굴패각 혼입
특수콘크리트 개발 (V)

－최종보고서－

2004.12

연구기관/한국해양연구원

제 출 문

해양수산부장관 귀하

본 보고서를 “굴패각 혼입특수콘크리트 개발”의 최종연구보고서로 제출합니다.

2004.12

주관연구기관명: 한국해양연구원

주관연구책임자: 윤길림

연 구 원 : 채광석, 조흥연, 심재설
박우선, 장인성, 권오순
한상훈, 염기대, 이달수
채장원,오영민

협동연구기관 : 인하대학교
협동연구책임자: 윤여원

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2004.3 - 2004.12	단계구분	5단계/5단계 (최종)
연구사업명	해양수산연구개발사업				
연구과제명	굴패각 혼입 특수콘크리트 개발(최종)				
연구책임자	윤길림	해당단계 참여연구원수	총: 13명 내부: 12명 외부: 1명	해당단계 연구비	정부:100,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양연구원 연안항만공학본부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명:		상대국연구기관명:		
위탁연구	연구기관명: 인하대		연구책임자:윤여원		

요약	보고서면수	227

가. 실규모의 굴패각-모래 혼합토에 대한 모래다짐말뚝(SCP)의 현장타설시험

굴패각과 모래를 혼합한 SCP에 대해, 5종류 굴패각 혼합비(10%, 20% ,30%, 40%, 50%)를 다르게 하여 SCP거동에 대한 비교 및 분석을 수행하였다. 굴패각혼합토의 균등계수(C_u)의 범위는 2.47 - 3.25로, 굴패각의 혼합비율이 증가할수록 균등계수는 증가하는 양상을 보이고 있다. 곡률계수의 경우에(C_g)는 0.69 - 1.08의 범위를 나타내고 있으며, 굴패각의 혼합비가 감소할수록 곡률계수가 증가하였다.

원지반은 실트질 점토층과 세립질의 모래층으로 심도별로 구성이 되어있으며, 표준관입시험(SPT)의 N값은 2-3정도의 초연약지반이다. 굴패각혼합토 N값은 5-10을 나타내었으며, 혼합비에 따른 N값은 변화는 나타나지 않았다.

나. 굴패각 혼합 모래다짐말뚝에 대한 정재하시험

시험결과의 분석방법으로 극한하중, 항복하중, 침하량에 의한 분석법을 실시하였다. 굴패각 혼합비에 따른 하중-침하곡선에서 비슷한 침하양상을 보였으며, 혼입별 항복압력은 52-61 tonf/m^2 ,전체침하량 25.4 mm에서는46-51 tonf/m^2 으로 나타났다. 또한 지중침하의 양상을 고찰하면, GL(-) 2.0m의 시험체 중심의 침하량을 비교하면, 각각에서 52-78 tonf/m^2에서 급격하게 증가하여 GL(-) 2.0m 아래까지 침하가 진행되는 것을 알 수 있다. GL(-) 4.0m, 6.0m, 8.0m에서의 침하량은 5mm 내외로 불규칙한 양상을 보였다.

색인어 (각 5개 이상)	한글	굴패각, 재활용, 혼합토, 고화재, 모래다짐말뚝
	영어	Oyster shell, Recycling, Mixed soil, Binder, Sand Compact Pile

요 약 문

I. 제 목

굴패각 혼입특수콘크리트 개발 (V) -최종보고서-

II. 연구개발의 목적 및 필요성

가. 세계적으로 자원의 재활용에 대한 관심이 점점 증가하고 있어 해양폐기물에 대한 연구필요성은 날로 높아지고 있다. 우리나라의 남해 및 서해 연해에서 발생하는 연간 약 30만 톤의 굴패각 폐기물의 효과적인 활용방안을 연구의 일환으로, 연약지반 개량재나 샌드파일재의 모래대체재료 등의 활용가능성을 분석하여, 폐기물의 재활용 증진 및 재활용기술 개발을 도모하려한다.

나. 연약지반 개량공법 중 많은 실적을 가지고 있는 모래다짐말뚝 (SCP)공법에 대해서 모래의 대체재로서의 굴패각의 활용성을 연구 및 검토하여, 효율적인 이용을 위한 필요한 기초 자료를 제시하였다.

다. 굴패각을 이용한 고화재와 연약지반의 지반특성을 가지고 있는 준설토를 혼합하여 그 강도특성을 규명함으로써 천층개량공법의 안정재로써 굴패각 고화재의 활용가치를 규명하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 실제규모의 모래다짐말뚝(직경 0.7m, 길이 10.0m)의 현장실험을 통하여, 굴패각을 건설재료 및 실용화 설계의 가능성을 확인하고, 실제 사용상의 시공지침서를 작성
- 굴패각 혼입비율을 다르게 한 모래다짐말뚝에 대하여, 표준관입시험(SPT)과정재하시

험을 실시하여 굴패각 혼합 모래다짐말뚝의 강도파악

- 실내실험을 통하여 현장에서 체취한 시료를 재해석

1차년도 (2000년)

- 굴패각의 현황 및 재료적 특성 검토
- 재활용성 기술분석

2차년도 사업 (2001년)

- 굴패각의 최적처리 및 콘크리트 혼화재의 장기특성 연구
- 굴패각을 활용한 고화재 개발

3차년도 사업 (2002년)

- 굴패각의 대체율에 따른 투수특성, 수평전단 저항성을 분석
- 시멘트계 고화재와 굴패각 고화재의 성분 정량적 분석을 통한 지반재료로써의 활용성 도출
- 굴패각의 고화재의 용출수에 대한 TCPL시험 수행
- 환경친화형 고화재의 현장 적용성을 투수성과 일축강도 측면에서 정량적으로 분석

4차년도 사업 (2003년)

- 굴패각 혼합토의 압축강도 특성 파악을 위한 구속압축시험과 대형직접전단시험
- 굴패각 혼합토의 현장조건을 고려한 표준관입시험 (자연건조상태와 포화상태)
- 시멘트계 고화재와 굴패각 고화재의 적용성을 압축강도측면에서 상호비교 검토(일축압축강도시험과 삼축압축강도시험)

5차년도 사업 (2004년)

- 실규모의 모래다짐말뚝(SCP) 현장타설시험
- 굴패각 혼합 모래다짐말뚝의 표준관입시험(SPT)
- 굴패각 혼합 모래다짐말뚝의 정재하시험
- 현장실험의 굴패각 혼합토에 대한 압축특성 파악을 위한 실내시험

IV. 연구개발 결과

가. 실규모의 모래다짐말뚝(SCP) 현장타설시험

- 5종류 굴패각 혼합비(10%, 20% ,30%, 40%, 50%)에 대한 SCP거동 비교 및 분석

나. 굴패각 혼합 모래다짐말뚝의 표준관입시험(SPT)

- 원지반에 대한 SPT시험
- 모래다짐말뚝과 5종류의 굴패각 혼합말뚝에 대한 SPT시험
- 표준관입시험의 N값에 의한 지반강도파악
- 심도별 교란시료를 채취하여, 실내시험에서 재해석
- 지하수위 측정

다. 굴패각 혼합 모래다짐말뚝의 정재하시험

- 앵커의 반력을 이용한 하중재하실험
- Loading과 Rebounding에 의한 반복재하시험

라. 현장실험의 굴패각 혼합토에 대한 압축특성 파악을 위한 실내시험

- 모래 및 굴패각의 입도분석 및 비중시험

V. 연구개발결과의 활용계획

가. 굴패각을 콘크리트 혼화재로서 사용함으로써 건설대체재로의 확보

나. 시멘트 고화재의 대체재로 육성

- 시멘트계 고화재의 크롬6가 중금속을 함유하여 사용이 제한되는 추세에 대해, 새로운 고화재로 굴패각의 재활용.
- 굴패각 재활용의 촉진으로 환경친화적인 항만개발로 해양환경 보호.

다. 굴패각을 이용한 항만건설 현장적용 추진

- 모래다짐말뚝(SCP)공법에서 모래 대체재로서 활용
- 굴패각 고화재를 이용한 천층개량공법 활용

라. 중소규모의 재활용 관련업체에 관련 기술의 제공으로 산업화 효과.

SUMMARY

I. TITLE

Development of oyster shell-mixed special concrete (V)

II. Objectives and necessities of study

A. Based on the research results of five years(200-2004): the concrete compound of artificial sea weeds and for improving ground soil by investigating the material properties, the quantification of characteristic change of oyster shell mixed ground soil according to the size and the inclusion rate of crushed oyster shells, an so on. The concern about the recycling of resources is increasing globally, and the research necessity over sea waste is also high. The wasted oyster shell of about 300,000t per year generated in korea. Based on the analysis of using possibilities of oyster shells, such as an alternative material of soft ground improvement and Sand Compact Pile (SCP), it is helpful in recycling improvement of waste.

B. The development of the applicability of environmentally friendly binder, the water permeability and the quantification of horizontal shear resistance of oyster shell mixed soil, and the water permeability and the applicability of binder were accomplished. The binder using oyster shells and the dredged soils with the characteristic of soft ground are mixed. therefore, the oyster shell binder as a material of the shallow soil stabilization was studied.

C. About the SCP method which has many using in the soft ground improvement , the using for the wasted oyster shells as alternative material of sand was studied and examined.

III. Contents and scope (yearly research results)

A. Oyster-shell mixed soil for Sand compaction pile (SCP) in site tests
- Different kind of mixture ratios for Oyster-shell (10, 20, 30,. 40, 50 %)

B. Standard penetration test(SPT)
- SPT in original ground
- SPT in only sand pile and five different kinds of Oyster-shell mixtures
- Investigation of soil strength characteristic from N values of SPT

- Measurement of water level

C. Standard test for piles under static axial compressive load
- Cyclic loading (loading and unloading)
- Loading test of using anchors for supports

IV. Results of study

A. Shear strength characteristic for mixed soil with oyster shell
- In material which mixed the oyster shell with the sand experimental tests, e.g. site-tests, confined compression test, direct shear test, SPT and grain size analysis, were conducted in difference condition of the initial density and the vertical stress. The experimental result shows that the internal friction angle of mixed soil with oyster shell is larger than sand. The mixed soil with oyster shell can be considered as highly crushable material but not much crushable with existing high loads.
- In consideration of overburden loads, N value of Peck Eq. has high a agreement than Eq. of Japan harbor standard.
- The internal friction angle of mixed soil with oyster shell ranges from 39 deg. to 50 deg. The internal friction angle gets large values in case of vertical stress is small and initial density increases.

