

경사식 방파제의 최적설계 기술개발 (II)

2001. 12

주관연구기관 / 한국해양연구원
공동연구기관 / 한국건설기술연구원



해양수산부

MINISTRY OF MARITIME AFFAIRS & FISHERIES

경사식 방파제의 최적설계기술개발 (Ⅱ)

2001. 12

주관연구기관 / 한국해양연구원

공동연구기관 / 한국건설기술연구원



해양수산부

MINISTRY OF MARITIME AFFAIRS & FISHERIES

제 출 문

해양수산부장관 귀하

본 보고서를 “경사식 방파제의 최적설계기술개발(II)”의 최종보고서로 제출합니다.

2001년 12월

주관연구기관명 : 한국해양연구원

주관연구책임자 : 이달수

연 구 원 : 이광수, 오영민, 조홍연

한상훈, 김동현, 김창일

김지희

연 구 조 원 : 백원대, 장세철, 우선미

김서정, 박재길

공동연구기관명 : 한국건설기술연구원

공동연구책임자 : 이종인

위탁연구기관명 : 건국대학교

위탁연구책임자 : 전인식

한국해양연구원

원 장 한상준

요 약 문

I. 제 목

경사식 방파제의 최적 설계기술 개발(II)

II. 연구개발의 목적 및 필요성

경사식 방파제 제체의 안정성은 지반조건과 외력을 제외하고도 해저면의 경사, 제체 사면의 경사, 중간피복재의 내용과 형상 및 두께, 피복재의 속고르기 정도, 소단의 형상 등 매우 다양한 설계인자들의 복합 작용으로 매우 다양하게 변한다. 국내에서는 그간 관련 기초기술의 개발이 활성화되지 못한 관계로 경사식 방파제를 설계할 때에는 주로 외국의 일반적인 기준이나 공법을 모방하여 이용하고 있는 실정이다.

한편 항만입지가 점차 대수심화 되며 지반조건도 열악해지므로 안정성과 경제성을 향상시키기 위해서는 우리나라 여건에 적합한 설계기술의 독자 개발이 필요하다. 또한 기 건설된 방파제의 피해사례를 조사 및 분석하여 향후 연구에 필요한 기초자료를 구축할 필요가 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구의 주요 내용은 다음과 같다.

- 제체에 작용하는 유효파력 추정식의 개발
- 전사면 경사도에 따른 사면의 변형특성 규명
- 전사면 중간피복층의 설치 형태에 따른 사면 안정성 변화특성 규명
- 경사식 방파제의 피해사례 조사 및 분석
- 경사식 방파제의 피복재 중량 산정공식인 Hudson 공식과 van der Meer 공식의 비교 검토

IV. 연구개발 결과

금년도 수행한 연구결과의 중요사항을 요약하면 다음과 같다.

- 경사제의 제체 내로 투파되는 파력을 예측하기 위한 수치모델을 개발하여 수리모형 실험과 1차 비교함으로써 향후 정밀 연구의 기반을 확립하였다.
- 제체에 작용하는 파력과 제체 내의 수압의 변화를 단면수리모형실험으로 측정하는 기술을 개발함으로써 향후 연약지반에 설치되거나 초기 침하가 진행중인 경사제의 안정성 평가에 필요한 핵심기술 개발의 기반을 확립하였다.
- 경사식 방파제의 피해 원인을 규명하기 위하여 국·내외 경사식 방파제의 피해사례를 수집하였다.
- 피복재 중량 산정공식인 Hudson 공식과 van der Meer 공식을 비교 분석하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

1차년도 및 금년도의 연구결과는 향후 수행될 3차년도 연구의 기초자료로 활용될 것이며, 연구 결과 중 일부는 설계업무에 참고가 될 것으로 예상된다.

VI. 연구개발 목표 달성을 및 대외 기여도

금년도의 연구목표를 달성하였으며, 연구결과는 설계기술자들이 이용할 수 있도록 설계용역회사에 배포할 예정이다.

SUMMARY

I. TITLE Development of Technology for the Optimal Design of Rubble-Mound Breakwater (II)

II. Necessity and Objective

Rubble-mound breakwaters are typically constructed with a core of quarry-run stone, sand or slag, and protected from wave action by one or more underlayers and a cover layer composed of stone or specially shaped concrete armour units. Due to the fact that the breakwaters of this type are suitable for nearly all types of foundations and any economically acceptable water depth, rubble-mound breakwaters have the longest construction history among various types of breakwaters, and have been widely used in Korea as well as all over the world.

Rubble-mound breakwaters are considered as a flexible structure in respect that displacement of elements and composition parts is allowable, and the stability depends largely upon seabed condition and external forces. For the design of breakwaters of this type, therefore, special care should be taken on the geometry and stability of the structure, such as crest elevation and width, slope of both sides, materials and thickness of armour layer and underlayers including method of placement, and location and shape of toe berm, etc.

The design and construction techniques of a rubble-mound structure have been developed on the basis of a broad range of experiences. In Korea, the geometrical condition for harbor construction is getting worse, that is, deeper and softer seabed. It is, therefore, necessary to develop the design techniques suitable for the local condition of Korea, for the improvement in stability and economical viability of rubble-mound breakwater. In addition, there is a necessity for collecting and analysing data on damaged cases of breakwaters constructed before, which could be used as a basis of future researches on rubble-mound breakwaters. The main purpose of this study is to develop the design technologies of rubble-mound breakwater suitable for

the local condition of Korea, and to collect and analyse damaged cases of rubble-mound breakwaters.

III. Scope of the Study

Main contents of this study are as follows ;

- Development of empirical equation for the estimation of the total effective wave force acting on the rubble-mound breakwater structure.
- Examination of deformation characteristics of the seaside slope with a variation of a angle of inclination.
- Examination of the stability according to the placement method of quarry- stones for underlayers.
- Collection and analysis of damaged cases of rubble-mound breakwaters.
- Comparison of Hudson formula and van der Meer formula, which are known as the conventional formulae on the determination of the armor stone weight.

IV. Results and Discussion

Main results drawn from this year study can be summarized as follows :

- A numerical model was newly developed, for the calculation of wave forces transmitted to the internal part of a rubble-mound breakwater. The computation results were compared and validated with the hydraulic scale model experiments. This model is of use in many applications for comprehensive study on rubble-mound structure in future.
- Technology of measuring the wave forces acting on the whole rubble-mound breakwater and the variation of water pressure of the internal part of the rubble-mound breakwater, by means of hydraulic scale model experiments, was developed. This technology can be used as the kernel for the evaluation of the stability of the rubble-mound breakwater being constructed or early subsided on the soft seabed.
- Home and foreign damaged cases of rubble-mound breakwaters were collected and analysed.

- Hudson formula and van der Meer formula were compared and the differences between them are analysed.

V. Practical Application of the Study

The study results will be used as a basis for the next year study. Some of them are expected to be used as a reference to the practical design of rubble-mound breakwaters as a reference.

V. Accomplishment and Contribution

The goal of this year study was attained with satisfactory results. The technology developed from this study will be distributed to consulting and construction company for the direct application to the execution design on the rubble-mound breakwaters.

목 차

요약문	i
표목차	xiii
그림목차	xvii
사진목차	xxv

PART I. 경사식 방파제의 안정성 및 경제성 향상기술 개발

제1장 서론	1
제1절 개요	1
제2절 연차별 주요 연구내용	3
1. 제1차년도(2000년)	3
2. 금년도(2001년)	3
3. 향후 연구계획	4
제2장 중간피복석의 사면고르기에 따른 사면의 안정성 변화	5
제1절 개요	5
제2절 조파기 및 실험장치	5
1. 수조 및 조파기	5
2. 실험장치	6
제3절 모형 및 계측기기의 설치	7
제4절 실험조건	9
제5절 실험 단면안 및 실험방법	12
1. 실험 단면안	12
2. 실험방법	14
제6절 실험결과 및 분석	17
1. 피복층의 피해량 및 평가	17
2. 중간피복층의 변형 측정 및 분석	21

3. 종합검토	35
제3장 경사식 방파제에 작용하는 파력 측정실험	37
제1절 개요	37
제2절 실험장치 및 실험조건	38
1. 실험장치	38
2. 모형 및 계측기기의 설치	43
3. 실험조건 및 실험방법	45
제3절 실험결과 및 분석	47
1. 대용 속채움 재료의 점검	47
2. 파력 측정결과 및 분석	48
3. 사면파압 계측결과 및 분석	66
제4절 결론 및 토의	74
1. 결론	74
2. 토의	75
제4장 경사식 방파제의 파력결정을 위한 수치해석	77
제1절 서론	77
1. 연구의 배경 및 필요성	77
2. 연구목적 및 내용	80
제2절 제체 내부의 파동장 해석	80
1. 개요	80
2. 경계요소법의 적용	81
제3절 간극수압 및 파력결정	91
1. 개요	91
2. 내부 간극수압의 결정	92
3. 파력의 결정	92
제4절 수리모형실험	95
1. 개요	95
2. 모형 방파제	96

3. 실험장치 및 계측	96
4. 실험조건	98
5. 실험자료의 분석	99
제5절 결과분석 및 토의	100
1. 실험결과	100
2. 수치해석 결과의 겹증	102
3. 파력 및 모멘트 결정	108
제6절 결론 및 제안	110
 제5장 국내 경사식 방파제의 현황	113
제1절 서론	113
제2절 대상자료 및 자료정리	115
1. 대상자료	115
2. 기준설정	118
3. 자료정리	119
제3절 자료의 분석	133
제4절 토의	138
 제6장 결론 및 향후 연구과제	141
제1절 결론	141
1. 중간피복석의 사면고르기에 따른 전사면의 안정성 변화	141
2. 경사식 방파제에 작용하는 파력 측정	142
3. 경사식 방파제의 파력 해석을 위한 수치해석	143
4. 경사식 방파제의 설치현황	144
제2절 향후 연구과제	144
 참고문헌	147
 부록	
1. 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과	149

2. 중간피복층의 연직방향 변형량의 이동평균	295
3. 전사면 파암시그널	313
4. 국내 지정항만 방파제의 현황	319
 PART II. 경사식 방파제 피해사례 분석(I)	
제 1 장 서 론	369
 제 2 장 경사식 방파제 피해사례 조사 371	
제 1 절 방파제의 분류	371
제 2 절 피해사례 조사 및 자료수집	375
1. 일본 피해사례	376
2. 포르투갈 Sines항 피해사례	403
3. 국내 피해사례	407
 제 3 장 방파제 피해사례 분석 433	
제 1 절 방파제 파괴구조	433
제 2 절 피해사례 분석	436
제 3 절 구조형식별 파괴구조 분석	445
1. 경사식 방파제의 파괴구조	445
2. 혼성제의 파괴구조	447
3. 소파블록피복제의 파괴구조	449
 제 4 장 경사식 방파제 설계법 비교 457	
제 1 절 방파제의 구조양식 및 특징	457
1. 케이슨식 혼성제의 특징과 설계외력	457
2. 경사식 방파제의 특징과 설계외력	459
제 2 절 각 설계기준에 따른 경사식 방파제 설계법	462
1. SPM(1984)의 방법	463

2. CIRIA/CUR(1991)의 방법	474
3. 항만 및 어항 설계기준(1999)의 방법	483
4. 경사식 방파제 설계예	489
제 5 장 다방향불규칙파 특성	495
제 1 절 다방향불규칙파 조파기	495
1. 다방향불규칙파	495
2. 조파장치	496
제 2 절 다방향불규칙파 생성원리	498
1. 조파이론	498
2. 다방향불규칙파 조파신호 작성법	502
제 3 절 다방향불규칙파의 재현	506
제 6 장 결 론	509
1. 피해사례에 대한 고찰	509
2. 피복재 중량 산정식에 대한 고찰	510
참고문헌	513
부 록	519
부록 A. 일본 방파제 피해사례 자료	521
부록 B. 국내 방파제 피해사례 자료	595

표 목 차

PART I

<표 2.5.1> 실험 단면안 개요	14
<표 2.6.1> 안별 Tetrapod의 파고별 누적 피해 현황	18
<표 2.6.2> 안별 중간피복층 단면적의 변화(cm)	34
<표 3.3.1> 사용 재료에 따른 반사율의 비교	47
<표 3.3.2> 사용 재료에 따른 전달파고비의 비교	47
<표 3.3.3> 사면수위와 하중계로 측정한 파력의 분력	56
<표 3.3.4> 사면수위와 수평파력의 위상차(rad)	57
<표 3.3.5> 하중계로 계측한 +방향의 최대 수평파력과 동시 연직파력	59
<표 3.3.6> 하중계로 계측한 -방향의 최대 수평파력과 동시 연직파력	60
<표 3.3.7> 하중계로 계측한 +방향의 최대 연직파력과 동시 수평파력	61
<표 3.3.8> 하중계로 계측한 -방향의 최대 연직파력과 동시 수평파력	62
<표 3.3.9> 하중계로 측정한 +방향의 최대분력 비교	63
<표 3.3.10> 하중계로 측정한 -방향의 최대분력 비교	64
<표 3.3.11> 사면 파압분포와 계산파력	68
<표 3.3.12> 정수면 위치에서 파압의 계측치와 이론값의 비교	69
<표 3.3.13> 측정방법별 최대수평력 (단위: kgf/m)	72
<표 3.3.14> 측정방법별 최대연직력 (단위: kgf/m)	72
<표 4.4.1> 압력센서의 좌표 (단위 : cm)	97
<표 4.4.2> 간극수압계의 좌표 (단위 : cm)	98
<표 4.4.3> 실험파 조건	99
<표 4.5.1> 전사면 파압의 진폭과 위상	100
<표 4.5.2> 수치해석의 입력조건	103
<표 5.2.1> 2000년 말 현재 지정항만의 시설현황	121
<표 5.2.2> 1992년 이후 지정항만 방파제 공사 현황	123
<표 5.2.3> 통계자료에 나타난 1992년 이후 지정항만 방파제의 길이	131

PART II

<표 2.2.1> 피해당시의 최대풍속과 내습파고(Hitachi, 1994)	381
<표 2.2.2> Mutsu-Ogawara항의 피해원인(Hitachi, 1994)	384
<표 2.2.3> Mutsu-Ogawara항의 설계파와 피해당시 내습파(Hitachi, 1994)	384
<표 2.2.4> Sines항 방파제의 피해상황	405
<표 2.2.5> 피해항만별 반복횟수(1976~1999년, 37항만 59사례, 국내)	413
<표 2.2.6> 표사 이동한계수심($d_{50}=0.6\text{mm}$)	429
<표 3.3.1> 동해안의 방파제 피해사례	446
<표 4.2.1> 조도조정계수	467
<표 4.2.2> 피복석 중량 결정을 위한 안정계수(SPM, 1984)	472
<표 4.2.3> 적용파고에 따른 계수 값	476
<표 4.2.4> 사면의 경사에 따른 계수	477
<표 4.2.5> 사석방파제의 경사에 따른 손상의 정의	480
<표 4.2.6> 콘크리트 블록에서 공칭직경의 정의	481
<표 4.2.7> 콘크리트 보호재에 대한 손상의 정의	482
<표 4.2.8> 피해한계의 월파량	487
<표 4.2.9> 배후지의 중요도를 고려한 허용 월파량	487
<표 4.2.10> 배후지 이용상황과 재해한계에서 본 월파량의 기준	487
<표 4.2.11> T.T.P. 경사제 계산결과 비교	492
<표 4.2.12> 사석 경사제 계산결과 비교	493
<표 5.1.1> 조파시스템의 주요 제원	497
<표 5.3.1> 실험조건	506
<표 A.1> 추출사례에 대한 이상기상 일람표(1954년~1964년, 20항만 68사례)	522
<표 A.2> 추출사례에 대한 이상기상 일람표(1965년~1972년, 49항만 63사례)	523
<표 A.3> 추출사례에 대한 이상기상 일람표(1973년~1982, 39항만 54사례)	524
<표 A.4> 추출사례에 대한 이상기상 일람표(1983년~1991년, 47항만 69사례)	525
<표 A.5> 피해대상시설 일람표(1954년~1964년, 20항만 68사례, 일본)	526
<표 A.6> 피해대상시설 일람표(1965년~1972년, 49항만 63사례, 일본)	528
<표 A.7> 피해대상시설 일람표(1973년~1982년, 39항만 54사례, 일본)	530

<표 A.8> 해석사례 일람(五明 등, 1995)	532
<표 A.9> 해석 및 답사사례일람 (五明 등, 1997)	533
<표 A.10> 대규모 파랑피해사례(鹿島 등, 1986)	534
<표 A.11> 케이슨 파괴사례(高橋 등, 1998)	535
<표 A.12> 연간 원인별 피해 시설수(1965~1991년, 135항만 186사례, 일본)	536
<표 A.13> 연간 원인별 피해 시설수(피해액 3,000만円 이상, 1983년~1991년)	537
<표 A.14> 연간 상황별 피해 시설수(피해액 3,000만円 이상, 1983년~1991년)	537
<표 A.15> 원인별 상황별 피해 시설수(피해액 3,000만円 이상, 1983년~1991년)	537
<표 A.16> 대표적 일본 피해사례	538
<표 B.1> 추출사례에 대한 이상기상 일람표(1976년~1999년, 37항만 59사례)	596
<표 B.2> 방파제 피해개요(1976년~1999년, 37항만 59사례, 국내)	599
<표 B.3> 동해안의 방파제 피해개요(1976년~1999년, 국내)	607
<표 B.4> 남해안의 방파제 피해개요(1976년~1999년, 국내)	608
<표 B.5> 서해안의 방파제 피해개요(1976년~1999년, 국내)	608
<표 B.6> 연간 원인별 피해사례수(1976년~1999년, 37항만, 국내)	597
<표 B.7> 연간 상황별 피해 시설수(1976년~1999년, 37항만 59사례, 국내)	597
<표 B.8> 원인·상황별 피해시설수(1976년~1999년, 37항만, 59사례, 국내)	598

그 림 목 차

PART I

<그림 1.1.1> 경사식 방파제의 종류	2
<그림 2.2.1> 2차원 파랑 흐름 복합수조	6
<그림 2.3.1> 모형 및 계측기기의 설치도	8
<그림 2.4.1> 목표스펙트럼과 입사파 스펙트럼($H_s=12.3\text{cm}$).	10
<그림 2.4.2> 목표스펙트럼과 입사파 스펙트럼($H_s=13.3\text{cm}$).	10
<그림 2.4.3> 목표스펙트럼과 입사파 스펙트럼($H_s=14.3\text{cm}$).	11
<그림 2.4.4> 목표스펙트럼과 입사파 스펙트럼($H_s=15.2\text{cm}$).	11
<그림 2.4.5> 목표스펙트럼과 입사파 스펙트럼($H_s=16.0\text{cm}$).	12
<그림 2.5.1> 제1안 모형 방파제의 표준 단면도	13
<그림 2.5.2> 제2안의 모형 방파제의 표준 단면도	13
<그림 2.5.3> 제3안의 모형 방파제의 표준 단면도	13
<그림 2.5.4> 사면의 피해량 평가실험	16
<그림 2.5.5> 중간피복층의 변형 계측	16
<그림 2.6.1> 2-4안 5회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1	22
<그림 2.6.2> 2-4안 5회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1	22
<그림 2.6.3> 2-4안 5회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교	23
<그림 2.6.4> 2-4안 5회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교	23
<그림 2.6.5> 2-4안 5회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균	24
<그림 2.6.6> 2-4안 5회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균	24
<그림 2.6.7> 2-4안 5회 실험 피해전 · 후 필터층의 단면형상 평균의 비교	25
<그림 2.6.8> 2-4안 5회 실험후 필터층의 연직방향 변형량	25
<그림 2.6.9> 2-4안의 필터층 연직방향 변형량 1회차 실험결과의 이동평균	27
<그림 2.6.10> 2-4안의 필터층 연직방향 변형량 2회차 실험결과의 이동평균	27
<그림 2.6.11> 2-4안의 필터층 연직방향 변형량 3회차 실험결과의 이동평균	28
<그림 2.6.12> 2-4안의 필터층 연직방향 변형량 4회차 실험결과의 이동평균	28

<그림 2.6.13> 2-4안의 필터총 연직방향 변형량 5회차 실험결과의 이동평균	29
<그림 2.6.14> 2-4안의 필터총 연직방향 변형량 이동평균 5회분의 평균	29
<그림 2.6.15> 1-1안의 필터총 연직방향 변형량 1회차 실험결과의 이동평균	30
<그림 2.6.16> 1-2안의 필터총 연직방향 변형량 1회차 실험결과의 이동평균	30
<그림 2.6.17> 2-1안의 필터총 연직방향 변형량 이동평균 4회분의 평균	31
<그림 2.6.18> 2-2안의 필터총 연직방향 변형량 이동평균 4회분의 평균	31
<그림 2.6.19> 2-3안의 필터총 연직방향 변형량 이동평균 4회분의 평균	32
<그림 2.6.20> 3-1안의 필터총 연직방향 변형량 이동평균 2회분의 평균	32
<그림 2.6.21> 3-2안의 필터총 연직방향 변형량 이동평균 3회분의 평균	33
<그림 3.2.1> 경사제 모형틀의 단면 및 측면도	39
<그림 3.2.2> 경사제 모형틀의 상세도1	40
<그림 3.2.3> 경사제 모형틀의 상세도2	41
<그림 3.2.4> 경사제 모형틀의 상세도3	42
<그림 3.2.5> 재현목표 실험 단면안	43
<그림 3.2.6> 기초사석 내의 간극수압계 배치도	43
<그림 3.2.7> 모형 및 파고계의 설치도	44
<그림 3.2.8> 경사제 모형틀의 형상	46
<그림 3.2.9> 파력측정 실험장면	46
<그림 3.3.1> 계측값들의 시계열($H= 10.6\text{cm}$, $T= 1.5\text{s}$)	49
<그림 3.3.2> 계측값들의 시계열($H= 12.7\text{cm}$, $T= 1.5\text{s}$)	50
<그림 3.3.3> 계측값들의 시계열($H= 15.0\text{cm}$, $T= 1.5\text{s}$)	51
<그림 3.3.4> 계측값들의 시계열($H= 10.8\text{cm}$, $T= 2.0\text{s}$)	52
<그림 3.3.5> 계측값들의 시계열($H= 12.8\text{cm}$, $T= 2.0\text{s}$)	53
<그림 3.3.6> 계측값들의 시계열($H= 14.4\text{cm}$, $T= 2.0\text{s}$)	54
<그림 3.3.7> 예비실험에서 계측한 파력 시계열의 예($H_S=13\text{cm}$, $T_S=1.58\text{s}$)	55
<그림 3.3.8> 입사파고별 사면 최대 수위차의 변화	57
<그림 3.3.9> 사면수위와 수평파력의 위상차	58
<그림 3.3.10> 방향별 최대 수평파력과 최대 연직력의 비교도	65
<그림 3.3.11> 사면 파압분포의 예($H=10.6\text{cm}$, $T=1.5\text{s}$)	66
<그림 3.3.12> 사면 파압분포의 예($H=12.7\text{cm}$, $T=1.5\text{s}$)	66

<그림 3.3.13> 사면 파압분포의 예($H=15.0\text{cm}$, $T=1.5\text{s}$).	67
<그림 3.3.14> 사면 파압분포의 예($H=10.8\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$).	67
<그림 3.3.15> 사면 파압분포의 예($H=12.8\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$).	67
<그림 3.3.16> 사면 파압분포의 예($H=14.4\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$).	67
<그림 3.3.17> 정수면에서 계측수위로 계산한 파압과 계측파압의 비교	71
<그림 3.3.18> 간극수압 계측 예($H = 14.4\text{cm}$ $T = 2.0\text{s}$).	73
<그림 4.1.1> 경사식 방파제의 설계절차.	78
<그림 4.1.2> 간극수압의 계산치와 계측치의 비교	79
($H = 0.12 \text{ m}$) ; 2000년도의 연구결과에서 발췌.	
<그림 4.2.1> 유체영역의 설정	81
<그림 4.3.1> 경사식 방파제에 작용하는 전파력.	91
<그림 4.4.1> 모형 방파제와 파압계의 위치 (단위 : cm).	96
<그림 4.4.2> 조파수조내 모형방파제와 파고계의 설치.	97
<그림 4.5.1> 전사면 파압의 진폭과 위상의 위치별 변화 (Test 1).	101
<그림 4.5.2> 전사면 파압의 진폭과 위상의 위치별 변화 (Test 2).	101
<그림 4.5.3> 전사면 파압의 진폭과 위상의 위치별 변화 (Test 3).	102
<그림 4.5.4> 전사면 파압의 진폭과 위상의 위치별 변화 (Test 4).	102
<그림 4.5.5> Level 2, 3, 4에서 간극수압고의 위치별 변화	104
($H = 0.08 \text{ m}$, $T = 1.2\text{초}, 1.6\text{초}$).	
<그림 4.5.6> Level 2, 3, 4에서 간극수압고의 위치별 변화	105
($H = 0.12 \text{ m}$, $T = 1.6\text{초}$).	
<그림 4.5.7> Level 2, 3, 4에서 간극수압고의 위치별 변화	106
($H = 0.16 \text{ m}$, $T = 1.6\text{초}$).	
<그림 4.5.8> 간극수압의 등압선도 (Test 1).	107
<그림 4.5.9> 간극수압의 등압선도 (Test 2).	107
<그림 4.5.10> 간극수압의 등압선도 (Test 3).	107
<그림 4.5.11> 간극수압의 등압선도 (Test 4).	107
<그림 4.5.12> 수평파력성분의 시간변화 ($H = 0.12 \text{ m}$, $T = 1.6\text{초}$).	108
<그림 4.5.13> 방파제 전지부에 대한 수평파력모멘트의 시간변화	109
($H = 0.12 \text{ m}$, $T = 1.6\text{초}$).	

<그림 4.5.14> 연직파력성분의 시간변화 ($H = 0.12$ m, $T = 1.6$ 초).	109
<그림 4.5.15> 방파제 전지부에 대한 연직파력모멘트의 시간변화 ($H = 0.12$ m, $T = 1.6$ 초).	110
<그림 5.1.1> 전형적인 경사식 방파제의 표준단면 및 각 부분의 명칭	113
<그림 5.2.1> 우리나라 지정항만 일람도	116
<그림 5.2.2> 우리나라 지정어항(제1종, 제3종) 일람도	117
<그림 5.3.1> 안정도질량비에 대한 단면구간수의 분포	136
<그림 5.3.2> 파고에 따른 안정도질량비의 분포	137
<그림 5.3.3> 수심에 따른 안정도 질량비의 분포	137
<그림 5.3.4> 피복재와 중간피복재의 질량비 분포	138

PART II

<그림 2.1.1> 대표적인 사석방파제의 종류	372
<그림 2.1.2> 대표적인 케이슨식 혼성제	374
<그림 2.2.1> 기상요인별 피해사례(1954년~1991년, 254사례, 일본)	377
<그림 2.2.2> 설치수심별 피해사례(1954년~1982년, 185사례, 일본)	377
<그림 2.2.3> 내습파고별 피해사례(1954년~1982년, 116사례, 일본)	378
<그림 2.2.4> 원인별 총피해 시설의 비율(1965년~1991년, 2,173시설, 일본)	378
<그림 2.2.5> 원인·상황별 총피해 시설수	378
<그림 2.2.6> Mutsu-Ogawara항의 평면배치도(Hitachi, 1994)	379
<그림 2.2.7> 북측 제두부 단면도(Hitachi, 1994)	380
<그림 2.2.8> 우각부 단면도(Hitachi, 1994)	380
<그림 2.2.9> 남측 제두부 단면도(Hitachi, 1994)	381
<그림 2.2.10> 북측 제두부 구간에서 발생한 케이슨의 사행피해(Hitachi, 1994)	382
<그림 2.2.11> 우각부에서 발생한 케이슨과 소파블록의 피해(Hitachi, 1994)	382
<그림 2.2.12> 남측 제두부 구간의 피해(Hitachi, 1994)	383
<그림 2.2.13> Yato항 서방파제의 위치 및 피해지점	385
<그림 2.2.14> Yato항 서방파제 피해지점의 평면도	385

<그림 2.2.15> Yato항 서방파제 A-A구간의 피해단면도	386
<그림 2.2.16> Yato항 서방파제 B-B구간의 피해단면도	386
<그림 2.2.17> Yato항 서방파제 C-C구간의 피해단면도	386
<그림 2.2.18> Yato항 서방파제 각 피해구간의 복구단면도	387
<그림 2.2.19> Yato항 북방파제의 위치 및 피해지점	388
<그림 2.2.20> Yato항 북방파제 각 피해지점의 평면도	389
<그림 2.2.21> Yato항 북방파제 각 피해구간의 피해단면도	390
<그림 2.2.22> Yato항 북방파제 각 피해구간의 복구단면도	391
<그림 2.2.23> Niigata 동항 서방파제의 피해 위치도 및 피해지점 평면도	393
<그림 2.2.24> Niigata 동항 서방파제 피해단면도 및 복구단면도(A-A)	394
<그림 2.2.25> Niigata 동항 서방파제 피해단면도 및 복구단면도(B-B)	395
<그림 2.2.26> Onahama항 제1서방파제 피해시설 위치도 및 피해지점 평면도	397
<그림 2.2.27> Onahama항 제1서방파제 케이슨 피해 상황도	397
<그림 2.2.28> Onahama항 제1서방파제 피해단면도 및 복구단면도(C-C구간)	398
<그림 2.2.29> Onahama항 제1서방파제 피해단면도 및 복구단면도(D-D구간)	399
<그림 2.2.30> Onahama항 제1서방파제 피해단면도 및 복구단면도(E-E구간)	400
<그림 2.2.31> 포루투갈 Sines항의 위치도	403
<그림 2.2.32> Sines항 방파제 단면도(Zwamborn, 1979)	404
<그림 2.2.33> Sines항 방파제의 응급 복구 평면도(1981년 4월)	406
<그림 2.2.34> Sines항 방파제의 완전 복구 평면도	407
<그림 2.2.35> Sines항 방파제 복구단면도	407
<그림 2.2.36> 구조형식별 방파제 연장 비율	409
<그림 2.2.37> 항외측 사면 피복층수에 따른 방파제 연장 비율	409
<그림 2.2.38> 항내측 사면 피복층수에 따른 방파제 연장 비율	409
<그림 2.2.39> 방파제 총연장중 항외측의 피복재 구성 비율(총연장: 38,351.5m)	410
<그림 2.2.40> 항외측 피복층의 경사	410
<그림 2.2.41> 항내측 피복층의 경사	410
<그림 2.2.42> 기상요인별 피해사례	411
<그림 2.2.43> 피해원인 · 상황별 피해시설수	412
<그림 2.2.44> 온산항 방파제의 평면배치도	414

<그림 2.2.45> 온산항 방파제의 설계파고	414
<그림 2.2.46> 온산항 남방파제의 피해상황도	415
<그림 2.2.47> 온산항 남방파제 ①구간 피해단면도	415
<그림 2.2.48> 온산항 남방파제 ②구간 피해단면도	416
<그림 2.2.49> 온산항 북방파제 피해상황도	416
<그림 2.2.50> 온산항 북방파제 표준단면도	417
<그림 2.2.51> 온산항 북방파제 보강단면도	418
<그림 2.2.52> 동해항의 방파제 및 호안 평면배치도	419
<그림 2.2.53> 동해항 북방파제의 피해구간	420
<그림 2.2.54> 동해항 북방파제의 표준단면도	420
<그림 2.2.55> 동해항 남측호안 피해구간의 평면도	421
<그림 2.2.56> 동해항 남측호안의 피해단면도(피해구간 ①~④)	421
<그림 2.2.57> 동해항 남측호안의 피해단면도(피해구간 ⑤~⑦)	422
<그림 2.2.58> 동해항 북방파제의 보강단면도(N-H 구간)	423
<그림 2.2.59> 동해항 북방파제의 보강단면도(N-I 구간)	423
<그림 2.2.60> 동해항 남측호안 보강단면도(⑥ 단면)	424
<그림 2.2.61> 주문진항 방파제 평면배치도	425
<그림 2.2.62> 주문진항 방파제 구간별 설계파고	425
<그림 2.2.63> 주문진항 방파제 1구간의 피해단면도	426
<그림 2.2.64> 주문진항 방파제 2구간의 피해단면도	426
<그림 2.2.65> 주문진항 방파제 3구간의 피해단면도	427
<그림 2.2.66> 주문진항 방파제 1구간의 보강단면도	427
<그림 2.2.67> 주문진항 방파제 2구간의 보강단면도	428
<그림 2.2.68> 주문진항 방파제 3구간의 보강단면도	428
<그림 2.2.69> 주문진항 방파제 5구간의 표준단면도	429
<그림 2.2.70> 주문진항 방파제 주변 해저저질의 중앙입경분포도	430
<그림 2.2.71> 주문진항 방파제 주변 해저저질의 중앙입경 종단면 분포도	431
<그림 3.1.1> 상치콘크리트가 있는 경사식 방파제의 파괴구조	433
<그림 3.1.2> 상치콘크리트가 없는 경사식 방파제의 파괴구조	434
<그림 3.1.3> 케이슨식 혼성제의 파괴구조	434

<그림 3.1.4> 소파블록피복제의 파괴구조	435
<그림 3.2.1> 방파제 배치형상에 따른 피해 발생지점의 빈도(혼성제)	437
<그림 3.2.2> 충격쇄파력 발생에 따른 혼성제의 피해범위	437
<그림 3.2.3> 해저경사별 소요 케이슨 폭의 변화에 따른 혼성제의 피해범위	438
<그림 3.2.4> 파형경사별 소요 케이슨 폭의 변화에 따른 혼성제의 피해범위	439
<그림 3.2.5> 상대천단고에 따른 혼성제의 피해범위	439
<그림 3.2.6> 상대케이슨폭에 따른 혼성제의 피해범위	440
<그림 3.2.7> 파형경사에 따른 혼성제의 피해범위	440
<그림 3.2.8> 방파제의 배치형상에 따른 피해 발생지점의 빈도(소파블록피복제)	441
<그림 3.2.9> 소파블록피복제의 피해범위	442
<그림 3.2.10> 상대천단고에 따른 소파블록피복제의 피해범위	442
<그림 3.2.11> 파형경사에 따른 소파블럭피복제의 피해범위	442
<그림 3.2.12> 방파제의 배치형상에 따른 피해 발생지점의 빈도(경사식 방파제)	443
<그림 3.2.13> 경사식 방파제의 피해범위	443
<그림 3.2.14> 상대 천단고에 따른 경사식 방파제의 피해범위	444
<그림 3.2.15> 파형경사에 따른 경사식 방파제의 피해범위	444
<그림 3.3.1> 경사식 방파제의 피해유형	453
<그림 3.3.2> 묵호항 방파제의 피해상황(1971년)	446
<그림 3.3.3> 혼성제의 피해유형	454
<그림 3.3.4> 소파블록피복제의 피해유형	455
<그림 3.3.5> Kametoku항의 피해단면도	450
<그림 3.3.6> Miyazaki항 남방파제의 피해 단면도	451
<그림 3.3.7> Ishikari항 신향방파제 피해단면의 시간적 변화	451
<그림 4.1.1> 직립벽에서의 파압분포(Goda, 1967)	458
<그림 4.1.2> 경사면에서의 쇄파의 형태	461
<그림 4.1.3> 하강류 시 제체의 유선망과 유출의 형태	462
<그림 4.2.1> 방파제에 작용하는 수리학적 현상(BREAKWAT Manual, 1992)	463
<그림 4.2.2> 심해파 경사에 대한 상대쇄파고	464
<그림 4.2.3> 쇄파경사에 대한 상대 쇄파수심	464
<그림 4.2.4> 쇄파 제원의 정의	465

<그림 4.2.5> 매끄럽고 불투수성인 사면에서의 파의 쳐오름	466
<그림 4.2.6> 축척조정계수	467
<그림 4.2.7> 월파에 관련된 제원의 정의	468
<그림 4.2.8> 월파계수 α 와 q_0^*	469
<그림 4.2.9> 월파가 거의 없거나 조금 일어날 때의 이상적인 단면 및 추천 단면	473
<그림 4.2.10> 월파가 양쪽에 어느 정도 있을 때 이상적인 단면 및 추천 단면	473
<그림 4.2.11> 사면 위에서 발생하는 쇄파의 형태	474
<그림 4.2.12> 투수계수(permeability)의 정의	475
<그림 4.2.13> 월파량의 허용한계(CIRIA/CUR)	478
<그림 4.2.14> 정수면 주위에서의 손상의 정의	480
<그림 4.2.15> 사석 경사제의 기하학적 제원 개념도	482
<그림 4.2.16> 쇄파대내에서 유의파고의 최대치 산정도	484
<그림 4.2.17> 유의파고가 최대치로 출현하는 수심의 산정도	485
<그림 4.2.18> 소파호안의 월파유량 산정도(Goda, 1975)	486
<그림 5.2.1> Serpent형 조파장치의 개념도	498
<그림 5.2.2> 파향의 개념도	499
<그림 5.2.3> 단일조파판의 배치	500
<그림 5.2.4> 파향의 정의	502
<그림 5.2.5> 좌표계 정의	503
<그림 5.2.6> 단일합성법에 의한 파향의 결정	504
<그림 5.3.1> 다방향불규칙파 계측을 위한 파고 측정지점	507
<그림 5.3.2> 목표스펙트럼($H_{1/3}=10.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.0\text{sec}$, $S_{\max}=10$)	507
<그림 5.3.3> 목표스펙트럼($H_{1/3}=10.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.0\text{sec}$, $S_{\max}=25$)	508
<그림 5.3.4> 목표스펙트럼($H_{1/3}=10.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.0\text{sec}$, $S_{\max}=75$)	508
<그림 A.1> 일본의 피해항만 위치도	521
<그림 B.1> 우리나라 피해항만 위치도	595

사진 목차

PART II

<사진 2.2.1> 충격쇄파력에 의한 케이슨벽의 파괴사례	401
<사진 2.2.2> 우각부에서 발생한 케이슨의 피해사례(Hitachi, 1994)	402
<사진 2.2.3> Sines항 방파제에 피복된 42ton급 Dolos 파괴장면	405
<사진 2.2.4> Sines항에서 발생한 월파장면	405
<사진 5.1.1> 소파장치	496
<사진 5.1.2> Serpent형 조파장치	497

PART I

경사식방파제의 안정성 및 경제성 향상기술 개발(II)

2001. 12.

연구기관 / 한국해양연구원

해양수산부

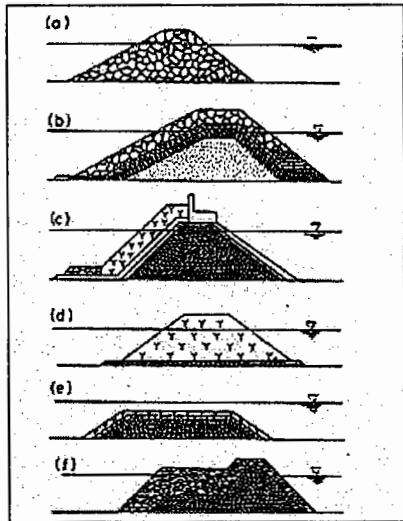
제 1 장 서론

제 1 절 개요

경사식 방파제는 현존하는 방파제의 종류 중에서 가장 역사가 길며 많은 경험을 통하여 그 축조기술이 발전되어 왔다. 초기에는 해변 주변에서 돌을 채집하여 바다에다 던져 넣는 원시적인 방법을 이용하였으며 이에 유래하여 일명 사석식 방파제라고도 칭한다.

지금까지 국내외에서 많이 사용되고 있는 경사식 방파제의 형상을 유형별로 나누어 보면 <그림 1.1.1>과 같다. 그림에서 보인 바와 같이 경사식 방파제는 경사 마운드를 가지고 있다. 가장 기초적인 형식으로는 (a)와 같이 사석을 난적 형식으로 쌓아놓은 경우이다. 여기에 마운드의 안정성을 높이고 배후 전달율을 낮추며 또한 재료의 비용을 줄이기 위하여 (b)와 같이 다층 사석 마운드 형식이 개발되었다. 이때 마운드의 안정성이 유지되는 한 상치 콘크리트를 설치하여 전달율을 저하시킬 수 있는 (c)의 형식이 등장했다. 한편, 콘크리트 블럭으로만 이루어진 형식(d)도 있다. 이는 주로 이안제인데 해안선 방호를 목적으로 한다. (e)형식은 다른 경사식 방파제의 형식에 비하여 전달율이 크지만 시공이 간단하고 수역의 풍치를 해치지 않는다는 장점이 있어 최근 점차 채택되고 있는 잠재 형식의 방파제이다. (f)형식은 S 形狀을 한 방파제로서 파의 거동과 사석의 경사를 일치시켜 제체의 안정성을 향상시키려는 의도의 방파제이다. 이는 전면부에 큰 소단(berm)을 가지고 있으며, 파의 거동에 의해 제체의 형상이 재형성되면서 安定한 형태로 바뀌어간다.

현재의 경사식 방파제의 설계 및 건설기술은 거의 성숙된 기술이라 볼 수 있으나 단면 제원의 변화가 안정성에 미치는 영향은 잘 알려지지 않았다. 따라서, ① 피복재, 중간 피복재 또는 소단의 이용에 관한 기술을 발전시켜 비탈면 경사를 조절하거나 건설재료를 줄이는 등 경제성과 구조적 안정성을 동시에 확보할 수 있는 기술을 개발하는 연구가 중요하며, ② 수심이 깊을 경우 또는 지반이 연약할 경우 등에 대해서는 제체에 작용하는 파력을 신뢰성 있게 추정하는 기술은 안정성과 경제성을 동시에 확보하기 위하여 매우 중요한 기술이다. 따라서, 항만시설의 부족으로 인하여 신규 항만의 건설 입지가 대수심화되고 연약지반이 많은 우리 나라의 입장에서는 방파제의 안정은 물론, 공사비를 절감할 수 있는 설계기술의 개발이 절실한 실정이다.



<그림 1.1.1> 경사식 방파제의 종류

경사식 방파제의 설계요소는 피복석의 안정성, 반사율, 전달율, 쳐오름 등의 수리역학적 요소와 제체의 활동 및 지반 지지력에 관련된 토질역학적 요소로 구성되어 있다. 사실상, 수리역학적 요소와 토질역학적 요소는 상호 밀접한 관련이 있다. 예를 들어, 제체의 사면 안정성과 활동에 대한 안정성은 제체 내에 형성되는 간극수압과 관련이 있으며 이 간극수압은 제체 내·외에 형성되는 파동장과 관련이 있다. 따라서, 경사식 방파제의 정확한 설계를 위해서는 이 수리역학적 측면과 토질역학적 측면이 상호 유기적인 관점에서 잘 파악되어야 한다.

국제적으로 방파제의 안정성에 영향을 미치는 요소들, 즉, 파랑조건, 사석의 무게, 그리고 방파제의 형상 등에 대하여 점차 경험적 지식이 쌓이면서 방파제의 유실 사고는 점차 감소되고 있다. 그러나 우리나라에서는 관련 기술의 축적이 부족하여 방파제의 피해는 계속되고 있는 실정이다. 따라서, 과거의 국내·외의 피해사례를 조사·분석하여 이에 대처하는 기술을 개발할 필요가 있다.

본 사업은 이러한 필요성에 대처하기 위하여 사면의 경사, 중간피복층의 재료 및 소단의 형상 변화에 따른 제체 사면의 변형 특성을 규명하고, 제체에 미치는 파력을 추정하는 기술을 개발하며, 중요 피해사례를 조사·분석함을 목표로 한다.

제 2 절 연차별 주요 연구내용

경사식 방파제의 최적설계 기술을 개발하기 위해서 수행되는 연차별 주요 연구내용은 다음과 같다.

1. 제1차년도(2000년)

■ 국내 경사식 방파제의 현황분석

현재까지 우리나라의 무역항과 연안항에 건설된 사석식 경사제에 대한 자료를 주로 제체 단면의 구조를 중심으로 분류, 정리하여 1차적인 데이터베이스를 구축하고, 통계적 특성 등에 대해 분석함으로써 연구 방향 설정에 이용되도록 하였다.

■ 경사식 방파제의 사면의 안정성

우선 현장에서 시급한 연구결과가 필요한 제체 사면의 경사($1:1.5$ 와 $1:1.33$)와 중간 피복재의 종류에 따른 제체의 안정성을 단면수리모형실험에 의하여 검토하고 피복재로서 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 테트라포드의 적정 중량 설계를 위하여 필요한 안정 계수(K_D)를 불규칙파를 이용하여 추정함으로써 어항 및 항만설계기준에 반영하였다.

■ 경사식 방파제의 파동장 해석

경사식 방파제의 제체에 작용하는 파력을 추정할 때에 필요한 경사식 방파제에 작용하는 파동장을 해석하기 위한 수치모델을 개발하여 수리모형실험과 1차적인 비교를 통하여 향후 개선하여야 할 점들을 규정하였다.

2. 금년도(2001년)

■ 중간피복층의 속고르기에 따른 사면의 안정특성 변화 규명

단면수리모형실험을 통하여 경사식 방파제 사면에 사석 중간피복층을 설치하고 사면 고르기를 시행하는 경우와 이를 시행하지 않는 경우가 피복층 및 중간피복층의 안정성에 미치는 영향을 비교하였다.

■ 경사식 방파제에 작용하는 파력 측정실험

특수한 실험장치 및 실험방법을 개발하여 사면에서의 수위변화, 제체에 작용하는 파력, 사면에 작용하는 파압 및 제체 내로 투과되는 파력을 동시에 측정함으로써 향후 제체

에 작용하는 파력식을 개발하기 위한 기초기술을 확보하였다.

■ 경사식 방파제의 파력 결정을 위한 수치해석

제체 사면에 파력이 작용할 때 파력이 제체 내로 침투하는 양상을 재현하기 위하여 제1차년도에 개발한 수치모델을 개량하여 단면수리모형실험의 결과와 비교함으로써 향후의 정밀 연구에 이용되도록 하였다.

■ 경사식 방파제의 설치현황 보완

1차년도에 수행한 국내 경사식 방파제의 설치현황에서 누락되었거나 추가된 자료를 보완하였다.

3. 향후 연구계획

■ 경사식 방파제에 작용하는 파력 추정기술 개발

경사식 방파제의 제체에 작용하는 파력을 보다 신뢰성 있게 추정하는 기술을 개발함으로써, 방파제가 연약지반에 설치되는 경우 또는 건설 후 제체의 각 부분에 자연침하가 적게 진행된 상태에서 설계파보다는 작지만 비교적 큰 파가 내습할 때 안정성을 평가할 수 있는 기술을 확보할 계획이다.

■ 사석 중간피복층의 두께에 따른 사면의 안정성 비교 연구

전사면의 중간피복층을 사석 2층의 두께로 설치하는 경우와 1층의 두께로 설치하는 경우에 따른 사면의 안정 특성을 비교할 계획이다.

제 2 장 중간피복층의 사면고르기에 따른 전사면의 안정성 변화

제 1 절 개요

경사식 방파제 사면의 중간피복층으로 사석이 사용될 경우 중간피복층의 표면을 고르게 설치하기 위하여 항만 및 어항 설계기준에는 사면속고르기를 시행하도록 규정하고 있다. 그러나 수심이 깊거나 수중의 시야가 불량한 입지에서는 정도 높은 속고르기란 사실상 기대하기 어려운 형편이다. 따라서, 사면 속고르기를 생략하려는 구상이 일고 있다.

이에 본 연구에서는 만일 속고르기를 생략하거나 제체의 사면 중 어떤 깊이 이하의 구간에서 중간피복층의 사면속고르기를 생략하는 시공법이 사면의 피복층의 안정성에 어떠한 영향을 미치는 가를 개략적으로 규명하는 한편 이 경우 중간피복층 자체의 형상은 어떻게 변형하는 지도 파악하였다.

제 2 절 조파기 및 실험장치

1. 수조 및 조파기

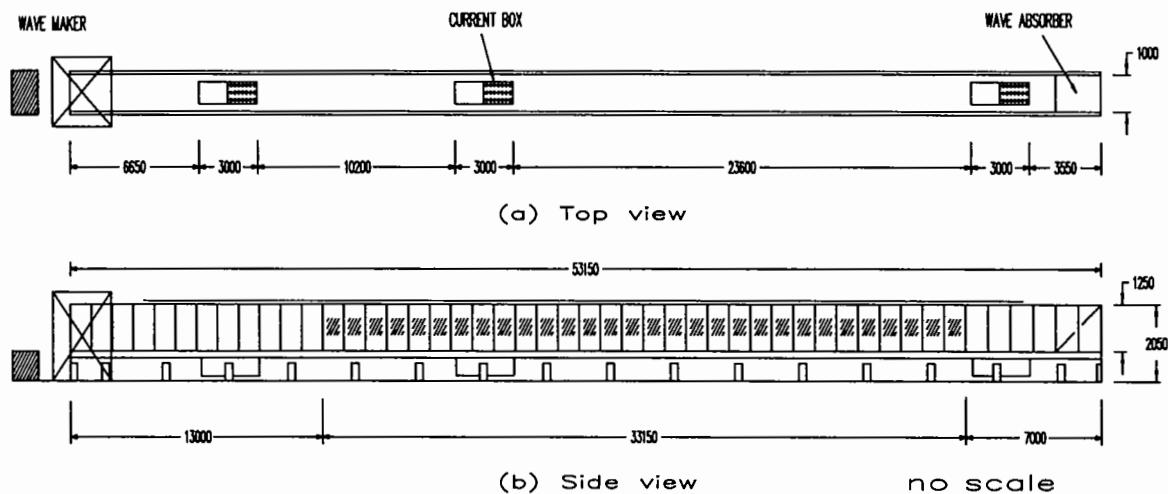
실험에 사용된 수조는 한국해양연구원에서 보유하고 있는 장수조로서 <그림 2.2.1>에 보인 바와 같이 길이 53.15m, 높이 1.25m, 폭 1.0m의 크기로서, 수조의 상류쪽 13m와 하류쪽 7m 구간은 양측벽이 철재로 되어 있으며, 나머지 중앙 부분 33.15m의 양측벽은 강화유리로 되어 있어 거의 모든 실험구간의 관찰이 가능하다.

조파기는 유압펌프에 의해 작동되는 피스톤형으로 최대 이격 거리가 $\pm 50\text{cm}$ 이며 조파기의 후면과 수조의 하류쪽 끝에는 경사식 소파장치가 설치되어 있다.

이 수조는 파랑과 흐름을 동시에 발생시킬 수 있는 복합수조로서, 수조 저면에 흐름상자 (Current Box)들이 설치되었고 이 흐름상자들은 수조의 하부에서 내경 30cm의 회류파이프를 통하여 서로 연결되어 있다.

조파중에 상·하류쪽 흐름상자의 입구를 약간 열어놓고 파이프의 밸브를 열어 놓으면 방파제 전면과 후면 사이에 파이프를 통한 흐름이 발생하여 방파제 전면과 후면 사이의 과도한 수위차 발생이 억제되므로 실험조건을 가능한 한 현장조건과 유사하게 유

지할 수 있다.



<그림 2.2.1> 2차원 파랑 호름 복합수조

2. 실험장치

실험에 사용된 계측기기는 다음과 같다.

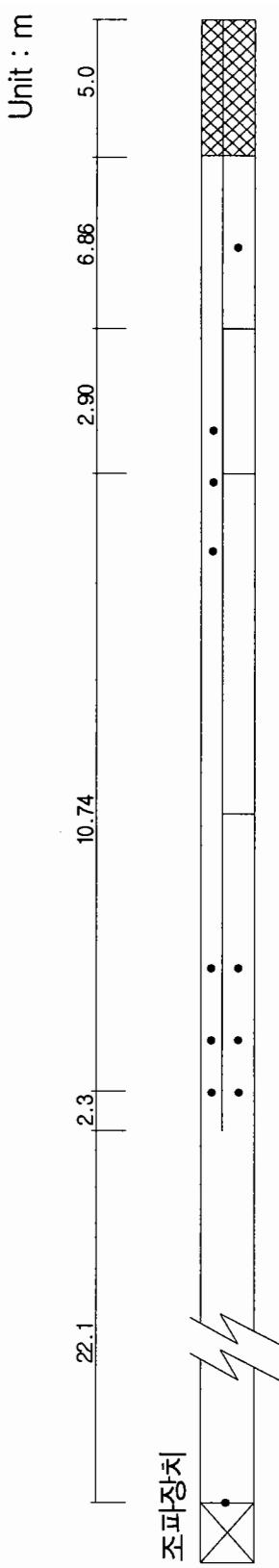
- 파고계 : 용량식으로서 길이 60cm와 80cm의 두 가지를 사용하였다.
- 사면 계측장치 : 사면(砂面) 계측센서로는 일본 KENEK사의 모델WHT60를 사용하였으며 센서들은 수평면에서 위치를 자유롭게 이동할 수 있도록 별도로 제작한 센서 이동기기에 부착시켰다.
- 컴퓨터 : IBM PC로서 조파기 제어 및 자료의 취득과 분석에 사용하였다.
- A/D Converter (16 채널) 및 D/A Converter (4 채널) : 계측기로부터의 아나로그 출력을 디지털 값으로 변환하여, 컴퓨터에서의 디지털 조파 신호를 아나로그 형태로 변환하여 조파기에 보내기 위하여 사용하였다.
- Multi-channel Oscilloscope : 파고계, 파압계의 아나로그 출력을 모니터링함으로써 기기의 정상 작동 유무를 확인함에 사용하였다.
- Camcoder, VTR, TV 및 디지털 카메라 : 실험과정의 모니터링, 촬영, 편집 및 결과 분석에 사용하였다.

제 3 절 모형 및 계측기기의 설치

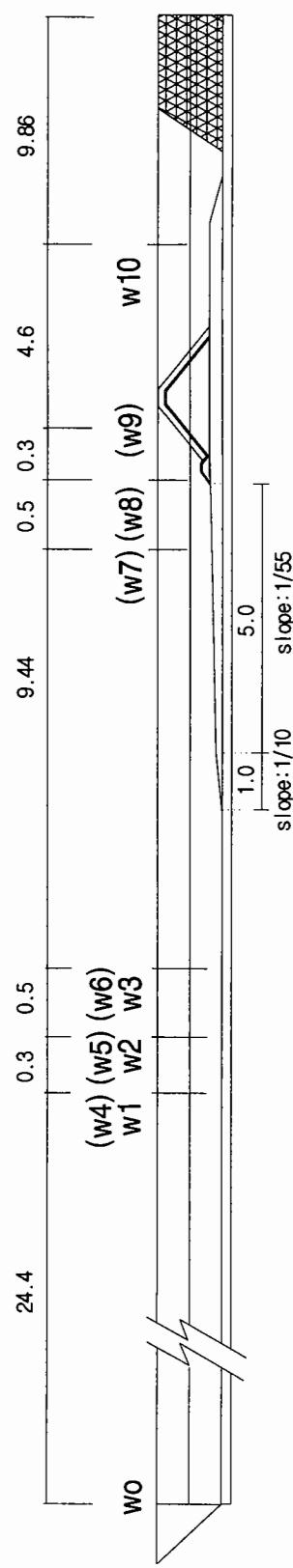
실험 수로는 <그림 2.3.1>에 보인 바와 같이 철재 분할판을 사용하여 수로를 폭 0.4m의 협수로와 폭 0.6m의 광수로로 분할하였다. 광수로에는 모형을 설치하였으며 협수로에서는 통과파를 계측하였다.

본 실험에서는 방파제 모형상의 내부에 직경 6cm의 파이프를 광수로 구간에 3개, 협수로 구간에 2개를 설치함으로써 제 2절의 1항에서 기술한 회류파이프와 함께 하류측 수위의 상승이 자연적으로 감소되도록 하였다.

<그림 2.3.1>에서 W는 파고계를 의미하며 W1~W3(W4~W6)은 광수로(협수로)의 평탄부에 설치된 용량식 파고계로서 입사파를 계측하고 반사율을 분석하는데 사용하였고, W7~W9는 협수로의 경사 해저면 위에서 방파제의 Toe 측면을 통과하는 파를 계측하는데 사용하였으며, W10은 광수로의 방파제 후면에 설치되어 전달파고를 계측하는데 사용하였다.



(a) 평면도



(b) 측면도

<그림 2.3.1> 모형 및 계측기기의 설치도

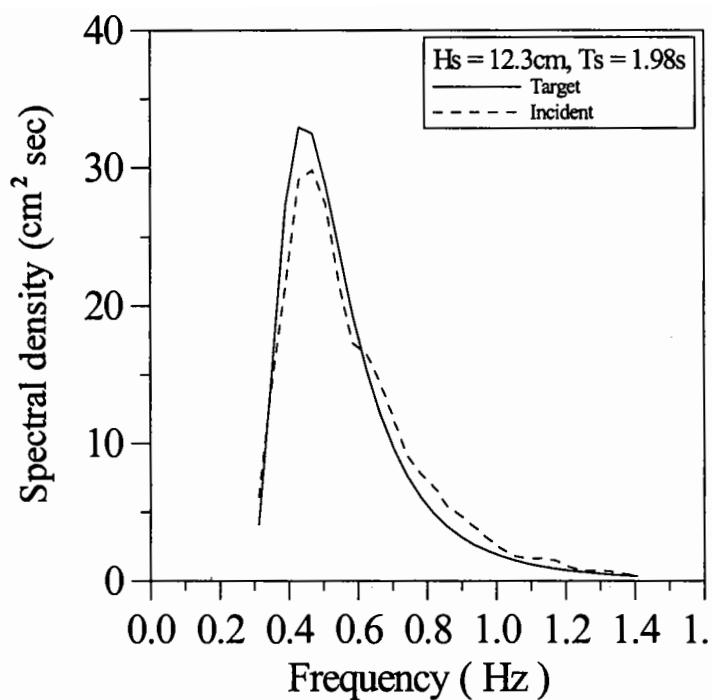
제 4 절 실험조건

- 수심 : 수심은 방파제 toe에서 36cm였으며 수조 상류의 저면이 수평인 구간에서는 57cm였다.
- 저면 경사 : 방파제 전면의 저면 경사는 광수로와 협수로에서 1/50로 동일하였다.
- 실험파 : 실험파는 불규칙파로서 광수로에 구조물이 설치된 상태에서 협수로에서 방파제 toe의 측면에서 평가하였다. 이때 입사파 스펙트럼의 형상은 다음과 같이 合田良實 (1987)에 의해 수정된 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼과 그 형상이 유사하도록 조파하였다.

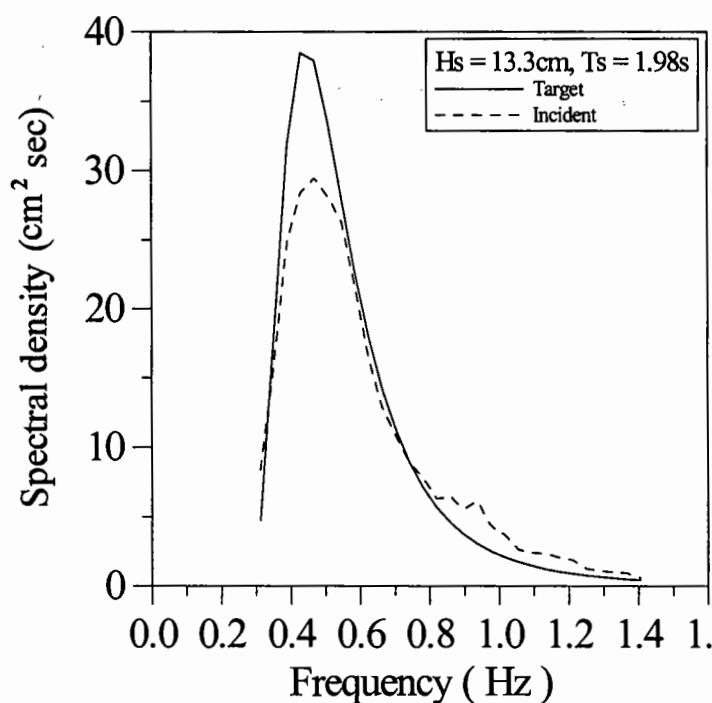
$$S(f) = 0.205H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3}f)^{-4}] \quad (2.4.1)$$

여기서 $S(f)$ 는 파랑에너지 밀도, f 는 주파수를 나타내며, $H_{1/3}$ 및 $T_{1/3}$ 은 각각 유의파고 및 유의파 주기를 나타낸다.

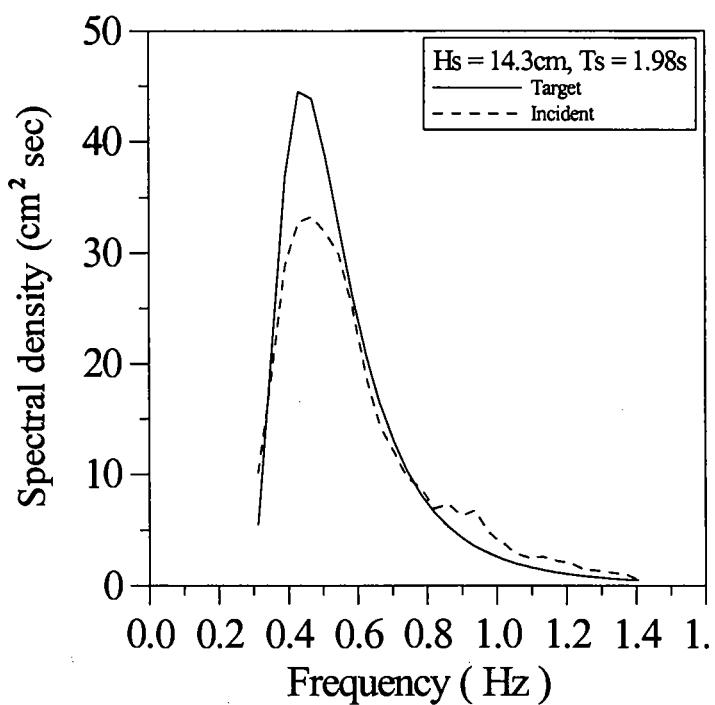
실험파로는 주기가 1.98초로 일정하며 파고가 각각 7.0cm, 10.0cm, 12.3cm, 13.3cm, 14.3cm, 15.2cm, 16.0cm인 7개의 파를 사용했으며 각 파의 지속시간은 26분이었다. <그림 2.4.1>~<그림 2.4.5>에는 파고가 12.3cm 이상인 파들의 목표스펙트럼과 입사파 스펙트럼을 제시하였다.



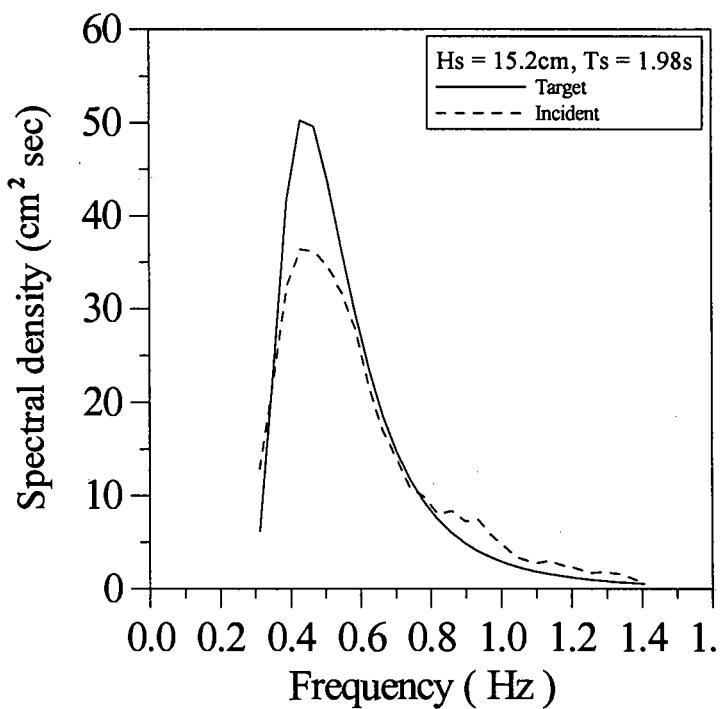
<그림 2.4.1> 목표스펙트럼과 입사파 스펙트럼($H_S=12.3\text{cm}$).



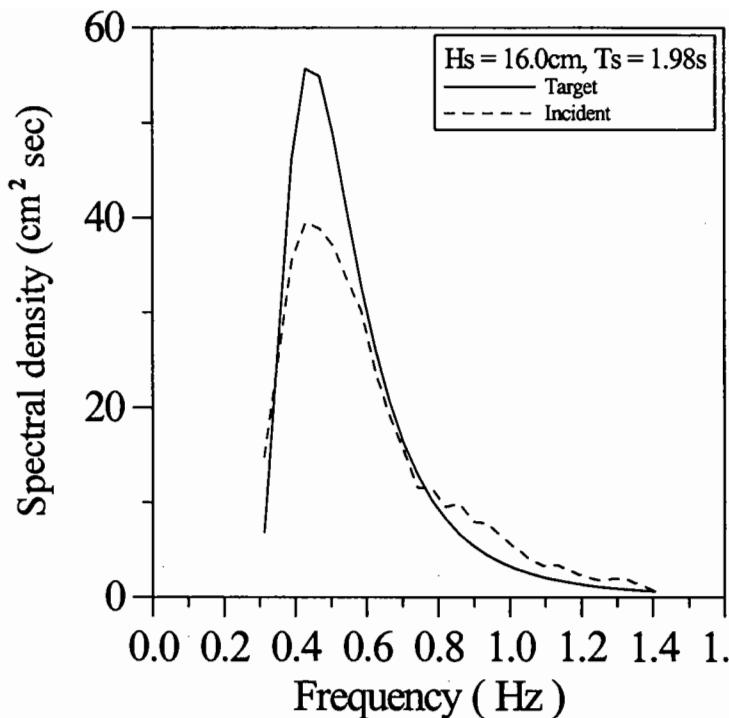
<그림 2.4.2> 목표스펙트럼과 입사파 스펙트럼($H_S=13.3\text{cm}$).



<그림 2.4.3> 목표스펙트럼과 입사파 스펙트럼($H_s=14.3\text{cm}$).



<그림 2.4.4> 목표스펙트럼과 입사파 스펙트럼($H_s=15.2\text{cm}$).



<그림 2.4.5> 목표스펙트럼과 입사파 스펙트럼($H_s=16.0\text{cm}$).

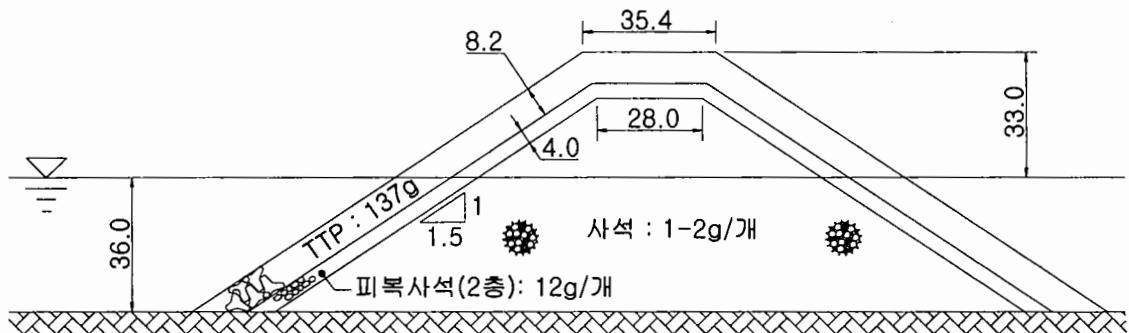
제 5 절 실험 단면안 및 실험방법

1. 실험 단면안

모형 방파제의 단면은 <그림 2.5.1>~<그림 2.5.3>에 제시한 바와 같이 3개 형식의 단면을 채택하였다. 제1안은 방파제가 암반 위에 설치되는 경우를 가정하여 Tetrapod가 바닥면에 바로 설치되는 경우이며, 제2안은 Toe의 Tetrapod가 수평 기초사석층 위에 설치되는 경우이고, 제3안은 Toe에 지지형 소단이 설치된 경우이다. 각각의 형식은 우선 피복층의 미끄럼 또는 저층 제 1열에 설치된 소파블록의 안정성 면에서 큰 차이를 보인다는 면에서 안정성 특성이 다르다.

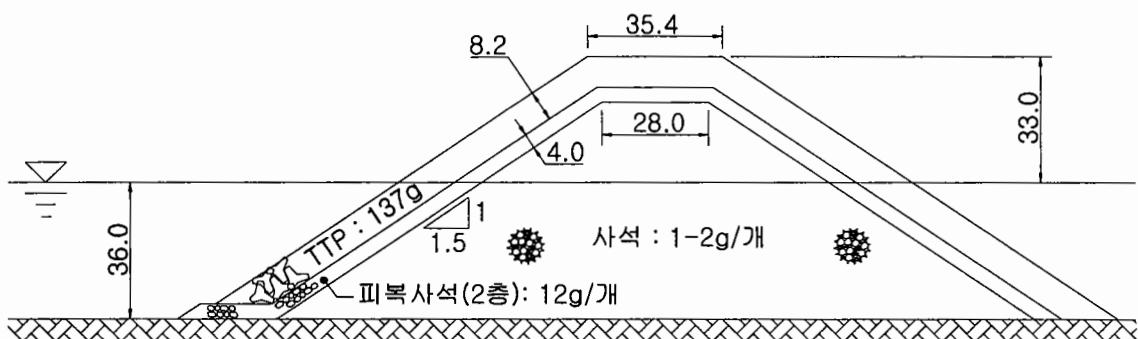
Tetrapod는 수평 한 열 한 층에 11개씩 설치되었다.

Unit : cm



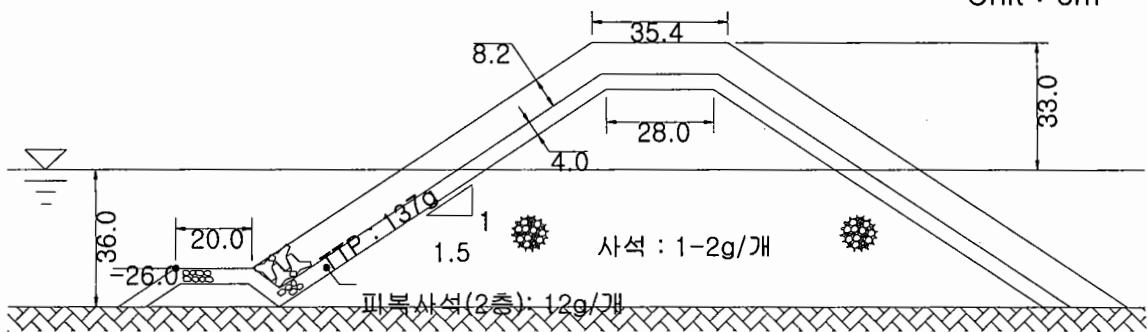
<그림 2.5.1> 제1안 모형 방파제의 표준 단면도

Unit : cm



<그림 2.5.2> 제2안의 모형 방파제의 표준 단면도

Unit : cm



<그림 2.5.3> 제3안의 모형 방파제의 표준 단면도

<표 2.5.1>에는 상기 3개 형식의 방파제를 대상으로 실험을 수행한 실험단면의 개요를 나타내었다. 이 표에서 정적이란 속고르기를 한 것을 의미하며 난적이란 속고르기를 수행하지 않고 단지 사석을 한 개씩 쌓은 것을 의미한다.

피복재의 피해는 주로 정지수면 바로 아래 구간에서 발생한다. 따라서, 전사면 난적과 정지수면하 난적 그리고 정지수면으로부터 12cm이하 구간의 난적을 비교하기로 하였다.

사용한 Tetrapod는 높이 6.05cm, 포화중량 137g이며 비중이 약 2.21정도로서, 안정계수 K_D 값을 8.0으로 볼 때 피해 한계파고가 11cm정도임을 고려하여 수면하 12cm부터 난적하는 안을 채택하였다.

<표 2.5.1> 실험 단면안 개요

단면안	TTP 중량(g)	중간피복석 중량(g)	수심(cm)	마루높이 (cm)	소단형상	마루폭 (cm)	중간피복층 설치방법
1-1안	137	12	36	33	소단없음	35.4	전체정적
1-2안	137	12	36	33	소단없음	35.4	전체난적
2-1안	137	12	36	33	수평소단	35.4	전체정적
2-2안	137	12	36	33	수평소단	35.4	전체난적
2-3안	137	12	36	33	수평소단	35.4	+0cm하 난적
2-4안	137	12	36	33	수평소단	35.4	-12cm하 난적
3-1안	137	12	36	33	지지형소단	35.4	전체정적
3-2안	137	12	36	33	지지형소단	35.4	-12cm하 난적

2. 실험방법

중간피복층의 설치방법에 따른 사면의 안정특성 변화를 비교하기 위해서는 완성된 제체에 일정한 파를 작용시킨 후에 피복층뿐 아니라 중간피복층의 피해 또는 변형을 파악할 필요가 있다. 이 중 피복층의 피해는 사면 피해를 관찰하는 일반적인 방법으로 그 피해를 정량화할 수 있다. 그러나 중간피복층의 피해 또는 변형은 일단 파를 작용시킨 후 피복층을 조심스럽게 제거한 후에 정밀하게 계측한 후 이를 파 작용 전의 상태와 정량적으로 비교하여야 하므로 실험에 많은 시간과 노력이 필요하다.

본 연구에서는 예비실험을 통하여 피복층에 소정의 피해를 유발하는 파고를 미리 파

악하여 각 실험안에 대하여 파고가 작은 파로부터 파고가 큰 파까지를 순차적으로 일정한 순서로 작용시키면서 피복층의 피해는 파의 작용 중 및 파의 작용 후에 육안 관찰 및 사진 촬영으로 파악하였으며, 중간피복층의 변형은 파의 작용을 끝낸 후에 피복층을 제거한 후 사면계측기로 계측하여 피복층을 설치하기 전에 계측한 자료와 비교하였다.

파는 파고 7.0cm인 파를 2회 작용시킨 후 파고 10.2cm인 파로부터 파고 16.0cm인 파 까지 각 1회씩 작용시켰다. 각 파의 1회 작용시간은 26분이었으며 이는 약 788파에 해당한다.

<그림 2.5.4>는 사면의 피해량 평가를 위한 조파실험 장면이다.

중간피복층의 피해량 평가는 육안관찰 및 사진촬영에 의존했으며 피해 판정의 기준은 해양수산부(2000)에 기술한 방법과 동일하였다. 수조 양 측벽에서 발생한 Tetrapod의 피해는 피해량에서 제외하였다. 그리고, Tetrapode의 피해가 측벽으로부터 시작하여 내측으로 이어서 확산되면서 피해량이 증가하는 경우에는 재실험을 실시하였다. 개별 Tetrapod의 거동이 다음과 같을 때에는 이를 피해로 분류하였다.

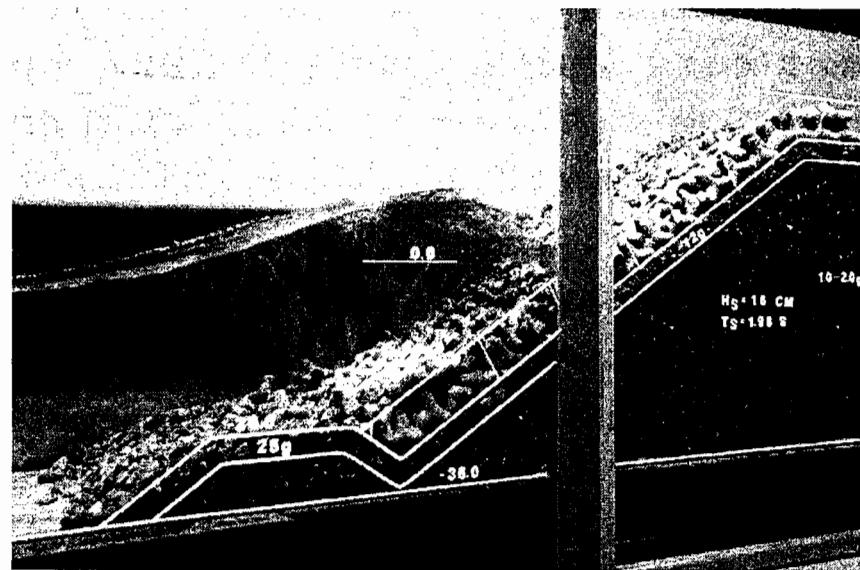
① 피복재의 제자리 이탈 : 사용 Tetrapod는 포화중량이 137g, 비중이 2.21정도였으므로, 사면의 전체적인 미끌림량을 제외한 상태에서, 개별 파를 끝까지 작용시킨 후에 개별 Tetrapod가 Tetrapod의 특성길이인 $(137/2.21)^{1/3} \approx 4\text{cm}$ 이상 제자리로부터 이동하는 경우

② 피복재의 이탈 후 복원 : 파를 작용시키는 도중에 Tetrapod가 위로 솟구친 다음 다시 제자리에 떨어지거나 일단 ①항의 기준만큼 이탈하여 사면 위에서 머물다가 차후의 내습 파에 의해 본래의 자리로 돌아가는 경우

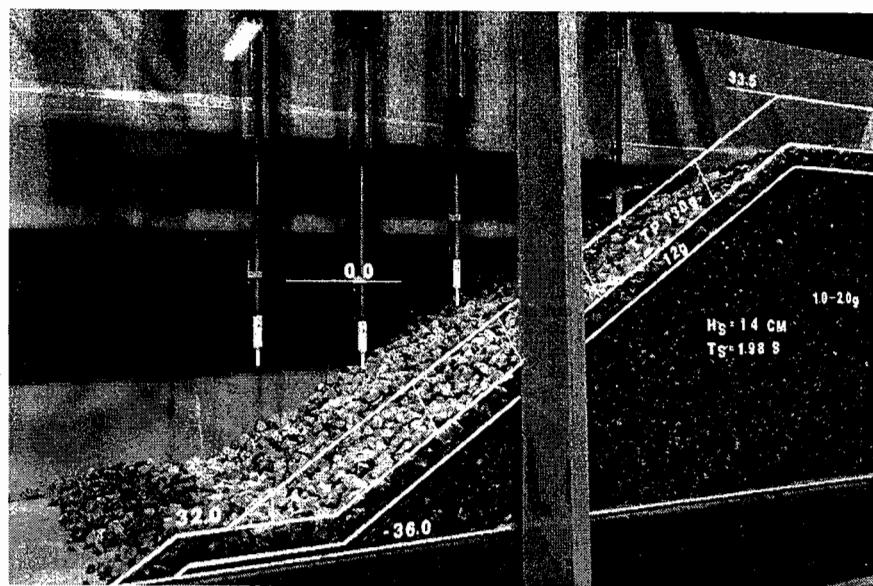
③ 피복재의 제자리 회전 또는 심한 롤링 : 파를 작용시키는 도중에 Tetrapod가 순간적으로 180도 이상 회전하는 현상이 반복적으로 나타나는 경우

④ 동일한 Tetrapod가 ①~③항에 중복 해당되는 경우에는 피해량을 1개로 계산하였다.

<그림 2.5.5>는 일련의 파를 작용시킨 후 중간피복층의 형상을 사면측정기로 계측하는 장면이다. 중간피복층 사면의 높이는 사면상의 고정 기준점으로부터 외해 방향으로 수평거리의 합수로 기록하였다. 계측 센서는 수조의 종방향으로 5개를 1열로 설치하였으며, 계측점간의 수평거리(수조의 상·하류 방향의 거리)는 중간피복석의 크기를 고려하여 0.9cm로 하였다. 한편, 계측선은 광수로의 종방향 중앙선을 포함하여 수조의 횡방향으로 3cm간격으로 설정하여 실험 1회의 관측은 3열 관측을 기본으로 하였다.



<그림 2.5.4> 사면의 피해량 평가실험



<그림 2.5.5> 중간피복층의 변형 계측

제 6 절 실험결과 및 분석

1. 피복총의 피해량 및 평가

본 연구의 피해량 평가 실험의 목적은 Tetrapod의 안정계수를 추정하는 것이 아니고 중간피복총의 설치 형태 변화에 따른 사면의 피해량 또는 변형량의 변화를 제한된 조건에서나마 상대적으로 비교함에 있다. 만일 안정계수를 추정하는 것이 목적이라면 보다 다양한 실험조건에서 방대한 양의 실험을 수행하여야 할 것이며. 속고르기의 시행 또는 생략에 따른 안정계수의 차이를 파악하려면 통상의 안정계수 추정을 위한 실험보다도 한 층 더 방대한 실험이 필요하다. 따라서, 본 실험결과만으로 안정계수를 추정하는 것은 불가능하며 또한 본 연구의 결과를 중간피복석총의 속고르기를 생략하거나 감소할 수 있는 한계파고를 최종 결정할 목적으로 이용하여서도 안될 것이다.

<표 2.6.1>에는 각 단면안별로 파고별 Tetrapod의 피해량을 표로 제시하였다. 피해량은 파고 7.0cm의 파는 26분씩 2회 연속 작용시킨 결과이며 나머지 파들은 26분씩 1회만 작용시킨 결과이다.

피복총의 피해량을 평가한 후 Tetrapod를 제거하고 중간피복총의 변형도 계측하여야 하므로 각 구조형식별로 Tetrapod의 피해량이 어느 정도 누적된 뒤에는 작용파고를 증가시키지 않았으므로 구조형식별로 작용파고의 최고치에는 차이가 있다. 각 구조형식별 작용파고의 최고치는 다음과 같다.

- 1안 계열 : 파고 13.3cm에서 2분 40초만에 중지
- 2안 계열 : 파고 14.3cm
- 3안 계열 : 파고 16.0cm

■ 1안 계열의 피해량 추이

1안 계열은 Tetrapod의 항외측 하단이 해저면에 바로 설치된 형식이다. 1-2안(전체 중간피복석 난적)의 경우에는 Tetrapod의 외해측 하단 제1열 상·하층의 안정성이 부족하여 파고 7.0cm에서 피해가 발생하였다. 1-1안(전체 중간피복석 정적)과 1-2안 모두에서 파고 13.3cm를 작용시킬 때 초기에 내습하는 파고가 작은 파에서 이미 피해가 발생할 뿐 아니라 Tetrapod의 거동도 매우 심하였으므로 파고 13.3cm의 파를 2분 40초간 작용시킨 후 파의 작용을 중지하였다.

<표 2.6.1> 안벌 Tetrapod의 파고별 낙적 푸른수염(주기)=1.98초, 청방수 TTP 1초 1열=11개)

파고 (cm)	1-1 안 안		2-1안 (전체 정적)		2-2안 (전체 낙적)		2-3안** (+0cm까지 낙적)		2-4안** (-12cm까지 낙적)		3-1 (전체 정적)		3-2안** (-12cm까지 낙적)	
	1회	1회	1회	2회	3회	4회	1회	2회	3회	4회	1회	2회	3회	4회
7.0	누적	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.0	누적	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12.3	누적	2	3	0	0	0	1	2	2	0	0	1	1	0
	평균	2	3	0			1.75			0.5		0.6		0
13.3	누적	3*	4*	0	0	2	2	3	5	4	2	4	3	4
	평균	-	-	1.0			3.5			3.25		2.0		0
14.3	누적	-	-	2	4	4	6	11	9	8	7	10	11	10
	평균			4.0			8.75			10.5		10.0		4.5
15.2	누적	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6
	평균													5.0
16.0	누적	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12
	평균													11.5

* 1-1안(전체 정적) 및 1-2안(전체 낙적)은 파고 13.3cm의 파를 2분 40초간 적용시킨 후 파의 작용을 중지

** 기준면은 정지수면임

■ 2안 계열의 피해량 추이

2안 계열은 Tetrapod의 항외측 하단이 해저면에 수평으로 설치된 사석 위에 설치된 형식이다. 피해는 전 사면에 속고르기를 시행한 2-1안에서는 파고 13.3cm에서 발생하기 시작하였으나 속고르기를 생략하거나 부분적으로 생략한 안들 모두에서는 파고가 이보다 한 단계 작은 12.3cm에서 발생하기 시작하였다. 즉, 중간피복층의 속고르기는 피복층의 안정에 크게 도움이 되고 있다. 속고르기를 생략한 안들간을 비교하면, 최초로 피해가 발생하여 안정성 평가면에서 가장 의미가 있는 파고 12.3cm까지 작용한 결과를 토대로 할 때, 피복층의 피해량은 사면 전체에 걸쳐 속고르기를 생략한 구간이 클수록 크게 나타났다.

파고를 13.3cm까지 작용시킨 결과에서 2안 전체를 비교하면, 피해량은 사면 속고르기 를 시행한 2-1안에서 가장 적으며 2-4안, 2-3안, 2-2안의 순서로 커진다.

이후 파고를 14.3cm까지 작용한 후의 피해량은 본 실험에서 이미 파고 12.3cm에서 피해가 발생하였으므로 피해를 유발한 파고보다 파고가 16%나 더 큰 파에 의한 결과이다. 실험실에서는 안정계수를 사용하여 추정한 Tetrapod가 설계파에 의해 피해가 거의 발생하지 않는다는 경험적 사실을 토대로 판단할 때 파고 14.3cm에서의 결과는 실제 설계에서는 설계파를 대폭 초과하는 매우 큰 파에 의한 피해량에 해당한다. 또한 경험에 의하면 2차원 수리모형실험에서 피복층에 어느 정도의 피해가 발생하면 이 후의 피해량은 실험의 횟수를 반복하여도 정량적인 측면에서 결과의 신뢰도가 급격히 저하되는 예가 많다. 그러므로 본 실험에서 파고 14.3cm에서의 결과는 속고르기의 실시 또는 생략을 선택하려는 매우 예민한 결정을 할 때에는 비중을 두고 이용하기 어려우며 단순히 참고만 하여야 할 것이다.

참고로 Tetrapod의 안정계수를 8.0으로 볼 때 사용한 Tetrapod에 대한 안정한계파고 를 Hudson식으로 계산하면 약 11cm가 된다. 이는 본 실험의 2-4안에서 정지수면하에서 수행한 속고르기의 높이 12cm와 유사한 값이다.

따라서, 본 실험에서 파고 12.3cm까지와 파고 13.3cm까지의 결과들로 판단할 때 만일 중간피복층의 속고르기를 생략하고자 한다면 이는 정지수면을 기준으로 하여 설계파고 보다 아래에 위치한 깊은 구간으로만 국한시키는 것이 바람직하다고 판단된다. 이 경우에 도 사면 안정성의 최종 평가는 통상의 기준과 마찬가지로 수리모형실험을 통하여 판단하여야 할 것이다.

실제 현장에서는 조위가 변하므로 설계조위보다 낮은 조위에서도 설계파가 내습할 수

있다면 속고르기를 생략하는 구간의 상단 경계는 낮은 조위를 기준으로 결정해야 할 것이다.

■ 3안 계열의 피해량 추이

3안 계열은 지지형 소단이 설치되었기에 사면에서 Tetrapod의 항외측 최하단 제1열의 거치 형태가 2안에서의 경우와 다를 뿐 아니라 사면의 미끌림도 크게 억제되는 안정적인 구조형식이다. 따라서, Tetrapod의 최초 피해는 2안 계열에서보다 한 단계 큰 파에서 발생하였다.

3안 계열에서도 마찬가지로 속고르기의 영향이 나타나서 최초의 피해는 속고르기를 한 3-1안에서는 피해가 파고 14.3cm에서 시작되었으나 이를 수면하 12cm부터 생략한 3-2안에서는 이보다 파고가 작은 13.3cm에서 시작하였다.

파고 13.3cm와 14.3cm까지의 누적 피해량을 토대로 판단할 때 최초의 피해가 이미 파고 13.3cm의 파에 의해 발생하였으므로 2안 계열의 피해량 추이에서 기술한 바와 같이 파고가 매우 큰 파고 16.0cm에서의 결과는 단순한 참고자료로만 보아야 할 것이다.

■ 피복층의 피해량 평가 결론

- ① 중간피복층의 피해는 검토된 3개의 단면형식에 대하여 피복재로 사용한 Tetrapod의 피해량은 중간피복층의 전 사면을 고르기한 경우에 가장 적고 해저로부터 사면고르기를 생략한 구간의 길이가 길어짐에 따라 증가한다.
- ② Tetrapod의 최초 피해는 속고르기를 적게 시행한 단면에서 보다 작은 파에서 발생한다.
- ③ 속고르기를 생략한다면 이는 기준 수위로부터 설계파고보다 낮은 구간으로만 국한시킴이 바람직하다.
- ④ 속고르기를 생략하는 구간을 설정할 때에는 저조위를 기준수위로 하여야 할 것이다.
- ⑤ 속고르기를 생략할 경우에는 가능한 한 사면의 미끌림을 감소시킬 수 있는 형식의 소단을 설치함이 바람직하다.

2. 중간피복층의 변형 측정 및 분석

<그림 2.6.1>~<그림 2.6.8>에는 2-5안(지지형 소단, 전체 정적)의 5회차 실험을 대상으로 각각 파 작용 전과 파고 16.3cm인 파고를 증가하여 작용한 후의 중간피복층의 단면형상을 사면계측기기로 계측하여 분석한 결과의 예를 제시하였다. 여기서 연직축의 원점은 정지수위이며 수평축의 원점은 정지수위보다 높은 중간피복층 사면의 일정한 기준점으로서 모든 실험에서 동일하게 유지하였다.

<그림 2.6.1>은 5회차 실험에서 모형 설치 과정에서 Tetrapod를 설치하기 이전에 계측한 단면형상이며, <그림 2.6.2>는 5회차 실험 종료후에 Tetrapod를 제거하고 계측한 변화된 단면이다. 두 그림을 비교하면 실험 전에는 전체적으로 매끈했던 사면이 실험 후에는 굴곡이 심한 형상으로 변한 것을 볼 수 있다.

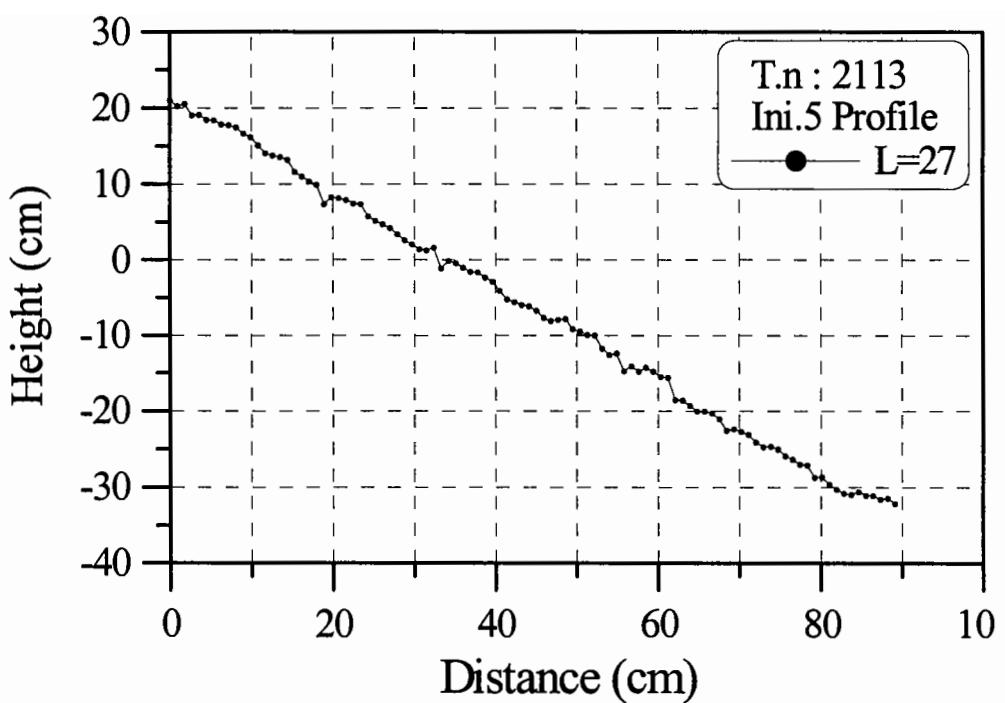
이러한 계측은 일련의 조파가 끝난 한 회의 실험에서 폭 60cm의 광수로의 중심축선 ($L=30\text{cm}$)과 이로부터 3cm의 이격을 두고 나란한 두 개의 선($L=27\text{cm}$, $L=33\text{cm}$) 등 모두 3개의 관측선을 따라 시행하였다. <그림 2.6.3>과 <그림 2.6.4>에는 파 작용 전과 후에 3개의 관측선을 따라 계측한 결과들을 각각 한 그림에 도시하였다.

<그림 2.6.5> 및 <그림 2.6.6>에는 파 작용 전과 후에 3개의 관측선을 따라 계측한 결과를 평균한 것들을 도시하였다. 이들을 여기서 편의상 평균단면이라 부르기로 한다.

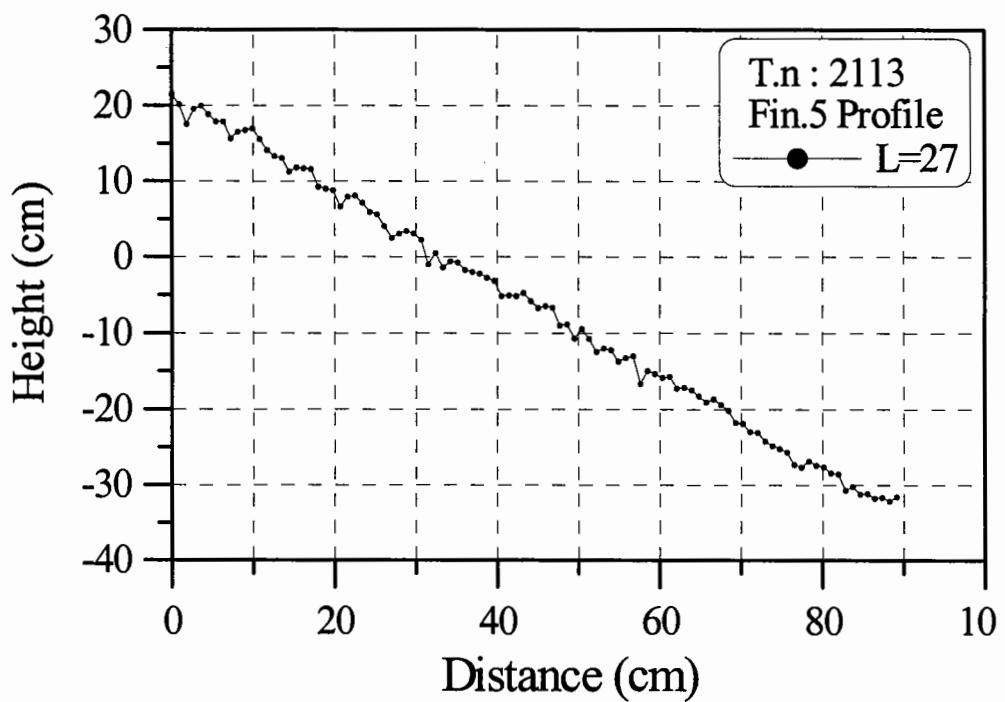
<그림 2.6.7>에는 파 작용 전의 평균단면과 파 작용 후의 평균단면을 비교하였다. 가는 선은 파 작용 전의 단면을 그리고 굵은 선은 파 작용 후의 단면을 나타낸다.

<그림 2.6.8>은 <그림 2.6.7>로부터 단면의 연직 방향 변위량을 계산하여 도시한 것이다. 이 그림에서 굵은 화살표 부근의 변형 량이 음인 부분은 사면의 위치가 낮아진 부분을 의미하며 이의 우측에 변형량이 양인 부분은 사면의 위치가 높아진 부분을 의미한다. 여기서 사면 변형량의 최대치는 사면이 낮아진 부분과 높아진 부분에서 각각 약 1.5cm 및 2.0cm 정도로서 사용한 중간피복석의 직경보다도 크게 나타났다. 이를 감수 낮아진 감보다는 높아진 감의 신뢰성이 높다.

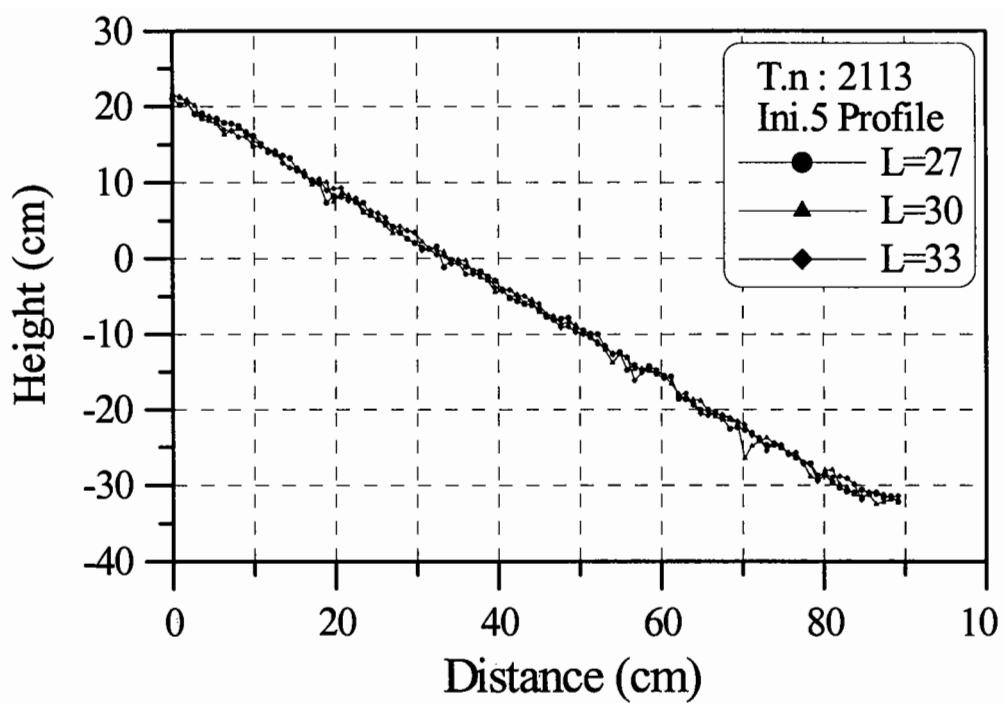
본 실험단면들을 포함하여 다른 실험안들에 대하여 <그림 2.6.1>~<그림 2.6.8>과 같은 계측 및 분석 결과들은 부록1에 제시하였다.



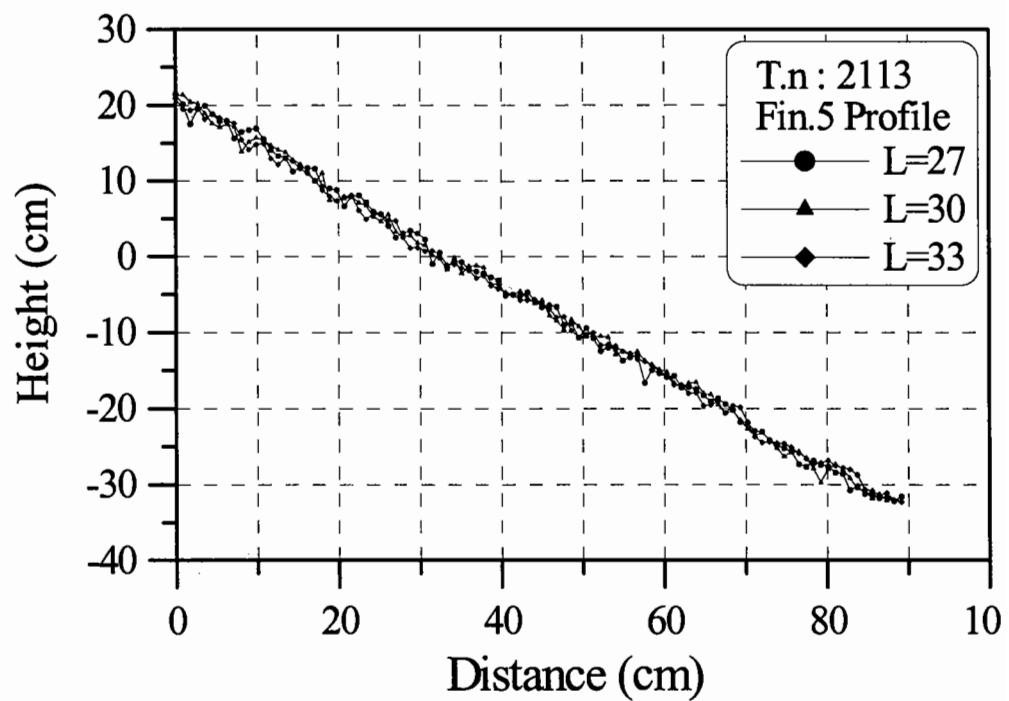
<그림 2.6.1> 2-4안 5회 실험 피해전 필터총의 단면형상 1



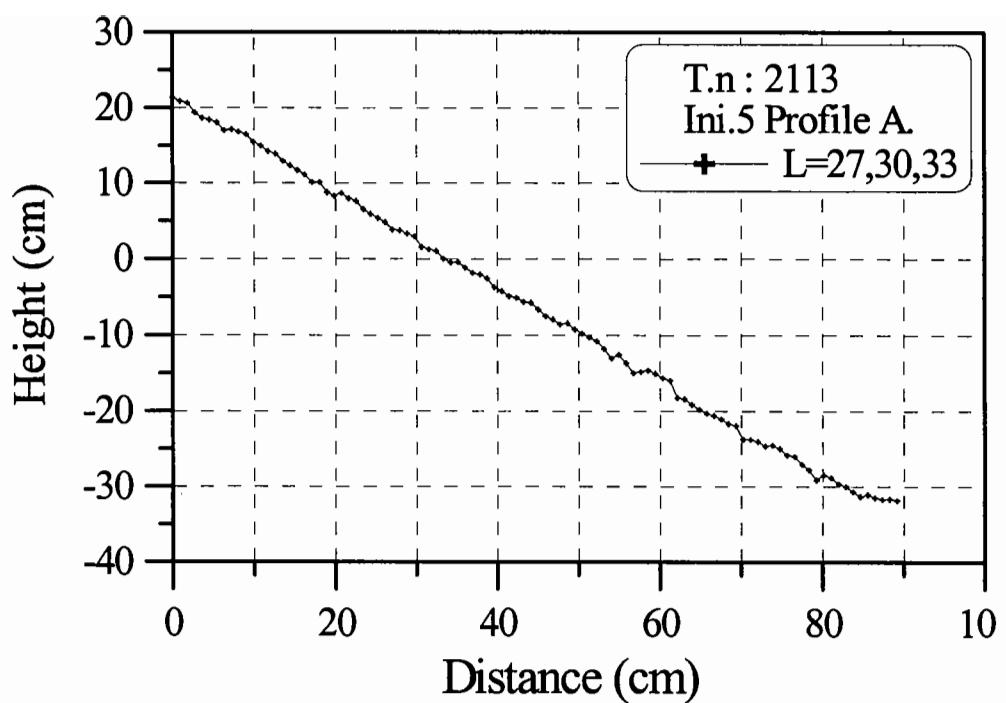
<그림 2.6.2> 2-4안 5회 실험 피해후 필터총의 단면형상 1



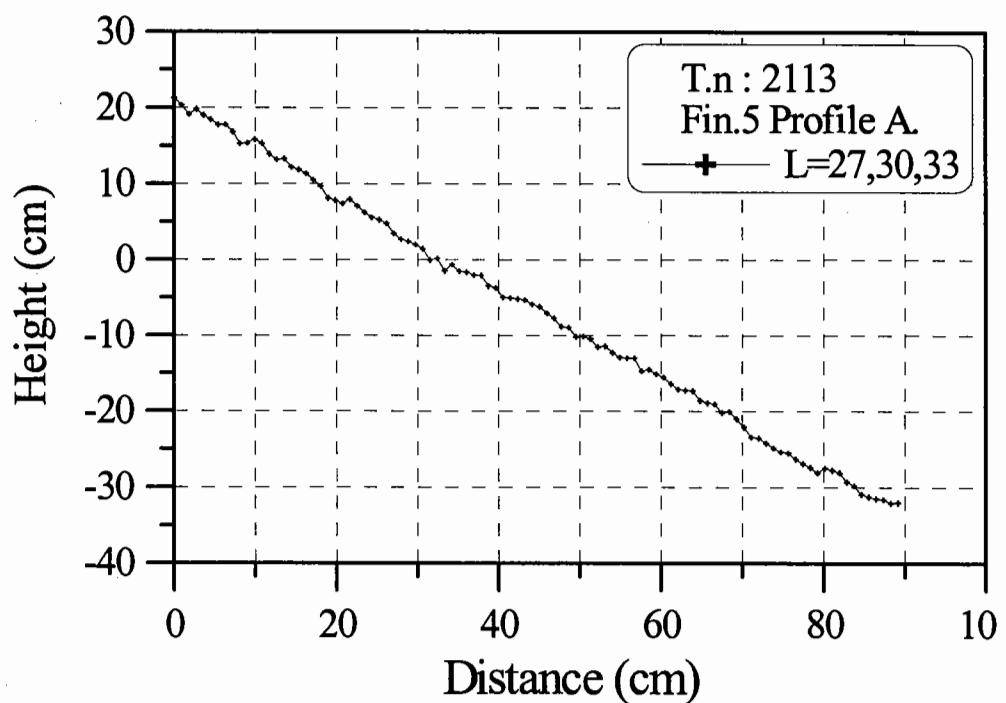
<그림 2.6.3> 2-4안 5회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교



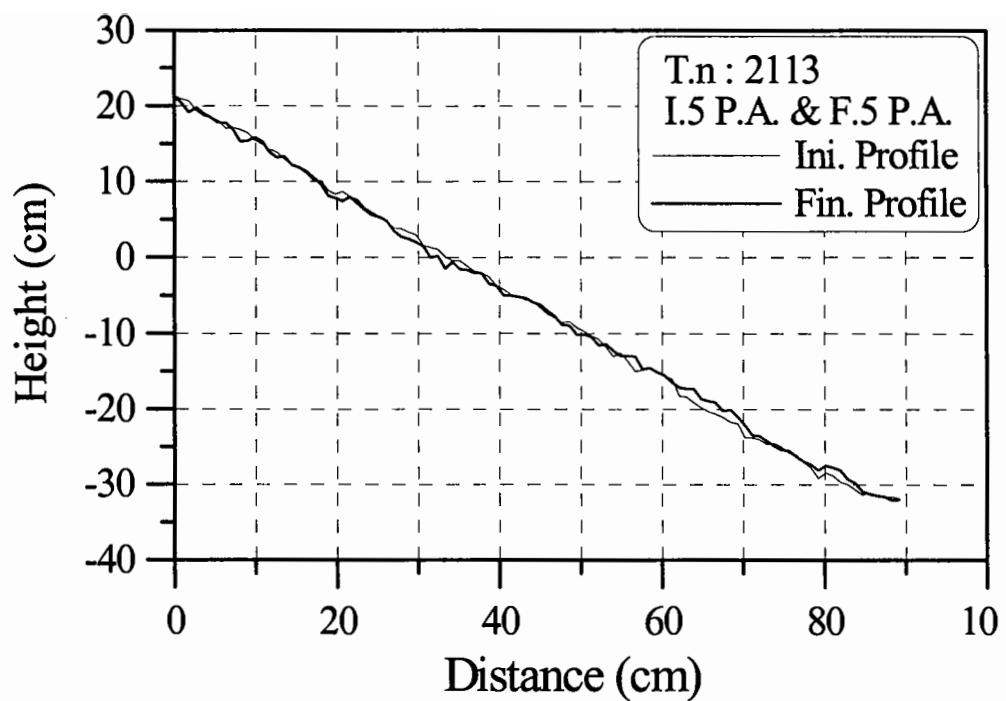
<그림 2.6.4> 2-4안 5회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교



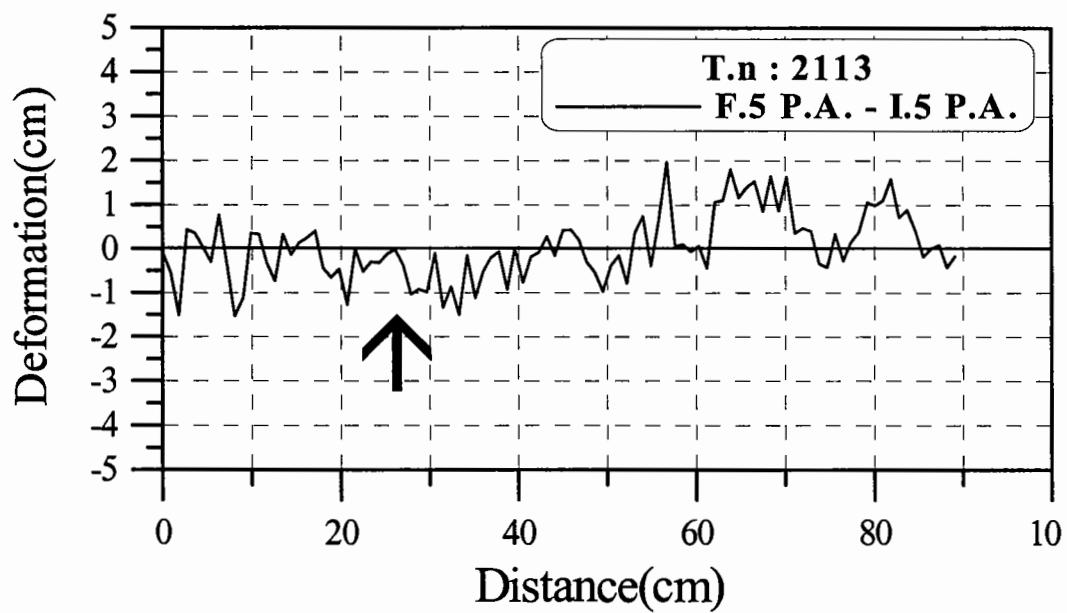
<그림 2.6.5> 2-4안 5회 실험 피해전 필터총의 단면형상 평균



<그림 2.6.6> 2-4안 5회 실험 피해후 필터총의 단면형상 평균



<그림 2.6.7> 2-4안 5회 실험 피해전·후 필터총의 단면형상 평균의 비교



<그림 2.6.8> 2-4안 5회 실험후 필터총의 연직방향 변형량

본 실험에 사용한 사면계측기는 센서가 위로부터 내려오다가 센서의 끝이 물체에 닿으면 다시 본래의 위치로 올라가며 기준점으로부터의 높이를 출력하는 방식을 사용한다. 이 때의 접촉력은 매우 약하지만 중간피복석이 매우 가볍다든지 또는 거치형태가 안정하지 않은 경우에는 중간피복석의 위치가 이동되어 다음 관측점에서의 계측 결과에 영향을 미치는 결과가 발생한다. 또한 센서가 중간피복석 사이의 틈 사이로 내려올 때 이 틈의 크기가 센서의 직경 6mm보다 큰 경우에는 센서의 끝이 중간피복석의 하층에 설치된 기초사석면까지 도달하는 경우가 발생하여 계측값을 그대로 해석하면 경우에 따라서는 국부적으로 심히 왜곡된 단면형상을 얻게 된다. 따라서, 단면의 대체적인 형상 파악을 쉽게 하기 위하여 계측자료들을 이동평균한 자료들을 사용할 필요가 발생하였다. 다음의 그림들은 5점 이동평균한 자료들로 분석한 것이다.

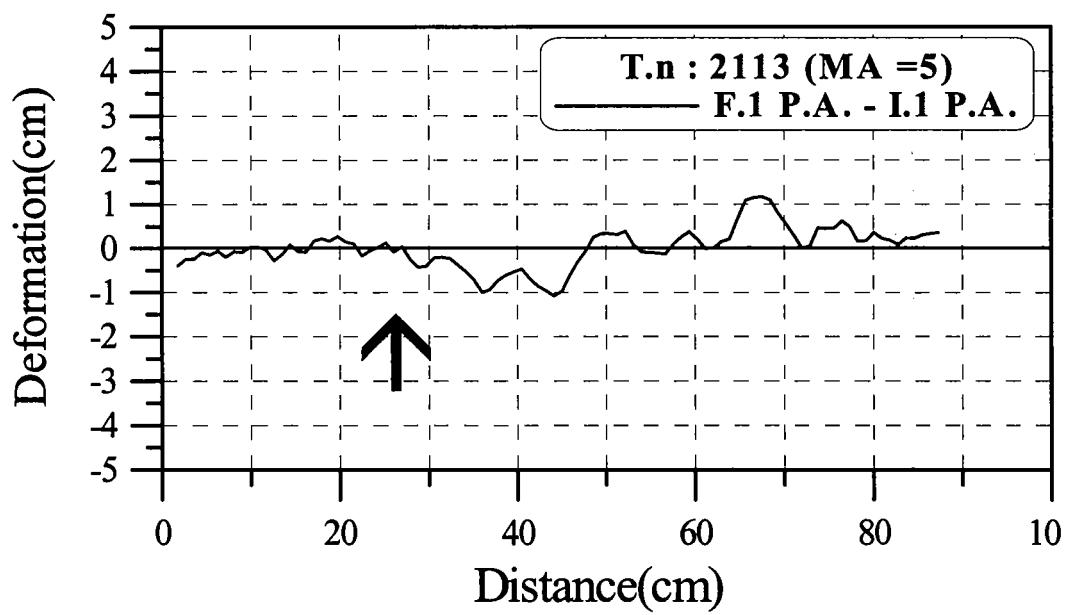
<그림 2.6.9>는 <그림 2.6.8>의 자료들을 이동평균하여 다시 그린 것이다. <그림 2.6.8>에서 보다는 단면의 대체적인 형상을 파악하기가 편이다.

본문에서 현재까지는 한 단면에 대한 1회분의 실험 결과만을 제시하였다. 예로 제시하는 2-4안의 경우에는 상기와 같은 실험을 총 5회에 걸쳐 수행하였다. <그림 2.6.10>~<그림 2.6.13>에는 나머지 4회의 실험결과로부터 얻은 <그림 2.6.9>와 같은 결과들을 제시하였다. 동일한 단면안에 대해서도 모형 방파제를 헐고 다시 쌓아 실험을 반복함에 따라 연직방향 변형량은 비교적 큰 편차를 보이고 있다. 이는 형상과 크기가 모두 다른 수많은 돌들을 하나씩 일일이 쌓아야 하므로 실험모형 설치 자체에서부터 편차가 크게 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 현장에서는 이러한 편차가 더욱 심하다.

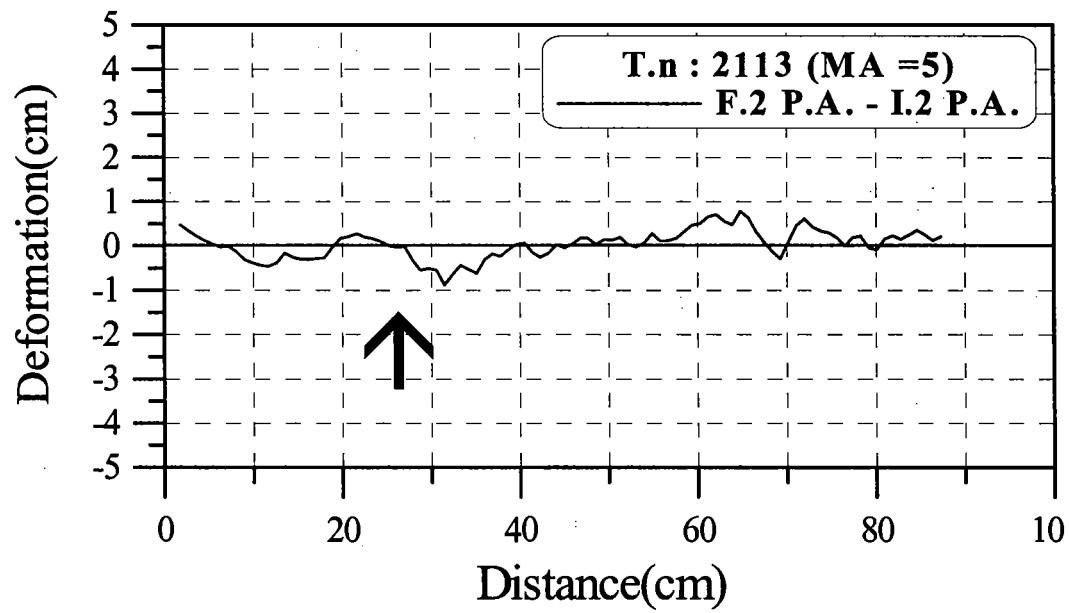
<그림 2.6.14>는 <그림 2.6.9>~<그림 2.6.13>의 자료들을 산술평균한 자료들로부터 그린 것이며, 2-4안 실험 결과에서 중간피복층의 연직방향 변형량을 대표한다고 할 수 있다. <그림 2.6.15>~<그림 2.6.21>에는 다른 단면안들에 대해서 <그림 2.6.14>와 같은 그림들을 제시하였다.

<그림 2.6.14>~<그림 2.6.21>을 살펴보면 다음과 같은 사실을 알수 있다.

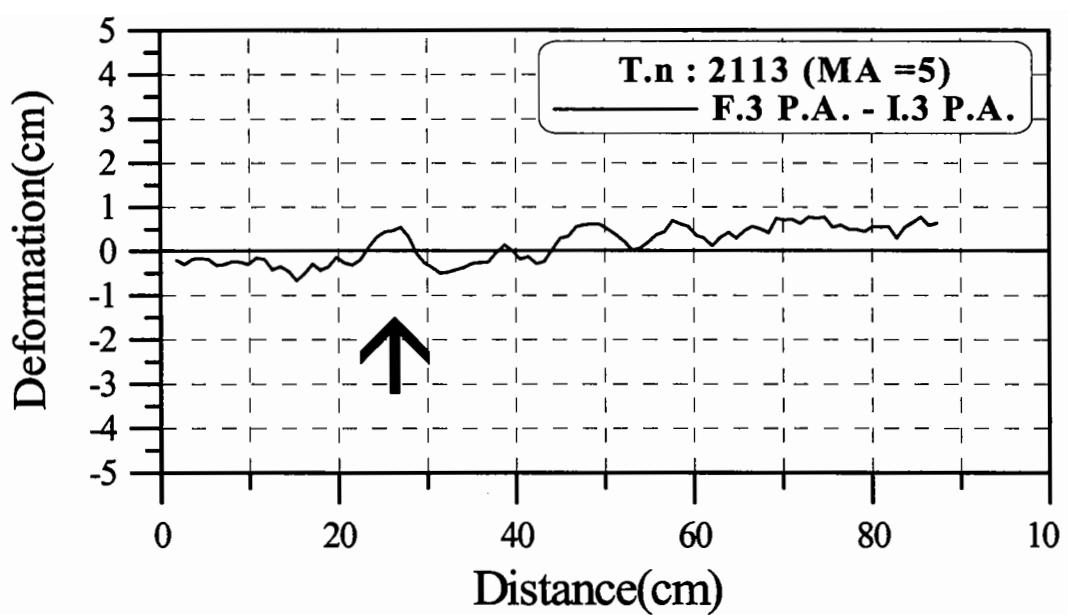
- ① 1안 계열은 소단이 없는 형식으로서 최후 작용파의 파고가 13.3cm로 가장 작았으며 이의 작용시간도 2분 40초밖에 되지 않았으나 중간피복층의 변형은 다른 안보다 매우 크다.
- ② 3안 계열은 최후 작용파의 파고가 16.0cm로 3개 구조형식 중 가장 컸음에도 불구하고 중간피복층의 변형은 3개 구조형식 중 가장 적다.
- ③ 수평축에서 사면변형의 방향이 바뀌는 위치는 실험마다 편차가 있으나 본 실험조건의



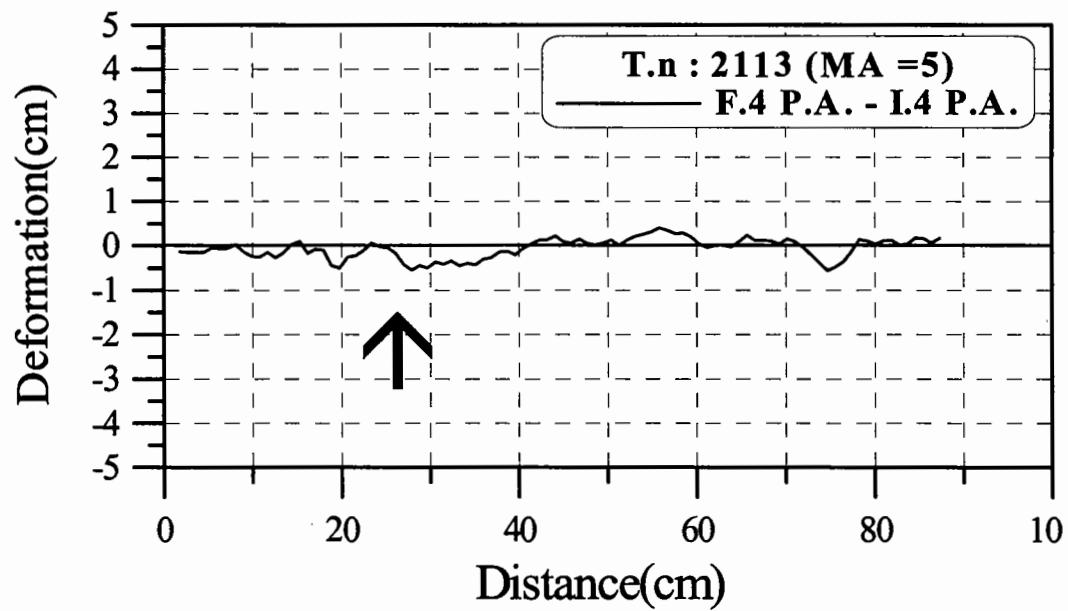
<그림 2.6.9> 2-4안의 필터층 연직방향 변형량 1회차 실험결과의 이동평균



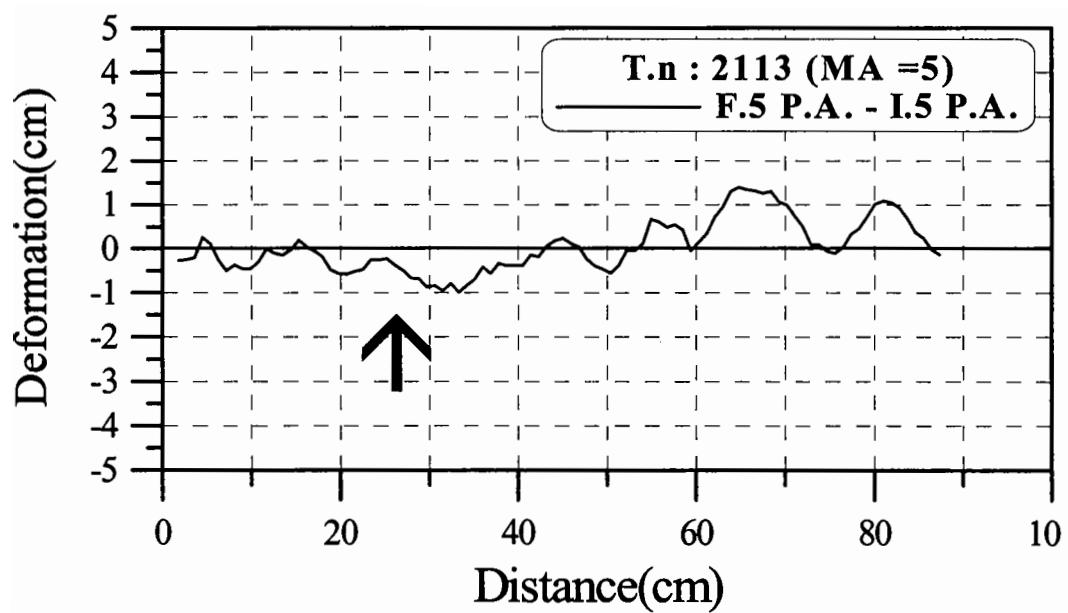
<그림 2.6.10> 2-4안의 필터층 연직방향 변형량 2회차 실험결과의 이동평균



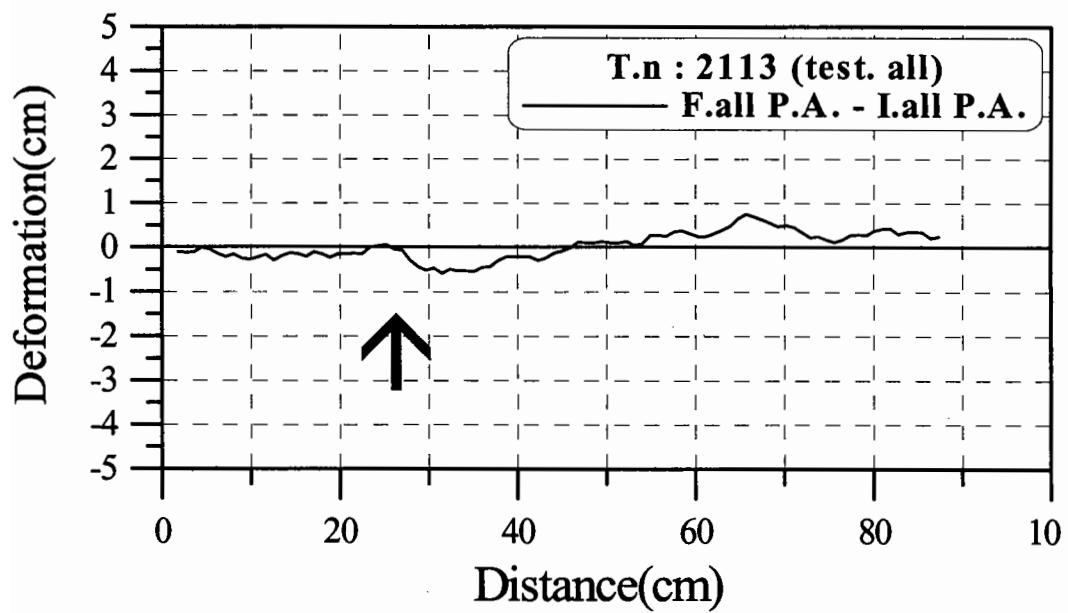
<그림 2.6.11> 2-4안의 필터층 연직방향 변형량 3회차 실험결과의 이동평균



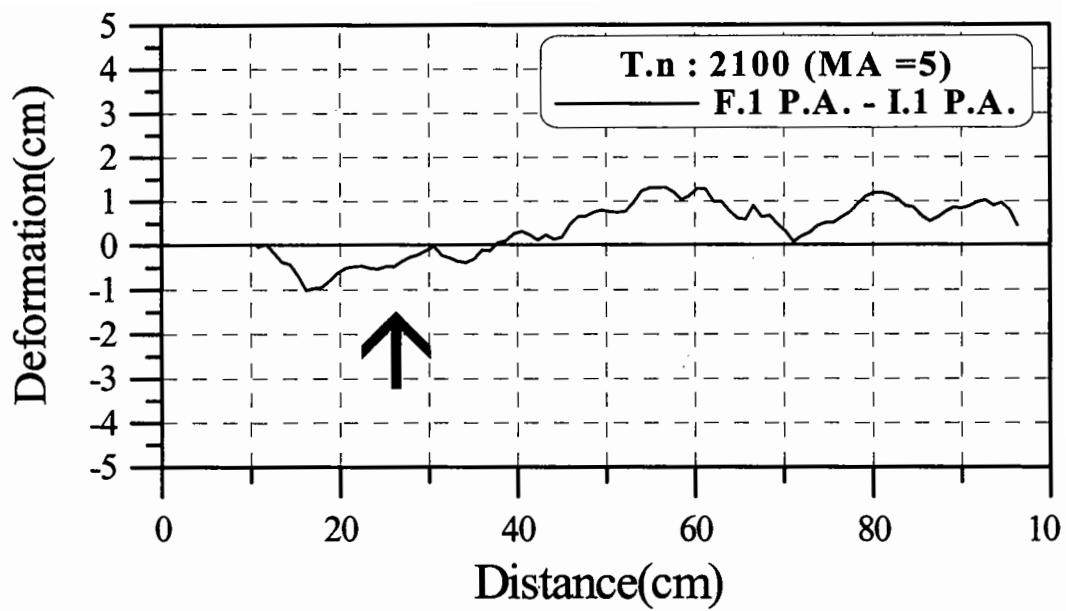
<그림 2.6.12> 2-4안의 필터층 연직방향 변형량 4회차 실험결과의 이동평균



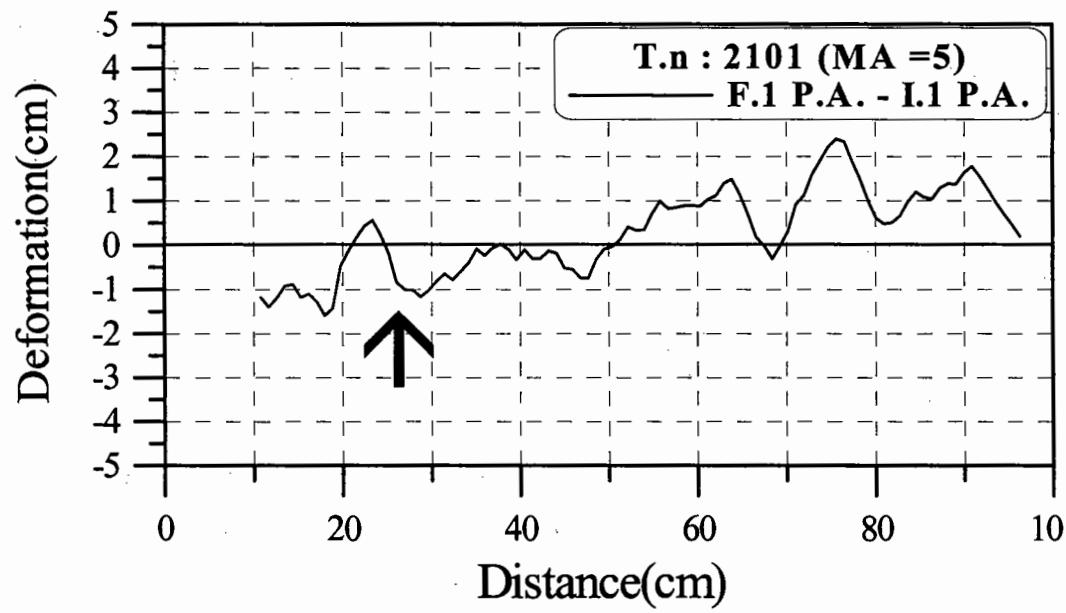
<그림 2.6.13> 2-4안의 필터층 연직방향 변형량 5회차 실험결과의 이동평균



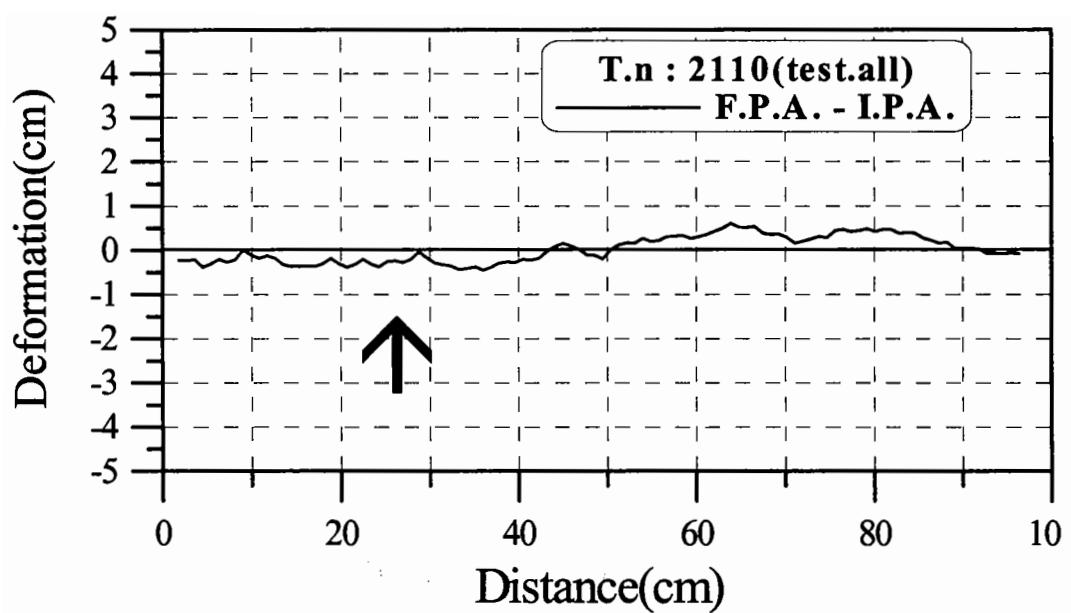
<그림 2.6.14> 2-4안의 필터층 연직방향 변형량 이동평균 5회분의 평균



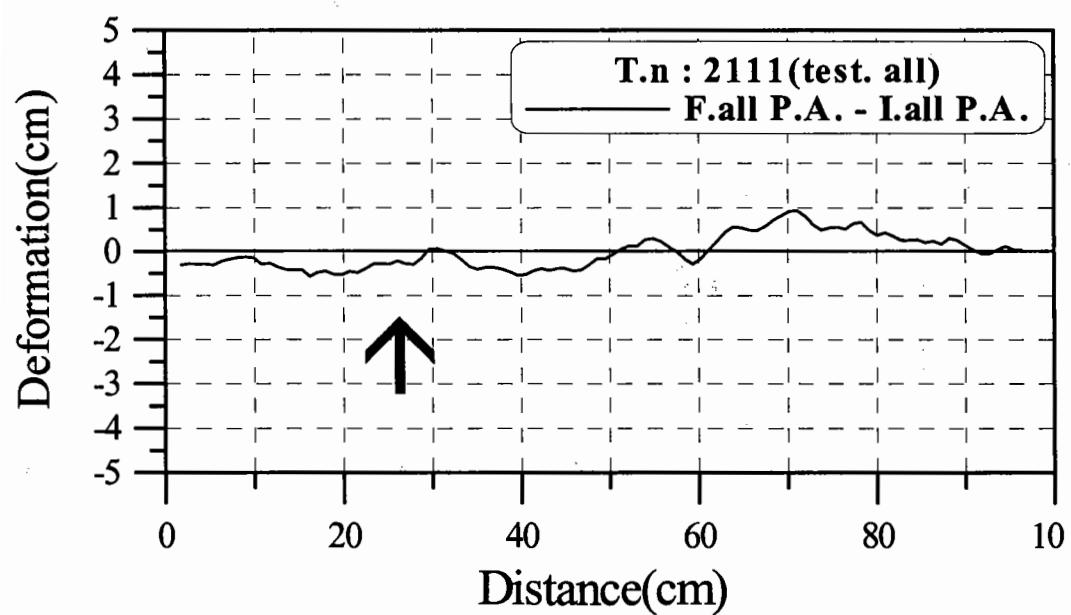
<그림 2.6.15> 1-1안의 필터층 연직방향 변형량 1회차 실험결과의 이동평균



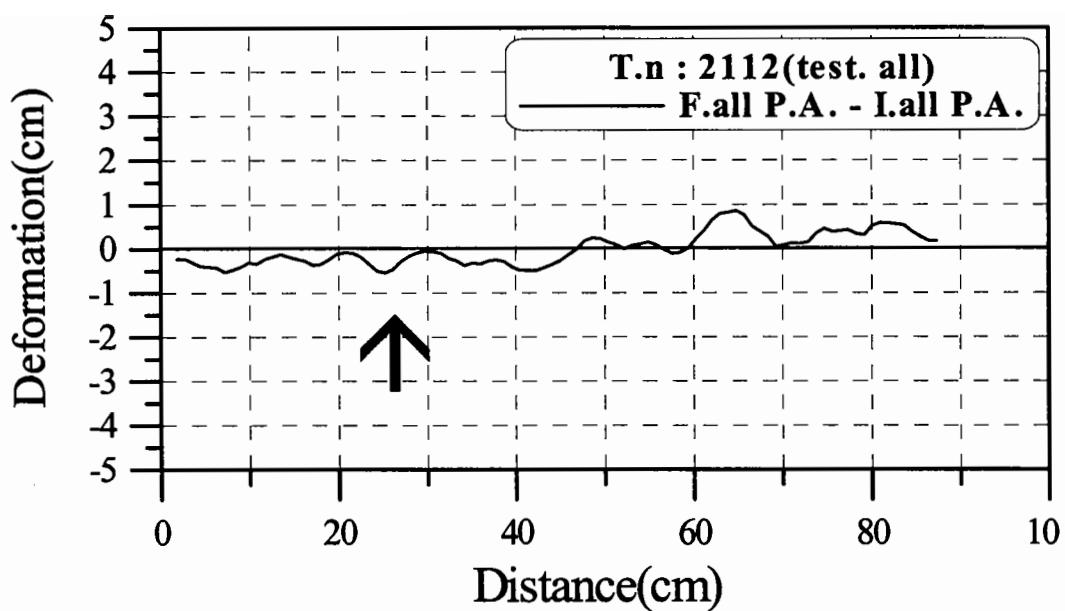
<그림 2.6.16> 1-2안의 필터층 연직방향 변형량 1회차 실험결과의 이동평균



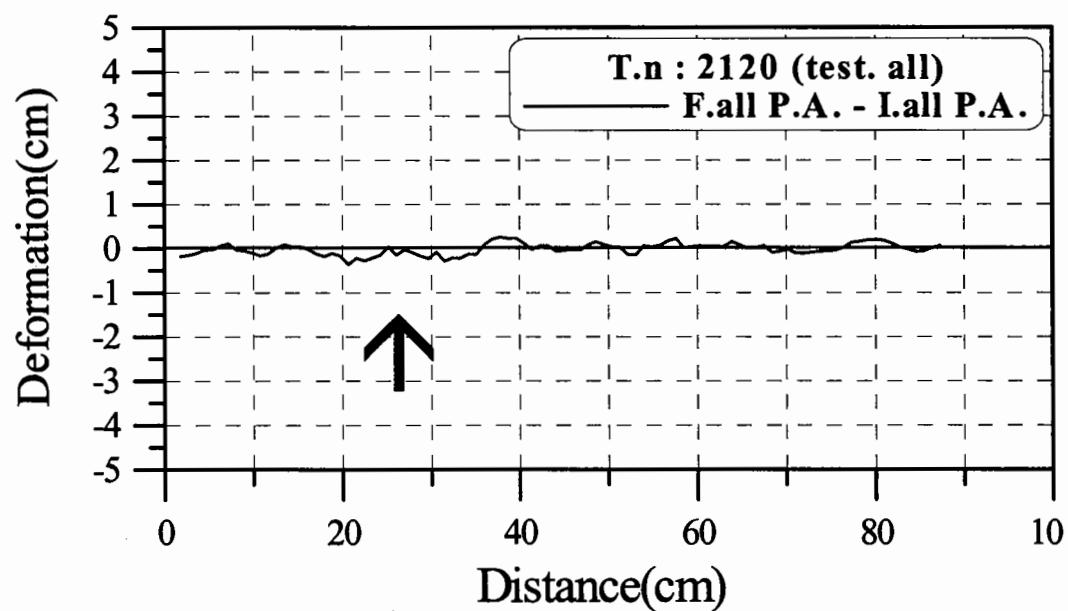
<그림 2.6.17> 2-1안의 필터층 연직방향 변형량 이동평균 4회분의 평균



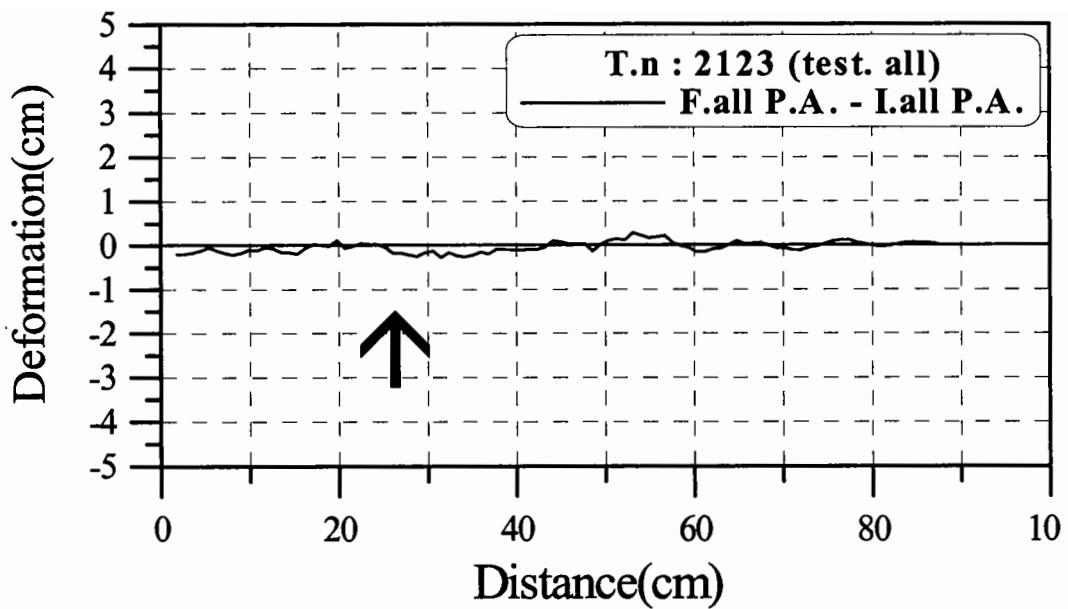
<그림 2.6.18> 2-2안의 필터층 연직방향 변형량 이동평균 4회분의 평균



<그림 2.6.19> 2-3안의 필터층 연직방향 변형량 이동평균 4회분의 평균



<그림 2.6.20> 3-1안의 필터층 연직방향 변형량 이동평균 2회분의 평균



<그림 2.6.21> 3-2안의 필터층 연직방향 변형량 이동평균 3회분의 평균

경우 약 45cm 정도로 추정되며 이는 사면상에서는 정지수면 하 약 7.5cm에 해당한다. 즉, 파의 작용에 의하여 중간피복층의 두께는 수면하 7.5cm보다 높은 구간에서는 얇아지며 이보다 깊은 구간에서는 두꺼워졌다.

부록2에는 모든 실험안에 대하여 <그림 2.6.9>~<그림 2.6.21>과 같은 결과들을 제시하였다.

<표 2.6.2>는 정지수면하 7.5cm를 기준으로 중간피복층의 상부 구간에서 축소된 단면적과 하부 구간에서 증가된 단면적을 표로 비교하였다. <표 2.6.2>에서 평균값들을 기준으로 비교할 때 다음의 사실을 발견할 수 있다.

① 피복층의 단면적은 모든 실험안 중에서 지지형 소단을 설치하고 속고르기를 사면 전체에 걸쳐 시행한 3-1안에서 작용파고가 가장 컸음에도 불구하고 가장 적게 변화한다. 반면에 소단을 설치하지 않은 1-1안과 1-2안에서는 작용파고가 가장 작았음에도 불구하고 단면적의 변화가 가장 크다. 이로부터 적절한 형상의 소단은 사면의 미끌림 또는 중간피복층의 두께 변화를 억제함에 크게 기여함을 알 수 있다.

② 지지형소단을 설치한 3안 계열에서는 속고르기를 전 사면에 걸쳐 시행한 경우에서 정

<표 2.6.2> 안별 중간피복총 단면적의 변화 (cm^2)

안변호 구분	1-1안 (정적)	1-2안 (난적)	2-1안 (수평소단, 전체 정적)				2-2안 (수평소단, 전체 난적)				2-3안 (수평소단, +0cm까지 난적)						
			1	2	3	4	평균	1	2	3	4	평균	1	2	3		
설계횟수	1	1	-28.0	-36.7	-68.7	-51.3	-49.5	-26.9	-81.9	-79.8	-73.1	-66.2	-36.7	-77.0	-61.1	-88.2	-65.8
-7.5cm상	-38.0	-79.9	-28.0	-36.7	-68.7	-51.3	-49.5	-26.9	-81.9	-79.8	-73.1	-66.2	-36.7	-77.0	-61.1	-88.2	-65.8
-7.5cm하	248.4	254.2	125.2	89.2	27.3	37.6	66.8	17.1	130.0	65.2	35.9	67.56	13.2	110.2	73.9	42.7	60.0
합 계	210.3	174.3	97.3	52.5	-41.4	-13.6	17.2	-9.8	48.1	-14.6	-37.1	1.4	-23.5	33.2	12.8	-45.5	-5.7

안변호 구분	2-4안 (수평소단, -12cm까지 난적)				3-1안 (지지형소단,전체 정적)				3-2안 (지지형소단, -12cm까지 난적)				
	1	2	3	4	5	평균	1	2	평균	1	2	3	평균
설계횟수	-59.3	-35.2	-38.5	-38.6	-75.9	-49.5	-5.8	-21.1	-13.4	-38.2	-6.1	-24.6	-23.0
-7.5cm상	61.0	48.8	102.4	12.8	93.0	63.6	13.4	-1.1	6.2	17.1	10.4	-6.4	7.1
합 계	1.8	13.6	63.9	-25.8	17.1	14.1	7.6	-22.1	-7.2	-21.1	4.3	-31.0	-15.9

* 적용파고 : 1안 계열 13.3cm, 2안 계열 14.4cm, 3안 계열 16.3cm

지수면하 12cm 이하의 구간에서 이를 생략한 경우보다 중간피복층의 단면적의 변화가 근소하게 작았다.

③ 수평소단을 설치한 2안 계열에서는 속고르기를 사면의 전구간에 걸쳐 시행한 2-1안과 정지수면하 12cm 아래 구간에서 이를 생략한 2-4안 사이에는 중간피복층의 단면적 변화에 별 차이가 없었다.

④ 수평소단을 설치한 2안 계열에서 사면 전구간에 걸쳐 속고르기를 생략한 2-2안과 정지수면 하에서만 이를 생략한 2-3안을 비교할 때 단면적의 변화에는 별 차이가 없었다.

3. 종합검토

중간피복석의 사면고르기를 일부 구간에서 생략하는 시공법이 사면의 안정성에 미치는 영향은 중간피복층과 피복층이 전혀 별개가 아니라 한 쪽의 움직임이나 변위는 다른 쪽의 움직임이나 변위를 유발하기 때문에 불안정성 면에서는 상호 원인과 결과의 관계가 있으므로 규명하기가 매우 어려운 현상이다.

중간피복층의 사면이 고르지 못하면 피복재는 설치 초기부터 맞물림 강도가 약하게 되어 파에 의해서 쉽게 피해가 발생하며 이는 이어서 중간피복층의 변형을 유발한다. 중간피복층에 고르기를 시행하면 상부의 피복재간에는 맞물림이 강화되어 피복재의 안정성은 강화될 수 있으나 중간피복석 자체간의 맞물림은 오히려 약화될 수도 있다.

따라서, 중간피복석의 사면고르기를 사면의 일부 구간에서 생략할 것인가를 판단하면서 피복층 자체 뿐 아니라 중간피복층의 거동이나 변화도 동시에 고려하여야 할 것이다. 따라서, 피복층의 폐해량과 중간피복층의 단면 변화를 동시에 비교하면 다음과 같은 검토 결과를 얻게 된다.

① 소단의 형식과 관련해서는 피복층과 중간피복층의 안정성은 유사하게 변화한다. 즉 사면의 미끌림 억제에 효과가 큰 형상의 소단을 설치하면 그렇지 않은 경우보다 피복재 및 중간피복층은 더 큰 파에서도 안정하며 폐해량도 감소된다. 즉, 사면을 효과적으로 지지할 수 있는 소단을 설치하는 것은 피복재의 안정계수를 대폭 향상시키는 것과 동일한 효과가 있다.

② 중간피복층에 사면고르기를 시행하면 피복재의 폐해량이 감소되며 중간피복층의 단면 변화도 적게 된다.

③ 중간피복층에서 사면고르기를 사면의 전체에서 생략하는 안과 정지수면하의 전 구간

에서 생략하는 안 그리고 정지수위를 기준으로 설계파고보다 더 깊은 구간에서 생략하는 3가지 안에 대해서 비교할 때, 피복층과 중간피복층의 안정성 모두는 속고르기를 적게 생략한 안에서 크게 나타난다.

④ 따라서, 중간피복층의 속고르기를 부분적으로 생략하려 한다면 적절한 소단을 설치하는 경우에 한하여 기준수위로부터 설계파고보다 깊은 구간으로 제한함이 바람직하다고 판단된다. 이때의 기준수위는 통상의 설계고조위가 아니라 설계파고, 수심 및 조위차를 동시에 고려하여 낮은 조위를 선정해야 할 것이다.

제 3 장 경사식 방파제에 작용하는 파력 측정

제 1 절 개요

연약지반 또는 개량이 완전히 이루어지지 않아 자연암밀이 상당기간 진행될 것으로 예상되는 지반에 경사제가 설치될 때 제체에 작용하는 파력을 신뢰성 있게 추정함은 제체의 초기 붕괴를 방지하기 위하여 매우 중요한 문제로 떠오르고 있다. 이 장에서는 경사제에 작용하는 파력의 특성에 관한 실험연구 결과를 기술한다.

구조물에 작용하는 파력을 실험으로 추정하는 방법에는 크게 파압을 계측하여 이를 적분하는 방법과 파력의 분력을 하중측정기로 직접 계측하는 방법의 두 가지가 있다. 이 중 파압을 계측하는 방법은 파압의 공간분포를 파악할 수 있다는 장점은 있으나 상대적으로 정밀도가 떨어지며 특히 투과성 제체에서의 파력의 추정은 매우 곤란하다. 한편, 하중계를 사용하는 방법은 제체의 투과성 여부에 관계없이 파력의 분력을 직접 측정할 수 있으나 파압계를 사용하는 방법에 비하여 파력 측정의 정밀도는 높지만 특수한 경우를 제외하고는 파력의 공간분포와 작용점을 구할 수 없다는 단점이 있다.

본 연구에서는 경사제의 사면에 작용하는 파압계측과 아울러 제체에 작용하는 총파력의 수평분력과 연직분력을 직접 계측하기 위하여 하중계를 사용하였다. 그리고 제체 내부의 파동장 결정 수치모델의 보정에 이용하기 위하여 제체 내의 간극수압도 관측하였다.

보유한 하중계는 수평력 및 연직력은 100kgf, 모멘트는 40kgf-m까지 계측할 수 있으며 공기중에 설치하여야 한다. 파력을 측정하기 위해서는 고정된 하중측정기에 모형 전체를 매달아야 한다. 이 경우 경사제에서는 케이슨의 경우와는 달리 제체 내부에 사석을 설치하여야 하므로 모형의 중량이 매우 크게 된다. 모형 전체의 수중 중량과 파 작용중의 연직하방력의 합은 하중측정기 연직력의 허용능력 범위내에 들어야 하므로 어려운 문제가 발생한다. 이때 모형의 중량을 가볍게 하기 위하여 모형의 폭을 작게 하면 계측값의 크기가 측정기의 허용하중에 비해 매우 작아 신뢰도가 크게 저하되어 정밀 연구가 불가능하다. 따라서, 하중측정기를 사용하려면 모형의 폭은 증가시키되 중량은 가볍게 하여야 하는 상반된 요구를 해결해야 한다. 본 연구에서는 이러한 상반된 필요성에 따라 시행착오 끝에 특수한 실험모형을 및 대용 속채움 재료를 제작하여 실험을 수행하였다.

현재까지 경사식 방파제에 작용하는 파력을 하중측정기로 직접 측정하였다는 문헌은 발견하지 못했다.

제 2 절 실험장치 및 실험조건

1. 실험장치

가. 수조의 구성

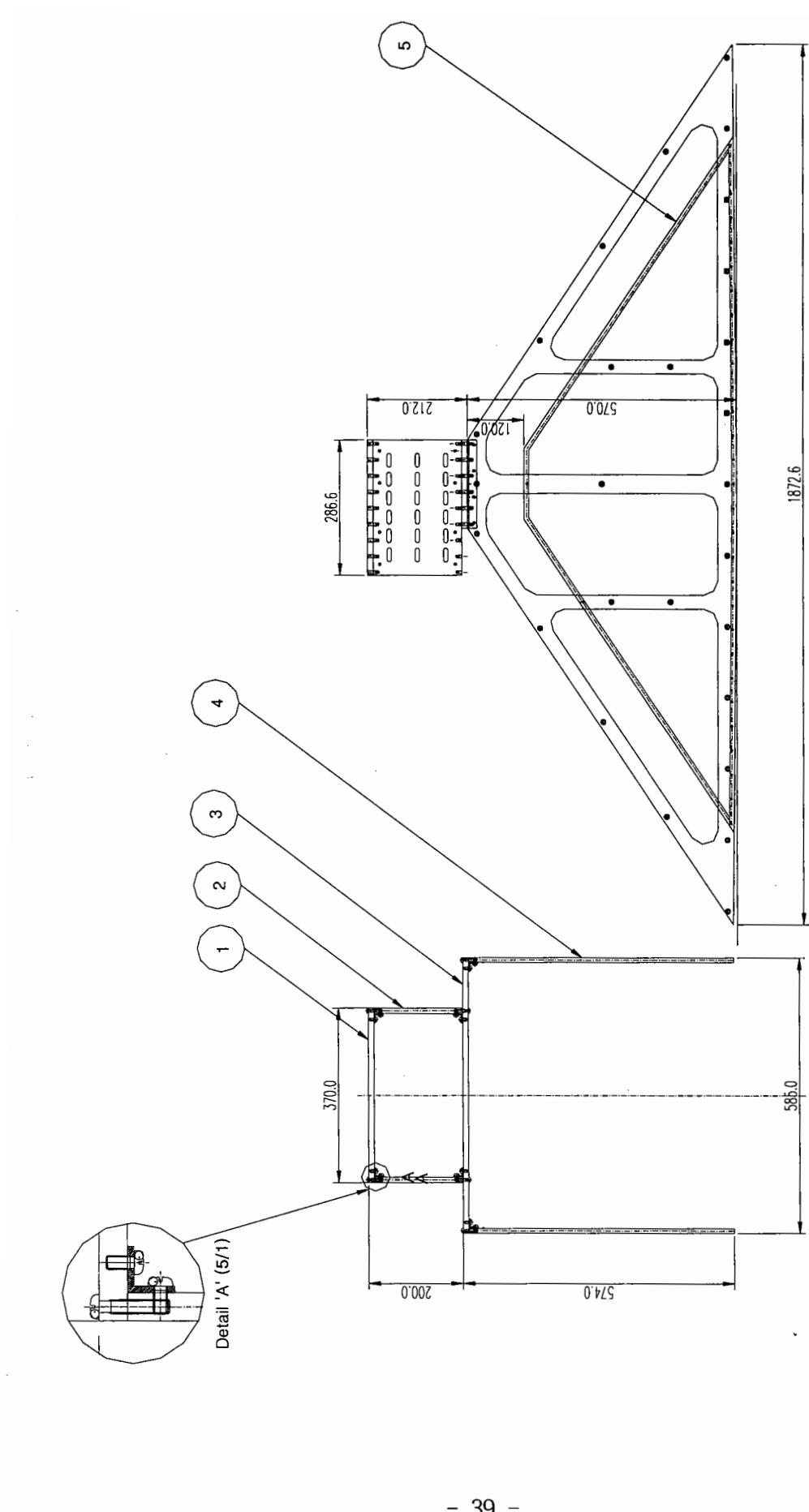
수조는 제2장에서와 동일하게 구성하였다.

나. 경사제 모형틀의 제작

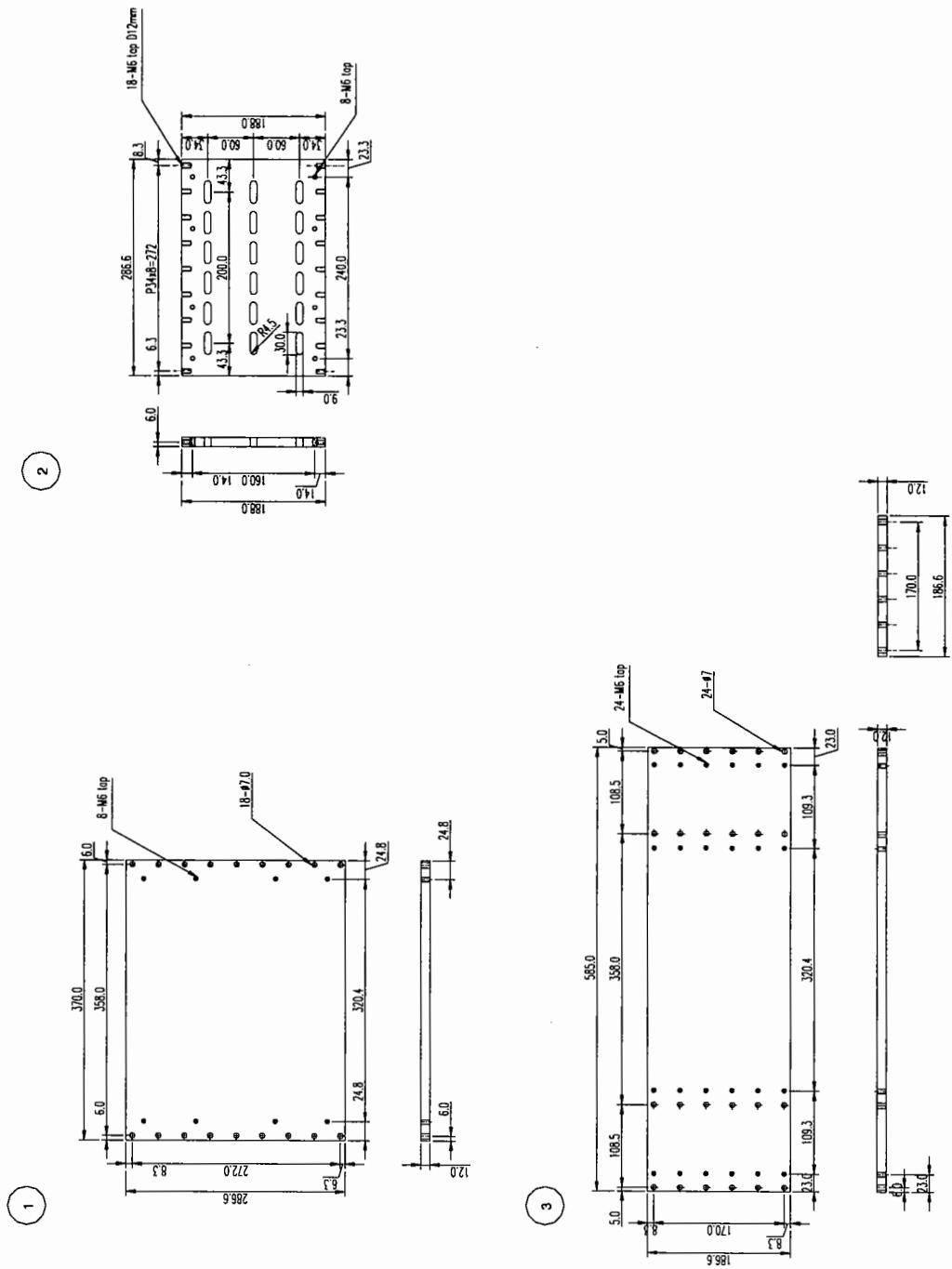
모형틀은 중량을 가볍게 하기 위하여 알미늄 재질과 얇은 아크릴 판을 이용하여 제작하였다. <그림 3.2.1>에는 경사제 모형틀의 단면도와 측면도를 그리고 <그림 3.2.2>~<그림 3.2.4>에는 상세도들을 제시하였다. 모형틀의 양측면은 두께 10mm의 알미늄 재질로 열개를 구성한 후 나머지 열린 부분에는 두께 4mm의 투명 아크릴판을 설치함으로써 중량을 감소시킴과 아울러 수조 측면벽을 통하여 모형을 관찰할 수 있도록 하였다. 모형의 저면과 사면 그리고 마루는 스텐레스망으로 구성하였다. 모형의 측면에서 수조 상·하류 측 양끝은 모형의 중앙에서보다 0.8cm 높도록 하였으며 모형의 전사면에는 파고계와 파압계를 사면과 나란하게 설치할 수 있도록 제작하였다.

나. 속채움 대용 재료의 제작

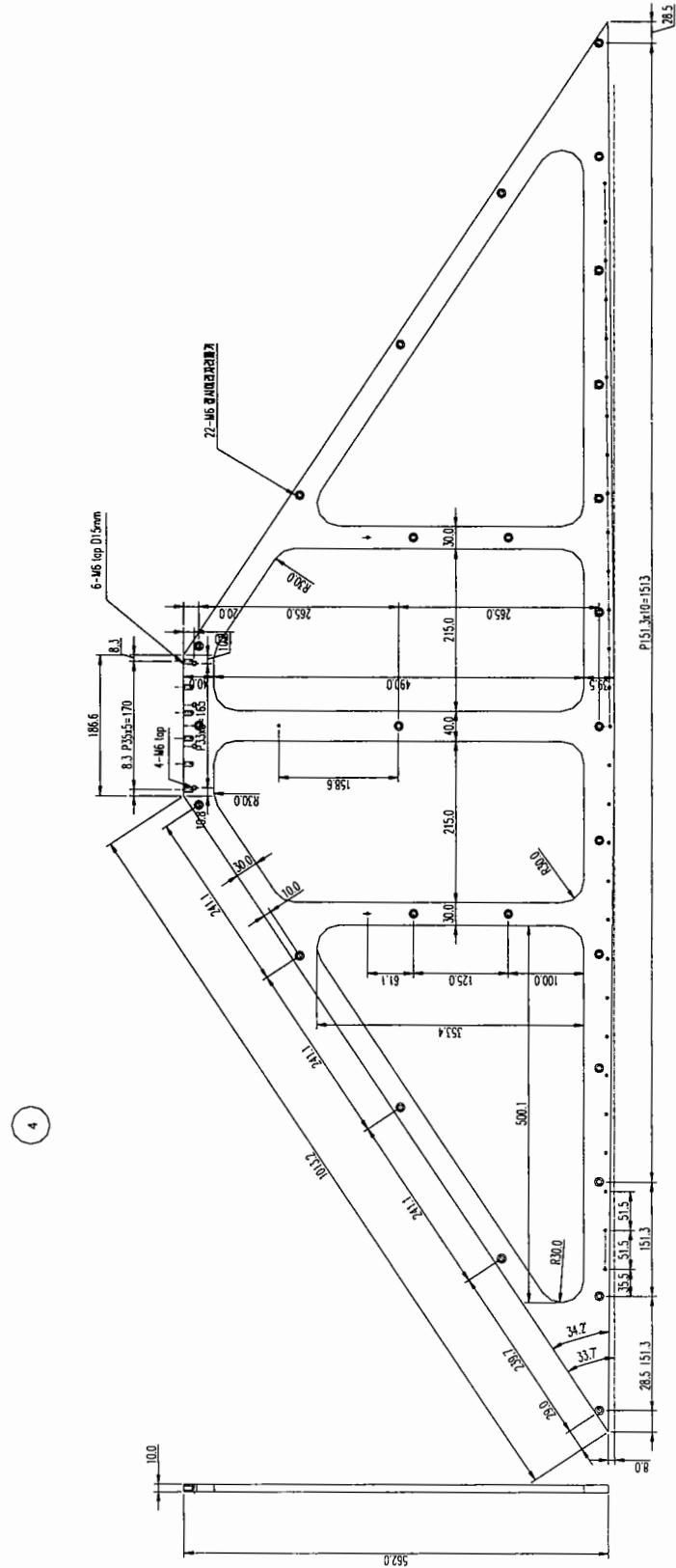
모형의 틀 뿐 아니라 이 모형틀 내에 사석 대신에 설치할 재료의 수중 중량을 대폭 가볍게 하여야만 모형 전체의 중량을 대폭 감소시킬 수 있다. 이를 위하여 모형 재료로는 피복석을 제외한 사석을 속이 빈 플라스틱 공기들을 이용하였다. 이 공기들은 형상을 사석과 유사한 찌그러진 공의 형태를 가지게 하기 위하여 플라스틱 공기들의 양 측면의 평坦한 면에는 합성소재를 반원형을 부착하여 1개의 부피는 2.77 cm^3 , 공극율은 0.43으로 사석보다 근소하게 컼으며 비중은 0.55정도였다. 이렇게 제작한 사석 대용재료는 비중이 물보다 작으므로 수중에서 부력을 받으면 모형의 수중 중량이 하중측정기의 허용하중 범위 내에 안전하게 들도록 되었다.



<그림 3.2.1>경사재 모형틀의 단면도 및 측면도

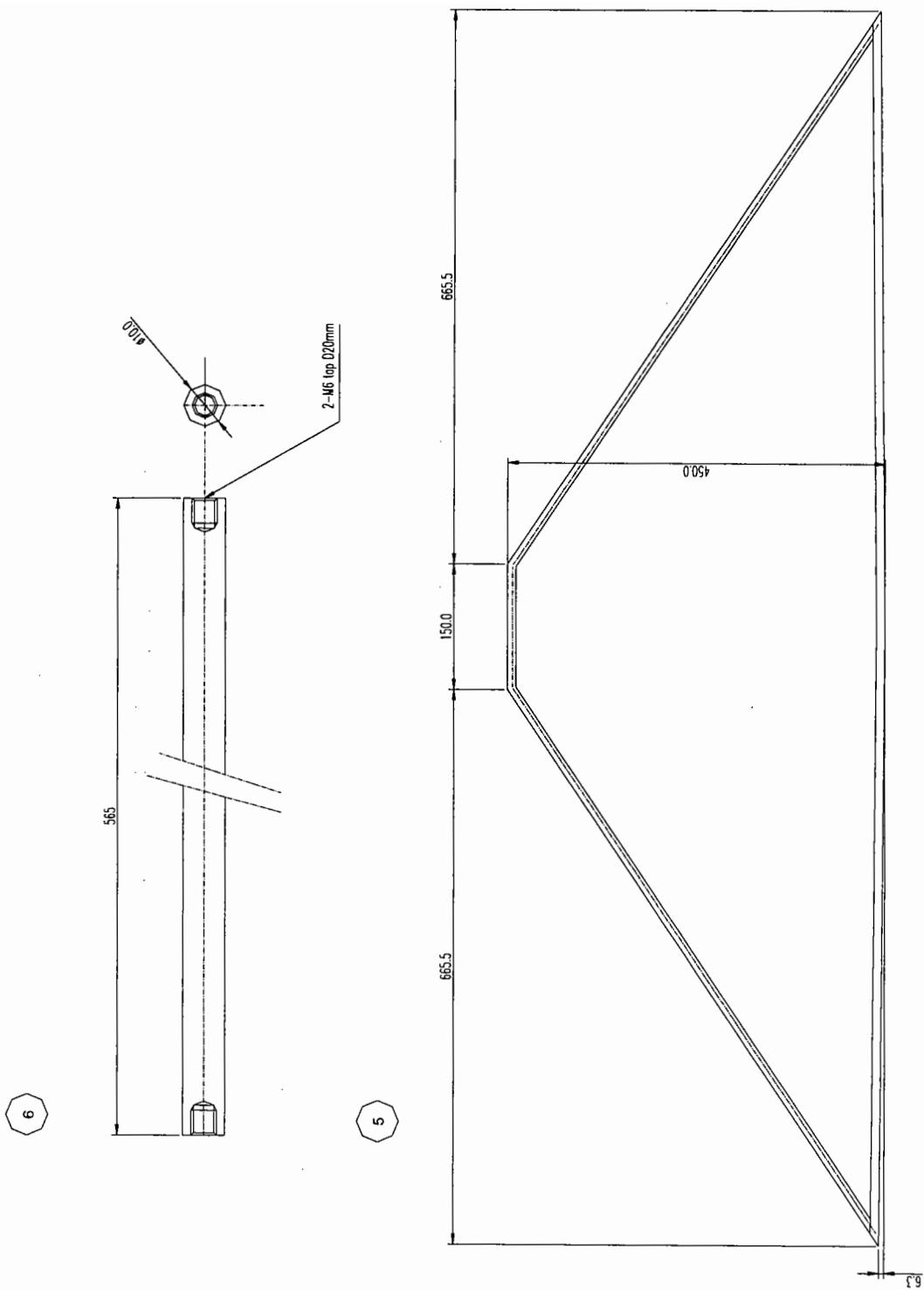


<그림 3.2.2> 경사재 모형틀의 상세도1



<그림 3.2.3> 경사제 모형틀의 상세도2

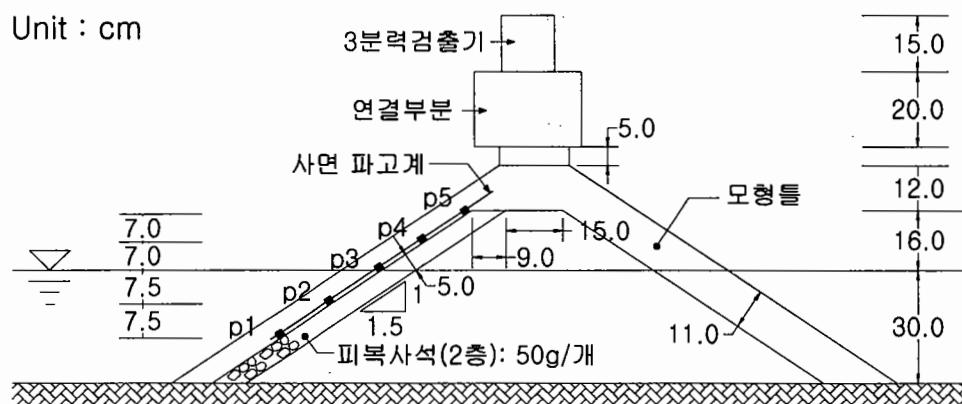
<그림 3_2_4> 경사체 모형틀의 상세도3



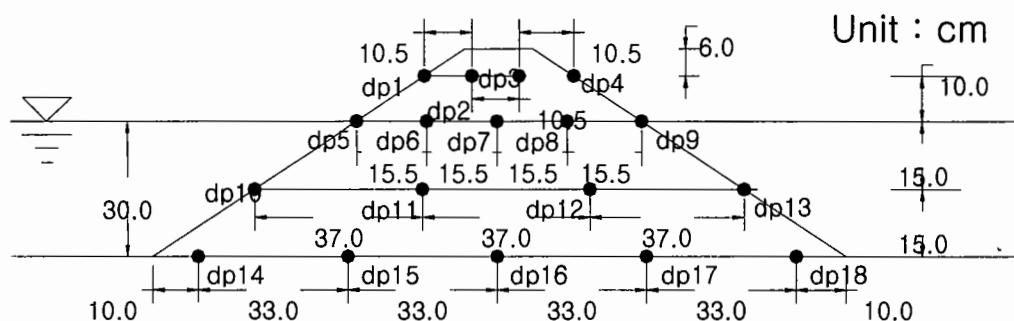
2. 모형 및 계측기기의 설치

<그림 3.2.5>는 하중계에 부착된 경사제 모형틀 내에 모형이 설치된 상태를 나타낸다. 피복석은 모형틀 전사면의 스텐레스망 밖에 설치하였고 그 위에 스텐망을 한 층 고정시킴으로서 실험 중 피복석의 미끌림이나 이탈이 없도록 하였다. 하중측정기(3분력 검출기)에서 모멘트 계측점은 수평으로는 피복석을 포함하여 폭이 24cm인 모형의 마루면 중앙으로부터 후사면 쪽으로 2.8cm 떨어졌으며 연직으로는 모형의 마루면으로부터 위로 43.4cm 떨어졌다. 직경이 0.5~0.8cm인 스트레인 게이지형 파압계(P)들 역시 사면으로부터 0.5~1.0cm이내에 설치하였다.

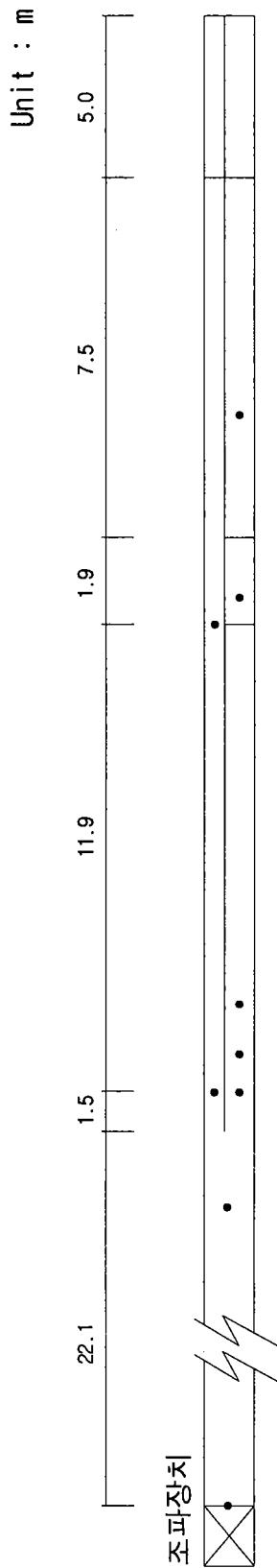
<그림 3.2.6>은 기초사석 내에 설치된 간극수압계의 위치를 그리고 <그림 3.2.7>은 수조 내에 모형 및 파고계가 설치된 위치를 나타낸다.



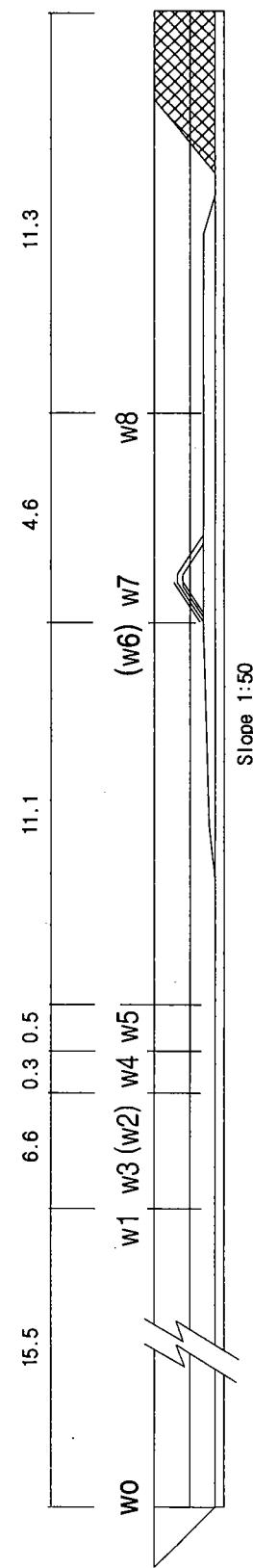
<그림 3.2.5> 재현목표 실험 단면안



<그림 3.2.6> 기초사석 내의 간극수압계 배치도



(a) 평면도



(b) 측면도

<그림 3.2.7> 모형 및 파고계의 설치도

<그림 3.2.7>에서 (W)는 파고계가 협수로에 설치되었음을 의미한다. 각 파고계는 다음의 용도로 사용되었다

W1 및 (W2) : 파고의 검증에 사용

W3~W5 : 저면이 수평인 구간에서 입사파와 반사파의 분리

(W6) : 방파제 Toe의 측면에서 통파파의 계측

W7 : 사면에서 0.5~1.0cm의 거리로 사면과 나란하게 설치하여 사면상의 수위를 계측.

W8 : 전달파고의 계측

<그림 3.2.8>에는 경사제 모형틀의 실물 사진을 나타냈으며, <그림 3.2.9>에는 완성된 모형방파제를 하중계에 고정시켜 파력을 측정하는 실험장면을 나타냈다. 모형틀은 그 바닥이 수조의 바닥으로부터 1.0cm 정도 떨어지게 설치하였다.

3. 실험조건 및 실험방법

실험파는 규칙파로서 방파제 Toe 측면의 협수로에서 평가하였다. 협수로의 하류에 있는 소파장치를 보강하여 본 실험의 경우 반사율을 0.03 이내로 유지한 후 협수로에서 계측한 파고를 입사파고로 간주하였다.

내재된 현상이 매우 복잡하여 선형이론의 수치모델 연구를 병행함을 고려하여 입사파는 방파제 전면에서 쇄파되지 않는 크기의 규칙파를 대상으로 하였다. 실험파는 총 6개로서 파고는 주기 1.5초에서 10.6cm, 12.7cm, 15.0cm 그리고 주기 2.0초에서 10.8cm, 12.8cm, 14.4cm로 변화시켰다. 이 중 간극수압의 계측에는 주기 2.0초, 파고 14.4초인 파만을 시험적으로 적용하였다.

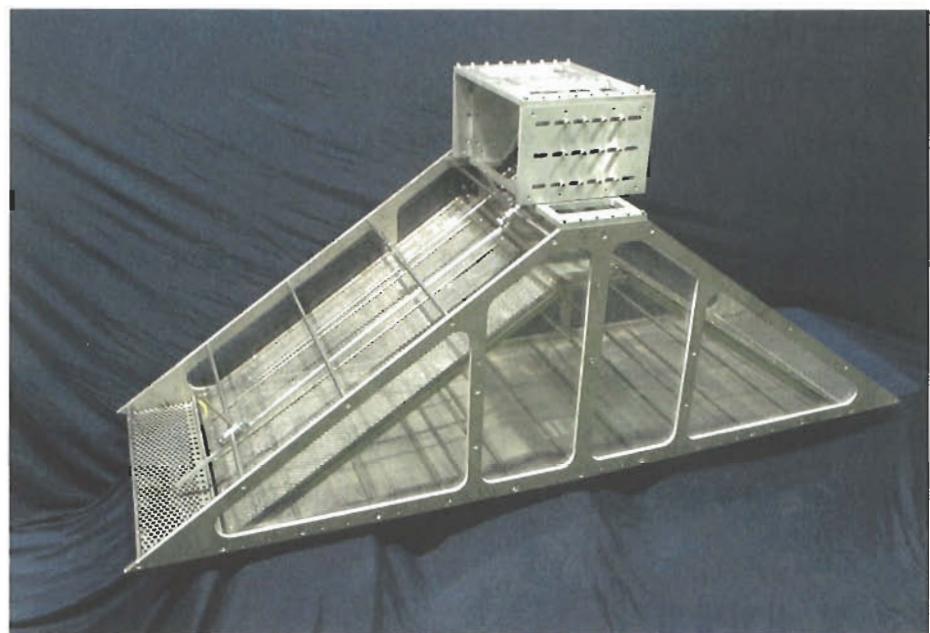
방파제 전면의 바닥 경사는 1/50이며, 수심은 방파제의 Toe에서 30cm 그리고 상류측 저면이 수평인 구간에서는 51cm이었다.

입사파고, 사면의 수위, 사면파압, 간극수압, 파력의 수평 및 연직분력을 동시에 계측하였으며 모든 자료들은 초당 40개씩 기록하였다.

간극수압은 <그림 3.2.6>에 보인 4열 중 1회차 실험에서 하층의 2열에서 측정한 후 2회차 실험에서 상층의 2열에서 계측하였다.

입·반사파의 분리는 최소자승법에 기초된 3점법에 의하여 수행하였다(Masard and Funke, 1980; 박 등, 1990).

전달파고비는 전달파고를 협수로에서의 통파파고로 나누어 구하였다.



<그림 3.2.8> 경사제 모형틀의 형상



<그림 3.2.9> 파력측정 실험장면

제 3 절 실험결과 및 분석

1. 대용 속채움 재료의 점검

제작한 모형틀의 속채움 재료는 공극율이 0.43으로 사석의 경우보다 크며 개별 재료의 부피는 사석의 경우보다 매우 균일하다. 따라서, 이의 사용 가능성을 1차적으로 확인하기 위하여 체가름한 사석을 속채움한 후 반사율과 전달파고비를 구하여 각각 <표 3.3.1>과 <3.3.2>에 비교하였다.

<표 3.3.1> 사용 재료에 따른 반사율의 비교

T(s)	H(cm)	공기돌(2.77 cm^3 /개)		사석(cm^3 /개)		
		모형틀 착지	모형틀 이격	0.65	2.23	4.04
1.5	10.6	0.201	0.187	0.202	0.157	0.191
	12.7	0.198	0.188	0.195	0.188	0.202
	15.0	0.180	0.201	0.204	0.199	0.195
2.0	10.8	0.279	0.330	0.285	0.303	0.317
	12.8	0.327	0.334	0.314	0.330	0.335
	14.4	0.325	0.339	0.327	0.331	0.329

<표 3.3.2> 사용 재료에 따른 전달파고비의 비교

T(s)	H(cm)	공기돌(2.77 cm^3)		사석(cm^3)		
		모형틀 착지	모형틀 이격	0.65	2.23	4.04
1.5	10.6	0.023	0.020	0.019	0.024	0.026
	12.7	0.029	0.025	0.034	0.036	0.024
	15.0	0.033	0.028	0.045	0.045	0.033
2.0	10.8	0.082	0.070	0.100	0.079	0.109
	12.8	0.109	0.093	0.102	0.101	0.094
	14.4	0.120	0.112	0.096	0.100	0.098

여기서, 사석의 부피는 사석 500개의 총중량을 500으로 나눈 후 다시 사석의 단위중량 2.6으로 나눈 값이다. 속채움 재료로 공기돌을 사용한 경우에는 모형틀을 바닥에 내려놓은 경우와 하중계에 고정시켜 바닥으로부터 1.0cm 이격시킨 두 가지를 비교하였다.

규칙파의 짧은 시계열 자료를 이용하였기에 결과값들 간에는 편차가 심하였다. 그러나 대용 속채움재료를 이용하여 모형틀을 바닥에서 1.0cm 이격시킨 경우의 결과를 재료의 크기가 비슷한 사석 $2.23 \text{ cm}^3/\text{개}$ 를 사용한 결과와 비교할 때 반사율과 전달율의 측면에서는 대용 속채움 재료를 사용하여도 특별한 문제가 없는 것으로 판단된다.

2. 파력 측정결과 및 분석

<그림 3.3.1>~<그림 3.3.6>에는 간극수압을 제외한 각종 측정 시계열자료를 파고 및 주기별로 도시하였다. 그림의 윗 부분에서, F_x 와 F_z 는 각각 하중계로 측정한 제체에 작용하는 총파력의 수평 및 연직분력이며 W_6 는 방파제 Toe 측면의 협수로에서 계측한 입사파이다. 그림의 아래 부분에서, P_i 는 제체의 사면에서 측정한 파압으로서 각각의 번호는 <그림 3.2.5>에 표시한 위치를 나타낸다. 그리고 W_6 는 제체의 사면에 나란하게 설치된 파고계로부터 계측한 수위를 나타낸다.

수평파력 및 연직파력의 방향은 각각 파가 진행하는 방향 및 연직 상방향을 +의 방향으로 하였다.

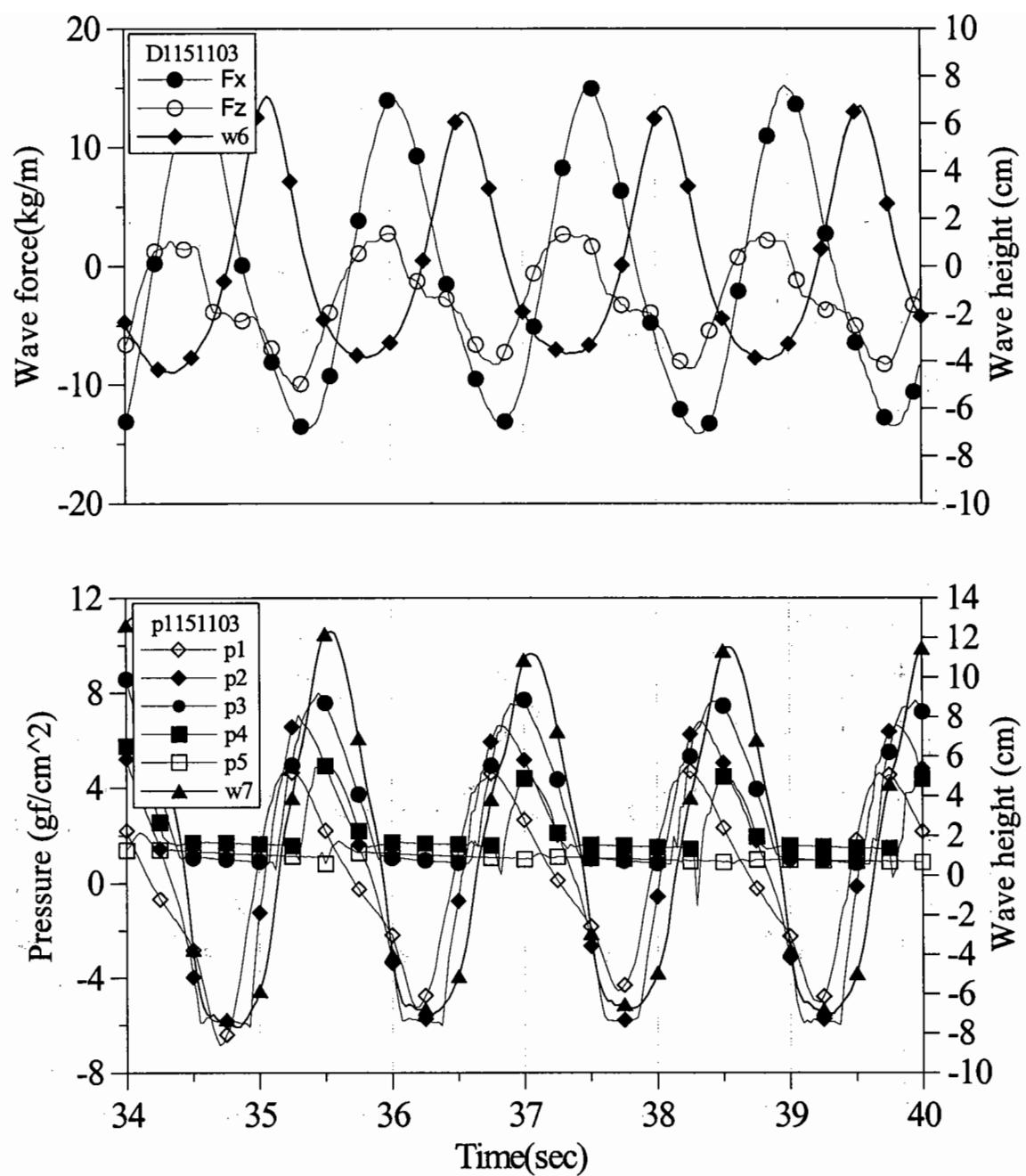
선행 예비실험에서 경사제 모형의 중량을 감소하기 위하여 제체의 폭을 17cm로 좁게 재현하였던 결과(한국해양연구소, 2000)의 예를 나타내는 <그림 3.3.7>과 본 실험결과를 비교할 때 파력측정 자료의 질이 대폭 개선되었음을 알 수 있다.

입사파형(W_6)은 파고가 증가할수록 파봉이 매우 뾰족한 반면에 파곡은 매우 둉뚝해져서 비선형성이 매우 강해짐을 알 수 있다.

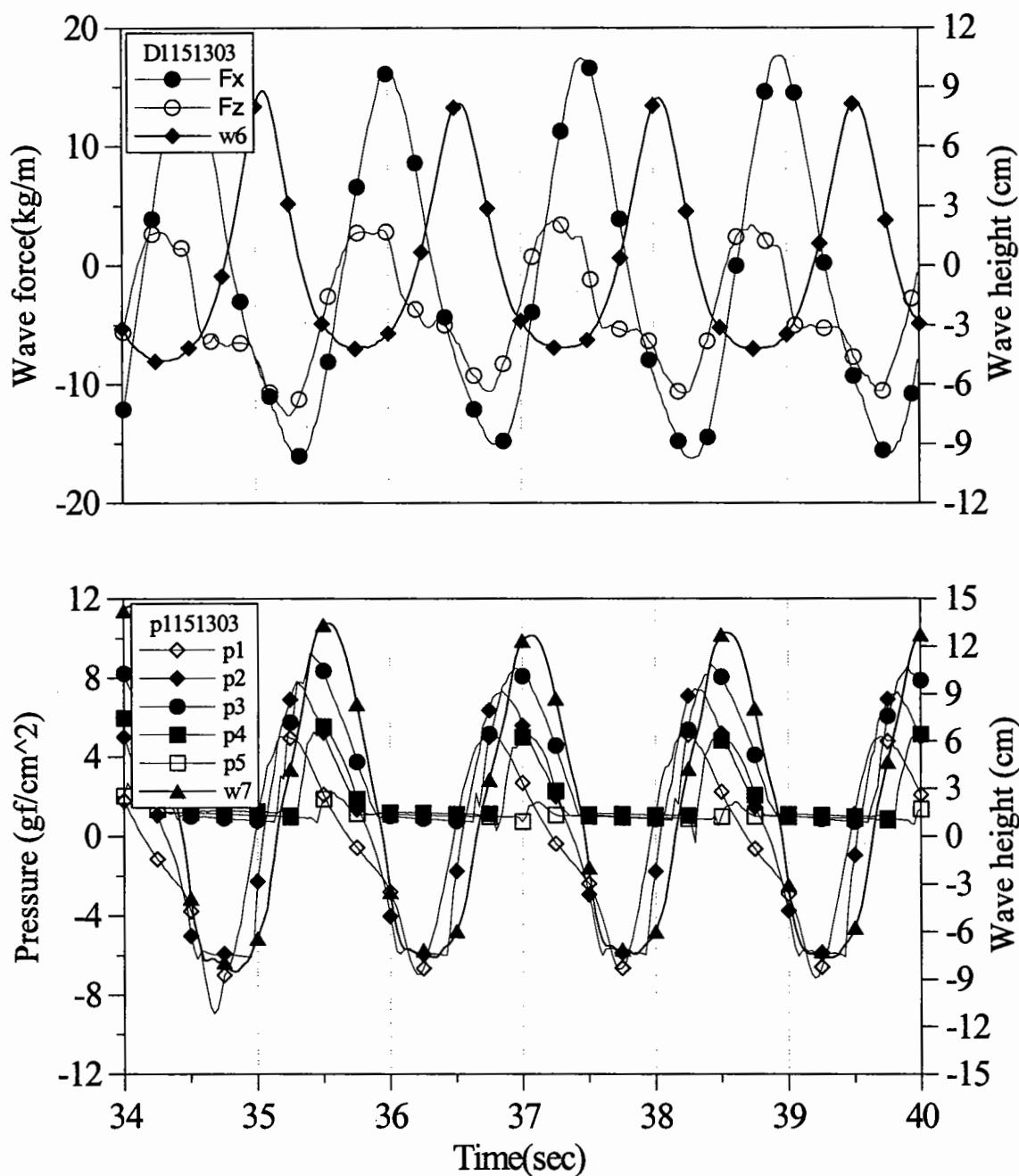
사면에서의 파압은 정지수위에 위치한 관측점 P3에서 항상 최대가 되어 전사면에서 특이한 쇄파가 발생하지 않고 있음을 알 수 있다.

사면에서 파압이 최대가 되는 시점은 사면에서 수위가 최고가 되는 시점보다 항상 약간 앞서고 있으나 위상차는 매우 작다.

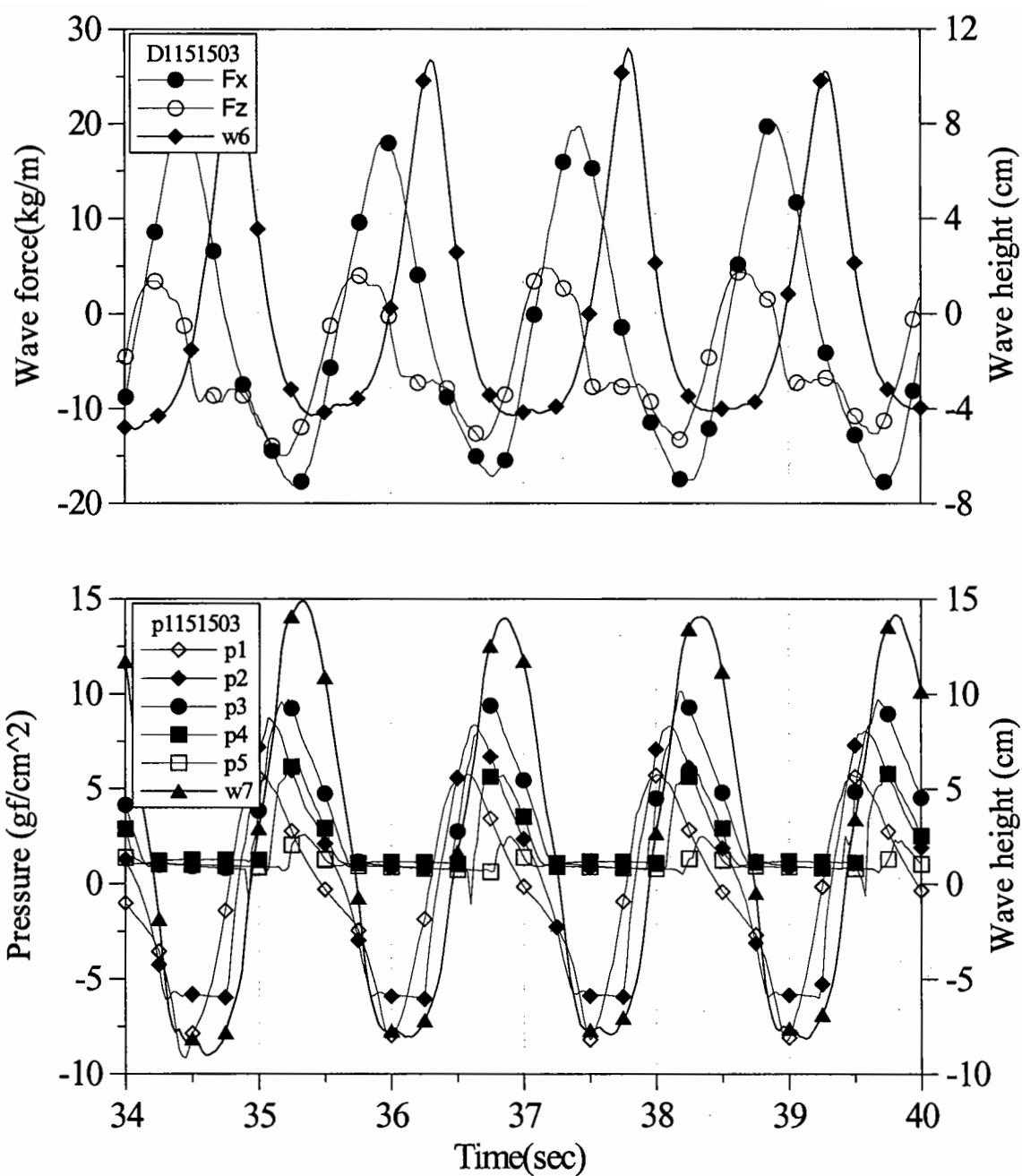
정지수위로부터 14cm 높이 설치된 파압계 P5에서는 파고가 큰 경우에나 의미 있는 값을 보이고 있어 본 실험은 비월파 조건에서의 실험이라고 할 수 있다.



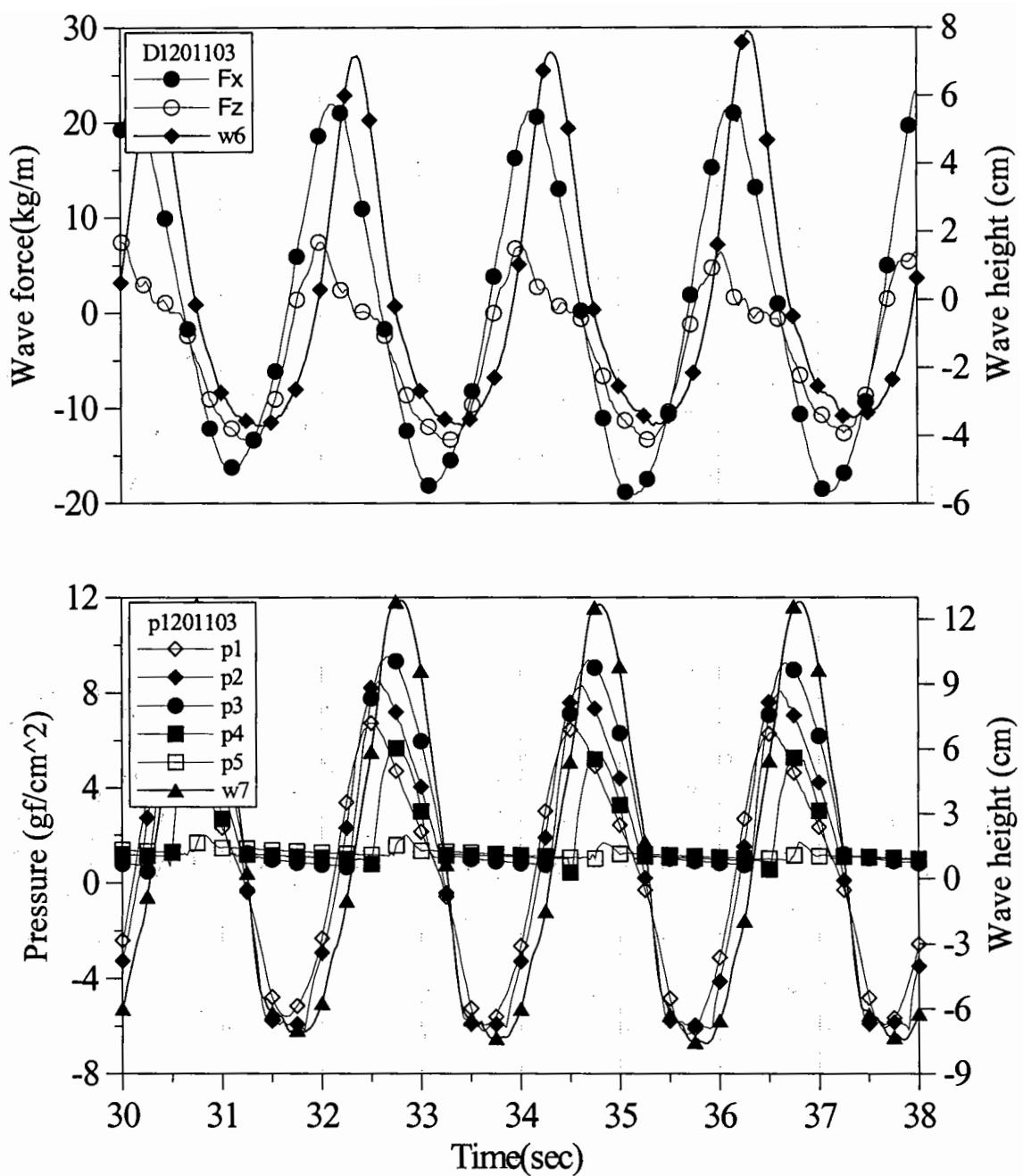
<그림 3.3.1> 계측값들의 시계열($H= 10.6\text{cm}$, $T= 1.5\text{s}$).



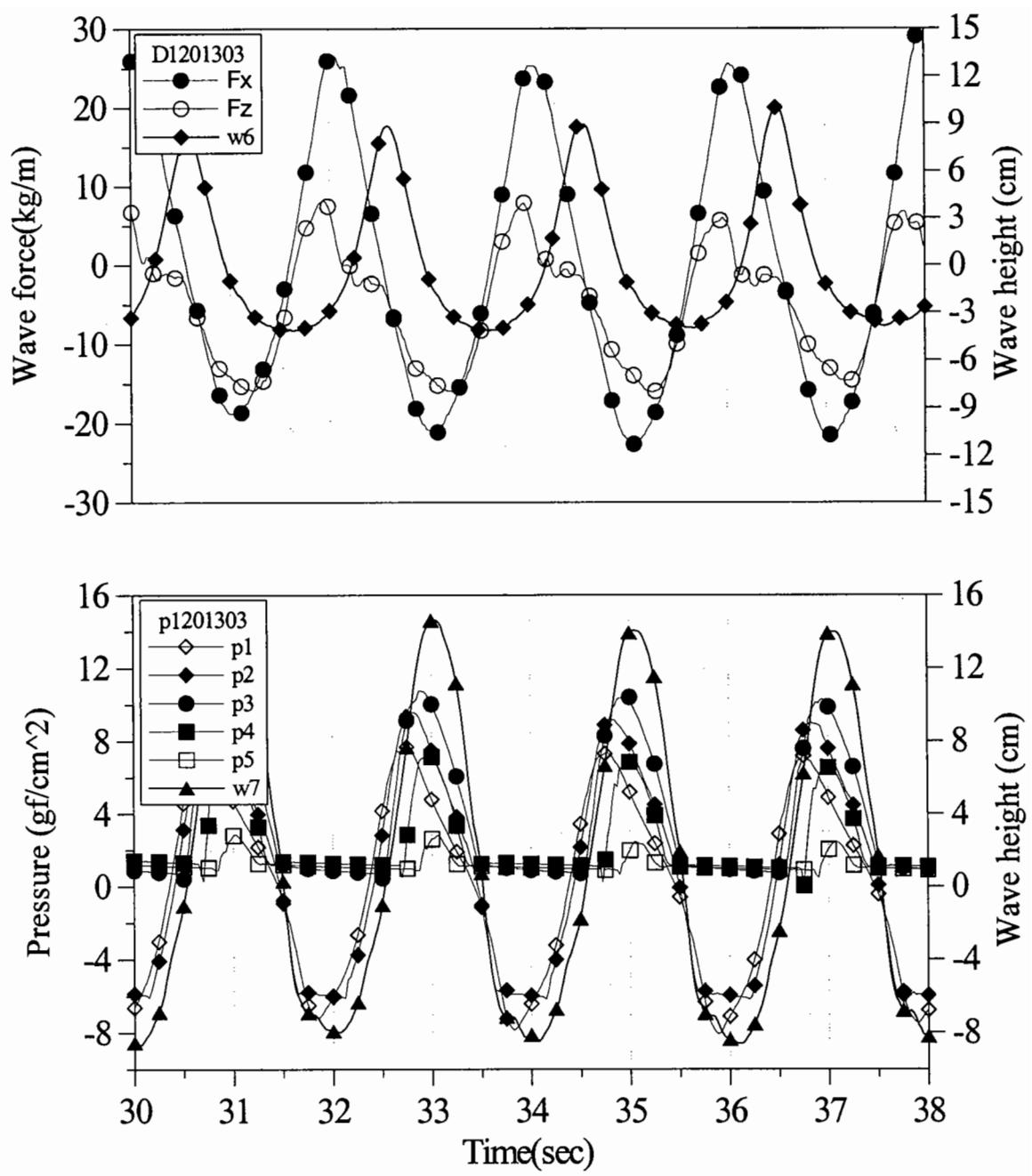
<그림 3.3.2> 계측값들의 시계열($H= 12.7\text{cm}$, $T= 1.5\text{s}$).



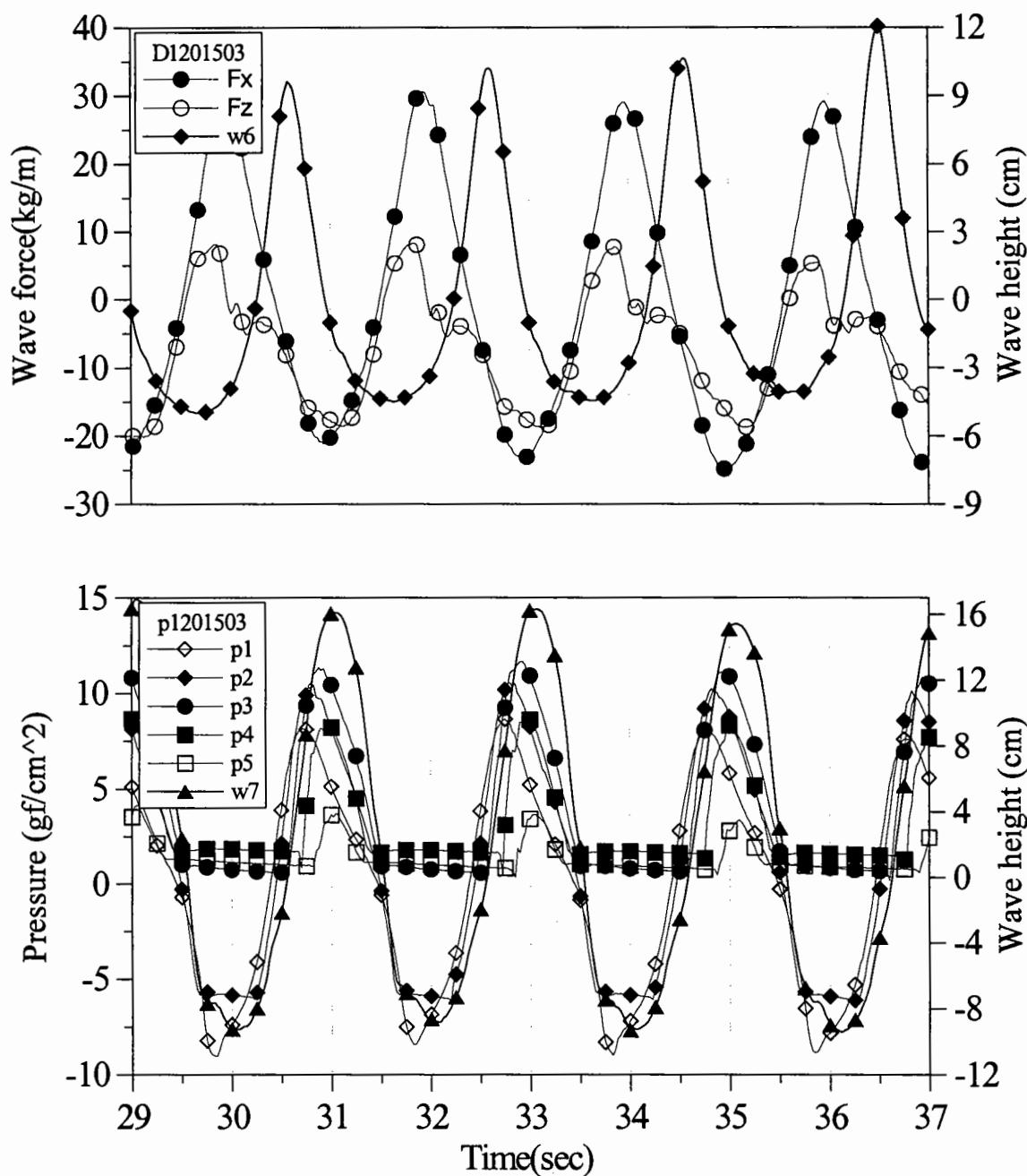
<그림 3.3.3> 계측값들의 시계열($H= 15.0\text{cm}$, $T= 1.5\text{s}$).



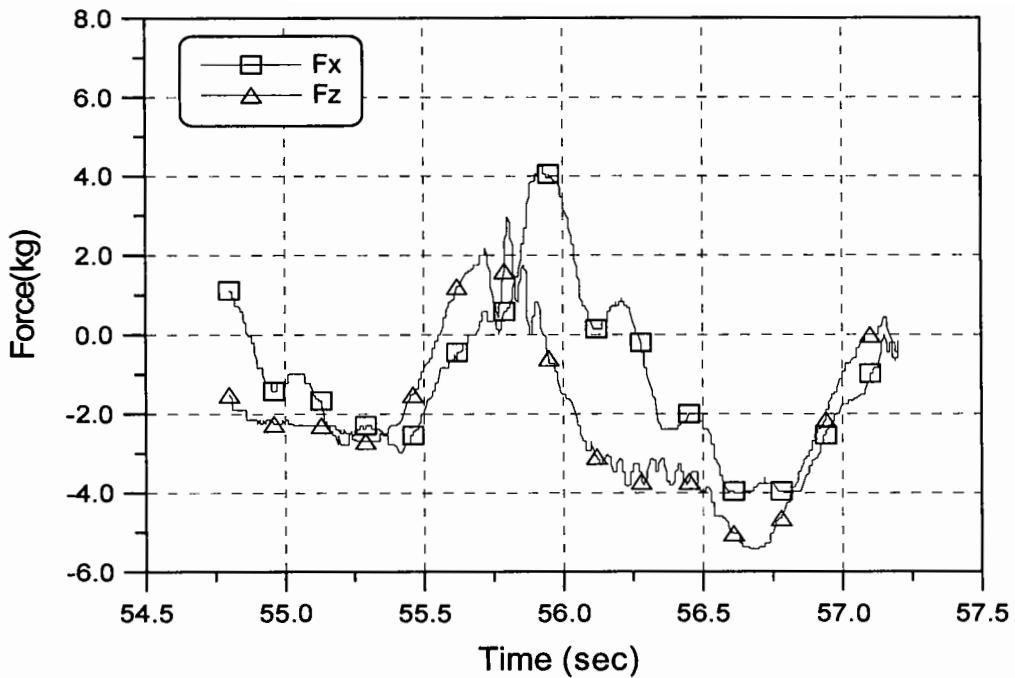
<그림 3.3.4> 계측값들의 시계열($H= 10.8\text{cm}$, $T= 2.0\text{s}$).



<그림 3.3.5> 계측값들의 시계열($H= 12.8\text{cm}$, $T= 2.0\text{s}$).



<그림 3.3.6> 계측값들의 시계열($H= 14.4\text{cm}$, $T= 2.0\text{s}$).



<그림 3.3.7> 예비실험에서 계측한 파력 시계열의 예($H_S=13\text{cm}$, $T_S=1.58\text{s}$).

■ 파고 및 주기에 따른 사면수위와 하중계로 측정한 파력의 진폭

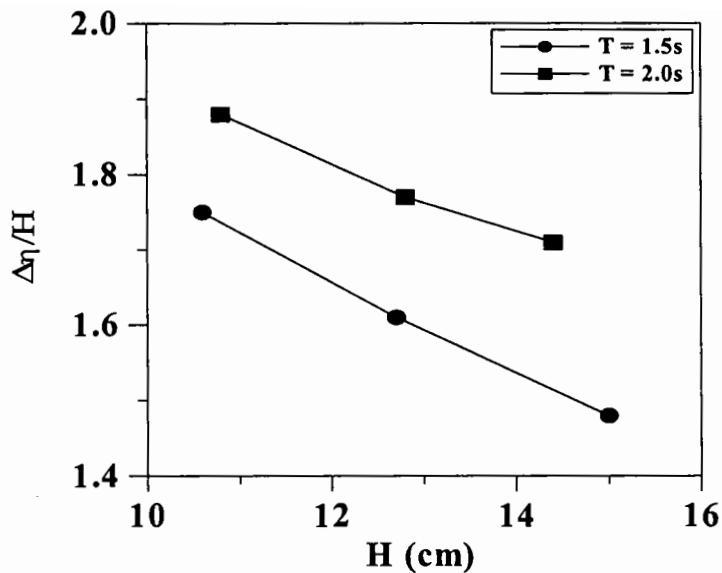
<표 3.3.3>에는 파고 및 주기에 따른 사면에서의 최대 수위차, 최고수위, 하중계로 측정한 총파력의 연직 및 수평분력의 진폭(최대차의 1/2)의 변화를 나타내었다. 여기서, H_i 는 협수로의 방파제 Toe 측면의 위치에서의 계측한 연속된 개별 입사파고를 의미하며, H 는 이들 3개의 파고를 대표하는 산술평균파고를 의미한다.

수평분력의 진폭에 대한 연직분력의 진폭의 비 d/c 의 값은 주기 1.5초인 경우에는 대부분 0.4~0.5의 값을 보이며, 주기 2.0초인 경우에는 0.5부근의 매우 균일한 값을 보인다.

<그림 3.3.8>에는 입사파에 대한 사면 최대수위차의 비를 입사파고의 함수로 나타내었다. 입사파고에 대한 사면 최대 위차의 비는 파고가 증가할수록 거의 선형적으로 감소 한다. 그러나 이 비는 주기가 짧은 경우보다 주기가 긴 경우에 크며 이는 주기가 길어질수록 처오름높이가 증가함을 의미한다.

<표 3.3.3> 사면수위와 하중계로 측정한 파력의 분력

T (s)	H (cm)	Hi(a) (cm)	사면최대 수위차(b) (cm)	사면최고 수위(cm)	수평분력 진폭(c) (kgf/m)	연직분력 진폭(d) (kgf/m)	b/a	d/c
1.5	10.6	10.9	19.3	12.3	13.61	5.51	1.77	0.40
		10.2	17.8	11.2	14.53	5.64	1.75	0.39
		10.6	18.5	11.5	14.32	5.34	1.75	0.37
		평균	18.5	11.7	14.15	5.50	1.75	0.39
	12.7	12.9	21.0	13.5	15.53	6.81	1.63	0.44
		12.4	20.0	12.7	16.74	7.26	1.61	0.43
		12.7	20.3	12.9	16.70	6.97	1.60	0.42
		평균	20.4	13.0	16.32	7.01	1.61	0.43
	15.0	15.1	22.8	14.9	17.53	8.68	1.51	0.50
		14.9	21.8	14.0	18.70	8.93	1.46	0.48
		15.0	22.0	14.1	18.82	8.47	1.47	0.45
		평균	22.2	14.3	18.35	8.70	1.48	0.47
2.0	10.8	10.4	20.3	12.9	20.03	10.23	1.95	0.51
		10.9	20.2	12.7	20.12	10.14	1.85	0.50
		11.0	20.3	12.8	20.08	9.52	1.85	0.47
		평균	20.3	12.8	20.08	9.96	1.88	0.50
	12.8	12.3	23.1	14.6	23.87	12.06	1.88	0.51
		13.1	22.6	14.1	23.96	11.98	1.73	0.50
		12.9	22.3	14.0	23.54	10.35	1.73	0.44
		평균	22.7	14.2	23.79	11.47	1.77	0.48
	14.4	14.0	24.7	16.1	25.75	13.40	1.76	0.52
		14.7	24.5	16.3	27.05	13.52	1.67	0.50
		14.6	24.8	15.4	26.92	13.23	1.70	0.49
		평균	24.7	15.9	26.57	13.39	1.71	0.50



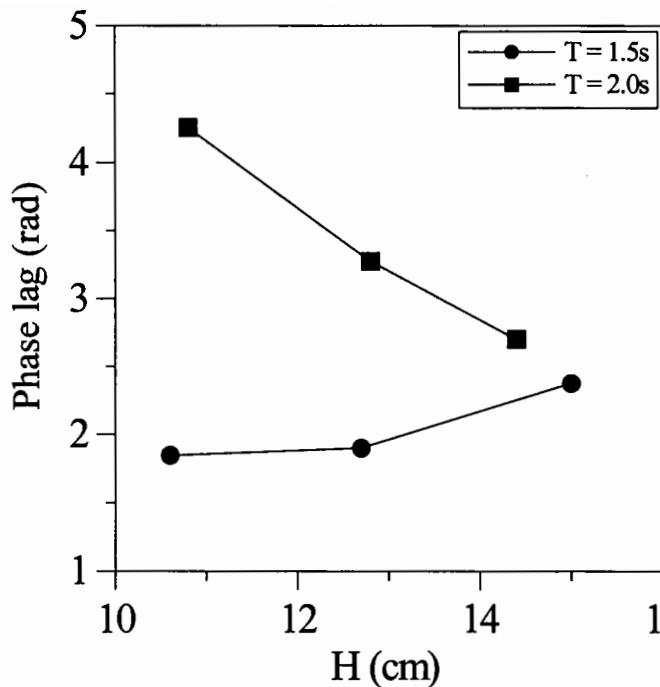
<그림 3.3.8> 입사파고별 사면 취대 수위차의 변화

■ 사면수위와 하중계로 측정한 수평파력의 위상차

위에서는 정지수위에서 파압이 최대가 되는 시점은 사면에서 수위가 최대가 되는 시점보다 근소하게 빠르나 거의 동일하게 볼 수 있을 정도로 차이가 작음을 밝혔다. 즉 본 실험조건의 범위 내에서는 사면에서의 수위와 사면에 작용하는 파력은 거의 동일 위상임을 의미한다. <그림 3.3.1>~<그림 3.3.6>에서 보면 수평파력은 사면수위가 최대가 된 이후에 최대가 된다. <표 3.3.4>와 <그림 3.3.9>에는 사면수위와 하중계로 계측한 수평파력 간의 위상차를 나타내었다.

<표 3.3.4> 사면수위와 수평파력의 위상차(rad)

T(s)	H(cm)	개별 입사파			
		1	2	3	평균
1.5	10.6	2.014	1.796	1.737	1.848
	12.7	2.033	1.843	1.826	1.901
	15.0	2.417	2.398	2.314	2.377
2.0	10.8	4.358	4.189	4.217	4.255
	12.8	3.302	3.182	3.346	3.276
	14.4	2.719	2.704	2.684	2.702



<그림 3.3.9> 사면수위와 수평파력의 위상차

<그림 3.3.9>에서 보면 이 위상차는 주기가 큰 경우에는 파고가 증가함에 따라 확실히 감소하나 주기가 짧은 경우에는 약간 증가하는 경향을 보인다. 그리고 위상차의 크기는 매우 크게 나타난다. 즉 제체에 작용하는 총파력의 수평분력은 사면에서 파압이 최대가 되는 시점보다 매우 지체되어 최대가 된다. 경사제의 제체에 작용하는 총파력은 사면에서의 파압 이외에도 제체 내의 마찰력 및 관성력 등에 따라서 결정되지만 사면에서의 파압에 가장 큰 영향을 받는 것을 감안할 때 본 실험의 결과 나타난 사면수위와 수평파력간의 위상차 또는 사면에서 파압이 최대가 되는 시점과 수평파력이 최대가 되는 시점 간의 시간차는 의외로 매우 크다고 하겠다. 제체 내부의 파동장을 이해하기 위해서는 향후 하중측정기의 정밀 정검과 아울러 현상에 대한 보다 심층적인 연구가 필요하다.

■ 하중계로 계측한 분력들의 비교

<표 3.3.5>~<표 3.3.8>에는 하중계로 계측한 하나의 분력이 최대가 될 때의 다른 분력의 동시값들과 이들의 비 및 합력을 나타내었으며, <표 3.3.9>~<표 3.3.10>에는 분력의 방향별로 최대값들을 비교하였다. <그림 3.3.10>에는 <표 3.3.9>와 <표 3.3.10>의 자료들을 그림으로 나타내었다.

<표 3.3.5> 하중계로 계측한 +방향의 최대 수평파력과 동시 연직파력

T (s)	H (cm)	Hi (cm)	파력(kg/m)			연직력/ 수평력
			+방향의 최대수평력	연직력	합력	
1.5	10.6	10.9	+13.939	+2.754	14.21	0.20
		10.2	+14.941	+2.587	15.16	0.17
		10.6	+15.191	+2.087	15.33	0.14
	12.7	12.9	+16.026	+1.252	16.07	0.08
		12.4	+17.278	+2.421	17.45	0.14
		12.7	+17.612	+1.669	17.69	0.09
	15.0	15.1	+17.945	+2.838	18.17	0.16
		14.9	+19.698	+1.085	19.73	0.06
		15.0	+19.949	+0.751	19.96	0.04
2.0	10.8	10.4	+21.952	+4.841	22.48	0.22
		10.9	+21.201	+5.091	21.80	0.24
		11	+21.368	+4.758	21.89	0.22
	12.8	12.3	+26.626	+4.090	26.94	0.15
		13.1	+25.29	+5.676	25.92	0.22
		12.9	+25.624	+4.758	26.06	0.19
	14.4	14.0	+30.382	+5.342	30.85	0.18
		14.7	+30.632	+5.509	31.12	0.18
		14.6	+29.046	+5.091	29.49	0.18

<표 3.3.6> 하중계로 계측한 -방향의 최대 수평파력과 동시 연직파력

T (s)	H (cm)	Hi (cm)	파력(kg/m)			연직력/ 수평력
			-방향의 최대수평력	연직력	합력	
1.5	10.6	10.9	-13.271	-8.263	15.63	0.62
		10.2	-14.106	-8.096	16.26	0.57
		10.6	-13.438	-7.846	15.56	0.58
	12.7	12.9	-15.024	-9.181	17.61	0.61
		12.4	-16.193	-9.933	19.00	0.61
		12.7	-15.775	-8.597	17.97	0.54
	15.0	15.1	-17.111	-11.936	20.86	0.70
		14.9	-17.695	-12.270	21.53	0.69
		15.0	-17.695	-11.268	20.98	0.64
2.0	10.8	10.4	-18.112	-12.603	22.07	0.70
		10.9	-19.030	-11.936	22.46	0.63
		11	-18.780	-11.852	22.21	0.63
	12.8	12.3	-21.117	-15.191	26.01	0.72
		13.1	-22.620	-14.607	26.93	0.65
		12.9	-21.451	-13.939	25.58	0.65
	14.4	14.0	-21.117	-17.194	27.23	0.81
		14.7	-23.454	-17.278	29.13	0.74
		14.6	-24.790	-17.027	30.07	0.69

<표 3.3.7> 하중계로 계측한 +방향의 최대 연직파력과 동시 수평파력

T (s)	H (cm)	Hi (cm)	파력(kg/m)			연직력/ 수평력
			+방향의 최대연직력	수평력	합력	
1.5	10.6	10.9	+2.754	+13.939	14.21	0.20
		10.2	+2.671	+10.600	10.93	0.25
		10.6	+2.421	+9.933	10.22	0.24
	12.7	12.9	+3.005	+16.026	16.31	0.19
		12.4	+3.756	+10.016	10.70	0.38
		12.7	+3.422	+8.013	8.71	0.43
	15.0	15.1	+4.090	+8.096	9.07	0.51
		14.9	+4.841	+6.594	8.18	0.73
		15.0	+4.340	+9.014	10.00	0.48
2.0	10.8	10.4	+7.429	+20.616	21.91	0.36
		10.9	+7.011	+18.697	19.97	0.37
		11	+6.427	+19.949	20.96	0.32
	12.8	12.3	+8.180	+24.122	25.47	0.34
		13.1	+7.929	+23.705	25.00	0.33
		12.9	+6.093	+23.872	24.64	0.26
	14.4	14.0	+8.180	+28.295	29.45	0.29
		14.7	+8.347	+28.629	29.82	0.29
		14.6	+7.762	+27.294	28.38	0.28

<표 3.3.8> 하중계로 계측한 -방향의 최대 연직파력과 동시 수평파력

T (s)	H (cm)	Hi (cm)	파력(kg/m)			연직력/ 수평력
			-방향의 연직력 최대	수평력	합력	
1.5	10.6	10.9	-8.263	-13.104	15.49	0.63
		10.2	-8.597	-13.689	16.16	0.63
		10.6	-8.263	-12.770	15.21	0.65
	12.7	12.9	-10.600	-15.024	18.39	0.71
		12.4	-10.767	-15.942	19.24	0.68
		12.7	-10.517	-15.525	18.75	0.68
	15.0	15.1	-13.271	-16.360	21.07	0.81
		14.9	-13.021	-17.695	21.97	0.74
		15.0	-12.603	-17.528	21.59	0.72
2.0	10.8	10.4	-13.021	-13.522	18.77	0.96
		10.9	-13.271	-17.445	21.92	0.76
		11	-12.603	-16.777	20.98	0.75
	12.8	12.3	-15.942	-17.111	23.39	0.93
		13.1	-16.026	-19.030	24.88	0.84
		12.9	-14.607	-18.112	23.27	0.81
	14.4	14.0	-18.613	-17.445	25.51	1.07
		14.7	-18.697	-18.780	26.50	1.00
		14.6	-18.697	-20.116	27.46	0.93

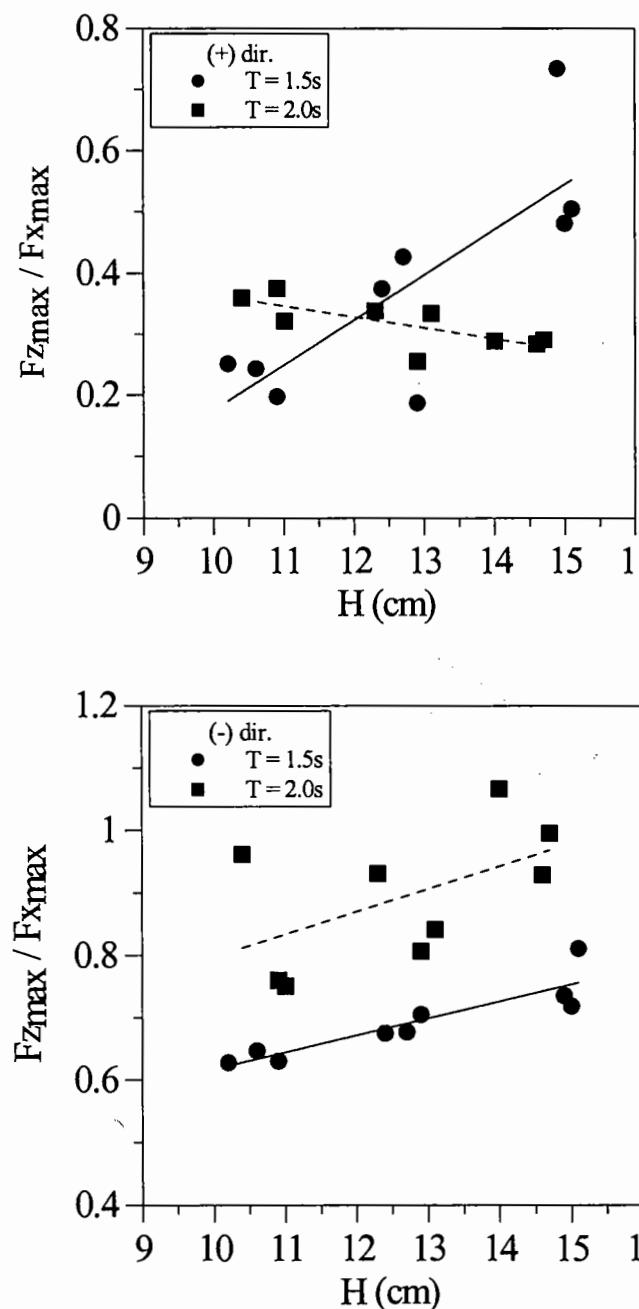
<표 3.3.9> 하중계로 측정한 +방향의 최대분력 비교

T (s)	H (cm)	Hi (cm)	파력(kg/m)		연직력/ 수평력
			+방향의 최대연직력	+방향의 최대수평력	
1.5	10.6	10.9	+2.754	+13.939	0.198
		10.2	+2.671	+10.600	0.252
		10.6	+2.421	+9.933	0.244
	12.7	12.9	+3.005	+16.026	0.188
		12.4	+3.756	+10.016	0.375
		12.7	+3.422	+8.013	0.427
	15.0	15.1	+4.090	+8.096	0.505
		14.9	+4.841	+6.594	0.734
		15.0	+4.340	+9.014	0.481
2.0	10.8	10.4	+7.429	+20.616	0.360
		10.9	+7.011	+18.697	0.375
		11	+6.427	+19.949	0.322
	12.8	12.3	+8.180	+24.122	0.339
		13.1	+7.929	+23.705	0.334
		12.9	+6.093	+23.872	0.255
	14.4	14.0	+8.180	+28.295	0.289
		14.7	+8.347	+28.629	0.292
		14.6	+7.762	+27.294	0.284

<표 3.3.10> 하중계로 측정한 -방향의 최대분력 비교

T (s)	H (cm)	Hi (cm)	파력(kg/m)		연직력/ 수평력
			-방향의 최대연직력	-방향의 최대수평력	
1.5	10.6	10.9	-8.263	-13.104	0.631
		10.2	-8.597	-13.689	0.628
		10.6	-8.263	-12.770	0.647
	12.7	12.9	-10.600	-15.024	0.706
		12.4	-10.767	-15.942	0.675
		12.7	-10.517	-15.525	0.677
	15.0	15.1	-13.271	-16.360	0.811
		14.9	-13.021	-17.695	0.736
		15.0	-12.603	-17.528	0.719
2.0	10.8	10.4	-13.021	-13.522	0.963
		10.9	-13.271	-17.445	0.761
		11	-12.603	-16.777	0.751
	12.8	12.3	-15.942	-17.111	0.932
		13.1	-16.026	-19.030	0.842
		12.9	-14.607	-18.112	0.806
	14.4	14.0	-18.613	-17.445	1.067
		14.7	-18.697	-18.780	0.996
		14.6	-18.697	-20.116	0.929

+방향의 수평력의 크기는 예외없이 -방향의 수평력의 크기보다 크게 나타났다. 수평력이 최대가 될 때의 합력의 크기는 수평력의 방향에 따라 근소하게 차이가 날 뿐이다. <그림 3.3.10>에서 방향별 최대 수평력에 대한 최대 연직력의 비를 살펴보면 -방향으로는 파고가 증가할수록 증가하는 경향이 보이나, +방향으로는 주기가 1.5초인 경우에는 증가하나 주기가 2.0초에서는 감소하는 경향을 보인다



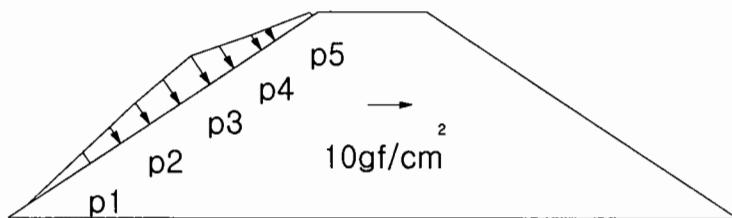
<그림 3.3.10> 방향별 최대 수평력과 최대 연직력의 비교도

3. 사면파압 계측결과 및 분석

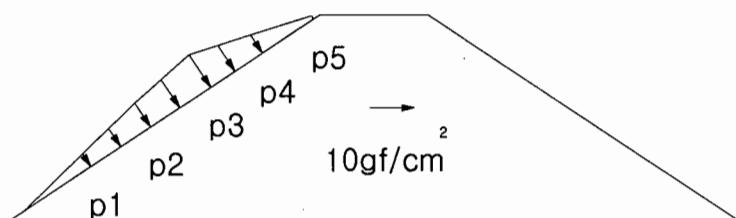
사면에서 계측한 파압자료로부터 정지수위(P3)에서 파압이 최대가 되는 시점의 파압분포도를 파고 및 주기별로 하나씩 예로 <그림 3.3.11>~<그림 3.3.16>에 제시하였다. 전사면 하부의 파압이 매우 미약한 것으로 사면을 따라 파압의 위상차가 매우 큼을 알 수 있다. 그리고 파압이 정수면에서 최대가 되었다는 사실과 이들 파압의 분포형상이 거의 두 개의 선분만으로도 잘 나타내지는 것으로부터 파가 내습하는 과정에서 쇄파가 거의 발생하지 않았음을 알 수 있다.

<표 3.3.11>에는 파압이 정수면 위치에서 최대가 될 때의 각 측점별 파압과 이들로부터 계산한 파력의 수평분력과 연직분력을 거의 동일한 시점의 사면에서의 최대수위값과 함께 제시하였다. 제체의 사면 경사가 1:1.5로서 1:1 경사보다 완만하기에 연직분력의 크기가 수평분력의 크기보다 월등히 크게 계산되었다.

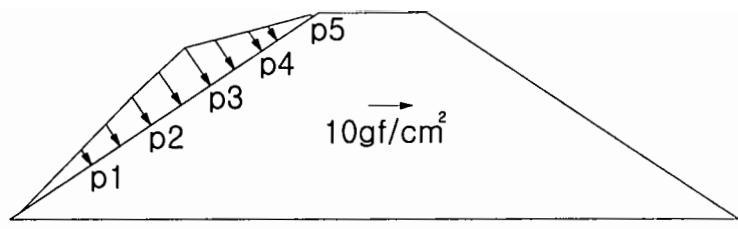
여기서 계산된 수평분력은 하중계로 계측한 제체에 작용하는 수평분력과 1:1로 비교할 수 있는 자료이지만 연직분력은 제체의 부력이 고려되지 않은 값이므로 하중계로 측정한 연직분력과 1:1로 비교할 수는 없다.



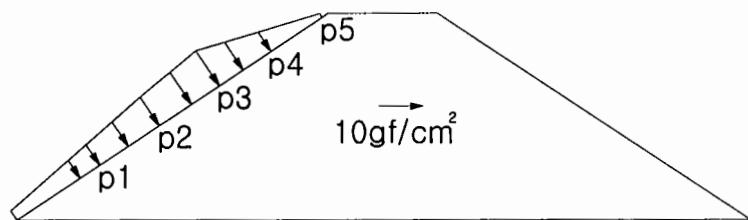
<그림 3.3.11> 사면 파압분포의 예($H=10.6\text{cm}$, $T=1.5\text{s}$).



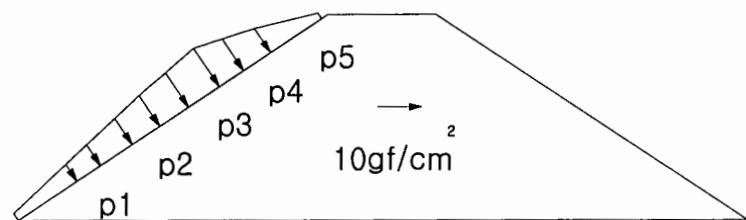
<그림 3.3.12> 사면 파압분포의 예($H=12.7\text{cm}$, $T=1.5\text{s}$).



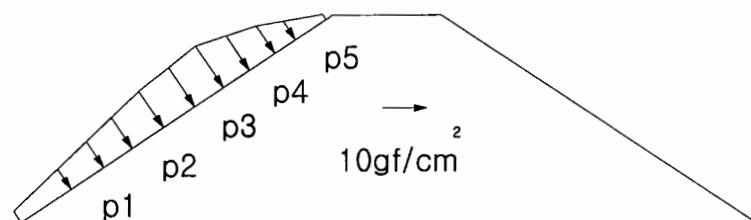
<그림 3.3.13> 사면 파압분포의 예($H=15.0\text{cm}$, $T=1.5\text{s}$).



<그림 3.3.14> 사면 파압분포의 예($H=10.8\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$).



<그림 3.3.15> 사면 파압분포의 예($H=12.8\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$).



<그림 3.3.16> 사면 파압분포의 예($H=14.4\text{cm}$, $T=2.0\text{s}$).

<표 3.3.11> 사면 파압분포와 계산파력

T (s)	H (cm)	Hi (cm)	사면 수위 (cm)	파압(gf/cm ²)					계산파력 (kgf/m)	
				p1	p2	p3	p4	p5	수평분력	연직분력
1.5	10.6	10.9	12.3	2.821	5.653	7.999	4.872	1.094	18.199	-27.298
		10.2	11.2	2.653	5.167	7.707	4.393	1.013	17.055	-25.582
		10.6	11.5	2.973	5.755	7.636	4.017	0.933	17.507	-26.261
		평균	11.7	2.816	5.525	7.781	4.427	1.013	17.587	-26.380
	12.7	12.9	13.5	3.583	6.727	9.252	4.884	0.95	21.026	-31.539
		12.4	12.7	3.385	6.501	8.468	4.427	0.996	19.591	-29.387
		12.7	12.9	3.370	6.377	8.655	4.815	0.858	19.916	-29.874
		평균	13.0	3.446	6.535	8.792	4.709	0.935	20.178	-30.267
2.0	15.0	15.1	14.9	3.248	6.512	9.733	6.071	0.841	21.579	-32.368
		14.9	14.0	4.330	7.677	9.428	5.192	0.737	23.171	-34.756
		15.0	14.1	4.117	7.564	10.131	5.249	0.651	23.266	-34.900
		평균	14.3	3.898	7.251	9.764	5.504	0.743	22.672	-34.008
	10.8	10.4	12.9	5.596	7.960	9.522	5.34	1.128	26.675	-40.012
		10.9	12.7	5.474	7.700	9.381	5.135	0.984	26.033	-39.049
		11	12.8	5.444	7.756	9.264	4.804	0.967	25.605	-38.407
		평균	12.8	5.505	7.805	9.389	5.093	1.026	26.104	-39.156
2.0	12.8	12.3	14.6	6.557	9.305	10.775	6.915	0.892	31.277	-46.915
		13.1	14.1	5.215	7.869	10.412	6.858	1.986	27.931	-41.897
		12.9	14.0	5.581	8.276	10.295	6.459	1.491	28.277	-42.415
		평균	14.2	5.784	8.483	10.494	6.744	1.456	29.162	-43.743
	14.4	14.0	16.1	6.938	9.735	11.349	7.999	1.917	33.933	-50.900
		14.7	16.3	6.496	9.531	11.665	8.433	2.337	33.569	-50.354
		14.6	15.4	6.907	9.712	11.103	7.383	1.359	32.972	-49.459
		평균	15.9	6.780	9.659	11.372	7.938	1.871	33.492	-50.238

■ 정수면 위치에서 파압의 계측치와 이론값의 비교

<표 3.3.12> 정수면 위치에서 파압의 계측치와 이론값의 비교

T (s)	H (cm)	H_i (cm)	K_R	P3 최대파압 (gf/cm^2)			A/C	B/C
				$\rho g \eta_{\max}$ (A)	$\rho g \eta^*_{\max}$ (B)	계측(C)		
1.5	10.6	10.9	-	12.720	12.324	7.999	1.590	1.541
		10.2	-	11.904	11.186	7.707	1.545	1.451
		10.6	-	12.370	11.538	7.636	1.620	1.511
		평균	0.167	12.343	11.683	7.781	1.585	1.501
	12.7	12.9	-	15.326	13.461	9.252	1.656	1.455
		12.4	-	14.732	12.676	8.468	1.740	1.497
		12.7	-	15.088	12.865	8.655	1.743	1.486
		평균	0.188	15.049	13.001	8.792	1.713	1.479
	15.0	15.1	-	18.136	14.870	9.733	1.863	1.528
		14.9	-	17.894	13.976	9.428	1.898	1.482
		15.0	-	18.016	14.057	10.131	1.778	1.388
		평균	0.201	18.015	14.301	9.764	1.846	1.465
2.0	10.8	10.4	-	13.832	12.865	9.522	1.453	1.351
		10.9	-	14.498	12.676	9.381	1.545	1.351
		11.0	-	14.630	12.784	9.264	1.579	1.380
		평균	0.330	14.320	12.775	9.389	1.526	1.361
	12.8	12.3	-	16.408	14.626	10.775	1.523	1.357
		13.1	-	17.476	14.057	10.412	1.678	1.350
		12.9	-	17.208	13.976	10.295	1.671	1.358
		평균	0.334	17.031	14.220	10.494	1.624	1.355
	14.4	14.0	-	18.746	16.089	11.349	1.652	1.418
		14.7	-	19.684	16.305	11.665	1.687	1.398
		14.6	-	19.550	15.357	11.103	1.760	1.383
		평균	0.339	19.327	15.917	11.372	1.700	1.400

<표 3.3.12>에는 사면의 정수면 위치에서 파암의 계측치와 이론적으로 계산한 값을 제체의 측정 반사율(K_R)과 함께 비교하였다. 이 표에서 $\rho g \eta^*_{\max}$ 는 사면에서 계측한 최대수위 η^*_{\max} 를 이용하여 계산한 정수압이다. 한편, $\rho g \eta_{\max}$ 는 사면에서의 최대수위와 파암이 입사파고와 제체의 반사율에 따라 각각 다음 식(3.3.1)과 식(3.3.2)로 결정된다고 가정한 잠정이론(해양수산부, 1999)에 따른 파암이다. 여기서 식(3.3.1) 및 식(3.3.2)를 잠정이론이라고 부르는 이유는 이 식들은 오직 아이디어의 단계에 머물 뿐 아직 경사제에 대해서 실험으로 검증된 적이 없기 때문이다.

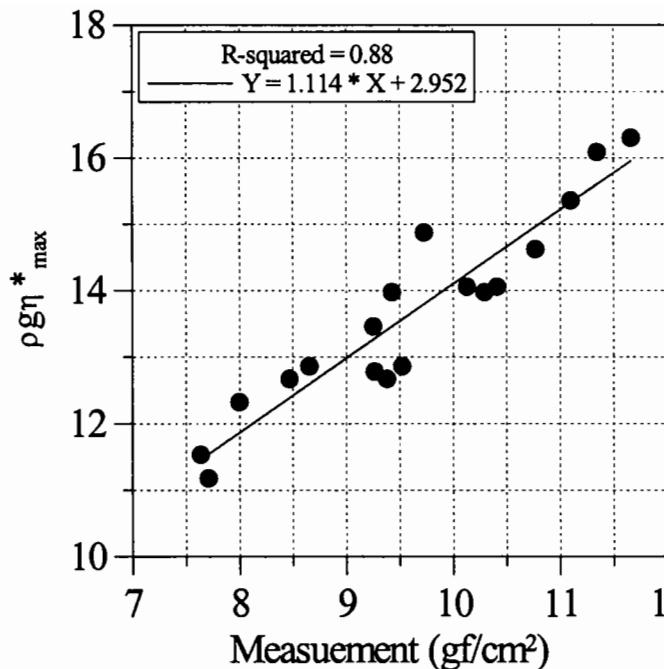
$$\eta_{\max} = \frac{1}{2}(1 + K_R)(1 + \cos \beta)H_{\max} \quad (3.3.1)$$

$$P = \rho g(\eta_{\max} - z) \quad (3.3.2)$$

식(3.3.1)에서 β 는 파의 입사각이다. 본 실험은 2차원실험으로서 $\beta=0$ 의 경우가 된다. 그리고 정수면 위치의 파암을 대상으로 하므로 식(3.3.2)에서 $z=0$ 인 경우에 해당한다.

<표 3.3.12>에 의하면, 사면의 정수면 위치에서 사면에서의 최대수위를 이용하여 추산한 파암들은 계측치의 135%~154%정도로서 비교적 균일한 경향을 보이나 계측치보다는 평균 약 38%정도나 크게 나타났다. 한편, 식(3.3.1)의 잠정이론을 이용하여 계산한 파암은 계측치의 145%~190%정도에 해당되어 계측치보다 무려 평균 약 66%정도나 크게 추산되었다. 이는 만일 경사제의 사면에 작용하는 파암을 추정하기 위하여 사면에서의 최대수위를 그대로 사용하면 제체에 작용하는 파력을 매우 과대 평가할 수 있으며, 더욱이 잠정 이론식(3.3.1)을 이용하는 경우에는 한 층 더 과대 설계할 수 있음을 말해주고 있는 것이다. 향후 이에 대한 심층 연구가 필요하다.

<그림 3.3.17>은 <표 3.3.12>의 사면 최대수위로부터 구한 파암들(B)과 계측 파암들(C)의 평균값들을 대상으로 상관관계를 나타낸 것이다. 결정계수(R^2)의 값이 0.88로서 매우 큰 편이므로 자료들은 직선식으로 잘 대표될 수 있음을 알 수 있다.



<그림 3.3.17> 정수면에서 계측수위로 계산한 파압과 계측파압의 비교

■ 제체에 작용하는 파력평가 결과의 비교

여기서는 제체에 미치는 파력을 평가하기 위하여 하중계를 사용하는 경우와 사면에서 파압을 계측하는 경우의 결과의 차이에 대하여 검토하기로 한다. <표 3.3.13>과 <표 3.3.14>에는 각각 제체에 미치는 최대 수평력과 최대 연직력을 계측방법에 따라 제시하였다.

<표 3.3.13>에 의하면, 파압 관측결과를 적분하여 구한 수평력은 하중계로 직접 계측한 수평력보다 11~22%정도 크게 평가되고 있다. 한편, 이 결과와 <표 3.3.12>에 제시한 결과를 종합하면 잠정이론식(3.3.1)과 식(3.3.2)를 이용하여 수평력을 구할 경우 본 실험조건의 범위에서는 하중계로 직접 계측한 결과보다 평균 $1.66 \times 1.17 \approx 1.94$ 배로 큰 값을 예측하게 된다. 이는 거의 2배에 가까운 값으로서 실제 설계에서는 반영하기 어려운 과다설계에 해당한다 하겠다.

<표 3.3.14>에서 파압계(B)에 해당하는 ()내의 값은 계측파력을 적분하여 이의 연직성분만을 구한 것으로 아직 제체의 정수면 위의 부분에 작용하는 부력을 고려하지 않은 것이다. 따라서, 개략적인 비교를 위해서 정수면 위의 부력을 감안한 연직파력을 별도로 제시하였다. 부력을 계산한 기준 부피는 제체의 부분 중 전사면에서 수위가 최대가 되는

선과 후사면이 정지수위와 만나는 선을 평면으로 잊고 제체중 정지수위와 이 평면 사이에 드는 부분의 부피로 하였다. 대용 속채움 재료의 공극율이 0.43이므로 이 기준 부피에 0.57과 물의 단위중량을 곱해서 부력을 추산하였다. 이렇게 할 경우 파압계측으로 구한 연직력은 주기 1.5초인 경우에는 하중계로 구한 값의 65%정도로서 과소 평가하게 되며 주기 2.0초인 경우에는 하중계로 구한 값보다 20%내외로 과대 평가하고 있다.

<표 3.3.13> 측정방법별 최대수평력 (단위: kgf/m)

측정방법	T = 1.5s			T = 2.0s		
	H=10.6cm	H=12.7cm	H=15.0cm	H=10.8cm	H=12.8cm	H=14.4cm
하중계(A)	14.690	16.972	19.197	21.507	25.847	30.020
파압계(B)	17.587	20.178	22.672	26.104	29.162	33.492
B/A	1.197	1.189	1.181	1.214	1.128	1.116

<표 3.3.14> 측정방법별 최대연직력 (단위: kgf/m)

측정방법	T = 1.5s			T = 2.0s		
	H=10.6cm	H=12.7cm	H=15.0cm	H=10.8cm	H=12.8cm	H=14.4cm
하중계(A)	-8.374	-10.628	-12.965	-12.965	-15.525	-18.669
파압계(B)	-5.373 (-26.380)	-6.925 (-30.267)	-8.332 (-34.008)	-16.174 (-39.156)	-18.246 (-43.742)	-21.689 (-50.238)
B/A	0.642	0.652	0.643	1.247	1.175	1.162

* 파압계(B)에서 ()내의 값은 파압 계측결과로 구한 연직분력으로서 부력을 보정하기 전의 자료

■ 간극수압의 계측

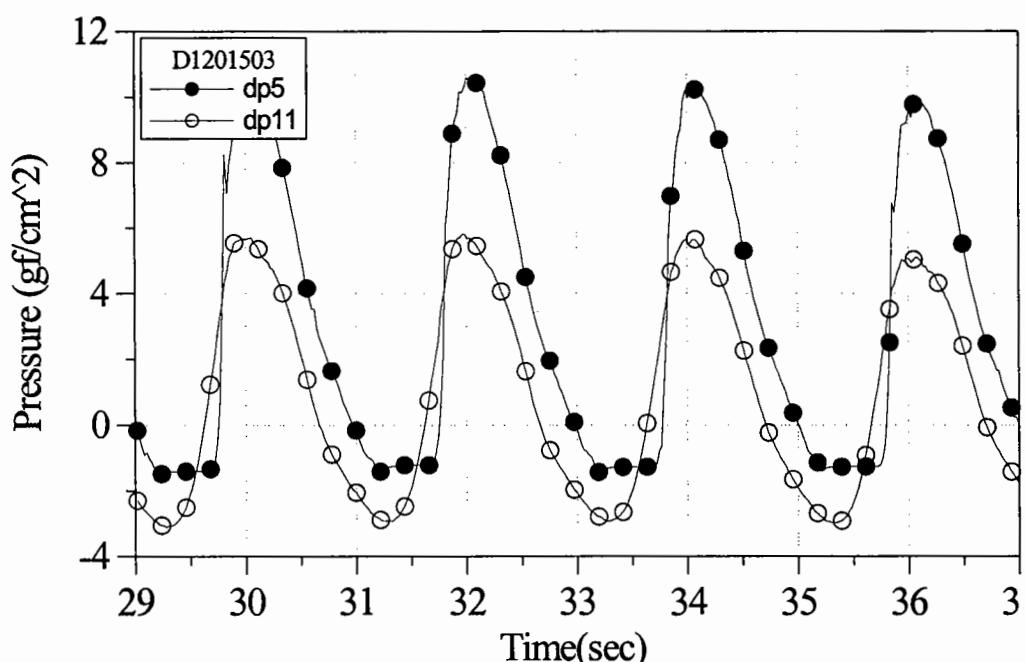
위에서 하중계로 직접 계측한 파력과 파압관측으로 구한 파력들을 비교하였으나 이들 간에 차이가 크며 차이의 양상도 균일하지 않음을 알게 되었다. 이러한 격차는 제체 내부의 파동장을 더 잘 이해하게 되면 상당 부분 해소할 수 있을 것으로 기대한다. 이는 수치 모형실험을 병행하여야 함을 의미하며 필요한 모형을 개발하여 보정하여야 한다. 이를 위해서는 우선 제체내의 간극수압의 변화를 파악하여야 한다. 이는 계측이 매우 어렵고 시간과 노력이 많이 소요될 뿐 아니라 계측센서 또한 실험 중 쉽게 고장이 나는 실험이다.

그리고 분석에도 매우 많은 시간과 노력이 필요하다.

본 실험에서는 1차적으로 파고=14.4cm, 주기=2.0초인 경우를 대상으로 간극수압을 계측하였으며 결과의 한 예를 <그림 3.3.18>에 제시하였다. 그림에서 속이 찬 동그라미와 빈 동그라미는 각각 <그림 3.2.6>에서 측점 5번과 측점 11번을 의미한다. 측점 dP5는 사면의 피복층 바로 아래에 설치되었으며 정지수위에 위치하므로 사면 파압계 P3와는 두께 5m인 피복층을 경계로 인접한 위치이다.

동시에 계측한 P3에서의 파압의 최대값이 3개의 개별파에서 각각 11.349 gf/cm^2 , 11.665 gf/cm^2 , 11.103 gf/cm^2 일 때 간극수압계 dP5에서는 각각 10.544 gf/cm^2 , 10.266 gf/cm^2 , 9.837 gf/cm^2 로서 피복층을 통과하며 파압이 저감되는 것을 알 수 있다. 한편, <그림 3.3.6>과 <그림 3.3.18>의 수평축의 시간에 유의하며 관찰하면 두 파압의 위상은 매우 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

계측자료들은 향후 수치모형의 보정자료로 사용할 계획이다.



<그림 3.3.18> 간극수압 계측 예($H = 14.4\text{cm}$ $T = 2.0\text{s}$).

