

# 대수심 방파제 및 연약지반 관련기술(VII)

2004. 12.

주관연구기관 : 한국해양연구원

협동연구기관 : (주) 대우건설



해양수산부

MINISTRY OF MARITIME AFFAIRS & FISHERIES

# 제 출 문

해양수산부장관 귀하

본 보고서를 “대수심 방파제 및 연약지반 관련기술 개발 연구(VII)” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2004. 12.

주관연구기관명 : 한국해양연구원  
주관연구책임자 : 권오순  
연구원 : 박우선, 장인성, 정원무,  
한상훈, 김동현, 장세철,  
이구영, 박은경, 이보람  
협동연구기관명 : (주)대우건설  
협동연구책임자 : 조영기

# 요 약 문

## I. 제 목

대수심 방파제 및 연약지반 관련기술(VII)

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

신항만은 지금까지 양호한 입지에 건설된 기존 항만과 달리 수심, 파랑, 지반 등 입지여건이 열악한 상태에서 건설되고 있다. 따라서 단기적으로는 미진한 국내의 설계 및 시공 기술에 대하여 외국의 선진 기술 및 첨단장비 등을 과감한 도입이 필요하고, 장기적으로는 선진항만기술의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

본 연구사업에서는 이러한 현실을 감안하여 연구사업의 최종 목표를 대규모 신항만의 건설에 필요한 대수심 및 연약지반에 적합한 신형식 방파제의 개발과 해저 및 매립 연약지반의 개량기법을 확립하는데 두고 연구를 수행하고 있다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

연구사업의 7차년도인 올해는 신형식 방파제 시험시공을 위해 실시설계 및 일부 구간의 시험시공을 실시하였다. 대수심, 고파랑, 연약지반 조건에 부합하는 석선파일기초 방파제를 울산신항 북방파제 예정 구간에 50m 시험시공을 계획하였다. 실시설계와 아울러 25m 구간에 해당하는 석선파일기초를 설치완료하였다.

## IV. 연구개발결과

석선파일기초 방파제를 울산 신항 북방파제 50m 구간에 시험 시공하기 위하여 실시설계를 실시하고, 그 중 25m 구간에 해당하는 석선파일기초 4함을 시공하였다. 최종 설계 결과, 상부 점토층이 12.4m이며 하부에 모래자갈층이 지지층으로 역할을 하는 것으로 나타나 최종 석선파일기초 단면은 지름이 11m, 두께 55cm, 길이는 하부 모래자갈층에 2.5m 관입되도록 설계하여 최종 14.9m로 결정되었다.

현재 석션파일기초 4함의 시공이 완료되었으며, 시공 중 석션파일의 기울어짐은 발생하지 않았으나, 하부 모래자갈층의 기울기로 인하여 최종 0도에서 4까지 기울어짐이 발생하였다. 워터제트를 이용한 관입이나 최대 석션압을 이용한 관입이 불가능할 정도로 견고한 지반으로 판정하여 최종 관입을 종료하였다. 4함 설치결과, 설치된 석션파일 기초간의 최대 수평이격거리는 3.29m이며, 최대 높이차는 0.7m 이다. 또한 석션파일기초 1함의 최대 기울기(높이차)는 약 4도(1.1m)로 나타났다. 또한, 석션파일기초 슬래브의 하부와 해저면의 이격거리는 약 1.4m~3.0m이다.

석션파일간의 수평이격거리 발생원인은 해상크레인에 의한 거치 부정확성 때문으로 최종 기초 사석의 포설시 이격구간에 T형 블록 거치하여 기초사석 포설할 계획이며, 석션파일 사이에 발생한 높이차는 하부 모래자갈층의 경사 때문에 발생했지만 기초사석의 포설 두께가 2.5m이므로 최대 0.7m의 높이차는 문제가 없을 것으로 판단되며, 이로 인해 발생한 최대 4도 가량의 경사도 편심으로 인한 영향을 고려해 재검토가 필요한 사항이다. 또한 석션파일기초의 슬래브와 해저면의 이격문제는 하부 모래자갈층이 지반조사로 예측한 것보다 더 단단했기 때문에 발생했지만 석션파일기초가 선단지지 개념으로 설계되었기 때문에 지지력에는 문제가 없을 것으로 생각된다.

## V. 연구개발결과의 활용계획

석션파일기초는 해양구조물 기초로 다양한 형태로 응용이 가능한 구조이며, 연구 결과를 토대로 해양의 초대형구조물 기초 설계 및 시공 기술을 확보할 수 있을 것으로 예측할 수 있다. 또한 신형식 방파제의 현장 시험시공을 통해 연구과제로 도출된 새로운 형식의 구조물을 실제 현장에 도입해 보는 실용적인 측면의 연구가 좀더 활성화될 것으로 예상된다.

## VI. 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

본 연구의 당해년도 목표는 모두 당초계획한 바대로 100% 달성하였으며, 연구결과의 대외기여도도 높을 것으로 판단된다. 특히, 석션파일기초 방파제는 대상 현장에서 기존의 사석 방파제를 적용하는 경우와 비교해 볼 때 30%의 예산이 절감되는 효과를 주는 것으로 계산되어 추후 우리나라 연약지반과 깊은 수심으로 이루어진 연안역 개발의 활성화에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

# SUMMARY

## 1. Title

Technologies for Breakwaters in Deep Water and Soft Ground Improvement (VII)

## 2. Objectives and necessities

Contrary to conventional ports which were constructed in good environments, new ports are being constructed under severe or extreme environmental conditions including deep underwater, high waves, very soft grounds and etc. Therefore, it is necessary to introduce some advanced technologies and instruments of foreign countries to the design and construction of domestic area and, eventually, the development of independent technologies is required.

The final objectives of this project are to develop a new type of breakwater applicable to deep water and soft ground, and to establish the improvement method of soft ground as seabed and reclamation.

## 3. Contents and scope

In this year, the seventh fiscal year, a detailed design of newly suggested breakwater and experimental construction of suction pile were conducted. The experimental construction of suction pile type breakwater with 50m length, which could be applicable to deep underwater, high waves, very soft grounds, is under consideration at the location where northern breakwater of Ulsan new port were scheduled to be constructed. Suction piles with 25m length as deep foundation were completed as well as detailed design.

## 4. Results and Discussions

In order to perform the experimental construction of suction pile type breakwater at Ulsan new port area, the detailed design and In this year, the seventh fiscal year, a detailed design of newly suggested breakwater was performed and 4 suction piles correspondent to 25m were manufactured and installed at the site. The final detailed design indicate that the height of clayey layer is 12.4m and the underlying sandy gravel layer plays a role of supporting layer. Therefore, dimension of the suction piles was determined as diameter 11m, thickness 0.55m and length 14.9m including the embedded depth to gravel layer 2.5m.

The installation processes were terminated after confirmation of no more penetration to the supporting layer even with the water-jet and maximum suction pressure. The results of the construction process of 4 suction piles are as follows; during installation no inclination of the suction pile was generated but due to the slope of the lower sandy gravel layer some degree of inclination of 0 to 4 degrees were occurred. The maximum lateral distance between piles was 3.29m and the vertical difference was 0.7m, and the height between pile head and the ground surface was 1.4m~3.0m. The difference of distance and height may be satisfactorily solved because of sufficient height of the leveling mound.

## 5. Practical Application of the Results

Suction pile system is a foundation for marine structure and can be applicable to various fields. Based on the results of this research, the design and construction technology for the pile foundation of very large marine structures is predicted to be guaranteed. Furthermore, a more practical research on the newly proposed structures will be succeeded with high concern through a successful experimental application of a new type of breakwater to the field.

## 6. Achievements and Contribution

The objectives of this project in this year were completely achieved as scheduled, and the

contribution to another fields is encouraging. With considerations of Korean coastal environments with highly distributed soft ground and deep sea, the contribution to another fields will be also outstanding. Especially, the suction pile breakwater can be expected to contribute to the economical efficiency of 30% budget reduction, which is compared to the previous breakwater. Therefore, the researches herein will be helpful to develop the Korean coastal environment with high efficiency in the economical and constructive aspects.





# 목 차

제1장 서론	1
제2장 석션파일기초 방파제 실시설계 요약	7
제1절 기초자료 조사·분석	7
1. 자연조건	7
가. 기상조건	7
나. 해상조건	8
2. 지반조사	10
가. 당초 지반조사	10
나. 추가 지반조사	14
3. 재료원조사	17
가. 석재원	17
나. 해사	17
다. 레미콘 및 아스콘	18
4. 제작장 선정	18
가. 1차 제작장 선정 결과	18
나. 최종 제작장 선정 결과	19
제2절 설계조건	20
1. 적용기준	20
가. 국내기준 및 지침	20
나. 외국참고자료	20
2. 해상조건	21
가. 설계조위	21
나. 설계조류속	21
다. 설계파랑	21
3. 재료조건	22

가. 단위체적중량 .....	22
나. 마찰계수 .....	22
4. 허용안전율 .....	22
5. 내진설계 기준 .....	23
가. 개요 .....	23
나. 설계적용 내진등급 .....	23
다. 설계지반운동 수준의 결정 .....	23
라. 내진 2등급 붕괴방지 수준의 구조물별 내진 해석방법 .....	24
제3절 석션파일기초(Suction Pile Foundation) .....	25
1. 석션파일기초 단면결정 .....	25
가. 개요 .....	25
나. 석션파일기초 구조물의 선정 .....	26
2. 석션파일기초 케이슨 방파제 .....	29
가. 당초 석션파일기초 케이슨 방파제 .....	29
나. 변경 석션파일기초 케이슨 방파제 .....	34
제4절 계측관리계획 .....	45
1. 개요 .....	45
가. 계측 목적 .....	45
나. 현장 계측흐름도 .....	45
2. 계측기 종류 및 설치 .....	46
가. 계측항목 및 내용 .....	46
나. 계측기의 설치 .....	48
제5절 시공계획 .....	52
1. 시공개요 .....	52
2. 시공 관리 .....	53
가. 개요 .....	53
나. 공정관리 .....	53
다. 품질관리 .....	53
라. 준공관리 .....	53
마. 안전관리 및 환경보전 .....	53
바. 공사기록 .....	54

3. 가설계획 .....	55
4. 제작장 조성공 .....	55
5. 석설파일기초 시공 .....	56
가. 개요 .....	56
나. 석설파일기초 제작 .....	56
다. 석설파일기초 설치 .....	57
제3장 석설파일기초 방파제 시험시공 및 계측 .....	63
제1절 제작장 조성공사 .....	63
1. 개요 .....	63
2. 공중흐름도 .....	64
3. 시 공 .....	64
가. 터파기 .....	64
나. 기초잡석 포설 및 다짐 .....	65
다. 콘크리트 타설 .....	66
제2절 석설파일 제작 및 거치공사 .....	67
1. 석설파일 제작 .....	67
가. 개요 .....	67
나. 공중흐름도 .....	67
다. 인원 및 장비투입 현황 .....	68
라. 석설파일 제작방법 .....	69
마. 석설파일 제작 .....	71
2. 석설파일 운반거치 .....	84
가. 개요 .....	84
나. 공중흐름도 .....	85
다. 인원 및 장비투입 현황 .....	86
라. 석설파일 운반거치 .....	89
제3절 계측 및 Data 분석 .....	100
1. 개요 .....	100
2. 공중흐름도 .....	100
3. 계측장비 및 계측 System .....	101

가. 계측 장비 .....	101
4. 계측 및 Data 분석 .....	102
5. 석선파일 설치현황 .....	103
6. 시공결과 및 대책 .....	105
가. 개    요 .....	105
나. 문제점 및 대책 .....	105
제4장 석선파일기초 방파제의 안정성 평가 .....	107
제1절 석선파일기초의 횡방향 지지력 평가 .....	107
1. 개요 .....	107
2. 이론적 배경 .....	108
가. 말뚝 기초 .....	108
나. 석선말뚝의 개요 .....	115
다. 석선말뚝의 설치와 인발 .....	115
라. 석선말뚝의 지지력 .....	116
마. 석선 앵커 공법 .....	119
3. 실험 장치 및 방법 .....	121
가. 모형시료 .....	121
나. 모형토조 .....	122
다. 모형말뚝 .....	123
라. 측정기구 .....	124
마. 모형실험 순서 .....	127
4. 결과분석 .....	129
가. 모형실험에 의한 수평거동 특성 .....	129
나. 말뚝의 극한 수평저항력 (Broms 방법) .....	137
제2절 석선파일기초의 수리·지반모형실험 .....	139
제3절 수치해석 .....	166
제5장 결론 및 토의 .....	179
제1절 결론 및 향후 일정 .....	179
1. 실시설계 .....	179

2. 시험시공 결과 분석 .....	180
3. 안정성 평가 결과 .....	180
제2절 토의 .....	181
참고문헌 .....	183

부록 A. 자문회의 내용

부록 B. 시공 사진첩

별책 : 석션파일기초 방파제 실시설계보고서

별책 : 석션파일방파제 건설공사 설계서

별책 : 석션파일기초 방파제 계측보고서(施工時)

별책 : 석션기초구조물 기술매뉴얼(譯)



# 표 목 차

표 2.1.1 기상개요 .....	7
표 2.1.2 인근 지역별 조위표 .....	8
표 2.1.3 조 류 속 도 .....	9
표 2.1.4 설 계 파 고 .....	9
표 2.1.5 지층 분포상태 조사당시 해저면 기준(단위: m) .....	11
표 2.1.6 물성시험 결과 .....	12
표 2.1.7 역학시험 결과 .....	12
표 2.1.8 실내시험 결과표 .....	13
표 2.1.9 시공위치에 따른 지층구조 비교표 .....	16
표 2.1.10 기허가된 석재원 현황 .....	17
표 2.1.11 해사 재료원 검토 .....	17
표 2.1.12 레미콘 및 아스콘 재료원 .....	18
표 2.1.13 인근 제작장 현황 .....	18
표 2.1.14 최종 제작장 선정 .....	19
표 2.2.1 석선파일기초 구조물의 안전율 .....	22
표 2.2.2 내진성능 목표별 재현주기 .....	23
표 2.2.3 내진성능 목표별 암반노두에서의 설계지반운동 수준 .....	23
표 2.3.1 토질조사 방법 및 내용 .....	26
표 2.3.2 구조형식별 특징 .....	27
표 2.3.3 기초형상별 특징 .....	28
표 2.3.4 사용재료별 특징 .....	28
표 2.3.5 케이슨부 안정성 평가 .....	33
표 2.3.6 석선파일기초 안정성 평가 .....	33
표 2.3.7 케이슨부 안정성 평가 .....	38
표 2.3.8 석선파일기초 안정성 평가 .....	38
표 2.4.1 계측기 설치 수량 .....	47

표 2.5.1	케이슨 제작장 조성 개요 .....	55
표 3.3.1	계측결과 요약 .....	102
표 3.3.3	시공 결과 발생한 문제점 및 대책 .....	105
표 4.1.1	시공법별 특징 .....	111
표 4.1.2	주문진 표준사의 물리적 특성 .....	121
표 4.1.3	카올리나이트의 물리적 특성 .....	122
표 4.1.4	모형말뚝의 제원 .....	123
표 4.1.5	모형실험 조건 .....	130
표 4.1.6	각 실험별 지반의 콘 저항 평균값 .....	130
표 4.1.7	수평하중-변위량 곡선에서 두 접선의 교점인 곳의 하중 .....	135
표 4.1.8	수평 변위량이 0.25inch (6.25mm)가 되었을 때의 하중 .....	135
표 4.1.9	Broms 방법에 의한 말뚝선단에서의 수평저항력 및 최대 모멘트 .....	137
표 4.2.1	모형실험 단면 크기(1/50 축척) .....	140
표 4.2.2	모형실험의 종류 .....	140
표 4.2.3	모형실험의 과량조건 .....	140
표 4.2.4	천단 최대 변위 비교(모형실험) .....	165
표 4.3.1	수치해석에 사용된 지반의 물성치 .....	166
표 4.3.2	천단 최대 변위 비교(수치해석) .....	177



# 그림 목 차

그림 1.1.1 우리나라 연약지반의 분포 .....	1
그림 1.1.2 시험시공 위치도 .....	6
그림 2.1.1 지반조사 위치도 .....	10
그림 2.1.2 당초 보링 주상도 .....	11
그림 2.1.3 추가 지반조사 위치도 .....	14
그림 2.1.4 추가 보링 주상도 .....	15
그림 2.3.1 당초 표준단면도 .....	29
그림 2.3.2 당초 종평면도 .....	30
그림 2.3.3 안정계산 흐름도 .....	31
그림 2.3.4 작용하중도 .....	32
그림 2.3.5 변경 표준단면도 .....	34
그림 2.3.6 변경 종평면도 .....	35
그림 3.3.7 안정계산 흐름도 .....	36
그림 2.3.8 작용하중도 .....	37
그림 2.3.9 자침량 산정도 .....	39
그림 2.3.10 워터젯트 배치도와 노즐 .....	44
그림 2.4.1 현장계측 흐름도 .....	45
그림 2.4.2 계측기 설치 일반도 .....	46
그림 2.4.3 석션파일 기초 배열도 .....	47
그림 2.4.4 유효응력계 설치도 .....	48
그림 2.4.5 경사계 설치도 .....	49
그림 2.4.6 간극수압계 설치도 .....	50
그림 2.4.7 반력계 설치도 .....	51
그림 2.5.1 방파제 시공순서 .....	52
그림 2.5.2 석션파일기초 제작흐름도 .....	56
그림 2.5.3 석션파일기초 설치 흐름도 .....	57

그림 3.1.1 제작장 평면 및 단면도 .....	63
그림 3.1.2 터파기 .....	64
그림 3.1.3 기초잡석 포설 .....	65
그림 3.1.4 기초잡석 다짐 .....	65
그림 3.1.5 거푸집 조립 .....	66
그림 3.1.6 제작장 콘크리트 타설 .....	66
그림 3.2.1 석션파일 배치도 .....	67
그림 3.2.2 석션파일 4함 제작 .....	68
그림 3.2.3 콘크리트 타설도 .....	69
그림 3.2.4 Shoe 상세도 .....	72
그림 3.2.5 Shoe 설치 .....	72
그림 3.2.6 Shoe 철근보강 .....	73
그림 3.2.7 워터제트 배치도 .....	73
그림 3.2.8 강제거푸집(벽체) .....	74
그림 3.2.9 벽체거푸집 설치 .....	74
그림 3.2.10 들음고리 고정틀 .....	75
그림 3.2.11 들음고리 설치 .....	75
그림 3.2.12 간극수압계 .....	76
그림 3.2.13 간극수압계 설치 .....	76
그림 3.2.14 강제거푸집(현치) .....	77
그림 3.2.15 현치거푸집 설치 .....	77
그림 3.2.16 슬래브 저판 거푸집 설치 .....	78
그림 3.2.17 슬래브 측면 유로폼 설치 .....	78
그림 3.2.18 초음파계 .....	79
그림 3.2.19 초음파계 설치 .....	79
그림 3.2.20 경사계 .....	80
그림 3.2.21 석션펌프 Flange 배치도 .....	80
그림 3.2.22 석션펌프 Flange 설치 .....	81
그림 3.2.23 작업용 개구부 배치도 .....	81
그림 3.2.24 작업용 개구부 설치 .....	82
그림 3.2.25 전단벽 유로폼 설치 .....	83

그림 3.3.1 석설파일 설치 위치도 .....	84
그림 3.3.1 크레인선 .....	86
그림 3.3.2 석설파일 콘트롤러 .....	87
그림 3.3.3 워터제트 펌프 .....	88
그림 3.3.4 크레인선 접안 .....	89
그림 3.3.5 석설파일 .....	90
그림 3.3.6 석설파일 체결 .....	90
그림 3.3.7 들음고리 체결 .....	91
그림 3.3.8 석설파일 권상 .....	91
그림 3.3.9 석설파일 예인-1 .....	92
그림 3.3.10 석설파일 예인-2 .....	92
그림 3.3.11 크레인선 및 세팅바지 고정-1 .....	93
그림 3.3.12 크레인선 및 세팅바지 고정-2 .....	93
그림 3.3.13 석설파일 가거치-1 .....	94
그림 3.3.14 석설파일 가거치-2 .....	94
그림 3.3.15 워터제트 고압호스 연결 .....	95
그림 3.3.16 계측기 계측 .....	95
그림 4.3.17 석설파일 콘트롤러 .....	96
그림 4.3.18 석설파일 가동 .....	96
그림 3.3.19 석설파일 하강-1 .....	97
그림 3.3.20 석설파일 하강-2 .....	97
그림 3.3.21 워터제트 가동-1 .....	98
그림 3.3.22 워터제트 가동-2 .....	98
그림 3.3.1 계측기 설치위치도 .....	100
그림 3.3.2 시간에 따른 석설파일의 관입(3함) .....	102
그림 3.3.3 석설파일 거치결과 .....	103
그림 3.3.4 석설파일 거치후 모습-1 .....	104
그림 3.3.5 석설파일 거치후 모습-1 .....	104
그림 4.1.1 기초의 개념 .....	108
그림 4.1.2 말뚝의 재질에 의한 분류 .....	109
그림 4.1.3 시공법에 의한 말뚝의 분류 .....	110

그림 4.1.4	하중전달 메커니즘에 의한 분류 .....	110
그림 4.1.5	기초공법 선정 요인 .....	112
그림 4.1.6	짧은 말뚝의 변형모드와 지반반력 및 모멘트 분포도 .....	113
그림 4.1.7	사질토 지반의 극한 수평저항력 (짧은 말뚝) .....	114
그림 4.1.8	점성토 지반의 극한 수평저항력 (짧은 말뚝) .....	114
그림 4.1.9	석션말뚝 설치 원리 .....	116
그림 4.1.10	석션말뚝의 압축 지지력 .....	117
그림 4.1.11	석션말뚝의 인발 지지력 .....	118
그림 4.1.12	석션말뚝의 횡방향 지지력 .....	118
그림 4.1.13	석션말뚝 지지력의 일반해 .....	119
그림 4.2.14	석션앵커의 설치 모식도 .....	120
그림 4.1.15	모형실험에 사용된 이층지반의 모습 .....	121
그림 4.1.16	지반조성용 토조 .....	123
그림 4.1.17	하중재하용 토조 .....	123
그림 4.1.18	모형말뚝의 모습 .....	124
그림 4.1.19	모형토조 및 말뚝단면도 .....	124
그림 4.1.20	LVDT (Spring Type) .....	125
그림 4.1.21	LVDT (Non-spring Type) .....	125
그림 4.1.22	로드셀과 모터 .....	126
그림 4.1.23	데이터 로거 .....	126
그림 4.1.24	정적 콘관입시험기 .....	127
그림 4.1.25	조성이 완료된 모형 지반 .....	127
그림 4.1.26	지반에 말뚝이 관입된 상태 .....	128
그림 4.1.27	말뚝과 LVDT가 연결된 모습 .....	128
그림 4.1.28	횡방향 하중재하실험의 모습 .....	129
그림 4.1.29	지반별 콘 저항치 .....	130
그림 4.1.30	모래지반에서의 하중-변위 곡선 .....	131
그림 4.1.31	이층지반에서의 하중-변위 곡선 .....	132
그림 4.1.32	모래지반에서의 하중-변위 곡선 .....	133
그림 4.1.33	이층지반에서의 하중-변위 곡선 .....	134
그림 4.1.34	말뚝 길이비에 따른 극한하중 (① 조건) .....	135

그림 4.1.35	말뚝 길이비에 따른 극한하중 (② 조건)	136
그림 4.1.36	말뚝의 변화 형상	136
그림 4.1.37	말뚝의 수평저항력	137
그림 4.1.38	말뚝의 최대 모멘트	137
그림 4.1.39	모형실험과 해석결과의 극한하중 비교	138
그림 4.2.1	원 설계 단면	141
그림 4.2.2	최종 실시설계 단면	141
그림 4.2.3	모형실험 개념도 및 계측기 설치 위치	142
그림 4.2.4	방과제 및 석선파일기초의 모형	142
그림 4.2.5	모형 방과제 평면도	142
그림 4.2.6	실험을 수행한 수조	143
그림 4.2.7	석선파일기초 모형 (좌 : 원 설계, 우 : 실시설계)	143
그림 4.2.8	케이슨 방과제 모형	143
그림 4.2.9	모래 20cm 지반 조성	144
그림 4.2.10	모래지반에 설치된 간극수압계	144
그림 4.2.11	석선파일기초 설치	144
그림 4.2.12	케이슨 거치	144
그림 4.2.13	최종 모형 완성 장면 (좌 : 정면, 우 : 측면)	144
그림 4.2.14	파압계 및 변위계 설치 장면	145
그림 4.2.15	모래 30cm 지반 조성	145
그림 4.2.16	석선파일기초 일부 관입	145
그림 4.2.17	석선파일기초 관입 완료 장면	145
그림 4.2.18	방과제 설치 장면	146
그림 4.2.19	최종 실험 준비 완료 장면	146
그림 4.2.20	상부 점토 20cm 지반 조성 장면	146
그림 4.2.21	계측기 설치된 장면	147
그림 4.2.22	파랑 하중 재하 장면	147
그림 4.2.23	반단면 방과제 실험 장면	147
그림 4.2.24	Case II의 통상과 실험결과	148
그림 4.2.25	Case II의 폭풍과 실험결과	149
그림 4.2.26	Case II의 설계과 실험결과	150
그림 4.2.27	Case III의 통상과 실험결과	151
그림 4.2.28	Case III의 폭풍과 실험결과	152
그림 4.2.29	Case III의 설계과 실험결과	153

그림 4.2.30 Case IV의 통상과 실험결과 .....	154
그림 4.2.31 Case IV의 폭풍과 실험결과 .....	155
그림 4.2.32 Case IV의 설계과 실험결과 .....	156
그림 4.2.33 Case V의 통상과 실험결과 .....	157
그림 4.2.34 Case V의 폭풍과 실험결과 .....	158
그림 4.2.35 Case V의 설계과 실험결과 .....	159
그림 4.2.36 Case V, 규칙과, 주기 1.0s, 파고 2.0cm 실험결과 .....	160
그림 4.2.37 Case V, 규칙과, 주기 1.2s, 파고 4.0cm 실험결과 .....	161
그림 4.2.38 Case V, 규칙과, 주기 1.4s, 파고 6.0cm 실험결과 .....	162
그림 4.2.39 Case V, 규칙과, 주기 1.6s, 파고 10.0cm 실험결과 .....	163
그림 4.2.40 Case V, 규칙과, 주기 1.8s, 파고 15.0cm 실험결과 .....	164
그림 4.3.1 수치해석을 위한 요소망 .....	166
그림 4.3.2 원 설계 단면의 요소망 .....	167
그림 4.3.3 실시 설계 단면의 요소망 .....	167
그림 4.3.4 원 설계 단면의 최종 변위 양상 .....	168
그림 4.3.5 원 설계 단면의 과잉간극수압 발생분포 .....	168
그림 4.3.6 원 설계 단면의 최종 평균주응력 분포 .....	169
그림 4.3.7 원 설계 단면의 최종 축차응력 분포 .....	169
그림 4.3.8 실시 설계 단면의 최종 변위 양상 .....	170
그림 4.3.9 실시 설계 단면의 최종 과잉간극수압 분포 .....	170
그림 4.3.10 실시 설계 단면의 최종 평균주응력 분포 .....	171
그림 4.3.11 실시 설계 단면의 최종 축차응력 분포 .....	171
그림 4.3.12 원 설계의 모형실험단면 요소망 .....	172
그림 4.3.13 실시 설계의 모형실험단면 요소망 .....	172
그림 4.3.14 원 설계 모형실험의 최종 변위 양상 .....	173
그림 4.3.15 원 설계 모형실험의 최종 과잉간극수압 분포 .....	173
그림 4.3.16 원 설계 모형실험의 최종 평균주응력 분포 .....	174
그림 4.3.17 원 설계 모형실험의 최종 축차응력 분포 .....	174
그림 4.3.18 실시 설계 모형실험의 최종 변위 양상 .....	175
그림 4.3.19 실시 설계 모형실험의 최종 과잉간극수압 분포 .....	175
그림 4.3.20 실시 설계 모형실험의 최종 평균주응력 분포 .....	176

그림 4.3.21 실시 설계 모형실험의 최종 축차응력 분포 ..... 176  
그림 5.1.1 최종 설계단면 ..... 179





## 제 1 장 서 론

현재 계획 또는 건설중인 부산신항만, 광양항, 아산항, 인천북항, 울산신항, 포항영일만신항, 새만금신항, 보령신항, 목포외신항 등 9대 신항만의 입지를 보면 건설환경이 열악하다. 대부분 연약지반 또는 수심이 깊은 열악한 건설환경에 놓여 있어 크고 작은 많은 문제들이 발생하고 있거나 발생 가능성이 높은 실정에 있다. 특히, 현재 건설 중인 부산신항, 광양항, 아산신항 등 3대 국책항만건설사업은 그림 1.1.1에 나타낸 우리나라의 주요 연약지반 분포 지역 6개 지역 중에 전부 포함되어 있어 많은 어려움이 발생되고 있다.

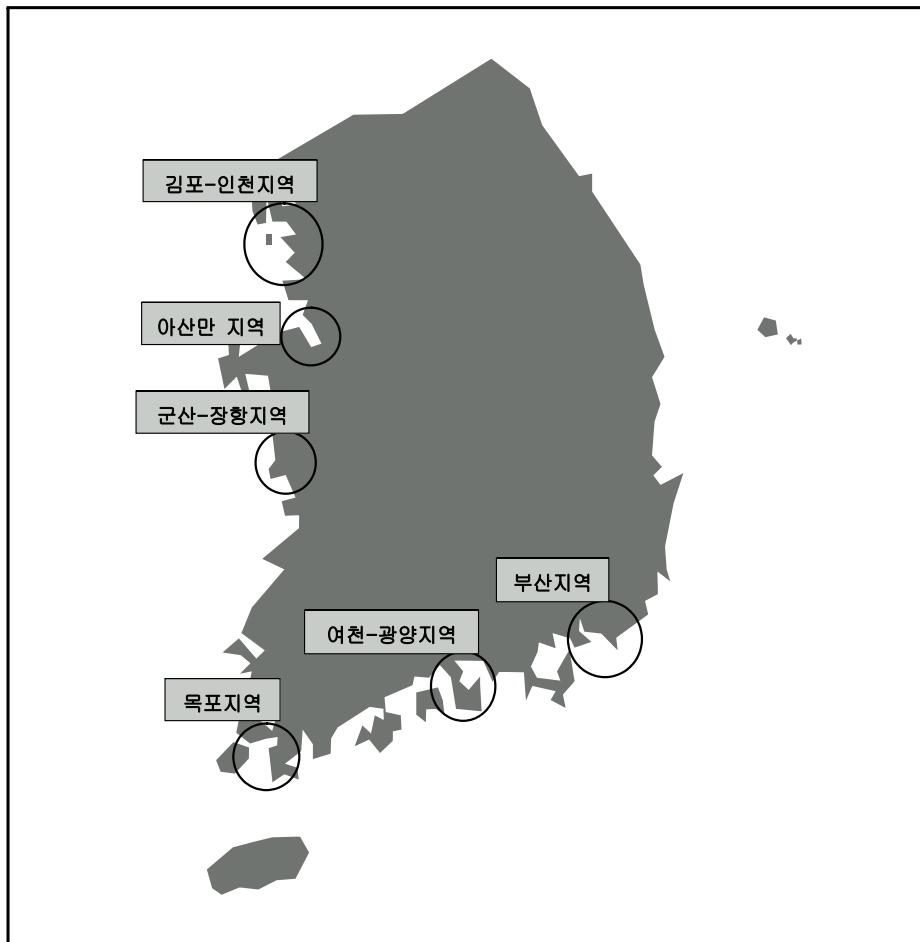


그림 1.1.1 우리나라 연약지반의 분포

이와 같이 신항만은 지금까지 양호한 입지에 건설된 기존 항만과 달리 수심, 파랑, 지반 등 입지여건이 열악한 상태에서 건설되고 있다. 따라서 단기적으로는 미진한 국내의 설계 및 시공 기술에 대하여 외국의 선진 기술 및 첨단장비 등의 과감한 도입이 필요하고, 장기적으로는 선진항만기술의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

이러한 현실을 감안하여 연구사업의 최종 목표를 대규모 신항만의 건설에 필요한 대수심 및 연약지반에 적합한 신형식 방파제의 개발과 해저 및 매립 연약지반의 개량기법을 확립하는데 두고 연구를 수행하고 있다. 이와 같은 목표의 달성을 위해서 현재 건설 중인 신항만 개발에 필요한 기반기술 중 시급하다고 판단되는 연약지반 개량기술 및 대수심, 연약지반에 적합한 새로운 형식의 방파제의 개발에 대한 연구를 우선적으로 추진하고 있다. 앞서 수행한 1~5차년도 연구는 연구사업의 1단계, 2003년부터 2006년까지 2단계 사업으로 볼 수 있다. 2단계 연구사업의 두 번째인 금년에는 작년 연구에서 현장시험시공 대상지로 결정된 울산 북방파제 시공계획 현장에 적절한 석션파일기초 방파제에 대한 실시설계 및 시험 시공의 일부를 수행하였다.

사업의 년차별 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

#### ■ 1차년도 사업

- 연약지반 개량기술
  - 우리나라 연약지반 현황 및 특성
  - 연약지반 개량공법 검토
  - 국내외 연약지반 개량공법 적용 사례 조사분석
- 신형식 방파제 개발
  - 국내외 대수심/연약지반 방파제 현황
  - 신형 대수심/연약지반 방파제 개념설계
  - 기초 실험을 통한 개략 성능평가

#### ■ 2차년도 사업

- 연약지반 개량기술
  - 모래다짐말뚝공법의 설계 기술 개선
    - 연약점토지반에 대한 SCP공법의 토조 시험 실시
    - 시험결과 분석을 통한 최적 치환율 산정
    - 응력분담비 및 하중집중율의 관계 규명

- 수치해석을 통한 시험결과의 신뢰성 검증
- Stone Column 공법의 실용화를 위한 기반연구
  - 극한지지력 이론 검토
  - Column의 크기 및 치환율에 대한 이론적 비교분석
  - 침하량 산정기법 분석
  - 시공장비의 현황 및 개발안 수립
- 신형식 방파제 개발
  - 대수심용 파력분산형 방파제 성능해석 및 개선
    - 규칙파(쇄파 포함) 수리 실험을 통한 파력 분산성능 평가
    - 제체에 작용하는 파력, 파압 등 계측 및 단면개선
    - 설계기법 검토
  - 연약지반용 방파제 성능해석 및 개선
    - 수질환경을 고려한 새로운 투과식 방파제 도입
    - 수치실험을 통한 수리특성 평가 및 설계파압분포 검토
    - 안전성 제고를 위한 기초시스템 개선 및 평가
    - 설계기법 검토

### ■ 3차년도 사업

- 연약지반 개량기술
  - 쇄석다짐말뚝의 거동 및 수치 모델링
    - 모래대체재로서 쇄석 및 부순자갈의 사용성 연구
    - 복합지반의 전단강도 산정을 위한 3차원적인 수치 모델링
  - 쇄석기동공법의 시공장비 메카니즘 분석 및 실용화 연구
    - 대수심 해저 연약지반에 모래 대신 쇄석 및 부순자갈의 적용성 검토
    - 특수 진동 장비 조사 분석
    - 국내 지반조건에 적합한 장비 개발을 위한 산학연 협동연구 추진
- 신형식 방파제 개발
  - 파력분산케이슨제
    - 설계지침 개발
    - 현장적용 설계예
    - 시공방법 검토

- 연약지반용 방파제 성능해석 및 개선
  - 토조시험을 통한 기초시스템 성능평가
  - 수리실험을 통한 소파성능평가 및 개선
  - 설계지침 개발
  - 현장적용 설계예
  - 시공방법 검토

#### ■ 4차년도 사업

- 연약지반개량기술
  - 모래다짐말뚝 공법 설계 및 시공지침 개발
  - 쇄석다짐말뚝 공법 설계 및 시공지침 개발
- 신형식 방파제 개발
  - 파력분산형 방파제
    - 설계지침 확립
    - 현장적용 실험계획 수립
  - 연약지반용 방파제
    - 기초시스템 성능평가 및 개선
    - 수리성능 평가 및 개선
    - 시공공법 검토
    - 설계지침 확립
    - 현장적용 실험계획 수립

#### ■ 5차년도 사업

- 연약지반개량기술
  - 쇄석다짐말뚝의 현장적용 실험
    - 대상지 선정
    - 현장적용 실험
  - 설계 및 시공관련 결과 도출
    - 적정 치환율
    - 응력분담 특성
- 연약지반 방파제 개발

- 현장 시험계획 수립
  - 대상지 검토
  - 상세 시험계획 수립
- 시공성 향상 방안 검토
  - 토조실험을 통한 검토
  - 수치실험을 통한 검토

#### ■ 6차년도 사업

- 현장실험용 신형식 방파제 기본설계
  - 실험 대상지 선정 : 울산신항 북방파제
  - 실험 방파제 형식 : 석션 파일기초 케이슨 방파제
  - 모니터링 계획 수립
- 석션파일을 이용한 신형식 방파제 개념설계
  - 석션파일 기술 분석
  - 석션파일을 이용한 방파제

#### ■ 금년도(7차년도) 사업

- 석션파일기초 방파제 구조성능평가
  - 석션기초의 횡방향 지지력 평가를 위한 실내 토조 모형 실험
  - 수리/지반 복합 모형실험
  - 기본/최종 설계단면에 대한 수치해석
  - 시공 후 거동분석을 위한 계측 계획 수립
- 석션파일기초 방파제 시험시공
  - 석션파일기초 방파제 실시설계
  - 석션파일 (Φ11m×14.9m) 기초 4개 제작 (총 연장 50m 가운데 25m 부분)
  - 석션파일기초 시공 중 모니터링 계획
  - 설계 및 시공에 관한 자문회의 3회 실시

■ 시험시공현장

- 시험시공 위치 : 경상남도 울산시 남구 용연동 전면해상

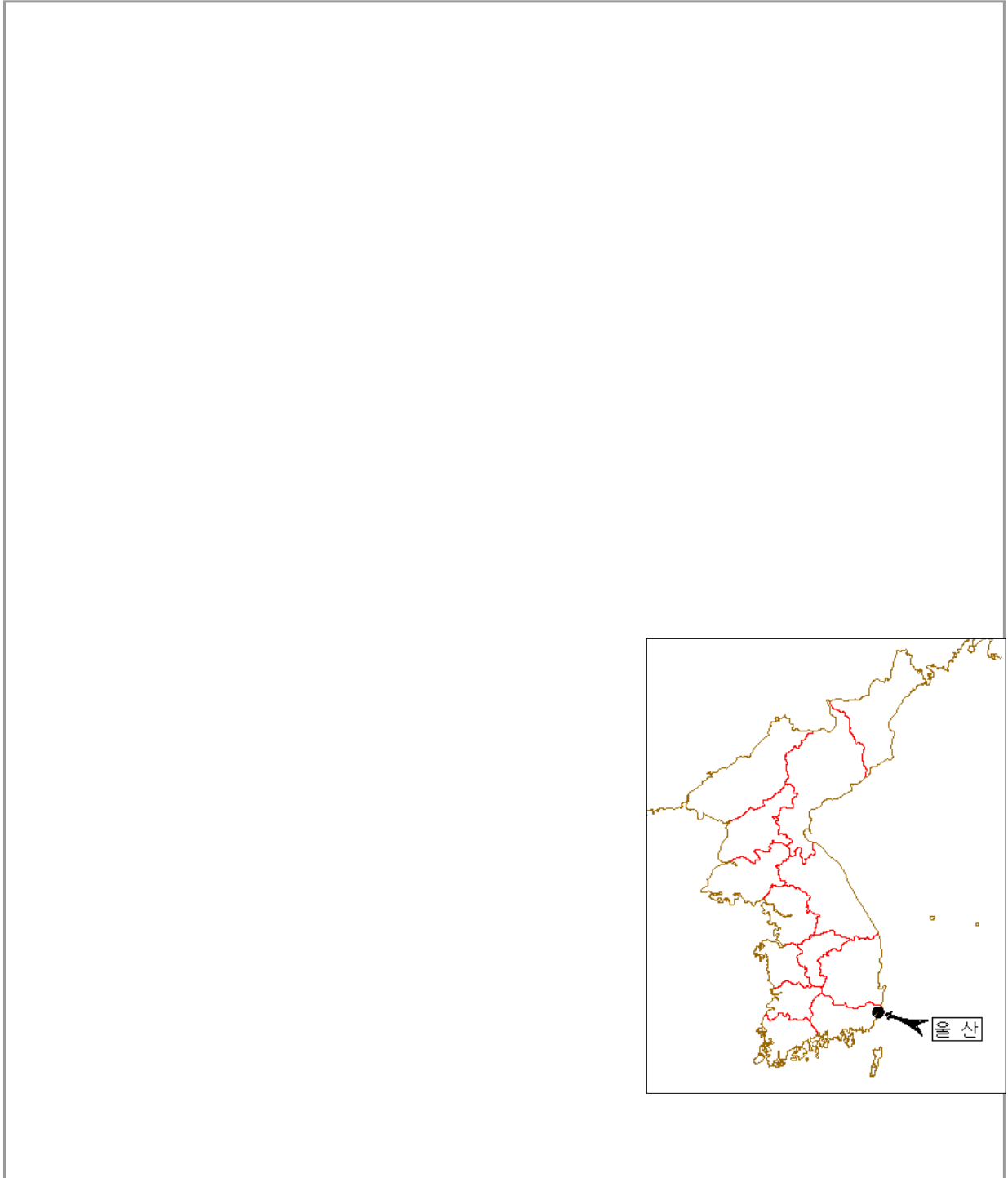


그림 1.1.2 시험시공 위치도

## 제 2 장 석선파일기초 방파제 실시설계 요약

### 제 1 절 기초자료 조사·분석

#### 1. 자연조건

##### 가. 기상조건

시험구조물이 설치될 울산지역은 대체로 온화한 해양성 기후 및 해류의 영향을 받고 있으며, 연평균 기온은 14.1℃이며 월별로는 1월의 평균기온이 1.9℃로 연중 가장 낮고, 8월의 평균기온이 25.8℃로 연중 가장 높게 나타난다. 연평균 풍속은 2.1m/sec이며, 풍속 13.9m/sec 이상의 폭풍일수는 년 중 0.6일 정도이다. 연평균 강수량은 1,332.1mm이며 63.2%가 6~9월에 집중하고 있다.

표 2.1.1 기상개요

구 분		단 위	제 원	구 분		단 위	제 원	
바 람	최대풍속	풍속	m/sec	18.3	강 수	연 평 균 일 최 대	mm	1,332.1
		풍향		NNW				417.8
	순 간 최대풍속	풍속	m/sec	36.7	천 기 일 수	일	맑 음	112.4
		풍향		NNW			흐 립	101.7
	평균풍속		m/sec	2.1			안 개	10.2
기 온	연 평 균		℃	14.1			강 설	5.0
	연평균최고			20.3			결 빙	88.1
	연평균최저			8.4			뇌 전	10.9
	최 고			38.2			폭 풍	0.6
	최 저			-11.8			강 수	96.1

- 주) 1. 폭풍 : 13.9m/sec 이상  
 2. 강수 : 0.1mm 이상  
 3. 출처 : 기상연보(1984년~2003년), 기상청

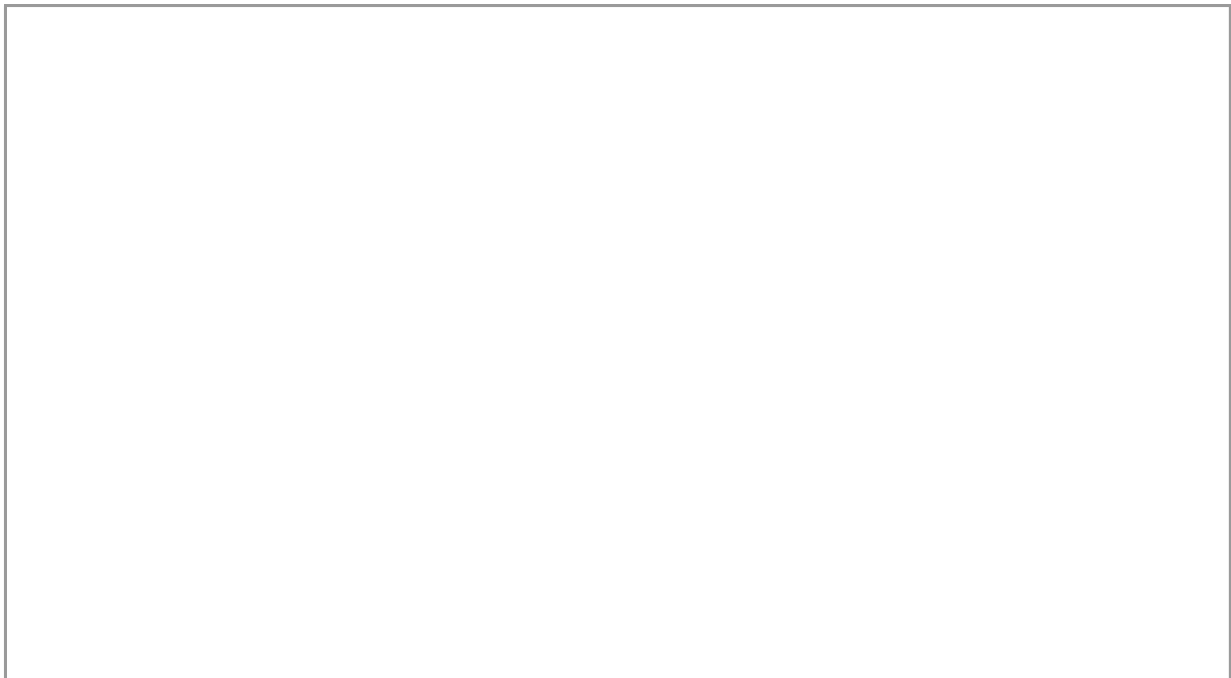
나. 해상조건

(1) 조석

울산지역의 조석 특징은 표 2.1.2와 같으며, 본 시험구조물이 축조될 울산신항 북방과제 지역은 온산항 조석을 기준으로 하였다.

표 2.1.2 인근 지역별 조위표

조 위	기준면상 조위(cm)		
	울산본항	온산항(적용)	미포항
삭망평균만조위 (H.W.L)	66.00	-	-
약최고고조위 (Approx. H.H.W)	60.80	63.20	56.40
대조평균고조위 (H.W.O.S.T)	54.50	56.40	47.30
평균고조위 (H.W.O.M.T)	46.70	48.90	41.20
소조평균고조위 (H.W.O.N.T)	38.90	41.40	35.10
평균해면 (M.S.L)	30.40	31.60	28.20
소조평균저조위 (L.W.O.N.T)	21.90	21.80	21.30
평균저조위 (L.W.O.M.T)	14.10	14.30	15.20
대조평균저조위 (L.W.O.S.T)	6.30	6.80	9.10
약최저저조위 (Approx. L.L.W)	0.00	0.00	0.00





(2) 조류

울산신항은 조차가 적어 만내의 층류의 유속은 0.4kn 미만으로 미약하나, 창조류는 만내 측으로 낙조류는 만외로 유출되고 있으며 대부분 반일주조류에 비하여 일주조류가 약간 우세하다. 항류는 북북동~동남동 사이로 흐르며 유속은 아주 미약하다. 시험구조물 대상지역 전면에서의 최강 창조류는 2.1kn이고 최강 낙조류는 1.2kn 정도이다.

표 2.1.3 조 류 속 도

구 분	조류속(knot)	비 고
창 조 류	2.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대상지역 전면 조류속</li> <li>• 세굴 방지공이나 피복석 규모 판단의 기초 자료</li> </ul>
낙 조 류	1.2	

(3) 파랑

『대수심 방파제 및 연약지반 관련기술』(2003. 12., 해양수산부)의 검토결과에 따르면 과업대상 지역의 설계파고는  $H_{1/3}$  6.40m,  $T_{1/3}$  11.0sec로 검토되었다.

표 2.1.4 설 계 파 고

파 향	파고 ( $H_{1/3}$ ) (m)	주기 ( $T_{1/3}$ ) (sec)	파장(L) (m)	비 고
SSE	6.40	11.0	148.07	50년 빈도

## 2. 지반조사

### 가. 당초 지반조사

#### (1) 조사개요

##### (가) 조사목적

본 조사는 “석선파일기초 신형식 방파제 시험시공” 용역 지반조사를 위해 현장조사(시추조사, 원위치시험) 및 실내시험을 통하여 지반의 구성상태를 파악하여 제반 토질공학적 인 기초 자료를 제공함으로서 합리적이고 경제적인 설계와 시공이 되도록 하는데 그 목적이 있다.

##### (나) 조사위치

- 경상남도 울산시 남구 용연동 울산신항 북방파제 예정구간

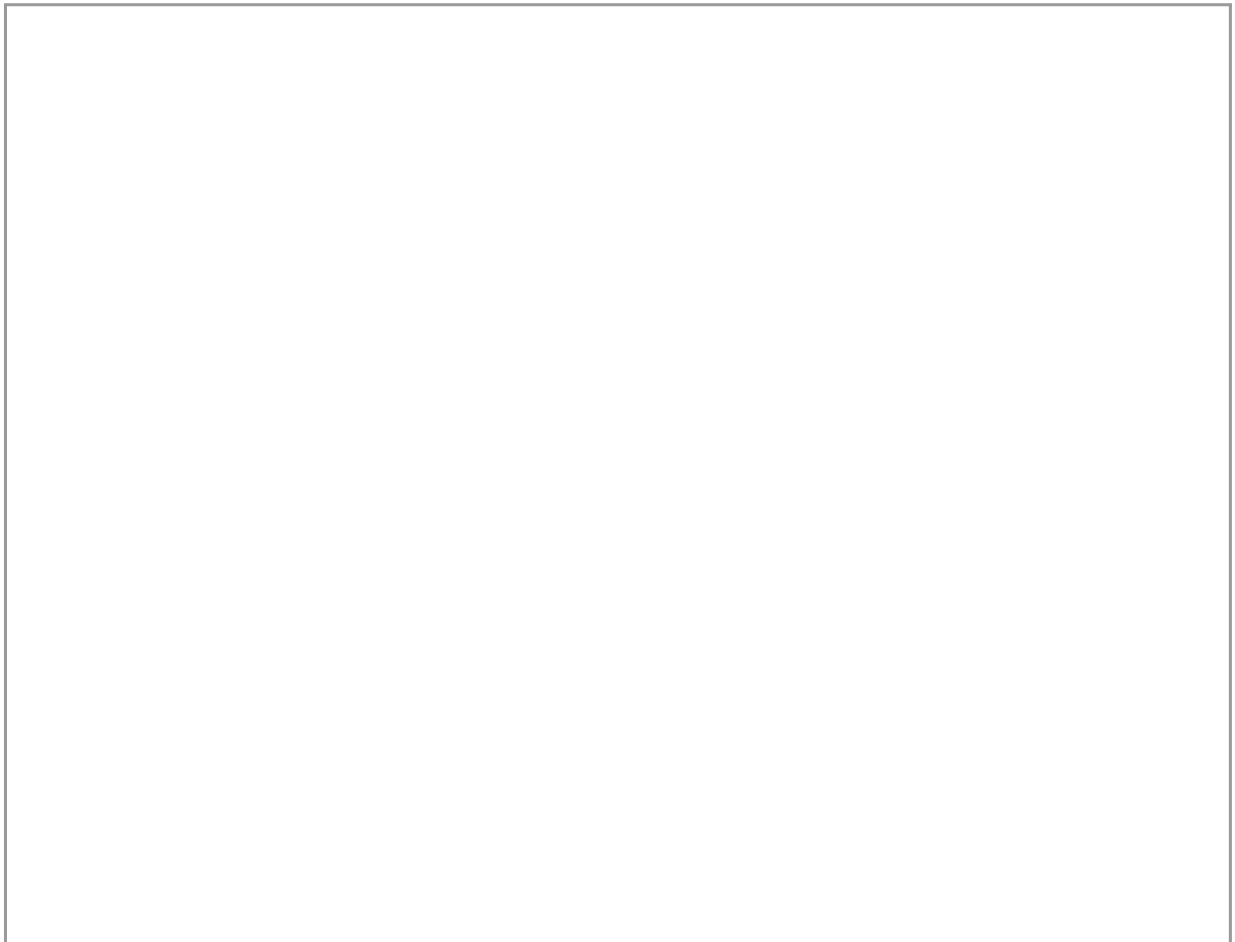


그림 2.1.1 지반조사 위치도

(다) 조사범위

공 종	수 량
시 추 조 사(NX 기준)	3 개소
표준관입시험(KS F 2318)	18 회
자연시료채취(KS F 2317)	6 회
베 인 시 험(KS F 2342)	1 개소
실 내 시 험(KS F 규정)	1 식

(2) 조사지역의 지층분포

본 조사지역에서 3개소에 대하여 시추조사를 실시하였으며 각 조사구역의 지층분포는 다음 표 2.1.5와 같다.