B. The binder using oyster shells for shallow soil stabilization
- Regardless of curing days, unconfined strength is maximum value, in 50% of water content for dredged soils and in 12% of rates of the oyster shell blinder mixed. In case for the mixing rate of blinder is high, early strength is increasing.
- Although strength increased to 9% of rates of mixing cement, other results were expressed with 12% of rates of mixing according to change of the water content.
- At 6% or more of mixing rates, the binder using oyster shells has strength with about 5 time higher than cement.

V. Usage plan of study results

A. Recycling of the wasted oyster shell at port construction site
- Utilizes of the wasted oyster shell as alternative materials of sand to SCP.
- Using of the binder from the oyster shell for the shallow soil .
- Industrialization by offer of related technology on the recycling company of a minor scale

B. Using instead of cement at the soft ground stabilization method

- Cement-series binder generate heavy metal such as chrome 6, therefore binder made by oyster shell may be of environmentally friendly high value product.
- Utilization of the oyster shell binder more efficient than cement for soft ground improvement of dredged soils with high water content
- By reuse of waste, marine-environment-protects in the environmental port development

Contents

Summary ····· i

Tables ····· xvi

Figures ····· xix

Photographs ····· xxvi

Chapter 1 Introduction ····· 1

Chapter 2 Development of concrete mixed oyster shell ····· 5

1 Purposes of research ····· 5

2 Optimum combination of concrete mixed oyster shell ····· 6

1.1 Aims and methods of experiment ····· 6

1.2 Results and discussions ····· 13

3 Behavior of concrete mixed oyster shell ····· 25

3.1 Aims of experiment ····· 25

3.2 Long terms characteristics ····· 25

3.3 Prediction models of .long terms characteristics ····· 30

3.4 Analysis of long terms characteristics ····· 50

4 Investigations of endurance strengths for concrete mixed oyster shell ····· 58

4.1 Aims of experiment ····· 58

4.2 Kinds of experiment ····· 58

4.3 Plans of experiment ····· 67

4.4 Analysis of long terms characteristics ····· 69

5 Conclusions ····· 79

Reference ····· 81

Chapter 3 Development of oyster-shell binder ····· 83

1 Chemical characteristic tests(XRF, XRD) ····· 84

2 Soil material tests ····· 85
3 Optimum combination design tests ····· 86
3.1 Limestone of oyster-shell ····· 86
3.2 Cement-series binder ····· 87
3.3 Oyster-shell binder ····· 88
4 Sampler manufacture ····· 89
5 Unconfined compression tests ····· 91
6 Triaxial compression tests ····· 92
7 TCLP(Toxicity characteristic leaching procedure) tests ····· 93
8 Results of limestone of oyster-shell experiment ····· 94
8.1 Condition of soil material ····· 94
8.2 Results for limestone of oyster-shell. ····· 95
8.3 Results for soil mixed limestone of oyster-shell ····· 105
8.4 Results for mixture soils ····· 105
9 Results of laboratory tests ····· 106
9.1 Results of binder components ····· 106
9.2 Results of soil material ····· 109
9.3 Unconfined compression tests ····· 110
9.4 Triaxial compression tests ····· 112
9.5 TCLP(Toxicity characteristic leaching procedure) tests ····· 113
9.6 Results of laboratory tests ····· 113
Reference ····· 115

Chapter 4 Model tests and site tests for oyster-shell mixed soil ····· 117
1 Introduction ····· 117
1.1 Backgrounds of research ····· 117
1.2 Purposes of research ····· 118
2 Basic background of oyster-shell mixed soil ····· 120
2.1 Physical-mechanical characteristics of oyster-shell mixed soil ····· 120
2.2 SPT(Standard penetration test) ····· 122
2.3 SCP(Sand compaction pile) ····· 125

2.4 Discussions for internal friction angle and settlement for cast in place Oyster-shell mixed SCP ····· 131
3 Tests of oyster-shell mixed soil ····· 133
3.1 Outlines of tests ····· 133
3.2 Physical of characteristic tests ····· 135
3.3 Results and discussions ····· 139
4 Conclusions ····· 164
Reference ····· 166

Chapter 5 Site tests for oyster-shell mixed SCP ····· 169
1 Laboratory tests ····· 169
2 Site tests for oyster-shell mixed SCP ····· 171
2.1 Situation of site tests ····· 171
3 SPT and boring test ····· 173
3.1 Outlines of SPT ····· 173
3.2 Topography and geological features ····· 176
4 Standard test for piles under static axial compressive load ····· 180
4.1 Outlines of tests ····· 180
4.2 Methods of tests ····· 183
4.3 Results of tests ····· 188
4.4 Results and discussions ····· 212
Reference ····· 217

Appendix ····· 219

목 차

요 약 문 ····· i
표 차 례 ····· xvi
그 림 차 례 ····· xix
사 진 차 례 ····· xxvi

제 1 장 서 론 ····· 1

제 2 장 굴패각 혼합 콘크리트의 개발 ····· 5
제 1 절 연구 목표 ····· 5
제 2 절 굴패각 혼합 콘크리트의 최적배합 ····· 6
1. 실험 목적 및 실험 방법 ····· 6
2. 실험 결과 및 고찰 ····· 13
제 3 절 굴패각 혼합 콘크리트의 장기거동 ····· 25
1. 실험 목적 ····· 25
2. 장기재령 특성 실험 ····· 25
3. 기존의 장기재령 특성 예측모델 ····· 30
4. 장기재령 특성 결과 분석 ····· 50
제 4 절 굴패각 혼입 콘크리트의 내구성 검토 ····· 58
1. 실험 목적 ····· 58
2. 실험 종류 ····· 58
3. 실험 계획 ····· 67
4. 장기재령 특성 결과 분석 ····· 69
제 5 절 결론 ····· 79
참고문헌 ····· 81

제 3 장 굴패각 고화재의 개발 ····· 83
제 1 절 화학성분 분석시험 (XRF, XRD) ····· 84
제 2 절 토성시험 및 대상토 분석 ····· 85

제 3 절 배합설계시험 ····· 86
1. 굴패각 생석회 ····· 86
2. 시멘트계 고화재 ····· 87
3. 굴패각 고화재 ····· 88
제 4 절 공시체 제작 ····· 89
제 5 절 일축압축강도 시험 ····· 91
제 6 절 삼축압 투수시험 ····· 92
제 7 절 고화재 용출수의 TCLP 실험 ····· 93
제 8 절 굴패각 생석회 시험결과 ····· 94
1. 대상토의 조건 ····· 94
2. 굴패각 생석회 적용시험 결과 ····· 95
3. 굴패각 생석회 대상토 적용성 시험결과 고찰 ····· 105
4. 대상토별 적용결과 검토의견 ····· 105
제 9 절 실내시험 결과 및 고찰 ····· 106
1. 고화재 성분분석 결과 ····· 106
2. 토성시험 및 대상토 분석결과 ····· 109
3. 일축압축강도 시험 결과 ····· 110
4. 삼축투수시험 결과 ····· 112
5. 고화재 용출수의 TCLP 실험결과 ····· 113
6. 실내 시험 결과 및 고찰 ····· 113
참고문헌 ····· 115

제 4 장 굴패각혼합토의 모형 및 현장실험 ····· 117
제 1 절 서론 ····· 117
1. 연구배경 ····· 117
2. 연구내용 및 목적 ····· 118
제 2 절 굴패각 혼합토의 이론적 배경 ····· 120
1. 굴패각의 물리적 특성 ····· 120
2. 표준관입시험 ····· 122
3. 모래다짐말뚝(SCP)공법 ····· 125
4. 현장타설 굴패각다짐말뚝의 마찰각 및 침하량 검토방법 ····· 131

제 3 절 굴패각 혼합토의 모형 및 현장시험 ····· 133
1. 시험개요 ····· 133
2. 굴패각 혼합토의 물리적 특성 시험 ····· 135
3. 시험결과 및 분석 ····· 139
제 4 절 결론 ····· 164
참고문헌 ····· 166

제 5 장 굴패각 혼합토의 모래다짐말뚝(SCP)현장시험 ····· 169
제 1 절 실내시험 ····· 169
제 2 절 굴패각 혼합토의 모래다짐말뚝(SCP) 현장타설실험 ····· 171
1. 현장실험의 위치 ····· 171
제 3 절 표준관입시험 (SPT) 및 확인보링 지반조사 ····· 173
1. 표준관입시험 (SPT)의 개요 ····· 173
2. 지형 및 지질개요. ····· 176
제 4 절 정재하시험 ····· 180
1. 실험준비 및 실험개요 ····· 180
2. 시험방법 ····· 183
3. 정재하 시험 결과 ····· 188
4. 시험 결과 및 검토 ····· 212
참고문헌 ····· 217

부록 ····· 219

표 목 차

제 2 장 굴패각 혼합 콘크리트의 개발
표 2.1 잔골재 비중 및 흡수율 ····· 7
표 2.2 굵은골재 비중 및 흡수율 ····· 8
표 2.3 굴패각의 비중 및 흡수율 ····· 9
표 2.4 콘크리트 기준 배합비 ····· 10
표 2.5 실험변수 및 측정항목 ····· 11
표 2.6 각 시험 배합비 일람 ····· 12
표 2.7 각 배합의 혼화제량 변화에 따른 시공성 변화 ····· 13
표 2.8 잔골재율 및 단위수량 변화에 따른 특성변화 ····· 15
표 2.9 선정된 최적 배합비 ····· 24
표 3.1 실험변수 및 측정항목 ····· 26
표 3.2 건조수축 측정 세부사항 ····· 28
표 3.3 크리프 측정 세부사항 ····· 29
표 3.4 보정계수 C_{cp} ····· 31
표 3.5 구성성분에 따른 시멘트 분류 ····· 44
표 3.6 장기재령에서의 압축거동 측정 결과 ····· 51
표 4.1 동결융해시험 조건 ····· 61
표 4.2 실험변수 상세 ····· 68
표 4.3 내구성 시험용 콘크리트 배합비 ····· 69
표 4.4 동결융해 실험결과 일람 ····· 70
표 4.5 굴패각 대체율별 중성화 깊이 ····· 72
표 4.6 황산용액에 의한 중량변화 ····· 75
표 4.7 염산용액에 의한 중량변화 ····· 76
표 4.8 굴패각 대체율별 투수특성 ····· 78