제 4 절 결론 및 토의

1. 결론

- 경사제에 작용하는 파력을 하중계로 직접 계측하기 위하여 경사제 모형들을 사용하며 대용 속채움 재료를 사용하는 방법은 반사율과 전달율로 판단할 때 사용 가능한 방법임을 확인하였다.
- 규칙파를 사용한 비월파 실험에서 입사파, 사면상의 수위, 사면에 작용하는 파압, 제체에 작용하는 파력 및 제체 내의 간극수압을 동시에 측정하여 1차 분석하였다.
- 입사파고에 대한 사면에서의 최대 수위차의 비는 파고가 증가할수록 감소하며, 주기가 길수록 증가한다.
- 사면상의 정지수위에서의 파압과 수평파력과의 위상차는 매우 크며 입사파의 주기가 2.0초일 때에는 파고의 증가에 따라 감소하고 주기가 1.5초일 때에는 파고의 증가에 따라 완만하게 증가한다.
- 제체에 작용하는 수평력은 항상 파가 진행하는 방향의 값이 의해 방향의 값보다 크다.
- 수평력이 최대가 될 때에 파력의 합력의 크기는 수평력의 방향에 따라서는 거의 변하지 않았다.
- 파의 진행방향 수평력의 최대값에 대한 연직 상향력의 최대값의 비는 주기가 1.5초인 경우에는 파고가 증가함에 따라 증가하나 주기가 2.0초인 경우에는 파고가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.
- 파의 진행방향과 반대방향 수평력의 최대값에 대한 연직 하향력 최대값의 비는 주기가 1.5초에서나 2.0초에서 모두 파고가 증가함에 따라 증가한다. 이 때 이들 비의 값은 주기가 2.0초인 경우에 더 크다.
- 사면에서 계측한 최대 수위값으로 계산한 사면의 정지수위에서의 파압은 계측한 파압보다 평균 38%정도 크며, 잠정이론으로 계산한 파압은 계측한 파압보다 평균 66%정도 크게 나타난다.
- 사면에서 계측한 파압으로 제체에 작용하는 수평파력을 계산하면 하중계로 직접 계측한 수평파력보다 11~22%정도 크게 평가된다.
- 잠정이론으로 제체에 작용하는 수평파력을 추산하면 본 실험조건의 경우 하중계로 직접 계측한 수평파력보다 2배 내외로 크게 되어 과다설계를 유발한다.

- 파압이 제체 내로 전달되는 과정에서 피복층을 통과할 때 매우 큰 위상차가 발생한다.

2. 토의

- 실제 현장에서는 속채움 사석의 크기가 $0.015\sim0.03 m^3$ 사이의 분포를 가지나 본 실험에서는 비록 공극율은 사석과 비슷하나 크기가 매우 균일한 대용 속채움 재료를 사용하였다. 그러므로 반사율과 전달율 면에서는 큰 문제가 없을 지 모르지만 제체 내부의 파동장에서는 차이가 클 것으로 예상된다. 따라서, 향후 재료를 적절한 재료를 구할 수 있다면 속채움 재료의 크기를 변화시킨 실험이 필요하다고 판단된다.
- 분석 대상 항목이 주기에 따라 매우 다양하게 변하는 것을 보았다. 따라서 향후 연구에서는 주기를 다양화한 실험이 추가되어야 할 것으로 판단된다.
- 실험에 사용한 파는 형장의 설계파와는 전혀 다른 규칙파이며 또한 사면에서 쇄파가 발생하지 않는 파들이었으므로 향후 쇄파가 되는 극한조건 또는 불규칙파 실험으로까지 실험 범위를 확장하는 것이 필요하다. 불규칙파 실험을 위해서는 매우 많은 시간과 노력이 필요할 것이다.
- 주어진 파 조건에서 제체의 투수성은 발생 총파력의 변화에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 실험조건을 완전 비투과 사면을 포함하도록 확장할 필요가 있다고 판단된다.

제 4 장 경사식 방파제의 파력 결정을 위한 수치해석

제 1 절 서 론

1. 연구 배경 및 필요성

임의 경사식 방파제를 설계하고 또한, 방파제의 경제적 적정단면을 도출하기 위해서는 다음과 같은 수리학적 요소와 토질역학적 요소를 복합적으로 고려하여야 한다 <그림 4.1.1>.

○ 수리학적 요소 :

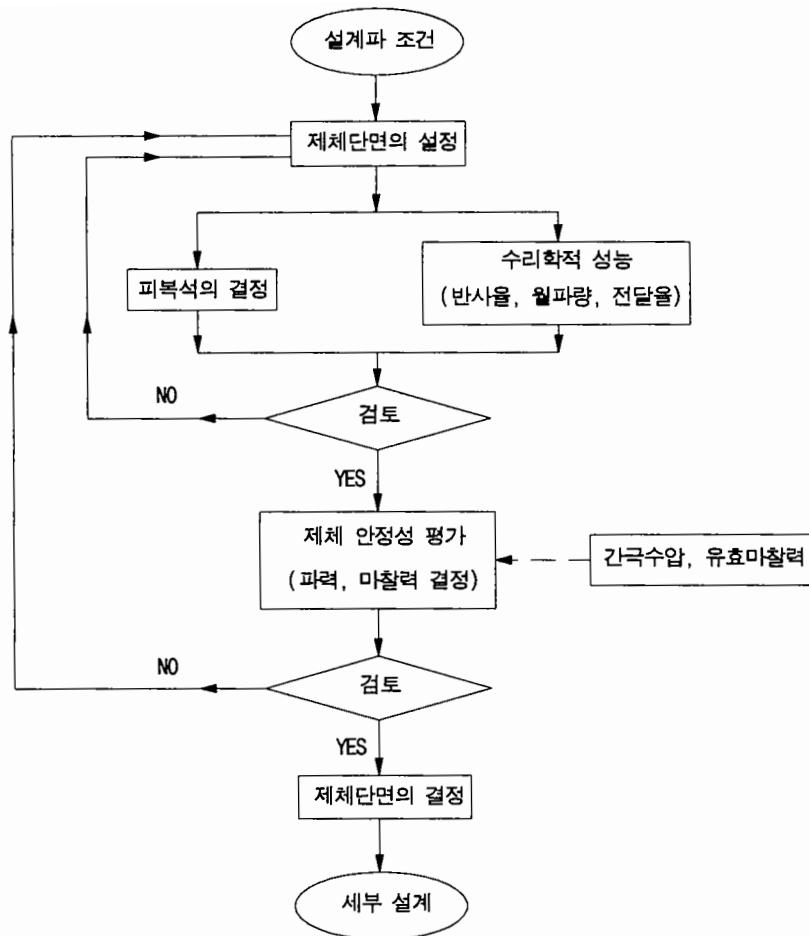
반사율, 전달율, 월파량, 쳐오름, 피복석의 안정성

○ 토질역학적 요소 :

임의 사면에서의 활동 (평면 및 원호활동), 지반 지지력 및 침하

토질역학적 요소는 방파제 제체의 안정성에 관련되어 있으며 안정성을 파악하기 위해서는 입사파에 의하여 방파제 제체에 작용하는 파력을 정확히 결정하여야 한다. 지반의 지지력 검토를 위해서는 연직파력성분을, 제체의 활동을 검토하기 위해서는 수평파력성분을 결정하여야 한다. 또한, 임의 활동면에서의 활동안정성을 검토하기 위해서는 그 면에서의 간극수압정보가 요구된다.

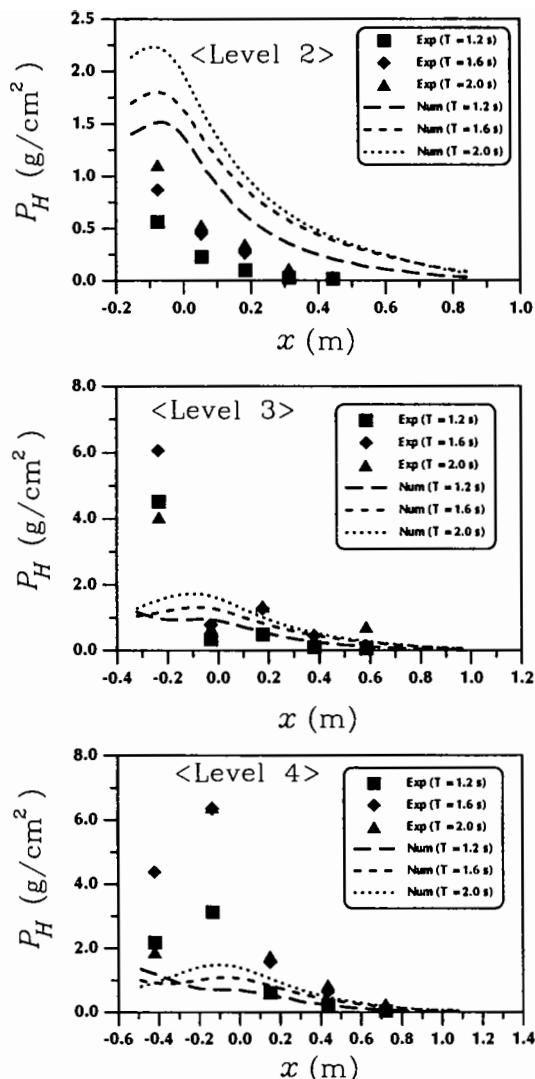
파력을 결정하기 위한 일차적인 시도로서 방파제 외곽 경계면을 불투과성으로 간주하고 경계면을 따른 동수압을 면적적분하여 수평 및 연직파력성분을 결정할 수 있다. 그러나, 일반적인 경사식 방파제가 공극매체로 이루어져 있음을 감안할 때, 제체 전체에 작용하는 파력은 경계면에서의 파압정보뿐만 아니라 공극매체에서의 마찰력과 그리고 파동에 의하여 내부쇄석에 작용하는 관성력을 포괄적으로 고려하여야 한다. 월파가 발생하지 않는 조건에서 방파제의 지반을 불투과로 가정하면 제체전체에 작용하는 파력은 전사면과 후사면에 작용하는 파압력, 제체내부에서 발생하는 마찰력과 관성력, 그리고 제체저면에 작용하는 간극수압력으로 구분할 수 있다.



<그림 4.1.1> 경사식 방파제의 설계절차.

경사제 제체에 작용하는 파력에 대한 정보가 실제 방파제 설계에서 매우 중요하게 요구되는 현실적 중요성에도 불구하고 파력결정을 위한 이론적 또는 실험적 기법이 가용하지 않다. 부연하면, 현재로서는 전사면 파압과 그리고 경사제 내부의 공극매체에서 발생하는 수평 및 연직 파력성분들을 구분하여 고려하지 않고 방파제 건현 (freeboard)에 Hiroi 식 등에 의한 수평 쇄파력만 작용한다고 보고 경사제의 안정성을 검토하고 있는 실정이다.

본 연구의 1차년도에서는 방파제 내·외부 파동장을 해석하여 수리학적 요소와 간극수압을 계산한 다음, 수리모형실험 결과와의 겹증을 시도하였다. 수리학적 요소의 예측성은 비교적 양호하나 간극수압은 계산치와 실험치의 차이가 상당 정도 발생하였다<그림 4.1.2>.



<그림 4.1.2> 간극수압의 계산치와 계측치의 비교 ($H = 0.12 \text{ m}$) ; 2000년도의 연구결과에서 발췌.

이는 방파제 전사면에서의 비선형 파압분포를 효과적으로 재현하지 못하는 본 선형파 수치모델의 한계로 인한 것이다. 전사면에 작용하는 파압은 전사면 파력뿐만 아니라 제체 내부에서의 마찰력과 관성력에도 영향을 미치게 된다.

전사면에서는 쇄파를 비롯한 비선형성이 매우 강한 파동장이 형성되며 현재로서는 전사면 파동장을 정확히 해석할 수 있는 이론적인 해석기법이 가용하지 않다. 따라서, 수리

모형실험을 통하여 자연적으로 구현되는 전사면 파압을 계측하여 제체내부의 파동장 해석에 입력하는 방법을 고려할 수 있다. 이와 같은 방법은 이미 Hannoura and McCorquodale (1986)이 시도한 바 있으며, 그 이후 Barends, et al. (1996)의 수치해석기법에 사용되기도 하였다.

2. 연구목적 및 내용

본 연구에서는 경사식 방파제의 토질역학적 안정성을 파악하기 위한 수단을 제공할 목적으로 기 1차년도에 수립한 수치해석기법을 개선 및 확장하여 방파제에 작용하는 파력을 결정하기 수치해석기법을 수립하기로 한다. 수치해석은 경계요소법을 이용하여 입력 조건으로서 방파제 전사면에서 발생하는 비선형 파압을 수리모형실험에 의하여 계측하여 사용하기로 한다. 세부 연구내용은 다음과 같다.

- 이차원 수리모형실험을 수행하여 전사면에서의 비선형 파압분포를 계측, 수치해석에 입력
- 경계요소법을 적용하여 경사제 내부의 파동장을 해석하기 위한 수치해석기법 수립
- 전사면 파압력, 제체내부의 간극수압, 내부 쇄석에 작용하는 마찰력 및 관성력의 결정기법 수립
- 간극수압의 계산치와 실험치와 비교, 검증.

제 2 절 제체 내부의 파동장 해석

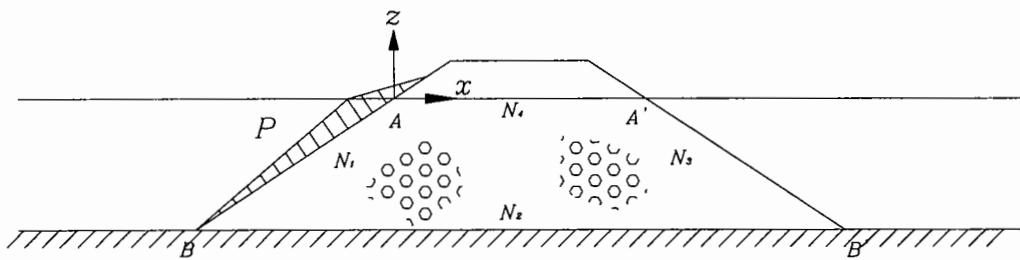
1. 개요

방파제 제체 내부의 파동장을 해석하기 위하여 경계요소법을 적용하기로 한다. 2000년도에 전개한 경계요소법은 방파제 내부뿐만 아니라 방파제의 앞쪽과 뒤쪽에도 영역을 설정하여 영역간 경계조건의 접속을 통하여 반사파와 투파파를 해석하였으나 여기에서는 제체내부의 간극수압 및 파력결정을 위하여 제체내부에만 경계요소법을 적용한다. 전사면 경계조건은 수리모형실험에 의하여 제공되는 파압정보를 이용하여 설정할 수 있으며, 후사면은 1차년도의 실험결과를 참조하여 동수압이 발생하지 않는 것으로 간주하여 경계조건을 설정한다.

2. 경계요소법의 적용

가. 유체영역의 설정

<그림 4.2.1>에서와 같이 유체영역은 경사식 방파제 제체 내부 ($ABB'A'$)에 설정된다. 여기에서, 경계면 AB 는 전사면 피복석의 두께를 제외한 내부 쇄석면으로 한다. 각 영역의 경계들에서 기호 N_i 는 i 번째 경계의 절점 수를 나타낸다. 절점의 번호부여는 반시계방향으로 취한다. 본 경계요소법의 영역에서 좌표계 (x, z) 의 원점은 전사면과 정지수면의 교점, 즉 A 점에 설정한다.



<그림 4.2.1> 유체영역의 설정.

나. 경사제 외부파동장

유체흐름이 비압축성, 비점성, 비회전성이라고 가정하면 경사제 외부에서의 속도포텐셜 ϕ_o 는 다음의 Laplace 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \phi_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_o}{\partial z^2} = 0 \quad (4.2.1)$$

시간과 공간의 함수인 속도포텐셜 $\phi_o(x, z ; t)$ 를 공간만의 함수인 간략화된 포텐셜 (reduced potential), $\phi_o(x, z)$ 를 이용하여 다시 쓰면,

$$\phi_o(x, z ; t) = -\frac{ig\zeta_o}{\sigma} \phi_o(x, z) e^{-i\sigma t} \quad (4.2.2)$$

와 같다. 여기서, g = 중력가속도, ζ_o = 입사파의 진폭, σ = 입사파의 각주파수, $i=\sqrt{-1}$ 이다. 식 (4.2.2)를 식 (4.2.1)에 대입하면 다음과 같은 $\phi_o(x, z)$ 에 대한 Laplace 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \phi_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_o}{\partial z^2} = 0 \quad (4.2.3)$$

(x, z) 방향의 평균유속성분 (u_o, w_o), 동수압 P , 그리고 수면변위 η 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_o = \frac{\partial \Phi_o}{\partial x} = -\frac{ig\zeta_o}{\sigma} \frac{\partial \phi_o}{\partial x} e^{-i\sigma t} \quad (4.2.4)$$

$$w_o = \frac{\partial \Phi_o}{\partial z} = -\frac{ig\zeta_o}{\sigma} \frac{\partial \phi_o}{\partial z} e^{-i\sigma t} \quad (4.2.5)$$

$$P_o = -\rho \frac{\partial \Phi_o}{\partial t} = \rho g \zeta_o \phi_o(x, z) e^{-i\sigma t} \quad (4.2.6)$$

$$\eta_o = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi_o}{\partial t} \Big|_{z=0} = \zeta_o \phi_o(x, 0) e^{-i\sigma t} \quad (4.2.7)$$

다. 경사제 내부파동장

영역내의 흐름을 비압축, 비점성, 비회전성이라고 가정하면 내부 파동장에 대한 지배방정식을 속도포텐셜 Φ 를 이용하여

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4.2.8)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 평균유속성분은

$$(u, w) = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}, \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \quad (4.2.9)$$

와 같다.

한편, 운동방정식은 선형파의 가정하에 이류항을 무시하면

$$\frac{C_m}{n} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{C_f}{n} u \quad (4.2.10)$$

$$\frac{C_m}{n} \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{C_f}{n} w - g \quad (4.2.11)$$

와 같다. 여기서, n = 공극률, P = 내부 동수압이다. C_m 은 관성력계수이며 공극입자에 대한 부가질량계수 C_a 를 이용하여

$$C_m = 1 + (1 - n)C_a \quad (4.2.12)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

식 (4.2.9)를 식 (4.2.10)과 (4.2.11)에 대입하여 합성하면 식 (4.2.13)와 같은 에너지 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{C_m}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + \frac{C_f}{n} \Phi + gz = 0 \quad (4.2.13)$$

제체내부에서의 수면변위 η 와 동수압 P 는 식 (4.2.13)을 이용하여

$$\eta = -\frac{1}{g} \left(\frac{C_m}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{C_f}{n} \Phi \right)_{z=0} \quad (4.2.14)$$

$$\frac{P}{\rho} = -\frac{C_m}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{C_f}{n} \Phi \quad (4.2.15)$$

와 같이 구할 수 있다.

식 (4.2.8)을 풀기 위한 자유수면에서의 운동학적 경계조건과 동력학적 경계조건은 각각

$$\frac{1}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{1}{g} \left(\frac{C_m}{n} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \frac{C_f}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) ; \quad z=0 \quad (4.2.16)$$

$$\frac{C_m}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{C_f}{n} \Phi + g\eta = 0 ; \quad z=0 \quad (4.2.17)$$

이며 이들 식을 결합하면

$$\frac{1}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial z} = - \frac{1}{g} \left(\frac{C_m}{n} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \frac{C_f}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) ; \quad z=0 \quad (4.2.18)$$

를 얻을 수 있다.

속도포텐셜 Φ 를 간략화된 포텐셜 (reduced potential) ϕ 를 이용하여

$$\Phi = - \frac{ig\zeta_0}{\sigma} \phi e^{-i\sigma t} \quad (4.2.19)$$

와 같이 나타내고, 이를 식 (4.2.8)에 대입하면 식 (4.2.20)과 같이 ϕ 에 대한 Laplace 방정식이 되며,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4.2.20)$$

유속성분 (u, w)은

$$u = - \frac{ig\zeta_0}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial x} e^{-i\sigma t} \quad (4.2.21)$$

$$w = - \frac{ig\zeta_0}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial z} e^{-i\sigma t} \quad (4.2.22)$$

와 같이 된다. 식 (4.2.19)를 다시 식 (4.2.14)와 식 (4.2.15)에 대입하면

$$\eta = C_2 \zeta_0 \phi e^{-i\sigma t} \quad (4.2.23)$$

$$\frac{P}{\rho} = g C_2 \zeta_o \phi e^{-i\sigma} \quad (4.2.24)$$

와 같다. 여기서, $C_1 = C_m + iC_f/\sigma$, $C_2 = C_1/n$ 이다. 또한, 식 (4.2.19)를 식 (4.2.18)에 대입하면 식 (4.2.25)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = C_1 \frac{\sigma^2}{g} \phi \quad (4.2.25)$$

공극내 흐름이 정상류일 경우에는 식 (4.2.10)은

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \rho \frac{C_f}{n} u \quad (4.2.26)$$

가 된다. 식 (4.2.26)의 우측 항을 Forchheimer 식 (McWhorter and Sunada, 1977)을 이용하여 나타내면

$$C_f u = n(\alpha u + \beta |u| u) \quad (4.2.27)$$

이다. 여기서, $\alpha = \nu/k_p$, $\beta = \sqrt{C_p/k_p}$, ν = 물의 동점성계수, k_p = 고유투수성 (Intrinsic permeability), C_p = 공극내 흐름의 특성에 관련된 계수 (이하 유로계수로 칭하며 통상 0.6의 값을 가짐)이다. Fair and Hatch (1933)는 고유투수성을 다음과 같이 제시하였다.

$$k_p = \frac{1}{A} \left\{ \frac{(1-n)^2}{n^3} \left(\frac{B}{D_m} \right)^2 \right\}^{-1} \quad (4.2.28)$$

여기서, $A \approx 5.0$, $B \approx 7.7$ 이다. 한편, Engelund (1953)는 식 (4.2.27)의 α , β 를 다음과 같이 제시하였다.

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-n)^3}{n^2} \frac{\nu}{D^2} \quad (4.2.29)$$

$$\beta = \beta_0 \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{D} \left(\frac{8}{3\pi} \right) \quad (4.2.30)$$

여기서, $\alpha_0 = 780 \sim 1500$ 또는 그 이상, $\beta_0 = 1.8 \sim 3.6$ 또는 그 이상이다.

식 (4.2.27)에서 C_f 는 다음과 같이 Lorentz 원리를 이용하여 구할 수 있다 (Sollitt and Cross, 1972; Sulisz, 1985).

$$C_f = \frac{n \int_R \left(\int_t^{t+T} (\alpha V^2 + \beta V^3) dt \right) dR}{\int_R \left(\int_t^{t+T} V^2 dt \right) dR} \quad (4.2.31)$$

여기서, R 은 공극률 n 을 갖는 영역을 의미한다. V 는 공극체 내부에서의 유속으로서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V = \sqrt{(\bar{u}_k)^2 + (\bar{w}_k)^2} \quad (4.2.32)$$

(\bar{u}_k, \bar{w}_k) 는 내부영역 임의점 k 에서의 유속성분 (u_k, w_k) 의 실수부분이며 (u_k, w_k) 는 식 (4.2.21)과 (4.2.22)를 이용하여

$$u_k = -i \frac{g\zeta_o}{\sigma} \frac{\partial \Phi}{\partial x} = -i \frac{g\zeta_o}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial x} e^{-i\sigma t} \quad (4.2.33)$$

$$w_k = -i \frac{g\zeta_o}{\sigma} \frac{\partial \Phi}{\partial z} = -i \frac{g\zeta_o}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial z} e^{-i\sigma t} \quad (4.2.34)$$

와 같이 결정할 수 있다. 점 k 에서의 $\partial\phi/\partial x, \partial\phi/\partial z$ 는 영역의 경계면에서의 ϕ 와 $\partial\phi/\partial n$ 을 이용하여 구할 수 있다.

식 (4.2.31)을 이용하여 C_f 를 구하기 위해서는 사전에 V 를 알고 있어야 하나 이 역시 본 수치해석을 통하여 구해지는 경계면에서의 ϕ 와 $\partial\phi/\partial n$ 의 값에 의존한다. 따라서, 반복계산이 요구되며 본 수치해석에서는 초기치로서 등가단면 (사다리꼴 단면과 동일면적인 직사각형 단면)에 대하여 Madsen and White (1976)의 장파이론을 적용하여 구한 마

찰계수를 이용하였다 (해양수산부, 2001).

라. 경계조건

(1) 전사면 경계조건 (AB)

경계 AB 에서의 경계조건을 정하기 위하여 수리모형실험에서 계측한 전사면 파압정보를 이용한다. 먼저, 전사면에 위치한 각 계측점에서의 계측시그널들을 분석하여 이들 시그널들의 진폭과 위상을 결정한다. 이들 값들을 경계요소법에서 설정한 전사면 절점의 각 위치에서의 값들로 보삽, 전환하면 j 번째 절점에서의 복소압력 p_j^o 를 다음과 같이 조합할 수 있다

$$p_j^o = A_j e^{i \beta_j} \quad (4.2.35)$$

여기서, A_j 와 β_j 는 각각 절점 j 에서의 파압의 진폭과 위상을 의미한다 ($i = \sqrt{-1}$). 결국, 실 계측시그널은

$$P_j^o = (p_j^o e^{-i\alpha}) \quad (4.2.36)$$

의 실수부분이 된다. 식 (4.2.6)과 식(4.2.36)을 비교하면, p_j^o 에 상응하는 속도포텐셜 ϕ_j^o 는

$$\phi_j^o = \frac{p_j^o}{\rho g \zeta_o} \quad (4.2.37)$$

이 됨을 알 수 있다.

내부파동장 전사면에서 압력의 연속성을 고려하면

$$\phi_j = \frac{\phi_j^o}{C_2} \quad (4.2.38)$$

(2) 후사면 경계조건 ($B'A'$)

2000년도 연구 (해양수산부, 2001)에서 방파제 내부의 간극수압은 후사면에 근접할수록 감소하였으며 후사면에서는 거의 동수압이 계측되지 않았다. 따라서, 후사면에서의 절점 j 에서의 압력조건을 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\phi_j = o \quad (4.2.39)$$

(3) 자유수면 경계조건 ($A'A$)

자유수면 경계조건은 식 (4.2.25)에서

$$\bar{\phi}_j = C_1 \frac{\sigma^2}{g} \phi_j \quad (4.2.40)$$

이다. 여기서, $\bar{\phi}_j$ 는 ϕ_j 의 외향 법선 미분치이다.

(4) 바닥경계조건 (BB')

방파제 지반을 불투과로 가정하면,

$$\bar{\phi}_j = o \quad (4.2.41)$$

마. 경계적분방정식의 구성

Green's Second Identity formula를 내부영역에 적용하면 식 (4.2.42)와 같다.

$$\frac{1}{2\pi} \alpha_i \phi_j = \sum_{j=1}^{N_T} G_{ij} \bar{\phi}_j - \sum_{j=1}^{N_T} H_{ij} \phi_j \quad (4.2.42)$$

여기서, i : field point, j : source point

$\alpha(i)$: i 절점에서의 내각 (일정요소 경계요소에서는 π 와 같다)

G_{ij} : Green 함수

H_{ij} : Green 함수의 외향법선미분치

N_T : 영역 경계면에서의 총 절점수.

식 (4.2.42)의 Green의 정리를 적용하여 절점 i 의 위치에 따라서 구분하여 쓰면 다음과 같다. 단, $K_j = K_{(j-1)} + N_j$

① $i : CD \quad 1 \leq i \leq K_1$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{K_1} \left(G_{ij} \bar{\phi}_j^{(1)} - \frac{1}{2\pi} \alpha_i \delta_{ij} \phi_j^{(1)} \right) - \sum_{j=K_1+1}^{K_2} H_{ij} \phi_j^{(2)} \\ & + \sum_{j=K_2+1}^{K_3} \left(G_{ij} \bar{\phi}_j^{(3)} - H_{ij} \phi_j^{(3)} \right) + \sum_{j=K_3+1}^{K_4} \left(C_1 \frac{\sigma^2}{g} G_{ij} - H_{ij} \right) \phi_j^{(4)} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (4.2.43)$$

② $i : DD' \quad K_1 + 1 \leq i \leq K_2$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{K_1} \left(G_{ij} \bar{\phi}_j^{(1)} - H_{ij} \phi_j^{(1)} \right) - \sum_{j=K_1+1}^{K_2} \frac{1}{2\pi} \alpha_i \delta_{ij} \phi_j^{(2)} \\ & + \sum_{j=K_2+1}^{K_3} \left(G_{ij} \bar{\phi}_j^{(3)} - H_{ij} \phi_j^{(3)} \right) + \sum_{j=K_3+1}^{K_4} \left(C_1 \frac{\sigma^2}{g} G_{ij} - H_{ij} \right) \phi_j^{(4)} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (4.2.44)$$

③ $i : D'C' \quad K_2 + 1 \leq i \leq K_3$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{K_1} \left(G_{ij} \bar{\phi}_j^{(1)} - H_{ij} \phi_j^{(1)} \right) - \sum_{j=K_1+1}^{K_2} H_{ij} \phi_j^{(2)} \\ & + \sum_{j=K_2+1}^{K_3} \left(-\frac{\alpha_i}{2\pi} \delta_{ij} \phi_j^{(3)} + G_{ij} \bar{\phi}_j^{(3)} \right) \\ & + \sum_{j=K_3+1}^{K_4} \left(C_1 \frac{\sigma^2}{g} G_{ij} - H_{ij} \right) \phi_j^{(4)} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (4.2.45)$$

④ $i : C'C \quad K_3 + 1 \leq i \leq K_4$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{K_1} \left(G_{ij} \bar{\phi}_j^{(1)} - H_{ij} \phi_j^{(1)} \right) - \sum_{j=K_1+1}^{K_2} \left(H_{ij} \phi_j^{(2)} \right) \\ & + \sum_{j=K_2+1}^{K_3} \left(G_{ij} \bar{\phi}_j^{(3)} - H_{ij} \phi_j^{(3)} \right) \end{aligned} \quad (4.2.46)$$

$$+ \sum_{j=K_3+1}^{K_4} \left(-\frac{\alpha_i}{2\pi} \delta_{ij} + C_1 \frac{\sigma^2}{g} G_{ij} \right) \phi_j^{(4)} = 0$$

여기서, 식 (4.2.38)에 의하여 $\phi_j^{(1)} = \phi_j^o / C_2$ 이며, 식 (4.2.39)에 의하여 $\phi_j^{(3)} = 0$ 이다.

바. 경계요소 행렬의 해석

절점 i 의 위치에 따라 구분한 식 (4.2.43) ~ (4.2.46)을 행렬 형태로 나타내면,

$$A_{ij} B_i = F_i \quad (4.2.47)$$

과 같다. 식 (4.2.47)을 풀어서 쓰면,

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1j} & \cdots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2j} & \cdots & A_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_{i1} & A_{i2} & \cdots & A_{ij} & \cdots & A_{iN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_N & A_{N2} & \cdots & A_{Nj} & \cdots & A_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_i \\ \vdots \\ B_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix} \quad (4.2.48)$$

과 같다. 미지수 행렬 $\{B\}$ 의 요소는 다음과 같다.

$$\bar{\phi}_j^{(1)} ; \quad j = 1 \sim K_1 \quad (N_1 \text{ 개})$$

$$\phi_j^{(2)} ; \quad j = K_1 + 1 \sim K_2 \quad (N_2 \text{ 개})$$

$$\bar{\phi}_j^{(3)} ; \quad j = K_2 + 1 \sim K_3 \quad (N_3 \text{ 개})$$

$$\phi_j^{(4)} ; \quad j = K_3 + 1 \sim K_4 \quad (N_4 \text{ 개})$$

상기 미지수의 총 개수는

$$N_T = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$$

이며, 방정식의 개수는

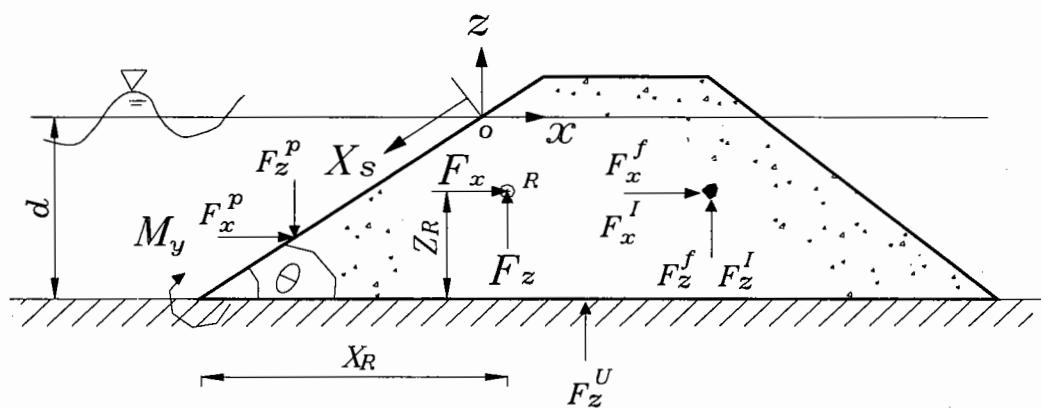
$$\overline{N_T} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$$

이다. 상기 미지수의 개수와 방정식의 개수가 동일하여 해를 구할 수 있다.

제 3 절 간극수압 및 파력결정

1. 개요

제 2 절에서 살펴보았듯이 내부파동장 해석을 통하여 제체내부에서의 간극수압과 유속장을 구할 수 있으며 이들 값과 전사면의 파압정보를 이용하여 제체에 작용하는 파력을 구할 수 있다. 방파제 지반을 불투과로 가정하면 파력은 전사면에서 작용하는 파력, 내부쇄석에 작용하는 마찰력과 관성력, 그리고 저면에서의 양압력에 의한 양력으로 구분된다. 이들 파력요소들은 <그림 4.3.1>에서 보이듯이 제체 전체에 작용하는 총 수평파력 F_x , 총 연직파력 F_z , 그리고 총 모멘트 M_y 를 발생시킨다. 그림에서 X_R 과 Z_R 은 각각 x 방향과 z 방향의 모멘트 팔길이 (Moment arm)이다. 본 장에서는 간극수압과 파력의 수평 및 연직성분을 결정하기 위한 방법에 대하여 기술하기로 한다.



<그림 4.3.1> 경사식 방파제에 작용하는 전파력.

2. 내부 간극수압의 결정

방파제 내부 임의점 q 에서의 간극수압을 결정하기 위해서는 먼저 q 점에서의 속도포텐셜 ϕ_q 를 구해야 하며 이는 영역 경계면에 위치한 경계요소 절점에서의 ϕ 와 $\bar{\phi}$ 를 이용하여 다음과 같이 결정된다.

$$\phi_q = \sum_{j=1}^{K_t} G_{q,j} \bar{\phi}_j - \sum_{j=1}^{K_t} H_{q,j} \phi_j \quad (4.3.1)$$

복소간극수압은 식 (4.2.24)에 근거하여

$$P_q = \rho g C_2 \zeta_o \phi_q e^{-i\sigma t} \quad (4.3.2)$$

와 같이 구할 수 있으며 발생간극수압은 이의 실수부분에 해당된다.

3 파력의 결정

가. 전사면 파력 및 모멘트

전사면에 발생하는 파력에 대해서는 수치해석에 입력된 계측파압을 면적적분하여 수평파력성분 F_x^p 와 연직파력성분 F_z^p 를 아래와 같이 결정할 수 있다.

$$F_x^p = \sum_{i=1}^{N_t} (p_i e^{-i\sigma t} l_i \sin \theta) \quad (4.3.3)$$

$$F_z^p = - \sum_{i=1}^{N_t} (p_i e^{-i\sigma t} l_i \cos \theta) \quad (4.3.4)$$

여기서, l_i = 경계면 AB 에서 i 번째 요소의 길이, θ = 전사면 경사각이다

각 파력성분에 의하여 발생하는 방파제 전지부 (Toe) 주위의 모멘트 성분 (M_x^p , M_z^p) 은 다음과 같이 결정된다.

$$M_x^p = \sum_{i=1}^{N_t} [(d+z_i) \operatorname{Re}(p_i e^{-i\sigma t} l_i \sin \theta)] \quad (4.3.5)$$

$$M_z^p = \sum_{i=1}^{N_t} [(x_i - x_t) \operatorname{Re}(p_i e^{-i\sigma t} l_i \cos \theta)] \quad (4.3.6)$$

여기서, x_t = 방파제 전지부의 x 좌표이다.

나. 제체내부 마찰력 및 모멘트

마찰력은 제체내부의 입자주변의 흐름 입자에 가하는 항력이며 x, z 방향의 마찰력 성분은 식 (4.2.10)과 (4.2.11)을 참조하여 다음과 같이 면적적분 형태로 결정할 수 있다.

$$F_x^f = \rho \int_A \frac{C_f}{n} u \, dA \quad (4.3.7)$$

$$F_z^f = \rho \int_A \frac{C_f}{n} w \, dA \quad (4.3.8)$$

여기서, A 는 제체 단면적을 의미한다. 방파제 단면적을 N_d 개의 소영역 (각 면적 A_q) 으로 구분하고 식 (4.2.33)과 (4.2.34)를 참조하여 각각에 작용하는 마찰력을 합산하면,

$$F_x^f = - \sum_{q=1}^{N_d} \left[\frac{\rho g \zeta_o C_f i}{n \sigma} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_q A_q e^{-i\sigma t} \right] \quad (4.3.9)$$

$$F_z^f = - \sum_{q=1}^{N_d} \left[\frac{\rho g \zeta_o C_f i}{n \sigma} \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_q A_q e^{-i\sigma t} \right] \quad (4.3.10)$$

수평 및 연직 마찰력에 의하여 전지부 (toe) 주위에 발생하는 모멘트는 다음과 같다.

$$M_x^f = - \sum_{q=1}^{N_d} \left[(d+z_q) \operatorname{Re} \left\{ \frac{\rho g \zeta_o C_f i}{n \sigma} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_q A_q e^{-i\sigma t} \right\} \right] \quad (4.3.11)$$

$$M_z^f = \sum_{q=1}^{N_d} \left[(x_q - x_t) \operatorname{Re} \left\{ \frac{\rho g \zeta_o C_f i}{n \sigma} \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_q A_q e^{-i\sigma t} \right\} \right] \quad (4.3.12)$$

다. 제체내부 관성력 및 모멘트

관성력은 제체내부의 파동장에 의하여 내부쇄석에 작용하는 힘으로서 수평 및 연직성분을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x^I &= \rho \int_A \frac{1-n}{n} (1+C_a) \frac{\partial u}{\partial t} dA \\ &= - \sum_{q=1}^{N_s} \left[\rho \frac{1-n}{n} (1+C_a) g \zeta_o \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_q A_q e^{-i\sigma t} \right] \end{aligned} \quad (4.3.13)$$

$$\begin{aligned} F_z^I &= \rho \int_A \frac{1-n}{n} (1+C_a) \frac{\partial w}{\partial t} dA \\ &= - \sum_{q=1}^{N_s} \left[\rho \frac{1-n}{n} (1+C_a) g \zeta_o \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_q A_q e^{-i\sigma t} \right] \end{aligned} \quad (4.3.14)$$

관성력 성분에 의하여 발생하는 전지부 주위의 모멘트 성분은 다음과 같다.

$$M_x^I = - \sum_{q=1}^{N_s} (d+z_q) Re \left[\left\{ \rho \frac{1-n}{n} (1+C_a) g \zeta_o \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_q A_q \right\} e^{-i\sigma t} \right] \quad (4.3.15)$$

$$M_z^I = \sum_{q=1}^{N_s} (x_q - x_i) Re \left[\left\{ \rho \frac{1-n}{n} (1+C_a) g \zeta_o \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_q A_q \right\} e^{-i\sigma t} \right] \quad (4.3.16)$$

여기서, C_a = 부가질량계수이다.

라. 방파제 저면 양력 및 모멘트

방파제 저면에 작용하는 양력 F_z^U 은 저면에서 발생하는 양압력을 합산하면 된다.

$$F_z^U = \sum_{i=N_1+1}^{N_2} (\rho g C_2 \zeta_o l_i \phi_i) e^{-i\sigma t} \quad (4.3.17)$$

$$M_z^U = - \sum_{i=N_1+1}^{N_2} (x_i - x_i) Re \left[(\rho g C_2 \zeta_o l_i \phi_i) e^{-i\sigma t} \right] \quad (4.3.18)$$

마. 총 파력 및 모멘트 arm

방파제 제체에 작용하는 총 파력은 전사면 파력, 내부 마찰력과 관성력, 그리고 저면에서의 양력을 고려하여 다음과 같이 결정된다.

$$F_x = F_x^b + F_x^f + F_x^I \quad (4.3.19)$$

$$F_z = F_z^b + F_z^f + F_z^I + F_z^U \quad (4.3.20)$$

$$M_x = M^{px} + M^{fx} + M^{lx} \quad (4.3.21)$$

$$M_z = M^{pz} + M^{ fz} + M^{lz} + M^{uz} \quad (4.3.22)$$

모멘트 팔 길이 (X_R , Y_R)는 총 성분파력과 각 모멘트요소의 합을 이용하여 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$X_R = \frac{M_z}{F_z} \quad (4.3.23)$$

$$Z_R = \frac{M_x}{F_x} \quad (4.3.24)$$

제 4 절 수리실험

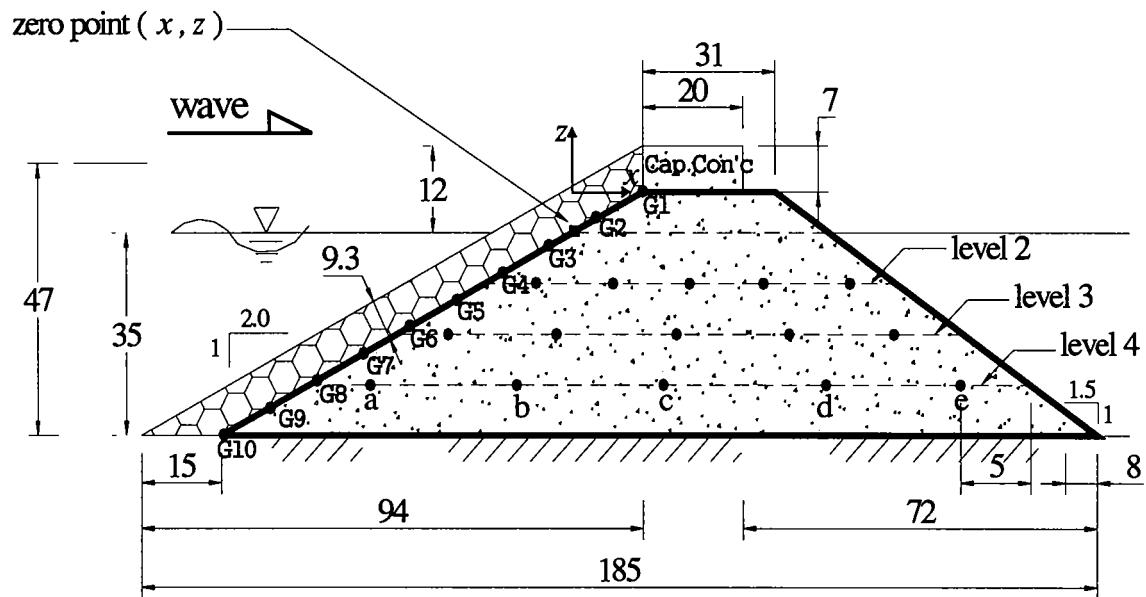
1. 개요

제 2절과 3절에서 기술하였던 수치해석기법의 적용성을 검증하기 위하여 수리실험을 수행하였다. 실험은 방파제 전사면에서의 파압을 계측하는 것으로 국한하였으며, 2000년도의 연구 (해양수산부, 2001)의 수리실험에서 계측하였던 반사율, 전달율, 월파량, 그리고 간극수압 등은 제외하였다. 본 연구의 목적중 일부가 제체내 간극수압에 대한 수치모델의 예측성을 제고하는데 있기 때문에 전사면에서의 계측파압을 수치해석에 입력하여 간극수압을 계산한 다음, 이 결과를 기 획득한 간극수압의 계측자료와 비교하는 것으로 하였다.

수치모델에서 간극수압 예측의 정확성은 파력계산에서 마찰력, 관성력, 그리고 양력 결정의 정확성으로 연결되는 것이며 간극수압에 대한 검증은 부분적이나마 본 수치해석에서 전개한 파력결정방법의 정확성을 검증하는 것이라고 볼 수 있다. 그러나, 파력 계측을 통한 파력의 직접적인 검증은 본 연구에서 시도하지 않았다.

2. 모형 방파제

<그림 4.4.1>은 모형방파제의 형상을 보여준다. 모형방파제는 2000년도 연구에서 사용하였던 방파제와 동일한 것이며 전면경사가 1 : 2, 후면경사가 1 : 1.5인 경사식 방파제이다.



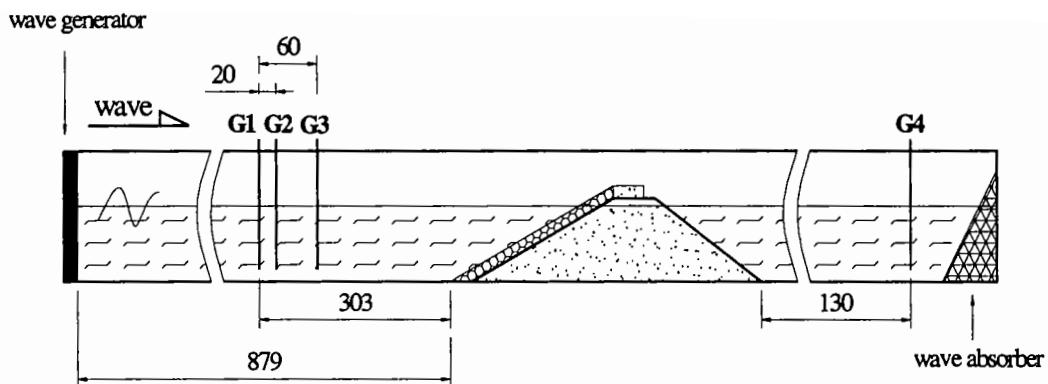
<그림 4.4.1> 모형 방파제와 파암계의 위치 (단위 : cm).

수심은 0.35 m로서 원형 방파제 대비 약 1/40의 축척을 갖는 모형이며 전사면은 개별 중량이 100 g인 TTP 모형을 2층 난적 (두께 9.3 cm)으로 피복하였다. 수치해석 결과와의 겸증의 편의를 위하여 중간 피복석은 제외하였으며 내부 쇄석은 평균입경 1.26 cm, 공극률이 0.498인 쇄석으로 하였다.

3. 실험장치 및 계측

가. 조파수조

실험 장치로서는 건국대학교 토목공학과에 설치되어 있는 이차원 조파수조 (18 m L x 0.4 m W x 0.6 m H)를 이용하였다 <그림 4.4.2>.



<그림 4.4.2> 조파수조내 모형방파제와 파고계의 설치.

나. 전사면 파압계측

전사면 파압은 전사면 피복층 바로 밑에 파압계를 설치하여 계측하였다. 전사면의 길이가 89.4 cm이기 때문에 파압계 간격을 9 cm 간격으로 총 10점 (Fig. 4.1에서 $G_1 \sim G_{10}$)을 계측하였다. 파압계는 용량이 100 g/cm^2 인 strain gauge 타입을 사용하였다. 실험지속시간은 모든 실험조건에서 110초로 하였으며 계측 높낮이은 공히 40 Hz로 하였다. 각 파압계의 위치는 <표 4.4.1>과 같다.

<표 4.4.1> 압력센서의 좌표 (단위 : cm)

파압계 번호	좌 표
G_1	(10.0, 5.0)
G_2	(1.1, 0.5)
G_3	(-7.9, -3.9)
G_4	(-16.8, -8.4)
G_5	(-25.8, -12.9)
G_6	(-34.7, -17.4)
G_7	(-43.6, -21.8)
G_8	(-52.6, -26.3)
G_9	(-61.5, -30.8)
G_{10}	(-70.0, -35.0)

다. 간극수압 계측

<그림 4.4.1>에 간극수압의 계측점들이 도시되어 있다. 간극수압계는 그림에서 보이는 바와 같이 모형 방파제 내부에 3층 (level 2, level 3, level 4)으로 각각 5개 (센서 a, b, c, d, e)를 배치하였다. <표 4.4.2>는 수치해석의 좌표계의 원점 (<그림 4.2.1>, <그림 4.4.1> 참조)을 기준하여 각 센서의 좌표를 보여준다.

<표 4.4.2> 간극수압계의 좌표 (단위 : cm)

구 분	a	b	c	d	e
level 2	(-7.7, -8.7)	(5.3, -8.7)	(18.3, -8.7)	(31.3, -8.7)	(44.3, -8.7)
level 3	(-23.5, -17.4)	(-3.0, -17.4)	(17.5, -17.4)	(38.0, -17.4)	(58.5, -17.4)
level 4	(-42.0, -26.1)	(-13.5, -26.1)	(15.0, -26.1)	(43.5, -26.1)	(72.0, -26.1)

4. 실험조건

실험에 이용된 파는 모두 규칙파이며 파고 H 를 8 cm, 12 cm 그리고 16 cm의 세 가지로 변화시켰으며 파 주기는 $H = 8$ cm에 대해서는 주기가 1.2초와 1.6초, $H = 12$ cm에 대해서는 1.6초, 그리고 $H = 16$ cm에 대해서는 1.6초로 총 4조건을 시도하였다. 실험에 사용된 수심은 공히 0.35 m이다. 각 실험파의 상세 제원은 <표 4.4.3>과 같다.

<표 4.4.3> 실험파 조건

Test no.	주기	수심	각주파수	파수	파고	등가심 해 파고	파장	심해파장	파속	군속도
	T (s)	d (m)	σ (rad/s)	k (rad/m)	H (m)	H_o (m)	L (m)	L_o (m)	C (m/s)	C_g (m/s)
1	1.2	0.35	5.236	3.377	0.08	0.088	1.861	2.247	1.551	1.123
2	1.6	0.35	3.927	2.335	0.08	0.085	2.691	3.995	1.682	1.398
3	1.6	0.35	3.927	2.335	0.12	0.127	2.691	3.995	1.682	1.398
4	1.6	0.35	3.927	2.335	0.16	0.169	2.691	3.995	1.682	1.398

5. 실험자료의 분석

전사면 계측파압의 분석구간은 원칙적으로 정상적인 진행파가 파고계 센서를 최초 통과한 이후 조파기 재반사파의 영향이 도달하기까지의 구간(군속도 개념을 이용하여 계산)으로 하되, 정확한 구간은 계측시그널을 관찰하여 정하였다.

분석결과는 수치모델의 입력자료로서 이용되는 파압 시그널의 진폭과 위상이다. 진폭은 zero-up-crossing 법을 이용하여 계산하였으며, 위상은 동일 실험조건에서 전사면 파압시 그널을 비교하여 전지부 (Toe)에서의 시그널을 기준으로 정하였다. 양단이 막혀있는 이차원 수조에서는 실험 중 국소적인 수위변화가 발생하여 본래의 파압 시그널이 변형되기 때문에 2000년도 실험에서처럼 간극수압고를 구하기 위한 zero-up-crossing 법의 적용에 앞서 원 계측 데이터에 하이패스 필터 (high-pass filter)를 적용하여 장주기 성분을 제거하였다.

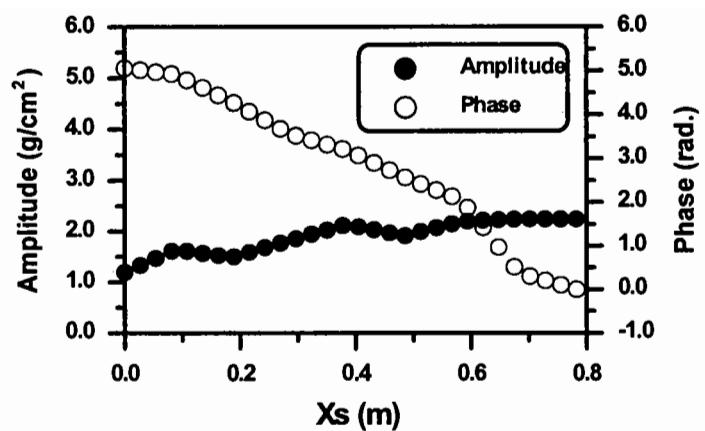
제 5 절 결과분석 및 토의

1. 실험결과

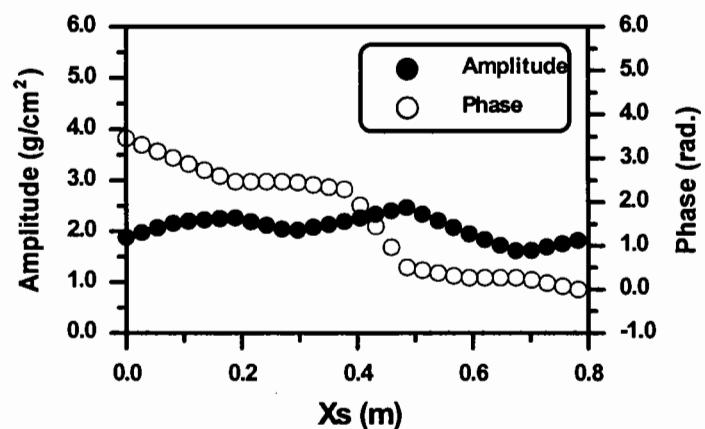
원 시그널의 분석구간에 대하여 High pass filter를 적용한 결과를 부록3에 수록하였다. <표 4.5.1>은 각 파악 시그널에서 획득한 진폭과 위상을 보여주며, 정수면으로 부터의 사면 거리 X_s (<그림 4.3.1> 참조)에 따른 파악의 진폭과 위상의 변화를 <그림 4.5.1> ~ <그림 4.5.4>에 도시하였다. 여기서, 위상은 방파제 전지부 (toe)에서의 파악시그널을 기준으로 한 것이다.

<표 4.5.1> 전사면 파악의 진폭과 위상

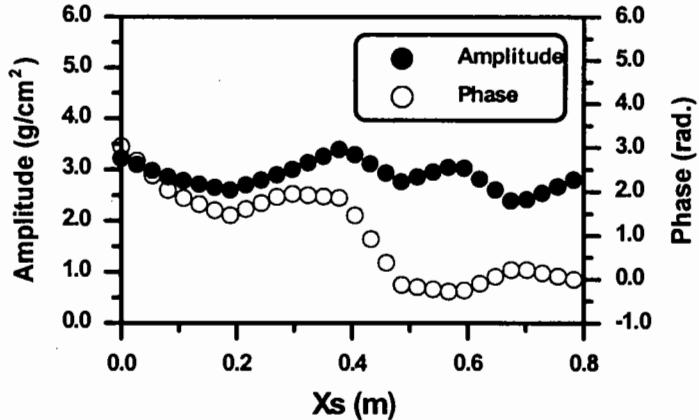
Sensor 위치	Test 1		Test 2		Test 3		Test4	
	진폭 (cm)	위상 (rad.)	진폭 (cm)	위상 (rad.)	진폭 (cm)	위상 (rad.)	진폭 (cm)	위상 (rad.)
1	0.13		0.28		2.02		2.01	
2	1.13	5.08	1.84	3.53	3.27	3.18	2.83	2.63
3	1.64	4.92	2.18	2.98	2.83	1.96	2.83	1.45
4	1.49	4.29	2.27	2.47	2.59	1.45	2.82	0.98
5	1.82	3.56	2.0	2.47	2.95	1.96	3.52	0.51
6	2.14	3.19	2.21	2.28	3.42	1.85	3.79	0.27
7	1.91	2.57	2.47	0.51	2.76	-0.12	4.26	-0.47
8	2.19	2.04	1.99	0.27	3.10	-0.31	4.41	-0.71
9	2.24	0.37	1.58	0.27	2.33	0.27	3.50	0.35
10	2.24	0.0	1.82	0.0	2.80	0.0	4.31	0.0



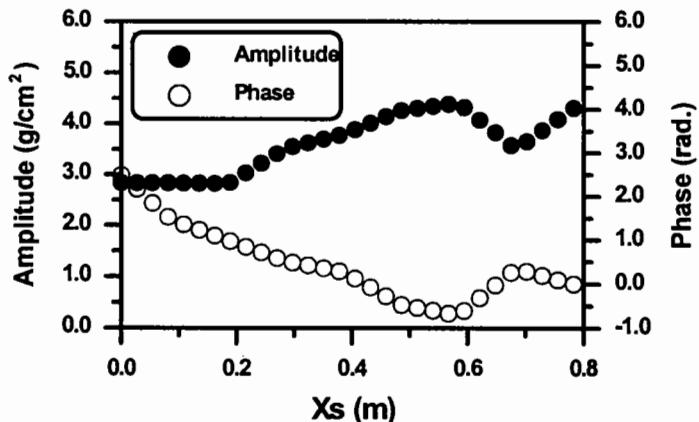
<그림 4.5.1> 전사면 파압의 진폭과 위상의 위치별 변화 (Test 1).



<그림 4.5.2> 전사면 파압의 진폭과 위상의 위치별 변화 (Test 2).



<그림 4.5.3> 전사면 파압의 진폭과 위상의 위치별 변화 (Test 3).



<그림 4.5.4> 전사면 파압의 진폭과 위상의 위치별 변화 (Test 4).

상기 그림들을 볼 때, 전사면을 따라 파압의 진폭과 위상이 공히 크게 변함을 알 수 있다. 특히, 전사면 파랑의 비선형 변형에 의하여 진폭이 반드시 정수면에서 가장 크게 나타나는 것이 아님을 알 수 있다.

2. 수치해석결과의 검증

수치해석은 수리실험과 동일한 조건에 대하여 수행하였으며 (<표 4.4.3> 참조), <표 4.5.1>의 전사면 파압자료를 입력하여 수행하였다. <표 4.5.2>는 수치해석에 이용된 파라미터들의 값을 보여준다. 파라미터 값들은 일반적인 값들로서 본 연구에서는 수치해석 결과와 수리실험결과의 정량

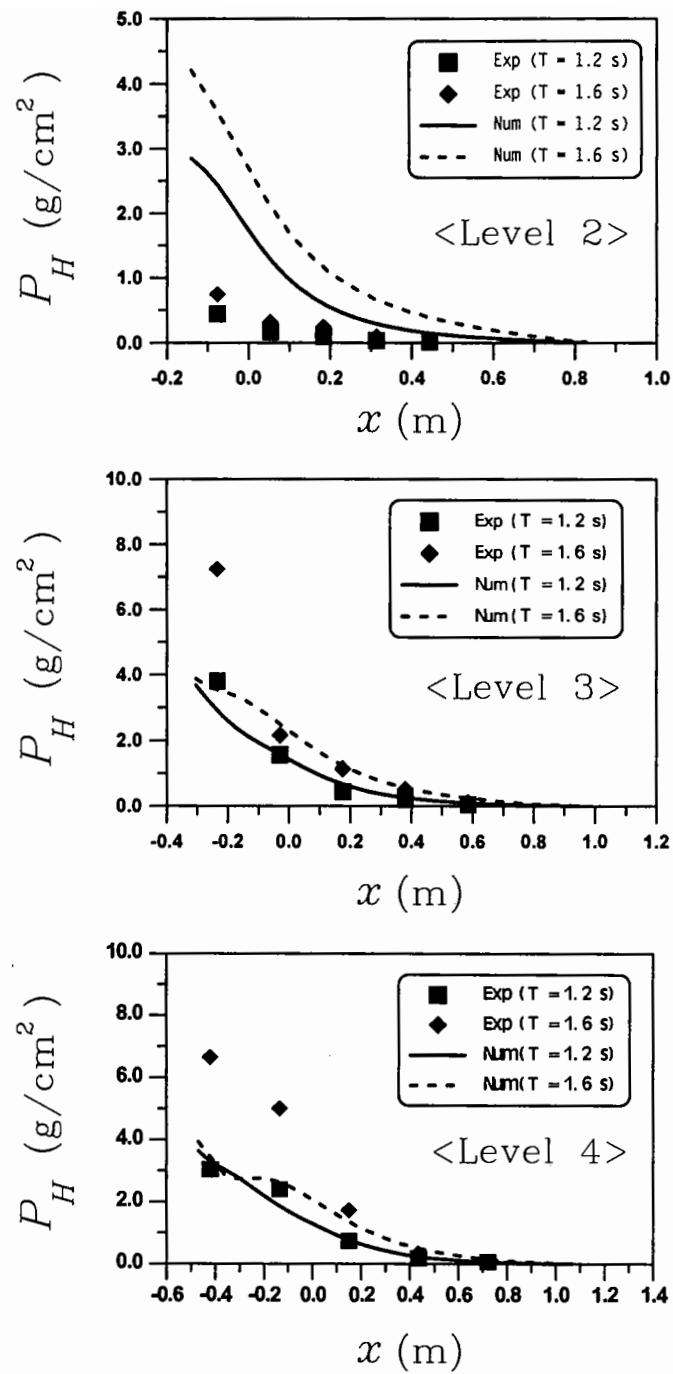
적 일치를 기도하기 위한 파라미터 값들의 조정은 일체 시도되지 않았다. 영역내의 흐름 마찰계수는 Engelund (1953)의 식 (4.2.29), (4.2.30)을 이용하였다.

수치해석에 의하여 간극수압고 P_H (수압변화 진폭의 2배)를 계산하여 2000년도 실험에서 획득한 실험결과와 함께 <그림 4.5.5> ~ <그림 4.5.7>에 도시하였다. 전반적으로 계산치와 실험치의 일치정도가 2000년도의 결과 (<그림 4.1.2> 참조)보다 월등 향상되었다. 그러나, 정수면 근방에 위치한 Level 2에서는 모든 실험조건에서 계산치가 실험치를 크게 상회함을 알 수 있다. 이는 수면의 위치를 정수면으로 대치하는 선형파 이론의 한계로 인하여 정수면 부근에서의 이론치가 다소 과장되어 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

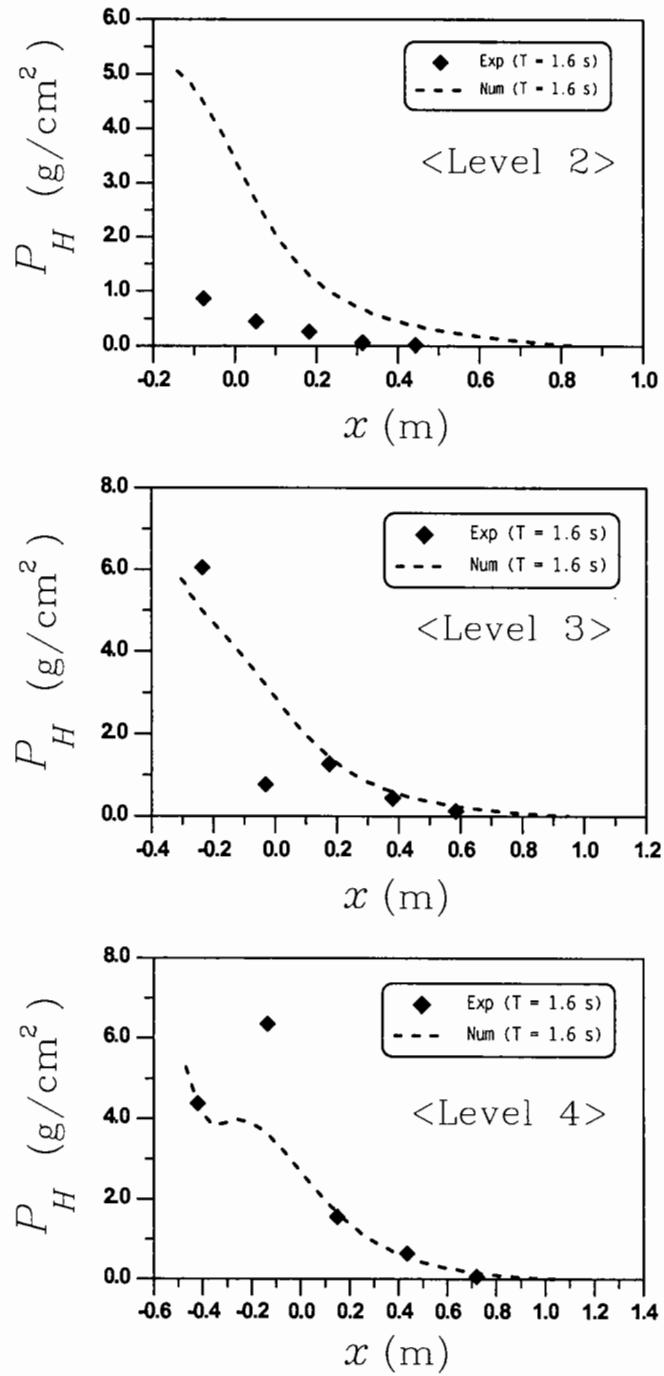
상기 그림들에서 파압고가 정수면 부근보다는 정수면과 바닥의 중간부위에서 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Oumeraci and Partenscky (1990)의 실험결과에서도 나타난 바 있다. 정수면하 제체 내부에서의 간극수압고에 대한 등압선도를 <그림 4.5.8> ~ <그림 4.5.11>에 제시하였다.

<표 4.5.2> 수치해석의 입력조건

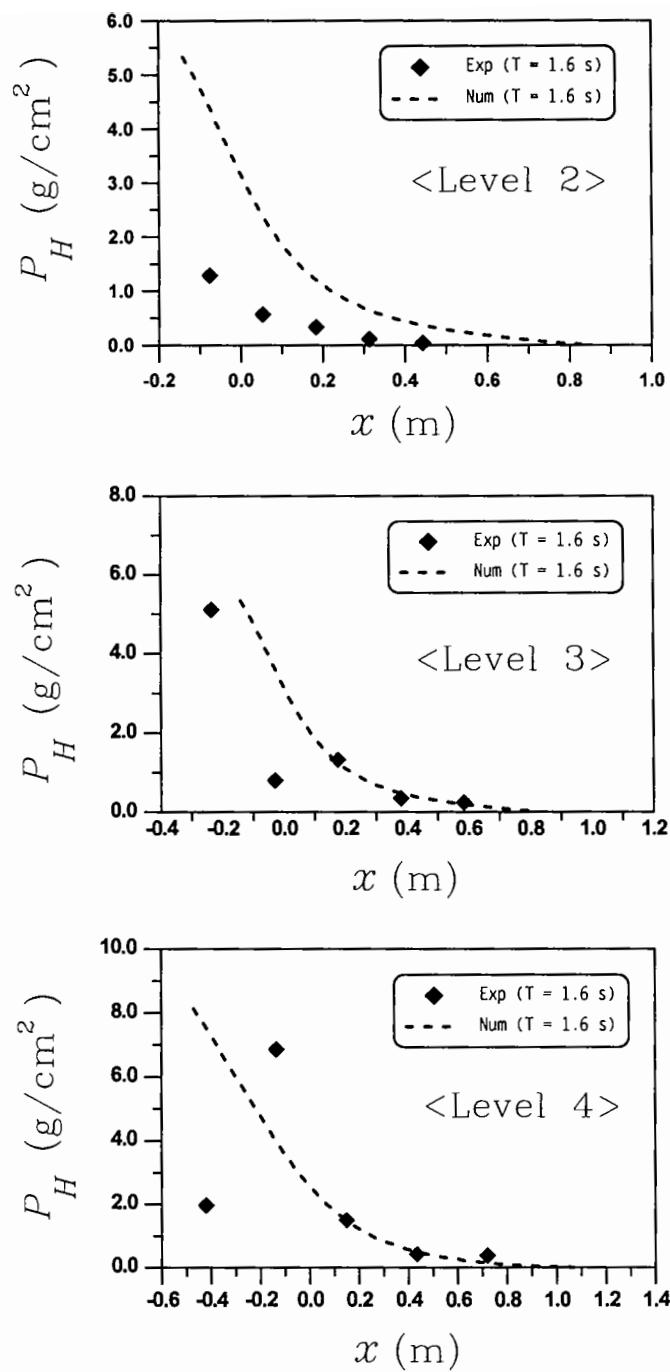
사양	기호	제원
영역 II의 수면길이	l	1 m
영역 IV의 수면길이	l'	1 m
경계면에서의 요소 수	$N_{21} \sim N_{44}$	20
영역 I, V에서의 소멸파 성분의 개수		10 개
영역 III 공극률	n	0.498
공극매체의 부가질량계수	C_a	0
Engelund (1953)의 파라미터	α_o	1000.
	β_o	2.5
Fair and Hatch (1933)의 파라미터	A	5.0
	B	7.7
	C_p	0.6
피복석 (TTP)의 평균입경	D_s	3.35 cm
Ahrens and Heimbaugh (1988)의 쳐오름 파라미터	a	1.01
	b	0.91
Lorentz 적분을 위한 제체의 분할 수		50 개



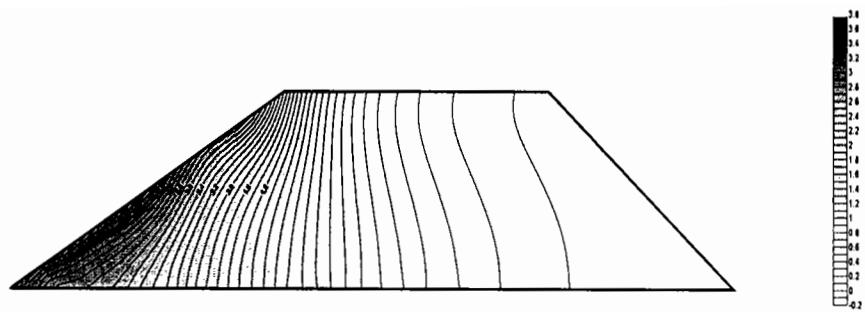
<그림 4.5.5> Level 2, 3, 4에서 간극수압고의 위치별 변화 ($H = 0.08 \text{ m}$, $T = 1.2\text{초}, 1.6\text{초}$).



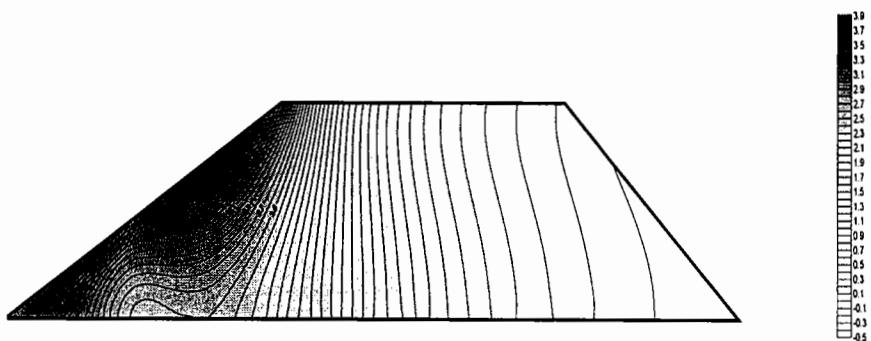
<그림 4.5.6> Level 2, 3, 4에서 간극수압고의 위치별 변화 ($H = 0.12 \text{ m}$, $T = 1.6 \text{ 초}$).



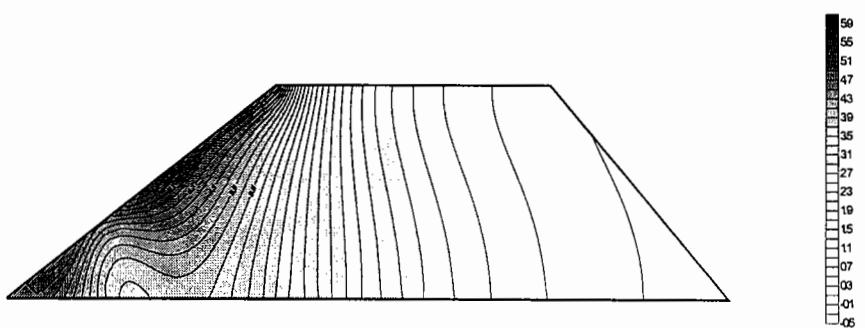
<그림 4.5.7> Level 2, 3, 4에서 간극수압고의 위치별 변화 ($H = 0.16$ m, $T = 1.6$ 초).



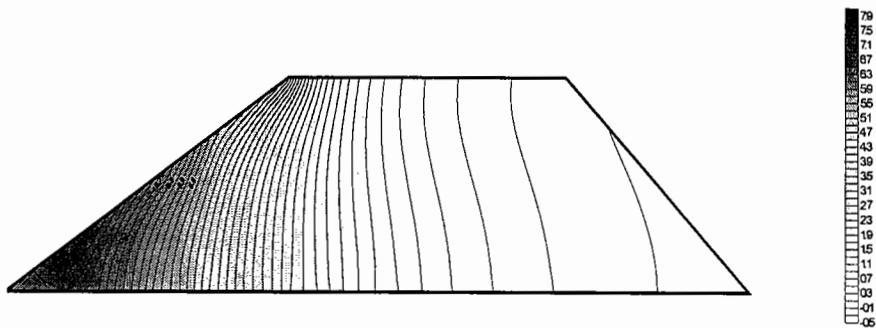
<그림 4.5.8> 간극수압의 등압선도 (Test 1).



<그림 4.5.9> 간극수압의 등압선도 (Test 2).



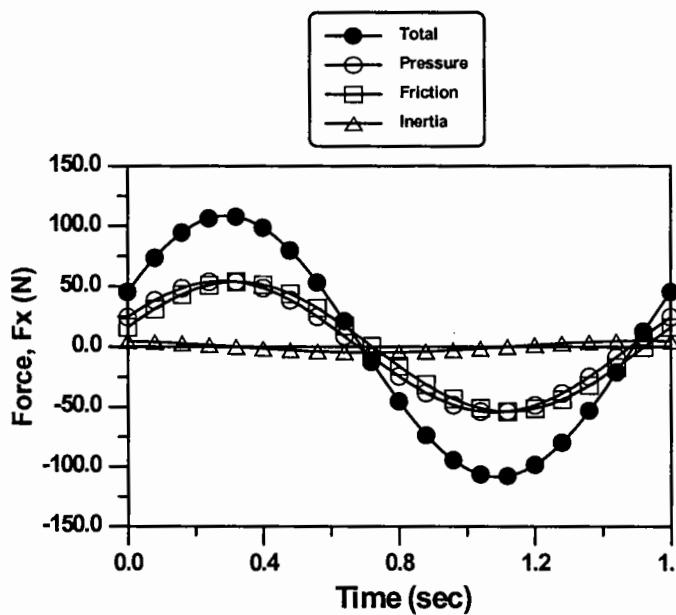
<그림 4.5.10> 간극수압의 등압선도 (Test 3).



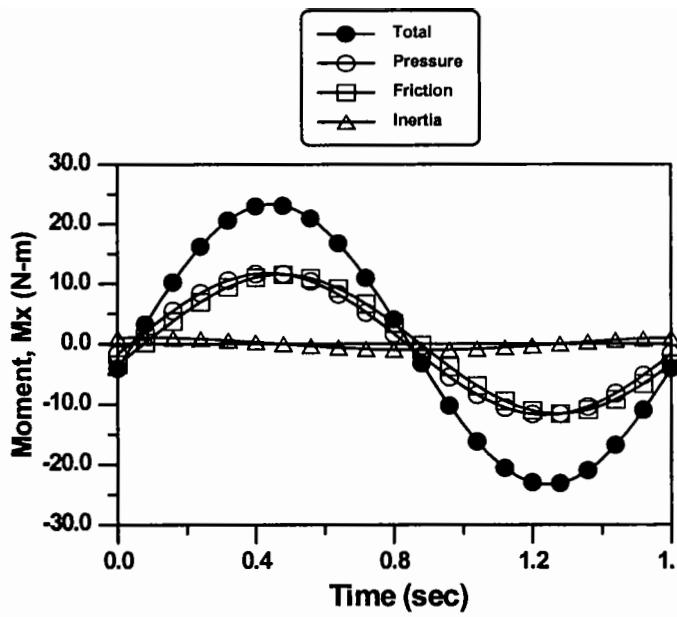
<그림 4.5.11> 간극수압의 등압선도 (Test 4).

3. 파력 및 모멘트 결정

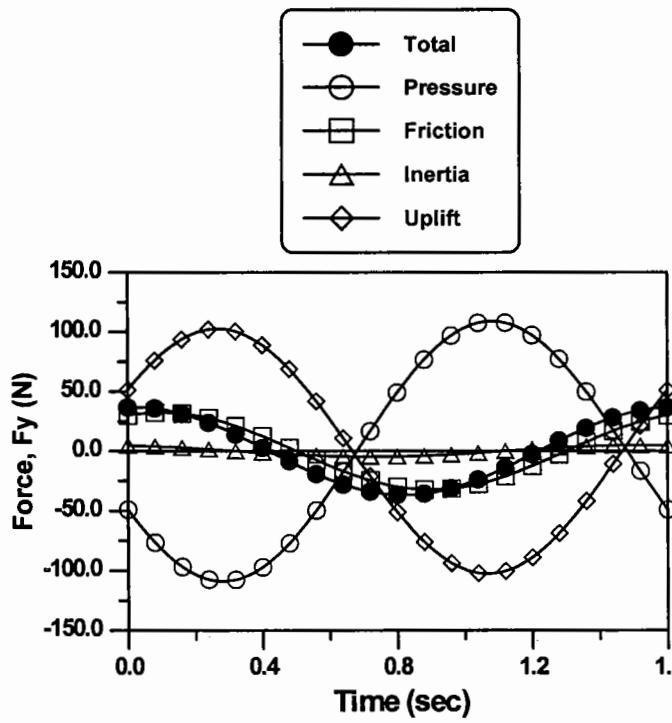
제 3 절에서 기술한 수평파력성분 및 모멘트, 연직파력성분 및 모멘트를 계산하였으며 실험조건 Test 3 ($H = 0.12\text{m}$, $T = 1.6\text{ s}$)에 대하여 1 주기 내에서의 파력 및 모멘트의 시간변화를 <그림 4.5.12> ~ <그림 4.5.15>에 도시하였다. 수평파력에서 전사면 압력에 의한 파력과 내부마찰력이 거의 동일한 위상을 가지며 유사한 값들을 보임을 알 수 있다. 연직파력에서는 전사면 파력과 바닥에서의 양력이 거의 동일한 절대 크기를 가지나 약 180도 정도의 위상차가 발생하기 때문에 이들 값이 거의 상쇄되어 연직파력성분이 거의 내부마찰력에 의한 결정된다. 제체내부에서의 관성력은 연직파력과 수평파력에서 공히 그 크기가 매우 미미한 것으로 나타났다.



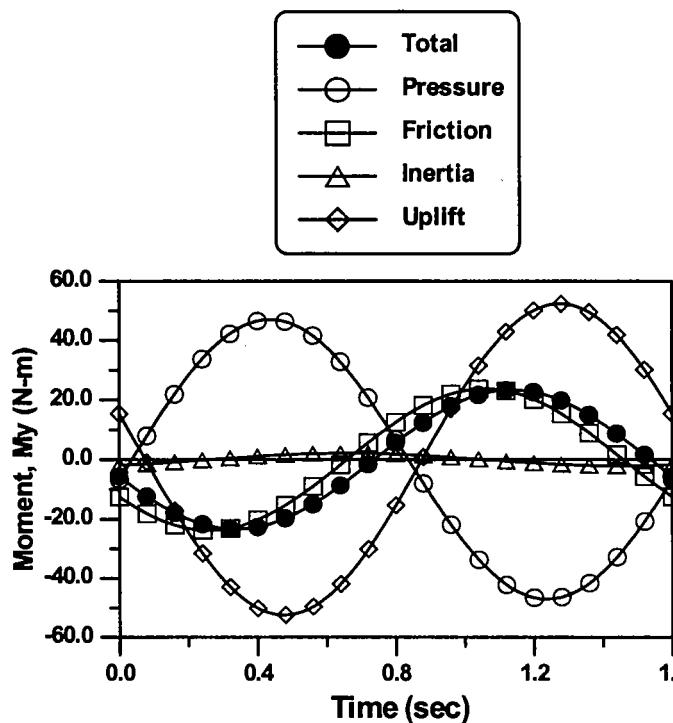
<그림 4.5.12> 수평파력성분의 시간변화 ($H = 0.12\text{ m}$, $T = 1.6\text{초}$).



<그림 4.5.13> 방파제 전지부에 대한
수평파력모멘트의 시간변화 ($H = 0.12$ m, $T = 1.6$ 초).



<그림 4.5.14> 연직파력성분의 시간변화 ($H = 0.12$ m, $T = 1.6$ 초).



<그림 4.5.15> 방파제 전지부에 대한
연직파력모멘트의 시간변화 ($H = 0.12$ m, $T = 1.6$ 초).

제 6 절 결론 및 제안

경사식 방파제의 활동안정성 및 지지력등의 검토에 필요한 방파제 제체내부에서의 간극수압과 파력을 결정하기 위한 수치모델을 수립하고 수리모형실험 자료를 이용하여 그 적용성을 검증하였다. 수치모델은 기본적으로 2000년도에 수립한 모델을 보완, 발전시킨 것으로서 본 개선 모델은 방파제의 외해측 사면에서의 파압변화를 수리실험을 통하여 직접 계측하여 수치모델에 입력하는 것을 주요 특징으로 하고 있다. 수치해석기법은 경계요소법을 이용하였으며 그 출력은 제체 경계면 및 내부에서의 속도포텐셜과 이의 공간미분치 (유속성분)이다. 비선형 마찰항을 선형화하기 위하여 여기에서는 내부 마찰계수를 반복계산을 통하여 결정하였다. 간극수압 및 파력은 결정된 포텐셜 및 유속성분들을 이용하여 계산하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 세부결론은 다음과 같다.

- 전사면 계측파압시그널을 분석하여 경사면에 따른 파압의 진폭과 위상변화를 도출하였다. 진폭과 위상은 상당정도로 변화하였으며 실험조건에 따라서는 정수면 보다는 그 이하에서 최대 파압고가 형성되었다. 이는 전사면에서 쇄파를 비롯하여 매우 복잡한 비선형 파랑변형이 발생하기 때문이다. 위상변화도 파 진행방향으로 볼 때 측점간 위상이 전도되는 경우가 발생하였다.
- 수치모델의 적용에 의하여 계산된 간극수압고를 수리모형실험의 결과와 비교한 결과, 이들간의 정량적 일치정도는 비교적 양호하였다. 따라서, 전반적으로 볼 때, 본 수치모델에 의하여 계산된 내부파동장과 제체파력 및 모멘트가 유효한 것으로 판단된다. 모든 실험조건에서 정수면 부근에서의 계산치가 실험치를 다소 상회하는 점이 발견되나 전반적으로 그 값들이 제체 중반부에서의 값들에 비하여 크지 않으며 더욱 이 방파제의 보수적인 설계관점에서 볼 때 계산치의 상회는 무방한 것으로 판단된다.
- 파력과 모멘트를 계산한 결과, 수평파력에서는 전사면 파압에 의한 파력과 내부마찰력이 거의 동일한 크기와 위상변화를 보이는 반면, 연직파력에서는 이들 파력이 절대 크기는 비슷하나 위상차이로 인하여 거의 상쇄되어 연직파력이 거의 내부마찰력에 의하여 결정되는 것으로 나타났다. 내부에서의 관성력은 수평 및 연직파력에서 차지하는 비중이 매우 미미한 것으로 나타났다.

본 연구에서 수립한 수치모델의 유효성은 입력자료로 활용된 전사면 파압정보 (외부피복층 하)와 그리고 계산된 내부파동장의 정확성 여하에 달려 있다. 본 연구에서는 내부파동장의 정확성 제고에 역점을 두었기 때문에 전사면 파압정보는 수리모형실험에 의하여 계측된 실험치를 이용하였다. 그러나, 실험을 배제하고 수치해석으로만 내부 파동장 및 파력 (특히, 전사면 파력)을 결정하기 위해서는 전사면 파압에 대한 체계적인 사전 정보가 확보되어 있어야 한다. 이를 위하여 다양한 입사파 및 방파제 단면조건에 대한 수리실험연구가 수행되어야 될 것으로 판단된다.

내부 파동장의 정확성을 검토하기 위해서 본 연구에서는 간극수압의 실험치를 이용하였다. 간극수압 뿐만 아니라, 전사면 파력을 제외한 나머지 파력성분들, 즉, 공극매체에서의 마찰력, 관성력, 그리고 지반에서의 양력 등은 모두 내부 파동장의 해석결과를 이용하여 결정되기 때문에 간극수압에 대한 검증은 파력 (전사면 파력 제외)에 대한 간접적인

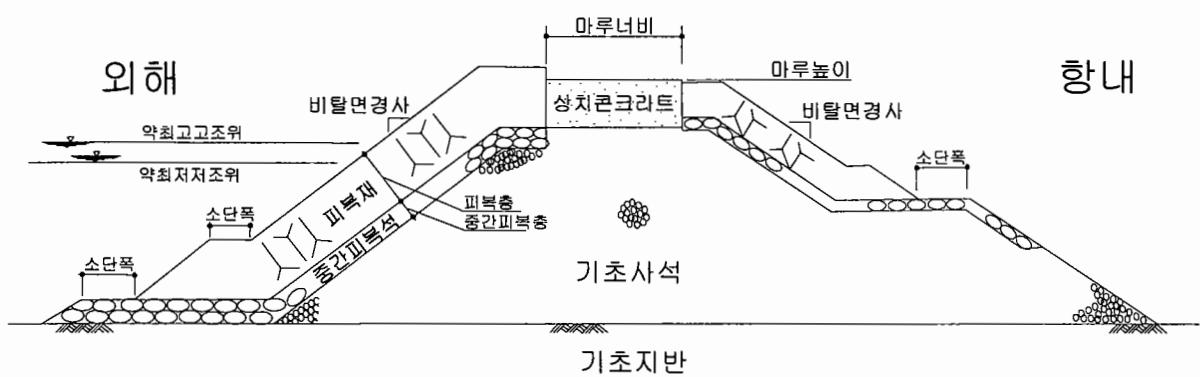
검증이라고 볼 수 있다. 그러나, 파력의 정확한 검증을 위해서는 파력의 직접적인 계측자료가 요구되며 이를 위한 수리실험이 수행되어져야 할 것이다.

본 연구에서는 수치모델의 계산영역을 전사면 피복석을 제외한 내부쇄석부로만 정하였다. 그러나, 보다 정확한 내부 파동장 및 제체파력을 구하기 위해서는 계산영역을 피복층과 내부쇄석부로 구분, 설정하여 경계요소법을 적용하여야 한다. 이 경우에는 전사면 파압정보로서 피복층 외측면에서의 계측파압을 사용하여야 한다.

제 5 장 국내 경사식 방파제의 현황

제 1 절 서 론

경사식 방파제 또는 경사제는 <그림 5.1.1>에서 보는 바와 같이 사다리꼴 또는 삼각형으로 기초사석을 쌓고 그 위에 피복석 또는 이형블록으로 피복한 사석식 경사제와 블록을 이용해 사다리꼴로 쌓은 블록식 경사제로 나를 수 있다. 이 중 사석식 경사제는 역사적으로 가장 오래된 형식이다. 경사식 방파제는 적용 가능한 수심의 범위가 넓고, 거의 모든 지반에 건설이 가능하며, 비교적 설계 및 시공이 용이하고, 반사파가 작다는 장점이 있다. 반면, 경사면에서 쇄파되므로 윌파가 많을 수 있으며 다른 형식의 방파제에 비해 재료가 많이 소요된다는 단점도 있다. 1940년대까지는 주로 자연 재료인 돌을 이용하여 사석식 경사제가 건설되었으나 파랑에 대한 저항력이 부족하여 사면이 붕괴된 경우가 많았다. 이러한 사석식 방파제의 약점이 파고에 대한 피복재의 중량이 부족한 데 있다는 것을 알게 되었고, 이를 극복하기 위하여 1개당 30~50톤 정도의 콘크리트블록을 덮어씌우는 방법이 이용되었다. 이런 흐름은 더욱 발전하여 콘크리트블록의 이형성에 착안하게 되었으며, 적당한 공극률을 갖는 이형소파블록을 개발하게 되었다. 1950년 프랑스에서 테트라포드(Tetrapod)가 개발된 후 이형소파블록은 물론 사석식 경사제의 축조기술이 비약적으로 발전하게 되었다.



<그림 5.1.1> 전형적인 경사식 방파제의 표준 단면 및 각 부분의 명칭.

그 후 수많은 형태의 이형블록이 개발되었으나, 현재도 그 탁월한 안정성과 시공성으로 인해 테트라포트가 피복재로서 가장 많이 사용되고 있으며, 또한 방파제, 방사제, 돌제 및 호안 등 다양한 용도로 이용되고 있다.

현재의 경사식 방파제의 설계 및 건설기술은 거의 완성된 기술이라 볼 수 있으나, 수심이 깊을 경우 또는 지반이 연약할 경우 등에 대해서는 신기술에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 또한 피복재, 중간피복재 또는 소단의 이용에 관한 기술을 발전시켜 비탈면 경사를 조절하거나 건설재료를 줄이는 등 경제성과 구조적 안정성을 동시에 확보할 수 있는 기술을 개발하는 연구 또한 매우 중요하다. 이러한 기술을 개발하기 위해서는 현재 건설되어 있는 경사식 방파제의 현황을 파악하고 개선점을 찾아 하나씩 풀어 가는 것이 중요하다 할 수 있다. 이러한 배경과 필요성에 따라 제1차년도 연구에서는 현재까지 우리나라의 무역항과 연안항에 건설된 사석식 경사제에 대해 1992년 발행된 '전국항만구조물도집'(해운항만청, 1992)을 기본자료로 주로 제체의 단면구조를 중심으로 분류, 정리하여 1차적인 데이터베이스를 구축하고 통계적 특성을 분석하였다. 이는 1992년 이후 기존 경사식 방파제의 보수 및 신규 경사식 방파제의 설계와 시공에 대해 추적하기 위한 기준으로 이용하기 위함이었다.

제2차년도인 금년도 연구에서는 구축된 데이터베이스의 일부 누락자료를 보완하고, 오류를 확인 수정하였으나 자료간 서로 다른 점이 있는 등 문제점이 있었으며, 또한 이후 지정항만에서 제외된 항만의 자료는 데이터베이스에서 제외하였고, 추가된 항만에 대해서는 관련 자료를 조사하였다. 그러나 용기포항, 신마항, 팽목항 등은 현재 기본설계가 완료된 단계이거나 기본설계 중으로 실시설계와 시공단계에서 여러 가지 변화 가능성이 있으며 현재의 자료와의 일관성에 문제가 있어 이를 반영하지 않았다. 또한 데이터베이스를 수정 보완할 목적으로 1992년 이후 증축, 보강 또는 보수된 자료를 각 지방해양수산청 별로 조사하였으나, 현재의 데이터베이스에 통합하는 데는 문제가 있어, 현재 해양수산부에서 수행 중인 항만시설관리를 위한 데이터베이스 구축 작업이 완료되면, 이 자료와 함께 종합하여 보완하는 것이 바람직할 것으로 판단되어 이 자료는 별도로 취급하기로 하였으며 본 보고서에서는 증축 또는 보강 내용에 대해서만 간략히 기술하였다. 한편, 항만별로 구축된 데이터베이스를 관할 지방청별 항만별로 재구성하였고, 경사식 방파제의 안정성에 초점을 두고 각 단면의 특성 및 이들의 통계적 특성에 대해 분석하였다.

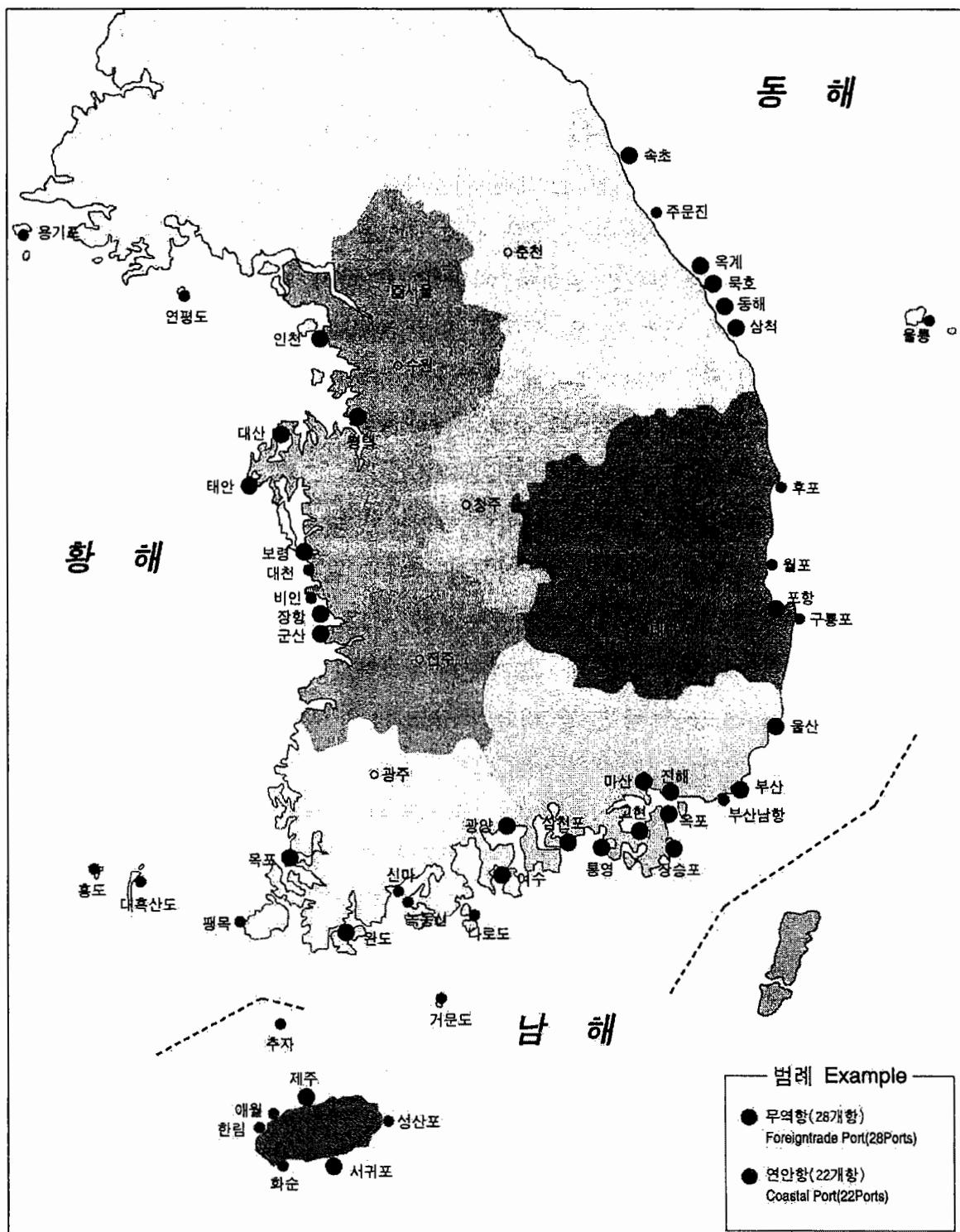
제 2 절 대상자료 및 자료정리

1. 대상자료

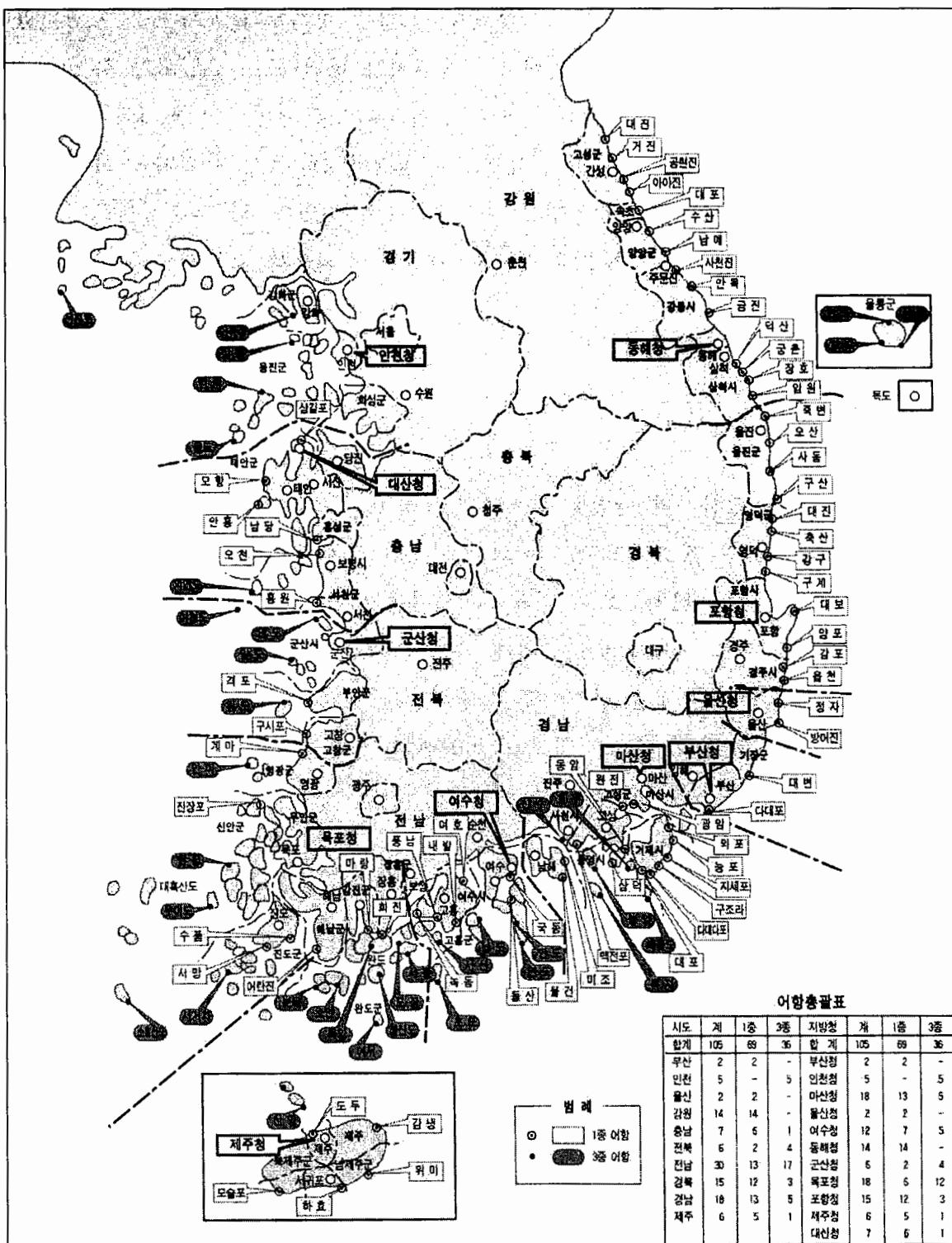
우리나라에는 2000년말 현재 총 472개의 항만이 건설되어 있으며, 이 중 50개가 비교적 규모가 큰 지정항만이며, 나머지 422개는 어항이다. 지정항만이란 항만법의 항만 분류에 따라 국민경제와 공공의 이해에 밀접한 관계가 있는 항만으로서 대통령령으로 그 명칭, 위치 및 구역이 지정된 항만을 말하며, 지정항만은 다시 원양구역을 항행하는 선박이 입·출항하는 항만으로서 해양수산부 장관이 건설·관리하는 무역항과 연해구역을 항행하는 선박이 입·출항하는 항만으로서 해양수산부 장관이 건설하고 관할 시·도지사가 관리하는 연안항으로 구분된다. 2000년 현재 <그림 5.2.1>에서 보는 바와 같이 무역항이 28개, 연안항이 22개 지정되어 있다.

한편, 어항은 이용범위가 전국적인 어업의 근거지가 되는 제1종 어항, 이용범위가 지방적인 제2종 어항, 그리고 어장의 개발, 어선의 대피에 필요한 낙도 또는 오지에 소재하는 어업의 근거지가 되는 제3종 어항으로 구분되며, 제1종 어항과 제3종 어항은 해양수산부 장관이 관리하며, 제2종 어항은 시·도지사가 관리한다. 총 422개의 어항 중 이전에는 연안항으로 관리되었던 강구, 축변 등 비교적 규모가 큰 69개의 항만이 제1종 어항으로 관리되고 있으며, 317개가 제2종 어항으로, 그리고 36개의 항만이 제3종 어항으로 관리되고 있다(<그림 5.2.2> 참조). 이 연구에서는 비교적 깊은 수심에 건설되는 규모가 큰 경사식 방파제의 건설기술 개선이라는 연구목적에 따라 지정항만의 외곽시설 만을 대상으로 하였다.

경사식 방파제는 항내의 정온도를 유지하거나 항내 시설물의 보호를 위해 설치되는 방파제 뿐만 아니라 방사제, 돌제, 이안제, 도류제, 파제제, 그리고 호안 등의 다양한 용도로 이용되며, 이러한 시설 모두를 항만과 직접 관련되어 있을 경우 항만의 외곽시설이라 통칭한다. 우리나라의 경우 항만의 외곽시설을 살펴보면 거의 대부분이 사석식 경사제로 건설되어 있음을 알 수 있다. 이는 건설현장 인근에서 기본재료인 사석을 구하기 쉽고, 구조적으로 비교적 안정성이 높고 경제적이며, 또한 설계 및 건설 기술이 많이 발달되어 있기 때문이라 할 수 있다. 2000년말 현재 우리나라 지정항만에는 총 52,741m의 방파제가 건설되어 있으며, 이를 무역항과 연안항으로 나누어 보면 각각 35,919m와 16,822m이며, 이들 대부분이 사석식 경사제로 건설되어 있다.



<그림 5.2.1> 우리나라 지정항만 일람도.



<그림 5.2.2> 우리나라 지정어항(제1, 3종) 일람도.

따라서 이 연구에서는 사석식 경사제로 건설된 항만의 외곽시설 중 가장 중요한 역할을 하는 방파제를 중심으로 자료를 정리하였으며, 일부 방사제와 도류제를 포함하였다. 이는 돌제, 호안, 파제제 등은 사석경사제로 건설되었다 하더라도 그 규모가 작거나 기능이 현저하게 다르기 때문이다. 또한 방파제로 건설되었으나 후면이 매립되어 물양장, 안벽, 토지 등 타 용도로 사용되거나 매립 예정으로 실질적으로 호안의 역할을 하는 경우는 포함하였으나 방파제의 전면 및 상부만을 분석대상으로 하였다. 당초 혼성제로 건설되었으나 후에 전면을 사석 또는 이형블록 등으로 보강한 소파블록 피복제는 분석에서 제외하였다.

2. 기준설정

일반적인 사석식 경사제의 단면을 살펴보면 <도 5.1.1>에 보인 바와 같이, 제체 중심부에 사다리꼴로 사석을 쌓고, 그 위에 비교적 일정한 크기의 사석 또는 이형블록을 이용하여 중간피복층을 덮고, 다시 그 위 의해 쪽 사면에는 큰 중량의 사석 또는 이형블록을 이용하여 피복하고, 항내 쪽 사면에는 의해 쪽보다 약간 작은 또는 동일한 크기의 사석 또는 이형블록으로 피복한 것을 알 수 있다. 또한 상부에는 상치콘크리트를 여러 가지 형태로 설치하여 월파를 막고 접근로 등으로 이용하게 된다. 이러한 사석식 경사제의 단면은 건설 수심, 중간피복층의 수, 양쪽 사면의 경사도, 또는 시공방법 등에 따라 약간씩 차이는 있으나 거의 표준화되어 있다.

이 연구에서는 데이터베이스 구축을 위한 여러 가지 기준을 따로 정하였다. 경사제와 소파블록 피복제를 구분하는 기준으로 제체 상부 상치콘크리트 아래에 근고블록이나 방파블록을 제외한 다른 구조물이 있는 경우 소파블록 피복제로 분류하였다. 그러나 도면 자료만으로 구분이 분명치 않은 경우 일단 경사제에 포함시키고 비고란에 혼성제로 분류 할 수도 있다는 뜻에서 혼성제로 표기하였다. 경사제의 마루높이와 마루너비는 사면 피복재의 높이와 너비와 상관없이 상치콘크리트가 있는 경우에는 상치콘크리트의 높이와 너비로, 상치콘크리트가 없는 경우에는 제체 마루의 높이와 너비로 하였다. 피복층의 수는 피복재의 설치 층수에 관계없이 피복층과 제1중간피복층, 제2 중간피복층 등으로 구분하였다. 즉, 피복재로 테트라포트를 사용한 경우 난적한 경우를 제외하면 2층적으로 설치하나, 특별히 그 크기가 다르거나 완전히 분리된 층이 아니면 피복층수 항목에서는 1층으로 간주하였고, 오해나 혼돈을 피하기 위해 피복층 및 중간피복층 항목에서 따로 피복재의

설치층수와 피복층의 두께를 기록하였다. 또한 사면의 피복층에 중점을 두었으며 상치콘크리트 하부에 따로 사석층을 둔 경우 또는 하부 소단을 별개의 사석으로 설치한 경우 등에 대하여는 고려하지 않았다. 즉 <도 5.1.1>의 경우 외해측 및 항내측 사면의 피복층의 수는 2이고, 소단은 2개 설치된 것으로, 그리고 피복재의 상부높이가 상치콘크리트의 마루높이 보다 높더라도 제체의 마루높이는 상치콘크리트의 높이로 하였다. 특히 피복재, 중간피복재의 비탈면 경사를 각각 표시하여 간접적으로 방파제의 건설 역사를 짐작할 수 있도록 하였다.

3. 자료정리

우리나라 지정항만의 경사식 방파제에 대한 데이터베이스 구축을 목적으로 경사제의 단면을 중심으로 자료를 정리하였다. 2000년말 현재 지정항만의 시설현황은 <표 5.2.1>과 같다. 이를 보면 1992년에 비해 지정항만이 새롭게 추가되거나 제외되었음을 알 수 있다. 무역항의 경우 태안항이 새로 추가되었으며, 연안항의 경우 거진항, 임원항, 감포항, 강구항, 그리고 축변항 등 5개항이 제외되었고, 새로이 용기포항, 팽목항, 신마항, 추자항, 애월항, 홍도항이 추가되었다. 제1차년도 연구에서 1992년 자료를 기본자료로 사용한 이유는 데이터베이스에 수록될 자료의 범위, 종류 및 종류별 특성 등을 파악하여 데이터베이스의 기본골격을 수립하기 위해서 일차적으로 종합 정리된 자료를 사용할 필요가 있었으며, 대상항만에 대한 설계 및 시공자료를 수집하기에는 많은 시간과 인력이 소요되기 때문이다. 즉, 현재 건설된 시설물이 당초 설계와는 달리 건설 중 설계 변경된 경우도 있으며, 또한 같은 방파제라 하더라도 조금씩 다른 형상으로 순차적으로 연장되거나 보강공사를 하는 등 이러한 모든 자료를 확보하기에도 어려움이 있었기 때문이다.

제2차년도인 금년도 연구에서는 제1차년도 연구를 통하여 구축된 제1차 데이터베이스에서 누락된 자료 및 출처간 서로 다른 자료를 기준 자료를 재검토하여 일부 보완하고 수정하였다. 이에 대한 원활한 자료 수집을 위하여 우선 항만별로 구축된 자료를 관할 지방청별로 재구성하였으며, 수정 보완해야 할 자료의 목록을 추출하여 관할 지방청별, 항만별 및 방파제 구간별로 정리하였다. 이를 토대로 각 관할 지방청의 협조를 받아 1992년 이후 신규로 지정된 지정항만에 대한 자료 및 기존 지정항만에서 손상, 보수, 수정, 복강 및 증축된 자료를 포함하여 수집하고 분류하였으나, 자료간 일관성의 문제 즉, 기본설계 자료, 실시설계 자료 및 시공자료 등이 혼재되어 있고, 단면이 보강된 경우 시설물 단면

번호를 따라 보강되는 것이 아니기 때문에 연속되는 단면 구간의 중간과 중간에서 표준 단면이 바뀌는 경우 등 여러 가지 자료 정리에 문제가 있었다. 한편 현재 해양수산부에서 는 항만시설을 인터넷을 이용하여 효율적으로 유지관리하기 위한 기본자료로 이용하기 위해 항만시설 전체에 대해 데이터베이스를 구축하는 연차사업을 수행 중이다. 따라서 데이터베이스 구축 작업이 완료되면 이 자료와 함께 종합하여 전체 데이터베이스에 통합시키는 것이 바람직할 것으로 판단되어 그리고 자료 간의 일관성 유지를 위해 이 자료는 현재의 데이터베이스에 포함시키지 않았다. 한편 차후의 인터넷 공개를 염두에 두고 그림 파일이 입수 가능한 각 방파제 구간의 표준단면도를 JPG형식으로 변환하여 데이터베이스에 하이퍼 링크시켜 가능한 한 데이터와 그림을 데이터베이스 내에서 상호 보완적으로 이용할 수 있도록 하였다.

2000년말 현재 지정항만에 건설된 방파제의 길이는 지정항만의 시설현황을 나타낸 <표 5.2.1>에 제시된 바와 같이 총 52,741m이며, 이 중 무역항에 35,919m, 그리고 연안항에 16,822m가 축조되어 있다. 지정항만의 보강, 연장 및 신축 등 방파제 공사현황에 대한 자료를 조사하였으며, 이를 정리하여 <표 5.2.2>에 수록하였다. 이 표를 보면 1992년 이후 신항만 개발, 방파제 축조 및 방파제 보강 등을 위한 공사가 꾸준히 실시되었음을 알 수 있다. 특히 많은 항만에서 방파제 보강공사가 연차적으로 실시되고 있음을 알 수 있다. 지정항만의 방파제 길이 변화는 항만 및 해양수산과 관련된 통계자료인 항만편람(해양수산부, 1997)과 해양수산통계연보(해양수산부, 1997, 1998, 1999, 2000 및 2001)를 참고하여 정리하였으며, 이를 <표 5.2.3>에 제시하였다. 이 표로부터 방파제 길이의 변화과정을 보면 평택항, 여수항, 제주항 등 15개 항만의 방파제 길이가 1992년에 비해 1996년에 짧아진 것을 알 수 있으며, 삼천포항의 경우 1992년의 648m에서 1996년에는 2,497m로 1,849m나 늘 것을 알 수 있다. 이는 방파제를 철거했거나 갑자기 증축했기 때문이라기 보다 각 시설물의 구간이 지니는 특징이나 용도가 변경됨에 따라 그 분류가 달라졌기 때문이거나 관할시설물에서 제외되었기 때문인 것으로 추측된다. 즉, 당초에는 방파제로 건설되었으나 배후지가 매립되면서 방파호안으로 변해 호안으로 분류되는 경우 등을 들 수 있을 것이다. 이러한 이유 등으로 인해 자료의 분류 및 정리에 어려움이 있었다.

<표 5.2.1> 2000년 말 현재 지정항만의 시설현황.

항별	항만시설능력		항만별 시설현황						
	접안능력 (척)	하역능력 (천톤/년)	안벽 (m)	방파제 (m)	잔교 (기)	물양장 (m)	상옥 (동)	창고 (동)	야적장 (천m2)
합계	626	430,437	95,845	52,741	115	55,352	31	31	8,850
무역항	581	422,642	91,333	35,919	111	40,359	31	31	8,605
인천항	75	56,820	10,802	2,233	21	1,939	11	2	1,848
평택항	15	6,951	1,840	240	8	330		2	515
대산항	16	4,987			16	807			
태안항	1	5,491			1	347			
보령항	2	10,662	472		2	90			
장항항	2	1,068			2	968		1	6
군산항	25	13,869	3,409	500	3	1,239		5	696
목포항	17	6,271	3,020		13	3,330			145
완도항	4	817	620	300	3	2,182			28
여수항	8	3,016	1,089	2,016	8	2,334	1		58
광양항	58	74,277	12,138			504	2		848
제주항	17	3,589	2,416	3,126		754		2	52
서귀포항	5	1,359	630	1,961		817		1	35
삼천포항	9	19,168	1,765	910	2	1,763			129
통영항	6	620	1,076	1,477	10	2,421			7
고현항	3	856	122		3	192			3
옥포항	1	454	100	1,385	1				
거제항		76		226	4	1,151			11
마산항	27	14,229	4,604		6	1,749		1	730
진해항	9	1,869	1,293	122	2	123		1	137
부산항	108	84,475	20,628	3,919	3	9,189	15		1,797
울산항	90	24,772	8,607	4,650	1	1,886		1	379
포항항	44	44,542	9,516	5,140		2,156		10	907
삼척항	7	7,171	776	880		1,258			
동해항	15	23,035	3,412	2,110	1		1	2	206
목호항	6	6,388	1,141	1,360		823	1	2	28
옥계항	5	4,914	940	2,003	1			1	15
속초항	6	896	917	1,361		2,007			25

<표 5.2.1> (계속)

항별	항만시설능력		항만별 시설현황						
	접안능력 (척)	하역능력 (천톤/년)	안벽	방파제	잔교	물양장	상옥	창고	야적장
			(m)	(m)	(기)	(m)	(동)	(동)	(천m ²)
연안항	45	7,795	4,512	16,822	4	14,993	0	0	245
용기포항									
연평도항				1,087		265			
대천항	1	332		1,220	2	1,188			
비인항		18		294		244			
대흑산도항	2	589	350	1,388	2	1,269			
홍도항		48				120			
팽목항									
신마항									
녹동신항		334				834			
나로도항		103		390		513			
거문도항	3	188	330	1,814		941			
한림항	9	822	790	2,418		955			39
화순항	2	282	292	810		100			3
애월항	4	384	302	740		312			15
성산포항	7	920	711	2,144		707			74
추자항									
부산남항		1,116		528		4,294			
구룡포항	13	1,251	1,262	1,014		895			56
월포항		50		157		250			
후포항	2	695	260	1,252		927			54
울릉항	1	148	110	648		161			4
주문진항	1	515	105	918		1,018			

<표 5.2.2> 1992년 이후 지정 항만 방파제 공사 현황

무역항	사업별	1992	1993	1994	1995	1996
인천항	역무선항구 방파제 축조	기초공 146m 하부공 145m	기초공 110m 하부공 143m	기초공 89m 하부공 110m		
평택항			상부공 335m	상부공 264m		
대산항						
태안항						
보령(고정)항						
장항항						
군산항	군장신항 북방파제 축조					
	군장신항 남측도류제 축조					
	군장신항 북측도류제 축조					
목포항						
완도항	방파제 축조	28.5m 및 두부 보강 90m	보강 99m	보강 55m TTP 보강	TTP 체적 하부 37.6m	보강상부 82.2m TTP 75m
여수항	서방파제 보강 동방파제 보강				거치 776개 보강 44.6m	부대공 1식
광양항						
제주항	방파제 축조 서방파제 보강 어항 구방파제	방파제 105m 서방파제 41m	동방파제 45m 서방파제 41m	방파제 30m 서방파제 41m	방파제 25m 보강 37.2m	
서귀포항	외항방파제 축조					하부 60m
심천포항	방파제 축조 구항방파제 축조	방파제 37m 하부 20m 중부 82m	방파제 37m 하부 26m 하부 10m	상부 20m 하부 46m 하부 74m	상부 80m 하부 46m	상부 68m 하부 155m

<표 5.2.2> 1992년 이후 지정항만 방파제 공사 현황 (계속)

무역항	사업별	1992	1993	1994	1995	1996
통영(충무)항	동호동방파제 보수					보수 55m
고현항						
옥포항	남방파제 보강					
거제(진승포)항						
미산항						
진해항						
부산항	해양대진입방파제 보강 감전항 동방파제 보강					
	부산신항 방파제 축조					
울산항	동방파제 축조	상부 171m 하부 90m	중부 171m 하부 19.7m	상부 171m 중부 114m 하부 102m	지반개량 80.6m	축조 76m
	운산항 북방파제 보강					
	울산신항 방파제 축조					
	포항구항 방파제 보강					
포항항	영일만신항 어항 방파제 영일만신항 북방파제 축조					
심천항	방파제 보강	보강 105.5m	보강 92m	보강 64m	보강 68m	TTP보강 76.5m
동해항	북방파제 보강					TTP(40톤) 제작 659개 보강 190.2m
목포항	남방파제 보강 방파제 축조					축조 6m
옥계항	방파제 보강					
속초항	청초호 방파제 축조 방파제 보강					축조 280m 상치보강 46m

<표 5.2.2> 1992년 이후 지정 항만 방파제 공사 현황 (계속)

현 안 항	사업별	1992	1993	1994	1995	1996
옹기포	방파제 보강				보강 58m	
연평도항	2단계 개발 방파제				상부 46m 하부 104m	
대천항	북방파제 축조	상부 120m 하부 185m	상부 178m 하부 60m	상부 100m 하부 40m		
비인항	서방파제 보강					보강 25.3m
대죽산도항	방파제 축조	상부 38.5m 하부 85m	TTP제작 302개	상부 82m	축조 54m	
홍도항	남방파제 보강					
평목항	방파제 보강					
신마항						
녹동신항						
나로도항	방파제 보강					보강 9m
거문도항	남방파제 축조 동방파제 보강 북방파제 축조				축조 46m 축조 84m	
한림항	북방파제 축조					
화순항	동방파제 축조 북방파제 축조		축조 19m	축조 35m	축조 18m	
성산포항	동방파제 축조 동방파제 보강		축조 294m		축조 10m	축조 36m
애월항	북방파제 보강					보강 35m

<표 5.2.2> 1992년 이후 지정항만 방파제 공사 현황 (계속)

연안항	사업별	1992	1993	1994	1995	1996
주자항						
부산남항	동방파제 축조 서방파제 보강					
구룡포항	방파제 보강	보강 80m	보강 43m	보강 62m	보강 46.3m	
월포항						
후포항	방파제 보강 방파제 축조 방파제 보강 방파제 축조	보강 100m	보강 41m	보강 42m	보강 100.3m	보강 110m
울릉항	사동항 방파제 축조					보강 74.5m
주문진항	방파제 축조 방파제 보강	축조 15m 상치보강 73.6m TTP보강 75m	상치보강 79.2m TTP보강 75m	상치보강 80m TTP보강 125m	상치보강 115m TTP보강 158m	상치보강 148m TTP보강 158m

<표 5.2.2> 1992년 이후 지정항만 방파제 공사 현황 (계속)

무역항	사업별	1997	1998	1999	2000
인천항	역무선항구 방파제 축조				
평택항					
대산항					
태안항					
보령(고성)항					
장항항					
군산항	군정신항 북방파제 축조	축조 116m	축조 355m	축조 70m 상부 500m 하부 355m	상부 30m 하부 452m
목포항					
원도항	방파제 축조				
여수항	서방파제 보강				
광양항	동방파제 보강				
제주항	방파제 축조				
서귀포항	서방파제 보강 어항 구방파제	보강 46.4m 보강 46.8m	보강 46.4m 보강 438m	보강 86.6m 축조 28m, 하부 26.6m	보강 86.6m 축조 102.5m, 상부 26.6m
심포항	방파제 축조				
구항항	외항방파제 축조	기초공 30m	상부 10m	TTP보강 69m 기초공 40m	TTP보강 86.4m 축조 120m
	방파제 축조		기초공 70m	기초공 70m	보강 32m 축조 200m
	구항방파제 축조	상부 46m 하부 25m	동상부 10m 서상부 35m	상치보강 120m 하부 18.5m	상부 180m 중부 35m 하부 27m
					상부 69m 하부 69.5m

<표 5.2.2> 1992년 이후 지정항만 방파제 공사 현황 (계속)

	사업별	1997	1998	1999	2000
통영(충무)항 고현항	동호동방파제 보수			방파제보강 160m	
옥포항 거제(진승포)항	남방파제 보강	상치보강 308m TTP보강 109m	상치보강 320m TTP보강 326m	상치보강 281m TTP보강 39m	
마산항					
진해항	해양대진입방파제 보강	보강 165m	보강 113.6m		
부산항	감천항 동방파제 보강 부산신항 방파제 축조	보강 112.3m 동 기초굴착 102m 서 기초굴착 176m 상치C. 178m		모래치환, 사석공 TTP 제작 2,283개	
울산항	온산항 북방파제 보강 울산신항 방파제 축조		상치보강 81m TTP보강 79m	상치보강 237.3m TTP보강 142.5m 축조 250m	방파호안 하부 340m 상치보강 79.3m TTP보강 156.2m 축조 320m
포항항	포항구항 방파제 보강 영일만신항 이항 방파제		축조 303.2m 축조 176.8m		
포항항	영일만신항 북방파제 축조		축조 160m 케이슨제작 8함	기초 360m 구체 280m 상부 160m	기초 880m 구체 620m 상부 280m
심천항	방파제 보강	보강 200m	보강 204m	보강 101.1m 상치보강 88.6m	보강 28m
동해항	북방파제 보강				
목포항	남방파제 보강 방파제 축조	TTP보강 37m 축조 10m	보강 133m 축조 20m	도부보강 축조 153m	축조 15m 보강 273m
옥계항	방파제 보강	보강 300m	보강 273m		보강 254m
속초항	청초호 방파제 축조	축조 48m	축조 40m		
	방파제 보강				

<표 5.2.2> 1992년 이후 지정항만 방파제 공사 현황 (계속)

연안형	사업별	1997	1998	1999	2000
옹기포	방파제 보강				
연평도형	2단계 개발 방파제				
대천항	북방파제 축조				
	서방파제 보강				
비인형	두부보강				
대죽산도항	방파제 축조				
	남방파제 보강				
홍도형	방파제 보강	TTP제작 2,110t	TTP(4톤) 제작 1,610t	방파호안축조 12m	
팽목형			TTP(40톤) 제작 500개	방파호안 기초공 44.6m	
신마항				방파호안 축조 6m	
녹동신항					
나로도항	방파제 보강	보강 26m	상부 50m 하부 27m	상치C. 90m TTP 1,105t	축조 18m
	남방파제 축조				
거문도형	동방파제 보강	보강 67m	태풍피해복구 37m		
	북방파제 축조		축조 41m		
한림항	북방파제 축조	보강 19.7m	축조 35m	상부 60m, 하부 17.4m	
화순형	동방파제 축조	축조 38m	보강 20.5m	보강 78.2m	축조 46.5m
	북방파제 축조				
성산포항	동방파제 축조	축조 31.9m		축조 15.8m	TTP보강 37.5m
	동방파제 보강	보강 50m	보강 52.2m	상치보강 320m	상치보강 75m
애월항	북방파제 보강	보강 43m	보강 176m	보강	

표 5.2.2> 1992년 이후 지정항만·방파제 공사 현황 (계속)

현안 항	사업별	1997	1998	1999	2000
제주	동방파제 축조	축조 40m	축조 40m		
신남항	서일교제 보강	보강 137m	보강 14m	보강 14m	
통포항	방파제 보강	보강 71m	보강 34m	보강 134m	보강 52.6m
포항	방파제 보강	보강 128m	보강 88.2m	보강 236.4m	축조 30.9m
포항	방파제 축조	축조 10.9m	축조 11m	축조 18m	축조 22m
포항	방사제 보강	보강 90m	보강 109m		
포항	방사제 축조	축조 62m	축조 40m	축조 153m	축조 96m
릉 흥	사동항 방파제 축조	케이슨 14제작 9가지 하부 5m	케이슨 제작 거치 5합 기초 117.1m		
문진항	방파제 축조	축조 22m	축조 18m		
문진항	방파제 보강	보강 47m			

<표 5.2.3> 통계자료에 나타난 1992년 이후 지정항만 방파제의 길이

	방파제 길이(m)					
	1992년	1996년	1997년	1998년	1999년	2000년
무역항	27	27	28	28	28	28
인천항	2,181	2,233	2,233	2,233	2,233	2,233
평택항	530	240	240	240	240	240
대산항						
태안항	x	x				
보령(고정)항						
장항항						
군산항					500	500
목포항						
완도항	271.5	300	300	300	300	300
여수항	2,043.0	2,016	2,016	2,016	2,016	2,016
광양항						
제주항	2,981	2,956	2,956	2,956	2,956	3,126
서귀포항	1,796.6	1,414	1,504	1,504	1,624	1,961
삼천포항	648	2,497	2,543	2,553	2,553	910
통영(충무)항	1,622	1,191	1,191	1,191	1,191	1,477
고현항						
옥포항	1,385	1,385	1,385	1,385	1,385	1,385
거제(장승포)항	231	231	231	231	231	226
마산항						
진해항		122	122	122	122	122
부산항	5,749	3,919	3,919	3,919	3,919	3,919
울산항	3,986	4,650	4,650	4,650	4,650	4,650
포항항	4,150.54	3,610	3,610	3,610	4,190	5,140
심척항	1,241.10	880	880	880	880	880
동해항	2,110	2,110	2,110	2,110	2,110	2,110
목호항	1,346.60	1,159	1,175	1,175	1,251	1,360
옥계항	2,003	1,304	1,304	1,304	1,304	2,003
속초항	1,050	1,279	1,321	1,321	1,321	1,361
옹기포						
연평도항	991.1	1,087	1,087	1,087	1,087	1,087
대천항	900	969	1,080	1,080	1,400	1,220
비인항	244.5	245	245	245	245	294
대흑산도항	1,263.5	1,388	1,388	1,388	1,388	1,388
홍도항						
팽목항						
신마항						
녹동신항						
나로도항	250	250	250	250	250	390
거문도항	1,645	1,775	1,775	1,775	1,814	1,814
한림항	2,776.80	2,568	2,568	2,403	2,418	2,418
화순항	579.5	734	772	772	799	810
성산포항	1,836.50	2,401	2,401	2,128	2,144	2,144
애월항		800	800	800	800	740
추자항						
부산남항	574	528	528	528	528	528
구룡포항	1,037	970	970	970	970	1,014
월포항	157	157	157	157	157	157
후포항	1,863	1,158	1,158	1,158	1,184	1,252
울릉항	184.6	445	445	495	648	648
주문진항	1,129.50	882	882	882	898	918

이와 같이 정리된 데이터베이스에는 우선 대상방파제의 전체적인 상황을 말해주는 항명과 방파제명, 그리고 참고로 항만구조물도집에 나타난 도면번호를, 그리고 방파제의 총길이, 마루높이, 마루길이, 그리고 표준단면도의 지반고에 대해 수록하였다. 각 방파제의 표준단면 구간별 설계조건을 파고, 주기, 파향, 풍향, 풍속, 조위, 그리고 지반조건으로 나누어 정리하였으며, 구조형식에 따라 사석식 경사제는 사석식으로, 블록식 경사제는 블록식으로, 혼성제, 그리고 소파블록 피복제는 피복제로 표기하였으며, 대칭성 여부와 각 단면 구간의 특징적인 요소를 간략히 수록하여 상부에 진충콘크리트가 있는지, 지반을 개량했는지 등에 대해 알 수 있도록 하였다. 특히 구조형식에서는 사석식 경사제로 분류하였으나 혼성제 또는 소파블록 피복제로도 분류할 수 있는 방파제에 대하여는 이를 표기하여 차후 이들을 구분하는 명확한 기준을 설정하는 데 이용할 수 있도록 하였다. 또한 현재의 자료가 건설 후 보수된 단면인지를 알 수 있도록 하였으며, 제체 하부에 설치된 소단에 대해서도 자료를 정리하였다. 즉, 설치된 소단의 수를 수록하였으며, 제체 외부에는 소단이 없으나 제체 내부 피복층 하부 등에 소단이 있는 경우 음(-)의 부호를 붙여 그 수를 표기하였다. 또한 제체 외부에 소단이 설치된 경우 피복층의 소단이 있으면 ‘피’로, 중간피복층의 소단인 경우 ‘중’으로, 기초사석부의 소단은 ‘기’로 표기하였으며, 이를 모두 포함할 경우 ‘피/중/기’ 등으로 표기하였다. 그리고 소단의 형태를 8가지로 분류하여(해양수산부, 2001) 그 중 어느 형태에 가장 가까운지를 알 수 있도록 하였다.

사석경사제의 단면에서 중요한 요소를 모두 포함하여 자료를 보면 해당 방파제를 그릴 수 있도록 하는 것을 목표로 하였다. 우선 외해측과 항내측의 피복층의 수와, 각 피복층에 대해 사용된 재료, 그 재료의 크기, 경사도, 설치층수 및 설치두께 등을 정리하였다. 또한 상치콘크리트의 형상을 구분하였으며, 상치콘크리트 하부의 상태를 간단히 정리하여 수록하였다. 기초사석부 역시 사용된 재료와 양측 사면의 경사도를 포함하였다. 기초사석에서 기초사석의 규격을 1로 표기한 것은 거의 표준화되어 사용되는 $0.015\sim0.03m^3$ 크기의 사석을 나타낸다. 주의할 점은 피복층수 항목의 층수와 제체 사면항의 층수와는 다르다는 점이다. 예를 들어 피복층수 항목의 외해측 층수가 2이면 피복층과 중간피복층이 있다는 뜻이며, 항외측 사면 항목의 피복층의 피복재가 테트라포트이고 그 층수가 2이면 테트라포트를 2층적한 피복층이며, 중간피복층의 피복재가 사석이고 층수가 2이면 사석을 2층적한 중간피복층을 나타낸다. 따라서 이 경우 총 피복층수를 합하면 4층이 된다.

이상과 같이 정리 분류된 자료는 차후의 확장 및 분석이 가능하도록 마이크로소프트사의 엑셀프로그램을 이용하여 입력하여 데이터베이스화하였다. 이상과 같이 정리 수록된

자료를 관할 지방청별로 구분하여 부록 <표 A4.1>~<표 A4.11>에 수록하였다.

제 3 절 자료의 분석

구축된 데이터베이스를 이용하여 피복재의 안정성에 중점을 두고 각 단면의 구조적 특성 및 이들의 통계적 특성 등에 대해 분석하였다.

경사식 방파제의 경우 내습하는 파력에 저항하고 내부 사석을 보호하기 위하여 사석 또는 인공블록 등의 피복재를 충적 또는 난적하여 피복층을 둔다. 따라서 피복층의 안정은 전체 방파제의 구조적 안정에 매우 중요한 역할을 한다. 피복층의 파괴는 피복층의 넓은 부분이 집단적으로 사면을 따라 아래로 미끄러져 일어나거나, 단위 피복재가 피복층으로부터 이탈되어 사면을 따라 위로 또는 아래로 이동되어 일어난다. 그러나 파력에 의한 피복층의 파괴는 점진적이며거나, 몇 개의 단위피복재의 이탈 또는 이동으로 피복층 전체가 구조적으로 파괴되거나 파복의 기능을 상실하는 것은 아니다. 현재의 피복층의 안정과 관련된 기술은 단위 피복재가 피복층으로부터 이탈되는 파력을 결정하는 기준을 제공해주는 것은 아니다. 사면피복재의 안정을 위해서는 파력에 저항할 수 있는 소요질량을 확보해야 한다. 사면피복재의 안정질량 또는 소요질량을 산정하기 위해서 가장 흔히 쓰이는 것이 광범위한 실내실험결과를 바탕으로 제안된 Hudson식, 식(5.3.1)이다.

$$W_s = \frac{\rho_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (5.3.1)$$

여기서,

W_s : 사석 또는 인공블록의 안정에 필요한 최소질량(t)

ρ_r : 사석 또는 인공블록의 밀도(t/m^3)

S_r : 사석 또는 인공블록의 해수에 대한 비중

H : 안정계산에 사용되는 파고(m)

K_D : 피복재의 형상 또는 피해율 등에 의해 결정되는 안정계수

α : 피복사면이 수평면과 이루는 각($^\circ$)

Hudson식은 규칙파에 의한 실험결과를 바탕으로 제안된 경험식이므로 불규칙파가 작용하는 실제 현장의 경우 사면 설치위치에서 진행파의 유의파고를 식(5.3.1)의 파고 H 로 사

용하는 것이 표준이 된다. 이 식에서 보는 바와 같이 사면 피복재의 소요질량은 사면경사, 파고 및 피복재의 밀도에 의해 변하지만, 이를 3가지 변수 이외의 변수에 대한 영향 모두가 내포되어 있는 안정계수에 의해서도 변한다. 따라서 적정한 안정계수의 사용은 피복재의 안정질량 산정에 결정적 영향을 미친다 할 수 있으며, 사석식 경사제 설계시 안정계수는 매우 신중하게 선정하여야 한다.

안정계수에 영향을 미치는 주요 요인으로 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- 1) 피복재의 형상
- 2) 피복층을 구성하는 피복재의 층수
- 3) 피복재를 쌓는 방법(정적 또는 난적)
- 4) 파랑의 형태(쇄파 또는 비쇄파)
- 5) 입사파향
- 6) 피복위치(제두부, 제간부, 정수면에서의 위치 등)
- 7) 천단고, 천단폭, 상부공의 형태
- 9) 하부피복층의 재료, 크기, 두께, 투수계수, 고르기 정도
- 10) 하부 소단의 형상, 재료, 크기

안정계수는 앞에서 열거한 많은 요인들에 따라 변하므로 수리모형실험을 통해 결정하는 것이 일반적이며, 현재 통상적으로 사용되고 있는 안정계수 역시 광범위한 수리모형실험 결과를 기반으로 도출된 것이다. 또한 사석식 경사제에 관한 수리모형실험 중 대부분이 피복층의 안정과 안정계수에 관련된 것이었다. 안정계수 결정을 위한 지금까지의 연구 대부분은 위의 요인 중 1)~8)에 관한 것이 대부분이었으나, 본 연구의 주요내용이 9)과 10) 요인과 관련된 피복층의 안정성을 검토하는 것으로 구성되어 있다. 따라서 본 장에서도 이러한 관점에서 수집 정리된 자료를 분석하여 보았다.

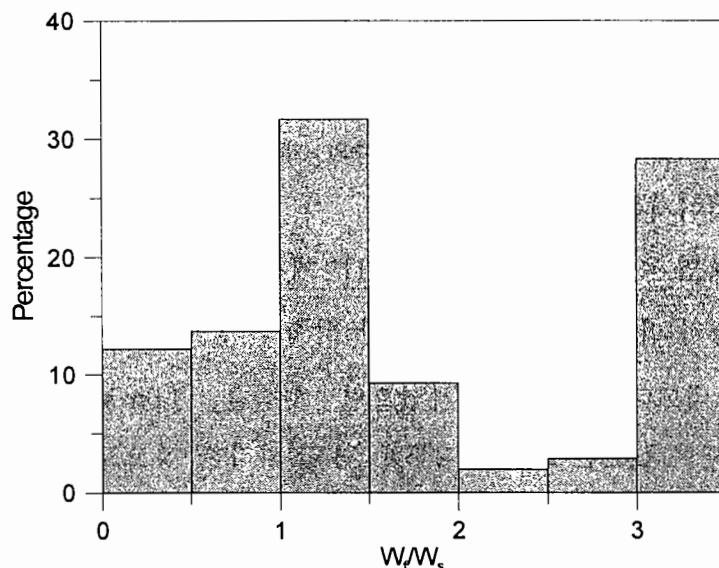
우선 허드슨식으로 구해지는 피복재의 안정질량과 실제 적용되어 있는 피복재의 질량과의 관계를 알아보기 위해, 구축된 데이터베이스에서 방사제, 도류제 등을 제외한 사석식 경사제만을 고르고, 다시 사석과 테트라포트로 피복된 경우만을 분석대상으로 선정하였다. 선정된 방파제 단면구간은 총 204개였으며, 길이는 총 28,639m였다. 이 중 사석으로 피복된 단면은 49개 구간의 9,704.4m이었으며, 테트라포트로 피복된 단면은 155개 구간의 18,935.5m이었다.

이와 같이 선정된 구간에 대하여 허드슨식을 적용하였다. 이 때 파고는 제시된 각 단

면에서의 설계파고를 그대로 사용하였으며, 파고가 수심의 0.78배보다 클 경우 쇄파되는 것으로 간주하여 개략적으로 파고를 수심의 0.78로 제한하였으며, 안정계수도 쇄파에 해당하는 값으로 취하였다. 사석의 밀도로 $2.65t/m^3$, 테트라포트의 밀도로 $2.3t/m^3$ 를 사용하였다. 안정계수는 Shore Protection Manual(1984)에 제시되어 있는 값을 사용하였으며, 사석의 경우 쇄파와 비쇄파에 따라 2와 4를 각각 사용하였으며, 테트라포트의 경우 각각 7과 8을 사용하였다. 이와 같이 계산된 소요질량(안정질량)을 <표 A4.1>~<표 A4.11>에 수록하였으며, 안정질량(W_s)과 실제 사용된 피복석의 질량(사용질량, W_f)의 비도 함께 수록하였다. 물론 이 계산결과는 절대적인 것은 아니며 파랑의 전파변형 등을 고려하지 않고 설계파고를 그대로 이용했으며 계산방법 또한 편의에 의해 간략한 가정을 도입한 것으로 이를 그대로 사용할 수는 없으며, 하나의 개략적인 지표로 이용하기 위해서 계산한 것이라는 것을 잊어서는 안될 것이다.

이 결과를 살펴보면 <표 A4.1>~<표 A4.11>에서 보는 바와 같이 사용질량/안정질량(W_f/W_s , 안정도질량비)이 최대인 경우는 부산 남항 서방파제로 나타났으며, 이 방파제는 피복재로 12.5톤의 테트라포트를 사용하였으며, 수심을 -1.0m로 간주하여(실제로는 ±0m) 계산된 안정질량은 0.09톤으로 약 225배 정도 과다한 것으로 나타났다. 이는 폭풍해일 또는 폭풍파가 내습할 경우를 대비하기 위한 것으로 판단된다. 한편 여수신항 북방파제에서 최소인 것으로 나타났다. 이 방파제의 설계파고는 5.29m였으며, 이로부터 계산된 안정질량은 16.8톤이었으나, 실제 사용한 피복석은 $0.6m^3$ 크기의 사석(약 1.6톤)을 사용하여 안정도질량비는 약 0.095 정도로 과소설계된 것으로 나타났다. 이 방파제는 외해로부터 잘 차폐되어 있어 설계파고는 실제로는 사용된 값보다 훨씬 작을 것으로 예상되며, 안정질량 또한 여기서 계산된 값보다 훨씬 작을 것으로 판단된다. 즉, 이와 같은 계산결과는 그대로 이용할 목적보다는 하나의 개략적인 지표로 참고할 수 있으며, 또한 구축된 데 이터베이스를 이용하는 하나의 예로서 계산되었다는 점을 유념해야 한다. 안정도질량비에 대한 단면구간 수의 분포는 <그림 5.3.1>과 같다. 이 그림을 보면 총 204개의 단면구간 중 19.6%에 해당하는 40개의 단면구간에서 1보다 적은 것으로 즉, 질량이 부족한 것으로 나타났으며, 나머지 164개 구간(80.4%)에서 1보다 큰 것으로 나타나 안정된 피복재 중량을 확보하고 있다고 할 수 있다. 또한 피복재로 사석을 사용한 경우와 테트라포트를 사용한 경우를 나누어 살펴보면, 먼저 사석을 사용한 총 49개의 단면구간 중 14개 단면구간, 길이로는 2,450.4m(25.3%)의 단면구간에서 1보다 작은 것으로, 35개 구간 7,254m(74.7%)

에서 1보다 큰 것으로 나타났다. 한편 테트라포트를 사용한 총 155개 단면구간(길이 18,935.5m) 중 26개 단면구간, 길이로는 2,584.8m(13.7%)의 단면구간에서 1보다 작은 것으로, 129개 구간 16,350.7m(86.3%)에서 1보다 큰 것으로 나타났다. 이로부터 피복재로 사석재를 사용하는 경우보다 테트라포트를 사용하는 경우 더 안정된 질량을 확보하고 있는 것을 미루어 짐작할 수 있다.

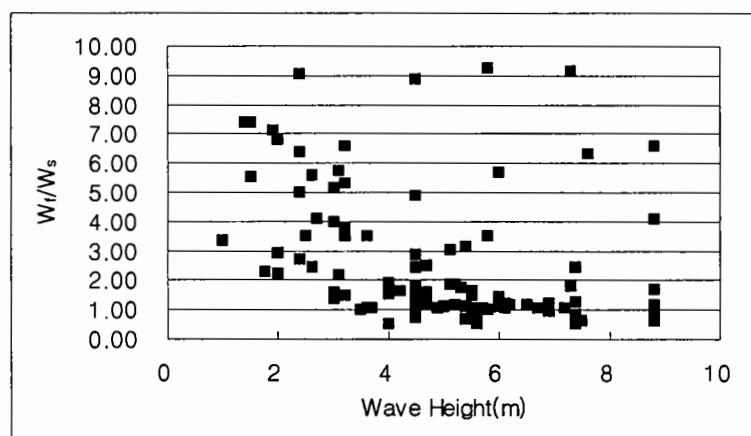


<그림 5.3.1> 안정도질량비에 대한 단면구간수의 분포.

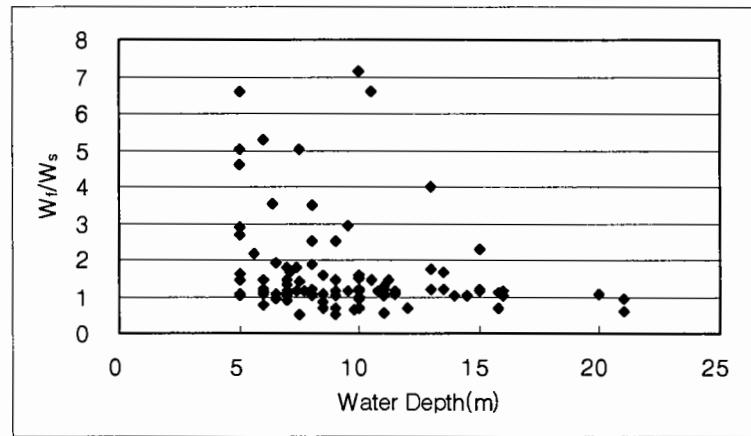
피복재의 질량은 파고의 세제곱에 비례하므로 피복재의 안정질량에 가장 큰 영향을 미치는 것이 파고라 할 수 있다. 또한 파고가 클 경우 피복재의 질량이 기하급수적으로 커지므로 안정도질량비도 1에 가깝도록 설계될 것이다. 이에 대해 검토해보기 위해 설계파고에 따른 안정도질량비의 분포를 <그림 5.3.2>에 도시하였다. 이 그림에서 파고는 설계파고를 그대로 사용했으며, 안정질량을 구하기 위해 사용 파고와는 다르고, 안정도질량비가 비상식적으로 작거나 큰 경우는 제외하였기 때문에 상관관계를 살피기는 어려우나 이 그림을 보면 안정도질량비는 대체로 1 근처에 집중되어 있으나 파고가 클 때보다 작을 때 안정도질량비의 변화가 많다는 것을 보여준다. 한편 파고가 클 경우 수심의 영향을 많이 받으므로 수심에 따른 안정도질량비의 분포도 <그림 5.3.3>에 도시하여 보았다. 이 그림에서 수심이 5m 이하인 자료와 안정도질량비가 0.5 이하이거나 10 이상인 경우의 자

료는 제외하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 수심이 깊을 경우보다는 낮을 경우 변화가 심한 것을 알 수 있다. 이로부터 방파제의 설계파고는 그 지역의 지형이나 수심에 영향을 많으므로 수치모형 등 적절한 수단을 이용하여 정확히 산정해야 한다는 것을 알 수 있다.

이상의 분석결과는 실제 지표가 되거나 바로 사용될 수 있는 것은 아니나 이와 같은 데이터베이스를 이용하면 여러 가지 경우의 변화 또는 특성을 분석할 수 있다는 것을 보여주는 예라 할 수 있다.

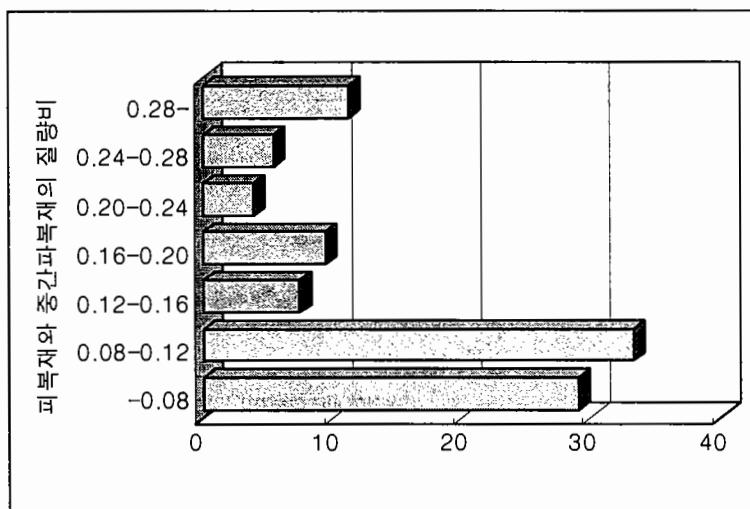


<그림 5.3.2> 파고에 따른 안정도질량비의 분포.



<그림 5.3.3> 수심에 따른 안정도질량비의 분포.

한편, 피복재의 안정도는 하부 중간피복층의 재료, 크기, 두께, 투수계수 그리고 고르기 정도 등에 영향을 받는다. 보통 피복층 바로 아래에 설치되는 제1중간피복층 두께는 두 개의 사석의 최소두께가 되어야 한다. 또한 피복재와의 질량비는 피복재의 안정에 매우 중요한 요소가 된다. 따라서 우리나라 지정항만에 설치되어 있는 방파제의 피복재와 제1중간피복재와의 질량비를 구하고 이들의 분포를 <그림 5.3.4>에 도시하였다. 이 때 피복재는 테트라포트를, 중간피복재는 사석을 사용한 경우에 대하여만 분석하였다.



<그림 5.3.4> 피복재와 중간피복재의 질량비 분포.

이 그림을 보면 대부분의 경우 사용된 중간피복재의 질량은 피복재 질량의 1/10에 해당하거나 그 보다 약간 작은 것으로 나타났다. 또한 중간피복재의 질량이 피복재 질량의 1/4보다 큰 사석을 사용한 경우도 적지 않았음을 알 수 있다. 이는 주로 방파제 보강공사를 하는 과정에서 피복석을 그대로 중간피복재로 사용한 경우가 많았기 때문인 것으로 추측된다.

제 4 절 토의

경사식 방파제는 여러 가지 장점으로 인해 가장 많이 채택되고 있는 구조형식으로 우

리나라에서도 방파제, 방사제, 도제, 호안 등에 가장 많이 사용되고 있다. 현재의 경사식 방파제의 설계 및 시공 기술은 거의 완성된 기술이라 볼 수 있으나, 수심이 깊을 경우 또는 지반이 연약할 경우 등에 대해서는 신기술에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 또한 피복재, 중간피복재 또는 소단의 이용에 관한 기술을 발전시켜 비탈면 경사를 조절하거나 건설재료를 줄이는 등 경제성과 구조적 안정성을 동시에 확보할 수 있는 기술을 개발하는 연구 또한 매우 중요하다. 이러한 기술을 개발하기 위해서는 현재 건설되어 있는 경사식 방파제의 현황을 파악하고 개선점을 찾아 하나씩 풀어 가는 것이 중요하다. 이러한 배경과 필요성에 따라 제1차년도 연구에서는 현재까지 우리나라의 무역항과 연안항에 건설된 경사식 방파제에 대해 주로 제체의 단면구조를 중심으로 분류, 정리하여 1차적인 데이터베이스를 구축하고 통계적 특성을 분석하였다. 제2차년도인 금년도 연구에서는 구축된 데이터베이스의 일부 누락자료를 보완하고, 오류를 확인 수정하였으나 자료간 서로 다른 점이 있는 등 문제점이 있었으며, 또한 이후 지정항만에서 제외된 항만의 자료는 데이터베이스에서 제외하였고, 추가된 항만에 대해서는 관련 자료를 조사하였으나 현재의 자료와 일관성에 문제가 있어 이를 데이터베이스에 포함시키지는 않았다. 또한 1992년 이후 증축, 보강 또는 보수된 자료를 각 지방해양수산청 별로 조사하였으나, 현재의 데이터베이스에 통합하는 데는 문제가 있어, 현재 해양수산부에서 수행 중인 항만시설관리를 위한 데이터베이스 구축이 완료된 후 이 자료와 함께 종합하는 것이 바람직한 것으로 판단되어 데이터베이스에 포함시키지는 않았다. 한편, 항만별로 구축된 데이터베이스를 관할 지방청별 항만별로 재구성하였고, 경사식 방파제의 안정성에 초점을 두고 각 단면의 특성 및 이들의 통계적 특성에 대해 분석하였다. 이로부터 현재 우리나라에 설치되어 있는 경사식 방파제 단면의 피복재의 안정성 변화, 피복재와 중간피복재의 질량비의 분포 등을 알 수 있었다. 이러한 분석결과는 실제 지표가 되거나 바로 사용될 수 있는 것은 아니며, 좀 더 정확한 그리고 광범위한 데이터베이스를 구축하면 이를 이용하여 여러 가지 경우의 조합에 대한 변화양상 또는 특성을 분석할 수 있다는 것을 보여주는 예라 할 수 있다. 따라서 현재 해양수산부에서 실시되고 있는 항만시설에 관한 데이터베이스 구축 사업과 통합하여 더욱 발전시킬 필요가 있다. 이로부터 항만시설의 유지관리를 주목적으로 하는 항만시설 데이터베이스가 좀더 다양하게 광범위하게 사용될 수 있을 것이다.

제 6 장 결론 및 향후 연구과제

제 1 절 결론

경사식 방파제의 안정성과 경제성을 향상시키는 기술을 개발하기 위하여 수행한 본 연구의 중요 결과는 연구 분야별로 다음과 같다.

1. 중간피복석의 사면고르기에 따른 전사면의 안정성 변화

중간피복석의 사면고르기를 일부 구간에서 생략하는 시공법이 사면의 안정성에 미치는 영향은 중간피복층과 피복층이 전혀 별개가 아니라 한 쪽의 움직임이나 변위는 다른 쪽의 움직임이나 변위를 유발하기 때문에 불안정성 면에서는 상호 원인과 결과의 관계가 있으므로 규명하기가 매우 어려운 현상이다.

중간피복층의 사면이 고르지 못하면 피복재는 설치 초기부터 맞물림 강도가 약하게 되어 파에 의해서 쉽게 피해가 발생하며 이는 이어서 중간피복층의 변형을 유발한다. 중간피복층에 고르기를 시행하면 상부의 피복재간에는 맞물림이 강화되어 피복재의 안정성은 강화될 수 있으나 중간피복석 자체간의 맞물림은 오히려 약화될 수도 있다.

따라서, 중간피복석의 사면고르기를 사면의 일부 구간에서 생략할 것인가를 판단하려면 피복층 자체 뿐 아니라 중간피복층의 거동이나 변화도 동시에 고려하여야 할 것이다. 따라서, 불규칙파를 사용한 2차원 수리모형실험에서 피복층의 패해량과 중간피복층의 단면 변화를 동시에 비교하여 다음과 같은 검토 결과를 얻었다.

① 소단의 형식과 관련해서는 피복층과 중간피복층의 안정성은 유사하게 변화한다. 즉 사면의 미끌림 억제에 효과가 큰 형상의 소단을 설치하면 그렇지 않은 경우보다 피복재 및 중간피복층은 더 큰 파에서도 안정하며 패해량도 감소된다. 즉, 사면을 효과적으로 지지할 수 있는 소단을 설치하는 것은 피복재의 안정계수를 대폭 향상시키는 것과 동일한 효과가 있다.

② 중간피복층에 사면고르기를 시행하면 피복재의 패해량이 감소되며 중간피복층의 단면 변화도 적게 된다.

③ 중간피복층에서 사면고르기를 사면의 전체에서 생략하는 안과 정지수면하의 전 구간

에서 생략하는 안 그리고 정지수위를 기준으로 설계파고보다 더 깊은 구간에서 생략하는 3가지 안에 대해서 비교할 때, 피복층과 중간피복층의 안정성 모두는 속고르기를 적게 생략한 안에서 크게 나타난다.

④ 따라서, 중간피복층의 속고르기를 부분적으로 생략하려 한다면 적절한 소단을 설치하는 경우에 한하여 기준수위로부터 설계파고보다 깊은 구간으로 제한함이 바람직하다고 판단된다. 이때의 기준수위는 통상의 설계 고조위가 아니라 설계파고, 수심 및 조위차를 동시에 고려하여 낮은 조위를 선정해야 할 것이다.

2. 경사식 방파제에 작용하는 파력 측정

경사제에 작용하는 파력을 하중계로 직접 계측하기 위하여 경사제 모형틀을 사용하며 대용 속채움 재료를 사용하는 방법은 반사율과 전달율로 판단할 때 사용 가능한 방법임을 확인하였다.

그리고 규칙파를 사용한 비월파 실험에서 입사파, 사면상의 수위, 사면에 작용하는 파압, 제체에 작용하는 파력 및 제체 내의 간극수압을 동시에 측정하여 1차 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

① 입사파고에 대한 사면에서의 최대 수위차의 비는 파고가 증가할수록 감소하며, 주기가 길수록 증가한다.

② 사면상의 정지수위에서의 파압과 수평파력과의 위상차는 매우 크며 입사파의 주기가 2.0초일 때에는 파고의 증가에 따라 감소하고 주기가 1.5초일 때에는 파고의 증가에 따라 완만하게 증가한다.

③ 제체에 작용하는 수평력은 항상 파가 진행하는 방향의 값이 의해 방향의 값보다 크다.

④ 수평력이 최대가 될 때에 파력의 합력의 크기는 수평력의 방향에 따라서는 거의 변하지 않는다.

⑤ 파의 진행방향 수평력의 최대값에 대한 연직 상향력의 최대값의 비는 주기가 1.5초인 경우에는 파고가 증가함에 따라 증가하나 주기가 2.0초인 경우에는 파고가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.

⑥ 파의 진행방향과 반대방향 수평력의 최대값에 대한 연직 하향력 최대값의 비는 주기가 1.5초에서나 2.0초에서 모두 파고가 증가함에 따라 증가한다. 이 때 이들 비의 값은 주기가 2.0초인 경우에 더 크다.

⑦ 사면에서 계측한 최대 수위값으로 계산한 사면의 정지수위에서의 파압은 계측한 파압보다 평균 38%정도 크며, 잠정이론으로 계산한 파압은 계측한 파압보다 평균 66%정도 크게 나타난다.

⑧ 사면에서 계측한 파압으로 제체에 작용하는 수평파력을 계산하면 하중계로 직접 계측한 수평파력보다 11~22%정도 크게 평가된다.

⑨ 잠정이론으로 제체에 작용하는 수평파력을 추산하면 본 실험조건의 경우 하중계로 직접 계측한 수평파력보다 2배 내외로 크게 되어 과다설계를 유발한다. 따라서 파력 예측을 위한 심층 연구가 필요하다.

3. 경사식 방파제의 파력 해석을 위한 수치해석

경사식 방파제의 활동안정성 및 지지력등의 검토에 필요한 방파제 제체내부에서의 간극수압과 파력을 결정하기 위한 수치모델을 수립하고 수리모형실험 자료를 이용하여 그 적용성을 검증하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 세부결론은 다음과 같다.

① 전사면 계측파압시그널을 분석하여 경사면에 따른 파압의 진폭과 위상변화를 도출하였다. 진폭과 위상은 상당정도로 변화하였으며 실험조건에 따라서는 정수면 보다는 그 이하에서 최대 파압고가 형성되었다. 이는 전사면에서 쇄파를 비롯하여 매우 복잡한 비선형파랑변형이 발생하기 때문이다. 위상변화도 파 진행방향으로 볼 때 측점간 위상이 전도되는 경우가 발생하였다.

② 수치모델의 적용에 의하여 계산된 간극수압고를 수리모형실험의 결과와 비교한 결과, 이들간의 정량적 일치정도는 비교적 양호하였다. 따라서, 전반적으로 볼 때, 본 수치모델에 의하여 계산된 내부파동장과 제체파력 및 모멘트가 유효한 것으로 판단된다. 모든 실험조건에서 정수면 부근에서의 계산치가 실험치를 다소 상회하는 점이 발견되나 전반적으로 그 값들이 제체 중반부에서의 값들에 비하여 크지 않으며 더욱이 방파제의 보수적인 설계관점에서 볼 때 계산치의 상회는 무방한 것으로 판단된다.

③ 파력과 모멘트를 계산한 결과, 수평파력에서는 전사면 파압에 의한 파력과 내부마찰력이 거의 동일한 크기와 위상변화를 보이는 반면, 연직파력에서는 이들 파력이 절대크기는 비슷하나 위상차이로 인하여 거의 상쇄되어 연직파력이 거의 내부마찰력에 의하여 결정되는 것으로 나타났다. 내부에서의 관성력은 수평 및 연직파력에서 차지하는 비중이 매우 미미한 것으로 나타났다.

4. 국내 경사식 방파제의 현황

우리나라 경사식 방파제의 현황을 분석하기 위하여 지정항만의 경사식 방파제에 대해 제체의 단면구조를 중심으로 제1차년도 연구를 통해 구축된 1차적인 데이터베이스의 누락 및 오류를 수정하였다. 또한 1992년 이후 중축, 보강 또는 보수된 자료를 각 지방해양수산청 별로 조사하였으나 현재의 자료와 일관성에 문제가 있어 데이터베이스에 포함시키지는 않았다. 현재 해양수산부에서 수행 중인 항만시설에 관한 데이터베이스 구축이 완료된 후 함께 종합하는 것이 바람직한 것으로 판단되어 데이터베이스에 포함시키지는 않았다. 이 자료를 이용하여 경사식 방파제의 안정성에 초점을 두고 각 요소들간의 관련성 및 이들의 통계적 특성에 대해 분석하였다.

제 2 절 향후 연구과제

- 파력 측정을 위한 본 실험에서는 비록 공극율은 사석과 비슷하나 크기가 매우 균일한 대용 속채움 재료를 사용하였다. 실제 현장에서는 크기가 $0.015\sim0.03 m^3$ 사이에서 변하는 사석을 사용한다. 그러므로 반사율과 전달율 면에서는 큰 문제가 없을지 모르지만 제체 내부의 파동장에서는 차이가 클 것으로 예상된다. 따라서, 향후 재료를 적절한 재료를 구할 수 있다면 속채움 재료의 크기를 변화시키는 실험이 필요하다고 판단된다.
- 파력과 관련하여 분석 대상 항목이 주기에 따라 매우 다양하게 변하는 것을 보았다. 따라서 향후 연구에서는 주기를 다양화한 실험이 추가되어야 할 것으로 판단된다.
- 실험에 사용한 파는 형장의 설계파와는 전혀 다른 규칙파이며 또한 사면에서 쇄파가 발생하지 않는 파들이었으므로 향후 쇄파가 되는 극한조건 또는 불규칙파 실험으로까지 실험 범위를 확장하는 것이 필요하다. 불규칙파 실험을 위해서는 매우 많은 시간과 노력이 필요할 것이다.
- 주어진 파 조건에서 제체의 투수성은 발생 총파력의 변화에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 실험조건을 완전 비투과 사면을 포함하도록 확장할 필요가 있다고 판단된다.
- 본 연구에서 수립한 수치모델의 유효성은 입력자료로 활용된 전사면 파압정보 (외부 피복층 하)와 그리고 계산된 내부파동장의 정확성 여하에 달려 있다. 본 연구에서는 내부

파동장의 정확성 제고에 역점을 두었기 때문에 전사면 파압정보는 수리모형실험에 의하여 계측된 실험치를 이용하였다. 그러나, 실험을 배제하고 수치해석으로만 내부 파동장 및 파력 (특히, 전사면 파력)을 결정하기 위해서는 전사면 파압에 대한 체계적인 사전 정보가 확보되어 있어야 한다. 이를 위하여 다양한 입사파 및 방파제 단면조건에 대한 수리 실험연구가 수행되어야 될 것으로 판단된다.

- 본 연구에서는 수치모델의 계산영역을 전사면 피복석을 제외한 내부쇄석부로만 정하였다. 그러나, 보다 정확한 내부 파동장 및 제체파력을 구하기 위해서는 계산영역을 피복층과 내부쇄석부로 구분, 설정하여 경계요소법을 적용하여야 한다. 이 경우에는 전사면 파압정보로서 피복층 외측면에서의 다양한 계측파압이 필요하다.

참 고 문 헌

- 한국해양연구소, 2000, 연안구조물의 설계기술 개발(I).
- 해양수산부, 1999, 항만 및 어항 설계기준. p.137.
- 해양수산부, 2001, 경사식 방파제의 최적설계기술개발(I).한국해양연구원
- 해양수산부. 1996. 항만편람.
- 해양수산부. 1997. 해양수산통계연보.
- 해양수산부. 1998. 해양수산통계연보.
- 해양수산부. 1999. 해양수산통계연보.
- 해양수산부. 2000. 해양수산통계연보.
- 해양수산부. 2001. 해양수산통계연보.
- 해운항만청. 1992. 전국항만구조물 도집.
- Barends, F.B.J., De Groot, M.B. and Hölscher, P., 1996, Hydro-geotechnical stability of breakwater, (ed.) Clifford, J.E., *Advances in Coastal Structures and Breakwaters*, Thomas Telford, pp. 322 – 335.
- Engelund, F., 1953, On the laminar and turbulent flows of ground water through homogeneous sand, *Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences*, Vol.3, No.4.
- Fair, G.M. and Hatch, L.P., 1933, Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand, *J. of Am. Water Works Assoc.*, vol. 25, pp. 1551–1565.
- Hannoura, A.A. and McCorquodale, 1986, Rubble mounds: numerical modeling of wave motion, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 5, pp. 800 – 816.
- Madsen, O.S. and White, S.M., 1976, Reflection and transmission characteristics of porous rubble-mound breakwater, CERC MR 76-5, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Mansard, E.P.D. and E.R. Funke. (1980). The Measurement of Incident and Reflected Spectra using Least Square Method. Proc. 17th Coastal Eng. Conf. pp.191–206.
- McWhorter, D.B. and Sunada, D.K., 1977, *Ground-water hydrology and hydraulics*, Water Resources Publications, pp. 65–82.

Oumeraci, H and Partenscky, H.W., 1990, Wave-induced pore pressure in rubble mound breakwaters, *Proc. 22nd. International Conference of Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1334-1347.

Sollitt, C.K. and Cross, R.H., 1972, Wave transmission through permeable breakwaters, *Proc. 13th Coastal Eng. Conf.*, Vancouver, pp. 1827-1846.

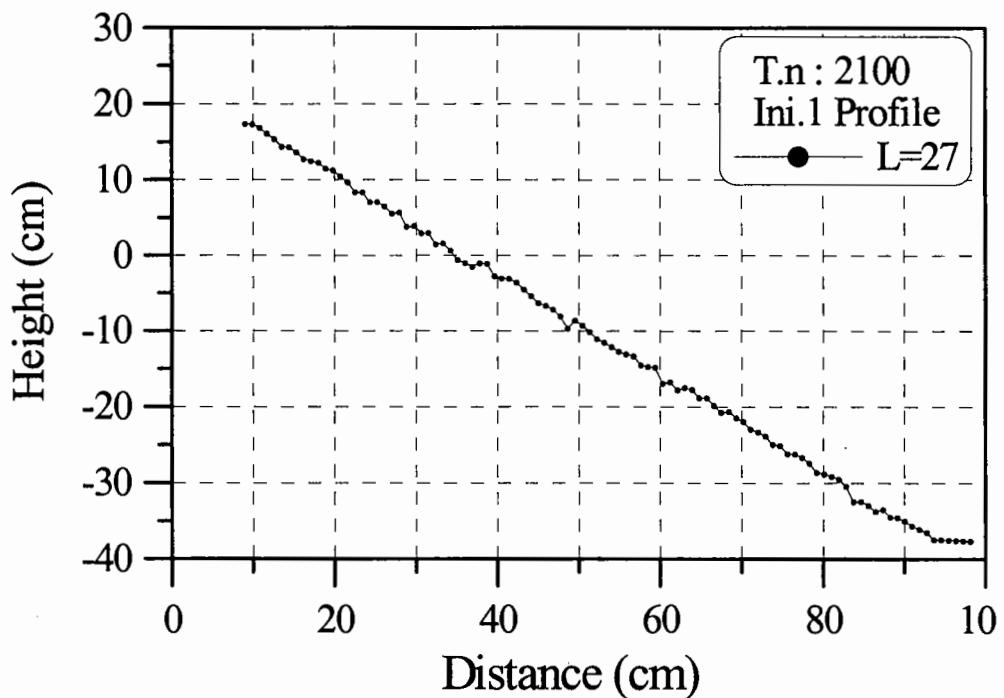
Sulisz, W., 1985, Wave reflection and transmission at permeable breakwaters of arbitrary cross-section, *Coastal Engineering*, 9(371-386).

US Army Corps of Engineers. 1984. Shore protection manual.

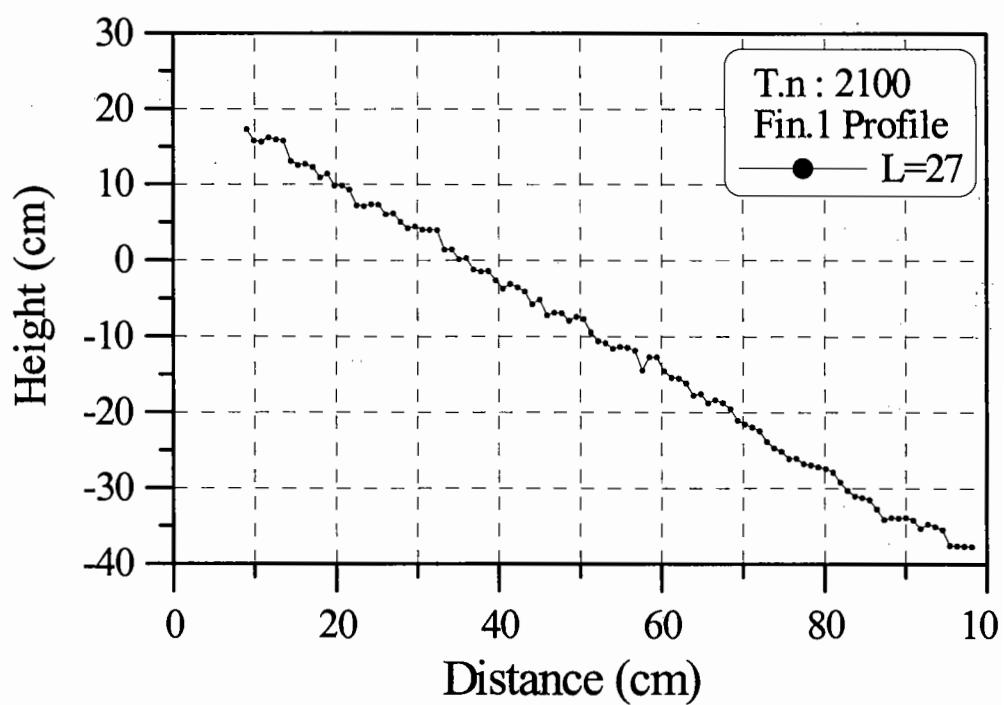
부 록 1

중간피복층의 연직방향 변형 실험결과

1-1안의 중간피복층의 영직방향 변형 실험결과 1회

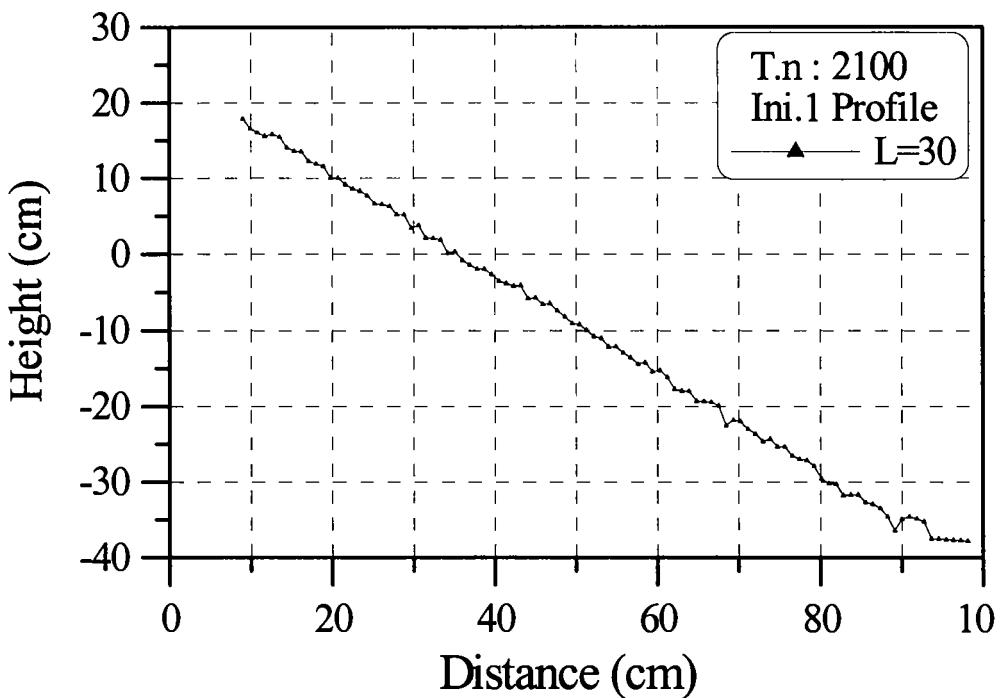


1-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

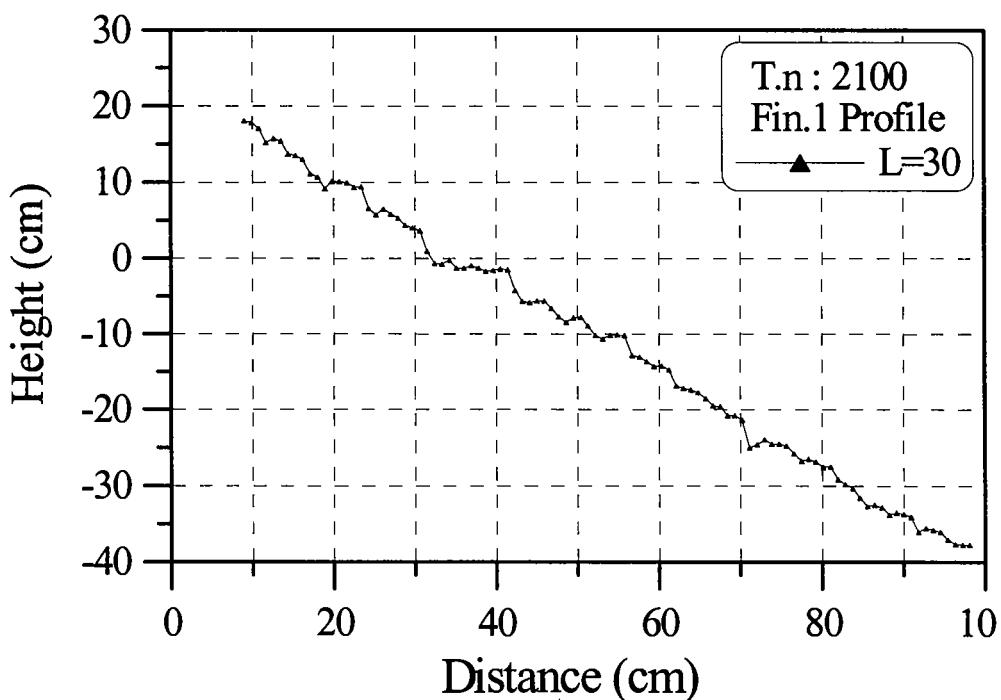


1-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

1-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

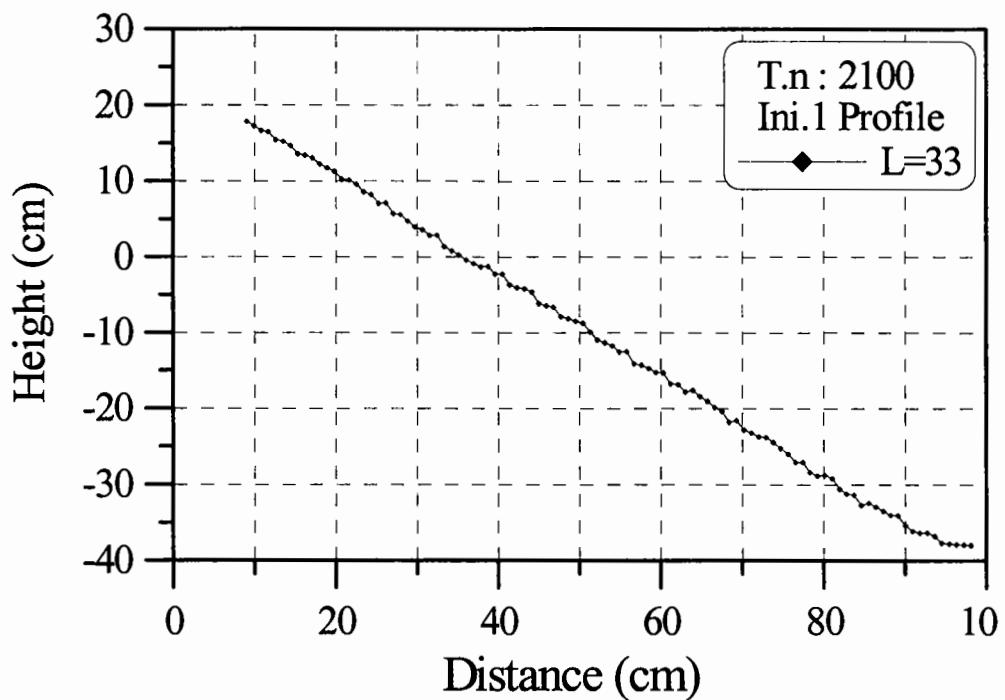


1-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

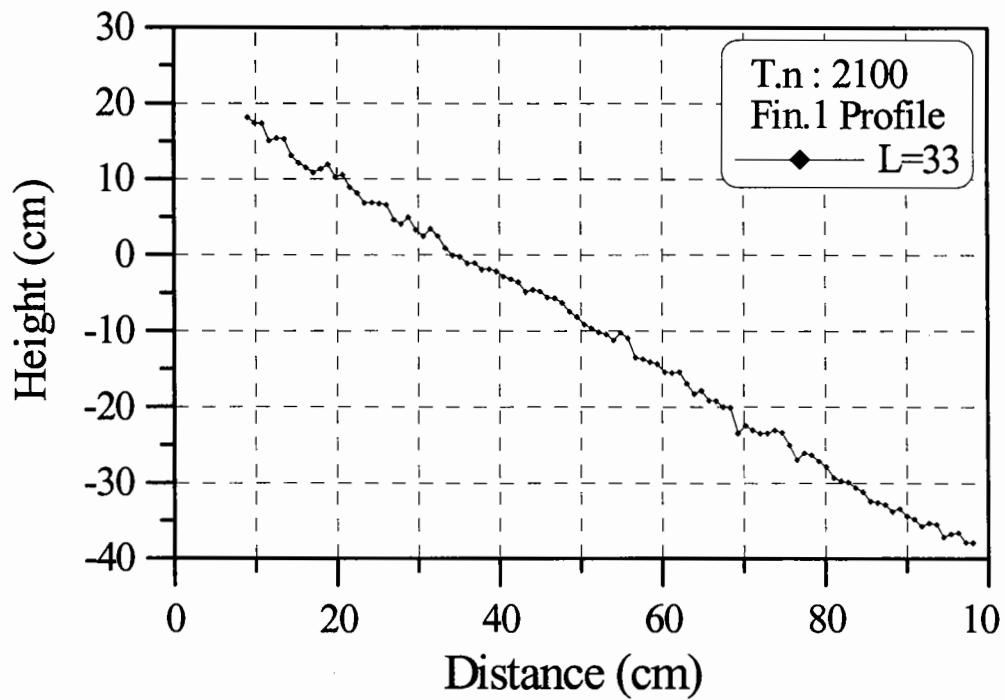


1-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

1-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

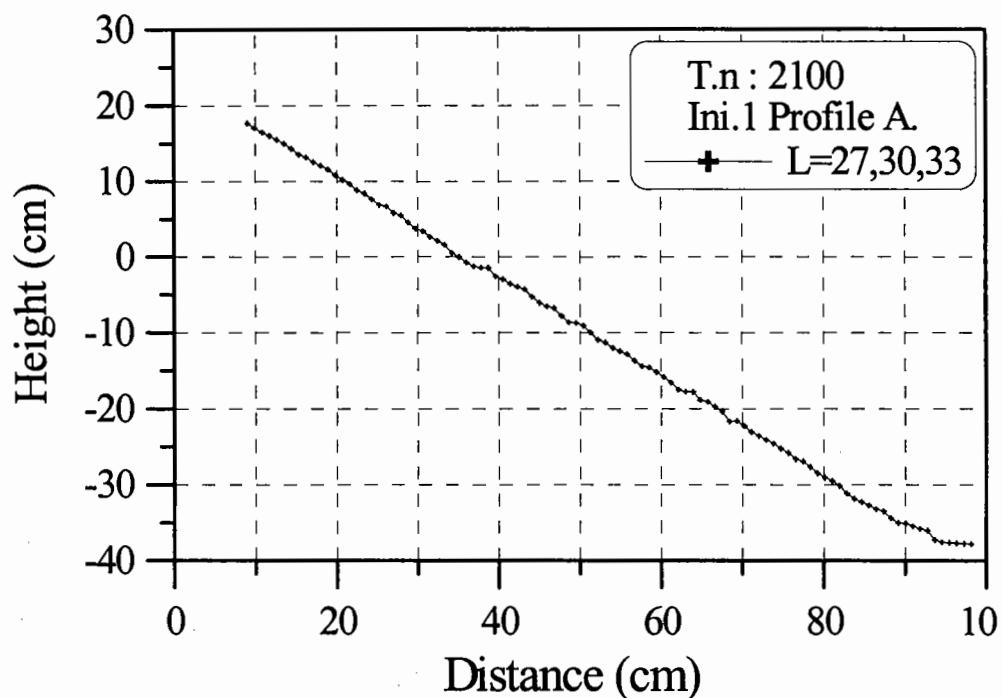


1-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

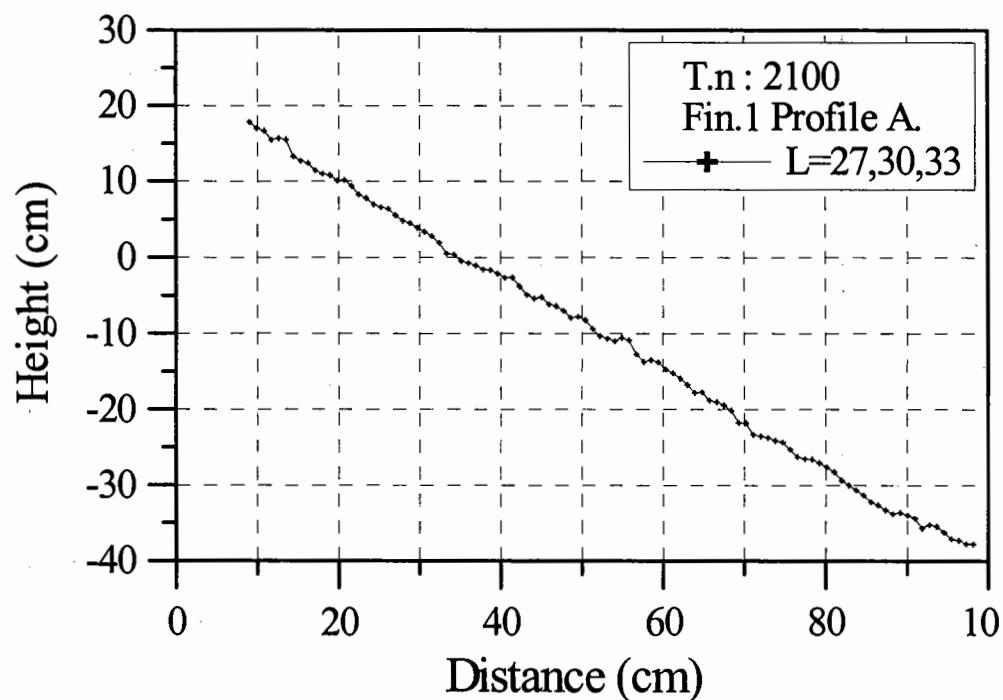


1-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

1-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

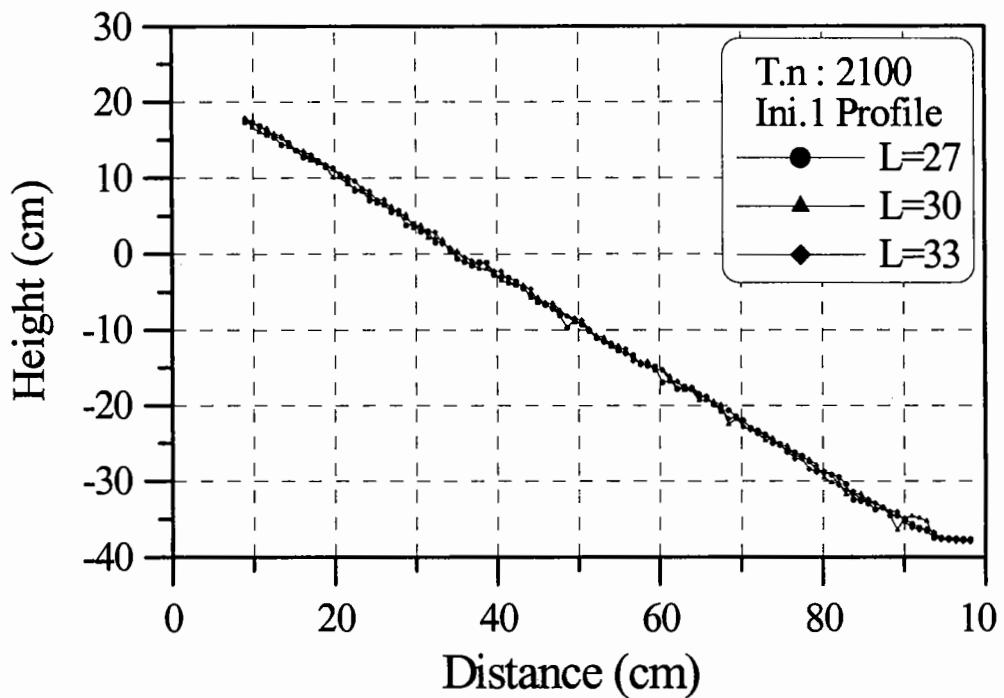


1-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

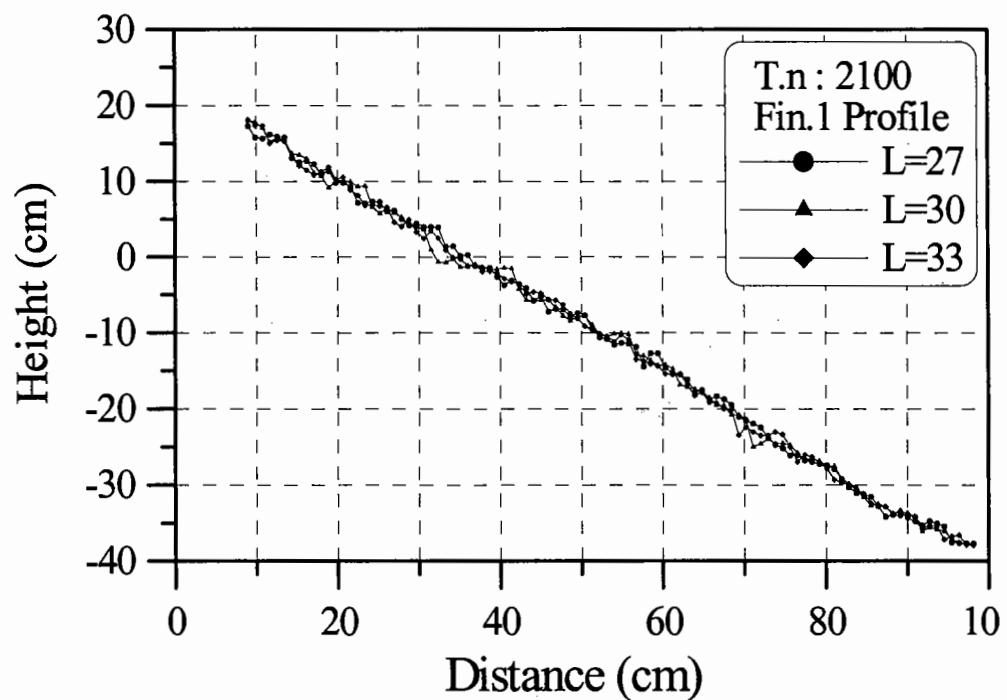


1-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

1-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

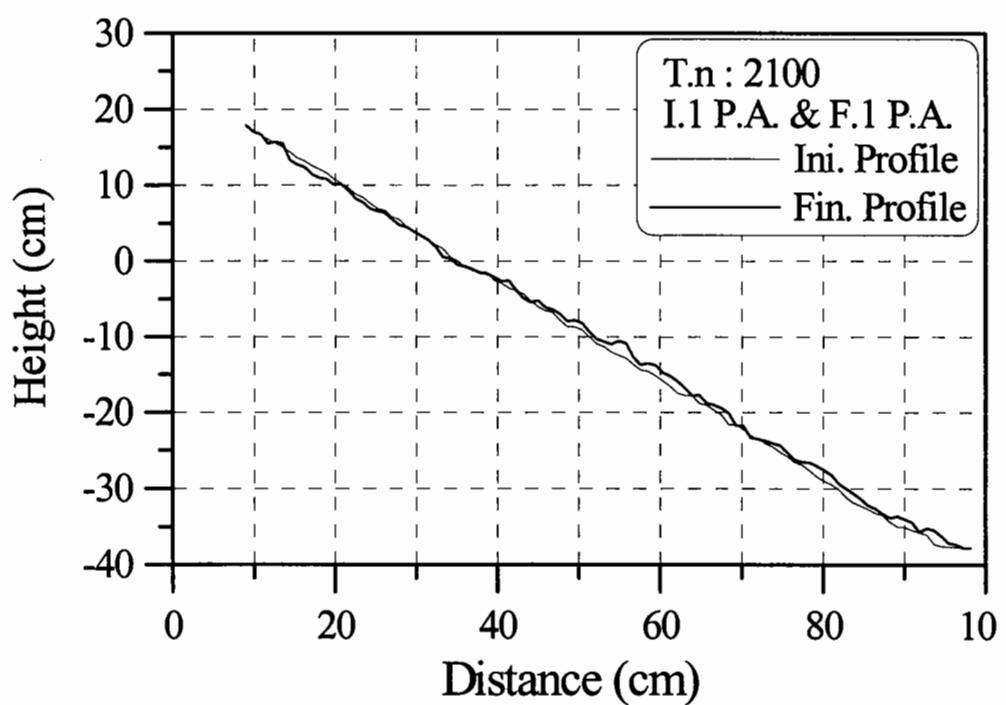


1-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

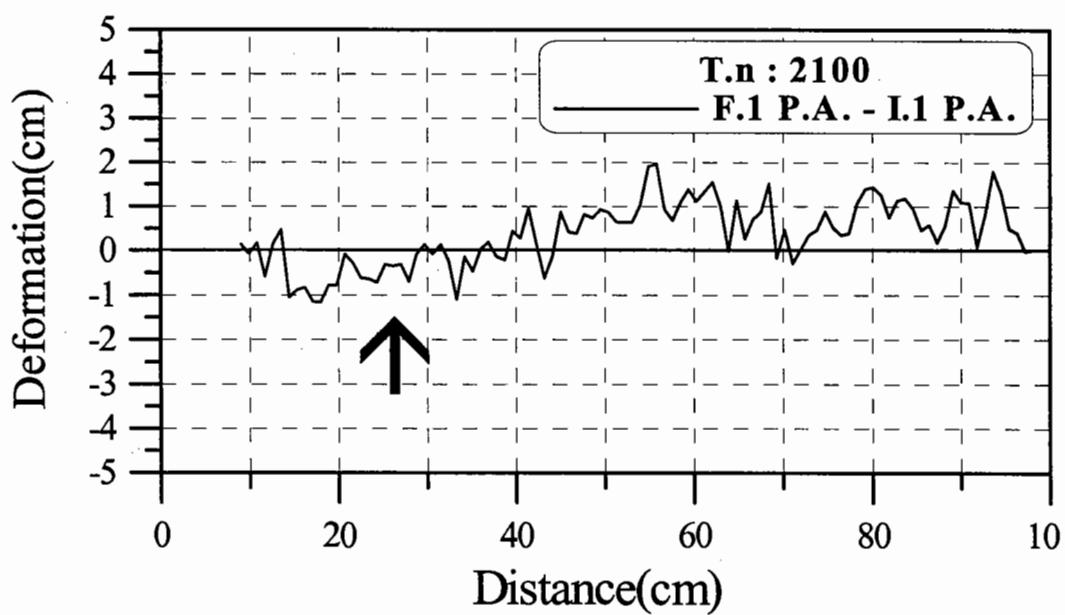


1-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

1-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

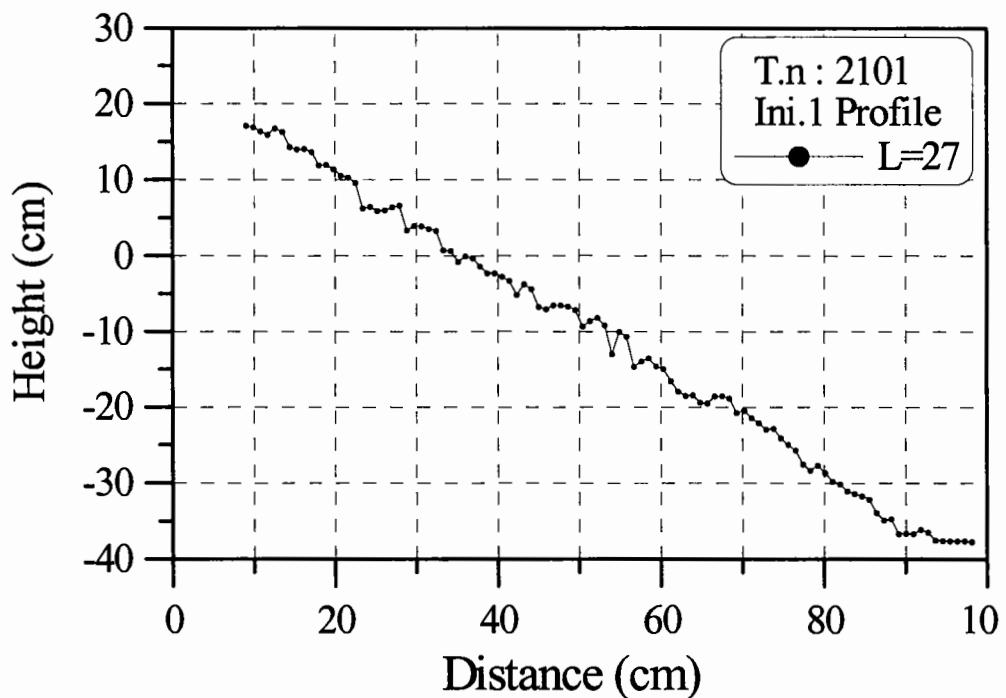


1-1안 1회 실험 피해전·후 필터층의 단면형상 평균의 비교

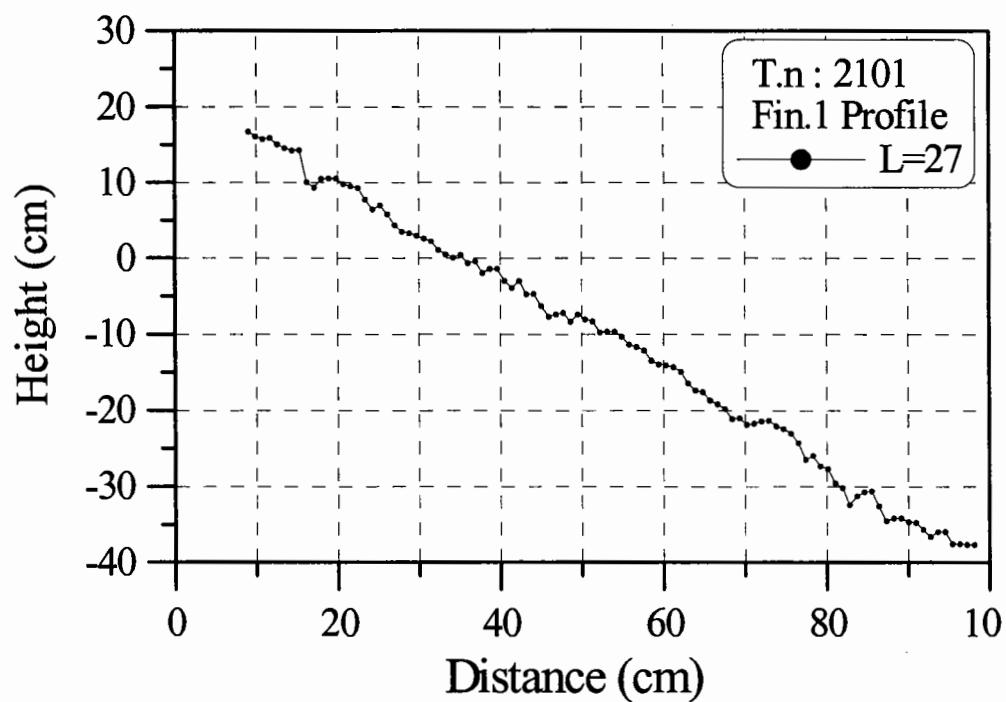


1-1안 1회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

1-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

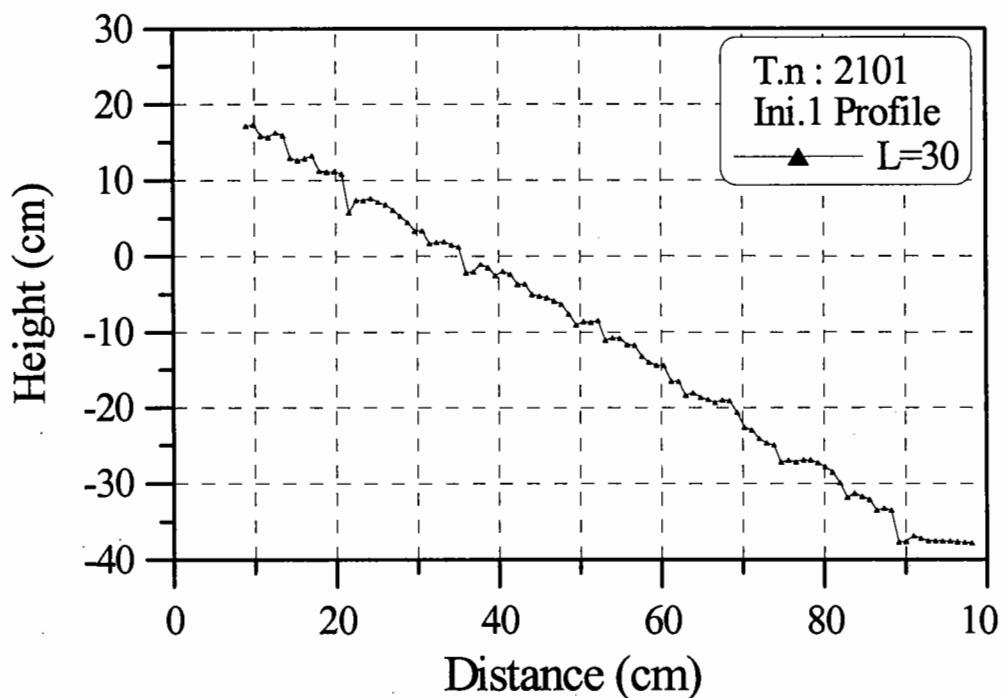


1-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

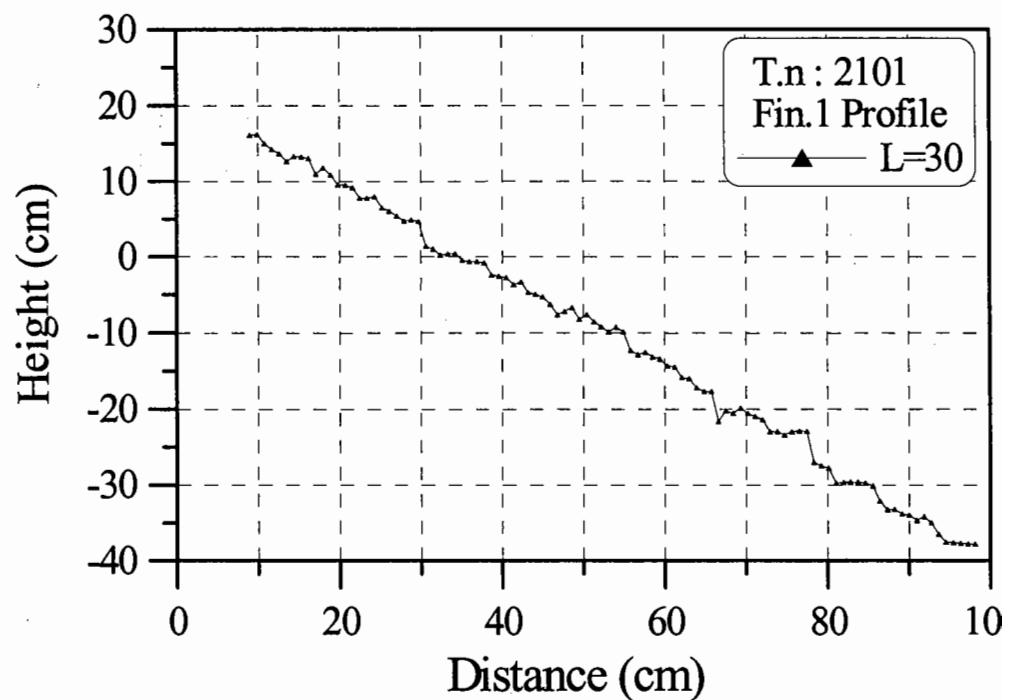


1-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

1-2안의 중간피복층의 연직 방향 변형 실험결과 1회

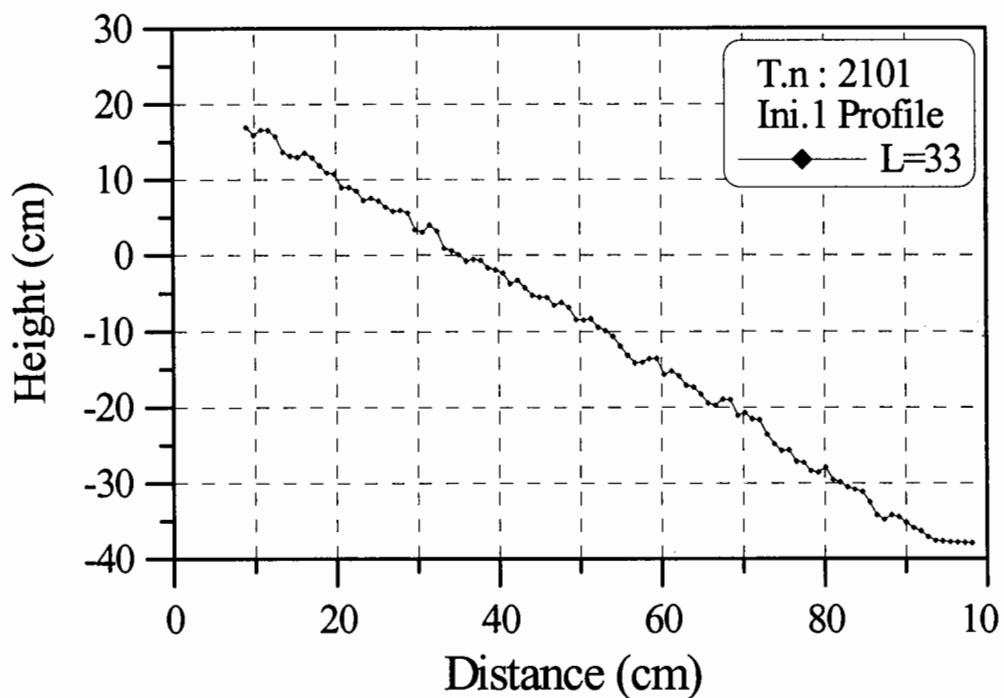


1-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

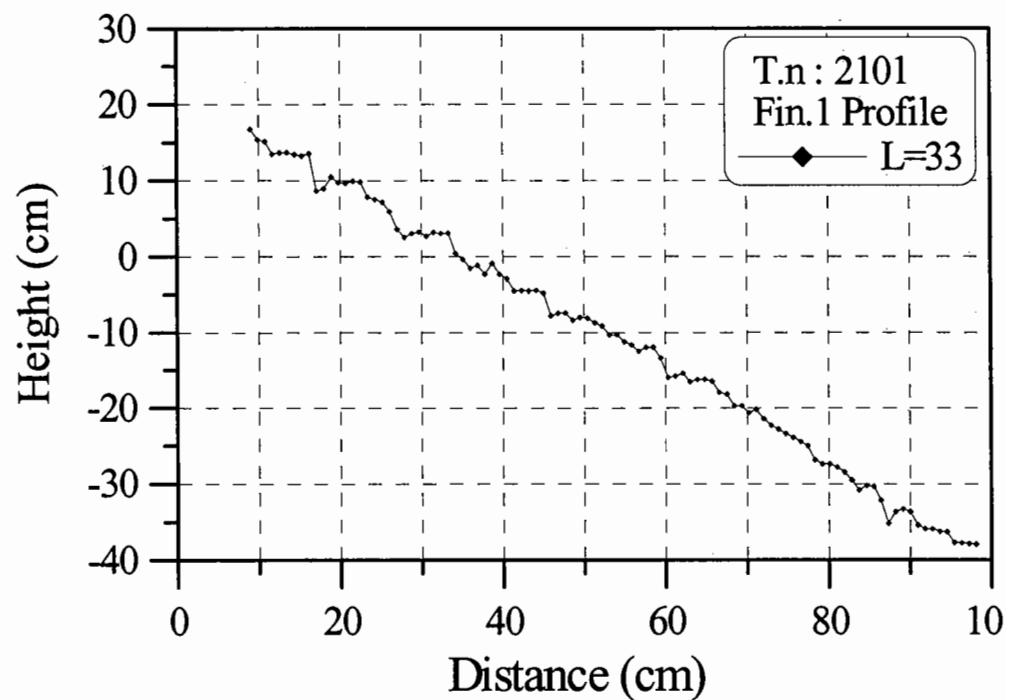


1-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

1-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

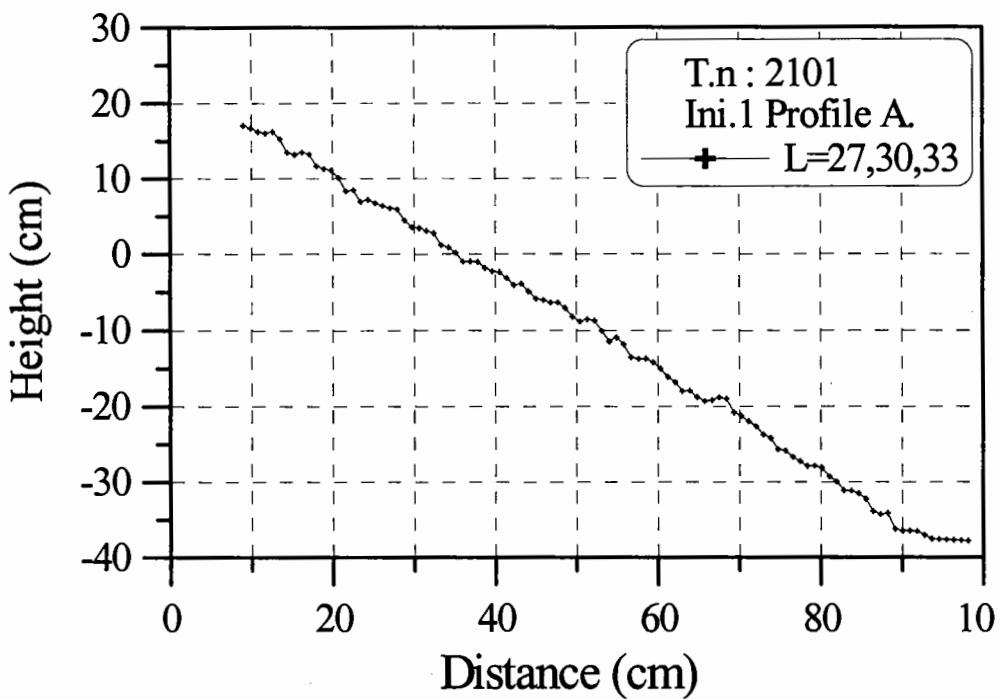


1-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

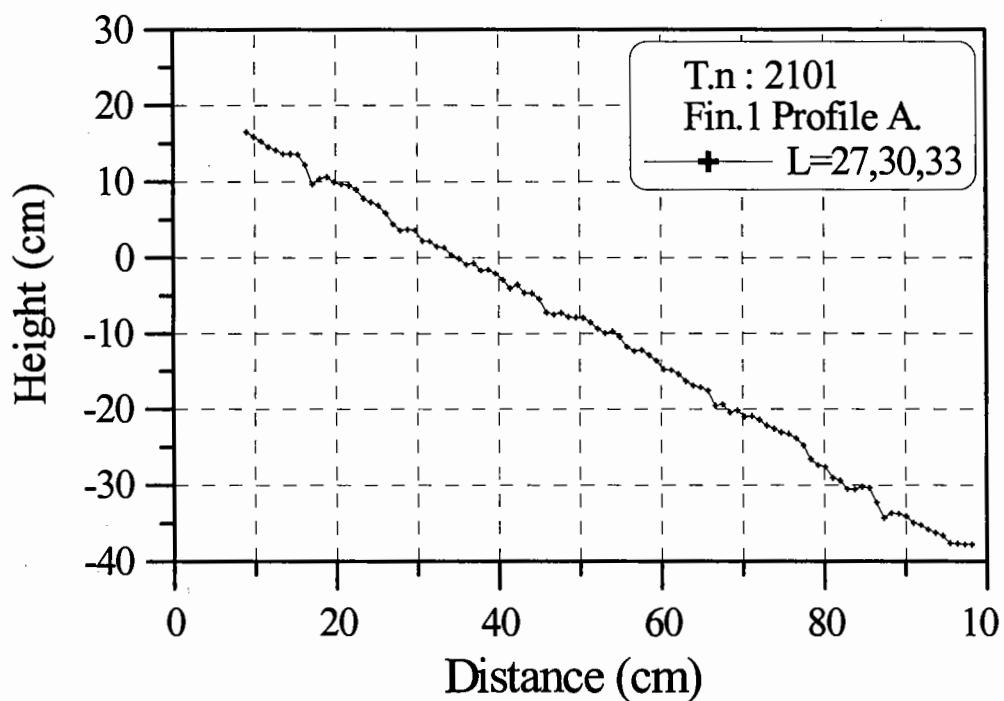


1-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

1-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

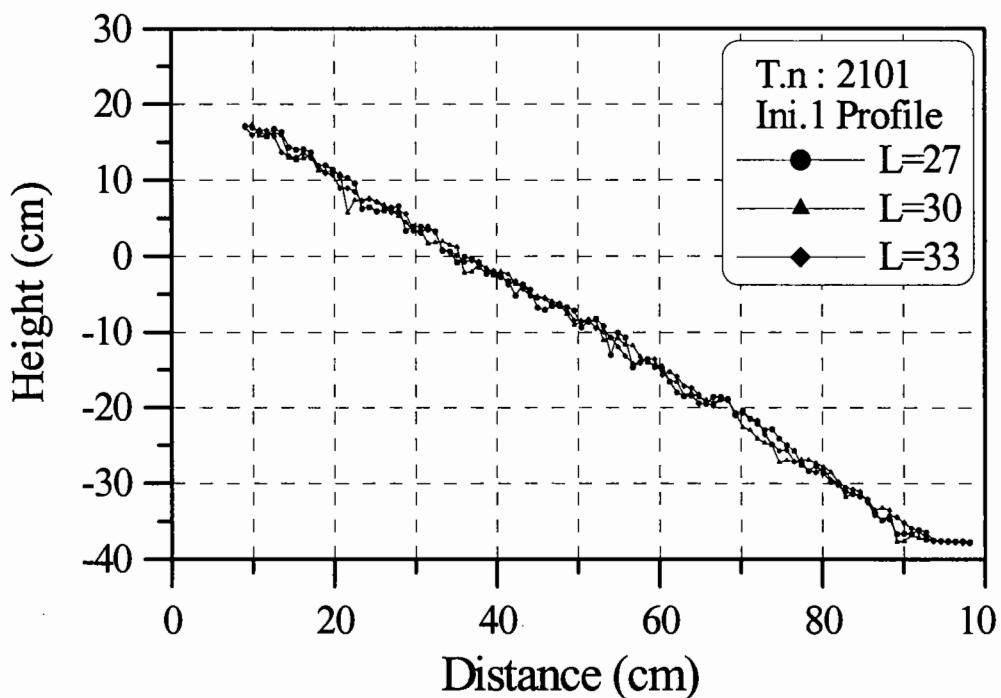


1-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

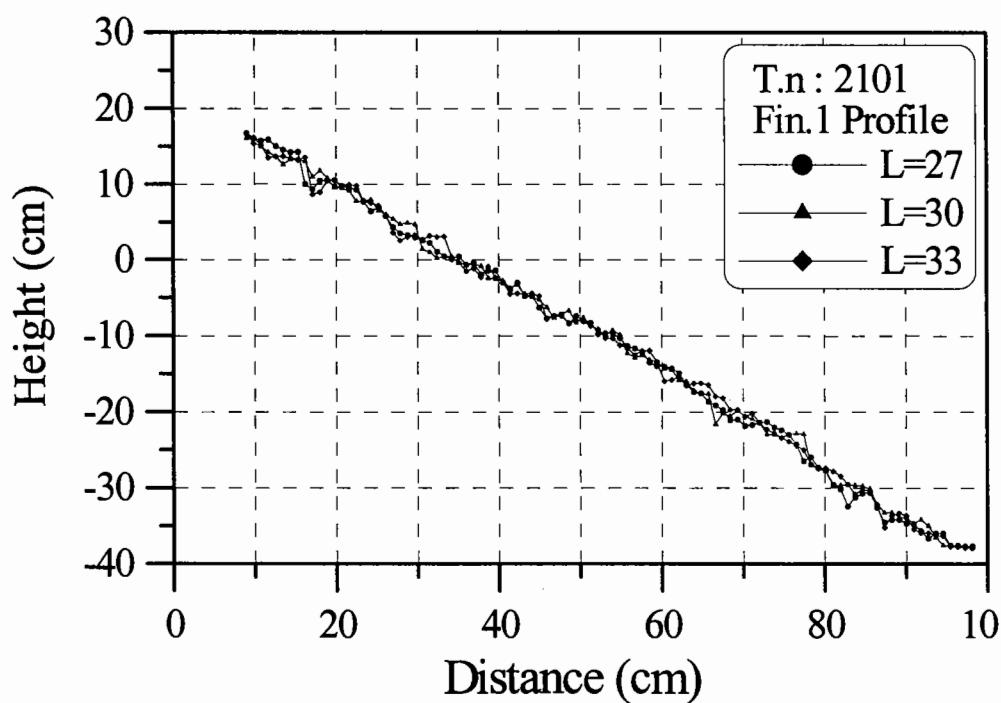


1-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

1-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

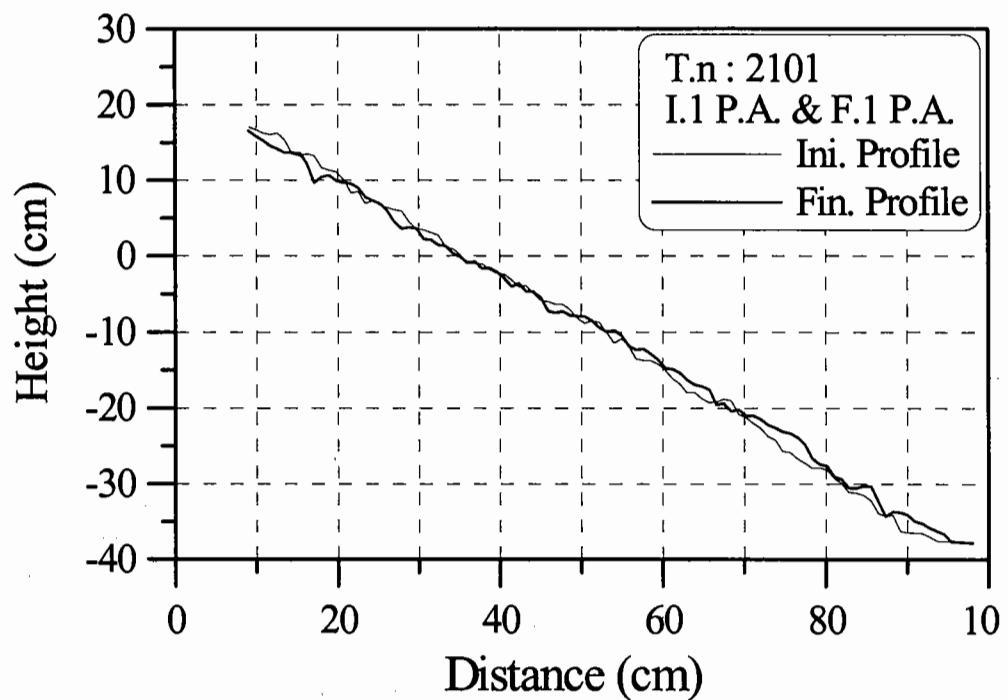


1-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

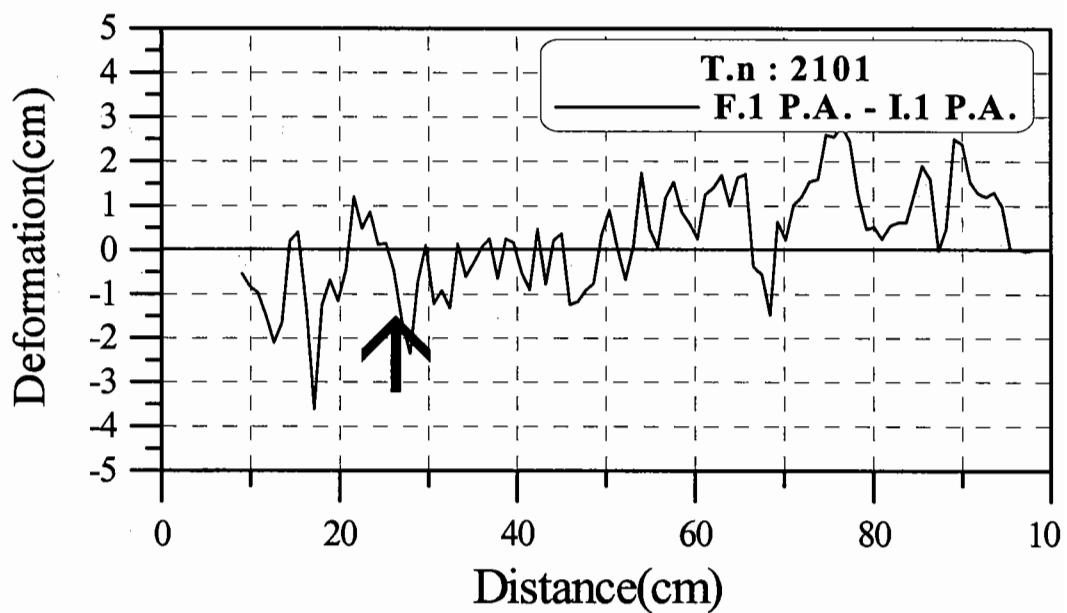


1-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

1-2안의 중간파복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

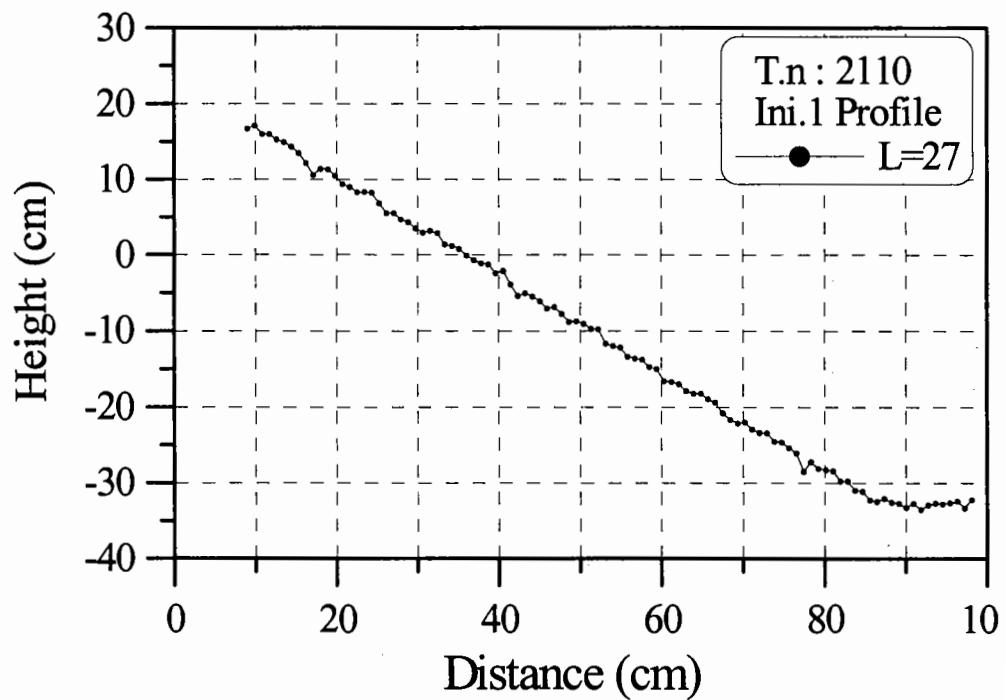


1-2안 1회 실험 피해전 · 후 필터층의 단면형상 평균의 비교

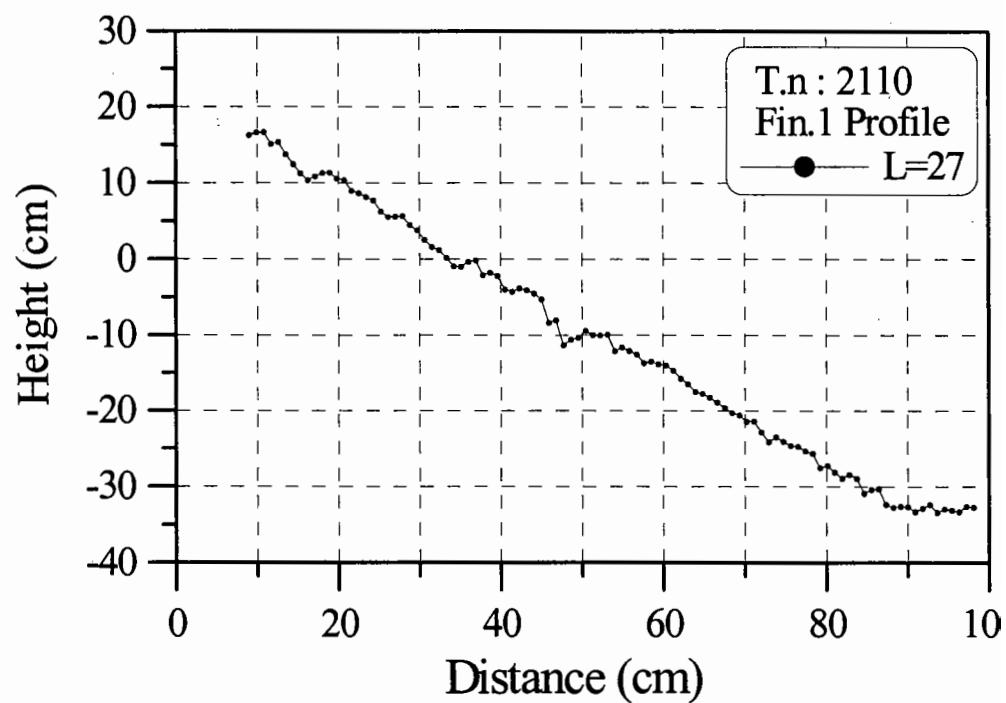


1-2안 1회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-1안의 중간파복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

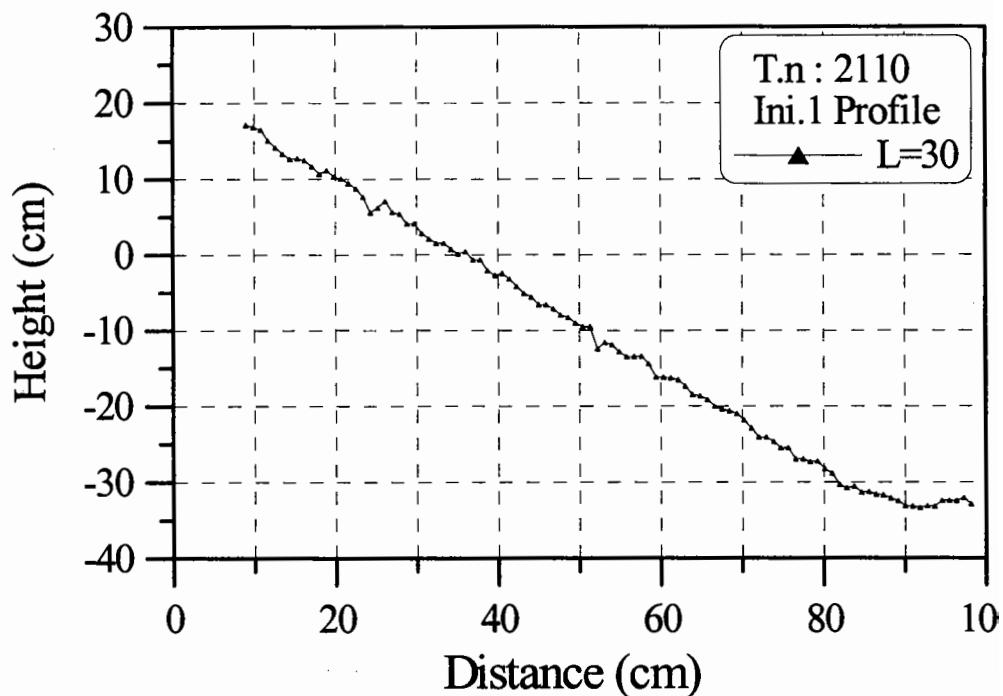


2-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

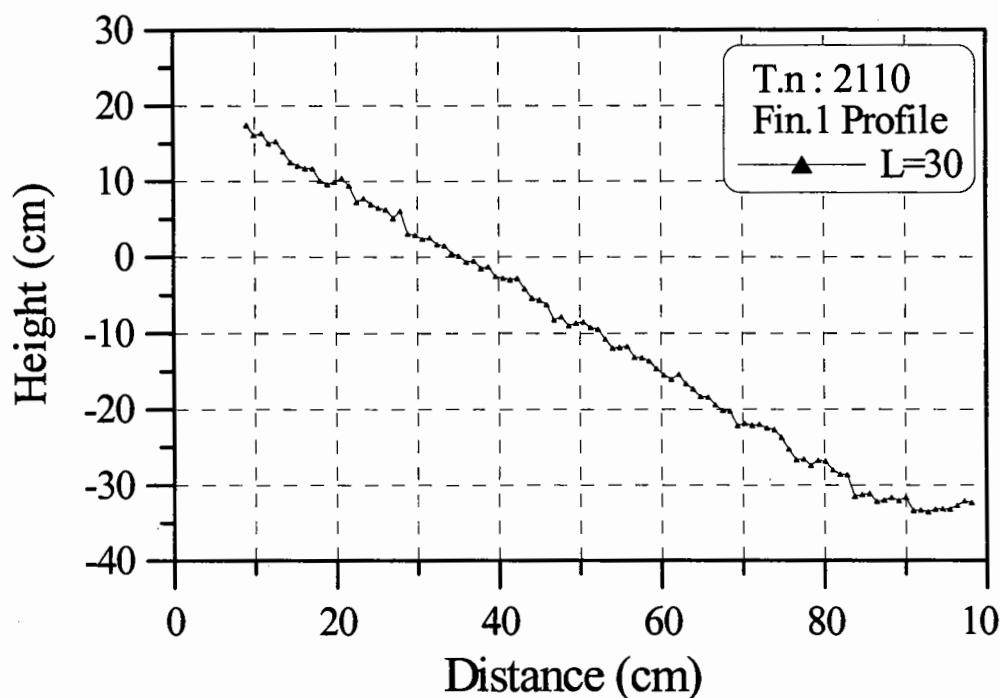


2-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

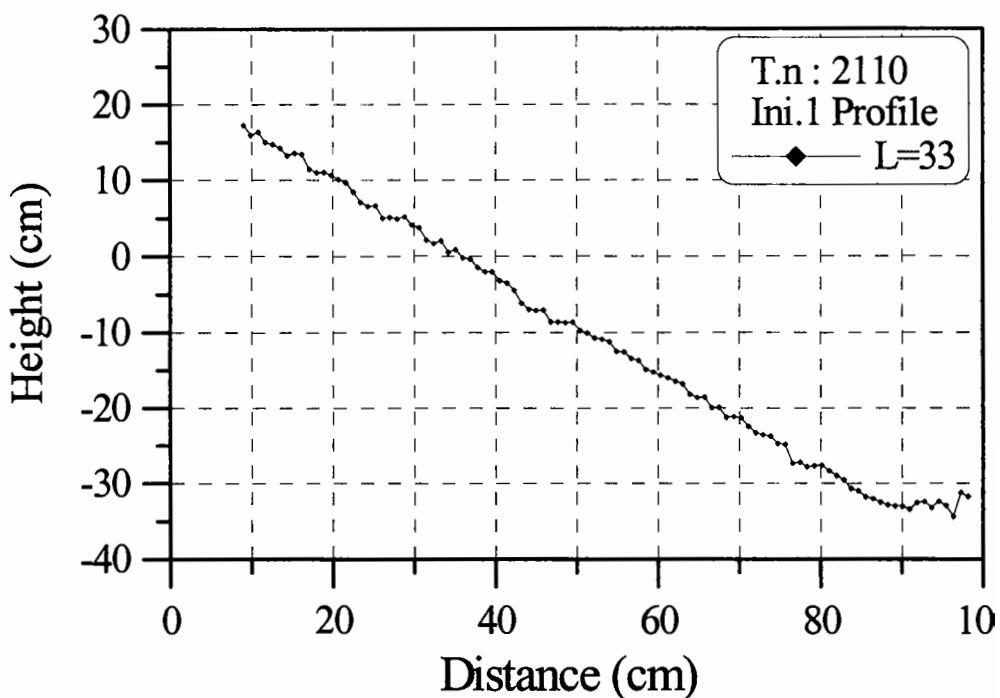


2-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

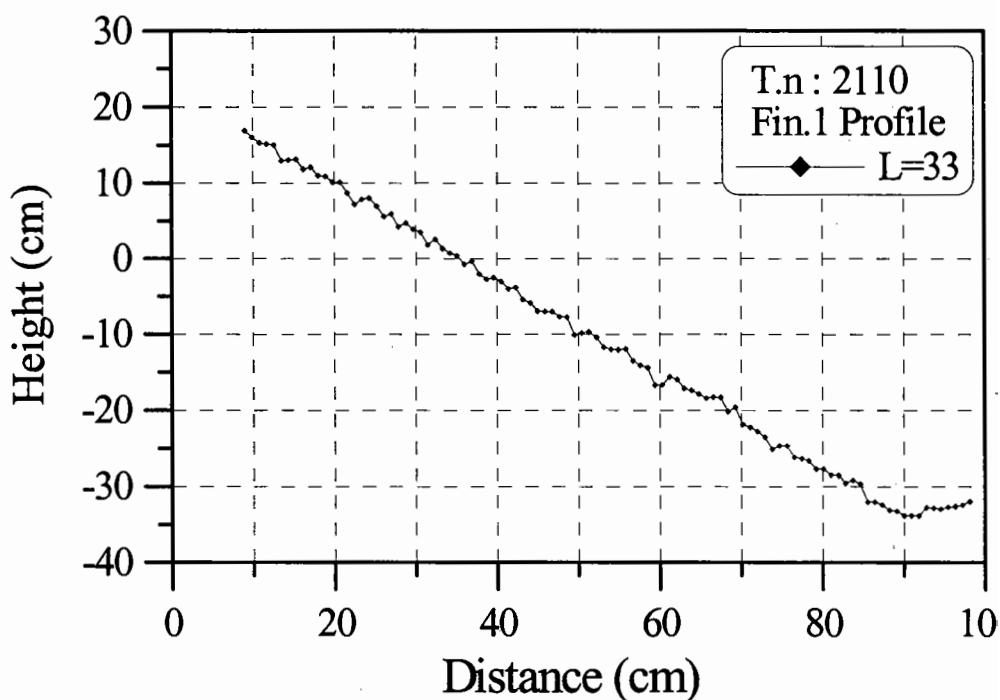


2-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

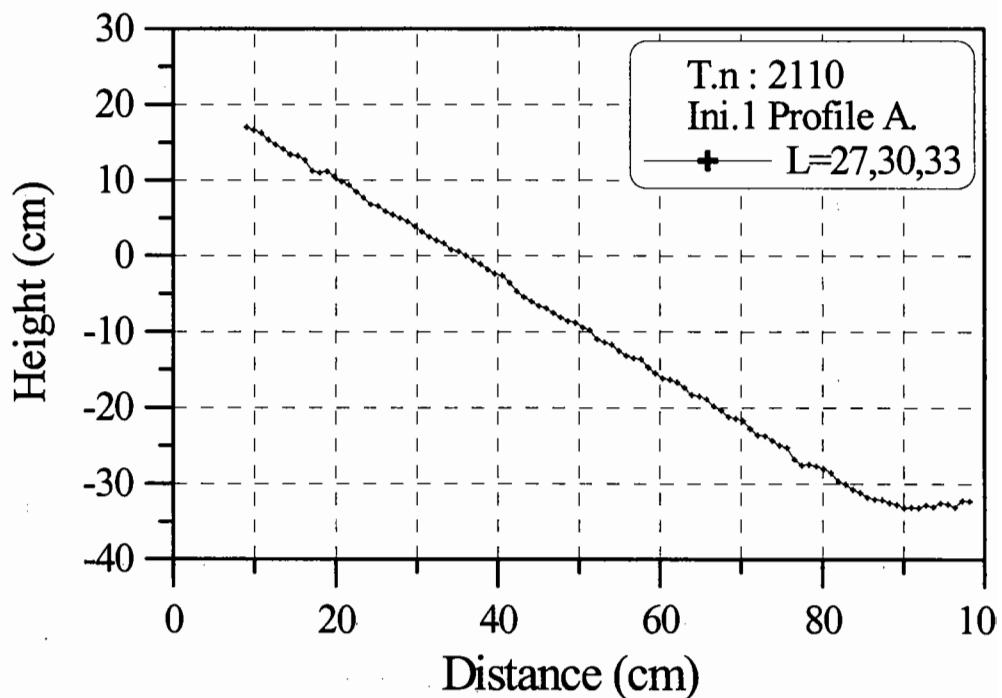


2-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

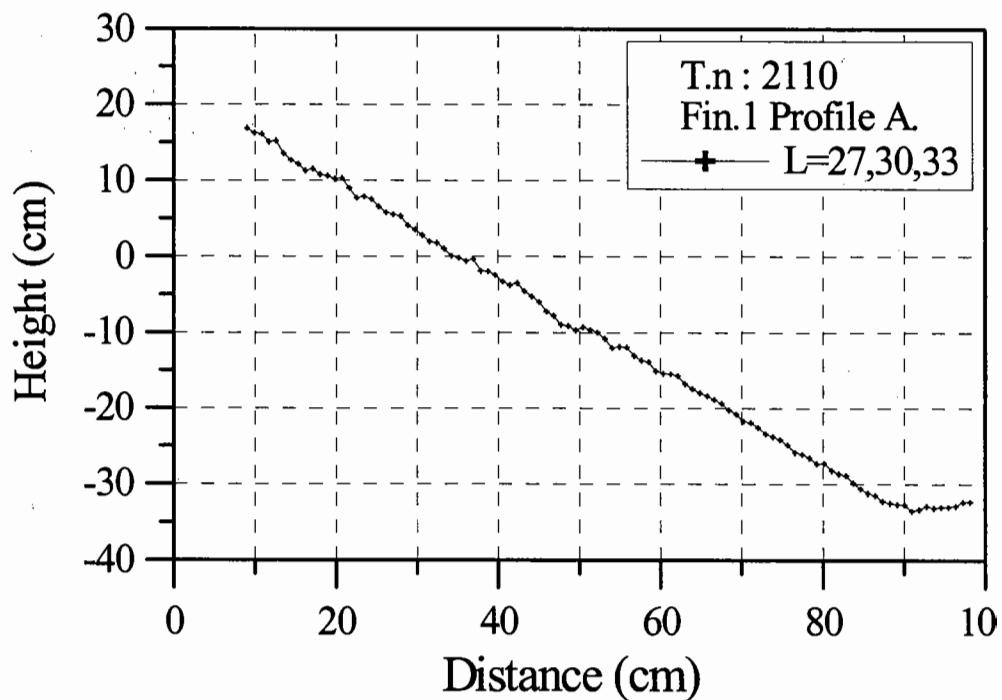


2-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

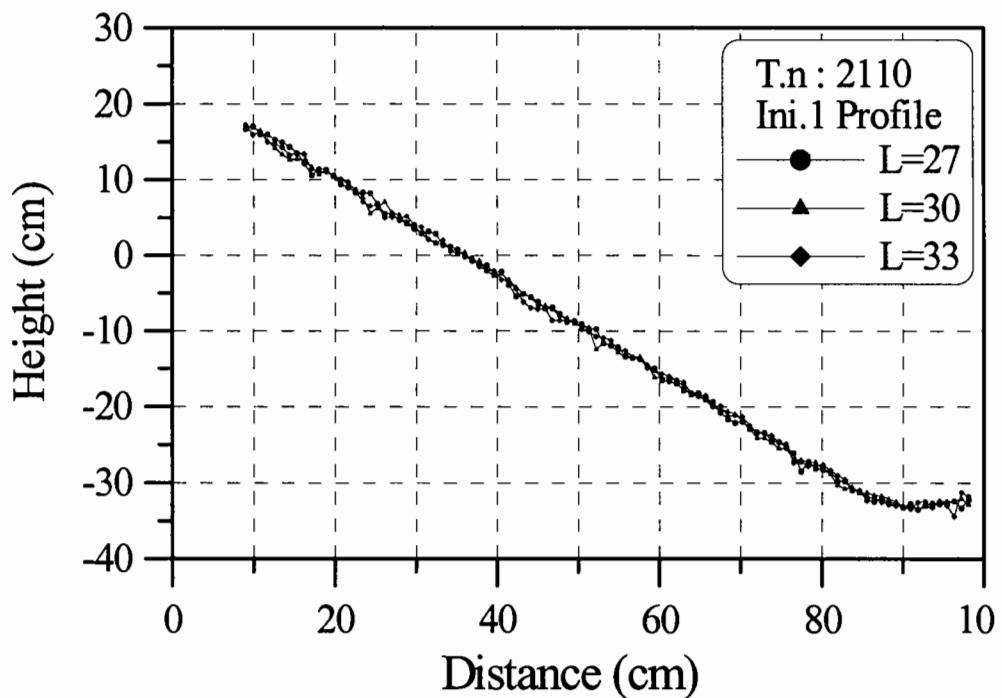


2-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

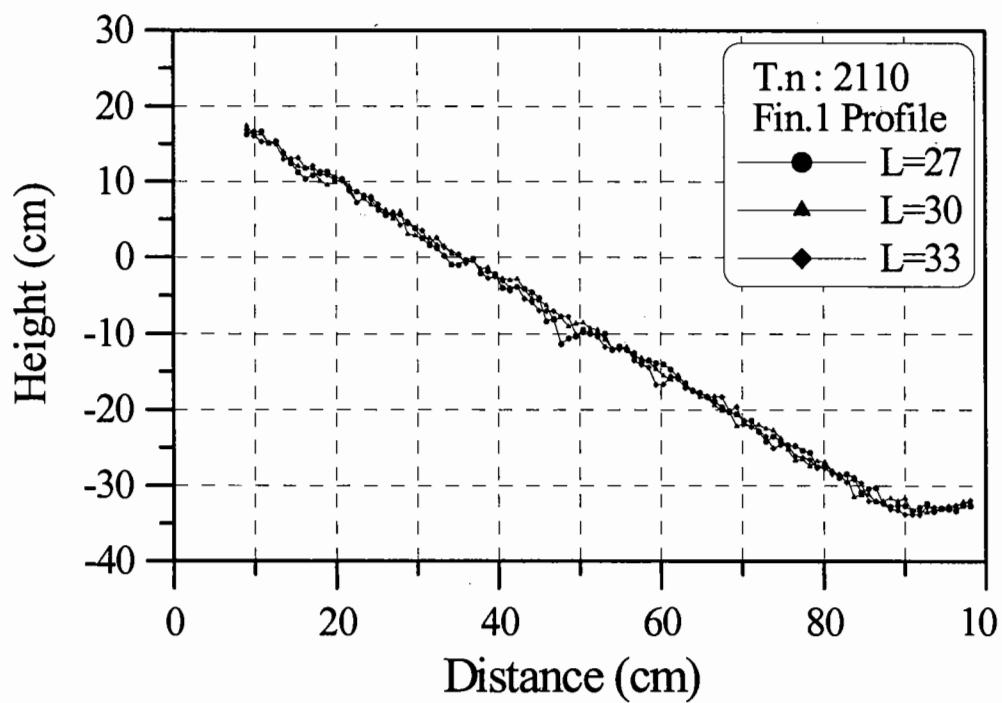


2-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

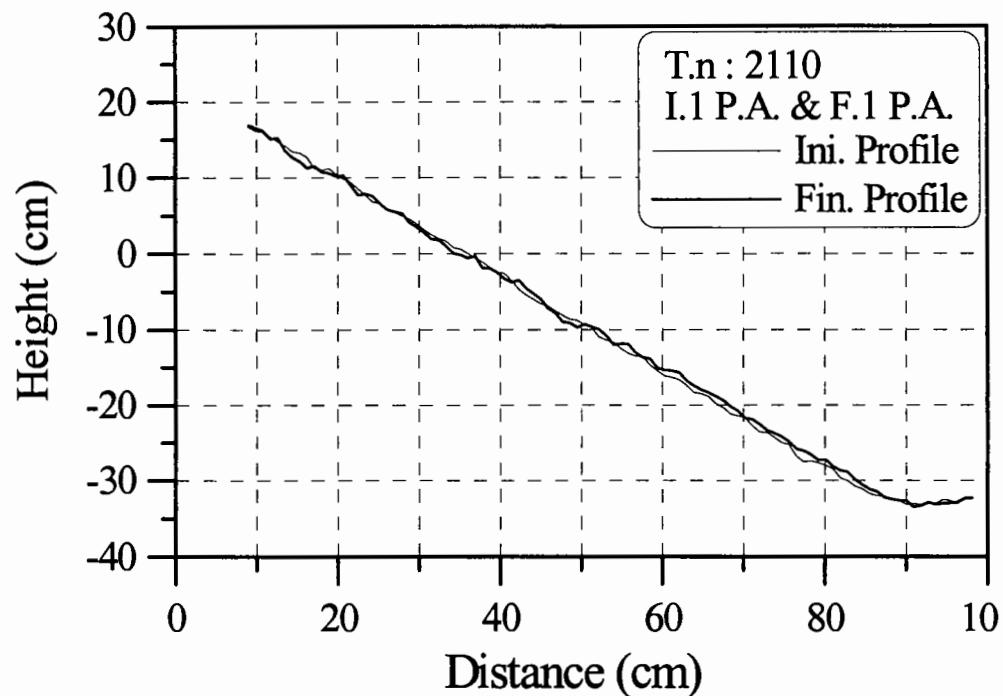


2-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

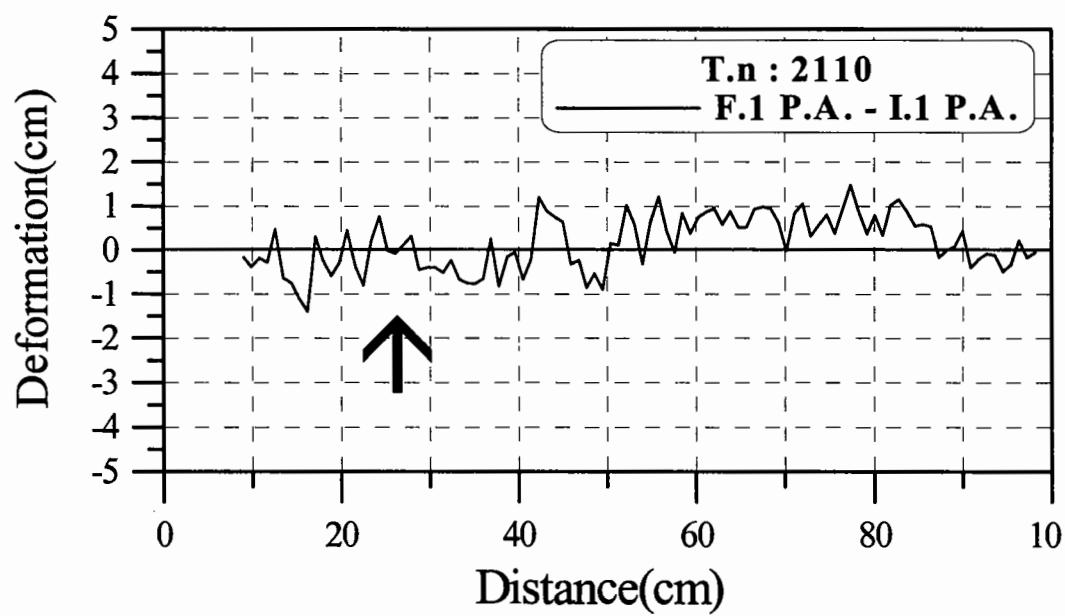


2-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

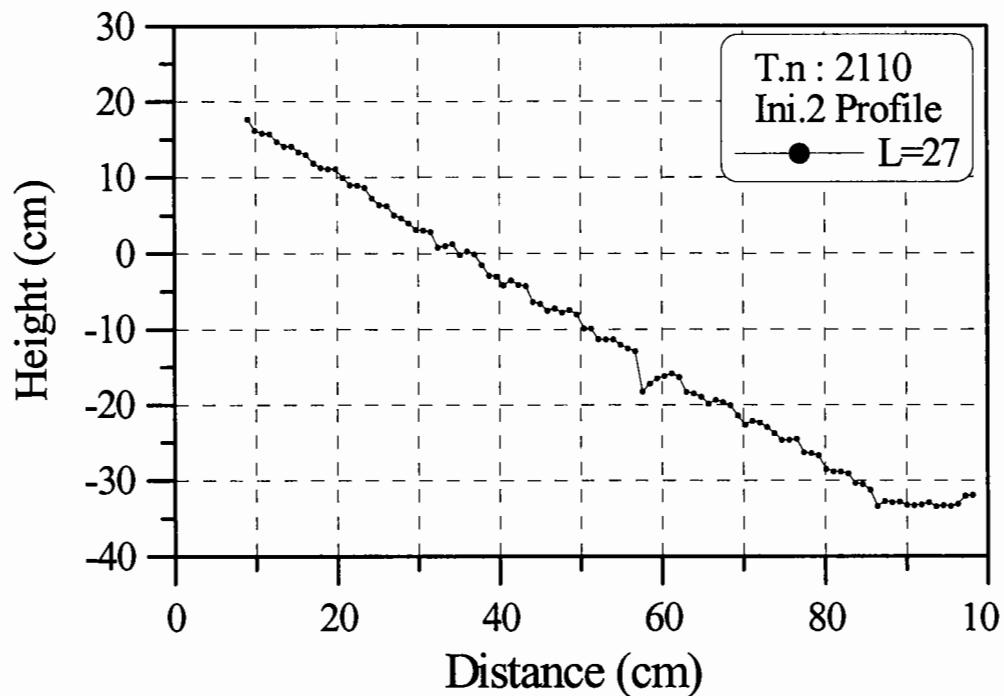


2-1안 1회 실험 피해전·후 필터층의 단면형상 평균의 비교

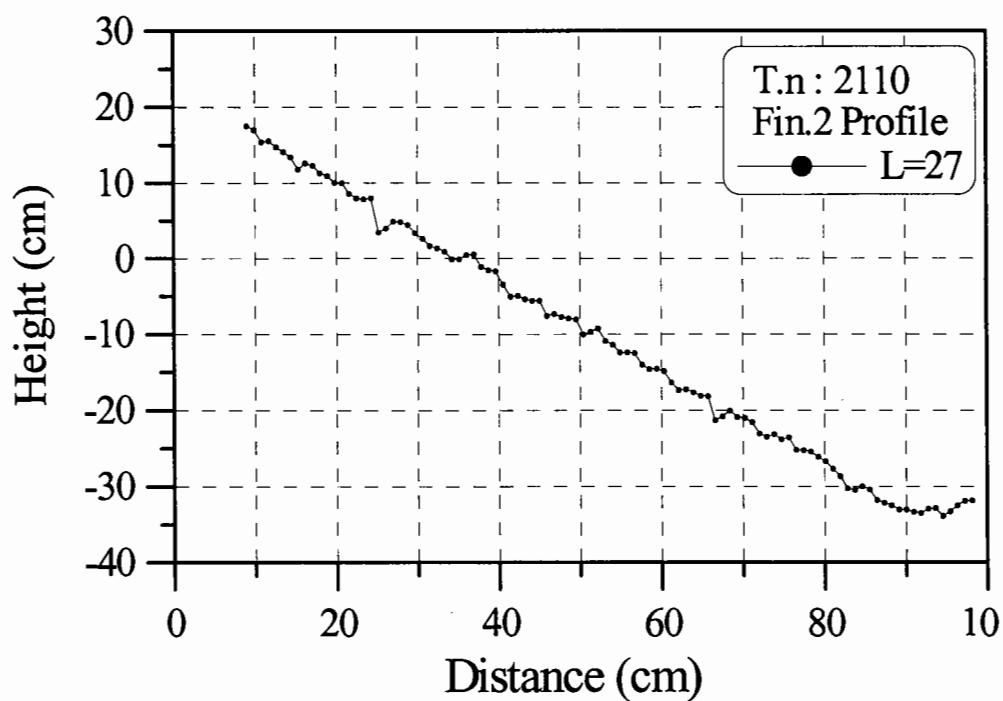


2-1안 1회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

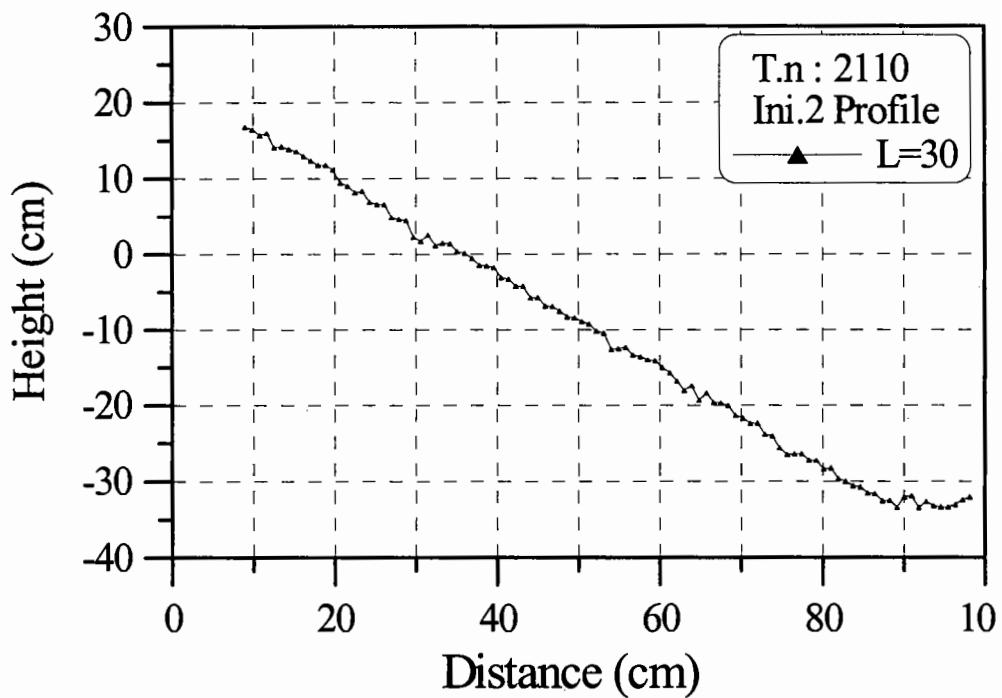


2-1안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

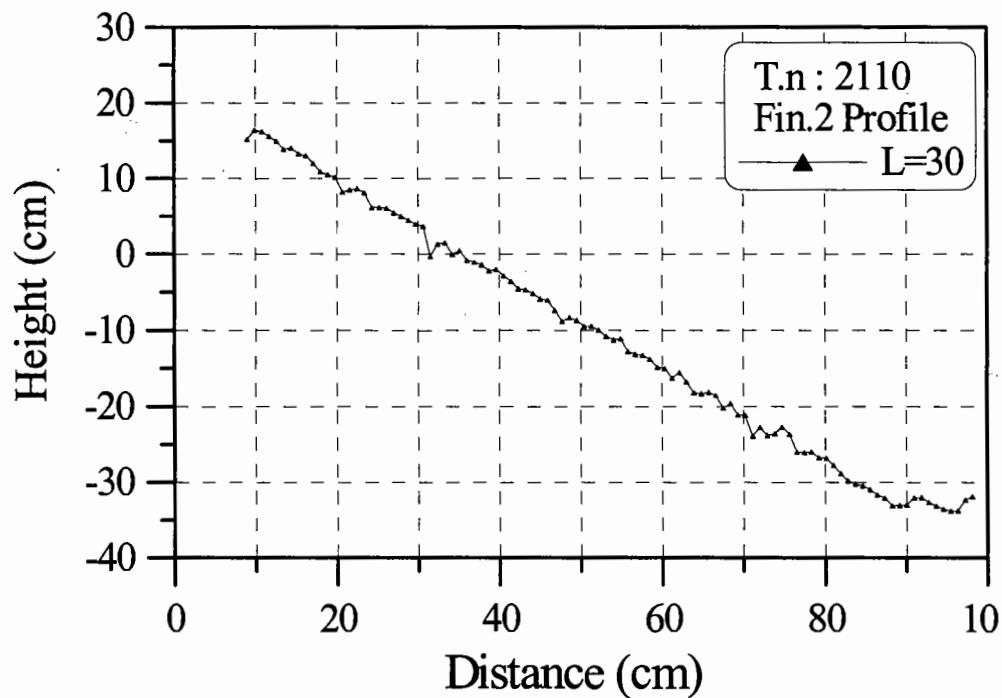


2-1안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

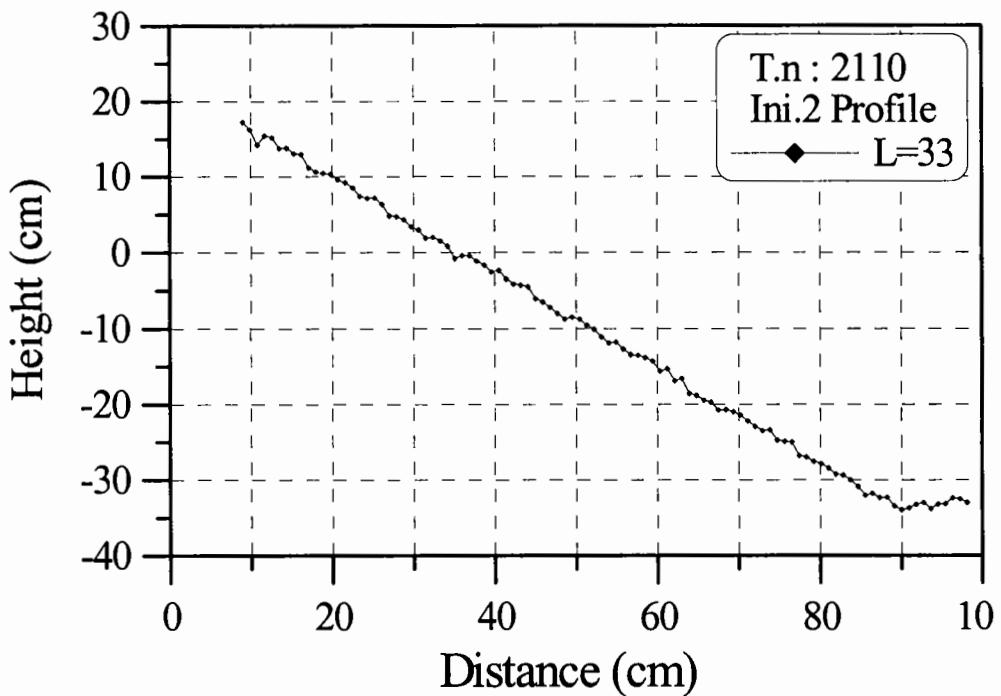


2-1안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

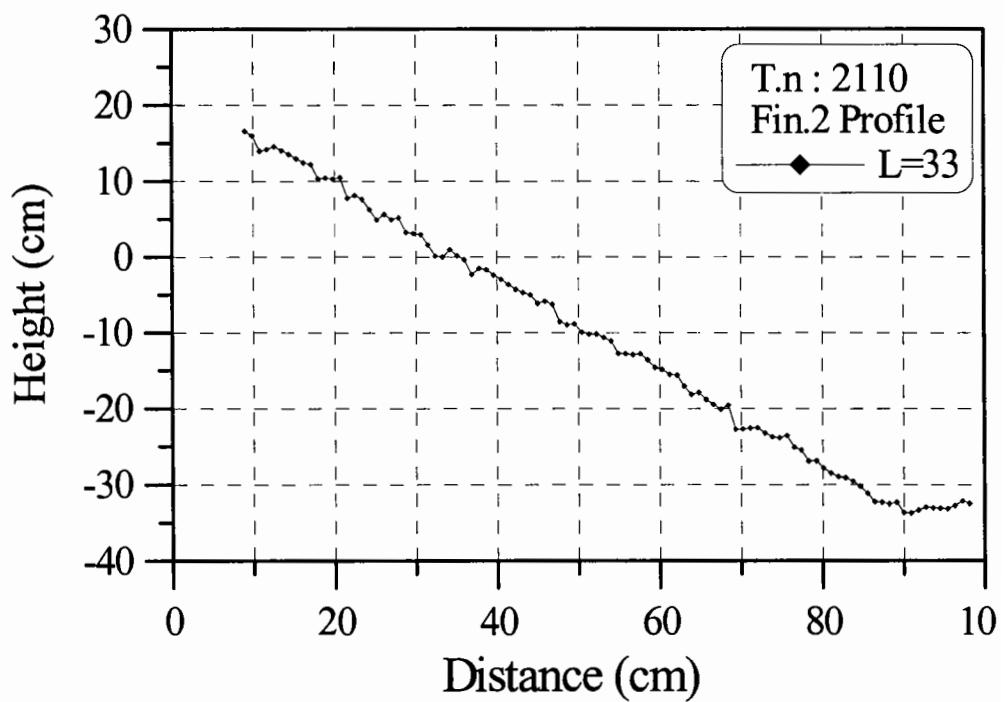


2-1안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

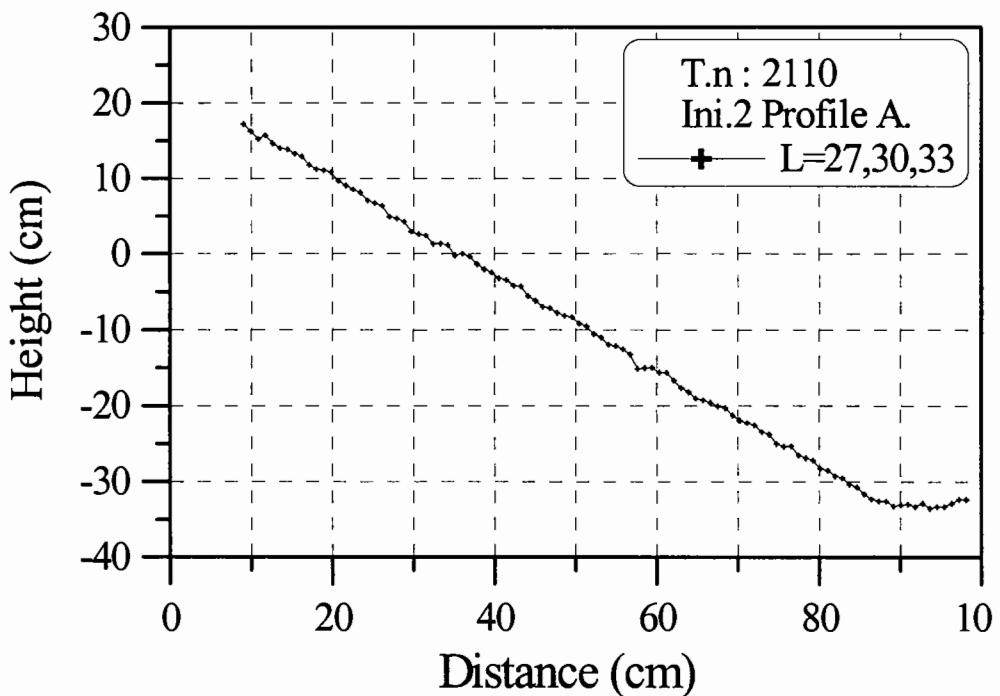


2-1안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

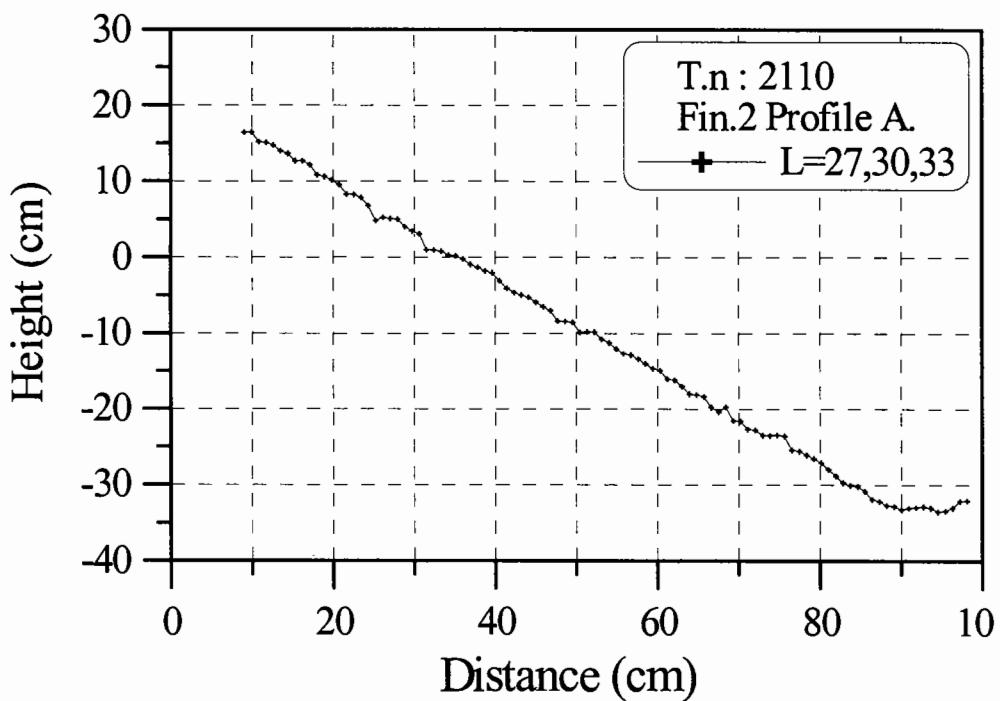


2-1안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

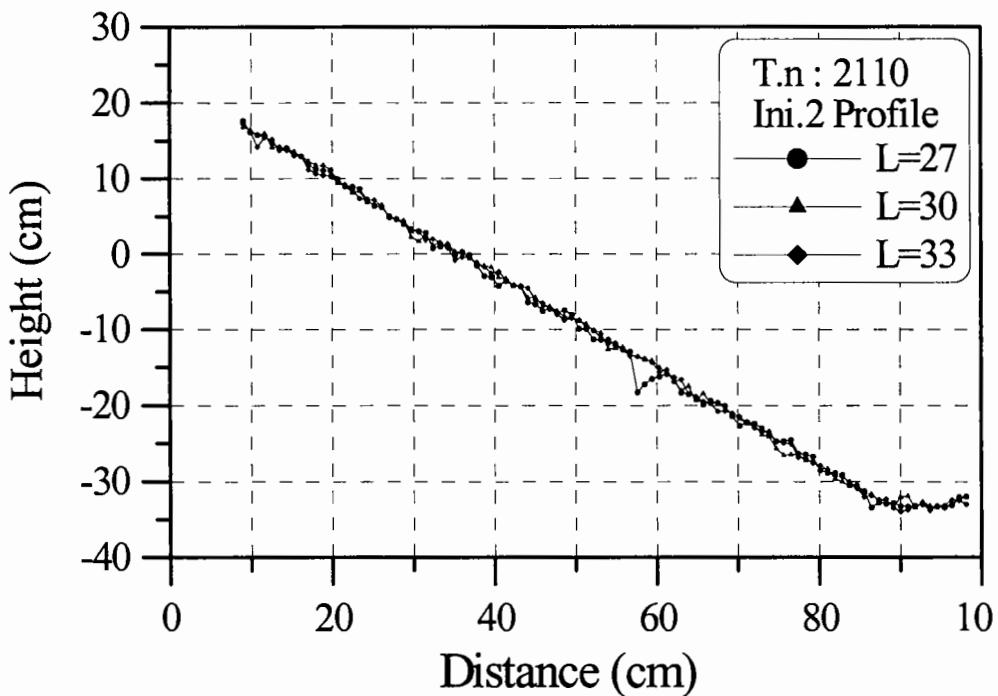


2-1안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

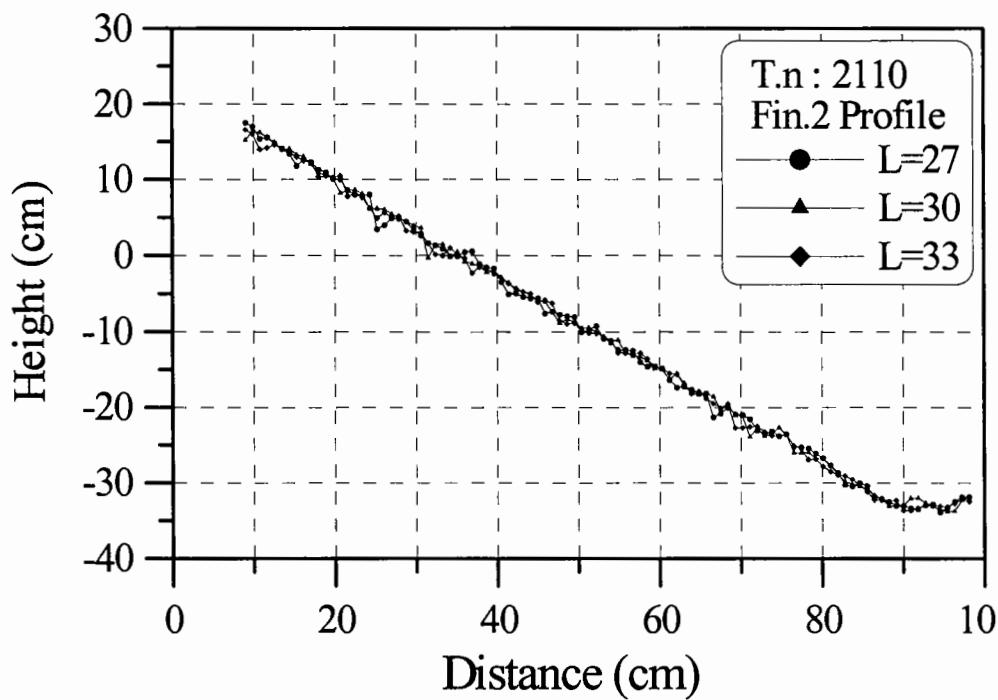


2-1안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

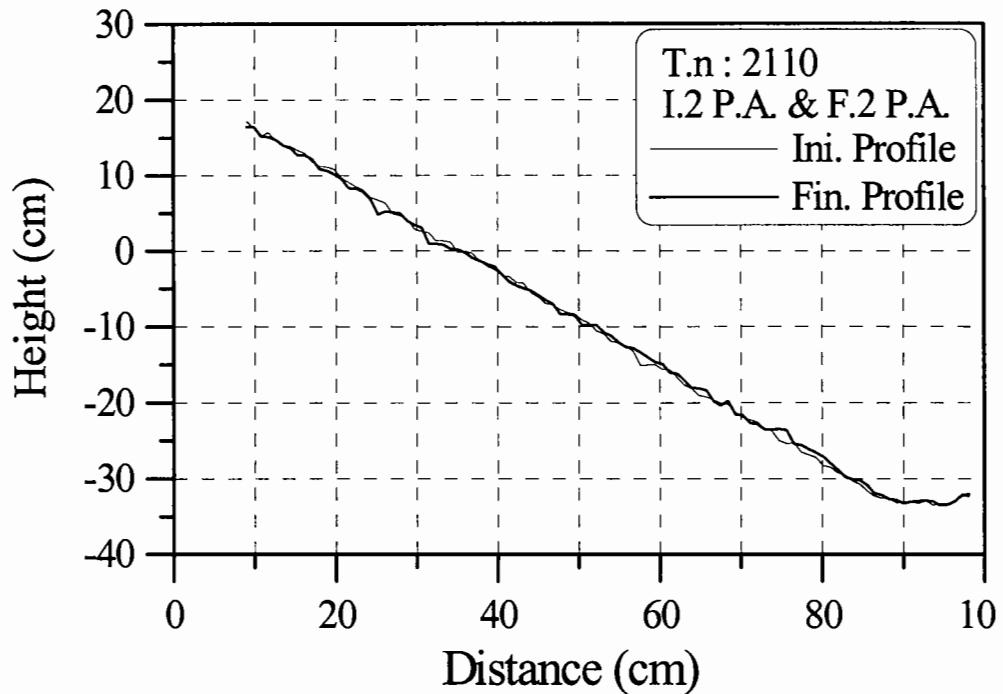


2-1안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

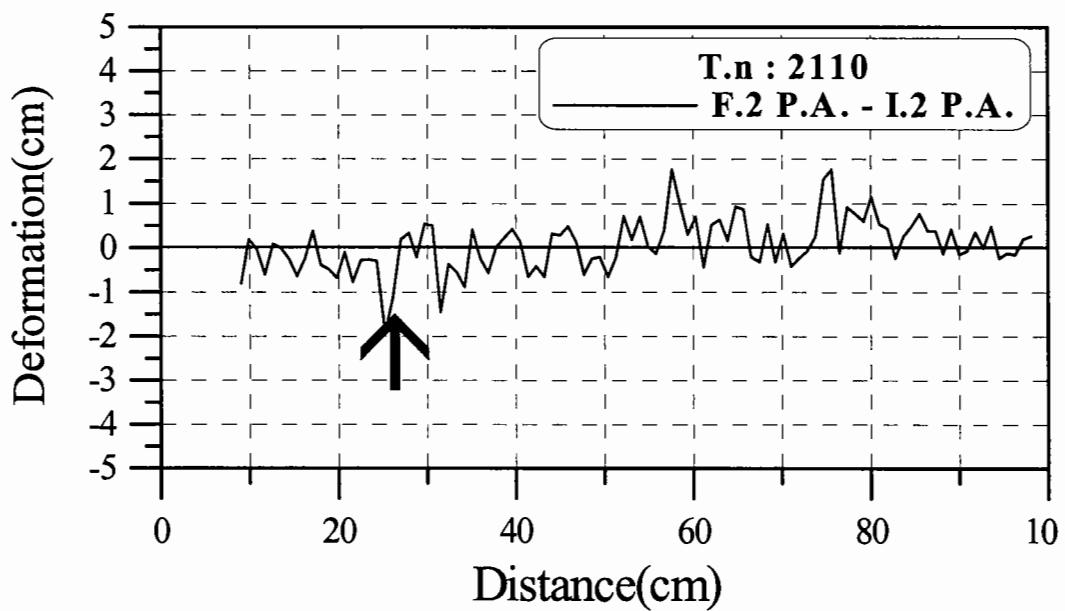


2-1안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

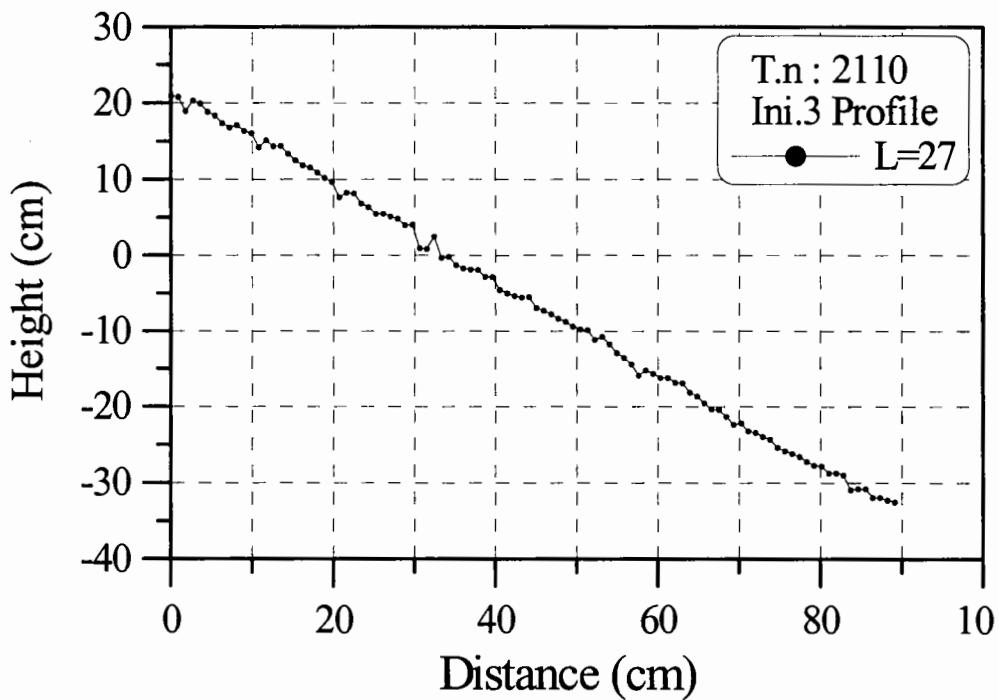


2-1안 2회 실험 피해전·후 필터층의 단면형상 평균의 비교

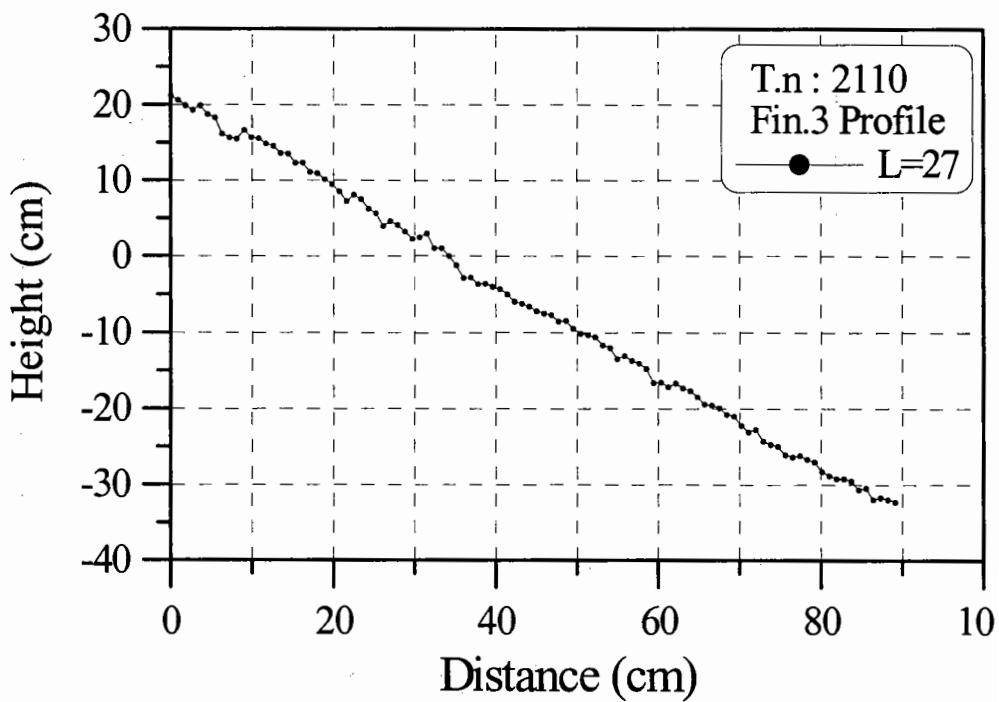


2-1안 2회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-1안의 중간파복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