표 2.1.5 지층 분포상태 조사당시 해저면 기준(단위: m)

공번	실트질 점 토	실트질 모 래	풍화토	연 암	보통암	계	S.P.T (회)	UD 채취
BH-1	7.5	-	-	-	2.0	9.5	4	2
BH-2	9.0	0.8	3.7	2.0	-	15.5	6	2
BH-3	13.0	0.8	-	2.0	-	15.8	8	1
계	29.5	1.6	3.7	4.0	2.0	40.8	18	5

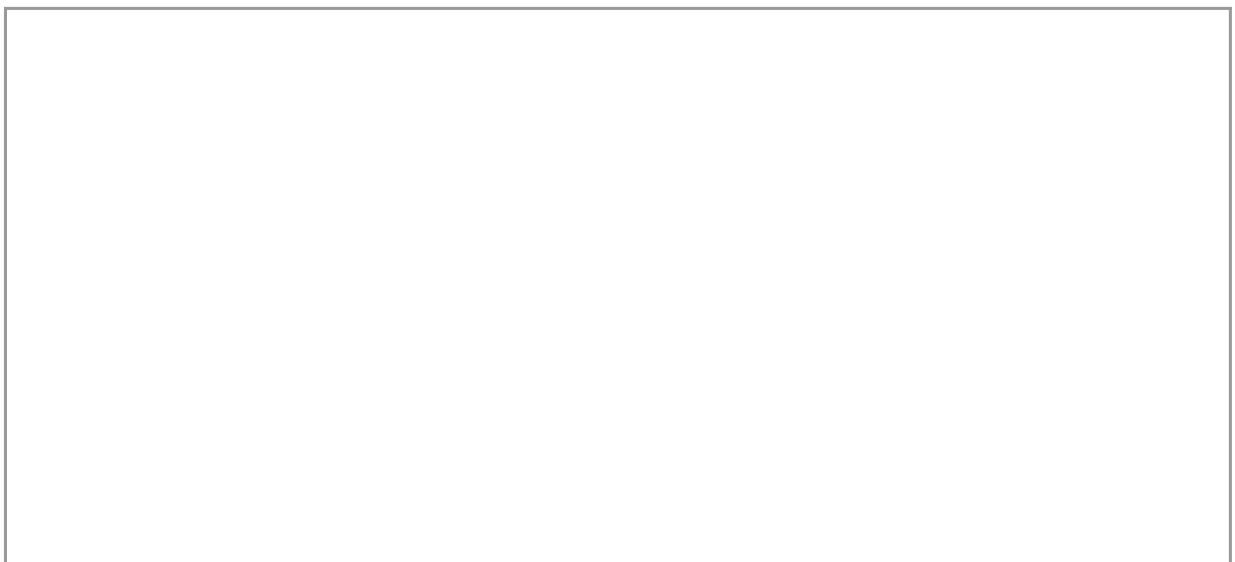


그림 2.1.2 당초 보링 주상도

(3) 실내시험 성과분석

(가) 물성시험

본 조사지역에서는 자연시료에 대해 물성시험을 실시하여 토질분류와 함수상태 등을 파악하였다. 이에 대한 물성시험 결과는 다음 표 2.1.6과 같다. 자세한 시험결과는 부록 실내시험결과에 수록하였으며 물성시험 성과는 주상도에 반영하여 현장에서의 육안분류를 수정, 보완하였다.

표 2.1.6 물성시험 결과

구 분		범 위	평 균
점성토 (자연시료)	함수비( $w_n$ , %)	56.3-95.4	89.4
	비중( $G_s$ )	2.72-2.75	2.74
	액성한계(%)	91.4-94.3	92.9
	소성지수	61.2-63.2	62.1
	소성한계(%)	30.2-31.2	30.8

(나) 역학시험

본 조사지역에서 채취된 자연시료(U.D)를 대상으로 일축압축시험, 삼축압축시험(UU, CU), 압밀시험을 수행하였다. 본 조사지역에 대한 역학시험 성과는 다음 표 2.1.7과 같다.

표 2.1.7 역학시험 결과

구 분	범 위	평 균	비 고
비배수전단강도( $\text{kgf/cm}^2$ )	0.08-0.13	0.10	일축압축시험( $q_u/2$ )
비배수전단강도( $\text{kgf/cm}^2$ )	0.04-0.05	0.05	삼축압축시험(UU)
비배수전단강도( $\text{kgf/cm}^2$ )	0.10-0.16	0.14	삼축압축시험(CU)
압축지수( $C_c$ )	0.927-1.363	1.032	

표 2.1.8 실내시험 결과표

Bore hole	Depth	MC	Sp/G	Atterberg L.		Unconf.comp.st			Triaxial comp. str				consolidation		Grain size analysis % finer than					USCS
		GS	LL	PI	Qu	Qur	St	Cuu	Ccu	$\sigma_{cu}$	Ko	Pc	Cc	#4	#10	#40	#200	2 $\mu$		
No.	(m)	(%)	%	%	kgf/cm <sup>2</sup>			kgf/cm <sup>2</sup>		deg	kgf/cm <sup>2</sup>									
BH-1	2.0	93.1	2.74	94.3	63.2	0.09			0.05				0.21	0.927	100	100	100	97.4	47.5	CH
	5.0	94.3	2.72	93.9	62.7	0.13				0.10	17.8		0.13	0.947	100	100	100	98.9	49.5	CH
BH-2	1.5	94.2	2.73	92.7	61.8	0.11				0.16	19.8		0.24	0.929	100	100	100	97.7	50.0	CH
	7.5	56.3	2.75	91.4	61.2										94.4	80.2	67.0	62.5	32.5	CH
BH-3	3.0	91.1	2.74	92.7	62.1	0.09			0.04				0.20	0.995	100	100	100	98.8	49.0	CH
	8.0	95.4	2.74	92.6	61.8	0.08				0.15	22.5		0.34	1.363	100	100	100	95.5	46.0	CH

(4) 지반조사 결과분석

(가) 수 심

본 조사지역의 수심은 21.0m~21.25m의 분포로 존재함.

(나) 지층개요

지 층	실 시 설 계	기 본 설 계	비 고
실트질 점토	7.5m ~ 13.0m	14.8m ~ 17.0m	
실트질 모래	0.0m ~ 0.8m	3.6m ~ 10.1m	기본설계에서 석션파일기초 지지층
풍 화 토	0.0m ~ 3.7m	3.0m ~	

- 기본설계에서 3.6m 이상의 층후로 존재하는 것으로 조사되었던 실트질 모래층이 금번 조사결과 없거나 층후가 매우 얇음.
- 기본설계에서 석션파일기초의 지지층이었던 실트질 모래층에 석션파일기초를 거치하지 못하므로 선단처리 필요.
- 선단처리 대책으로는 선단하부를 시멘트 그라우팅하거나 모래층이 존재하는 위치로 대상위치를 이동하여야 함.

나. 추가 지반조사

(1) 조사개요

(가) 조사목적

본 조사는 기 시행된 “석션파일기초 신형식 방파제 시험시공” 용역 지반조사(3공)에서 일부구간이 시험시공에 부적합한 지질구조로 판명되어, 시험시공에 적합한 지역을 새로이 선정하기 위하여 12공의 추가 지반조사를 시행하였다.

(나) 조사위치

- 경상남도 울산시 남구 용연동 울산신항 북방파제 예정구간



그림 2.1.3 추가 지반조사 위치도

(다) 조사범위

공 종	수 량
시 추 조 사(NX 기준)	12 개소
표준관입시험(KS F 2318)	52 회

(2) 조사지역의 지층분포

본 조사지역에서 12개소에 대하여 시추조사를 실시하였으며 각 조사구역의 지층분포는 다음 그림 2.1.4와 같다.

그림 2.1.4 추가 보링 주상도

(3) 지반조사 결과분석

(가) 시험시공 위치변경

본 추가조사를 통하여 시험시공에 적합한 지층구조를 가지고 있는 구간으로 Bh-12번을 중심으로 50m 구간(Bh-11, Bh-12, Bh-13)을 선정하였다.

(나) 수 심

본 조사지역의 수심은 20.0m~21.00m의 분포로 존재함.

(다) 지층개요

기존 지반조사 결과에 따른 시험시공 위치와 금번 추가조사를 통하여 변경된 시험시공 위치의 지층구조는 비교하면 표 2.1.9와 같다. 추가 지반조사에 따른 시험시공 위치 변경으로 선단지반처리 대신 석선파일이 모래질자갈층에 충분히 관입할 수 있도록 보조장치로 선단부에 워터제트를 설치하였다.

표 2.1.9 시공위치에 따른 지층구조 비교표

지 층	기존 시험시공 구간	변경 시험시공 구간	비 고
실트질 점토	7.5m ~ 13.0m	10.0m ~ 12.4m	
모래질 자갈	0.0m ~ 0.8m	5.5m ~ 6.3m	
풍 화 토	0.0m ~ 3.7m	-	



### 3. 재료원조사

#### 가. 석재원

석재원은 기허가된 지역과 개발가능 지역이 있으며 석재원 위치 및 가채량은 다음과 같이 조사되었다. 본 공사용으로 필요한 석재는 적출장까지의 거리 및 허가기간을 고려하여 태천석산과 현대광업석산의 2곳으로 후보지를 선정한다.

표 2.1.10 기허가된 석재원 현황

구 분	위 치	가채량 (만m <sup>3</sup> )	허가기간	적용
태천석산	울주군 범서면 중리 103번지	187	99.04.30 ~ 07.09.06	○
한진산업(주)	울주군 웅촌면 곡천리 43-1	190	01.04.26 ~ 05.07.31	
산광석산	울주군 삼동면 작동리 산217번지	93	02.04.19 ~ 02.12.31	
대복석산	울주군 웅촌면 대복리 산186 외	138	98.07.01 ~ 03.06.30	
(주)KNC(구함월)	울주군 범서면 중리 산240-1번지	288	98.06.01 ~ 03.09.31	
용호석산	울주군 범서면 중리 산117-1번지	369	01.09.22 ~ 05.08.30	
현대광업석산	울주군 범서면 중리 산1-4번지	110	00.10.19 ~ 05.07.31	○
계	총 7 개소	1,400	최대 2007년까지	

#### 나. 해사

본 공사에 소요되는 해사는 케이슨 속채움용으로 수량이 소량이므로 울진해사를 사용하는 것으로 계획한다.

표 2.1.11 해사 재료원 검토

구 분	위 치	주 정 가채량	운반거리 (해상)	특 성	적 용
울진해사	울진군 기성면 사동리 부근 해상	70만m <sup>3</sup> /년	189km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 광업권 지역으로 민원 문제없음</li> <li>• 해상 운송거리가 가까움</li> </ul>	○
신안해사	신안군 압해면, 안좌면, 장산면 부근해상	풍 부	470km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 민원발생 문제로 채취 불가</li> <li>• 해상 운송거리가 최장</li> <li>• 안정적인 물량공급의 어려움</li> </ul>	
매물도해사	거제시 매물도 부근해상	풍 부	170km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 어업권 및 환경파괴 관련민원발생지역</li> <li>• 수심 100m로 대형 호퍼선 필요</li> <li>• 최단</li> </ul>	

다. 레미콘 및 아스콘

본 공사에 필요한 레미콘 생산업체에 대한 사항은 다음과 같다.

표 2.1.12 레미콘 및 아스콘 재료원

공 급 사	위 치	비 고
쌍 용 양 회	울산시 남구 매암동 472	
대 원 레 미 콘	울산시 남구 매암동 139-18	
진 성 레 미 콘	울산시 남구 매암동 353	
동 성 산 업	울산시 울주군 온산면 당월리 222	○
울 산 콘 크 리 트	울산시 울주군 언양면 반천리 42	
원 진 레 미 콘	울산시 남구 야음동 9-9	
국 동 레 미 콘	울산시 남구 매암동 360-27	
경 남 레 미 콘	울산시 울주군 범서면 중리 767-1	

4. 제작장 선정

가. 1차 제작장 선정 결과

케이슨 및 석선파일기초 구조물을 제작하기 위한 제작장 및 적출장은 본 공사를 위해 신규로 축조하기는 현실적으로 불가능하므로 인근의 제작장을 조사하여 비교 검토한 결과 삼성 T.T.P. 제작장의 일부를 사용하는 것이 적절한 것으로 검토되었다.

표 2.1.13 인근 제작장 현황

구 분	부산신항 연결 잔교 현장 케이슨제작장	녹산하수처리장 방류관거현장	Floating Dock	울산 해양공원 예정부지	동북화학 부두현장
소 재 지	경남 진해시 안골동	부산시 강서구 녹산국가공단	-	울산시 남구 매암동	울산시 울주군 온산공단
발 주 처	부산지방 해양수산청	부산광역시	-	울산지방 해양수산청	울산지방 해양수산청
부지소유	해양수산부	쌍용건설	-	삼성건설	동북화학
장 점	별도의 제작장 조성 불필요	부지확보 가능	장소 및 시기에 상관없음	별도의 제작장 조성 불필요	별도의 제작장 조성 불필요
문 제 점	연결잔교 공정상 9월말까지 부지여유 없음	부지 임대료 추가 및 제작장 조성 시공사의 협조필요	Floating Dock 임대에 따른 공사비 증가	시공사의 협조 필요	시공사의 협조 필요
선 정				○	○

나. 최종 제작장 선정 결과

해양수산부와 동북화학의 협조로 동북화학부두(2004년 11월 26일 준공) 부지를 제작장으로 선정하였으며, 제작장 사용기간은 9월 1일 ~ 12월 17일 까지 사용하는 것으로 협의되었다.

표 2.1.14 최종 제작장 선정

구 분	울산 해양공원 예정부지	동북화학 부두현장
제작장~시험시공 위치	12km	3km
안벽형식	경사제	직립제
전면수심	5 ~ 7m	12 ~ 13m
민원가능성	다수있음	없음
선정		○

## 제 2 절 설계조건

### 1. 적용기준

#### 가. 국내기준 및 지침

- 항만 및 어항 설계기준 (해양수산부, 2000)
- 항만 및 어항공사 전문시방서 (해양수산부, 2000)
- 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서 (해양수산부, 1999)
- 항만구조물의 내진성능 평가지침서 (해양수산부, 2001)
- 토목 공사 표준시방서 (건설교통부, 1996)
- 토목 일반 표준시방서 (건설교통부, 1996)
- 콘크리트 구조설계기준·해설 (한국콘크리트학회, 2000)
- 콘크리트 표준시방서 (한국콘크리트학회, 1999)
- 구조물 기초 설계기준 (한국지반공학회, 1997)
- 한국산업규격(KS 규격)
- 관련법령 및 지침

#### 나. 외국참고자료

- 항만시설 기술상 기준 동해설(일본항만협회, 1999)
- 석션파일기초 구조물 기술매뉴얼 (일본, 연안개발기술연구센터, 2003)
- Department of Navy Facilities Engineering Command, U.S.Navy.
- 미국 콘크리트 협회 기준(American Concrete Institute, ACI)

## 2. 해상조건

### 가. 설계조위

--

### 나. 설계조류속

구 분	조류속(knot)	비 고
창 조 류	2.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대상지역 전면 조류속</li> <li>• 세굴 방지공이나 피복석 규모 판단의 기초 자료</li> </ul>
낙 조 류	1.2	

### 다. 설계파랑

구 분	파 향	파고 ( $H_{1/3}$ ) (m)	주기 ( $T_{1/3}$ ) (sec)	파장(L) (m)	비 고
50년 빈도	SSE	6.40	11.0	148.07	북방파제 구간

### 3. 재료조건

#### 가. 단위체적중량

(단위 : tf/m<sup>3</sup>)

구 분	수 상	수 중	비 고
무근콘크리트	2.30	1.30	
철근콘크리트	2.45	1.45	
강 재	7.85	6.85	
레벨링 사석(레벨링용)	1.80	1.00	
해 수	1.03		
모래(케이슨 속채움용)	1.80	1.00	

#### 나. 마찰계수

구 분	특 성	비 고
Con'c와 Con'c	0.5	
Con'c와 사석	0.6	
석션파일기초와 사질토	0.7	$\tan\theta(\theta=35^\circ)$

### 4. 허용안전율

표 2.2.1 석션파일기초 구조물의 안전율

구 분		상부구조물(케이슨)	석션파일기초 구조물	비 고
활 동	파랑작용시	1.2	1.2	
	지 진 시	1.0	1.0	
전 도	파랑작용시	1.2	1.2	
	지 진 시	1.1	1.1	
지지력 (편심 경사하중)	파랑작용시	-	1.2	
	지 진 시	-	1.0	
원호활동	상 시	-	1.3	
	지 진 시	-		

5. 내진설계 기준

가. 개요

“항만 및 어항시설의 내진설계 표준서(해양수산부, 1999)”, “항만 및 어항 설계기준(해양수산부, 2000)” 및 “항만구조물의 내진성능 평가지침서(해양수산부, 2001)”에 준하여 내진설계를 실시한다.

나. 설계적용 내진등급

(1) 내진성능 목표

내진 2등급 구조물의 경우는 붕괴방지수준은 기능수행수준을 포함하므로 붕괴방지수준을 적용한다.

표 2.2.2 내진성능 목표별 재현주기

성능 목표	내진 I 등급	내진 II 등급	비고
기능수행수준(O.L.E)	평균재현주기 100년	평균재현주기 50년	
붕괴방지수준(C.L.E)	평균재현주기 1000년	평균재현주기 500년	적용

다. 설계지반운동 수준의 결정

(1) 기반암의 설계지반운동 수준의 결정

기반암에서의 설계지반운동 수준은 지진구역계수 및 위험도 계수의 조합에 의한 방법과 지진재해도에 의한 방법을 상호 비교하여 적용하였다.

표 2.2.3 내진성능 목표별 암반노두에서의 설계지반운동 수준

등급	성능수준	재현주기 (년)	암반노두에서의 설계지반운동 수준	
			지진구역계수×위험도계수	지진재해도에 의한 방법
내진1등급	붕괴방지	1,000	0.154g	0.13g
	기능수행	100	0.063g	0.04g
내진2등급	붕괴방지	500	0.110g	0.10g
	기능수행	50	0.044g	0.04g

(2) 설계지반운동 수준의 결정

해석방법	지반종별계수 이용	지진응답해석 이용
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>기반암에서의 설계지반가속도와 상부 30m의 평균지반특성에 의해 분류되는 지반종별에 의한 계수를 곱하여 설계 지반운동수준을 결정하는 방법</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>등가선형해석방법 및 등가비선형해석 방법등을 이용하여 지진응답해석을 수행하여 설계지반운동수준을 결정하는 방법</li> </ul>
설계적용		○

라. 내진 2등급 붕괴방지 수준의 구조물별 내진 해석방법

(1) 구조물별 내진 해석방법

종 류	해석방법	설계 수평지진 가속도	설계기준	적용
벽체 구조물	등가정적 해석법	$1/2 \cdot a_{max}$	안전율	○
	변위를 고려한 해석법	$1/2 \cdot a_{max}$	허용변위, 안전율	
말뚝지지 구조물	등가정적 해석법	$a_{max}$	안전율	
기초 구조물	등가정적 해석법	$1/2 \cdot a_{max}$	안전율	○

(2) 허용안전율

구 분		안 전 율 (S.F)		
		활동	전도	지지력
중력식벽체구조물	내진2등급	1.0	1.1	1.0



## 제 3 절 석션파일기초(Suction Pile Foundation)

### 1. 석션파일기초 단면결정

#### 가. 개요

##### (1) 석션파일기초 개요

석션파일기초는 시공시 수심에 큰영향을 받지 않으며, 대구경 시공이 가능하므로 일반적으로 수심이 깊거나, 연약지반상에 큰 지지력이 요구되는 구조물의 기초를 대상으로 적용이 된다. 타 공법과 석션파일기초 구조물의 경제성을 비교하면 일반적으로 수심이 깊어질수록 석션파일기초 구조물의 경제성이 우수한 것으로 나타나며, 매립기초나 파일기초와 비교하면 수심이 각각 10m, 15m 이상이면 석션파일기초가 경제적인 것으로 평가된다.

따라서 석션파일기초 구조물을 계획함에 있어서는, 대상 시설의 기능을 충분히 파악함과 아울러 자연조건(수심, 지반상태) 또한 고려하여 목적에 맞는 구조물을 합리적으로 건설하도록 한다. 그리고 석션파일기초 구조물의 설계에 있어서는 구조의 안정은 물론 설치시공을 확실히 고려하여 적절한 조사계획을 실시한다.

##### (2) 설치 검토

설치시 요구되는 석션압은 설치 깊이의 변화에 따라서 연속적으로 변한다. 이는 지반조건과 관입 깊이에 따라서 관입저항력과 토사내의 물의 흐름 조건이 연속적으로 변하기 때문이다. 따라서 요구되는 설계 석션압이 설치 초기부터 완료시까지 석션압의 상한 및 하한 값 사이에 존재하여 설치가 가능한지 여부를 확인하여야 한다. 만약 설계된 석션파일기초에 대하여 설치도중 상한 및 하한 석션압이 만난다면 석션파일기초 제원을 바꾸어 재설계해야 한다. 이를 위하여 지반의 성층상태 및 토질 특성을 연속적으로 충분히 조사할 필요가 있다. 본 조사에서 필요로 하는 지반의 조사방법과 요구되는 지반정보를 표 2.3.1에 제시한다.

표 2.3.1 토질조사 방법 및 내용

조사목적	조사방법	조사내용	비 고
성층상태확인	표준관입시험 사 운 덩 물리시험 물리탐사	층 두 계	설치의 설계 및 시공상 특히 중요
		층 순 서	
		지반심도	
지 지 력 사면안정 토 압	표준관입시험 사 운 덩 압축시험	일축압축강도 $q_u$	
		전단강도 $\tau_f$	
		전단저항각 $\phi$	
압밀특성	압밀시험	압밀계수 $C_v$	
		체적압축계수 $m_v$	
투 수 성	투수시험 현장시험 물리시험	투수계수 $k$ 입도	
분류특성	물리시험	단위중량 $\gamma$ 입 도	

나. 석선파일기초 구조물의 선정

석선파일기초 구조물의 계획에 있어서는 다음 사항을 고려하여 현장상황에 맞는 적절한 구조형식을 선정토록 한다.

(1) 구조형식 선정

석선파일기초 구조물의 구조형식은 석선파일기초와 상부구조물이 일체로 된 일체형 구조와 석선파일기초와 상부구조물을 분리하여 제작·거치하는 분리형 구조가 있으며, 각 구조형식별 특징을 요약하면 표 2.3.2와 같다.

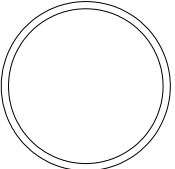
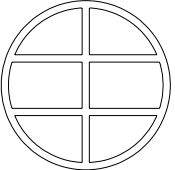

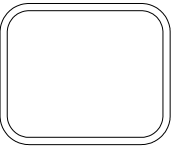
표 2.3.2 구조형식별 특징

구 분	특 징
일체형 구조	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 석션파일기초와 상부구조물의 일체화로 상부구조물의 축소가 가능하다.</li> <li>• 제작공간은 작게 소요되나 구조물이 장대화될 경우 고소작업을 요한다.</li> <li>• 상부구조물 중량이 압력으로 작용하므로 분리형에 비해 적은 석션압으로 큰 효과를 볼 수 있다.</li> <li>• 상·하부공이 일체이기 때문에 상부구조물 거치작업이 생략되므로 시공기간이 단축된다.</li> <li>• 설치시 발생하는 경사가 구조물 자체의 거치정도에 영향을 미치므로 설치시 시공관리에 충분히 주의할 필요가 있다.</li> <li>• 대수심이나 연약지반으로 인해 구조물이 장대화 또는 고중량화 될 경우, 적출작업이 불가능할 수도 있다.</li> </ul>
분리형 구조	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 석션파일기초와 상부구조물의 제작공간이 필요하다.</li> <li>• 구체중량이 가벼워서 적출, 예인, 거치시 기중기 등의 기계능력이 비교적 작아도 된다.</li> <li>• 구조형식이 비교적 단순하여 제작이 용이하나, 전체 제작공기는 비교적 길다.</li> <li>• 석션파일기초 설치후 상부구조물에 의하여 범선의 출입, 회전, 경사 등에 대한 조정을 하게되므로 보다 높은 시공정도를 기대할 수 있고 벽체로서의 연속성 확보가 용이하다.</li> </ul>
선 정	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 금번 시험시공의 경우는 석션파일기초와 상부케이슨의 시공일정이 상이하여 동시에 시공에 불가능하므로 분리형 구조를 채택하였다.</li> </ul>

(2) 기초형상 선정

석션파일기초 구조물의 기초형상으로는 원통형, 구형 등이 있으며 이들 형상의 선정에 있어서는 설치의 신뢰성, 시공성, 경제성 등을 고려해야 하며 각기 특징은 표 2.3.3과 같다.

표 2.3.3 기초형상별 특징

단 면	형 상	특 징
원 통 형 (격실 無)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 설치가 용이하다.</li> <li>• 부재두께를 비교적 얇게 제작할 수 있다.</li> <li>• 제작이 어렵다.</li> <li>• 등변장비 (B:L)로 인하여 구조물이 대형화된다.</li> </ul>
원 통 형 (격실 有)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 설치시 각실별 석션압 조절로 경사조정이 용이하다.</li> <li>• 상판 측벽 등의 부재단면이 축소된다.</li> <li>• 설치시 관입저항력이 크다.</li> <li>• 제작이 어렵다.</li> <li>• 등변장비 (B:L)로 인하여 구조물이 대형화된다.</li> </ul>
구 형		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 제작이 용이하다.</li> <li>• 부재두께가 커진다.</li> <li>• 설치시 우각부에서 누수가 생기기 쉽다.</li> <li>• 자유로운 변장비로 인하여 필요한 제작톤수가 가능하다.</li> </ul>
구 형 모따기식		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 구형의 특징과 대동소이하나 설치시 우각부 누수문제를 해결 가능하다.</li> </ul>
선 정		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지반반력 및 상부케이슨으로부터 전달되는 파압에 가장 잘 견딜 수 있으며, 규모를 최소화할 수 있는 원통형을 채택하였다.</li> </ul>

(3) 사용재료 선정

석션파일기초 구조물의 사용재료로는 RC재, PC재 Hybrid재, 강재 등을 고려할 수 있으며 제작장, 시공성, 경제성 등을 고려하여야 한다. 분리형 구조의 석션파일기초에서 RC재와 강재를 비교하는 경우 각기 특징은 다음과 같다.

표 2.3.4 사용재료별 특징

재 료	특 징
R C 재	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RC재의 특징으로 측벽은 어느 정도 두께를 가지나 강성이 크고 석션압 작용시에 원주방향의 좌굴을 고려하지 않아도 되며 내부식성이 있다.</li> </ul>
강 재	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 강재의 특징으로는 측벽이 얇고 설치시의 관입저항이 적다.</li> </ul>
선 정	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 강성이 크고 부식의 염려가 없는 RC재를 채택하였다.</li> </ul>

## 2. 석션파일기초 케이슨 방파제

### 가. 당초 석션파일기초 케이슨 방파제

#### (1) 석션파일기초 케이슨 방파제 표준단면도

그림 2.3.1 당초 표준단면도

(2) 석션파일기초 케이슨 방파제 종평면도

그림 2.3.2 당초 종평면도

(3) 석션파일기초 케이슨 방파제 안정계산

(가) 기본방향

석션파일기초 구조물의 안정계산은 중력식 벽체로 가정하여 다음의 계산순서에 따라 안정성 검토를 실시한다.

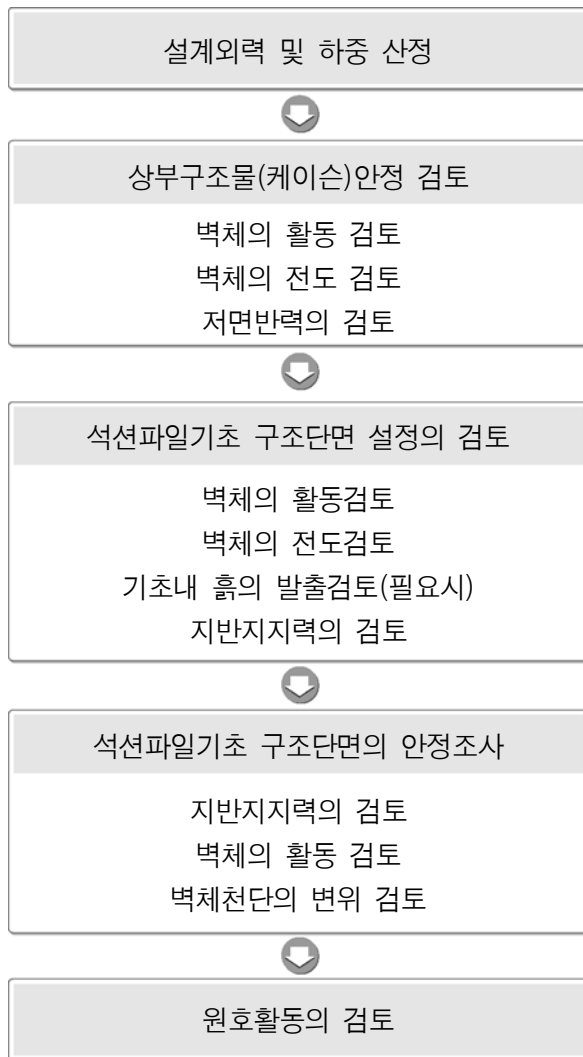


그림 2.3.3 안정계산 흐름도

① 상부구조물의 안정 및 석션파일기초 구조단면 설정의 검토

상부구조물의 안정 및 구조단면 설정의 검토는 벽체에 작용하는 설계외력 및 하중에 대하여 하중의 평형조건식에 의하여 연직방향 및 수평방향의 저면반력을 구하고 지반의 허용전단 저항력 및 허용지지력과의 비교 등으로 시행한다.

② 석션파일기초 구조단면의 안정조사

구조단면의 안정조사는 벽체에 작용하는 설계외력 및 하중에 대하여 연직방향 및 수평 방향의 지반 스프링을 계산하고 지반의 허용전단 저항력 및 허용지지력과 비교 및 허용 변위량과 비교에 의하여 수행한다. 또한, 구조단면의 안정조사에 대해서는 기초를 강체로 보고 계산을 수행한다.

(나) 설계외력 및 하중

석션파일기초 구조물의 안정검토시 적용되는 설계외력 및 하중은 파랑 작용시와 지진 시로 구분하여 산정하였으며 작용하중은 다음과 같다.

파랑 작용시	
지진 시	

그림 2.3.4 작용하중도



(다) 상부구조물(케이슨) 안정성 검토

상부구조물에 작용하는 각종 외력 및 하중조건에 따라 검토된 안정성 결과는 다음과 같다.

표 2.3.5 케이슨부 안정성 평가

구 분	파랑 작용시		지 진 시	
	안정 검토	판 별	안정 검토	판 별
활동 안전율	1.53 > 1.2	O.K	1.64 > 1.0	O.K
전도 안전율	2.08 > 1.2	O.K	1.92 > 1.1	O.K
기초저면 반력	67.47 tf/m <sup>2</sup>	O.K	71.25 tf/m <sup>2</sup>	O.K

주) 기초저면 반력은 석션파일기초 상부에 포설된 레벨링 사석으로 전달되며 전단벽을 통해 측압이 구속되므로 본 검토에서 산정된 최대저면 반력인 71.25 tf/m<sup>2</sup>은 충분히 지지할 것으로 판단됨. 레벨링 사석의 허용지지력은 향후 실시설계시 실험을 통해 검증되어야 할 것임.

(라) 구조단면 설정에 대한 검토

본 석션파일기초 구조물은 분리형 구조이나 상부구조물에 작용하는 각종 외력 및 하중조건에 따라 산정된 케이슨부의 활동안전율이 충분히 안정된 상태이므로 석션파일기초의 구조단면 설정은 하중의 평행조건식에 따라 구조물 전체를 일체로 보고 검토를 수행하였으며 검토된 결과는 다음과 같다.

표 2.3.6 석션파일기초 안정성 평가

구 분	파랑 작용시		지 진 시	
	안정 검토	판 별	안정 검토	판 별
활동 안전율	3.26 > 1.2	O.K	2.26 > 1.0	O.K
전도 안전율	2.18 > 1.2	O.K	2.67 > 1.1	O.K
기초저면 반력	105.89 tf/m <sup>2</sup> q <sub>a</sub> = 198.53 tf/m <sup>2</sup>	O.K	126.55 tf/m <sup>2</sup> q <sub>a</sub> = 214.90 tf/m <sup>2</sup>	O.K

나. 변경 석션파일기초 케이스 방파제

(1) 석션파일기초 케이스 방파제 표준단면도

그림 2.3.5 변경 표준단면도

(2) 석션파일기초 케이슨 방파제 종평면도

그림 2.3.6 변경 종평면도

(3) 석선파일기초 케이슨 방파제 안정계산

(가) 기본방향

석선파일기초 구조물의 안정계산은 중력식 벽체로 가정하여 다음의 계산순서에 따라 안정성 검토를 실시한다.

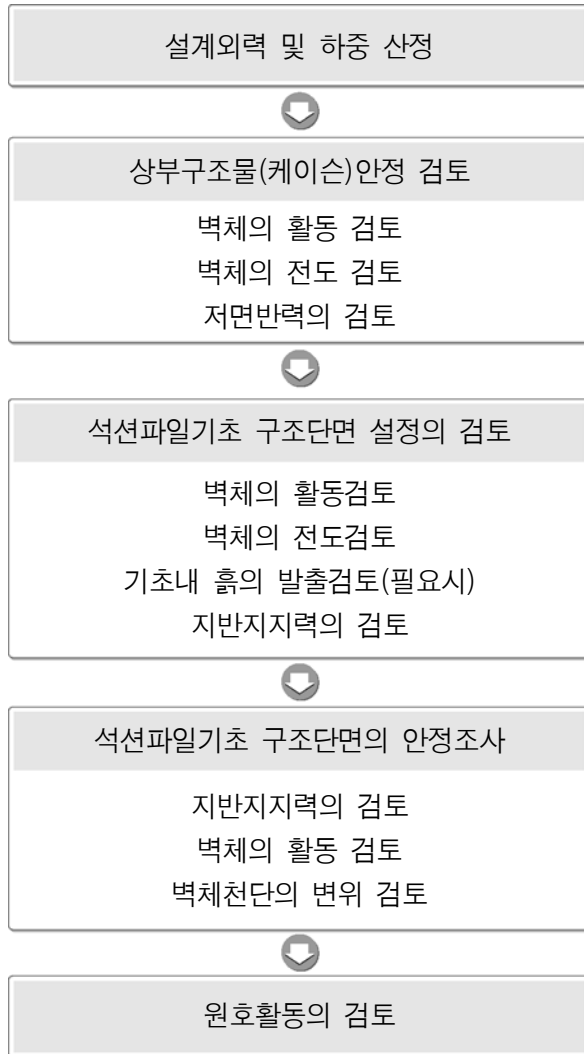


그림 3.3.7 안정계산 흐름도

① 상부구조물의 안정 및 석선파일기초 구조단면 설정의 검토

상부구조물의 안정 및 구조단면 설정의 검토는 벽체에 작용하는 설계외력 및 하중에 대하여 하중의 평형조건식에 의하여 연직방향 및 수평방향의 저면반력을 구하고 지반의 허용전단 저항력 및 허용지지력과의 비교 등으로 시행한다.

② 석션파일기초 구조단면의 안정조사

구조단면의 안정조사는 벽체에 작용하는 설계외력 및 하중에 대하여 연직방향 및 수평 방향의 지반 스프링을 계산하고 지반의 허용전단 저항력 및 허용지지력과의 비교 및 허용 변위량과 비교에 의하여 수행한다. 또한, 구조단면의 안정조사에 대해서는 기초를 강체로 보고 계산을 수행한다.

(나) 설계외력 및 하중

석션파일기초 구조물의 안정검토시 적용되는 설계외력 및 하중은 파랑 작용시와 지진 시로 구분하여 산정하였으며 작용하중은 다음과 같다.

파랑 작용시	
지진 시	

그림 2.3.8 작용하중도

(다) 상부구조물(케이슨) 안정성 검토

상부구조물에 작용하는 각종 외력 및 하중조건에 따라 검토된 안정성 결과는 다음과 같다.

표 2.3.7 케이슨부 안정성 평가

구 분	파랑 작용시		지 진 시	
	안정 검토	판 별	안정 검토	판 별
활동 안전율	1.51 > 1.2	O.K	1.67 > 1.0	O.K
전도 안전율	2.06 > 1.2	O.K	2.00 > 1.1	O.K
기초저면 반력	66.63 tf/m <sup>2</sup>	O.K	74.32 tf/m <sup>2</sup>	O.K

주) 기초저면 반력은 석션파일기초 상부에 포설된 레벨링 사석으로 전달되며 전단벽을 통해 측압이 구속되므로 본 검토에서 산정된 최대저면 반력인 74.32 tf/m<sup>2</sup>은 충분히 지지할 것으로 판단됨. 레벨링 사석의 허용지지력은 향후 실시설계시 실험을 통해 검증되어야 할 것임.

(라) 구조단면 설정에 대한 검토

본 석션파일기초 구조물은 분리형 구조이나 상부구조물에 작용하는 각종 외력 및 하중조건에 따라 산정된 케이슨부의 활동안전율이 충분히 안정된 상태이므로 석션파일기초의 구조단면 설정은 하중의 평행조건식에 따라 구조물 전체를 일체로 보고 검토를 수행하였으며 검토된 결과는 다음과 같다.

표 2.3.8 석션파일기초 안정성 평가

구 분	파랑 작용시		지 진 시	
	안정 검토	판 별	안정 검토	판 별
활동 안전율	4.43 > 1.2	O.K	2.64 > 1.0	O.K
전도 안전율	2.37 > 1.2	O.K	3.09 > 1.1	O.K
기초저면 반력	124.73 tf/m <sup>2</sup> qa = 206.45 tf/m <sup>2</sup>	O.K	161.71 tf/m <sup>2</sup> qa = 225.71 tf/m <sup>2</sup>	O.K

(4) 석션파일기초의 설치 검토

석션파일기초의 설치는 거치초기에 발생하는 자중에 의한 관입 이후 석션압으로 관입하게 되는데, 사전에 최종 관입 깊이를 산정한 후 안정성을 검토하여야 한다.

(가) 자침량 산정

석션파일기초의 자중에 의한 관입량(자침량, 自沈量)은 자중에 의한 관입력(FD)이 관입저항력(FR)보다 크면 관입되고 관입력과 관입저항력이 평형상태가 되면 관입을 멈춘다.

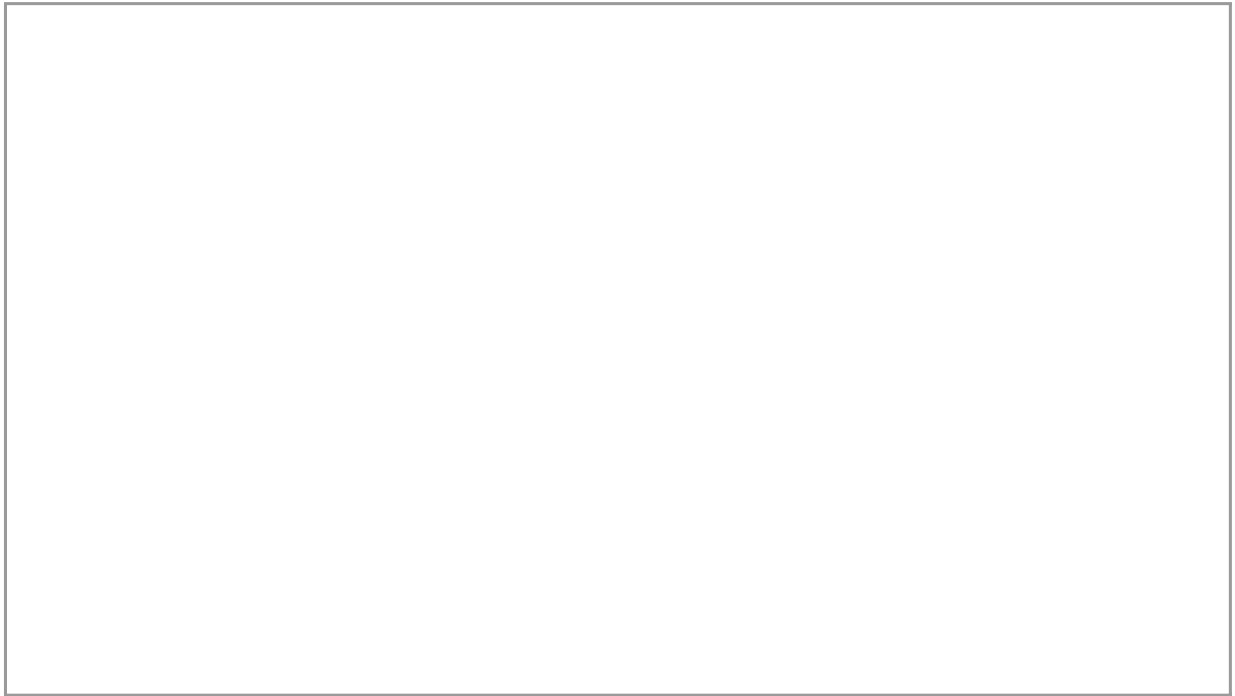


그림 2.3.9 자침량 산정도

- 관입력(  $F_D$  ) : 석션파일기초의 수중 중량(Type-A : 702tonf, Type-B : 758tonf)
- 관입저항력(  $F_R$  ) : 석션파일기초의 주면저항력 및 선단 저항력

$$F_R = P_{fi} \cdot A_{fi} + P_{fo} \cdot A_{fo} + q_t \cdot A_t$$

여기서,  $P_{fi}$  : 기초내측의 주면저항 ( $0.032 \times \frac{h}{2} + 0.84$  tf/m<sup>2</sup>)

$P_{fo}$  : 기초외측의 주면저항 ( $0.032 \times \frac{h}{2} + 0.84$  tf/m<sup>2</sup>)

$h$  : 관입 깊이(m)

$A_{fi}$  : 기초측벽 내측의 주면적 (31.11 h m<sup>2</sup>)

$A_{fo}$  : 기초측벽 외측의 주면적 (34.56 h m<sup>2</sup>)

$A_t$  : 기초측벽 선단부의 면적 (38.3 m<sup>2</sup>)

$q_t$  : 기초의 선단저항(tf/m<sup>2</sup>)

$$q_t = 1.018k_o \cdot t + 5.14C_o + \sigma_v'$$

여기서,  $\sigma_v'$  : 기초선단의 유효토포압 (0.5 h tf/m<sup>2</sup>)

$C_o$  : 기초저면에서의 점착력 (0.032 h + 0.84 tf/m<sup>2</sup>)

$k_o$  : 깊이에 따른 점착력 증가비율 (0.032 tf/m<sup>2</sup>/m)

t : 기초의 측벽두께 (0.55 m)

• 압입력(  $F_D$  ) 및 관입저항력 (  $F_R$  ) 산정결과

$F_D$ (tonf)	$F_R$ (tonf)			검토 결과
	해저 면으로부터 깊이(m)	실하중	실하중×안전율 (1.5)	
Type-A : 702  Type-B : 758	0	165.36	248.05	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 해저 면으로부터 깊이가 Type-A는 약 2~5m, Type-B는 3~6m 지점까지 자중으로 침하하는 것으로 판단됨.</li> <li>( <math>F_D &gt; F_R</math> 인 구역)</li> </ul>
	1	247.70	371.56	
	2	332.15	498.22	
	3	418.69	628.03	
	4	507.33	761.00	
	5	598.08	897.11	
	6	690.92	1,036.38	
	7	785.87	1,178.80	

(나) 설치가능여부검토

① 석션압을 이용한 관입 특징

1-석션에 의한 기초의 관입력의 증가, 2-석션에 의한 지반의 관입저항력의 감소를 들 수 있다. 1-석션압에 의한 관입력은 기초내외의 수압차를 이용한 관입력이다. 기초상부에 수압면적이 클수록 동일한 석션압에 대하여 큰 관입력을 얻을 수 있다.

2-관입저항력의 감소는 기초내외에 석션으로 인한 수압차가 생기면 지반 내에는 기초측벽을 따라 기초외측으로부터 내측으로 향하는 침투류가 발생하고 기초내측의 지반 내에는



상향 침투류가 발생하게 되어 유효 토피압이 감소하고 파일이 관입되면서 파일 벽면과 토사 사이에 발생하는 Smear 현상 때문이다. 지반의 침투류의 속도는 지반의 투수계수에 따라 결정되므로 석션압 검토시 지층의 투수계수의 정밀한 자료가 요구된다. 일반적으로 모래지반은 높은 투수성으로 인하여 빠른 침투류가 발생하지만 점토지반에서는 통상의 경우 투수계수가 극히 낮으므로 침투류의 속도가 극히 작지만 파일면을 따라 흐르는 침투류의 속도는 상대적으로 크다. 파일 주변의 토사는 파일의 연속적인 관입으로 교란(Smear 현상)되어 파일과의 마찰저항력이 감소한다. 석션파일 설치 설계에서는 이와 같은 관입저항력의 감소를 고려한 최저 관입력과 내부 토사가 불안정해져 Sand Boiling이나 Clay Plugging이 발생하는 석션압 상한값을 적절히 평가하여 설계된 석션파일기초의 설치가능 여부를 판정한다. 설치 중 현재의 관입 깊이에서 요구되는 석션압은 석션압의 하한과 상한값 사이의 값이다. 이들 값의 결정은 복잡한 과정을 거쳐야 되며, 개발된 컴퓨터 프로그램에 의하여 산정될 수 있다.

## ② 석션압의 하한값 산정

석션파일기초의 설치 중 현재의 관입 깊이에서의 석션압에 의한 관입력의 하한값(P)은 지반의 관입 저항력(Q)에서 파일의 수중 무게(W'pile)를 감한 것과 같다. 현재의 관입 깊이에서의 지반의 관입 저항력의 산정은 아래와 같다.

$$P = Q - W'_{pile}$$

여기서,

$$Q = Q_{out} + Q_{in} + Q_{tip}$$

$Q_{out}$  = 파일 외부 주변 마찰력

$Q_{in}$  = 파일 내부 주변 마찰력

$Q_{tip}$  = 파일 선단 지지력

$W'_{pile}$  = 파일 수중 무게

상기 식에서 극한 지지력 요소인  $Q_{out}$ ,  $Q_{in}$ ,  $Q_{tip}$ 의 값들은 Terzaghi, Meyerhof, Prandt and Reissner, De Beer, Hansen 등의 일반 토질역학이론을 이용하여 구할 수 있다. 하지만, 관입 저항력은 Smear 등과 같은 여러 가지 이유로 지반의 극한 지지력보다 감소하게 되는데, 이는 지반의 강도계수 즉 정지마찰계수 및 비배수 전단강도를 조정하여 산정될 수 있다. 이 강도 조정계수는 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{\tan\phi'_m}{\tan\phi}$$

$$\beta = \frac{c_m}{S_u}$$

여기서,  $\alpha$  : 마찰각 조정계수

$\beta$  : 점착력 조정계수

$\phi'_m$  : 조정 마찰각

$c_m$  : 조정 점착력

현재 관입 깊이에서 사질토에 대한 마찰각 조정계수  $\alpha$ 는 실험 결과로부터 석션 파일의 설치에 관련된 변수들의 무차원식 조합으로 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = 1 - \frac{1}{1 + 3.156 X'^{1.943}}$$

여기서,  $X' = ((p_s + \frac{F_b}{A})/\gamma_b d_p)(D/d_{p-max})$

$p_s$  : 적용 석션압

$F_b$  : 수중 파일 및 상부하중

$A$  : 석션파일 내부 단면적

$D$  : 석션파일 직경

$\gamma_b$  : 토사의 수중단위중량

$d_p$  : 현재의 관입깊이

$d_{p-max}$  : 주어진 지반과 파일 조건에서의 최대관입깊이

사질토와 유사하게 점성토에 대한 점착력 조정계수  $\beta$ 는 아래 식과 같이 실험결과로부터 산정된다.

$$\beta = 1 - \frac{1}{1 + 0.01697 X'^{1.0420}}$$

여기서,  $X' = ((p_s + \frac{F_b}{A})/S_u)(d_{p-max}/D)^{0.5}(d_{p-max}/d_p)$

$p_s$  : 적용 석션압

$F_b$  : 수중 파일 및 상부하중

$A$  : 석션파일 내부 단면적

$D$  : 석션파일 직경

$S_u$  : 비배수 전단강도

$d_p$  : 현재의 관입깊이

$d_{p-max}$  : 주어진 지반과 파일 조건에서의 최대관입깊이

위 식에 제시된 바와 같이 조정계수는 석션 파일의 관입 깊이에 따라 연속적으로 변화한다. 즉, 석션압 하한값은 석션 파일이 설치되는 동안 연속적으로 변하는 값을 가진다.

최종적으로 최대 관입 저항력의 산정 요소인  $Q_{out}$ ,  $Q_{in}$ ,  $Q_{tip}$ 의 값들을 구하기 위해서는 동투수 조건(Hydrodynamic Condition)을 고려한 지반의 유효응력을 산정하여야 한다. 이러한 과정은 본 보고서 범위를 벗어나는 것으로 사료되어 상세한 기술을 생략한다.

### ③ 석션압의 상한값 산정

석션파일기초의 설치시 석션압의 하한값과 마찬가지로 석션압의 상한값도 관입 깊이에 따라 연속적으로 변한다. 만약 어느 순간에라도 석션압이 상한값에 도달되면 모래 지반의 경우는 Sand Boiling이 발생하고 점토 지반의 경우에는 Clay Column Plugging이 발생하여 파일 내부가 토사로 채워져 파일 설치에 실패하게 된다. 현재의 설치 깊이에서 석션압의 상한값은 아래의 조건에서 결정될 수 있다.