제 3 장 굴패각 고화재의 개발
표 3.1 XRF를 이용한 고화재의 화학성분 분석항목 ····· 84
표 3.2 굴패각 생석회와 대상토의 배합표 ····· 86

표 3.3 시멘트계 고화재와 대상토의 배합표 ····· 87
표 3.4 굴패각 고화재와 대상토의 배합표 ····· 88
표 3.5 공시체의 규격 ····· 90
표 3.6 중금속 용출 시험항목 ····· 93
표 3.7 굴패각 생석회 적용 대상토 조건 ····· 94
표 3.8 굴패각 생석회의 재령에 따른 압축강도 측정결과 ····· 95
표 3.9 굴패각 생석회의 재령에 따른 함수비 변화 측정결과 ····· 98
표 3.10 굴패각 생석회의 시간에 따른 온도변화 측정결과 ····· 101
표 3.11 굴패각 생석회의 수축율 변화 측정결과 ····· 104
표 3.12 고화재의 화학성분 비교표 ····· 106
표 3.13 대상토 토성시험 ····· 109
표 3.14 시멘트 고화재와 굴패각 고화재의 중금속 용출시험 비교 결과표 ····· 113

제 4 장 굴패각혼합토의 모형 및 현장실험
표 2.2.1 굴패각 실험 적용조건의 비교 ····· 121
표 2.2.2 굴패각 실험 결과의 비교 ····· 122
표 2.2.3 흙의 상태, Rod길이 및 상재압을 고려한 수정N값 ····· 123
표 2.2.4 N치로부터 추정할 수 있는 토질의 물성치 ····· 124
표 2.2.5 SCP공법과 각종 배수공법의 비교 ····· 125
표 2.2.6 치환율에 따른 모래다짐말뚝의 내부마찰각과 응력분담비의 관계 ····· 128
표 2.2.7 안정해석에 있어서의 복합지반의 전단저항 ····· 129
표 3.1.1 모래와 굴패각혼합토의 물리적 특성 ····· 134
표 3.2.1 대형직접전단실험의 시험조건 ····· 135
표 3.2.2 SPT 시험조건 ····· 138
표 3.3.1 초기단위체적중량과 내부마찰각과의 관계 ····· 146
표 3.3.2 구속압축시험에서 얻어진 Cc, Cc‘ , m_v , σ_p ····· 158

제 5 장 굴패각 혼합토의 모래다짐말뚝(SCP)현장시험
표 5.1.1 모래와 굴패각의 물리적 특성 ····· 170
표 5.3.1 조사위치별 SCP 모래 및 굴패각의 배합비 ····· 174
표 5.3.2 지층의 분포 상태(BH-1번공 기준 ····· 177

표 5.3.3 표준관입시험결과 ····· 178
표 5.3.4 지하수위 측정결과 ····· 179
표 5.4.1 정재하시험 주기표 ····· 184
표 5.4.2 (a) 정재하 시험 결과 ····· 212
표 5.4.2 (a) 정재하 시험 결과 ····· 212

그림차례

제 2 장 굴패각 혼합 콘크리트의 개발
그림 2.1 잔골재 체가름 곡선 ····· 7
그림 2.2 굵은골재 체가름 곡선 ····· 7
그림 2.3(a) 굴패각 체가름 곡선(조립율=2.3) ····· 9
그림 2.3(b) 굴패각 체가름 곡선(조립율=2.8) ····· 10
그림 2.4 잔골재율 변화에 따른 특성변화 ····· 17
그림 2.5 단위수량 변화에 따른 특성변화 ····· 18
그림 2.6 잔골재율 변화에 따른 특성변화 ····· 19
그림 2.7 단위수량 변화에 따른 특성변화 ····· 21
그림 2.8 잔골재율 변화에 따른 특성변화 ····· 22
그림 2.9 단위수량 변화에 따른 특성변화 ····· 24
그림 3.1 굴패각 대체에 따른 압축강도 변화 ····· 51
그림 3.2 굴패각 대체에 따른 탄성계수 변화 ····· 51
그림 3.3 굴패각 대체에 따른 응력-변형률 곡선 변화 ····· 52
그림 3.4 굴패각 혼합 콘크리트의 건조수축 변형률 변화(대체율=0%) ····· 53
그림 3.5 굴패각 혼합 콘크리트의 건조수축 변형률 변화(대체율=10%) ····· 54
그림 3.6 굴패각 혼합 콘크리트의 건조수축 변형률 변화(대체율=20%) ····· 54
그림 3.7 굴패각 혼합 콘크리트의 건조수축 변형률 비교 ····· 54
그림 3.8 굴패각 혼합 콘크리트의 크리프 변형률 변화(대체율=0%) ····· 56
그림 3.9 굴패각 혼합 콘크리트의 크리프 변형률 변화(대체율=10%) ····· 56
그림 3.10 굴패각 혼합 콘크리트의 크리프 변형률 변화(대체율=20%) ····· 57
그림 3.11 굴패각 혼합 콘크리트의 크리프 변형률 비교 ····· 57
그림 4.1 동결융해 사이클에 따른 동탄성계수 변화 특성 ····· 70
그림 4.2 동결융해 사이클에 따른 중량 변화 특성 ····· 71
그림 4.3 동결융해 사이클에 따른 길이 변화 특성 ····· 71
그림 4.4 굴패각 대체율에 따른 중성화 깊이 변화 ····· 73
그림 4.5 황산용액에 의한 중량 백분율 변화 ····· 76
그림 4.6 염산용액에 의한 중량 백분율 변화 ····· 77

제 3 장 굴패각 고화재의 개발

그림 3.1 . 화학성분 분석용 XRF, XRD 장비 ····· 85
그림 3.2 채취시료에 대한 토성시험 과정 중 다짐시험 장면 ····· 85
그림 3.3 일축압축강도 및 투수계수 측정용 공시체 ····· 90
그림 3.4 일축압축강도 측정용 만능재료 시험기 ····· 91
그림 3.5 삼축압 투수 시험기 ····· 92
그림 3.6 굴패각 생석회 10% 적용에 따른 압축강도 변화 ····· 96
그림 3.7 굴패각 생석회 20% 적용에 따른 압축강도 변화 ····· 96
그림 3.8 굴패각 생석회 30% 적용에 따른 압축강도 변화 ····· 97
그림 3.9 굴패각 생석회 10% 적용에 따른 함수비 변화 ····· 99
그림 3.10 굴패각 생석회 20% 적용에 따른 함수비 변화 ····· 99
그림 3.11 굴패각 생석회 30% 적용에 따른 함수비 변화 ····· 100
그림 3.12 굴패각 생석회 10% 적용에 따른 온도 변화 ····· 101
그림 3.13 굴패각 생석회 20% 적용에 따른 온도 변화 ····· 102
그림 3.14 굴패각 생석회 30% 적용에 따른 온도 변화 ····· 102
그림 3.15 대상토별 굴패각 생석회 적용에 따른 온도변화 ····· 103
그림 3.16 굴패각 생석회 적용에 따른 수축율 변화 ····· 104
그림 3.17 굴패각 고화재와 시멘트계 고화재의 X-선 회절분석 결과 ····· 107
그림 3.18 고화재의 고화처리 전후의 SEM사진 비교분석 ····· 108
그림 3.19 대상토의 입경분포 곡선(Grain Size Accumulation Curve) ····· 110
그림 3.20 고화재의 물/고화재 비=0.8인 경우 함량에 따른 일축압축강도 변화 ····· 111
그림 3.21 고화재의 물/고화재 비=1.0인 경우 함량에 따른 일축압축강도 변화 ····· 111
그림 3.22 고화재의 물/고화재 비=1.2인 경우 함량에 따른 일축압축강도 변화 ····· 112
그림 3.23 양생기간에 따른 고화재량에 따른 투수계수 그래프 ····· 112

제 4 장 굴패각혼합토의 모형 및 현장실험

그림 1.1.1 실험과정과 강도정수 결정 ····· 118
그림 2.2.1 각 시료의 입도분포곡선 ····· 120
그림 2.2.2 동일한 상대밀도에서의 상재압과 N치의 관계 ····· 124
그림 2.2.3 복합지반의 기본 개념 ····· 127
그림 2.2.4 치환율과 응력분담비의 관계 ····· 128

그림 2.2.5 모래다짐말뚝의 시공단계 ····· 130
그림 2.2.6 현장타설 굴패각다짐말뚝의 내부마찰각 추정 ····· 131
그림 2.2.7 타입체적에 의한 N치와 내부마찰각의 비교 ····· 132
그림 3.1.1 모래와 굴패각혼합토의 입도분포 ····· 133
그림 3.1.2 대형직접전단시험의 시료준비 ····· 134
그림 3.1.3 SPT의 시료준비 ····· 134
그림 3.2.1 대형직접전단실험기와 제원 ····· 136
그림 3.2.2 시간에 따른 변형속도의 변화곡선 ····· 137
그림 3.2.3 SPT 시험과 제원 ····· 139
그림 3.3.1 포화조건에 따른 단위체적중량과
SPT의 N치의 관계 (γ_t=1.05 g/cm^3 ····· 140
그림 3.3.2 포화조건에 따른 단위체적중량과
SPT의 N치의 관계 (γ_t=1.20 g/cm^3) ····· 140
그림 3.3.3 포화조건에 따른 단위체적중량과
SPT의 N치의 관계(γ_t=1.40 g/cm^3)정 ····· 141
그림 3.3.4 포화조건에 따른 단위체적중량과 SPT의 N치의 관계 ····· 141
그림 3.3.5 단위체적중량과 N치의 관계에 대한 실험값과
제안식의 비교 (일본항만기술기준) ····· 142
그림 3.3.6 단위체적중량과 N치의 관계에 대한 실험값과]
제안식의 비교 (Peck) ····· 143
그림 3.3.7 굴패각 혼합토에 대한 전단응력과
수평변형의 관계 (γ_t=1.05 g/cm^3) ····· 144
그림 3.3.8 굴패각 혼합토에 대한 전단응력과
수평변형의 관계 (γ_t=1.20 g/cm^3) ····· 144
그림 3.3.9 굴패각 혼합토에 대한 전단응력과
수평변형의 관계 (γ_t=1.40 g/cm^3) ····· 145
그림 3.3.10 초기단위체적중량과 내부마찰각과의 관계 ····· 146
그림 3.3.11 최대전단응력과 수직응력 곡선 (γ_{to} = 1.05 kg/cm^2) ····· 147
그림 3.3.12 최대전단응력과 수직응력 곡선 (γ_{to} = 1.20 kg/cm^2) ····· 147
그림 3.3.13 최대전단응력과 수직응력 곡선 (γ_{to} = 1.40 kg/cm^2) ····· 148
그림 3.3.14 수직응력과 내부마찰각 곡선 ····· 148