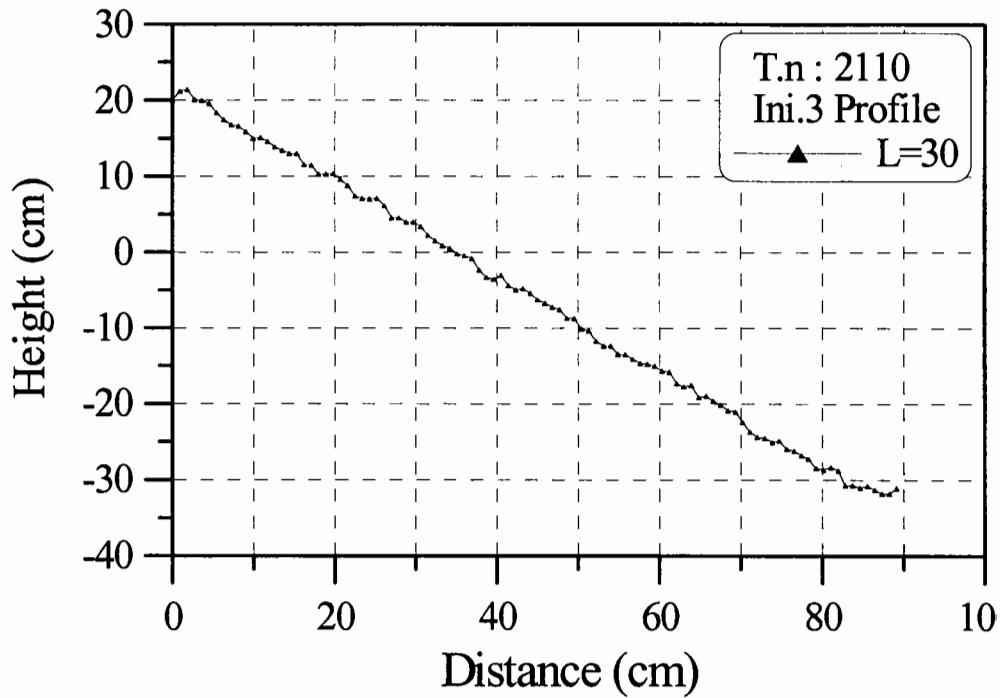


2-1안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

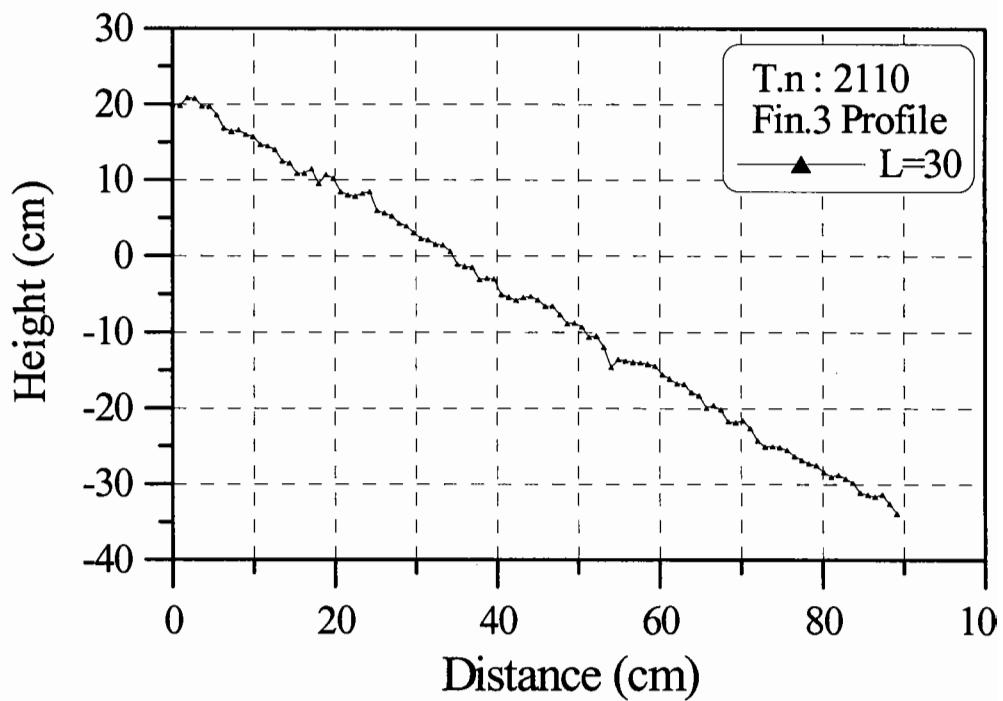


2-1안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

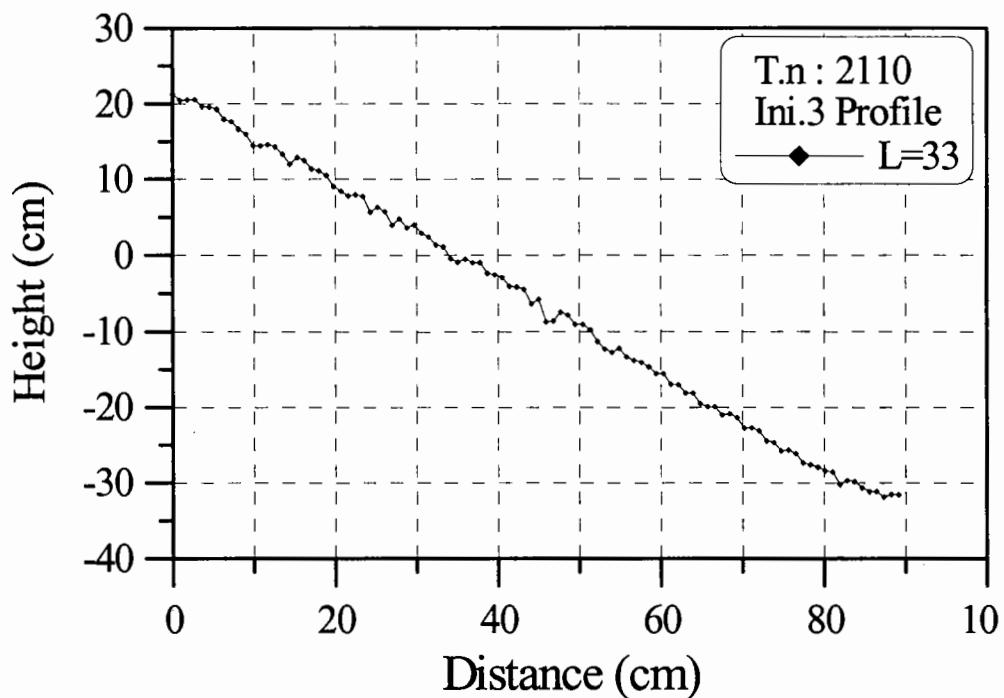


2-1안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

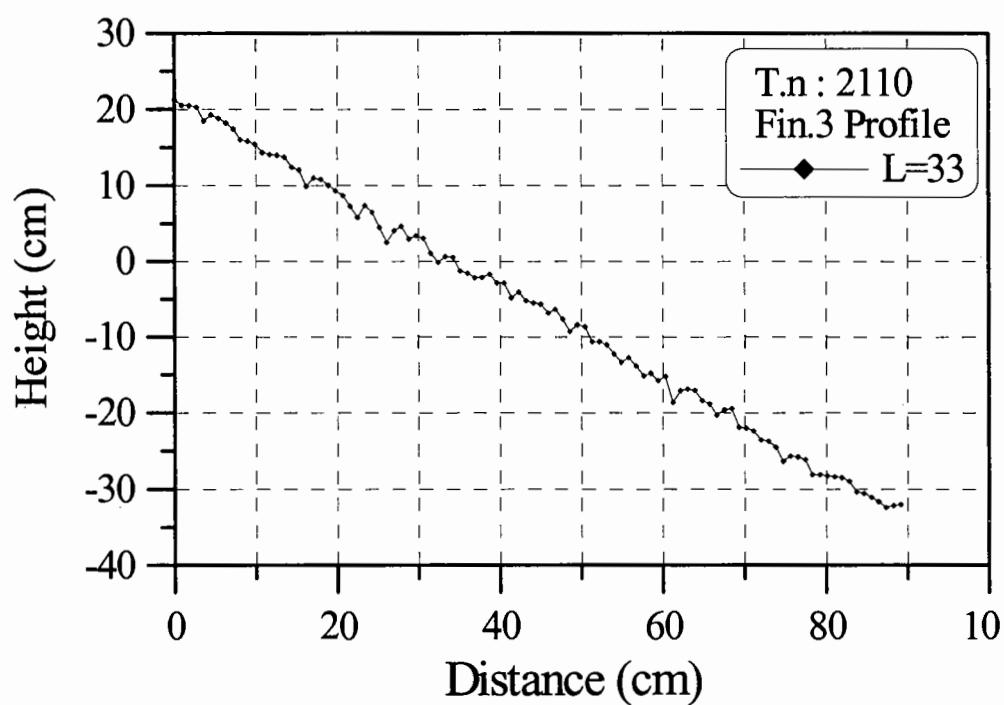


2-1안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

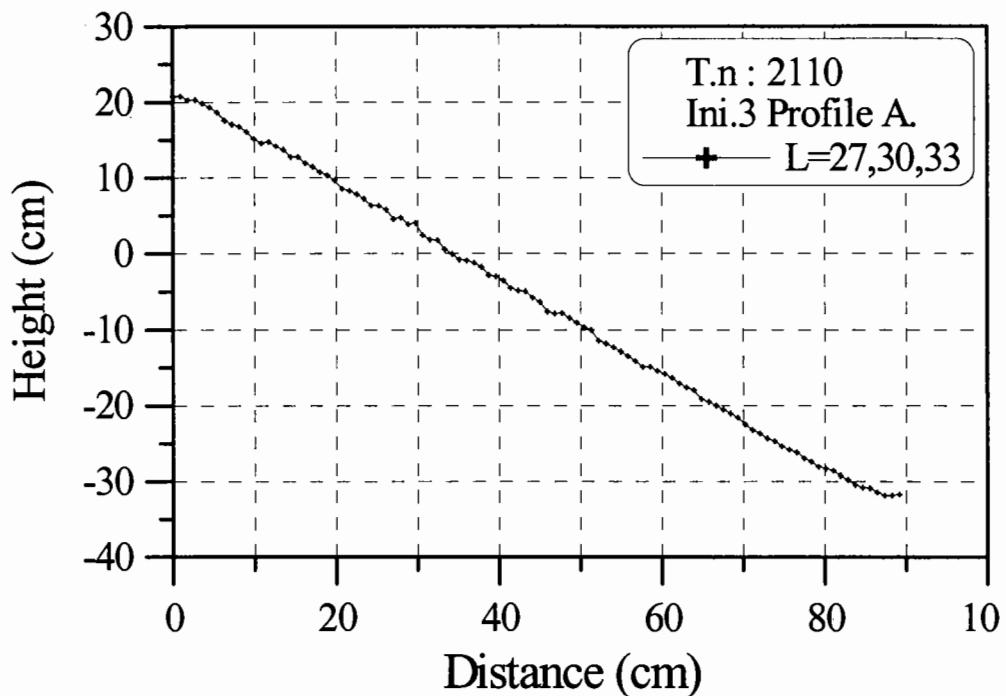


2-1안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

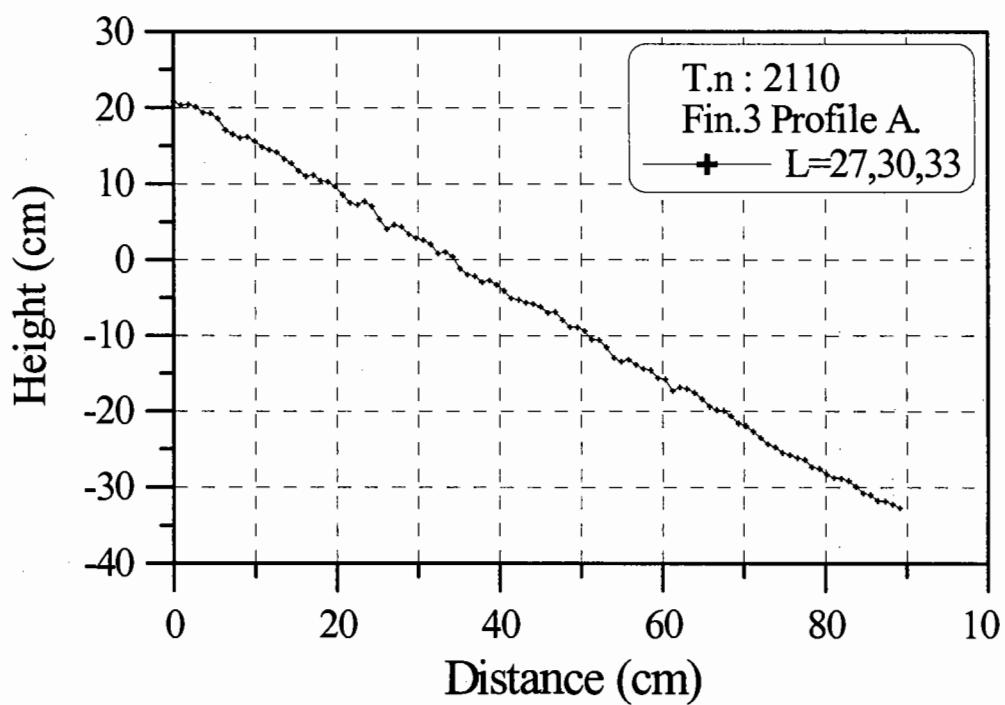


2-1안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

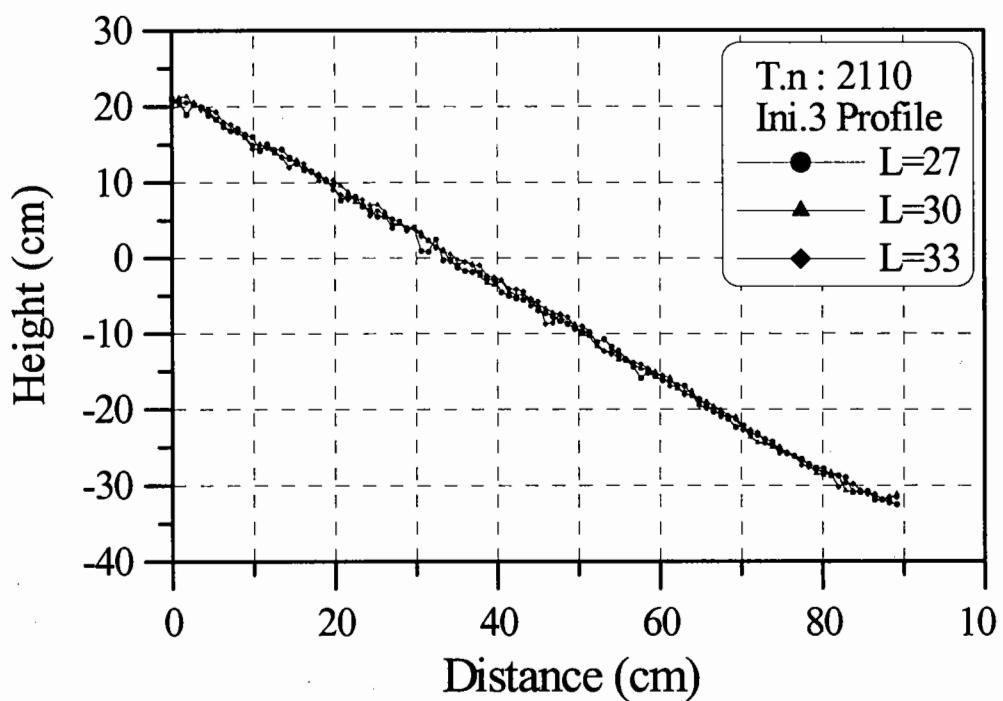


2-1안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

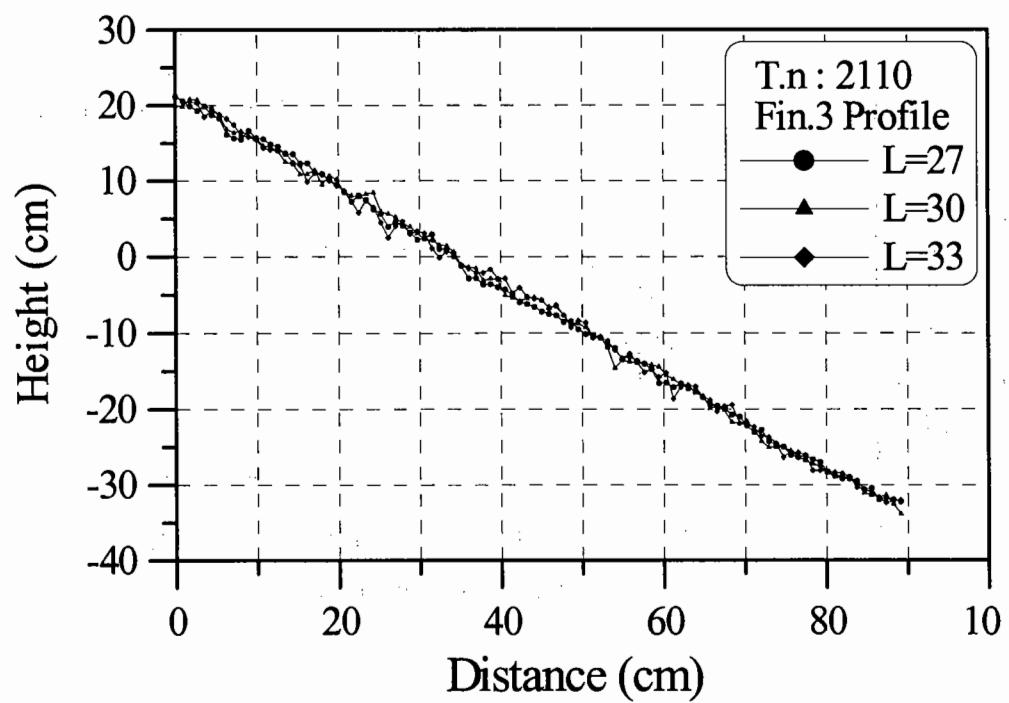


2-1안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

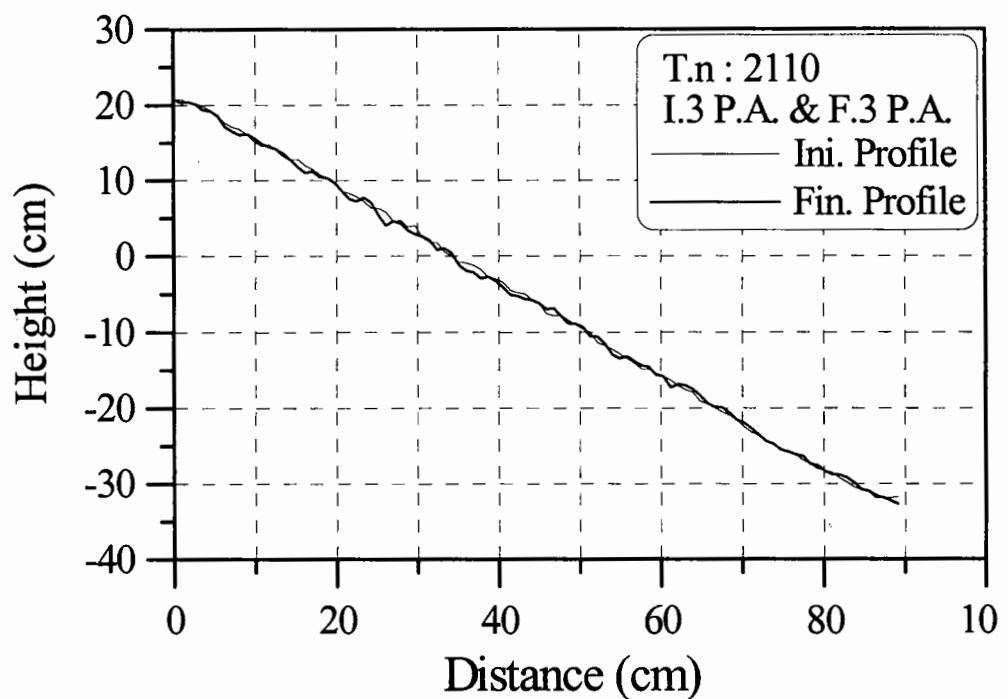


2-1안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

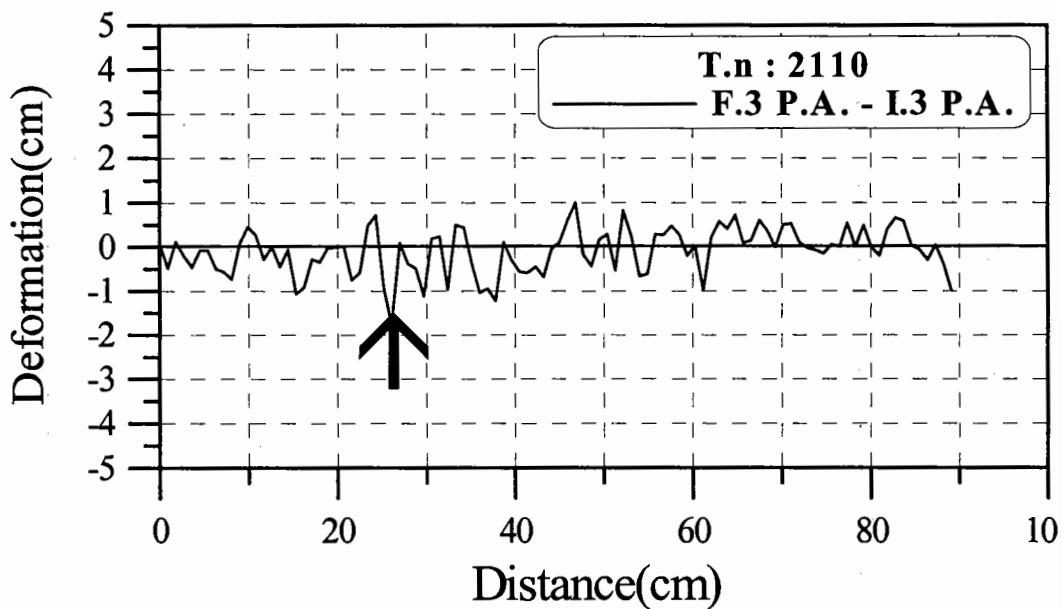


2-1안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

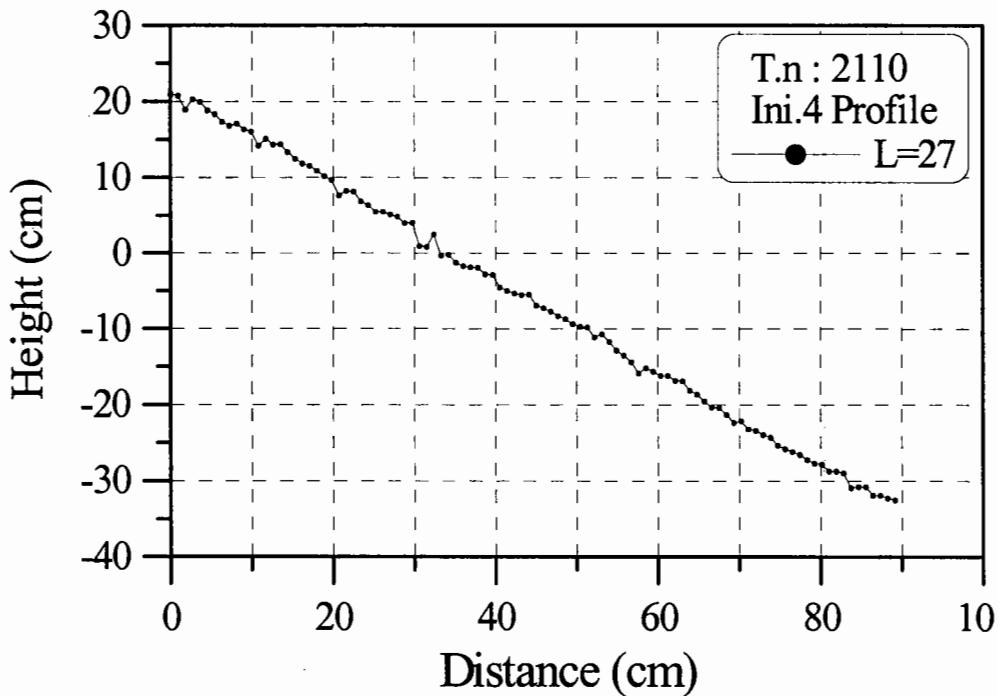


2-1안 3회 실험 피해전·후 필터층의 단면형상 평균의 비교

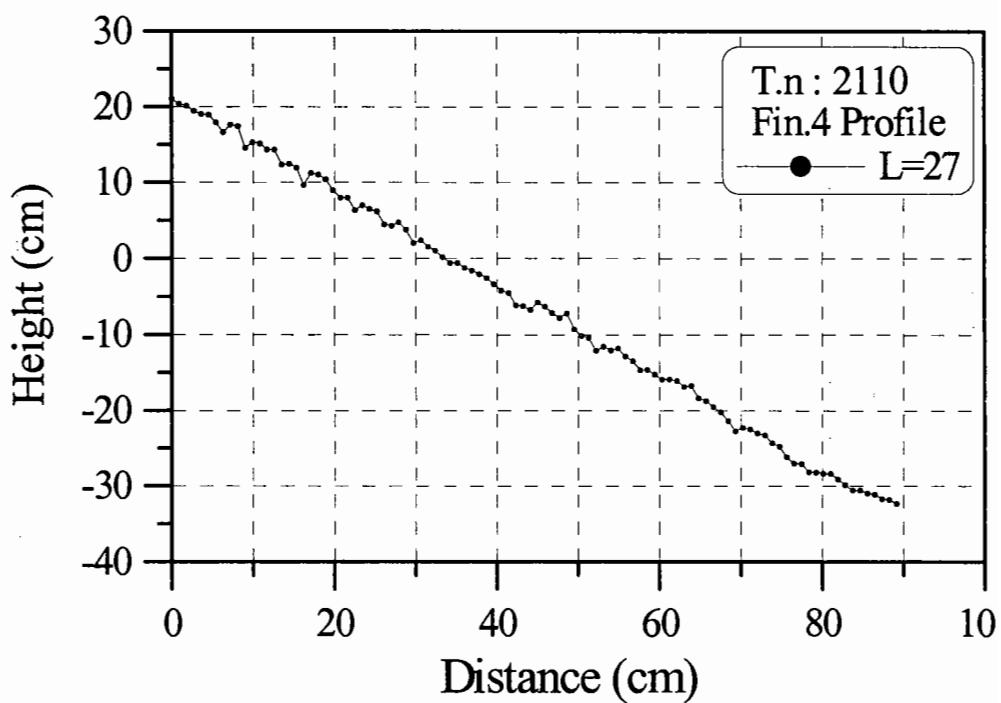


2-1안 3회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

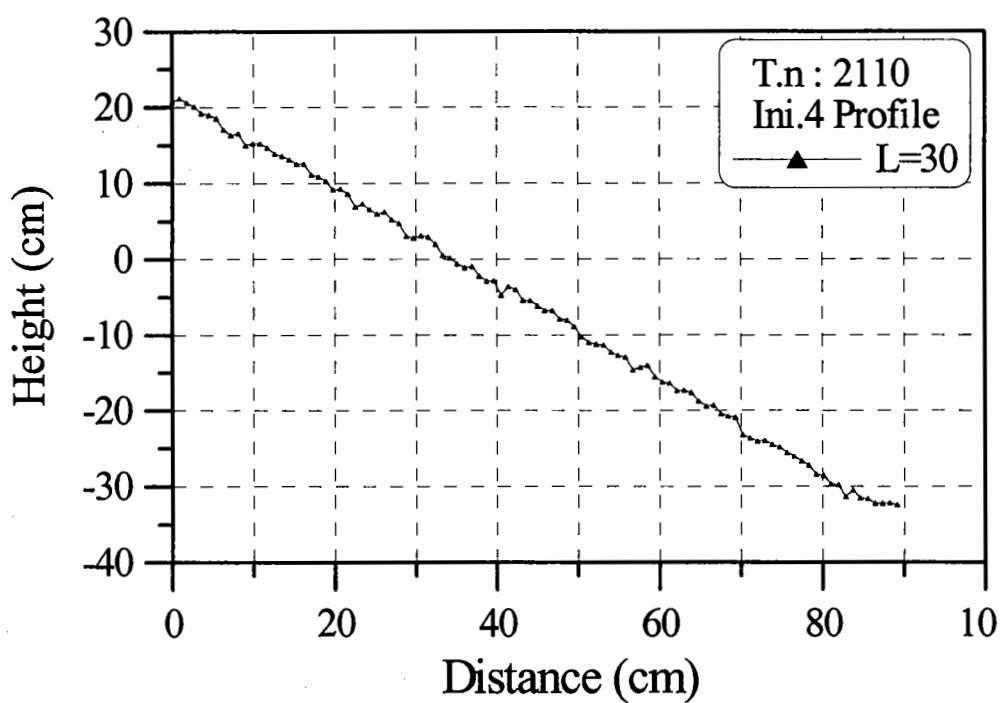


2-1안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

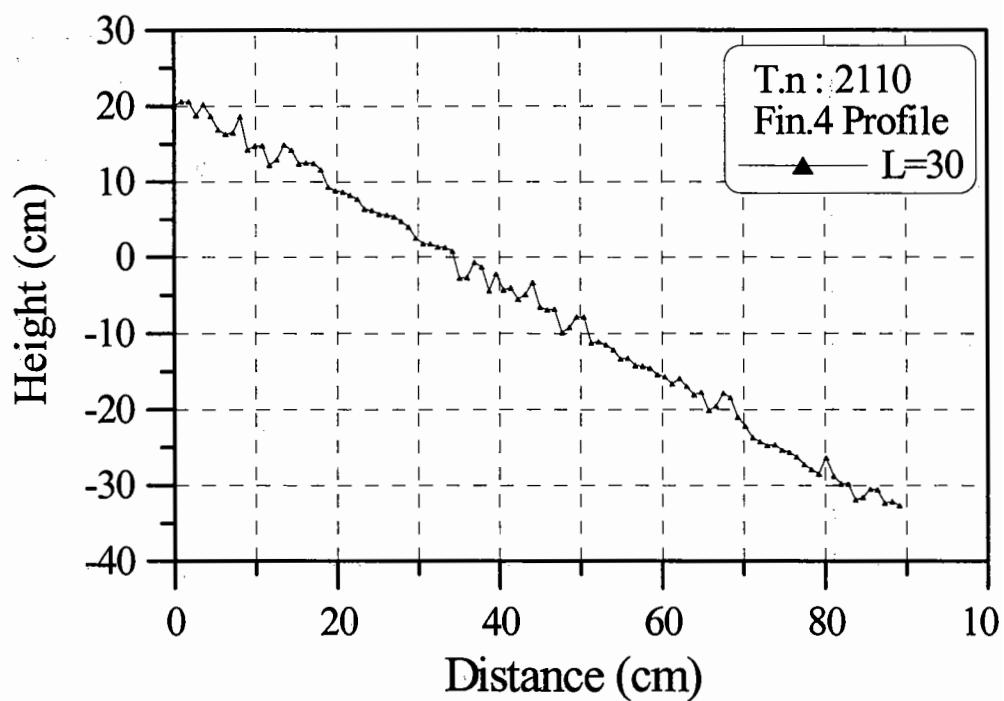


2-1안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

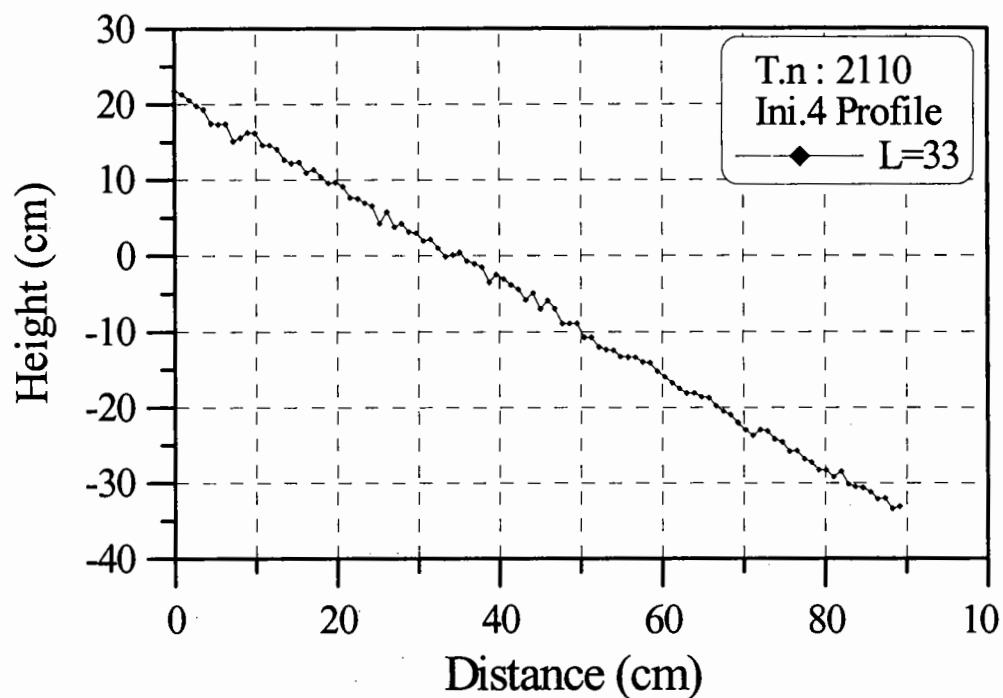


2-1안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

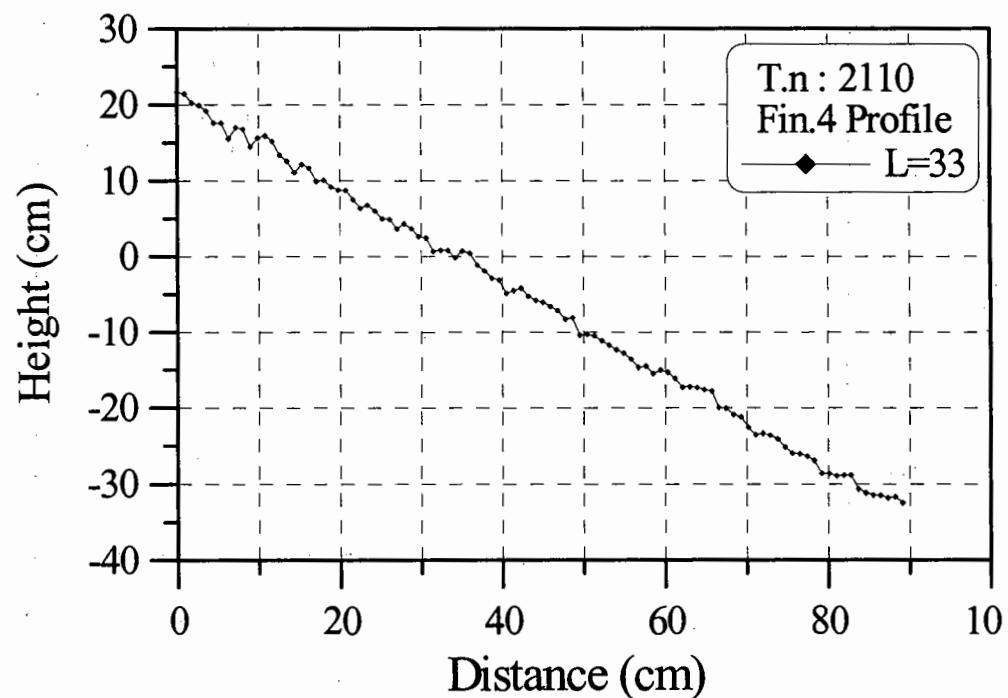


2-1안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

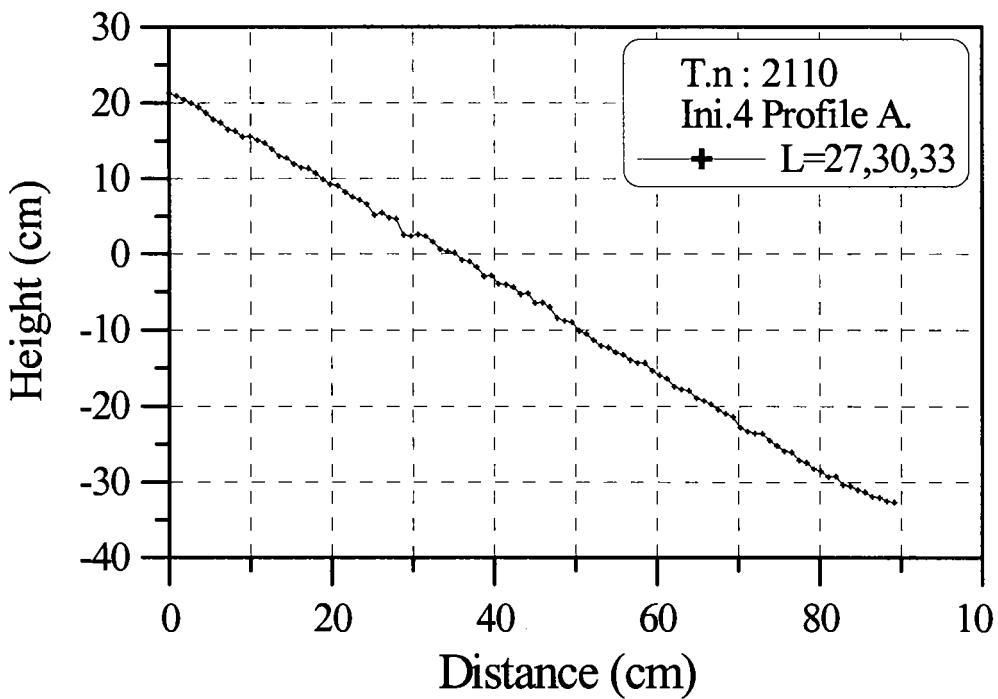


2-1안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

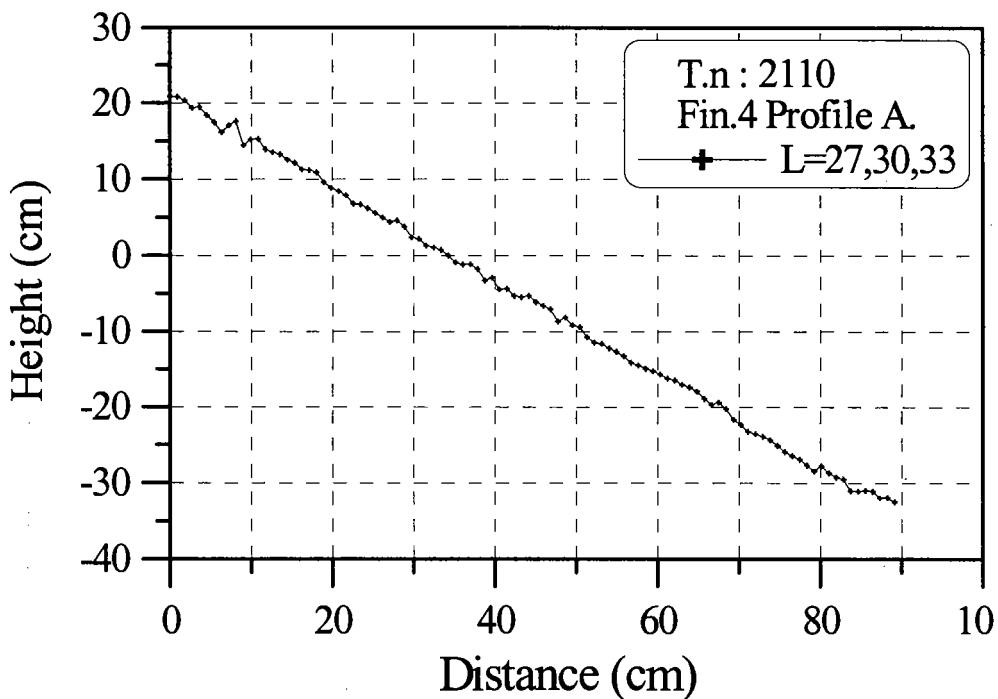


2-1안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

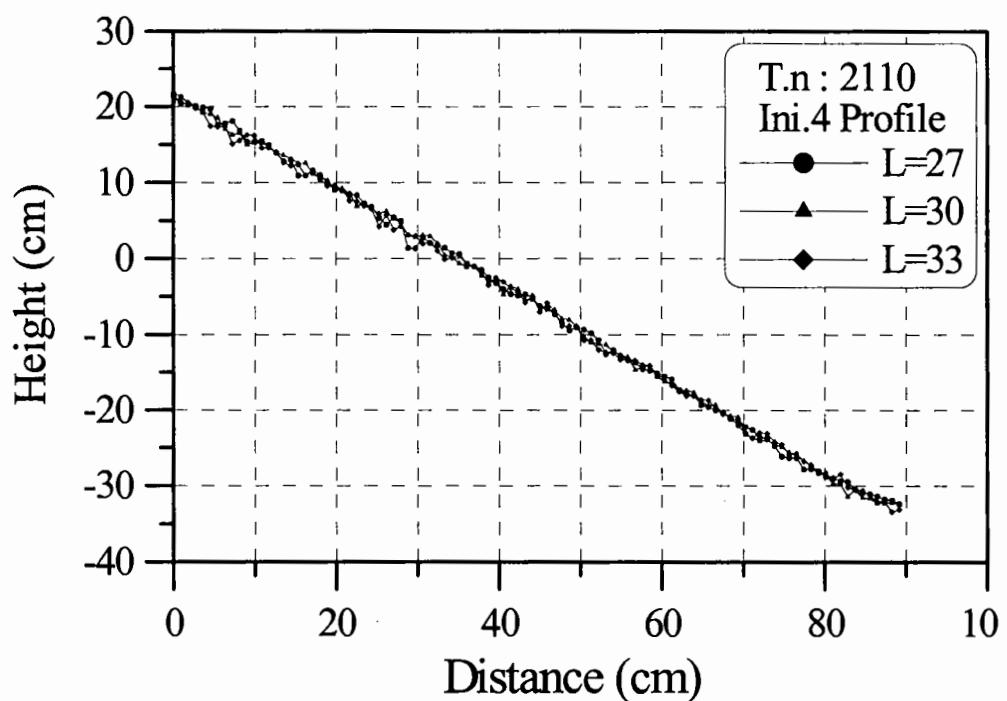


2-1안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

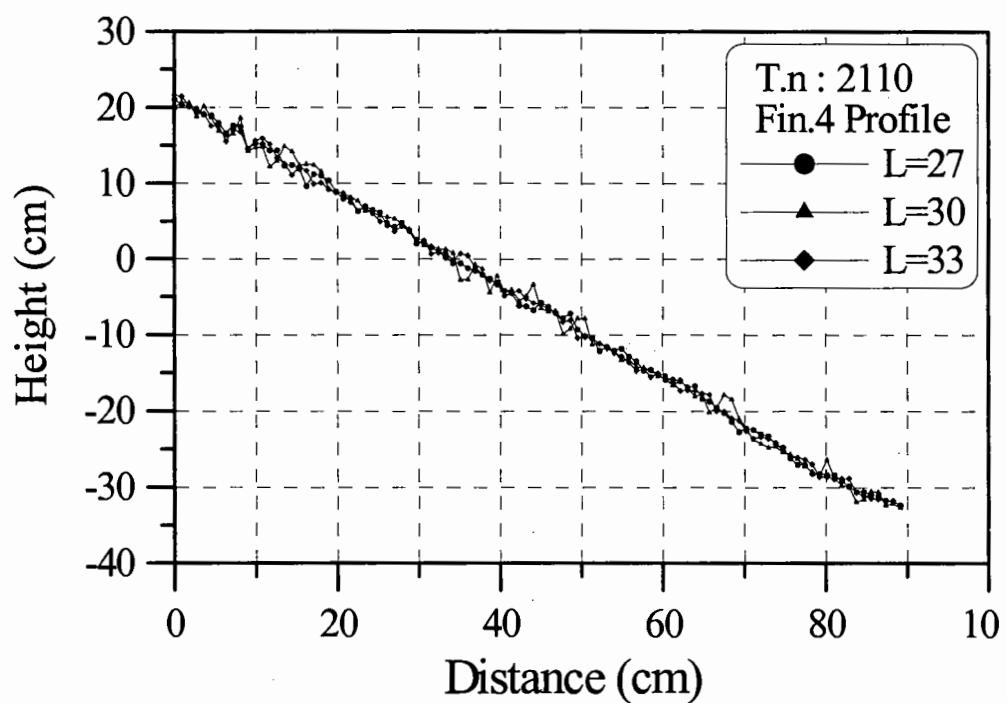


2-1안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

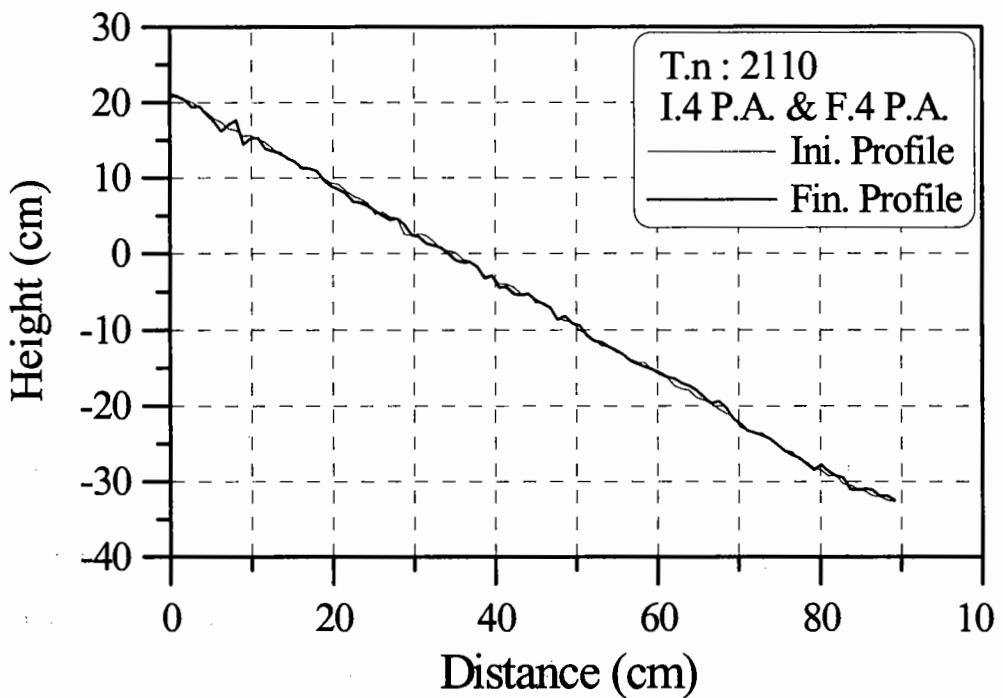


2-1안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

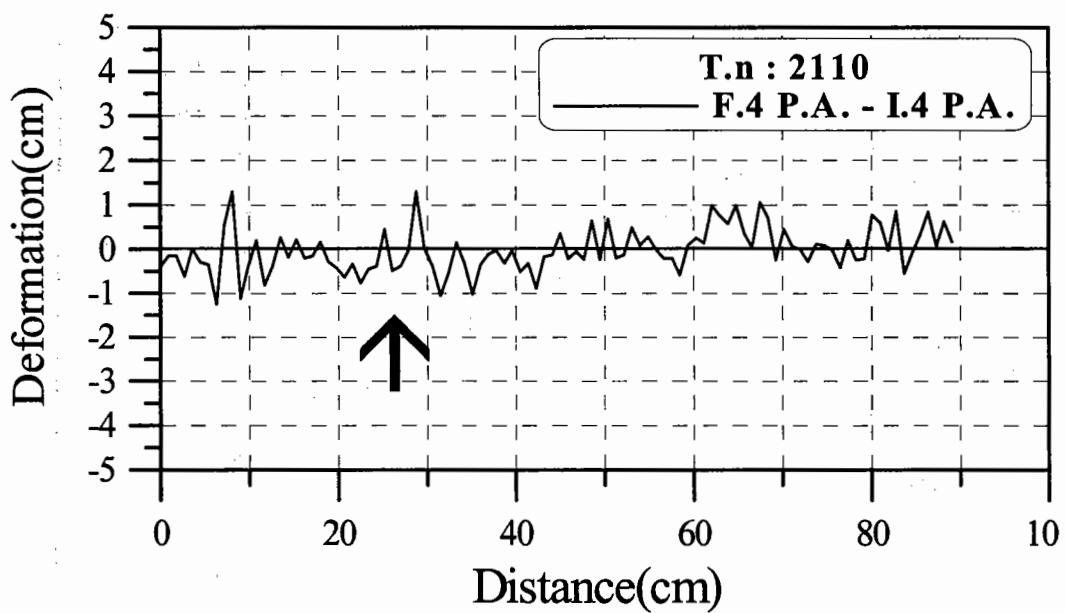


2-1안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

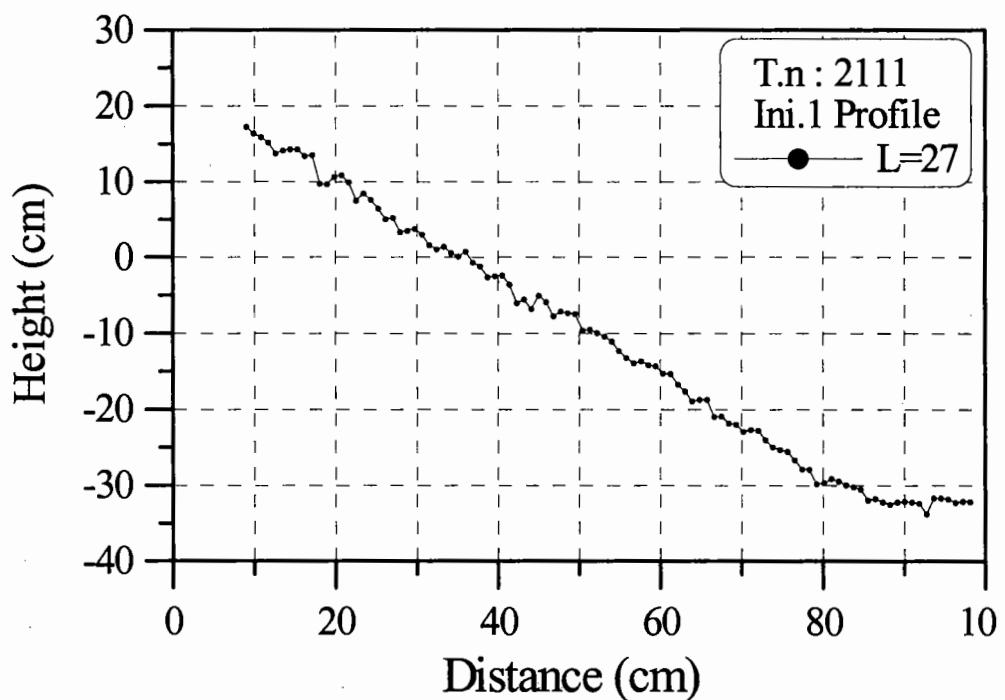


2-1안 4회 실험 피해전·후 필터층의 단면형상 평균의 비교

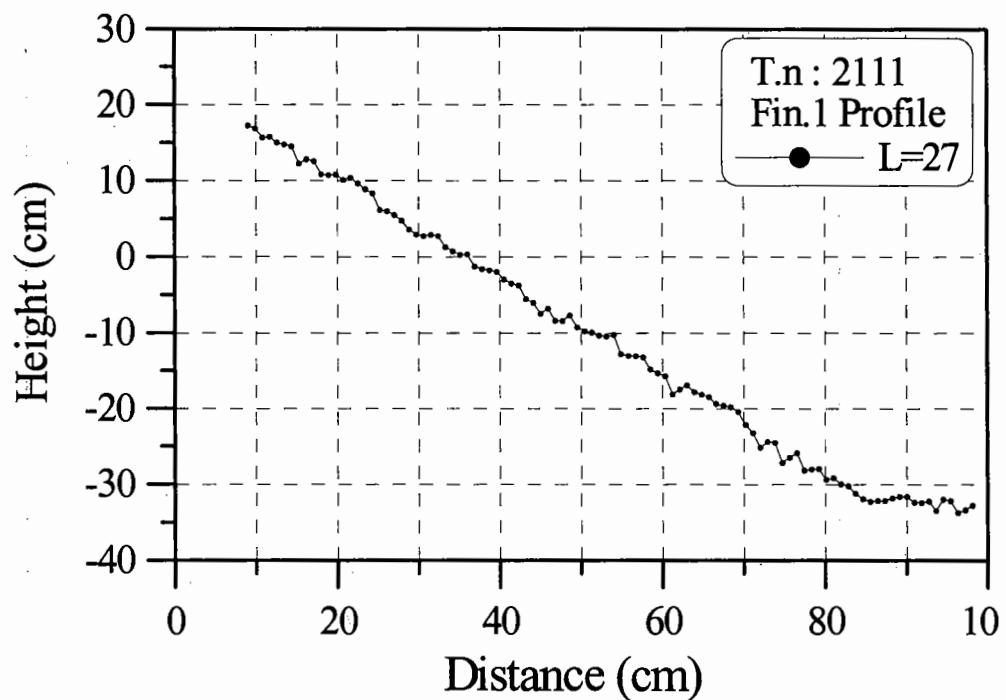


2-1안 4회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

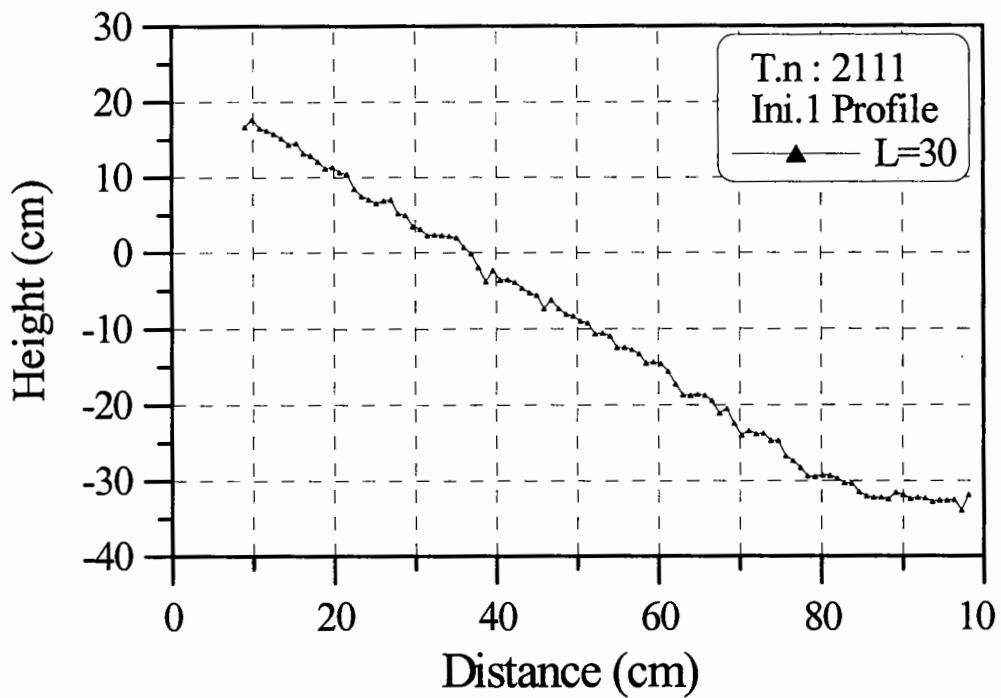


2-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

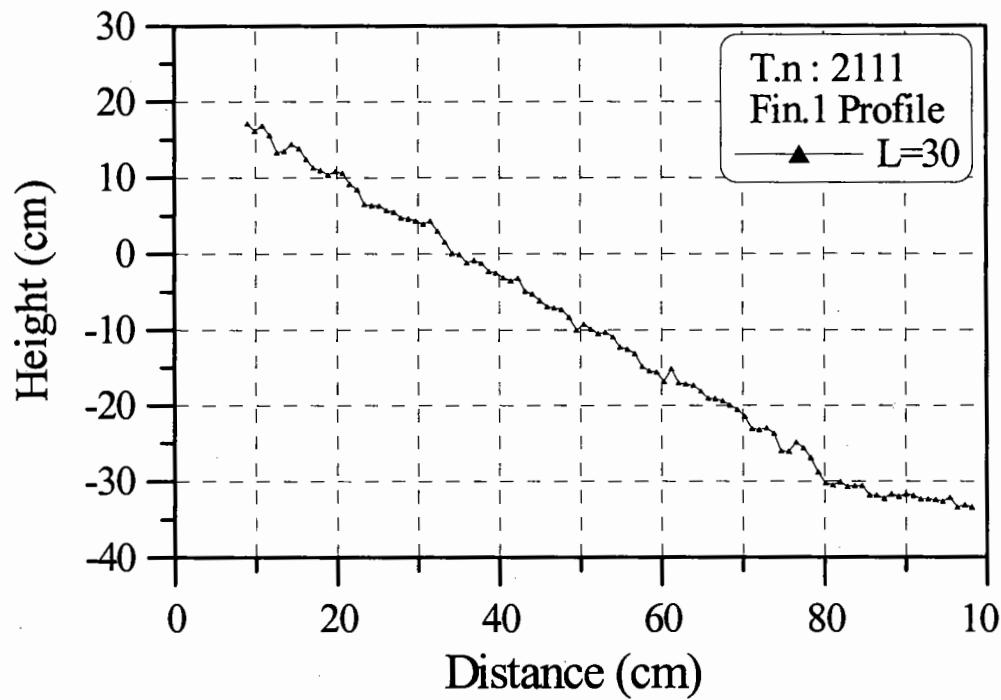


2-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

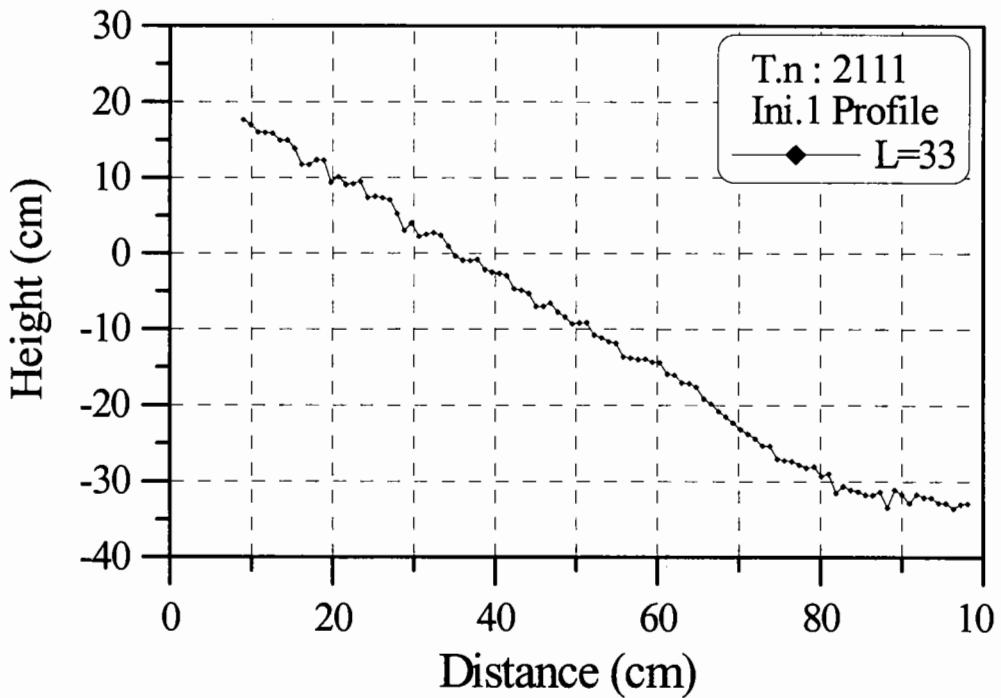


2-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

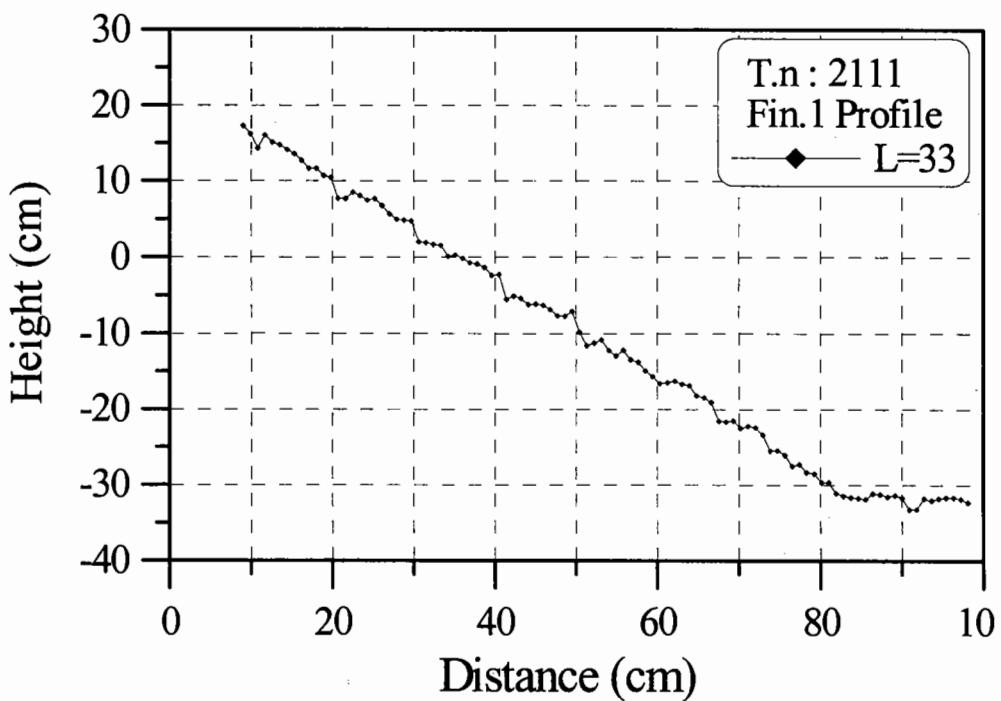


2-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

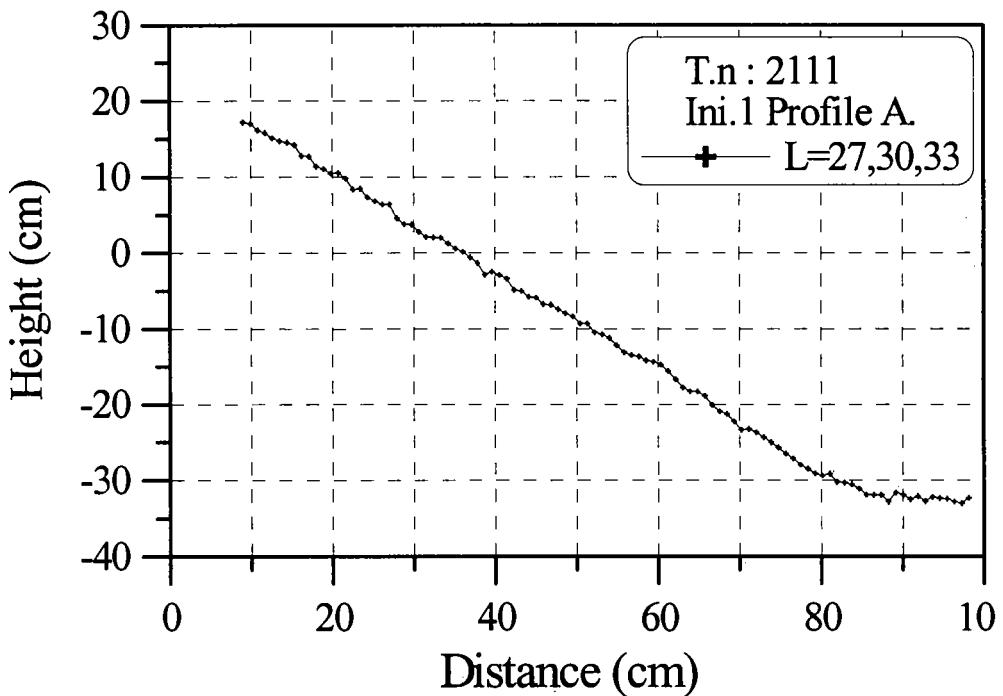


2-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

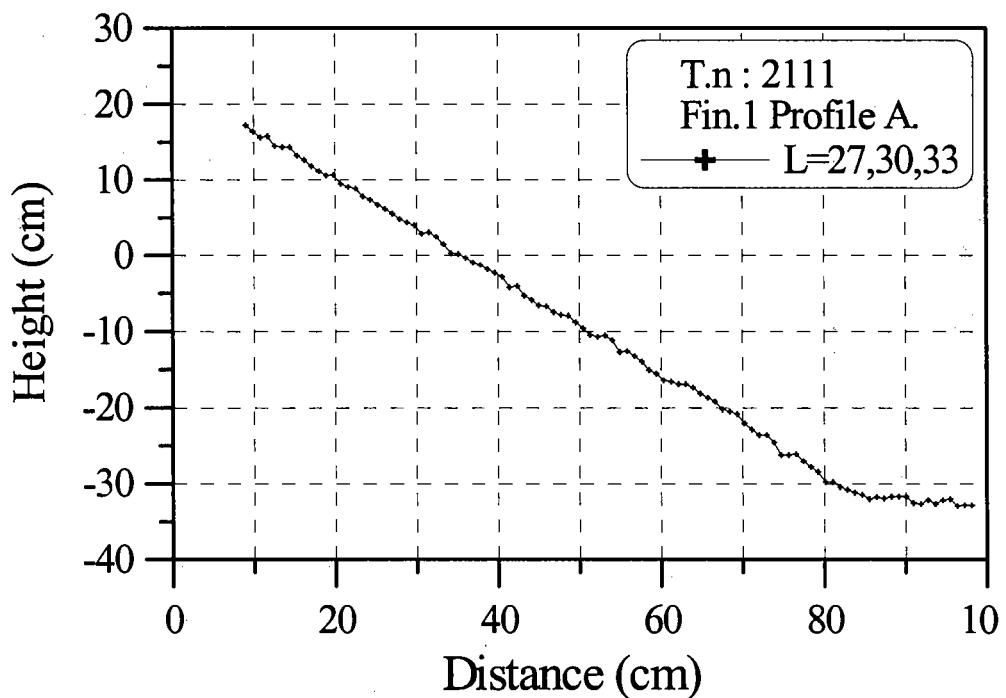


2-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

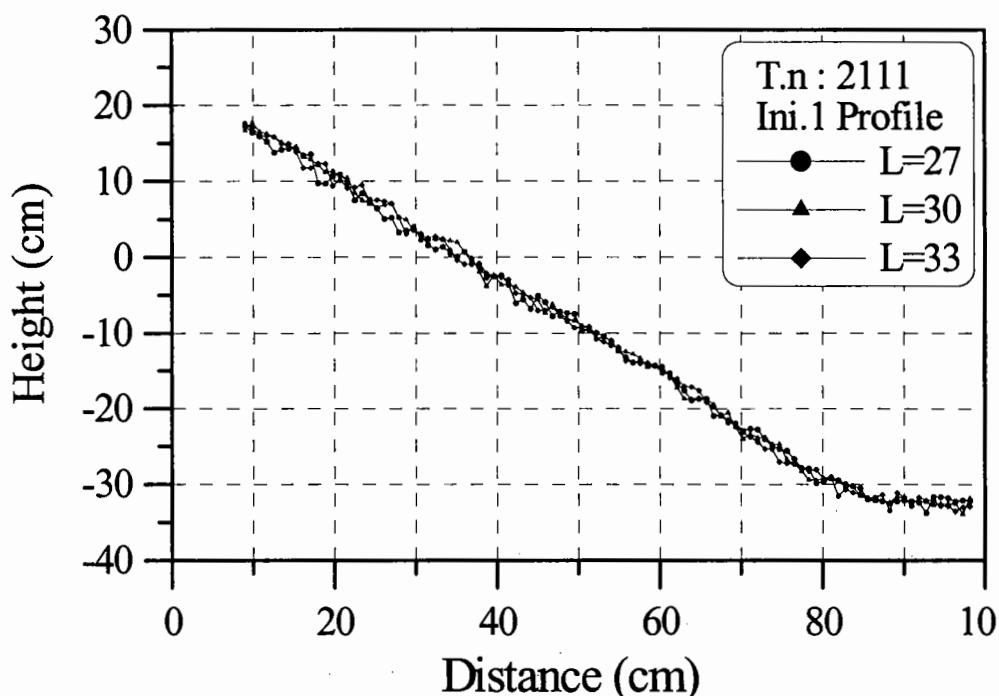


2-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

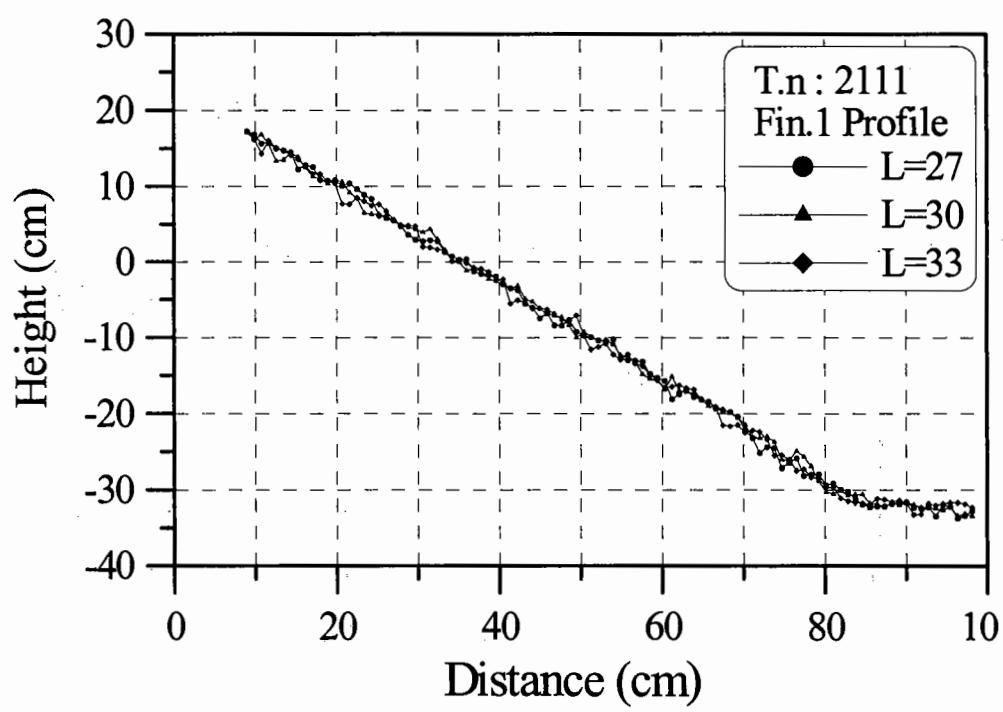


2-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

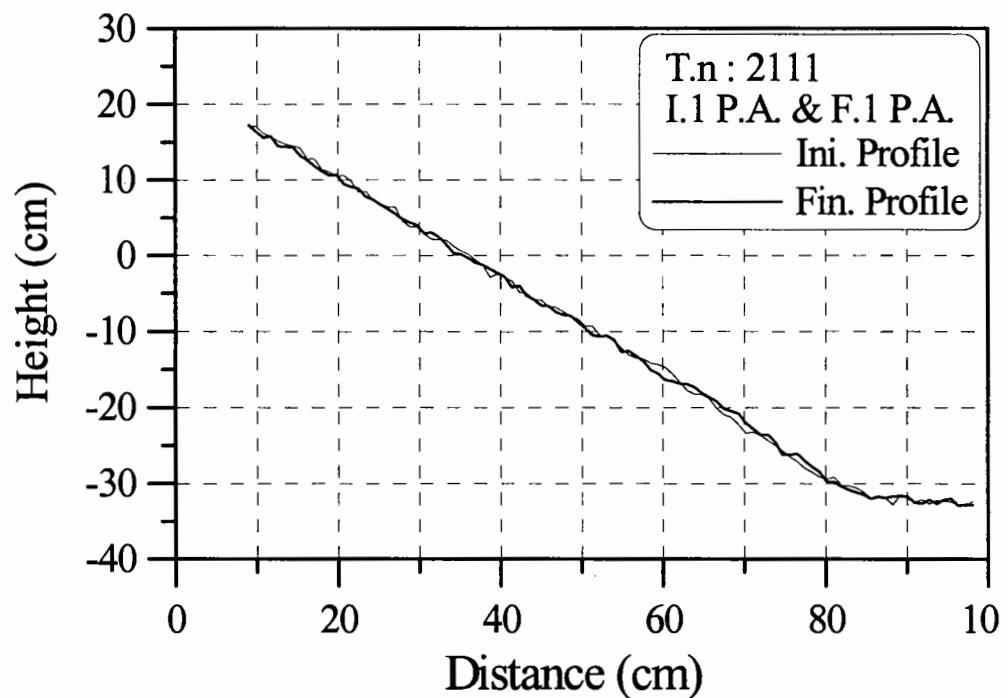


2-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

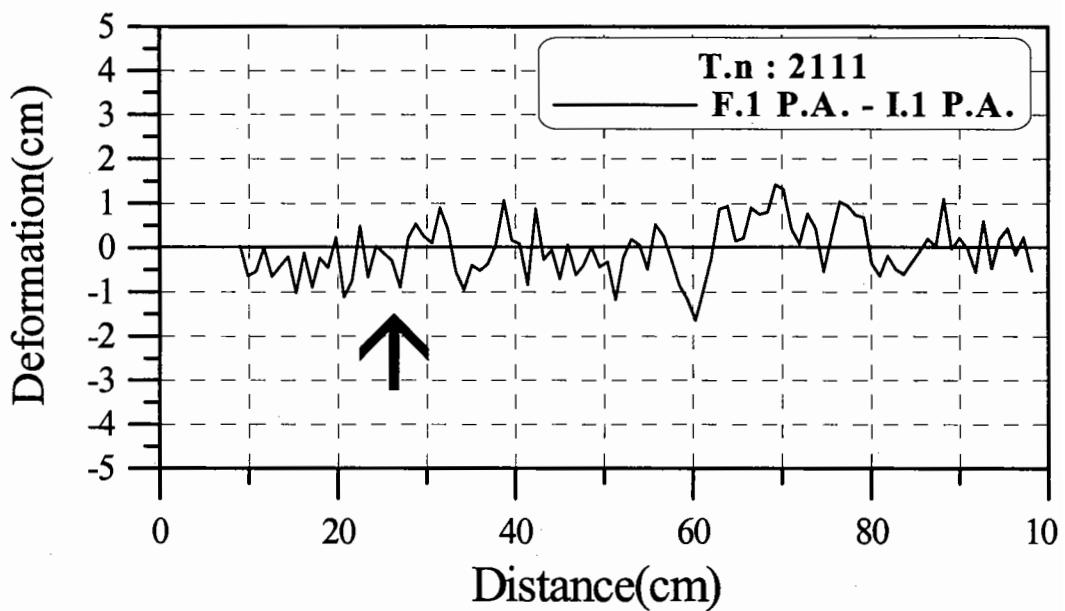


2-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

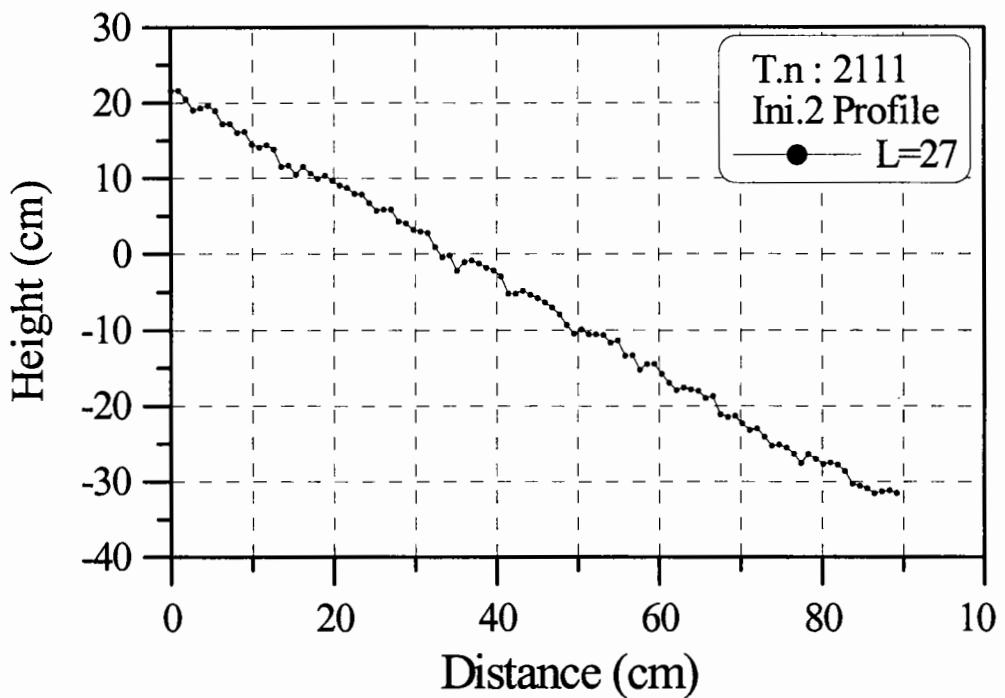


2-2안 1회 실험 피해전 · 후 필터층의 단면형상 평균의 비교

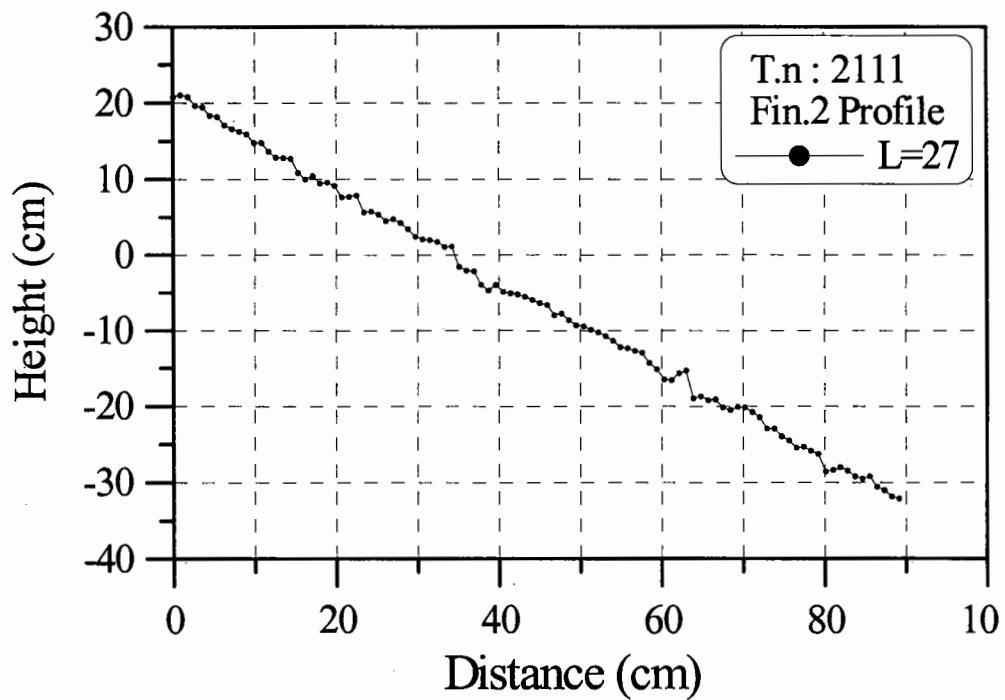


2-2안 1회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

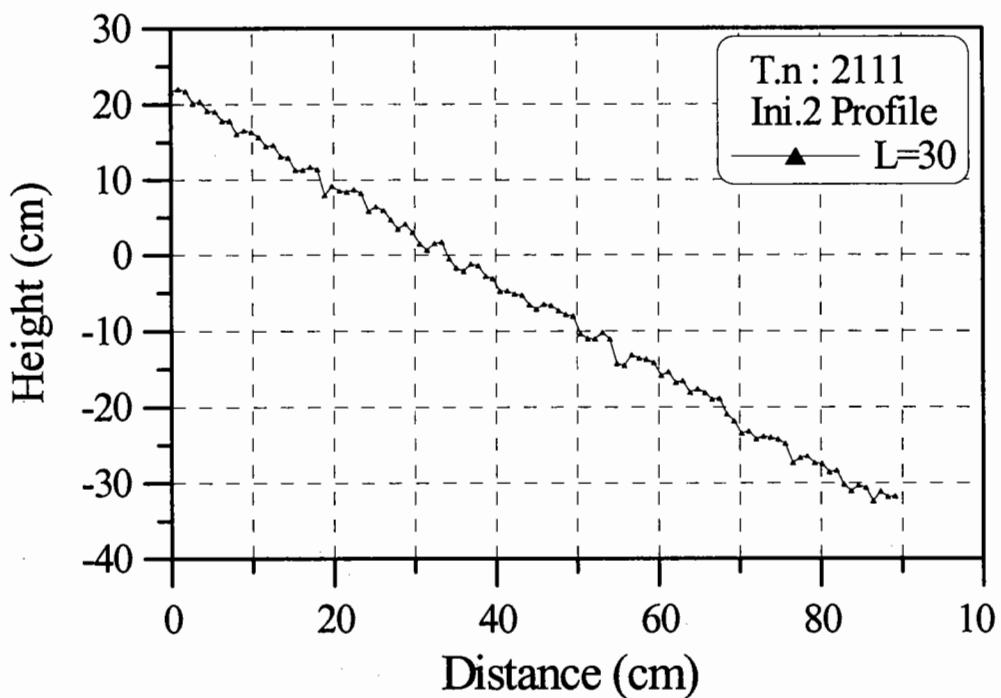


2-2안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

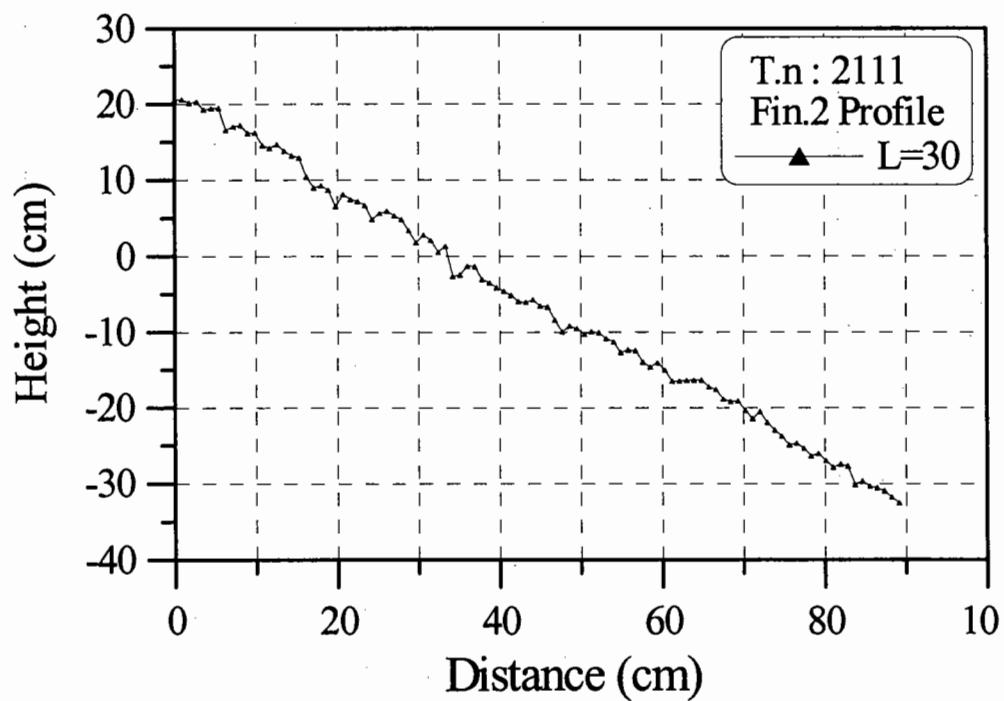


2-2안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-2안의 중간파복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

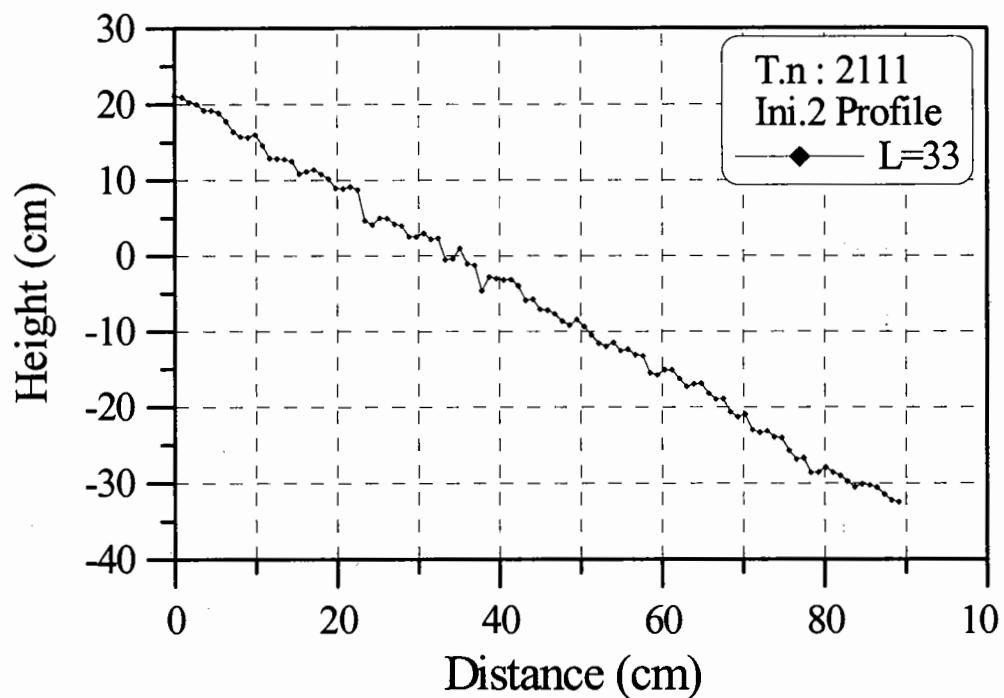


2-2안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

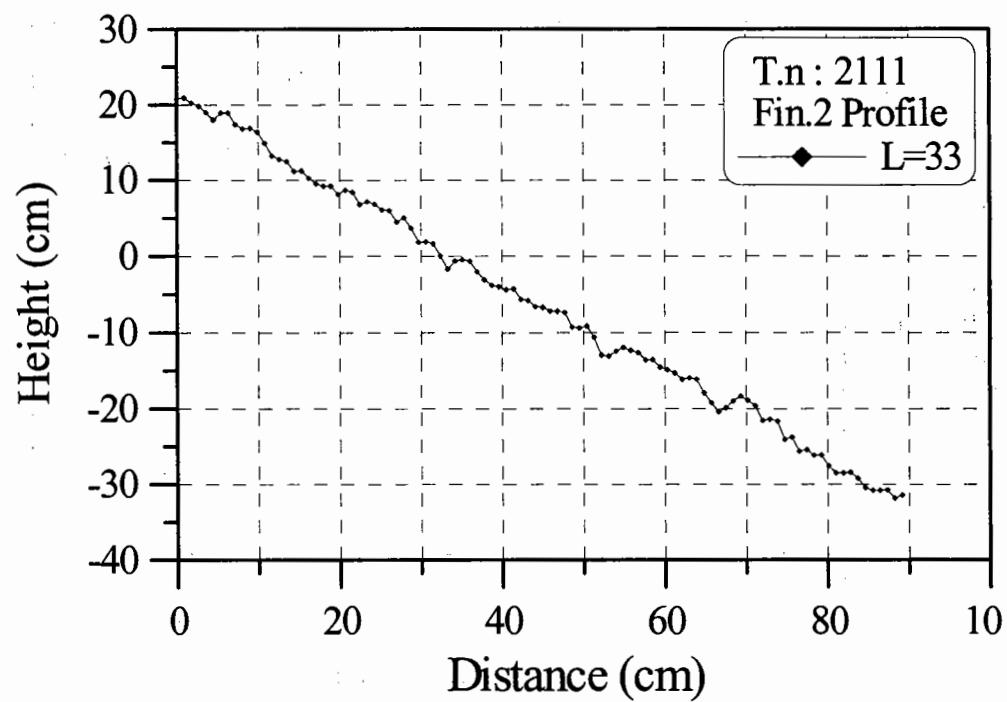


2-2안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

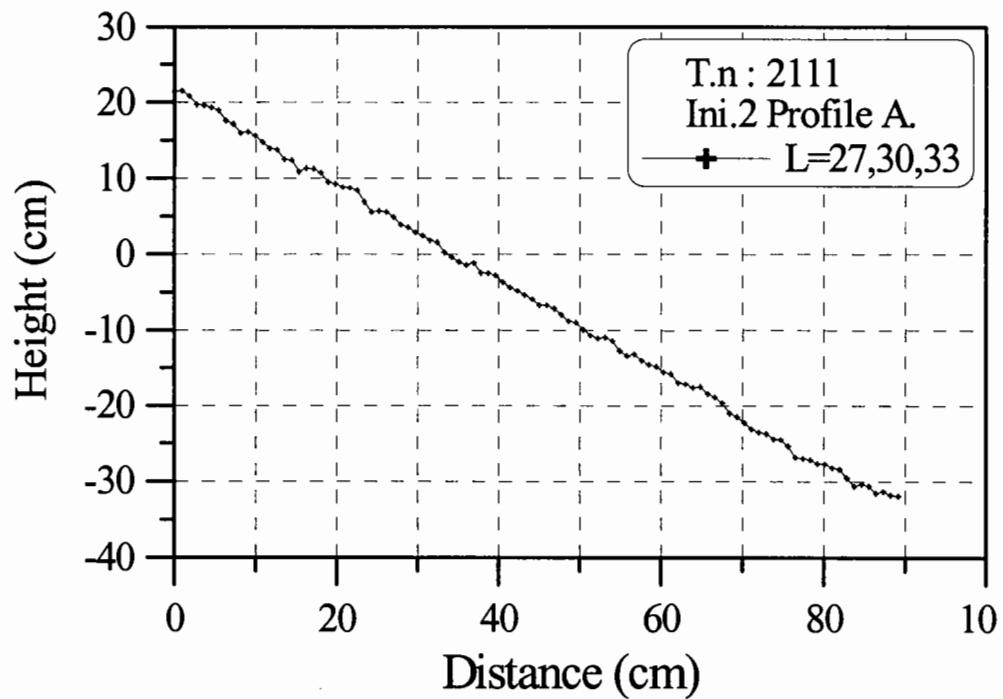


2-2안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

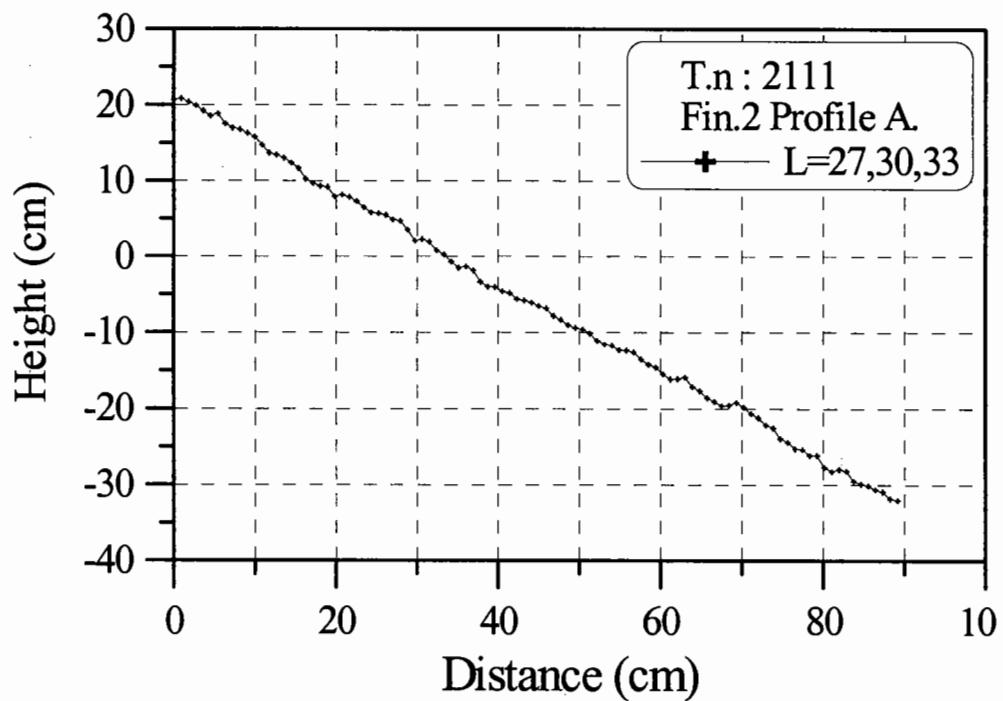


2-2안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

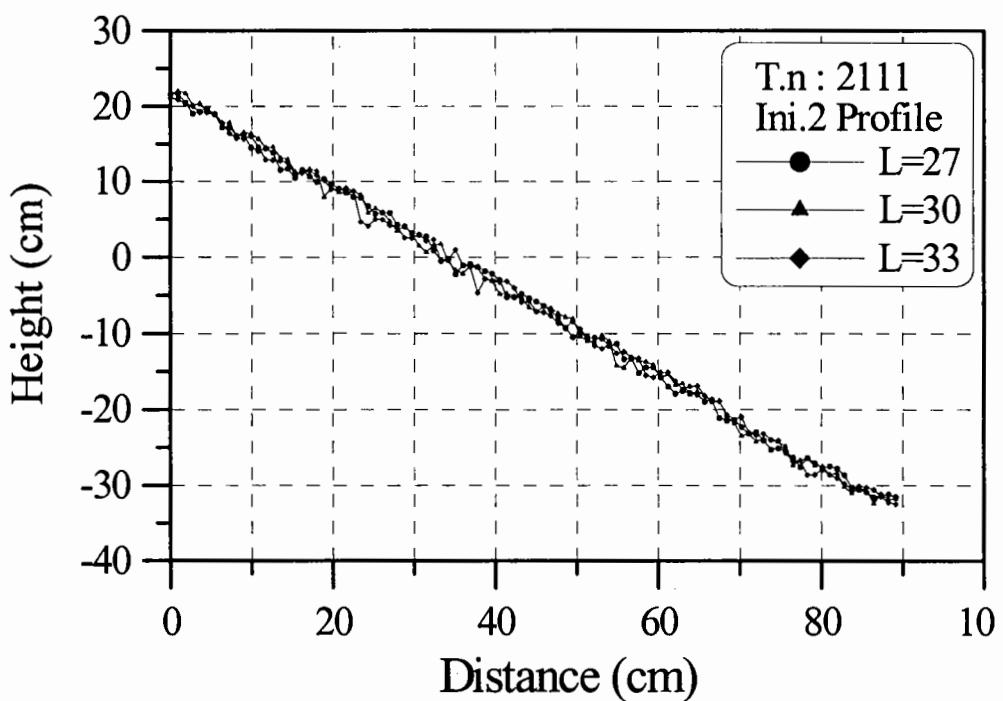


2-2안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

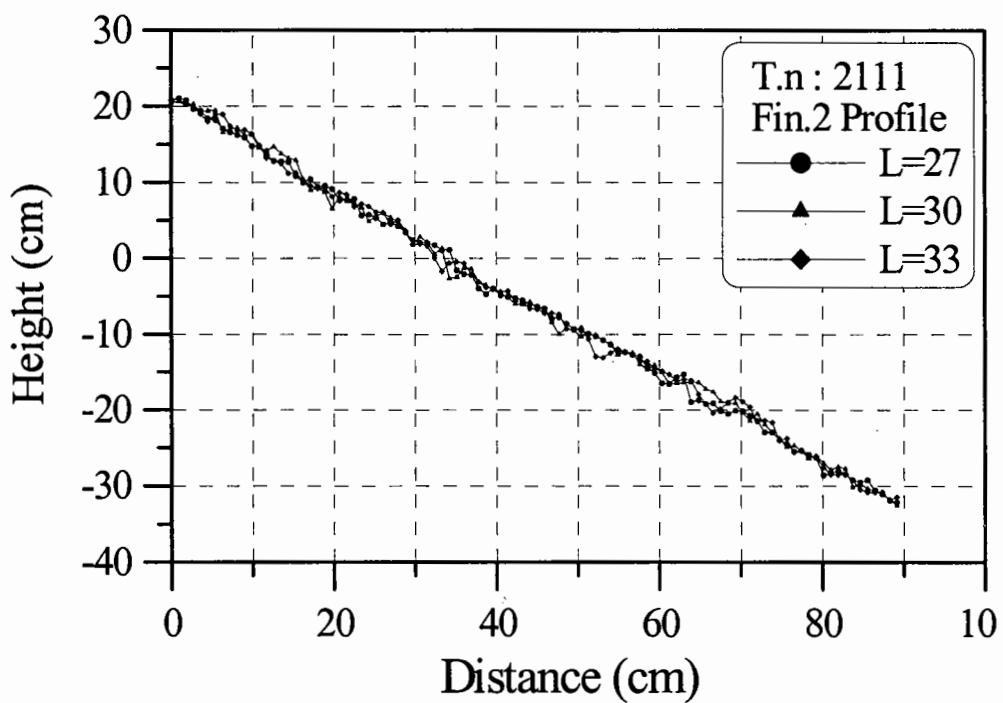


2-2안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

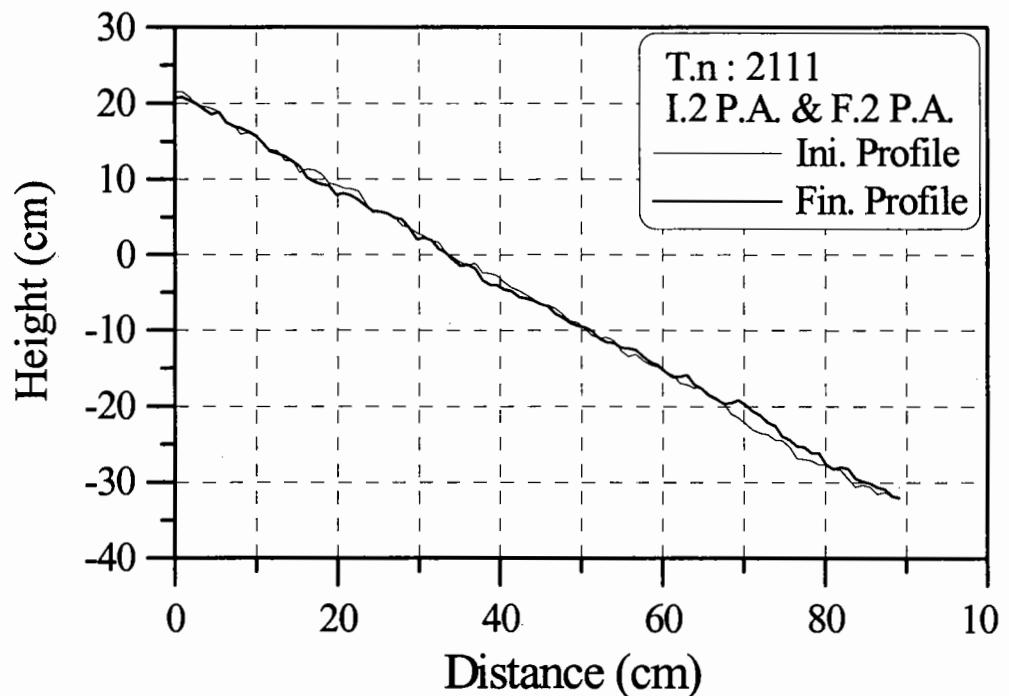


2-2안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

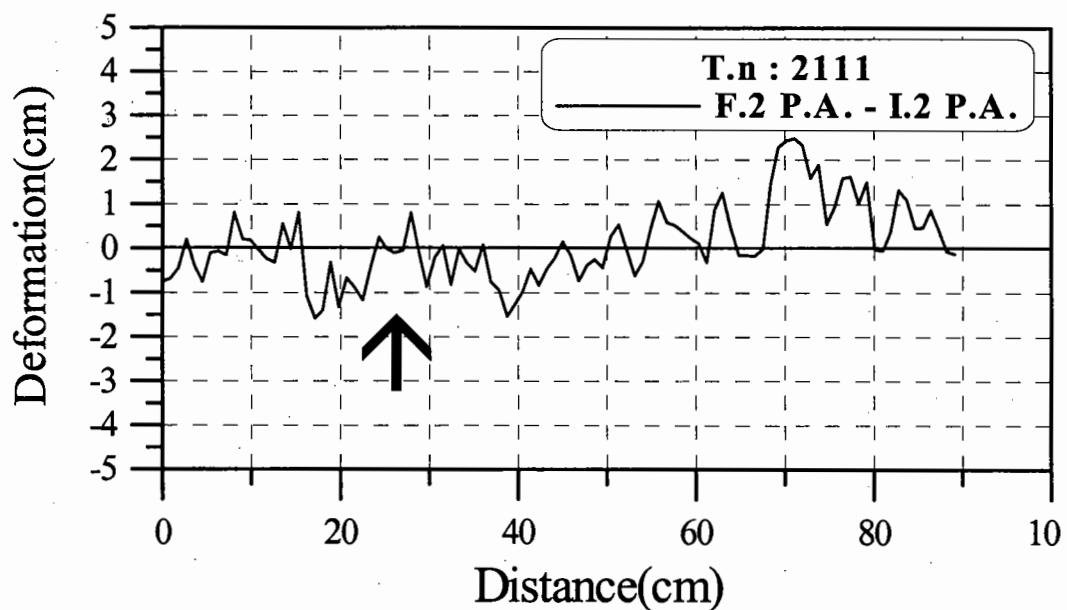


2-2안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

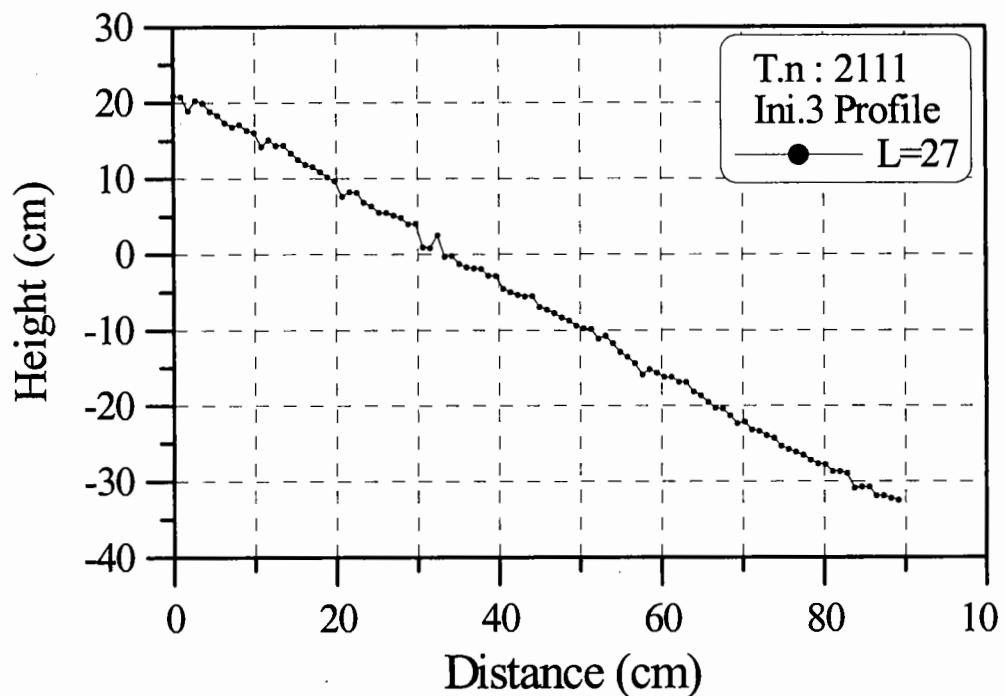


2-2안 2회 실험 피해전·후 필터층의 단면형상 평균의 비교

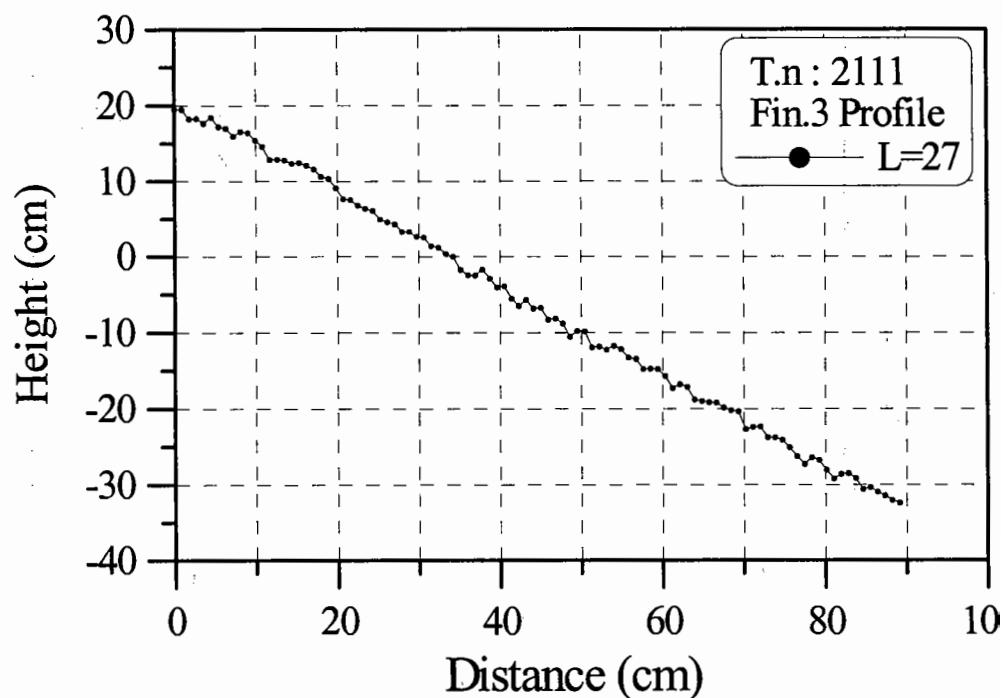


2-2안 2회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

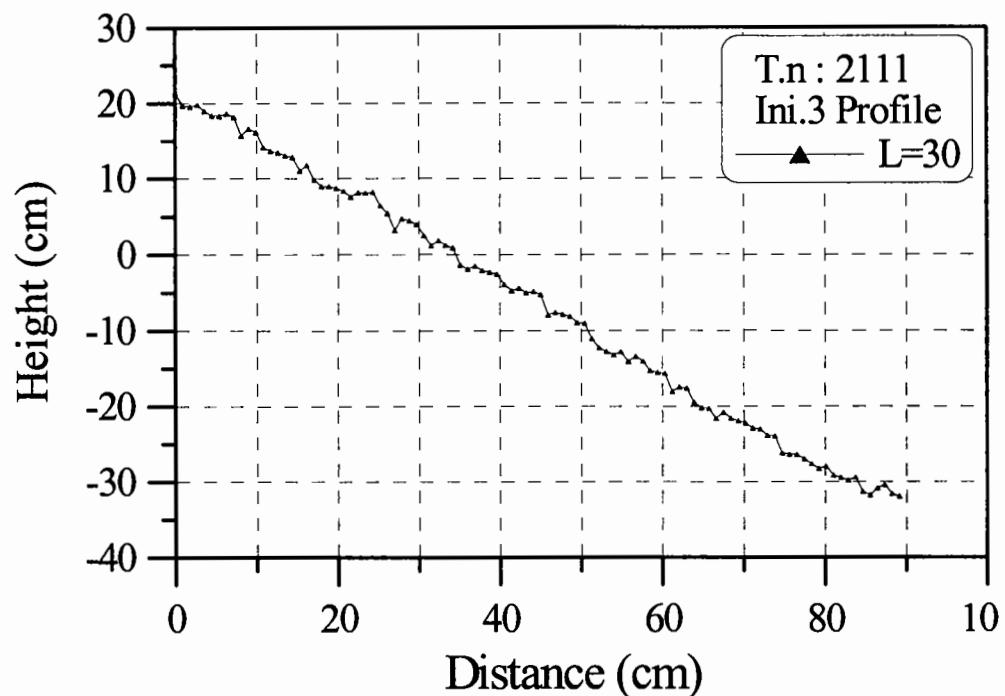


2-2안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

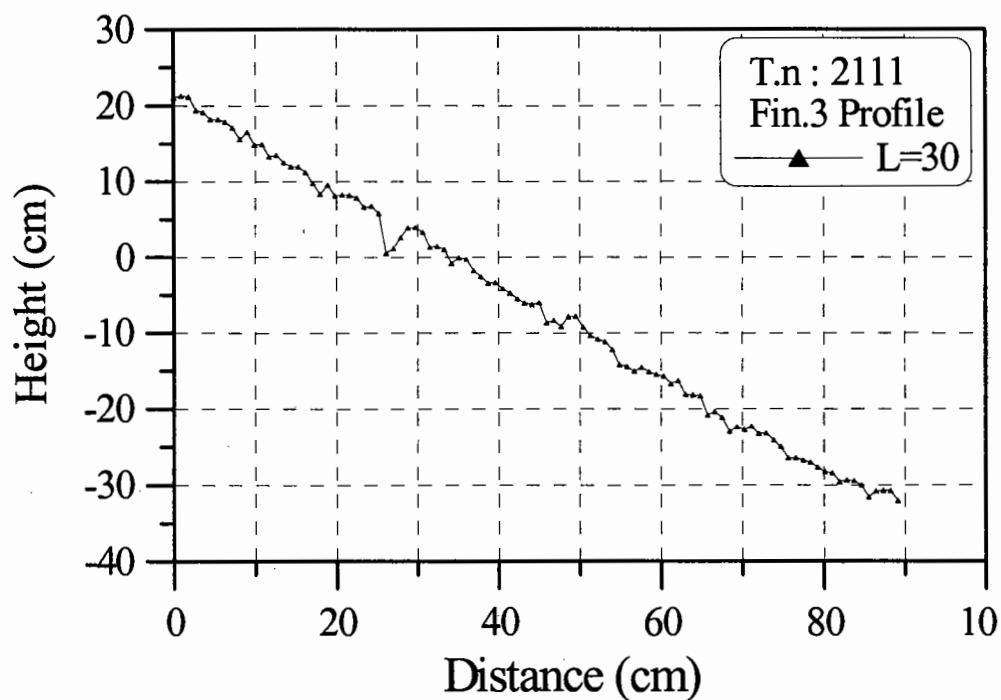


2-2안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

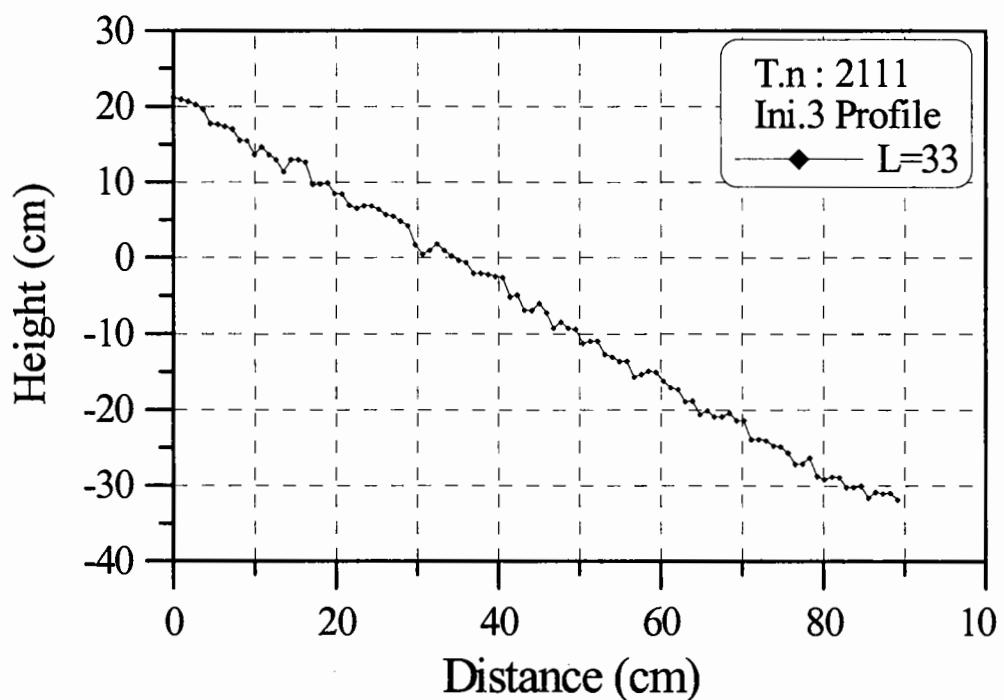


2-2안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

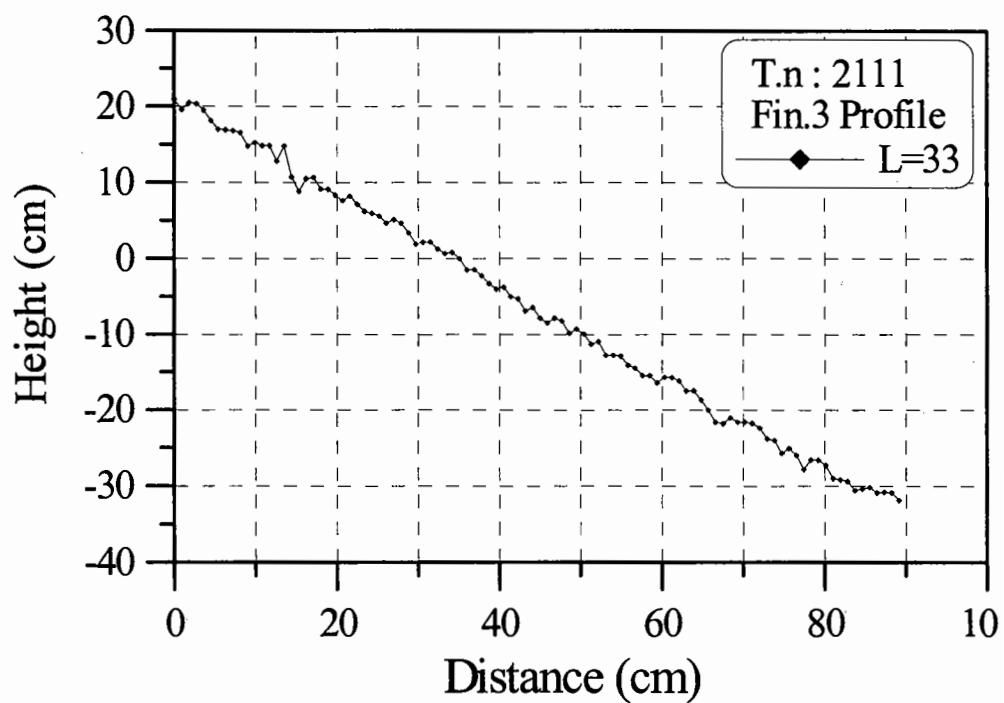


2-2안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

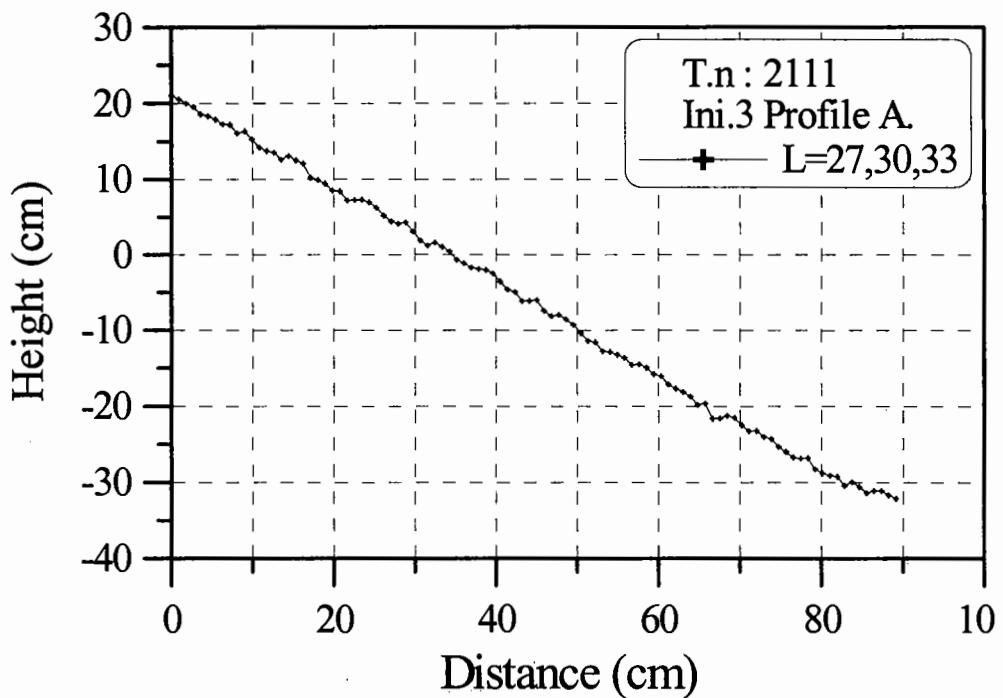


2-2안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

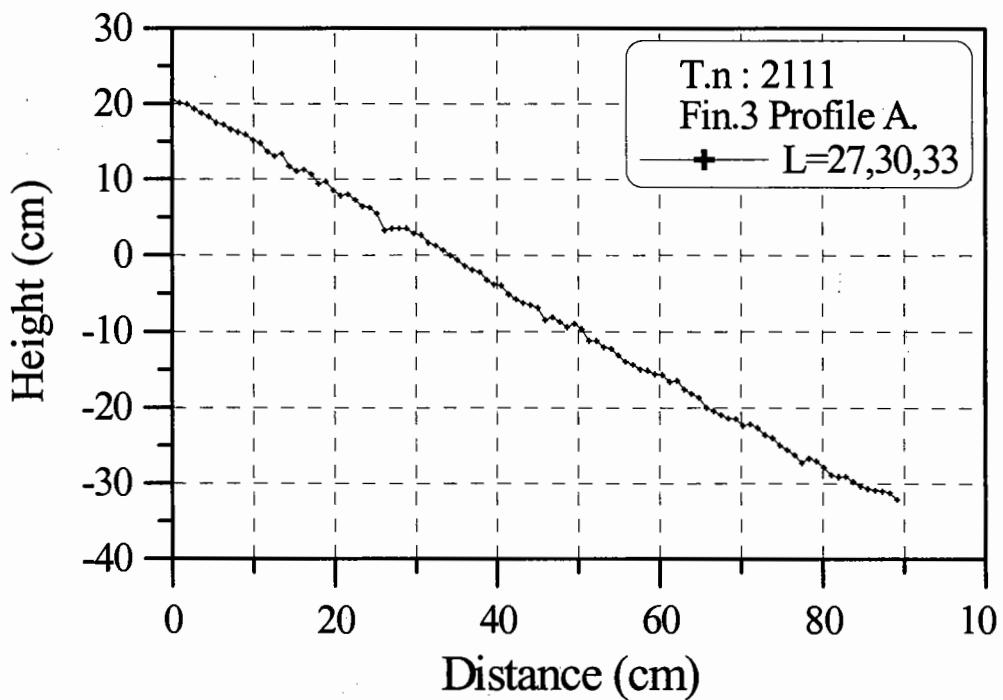


2-2안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

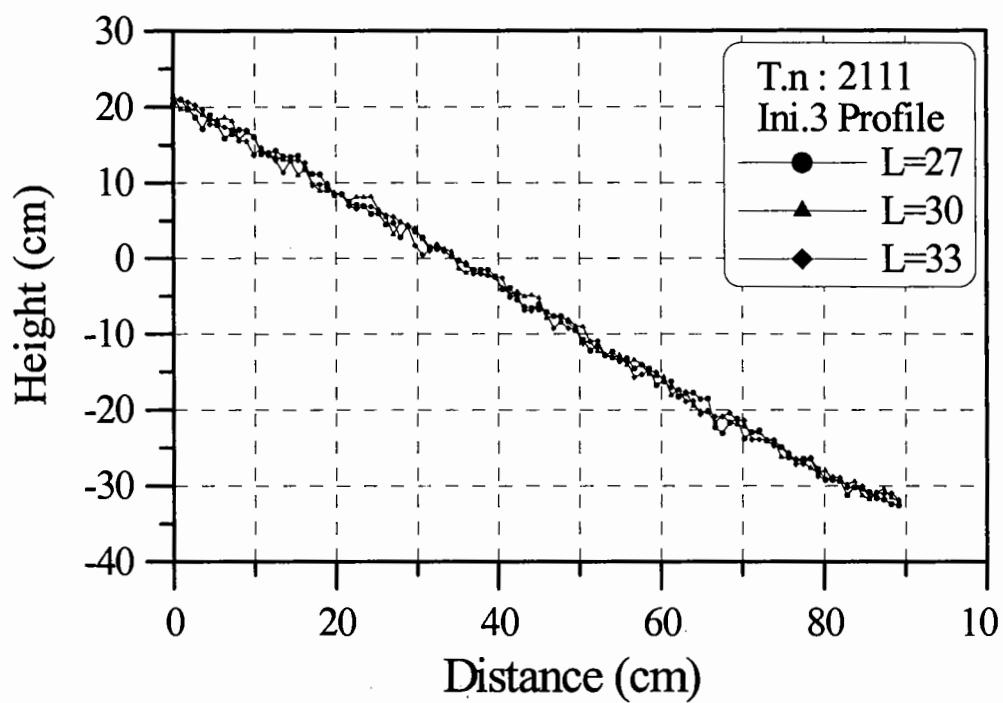


2-2안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

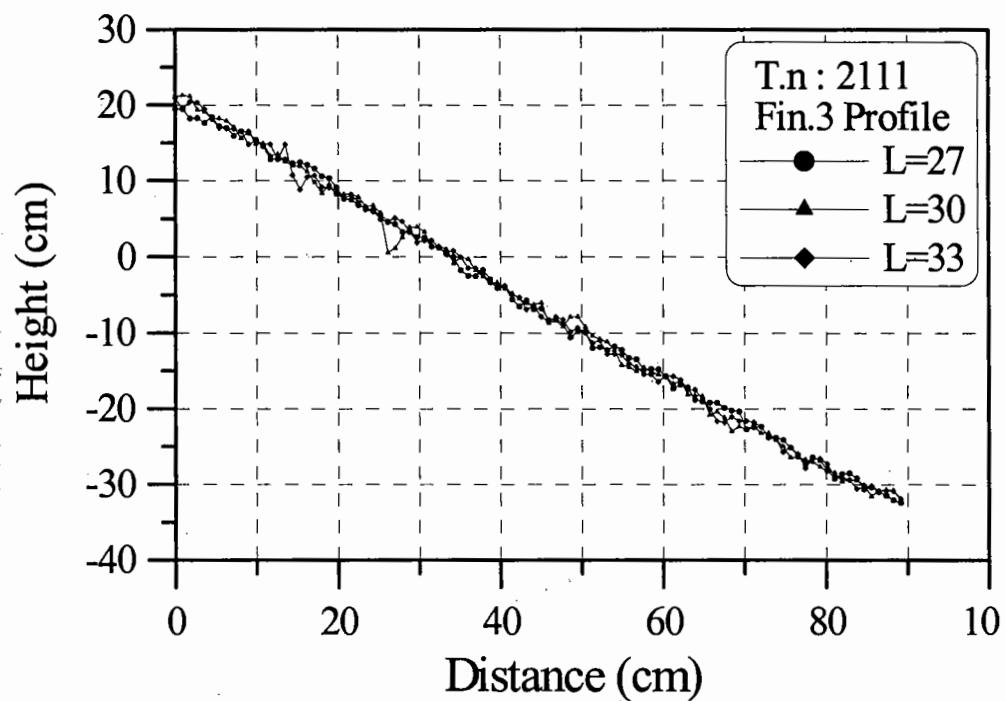


2-2안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

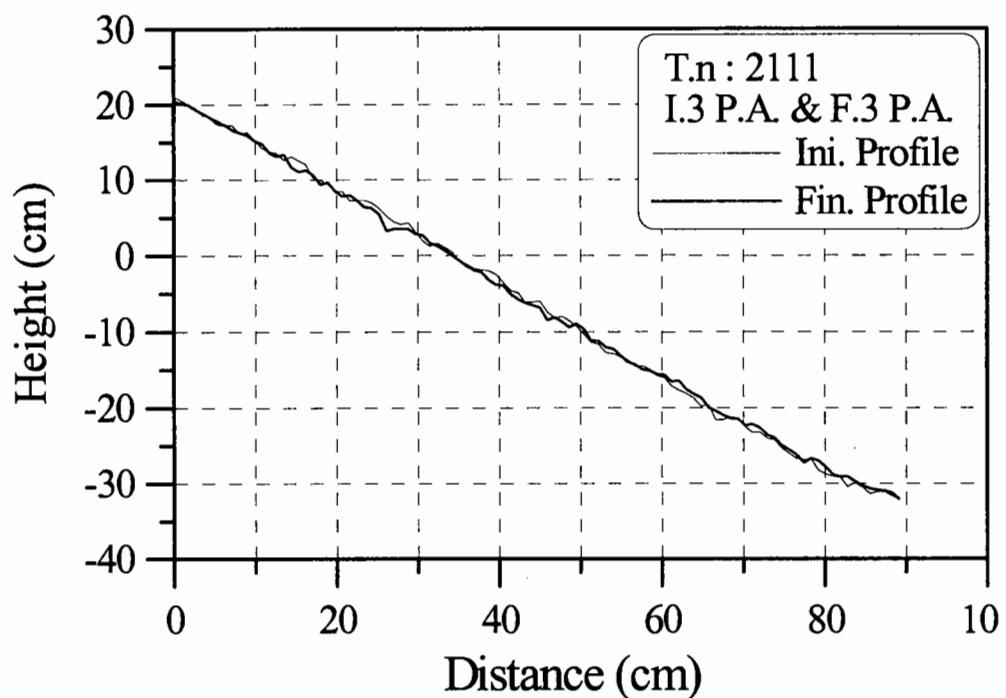


2-2안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

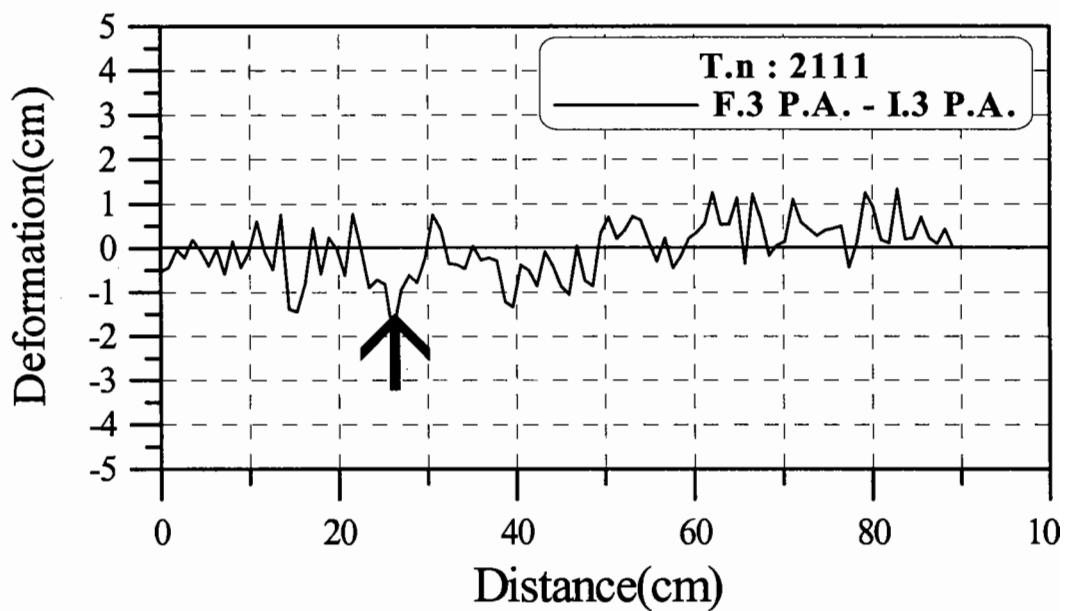


2-2안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

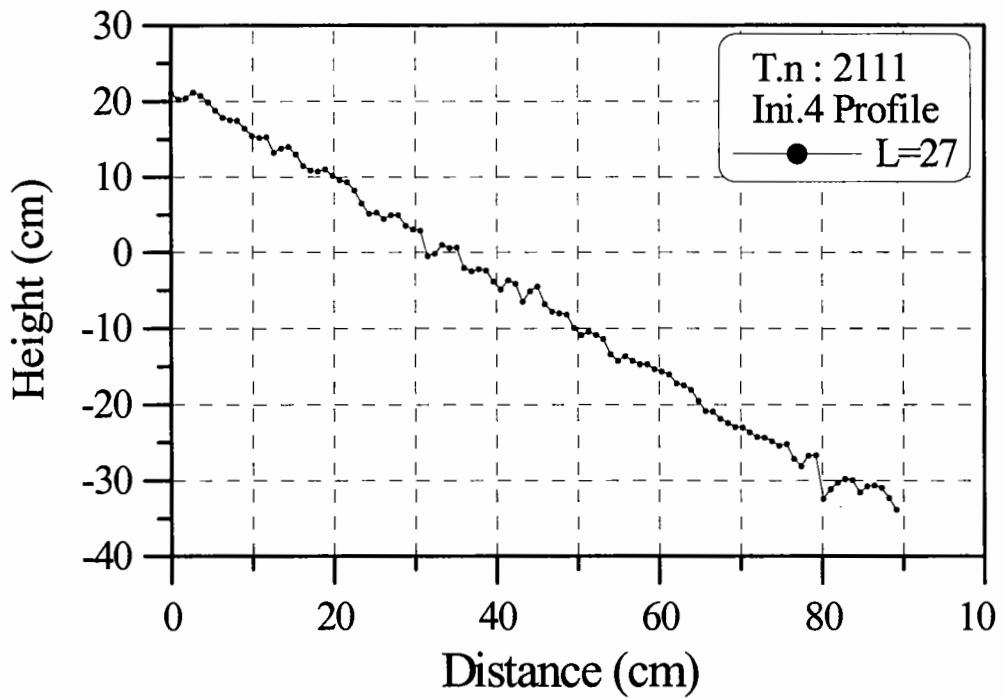


2-2안 3회 실험 피해전·후 필터층의 단면형상 평균의 비교

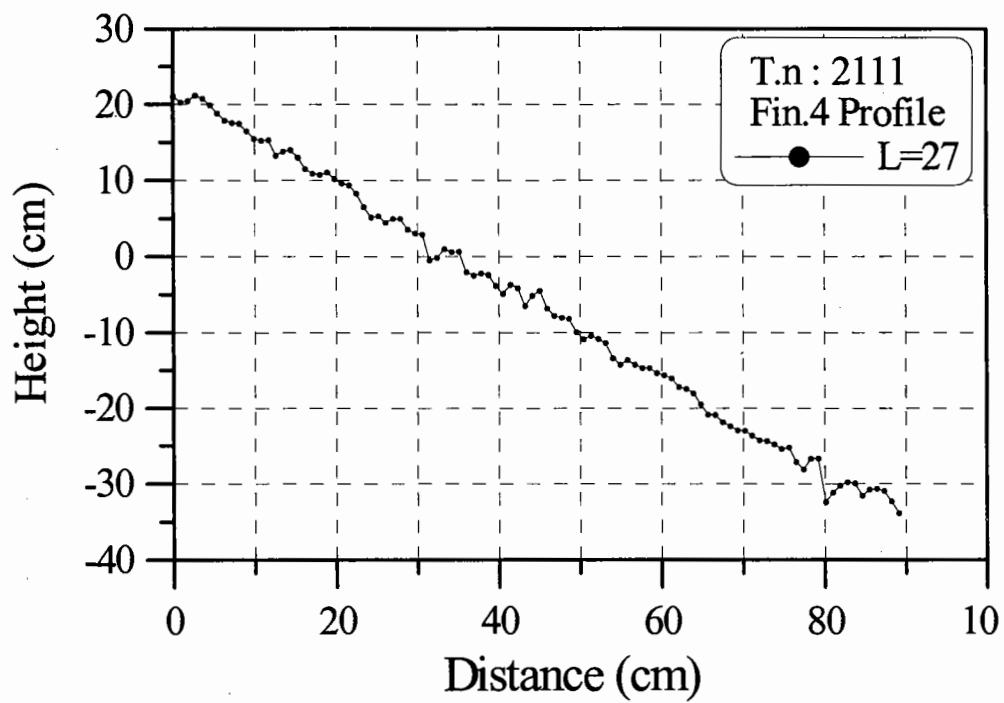


2-2안 3회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

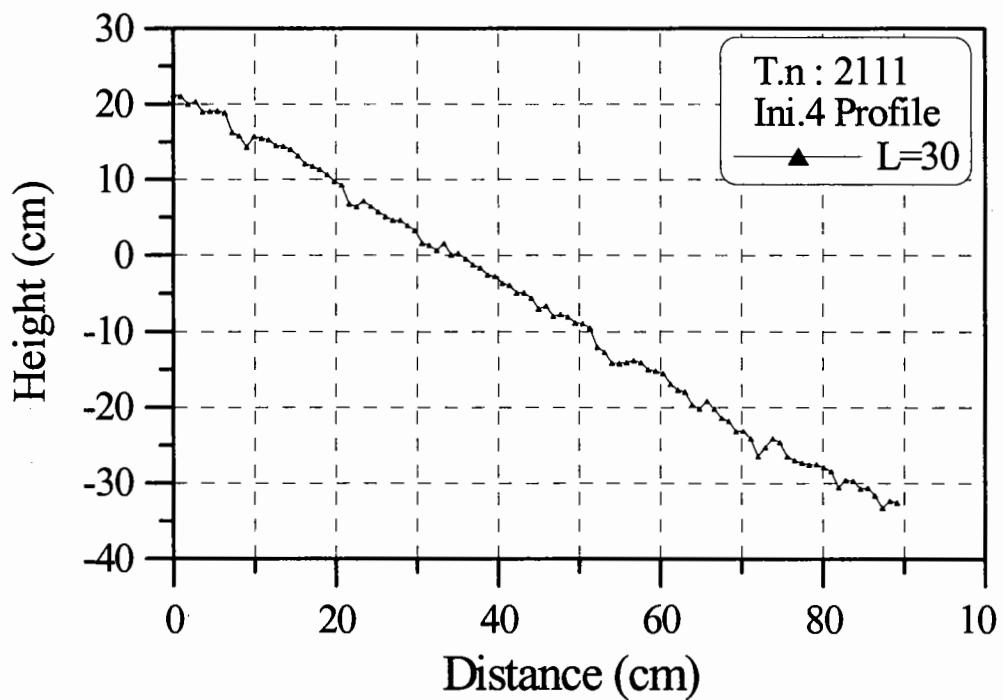


2-2안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

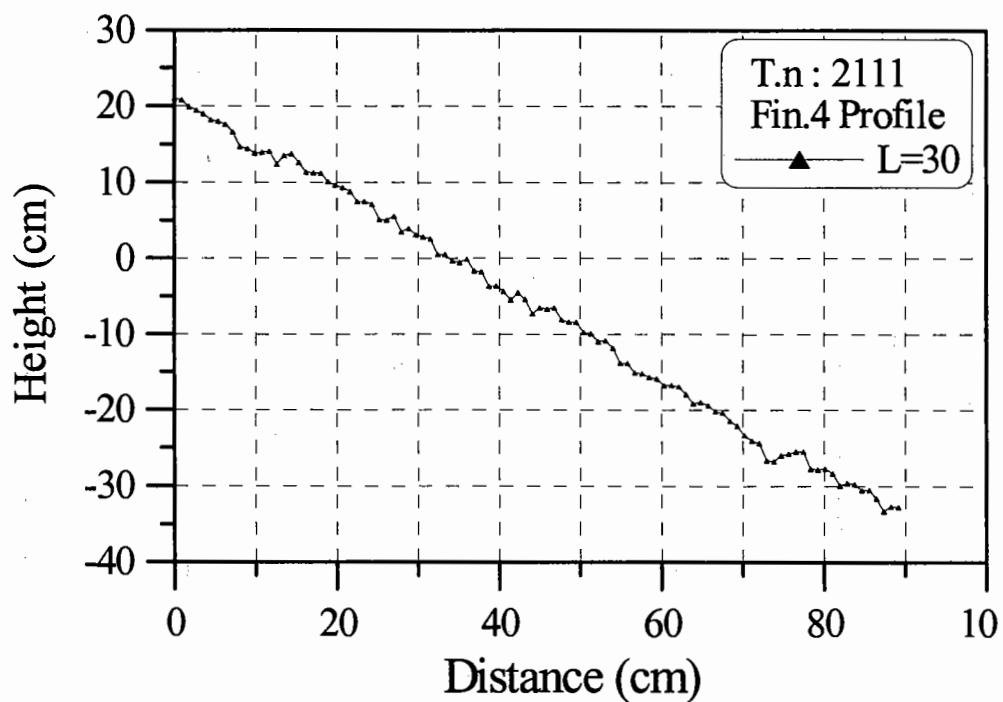


2-2안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

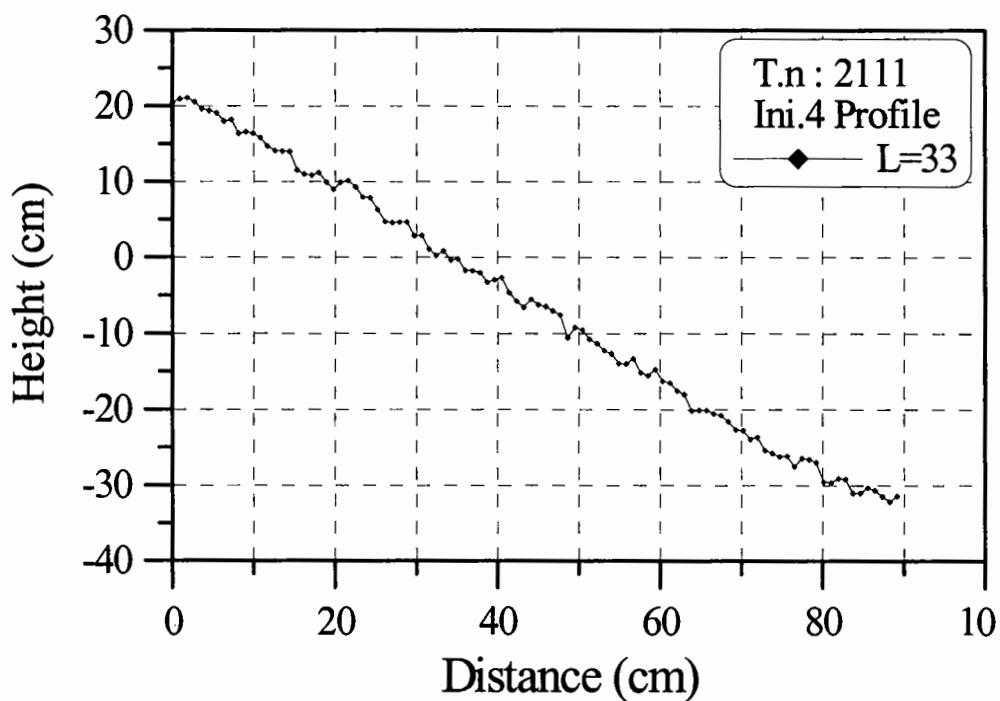


2-2안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

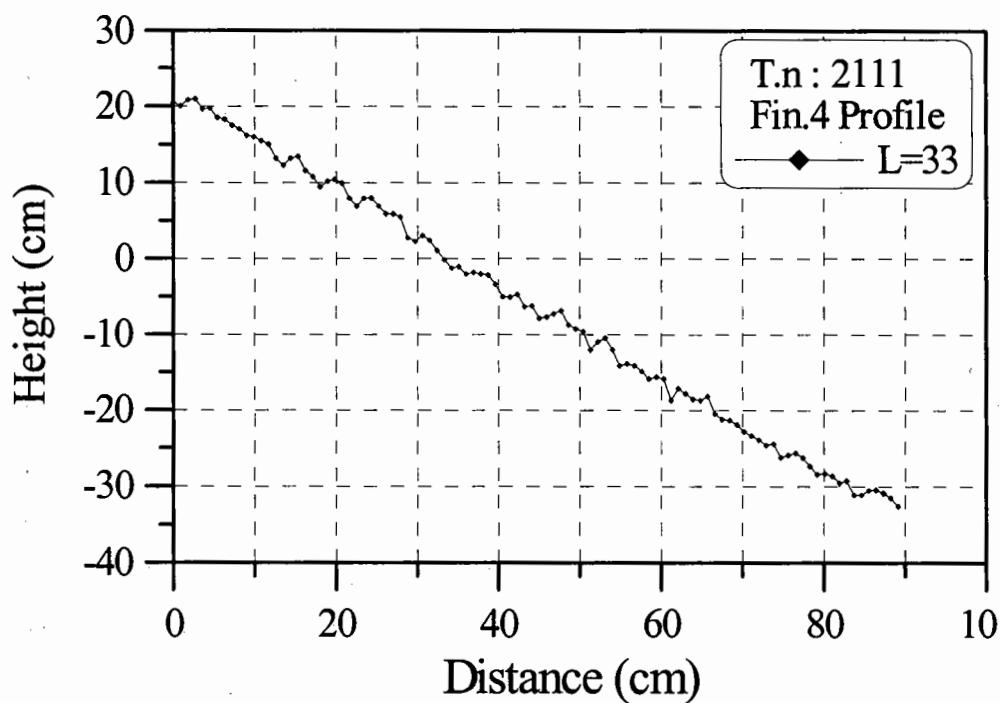


2-2안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

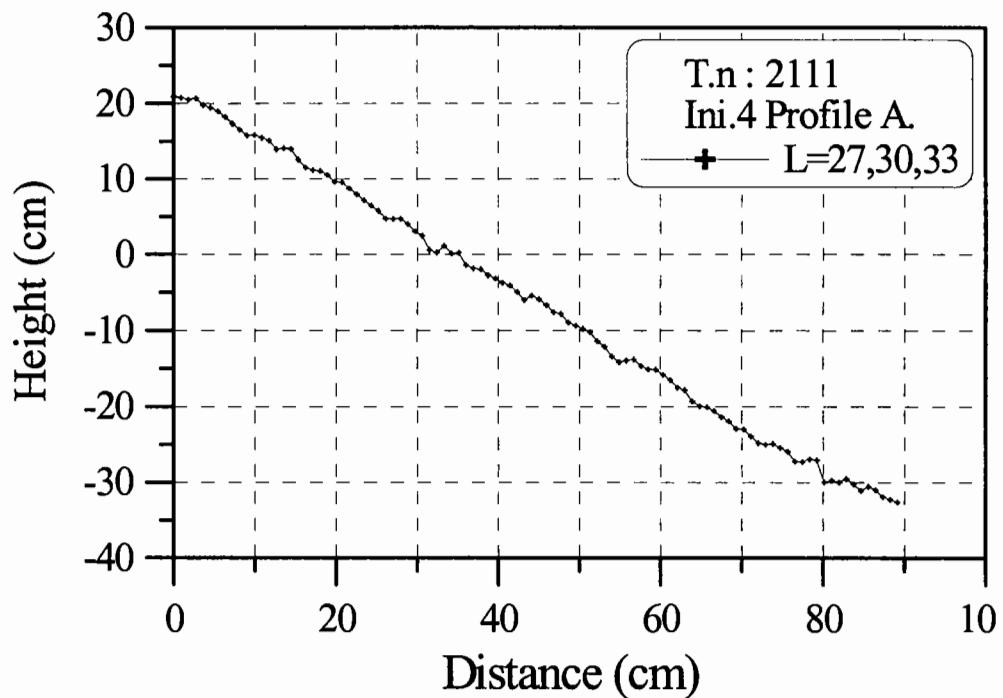


2-2안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

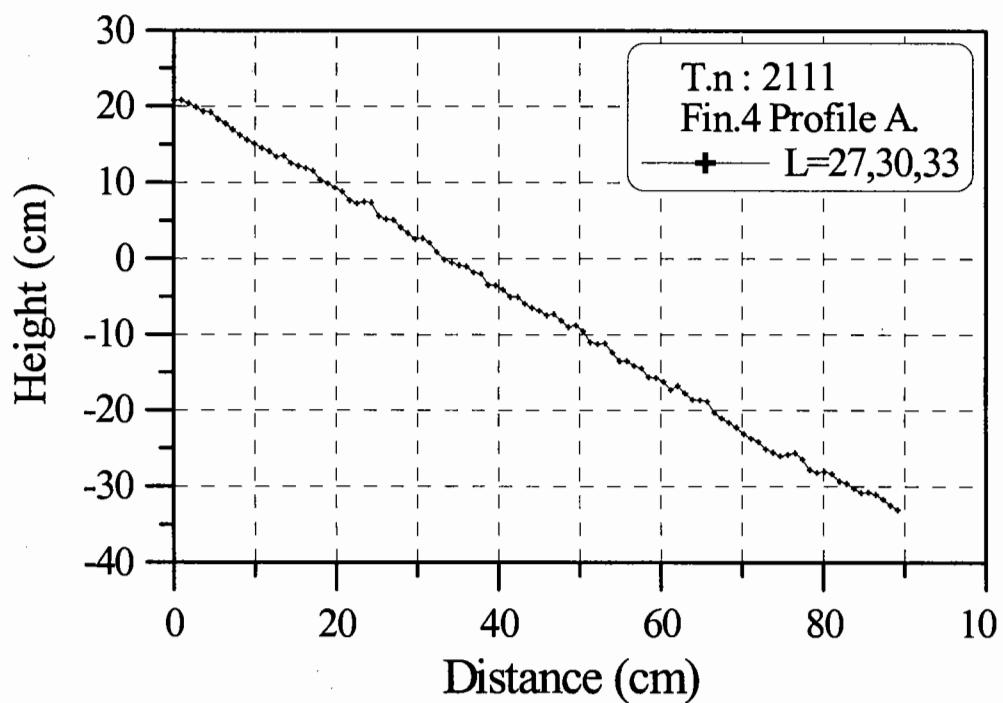


2-2안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

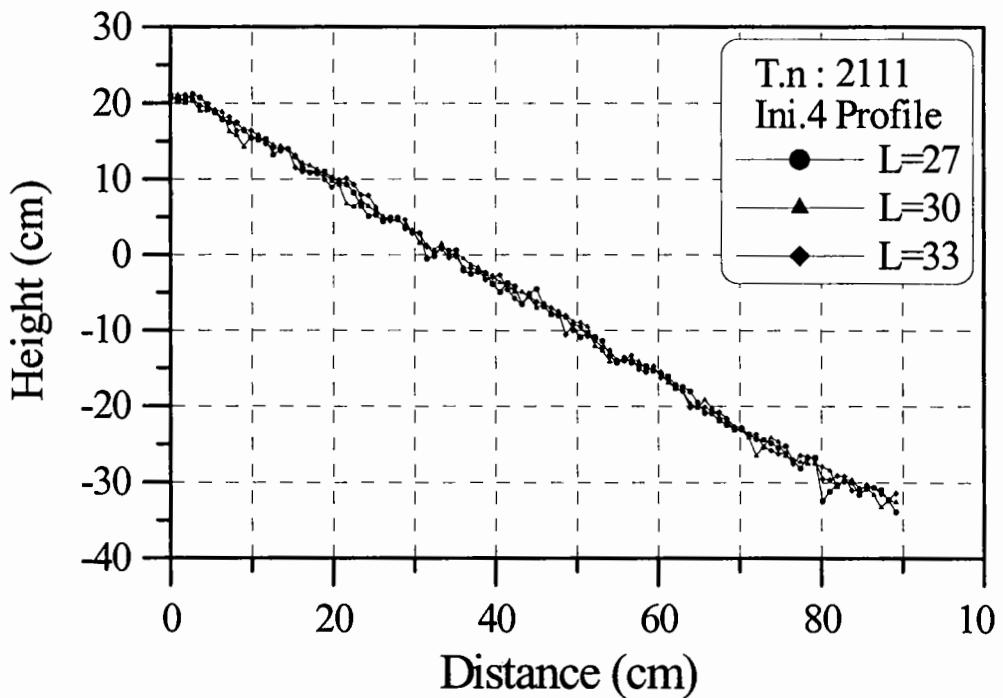


2-2안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

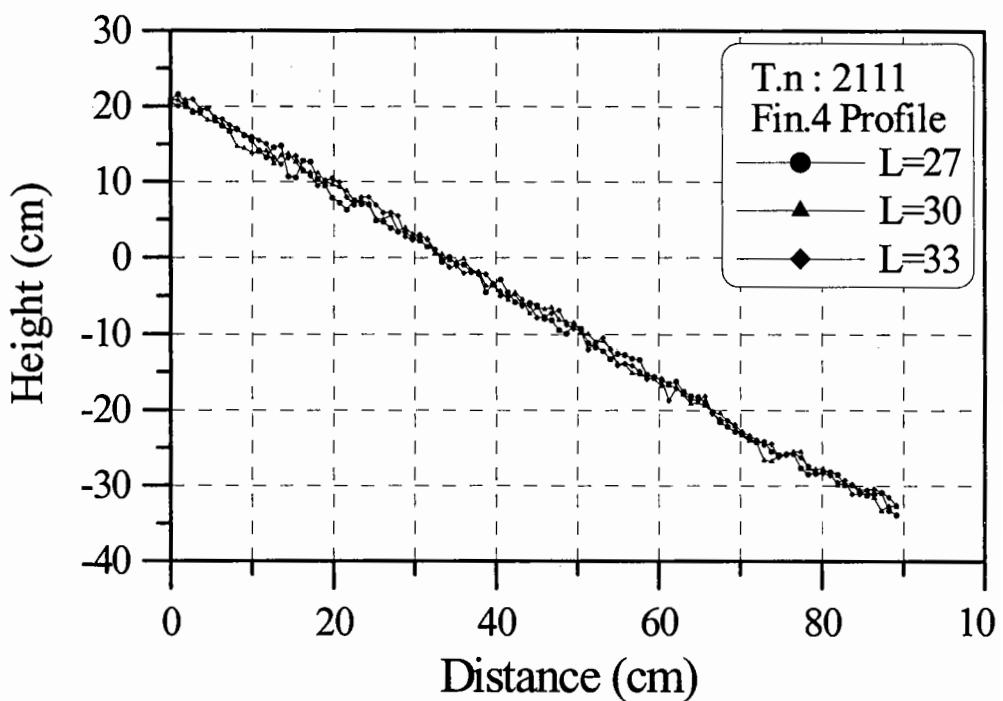


2-2안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

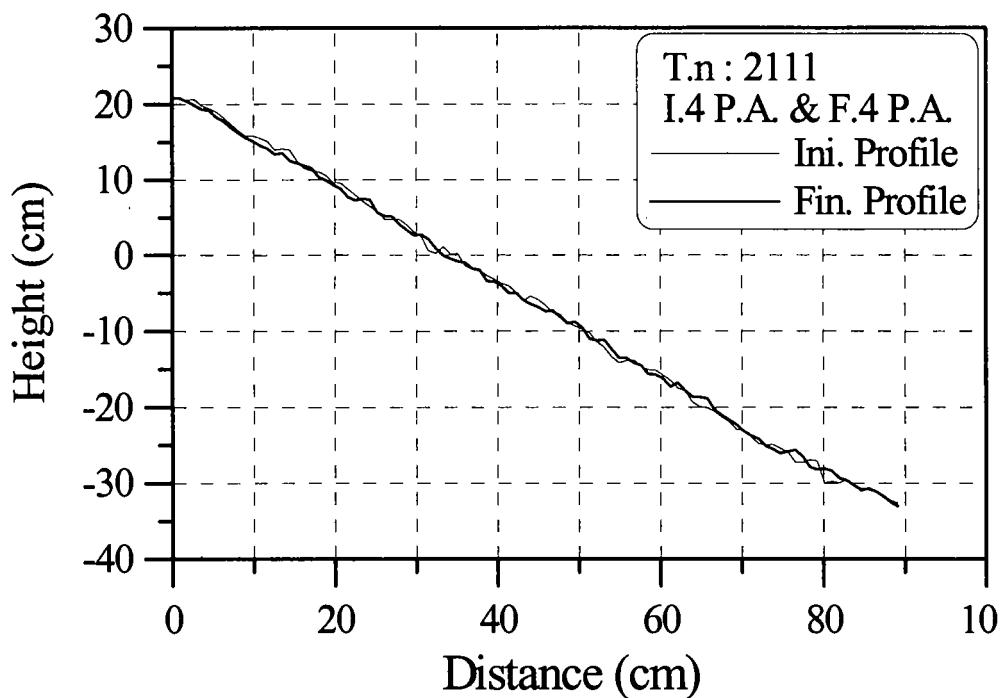


2-2안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

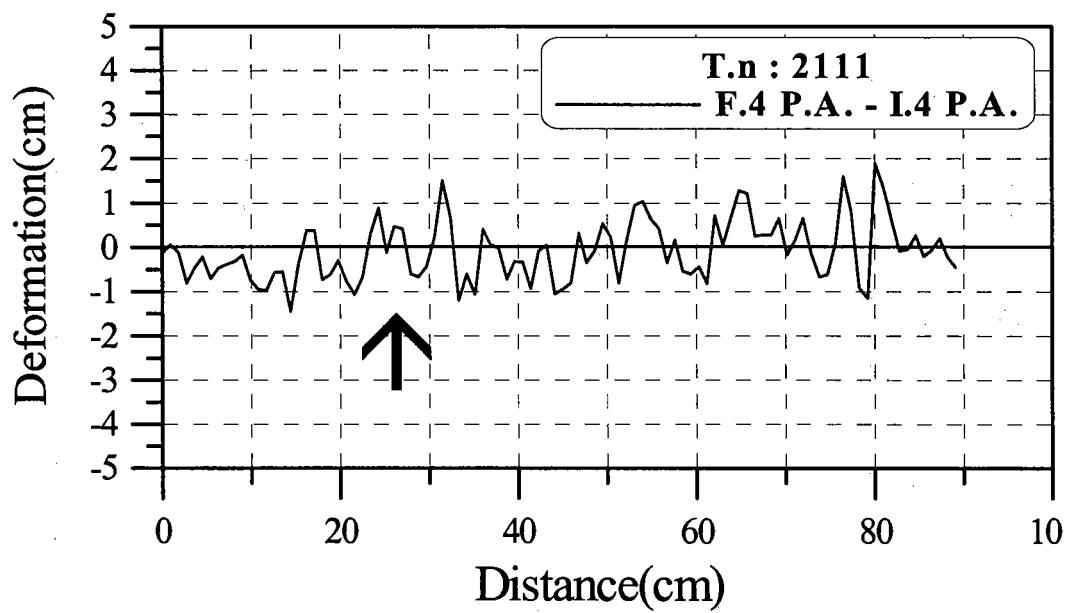


2-2안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

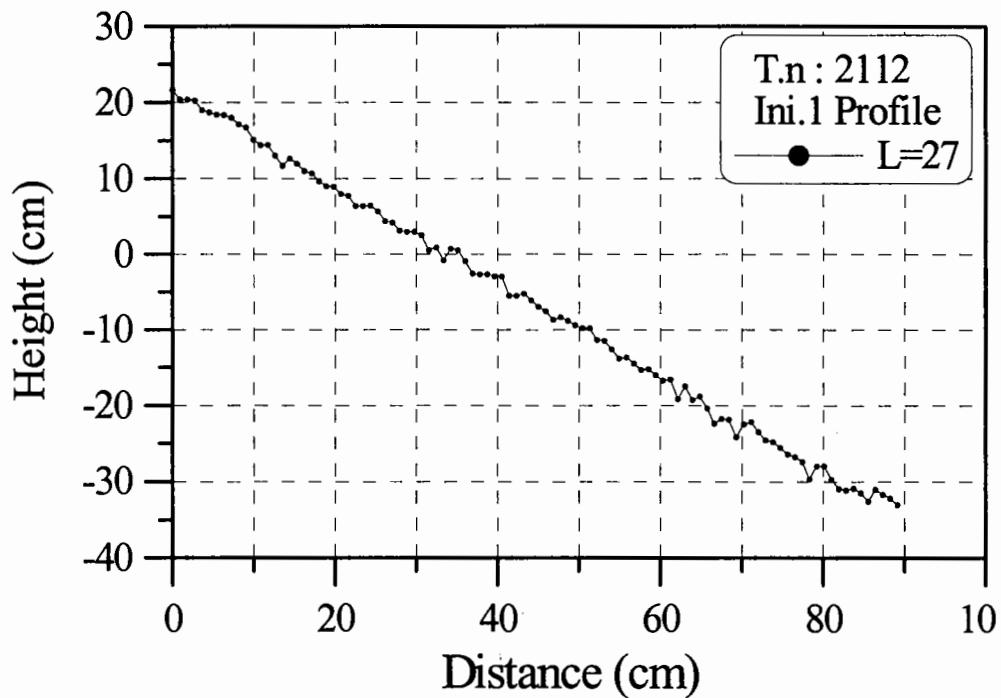


2-2안 4회 실험 피해전 · 후 필터층의 단면형상 평균의 비교

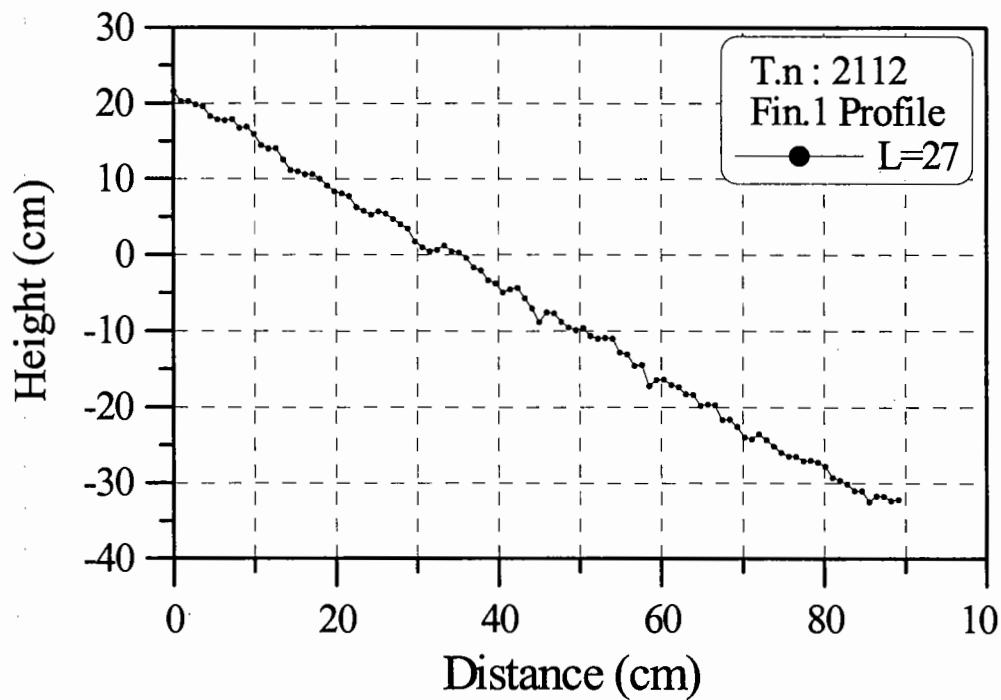


2-2안 4회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-3안의 중간파복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

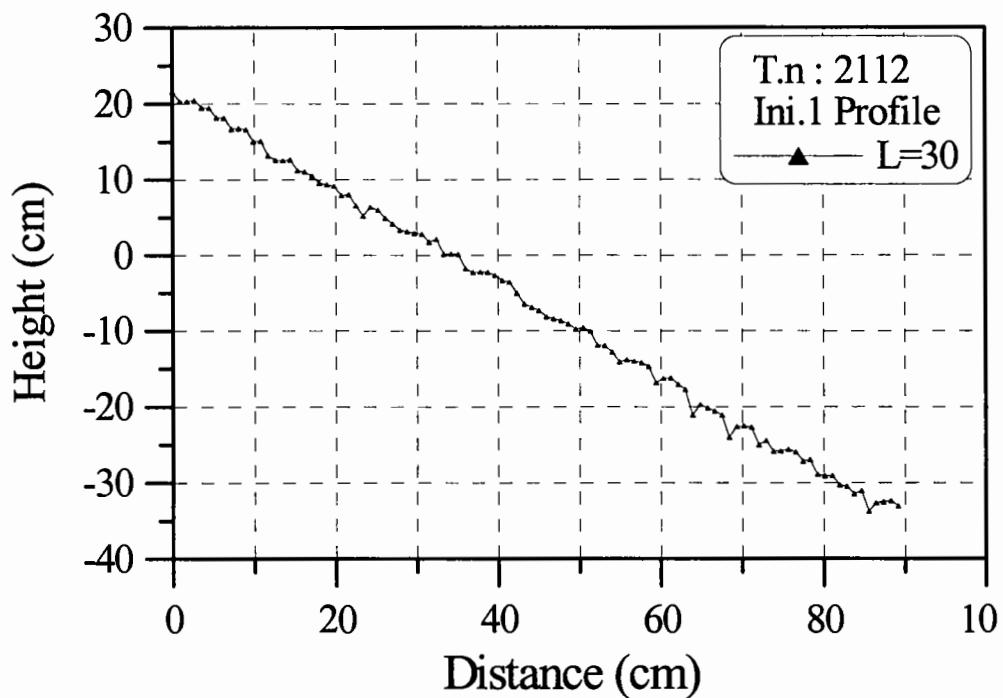


2-3안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

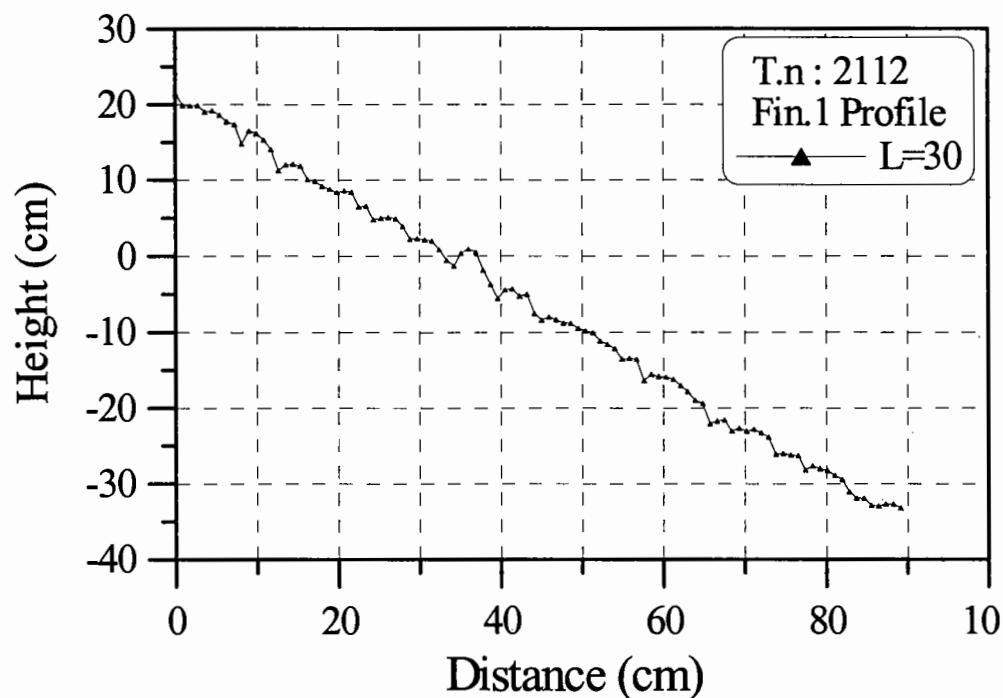


2-3안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

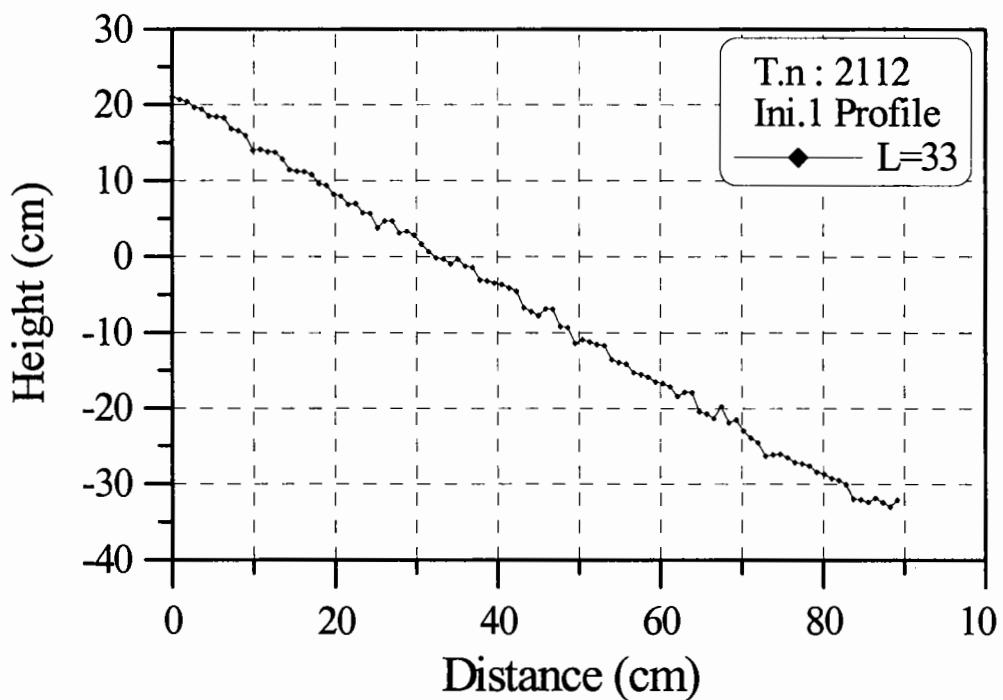


2-3안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

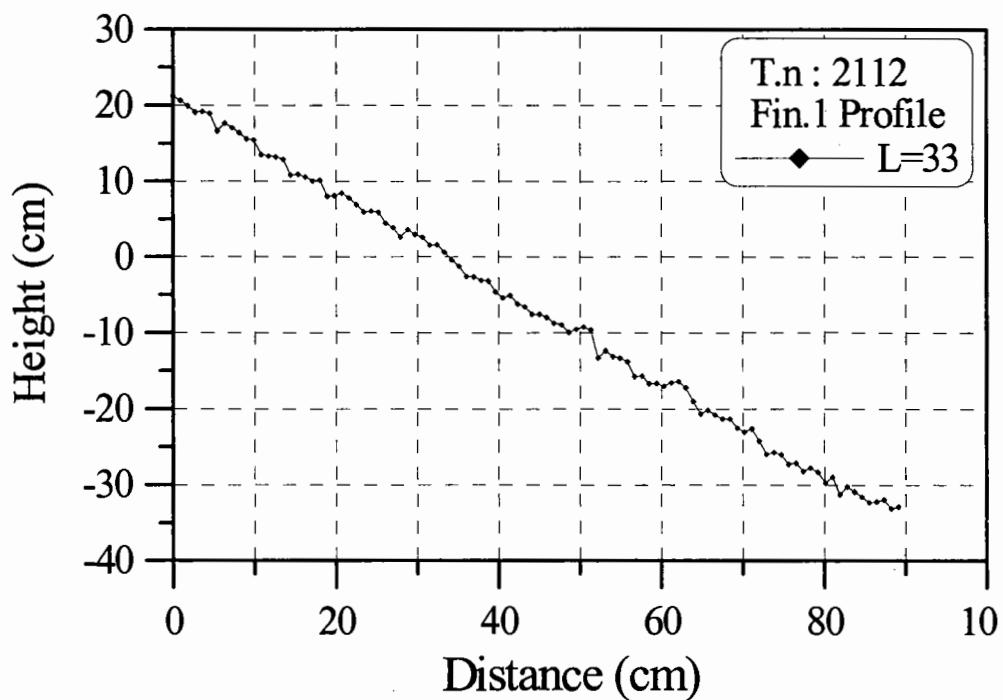


2-3안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

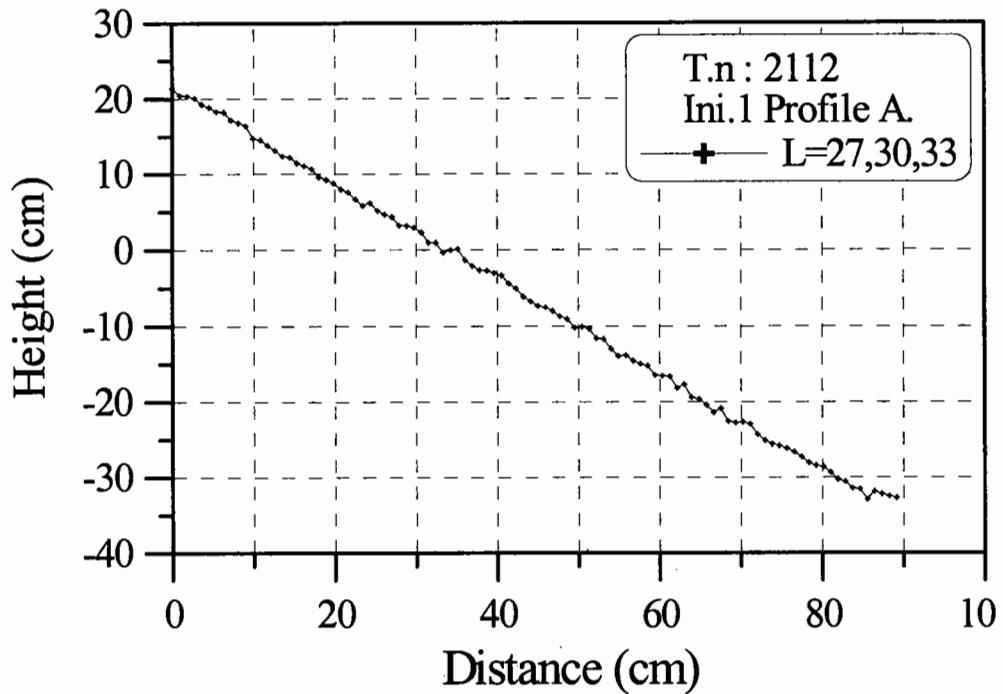


2-3안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

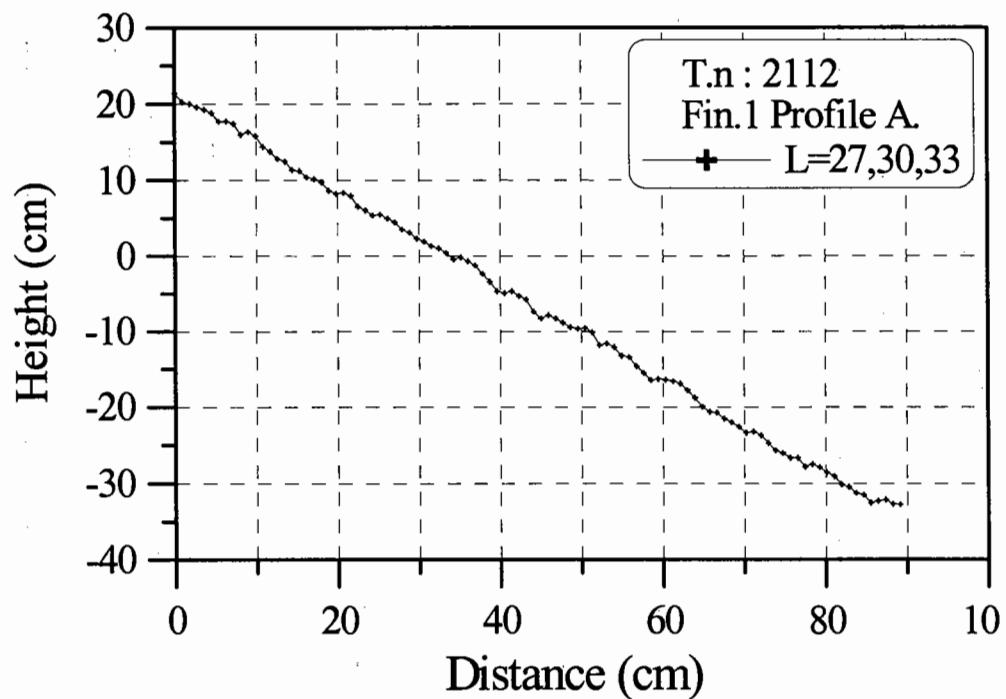


2-3안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

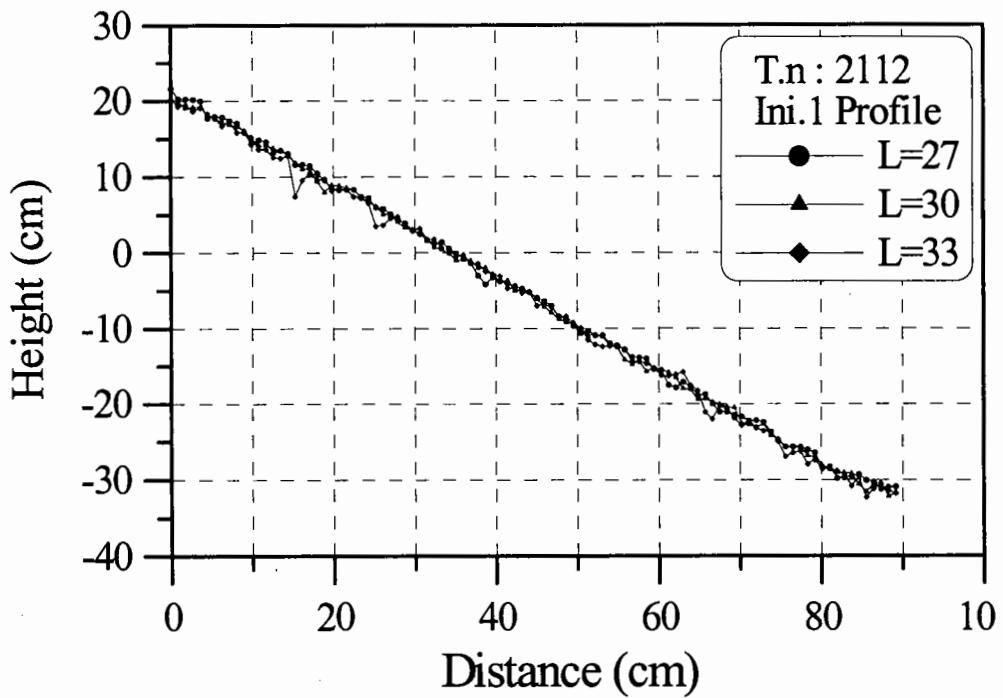


2-3안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

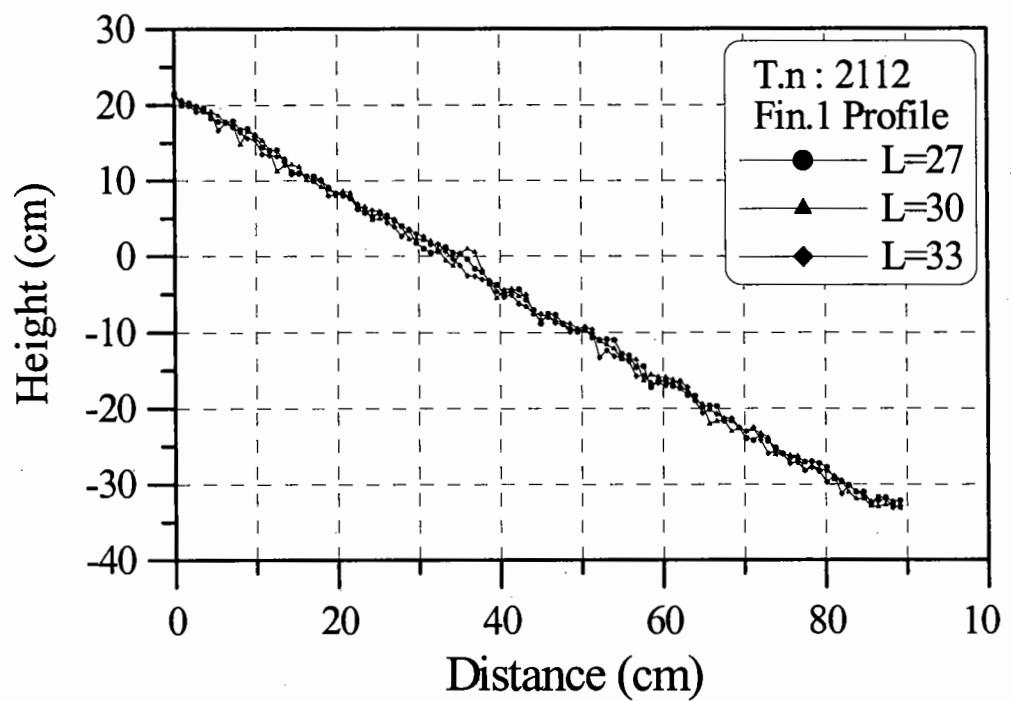


2-3안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-3안의 중간파복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

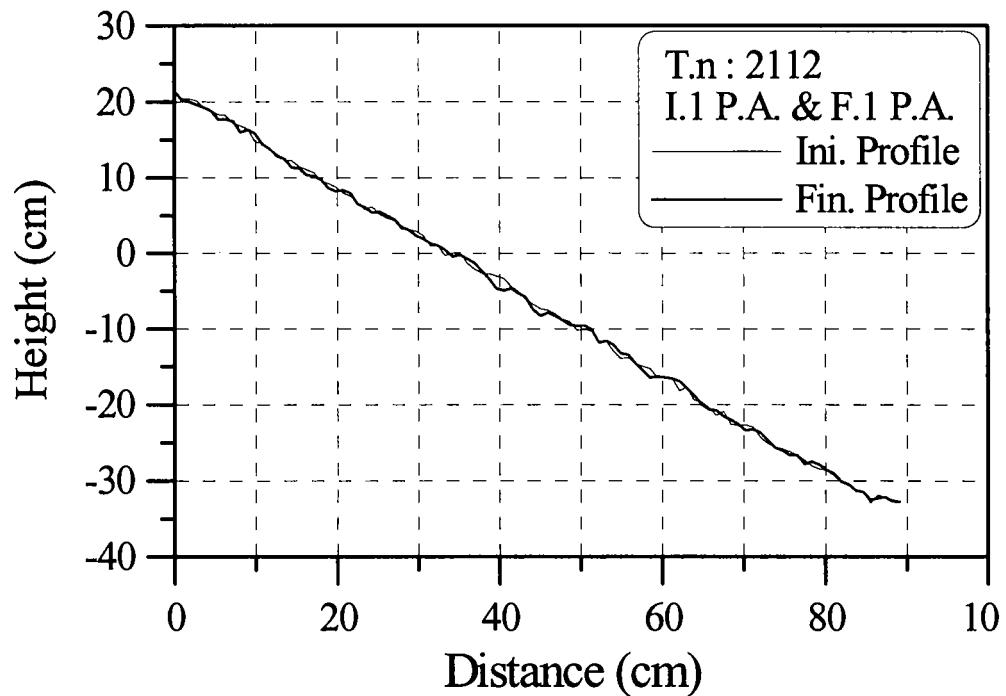


2-3안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

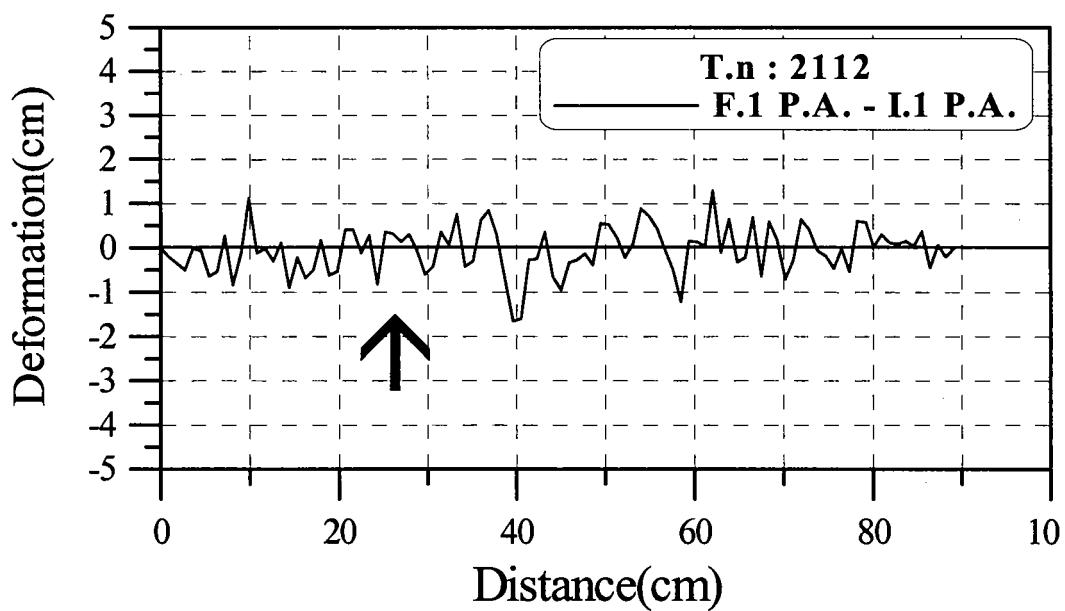


2-3안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

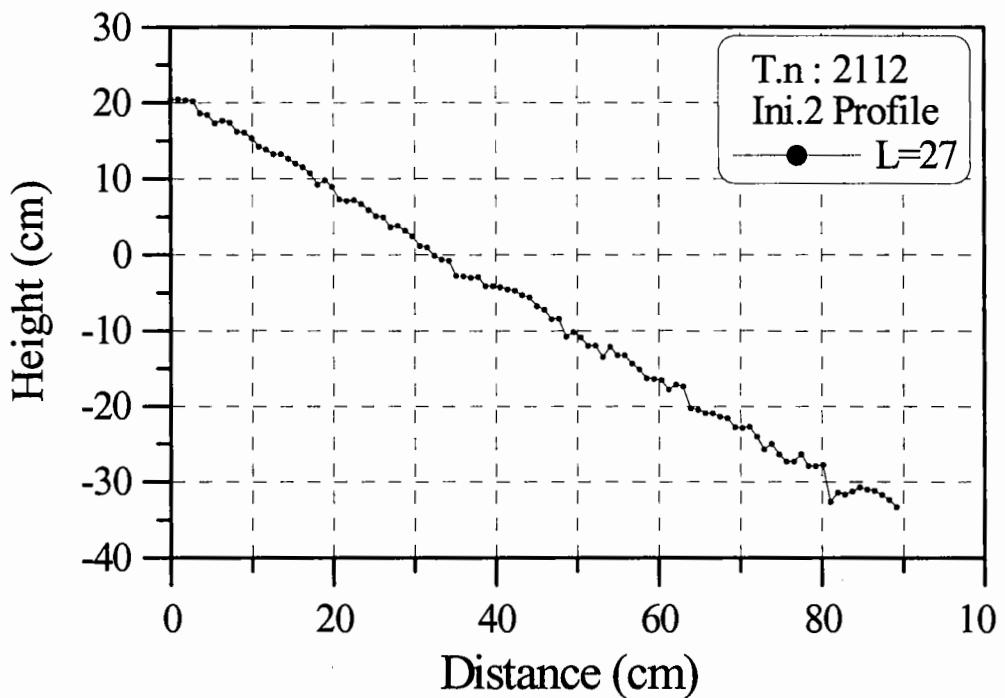


2-3안 1회 실험 피해전 · 후 필터층의 단면형상 평균의 비교

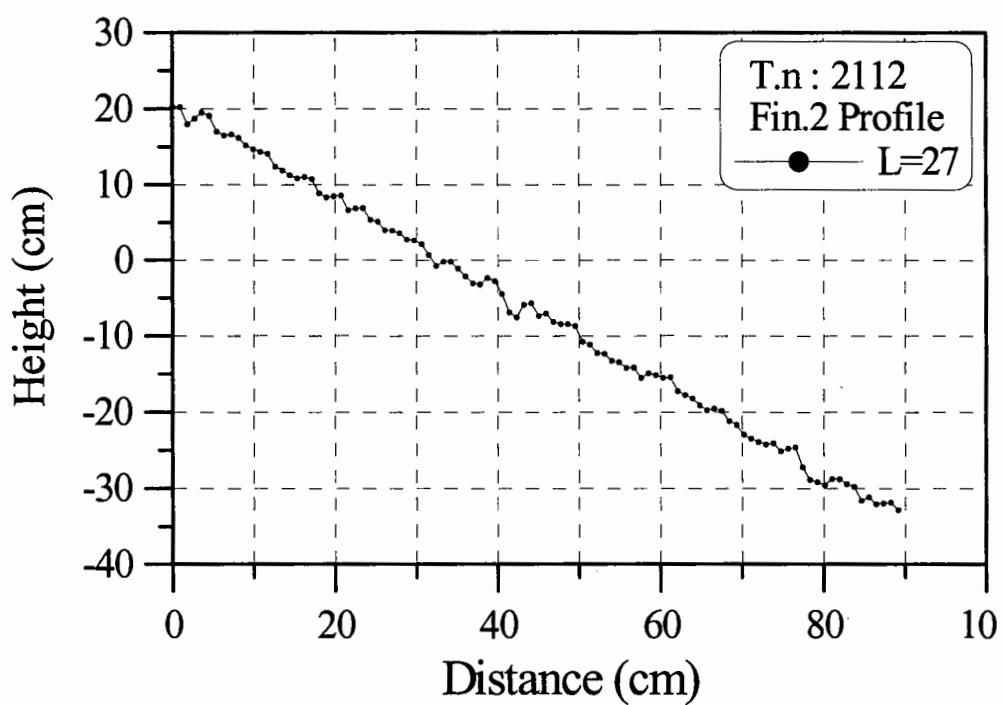


2-3안 1회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

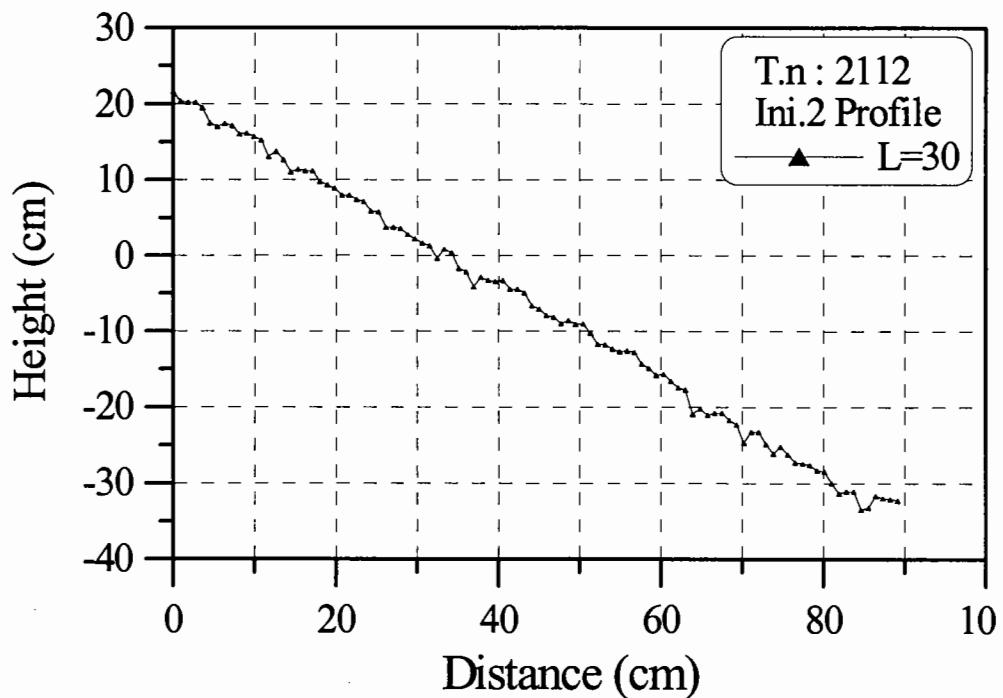


2-3안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

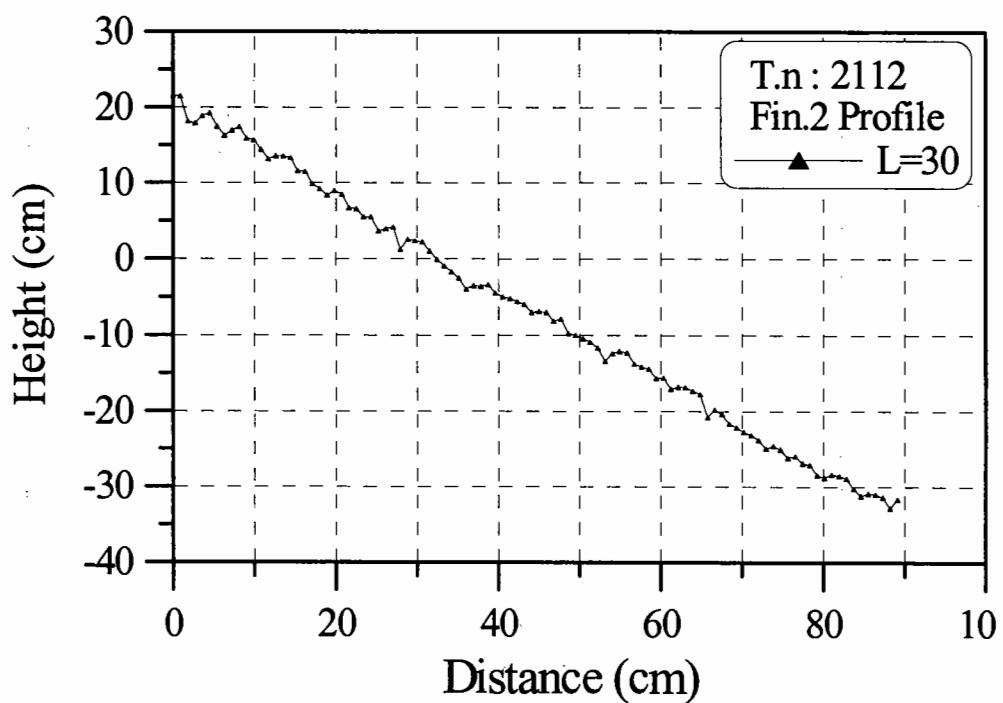


2-3안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-3안의 중간피복층의 연직 방향 변형 실험결과 2회

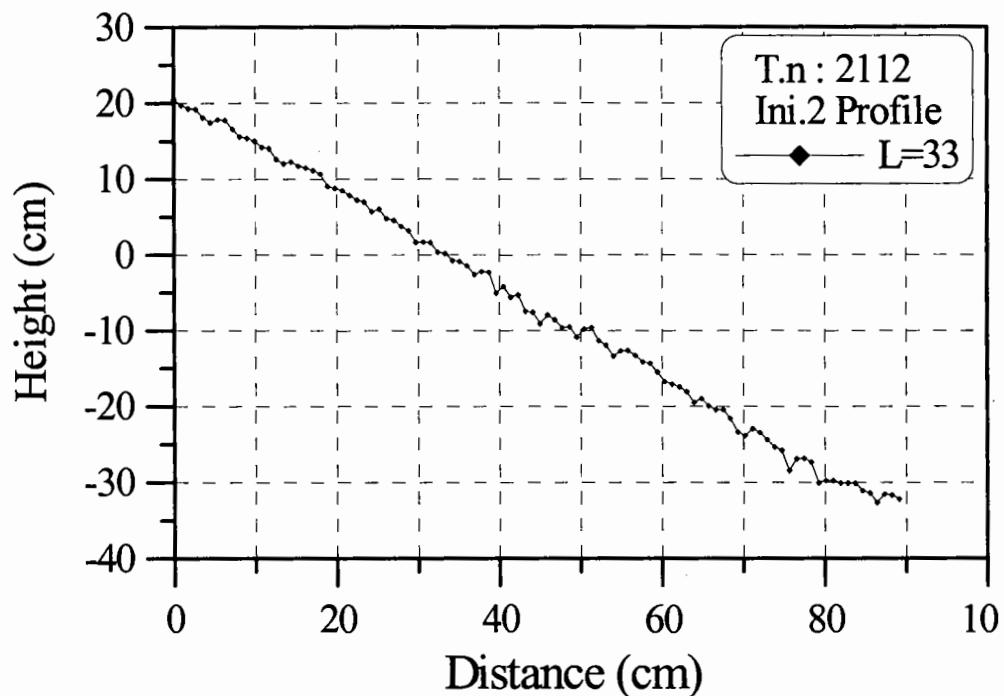


2-3안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

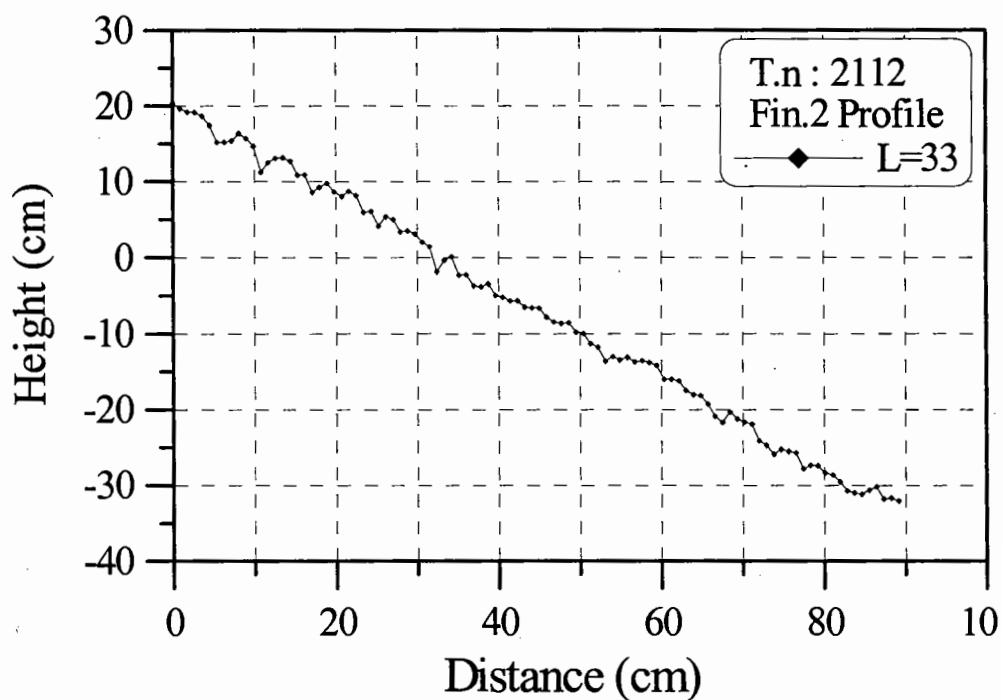


2-3안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

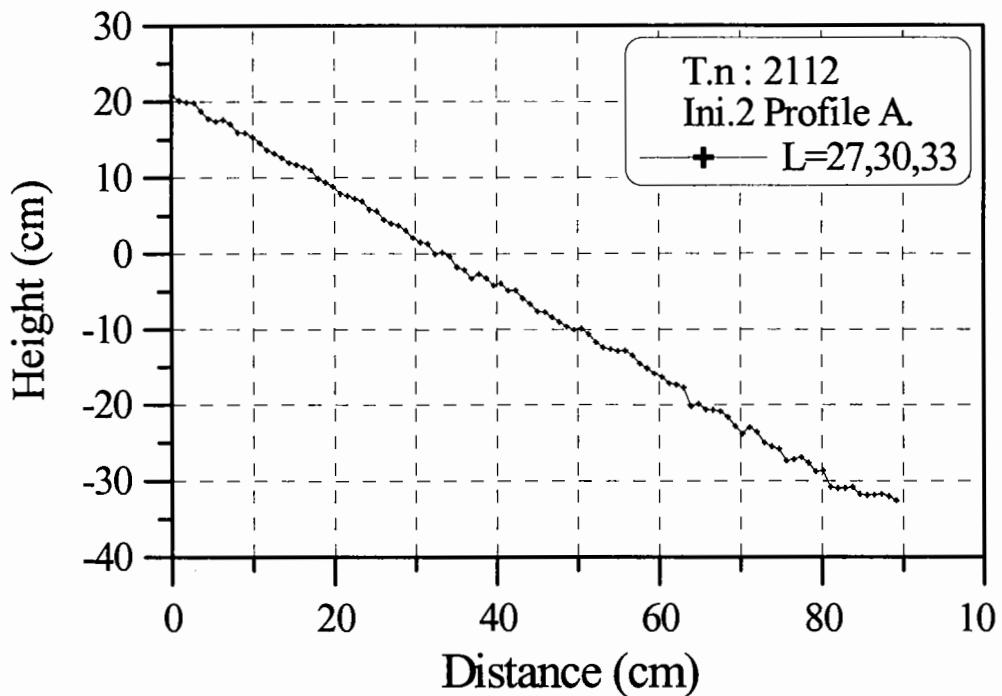


2-3안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

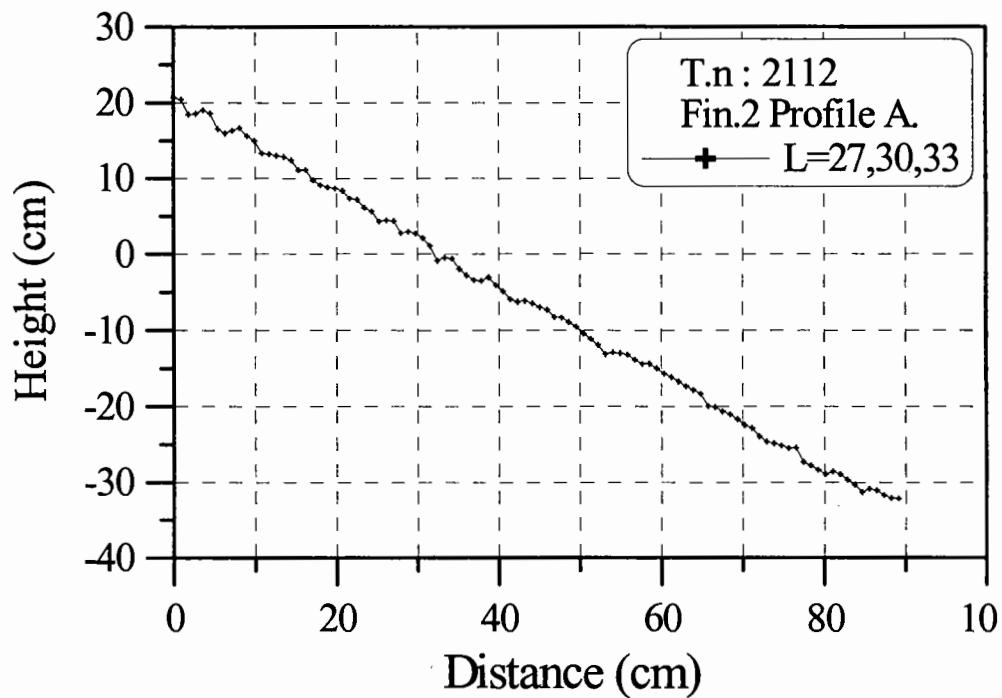


2-3안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

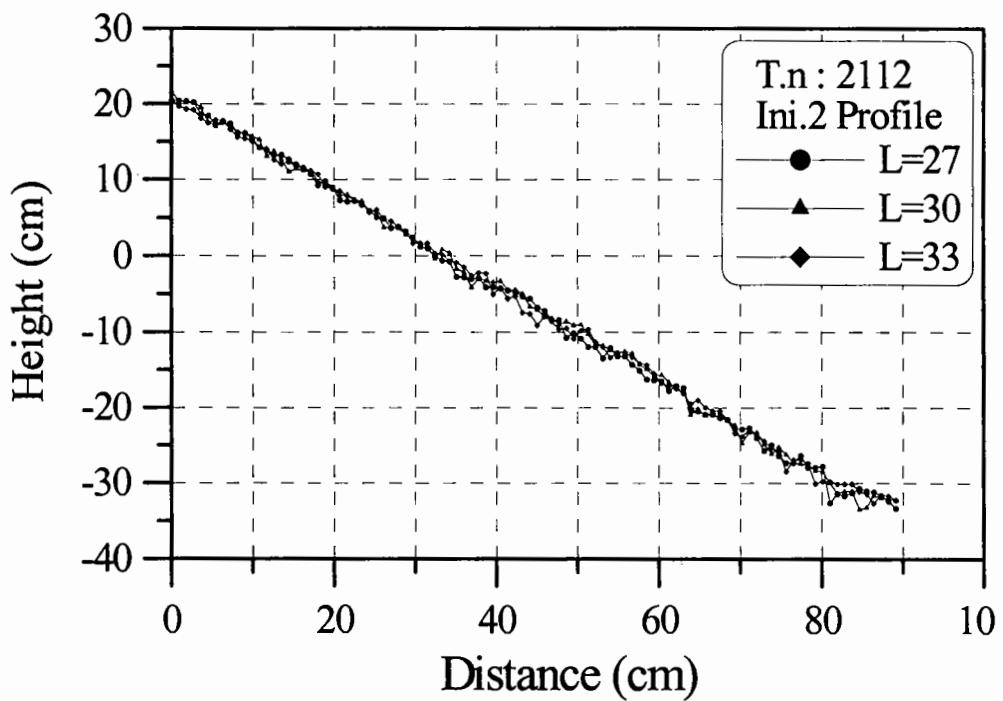


2-3안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

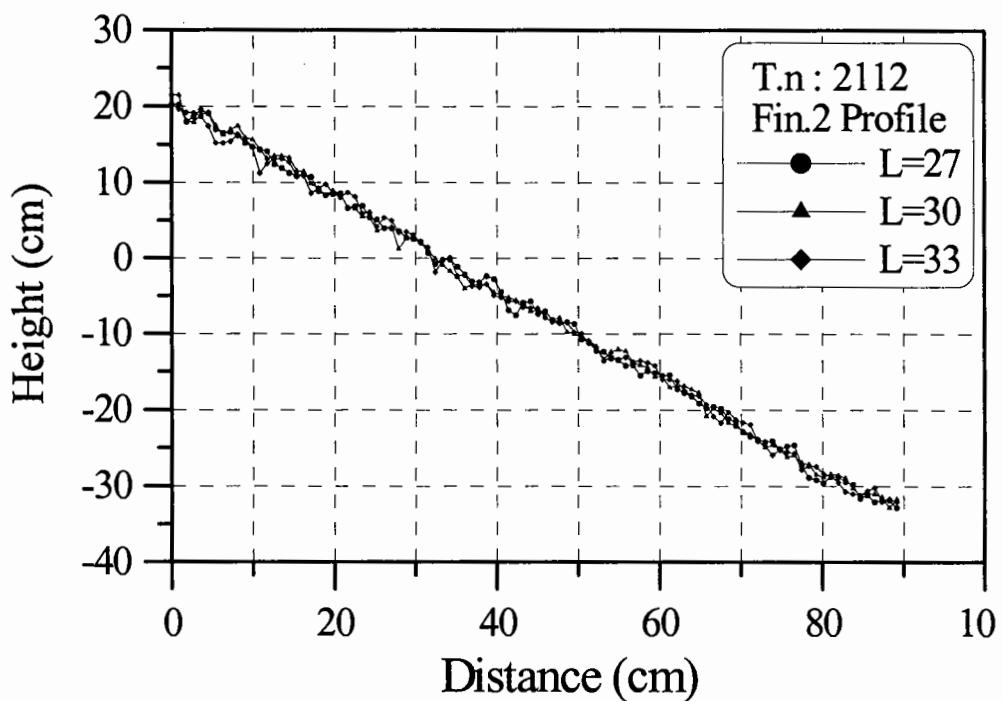


2-3안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

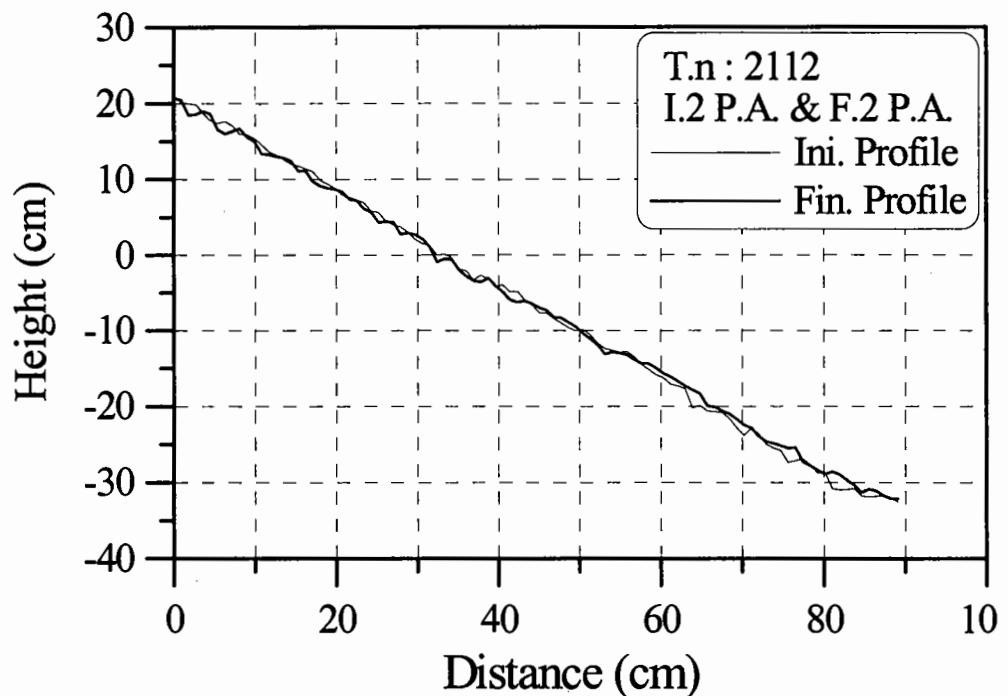


2-3안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

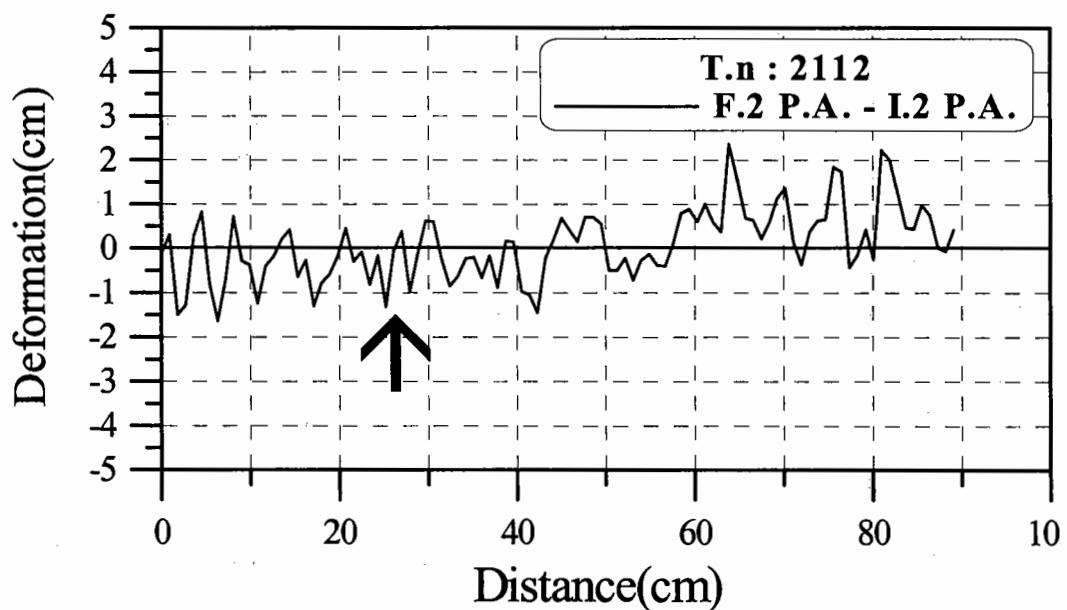


2-3안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

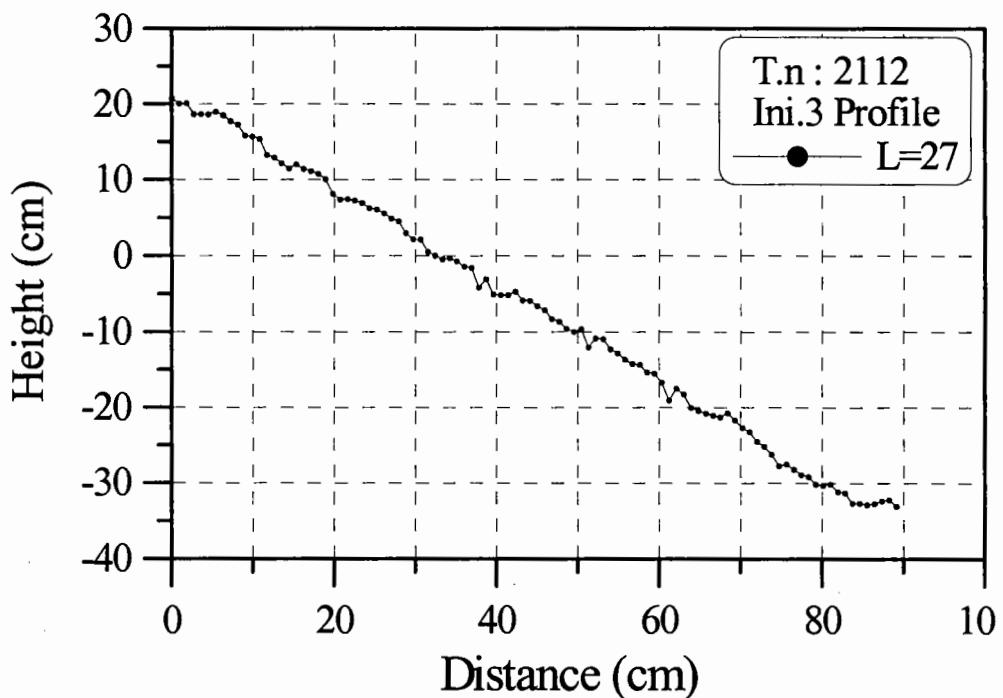


2-3안 2회 실험 피해전·후 필터층의 단면형상 평균의 비교

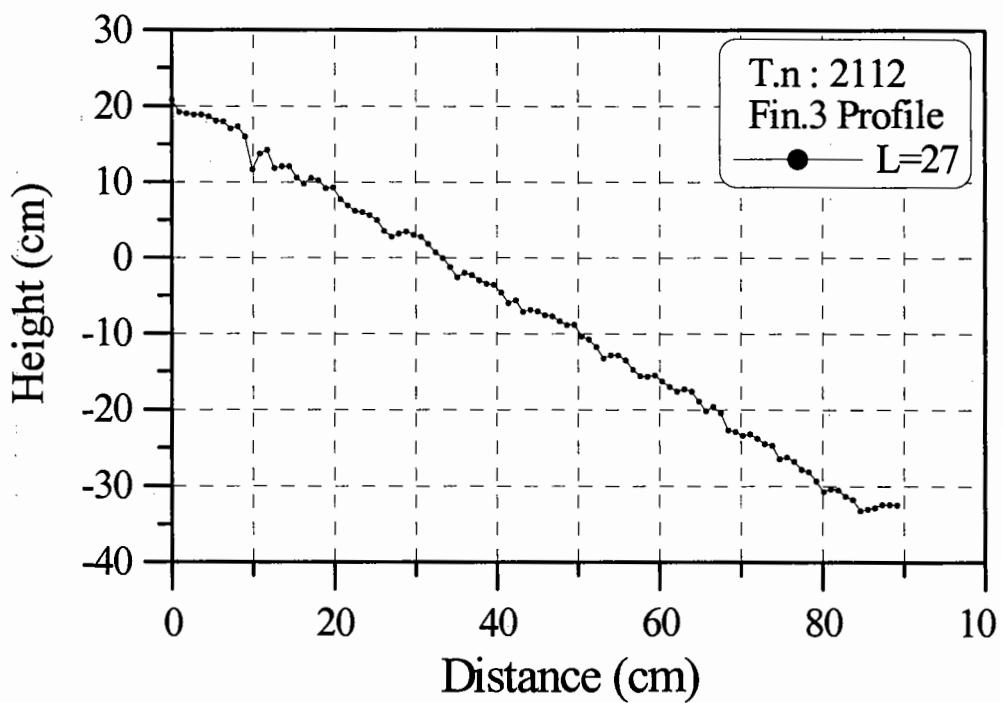


2-3안 2회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

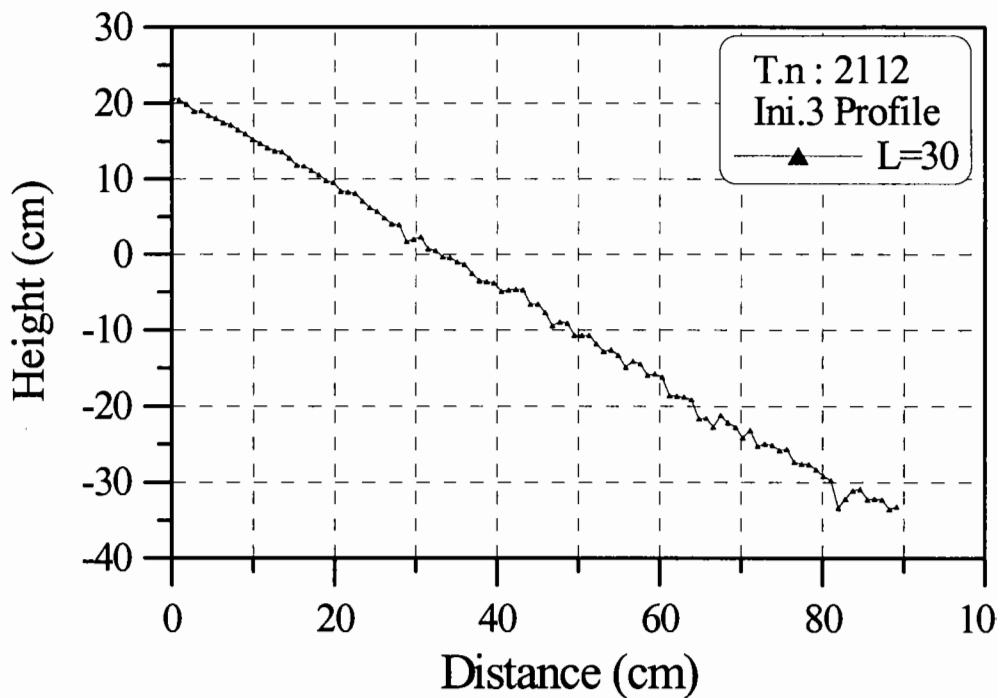


2-3안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

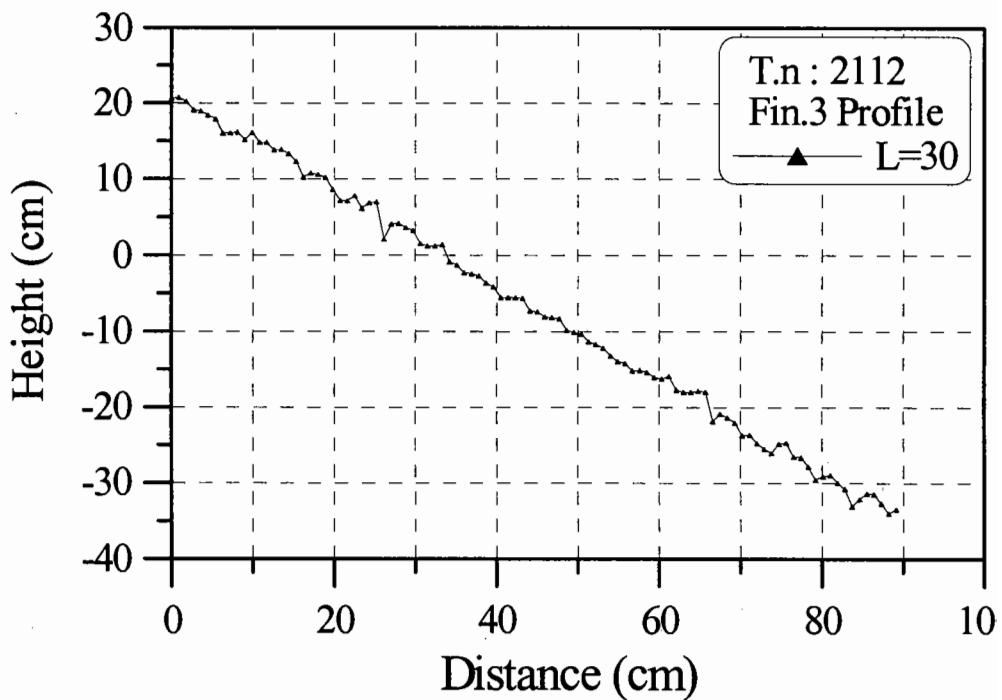


2-3안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

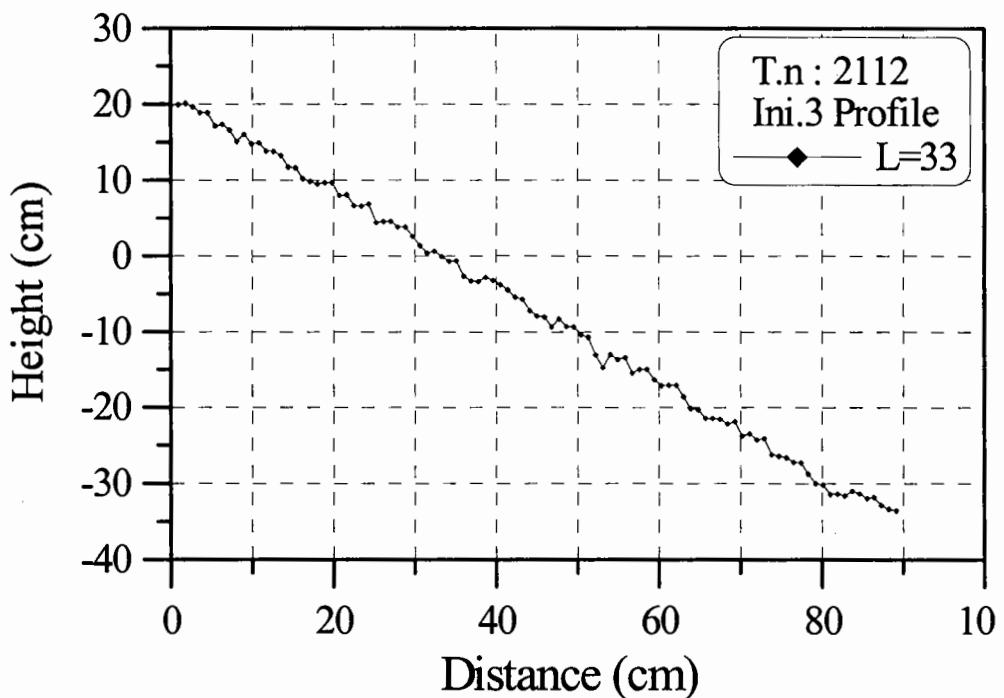


2-3안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

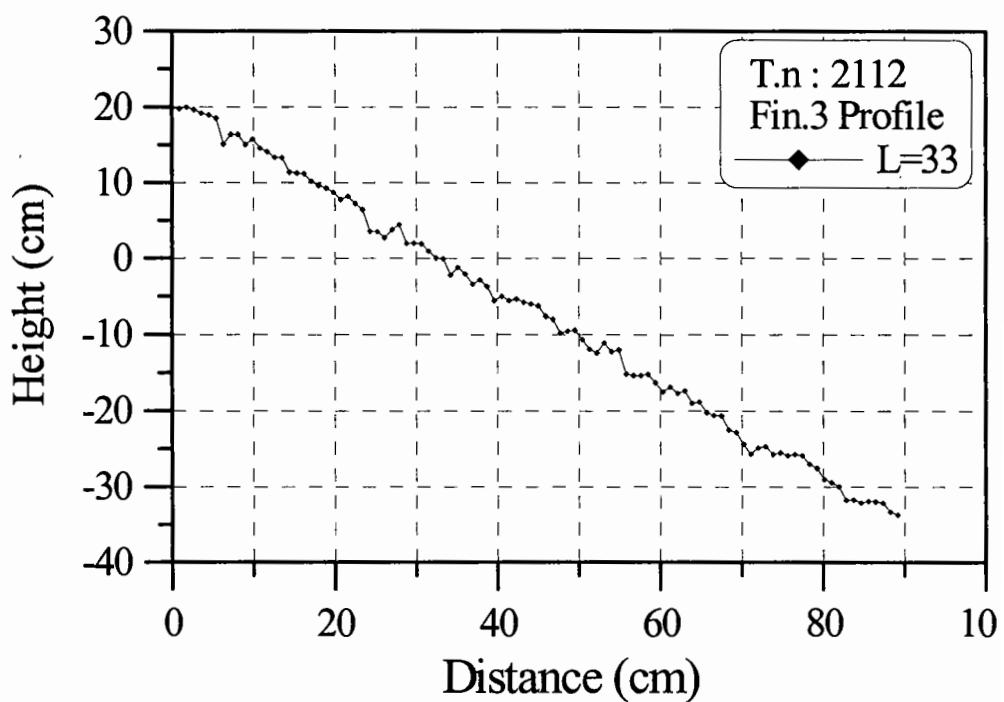


2-3안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

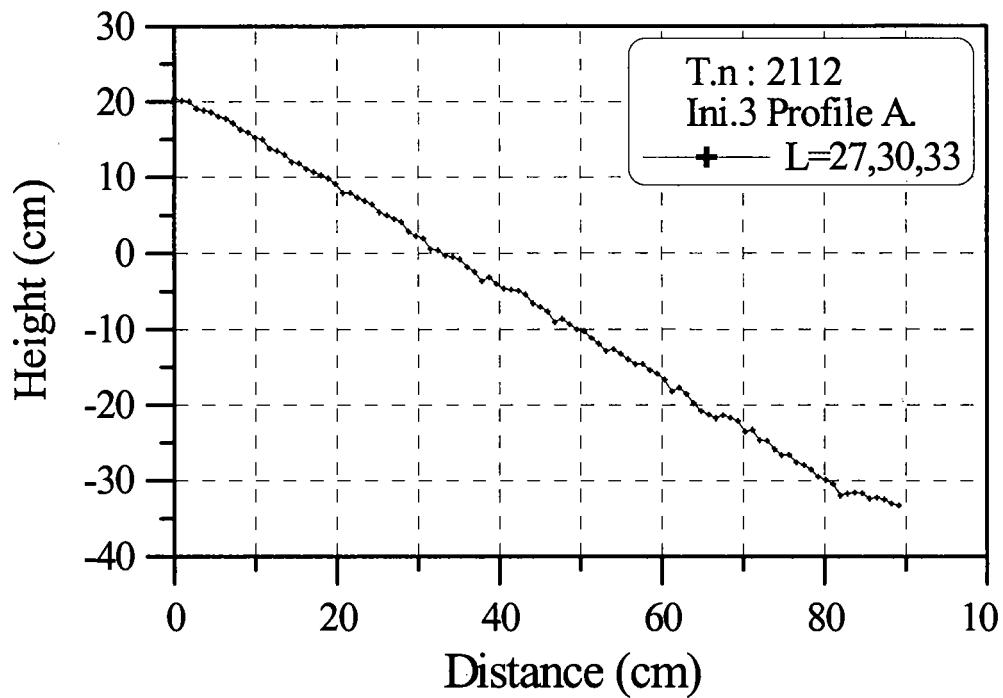


2-3안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

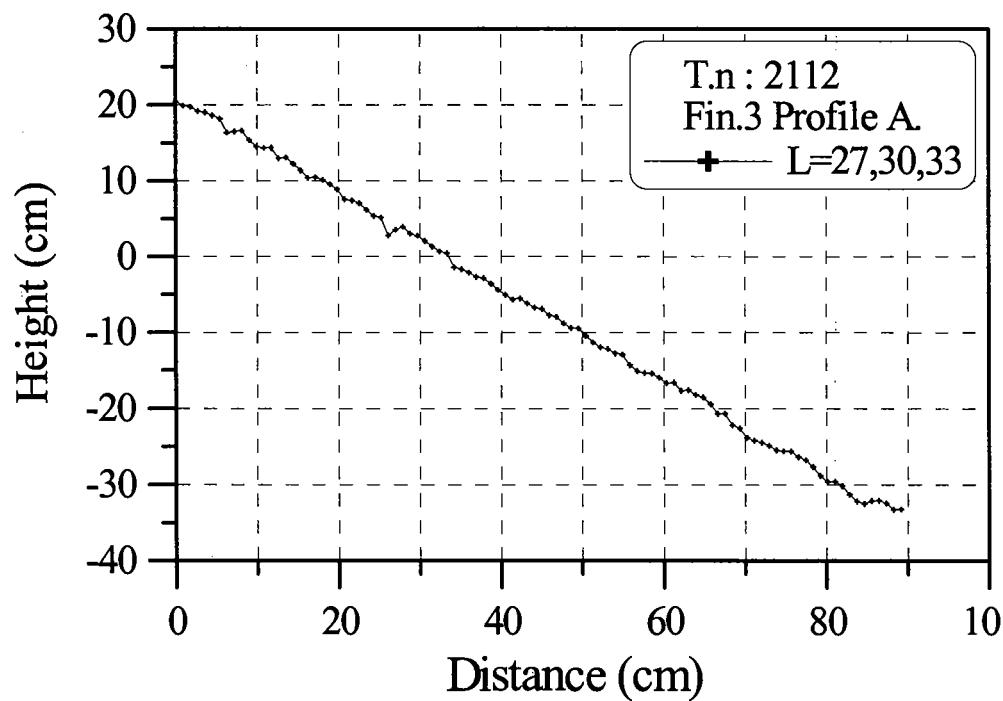


2-3안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

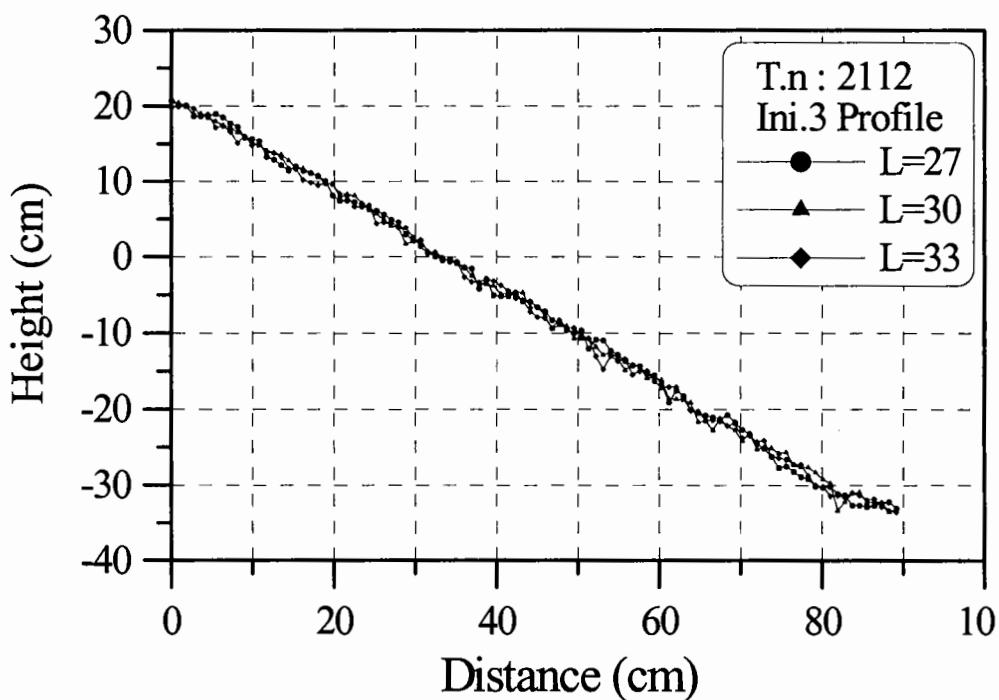


2-3안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

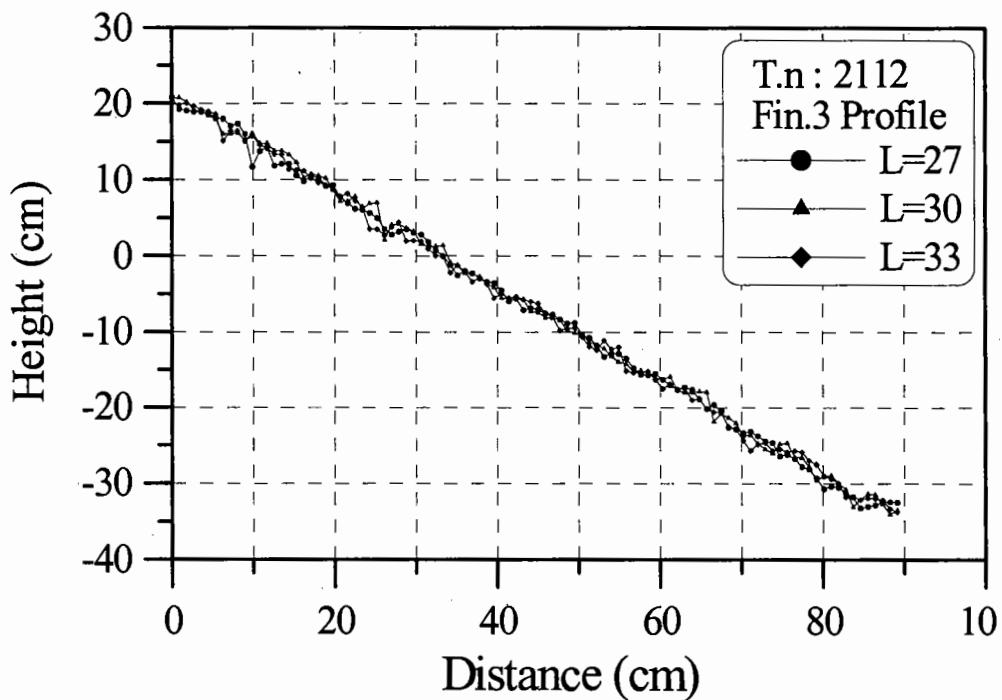


2-3안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

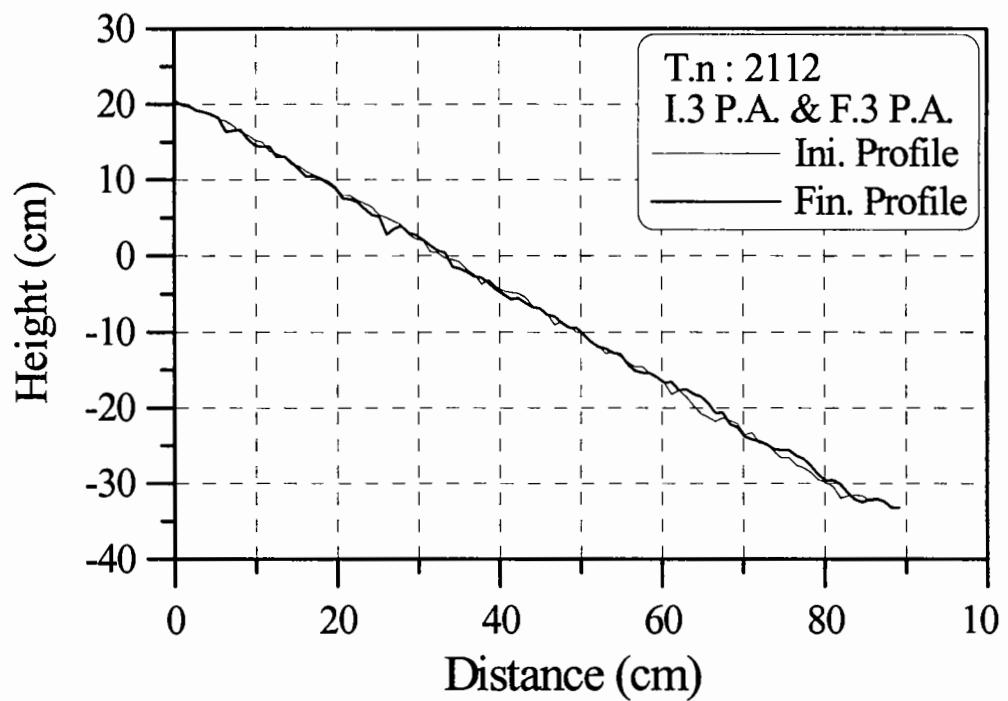


2-3안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

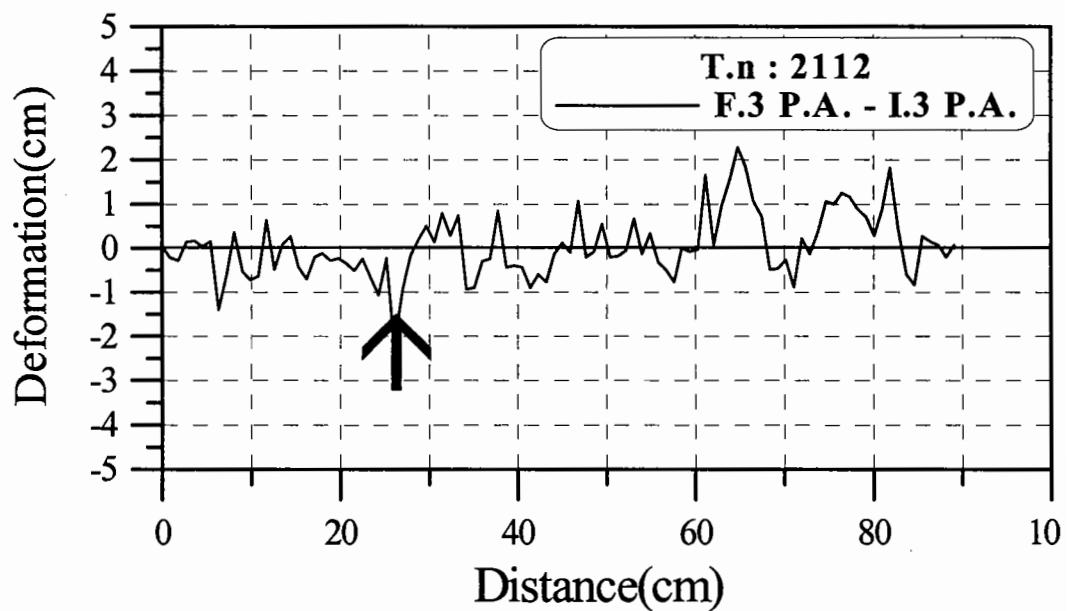


2-3안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

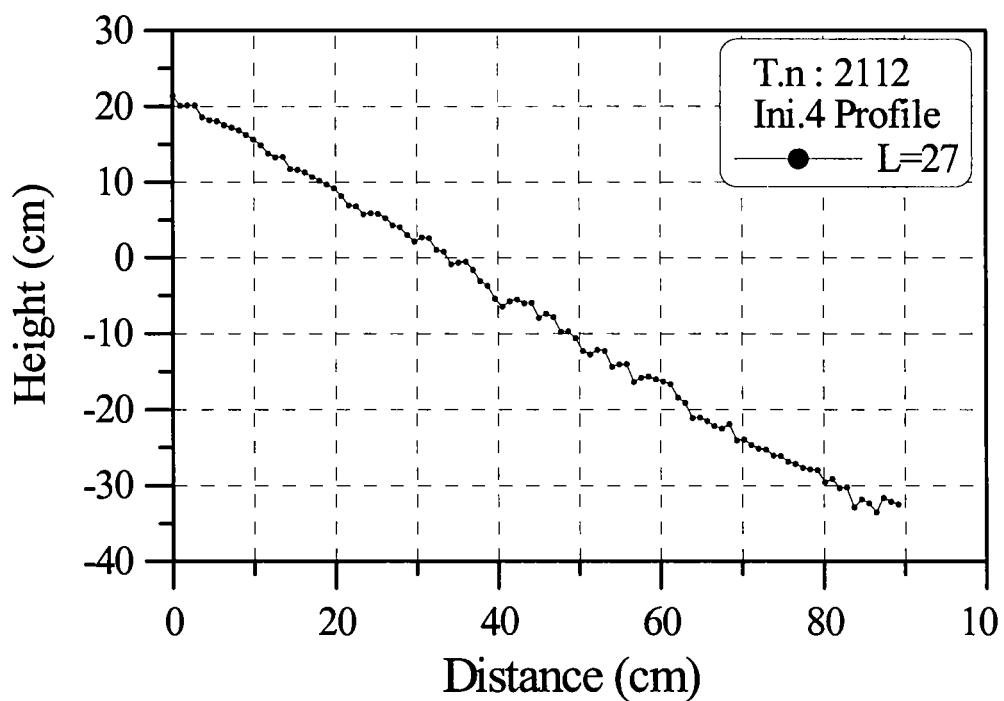


2-3안 3회 실험 피해전·후 필터층의 단면형상 평균의 비교

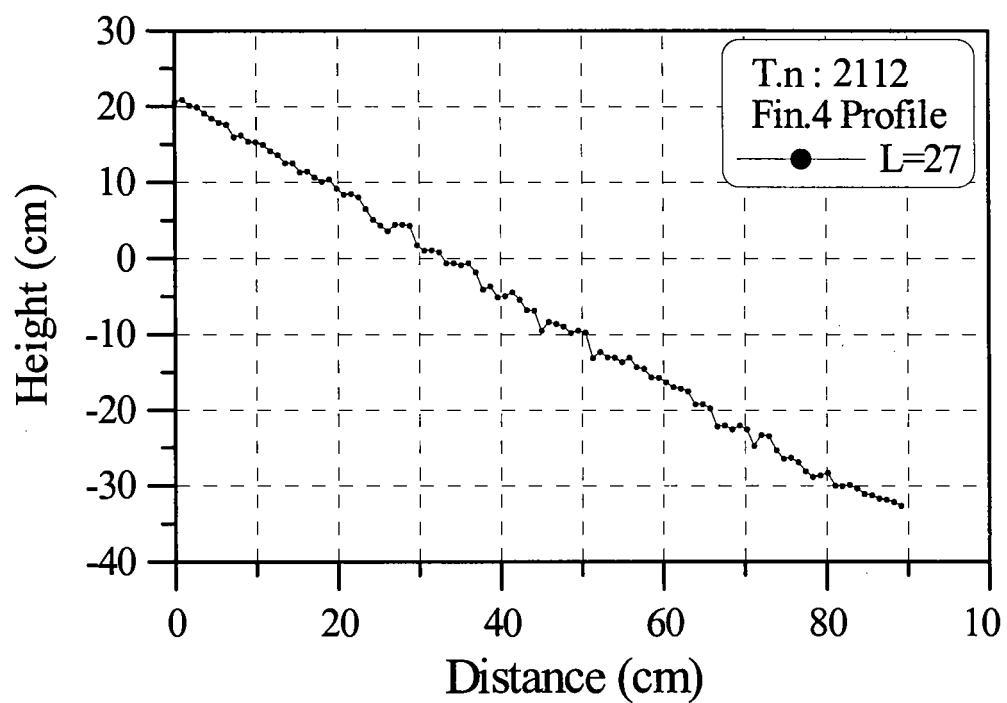


2-3안 3회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

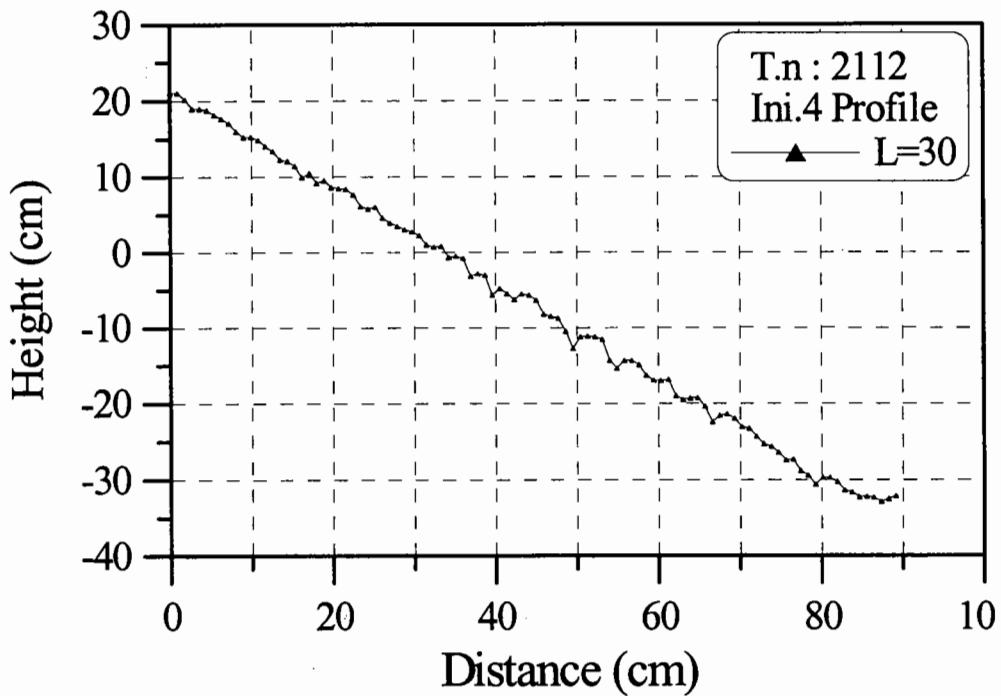


2-3안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

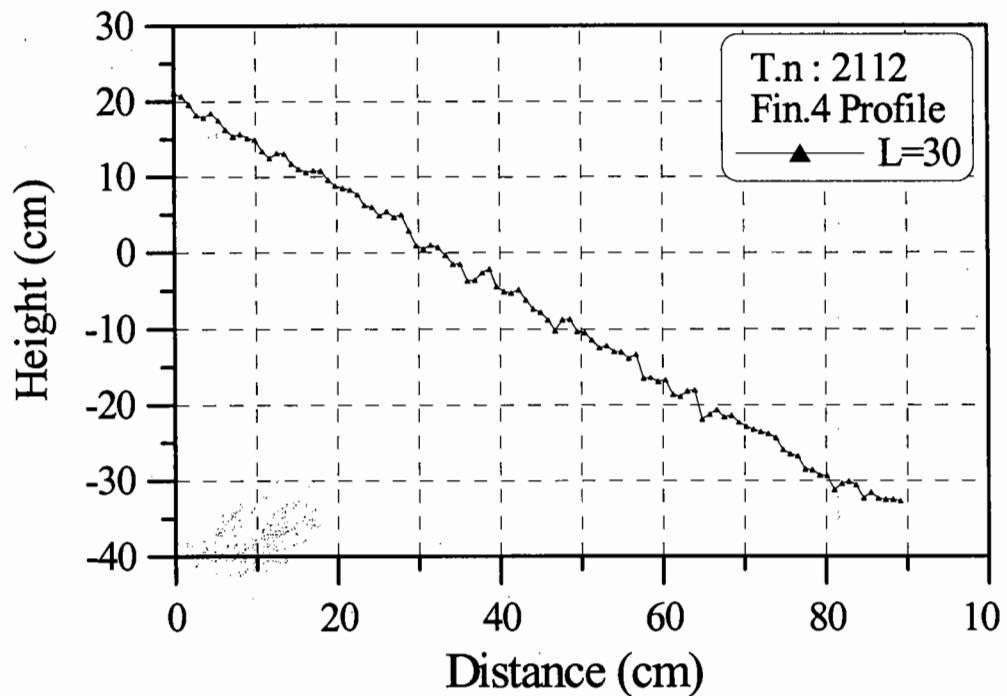


2-3안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

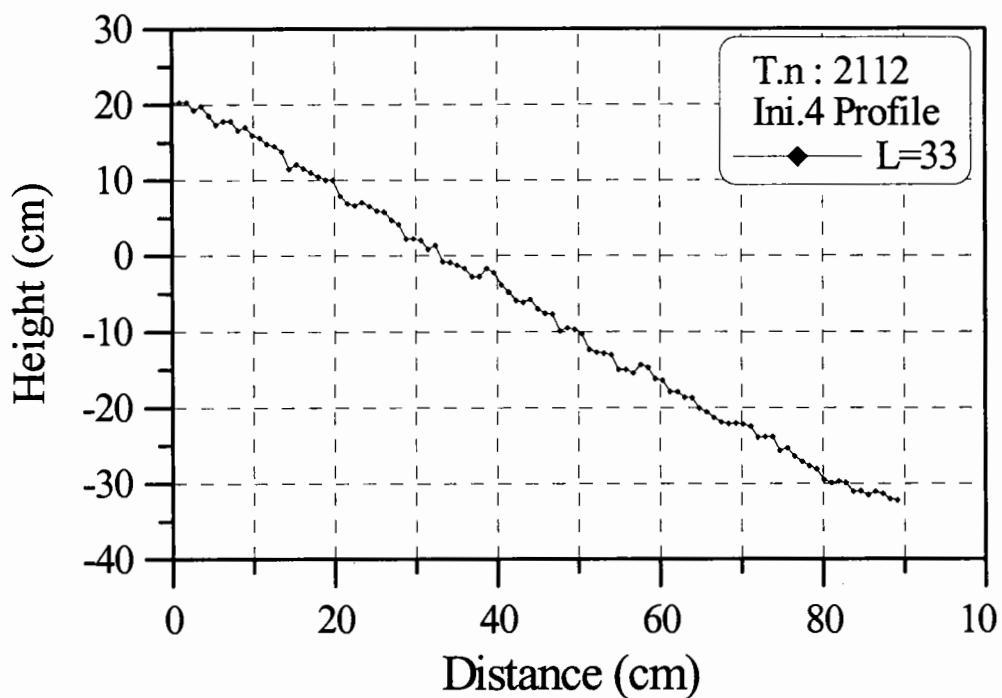


2-3안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

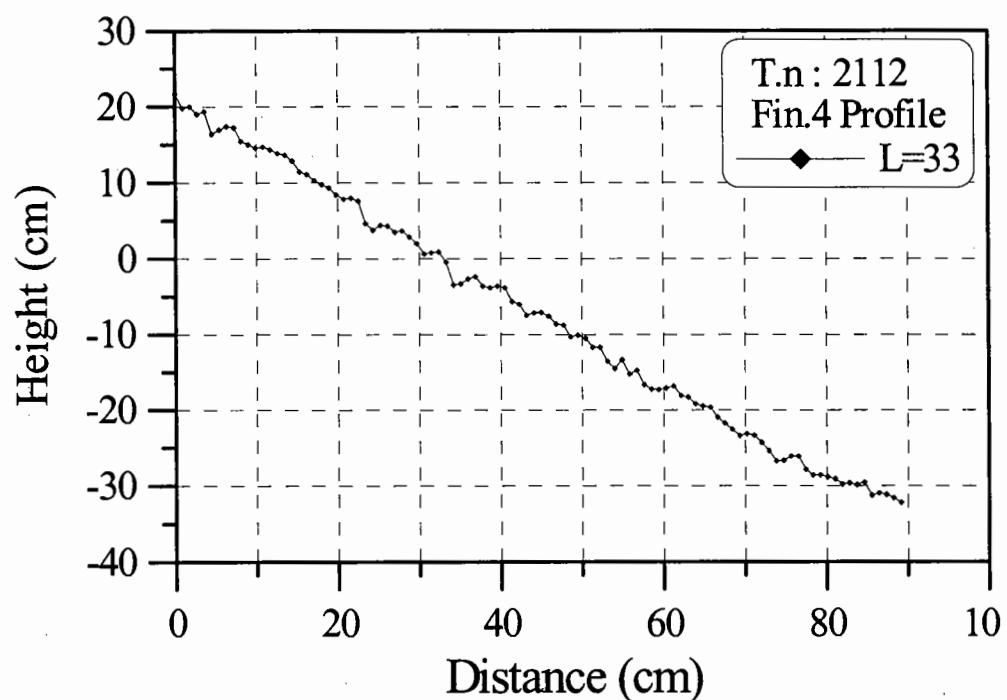


2-3안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

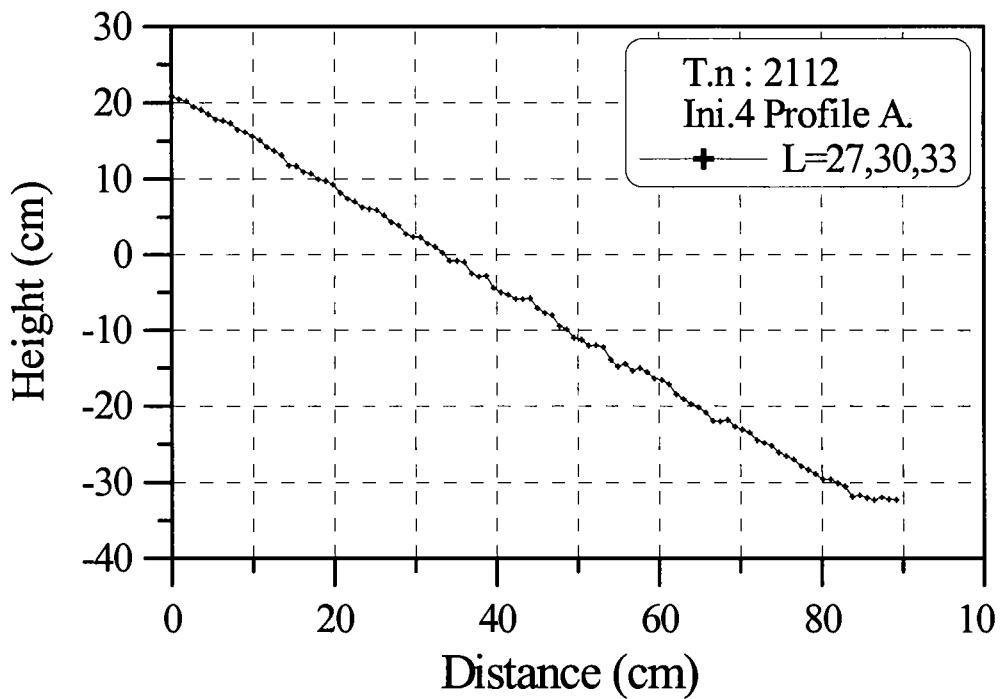


2-3안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

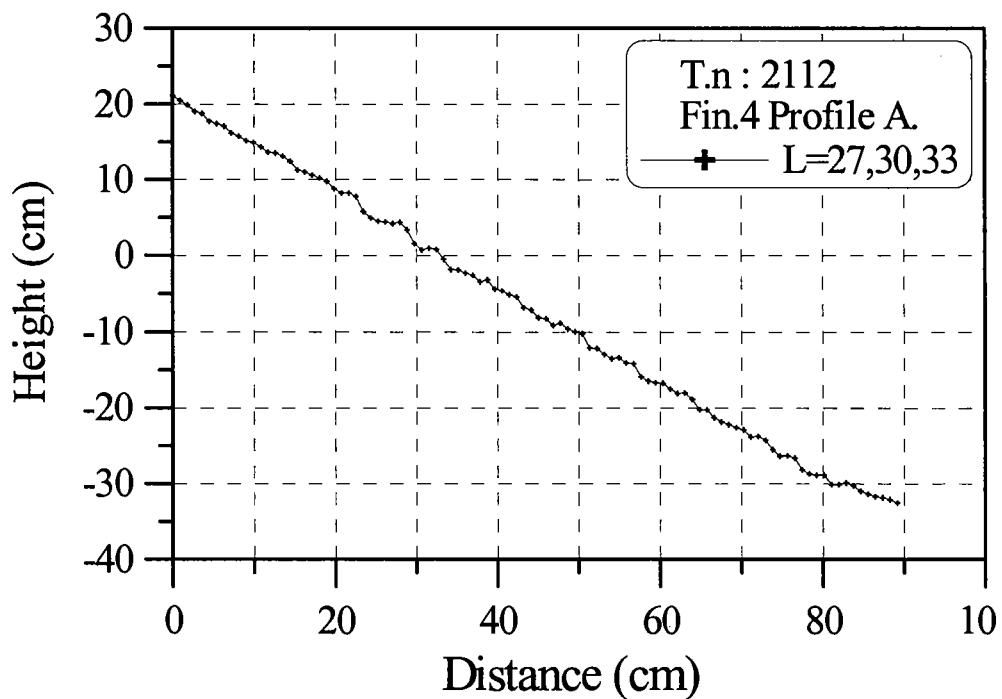


2-3안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

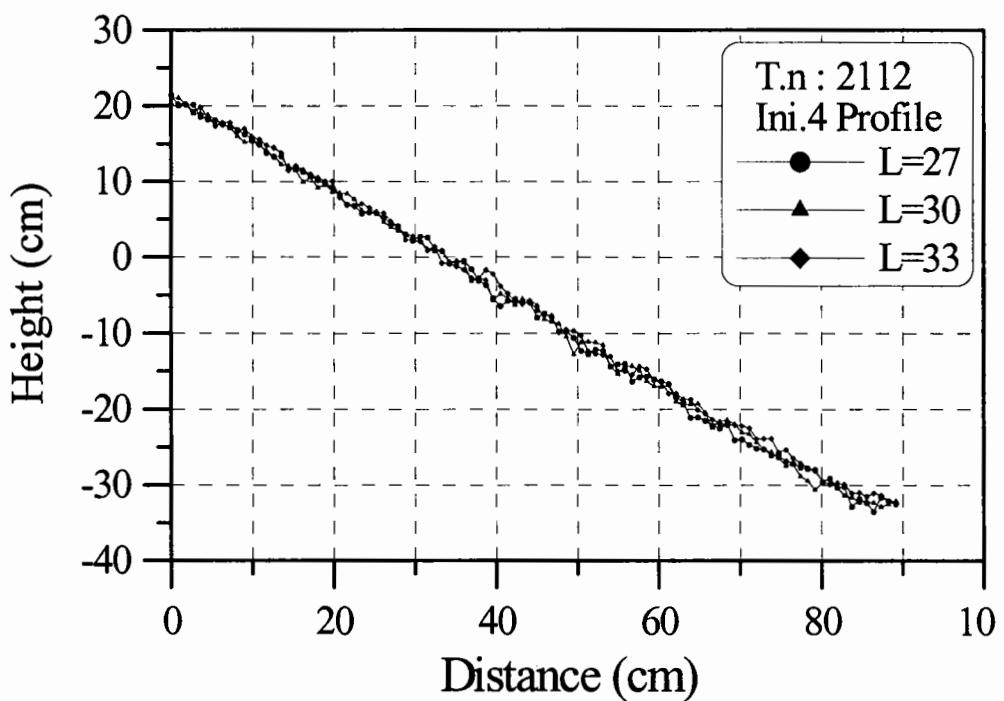


2-3안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

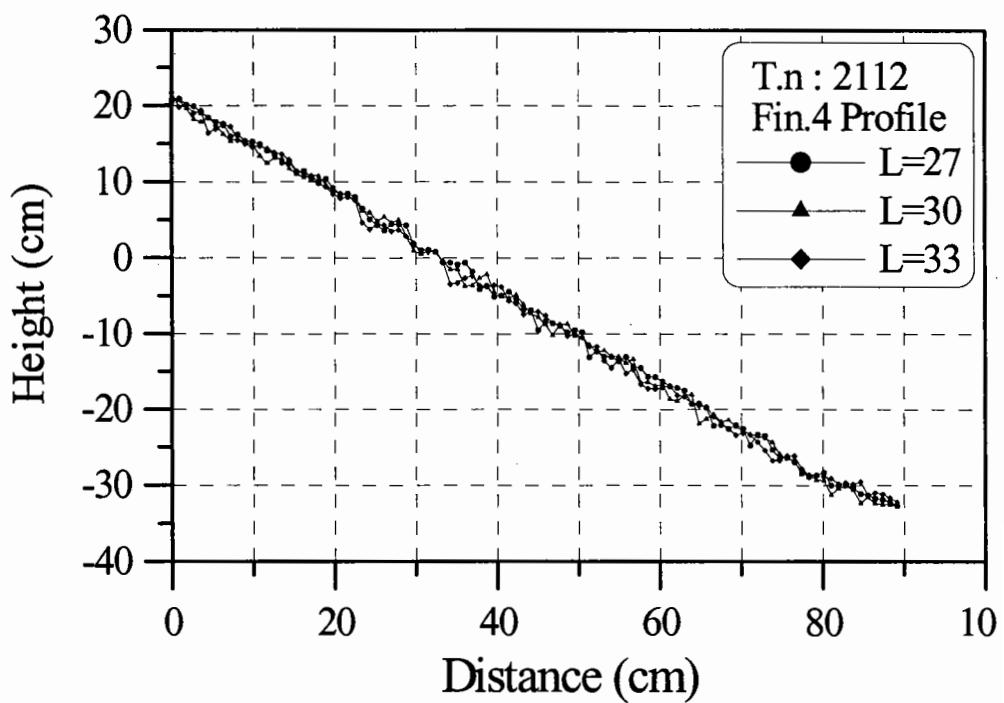


2-3안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

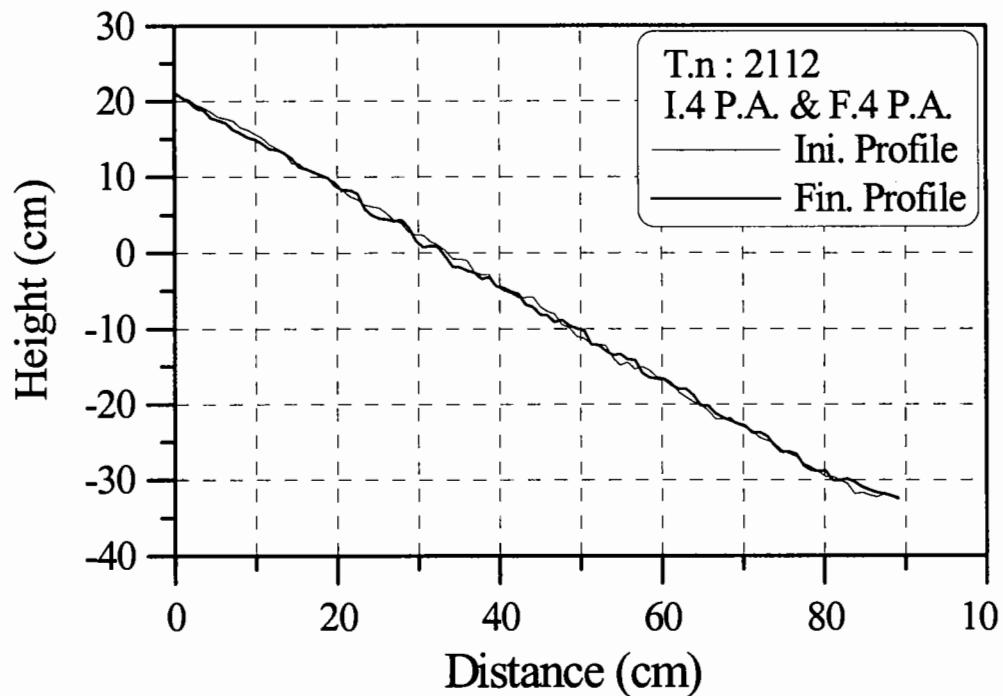


2-3안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

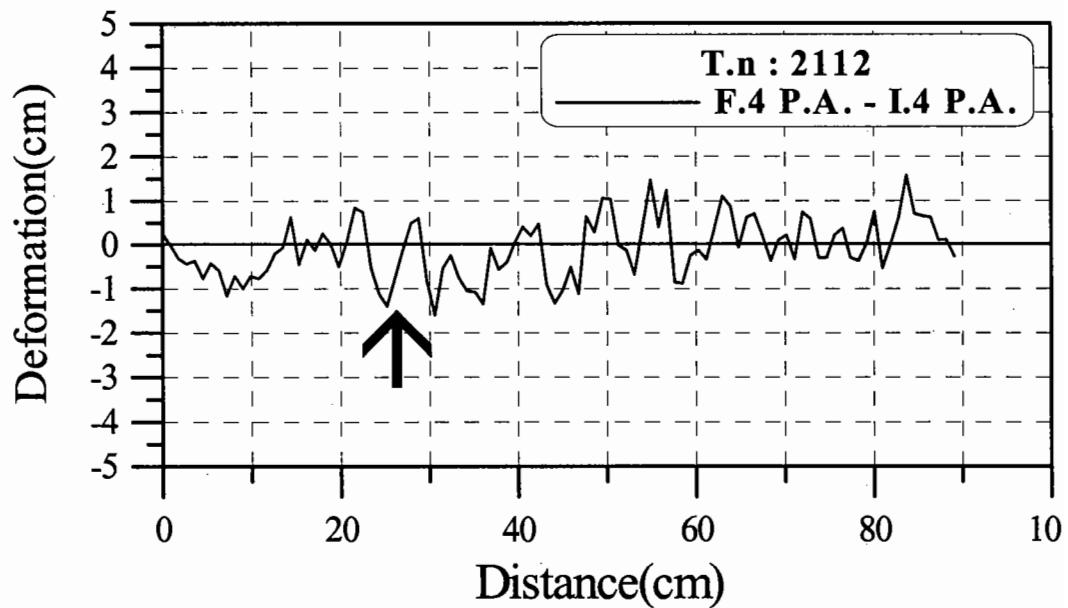


2-3안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-3안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