모래지반

$$i_c = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} - 1$$

여기서,  $i_c$  : 한계동수경사

$\gamma_{sat}$  : 포화단위중량

$\gamma_w$  : 물의 단위중량

점토지반

$$p_{s-max} = \gamma_b d_p + 2S_u + \frac{4}{D} \sum_{i=1}^N \int_0^{L_i} c_m dz$$

여기서,  $p_{s-max}$  : 해당 깊이에서 최대석션압

$\gamma_b$  : 양압력을 고려한 수중단위중량

$d_p$  : 관입깊이

$c_m$  : 조정 점착력

$D$  : 석션파일 내경

$S_u$  : 석션파일 선단부 흙의 비배수 전단강도

$L_i$  : i번째 지층에서 파일 근입장

N : 지층 수

(5) 워터제트

석선파일은 모래질 자갈층 약 2.5m의 깊이로 관입되어야 하므로 석선압을 보조하기 위한 장비로 워터제트를 설치하여 석선파일이 사질토층에 충분히 관입될 수 있도록 한다.

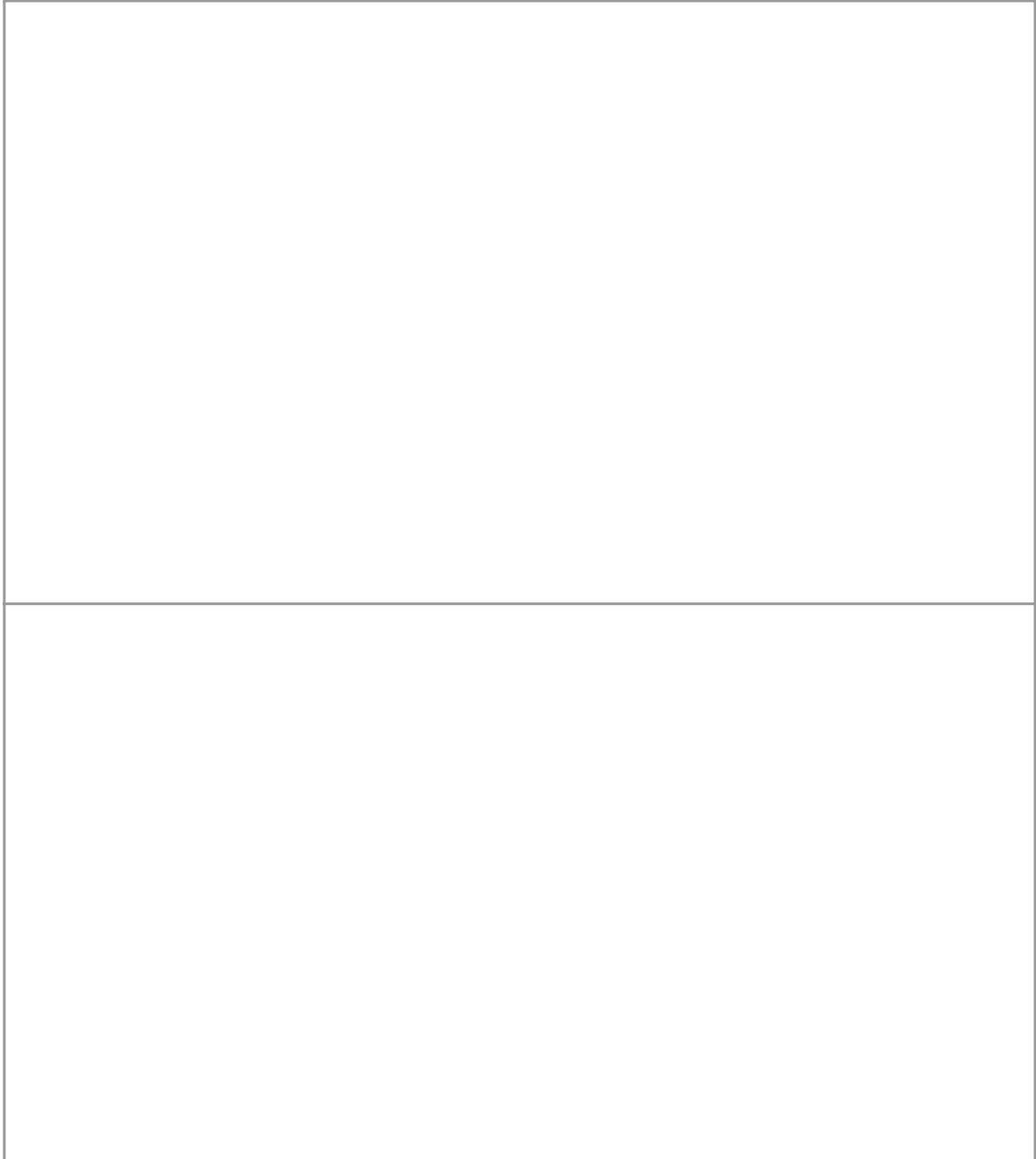


그림 2.3.10 워터제트 배치도와 노즐

## 제 4 절 계측관리계획

### 1. 개요

#### 가. 계측 목적

- 설계과정에 포함된 해석이론, 토질특성 및 지반거동의 불확실성을 계측을 통해 확인, 주요항목에 대해 계측데이터를 Feed-Back 함으로써 공사의 안정성 도모
- 과업을 위한 계측의 주목적
  - 설치시 : 석션파일기초 구조물의 설치거동 파악
  - 설치후 : 신형식 방파제의 거동분석

#### 나. 현장 계측흐름도

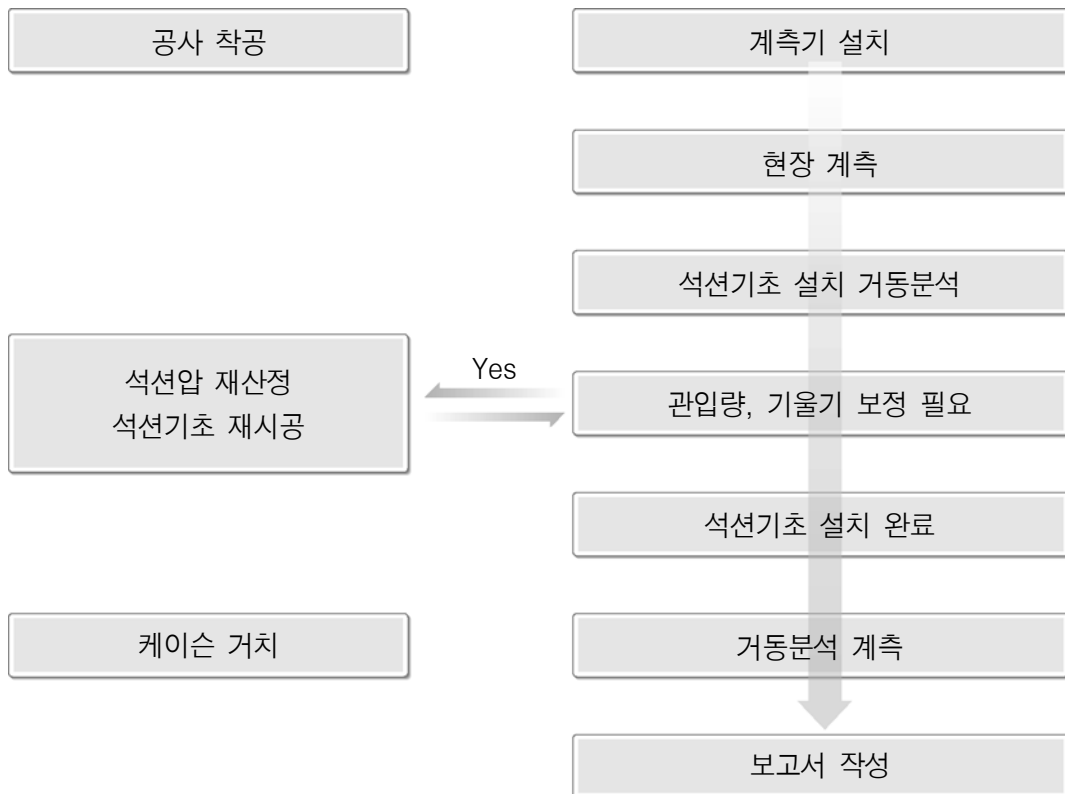


그림 2.4.1 현장계측 흐름도

## 2. 계측기 종류 및 설치

### 가. 계측항목 및 내용

계 측 항 목		계측내용 및 목적	계측기
석션파일 기 초 설 치 시	석 선 압	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 석션파일기초 내·외 수압의 차를 측정</li> <li>• 설치중 석션압 조절</li> </ul>	간극수압계
	석션파일기초 기울기	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 관입에 따른 석션파일기초의 수직도 측정</li> </ul>	경사계
	관 입 량	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 석션파일기초의 관입량 측정</li> <li>• 관입중단여부 판단</li> </ul>	침하계
설치 완료 후 거동분석	과잉 간극수압	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con'c 구조물에 가해지는 외력(토압 및 간극수압)을 실질적으로 측정</li> <li>• 구조물의 이상거동을 판단</li> </ul>	간극수압계
	유효응력	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con'c 구조물의 응력상태를 측정</li> <li>• 구조물의 안정성 검토를 위하여 설계, 해석치와 비교 검토</li> </ul>	유효응력계
	지반반력	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 석션 파일의 기초부에 설치</li> <li>• 석션파일에 작용하는 하중을 측정하여 구조물의 이상거동 유무를 파악</li> </ul>	반력계

\*설치완료 후 거동분석용 계측기도 설치 전 미리 매설

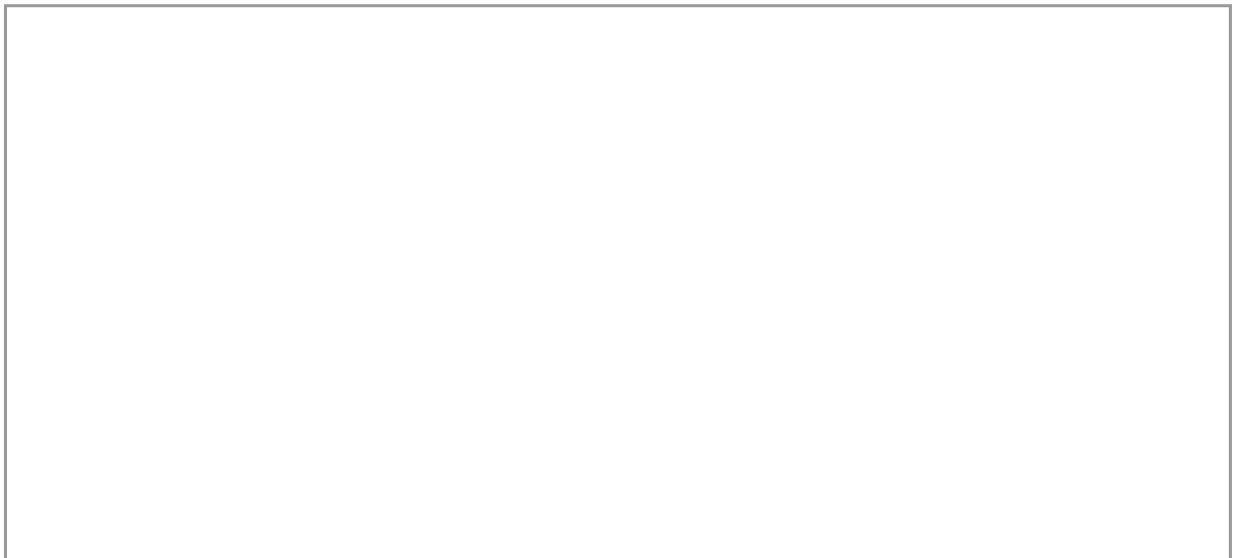


그림 2.4.2 계측기 설치 일반도

표 2.4.1 계측기 설치 수량

계측항목		S/P 1	S/P 2	S/P 3	S/P 4	S/P 5	S/P 6	S/P 7	S/P 8	총수량	비 고
석선파일 기초 설치시	경사계	2	2	2	2	2	2	2	2	2	재사용
	간극수압계	6	6	6	6	6	6	6	6	48	
	침하계	2	2	2	2	2	2	2	2	9	1EA 재사용
설치완료 후 거동분석	간극수압계	5	0	0	0	5	0	0	0	10	
	유효응력계	4	0	0	0	0	0	0	0	4	
	반력계	4	0	0	0	0	0	0	0	4	



그림 2.4.3 석선파일 기초 배열도

나. 계측기의 설치

(1) 콘크리트 유효응력계(Con'c Stressmeter)

(가) 사양

형 식(NK-100)			
측정범위(FS)	100 kgf/cm <sup>2</sup>	허용온도 범위	-10~80℃
정격출력(RO)	1.0mV/V이상	최대 인가전압	10V
직 선 성	1.0% RO 이내	입출력 저항	350Ω
Hysteresis	1.0% RO 이내	허용 내수압	5kgf/cm <sup>2</sup>
한계사용조건	120% FS		

(나) 설치방법

- 사용계기의 성능 및 안정성을 시험한다
- 계측기의 내부에 사용 콘크리트와 같은 재질의 콘크리트로 채운다.

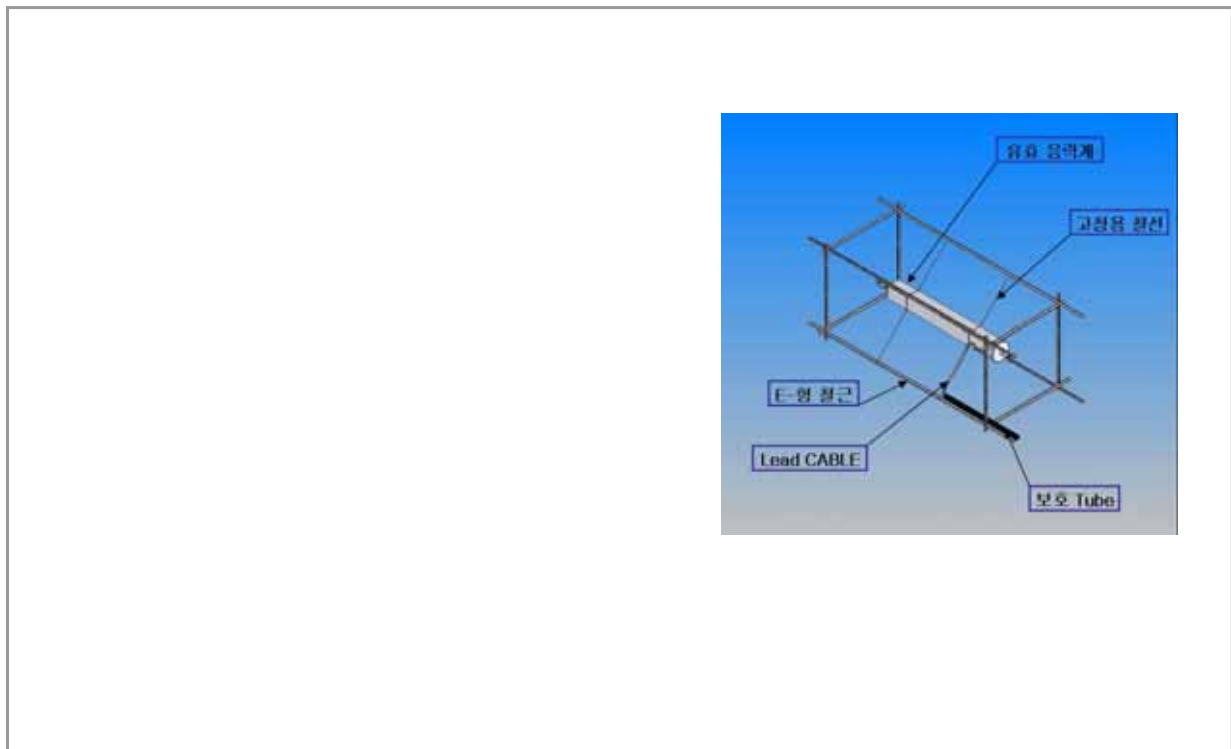


그림 2.4.4 유효응력계 설치도



- 철근망내의 설치위치에 계측기 고정용 지그를 설치한다
- 철근망 설치작업에 따라 설치위치에 와이어를 이용하여 센서를 고정시킨다
- 측정용 케이블의 배선 계획에 따라 케이블 보호관을 설치한다
- 측정용 케이블을 보호관을 통하여 측정 지점까지 유도한다
- 계측 System에 케이블을 접속하고 측정을 실시한다

(2) 경사계(Inclinometer)

(가) 사양

형 식 NT-5A			
측정범위(FS)	±10	정격출력	2 mV/V
Hysteresis	0.5% RO이내	최대 인가전압	10V
직 선 성	0.5% RO이내	입출력 저항	350Ω
사용온도 범위	-20~80℃	허용 내수압	10kgf/cm <sup>2</sup>

(나) 설치방법

- 사용계기의 성능 및 안정성을 시험한다
- 철근망내의 설치위치에 센서 고정용 가시설을 한다
- 철근망 시설작업에 따라 설치위치에 와이어를 이용하여 센서를 고정시킨다
- 측정용 케이블의 배선 계획에 따라 케이블 보호관을 설치한다
- 측정용 케이블을 보호관을 통하여 측정지점까지 유도한다
- 계측 System에 케이블을 접속하고 측정을 실시한다

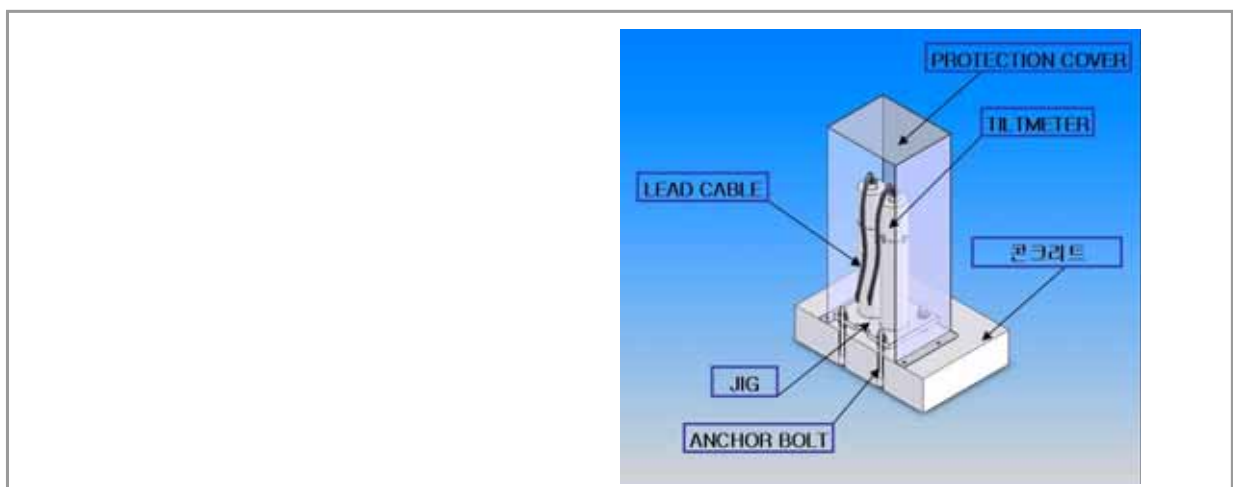


그림 2.4.5 경사계 설치도

(2) 간극수압계(Pore Pressure Meter)

(가) 사양

형 식 SP-5K			
측정범위(FS)	5kgf/cm <sup>2</sup>	허용온도 범위	-0~80℃
출력정도(RO)	0.9mV/V이상	허용 인가전압	10V
직 선 성	1.0% RO 이내	입출력 저항	350Ω
Hysteresis	1.0% RO 이내	온도특성	0.05%/℃

(나) 간극수압계의 설치방법

- 간극수압계 필터내의 공기를 완전히 제거시키기 위해 물속에 1시간 이상 넣어둔다
- 사용계기의 성능 및 안정성을 시험한다
- 철근망내의 설치위치에 계측기 고정용 가시설을 한다
- 측정용 케이블의 배선 계획에 따라 케이블 보호관을 설치하여 케이블을 포설한다
- 센서 설치용 지그를 설치지점에 고정한 후 콘크리트에 매설이 되지 않도록 보호한다
- 콘크리트 양생 후 설치용 지그에 센서를 고정한다
- 고운 모래로 센서주변을 채운 후 흘러내리지 않도록 보호한다
- 계측 System에 케이블을 접속하고 측정을 실시한다

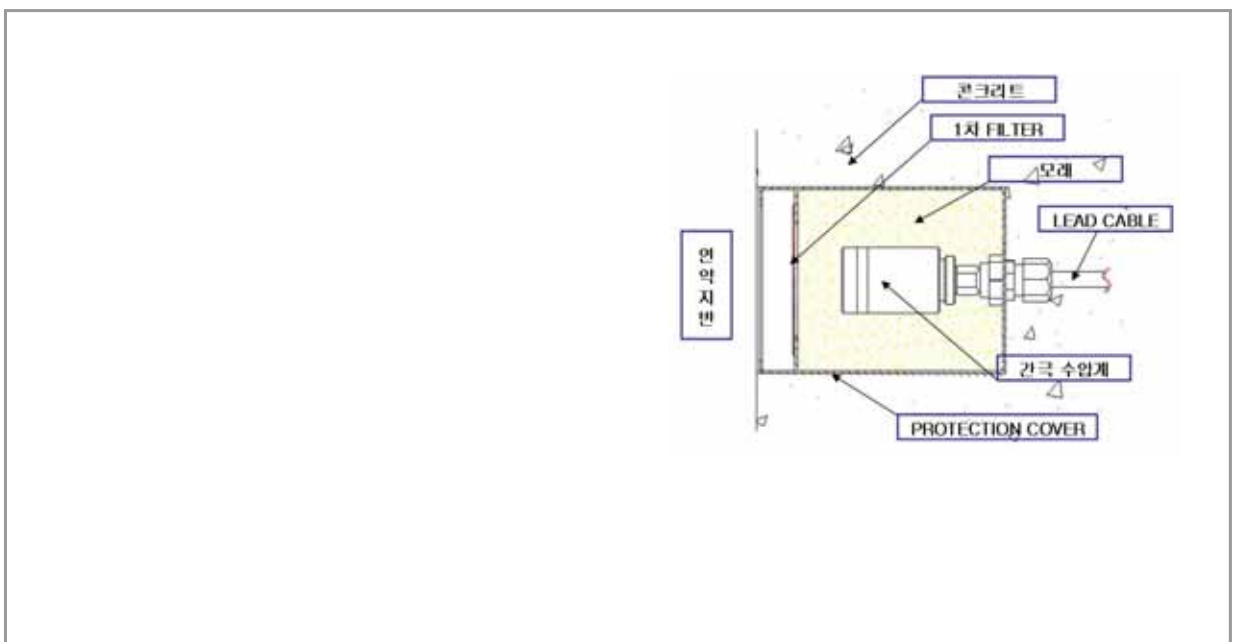


그림 2.4.6 간극수압계 설치도

(4) 반력계

(가) 사양

형 식(ER-10L)			
측정범위(FS)	10kgf/cm <sup>2</sup>	허용온도 범위	-10~80℃
출력정도(RO)	1.0mV/V이상	허용 인가전압	10V
직 선 성	0.5% RO이내	입출력 저항	350Ω
Hysteresis	0.5% RO이내	온도 특성	0.05%/℃

(나) 설치방법

- 사용계기의 성능 및 안정성을 시험한다
- 철근망내의 설치위치에 계측기 고정용 가시설을 한다
- 측정용 케이블의 배선 계획에 따라 케이블 보호관을 설치하여 케이블을 포설한다
- 콘크리트 타설전 설치용 지그를 설치지점에 고정한다
- 센서 설치용 지그를 설치지점에 고정한 후 콘크리트에 매설이 되지 않도록 보호한다
- 콘크리트 양생후 설치용 지그에 센서를 고정한다
- 계측 System에 케이블을 접속하고 측정을 실시한다

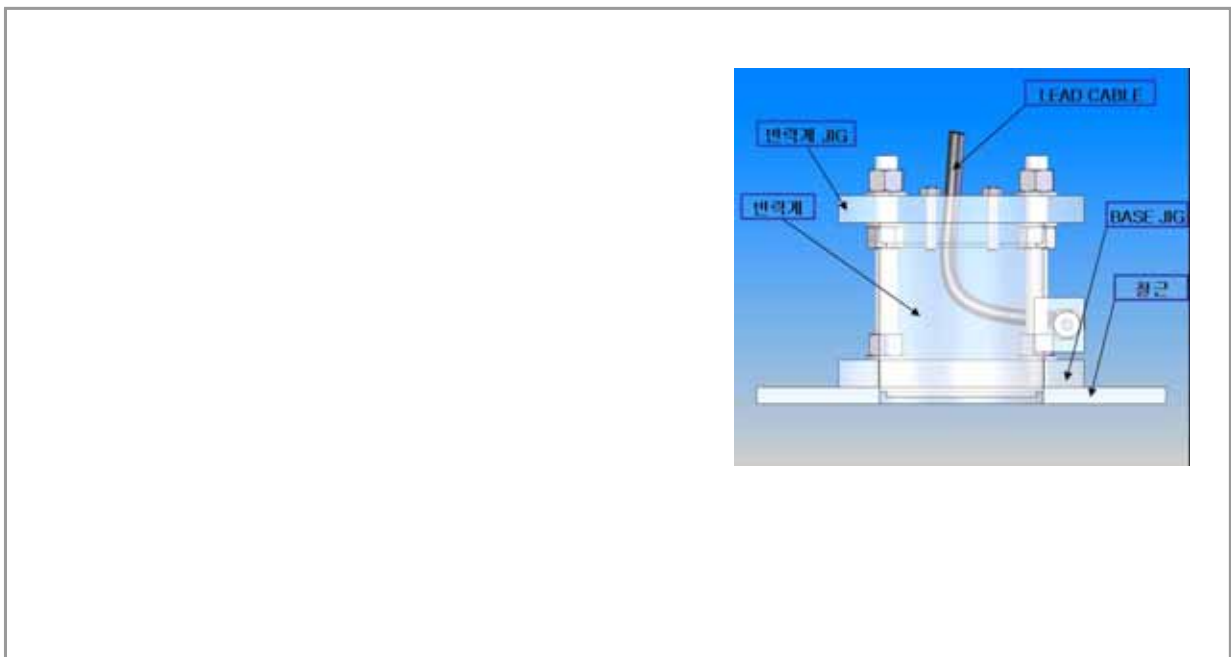


그림 2.4.7 반력계 설치도

## 제 5 절 시공계획

### 1. 시공개요

시험용 석선파일기초 구조물의 시공은 각 제작공정에 있어서 구조물의 제원이나 주변 환경, 기상·해상 등의 자연조건, 지리적 조건, 공기 등을 고려하여 설계도서를 만족시킬 수 있도록 적절한 제작방법, 시공방법 등을 선정해야 한다. 특히 석선파일기초 구조물의 원활한 제작·관입을 실시할 수 있도록 시공 조건 및 설계조건을 충분히 고려하여 시공계획을 세워야 한다. 시험용 방파제 시공순서와 사용 장비는 다음과 같다.

가 설 공	각종 가설장비
제작장 조성공	각종 제작장비
석선파일기초 제작	유로폼 제작
석선파일기초 적출 및 인양·거치	1,800ton급 크레인 7,000ton급 바지선
석선압에 의한 관입	수중펌프 사용
레벨링사석 투하	조합 기중기선
케이슨 제작	유로폼 제작
케이슨 적출 및 인양	3,000ton급 크레인
케이슨 진수 및 거치	3,000ton급 크레인
속채움 모래	해상크랩셀
프리캐스트 덮개 거치	각종 해상장비
상치콘크리트 타설	각종 해상장비

그림 2.5.1 방파제 시공순서

## 2. 시공 관리

### 가. 개요

시공관리란 제작, 운반, 설치 계획 및 관리에 대한 총칭이며, 설계도서, 시방서, 시공계획서 등에서 제시한 공기·수량·제원·기능·품질·정도 등을 확보하기 위해 실시하는 것이다. 특히, 해상공사가 되는 석션과일기초 구조물의 시공은 지반이나 작업환경의 변화에 좌우되기 쉽고, 끊임없이 충분한 시공관리를 실시해야 한다. 그리고, 시공조건을 변경할 경우에는 시공계획서를 빨리 수정하여 안전한 시공이 될 수 있도록 노력해야 한다. 또한 시공계획을 토대로 설계상의 요건 및 구조물로서의 품질·기능이 충분히 확보될 수 있도록 공정관리, 품질관리, 준공관리 등의 시공관리를 해야 한다.

### 나. 공정관리

공정관리는 소정의 공기내에 공사를 완료시키기 위해 실시하는 것으로, 시공계획서에 따라 구조물이 완성되고 작업이 종료될 수 있도록 관리해야 한다.

### 다. 품질관리

품질관리는 사용하는 재료 및 구조물이 설계도서, 시방서 등에 표시된 품질을 확보할 수 있도록 실시하는 것으로, 시공의 각 단계에 있어서 각각 품질관리 목적에 맞는 관리방법, 시험방법 등으로 실시한다.

### 라. 준공관리

준공관리는 구조물에 필요한 기능이 발휘될 수 있도록 실시하는 것으로 품질관리와 아울러 구조물의 시공정도를 설계도서나 시방서에 나타난 허용치의 범위에서 이루어지도록 관리해야 한다.

### 마. 안전관리 및 환경보전

시공에 있어서는 다음 사항에 유의하여 안전관리를 실시해야 한다.

- (1) 관련 법률 등을 준수하고, 안전시공에 노력한다.
- (2) 시공법의 특성을 충분히 이해하고, 안전을 확보토록 한다. 또한 공사시 시공현장 주변의 환경에 피해를 주지 않도록 충분히 배려하고, 환경보전에 노력해야 한다.

#### 바. 공사기록

시공 중이나 시공후의 전반적인 기록을 통해 시공의 각 단계에 있어서의 문제점 등을 사전에 파악하여 공구 내에서 실시되는 다른 석선과일기초 구조물에 있어서의 시공성 향상에 도움을 주고, 사고를 미연에 방지 할 수 있도록 한다. 시공에 관한 전반적인 기록은 다음 사항에 대해 기재하는 것을 원칙으로 한다.

- (1) 공사명, 공사장소, 사업주체, 시공자, 실시공정
- (2) 구조의 제원, 배치도, 구조도, 지반의 개요
- (3) 시공방법, 사용한 기계도구
- (4) 시공관리
- (5) 환경대책 및 안전대책
- (6) 시공 중에 생긴 특수한 상황과 대책
- (7) 각 공정의 시공기록

### 3. 가설계획

석선파일기초 구조물에 필요한 시설, 설비, 가설부재 등은 가설계획을 토대로 기본적으로 제작시, 진수전 및 설치전에 석선파일기초에 부착해 둘 필요가 있다. 이것은 시공성, 완제품 관리 및 안전상 중요하다. 가설계획은 시공방법, 현장조건 등에 의해 달라지지만, 석선파일기초의 제작에서부터 설치까지의 공정에 특히 필요하다고 생각되는 설비, 가설부재 등은 다음과 같다.

- (1) 제작시 : 제작받침대, 비계, 동바리, 기초내의 환기·조명설비 등
- (2) 적출·예인시 : 조급구 및 리프팅 디바이스 등
- (3) 설치시 : 석선설비, 위치측량 장비, 작업발판, 손잡이 등

### 4. 제작장 조성공

석선파일기초 및 케이슨 제작장 선정시 고려할 사항으로 첫째, 주요자재를 원활히 공급 받을 수 있는 배후도로망 및 충분한 제작장 부지의 확보가 가능한 지역과 둘째, 원활한 적출 및 예인이 가능한 입지여건이 갖추어진 곳을 선정하여야 한다.

표 2.5.1 케이슨 제작장 조성 개요

구 분	위 치	조 성 기 간	비 고
제작장 위치	동북화학부두현장	15일	

## 5. 석션파일기초 시공

### 가. 개요

석션파일기초의 시공은 크게 석션파일기초 제작, 적출, 예인, 설치로 나눌 수 있으며 그 제작과정은 다음과 같다.

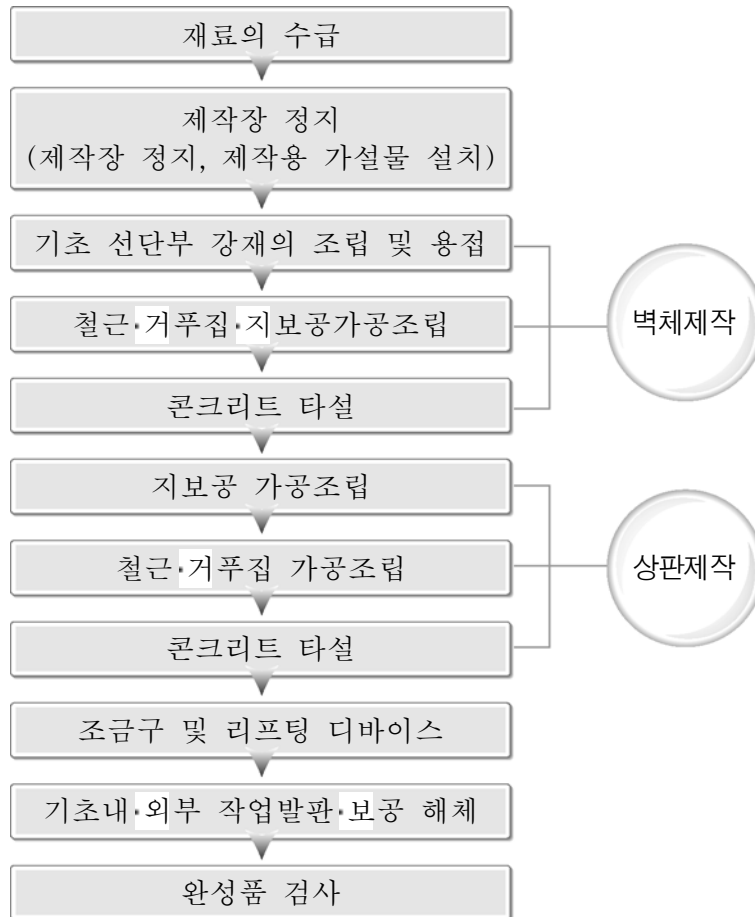


그림 2.5.2 석션파일기초 제작흐름도

### 나. 석션파일기초 제작

#### (1) 석션파일기초 제작시 주의할 사항

- ① 작업원의 출입 및 재료의 반입·반출구로서의 작업성·안전성을 충분히 고려하여 적절한 개구부를 설치한다.
- ② 석션파일기초의 제작은 앞에서 언급한 바와 같이 케이슨 제작장에서 유로폼과 동

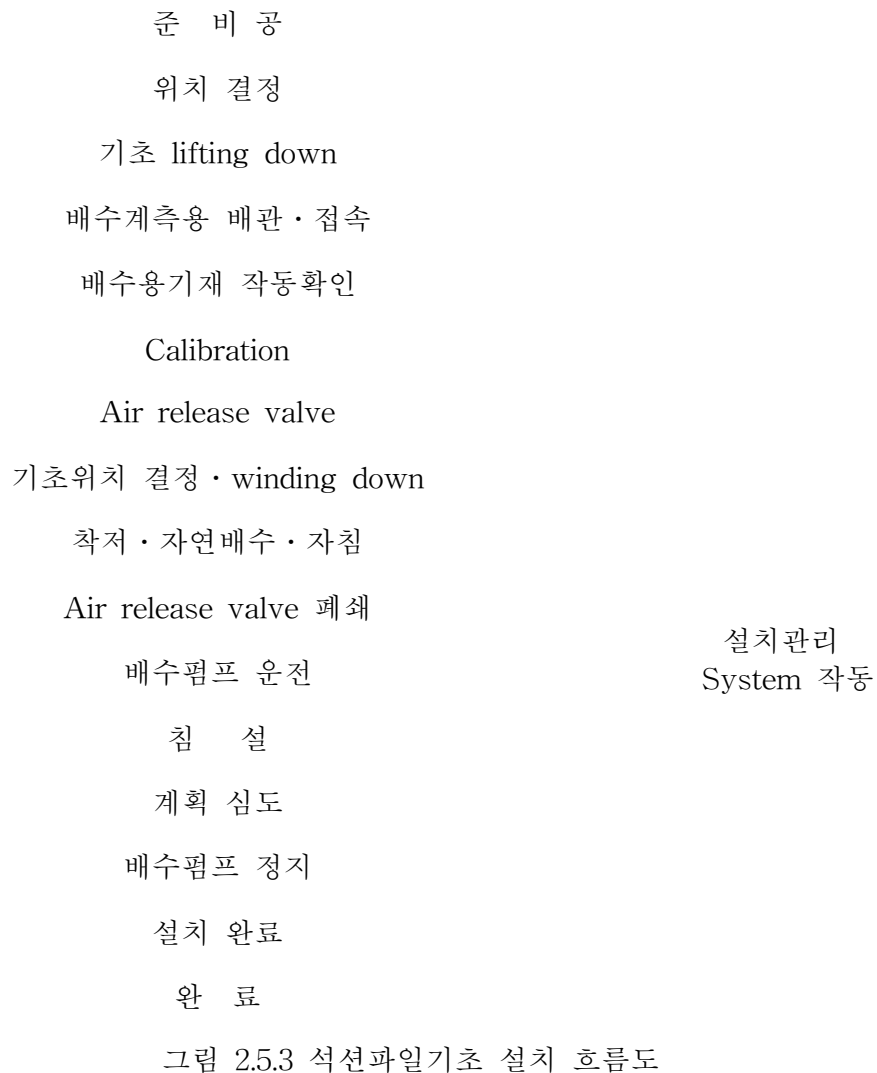


바리를 이용하여 제작하므로 고소작업이 발생하고 상판 작업시에는 폐쇄작업이 이루어지므로 안전을 확보하기 위해서는 적절한 시공순서를 검토해야 하며, 특히 적절한 환기·조명설비를 배치해야 한다.

- ③ 석션파일기초의 원활한 설치를 위해서는 선단부에서 발생하는 마찰력을 최소화해야 하므로 선단부를 강재로 제작해서 선단 면적을 최소화한다.
- ④ 상판의 스팬이 긴 경우, 재령이 짧은 콘크리트로는 굴곡량이 커져 천단의 평탄 정도가 나빠질 뿐만 아니라 크랙의 발생도 염려되기 때문에 지보공 해체시기에는 주의해야 할 필요가 있다.

다. 석션파일기초 설치

(1) 석션파일기초 설치흐름도



(2) 설치를 위한 사전조사

석선파일기초 구조물의 설치에 있어서는 설치계획서 작성상 또는 시공관리상 필요한 조사항목은 다음과 같다.

- 현장상황의 조사
- 현장지형 등의 조사
- 자연환경의 조사
- 현장 주변환경의 조사

(3) 작업선 및 시공기계의 선정

① 기중기선

기중기선의 선정시 고려사항은 다음과 같다.

- 석선파일기초의 적출 및 거치시 적절한 권양능력
- 설치시 석선파일기초의 자세제어 방법에 적절히 대응할 수 있는 능력

② 배수펌프

설치시 사용되는 배수펌프의 고려사항은 다음과 같다.

- 설치 석선압에 맞는 양정을 가질 것
- 토사 등을 흡출할 수 있는 샌드펌프를 사용할 것
- 설치 초기 및 자세제어시 등의 소량의 양수가 필요한 경우에 대응할 수 있는 펌프규격 및 배치로 할 것

③ 이젝터

설치시 사용되는 이젝터의 고려사항은 다음과 같다.

- 소요 석선압을 발생시킬 수 있는 배수 능력을 가질 것
- 개폐가 원활히 될 것

(4) 준비공

① 측량 : 해저면의 평탄성과 마무리 레벨이 적절하지 않은 경우는 석선파일기초의 거치정도에 큰 영향을 미치기 때문에 사전에 수심측량을 실시하고 그 결과가 명백하게 석선파일기초의 거치에 지장을 줄 것으로 예측되는 경우는 저면굴착·해저면 평탄작업을 실시한다

② 의장공 : 석선파일기초의 설치에 필요한 설비는 사전에 소요설비 능력을 검토하고 적절한 배치계획을 세워 거치한다.

(5) 설치관리 계획도

① 설치 석션압의 설정

석션파일기초의 설치관리는 설계시 설정되어 있는 소요석션압을 기초로 시공조건을 근거로 한 설치석션압을 설정한다.

② 자침량

석션파일기초의 구조물의 제원 및 지반조건을 토대로 가상 자침량을 설정한다. 가상 자침량은 석션에 의한 설치 가능여부의 기준이 된다. 즉 자침량이 작은 경우에는 초기 상한 석션압이 작아져 설치가 불가능해지는 경우도 있다. 그리고 가상 자침량이 충분하지 않을 경우에 대한 대응책을 강구해 두어야 한다.

만약, 가정된 자침량을 얻지 못한 경우에는 재하용 방괴 등의 재하 또는 펌프이동에 의해 설치시키는 방법이 있다. 단, 석션파일기초 자침량이 표층에 가까운 경우, 급격한 펌프이동은 물질을 발생시킬 수 있으므로 펌프능력을 줄여서 서서히 설치시켜야 한다.

③ 배수계획 설치시에는 배수계획이 확실하게 실시될 수 있도록 하며, 또한 설치 석션압을 관리할 수 있는 배수계획을 작성한다.

④ 설치완료 판단

토층 변화가 심한 경우에는 설계시에 석션파일기초가 높은 곳에 위치할 경우를 대비하여 제체안정 조사를 실시해 둔다. 시공중 석션파일기초의 설치상황을 감안하여 적절한 상태에서 설치완료를 판단해야 한다.

⑤ 설치시공 관리시스템의 구축

설치상황을 확실하게 파악할 수 있도록 시공형태에 맞는 설치시공 관리시스템을 구축한다.

• 설치 관리시스템 항목은 다음과 같다.

- 부착위치 관리 : 기중기선 및 석션파일기초의 원위치를 측량하여 계획위치로 유도한다.
- 설치관리 : 설치깊이와 석션압의 발생상황, 관입량, 원지반 변형량 등의 실측치와 계획치를 관리하고, 매단 하중, 기초의 경사를 측정하여 자세제어를 한다.

- 설치시의 시공관리에 필요한 계측계기 및 계측항목

관리항목		계측목적	사용계기	계측항목 등	비 고
설치시공관리시스템	설치위치관리		측 량		
	설치관리	설치위치	초음파수위계	관입량	
		설치시 석션압	초음파수위계	원지반변형량	
		설치시 석션압	기중기선의 하중계	권상하중	
		설치시 석션압	상관부 중앙부 간극수압계	간극수압	
		자세제어	측 량	경사,회전	
		자세제어	기중기선의 하중계	권상하중	
		자세제어	경사계	경사	

- 시공관리 차트작성

석션파일기초의 설치에 관한 시공관리 도표로서, 다음의 상관관계를 나타내는 관리도표를 작성하기로 한다.

(설치깊이)~(설계 석션압)~(작용가능 석션압)~(상한 석션압)~(소요 석션압)~(상한의 들어올리는 힘)~(설치 석션압)

#### (6) 석션파일기초 설치

석션파일기초의 설치는 설치시공 관리시스템에 의해 미리 정한 정도 및 관리치를 확보하여 설치시키며 설치요령은 다음과 같다.

##### ① 착저

설치시공 관리시스템의 설치위치 관리에 따라 위치결정을 하여 와이어링 등에 의한 석션파일기초 회전방지책을 적절히 강구한다.

##### ② 자침

- 자체하중에 의한 설치에는 기중기선에 의해 자세제어를 실시하면서 내린다.
- 자침완료까지는 배기밸브를 열어 기초내의 물을 배수하면서 내린다.

##### ③ 설치

- 설치시의 시공관리는 미리 작성한 시공관리 차트를 토대로 실시한다.
- 설치시, 지층변화 의한 지반의 관입저항력(선단저항력, 주변마찰력 등)의 분산으로 석션파일기초가 기울어져서 내려가는 것이 우려되므로 주의를 요하여 석션압을 조절하

여야 한다.

- 설치는 배수펌프를 사용하지만 설치 초기단계는 상한석션압도 작으므로 배수량을 줄여서 지반에 누수가 발생하지 않는 것을 확인한 후 서서히 배수량을 증가시키는 것이 좋다.
- 설치완료
  - 설치는 준공관리 기준치에 적합한가를 확인하고 완료한다.



## 제 3 장 석선파일기초 방파제 시험시공 및 계측

### 제 1 절 제작장 조성공사

#### 1. 개 요

“석선파일기초 신형식 방파제 건설공사” 1차년도(2004년) 공사분인 석선파일기초 4함을 제작하기 위한 제작장 조성공사로 해양수산부와 동북화학의 협조로 동북화학부두(2004년 12월 22일 준공) 부지에 조성하였다.

그림 3.1.1 제작장 평면 및 단면도

## 2. 공중흐름도

터 파 기

기초잡석 포설

콘크리트 포장

## 3. 시 공

가. 터파기



그림 3.1.2 터파기



나. 기초잡석 포설 및 다짐



그림 3.1.3 기초잡석 포설



그림 3.1.4 기초잡석 다짐

다. 콘크리트 타설



그림 3.1.5 거푸집 조립



그림 3.1.6 제작장 콘크리트 타설

## 제 2 장 석션파일 제작 및 거치공사

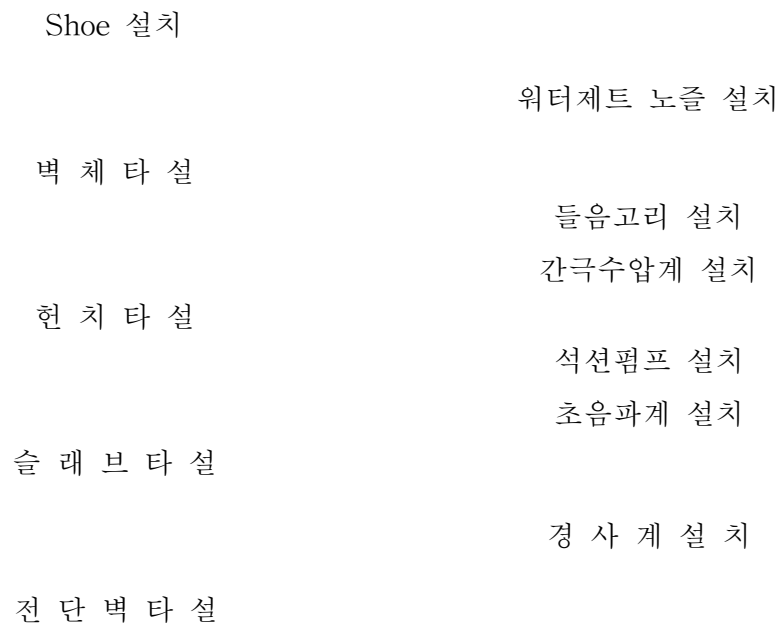
### 1. 석션파일 제작

#### 가. 개 요

석션파일기초 케이슨 방파제의 하부공인 석션파일기초 8함 중 1차년도 공사분인 4함 (Type-A)을 제작하였다.

그림 3.2.1 석션파일 배치도

#### 나. 공종흐름도



다. 인원 및 장비투입 현황

(1) 인원투입 현황

직 종	단 위	인 원 수	비 고
형 틀 목 공	명	123명	석선파일 4함
철 근 공	명	898명	
비 계 공	명	193명	
콘 크 리 트	명	107명	
기 타	명	85명	
작 업 반 장	명	60명	
장 비	명	77명	
합 계		1,543명	

(2) 장비투입 현황

장비명 \ 구분	규 격	단 위	사용대수	비 고
Pump Car	-	대	25	석선파일 4함
Crane	25Ton	대	52	
Crane	50Ton	대	3	



그림 3.2.2 석선파일 4함 제작

라. 석션파일 제작방법

(1) 작업개요

석션파일(13.9m×13.9m×17.5m)을 7단으로 나누어 작업을 시행하였다.

그림 3.2.3 콘크리트 타설도

구분 공종	단위	벽 체					슬 래 브		합계
		1단	2단	3단	4단	5단	6단	7단	
콘크리트	m <sup>3</sup>	50.5	49.3	49.3	49.3	44.4	195.6	42.2	480.6

(2) 작업순서

- ① 제작장 조성 및 부지정리
- ② 1단 : Shoe 설치 - 워터제트 노즐 설치 - 발판 및 작업대 설치 - 철근 조립 - 거푸집 설치 - 콘크리트 타설 - 콘크리트 양생 - 거푸집제거
- ③ 2단 : 이음부 청소(레이탄스 제거) - 발판 및 작업대 설치 - 철근 조립 - 거푸집 설치 - 콘크리트 타설 - 콘크리트 양생 - 거푸집제거
- ④ 3단 : 이음부 청소(레이탄스 제거) - 발판 및 작업대 설치 - 철근 조립 - 거푸집 설치 - 콘크리트 타설 - 콘크리트 양생 - 거푸집제거
- ⑤ 4단 : 이음부 청소(레이탄스 제거) - 발판 및 작업대 설치 - 철근 조립 - 들음고리 설치 - 거푸집 설치 - 콘크리트 타설 - 콘크리트 양생 - 거푸집제거
- ⑥ 5단 : 이음부 청소(레이탄스 제거) - 발판 및 작업대 설치 - 철근 조립 - 거푸집 설치 - 간극수압계 설치 - 콘크리트 타설 - 콘크리트 양생 - 거푸집제거
- ⑦ 6단 : 이음부 청소(레이탄스 제거) - 발판 및 작업대 설치 - 거푸집 설치 - 철근 조립 - 초음파계, 경사계 설치 - 석션펌프 배관설치 - 콘크리트 타설 - 콘크리트 양생 - 거푸집제거
- ⑧ 7단 : 이음부 청소(레이탄스 제거) - 발판 및 작업대 설치 - 거푸집 설치 - 철근 조립 - 콘크리트 타설 - 콘크리트 양생 - 거푸집제거

(3) 철근 보관, 가공, 조립

- ① 보관 : 철근 야적장에 침목을 놓고 그 위에 철근을 보관하며 천막으로 덮어서 철근이 비에 젖지 않도록 한다.
- ② 가공 : 공장이나 철근 야적장에서 철근을 가공 후 소운반하여 철근을 조립한다.
- ③ 조립 : 철근을 조립하기 전에 깨끗이 청소하여 콘크리트와 철근의 부착력을 높인다. 철근과 철근의 간격은 철근을 정확히 가공하여 일정간격을 유지하고 철근과 벽체의 간격은 콘크리트로 spacer를 제작하여 사용하며 철근은 매 교차점마다 0.9mm 이상의 연한 철선으로 견고하게 잡아매서 조립한다.

(4) 거푸집 제작, 조립, 해체

- ① 석선과일의 거푸집은 석선과일 벽체와 헌치부는 원형 강거푸집을 사용하며, 슬래브 저판은 합판거푸집, 슬래브 벽체는 유로폼을 사용한다.
- ② 거푸집을 조립하기 전에 깨끗이 청소하고 박리제를 칠하여 거푸집 해체시 콘크리

트면에 손상이 가지 않도록 한다.

(5) 비계 및 발판설치

비계 자재는 강관비계를 사용하며 석션파일 내부와 외부에 모두 설치하며 외부는 15m×16m의 넓이로 설치한다.

(6) 콘크리트 생산, 운반, 타설, 다짐, 양생

① 콘크리트 생산

콘크리트는 기 승인된 레미콘 생산공장에서 중량 배합한 콘크리트를 사용한다.