그림 3.3.15 압밀침하후의 단위체적중량과 내부마찰각의 관계 ····· 149
그림 3.3.16 수평변위에 따른 체적변형율 (σ_{to} = 1.05 kg/cm^2) ····· 150
그림 3.3.17 수평변위에 따른 체적변형율 (σ_{to} = 1.20 kg/cm^2) ····· 150
그림 3.3.18 수평변위에 따른 체적변형율 (σ_{to} = 1.40 kg/cm^2) ····· 151
그림 3.3.19 SPT시험후의 입도분포 ····· 152
그림 3.3.20 대형직접전단 시험후의 입도분포 ····· 152
그림 3.3.21 대형직접전단 시험후의 입도분포 (σ'_v = 0.4 kg/cm^2) ····· 153
그림 3.3.22 대형직접전단 시험후의 입도분포 (σ'_v = 0.8 kg/cm^2) ····· 154
그림 3.3.23 대형직접전단 시험후의 입도분포 (σ'_v = 1.6 kg/cm^2) ····· 154
그림 3.3.24 대형직접전단 시험후의 입도분포 (σ'_v = 3.2 kg/cm^2) ····· 155
그림 3.3.25 대형직접전단 시험후의 입도분포 (σ_{to} = 1.05 kg/cm^2) ····· 155
그림 3.3.26 대형직접전단 시험후의 입도분포 (σ_{to} = 1.20 kg/cm^2) ····· 156
그림 3.3.27 대형직접전단 시험후의 입도분포 (σ_{to} = 1.40 kg/cm^2) ····· 156
그림 3.3.28 SPT 샘플에서 채취한 시료의 입도분포 ····· 157
그림 3.3.29 수직하중 증가에 따른 침하량곡선 ····· 158
그림 3.3.30 수직하중과 간극비의 관계 (σ_t = 1.05 kg/cm^2) ····· 160
그림 3.3.31 수직하중과 간극비의 관계 (σ_t = 1.20 kg/cm^2) ····· 160
그림 3.3.32 수직하중과 간극비의 관계 (σ_t = 1.40 kg/cm^2) ····· 161
그림 3.3.33 수직하중과 체적변형률의 관계 (σ_t = 1.05 kg/cm^2) ····· 161
그림 3.3.34 수직하중과 체적변형률의 관계 (σ_t = 1.20 kg/cm^2) ····· 162
그림 3.3.35 수직하중과 체적변형률의 관계 (σ_t = 1.40 kg/cm^2) ····· 162
그림 3.3.36 단위체적중량 변화에 따른 압축관련 지수의 변화 (Cc, Cc') ····· 163

제 5 장 굴패각 혼합토의 모래다짐말뚝(SCP)현장시험

그림 5.1.1 굴패각 혼합토의 비중시험 ····· 169
그림 5.1.2 굴패각 혼합토의 체분석실험 ····· 170
그림 5.1.3 모래 굴패각의 입도분포 ····· 170
그림 5.2.1 실험현장의 위치 ····· 171
그림 5.2.2 SCP타설 장비 ····· 172
그림 5.2.3 실험에 사용된 굴패각 ····· 172
그림 5.2.4 모래와 굴패각의 혼합과정) ····· 172

그림 5.3.1 지반조사 위치도 ····· 173
그림 5.3.2 조사위치 전경 ····· 173
그림 5.3.3 SPT 장비 ····· 174
그림 5.3.4 SPT의 케이싱 삽입 작업 ····· 175
그림 5.3.5 지하수위 측정을 위한 관측공 ····· 175
그림 5.3.6 조사지역 지질개요 ····· 176
그림 5.3.7 원지반 시료채취 ····· 179
그림 5.3.8 굴패각혼합시료채취 ····· 179
그림 5.3.9 표준관입시험 결과 ····· 179
그림 5.4.1 재하시험 모식도 ····· 180
그림 5.4.2 재하시험 전경 ····· 181
그림 5.4.3 Tension bar (앵커의 반력을 이용한 재하 ····· 182
그림 5.4.4 Bearing plate(재하판)의 계측기 설치 ····· 182
그림 5.4.5 다중침하계(지중침하계측용) ····· 183
그림 5.4.6 시험전 지반평탄 작업 ····· 185
그림 5.4.7 시험전 다중침하계의 두부 설치 ····· 185
그림 5.4.8 재하판 설치 ····· 186
그림 5.4.9 시험전경 ····· 186
그림 5.4.10 계측기 설치 ····· 187
그림 5.4.11 시험후 지반침하 ····· 187
그림 5.4.12 하중-침하-시간 곡선 (A-1 case) ····· 188
그림 5.4.13 P-S Curve (A-1 case) ····· 189
그림 5.4.14 LogP-LogS Curve (A-1 case) ····· 190
그림 5.4.15 S-Logt Curve (A-1 case) ····· 190
그림 5.4.16 P-dS/dLogt Curve (A-1 case) ····· 191
그림 5.4.17 P-S Curve(전침하량 분석) (A-1 case) ····· 191
그림 5.4.18 Residual & Elastic settlement curve (A-1 case) ····· 192
그림 5.4.19 Multi-settlement curve (A-1 case) ····· 192
그림 5.4.20 하중-침하-시간 곡선 (A-2 case) ····· 193
그림 5.4.21 P-S Curve (A-2 case) ····· 194
그림 5.4.22 LogP-LogS Curve(A-2 case) ····· 194

그림 5.4.23 S-Logt Curve (A-2 case) ····· 195
그림 5.4.24 P-dS/dLogt Curve (A-2 case) ····· 195
그림 5.4.25 P-S Curve(전침하량 분석) (A-2 case) ····· 196
그림 5.4.26 Residual & Elastic settlement curve (A-2 case) ····· 197
그림 5.4.27 Multi-settlement curve (A-2 case) ····· 197
그림 5.4.28 하중-침하-시간 곡선 (A-5 case) ····· 198
그림 5.4.29 P-S Curve (A-5 case) ····· 199
그림 5.4.30 LogP-LogS Curve (A-5 case) ····· 199
그림 5.4.31 S-Logt Curve (A-5 case) ····· 200
그림 5.4.32 P-dS/dLogt Curve (A-5 case) ····· 200
그림 5.4.33 P-S Curve(전침하량 분석) (A-5 case) ····· 201
그림 5.4.34 Residual & Elastic settlement curve (A-5 case) ····· 201
그림 5.4.35 하중-침하-시간 곡선 (A-6 case) ····· 202
그림 5.4.36 P-S Curve (A-6 case) ····· 203
그림 5.4.37 LogP-LogS Curve (A-6 case) ····· 203
그림 5.4.38 S-Logt Curve (A-6 case)) ····· 204
그림 5.4.39 P-dS/dLogt Curve (A-6 case) ····· 204
그림 5.4.40 P-S Curve(전침하량 분석) (A-6 case) ····· 205
그림 5.4.41 Residual & Elastic settlement curve (A-6 case) ····· 205
그림 5.4.42 Multi-settlement curve (A-6 case) ····· 206
그림 5.4.43 하중-침하-시간 곡선 (A-7 case) ····· 207
그림 5.4.44 P-S Curve (A-7 case) ····· 208
그림 5.4.45 LogP-LogS Curve (A-7 case) ····· 208
그림 5.4.46 S-Logt Curve (A-7 case) ····· 209
그림 5.4.47 P-dS/dLogt Curve (A-7 case) ····· 209
그림 5.4.48 P-S Curve(전침하량 분석) (A-7 case) ····· 210
그림 5.4.49 Residual & Elastic settlement curve (A-7 case) ····· 210
그림 5.4.50 Multi-settlement curve (A-7 case) ····· 211
그림 5.4.51 혼입율 변화에 따른 재하하중-침하량 관계 곡선 ····· 213
그림 5.4.52 혼입율별 항복압력 ····· 214
그림 5.4.53 전침하량 25.4㎜일때의 압력 ····· 214

그림 5.4.54 임의하중에서의 혼입율별 침하량 관계도 ····· 215
그림 5.4.55 시험체 G.L.(-)2.0m에서의 혼입율별 하중별 침하량 ····· 216

사 진 목 차

제 1 장 서 론

사진 1.1 굴패각 집하장 주변의 적치 모습 ····· 2

사진 1.2 환경오염의 원인이 되고 있는 굴 껍질 폐기물 ····· 3

제 2 장 굴패각 혼합 콘크리트의 개발

사진 3.1 장기재령 압축강도 시험체 ····· 26

사진 3.2 압축강도 시험 전경 ····· 27

사진 3.3 건조수축 시험체 전경 ····· 28

사진 3.4 건조수축 측정 전경 ····· 28

사진 3.5 크리프 시험체 전경 ····· 30

사진 3.6 크리프 측정 장비 ····· 30

사진 4.1 동결융해시험기 ····· 59

사진 4.2 동결융해시험기 내부 ····· 59

사진 4.3 중성화 시험기 ····· 62

사진 4.4 중성화 시험실시 예 ····· 62

사진 4.5 황산용액을 제조하는 장면 ····· 65

사진 4.6 밀봉한 시험체 전경 ····· 65

사진 4.7 흐름시험 과정 ····· 67

사진 4.8 시편제작 과정 ····· 67

사진 4.9 투수시험 장치 ····· 67

사진 4.10 중성화 깊이 측정 결과 ····· 73

사진 4.11 황산용액 침식에 의한 공시체 상태 변화 ····· 74

사진 4.12 염산용액 침식에 의한 공시체 상태 변화 ····· 74

제 1 장 서 론

우리 나라의 남해 및 서해 연해에서 이루어지는 굴양식은 주변 어민의 주요 소득원이 되고 있으며 국내 굴 수요의 원활한 공급원이 되고 있다. 그러나 양식된 굴의 출하에 있어서는 대부분의 경우 굴의 껍질을 제거한 후에 내용물만을 판매하고 있으며 굴 집하장 주변에는 막대한 굴패각이 폐기물로서 남게 된다 (예: 거제시와 통영시의 경우 약30만톤/년). 굴패각은 현재 굴 채묘 및 비료 등으로 일정량이 재활용되고 있기는 하지만 재활용의 양적 한계 및 처리시의 집하장 확보, 살포 후 응결 등의 문제점이 거론되어 재활용의 활성화가 지연되고 있어 양식되는 대부분의 굴패각은 재활용되지 않고 매립하거나 주변에 적재하는 형식으로 처리되고 있는 실정이다.