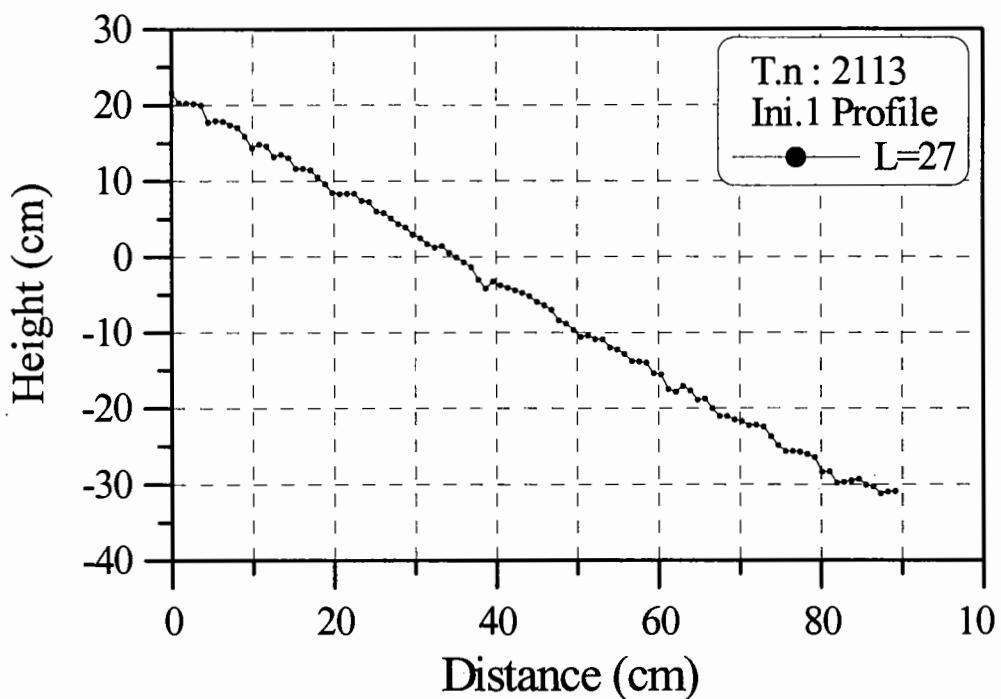


2-3안 4회 실험 피해전 · 후 필터층의 단면형상 평균의 비교

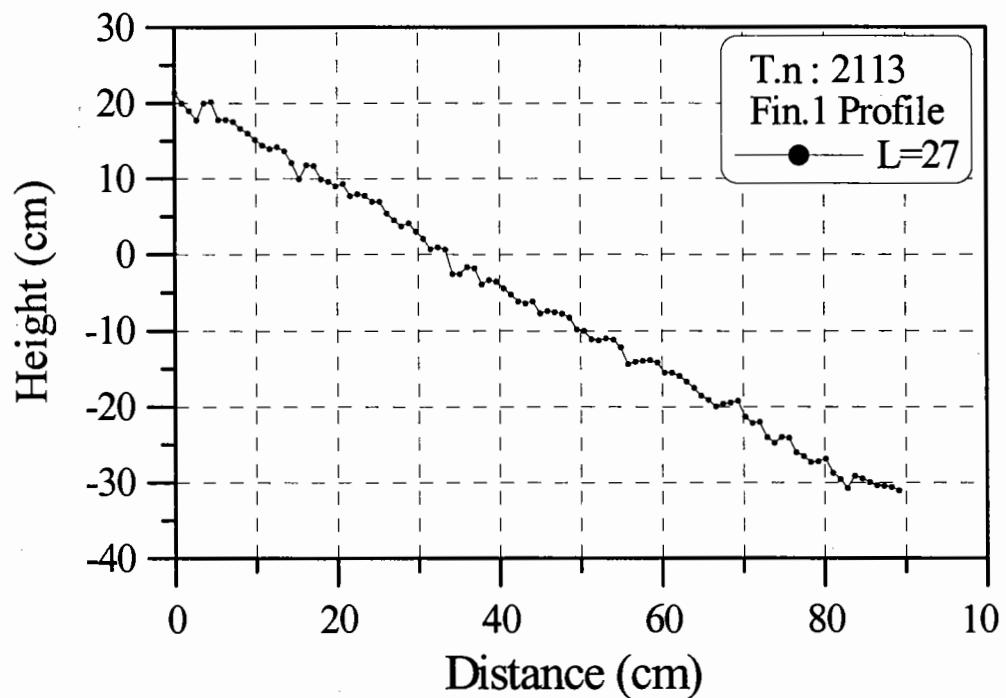


2-3안 4회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

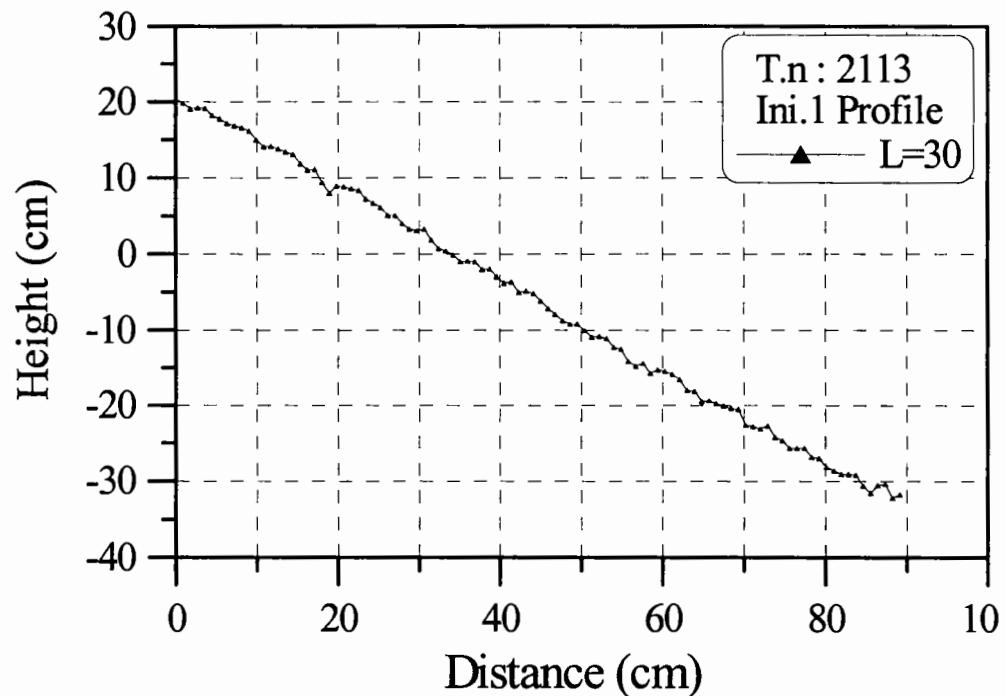


2-4안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

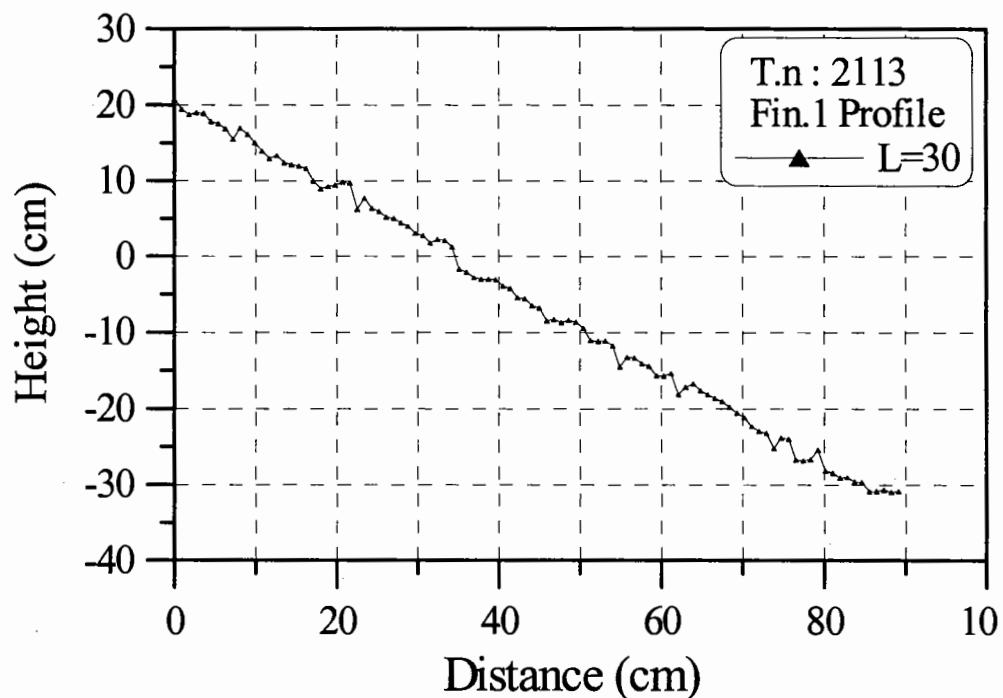


2-4안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

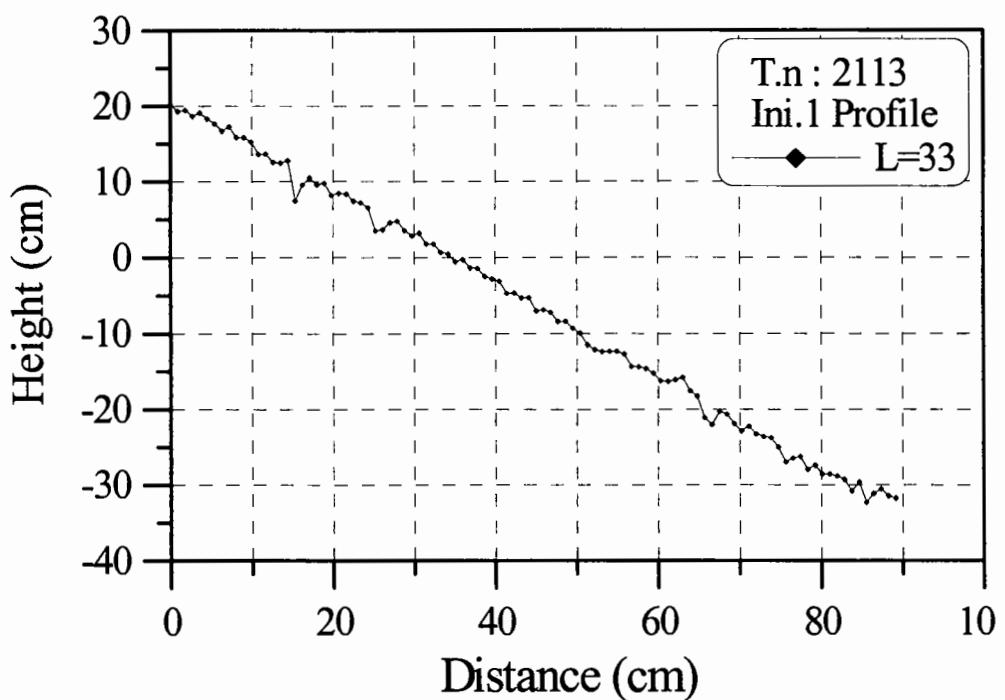


2-4안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

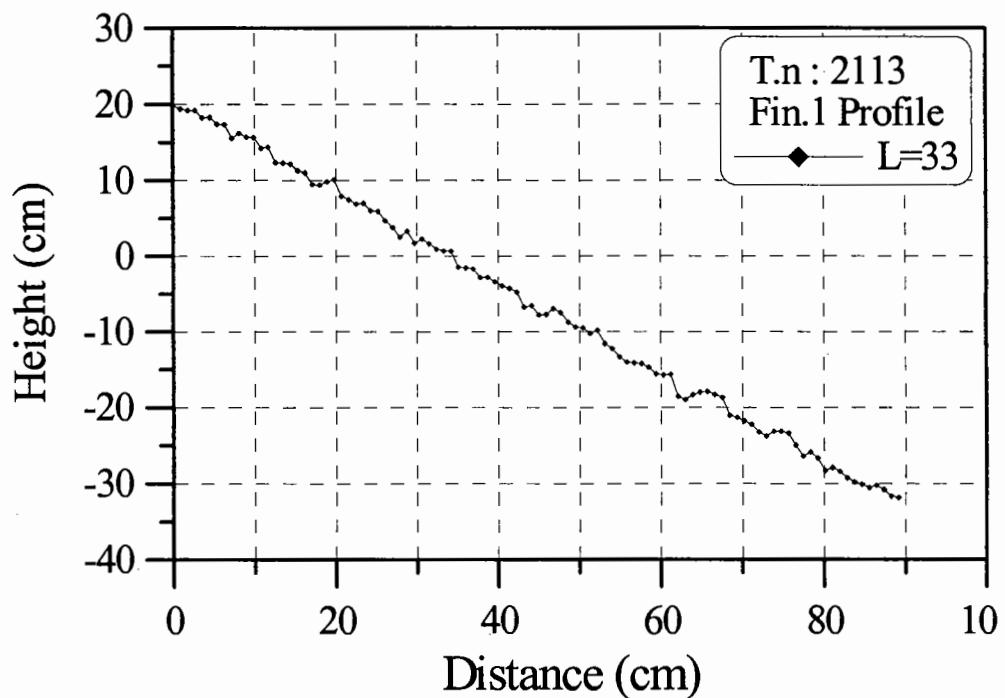


2-4안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-4안의 중간파복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

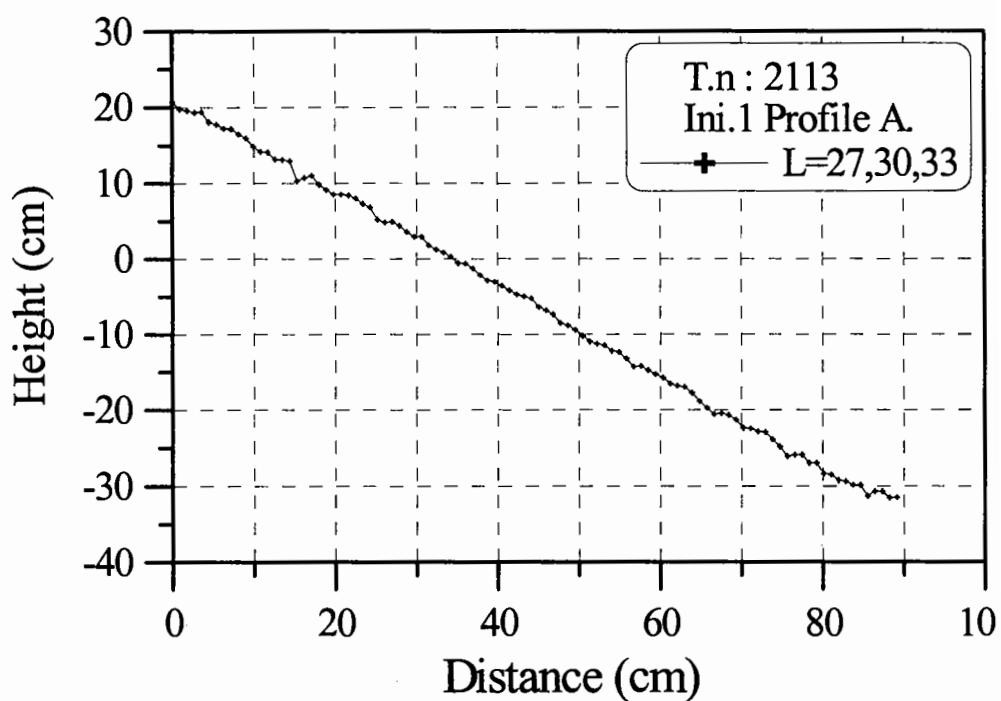


2-4안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

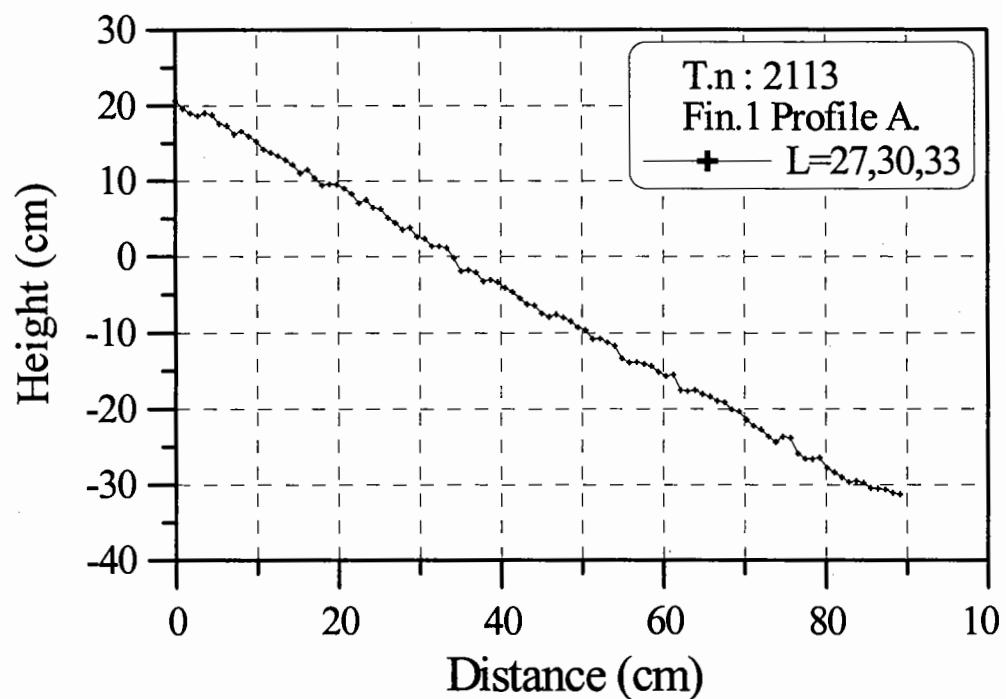


2-4안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

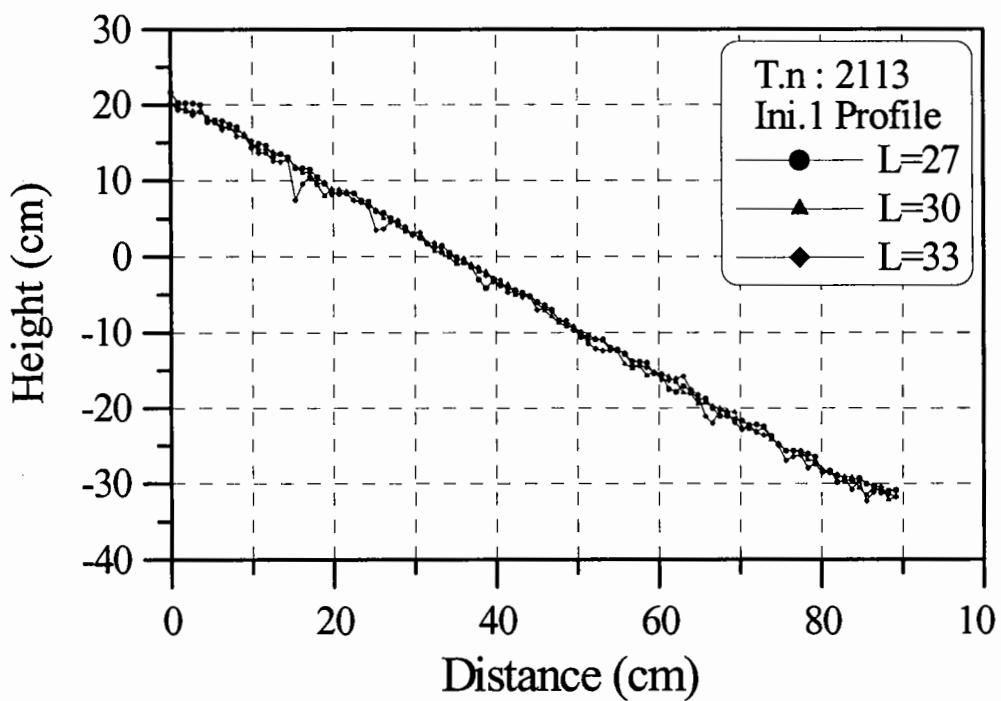


2-4안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

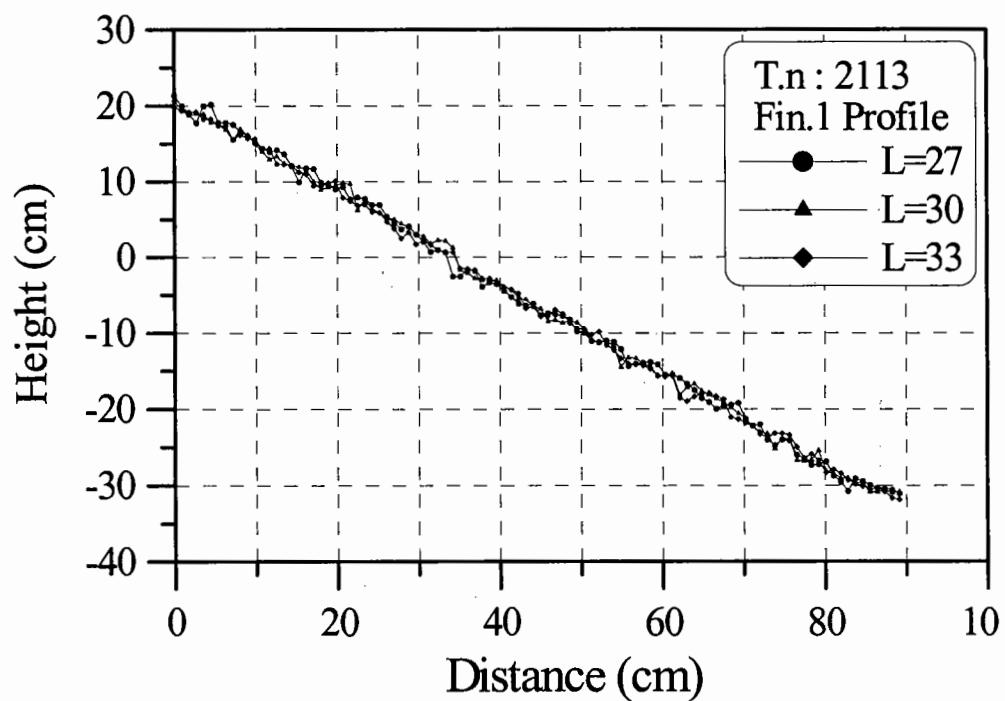


2-4안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

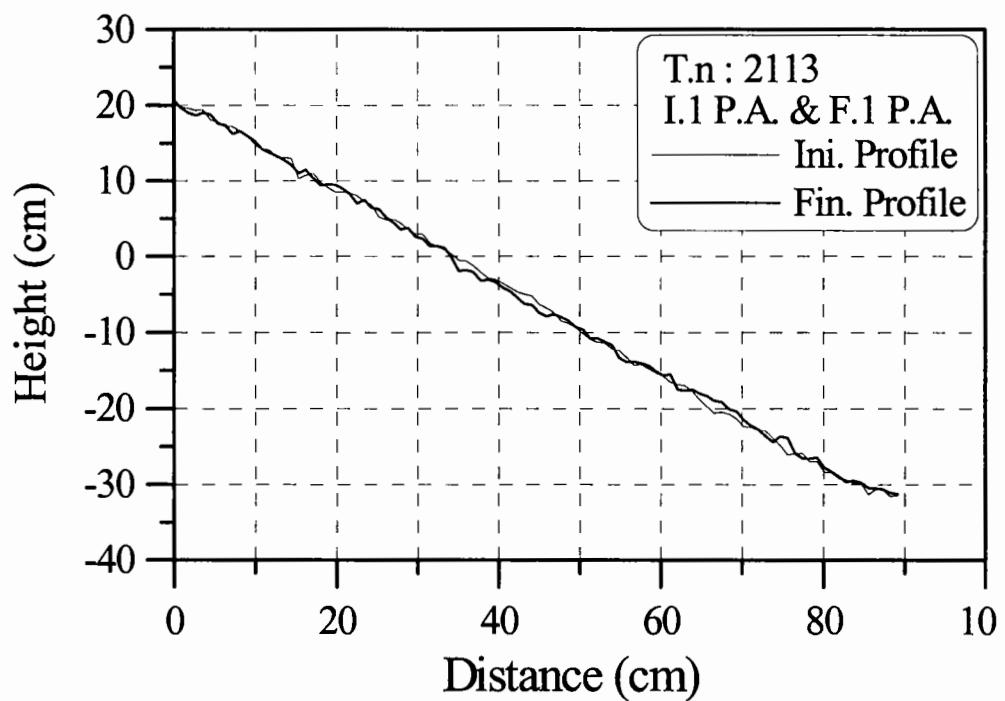


2-4안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

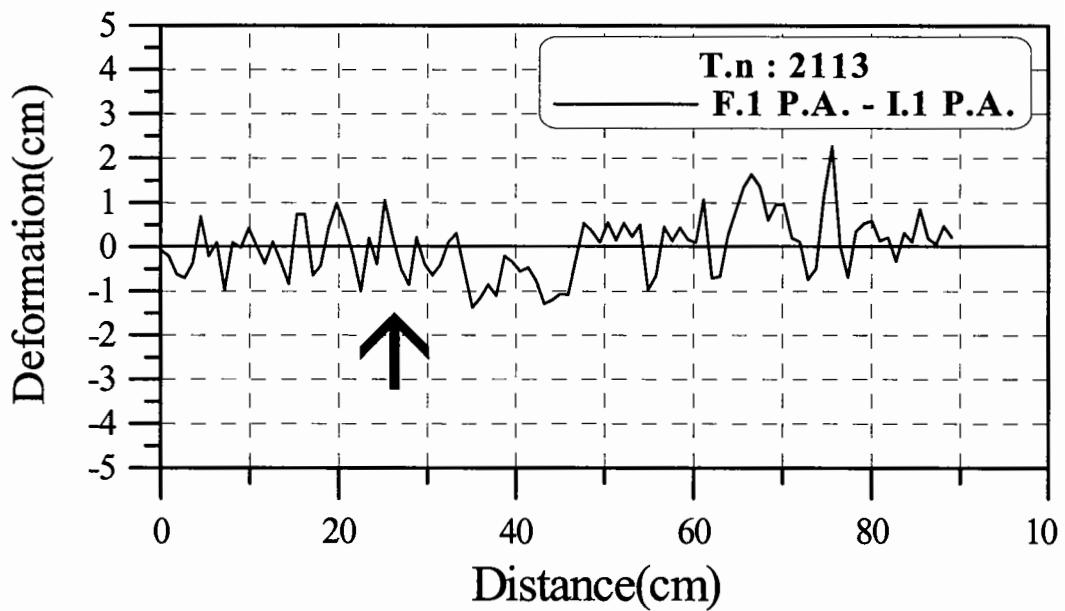


2-4안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

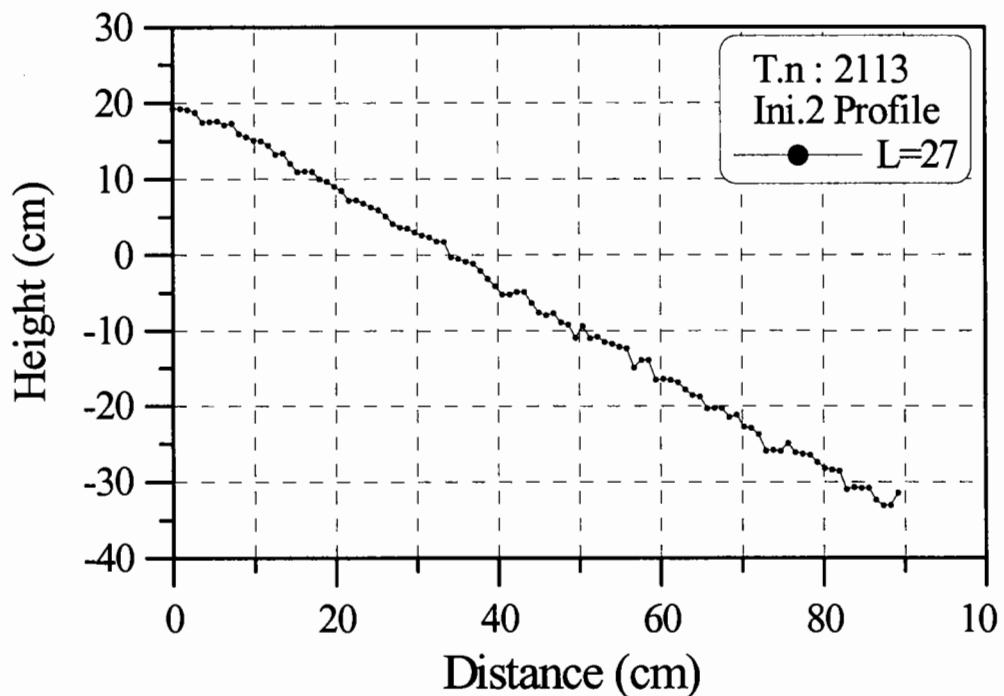


2-4안 1회 실험 피해전·후 필터층의 단면형상 평균의 비교

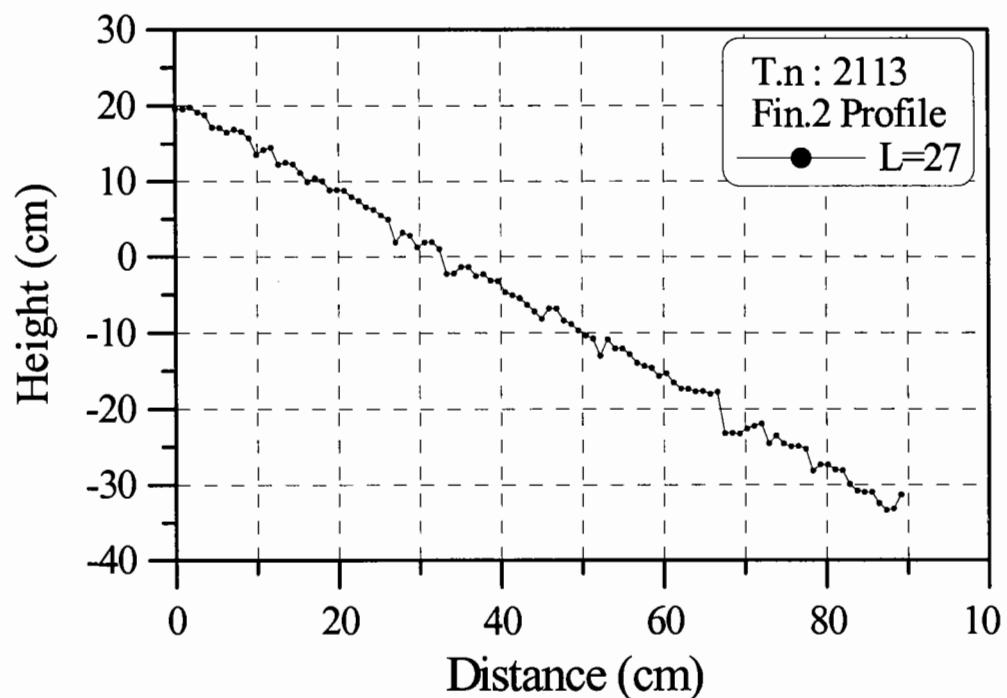


2-4안 1회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

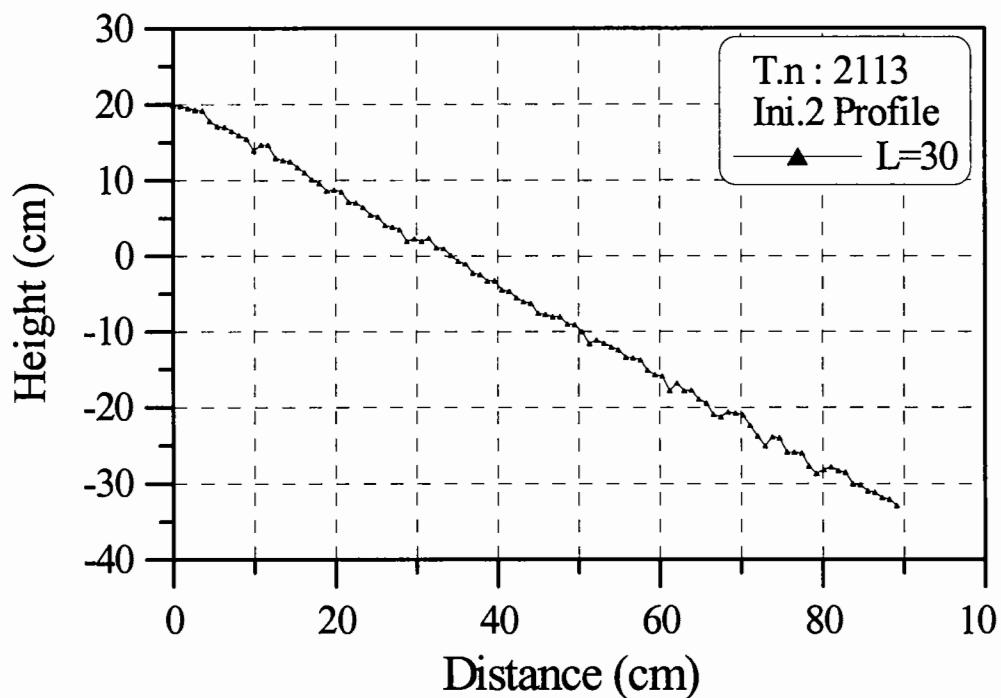


2-4안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

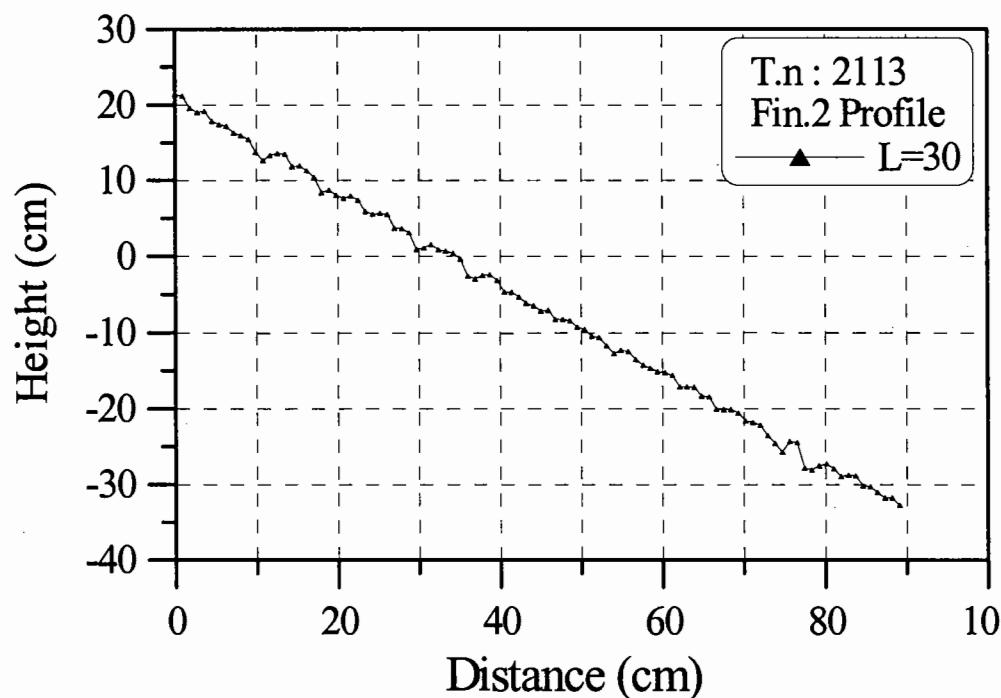


2-4안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

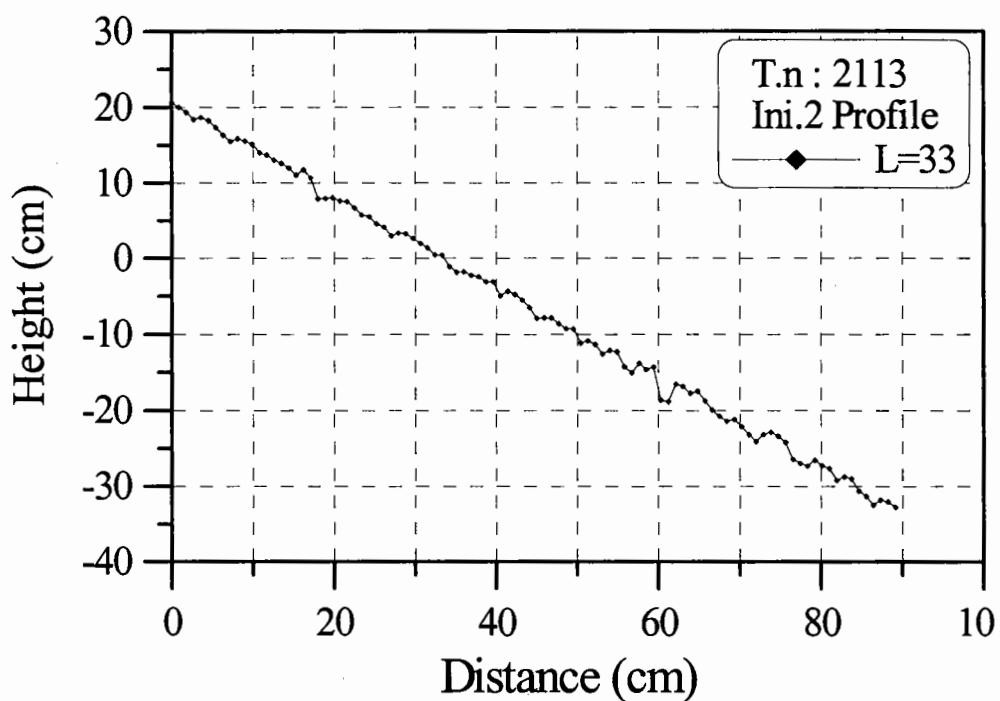


2-4안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

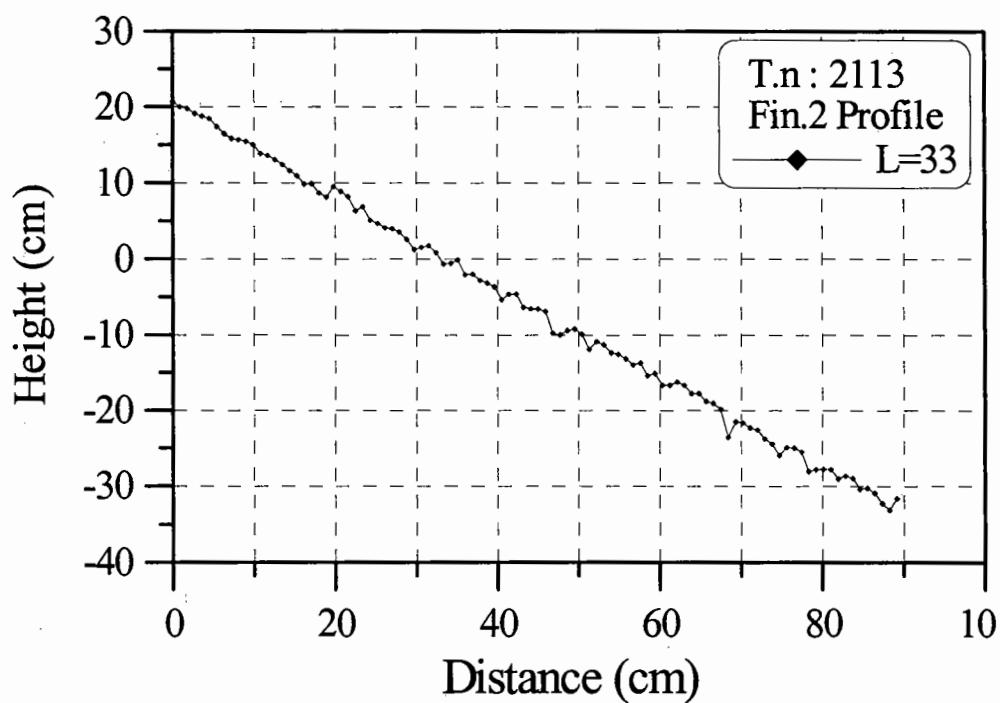


2-4안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

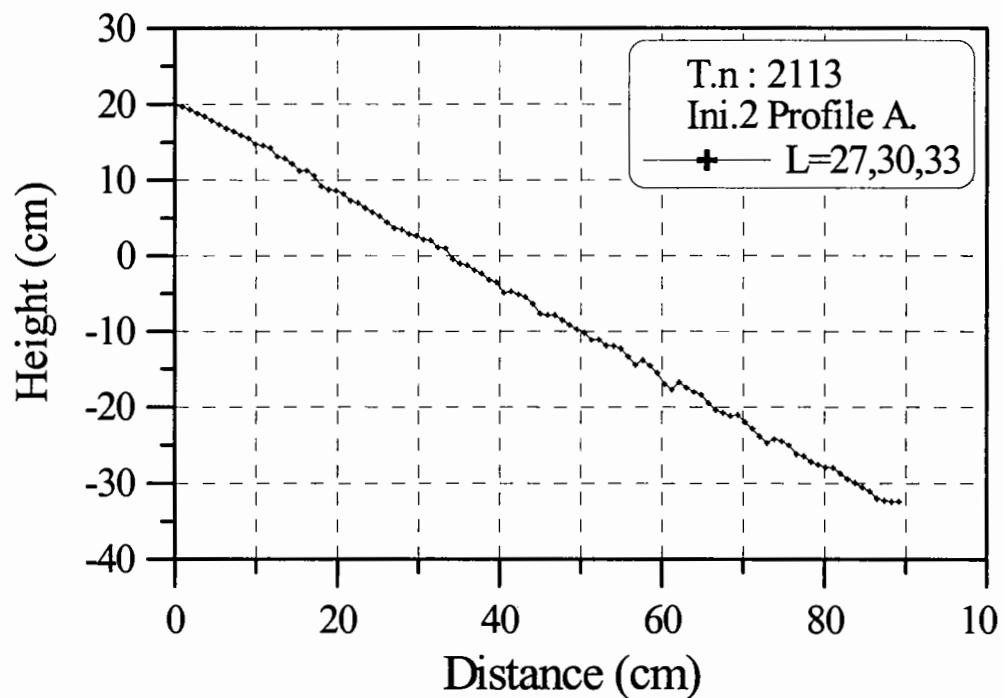


2-4안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

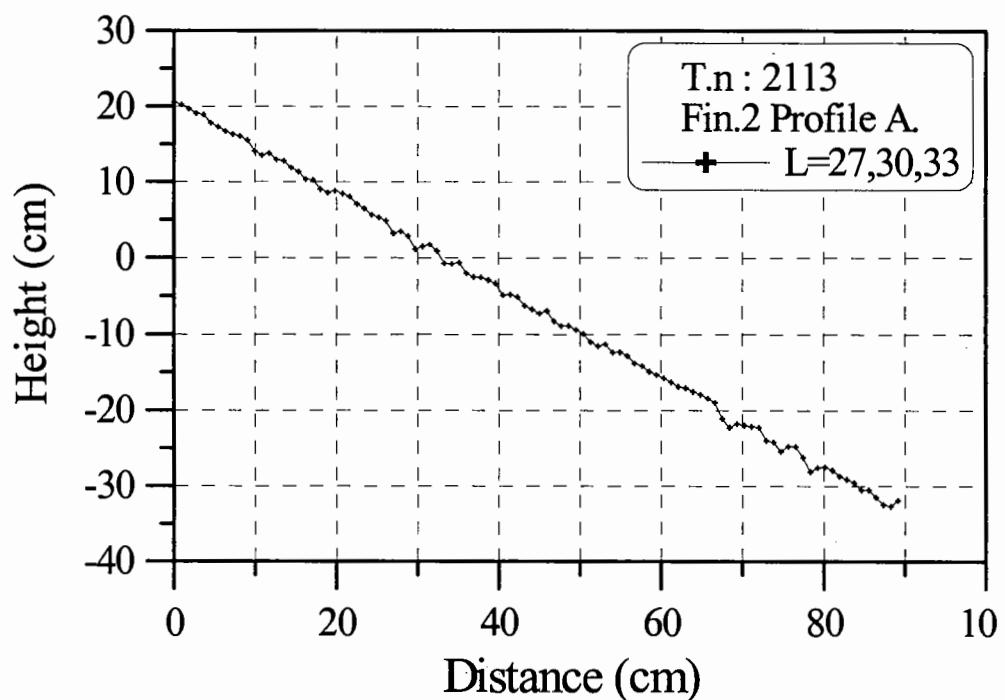


2-4안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

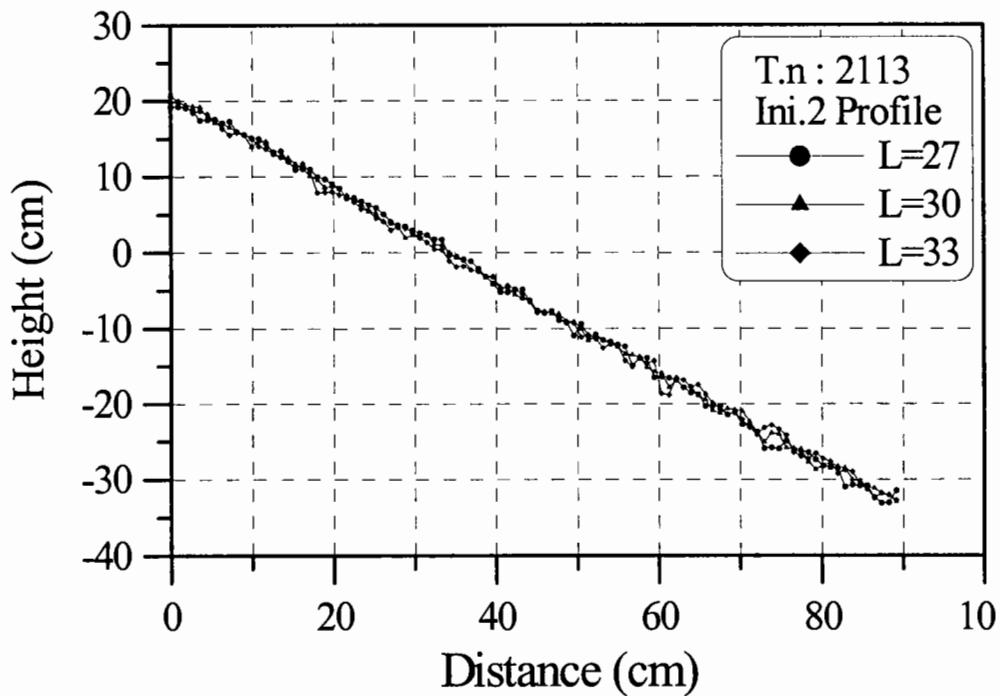


2-4안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

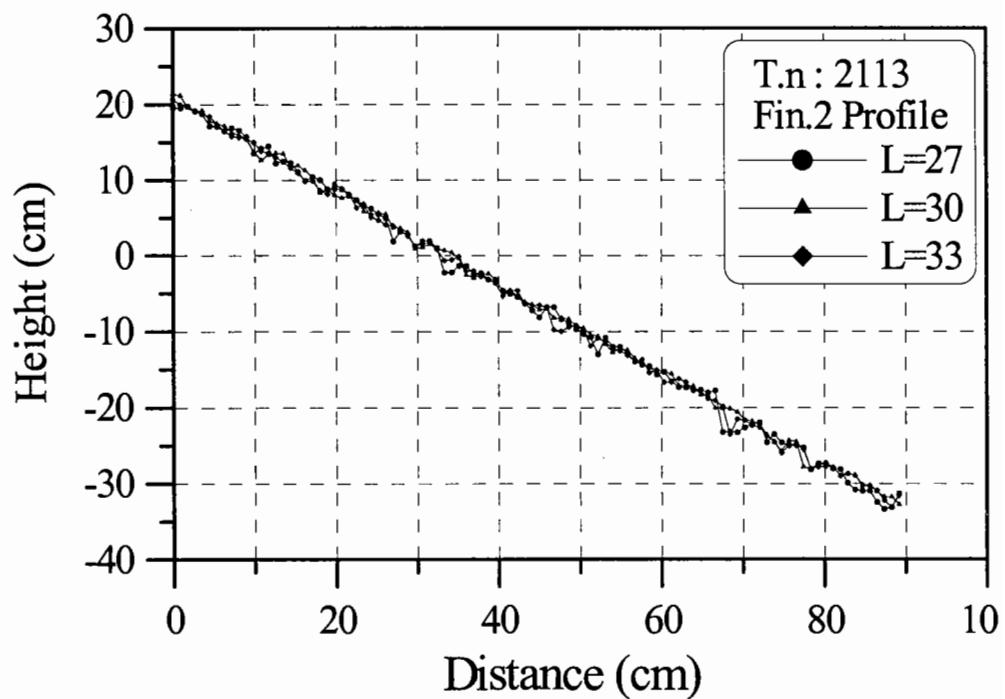


2-4안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

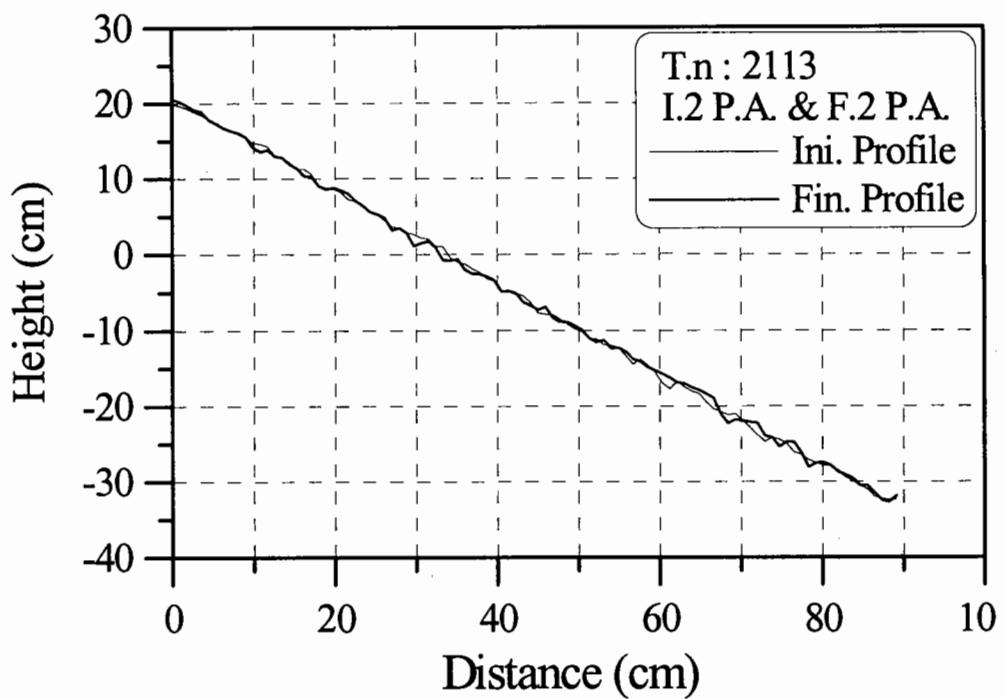


2-4안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

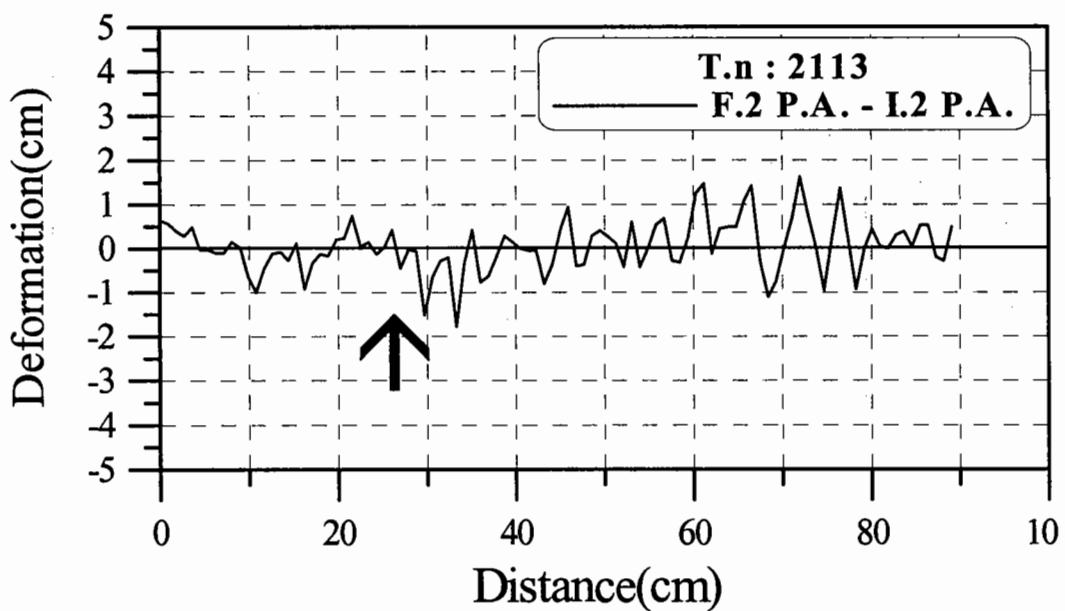


2-4안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

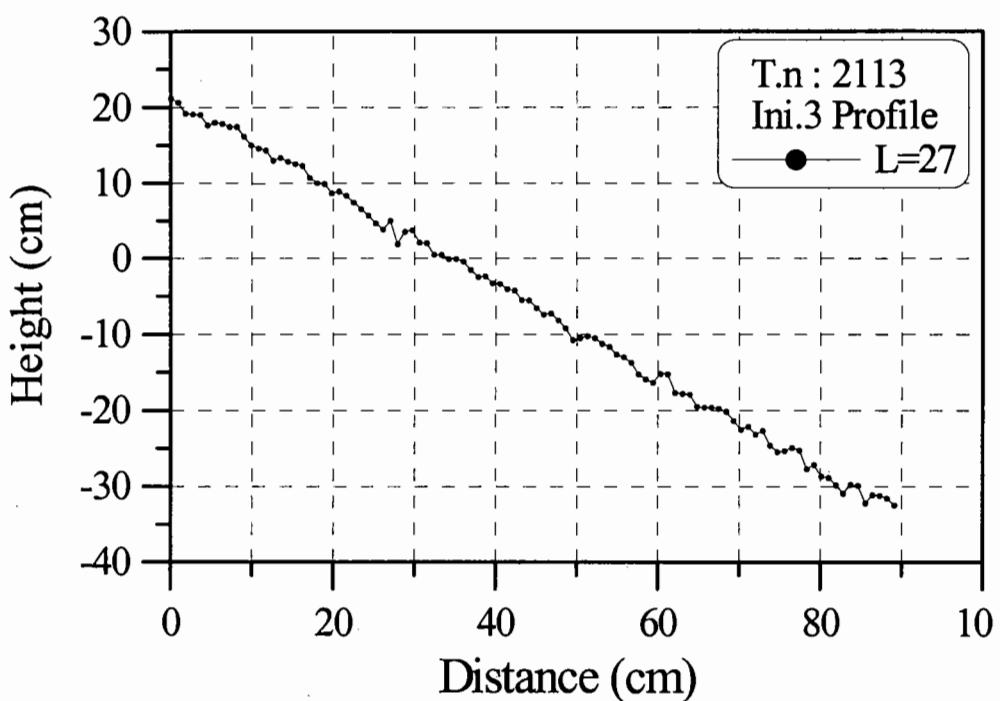


2-4안 2회 실험 피해전·후 필터층의 단면형상 평균의 비교

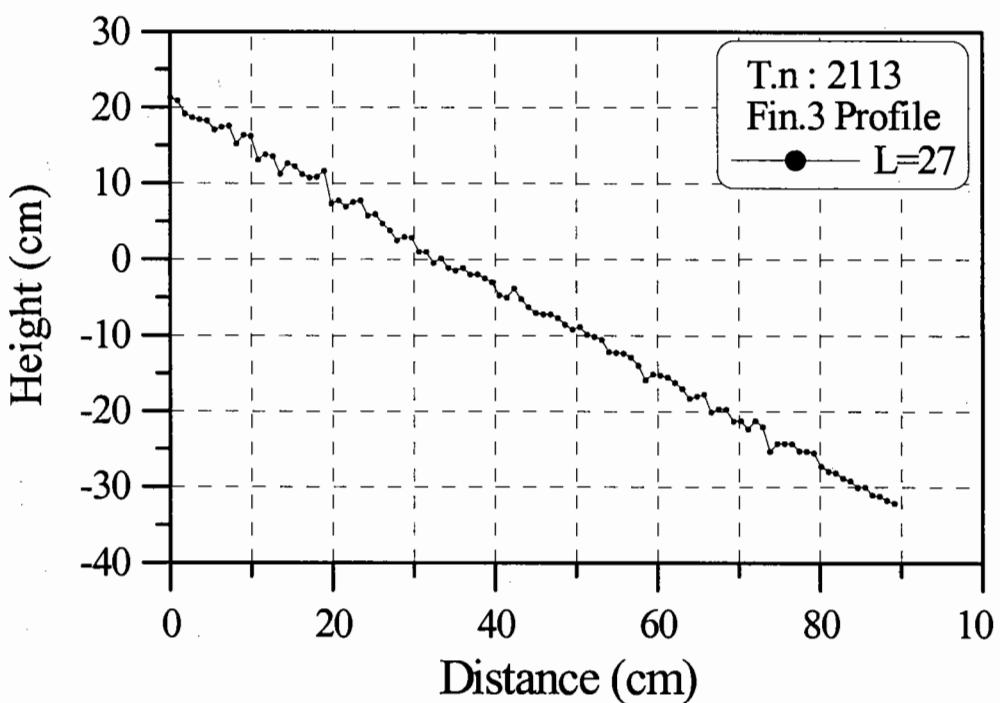


2-4안 2회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

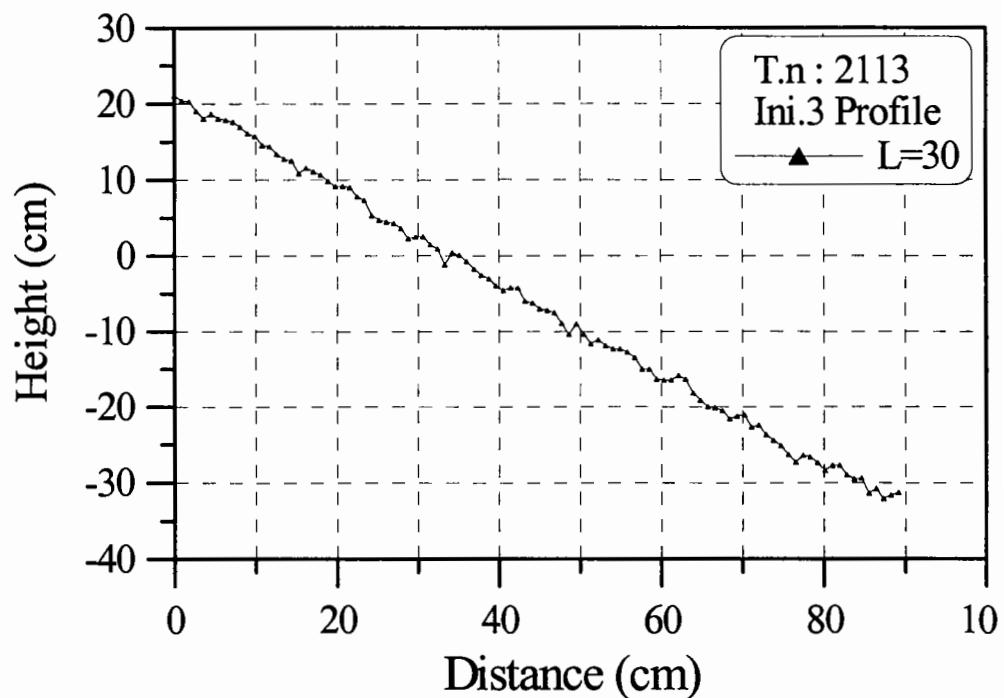


2-4안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

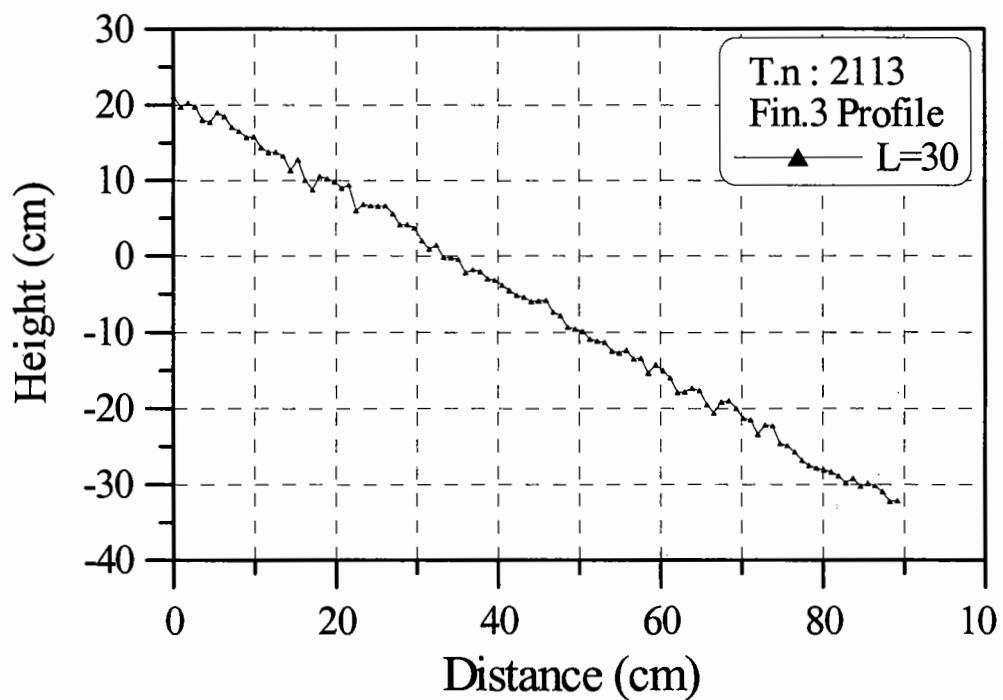


2-4안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

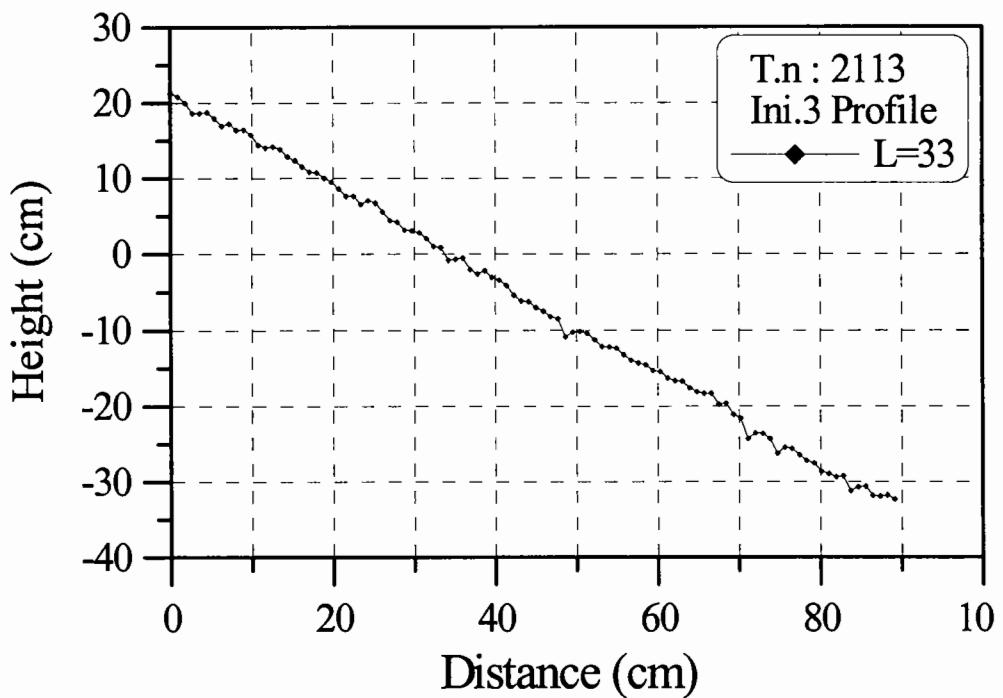


2-4안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

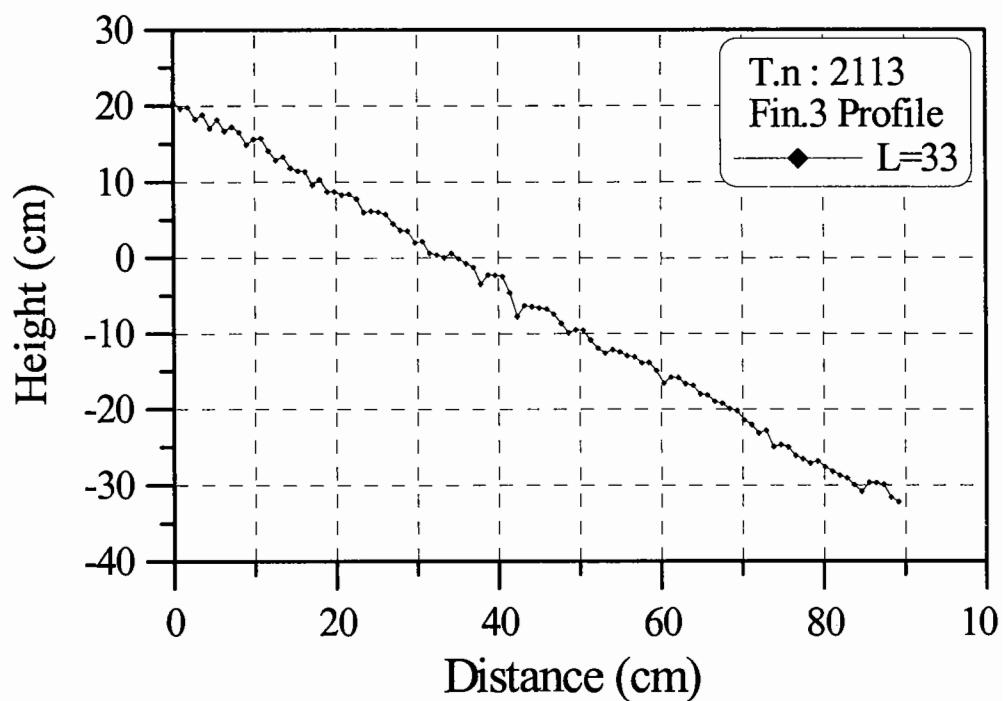


2-4안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

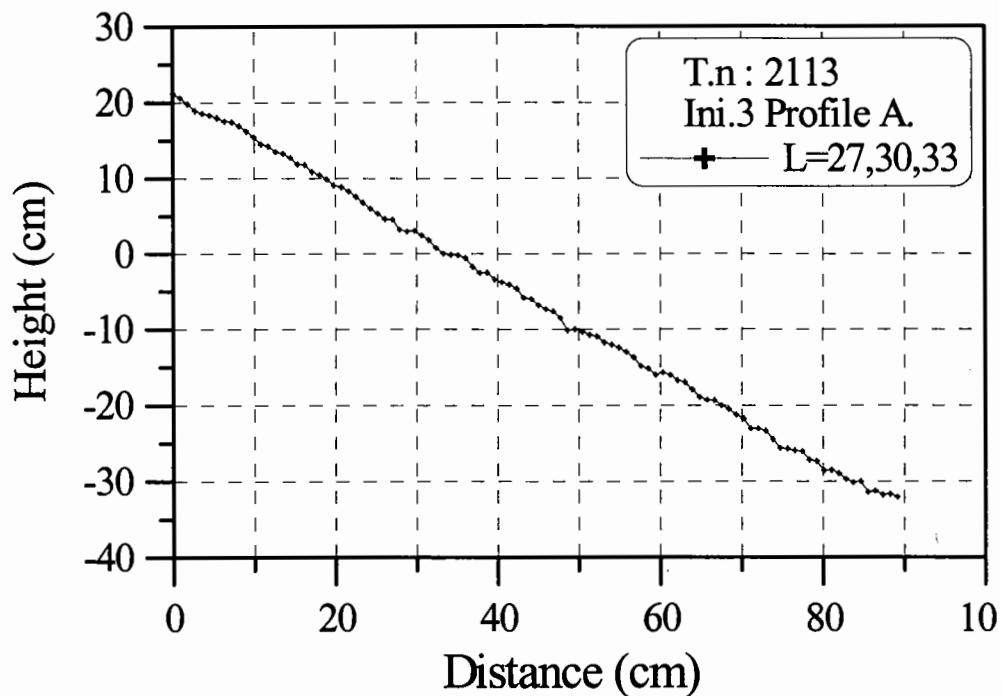


2-4안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

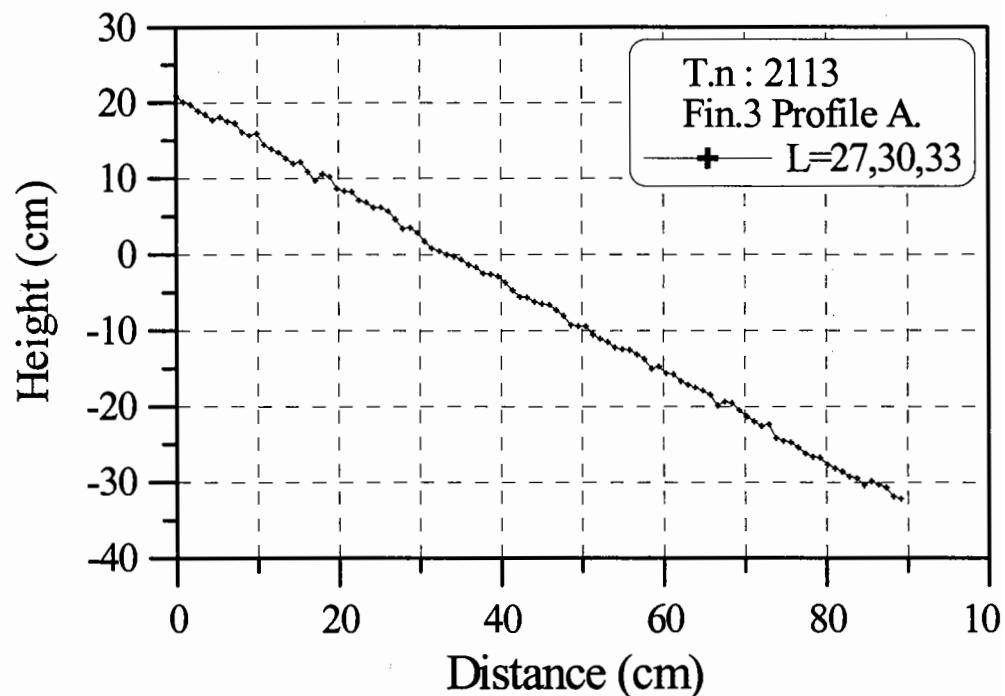


2-4안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

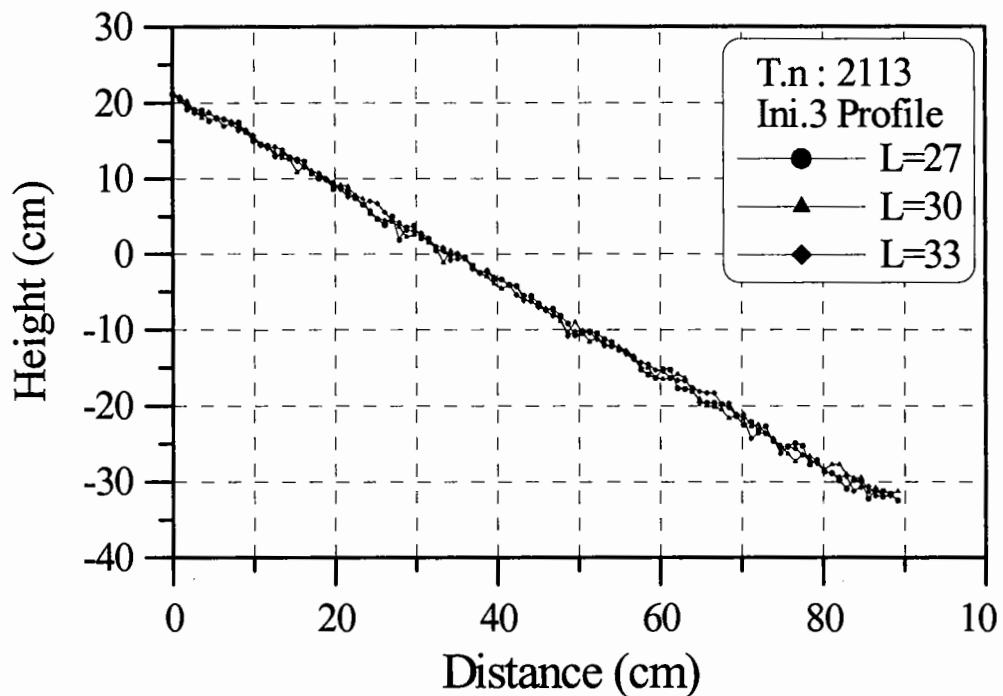


2-4안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

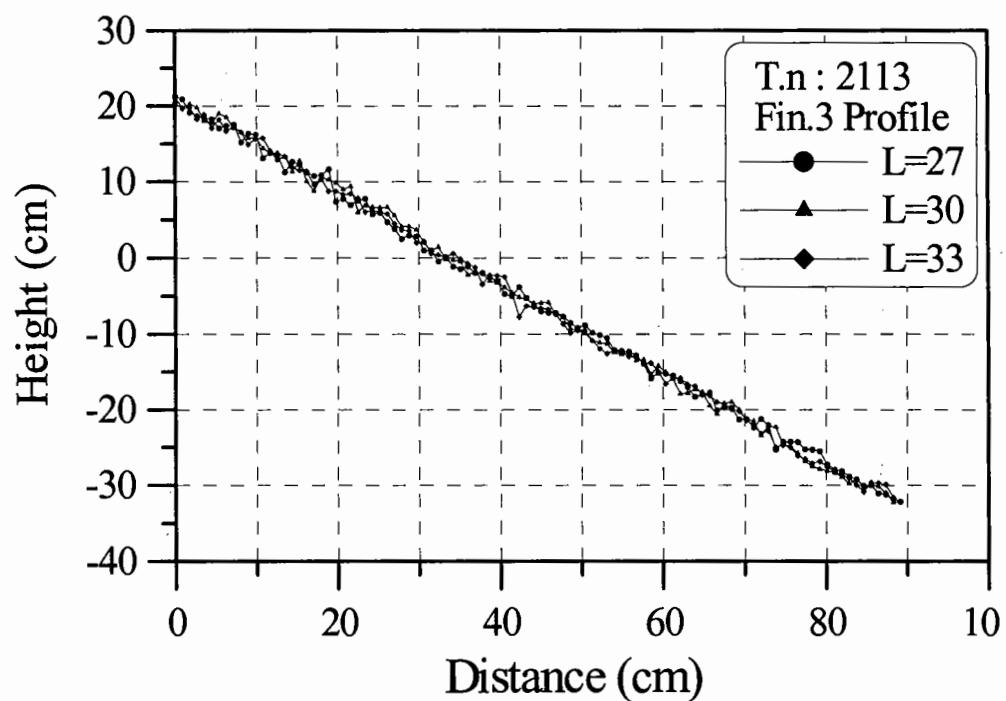


2-4안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

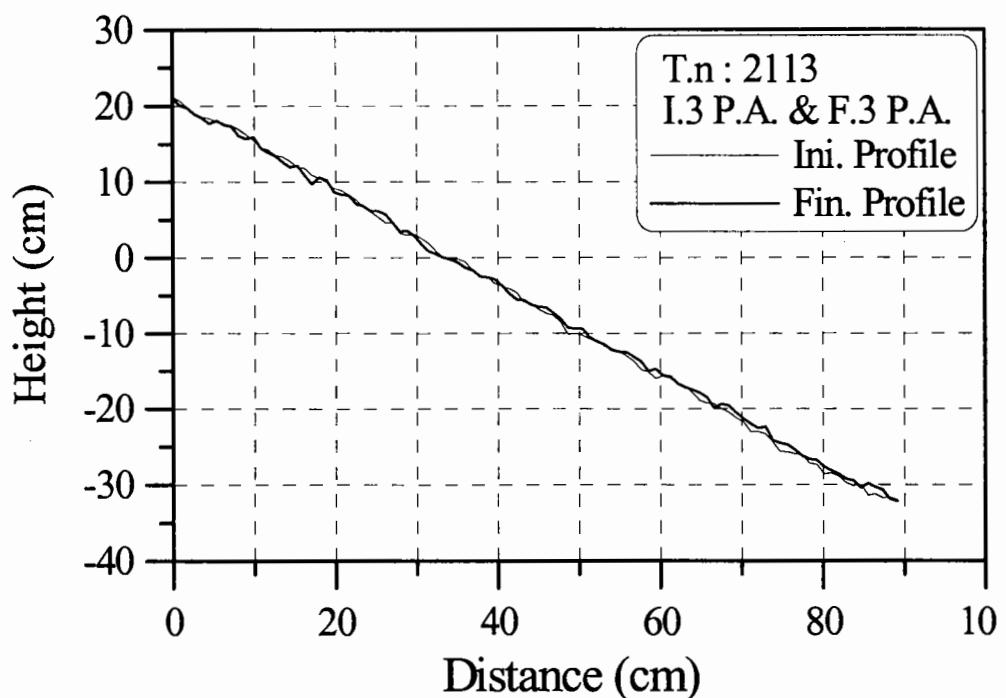


2-4안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

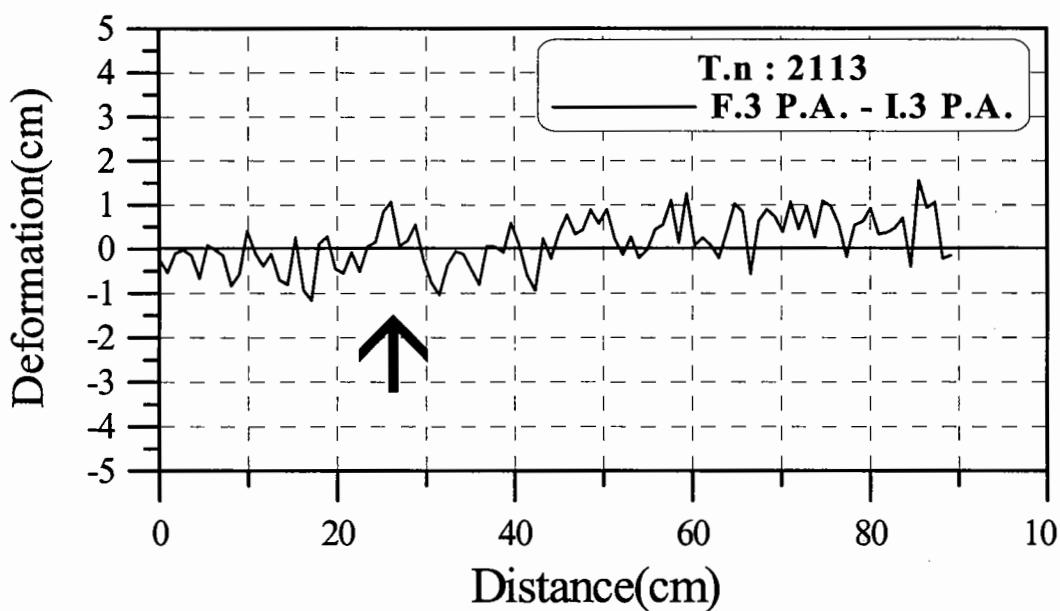


2-4안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회

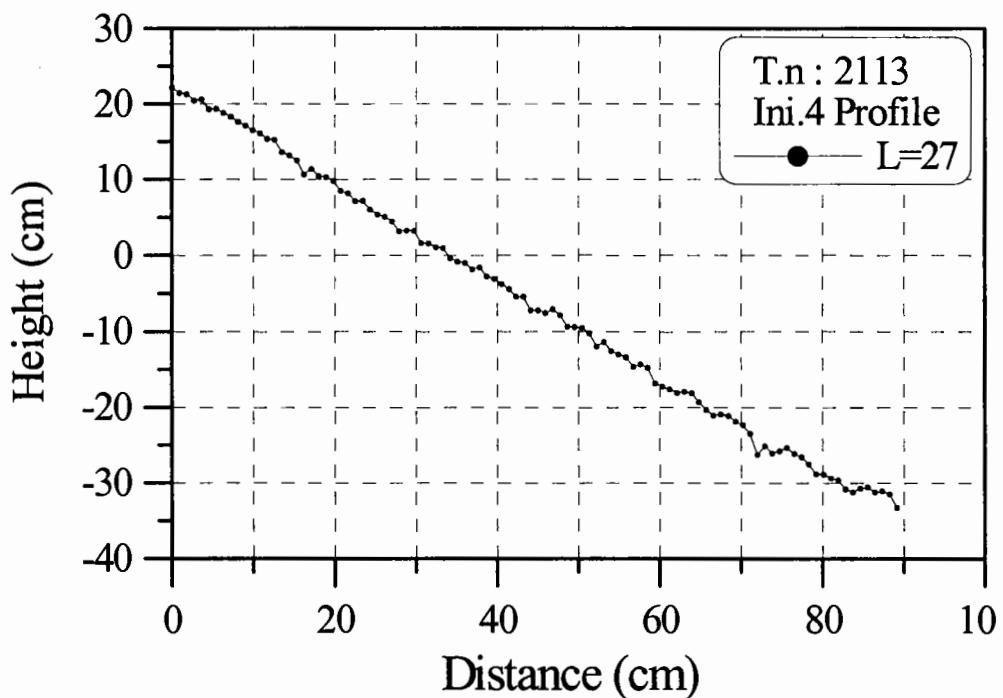


2-4안 3회 실험 피해전 · 후 필터층의 단면형상 평균의 비교

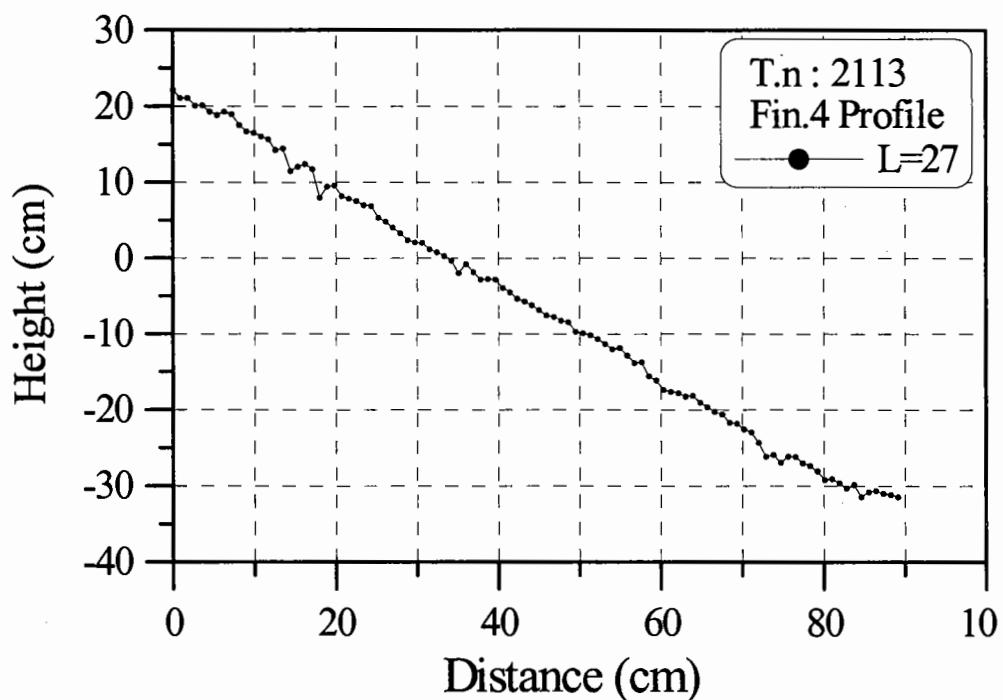


2-4안 3회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

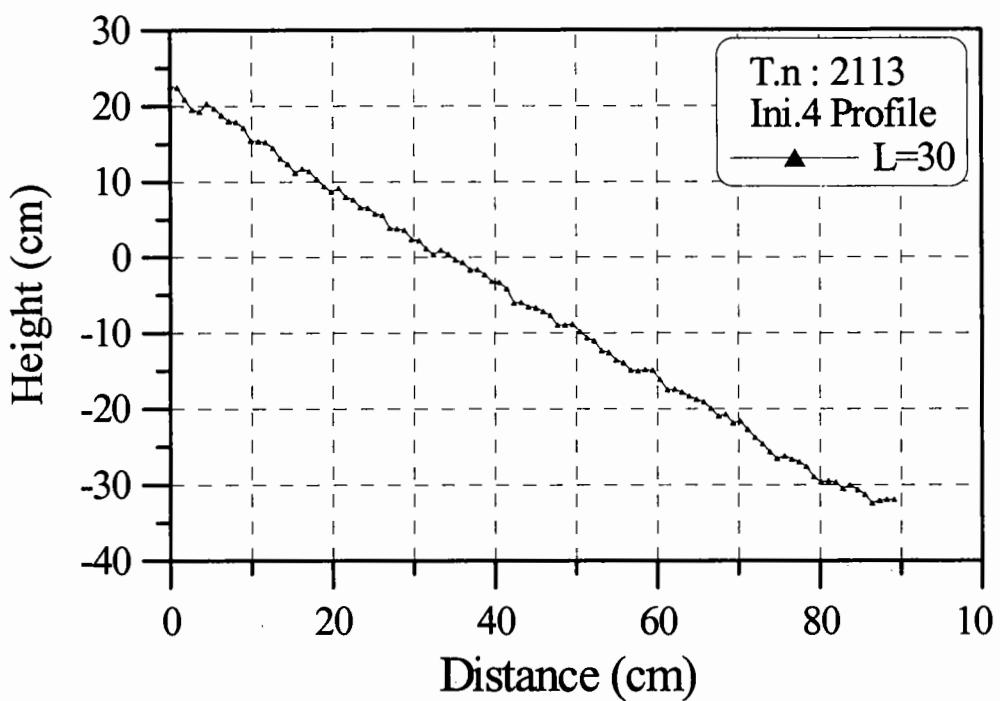


2-4안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

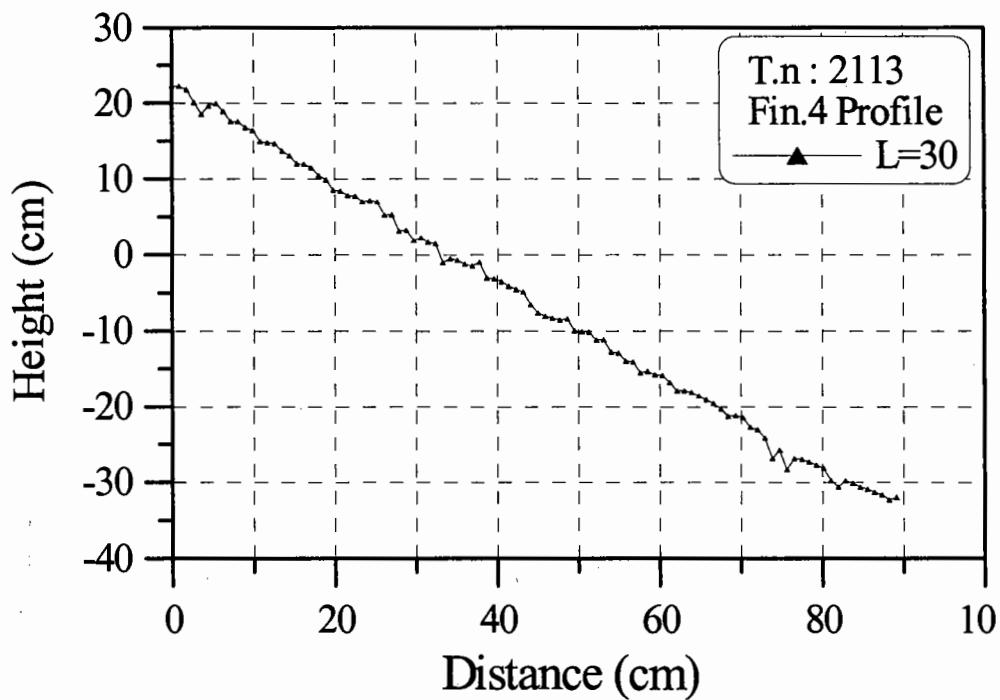


2-4안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

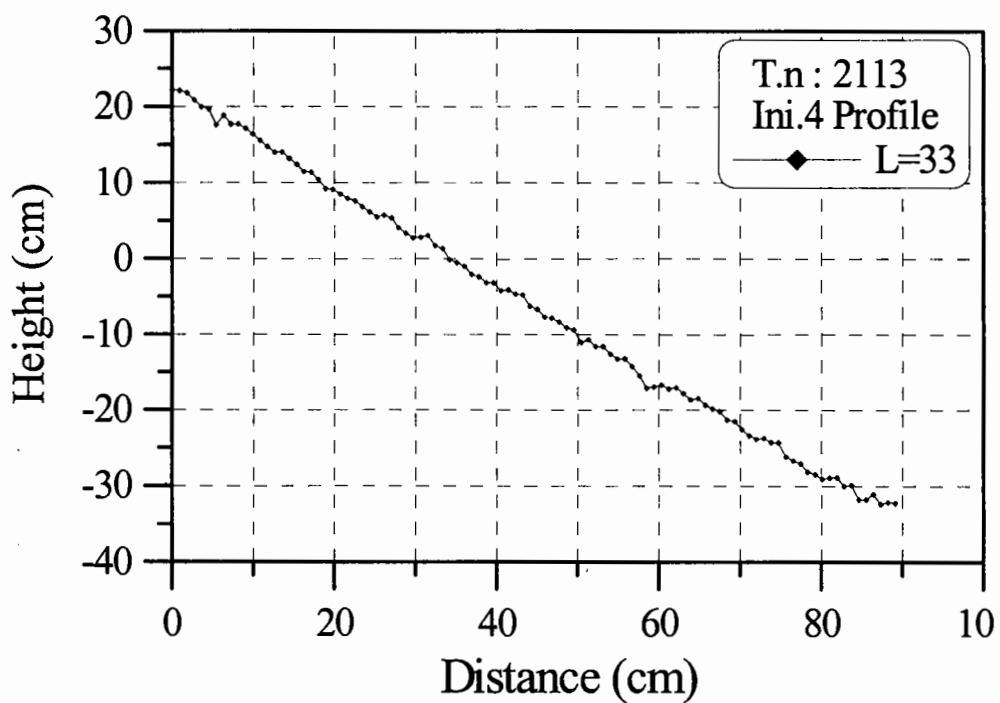


2-4안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

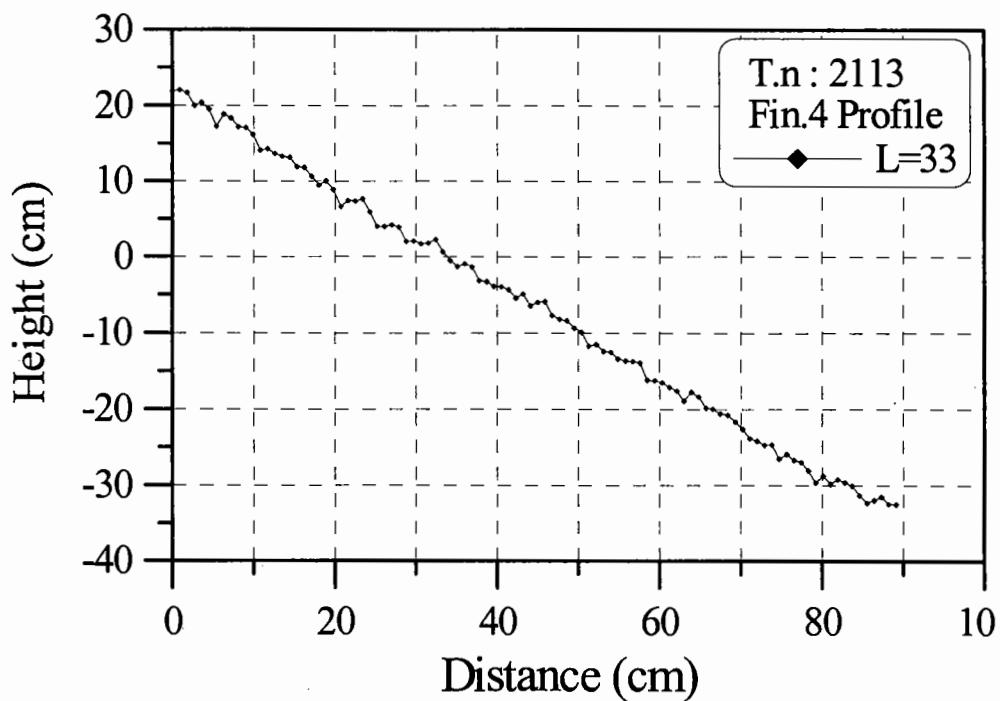


2-4안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

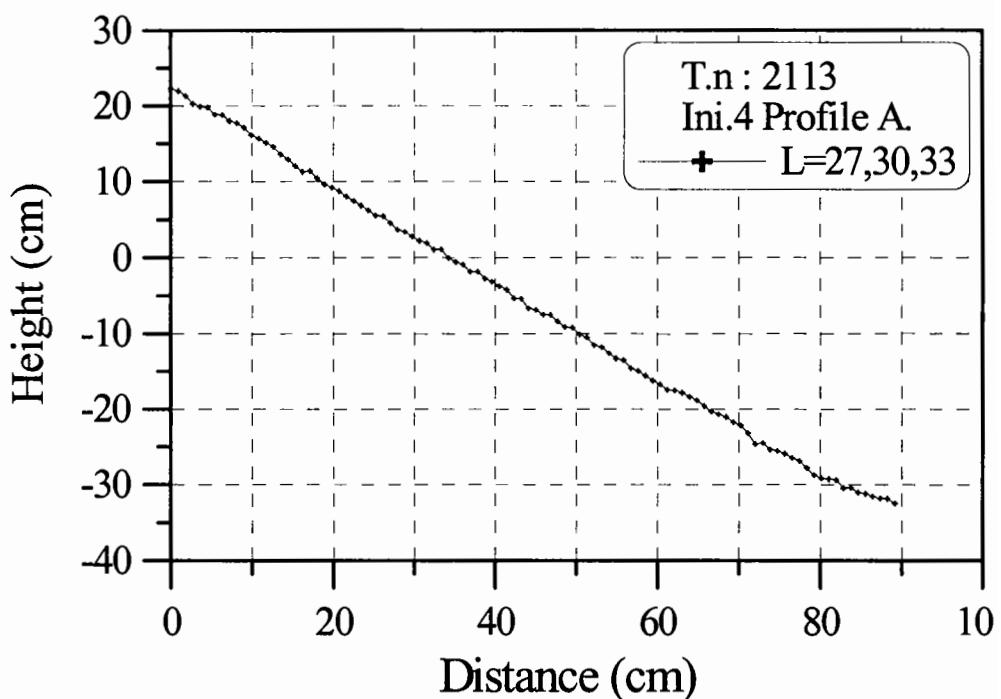


2-4안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

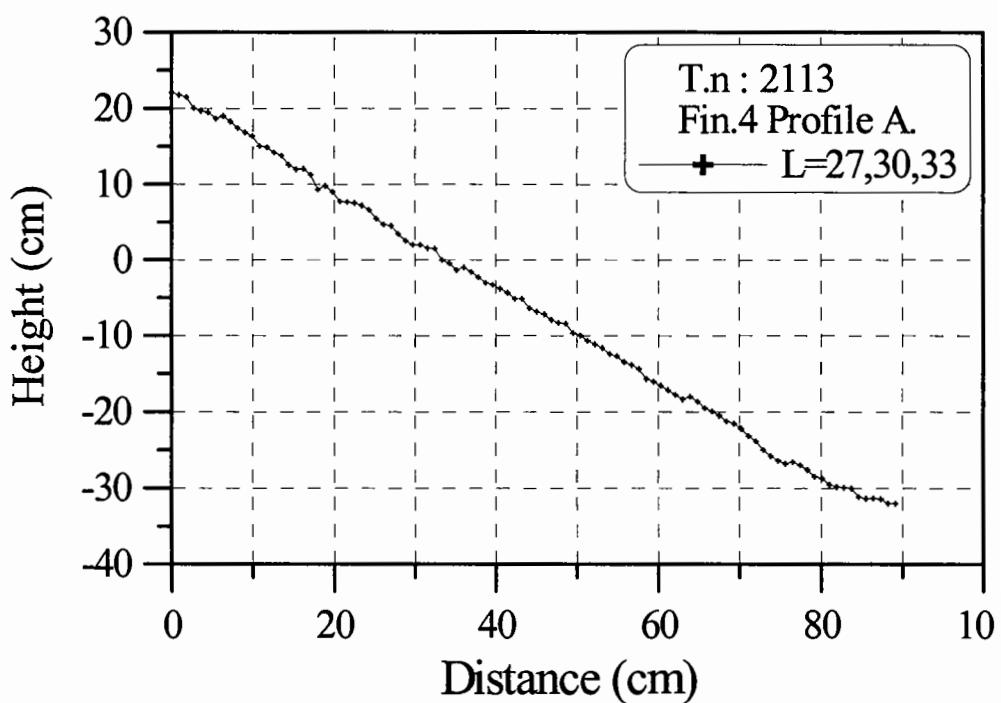


2-4안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

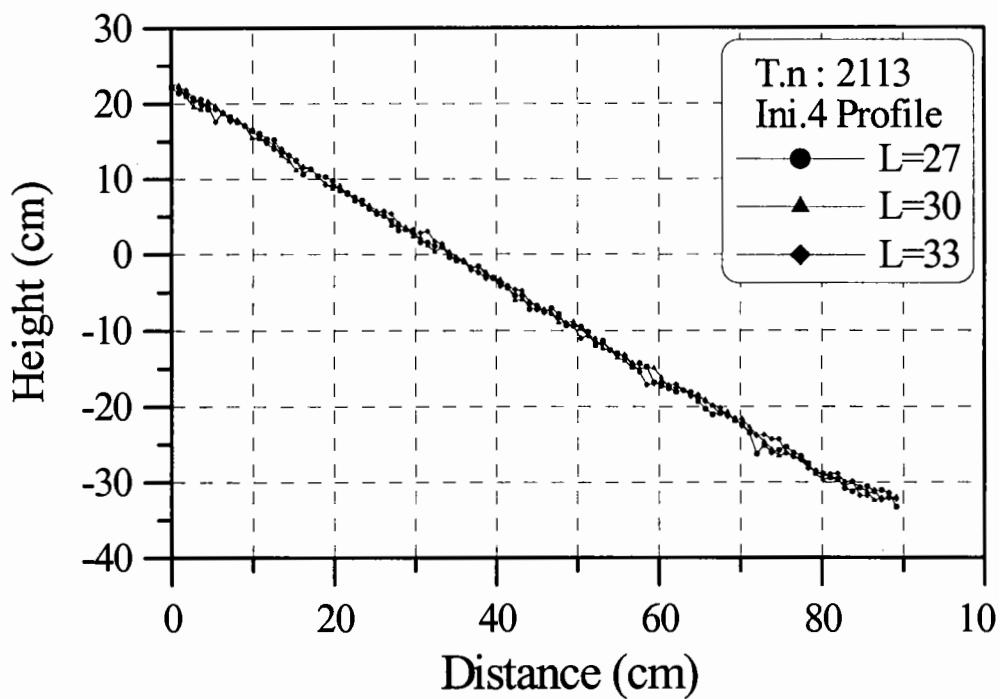


2-4안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

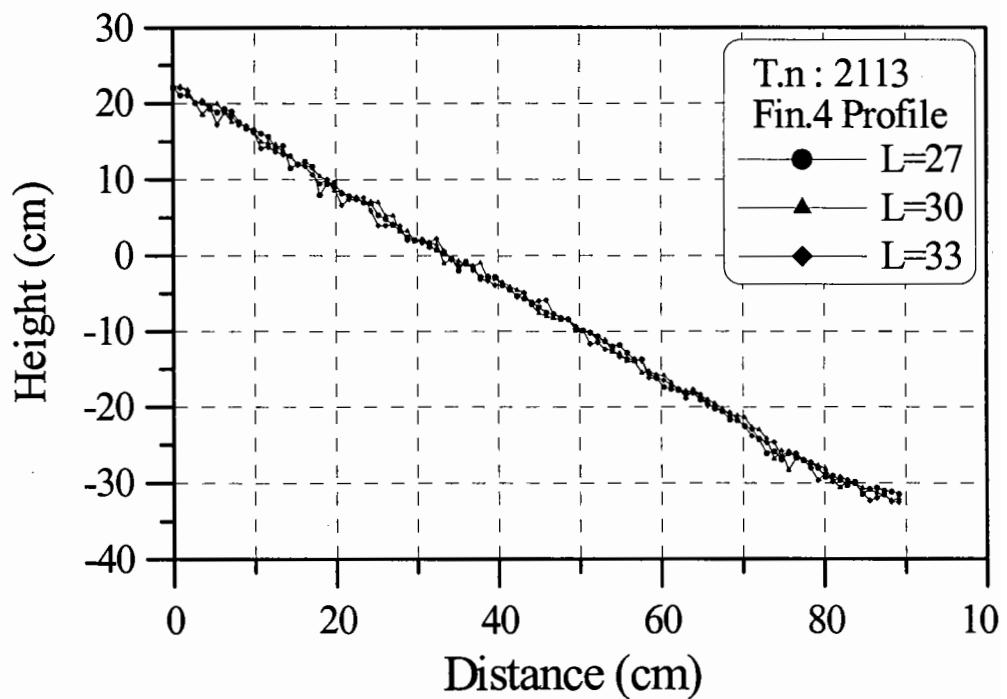


2-4안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

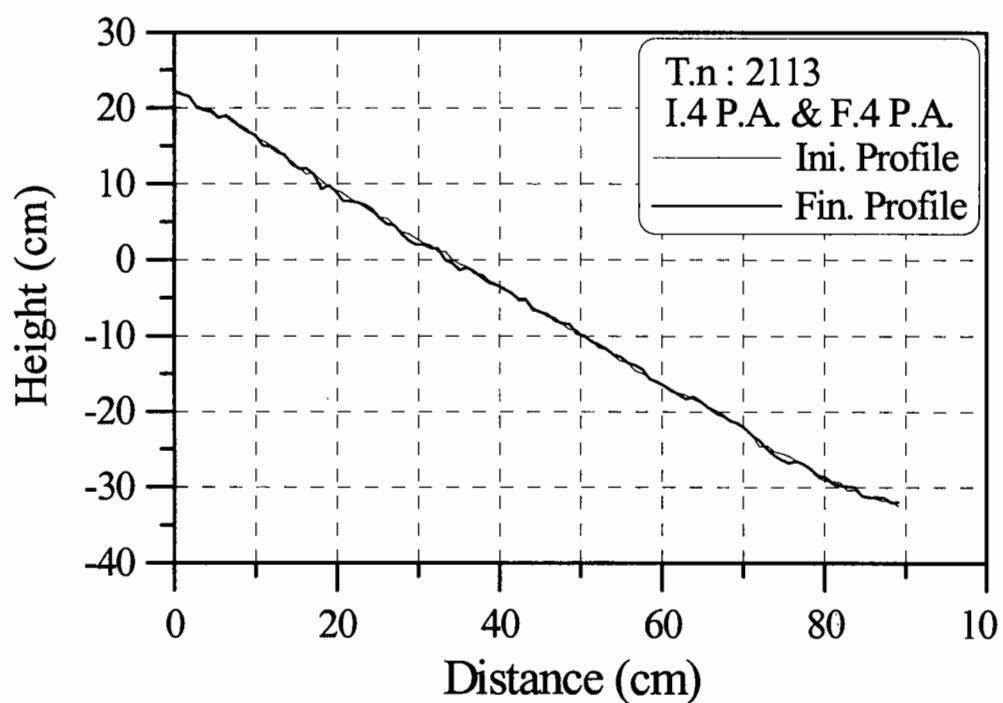


2-4안 4회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

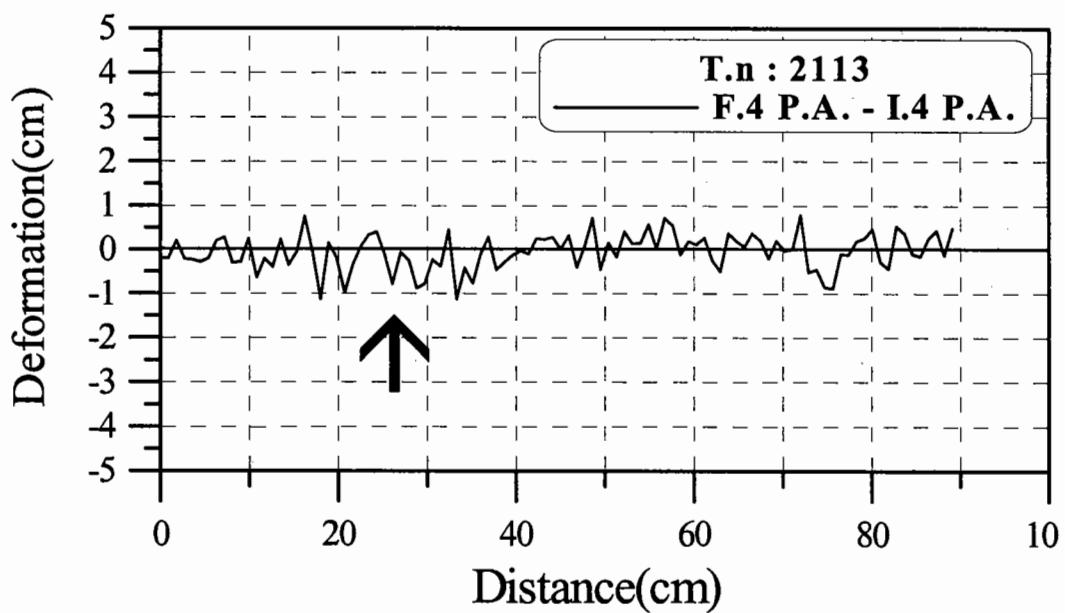


2-4안 4회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 4회

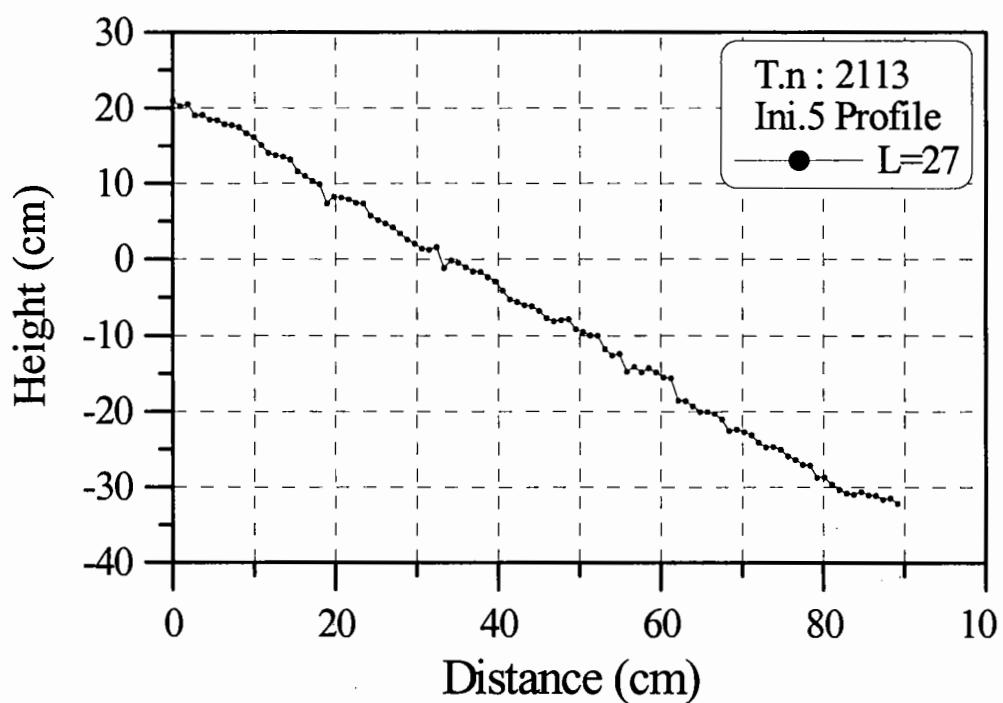


2-4안 4회 실험 피해전 · 후 필터층의 단면형상 평균의 비교

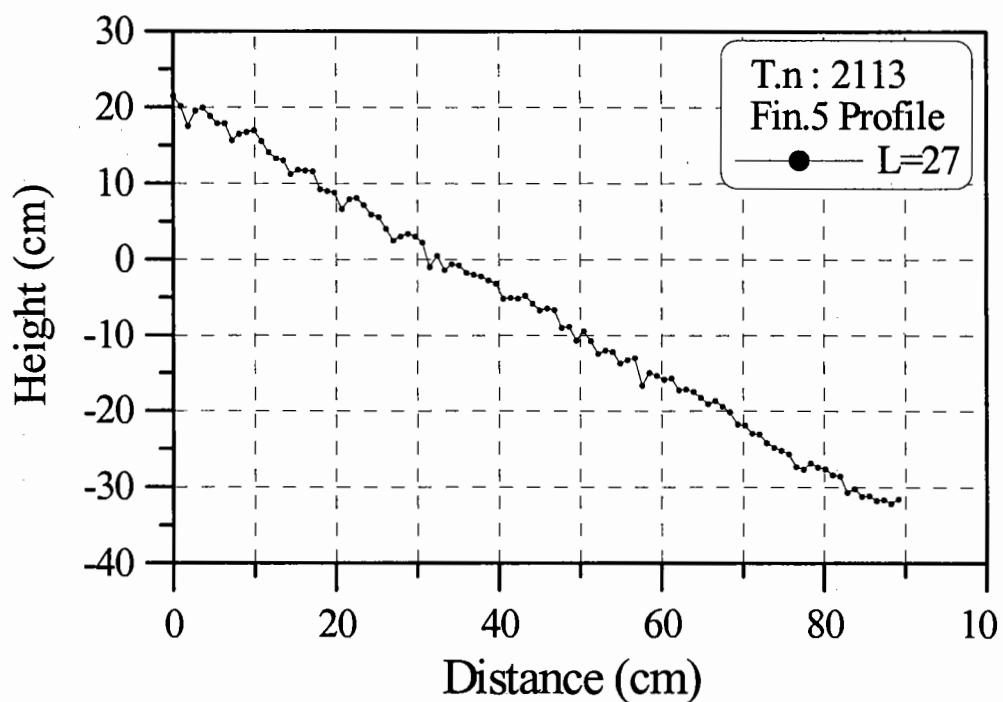


2-4안 4회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 5회

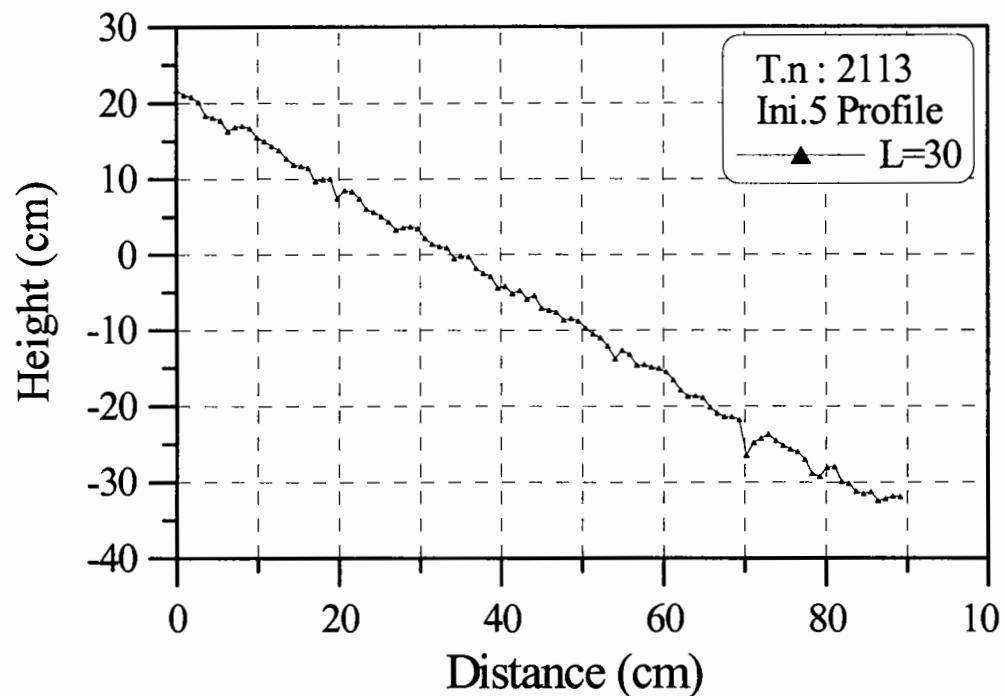


2-4안 5회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

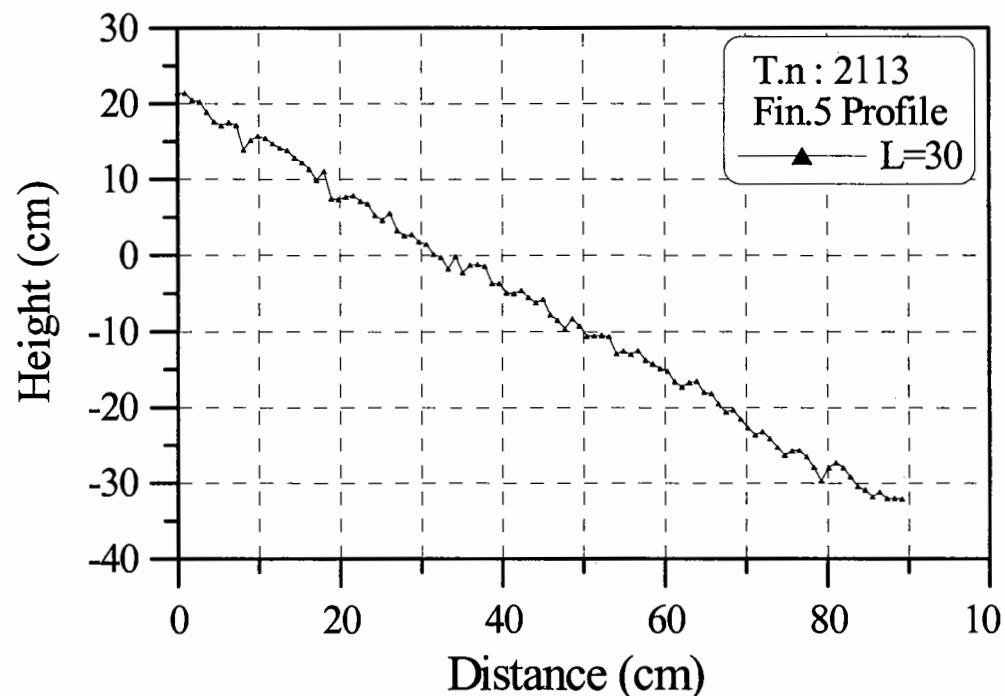


2-4안 5회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 5회

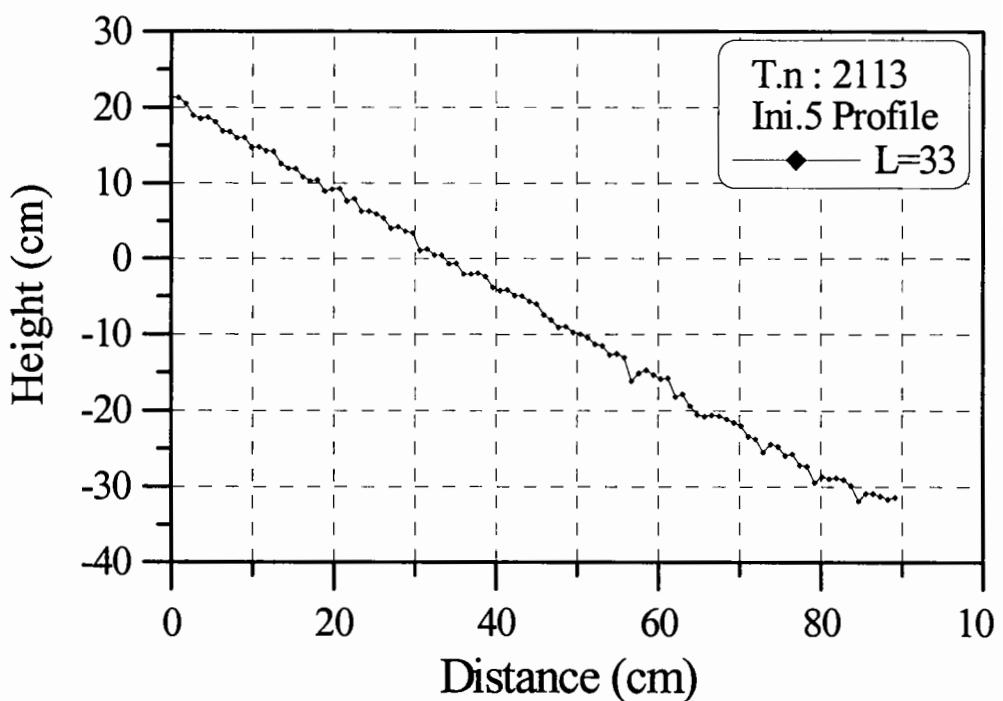


2-4안 5회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

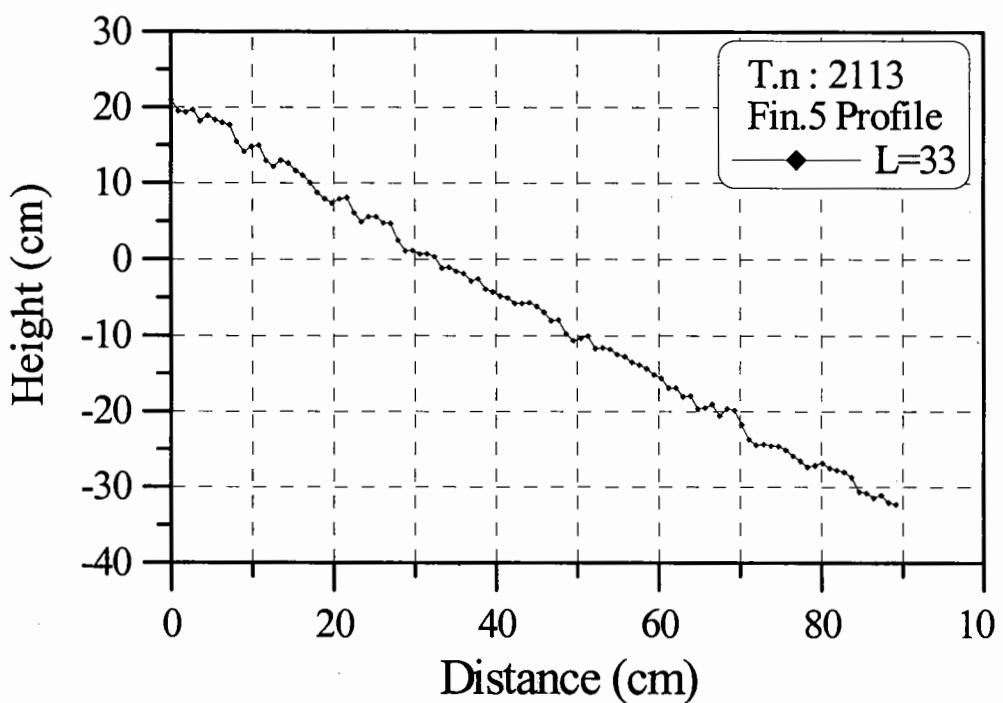


2-4안 5회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 5회

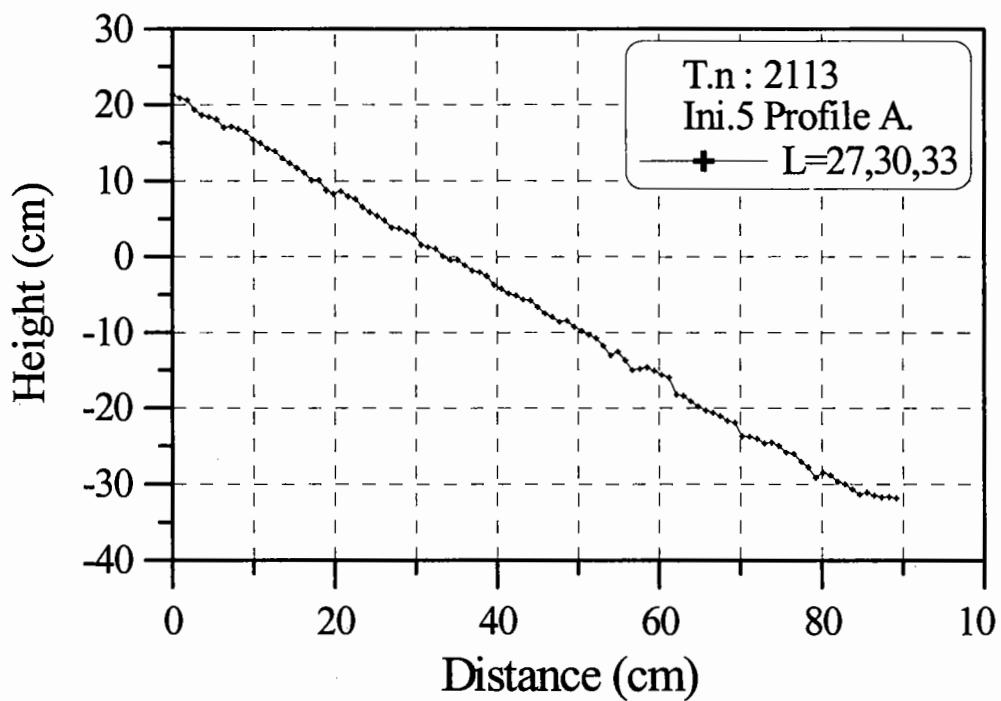


2-4안 5회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

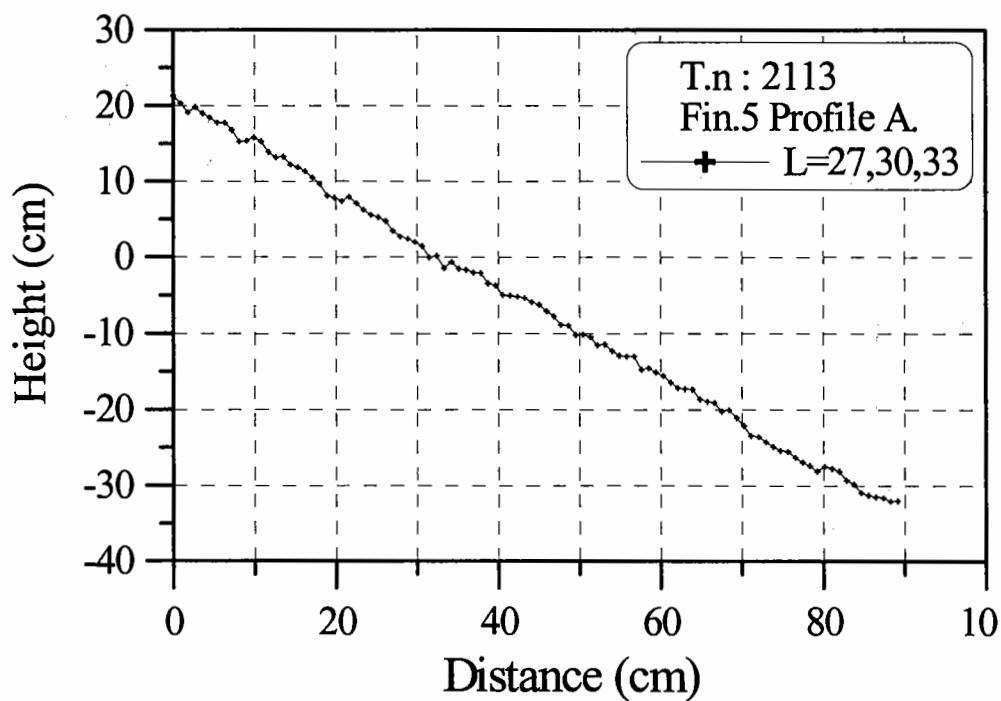


2-4안 5회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

2-4안의 중간파복층의 연직방향 변형 실험결과 5회

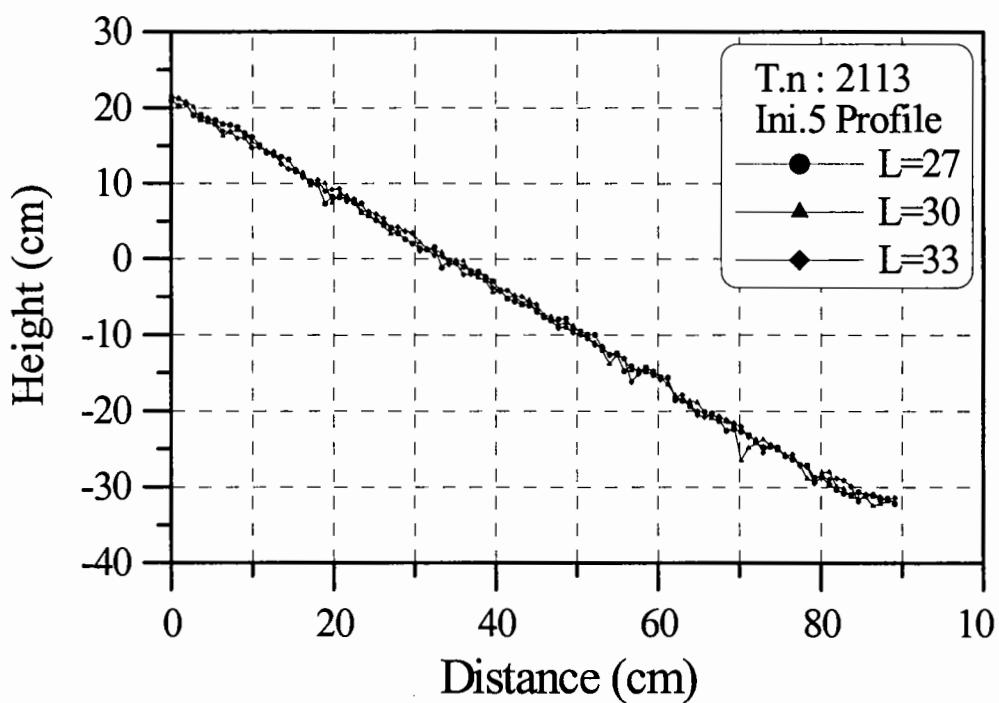


2-4안 5회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

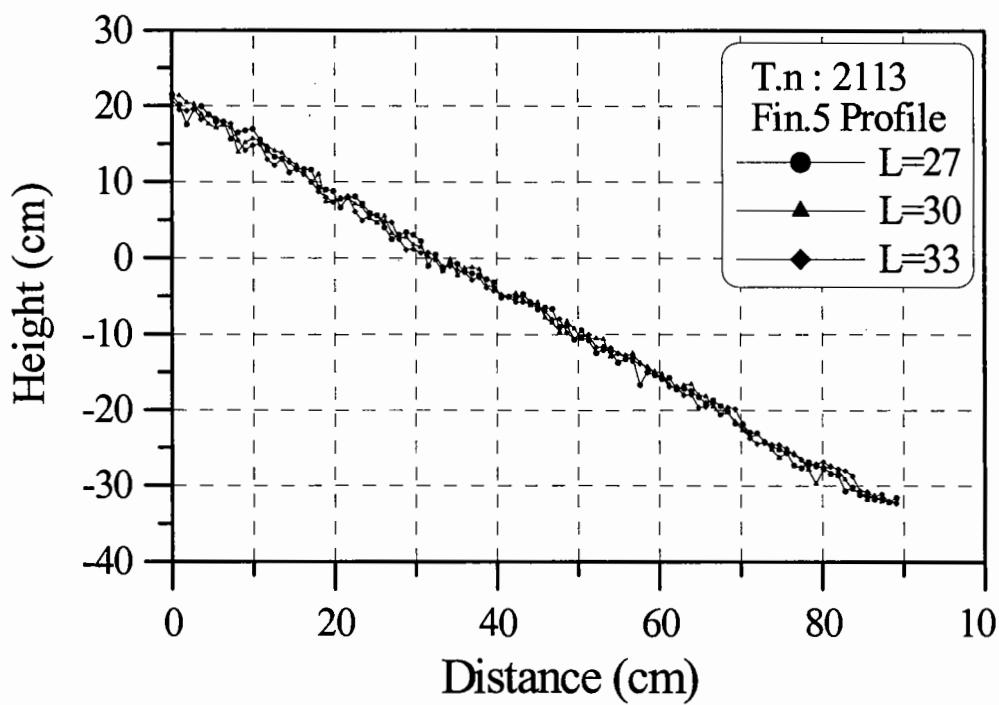


2-4안 5회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 5회

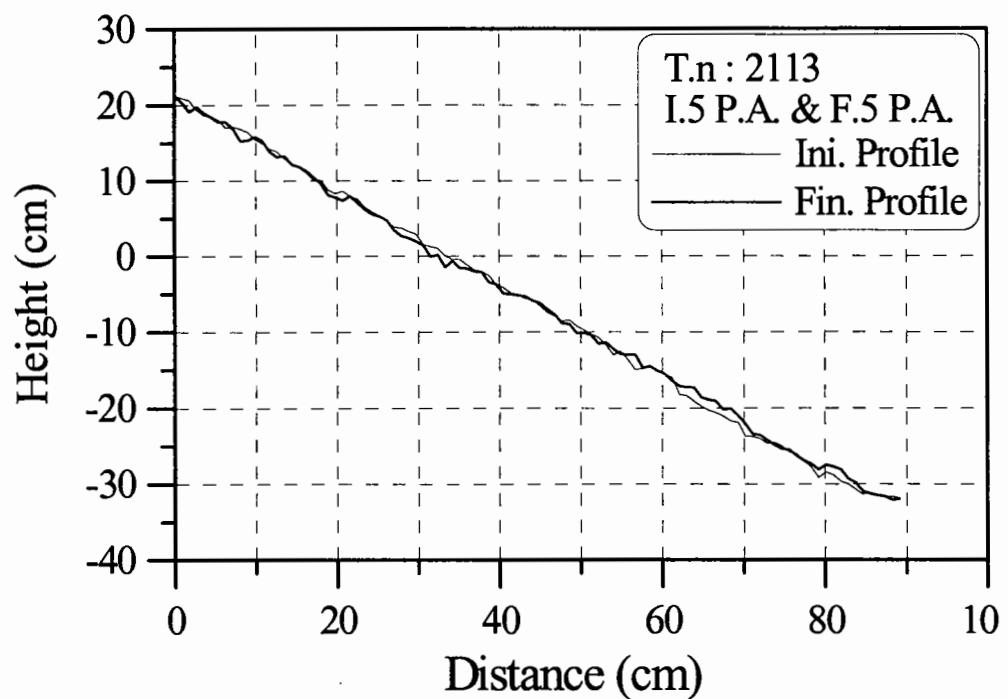


2-4안 5회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

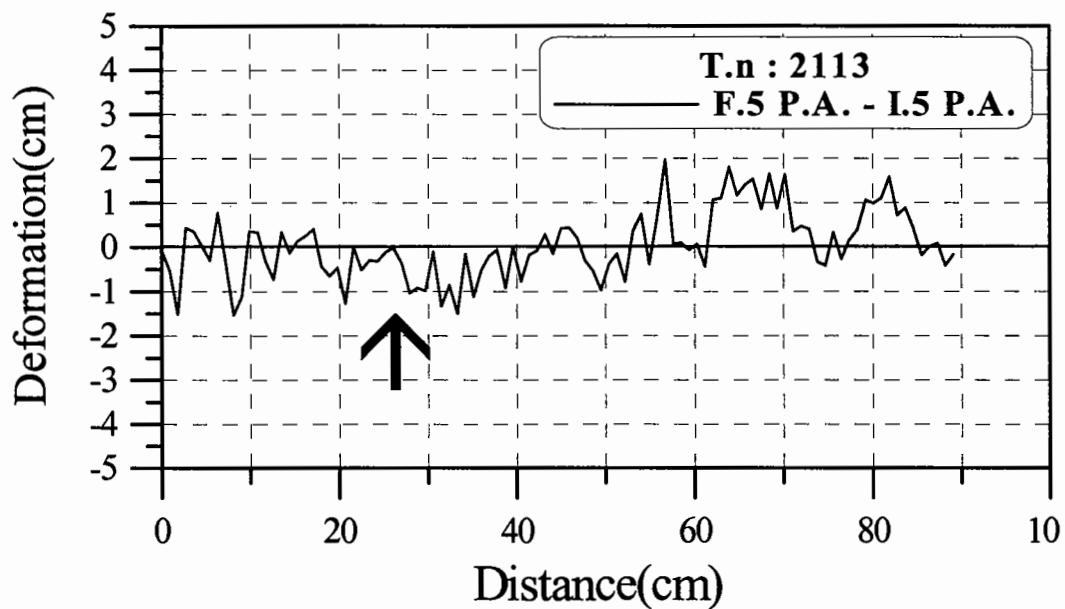


2-4안 5회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

2-4안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 5회

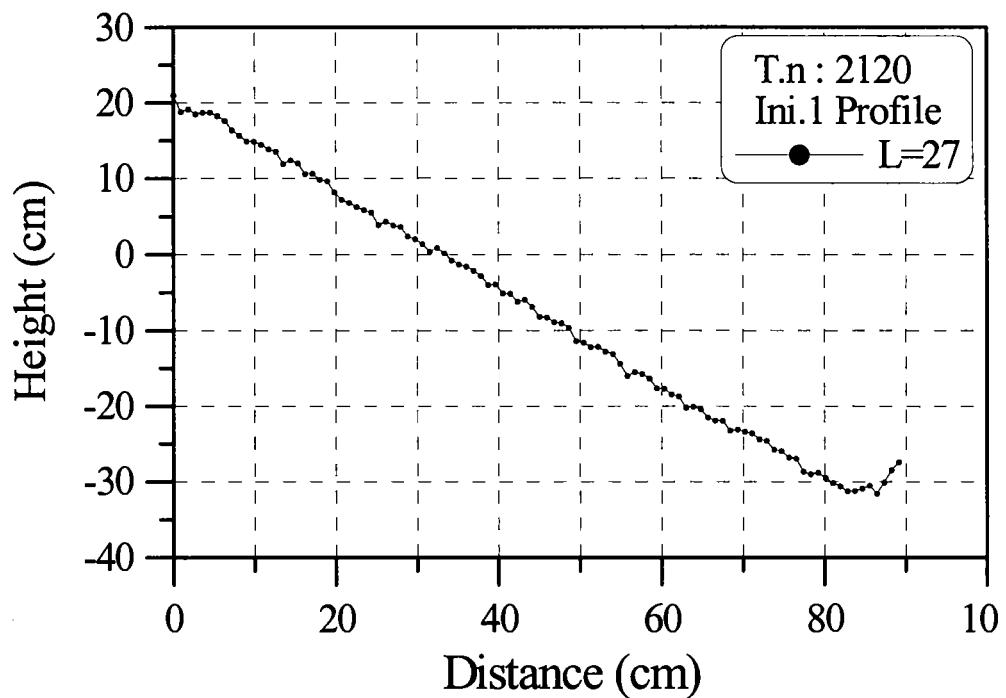


2-4안 5회 실험 피해전·후 필터층의 단면형상 평균의 비교

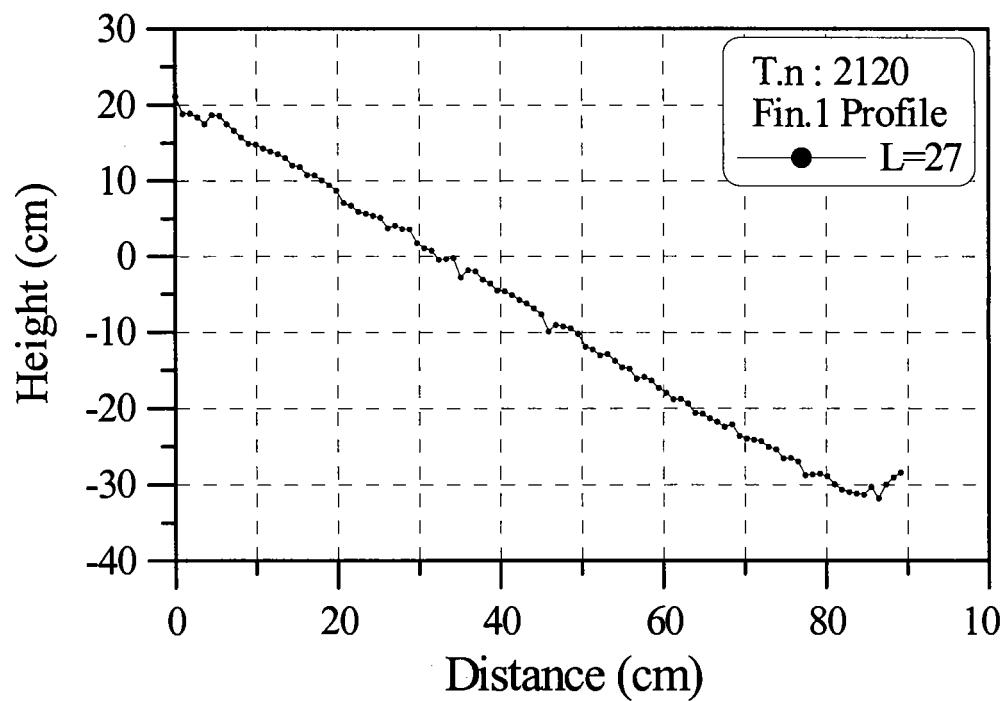


2-4안 5회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

3-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

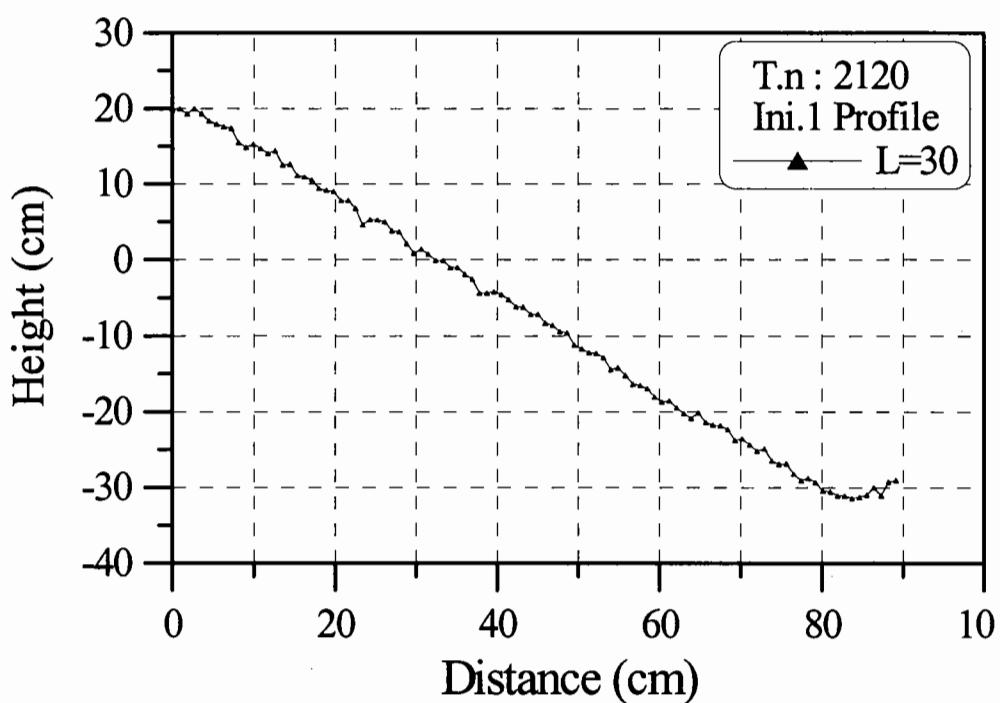


3-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

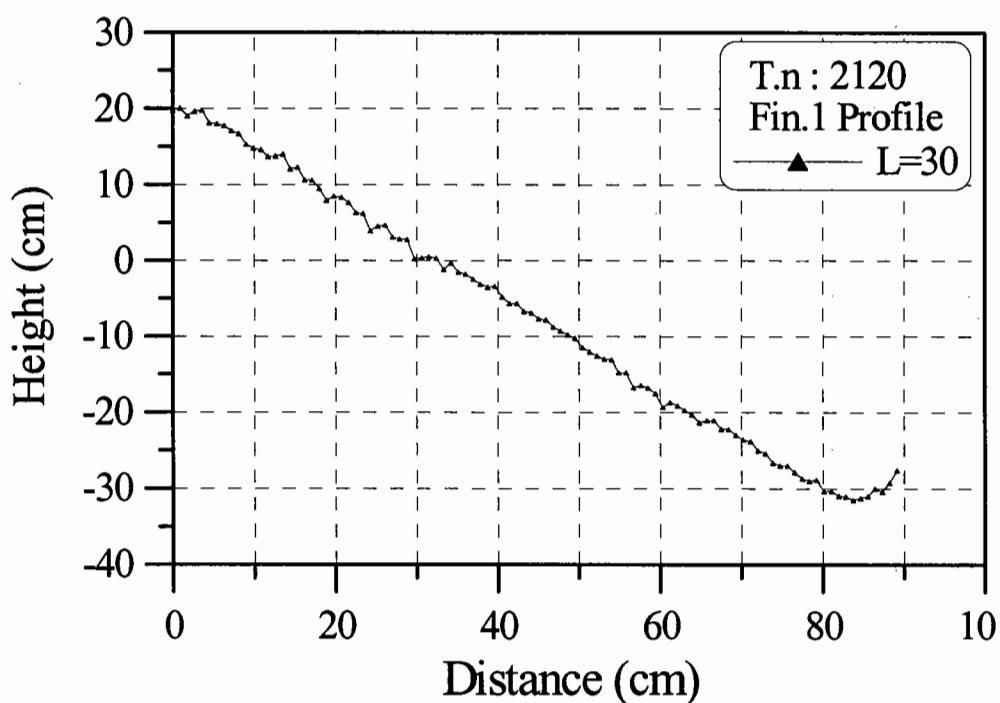


3-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

3-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

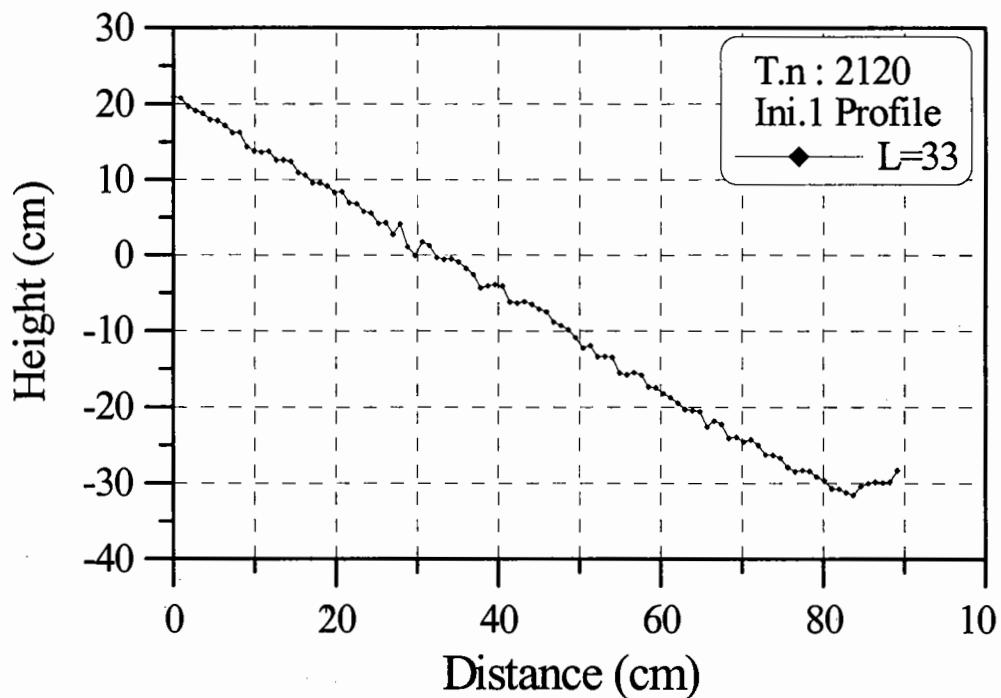


3-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

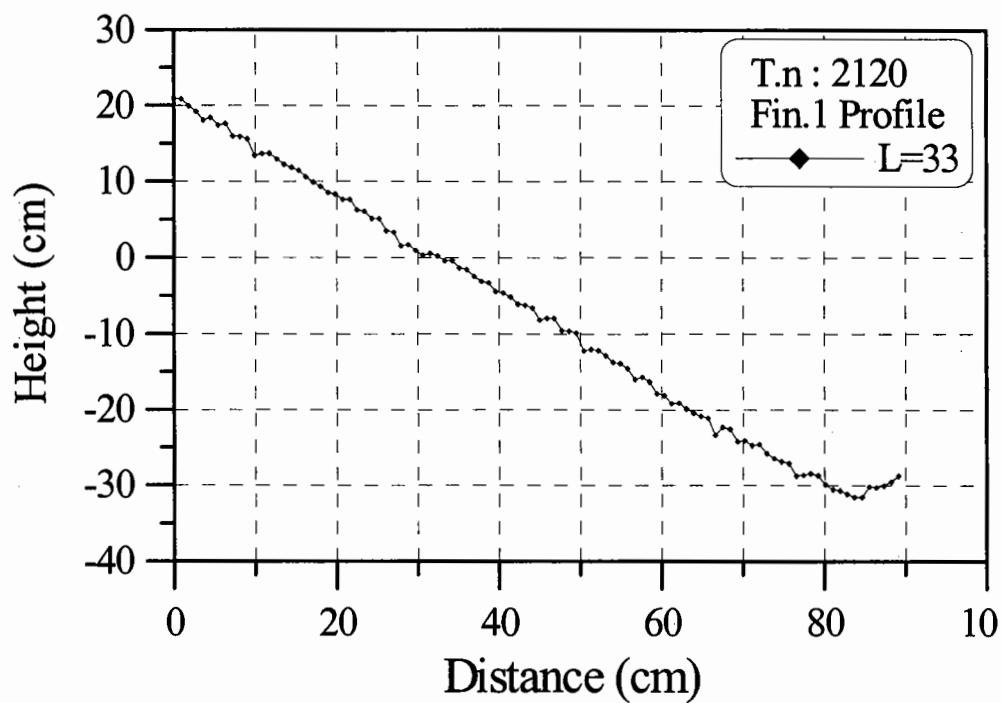


3-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

3-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

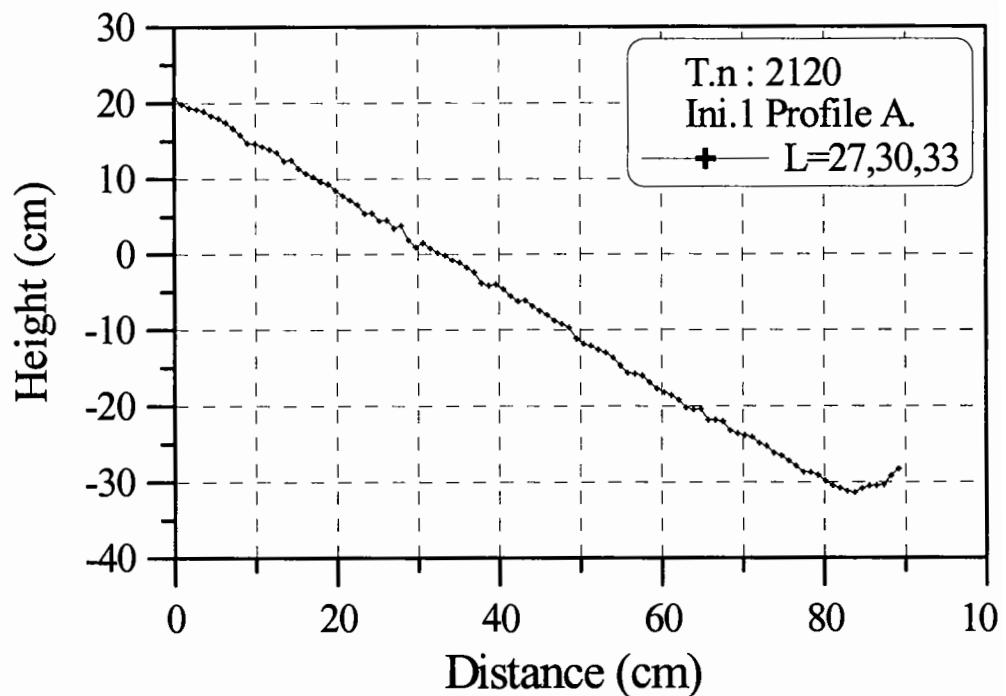


3-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

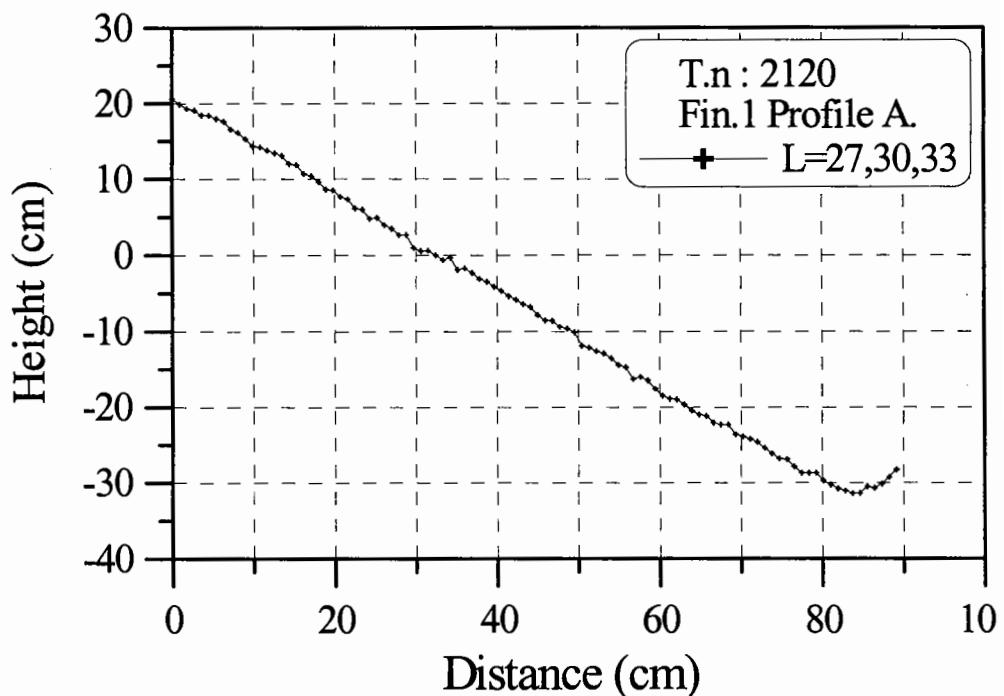


3-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

3-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

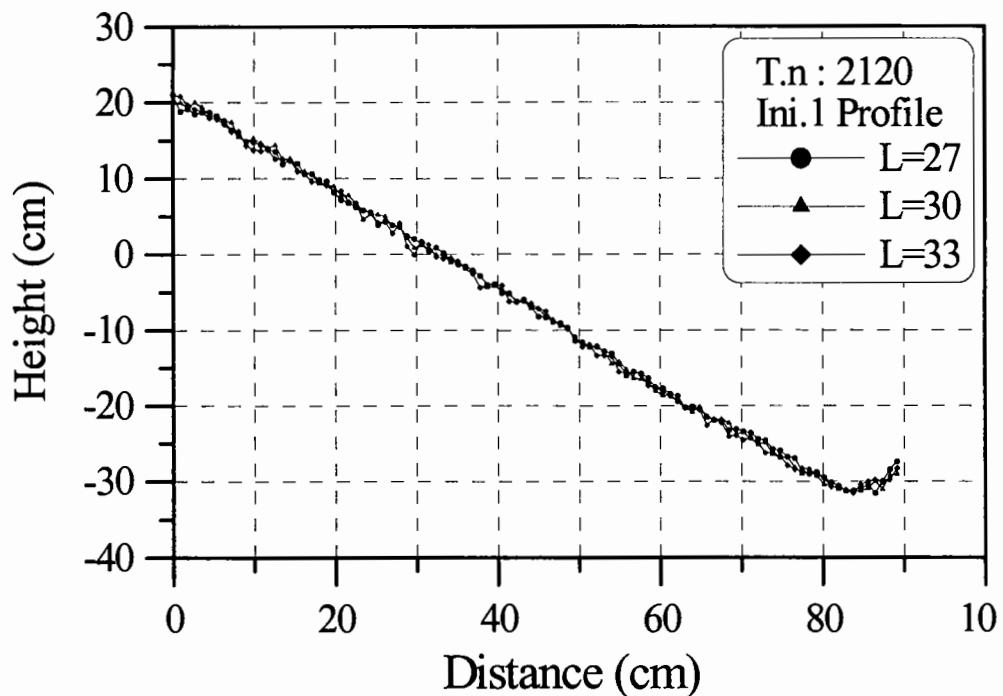


3-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

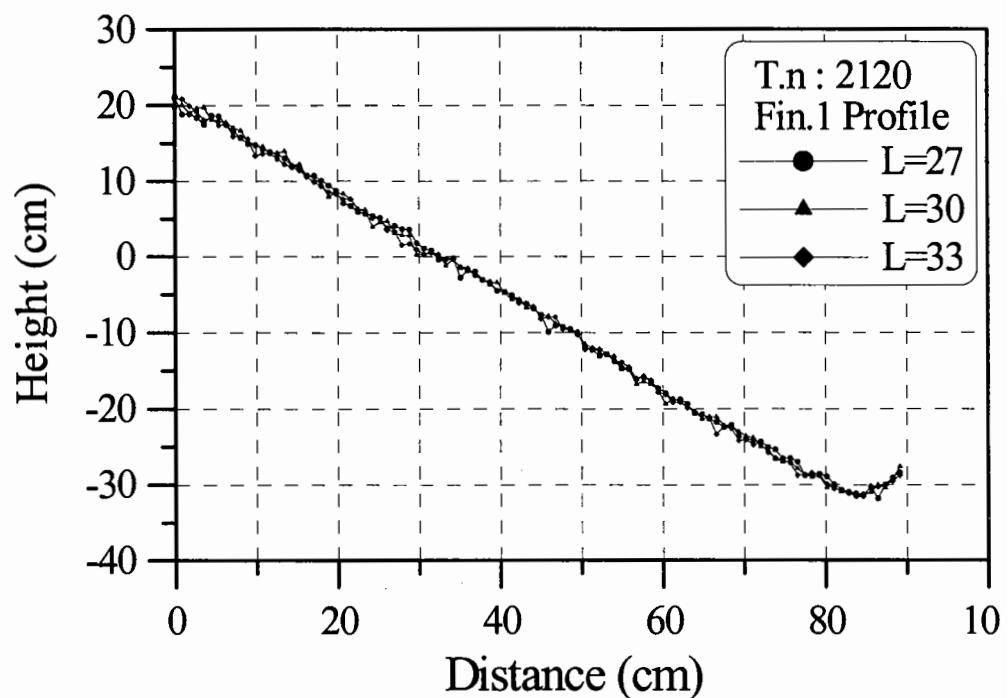


3-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

3-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

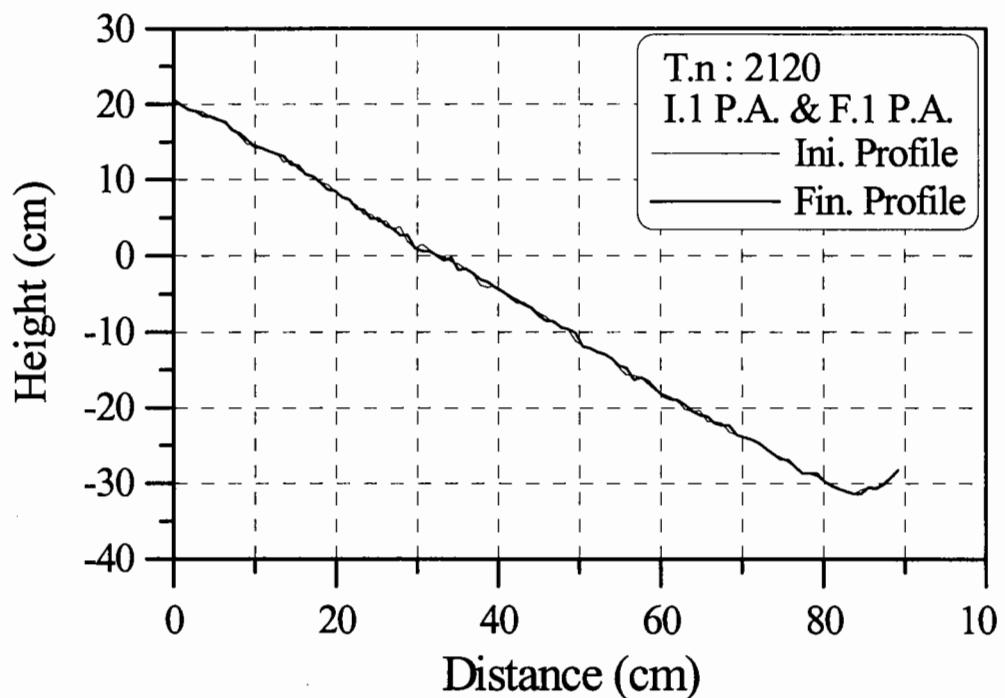


3-1안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

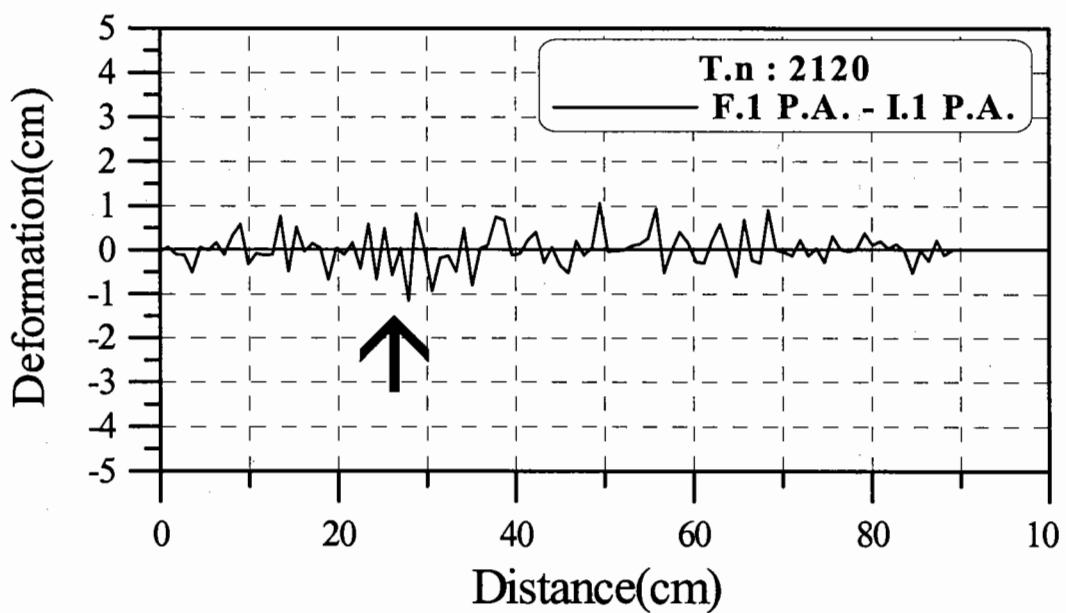


3-1안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

3-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

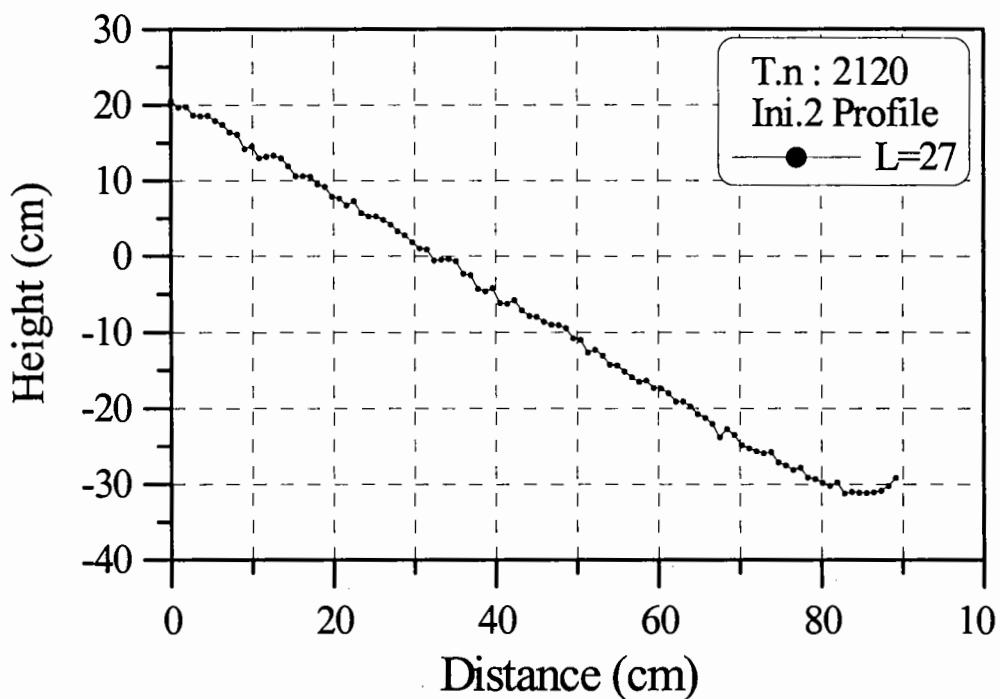


3-1안 1회 실험 피해전·후 필터층의 단면형상 평균의 비교

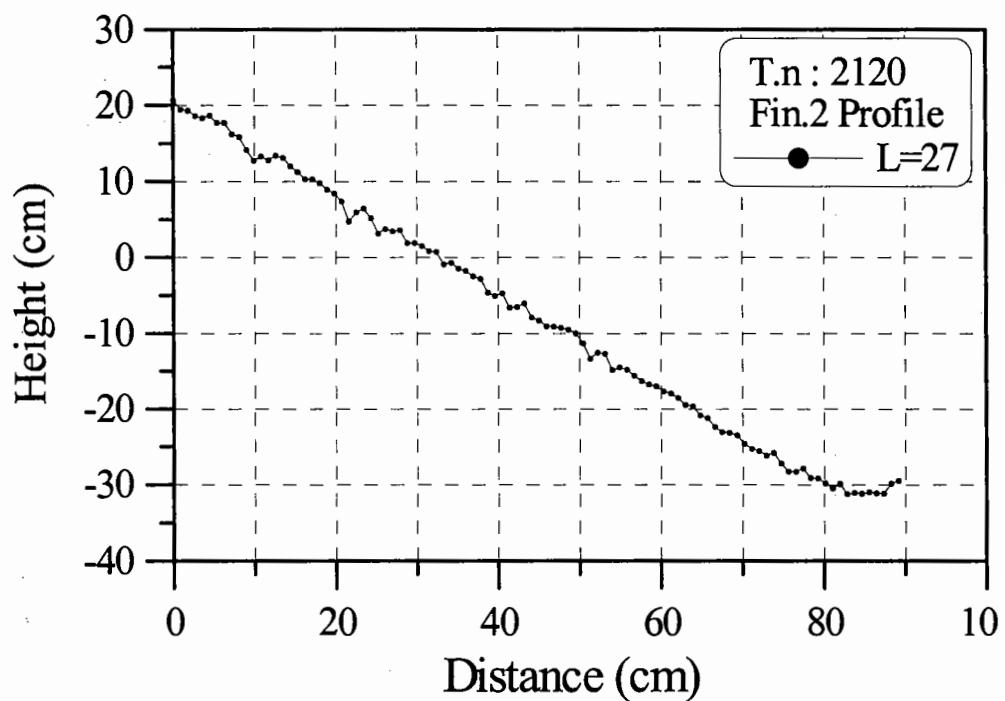


3-1안 1회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

3-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

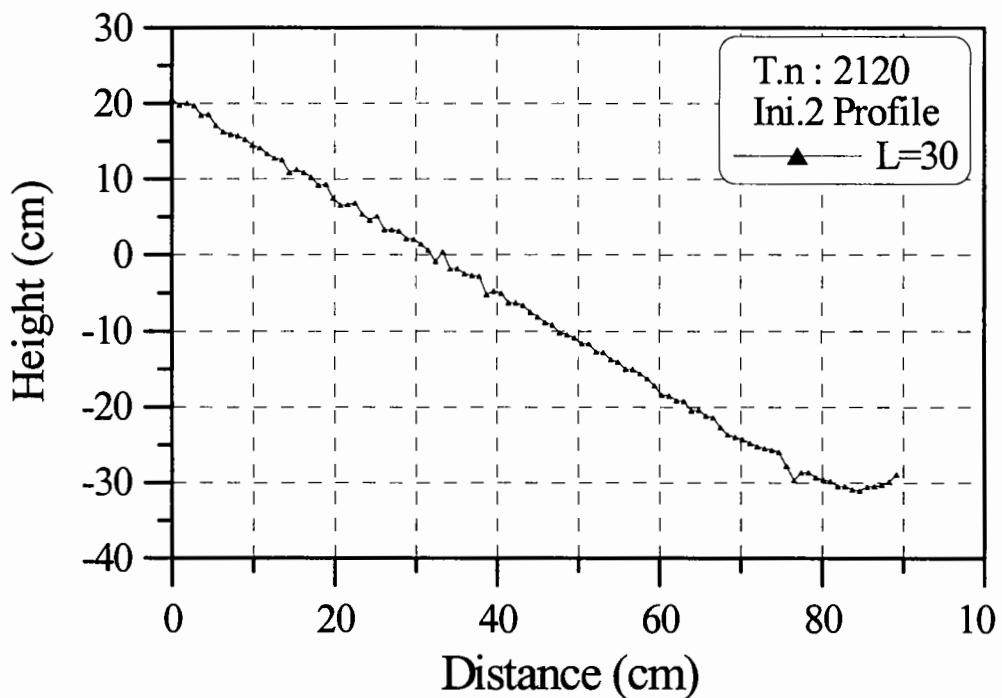


3-1안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

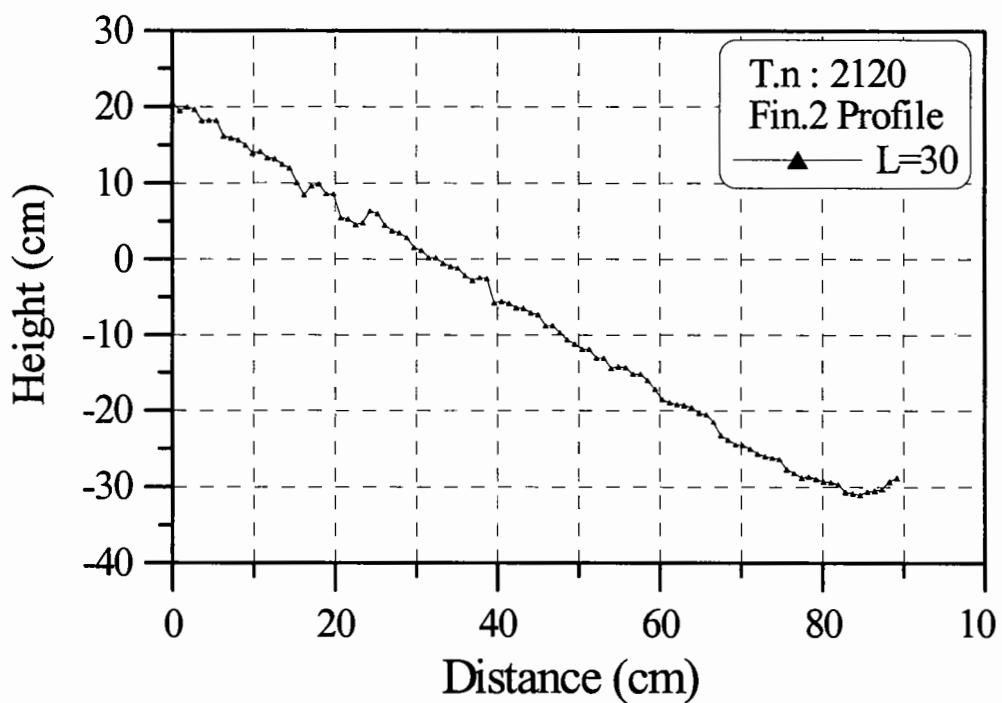


3-1안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

3-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

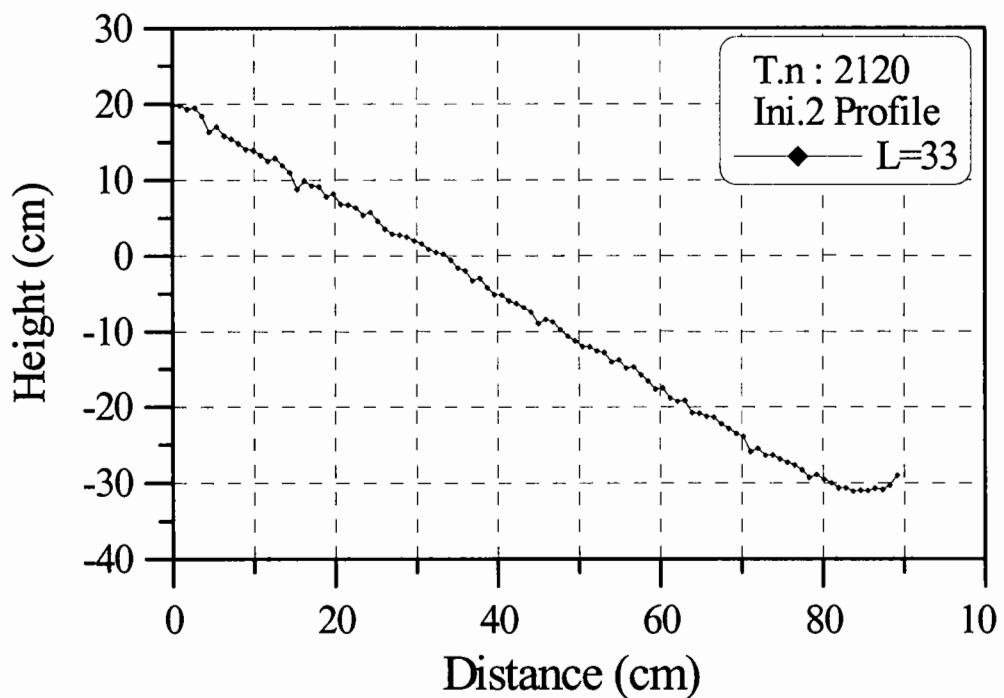


3-1안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

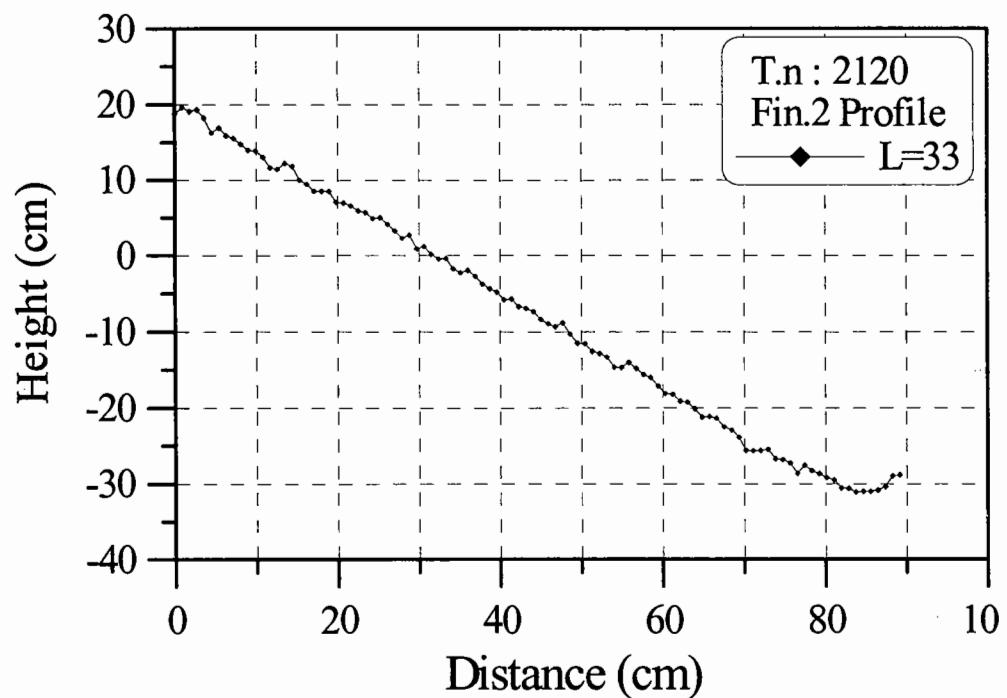


3-1안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

3-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

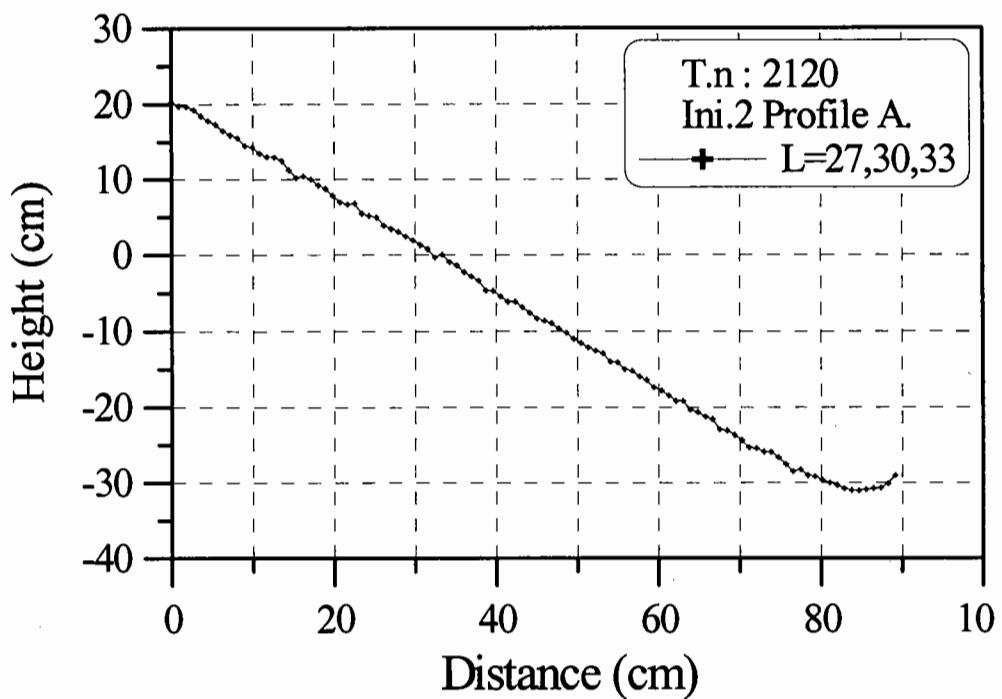


3-1안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

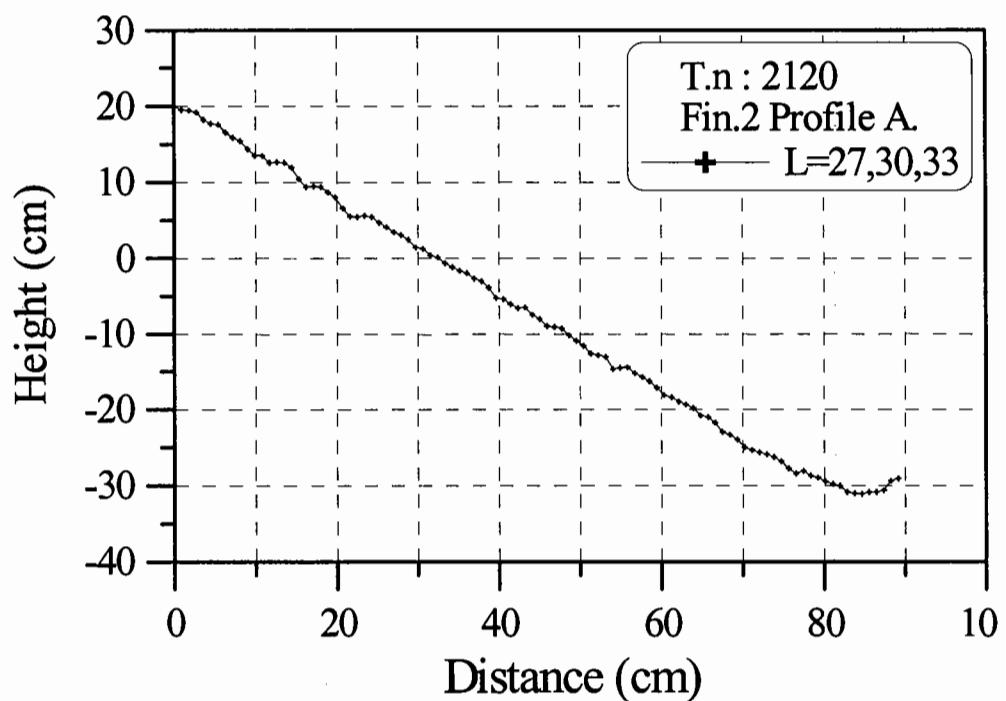


3-1안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

3-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

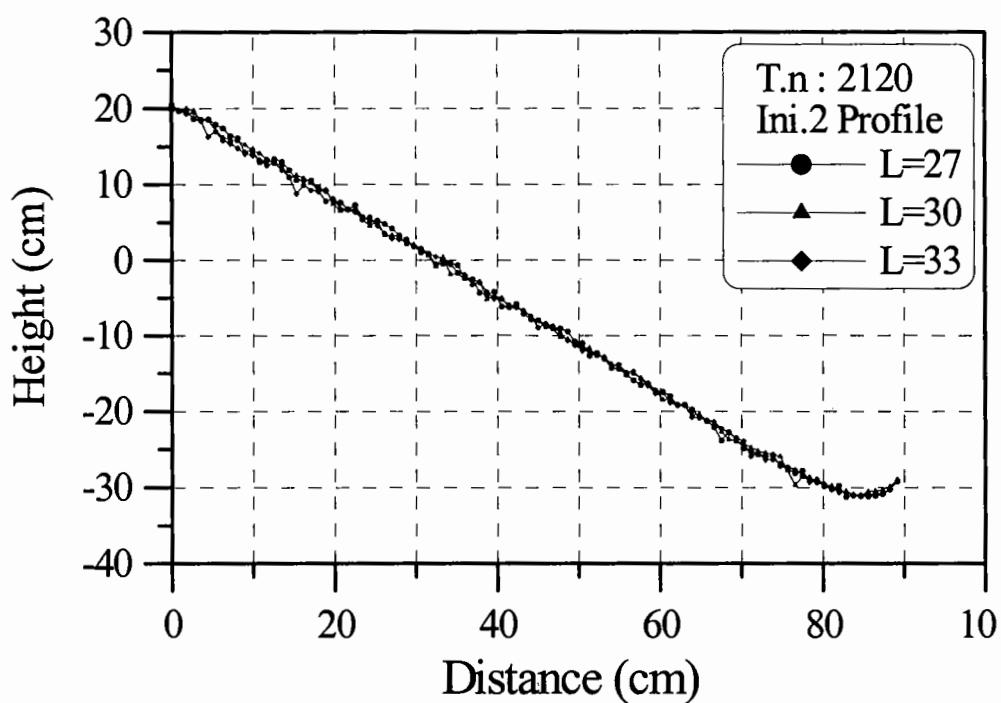


3-1안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

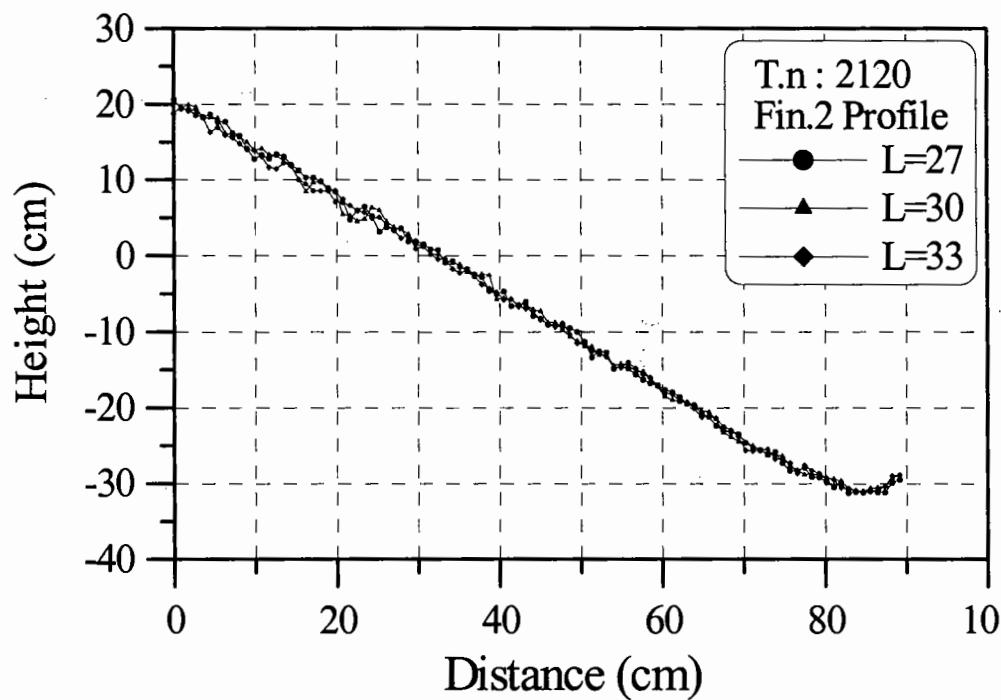


3-1안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

3-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

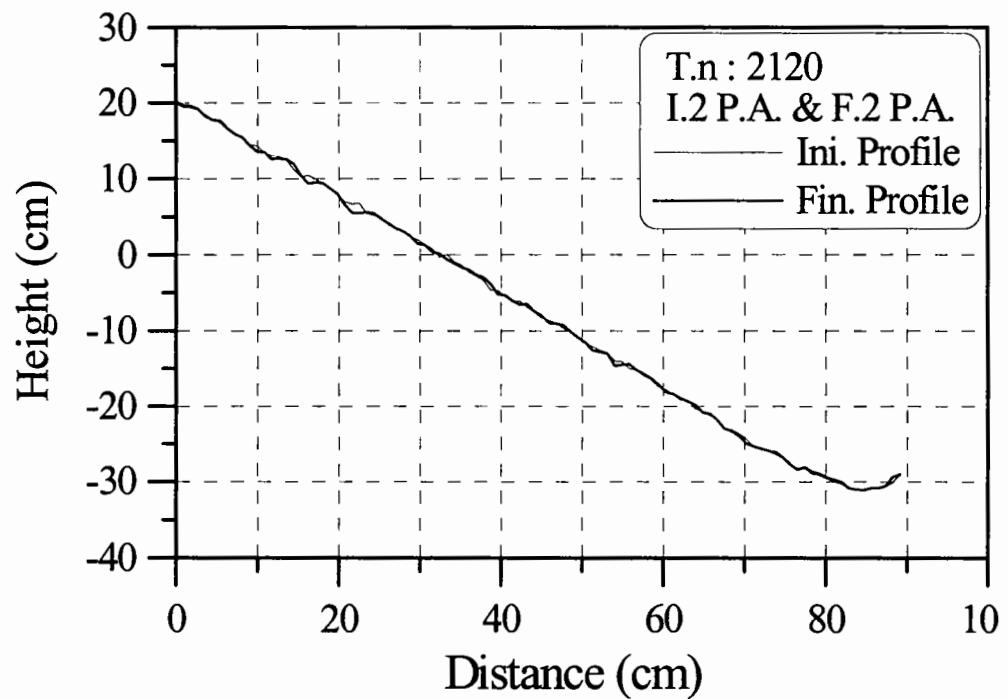


3-1안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

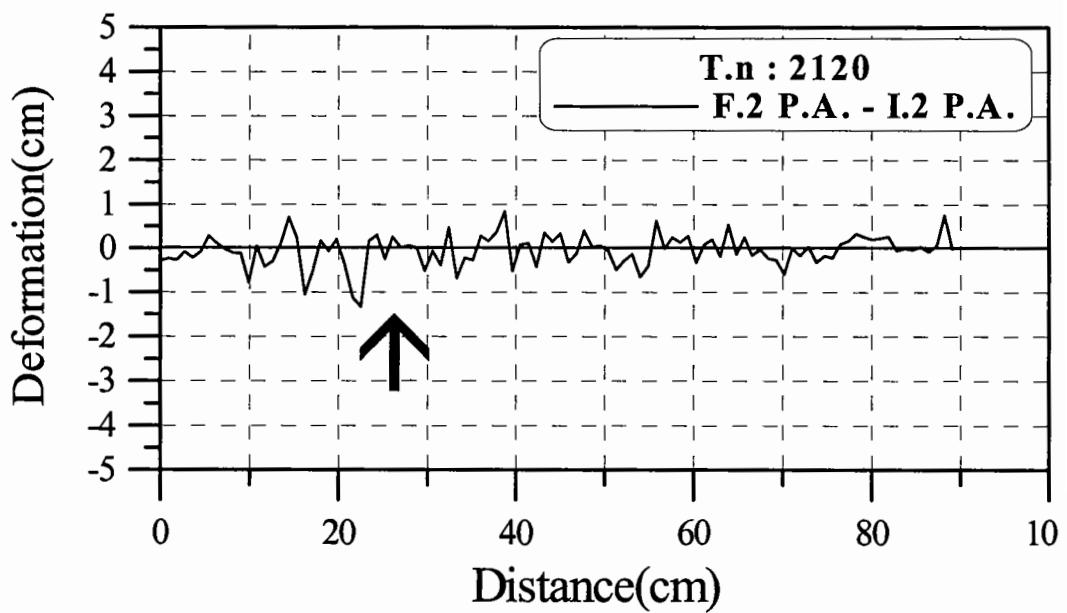


3-1안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

3-1안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

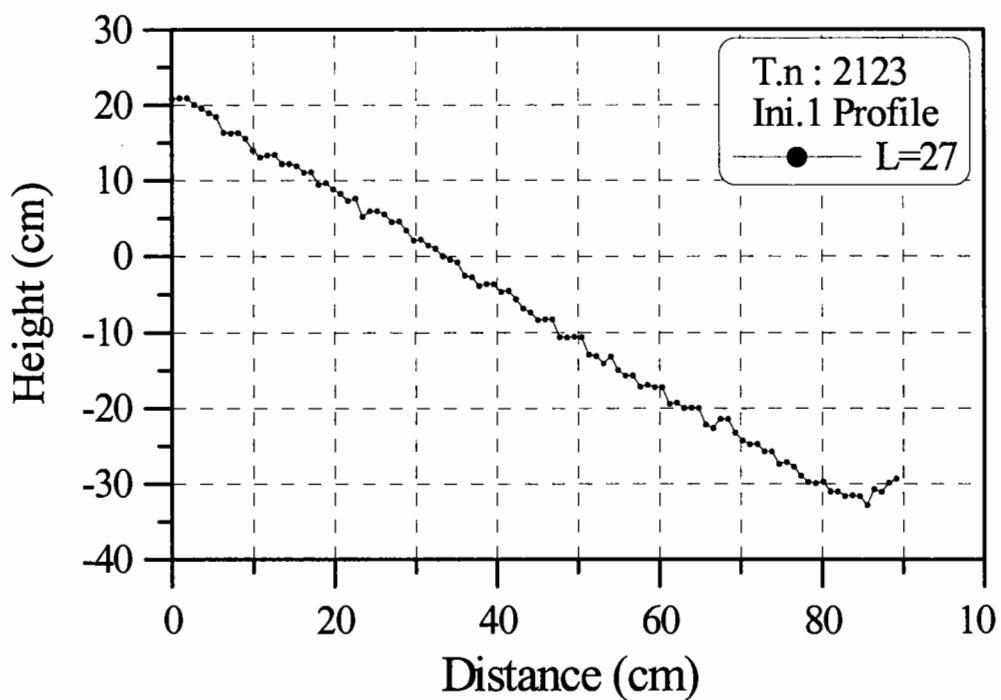


3-1안 2회 실험 피해전 · 후 필터층의 단면형상 평균의 비교

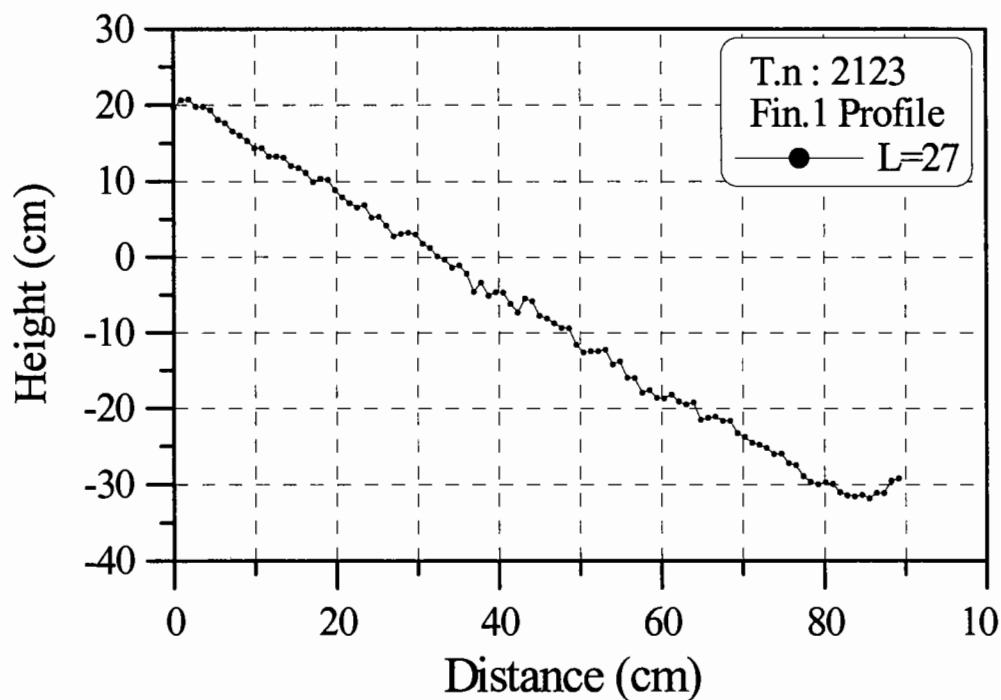


3-1안 2회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

3-2안의 중간파복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

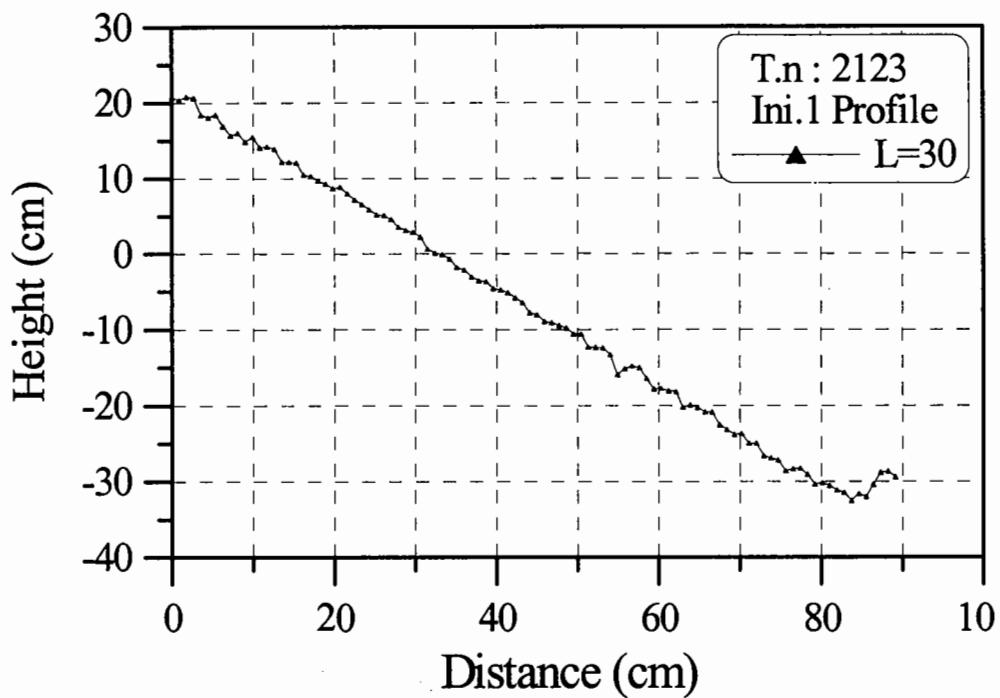


3-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

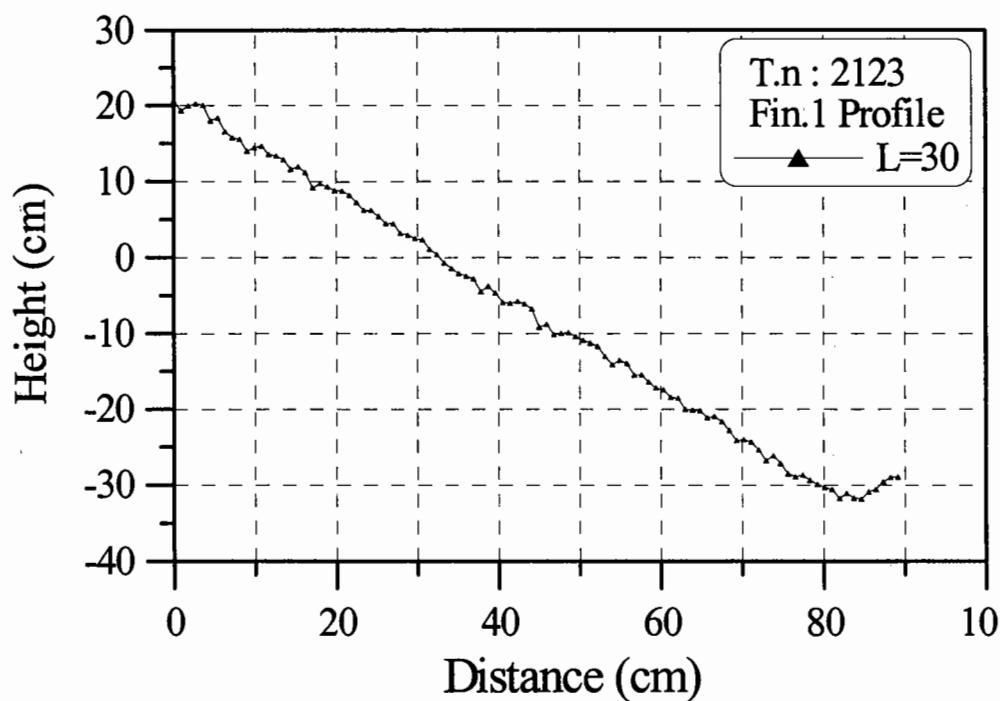


3-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

3-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

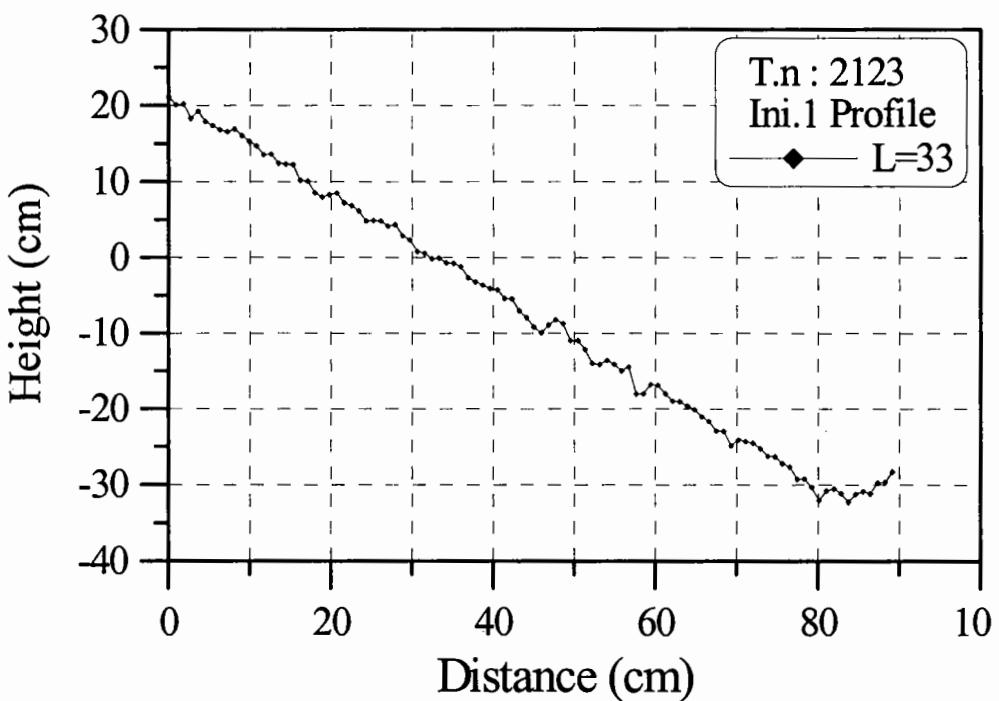


3-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

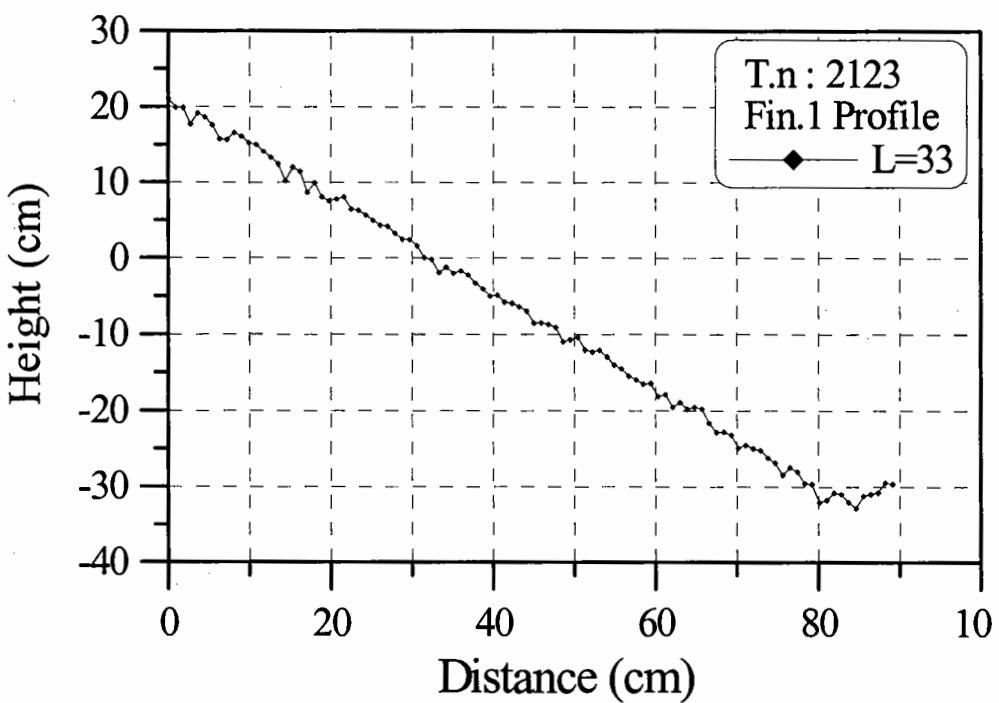


3-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

3-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

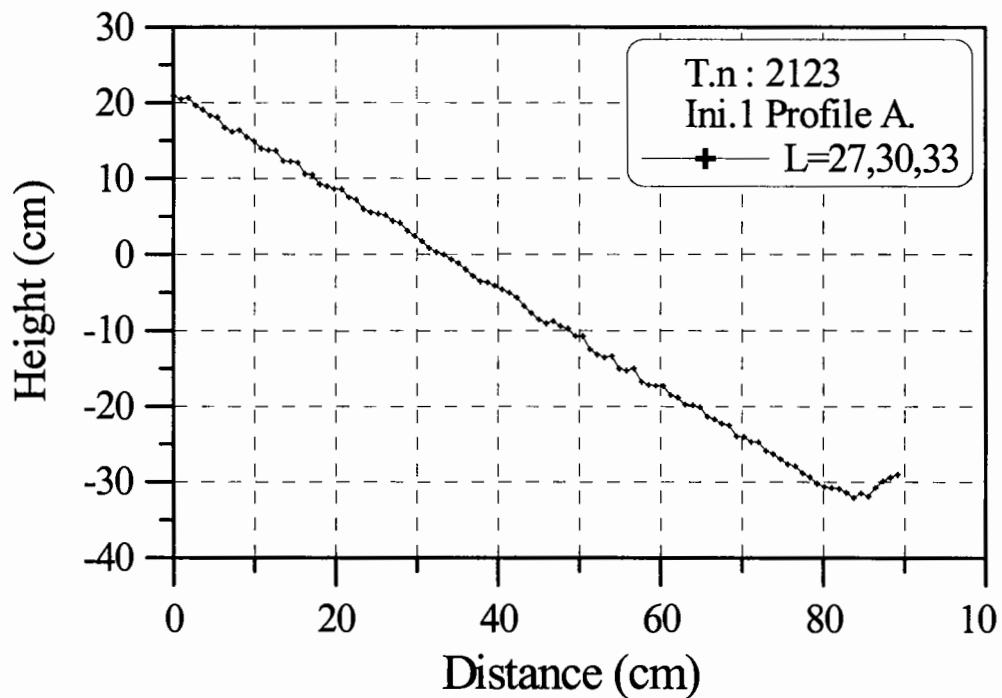


3-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

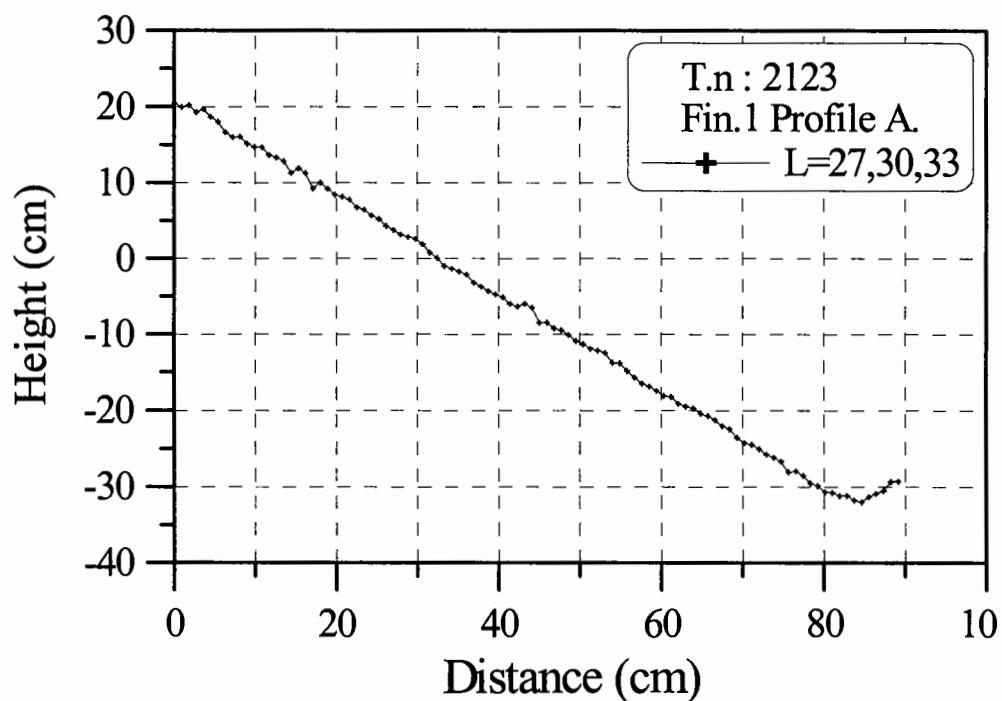


3-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

3-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

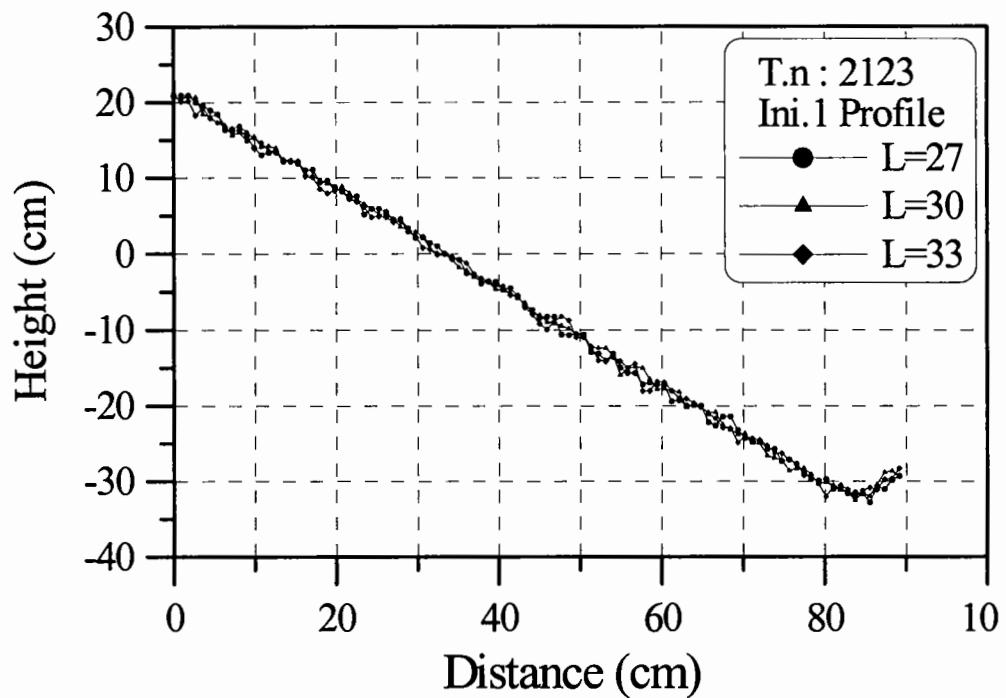


3-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

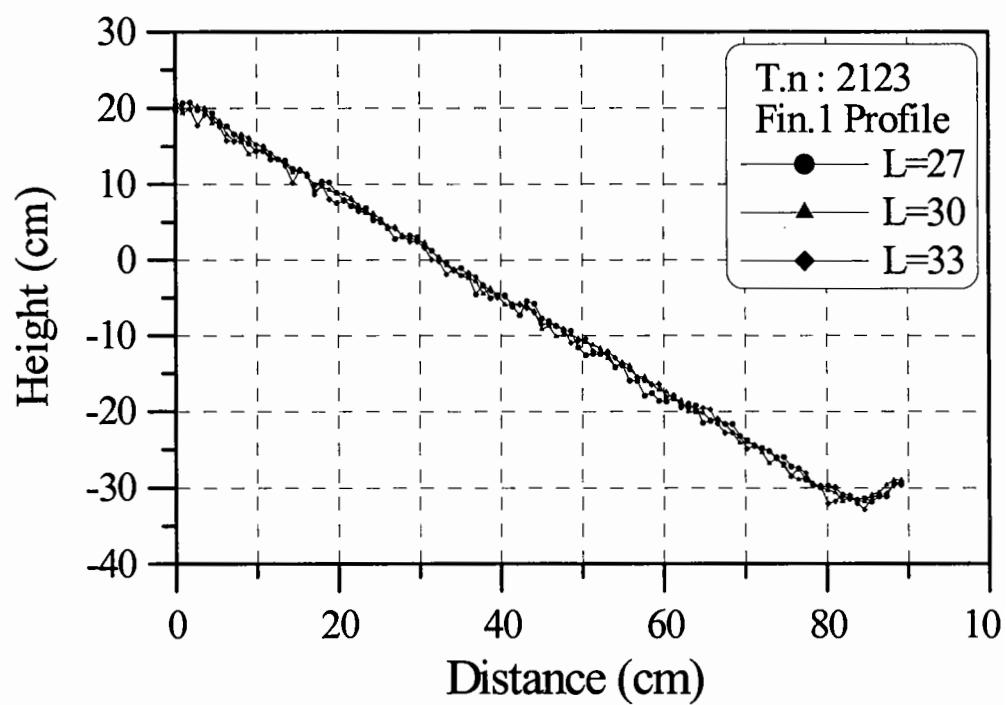


3-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

3-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

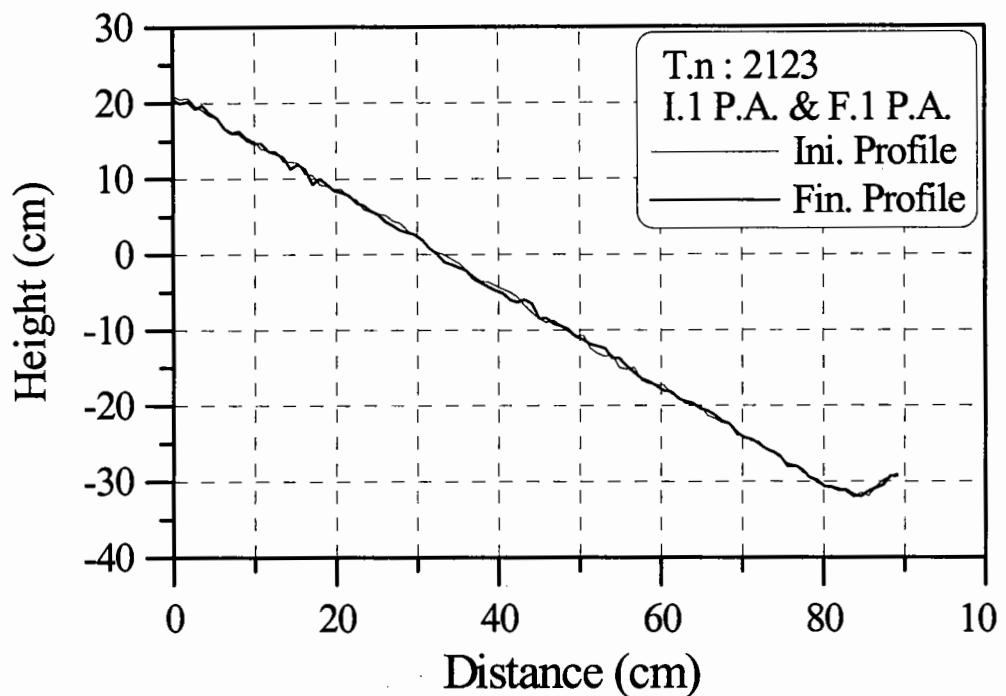


3-2안 1회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

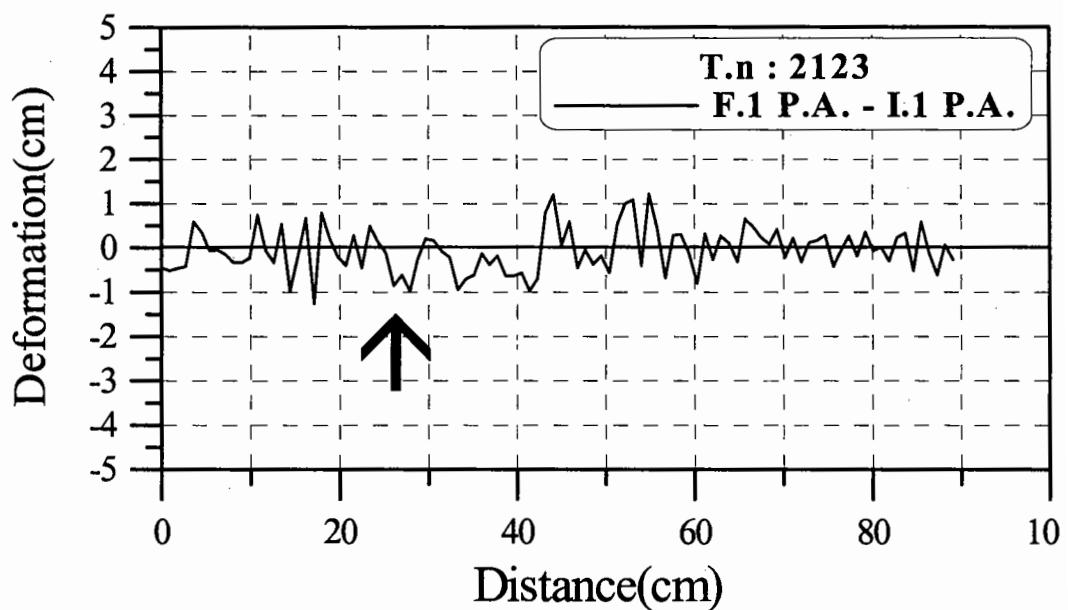


3-2안 1회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

3-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 1회

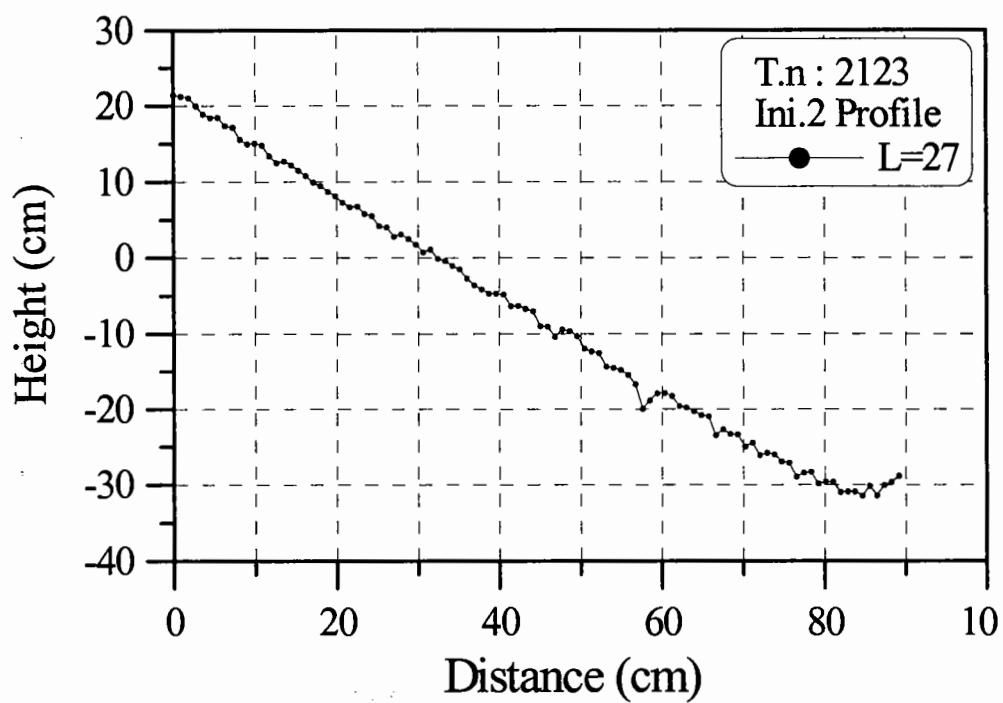


3-2안 1회 실험 피해전 · 후 필터층의 단면형상 평균의 비교

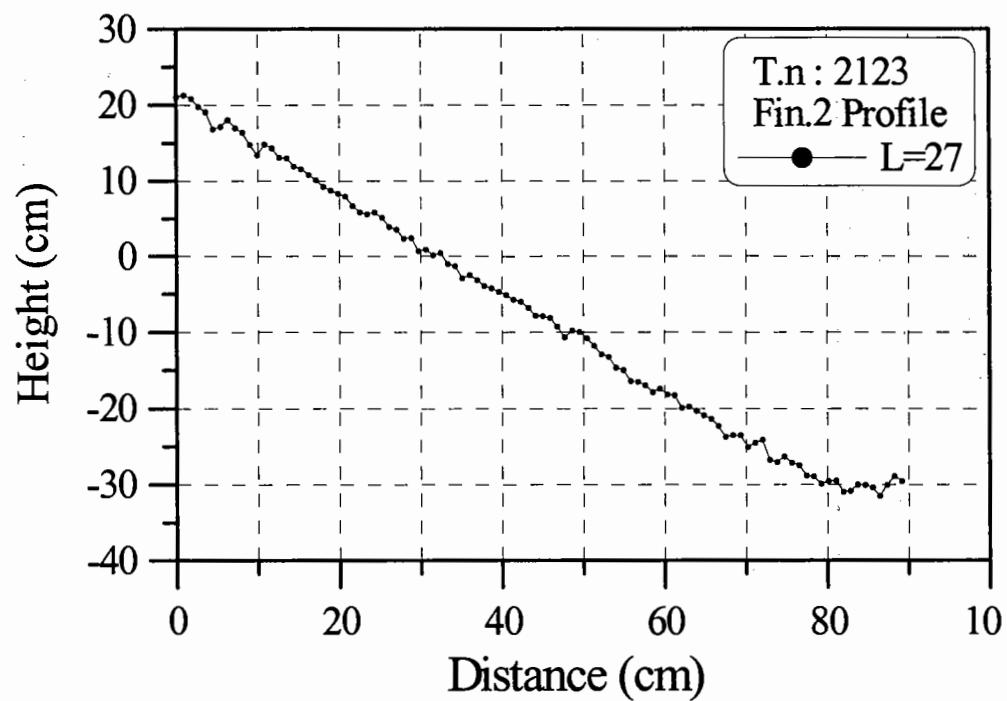


3-2안 1회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

3-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

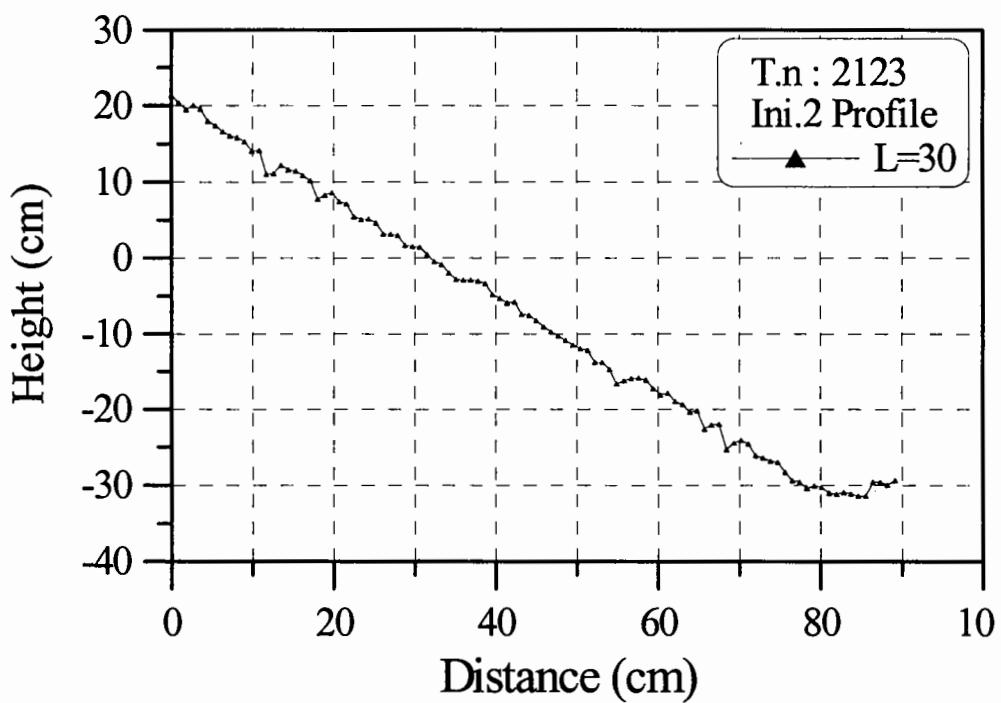


3-2안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1

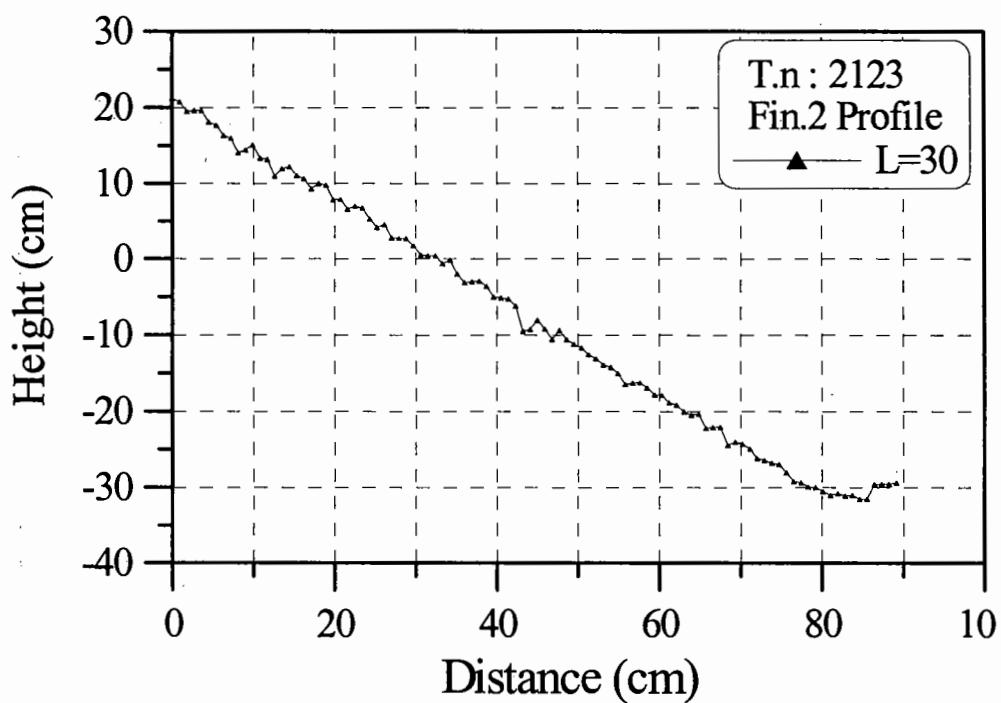


3-2안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1

3-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

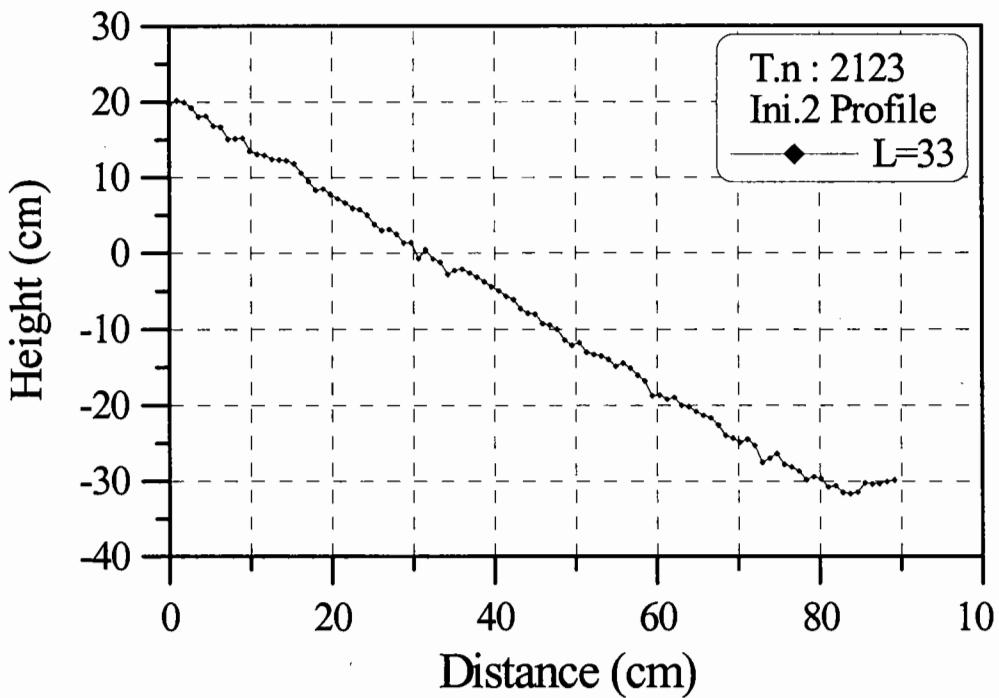


3-2안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2

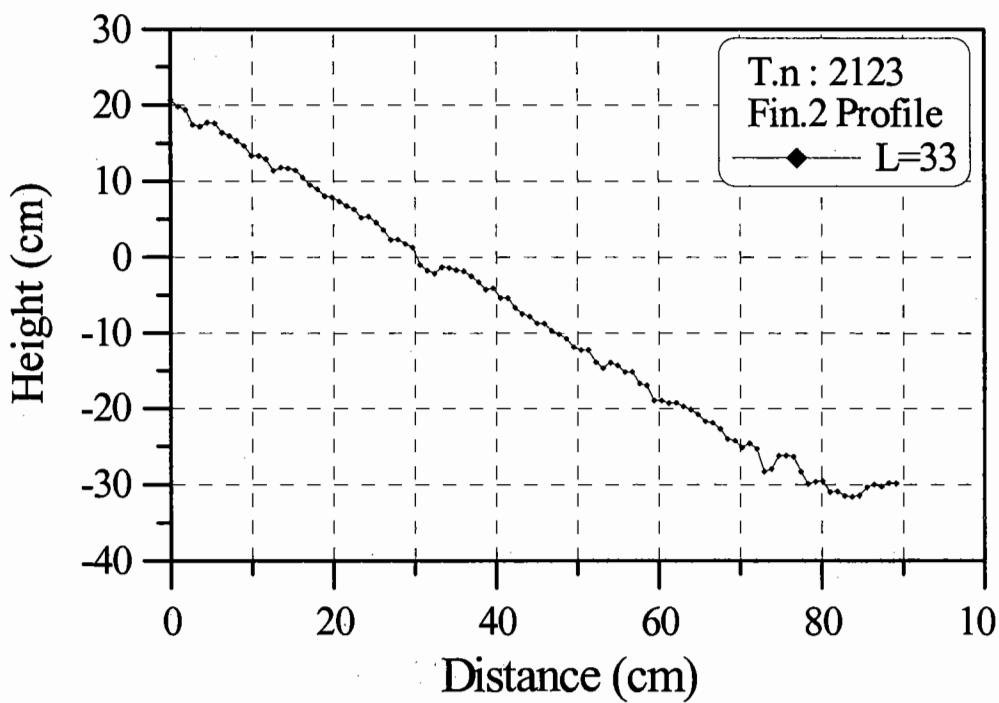


3-2안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2

3-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

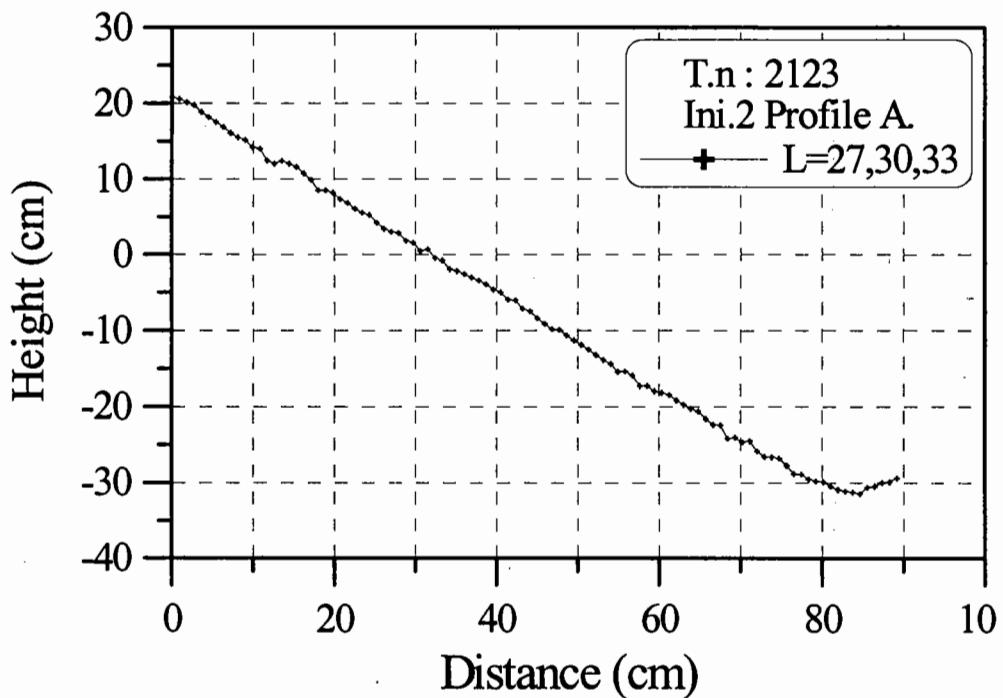


3-2안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3

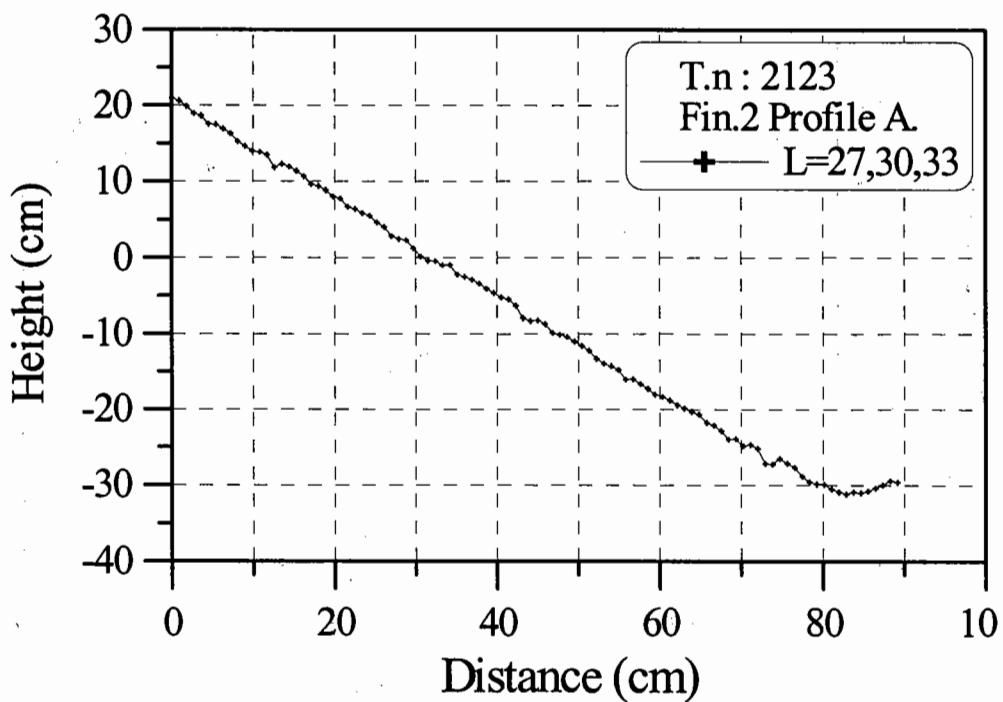


3-2안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3

3-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

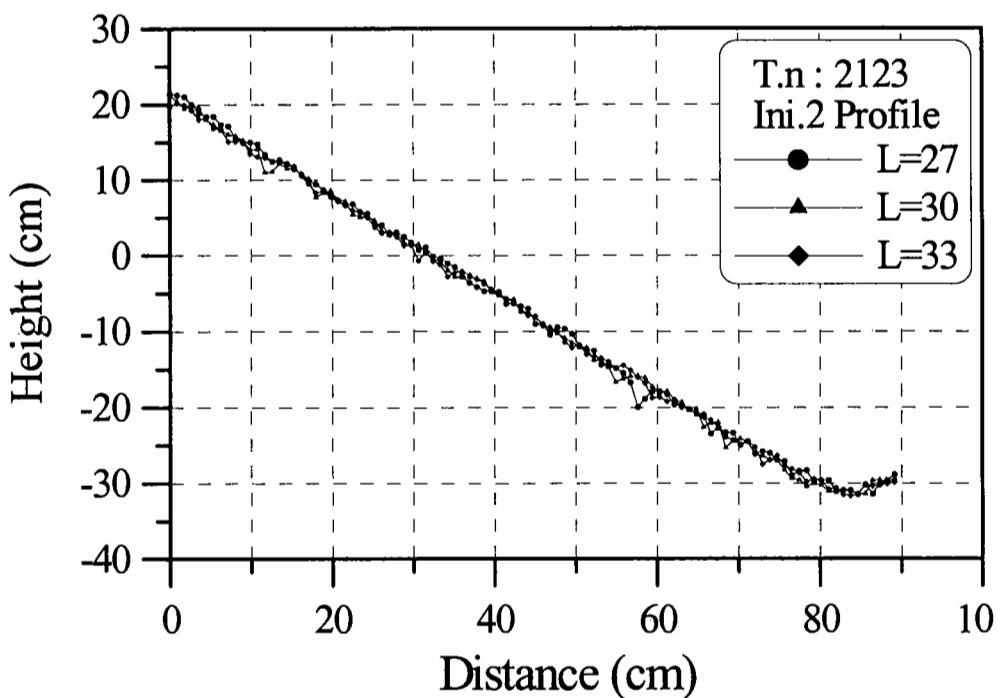


3-2안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균

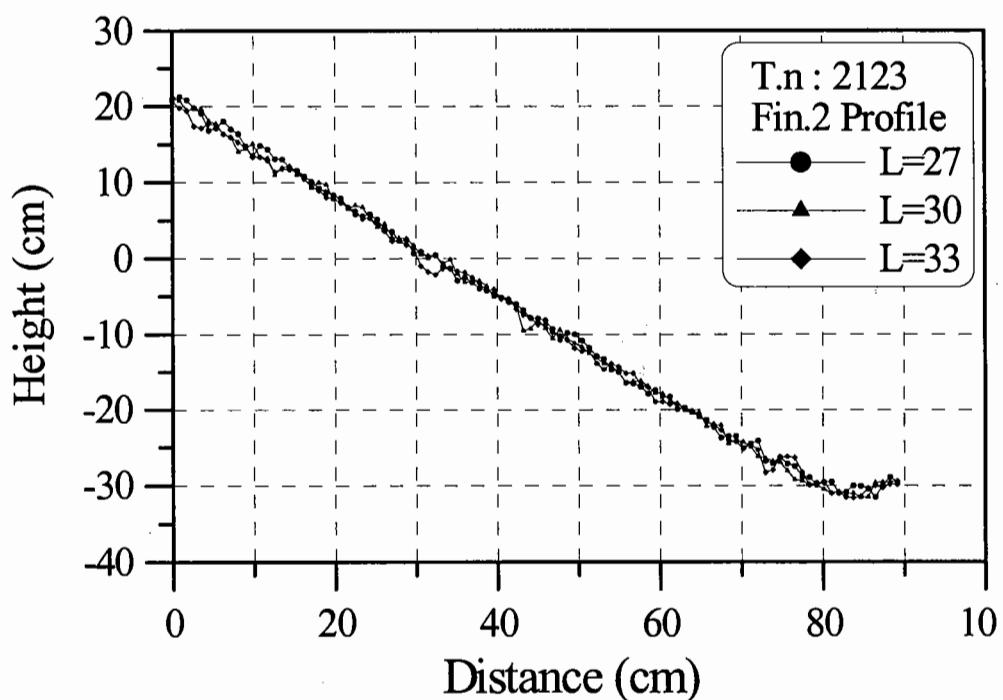


3-2안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균

3-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

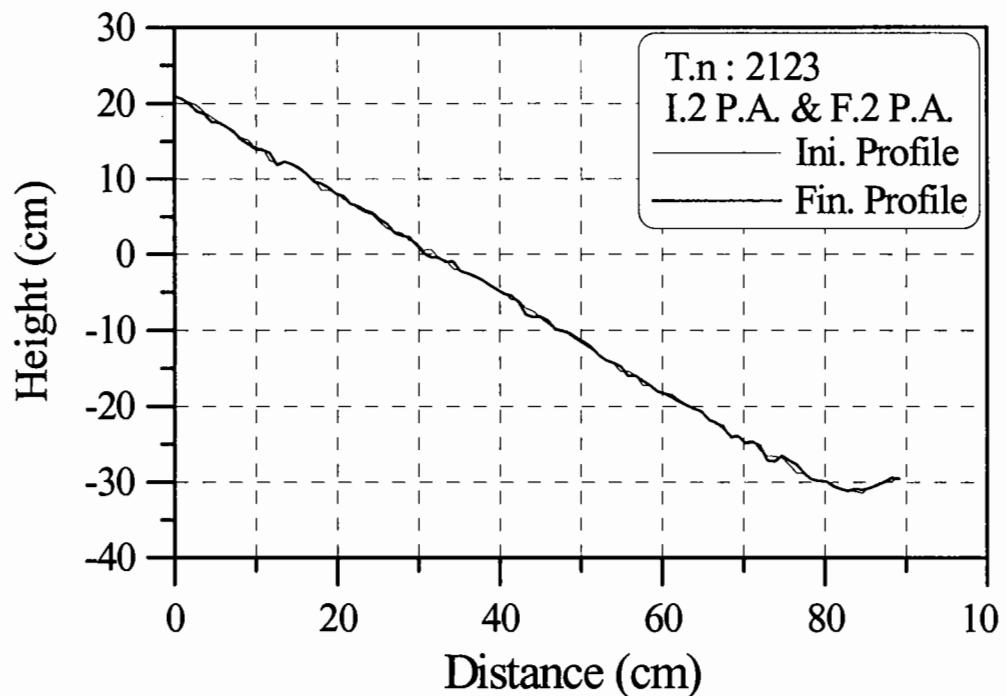


3-2안 2회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교

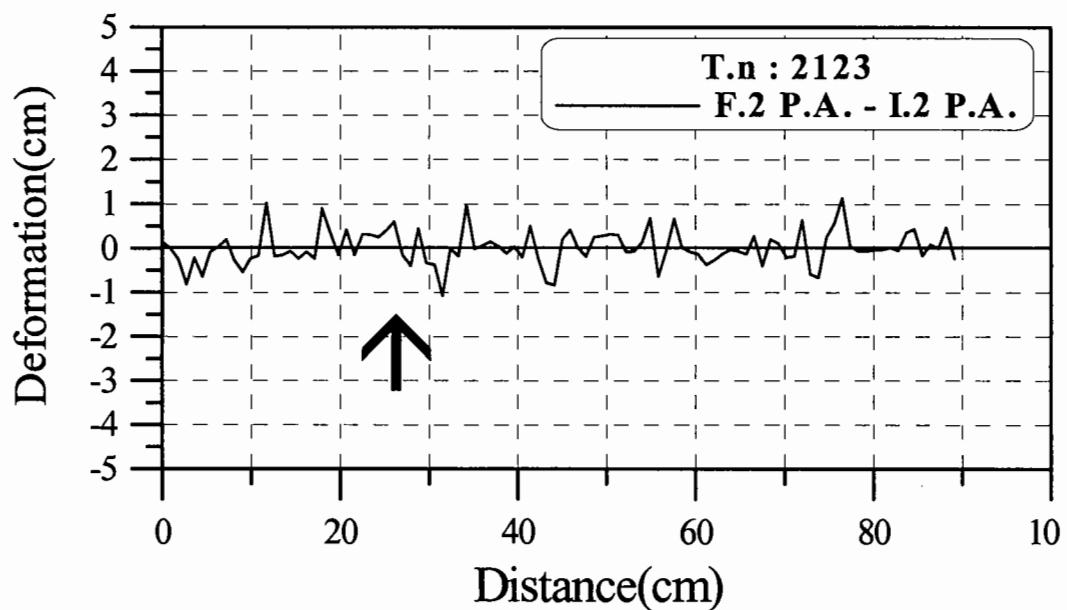


3-2안 2회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교

3-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 2회

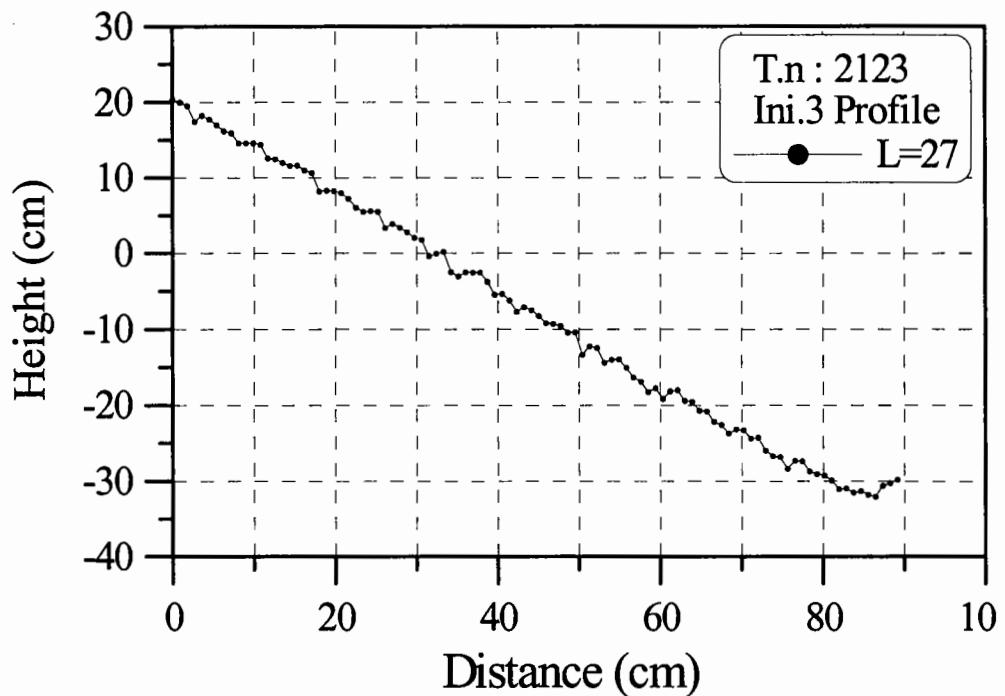


3-2안 2회 실험 피해전 · 후 필터층의 단면형상 평균의 비교

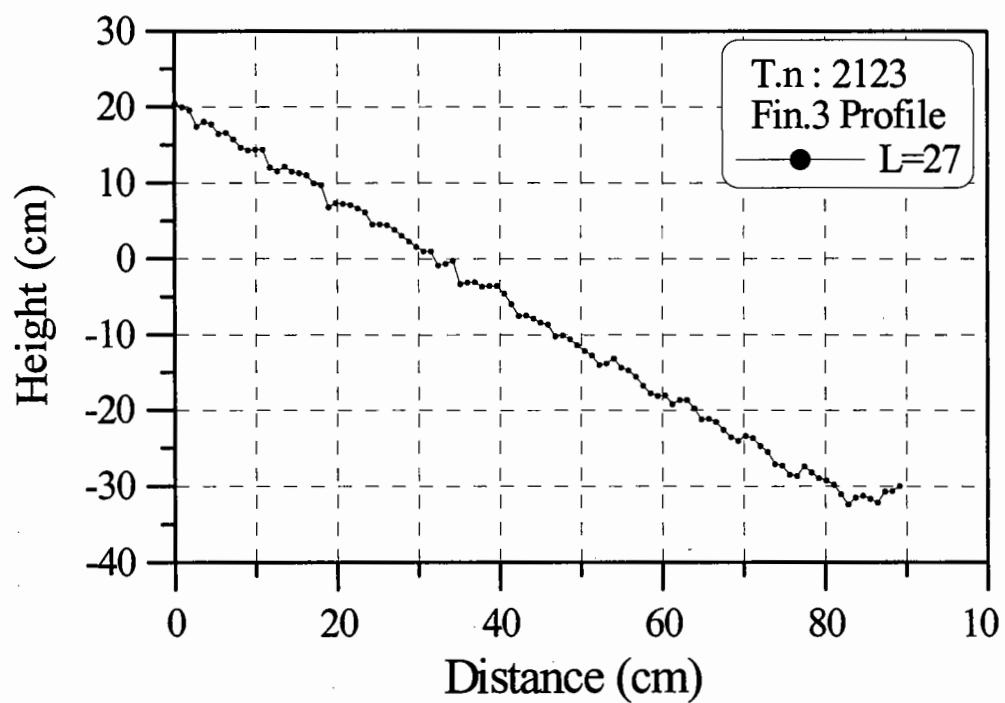


3-2안 2회 실험후 필터층의 연직방향 변형량

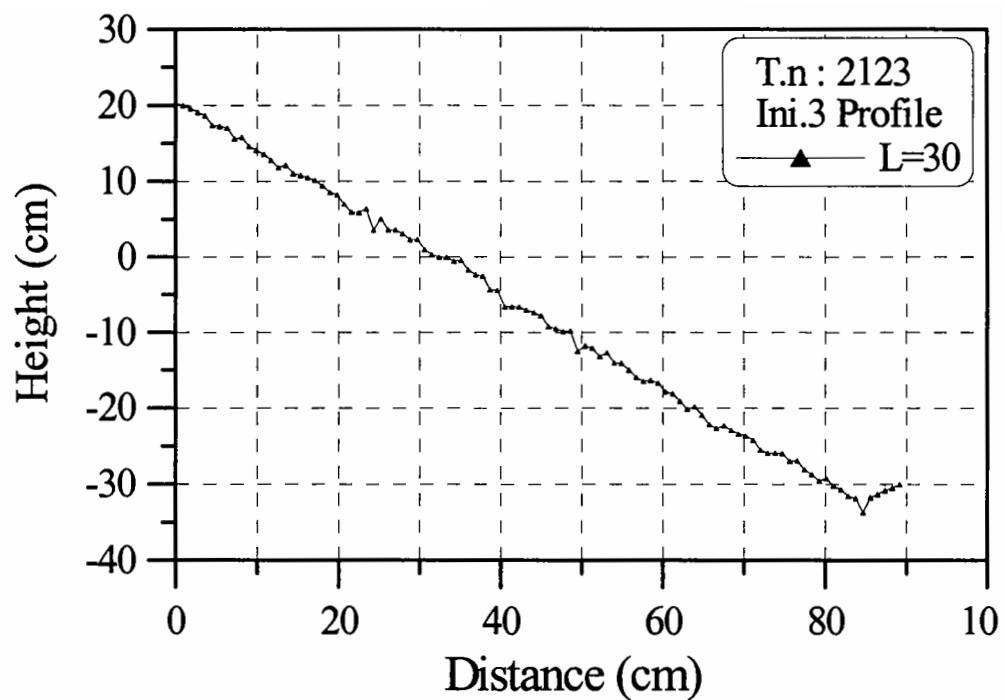
3-2안의 중간피복층의 연직방향 변형 실험결과 3회



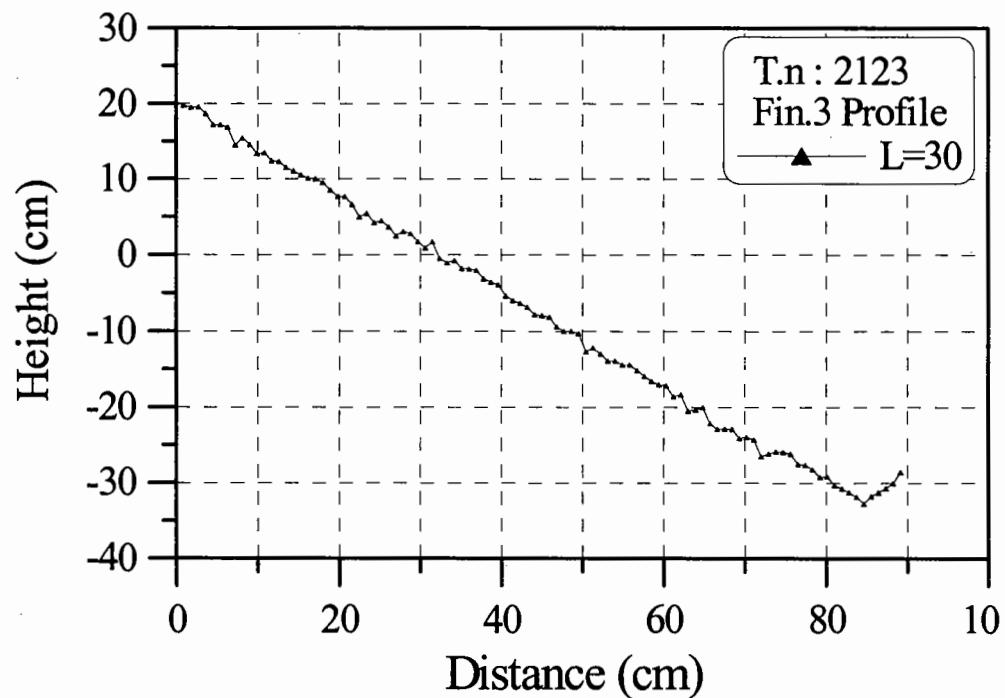
3-2안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 1