② 콘크리트 운반

콘크리트 운반은 레미콘 공장에서 타설장소까지 Mixer Truck으로 운반하며 콘크리트 타설 도중 중단되는 일이 없도록 유무선 통신망을 설치한다

③ 콘크리트 타설

○ 콘크리트는 Pump Car(80m<sup>3</sup>/Hr)로 타설한다.

○ 콘크리트 타설시 슬래브와 전단벽은 2회에 걸쳐서 타설한다.

④ 콘크리트 다짐

콘크리트 다짐은 내부 진동기(전기식)를 사용하여 한 장소에서 10회 정도 다지고 50cm간격으로 먼저 타설한 콘크리트와 10cm 정도 겹치게 짚러 넣어 다진다.

⑤ 콘크리트 양생

콘크리트 노출면은 마대로 덮고 1일 2회 정도 물을 뿌려서 습윤양생을 한다.

마. 석션파일 제작

(1) Shoe

(가) Shoe

석션파일의 선단부 Shoe의 표면은 강재로 보강되어 있으며, 강재와 콘크리트와의 결속력을 증대시키기 위하여 철근으로 보강되어 있다.

그림 3.2.4 Shoe 상세도



그림 3.2.5 Shoe 설치





그림 3.2.6 Shoe 철근보강

(나) 워터제트 노즐

워터제트용 노즐은 강제 Shoe에  $\phi 10.0\text{mm}$ 로 천공을 한 후  $\phi 2.0\text{mm}$  노즐을 설치하였으며, 흑관  $\phi 34\text{mm}$ 로 상부슬래브까지 연결되어 있다.

그림 3.2.7 워터제트 배치도

(2) 벽 체

(가) 벽체거푸집(강재)

석선과일기초 벽체는 강재 거푸집을 사용하여 제작되었으며, 강재거푸집은 외측 거푸집 (D=11.0m)과 내측 거푸집(D=9.9m)으로 높이 3m에 8조각으로 구성되어 있다.



그림 3.2.8 강재거푸집(벽체)



그림 3.2.9 벽체거푸집 설치

(나) 들음고리

석션파일 들음고리는 강재로 고정틀을 제작하여 상부 device가 체결되는 부분의 간격을 유지할 수 있도록 하였으며, 하부 매입부(5.7m)는 철근에 묶어서 고정하였다.



그림 3.2.10 들음고리 고정틀



그림 3.2.11 들음고리 설치

(다) 간극수압계

석션파일 내외부의 수압차를 계측하는 간극수압계는 벽체 상부에 설치하였으며, 간극수압계를 주철근과 띠철근 사이에 설치하고 철근에 단단히 고정하였다.



그림 3.2.12 간극수압계



그림 3.2.13 간극수압계 설치

(3) 현치

(가) 현치거푸집(강재)

석선과일기초 현치는 강재 거푸집을 사용하여 제작되었으며, 강재거푸집은 외부 거푸집 (D=11.0m)과 내부 거푸집(D=9.9m)으로 높이 2m에 8조각으로 구성되어 있다.



그림 3.2.14 강재거푸집(현치)



그림 3.2.15 현치거푸집 설치

(4) 슬래브

(가) 슬래브거푸집

상부 슬래브의 저판 거푸집은 합판거푸집을 사용하였으며, 측면은 유로폼을 사용하였다.



그림 3.2.16 슬래브 저판 거푸집 설치



그림 3.2.17 슬래브 측면 유로폼 설치

(나) 초음파계, 경사계

상부 슬래브에는 초음파계와 경사계를 설치하였으며 초음파계는 슬래브의 밑면에 경사계는 윗면에 각각 설치하였으며 경사계는 탈착이 가능하도록 하였다.



그림 3.2.18 초음파계



그림 3.2.19 초음파계 설치



그림 3.2.20 경사계

(다) 석션펌프 배관

석션파일 상부 슬래브에는 석션펌프를 위한 6개의 강제 배관이 설치되며, 4개의 석션펌프용 배관과 1개의 공기배출구, 그리고 1개의 메니폴더로 구성되어 있다.

그림 3.2.21 석션펌프 Flange 배치도





그림 3.2.22 석션펌프 Flange 설치

(라) 작업용 개구부

석션파일 내부의 동바리 및 거푸집을 제거하기 위하여 상부에 2.0m×2.0m의 임시 개구부를 설치하였다. 석션파일 내부의 동바리는 상부 슬래브가 자중을 지지할 수 있을 만큼 충분히 양생을 시킨 후 임시 개구부를 통해서 제거하며 임시 개구부는 다음과 같이 설치한다.

그림 3.2.23 작업용 개구부 배치도

- 개구부는 2.0m×2.0m의 넓이로 철근이음장(용접)을 고려하여 실제 폭은 2.3m×2.3m로 설치한다.
- 철근의 용접은 철근의 지름의 4배(4D) 이상을 하도록 규정되어 있으며 본 공사에서는 5D의 길이인 15.0cm(H29mm 철근) 이상 견고하게 용접한다.
- 개구부 저면 거푸집은 별도의 거푸집 지지대에 의해서 지지하며 거푸집 지지대는 충분한 양생을 거친 후 거푸집과 함께 제거한다.



그림 3.2.24 작업용개구부 설치

(5) 전단벽

(가) 거푸집

전단키의 거푸집은 유로폼을 사용한다.



그림 3.2.25 전단벽 유로폼 설치

## 2. 석션파일 운반거치

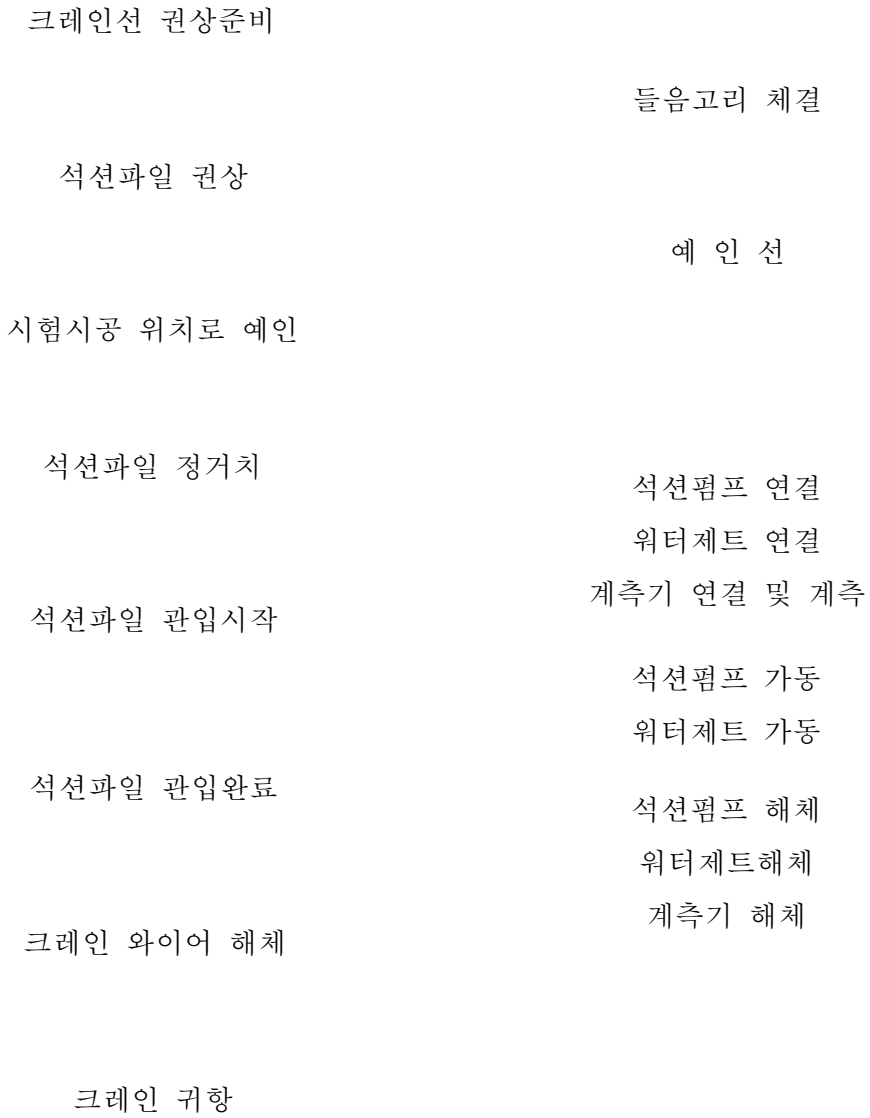
### 가. 개 요

석션파일 기초 케이슨 방파제의 하부공인 석션파일기초 8함 중 1차년도 공사분인 4함 (Type-A)을 시험시공 위치로 운반하여 설치한다.

그림 3.3.1 석션파일 설치 위치도

구 분	X 좌표	Y 좌표	비 고
1	234,752.34	217,825.83	
2	234,767.23	217,849.43	
3	234,775.94	217,810.94	
4	234,790.83	217,834.54	

나. 공중흐름도



다. 인원 및 장비투입 현황

(1) 해상선단

구 분	선 명	목 적	인 원	비 고
크레인 선단	삼호2000호	크레인선	8	1,800Ton 급 크레인선
	삼호T-1호	예인선	3	133 hp
	제3대진호	예인선	7	181 hp
	해강3호	예인선	5	350 hp
기 타 선 단	대양2002호	바지선	1	2000P급
	신신101호	잠수보조	9	19Ton
	성진호	통신선	1	10Ton



그림 3.3.1 크레인선

(2) 석션펌프

구 분	단 위	수 량	비 고
펌 프	대	4	3m <sup>3</sup> /min/EA, 40Hp, 380V
발 전 기	대	1	500kw
콘트롤러	대	4	인버터 50Hp, RPM 제어



그림 3.3.2 석션펌프 콘트롤러

(3) 워터제트

구 분	단 위	수 량	비 고
High Z Pump Blaster	대	10	압력
Water 공급 펌프	대	2	
발 전 기	대	6	전압
분 배 기	대	10	



그림 3.3.3 워터제트 펌프



라. 석션파일 운반거치

(1) 크레인 인양준비 및 인양

(가) 크레인선 접안

크레인선이 제작장에 접안하면 육상앵커로는 선수 좌우방향을 고정하고 해상앵커로는 예인선(2대)로 선미 좌우방향에서 고정하여 크레인선의 동요를 방지한다



그림 3.3.4 크레인선 접안

(나) 석션펌프 장비체결

석션파일이 시공위치에 가거치되면 Setting Barge에 위치한 석션펌프를 소형 크레인을 이용하여 인양하여 석션파일 슬래브의 Flange에 연결한다.



그림 3.3.5 석션펌프



그림 3.3.6 석션펌프 체결

(다) 들음고리 체결 및 권상

크레인선의 고정이 완료되면 즉시 들음고리를 크레인 와이어에 체결한 후, 석션파일을 조심스럽게 권상한다.



그림 3.3.7 들음고리 체결



그림 3.3.8 석션파일 권상

(2) 크레인선 예인

(가) 크레인선 시공위치로 예인

석선파일 권상이 완료되면 크레인선의 육상앵커를 해체하고, 예인선이 크레인선을 시공 위치까지 예인한다(석선파일의 일부를 물속에 잠기게 하여 자중을 감소시킨다).



그림 3.3.9 석선파일 예인-1



그림 3.3.10 석선파일 예인-2

(나) 크레인선 및 세팅바지 고정

크레인선이 시공위치에 도착하면 크레인선(선수 2EA, 선미 2EA)과 세팅바지(선수 2EA, 선미 2EA)의 앵커를 투묘하여 고정시킨다.



그림 3.3.11 크레인선 및 세팅바지 고정-1



그림 3.3.12 크레인선 및 세팅바지 고정-2

(3) 석션파일 가거치 및 작업준비

(가) 석션파일 거치

크레인선의 고정이 완료되면 측량을 통하여 석션파일을 시공위치에 정밀하게 위치하여 거치한다(석션파일의 상부 슬래브까지 물속에 잠수시킨다).



그림 3.3.13 석션파일 가거치-1



그림 3.3.14 석션파일 가거치-2

(나) 워터제트 및 계측기 체결

Setting Barge에 위치한 워터제트 펌프를 석션파일 슬래브에 있는 워터제트용 파이프에 고압호스로 연결하고, 계측용 케이블을 계측 시스템에 연결한 후 계측을 시작한다.



그림 3.3.15 워터제트 고압호스 연결



그림 3.3.16 계측기 계측

(4) 석션파일 관입

(가) 석션펌프 가동

석션파일의 관입 준비가 완료되면 석션펌프를 가동하여 석션압에 의해서 석션파일의 관입을 시작한다.



그림 4.3.17 석션펌프 콘트롤러



그림 4.3.18 석션펌프 가동



(나) 석션파일 하강

석션파일이 지지층에 도착할 때까지 천천히 석션파일을 하강한다(약 1cm/sec).



그림 3.3.19 석션파일 하강-1



그림 3.3.20 석션파일 하강-2

(다) 워터제트 가동

석션파일이 모래자갈층에 도달하여 석션압에 의한 관입력이 감소하면 소정의 깊이까지 워터제트를 작동하여 관입을 유도한다.



그림 3.3.21 워터제트 가동-1



그림 3.3.22 워터제트 가동-2

(라) 관입완료

석선파일이 소정의 위치까지 관입이 완료되면 워터제트, 석선펌프, 계측기의 작동을 중지한다.

(5) 들음고리, 석선펌프, 워터제트, 계측기 해체

(가) 들음고리 해체

석선파일의 관입이 완료되면 잠수부에 의해서 들음고리 Device의 핀(16EA)을 제거하여 크레인 와이어를 해체한다.

(나) 석선펌프, 워터제트, 계측기 해체

들음고리가 해체되면 잠수부에 의해서 석선파일 상부의 석선펌프 4EA, 워터제트 48EA를 해체하고 계측기 중 간극수압계 케이블과 초음파계 케이블은 절단하며 경사계 2EA는 회수한다.

(6) 크레인 귀항

(가) Setting Barge 정리

회수된 석선펌프, 워터제트, 계측기를 Setting Barge에서 정리하여 다음 작업에 차질이 없도록 한다.

(나) 크레인 귀항

크레인선을 고정하는 선수 앵커 2EA와 선미 앵커 2EA를 인양한 후 예인선에 의해서 작업장까지 예인한다.

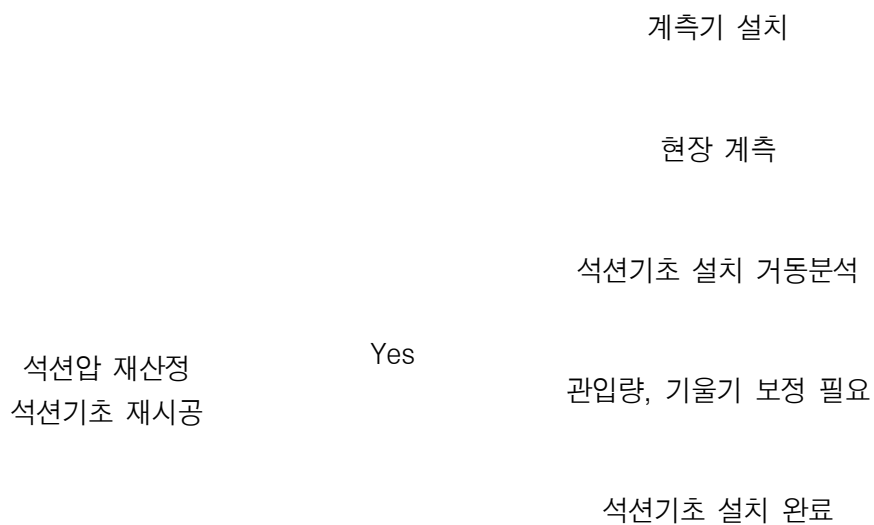
## 제 3 절 계측 및 Data 분석

### 1. 개요

석선파일 기초 관입시 석선파일 내외부의 수압차, 관입깊이, 석선파일의 경사를 연속적으로 측정하여 석선파일이 해당 위치에 정확히 설치될 수 있도록 한다.

그림 3.3.1 계측기 설치위치도

### 2. 공종흐름도



### 3. 계측장비 및 계측 System

#### 가. 계측 장비

##### (1) 간극수압계

형 식 SP-5K			
측정범위(FS)	5kgf/cm <sup>2</sup>	허용온도 범위	-0~80℃
출력정도(RO)	0.9mV/V이상	허용 인가전압	10V
직 선 성	1.0% RO 이내	입출력 저항	350Ω
Hysteresis	1.0% RO 이내	온도특성	0.05%/℃

##### (2) 초음파계

형 식 F-3000			
송수파기주파수	200kHz	입출력저항	200ohms
빔 각도(deg@-3db)	7°	전파발신응답	167db
소 자 크 기	65mm	전파수신응답	-183db
Capacitance	3,700pf	송수신출력	1kw RMS

##### (3) 경사계

형 식 NT-5A			
측정범위(FS)	±10	정격출력	2 mV/V
Hysteresis	0.5% RO이내	최대 인가전압	10V
직 선 성	0.5% RO이내	입출력 저항	350Ω
사용온도 범위	-20~80℃	허용 내수압	10kgf/cm <sup>2</sup>

##### (4) 초음파 Logger

형 식 F-3000			
주 파 수	200khz	정 확 도	20m±0.5m
측심범위	5~1,000m	사용환경	-15~55°, 95%RH
송수신출력	1kw RMS	식별범위	20m내 6.5mm/m

##### (5) 데이터로고

형 식 TDS-303			
측정속도	0.06sec	분 해 능	0.1×10 <sup>-6</sup> strain
내장채널	30ch	데이터 송수신	GP-IB, RS-232C

#### 4. 계측 및 Data 분석

석선파일의 올바른 설치를 위한 계측항목은 석선압, 관입량 및 기울기이며, 관입량은 주계측은 초음파 센서로 측정하였으며 보조계측으로 간극수압계를 이용하였다.

- (1) 초음파센서를 이용한 관입량의 측정은 석선파일 상부에 위치하는 조금구의 영향으로 부정확하여 3함부터는 사용하지 않았다.
- (2) 관입속도는 1cm/sec를 유지하도록 하였다.
- (3) 관입완료 후 잠수부에 의해 최종 설치위치를 확인하였다.
- (4) 계측결과

표 3.3.1 계측결과 요약

구 분	1함	2함	3함	4함	비고
설치일자	11월 29일	12월 1일	12월8일	12월 9일	
관입시간	2h:38m	2h:10m	2h:1m	1h:50m	
최대 Driving Force	1,630ton	1,550ton	1,610ton	1,520ton	
최종기울기	A	-0.247	-0.172	1.578	1.487
	B	-3.935	-0.143	0.642	1.004

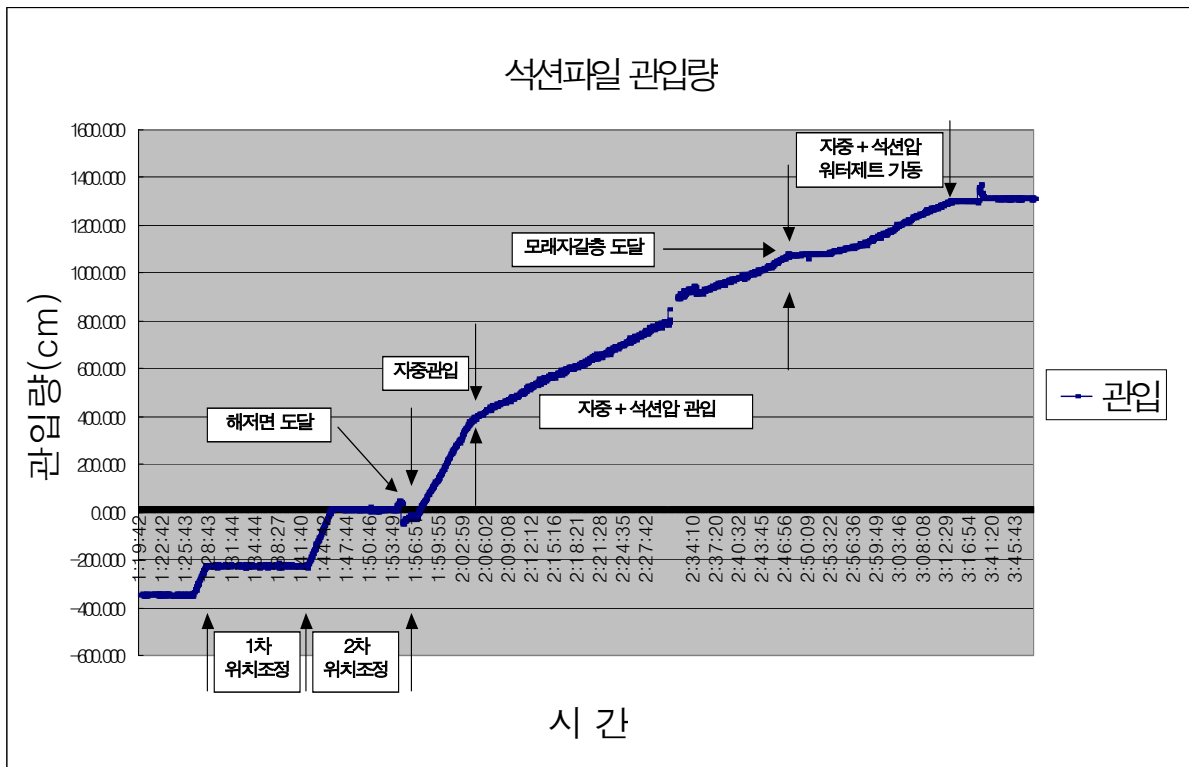


그림 3.3.2 시간에 따른 석선파일의 관입(3함)

## 5. 석선파일 설치현황

석선파일의 설치가 완료된 후 잠수부가 설치상태를 확인하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

구 분	수평거리(m)		높이차(m)	
	1함-2함	3.29	0.95	0.0
1함-3함	1.81	2.22	-0.5	0.2
3함-4함	0.83	0.43	-0.1	-0.3
2함-4함	2.96	1.32	0.7	0.3

그림 3.3.3 석선파일 거치결과



그림 3.3.4 석션파일 거치 후 모습-1



그림 3.3.5 석션파일 거치 후 모습-1



6. 시공결과 및 대책

가. 개 요

- (1) 설치된 석션파일 기초간의 최대 수평이격거리는 3.29m 이며, 최대 높이차는 0.7m 이다. 또한 석션파일기초 1함의 최대 기울기(높이차)는 약 4도(1.1m) 이다.
- (2) 석션파일기초 슬래브의 하부와 해저면의 이격거리는 약 1.4m~3.0m이다.

나. 문제점 및 대책

표 3.3.3 시공 결과 발생한 문제점 및 대책

구 분	발 생 원 인	문 제 점	대 책
석션파일간 수평이격	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 해상크레인에 의한 정거치 부정확</li> <li>• 개체의 기울어짐</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기초사석의 유출</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 이격구간에 T형 블록 거치 후 기초사석 포설</li> </ul>
석션파일간 높이차	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지지층의 불균일</li> <li>• 모래층의 층후가 얇음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기초사석의 포설두께가 2.5m 이므로 최대 0.7m의 높이차는 문제없음</li> </ul>	-
석션파일 개체의 기울어짐	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지지층의 불균일</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 편심하중 작용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 현재의 기울어진 정도로 편심영향 검토</li> <li>• 향후 최대기울기 2도이내로 제어</li> </ul>
해저면과의 이격	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 길이방향으로 연속적인 지반조사 불가능</li> <li>• 해저면의 불균일</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 석션파일기초는 선단지지 개념이므로 일부가 노출되어도 지지력에는 문제없음</li> </ul>	-



## 제 4 장 석션파일기초 방파제의 안정성 평가

### 제 1 절 석션파일기초의 횡방향 지지력 평가

#### 1. 개요

현재까지 석션말뚝에 대한 국내외의 연구경향은 대단히 미약한 수준이며 국외에서도 소량의 연구결과만이 발표되었다. Cho 등(2002)은 강재와 콘크리트로 만든 대형 실물 석션말뚝 2개를 제작하여 현장실험을 실시하였는데, 강관으로 된 대형말뚝의 두께는 1.4cm이고, 콘크리트로 제작된 말뚝은 두께가 15cm이다. 현장실험은 한국 거제도 옥포만에서 수행하였으며, 강관말뚝은 완전관입이 되었으나 콘크리트말뚝의 경우는 완전관입이 불가능하였다. 그 이유는 콘크리트 말뚝의 두께에 문제가 있으며, 말뚝선단에 슈(shoe)를 설치하면 콘크리트 말뚝도 완전 관입하는데 큰 무리는 없을 것으로 판단된다고 하였다.

Bang 등(2000)은 사질토와 점성토 지반에 대하여 모형실험을 실시하였으며, 상재하중, 초기관입량, 말뚝직경 등을 변화시켰다. 석션말뚝의 관입에 따른 지반의 교란은 원 지반 강도와 교란지반 강도의 관계로 나타내었으며, 사질토 지반에서는  $\alpha$ , 점성토 지반에서는  $\beta$ 로 나타내었다. 석션말뚝의 압력이 감소함에 따라 말뚝은 지반 속으로 관입되며, 그에 따라  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 감소하는 경향을 나타내었다. 말뚝의 관입에 따른 지반의 강도변화는 사질토에서 지반의 밀도, 점성토에서 예민비에 의존하며 앞으로 이것들에 관한 많은 연구가 필요하다고 보고 하였다.

Bang 등(2000)은 석션말뚝을 지반에 관입시키는데 필요한 압력을 상한치와 하한치로 정의하였다. 하한 압력(lower bound pressure)은 지반의 파괴없이 말뚝이 지반속으로 관입이 시작하기 시작하는 시점의 압력이며, 상한 압력은 지반의 파괴현상발생으로 인하여 더 이상의 관입이 불가능한 시점의 압력이라 정의하였다. 또한, 적절한 압력을 가하여 길이 2.3m 길이의 강제말뚝을 관입시킬 수 있었다고 하였다.

Bang 등(2001)은 2종류의 모형말뚝에 대하여 원심 모형 실험(centrifuge model test)을 실시한 바 있으며, 사질토 지반에서 말뚝의 형상비(말뚝길이와 직경의 비, L/D)가 1.17인 경우는 석션말뚝의 관입에 따른 지반의 교란이 작게 발생하며, 형상비가 2.85인 경우에는 관입 완료 후의 지반강도가 원 지반 강도에 비하여 50%이하로 감소하였다고 보고하였다.

Bang & Cho (2002)는 석션말뚝에 수평하중이 작용하는 경우에 대하여 연구를 수행하였으며, 점성토 지반은 말뚝길이의 0.55L 지점, 사질토 지반에서는 0.8L 지점에 수평하중이 재하될 경우에 최대수평저항력이 나타난다고 보고하였다. 또한, 말뚝의 형상비에 대한 연구결과로 말뚝의 길이가 증가할수록 수평하중에 대한 저항력이 증가한다고 하였다.

이번 연구에서는 횡방향 수평하중을 받는 단말뚝에 대한 실내모형실험을 수행하여 말뚝의 근입깊이 및 지반조건에 따른 말뚝의 수평지지력과 변위양상에 대한 연구를 수행하였다. 모형실험에 사용된 말뚝은 아크릴로 제작하였으며 직경은 100mm이다. 그리고 길이는 각각 말뚝 직경의 1:0.8, 1:1, 1:1.2, 1:1.4, 1:1.6, 1:2인 80mm, 100mm, 120mm, 140mm, 160mm, 200mm의 6종류로 제작하였다.

모형실험에 사용되는 지반은 모래만으로 조성된 지반과 이층지반으로, 이층지반은 상부에 카울리나이트를 사용한 점토층, 하부에 균질한 입도의 주문진 표준사를 사용한 모래층으로 조성하였으며 모래층은 보통지반과 조밀한 지반의 2가지 지반조건으로 하였다.

모형지반의 조성이 완료되면 모형말뚝을 지반의 중심부에 위치시켜 말뚝을 소정의 위치까지 관입시켰으며, 말뚝길이 및 지반조건에 따라 관입깊이를 달리하였다.

## 2. 이론적 배경

### 가. 말뚝 기초

#### (1) 말뚝기초의 정의 및 필요성

기초란 상부구조물의 하중을 지반에 전달하는 하부구조를 뜻한다. 외부하중에 대해서 기초는 항상 기초 주변의 지반 및 암반과 상호작용을 하면서 거동하므로 기초의 거동을 분석할 때에는 하부구조물 및 인접한 지반 또는 암반의 특성을 함께 다루어야 한다.

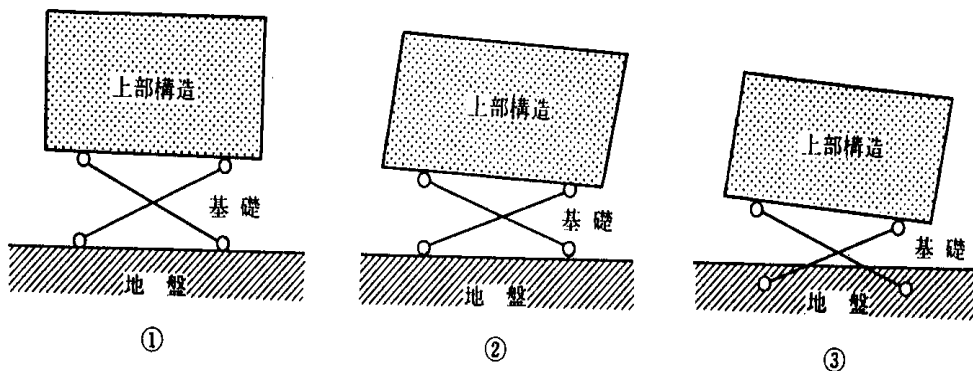


그림 4.1.1 기초의 개념

다음과 같은 말뚝기초가 필요로 하는 몇 가지 상황은 주변 환경에 의해서 결정된다.

첫째, 상부 지층이 압축성이 크거나 아주 연약하여 상부 구조물에서 전달되는 하중을 지지할 수 없을 때, 하중을 암반으로 전달시키기 위해서 사용. 구조물에 가해진 말뚝의 저항은 주로 흙과 말뚝의 접촉면에서 발생하는 마찰 저항으로 얻어진다.

둘째, 횡하중이 작용할 때 말뚝기초는 상부 구조물에 의해 전달된 연직하중도 지지하면서 휨에 대해서도 저항한다.

셋째, 흙의 팽창 수축이 심한 영역을 지난 심도까지 말뚝기초를 시공함으로써 피해를 막을 수 있다.

넷째, 송전탑, 해상 플랫폼이나 지하수위 아래 구조물들의 기초는 상향 인발력을 받는다.

다섯째, 교량의 교대나 교각은 지표면에서의 흙의 침식에 의해 발생하는 얇은 기초의 지지력 손실 가능성을 피하기 위해 일반적으로 말뚝기초 위에 설치.

## (2) 말뚝의 종류와 구조적 특성

건설현장에서 사용되는 말뚝의 형식은 가해지는 하중, 지층조건, 지하수위에 따라 결정되며, 말뚝기초를 분류하는 방법은 말뚝의 특성에 따라 시공법에 의한 것, 재질에 의한 것, 지지력에 의한 것, 형상에 의한 것, 이용목적에 의한 것 등으로 고려될 수 있다.

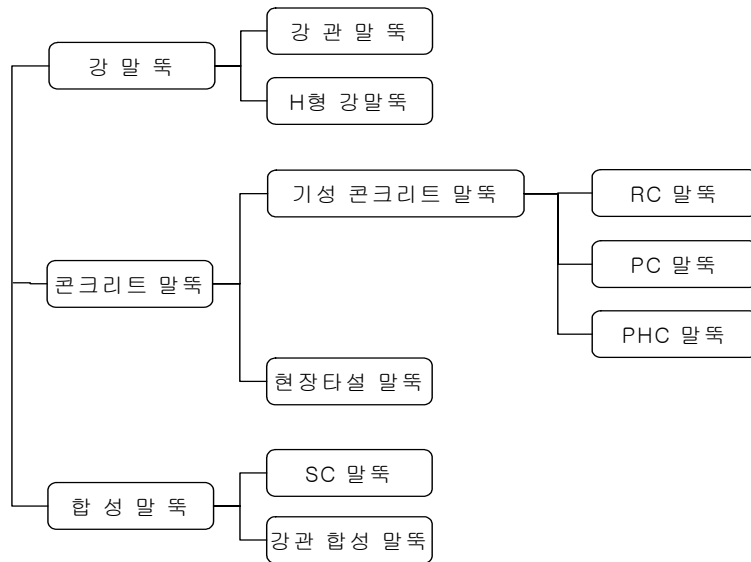


그림 4.1.2 말뚝의 재질에 의한 분류

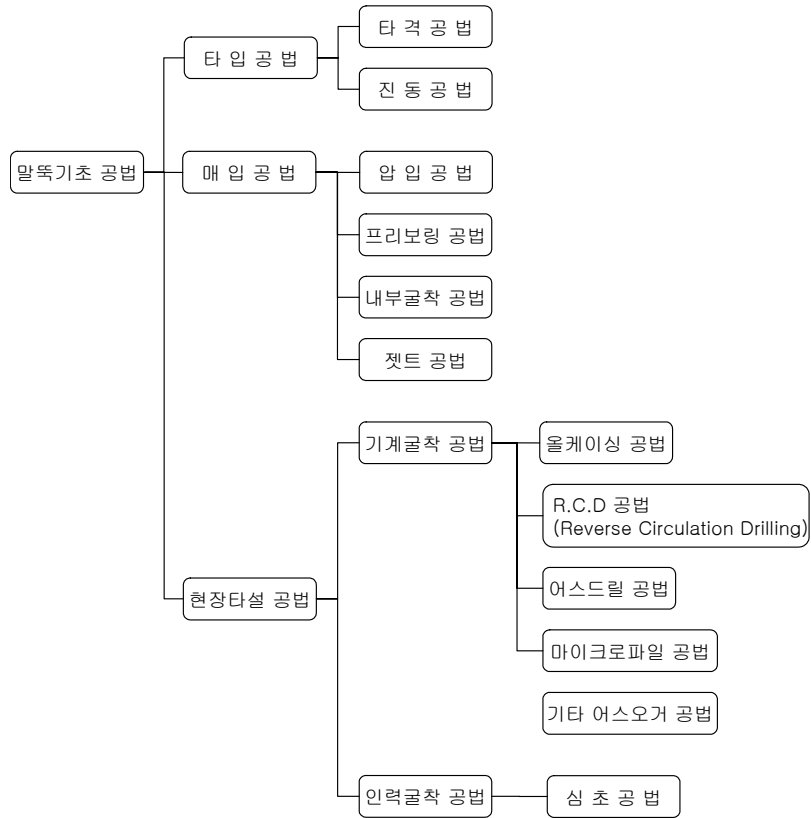


그림 4.1.3 시공법에 의한 말뚝의 분류

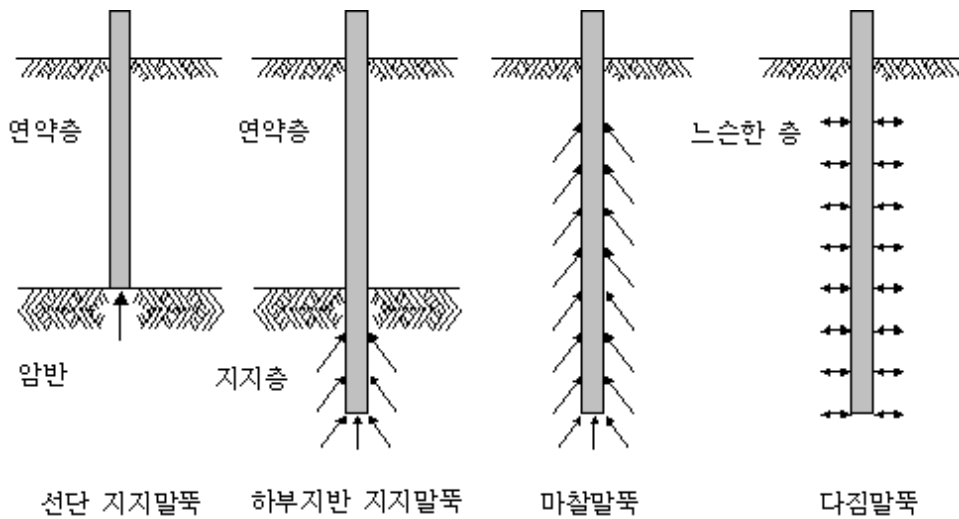


그림 4.1.4 하중전달 메커니즘에 의한 분류

### (3) 말뚝기초의 시공법별 특징

말뚝 기초를 시공방법에 의해 타입말뚝, 매입말뚝, 현장 타설 말뚝의 세 가지로 분류할 수 있으며, 각각의 장·단점과 시공관리의 난이도 및 문제점에 대해 정리하면 아래와 같다.

표 4.1.1 시공법별 특징

	장 점	단 점	시 공 관 리 난이도	비 고
타입말뚝	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시공 용이</li> <li>· 개개 지지력 check</li> <li>· 동일직경의 말뚝 중 가장 지지력 크다</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 진동, 소음문제</li> <li>· 대구경 말뚝 시공 곤란 →시공장비의 발달로 문제 해결 가능</li> </ul>	비교적 용이	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 경사진 지반→말뚝파손, 구부러짐</li> <li>· 리바운드가 큰(실트, 점토) 지반의 선단폐쇄말뚝 →관입 곤란</li> <li>· 전석층, 호박돌층 → 말뚝파손 →지지층으로 사용 가능</li> </ul>
매입말뚝	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 진동, 소음 비교적 작다</li> <li>· 작은 직경부터 큰 직경까지 시공 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시공방법, 시공자에 의한 차이 크다</li> <li>· slurry 처리 곤란</li> <li>· 지지력 작음</li> <li>· 지반조건에 따라 시공방법 변경 필요</li> </ul>	어려움	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 피압수의 모래층 →보일링현상</li> <li>· 전석층, 호박돌층 → 굴착 지연, 시공 불가능한 경우</li> </ul>
현장 타설 말뚝	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 진동, 소음이 비교적 작다</li> <li>· 대구경 말뚝 시공 가능</li> <li>· 말뚝길이 변경 용이</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시공자에 의한 차이 크다</li> <li>· 지지력 작음</li> <li>· 소구경 말뚝의 시공에 문제가 있는 공법이 많이 있다</li> <li>· slurry처리 곤란</li> <li>· 말뚝자체의 결함 가능성</li> <li>· 지반조건에 따라 시공방법 변경 필요</li> </ul>	어려움	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 피압수를 가진 모래층 → 보일링 현상</li> <li>· 수위가 낮은 모래 자갈층 → slurry 유출로 공벽 붕괴 가능성</li> <li>· 경사진 지반 → 구부러짐</li> <li>· 지하수 흐름이 있는 지반 → 시멘트분 유출</li> </ul>

### (4) 기초공법 선정 요인

아래 그림 4.1.5는 기초계획단계에서 제시된 조건에 맞는 몇 가지 공법에 대한 예비선정에 이용되며 구체적인 공법선정은 개략설계를 통한 공기와 공비 산출 후에 종합적인 평가를 거쳐서 이루어진다.

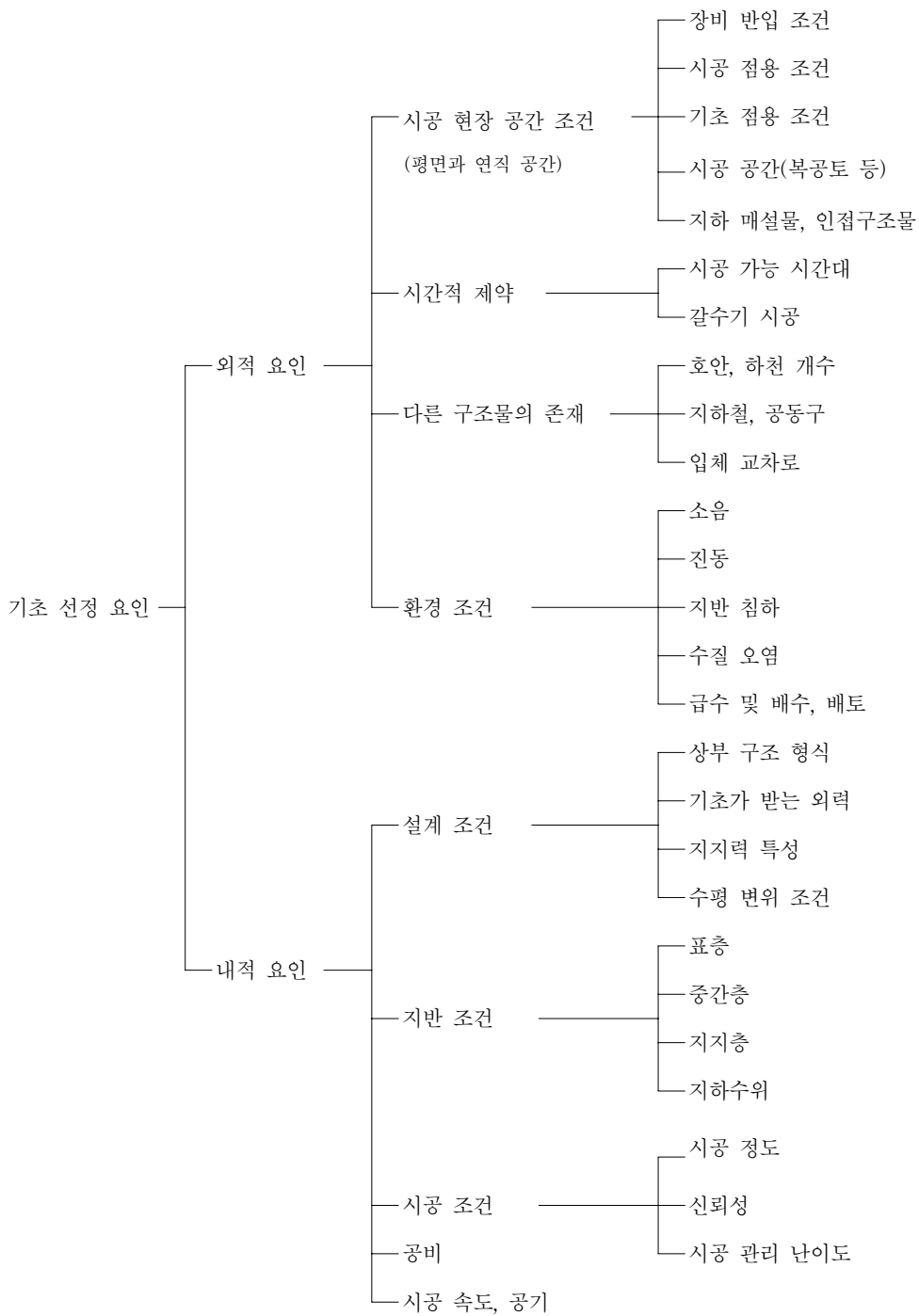


그림 4.1.5 기초공법 선정 요인

(5) 기초의 수평하중 지지거동

수평력을 받는 말뚝은 말뚝과 지반 중 어느 것이 움직이는 주체인가에 따라 주동말뚝 및 수동말뚝의 2종류로 대별할 수 있다, 주동말뚝은 말뚝이 움직이는 주체가 되어 먼저 움직이게 되고 말뚝의 변위가 주변지반의 변형을 유발하게 된다.



한편, 수동말뚝은 우선 어떤 원인에 의하여 말뚝주변지반이 먼저 변형을 일으키면 말뚝에 측방토압이 작용하고 나아가 부동지반면 하의 지반으로 이 측방토압이 전달된다. 이 경우에는 말뚝주변지반이 움직이는 주체가 되어 말뚝이 지반변형의 영향을 받게 된다.

(6) Broms 방법에 의한 짧은 말뚝 거동

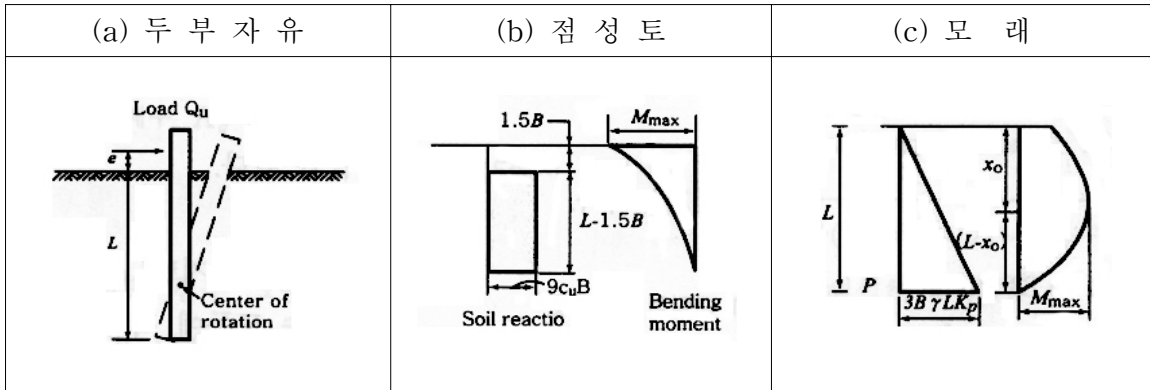


그림 4.1.6 짧은 말뚝의 변형모드와 지반반력 및 모멘트 분포도

그림 4.1.6 (a), (c)에 사질토 지반 내 짧은 말뚝 ( $L / T \leq 2$ )의 파괴형태, 수평지반반력 분포 및 휨모멘트 분포가 나타나 있다. 짧은 말뚝의 회전중심은 말뚝선단 부근으로 가정할 수 있으므로 선단 부근의 높은 압력을 집중하중으로 대체하고 말뚝선단에서 모멘트를 취하여 수평저항력을 구하면 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다. (그림 4.1.6 (c))

$$Q_u = \frac{0.5 \gamma' L^3 B K_p}{(e + L)}$$

이 관계식을 무차원량  $L / B$ 의 향으로 나타내면 그림 4.1.7과 같이 나타낼 수 있다. 그림 4.1.6 (c)에서 보듯이 최대 모멘트( $M_{max}$ )는 지표면 아래  $x_0$  깊이에서 발생하고 이 위치에서 전단력은 0이므로 다음의 관계식이 성립한다.

$$Q_u = 1.5 \gamma' B x_0^2 K_p$$

이 식에서 다음 관계식을 구할 수 있고,

$$x_0 = 0.82 \left( \frac{Q_u}{\gamma' B K_p} \right)^{0.5}$$

따라서 최대 모멘트는 다음과 같이 계산된다.

$$M_{max} = Q_u (e + 0.67 x_0)$$

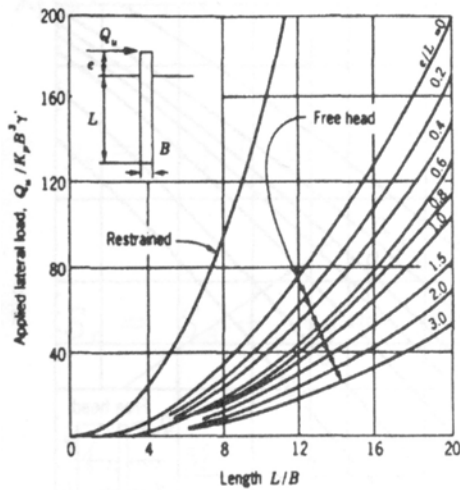


그림 4.1.7 사질토 지반의 극한 수평저항력 (짧은 말뚝)

그림 4.1.6에 점성토 지반 내 짧은 말뚝의 파괴형태, 수평 지반 반력 분포 및 휨 모멘트 분포가 나타나 있다. 수평 저항력의 크기가 일차적으로 말뚝의 항복모멘트에 의해 결정되는 긴 말뚝의 경우와 달리 짧은 말뚝의 수평저항력은 단순히 지반 반력의 크기에 의해 결정된다. 최대모멘트 점 (지표면 아래  $1.5BX_0$  깊이)에서 모멘트를 취하면,

$$M_{\max} = Q_u(e + 1.5B + 0.5x_0)$$

이 되고, 말뚝의  $L - X_0$  길이가 최대 휨모멘트에 저항하게 되므로

$$M_{\max} = 2.25 B c_u (L - x_0)^2$$

이 된다. 여기서  $x_0 = (Q_u / 9 c_u B)$  이다. 그림 4.8.에서  $L / B$ 와  $e / B$ 로부터  $(Q_u / c_u B^2)$ 가 구해지고 따라서  $Q_u$ 가 결정된다.

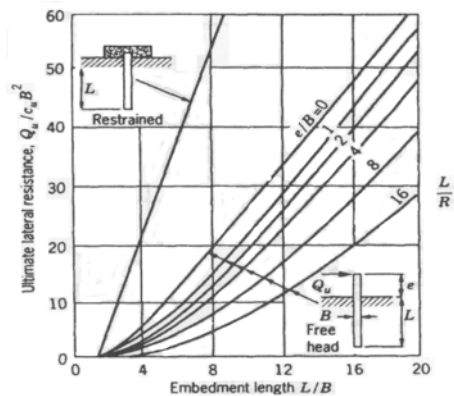


그림 4.1.8 점성토 지반의 극한 수평저항력 (짧은 말뚝)

## 나. 석션말뚝의 개요

석션말뚝은 말뚝 내부의 물이나 공기와 같은 유체를 외부로 배출시킴으로써 발생된 말뚝 내부와 외부의 압력차를 이용하여 설치되는 말뚝을 말하며, 석션말뚝이란 명칭도 이러한 독특한 설치방법에서 기인한 것이다. 석션말뚝은 길이에 비하여 직경이 상대적으로 큰 구조형식이며, 보통 길이와 직경비가 2:1을 넘지 않는다. 형상은 석션을 가하기 용이하도록 상단부는 밀폐되고 하단부가 열린 컵을 얹어놓은 모양을 하고 있는데, 석션말뚝의 설치기구(Mechanism)는 다음과 같다.

석션말뚝을 해저면에 안착시키면 말뚝자중에 의하여 말뚝 하단부가 해저면 아래의 일정 깊이까지 관입하게 되는데, 이 상태에서 말뚝두부에 설치된 석션장치를 이용해서 말뚝 내부의 물을 외부로 배수시킨다. 석션말뚝의 구조가 말뚝 하단부를 제외한 부분들은 물의 흐름이 완전히 차단되어 있으므로 배수된 물은 말뚝 하단부의 해저층을 통해서만 유입될 수 있다. 그렇지만 해저 지반의 투수성이 낮아 배수된 물이 유입되어 회복되는 것을 방해받게 되어 파일 내부의 압력이 저하된다. 그 결과 말뚝 내부와 외부의 압력차가 발생하게 되고, 이로 인하여 말뚝은 관입되게 된다. 말뚝 관입을 방해하는 저항력은 말뚝 하단부의 선단지지력과 주면마찰력에 의하여 결정되며, 관입력이 저항력보다 크면 말뚝은 관입하게 된다.

석션말뚝의 관입 유도력은 말뚝 내부와 외부의 압력차와 말뚝 단면적 즉 직경의 제곱에 비례하지만 저항력은 직경에 비례하므로 말뚝의 직경이 클수록 작은 압력차로도 설치가 가능하다. 석션말뚝의 또 하나의 중요한 기술적 특징은 설치의 반대 개념 즉 물을 파일 내부로 주입하여 파일 내부에 양압력을 가하여 쉽게 인발할 수 있다는 것이다. 따라서 기 시공된 석션말뚝을 인발하여 재시공할 수 있기 때문에 한번 만들어진 파일 구조물을 반복해서 사용할 수 있다. 석션말뚝은 주로 강재나 콘크리트로 제작되지만, 구조적 안정성만 확보된다면, 복합소재, 목재 등 다양한 재료로도 제작할 수 있다.