그러나 굴패각을 매립할 경우 매립지의 확보곤란은 물론 매립에 따른 매립지 처리와 누출수에 의한 환경피해 및 환경오염의 근원지가 되고 있으며, 주변 적재의 경우는 심각한 악취와 오염으로 혐오재료로써 인식됨은 물론 위생과 주거환경에 지대한 악영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편 굴패각을 매립하거나 주변에 적재할 경우에도 한계가 있으며, 경제적, 환경적 문제를 내포하고 있어 굴패각의 처리에 대단한 곤란을 겪고 있어 어민의 민원이 계속적으로 발생하고 있다.

최근 정부의 주도아래 대규모 예산을 투자하여 칼슘공장 및 비료공장 등이 건설되어 굴패각의 재활용량을 증가시키려는 노력이 시도되고 있으나 투자비용에 비해 처리효율이 문제시되고 있어서 굴패각의 적절한 대량처리를 위한 새로운 해결 방안의 제시가 시급한 실정이라 할 수 있다. 특히 굴패각은 유기물을 부착하고 있으며 염분을 포함하고 있어 재활용하고자 할 경우 이에 대해 충분히 배려된 기법의 개발이 요구되고 있으며 기존의 처리비용에 경쟁할 수 있어야 할 것으로 판단된다.

굴패각의 처리에 대한 연구는 일본의 경우 연약지반 개량재, 샌드파일재로서 활용하고자하는 연구가 추진된 바 있으며 특히 세계적으로 자원의 재활용에 대한 관심이 점점 증가하고 있어 해양폐기물에 대한 연구필요성은 날로 증가하고 있다. 한편 국내의 건설시장에 있어서는 건설재료의 부족 현상이 날로 심각한 문제점으로 대두되고 있으며 이에 대한 막대한 연구 투자가 실시되고 있다. 이러한 상호여건을 고려하여 볼 때 우리현실에 적합하고 실용적인 대안 개발의 하나로서 굴패각을 콘크리트에 혼입시켜 활용하고자 하는 연구는 점점 양식 어민의 부담으로 작용되는

굴패각의 대량처리뿐만 새로운 콘크리트재료 개발로도 이어지는 결과를 창출할 수 있으므로 이에 대한 적극적인 시도가 요구된다.

(1) 기술적 측면

굴패각은 탄산 칼슘이 주성분이며 수 %의 유기물을 함유하는 것으로 알려져 있다. 이러한 굴패각을 분쇄 및 처리하여 콘크리트용 혼화재료로서 활용하게 될 경우 폐기물 처리 측면은 물론 건설재료의 절감 및 자원의 유효 활용 측면에서 기대되고 있다.

사진 1.1 굴패각 집하장 주변의 적치 모습

지금까지 굴패각을 분쇄하여 토질 개량재로서의 사용 가능성을 검토한 연구가 외국에서 약간 시도된 적은 있으나 실용적인 단계에는 이르지 못하였으며 특히 콘크리트용 혼화재로서 활용한연구는 거의 전무한 실정이라 할 수 있다. 따라서 건설재료인 콘크리트가 해안 및 항만 구조물에 사용될 경우에는 하중에 대한 안전성은 물론 장기간의 사용성에 대한 내구성이 요구되므로 굴패각을 혼화재료로 사용하고자 할 경우에는 이에 대한 연구가 필수적으로 선행되어야 한다. 특히 근해의 바다 목장화가 추진되고 있는 현 여건에서 굴패각을 콘크리트용 혼화재로 사용하는 환경 친화 콘크리트의 개발 가능성을 검토하는 것은 기술적 의미가 크다 할 수 있다.

굴패각이 건설재료로서의 활용성이 입증될 경우 지금까지 굴패각의 매립 또는 적재에 필요한 경비의 절감은 물론 굴패각의 처리를 통한 2차적 수입원 가능성과 이에 따른 관련 산업의 발전 등으로 풍요로운 환경조성을 예상할 수 있다. 사회·문화적 파급 효과로는 양식장 주변의 위생 개선으로 어민의 건강 향상에 기여할 수 있으며 산업 발전에 따른 지역간 갈등 해소 및 애향심 향상에 따른 유대관계 발전으로 사회적 안정을 기대할 수 있다. 또한 산업폐기물의 재활용에 따른 자원의 중요성을 제고하는 풍토를 마련하게 된다.

사진 1.2 환경오염의 원인이 되고 있는 굴 껍질 폐기물

제 2 장 굴패각 혼합 콘크리트의 개발

제 1 절 연구 목표

우리나라의 남해 및 일부 서해 연안에서 대량으로 발생하여 산업폐기물로 처리되고 있는 굴패각을 활용하는 방안으로써, 굴패각을 콘크리트의 잔골재로 대체하고자 하는 연구가 정부의 지원아래 추진되어 왔다. 그 결과, 굴패각을 콘크리트의 잔골재로써 일정 범위 내에서 대체하여도 역학적 특성상으로 양호한 결과를 보이며, 굴패각의 대체에 따른 시공상의 악화는 일반적으로 건설현장에서 사용되고 있는 AE감수제 등을 사용하여 복원할 수 있다는 것을 정량적으로 나타낼 수 있었다. 또한, 함유되는 분쇄 굴패각은 시멘트와의 사이에서 이상 반응을 보이지 않는 것을 각종 분석실험(XRD, XRF)과 사진촬영(SEM)으로 확인하였으며, 함유하는 염분 및 소량의 유기물이 콘크리트의 특성에 영향을 미치지 않는 범위에서의 대체율 등을 검토하여 굴패각을 콘크리트의 대체재료로써 활용하는데 필요한 기본적인 데이터를 제공하였다.

그러나, 이러한 결과를 토대로 굴패각을 콘크리트의 잔골재 대체재료로 사용하고자 하여도 콘크리트에 함유되는 분쇄된 굴패각이 콘크리트의 배합비에 미치는 영향에 대한 검토결과가 부족하고, 실제 현장에 적용하기 위해서는 단기적인 강도특성을 넘어 장기재령에 대한 특성분석이 반드시 요구된다. 특히, 이를 위해 장기재령에서의 특성으로써 장기강도발현의 비교 외에 콘크리트의 건소수축량 및 크리프 특성을 검토하는 것은 굴패각 혼합 콘크리트를 구조재료로써 활용하기 위한 기초자료라 할 수 있다. 또한, 콘크리트의 수명예측 및 건전도 평가 등을 위해 최근의 콘크리트 분야에서 대두되고 있는 내구성의 중요성을 인식하여 굴패각의 대체가 기존 콘크리트의 내구성 특성에 어떠한 영향을 미치는가를 비교 분석하는 것은 해양 콘크리트로의 적용을 위해 필요 불가결한 사항이라 할 수 있다.

이와 같이 굴패각의 원활한 활용을 위해서는 지금까지의 연구 성과에 계속하여 위에서 언급한 내용에 대한 추가적인 연구의 진행이 반드시 필요한 실정이며 이를 위한 체계적인 연구계획 및 추진 방향이 지속적으로 제시되어야 한다.

산업폐기물로 지정되어 있는 굴패각을 콘크리트의 잔골재 대체재료로써 활용하기 위하여 굴패각 대체율에 따른 콘크리트의 각 특성을 비교 검토하여 최적의 배합비

를 결정하고, 결정된 배합의 콘크리트에 대한 장기거동특성을 검토하는 본 연구의 목표를 서술하면 다음과 같다.

- 굴패각의 잔골재 대체율에 따른 단위수량, 잔골재율, 굴패각 조립율 및 혼화제 첨가량이 콘크리트의 시공특성 및 역학적 특성에 미치는 영향을 비교 검토하여 각 대체율에 대한 최적 배합비를 도출한다.
- 굴패각의 잔골재 대체가 콘크리트의 동결융해저항성, 황산염저항성, 중성화저항성 및 염소이온투과성 등 콘크리트의 내구성에 미치는 영향을 비교 분석하고 정량화하여 굴패각의 내구적 안정성을 확보한다.
- 굴패각 혼합 콘크리트의 장기강도 특성을 정량화함으로서 굴패각의 건설재료로써의 가능성 및 역학적 특성을 확립한다.
- 굴패각 혼합 콘크리트의 건조수축 특성 및 크리프 특성을 정량화하고 기존 모델과의 비교 검토를 통하여 굴패각 잔골재 대체에 따른 영향을 정량화하며 구조물 설계시에 고려해야 하는 콘크리트의 역학특성을 검토한다.

제 2 절 굴패각 혼합 콘크리트의 최적배합

1. 실험 목적 및 실험 방법

건조시켜 분쇄한 굴패각을 콘크리트의 잔골재 대체재료로 사용하고자 할 경우, 시공성의 악화 및 굴패각의 입도와 잔골재의 입도와의 차이에 기인하는 물성의 변화 등을 검토하여 이를 적절히 고려할 필요가 있다. 이를 위해서 이 연구에서는 굴패각의 대체율에 따른 최적의 배합비를 선정하고자 하며, 단위수량, 잔골재율, 굴패각 입도 등을 변수로 하는 비교 실험을 실시하여 굴패각의 대체에 따른 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향을 정량화 하고자 한다.