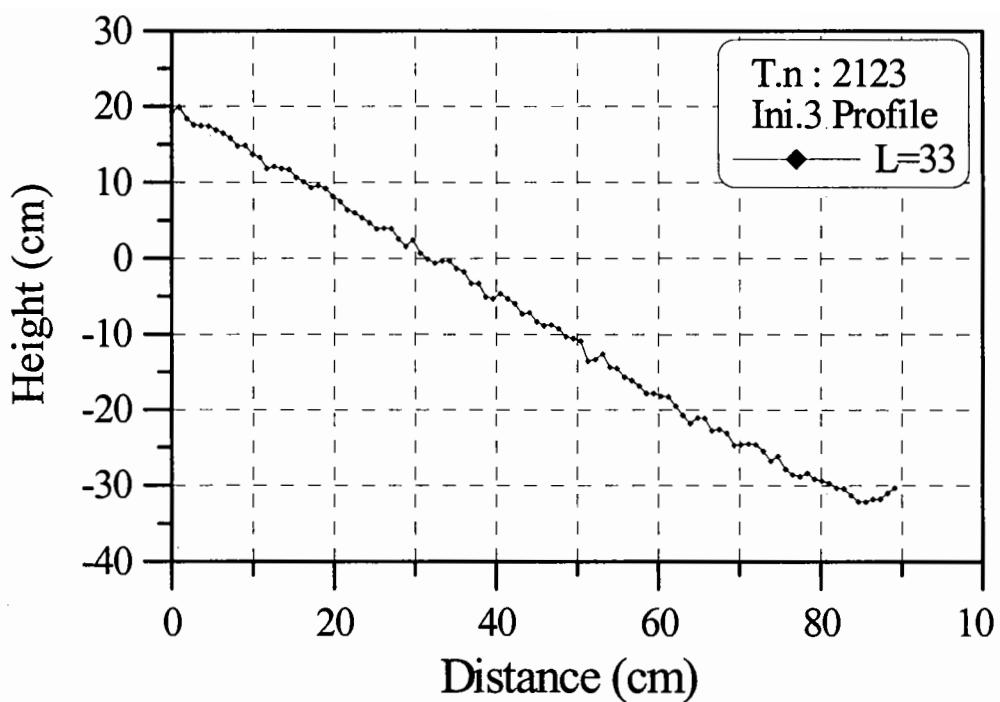
3-2안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 1



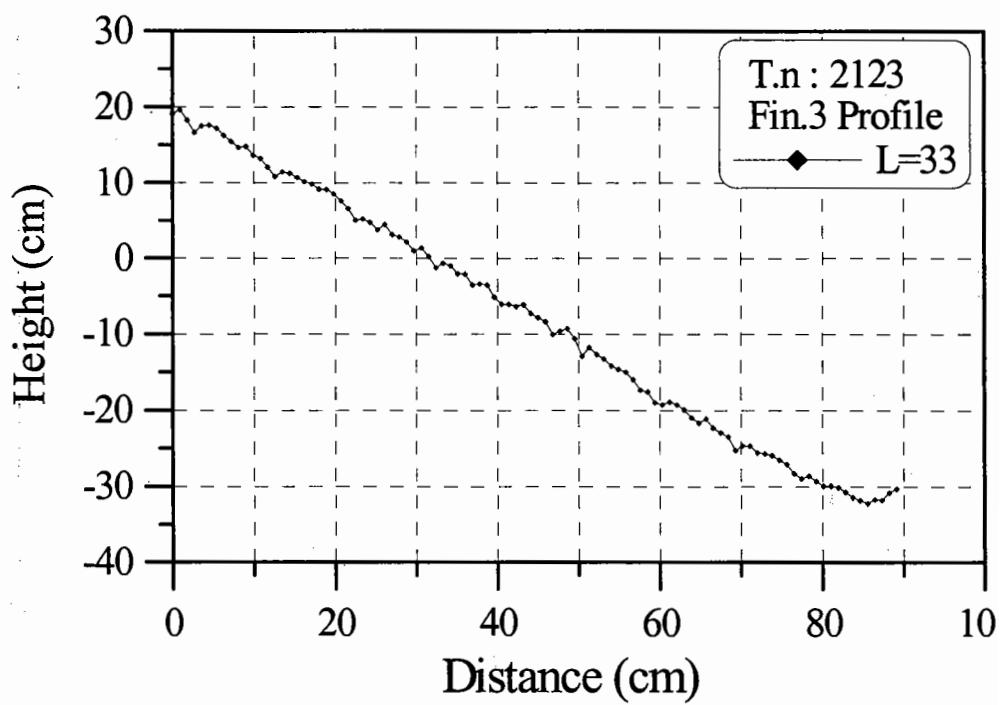
3-2안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 2



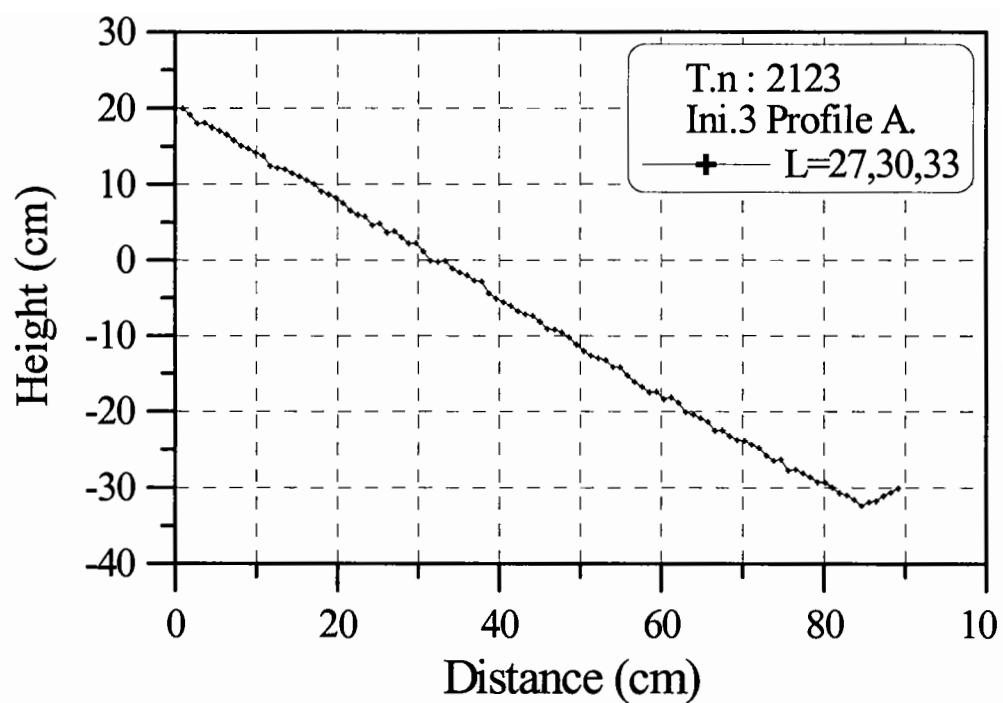
3-2안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 2



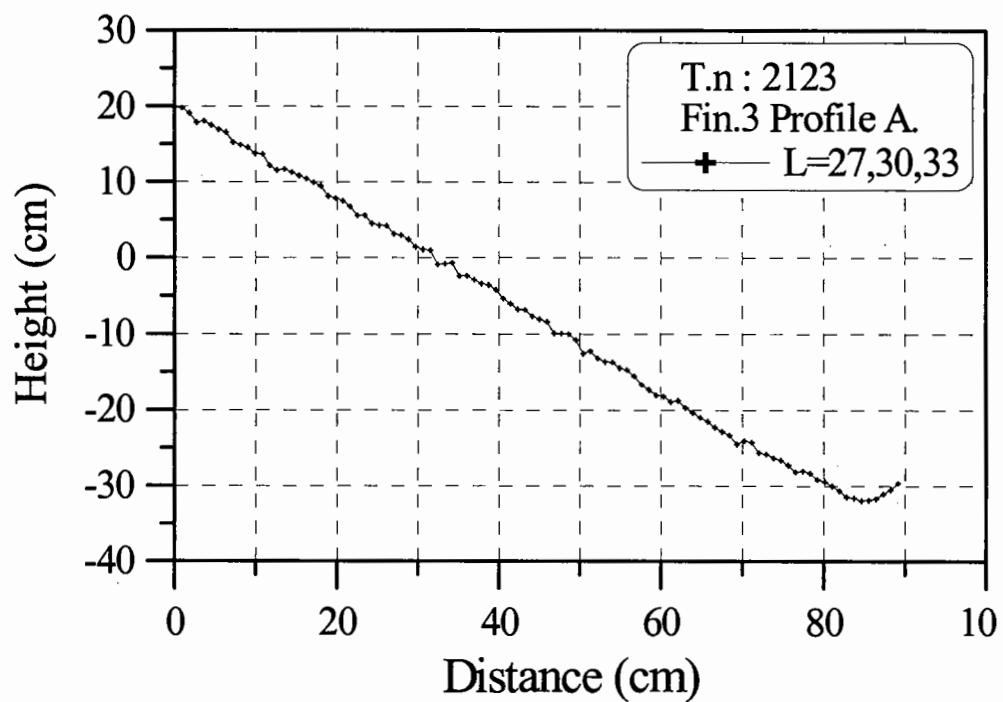
3-2안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 3



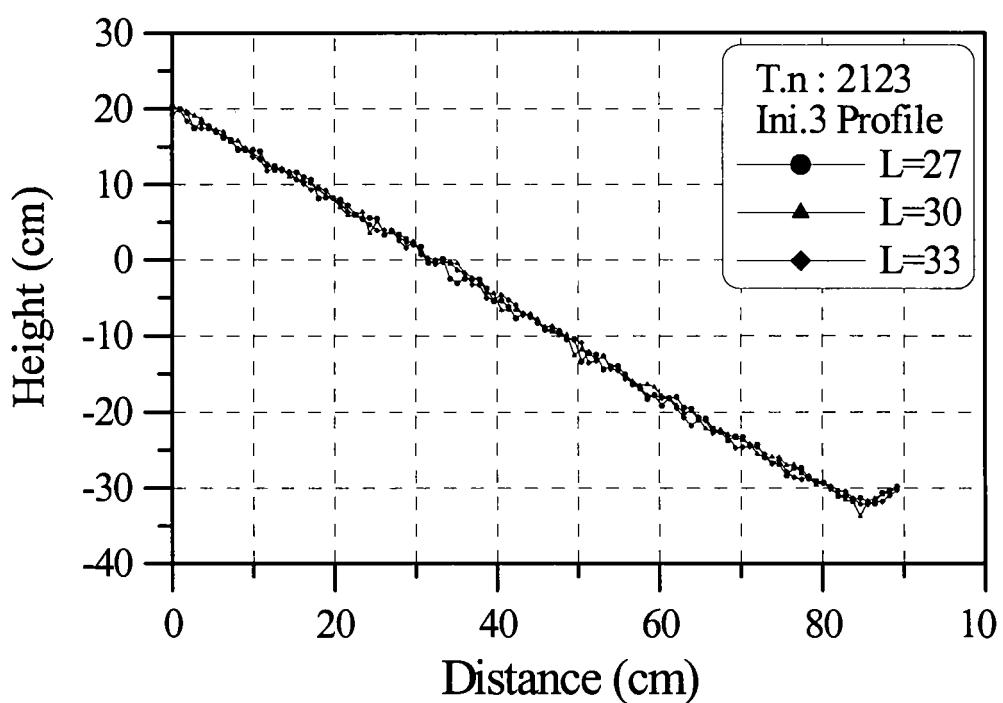
3-2안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 3



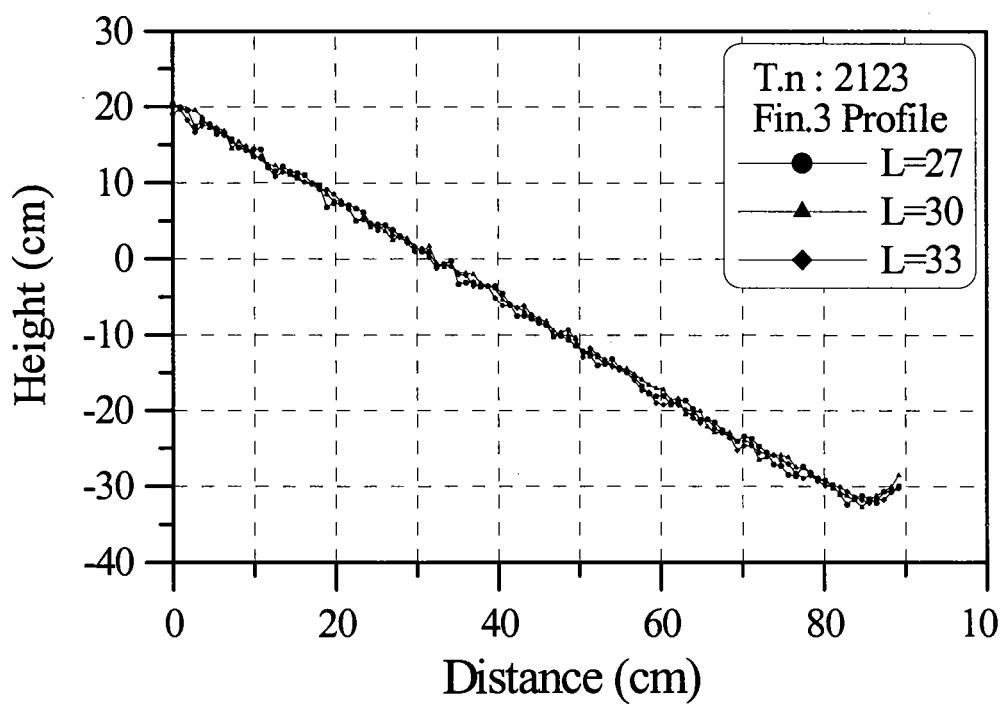
3-2안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 평균



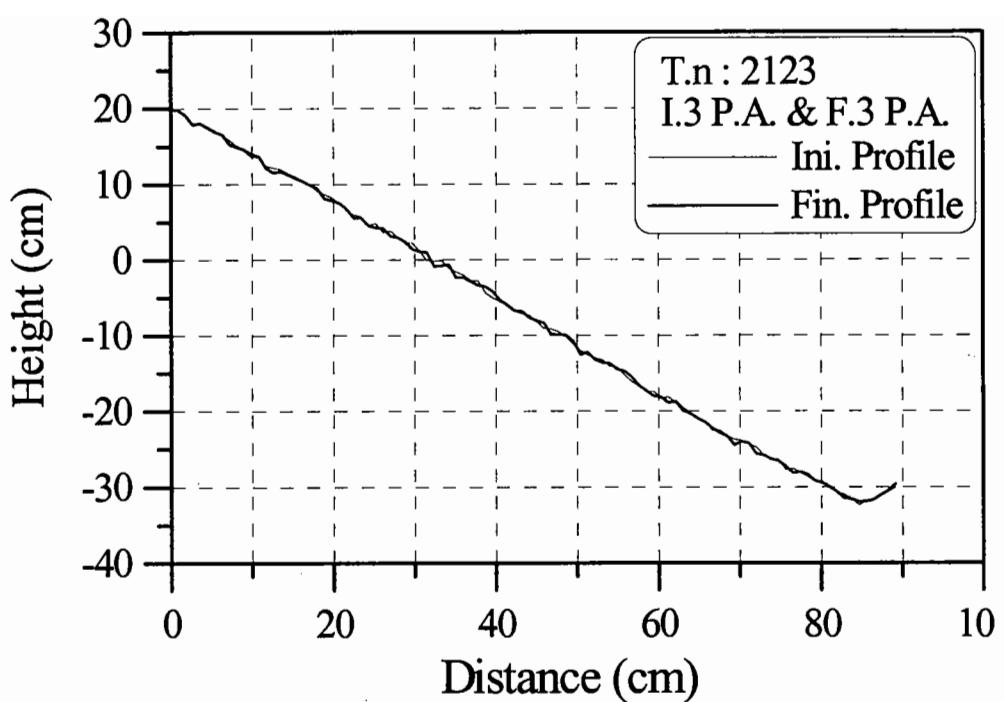
3-2안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 평균



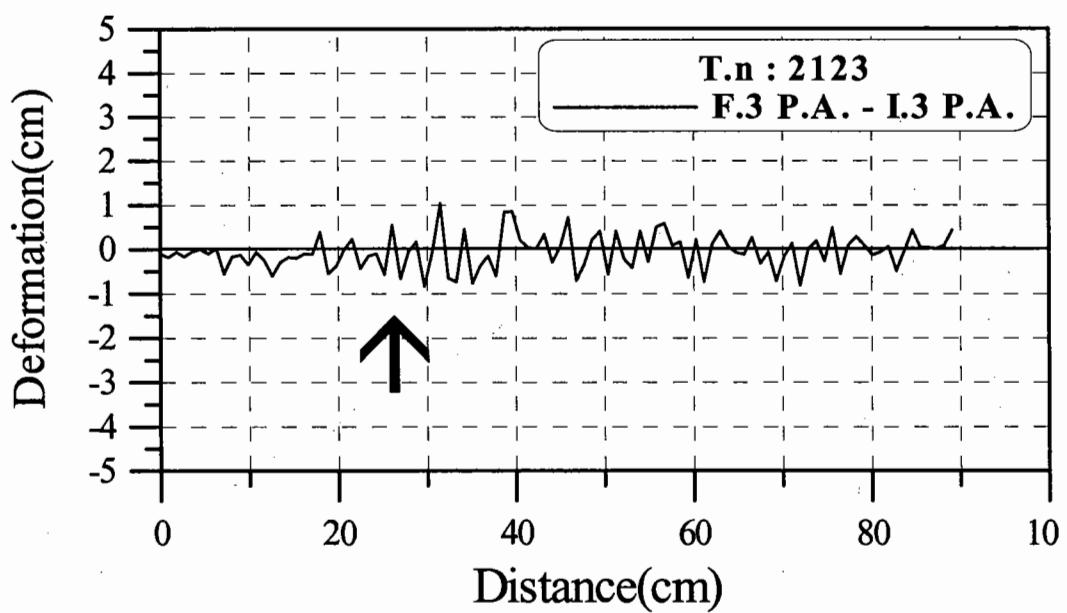
3-2안 3회 실험 피해전 필터층의 단면형상 비교



3-2안 3회 실험 피해후 필터층의 단면형상 비교



3-2안 3회 실험 피해전·후 필터총의 단면형상 평균의 비교

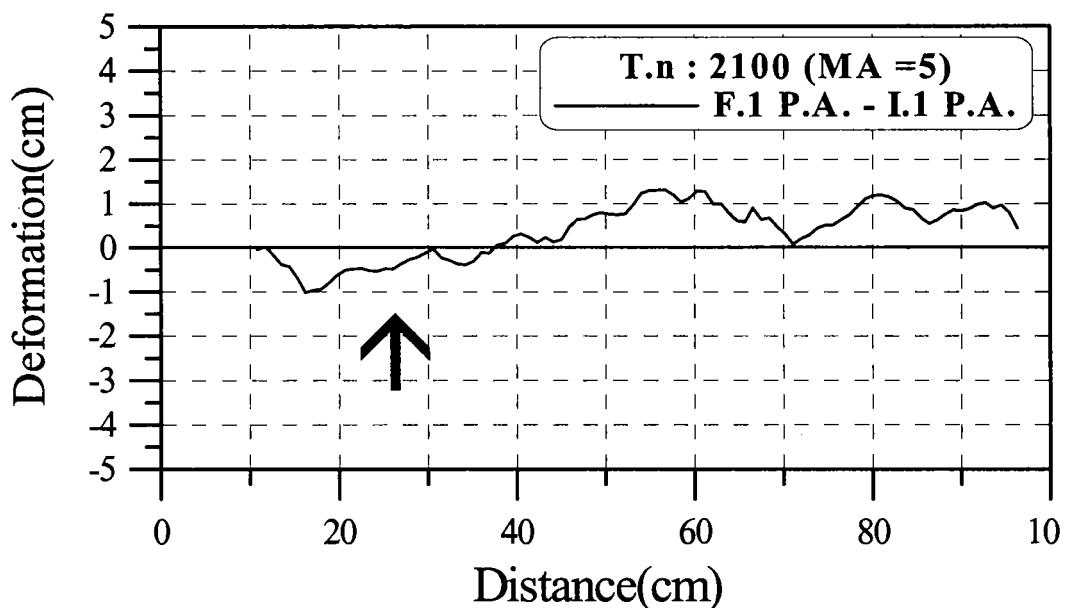


3-2안 3회 실험후 필터총의 연직방향 변형량

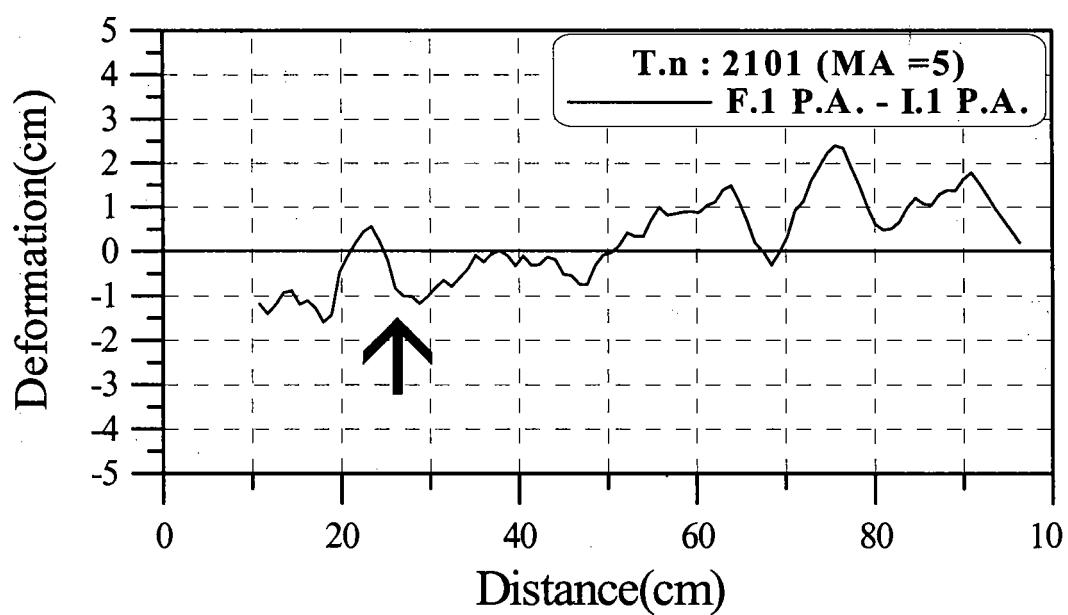
부 록 2

중간피복층의 연직방향 변형량

필터층 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림

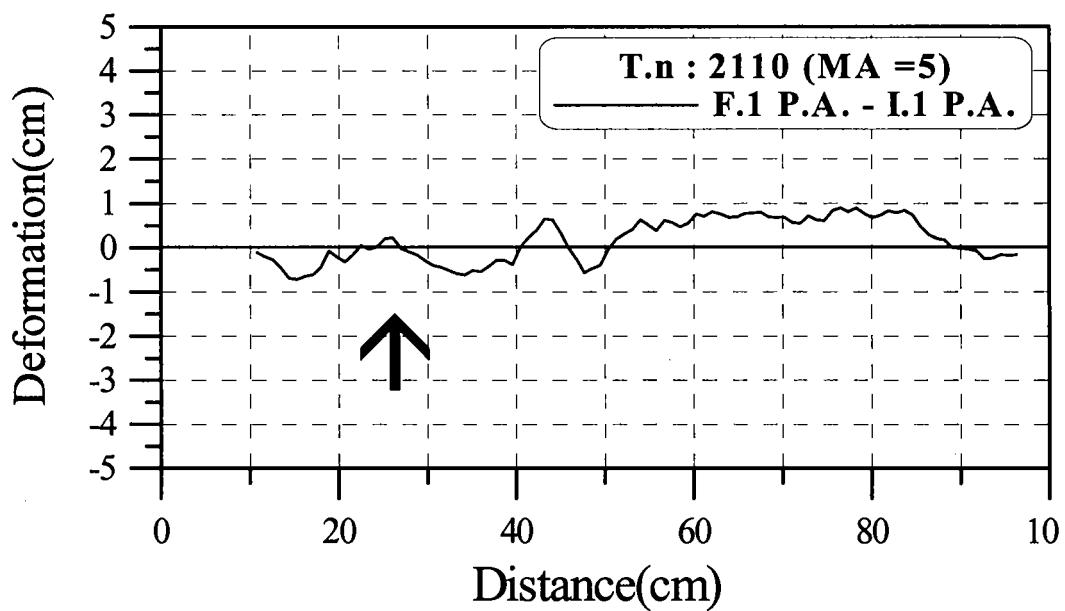


1-1안의 필터층 연직방향 변형량 1회차 실험결과의 이동평균

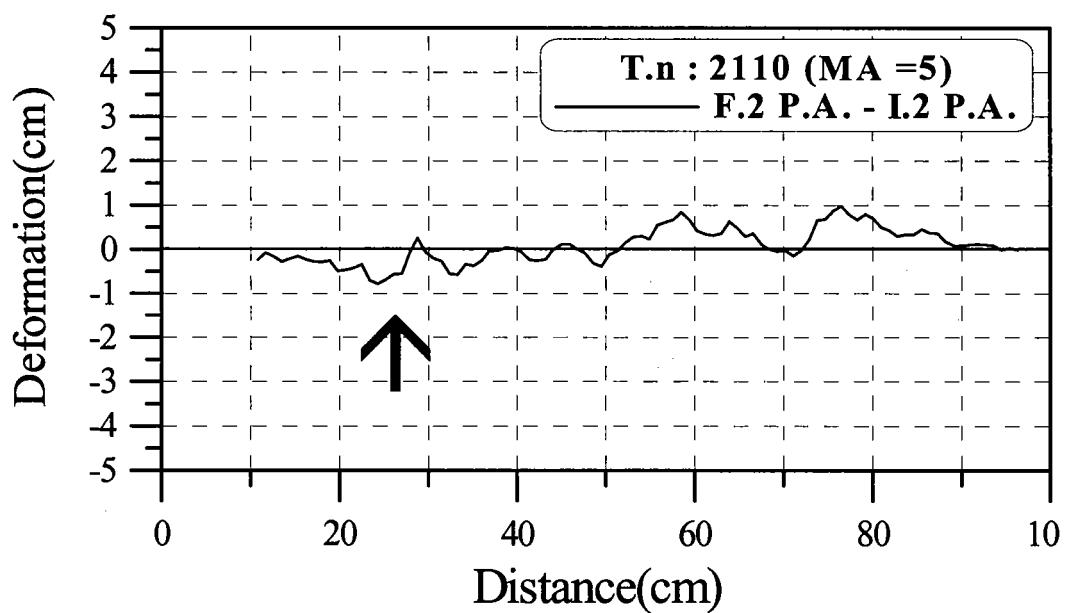


1-2안의 필터층 연직방향 변형량 1회차 실험결과의 이동평균

필터층 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림

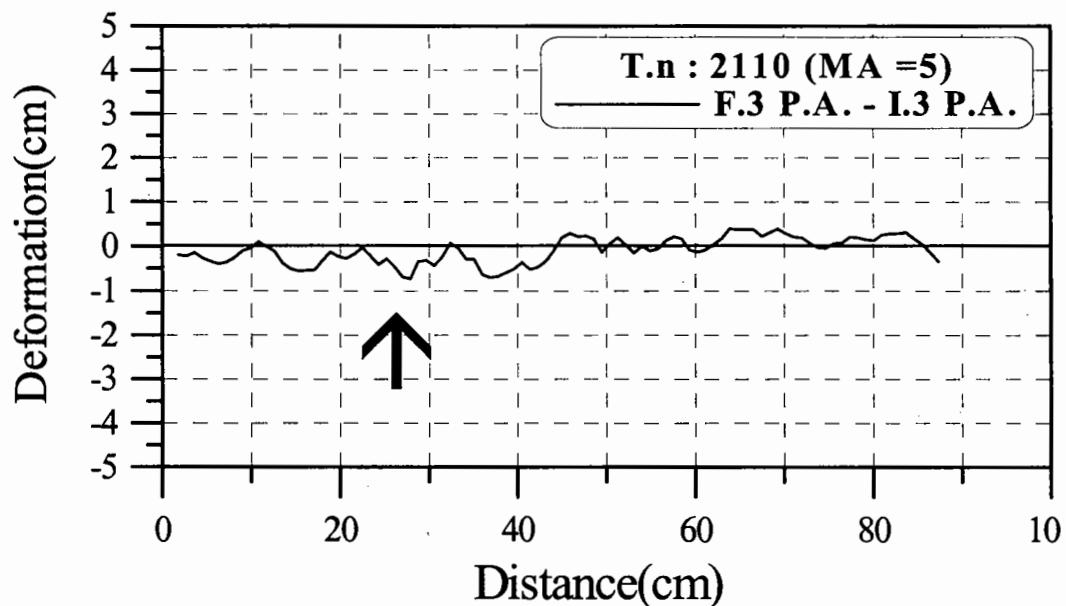


2-1안의 필터층 연직방향 변형량 1회차 실험결과의 이동평균

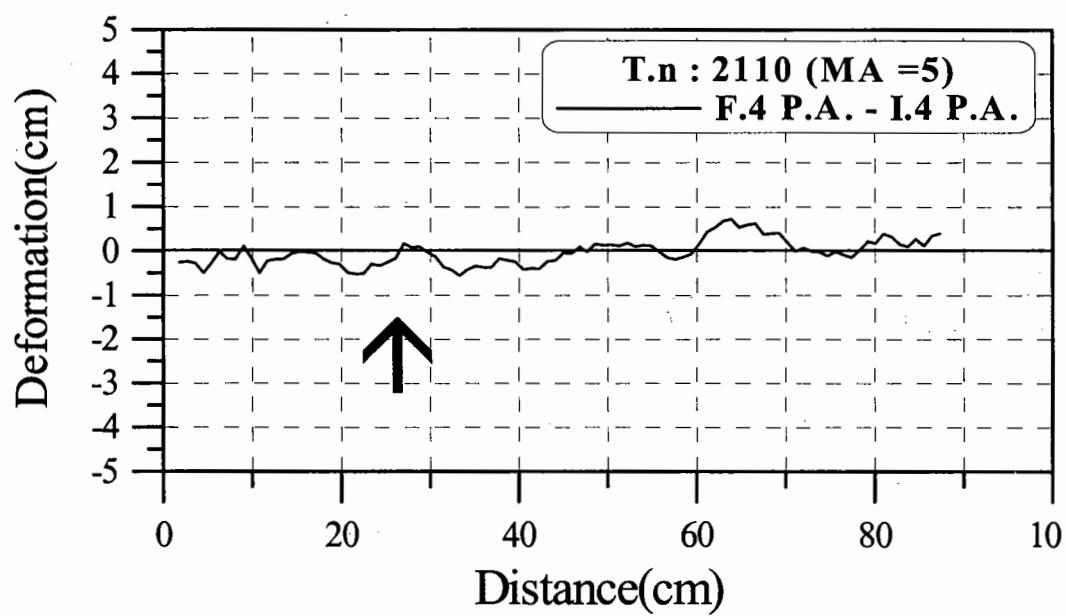


2-1안의 필터층 연직방향 변형량 2회차 실험결과의 이동평균

필터층 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림

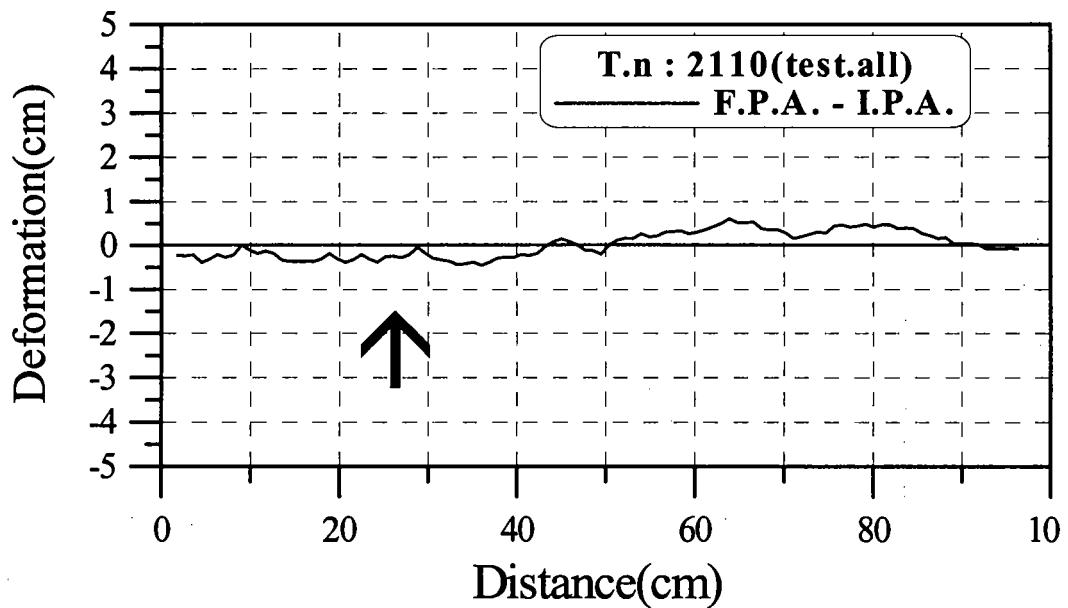


2-1안의 필터층 연직방향 변형량 3회차 실험결과의 이동평균

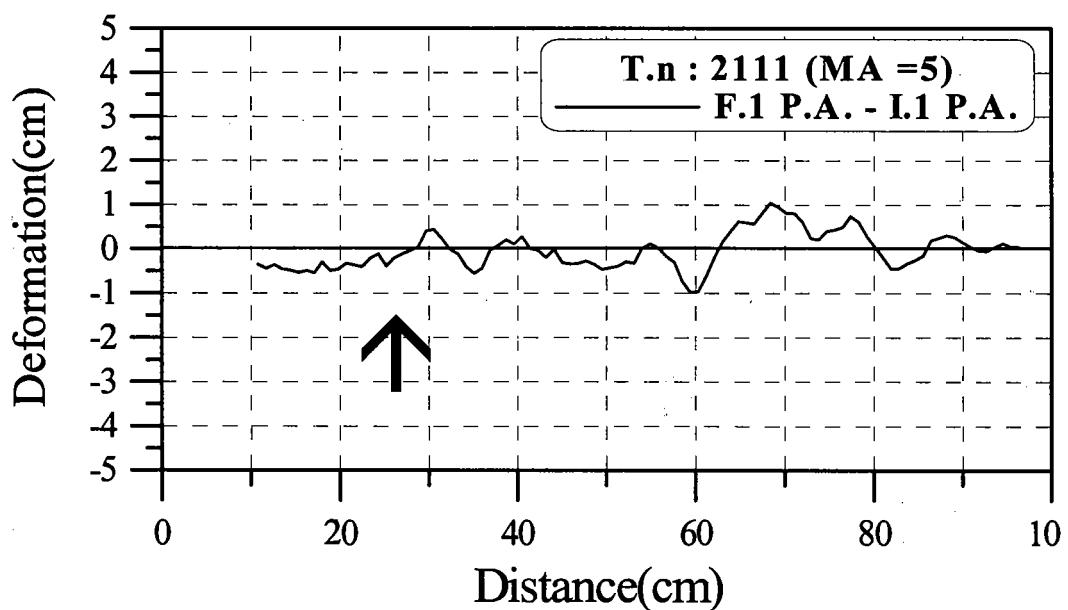


2-1안의 필터층 연직방향 변형량 4회차 실험결과의 이동평균

필터층 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림

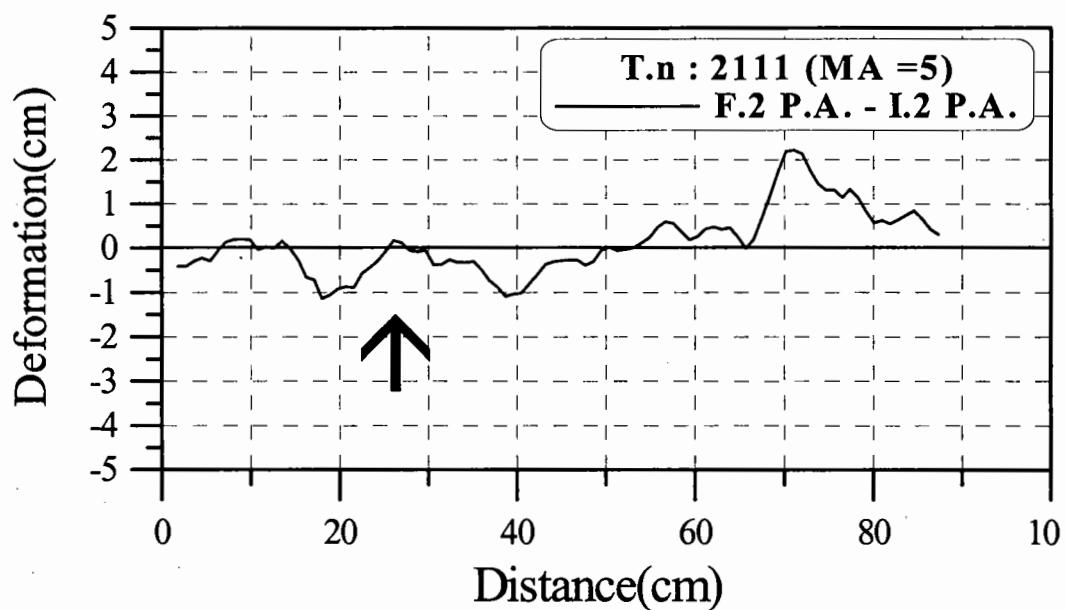


2-1안의 필터층 연직방향 변형량 이동평균 4회분의 평균

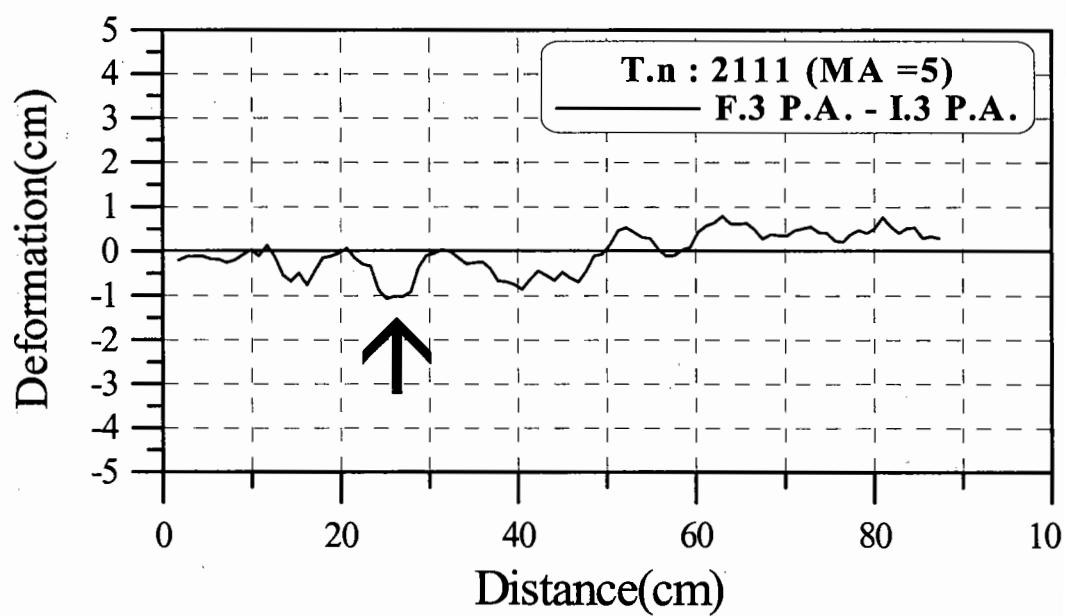


2-2안의 필터층 연직방향 변형량 1회차 실험결과의 이동평균

필터층 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림

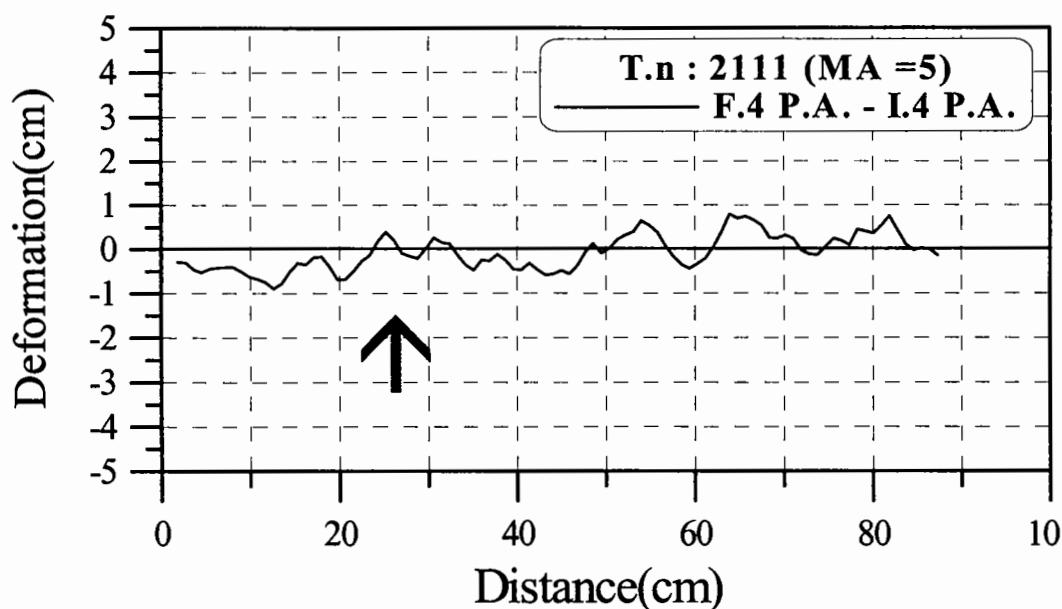


2-2안의 필터층 연직방향 변형량 2회차 실험결과의 이동평균

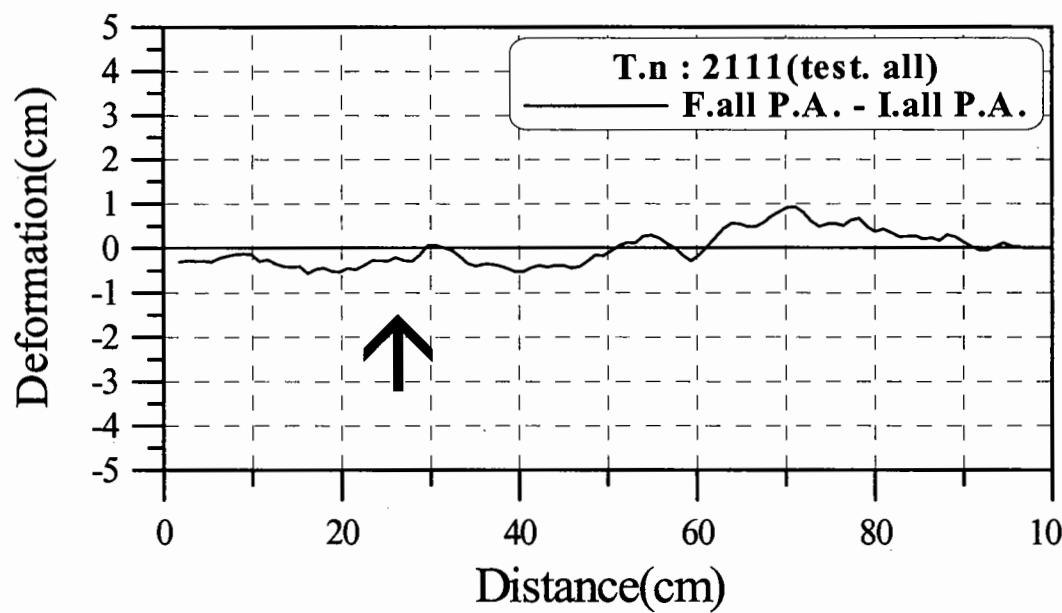


2-2안의 필터층 연직방향 변형량 3회차 실험결과의 이동평균

필터층 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림

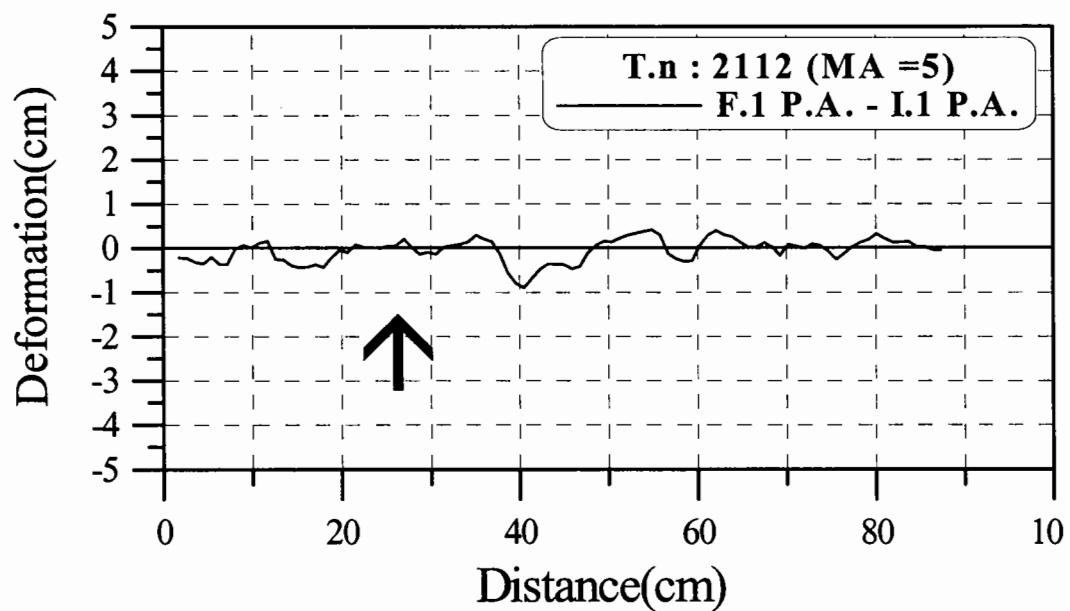


2-2안의 필터층 연직방향 변형량 4회차 실험결과의 이동평균

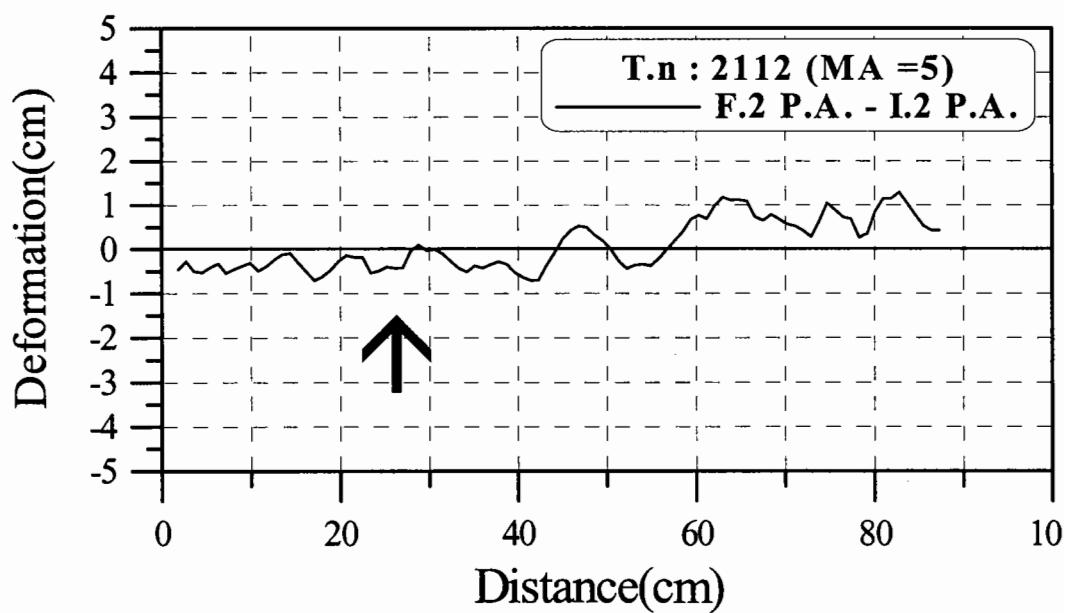


2-2안의 필터층 연직방향 변형량 이동평균 4회분의 평균

필터총 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림

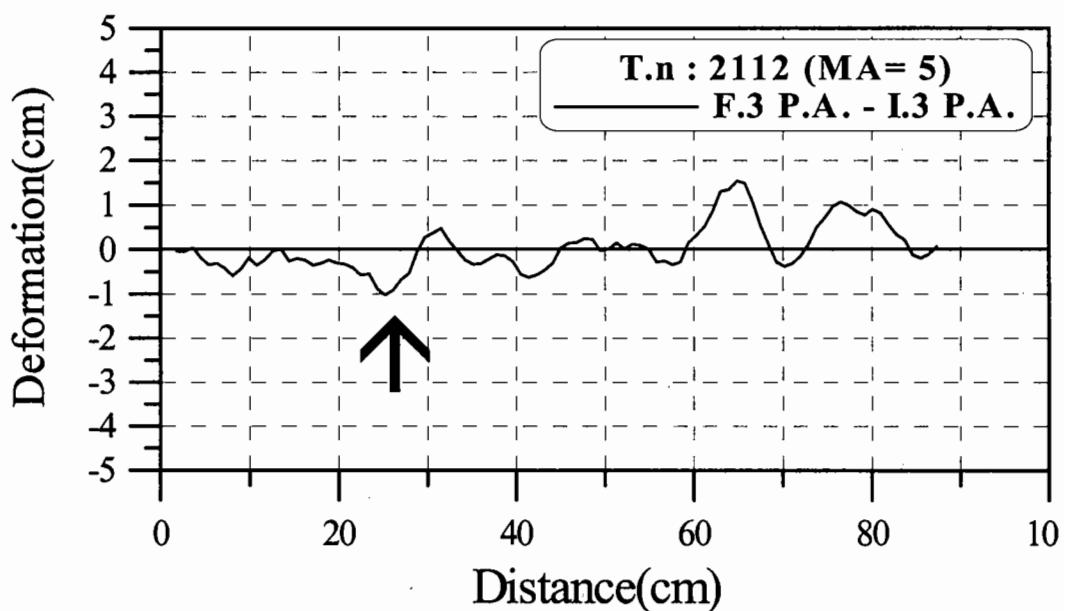


2-3안의 필터총 연직방향 변형량 1회차 실험결과의 이동평균

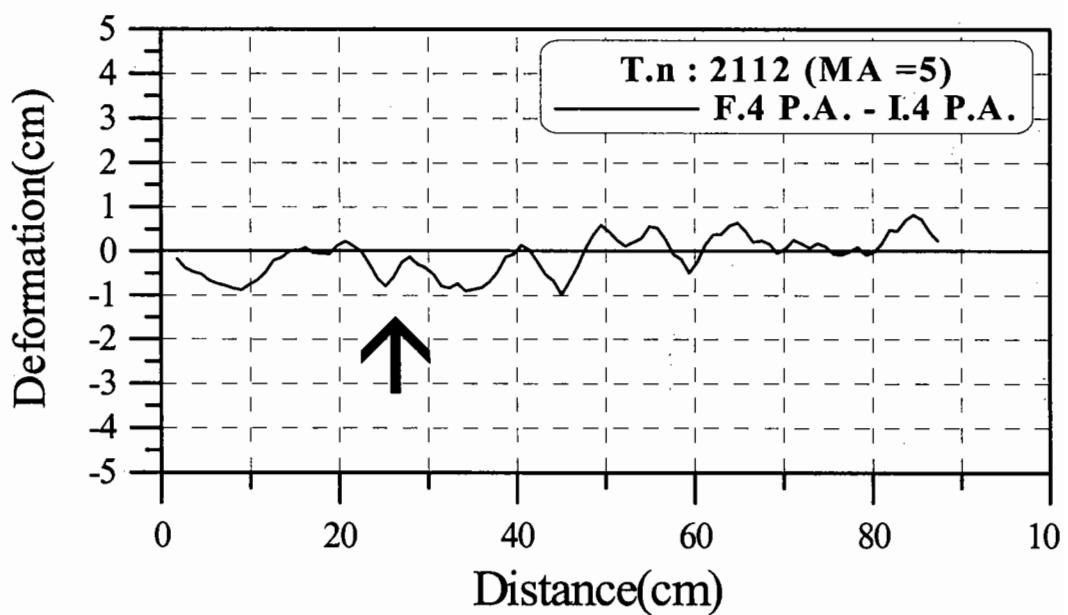


2-3안의 필터총 연직방향 변형량 2회차 실험결과의 이동평균

필터총 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림

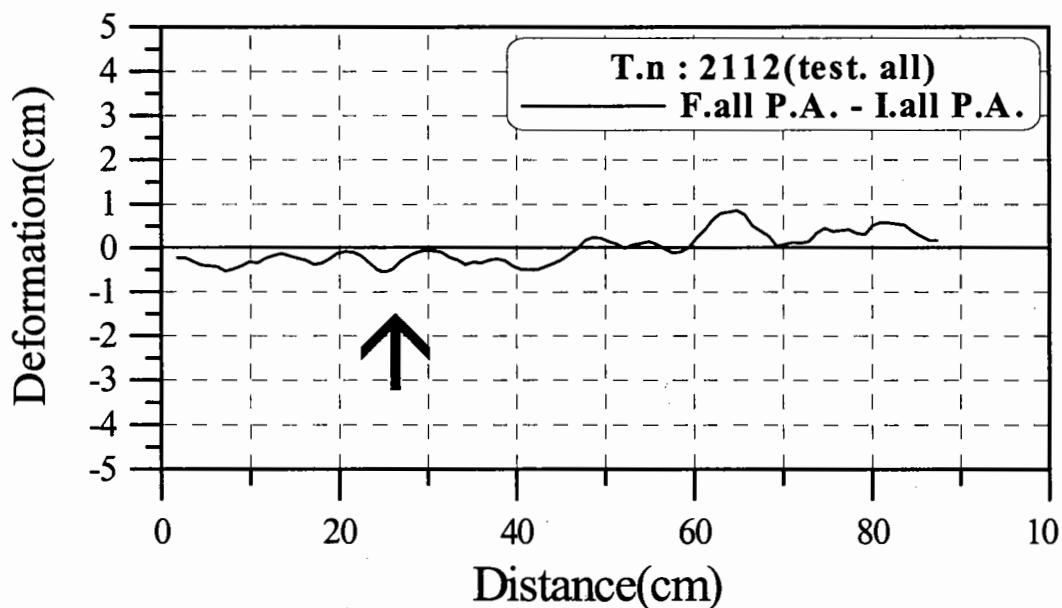


2-3안의 필터총 연직방향 변형량 3회차 실험결과의 이동평균

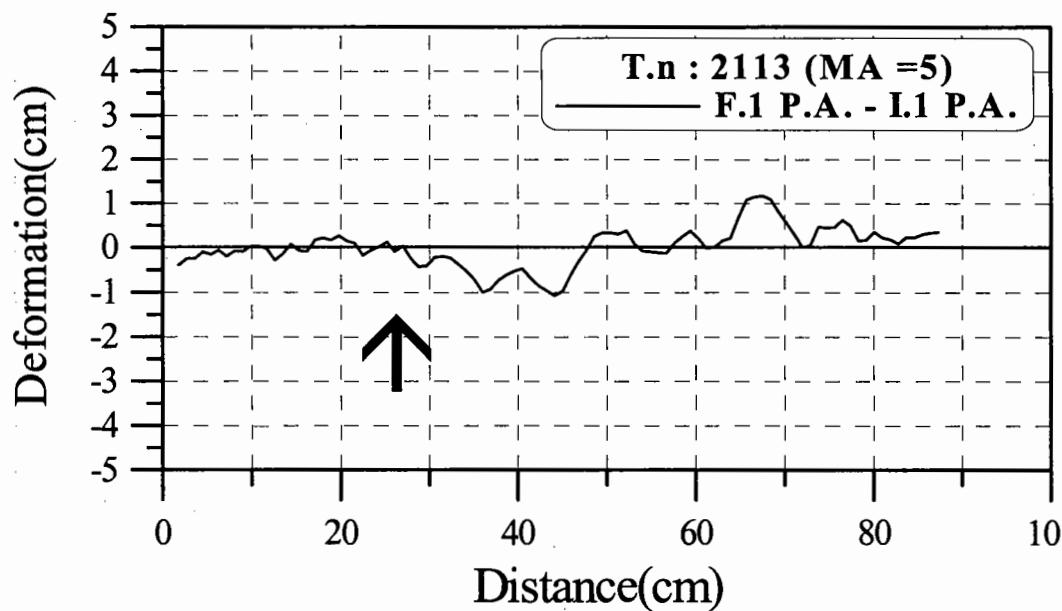


2-3안의 필터총 연직방향 변형량 4회차 실험결과의 이동평균

필터층 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림

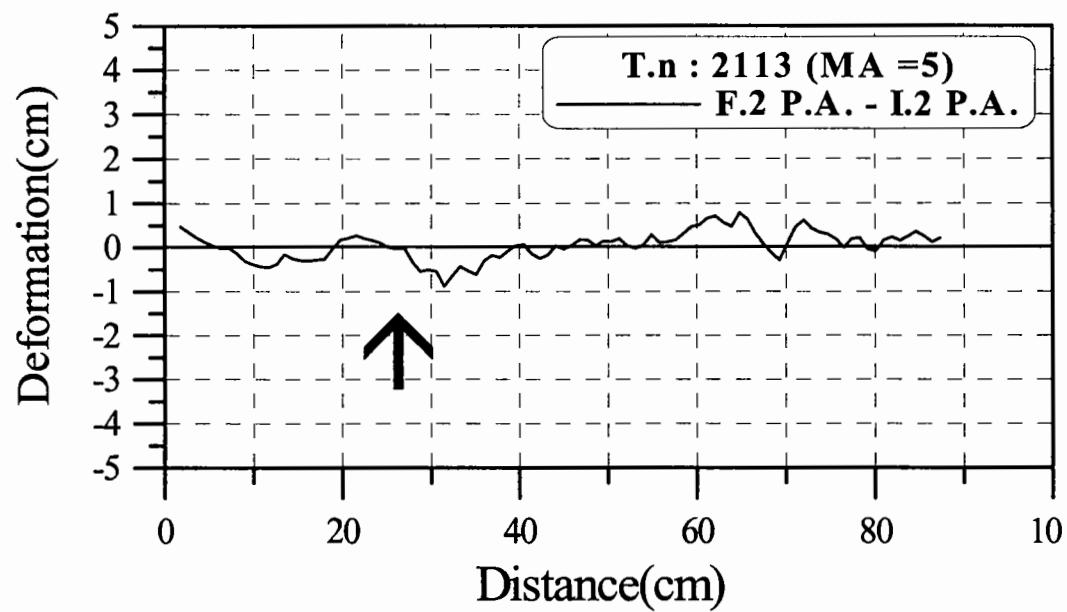


2-3안의 필터층 연직방향 변형량 이동평균 4회분의 평균

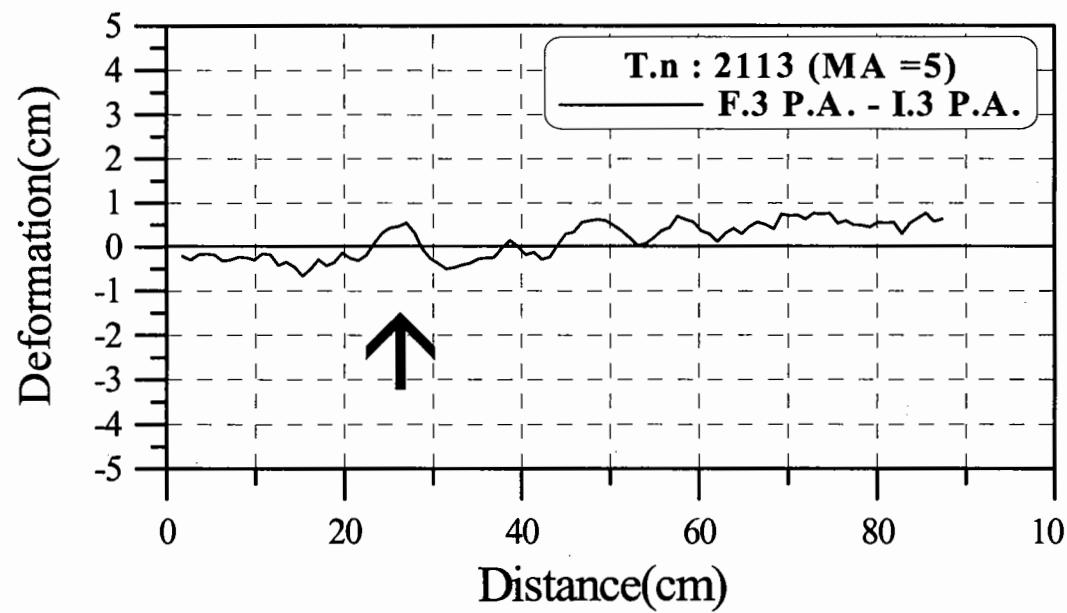


2-4안의 필터층 연직방향 변형량 1회차 실험결과의 이동평균

필터층 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림

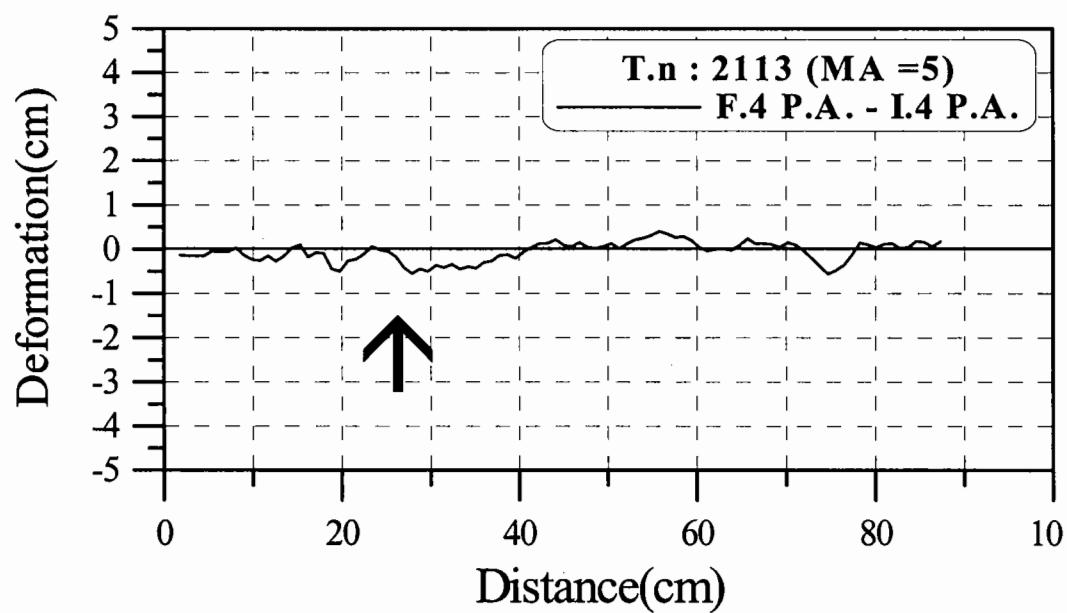


2-4안의 필터층 연직방향 변형량 2회차 실험결과의 이동평균

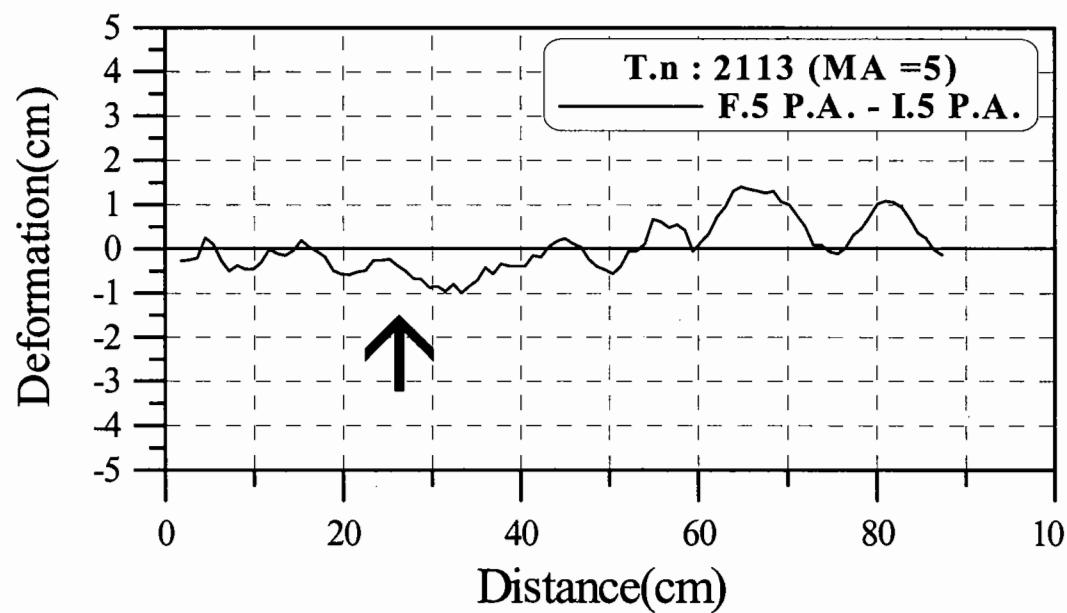


2-4안의 필터층 연직방향 변형량 3회차 실험결과의 이동평균

필터층 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림

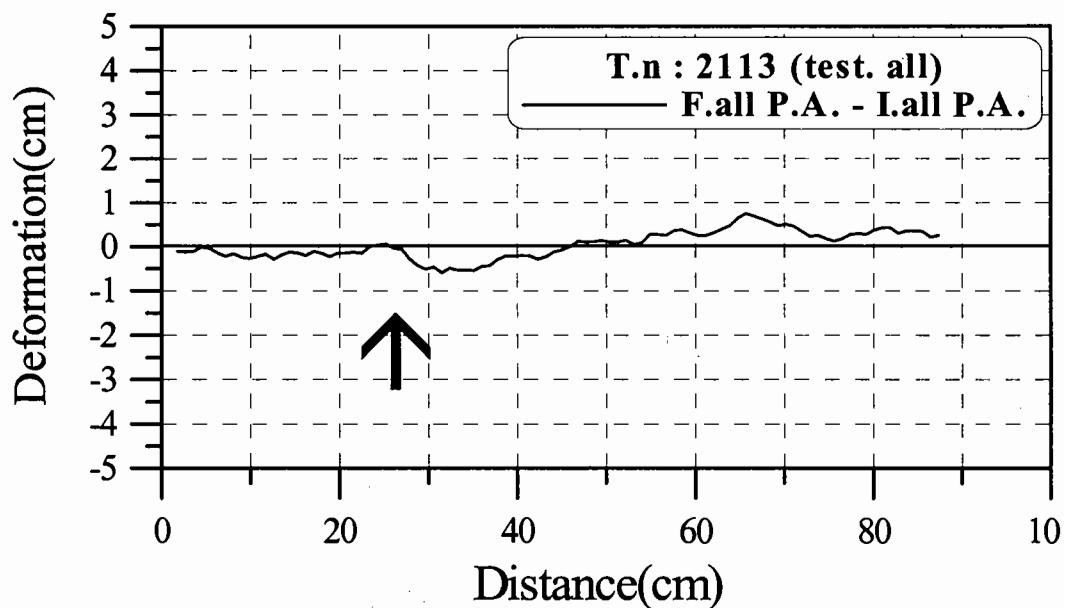


2-4안의 필터층 연직방향 변형량 4회차 실험결과의 이동평균

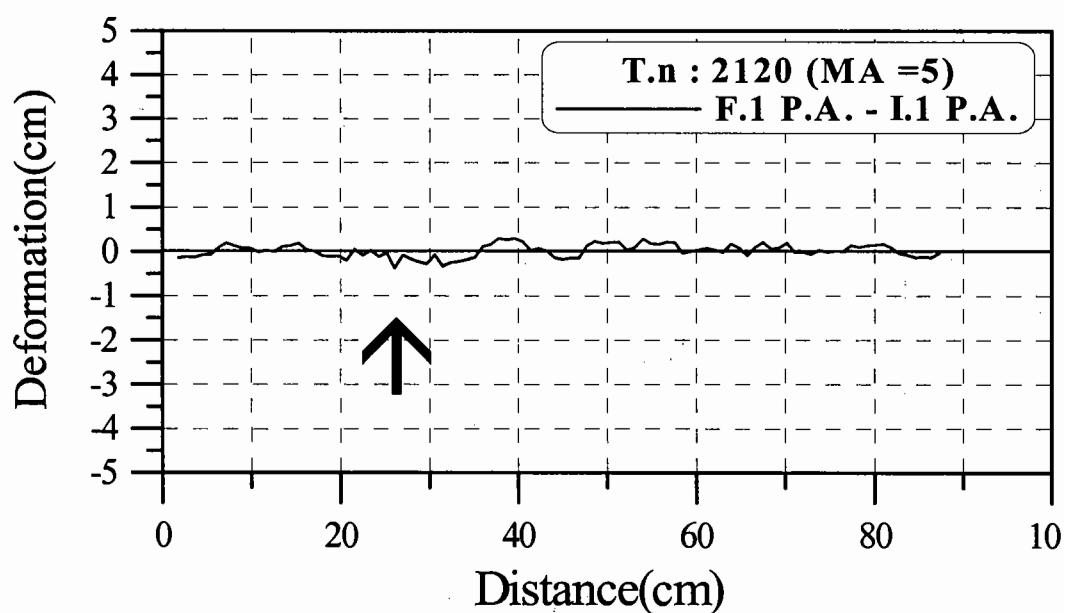


2-4안의 필터층 연직방향 변형량 5회차 실험결과의 이동평균

필터층 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림

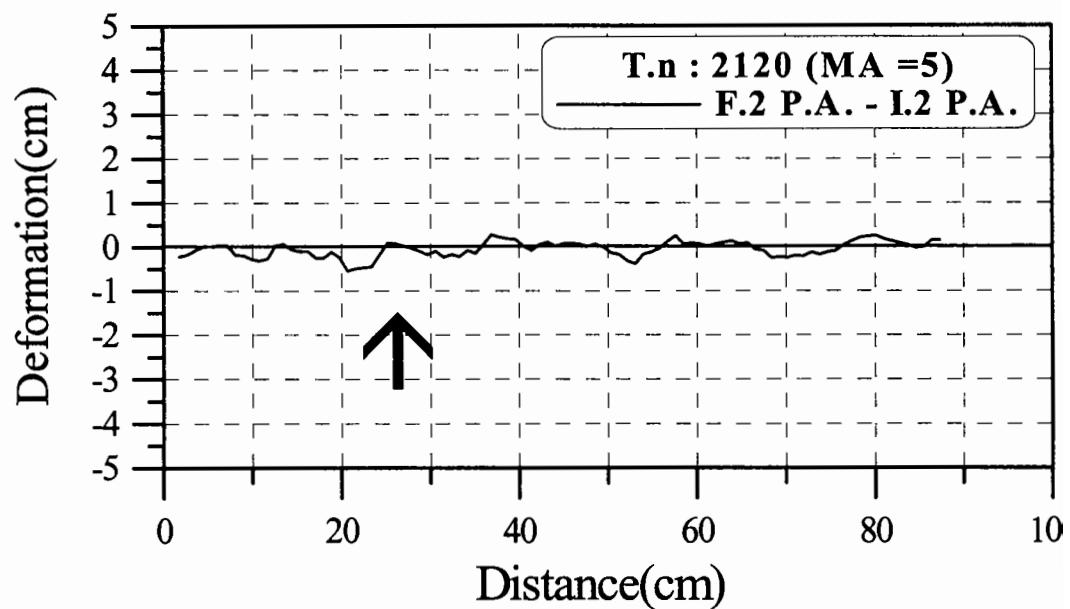


2-4안의 필터층 연직방향 변형량 이동평균 5회분의 평균

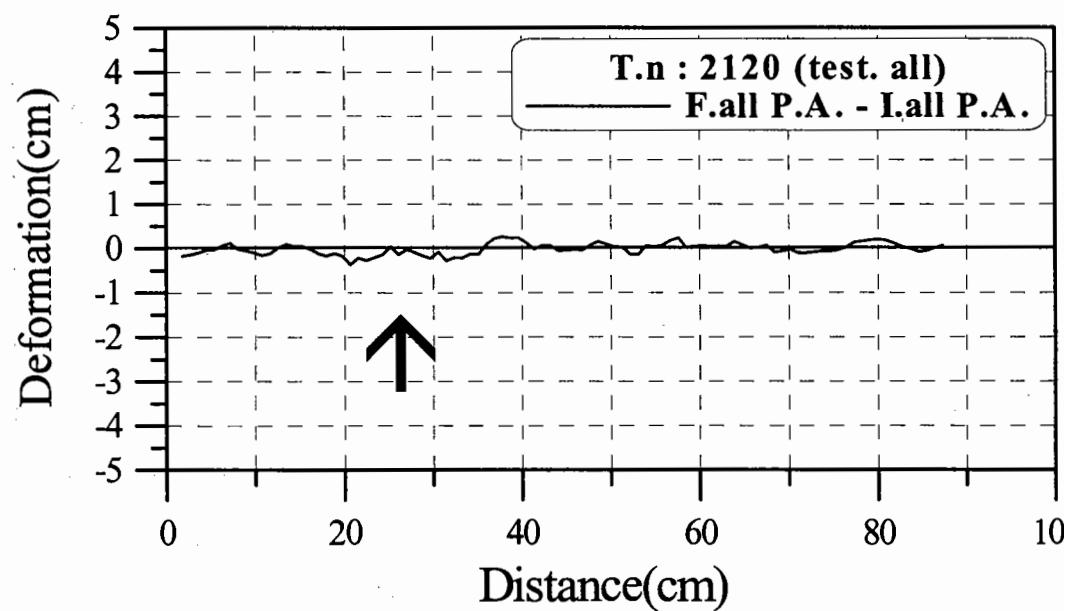


3-1안의 필터층 연직방향 변형량 1회차 실험결과의 이동평균

필터층 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림

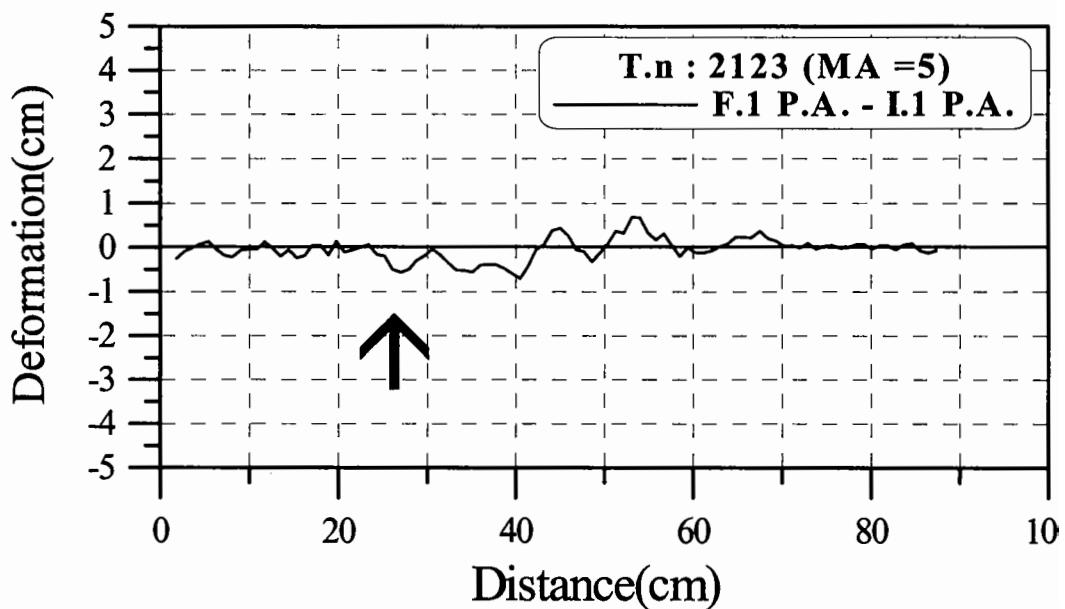


3-1안의 필터층 연직방향 변형량 2회차 실험결과의 이동평균

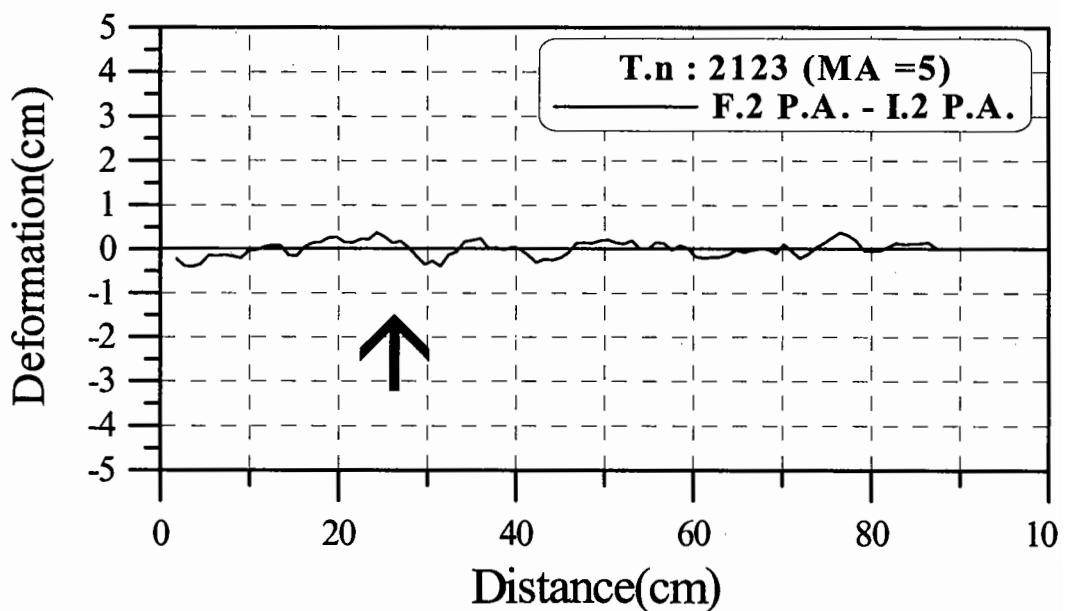


3-1안의 필터층 연직방향 변형량 이동평균 2회분의 평균

필터층 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림

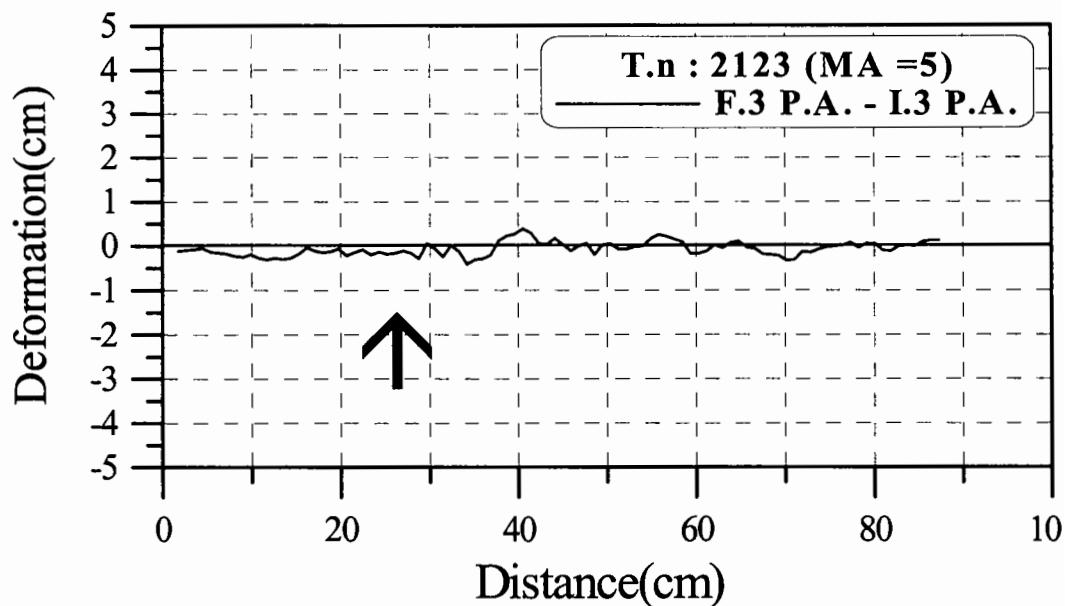


3-2안의 필터층 연직방향 변형량 1회차 실험결과의 이동평균

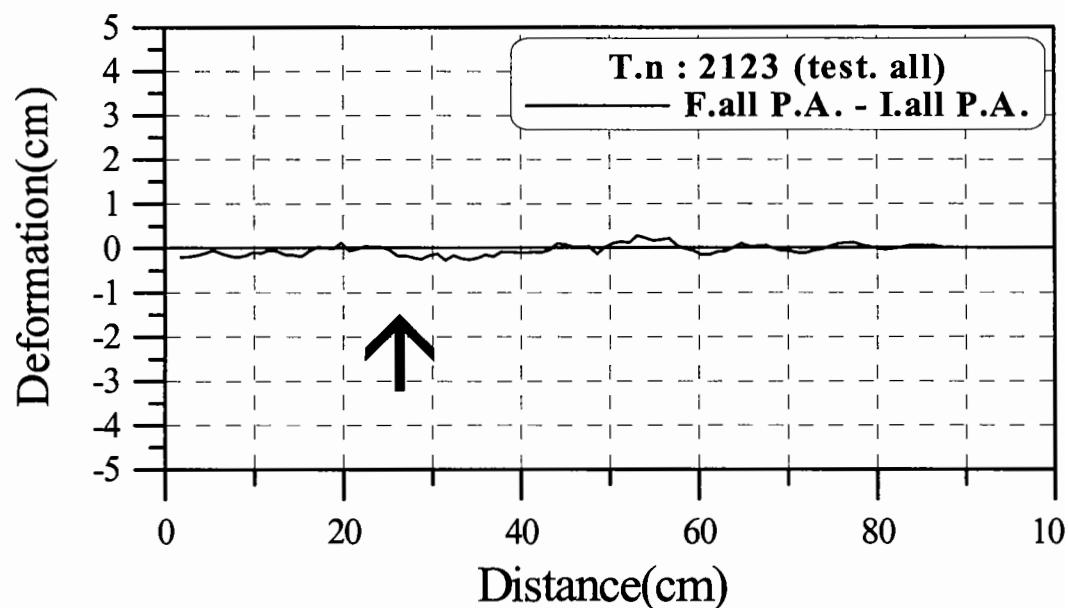


3-2안의 필터층 연직방향 변형량 2회차 실험결과의 이동평균

필터층 연직방향 변형량의 5점 이동평균 그림



3-2안의 필터층 연직방향 변형량 3회차 실험결과의 이동평균



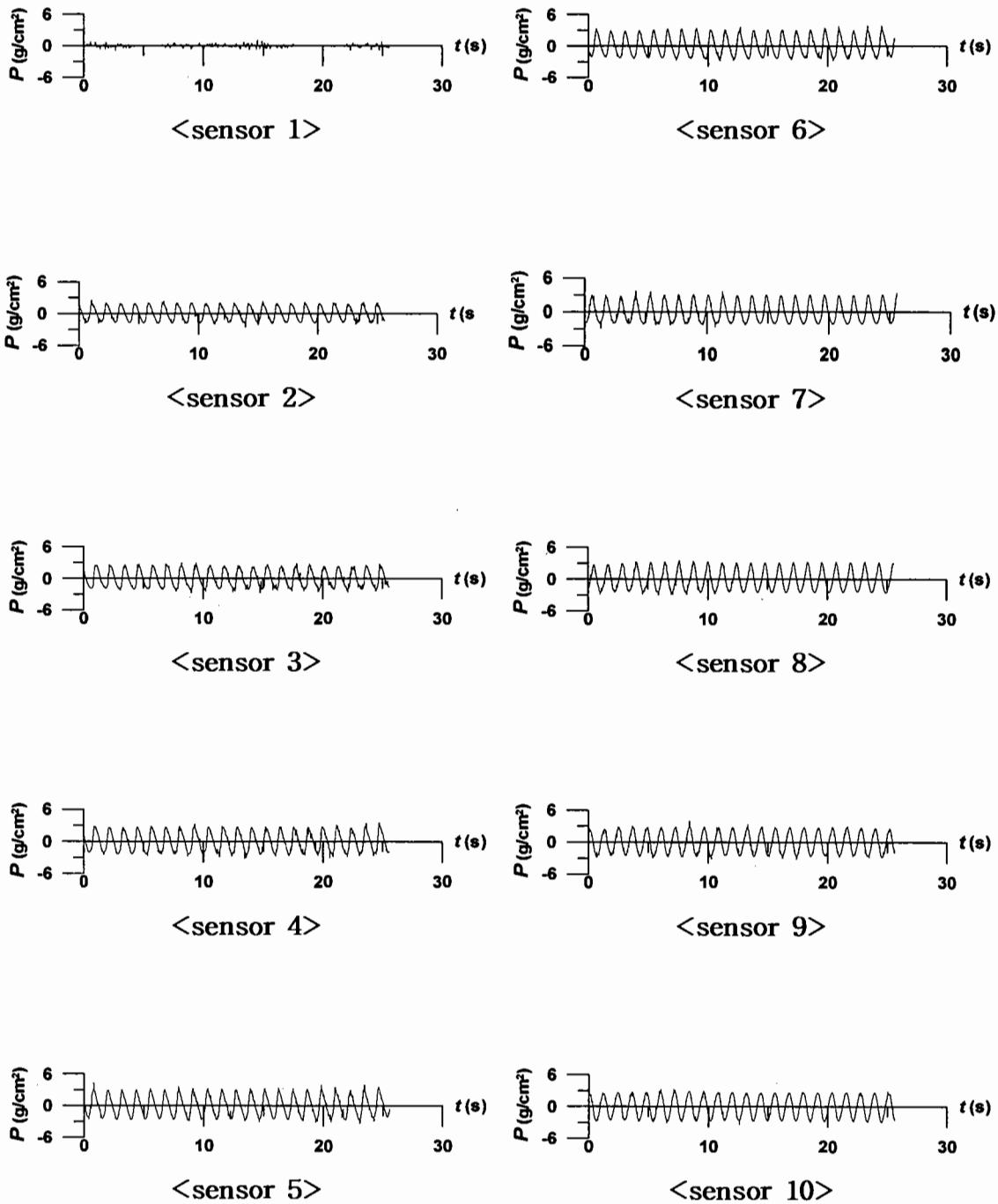
3-2안의 필터층 연직방향 변형량 이동평균 3회분의 평균

부 록 3

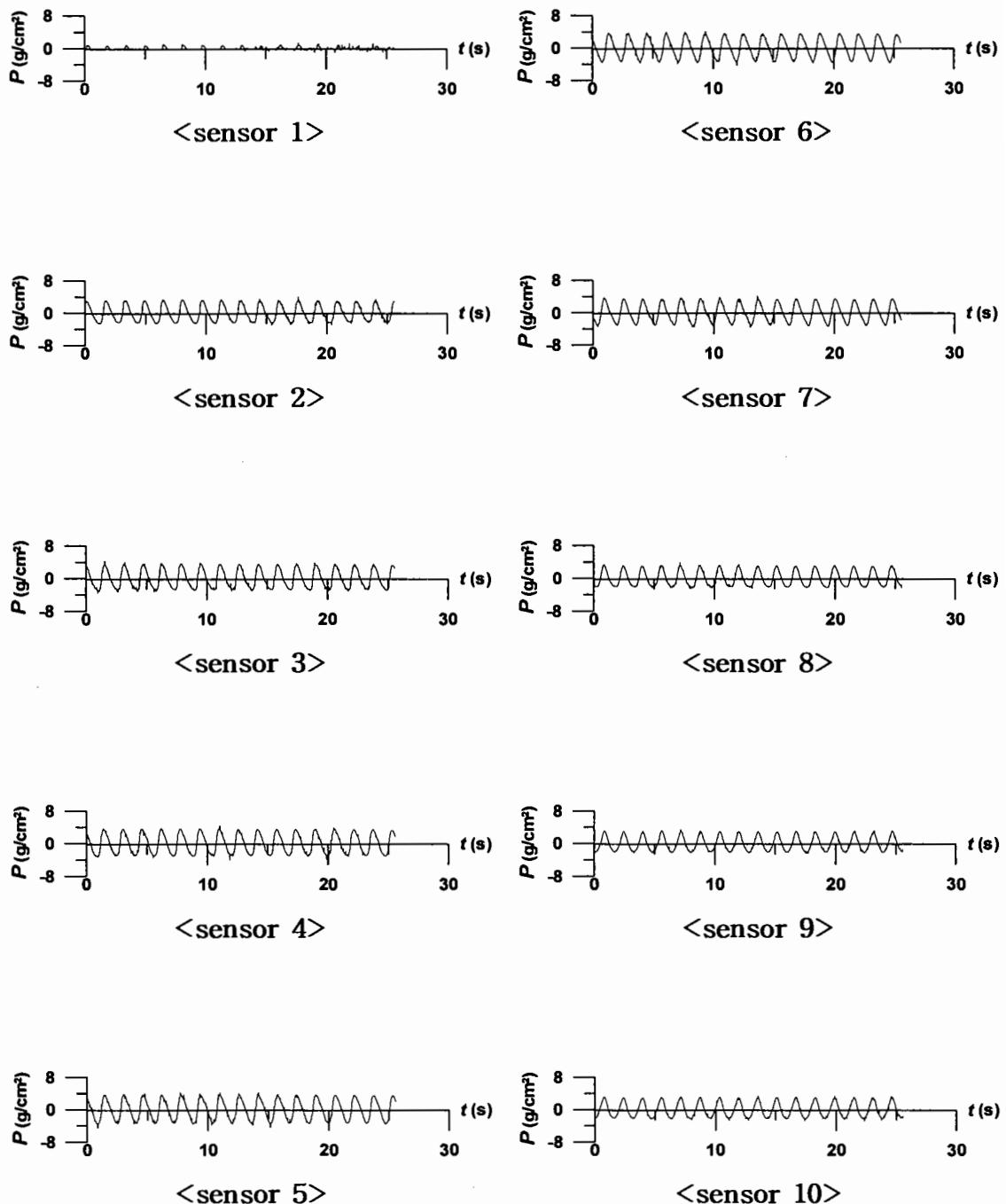
전사면 파압시그널

부록3. 전사면 파압시그널

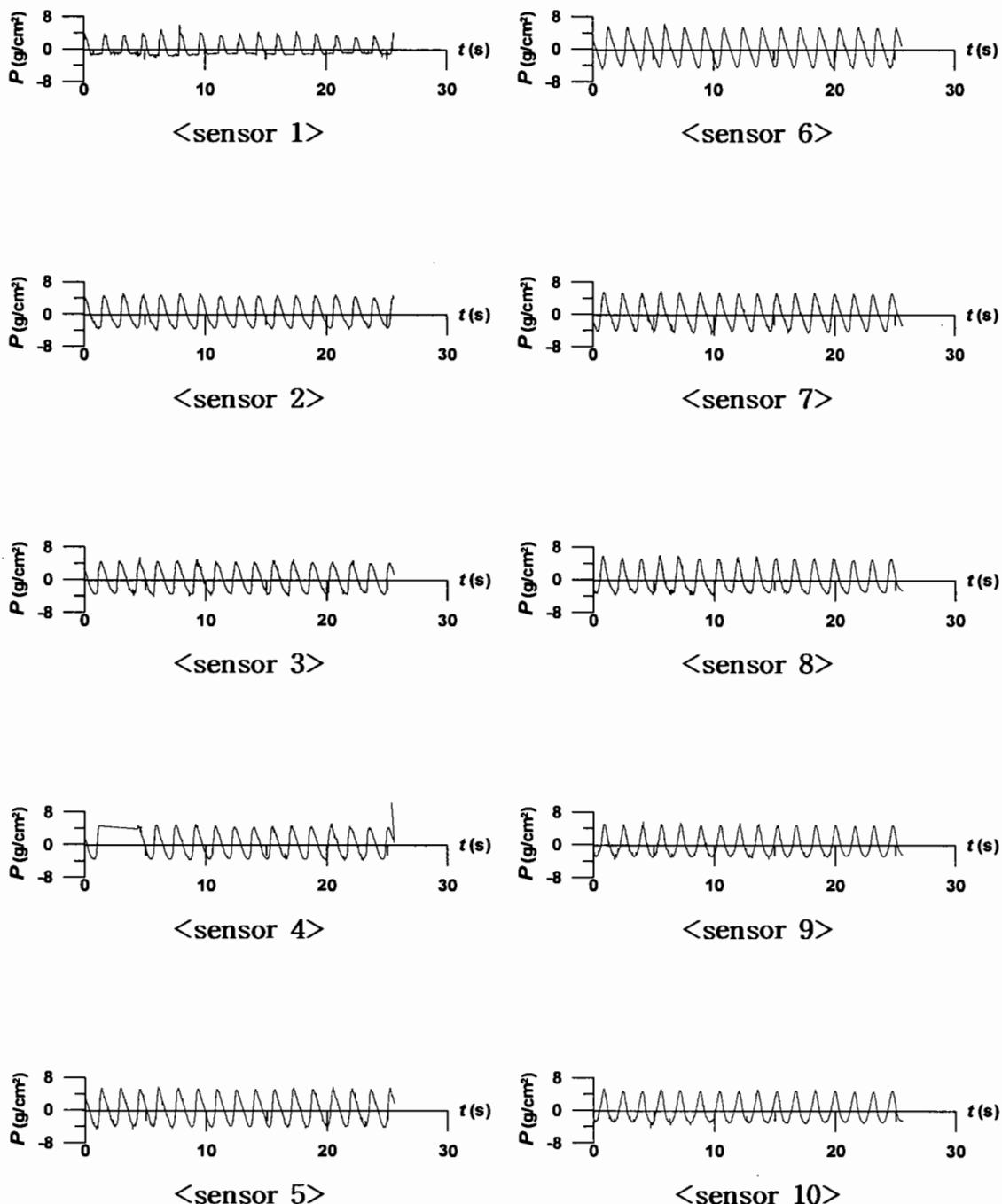
<Test 1 ($H = 0.08$ m, $T = 1.2$ s)>



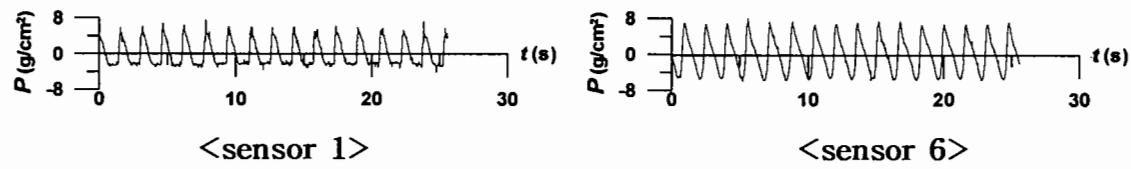
<Test 2 ($H = 0.08$ m, $T = 1.6$ s)>



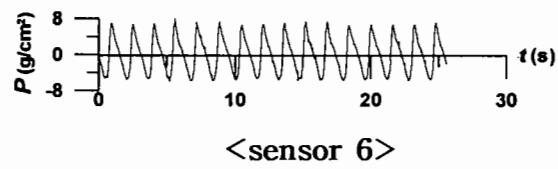
<Test 3 ($H = 0.12$ m, $T = 1.6$ s)>



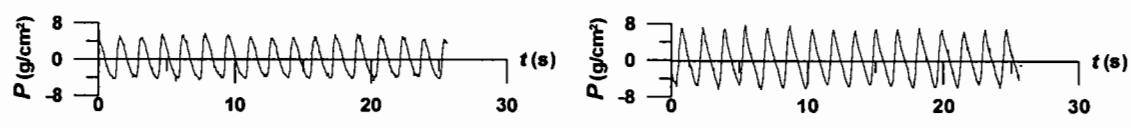
<Test 4 ($H = 0.16$ m, $T = 1.6$ s)>



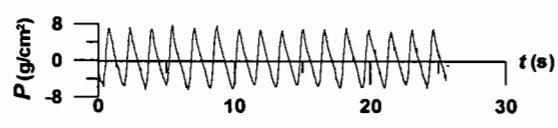
<sensor 1>



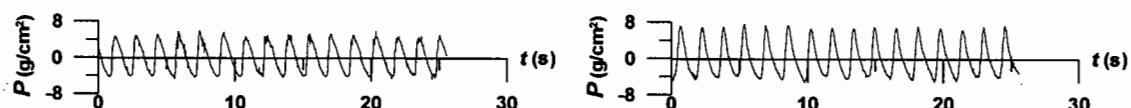
<sensor 6>



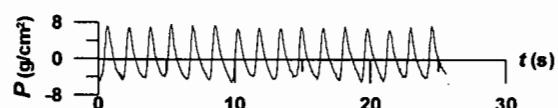
<sensor 2>



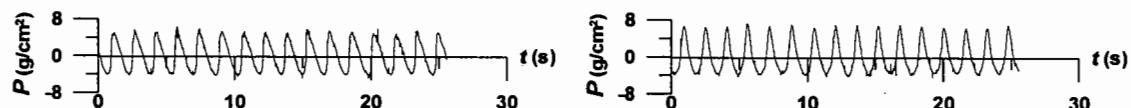
<sensor 7>



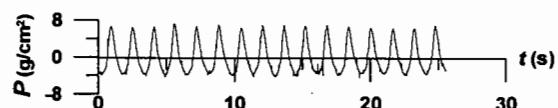
<sensor 3>



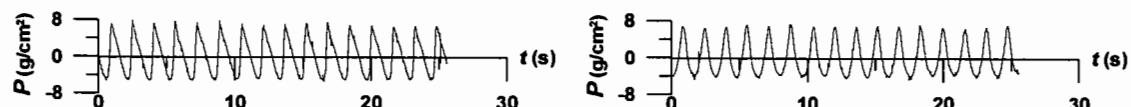
<sensor 8>



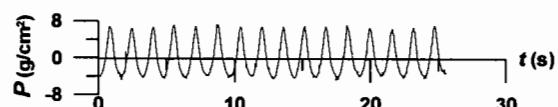
<sensor 4>



<sensor 9>



<sensor 5>



<sensor 10>

부 록 4

국내 지정항만 방파제의 현황

<표 A4.1> 인천해양수산청 관할 지정 항만의 방파제 현황

항명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료			설계조건						비고	
				설계/보수	그림	연장 (m)	마루높이 (m)	마루폭 (m)	지반고 E.L.(m)	파랑 파고(m)	주기(초) E.L.(m)	파향	토질 조건	
인천항	방파제	44	흔성재	M02-44	240.0	+11.5	8.0		2.7	5.9			9.840	실트질 모래
	방파제	45	흔성재	M02-45	308.0	+11.5	10.0		2.7	5.9			9.840	실트질 모래
	방파제	51	시석식	M02-51	240.0	+10.0	4.0		2.7	6.3	SW	NNW	40.0	9.27
	방파제	52	흔성재	M02-52	700.0	+12.0	9.0	-16.2	5.1	5.1	SW	NNW	20.0	9.27
	방파제	53	흔성재	M02-53	207.0	+12.5	6.0		2.7	6.3	SW	NNW	40.0	9.27
	방파제	54	흔성재	M02-54	270.0	+11.0	7.0		2.7	5.9			40.0	9.27
	방파제	55	흔성재	M02-55	216.0	+12.5	6.0		2.7	6.3	SW	NNW	40.0	9.27
	신천지구 방파제	29	시석식	M03-29	150.0	+11.0	3.0	DL+4.5	1.4	4.3	S	NW	30.0	9.308
	남방파제	30	시석식	M03-30	80.0	+11.0	4.1	DL+2.0	1.7	5.0	NW	NW	30.0	9.308
평택항	서방파제	31	시석식	M03-31	300.0	+11.0	3.65	DL+5.50	1.7	5.0	NW	NW	30.0	9.308
	동방파제	4	시석식	Y02-04	392.4	+8.0	6.0	-0.2	2.4	5.9	SW	NNW	40.0	7.5
	서방파제	5	시석식	Y02-05	174.7	+8.0	6.9	+2.8	2.6	11.0	SW	NNW	40.0	7.5
	서방파제	6	시석식	Y02-06	174.0	+8.5	6.0	+4.0	2.6	11.0	SW	NNW	40.0	7.5
	남방파제	7	시석식	Y02-07	96.9	+9.0	6.5	-1.5	2.4	5.9	SE	NNW	40.0	7.5
	남방파제	8	시석식	Y02-08	153.1	+9.0	6.5	-2.0	2.4	5.9	SE	NNW	40.0	7.5
	총기포항													

<표 A4.1> 인천 해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	하부소단		피복총수		항의측 사면		증간피복총		Hudson식 적용			
			소단수	소단총	형태	항의측	피복재	규격	경시도	총수	두께	인정질량	질량비	
인천항	방파제	44												
	방파제	45												
	방파제	51												
	방파제	52												
	방파제	53												
	방파제	54												
영락항	방파제	55												
	석천지구 방파제	29										0.11	2.78	
	남방파제	30										0.11	4.64	
	서방파제	31										0.11	4.64	
연평도항	동방파제	4	2	피/사	A	2	TP	2	3	2	1.9	피복식	0.3	
	서방파제	5	1	사/석T	C	2	TP	4	2	2	0.4	피복식	0.4	
	서방파제	6				2	1	TP	5	1.5	2	2.6	피복식	0.2
	남방파제	7	1	사/석T	C	2	1	TP	4	2	2	0.4	피복식	0.4
	남방파제	8	2	피/중/기	D	2	1	TP	5	1.5	2	1.5	피복식	0.4
	옹기포항													

<표 A4.1> 인천 해양수산청 관할 지정 항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	기초사석		상처콘크리트		교복층		항내측 사면		총간피복총	구격	경시도	항외측	항내측	형상	하부	교복재	규격	경사도	총수	두께	중간피복재	구격	경시도	총수	두께	
			규격	경사도																								
인천항	방파제	44																										
	방파제	45																										
	방파제	51	1	2	1.5/2	ㅁ형	방고	교복재	0.2	1.5/2	1																	
	방파제	52																										
	방파제	53																										
	방파제	54																										
평택항	방파제	55																										
	식천지구 방파제	29	1	1.5	1.5	ㅁ형	기초사석	교복재	0.2	1.5	1	0.6																
	남방파제	30	1	1.5	1.5	ㅂ형	기초사석	교복재	0.3	1.5	1	0.7																
	서방파제	31	1	1.5	1.5	ㅁ형	기초사석	교복재	0.3	1.5	1	0.7																
언평도항	동방파제	4	1	3	2	집형	속재음	교복재	0.2	2	2	1.5																
	서방파제	5	1	2	2	ㄴ형	중간피복	교복재	0.4	2	3																	
	서방파제	6	1	1.5	1.5	丁형	기초사석	교복재	0.2	1.5	1	0.6																
	남방파제	7	1	2	1.5	ㄴ형	중간피복	교복재	0.4	1.5	2	1.8																
	남방파제	8	1	1.5	1	ㄴ형	기초사석	교복재	0.4	1	1	0.8																
	옹기포항																											

<표 A4.2> 대산해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황

항명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료		설계조건						비 고					
				설계/보수	그림	연장 (m)	마루높이 (m)	마루폭 (m)	지반고 E.L.(m)	파랑 파고(m)	파랑 주기(초)	파랑 파향	풍향 풍속(m/s)	조위(m) HWL	토질조건	대장형상	특징
대신항																	
보령항																	
티안항																	
대전항	서방파제	6	사석식			300.0	+7.8	4.0	-4.3			SW	N	19.2	7.682	비대칭	상부진총
	북방파제	7	사석식	Y06-07	250.0	+8.5	4.0					SW	N	17.0	7.682	대칭	
	북방파제	8	사석식	Y06-08	350.0	+8.5	4.0					SW	N	17.0	7.682	대칭	
비인항	서방파제	1	사석식	Y21-01	244.5	+8.0	4.0	-2.8				SW	N	19.2	7.106	비대칭	

<표 A4.2> 대산해 양수산청 관찰 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	하부소단	피복총수			항외측 사면			중간피복총			Hudson식 적용				
				소단수	소단총	형태	항외측	항내측	피복재	구격	경사도	총수	두께	규격	경사도	총수	
대신항																	
보령항																	
태안항																	
대전항	서방파제	6					2	1	피복석	0.3	2	2		피복석	0.4	2	1
	북방파제	7	1	피/2	0	1	1	1	피복석	0.4	2	1					
	북방파제	8	1	피/2	0	1	1	1	피복석	0.8	1.5	1	1.0				
비인항	서방파제	1					1	1	피복석	0.5	2	2	2.0				

<표 A4.2> 대산해 양수산정 관찰 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	기초시식	상치콘크리트				한내측 사면				중간피복총			
				규격	경사도		피복재	경사도	총수	두께	중간피복재	구격	경사도	총수	두께
					항외측	한내측									
대산항															
보령항															
태안항															
대전항	서방파제	6	1	2	1.5	진충	기초시식	피복재	0.4	1.5	1				
	북방파제	7	1	1.5	1.5			피복재	0.8	1.5	1	1.0			
	북방파제	8	1	1.5	1.5			피복재	0.8	1.5	1	1.0			
비오항	서방파제	1	1	2	1.5			피복재	0.3	1.5	2	1.5			

<표 A4.3> 군산해양수산청 관할 지정항만의 냉·과제 현황

항명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료			설계 조건			비고			
				설계/보수	그룹	연장 (m)	E.L.(m)	파고(m)	주기(초)	파랑	비류	조위(m)	HWL
군산내항													
군산외항	병사제	6	시석식			143.0	+8.0	4.0	2.2	6.0	W		7.246
	도류제	1	시석식			49.0	+8.0	4.3	5.0	8.7	WNW	NNW	31.7
군장신항	도류제	2	피복제			102.0	+8.0	7.0	5.0	8.7	WNW	NNW	31.7
	도류제	3	피복제			468.0	+8.0	7.0	5.0	8.7	WNW	NNW	31.7
	장항항												

<표 A4.3> 군산해 양수산청 관찰 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	허부소단		피복총수		항외측 시면			Hudson식 적용			
			소단수	소단총	형태	항외측	항내측	피복재	구격	경사도	총수	두께	
고신나항													
군산외항	방사제	6											
			1	1	피복식	0.5	1.5	1	0.8				
군장신항	도류제	1			2	TTP	16	1.5	2	3.8	피복식	0.7	
	도류제	2			2	1	TTP	16	1.5	2	3.8	피복식	0.7
	도류제	3			2	2	TTP	16	1.5	2	3.8	피복식	0.7
장항항													

<표 A4.3> 군산해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	규격	기초사석			상치콘크리트			피복총			항내측 사면			중간피복총		
				총외측	항내측	경사도	하부	피복재	구격	경사도	총수	두께	총간피복재	구격	경사도	총수	두께	
군산내항																		
군산외항	방사제	6	1	1.5	1			피복식	0.2	1	1	0.6						
도류제	1	1	1.5															
도류제	2	1	1.5	1.5	□ 60		셀블러	피복식	0.2	1.5	4	3.0						
도류제	3	1	1.5	1.5	□ 60		셀블러	TTP	5	1.5	2	2.6	피복식	0.2	1.5	1	0.4	
장충내항																		

<표 A4.4> 목포해양수산청 관할 지정 항만의 방파제 현황

항명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료		연장 (m)	마루높이 (m)	마루폭 (m)	지반고	설계조건		비 고								
				설계/보수	그림					E.L.(m)	E.L.(m)	파고(m)	주기(초)	파향	풍향	풍속(m/s)	조위(m)	비 런	토질 조건	대 청 험 상
목포항																				
대불항																				
목포북항																				
완도항	방파제	10	사석식			271.5	+5.5	4.5												
대흑산도항	영산방파제	6	사석식			Y09-06	368.0	+5.5	5.8	-2.0			NW	NNW					4.004	대 청
	북방파제	7	사석식			Y09-07	75.5	+6.5	9.0	-7.5			NW	NNW						비 대 청
	남방파제	8	사석식			Y09-08	320.0	+6.5	8.8	-7.8			NW	NNW						비 대 청
	중앙방파제	9	사석식			Y09-09	500.0	+5.5	4.5				NW	NNW						지 반 치 환
	홍도항																			
평목항																				
신마항																				

<표 A4.4> 목포해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	하부소단	피복총수	향외측 사면				향내측 사면				Hudson식 적용					
					소단수	소단총	향태	향외측	향내측	피복재	규격	경사도	총수	두께(m)	중간피복재	구격	경사도	총수
목포항																		
대구항																		
목포부항																		
원도항	방파제	10		1	1	1	피복식	1.0	1.5	1	1.2						0.91	1.10
대흑산도항	영산방파제	6			2	1	TTT	5	1.5	2	2.5	피복식	0.1	1.5	1	0.5		
	북방파제	7	1	중/7	D	2	TTT	10	1.5	2	피복식(상)	0.5	1.5	1	0.8			
	남방파제	8	1	시석T	B	2	TTT	10	1.33	2	3.2	피복식	0.5	1.5	1	0.8		
	중앙방파제	9	-1	중	H	2	2	피복식	0.6	2.5	1	피복식	0.2	2.5	1			
총도항																		
평목항																		
신마항																		

<표 A4.4> 목포해양수산청 관할 지정항만의 냉파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	규적	기초사석		상치콘크리트	피복총	항내·축·사면			중간피복재	구격	경시도	총수	두께	
				항외측	항내측			형상	하부	피복재	규적	증시도	총수	증진피복재		
목포항																
대불항																
목포북항																
완도항	방파제	10	1	1.5	1.5	□형	기초사석	피복식	1.0	1.5	1	1.2				
영산항	방파제	6	1	1.5	1.5	□형	방고/기초	피복식	0.7	1.5	1					
대흑산도항	북방파제	7	1	1.5	1.5	□형	방고/기초	피복식	0.5	1.5	1	0.8				
	남방파제	8	1	1.33	1.5	□형	방고/기초	피복식	0.5	1.5	1	0.8				
	중앙방파제	9	1	2.5	2	□형	피복식	피복식	0.6	2	1	피복식	0.2	2	1	
홍도항																
평목항																
신마항																

<표 A4.5> 여수해양수산청 관할 지정항만의 봉파제 현황

항명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료		연장 (m)	마루높이 (m)	마루폭 (m)	지반고 (m)	설계조건			비고				
				설계/보수	그림					E.L.(m)	E.L.(m)	파고(m)	주기(초)	파향	비류	조류(m)	HWL
여수구항														대청형상	특징		
	북방파제	12	사석식	M23B-12	180.0	+5.5	5.0	-10.0	1.9	S	NE	36.5	3.616	실트	비대칭		
	북방파제	13	사석식	M23B-13	640.0	+5.5	5.0	-9.0	5.29	S	NE	36.5	3.616	실트	비대칭		
	북방파제	14	사석식	M23B-14	10.0	+5.5	5.0	-9.0	5.29	S	NE	36.5	3.616	실트	비대칭		
	서방파제 보강	16	파복제	M23B-16	361.0	+9.0	11.5	-9.0	5.29	S	NE	36.5	3.616	실트	비대칭		
	서방파제 보강	17	파복제	M23B-17	407.0	+8.5	11.5	-8.0	4.96	S	NE	36.5	3.616	실트	비대칭		
	동방파제	18	사석식	M23B-18	315.0	+6.5	5.0	-11.0	5.6	S	NE	36.5	3.616	실트	비대칭		
	동방파제	19	사석식	M23B-19	130.0	+6.5	10.0	-12.0	5.6	S	NE	36.5	3.616	실트	비대칭		
관양항																	
	제1동서방파제	6	사석식	Y07-06	330.0	+5.0	5.0		1.76	SE			3.4	대칭	상부진충		
	제2동방파제	7	사석식	Y07-07	180.0	+5.0	5.9	-5.0	4.0	SE			3.4	비대칭			
	제2서방파제	8	사석식	Y07-08	165.0	+5.0	5.9	-5.0	4	SE			3.4	비대칭			
	동방파제	9	사석식	Y07-09	300.0	+6.5	3.7	-2.0	4.1	SE			3.4	모래자갈	비대칭		
	동방파제	10	사석식	Y07-10	650.0	+6.5	6.4	-8.0	4.7	SE			3.4	모래자갈	비대칭		
	동방파제	11	사석식	Y07-11	20.0	+6.5	8.5	-10.0	4.7	SE			3.4	모래자갈	대칭		
	동방파제	6	사석식	Y08-06	100.0	+5.0	6.0	-5.0	4.0	SW			1.94	대칭			
	서방파제	7	사석식	Y08-07	150.0	+5.0	4.0	-7.5	4.0	SW			1.94	비대칭	상부진충		
	녹동항																

<표 A4.5> 여수해양수산청 관할 지정항만의 봉파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	하부소단		피복총수		피복총		항외측 시면		중간피복총		Hudson식 적용						
			소단수	소단총	형태	항외측	항내측	피복재	구격	경사도	총수	두께	중간피복재	구격	경사도	총수	두께	안정질량	질량비
여수구항																			
	북방파제	12			2	1		TTP	5	1.5	2	2.6	피복식	0.2	1.5	2	1.2	0.70	7.13
	북방파제	13			1	1		피복식	0.6	1.5	2	1.7						16.80	0.04
	북방파제	14	1	시석/지	D	1	1	피복식	1.0	1.5	2	2.0						16.80	0.06
여수신항	서방파제 보강	16																	
	서방파제 보강	17																	
	동방파제	18	1	피	D	2	2	TTP(상)	10	1.5	2	3.25	피복식	0.05	1.5	2	0.6	17.96	0.56
	동방파제	19				2	1	TTP	12.5	1.5	2	3.5	피복식	0.35	1.5	2	1.4	17.96	0.70
광양항																			
	제1동서방파제	6			3	3		피복식	0.4	2	1	피복식	0.1	2	2	1.0	0.46	0.86	
	제2동방파제	7				2	2	4원주볼록(상)	4	2		피복식	0.1	2	1	0.6			
거문도항	제2서방파제	8			2	2		피복식(중)	0.4	2	2	2.0	피복식	0.1	2	2	1		
	동방파제	9			2	1		4원주볼록(상)	4	2	1	2.0	피복식	0.1	2	1			
	동방파제	10			2	1		TTP	8	1.5	2	3.1	피복식	0.5	1.5	1	0.8	0.44	18.03
	동방파제	11			2	2		TTP	12.5	1.5	2	3.5	피복식	0.5	1.5	1	0.8	10.62	1.18
	동방파제	12						TTP	16	1.5	2	3.8	피복식	0.5	1.5	1	0.8	10.62	1.51
나로도항	동방파제	6			2	2		피복식	0.7	2.5	1	1.0	피복식	0.2	2.5	1	0.6	8.08	0.09
	서방파제	7			2	2		피복식(상)	0.7	3	2	2.0	피복식	0.1	3	2	1.0	3.63	0.19
	녹동항																		

<표 A4.5> 여수 해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	규격	기초사석		상처콘크리트		피복총		한나축 사면		중간피복총		
				항외측	항내측	형상	하부	피복재	규격	경사도	총수	중간피복재	규격	경사도
여수구항														
	북방파제	12	1	1.5	2	L형	방고/기초	피복석	0.35	2	2	1.4		
	북방파제	13	1	1.5	1.5	L형	기초사석	피복석	0.3	1.5	1			
	북방파제	14	1	1.5	1.5	ㅁ형	기초사석	피복석	0.6	1.5	1	0.85		
여수신항	서방파제 보강	16												
	서방파제 보강	17												
	동방파제	18	1	1.5	1.5	ㅁ형	중간피복	피복석(상)	0.8	1.5	1	1.0	피복석	0.05
	동방파제	19	1	1.5	1.5	ㅁ형	방고/기초	피복석(하)	0.4	2	1	1.0		
관인항														
	제1동서방파제	6	1	2	2	진총		피복석	0.4	2	1	1.0	피복석	0.1
	제2동방파제	7	1	2	2	L형	중간피복	피복석	0.4	2	2	2.0		
거문도항	제2서방파제	8	1	2	1.5	L형	중간피복	피복석(상)	0.4	2	1	0.8	피복석	0.1
	동방파제	9	1	1.5	1.5	L형	방고/기초	피복석	0.5	1.5	1	0.8		
	동방파제	10	1	1.5	1.5	L형	방고/기초	피복석	0.5	1.5	1	0.8		
	동방파제	11	1	1.5	1.5	L형	방고/기초	TTP	16	1.5	2	3.8	피복석	0.5
나로도항	동방파제	6	1	2.5	2.5			피복석	0.7	2.5	1	1.0	피복석	0.5
	서방파제	7	1	3	2	액L형	기초사석	피복석	0.4	2	2	2.0	피복석	0.2
	노동항													

<표 A4.6> 제주해 양수선정 관찰 지정항만의 방파제 현황

항명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료			설계조건						비고			
				설계/보수	그림	연장 (m)	마루높이 (m)	마루폭 (m)	지반고 E.L.(m)	파고(m)	파형	풍속(m/s)	HWL			
제주항	서방파제	16	시석식	보수	M26-16	150.0	+5.0	10.5	-3.0	6.0	NW	NNW	36.5	모래/현무암 비대칭		
	서방파제	17	시석식	보수	M26-17	240.0	+5.5	8.5	-3.0	6.0	NW	NNW	36.5	모래/현무암 비대칭		
	서방파제	18	시석식	보수	M26-18	260.0	+6.0	11.0	-7.0	6.0	NW	NNW	36.5	모래/현무암 비대칭		
	서방파제	19	시석식	보수	M26-19	90.0	+6.0	12.0	-7.5	6.0	NW	NNW	36.5	모래/현무암 비대칭		
	서방파제	20	교목제	보수	M26-20	38.2	+6.0	12.0	-9.5	6.0	NW	NNW	36.5	모래/현무암 비대칭		
	서방파제	21	시석식	보수	M26-21	58.5	+6.0	12.0	-10.0	6.0	NW	NNW	36.5	모래/현무암 비대칭		
	서방파제	22	시석식	보수	M26-22	33.3	+6.0	12.0	-10.0	6.0	NW	NNW	36.5	모래/현무암 비대칭		
	서방파제	23	시석식		M26-23	471.0	+6.0	13.0	-11.0	6.9	NW	NNW	41.5	모래/현무암 비대칭		
	서방파제	24	시석식		M26-24	128.5	+6.0	13.0	-13.0	6.0	12.0	NW	NNW	36.0	모래/현무암 비대칭	
	서방파제	25	시석식		M26-25	168.7	+6.0	13.0	-13.5	6.0	12.0	NW	NNW	36.0	모래/현무암 비대칭	
	서방파제	26	시석식		M26-26	151.8	+6.0	13.0	-15.0	6.0	12.0	NW	NNW	36.0	모래/현무암 비대칭	
	서방파제	27	시석식		M26-27	100.0	+6.0	13.0	-16.0	6.0	12.0	NW	NNW	36.0	모래/현무암 비대칭	
	구동방파제	28	시석식		M26-28	81.0	+5.0	12.0	-5.0	6.9	NW	NNW	41.5	모래/현무암 비대칭		
	구동방파제	29	시석식		M26-29	219.0	+5.0	6.0	-10.5	6.9	NW	NNW	41.5	모래/현무암 비대칭		
	동방파제	30	시석식		M26-30	50.0	+7.0	10.0	-2.5	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	모래/현무암 비대칭	
	동방파제	31	시석식		M26-31	40.0	+7.0	10.0	-4.0	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	모래/현무암 비대칭	
	동방파제	32	시석식		M26-32	4.0	+7.5	10.0	-8.0	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	모래/현무암 비대칭	
	동방파제	33	시석식		M26-33	96.0	+7.5	10.0	-9.0	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	모래/현무암 비대칭	
	동방파제	34	시석식		M26-34	260.0	+7.5	10.0	-11.0	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	모래/현무암 비대칭	
	동방파제	35	시석식		M26-35	150.0	+7.5	10.0	-14.0	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	모래/현무암 비대칭	
	동방파제	36	시석식		M26-36	130.0	+7.5	12.0	-14.5	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	모래/현무암 비대칭	
	동방파제	37	시석식		M26-37	61.0	+6.0	12.0	-16.0	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	모래/현무암 비대칭	
	구동방파제	9	시석식			143.0	+6.0	5.0		8.8	12.0	S	NE	40.2	모래/사력 비대칭	
	동방파제	10	시석식			95.0	+5.0	6.0		8.8	12.0	S	NE	40.2	모래/사력 비대칭	
	동방파제	11	시석식	보수		285.0	+5.2	6.0		8.8	12.0	S	NE	40.2	모래/사력 대침	
	동방파제	12	시석식			71.4	+6.0	8.0	-6.0	8.8	12.0	S	NE	40.2	모래/사력 대침	
	동방파제	13	시석식			59.6	+7.0	11.0	-8.0	8.8	12.0	S	NE	40.2	모래/사력 비대칭	
	동방파제	14	시석식			M27-14	73.0	+7.0	12.0	-7.1	8.8	12.0	S	NE	40.2	모래/사력 비대칭
	동방파제	15	시석식			M27-15	133.0	+7.0	12.0	-	8.8	12.0	S	NE	40.2	모래/사력 비대칭
	동방파제	16	풀목식			M27-16	136.6	+7.0	8.9	-7.5	8.8	12.0	S	NE	40.2	모래/사력 25톤TP 비대칭
	서방파제	17	시석식	보수		M27-17	280.0	+4.0	4.0	-2.0	7.4	12.0	SW	NE	40.2	모래/사력 비대칭
	서방파제	18	시석식	보수		M27-18	280.0	+6.5	6.0		8.8	12.0	S	NE	40.2	모래/사력 비대칭
	남방파제	19	시석식			M27-19	44.0	+7.5	9.7	-21.0	8.8	12.0	S	NE	40.2	모래/사력 비대칭
	남방파제	20	시석식			M27-20	196.0	+8.0	12.7	-21.0	8.8	12.0	S	NE	40.2	모래/사력 대침

<표 A4.6> 제주해 양수산청 관찰 지정항만의 봉파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료		연장(m)	마루높이(m)	마루높이(m)	E.L.(m)	파고(m)	주기(초)	파향	총향	풍속(m/s)	HWL	토질조건	바람	설계조건	비고
				설계/보수	그림														
남방파제	8	시·식·식		Y17-08	75.0	+4.0	4.0	-4.0	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			비대청	대청형상	특징
남방파제	9	시·식·식		Y17-09	125.0	+6.0	4.0	-4.0	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			비대청	상부진충	상부진충
북방파제	10	시·식·식		Y17-10	198.0	+3.0	3.0	+1.0	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			비대청		
북방파제	11	시·식·식		Y17-11	79.0	+4.0	4.0	+0.1	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			비대청		
북방파제	12	시·식·식		Y17-12	91.0	+4.0	6.0	0.0	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			비대청		
북방파제	13	시·식·식		Y17-13	570.0	+4.0	6.0	-2.0	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			비대청	상부진충	
북방파제	14	시·식·식		Y17-14	156.4	+4.0	6.0	-8.0	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			비대청		
북방파제	15	시·식·식		Y17-15	173.4	+5.0	6.5	-6.0	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			비대청		
북방파제	16	시·식·식		Y17-16	6.5	+5.0	6.5	-9.0	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			대청		
북방파제	17	시·식·식		Y17-17	13.5	+5.0	6.5	-9.5	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			대청		
북방파제	18	시·식·식		Y17-18	23.5	+5.0	10.0	-9.5	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			대청		
북방파제	19	시·식·식		Y17-19	215.0	+6.0	8.0	-8.5	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			비대청		
북방파제	20	시·식·식		Y17-20	15.0	+6.0	9.0	-10.5	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			대청		
서방파제	21	시·식·식		Y17-21	167.5	+5.0	6.0	-3.0	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			대청		
서방파제	22	시·식·식		Y17-22	201.0	+6.0	8.0	-7.0	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			비대청		
서방파제	23	시·식·식		Y17-23	293.0	+6.0	8.0	-8.5	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			비대청		
서방파제	24	시·식·식		Y17-24	12.0	+6.0	8.0	-9.0	4.5	4.5	NW	NWW	41.5	2.712			비대청		
서방파제	25	시·식·식		Y17-25	362.0	25.0					S	NNW	41.5	2.712			대청	진일도로	
구동방파제	4	시·식·식		Y18-04	234.0	+4.0	6.0	-8.0	5.1	5.1	S	NNW	20.0	3.194			비대청	상부진충	
구동방파제	5	시·식·식		Y18-05	33.0	+4.1	6.0	-8.0	5.1	5.1	S	NNW	20.0	3.194			비대청	상부진충	
동방파제	6	시·식·식		Y18-06	99.0	+4.5	7.0	+0.7	5.1	5.1	S	NNW	20.0	3.194			비대청		
동방파제	7	시·식·식		Y18-07	40.0	+5.5	7.0	-2.6	5.1	5.1	S	NNW	20.0	3.194			비대청		
동방파제	8	시·식·식	보수	Y18-08	94.0	+7.0	7.0	-4.0	5.1	5.1	S	NNW	20.0	3.194			비대청		
동방파제	9	시·식·식		Y18-09	79.5	12.0	-5.0						20.0	3.194			비대청		
구동방파제	7	시·식·식		Y19-09	239.0	+5.7	6.5	-5.0	2.4	ENE	SE	21.0	2.833			비대청	상부진충		
구동방파제	8	시·식·식	보수		108.5	+5.7	6.5	-5.0	2.4	ENE	SE	21.0	2.833			비대청	상부진충		
서방파제	9	시·식·식		Y19-09	242.0	+4.5	5.0	-5.0	1.2	NNW	SE	21.0	2.833			비대청			
서방파제	10	시·식·식		Y19-10	70.0	+5.0	6.0	-5.0	1.2	NNW	SE	21.0	2.833			비대청			
서방파제	11	시·식·식		Y19-11	5.0	+4.5	5.0	-5.0	1.2	NNW	SE	21.0	2.833			비대청			
서방파제	12	시·식·식		Y19-12	143.0	+4.0	6.5	-5.0	1.2	NNW	SE	21.0	2.833			비대청			
서방파제	13	시·식·식	보수	Y19-13	64.0	+5.0	8.0	-4.0	2.4	ENE	SE	21.0	2.833			비대청	후면보수		
서방파제	14	시·식·식		Y19-14	200.0	+5.0	6.0	-5.0	1.2	NNW	SE	21.0	2.833			비대청			
동방파제	15	시·식·식		Y19-15	70.0	+6.0	8.0	-2.0	2.4	ENE	SE	21.0	2.833			비대청	후면배립		
동방파제	16	시·식·식		Y19-16	39.0	+6.0	8.0		2.4	ENE	SE	21.0	2.833			비대청			
동방파제	17	시·식·식		Y19-17	11.0	+6.9	8.0	-5.0	2.4	ENE	SE	21.0	2.833			비대청			
동방파제	18	시·식·식		Y19-18	140.0	+6.6	12.0	-8.5	2.4	ENE	SE	21.0	2.833			비대청			
동방파제	19	시·식·식		Y19-19	422.0	+6.5	12.0	-15.0	2.4	ENE	SE	21.0	2.833			비대청			
동방파제	20	시·식·식		Y19-20	18.0	+6.5	18.0	-15.0	2.4	ENE	SE	21.0	2.833			대청			
북방파제	21	시·식·식		Y19-21	18.2	+5.0	13.1	-6.2	2.4	ENE	SE	21.0	2.833			대청			
북방파제	22	시·식·식		Y19-22	46.8	+5.0	7.5	-6.7	2.4	ENE	SE	21.0	2.833			비대청			
에월항																			
주자항																			

<표 A4.6> 제주해 양수산정 관찰 지점 항만의 봉파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	하부소단	피복총수	피복총		항의축 시면			중간피복총			Hudson식 적용						
					소단수	소단총	형태	항의축	항내측	피복재	규격	경사도	총수	두께(m)	중간피복재	구격	경사도	총수	두께
서방파제	16				2	1	TPP	3.2	4	2	2.2	피복식	0.5	4	2.5	0.56	5.70		
서방파제	17				2	1	TPP	3.2	4	2	2.2	피복식	0.5	4	4	2.5	0.56	5.70	
서방파제	18				2	1	TPP	12.5	3	2	3.5	피복식	0.5	3	1	0.8	9.51	1.31	
서방파제	19				3	2	TPP	12.5	4	2	3.5	피복식	0.8	4	2	2.0	8.77	1.42	
서방파제	20											피복식	0.1	4	4	2.0			
서방파제	21	-2	사석T	B/H	4	2	TPP(상)	20	2	2	2	피복식	0.8	2	1		16.56	1.21	
서방파제	22	1	피/사T	B/D	4	2	TPP	11.5	2	2	2	피복식	0.3	2	2	1.5			
서방파제	23				2	1	ATB	11.5	2	2	2	피복식	0.3	2	2	1.5	16.56	1.21	
서방파제	24				2	1	TPP	20	2	2	4.1	피복식	0.8	2	1	1.0	16.56	1.21	
서방파제	25				2	1	TPP	20	2	2	4.1	피복식	0.8	2	1	1.0	16.56	1.21	
서방파제	26				2	1	TPP	25	1.5	2	4.4	피복식	0.8	2	1	1.0	16.56	1.21	
서방파제	27				2	2	TPP	25	1.5	2	4.4	피복식	0.8	1.5	1	1.0	22.09	1.13	
구동방파제	28				2	2	피복식	1.0	3	1	1.5	피복식	0.3	3	2	1.5	6.73	0.15	
구동방파제	29	1	사석T	G	2	2	6/4를통(상)	5	1.5	1	2.4	피복식	0.5	1.5	1	1.0			
동방파제	30				2	1	TPP	1.0	1.5	1	1.5	소단							
동방파제	31				2	1	TPP	8	1.5	2	3.0	피복식	0.5	1.5	1	0.8	0.87	9.23	
동방파제	32				2	1	TPP	12.5	1.5	2	3.5	피복식	0.5	1.5	1	0.8	3.55	3.52	
동방파제	33				2	1	TPP	20	1.5	2	4.1	피복식	0.8	1.5	1	1.0	19.95	1.00	
동방파제	34				2	1	TPP	20	1.5	2	4.1	피복식	0.8	1.5	1	1.0	19.95	1.00	
동방파제	35				2	1	TPP	20	1.5	2	4.1	피복식	0.8	1.5	1	1.0	19.95	1.00	
동방파제	36				2	1	TPP	20	1.5	2	4.1	피복식	0.8	1.5	1	1.0	19.95	1.00	
동방파제	37				2	1	TPP	20	1.5	2	4.1	피복식	0.8	1.5	1	1.0	19.95	1.00	
구동방파제	9				3		피복식	0.5	2	1	1.5	피복식	0.4	2	2	2.0	3.46	0.14	
동방파제	10				1	1	피복식	1.0	2	1	1.2	피복식	0.05	2	M	2.5			
동방파제	11				1	1	피복식	1.0	2	1	1.2					0.65	1.55		
동방파제	12				2	2	TPP	10	2	2	3.2	피복식	0.5	2	1	0.8	8.98	1.11	
동방파제	13				2	2	TPP	25	2	2	4.4	피복식	0.8	2	1	1.0	21.29	1.17	
동방파제	14				2	1	TPP	25	2	2	4.4	피복식	0.8	2	1	1.0	14.89	1.68	
동방파제	15				2	1	TPP	25	2	2	4.4	피복식	0.8	2	1	1.0	3.79	6.60	
동방파제	16				1	1	피복식	0.4	3	2	2.0					0.43	0.93		
서방파제	17				3	1	TPP	5	1.5	2	2.6	피복식	0.4	1.5			0.05	103.05	
서방파제	18				2	2	TPP	32	2	2	4.8	피복식	0.8	3	2	2.0			
남방파제	19				3	3	TPP	64	1.5	2	6.0	남각물현	27	1.5	1	1.4	52.26	0.61	
남방파제	20											피복식	0.8	1.5	1	1.0	69.68	0.92	

<표 A4.6> 제주해 양수산충 관찰 지정항만의 봉·폐·체 현황 (계속)

항명	시설명	번호	하부소단		피복총수	피복총		항의총 사면		중간피복총		Hudson식 적용		
			소단수	소단총		형태	항의총	항내총	구역 경사도	총수	도개	경사도	총수	도개
남방파제	남방파제	8			1	1	0.4	3	2	2.0			3.45	0.12
남방파제	남방파제	9			1	1	0.4	3	2	2.0			3.45	0.12
동방파제	동방파제	10			1	1	0.2	1.5	1	0.6			0.11	1.86
북방파제	북방파제	11			2	2	0.6	2	1	0.8	0.2	2	1	0.6
북방파제	북방파제	12			2	2	0.6	3	1	0.8	0.2	3	1	0.6
북방파제	북방파제	13			1	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
북방파제	북방파제	14			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
북방파제	북방파제	15			2	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
북방파제	북방파제	16			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
북방파제	북방파제	17			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
북방파제	북방파제	18			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
북방파제	북방파제	19			2	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
북방파제	북방파제	20			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
서방파제	서방파제	21			1	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
서방파제	서방파제	22			2	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
서방파제	서방파제	23			2	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
서방파제	서방파제	24			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
서방파제	서방파제	25			1	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
구동방파제	구동방파제	4	-1	H	2	2	0.4	3	1	1.0	0.5	2	1	0.8
구동방파제	구동방파제	5			1	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
동방파제	동방파제	6			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
동방파제	동방파제	7			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
동방파제	동방파제	8			3	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
동방파제	동방파제	9			2	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
구동방파제	구동방파제	7			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
구동방파제	구동방파제	8			3	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
서방파제	서방파제	10			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
서방파제	서방파제	11			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
서방파제	서방파제	12			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
서방파제	서방파제	13			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
서방파제	서방파제	14			2	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
동방파제	동방파제	15			2	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
동방파제	동방파제	16			2	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
동방파제	동방파제	17			2	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
동방파제	동방파제	18			2	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
동방파제	동방파제	19			2	1	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
동방파제	동방파제	20			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
북방파제	북방파제	21			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
북방파제	북방파제	22			2	2	0.4	3	2	2.0			0.43	0.93
			애월항											
			추자항											

<표 A4.6> 제주해양수산청 관할 지정항만의 냉장화물 현황 (계속)

항명	시설명	번호	규격	기초사석		상치존크리트		파복층		항내측 사면		중간파복층				
				항외측	경사도	하부	파복재	규격	경사도	총수	두께	중간파복재	규격	경사도	총수	두께
	서방파제	16	1	4	1.5	L형	진출/시식	0.1	1.5	3						
	서방파제	17	1	4	1.5	L형	진출/시식	0.1	1.5	3						
	서방파제	18	1	3	1.5	L형	중간파복	1.0	1.5	1	1.2					
	서방파제	19	1	4	3	L형	진출/시식	파복재	0.8	3	2	2.0	파복재	0.1	3	4
	서방파제	20														2.0
	서방파제	21	1	2	2	L형	진출/중간	파복재	1.0	2	1	1.5	파복재	0.3	2	2
	서방파제	22	1	2	2	L형	진출/중간	파복재	1.0	2	1	1.5	파복재	0.3	2	2
	서방파제	23	1	2	2	L형	방고/시식	파복재	1.0	2	1	1.2				
	서방파제	24	1	2	2	L형	방고/기초	파복재	1.0	2	1	1.2				
	서방파제	25	1	2	2	L형	방고/기초	파복재	1.0	2	1	1.2				
	서방파제	26	1	1.5	2	L형	방고/기초	파복재	1.0	2	1	1.2				
	서방파제	27	1	1.5	1.5	L형	방고/기초	TTP	20	1.5	2	4.1	파복재	0.8	1.5	1
	구동방파제	28	1	3	2	L형	진출/시식	파복재	1.0	2	1	1.5	파복재	0.3	2	2
	구동방파제	29	1	1.5	1.5	L형	중간파복	파복재	1.0	1.5	1	1.5	파복재	0.3	1.5	2
	동방파제	30	1	1.5	1.5	L형	기초시식	파복재	1.0	1.5	1	1.2				
	동방파제	31	1	1.5	1.5	L형	기초시식	파복재	1.0	1.5	1	1.2				
	동방파제	32	1	1.5	1.5	L형	기초시식	파복재	1.0	1.5	1	1.2				
	동방파제	33	1	1.5	1.5	L형	방고/기초	파복재	1.0	1.5	1	1.2				
	동방파제	34	1	1.5	1.5	L형	방고/기초	파복재	1.0	1.5	1	1.2				
	동방파제	35	1	1.5	1.5	L형	방고/기초	파복재	1.0	1.5	1	1.2				
	동방파제	36	1	1.5	1.5	L형	방고/기초	파복재	1.0	1.5	1	1.2				
	동방파제	37	1	1.5	1.5	L형	방고/기초	파복재	1.0	1.5	1	1.2				
	구동방파제	9	1	2		시다리벽	진출/시식									
	동방파제	10	1	2	2			파복재	1.0	2	1	1.2				
	동방파제	11	1	2	2	집침	시식	파복재	1.0	2	1	1.2				
	동방파제	12	1	2	2	L형	방고/중간	TTP	10	2	2	3.2	파복재	1.0	2	1
	동방파제	13	1	2	2	L형	방고/기초	TTP	25	2	2	4.4	파복재	0.8	2	1
	동방파제	14	1	2	2	L형	방고/중간	파복재	0.8	2	1	1.0				
	동방파제	15	1	2	1.5	L형	방고/시식	파복재	0.8	1.5	1	1.0				
	동방파제	16														
	서방파제	17	1	3	2	진출		파복재	0.4	2	2	2.0				
	서방파제	18	1	3	2	L형	진출/중간	파복재	0.4	2	2	2.0				
	남방파제	19	1	2	1.5	32톤TTP	중간파복	TTP	32	1.5	2	4.8	파복재	0.8	1.5	1
	남방파제	20	1	1.5	1.5	64톤TTP	중간파복	TTP	64	1.5	2	6.0	설각블록	27	1.5	1
													파복재	0.8	1.5	1

<표 A4.6> 제주해 양수산정 관찰 지정 항만의 봉파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	규격	기초시설		상자콘크리트		피복층				중간피복재				구역		경사도		총수		총수	두께
				형외측	형내측	형상	하부	피복재	구역	경사도	총수	두께	중간피복재	구역	경사도	총수	두께	구역	경사도	총수	두께		
한림항	남방파제	8	1	3	2	전총	피복재	0.4	2	2	2.0												
	남방파제	9	1	3	2	피제벽	전총	피복재	0.4	2	2	2.0											
	북방파제	10	1	1.5	1			피복재	0.1	1	1	0.5											
	북방파제	11	1	2	1.5			피복재	0.6	1.5	1	0.8	피복식	0.2	1.5	1	0.6						
	북방파제	12	1	3	2	전총		피복재	0.6	2	1	0.8	피복식	0.2	2	1	0.6						
	북방파제	13	1	3	2			피복재	0.4	2	2	2.0											
	북방파제	14	1	2	1.5			피복재	1.0	1.5	1	1.2	피복식	0.3	1.5	1	0.7						
	북방파제	15	1	1.33	1.5	액체형	중간피복	피복재	1.0	1.5	1	1.2											
	북방파제	16	1	2	2	액체형	TTP	8	2	2	3.0	피복식	0.5	2	1	0.8							
	북방파제	17	1	2	2	ㅁ형	중간피복	TTP	8	2	2	3.0	피복식	0.5	2	1	0.8						
화순항	북방파제	18	1	2	2	ㅁ형	중간피복	TTP	8	2	2	3.0	피복식	0.5	2	1	0.8						
	북방파제	19	1	1.5	1.5	L형	기초사면	피복재	0.5	1.5	1	0.8											
	북방파제	20	1	2	2	ㅁ형	기초사면	TTP	10	2	2	3.2	피복식	1.0	2	1	1.2						
	서방파제	21	1	2	2	ㅁ형	시석	피복재	1.0	2	1	1.2											
	서방파제	22	1	2	2	L형	중간피복	피복재	1.0	2	1	1.2											
	서방파제	23	1	1.5	1.5	L형	기초사면	피복재	0.5	1.5	1	0.8											
	서방파제	24	1	2	2	ㅁ형	기초사면	TTP	10	2	2	3.2	피복식	0.5	2	1	0.8						
	서방파제	25	1	2	1.5	도로포장	매립토석	피복재	0.2	1.5	1												
	구동방파제	4	1	3	2	돌출진총	시석	피복재	0.4	2	2	2.0	피복식	0.07	2	M	2.0						
	구동방파제	5	1	3	2	진형	피복재	0.0	2	2	2.0	피복식	0.3	1.5	1	0.6							
성산포항	동방파제	6	1	2	1.5	ㅁ형	시석	피복재	1.0	1.5	2	2.5	피복식	0.3	1.5	1	0.6						
	동방파제	7	1	2	1.5	ㅁ형	중간피복	피복재	1.0	1.5	1	1.2	피복식	0.3	1.5	1	0.6						
	동방파제	8	1	2	1.5	ㅁ형	피복재	1.0	1.5	1	1.2	피복식	0.6	1.5	1	0.8							
	동방파제	9	1	1.5	1.5	ㅁ형	방파기초	피복재	1.0	1.5	1	1.2											
	구동방파제	7	1	3	2	피제벽	피복진층	피복재	0.8	2	2	1.0	사석	0.2	2	3	2.0						
	구동방파제	8	1	3	2	피제벽	피복진층	피복재	0.8	2	2	1.0	사석	0.2	2	3	2.0						
	서방파제	9	1	3	2	ㅁ형	피복재	0.8	2	1	1.0	사석	0.2	2	1	0.6							
	서방파제	10	1	3	2	L형	피복재	0.8	2	1	1.0	사석	0.2	2	1	0.6							
	서방파제	11	1	3	2	ㅁ형	피복재	0.8	2	1	1.0	사석	0.2	2	1	0.6							
	서방파제	12	1	3	2	L형	중간피복	TTP	8	2	2	3.0	피복식	1.0	2	1	1.2						
여울항	서방파제	13	1	1.33	2	ㅁ형	방파기초	피복재	0.8	2	1	1.0											
	서방파제	14	1	1.33	2	ㅁ형	중간피복	피복재	0.8	2	1	1.0											
	동방파제	15	1	1.33	1.5	ㄴ형	시석	피복재	0.5	1.5	1	0.8											
	동방파제	16	1	1.33	1.5	ㄴ형	시석	피복재	0.8	1.5	1	1.0											
	동방파제	17	1	1.33	1.5	ㄴ형	기초사면	피복재	0.8	1.5	1	1.0											
	동방파제	18	1	1.5	1.5	ㄴ형	방파기초	피복재	1.0	1.5	1	1.2											
	동방파제	19	1	1.5	1.5	ㄴ형	방파기초	피복재	1.0	1.5	1	1.2											
	동방파제	20	1	1.5	1.5	ㅁ형	방파기초	TTP	40	1.5	2	5.1	피복식	0.8	1.5	1	1.0						
추자항	북방파제	21	1	1.5	1.5	중공심각블럭	8	1.5	2.3	2.3	피복식	0.5	1.5	1	0.8								
	북방파제	22	1	1.5	1.5	중공심각블럭	8	1.5	2.3	2.3	피복식	0.5	1.5	1	0.8								
	추자항																						

<표 A4.7> 미산해 양수산정 관찰 지정 항만의 방파제 현황

항명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료			설계조간					비고						
				설계/보수	그립	연장 (m)	마루높이 (m)	마루폭 (m)	지반고 (E.L.(m))	파랑 (파고(m))	파랑 (주기초(m))	파랑 (파향)	비람 (풍속(m/s))	조우(m)	H WL	토질조건	대청첨성	특징
미산항																		
동영항	동호만 방파제 도남 방파제	9 14 15	사석식 사석식 흔설제	M05-09 M05-14 M05-15	145.0 850.0 627.0	+3.3 +4.5 +4.0	5.0 4.0 4.0	-6.0 -8.0 -13.0					2.82	2.82	2.82	비대칭 비대칭 대칭	기초처환 기초준설	
삼천포항	방파제 방파제 방파제 방파제 방파제 방파제 방파제 방파제 방파제	9 10 11 12 13	사석식 사석식 사석식 사석식 사석식	M06-09 M06-10 M06-11 M06-12 M06-13	225.0 160.0 140.0 113.0 10.0	+5.59 +6.5 +6.5 +6.5 +6.5	5.0 9.0 9.0 9.0 9.0	-2.0 -4.0 -10.0 -15.8 -15.8	2.0 5.4 5.4 5.4 5.4	6.0 15.0 15.0 15.0 15.0	SE SW SW SW SW	WSW SW SW SW SW	18.5 18.5 18.5 18.5 18.5	3.296 3.296 3.296 3.296 3.296	모래/시질이토 모래/시질이토 모래/시질이토 모래 모래/시질이토	비대칭 비대칭 비대칭 비대칭 비대칭	혼성제	
장승포항	서방파제 동방파제	7 8	사석식 사석식	보수 보수	M07-07 M07-08	145.0 86.0	+4.5 +4.5	6.0 6.0	-2.0 -2.5	4.5 12.0	S S	NE NE	13.9 13.9	1.934 1.934	전석 전석	비대칭 비대칭	상부진충 상부진충	
옥포항	남북방파제	1	사석식															
고현항																		
진해항																		

<표 A4.7> 마산해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	하부소단	피복총수	항외측 사면				Hudson식 적용										
					소단수	소단총	형태	항외측 헉내측	피복재	구격	경사도	총수	중간피복재	구격	경사도	총수	두께	인정질량	질량비
마산항																			
통영항	방파제	9			2	2	피복식	0.4	2.5	1	1.0	피복식	0.15	2.5	1	0.8			
	동호만 방파제	14			2	2	피복식	1.0	1.5	2	2.4	피복식	0.15	1.5	1	0.6			
	도남 방파제	15																	
삼천포항	방파제	9			1	1	피복식	0.55	2	1	1.0	피복식	0.4	1.33	2	1.5	0.65	0.85	
	방파제	10			2	1	TTP	12.5	1.33	2	3.5	피복식	0.4	1.33	2	1.5	4.00	3.12	
	방파제	11	1	시석T	B	2	1	TTP	12.5	1.33	2	3.5	피복식	0.4	1.33	2	1.5	18.16	0.69
	방파제	12			2	1	TTP	12.5	1.33	2	3.5	피복식	0.5	1.33	1	0.8	18.16	0.69	
	방파제	13			2	1	TTP	20	1.33	2	4.1	피복식	0.5	1.33	1	0.8	18.16	1.10	
장승포항	서방파제	7			2	1	TTP	8	1.75	2		피복식(상)	0.4	1.33			0.38	21.04	
	동방파제	8			2	1	TTP	8	1.75	2		피복식(하)	0.4	2	M				
진해항												피복식(상)	0.4	1.5			0.74	10.77	
울포항	남북방파제	1	1	시석T	G	2	1	6/4풀록(상)	6.3	1.5	2.8	피복식	0.2	1.5	1	0.6			
								풀록식(중)	1.0	1.5	1	1.2	피복식	0.5	1.5	1			
고현항								풀록식(하)	0.5	1.5	1	0.8							

<표 A4.7> 미산체 양수산정 관찰 지침 항만의 냉방제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	규격	기초시식		상치콘크리트		항내측 시면									
				항외측	경사도	하부	피복재	규격	경사도	총수	두께	중간피복재	규격	경사도	총수	두께	
마산항																	
통영항	방파제	9	1	2.5	2												
	동호만 방파제	14	1	1.5	1												
	도남 방파제	15															
삼천포항	방파제	9	1	2	1.5	L형	방고	피복재	0.4	2	1	1.0	피복재	0.15	2	1	0.8
	방파제	10	1	1.33	1.5	□형	방고/속채움	피복재	0.5	1	2	1.6	피복재	0.15	1	1	0.6
	방파제	11	1	1.33	1.5	□형	방고/속채움	피복재	1.0	1.5	2	2.0					
	방파제	12	1	1.33	1.5	□형	방고/[기]초	피복재	1.0	1.5	2	2.0					
	방파제	13	1	1.33	1.5	□형	방고/[기]초	피복재	1.0	1.5	1	1.2					
장승포항	서방파제	7	1	1.33	1.5	역L형	진총/사석	피복재(상)	0.4	1.5							
	동방파제	8	1	1.5	2	3	역L형	진총/사석	피복재(하)	0.4	3	M					
진해항																	
옥포항	남북방파제	1	1	1.5	1.5	L형	중간피복	피복재(상)	1.0	1.5	1	1.2					
								피복재(하)	0.2	1.5	1	0.6					
고현항																	

<표 A4.8> 부산해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황

현명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료			설계조건						비고				
				설계/보수	그림	연장	마루높이	마루폭	지반고	파랑	파고(m)	주기(초)	파향	풍속(m/s)	조위(m)	HWL	토질조건
부산항	남북방파제부두	30	흔성제	M01A-30	1,050.0	+2.9	14.6	-10.0	7.3	13.0	SE	NNE	34.7	1.282	실트	대침	기초자환
	오목도방파제	35	흔성제	M01A-35	1,004.0	+6.0	20.0	-22.0	7.1	15.0	SW/NE	SE	34.7	1.5	모래	대침	기초자환
	남북방파제	36	흔성제	M01A-36	1,050.0	+2.9	7.6	-10.0	7.3	13.0	SE	NNE	34.7	1.282	실트	비대침	기초자환
	조도방파제A	43	시식식	M01A-43	635.0	+5.0	10.0		7.3	13.0	SE	NNE	34.7	1.282	실트	비대침	
	조도방파제B	44	흔성제	M01A-44	700.0	+6.0	20.0		6.4	15.0	SW/NE	SE	34.7	1.5	이토	대침	기초자환
	김천항	7	흔성제	M01B-07	650.0	+6.2	22.0		9.5	15.0	SW	NNE	34.7	1.282	흔토	비대침	기초자환
김천항	동방파제	8	흔성제	M01B-08	500.0	+4.5	17.0	-16.0	6.3	12.0	SE	NNE	34.7	1.282	이토	비대침	기초자환
	남천항	7	피복제						5.7	13.0	SE	NNE	34.7	1.282	비대침	흔성제	
	다대포항	방파제(동령목재)	1	시식식	M01D-01	160.0	+3.3	7.0		5.0		SE	NNE	34.7	1.282	시질토	비대침
부산남항	서방파제	5	시식식	Y01-05	440.0	+5.0	10.5		7.3	13.0	SE	NNW	34.7	1.282	비대침	후면안벽	
	동방파제	6	시식식	Y01-06	134.0	+5.0	7.0		7.3	13.0	SE	NNE	34.7	1.282	비대침		

<표 A4.8> 부산해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	허부소단		피복총수		항외측 사면			중간피복총			Hudson식 적용			
			소단수	소단총	형태	항외측	항내측	피복재	규격	경시도	총수	구격	경사도	총수	두께	인정질량
부산항	남북방파제부두	30														
	오륙도방파제	35														
	남북방파제	36														
	조도방파제A	43														
	조도방파제B	44														
	서방파제	7														
감천항	동방파제	8														
남천항	방파제	7														
대포항	방파제(동명목재)	1														
부산남항	서방파제	5														
	동방파제	6														

<표 A4.8> 부산해양수산청 관할 지정 항만의 냉장화물 현황 (계속)

항명	시설명	번호	기초사석		상차くん크리트			피복층			총내측 사면						
			규격	경사도	항외측	항내측	형상	하부	피복재	규격	경사도	총수	두께	중간피복재	규격	증사도	총수
부산항	남북방파제부두	30															
	오른도방파제	35															
	남북방파제	36															
	조도방파제 A	43	1	3	2	2	L형/파자벽	전총/시석	피복식	0.5	2	1	0.8				
	조도방파제 B	44															
김천항	서방파제	7															
	동방파제	8															
남천항	방파제	7															
	방파제																
디대포항	방파제(동명목자)	1	1	2	1.5	액비형	사석/석축	피복식	0.5	1.5	1	1.0					
	서방파제	5	1	1.5		口형	방고/지반										
부산남항	동방파제	6	1	2	2	口형	중간피복	피복식	1.0	2	1.2	사석	0.0225	2			
	피복식											0.5	2				

<표 A4.9> 울산해양수산청 관할 지정항만의 봉파제 현황

항명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료		설계 조건						비고		
				설계/보수	그림	연장	마루높이	마루폭	지반고	파랑	바람	조위(m)		
울산항	봉파제	17	사석식		M16A-17	200.0	+4.0	7.0	-10.0	3.2	10.3	S	NNE 31.7	0.608 이토/시질
	동방봉파제	26	흔성제		M16A-26	209.0	+6.5	15.0	-18.0	6.5	14.0	SE/SSE		0.608 비대칭
	동방봉파제	27	흔성제		M16A-27	190.0	+6.5	18.0	-20.2	6.5	14.0	SE/SSE		0.608 비대칭
	동방봉파제	28	흔성제		M16A-28	247.0	+6.5	19.0	-21.5	6.5	14.0	SE/SSE		0.608 비대칭
남방봉파제	7	사석식		M16B-07	120.0	+5.0	8.7	-5.0	3.2	10.3	S	NNE 31.7	0.608 비대칭	
	남방봉파제	8	흔성제		M16B-08	300.0	+5.0	12.0	-22.0	3.2	10.3	S	NNE 31.7	0.608 비대칭
온신항	남방봉파제	9	사석식		M16B-09	590.0	+5.0	9.4		3.2	10.3	S	NNE 31.7	0.608 비대칭
	북방봉파제	10	사석식		M16B-10	220.0	+5.0	7.0	-6.0	3.2	10.3	S	NNE 31.7	0.608 비대칭
	북방봉파제	11	사석식		M16B-11	200.0	+5.0	8.7	-10.5	3.2	10.3	S	NNE 31.7	0.608 비대칭
	북방봉파제	12	흔성제		M16B-12	930.0	+5.0	12.0		3.2	10.3	S	NNE 31.7	0.608 비대칭
포항	남방봉파제	1	사석식		M16C-01	550.0	+4.5	6.0		3.2	10.3	S	NNE 31.7	0.608 비대칭
	북방봉파제	2	사석식		M16C-02	230.0	+4.0	6.0		3.2	10.3	S	NNE 31.7	0.608 비대칭

<표 A4.9> 울산해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	하부소단	피복총수	항외측 시면						Hudson식 적용								
					소단수	소단총	형태	항외측	항내측	피복재	규격	경사도	총수	두께(m)	중간피복총	총수	두께	안정질량	질량비
울산항	방파제	17	1	사석T	B	2	1	TTP(상)	5	1.5	2	2.6	피복식	0.3	1.5	1	0.8	48.52	0.10
	동방파제	26						피복식(하)	0.5	1.5	M	소단							
	동방파제	27																	
	동방파제	28																	
온산항	남방파제	7																	
	남방파제	8																	
	남방파제	9	1	사석T	B	2	2	TTP	25	1.33	2	4.4	피복식	0.5	1.33	1	0.9	3.78	6.62
	북방파제	10						피복식	0.5			4.5	피복식	0.5	1.33	1	0.9	3.78	6.62
포항항	북방파제	11						TTP	20	1.33	2	4.0	피복식	0.5	1.33	1	0.9	3.78	5.29
	북방파제	12						TTP	25	1.33	2	4.4	피복식	0.5	1.33	1	0.9	3.78	6.62
	남방파제	1	1	피	F	2	2	피복식(상)	2.0	4	2	2.5	피복식	0.25	4	1	1.0	1.39	1.43
	북방파제	2	1	기	E	2	2	피복식	1.85	4	2	2.5	피복식	0.15	4	2	1.0	1.39	1.33

<표 A4.9> 울산해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	기초사석		상치콘크리트		항내측 시면										
			규격	경사도	항내측	형상	하부	피복재	구격	경사도	총수	두께	중간피복재	규격	경사도	총수	두께
울산항	방파제	17	1	1.5	1.5	L형	방파/기초	피복식	0.5	1.5	1	0.8					
	동방파제	26															
	동방파제	27															
	동방파제	28															
운산항	남방파제	7	1	1.33	1.5	ㅁ형	중공블럭	피복식	1.1	1.5	1	1.2					
	남방파제	8															
	남방파제	9	1	1.33	1.33												
	남방파제	10	1	1.33	1.5	ㅁ형	중공블럭	TTP	25	1.33		4.5	피복식	0.5	1.33	1	0.9
포항항	북방파제	11	1	1.33	1.5	ㅁ형	중공블럭	피복식	0.5	M	소단						
	북방파제	12															
	남방파제	1	1	4	1.5												
	북방파제	2	1	4	3												
대구항	남방파제	1						피복식(상)	1.2	1.5	2	2.1	피복식	0.25	1.5	1	1.0
	북방파제	2						피복식(하)	0.25	1.5	3	3.1	피복식	0.15	3	2	1.0
								피복식	1.2	3	2	2.0					

<표 A4.10> 포항해양수산청 관찰 지정 항만의 봉파제 현황

항명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료				설계 조건				비고		
				설계/보수		그림	연장 (m)	마루높이 (m)	마루폭 (m)	지반고 (m)	파랑		조위(m)	HWL
				E.L.(m)	파고(m)						주기(초)	파향	풍향	풍속(m/s)
봉사제	11	시식식		M25A-11	488.7	+2.5	5.0	-3.7	4.5	12.0	NE	SW	39.8	0.246
봉사제	12	시식식		M25A-12	51.3	+2.5	4.0	-6.3	4.2	12.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	14	시식식			303.0	+3.0	6.0	-5.0	4.5	12.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	15	시식식	보수	M25A-15	143.5	+3.0	6.0	-5.0	4.5	12.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	16	시식식	보수	M25A-16	101.5	+2.0	6.0	-5.0	4.5	12.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	17	시식식	보수	M25A-17	69.0	+3.5	6.0	-6.0	4.5	12.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	18	시식식	보수	M25A-18	45.0	+3.5	6.0	-6.5	4.5	12.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	19	시식식		M25A-19	186.5	+3.5	10.0	-7.4	4.5	12.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	20	시식식		M25A-20	13.5	+3.5	15.0	-7.4	5.2	12.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	21	시식식		M25A-21	138.0	+3.5	10.0	-7.7	5.2	12.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	22	시식식		M25A-22	10.0	+4.0	10.0	-8.0	5.2	12.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	30	교복제		M25B-30	561.0	+6.8	13.5	-10.6	5.0	10.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	31	혼성제		M25B-31	456.0	+4.0	13.6		5.0	10.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	32	교복제		M25B-32	126.54	+4.0	3.6		5.0	10.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	33	혼성제		M25B-33	507.0	+6.0	13.6	-13.0	5.0	10.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	34	혼성제		M25B-34	200.0	+6.0	14.6	-14.0	5.0	10.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	35	혼성제		M25B-35	185.0	+6.0	14.6	-15.0	5.0	10.0	NE	SW	39.8	0.246
봉파제	36	교복제		M25B-36	15.0	+6.0	14.6	-15.0	5.0	10.0	NE	SW	39.8	0.246
동봉파제	37	교복제		M25B-37	300.0	+4.0	9.3	-13.0	5.6	10.0	NE	SW	39.8	0.246
동봉파제	38	교복제		M25B-38	250.0	+5.5	11.0	-11.0	5.6	10.0	NE	SW	39.8	0.246
부봉파제	9	시식식	보수	Y11-09	182.0	+5.0	9.0	-6.5	5.5	13.0	NE	SW	39.8	0.232
부봉파제	10	시식식		Y11-10	125.0	+5.0	9.0	-10.0	5.5	13.0	NE	SW	39.8	0.232
북봉파제	11	시식식		Y11-11	150.0	+2.8	8.0	-10.0	5.5	13.0	NE	SW	39.8	0.232
북봉파제	12	시식식		Y11-12	110.0	+3.5	7.0	-10.0	5.5	13.0	NE	SW	39.8	0.232
북봉파제	13	시식식		Y11-13	10.0	+4.1	10.0	-10.0	5.5	13.0	NE	SW	39.8	0.232
남봉파제	14	시식식		Y11-14	115.0	+2.0	4.0	-2.0	2.7	12.0	NE	SW	39.8	0.232
남봉파제	15	시식식		Y11-15	215.0	+4.0	10.0	-11.5	6.1	13.0	NE	SW	39.8	0.232
남봉파제	16	시식식		Y11-16	114.0	+4.0	11.0	-11.5	6.1	13.0	NE	SW	39.8	0.232
남봉파제	17	시식식		Y11-17	16.0	+4.6	12.0	-11.5	2.7	12.0	NE	SW	39.8	0.232

<표 A4.10> 포항해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료			설계조건			비고							
				설계/보수	그림	연장 (m)	마루높이 (m)	마루폭 (m)	지반고	파랑 주기(초)	파랑 풍속(m/s)	조위(m)	HWL				
월포항	방파제	3		Y12-03	157.0	+5.0	7.7		4.0	12.0	NE	SW	39.8	0.252	모래	비대칭 상부진충	
	방파제	5	사석식	Y14-05	370.0	+3.5	9.0	-4.0	3.0	11.0	SE	NNW	23.7	0.278	모래	대칭	
	방파제	6	사석식	Y14-06	118.0	+2.0	6.0	-4.0	3.0	11.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	대칭	
	방파제	7	사석식	Y14-07	64.0	+3.5	9.0	-7.0	4.5	11.0	SE	NNW	23.7	0.278	모래	비대칭 방파제	
	동법사제	8	사석식	Y14-08	83.0	+2.5	6.0	-5.0	3.5	14.0	E/NE	W	21.0	0.278	모래	비대칭	
	방파제	9	사석식	보수	Y14-09	70.0			2.6	14.0	E/NE	W	23.7	0.278	모래	비대칭	
	방파제	10	사석식	보수	Y14-10	70.0	+4.1	6.0	-4.0	2.6	14.0	E/NE	W	23.7	0.278	모래	비대칭
	방파제	11	사석식	보수	Y14-11	329.0	+4.1	6.0	-4.0	2.6	14.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	비대칭 후면매립
	방파제	12	사석식	Y14-12	153.0	+5.0	9.0	-2.5	3.1	14.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	비대칭	
	방파제	13	사석식	Y14-13	70.0	+5.0	9.0	-5.6	3.1	14.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	비대칭	
	방파제	14	사석식	Y14-14	226.0	+5.0	9.0		3.1	14.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	비대칭	
	방파제	15	사석식	Y14-15	84.0	+5.0	9.0		4.2	14.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	비대칭	
	방파제	16	사석식	Y14-16	55.0	+5.0	9.0	-13.5	4.2	14.0	E/NE	W	23.7	0.278	모래	비대칭	
	방파제	17	사석식	Y14-17	89.0	+5.0	9.0		4.2	14.0	E/NE	W	23.7	0.278	모래	비대칭	
	방파제	18	사석식	Y14-18	64.5	+4.5	12.0	-14.0	6.7	14.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	비대칭	
	방파제	19	사석식	Y14-19	17.5	+4.6	13.0	-20.0	7.2	14.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	비대칭	
	북방파제	7	블록식	Y16-07	18.9	+9.0	3.0	-11.0	7.6	SSW			0.314	비대칭	호안		
	북방파제	8	블록식	Y16-08	44.1			-10.2	7.6	SSW			0.314	비대칭	호안		
	북방파제	9	사석식	Y16-09	23.0	+4.96	13.8	-13.0	7.6	12.0	S/SW	NE	46.2	0.314	모래	대칭 TTP코아	
	북방파제	10	사석식	Y16-10	17.0	+6.0	11.5	-15.0	7.6	12.0	S/SW	NE	46.2	0.314	모래	대칭 TTP코아	
	북방파제	11	사석식	Y16-11	41.6	+6.0	13.4		7.6	SSW			0.314				
	북방파제	12	블록식	Y16-12	7.5	+6.0	11.5	-4.0	7.6	12.0	S/SW	NE	46.2	0.314	모래	대칭 TTP코아	
	북방파제	13	사석식	Y16-13	32.5	+6.0	11.5	-9.0	7.6	12.0	S/SW	NE	46.2	0.314	모래	대칭 TTP코아	

<표 A4.10> 포항해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	하부소단	파복총수	항외측 사면						Hudson식 적용								
					소단수	소단총	형태	항외측	파복재	규격	경사도	총수	두께	안정질량	질량비				
포항구항	방파제	1.1	F	1	1	1	파복식	1.0	3	1	1.2								
	방파제	1.2		2	2	TTP	8	2	2	3.0	피복식	0.2	2	1	0.6				
	방파제	1.4		1	1	피복식	0.5	3	2	2.0					6.73	0.07			
	방파제	1.5		2	1	TTP	10	3			피복식	0.5	3	2	3.47	2.89			
	방파제	1.6		2	1	TTP	10	3	2	3.2	피복식	0.5	3	2	3.47	2.89			
	방파제	1.7	-1	사석T	H	3	1	TTP	10	2	3.2	피복식	0.5	2	1	6.99	1.43		
	방파제	1.8	-1		H	3	2	ATB	2	1.4	피복식	0.5	2	1	1.0	6.99			
	방파제	1.9	1	J	E	2	1	TTP	10	1.33	2	3.2	피복식	0.5	1.33	1	1.0	10.51	0.95
	방파제	2.0	1	J	E	2	1	TTP	12.5	2	2	3.5	피복식	0.35	2	1	0.7	6.99	1.79
	방파제	2.1	1	J	E	2	1	TTP	12.5	2	2	3.5	피복식	0.35	2	1	0.7	10.78	1.16
포항신항	방파제	2.2	1	중	D	2	2	TTP	20	2	2	4.1	피복식	0.5	2	1	0.8	10.78	1.85
	방파제	3.0																	
	방파제	3.1																	
	방파제	3.2																	
	방파제	3.3																	
	방파제	3.4																	
	방파제	3.5																	
	방파제	3.6																	
	동방파제	3.7																	
	동방파제	3.8																	
구룡포항	북방파제	9		2		TTP	8	2	2	3.0	파복식(상)	0.3	2	2	2	7.61	1.05		
	북방파제	10		2		TTP	12.5	3/2	2	3.5	파복식	1.0	3/2	2	2.5	8.51	1.47		
	북방파제	11		2	3	TTP	12.5	3/2	2	3.5	파복식	1.0	3/2	2	2.5	8.51	1.47		
	북방파제	12		2	1	TTP	12.5	2	2	3.5	파복식	0.5	2	1	0.8	12.76	0.98		
	북방파제	13		2	2	TTP	20	2	2	4.1	파복식	1.0	2	1	1.2	12.76	1.57		
	남방파제	14		1	1	파복식	1.0	2	1	1.2						0.65	1.55		
	남방파제	15		2	1	TTP	20	2	2	4.1	파복식	1.0	2	1	1.2	17.41	1.15		
	남방파제	16		2	1	TTP	25	1.5	2	4.4	파복식	0.8	1.5	1	1.0	23.21	1.08		
	남방파제	17		2	2	TTP	25	2	2	4.4	파복식	0.8	2	1	1.0	1.51	16.56		

<표 A4.10> 포항해양수산청 관할 지정항만의 봉파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	하부소단	피복총수			항외측 사면			Hudson식 적용								
				소단수	소단총	형태	항외측	항내측	피복재	규격	경사도	총수	중간피복재	규격	경사도	총수	두께	안정질량
월포항	봉파제	3			3	2	TPP	5	3	2		TPP	0.8	3	2	2.0	3.27	1.53
	봉파제	5			1	1	피복식	0.8	3	2		TPP	0.8	3	2	2.0	3.20	
	봉파제	6			1	1	피복식	0.8	3	2		TPP	0.8	3	2	2.0	3.27	1.53
	봉파제	7			2	1	TPP	10	1.5	2	3.2	피복식	0.2	1.5	2	1.2	9.32	1.07
후포항	동방사제	8	1	피복T	B	2	TPP	5	1.33	2	2.6	피복식	0.5	1.33	2	1.4	4.94	1.01
	봉파제	9			1		TPP	5		2	2.6	피복식					2.03	2.47
	봉파제	10			2	1	TPP	5		2	2.6	피복식	0.8	3	2	2.0	0.90	5.56
	봉파제	11			2	1	TPP	5		2	2.6	피복식	0.8	3	2	2.0	0.90	5.56
	봉파제	12			2	1	TPP	5	1.5	2	2.6	피복식	0.55	1.5	1	0.8	0.87	5.77
	봉파제	13	2	피/사	A	2	TPP	5	2	2	2.6	피복식	0.5	2	1	1.0	2.28	2.19
	봉파제	14	2	피/중	D	2	TPP	5	2	2	2.6	피복식	0.5	2	1	0.8	2.28	2.19
	봉파제	15			2	1	TPP	12.5	1.5	2	3.5	피복식	0.5	1.5	1	0.8	7.58	1.65
	봉파제	16	1	사식	A	2	TPP	12.5	1.5	2	3.5	피복식	0.5	1.5	1	0.8	7.58	1.65
	봉파제	17			2	1	TPP	12.5	1.5	2	3.5	피복식	0.5	1.5	1	0.8	7.58	1.65
	봉파제	18	1	사식T	C	2	TPP	32	1.5	2	4.8	피복식	0.8	1.5	1	1.0	30.75	1.04
	봉파제	19			2	1	TPP	40	1.5	2	5.1	피복식	0.8	1.5	2	2.0	38.16	1.05
울릉항	북방파제	7					TPP	32		2	4.8	TPP	20					
	북방파제	8					TPP	32		2	4.8	TPP	20					
	북방파제	9			2	2	6/4틀록	20	1.33	2	4.1	피복식	1.0	1.33	1	1.2		
	북방파제	10			2	2	TPP	20	1.33	2	4.1	피복식	1.0	1.33	1	1.2	50.62	0.40
	북방파제	11			2	2	TPP	32	1.5	2	4.8	피복식	1.0	1.5	1	1.2	5.05	6.33
	남방파제	12			1	1	TPP	20	1.5	2	4.1	피복식						
	남방파제	13			2	2	TPP	20	1.5	2	4.1	피복식	1.0	1.5	1	1.2	44.88	0.45

<표 A4.10> 포항해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	구격	기초사석		상치콘크리트		파복총		항내측 시면		중간파복총					
				항외측	항내측	형상	하부	파복재	파복재	구격	경사도	총수	두께	구격	경사도	총수	두께
포항구항	방파제	11	1	3	2	ㅁ 형	파복재	0.3	1.0	2	1	1.2					
	방파제	12	1	2	2	ㅁ 형	방파	TTP	8	2	2	3.0	피복식	0.2	2	1	0.6
	방파제	14	1	3	2.5	L 형	방파/사석	파복재	0.3	2.5	2	1.5					
	방파제	15	1	3	2	액비형	방파/사석	파복재	0.3	2.5	2	1.5					
	방파제	16	1	3	2	액비형	방파/사석	파복재	0.3	2.5	2	1.5					
	방파제	17	1	2	2.5	L 형	진총	파복재	0.5	2.5	1	1.0					
	방파제	18	1	1.33	2	L 형	진총/사석	파복재	0.5	2	1	1.0	피복식	0.3	2	1	0.7
	방파제	19	1	2	1.5	L 형	방파/사석	파복재	0.8	1.5	1	1.0					
	방파제	20	1	2	2	ㅂ 형	방파/사석	파복재	0.35	2	1	0.7					
포항신항	방파제	21	1	2	1.5	L 형	방파/사석	파복재	0.8	1.5	1	1.0					
	방파제	22	1	2	2	ㅂ 형	방파/사석	TTP	20	2	2	4.1	피복식	0.5	2	1	0.8
	방파제	30															
	방파제	31															
	방파제	32															
	방파제	33															
	방파제	34															
	방파제	35															
	방파제	36															
구릉포항	동방파제	37															
	동방파제	38															
	북방파제	9	1	2	ㅂ 형	기초사석											
	북방파제	10	1	3/2	2	ㅂ 형	근고블록										
	북방파제	11	1	3/2	2	ㅁ 형	방파/근고	파복재	0.5	2	2	2.0	피복식	0.5	2	M	2.5
	북방파제	12	1	2	1.5	ㅁ 형	방파/기초	파복재	1.0	1.5	1	1.2	피복식	1.0	2	1	2.0
	북방파제	13	1	2	2	ㅁ 형	방파/기초	TTP	20	2	2	4.1	피복식	1.0	2	1	1.2
	남방파제	14	1	2	1.5	ㅁ 형	기초사석	파복재	0.5	1.5	1	0.8					
	남방파제	15	1	2	1.5	ㅁ 형	방파/기초	파복재	1.0	1.5	1	1.2					
	남방파제	16	1	1.5	1.5	ㅁ 형	방파/기초	파복재	1.0	1.5	1	1.2					
	남방파제	17	1	2	2	ㅂ 형	방파/기초	TTP	25	2	2	4.4	피복식	0.8	2	1	1.0

<표 A4.10> 포항해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	규격	기초사석		상치콘크리트		피복총		항내축 시면		중간피복총					
				항외축	항내축	형상	하부	방파/진총	피복재	구격	경사도	총수	두께	구격	경사도	총수	두께
월포항	방파제	3	1	3	2	L형	방파/진총	피복재	0.8	2	2.0	피복식	0.2	2	3	2.0	
	방파제	5	1	3	3	ㅁ형	피복진총	피복식	0.8	3	2.0						
	방파제	6	1	3	3	전총	피복식	0.8	3	2.0							
	방파제	7	1	1.5	1.5	ㅁ형	방파/기초	피복식	1.0	1.5	2	2.4					
후포항	동방사제	8	1	1.5	1.5	ㅁ형	사석	피복식	0.8	1.5	1	1.0	피복식	0.5	1.5	1	0.7
	방파제	9															
	방파제	10	1	3	3	L형	진총	피복식	0.8	3	2	2.0					
	방파제	11	1	3	3	L형	진총	피복식	0.8	3	2	2.0					
	방파제	12	1	1.5	1.5	L형	방파/기초	피복식	0.8	1.5	1	1.0					
	방파제	13	1	2	1.5	L형	방파/기초	피복식	0.9	1.5	1	1.0					
	방파제	14	1	2	1.5	L형	방파/기초	피복식	0.9	1.5	1	1.0					
	방파제	15	1	1.5	1.5	L형	방파/기초	피복식	0.9	1.5	1	1.0					
	방파제	16	1	1.5	1.5	L형	방파/기초	피복식	0.9	1.5	1	1.0					
	방파제	17	1	1.5	1.5	L형	방파/기초	피복식	0.9	1.5	1	1.0					
	방파제	18	1	1.5	1.5	L형	방파/기초	피복식	1.0	1.5	1	1.2					
	방파제	19	1.5	1.5	ㅁ형	방파/기초	피복식	1.0	1.5	2	2.4						
울릉항	북방파제	7				사다리											
	북방파제	8															
	북방파제	9	1	1.33	1.33	10톤 TTP 6/4블록	20	1.33	2	4.1	피복식	1.0	1.33	1	1.2		
	북방파제	10	1	1.33	1.33	10톤 TTP TTP	20	1.33	2	4.1	피복식	1.0	1.33	1	1.2		
	북방파제	11	1	1.5	1.5		TTT	32	1.5	2	4.8	피복식	1.0	1.5	1	1.2	
	남방파제	12	10톤 TTP	1.5	1.5		TTT	20	1.5	2	4.1						
	남방파제	13	1	1.5	1.5	10톤 TTP	TTT	20	1.5	2	4.1	피복식	1.0	1.5	1	1.2	

<표 A4.11> 동해 해 양수·신청 관할 지정 항만의 방파제 현황

항명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료		설계 조건						비 고						
				설계/보수	그림	연장 (m)	마루높이 E.L.(m)	마루폭 (m)	지반고 E.L.(m)	파랑 파고(m)	파랑 주기(초)	파랑 풍향	풍속(m/s)	조위(m)	HWL	토질조건	대체현상	특징
동해 항	북방파제	7	피복재		M11-07	100.0	+8.0	19.8	-8.0	7.4	13.0	NE/ENE	SSW	23.3	0.392	모래	비대청	흔성재
	북방파제	8	피복재		M11-08	550.0	+8.0	20.0	-	7.4	13.0	NE/ENE	SSW	23.3	0.392	모래	비대청	흔성재
	북방파제	9	흔성재		M11-09	151.48	+5.0	19.8	-	8.0	14.0	E/ENE	SSW	12.5	0.392	모래	비대청	비대청
	북방파제	10	흔성재		M11-10	323.83	+5.7	19.8	-16.6	8.0	14.0	E/ENE	SSW	12.5	0.392	모래	비대청	비대청
	북방파제	11	흔성재		M11-11	354.69	+5.5	19.8	-18.5	8.0	14.0	E/ENE	SSW	12.5	0.392	모래	비대청	비대청
	남방파제	12	피복재		M11-12	410.0	+5.0	6.7	-6.0	8.0	14.0	E/ENE	SSW	12.5	0.392	모래	비대청	비대청
	남방파제	13	흔성재		M11-13	170.0	+5.0	19.8	-	6.6	14.0	E/ENE	SSW	12.5	0.392	모래	비대청	비대청
	남방파제	14	흔성재		M11-14	50.0	+5.2	19.8	-14.5	8.0	14.0	E/ENE	SSW	12.5	0.392	모래	비대청	비대청
북호항	방파제	17	사석식	보수	M12-17	158.0	+5.5	4.0	-3.0	4.5	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	연암	비대청	후면매립
	방파제	18	사석식	보수	M12-18	100.0	+3.5	2.9	-	-	-	-	-	-	-	-	비대청	비대청
	방파제	19	사석식	보수	M12-19	105.6	+5.1	1.0	-	5.8	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	연암	비대청	후면매립
	방파제	20	사석식	보수	M12-20	23.0	+5.1	1.0	-	5.7	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	연암	비대청	비대청
	방파제	21	피복재	보수	M12-21	188.0	+2.8	11.5	-	6.9	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	연암	비대청	비대청
	방파제	22	피복재	보수	M12-22	138.0	+2.8	11.5	-	7.5	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	모래	비대청	비대청
	방파제	23	피복재	보수	M12-23	71.0	+4.0	9.0	-	5.8	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	모래	비대청	비대청
	방파제	24	피복재	보수	M12-24	24.0	+4.0	9.5	-	7.5	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	모래	비대청	비대청
방파제	방파제	25	피복재	보수	M12-25	119.0	+4.0	9.5	-	8.0	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	모래	비대청	비대청
	방파제	26	피복재	보수	M12-26	77.0	+4.0	9.5	-	7.8	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	모래	비대청	비대청
	방파제	27	피복재	보수	M12-27	38.0	+4.0	10.0	-	7.5	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	모래	비대청	비대청
	방파제	28	사석식	보수	M12-28	38.0	+4.0	11.5	-	-	-	-	-	-	-	-	비대청	비대청
	방파제	29	사석식	보수	M12-29	24.0	+4.0	11.5	-	-	-	-	-	-	-	-	비대청	비대청
	방파제	30	사석식	보수	M12-30	33.0	+4.5	11.5	-	6.1	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	모래	비대청	비대청
	방파제	31	사석식	보수	M12-31	39.0	+4.5	11.5	-10.0	6.1	14.0	ESE	WSW	12.5	0.376	모래	비대청	비대청
	방파제	32	사석식		M12-32	18.0	+4.5	12.0	-10.0	6.9	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	모래	비대청	비대청
방사제	방파제	33	사석식	보수	M12-33	153.0	+3.5	6.0	-8.0	4.5	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	모래	비대청	방사제
	방파제	34	사석식		M12-34	45.0	+4.0	9.5	-	4.5	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	모래	비대청	비대청
	방파제	35	사석식		M12-35	40.0	+4.0	9.5	-	5.4	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	모래	비대청	비대청
	방파제	36	사석식		M12-36	20.0	+4.0	6.5	-	5.4	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	모래	비대청	비대청
	방파제	37	사석식		M12-37	6.0	+4.0	6.5	-	5.4	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	모래	비대청	비대청

<표 A4.11> 동해 해양수산청 관할 지정항만의 봉파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료		설계조건						비고				
				설계/보수	그림	(m)	E.L.(m)	마루높이 마루폭	지반고	파랑	파향	주기(초)	총속(m/s)	HWL	토질조건	대중형상
속초항	봉파제	25	사석식		M13-25	18.0	+3.4	2.0	4.0	E/NE	SSW	46.0	0.39	총화암	비대칭	후면매립
	봉파제	26	사석식		M13-26	25.0	+3.4	10.0	-5.0	E/NE	SSW	46.0	0.39	총화암	비대칭	비대칭
	봉파제	27	사석식		M13-27	639.0	+5.5	10.0	-13.0	E/NE	W	46.0	0.39	총화암	비대칭	비대칭
	봉파제	28	사석식		M13-28	18.0	+5.5	18.0	-15.0	E/NE	SSW	46.0	0.39	총화암	대칭	
	봉파제	29	사석식	보수	M13-29	330.0	+2.5	7.0	-10.0	E/NE	SSW	46.0	0.39	모래	비대칭	방사제
	봉파제	30	사석식		M13-30	20.0	+3.5	7.4	-13.0	E/NE	SSW	46.0	0.39	모래	대칭	방사제
	봉파제	16	사석식	보수	M14-16	97.5	+6.0	11.6	-5.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	비대칭	후면매립
	봉파제	17	사석식	보수	M14-17	131.0	+6.0	11.6	-6.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	비대칭	후면매립
	봉파제	18	사석식	보수	M14-18	55.0	+6.0	11.6	-7.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	비대칭	후면매립
	봉파제	19	사석식	보수	M14-19	42.0	+6.0	11.8	-7.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	비대칭	후면매립
삼척항	봉파제	20	사석식	보수	M14-20	163.0	+6.0	11.7	-7.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	비대칭	후면매립
	봉파제	21	사석식	보수	M14-21	41.0	+6.0	11.7	-9.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	비대칭	후면매립
	봉파제	22	사석식	보수	M14-22	35.0	+6.0	11.7	-9.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	비대칭	후면매립
	봉파제	23	사석식	보수	M14-23	65.6	+6.0	11.8	-9.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	비대칭	후면매립
	봉파제	24	사석식	보수	M14-24	17.0	+6.0	11.8	-10.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	비대칭	후면매립
	봉파제	25	사석식	보수	M14-25	33.0	+6.0	11.8	-9.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	비대칭	후면매립
	봉파제	26	사석식		M14-26	14.0	+5.5	12.0	-9.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	비대칭	
	봉파제	27	사석식		M14-27	87.0	+5.5	12.0	-9.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	비대칭	
	봉파제	28	사석식		M14-28	63.0	+5.5	12.0	-9.8	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	비대칭	
	봉파제	29	사석식		M14-29	17.0	+5.5	12.0	-9.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	비대칭	
	봉파제	30	사석식		M14-30	19.0	+5.5	18.0	-11.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	비대칭	
	봉파제	31	사석식		M14-31	123.0	+2.5	6.0	-4.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	비대칭	후면매립
	봉파제	32	사석식		M14-32	20.0	+2.5	6.0	-7.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	비대칭	후면매립
	봉파제	33	사석식		M14-33	18.0	+3.3	6.0	-8.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	비대칭	후면매립
	봉파제	34	사석식		M14-34	182.0	+2.5	6.0	-7.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	비대칭	
	봉파제	35	사석식		M14-35	18.0	+3.5	10.0	-6.5	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	대칭	

<표 A4.11> 동해해 양수산청 관찰 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	구조형식	1992년 자료		연장 (m)	마루높이 (m)	마루폭 (m)	지반고 E.L.(m)	설계조건		비 고	
				설계/보수	그림					파고(m)	주기(초)		
방파제	4 시석식			M15-04	168.0	+4.5	3.2	1.5	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
방파제	5 시석식			M15-05	100.0	+4.3	1.0	1.5	14.0	E	SSW	21.0 0.38	
방파제	6 시석식			M15-06	125.5	+4.7	1.0	2.0	14.0	E	SSW	21.0 0.38	
방파제	7 시석식			M15-07	134.5	+5.0	8.0	2.5	14.0	E	SSW	21.0 0.38	
방파제	8 시석식			M15-08	110.0	+5.0	8.0	3.0	14.0	E	SSW	21.0 0.38	
방파제	9 혼성재			M15-09	40.0	+5.0	18.0	3.5	14.0	E	SSW	21.0 0.38	
방파제	10 시석식			M15-10	135.0	+3.5	3.8	1.0	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
방파제	11 시석식			M15-11	105.0	+3.95	1.0	1.0	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
방파제	12 시석식			M15-12	65.0	+6.35	1.0	1.5	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
방파제	13 시석식			M15-13	185.0	+4.7	8.0	3.7	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
방파제	14 시석식			M15-14	70.0	+5.5	8.0	5.0	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
방파제	15 시석식			M15-15	30.0	+5.5	11.0	5.5	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
방파제	16 시석식			M15-16	55.0	+6.5	11.0	6.1	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
방파제	17 시석식			M15-17	216.0	+5.5	11.0	6.1	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
방파제	18 시석식			M15-18	99.0	+5.5	11.0	6.2	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
방파제	19 시석식			M15-19	120.0	+5.5	11.0	6.2	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
방파제	20 시석식			M15-20	91.0	+5.5	11.0	6.2	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
방파제	21 시석식			M15-21	60.0	+5.5	11.0	6.2	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
방파제	22 시석식			M15-22	40.0	+5.5	11.0	6.2	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
방파제	23 교복제			M15-23	54.0	+5.5	20.0	6.5	14.0	NE	SSW	21.0 0.38	
주문진항	방파제	8 시석식	보수	Y04-08	58.0	3.0	-8.0	3.6	NE	SW	39.0 0.39	비대칭 후면안벽	
	방파제	9 시석식	보수	Y04-09	111.7	+5.0	-8.0	3.6	NE	SW	38.0 0.39	비대칭 후면안벽	
	방파제	10 시석식	보수	Y04-10	52.3	+5.0	3.0	-9.0	5.1	NE	SW	38.0 0.39	비대칭
	방파제	11 시석식	보수	Y04-11	54.0	+5.0	3.0	-13.0	7.4	14.0	E, NE	SW 38.0 0.39	모래 비대칭
	방파제	12 시석식		Y04-12	316.0	+3.4	2.0	-8.5	5.4	14.0	NE	SW 38.0 0.39	모래 비대칭
	방파제	13 시석식		Y04-13	147.5	+3.4	2.0	-8.5	4.7	14.0	NE	SW 38.0 0.39	모래 비대칭
	방파제	14 시석식		Y04-14	100.0	+3.4	10.0	-9.0	4.7	14.0	NE	SW 38.0 0.39	모래 비대칭
방파제	방파제	15 시석식		Y04-15	50.0	+3.4	10.6	-8.0	4.7	14.0	NE	SW 38.0 0.39	모래 비대칭
	방파제	16 시석식		Y04-16	240.0	+1.0	6.0	-6.0	4.5	14.0	NE	SW 38.0 0.39	모래 비대칭 방사제

<표 A4.11> 동해 해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	하부소단		피복총수		항외측 사면		중간피복총		Hudson식 적용		
			소단수	소단총	형태	항외측	피복재	구격	경사도	총수	두께	안정질량	질량비
동해항	북방파제	7											
	북방파제	8											
	북방파제	9											
	북방파제	10											
	북방파제	11											
	남방파제	12											
목호항	남방파제	13											
	남방파제	14											
	방파제	17											
	방파제	18											
	방파제	19	1	피	F								
	방파제	20											
방파제	방파제	21	1	피	F								
	방파제	22	1	피	F								
	방파제	23	1	피	F								
	방파제	24	1	피	F								
	방파제	25	1	피	F								
	방파제	26	1	피	F								
방파제	방파제	27	1	사석	T								
	방파제	28	1	중/2	D	2	3	TPP	20	2	4.1	피복식	0.5
	방파제	29	1	중/2	D	2	1	TPP	20	2.5	4.1	피복식	0.5
	방파제	30				2	1	TPP	20	2	4.1	피복식	0.5
	방파제	31				2	2	TPP	20	2	4.1	피복식	0.5
	방파제	32				2	2	TPP	32	1.5	4.8	피복식	0.8
방파제	방파제	33	-1	H	3	2	TPP	5	3	2	2.6	피복식	0.5
	방파제	34			2	1	TPP	8	1.5	2	3.0	피복식	0.2
	방파제	35			2	1	TPP	8	1.5	2	3.0	피복식	0.35
	방파제	36			2	1	TPP	16	1.5	2	3.8	피복식	0.5
	방파제	37			2	2	TPP	16	1.5	2	3.8	피복식	0.9

<표 A4.11> 동해 해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	하부소단			피복총수			피복총			항외족시면			종간피복총			Hudson식 적용		
			소단수	소단총	형태	항외측			피복재	규격	경사도	총수	중간피복재	규격	경사도	총수	두께	안정질량	질량비	
						TP	TP	TP					TP	TP	TP	TP				
속초항	방파제	25				2	1	TP	12.5	1.33	2	3.5	피복식	0.35	1.33	2	1.4	7.82	1.60	
	방파제	26				2	1	TP	20	2	2	4.1	피복식	0.55	2	2	1.6	11.42	1.75	
	방파제	27			D	2	2	TP	25	2	2	4.4	피복식	0.55	2	2	1.6	21.06	1.19	
	방파제	28	1	중/기	D	2	2	피복식	1.1	2.5	1	1.2	피복식	0.1	2.5	1	0.5	1.84	0.60	
	방파제	29				2	2	TP	12.5	1.33	2	3.5	피복식	0.5	1.33	1	0.8	3.11	4.01	
삼척항	방파제	30											피복식	0.8	4	2	2.0	3.47	1.44	
	방파제	16				2		TP	5	3			피복식	0.5	3			4.66	1.07	
	방파제	17	-1	사석T	H	3		TP(설)	5	3			피복식	0.8	2.5	M				
	방파제	18				2		TP	5	4	2		피복식	0.8	4	2	2.0	3.49	1.43	
	방파제	19	1	사석T	G	3		TP	12.5	2			피복식	0.8	4	1	0.8	6.99	1.79	
포항항	방파제	20	1	사석T	G	3		ATB	9	4			피복식	0.8	3	1	1.0	14.27	0.88	
	방파제	21	1	사석T	G	3		TP	12.5	2			피복식	0.5	3	2	2.0	30.32	0.41	
	방파제	22	1	사석T	G	3		ATB	11.6	3			사석	0.2	3			30.32	0.41	
	방파제	23	1	사석T	G	3		TP	12.5	2	3.5		피복식	0.3	3	2				
	방파제	24	1	사석T	G	3		TP	12.5	2	3.5		피복식	0.3	3	2.0				
울릉도항	방파제	25	1	사석T	C/G	3		TP	12.5	3	2	4.1	피복식	0.65	2	2	1.6	30.32	0.66	
	방파제	26				2	2	TP	20	2	2	4.1	피복식	0.65	2	2	1.6	30.32	0.66	
	방파제	27				2	2	TP	20	2	2	4.1	피복식	0.65	2	2	1.6	30.32	0.66	
	방파제	28				2	2	TP	20	2	2	4.1	피복식	0.65	2	2	1.6	32.35	0.62	
	방파제	29			D	2	2	TP	20	2	2	4.1	피복식	0.65	2	2	1.6	30.32	0.66	
제주도항	방파제	30	1	중/기	D	2		TP	40	2	2	4.4	피복식	0.9	2	2	1.9	31.07	1.29	
	방파제	31	1	사석T	B	3		ATB	3	2		1.16	피복식	0.8	2	1	0.8			
	방파제	32	1	사석T	B	3		ATB	5	2		1.4	피복식	0.5	2	1	0.8			
	방파제	33	1	사석T	B	3		ATB	5	2		1.4	피복식	0.2	2	2	1.2			
	방파제	34	1	사석	A	2		TP	12.5	1.5	2	3.5	피복식	0.35	1.5	2	1.4	12.03	1.04	
제주도항	방파제	35	1	기	E	2		TP	12.5	1.5	2	3.5	피복식	0.35	1.5	2	1.4	6.54	1.91	

<표 A4.11> 동해 해양수산청 관할 지정항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	하부소단	피복총수			피복총			항외측 시연			Hudson식 적용						
				소단수	소단총	형태	항외측			항내측			구격	경사도	총수	중간피복재	구격	경사도	총수
							피복재	피복식	피복재	피복식	피복재	피복식							
옥계항	방파제	4	1	F	1	피복식	0.8	1.5	3	3.0	피복식	0.8	1.5	3	3.0	0.38	2.09		
	방파제	5	1	F	1	피복식	0.8	2	1.8	2	피복식	0.8	2	2.7	2	0.29	2.78		
	방파제	6	2	피/중	D	2	TTP	6.3	1.33	2	2.7	피복식	0.15	1.33	2	1.0	0.92	6.83	
	방파제	7	2	피/중	D	2	TTP	6.3	1.33	2	2.7	피복식	0.15	1.33	2	1.0	1.80	3.50	
	방파제	8	2	피/중	D	2	TTP	16	1.33	2	3.8	피복식	0.3	1.33	2	1.3	3.11	5.14	
	방파제	9																	
	방파제	10	1	F	1	피복식	0.8	2	1	0.9	피복식	0.8	2	1	1.0	0.08	9.90		
	방파제	11	1	F	1	피복식	0.8	2	1	1.0	피복식	0.8	2	1	1.0	0.63	1.27		
	방파제	12	2	피/중	D	2	TTP	6.3	1.33	2	2.7	피복식	0.15	1.33	2	1.0	0.39	16.19	
	방파제	13	2	피/중	D	2	TTP	6.3	1.33	2	2.7	피복식	0.15	1.33	2	1.0	5.84	1.08	
주문진항	방파제	14	2	피/중	D	2	TTP	16	1.33	2	3.8	피복식	0.3	1.33	2	1.3	14.41	1.11	
	방파제	15	2	피/중	D	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복식	0.5	1.33	2	1.7	19.19	1.67	
	방파제	16	2	피/중	D	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복식	0.5	1.33	2	1.7	26.17	1.22	
	방파제	17	2	피/중	D	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복식	0.5	1.33	2	1.7	26.17	1.22	
	방파제	18	2	피/중	D	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복식	0.5	1.33	2	1.7	27.48	1.16	
	방파제	19	2	피/중	D	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복식	0.5	1.33	2	1.7	27.48	1.16	
	방파제	20	2	피/중	D	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복식	0.5	1.33	2	1.7	27.48	1.16	
	방파제	21	2	피/중	D	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복식	0.5	1.33	2	1.7	27.48	1.16	
	방파제	22	2	피/중	D	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복식	0.5	1.33	2	1.7	27.48	1.16	
	방파제	23	2	피/중	D	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복식	0.5	1.33	2	1.7			
	방파제	8					피복식	0.8	4/2	1	1.0	피복식	0.2	4/2	2	1.2	1.99	0.40	
	방파제	9					TTP	5	5/2.5	2		피복식	0.8	5/2.5	1		1.43	3.49	
	방파제	10									피복식	0.8	4/4	1					
	방파제	11	-1	사석T	H	4	2	TTP	12.5	2		피복식	0.8/1.0	2/1.5	1/M	1.0/소단	31.07	0.40	
	방파제	12						ATB	9	2	1	1.68	피복식	0.2	2	2	1.2		
	방파제	13									피복식	0.35	1.33	2	1.4	18.16	0.69		
	방파제	14									피복식	0.35	2	2	1.4	7.96	1.57		
	방파제	15									피복식	0.55	2	2	1.6	7.96	2.51		
	방파제	16	1	기	E	2		TTP	12.5	1.33	2	4.1	피복식	0.55	2	1	0.8	7.96	2.51
	방파제	17									피복식	0.35	1.33	2	1.4	10.51	1.19		

<표 A4.11> 동해 해양수산청 관할 지정항만의 냉장화물 현황 (계속)

항명	시설명	번호	규격	기초사석		상치콘크리트		피복총		충내 측 사면		중간피복총	구격	경시도	총수	두께
				항외측	항내측	형상	하부	피복재	구격	경시도	총수					
동해항	북방파제	7														
	북방파제	8														
	북방파제	9														
	북방파제	10														
	북방파제	11														
	남방파제	12														
목호항	남방파제	13														
	남방파제	14														
	방파제	17	토사	4		ㄴ형										
	방파제	18	1	1.33		도로		피복재								
	방파제	19	1	1.5		사다리벽		기초사석								
	방파제	20	1	2		사다리벽		기초사석								
목호항	방파제	21														
	방파제	22														
	방파제	23														
	방파제	24														
	방파제	25														
	방파제	26														
목호항	방파제	27														
	방파제	28	1	2	1	ㅁ형	0.50	방고/기초	ATB	8	1	1.6	피복석	1.0	1	2
	방파제	29	1	2.5	2	ㅁ형	0.50	방고/기초	피복석	0.5	2	2	1.6			
	방파제	30	1	2	1.5	ㅁ형	0.50	방고/기초	피복석	0.8	1.5	2	2.0			
	방파제	31	1	2	1.5	ㅁ형	0.50	방고/기초	TTP	8	1.5	2	3.0	피복석	0.2	1.5
	방파제	32	1	1.5	1.5	ㅁ형	0.50	방고/기초	TTP	8	1.5	2	3.0	피복석	0.2	1.5
목호항	방파제	33	1	3	2	ㅁ형	0.50	방고/피체벽	피복석	0.5	2	2	피복석	0.2	2	M
	방파제	34	1	1.5	1.5	ㄴ형		방고/기초	피복석	0.5	1.5	2	1.6			
	방파제	35	1	1.5	1.5	ㄴ형		방고/셀룰락	피복석	0.5	1.5	2	1.6			
	방파제	36	1	1.5	1.5	ㅁ형		셀룰락	피복석	0.9	1.5	2	2.0			
	방파제	37	1	1.5	1.5	ㅁ형		셀룰락	TTP	16	1.5	2	3.8	피복석	0.55	1.5
	방파제															

<표 A4.11> 동해 해양수산청 관할 지정 항만의 봉파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	규격	기초사적		상치콘크리트		피복총		항내측 시면		중간피복총						
				경사도	항외측	형상	사다리벽	하부	피복재	규격	경사도	총수	두께	구격	경사도	총수	두께	
속초항	봉파제	25	1	1.33	1.5	L형	피복재	방고/7 초	피복재	0.9	1.5	2	2.0					
	봉파제	26	1	2	1.5	□형	방고/7 초	피복재	1.0	1.5	1	1.2						
	봉파제	27	1	2	2	□형	방고/7 초	피복재	25	2	4.4	피복재	0.55	2	2	1.6		
	봉파제	28	1	2	2	□형	중간피복	0.9	1.5	1	1.0	1.0	0.1	0.5	1	0.5		
	봉파제	29	1	2.5	1.5	□형	방고/7 초	피복재	12.5	1.33	2	3.5	피복재	0.5	1.33	1	0.8	
	봉파제	30	1	1.33	1.33	□형	방고/7 초	피복재	12.5	1.33	2	3.5	피복재	0.5	1.33	1	0.8	
	봉파제	16	1	4		L형	진총/파라펫											
	봉파제	17	1	3		L형	진총/파라펫											
삼척항	봉파제	18	1	4		L형	진총/파라펫											
	봉파제	19	1	4		L형	진총/파라펫											
	봉파제	20	1	3		L형	파라펫											
	봉파제	21	1	3		L형	방고/파라펫											
	봉파제	22	1	3		L형	방고/파라펫											
	봉파제	23	1	3		L형	방고/파라펫											
	봉파제	24	1	2.5		L형	방고/파라펫											
	봉파제	25	1	2		L형	방고/파라펫											
영동항	봉파제	26	1	2	1.33	L형	방고/7 초	TPP	5	1.33	2	2.6	피복재	0.35	1.33	2	1.4	
	봉파제	27	1	2	1.33	L형	방고/7 초	TPP	5	1.33	2	2.6	피복재	0.35	1.33	2	1.4	
	봉파제	28	1	2	1.33	L형	방고/7 초	TPP	5	1.33	2	2.6	피복재	0.35	1.33	2	1.4	
	봉파제	29	1	2	1.33	L형	방고/7 초	TPP	5	1.33	2	2.6	피복재	0.35	1.33	2	1.4	
	봉파제	30	1	2	2	□형	방고/7 초	TPP	25	2	4.4	피복재	0.9	2	2	1.9		
	봉파제	31	1	2		역사다리	중간피복											
	봉파제	32	1	2		역사다리	중간피복											
	봉파제	33	1	2		역사다리	중간피복											
울릉도	봉파제	34	1	1.5	1.5	□형	방고/7 초	TPP	5	1.5	2	2.6	피복재	0.35	1.5	2	1.4	
	봉파제	35	1	1.5	1.5	□형	방고/7 초	TPP	12.5	1.5	2	3.5	피복재	0.35	1.5	2	1.4	

<표 A4.11> 동체 양수산정 관찰 지정 항만의 방파제 현황 (계속)

항명	시설명	번호	규격	기초시식		상치콘크리트		한내측 사면						
				항외측		항내측		경사도		피복재		규격		
				하부	사다리벽	하부	사다리벽	기초시식	기초시식	경사도	총수	두께	중간피복재	규격
육계항	방파제	4	1	1.5										
	방파제	5	1	2										
	방파제	6	1	1.33										
	방파제	7	1	1.33	1.5	1.5	1.5	기초시식	기초시식	1.0	1.5	1.0	0.1	0.4
	방파제	8	1	1.33	1.5	1.5	1.5	기초시식	기초시식	1.0	1.5	1.0	0.1	0.4
	방파제	9												
	방파제	10	1	2										
	방파제	11	1	2										
	방파제	12	1	1.33										
	방파제	13	1	1.33	1.5	1.5	1.5	기초시식	기초시식	1.0	1.5	1.0	0.1	0.45
주문진항	방파제	14	1	1.33	1.5	1.5	1.5	기초시식	기초시식	1.0	1.5	1.0	0.1	0.45
	방파제	15	1	1.33	1.5	1.5	1.5	기초시식	기초시식	1.0	1.5	1.0	0.1	0.45
	방파제	16	1	1.33	1.5	1.5	1.5	기초시식	기초시식	0.15	1.5	2	1.0	
	방파제	17	1	1.33	1.5	1.5	1.5	기초시식	기초시식	TTP	6.3	1.5	2	2.7
	방파제	18	1	1.33	1.5	1.5	1.5	기초시식	기초시식	TTP	6.3	1.5	2	2.7
	방파제	19	1	1.33	1.33	1.33	1.33	기초시식	기초시식	TTP	6.3	1.33	2	2.7
	방파제	20	1	1.33	1.33	1.33	1.33	기초시식	기초시식	TTP	6.3	1.33	2	2.7
	방파제	21	1	1.33	1.33	1.33	1.33	기초시식	기초시식	TTP	16	1.33	2	3.8
	방파제	22	1	1.33	1.33	1.33	1.33	기초시식	기초시식	TTP	32	1.33	2	4.8
	방파제	23	1	1.33	1.33	1.33	1.33	케이슨	케이슨	TTP	32	1.33	2	4.8
	방파제	8	1	4/2										
	방파제	9	1	4/2.5										
	방파제	10	1	2	2	2	2	액체벽	액체벽	중간피복	피복재	0.8	2	1
	방파제	11	1	2	1.5	1.5	1.5	방벽/중간	방벽/중간	방벽	0.8	1.5	1	1.0
	방파제	12	1	1.33	1.5	1.5	1.5	방고/기초	방고/기초	피복재	0.9/0.35	1.5	2	2.0/1.4
	방파제	13	1	2	1.5	1.5	1.5	방고/기초	방고/기초	피복재	0.9	1.5	2	2.0
	방파제	14	1	2	1.5	1.5	1.5	방고/기초	방고/기초	피복재	1.0	1.5	2	2.0
	방파제	15	1	2	1.5	1.5	1.5	방고/기초	방고/기초	피복재	0.9	1.5	1	1.0
	방파제	16	1	1.33	1.33	1.33	1.33	방고/기초	방고/기초	TTP	12.5	1.33	2	2.6

PART II

경사식 방파제 피해사례 분석(I)

2001. 12.

공동연구기관 / 한국건설기술연구원

연구책임자 : 이종인

연 구 원 : 김영택, 함장호, 안춘성

손병규, 이정육, 조지훈

해양수산부

제 1 장 서 론

다양한 연안역 방재시설중에서 방파제는 내습파를 제어하여 항만이나 배후지역의 기능을 유지시킬 목적으로 건설되는 가장 기본적이고 중요한 연안시설물중의 하나이다. 외곽시설인 방파제는 외해로부터 파랑에너지를 반사, 소파시켜 항내정온도를 유지하여 선박의 항행 및 정박, 하역작업 등의 안전성 확보 및 가동을 등의 향상을 도모하는 주된 역할을 맡고 있다. 이들 방파제는 구조형식상 크게 경사식 방파제, 직립식 방파제, 혼성식 방파제, 소파블록피복제로 나눌 수 있다(해양수산부, 1999).

방파제 설계기준은 각 나라마다 서로 다른 기준을 정하고 있으나, 그 근간을 이루는 기준은 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 주로 미국 등지에서 사용하고 있는 "Shore Protection Manual(1984, SPM)"이고, 두 번째는 유럽을 중심으로 사용되고 있는 "BS 6349: Maritime Structures(1984)"와 "Manual on the Use of Rock in Coastal and Shoreline Engineering(CIRIA/CUR SP 83, 1991)"이며, 세 번째는 일본의 "항만의 시설의 기술상의 기준 · 동해설(1999)"을 들 수 있다.

SPM은 미 육군 공병단 해안공학연구센터에서 수리모형실험 및 연구를 통해 만든 설계기준서이며, 사석중량 결정식으로 Hudson식을 사용하고 있다. CIRIA/CUR은 영국과 네덜란드의 공동연구로 만들어진 설계기준서로서 Delft 수리연구소와 HR Wallingford에서 수행한 수리모형실험 결과들을 바탕으로 SPM에서 제시한 설계기준을 개선한 것이다. CIRIA/CUR은 현재까지 발표된 설계기준서 중에서 가장 개선된 것으로 평가받고 있으며, van der Meer의 사석중량 결정식을 적용하고 있다.

우리나라의 "항만 및 어항 설계기준(해양수산부, 1999)"은 일본의 "항만의 시설의 기술상의 기준 · 동해설(일본항만협회, 1999)"을 근간으로 국내 실정에 맞추어 사용하고 있다. "항만시설물 설계기준(해운항만청, 1993)"과 비교해볼 때 경사식 방파제 설계에서 가장 두드러진 사항은 방파제 제두부에서의 사석 중량을 제간부의 1.5배를 쓰도록 규정한 것과 사석중량 결정식으로 van der Meer식이 추가되어 Hudson식과 함께 사용하도록 되어 있는 것이다. 그러나 국내에서는 현재까지 Hudson식을 준용하고 있는 실정이기 때문에 Hudson식의 적용한계 및 적용조건에 대한 규명과 검토가 이루어져야 할 것으로 생각된다. 특히, 방파제의 안정성 확보에 영향을 미치는 인자 가운데 파고, 주기, 사면경사, 쇄파 등과 같은 물리적인 현상의 특성을 충분히 고려하는 외력인자화의 연구가 더욱 필요할

것이다. 본 연구에서는 Hudson식과 van der Meer식을 적용하여 경사식 방파제에 사용되는 피복재 중량을 검토하고자 한다.

경사제는 피복재, 중간피복석, 내부사석으로 이루어져 있고, 중간피복석과 내부사석은 피복재의 중량비로 시공하는 것이 일반적이다. 국내 경사식방파제의 피해형태는 피복재 및 사석유실이 대부분이며, 피해를 유발하는 기상요인은 태풍이 지배적인 것으로 알려져 있다(정, 1997). 그리고 설계파고의 과소평가, 제체 안정성의 미확보, 지반침하, 제체 구성재료의 부식, 마모 등으로 인한 피해사례도 많이 나타났다(이, 1995).

케이슨 전면에 소파블록을 설치한 소파블록 피복제는 소파기능과 내파 안정성의 장점 때문에 일본의 대표적인 방파제 구조중의 하나이다. 방파제 피해사례에 관해서는 鹿島 등(1986), 宮井 등(1993)의 보고도 있지만, 소파블록을 대상으로 상세히 해석한 예는 거의 없다. 특히, 피해사례를 살펴보면, 소파블록만의 피해사례는 의외로 적을 뿐만 아니라, 피해지점에서 아주 가까운 지점이 무피해인 경우도 많이 볼 수 있고, 블록중량의 안정한계만으로는 설명될 수 없는 사례도 적지 않다.

흔성제는 소파블록 피복제와 더불어 일본의 주요한 방파제 구조로서, 현재 경제성을 중시한 신뢰성설계법의 도입(下迫 등, 1998)이 고려되고 있다. 흔성제의 피해사례를 살펴보면 피해정도, 케이슨의 활동량 등이 방파제 전체의 길이에 걸쳐 일정하게 발생하는 경우는 거의 없고, 법선을 따라 그 크기가 서로 다르며, 많은 사례에서 나타난 바와 같이 물결모양의 형태로 발생하는 것이 일반적이다(伊藤・谷本, 1971). 이러한 현상은 예전부터 지적되어 왔으며, 이것을 伊藤・谷本(1971)는 방파제의 사행피해(meandering damage)라 하였고, 최근 Hitachi(1994)의 피해사례에서도 검토되었다.

방파제의 설계 및 시공기술은 태풍, 폭풍파 등에 의한 피해사례 등을 참고하여 현재에도 개발과 개선이 지속적으로 수행되고 있다. 더욱이 방파제의 피해상황이 정확히 파악되면, 구조물의 설계에 반영될 귀중한 자료로서 설계기술발전에 기여하는 바가 적지 않을 것이다. 본 연구에서는 안정성 높은 외곽시설 설계의 신뢰성 있는 기초자료 획득을 목적으로 방파제 피해사례를 조사하였다. 국내·외 방파제의 피해사례를 조사하여 주요 피해형태에 관해 분석함과 동시에, 피해양상에 관해 검토하였다. 본 연구에서는 가능한 한 많은 피해사례를 수집하고, 피해양상을 분석하여 국내 방파제 설계기술 개선을 위한 기초자료를 축적하는데 그 목적이 있다.

제 2 장 경사식 방파제 피해사례 조사

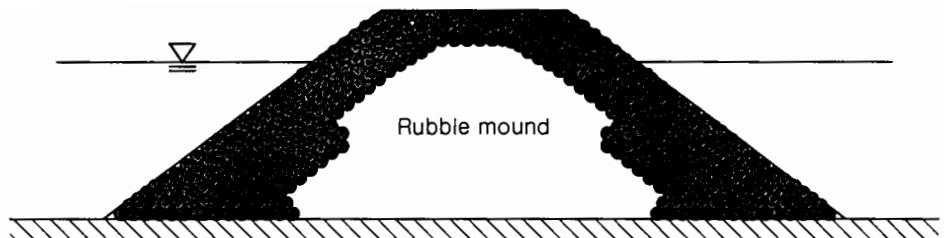
제 1 절 방파제의 분류

방파제의 구조형식을 선정할 때는 각 형식의 특성을 고려하여 ① 배치조건, ② 자연조건, ③ 시공조건, ④ 공사비, ⑤ 공사기간, ⑥ 공사재료의 입수조건, ⑦ 이용조건, ⑧ 유지관리, ⑨ 중요도 등을 비교·검토하여 결정하게 되며, 방파제의 구조형식은 다음과 같이 분류할 수 있다.

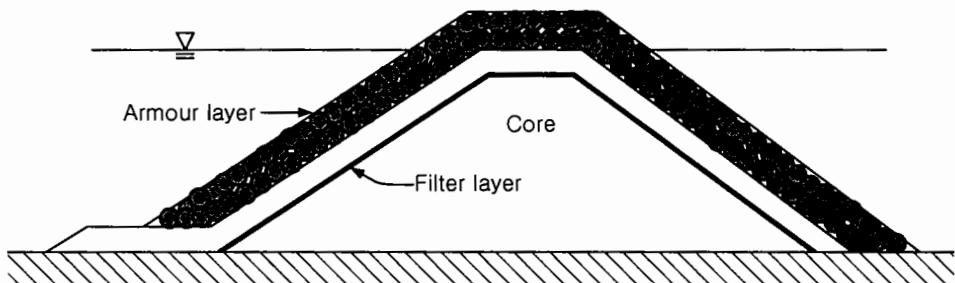
- (1) 경사제 : 사석식 경사제, 인공블록식 경사제
- (2) 직립제 : 케이슨식 직립제, 블록식 직립제, 셀블록식 직립제, 콘크리트 단괴식
직립제
- (3) 혼성제 : 케이슨식 혼성제, 블록식 혼성제, 셀블록식 혼성제, 콘크리트 단괴식
혼성제
- (4) 소파블록피복제
- (5) 기타 형식의 방파제

경사제는 <그림 2.1.1>과 같이 거친 사석, 콘크리트 블록 등을 이용하여 사다리꼴 형상으로 쌓아올린 것으로서 주로 사면에서의 쇄파에 의하여 에너지를 감쇄시키는 형식이다. 경사제의 피복블록에는 Tetrapod(T.T.P.), Dolos, Core-loc 등이 있다. 경사제는 연약지반에 적합하고 시공법이 간단하며 시공후 유지보수가 다른 형식의 방파제보다 쉬운 장점이 있으나, 파고가 큰 곳에서는 필요한 크기의 재료를 구하기가 어렵고, 특히 수심이 깊은 곳에서는 재료가 많이 소요되는 단점이 있다.

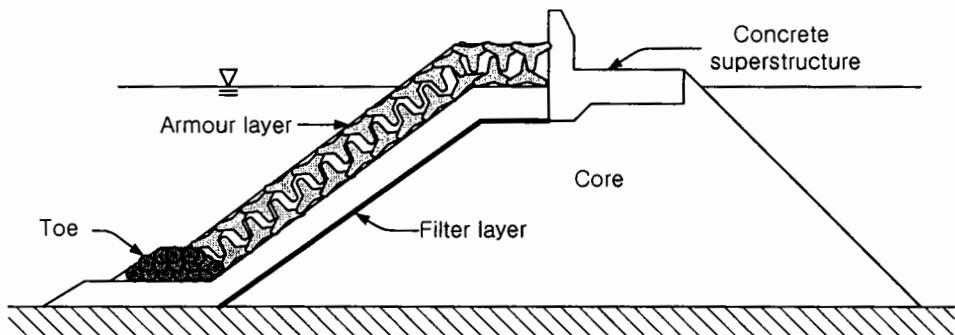
경사제는 내습파랑의 에너지 감쇠, 반사파 발생의 억제, 그리고 쳐오름 높이의 저감 등을 목적으로 표층을 이형블록으로 시공하는 것이 일반적이며, 이형블록의 중량은 내습파랑의 조건에 의해 결정된다. “항만 및 어항설계기준(1999)”에서 적용하고 있는 Hudson 공식은 입사파 조건과 다양한 실험연구를 통해 사용되는 블록 각각의 안정계수(K_D)를 사용하여 중량을 산정하며, van der Meer공식에서는 내습파의 주기 및 파고, 피해정도, 파형경사, 쇄파조건, 작용파수 등을 고려하여 중량을 결정한다. 그러나 실제 설계에 적용하기 위해서는 이러한 공식들에 의해 산정된 소요 중량을 수리모형실험을 통해 검증하는 것이 일반적이다.



(a) 종래의 사석방파제



(b) 전형적인 사석방파제



(c) 상부공과 소파공이 설치된 사석방파제

<그림 2.1.1> 대표적인 사석방파제의 종류

중간 피복석은 자연석으로 시공하는 경우가 일반적이지만, 기존 항만의 증·개축이나 거대 신항만 건설시 설계파고의 증가에 따라 이형블록의 소요중량이 증가하고, 이에 따른 중간 피복석의 소요중량 또한 증가하기 때문에 거대 자연석이 요구되며, 거대 자연석의 수급이 용이하지 않은 경우에는 자연석 대신 중간 피복블록을 시공하는 사례가 늘고 있는 실정이다. 중간 피복블록의 결정을 위해서는 내부사석의 보호기능, 이형블록의 시공 편이성, 그리고 시공단계의 외해 노출에 대한 안정성에 대한 검토가 필요하다. 특히, 경사제 시공상의 유의점은 다음과 같이 생각할 수 있다.