## 다. 석션말뚝의 설치와 인발

석션말뚝은 말뚝 내부의 물이 배출되어 말뚝 내부의 압력이 저하되면 관입되고 물이 파일 내부로 주입되어 말뚝의 내부에 양압력을 발생되면 인발된다.(그림 4.1.9 참조) 석션말뚝의 설치 시 중요 설계 인자로는 말뚝 내부와 외부의 압력차, 물의 유입 및 말뚝 관입으로 인한 지반의 교란, 보일링 현상, 플러깅 현상 등이 있다. 안전한 말뚝 관입을 위한 압력

차는 다음의 두 가지 요소에 의하여 지배된다. 첫째로 압력차가 너무 작아서 관입력이 지반의 저항력을 극복하지 못하면 말뚝의 관입이 불가능하게 되며, 말뚝이 지반의 저항력을 극복하여 관입하는데 필요한 최소한의 압력차를 하한 압력(Lower Bound Pressure)이라고 한다. 둘째로 압력차가 너무 크면, 모래층의 경우에는 말뚝 외부로부터 내부로 유입되는 급속한 물의 흐름으로 인하여 발생된 상향의 침투압(Uplift Seepage Force)에 의하여 보일링 현상이 발생하고, 점토층의 경우는 말뚝 내부 전체의 점토 기둥(Column)이 말뚝 하단 부에서 절단(Soil Tension Failure)되어 밀려 올라오는 플러깅(Plugging)현상이 발생한다.

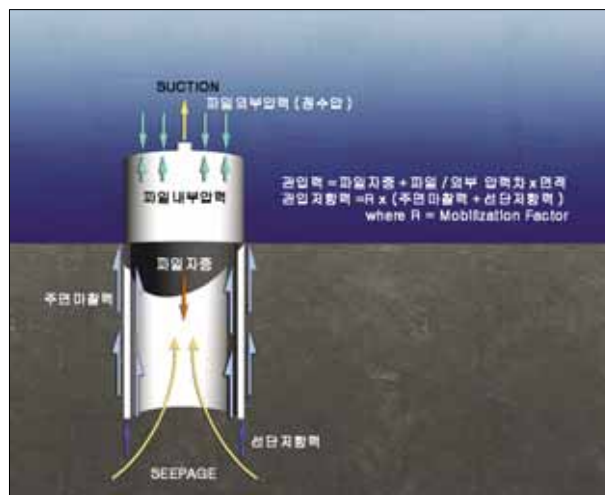


그림 4.1.9 석션말뚝 설치 원리

어떤 경우든 말뚝 내부는 토사로 가득 차 더 이상의 말뚝 관입이 불가능해지고 말뚝 설치에 실패하게 된다. 이에 해당하는 압력차를 상한압력(Upper Bound Pressure)라고 부른다. 따라서 설계 압력차는 상한압력과 하한압력의 사이의 어떤 값이 된다. 설치 도중 관입 깊이가 변화에 따라서 가할 수 있는 설계압력이 연속적으로 변화하므로 Closed-Loop System으로 말뚝 내부와 외부의 압력차를 자동으로 조절하는 것이 필요하다.

#### 라. 석션말뚝의 지지력

석션말뚝은 다양한 용도로 구조물에 적용될 수 있다. 해양 구조물의 기초로 적용될 경우에는 주로 압축력과 횡방향력을 받고 앵커로 적용될 경우에는 주로 인발력에 대하여 저항한다.

##### (1) 압축 지지력

지반으로 완전히 관입하게 되면, 말뚝 내부가 토사로 완전히 꽉 차게 되는데 만약 석션 말뚝 내부의 토사가 상대적으로 연약하거나 석션말뚝 상부와 토사가 밀착되지 못한 경우

에는 압축 지지력은 말뚝 내부와 외부의 주면 마찰력과 말뚝 유효단면의 선단 지지력에 의하여 지배된다. 반면에 내부를 그라우팅 등으로 고착시킨 경우, 수직 하중을 받는 석션 말뚝의 지지력은 말뚝 외부 주면 마찰력과 말뚝 전체 단면에 대한 선단지지력에 의하여 결정된다. 그림 4.1.10은 석션말뚝의 압축지지력을 도식화한 것이다.



그림 4.1.10 석션말뚝의 압축 지지력

(2) 인발 지지력

말뚝 인발에 대한 파괴 양상은 크게 2가지 형태로 나눌 수 있다. 말뚝이 상대적으로 직경에 비하여 길이가 짧고 하중이 천천히 가해질 경우에는 말뚝 몸체 자체만 빠져 올라오게 되는데 이 경우의 인발지지력은 말뚝 자중과 말뚝 내부 및 외부의 마찰력에 의하여 결정된다. 반면에 말뚝의 길이가 상대적으로 직경에 비하여 크고 하중이 빠르게 가해질 경우에는 말뚝 내부의 토사가 말뚝과 함께 일체로 떨어져 올라오게 되고 이 경우의 인발지지력은 말뚝 외부 마찰각과 말뚝 하단면의 토사의 인장저항력 그리고 말뚝자중 및 말뚝 내부의 토사의 무게에 의하여 지배된다.(그림 4.1.11 참조)

해상에서 석션말뚝이 앵커로 사용되어 파랑하중에 의한 인발 하중을 받을 경우는 후자의 파괴 양상을 나타낸다. 일반적으로 앵커의 효율(Efficiency)은 말뚝 무게와 저항력과의 관계로 다음과 같이 표현된다.

$$E = \text{앵커 저항력} / \text{앵커 자중} \quad (1)$$

일반적으로 적용되는 콘크리트 블록 앵커는 효율이 1.11.2로 가장 비효율적이고 미해군에서 개발한 판 앵커(Plate Anchor)는 효율이 지반 조건에 따라서 차이는 있지만 최대 46 정도이다. 석션말뚝이 앵커로 적용될 경우는 효율이 3 이상으로 콘크리트 블록 앵커보다 효율적이다.

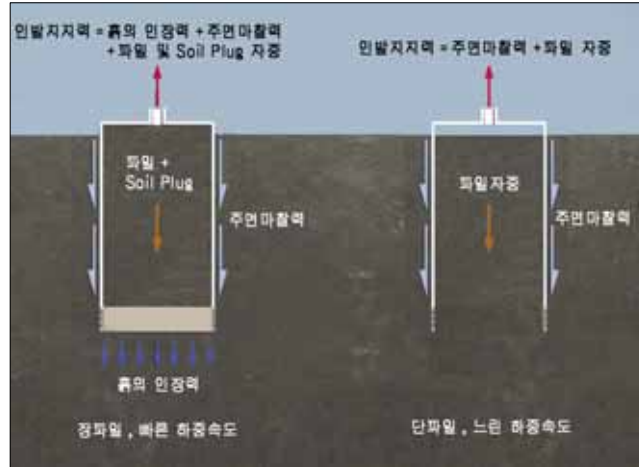


그림 4.1.11 석션말뚝의 인발 지지력

### (3) 횡방향 지지력

석션말뚝이 구조물의 기초로 적용될 경우는 횡방향 하중이 석션말뚝의 상단에서 작용하지만, 앵커를 적용될 경우에는 계류 라인을 말뚝의 어느 위치에도 부착할 수 있다. 따라서 석션말뚝의 횡방향 지지력은 모든 하중점에 대하여 산정할 수 있도록 개발하여야 한다. 주로 석션말뚝은 원형 단면을 취하고 있으므로 보다 정확한 말뚝의 횡방향 지지력 산정을 위해서 3차원 파괴 썸기(Failure Wedge)에 기초한 해석법을 적용하고, 말뚝의 회전 및 전이에 따라서 파일 주위의 토사가 탄성(Elastic)상태에서 소성상태로 연속적으로 변화하므로 점진적 파괴(Progressive Failure) 개념으로 해석한다(그림 4.1.12 참조).

최대 지지력에 대응하는 하중점은 말뚝의 중간깊이보다 조금 하단부에 위치한다. 모래질 지반에 대해서는 깊이에 따른 강도증가 특성 때문에 보다 하단부에 최대 하중 작용점이 있다. 따라서 석션말뚝이 수평하중을 받는 경우에는 하중점을 최대 지지력 점에 위치시키는 것이 효과적이다.

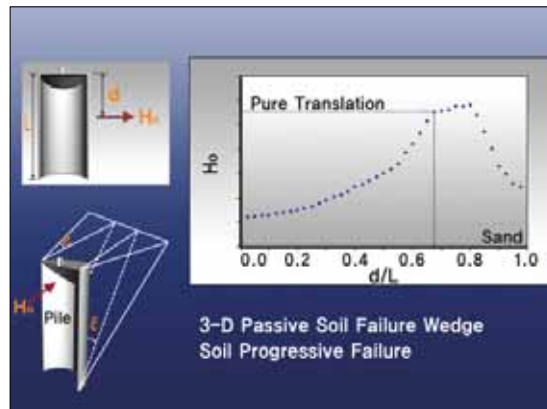


그림 4.1.12 석션말뚝의 횡방향 지지력

#### (4) 석션말뚝 지지력의 일반해

석션말뚝의 지지력에 대한 일반해를 이론적으로 구하는 것은 현실적으로 불가능할지도 모르고, 가능하다고 하더라도 너무 많은 시간과 노력이 요구될 것이다. 따라서 임의의 하중점 및 방향에 대한 지지력은 앞에서 설명한 수직 및 수평 방향의 극한지지력으로부터 연장된 파괴 포락선(Failure Envelop)을 이용하여 시험적으로 구할 수 있다. 그림 4.1.13에서 파괴 포락선은 유한요소해석으로 구해진 것이며, 현재 검정 시험이 진행 중이다.

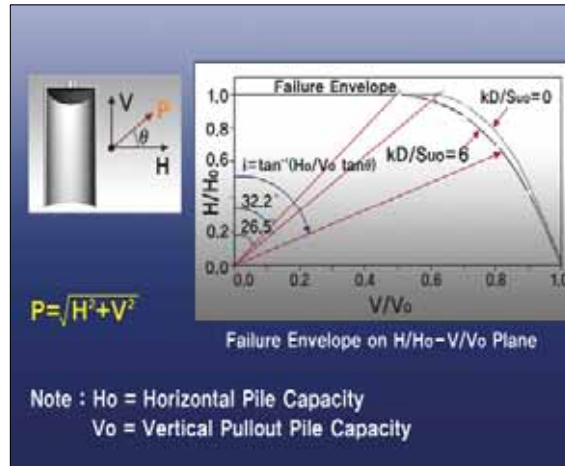


그림 4.1.13 석션말뚝 지지력의 일반해

#### 마. 석션 앵커 공법

석션말뚝의 가장 두드러지는 특징 중의 하나가 인발이 용이하여 동일한 말뚝을 반복해서 사용할 수 있다는 것이다. 이것을 응용하여 해저층에 굴착없이 강력한 앵커를 지중에 설치할 수 있다. 그림 4.1.14는 석션 앵커 (Suction Anchor)의 설치 모식도이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 석션말뚝 하단부에 앵커를 부착하여 석션말뚝의 설치와 동일한 방법으로 설치한 후 석션말뚝만 인발하면, 지중에 앵커의 설치가 완료된다. 이렇게 지중에 설치된 앵커는 지층의 수동토압으로 인하여 큰 인발 저항력을 가진다. 앞에서 설명한 앵커의 효율이 지반 조건과 설치 심도에 따라서 10~30정도에 이른다.

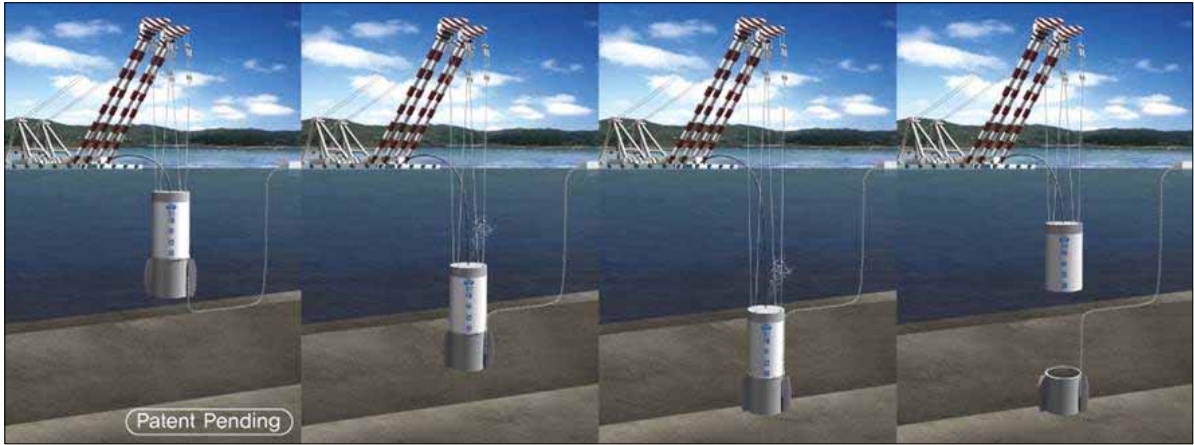


그림 4.2.14 석션앵커의 설치 모식도

미해군 시방서에 의하면, 모든 해상 앵커는 설치 후 설계하중을 가하여 그 지지력을 검증하는 것을 원칙으로 한다. 즉 해상 앵커는 설치와 동시에 그 지지력의 검증이 완료되므로 안전율 2를 적용한다. 또한 시간의 경과와 함께 인발 지지력 시험으로 교란된 지반이 안정되므로 실제 지지력은 시간의 경과와 함께 증가하여 보다 안전하게 된다.



### 3. 실험 장치 및 방법

#### 가. 모형시료

본 연구에서는 모형지반을 순수 모래층과 점토와 모래로 이루어진 이층지반의 두가지 종류로 조성하여 모형실험을 수행하였다. 모형지반에 사용된 모래층은 주문진 표준사를 이용하였고 점토층은 카올리나이트(고령토)를 사용하여 조성하였다. 다음의 그림 4.1.15는 모래층과 점토층으로 이루어진 이층지반의 모습을 보여준다.



그림 4.1.15 모형실험에 사용된 이층지반의 모습

강원도 주문진에서 생산되는 표준사는 국내 유일의 KS제품 (K.S.L 5100)으로 시멘트의 압축 및 인장강도 시험에 널리 사용되고 있다. 본 실험에 사용되는 표준사는 압축강도 시험용으로 물리적 특성은 다음의 표 4.1.2에 나타나 있다.

표 4.1.2 주문진 표준사의 물리적 특성

구 분	입 도 범 위	단위중량 (t/m <sup>3</sup> )
압축강도 시험용	3050 MESH	1.53 1.6
인장강도 시험용	2030 MESH	

카올리나이트 (Kaolinite)는 일반적으로 고령토로 알려져 있다. 카올리나이트의 화학성분은  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ 이며 결정(結晶)은 미세한 육각형 또는 주상(柱狀) · 판상(板狀)이지만, 육안으로는 작은 인상(鱗狀)이나 토상(土狀)으로 보인다. 주로 장석(長石)을 비롯하여 산화알루미늄을 많이 함유하는 광물이 분해되어 생성된다. 고령토의 주성분을 이루며, 종종 원광물(原鑛物)의 의결정(擬結晶)이 되어 있다. 또 탄층(炭層)에 수반하여, 그 하반(下盤)에 층을 이루어 산출되기도 한다. 본 실험에서 사용된 카올리나이트는 No.40으로 체가름하였

으며 물리적 특성은 다음의 표 4.1.3와 같다.

표 4.1.3 카올리나이트의 물리적 특성

균기	비중	색상	액성한계(LL)	소성한계(PL)
22.5	2.6	담황색	35%	28.5%

#### 나. 모형토조

본 연구에서는 실험의 원활한 진행을 위하여 지반조성과 하중재하를 위한 2개의 토조를 사용하여 모형실험을 실시하였다. 지반조성용으로 사용되는 토조는 시료무게로 인한 횡방향 파손을 방지하기 위해 두께 6mm의 강재를 사용하여 800mm×600mm의 원기둥 형태로 그림 4.1.16와 같이 제작하였다. 또한, 토조의 한쪽에 말뚝의 횡방향 하중을 가하기 위하여 와이어가 통과할 수 있도록 너비 2mm, 길이 300mm정도의 틈이 만들어져 있다.

하중재하용 토조는 그림 4.1.17과 같다. 수평하중은 모터(Moter)를 이용하여 재하하며, 로드셀(Load cell)을 이용하여 측정된다. 수평하중에 따른 모형말뚝의 변위는 5개의 LVDT를 이용하여 측정하였다. 모형 토조는 무한한 현장상태의 지반을 재현하기 위한 것이나 토조의 크기가 한정됨으로써 크기효과는 불가피하게 나타난다. 그러나 모형지반에 관입되는 관입체의 직경에 대한 토조의 크기비가 어떤 값 이상이 되면 경계효과는 무시될 수 있다고 알려져 있다. 참고문헌 공동확장이론(cavity expansion theory)에 의하면 조밀한 사질토 지반에 관입된 말뚝의 선단부에 발생하는 소성영역은 수평방향으로는 말뚝직경의 7.5배까지, 그리고 말뚝선단부로부터 수직방향으로는 말뚝반경의 8배까지 확장된다. 그리고 지반에 수직으로 말뚝이 관입될 때 변형율경로기법(strain path technique)을 이용하여 계산한 경우 말뚝선단부에 발생하는 소성영역의 크기는 수직방향으로는 말뚝선단부로부터 말뚝반경의 3배이고 수평방향으로는 반경의 5배였다.(Baligh, 1985) 이와 같이 말뚝선단부에 발생하는 소성영역의 크기는 말뚝의 지지력과 관계되므로 경계효과를 피하기 위해서는 토조의 크기가 최소한 소성영역의 크기보다는 커야 한다. 이를 고려하여 Vipulanandan 등(1989)은 조밀한 모래지반에서 경계효과를 감소시키기 위하여 토조직경이 말뚝직경의 7.5배 이상 되도록 하였으며, 말뚝의 최대 관입깊이는 토조 밑면으로부터 말뚝직경의 4배되는 지점까지로 제한하였다.



그림 4.1.16 지반조성용 토조



그림 4.1.17 하중재하용 토조

실험에서 사용된 토조와 모형말뚝의 수평방향 직경비는 6으로써 공동확장이론과 Vipulanandan의 제안치인 말뚝직경의 7.5배 보다 조금 작고 말뚝의 최종관입깊이는 80cm로 토조의 밑면과 말뚝선단부가 말뚝직경의 최소 약 7.5배 정도 떨어져 있다. 그러므로 말뚝의 관입시 발생하는 소성영역의 크기가 토조 내에 있다는 것을 고려하면 말뚝의 지지력에 대한 경계효과는 그다지 크지 않을 것으로 기대된다.

#### 다. 모형말뚝

말뚝두부에는 직경 8mm의 구멍을 3개 뚫어 두 곳은 변위측정기(LVDT)를 연결하도록 하였으며 한 곳은 파일을 관입할 때 물이 잘 빠져 나오도록 하였다. 그리고 옆면에 지름 2mm의 구멍을 뚫어 횡방향 하중을 가하기 위한 와이어를 연결할 수 있도록 하였다. 모형말뚝의 제원과 사진은 다음의 표 4.1.4과 그림 4.1.18에 나타나 있다.

표 4.1.4 모형말뚝의 제원

직 경	두 께	길 이	재 질
100mm	3mm	80mm, 100mm, 120mm, 140mm, 160mm, 200mm	아크릴

※ 말뚝의 탄성계수 :  $7,950 \text{ kg}/\text{m}^2$



그림 4.1.18 모형말뚝의 모습

본 연구에 사용된 모형말뚝의 개략도와 와이어의 연결위치는 말뚝 두부 위 5cm지점이며, 4종류의 말뚝 본체들은 각각 2cm의 관입차를 두었고 최저 0cm에서 최고 6cm까지 모래지반에 관입이 이루어지도록 하였다.

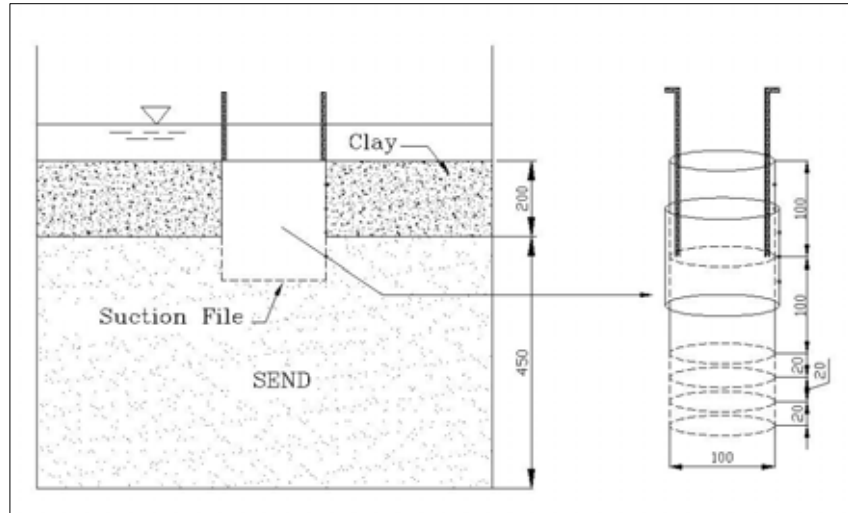


그림 4.1.19 모형토조 및 말뚝단면도

라. 측정기구

(1) 변위계 (LVDT)

스프링(Spring)타입의 변위계는 일본 동경측기 연구소(TML) CDP-50 제품으로 측정범위는 050mm이다. (그림 4.1.20)참조. 이 변위계는 수평하중을 받는 말뚝의 수평변위와 말뚝의 기울기를 간접 측정하기 위하여 두부와 와이어의 끝부분에 설치하였다.



그림 4.1.20 LVDT (Spring Type)

스프링이 없는 형식의 변위계는 측정범위가 0mm180mm이며 말뚝의 두부의 이동변위를 측정하기 위하여 말뚝 두부 양쪽에 설치되었다. (그림 4.1.21)참조.



그림 4.1.21 LVDT (Non-spring Type)

## (2) 하중계

로드셀은 0.003kg 단위로 최대하중 200kg까지 측정 가능한 CAS제품으로 속도조절이 가능한 감속기가 적용된 모터와 연결되어 있다. (그림 4.1.22 참조) 그리고 와이어(wire)는 지름 2mm, 길이 3m의 철선으로 횡방향 하중을 가할 수 있도록 말뚝과 로드셀을 연결시켜 준다.



그림 4.1.22 로드셀과 모터

### (3) 데이터 로거

실험에 사용된 데이터 로거(Data Logger)는 그림 4.1.23에서 보는 바와 같이 30개 채널 까지 설치 가능한 동경측기사 TDS-602 제품을 사용하였으며 로드셀과 LVDT에서 얻어지는 전기적인 신호를 디지털화하여 하중과 변위량을 자동으로 기록 저장한다.



그림 4.1.23 데이터 로거

### (4) 정적 콘 관입 시험기

본 연구에서 전단강도 시험은 시료의 특성과 토조내부시료를 대상으로하는 것을 고려하여 휴대용 정적 콘관입시험기(Portable Cone Penetrometer)를 사용하여 실시하였다. 휴대용 정적 콘관입시험기는 조작이 용이하고 응용범위가 넓은 단관식 원추 관입시험기로 점토와 피트층의 개략적인 점착력이나 연약층의 깊이를 신속히 파악하기에 용이하다.

다음 그림은 휴대용 정적 콘관입시험기의 사진과 개략적인 모식도이다. 여기에서 콘관

입시험은 모형실험 종료 후 깊이에 따른 전단강도의 변화를 알기 위하여 깊이별(5cm마다)로 세 번의 실험을 하였다. 시험을 통하여 측정된 값과 아래의 식을 이용하여 콘 저항치를 계산하였다.

$$q_c = \frac{\text{콘관입저항}}{\text{콘의저면적}(6.45 \text{ cm}^2)} [\text{kgf/ cm}^2]$$

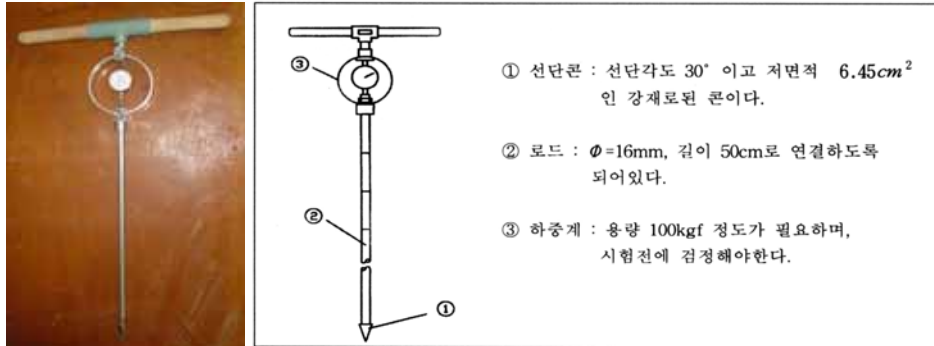


그림 4.1.24 정적 콘관입시험기

#### 마. 모형실험 순서

##### (1) 모형지반의 조성

모형토조 속에 모형지반의 조성방법은 하부에 깊이 45cm의 포화된 모래층을 조성하였으며 2가지로 상대밀도로 변화시켰다. 그리고 상부는 높이 10cm의 점토층(카올리나이트)을 조성하였으며, 물과 완전 희석하여 3일 동안 자중 압밀시켰다.

모래지반은 2가지 상대밀도로 만들기 위해 보통지반은 3층 1회 다짐을 실시하였고 조밀한 지반은 3층 2회 다짐을 하여 조성하였다. 이와 같이 조성된 모래지반의 깊이별 상대밀도는 조성된 지반에 정적 콘관입시험을 실시하여 매 실험마다 측정하였다. 다음의 그림 4.1.25은 조성이 완료된 지반의 모습을 보여 준다.



(a) 모래지반



(b) 이층지반

그림 4.1.25 조성이 완료된 모형 지반

## (2) 말뚝관입

지반조성 후 말뚝을 관입시켜 모형실험을 수행하였다. 말뚝 설치 순서는 먼저 경계효과를 고려하여 말뚝의 관입위치를 선정하고, 유압잭을 이용하여 실험위치까지 말뚝을 관입시켰다. 이때 말뚝의 흔들림이 없어야 지반의 교란을 막을 수 있기 때문에 주의하여야 한다. 그림 4.1.26은 말뚝을 압입하여 실험을 수행할 깊이까지 관입 완료한 상태를 나타낸 것이며, 말뚝에 수평하중을 가하기 위하여 말뚝측면에 와이어를 연결하였다.



(a) 모래지반

(b) 이층지반

그림 4.1.26 지반에 말뚝이 관입된 상태

## (3) 실험장치 연결

전체 지지력과 침하량은 로드셀과 5개의 LVDT를 데이터 로거 (TDS-602)에 연결하여 자동으로 측정하였다. 그림 4.1.27에서 보는 바와 같이 말뚝두부에 설치한 변위계는 스프링이 없는 형태로 두부변위를 측정하는데 사용되며, 말뚝의 측면에 설치한 변위계는 스프링 형식으로 말뚝의 움직임을 측정하는데 사용된다.



그림 4.1.27 말뚝과 LVDT가 연결된 모습



#### (4) 횡방향 하중재하

말뚝의 횡방향 지지력 실험은 말뚝을 설치할 때의 불안정한 지반이 안정된 상태가 되도록 일정한 시간이 경과한 후 실시하였으며, 하중 재하는 토조의 외부에 설치된 와이어와 도르래를 이용하여 감속기가 달린 모터를 이용하였다. 이때 하중의 재하 속도는 0.75 mm/min으로 일정하게 유지하였으며 변위계의 측정범위를 고려하여 와이어의 변위 즉, 말뚝의 총 변위가 40mm가 될 때까지 실험을 수행하였다. 그림 4.1.28은 말뚝의 횡방향 지지력 측정 실험을 위한 재하장치와 계측기 설치가 완료된 모습을 보여준다.



그림 4.1.28 횡방향 하중재하실험의 모습

## 4. 결과분석

### 가. 모형실험에 의한 수평거동 특성

말뚝의 지지력 산정은 완전히 관입이 되었다는 가정 하에 수행되었으며, 본 실험에서는 완전 관입이 가능하도록 유압잭을 이용하여 파일을 적정 위치까지 관입시켰다. 그리고 수압의 영향을 고려하여 지반의 수심을 10cm로 일정하게 유지하였다. 표 4.1.5와 그림 4.1.29는 실험시 측정된 각 지반의 깊이별 콘 저항값을 나타낸 것이다.

표 4.1.5 모형실험 조건

영향인자	L / D* (모래지반)	관입깊이 (이층지반)	지 반 조 건	지반상태
모형실험 조 건	0.8 1 1.2 1.4 1.6 2.0	2cm 6cm 10cm	① 모래지반 - 보 통 지 반 : $D_r=60\%$ - 조밀한 지반 : $D_r=78\%$  ② 이층지반 - 상부 : 점토 (자중압밀) - 하부 : 모래 (보통, 조밀)	포화토

\* L / D는 말뚝 직경(D)에 대한 말뚝의 전체길이(L)의 비

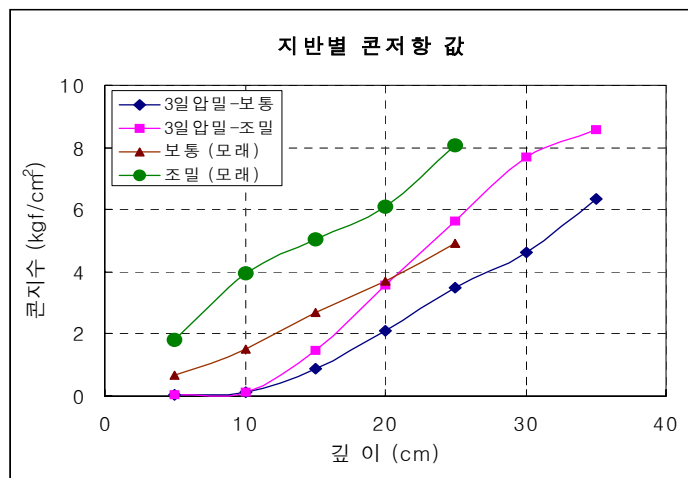


그림 4.1.29 지반별 콘 저항치

표 4.1.6 각 실험별 지반의 콘 저항 평균값

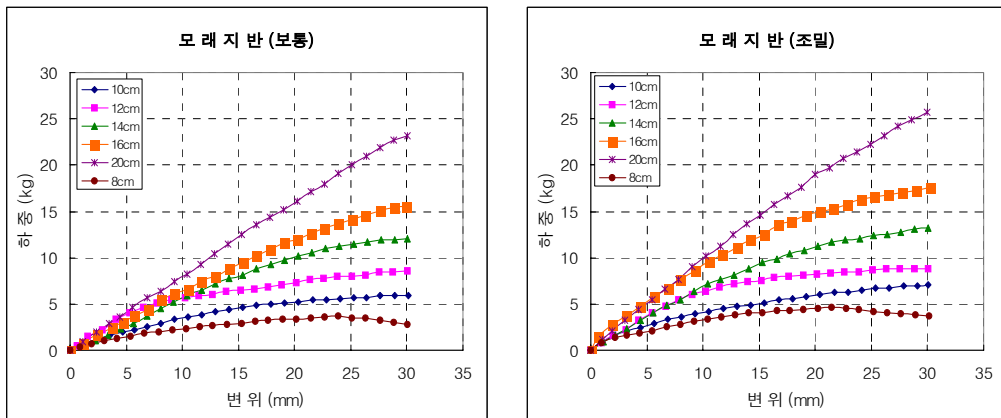
깊이 (cm)	지층	콘 저항치 (kgf/cm <sup>2</sup> )									지층	콘 저항치 (kgf/cm <sup>2</sup> )						
		이층지반 (점토10cm, 모래35cm)										모래지반 (모래45cm)						
		보통지반(3일압밀)			보통지반(7일압밀)			조밀한지반(3일)				보통지반			조밀한지반			
		10cm	16cm	20cm	10cm	16cm	20cm	0cm	6cm	10cm								
5	clay	0.03	0.03	0.05	0.06	0.06	0.08	0.04	0.04	0.03	send	0.71	0.62	0.71	1.88	1.97	1.60	
10		0.11	0.09	0.08	0.19	0.17	0.19	0.12	0.14	0.12		1.60	1.43	1.43	3.75	3.83	4.28	
15	send	0.81	0.98	0.79	0.88	1.07	0.81	1.60	1.33	1.60		2.85	2.59	2.67	5.27	5.08	4.73	
20		2.23	2.14	1.95	2.14	2.31	1.88	3.38	3.38	3.75		4.01	3.66	3.47	5.98	6.08	6.25	
25		3.47	3.66	3.21	3.38	3.83	3.30	5.44	5.80	5.80		4.99	4.99	4.82	7.86	8.12	8.22	
30		4.54	4.73	4.37	4.46	4.63	4.91	7.67	7.41	8.03		-	-	-	-	-	-	
35		6.15	6.42	6.51	6.15	6.34	6.60	8.48	8.29	8.93		-	-	-	-	-	-	

(1) 말뚝길이에 따른 하중-변위 관계

말뚝 - 지반의 상호작용 문제에서 일반적으로 말뚝의 수평거동은 말뚝의 단면과 관입길이 그리고 말뚝의 휨강성에 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있으며, 수평방향 하중을 지지하는 말뚝의 설계에 있어서 가장 고려해야 될 사항은 말뚝의 수평방향 극한 강도가 아니라 말뚝의 최대변위 및 최대 휨모멘트이다.

실험에서 모형말뚝은 직경에 대한 길이비가 일반 깊은 기초보다 현저히 짧기 때문에 말뚝의 재질에 의한 휨강성은 무시하고 실험을 하였다. 또한, 실제 말뚝의 수평거동은 관입길이가 증가함에 따라, 동일한 하중을 가하면 수평변위가 감소하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 사용된 두부가 막힌 말뚝에서는 어느 정도의 수평변위가 나타나는지에 대한 연구가 없기 때문에 이 모형실험의 의의가 있다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 직경 10cm의 원형단면을 가진 모형말뚝으로 관입길이를 다르게 하여 실험을 수행하였다.

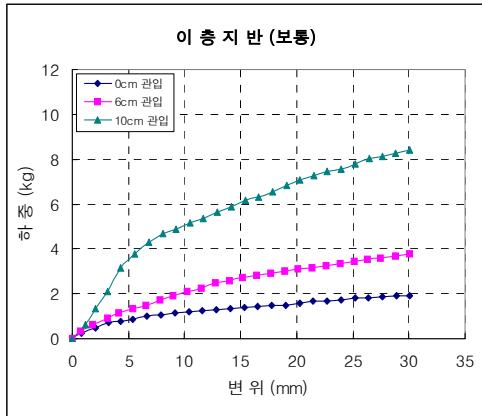
그림 4.1.30은 모래지반에서의 하중-변위 곡선을 나타낸 것으로 말뚝의 길이가 일정하게 변함에 따라 말뚝의 하중-변위 곡선도 비례적으로 일정하게 증가함을 알 수 있었다. 그림 4.1.31은 이층지반에서의 하중-변위곡선을 나타낸 것으로 모래지반에서의 경우보다 훨씬 작은 하중에도 변위가 증가함을 알 수 있는데, 이는 말뚝의 변위에 직접적으로 영향을 주는 말뚝 두부 쪽의 지반이 연약한 점토층으로 이루어져 있어 훨씬 작은 하중에도 말뚝이 빨리 변화하기 때문이다. 그림 4.1.31(c)는 점토의 자중압밀기간을 늘려 상부 쪽 지반의 강도를 증가시켜 실시한 실험으로 말뚝의 변위는 훨씬 감소하였다.



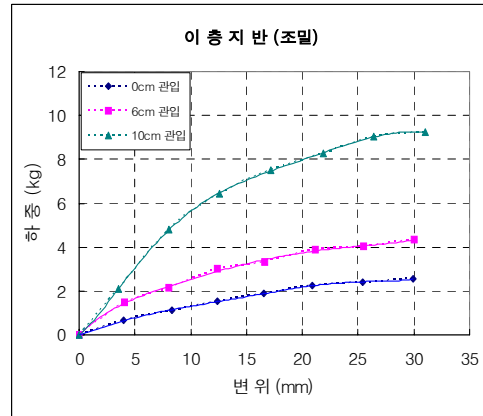
(a) 보통지반

(b) 조밀한 지반

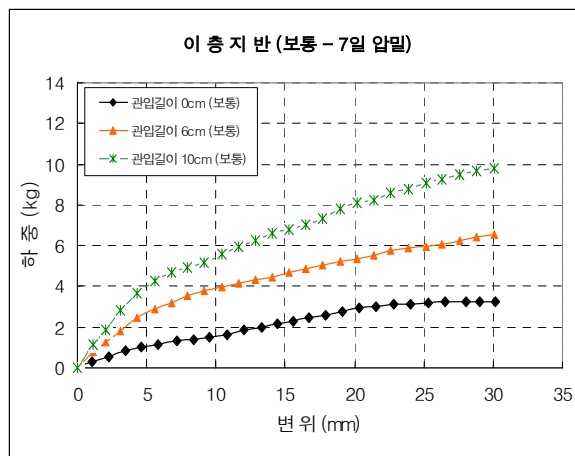
그림 4.1.30 모래지반에서의 하중-변위 곡선



(a) 보통지반 (3일 압밀)



(b) 조밀한 지반 (3일 압밀)

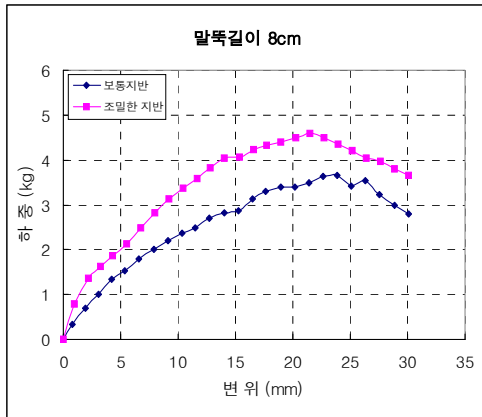


(c) 보통지반 (7일 압밀)

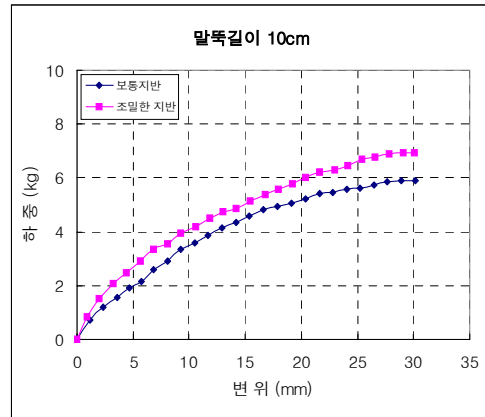
그림 4.1.31 이층지반에서의 하중-변위 곡선

(2) 지반조건에 따른 하중-변위 관계

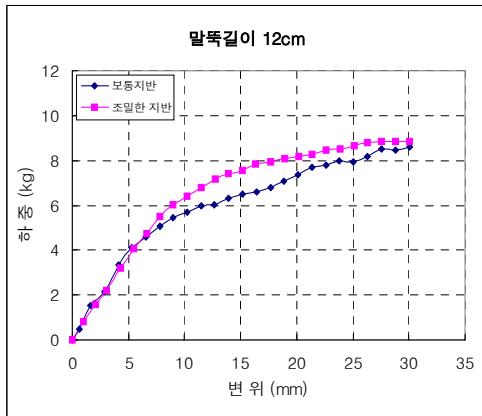
말뚝 수평거동은 말뚝과 지반의 상호작용의 문제로서 말뚝과 지반의 조건에 대하여 동시에 영향을 받고 있다. 본 절에서는 말뚝의 조건은 동일하고 지반의 조건이 다른 경우에 대하여 수평거동에 미치는 지반 조건의 영향을 알아보았다. 말뚝의 수평거동에 대한 지반 조건의 영향은 다양한 지반재료에 대하여 검토하지는 못하였으나, 모래층으로만 이루어진 단일지반과 모래층위에 3일간과 7일간 자연압밀 된 점토층을 가진 이층지반으로 조건을 달리하여 실험하였다. 모형실험에서 얻어진 하중 - 변위 관계곡선은 다음에 나타나는 그림들에 나타나 있으며, 상대밀도가 클수록 말뚝의 하중은 증가하고 변위는 감소함을 알 수 있다.



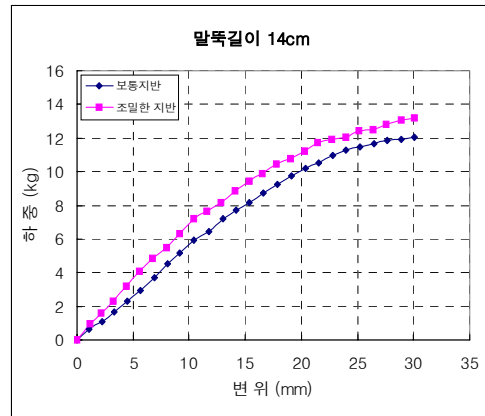
(a) 말뚝길이 8cm



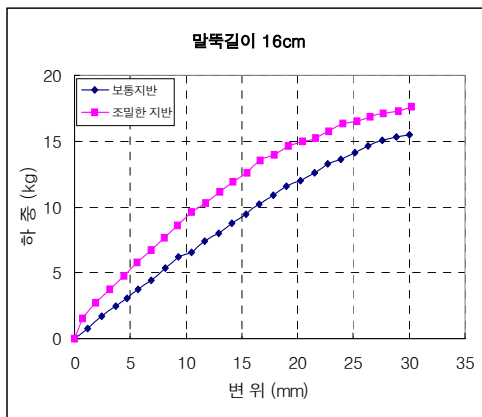
(b) 말뚝길이 10cm



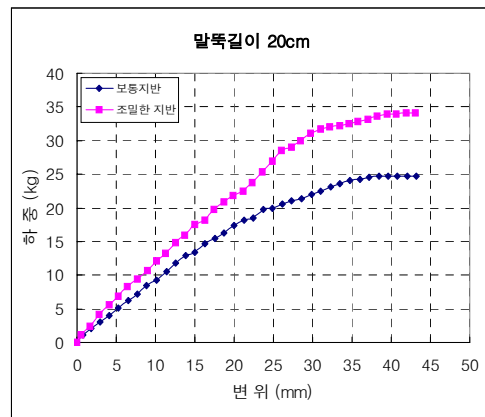
(c) 말뚝길이 12cm



(d) 말뚝길이 14cm

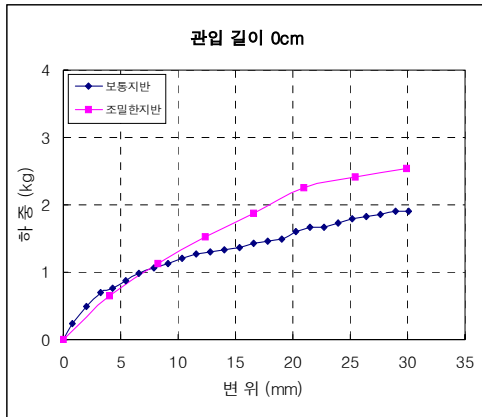


(e) 말뚝길이 16cm

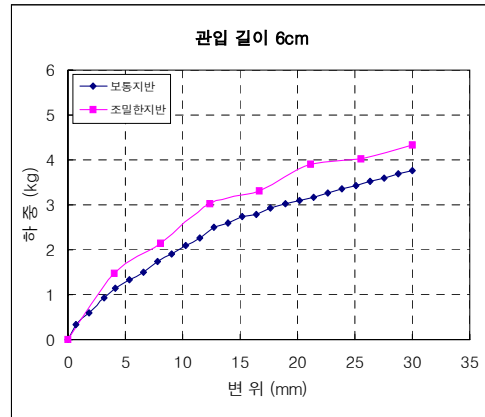


(f) 말뚝길이 20cm

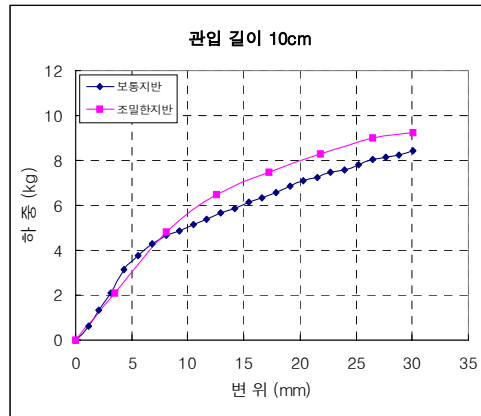
그림 4.1.32 모래지반에서의 하중-변위 곡선



(a) 관입길이 0cm



(b) 관입길이 6cm



(b) 관입길이 10cm

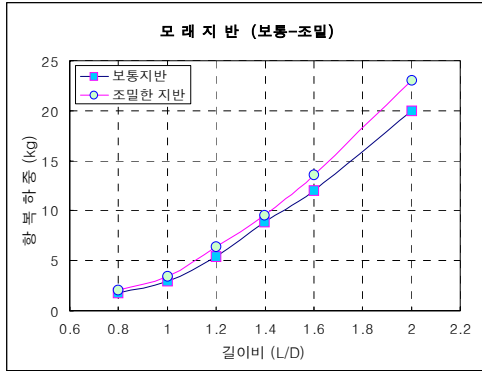
그림 4.1.33 이층지반에서의 하중-변위 곡선

각각의 조건에서 실시한 실험에서 산정된 항복하중을 표 4.4.3과 그림 4.4.5에 나타내었다. 횡방향 하중을 가한 말뚝의 파괴하중을 결정하는 방법은 상부 구조물의 허용변위량에 의존한다. 일반적으로 극한수평하중을 산정하기 위해 채택된 해석방법은 다음 2개의 규정 중 작은 값을 사용한다.

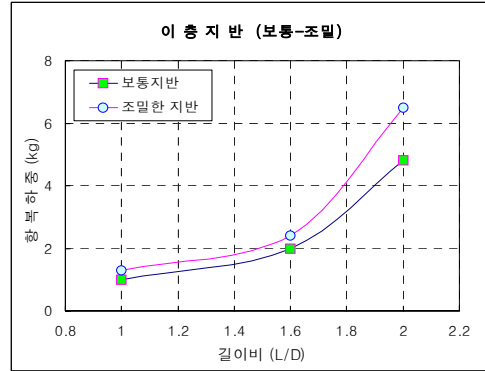
- ① 수평하중-변위량 곡선에서 두접선 (초기와 나중)의 교차점인 곳의 하중.
- ② 수평 변위량이 0.25 inch (6.25mm)가 되었을 때의 하중.

표 4.1.7 수평하중-변위량 곡선에서 두 접선의 교점인 곳의 하중

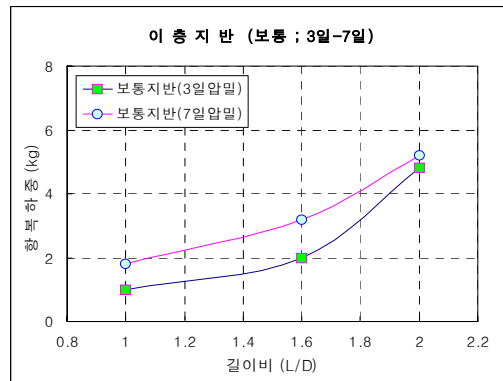
지반종류	지반조건	극한하중 (kg)					
		8cm	10cm	12cm	14cm	16cm	20cm
모래지반	보통지반	1.8	3	5.4	8.9	12	20
	조밀한 지반	2.1	3.4	6.4	9.5	13.6	23
이층지반	보통지반	3일 압밀	-	1	-	2	4.8
		7일 압밀	-	1.8	-	-	3.2
	조밀한 지반	-	4.8	-	-	2.4	6.5



(a) 모래지반



(b) 이층지반

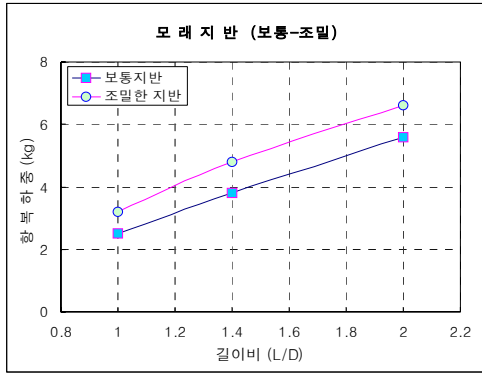


(c) 이층지반 (3일-7일)

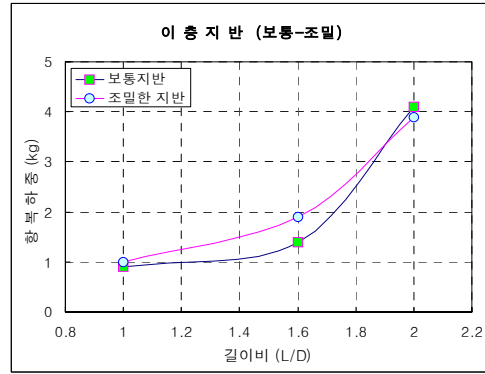
그림 4.1.34 말뚝 길이비에 따른 극한하중 (① 조건)

표 4.1.8 수평 변위량이 0.25inch (6.25mm)가 되었을 때의 하중

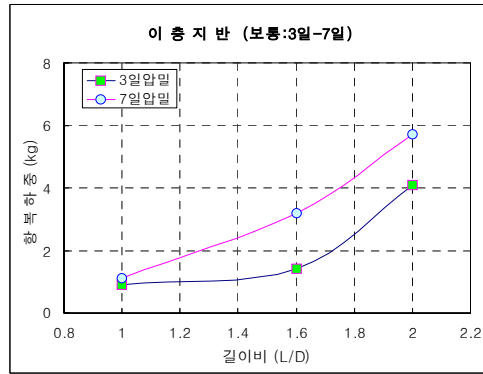
지반종류	지반조건	극한하중 (kg)				
		10cm	14cm	16cm	20cm	
모래지반	보통지반	2.5	3.8	-	5.6	
	조밀한 지반	3.2	4.8	-	6.6	
이층지반	보통지반	3일 압밀	0.9	-	1.4	4.1
		7일 압밀	1	-	3.2	5.7
	조밀한 지반	1	-	1.9	3.9	



(a) 모래지반



(b) 이층지반



(c) 이층지반 (3일-7일)

그림 4.1.35 말뚝 길이비에 따른 극한하중 (② 조건)

그림 4.1.33은 수평하중-변위량 곡선에서 두접선 (초기와 나중)의 교차점인 곳의 하중을 극한 하중으로 나타낸 것으로 말뚝의 길이비에 따른 각 실험에 대한 극한하중은 길이비가 클수록 일정하게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그림 4.1.34는 수평 변위량이 0.25 inch (6.25mm)가 되었을 때의 하중을 극한 하중으로 나타낸 것으로 길이비가 클수록 ①조건 보다 훨씬 작다. 따라서 본 실험에서는 ②조건을 값을 극한 하중으로 한다. 그림 4.1.36은 말뚝의 변화 양상을 도식화 한 것이다.