1) 사용재료

콘크리트 제작을 위해 시멘트는 L사의 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 잔골재로는 송정지역 모래를, 굵은골재는 임곡석산의 쇄석으로 최대골재크기 25mm인 것을 사용하였다. 콘크리트 배합에 사용한 각 골재의 특성을 정리하여 나타내면 그림 2.1, 그림 2.2, 표 2.1, 표 2.2 와 같다.

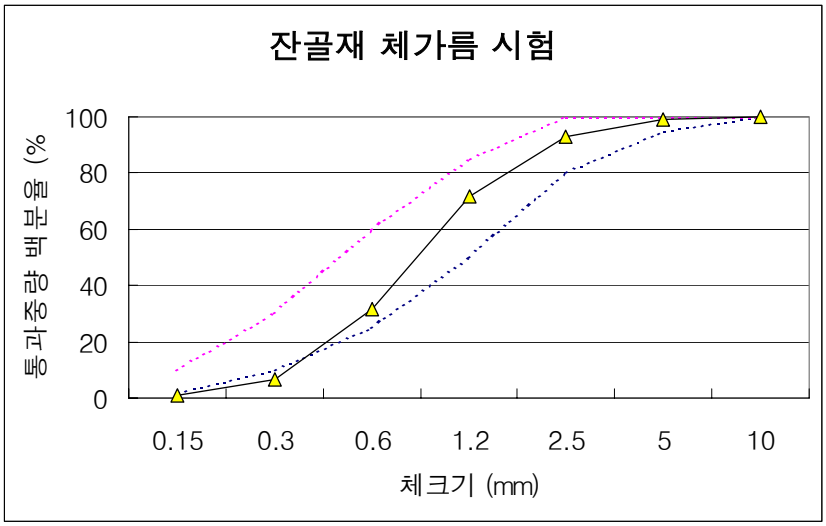


그림 2.1 잔골재 체가름 곡선

표 2.1 잔골재 비중 및 흡수율

겉보기 비중	표면건조 포화상태의 비중	진비중	흡수량 (%)	조립률
2.65	2.58	2.53	1.64	2.98

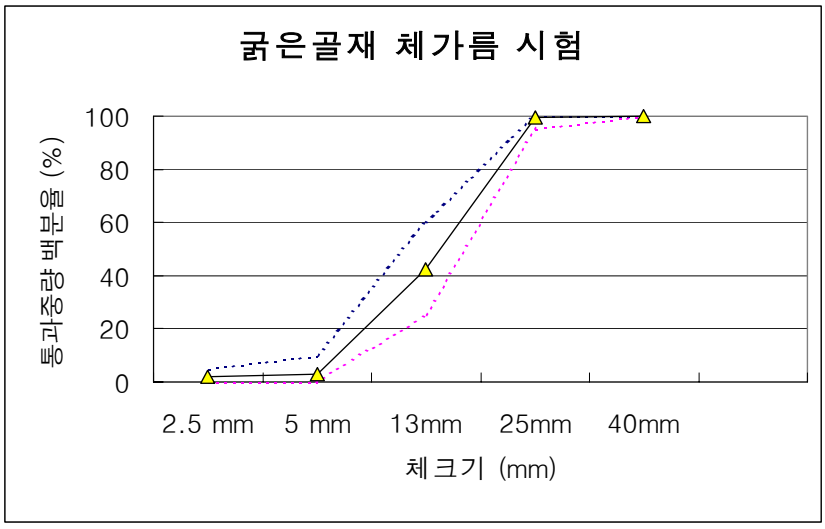


그림 2.2 굵은골재 체가름 곡선

표 2.2 굵은골재 비중 및 흡수율

겉보기 비중	표면건조 포화상태의 비중	진비중	흡수량 (%)	조립률
2.78	2.75	2.73	0.57	6.88

한편 콘크리트에 혼입하는 굴패각은 통영시에 소재하는 굴패각 처리장으로부터 수집하였으며 원활한 분쇄를 위하여 110±10℃ 건조로에서 24시간동안 건조시킨 후 마모시험기와 조크러쉬를 사용하여 분쇄하였다. 굴패각의 분쇄에 있어서는 분쇄정도에 따른 굴패각의 물리적 특성이 콘크리트의 시공성에 영향을 미치는 것으로 확인되었으므로 전년도 결과에 근거하여 분쇄정도를 2종류로 선정하였다. 굴패각의 분쇄정도는 분쇄한 굴패각의 체가름 시험을 통한 조립율로써 정의하였으며 본 실험에 사용한 굴패각의 조립율은 각각 2.8과 2.3의 것으로 선정하였다.

굴패각을 콘크리트 재료로써 활용하기 위해서 필요로 하는 물리적 특성치는 정해진 실험방법이 없고 건설재료로써 입증되어 있지 않은 상태이므로 잔골재 기준에 근거하여 구하였다. 그러나 잔골재에 근거한 실험과정을 살펴보면 굴패각의 형상이 판상이기 때문에 잔골재 시험에서 나타나지 않는 문제점을 보였으며 이러한 문제점을 고려하여 굴패각의 비중 및 흡수율 측정시에 다짐몰드의 파괴상태를 고려한 비교 검토를 실시하였다. 이러한 검토결과를 나타내면 각각 표 2.3, 그림 2.3과 같다.

표 2.3, 그림 2.3에 따르면 굴패각의 조립율은 다짐몰드 파괴형태에 따라 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 이것은 굴패각의 형상에 기인하는 것으로 향후 굴패각을 건설재료로 사용하고자 할 경우 기준을 정해야할 필요가 있음을 시사하고 있는 것으로 판단된다. 이러한 판단아래, 본 연구에서는 굴패각의 특성치를 구할 때 다짐몰드 제거시 완전히 무너지는 (a)경우를 기준으로 하였으며, 비중은 표건비중의 평균값(=2.5)으로 하였다.

한편 굴패각의 입도곡선을 살펴보면 세립자의 비율이 높은 것으로 나타났으나 전체적으로 잔골재의 입도 기준에 만족하는 결과로 판단되었다.

표 2.3(a) 굴패각의 비중 및 흡수율

(다짐몰드를 올릴 때 완전히 무너지는 경우)

조립율	2.3	2.7	2.8
겉보기 비중	2.66	2.62	2.59
표건 비중	2.58	2.44	2.48
진 비중	2.52	2.33	2.41
흡수율 (%)	2.0	4.9	2.9

표 2.3(b) 굴패각의 비중 및 흡수율

(다짐몰드를 올릴 때 중앙은 원기둥, 측면은 무너지는 경우)

조립율	2.3	2.7
겉보기 비중	2.64	2.64
표건 비중	2.29	2.34
진 비중	2.08	2.16
흡수율 (%)	10.3	8.03

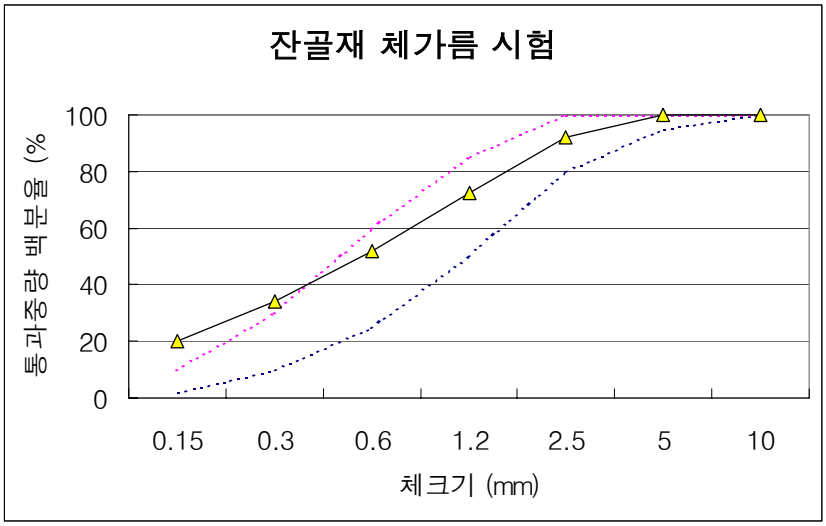


그림 2.3(a) 굴패각 체가름 곡선 (조립율=2.3)

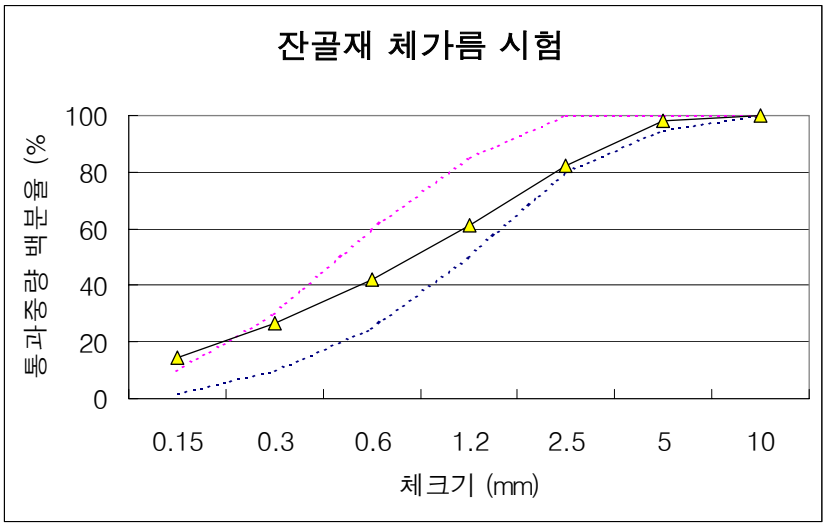


그림 2.3(b) 굴패각 체가름 곡선 (조립율=2.8)

이외에 굴패각의 잔골재 대체에 따른 시공성의 저하 및 각종 배합변수를 변화시킨 굴패각 혼합 콘크리트의 특성 비교를 위해 사용하는 혼화제는 상호간의 상성을 고려하여 J사의 제품으로 고정하였으며, AE제, 감수제 및 고성능감수제를 용도에 따라 사용하였다. 이때, AE제는 표준사용량 범위에서 사용하였으며, 감수제 및 고성능감수제는 콘크리트의 시공성 회복 정도에 따라 실험으로 첨가량을 정하였다.