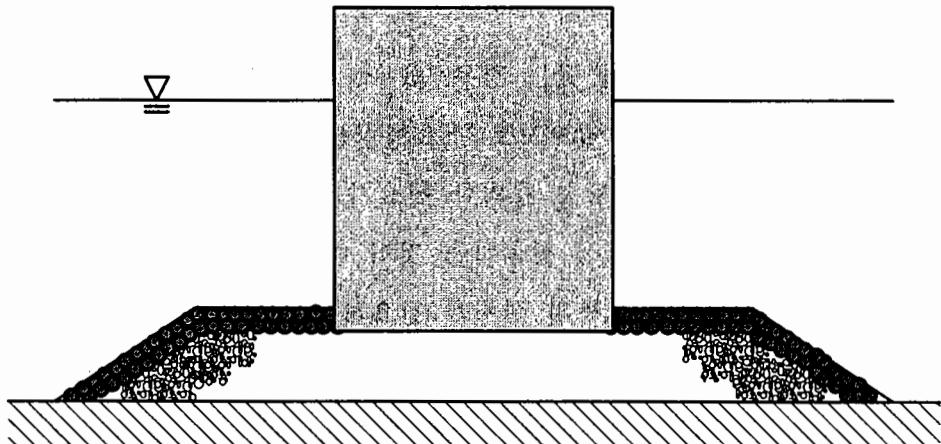
- ① 표층 블록중 하나가 이탈하면 그 부분이 약점이 되어 파력이 집중되고, 서서히 파괴가 진행하는 원인이 된다. 따라서 불안정한 상태의 블록이 발생하지 않도록 하여야 한다.
- ② 사석제와 같이 여러 층이 있는 경우, 하부층이 확실히 형성되어 있지 않으면, 상부층의 안정이 유지되지 않으므로 소요형상을 유지하는 것이 중요하다.
- ③ 범선세굴이 발생되지 않도록 유의할 필요가 있다. 특히 쇄파가 작용하는 경우에는 세굴방지 매트를 깔아서 시공하는 것이 바람직하다. 또한 표층이 정적인 경우에는 범선을 마무리할 블록의 설치가 필요하게 된다.

경사제 사면상의 블록은 비쇄파인 경우보다 쇄파인 경우에 큰 파력이 작용하기 때문에 더 큰 중량을 필요로 하며, 대부분의 경우에 사면의 안정에는 내습파가 직각으로 입사하는 경우가 경사지게 입사의 경우보다 지배적인 영향을 미치지만, T.T.P. 또는 Dolos 사면은 경우에 따라 경사 입사파가 직각 입사파보다 더 큰 영향을 미친다는 보고도 있다 (Losada와 Giménez-Curto, 1982; 손 등, 2001).

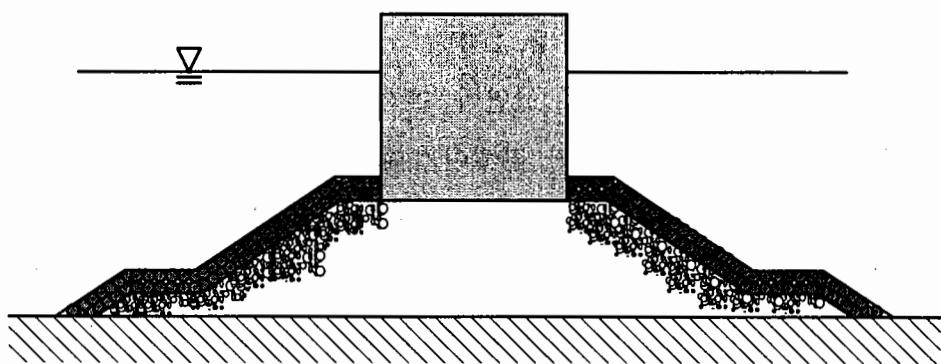
직립제는 <그림 2.1.2(a)>와 같이 전면이 연직 또는 연직에 가까운 제체로서 파랑을 대부분 반사시키는 형식으로서 제체가 일체이기 때문에 파력에 대한 저항력이 크다. 그리고 유지보수비가 저렴하고 방파제의 내측을 계류시설로 사용할 수 있는 장점이 있으나, 제체 바닥면적이 작아서 연약지반인 경우 소요지지력의 부족 때문에 부적당하다.

혼성제는 <그림 2.1.2(b)>와 같이 사석부를 기초로 하고 그 위에 직립부의 본체를 설치하는 형식으로 경사제와 직립제의 장점을 이용한 것이라고 할 수 있다. 혼성제는 하부의 사석부가 상부의 하중을 분산시킬 수 있으므로 연약지반에도 적합하고, 상부의 직립부는 재료가 적게 들기 때문에 수심이 깊은 곳에도 적합하다. 그리고 파압은 정수면 부근에서 가장 크므로 직립부가 큰 파력에 저항하고, 파력이 비교적 작은 해저부근은 사석으로도 충분히 견딜 수 있기 때문에 사석제의 단점인 사석의 이동·이탈을 상부의 직립부에서 방지할 수 있다.

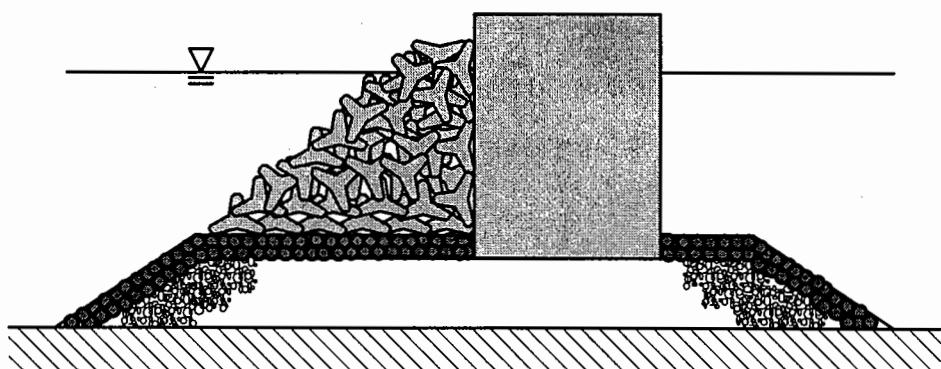
소파블록피복제는 <그림 2.1.2(c)>와 같이 직립제 또는 혼성제 전면에 소파블록을 쌓기 때문에 경사제와 유사하다. 전면에 피복된 소파블록은 파압, 월파, 전달파 및 반사파를 저감시키는 역할을 담당한다. 그러나 소파공의 마루높이가 직립부 마루높이에 비해 낮으면 직립부에 충격 쇄파력이 작용할 우려가 있고, 반대로 직립부의 마루높이 보다 높으면 소파블록 마루의 블록이 불안정하게 된다.



(a) 일반적인 케이슨제



(b) 직립혼성제



(c) 소파블록 피복제

<그림 2.1.2> 대표적인 케이슨식 혼성제

제 2 절 피해사례 조사 및 자료수집

일본의 경우에 방파제 피해에 관한 조사는 1960년대 이전부터 수행되어 왔다. Hatori(服部) 등(1968)이 被災防波堤集覽에 주요 항만의 피해를 분석하기 시작하였으며, 최근에는 Miyai(宮井) 등(1993)이 被災防波堤集覽(4편)을 보고하였다. 또한, Kashima(鹿島) 등(1986)은 소파블록으로 피복된 방파제나 호안의 피해조사를 수행하였으며, 五明 등(1995, 1997)도 소파블록피복제의 침하 및 이탈 등에 대해 조사·분석하였다. 이러한 조사는 방파제 피해의 전체 상황을 파악하는 것 자체로서도 중요한 기초자료가 될 뿐만 아니라, 관련 연구자들에게 유용한 정보로 활용되고 있다.

국내의 경우에는 방파제 피해사례를 체계적으로 정리한 보고서가 거의 없기 때문에 기존 문헌 및 현지답사를 통하여 방파제 피해 발생 후에 산정되는 방파제 복구금액 등의 자료를 근거로 기존 자료와 더불어 검토를 수행하였다.

본 연구에서는 국내·외 방파제 피해사례를 가능한 한 많이 수집하여 이에 대한 객관적인 분석자료를 도출하고자 하였으며, 방파제 피해사례가 비교적 잘 정리된 다음과 같은 일본의 자료를 이용하여 피해사례를 분석·정리하였다.

- ① 被災防波堤集覽 : 港研資料 No. 58, 1954년~1964년 20항만 68사례
- ② 被災防波堤集覽(2편) : 港研資料 No. 200, 1965년~1972년 49항만 63사례
- ③ 被災防波堤集覽(3편) : 港研資料 No. 485, 1973년~1982년 39항만 54사례
- ④ 被災防波堤集覽(4편) : 港研資料 No. 765, 1983년~1991년 47항만 69사례

상기 자료에서도 방파제의 피해형태, 피해규모, 구조형식, 피해지점, 피해수심 및 피해 요인 등 하나 하나의 피해사례에 관한 상세한 검토는 충분하다고는 할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 경사식 방파제를 비롯한 소파블록피복제, 케이슨식 혼성제를 대상으로 최근 40년간 발생한 주요 피해사례 가운데 가까운 일본을 비롯한 포르투갈 Sines항에 대해 주요 피해유형을 분석·검토하였다. 특히, 방파제의 약점이나 설계상의 문제점에 관련된 주요 피해유형에 대해서는 대표적인 피해사례를 정리하였다.

이와 같이 국내 방파제 피해사례의 객관적인 분석을 위해 일본 및 포르투갈 Sines 항의 대표적인 피해사례를 수집하였다. 이러한 피해사례 분석은 국내 방파제 설계 및 시공 기술의 개발과 개선을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이고, 추후 피해사례를 지속적으로 수집 및 분석함으로서 안정한 방파제 설계기술을 한층 발전시키는데 그 의의가 있을 것이다.

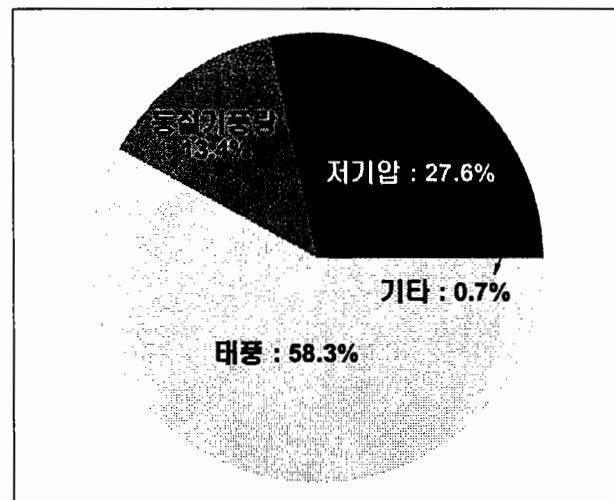
1. 일본 피해사례

방파제의 피해사례를 통한 피해원인이 분석되면 설계기술의 발전, 방파제의 기능저하를 방지하기 위한 유지공법 개발 등에 유용한 자료로 활용될 수 있다. 이러한 관점으로부터 일본에서는 1968년, 1975년, 1984년, 1993년에 방파제 피해사례를 「被災防波堤集覽」이라는 자료로 정리하여 발간하고 있다. 이들 자료에 나타난 피해사례는 복구예정금액이 3,000만円 이상, 시공중 피해가 발생한 케이슨제, 상치콘크리트까지 시공한 단계에서 본체의 이동 또는 파괴가 발생한 경우 등에 대해 피해 전·후의 도면이 비교적 양호하고, 피해상황이 비교적 잘 정리된 것을 수록한 것이다.

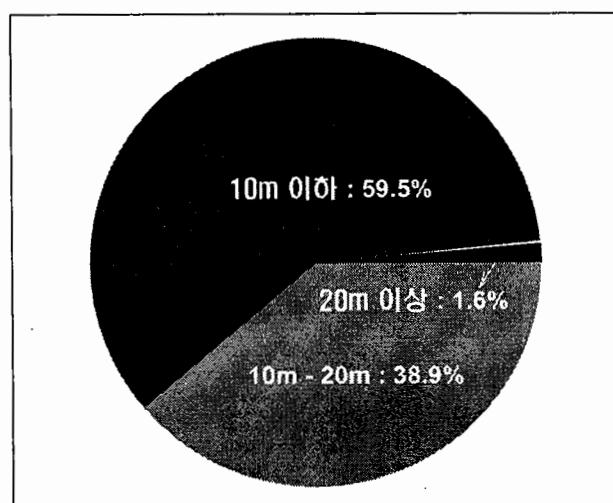
이러한 일본자료를 이용하여 대표적인 피해상황을 정리함과 동시에 모든 사례를 대상으로 피해현황을 분석하였다. <그림 2.2.1>~<그림 2.2.5>는 피해사례를 정리하여 피해의 특징과 피해를 발생시킨 기상요인 등으로 분류하여 도시한 것이다. <그림 2.2.1>은 1954년~1982년까지 254 피해사례 가운데 직접적인 피해요인인 기상요인별로 피해사례의 분포를 각각 나타낸 것이며, 태풍에 의한 피해는 58.3%, 저기압은 27.6%, 동절기 고파랑은 13.4%, 기타 0.7%로 태풍에 의한 피해가 대부분 임을 알 수 있다. <그림 2.2.2>는 전술한 <그림 2.2.1>의 피해사례 중 방파제의 설치수심별 분포를 각각 나타낸 것으로 10m 이하는 59.5%, 10m~20m는 38.9%, 20m 이상은 1.6%로 분포하고 있다. 대부분의 방파제가 20m 이하의 수심에 설치되고, 쇄파대의 복잡한 파랑장에 의해 피해가 발생한다는 것은 일반적인 사실이다. 따라서, 이에 대한 피해를 줄이기 위해서는 쇄파의 영향을 외력인 자화하는 노력이 필요할 것으로 생각된다. <그림 2.2.3>은 전술한 피해사례 가운데 피해 당시의 내습파와 설계파의 자료가 비교적 잘 정리되어 있는 사례를 이용하여 내습파고에 대한 설계파고의 비를 나타낸 것이다. 설계파고 이상의 파랑이 내습하여 피해가 발생한 경우는 52.6%이며, 이는 설계파의 과소평가 또는 해양환경변화로 인한 심해설계파의 증대 등에 의한 것으로 생각된다. 그리고 설계파고 이하의 파랑이 내습하여 피해가 발생한 경우는 47.4%에 달한다. 일본의 피해사례에서 피해당시의 외력조건(파고, 주기 등)이 관측된 경우는 전체 피해사례의 약 33%에 불과하며, 대부분의 경우는 피해발생 후 외력조건을 추정하여 수록하고 있다. <그림 2.2.4>는 1965년~1991년에 발생한 피해사례 가운데 소규모의 피해도 포함한 경우로서 총피해 시설수에 대해 기상요인별 분포를 나타낸 것이다. 태풍에 의한 피해는 72%, 저기압은 14%, 동절기 풍랑은 11%, 지진 1%, 기타 2%로 각각 나타났다. 피해금액의 대·소에 관계없이 방파제의 직접적인 피해요인은 태풍임을

알 수 있다. <그림 2.2.5>는 1983년~1991년에 발생한 피해사례 중 피해액 3,000만円 이상의 피해사례를 기상요인과 피해형태별로 나타낸 것으로서 태풍, 동절기 풍랑에 의한 피해빈도가 대부분을 차지하고 있다. 일본은 케이슨식 방파제가 대부분을 차지하고 있기 때문에 제체가 활동 및 전도되는 피해빈도와 더불어 소파공 및 기초공의 피해가 복합적으로 발생함을 알 수 있다.

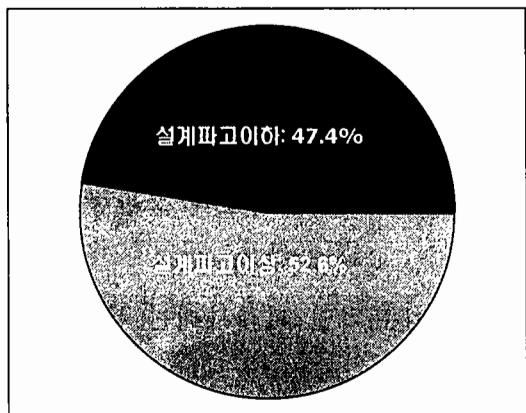
일본 피해사례에 대한 자료와 대표적인 피해사례는 부록 A에 수록되어 있다.



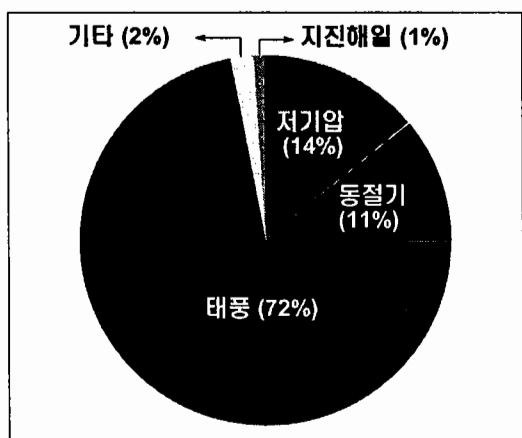
<그림 2.2.1> 기상요인별 피해사례(1954년~1991년, 254사례, 일본)



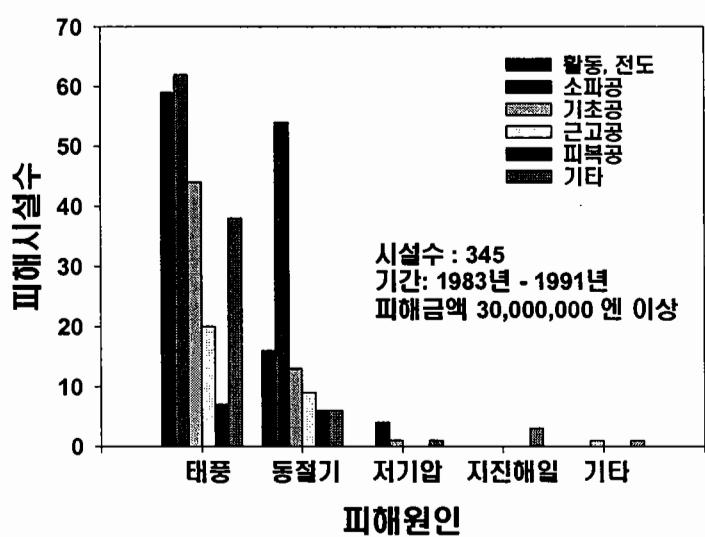
<그림 2.2.2> 설치수심별 피해사례(1954년~1982년, 185사례, 일본)



<그림 2.2.3> 내습파고별 피해사례(1954년~1982년, 116사례, 일본)



<그림 2.2.4> 원인별 총피해 시설의 비율(1965년~1991년, 2,173시설, 일본)

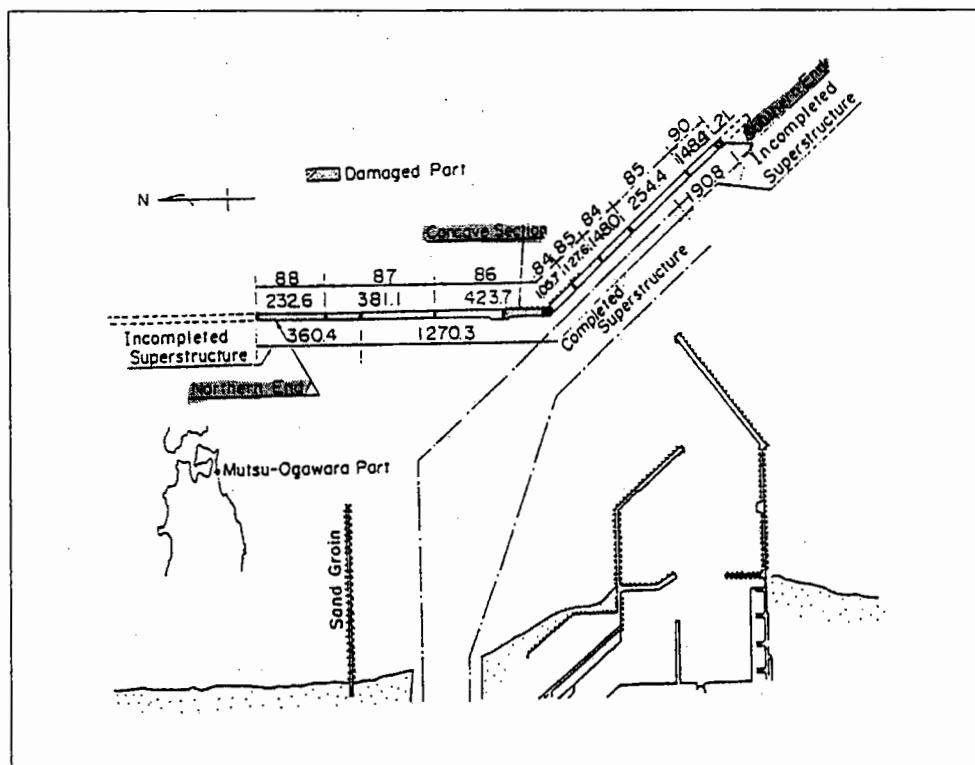


<그림 2.2.5> 원인·상황별 총피해 시설수

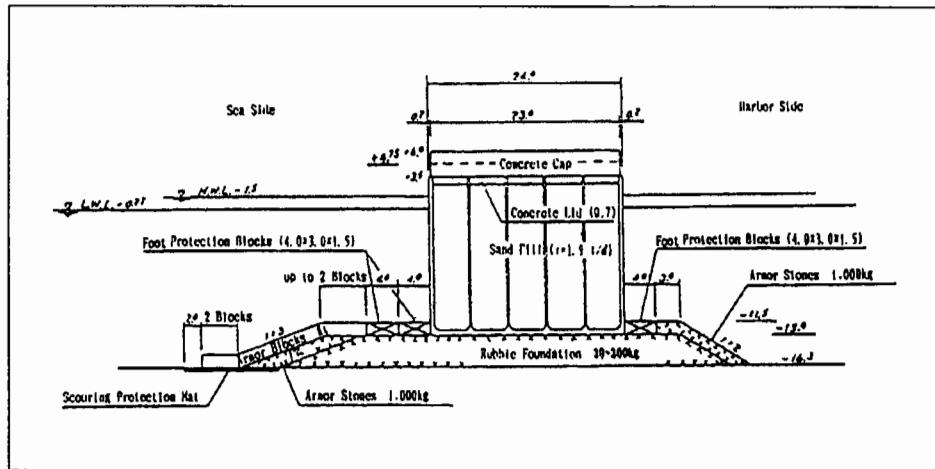
가. Mutsu-Ogawara항 피해사례

Mutsu-Ogawara항은 외양에 직접 노출되어 있어 방파제의 우각부에 소파블록을 불연 속적으로 설치한 케이슨식 혼성제이다. Mutsu-Ogawara항의 평면배치 및 피해당시의 대표적인 표준단면도는 <그림 2.2.6>~<그림 2.2.9>와 같다. <그림 2.2.8(a)>는 우각부에서 발생하기 쉬운 파랑의 집중현상 등에 의한 복잡한 파와 구조물의 상호작용을 제어하기 위해 케이슨 전면에 소파블록을 설치하여 방파제의 안정성을 도모한 경우이며, <그림 2.2.8(b)>는 공사중인 단계의 단면도를 나타낸 것으로 피해당시에 소파블록이 완전히 회복되지 않았던 경우이다.

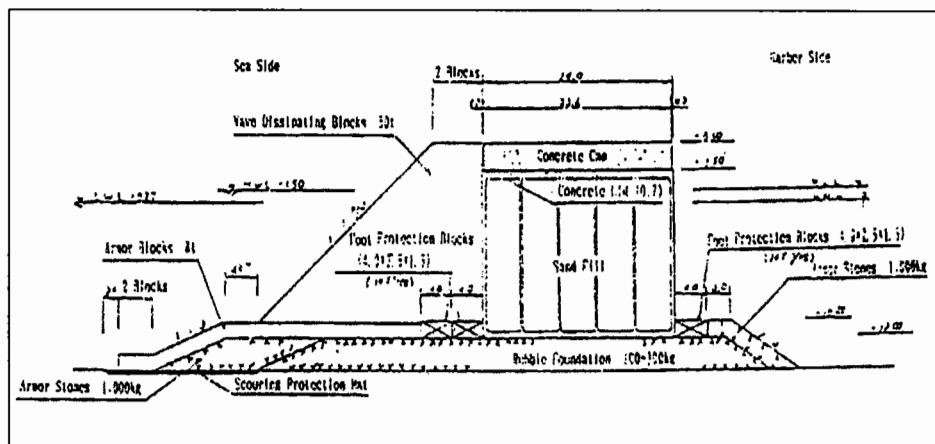
1991년 2월 겨울철 저기압에 의한 기상요인으로 인해 외곽방파제의 북측 제두부, 우각부, 남측 제두부 등 세 지점에서 피해가 발생하였으며, 당시 북측과 남측 제두부의 상부 구조는 건설이 진행중인 상태였다. 피해당시에 관측된 기상상태와 해상상태는 <표 2.2.1>과 같다.



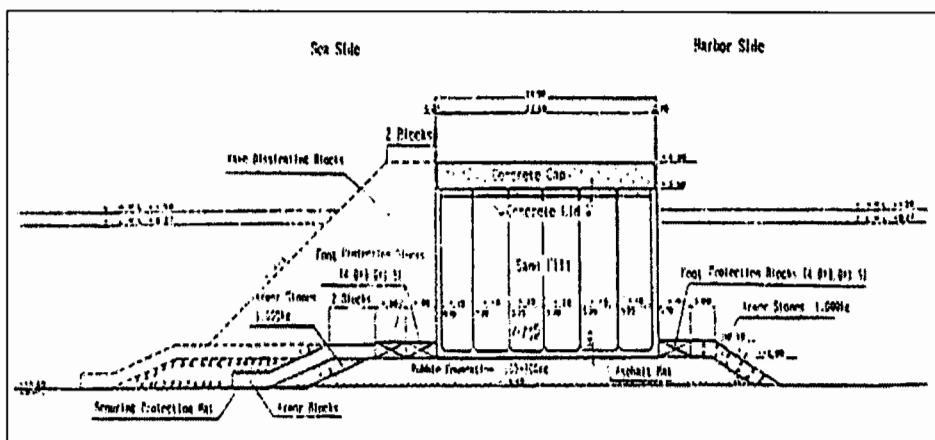
<그림 2.2.6> Mutsu-Ogawara항의 평면 배치도(Hitachi, 1994)



<그림 2.2.7> 북측 제두부 단면도(Hitachi, 1994)

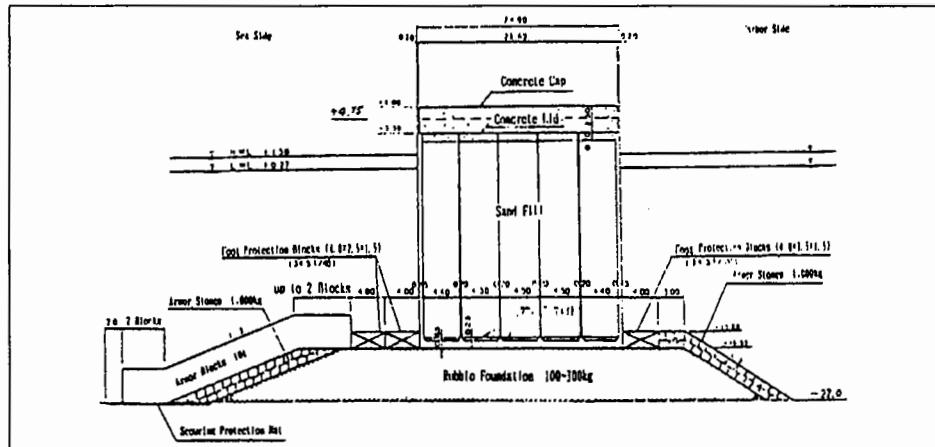


(a) 소파블록으로 피복된 구간



(b) 소파블록으로 피복되지 않은 구간(공사중 구간)

<그림 2.2.8> 우각부 단면도(Hitachi, 1994)



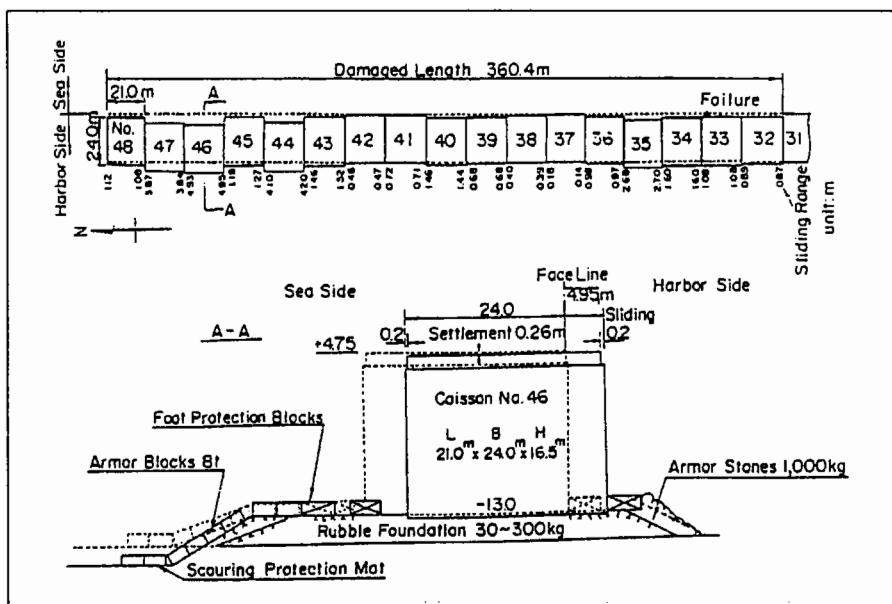
<그림 2.2.9> 남측 제두부 단면도(Hitachi, 1994)

<표 2.2.1> 피해당시의 최대풍속과 내습파고(Hitachi, 1994)

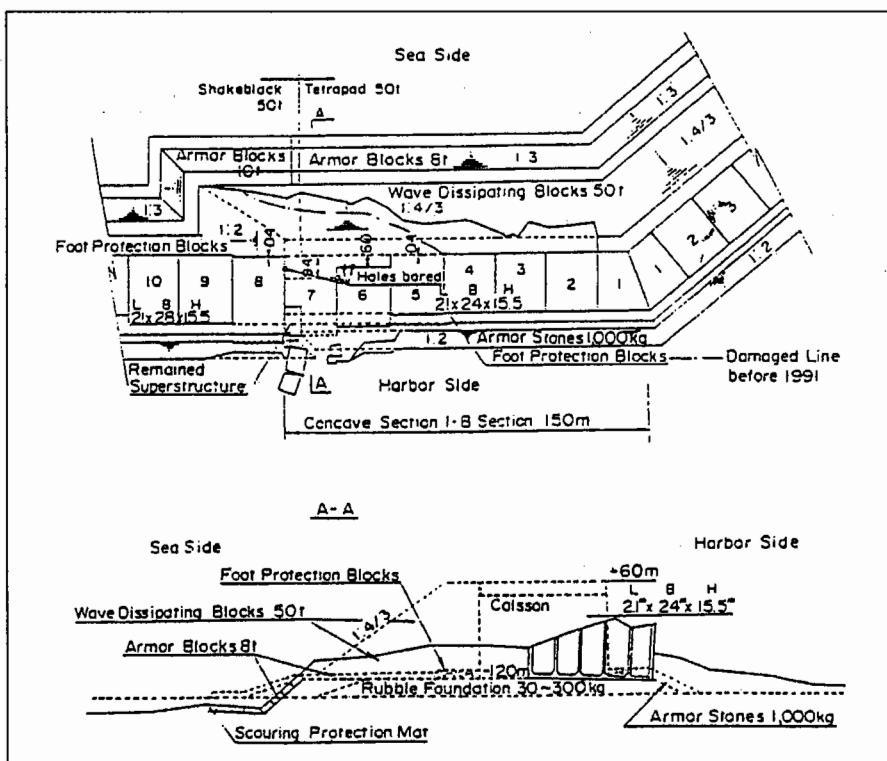
관측일시	1991. 2. 16	
풍 속	최대(10분간 평균)	27.7m/sec (ENE)
	순간최대	37.6m/sec (ENE)
조 위	188cm	
내습파고	최대파고(H_{max})	14.77m
	유의파고($H_{1/3}$)	9.94m ($T=13.4sec$)

<그림 2.2.10>은 북측 제두부 구간에서 발생한 케이슨의 사행피해를 나타낸 것으로서 피해가 발생한 총 연장은 360.4m이고, 17함의 케이슨이 「사행피해」라는 법선방향의 피해유형을 보였다(伊藤・谷本, 1971). 케이슨은 전체적으로 0.14m~4.95m 정도 이동하였으며, 상부공이 완료된 케이슨에서는 피해가 발생하지 않았으나, 상부공의 케이슨이 임시로 거치 된 경우에는 피해가 발생하였다. 그리고 근고공과 피복석이 다소 이동 및 이탈하였으며, 사석 기초부 전면의 해저는 2m~3m 정도 세굴 되었다.

<그림 2.2.11>은 우각부에서 발생한 케이슨의 피해와 소파블록 및 근고공의 이동·이탈을 나타낸 것으로, 우각부에 설치된 케이슨 중 No.2~No.9의 케이슨에서 피해가 발생하였다. No.5의 케이슨은 항내측으로 0.4m 정도 이동하였으며, No.6은 항내측으로 6.0m 정도 이동하였고, 케이슨 전면벽에 3개의 구멍이 생겼다. No.7은 9.4m 정도 항내측으로 이동하였으며, 케이슨 5/6정도가 파괴되어 상부공과 케이슨벽의 파편이 유실되었다. No.8의 케이슨은 0.4m 정도 이동하였으며, 전면벽에 구멍이 하나 생겼다.



<그림 2.2.10> 북측 제두부 구간에서 발생한 케이슨의 사행피해(Hitachi, 1994)

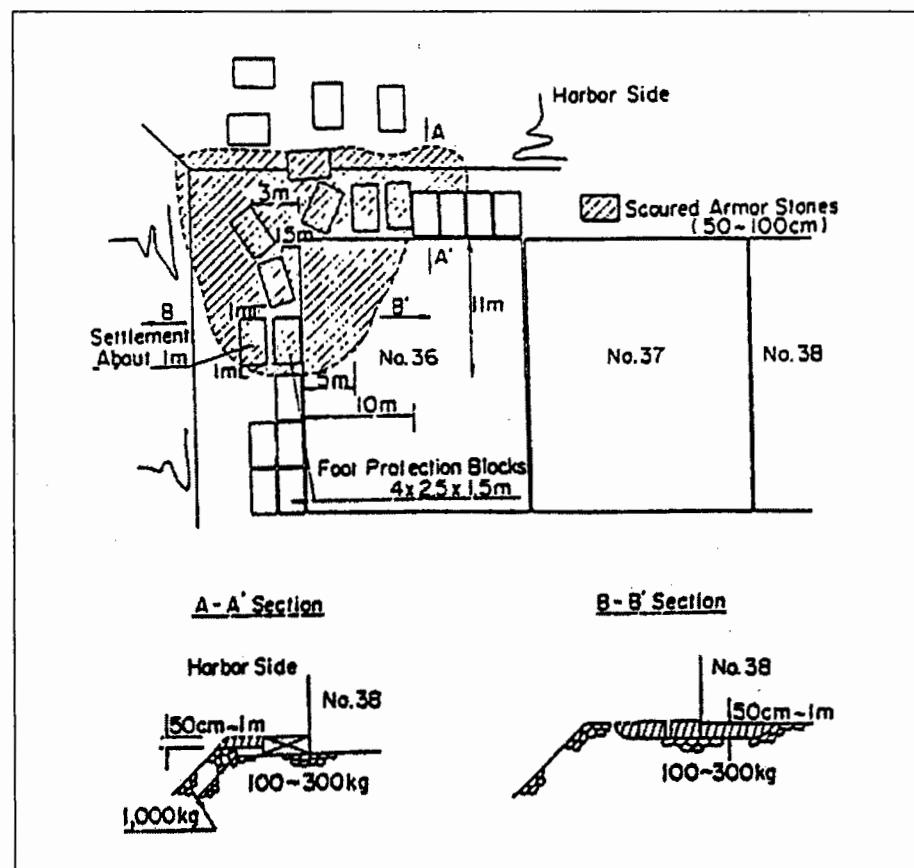


<그림 2.2.11> 우각부에서 발생한 케이슨과 소파블록의 피해(Hitachi, 1994)

No.7 케이슨 전면에 피복된 소파블록은 전체적으로 유실되었으며, 이탈된 소파블록 가운데 일부는 케이슨 전면에서 발견되었고, 케이슨 No.1~No.4 전면의 소파블록은 일부가 이동 및 이탈되었으나 심각한 정도는 아니었다. 그리고 피해가 발생한 케이슨의 사석기초부는 세굴로 인해 침식이 발생하였다.

<그림 2.2.12>는 남측 제두부에 발생한 케이슨 기초부의 세굴과 근고공의 이동 및 이탈에 의한 피해유형을 나타낸 것이다. 방파제 제두부에서 발생하는 국지적인 유속의 증가가 제두부 구간 피복석의 이탈을 야기 시켰으며, 피복석이 이탈함에 따라 사석기초부가 침식되었다. 방파제 두부구간은 국지적인 강한 흐름의 발생 가능성으로 인해 제간부의 피복블록 중량보다 크게 설계하는 것이 일반적이다. 본 피해사례에서 남측 제두부 구간의 피해구간은 시공중인 상태였기 때문에 이러한 피해가 발생하였다고 생각된다.

전술한 피해사례의 피해원인은 <표 2.2.2>와 같이 생각할 수 있으며, Mutsu-Ogawara 항의 설계파고와 피해당시 관측파고는 <표 2.2.3>과 같다.



<그림 2.2.12> 남측 제두부 구간의 피해(Hitachi, 1994)

<표 2.2.2> Mutsu-Ogawara항의 피해원인(Hitachi, 1994)

피해원인	피해구간	북측 제두부	우각부	남측 제두부
설계파 이상의 높은 파랑	○	○	○	
방파제 제두부에서 파고의 국지적인 증가	○			
소파블록의 불연속면에서 발생하는 충격쇄파력		○		
방파제 제두부상에서 발생하는 국부적인 흐름장				○

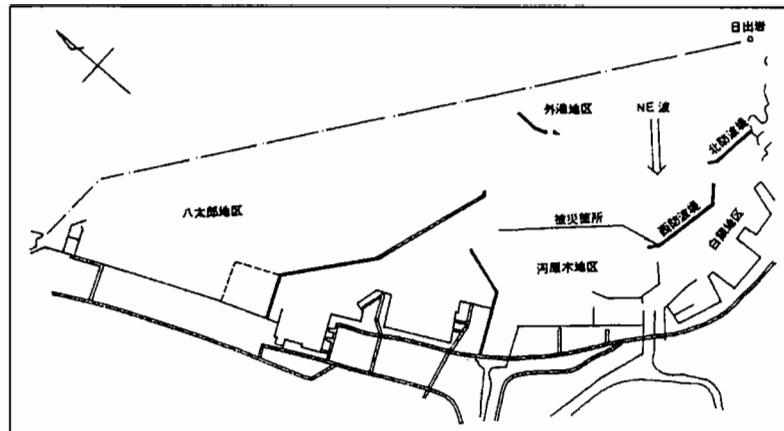
<표 2.2.3> Mutsu-Ogawara항의 설계파와 피해당시 내습파(Hitachi, 1994)

설계파		H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T(sec)
설계파	10년 빈도	북측 제두부 구간	10.8	6.2
		우각부	12.1	6.9
		남측 제두부 구간	12.3	7.0
	50년 빈도	북측 제두부 구간	13.2	7.6
		우각부	13.0	7.1
		남측 제두부 구간	13.7	7.6
피해당시의 관측파고 및 주기		14.77	9.94	13.4

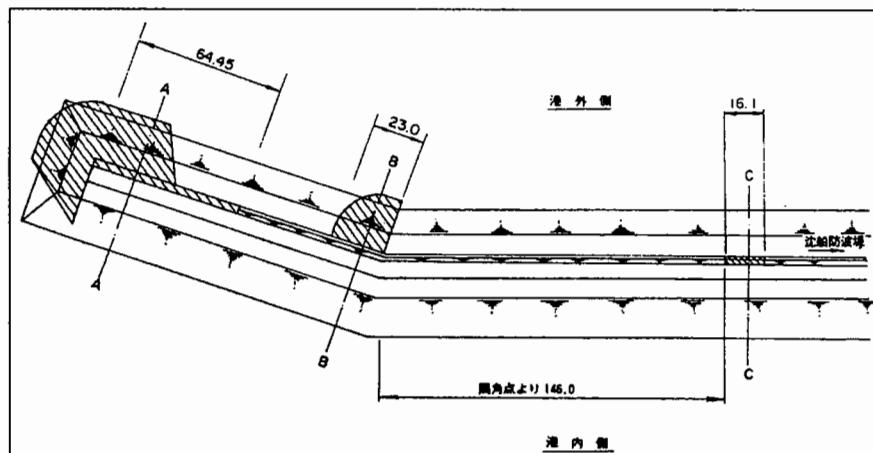
나. Yato항 피해사례

1980년 12월 23일~24일에 저기압에 의한 기상요인으로 Yato(八戸)항 서방파제 일부 구간에서 소파블록이 이탈되는 등의 피해가 발생하였다. <그림 2.2.13>은 Yato항 서방파제의 위치도와 피해지점을 나타낸 것이며, 내습파에 의해 소파블록이 붕괴되고, 상치콘크리트의 파라펫(parapet)이 활동하는 피해가 발생하였다. <그림 2.2.14>는 Yato항 서방파제의 우각부에서 발생한 피해구간의 평면도를 나타낸 것으로, 방파제의 구조양식은 케이슨식 혼성제이며, 일부구간은 소파블록피복제로 구성되어 있다. 소파공으로 16ton급 T.T.P.가 설치되어 있었으며, 방파제 설계파고는 5.5m, 주기는 10.0sec이다.

Yato항 방파제로부터 약 1.8km 정도 떨어진 수심 20m에 설치된 파고계로부터 관측된 자료를 이용하여 피해당시의 내습파가 분석되었으며, 유의파고 6.84m, 최대파고 9.94m, 유의파 주기 12.5sec, 최대파 주기 8.9sec로 분석되어 설계파고보다 큰 파고가 내습한 것으로 나타났다. 파향은 NE방향이었으며, 최대풍속은 17.1m/sec이었다.



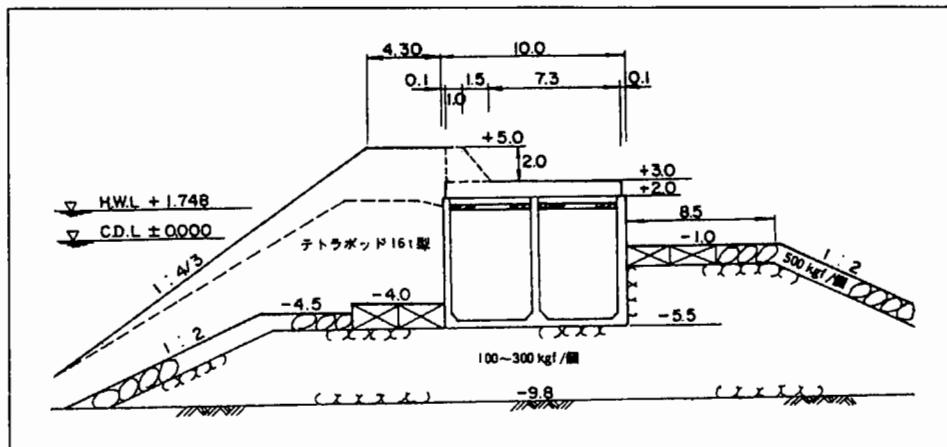
<그림 2.2.13> Yato항 서방파제의 위치 및 피해지점



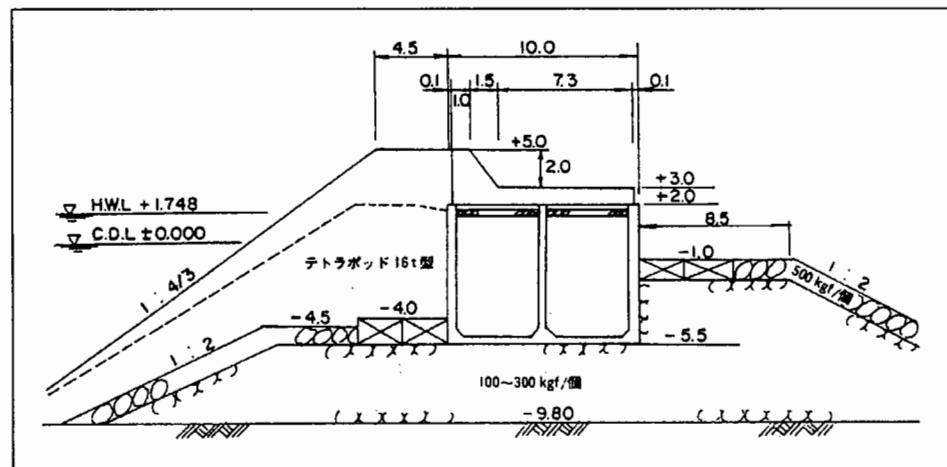
<그림 2.2.14> Yato항 서방파제 피해지점의 평면도

방파제의 피해는 직립부, 사석부, 소파공에서 각각 발생하였으며, <그림 2.2.15>는 <그림 2.2.14>의 A-A구간의 피해단면을 나타낸 것으로 상치콘크리트의 파라펫이 부분적으로 붕괴되고, 연장 56.45m에 걸쳐 239개의 T.T.P.가 이동 및 이탈하는 소파공의 피해가 발생하였다. <그림 2.2.16>은 <그림 2.2.14>의 B-B구간의 피해단면을 나타낸 것으로 연장 23m에 걸쳐 47개의 T.T.P.가 이탈되는 피해가 발생하였다. <그림 2.2.17>은 <그림 2.2.14>의 C-C구간의 피해단면을 나타낸 것으로 상치콘크리트 파라펫의 일부가 약 30cm 활동하는 피해가 발생하였으며, 부분적으로 파손되거나 균열이 발견되기도 하였다. 방파제 전면에 세굴방지공이 설치되지 않았지만 해저지반의 세굴에 의한 피해는 확인되지 않았다.

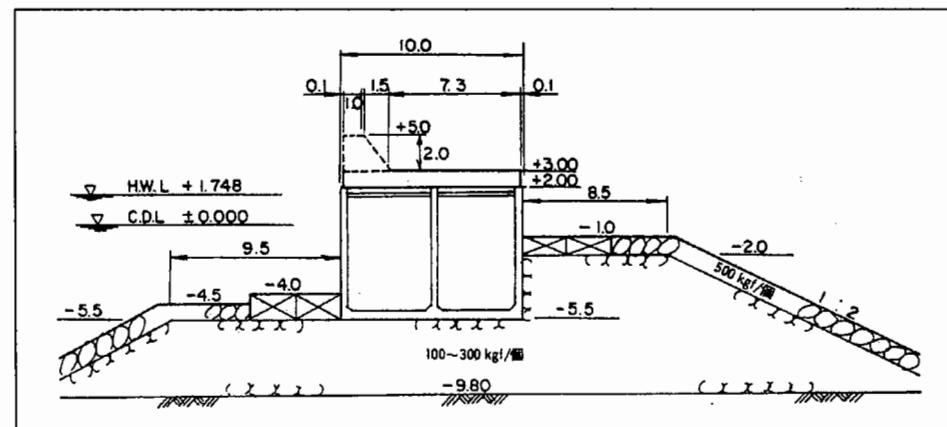
피해가 발생한 방파제는 <그림 2.2.18>과 같이 파손된 상치콘크리트 파라펫을 철거하고 새로 축조되었으며, 이탈된 소파블록은 동일한 중량의 블록으로 재설치되었다.



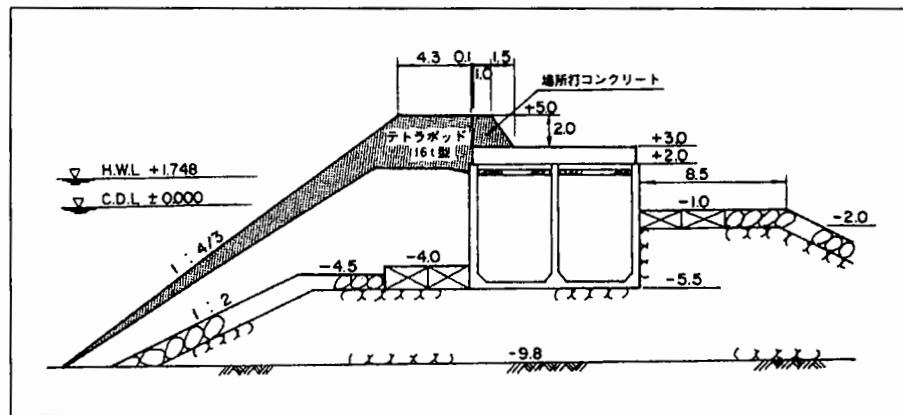
<그림 2.2.15> Yato항 서방파제 A-A구간의 피해단면도



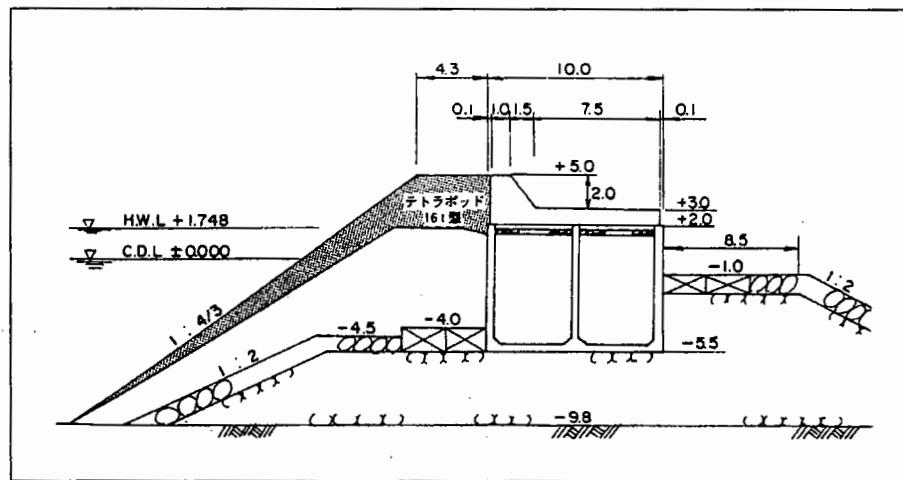
<그림 2.2.16> Yato항 서방파제 B-B구간의 피해단면도



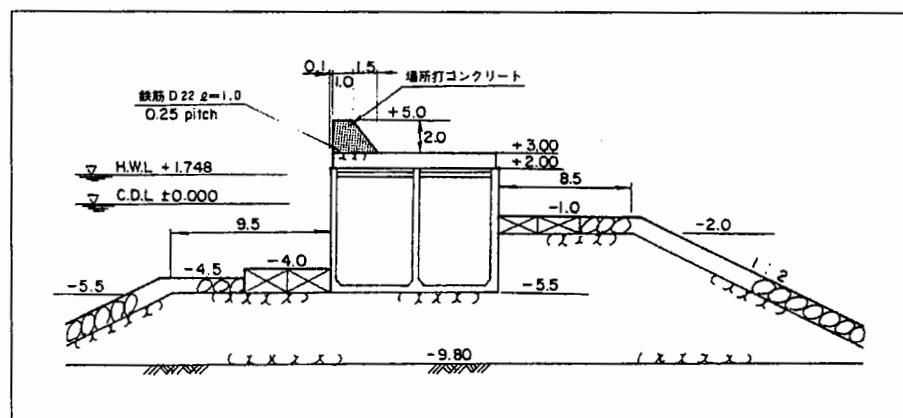
<그림 2.2.17> Yato항 서방파제 C-C구간의 피해단면도



(a) A-A구간



(b) B-B구간

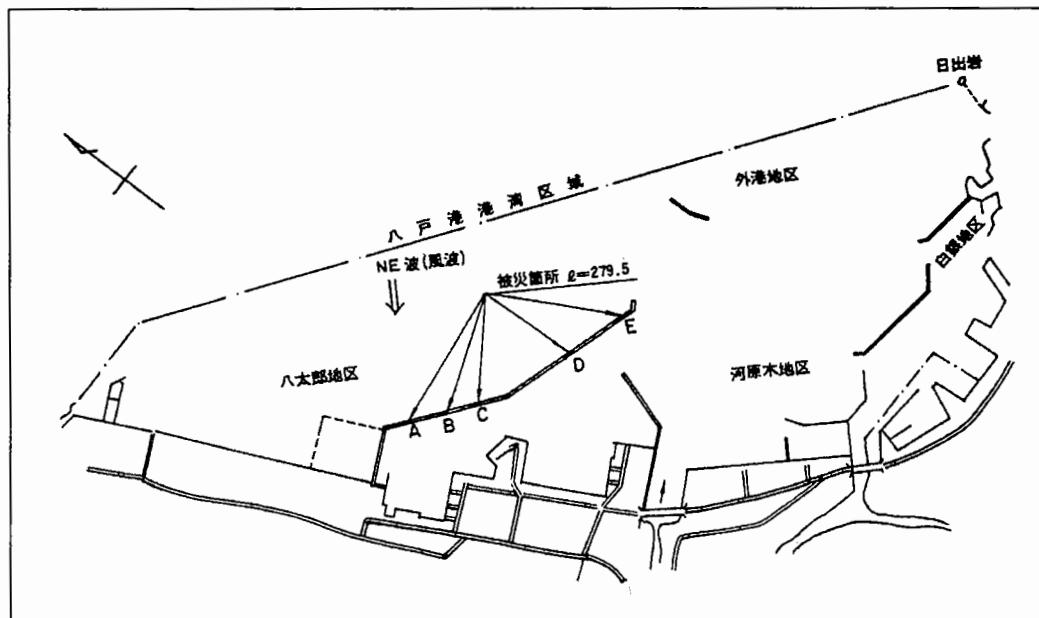


(c) C-C구간

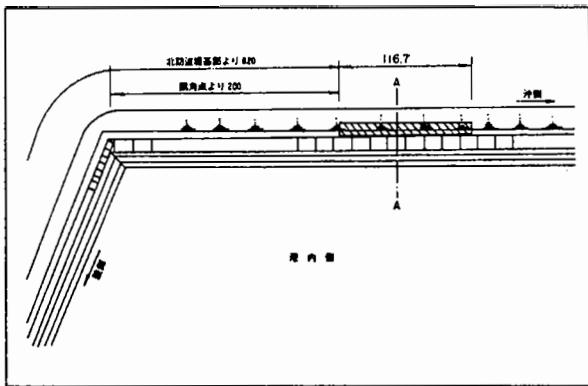
<그림 2.2.18> Yato항 서방파제 각 피해구간의 복구단면도

동일한 시기에 북방파제에서도 소파블록이 이탈되는 피해가 발생하였으며, 이를 도시한 것이 <그림 2.2.19>로서 설계파 제원과 피해당시의 내습파 제원은 전술한 바와 같다. 북방파제의 구조양식은 소파블록피복제로서 크게 칙립부, 사석부, 소파공으로 나눌 수 있으며, 피해가 발생한 지점에 대한 각각의 평면도는 <그림 2.2.20>과 같다. 그리고 피해구간의 단면도를 나타낸 것이 <그림 2.2.21>이다. 북방파제의 피해는 파랑의 직접작용에 의해 소파공이 이동 및 이탈된 것으로 피해가 발생한 5지점의 총 연장은 279.5m이며, 20ton급 T.T.P. 209개가 이탈되는 피해가 발생하였다.

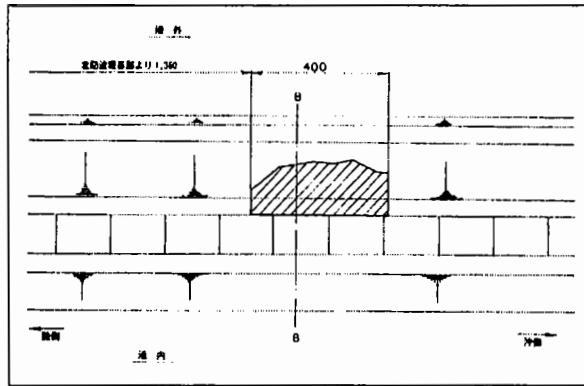
그리고 <그림 2.2.22>는 피해 소파공 단면에 대해 20ton급 T.T.P.를 사용하여 원상복구한 도면을 나타낸 것이다.



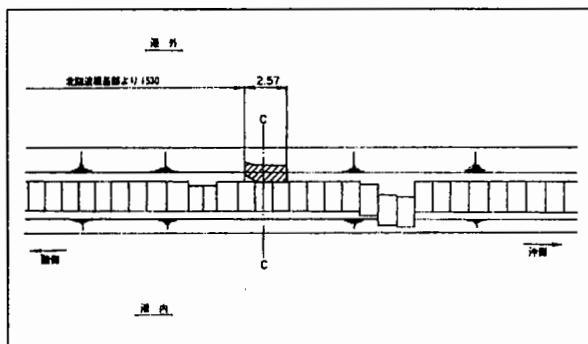
<그림 2.2.19> Yato항 북방파제의 위치 및 피해지점



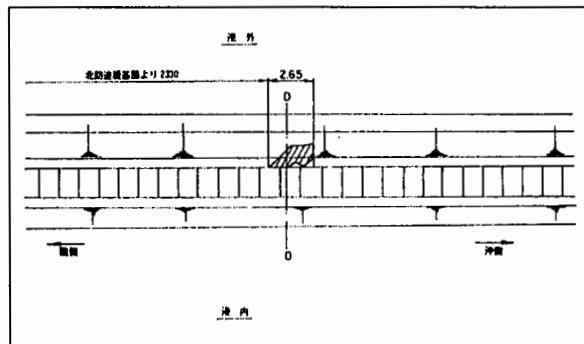
(a) A지점



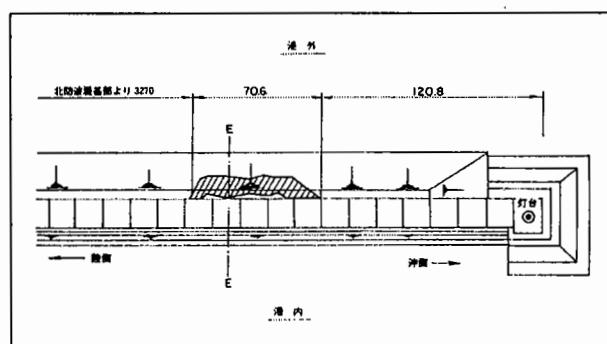
(b) B지점



(c) C지점

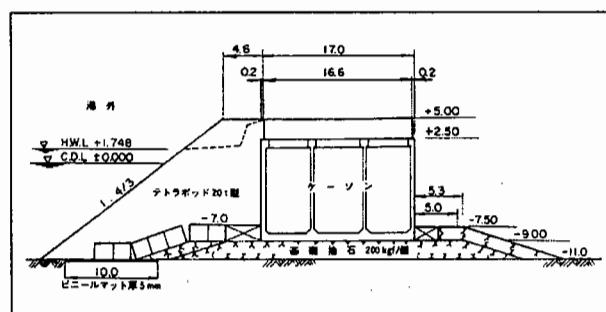
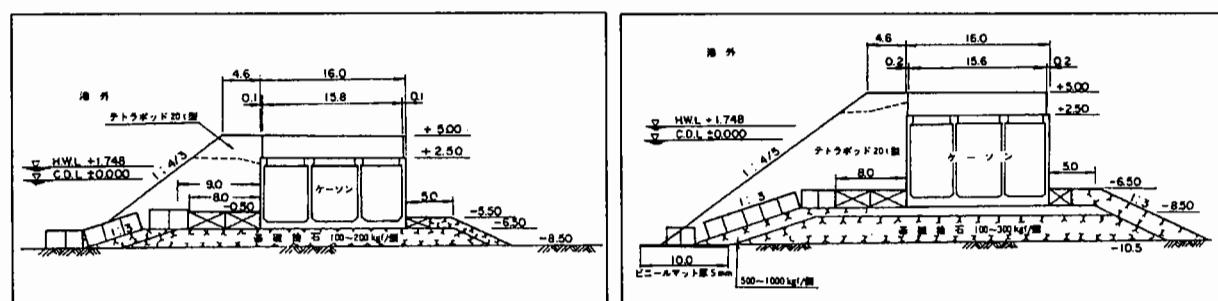
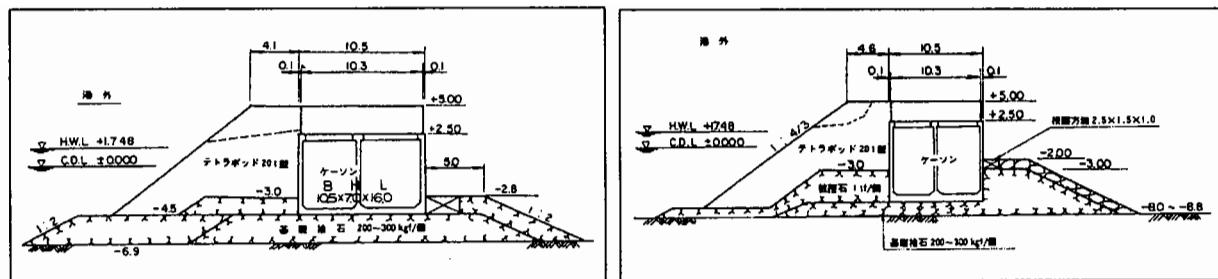


(d) D지점

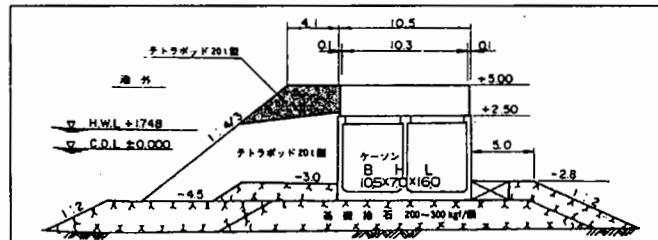


(e) E지점

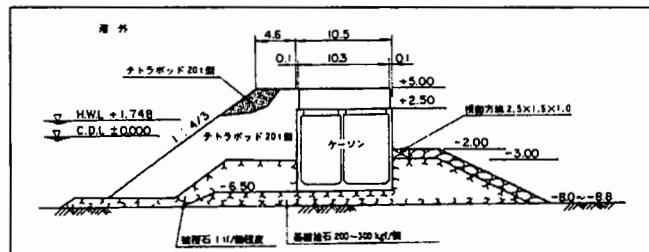
<그림 2.2.20> Yato항 북방파제 각 피해지점의 평면도



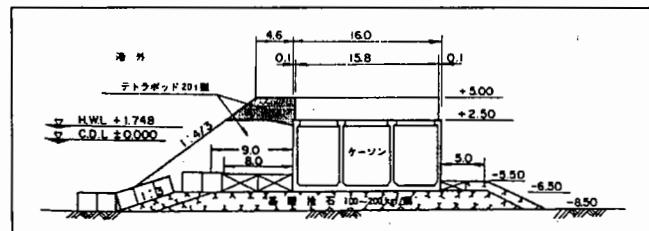
<그림 2.2.21> Yato항 북방파제 각 피해구간의 피해단면도



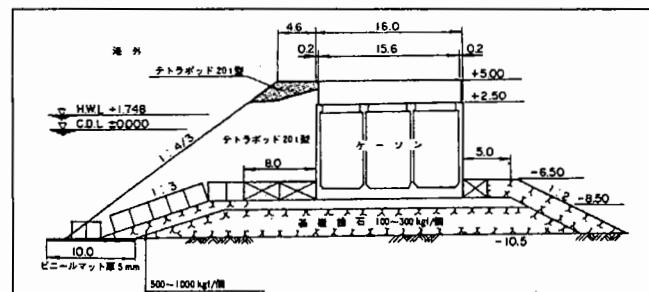
(a) A-A구간



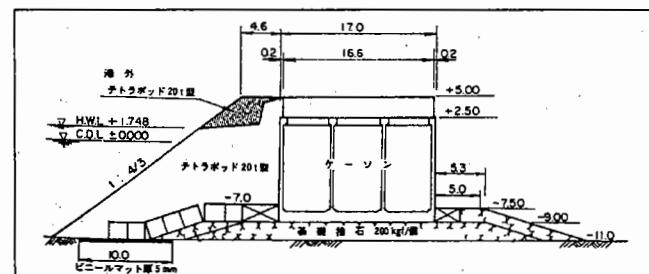
(b) B-B구간



(c) C-C구간



(d) D-D구간



(e) E-E구간

<그림 2.2.22> Yato항 북방파제 각 피해구간의 복구단면도

다. Niigata 동항 피해사례

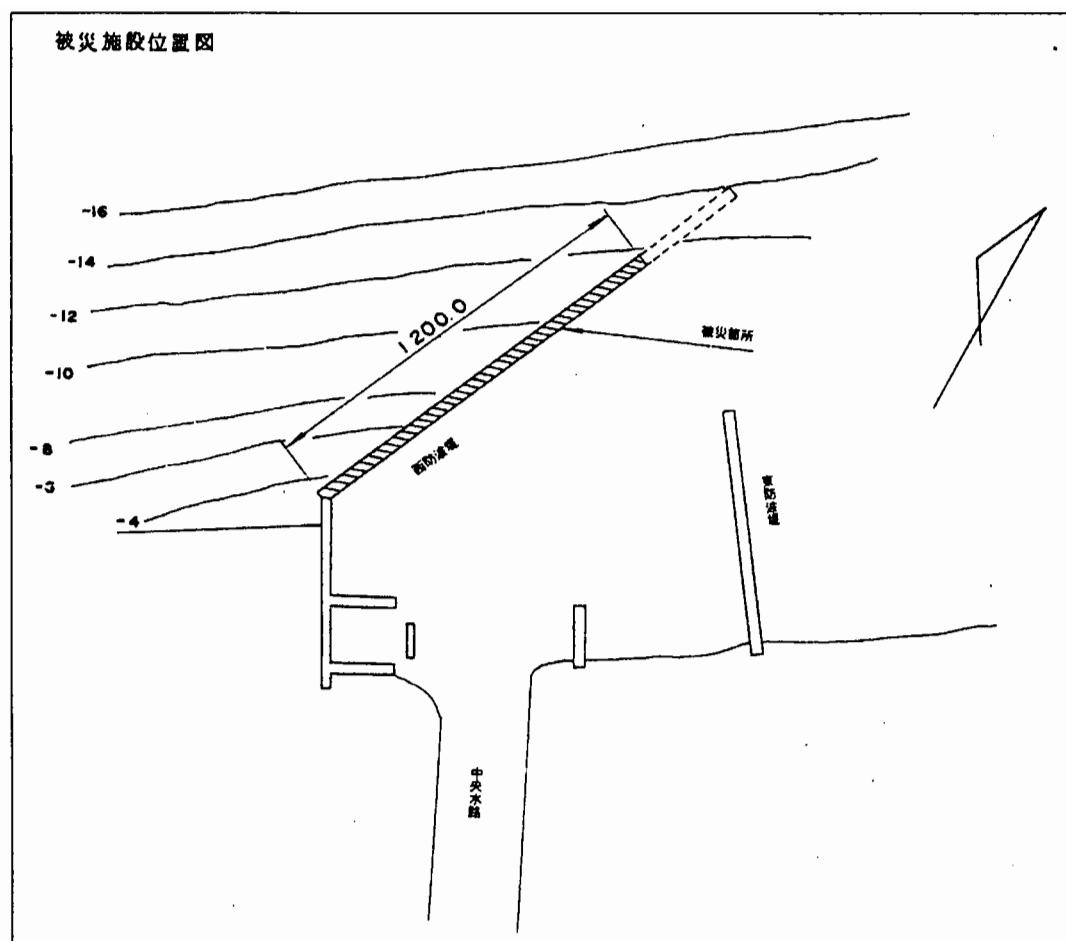
Niigata 동항은 1965년~1969년에 걸쳐 완공되었으나, 1970년 1월 31일 저기압에 의한 기상요인으로 Niigata 동항의 서방파제에서 피해가 발생하였다. <그림 2.2.23(a)>는 Niigata 동항 서방파제의 위치도와 피해지점을 나타낸 것이며, 내습파에 의해 해저지반이 세굴되어 기초사석과 피복석이 침하 및 이탈하고, 근고블록이 이동하는 피해가 발생하였다. <그림 2.2.23(b)>는 Niigata 동항 서방파제 피해구간의 평면도를 나타낸 것으로, 방파제의 구조형식은 케이슨식 혼성제이다. 방파제 설계파고는 6.0m~6.6m, 주기는 12.0sec이며, 해저경사는 1/100이다. 피해당시의 파고는 유의파고 6.75m, 주기 13.0sec로 나타났으며, 파향은 NW~NNW방향이었다. 또한 관측된 평균최대풍속은 20.0m/sec이었으며, 이러한 고파랑의 지속시간이 약 50시간에 이르렀다.

방파제의 피해는 주로 사석부에서 발생하였으며, 항외측 피복석은 연장 1,200m에 걸쳐 13,500m³의 피복석이 이동 및 이탈하고, 기초사석은 항외측으로 연장 1,200m에 걸쳐 4,400m³의 사석이 이동 및 이탈되었다. 그리고 근고블록은 연장 264m에 걸쳐 100개가 이동 및 이탈되었다. <그림 2.2.24>는 <그림 2.2.23>의 A-A구간의 피해단면을 나타낸 것이다, <그림 2.2.25>는 <그림 2.2.23>의 B-B구간의 피해단면을 나타낸 것이다. 피해단면에서 알 수 있는 바와 같이 방파제 전면 해저지반의 세굴에 의해 피복석이 침하되고, 파랑의 지속시간이 길어짐에 따라 점차 기초사석까지 침하하는 전형적인 세굴 피해현상을 보이고 있다.

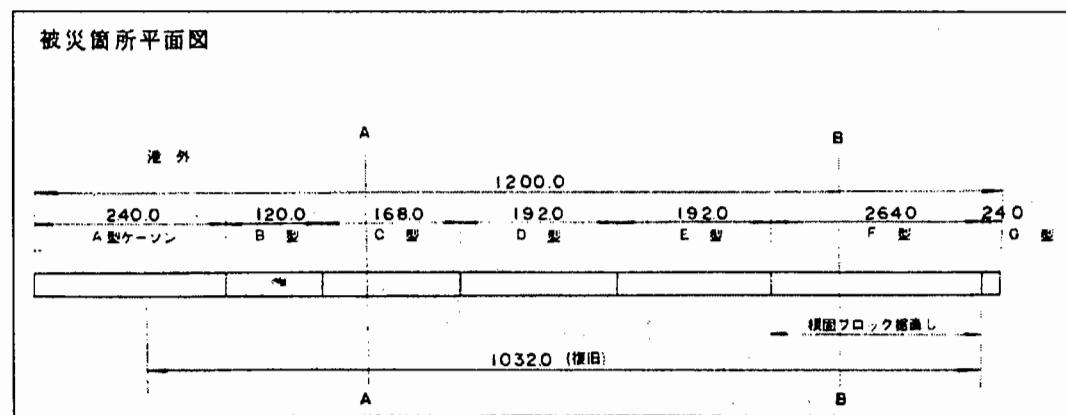
피해가 발생한 방파제는 <그림 2.2.24>와 <그림 2.2.25>의 복구단면도에서와 같이 기초사석은 200kg~500kg급으로 보충되었으며, 근고블록은 제자리에 원상복구되었다. 그리고 8ton급 Tribar가 피복공으로서 시공되었고, 1ton급 사석으로 피복공이 근고되었다.

라. Onahama항 피해사례

Onahama항은 1968년 3월 25일 완공되었으나, 1971년 4월 29일~30일에 발생한 저기압에 의한 기상요인으로 Onahama항의 제1서방파제에서 피해가 발생하였다. 방파제의 구조형식은 케이슨식 혼성제이며, <그림 2.2.26>은 Onahama항 제1서방파제의 위치도와 피해지점을 나타낸 것이다. 피해구간을 C구간, D구간, E구간 등 3개구간으로 구분하였고, C구간 항외측은 8ton급 T.T.P.와 중공삼각블록이, D구간 항외측은 피복 콘크리트블록이, E구간 항외측은 피복석 및 기초사석이 이동 및 이탈하였으며, 항내측은 피복석 및 근고블록이 전체에 걸쳐 이탈하였다. 또한 E구간 케이슨은 이동 및 파손이 발생하였다. 방파제 설계파고는 6.2m, 주기는 14.0sec이고, 해저경사는 1/300이다.



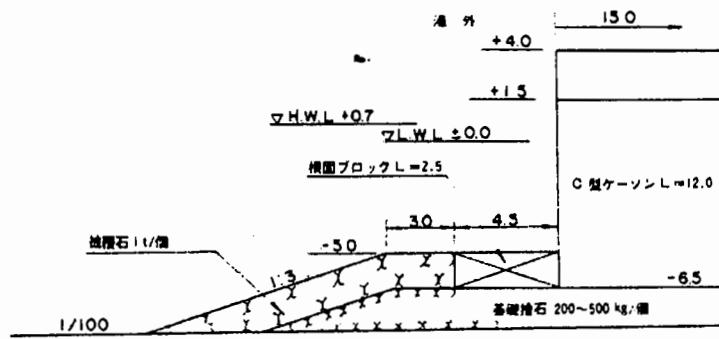
(a) Niigata 동항 서방파제 위치 및 피해구간



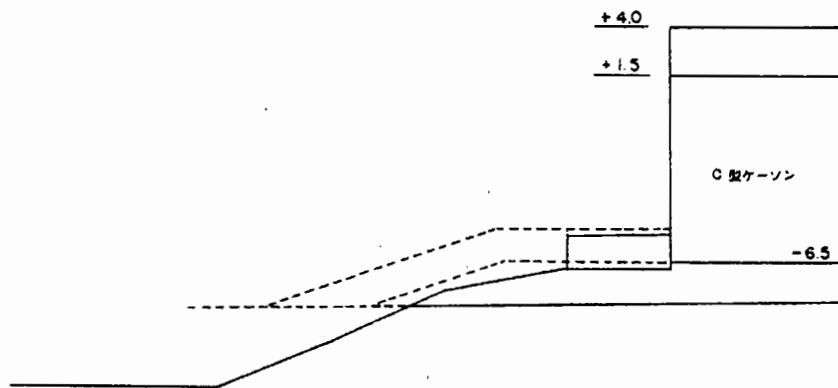
(b) 피해구간 평면도

<그림 2.2.23> Niigata 동항 서방파제의 피해 위치도 및 피해지점 평면도

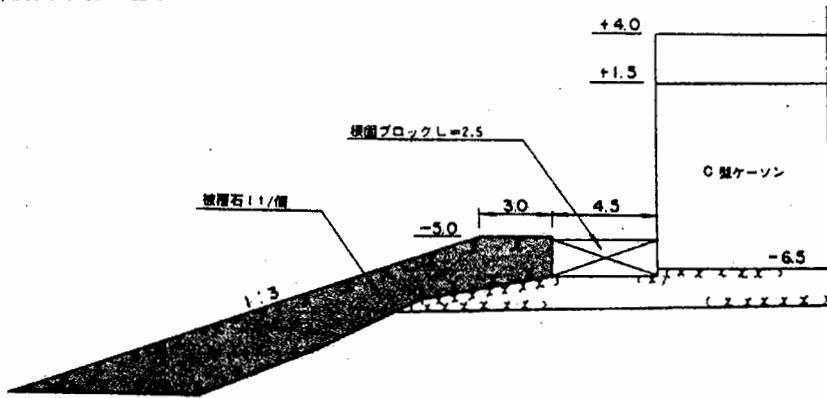
被災前断面図 (A-A)



被災時断面図 (A-A)

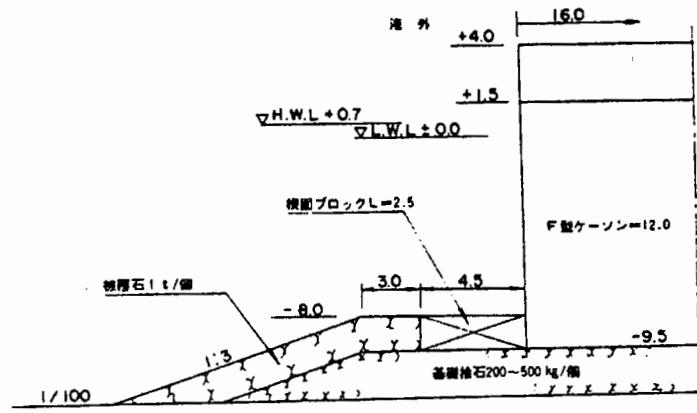


復旧断面図 (A-A)

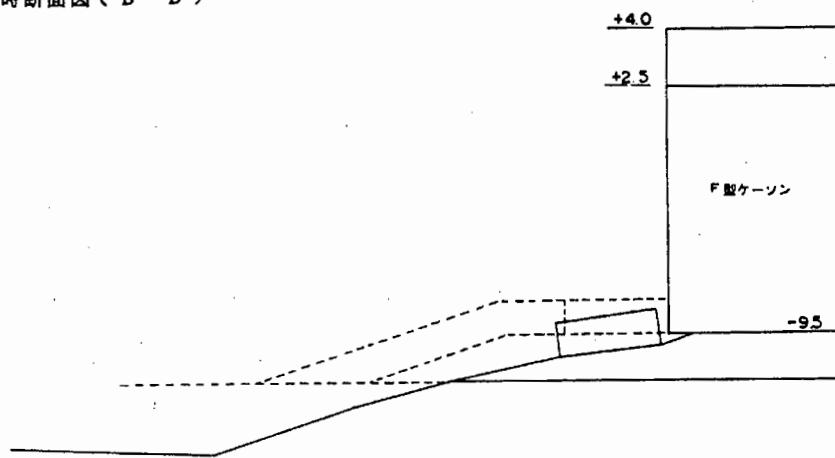


<그림 2.2.24> Niigata 동항 서방파제 피해단면도 및 복구단면도(A-A)

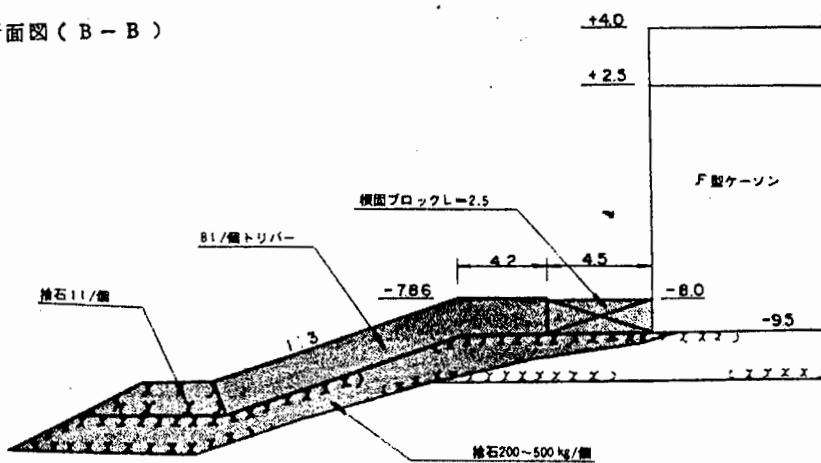
被災前断面図 (B-B)



被災時断面図 (B-B)



復旧断面図 (B-B)

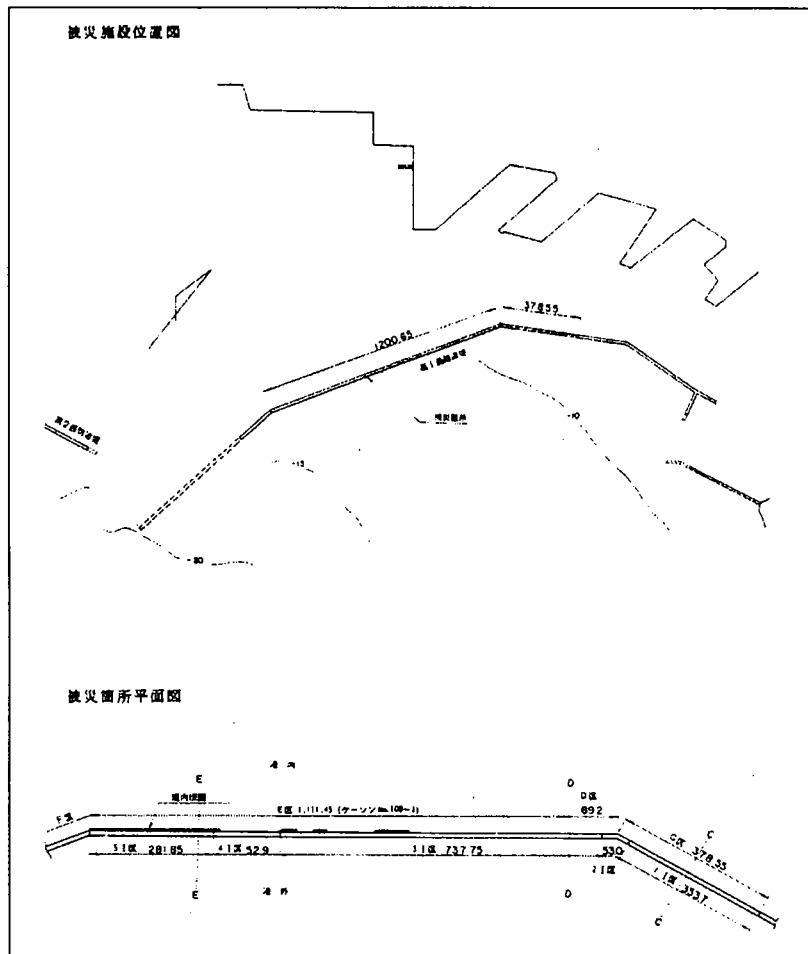


<그림 2.2.25> Niigata 동향 서방파제 피해단면도 및 복구단면도(B-B)

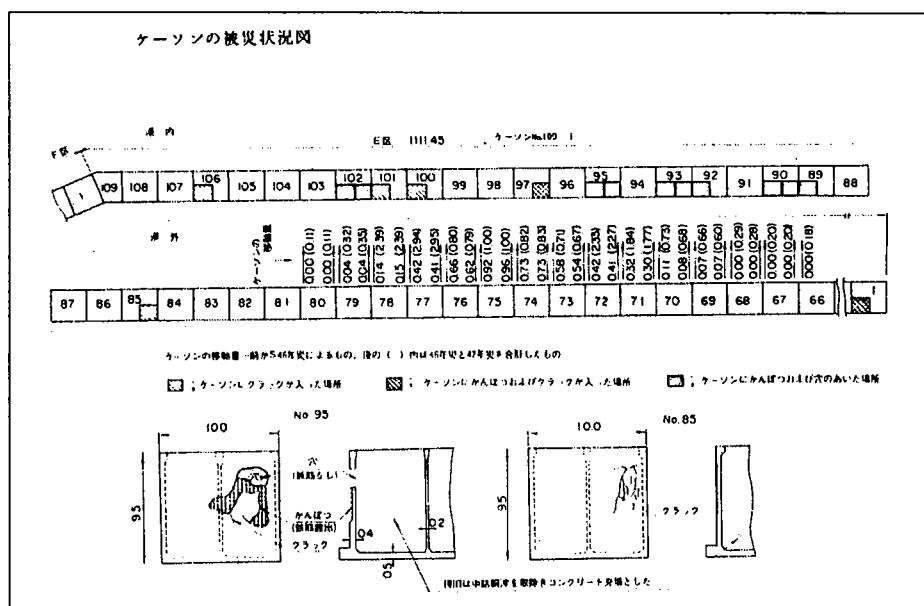
피해 당시의 외력은 관측되지 않았으나, 최대파고는 8.7m, 파향은 SE방향으로 추정되었다. 관측된 평균최대풍속은 9.8m/sec이었다.

방파제의 피해는 직립부와 사석부에서 발생하였으며, <그림 2.2.27>은 <그림 2.2.26>의 케이슨 피해단면을 나타낸 것으로 케이슨 11함이 활동하였다. 케이슨은 최대 0.96m까지 이동하는 피해가 발생하였고, 제체가 전체적으로 기울어지는 현상이 발생하였다. 그리고 케이슨 12함에서 균열이 발생하여 함몰되거나, 균열에 의해 구멍이 생기는 피해가 발생하였다. 케이슨의 피해는 「사행피해」로 검토되었으며, 이에 대한 연구는 계속 진행되고 있는 상태이다. 항외측 사석부에서는 피복공의 이동 및 이탈이 연장 1,200m에 걸쳐 $33,000\text{ m}^3$ 에 이르고, 항내측에서는 연장 447m에 걸쳐 $3,300\text{ m}^3$ 에 이른다. 기초사석의 이동 및 이탈은 항외측에서 연장 1,200m에 걸쳐 $7,700\text{ m}^3$ 에 이르고, 항내측에서는 연장 447m에 걸쳐 $2,500\text{ m}^3$ 에 이르렀다. 근고블록의 이동 및 이탈은 항외측에서 연장 1,200m에 걸쳐 1000개, 항내측에서는 연장 447m에 걸쳐 440개가 발생하였다. <그림 2.2.28>은 <그림 2.2.26>의 C-C구간의 피해단면을 나타낸 것이며, <그림 2.2.29>는 D-D구간의 피해단면을 나타낸 것이다. C-C구간과 D-D구간의 피해는 방파제 전면 해저지반의 세굴에 의해 발생한 것으로 판단되며, 세굴에 의해 피복공 및 기초사석이 고파랑의 지속시간에 따라 점차 침하하는 양상으로 확산된 것으로 생각된다. <그림 2.2.30>은 E-E구간의 피해단면을 나타낸 것으로 C-C구간이나 D-D구간과 같이 세굴에 의한 피해는 뚜렷하지 않으며, 설계파에 상당하는 직접적인 파력에 의해 피복공과 기초사석이 이동 및 이탈된 것으로 판단된다. Onahama항의 제1서방파제는 세굴방지공이 설치되지 않았음에도 불구하고 해저지반의 세굴에 의한 피해는 공간적으로 다르게 나타났으며, 이는 방파제의 형상 및 배치형태에 따라 다르게 나타난 것으로 생각된다.

피해 방파제 복구공사 중 다음해인 1972년 1월 11일~17일에 또다시 피해가 발생하였다. 이때 관측된 내습파의 유의파고는 6.82m, 주기는 14.0sec이며, <그림 2.2.28>~<그림 2.2.30>의 복구단면도에서와 같이 재피해시의 유의파고에 대해 검토된 블록의 소요중량으로 근고공과 피복공이 복구되었다. 또한, 이동한 케이슨은 기능상 지장이 없는 것으로 판단되어 복구되지 않았으며, 파손된 케이슨은 속채움 및 콘크리트를 타설하여 복구되었다.

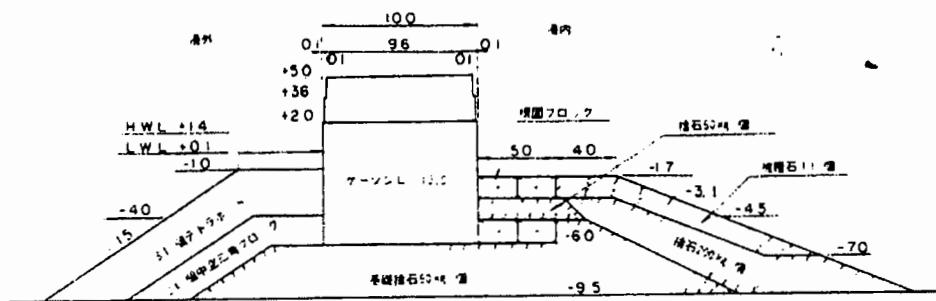


<그림 2.2.26> Onahama항 제1서방파제 피해시설 위치도 및 피해지점 평면도

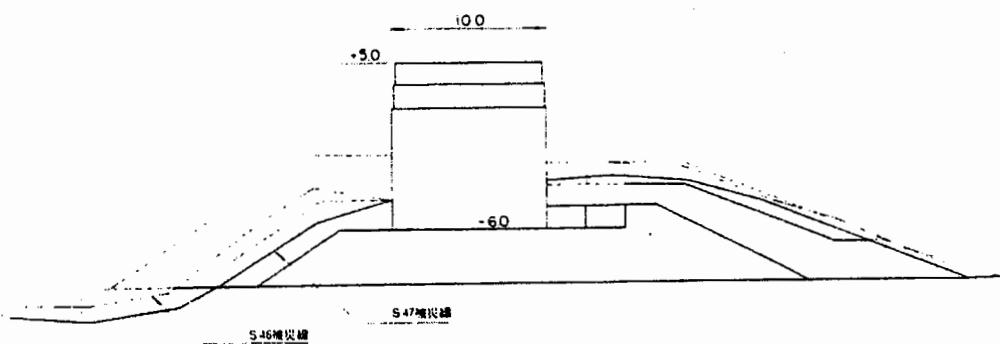


<그림 2.2.27> Onahama항 제1서방파제 케이슨 피해 상황도

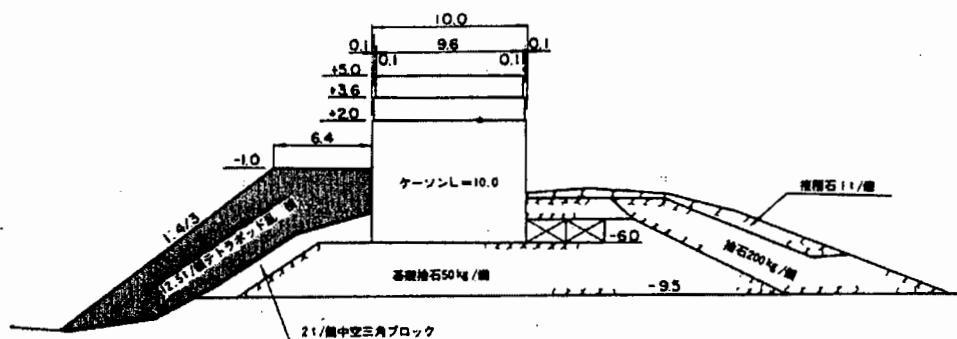
被災前断面図 (C - C)



被災時断面図 (C - C)

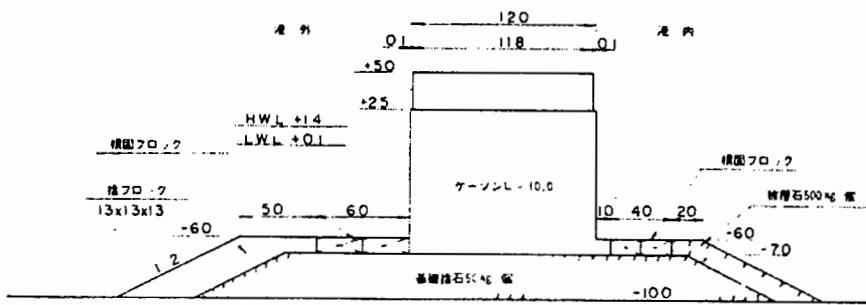


復旧断面図 (C - C)

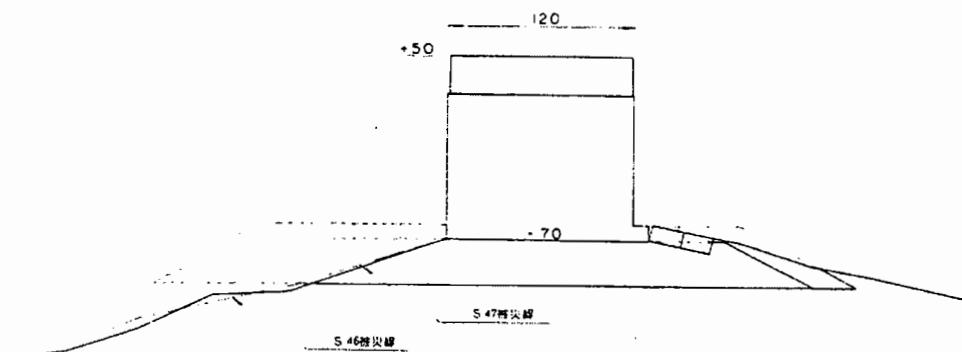


<그림 2.2.28> Onahama항 제1서방파제 피해단면도 및 복구단면도(C-C구간)

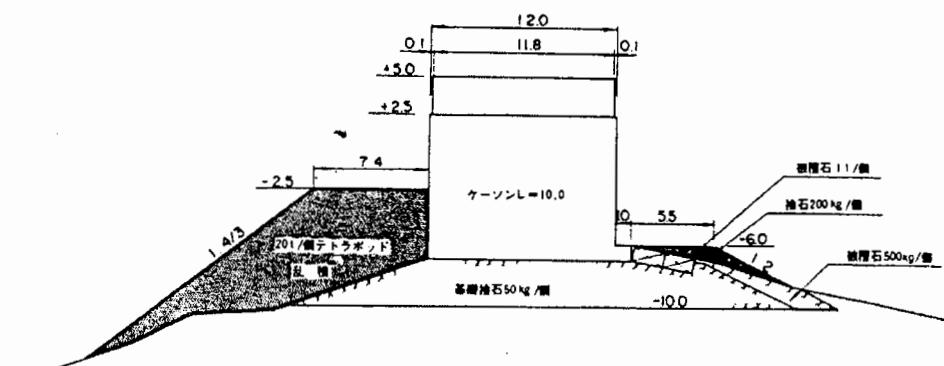
被災前断面図 (D-D)



被災時断面図 (D-D)

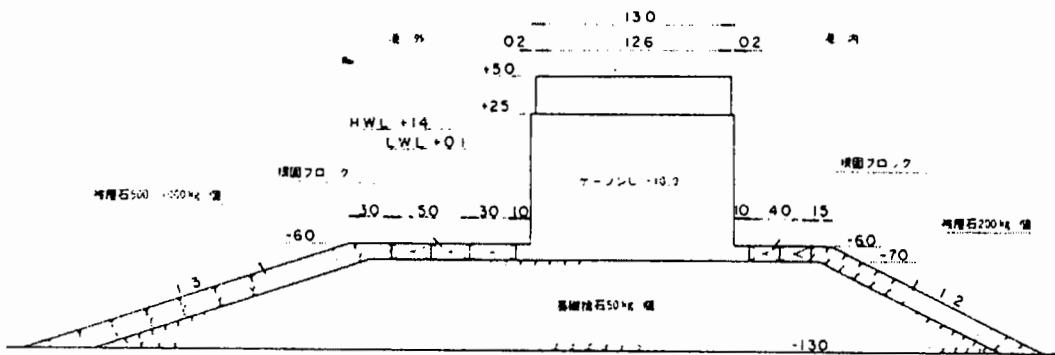


復旧断面図 (D-D)

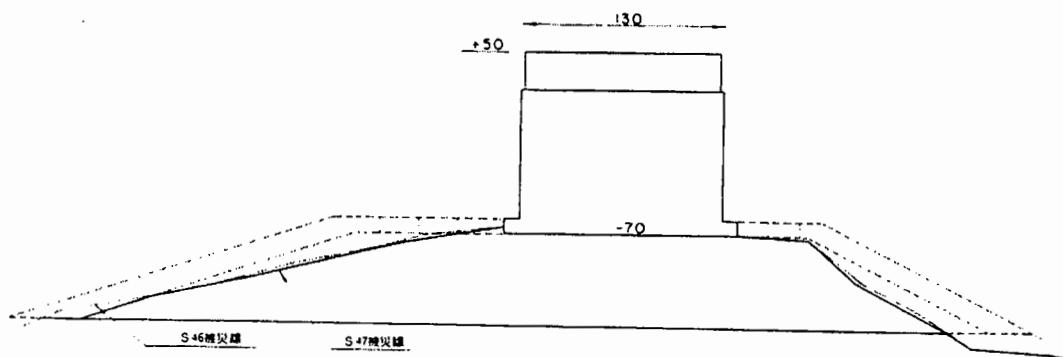


<그림 2.2.29> Onahama항 제1서방파제 피해단면도 및 복구단면도(D-D구간)

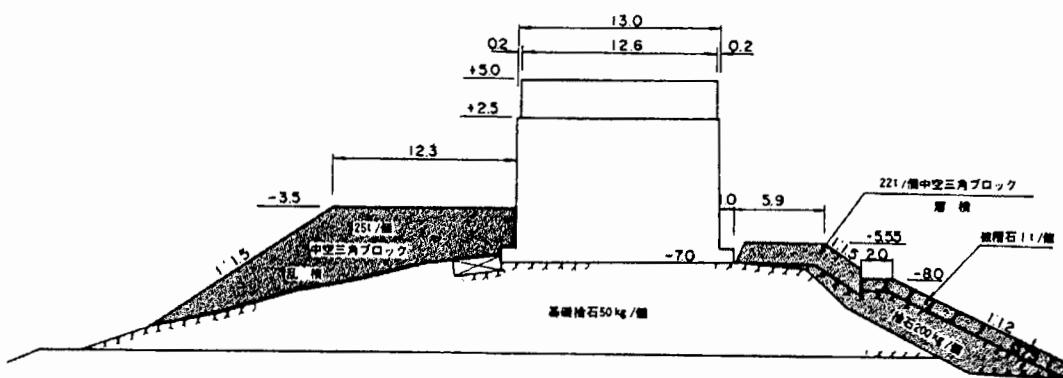
被災前断面図 (E-E)



被災時断面図 (E-E)



復旧断面図 (E-E)

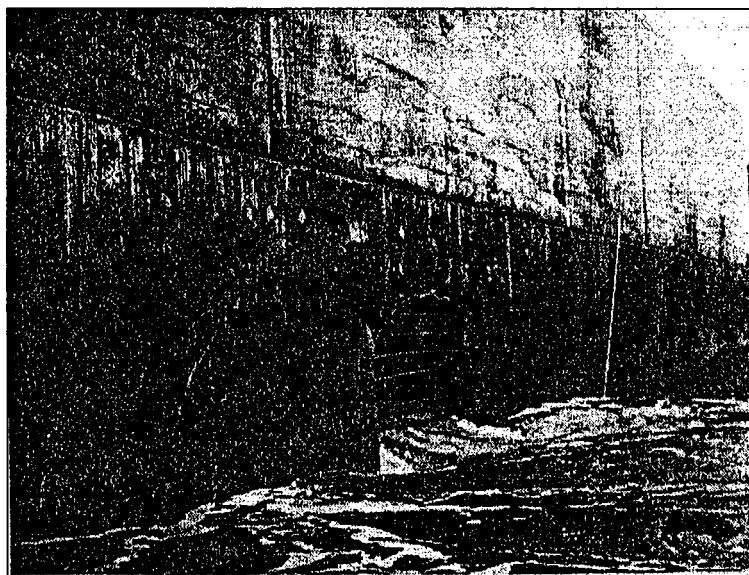


<그림 2.2.30> Onahama항 제1서방파제 피해단면도 및 복구단면도(E-E구간)

마. 방파제 케이슨벽의 파괴

Takahashi 등(1998)에 의하면 <사진 2.2.1>과 같이 방파제 케이슨벽에 구멍(구조적인 파괴)이 발생하는 피해사례는 의외로 적지 않다고 하였으며, 그 원인으로는 소파블록의 충돌, 파력, 특히 충격쇄파력의 직접적인 작용에 의한 것이라 하였다. Tanimoto 등(1975)은 케이슨벽의 파괴에 대해 8건의 피해사례를 중심으로 검토하였으며, 소파공이 없는 혼성제에 충격적인 파압이 작용하여 높은 마운드에 의한 충격쇄파력의 발생이 주요 피해원인이라고 하였다.

Tanimoto 등(1975)의 조사 이후, Takahashi 등(1998)은 최근까지 거의 20년간 주요 케이슨의 파괴사례를 조사하였으며, 케이슨벽의 파괴사례 중 경미한 피해사례를 제외하고 부록 <A.11>과 같이 17건의 피해사례에 대해 검토하였다. 케이슨 벽의 파괴원인으로는 ① 높은 마운드 또는 급경사 해저면으로 인해 발생하는 충격쇄파력, ② 소파블록과의 충돌, ③ 케이슨간의 충돌 등에 의한 것으로 제시되었다. 부록 <A.11>에 제시된 17건의 피해사례 중 12건은 충격쇄파력에 의해 케이슨벽이 파괴된 경우이며, 이 중 7건은 소파공이 없는 경우로서 높은 마운드나 급경사 해저면에 의한 충격쇄파가 피해의 원인이고, 5건은 소파공이 있는 경우로서 소파공 마루 등과 같은 불완전 소파부에서의 충격쇄파력의 발생에 의한 것으로 검토되었다. 그리고 17건중 5건은 소파블록의 충돌에 의한 것으로 나타났다. 그러나 부록 <A.11>의 피해사례는 일본 전지역에 설치된 16,000함이라는 많은 케이슨 수에 비하면 피해발생 빈도는 미미한 설정이라 할 수 있다.



<사진 2.2.1> 충격쇄파력에 의한 케이슨벽의 파괴사례

전술한 케이슨벽의 파괴원인에 대해 자세히 살펴보면 다음과 같다.

(1) 높은 마운드 또는 급경사 해저면에 의한 충격쇄파력 발생

Tanimoto 등(1975)에 의한 사례연구의 대부분은 높은 마운드 또는 급경사 해저면에 의한 충격쇄파력이 그 원인이었으며, 부록 <A.11>의 Takahashi 등(1998)의 조사에서도 이와 같은 피해사례가 대부분이다. 그러나 Sakata(酒田)항에서 발생한 충격쇄파력에 의한 방파제의 대규모 피해(谷本 등, 1981) 이후, 기술자들에게 충격쇄파력의 위험성이 많이 인식되어 그 이후로는 이러한 피해가 점차 줄어들었다. 실제로 谷本 등(1981)의 조사에서는 4년간 8건의 피해가 발생하였지만, 그 이후에는 부록 <A.11>에 제시된 경우와 같이 20년간 7건의 피해가 발생하였다.

(2) 불완전 소파부의 충격쇄파력 발생

충격쇄파력에 의한 케이슨벽의 피해는 최근에도 발생하고 있지만, 이러한 피해는 소파블록피복제의 불완전 소파부(소파공 마루 등)에서 발생하고 있는 것이 특징이다. 이것은 통상 혼성제 전면을 소파블록으로 피복하여 개량하거나, 처음부터 소파블록피복제를 건설하는 경우가 많아지는 것에 대응되며, 특히 소파공 시공중에 피해가 발생하는 경우가 많다. 불완전 소파부에서 쇄파되어 강한 충격파력이 발생하기 때문에 이러한 형태의 피해 5 사례 중 4사례가 케이슨이 거의 완파되는 정도의 피해로 나타났다.

예를 들면, 전술한 Mutsu-Ogawara항의 동방파제에서는 우각부에 소파공이 있었으며, <사진 2.2.2>와 같이 케이슨 1함이 완파되는 피해가 발생하였다(Hitachi, 1994). 그러나 케이슨벽의 두께를 70cm로 한 경우에는 40cm 정도 활동하였을뿐 케이슨벽의 피해는 발생하지 않았다.



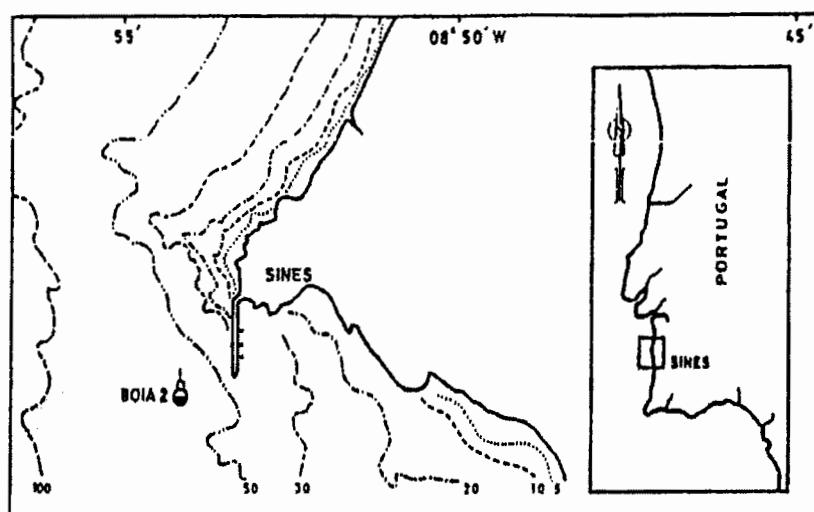
<사진 2.2.2> 우각부에서 발생한 케이슨의 피해사례(Hitachi, 1994)

(3) 블록의 충돌에 의한 피해

소파블록피복제 형식의 방파제가 많이 건설됨에 따라 소파블록의 충돌에 의한 케이슨 벽의 손상도 문제가 되고 있다. 부록 <A.11>에는 5건의 피해사례가 수록되어 있으며, 경미한 피해를 포함하면 피해사례는 상당히 증가할 것으로 생각된다. 케이슨벽과 소파블록의 충돌은 방파제 전체에 걸쳐 발생하지는 않으며, 국부적으로 발생하고 있다. 소파블록 피복제 형식의 전체 방파제 수에 비해 피해가 발생하는 사례는 미미한 실정이며, ① 설계 파고가 크고, 대규모 소파블록이 설치된 방파제, ② 소파블록의 침하, 이동, 이탈이 발생하고 있는 방파제, ③ 소파공의 마루부분 또는 소파공이 침하한 장소 등에서 주로 피해가 발생하고 있다. 대부분의 경우에 케이슨의 손상은 정수면과 케이슨 마루 사이에서 발생하였다. 일반적으로 케이슨 마루부근의 소파블록이 케이슨의 상부와 접촉하고 있기 때문에 소파블록의 마루부분이 침하할 때에 케이슨벽과 접촉하기 쉽고, 블록이 침하하거나 이동 또는 이탈할 때 케이슨벽과 충돌하는 것으로 생각된다.

2. 포르투갈 Sines항 피해사례

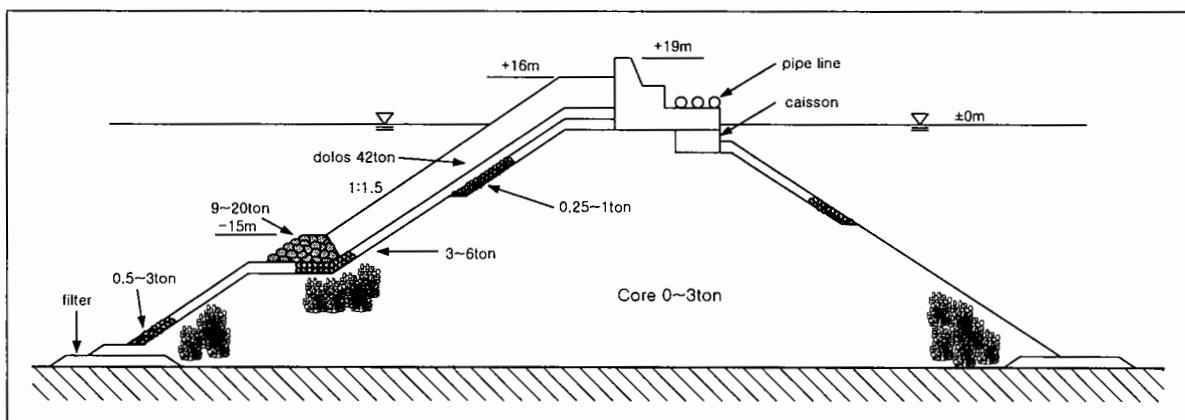
Sines항은 대서양에 인접한 포르투갈의 거대한 국영 공업항만으로서 Sines항의 방파제는 현존하는 방파제 가운데 가장 큰 방파제 중의 하나이다(그림 2.2.31 참조). 방파제의 설계파고는 재현기간 100년으로서 $H_{1/3}=11m$ 가 적용되었으며, 방파제가 건설된 최대수심은 50m로서 구조형식은 경사식 방파제이다.



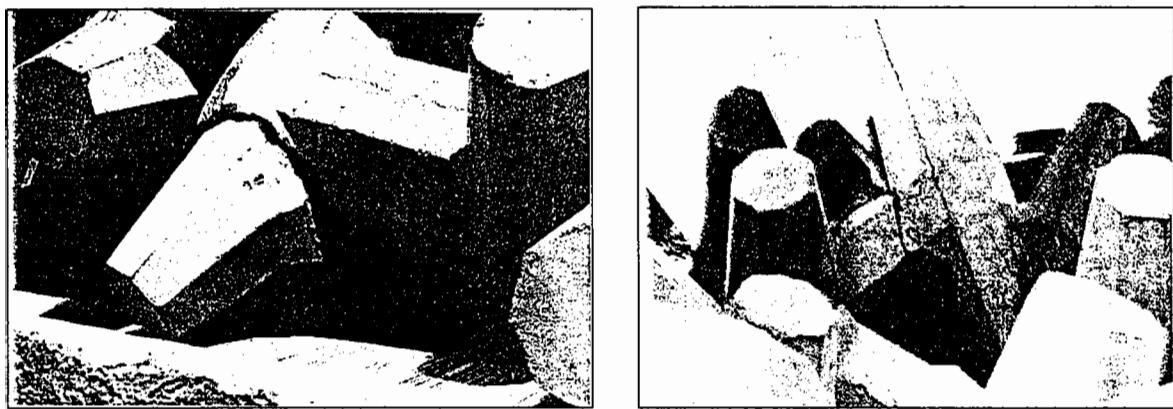
<그림 2.2.31> 포르투갈 Sines항의 위치도

1972년 영국과 이탈리아의 설계자에 의해 <그림 2.2.32>와 같은 최종단면이 결정되었다. 1973년부터 방파제 공사가 시작되어 전연장 약 2km의 완료가 거의 임박한 시기인 1978년 2월 26일 폭풍파에 의해 소파블록으로 사용된 42ton급 Dolos의 2/3가 붕괴되는 재해가 발생하였다(사진 2.2.3 및 사진 2.2.4 참조). 당시 내습파의 유의파고는 11m 미만이었으며, 최대파고는 17m 정도이고, 주기는 18.0sec~20.0sec로 추정되었다. 이러한 Sines항의 피해사례는 세계 항만기술자의 주목을 받게 되었다. 당시 내습한 파랑의 정확한 자료가 없어 피해원인을 명백히 밝히기에는 무리가 있었지만, 미국 토목학회(ASCE) 조사단에 의해 분석된 파괴과정은 다음과 같다.

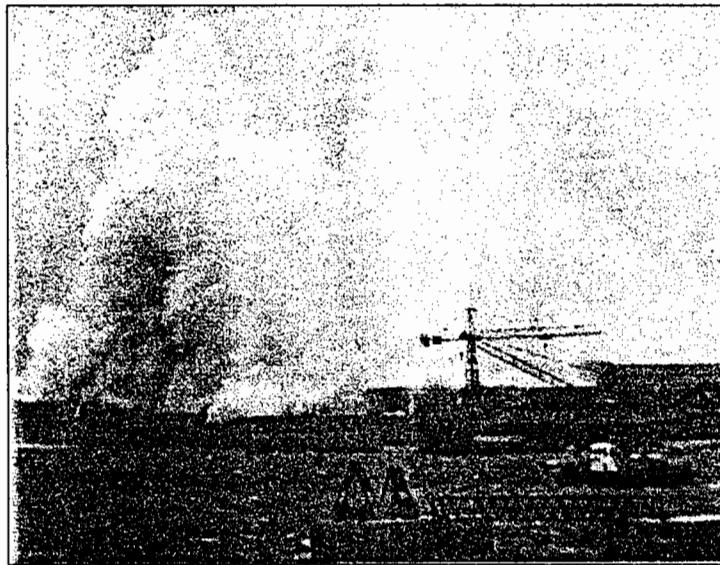
- ① $H_{1/3} < 6m$ 단계에서 불안정하게 설치된 Dolos가 평균해수면 부근에서 동요하기 시작하였다.
- ② 파고와 주기가 증가함에 따라 블록의 동요가 심해지고, 주변의 블록과 서로 충돌하여 파괴가 발생하였으며, 파괴된 블록의 파편은 파랑에 의해 유실되었다.
- ③ $H_{1/3} > 8m$ 인 폭풍 피크시에는 평균해수면 바로 아래에 있는 블록이 파괴되어 파랑에 의해 유실되고, 그 주변의 블록이 빈 공간을 채우기 위해 이동함으로서 결국 표층이 붕괴되었다. 가장 큰 피해는 평균해수면 바로 아래에서 일어났으며, 부서진 블록은 아래로 탈락되었다.
- ④ 폭풍이 끝날 즈음에 표층은 완전히 유실되는 단계에 이르렀고, 표층 아래의 사석 층과 코어(core)층이 침식되어 상부공의 기초가 세굴되었다. 상부공 기초부의 세굴로 인하여 상부공은 항외측으로 기울었으며, 결국 상부공은 부서지고 흥벽이 파괴되었다.



<그림 2.2.32> Sines항 방파제 단면도(Zwamborn, 1979)



<사진 2.2.3> Sines항 방파제에 피복된 42ton급 Dolos 파괴장면



<사진 2.2.4> Sines항에서 발생한 월파장면

Sines항 방파제의 피해사례를 정리하면 <표 2.2.4>와 같다.

<표 2.2.4> Sines항 방파제의 피해상황

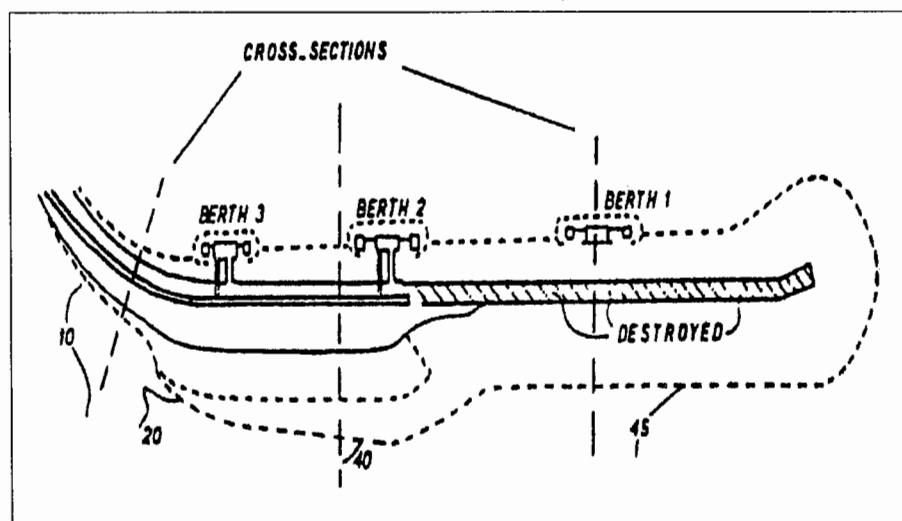
피해과정	최대피해 발생지점	100년빈도 설계파고	폭풍파내습시 추정유의파고	비고
피복블록의 동요 → 블록의 이동→ 코어층의 침식 → 상부공의 기초부 세굴 → 상부공의 파괴	평균해수면 아래	11m	8.5m~9m	설계파 이하

그리고 1978년에 이어 다음 해인 1979년 2월 유의파고 11m에 달하는 폭풍파에 의해 Sines항의 방파제는 완전히 파괴되었다. 이에 대한 피해는 다음과 같은 원인 때문으로 분석되었다(Zwamborn, et. al., 1980).

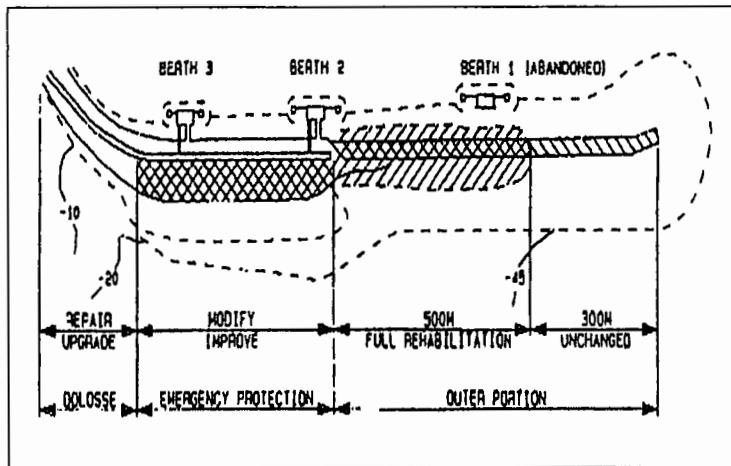
- ① 방파제 전면의 깊은 수심으로 인한 높은 파고와 장파의 내습
- ② 굴절로 인한 파랑의 집중
- ③ 폭풍파의 지속시간에 따른 피복블록 각 개체의 과도한 움직임에 의한 블록(dolos)의 구조적 파괴

피해가 발생한 이후, Sines항의 중요성 때문에 1979년 8월에 복구가 시작되어 방파제의 최종 복구때까지 항만의 운영을 위해 1981년 4월에 <그림 2.2.33>과 같이 응급복구되었으며, 이후 수리모형실험에 의해 안정성을 검토한 후 <그림 2.2.34> 및 <그림 2.2.35>와 같이 완전히 복구되었다. 제간부는 소파블록으로 90ton급 Antifer cubes를 정적으로 설치하였으며, 방파제 제두부는 수리모형실험결과에 의거하여 Antifer cubes 105ton급이 설치되었다. 이러한 피해가 발생한 뒤 계속적인 현장관측이 실시되었으며, 정수면부근에서 소파블록의 침하현상과 파손이 미미하게 발생하였으나, 즉시 복구되었다(Weggel, et. al., 1994).

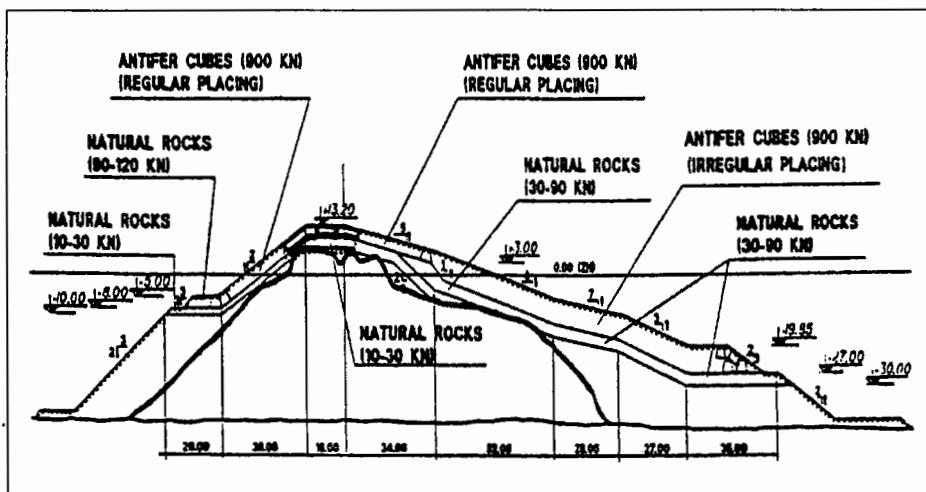
이상과 같이 Sines항 방파제의 피해상황을 종합해보면 방파제의 피해원인은 1) 설계파고의 과소평가(파랑추산 자료의 부적절), 2) 소파블록의 중량 부족, 3) 소파블록의 구조적 약점, 4) 부적절한 모형결과 적용, 5) 파력과 파괴구조 인자의 과소평가 등에서 비롯되었다고 할 수 있다.



<그림 2.2.33> Sines항 방파제의 응급 복구 평면도(1981년 4월)



<그림 2.2.34> Sines항 방파제의 완전 복구 평면도



<그림 2.2.35> Sines항 방파제 복구단면도

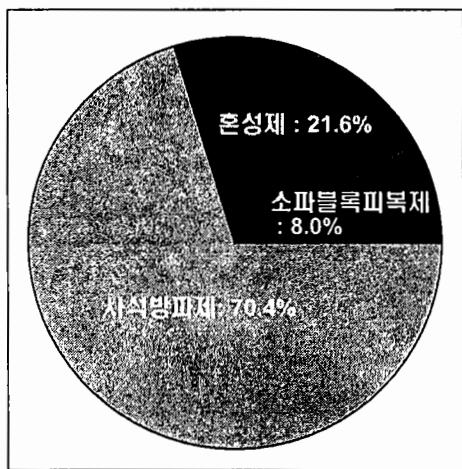
3. 국내 피해사례

우리나라는 삼면이 바다로 둘러 쌓인 반도국가로서 동해, 남해 및 서해의 해안특성이 서로 다르다. 우리나라 연안에서 파랑을 일으키는 주요한 기상인자로는 동절기 계절풍과 매년 2~3회씩 한반도를 통과하는 태풍으로서, 이 중 항만구조물에 가장 큰 영향을 미치는 것은 태풍에 의한 파랑이다.

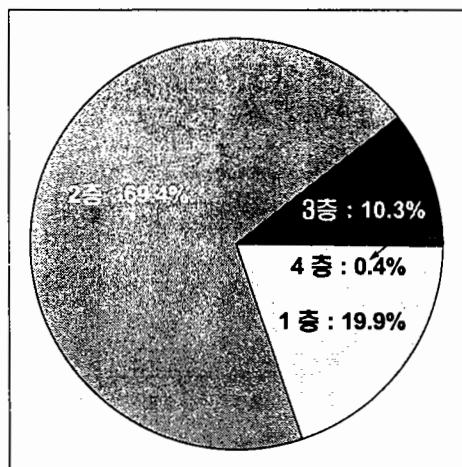
우리나라 각 해안별 특성을 살펴보면 동해안은 수심이 깊고 해안선이 단조로와 의해에서 발생한 심해파가 직접 방파제 전면까지 도달하므로 파고가 크고 파력도 크게 작용

하여 방파제 규모도 대규모이며, 해저질은 사질로서 항만구조물 배치가 비교적 용이한 조건을 가지고 있다. 남해안은 리아스식 해안으로서 만내에 위치한 항만은 천연의 지형으로 파랑이 차폐되어 방파제 시설 없이 정온수역을 확보할 수 있으나, 부산항 등과 같이 외해에 면한 항만은 심해파의 내습으로 파고가 비교적 높다. 또한 해저질이 연약점토 또는 실트질 점토로서 항만구조물 설치시에는 연약지반 개량공법이 요구되며, 방파제의 경우에는 강제치환 공법에 의한 경사식 방파제의 채택사례가 많아 지반침하에 의한 피해사례도 종종 발생하는 특징을 가지고 있다. 서해안은 인천항, 군산항, 아산항 등 대부분의 주요 항만이 만 깊숙이 위치하고 있고, 전면 바다로 중국대륙으로 차폐되어 있을 뿐만 아니라 대륙붕이 넓게 분포되어 천연의 섬이나 육지로 파랑이 차폐되어 대부분의 항만에 방파제 시설이 필요 없거나 소규모 방파제가 축조되어 있다.

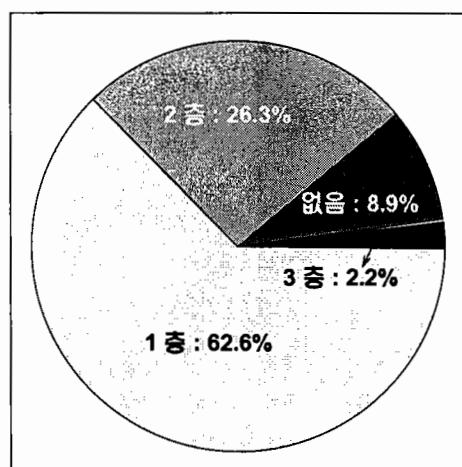
우리나라에 건설되어 있는 무역항과 연안항의 방파제를 구조형식별로 분류해 볼 때 (1999년 기준) <그림 2.2.36>과 같이 경사제가 70.4%로 대부분을 차지하고 있으며, 혼성제가 21.6%, 소파블록피복제가 8.0%로 구성되어 있다. <그림 2.2.37>은 항외측 사면의 피복총수에 따른 방파제 연장비율을 도시한 것으로 1층으로 피복된 경우가 19.9%, 2층 피복이 69.4%, 3층 피복이 10.3%, 그리고 4층 피복이 0.4%이다. 전체적으로 3층 이상으로 피복된 경우는 적었으며, 약 70%의 방파제 구간이 2층으로 피복되어 있음을 알 수 있다. 항내측 사면을 살펴보면 <그림 2.2.38>에서 보는 바와 같이 1층으로 피복된 경우가 62.6%, 2층으로 피복된 경우가 26.3%로서 1층 또는 2층으로 피복된 경우가 전체의 89%를 차지하고 있다. 3층으로 피복된 경우는 2.2%, 항내측 사면이 매립되었거나 안벽 또는 물양장 등으로 사용되는 경우에는 피복되지 않은 것으로 간주하였으며, 8.9%에 달한다. 그리고 사용된 항외측 피복재를 살펴보면, T.T.P., 4원주블록, 육각사주블록, 중공삼각블록, ATB(아치트라이바), 사석 등이 사용되었다. T.T.P.와 사석을 피복재로 이용한 경우가 <그림 2.2.39>에서 볼 수 있는 바와 같이 대부분을 차지하며, 방파제 연장에 따른 사용비율을 비교해 볼 때 T.T.P.는 59.1%, 사석은 34.2%로 나타났다. 그리고 T.T.P.와 사석을 제외한 이형블록은 6.7%를 차지하고 있다. 사용된 T.T.P.의 중량을 살펴보면 12.5ton급 T.T.P.가 24.0% 구간에서 사용되었으며, 그 다음으로 사용빈도가 높은 것은 5ton급과 20ton급이다. 항외측 피복총의 경사 즉, 제체의 경사는 <그림 2.2.40>에서 보는 바와 같이 1:1.5 경사가 가장 많아 34.6%를 차지하고 있으며, 1:2보다 급한 경사의 방파제가 73.8%를 차지한다. 항내 피복총의 경사는 <그림 2.2.41>과 같다(해양수산부, 2001).



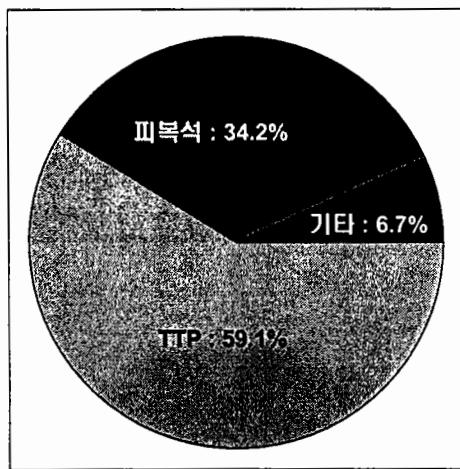
<그림 2.2.36> 구조형식별 방파제 연장 비율



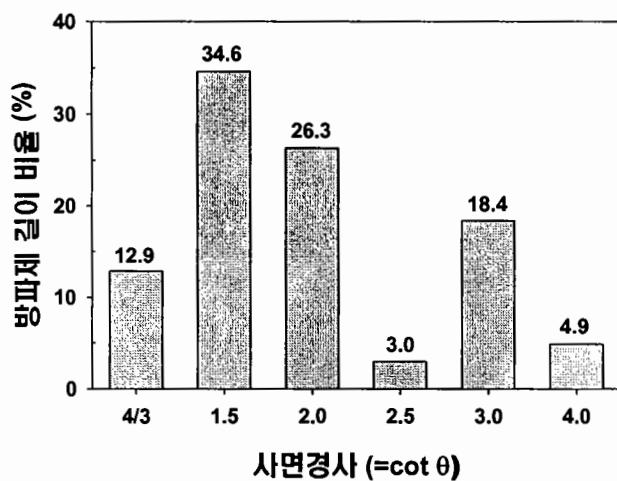
<그림 2.2.37> 항외측 사면 피복총수에 따른 방파제 연장 비율



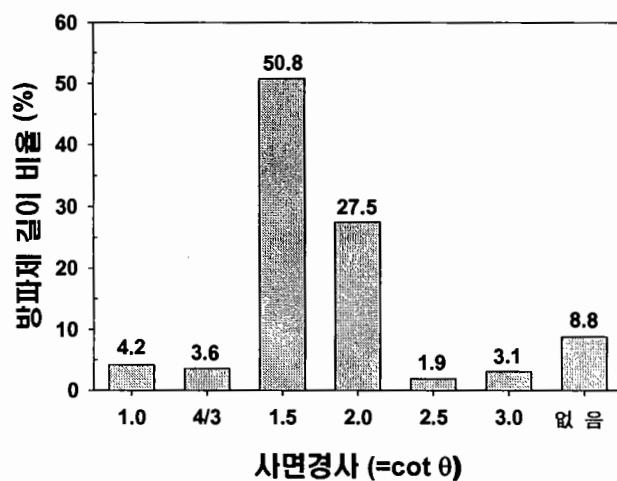
<그림 2.2.38> 항내측 사면 피복총수에 따른 방파제 연장 비율



<그림 2.2.39> 방파제 총연장중 항외측의 피복재 구성 비율(총연장: 38,351.5m)

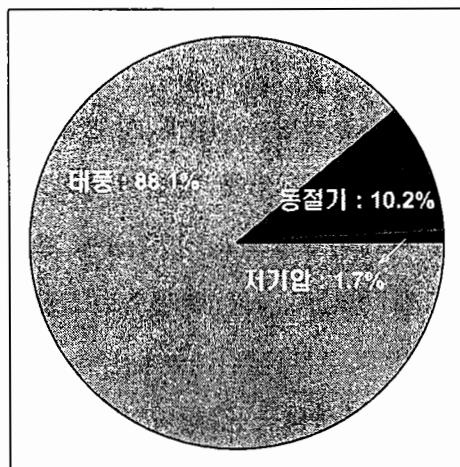


<그림 2.2.40> 항외측 피복층의 경사



<그림 2.2.41> 항내측 피복층의 경사

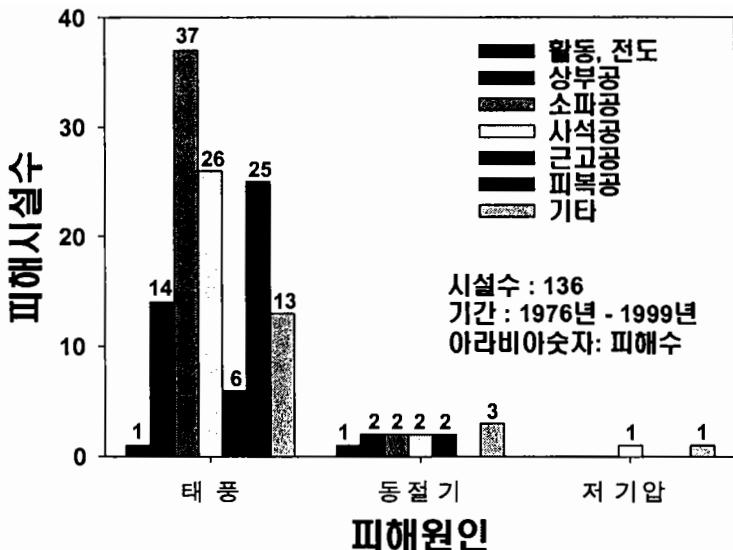
본 연구에서는 국내에서 25년간(1976년~2000년) 발생한 주요 항만시설물 및 지정어항의 피해사례를 조사하여, 피해발생시의 파고, 피해상황, 피해유형, 방파제의 구조형식 등으로 분류하고 피해사례를 분석하였다. 수집한 방파제 피해사례 가운데 37개항만 59개 피해사례에 대해 분석하였다(부록 <표 B.2> 참조). 피해가 발생한 시기의 기상요인별 피해사례수는 <그림 2.2.42>와 같이 태풍에 의한 피해가 88.1%로 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있으며, 설계파 이상의 파랑이 내습하였을 때 피해가 발생한 경우가 전체의 7.9%이다. 그러나 피해사례 분석에서 적용된 내습파고는 대부분 목측이나 추정에 의한 것으로 자료의 신뢰도는 다소 낮다고 판단된다. 일본의 경우에는 피해당시 내습파의 관측비율이 약 33%로 나타났다.



<그림 2.2.42> 기상요인별 피해사례

<그림 2.2.43>은 전술한 기상요인에 따라 발생한 피해시설수를 나타낸 것으로 태풍에 의한 피해가 대부분을 차지하며, 소파공, 피복공, 사석공의 피해수가 상당한 비율을 나타내고 있다. 경사식 방파제의 구성상 파력이 직접 작용하는 소파공이나 피복공에 피해가 발생하면 상부공, 사석공, 기초공 등이 연쇄적으로 피해가 발생하는 복합적인 피해가 발생함을 알 수 있다.

주요 항만별 피해사례를 동해안, 남해안, 서해안으로 구분하여 구조형식, 피해반복횟수를 나타낸 것이 <표 2.2.5>이다. 조사기간동안 동해안에서 발생한 최대 피해반복횟수는 3회이며, 죽변항, 후포항, 도동항이 이에 해당된다. 남해안에서는 부산남항이 4회에 이르는 피해가 반복되었으며, 서해안에는 파랑에 의한 직접적인 피해가 작으며, 피해발생 반복횟수도 1회에 그치고 있다.



<그림 2.2.43> 피해원인 · 상황별 피해시설수

반복 피해현황 분석에 있어서 동해안은 15개 항만중 8개 항만이 1회 피해발생으로 53.3%, 4개 항만이 2회 발생으로 26.7%, 3개 항만이 3회 발생으로 20.0%이다. 남해안은 18개 항만중 11개 항만이 1회 피해발생으로 61.1%, 3개 항만이 2회 발생으로 16.7%, 3개 항만이 3회 발생으로 16.7%, 1개 항만이 4회 발생으로 5.5%이다. 서해안은 4개 항만중 4개 항만이 모두 1회 발생한 것으로 나타났다. 동해안과 남해안에 위치한 항만은 피해가 한번 발생한 곳에서 다시 피해가 발생되는 경향이 뚜렷하며, 이는 피해 구조물의 복구공사 시행에 있어서 경제적 여건 및 기타 사정으로 인하여 원상수준으로 복구되는데 기인하는 것으로 판단된다.

가. 온산항 피해사례

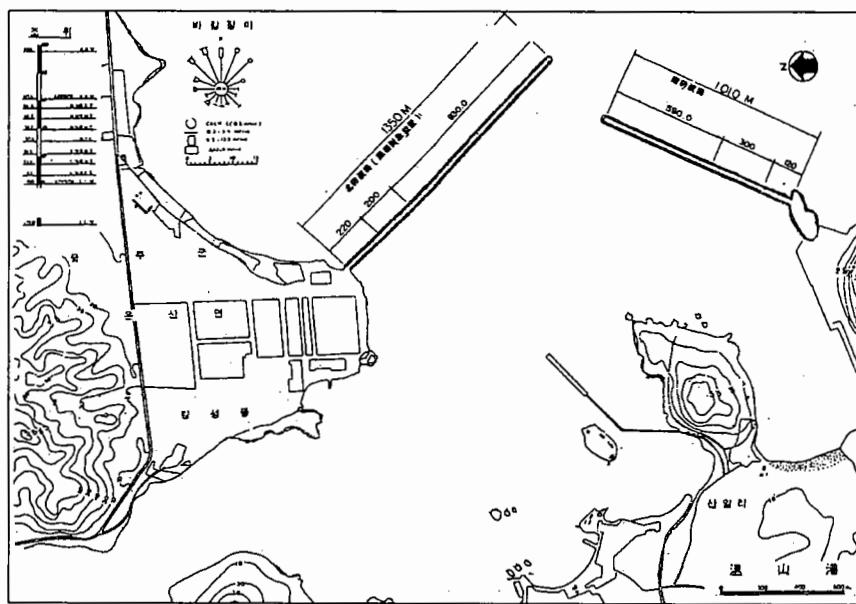
온산항은 1987년 7월과 8월에 내습한 태풍에 의해 남방파제와 북방파제에서 피해가 발생하였다. 온산항의 평면도는 <그림 2.2.44>와 같으며, 저질은 니토 및 사질로 구성되어 있다. 피해상황을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 남방파제: 1987년 7월 15일~16일에 5호 태풍 THELMA에 의해 피해복석 70m가 유실되었으며, 25ton급 6각 4주 20m가 유실되었다.
- (2) 북방파제: 1987년 8월 29일~31일에 12호 태풍 DINAH에 의해 케이슨이 활동하는 피해와 더불어 단면이 침하 하였으며, 상치콘크리트가 파손되었다. 최대 활동량은 8cm~11cm이고, 최대침하량은 약 16cm 정도이었다.

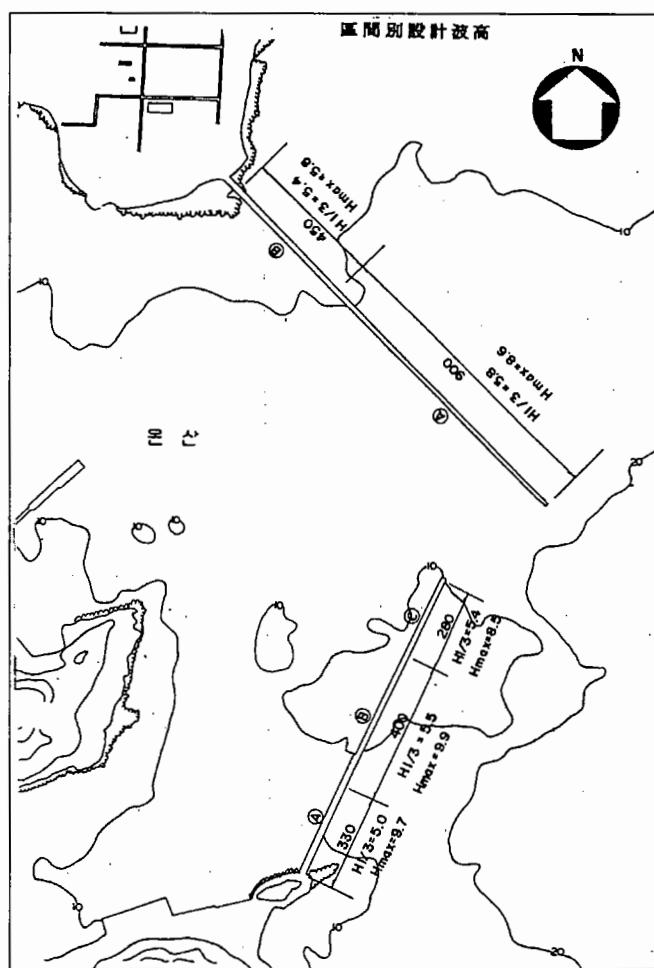
<표 2.2.5> 피해항만별 반복횟수(1976-1999년, 37항만 59사례, 국내)

해역	반복횟수		1회		2회		3회	4회	비 고
	경사제	흔성제	경사제	흔성제	경사제	경사제	경사제	경사제	
동 해 안	임원항 삼척항 주문진항 속초항 목호항 양포항	동해항 포항신항	포항구항 구룡포항 감포항	온산항	죽변항 후포항 도동항				
소 계	8개 항		4개 항		3개 항			15개 항	
비 율	53.3%		26.7%		20.0%			100.0%	
남 해 안	화순항 제주항 부산항 대변항 삼천포항 삼천포신항 연도항 물건항 외포항 성산포항	목포항 선착장	구조라항 거문도항	감천항	서귀포항 여수항 다대포항	부산남항			
소 계	11개 항		3개 항		3개 항		1개 항	18개 항	
비 율	61.1%		16.7%		16.7%		5.5%	100.0%	
서 해 안	인천항 모항항 군장항	말도항							
소 계	4개 항							4개 항	
비 율	100.0%							100.0%	

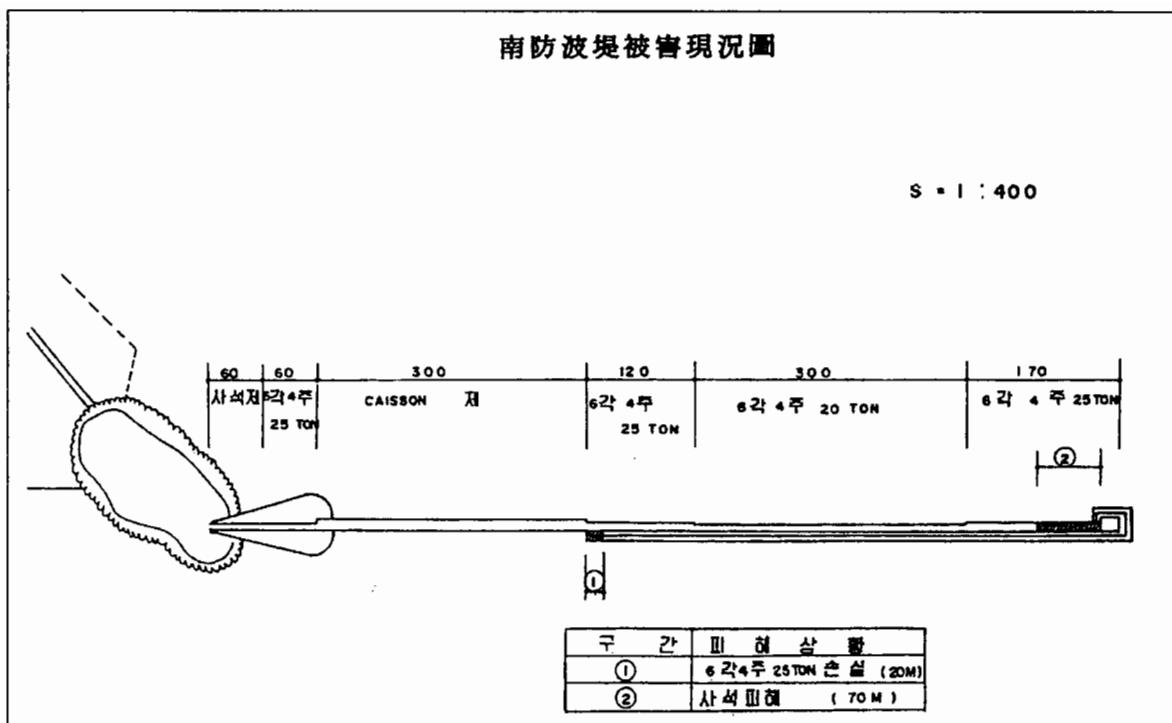
피해당시의 내습파는 관측되지 못했으며, 방파제 설계당시의 설계파고는 <그림 2.2.45>와 같다. 현지조사결과 남방파제의 피해상황으로는 <그림 2.2.46>과 같이 케이슨 제에서 흔성제가 시작되는 20m 구간에 피복된 25ton급 6각 4주 일부가 유실되었으며, 방파제 제두부 구간의 항내측 사석 일부가 약 70m 정도 유실되었다. <그림 2.2.47>은 <그림 2.2.46>의 ①구간 피해단면을 나타낸 것이다, <그림 2.2.48>은 ②구간에서 발생한 피해단면을 나타낸 것이다. 북방파제에서는 <그림 2.2.49>와 같이 케이슨제 단면구간에서 침하, 활동, 일부 상치콘크리트의 파손이 발생하였으며, 피해상황에 따라 피해발생 위치를 각각 도시하였다. <그림 2.2.50>은 북방파제의 표준단면도를 나타낸 것이다.



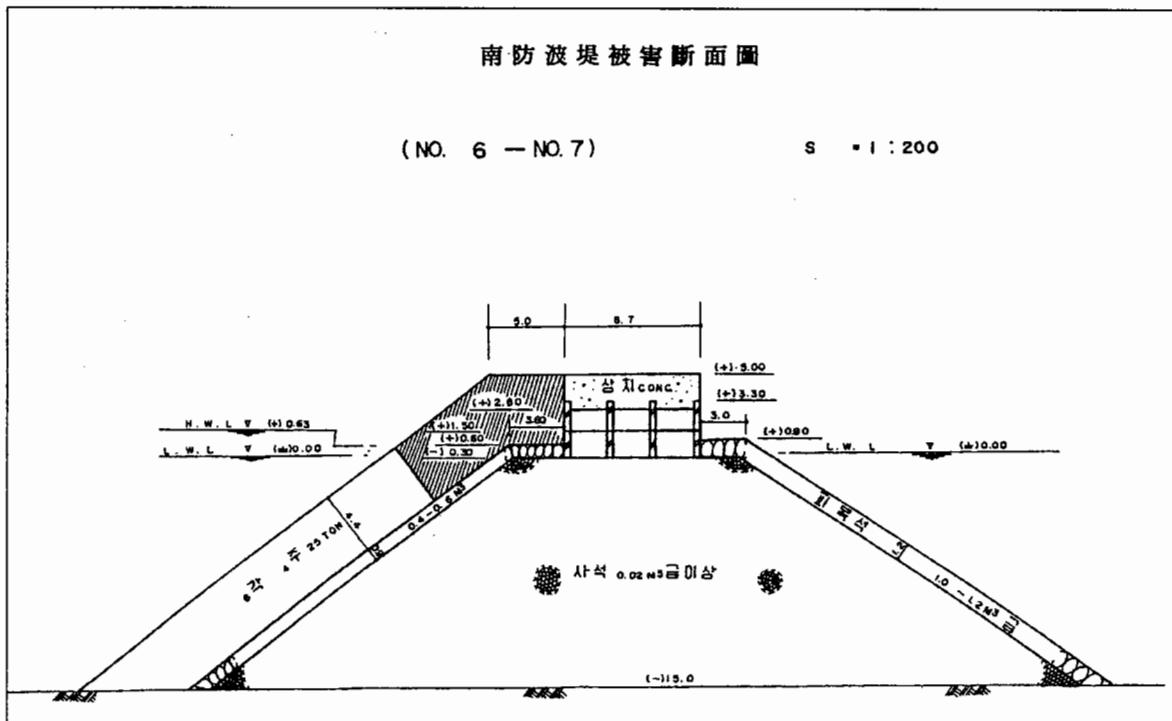
<그림 2.2.44> 온산항 방파제의 평면배치도



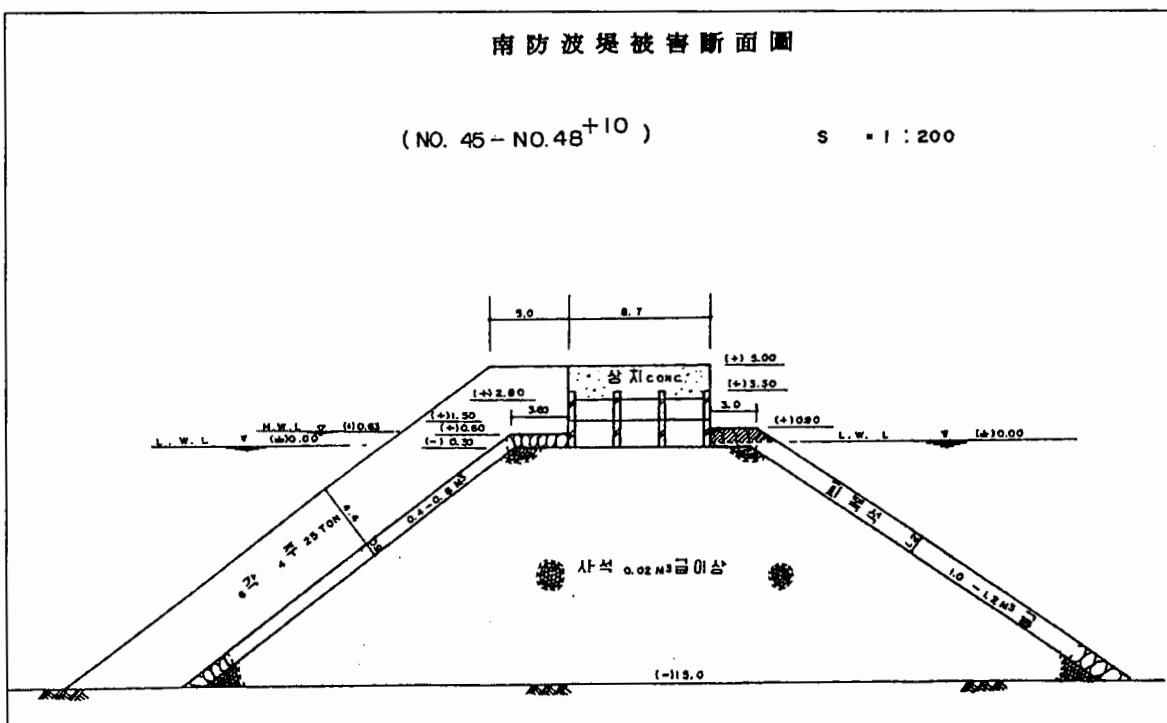
<그림 2.2.45> 온산항 방파제의 설계파고



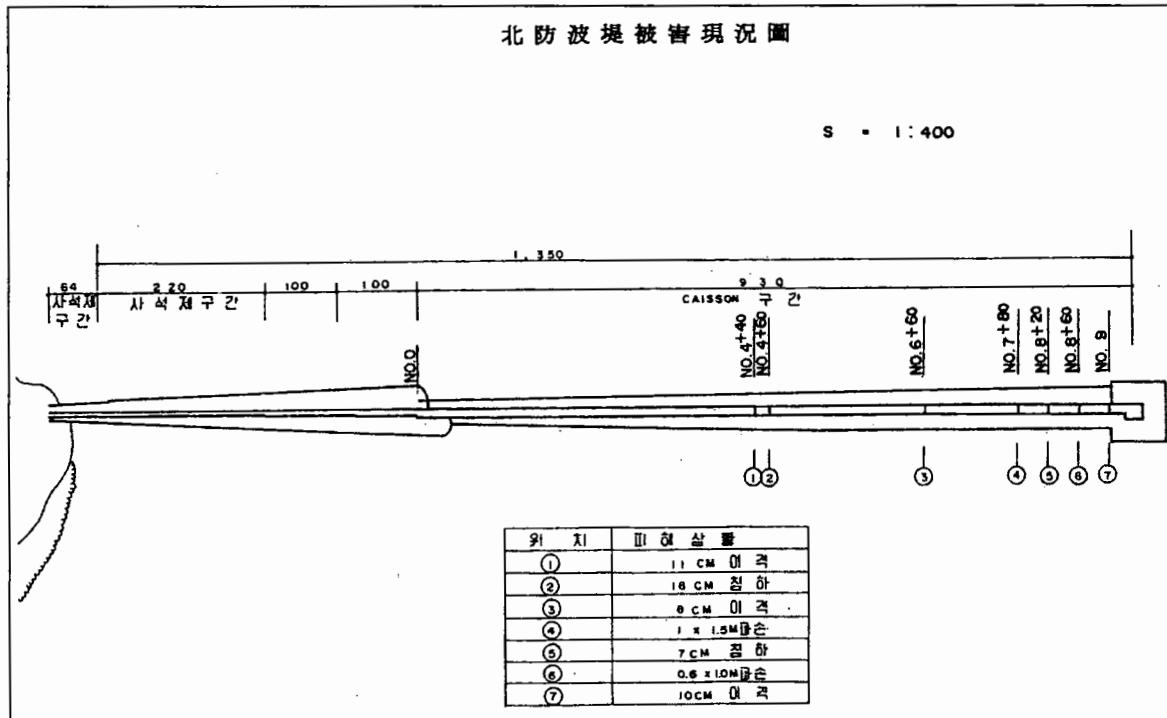
<그림 2.2.46> 온산항 남방파제의 피해상황도



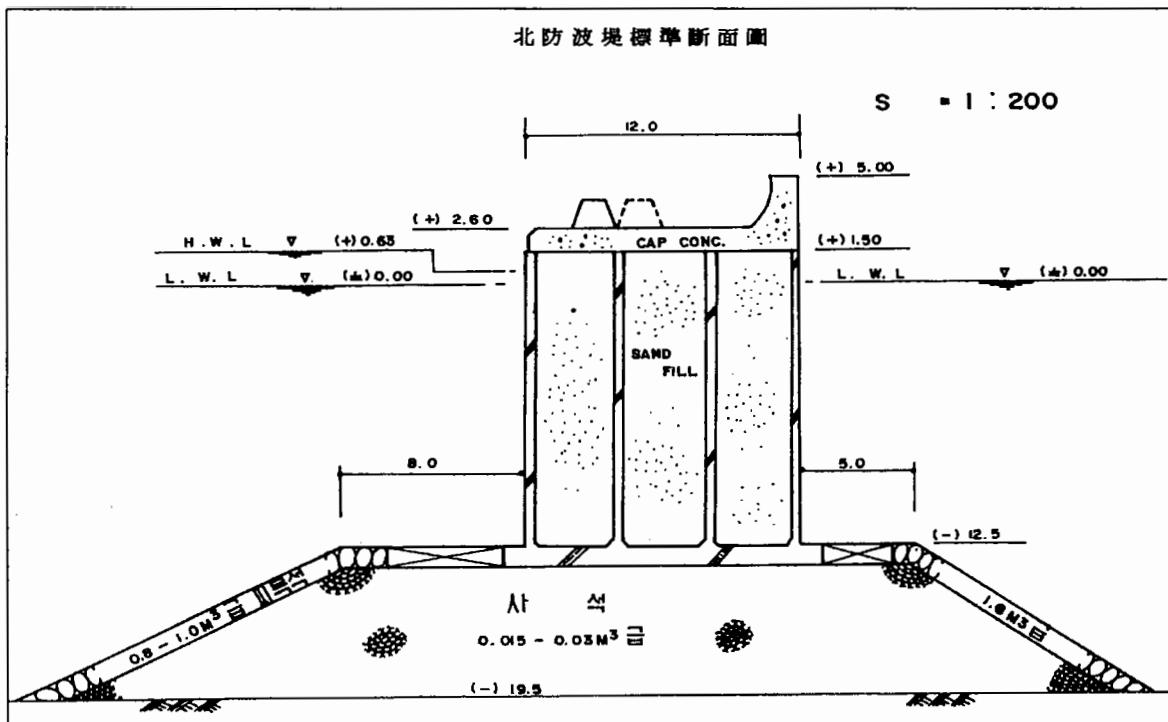
<그림 2.2.47> 온산항 남방파제 ①구간 피해단면도



<그림 2.2.48> 온산항 남방파제 ②구간 피해단면도



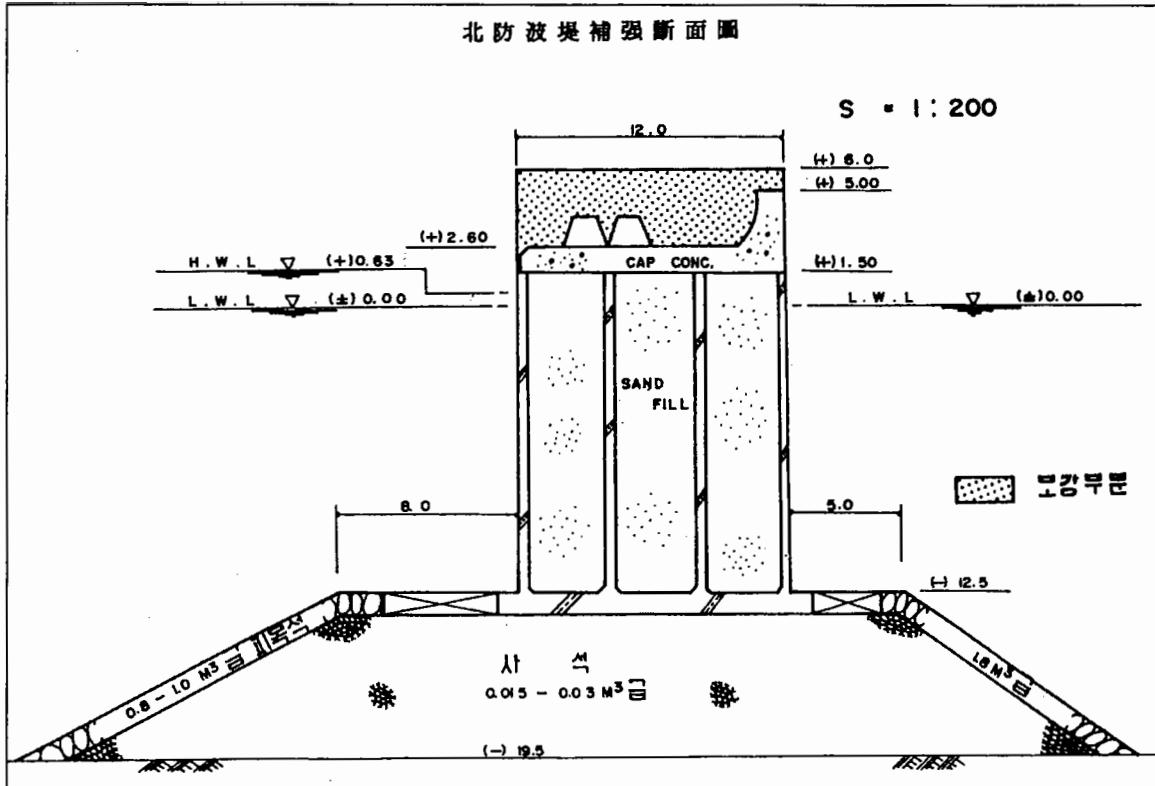
<그림 2.2.49> 온산항 북방파제 피해상황도



<그림 2.2.50> 온산항 북방파제 표준단면도

온산항 남방파제의 피해는 25ton급 6각 4주의 일부 유실과 항내측의 일부 피복석의 유실로서 설계파고 5.5m에서 피복재의 소요중량이 18.5ton으로 산정되므로 항외측 피복재의 중량은 충분하였지만 피해구간이 케이슨제와의 단면변경구간이기 때문에 파랑의 집중현상과 더불어 소파블록의 불연속단면에서 볼 수 있는 파력의 증대현상에 의한 피해로 생각된다. 항내측의 피복석 유실은 항입구로 침입하는 회절파와 월파에 의한 경우가 대부분인데 본 피해는 주로 월파로 인한 피해와 시공후 10여년이 경과하면서 진행된 일부 침하에 의한 것으로 판단된다. 북방파제의 케이슨 구간은 유의파고 5.84m에 대해 Hiroi 파압공식으로는 안정하게 나타났으나, Goda 파압공식 적용시에는 안전율이 부족하였다. 따라서 북방파제 케이슨단면의 침하 및 활동은 설계파에 대한 제체중량 부족으로 판단된다.

남방파제에 대해 안정성을 검토한 결과, 기존 단면의 안정성이 확보되었기 때문에 피해구간 20m를 25ton급 6각 4주로 소파블록의 불연속면에서 발생하기 쉬운 파력의 집중현상을 억제하도록 배치하였으며, 방파제 배후면에서 피해가 발생한 피복석의 피해는 $1.0m^3 \sim 1.2m^3$ 급 피복석으로 연장 70m를 원상복구 하였다. 북방파제는 기존 단면이 활동과 전도에 대해 불안정하에 나타났기 때문에 <그림 2.2.51>과 같이 상치콘크리트를 D.L.(+)5.0m에서 D.L.(+)6.0m까지 더듬기하여 자중을 보강하였다.



<그림 2.2.51> 온산항 북방파제 보강단면도

나. 동해항 피해사례

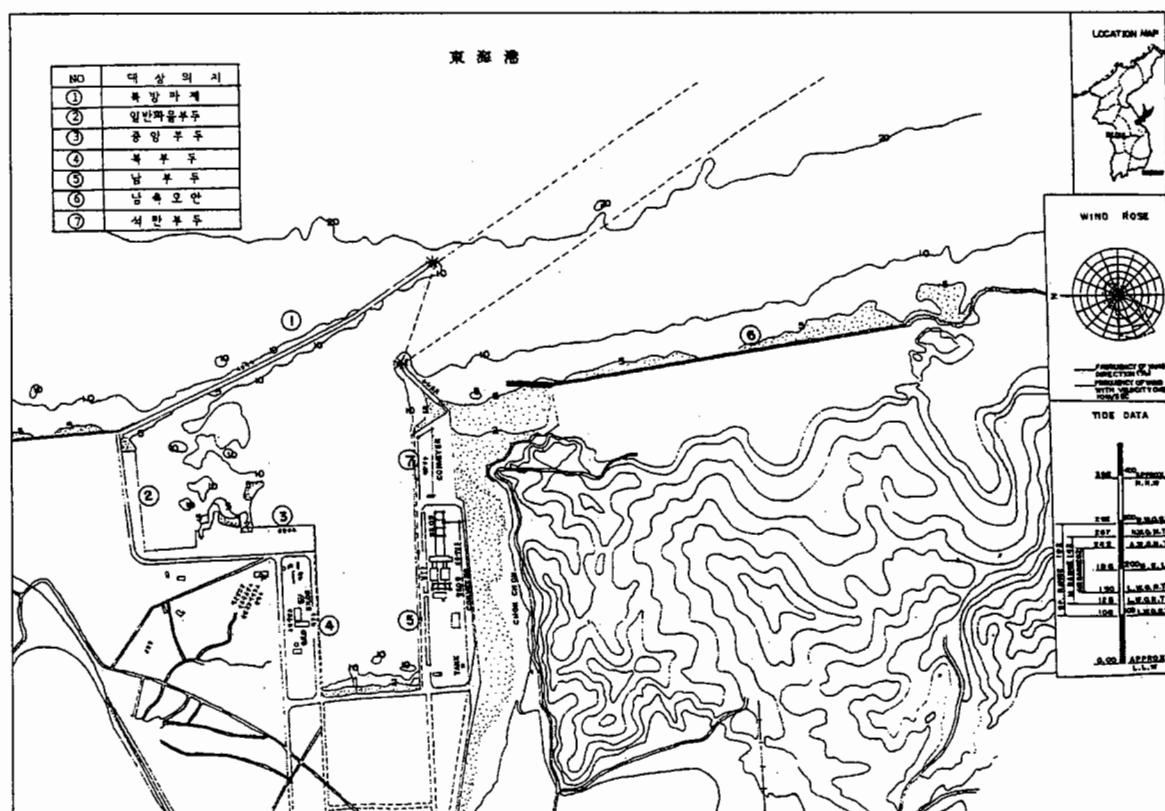
동해항의 평면배치도는 <그림 2.2.52>와 같으며, 저질은 모래 및 사력층으로 구성되어 있다.

동해항은 1987년 2월 3일에 발생한 동절기 이상파랑에 의해 북방파제 케이슨 1,500m 중 900m가 항내측으로 10cm~15cm 활동 및 침하하는 피해가 발생하였으며, 남측호안은 전연장에 걸쳐 T.T.P.의 마루높이가 1.5m~2.5m 정도 침하하는 피해가 발생하였다.

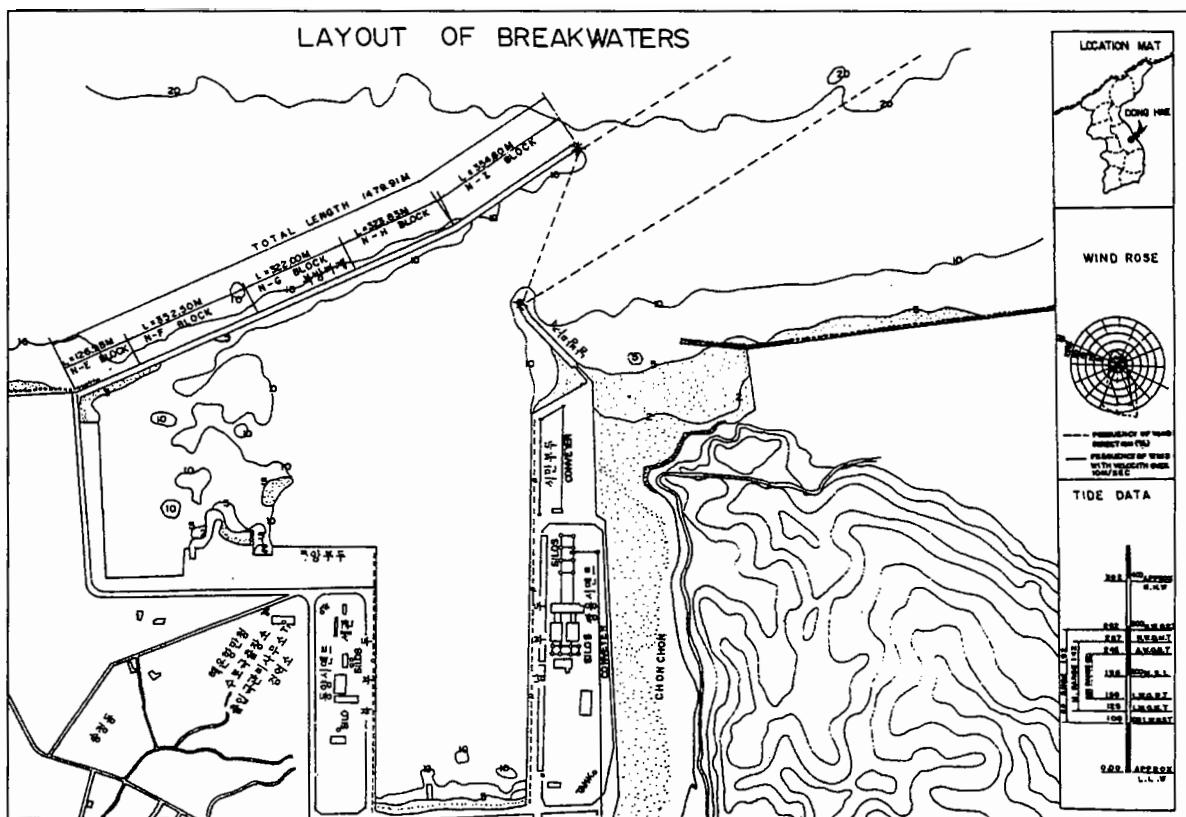
피해당시인 1987년 2월 2일 20시~2월 5일 06시까지 58시간 동안의 동해항 파랑관측 기록에 의하면 2월 2일 20시에 유의파고가 8.85m, 주기는 11.8sec이었고, 2월 3일 15시에는 유의파고가 8.72m, 주기는 12.1sec로 나타났다. 관측자료에 의하면 2월 2일 20시부터 2월 3일 15시까지 19시간 동안 유의파고가 8.85m에 달하는 파랑이 내습한 것으로 나타났다. 주기도 같은 시간대에 발달하여 12.0sec까지 파고 증대에 따라 증가하였다. 피해당시의 내습파는 비교적 짧은 시간(약 24시간)에 파랑이 크게 발달하고 주기는 크게 발달하지 못하였다는 것이 특징이다. 동해안에서 동절기 계절풍에 의한 파랑은 2일~3일 이상의 발달 시간을 두고, 주기 14sec~16sec까지 발달하며, 이때 파고는 8m~8.5m까지 발달하

는 것이 일반적이다. 그리고 유의파고와 최대파고의 비가 작은 특징이 있다. 일반적으로 $H_{\max} / H_{1/3}$ 가 1.8 이상이지만, $H_{\max} / H_{1/3} = 1.5$ 정도로 나타났다. 북방파제에서 심해방향으로 약 600m 정도 떨어진 수심 D.L.(-)15m 지점에서 파랑이 관측되었으므로 방파제에 내습한 파랑도 이와 유사할 것으로 생각된다.

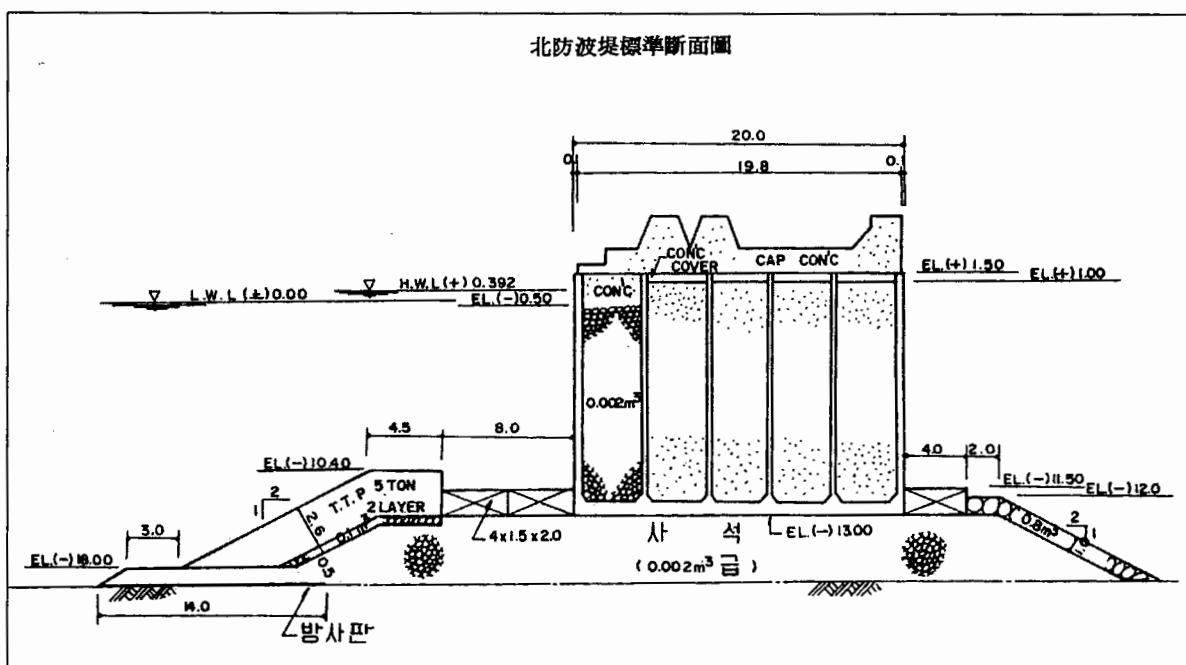
피해상황을 살펴보면, <그림 2.2.53>과 같이 북방파제 연장 약 1,480m를 각각의 피해 구간으로 나누었을 때, <그림 2.2.54>와 같이 제체 형상을 가지는 케이슨(연장 약 900m)은 항내측으로 10cm~15cm 정도 활동하였고, 일부 케이슨은 약 10cm 정도 침하하면서 활동하는 피해가 발생하였다. 전연장 1,535m의 남측호안에서 가장 피해가 심한 구간은 No.59+13-No.63+13(연장 약 80m)구간으로서 실제 시공시의 T.T.P. 마루높이 D.L.(+)6.1m 가 D.L.(+)3.6m로 낮아졌으며, No.56+8.0-No.59+13.0 및 No.63+13.0-No.69+13.0(연장 약 185m) 구간 역시 T.T.P. 마루높이 D.L.(+)6.1m가 D.L.(+)4.6m로 침하되는 등 T.T.P. 및 피복석의 피해가 발생하였다(그림 2.2.55 참조). 다른 구간에서도 T.T.P.의 침하가 발생하였으며, 호안 전면 수심측량에 의하면 해저지반의 세굴로 인한 유실이 확인되었다. 호안의 각 구간별 피해상황은 <그림 2.2.56> 및 <그림 2.2.57>과 같다.



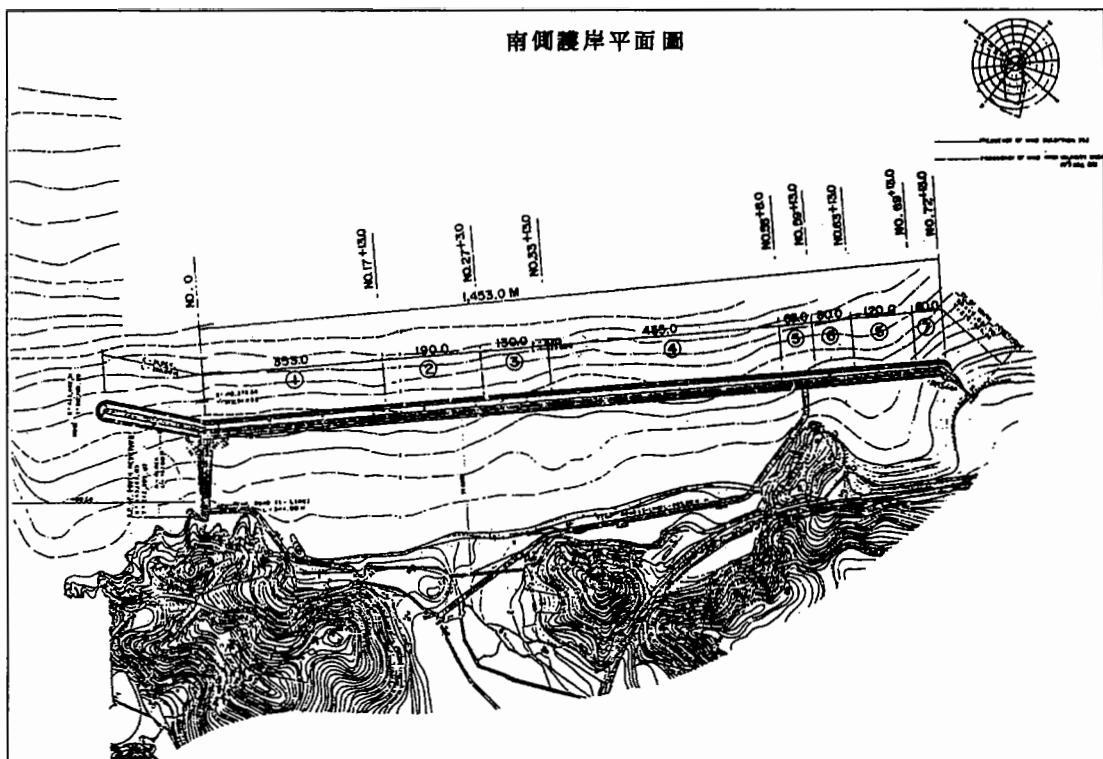
<그림 2.2.52> 동해항의 방파제 및 호안 평면배치도



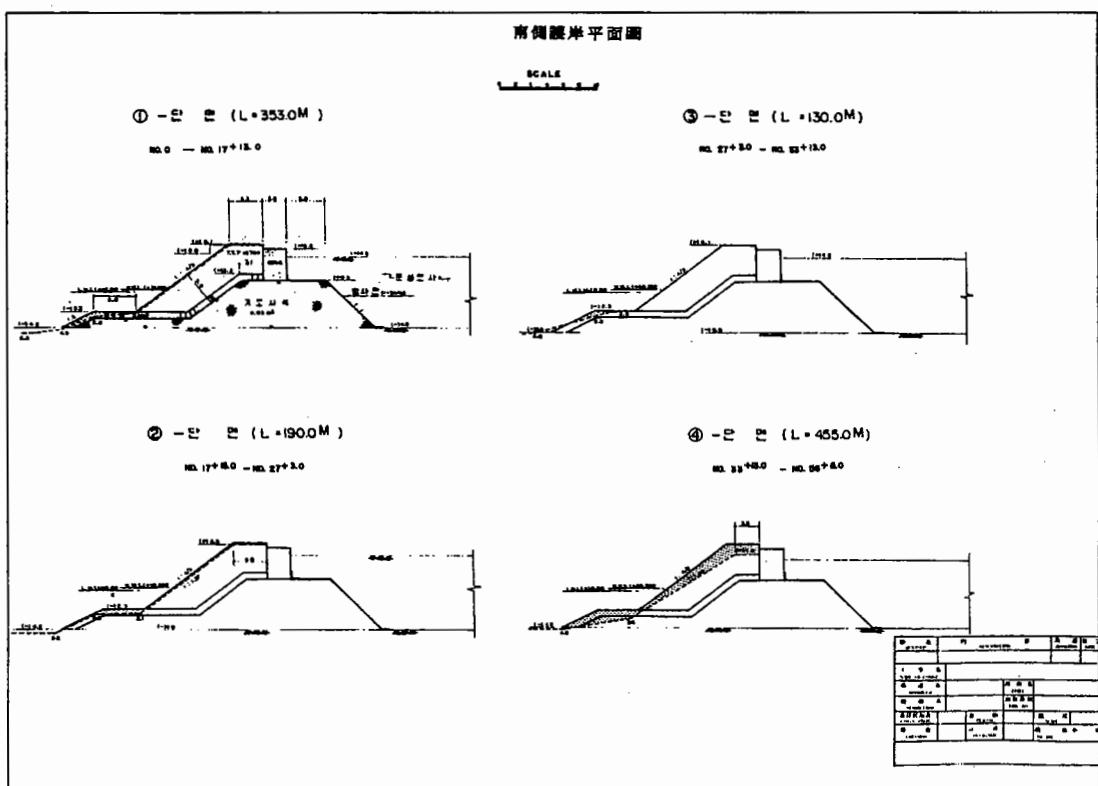
<그림 2.2.53> 동해항 북방파제의 피해구간



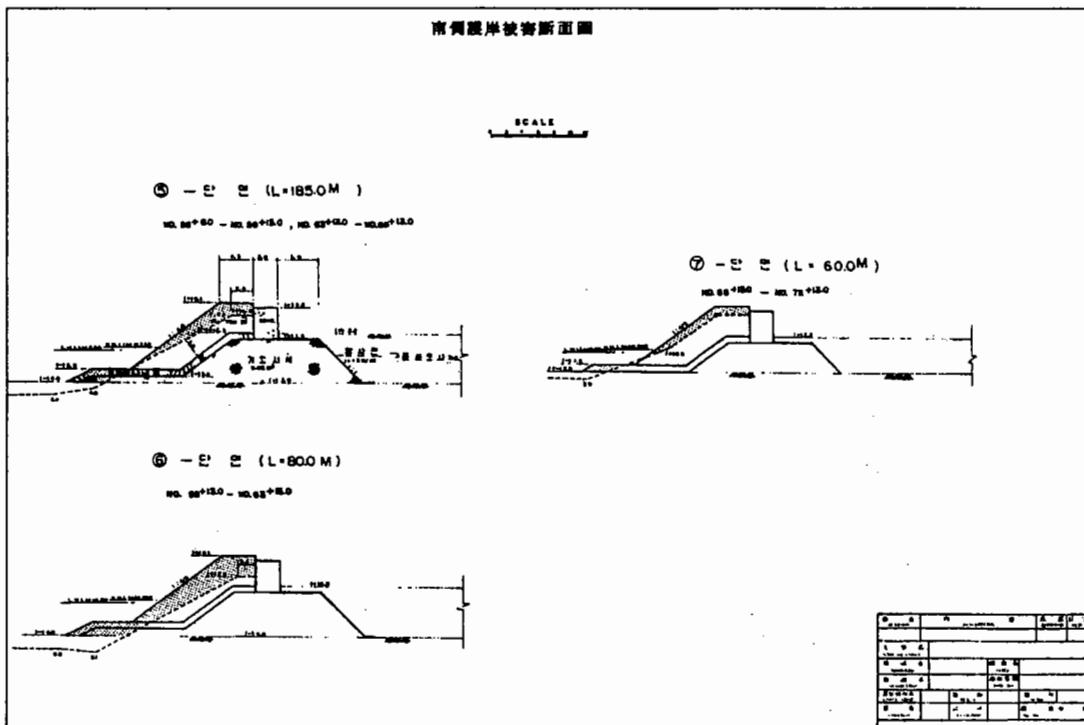
<그림 2.2.54> 동해항 북방파제의 표준단면도



<그림 2.2.55> 동해항 남측호안 피해구간의 평면도



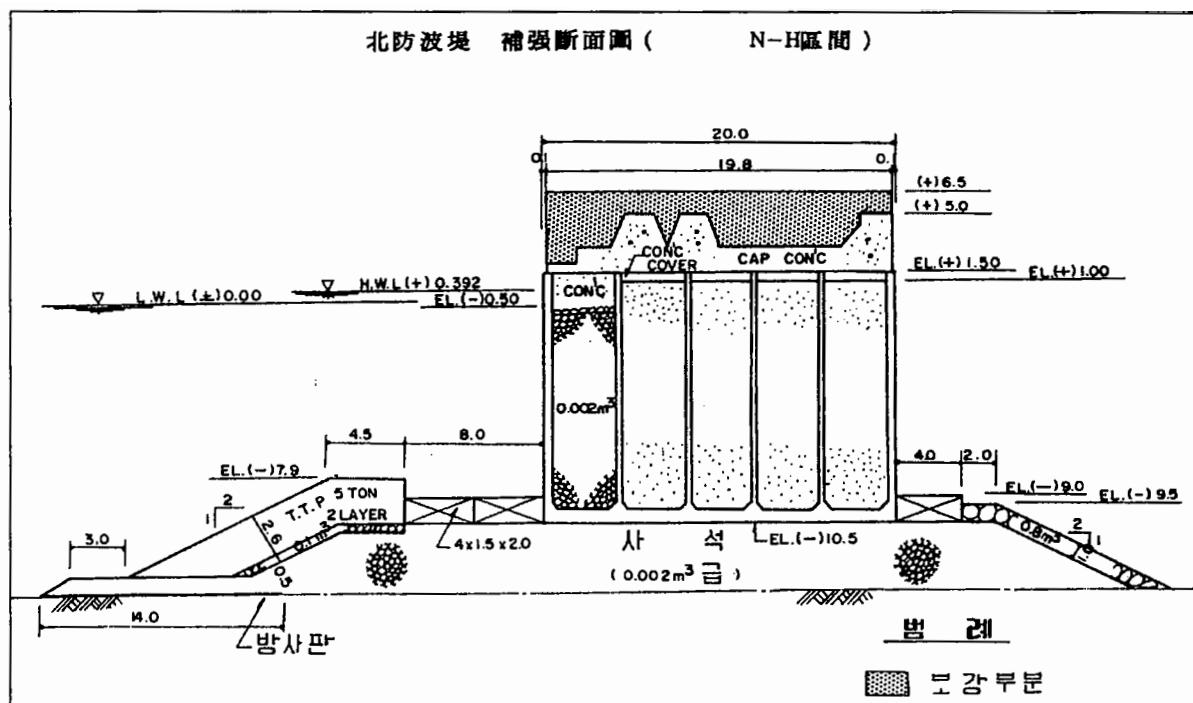
<그림 2.2.56> 동해항 남측호안의 피해단면도(피해구간 ①~④)



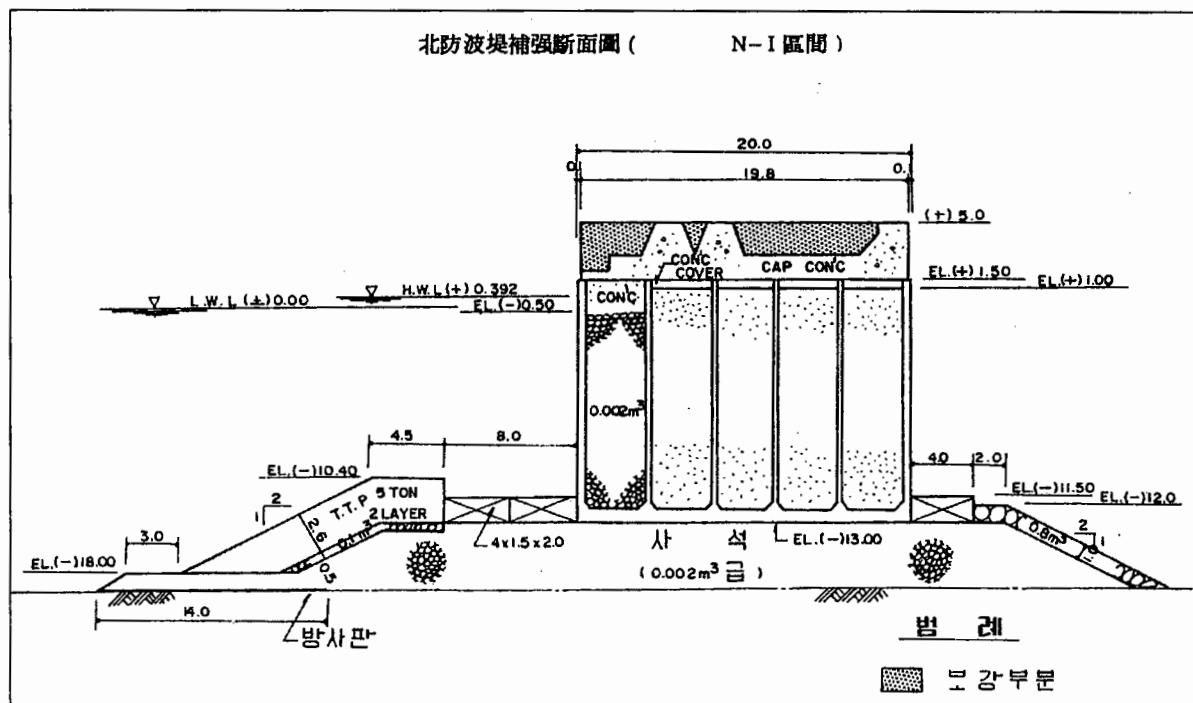
<그림 2.2.57> 동해항 남측호안의 피해단면도(피해구간 ⑤~⑦)

동해항의 피해사례를 분석해 보면 북방파제에서 피해가 발생한 구간은 <그림 2.2.54>와 같은 상치콘크리트를 설치한 구간으로서 <그림 2.2.53>의 N-H구간 및 N-I구간이 이에 해당된다. 이는 다른 구간에 비해 제체 중량이 작았기 때문에 피해가 발생한 것으로 판단된다. N-H구간 및 N-I구간의 단면을 Goda 파암공식과 Hiroi 파암공식으로 검토하여 피해원인을 분석하였다. 검토결과에 의하면 피해당시의 내습파에 대해 Goda식과 Hiroi식 적용시 활동에 대한 구간별 안전율은 N-H구간에서 Goda식이 0.84, Hiroi식이 0.93, N-I 구간에서는 Goda식이 1.0, Hiroi식이 0.94로서 활동에 대한 단면의 안전율이 미달되는 것으로 나타났다. 상치콘크리트 전체를 D.L.(+)5.0m까지 콘크리트로 타설하지 않고 체적을 줄여 시공함으로써 제체의 중량부족에 의해 피해가 발생한 것으로 생각된다. 남측호안 피해의 직접적인 원인은 호안전면 해저면의 모래가 1.5m~2.0m 정도 세굴되어 사면이 붕괴된 것으로 판단된다.

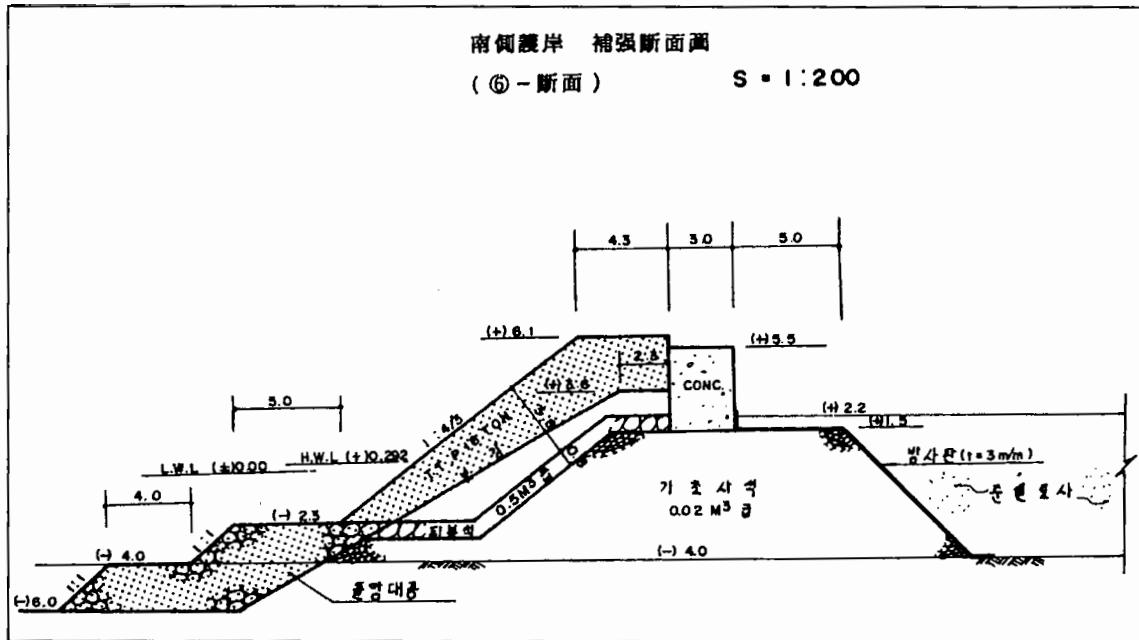
북방파제는 자중을 증대시키기 위해 상치콘크리트를 <그림 2.2.59>와 같이 더듬기하는 방법으로 보강되었으며, 남측호안은 <그림 2.2.60>과 같이 D.L.(-)6.0m까지 돌망태를 시공하여 세굴을 방지하였으며, 침하된 사면은 16ton급 T.T.P.로 원상복구 하였다.



<그림 2.2.58> 동해항 북방파제의 보강단면도(N-H 구간)



<그림 2.2.59> 동해항 북방파제의 보강단면도(N-I 구간)



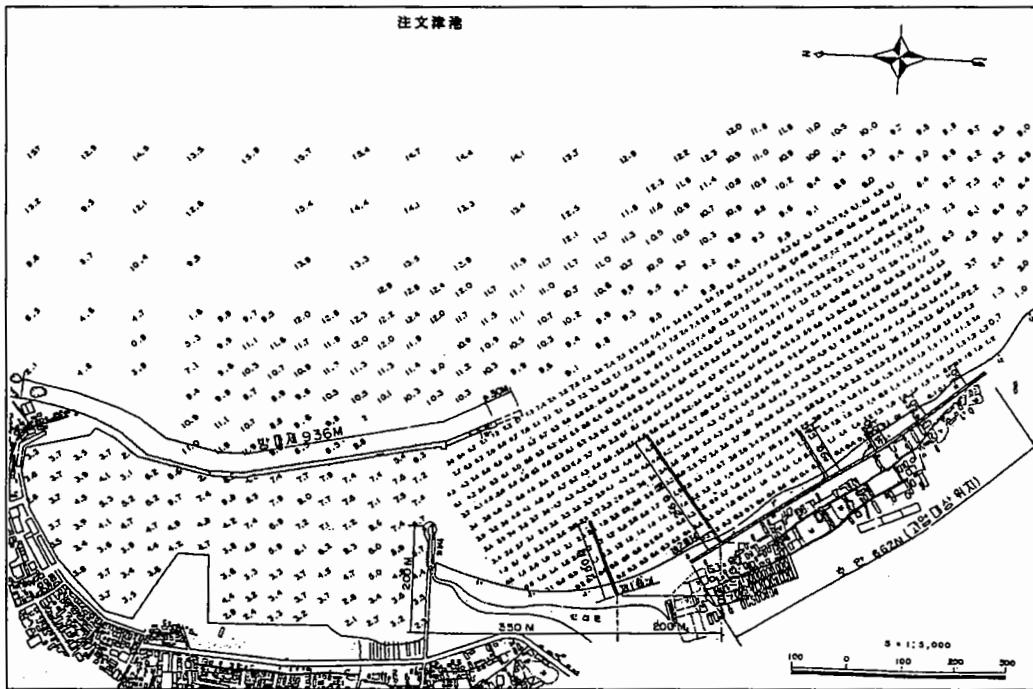
<그림 2.2.60> 동해항 남측호안 보강단면도(⑥ 단면)

다. 주문진항 피해사례

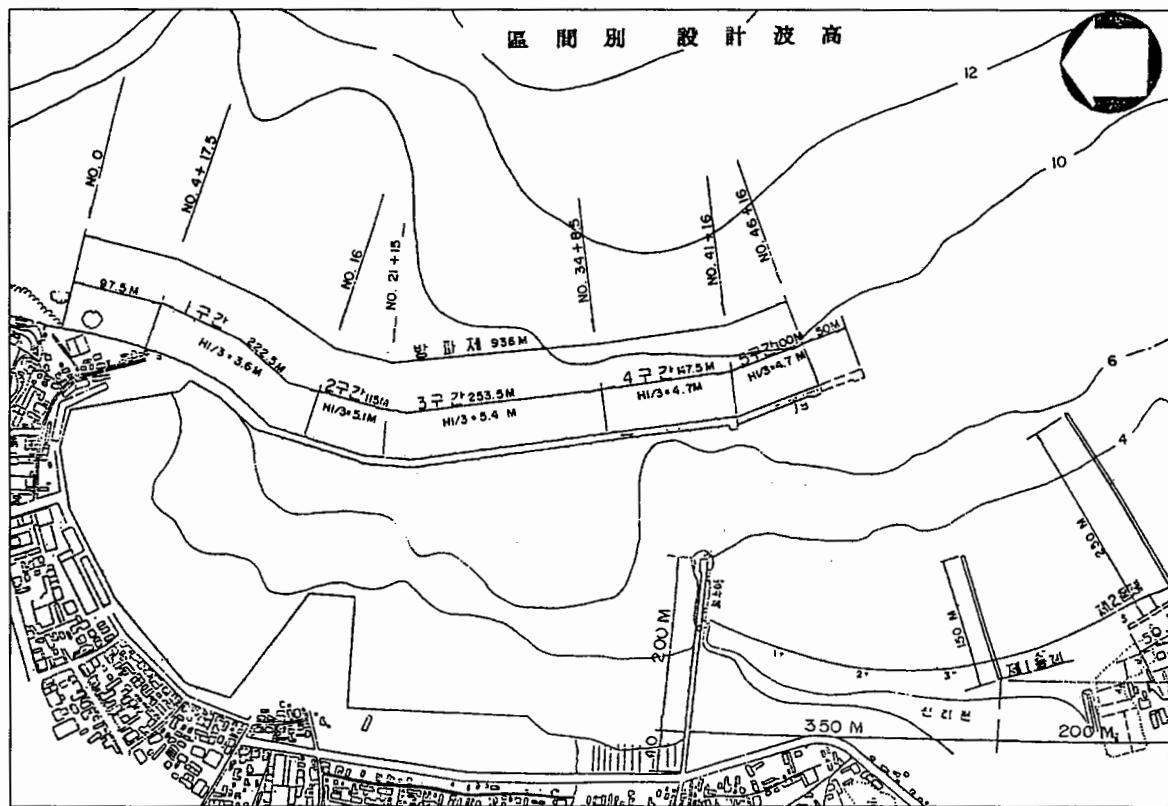
주문진항의 방파제 평면배치는 <그림 2.2.61>과 같으며, 저질은 모래 및 사질토로 구성되어 있다. 주문진항은 1985년 10월 5일~6일에 발생한 20호 태풍 BRENDAL에 의해 방파제 피복블록인 20ton급 T.T.P. 120개가 침하되고, 사석 4,000m³가 유실되는 피해가 발생하였다. 그리고 둘째 15m, 호안피복석 180m³가 유실되었다.

주문진항의 설계파는 1985년 당시에 파고는 8.4m, 주기는 14.0sec, 파향은 E방향과 NE방향이었다. 피해당시의 풍향은 ESE방향이고, 풍속은 14.3m/sec로 관측되었으며, 내습파고는 약 8m에 달하는 것으로 추정되었다.

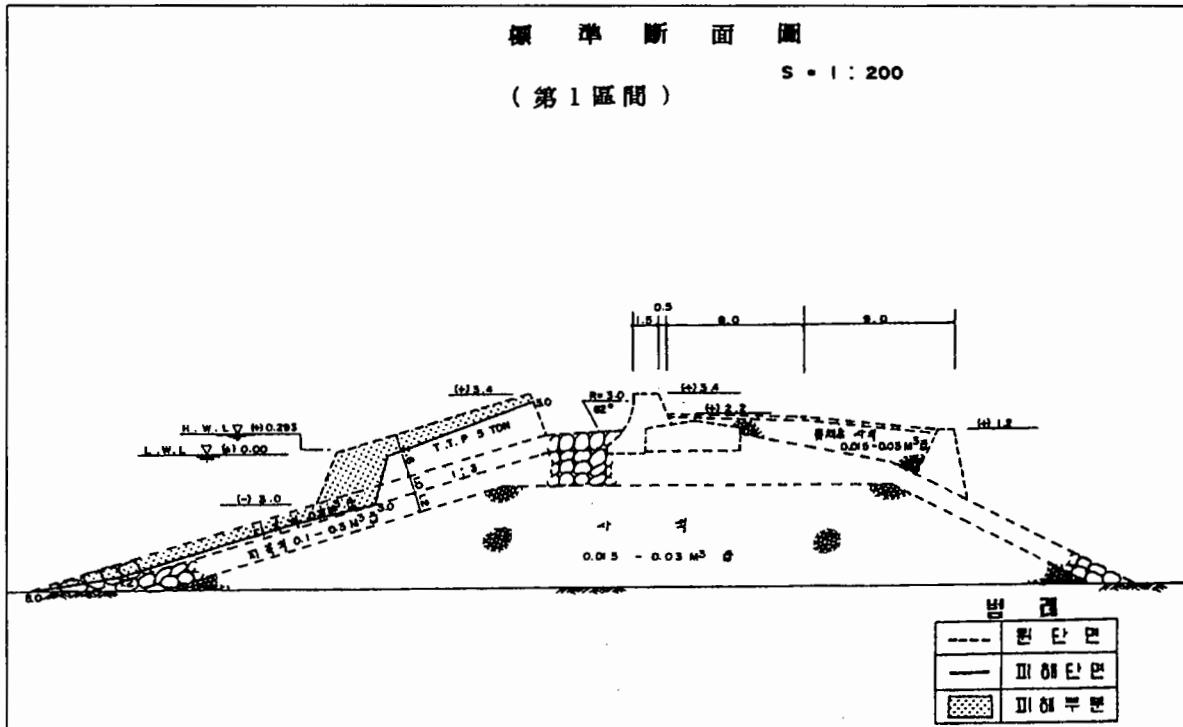
과거 노후항만 시설 점검시 주문진항은 <그림 2.2.62>와 같은 구간별 설계파고에 대해 구간별로 피해상황이 검토되었다. <그림 2.2.63>~<그림 2.2.65>에 의하면 1구간의 5ton급 T.T.P.와 2구간과 3구간의 12.5ton급 T.T.P.에서 피해가 발생하였으며, 4구간과 5구간에서는 피해가 발생하지 않았다는 기록이 있다. 1구간에서 3구간까지 피해가 발생한 원인은 비탈면 끝부분에서 T.T.P.의 거치 정도가 불안해 방파제 사면상에서 발생하는 파랑의 쳐오름과 쳐내림에 의한 미끌어짐 현상에 의한 피해로 검토되었으며, 이후 <그림 2.2.66>~<그림 2.2.68>과 같이 복구되었다.



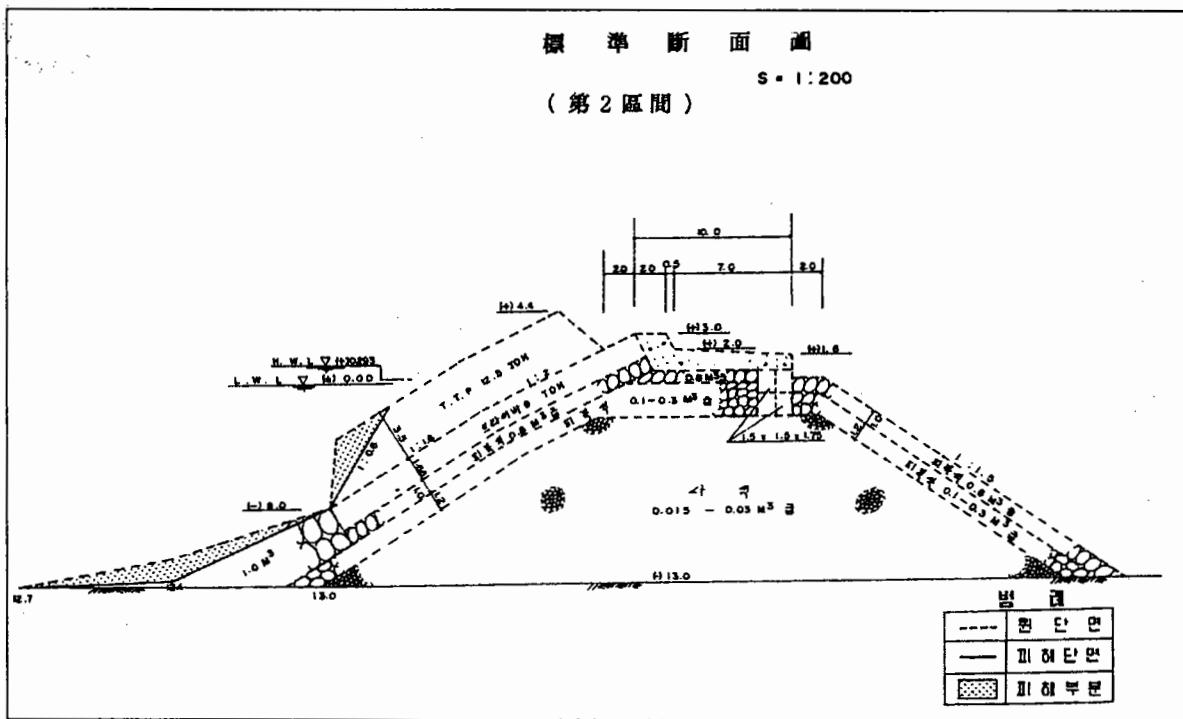
<그림 2.2.61> 주문진항 방파제 평면배치도



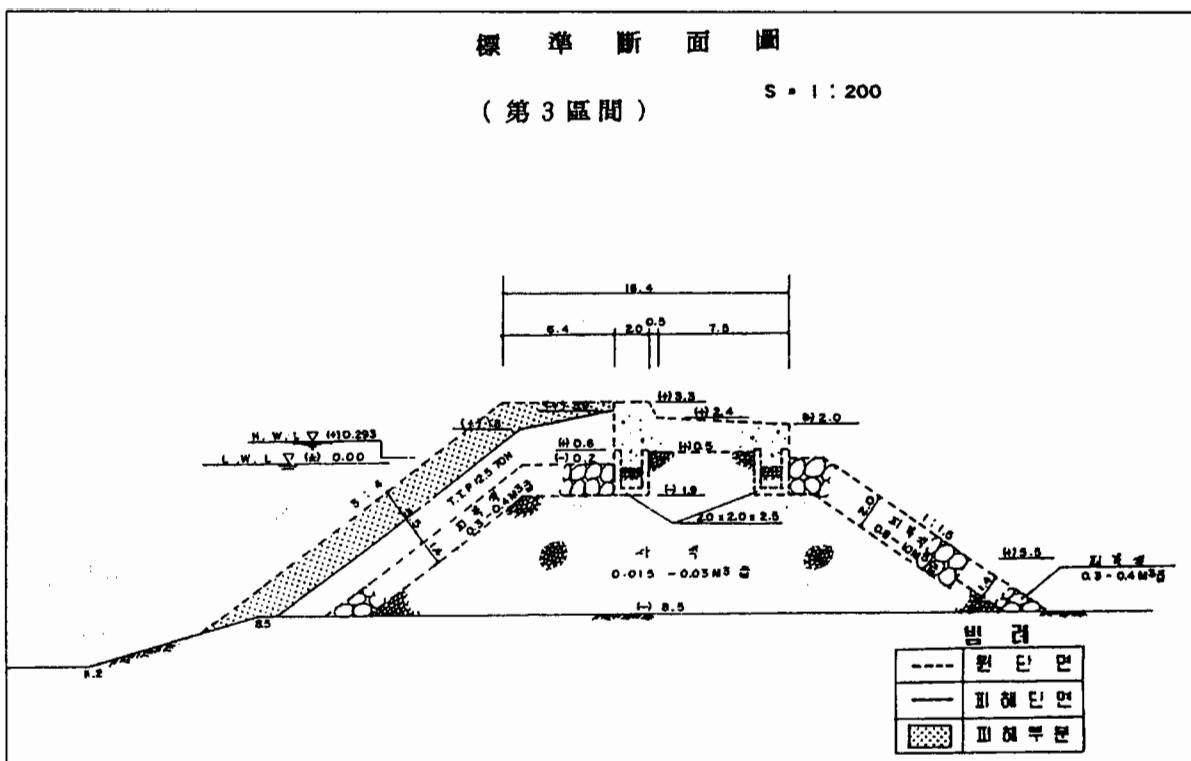
<그림 2.2.62> 주문진항 방파제 구간별 설계파고



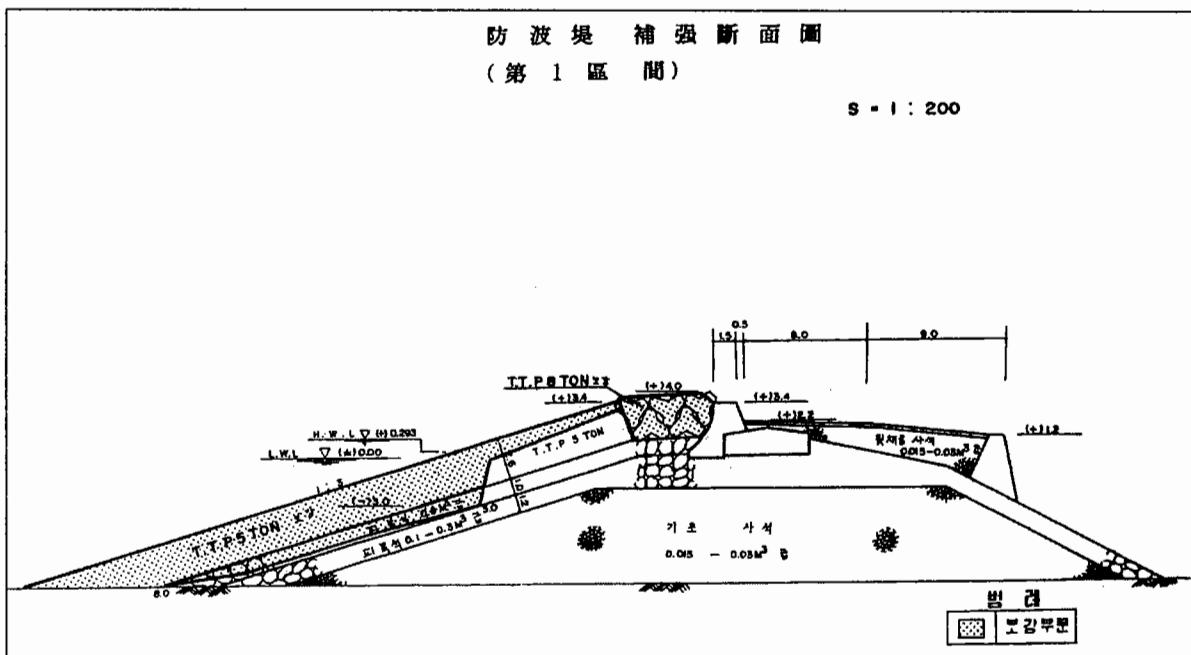
<그림 2.2.63> 주문진항 방파제 1구간의 피해단면도



<그림 2.2.64> 주문진항 방파제 2구간의 피해단면도



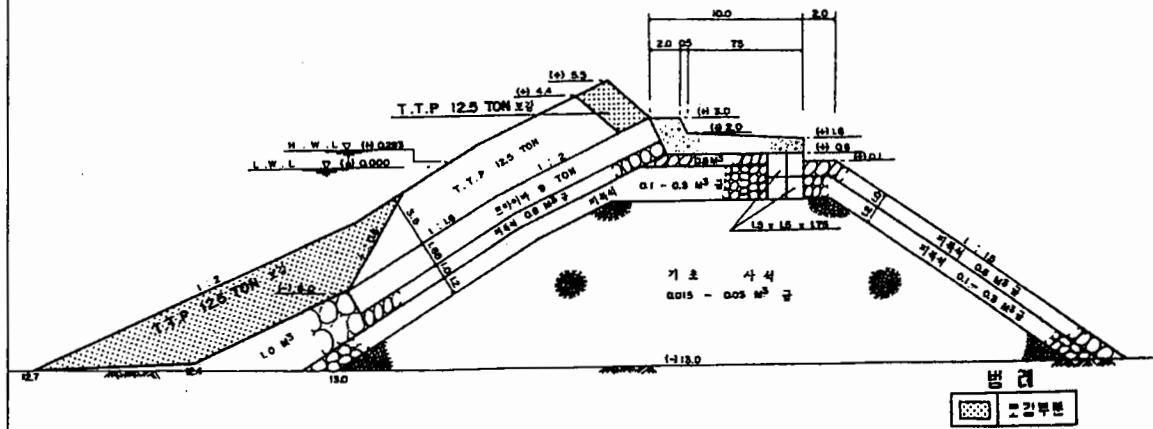
<그림 2.2.65> 주문진항 방파제 3구간의 피해단면도



<그림 2.2.66> 주문진항 방파제 1구간의 보강단면도

防波堤 補強断面圖
(第 2 區間)

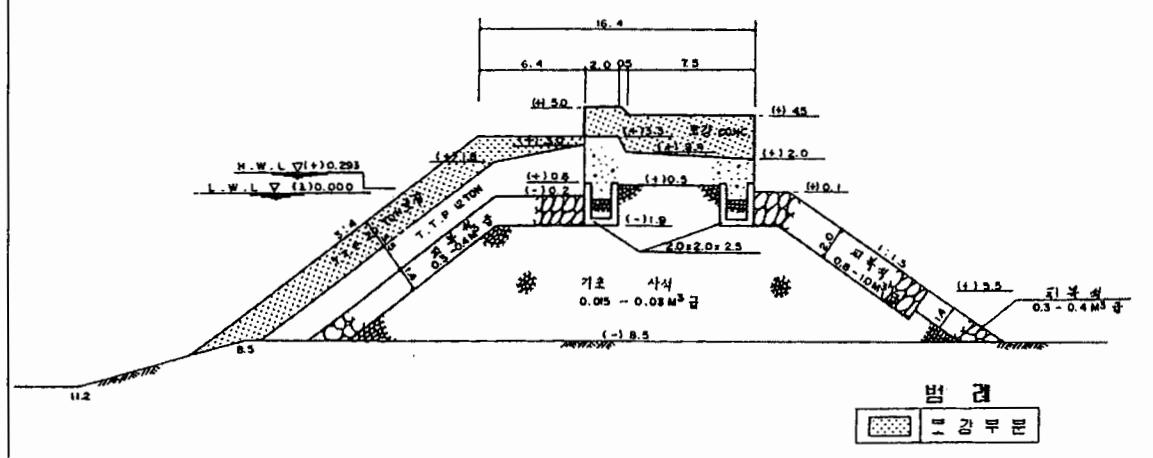
S : 1 : 200



<그림 2.2.67> 주문진항 방파제 2구간의 보강단면도

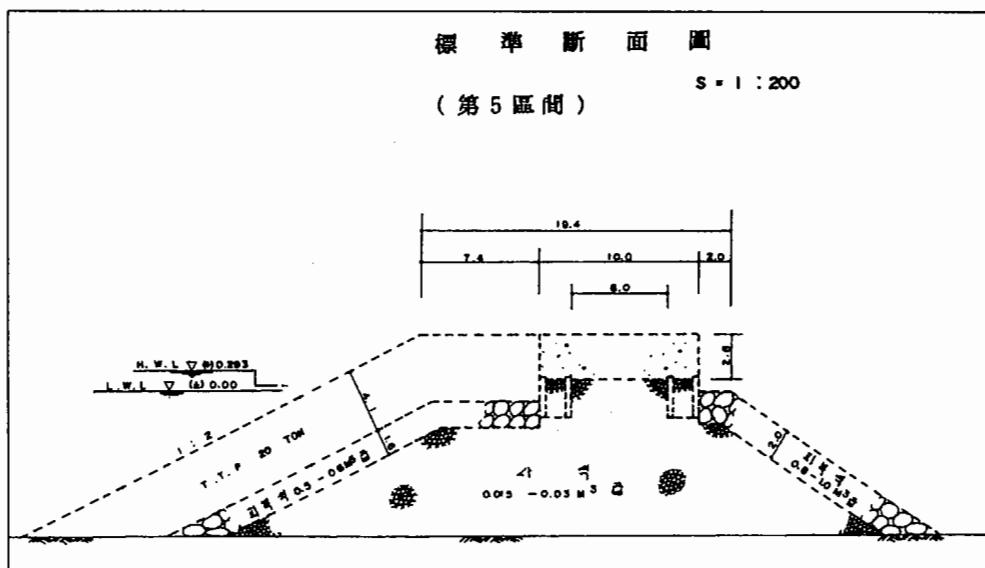
防波堤 補強端面圖 (第 3 區間)

S : 1 : 200



<그림 2.2.68> 주문진항 방파제 3구간의 보강단면도

또한 1985년 10월 5일~6일에 발생한 20호 태풍에 의해 <그림 2.2.62>의 5구간에서 20ton급 T.T.P. 120개가 침하하고, 5구간 연장 100m에 걸쳐 사석이 $4,000\text{m}^3$ 정도 유실되는 피해가 발생하였다. 피해 당시의 내습파고는 약 8m 정도로 추정되었다. 피해가 발생한 5구간의 표준단면은 <그림 2.2.69>와 같으며, 마루높이는 D.L.(+)3.4m이다.

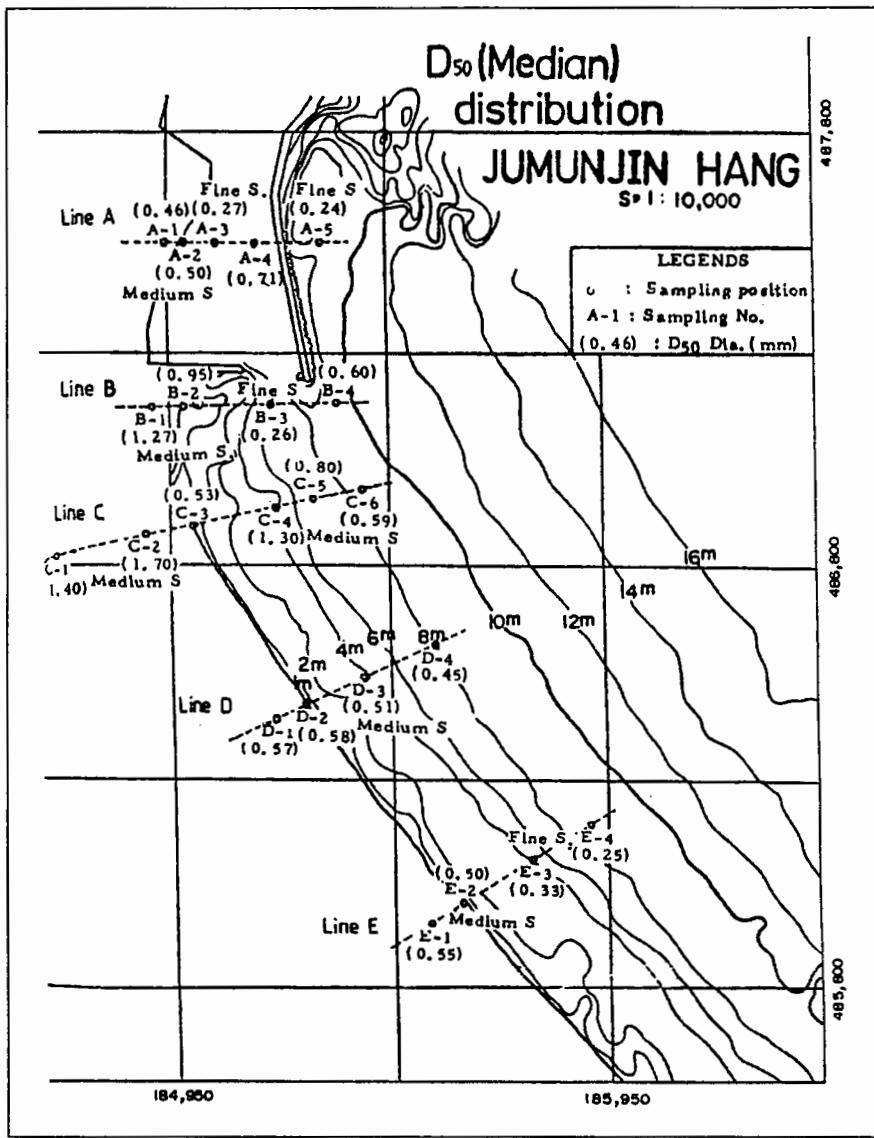


<그림 2.2.69> 주문진항 방파제 5구간의 표준단면도

주문진항 부근의 해안선 약 2.0km 범위에서 심해방향으로 600m 부근까지 분포되어 있는 저질 모래의 대표치가 되는 d_{50} 의 분포도는 <그림 2.2.70>과 같으며, 심해방향으로 종단면상의 저질분포는 <그림 2.2.71>과 같이 조사되었다. 사빈이나 해저의 모래는 모래의 구성조건(입경, 비중, 모양 등), 수심, 내습파의 크기 등에 따라 움직임이 달라지게 된다. 주문진항 5구간의 선단 부근에서의 입경(d_{50})은 0.6mm이며, 수심이 9m~10m인므로 방파제 전면파고에 대한 저질의 이동한계수심은 <표 2.2.6>과 같다.

<표 2.2.6> 표사 이동한계수심($d_{50}=0.6\text{mm}$)

파고 (m)	1.3	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
주기 (sec)	5.3	6.5	7.0	9.1	10.0	11.0	11.0
표층이동한계수심(m)	3.50	6.39	9.94	11.63	14.82	17.93	22.65
완전이동한계수심(m)	1.71	3.16	4.51	5.68	7.49	8.87	10.38



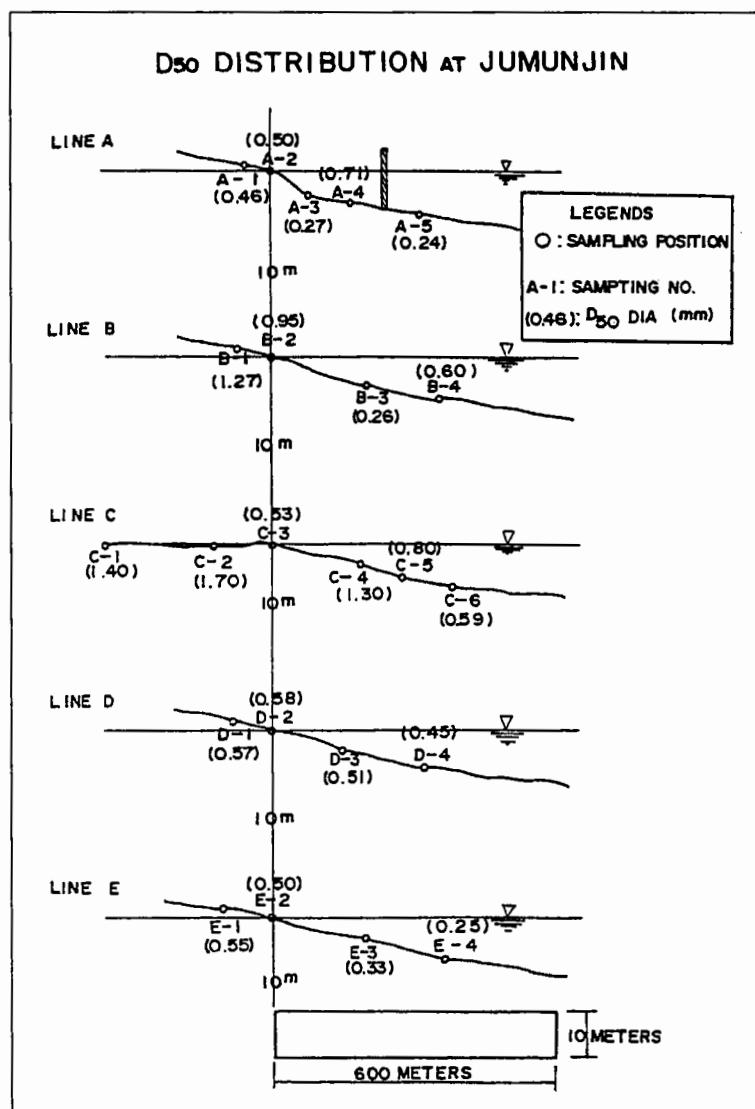
<그림 2.2.70> 주문진항 방파제 주변 해저저질의 중앙입경분포도

<표 2.2.6>에 의하면 피해당시의 5구간 부근 모래는 설계파에 상당하는 내습파가 작용했을 경우, 저면 모래의 이동이 활발하여 세굴에 의한 침하가 발생하였을 가능성이 높은 것으로 판단된다.

주문진항의 피해가 발생한 구간에서의 T.T.P. 중량은 적정한 것으로 검토되었으며, 전술한 저질분포 및 저질이동에 따라 방파제 전면 기초부에서의 세굴로 인해 T.T.P. 피복블록이 침하되었고, 침하된 T.T.P. 피복블록 하부의 피복석이 높은 파고의 내습파에 의해 유실되는 피해가 발생한 것으로 판단된다. 즉, 세굴방지공이 설치되지 않았기 때문에 고파랑의 지속시간에 따라 피해가 연속적으로 발생하여 사석방파제의 파괴기구중 세굴로

인하여 침하가 발생한 것으로 판단된다. 따라서, 피해의 직접적인 원인으로는 파력에 의해 피복블록인 T.T.P.가 이동 및 이탈함과 동시에 세굴에 의한 침하가 연속적으로 발생한 복합적인 것으로 생각된다.

현재까지 검토된 바로는 세굴방지공은 설치되지 않은 상태에서 T.T.P. 및 사석이 원상복구 되었다.



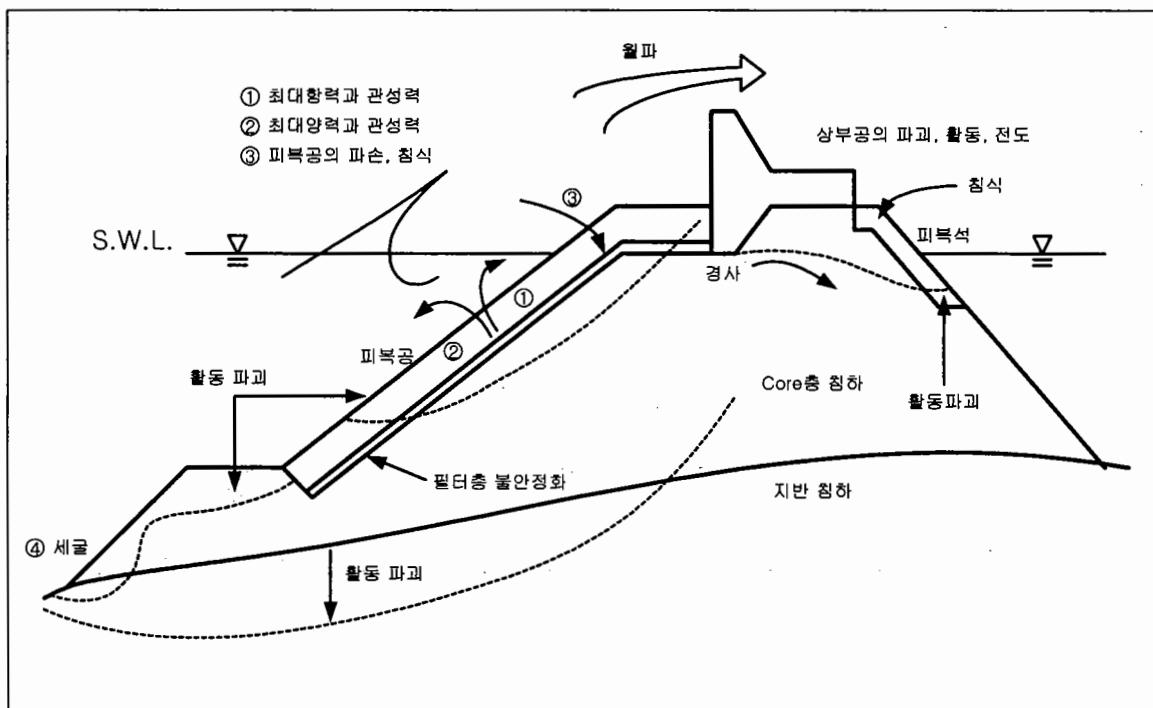
<그림 2.2.71> 주문진항 방파제 주변 해저저질의 중앙입경 종단면 분포도

제 3 장 방파제 피해사례 분석

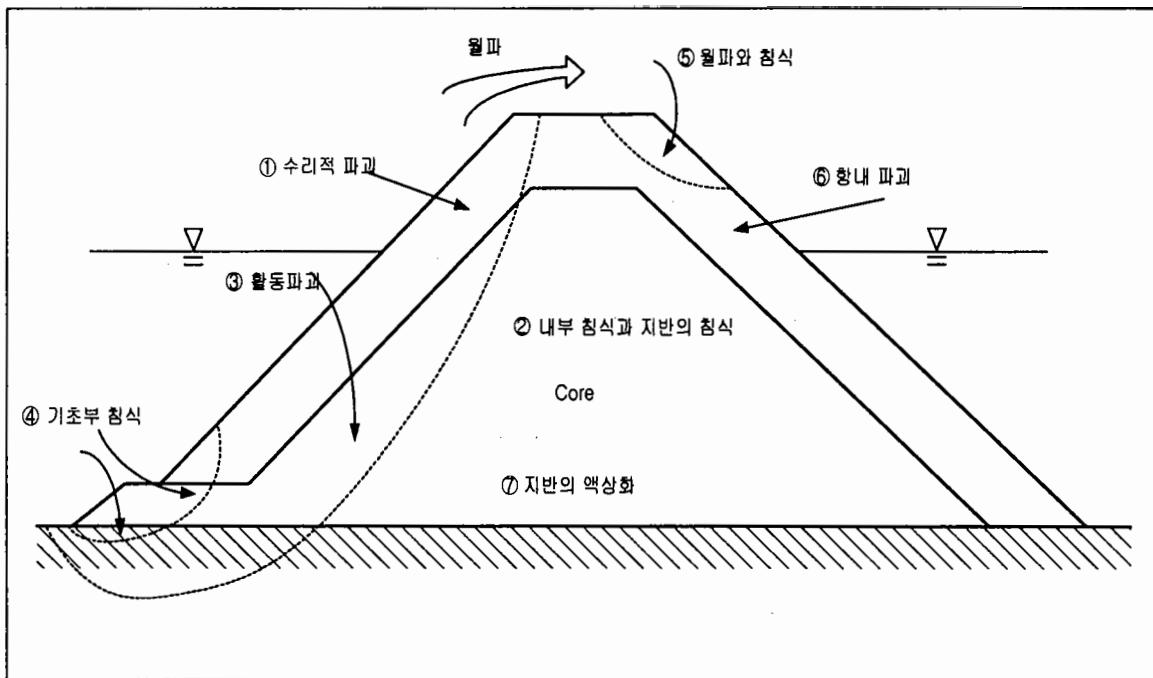
제 1 절 방파제 파괴구조

방파제의 구조형식은 지역과 지형적인 특성 등에 따라 다르다. 국내의 경우에는 경사식 방파제가 주로 적용되고 있으며, 일본의 경우는 케이슨제가 널리 이용되고 있는 실정이다. 서구에서는 국내와 마찬가지로 경사식 방파제가 많이 이용되고 있지만, 수심에 따라 방파제의 형식을 다르게 하고 있다. 방파제 피해사례를 살펴보면, 국내의 경우는 자료의 축적이 비교적 적으며, 일본은 1960년대부터 방파제 피해사례에 대한 근본적인 대안을 찾기 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

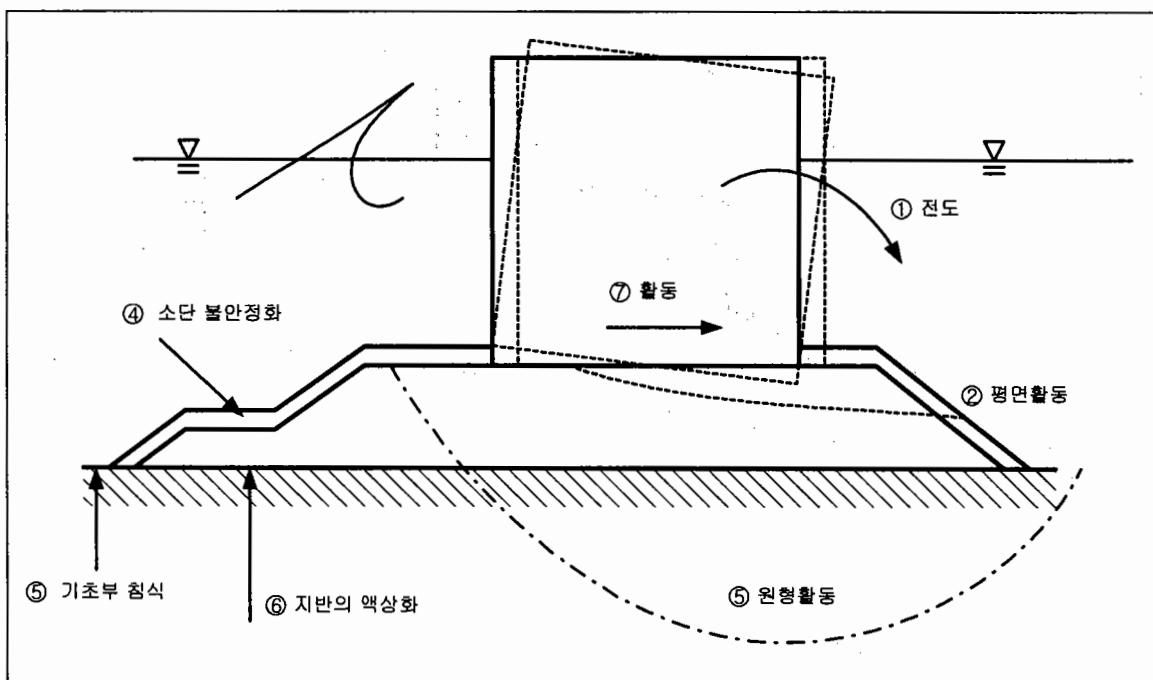
항만의 외곽시설인 방파제 피해에 대해 많은 노력을 기울였던 관련 연구자들의 연구 결과를 정리해보면 <그림 3.1.1>~<그림 3.1.4>와 같이 구조형식에 따른 대표적인 파괴구조로 나눌 수 있다.



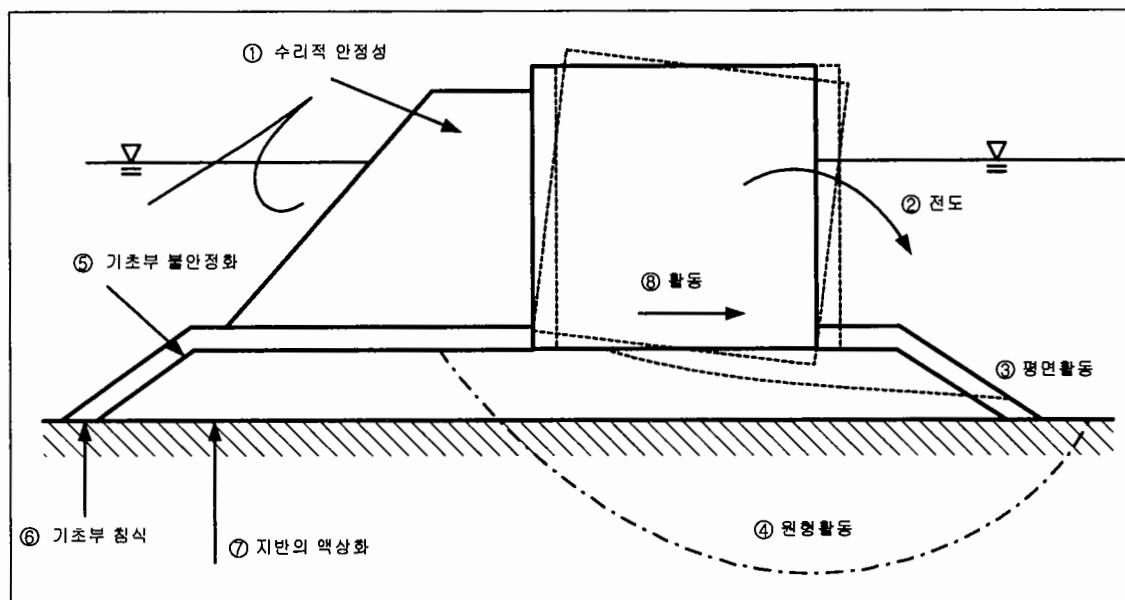
<그림 3.1.1> 상치콘크리트가 있는 경사식 방파제의 파괴구조



<그림 3.1.2> 상치콘크리트가 없는 경사식 방파제의 파괴구조



<그림 3.1.3> 케이슨식 혼성제의 파괴구조



<그림 3.1.4> 소파블록피복제의 파괴구조

국외 피해사례중 경사식 방파제의 대표적인 피해사례인 포르투갈의 Sines항을 대상으로 피해상황을 검토하였으며, 일본의 경우에는 소파블록피복제와 케이슨식 혼성제를 대상으로 각각의 피해사례를 종합적으로 검토하였다. 특히, 케이슨벽에 구멍이 생기는 구조적인 파괴를 일본의 몇 가지 사례를 들어 이들 피해요인에 대해 검토하였다. 국내의 경우에는 경사식 방파제와 케이슨 방파제를 대상으로 피해사례를 검토하였으며, 전술한 방파제의 파괴구조에 의한 피해유형을 분석하였다.

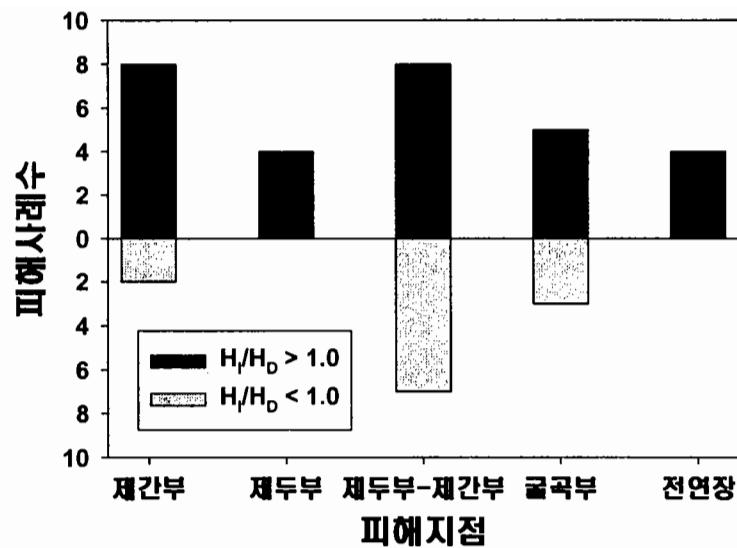
제 2 절 피해사례 분석

일본에서 발생한 피해사례 중 ① 시공이 완료된 경우, ② 피해당시의 관측자료, 도면 등의 피해상황이 비교적 상세히 서술된 사례, ③ 구조물의 용도별 분류중 방파제인 경우, ④ 구조형식별로 분류하여 경사식 방파제, 소파블록피복제, 혼성식 방파제에 해당되는 경우, ⑤ 설계파의 과소평가 등에 해당되는 총 78사례에 대해 외력인자화에 의한 방파제의 피해유형을 분석하였다. 전체 78건의 피해사례에서 피해당시 내습한 파랑의 주기가 제시되어 있지 않은 경우에는 피해 기간동안 인접한 항에서 관측된 파랑의 주기를 이용하거나, 피해항만의 설계파 주기를 이용하거나, 인접한 항의 설계파 주기를 이용하였다. 그리고 설계파고가 제시되지 않은 경우에는 인접 항만의 설계파고를 이용하였으며, 피해당시의 관측파고가 최대파고인 경우에는 파랑의 통계적 특성, 즉 $H_{\max} \approx (1.6 \sim 2.0)H_{1/3}$ 의 관계식(Goda, 1985)을 이용하여 유의파고를 추정하였다.

가. 혼성제

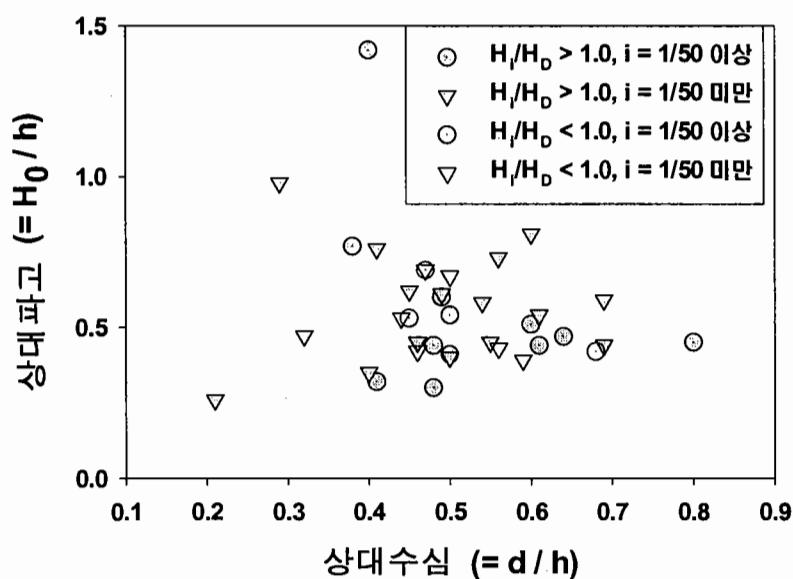
혼성제의 피해사례에 해당하는 42건 중 피해당시의 내습파고(H_i)가 설계파고(H_D) 이상인 경우가 71%, 설계파고 이하인 경우가 29%로 나타났으며, <그림 3.2.1>과 같이 방파제의 배치형상에 따라 피해지점별 피해사례수가 다르게 나타났다. 내습파고가 설계파고 이상인 경우에는 방파제의 제간부와 제두부-제간부에서의 피해가 두드러졌으며, 전 연장에 걸쳐 피해가 발생된 경우도 4건이 발생하였다. 내습파고가 설계파고 이하인 경우에는 제두부-제간부에서의 피해가 두드러졌으며, 제간부 및 굴곡부(우각부 또는 둔각부)의 피해사례도 일부 나타났다.

기존의 많은 연구자들이 수행한 수리모형실험과 현장관측자료를 살펴보면 수직벽에 설치된 계기는 쇄파로 인하여 매우 높은 압력을 나타낸다. 이 압력은 작용시간이 매우 짧지만 파고에 대응하는 정수압의 10배 이상이 발생할 수도 있다. 이와 같은 이상 고압의 쇄파압을 충격쇄파압(impulsive breaking wave pressure)이라 한다. 이러한 충격쇄파압은 입사파가 방파제 전방에서 쇄파되기 시작하여 파가 거의 수직이 되어 방파제와 부딪칠 때 발생한다. 방파제에 대한 파랑의 입사각은 충격쇄파압에 영향을 주는 주요한 요소로서 입사각이 커지면 충격쇄파압은 급격히 감소한다. 기존 연구에 의하면 충격쇄파압이 발생하는 입사각의 한계가 20° 정도로 제시되어 있으며, 입사각이 이보다 크게 되면 충격쇄파압이 발생할 가능성이 적다고 하였다.



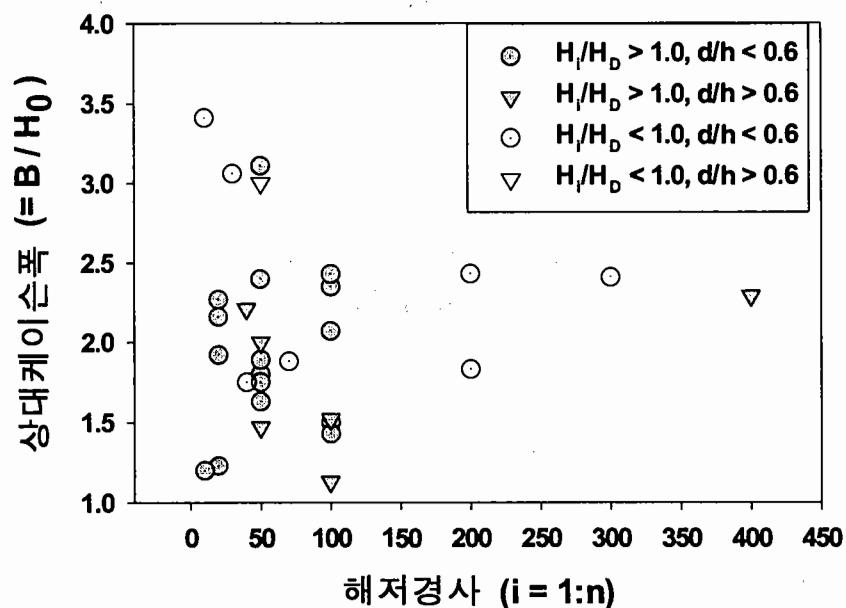
<그림 3.2.1> 방파제 배치형상에 따른 피해 발생지점의 빈도(흔성제)

<그림 3.2.2>는 천해에서 쇄파한계를 나타내는 외력인자인 상대파고($= H_{1/3}/h$)와 충격 쇄파의 발생여부를 나타내는 상대수심($= d/h$)을 이용하여 흔성제에서 발생한 피해한계를 나타낸 것이다. 전체적으로 상대파고가 0.3 이상에서 피해가 발생하였으며, 설계파고 이하의 파랑이 내습한 경우에는 상대수심이 0.3~0.7 범위에서 피해가 발생하였다. 여기서, d 는 흔성제 기초부에서 정수면까지의 수심이고, h 는 해저면부터 정수면까지의 수심이다.



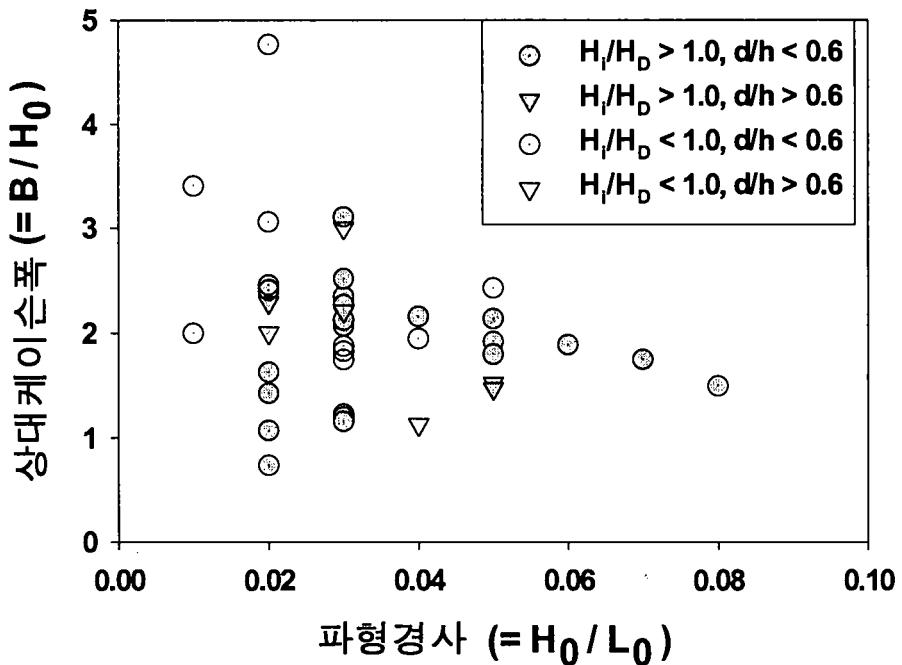
<그림 3.2.2> 충격쇄파력 발생에 따른 흔성제의 피해범위

방파제의 수직부에 작용하는 파압은 입사파의 파고에 비례하지만, 파의 주기, 해저경사 또는 방파제의 형상 및 크기에 따라 다르게 작용한다. <그림 3.2.3>은 해저경사가 케이슨의 소요폭에 미치는 영향을 보인 것으로 쇄파대내에서는 해저경사가 급해침에 따라 요구되는 케이슨의 폭이 증가함을 알 수 있다.



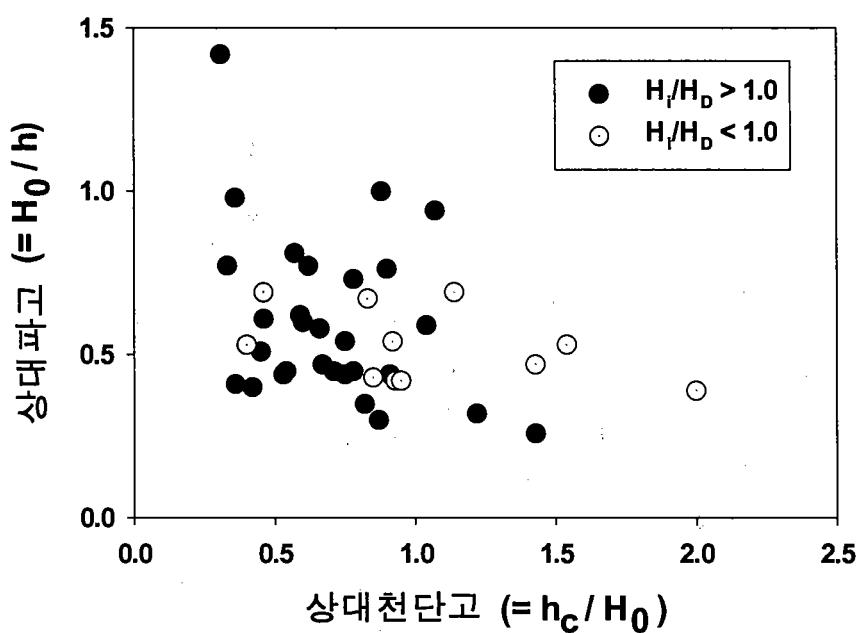
<그림 3.2.3> 해저경사별 소요 케이슨 폭의 변화에 따른 혼성체의 피해범위

<그림 3.2.4>는 파의 주기가 파고와 케이슨의 소요폭에 미치는 영향을 나타낸 것으로 파형경사가 작을 수록 케이슨의 소요폭이 증가함을 알 수 있다. 따라서 케이슨 방파제 설계시 파고뿐만 아니라 주기에 대한 검토도 필요할 것으로 생각된다. 케이슨의 폭은 파랑 작용에 대한 안정조건으로부터 결정되며, 세굴이나 사석제와 기초지반의 부동침하에 대비하여 케이슨의 길이는 케이슨폭의 0.5~2.0배의 범위로 설정하는 것이 일반적이다. 높은 파압의 발생을 방지하기 위해서는 기초사석부의 높이를 가능하면 낮게 설정하는 것이 최선이지만, 기초사석부는 케이슨의 연직하중과 파력을 넓은 면적으로 분산시키는 기능을 하기 때문에 최소한의 높이를 필요로 하게 된다. 일본의 경우에는 기초부의 높이를 1.5m 이상 설치하는 것으로 되어 있다. 기초부의 소단은 해저지반의 세굴을 방지하는 역할을 하기 때문에 넓은 소단이 요구되지만 충격쇄파압을 발생시킬 위험성이 있기 때문에 소단 폭을 너무 넓게 설계할 수는 없다. 일본의 경우에 소단폭은 최소 5m 정도로 설정하지만, 높은 파고가 내습하는 해역에서는 약 10m를 설정하고 있다.



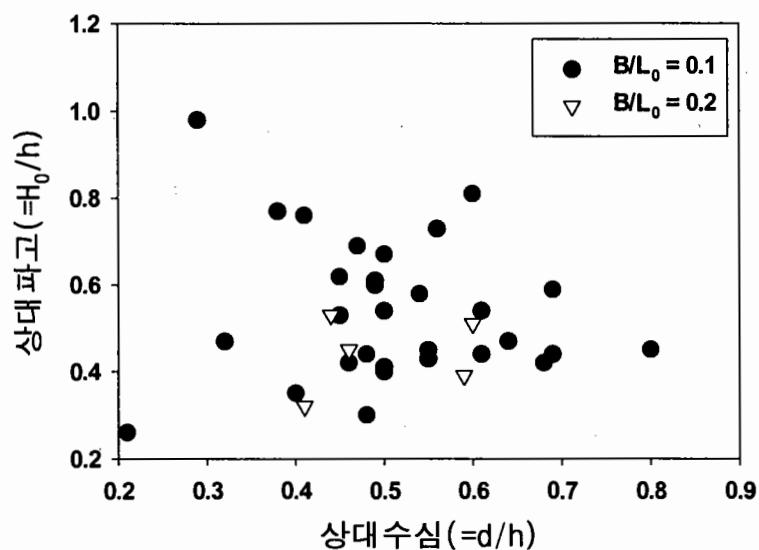
<그림 3.2.4> 파형경사별 소요 케이슨 폭의 변화에 따른 혼성제의 피해범위

<그림 3.2.5>는 방파제의 안정성에 영향을 미치는 영향인자인 상대파고와 상대천단고와의 관계를 내습파고가 설계파고 이상과 이하인 경우로 나누어 각각 나타낸 것으로 상대천단고($= h_c/H_i$)가 1.0 이하이고 상대파고가 0.3 이상에서 대부분의 피해가 발생하였다.

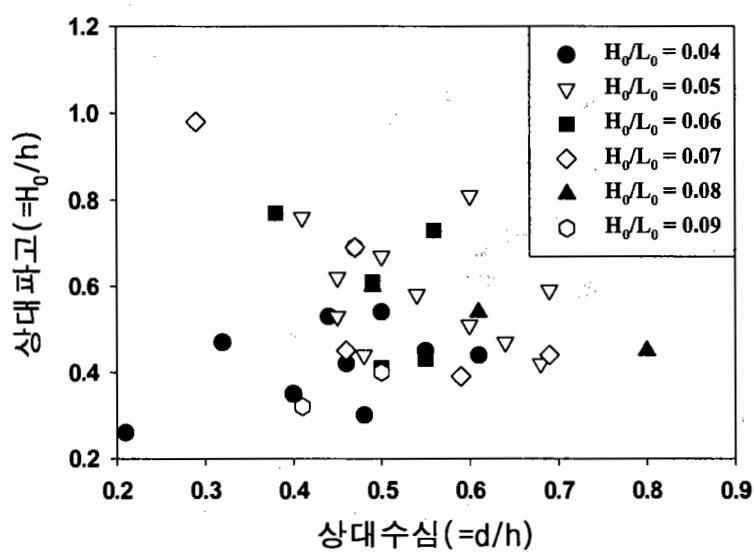


<그림 3.2.5> 상대천단고에 따른 혼성제의 피해범위

<그림 3.2.6>은 방파제의 안정성에 영향을 미치는 인자인 상대파고와 상대수심과의 관계를 상대케이슨폭($= B/L_0$)에 대해 나타낸 것으로 대부분의 피해는 상대수심 0.4~0.7, 상대파고 0.4~0.8의 범위에서 발생하였다. <그림 3.2.7>은 파형경사에 따른 혼성제의 피해 범위를 나타낸 것으로 파형경사에 대해 도시한 것이다. 방파제 안정성 확보에 영향을 미치는 인자로 판단되는 각각의 변수를 사용하여 피해사례자료를 검토하였으며, 이러한 검토자료는 피해가 발생한 사례에 대해서 나타낸 결과들이므로 추후 수리모형실험으로 재현 또는 검증되어야 할 것으로 생각된다.