말뚝의 변화 양상					
말뚝 길이비	1:1 (100mm)	1:1.2 (120mm)	1:1.4 (140mm)	1:1.6 (160mm)	1:2 (200mm)
② 조건 극한하중시 말뚝의 기울기	4°	4.5°	6.7°	6.4°	6.6°

그림 4.1.36 말뚝의 변화 형상



나. 말뚝의 극한 수평저항력 (Broms 방법)

사실토 지반내 짧은 말뚝의 회전중심은 말뚝 선단부근으로 가정할 수 있다. 따라서 선단 부근의 높은 압력을 집중하중으로 대체하고 말뚝선단에서 모멘트를 취하여 수평저항력을 구하였다. 아래 표는 말뚝 선단에서의 극한 수평저항력과 각 말뚝의 최대 모멘트 값을 Broms의 방법에 의해 계산한 값이다.

표 4.1.9 Broms 방법에 의한 말뚝선단에서의 수평저항력 및 최대 모멘트

말뚝길이 (cm)	8cm	10cm	12cm	14cm	16cm	20cm
말뚝 선단에서의 극한 수평저항력 (kg)	0.31	0.52	0.79	1.12	1.51	2.48
말뚝 전체에서의 극한 하중(kg/cm <sup>2</sup> )	1.24	2.6	4.74	7.84	12.08	24.8
최대 모멘트 (kg · cm)	2.4	4.24	6.76	10.03	14.02	24.53

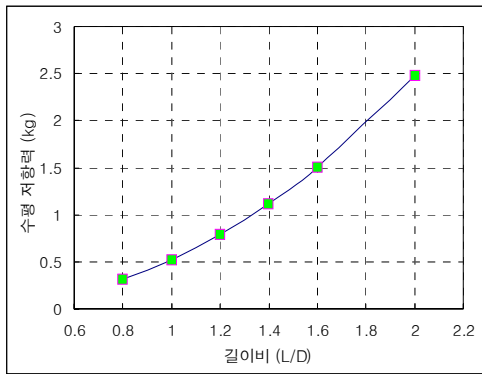


그림 4.1.37 말뚝의 수평저항력

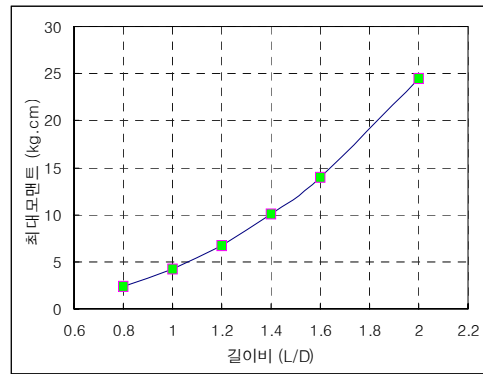
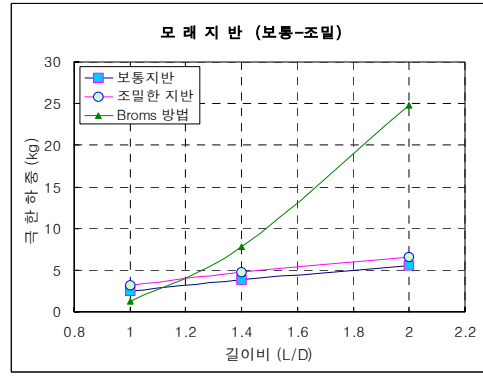
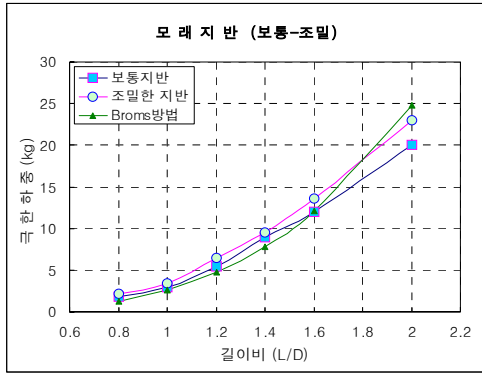


그림 4.1.38 말뚝의 최대 모멘트

다음 그림 4.4.39는 ①, ②조건에서의 모형실험과 Broms 방법에 의한 해석결과의 극한하중을 비교한 것으로 항복하중을 구하는 방법인 수평하중-변위량 곡선에서 두점선 (초기와 나중)의 교점인 곳의 하중은 비교적 Broms방법에 의한 해석결과와 비슷한 값을 나타내었지만 수평 변위량이 0.25 inch (6.25mm)가 되었을 때의 하중은 말뚝의 길이비가 클수록 차이가 훨씬 크게 나타났다. 이는 말뚝의 직경대 길이비가 1:2를 넘지 않는 석션말뚝의 특성 때문인 것으로 판단된다.



(a) ①조건외 극한하중

(b) ②조건외 극한하중

그림 4.1.39 모형실험과 해석결과의 극한하중 비교

## 제 2 절 석션파일기초의 수리·지반모형실험

석션파일기초 방파제의 안정성을 검토하기 위하여 수조·지반 모형실험을 실시하였다. 실험 단면은 설계단면을 1/50의 축척으로 축소하여 상사비에 맞추어 제작된 방파제 모형(표 4.2.1 참조)을 이용하여 지반조건과 원 설계단면(그림 4.2.1 참조)과 실제 최종 설계단면(그림 4.2.2 참조)에 대하여 실험을 수행하였다. 지반조건은 표 4.2.2에 나타낸 바와 같이 1/50로 축소된 원 지반의 지반조건(상부 점토층 20cm + 하부 모래층 10cm)과 함께 상부 점토층이 설계에서 저항력을 발휘하지 않는 것으로 가정하였기 때문에 이에 대한 검토를 위하여 상부 점토층을 비워 둔 경우 그리고 상부점토층이 모래인 경우와 점토로 채워진 경우에 대하여 비교·실험을 수행하였다. 또한 실제 방파제형상과는 달리 시험시공될 방파제가 상대적으로 길이방향으로 짧기 때문에 이에 대한 검토를 수행하기 위하여 전체 수조의 절반만 방파제로 막은 반단면에 대한 실험도 실시하여 그 영향을 고찰하였다.

그림 4.2.3은 설치된 방파제 수조·지반모형실험의 개념도 및 설치된 계측기의 위치를 나타낸 것이다. 설치된 계측기는 파고를 측정하기 위한 파고계를 전면 외해부에 3개 설치하였고 방파제 전면에 인접하여 처울림 높이를 측정하기 위한 파고계 및 전달율을 측정하기 위한 파고계를 설치하였으며, 방파제에 6개의 파압계를 설치하여 실험시 파압을 실측하였고 방파제 중앙 하단과 전면 하단 지반 속에 간극수압계를 설치하였다. 또한 방파제의 변위를 측정하기 위하여 전면 상부에 연직방향으로 그리고 후면 상부에 횡방향으로 변위계를 설치하여 계측을 수행하였다. 그림 4.2.4는 모형방파제의 형상을 나타낸 그림이며, 그림 4.2.5는 평면도를 나타낸 것이다.

작용하중은 표 4.2.3에 제시한 바와 같이 모든 경우에 불규칙파로 통상파, 폭풍파, 설계파를 가하였으며, 실시설계 단면에 대한 실험인 Case V(상부 점토 20cm + 하부 모래 10cm, 석션파일 8개)에 대하여 규칙파를 조파하여 그 결과를 분석하였다.

표 4.2.1 모형실험 단면 크기(1/50 축척)

구 분	크 기	비 고
수심, cm	50	
점토층 두께, cm	20	
모래층 두께, cm	10	
방파제 기초 폭, cm	56	
방파제 케이슨 폭, cm	35	
석션파일 지름, cm	45, 20	
석션파일 길이, cm	25	모래층에 5cm 근입

표 4.2.2 모형실험의 종류

구 분	실험 종류	비 고
석션파일의 종류	석션파일 2개 (Φ45cm) 석션파일 8개 (Φ20cm)	Case V
지반조건	물* 20cm + 모래 10cm 모래 20cm + 모래 10cm 점토 20cm + 모래 10cm	Case I Case II Case III
단면조건	전단면 반단면	Case IV

\* 비워두는 부분

표 4.2.3 모형실험의 파랑조건

구 분	주기( $T_s$ ), 초	파고( $H_s$ ), cm	작용시간	
규칙파	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0	2, 4, 6, 10, 15, 20	1분30초	
불규칙파	통상파	1.20	2.0	20분(1000파)
	폭풍파	1.40	6.0	23분(1000파)
	설계파	1.56	12.8	26분(1000파)

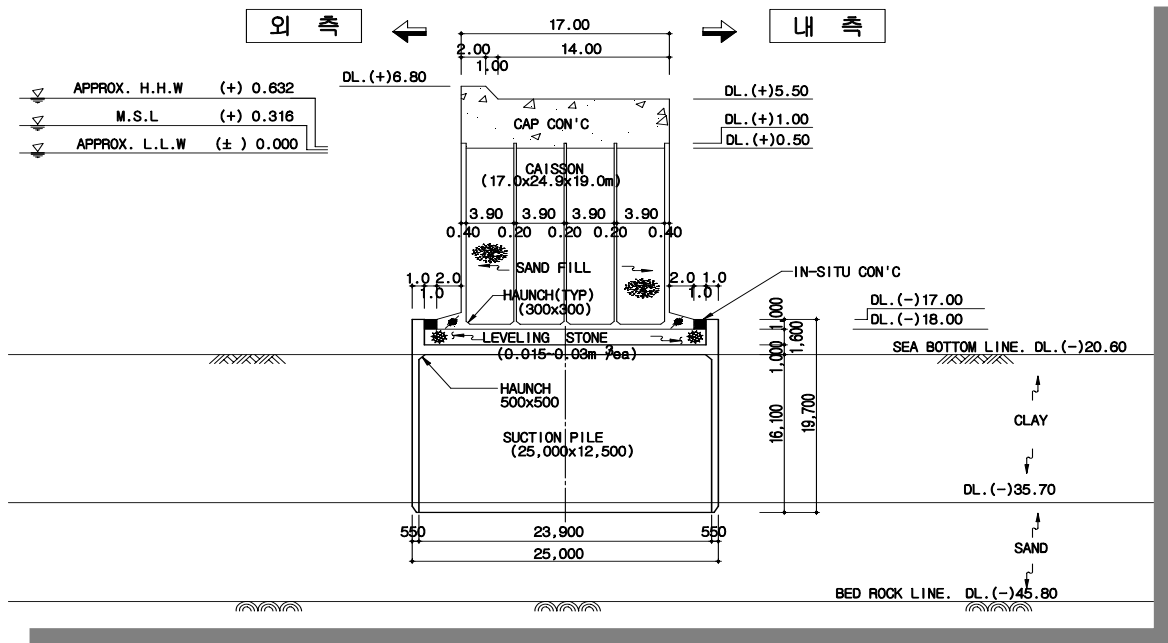


그림 4.2.1 원 설계 단면

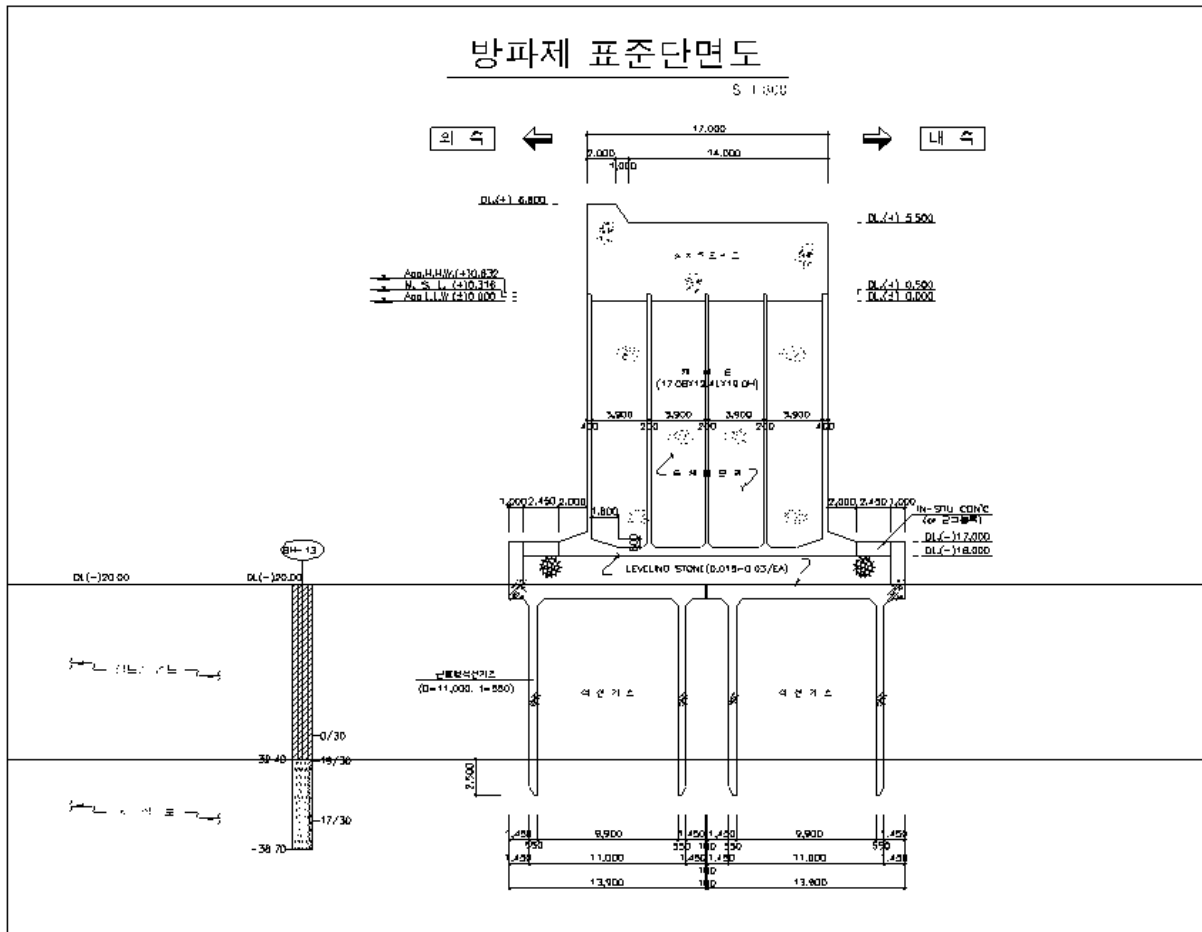


그림 4.2.2 최종 실시설계 단면

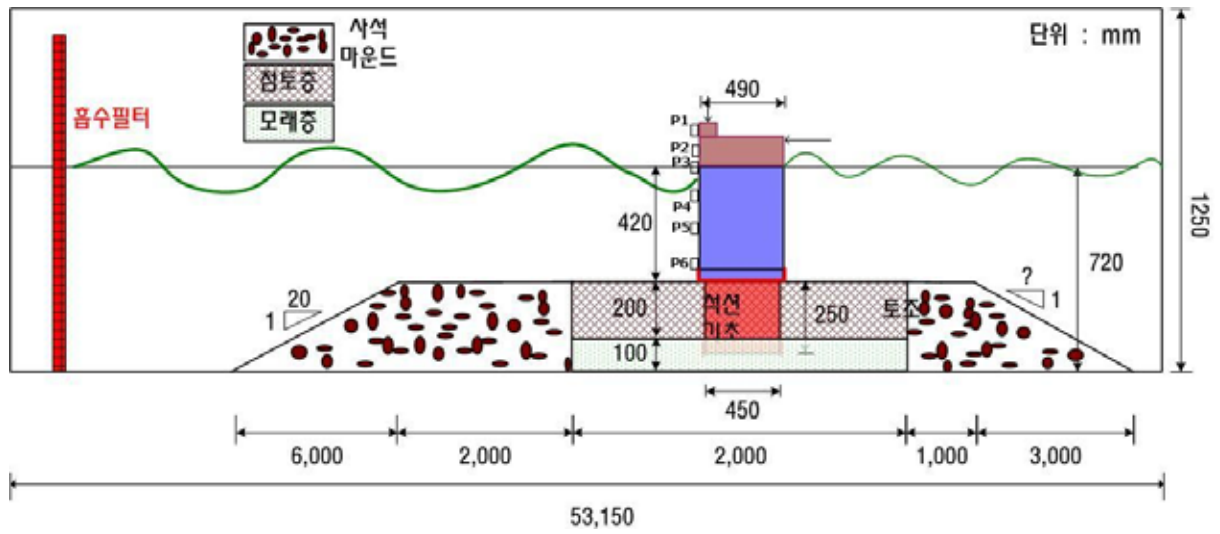


그림 4.2.3 모형실험 개념도 및 계측기 설치 위치

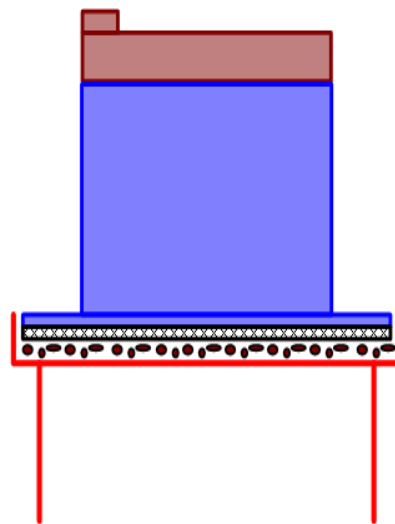


그림 4.2.4 방파제 및 석선파일기초의 모형

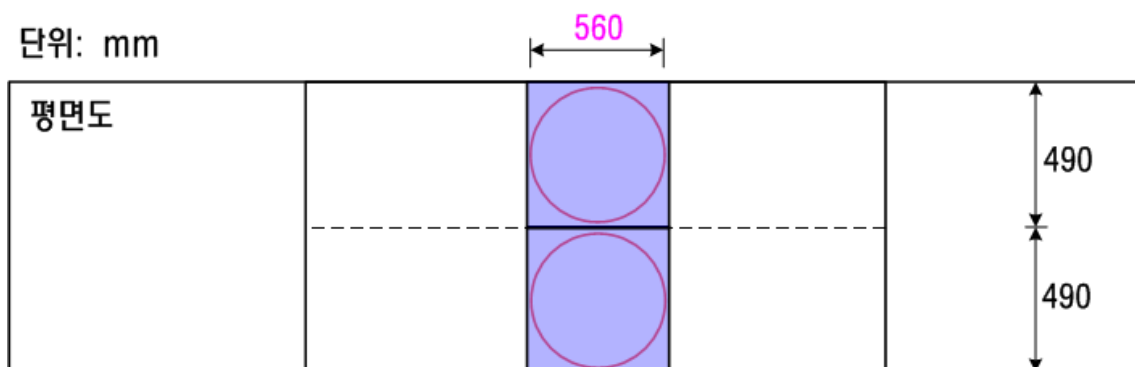


그림 4.2.5 모형 방파제 평면도

다음 그림 4.2.6~그림 4.2.23은 실험에 사용된 수조 및 방파제 모형, 실험 준비 과정 그리고 실험장면을 나타낸 것이며, 그림 4.2.24~그림 4.2.40은 실험결과를 도시한 것이다.



그림 4.2.6 실험을 수행한 수조

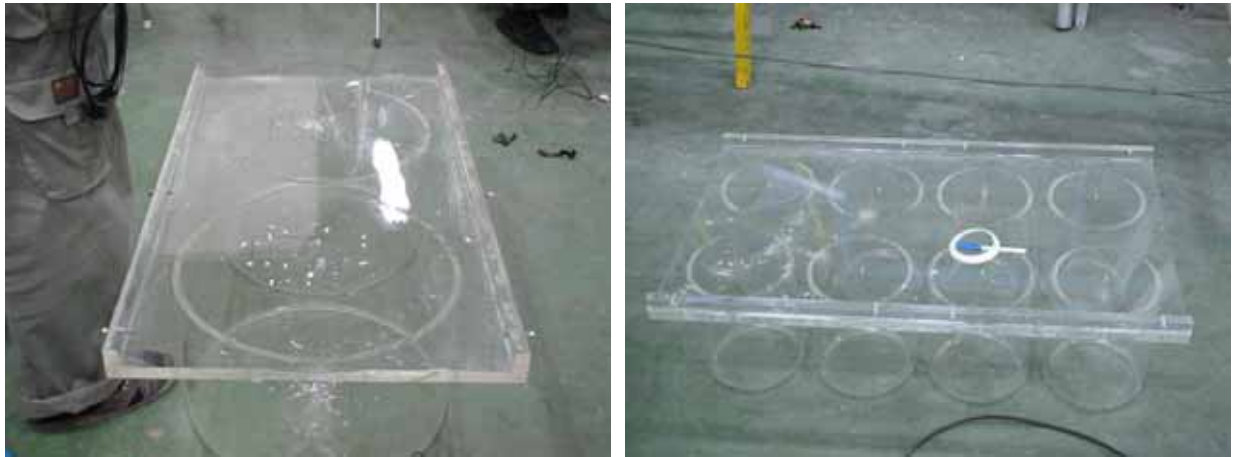


그림 4.2.7 석선파일기초 모형 (좌 : 원 설계, 우 : 실시설계)



그림 4.2.8 케이스 방파제 모형



그림 4.2.9 모래 20cm 지반 조성



그림 4.2.10 모래지반에 설치된 간극수압계



그림 4.2.11 석션파일기초 설치  
(모래 10cm 지반)



그림 4.2.12 케이스 거치

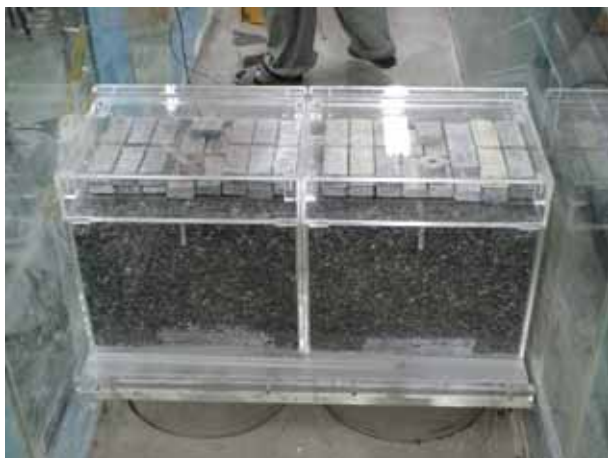


그림 4.2.13 최종 모형 완성 장면(좌 : 정면, 우 : 측면)





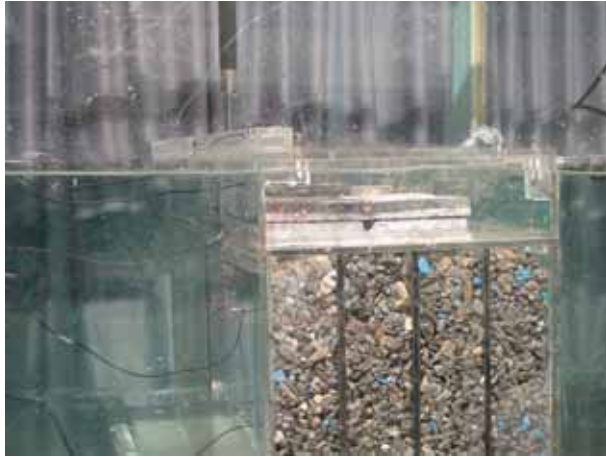


그림 4.2.14 파압계 및 변위계 설치 장면



그림 4.2.15 모래 30cm 지반 조성



그림 4.2.16 석설파일기초 일부 관입



그림 4.2.17 석설파일기초 관입 완료 장면

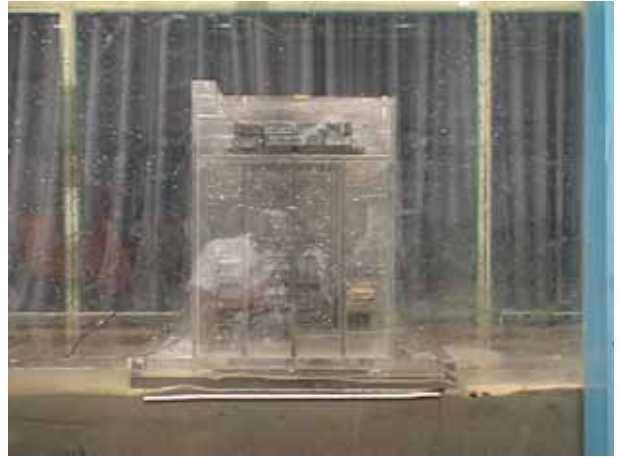
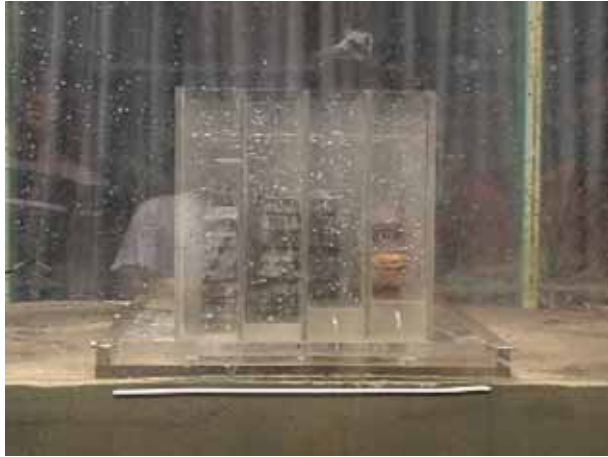