2) 콘크리트 기준 배합비

굴패각의 잔골재 대체에 따른 콘크리트 특성의 변화를 조사하기 위하여 실시하는 실험의 콘크리트 배합비는 목표 슬럼프를 10±1.5cm로, 공기량은 혼화제를 첨가하여 5.5±1.0%를 만족하도록 하는 기준으로 하였다. 한편 굴패각을 대체하지 않고 혼화제도 첨가하지 않은 기준 배합비는 기존의 연구결과와 문헌 등을 검토하여 표 2.4와 같이 결정하였다. 표 2.4의 배합비는 해양 콘크리트의 내구성 확보를 위해 요구되는 물/시멘트비의 기준치를 만족하도록 하였으며 설계기준강도는 280 kgf/cm^{2}으로 하였다.

표 2.4 콘크리트 기준 배합비

물/시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량 (kg/m^3)			
		물	시멘트	모래	자갈
45	43	175	389	723	1021

3) 실험변수 및 측정항목

굴패각의 대체에 따른 콘크리트 특성의 변화를 파악하여 최적의 배합비를 도출하기 위하여 실시하는 실험의 변수 및 측정항목을 정리하여 나타내면 표 2.5와 같다.

표 2.5에서 알 수 있는 바와 같이 분쇄한 굴패각은 2종류를 사용하였으며, 굴패각의 대체율은 전년도 결과에 근거하여 10, 20 %로 정하였으며 배합 계산의 편의성을 고려하여 내할 부피비로 대체하였다.

한편 배합비의 변화에 따른 굴패각 혼합 콘크리트의 특성을 비교하기 위해 변화시킨 잔골재율 및 단위수량의 변화는 각각 ±3% 범위 내에서 변화시켰으며, AE제는 모든 배합에, 감수제는 굴패각 10% 대체 배합의 경우에, 고성능감수제는 굴패각 20% 대체 배합의 경우에 첨가하였다. 이것은 굴패각 10%의 대체에도 불구하고 기본 조건을 만족하기 위한 감수제의 투여량이 매우 증가하는 실험결과를 고려하여 굴패각 대체 20%의 경우 혼화제를 고성능감수제로 바꾸었기 때문이다.

굴패각 대체 콘크리트의 측정항목은 전년도 결과를 참조하여 표 2.5에 제시한 범위에서 실시하였다.

표 2.5 실험변수 및 측정항목

실험변수	내용	비고
굴패각 종류	A (조립율:2.8) B (조립율:2.3)	-
굴패각 대체율	0, 10, 20 %	잔골재 내할 부피비
혼화제량	AE제, 감수제, 고성능감수제	기본조건 만족 여부
잔골재율	40, 43, 46%	-
단위수량	170, 175, 180 kg/m^3	-
측정항목	슬럼프, 공기량	KS F 2402, KS F 2421
	압축강도(3, 7, 28일)	KS F 2405

4) 시험 배합비

굴패각의 잔골재 대체율에 따른 시공성 및 역학적 특성을 비교하기 위해 실시하는 배합의 일람을 정리하면 표 2.6과 같다.

표 2.6에 나타낸 바와 같이 각 배합은 모두 4개의 부분으로 구분되며 Ⅰ배합은 기준배합, Ⅱ배합은 굴패각 대체율이 10%이고 A 굴패각을 사용한 경우(조립율=2.8)이며, Ⅲ배합은 굴패각 대체율이 10%이고 B 굴패각을 사용한 경우(조립율=2.3), Ⅳ배합은 굴패각 대체율이 20%이고 A 굴패각을 사용한 경우이다. 특히 이러한 각 배합 중에서 Ⅰ, Ⅱ-1, Ⅲ-1, Ⅳ-1 배합은 기본 시공조건(슬럼프: 10±1.5cm, 공기량: 5.5±1.0%)을 만족하는 혼화제량을 결정하기 위한 시험 배합비로 사용되었다. 즉 Ⅰ, Ⅱ-1, Ⅲ-1, Ⅳ-1 배합에서 결정된 혼화제량을 각 부분의 혼화제량으로 고정한 후 표 2.6에 나타낸 단위수량 및 잔골재율을 변화시킨 각 배합과의 특성을 비교하였다.

표 2.6 각 시험 배합비 일람

배합 No.	w/c (%)	S/a (%)	단위량 (kg/m^3)				
			물	시멘트	모래	자갈	굴패각
Ⅰ	45	43	175	389	723	1021	-
Ⅱ-1	45	43	175	389	651	1021	70
Ⅱ-2	45	40	175	389	605	1075	65
Ⅱ-3	45	46	175	389	696	968	75
Ⅱ-4	45	43	170	378	659	1035	71
Ⅱ-5	45	43	180	400	642	1008	69
Ⅲ-1	45	43	175	389	651	1021	70
Ⅲ-2	45	40	175	389	605	1075	65
Ⅲ-3	45	46	175	389	696	968	75
Ⅲ-4	45	43	170	378	659	1035	71
Ⅲ-5	45	43	180	400	642	1008	69
Ⅳ-1	45	43	175	389	578	1021	140
Ⅳ-2	45	40	175	389	538	1075	130
Ⅳ-3	45	46	175	389	618	968	150
Ⅳ-4	45	43	170	378	586	1035	142
Ⅳ-5	45	43	180	400	571	1008	138

2. 실험 결과 및 고찰

1) 시공성 확보를 위한 혼화제량 결정

앞 절에서 언급한 각 Ⅰ, Ⅱ-1, Ⅲ-1, Ⅳ-1배합에 대하여 기준 조건을 만족하는 적절한 혼화제량을 결정하기 위해, 첨가하는 혼화제량을 변화시켜 가면서 이에 따른 슬럼프 및 공기량을 측정하였다. 그 결과를 정리하면 표 2.7과 같다. 표 2.7의 각 배합에서 제시된 시공조건을 만족하는 혼화제 첨가량 조합의 경우를 굵게 표시하였다.

표 2.7 각 배합의 혼화제량 변화에 따른 시공성 변화

배합명	혼화제 (%)*1			슬럼프 (cm)	공기량 (%)
	AE제	감수제	고성능감수제		
Ⅰ	0.05	0.2	-	10.7	9.5
	0.03	0.2	-	8.0	6.4
	0.03	0.2	-	5.6	4.8
	0.03	0.25	-	12.5	9.8
	0.00	0.25	-	4.1	0.7
	0.02	**0.25**	-	**8.8**	**4.5**
Ⅱ-1	0.03	0.3	-	3.4	4.0
	0.03	0.5	-	2.8	3.9
	0.04	0.6	-	6.3	7.9
	0.03	0.8	-	4.9	4.2
	0.03	**1.0**	-	**11.5**	**4.6**
Ⅲ-1	0.03	1.0	-	8.4	3.6
	0.03	1.1	-	9.1	3.0
	0.03	1.2	-	12.8	4.9
	0.03	**1.15**	-	**10.9**	**4.7**
Ⅳ-1	0.03	-	1.0	2.3	2.8
	0.03	-	2.5	21.0	10.0
	0.03	-	1.5	6.8	5.7
	0.025	-	1.6	9.0	7.8
	0.023	-	**1.6**	**11.2**	**6.2**
	0.020	-	**1.6**	**9.8**	**6.4**

*1 혼화제는 시멘트 중량대비 사용비율

표 2.7의 결과를 살펴보면 주어진 시공조건을 만족하는 배합을 만들기 위해 필요로 하는 혼화제량은 분쇄한 굴패각의 조립율이 클수록, 굴패각 대체율이 증가할수록 많아지는 것을 알 수 있다. 특히 AE제의 경우는 각 조건에 대해 크게 변화하지 않지만 감수제(또는 고성능감수제)의 경우는 배합 변수에 따라 크게 좌우됨을 알 수 있다. 이것은 어느 정도의 작업성이 갖추어지면 AE제의 흡착 등에 대한 문제는 없는 것으로 판단되며 굴패각의 세립분 및 대체량의 증가는 감수제로써 해결 할 수 있음을 보이고 있다.

그러나 표 2.7에서 알 수 있는 바와 같이 대체율이 20%인 배합은 감수제로써 작업성을 확보할 수 없어 고성능감수제를 사용할 정도로 작업성이 크게 저하되는 등 굴패각의 대체에 따른 작업성의 저하가 크게 일어나고 있다. 즉, 굴패각을 콘크리트 잔골재의 대체재료로 활용하고자 하는 경우에는 작업성의 확보에 대한 배려가 가장 큰 주의점이 될 것으로 예상된다.

또한, 본 실험에서는 별도의 실험이 수행되지는 않았으나 실험의 진행상태를 살펴보면 굴패각의 대체로 인하여 콘크리트의 점성이 상당히 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 점성의 증가에 따른 작업성의 평가에 대해서도 추후 검토되어야 할 것으로 판단된다.

2) 잔골재율, 단위수량 변화에 따른 콘크리트 특성 변화

앞 절에서 결정된 혼화제 첨가량이 동일한 각 배합에서 잔골재율 및 단위수량의 변화에 따른 굴패각 혼합 콘크리트의 시공적 특성 및 역학적 특성을 비교 검토하였다. 그 결과를 정리하면 표 2.8과 같다.