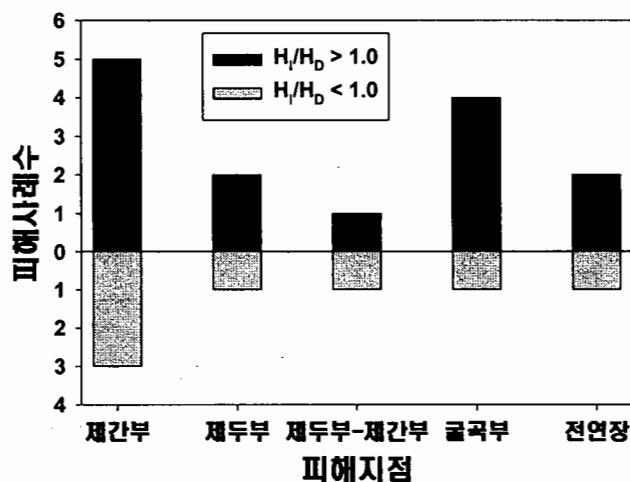
<그림 3.2.6> 상대케이슨폭에 따른 혼성제의 피해범위



<그림 3.2.7> 파형경사에 따른 혼성제의 피해범위

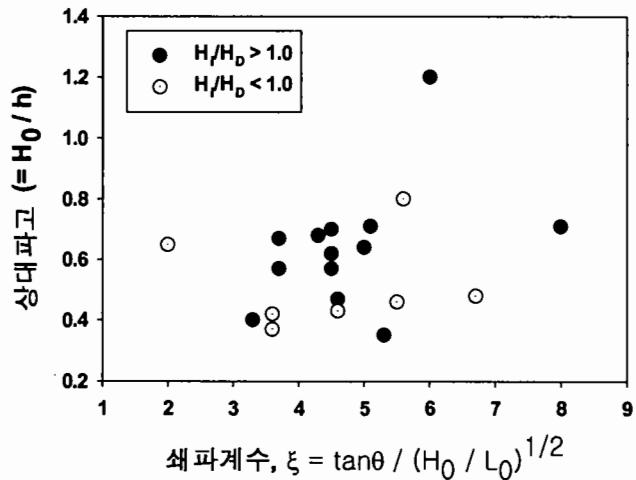
나. 소파블록피복제

소파블록피복제의 피해사례에 해당하는 20건의 피해사례에서 피해당시의 내습파고가 설계파고 이상인 경우가 67%, 설계파고 이하인 경우가 33%로 나타났으며, <그림 3.2.8>과 같이 방파제의 배치형상에 따라 피해지점별 피해사례수가 다르게 나타났다. 내습파고가 설계파고 이상인 경우에는 방파제의 제간부와 굴곡부에서 대부분의 피해가 발생하였으며, 방파제 전연장, 제두부, 제두부-제간부에서 발생한 피해사례는 각각 2건, 2건, 1건으로 나타났다. 내습파고가 설계파고 이하인 경우에는 제두부에서 3건의 피해가 발생하였으며, 제두부 이외의 구간에서는 각각 1건의 피해가 발생하였다. 소파블록피복제는 혼성제의 케이슨에 작용하는 파압을 완화시킬 목적으로 혼성제 전면에 T.T.P.와 같은 이형블록을 설치한 구조로서 혼성제의 설계기준을 어느 정도 준용하고 있으나, 소파블록피복제의 안정성 검토는 현재까지도 수리모형실험에 의존하는 실정이다.

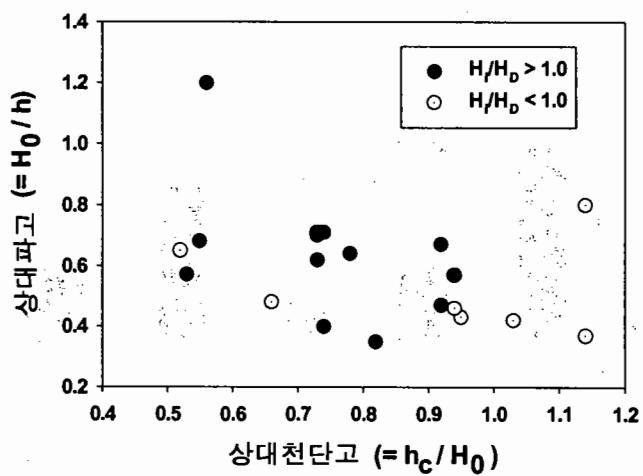


<그림 3.2.8> 방파제의 배치형상에 따른 피해 발생지점의 빈도(소파블록피복제)

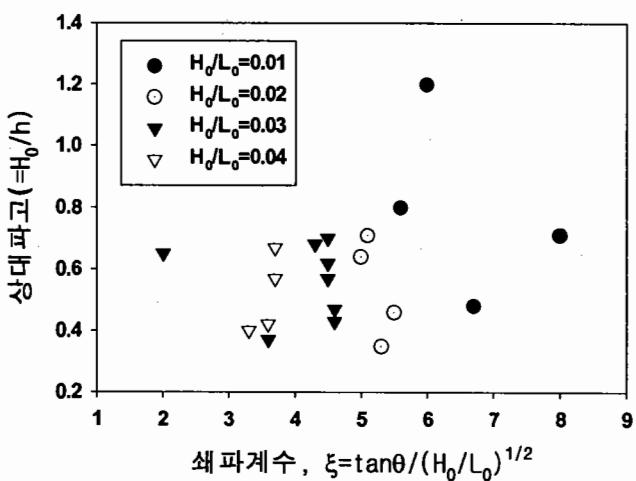
<그림 3.2.9>는 상대파고와 무차원 쇄파계수(surf similarity parameter) ξ 를 사용하여 소파블록피복제의 피해범위를 나타낸 것으로, 대부분의 피해는 상대파고가 0.3 이상이고, 쇄파계수 ξ 가 3~6의 범위에서 발생한 것으로 나타났다. <그림 3.2.10>은 상대파고와 상대천단고에 대해 검토한 경우로서 상대파고가 0.8 이하에서 대부분의 피해가 발생하였음을 알 수 있으며, 상대천단고는 0.5~1.2의 범위로 나타났다. <그림 3.2.11>은 소파블록피복제의 안정성에 영향을 미치는 영향인자라고 판단되는 상대파고와 무차원 쇄파계수와의 관계를 파형경사별로 각각 나타낸 것으로 파형경사는 0.01~0.04까지 분포하고 있다.



<그림 3.2.9> 소파블록피복제의 피해범위



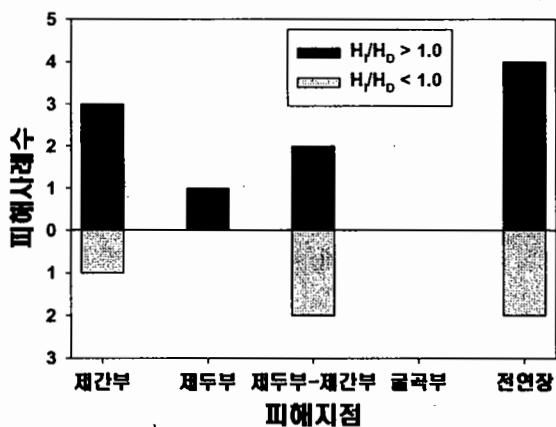
<그림 3.2.10> 상대천단고에 따른 소파블록피복제의 피해범위



<그림 3.2.11> 파형경사에 따른 소파블록피복제의 피해범위

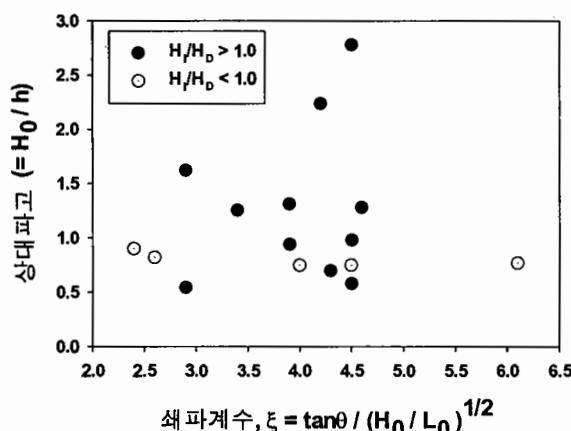
다. 경사식 방파제

경사식 방파제 피해사례에 해당하는 16건의 피해사례에서 피해당시의 내습파고가 설계파고 이상인 경우가 67%, 설계파고 이하인 경우가 38%로 나타났으며, <그림 3.2.12>와 같이 방파제의 배치형상에 따라 피해지점별 피해사례수가 다르게 나타났다. 내습파고가 설계파고 이상의 경우에는 방파제의 전연장, 제간부, 제두부-제간부, 제두부 순으로 발생빈도가 높았으며, 설계파고 이하인 경우에는 전연장, 제두부-제간부, 제간부에서 피해가 발생하였다. 굴곡부 구간에서의 피해사례가 없는 것은 일본의 경사식 방파제 대부분은 직선으로 배치되어 있기 때문인 것으로 생각되며, 방파제 형식에 따른 구성비율을 보더라도 혼성제나 소파블록피복제에 비해 상대적으로 작기 때문으로 생각된다.



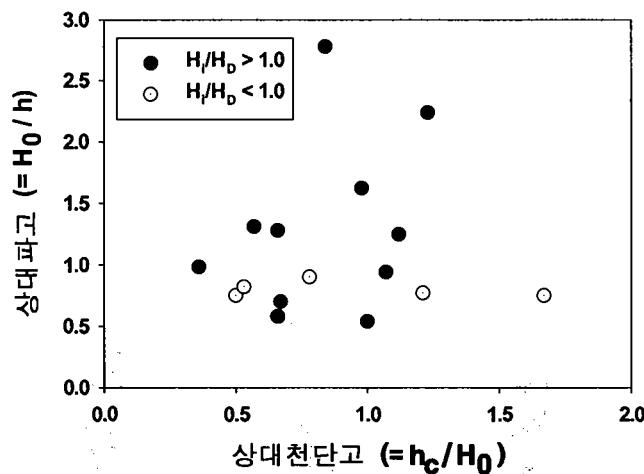
<그림 3.2.12> 방파제의 배치형상에 따른 피해 발생지점의 빈도(경사식 방파제)

<그림 3.2.13>은 상대파고와 무차원 쇄파계수를 사용하여 경사제의 피해사례를 검토한 것으로, 대부분의 피해는 상대파고가 0.5 이상이고, 무차원 쇄파계수 ξ 가 2.5~4.5 범위에서 발생한 것으로 나타났다.

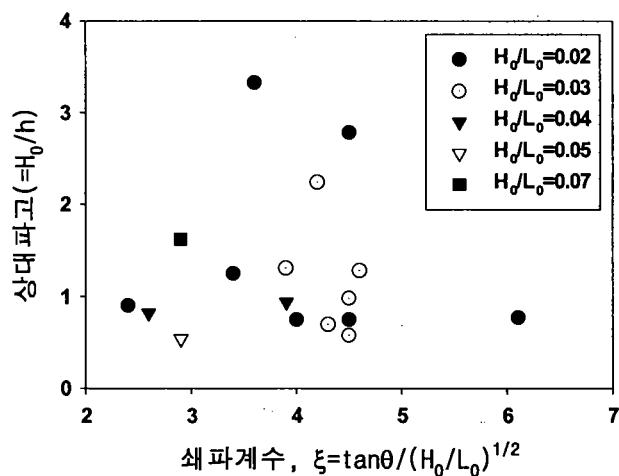


<그림 3.2.13> 경사식 방파제의 피해범위

<그림 3.2.14>는 상대파고와 상대천단고에 대해 피해사례를 분석한 것으로서 상대천단고가 0.5~1.3 범위에서 대부분의 피해가 발생한 것으로 나타났으며, 상대파고는 0.5~1.5 범위에서 피해가 집중되었다. <그림 3.2.15>는 파형경사에 따른 피해범위를 상대파고와 무차원 쇄파계수에 대해 나타낸 것으로 파형경사는 0.02~0.07사이에 분포하고 있다.



<그림 3.2.14> 상대 천단고에 따른 경사식 방파제의 피해범위



<그림 3.2.15> 파형경사에 따른 경사식 방파제의 피해범위

제 3 절 구조형식별 파괴구조 분석

1. 경사식 방파제의 파괴구조

항만구조물 중에서 파랑에 의한 피해는 방파제에서 대부분 발생한다. 우리나라 방파제의 대부분은 경사식 방파제이며, 경사식 방파제의 피해는 주로 법선 기초부의 세굴에 의한 파괴와 파력의 직접작용에 의한 사면상에서 파와 구조물의 상호작용으로 인한 파괴로 크게 나눌 수 있다. <그림 3.3.1>은 경사식 방파제의 파괴구조에 대한 피해유형을 나타낸 것이며, 경사식 방파제의 전형적인 피해유형은 다음과 같이 6가지로 분류할 수 있다.

(1) 피복재 중량부족 또는 설계파의 과소평가에 의한 피복재의 이동 및 이탈

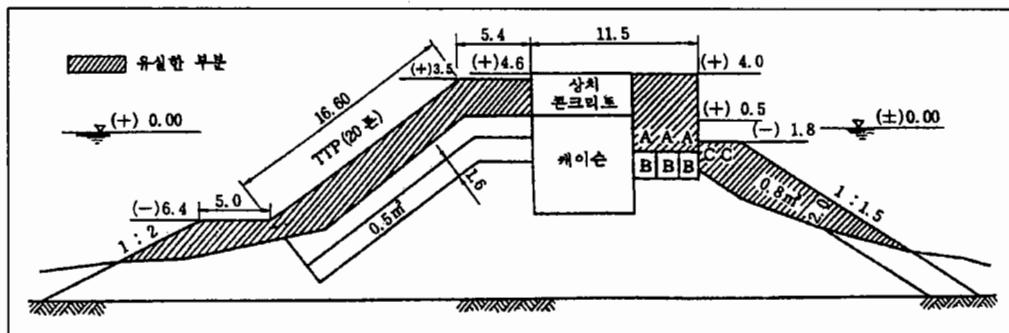
우리나라 동해안에 설치된 방파제는 전술한 피해사례 이외에도 <표 3.3.1>과 같이 과거 1966년~1971년 사이에 매년 피해가 발생한 것을 확인할 수 있다. 피해가 발생된 방파제는 대부분 사석 또는 인공블록, T.T.P. 등의 경사식 방파제이고, 큰 상치콘크리트가 설치되어 있는 경우가 많았다. <표 3.3.1>에 의하면 속초항, 목호항 및 삼척항은 매년 피해가 발생하였다. 1971년 1월 4일~5일에 동절기 폭풍파에 의한 목호항 방파제의 피해상황은 <그림 3.3.2>와 같다. <그림 3.3.2>의 사선부분이 유실된 부분을 나타낸 것으로서 당시의 내습파고는 6m~8m로 추정되었으며, 20ton급 T.T.P.가 유실된 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 피해는 소파공이나 피복공의 중량부족에 의한 피해로 생각되며, 과거 파랑판측자료의 부족으로 당시 파랑추산자료의 부적절, 부정확한 모형결과 적용, 파력과 파괴구조 인자의 과소평가 등에서 비롯된 것으로 생각할 수 있다.

(2) 피복재 중량 산정식의 적합성

대표적인 피복재 중량 산정식은 Hudson식과 van der Meer식이 있으며, Hudson식은 사용하기 쉬운 식이지만 각종 문제점이 지적되고 있다. Hudson식은 파고와 단위중량, 사면경사만으로 피복재 중량이 산정되고, 다른 외력요인들은 모두 안정계수(K_D) 값으로 표현된다. 즉, 피복재의 형상, 쇄파대 여부, 장소(제두부, 제간부)에 따라 서로 다른 안정계수 값이 이용되고 있다. 그러나 파형경사, 파랑의 지속시간, 피해의 정도, 파랑의 불규칙성, 피복층 하부의 투수성, 마루높이, 해저경사 등의 인자에 대한 고려가 미흡한 것으로 판단되며, 이러한 문제점을 극복하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

<표 3.3.1> 동해안의 방파제 피해사례

구 분		1966년	1967년	1968년	1970년		1971년
		9/24~27	9/16	10/23~26	1/30~2/2	7/5~9	1/4~5
내습파 조건	파고	5.25m 6.15m (추정)	5.44m	6.5m 7.0m (추정)	4.9m 5.3m (추정)	8.3m (추정)	8.0m (추정)
	파향	NE E	NE	-	-	-	-
피해 항		속초 목호 삼척	목호 속초 임원	거진 속초 주문진 목호 삼척 임원 죽변	거진 죽변	거진 속초 주문진 목호 삼척 죽변	거진 속초 목호 삼척 임원 죽변



<그림 3.3.2> 목호항 방파제의 피해상황(1971년)

van der Meer식은 Hudson식에 비해 발전된 식으로 평가받고 있지만, 피해의 크기를 나타내는 피해도의 산정, 파의 작용시간의 적용, 쇄파의 영향, 투수계수의 적용 등에 다소 문제가 있으며, 실제 현장에서 적용하기에는 여러 가지 어려움이 남아있다. 따라서 이에 대한 검토가 수행되어야 한다.

(3) 사면상에 작용하는 직접파력에 의한 피복재의 이동 및 이탈

사면상의 쇄파에 의한 파괴는 강한 유속과 함께 피복재의 파괴 및 이동에 영향을 미친다. 입사파향에 따른 사면상을 진행하는 파랑이 수심의 변화와 굴절 및 회절에 의해 에너지가 집중되어 쇄파형태가 권파가 되고 이에 따른 강한 흐름을 동반하게 된다. 항외측

사면의 기초가 되는 근고공이 유실 또는 세굴됨에 따라 사면이 활동 또는 파괴되는 사례도 나타났다.

(4) 방파제 전면 기초부의 국부세굴에 의한 제체의 침하

세굴에 의한 구조물의 안정성은 다른 파괴구조에 비해 장기적이고, 주기가 클 때 상대적으로 세굴이 신속히 진행되어 평형상태에 이르는 것을 알 수 있다. 기초부의 세굴은 파랑과 구조물의 상호작용으로 회절, 굴절 및 반사되어 기초부에 연행한 와류와 정상류의 발달, 사면상에서 쇄파 이후에 진행되는 흐름이 제체 배후의 유속을 증가시키고, 세굴에 의한 기초부의 파괴를 발달시키게 된다.

(5) 월파로 인해 발생되는 방파제 배후면 활동에 의한 제체의 침하

포르투갈 Sines항의 피해사례에서와 같이 높은 파랑에 의해 발생되는 월파와 더불어 사면에 작용하는 직접적인 파력에 의해 상호 복합적인 피해가 발생하는 것으로 추정된다. 그리고 방파제 설치지점 주변의 해저지형, 파괴수준과 월파량 사이에는 깊은 상관을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 <그림 3.3.2>에서 나타난 바와 같이 방파제 마루부가 파괴됨에 따라 항내측 사면의 사석이 유실되거나, 월파로 인하여 항내측 사면이 파괴되는 사례는 종종 볼 수 있다.

(6) 입사파의 방향성효과에 의한 피복재의 이동 및 이탈

입사파의 방향성효과에 의해 발생되는 피복재의 이동 및 이탈은 피해장소에 따라 공간적인 분포가 서로 달리 나타났다. 특히, 제두부는 입사파의 방향성효과에 의해 피해가 두드러지며, 이에 대한 검토가 필요하다.

2. 혼성제의 파괴구조

Takahashi 등(1999)은 일본의 대표적 방파제 구조인 혼성제의 피해유형을 <그림 3.3.3>과 같이 분석하였다. 피해사례 대부분은 내습파고가 설계파고에 가깝던지 그 이상에서 발생하지만, 방파제 전체에 피해가 발생하는 일은 드물고, 방파제의 약점이나 설계상의 문제점에 관련된 (1)~(5)가 주된 피해유형으로 지적되고 있으며, 중량이 크게 부족하여 전체적인 피해에 이른 경우(설계파의 과소평가, 부정확한 파력산정, 시공시 문제점 등)도 있다.

(1) 법선방향의 파고증대

Mutsu-Ogawara항 방파제의 피해상황으로부터 알 수 있듯이 거의 설계파에 가까운 파가 작용하여 케이슨이 활동하였고, 「사행피해」라고 하는 법선방향의 피해유형을 보이고 있다. 이것은 방파제 제두부로부터의 회절파에 의한 파고증대의 영향으로서 제두부의 첫 번째 케이슨으로부터 0.3~0.5 파장의 구간에서 20% 정도의 파고증대가 있었고, 3m~4m의 활동이 나타났다. 이러한 파고증대로 인해 설계파에 가까운 이상파랑에 의한 활동 피해는 빈번히 발생하고 있다.

(2) 높은 마운드 및 급경사 해저에 의한 충격쇄파력

급경사 해저사면상의 케이슨에 발생하는 충격쇄파력으로 인해 케이슨이 활동하거나 케이슨벽이 손상되는 것으로 알려져 있다. 특히 기초부형상에 의한 충격파력의 크기를 표현하는 충격쇄파력 계수가 제안되었으며, 기초부상의 수심(d)과 해저면의 수심(h)의 비 (d/h)가 0.6 이하인 경우에 위험한 것으로 알려져 있다.

(3) 경사입사파에 의해 발생되는 강한 유속에 의한 피복재의 이동 및 이탈

제두부에서는 파랑에 의해 발생하는 흐름으로 기초부의 피해가 발생하기 쉽다. 특히, 시공시 임시 제두부에서는 대책이 충분하지 않아 피해가 빈번히 발생한다. 근고블록의 이탈 후 케이슨 하부의 기초사석이 유실되어 제두부 케이슨이 크게 기울어진 사례도 있다. 외해에 접한 방파제에 장주기파가 작용할 때 제두부 기초부 부근에서 흐름의 최대값이 발생하고, 이에 따라 피해가 발생하는 것으로 알려져 있다.

제간부에서도 입사각이 60° 정도일 때 방파제를 따라 발생하는 파랑에 의한 흐름으로 인해 케이슨 기초부의 사석이 유실되기 쉬우며, 사석이 이탈되어 직립부가 항외측으로 기울어져 전도한 피해사례도 있다.

(4) 전면의 침식 · 법선의 세굴

직립제 전면 해저지형의 변화에는 전체적인 지형변화(침식)와 국부적인 세굴이 있다. 법선의 국부적인 세굴은 Irie 등(1984)에 의해 발생구조가 어느 정도 규명되었고, 자갈이나 세굴방지 매트 등을 적용하는 대책공법 어느 정도 확립되어 있다. 그러나 지형변화가 대규모로 발생하면 이에 대한 대처가 어렵기 때문에 기초부의 이탈 · 침하가 어느 정도 있어도 케이슨이 침하되거나 기울어지지 않도록 하는 것이 중요하다. 뿐만 아니라 전면의

해저지형이 변화하고 제체의 전면수심이 증대하는 경우에는 쇄파파고가 증대하거나 기초부가 상대적으로 높게 되어 충격쇄파가 발생하기 쉬우므로 주의가 필요하다.

(5) 사석마운드 아래 모래지반의 흡출

외해에 인접한 혼성제의 기초부에는 200kg~500kg의 사석을 이용하는 경우가 많다. 이렇게 입경이 큰 사석을 이용하면 기초부내의 흐름도 작지 않아 기초부 하부의 모래지반이 흡출될 가능성이 높다. 따라서 마운드 하부에는 흡출방지공이 적용되고 있으며, 최근 이러한 대책공을 설치하지 않아 케이슨의 침하에 이르는 경우도 발생하였다.

3. 소파블록피복제의 파괴구조

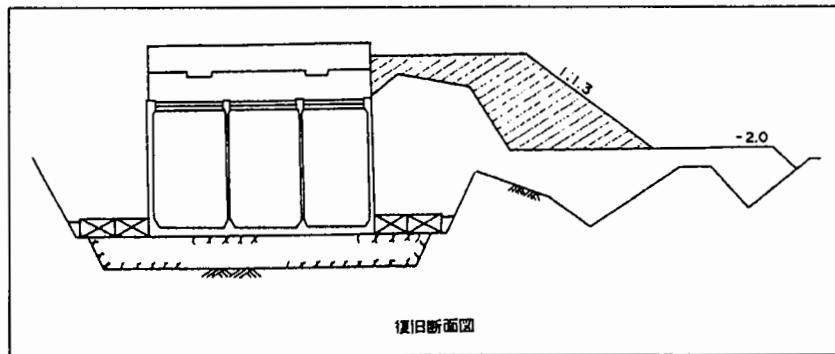
일본에서는 1970년대 후반부터 혼성제보다 소파블록피복제를 적용하는 경우가 많아 소파블록피복제의 피해가 증가하고 있다. <그림 3.3.4>는 소파블록피복제의 피해유형을 나타낸 것이다. 소파블록피복제의 피해유형은 케이슨 전면에 소파블록이 설치되어 있어 혼성제에 비해 복잡하지만, 주요한 피해유형은 크게 6가지로 나눌 수 있다. (1)은 소파블록의 이탈에 관계가 있고, (2)와 (3)은 블록의 이탈과 불완전소파에 의한 충격쇄파력의 발생요인이 된다. 소파블록 피복제의 전형적인 6가지 주요 피해유형은 다음과 같다.

(1) Reef 혹은 급경사 해저에서 소파블럭의 유실

Reef 해역이나 섬과 같이 급경사 해저가 있는 장소에서는 소파블록의 이탈이 발생하기 쉽다. 해저경사 1/10, 1/2.5의 복합경사 실험에서 쇄파영역에서 파고가 10%~50% 증대되거나, 입사파가 권파가 되어 소파블록의 이탈이 범선에 집중하여 발생하였다. <그림 3.3.5>의 Kametoku항 사례에서는 급경사 reef 끝에 방파제 제두부가 존재하고 파고증대와 쇄파후의 강한 흐름에 의해 소파블록 중량이 부족하여 피해가 발생한 경우이다.

(2) 불완전 소파에 의한 충격 쇄파력의 발생

제두부에서는 파랑에 의해 발생되는 흐름으로 인하여 소파블록이 불안정하기 쉬우며, 소파블럭의 천단이 낮아지면 직립부에 파력증대가 발생하여 케이슨이 활동할 수 있다. Mutsu-Ogawara항의 피해사례와 같이 단면형상이 변화하는 구간에서는 불완전 소파가 발생하여 직립부에 충격파력이 작용할 수 있다. 뿐만 아니라 소파공 마루부에서는 제두부와 같이 소파블록이 불안정하기 쉽다.



<그림 3.3.5> Kametoku항의 피해단면도

(3) 소파공 시공시 충격쇄파력의 발생

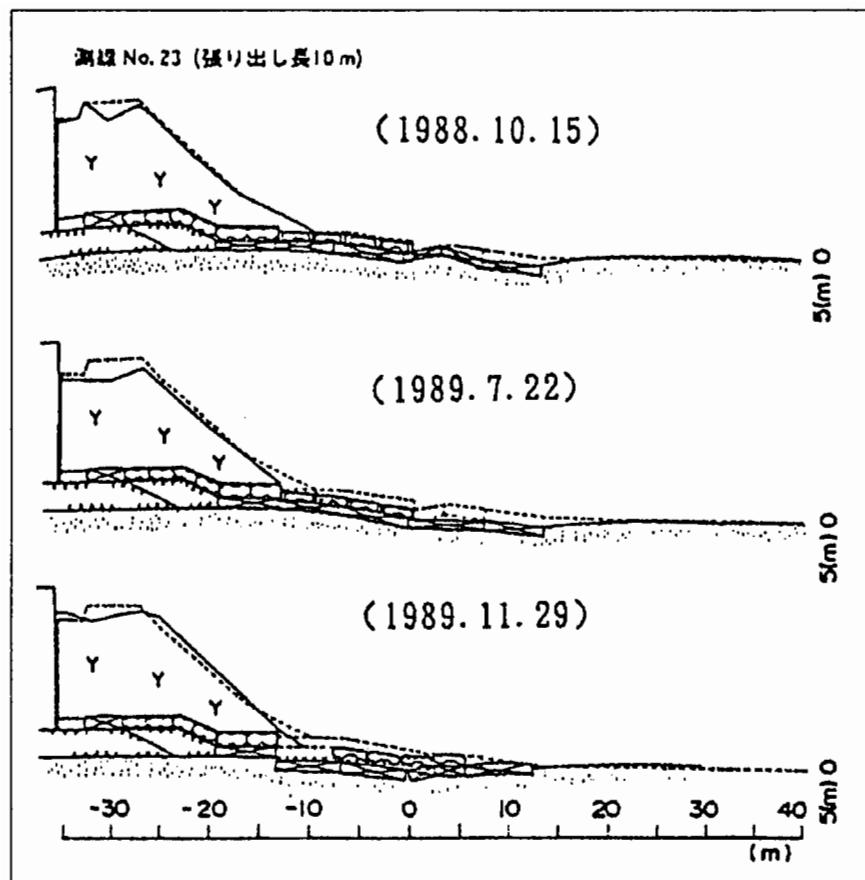
Itsumei 등(1995)에 의하면 소파공 단부의 불완전 소파로 인해 임시 제두부 케이슨이 충격 쇄파력을 받아 활동하면 소파블록의 이탈이 진행되어 인접한 케이슨도 연속적으로 활동하는 것으로 검토되었다. 소파공의 마무리가 충분한 제두부 케이슨에서는 대조적으로 소파공이 침하하는 정도에 그쳤다.

(4) 세굴이나 흡출에 의한 소파블럭의 침하

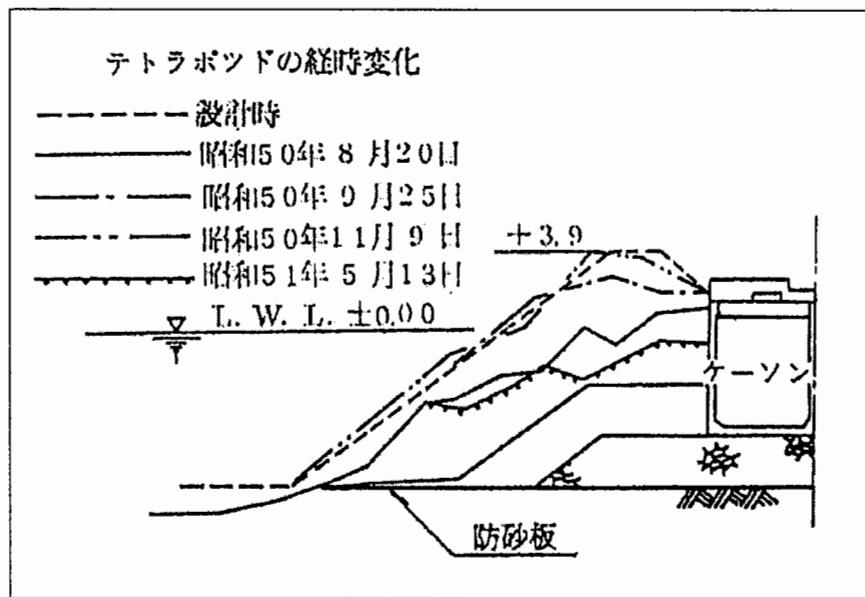
모래지반상에 설치된 소파블록 피복제의 블록의 침하 문제는 소파블록 피복제가 시공된 아래, 끊임없이 발생되고 있고, Itsumei 등(1997)도 이에 대한 사례를 다수 소개하고 있다. 그러나 블록 침하후에 블록을 추가 설치하면 침하가 중지되는 경향이 있기 때문에 큰 문제가 되지 않는다.

<그림 3.3.6>은 Miyazaki항의 피해사례로서, 1988년 3월 준공후부터 1990년 11월까지 소파공의 변동상황을 나타낸 것이며, 방파제 전면의 해저지반이 세굴되어 기초공 및 소파공의 침하와 이탈이 연속적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 지반변형에 의한 피해 사례로서 1975년 Ishikari항의 사례가 있으며, <그림 3.3.7>과 같이 소파공 기초부의 해저지반이 2m 정도 세굴되고, 중량 부족에 의한 이탈뿐만 아니라, 법선 전면의 세굴이 피해의 주요 원인으로 생각할 수 있다.

Suzuki 등(1998)은 블록 전면의 세굴에 의해 블록이나 사석기초부 아래의 모래의 흡출이 침하의 주요 원인이고, 특히 모래의 입경이 가는 경우에는 피해규모가 크게 나타난다고 하였다. 블록이 크게 침하하면 충격쇄파력이 발생하기 쉽게 되어 이 경우에는 케이슨 자체도 활동하게 된다. 또한, 침하에 동반하여 블록이 움직이면 블록이 부러지거나 케이슨벽을 손상시키는 일도 있다.



<그림 3.3.6> Miyazaki항 남방파제의 피해 단면도



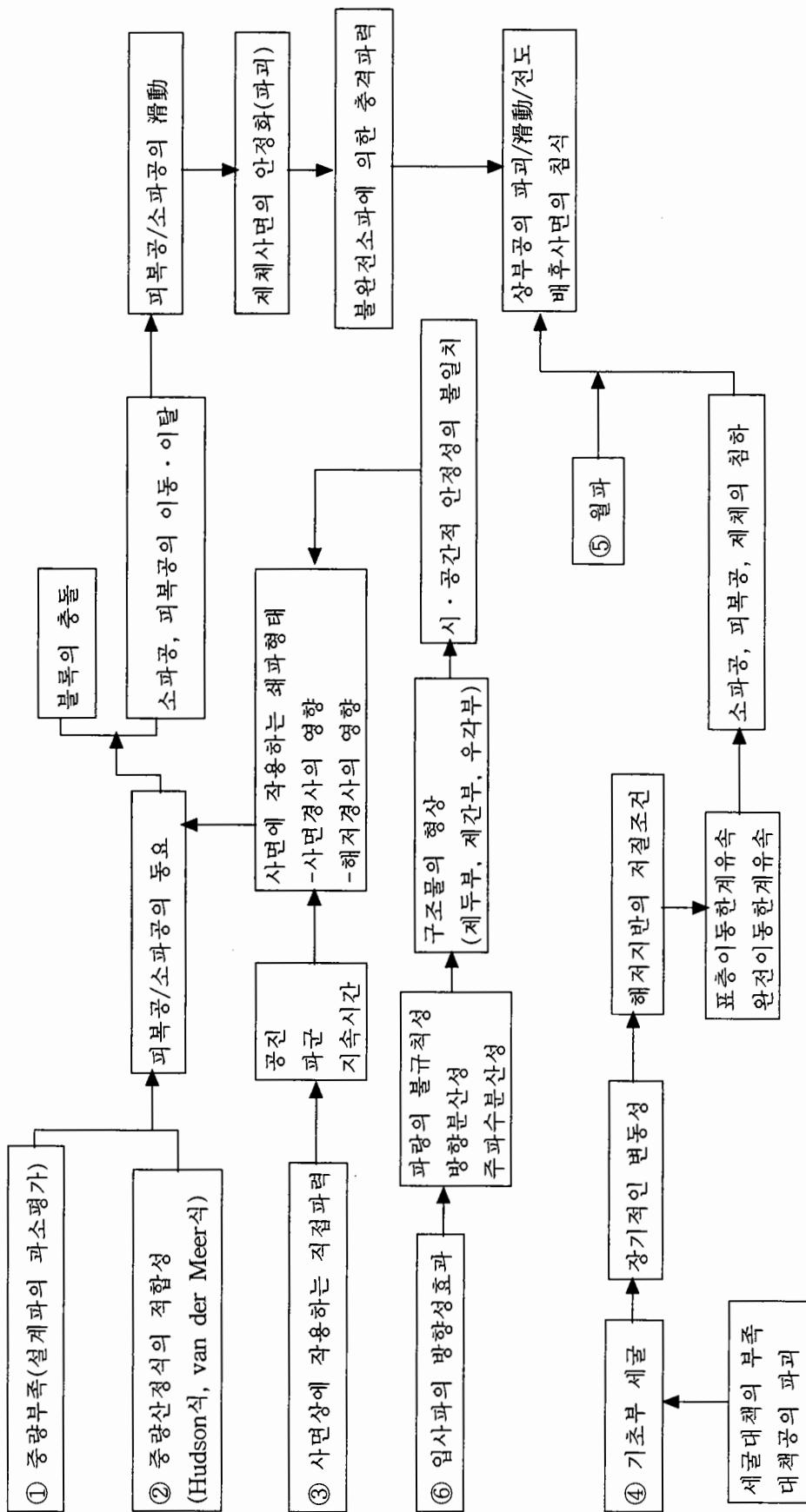
<그림 3.3.7> Ishikari항 신항방파제 피해단면의 시간적 변화

(5) 소파공 설치전의 폭이 넓은(높은) 기초부의 충격쇄파력

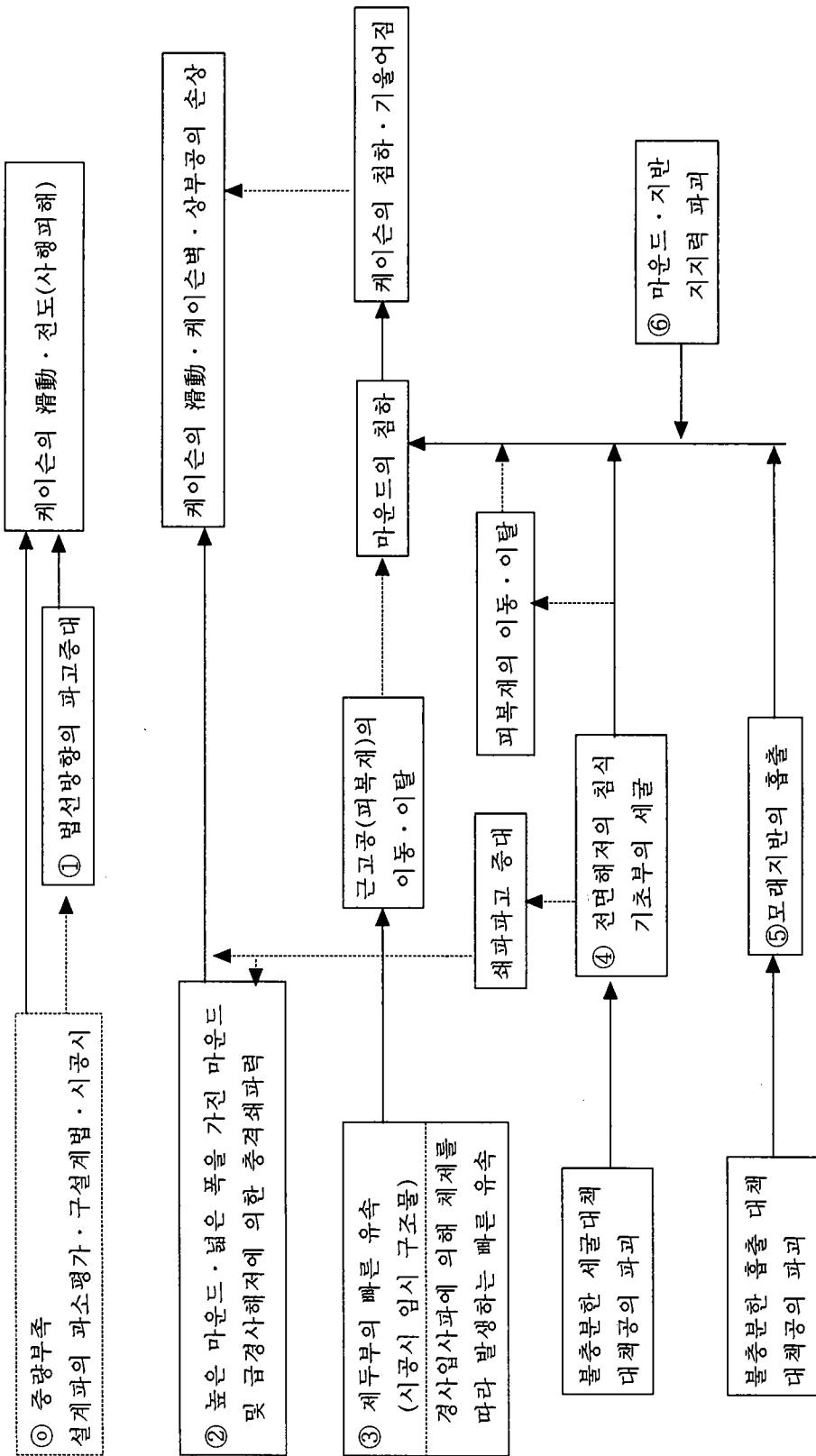
소파블록 피복제는 소파블록 설치전에는 폭이 넓은 사석 기초부를 가진다. 특히, 기초부가 높은 경우에는 기초부상에서 충격쇄파의 발생 위험성이 있다.

(6) 소파블록에 의한 파력 감쇄효과의 과대평가

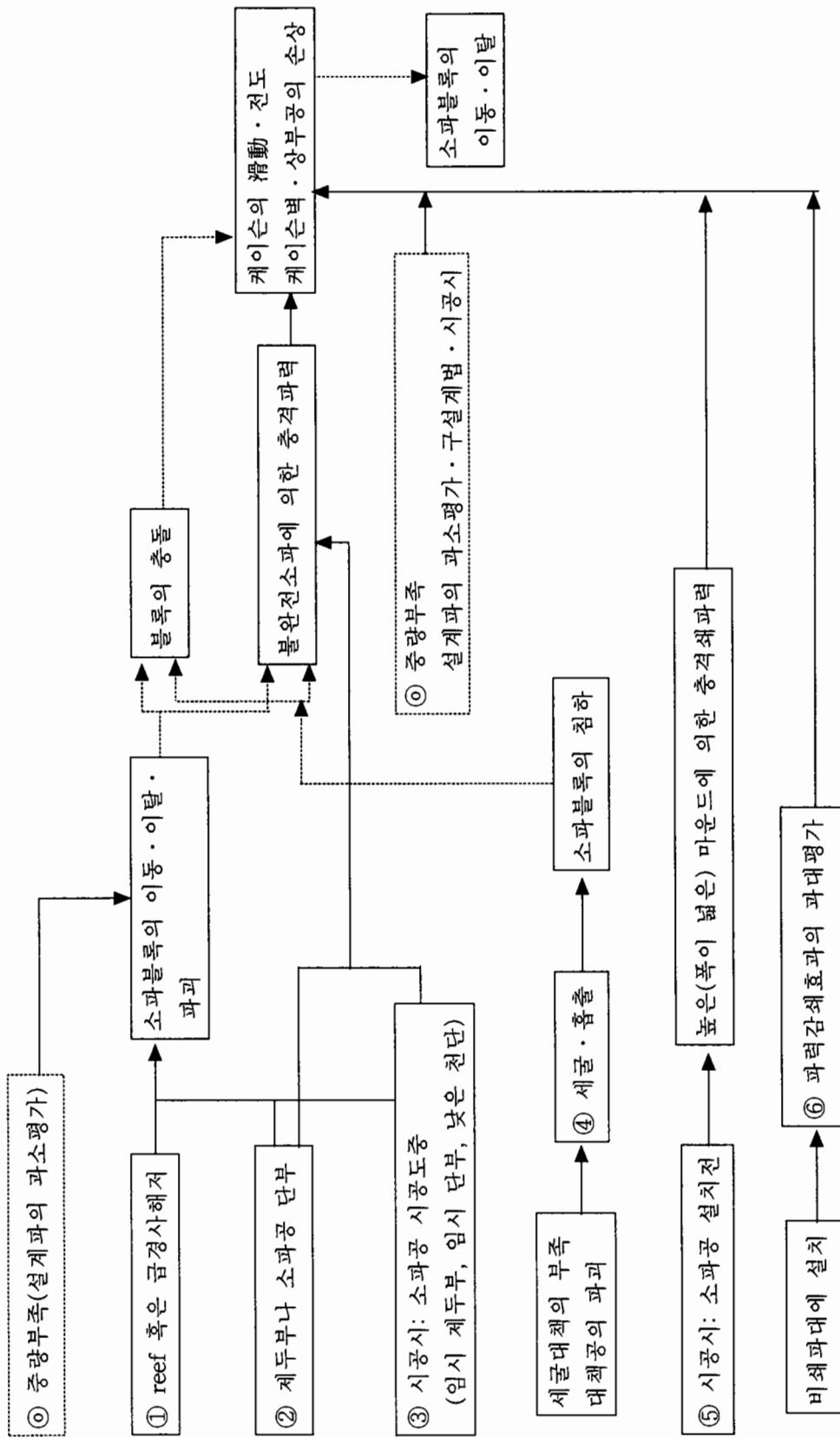
케이슨이 활동한 후 소파블록이 이탈한 피해사례의 경우, 설계파고의 85% 파고에서 피해가 발생한 경우도 있었다. 따라서 소파블록에 의한 파력 감쇄효과, 중복파압의 발생 여부, 제두부로부터의 회절파 영향 등의 평가가 충분히 검토되어야 할 것으로 생각된다.



<그림 3.3.1> 경사식 방파제의 폐해유형



<그림 3.3.3> 호성제의 파쇄유형



<그림 3.3.4> 소파블록파목제의 파쇄유형

제 4 장 경사식 방파제 설계법 비교

제 1 절 방파제의 구조양식 및 특징

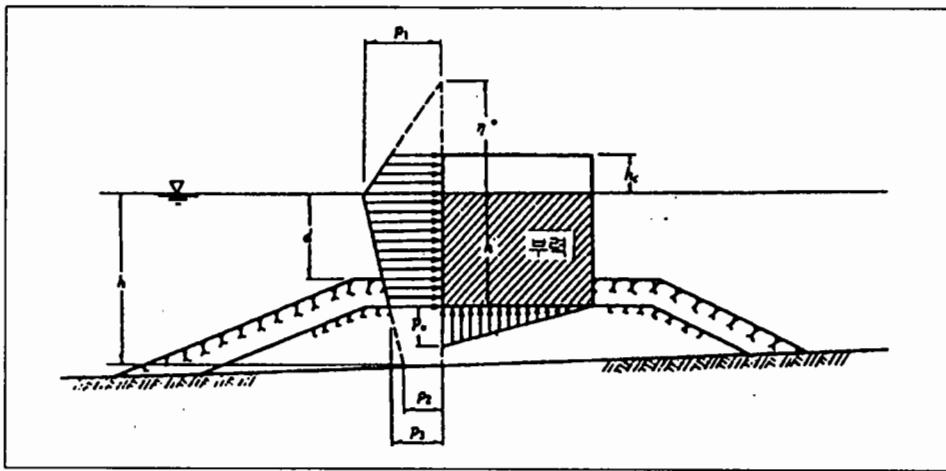
우리나라에서 주로 사용하는 형식으로는 사석 또는 Tetrapod(T.T.P.) 경사제와 케이슨 혼성제를 들 수 있으며, 이 두 가지 형식에 대한 특징과 설계법에 대한 고찰을 통해 혼성제와 경사제 설계시 적용하는 외력 산정법의 차이를 파악하여 경사식 방파제의 설계법을 검토하고자 한다.

1. 케이슨식 혼성제의 특징과 설계외력

케이슨은 철근콘크리트 구조물로서 육상이나 부선거(floating dock)에서 제작하여 해상에 부유시킨 후 이동하고, 주수하여 계획된 위치에 거치시킨 다음 속채움과 상치 콘크리트 타설로 혼성제를 만드는 형식이다. 이 구조양식은 시공이 비교적 정확하고, 케이슨의 속채움 재료를 저렴한 모래나 자갈 등을 사용할 수 있어 공사비를 절감할 수 있는 방법이다. 케이슨식 방파제는 파랑 등의 설계 외력에 대해 케이슨 자체의 중량과 마찰로 저항하는 구조물이며, 파에너지의 반사시켜 차단하므로 전면의 파고가 커지는 단점이 있다. 근래에는 항내정온도의 유지나 파압 저감을 위해 항 내·외측에 반사율을 저감시킬 수 있는 유공 케이슨(perforated caisson)과 같은 소파형태의 구조양식이 쓰이기도 한다.

케이슨 혼성제 설계시 설계외력으로 가장 중요한 것은 파압이며, 주로 사용하는 파압 분포는 Goda(1967)의 파압 분포식으로서 사다리꼴 압력분포를 가정하여 중복파에서 쇄파 까지의 파압을 연속적으로 구할 수 있다. 파력계산에 사용되는 파고 및 파장은 최고파의 파고 및 파장으로 하며, 최고파고(H_{max})는 쇄파의 영향을 받지 않는 경우는 유의파고 ($H_{1/3}$)의 약 1.8배로 하고, 쇄파의 영향을 받는 경우, 즉 쇄파대 내에서는 최고파고를 사용하도록 규정하고 있다. 파압분포는 <그림 4.1.1>과 같이 나타낼 수 있으며, 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta)\lambda_1 H_D \quad (4.1.1)$$



<그림 4.1.1> 직립벽에서의 파압분포(Goda, 1967)

$$p_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) (\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2 \cos^2 \beta) \rho_0 g H_D \quad (4.1.2)$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2\pi h/L)} \quad (4.1.3)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (4.1.4)$$

$$p_u = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \alpha_1 \alpha_3 \lambda_3 \rho_0 g H_D \quad (4.1.5)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \quad (4.1.6)$$

$$\alpha_2 = \min \left[\frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_D}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_D} \right] \quad (4.1.7)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right] \quad (4.1.8)$$

여기서, η^* : 정수면상 파압강도가 영(zero)이 되는 높이

p_1 : 정수면에서의 파압강도

p_2 : 해저면에서의 파압강도

p_3 : 직립벽 저면에서의 파압강도

p_u : 직립벽 저면에서의 양압력강도

ρ_0 : 해수의 밀도

g : 중력가속도

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: 파암 보정계수

h : 직립벽 전면의 수심

h_b : 직립벽 전면에서 외해로 유의파고의 5배 떨어진 지점의 수심

h' : 직립벽 저면의 수심

d : 사석부의 근고공

H_D : 설계계산에 쓰이는 파고

L : 수심 h 에서 설계계산에 쓰이는 파장

$\min(a, b)$: a 또는 b 중 작은 값

β : 구조물 범선과 $\pm 15^\circ$ 범위에서 가장 위험한 방향과의 각도

2. 경사식 방파제의 특징과 설계외력

경사제는 사면을 사석이나 콘크리트 블록으로 피복하여 내습하는 파랑에 견딜 수 있도록 만든 구조물로서 주로 사면에서의 소파작용을 통해 파에너지의 소산시켜 반사 및 전달을 저감시키는 형태이다.

파랑에 의해 사면에 작용하는 힘은 사면에 수직하게 충격력으로 작용하는 파암과 파의 처오름 및 처내림의 유속으로 인한 전단력으로 구분될 수 있다. 경사제의 사면에서는 이러한 충격력과 전단력의 연속적인 작용으로 인해 사석이나 콘크리트 블록의 유실이 발생되며, 이와 같은 사면 보호공의 유실은 특히 정수면 주위에서 가장 잘 일어난다. 경사제는 사석이나 콘크리트 블록이 유실되기 시작하면 유실된 부분에 파암이 집중되므로 피해가 급속히 확산되는 경향이 있으며, 이것은 사면 위에서 발생하는 쇄파의 형태 및 크기와 밀접한 관련이 있다.

쇄파는 파봉 부근의 물입자 속도가 파속보다 크게 되어 물입자가 파면보다 앞으로 튀어나가기 때문에 발생하는 현상이다. 쇄파는 파형경사, 해저경사, 수심, 사면의 형태 및 피복공의 종류 등에 따라 다르게 결정되며, 사면에서 발생하는 쇄파의 형태는 경사제의 안정문제에 있어서 매우 중요하다. 쇄파는 <그림 4.1.2>에서 보는 바와 같이 봉괴파(spilling breaker), 권파(plunging breaker) 및 쇄기파(surging breaker)의 세 가지 형태로 구분될 수 있는데, 이는 Iribarren수(Iribarren Number)라는 무차원 쇄파계수(surf similarity, ξ_m)로 특성화될 수 있다.

$$\xi_m = \tan \alpha / \sqrt{s} = \tan \alpha / \sqrt{2\pi H_s / (g T_m^2)} \quad (4.1.9)$$

여기서, α 는 구조물의 경사각, s 는 파형경사, H_s 는 유의파고, T_m 은 평균파 주기이다.

경사제의 안정에 가장 악영향을 미치는 쇄파의 형태는 권파와 collapsing breaker가 동시에 발생하는 경우이며, <그림 4.1.3>의 유선망에서 알 수 있듯이 제체의 투수성으로 인해 유출은 강한 수직력을 일으키는 처내림의 가장 낮은 높이에 집중하게 되므로 사면에 평행한 전단력은 최소가 되지만, 사면에 수직인 유출력은 최대가 된다. 이 때 하강류의 주기가 다시 입사하는 입사파의 주기와 일치하게 되면 매우 위험한 증폭현상이 발생하는데, 이것을 공진이라 한다.

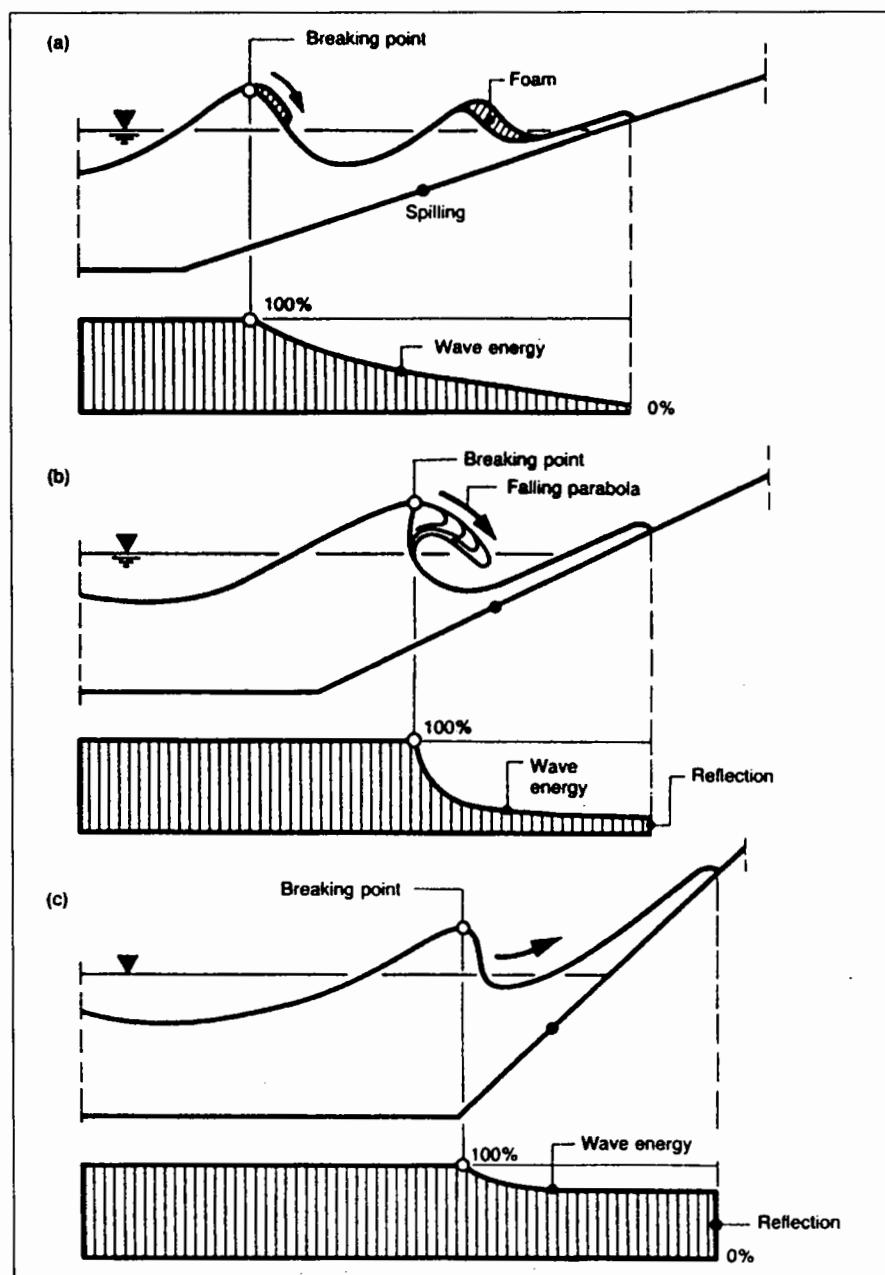
Collapsing breaker와 권파가 함께 존재하는 쇄파는 ξ 값이 2.5 정도에서 발생하며 (Brunn, 1976), 파랑의 내습에 의한 최대압력(maximum pressure)과 제체내로의 물의 흡입에 의한 최소양력(minimum uplift by suction)은 같은 ξ 값에서 발생하므로 공진현상을 피하는 설계가 반드시 필요하다.

현재의 방파제 설계법은 파고, 보호공의 단위중량, 사면의 경사와 안정계수 - SPM과 항만 및 어항 설계기준에서 사용하는 Hudson 공식에서는 K_D 값 - 만으로 경사제 사면에 작용하는 파랑의 영향을 대변하기 때문에 파랑의 주기, 제체의 투수성, 파랑의 불규칙성, 사면에서의 쇄파형태, 충격력 및 전단력 등의 영향을 고려할 수 없다.

류청로(1999)의 연구에 따르면 설계파고보다 낮은 파고에서도 사면에 피해가 발생할 수 있으며, 이러한 현상은 주로 사면에서의 쇄파와 구조물 하단에서의 세굴에 의한 것으로 보고되고 있다. 네덜란드 Delft 수리연구소에서의 실험결과를 바탕으로 한 van der Meer 공식에서는 파랑의 주기, 피해정도, 투수성, 사면에서의 쇄파형태, 파랑의 지속시간 등의 영향을 고려할 수 있으나, 적용 가능한 투수계수의 범위가 매우 한정되어 있고 방파제 전면에서의 수심효과, 충격력 및 전단력의 영향 등이 고려되지 않는 단점이 있다.

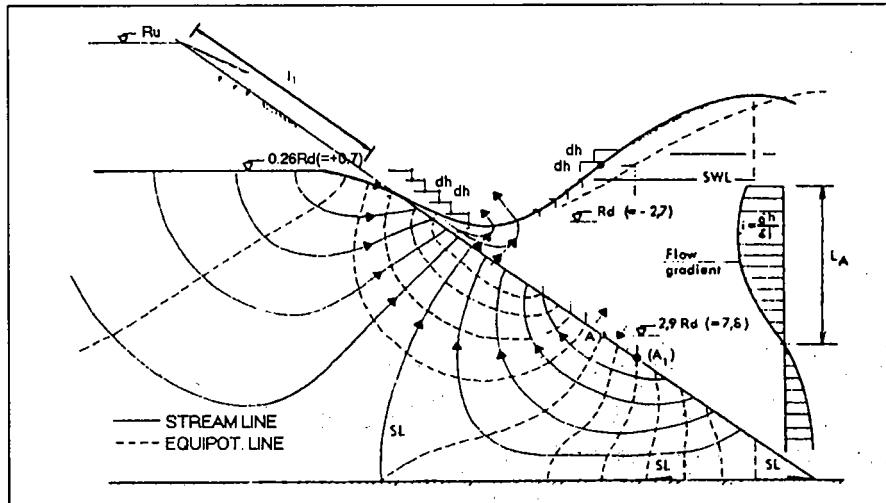
Fuhrbutter(1994)의 연구에 따르면 경사가 1:4인 사면에서 최대파압은 파고로 인한 정수압의 약 5배 정도가 발생하며, Greslou와 Montaz(1962)의 실험에 따르면 최대파압은 경사 1:3.3~1:5보다 경사 1:2에서 2.3배 증가하고, 경사 1:1.3에서는 4.4배 증가하는 것으로 밝혀졌다. 파랑과 구조물의 상호작용에 의한 경사제의 파괴과정을 정확히 밝히기는 매우 어렵지만 여러 연구에서 밝히고 있는 사면에서의 쇄파에 대한 영향은 방파제 설계시 반드시 포함되어야 할 것으로 생각되며, 이런 관점에서 보면 쇄파의 형상 및 크기에 따라 다른 사석 중량을 제시하는 van der Meer 공식이 Hudson 공식보다는 더 우위에 있다고

볼 수 있다.



<그림 4.1.2> 경사면에서의 쇄파의 형태;

(a) 봉괴파, (b) 권파, (c) 쇄기파



<그림 4.1.3> 하강류 시 제체의 유선망과 유출의 형태

제 2 절 각 설계기준에 따른 경사식 방파제 설계법

방파제 설계를 위해서는 수리학적 요소, 구조역학적 요소, 환경적 요소 및 토질역학적 요소의 고려가 필요하다.

환경적 요소로는 파고 및 파고분포, 파의 주기, 파의 입사각, 해안의 기하학적 형태, 수심, 수면상승과 조석, 연안류 등을 들 수 있다. 수리학적 요소는 <그림 4.2.1>에 도시된 것과 같이 쇄파, 파의 처오름 및 처내립, 월파, 전달파, 반사, 굴절, 회절, 천수와 세굴 등의 파랑운동을 포함한다. 구조역학적 요소로는 구조물의 경사도, 사석의 질량 및 밀도, 사석의 형상, 표면조도, 점착력, 다공성 및 투수성, 단면의 치수 및 형태 등이 있다. 이외에도 지반의 침하, 액상화, 원호활동 파괴, 직선활동 파괴 등의 토질역학적 요소들이 방파제의 안정성에 영향을 끼칠 수 있으며, 이런 요소들을 포괄적으로 고려한 연구들이 현재 여러 연구자들에 의해 활발하게 진행중이다.

본 연구에서는 방파제 설계법에 대한 분석 및 연구의 범위를 경사식 방파제로 제한하여 각 설계기준서에서 제시하는 방파제 설계법을 정리하고, 계산예를 통해 설계된 단면과 각 설계법의 장단점을 비교하여 더 나은 설계기법 개발을 위한 기초자료를 구축하고자 한다.

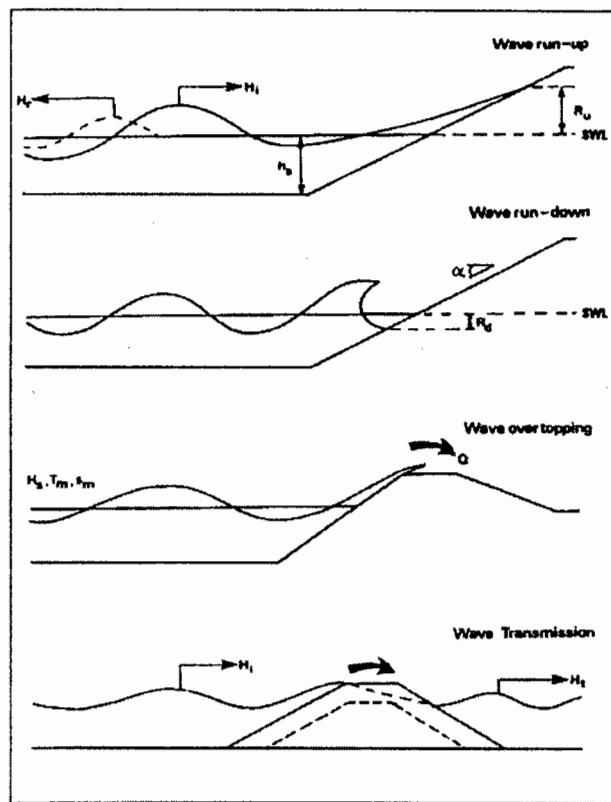
1. SPM(1984)의 방법

가. 쇄파

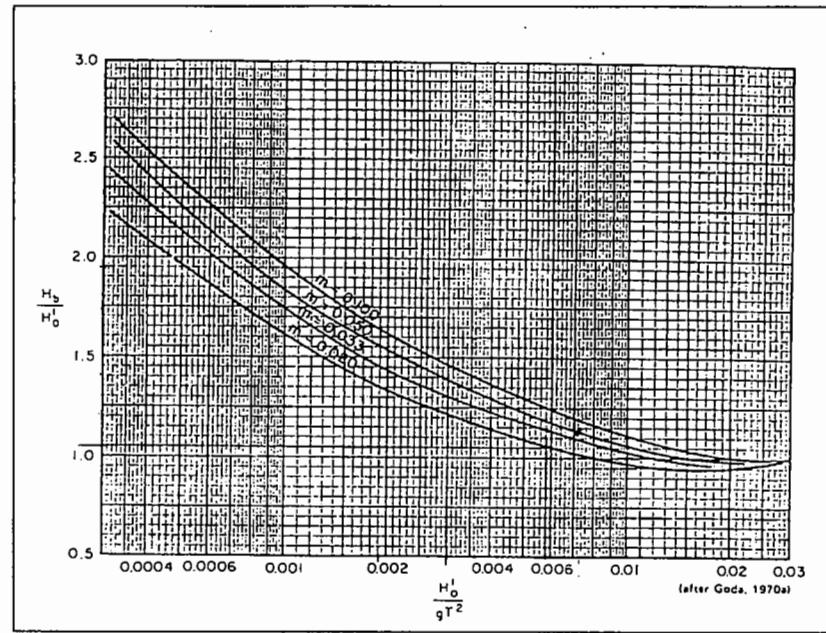
Goda(1970)는 해저경사에 따라 심해파의 파형경사 H_o'/L_o 를 이용하여 상대쇄파고 H_b/H_o' 를 <그림 4.2.2>를 이용하여 구하는 방법을 제시하였고, Weggel(1972)은 쇄파의 파형경사 H_b/L_o 를 이용하여 구조물의 영향을 고려한 상대 쇄파수심 d_b/H_b' 를 <그림 4.2.3>을 이용하여 구하는 방법을 제시하였다. <그림 4.2.4>는 쇄파에 대한 정의를 나타낸 것이다.

Galvin(1968)은 권파에 의해 전파된 거리 X_b 와 쇄파고 H_b 사이의 관계를 제시하였는데, 쇄파거리는 쇄파고 및 해저경사와 관계가 있다고 하였다. 쇄파거리는 식(4.2.1)과 같이 표현되며, m 은 해저경사를 나타낸다.

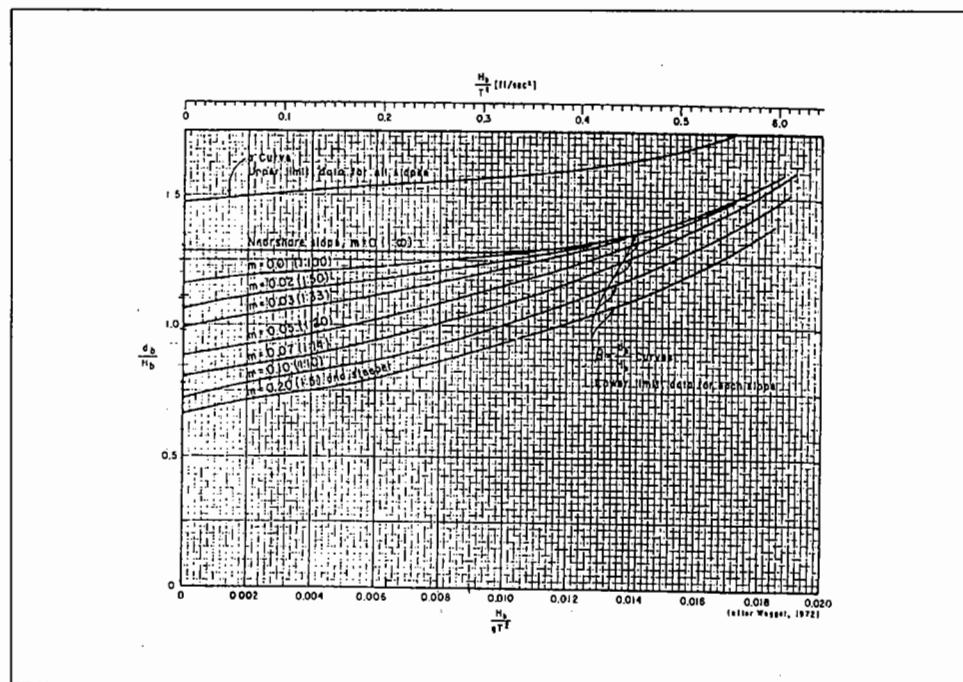
$$X_b = \tau_b H_b = (4.0 - 9.25m) H_b \quad (4.2.1)$$



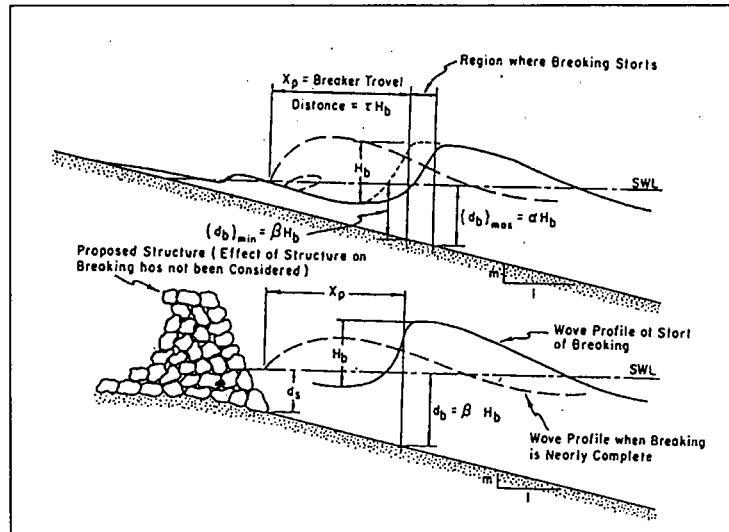
<그림 4.2.1> 방파제에 작용하는 수리학적 현상(BREAKWAT Manual, 1992)



<그림 4.2.2> 심해파 경사에 대한 상대쇄파고



<그림 4.2.3> 쇄파경사에 대한 상대 쇄파수심

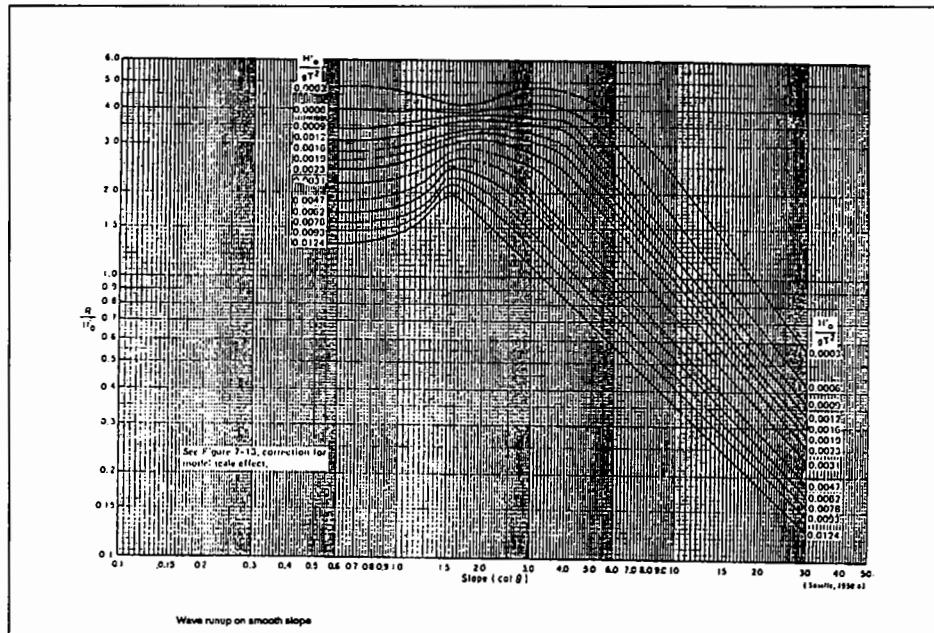


<그림 4.2.4> 쇄파 제원의 정의

이 방법에 의한 쇄파고, 쇄파수심 및 쇄파거리의 계산값을 이용하여 해당 해역에서의 쇄파대 분포를 찾을 수 있으며, 구조물의 피복석 중량 산정에도 이용될 수 있다. 또한 연안이송의 공급원이 주로 쇄파대임을 비추어 볼 때 연안류의 이송방향에 따른 유사이송의 방향과 분포를 추측할 수 있다.

나. 파의 쳐오름

파의 쳐오름 높이는 입사파가 구조물을 만났을 때 파랑이 쳐 올라가서 뒹는 점까지의 수직거리를 말하며, <그림 4.2.1>에 잘 나타나 있다. 월파를 허용하는 방파제의 경우에 파의 쳐오름은 천단부와 항내측 피복층에 심각한 피해를 유발할 수 있으며, 방파제가 가장 위험한 경우는 천단부나 항내측 사면이 월파를 지탱하기 어려운 구조물에서 월파가 심하게 발생하는 태풍이나 폭풍 등이 내습하는 기간이다. 쳐오름은 사면경사가 1:3.5 이상의 완경사면에서 피복석의 안정을 지배하며, 상치콘크리트가 설치된 방파제의 경우에는 항외측의 피복층이 침하 또는 유실될 때 상치콘크리트 수직벽이 파의 반사를 증가시키게 되고, 쳐내림량도 증가시켜 상치콘크리트의 파괴를 급속히 진행시킨다. 주 피복층과 필터 층 표면, 방파제 내부의 쳐내림은 경사 1:1.5~1:3.0까지의 사면상에서 피복석의 안정성을 주로 지배하며, 주 피복석을 지지하는 소단의 안정을 지배한다. 쳐오름과 쳐내림은 파의 주기에 큰 영향을 받으며, 파장이 긴 장파일수록 파의 쳐오름 및 쳐내림 양이 많아지므로 이에 대한 고려가 필요하다(그림 4.2.5 참조).



<그림 4.2.5> 매끄럽고 불투수성인 사면에서의 파의 쳐오름

SPM에서는 쳐오름 높이를 소축척의 매끄러운 불투수성 경사면에 대한 모형실험의 결과에 축척계수와 조도조정계수를 적용하여 다음 식으로 계산한다.

$$R = H_o' \times (R / H_o') \times r \times k \quad (4.2.2)$$

여기서, R : 쳐오름높이

H_o' : 환산심해파고

R / H_o' : 상대谗오름높이

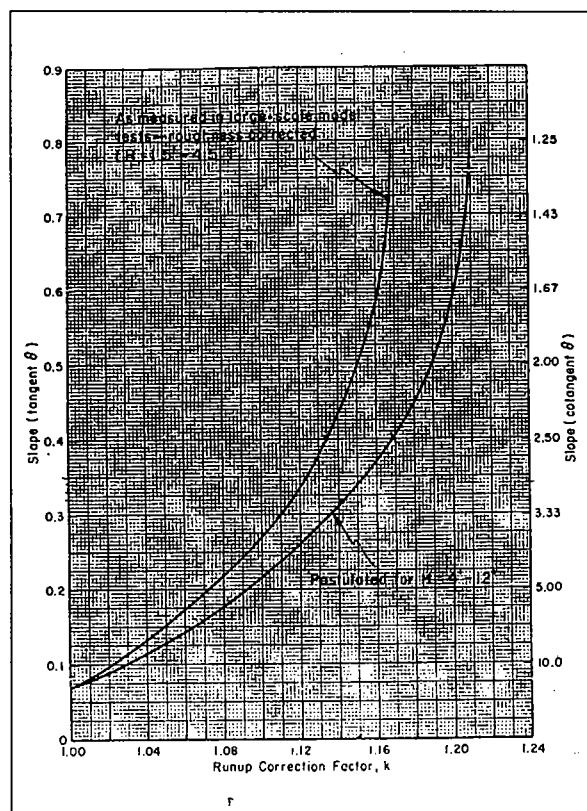
r : 조도조정계수

k : 축척조정계수(인공 콘크리트 피복석의 경우: 1.03)

식(4.2.2)의 조도조정계수는 <표 4.2.1>에 주어져 있고, 축척조정계수는 <그림 4.2.6>에 도시되어 있다.

<표 4.2.1> 조도조정계수

사면의 특성	거치방법	조도조정계수
매끄럽고 불투수성의 사면(smooth, impermeable)	-	1.00
콘크리트 블록(concrete block)	정적(fitted)	0.90
바살 블록(basalt block)	정적(fitted)	0.85~0.90
고비블록(gobi block)	정적(fitted)	0.85~0.90
유리(grass)	-	0.85~0.90
1층의 쇄석, 불투수성(one layer of quarry stone)	-	0.80
쇄석(quarry stone)	정적(fitted)	0.75~0.80
둥근 쇄석(rounded quarry stone)	난적(random)	0.60~0.65
3층의 쇄석, 불투수성(three layer of quarry stone)	난적(random)	0.60~0.65
쇄석(quarry stone)	난적(random)	0.50~0.55
50%의 공극율을 가진 콘크리트 보호재	난적(random)	0.45~0.50



<그림 4.2.6> 축척조정계수

다. 월파

월파는 내습파의 처오름 높이가 제체의 마루높이 보다 높을 때 발생하는 현상으로 방파제나 호안의 안정에 매우 중요한 요소이다. 제체의 마루높이가 낮은 방파제에서는 월파로 인해 제체 천단과 배면 상단부의 피복석이 유실되는 피해가 발생하며, 호안에서는 배후지 및 피복석에 심각한 피해를 일으키고 배후지의 이용 및 배수에 큰 지장을 일으킨다. 월파에 관련된 제원은 <그림 4.2.7>에 나타나 있다.

SPM에서는 Saville(1955)의 연구를 바탕으로 하여 규칙파에 대해 월파량을 유도한 Weggel(1976)의 공식을 제시하고 있다.

$$q = \sqrt{gq_o^*(H_o')^3} \exp\left\{-\frac{0.217}{\alpha} \left[\tanh^{-1}\left(\frac{d_c - d_s}{R}\right) \right]\right\} \quad \text{for } R > d_c - d_s \quad (4.2.3)$$

여기서, q_o^* , α : 입사파 특성과 구조적 형상에 의해 영향을 받는 경험적 무차원 계수

g : 중력 가속도

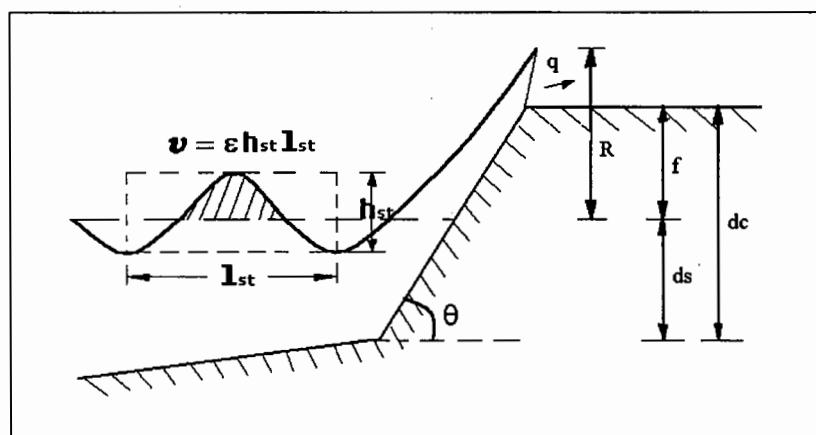
H_o' : 환산심해파고(unrefracted deep water wave height)

d_c : 구조물 하단(toe)에서 쟁 구조물의 높이

d_s : 구조물 하단에서 쟁 수심

R : 파의 처오름 높이

$\tanh^{-1}(a/b) = [\ln(b + a/b)]/2$ 와 여유고 $f = d_c - d_s$ 를 도입하면 식(4.2.3)은 다음과 같이 쓸 수 있다



<그림 4.2.7> 월파에 관련된 제원의 정의

$$q = \sqrt{gq_o^*(H_o')^3} \exp\left\{-\frac{0.1085}{\alpha} \left[\ln\left(\frac{R-f}{R+f}\right) \right]\right\} \quad \text{for } R > f \quad (4.2.4)$$

로그와 지수함수의 관계를 이용하면 식(4.2.4)는 식(4.2.5)와 같이 정리할 수 있다.

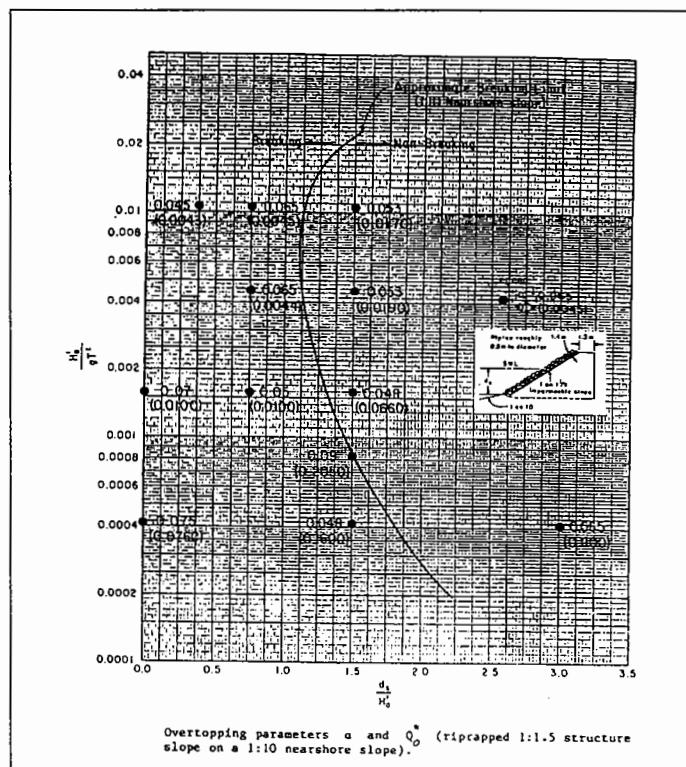
$$q = \sqrt{gq_o^*(H_o')^3} \left(\frac{R-f}{R+f} \right)^{\beta} \quad \text{for } R > f \quad (4.2.5)$$

여기서, $\beta = 0.1085/\alpha$ 이다.

주어진 구조물의 경사 θ 에 대해 α 의 변동성은 작으며, 매끄러운 사면에 대해 추정된 평균치의 사용이 Weggel에 의해 제안되었다.

$$\alpha = 0.06 - 0.0143 \ln(\sin \theta) \quad (4.2.6)$$

이 방법은 직립벽, 사석방파제, 계단형 및 곡선형 벽의 월파량을 계산할 수 있지만 q_o^* 의 값은 실험 결과인 <그림 4.2.8>에서 구해야만 하고, 이런 실험치들은 매우 제한적이며 보간법을 사용하는 것도 부적절하므로 설계시 적용이 어렵다.



<그림 4.2.8> 월파계수 α 와 q_o^*

라. 파의 전달

방파제에서의 파의 전달은 낮은 마루높이의 구조물(low crested structure)에서 파가 월파 되는 경우에 발생하고, 투수성 구조물에 장주기파가 입사하면 구조물 속으로 파에너지 를 전달하여 항내로 파가 전파하게 된다. 이러한 파의 전달은 구조물의 기하학적 형상과 천단 여유고, 천단 폭 및 수심과 주로 관계가 있다.

전달계수 C_t 는 입사파고 H_i 와 전달파고 H_t 의 비 또는 입사파 에너지 E_i 와 전달파 에너지 E_t 의 비로 정의된다.

$$C_t = H_t / H_i = \sqrt{E_t / E_i} \quad (4.2.7)$$

Seelig(1980)가 제안한 월파에 의한 파고의 전달율은 다음과 같다.

$$C_t = C(1 - F/R) \quad (4.2.8)$$

여기서, F : 여유고

R : 쳐오름 높이

식(4.2.8)에서 계수 C 는 방파제의 폭(B)과 방파제의 높이(h)에 관련된 값이며, 다음 식 으로 구한다.

$$C = 0.51 - 0.11(B/h) \quad \text{for } 0 < B/h < 3/2 \quad (4.2.9)$$

마. 사석의 중량

Iribarren(1938)의 연구를 기초로 폭 넓은 소축척 모형 실험(small scale model test)과 대축척 모형 실험(large scale model test)을 통하여 Hudson(1953, 1959, 1961)은 아래와 같은 사석안정공식을 발표했다.

$$W = \frac{w_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (4.2.10)$$

여기서, w_r : 피복재의 단위중량

H : 설계파고

S_r : 피복재의 비중

θ : 사면의 경사각

K_D : 안정계수

Hudson공식은 사면의 경사가 1:1.5에서 1:5까지의 구조물에 적용이 가능하며, 계수 K_D 는 보호사석의 형상과 끝의 예리함, 거치에 의해 얻어지는 엇물림 효과 등 여러 요소들에 따라 변하고, 제두부와 제간부, 쇄파 여부 및 보호재의 종류에 따라 각각 다르게 적용된다.

안정계수 K_D 는 5%의 보호재가 치환될 수도 있는 무손상 상태에 일치하는 설계의 제안치이며, 더 높은 손상에 대한 값들은 무손상 상태에 대한 손상 상태의 파고의 비로 정의된다. K_D 의 적용을 위한 쇄파의 정의는 권파와 쇄기파의 차이를 말하며, 식(4.2.10)에는 $H_{5\%}$ 에서 H_s 까지 쓰는 것이 제안되었으나, SPM에서는 $H_{1/10}$ 이 항만 구조물 설계에 있어 가장 선호되는 값이라고 밝히고 있다.

Hudson공식은 실험 결과가 규칙파에 의한 것이며, Oeullet(1972)과 Rogan(1969)은 불규칙 파군의 유의파고가 규칙파의 파고와 같으면 사석경사제에 작용하는 불규칙파의 작용을 규칙파로 모델링하는 것이 가능함을 보였다. 이러한 이유로 방파제 설계시 Hudson 공식에 유의파고 $H_s (= H_{1/3})$ 를 쓰는 것이 일반화되어 있다.

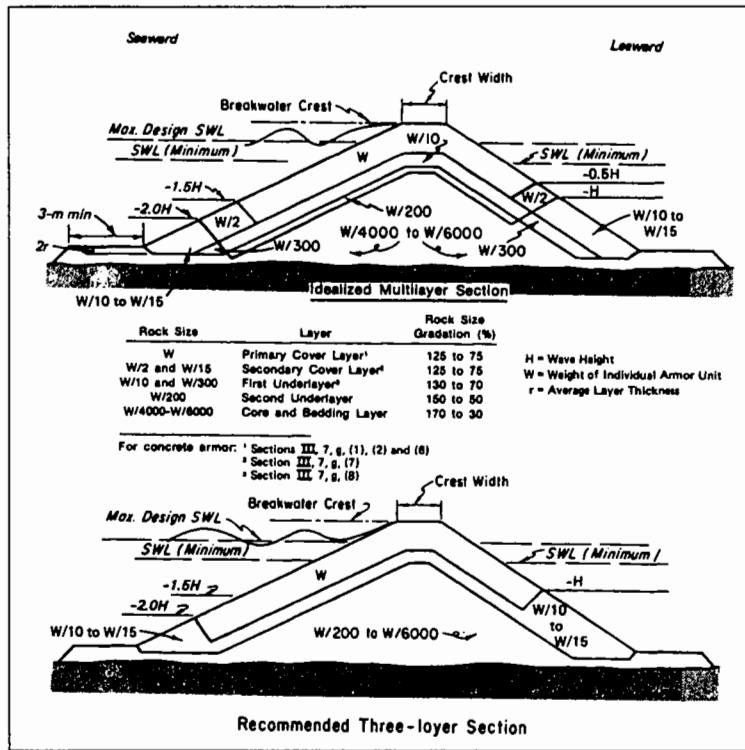
Hudson공식은 형태가 매우 단순하고, 폭 넓은 범위의 보호재에 적용이 되며, 안정계수 K_D 로 파와 구조물 상호간의 물리적 현상을 대변하기 때문에 매우 쉽게 적용할 수 있다(표 4.2.2 참조). 그러나 대부분의 실험에서 수행된 작은 축척 때문에 잠재적인 축척의 영향이 발생하고, 규칙파에만 사용해야 하며, 파 주기나 폭풍기간이 공식에서 언급되지 않았다. 또한 피해정도에 대한 파 개수의 영향이 고려되지 않았으며, 비월파와 투수성 코아 구조물에만 사용이 가능하다.

미육군공병단의 해안공학연구센터(CERC)에서는 방파제 설계를 위해 ACES(Automated Coastal Engineering System, 1992)라는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램에서는 Hudson공식을 근간으로 하여 파랑의 추정(확률 분포를 이용한 빈도 추정), 각 파랑 이론에 따른 매개변수들의 계산, 파랑의 굴절 및 회절현상에 의한 파의 변형, 경사제의 사석 중량 및 하단 설계, 직립벽에 작용하는 파압계산, 파의 쳐오름 높이, 전달파고 및 월파량, 연안 이송량 등을 다룰 수 있다.

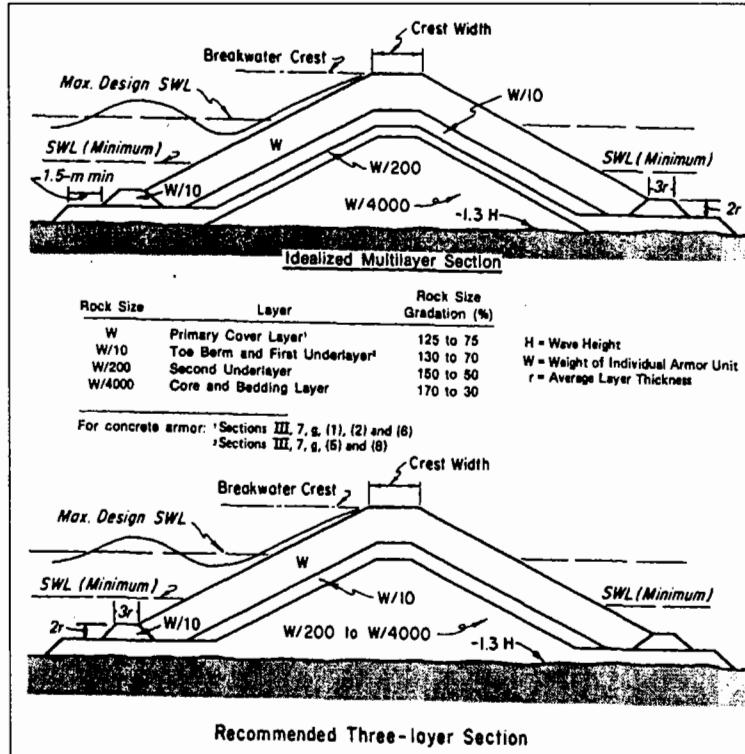
SPM에서는 산정된 피복석 중량으로부터 천단 마루 폭, 필터층, 코어의 중량, 각 층의 두께, 하단부 등의 기하학적 제원을 <그림 4.2.9>와 <그림 4.2.10>과 같이 3개층으로 구성된 이상적인 단면과 추천단면으로 월파의 정도에 따라 제안하고 있다.

<표 4.2.2> 피복석 중량 결정을 위한 안정계수(SPM, 1984)

피복재	총수	거치방법	제간부, K_D		제두부, K_D		사면경사 $\cot \alpha$
			쇄파	비쇄파	쇄파	비쇄파	
사석 매끈하고 둥근 것	2	난적	1.2	2.4	1.1	1.9	1.5~3.0
매끈하고 둥근 것	>3	난적	1.6	3.2	1.4	2.3	1.5~3.0
거칠고 모가난 것	1	난적		2.9		2.3	1.5~3.0
거칠고 모가난 것	2	난적	2.0	4.0	1.9 1.6 1.3	3.2 2.8 2.3	1.5 2.0 3.0
거칠고 모가난 것	>3	난적	2.2	4.5	2.1	4.2	1.5~3.0
거칠고 모가난 것	2	특별	5.8	7.0	5.3	6.4	1.5~3.0
평행육면체 돌	2	특별	7.0~20.0	8.5~24.0	-	-	-
Tetrapod 또는 Quadripod	2	난적	7.0	8.0	5.0 4.5 3.5	6.0 5.5 4.0	1.5 2.0 3.0
Tribar	2	난적	9.0	10.0	8.3 7.8 6.0	9.0 8.5 6.5	1.5 2.0 3.0
Dolos	2	난적	15.8	31.8	8.0 7.0	16.0 14.0	2.0 3.0
Modified cube	2	난적	6.5	7.5	-	5.0	1.5~3.0
Hexapod	2	난적	8.0	9.5	5.0	7.0	1.5~3.0
Toskane	2	난적	11.0	22.0	-	-	1.5~3.0
Tribar	1	정적	12.0	15.0	7.5	9.5	1.5~3.0



<그림 4.2.9> 월파가 거의 없거나 조금 일어날 때의 이상적인 단면 및 추천 단면



<그림 4.2.10> 월파가 양쪽에 어느 정도 있을 때 이상적인 단면 및 추천 단면

2. CIRIA/CUR(1991)의 방법

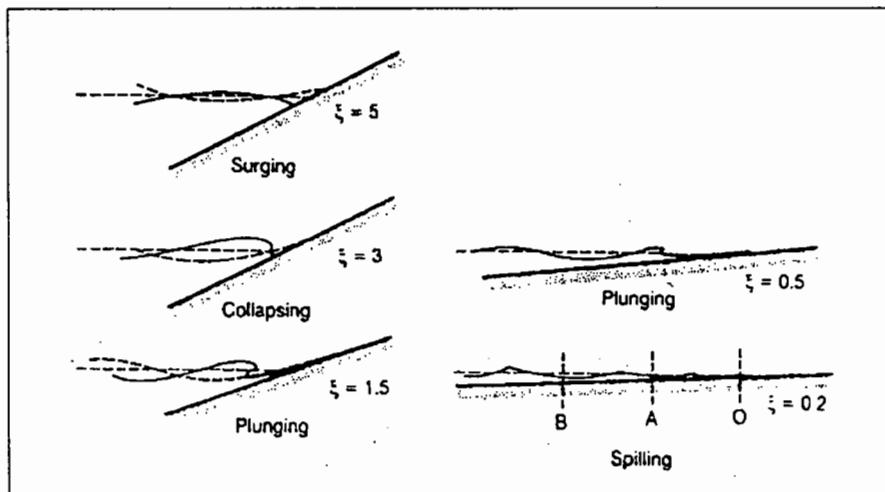
가. 쇄파

파랑의 주기 영향은 종종 심해 파형경사(deepwater wave steepness)로 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$s = 2\pi H/gT^2 \quad (4.2.11)$$

여기서, s 는 파형경사, H 는 파고, T 는 주기이다.

경사면에서의 쇄파발생은 Battjes(1974)가 제안한 쇄파계수(surf similarity or breaker parameter)를 이용하여 판단할 수 있는데, 이 계수는 사면에서 발생하는 파운동의 주기 영향을 나타내며 식(4.1.9)로 구한다. 쇄파계수 ξ 에 따른 쇄파의 형태는 <그림 4.2.11>에 잘 나타나 있고, SPM에서 제시한 방법과는 달리 사면 위에서 발생하는 쇄파의 형태에 더 큰 중점을 두고 있다.

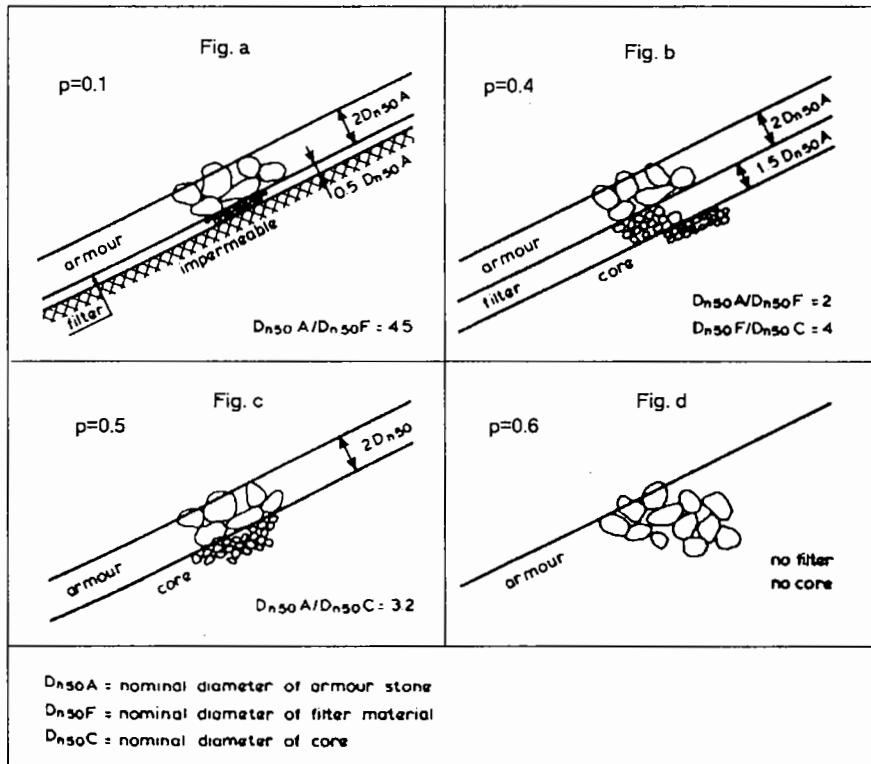


<그림 4.2.11> 사면 위에서 발생하는 쇄파의 형태

각각의 구조물에서 발생하는 쇄파의 형태가 권파인지 쇄기파인지를 구분하기 위한 한계쇄파계수(critical surf similarity)는 다음과 같이 정의된다.

$$\xi_{mc} = [5.77 P^{0.3} \sqrt{\tan \alpha}]^{1/(P+0.75)} \quad (4.2.12)$$

여기서, P 는 van der Meer에 의해 정의된 공칭투수계수이며, <그림 4.2.12>에 표현되어 있고, α 는 구조물의 경사각이다.



<그림 4.2.12> 투수계수(permeability)의 정의

평균 파주기를 이용한 쇄파계수 ξ_m 이 한계쇄파계수 ξ_{mc} 보다 작으면 쇄파의 형태는 권파가 되고, 쇄파계수 ξ_m 이 한계쇄파계수 ξ_{mc} 보다 크면 쇄파의 형태는 물이 오르락 내리락 하는 쇄기파가 된다. Hudson공식의 적용 측면에서 보면 권파는 쇄파가 발생하는 경우를 말하고, 쇄기파는 비쇄파의 경우에 해당한다.

나. 파의 쳐오름

파의 쳐오름 높이(R_u)의 예측은 모형실험에 의한 단순 경험식에 기초하여 산정되며, 매끄러운 사면, 거친 비다공성 사면, 거친 다공성 사면에 따라 나누어서 적용한다. 쳐오름의 확률적 분포는 Rayleigh 분포를 사용하여 파고 $H_2\%$ 에 대한 쳐오름($R_{u2\%}$)과 유의파 H_s 의 쳐오름(R_{us}) 사이의 관계는 다음과 같다.

$$R_{u2\%} = 1.4 R_{us} \quad (4.2.13)$$

대부분의 경우에 사석 경사면은 등가의 매끄러운 경사면이나 비다공성 경사면보다 상당히 많은 파 에너지를 분산시키기 때문에 쳐오름 높이는 낮아진다. 이러한 쳐오름의 감

소는 보호층, 필터, 하부층의 침투에 영향을 받고, 파형경사와 주기에도 영향을 받는다.

불투수성 코어를 가진 사석경사면의 경우는 투수계수 P 는 0.1이 사용되고, 투수성이 매우 좋은 사석경사면의 경우는 투수계수 $P=0.4\sim0.6$ 가 권장되며, 다음 식에 의해 계산된다(van der Meer, 1988).

$$R_{us}/H_s = a\xi_m \quad \text{for } \xi_m < 1.5 \quad (4.2.14)$$

$$R_{us}/H_s = b\xi_m^c \quad \text{for } \xi_m > 1.5 \quad (4.2.15)$$

투수성이 매우 좋은 구조물 ($P > 4$)에 대한 처오름은 최대치로 제한된다.

$$R_{us}/H_s = d \quad (4.2.16)$$

계수 a, b, c, d 는 처오름 높이 $R_{u0.1\%}, R_{u1\%}, R_{u2\%}, R_{u10\%}$, 유의파의 처오름 높이 R_{us} , 평균 처오름 높이 R_{umean} 에 대하여 구해지며 각 계수는 <표 4.2.3>에 나타나 있다.

<표 4.2.3> 적용파고에 따른 계수 값

Run-up Level	a	b	c	d
0.1%	1.12	1.34	0.55	2.58
1%	1.01	1.24	0.48	2.15
2%	0.96	1.17	0.46	1.97
5%	0.86	1.05	0.44	1.68
10%	0.77	0.94	0.42	1.45
유의파	0.72	0.88	0.41	1.35
mean	0.47	0.60	0.34	0.82

다. 월파

Owen(1980)은 불규칙파 실험결과에 기초한 무차원 월파량 Q_m^* 을 이용하여 $m^3/sec \cdot m$ 로 표시되는 단위폭당 평균월파량 \bar{Q} 를 구하는 방법을 제시하였고, 평균월파량 \bar{Q} 가 허용치를 넘지 않게 설계하도록 제안하였다. 예측공식은 여유고와 설계파고의 비인 상대 여유고 R_c/H_s 을 이용하여 무차원 월파량 Q_m^* 을 구하도록 하였으며, 평탄하거나 소단을 가진 매끄러운 경사면에서의 월파량공식은 다음과 같다.

$$R_m^* = R_c / H_s \times \sqrt{s_m / 2\pi} \quad (4.2.17)$$

$$Q_m^* = a \exp(-b R_m^* / r) \quad (4.2.18)$$

$$\bar{Q} = \frac{Q_m^*}{\sqrt{s_m / 2\pi}} \sqrt{g H_s^3} \quad (4.2.19)$$

여기서, R_c 는 여유고, H_s 는 유의파고, r 은 쳐오름 감소계수 또는 조도조정계수, s_m 은 파형경사이며, 사면의 경사에 따른 계수 a, b 는 실험결과에 의해 <표 4.2.4>에 제시되어 있다.

<표 4.2.4> 사면의 경사에 따른 계수 a, b

사면경사	a	b
1 : 1.0	0.00794	20.12
1 : 1.5	0.01020	20.12
1 : 2.0	0.01250	22.06
1 : 3.0	0.01630	31.90
1 : 4.0	0.01920	46.96
1 : 5.0	0.02500	65.20

Owen(1980)은 식(4.2.17)~식(4.2.19)에 <표 4.2.1>의 조도감소계수를 도입하여 거친 비다공성 경사면의 월파량 계산에 사용하도록 권장하였으며, 이것은 사석보호사면의 월파량 추정에 보편적인 결과를 준다. 각 구조물에 따른 허용 월파량은 <그림 4.2.13>에 잘 나타나 있다.

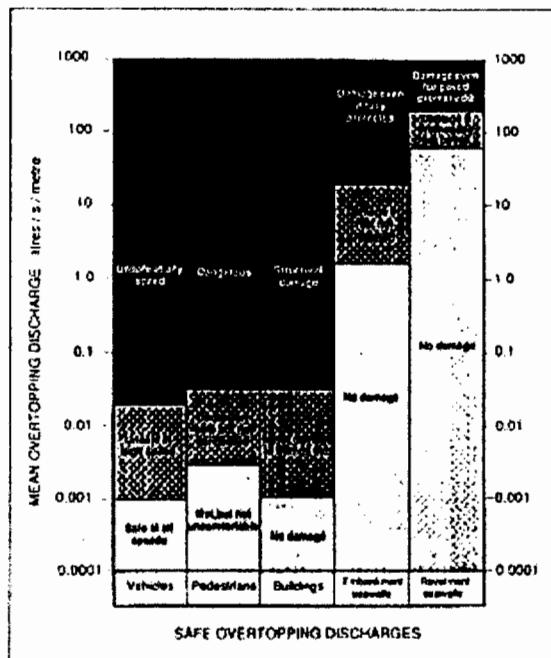
라. 파의 전달

van der Meer는 Seelig(1980)의 연구를 재고찰하여 상대여유고 R_c / H_s 에 관련된 전달계수 C_t 를 도입하여 전달파고를 구하였다. 상대여유고의 범위에 따른 전달계수 C_t 는 다음 식과 같다.

$$-2.00 < R_c / H_s < -1.13 \quad \text{for } C_t = 0.80 \quad (4.2.20)$$

$$-1.13 < R_c / H_s < 1.2 \quad \text{for } C_t = 0.46 - 0.3R_c / H_s \quad (4.2.21)$$

$$1.2 < R_c / H_s < 2.0 \quad \text{for } C_t = 0.10 \quad (4.2.22)$$



<그림 4.2.13> 월파량의 허용한계(CIRIA/CUR)

마. 사석의 중량

Thomson과 Shuttler(1975)의 연구를 바탕으로 Delft 수리연구소에서는 다양한 파랑조건과 코어 및 하부층의 투수성을 고려한 수리모형실험이 van der Meer(1988)에 의해 수행되었다. van der Meer는 기존의 연구결과와 실험결과를 이용하여 권파와 쇄기파에 대해 구분해서 적용하고 투수성을 종합적으로 고려하는 안정공식을 발표하였다.

심해조건에서 사면에 발생하는 쇄파의 형태가 권파일 경우에 안정공식은 다음과 같다.

$$H_s / \Delta D_{n50} = 6.2 P^{0.18} (S_d / \sqrt{N})^{0.2} \xi_m^{-0.5} \quad (4.2.23)$$

여기서, P : 공칭투수계수

S_d : 피해 정도

N : 파의 수

ξ_m : 쇄파계수

쇄기파의 경우는 다음의 안정공식을 사용하여 보호재의 공칭직경을 구한다.

$$H_s / \Delta D_{n50} = 1.0 P^{-0.13} (S_d / \sqrt{N})^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^P \quad (4.2.24)$$

여기서, α 는 구조물의 경사각이다.

권파에서 쇄기파로의 천이시 사용하는 쇄파계수의 한계치는 다음과 같이 구한다.

$$\xi_{mc} = [6.2P^{0.31}\sqrt{\tan \alpha}]^{1/(P+0.5)} \quad (4.2.25)$$

식(4.2.24)와 식(4.2.25)에서 계수 1.0과 6.2는 사석의 형상에 따른 계수이다. 사면의 경사가 $\cot \alpha \geq 4.0$ 이면, 권파에서 쇄기파로의 천이는 발생하지 않으므로 식(4.2.23)을 적용할 수 있으며, 투수계수 P 의 범위는 0.1~0.6이다.

또한 van der Meer는 1:30 경사의 천해에서 폭 넓은 조건에 대한 수리모형실험으로 유의파(H_s)보다는 $H_{2\%}$ 가 설계조건에 더 부합됨을 보였고, 파고분포는 Rayleigh 분포를 이용하여 식(4.2.23)과 식(4.2.24)를 재정리하였다.

권파와 쇄기파에 대한 안정공식은 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H_{2\%}/AD_{n50} = 8.7P^{0.18}(S_d/\sqrt{N})^{0.2}\xi_m^{-0.5} \quad (4.2.26)$$

$$H_{2\%}/AD_{n50} = 1.4P^{-0.13}(S_d/\sqrt{N})^{0.2}\sqrt{\tan \alpha}\xi_m^P \quad (4.2.27)$$

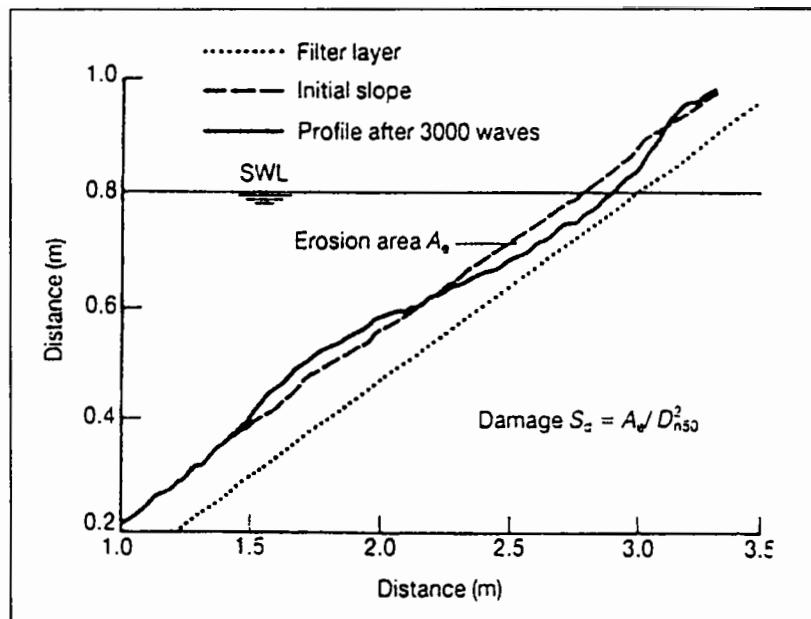
식(4.2.26)과 식(4.2.27)은 수심이 제한된 상태의 효과를 고려할 수 있지만, CIRIA/CUR에서는 설계를 위한 안전한 접근법으로 식(4.2.23)과 식(4.2.24)의 적용을 추천하고 있다. 그러나 식(4.2.23)과 식(4.2.24)의 적용시에는 쇄파로 인해 파고의 증가분은 고려되지 않으며, 실제 파고분포가 $H_{2\%}/H_s=1.4$ 로 표현되는 Rayleigh 분포일 경우에 식(4.2.23)과 식(4.2.24)는 식(4.2.26) 및 식(4.2.27)과 같은 형태로 표현된다. 수심이 제한된 상태에서 $H_{2\%}/H_s$ 는 작아질 것이고, 실제 설계를 위해서는 설계 해역의 정확한 파고분포를 알아야 한다.

무차원 손상레벨 S_d 는 식(4.2.28)과 같이 정의되며, <그림 4.2.14>에서와 같이 정수면 위로는 퇴적이 일어나고 정수면 부근에서는 침식이 발생한다.

$$S_d = A_e/D_{n50}^2 \quad (4.2.28)$$

여기서, A_e 는 수면 주위의 침식된 면적(m^2)이다.

S_d 의 물리적 표현은 침식된 면적을 $1D_{n50}$ 의 길이와 $1D_{n50}$ 의 폭을 가진 면적으로 나눈 숫자이며, 또 다른 표현은 종방향으로 D_{n50} 의 넓은 끝에서 D_{n50} 의 길이를 가진 입면체가 침식된 숫자이다. S_d 의 허용한계는 주로 경사각에 좌우되고 사면에 따른 허용한계는 <표 4.2.5>에 제시되어 있다. 초기파해는 Hudson공식에서 0~5%의 손상을 받는 경우와 같으며, 붕괴는 필터층의 노출로 정의된다.



<그림 4.2.14> 정수면 주위에서의 손상의 정의

<표 4.2.5> 사석방파제의 경사에 따른 손상의 정의

Slope	Initial Damage	Intermediate Damage	Failure
1 : 1.5	2	3 - 5	8
1 : 2.0	2	4 - 6	8
1 : 3.0	2	6 - 9	12
1 : 4.0	3	8 - 12	17
1 : 6.0	3	8 - 12	17

콘크리트 보호층의 피해는 상대피해수(N_{od})로 정의되며, 이것은 공칭직경 $1D_{n50}$ 의 종방향폭에 대한 실제 치환되는 블록 수이다. N_{or} 은 층 내에서 흔들리는 블록의 수이고, N_{omov} 는 파괴 가능한 블록의 수를 나타낸다.

$$N_{omov} = N_{od} + N_{or} \quad (4.2.29)$$

콘크리트 블록에서의 공칭직경 D_n 은 <표 4.2.6>과 같이 정의된다.

<표 4.2.6> 콘크리트 블록에서 공정직경의 정의

Cube	$D_n = \text{입면체의 측변}$
Tetrapod	$D_n = 0.65D$ (D 는 T.T.P.의 높이)
Accropode	$D_n = 0.7D$

식(4.2.23)과 식(4.2.24)는 Hudson공식보다 복잡하지만 파의 주기, 폭풍기간, 투수성과 명백히 정의된 손상의 효과를 포함하며, 사면에서의 공진현상을 쇄파계수를 이용하여 피할 수 있는 이점을 가지고 있다.

van der Meer(1988)는 사석보호공의 안정성에 관해 발견된 지배 매개변수들에 기초하여 콘크리트 보호재에 대한 실험을 수행하였다. 그러나 각 보호재에 대해서 한가지 단면에 대해서만 수행하였기 때문에 경사각과 쇄파계수는 안정공식에는 언급되지 않았고, 투수계수 P 는 0.4를 사용하였다. 일반적으로 입방체(cubes)와 T.T.P.는 1:1.5의 경사로 시공되며, Accropode는 1:1.33의 경사로 건설된다.

콘크리트 블록의 안정성에 대한 공식은 피해의 정도 N_{od} , 파의 수 N , 파의 경사 s_m 의 매개변수로 표현되며 다음과 같다.

$$H_s / \Delta D_n = (6.7 N_{od}^{0.4} / N^{0.3} + 1.0) s_m^{-0.1} \quad \text{for cube} \quad (4.2.30)$$

$$H_s / \Delta D_n = (3.75 N_{od}^{0.5} / N^{0.25} + 0.85) s_m^{-0.2} \quad \text{for T. T. P.} \quad (4.2.31)$$

피해가 없는 경우, 즉 치환된 갯수 N_{od} 가 없는 경우는 다음의 공식을 사용한다.

$$H_s / \Delta D_n = 1.0 s_m^{-0.1} \quad \text{for cube} \quad (4.2.32)$$

$$H_s / \Delta D_n = 0.85 s_m^{-0.2} \quad \text{for T. T. P.} \quad (4.2.33)$$

Accropode에서는 공극이 매우 커서 내습파의 에너지를 많이 분산시키므로 파의 갯수와 파의 주기는 안정성에 크게 영향을 미치지 못하고, 1개충만을 거치하므로 손상이 없을 때와 파괴가 일어날 때의 기준은 거의 비슷하여 안정성은 다음 두 개의 단순한 공식으로 표현된다.

$$H_s / \Delta D_n = 3.7 \quad (\text{초기손상 } N_{od} = 0) \quad (4.2.34)$$

$$H_s / \Delta D_n = 4.1 \quad (\text{파괴 } N_{od} > 0.5) \quad (4.2.35)$$

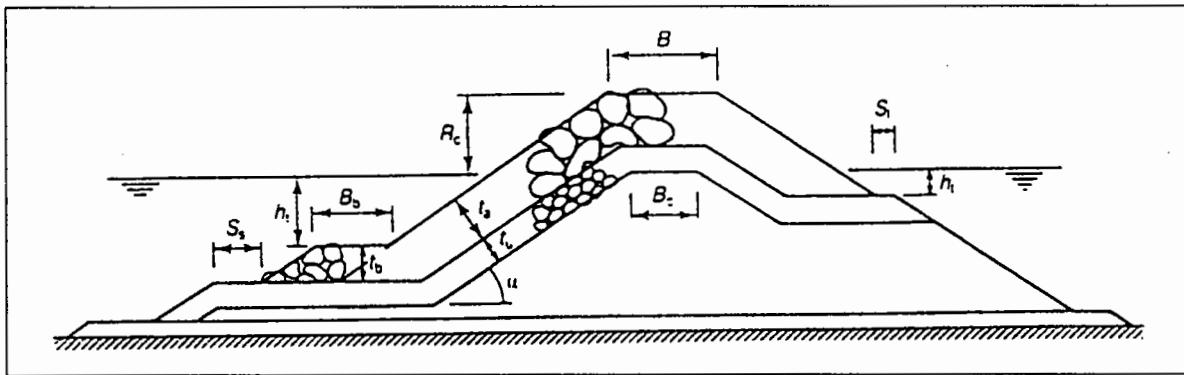
각 보호재에 대한 손상의 정의는 <표 4.2.7>에 나타나 있다.

<표 4.2.7> 콘크리트 보호재에 대한 손상의 정의

보호재의 종류	손상의 시작	파괴
Cube	$N_{od} = 0$	$N_{od} = 2.0$
Tetrapod	$N_{od} = 0$	$N_{od} = 1.5$
Accropode	$N_{od} = 0$	$N_{od} > 0.5$

Delft 수리연구소에서는 van der Meer의 연구를 근간으로 방파제 설계 프로그램인 BREAKWAT(1992)을 개발하였으며, 이 프로그램은 파랑의 처오름, 사석중량, 주어진 입사파 조건에서 사면의 피해정도 및 피해형상, 소단의 안정성, 파의 전달, 암초 방파제, 정적 안정 저천단 방파제(statically stable low-crest breakwater), 수중 방파제(잠제) 및 동적 안정 소단 방파제(dynamically stable berm breakwater)의 안정성 및 입사파 조건에서 사면의 변화형상 등을 해석할 수 있다.

CIRIA/CUR에서는 구조물의 기하학적 제원을 결정하기 위해 <그림 4.2.15>와 같은 개념도를 제시하고 있으며, 각각의 제원은 다음과 같은 기준으로 정하고 있다.



<그림 4.2.15> 사석 경사제의 기하학적 제원 개념도

(1) 어깨 폭(shoulder width, S_s & S_l)

외해측(sea-side)의 어깨 폭 S_s 는 일반적으로 2m보다 작아서는 안되며, 배면(lee-side)의 어깨 폭 S_l 는 $S_l = 0.5 \times t_u$ 로 결정된다.

(2) 소단 폭(berm width, B_b) 및 높이

소단 폭은 적어도 3개 이상의 사석이 놓여져야 하며, $B_b \geq 3.3 D_{50}$ 가 되도록 하여야 한다. 또한 소단은 큰 파암이 발생하지 않는 정수면에서 1~1.5 H_s 보다 아래쪽에 위치하여야 한다. 배면 소단의 높이는 제체 내부의 흐름에 의한 영향 및 월파량과 밀접한 관계가 있다.

(3) 천단 폭(crest width, B)

천단 폭은 최소 3개 이상의 사석이 놓여져야 하며, 실제 크기는 코어의 천단 폭 B_c 와 밀접한 관련이 있다.

(4) 층 두께(layer thickness, t_a & t_u) 및 하부층 사석의 직경

층 두께는 산정된 피복석 중량 및 공칭직경으로부터 결정되며, 2층의 사석으로 설계하도록 규정되어 있다. 또한 하부층 사석의 직경은 필터 룰(filter rule)을 이용하여 내부사석이 이탈되지 않도록 다음과 같이 규정하고 있다.

$$D_{15}(\text{armour}) / D_{85}(\text{filter}) < 4 \sim 5 : \text{Filter layer}$$

$$D_{50}(\text{filter}) / D_{50}(\text{core}) < 5 : \text{Core}$$

(5) 경사각(slope angle)

사면의 경사는 수리학적 및 토질역학적 안정성을 고려하여 결정하여야 하며, 수중에 투하되는 사석의 자연 암석각을 고려할 때 최대 1:1.2까지 가능하지만 보통 1:1.5보다 급하게 하지는 않는다. 배면의 경사는 가능한 최대로 급하게 하지만 1:1.5를 넘지 않는 것이 좋다.

3. 항만 및 어항 설계기준(1999)의 방법

가. 쇄파

항만 및 어항 설계 기준에서는 수심이 환산 심해파고의 약 3배 이하의 지점에서는 쇄파에 의한 파고변화를 고려하여야 한다고 규정하고 있으며, 쇄파대 내에서의 파고의 변화는 Goda(1975)의 쇄파이론을 적용하여 산정한다.

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_s H_o' & (h/L_o \geq 0.2) \\ \min[(\beta_0 H_o' + \beta_1), \beta_{\max} H_o', K_s H_o'] & (h/L_o < 0.2) \end{cases} \quad (4.2.36)$$

$$H_{\max} = \begin{cases} 1.8 K_s H_o' & (h/L_o \geq 0.2) \\ \min[(\beta_0 H_o' + \beta_1^* h), \beta_{\max}^* H_o', 1.8 K_s H_o'] & (h/L_o < 0.2) \end{cases} \quad (4.2.37)$$

여기서, $\beta_0 = 0.028(H_o'/L_o)^{-0.38} \exp[20(\tan \theta)^{1.5}]$

$$\beta_1 = 0.52 \exp[4.2(\tan \theta)]$$

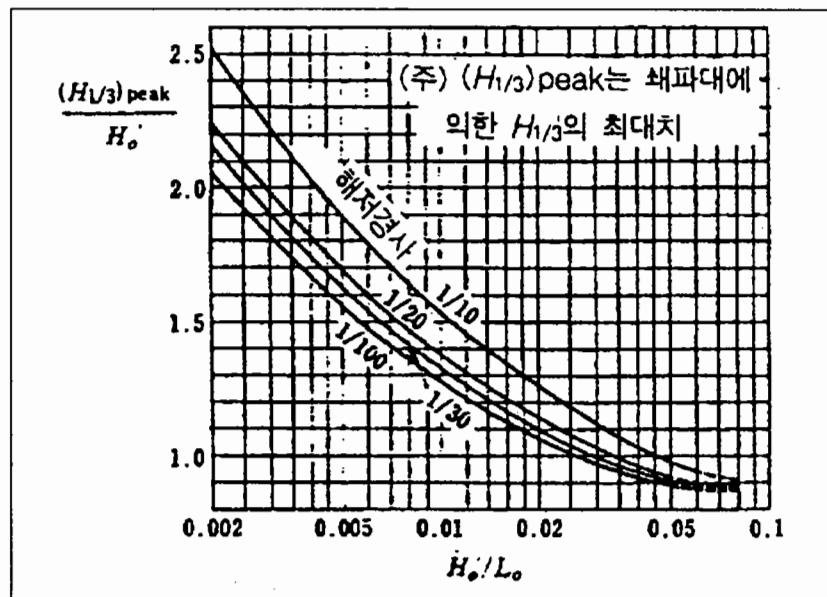
$$\beta_{\max} = \max[0.92, 0.32(H_o'/L_o)^{-0.29} \exp[2.4(\tan \theta)]]$$

$$\beta_0^* = 0.052(H_o'/L_o)^{-0.38} \exp[20(\tan \theta)^{1.5}]$$

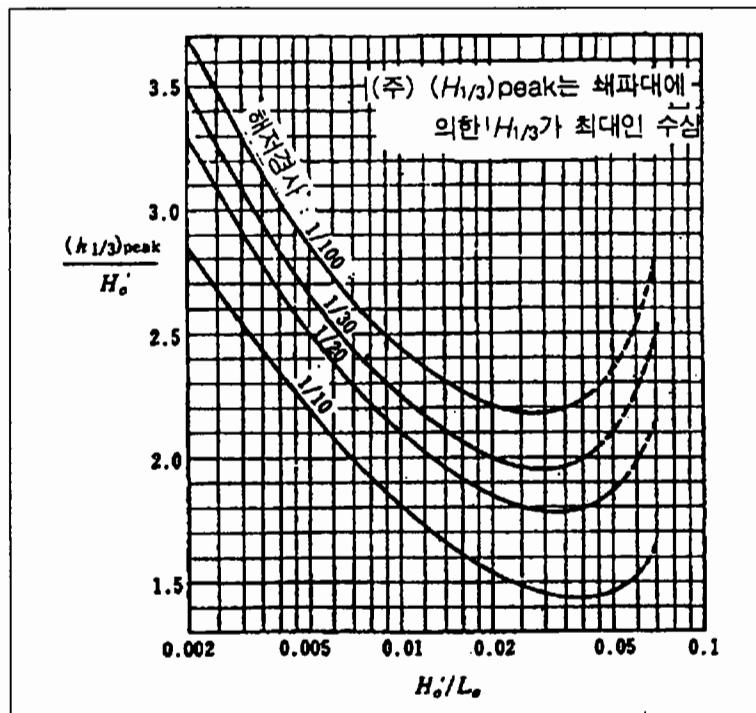
$$\beta_1^* = 0.68 \exp[3.8(\tan \theta)]$$

$$\beta_{\max}^* = \max[1.65, 0.53(H_o'/L_o)^{-0.29} \exp[2.4(\tan \theta)]]$$

쇄파고와 쇄파수심은 Goda의 연구결과를 이용하여, 쇄파대내에서 유의파고의 최대치 $(H_{1/3})_{\text{peak}}$ 를 쇄파고로 하여 <그림 4.2.16>을 이용해 구할 수 있으며, 쇄파수심은 유의파고가 최대로 되는 수심 $(h_{1/3})_{\text{peak}}$ 를 쇄파수심으로 하여 <그림 4.2.17>에서 구할 수 있다.



<그림 4.2.16> 쇄파대내에서 유의파고의 최대치 산정도



<그림 4.2.17> 유의파고가 최대치로 출현하는 수심의 산정도

나. 파의 쳐오름

파의 쳐오름의 높이는 제체의 형상, 설치위치 및 해저지형에 따라 적절히 산정 하여야 하며, 해안제방 및 호안의 마루높이를 결정하는 중요한 요소가 된다. 항만 및 어항 설계 기준에서는 SPM에서 제시한 쳐오름 높이 산정법에 따라 입사파의 파고, 파형경사, 구조물의 형상 및 사면의 조도 등 여러 가지 요소를 이용하여 산정한다.

d_s/H_o' 가 3보다 작은 경우에는 축척 조정계수와 조도 조정계수를 사용하여 다음 식으로 쳐오름 높이를 계산한다.

$$(R/H_o') = (R/H_o')_{\text{매끈하고 불투과 경사면}} \times r \times k \quad (4.2.38)$$

여기서, R : 쳐오름 높이

H_o' : 환산심해파고

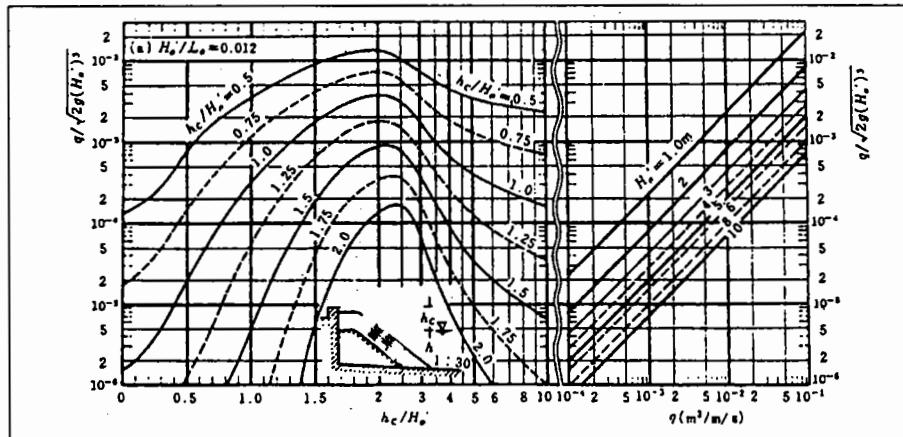
R/H_o' : 상대 쳐오름 량

r : 조도조정계수

k : 축척조정계수(인공 콘크리트 피복석의 경우 : 1.03)

다. 월파

월파량은 수리모형실험 또는 기존의 실험결과로 산정하도록 규정되어 있으며, 파랑의 불규칙성을 고려하도록 되어 있다. 단순한 형상의 직립 및 소파호안에 대해서는 <그림 4.2.18>에 도시된 Goda(1975)의 불규칙파 실험에 의한 도표를 이용하여 월파량을 추정하도록 규정하고 있다.



<그림 4.2.18> 소파호안의 월파유량 산정도(Goda, 1975)

항만 및 어항 설계기준에서는 피해(被災)한계의 월파량, 호안에서 배후지의 중요도 및 이용상황에 따른 월파량의 기준을 제시하고 있으며, <표 4.2.8>~<표 4.2.10>과 같다.

라. 파의 전달

방파제를 월파한 파랑이나 방파제 자체를 통과한 파랑에 의한 전달파의 파고는 수리모형실험의 결과나 기존의 자료를 참고하여 산정 하도록 규정되어 있으며, 파고의 전달율은 다음 식으로 구한다.

$$K_t = \sqrt{(K_o)^2 + (K_t)^2} = H_t / H_i \quad (4.2.39)$$

여기서, K_o : 월파에 의한 파고 전달율

K_t : 투파에 의한 파고 전달율

H_i : 입사파고

H_t : 전달파고

<표 4.2.8> 피재한계의 월파량

종 별	피 복 공	월파량($m^3/sec \cdot m$)
호 안	배후포장 있음	0.20
	배후포장 없음	0.05
제 방	3면이 콘크리트	0.05
	마루포장 · 뒷채움 미시공	0.02
	마루포장 없음	0.005 이하

<표 4.2.9> 배후지의 중요도를 고려한 허용 월파량

요 건	월파량($m^3/sec \cdot m$)
배후에 민가, 배후시설 밀집으로 월파, 물보라 등의 유입으로 중대한 재해가 예상되는 지역	0.01 정도
기타 중요한 지역	0.02 정도
기타 지역	0.02 ~ 0.06

<표 4.2.10> 배후지 이용상황과 재해한계에서 본 월파량의 기준

이 용 방 법	상태(호안후면)	월파량($m^3/sec \cdot m$)
보 행	위험없음	2×10^{-4}
자 동 차	고속통행 가능	2×10^{-5}
	운전가능	2×10^{-4}
가 옥	위험없음	7×10^{-4}

Seelig(1980)이 제안한 월파에 의한 파고의 전달율은 다음과 같다.

$$K_o = c(1 - F_b/R) \quad (4.2.40)$$

여기서, F_b : 방파제의 정수면상의 높이($h - d$)

c : 경험계수

d : 수심

계수 c 는 방파제의 폭(B)과 방파제의 높이(h)에 관련된 값이며, 식(4.2.41)로 구한다.

$$c = 0.51 - 0.11(B/h), \quad 0 < B/h < 3.2 \quad (4.2.41)$$

파의 처오름량 R 은 Ahren(1975)이 제안한 식(4.2.42)로 구할 수 있다.

$$\frac{R}{H_i} = \frac{a\xi}{1+b} \quad (4.2.42)$$

여기서, 사석 경사제일 때 $a = 0.692$, $b = 0.504$

2층으로 쌓은 Dolos 피복 방파제일 때 $a = 0.988$, $b = 0.703$

그리고 ξ (surf similarity parameter)는 식(4.1.9)로 계산된다.

마. 사석의 중량

파력을 받는 경사면의 표면에 피복하는 사석 또는 인공블록의 안정질량은 적절한 수리모형실험 또는 다음 식으로 산정한다.

$$M = \frac{\rho_r H^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (4.2.43)$$

여기서, M : 사석 또는 블록의 안정에 필요한 최소질량(ton)

ρ_r : 사석 또는 블록의 밀도(ton/m³)

H : 안정계산에 사용하는 파고(m)

S_r : 사석 또는 블록의 해수에 대한 비중

N_s : 피복재의 형상, 경사 또는 피해율 등에 의해 결정되는 계수

안정계수 N_s 는 Hudson 공식과 van der Meer 공식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

(1) Hudson공식

$$N_s^3 = K_D \cot \alpha \quad (4.2.44)$$

여기서, α : 사면이 수평면과 이루는 각(°)

K_D : 주로 피복재의 형상 또는 피해율 등에 의해서 결정되어지는 정수

항만 및 어항 설계기준에서 제시하는 Hudson공식에서의 안정계수 K_D 는 SPM과 비교하면 제두부의 K_D 값은 제시되지 않고, 제간부 중량의 1.5배 이상을 사용하도록 규정하고 있다.

(2) van der Meer^{공식}

$$N_s = \max (N_{spl}, N_{ssr}) \quad (4.2.45)$$

$$N_{spl} = 6.2 C_H P^{0.18} (S^{0.2} / N^{0.1}) I_r^{-0.5} \quad (4.2.46)$$

$$N_{ssr} = C_H P^{-0.13} (S^{0.2} / N^{0.1}) (\cot \alpha)^{0.5} I_r^P \quad (4.2.47)$$

여기서, N_{spl} : 권파에 대한 안정 계수

N_{ssr} : 쇄기파에 대한 안정 계수

I_r : Iribarren수 ($= \tan \alpha / S_{om}^{0.5}$)

S_{om} : 파형구배 ($= H_{1/3} / L_o$)

L_o : 심해파장 ($L_o = g T_{1/3}^2 / 2\pi$, $g = 9.81 \text{ m/sec}^2$)

$T_{1/3}$: 유의파 주기

C_H : 쇄파효과계수 ($= 1.4 / (H_{1/20} / H_{1/3})$), 비쇄파 영역에서는 1.0

$H_{1/3}$: 유의파고

$H_{1/20}$: 1/20 최대파고

α : 사면이 수평면과 이루는 각($^\circ$)

D_{n50} : 피복석의 50% 질량에 상당하는 입경 ($= (M_{50} / \rho_r)^{1/3}$)

M_{50} : 피복석의 질량누적곡선에서 50%에 해당하는 질량

P : 피복층 하부의 투수지수

S : 변형정도 ($S = A / D_{n50}^2$)

A : 침식부의 면적

N : 작용하는 파의 수

4. 경사식 방파제 설계예

방파제 설계예는 T.T.P. 경사제와 사석식 경사제 두가지 경우에 대하여 수행하였다. 설계파고는 평상시와 이상시의 파고를 적용하여 평상시 파고는 사석식 경사제 설계에 이용하였고, 이상시 파고는 T.T.P. 경사제의 설계에 이용하였다. 각각의 설계기준에 동일한 조건을 적용하여 방파제를 설계한 후 그 차이점을 비교하였다.

가. 설계조건

(1) 설계조위

구 분	만조위(H.W.L.)	평균해면(M.S.L.)	간조위(L.W.L.)
조 위	30.0cm	20.0cm	0.0cm
수 심	10m		

(2) 파랑조건

- 이상시

유의파고 (H_s) = 4.71m

유의파 주기(T_s) = 13.0sec

- 평상시

유의파고 (H_s) = 1.50m

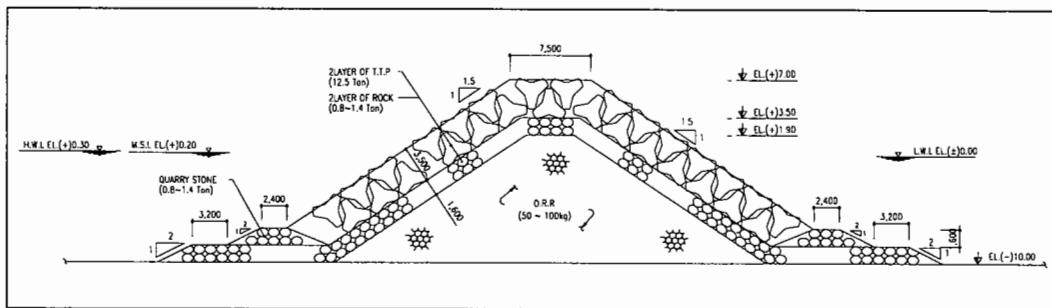
유의파 주기(T_s) = 10.0sec

(3) 재료의 성질

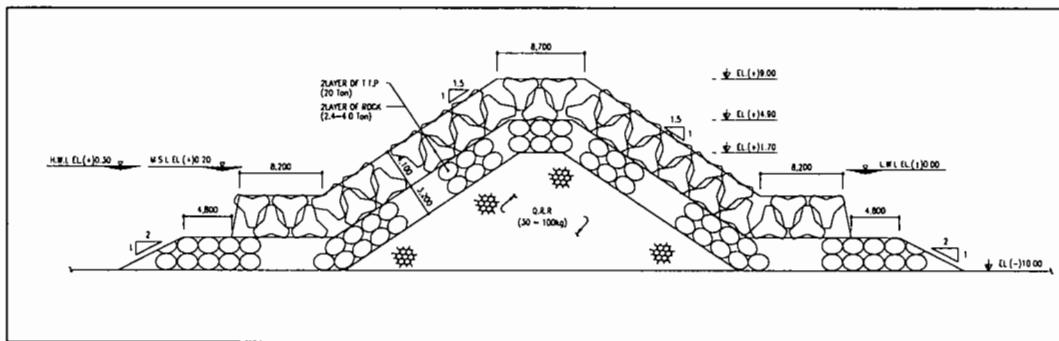
- 해수의 단위중량 : γ_w = 1.03ton/m³
- 무근 콘크리트 : γ_t = 2.30ton/m³, γ_{sub} = 1.30ton/m³
- 사석 : γ_t = 2.60ton/m³, γ_{sub} = 1.60ton/m³
- 매립재 : γ_t = 1.80ton/m³, γ_{sub} = 1.00ton/m³

나. T.T.P. 경사체 표준단면도

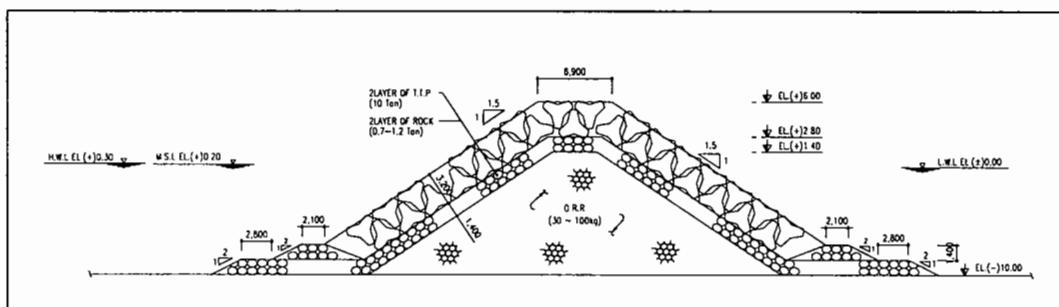
(1) SPM(1984)의 방법



(2) CIRIA/CUR(1991)의 방법

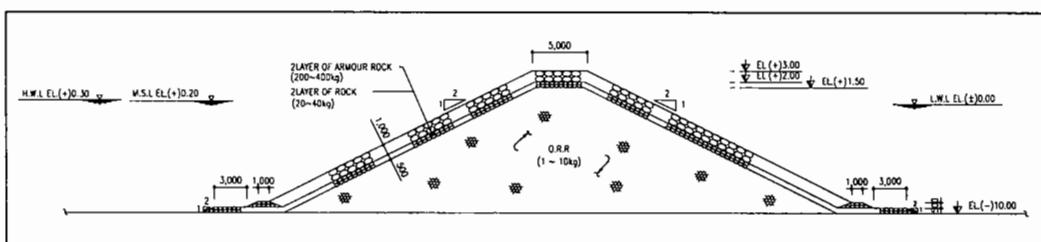


(3) 항만 및 어항 설계기준(1999)의 방법

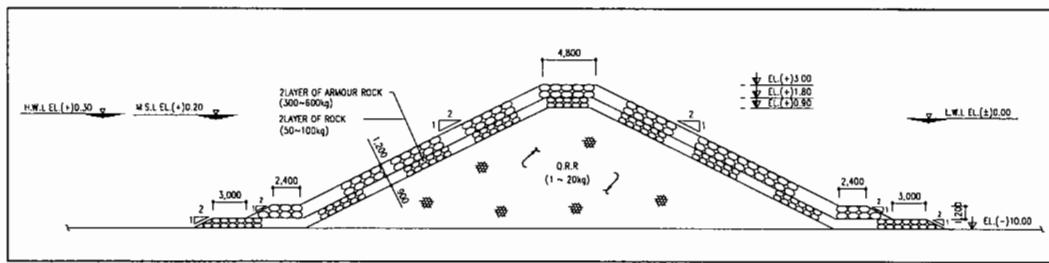


다. 사석식 경사제 표준단면도

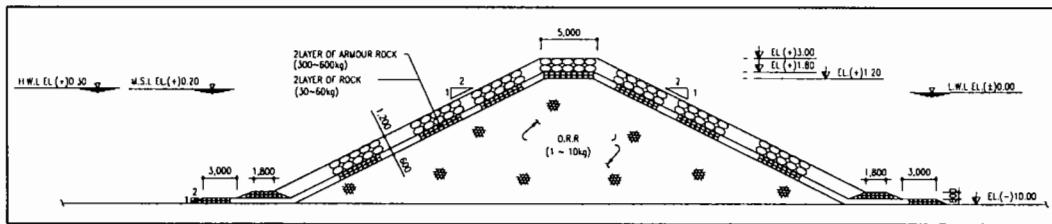
(1) SPM(1984)의 방법



(2) CIRIA/CUR(1991)의 방법



(3) 항만 및 어항 설계기준(1999)의 방법



라. 방파제 설계결과 비교

동일한 해역조건 및 외력조건으로 각각의 설계기준에 따라 수행한 방파제 설계예의 계산결과를 정리하면 <표 4.2.11>과 <표 4.2.12>와 같다. T.T.P. 경사제와 사석 경사제의 설계결과에서 알 수 있듯이 적용한 설계기준서에 따라 서로 다른 형태의 방파제 단면이 얻어짐을 알 수 있다. 따라서 경제적이고 안정한 방파제 단면의 설계를 위해서는 선진 외국의 설계기준을 분석하여 문제점 및 개선점을 파악하고, 이에 대한 기초연구를 수행한 후 우리나라 해역조건 및 해양외력 특성에 적합한 설계기준을 수립할 필요가 있다.

<표 4.2.11> T.T.P. 경사제 계산결과 비교

설계항목 \ 설계기준	SPM (1984)	CIRIA/CUR (1991)	항만 및 어항 설계기준(1999)	비고
피복재 중량	12.5ton급(2층)	20ton급(2층)	10ton급(2층)	
보호 사석층 두께	3.50m	4.10m	3.20m	
필터층 두께	1.60m	3.20m	1.40m	
필터층 사석 질량	0.8~1.4ton	2.4~4.0ton	0.7~1.2ton	
Q.R.R. 질량	50~100kg	30~100kg	30~100kg	
소단폭	2.4m	8.2m	2.1m	
천단부 폭	7.5m	8.7m	6.9m	

<표 4.2.12> 사석 경사제 계산결과 비교

설계항목	설계기준 SPM (1984)	CIRIA/CUR (1991)	항만 및 어항 설계기준(1999)	비고
사석 중량	200~400kg(2층)	300~600kg(2층)	300~600kg(2층)	
보호 피복층 두께	1.00m	1.20m	1.20m	
필터층 두께	0.50m	0.90m	0.6m	
필터층 사석 질량	20~40kg	50~100kg	30~60kg	
Q.R.R. 질량	1~10kg	1~20kg	1~20kg	
소단폭	1.0m	2.4m	1.8m	
천단부 폭	5.0m	4.8m	5.0m	

제 5 장 다방향불규칙파 특성

제 1 절 다방향불규칙파 조파기

1. 다방향불규칙파

항만구조물의 설계에 있어서 가장 중요한 설계외력은 파랑이다. 실제 해상의 파랑은 여러 방향으로부터 파가 충첩되어 발생하며(Cartwright, 1962), 이와 같이 다방향성을 가지는 파를 다방향불규칙파라 한다. 심해에서 발생한 파랑은 천해역으로 전파하면서 각각의 성분파는 굴절 등에 의해 파향이 변화하고 해안선에 거의 직각으로 입사하게 된다. 이것은 비교적 수심이 깊은 심해에서는 다방향불규칙파로서의 특성이 강하고, 수심이 얕은 해역에서는 일방향불규칙파로서의 특성에 가깝다는 것을 의미한다.

실험실내에서 다방향파뿐만 아니라 규칙파의 파향을 임의로 변경하는 실험장치의 조파기법이 Biesel(1954)에 의해 제안되었다. 이 기법은 폭이 좁은 다수의 조파판을 횡방향으로 나열하여 진폭과 주기를 일정하게 하고, 위상을 각 조파판에 대해 일정간격으로 변화시키며 운전하는 방법으로 Serpent형 조파장치로 불린다. 기계·전기적인 기술이 발달함에 따라 Salter(1981)는 Serpent형 조파기로 서로 다른 파향을 가지는 규칙파를 중첩시키는 방법으로 다방향불규칙파를 조파할 수 있음을 보였다. 현재는 폭이 좁은 다수의 조파기를 횡방향으로 일렬로 배치하여 진폭, 주기, 파향, 위상이 서로 다른 경사 규칙파의 조파신호를 중첩한 조파신호를 줌으로서 다방향불규칙파를 조파하는 기법이 일반적으로 사용되고 있다.

방파제의 설계 및 건설에 있어서 구조물의 안정성은 단면적으로만 평가되어 왔으나, 복잡한 수리현상에 대한 항만구조물의 안정성 확보측면에서 입사파랑의 방향성, 불규칙성 및 3차원성의 중요성이 높아지고 있는 실정이다. 파랑의 다방향성이 항만구조물의 설계에 있어서 중요한 요소임에도 불구하고 실질적으로는 다방향불규칙파의 적용이 일반적이지 못하다. 과거 다방향불규칙파의 활용도가 낮은 주된 이유중의 하나는 다방향불규칙파의 측정법 및 해석법이 명확하게 확립되어 있지 않았고, 실제 해상의 다방향성을 정도 높게 재현하기 어려운 것에 기인하는 것으로 생각된다. 그러나 Longuet-Higgins(1957), Barber(1963)에 의해 파랑의 방향분산성을 나타내는 방향스펙트럼의 해석법이 제안된 이후로 많은 연구자에 의해 우수한 방향스펙트럼의 해석법이 제안되었고(Capon, 1967; 磯部·近

藤, 1983; 磯部·近藤·堀川, 1984; 小舟·橋本, 1985; 橋本, 1987; Nwogu, 1989), 실용적으로 문제가 없는 정도까지 그 추정정도는 향상되었다.

다방향불규칙파 조파장치는 세계 주요 수리연구소에 설치되어 있거나 계획되고 있다. 국내에서는 한국해양연구원, 한국건설기술연구원에 설치된 이래 실험방법 및 해석방법이 꾸준히 개선되고 있으나, 방향성을 가지는 불규칙파의 정도를 향상시키기 위해서는 조파판의 운동과 발생파 응답특성의 정확한 해석과 굴절 및 반사를 고려할 수 있는 실험영역의 최적화가 필요하다(平石, 1991).

본 연구에서는 한국건설기술연구원에 설치된 Serpent형 조파장치를 대상으로 다방향 불규칙파의 조파특성에 대해서 검토하고, 목표로 하는 다방향불규칙파를 실험실내에서 조파하는 기법을 확립한 후, 조파된 다방향불규칙파를 이용하여 방향스펙트럼의 측정방법 및 해석결과를 검토하고, 조파수조내의 다방향불규칙파에 대한 시·공간적인 변동특성을 검토한다.

2. 조파장치

가. 조파수조

한국건설기술연구원의 조파수조는 길이 42m, 폭 36m, 높이 1.05m이며, 수조내에 60대의 조파판이 하나의 시스템으로 작동되는 Serpent형 조파기로 구성되어 있다. 조파장치 배후의 교란이나 반사파에 의해 조파기전면의 실험영역이 영향을 받지 않도록 수조내의 각 측벽은 쇄석(반사를 0.1이하)을 1:3의 경사로 설치하였으며, 소파공 전면에 수조내의 반사파를 제어하기 위해 <사진 5.1.1>과 같은 소파장치를 추가로 설치하였다.



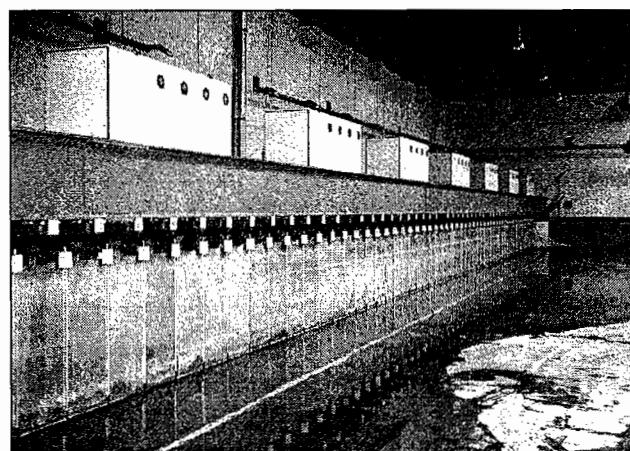
<사진 5.1.1> 소파장치

조파장치는 조파기 제어와 실험계측을 위한 컴퓨터와 Serpent형 조파기 본체로 이루어져 있다. Serpent형 조파장치를 제어하는 컴퓨터는 조정실에 설치되어 있으며, 컴퓨터로부터의 조파신호는 조파판의 변위를 제어하도록 되어 있다. <표 5.1.1>은 조파기의 주요제원을 나타낸 것으로 조파기의 설치높이는 수조바닥으로부터 120cm이고, 최대설계수심은 80cm로 설정되어 있다.

<표 5.1.1> 조파시스템의 주요 제원

항 목	조 파 장 치
조파판수	61대
조파판의 폭	30m (0.5m(W)×1.2m(H)×60대)
모터	AC 서보 (1.5kW/대)
최대발생파고	0.3m (수심 0.8m 일때)
주기	0.3sec ~ 5.0sec
수조크기	42m(L)×36m(W)×1.05m(H)
제어방식	함수발생기에 따라 동기제어 및 컴퓨터제어
구동방식	서보모터 ball screw 시스템

<사진 5.1.2>는 Serpent형 조파기의 외관을 나타낸 것이다. 조파기는 피스톤형으로 조파판의 폭은 1대당 50cm로 반사파를 흡수·제어할 수 있는 시스템으로 구성되어 다방향 불규칙파를 조파할 수 있도록 설계되어있다.



<사진 5.1.2> Serpent형 조파장치

제 2 절 다방향불규칙파 생성원리

1. 조파이론

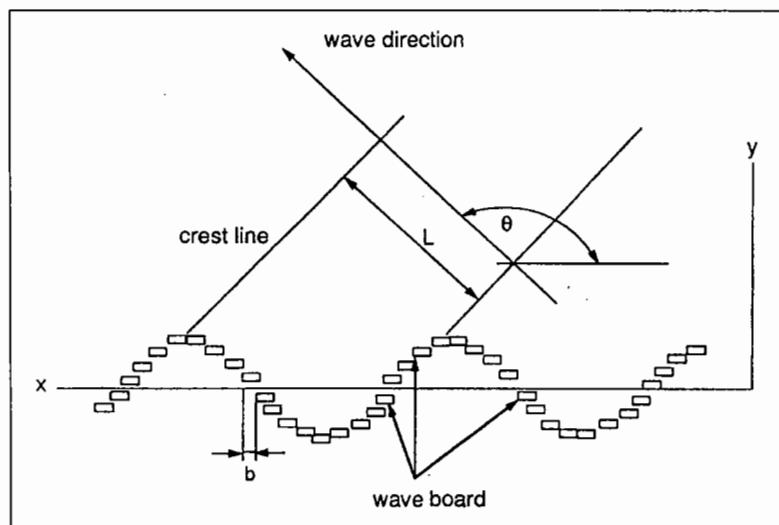
Serpent형 조파장치는 폭이 좁은 다수의 피스톤 혹은 플랩형 조파기를 횡방향으로 일렬로 배치한 것이고, 기본적으로는 각 조파판의 운전위상을 달리하여 파향이 조파판열에 대해서 어느 각도를 가지는 주기, 파고가 일정한 경사파를 조파시키도록 설계된 것으로 <그림 5.2.1>은 Serpent형 조파장치의 개념도를 나타낸 것이다. 조파판열에 평행한 방향과 파의 진행방향이 이루는 각(파향)을 θ , 파장 L 및 각 조파판의 폭을 b 로 하면 필요 한 각 조파판의 운전위상의 차 δ 는 다음과 같다(Biesel, 1954)

$$\delta = 2\pi b \cos \theta / L \quad (5.2.1)$$

따라서 파향 θ 의 경사파를 조파하기 위한 각 조파판의 신호는 다음 식으로 주어진다.

$$\xi(t, l) = \frac{a}{F} \cos \left(\sigma t - \frac{2\pi bl \sin \theta}{L} \right) \quad (5.2.2)$$

여기서, $\xi(t, l)$ 은 시각 t 에서 l 번째 조파판의 변위, σ 는 각주파수, a 는 목표파의 진폭, F 는 2차원수로에서 조파판의 조파효율이다. 조파효율은 2차원수로에서 정수면상의 조파판의 변위진폭 e 에 대한 발생파의 진폭비로 조파방식에 의해 각각 다음 식으로 나타나 어진다.



<그림 5.2.1> Serpent형 조파장치의 개념도

피스톤형 조파기의 경우 :

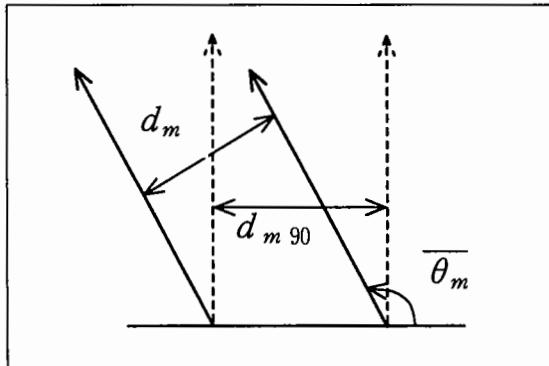
$$F_1 = \frac{a}{e} = \frac{4 \sinh^2(2\pi h/L)}{4\pi h/L + \sinh(4\pi h/L)} \quad (5.2.3)$$

플랩형 조파기의 경우 :

$$F_2 = \frac{a}{e} = \frac{4 \sinh(2\pi h/L)}{2\pi h/L} \times \frac{1 - \cosh(2\pi h/L) + (2\pi h/L)\sinh(2\pi h/L)}{4\pi h/L + \sinh(4\pi h/L)} \quad (5.2.4)$$

<그림 5.2.2>에 나타낸 파향 θ_m 으로 진행하는 성분파를 고려할 때, θ_m 이 90° 보다 크거나 작으면 파향선사이의 간격 d_m 은 90° 일 때와 비교하면 작게 된다. 이러한 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$d_m = d_{m90} \times \sin \theta_m \quad (5.2.5)$$



<그림 5.2.2> 파향의 개념도

여기서, d_{m90} 은 $\theta=90^\circ$ 일 때 파향선의 간격이다. 파향선 사이에 주어지는 파의 에너지가 일정한 것으로 하면 성분파의 파향이 90° 가 아닐 경우에는 파고가 설정값보다 증대된다. 따라서 조파신호의 진폭을 작게 할 필요가 있고, 조파신호의 생성은 식(5.2.2)의 목표진폭 a 에 $\sin \theta_m$ 을 곱한 진폭을 이용한다.

전술한 조파신호에 의해 파고가 공간적으로 일정한 경사파가 조파된다고 생각하는 이론을 snake principle이라 한다(Biesel, 1954). 그러나 조파판의 폭이 유한하고, 조파기의 총연장이 유한한 것으로부터 조파된 경사파의 파고는 공간적으로 일정하지 않고 변동한다. Takayama(1982)는 <그림 5.2.3>과 같이 무한한 벽면에 설치된 1조의 조파판에서 규칙적인 운동에 의해 발생되는 파를 포텐셜이론으로 해석한 후, 해를 중첩하여 경사파의

파고분포를 구하는 경사파의 조파이론을 제안하였다. 이 조파이론에 의해 조파판이 주기적으로 운동할 때의 속도포텐셜은 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned}\Phi = & \left[\frac{\sigma}{k} (\zeta \alpha_p) \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \times \int_{-kb/2}^{kb/2} N_0(\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}) dq \right. \\ & - \sum_{\nu} \frac{\sigma}{\nu} (\zeta \beta_p) \frac{\cos \nu(h+z)}{\sin \nu h} \times \int_{-\nu b/2}^{\nu b/2} \frac{2}{\pi} K_0(\sqrt{(\nu x-q)^2 + (\nu y)^2}) dq \Big] \cos \sigma t \\ & \left. - \frac{\sigma}{k} (\zeta \alpha_p) \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \times \int_{-kb/2}^{kb/2} J_0(\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}) dq \sin \sigma t \right]\end{aligned}\quad (5.2.6)$$

여기서, $J_0(x)$, $N_0(x)$ 및 $K_0(x)$ 는 각각 0차 Bessel 함수, Neumann 함수 및 변형 Bessel 함수이다. x , y 는 평면좌표, z 는 연직좌표, ζ 는 조파기의 변위진폭이다. 그리고 k 와 ν 는 다음 식으로 주어진다.

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (5.2.7)$$

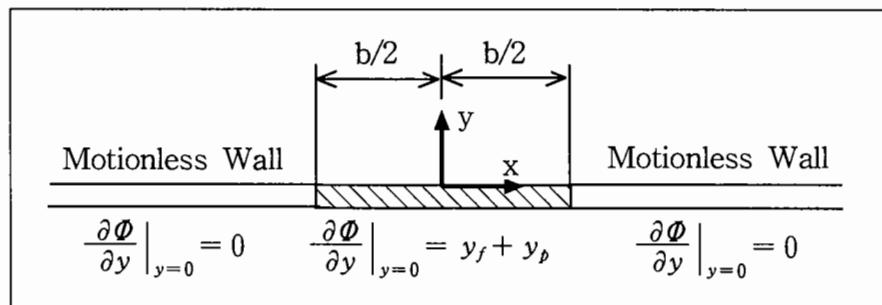
$$\sigma^2 = -g\nu \tan \nu h \quad (5.2.8)$$

α_p 는 피스톤형 조파기 조파효율의 $1/2$ 에 상당하는 함수로 α_p 와 β_p 는 식(5.2.9) 및 식(5.2.10)으로 주어진다.

$$\alpha_p = 2 \sinh^2 kh / (2kh + \sinh 2kh) \quad (5.2.9)$$

$$\beta_p = 2 \sin^2 \nu h / (2\nu h + \sin 2\nu h) \quad (5.2.10)$$

식(5.2.6)의 우변 두번째항은 정상감쇠항이면, 조파판으로부터 1파장 이상 떨어지면 매우 작은 값이므로 무시할 수 있다. 이 항을 무시하고 조파판을 몇 대 나열한 경우를 생각하여 각 조파판의 위상을 식(5.2.1)에 따라 식(5.2.6)을 중첩시키면 경사파의 속도포텐셜이 얻어진다. 정상감쇠항을 무시한 과향 θ 의 경사파의 속도포텐셜 Φ_{0b} 는 식(5.2.11)과 같다.



<그림 5.2.3> 단일조파판의 배치

$$\begin{aligned}\Phi_{ob} = & \sum_{l=-N_-}^{N_+} \left[\frac{\sigma}{k} (\zeta \alpha_p) \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \right. \\ & \times \left\{ \cos(\sigma t - lkbcos\theta) \times \int_{(l-1/2)kb}^{(l+1/2)kb} N_0(\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}) dq \right. \\ & \left. \left. - \sin(\sigma t - lkbcos\theta) \times \int_{(l-1/2)kb}^{(l+1/2)kb} J_0(\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}) dq \right\} \right]\end{aligned}\quad (5.2.11)$$

여기서, N_+ , N_- 은 각각 x 축의 $+$, $-$ 측에서 조파판 수로서 $(N_+ + N_- + 1)$ 가 전체 조파판 수가 된다. 속도포텐셜 Φ_{0b} 로부터 수면파형 η 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi_{0b}}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (5.2.12)$$

여기서, g 는 중력가속도이다. x 와 y 방향의 경사파의 수립자속도 u 와 v 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u = \frac{\partial \Phi_{0b}}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \Phi_{0b}}{\partial y} \quad (5.2.13)$$

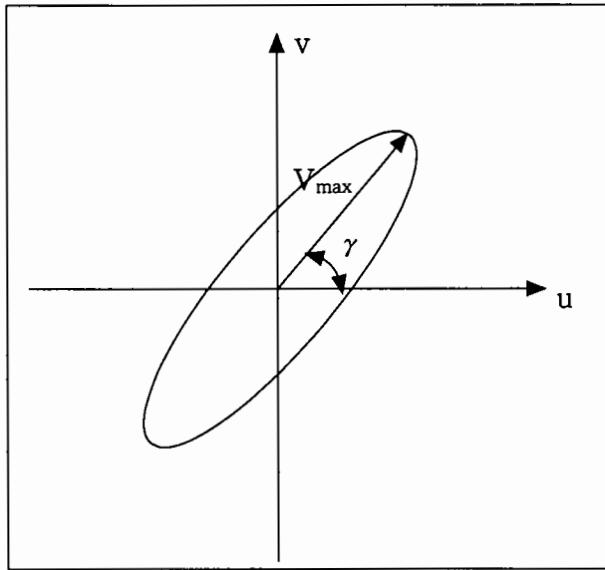
$$\begin{aligned}u = & \sigma(\zeta \alpha_p) \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \\ & \times \left[\cos \sigma t \{ N_0(k\sqrt{(x+b/2)^2 + y^2}) - N_0(k\sqrt{(x-b/2)^2 + y^2}) \} \right. \\ & \left. - \sin \sigma t \{ J_0(k\sqrt{(x+b/2)^2 + y^2}) - J_0(k\sqrt{(x-b/2)^2 + y^2}) \} \right]\end{aligned}\quad (5.2.14)$$

$$\begin{aligned}v = & \sigma(\zeta \alpha_p) \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \\ & \times \left[\sin \sigma t \int_{-kb/2}^{kb/2} \frac{ky}{\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}} J_1(\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}) dq \right. \\ & \left. - \cos \sigma t \int_{-kb/2}^{kb/2} \frac{ky}{\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}} N_1(\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}) dq \right]\end{aligned}\quad (5.2.15)$$

여기서, $J_1(x)$, $N_1(x)$ 는 각각 1차 Bessel 함수와 Neumann 함수를 나타낸다. 각 지점에서 파향 θ 는 <그림 5.2.4>와 같이 수립자의 합성속도 $V=\sqrt{u^2+v^2}$ 가 최대가 되는 방향으로 정의하고 다음 식으로 구한다.

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left\{ \frac{(u)_{\max}}{(v)_{\max}} \right\} \quad (5.2.16)$$

여기서, $(u)_{\max}$ 와 $(v)_{\max}$ 는 V 가 최대가 될 때의 값이다.

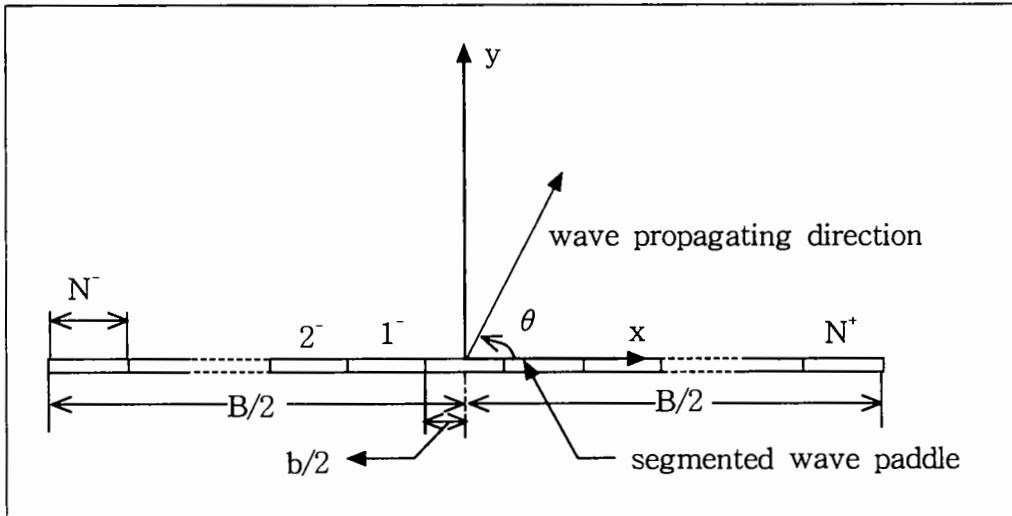


<그림 5.2.4> 파향의 정의

2. 다방향불규칙파 조파신호 작성법

Serpent형 조파장치는 조파판의 폭이 b 인 $(N_+ + N_- + 1)$ 대의 피스톤형의 조파기로 구성된다. 여기서, N_+ 와 N_- 는 각각 원점을 기준 조파판의 중심에 취하는 수평좌표 x 축의 +와 -방향의 조파판 수를 나타낸다(그림 5.2.5 참조). 각각의 조파판이 일정 위상차로 일정 주기 및 진폭으로 운동하는 것으로 설정하면 위상차에 상당하는 파향을 가지는 경사파가 조파된다. 다방향불규칙파는 서로 다른 주파수, 파고 및 파향을 가지는 다수의 경사파를 선형중첩시켜 표현되며, 다수의 서로 다른 경사파를 동시에 조파함으로서 수조 내에서 다방향불규칙파를 재현할 수 있다. 즉, 다방향불규칙파의 조파신호는 경사파의 조파신호를 중첩시켜 구성된다.

경사파의 조파신호를 중첩시켜 다방향불규칙파의 조파신호를 생성하는 기법에는 2가지가 있다. 첫 번째는 단일합성법(Single Summation Method, SS법)으로서 다방향파를 구성하는 주파수가 다른 각 성분파가 각각 다른 파향을 가지는 것으로서 이들의 성분파를 중첩시킴으로서 다방향불규칙파를 조파하는 방법이다. 두 번째는 이중합성법(Double Summation Method, DS법)으로서 동일 주파수에 대해서 파향이 다른 성분파가 다수 존재하는 것을 이들의 성분파를 중첩시킴으로서 다방향불규칙파를 조파하는 기법이다.



<그림 5.2.5> 좌표계 정의

가. 단일합성법(SS법)

SS법은 다른 주파수를 가지는 성분파는 각각 어느 일정한 방향으로 진행하는 것으로 한다. 따라서 각 성분파는 각각 별개의 주파수와 파향을 가진다. Serpent형 조파장치에서 i 번째 조파판의 변위 $\eta_i(t)$ 는 식(5.2.17)로 주어진다.

$$\eta_i(t) = \sum_{n=1}^{N_s} \frac{a_n}{F_n} \sin(2\pi f_n t - ik_n b \cos \theta_n + \varepsilon_n) \sin \theta_n \quad (5.2.17)$$

여기서, 첨자 n 은 n 번째 성분파의 값이며, N_s 는 성분파의 총수이다. t , f_n , k_n 및 θ_n 은 각각 시간, n 번째 성분파의 주파수, 파수 및 파향을 나타낸다. 식(5.2.17)에서 $\sin \theta$ 는 경사파의 진폭을 목표치와 일치시키기 위해 조파판의 진폭을 조정하는 계수이다.

파수 k_n ($k_n = 2\pi/L_n$: L_n 은 n 번째 성분파의 파장)은 다음 식으로 주어지는 분산관계식을 만족하는 실수해로 구해진다.

$$(2\pi f_n)^2 = k_n g \tanh k_n h \quad (5.2.18)$$

여기서, h 와 g 는 정수심 및 중력가속도이다. n 번째 성분파의 진폭 a_n 은 식(5.2.19)로 계산된다.

$$a_n = \sqrt{2S(f_n) \delta f_n} \quad (5.2.19)$$

여기서, $S(f_n)$ 과 δf_n 은 각각 주파수스펙트럼과 스펙트럼폭을 나타낸다. n 번째 성분파의 대표주파수 f_n 은 밴드폭 δf_n 에 포함되는 주파수스펙트럼의 2차 모멘트와 같도록 결정하

면 좋다(永井, 1972). 국내에서 일반적으로 이용되는 Bretschneider-Mitsuyasu 주파수스펙트럼은 다음과 같다.

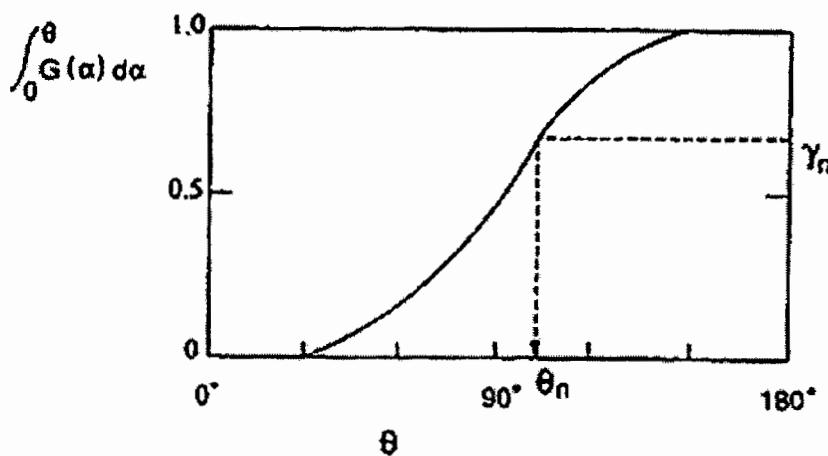
$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} f)^{-4}] \quad (5.2.20)$$

여기서, $T_{1/3}$ 과 $H_{1/3}$ 은 각각 유의파의 주기 및 파고이다. 이 경우에 대표주파수 f_n 은 근사적으로 다음 식으로 표현된다.

$$f_n = (1.007 / T_{1/3}) [\ln(2N_s / (2n-1))]^{-1/4} \quad (n=1, 2, 3, \dots, N_s) \quad (5.2.21)$$

SS법에서 n번째 성분파의 파향 θ_n 은 목표 다방향파의 방향분포특성을 나타내는 방향함수 $G(\theta; f)$ 의 누가곡선과 난수에 의해 결정된다. <그림 5.2.6>은 방향함수가 주파수에 의존하지 않는 간단한 경우로서 파향 θ_n 을 구하는 모식도이다. <그림 5.2.6>에서 γ_n 은 0에서 1사이의 값을 가지는 일정난수이다. $\int_0^\theta G(\alpha; f) d\alpha$ 은 에너지 누가곡선으로 0에서 1까지의 값을 가진다. 따라서 난수열 $\gamma_n (n=1, 2, \dots, N_s)$ 의 값과 같게 될 때 θ 의 값을 <그림 5.2.6>과 같이 누가곡선으로부터 구하고 파향 $\theta_n (n=1, 2, \dots, N_s)$ 을 결정한다. F_n 은 n번째 성분파에 상당하는 조파효율을 나타내고 피스톤형 조파기의 경우 다음 식과 같다.

$$F_n = \frac{2 \sinh^2 k_n h}{k_n h (1 + \sinh 2k_n h)} \quad (5.2.22)$$



<그림 5.2.6> 단일합성법에 의한 파향의 결정

나. 이중합성법(DS법)

DS법에서는 각 주파수에 대해 여러 가지 방향의 성분파가 분포되어 있다. i 번째 조파판의 변위 $\eta_i(t)$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\eta_i(t) = \sum_{n=1}^{N_D} \sum_{m=1}^{M_D} \frac{a_{nm}}{F_n} \sin(2\pi f_n t - ik_n b \cos \theta_m + \varepsilon_{nm}) \times \sin \theta_m \quad (5.2.23)$$

여기서, 첨자 n 과 m 은 각각 n 번째의 주파수 및 m 번째의 방향이며, N_D 와 M_D 는 각각 주파수분할수 및 방향분할수를 나타낸다. 식(5.2.23)에서 ε_{nm} 은 nm 번째 성분파의 위상차로서 0에서 2π 의 값을 가지는 일정난수로 주어지며, 계수 $\sin \theta_m$ 은 경사파의 파고를 저감시키기 위한 계수이다. 성분파의 진폭 a_{nm} 은 다음 식으로 정의된다.

$$a_{nm} = \sqrt{2S(f_n, \theta_m)\delta f_n \delta \theta_m} \quad (5.2.24)$$

여기서, $S(f_n, \theta_m)$ 은 주파수 f_n , 방향 θ_m 에서의 방향스펙트럼이고, 일반적으로 주파수스펙트럼 $S(f)$ 와 방향함수 $G(\theta; f)$ 의 곱으로서 다음과 같다.

$$S(f_n, \theta_m) = S(f_n) G(\theta_m; f_n) \quad (5.2.25)$$

대표주파수 f_n 은 SS법과 같은 방법으로 계산되며, 대표방향 θ_m 은 0에서 π 까지를 등간격으로 분할하여 산정된다. 식(5.2.25)에서 δf_n 과 $\delta \theta_m$ 은 n 번째 주파수 및 m 번째 방향의 성분폭을 각각 나타낸다.

제 3 절 다방향불규칙파의 재현

파랑의 스펙트럼 $S(f, \theta)$ 는 식(5.3.1)과 같이 주파수스펙트럼 $S(f)$ 와 방향함수 $G(f; \theta)$ 의 곱으로 표현된다.

$$S(f, \theta) = S(f) G(f; \theta) \quad (5.3.1)$$

여기서, $S(f)$ 는 식(5.2.20)과 같은 Bretsneider-Mitsuyasu 주파수스펙트럼을 이용하고, $G(f; \theta)$ 는 식(5.3.2)과 같은 Mitsuyasu형 방향함수를 이용한다.

$$G(f; \theta) = G_0 \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (5.3.2)$$

여기서, G_0 는 파향범위에 있어서 $G(f; \theta)$ 의 적분값을 1로 하기 위한 계수이며, 최대방향각 θ_{\max} 와 최소방향각 θ_{\min} 을 이용하여 식(5.3.3)으로 구할 수 있다.

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \quad (5.3.3)$$

여기서, S 는 방향집중도를 나타내는 값이고, 방향분산변수 S_{\max} 와 첨두주파수 f_p 를 이용하여 식(5.3.4)로 구한다.

$$S = \begin{cases} S_{\max} (f/f_p)^5 & \text{for } f \leq f_p \\ S_{\max} (f/f_p)^{-2.5} & \text{for } f \geq f_p \end{cases} \quad (5.3.4)$$

여기서, 첨두주파수는 다음 식과 같다.

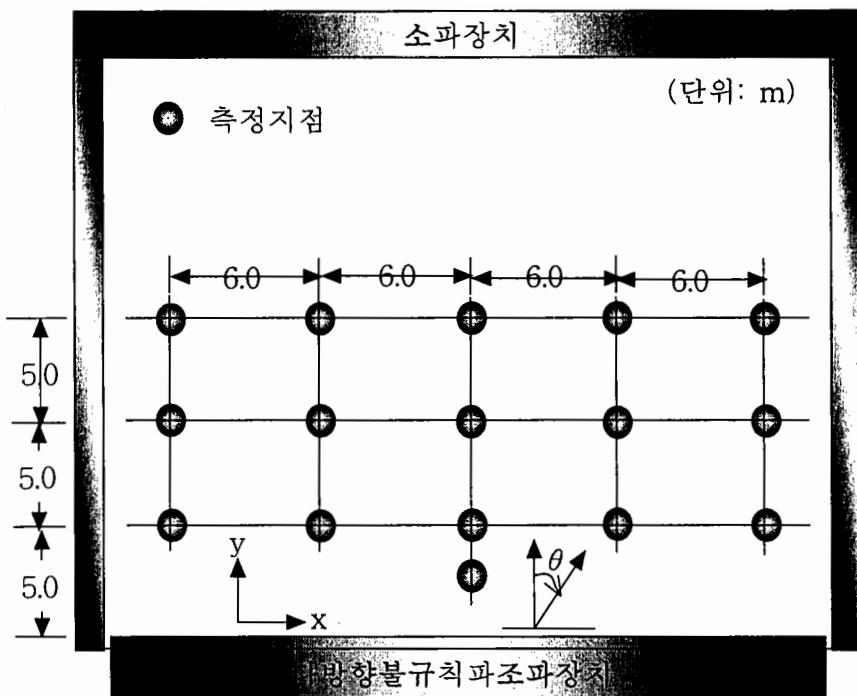
$$f_p = 1/(1.05 T_{1/3}) \quad (5.3.5)$$

목표스펙트럼과 실험파의 방향스펙트럼을 비교하기 위하여 <표 5.3.1>과 같은 실험조건을 적용하였다. <그림 5.3.1>과 같은 측정지점을 설정하여 계측장치를 배치하고 다방향불규칙파 조파장치를 이용한 파랑의 특성을 검토함과 동시에 조파수조내의 유효조파영역을 검정하였다.

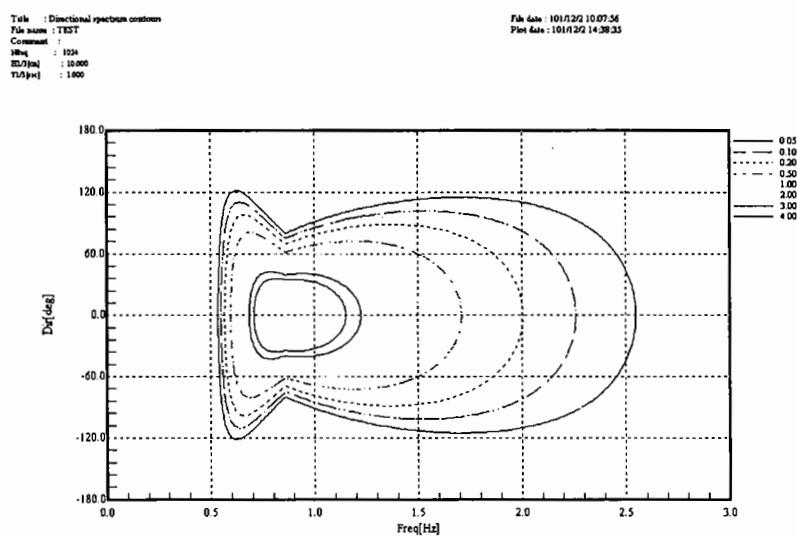
<표 5.3.1> 실험조건

$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (sec)	d (cm)	S_{\max}	θ_m (°)	$S(f)$	$G(\theta)$	비고
5, 10	1.0	60	10, 25, 75	0	B-M type	M type	비쇄파

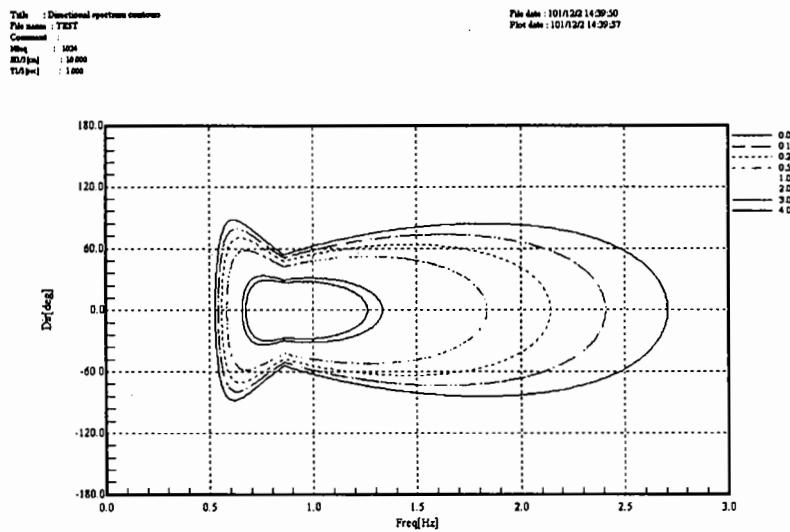
※ B-M: Bretschneider-Mitsuyasu spectrum, M: Mitsuyasu type



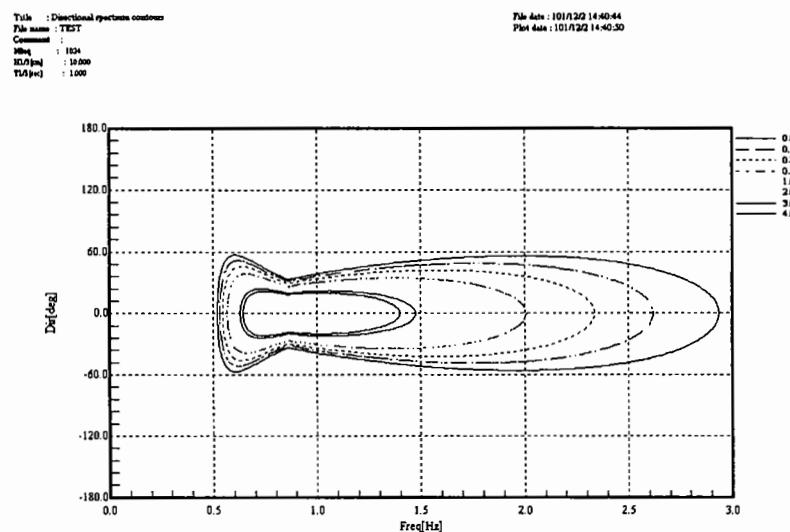
<그림 5.3.1> 다방향불규칙파 계측을 위한 파고 측정지점



<그림 5.3.2> 목표스펙트럼($H_{1/3}=10.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.0\text{sec}$, $S_{\max}=10$)



<그림 5.3.3> 목표스펙트럼($H_{1/3}=10.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.0\text{sec}$, $S_{\max}=25$)



<그림 5.3.4> 목표스펙트럼($H_{1/3}=10.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.0\text{sec}$, $S_{\max}=75$)

제 6 장 결 론

1. 피해사례에 대한 고찰

본 연구에서는 안정성 높은 방파제 설계의 신뢰성 있는 기초자료를 얻는 것을 목적으로 방파제 피해사례를 조사·분석하였다. 가능한 한 많은 피해사례를 수집하여 파랑에 의한 방파제 피해의 전체 상황을 파악하는 것을 목적으로 하였으며, 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 방파제의 피해사례 분석결과 국내와 일본의 경우 태풍에 의한 피해가 대부분을 차지하였으며, 피해시설수는 태풍이 내습하는 빈도보다 개별적인 태풍의 영향력이 크다는 것을 알 수 있었다.
- (2) 경사제의 피해유형은 ① 중량부족이나 설계파의 과소평가에 의한 피복재의 이탈, 사면상에 작용하는 직접적인 파력에 의한 사석이나 소파블록의 이탈, ② 중량산정식의 적합성, ③ 방파제 전면 기초부의 국부세굴에 의한 제체의 침하, ④ 월파로 인해 발생되는 방파제 배후면 활동에 의한 제체의 침하, ⑤ 입사파의 방향성 효과에 의한 피복재의 이탈 등으로 나눌 수 있다.
- (3) 혼성제의 피해유형은 ① 법선방향의 과고증대, ② 높은 기초부 및 급경사 해저에 의한 충격쇄파력, ③ 경사입사파에 의해 발생되는 강한 유속에 의한 피복재의 이탈, ④ 전면의 침식·법선의 세굴, ⑤ 사석기초부 아래의 모래지반 흡출, ⑥ 사석기초부와 지반의 원호활동 등으로 나눌 수 있다. 특히, 중량이 부족하여 전체적인 피해에 이른 경우에는 설계파산정, 파력산정법에 관한 연구를 계속 수행하여야 할 것으로 생각된다.
- (4) 소파블록 피복제의 피해유형은 ① reef 혹은 급경사 해저에서 소파블록의 이탈, ② 제두부나 소파공 端部에서 소파블록의 이탈과 불완전 소파에 의한 충격쇄파력의 발생, ③ 소파공 시공시 소파블록의 이탈과 불완전 소파에 의한 충격쇄파력의 발생, ④ 세굴이나 흡출에 의한 소파블록의 침하, ⑤ 소파공 설치전의 폭이 넓은(높은) 기초부에 의한 충격쇄파력, ⑥ 소파블록에 의한 파력 감쇄효과의 과대평가 등으로 나눌 수 있다.
- (5) 방파제 케이슨벽의 파괴원인으로는 ① 높은 기초부·급경사 해저에 의한 충격쇄

파력, ② 불완전 소파부의 충격쇄파력, ③ 블록의 충돌에 의한 피해 등에 기인하는 것으로 생각된다.

(6) 피해원인의 고찰방법에 대해서는 본 자료에서는 재해기록에 의거하여 피해원인을 조사하여 태풍 등 기상적인 요인만 기술하고 있지만, 실제로는 방파제의 기능에 큰 장해를 받는 두드러진 피해에 이르기까지는 장기적인 변화에 의한 것이기 때문에 방파제 피해에 이르기까지의 변형, 변화과정에 관한 지속적인 관찰 및 연구가 필요할 것으로 생각된다.

2. 피복재 중량 산정식에 대한 고찰

Hudson식은 파의 주기성 및 제체의 투수성을 고려하지 않은 공식으로 파형경사의 증감에 대한 변화가 매우 둔감하며, 경우에 따라 사석의 중량을 과대평가 또는 과소평가 할 수 있음을 보인다. 또한 사면 위에서의 쇄파발생 여부를 평가하기가 어렵다. 전반적으로 van der Meer식에 의해 산정된 사석중량과 비교할 때 파형경사가 크고 사면이 완만할 때는 더 작은 사석을 필요로 하며, 파형경사가 작고 사면이 완만할 때는 더 큰 사석을 필요로 한다. 그리고 사면이 1:1~1:3 정도의 경사인 경우는 전반적으로 Hudson식으로 구한 사석의 중량이 더 크게 나타난다. 물론 이것은 van der Meer식의 적용시 파의 개수 (the number of waves)를 어떻게 정하느냐에 따라 사석의 중량은 크게 차이가 날 수 있으며, 전반적인 비교를 위해서는 많은 경우에 대한 비교가 필요하다.

van der Meer식은 확실히 Hudson식에 비해서 진일보된 사석중량 결정식임에는 틀림이 없으나, 크게 두 가지의 문제점을 가지고 있는 것으로 판단된다. 첫 번째는 모든 계산에 적용되는 파형경사 결정시에 파고는 사면 전면부의 파고를 사용하고, 파장은 심해파의 파장을 사용하는 불일치이다. 파장을 심해파장을 사용하기 때문에 수심의 변화에 대한 고려가 없다. 물론 van der Meer의 천해에서의 적용공식을 사용할 수 있으나, 이 공식의 적용에 있어서도 파형경사의 적용 문제는 여전히 남는다. 두 번째는 투수성의 고려에 있어서 적용할 수 있는 경우가 네 가지밖에 없기 때문에 실제 구조물 설계에 있어서 정확한 투수성의 고려가 어렵다는 것이다.

개선 방안으로는 파형경사의 적용에 있어 심해파의 파장이 아닌 방파제 설치위치에서의 파장을 이용한 공식의 유도를 통해 van der Meer의 실험성과를 충분히 이용하면서 개선된 사석 중량 결정식의 유도를 들 수 있다. 그리고 대부분의 사석경사제의 단면 형태

는 SPM의 제안 형상(즉, 필터총의 중량은 사석총의 1/10 등)을 따르므로, 이에 대한 실험과 다양한 단면의 기하학적 형상에 대한 투수성의 평가를 통해 적용범위를 확장 할 필요가 있다.

van der Meer식은 위의 두 문제로 인해 호안에 적용하기에는 약간의 문제를 가지고 있으므로, 위의 두 문제를 보완해서 일반적인 관계식을 유도한다면 Hudson식보다 더 적용 범위가 넓고 적용도 간편하며 입사파와 구조물의 기하학적 특성 및 지속시간 등을 고려한 더 합리적인 사석 중량 결정식이 될 것이다.

참고문헌

- 기상청, 1996, 태풍백서, pp. 261.
- 내무부, 1979, 재해연보, pp. 53-63.
- 내무부, 1980, 재해연보, pp. 61-68.
- 내무부, 1981, 재해연보, pp. 42-54.
- 내무부, 1982, 재해연보, pp. 30-37.
- 내무부, 1983, 재해연보, pp. 33-37.
- 내무부, 1984, 재해연보, pp. 66-71.
- 내무부, 1985, 재해연보, pp. 56-68.
- 내무부, 1986, 재해연보, pp. 54-67.
- 내무부, 1987, 재해연보, pp. 54-62.
- 내무부, 1988, 재해연보, pp. 89-91.
- 내무부, 1989, 재해연보, pp. 82-87.
- 내무부, 1990, 재해연보, pp. 125-129.
- 내무부, 1991, 재해연보, pp. 67-71.
- 내무부, 1992, 재해연보, pp. 53-57.
- 내무부, 1993, 재해연보, pp. 64-68.
- 내무부, 1994, 재해연보, pp. 69-74.
- 내무부, 1995, 재해연보, pp. 71-75.
- 내무부, 1996, 재해연보, pp. 70-74.
- 내무부, 1997, 재해연보, pp. 71-75.
- 내무부, 1998, 재해연보, pp. 69-73.
- 내무부, 1999, 재해연보, pp. 67-71.
- 동해지방해운항만청, 1988, 노후항만시설개량방안 용역보고서.
- 손병규, 류청로, 2001, 사석방파제의 안정성에 미치는 방향성효과에 관한 실험적연구, 한국해안·해양공학회지, 13(2), pp. 139-148.
- 李鎮五, 1995, 傾斜 防波堤의 構造的인 被害原因에 關한 研究, 한양대학교 산업대학원, 석사학위논문.
- 鄭奎燮, 1997, 韓國 主要 港灣 防波堤의 被害原因 및 安全性 分析, 한양대학교 산업대학원, 석사학위논문.
- 해양수산부, 1999, 항만 및 어항 설계기준.

- 해양수산부, 2001, 경사식 방파제의 최적설계연구.
- 해운항만청, 1993, 항만시설물 설계기준서.
- Abbott, M.B. and Price, W.A., 1994, Coastal, estuarial and harbour engineer's reference book, Chapman & Hall.
- Ahrens, J., 1975, Large wave tank tests of riprap stability, TM 51, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Barber, N.F., 1963, The directional resolving power of an array of wave detectors, Ocean Wave Spectra, Prentice-Hall, Inc.
- Battjes, J.A., 1974, Wave runup and overtopping, Technical Advisory Committee on Protection Against Inundation, Rijkswaterstaat, The Hague, Netherlands.
- Biesel, F., 1954, Wave machines, Proc. 1st Conf. on Ships and Waves, Hoboken, N.J., pp. 288-304.
- Briggs M.J., L.E. Borgman and D.G. Outlaw, 1987, Generation and analysis of directional spectral waves in a laboratory basin, Proc. 19th Offshore Technology Conf., pp. 495-502.
- British Standards Institution, 1984, Maritime structures: Part 1. General Criteria.
- Brunn, P. and Johannesson, P., 1976, Parameters affecting stability of rubble mounds, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.102, No.WW2.
- Burcharth, H.F., S.P.K. Nielsen and K. Schaarup-Jensen, 1986, A three dimensional sea facility for deep and shallow water waves, Proc. Conf. Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Tokyo, Vol.1, pp. 72-79.
- Capon, J., 1969, High resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, Proc. IEEE, 57, pp. 1408-1418.
- Cartwright, D.E., 1962, Analysis and statistics of waves, The Sea, edited by M.N. Hill, Interscience Publications, pp. 567-589.
- CERC, 1984, Shore protection manual, US Army Corps of Engineers, Vol.2, Ch.7, pp.7-1-7-245.
- CIRIA/CUR SP 81, 1991, Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, Vol.2, pp. 235-300.
- Delft Hydraulics, 1992, BREAKWAT design tool for rubble mound structures, Part B. Technical Manual.

- Galvin, C.J., 1968, Horizontal distance traveled by a breaking wave, National Meeting on Transportation Engineering, ASCE, San Diego, California.
- Goda, Y., 1970, A synthesis of breaker indices, Transactions of The Japanese Society of Civil Engineering, Vol.2, Part 2.
- Goda, Y., 1985, Random sea and design of marine structures, Univ. of Tokyo Press, pp. 1-323.
- Hitachi, S., 1994, Case study of breakwater damages - Mutsu-ogawara Port -, Proc. of Intl. Workshop on Wave Barriers in Deepwaters, PHRI, pp. 308-331.
- Hudson, R.Y., 1953, Wave forces on breakwaters, Transactions of the American Society of Civil Engineering, ASCE, Vol.118, pp. 653.
- Hudson, R.Y., 1959, Laboratory investigation of rubble mound breakwaters, Proc. of the American Society of Civil Engineering, ASCE, Waterways and Harbors Division, Vol.85, No.WW3, Paper No.2171.
- Hudson, R.Y., 1961, Laboratory investigation of rubble mound breakwaters, Transactions of the American Society of Civil Engineering, ASCE, Vol.126, Part IV.
- Hudson, R.Y., 1961, Wave forces on rubble mound breakwaters and jetties, Miscellaneous Paper 2-453, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Huntington S.W., 1981, Wave loading in short crested seas, Proc. International Conf. Wave and Wind Directionality, Paris, pp. 497-518.
- Iribarren Cavanilles, R., 1938, A formula for the calculation of rock-fill Dikes, Revissta de Obras Publicas (Translation in The Bulletin of the Beach Erosion Board, Vol.3, No.1, 1949).
- Longuet-Higgins, M.S., 1957, The statistical analysis of a random moving surface, Phil. Trans. Rot. Soc. London, A249, pp. 321-387.
- Magoon, O.T. and Davidson, D.D., 1995, Case histories of the design, construction, and maintenance of rubble mound structures, ASCE.
- Mynett, A.E., J. Bosma and D. van Vlietie, 1984, Effects of directional seas in coastal region, Proc. of Symposium on Description and Modelling of Directional Seas, Technical Univ., Denmark. pp. B7.1-B7.17.
- Nwogu, O., 1989, Maximum entropy estimation of directional wave spectra from an array of wave probes, Applied Ocean Research, Vol. 11, No. 4, pp. 176-182.

- Ouellet, Y., 1972, Effect of irregular wave trains on rubble mound breakwaters, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.98, No.WW I , Paper 8693, pp. 1-14.
- Owen, M.W., 1980, Design of seawalls allowing for wave overtopping, Report No.EX 924, Hydraulics Research, Wallingford.
- Port Sines Investigating Panel, 1982, Failure of the breakwater at port sines, Portugal, ASCE, pp. 1-77.
- Rogan, A.J., 1969, Destruction criteria for rubble mound breakwaters, Proc. of 11th Coastal Eng. Conf., ASCE, London, pp. 761-778.
- Salter, S.H., 1981, Absorbing wave-makers and wide tanks, Proc. Conf. Directional Wave Spectra Applications, pp. 185-202.
- Saville, R., 1955, Laboratory data on wave runup and overtopping on shore structures, TM-64, U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Washington, D.C.
- Seelig, W., 1980, Two-dimensional tests of wave transmission and reflection characteristics of laboratory breakwaters, TR 80-1, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Takahashi, S., Hayashi, K., Ifuku, S., Shimosako, K. and Kang, Y.K., 1997, Recent failures of composite breakwaters in Japan, Proc. of the fourth Japan-Chinese(Taipei) Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation, Kyoto, Japan, pp. 201-209.
- Takayama, T., 1982, Theoretical properties of oblique waves generated by serpent-type wavemakers, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 21, No. 2, pp. 3-48.
- Thomson, D.M. and Shuttler, R.M., 1975, Riprap design for wind wave attack, A Laboratory Study in Random Waves, HRS, Wallingford, Report EX 707.
- van der Meer, J.W. and Pilarczyk, K.W., 1984, Stability of rubble mound slopes under random wave attack, Coastal Engineering.
- van der Meer, J.W., 1988, Determination and probabilistic design of breakwater armour layers, ASCE, Journal of WPC and OE, Vol.114, No.1.
- van der Meer, J.W., 1988, Rock slopes and gravel beaches under wave attack, Doctoral Thesis, Delft Univ. of Technology. Also: Delft Hydraulics Communication, No.396.

- van der Meer, J.W., 1988, Stability of cubes, tetrapods and accropode, Proc. Breakwater '88, Eastbourne. Thomas Telford.
- Weggel, J.R., 1972, Maximum breaker height, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.98, No.WW4, Paper No.9384.
- Weggel, J.R., 1976, Wave overtopping equation, Proc. of 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, Honolulu, Hawaii, pp. 2737-2755.
- Zwamborn, Z.A., Bosman, D.E. and Moes, J., 1980, Dolosse past, present, future, Proc. of 17th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 1048-1067.
- 磯部雅彦・近藤浩右, 1983, 入・反射波の共存場における方向スペクトルの推定法, 第30回海岸工學講演會論文集, pp. 44-48.
- 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司, 1984, 方向スペクトルの推定におけるMLMの擴張, 第31回海岸工學講演會論文集, pp. 173-177.
- 伊藤喜行・谷本勝利, 1971, 混成防波堤の蛇行災害, 港灣技研資料 No. 112.
- 五明美智男・堺 和彦・高山知司・寺内 潔・高橋重雄, 1995, 消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査, 海岸工學論文集, No. 42, pp. 901-905.
- 五明美智男・高橋重雄・鈴木高二郎・姜 閨求, 1997, 消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査(第2報) -消波ブロックの法尻沈下災害-, 海岸工學論文集, No. 44, pp. 961-965.
- 鹿島遼一・今泉正次・戸田泰和, 1986, 被災事例から見た防波堤・防波護岸の波浪被災特性, 第33回海岸工學講演會論文集, pp. 626-630.
- 近藤俊郎・竹田英章, 1983, 消波構造物, 森北出版.
- 北島昭一・中野拓治・掘井修身・柿崎秀作・降旗健一・花木芳雄, 1968, 被災防波堤集覽, 港灣技研資料 No. 58.
- 木村克俊・上久保勝美・須藤賢哉・桑原伸司・林 倫史, 1996, 混成堤堤頭部のマウンド被災特性と被覆材の安定重量算定法, 海岸工學論文集, 第43券, pp. 806-810.
- 小舟浩治・橋本典明, 1985, 最大エントロピー原理(MEP)を用いた方向スペクトルの推定, 第32回海岸工學講演會論文集, pp. 159-163.
- 合田良實・鈴木康正, 1975, 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港灣技研資料 No. 155.
- 下迫健一郎・高橋重雄・高山知司・谷本勝利, 1998, 變形を許容した混成防波堤の新設計法の提案-期待滑動量を用いた信頼性設計-, 海岸工學論文集, No. 45, pp. 801-805.
- 鈴木高二朗・高橋重雄, 1998, 消波ブロック被覆堤のブロック沈下に関する一実験, 海岸工學論文集, 제45권, pp. 821-825.

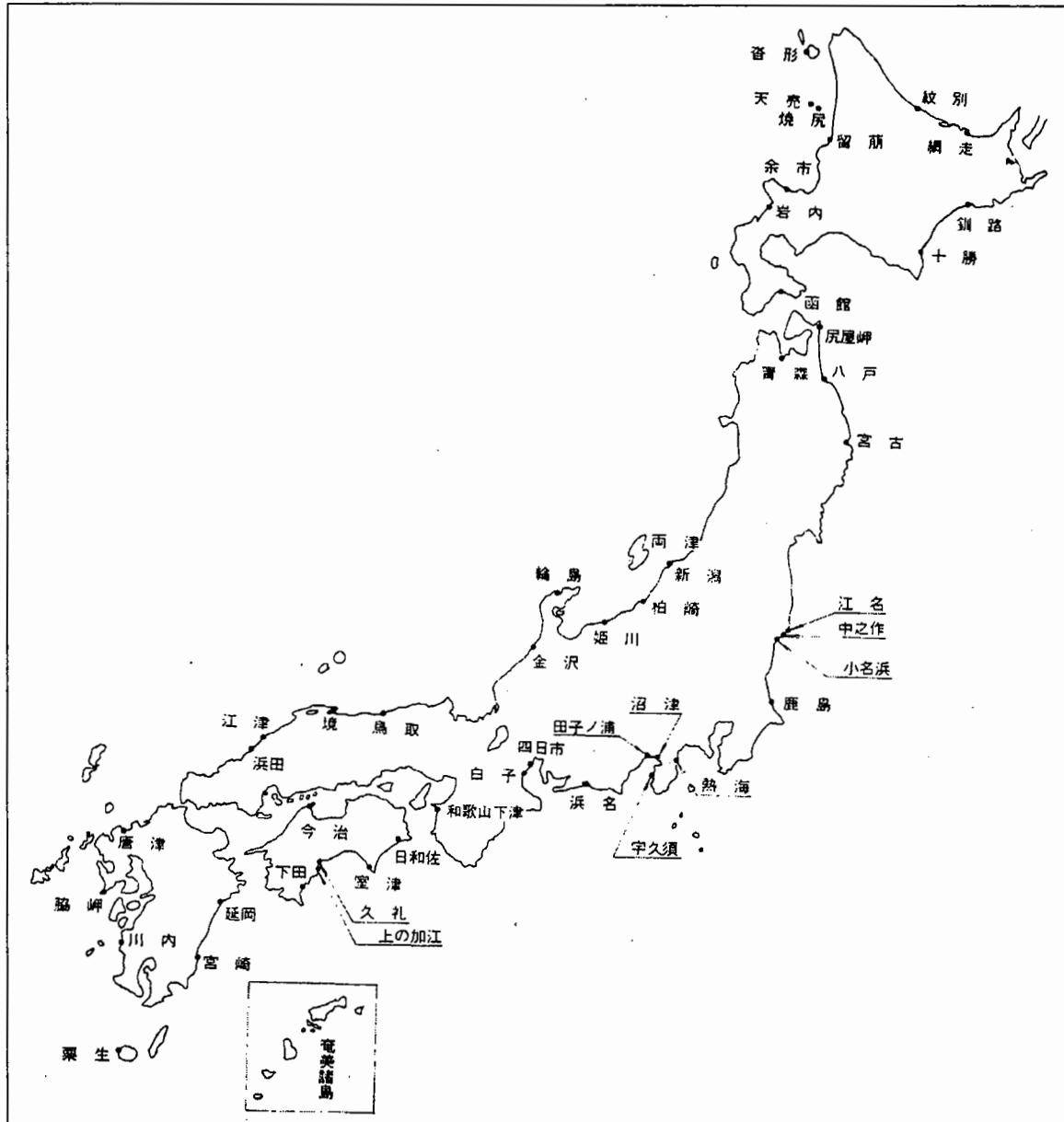
- 武山秀夫・中山種清, 1975, 被災防波堤集覽(その2), 港灣技研資料 No. 200.
- 土木施工設計計算例委員會, 1987, 港灣・海洋構造物の設計計算例, 山海堂.
- 服部千佳志・紫田鋼三・大堀晃一, 1984, 被災防波堤集覽(その3), 港灣技研資料 No. 485.
- 竹田英章・山本泰司・木村克俊・笹島隆彦, 1995, 急勾配斜面上の防波堤に作用する衝撃波
力と消波29) ブロックの安定性について, 海洋開發論文集, 第11卷, pp. 287-290.
- 宮井眞一郎・大平勝司・塙見雅樹, 1993, 被災防波堤集覽(その4), 港灣技研資料 No. 765.
- 谷本勝利・小舟浩治・大里睦夫, 1975, ケーソン壁に作用する波力と應答計算, 港灣技研資料
No. 224.
- 高橋重雄・津田宗男・下迫健一郎・横田 弘・清宮 理, 1998, 防波堤ケーソン壁の破壊と衝
擊碎波力について, 海岸工學論文集, 第45卷, pp. 751-755.
- 橋本典明, 1987, ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 港灣技術研究所報告, Vol.
26, No. 2, pp. 97-125.
- 平石哲也, 1991, サーペント型造波装置の有效造波領域の擴張法に關する検討, 海岸工學論文
集, 第38卷, pp. 126-130.
- 柳青魯, 1984. 捨石防波堤の水理學的最適設計に關する研究, 日本大阪大學博士學位論文.
- 柳青魯・金憲泰・孫炳奎・李泰煥, 1999, 捨石護岸の斷面的・平面的安定性と水理特性, 海岸
工學論文集, 제46권, pp. 886-889.
- 日本港灣協會, 1999, 港灣の施設の技術上の基準・同解説.

부 록

부록 A. 일본 피해사례 자료

부록 B. 국내 피해사례 자료

부록 A. 일본 피해사례 자료



<그림 A.1> 일본의 피해항만 위치도

<표 A.1> 피해사례의 기상요인(1954년~1964년, 일본)

No.	연도	기 간	기상요인	피해 항만명
1	1920	秋, 冬	동절기풍랑	留萌
2	1927	12~3/1	저기압	網走
3	1946	12/8	저기압	秋田
4	1948	1/7~8	저기압	酒田
5	1949	8/31	태풍	小名浜
6	"	10/30	저기압	酒田, 新潟
7	1950	9/3	태풍	酒田, 神戶, 和歌山下津, 小松島
8	"	9/13	태풍	博多
9	"	10/31	태풍	富山
10	"	12/30~31	저기압	秋田, 新潟
11	1951	10/14~15	태풍	神戶, 和歌山下津, 鹿兒島
12	1952	10/23	저기압	稚內
13	1953	1/12~16	저기압	酒田, 新潟
14	"	9/25	태풍13호	富山
15	"	11/22	동절기풍랑	岩内
16	1954	9/13~26	태풍12, 14, 15호	秋田, 酒田, 和歌山下津
17	1955	7/16	태풍8호	高知
18	1956	9/11	태풍12호	岩内
19	1957	2/11~4/2	동절기풍랑	秋田
20	"	12/13	동절기풍랑	秋田
21	1958	2/13	저기압	新潟
22	"	5/13	저기압	岩内
23	1959	9/18~19	태풍14호	小樽, 岩内, 留萌
24	"	9/26~27	태풍15호	樺法華
25	1960	10/20~22	태풍24호	小名浜, 樺法華
26	"	12/25~28	저기압	網走
27	1961	1/4~6	저기압	網走
28	"	9/16~18	태풍18호	留萌, 稚内, 酒田
29	"	10/29	태풍26호	樺法華
30	1962	1/20	저기압	小樽
31	1963	8/9	태풍9호	苅田
32	"	11/26~29	동절기풍랑	岩内, 留萌
33	1964	2/1~2	저기압	樺法華
34	"	9/25	태풍20호	神戶, 和歌山下津, 姫路
35	"	11/13	저기압	網走
36	1964	12/1	동절기풍랑	小樽
37	1965	1/9	저기압	網走
38	"	9/10	태풍23호	神戶, 和歌山下津
39	"	9/17	태풍24호	清水
40	"	12/15	동절기풍랑	岩内

<표 A.2> 추출사례에 대한 이상기상 일람표(1965년~1972년, 49항만 63사례, 일본)

No.	연도	기 간	기상요인	피 해 항 만 명
1	1965	1/8~10	저기압	紋別, 網走
2	"	2/21	저기압	留萌
3	"	7/23	호우	江津
4	"	9/17~18	태풍24호	田子の浦, 沼津
5	"	12/16~17	저기압	天賣, 余市
6	1966	1/19~22	동절기풍랑	兩津, 柏崎
7	"	3/5~6	저기압	岩内
8	"	10/28~30	저기압	畜形
9	"	12/20	저기압	網走
10	1967	3/22~24	저기압	函館
11	"	9/21~22	태풍27호	尻屋岬
12	"	10/27~28	태풍34호	宇久須
13	"	11/9~11	저기압	釧路
14	1968	1/14~16	저기압	金澤
15	"	2/15	저기압	唐津
16	"	7/28	태풍4호	日和佐
17	"	9/24	태풍16호	栗生
18	1969	2/5~6	저기압	沓形, 燒尻, 岩内, 鳥取
19	"	6/28~7/7	장마전선	川内
20	1970	1/31	저기압	新潟, 姫川, 小名浜
21	"	7/5~6	태풍2호	白子
22	"	8/14	태풍9호	脇岬
23	"	8/21	태풍10호	境, 今治, 室津, 久礼, 上の加江, 下田
24	1971	1/4	저기압	浜田
25	"	1/16~17	저기압	宮古
26	"	4/29~30	저기압	小名浜
27	"	8/5	태풍19호	宮崎
28	"	8/30	태풍23호	延岡
29	"	9/11~13	태풍26호	江名, 中之作
30	"	11/9	저기압	網走
31	1972	1/11~12	저기압	鹿島, 熱海
32	"	2/14	저기압	釧路
33	"	2/28	저기압	十勝
34	"	9/16~17	태풍20호	浜名, 四日市
35	"	12/1~2	저기압	輪島
36	"	12/24	저기압	鹿島

<표 A.3> 추출사례에 대한 이상기상 일람표(1973년~1982, 39항만 54사례, 일본)

No	연도	기 간	기상요인	피 해 항 만 명
1	1974	2/8~9	저기압	宮古
2	"	10/31~11/1	저기압	増毛
3	1975	11/7~8	저기압	石狩灣
4	1976	9/9~10	태풍17호	那霸
5	"	10/28~29	저기압	新潟, 福井
6	"	11/3~15	태풍22, 23호	那霸
7	"	12/8~9	동절기풍랑	那霸
8	1978	1/22	저기압	深浦
9	"	11/19~20	동절기풍랑	留萌
10	1979	12월중순 ~1980년 2월중순	동절기풍랑	酒田
11	1980	1월상순~2월중순	동절기풍랑	福井
12	"	9/9~12	태풍13호	姫路, 三崎, 佐賀, 志布志
13	"	10/13~14	태풍19호	大里, 宮之浦
14	"	10/22~26	저기압	天塩, 酒田, 鼠ヶ關
15	"	12/23~25	동절기풍랑	八戸, 宮古, 鹿島, 宮古
16	1981	4/20	저기압	大洗
17	"	8/1~2	태풍10호	御前崎
18	"	8/22~24	태풍15호	根室, 鉈路, 金華山, 金華山, 小名浜, 小名浜
19	"	8/30	태풍18호	和泊, 德仁
20	"	12/1~2	동절기풍랑	内浦
21	1982	1/19~21	동절기풍랑	深浦
22	"	1/28~29	동절기풍랑	赤崎
23	"	3/21~24	저기압	むつ小川原, 久慈, 八木
24	"	7/31~8/3	태풍10호	熱海, 鵜殿, 新宮, 宮崎
25	"	8/26~27	태풍13호	宮崎, 志布志, 土屋久永田
26	"	9/12	태풍18호	新宮
27	"	9/24~25	태풍19호	境
28	"	10/24~25	저기압	鴛泊, 天塩

<표 A.4> 추출사례에 대한 이상기상 일람표(1983년~1991년, 47항만 69사례, 일본)

No	연도	기 간	기상요인	피 해 항 만 명
1	1983	3/16~20	동절기풍랑	金澤
2	"	9/24~30	태풍10호	片泊
3	1985	8/27~9/2	태풍12, 13, 14호	鹿兒島, 大島
4	1986	3/14~18	동절기풍랑	鴛泊
5	"	8/25~30	태풍13호	和泊, 勝本, 仲田
6	1987	2/2~6	동절기풍랑	唐津
7	"	8/27~9/2	태풍12호	渡嘉敷, 片泊, 串木野, 川内, 長浜, 高浜、龜徳, 小口
8	"	10/13~18	태풍19호	志布志, 三本松
9	"	11/23~26	동절기풍랑	留萌
10	1989	7/26~28	태풍11호	守江
11	1990	8/16~23	태풍12, 14호	宮崎
12	"	9/16~21	태풍19호	志布志, 由良, 宮の浦
13	"	11/28~12/5	태풍28호	鵜殿, 鹿島
14	1991	2/13~18	동절기풍랑	小本, 久慈, 鳥取, 宮古, むつ小川原, 八戸, 金澤
15	"	7/27~30	태풍9호	鹿浦, 神ノ浦, 大瀬戸柳, 牛深, 川内
16	"	9/26~29	태풍19호	長崎, やすら浜, 牛深, 川内, 茂木, 安下庄, 脇岬, 高島, 立石, 須川, 津名, 小木

<표 A.5> 페체대상시설 일람표(1954년~1964년, 20항만 68사례, 일본)

번호	항명	시설명	구조형식	폐해일시	기상상황	주요 피해상황		파고비	조위	설치수심	천단고	사면경사	비고
						폐복사석, 기초사석, 근고불력의 이탈	폐복사석, 근고불력의 이탈						
1	小樽	島房파제	케이슨식흔성제	1959/9/18	태풍14호	폐복사석, 기초사석, 근고불력의 이탈	폐복사석, 기초사석, 근고불력의 이탈	-5.0	+0.6	-15.75	+1.67	1:3***	
2	"	島房파제	케이슨식흔성제	1962/1/20	서기암	"	"	-4.5	+1.03	-15.75	+1.67	"	
3	"	북방파제	불역식흔성제	1964/12/1	동철기통령	"	"	-4.1	+1.21	-14.10	+1.97	1:4***	
4	岩内	서방파제	케이슨식흔성제	1953/11/22	동철기통령	폐복사석, 근고불력의 이탈, 체체의 경사	폐복사석, 근고불력의 이탈, 체체의 경사	-4.0**	+0.6	-6.15	+1.80	1:5***	
5	"	"	"	1956년 9/11	태풍12호	체체의 이동, 폐복사석, 근고불력의 이탈	체체의 이동, 폐복사석, 근고불력의 이탈	-4.5**	-6.0	+1.63	"	시공중	
6	"	"	"	1958/5/13	서기암	체체의 이동·경사, 폐복사석, 근고불력의 이탈	체체의 이동·경사, 폐복사석, 근고불력의 이탈	-5.0**	-6.15	+1.80	"		
7	"	"	"	1959/9/18	태풍14호	폐복사석, 근고불력의 이탈	폐복사석, 근고불력의 이탈	4.0/5.0**	+0.8	-7.0	+1.65	"	
8	"	"	"	"	"	"	"	5.0/5.0**	+0.8	-10.4	+1.85	"	
9	"	"	"	1963/11/29	동철기통령	"	"	-5.0**	+0.5	-6.9	+1.65	"	
10	"	"	"	1965/12/15	"	체체의 이동	체체의 이동	4.48/3.94	-12.0	+0.5	1:3***	시공중	
11	網走	북방파제(丁)	"	1927/12/31	서기암	"	"	-6.5**	-10.91	+2.42	"		
12	"	"	"	1960/12/25-28	"	상부구의 파괴	상부구의 파괴	-6.0**	-10.91	+2.42	"		
13	"	"	"	1965/1/9	"	폐복사석 이탈, 근고불력 비난, 상부구 파괴	폐복사석 이탈, 근고불력 비난, 상부구 파괴	4.4/4.4	-11.0	+2.42	1:10***		
14	"	"(乙)	"	1964/1/13	"	폐복사석, 근고불력의 이탈	폐복사석, 근고불력의 이탈	-3.0**	-3.20	+2.42	1:3***		
15	"	동방파제	"	1961/1/4-6	"	케이슨 군현, 케이슨내외 모래유실, 상부콘크리트 침하	케이슨 군현, 케이슨내외 모래유실, 상부콘크리트 침하	5.2/4.0	+2.14	-8.9	+3.5	"	시공중
16	留萌	남방파제	"	1920년 秋, 冬	동철기통령	케이슨의 이동, 경사	케이슨의 이동, 경사	-7.5	+1.53	-14.5	+0.61	1:2***	"
17	"	"	"	1959/9/18-19	태풍14호	체체의 이동, 근고불력의 이탈, 상부구의 파괴	체체의 이동, 근고불력의 이탈, 상부구의 파괴	-4.0	+0.6	-14.5	+1.82	1:4***	
18	"	"	"	1961/9/17-18	태풍18호	체체의 이동, 상부구의 파괴	체체의 이동, 상부구의 파괴	-6.0	+0.94	"	"		
19	"	케이슨식침입제	"	1963/11/26-27	동철기통령	기초사석, 근고불력의 이탈, 체체처부 기초불력의 유풀	기초사석, 근고불력의 이탈, 체체처부 기초불력의 유풀	-4.0	-13.9	+1.82	"		
20	般若華	동방파제	케이슨식흔성제	1959/9/26-27	태풍15호	체체의 이동, 상부구 일부 균열, parapet의 파괴	체체의 이동, 상부구 일부 균열, parapet의 파괴	3.1/4.0	+1.25	-7.5	+4.2		
21	"	"	케이슨식침입제	1960/10/21-22	태풍24호	체체의 이동, 상부구 파괴	체체의 이동, 상부구 파괴	3.1/5.0	+1.25	"	"		
22	"	"	케이슨식흔성제	1961/10/29	태풍26호	체체의 이동, 근고불력의 이탈, T.T.P. 이탈	체체의 이동, 근고불력의 이탈, T.T.P. 이탈	5.0/4.9	+1.53	-6.6	+2.6	시공중	
23	"	"	케이슨식흔성제	1964/2/1-2	서기암	폐복사석, T.T.P. 이탈, parapet 파괴	폐복사석, T.T.P. 이탈, parapet 파괴	3.1/5.0	+1.7	-6.5	+4.2	1:2***	
24	稚内	북방파제	"	1952/10/23	"	폐복사석, 근고불력의 이탈, 상부구 파괴	폐복사석, 근고불력의 이탈, 상부구 파괴	-3.5	-10.2	+1.8	1:3***		
25	"	"	인공불력경사제	1961/9/16	태풍18호	폐복사석, 근고불력의 이탈	폐복사석, 근고불력의 이탈	-4.0	+0.8	-9.6	+1.8		
26	秋田	남방파제	"	1946/12/8	서기암	폐복사석의 이탈, 상부콘크리트의 파쇄	폐복사석의 이탈, 상부콘크리트의 파쇄	-/-	-/-	-2.0	+2.0	1:2	
27	"	"	케이슨식흔성제	1950/12/30	"	체체의 경사, 폐복사석, 근고불력의 이탈	체체의 경사, 폐복사석, 근고불력의 이탈	-5.0	+0.8	-10.0	+2.5	1:3***	
28	"	"	흔성제	1954/9/26	태풍15호	체체의 이동, 기초사석의 이탈, 상부콘크리트 파쇄	체체의 이동, 기초사석의 이탈, 상부콘크리트 파쇄	-5.0	-4.0	+2.10	1:2.5***		
29	"	"	"	1957/2/11-4/2	동철기통령	폐복사석, 근고불력의 이탈	폐복사석, 근고불력의 이탈	-/-	-3.0	+2.1	"		
30	"	"	"	1957/12/13	"	폐복사석의 이탈	폐복사석의 이탈	-6.0	+0.80	+3.0	+1.2		
31	酒田	북방파제	불역식흔성제	1949/10/30	서기암	폐복사석, 기초사석, 근고불력의 이탈	폐복사석, 기초사석, 근고불력의 이탈	-/-	-4.10	+2.7	1:3***		
32	"	"	"	1950/9/3	태풍	"	"	-/-	-7.50	+2.7	"		
33	"	"	"	1954/9/26	태풍15호	체체의 경사, 폐복사석의 이탈, 상부콘크리트 파쇄	체체의 경사, 폐복사석의 이탈, 상부콘크리트 파쇄	-5.2	+0.6	-6.30	+2.7	1:2.5***	
34	"	남방파제	"	1948/1/7-8	서기암	폐복사석, 근고불력의 이탈, 상부콘크리트의 파쇄	폐복사석, 근고불력의 이탈, 상부콘크리트의 파쇄	-/-	-7.7	+2.7	1:3***		
35	"	"	"	1949/10/30	태풍	"	"	-/-	-6.0	+2.7	"		

(주) 소파블러피복제, ** 무축, *** 폐복공의 경사, 파고비: 설계파고/내습파고, 단위: m

<표 A.5 계속>

번호	항명	시설명	구조형식	파해일시	기상상황	주요 피해상황	파고비	조위	설치수심	천단고	사면경사	비고
36	酒田	남방파제	케이슨식 혼성체	1953/1/12~15	서기암	제3체의 이동, 파복사식, 균고불력의 이탈, 상부콘크리트의 폐해	7.0/6.0	+0.9		+1.15		
37	"	"	"	1954/9/26	태풍15호	제3체의 이동, 상부콘크리트의 폐해	7.0/5.2	+0.6	-8.5	+2.0	1.3***	시공중
38	"	"	"	1961/9/16	태풍	파복사식, 기초사식, 균고불력의 이탈	-6.0	+1.05	-8.0	+2.0	"	
39	新潟	서방파제	"	1949/10/30	서기암	"	6.5/7.0	-13.0	+2.0	1.2***		
40	"	서들파제	불력식 혼성체	1950/12/31	"	파복사식, 기초사식, 균고불력의 이탈, 상부콘크리트의 폐해	-5.0	-7.0	+3.63	"		
41	"	"	"	1953/1/12~16	"	기초사식, 균고불력의 이탈, 상부콘크리트의 폐해	-5.0	+1.36	-7.0	+3.63	"	
42	"	"	"	1958/2/13	"	상부공의 폐해	-4.0	+1.6	"	"		
43	富山	동방파제	"	1950/10/31	태풍	파복사식, 기초사식, 균고불력의 이탈	-3.0	+1.0				
44	"	"	"	1953/9/25	태풍13호	"	-3.5					
45	小名浜	서의방파제	케이슨식 혼성체	1949/8/31	태풍	파복사식의 이탈	9.8/6.0	-7.10	+3.70	1.3***		
46	"	서방파제	"	1960/10/20	태풍24호	제3체의 경사, 기초사식의 이탈	6.1/5.23	+1.56	-9.0	+3.7	1.25***	시공중
47	滑水	동방파제	"	1955/9/17	태풍24호	제3체의 이동	4.5/6.0	+1.9	-8.5	+5.0	1.2***	
48	神戸	제1방파제	"	1950/9/3	태풍	파복사식, 균고불력의 이탈	2.5/2.3	+3.16	-13.03	+3.03	"	
49	"	"	케이슨식 혼성체*	1964/9/25	태풍20호	제3체의 이동, 경사, 파복사식, 균고불력, 소파공의 이탈	3.0/3.8	+3.2	-14.0	+4.0	1.1	
50	"	"	"	1965/9/10	태풍23호	제3체의 이동, 파복사식, 기초사식, 소파공의 이탈	4.5/5/4.35	+2.76	-13.0	+4.0	1.4/3	
51	"	제3방파제	케이슨식 혼성체	1951/10/14	태풍	파복사식, 균고불력의 이탈	2.5/1.2	+2.75	-11.21	+3.02	1.2***	
52	"	"	"	1965/9/10	태풍23호	제3체의 이동, 파복사식, 균고불력의 이탈	2.5/4.35	+2.76	-11.21	+3.02	"	
53	"	제5방파제	센들리식 척립체	1964/9/25	태풍20호	제3체의 경사, 소파공의 이탈	3.0/3.8	+3.10	-11.0	+5.0		
54	"	長田방파제	케이슨식 혼성체	1964/9/25	"	제3체의 경사, 소파공의 이탈, 상부콘크리트의 폐해	3.0/3.8	+2.98	-9.4	+4.5	1.2***	
55	和歌山	本港남방파제 下津	"	1950/9/3	태풍	파복사식, 균고불력의 이탈, 상부콘크리트의 폐해	5.0/4.0	+2.34	-6.90	+2.80	"	
56	"	本港북방파제	불력식 혼성체	1951/10/15	태풍	파복사식, 균고불력의 이탈, 기초부의 폐해	-5.7"	+2.74	-5.8	+2.8	"	
57	"	"	인공물력 경사제	1954/9/13~26	태풍12, 14, 15호	제3체의 이동, 파복사식, 균고불력의 이탈	-4.0"	-1.60	+2.60	1.1.5		
58	"	北港서방파제	케이슨식 혼성체	1964/9/25	태풍20호	제3체의 이동	5.0/6.0	+2.78	-9.4	+5.0	1.3***	
59	"	本港副방파제	"	1965/9/10	태풍23호	제3체의 이동, 경사, 침하	5.0/6.25	+1.96	-10.30	+2.80	"	시공중
60	"	南港방파제	사식식 경사제	1964/9/25	태풍20호	제3체의 이동, 소파공의 이탈, 침하	3.5/4.0	+2.78	-5.40	+5.50	1.4/3	
61	姫路	船瀬동방파제	케이슨식 혼성체	1964/9/25	"	제3체의 경사	3.4/3.8	+2.0	-7.50	+3.50	1.2***	
62	"	姫路서방파제	"	"	태풍	파복사식, 기초사식의 이동, 벽체 불력의 이동, 침하	3.0/3.8	+2.0	-9.50	+2.0	"	시공중
63	小松島	북방파제	불력식 혼성체	1950/9/3	태풍9호	파복사식의 이탈	2.5/2.5	+3.05	-7.0	+3.0	1.25***	"
64	高知	龍頭방파제	경사제	1955/7/16	태풍8호	파복사식의 이탈	-4.0		-1.83	+5.10	1.2	
65	博多	船瀬방파제	불력식 혼성체	1950/9/13	태풍	상부공의 폐해	-/-		-3.80	+3.20	1.2***	
66	苅田	동방파제	센들리식 혼성체	1963/8/9	태풍9호	파복사식의 이탈	2.3/1.9	+4.7	-4.5	+5.5	1.25	
67	鹿児島	新波止端	인공물력 경사제	1951/10/14	태풍	파복사식의 이탈, 천단면의 붕괴	-3.5	+4.60	-7.6	+7.3	1.1.5	
68	"	三五鄭波止端	"	"	"	인공물력의 제3체가 붕괴	-3.5	+4.6	-3.6	+6.0	1.3	

<표 A.6> 피해대상시설 일람표(1965년~1972년, 49항만 63사례, 일본)

번호	항명	시설명	구조형식	파괴일자	기상상황	주요 피해상황	파고비	조위	설치수심	천단고	사면경사	비고
1	敎別	島嶋파제	케이슨식흔성체	1965/1/8-10	지기압	케이슨, 근고불력 이동, T.T.P., 기초사석 이탈	5.0/5.0*	+1.6	-9.0	+1.0	1.2***	시공중
2	綱走	북방파제(丁)	"	1965/1/8-9	"	상부공 및 근고공 파괴	-/5.5*	+1.2	-10.7	+2.5	1.3***	
3	"	(甲)	콘크리트식흔성체	1966/2/20	"	상부공 파괴, 페복석 이탈	-/4.0*	+1.1	-1.2	+3.5	1.2	
4	"	동방파제	케이슨식흔성체	1971/11/9	"	케이슨 파괴 및 군연	4.0/3.7	+0.8	-8.8	+3.5	1.3***	
5	釧路	북방파제	블럭식흔성체	1967/11/9-11	"	상부공 파괴, 기초사석, 근공불력 이탈	-/4.0*	+1.2	-6.0	+3.3	*	
6	"	西港동방파제	케이슨식흔성체	1971/9/11-13	태풍26호	케이슨 이동, 기초사석 이탈	4.5/4.7	+1.5	-6.0	+2.2	*	시공중
7	"	"	"	1972/2/14	지기압	케이슨 이동, 기초사석 이탈	5.0/5.8	+0.5	-6.0	+2.0	*	
8	十勝	남방파제	"	1972/2/28	"	케이슨, 상부공 파괴	3.8/4.8	+1.3	-7.0	+5.0	*	
9	香形	서방파제	"	1966/10/28-30	"	케이슨 이동, 상부공 파괴, 페복석, 근고불력 이탈	-/6.4	+0.5	-4.5	+2.0	*	
10	"	"	"	1969/2/6	"	케이슨 이동, 상부공 파괴, 기초사석, 페복석, 근고불력 이탈	6.0/5.7	+0.3	-10.8	+2.3	1.5***	
11	天竜	북방파제	"	1965/12/16-17	"	케이슨 이동, T.T.P., 기초사석, 근고불력 이탈	4.0/-	+0.5	-9.0	+3.0	1.4/3***	
12	焼尻	북방파제	"	1969/2/5-6	"	케이슨 이동, 상부공 파괴, T.T.P., 기초사석, 근고불력 이탈	3.5/5.0*	+0.4	-8.3	+3.0	*	
13	留萌	남방파제	케이슨식흔성체	1965/2/21	"	케이슨 경사, 상부공 기초공 파괴	-/4.9	+0.1	-11.9	+1.75		
14	余市	남방파제	케이슨식흔성체	1965/12/17	"	페복석, 기초사석 이탈	3.0/4.0*	+0.4	-7.4	+3.0	1.3***	
15	岩内	서방파제(A부)	케이슨식흔성체	1966/3/5-6	"	케이슨, 상부공 파괴, T.T.P. 이탈	5.4/6/0	+0.7	-5.2	+1.65	1.1.3	
16	"	서방파제	케이슨식흔성체	1969/2/5-6	"	케이슨 이동·파괴	4.8/5.2	+0.4	-11.0	+3.5	1.3***	
17	函館	서방파제	"	1967/3/22-24	"	페복석, 기초사석, 근고불력 이탈	5.5/6.0*	+0.9	-15.0	+2.5	1.2***	
18	新潟東	서방파제	"	1970/1/31	"	"	6.6/6.8	+0.9	-11.0	+4.0	1.3***	
19	兩津	북방파제	블럭식흔성체*	1966/1/19-24	동절기풍랑	T.T.P. 이탈	3.5/4.5	+0.5	-7.0	+3.5	11.3	
20	柏崎	서방파제	콘크리트식흔성체	1966/1/19-20	"	체계 이동·침하, 페복석, 기초사석, 근고불력 이탈	5.5/5.8*	+0.8	-8.0	+4.5	1.25***	
21	越川	서방파제	케이슨식흔성체	1970/1/31	지기압	케이슨 이동·침하·파손, 페복석 이탈	5.5/7.9	+0.8	-9.0	+4.5	1.3***	
22	輪島	제방파제	블럭식흔성체	1972/12/1-2	"	체계불력 이탈, 상부공 파괴	4.5/5.0*	+0.6	-6.5	+3.1	*	
23	金澤	서방파제	케이슨식흔성체	1968/1/14-16	"	케이슨 이동, 페복석, 근고불력 이탈	6.0/4.0	+0.6	-7.0	+1.0	*	시공중
24	青森	袖川地區, 동방파제	"	1967/10/28	태풍34호	케이슨 이동, 페복석 이탈	2.5/2.5*	+0.8	-5.2	+1.5	1.2***	*
25	尻屋岬	방파제	"	1967/9/21-22	태풍27호	케이슨 이동	4.0/4.5*	+0.9	-10.0	+3.5	1.25***	
26	八戸	河原木, 동방파제	"	1970/7/6	태풍2호	케이슨 이동·군연, 페복석 이탈	5.8/4.8	+1.5	-7.2	+3.0	1.2***	시공중
27	"	"	"	1972/1/13	지기압	케이슨 이동·군연	5.8/4.6	+1.5	-7.5	+5.0	1.3***	*
28	宮古	出岐방파제	"	1971/1/16-17	"	케이슨 이동, 상부공 군연	4.0/4.6	+1.5	-15.5	+4.0	*	
29	江名	神방파제	"	1971/9/11-13	태풍26호	케이슨 이동, T.T.P. 기초사석 이탈	6.0/4.4*	+1.8	-6.4	+5.0	1.4/3***	
30	中之作	방파제(E)	케이슨식흔성체*	1971/9/11-13	"	소파공(中空상각분력) 이탈	5.3/7.0*	+1.8	-5.5	+5.0	1.1.5	
31	小名浜	제1서방파제	케이슨식흔성체	1971/4/29-30	지기압	케이슨 이동·파괴, 페복석, 기초사석 이탈	6.2/8.7	+1.4	-13.0	+5.0	1.2***	
32	"	제2서방파제	"	1970/1/31	"	케이슨 이동, 페복석, 기초사석 이탈	6.1/5.0	+1.8	-17.0	+2.5	1.3***	시공중

(주) * 소파블럭피복제, ** 목축, *** 페복공의 경사, 파고비: 설계파고/내습파고, 단위: m

<표 A.6 계속>

번호	항명	시설명	구조형식	폐쇄일자	기상상황	주요 피해상황	파고비	조위	설치수심	천단고	사면경사	비고
33	小名浜	제2사방파제	케이슨식흔성제	1972/11/13	처기압	케이슨 침하, 기초사적, 균고불력 이탈	6.1/6.8	+1.3	-16.0	*2.5	1:3**	시공중
34	鹿島	외港地區남방파제	"	1972/1/12	"	케이슨 이동, 파복공, 기초사적의 이탈	6.0/7.0	+1.2	-15.5	*5.0	"	시공중
35	"	"	"	1972/12/24	"	"	6.0/7.0	+1.2	-21.0	*3.8	"	시공중
36	燃灘	동방파제	"	1972/1/11-12	"	케이슨 이동, 파복석, 기초사적, 균고불력 이탈	3.5/7.0*	+1.4	-10.0	*4.0	1:2**	
37	沼津	외港서방파제	케이슨식흔성제*	1965/9/17-18	태풍24호	케이슨 이동·침하, T.T.P. 이탈	4.9/5.4	+1.9	-7.6	*4.0	1:1.2	
38	"	외港동방파제	"	1965/9/17-18	"	케이슨 이동, T.T.P. 이탈	4.9/5.4	+1.9	-4.5	*3.0	1:1.6	
39	宇久須	방파제	케이슨식흔성제	1967/10/27-28	태풍24호	케이슨 이동·침하, 파복석, 기초사적 이탈	3.4/-	+1.7	-9.0	*4.8	1:2**	
40	田子の浦	서방파제	케이슨제	1965/9/17	태풍24호	케이슨의 경사	8.0/9.2	+2.0	-12.0	*3.0		
41	浜名	동도류제	불리식흔성제*	1972/9/16-17	태풍20호	제체불력 경사, T.T.P. 이탈	-5.6	+1.8	-3.5	*3.1	1:2	
42	浜名	"	사석식경사제	1972/9/16	"	T.T.P. 상부콘크리트 블록 이탈	4.5/5.6	+1.8	-6.5	*5.0	1:4/3	
43	四日市	旭방파제	케이슨식흔성제	1972/9/16	"	케이슨 이동, 상부공 마운	4.0/3.5	+4.2	-9.0	*7.0	1:2**	
44	白子	남방파제	콘크리트식흔성제	1970/7/6-6	태풍2호	제체, 상부구 균열, 파복석 이탈	2.1/4.0*	+2.1	-4.0	*3.5		
45	鳥取	加露地區동방파제	불리식흔성제	1969/2/5-6	처기압	T.T.P. 침하·이탈, 제체불력의 활동	6.0/7.6	+0.6	-7.0	*2.2	1:1***	
46	境	外港地區남방파제	"	1970/8/21	태풍10호	제체불력 이동·침하, 파복석, 기초사적 이탈	-3.0*	+0.4	-4.0	*1.5	1:2**	
47	江津	須田地區도류제	사석불력식경사제	1965/7/23	호우	T.T.P. 제 철하·이탈, 세굴	-/-	-	-10.0	*1.0	1:1.3	
48	浜田	서방파제	불리식흔성제*	1971/1/4	태기압	상부공, 제체불력 전도, T.T.P. 이탈	6.0/8.0	+1.1	-12.0	*4.2	1:1.3	
"	"	"	"	1971/1/4	"	상부공, 제체불력 전도	6.0/8.0	+1.1	-18.0	*4.2	1:2**	
49	和歌山下津	南港외방파제	케이슨식흔성제	1971/8/30	태풍23호	케이슨 균열, 파복석, 기초사적, 균고불력 이탈	6.3/2.6	+1.8	-10.6	*4.3	1:3**	시공중
50	日和佐	동방파제	불리식흔성제	1968/7/28	태풍1호	파복석 이동·기초사적, 균고불력 이탈	5.0/4.5	+2.9	-2.5	*3.5	"	
51	今治	동방파제	"	1970/8/21	태풍10호	제체불력, 상부공 전도, 파복석, 기초사적 이탈	-3.5	+2.8	-13.5	*5.0	1:1.5**	
52	宝津	後免제1방파제	케이슨식흔성제*	1970/8/21	"	소파공(수호상각불력) 이탈	10.0/6.5*	+3.5	-10.0	*3.4	1:3	
53	久礼	双名島방파제	콘크리트식지름제	1970/8/21	"	근고공 이탈	5.0/5.0	+4.1	-1.5	*3.0	1:2**	
54	"	綾田서방파제	사석식경사제	1970/8/21	"	제체불력, 근고사적 이탈	5.0/5.0	+4.1	-1.8	*4.2	1:1.5	
55	上の加江	金ヶ雀방파제	콘크리트식흔성제	1970/8/21	"	근고사적 이탈	-5.0	+4.1	-4.0	*5.6	1:2	
56	下田	港口도류제	사석불력식경사제	1970/8/21	"	T.T.P. 제 침하·이탈	6.8/5.0	+2.9	-10.0	*3.5	1:4/3	
57	唐津	東港지구서방파제	케이슨식흔성제	1968/2/15	처기압	케이슨 이동	2.3/-	+2.4	-9.0	*1.6	1:2**	시공중
58	福岡	북방파제	"	1970/8/14	태풍9호	케이슨 이동·침하	2.5/4.5*	+3.4	-14.0	*5.5	"	
59	延岡	남도류제	사석불력식경사제	1971/8/30	태풍23호	T.T.P. 제 침하·이탈	4.5/4.0	+2.3	-4.5	*3.0	1:4/3	
60	宮崎	中도류제	"	1971/8/5	태풍19호	"	4.3/4.0	+3.6	-3.5	*3.0	1:1.3	
61	"	북도류제	"	1971/8/5	"	T.T.P. 제 침하·이탈	4.3/4.0	+3.6	-3.5	*3.0	"	
62	川内	도류제	불리식흔성제*	1969/6/28-7/7	장마전선	소파공(육각불력) 이탈, 세굴	5.0/-	+0.0	+5.0	1:1.5		
63	栗生	방파제	사석불력식경사제	1968/9/24	태풍16호	육각불력 제 침하·이탈	5.0/3.0	+3.0	-4.0	*5.0	"	

<표 A.7> 광해대상시설 일람표(1973년~1982년, 39항만 54사례, 일본)

번호	항명	시설명	구조형식	폐쇄일자	기상상황	주요 피해상황	파고비	조위	설치수선	천단고	사면경사	비고
1	留萌	서방파제	케이슨식 혼성체*	1978/11/18-20	동절기통풍	체계의 이동, 소파공의 이탈	8.85/6.8	+0.54	-18.0	+4.5	1:43	시공중
2	石狩灘新	島방파제	"	1975/11/7-9	저기압	소파공의 이탈, 해저지반의 세출	5.6/3.8	+0.56	-9.0	+3.9	1:43	
3	根室	花咲地區內방파제	직립소파블럭식 혼성체	1981/8/23-24	태풍15호	체계의 이동	1.8/1.9	+1.5	-5.5	+3.0		시공중
4	劍路	西港地區 남방파제	케이슨식 혼성체*	"	"	체계의 파손, 소파공의 이탈	6.3/5.9	"	-11.0	+5.3	1:1.5	*
5	鷗泊	本港地區 남방파제	1982/10/24-25	저기압	체계의 이동, 경사, 폐복공, 기초사석, 근고공, 소파공의 이탈	4.9/5.8	+0.56	-14.6	+4.3	1:1.5		
6	天塩	本港地區 북도류제	특수 양식	1980/10/22-26	"	소파공의 이탈, 해저지반의 세출, 세균방지공 파손	4.0/4.0	+0.45	-5.5	+2.7		
7	"	本港地區 남도류제	콘크리트식 혼성체	1982/10/25	"	체계의 경사, 기초사석, 근고공의 이탈, 해저지반의 세출	-7.0	+0.55	"	+1.3		
8	増毛	북방파제	케이슨식 혼성체	1974/10/31-11/1	"	체계의 이동, 폐복공, 근고공의 이탈	5.5/6.6	"	-7.0	+4.4	1:3**	시공중
9	むつ小川原	남방파제	케이슨식 혼성체*	1982/3/21-24	"	소파공의 이탈	5.7/6.27	+1.21	-12.37	+5.0	1:43	
10	八戸	白銀地區 남방파제	"	1980/12/23	"	체계의 이동, 파손, 소파공의 이탈	5.5/6.84	+1.75	-9.8	+5.0	1:43	
11	"	八大部地區 북방파제	"	"	"	소파공의 이탈	5.5/6.84	+1.75	-6.9~	+5.0	1:43	
12	深浦	동방파제	케이슨식 혼성체	1978/1/23	"	폐복공, 기초사석, 근고공, 소파공의 이탈	7.0/6.2	"	-11.0			시공중
13	"	서방파제	"	1979/3/31	"	폐복공의 이탈	7.6/6.3	"	-11.0		1:3**	*
14	"	"	"	1982/1/19-21	동절기통풍	체계의 이동, 폐복공, 기초사석, 근고공의 이탈	7.6/6.26	"	-11.0			
15	"	"	"	1982/3/21-22	저기압	체계의 이동, 소파공의 이탈	7.6/6.2	"	-17.5	+5.5	1:3**	*
16	久慈	방파제	케이슨식 혼성체*	"	"	소파공의 이탈, 파손	-6/89	+0.93	"	+6.5	1:43	
17	宮古	藤原방파제	케이슨식 혼성체	1974/2/8-9	"	폐복공, 기초사석의 이탈	4.0/4.5	+1.5	-9.0	-3.3	1:2**	시공중
18	"	"	"	1980/1/24-25	동절기통풍	체계의 이동, 폐복공, 기초사석, 근고공, 소파공의 이탈, 파손	4.4/4.6	"	-11.8	+4.0	1:43	*
19	"	"	케이슨식 혼성체*	1980/1/23-24	"	소파공의 이탈	4.0/7.31	+2.18	-10.7	+4.0	1:43	
20	八木	南港방파제	사석 틀 력식 경사체	1982/3/21-22	저기압	체계의 파손, 소파공의 이탈, 파손	-6/89	+0.93	"	+2.5	1:43	
21	金華山	방파제	케이슨식 혼성체	1981/8/23	태풍15호	체계의 이동, 소파공의 이탈	-5/95	+2.58	-10.2	+4.5	1:2**	
22	酒田	北港地區 남방파제	케이슨식 혼성체	1979/12/ 중순 ~1980/2/ 중순	동절기통풍	체계의 파손, 폐복공, 기초사석, 근고공의 이탈	10.7/10.8	+0.43	-9.0	+5.0	1:2**	
23	"	北港地區 애럼호안	"	1980/10/26	저기압	체계의 이동, 경사, 파손, 폐복공, 기초사석, 근고공의 이탈	3.3/6.1	+1.0	-9.0	+5.5	1:1.5**	
24	鼠ヶ觸	서방파제	케이슨식 혼성체*	1980/10/26-28	"	소파공의 이탈	-5/28	+1.0	-14.4	+6.0	1:1.5	
25	小名浜	本港地區 남방파제	케이슨식 혼성체	1981/8/22-23	태풍15호	체계의 이동, 파손, 기초사석, 근고공의 이탈	7.4/3.15	+2.3	-25.0		시공중	
26	"	小船留방파제	불력식 혼성체	"	"	체계의 이동, 청사, 폐복공, 소파공의 이탈	2.7/6.10	+1.75	-7.50	+3.5		
27	"	제2서방파제	케이슨식 혼성체*	"	"	체계의 이동, 파손, 폐복공, 소파공의 이탈	6.1/6.10	+1.75	"	+5.0	1:43	
28	鹿島	남방파제(F.G區)	케이슨식 혼성체	1980/12/24-25	동절기통풍	소파공의 이탈	8.6/6.37	+1.88	-14.0	+6.0	1:43	
29	大洗	本港地區 서방파제	사석 경사체	1981/4/20	저기압	폐복공, 기초사석, 근고공의 이탈, 해저지반의 세출	-3/74	+1.35	+4.0	1:43		

(주) * 소파블럭피복제, ** 목축 *** 폐복공의 경사, 파고비: 설계파고/내습파고, 단위: m

<표 A.7 계속>

번호	항명	시설명	구조형식	폐기일시	가상상황	주요 피해상황	파고비	조위	설치수정	천단고	사면경사	비고
30	新潟	東地地區서방파제	케이슨식흔성제	1976/10/28-29	계기압	체계의 이동, 경사, 파손, 폐복공, 근고공의 이탈	7.5/7.5	-0.82	-200			시공중
31	"	西港地區 제2서방파제	"	"	"	체계의 이동, 경사, 기초사석, 근고공의 이탈, T.T.P. 8톤 첨하, 이동	7.0/7.1	+1.03	-160	+4.48	1.3**	*
32	福井	남방파제	"	1976/10/29	"	폐복공, 기초사석의 이탈	7.5/6.23	-120	+5.0	1.25**	*	
33	"	"	"	1976/1/1 ~ 1/2 중순	동철기통량	폐복공, 기초사석, 근고공의 이탈	8.0/7.0	+0.32	-16.5	+5.5	*	*
34	内浦	音海地區 내부방파제	불럭식흔성제	1981/8/1-2	"	체계의 경사, 파손, 폐복공, 기초사석, 근고공의 이탈 해저지반의 세균	-6.58	+0.5	-60	+3.5	1.2	
35	御前崎	동방파제	케이슨식흔성제*	1981/8/1-2	태풍10호	체계의 이동, 경사, 파손, 폐복공, 기초사석, 근고공의 이탈	9.5/7.2	+1.83	-13.4	+5.0	1.4/3	시공중
36	熱海	방파제	케이슨식흔성제	1982/7/31-8/3	태풍10호	체계의 경사, 폐복공의 이탈, 파손	5.2/10.45			+3.5		
37	櫻駿	川原地區방파제	사석식경사제	"	"	체계의 이동, 폐복공, 기초사석, 근고공의 이탈 체계의 경사, 폐복공의 이탈	6.8/10.51	+2.34		+6.0	1.1.5	
38	越路	西部工業地區網子 서방파제	"	1980/9/11	태풍13호	폐복공, 기초사석의 이탈	-2.7	+2.13		+2.7	1.1.5	
39	新宮	三輪崎地區 북방파제	케이슨식흔성제	1982/8/1 1982/9/12	태풍10호 태풍18호	체계의 이동, 파손, 폐복공, 기초사석의 이탈	-4.21	+1.87	-80	+6.5		
40	境	外津地區방파제	케이슨식흔성제*	1982/9/24-25	태풍19호	체계의 이동, 폐복공, 근고공, 소파공의 이탈	4.1/5.3		-10.0	+1.0	1.4/3	시공중
41	赤崎	松ヶ谷地區 서방파제	"	1982/1/28-29	동철기통량	소파공의 이탈	-4.9		-10.5	+4.5	1.1.3	
42	三崎	井野浦지방파제	山庄식흔성제	1980/9/9-12	태풍13호	체계의 이동, 기초사석의 이탈, 세분면내 사석 훈출	-3.5	+2.70		+5.0	1.1.3**	
43	佐賀	鹿島방파제	사석불락식경사제	1980/9/11	"	소파공의 이탈	-8.41	+3.50	-12.0	+5.6	1.4/3	
44	宮崎	남방파제	"	1982/7/31-8/1 1982/8/26-27	태풍10호 태풍13호	폐복공, 기초사석의 이탈, 해저지반의 세균, 삼부공의 침하	6.7/4.62		-6.0	+5.6	1.4/3	
45	志浦志	神방파제	케이슨식흔성제	1980/9/10-11	태풍13호	체계의 이동, 경사, 파손, 폐복공, 기초사석, 근고공의 이탈	7.7/5.6		-11.5	+3.0	1.3**	시공중
46	"	外港地區동방파제	사석식경사제	1982/8/27	"	폐복공, 기초사석, 근고공의 이탈	-8.3	+2.5	-6.5	+5.5	1.1.3	
47	大里	大里地區서방파제	山庄식적립제*	1980/10/13-14	태풍19호	체계의 이동, 소파공의 이탈	4.4/6.0	+2.70	-9.0	+5.5	1.4/3	
48	宮之浦	북방파제	케이슨식흔성제*	1982/8/26	태풍13호	소파공의 이탈, 침하, 파손	-5.9	+2.9	-13.7	+5.0	1.3**	
49	土屋久永田	"	케이슨식흔성제*	1982/8/26	태풍18호	소파공의 이탈, 침하	-7.0*	+2.3		+5.10	1.4/3	
50	和泊	和泊地區남방파제	사석불락식경사제	1981/8/30 1981/10/21	태풍24호	소파공의 이탈, 침하	-14.26	+4.0	+4.0	+7.0	1.4/3	
51	那霸	新港地區중방파제	케이슨식흔성제*	1976/9/9-10	태풍17호	체계의 이동, 경사, 기초사석의 이탈	6.5/6.5	+2.66	-11.4	+6.0	1.4/3	시공중
52	"	"	"	1976/11/3-15	태풍22-23호	기초사석의 이탈, 세균	1.5/4.08	-2.11		+6.0	*	
53	"	"	"	1976/12/8-9	동철기통량	기초사석의 이탈	6.5/4.61	+1.88		+6.0	1.4/3	*
54	篠仁	久高地區방파제	콘크리트식흔성제*	1981/8/30	태풍18호	기초사석의 이탈, 소파공의 이탈	-3.81	+2.34	-1.70	+4.70	1.4/3	

<표 A.8> 해석사례 일람(五明 등, 1995)

번호	기상요인	파해 유무	파해구분	형명	내상지점	소파공형상	설치파랑 해저경사	사용블록	파해시파랑*	블록 파해상황	기타 파해상황
1		파해	간접,직접		隅角部 소파공	端部	$H_{1/3} = 7.1m$ $T=13.0s, 1/50$	사각블럭, T.T.P. 50t	$H_{1/3}=9.6m,$ $T=13.4s$ $\beta=-7.1^{\circ}$	침하,이탈	케이슨이동
2	파해(?)				표준단면부	端部		T.T.P. 50t		일부침하 (0-1.5m)	
3		파해	직접					사각블럭 50t		침하,이탈 (4-5m)	
4	1991년 2월 16-17일 동절기풍랑	파해	간접,직접	八戶항 중앙제1방파제	堤頭부 소파공	"	$H_{1/3} = 6.3m$ $T=13.0s, 1/100$	T.T.P. 50t	$H_{1/3}=7.5m$ $T=11.4s \beta=8.9^{\circ}$	침하,이탈	케이슨이동
5		파해(?)			표준단면부	端部	$H_{1/3} = 6.6m$ $T=13.0s, 1/100$	T.T.P. 40t	$H_{1/3}=5.9m$ $T=11.4s \beta=23.8^{\circ}$	일부침하	케이슨이동
6		파해		八戶항 중앙제2방파제	"						
7		파해(?)	간접,직접	(도제)		"	$H_{1/3} = 7.9m$ $T=12.0s, 1/30$	T.T.P. 64t	$H_{1/3}=9.3m$ $T=13.7s \beta=31.8^{\circ}$	이탈,파손 및 파괴	케이슨이동
8		파해	직접	小本항 심해방파제	堤頭부 소파공	端部(소단)		T.T.P. 20t			
9		파해	직접	長崎항 小江지구 심해방파제	"		$H_{1/3} = 5.5m$ $T=10.7s, 1/30$	T.T.P. 20,40t	$H_{1/3}=7.2m$ $T=15.6s \beta=36^{\circ}$	이탈,파손 및 파괴	케이슨이동
10		파해	간접		표준단면부			T.T.P. 20,40t			
11		무파해								무파해	
12	1991년 9월27일 태풍 19호	파해	간접	肱岬항 남방파제	堤頭부 소파공		$H_{1/3} = 3.9m$ $T=10.0s, 1/100$	T.T.P. 32t	$H_{1/3}=4.8m$ $T=15.1s$	침하,이탈 무파해	
13		무파해			표준단면부						
14		파해	직접	串木野신항 방파제(西)			$H_{1/3} = 6.0m$ $T=13.0s$	T.T.P. 50t			
15		파해	직접			"	$H_{1/3} = 7.7m$ $T=13.8s$	T.T.P. 64t			
16		파해	간접	茂木항 방파제(심해)	堤頭부	"	$H_{1/3} = 4.5m$ $T=12.5s$	T.T.P. 16t			이탈, 케이슨이동
17		무파해								무파해	
18	1987년 8월 31일 태풍 12호	파해	간접,직접	龜德항 방파제(南)	堤頭부, reef상	"	$H_{1/3} = 10.2m$ $T=16.0s, 1/50$	Dolos 50t (1:1.3)	$H_{1/3}=5.9m$ $T=12.2s \beta=39^{\circ}$	이탈	케이슨이동
19		파해	직접	渡嘉敷항 방파제(남)	堤頭부	"		T.T.P. 5,32t	$H_{1/3}=7.0m$ $T=14.4s \beta=51^{\circ}$	침하	케이슨이동, 침하
20	1988년 12월 - 1990년 9월	파해	간접	宮崎항 남방파제	"	"	$H_{1/3} = 8.9m$ $T=14.0s, 1/200$	T.T.P. 64t		침하	법선해저지반 의 세균

(주) * 파해시 파랑은 파해후 실시한 파랑추산에 의한 값임.