그림 4.2.18 방과제 설치 장면

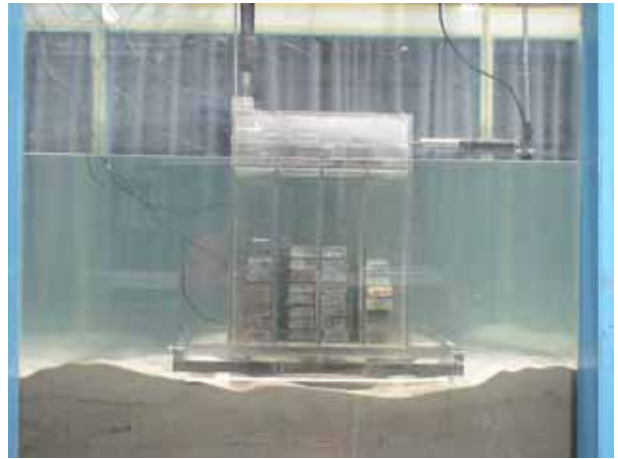


그림 4.2.19 최종 실험 준비 완료 장면



그림 4.2.20 상부 점토 20cm 지반 조성 장면

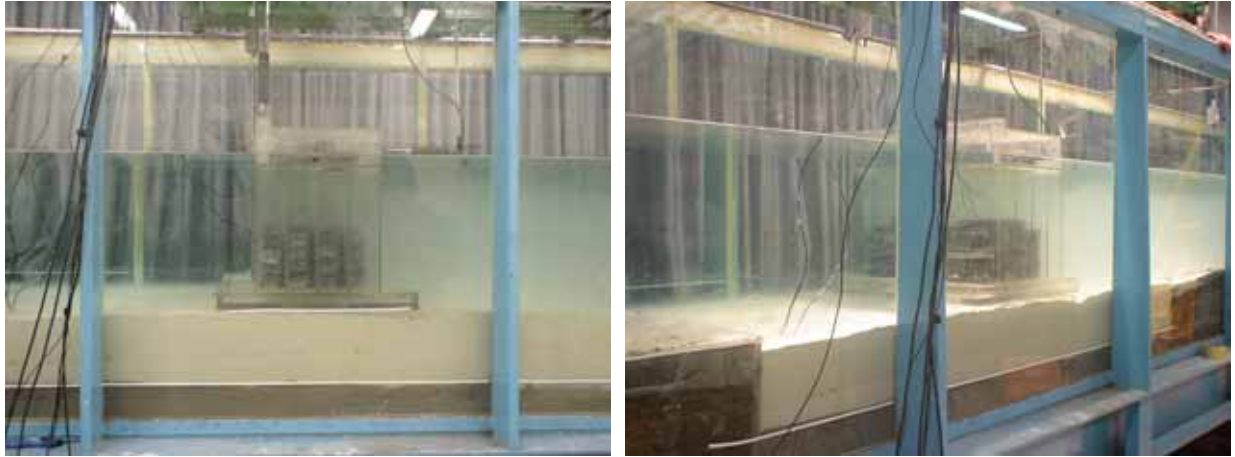


그림 4.2.21 계측기 설치된 장면



그림 4.2.22 파랑 하중 재하 장면

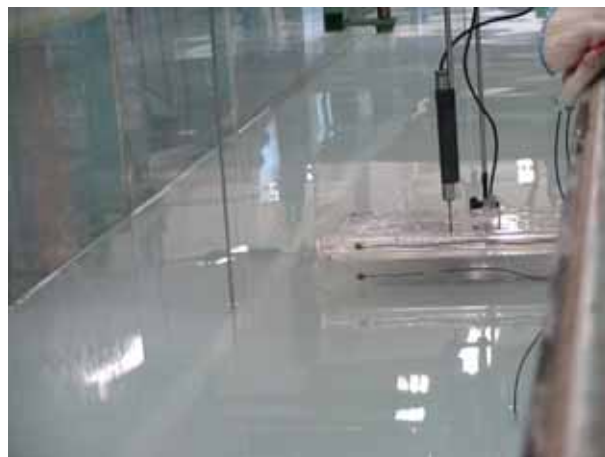


그림 4.2.23 반단면 방파제 실험 장면

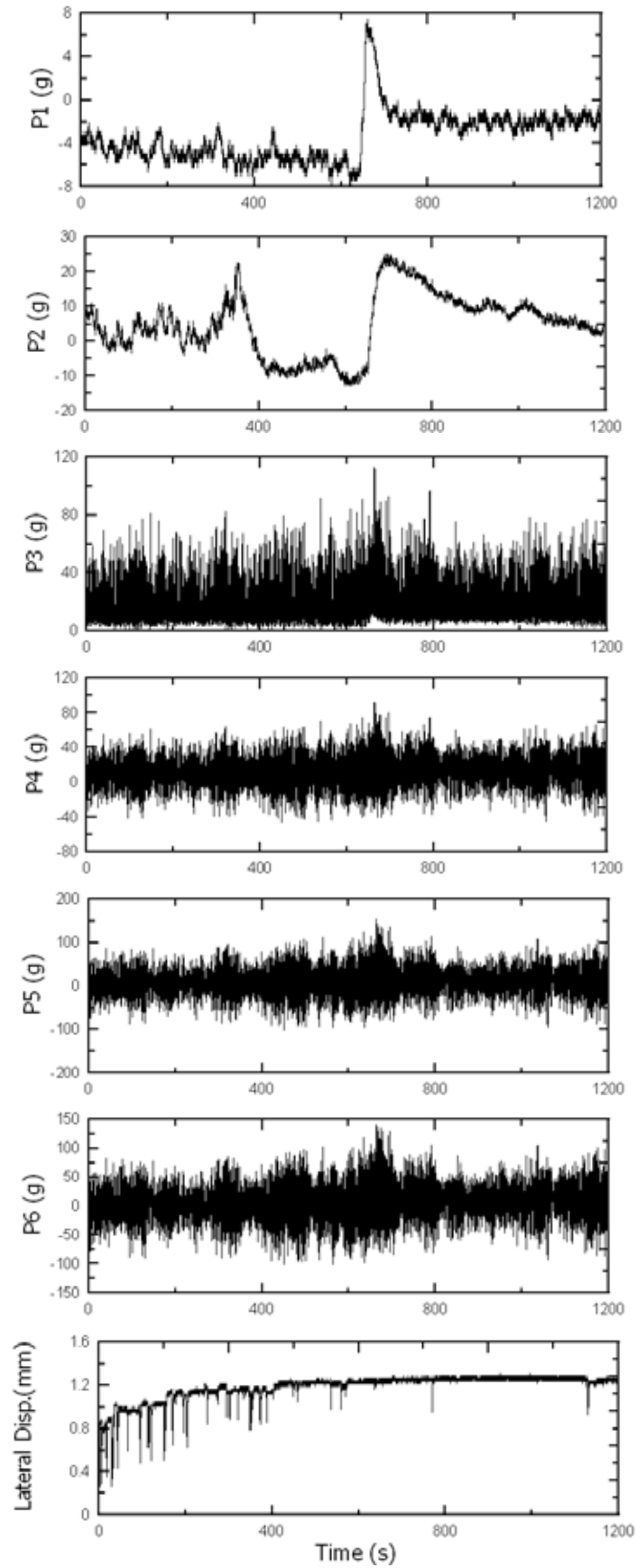


그림 4.2.24 Case II의 통상과 실험결과

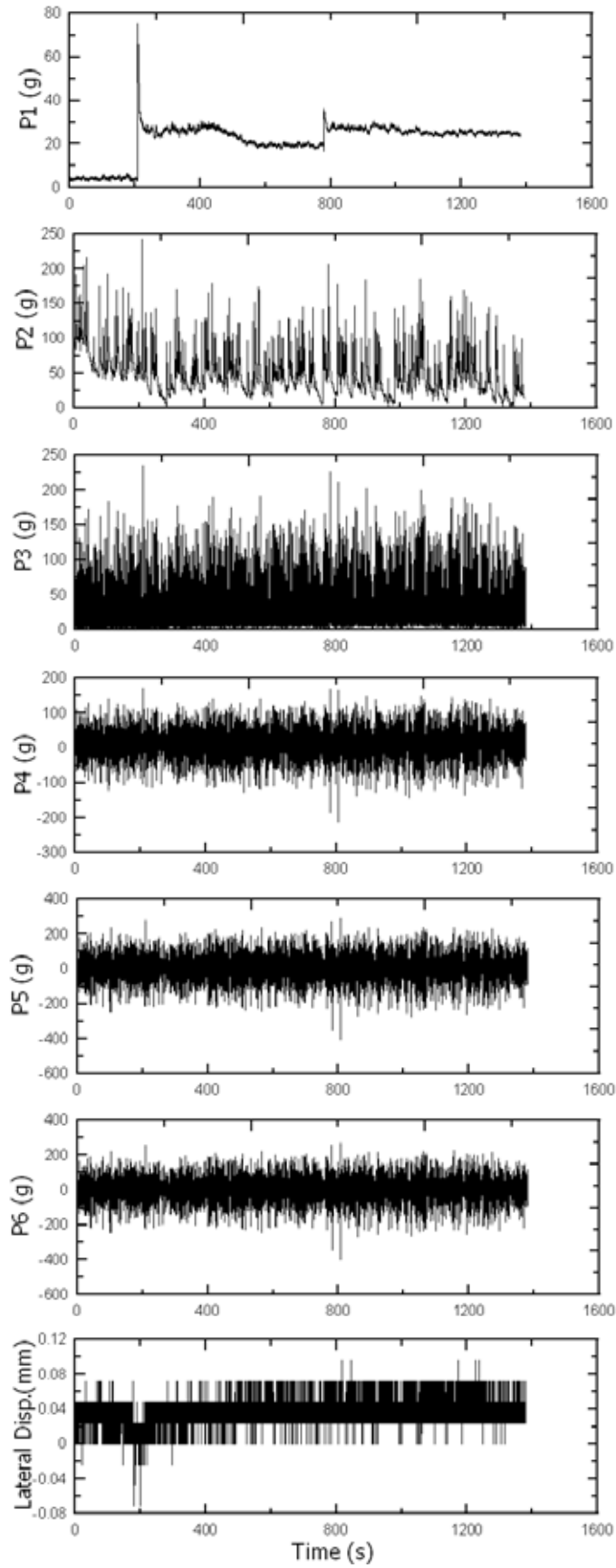


그림 4.2.25 Case II의 폭풍파 실험결과

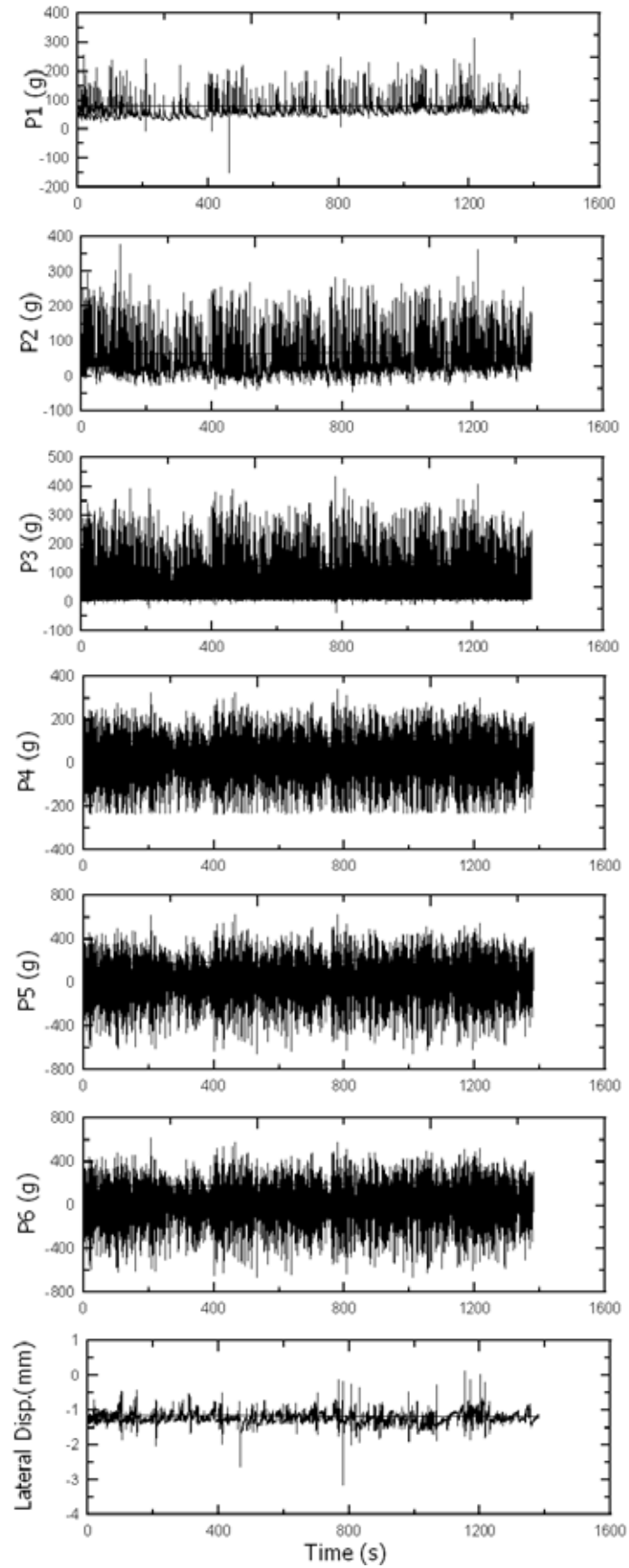


그림 4.2.26 Case II의 설계파 실험결과

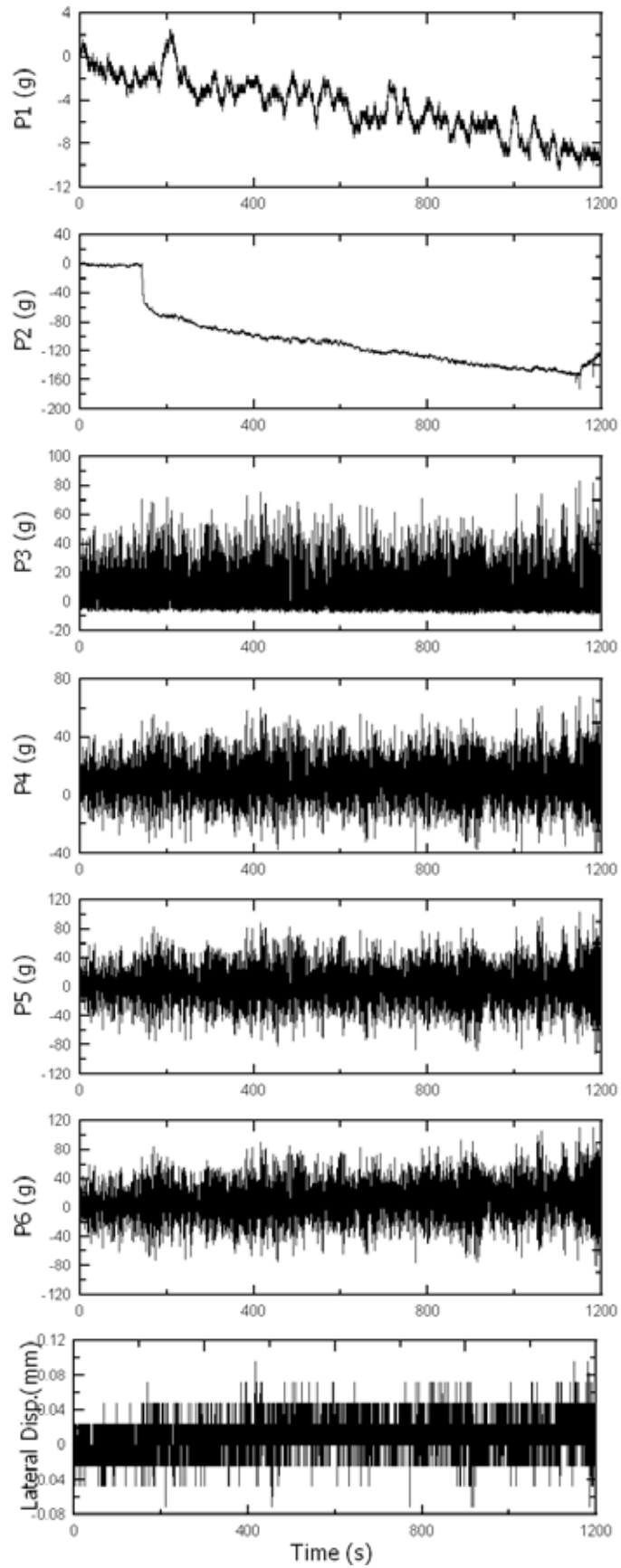


그림 4.2.27 Case III의 통상과 실험결과

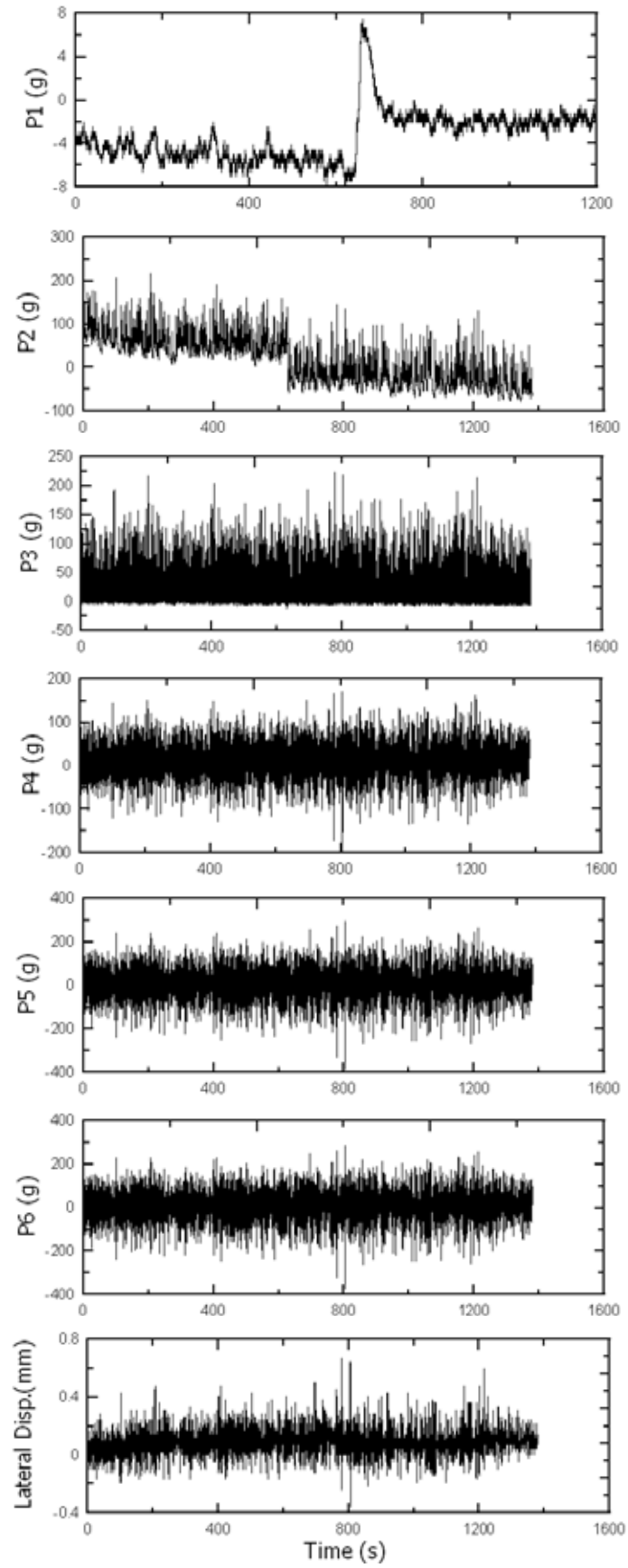


그림 4.2.28 Case III의 폭풍파 실험결과



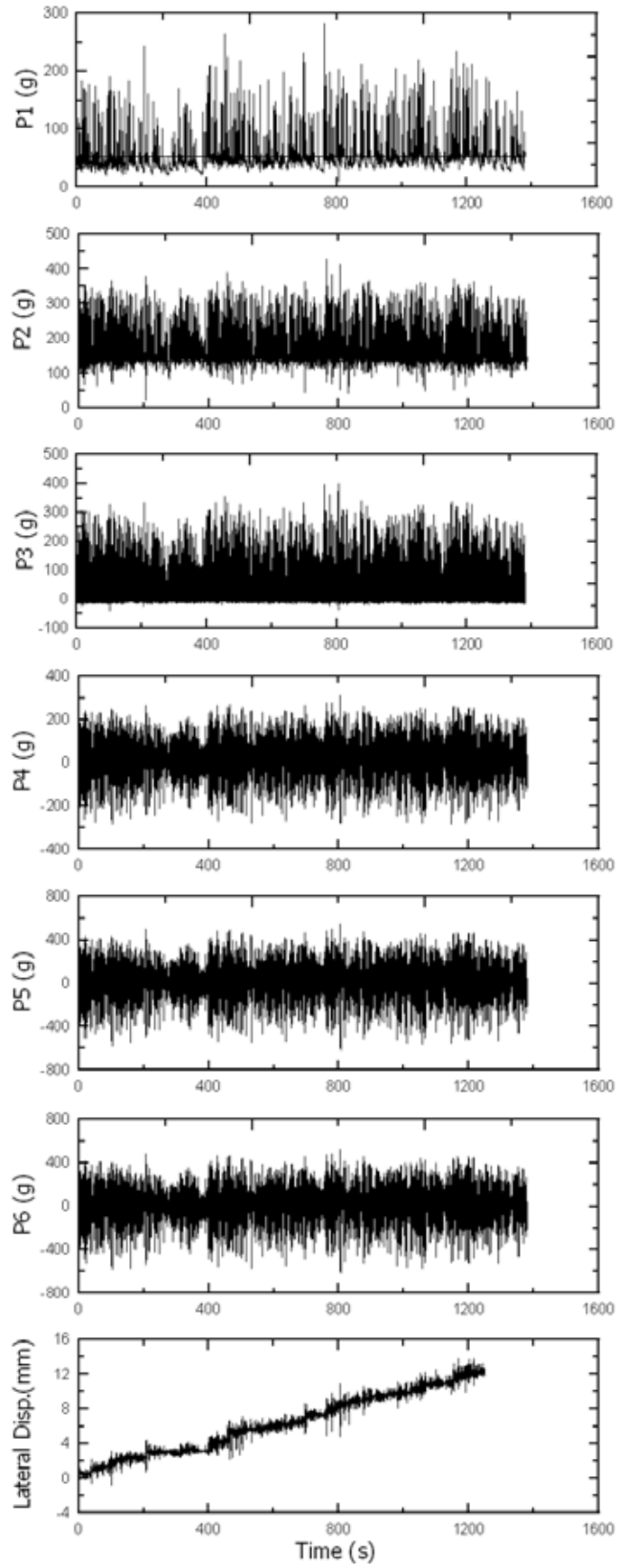


그림 4.2.29 Case III의 설계파 실험결과

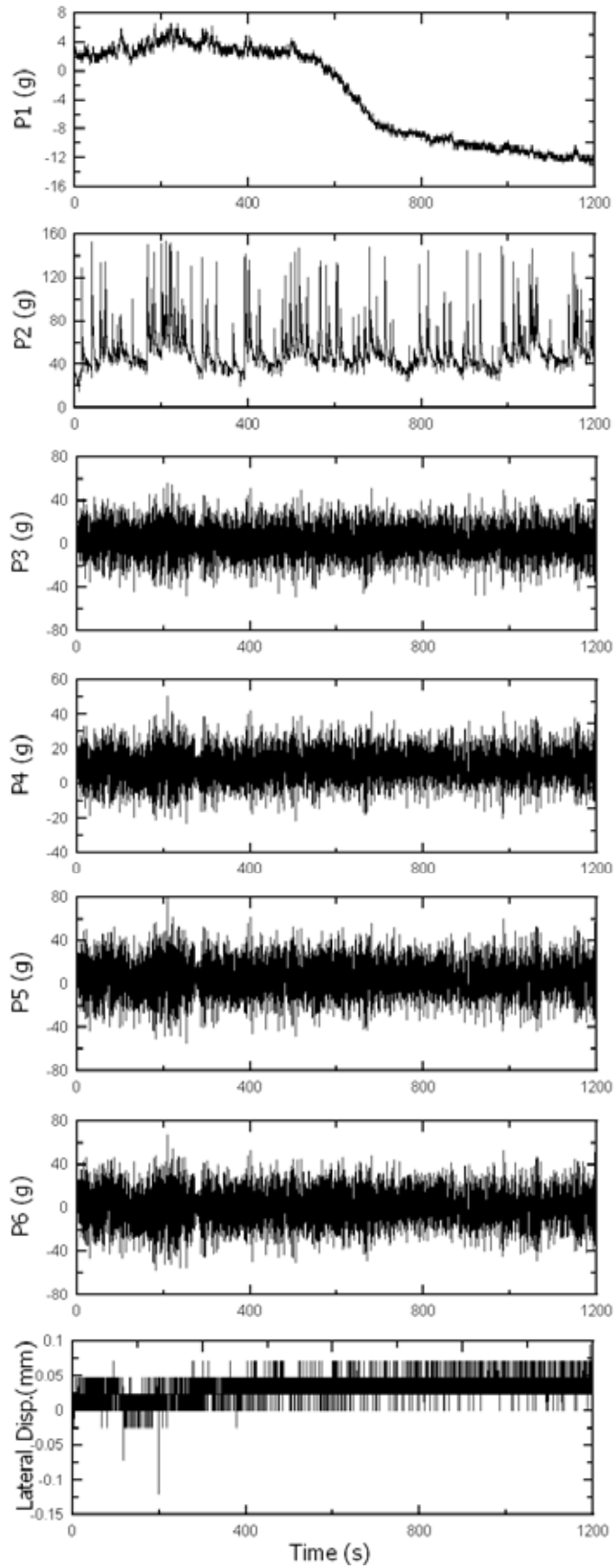


그림 4.2.30 Case IV의 통상과 실험결과

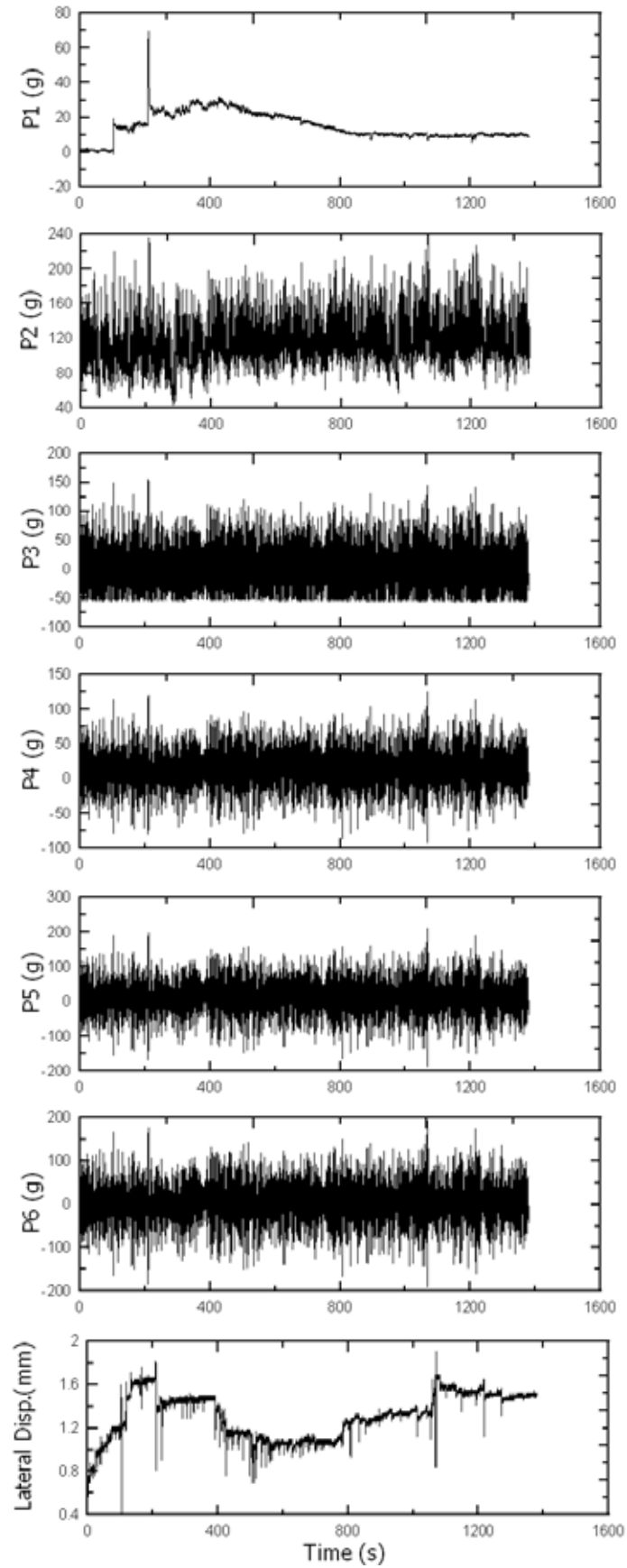


그림 4.2.31 Case IV의 폭풍파 실험결과

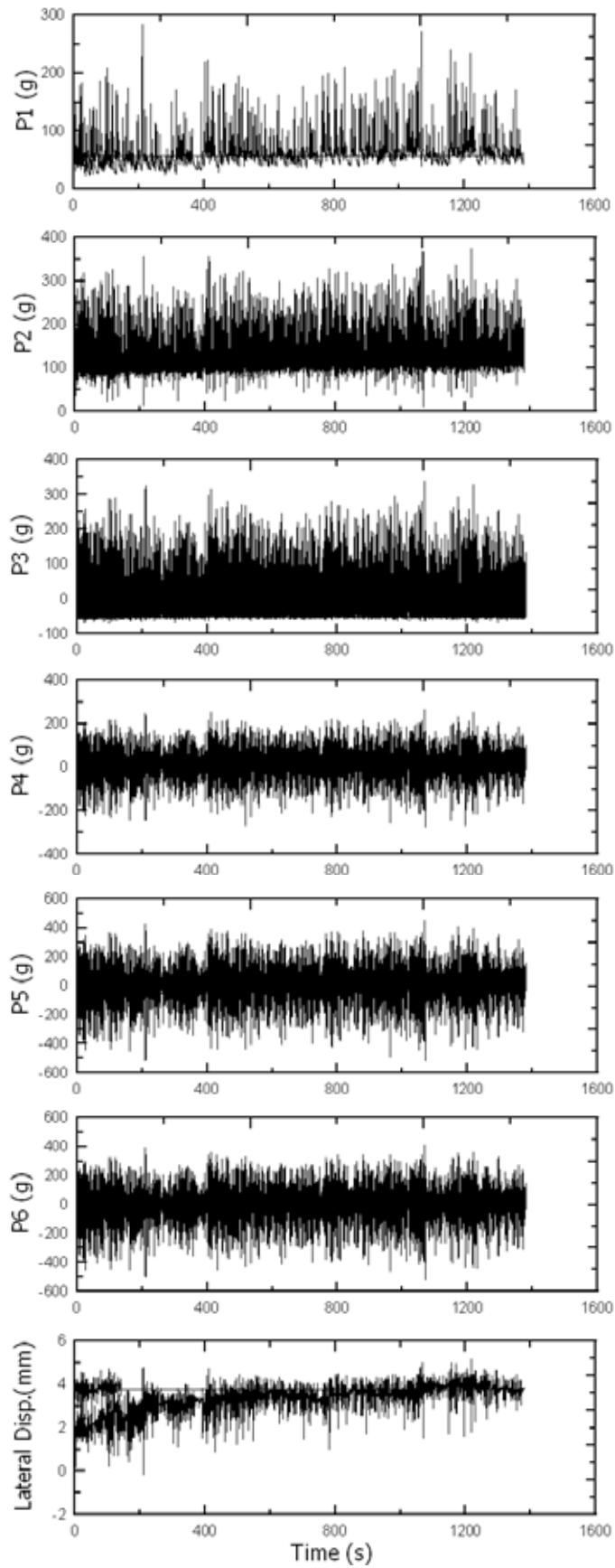


그림 4.2.32 Case IV의 설계파 실험결과

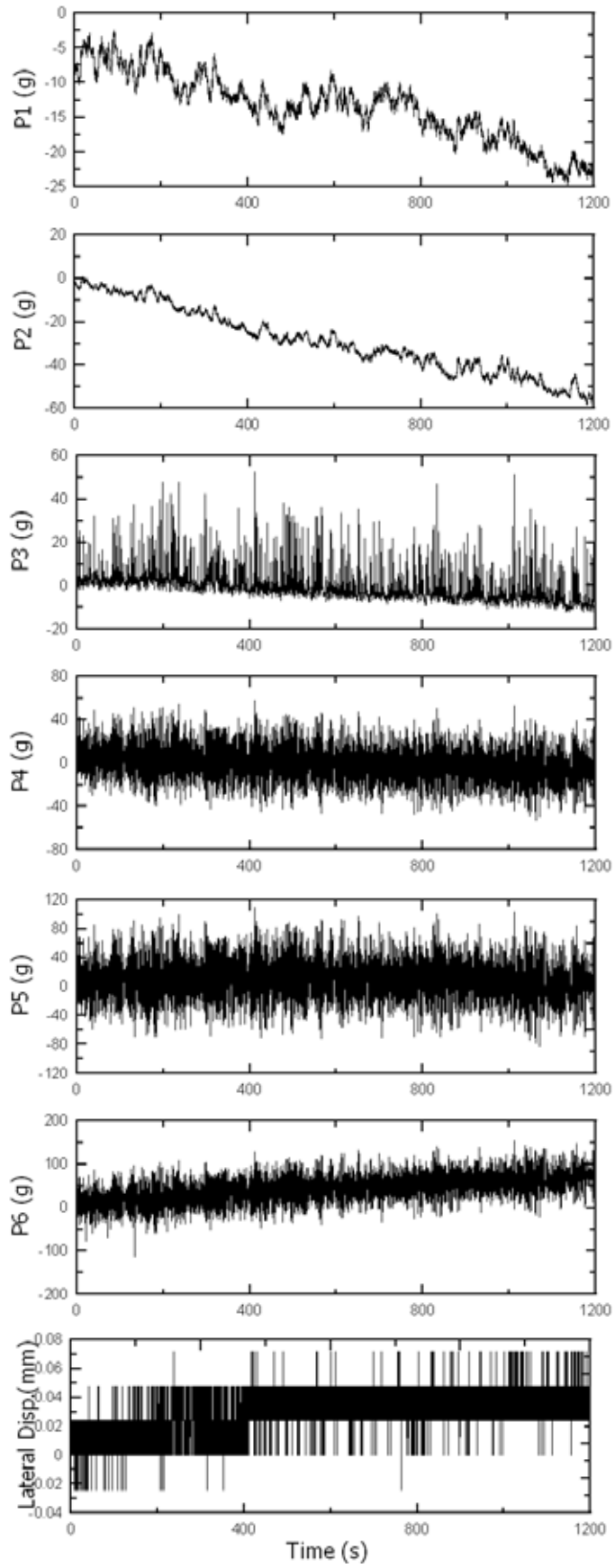


그림 4.2.33 Case V의 통상과 실험결과

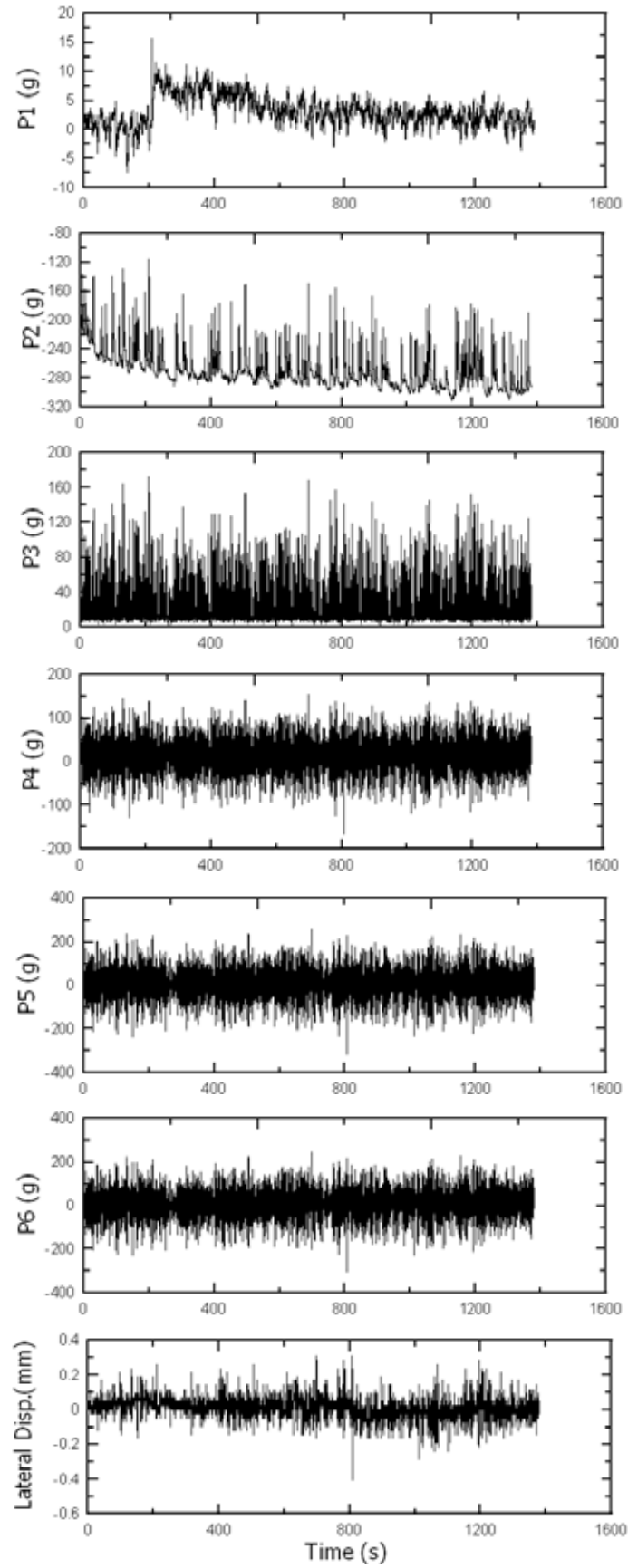


그림 4.2.34 Case V의 폭풍파 실험결과

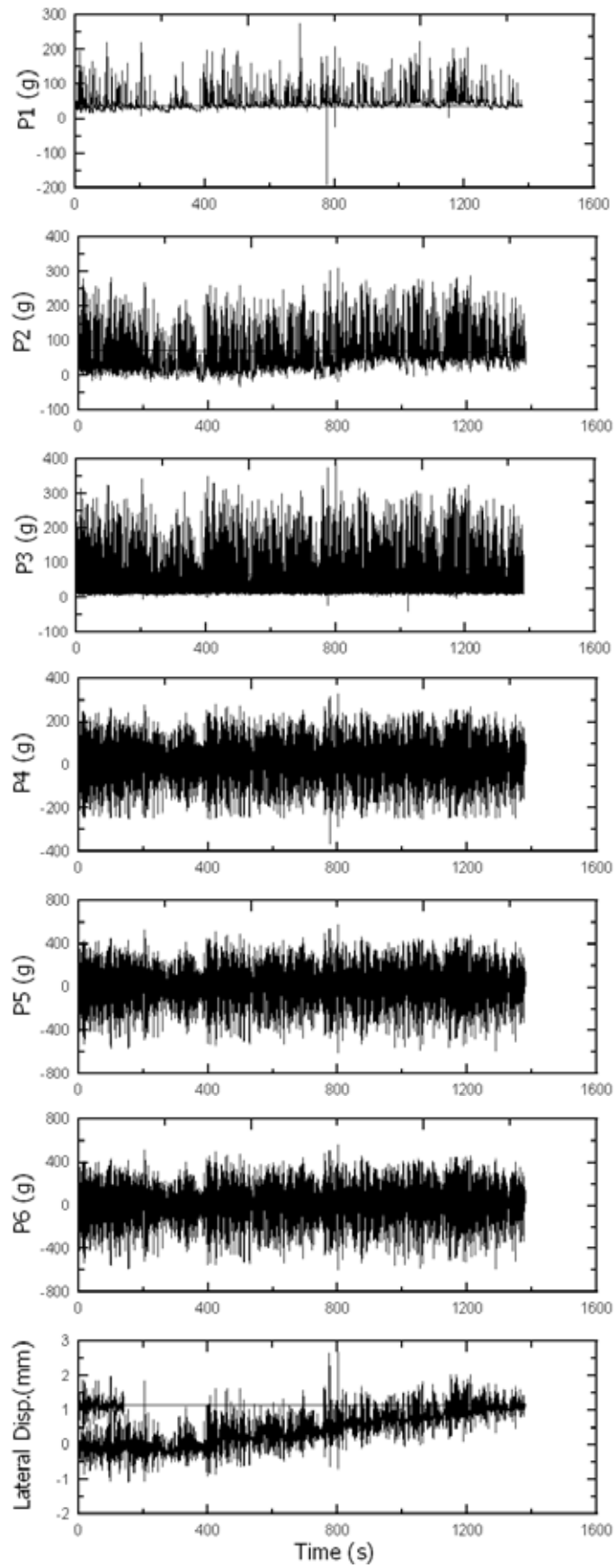


그림 4.2.35 Case V의 설계과 실험결과

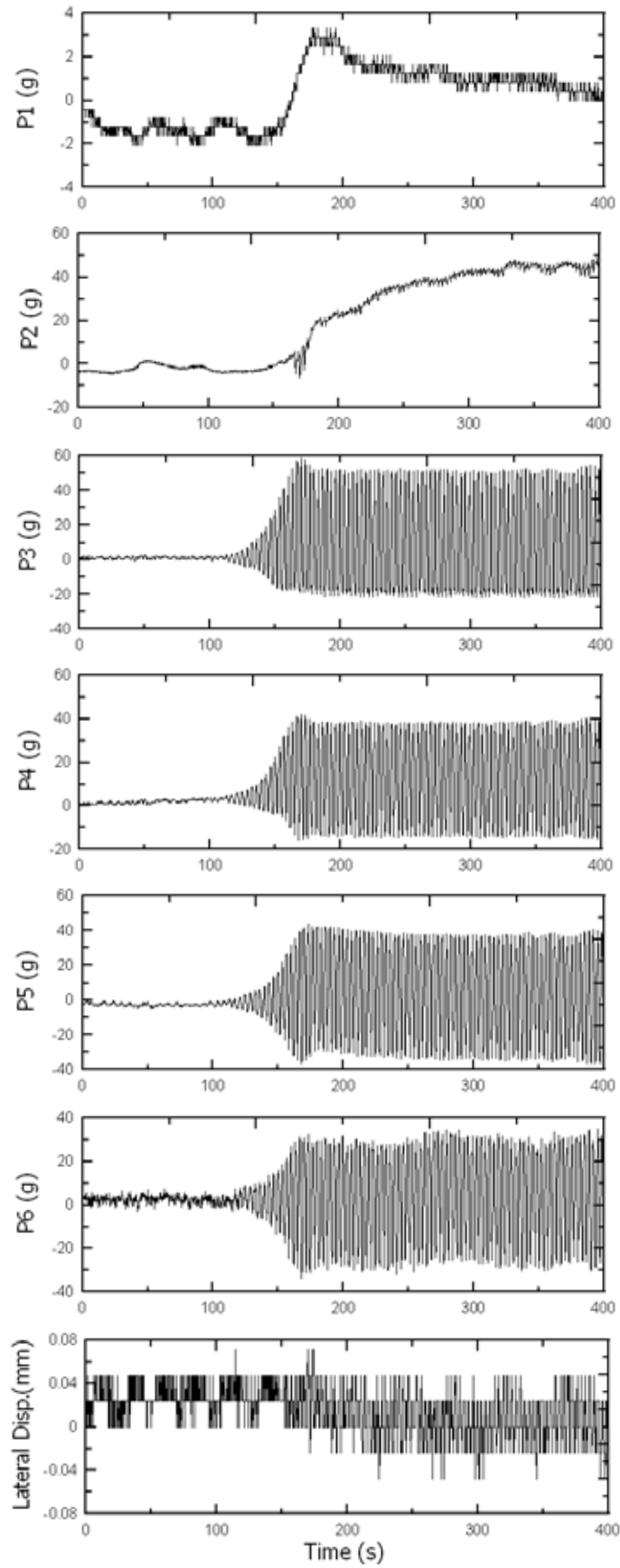


그림 4.236 Case V, 규칙파, 주기 1.0s, 파고 2.0cm 실험결과



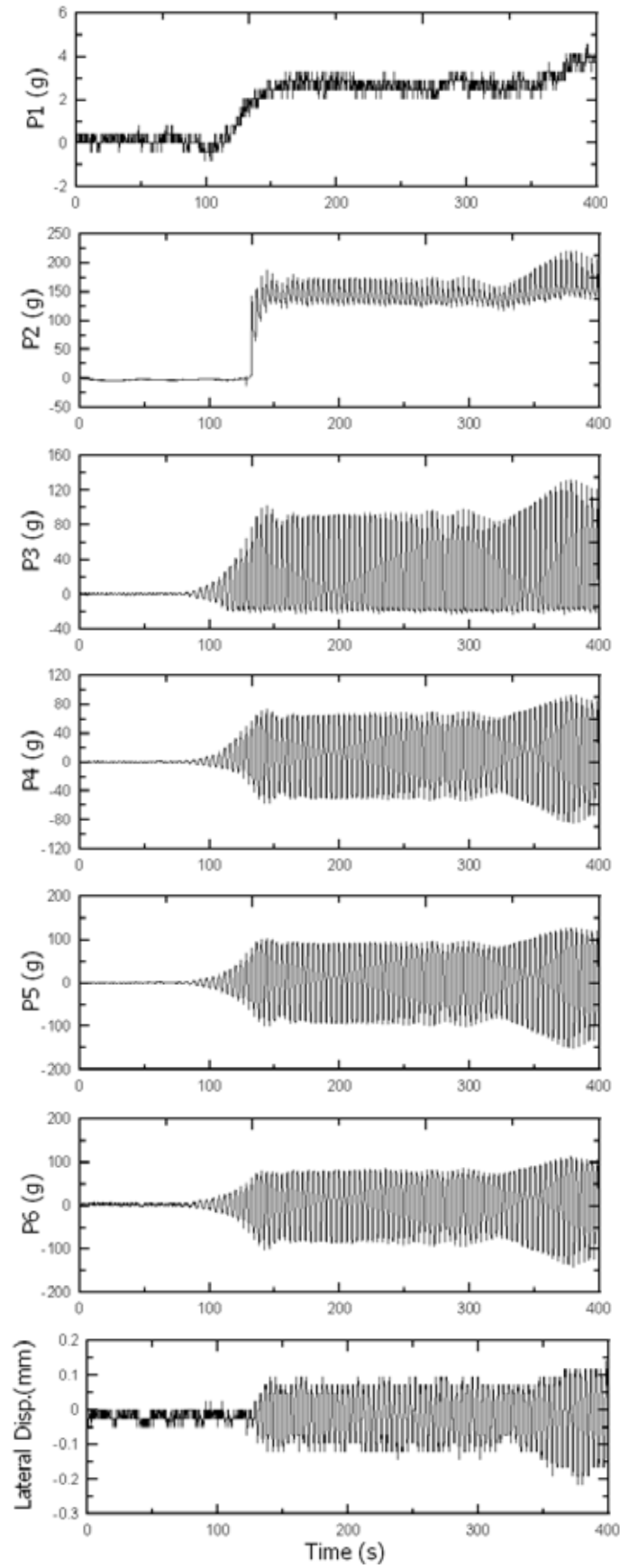


그림 4.2.37 Case V, 규칙파, 주기 1.2s, 파고 4.0cm 실험결과

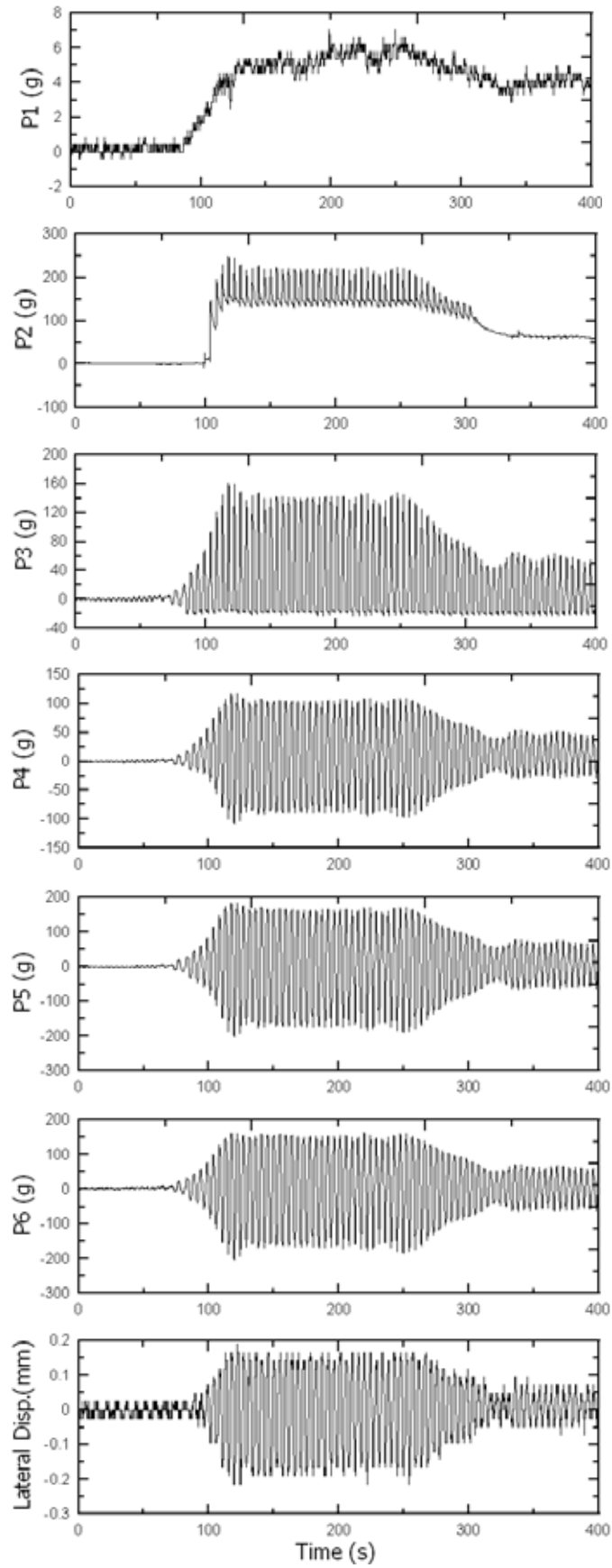


그림 4.238 Case V, 규칙파, 주기 1.4s, 파고 6.0cm 실험결과

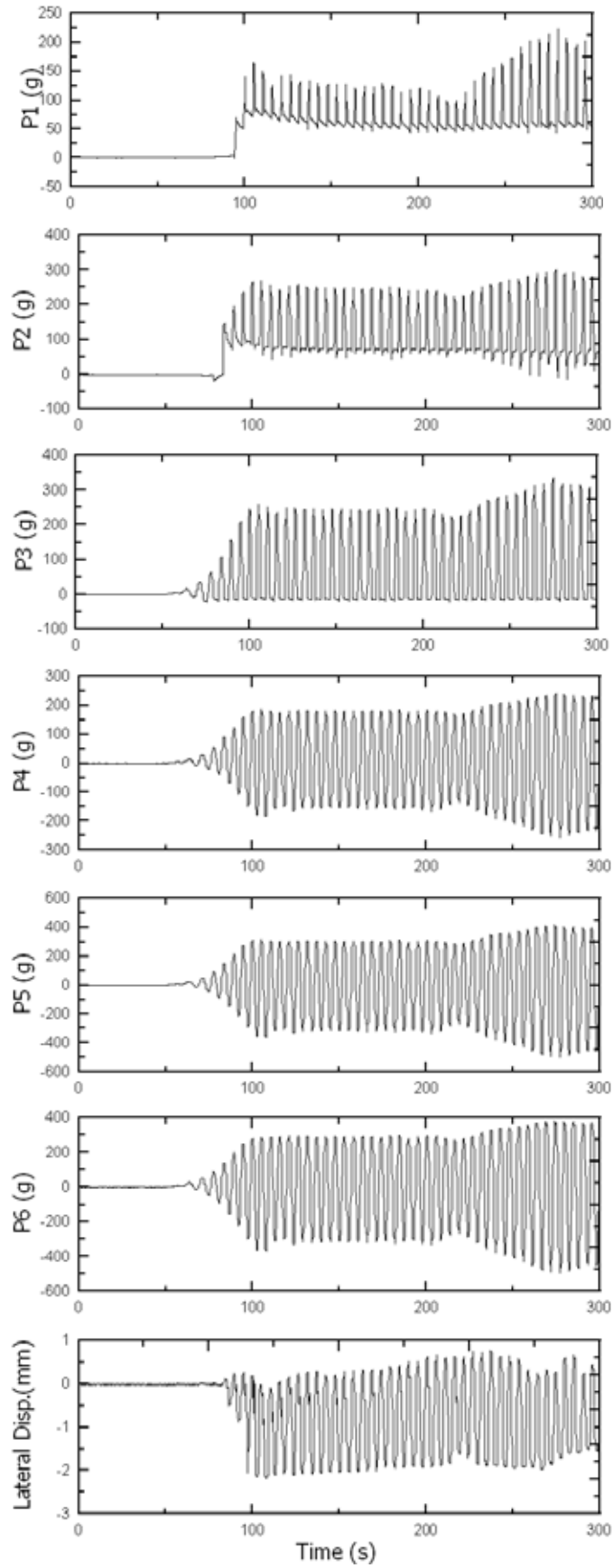


그림 4.2.39 Case V, 규척파, 주기 1.6s, 파고 10.0cm 실험결과

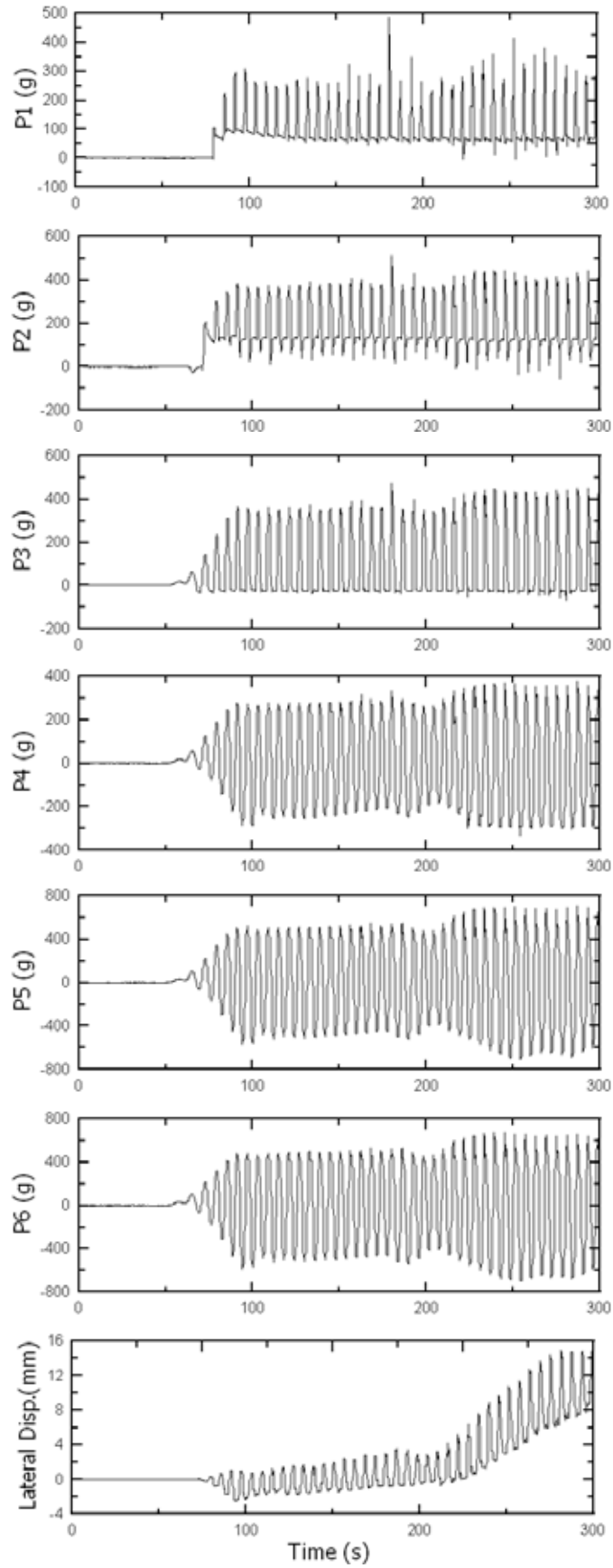


그림 4.2.40 Case V, 규척파, 주기 1.8s, 파고 15.0cm 실험결과

다음 표 4.2.4에서 설계과를 가하였을 때 발생한 방과제 천단의 횡방향 변위를 정리하였다. 표에서 보면, 상부 20cm를 모래로 채운 Case II의 경우에 가장 작은 변위를 보였으며, 상부 20cm를 점토로 채운 Case III와 Case V의 경우를 비교하면 지름 20cm 석선과일 8개를 설치한 경우가 지름 45cm 석선과일 2개를 설치한 경우보다 변위가 작게 발생해 더 안정적인 것을 알 수 있으며, 이것은 원 설계보다 실시설계 단면이 더 안전한 설계임을 의미한다. 전단면(Case III)과 반단면(Case IV)에 대한 실험결과를 비교해 보면, 대부분의 하중이 측면으로 소산되어 버리는 반단면의 경우가 훨씬 작은 변위가 발생함을 알 수 있다.

표 4.2.4 천단 최대 변위 비교(모형실험)

구 분	모래 30cm (Case II)	모래 10cm + 점토 20cm		
		석선 $\Phi 45\text{cm} \times 2$ , 전단면(Case III)	석선 $\Phi 20\text{cm} \times 8$ , 전단면(Case V)	석선 $\Phi 20\text{cm} \times 8$ , 반단면(Case IV)
천단 최대변위(mm)	1.5	14.0	3.0	4.8

### 제 3 절 수치해석

석선파일기초 방파제의 거동을 분석하기 위하여 단면조건과 지반조건 및 하중조건을 변화시키며 수치해석을 실시하였다. 수치해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(1999)를 사용하였으며, 그림 4.3.1은 해석에 사용된 요소망을 나타낸 것으로 평면변형률 조건에서 등방 경화모델인 modified Cam-Clay model을 지반의 구성모델로 적용하였고, Biot의 압밀이론을 이용한 해석을 통해 압밀거동을 모사하였다. 작용하중은 Goda 과압식을 이용하여 설계과를 정적인 횡방향 하중으로 변환하여 그림과 같이 적용하였다.

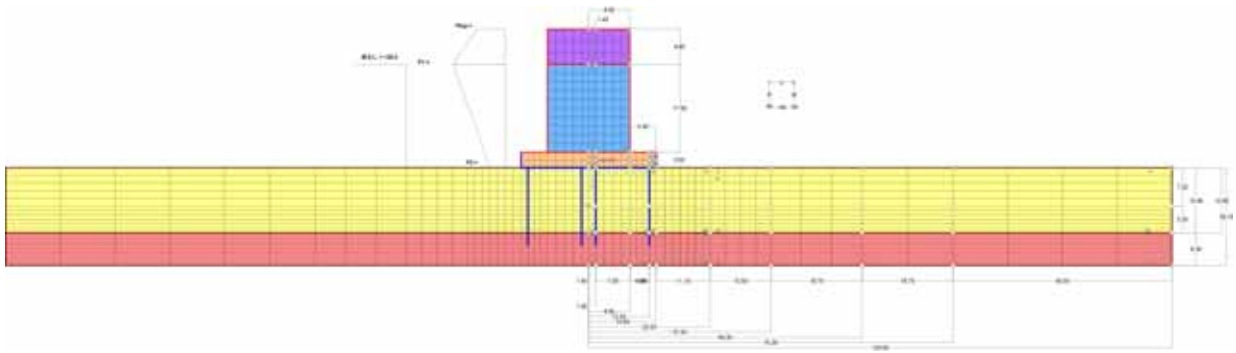


그림 4.3.1 수치해석을 위한 요소망

해석 단면은 원 설계 단면인 지름 24m 단일 석선파일기초를 사용하는 그림 4.2.1과 같은 단면과 실시설계 단면과 같이 지름 11m 석선파일을 사용하는 그림 4.2.2와 같은 단면에 대하여 설계 지반조건을 적용하여 설계과 하중조건을 적용하였다. 원 설계와 실시설계 단면에서 사용한 상세한 요소망은 다음 그림 4.3.2와 그림 4.3.3과 같다. 해석에 사용한 지반의 물성치는 다음 표 4.3.1과 같다. 그림 4.3.4~그림 4.3.11은 설계과가 작용했을 때의 해석결과이며, 그림 4.3.12와 그림 4.3.13은 모형실험에 해당하는 요소망이고 그림 4.3.14~그림 4.3.21은 해석결과이다.

표 4.3.1 수치해석에 사용된 지반의 물성치

구 분	점성토		자갈모래층	
	단위중량	비배수전단강도	단위중량	내부마찰각
물성치	1.5 tf/m <sup>3</sup>	0.032×depth(m)+0.84 tf/m <sup>2</sup>	2.0 tf/m <sup>3</sup>	35도

그림 4.3.2 원 설계 단면의 요소망

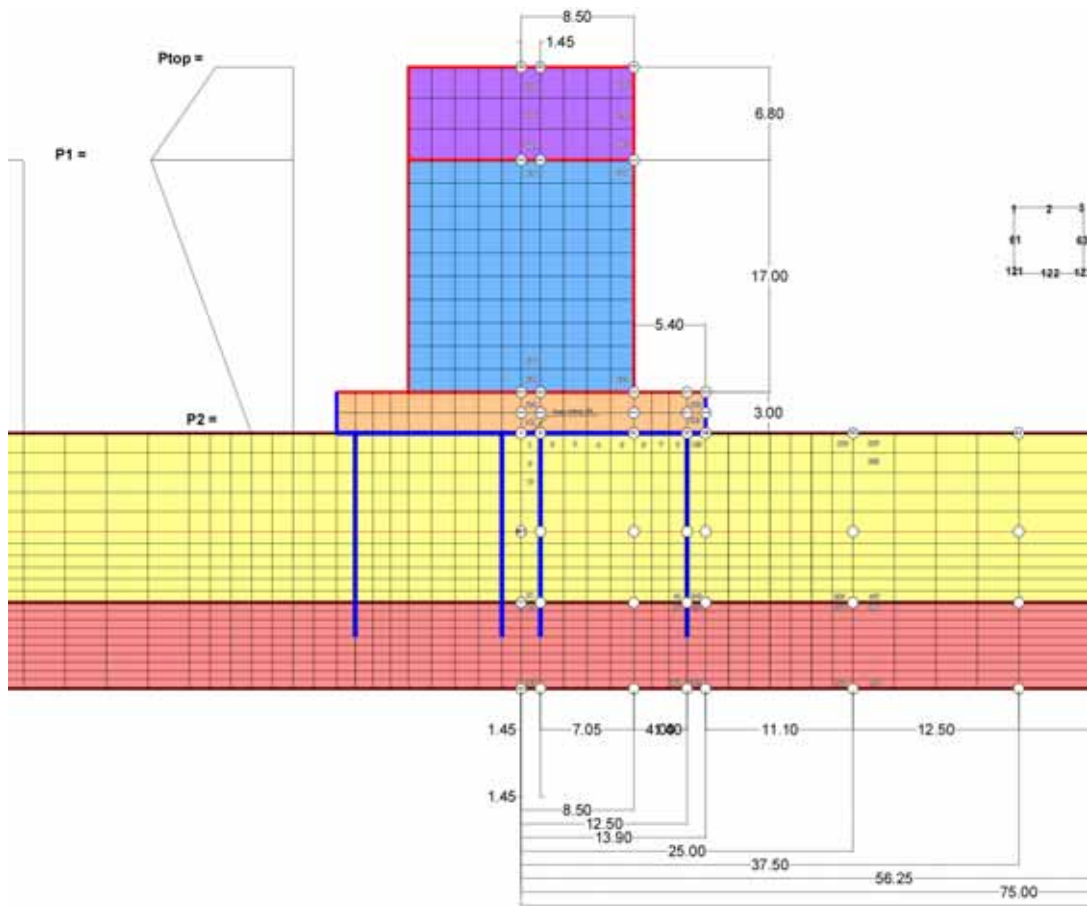


그림 4.3.3 실시 설계 단면의 요소망

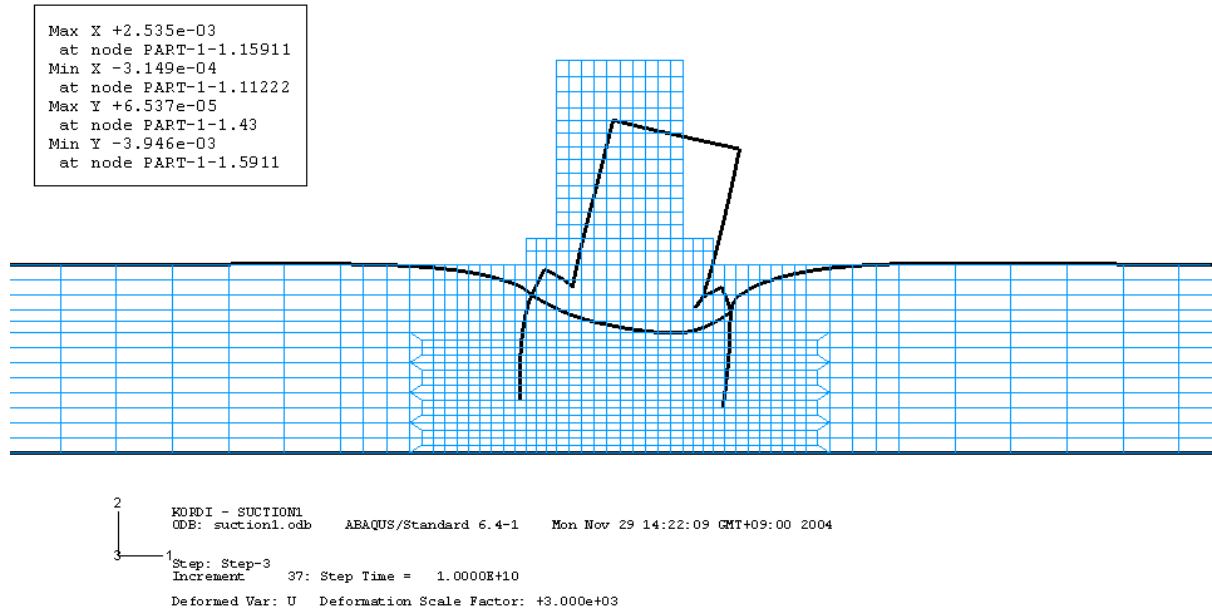


그림 4.3.4 원 설계 단면의 최종 변위 양상

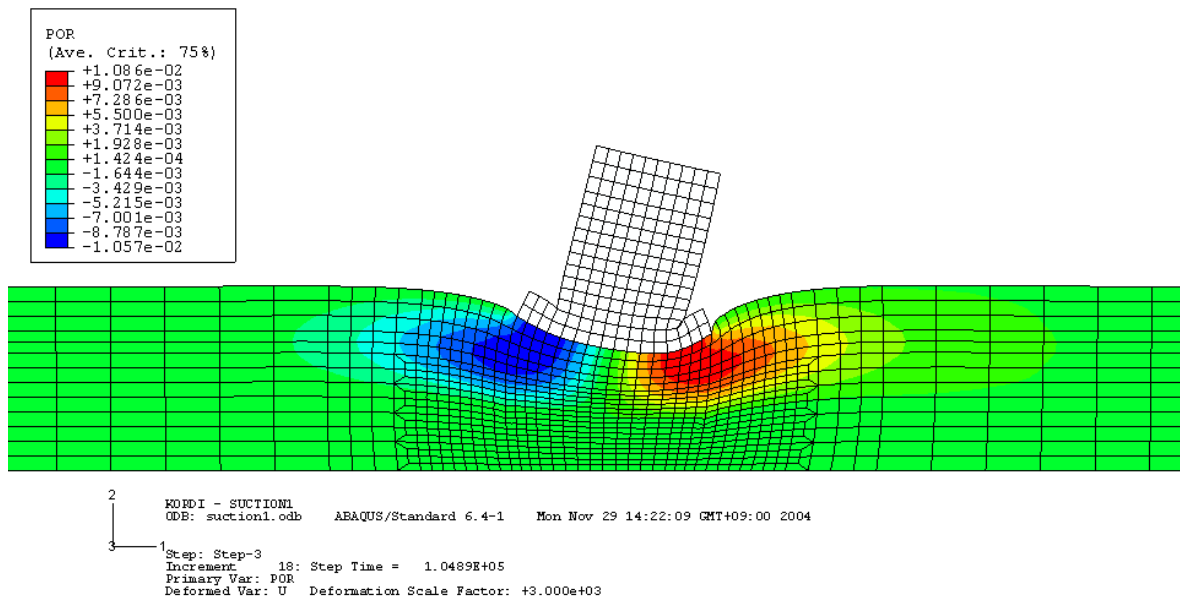


그림 4.3.5 원 설계 단면의 과잉간극수압 발생분위



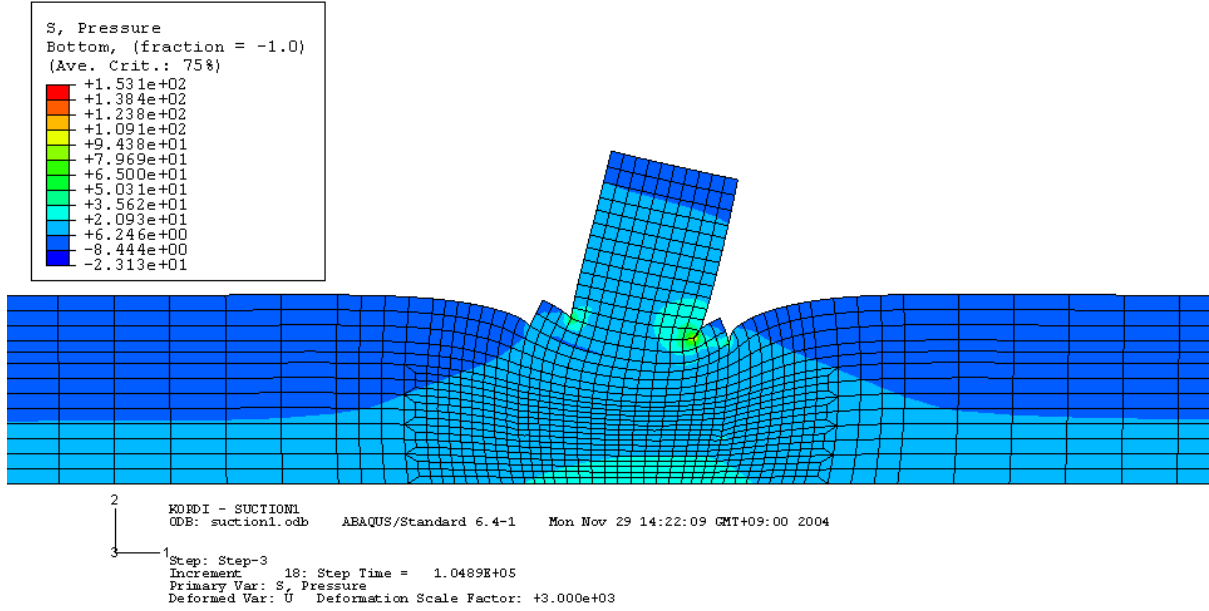


그림 4.3.6 원 설계 단면의 최종 평균주응력 분포

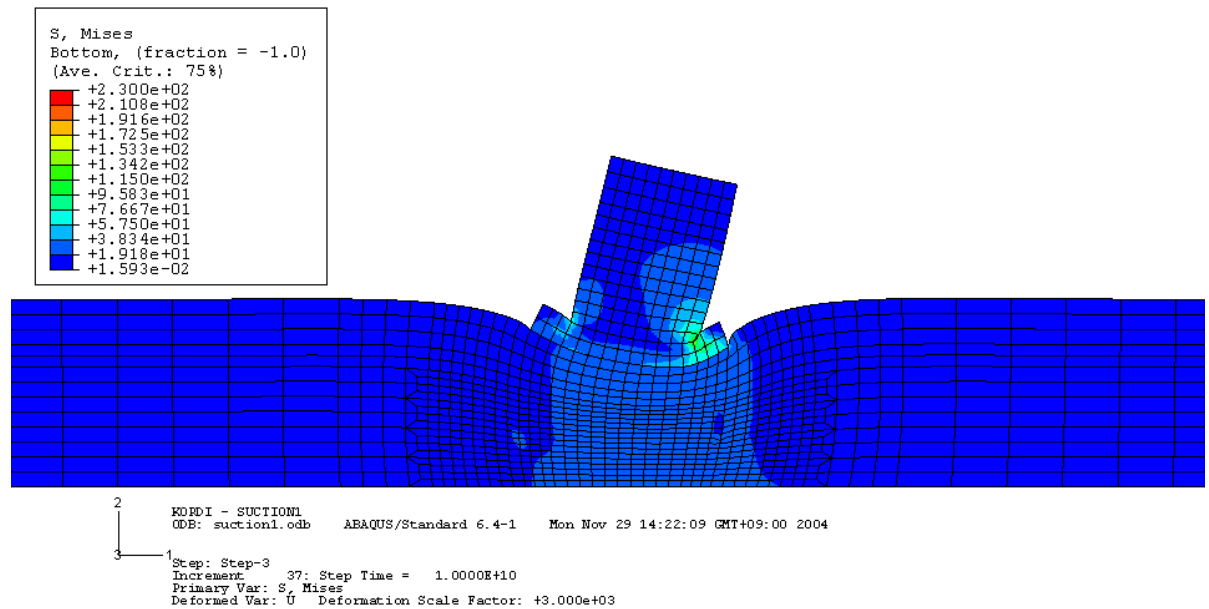
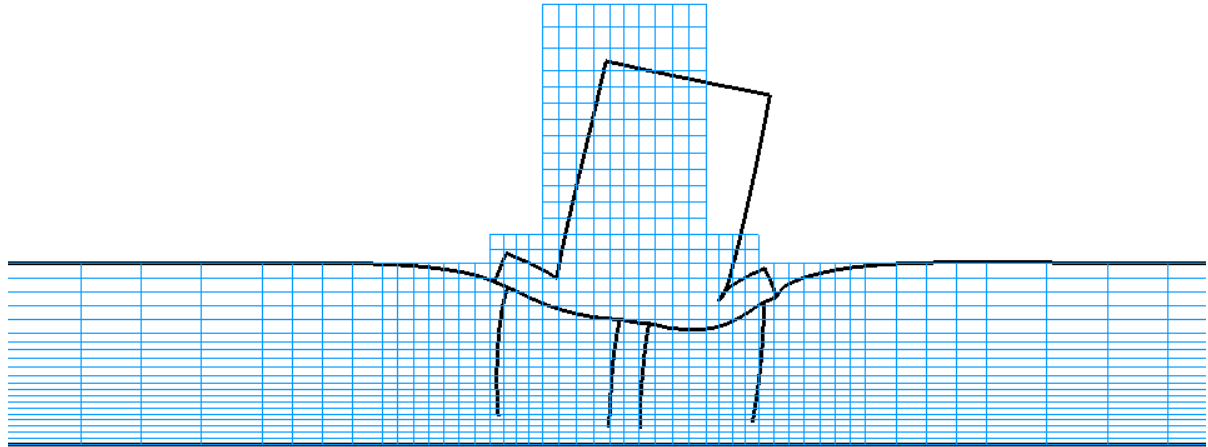
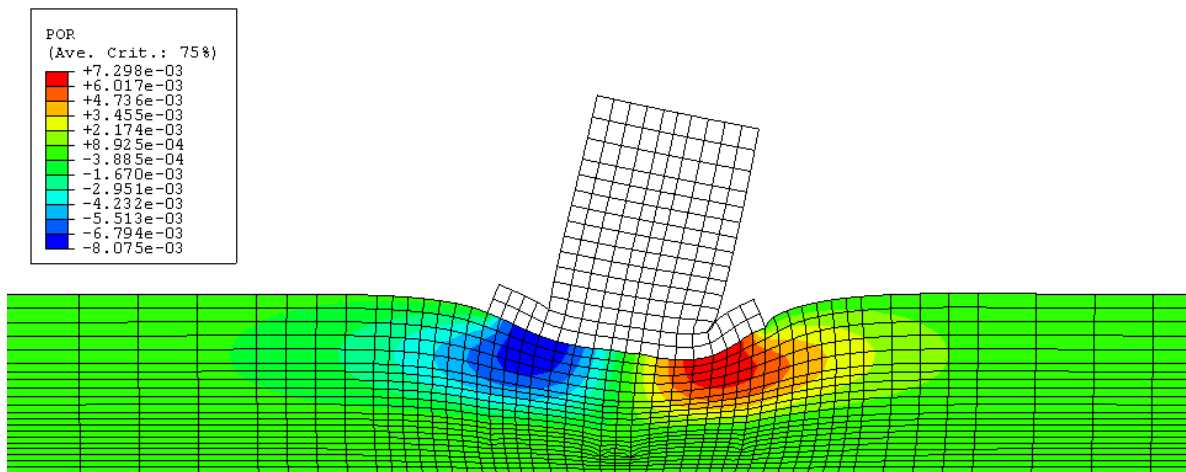


그림 4.3.7 원 설계 단면의 최종 축차응력 분포



2 KORDI - SUCTION2 ABAQUS/Standard 6.4-1 Tue Nov 30 00:43:57 GMT+09:00 2004  
 ODB: suction2.odb  
 1 Step: Step-3  
 Increment 37: Step Time = 1.0000E+10  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +3.000e+03

그림 4.3.8 실시 설계 단면의 최종 변위 양상



POR  
 (Ave. Crit.: 75%)  
 +7.298e-03  
 +6.017e-03  
 +4.736e-03  
 +3.455e-03  
 +2.174e-03  
 +8.925e-04  
 -3.885e-04  
 -1.670e-03  
 -2.951e-03  
 -4.232e-03  
 -5.513e-03  
 -6.794e-03  
 -8.075e-03

2 KORDI - SUCTION2 ABAQUS/Standard 6.4-1 Tue Nov 30 00:43:57 GMT+09:00 2004  
 ODB: suction2.odb  
 1 Step: Step-3  
 Increment 18: Step Time = 9.3417E+04  
 Primary Var: POR  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +3.000e+03

그림 4.3.9 실시 설계 단면의 최종 과잉간극수압 분포

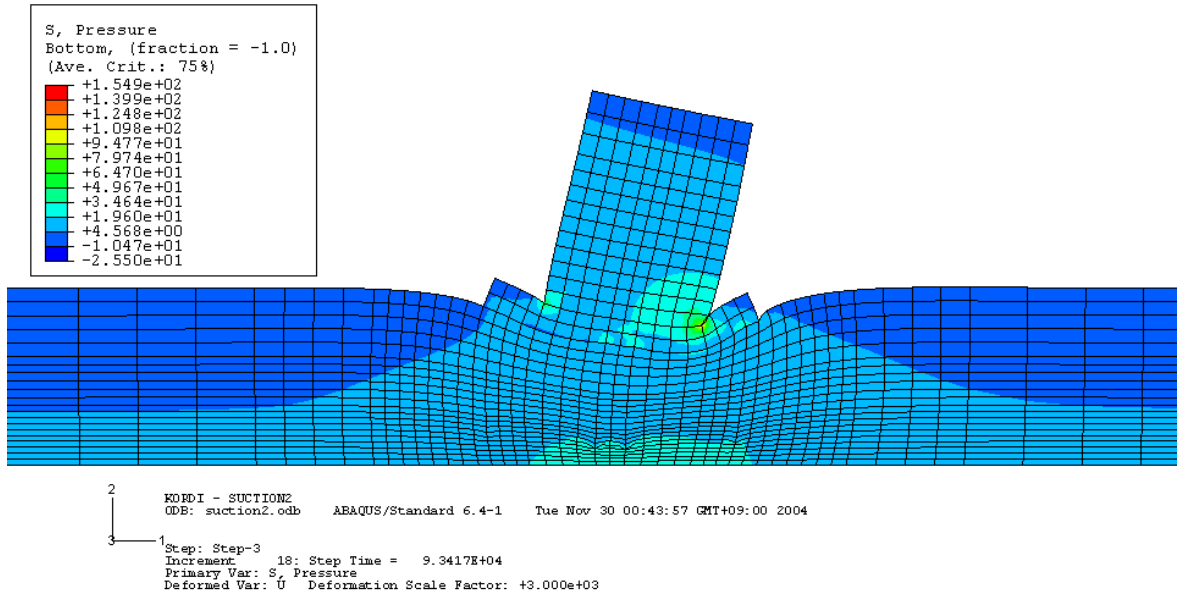


그림 4.3.10 실시 설계 단면의 최종 평균주응력 분포

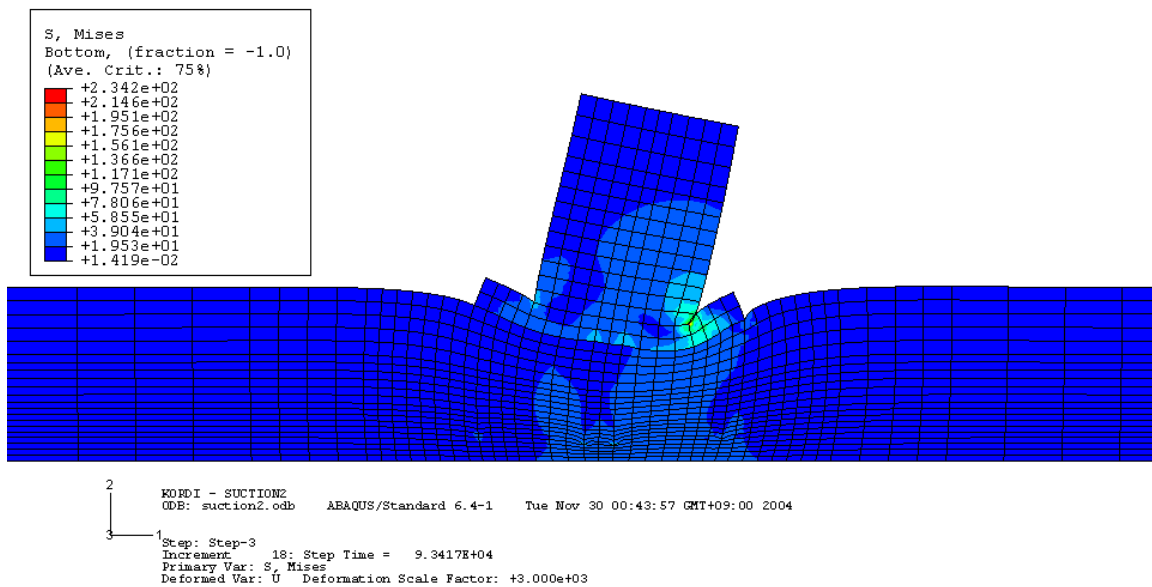


그림 4.3.11 실시 설계 단면의 최종 축차응력 분포

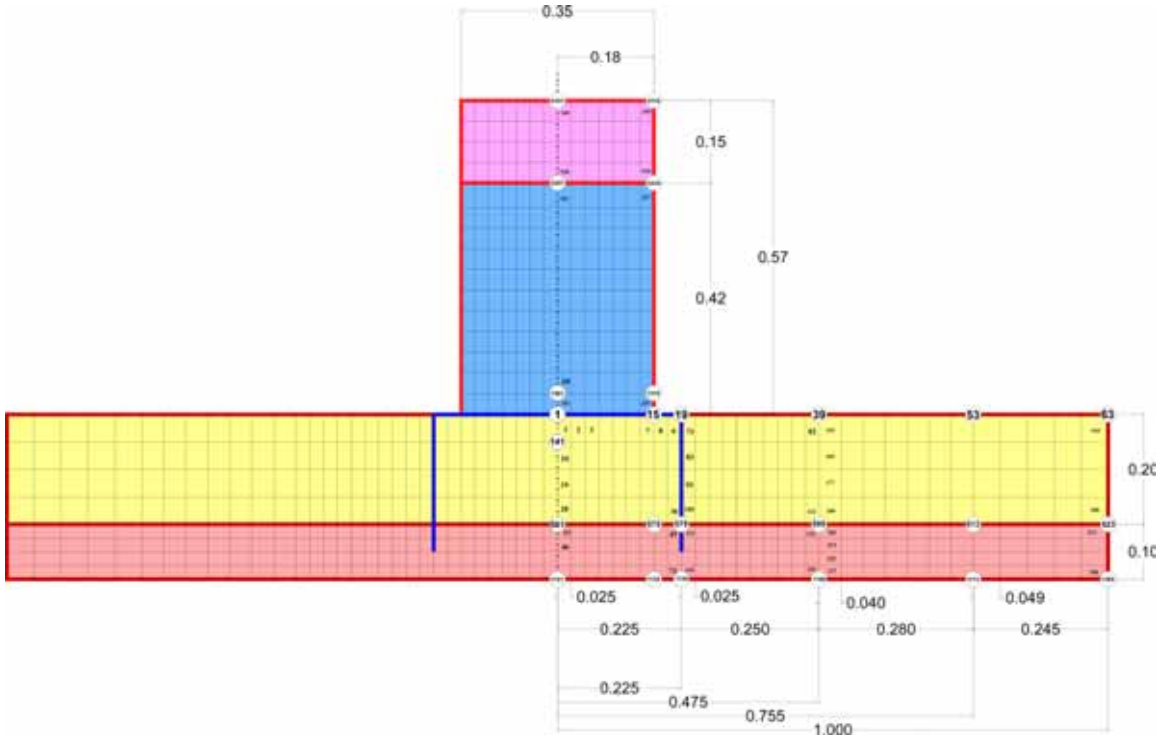


그림 4.3.12 원 설계의 모형실험단면 요소망

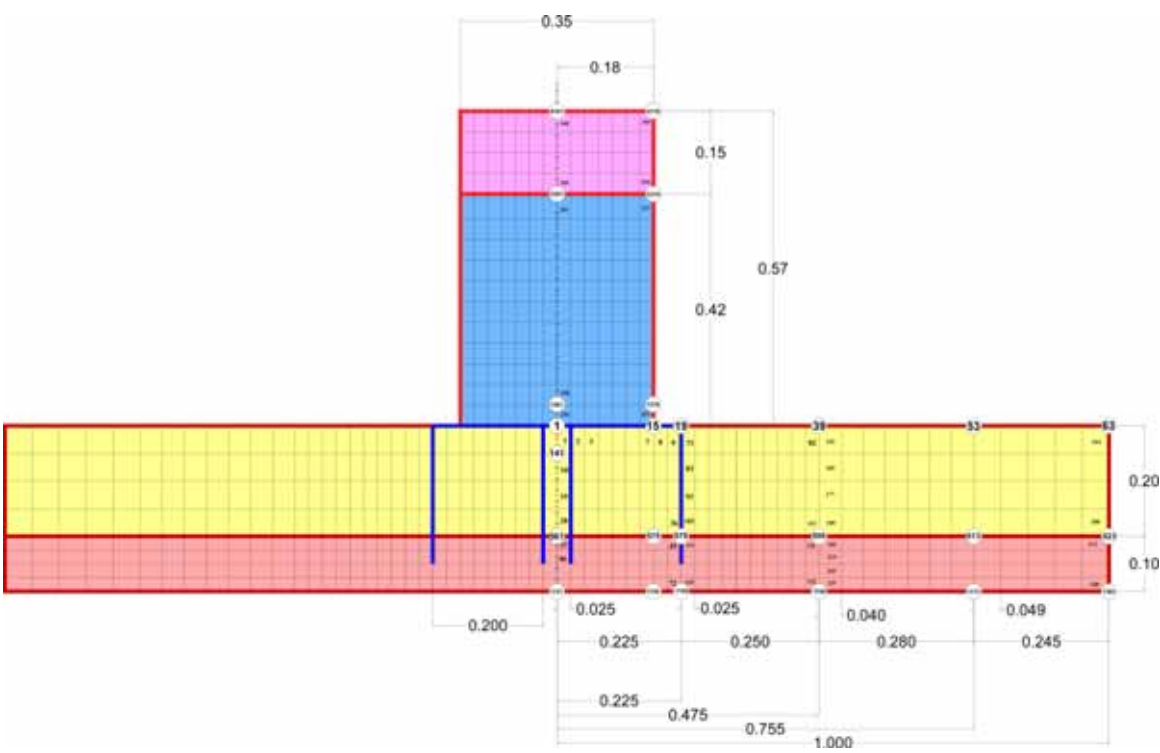
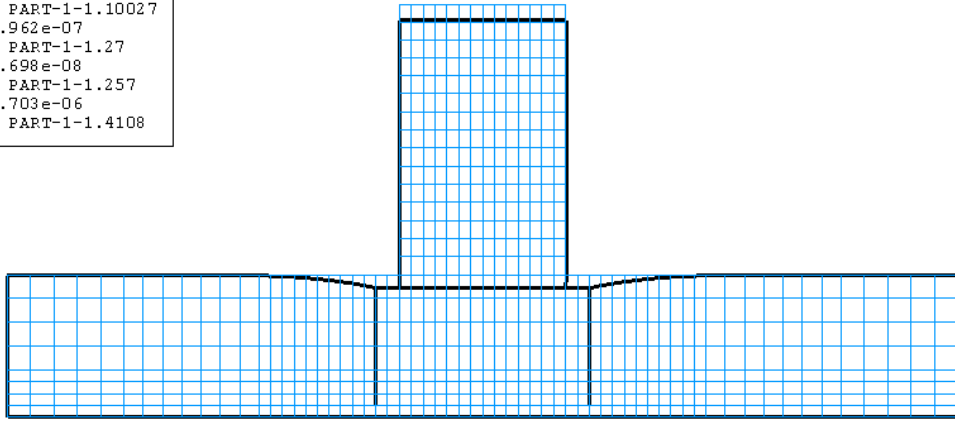


그림 4.3.13 실시 설계의 모형실험단면 요소망

```

Max X +3.045e-07
at node PART-1-1.10027
Min X -2.962e-07
at node PART-1-1.27
Max Y +2.698e-08
at node PART-1-1.257
Min Y -1.703e-06
at node PART-1-1.4108

```



```

2
KORDI - LAB1
ODB: lab1.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Tue Nov 30 13:50:49 GMT+09:00 2004
3
1
Step: Step-3
Increment 11: Step Time = 3600.
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.000e+04

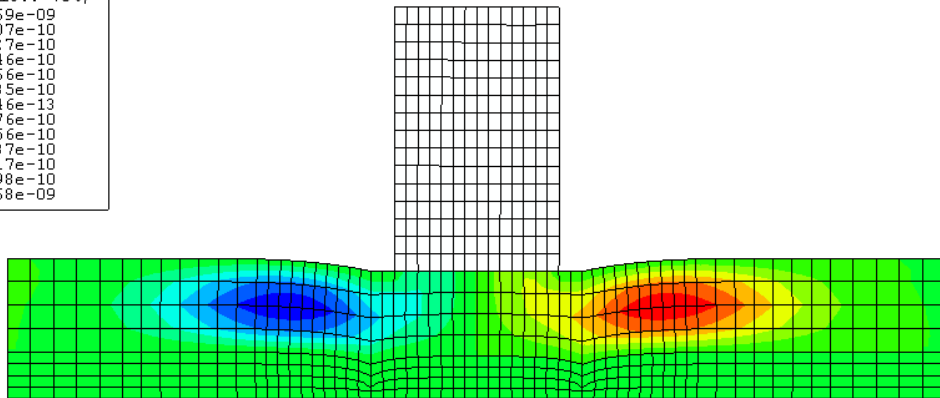
```

그림 4.3.14 원 설계 모형실험의 최종 변위 양상

```

POR
(Ave. Crit.: 75%)
+1.069e-09
+8.907e-10
+7.127e-10
+5.346e-10
+3.566e-10
+1.785e-10
+4.746e-13
-1.776e-10
-3.556e-10
-5.337e-10
-7.117e-10
-8.898e-10
-1.068e-09

```



```

2
KORDI - LAB1
ODB: lab1.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Tue Nov 30 13:50:49 GMT+09:00 2004
3
1
Step: Step-3
Increment 6: Step Time = 136.0
Primary Var: POR
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.000e+04

```

그림 4.3.15 원 설계 모형실험의 최종 과잉간극수압 분포

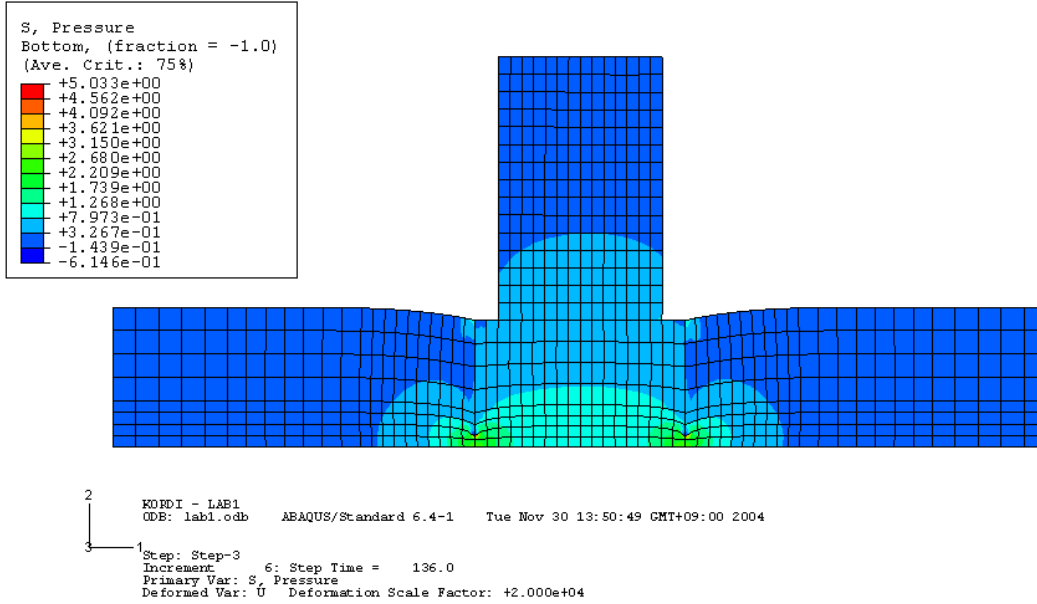


그림 4.3.16 원 설계 모형실험의 최종 평균주응력 분포

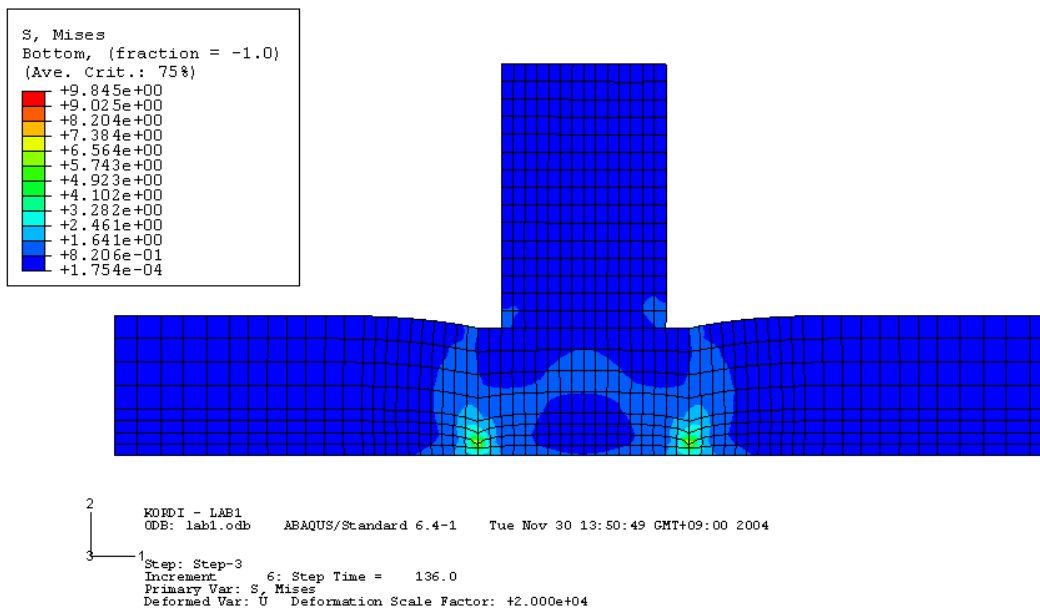
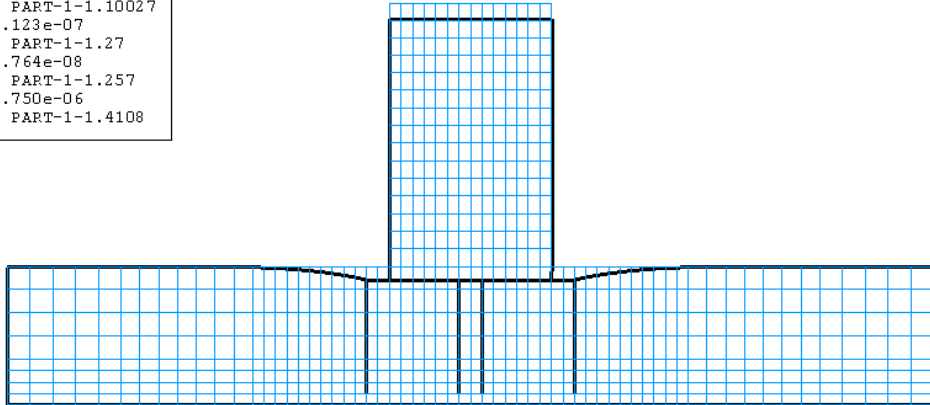


그림 4.3.17 원 설계 모형실험의 최종 축차응력 분포

```

Max X +3.201e-07
at node PART-1-1.10027
Min X -3.123e-07
at node PART-1-1.27
Max Y +2.764e-08
at node PART-1-1.257
Min Y -1.750e-06
at node PART-1-1.4108

```



```

2
KORDI - LAB2
ODB: lab2.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Tue Nov 30 14:02:33 GMT+09:00 2004
3
1
Step: Step-3
Increment 11: Step Time = 3600.
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.000e+04

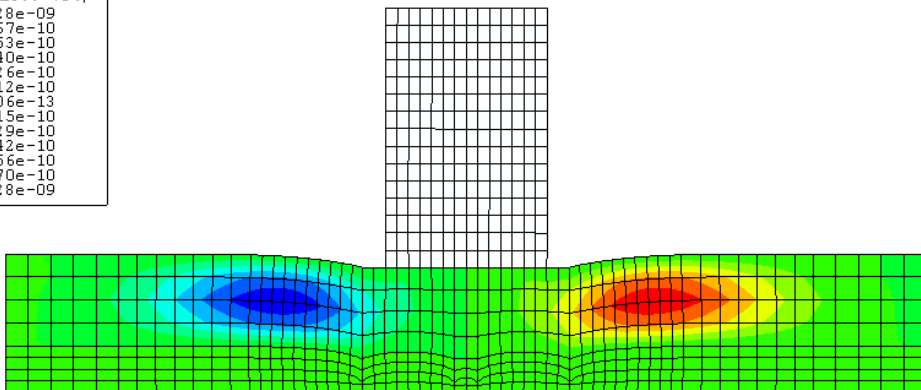
```

그림 4.3.18 실시 설계 모형실험의 최종 변위 양상

```

POR
(Ave. Crit.: 75%)
+1.028e-09
+8.567e-10
+6.853e-10
+5.140e-10
+3.426e-10
+1.712e-10
-1.206e-13
-1.715e-10
-3.429e-10
-5.142e-10
-6.856e-10
-8.570e-10
-1.028e-09

```



```

2
KORDI - LAB2
ODB: lab2.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Tue Nov 30 14:02:33 GMT+09:00 2004
3
1
Step: Step-3
Increment 6: Step Time = 136.0
Primary Var: POR
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.000e+04

```

그림 4.3.19 실시 설계 모형실험의 최종 과잉간극수압 분포

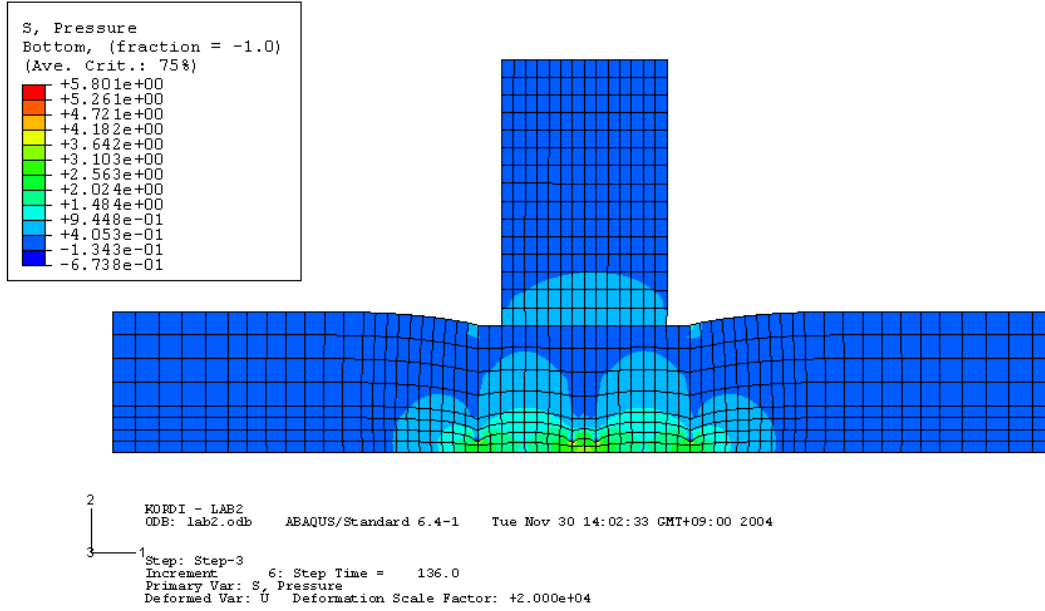


그림 4.3.20 실시 설계 모형실험의 최종 평균주응력 분포

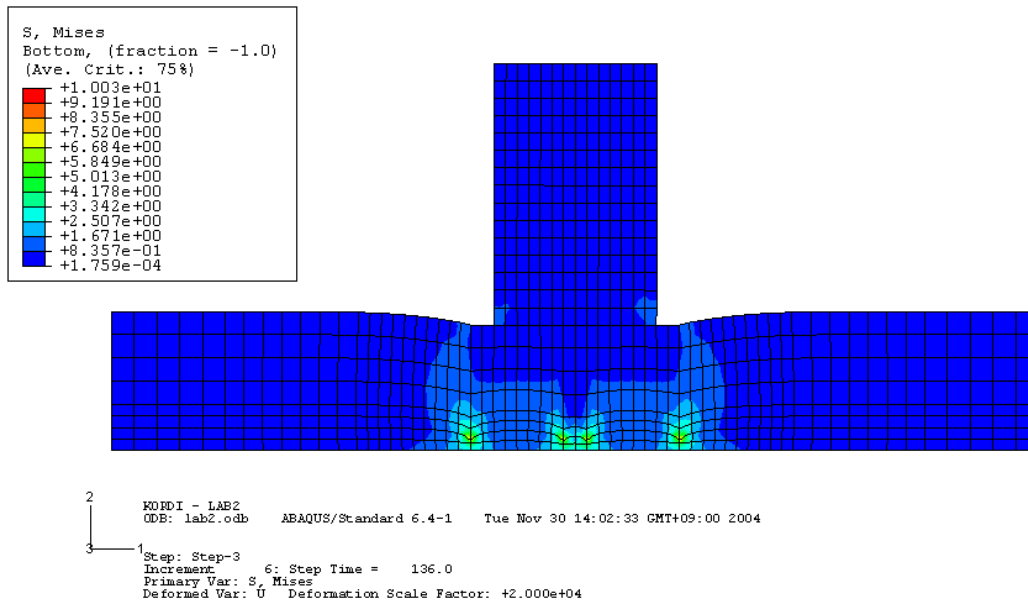


그림 4.3.21 실시 설계 모형실험의 최종 축차응력 분포



해석결과에서 얻어진 횡방향 천단변위를 비교한 표 4.3.2를 보면, 실제 단면과 모형 단면에서 모두 대형 석션파일을 설치한 경우보다 작은 석션파일 두개를 설치한 경우가 더 변위가 작게 발생하는 것을 알 수 있어 좀 더 안정적인 설계가 이루어진 것을 확인할 수 있다. 향후 시험시공이 완료되고 실제 과량하중에 대한 계측결과를 이용한다면, 실제 크기의 방파제에 대한 수치해석결과와 비교하여 뜻있는 결론을 얻을 수 있을 것으로 생각한다.

표 4.3.2 천단 최대 변위 비교(수치해석)

구 분	실제 단면		모형실험 단면	
	원 설계 (석션파일 1개)	실시설계 (석션파일 2개)	원 설계 (석션파일 1개)	실시설계 (석션파일 2개)
횡방향 천단 최대변위	2.54mm	2.21mm	$5.27 \times 10^{-5}$ mm	$5.02 \times 10^{-5}$ mm



## 제 5 장 결론 및 토의

### 제 1 절 결론 및 향후 일정

전체 연구의 7년차인 금년도 연구에서는 고파랑, 대수심, 연약지반의 악조건을 갖은 울산 신항 북방파제 구간에 적합한 석선파일기초 방파제를 50m 구간에 시험시공하기 위하여 실시설계를 실시하고, 그 중 25m 구간에 해당하는 석선파일기초 4함을 시공하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

#### 1. 실시설계

실시설계를 위한 지반조사 결과, 기본설계와 다소 지층 분포가 상이하여 상세 지반조사 결과를 바탕으로 시험시공 위치를 약간 이동하였다. 최종 설계 단면을 기준으로, 상부 점토층이 12.4m이며 하부에 모래자갈층이 지지층으로 역할을 하는 것으로 나타나 최종 석선파일기초 단면은 지름이 11m, 두께 55cm, 길이는 하부 모래자갈층에 2.5m 관입되도록 설계하여 최종 14.9m로 결정되었다. 엄격한 시공관리를 위하여 석선파일 상부와 내외부에 경사계와 간극수압계를 설치하여 관입력과 경사, 등을 계측하며 시공이 되도록 하였으며, 석선파일 하부 슈에 48개의 노즐을 설치하여 워터제트를 작동하여 예기치 못한 모래층의 관입을 위해 사용할 수 있도록 하였다. 최종 실시설계 단면은 다음 그림과 같다.

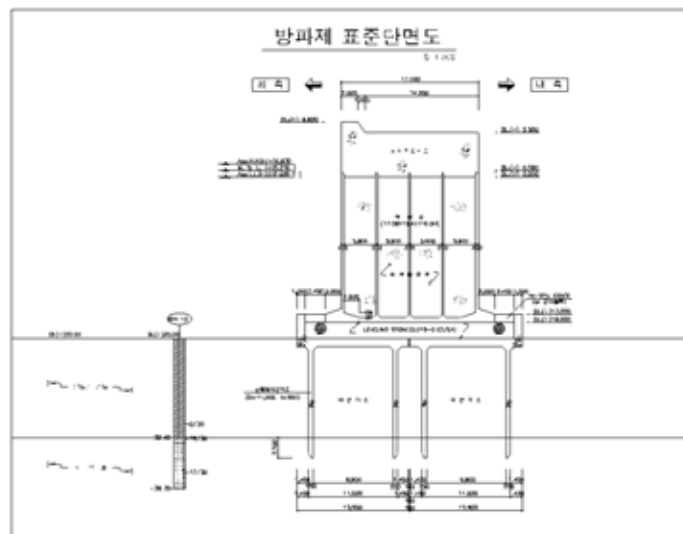


그림 5.1.1 최종 설계단면

## 2. 시험시공 결과 분석

석선파일기초 4함의 시공이 완료되었으며, 시공 중 석선파일의 기울어짐은 발생하지 않았으나, 하부 모래자갈층의 기울기로 인하여 최종 0도에서 4까지 기울어짐이 발생하였다. 워터제트를 이용한 관입이나 최대 석선압을 이용한 관입이 불가능할 정도로 견고한 지반으로 판정하여 최종 관입을 종료하였다. 4함 설치결과, 설치된 석선파일 기초간의 최대 수평이격거리는 3.29m이며, 최대 높이차는 0.7m 이다. 또한 석선파일기초 1함의 최대 기울기(높이차)는 약 4도(1.1m)로 나타났다. 또한, 석선파일기초 슬래브의 하부와 해저면의 이격거리는 약 1.4m~3.0m이다.

석선파일간의 수평이격거리 발생원인은 해상크레인에 의한 거치 부정확성 때문으로 최종 기초 사석의 포설시 이격구간에 T형 블록 거치하여 기초사석 포설할 계획이며, 석선파일간에 발생한 높이차는 하부 모래자갈층의 경사 때문에 발생했지만 기초사석의 포설두께가 2.5m이므로 최대 0.7m의 높이차는 문제가 없을 것으로 판단되며, 이로 인해 발생한 최대 4도 가량의 경사도 편심으로 인한 영향을 고려해 재검토가 필요한 사항이다. 또한 석선파일기초의 슬래브와 해저면의 이격문제는 하부 모래자갈층이 지반조사로 예측한 것보다 더 단단했기 때문에 발생했지만 석선파일기초가 선단지지 개념으로 설계되었기 때문에 지지력에는 문제가 없을 것으로 생각된다.

## 3. 안정성 평가 결과

수치해석과 수리·지반모형실험 결과에서 대형 석선파일을 설치하는 경우보다 작은 석선파일을 여러 개 설치하는 것이 더 안정적인 결과를 보이고 있었으며, 안정성 평가 결과를 향후 시험시공이 완료되고 실제 과량하중에 대한 계측결과와 비교하여 석선파일기초의 설계법의 적절성을 검증할 수 있을 것으로 예상되며, 또한 석선파일기초 방파제의 횡방향 하중에 의한 거동 특성을 규명할 수 있을 것으로 생각한다.

## 제 2 절 토의

다음은 중간발표에서 과제 전반에 대한 토의 내용을 정리한 것으로 질문과 답변의 형식으로 서술하였다.

- ① 지금 수행한 실험(정적 모형토조실험, 수리모형실험)의 의미가 큰 의미가 없는 것 같은데, 원심모형(centrifuge) 실험을 하지 않은 이유는?
  - 예산상 문제로 인해 원심모형시험이 제외된 것으로 알고 있습니다.
- ② 수치해석과 계측결과를 서로 비교할 것인지? 이것이 어떤 의미가 있는 것인지?
  - 수치해석 결과와 계측결과를 비교하여, 수치해석에 대한 합리적인 추론이 가능하도록 한다면, 직접 실험이 불가능한 다양한 형태의 방과제 조건에 대한 해석을 통해 다른 현장조건이나 다른 설계조건에 대한 설계에도 반영할 수 있는 장점이 있습니다.
- ③ 계측 위치가 ‘시공 중’과 ‘시공 후’가 서로 틀린 것 같은데, 정확한 표시를 하도록?
  - 시공 중 계측과 시공 후 계측은 목적이 다른 만큼 구분하여 표기하고 있습니다.
- ④ 모래층 관입깊이는 어떻게 결정하나?
  - 현재 석션파일의 지지력은 선단만이 지지하는 선단지지말뚝과 같은 방식으로 계산되기 때문에, 관입깊이가 선단지지력의 계산에 아주 중요한 역할을 합니다. 따라서 관입깊이는 필요한 안전율이 확보될 수 있는 깊이로 정하였습니다.



## 참고문헌

1. Bang, S. (2002) "Ultimate Horizontal Loading Capacity of Suction Piles", International journal of offshore and polar engineering, Vol.12 No.1
2. Cho, Y, and Bang, S, and Preber, T, (2002). "Transition of Soil Friction During Suction Pile Installation," Canadian Geotechnical J, Vol 39. No 5, pp1118-1125.
3. Cho, Y. (2002) "Field Validation of Soil Friction Transition During Suction Pile Installation" International journal of offshore and polar engineering, Vol.12 No.4
4. Renzi, R., Maggioni, W. and Smits, F. (1991), "A centrifugal study on the behavior of suction piles", Balkema, Rotterdam, p.196.
5. Prakash, S., Sharma, H.D. (1989). "PILE FOUNDATIONS IN ENGINEERING PRACTICE." John & Sons, Inc.
6. 김낙경. (1986). 水平載荷 말뚝의 舉動解析에 關한 研究. 석사학위논문, 고려대학교
7. 김병탁, 김영수, 서인식, 손영환. (2000). 포화토 지반에서 강관말뚝의 수평거동에 관한 연구 대한토목학회 논문집, Vol.20 No.7
8. 김병탁. (2000). 비균질 사질토 지반에서 말뚝의 수평거동 연구. 석사학위논문, 경북대학교, 경북.
9. 김수일, 정상섭. (1996). 말뚝기초의 지지력 산정방법에 관한 연구. 연세대학교 공과대학 산업기술연구소.
10. 박용원. (1994). 말뚝기초의 종류 및 적용성. 토지개발기술. 한국토지개발공사, (통권25호), 6-17.
11. 방상철, 조영기. (2004). Suction Pile 설계 및 적용성 분석. 기초기술 학술발표회. 한국지반공학회, 3-15.
12. 배강현. (2001). 흡입말뚝의 연직방향 지지력에 대한 연구. 석사학위논문, 국민대학교
13. 이상덕. (1996). 기초공학. 엔지니어즈.
14. 조영기. (2003). Suction Pile 공법과 신개념 해상구조물. 건설감리. 한국건설감리협회, 6-9.
15. 한국지반공학회. (2002). 깊은기초. 구미서관.





## **부록 - 자문회의 내용**

## A.1 1차 자문회의 결과

- 일시 : 2004년 7월 1일 (목) 10:00 ~ 12:00
- 장소 : 한국해양연구원 국제회의실
- 자문위원 : 편종근(명지대학교 교수), 김명모(서울대학교 교수), 유혁근((주)한국항만기술 단 부사장), 정성교(동아대학교 교수), 오세범((주)건일엔지니어링 사장), 이태환(극동건설 부사장), 정상섭(연세대학교 부교수), 임선택(삼안건설기술공사 이사), 함종철(대양건설컨트 상무)

### <편종근>

1. 사업개요에서 '04년도 사업비 총액에 오류가 있고 총사업비 계산이 잘못되어 있습니다. 그리고, 총사업비에서 민자가 얼마나 드는지 구분할 필요가 있습니다.

답변) 사업비의 경우 정부예산이 8,713백만원이고, 민자예산이 약 4,000백만원입니다.

2. 사업비 계획과 공사비 예상액이 잘 맞는 것인지 확인이 필요합니다. 그리고, 공사비 예상표에 계측비가 누락되었는데 계측비용이 얼마나 드는 것인지요?

답변) 계측비용은 계측기 구입을 포함하여 총 2억 정도이고, 2003년도 사업비용에 이미 포함되어 있습니다.

3. 노르웨이에서 시공한 플랫폼은 방교수님 연구와 관련이 없는지요?

답변) 관련이 없습니다.

4. 파일 근입 깊이에 대한 근거는 어떤 것입니까?

답변) 지반조건에 따른 최대 근입량을 계산하고 이것이 모자랄 경우 파일 직경을 조절해서 관입량을 확보할 수 있도록 합니다.

### <김명모>

1. 지반조건이 기본계획과 다르다고 했으니 그 부분에 대한 검토가 필요함.

답변) 우선 현 지반조사 결과를 바탕으로 설계를 추진하고, 이후 추가 보링을 수행하여 재검토하도록 하겠습니다.

<류혁근>

1. 울산 해저지형이 아주 묘합니다. 암반심도가 불규칙해서 차이가 많이 납니다. 석션파일 기초 적용시 불균질한 지반을 어느 정도 고려할지 자세한 조사가 필요합니다.

답변) 그라우팅 기법을 활용하여 불균질한 지반을 보완하던지, 설치위치를 이동하는 방법도 고려하겠습니다.

2. 파일 시공시 지반 불균질로 인한 레벨의 불균형이 발생할 수 있습니다. 관입 중에 파일이 회전해서 인접파일과 잘 맞지 않을 수 있는 문제에 대한 검토가 필요합니다.

답변) 파일의 크기가 작을 때는 문제가 될 수 있지만 석션파일의 크기가 큰 경우는 회전효과가 거의 없이 안정적으로 관입됩니다. 만일 그런 문제가 발생하면 시공과정에서 충분히 보정이 가능합니다.

<오세범>

1. 석션파일에 편심력을 받게 될텐데 관촬율지에 대한 검토와 지층에서 모래층이 없는 것에 대한 적절한 대비가 필요합니다.

답변) 9.6일 현재 추가 지반조사 중이며, 추가 지반조사가 완료된후 최종결정을 내릴 계획입니다.

<정상삼>

1. 선단지지의 효과가 없어도 파일의 지지력이 충분한지에 대한 검토가 필요합니다.

답변) 사이즈가 작은 파일은 선단지지가 필요하지만 선선파일은 단면이 크기 때문에 괜찮습니다. 그리고 직경이 워낙 커서 선단 면적이 크기 때문에 그것으로 선단지지가 충분합니다. 또한, 교각등은 장기침하에 매우 민감하지만 방파제는 그렇게 민감하지 않습니다. 그리고, 석션파일을 시공한 후 최대의 압력을 추가로 가할 수 있는데 이 때 선행재하 효과가 있어 추가침하를 어느 정도 줄일 수 있고 또한 재하시험효과도 얻을 수 있습니다.

<정성교>

1. 계측기를 매설할 계획이 있다면 틸트미터를 같이 설치하는 것이 필요합니다.

답변) 설치하여 계측할 예정입니다.

<임선택>

1. 지층의 불균질로 인한 부등침하 문제를 검토 바라며 염해 등의 내구성에 대한 대책이 필요합니다.

답변) 모래층에 거치될 경우에는 부등침하의 문제가 없으며, 기반암에 거치될 경우 기반암의 불균질로 인한 부등침하는 그라우팅으로 부등침하를 방지토록 하였습니다. 또한 금번 실험 구조물은 설치 후 약 2년 후 제거를 기본원칙으로 하였기 때문에 염해는 고려치 않았습니다.

2. 레벨링 사석을 많이 사용하면 공사비 증가로 이어질 수 있으므로 최소한 사용할 수 있는 방안이 필요합니다.

답변) 항만설계기준의 권장높이(약 1.5m이상)와 석션파일 설치시 지반굴곡으로 인한 실제 계획고와 오차가 발생할 경우를 고려하여 적정한 높이를 산정하였습니다.(적용 : 1.6m)

3. 현장시공시 시공위치 등에 대한 오차가 발생할 수 있으므로 여기에 대한 대비가 필요합니다.

답변) 해상크레인의 선미와 후미 양쪽에 GPS를 설치하여 기준선을 맞출 계획이며, 석션기초의 슬라브에 파이프를 설치하여 시공시 Guide 역할을 하도록 할 예정입니다.



부록 그림 A-1 1차 자문회의 장면-1



부록 그림 A-2 1차 자문회의 장면-2

## A.2 2차 자문회의 결과

일시 : 2004년 8월 30일 (월) 10:00 ~ 12:00

장소 : 한국해양연구원 국제회의실

자문위원 : 편종근(명지대학교 교수), 김명모(서울대학교 교수), 유혁근((주)한국항만기술단 부사장), 오세범((주)건일엔지니어링 사장), 임선택(삼안건설기술공사 이사), 함종철(대양건설턴트 상무), 장학성(유신코퍼레이션 상무)

### <편종근>

1. 방파제의 마루높이가 6.8m가 아니라 북방파제 기준인 7.0m로 설계하여야 하는 것이 아닌지요?

답변) 향후 울산항의 설계과고가 공식적으로 결정되면 추가로 검토할 계획입니다.(상치높이 조절)

2. 수리모형실험이 이미 수행된 것으로 나오는데. 결과가 어떻게 나왔습니까?

답변) 토조를 활용한 수리모형실험, 즉 지반과 석선파일 및 파압 등을 고려한 수리실험을 곧 수행할 예정입니다. 이 실험에서는 점성토 지반의 두께와 근입깊이, 그리고 지반조건 등에 따른 결과를 비교·분석할 계획입니다.

3. 원호활동 계산시 파압을 고려하였는지요?

답변) 이미 설계에 반영하였습니다.

4. 3차원 회절계산을 통하여 독립구조물에 작용하는 파압을 고려하는 것이 어떨지요?

답변) 해석을 수행하도록 하겠습니다.

5. 계측도면이 보고서에 누락된 것으로 보입니다.

답변) 실시설계보고서 p.105-112에 나타나 있습니다.

### <김명모>

1. 지반조사 결과에 따라서 석선파일의 설치 위치를 이동하는 것이 좋을 듯 합니다.

답변) 추가보링을 곧 수행하고 이를 바탕으로 설치위치를 이동하도록 하겠습니다.

2. 석션파일의 지지력이 충분하지 않을 것으로 보입니다. 특히, 폐색효과를 고려한다면 더욱 충분하지 않을 것으로 보입니다.

답변) 재검토후 보고하겠습니다.

#### <류혁근>

1. 50m 구간에 대한 시험시공이기 때문에 이에 따른 파압을 고려해 봄이 좋을 듯합니다.

답변) 3차원 회절계산을 통한 해석을 수행할 계획입니다.

2. 울산항에 대한 설계파가 곧 변할 것으로 예상되는데, 이에 따른 설계를 고려하였는지요?

답변) 설계시는 변하지 않았고, 이번은 시험시공을 위한 것이라 기존의 설계파를 그대로 활용하였으며, 향후 울산항의 설계파고가 공식적으로 결정되면 추가로 검토할 계획입니다.

3. 시험시공 날짜를 변경하는 것이 어떤지요?

답변) 가능하다면 올해 회계년도 내에 끝낼 수 있도록 하겠습니다.

#### <오세범>

1. 50m 구간의 경우 실제 북방파제에 비해 파력이 틀릴 것으로 예상된다.

답변) 3차원 회절계산을 통한 해석을 수행할 계획입니다. 그리고 충분한 유의폭을 두고 상부 케이슨을 설치할 계획입니다.

2. 파압계를 설치할 계획인지요?

답변) 상부 케이슨이 시공될 경우 파압계를 설치할 것입니다.

3. 가능하다면 어렵고 열악한 조건으로 설치위치를 두는 것이 어떨까요?

답변) 추가 지반조사 결과와 공정, 그리고 예산 등을 모두 고려하여 결정할 것입니다.

<함종철>

1. 보링결과의 정밀성이 요구됩니다.

답변) 추가 지반조사 이외에도 실제 시공 직전에 설치 위치를 비롯하여 주변 지반에 대상으로 정밀한 보링을 수행할 예정입니다.

2. 예산 등의 문제가 있을 경우에 설계과압의 계산시 50년 빈도보다 적게 설계하여 천단고를 줄이는 것이?

답변) 원래 본 사업의 목적이 울산신항의 조건을 최대한 반영하여 시험 시공하는 것이기 때문에 천단고를 원조건과 맞추는 것이 필요할 것으로 보입니다.

<장학성>

1. 케이슨의 위치를 setting하는데 있어 오차가 발생할 가능성이 클 것 같은데요?

답변) 해상크레인의 선미와 후미 양쪽에 GPS를 설치하여 기준선을 맞출 계획이며, 석션기초의 슬라브에 파이프를 설치하여 시공시 Guide 역할을 하도록 할 예정입니다.

2. 투수계수가 낮은 경우에는 grouting이 잘 안될 것으로 보이는데, 이에 대한 대책은 있는지요?

답변) 지반조사 후 모래지반으로 옮길 계획입니다.

<임선택>

1. 설계에 활용한 콘크리트 시방기준을 2003년도에 개정된 것으로 하는 것이?

답변) 그렇게 하도록 하겠습니다.(단위계 조정)

2. 석션파일 상판의 경우 1방향보다는 2방향 slab로 하는 것이 어떨지요?

답변) MIDAS를 이용하여 2방향 슬래브로 이미 해석을 수행하였습니다.

3. 충전제를 활용하는 것이 어떨지요?

답변) 충전대신 파력에 대한 저항력을 높이기 위하여 파일 상부를 완전 밀폐할 계획입니다.



4. 설치시 지반 지지력을 검토하는 것이 좋을 것 같습니다.

답변) 반력계를 활용하여 지반지지력을 모니터링 할 계획입니다.

5. 실제 방파제가 설치될 경우 석션파일 key의 활용성 어떤가요?

답변) 제거하지 않고 활용할 수 있는 방안을 고려하겠습니다.

6. 염해 등 내구성에 대한 검토는 있습니까?

답변) 금번 실험 구조물은 설치 후 약 2년 후 제거를 기본원칙으로 하였기 때문에 염해는 고려치 않았습니다.



부록 그림 A-3 2차 자문회의 장면-1



부록 그림 A-4 2차 자문회의 장면-2

## A.3 3차 자문회의 결과

- 일시 : 2004년 12월 2일 (목) 13:00 ~ 15:00
- 장소 : 울산신항 민자부두현장 상황실
- 자문위원 : 편종근(명지대학교 교수), 정성교(동아대학교 교수), 정상섭(연세대학교 부교수), 함종철(대양컨설팅 상무), 장학성(유신코퍼레이션 상무)

### <정성교>

1. 지반상태가 불규칙 할 때 pile의 leveling 문제는?

답변) 현재 시공 상태에 대해서는 1m 정도의 단차가 발생하였기 때문에 기초 사석으로 충분히 만회 가능하며, 향후 석션파일의 워터제트 기능을 보장하거나 시추기능을 보장해서 이 부분에 대한 문제는 해결되어야 할 사안이라고 생각합니다.

2. tilter meter 추가 설치는?

답변) 현재 2차원 방향에 대한 경사계가 2개 부착되어 있으며, 내년도에는 추가 설치를 검토해 보도록 하겠습니다.

3. 자갈층에 석션압이 작용했을 때 장·단기 영향 검토 필요?

답변)

### <장학성>

1. 계측기 반력계가 선단에 설치되어 있으므로 외력(파랑 등)에 따른 반력변화를 지속적으로 추진요망

답변) 다양한 항목에 대한 계측계획을 추가적으로 수립할 계획에 있습니다.

2. 한쪽의 반력뿐만 아니라 양쪽의 반력도 측정하고, 작용하중 측정을 위해 파압도 측정요망

답변) 파압 측정은 이미 계획되어 있으며, 반력계를 추가 설치할 계획도 있습니다.

### <함종철>

1. 석션파일의 기울어짐을 관리하는 방안은?

답변) 석션압과 크레인의 힘으로 충분히 경사 없이 가능합니다.

2. 케이슨의 위치가 1m 이상 올라오면 구조물 형태가 변화되어야 함

답변) 석션이 원래계획보다 1m 올라와 있는 것은 현재 구조물의 안정성 측면에서는 큰 문제가 없으므로 향후 상부 케이슨 제작 시 반영하여 계속적으로 수정해 나가겠습니다.

<정상섬>

1. 반력계의 추가가 필요하지 않은가?

답변) 추가적인 계측기를 설치하여 다양한 거동에 대한 연구를 수행할 계획입니다.

2. 재하시험 계획이 있는지?

답변) 현실적으로 일반적인 현장 재하시험은 불가능하며, 석션압을 이용한 하중 재하가 가능하기 때문에 이를 이용한 재하시험은 계획 중에 있습니다.

<편종근>

1. 1차, 2차와 마찬가지로 자문회의 결과와 조치사항에 대해 요약하여 이메일로 전송해 주시기 바랍니다.

답변) 그렇게 조치하겠습니다.



부록 그림 A-5 3차 자문회의 장면



부록 그림 A-6 현장견학 장면

## **부록 - 시공관련 사진첩**

## ■ 제작장 조성



제작장부지 정리작업



기초잡석포설 및 다짐



거푸집 조립



콘크리트 타설





제작장 조성 완료

## ■ 석션 파일 제작



슈(Shoe) 거치 및 세팅



워터제트 노즐 및 지지철근 조립



벽체 1단 타설



벽체 2단 타설



벽체 3단 타설



들음고리 설치



벽체 4단 타설



간극수압계 설치



벽체 5단(헌치) 타설



초음파계 설치



석션펌프 배관 및 공기배출구 설치



슬래브 타설



경사계 설치



전단벽 타설



## ■ 석션 파일 운반 및 거치



석션펌프 체결



들음고리 체결



석션파일 권상



석션파일 운반



석션파일 가거치



워터제트 체결



석션파일 가동 및 관입시작



석션파일 관입 - 1



석션파일 관입 - 2



석션파일 관입 계측 및 모니터링

## 주 의

1. 이 보고서는 해양수산부에서 시행한 해양수산연구개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 해양수산부에서 시행한 해양수산연구개발 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.