<표 A.9> 해석 및 답사사례일람(五明 등, 1997)

번호.	항명	대상지점	소파공형상	설치파 (유의파)	해저 경사	사용 블록**	폐해시 기상요인	파해시 (유의파)***	블록파해상황	기타	파해상황	현지답사
1	秋田항	제간부소파공(E)	7.5m, 13.5s	T50t형 (1:1.5)	1984/8 태풍10호	침하(최대3m)	1996/2					
2	남방파제	제간부소파공(E)	5.6m, 11.0s	T4, 20t형 1985/11	1985/9 태풍13호	침하(최대3.5m)	1996/2					
3	石狩만신항	우각부근점소파공	8.9m, 14.0s	T64t형 1990/9	1988/12~	설계파이하	침하(3~5m)	법선해저지반				
4*	宮崎항	제간부소파공(8)	10.0m, 14.0s	-	-	설계파이하	침하	법선해저지반				
5	남방파제	제간부소파공(14)	7.1m, 13.0s	T50t형 1/100	1991/2/16~17	침하	침하	법선해저지반				
6*	むつ小川原항	북측우각부소파공	6.3m, 13.0s	T64t형 1/100	1991/2/16~17	9.6m, 13.4s	일부침하(0~1.5m)	법선해저지반				
7*	八戸항	제 두부근점소파공	6.6m, 13.0s	T40t형 1/100	1991/2/16~17	7.5m, 11.4s	일부침하	법선해저지반				
8*	中洋 제2방파제	제 두부소파공(島)	6.0m, 13.0s	T50t형 1/100	1991/2/16~17	5.9m, 11.4s	일부침하	법선해저지반				
9*	串木野신항	제간부소파공(A)	7.7m, 13.8s	T64t형 1/100	1991/9/27	설계파이하	파손, 이탈, 침하	법선해저지반				
10*	방파제(西)	제간부소파공(B)	6.2m, 14.0s	T25t형 1/100	1993/8 태풍11호	6.6m, 12.0s	설계파이하	법선해저지반				
11	小名浜항	제간부소파공(1西)	6.1m, 14.0s	R25t형 (1:1.5)	1993/8 태풍11호	6.6m, 12.0s	침하, 통과	법선해저지반				
12	小名浜항	제간부소파공(10)	6.8m, 14.0s	T50t형 1/100	1993/8 태풍11호	8.6m, 12.0s	침하, 통과	법선해저지반				
13	방파제(제2西)	제간부소파공(11)	8.1m, 14.0s	-	1993/8 태풍11호	9.1m, 12.0s	침하, 통과	법선해저지반				
14	방파제(제12)	제간부소파공(12)	-	-	1993/8 태풍11호	4.9m, 10.8s	침하, 통과	법선해저지반				
15	제간부소파공(4)	-	-	-	1993/8 태풍11호	4.9m, 10.8s	침하, 통과	법선해저지반				
16	相馬항	제간부소파공(3)	4.5m, 15.0s	R25t형 (1:1.5)	1993/8 태풍11호	4.9m, 10.8s	침하, 통과	법선해저지반				
17	방파제(南)	제간부소파공(2)	-	-	1993/8 태풍11호	5.0m, 10.8s	침하, 통과	법선해저지반				
18	제간부소파공(1)	-	-	-	1993/8 태풍11호	4.6m, 10.8s	침하, 통과	법선해저지반				
19	新潟東항	표준·단부	8.3m, 12.9s	T50t형 (1:1.5)	1995/11	설계파이하	침하	법선해저지반				
20	방파제(西)	제간부소파공	7.1m, 12.0s	T32t형 1/100	1996/9 태풍17호	7.35m, 11.0s (파고계)	침하, 이탈	법선해저지반				
21	鹿兒島항	표준단면부	8.0m, 12.0s	T40t형 1/100	1996/9 태풍17호	-	-	법선해저지반				
22	남방파제	8.6m, 14.0s	T50t형 1/100	-	-	-	-	법선해저지반				

(주) * 五明 등(1995)이 해석한 결과. ** T: 테트라포드, R: 육각블럭. *** 파해시를 예상한 경우에 의한 병파체 전면의 파랑을 나타냄.

<표 A.10> 대규모 파랑파해사례(鹿島 등, 1986)

구분	시설명 청	파해상황	비고
설계파고 이상의 파랑내습	鶴泊항本港지구동외방파제 桿法華항동방파제乙部 福浦항제7방파제 浜田항서방파제 神戶항長田방파제기초부 尼崎항西방파제 大里항大里지구서방파제堤幹部 沼津항외항동방파제先端부 北九州항 대립호안 八戶해안/八太郎지구해안계방	케이슨 하나가 15m 활동하여 마운드로부터 낙하 케이슨 세 개가 크게 항내로 활동 천단의 변화 +2.0m → -2.0m " +4.2m → -5.0m 체체가 무너짐 " +4.0m → -0.0m " +5.4m → +0.5m " +5.0m → ±0.0m 항내로 무너짐 케이슨 이동량 최대 9.6m 케이슨 하나가 마운드 밖으로 뛰어나가 무너짐 천단의 변화 +2.6m → -3.5m 제체부콘크리트 파괴	설계파고 $H_{1/3} = 4.9m <$ 파해시파고 $H_{1/3} = 5.8m$ 파복체사용중량 7.36t < 파해시의 파복체필요중량 11.6t " 46.0t < " 설계파고 $H_{1/3} = 6.0m <$ 파해시파고 $H_{1/3} = 8.0m$ 파복체사용중량 3.68t < 파해시의 파복체필요중량 6.1t 설계파고 $H_{1/3} = 4.4m <$ 파해시파고 $H_{1/3} = 6.0m$ " 3.68t < " 설계파고 $H_{1/3} = 4.4m <$ 파해시파고 $H_{1/3} = 6.0m$ " 4.9m < " 5.42m 5.42m 5.42m 4.42m 설계파고 $H_0 = 6.0m <$ 파해시심해파고 $H_{1/3} = 6.2m$ 세굴된 해저모래가 급사면의 전면에 퇴적하고, 군형을 잃음 법선지반의 세굴 North Carolina주에서 캐내의 침식속도를 나타냄
해저지반의 세굴 및 이동	栗島內浦항제3방파제 江津항鶴田지구도류제堤頭部 Fort Fisher 해안제방(USA)	모두 파괴 천단의 변화 +1.0m → -4.0m 제방북측의 여러부분이 심하게 침식	
흡출에 의한 파해	長島 항제방	제체내의 토사가 흡출되어 공동화 현상	
소파공 미시공 부문의 파해 가능성	網代어항제1방파제	케이슨 세 개가 항내속으로 굴러 떨어짐	파복체사용중량 28.75t > 파해시의 파복체필요중량 17.5t
무원인	江ノ島어항방파제('72) 江ノ島어항방파제('80) 久慈항방파제 SINES항방파제(포루트찰)	제체가 53.5m에 걸쳐 파괴 52m에 걸쳐 케이슨이 활동, 파괴 제체는 원형을 유지하지 않음 천단의 변화 +19.0m → ±0.0m	지형이 암초로 복잡하고, 파의 짐증으로 예상 " 소파불력의 파괴가 파해를 확대

<표 A.11> 케이슨 파괴사례(高橋 等, 1998)

항명	구조형식	파쇄년월	케이슨 파괴상황	파해원인
增毛 ^{ヒナギ}	혼성재	1977/4	파손·속체움재료 유출, 균열	수심 금변부의 충격쇄파력
剣路 ^{カマクラ} 항	소파블럭피복재	1981/8	전면 벽면에 직경 1m의 구멍, 속체움 모래 유실	소파공 단부(시공시), 소파블럭의 충돌
小名浜 ^{コニミハ} 항	혼성재	1981/8	1합 균열·속체움 재료 유실	높은 마운드에 의한 충격쇄파력
御前崎 ^{エマモリ} 항	소파블럭피복재	1981/8	1합 손상(직경 1m의 미관통된 구멍)	소파공 단부(시공시), 소파블럭의 충돌
新宮 ^{シンノウ} 항	혼성재	1982/9	파손·균열·속체움 재료 유출	수심 금변부의 충돌쇄파력
A ^ア 항	소파블럭피복재	1987/2	1합 거의 완파, 속체움 재료 유출	불완전소파(시공시), 충격쇄파력, 우각부의 케이슨
B ^ビ 항	소파블럭피복재	1987/12	전면 벽면에 직경 3m의 구멍, 균열, 상부공의 파손	제2부 소파공 단부의 충격쇄파력
片泊 ^{カタボ} 항	소파블럭피복재	1987/8	1합이 거의 완파	소파공의 이탈·침하에 따른 충격쇄파력
鵜殿 ^{ウツミ} 항	혼성재	1990/11	전면 벽면에 직경 3m의 구멍	해저지반이 변동·수심변화, 높은 마운드에 의한 충격쇄파력
鹿島 ^{カシマ} 항	혼성재	1990/11	1합이 거의 완파	높은 마운드에 의한 충격쇄파력
むつ川原 ^{ムツガワハラ} 항	소파블럭피복재	1991/2	4합이 파손, 1합은 거의 완파	우각부 소파공 단부의 충격쇄파력
小本 ^{コトコ} 항	소파블럭피복재	1991/2	3합이 파손, 상부공 연장 42m 파손	소파공의 이탈·침하에 따른 충격쇄파력
南の浜 ^{ミナミノハ} 항	혼성재(돌재)	1991/9	1합 거의 완파	금정사해저에 의한 충격쇄파력, 제2부 케이슨 심해쪽 측벽의 파괴
K ^{ケイ} 항	소파블럭피복재	1996/9	몇 개의 벽면에 구멍	소파블럭의 충돌
H ^{エイ} 항	소파블럭피복재	1996조사	129합 가운데 18합이 구멍 등의 손상	소파블럭의 충돌
M ^{エム} 항	소파블럭피복재	1996/8, 1997/9	3군데의 벽면에 구멍	소파블럭의 충돌
W ^{ダブリュ} 항	혼성재	1977/8	1합 거의 완파, 상부공 연장 24m 파손	급경사해저에 의한 충격쇄파력

<표 A.12> 연간 원인별 피해시설수(1965~1991년, 135항만 186사례, 일본)

연도	태풍	동절기풍랑	저기압(풍랑)	지진	기타	합계
1965	219	5	29		6	259
1966	32	13	20		6	71
1967	31	8	12		5	56
1968	69	3	21	1		94
1969	11	8	15		5	39
1970	171	1	39		1	212
1971	65	6	17		3	91
1972	43	9	24		2	78
소계	641	53	177	1	28	900
1973	2	5	4	1	1	13
1974	53	6	14			73
1975	50	6	9		1	66
1976	85	2	13			100
1977	8	4	4			16
1978	69	2	4			75
1979	100	4	6		19	129
1980	38	22	31			91
1981	45	3	2			50
1982	59	1	19			79
소계	509	55	106	1	21	692
1983	20	13		6	1	40
1984	9	2	1			12
1985	43	8	1			52
1986	17	10				27
1987	89	31			1	121
1988	14	1	11			26
1989	16	11			1	28
1990	36	8	6			50
1991	171	54				225
소계	415	138	19	6	3	581
합계	1,565	246	302	8	52	2,173

<표 A.13> 연간 원인별 피해시설수(피해액 3,000만円 이상, 1983년~1991년, 일본)

연도	태풍	동절기풍랑	풍랑	지진	기타	합계
1983	5	11		3	1	20
1984	3	1	1			5
1985	12	8				20
1986	7	7				14
1987	34	10				44
1988	9		3			12
1989	4	6				10
1990	13	5	1			19
1991	57	26				83
합계	144	74	5	3	1	227

<표 A.14> 연간 상황별 피해시설수(피해액 3,000만円 이상, 1983년~1991년, 일본)

연도	제체 滑動·전도	소파공피해	기초공피해	근고공피해	피복공피해	기타	합계
1983	2	13	3	1		6	25
1984	1	3	1			1	6
1985	9	10	3	1		3	26
1986	4	11	5	1	1	3	25
1987	15	23	14	6	5	10	73
1988	1	10	2			2	15
1989	1	8	1			2	12
1990	5	9	7	3	1	2	27
1991	37	33	23	17	6	20	136
합계	75	120	59	29	13	49	345

(주) 각 피해사례에 대해 피해상황이 중복되는 항목도 있음.

<표 A.15> 원인별 상황별 피해시설수(피해액 3,000만円 이상, 1983년~1991년, 일본)

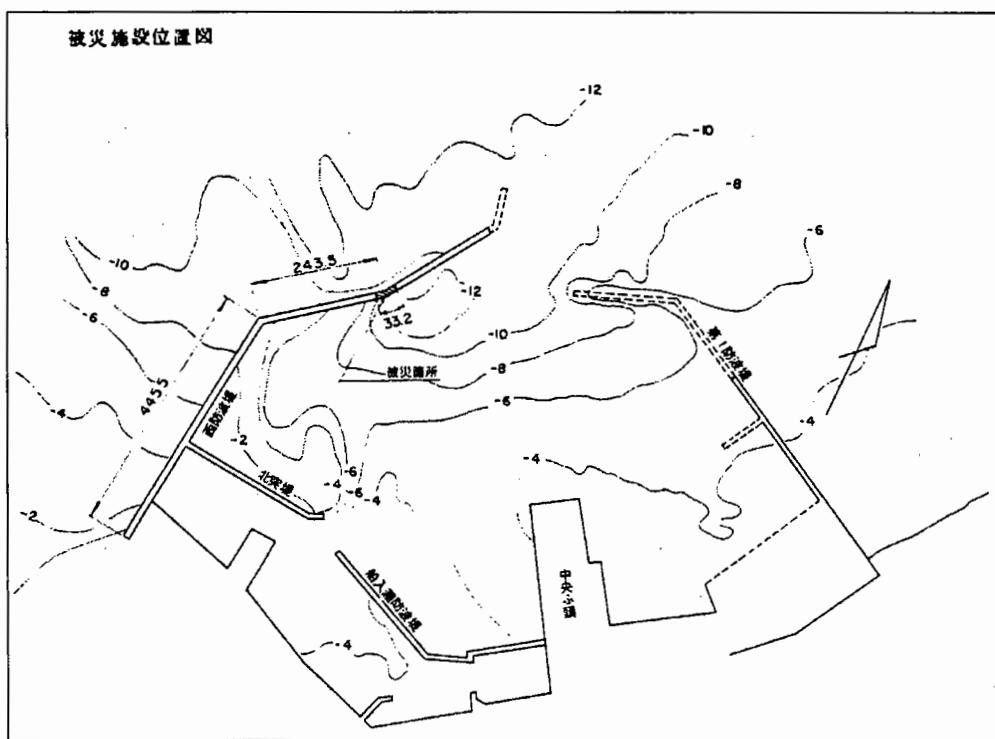
	제체 滑動·전도	소파공피해	기초공피해	근고공피해	피복공피해	기타	합계
태풍	59	62	44	20	7	38	230
동절기풍랑	16	54	13	9	6	6	104
풍랑		4	1			1	6
지진						3	3
기타			1			1	2
합계	75	120	59	29	13	49	345

(주) 각 피해사례에 대해 피해상황이 중복되는 항목도 있음.

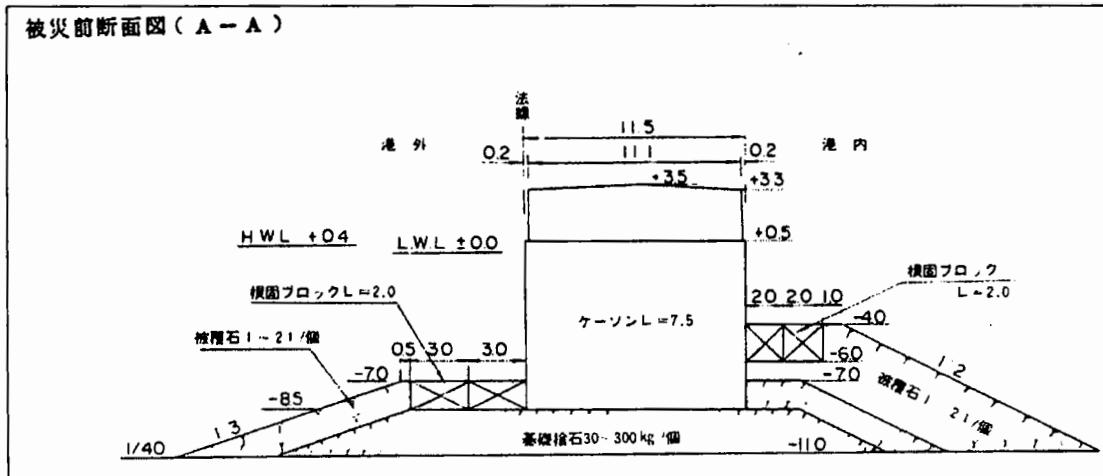
<표 A.16> 대표적 일본 피해사례

(1) 岩内항

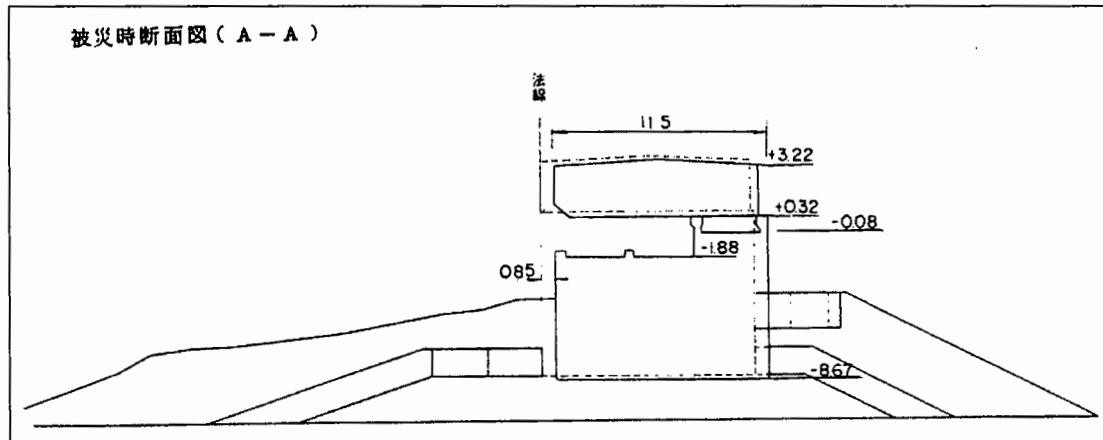
No.	1	시설명		구조형식	케이슨식 혼성제			
시설명	岩内항 서방파제	구조형식	케이슨식 혼성제					
완공일시	1965년 11월	피해일시	1969년 2월 5일~6일 (저기압)					
피해상황	굴곡부에 파랑이 집중되어 케이슨 2函이 이동하였고, 이 중 1函은 측벽이 파괴되어 속채움 재료가 유출되었음.							
피해전	설계자료	파고 주기	$H_{1/3} = 4.8m$ 11sec		파압 입사각	쇄파 $\beta = 0^\circ$		
피해시	피해수량	직립부	제체의 이동	2函, 최대 1.55m				
			제체의 傾斜	無				
		사석부	제체파손의 상황	케이슨, 덮개콘크리트 파괴, 속채움재료 유출				
			피복공의 이탈	無				
			기초사석의 이탈	無				
			근고블록의 이탈	無				
			소파공의 이탈	-				
		기타		-				
복구방법	자연조건	파고 파향 지속시간	$H_{1/3} = 5.2m$ (실측) NW 不明	주기 조위 풍속	不明 +0.35m 평균 W 18.0m/sec 순간최대 NW 30.8m/sec			
	케이슨 1函의 상부공을 제거하고, 속채움재료가 유출된 부분은 수증콘크리트(항외측) 및 쇄석으로 보충하였으며, 항외측 소파공은 1~2ton급 사석과 25ton급 中空삼각블럭을 2층으로 시공하였음(연장 40m).							



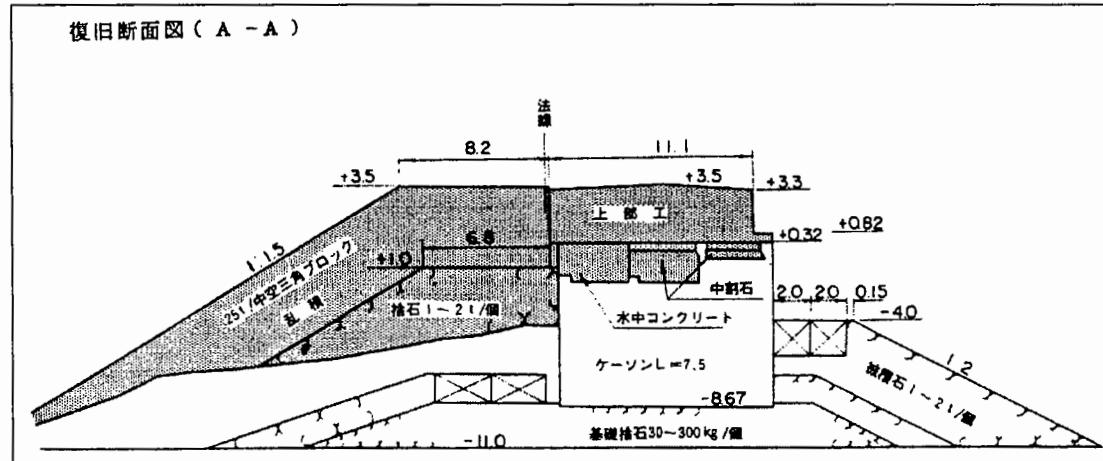
被災前断面図 (A-A)



被災時断面図 (A-A)

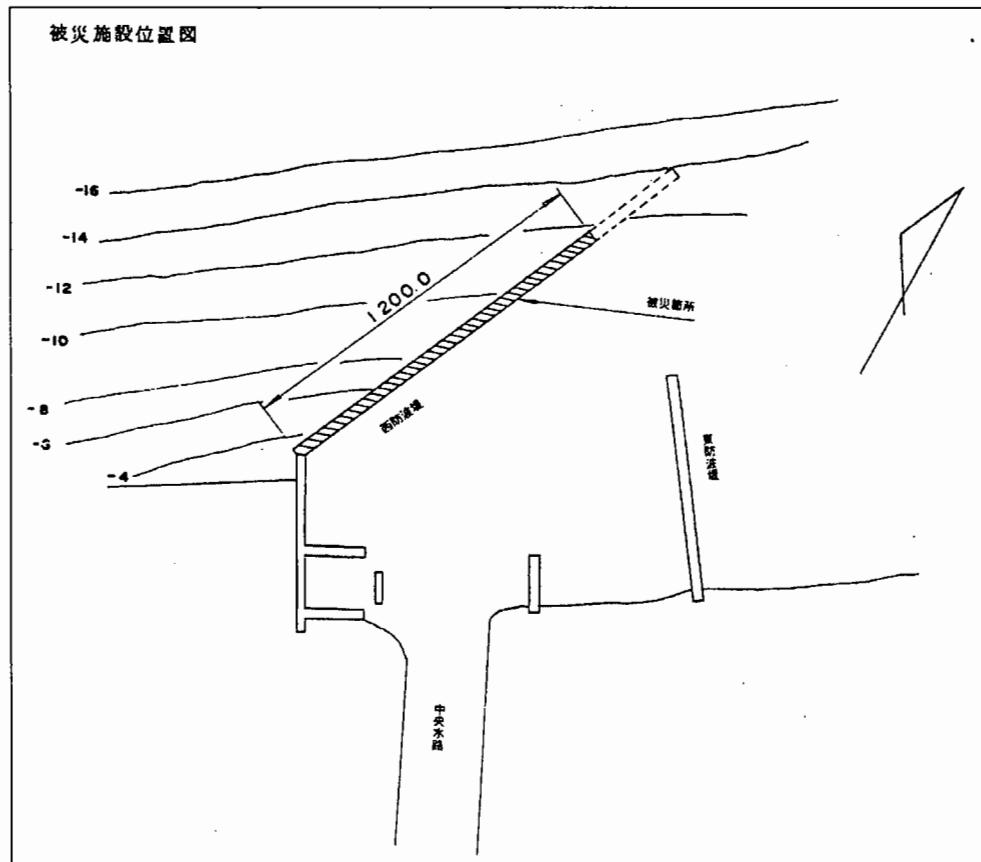


復旧断面図 (A-A)

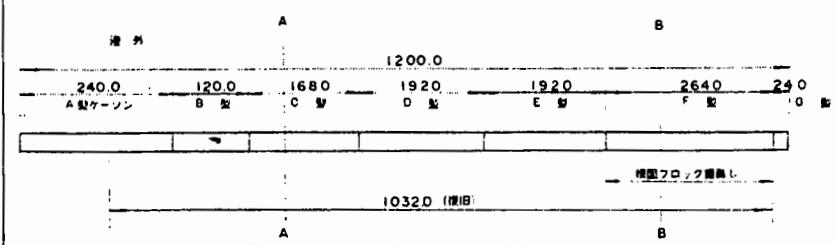


(2) 新潟東港

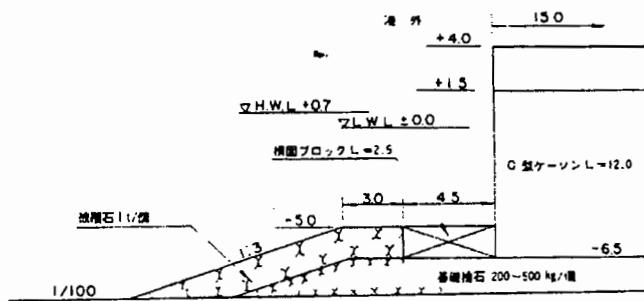
No.	2				
시설명	新潟東港 서방파제	구조형식	케이슨식 혼성제		
완공일시	1965년 ~ 1969년	피해일시	1970년 1월 31일 (저기압)		
피해상황	전면 범선의 지반이 세굴되어 기초사석, 피복석이 침하·이탈하고, 근고블럭이 이동하였음.				
피해전	설계자료	파고 주기	$H_{1/3} = 6.0 \sim 6.6m$ 12sec	파압 입사각	쇄파 $\beta = 17^\circ \sim 18^\circ$
피해시	피해수량	직립부	제체의 이동	無	
			제체의 傾斜	無	
			제체 파손의 상황	無	
		사석부	피복공의 이탈	항외, 延長 1,200m, 13,500m ³ 항내, 無	
			기초사석의 이탈	항외, 延長 1,200m, 4,400m ³	
	자연조건	근고블록의 이탈	延長, 264m, 100개		
		소파공의 이탈	-		
		기타	-		
		파고 파향 지속시간	$H_{1/3} = 6.75m$ (실측) NW ~ NNW 50시간	주기 조위 풍속	13.0sec +0.91m 평균 WNW 20.0m/sec 순간최대 WNW 34.3m/sec
복구방법	기초사석은 200~500kg급으로 보충하고, 근고블럭은 재설치 하였음. 8ton급 Tribar를 피복공으로 시공하고, 1ton급 사석으로 피복공을 근고하였음.				



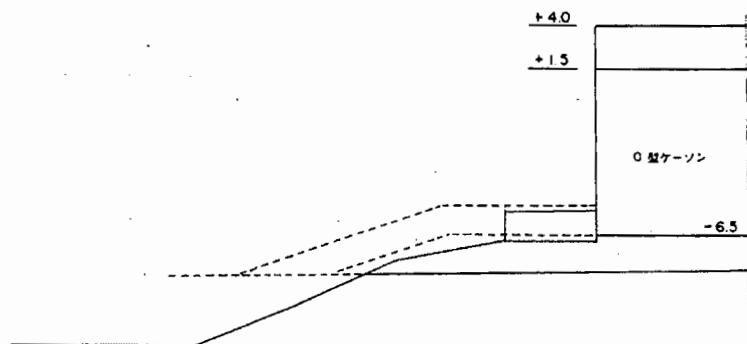
被災箇所平面図



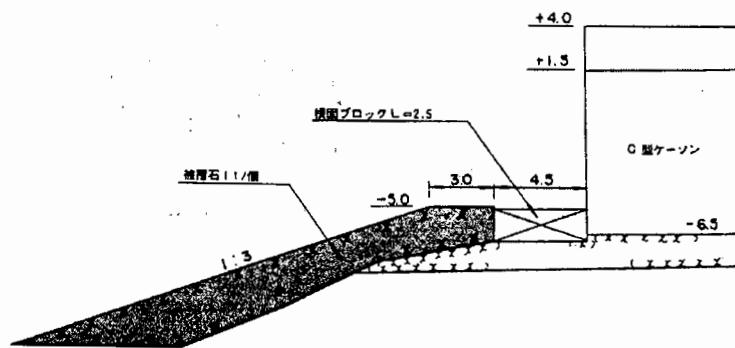
被災前断面図 (A-A)



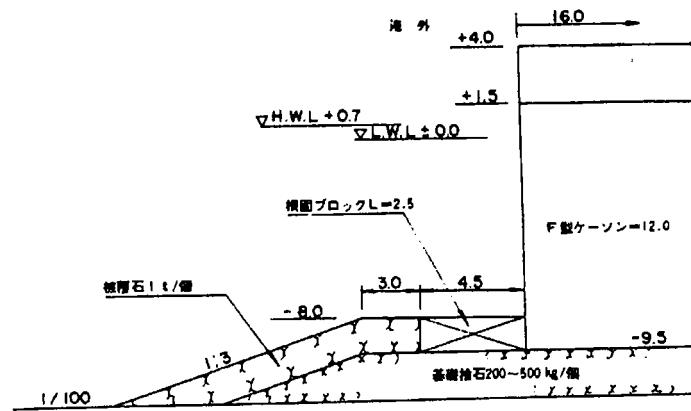
被災時断面図 (A-A)



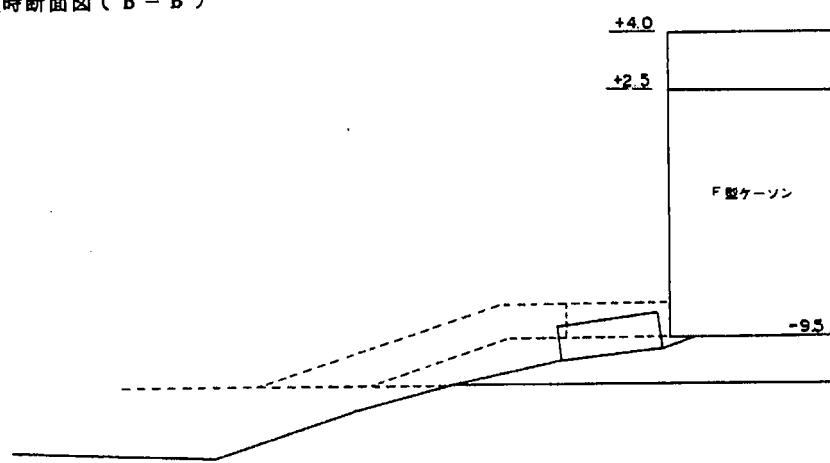
復旧断面図 (A-A)



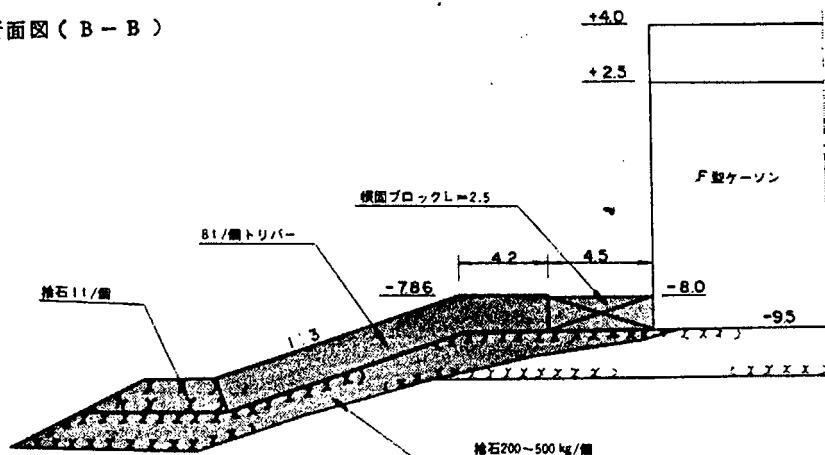
被災前断面図 (B-B)



被災時断面図 (B-B)

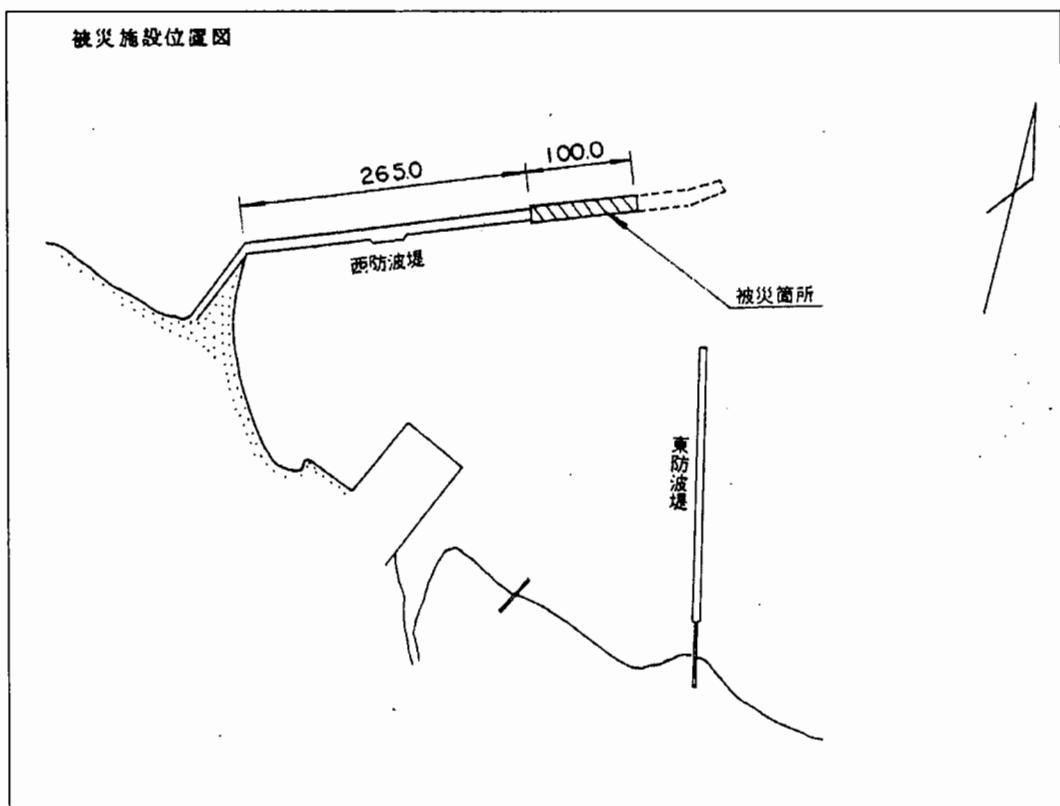


復旧断面図 (B-B)

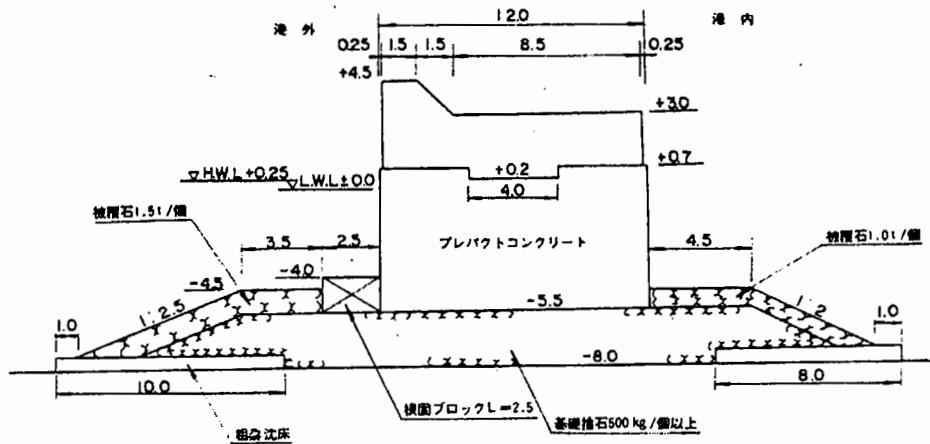


(3) 柏崎항

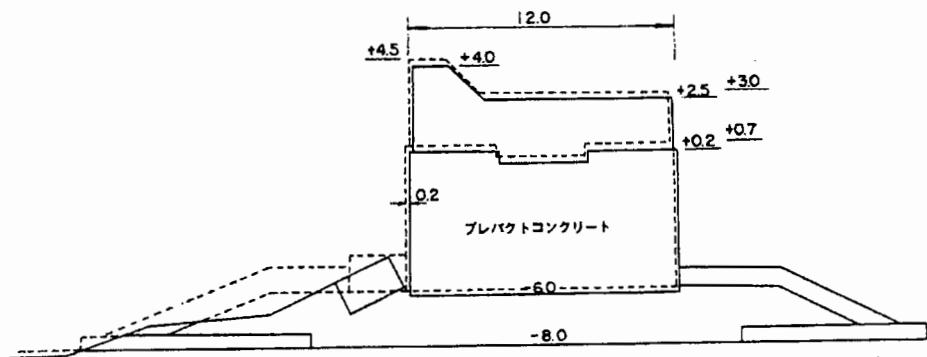
No.	3			
시설명	柏崎항 서방파제	구조형식	콘크리트식 혼성제	
완공일시	1963년 11월 5일	피해일시	1966년 1월 19~20일 (동절기풍랑)	
피해상황	기초사석 및 피복석 이탈, 근고블럭의 이동, 제체의 이동·침하			
피해전	설계자료	파고	$H_{1/3} = 5.5m$	파압 不明
		주기	不明	입사각 $\beta = 5^\circ$
피해시	피해수량	직립부	제체의 이동	2블록 최대 0.26m
			제체의 傾斜	1° 30'
			제체파손의 상황	제체의 균열
	사석부	피복공의 이탈	항외, 延長 100m, 5,640m ³	항내, 無
			항외, 延長 100m, 1,378m ³	
		기초사석의 이탈	항내, 延長 100m, 40개	
		근고블록의 이탈	延長, 100m, 40개	
		소파공의 이탈	-	
		기타	-	
	자연조건	파고	$H_{1/3} = 5.8m$ (목측)	주기 不明
		파향	NW	조위 +0.82m
		지속시간	不明	평균 NW 19.7m/sec 순간최대 NW 26.0m/sec
복구방법	피해가 발생한 구간에는 전면에 12ton급 中空삼각블럭을 난적으로 설치			



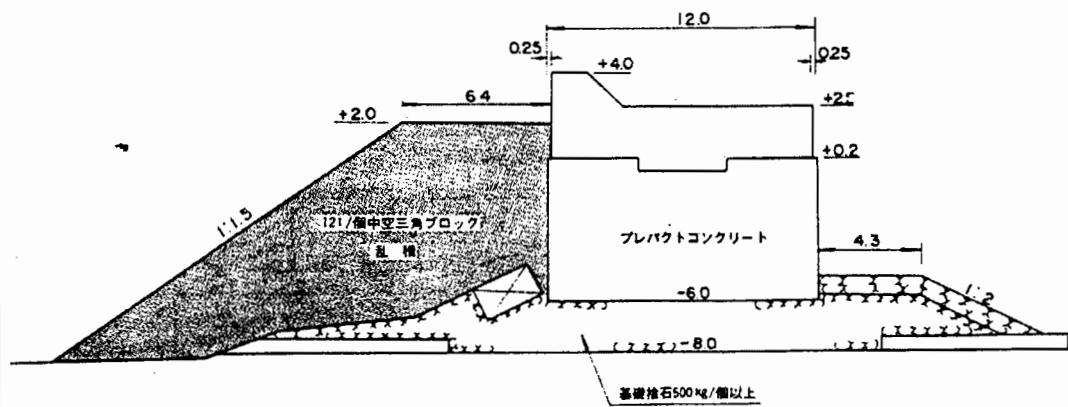
被災前断面図 (A - A)



被災時断面図 (A - A)

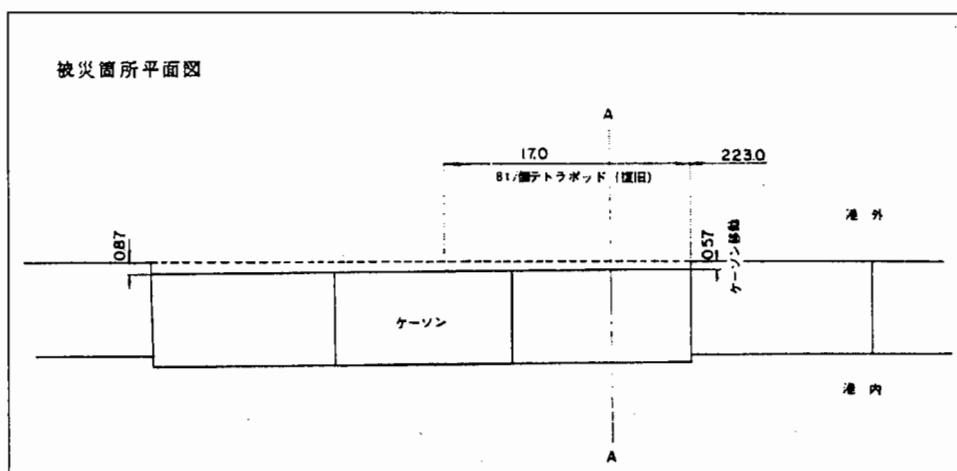


復旧断面図 (A - A)

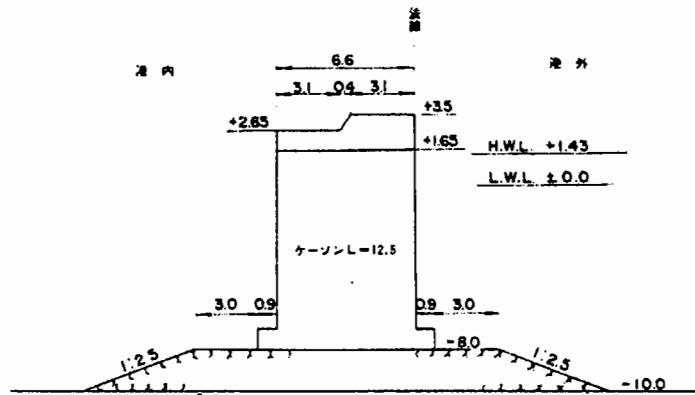


(4) 尻屋岬항

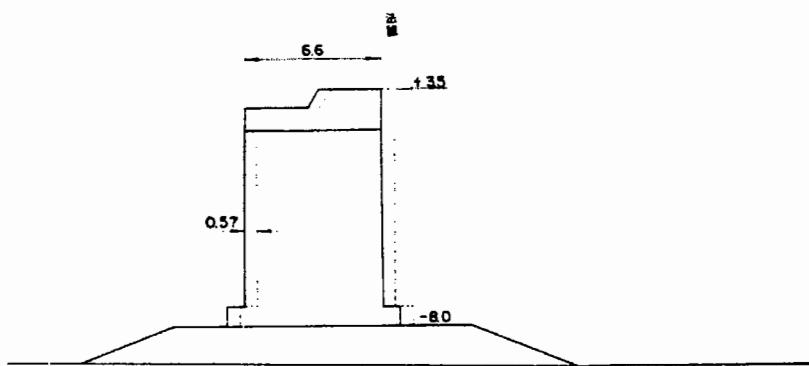
No.	4				
시설명	尻屋岬항 방파제	구조형식	케이슨식 혼성제		
완공일시	1963년	피해일시	1967년 9월 21~22일 (태풍 27호)		
피해상황	케이슨이 항내측으로 0.57m~0.87m 이동				
피해전	설계자료	파고	$H_0 = 4.0\text{m}$	파압	증복파
		주기	7.3sec	입사각	$\beta = 45^\circ$
피해시	직립부	제체의 이동	2函, 최대 0.87m		
		제체의 傾斜	無		
		제체파손의 상황	無		
	사석부	피복공의 이탈	-		
		기초사석의 이탈	無		
		근고블록의 이탈	-		
		소파공의 이탈	-		
	기타		-		
	자연조건	파고	$H_{1/3} = 4.5\text{m}$ (목측)	주기	不明
		파향	NW	조위	+0.9m
		지속시간	不明	풍속	순간최대 19.0m/sec
복구방법	이동한 케이슨은 복구하지 않고, 항외측에 200kg급 사석과 8ton급 T.T.P.를 난적으로 배치하여 소파공을 설치(1969년에 소파공이 이탈하여 케이슨이 이동하는 피해가 발생)				



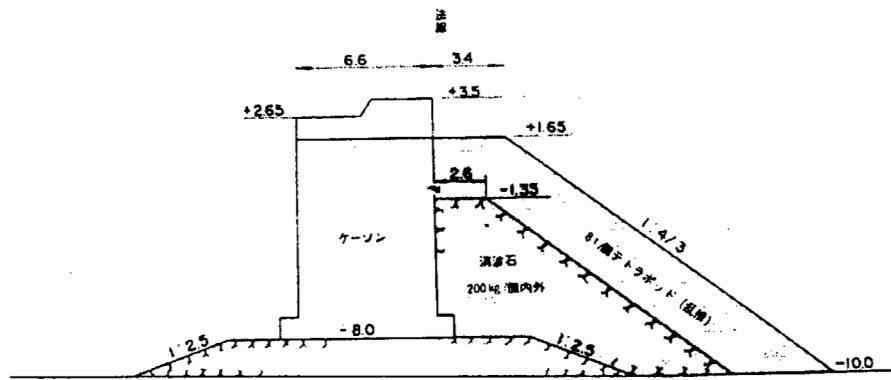
被災前断面図(A - A)

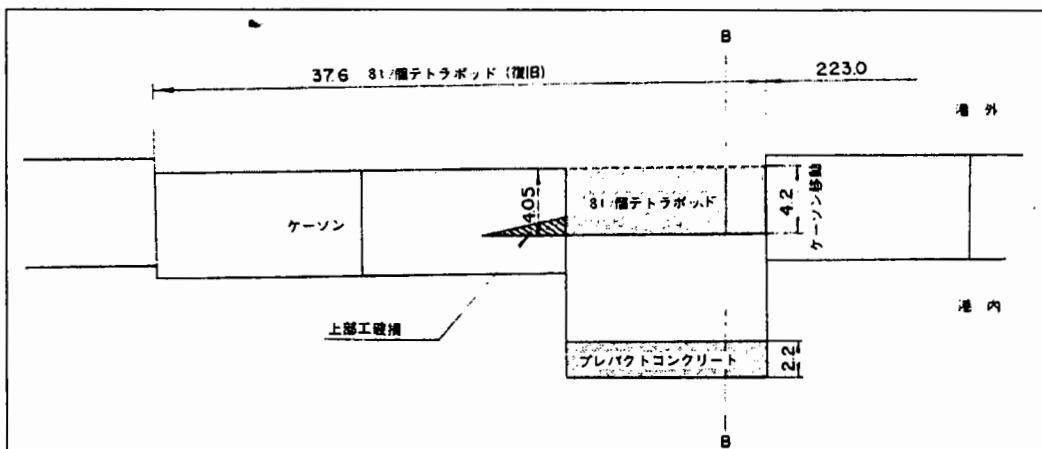


被災時断面図(A - A)

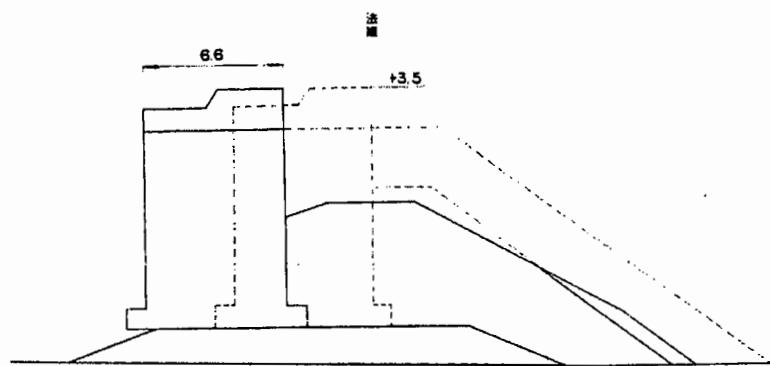


復旧断面図(A - A)

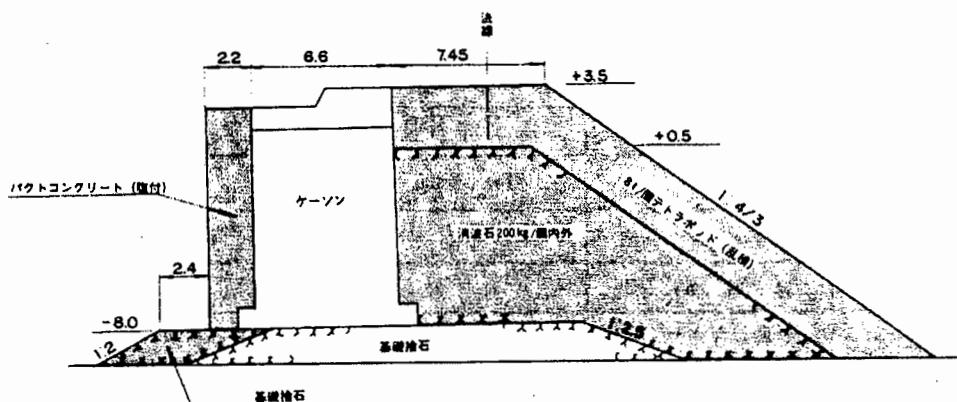




被災時断面図（B-B）

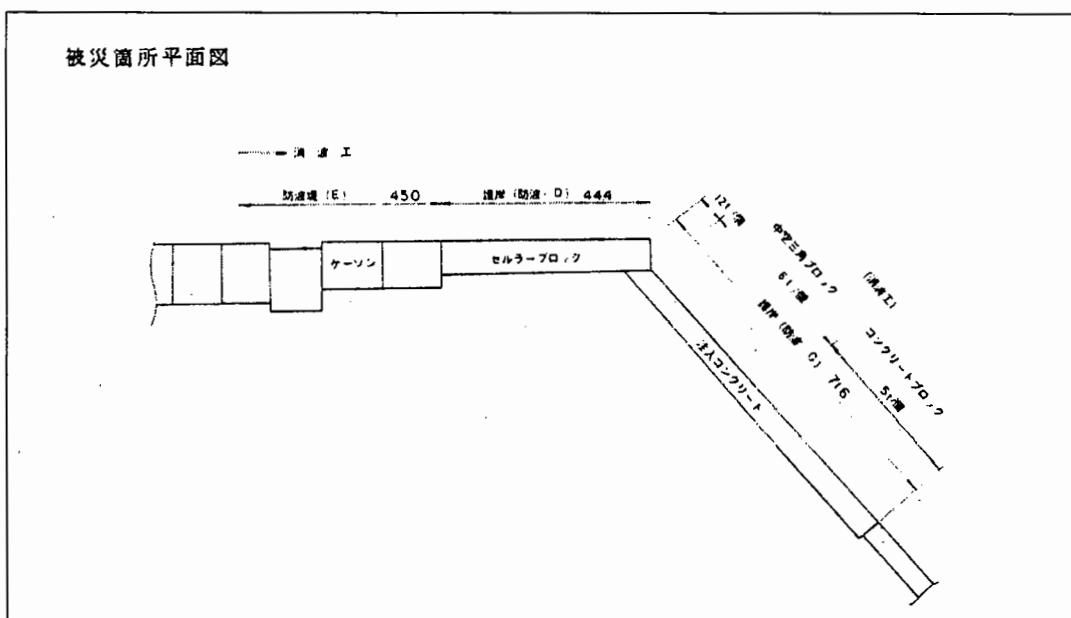


復旧断面図（B-B）

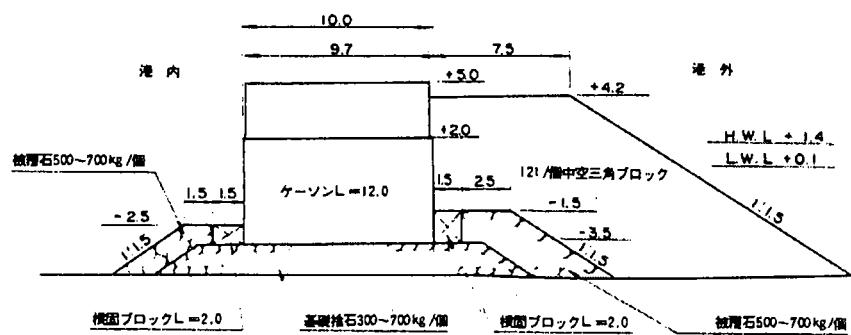


(5) 中の作항

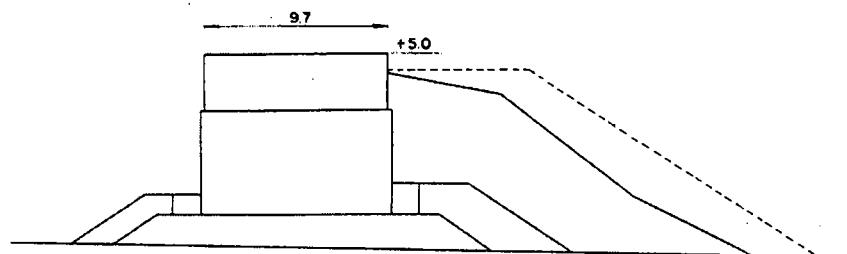
No.	5				
시설명	中の作항 방파제(E)	구조형식		케이슨식 혼성재	
완공일시	1967년 3월 25일	피해일시		1971년 9월 11일 ~ 13일 (태풍26호)	
피해상황	12ton급 中空삼각블럭 이탈, 호안(방파-D), 호안(방파-C)의 6ton급 中空삼각블럭 및 5.0ton급 콘크리트 블록이 이탈				
피해전	설계자료	파고	$H_{1/3} = 5.3m$	파압	쇄파
		주기	不明	입사각	$\beta = 0^\circ$
피해시	피해수량	직립부	제체의 이동	無	
			제체의 傾斜	無	
			제체 파손의 상황	無	
		사석부	피복공의 이탈	無	
			기초사석의 이탈	無	
			근고블록의 이탈	無	
	자연조건	소파공의 이탈			中空삼각블럭 80개
		기타			-
		파고	$H_{max} = 7.0m$ (목측)	주기	不明
		파향	ESE	조위	+1.76m
		지속시간	4시간	풍속	평균 ESE 7.2m/sec 순간최대 N 10.7m/sec
복구방법	제체의 보강과 더불어 소파공의 천단을 +5.0m까지 높여 복구				



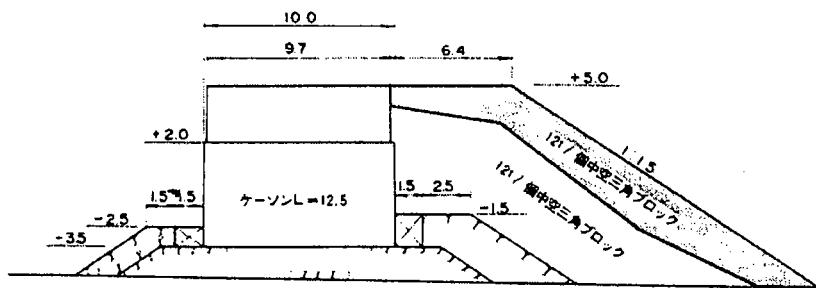
被災前断面図（防波堤 E）



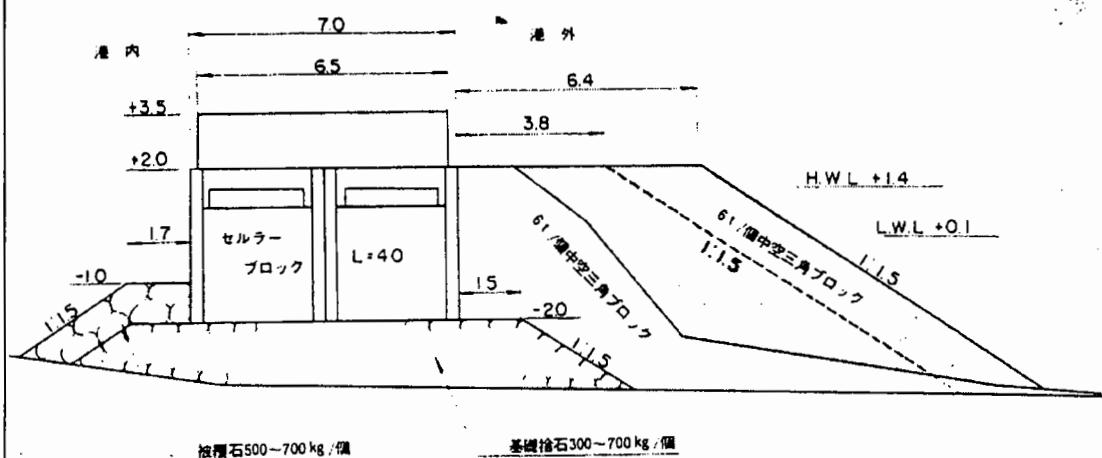
被災時断面図（防波堤 E）



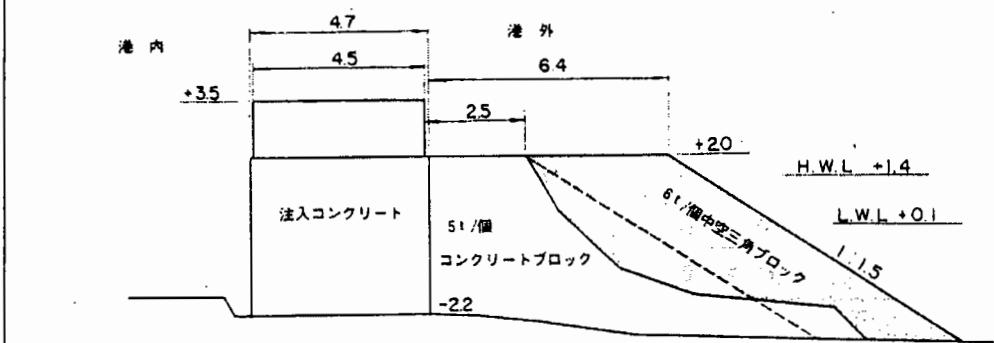
復旧断面図（防波堤 E）



復旧断面図（護岸防波 - D）



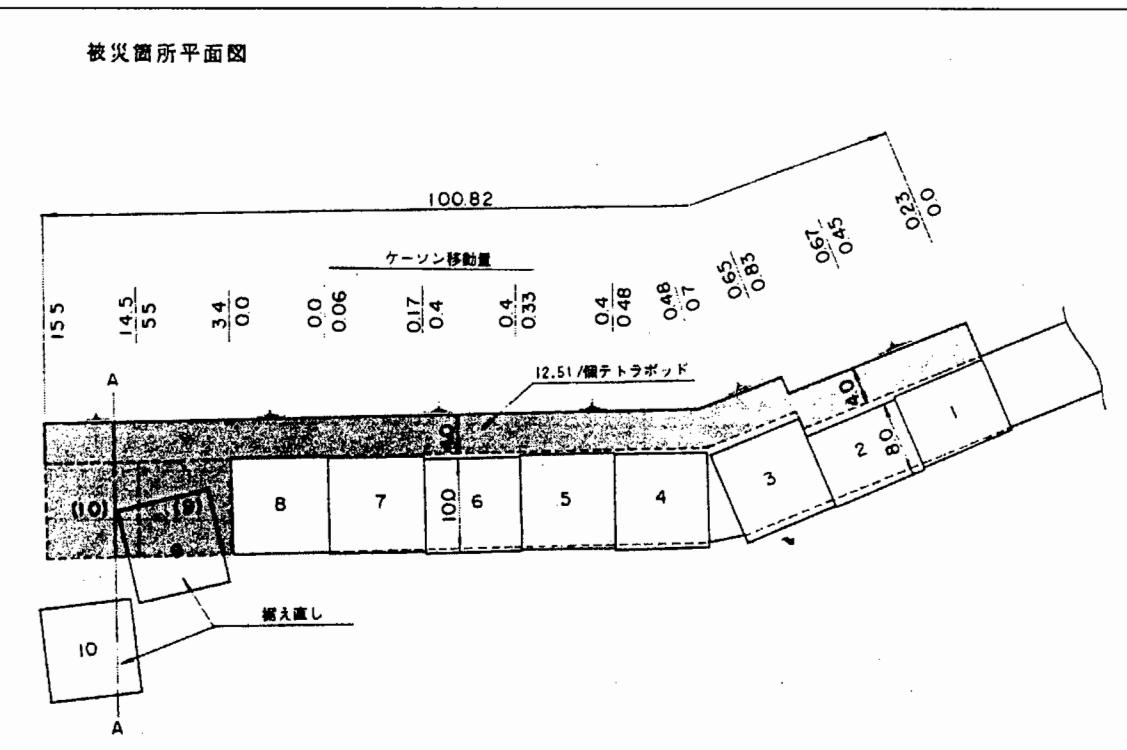
復旧断面図（護岸防波 - C）



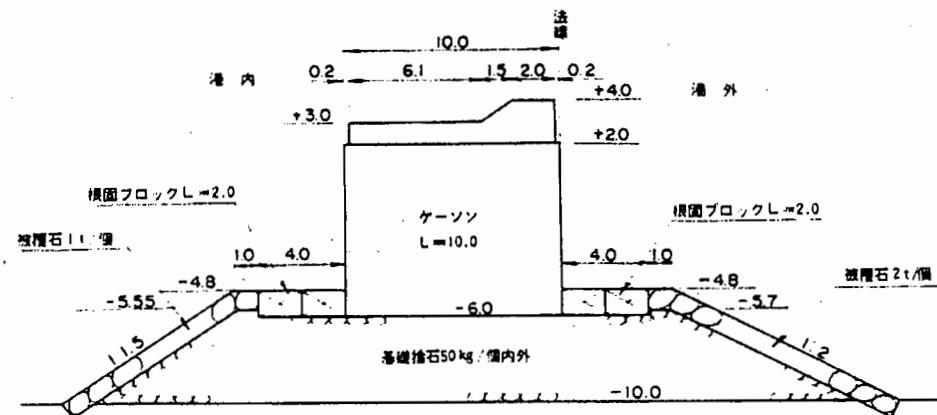
(6) 热海港

No.	6					
시설명	热海港 동방파제	구조형식	케이슨식 혼성제			
완공일시	1971년 12월 25일	피해일시	1972년 1월 11~12일 (저기압)			
피해상황	피해구간은 100.82m로 케이슨 10函 가운데, 9函이 이동, 특히 先端 2函은 마운드에서 이탈. 이 때문에 항내측 피복석, 기초사석, 근고블록이 이탈. 또한, 항외측 피복석, 기초사석도 이탈.					
피해전	설계자료	파고 주기	$H_{1/3} = 3.5m$ 9.0sec	파압 입사각		
피해시	피해수량	직립부	제체의 이동 제체의 傾斜 제체파손의 상황	9函, 최대 15.5m 21° 無		
		사석부	피복공의 이탈 기초사석의 이탈 근고블록의 이탈 소파공의 이탈	항외, 延長 70.4m 수량 不明 항내, 延長 100.8m 727.5m ³ 延長 20m, 443m ³ 항외, 延長 28.0m, 38개 항내, 無		
			기타	-		
			파고 파향 지속시간	$H_{max} = 7.0m$ (목측) 不明 不明	주기 조위 풍속	不明 +1.4m $N \sim NNE$ 12~17m/sec
			자연조건			
	복구방법	크게 이동된 先端의 2函을 바로 거치하고, 항내측 피해지점은 원상복구, 항외측은 피해구간 全延長에 걸쳐 12.5ton급 T.T.P.로 소파공을 설치.				

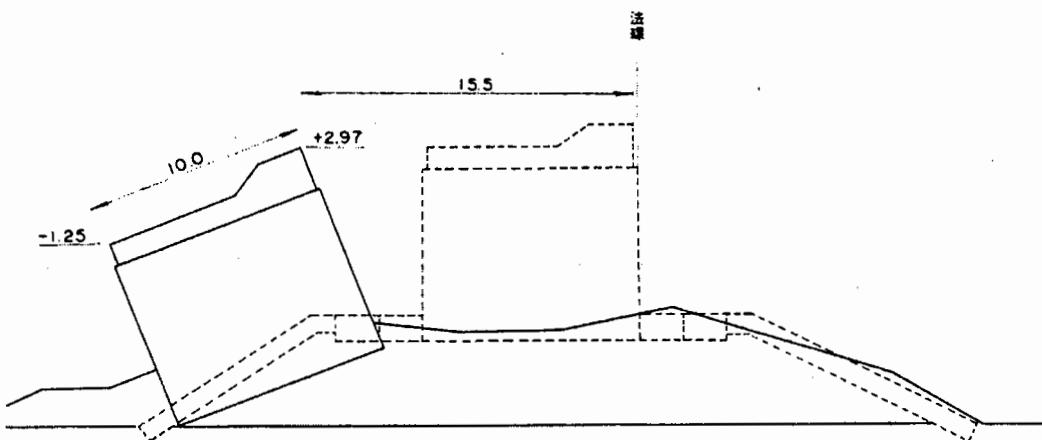
被災箇所平面図



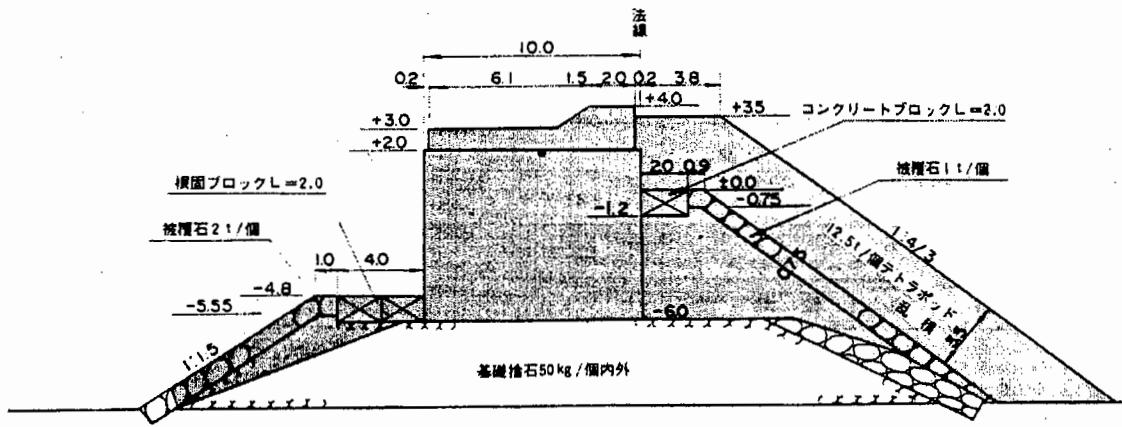
被災前断面図 (A-A)



被災時断面図 (A-A)

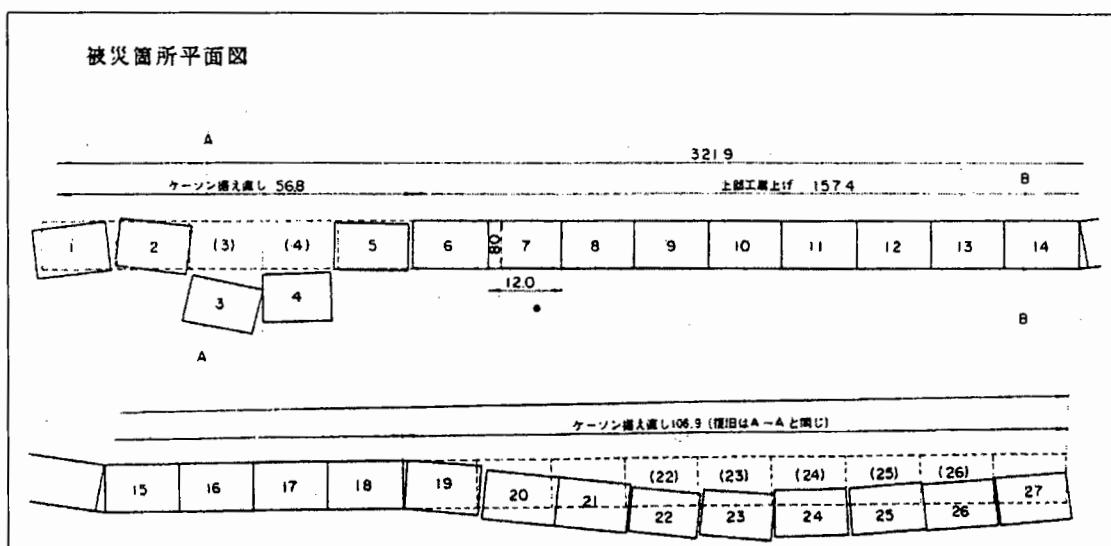


復旧断面図 (A-A)

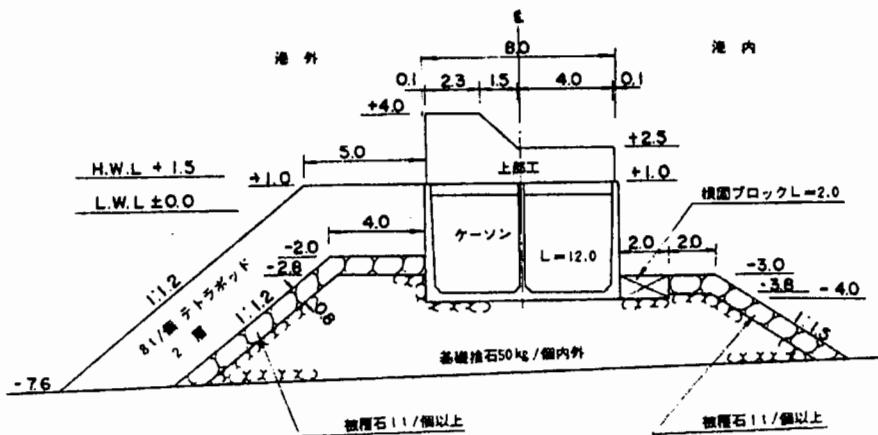


(7) 沼津항

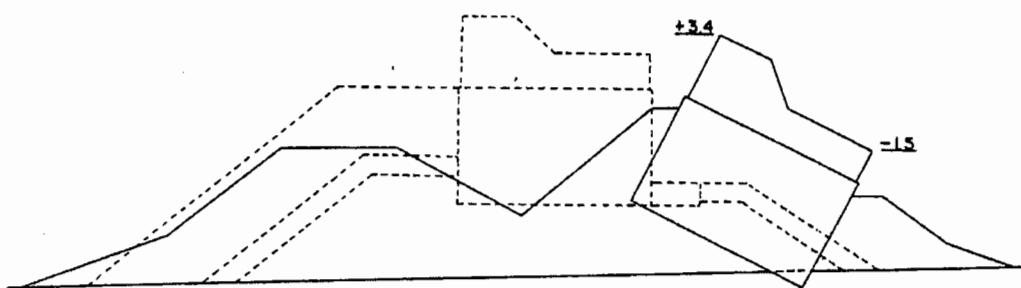
No.	7			
시설명	沼津항 외항 서방파제	구조형식	케이슨식흔성제	
완공일시	1965년 3월 25일	피해일시	1965년 9월 17~18일 (태풍24호)	
피해상황	피해구간 321.9m에서 케이슨 14번이 이동하고, 특히 3, 4호 번은 기울어져 침하됨. 케이슨 전면의 T.T.P.가 全延長에 걸쳐 이탈. 항내측 피복석도 많은 피해가 발생.			
피해전	설계자료	파고	$H_{1/3} = 4.9m$	파압 쇄파
		주기	12.0sec	입사각 $\beta = 30^\circ$
피해시	피해수량	직립부	제체의 이동	14번, 최대 9.6m
			제체의 傾斜	30°
			제체파손의 상황	無
		사석부	피복공의 이탈	항외, 無 항내, 延長 182m $986m^3$
			기초사석의 이탈	延長 187m, $1,738m^3$
			근고블록의 이탈	延長 324m, 163개
			소파공의 이탈	延長 321.9m, 2,124개
			기타	-
	자연조건	파고	$H_{max} = 5.42m$ (실측)	주기 17.9sec
		파향	不明	조위 +1.88m
		지속시간	不明	평균 7.2m/sec 순간최대 33.0m/sec
복구방법	피해가 발생한 항내측 피복석은 원상복구, 이동한 케이슨은 재거치하고, 불충분한 것은 새로 제작하여 거치. 항외측 피복부분은 20ton급 T.T.P.로 소파공을 복구. 또한, 제체가 침하한 지점은 상부공을 침하부분 만큼 시공.			



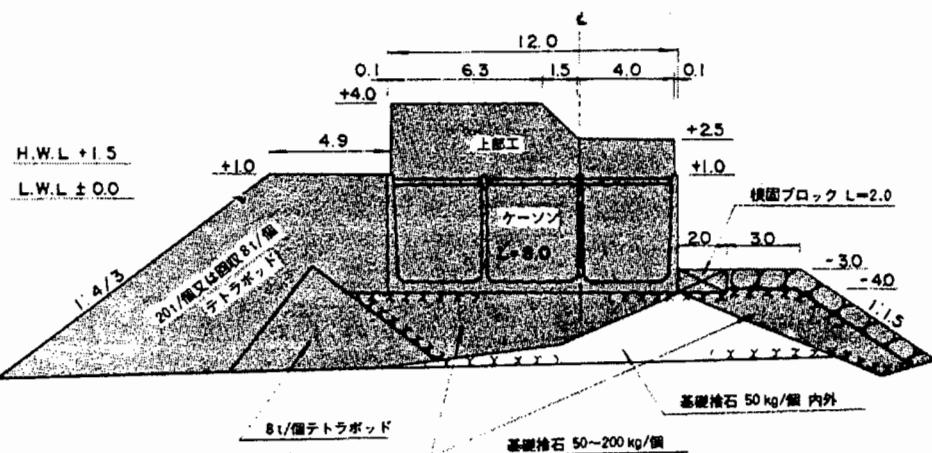
被災前断面図



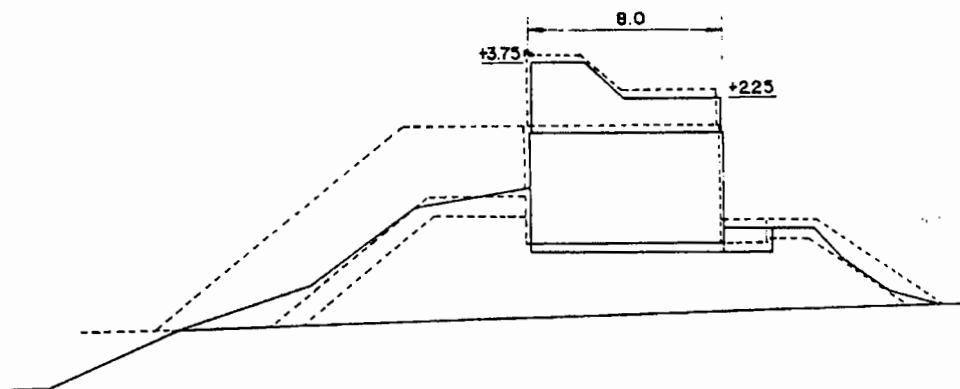
被災時断面図 (A-A)



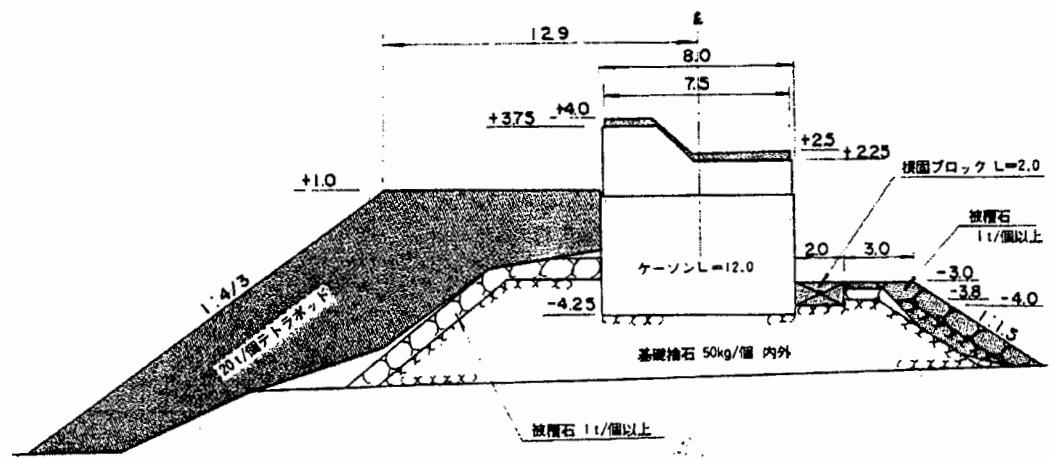
復旧断面図 (A-A)



被災時断面図（B-B）

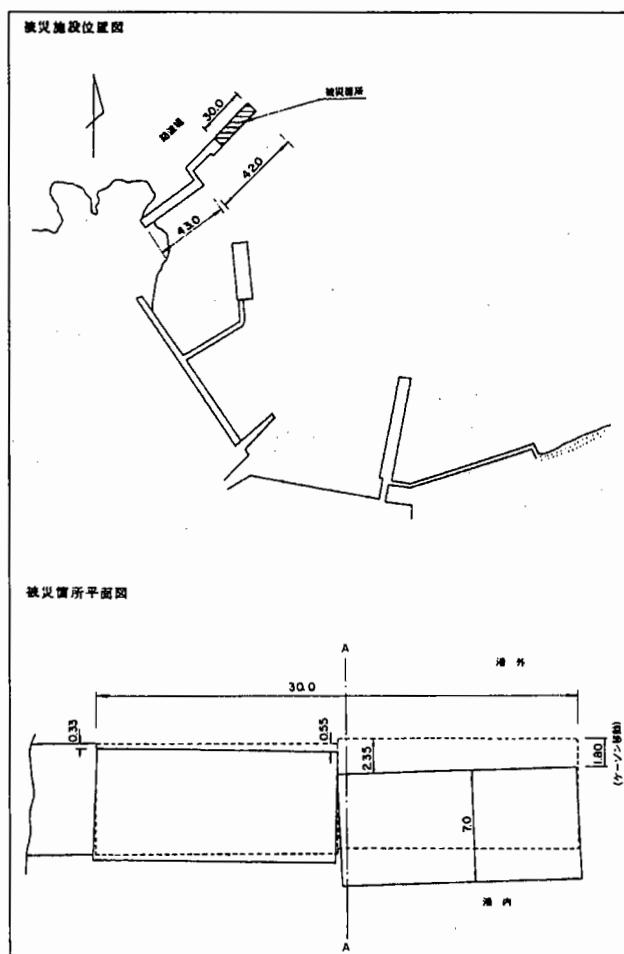


復旧断面図（B-B）

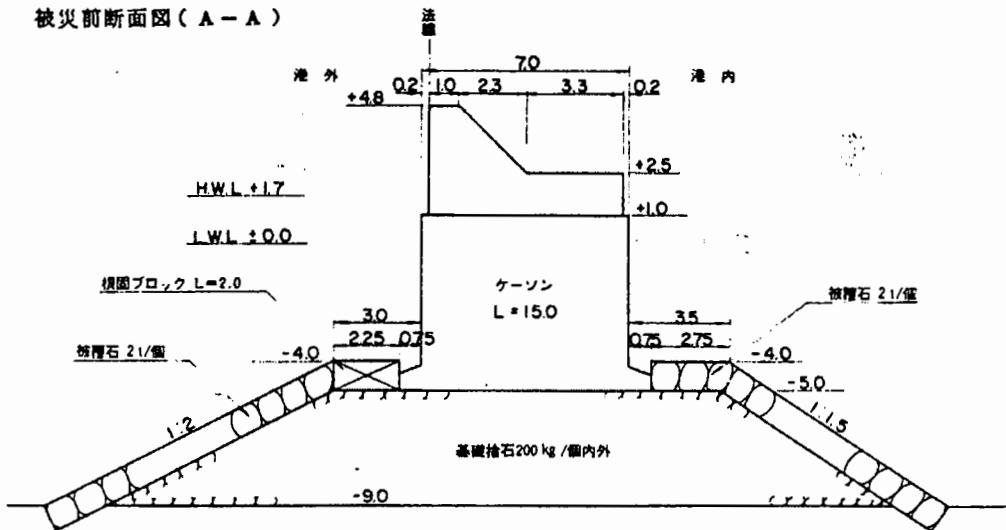


(8) 宇久須航

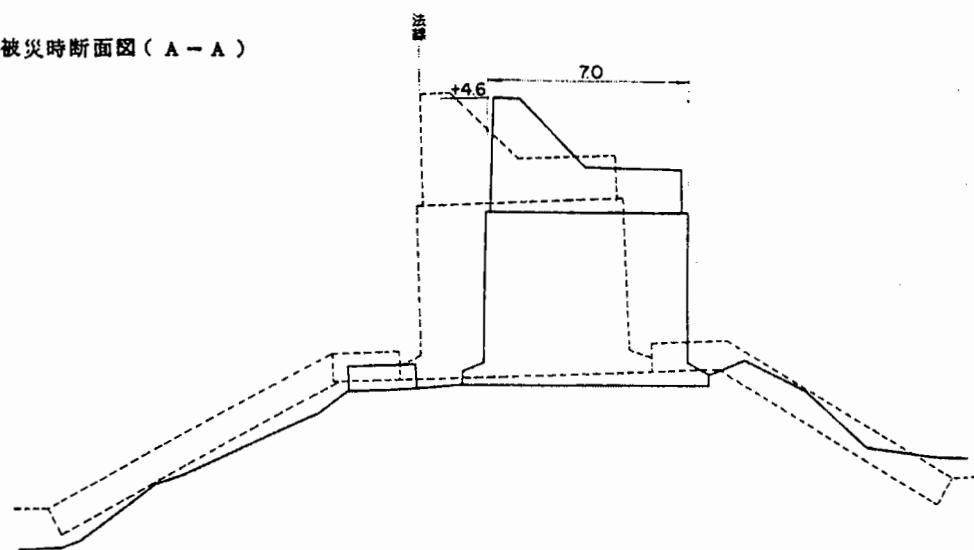
No.	8			
시설명	宇久須航 방파제	구조형식	케이슨식 혼성제	
완공일시	1964년 3월 25일	피해일시	1967년 10월 27~28일 (태풍34호)	
피해상황	先端 케이슨 2函이 이동·침하하고, 항외측의 피복석, 기초사석 및 항내측 피복석이 이탈.			
피해전	설계자료	파고 주기	$H_{1/3} = 3.4m$ 不明	파압 입사각 $\beta = 20^\circ$
피해시	피해수량	직립부	제체의 이동 제체의 傾斜 제체파손의 상황	2函, 최대 2.35m 不明 無
		사석부	피복공의 이탈 기초사석의 이탈 근고블록의 이탈 소파공의 이탈	不明 不明 不明 -
		기타		-
		파고 파향 지속시간	不明 不明 不明	주기 조위 풍속
				不明 不明 不明
	자연조건			
복구방법	이동한 케이슨, 피복석 및 기초사석은 복구하지 않고, 항외측에 5ton급 中空삼각블럭으로 소파공을 설치하고, 항내측 피복석은 원형으로 복구.			



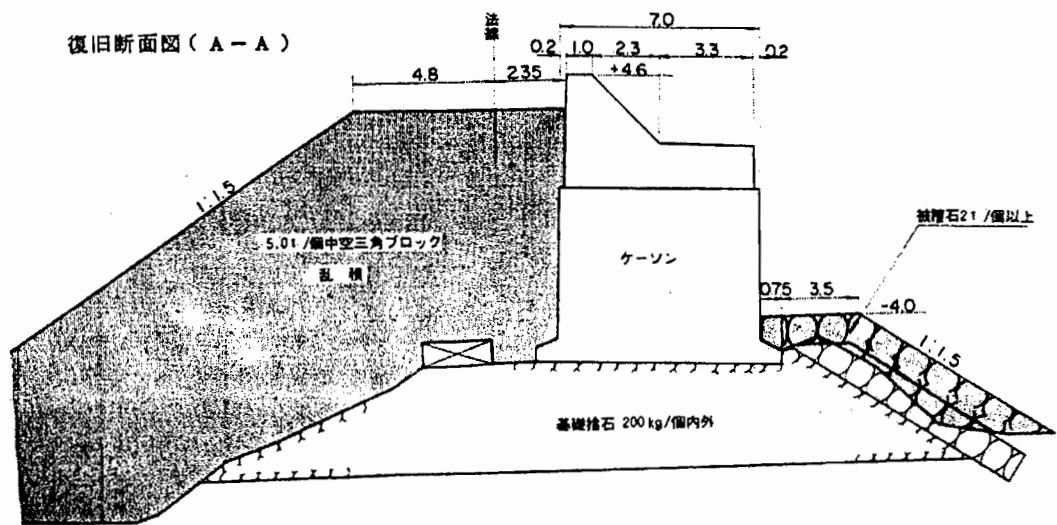
被災前断面図 (A-A)



被災時断面図 (A-A)

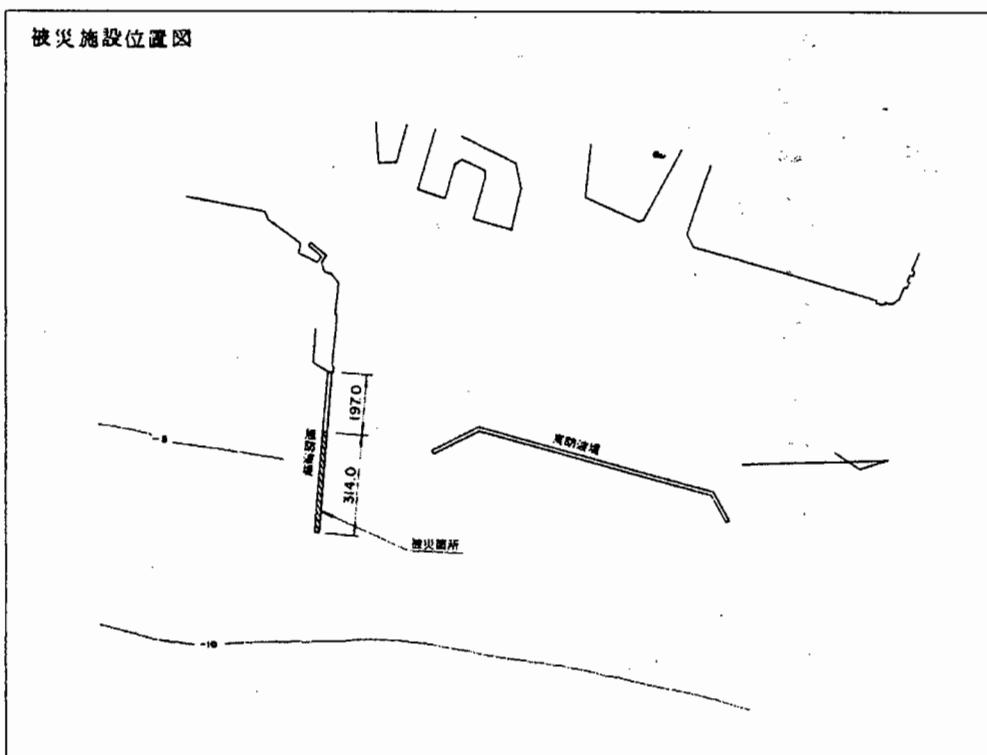


復旧断面図 (A-A)

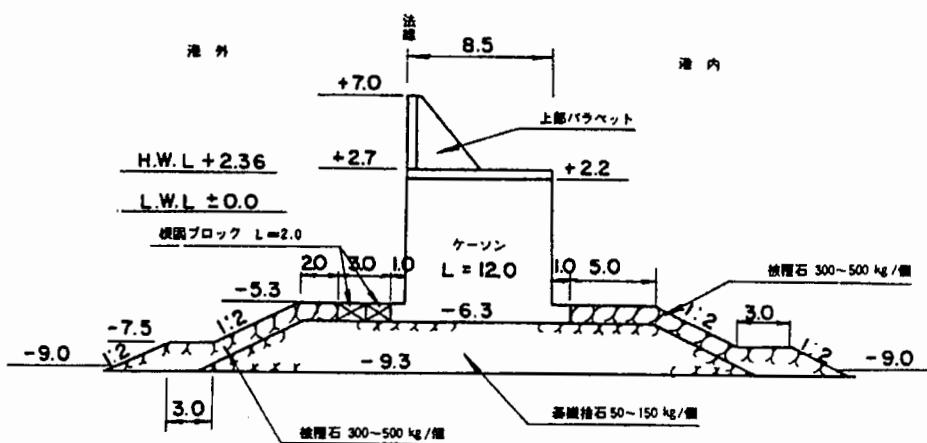


(9) 四日市항

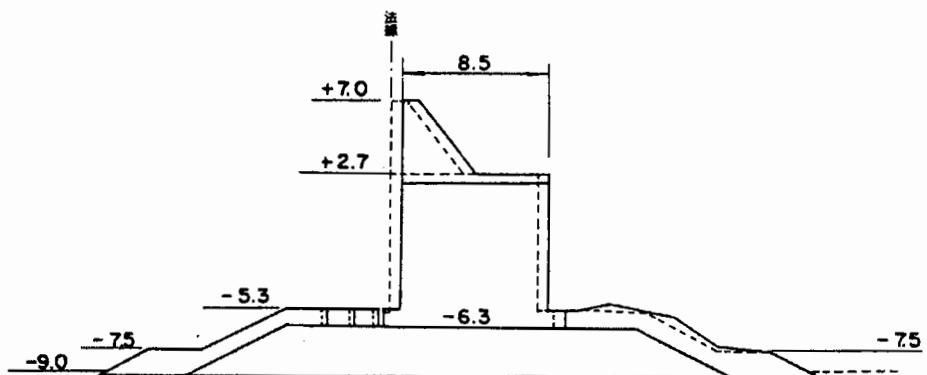
No. 9			
시설명	四日市항 旭방파제	구조형식	케이슨식 혼성제
완공일시	1963년 3월	피해일시	1972년 9월 16일 (태풍20호)
피해상황	케이슨이 이동하여 그 충격과 진동에 의해 상부 파라펫 14곳에서 파괴 또는 균열이 발생.		
피해전	설계자료	파고 주기	$H_{1/3} = 4.0m$ $7.4sec$
		파 압 입사각	쇄파 $\beta = 28^\circ$
피해시	피해수량	직립부	제체의 이동 제체의 傾斜 제체파손의 상황
			26函, 최대 0.7m 無 상부 파라펫의 파괴 또는 균열
		사석부	피복공의 이탈 기초사석의 이탈 근고블록의 이탈 소파공의 이탈
			無 無 無 -
		기타	-
	자연조건	파고	$H_{1/3} = 3.5m$ (추산)
		파향	SE
		지속시간	不明
		주기 조위	7.0sec $+4.15m$
		풍속	최대 SE 33.5m/sec 순간최대 SE 44.0m/sec
복구방법	이동한 케이슨은 방파제 기능상 문제가 없는 것으로 판단되어 복구하지 않고, 항내 측에 피복석을 보강한 후 그 위에 근고블력을 2층으로 설치. 또한, 파라펫은 원상복구. 단면결정에 있어서 당초 설계조건을 이용하여 다음 사항을 추가로 검토. (1) 반무한제 회절현상에 의한 蛇行被害의 대책, (2) 기대이동량의 대책		



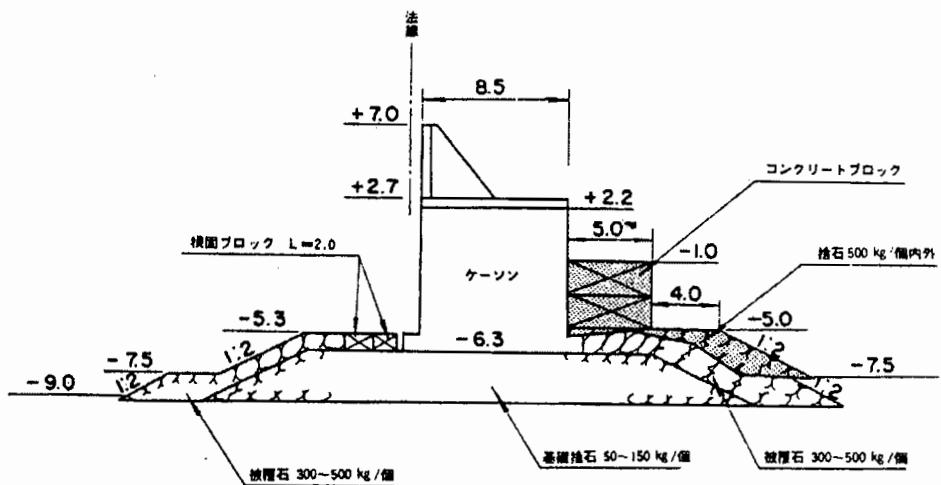
被災前断面図(A - A)



被災時断面図(A - A)



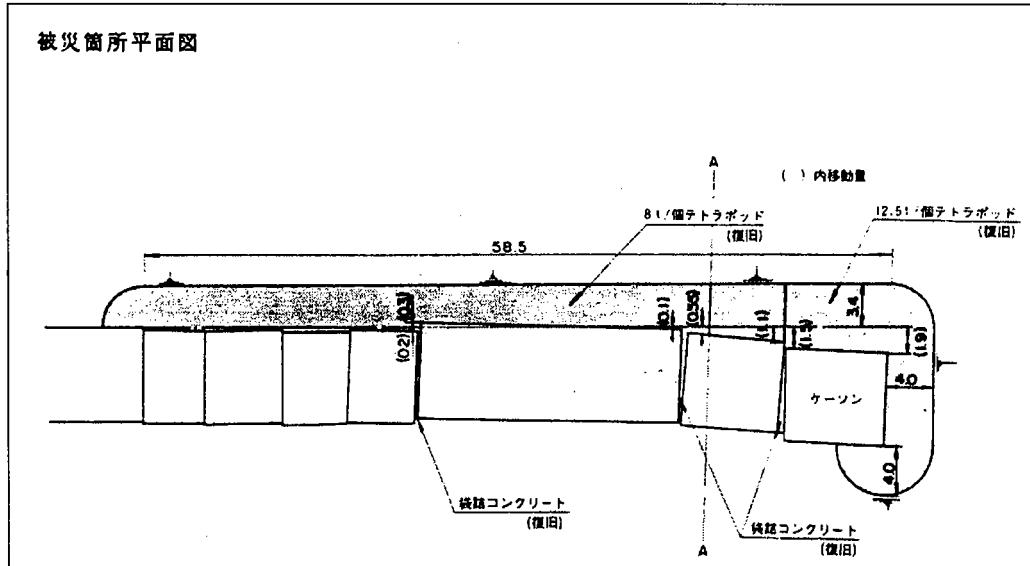
復旧断面図(A - A)



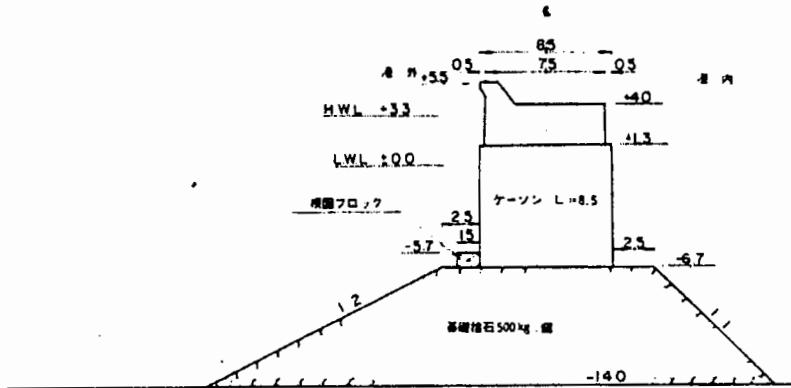
(10) 腸岬항

No.	10				
시설명	肱岬항 북방파제		구조형식	케이슨식 혼성제	
완공일시	不明		피해일시	1970년 8월 14일 (태풍9호)	
피해상황	케이슨 제체가 다소 이동하여 마운드 사석 중앙에 침하 및 기울어짐. 또한, 근고블럭도 동일 장소에서 마운드 중앙에 침하.				
피해전	설계자료	파고	$H_{1/3} = 2.5m$	파압	증복파
		주기	7.0sec	입사각	不明
피해시	직립부	제체의 이동			
		제체의 傾斜		6°	
		제체파손의 상황		無	
	사석부	피복공의 이탈		-	
		기초사석의 이탈		無	
		근고블록의 이탈		침하	
		소파공의 이탈		-	
		기타		-	
	자연조건	파고	$H_{1/3} = 4.5m$ (목측)	주기	不明
		파향	SSE	조위	+3.4m
		지속시간	不明	풍속	최대 SE 39.0m/sec 순간최대 SSE 55.0m/sec
복구방법	피해가 발생한 케이슨 및 근고블럭은 복구하지 않고, 항외측에 200kg급 및 500kg급 사석을 속채움 한 8ton급 T.T.P.로 소파공을 설치. 또한, 제체가 침하 하였기 때문에 상부공을 재시공하였음.				

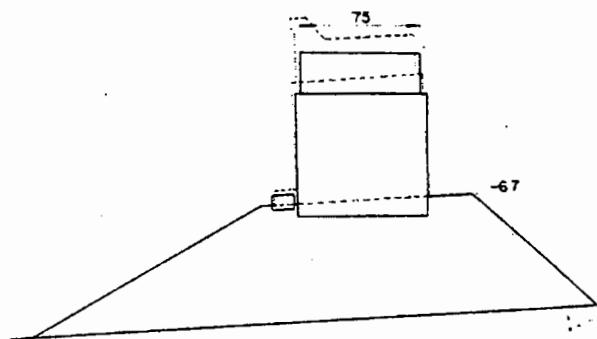
被災箇所平面図



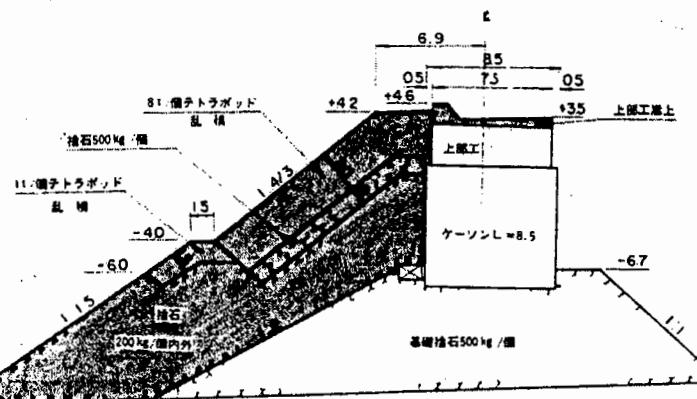
被災前断面図 (A-A)



被災時断面図 (A-A)

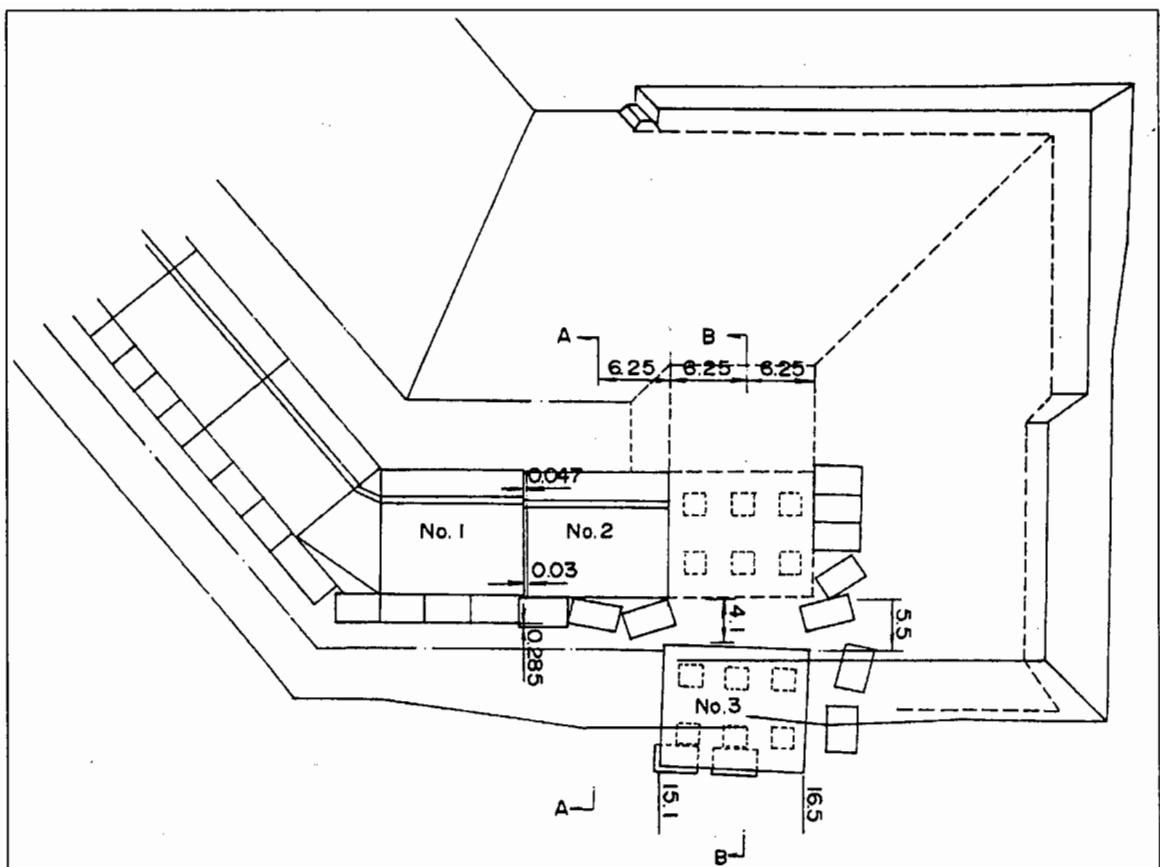


復旧断面図 (A-A)

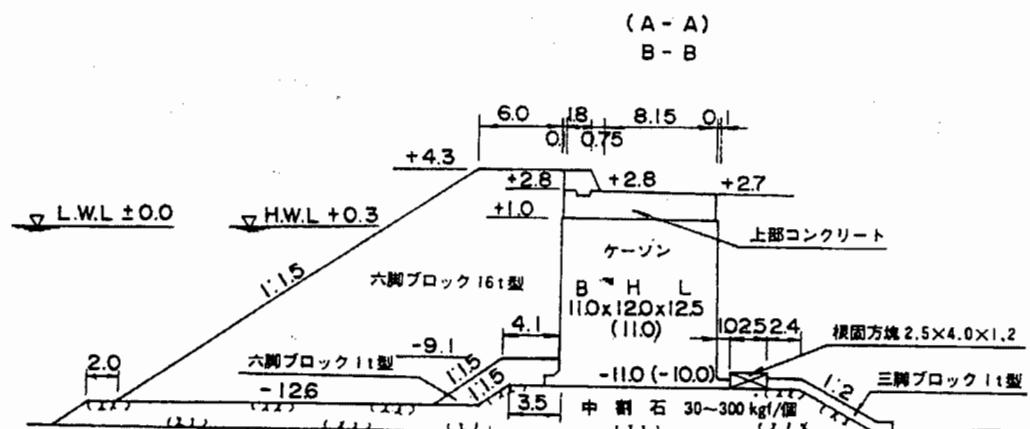


(11) 鷺泊항

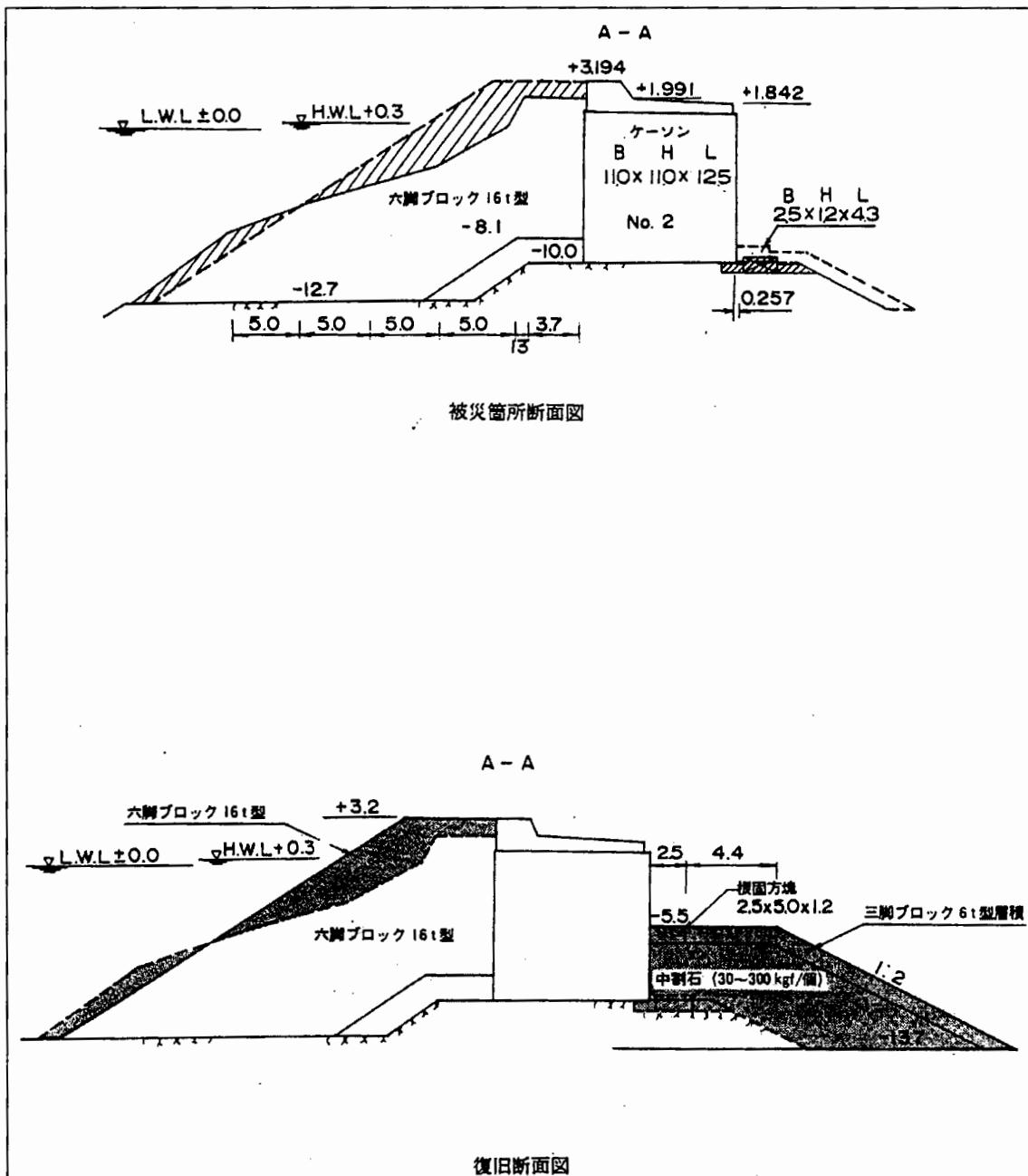
No.	11				
시설명	鹭泊항 本港지구 방파제(東外)	구조형식	케이슨식 혼성제(소파블럭피복제)		
완공일시	1982년 9월 17일	피해일시	1982년 10월 24~25일 (저기압)		
피해상황	케이슨 1函이 약 15m 이동하여, 사석마운드로부터 탈락. 전면 소파블럭 20m, 근고블럭 30m, 배후면 사석마운드가 10m에 걸쳐 이탈. 탈락된 케이슨에 인접한 케이슨 1函이 28.5cm 이동(피해延長 약 24m).				
피해전 설계자료	파고	$H_0=6.0\text{m}$, $H_{1/3}=4.9\text{m}$, $H_{\max}=8.3\text{m}$	설계수심	$h = 14.6\text{m}$	
	주기	$T_0 = 11.0\text{sec}$	설계조위	$H.W.L + 0.3\text{m}$	
	입사각	$NE \beta = 15^\circ$	파압식	合田식 (준용)	
피해 시	직립부	제체의 이동	케이슨 1函이 15.0m 이동하여 마운드로부터 탈락, 인접 케이슨이 28.5cm 이동		
		제체의 傾斜	마운드로부터 탈락한 케이슨이 연직방향에 대해 $12.5\sim 12.7^\circ$ 기울어짐		
		제체의 破損	不明		
	사석부	피복공의 이탈	배후면 피복블럭 이탈		
		기초사석의 이탈	배후면 사석 마운드의 속채움재 10m에 걸쳐 이탈		
		근고공의 이탈	배후면 근고블럭이 30m에 걸쳐 이탈		
	소파공	소파공의 이탈	전면 소파공이 후면으로 붕괴되어 천단 3~6m 저하, 이탈범위 약 20m		
		소파공의 破損	파손된 수량은 不明		
	해저지반의 세굴		不明		
	기타		-		
	자연조건	파고	$H_{1/3}=5.8\text{m}$, $H_{\max}=9.5\text{m}$ (제체 전면파고)	풍속	최대 20.0m/sec 순간최대 35.0m/sec
		주기	$T_{1/3} = 9.5\text{sec}$	조위	$H.W.L+0.56\text{m}$
		파향	N	지속시간	不明
		파랑데이타의 측정방법 등	풍속, 조위: 梯形항 사업소, 풍속의 측정방법 不明 파고, 주기, 파향: 일본기상협회북해도 본부 추산, $H_0=7.0\text{m}$		
복구방법	새로운 설계파(파향 N, $H_{1/3} = 6.2\text{m}$, $H_{\max}=11.2\text{m}$, $T=11.0\text{sec}$, $\beta=0^\circ$)에 의해 단면변경. (1) 전면 소파블럭을 16ton급에서 25ton급으로 증대, (2) 케이슨 배후의 피복블록을 1ton에서 6ton으로 증대, (3) 배후면의 이동을 방지하기 위해 속채움사석으로 마운드를 형성, (4) 기존 케이슨 유용.				

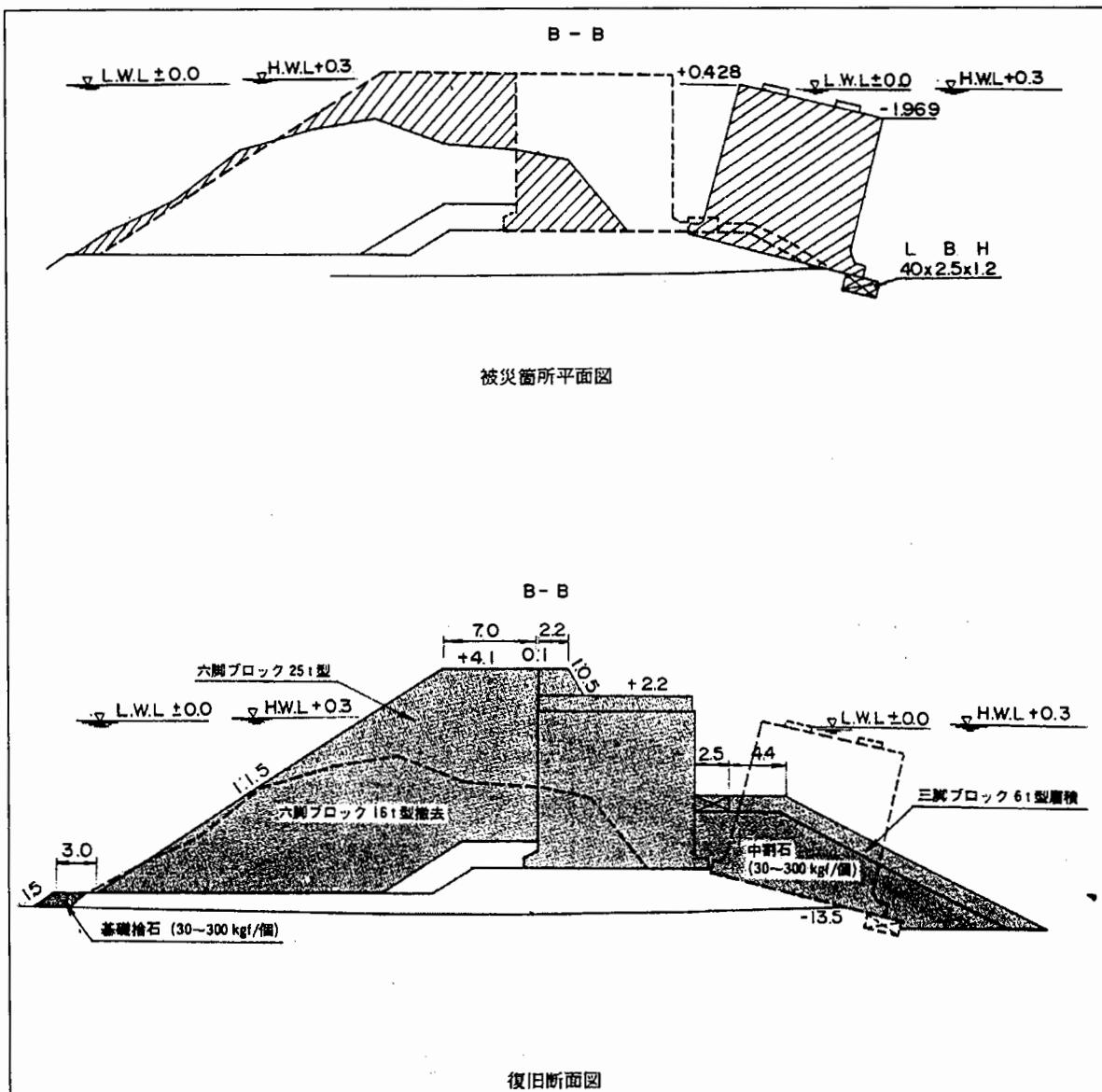


被災箇所位置図



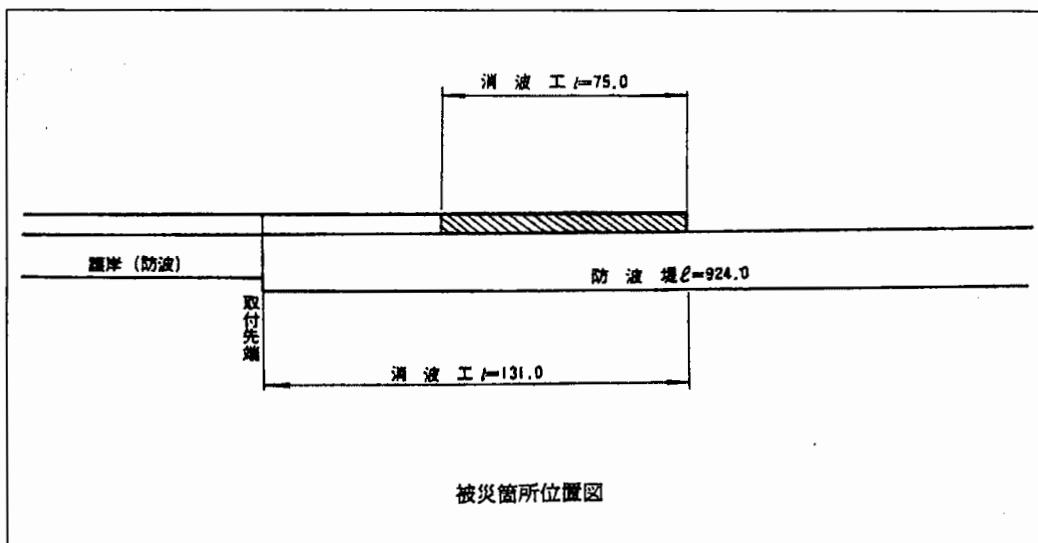
被災前断面図

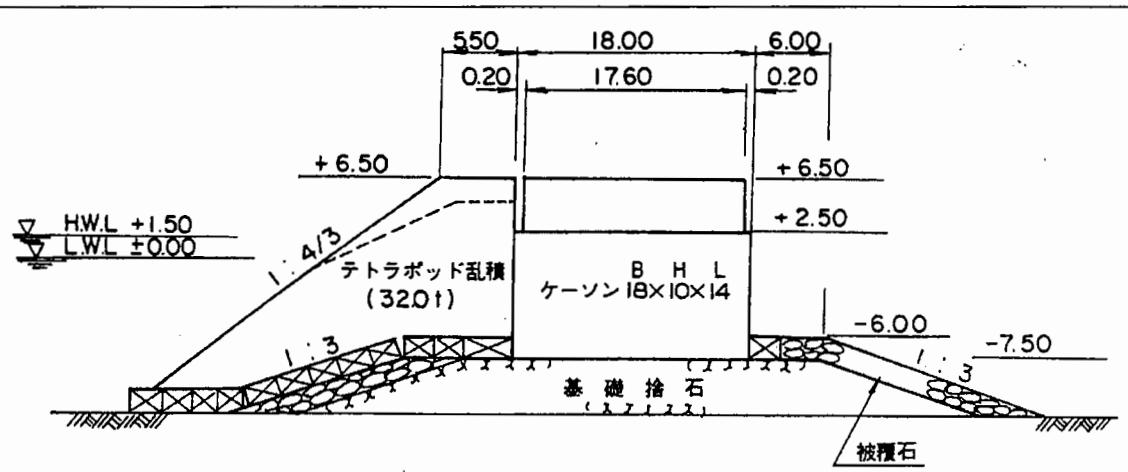




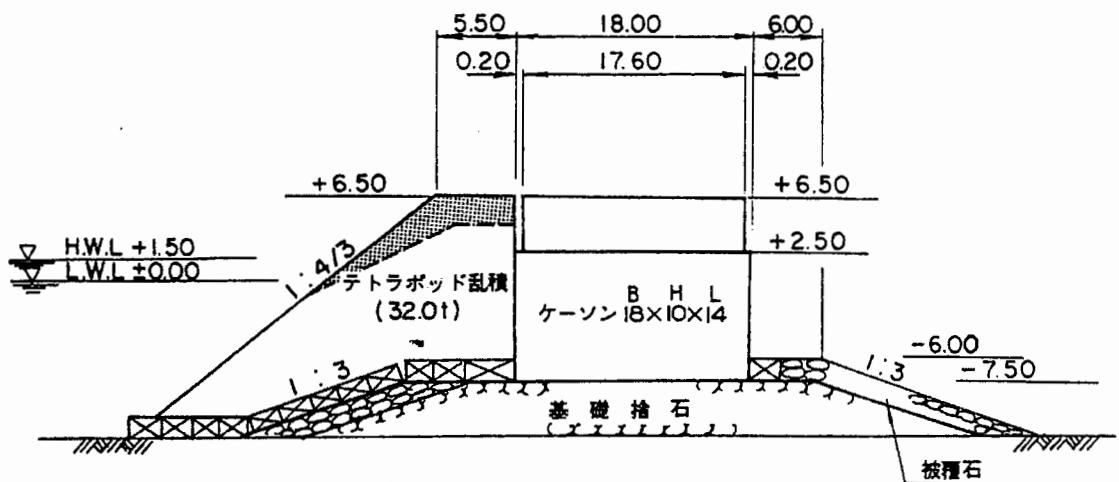
(12) 久慈항

No.	12				
시설명	久慈항 방파제	구조형식	케이슨식 혼성재(소파블럭피복제)		
완공일시	1982년 3월 8일	피해일시	1982년 3월 21~22일 (저기압)		
피해상황	파랑에 의해 소파블록이 이탈.				
피해전 설계자료	파고	不 明	설계수심	不 明	
		不 明	설계조위	不 明	
		不 明	파압식	不 明	
	피해장소·수량	직립부	제체의 이동	無	
		사석부	제체의 傾斜	無	
		소파공	제체의 破損	無	
		파복공	파복공의 이탈	無	
		기초사석	기초사석의 이탈	無	
		근고공	근고공의 이탈	無	
		소파공	소파공의 이탈	소파블록 187개 이탈	
		파랑대	소파공의 破損	이탈한 블록에 파손이 생김	
		기타	해저지반의 세굴	無	
피해시	자연조건	파고	$H_{1/3}=6.89m, H_{max}=8.50m$	풍속	不 明
		주기	$T_{1/3}=12.6sec, T_{max}=13.6sec$	조위	최고조위 +0.93m
		파향	不 明	지속시간	不 明
		파랑대이타의 측정방법 등	파고, 주기: 久慈항 玉の脇방파제 동북동 1.5km, 수심 16m에서 파고계기록		
복구방법	이탈한 소파블록은 파손되어 이용하기 불가능하고, 피해가 발생한 전체 수량을 제작·거치.				





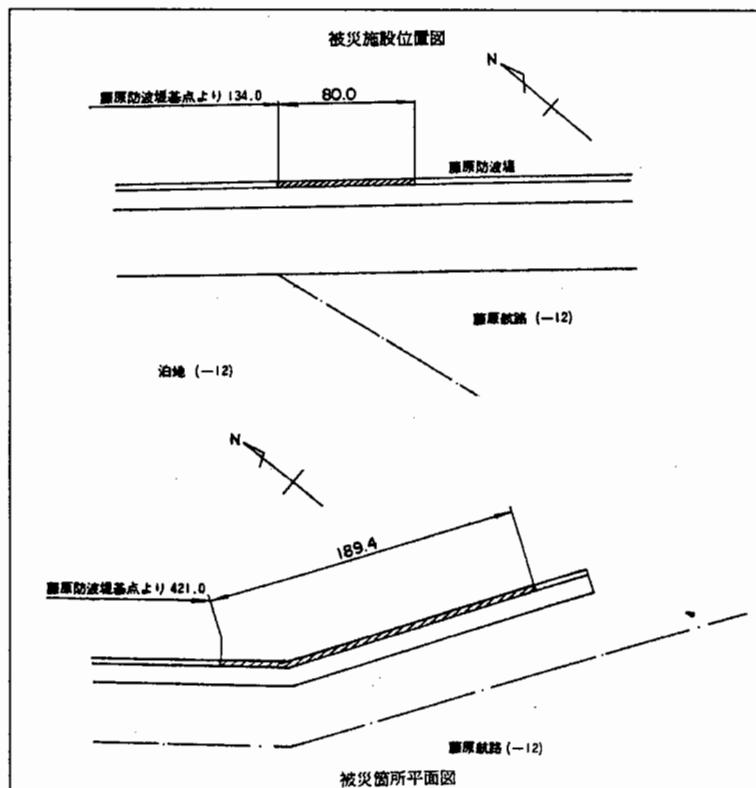
被災前断面図

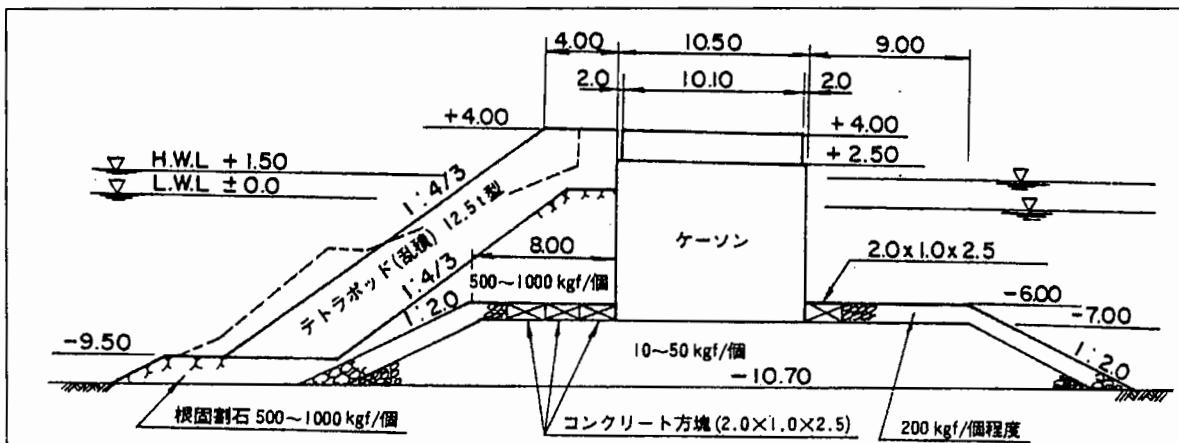


復旧断面図

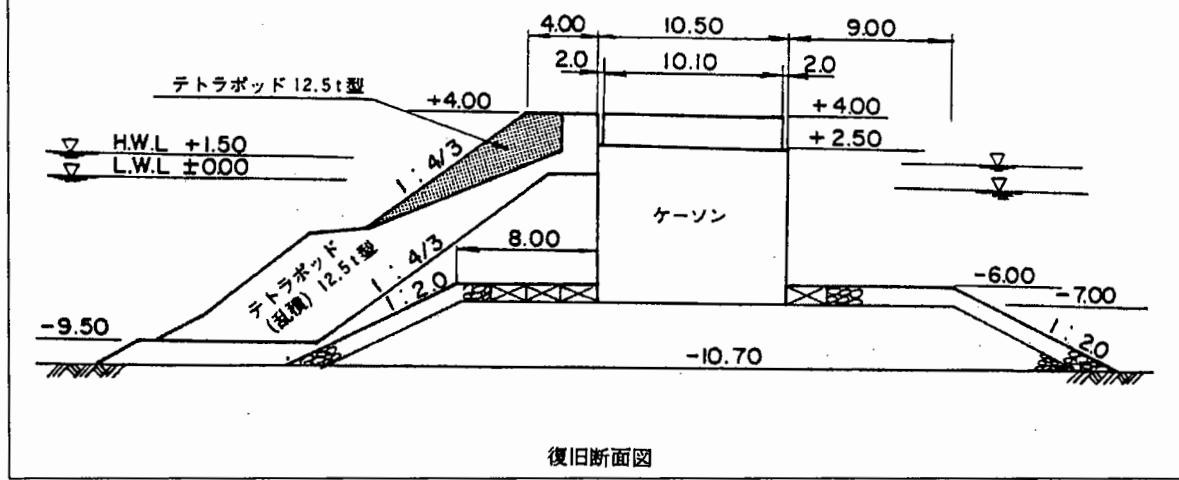
(13) 宮古町

No.	13			
시설명	宮古항 藤原지구 藤原방파제	구조형식	케이슨식 혼성제(소파블럭피복제)	
완공일시	1978년 3월	피해일시	1980년 12월 23~24일 (동절기풍랑)	
피해상황	파랑에 의해 소파블록이 세굴 및 침하하였음.			
피해전	설계자료	파고	$H_{1/3}=4.0m$	설계수심
		주기	$T_{1/3} = 11.0\text{sec}$	설계조위
		입사각	$\beta = 0^\circ$	파압식
피해시	피해장소·수량	직립부	제체의 이동 제체의 傾斜 제체의 破損	無 無 無
		사석부	피복공의 이탈 기초사석의 이탈 근고공의 이탈	無 無 無
		소파공	소파공의 이탈 소파공의 破損	$l=80\text{m}$ 84개 침하, $l=189.4\text{m}$ 325개 침하 不明
		해저지반	해저지반의 세굴	不明
		기타		-
자연조건	파고	$H_{1/3}=7.31\text{m}$, $H_{\max}=11.50\text{m}$	풍속	최대 14.4m/sec
	주기	$T_{1/3}=12.3\text{sec}$, $T_{\max}=11.0\text{sec}$	조위	최고조위 $+2.18\text{m}$
	파향		지속시간	
	파랑데이터의 측정방법 등	파고, 주기: 島之越漁港, 島之越방파제 북북동 0.4km 수심 18m 에 서의 파고계기록		
복구방법	침하한 소파블록은 침하한 장소에서 안정하기 때문에 그대로 두고, 피해수량을 제작 보충하였음.			





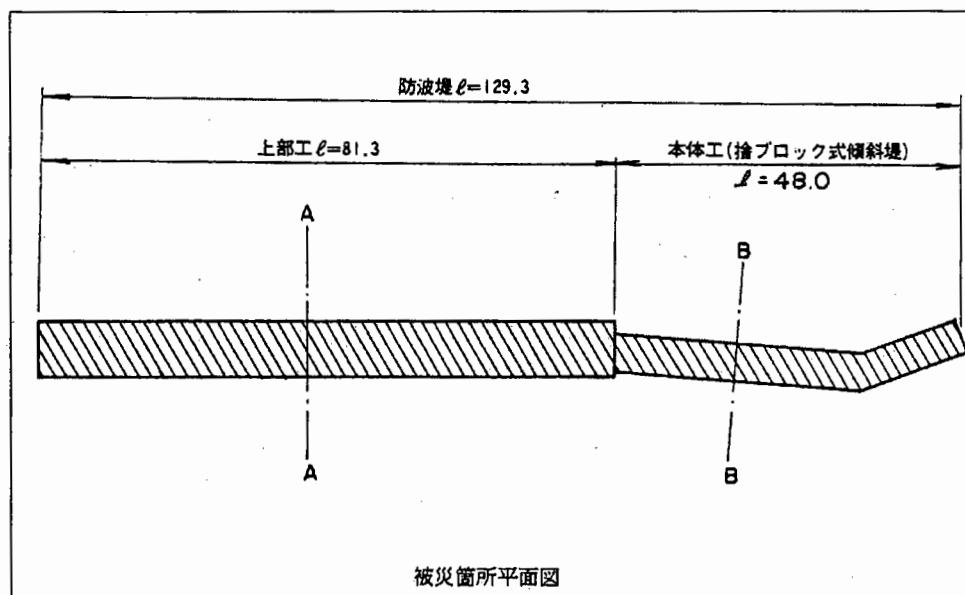
被災前断面図

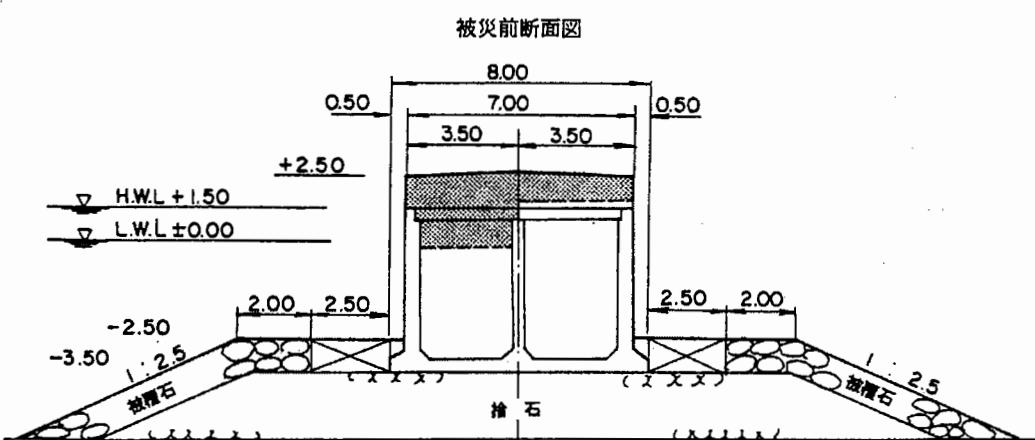
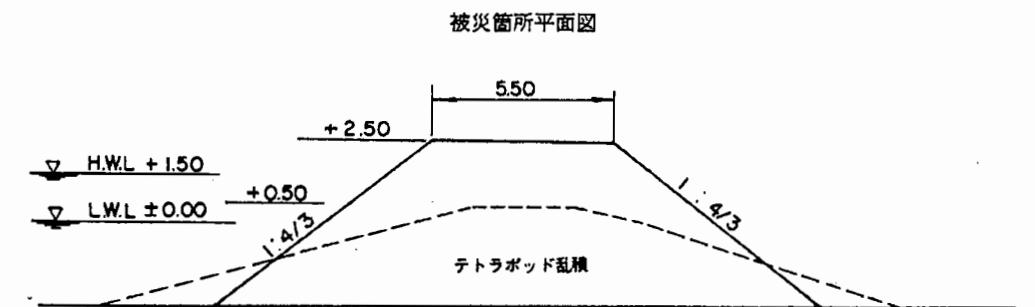
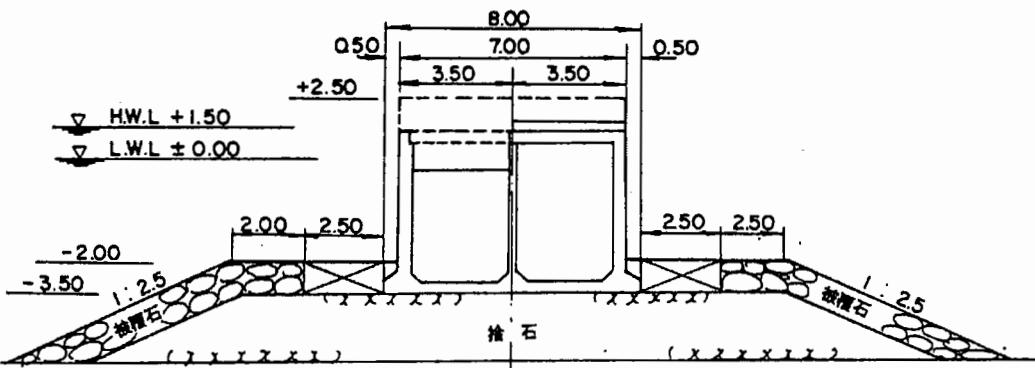


復旧断面図

(14) 八木防

No.	14				
시설명	八木防 남항지구 남항방파제	구조형식	A부 케이슨식 혼성제 B부 사석블럭식 경사제		
완공일시	1950년 3월	피해일시	1982년 3월 21~22일 (저기압)		
피해상황	케이슨식 혼성제의 상부공이 파랑에 의해 파손됨과 동시에 사석블록식 경사제의 소파블록이 이탈, 침하하였음.				
피해전	설계자료	파고	不明	설계수심	不明
		주기	不明	설계조위	H.W.L + 1.50m
		입사각	不明	파압식	不明
피해시	피해장소·수량	직립부	제체의 이동	無	
			제체의 傾斜	無	
			제체의 破損	상부콘크리트 파손, 덮개콘크리트 飛散, 속채움재 유실(A부)	
		사석부	피복공의 이탈	無	
			기초사석의 이탈	無	
			근고공의 이탈	無	
		소파공	소파공의 이탈	소파블럭 이탈, 침하(B부)	
			소파공의 破損	이탈한 블록에 파손이 발생, 수량 不明(B부)	
			해저지반의 세굴	無	
			기타	-	
	자연조건	파고	$H_{1/3}=6.89m, H_{max}=8.50m$	풍속	최대 10.3m/sec
		주기	$T_{1/3}=12.6sec, T_{max}=13.6sec$	조위	최고조위 +0.93m
		파향	不明	지속시간	不明
	파랑데이터의 측정방법 등	파고, 주기: 久慈防 玉の脇방파제 동북동 1.5km, 수심 16m에서 파고계기록, 풍속: 久慈防			
복구방법	파손된 상부공은 철거한 뒤 원형상구하고, 이탈·침하한 소파블록은 파손되었기 때문에 피해 수량을 제작·거치하였음.				

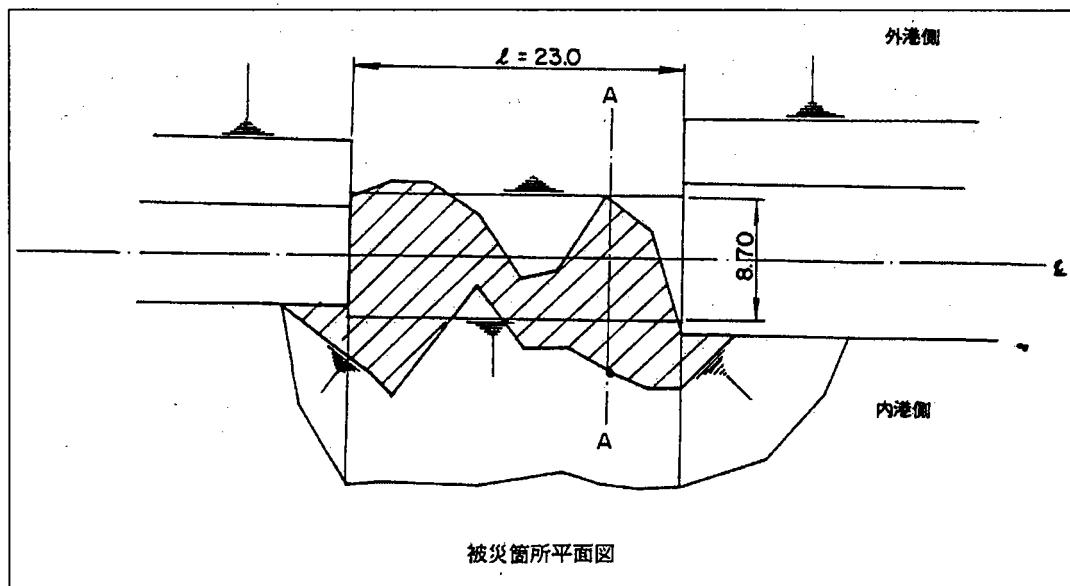




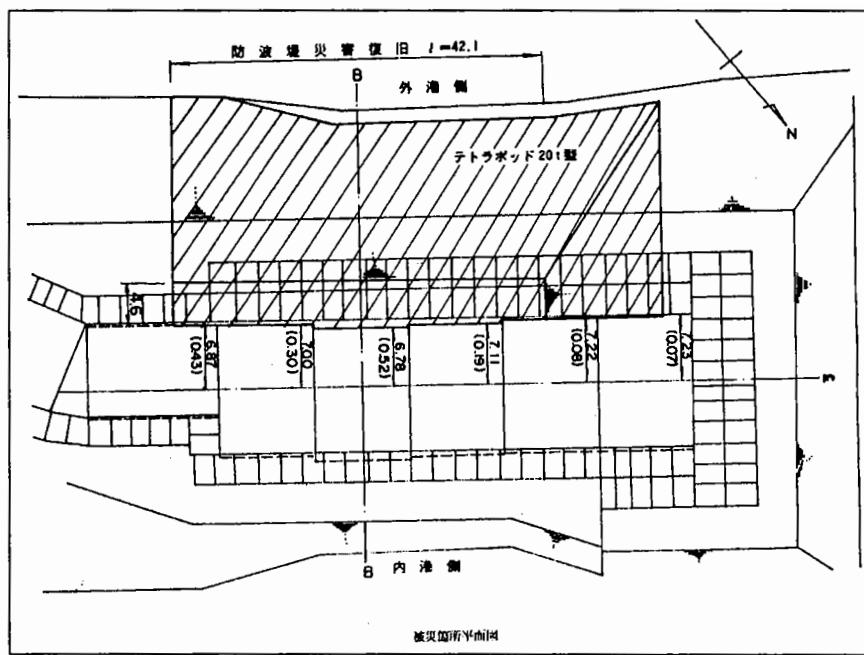
復旧断面図

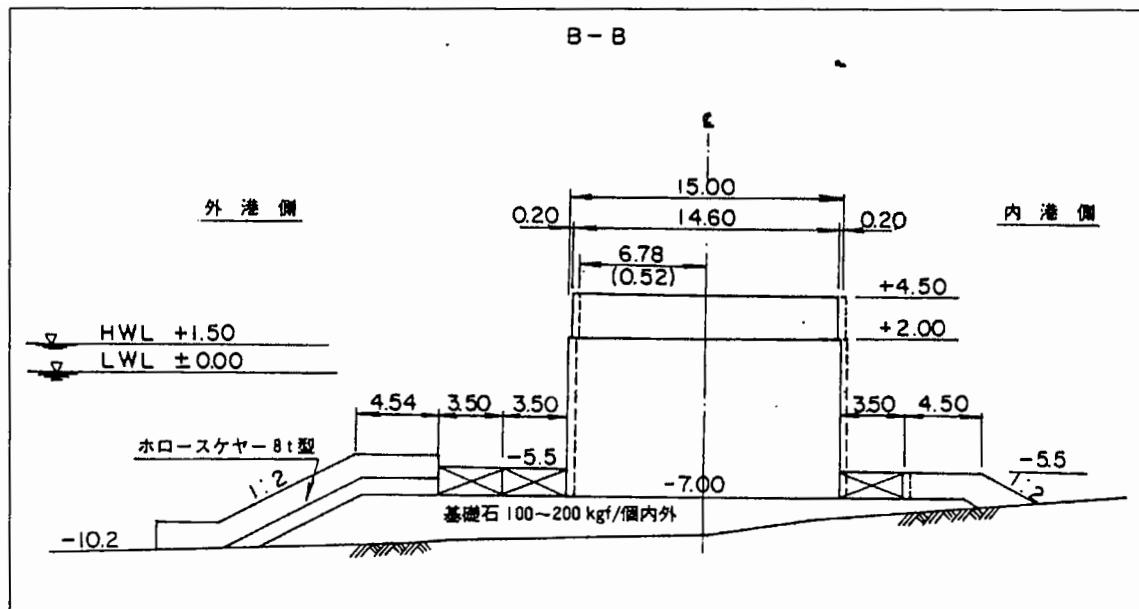
(15) 金華山항

No. 15				
시설명	金華山항 방파제	구조형식	사석블럭식경사제(A) 케이슨식혼성제(B)	
완공일시	1972년 3월 (사석블럭) 1980년 3월 (케이슨식)	피해일시	1981년 8월 23일 (태풍 15호)	
피해상황	파랑에 의해 사석블록식 경사제의 소파블록이 延長 23m에 걸쳐 이탈하고, 케이슨식 혼성제의 케이슨이 延長 68.5m에 걸쳐 0.07~0.52m 이동하였음.			
피해전	설계자료	파고 不明	설계수심 不明	
	주기 不明	설계조위 H.W.L + 1.50m		
	입사각 不明	파압식 不明		
피해시	피해장소·수량	직립부 제체의 이동	케이슨 6函이 0.07~0.52m 이동하였음(케이슨식혼성제)	
	제체의 傾斜		無	
	제체의 破損		無	
	파복공의 이탈		無	
	기초사석의 이탈		無	
	근고공의 이탈		無	
	소파공의 이탈	사석블록식 경사제의 소파블록이 延長 23m에 걸쳐 이탈		
	소파공의 破損		不明	
	해저지반의 세굴		無	
	기타		-	
자연조건	파고	$H_{1/3}=5.95m, H_{max}=7.12m$	풍속 최대 22.5m/sec 순간최대 40.5m/sec	
	주기	$T_{1/3}=11.8sec, T_{max}=6.4sec$	조위 최고조위 +2.58m	
	파향	不明	지속시간 不明	
	파랑데이터의 측정방법 등	파고, 주기: 石卷항 동濒해안으로부터 약 1km, 수심 -8.50m에서의 파고계 기록, 풍속: 石卷항 항만사무소		
복구방법	사석블록식 경사제: 이탈한 소파블록을 바로 거치시켰으며, 사용할 수 없는 소파블록은 제작, 거치시켰음. 케이슨식혼성제: 케이슨전면에 소파블록(T.T.P. 20ton급)을 설치하여 제체를 보강하였음.			

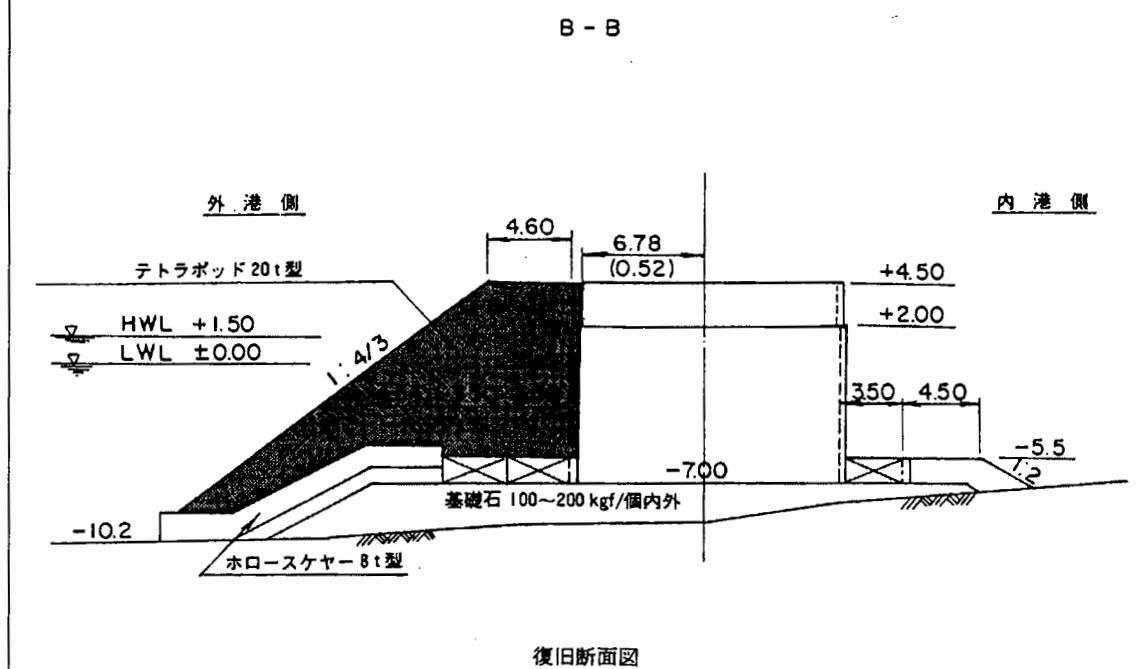


被災箇所平面図





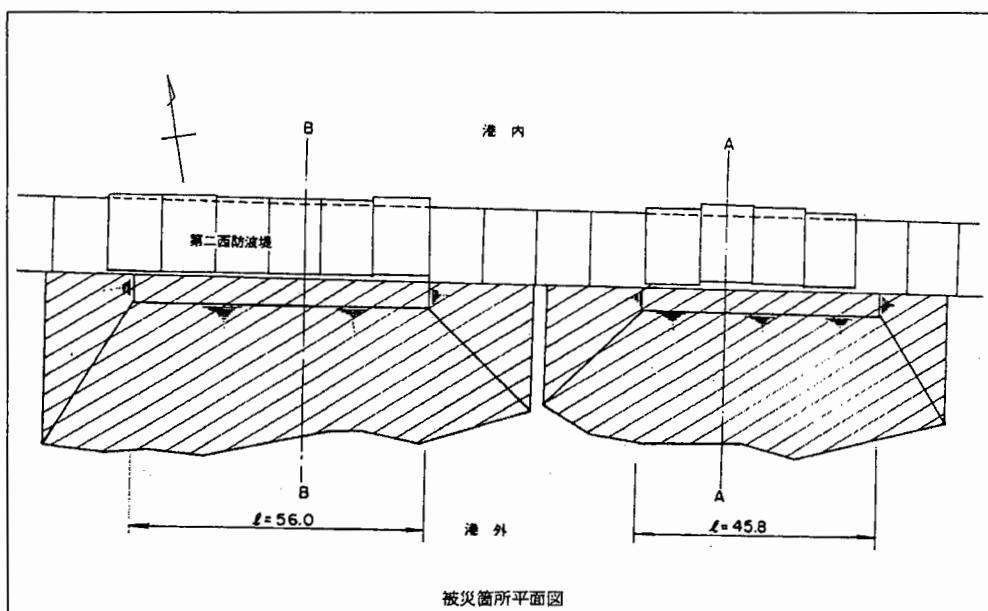
被災前断面図

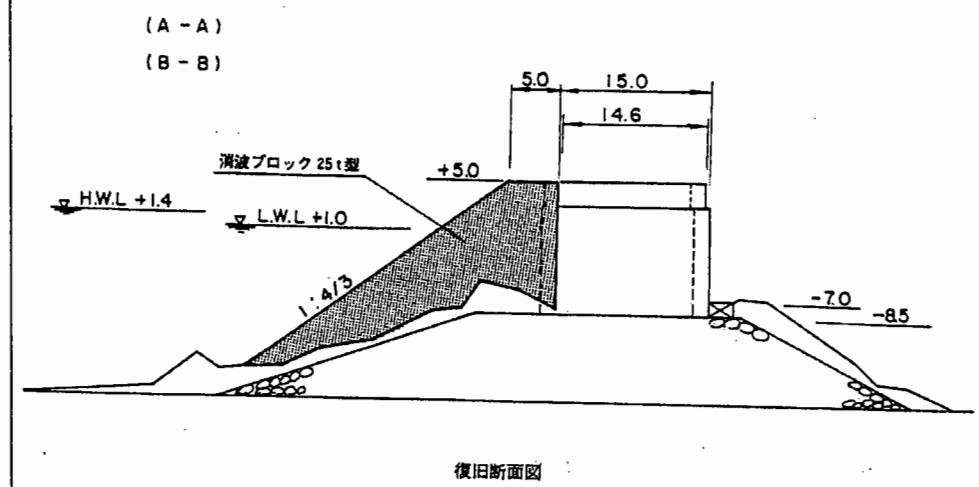
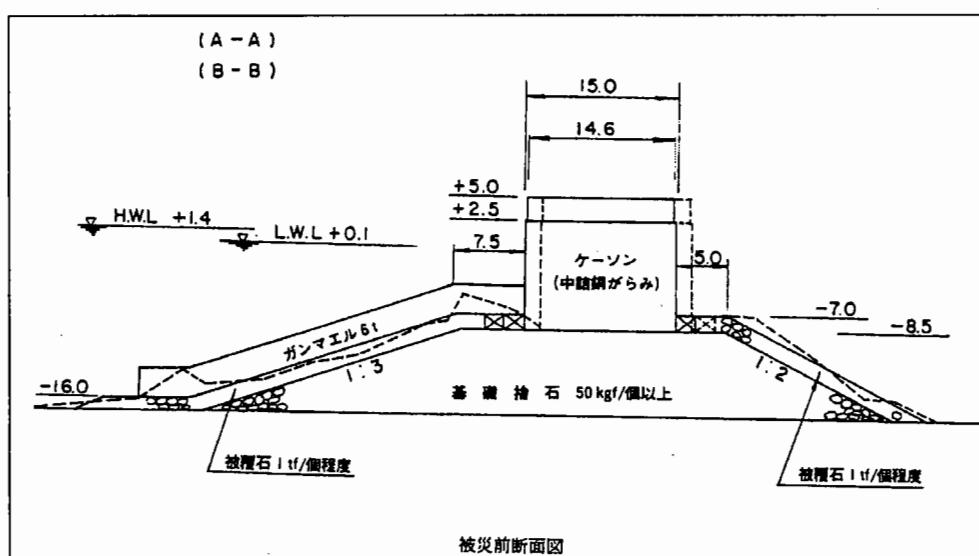
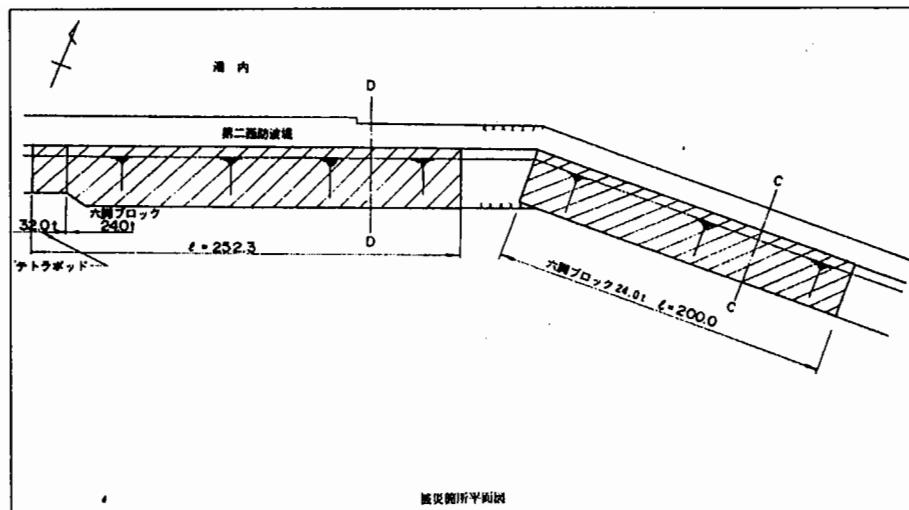


復旧断面図

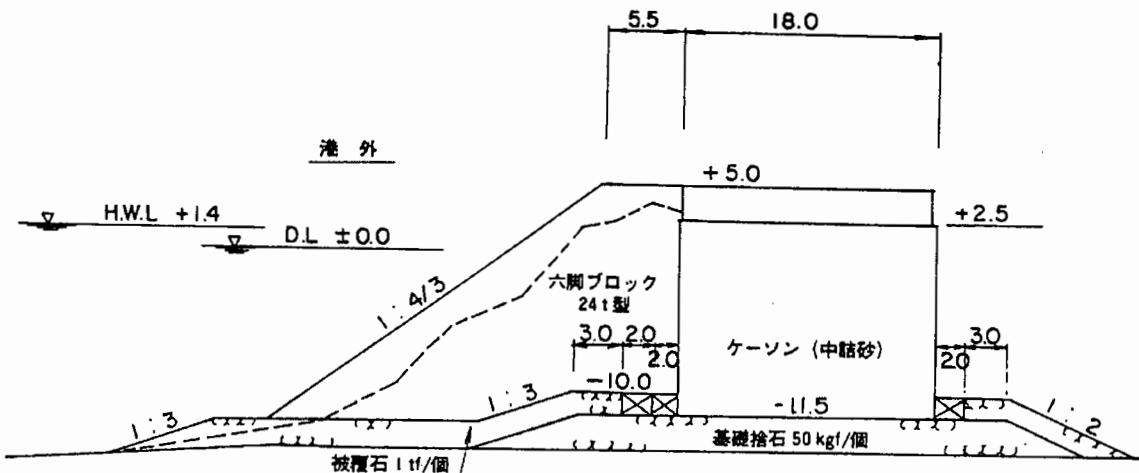
(16) 小名浜항

No.	16			
시설명	小名浜항 제2서방파제	구조형식	케이슨식 혼성제(일부 소파블록 피복)	
완공일시	1977년	피해일시	1981년 8월 22~23일 (태풍15호)	
피해상황	파랑에 의해 케이슨 9函이 이동하고, 그 중 1函이 항외측 측벽에 균열이 발생하여 속채움재가 유실되었음. 소파블록피복제의 지점에서는 소파블록이 全延長 452m에 걸쳐 飛散, 침하하였음.			
피해전	설계자료	파고	$H_{1/3} = 6.1\text{m}$	설계수심
		주기	$T_{1/3} = 14.0\text{sec}$	설계조위
		입사각	$\beta = 0^\circ$	파압식
피해시	피해장소 · 수량	직립	제체의 이동	케이슨 6函이 이동(A부), 케이슨 5函 활동(B부)
		제체의 傾斜		不明
		제체의 破損	케이슨 1函(B부) 항외측 측벽에 균열 발생, 속채움재 유실	
	소파공	사석	피복공의 이탈	피복블록 이탈, 수량 不明(A, B부)
		기초사석의 이탈		無
		근고공의 이탈		不明
	파고	소파공의 이탈	소파블록 飛散, 침하(C, D부)	
		소파공의 破損		不明
	해저지반의 세굴		不明	
	기타		-	
자연조건	파고	$H_{1/3}=6.10\text{m}, H_{\max}=8.51\text{m}$	풍속	최대 19.5m/sec 순간최대 31.0m/sec
	주기	不明	조위	최대조위 $+1.75\text{m}$
	파향	不明	지속시간	不明
	파랑데이터의 측정방법 등	파고, 주기: 제2항만건설국 小名浜항 공사사무소(1km 심해방향) 파고계기록, 풍속: 小名浜측후소		
복구방법	케이슨 이동부분(A, B부)은 전면에 25ton급 소파블록톤을 시공하여, 소파블록피복제로 함. 소파블록 이탈부분(C, D부)은 소파블록을 보충하여 원상복구함.			



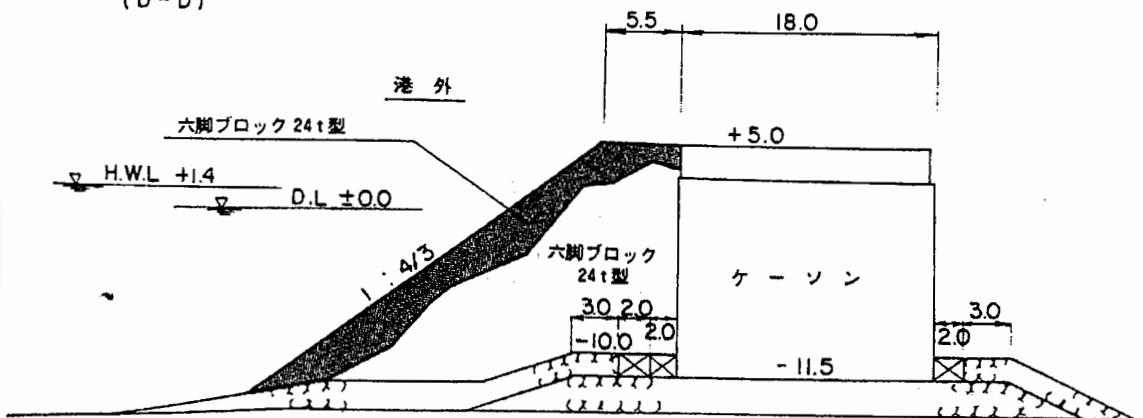


(C-C),
(D-D)



被災前断面図

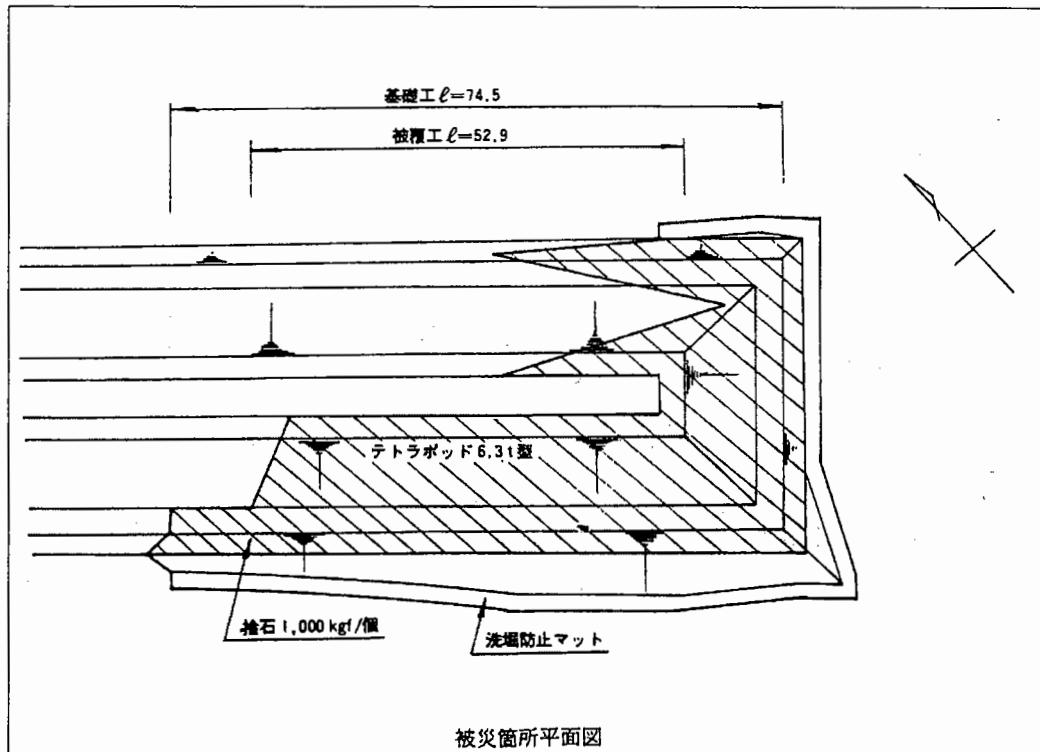
(C-C)
(D-D)

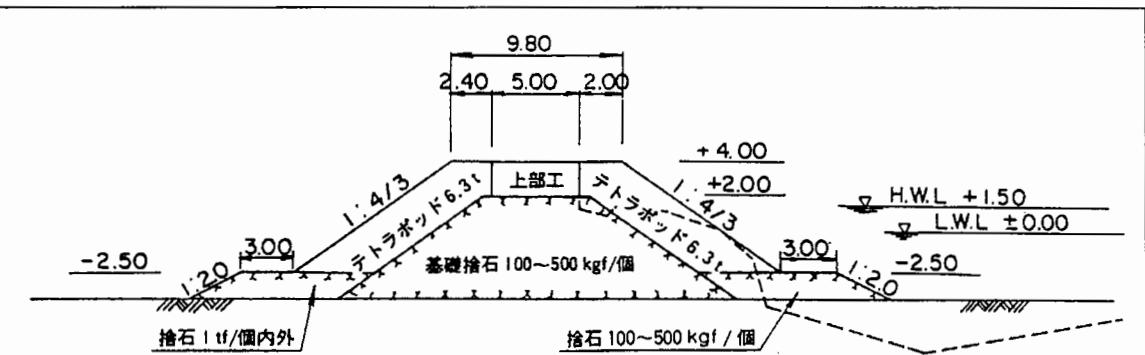


復旧断面図

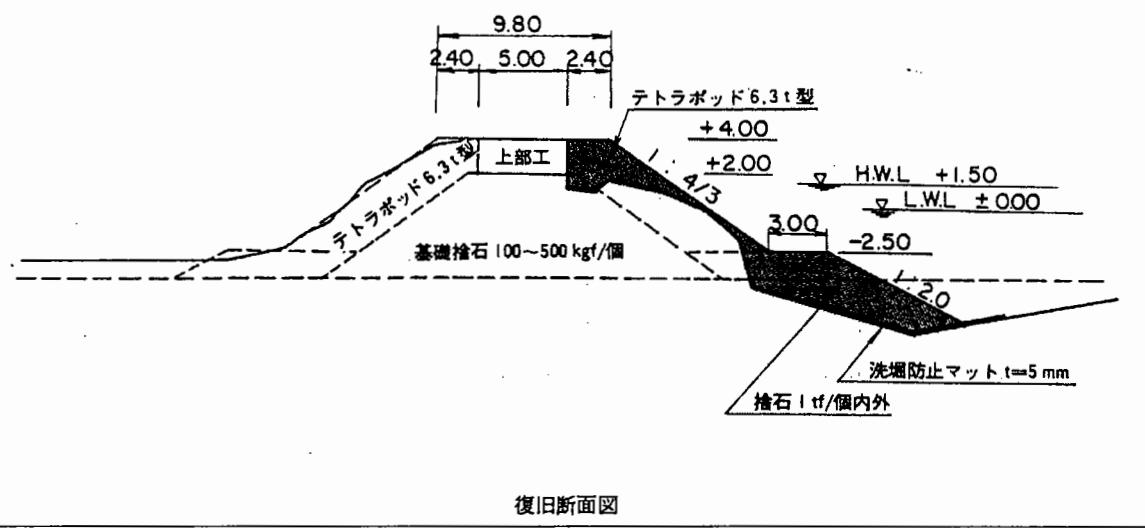
(17) 大洗町

No.	17				
시설명	大洗町 본항지구 서방파제	구조형식	사석식경사제		
완공일시	1981년 2월	피해일시	1981년 4월 20일 (저기압)		
피해상황	파랑에 의해 제체의 先端부가 세굴되어 피복블록과 기초사석이 침하, 붕괴되었음.				
피해전	설계자료	파고	不明	설계수심	不明
		주기	不明	설계조위	H.W.L + 1.50m
		입사각	不明	파압식	
피해시	피해장소·수량	직립부	제체의 이동	-	
		제체의 傾斜	-		
		제체의 破損	-		
	소파공	사	피복공의 이탈	피복블록 침하, 붕괴, 수량 不明	
		석	기초사석의 이탈	기초사석 침하, 붕괴, 수량 不明	
		근고공	근고공의 이탈	항외측 근고사석 세굴	
	수량	소파공	소파공의 이탈	-	
		소파공	소파공의 破損	-	
		해저지반	세굴	세굴이 발생	
		기타		-	
자연조건	파고	$H_{1/3}=3.74m$, $H_{max}=7.62m$	풍속	최대 SSE 16.0m/sec 순간최대 SSE 20.2m/sec	
	주기	$T_{1/3}=8.1sec$, $T_{max}=7.7sec$	조위	최고조위 +1.35m	
	파향	SE	지속시간	不明	
	파랑데이터의 측정방법 등	파고, 주기: 大洗町 남방파제 기초부로부터 남동 3.6km, 수심 -21m의 파고계기록			
복구방법	先端부의 세굴을 방지하기 위해 세굴방지 매트(두께 5mm)를 부설하고, 기초사석 (1ton급), 피복블록(6.3ton급 T.T.P.)으로 원상복구하였음.				





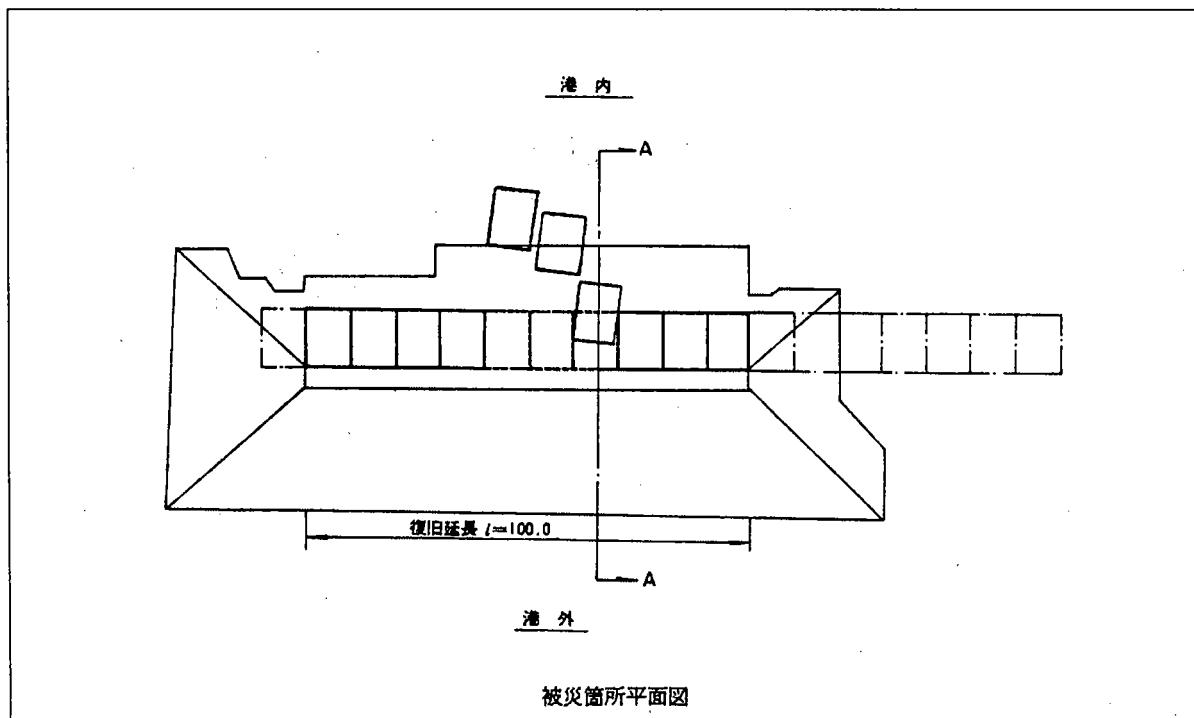
被災前断面図



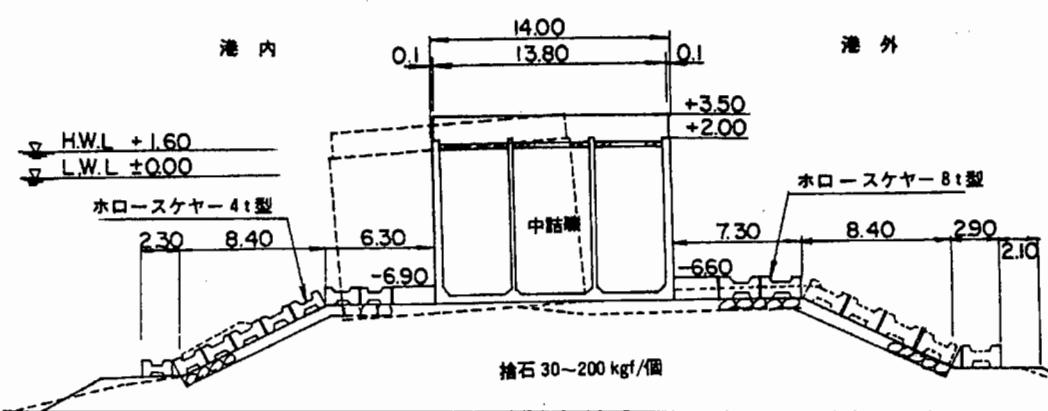
復旧断面図

(18) 热海港

No.	18				
시설명	热海港 방파제		구조형식	케이슨식 혼성제	
완공일시	1981년 3월		피해일시	1982년 7월 31일 ~ 8월 3일 (태풍10호)	
피해상황	파랑에 의해 케이슨이 이동하고, 근고공, 피복공에 피해가 발생하였음.				
피해전	설계자료	파고	$H_{1/3}=5.2m, H_0=6.0m$	설계수심	不明
		주기	$T_{1/3}=9.0sec, T_0=9.0sec$	설계조위	$H.W.L + 1.60m$
		입사각	不明	파압식	不明
피해시	피해부	직립	제체의 이동	가장 이동량이 큰 것은 마운드로부터 이탈됨	
		제체의 傾斜		不明	
		제체의 破損		不明	
	장소·수량	사석	피복공의 이탈	항내측 피복블록 이탈(케이슨 이동에 의함)	
		기초사석의 이탈		사석 이탈(케이슨 이동에 의함)	
		근고공	근고공의 이탈	콘크리트 방파 이탈(케이슨 이동에 의함)	
	소파공	소파공의 이탈		-	
		소파공의 破損		-	
	해저지반의 세굴			無	
	기타				
	자연조건	파고	$H_{max}=10.45m$	풍속	순간최대 SSW 26.4m/sec
		주기	不明	조위	不明
		파향	不明	지속시간	不明
		파랑데이터의 측정방법 등		不明	
복구방법	케이슨을 바로 거치하고, 근고공, 피복공의 복구 및 항외측에 소파공(25ton급 T.T.P.)를 시공하였음.				

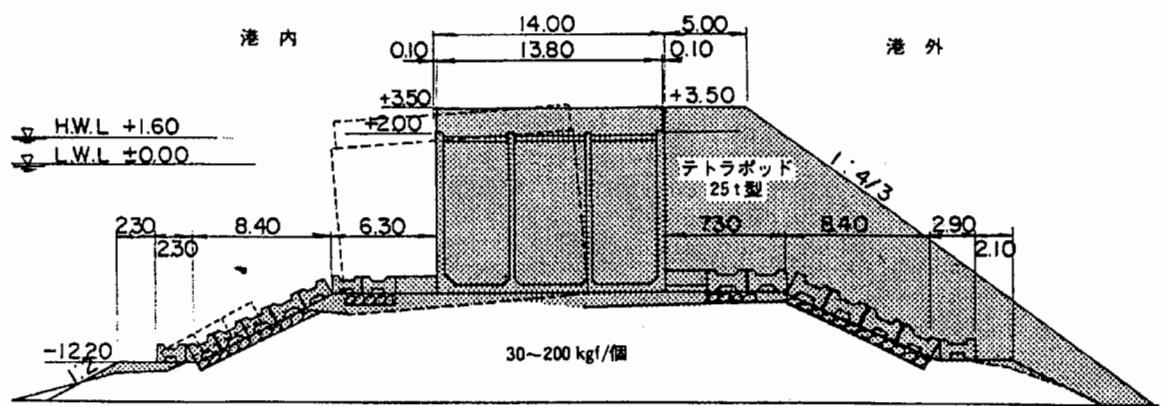


(A-A 断面)



被災前断面図

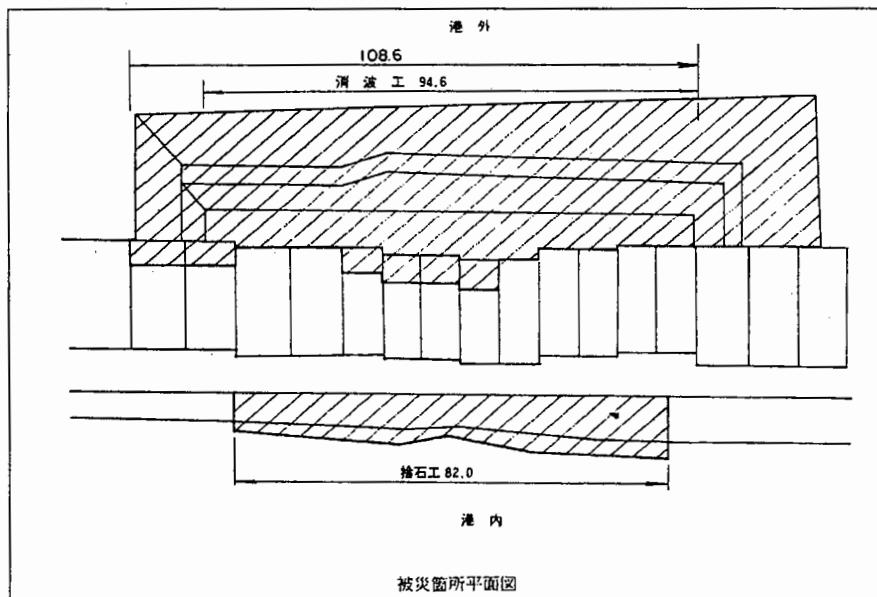
(A-A 断面)

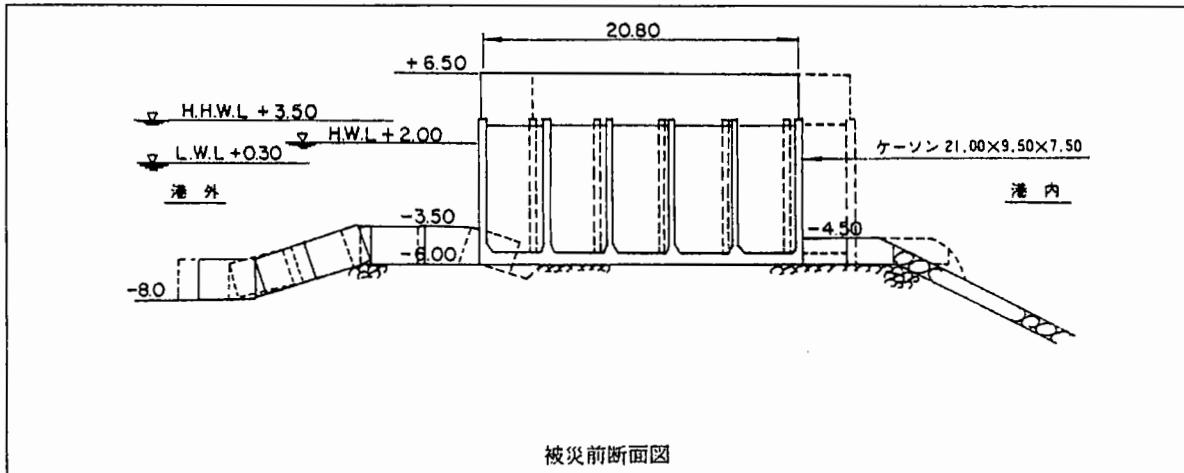


復旧断面図

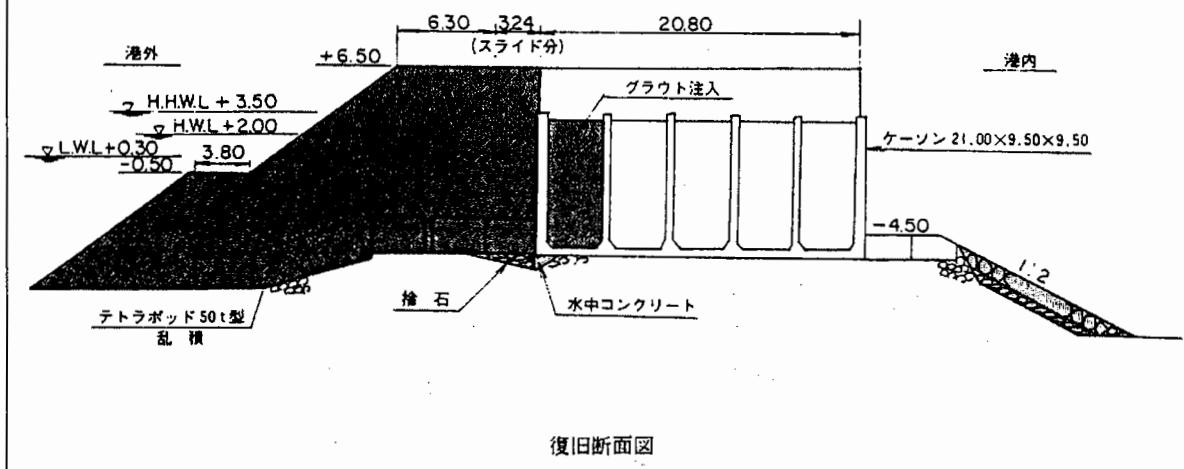
(19) 新宮항

No.	19			
시설명	新宮항 三輪崎지구 북방파제	구조형식	케이슨식 혼성제	
완공일시	1975년 5월 30일	피해일시	1982년 8월 1일(태풍10호), 9월 12일(태풍18호)	
피해상황	파랑에 의해 케이슨이 延長 130m에 걸쳐 0.3~3.3m 이동하였음(태풍10호). 이동한 케이슨이 파손되고, 속채움재가 유출되었음(태풍18호).			
피해전	설계자료	파고	不明	설계수심
		주기	不明	설계조위 H.H.W.L + 3.50m H.W.L + 2.00m
		입사각	不明	파압식
피해시	피해장소·수량	직립부	제체의 이동	케이슨이 延長 130m에 걸쳐 0.3~3.3m 이동(태풍10호) 無
		제체의 傾斜	케이슨 측벽이 파손되어 속채움재가 유출(태풍18호)	
		제체의 破損	피복공의 이탈 파복콘크리트 방괴가 이동	
		사석부	기초사석의 이탈 이동한 케이슨의 전면 기초사석이 이탈	
		근고공의 이탈	-	
		소파공의 이탈	-	
	소파공의 破損	-		
	해저지반의 세굴	不明		
	기타	-		
	자연조건	파고	$H_{1/3}=4.21m$, $H_{max}=5.95m$	풍속
	주기	$T_{1/3}=12.5sec$, $T_{max}=11.7sec$	조위	최고조위 +1.87m 태풍10호 최고조위 +1.44m 태풍18호
	파향	不明	지속시간	不明
복구방법	측벽이 파괴되고 속채움재가 유출된 케이슨은 상부공을 보완하여 복구하였음. 측벽에 균열이 발생한 케이슨은 상부공을 시추하여 시멘트를 속채움재로 주입하였음.			





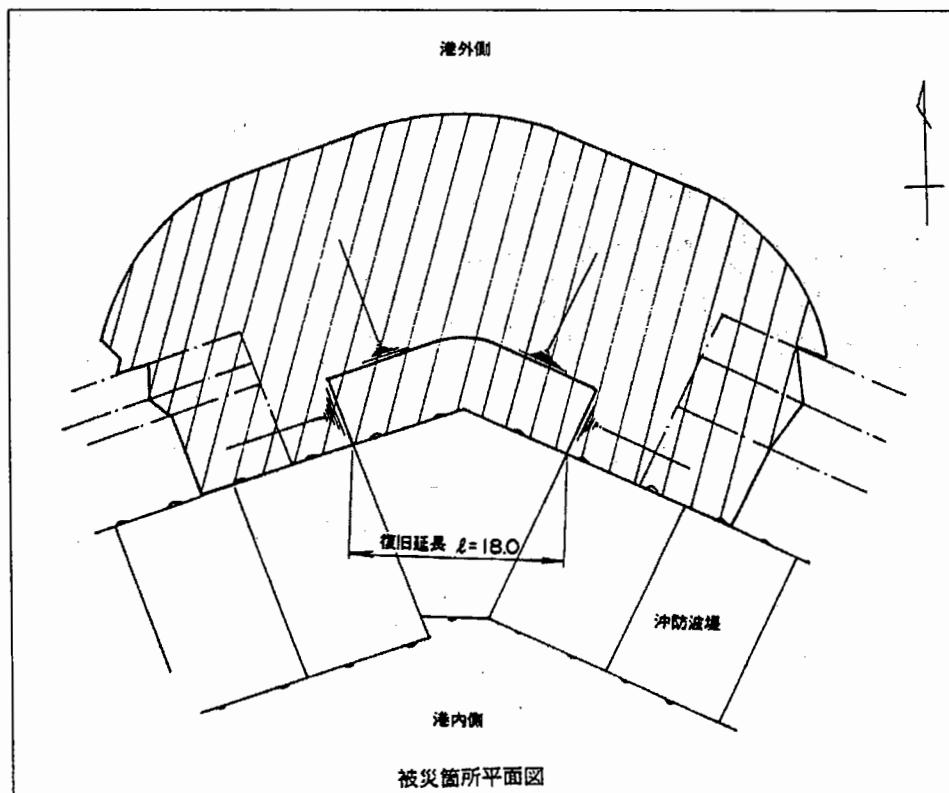
被災前断面図

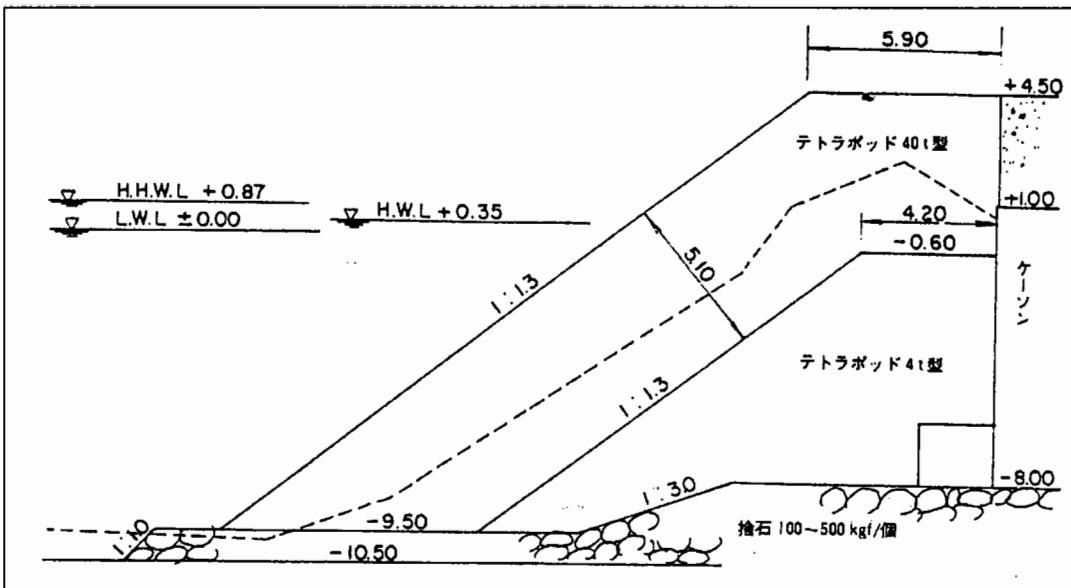


復旧断面図

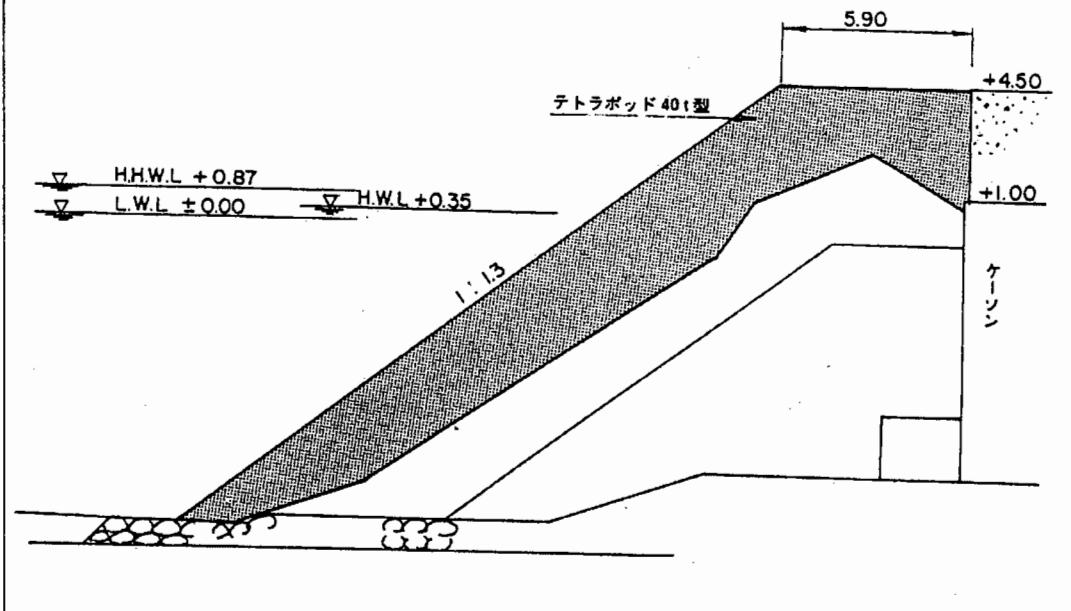
(20) 赤崎防

No. 20				
시설명	赤崎防 松ヶ谷地区 浅海防波堤	구조형식	케이슨식 혼성제(소파블럭피복)	
완공일시	1980년 10월 31일	피해일시	1982년 1월 28일 ~ 29일 (동절기풍랑)	
피해상황	소파블록이 침하, 이탈하였음.			
피해전	설계자료	파고 不明	설계수심	不明
	주기 不明	설계조위	H.H.W.L + 0.87m	
	입사각 不明	파압식	不明	
피해시	피해장소	직립부	제체의 이동	無
		제체의 傾斜		無
		제체의 破損		無
	사석부	피복공의 이탈		-
		기초사석의 이탈		無
	근고공부	근고공의 이탈		無
	소파공	소파공의 이탈	40ton급 T.T.P. 침하, 이탈	
		소파공의 破損	不明	
		해저지반의 세굴	無	
		기타	-	
자연조건	파고	$H_{1/3}=4.9m, H_{max}=7.2m$	풍속	최대 NNW 23.0m/sec
	주기	不明	조위	不明
	파향	不明	지속시간	不明
	파랑데이터의 측정방법 등	鳥取防 鳥ヶ島 북서 3km, 수심 -30m에서의 파고계기록		
복구방법	동일한 블록으로 원상복구하였음.	6.0m(목측)		





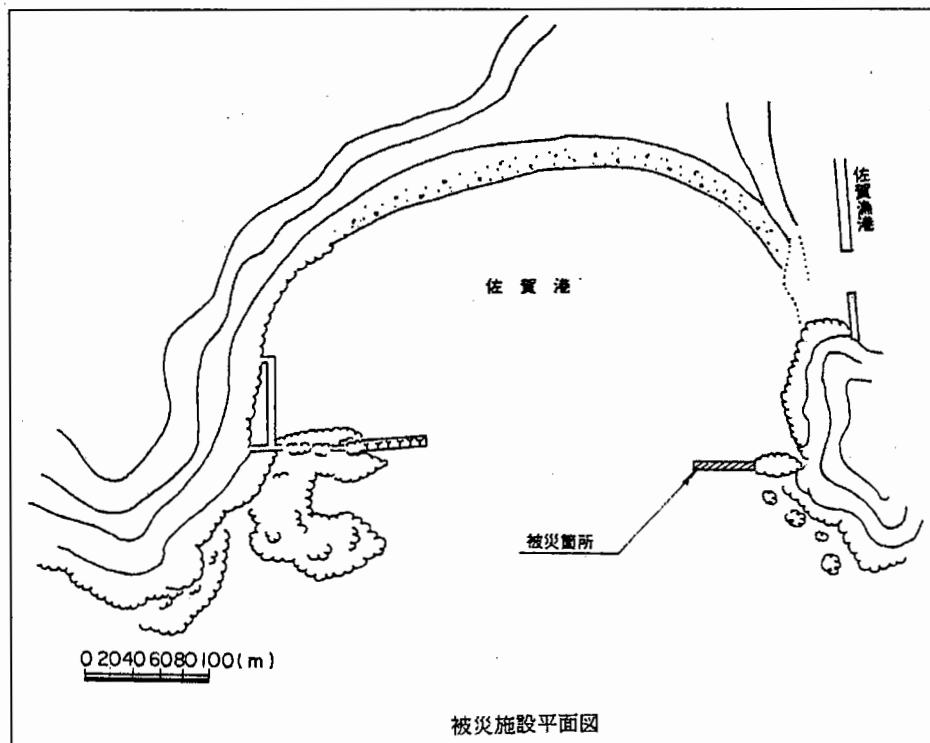
被災前断面図

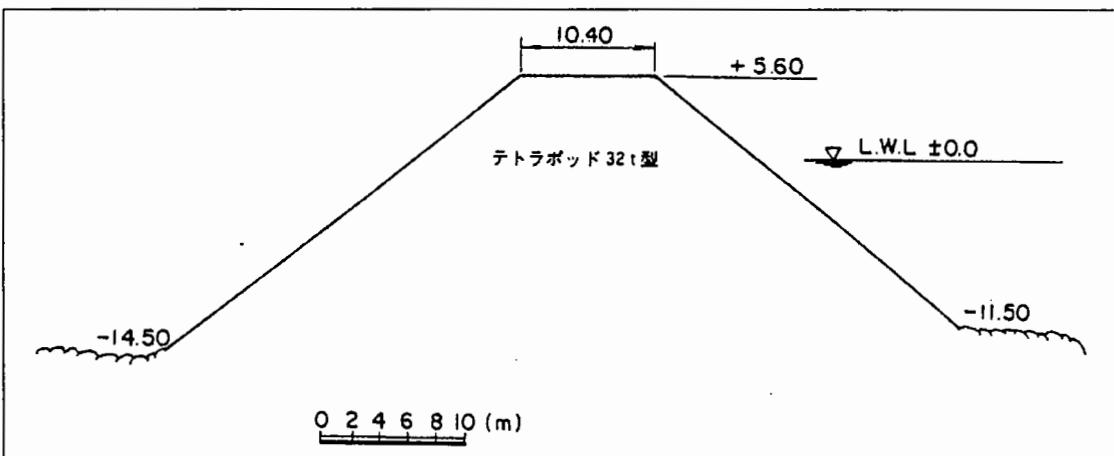


復旧断面図

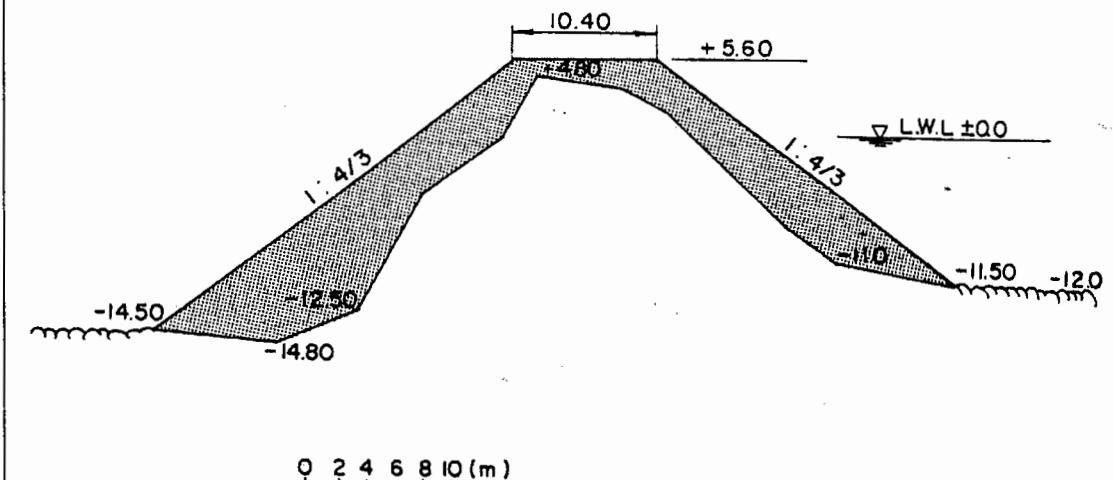
(21) 佐賀항

No.	21				
시설명	佐賀항 鹿島방파제	구조형식	사석블록경사제		
완공일시	1977년 3월 31일	피해일시	1980년 9월 11일 ~ 29일 (태풍13호)		
피해상황	파랑에 의해 소파블록이 全延長에 걸쳐 유실, 이탈되었음.				
피해전 설계자료	파고 주기 입사각	不明 不明 不明	설계수심 설계조위 파압식	不明 不明 不明	
피해시 수량	피해장소 · 수량	직립부	제체의 이동 제체의 傾斜 제체의 破損	- - -	
		사석부	피복공의 이탈 기초사석의 이탈 근고공의 이탈	- - -	
		소파공	소파공의 이탈 소파공의 破損	소파블록이 全延長에 걸쳐 유실, 이탈되었음 不明	
	자연조건	해저지반의 세굴	無		
		기타	-		
		파고	$H_{1/3}=8.41m, H_{max}=14.44m$	풍속	최대 SSW 15.1m/sec 순간최대 33.4m/sec
		주기	$T_{1/3}=13.2sec, T_{max}=14.8sec$	조위	최대조위 +3.50m
		파향	不明	지속시간	
		파랑데이터의 측정방법 등	파고, 주기: 上川口 심해방향 약 1.1km, 수심 -28m 설치 지점에서의 파고계기록, 풍속: 足摺岬측후소		
		복구방법	동일한 소파블록으로 원상복구하였다.		





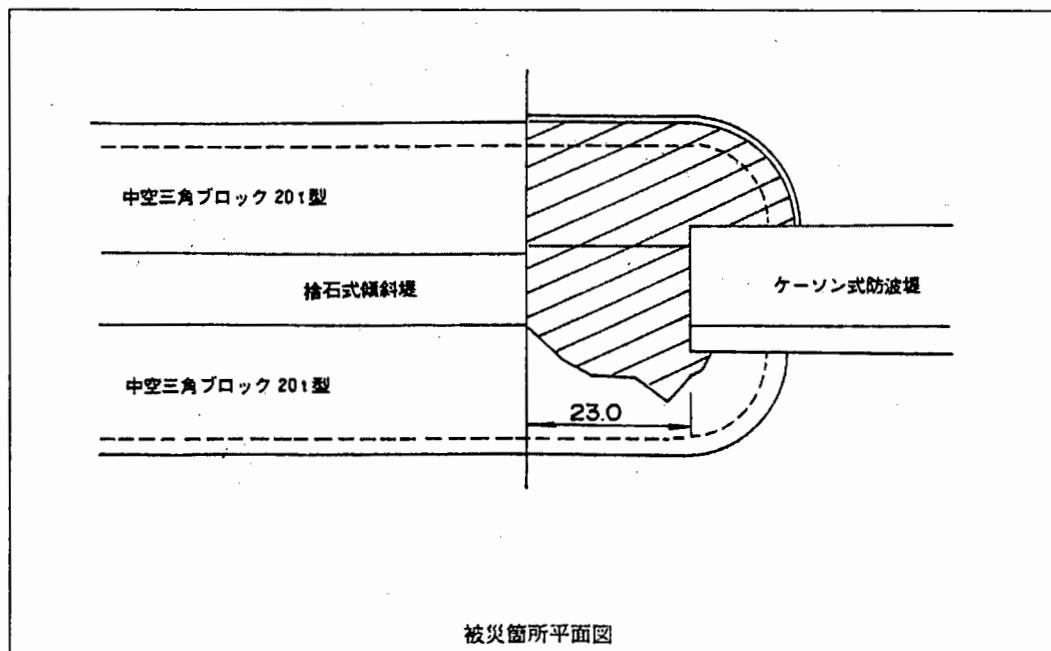
被災前断面図

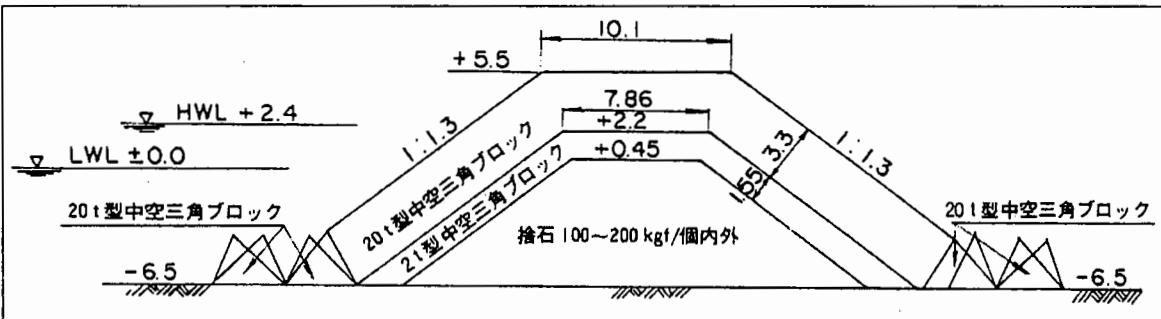


復旧断面図

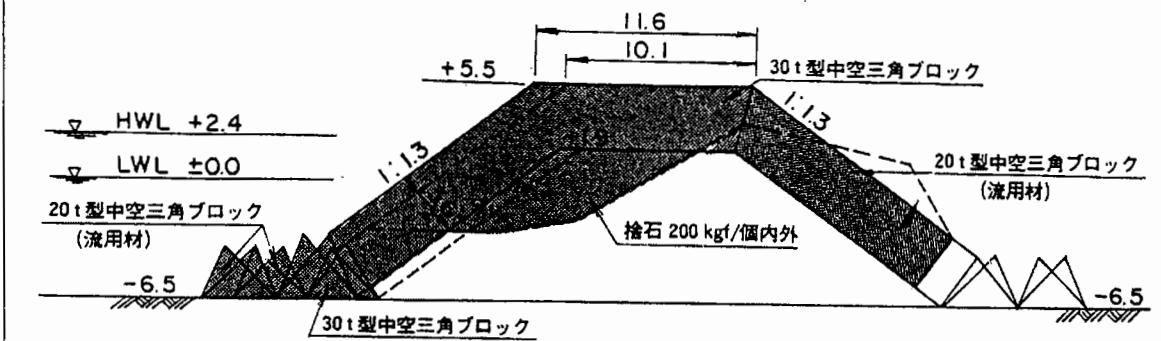
(22) 志布志항

No.	22			
시설명	志布志항 외항지구 방파제 (동) (A)	구조형식	사석식경사제	
완공일시	1974년 5월 28일	피해일시	1982년 8월 27일 (태풍13호)	
피해상황	파랑에 의해 경사제의 피복블록이 이탈하였음.			
피해전 설계자료	파고 주기 입사각	不明 不明 不明	설계수심 설계조위 파압식	-6.5m H.W.L +2.4m -
피해 시 장소·수량	직립부	제체의 이동 제체의 傾斜 제체의 破損		- - -
	사석부	파복공의 이탈 기초사석의 이탈 근고공의 이탈	20ton 및 2ton급 中空 삼각블록 이탈 사석(100~200kg급) 이탈	
	소파공	소파공의 이탈 소파공의 破損		- -
		해저지반의 세글	不明	
		기타		-
	자연조건	파고 주기 파향 파랑데이터의 측정방법 등	$H_{1/3}=8.3m, H_{max}=10.1m$ 不明 S 파고: 수심 -27m 설치의 파고계기록, 풍속: 해상자위대 기지	풍속 조위 지속시간 최대 23.2m/sec 최고조위 +2.50m 不明
복구방법	이탈된 사석을 보충하여 시공한 후, 항내측은 20ton급 中空 삼각블록을 거치하고, 천단으로부터 항외측에 걸쳐 30ton급 中空 삼각블록을 거치하였음.			





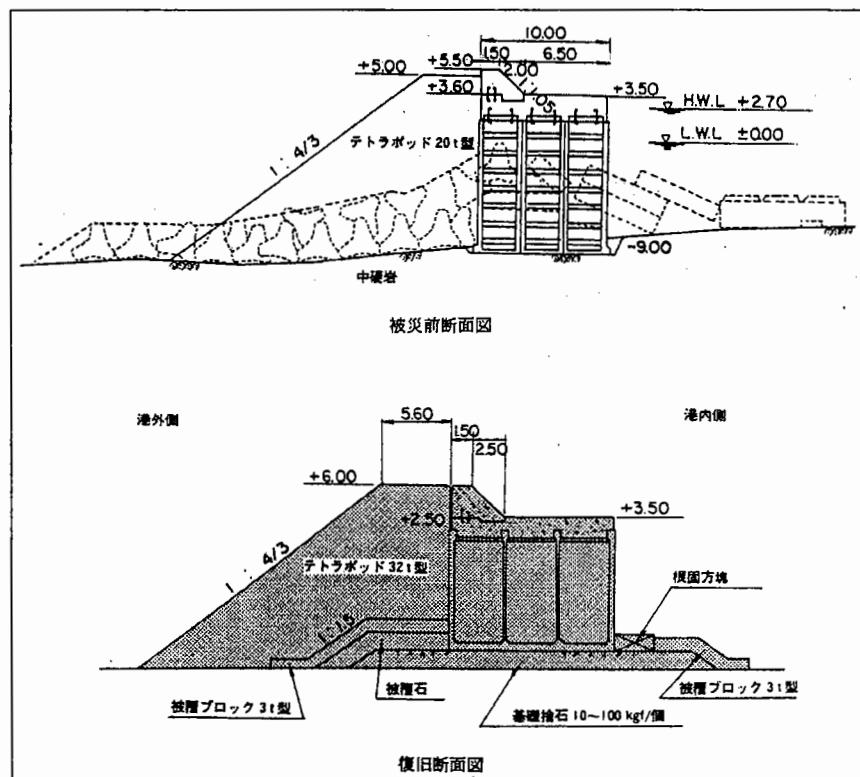
被災前断面図



復旧断面図

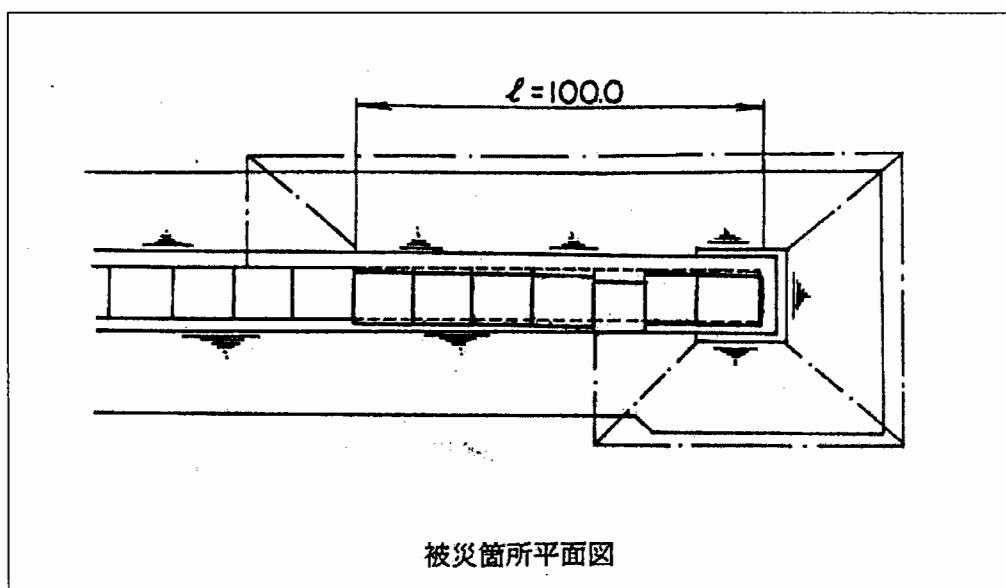
(23) 大里항

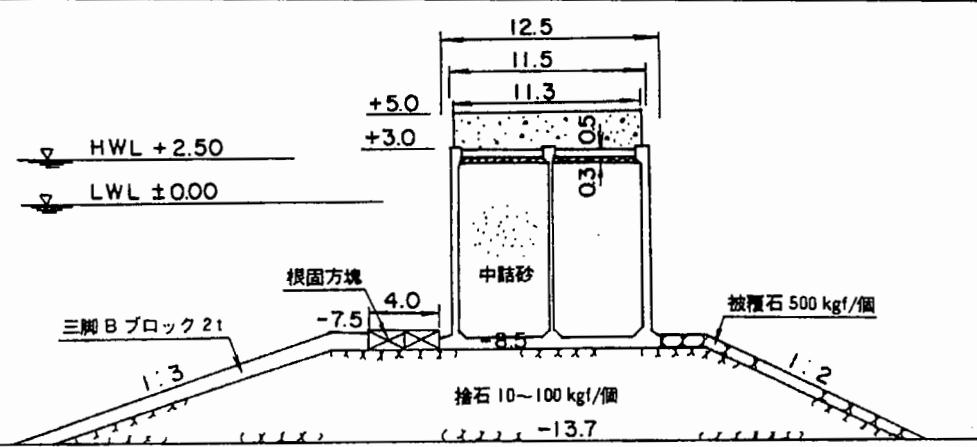
No.	23			
시설명	大里항 大里지구 방파제(서)	구조형식	셀블록식직립제(소파블록피복)	
완공일시	1979년	피해일시	1980년 10월 13일 ~ 14일	
피해상황	파랑에 의해 셀블록(속채움 콘크리트 방괴)이 항내측으로 이탈하였음.			
피해전 설계자료	파고	$H_{1/3}=4.4\text{m}$	설계수심	-9.0m
	주기	$T_{1/3}=9.6\text{sec}$	설계조위	H.W.L +2.70m
	입사각	不明	파압식	不明
피해 시 수량	직립부	제체의 이동	셀블록(속채움 콘크리트 방괴)이 연장 46m에 걸쳐 항내측으로 이탈, 파손되었음	
		제체의 傾斜	-	
		제체의 破損	不明	
	사석부	피복공의 이탈	-	
		기초사석의 이탈	-	
		근고공의 이탈	-	
	소파공	소파공의 이탈	직립부의 이탈, 파손에 따라 소파블록이 이탈하였음	
		소파공의 破損	不明	
		해저지반의 세굴	-	
		기타	-	
자연 조건	파고	$H_{1/3}=6.0\text{m}$ (제체 전면파고)	풍속	최대 NW 24.1m/sec 순간최대 NW 39.8m/sec
	주기	$T_0=9.6\text{sec}$	조위	최고조위 +2.70m
	파향	不明	지속시간	不明
	파랑데이터의 측정방법 등	파고, 주기: 관측위치 不明($H_0=6.8\text{m}$, $T_0=9.6\text{sec}$ 로 추정) 풍속: 屋久島측후소		
복구방법	구조형식을 케이슨식 혼성제(소파블록피복제)로 변경하여 복구하였다.			



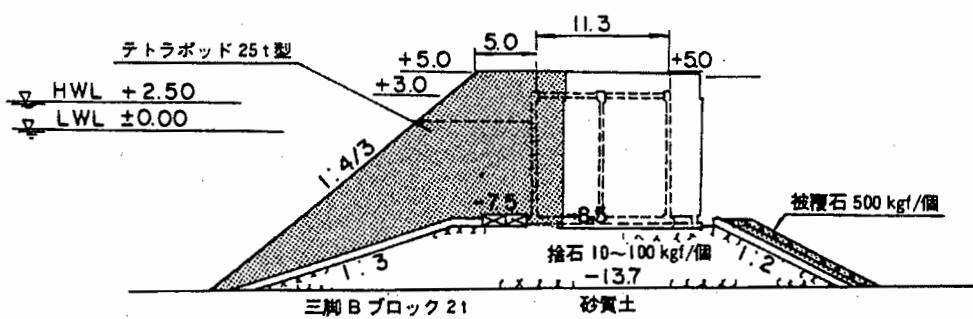
(24) 宮ノ浦항

No.	24				
시설명	宮ノ浦항 북방파제		구조형식	케이슨식 혼성제	
완공일시	1975년 ~ 1977년		피해일시	1980년 10월 13일 ~ 14일 (태풍19호)	
피해상황	파랑에 의해 케이슨이 항내측으로 0.6~2.6m 이동하였음.				
피해전 설계자료	파고	不明	설계수심	不明	
	주기	不明	설계조위	H.W.L +2.5m	
	입사각	不明	파압식	不明	
	직립부	제체의 이동	케이슨 7函이 0.6~2.6m 이동하였음		
		제체의 傾斜	不明		
		제체의 破損	無		
	사석부	피복공의 이탈	不明		
		기초사석의 이탈	不明		
	근고공부	근고공의 이탈	不明		
	소파공	소파공의 이탈	-		
피해시 수량	소파공	소파공의 破損	-		
	해저지반의 세굴		不明		
	기타		-		
	자연조건	파고	$H_{1/3}=5.9m$ (제체 전면파고)	풍속	최대 24.1m/sec 순간최대 39.8m/sec
		주기	$T_0=9.4sec$	조위	최고조위 +2.9m
		파향	不明	지속시간	不明
	파랑데이터의 측정방법 등	파고, 주기: 관측위치 不明($H_0=7.0m$, $T_0=9.4sec$ 로 추정)			
복구방법	직립부 전면에 소파블록을 설치하여 안정성을 향상시켰음.				





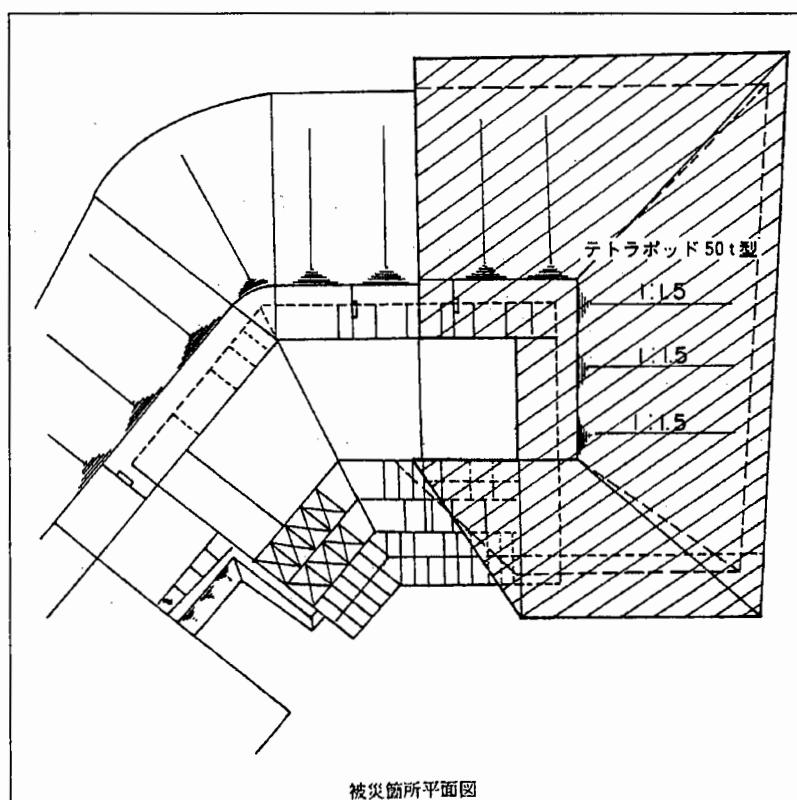
被災前断面図

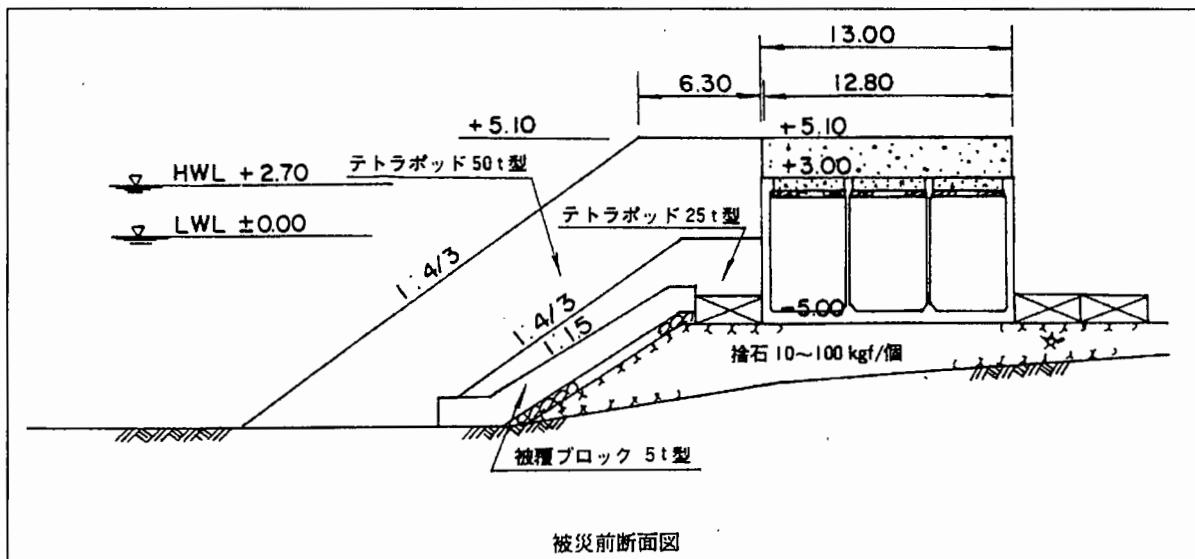


復旧断面図

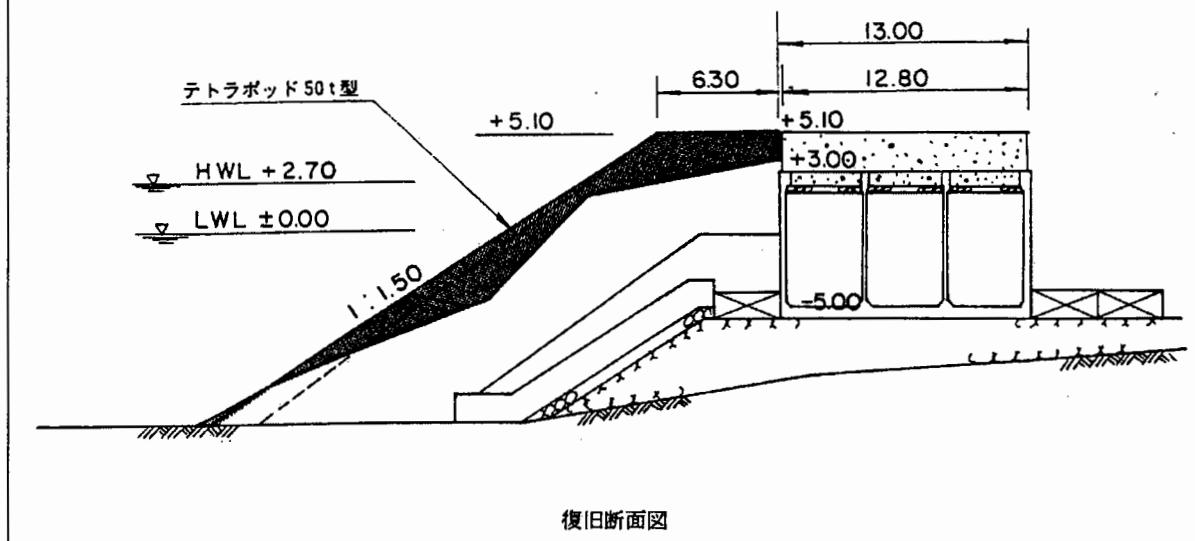
(25) 土屋久永田항

No.	25				
시설명	土屋久永田항 북방파제	구조형식	케이슨식 혼성제(소파블록피복)		
완공일시	1982년 7월 29일	피해일시	1982년 8월 26일 (태풍13호)		
피해상황	파랑에 의해 소파블록이 이탈, 침하하였음.				
피해전	설계자료	파고	不明	설계수심	不明
		주기	不明	설계조위	H.W.L +2.70m
		입사각	不明	파압식	不明
피해시	피해부	직립	제체의 이동	無	
		제체의 傾斜		無	
		제체의 破損		無	
	장소	사석	피복공의 이탈	無	
		기초사석의 이탈		無	
		근고공의 이탈		無	
	· 수량	소파공	소파공의 이탈	50ton급 T.T.P. 이탈, 침하	
		소파공	소파공의 破損	파손이 발생함	
		해저지반의 세굴		不明	
		기타		-	
자연조건	파고	$H_{1/3}=7.0\text{m}$ $H_{\max}=9.0\text{m}$		풍속	최대 NNW 20.7m/sec
	주기	不明		조위	최고조위 $+2.30\text{m}$
	파향	不明		지속시간	不明
	파랑데이터의 측정방법 등	파고: 북방파제 전면에서 목측 풍속: 屋久島측후소			
복구방법	안정을 위해 소파블록을 보충하고 사면경사를 1:4/3에서 1:1.5로 변경하였음.				



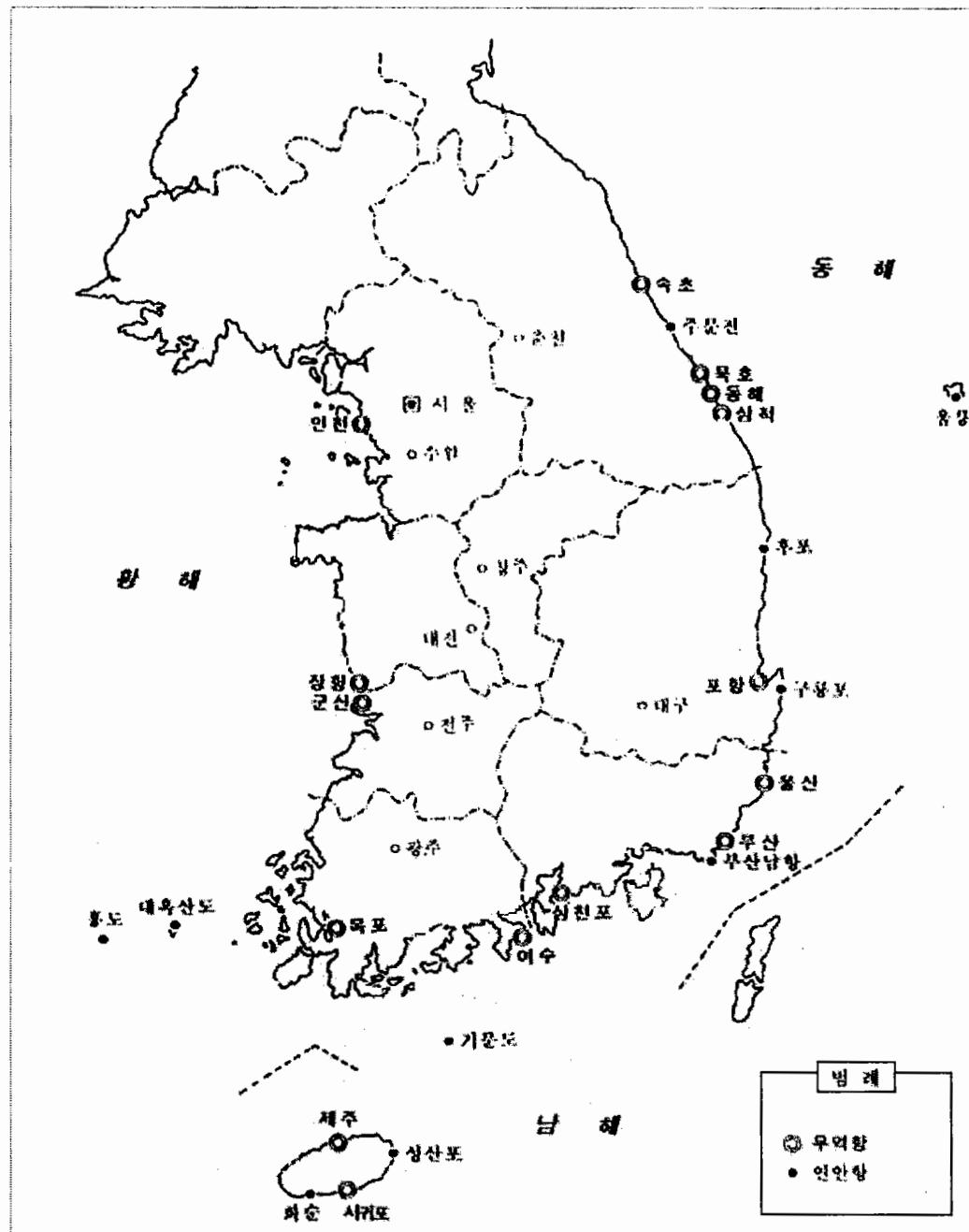


被災前断面図



復旧断面図

부록 B. 국내 피해사례 자료



<그림 B.1> 우리나라 피해항만 위치도

<표 B.1> 추출사례에 대한 이상기상 일람표(1976년~1999년, 37항만 59사례, 국내)

번호	연도	기 간	기상요인	피 해 항 만 명
1	1976	9/12~14	태풍17호	죽변항, 포항구항
2	1979	8/15~18	태풍10호	부산남항, 서귀포항
3	1981	9/1~4	태풍18호	부산남항, 감천항, 화순항
4	1982	8/12~15	태풍11호	서귀포항
5	"	8/27~28	태풍13호	죽변항
6	1983	9/27~30	태풍10호	제주항
7	1984	8/20~21	태풍10호	여수항
8	1985	8/13~14	태풍9호	인천항
9	"	8/31~9/1	태풍13호	도동항
10	"	10/5~6	태풍20호	부산남항, 죽변항, 도동항, 다대포항, 후포항, 포항구항, 임원항, 삼척항, 주문진항, 속초항, 부산항
11	1986	8/27~28	태풍13호	부산남항, 다대포항, 후포항, 구조라항
12	1987	2/3	동절기 이상파랑	동해항
13	"	7/15~16	태풍5호	다대포항, 감천항, 구조라항, 거문도항, 삼천포항, 온산항
14	"	8/29~31	태풍12호	도동항, 후포항, 구룡포항, 감포항, 온산항, 포항신항
15	1991	2/15~16	저기압 이상파랑	북호항
16	"	7/28~30	태풍9호	구룡포항, 감포항
17	1993	6/2	저기압 이상파랑	말도항
18	1995	7/23~24	태풍3호	여수항, 삼천포신항, 물건항, 외포항
19	1997	1/1~2	동절기 이상파랑	모항항
20	"	8/7~9	태풍11호	대변항
21	"	9/14~17	태풍19호	성산포항
22	1998	1/15~16	동절기 이상파랑	양포항
23	"	9/28~30	태풍9호	거문도항
24	"	11/16~18	동절기 이상파랑	군장항
25	1999	2/2~3	"	목포항
26	"	8/2~4	태풍7호	서귀포항, 여수항, 연도항

<표 B.6> 연간 원인별 피해사례수(1976년~1999년, 37항만, 국내)

연도	태풍	동절기 이상파랑	저기압 이상파랑	지진	기타	합계
1976	2					2
1979	2					2
1981	3					3
1982	2					2
1983	1					1
1984	1					1
1985	13					13
1986	4					4
1987	12	1				13
1991	2	1				3
1993			1			1
1995	4					4
1997	2	1				3
1998	1	2				3
1999	3	1				4
합계	52	6	1			59

<표 B.7> 연간 상황별 피해시설수(1976년~1999년, 37항만 59사례, 국내)

개요 년도	제체 滑動·전도	상부공 피해	소파공 피해	사석공 피해	근고공 피해	피복공 피해	기타	합계
1976				1		2		3
1979			2			2		4
1981		1	1	1		2	1	6
1982			2	2				4
1983				1				1
1984		1	1	1		1		4
1985		4	11	6	2	7	7	37
1986		1	1	3	1	3	1	10
1987	2	4	9	5	2	6	1	29
1991		3	3	3	2			11
1993				1			1	2
1995			4	1		1	1	7
1997			2	1		1	2	6
1998			1				2	3
1999		2	2	3	1		1	9
합계	2	16	39	29	8	25	17	136

(주) 각 항만의 피해상황이 중복되는 경우도 있음.

<표 B.8> 원인 · 상황별 피해시설수(1976년 ~1999년, 37항만, 59사례, 국내)

	제체 滑動 · 전도	상부공 피해	소파공 피해	사석공 피해	근고공 피해	피복공 피해	기타	합계
태풍	1	14	37	26	6	25	13	122
동절기 이상파랑	1	2	2	2	2		3	12
저기압				1			1	2
합계	2	16	39	29	8	25	17	136

(주) 각 항만의 피해상황이 중복되는 경우도 있음.

<표 B.2> 봉파제 파해개요(1976년~1999년, 37항만 59사례, 국내)

항별	설계제원	최대풍향 풍속	구조형식	해저 지질	파해시 기상요란	파대통향풍속	파해시 파고	파해내용	북구내용
포항구항	파고: 4.5m 주기: 12sec 파향: NE	SW, 39.8m/sec	정사제	모래	'76 9/12-14 (태풍 17호) FRAN	N, 23.3m/sec	6.0m	파복석 89.0m 파손	파복석: 89m 북구 북구비: 33백만원
죽변항	파고: 4.5m 주기: 14sec 파향: E, NE	W, 21.0m/sec	"	모래	'76 9/12-14 (태풍 17호) FRAN	23.3m/sec	10.4m	파복석 및 사석 442m ³ 유실	파복석: 442m ³ 북구비: 5백만원
부산남항	파고: 7.3m 주기: 13sec 파향: SE	NNE, 34.7m/sec	"	나토 사질토	'79 8/15-18 (태풍 10호) IRVING	SSW, 23.3m/sec	6-8m	T.T.P. 10ton 및 파복석 등 289m 유실	방파제 북구: 289m 북구비: 283백만원
서귀포항	파고: 8.8m 주기: 12sec 파향: S	NE, 40.2m/sec	"	모래 사력충	'79 8/15-18 (태풍 10호) IRVING	SSW, 23.3m/sec	6-8m	T.T.P. 10ton 및 파복석 등 동방파제 8.5m 유실	동방파제 북구 물양장 및 기타 북구비: 78백만원
부산남항	파고: 7.3m 주기: 13sec 파향: SE	NNE, 34.7m/sec	"	나토 사질토	'81 8/31-9/4 (태풍 18호) AGNES	ESE, 11.7m/sec	6-8m	T.T.P. 12.5ton 및 파복석 등 509m 유실	동방파제 북구 물양장 및 기타 북구비: 78백만원
감천항	파고: 6.27m 주기: 12sec 파향: SE	NNE, 34.7m/sec	케니순식 흔성제	이토	'81 8/31-9/4 (태풍 18호) AGNES	ESE, 11.7m/sec	6-8m	상치콘크리트 114m ³ 파손 케이슨 속채움재료 2,014m ³ 유실	원상복구 북구비: 12백만원
화순항	파고: 5.2m 주기: 12sec 파향: S	NNE, 20m/sec	정사제	사질토	'81 8/31-9/4 (태풍 18호) AGNES	SSE, 16.7m/sec		파복석 및 사석 등 49m 유실	원상복구 북구비: 80백만원
서귀포항	파고: 8.8m 주기: 12sec 파향: S	NE, 40.2m/sec	"	모래 사력충	'82 8/12-15 (태풍 11호) CECIL	ESE, 14.0m/sec	6-8m	사석 18.7천m ³ 129m 유실 T.T.P. 25ton 30개 유실	원상복구 북구비: 313백만원

(주) 파해지점의 기상상황과 해상상태의 실측치가 없는 경우는 제해연보(내무부)를 참고하여 관측치와 추정치를 이용하였음.

<표 B.2 계속>

항별	설계 원	최대 풍 풍속	구조 형식	해지 철	파해시 기상 요란	파해시 최대 풍향 풍속	파해시 파고	파해시 내용	복구 내용
죽변항	파고: 4.5m 주기: 14sec 파향: E, NE	W, 21m/sec	경사체	모래	'82 8/25-28 (태풍 13호) ELLIS	W, 20.3m/sec	5.4m	사석 2,000m ³ 유실 T.T.P. 5ton 30개 56m 이탈	사석 580m ³ , T.T.P. 5ton 266개, 상치콘크리트 112m ³ , 복구비: 70백만원
제주항	파고: 6.0m 주기: 36.5m/sec	NNW,	"	모래 사벽 층	'83 9/26-30 (태풍 10호) FORREST	ENE, 16.7m/sec		제두부 사석 14m 유실	원상복구 복구비: 66백만원
여수항	파고: 5.6m 주기: 35.5m/sec	NE, 35.5m/sec	"	실트	'84 8/20-22 (태풍 10호) HOLLY	ENE, 15.0m/sec		상치콘크리트 52m 파손 T.T.P. 12.5ton 및 파복석, 사석 등 유실	원상복구 복구비: 450백만원
인천항	파고: 2.7m 주기: 6.3sec 파향: SE	NNW, 40m/sec	"	이토 점토	'85 8/13-14 (태풍 9호) LEE	E, 20.0m/sec		남방파제 400m 파복석 소단 유실, 호안 390m 석축 파손 남향호안 21개소 석축 파손	파해보상 원상복구 복구비: 7백만원
도동항	파고: 7.6m 주기: 12sec 파향: S, SW	NE, 46.2m/sec	"	모래	'85 8/30-9/1 (태풍 13호) PAT	NE, 19.7m/sec	7m	T.T.P. 20ton 45개 유실	T.T.P. 20ton 43개 거치 복구비: 46백만원
임원항	파고: 7.4m 주기: 14sec 파향: E, NE	W, 21m/sec	"	자갈 전석 층	'85 10/5-6 (태풍 20호) BRENDA	NNE, 18.0m/sec	10m	T.T.P. 5ton, 사석 등 70m 유실, 물양장 118m 상치콘크리트 60m 파손	원상복구 복구비: 1,685백만원
삼척항	파고: 6m 주기: 14sec 파향: E, NE	W, 12.5m/sec	"	모래 자갈	'85 10/5-6 (태풍 20호) BRENDA	ESE, 14.3m/sec	10m	T.T.P. 20ton 및 사석 등 350m 유실, 파체벽 60m 전도, 물양장 포장 400m ³	T.T.P. 복구 350m 파체 벽 복구 60m 물 양장 등 복구비: 54백만원
주문진항	파고: 7.4m 주기: 14sec 파향: E, NE	SW, 38m/sec	경사체	모래	'85 10/5-6 (태풍 20호) BRENDA	ESE, 14.3m/sec	8m	사석 4,000m ³ 유실, T.T.P. 20ton 120개 침하, 돌재 15m 유실, 호안 파복석 180m ³	원상복구 복구비: 100백만원

<표 B.2 계속>

항별	설계체원	중심대 풍속	구조형식	해저 저질	피해시 기상요란	피해시 최대풍향풍속	피해시 파고	피해시 파괴	피해내용	복구내용
죽현항	파고: 4.5m 주기: 14sec 파향: E, NE	W, 21m/sec	경사체	모래	'85 10/5-6 (태풍 20호) BRENDA	NNE, 18.0m/sec	10m	T.T.P. 5ton 380개 유실 T.T.P. 12.5ton 350개 유실 상치 콘크리트 697m ³ 복구비: 119백만원	T.T.P. (12.5ton) 269개	
도동항	파고: 7.6m 주기: 12sec 파향: S, SW	NE, 46.2m/sec	"	모래	'85 10/5-6 (태풍 20호) BRENDA	NE, 14.7m/sec	10.7m	T.T.P. 360개 유실(남방파제) T.T.P. 체작장 및 T.T.P. 10ton 30개 유실(북방파제)	T.T.P. 12.5ton 350개 유실 상치 콘크리트 6.5m 침하 복구비: 905백만원	
속초항	파고: 7.4m 주기: 14sec 파향: E, ENE	W, 46m/sec	"	경암	'85 10/5-6 (태풍 20호) BRENDA	ESE, 14.3m/sec	8m	T.T.P. 20ton 및 방파 107개 동 유실	피복석 2,260m ³ 유실 T.T.P. 거치 157개	피복석 복구: 2,350m ³ 복구비: 200백만원
부산남항	파고: 7.3m 주기: 13sec 파향: SE	NNE, 34.7m/sec	"	나토 사질토	'85 10/5-6 (태풍 20호) BRENDA	NE, 12.3m/sec	5.5m	파체체 피복석 및 사석 132m 유실, T.T.P. 12.5ton 및 피복석 등 100m	원상복구 복구비: 31백만원	
부산항	파고: 7.3m 주기: 13sec 파향: SE	NNE, 34.7m/sec	"	실트	'85 10/5-6 (태풍 20호) BRENDA	NE, 12.3m/sec	5.5m	상치콘크리트 82m 파손	상치 82m 복구 복구비: 4백만원	
다대포항	파고: 5.0m 주기: 13sec 파향: SE	NNE, 34.7m/sec	"	사질토	'85 10/5-6 (태풍 20호) BRENDA	NE, 12.3m/sec	5.5m	피복석 동 사석 23m 유실	원상복구 복구비: 5백만원	
포항구항	파고: 4.5m 주기: 12sec 파향: NE	SW, 39.8m/sec	"	모래	'85 10/5-6 (태풍 20호) BRENDA		10.7m	피복석 43m 유실	피복석 및 보강 43m 복구비: 66백만원	
후포항	파고: 7.1m 주기: 14sec 파향: E, NE	W, 21.0m/sec	"	모래	'85 10/5-6 (태풍 20호) BRENDA	NNE, 18.0m/sec	10m	사석 7,400m ³ , 방파 60개 유실, 상치 콘크리트 및 T.T.P. 12.5ton 70개 유실	사석 11,400m ³ , 방파 50개 체작, T.T.P. 제 작 거치 60개, 상치 콘 크리트 428m ³ 복구비: 193백만원	

<표 B.2 계속>

형별	설계지 원	최대풍향 풍속	구조형식	해저 저질	피해시 기상요란	피해시 최대풍향풍속	피해시 파고	피해내용	복구비용
부산남항	파고: 7.3m 주기: 13sec 파향: SE	NNE, 34.7m/sec	경사체 사질토	나토 (태풍 13호) VERA	'86 8/27-29 (태풍 13호)	SSE, 21.7m/sec		파체 체 피복석 및 사석 등 129m 유실	파체 체 129m 복구 복구비: 11백만원
다대포항	파고: 5m 주기: 15sec 파향: SE	NNE, 34.7m/sec	"	사질토	'86 8/27-29 (태풍 13호)	SSE, 21.7m/sec		피복석 등 사석 68m 유실 호안 물 양장 70m	원상복구 복구비: 24백만원
구조라항	파고: 5.62m 주기: 15sec 파향: S	NW, 15.5m/sec	"	"	'86 8/27-29 (태풍 13호)	S, 23.7m/sec	5~8m	1972년 축조된 피복석 23m 유 실	방파제 23m 보수 복구비: 5백만원
후포항	파고: 7.1m 주기: 14sec 파향: E, NE	W, 21m/sec	"	모래	'86 8/27-29 (태풍 13호) VERA	SE, 28.0m/sec	8-9m	상처 콘크리트 209m ³ 사석 766m ³ 유실 T.T.P. 12.5ton 162개 유실 방파 60개 유실	상처 콘크리트 209m ³ , T.T.P. 122개 체작, 189 개 거치, 방파거치 10개, 사설투하 766m ³ , 복구비: 83백만원
동해항	파고: 8.0m 주기: 14sec 파향: E, ENE	NW, ? 12.5m/sec	흔성체	모래	'87 2/3 (동절기 이상파랑)		8.85m	케이슨 1,500m 층 900m 가 내 항쪽으로 10-15cm 滑動 및 침하	외 항측에 T.T.P. 5ton 및 상처 콘크리트 보강 보강공사비: 1,673백만원
거문도항	파고: 4.7m 주기: 15sec 파향: SE	"	"	모래 자갈	'87 7/15-16 (태풍 5호) THELMA	SSE, 25.0m/sec	6-7m	T.T.P. 12.5ton 95m 및 피복석 유실	원상복구 복구비: 43백만원
구조라항	파고: 5.62m 주기: 15sec 파향: S	NW, 15.5m/sec	"	"	'87 7/15-16 (태풍 5호) THELMA	SSW, 26.7m/sec	6-7m	피복석 37m 이탈 T.T.P. 8ton 75개 등 13m 유실	피복석 보강 27m T.T.P. 보강 13m 75개 복구비: 21백만원
삼천포항	파고: 5.4m 주기: 15sec 파향: S	SW, 18.5m/sec	"	모래 사질이 토	'87 7/15-16 (태풍 5호) THELMA	SSW, 26.7m/sec	6-7m	피복석 750m ³ 유실	사면 피복석 750m ³ 보강 복구비: 11백만원

<표 B.2 계속>

항별	설계체원	최대풍향 풍속	구조형식	해저 지질	파해시 기상요란	파해시 최대풍향풍속	파해시 파고	파해내용	복구내용
다대포항	파고: 5.0m 주기: 15sec 파향: SE	NNE, 34.7m/sec	"	사질토	'87 7/15-16 (태풍 5호) THELMA	SSW, 25.7m/sec	파복석 등 사석 96m 유실	방파제 복구 96m 복구비: 17백만원	
김천항	파고: 6.5m? 주기: 15sec 파향: NNE	NNE, 34.7m/sec	경사체	흔합토 사	'87 7/15-16 (태풍 5호) THELMA		상치콘크리트 26m 파손 T.T.P. 32ton 및 파복석, 사 석 등	원상복구 복구비: 150백만원	
온산항(남)	파고: 5.5m 주기: 파향:				'87 7/15-16 (태풍 5호) THELMA		6각 4주 25ton급 20m 유실 파복석 등 70m 유실	남방파제는 원상복구 북방파제는 상치 콘크리트로	
온산항(북)	파고: 5.84m 주기: 파향:		"		'87 8/29-31 (태풍 12호) DINAH	NNW, 18.3m/sec	단면 침하 및 케이슨 滑動 및 상치콘크리트 파손 (8-11cm 침하, 16cm 침하)	부족한 단면 중량을 증가 복구비: 1,778백만원	
구룡포항	파고: 6.1m 주기: 13sec 파향: NE	SW, 39.8m/sec	경사체	모래	'87 8/29-31 (태풍 12호) DINAH	N, 23.0m/sec	방파 28개 유실 사석 2,081m ³ 유실 T.T.P. 20ton 60개 유실	원상복구 복구비: 39백만원	
후포항	파고: 6.7m 주기: 14sec 파향: E, NE	NNW, 23.7m/sec	"	모래	'87 8/29-31 (태풍 12호) DINAH	NNW, 23.3m/sec	사석 4,300m ³ 유실, 방파 20 개 유실, T.T.P. 32ton 50개 유실, 상치콘크리트 25m 파 손	원상복구 복구비: 66백만원	
감포항	파고: 7.4m 주기: 14sec 파향: E, ENE	SW, 39.8m/sec	"	모래	'87 8/29-31 (태풍 12호) DINAH	N, 23.0m/sec	사석 600m ³ 유실 T.T.P. 12.5ton 80개 유실 물양정 169m	원상복구 복구비: 336백만원	
포항신항	파고: 5.0m 주기: 10sec 파향: NE	SW, 39.8m/sec	케이슨식 흔성체	가는모 래	'87 8/29-31 (태풍 12호) DINAH	N, 23.0m/sec	케이슨 전면부 20ton 250개 유실 T.T.P. 20ton 250개 거치	T.T.P. 20ton 250개 거치 복구비: 95백만원	

<표 B.2 계속>

항별	설계 원	최대 풍향 풍속	구조 형식	해저 저질	파해시 기상 요란	파해시 최대 풍향-풍속	파해시 파고	파해 내용	복구 내용
도동항	파고: 7.6m 주기: 12sec 파향: S, SW	NE, 46.2m/sec	경사 체	모래	'87 8/29-31 (태풍 12호) DINAH		7m 유실, 상치 콘크리트 40m ³	북방파제 T.T.P. 32ton 8개 북구비: 65백만원	원상복구
목포항	파고: 6.1m 주기: 14sec 파향: E 20S	WSW, 12.5m/sec	"	모래	'91 2/15-16 (동철기 이상 파랑)			상치 콘크리트 19m 침하, 사 체 859m ³ 유실, 방파 6개 유 실, T.T.P. 20ton 260개 유실	원상복구 북구비: 210백만원
감포항	파고: 7.4m 주기: 14sec 파향: E, ENE	SW, 39.8m/sec	"	모래	'91 7/28-30 (태풍 9호) CAITLIN		9-11m 유실, 상치 콘크리트 10m 침하	사석 11,000m ³ 유실, T.T.P. 20ton 350개, 방파 15개 유 실, 상치 콘크리트 10m 침하	원상복구 북구비: 440백만원
구룡포항	파고: 6.1m 주기: 13sec 파향: NE	SW, 39.8m/sec	"	모래	'91 7/28-30 (태풍 9호) CAITLIN		9-11m 상치 콘크리트 12m 침하	사석 6,900m ³ 유실 상치 콘크리트 12m 침하	원상복구 북구비: 191백만원
발도항	파고: 3.6m 주기: 9.5sec 파향: SW	T.T.P. 흔 성 경사 체			'93 6/2 (저기압 이상파랑)	WSW, 23.5m/sec	4m 유실, 작업장 50m	서방파제 7m 사석 유실, 작업장 50m	원상복구 북구비: 196백만원
여수항	파고: 5.67m 주기: SSE	케이슨식 혼성 체		니토 점토	'95 7/23-24 (태풍 3호) FAYE	N, 33.2m/sec	5-6m 유실, 흙 벽 유실 7.5m	서방파제 T.T.P. 106m 동방파제 흙 벽 유실 7.5m	원상복구 북구비: 137백만원
삼천포신 항	파고: 6.9m 주기: 14.0sec 파향: S	사석식 경 사체		모래 사질니 토	'95 7/23-24 (태풍 3호) FAYE	SE, 24.3m/sec	8-10m 100m 유실, 침하	T.T.P. 107개 파손 100m 유실, 침하	100m 복구 등 복구비: 50백만원
물진항	파고: 5.3m 주기: 13.0sec 파향: SE	사석식 경 사체		모래	'95 7/23-24 (태풍 3호) FAYE	SE, 24.3m/sec	8-10m 유실 및 이탈 사석 유실 654m ³	T.T.P. 254개 유실 및 이탈 사석 유실 654m ³	원상복구 북구비: 394백만원

<표 B.2 계속>

항별	설계체원	최대풍향 풍속	구조형식	해저 지질	파해시 기상요란	파해시 최대풍향풍속	파해시 파고	파해내용	복구내용
외포항	파고: 5.12m 주기: 14.0sec 파향: SSW		사석식경 사체		'95 7/23-24 (태풍 3호) FAYE	SW, 5.2m/sec	8-10m	T.T.P. 86개 유실 및 이탈	T.T.P. 56개 해적 및 거처 T.T.P. 99개 인양 및 재거 복구비: 88백만원
모항항	파고: 5.0m 주기: 9.0sec 파향: NW		사석식경 사체		'97 1/1~2 (동철기이상 파랑)	12.3m/sec	4-6m	22m 파손	원상복구 복구비: 516백만원
내변항	파고: 5.5m 주기: 13.0sec 파향: SSE		사석식경 사체	사질토 점토	'97 8/7-9 (태풍 11호) TINA	NE, 16.0m/sec	6-8m	10m, 사석 24,932m ³ , 고르기 4,393m ³ , T.T.P. 45개	원상복구 복구비: 660백만원
성산포항	파고: 4.0m 주기: 9.0sec 파향: S		T.T.P.흔 성체	모래 암반	'97 9/14-17 (태풍 19호) OLIWA	ENE, 18.3m/sec	7-10m	T.T.P. 25ton 40개 파복석 276m ³	T.T.P. 25ton 67개 해적 및 거처, 파복석 276m ³ 복구 복구비: 216백만원
양포항	파고: 4.6m 주기: 9.0sec 파향: E		사석식경 사체	모래 자갈	'98 1/15-16 (동철기 이상파랑)	NE, 13.7m/sec	6-7m	160m	원상복구 복구비: 782백만원
거문도항	파고: 주기: 파향:		사석식경 사체	사질토	'98 9/28-30 (태풍 9호) YANNI	SSE, 10.5m/sec		T.T.P. 교란	동방파제 37m 보강 등 복구비: 180백만원
군장항	파고: 4.8m 주기: 7.0sec 파향: W.WNW		사석식경 사체		'98 11/16-18 (동철기 이상파랑)	25m/sec	5m	37m	원상복구 복구비: 370백만원

<표 B.2 계속>

형별	설치 계원	최대풍향 풍속	구조형식	해저 저질	파해시 기상요란	파해시 최대풍향:풍속	파해시 파고	파해시 파고	파해내용	복구비용
목포형 선착장	파고: 4.7m 주기: 7.0sec 파향: NNW	중력식구 조	나토 사질	'99 2/2-3 (동절기 이상파랑)	NNW, 15.7m/sec	5.3m	상부 파손, 근고블럭 90m ³ 세출	8.4m 파손, 블록 1개	블록 15개 파손, 등 원상복구 복구비: 300백만원	제작 및 거치
서귀포형	파고: 9.1m 주기: 13.0sec 파향: SE	T.T.P.흔 성체	모래 사력	'99 8/2-4 (태풍 7호) OLGA		5-8m	상부콘크리트 30m 이탈, T.T.P. & TRIPOD 90% 유 실, 사석 2,500m ³ 유실	기초사석 2,687m ³ , 220m ³ , T.T.P. 124%, 제작 254 개 거치, TRIPOD 11개제작 20 개 거치, 복구비: 1,787 백만원	파복식	
여수형	파고: 2.6m 주기: 6.27sec 파향:	사석강제 치환	나토 첨토	'99 8/2-4 (태풍 7호) OLGA	S, 30.7m/sec	2-4m	사석 400m ³ 유실		원상복구 복구비: 30백만원	
연도형	파고: 6.5m 주기: 12.0sec 파향: SSW	사석식경 사체		'99 8/2-4 (태풍 7호) OLGA	S, 30.7m/sec	2-4m	14m 파손	6m 복구 등, 복구비: 300백만원		

<표 B.3> 동해안의 봉파제 피해개요(1976년 ~ 1999년, 국내)

구분	년 일자	1976	1982	1985	1986	1987	1991	1998				
파랑	파 고	9/12-14	8/25-28	8/30-9/1	10/5-6	8/27-29	2/3	7/15-16	8/29-31	2/15-16	7/28-30	11/15-16
기상상황	태풍	5.4m	7.0m	8.0-10.7m	8.0-9.0m	8.85m				9.0-11.0m	6.0-7.0m	
피해항만	포항구 죽변	죽변	도동	포항구 죽변 임원 삼척 주문진 속초 후포 도동	후포	동해	온산남	온산북 구룡포 후포 감포 포항신 도동	목포 구룡포	감포 구룡포	양포	
복구비(백만원)	38	70	46	3,322	83	1,673		2,379	210	631	782	

- ※ 1) 파고는 관련문헌을 참고하여 추정하였음.
- 2) 동해 항의 경우 보수, 보강공사를 포함한 비용을 나타냄.
- 3) 온산남항은 같은 해 피해가 발생한 온산북항과 더불어 복구비가 함께 산정되었음.

<표 B.4> 남해안의 봄파제 폭해개요(1976년~1999년, 국내)

구분	년	1979	1981	1982	1983	1985	1986	1987	1995	1997	1998	1999	1999	
파랑	일자	8/15-18	8/31-9/4	8/12-15	9/26-30	10/5-6	8/27-29	7/15-16	7/23-24	8/7-9	9/14-17	9/28-30	2/2-3	
파고	기상상황	6.0-8.0m	6.0-8.0m	6.0-8.0m		5.5m	5.0-8.0m	6.0-7.0m	5.0-10.0m	6.0-8.0m	7.0-10.0m		5.3m	
파고	기상상황	태풍	태풍	태풍	태풍	태풍	태풍	태풍	태풍	태풍	태풍	태풍	태풍	
파고	기상상황	부산남부 서귀포	부산남부 감천 화순	서귀포	제주 여수	부산남부 부산 다대포	부산남부 부산 다대포	부산남부 부산 다대포	거문도 구조라 구조라 다대포	여수 삼천포 삼천포 다대포 감천	여수 삼천포 물건 의포	성산포	거문도 목포항 신천장	서귀포 여수 연도
복구비(백만원)	361	170	313	516	40	40	40	242	669	660	216	180	300	
복구비(백만원)													2,117	

* 1) 파고는 관련문헌을 참고하여 추정하였음.

<표 B.5> 서해안의 봄파제 폭해개요(1976년~1999년, 국내)

구분	년	1985	1993	1997	1998
파랑	일자	8/13-14	6/2	1/1-2	11/16-18
파고	기상상황		4.0m	4.0-6.0m	5.0m
파고	기상상황	태풍	저기압	이상파랑	동절기 이상파랑
파고	기상상황	인천	말도	모항	군장
복구비(백만원)	7	196	516	370	

* 1) 파고는 관련문헌을 참고하여 추정하였음.