표 2.8 잔골재율 및 단위수량 변화에 따른 특성변화

배합명	s/a (%)	W (kg/m^3)	OS (kg/m^3)	slump (cm)	공기량 (%)	압 축 강 도 (kgf/cm^2)		
						3일	7일	28일
Ⅰ	43	175	-	8.8	4.5	198	253	295
Ⅱ	43	175	70	11.5	4.6	226	256	296
	40	175	65	14.1	3.4	223	261	293
	46	175	75	8.9	4.9	225	255	287
	43	170	71	6.6	4.2	219	250	293
	43	180	69	19.0	5.0	221	247	293
Ⅲ	43	175	70	10.9	4.7	241	272	327
	40	175	65	9.1	5.0	242	267	331
	46	175	75	8.3	5.5	225	252	318
	43	170	71	4.5	4.2	252	272	342
	43	180	69	10.2	4.8	240	263	325
Ⅳ	43	175	140	9.8	6.4	238	260	290
	40	175	130	11.1	5.3	235	245	286
	46	175	150	5.9	5.8	241	258	280
	43	170	142	4.4	3.4	253	272	290
	43	180	138	16.1	6.9	232	244	274

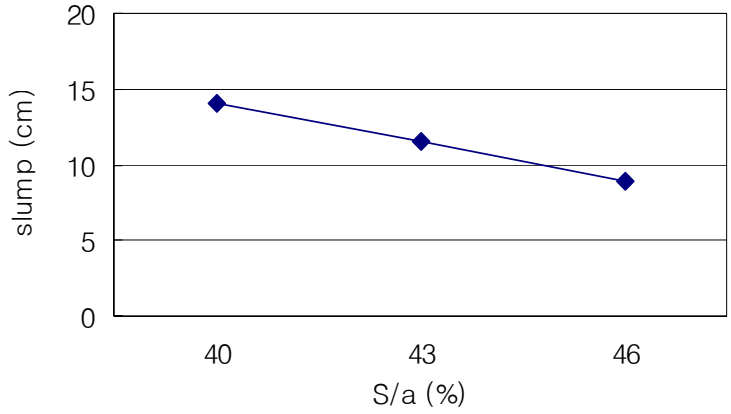
표 2.8에 나타낸 바와 같이 굴패각 혼합 콘크리트는 배합의 잔골재율 및 단위수량의 변화에 따라 시공성은 물론 압축강도가 영향을 받았으며 굴패각의 종류(조립율 차이) 및 대체율 차이에 따른 영향도 있음을 보였다. 이러한 결과를 각 경우별로 정리하면 다음과 같다.

가. 굴패각 대체율 10% 경우 (A 굴패각 사용)

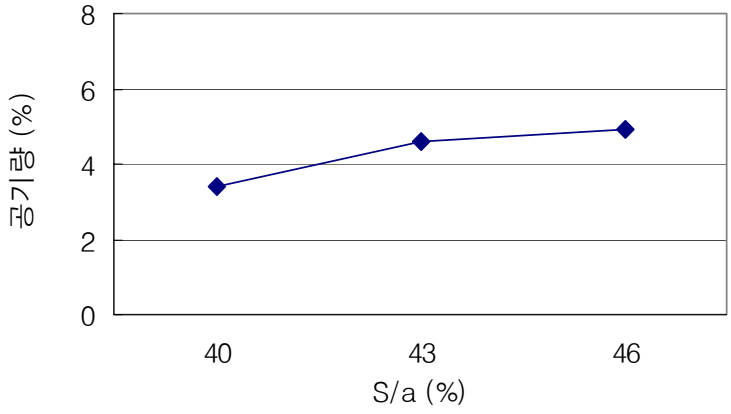
(1) S/a의 영향

잔골재율 변화에 따른 슬럼프, 공기량 및 압축강도 발현의 상태를 각각 그림 2.4에 나타내어 비교하였다. 그림 2.4에 따르면 굴패각 대체율이 10%(A 굴패각 사용)

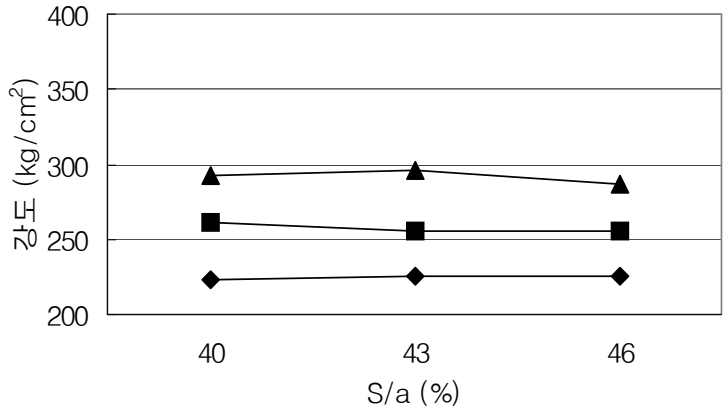
인 굴패각 혼합 콘크리트는 잔골재가 증가할수록 슬럼프는 저하하였으며 공기량은 점차 증가하는 경향을 보였다. 이에 비해 압축강도의 경우에는 각 재령마다 압축강도 값을 비교하여 보면 공기량이 가장 큰 배합의 경우에 28일 강도가 약간 저하하는 값을 보이기는 하였으나 크게 차이를 보이지는 않았다.



(a) slump



(b) 공기량

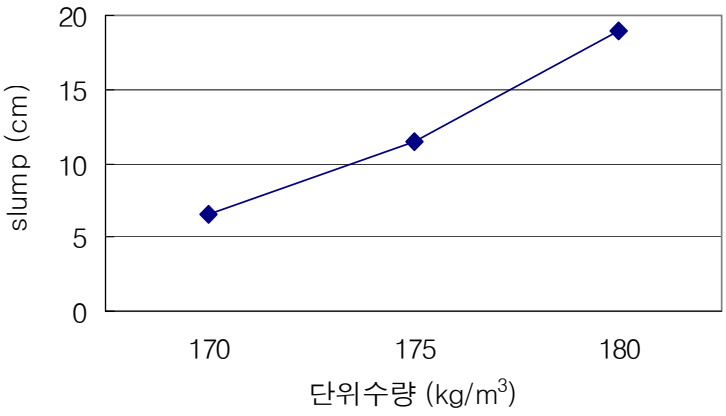


(c) 압축강도

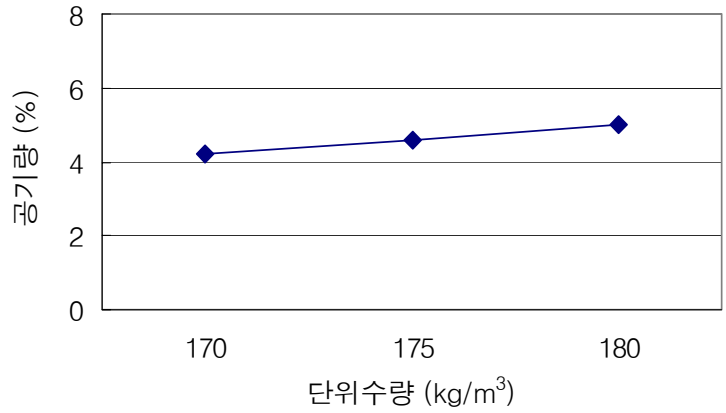
그림 2.4 잔골재율 변화에 따른 특성변화

(2) 단위수량의 영향

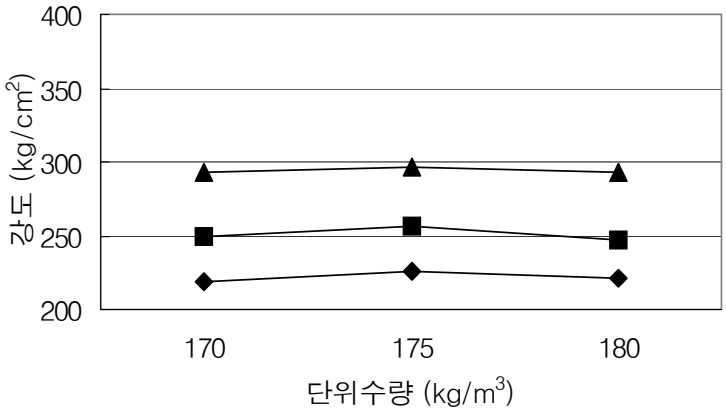
단위수량 변화에 따른 슬럼프, 공기량 및 압축강도 발현의 상태를 각각 그림 2.5에 나타내어 비교하였다. 그림 2.5에 따르면 그림 2.4와는 달리 단위수량이 증가할수록 슬럼프와 공기량이 모두 증가하는 경향을 보였으며 특히 슬럼프의 개선이 탁월함을 보였다. 그러나 압축강도의 경우에는 크게 변화하지 않았으며 오히려 약간 감소하는 경향을 보였다. 단위수량이 증가하면 이에 따라 단위시멘트량이 증가하여 경제성의 감소는 물론 시멘트 수화열 발생 및 플라스틱 건조수축의 증가 등 많은 문제점을 유발할 수 있으므로 시공성이 유지되는 범위에서 가장 적은 단위수량을 선택하는 것이 일반적인 콘크리트의 사항임을 고려할 때 굴패각 혼합 콘크리트도 이와 동일한 결과를 보이는 것으로 판단된다.



(a) slump



(b) 공기량



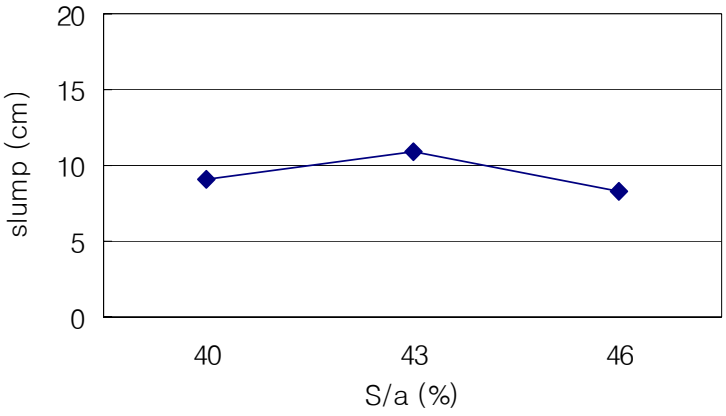
(c) 압축강도

그림 2.5 단위수량 변화에 따른 특성변화

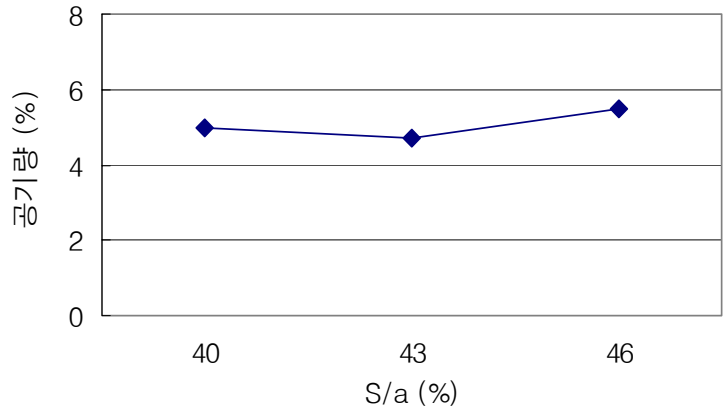
나. 굴패각 대체율 10% 경우 (B 굴패각 사용)

(1) S/a의 영향

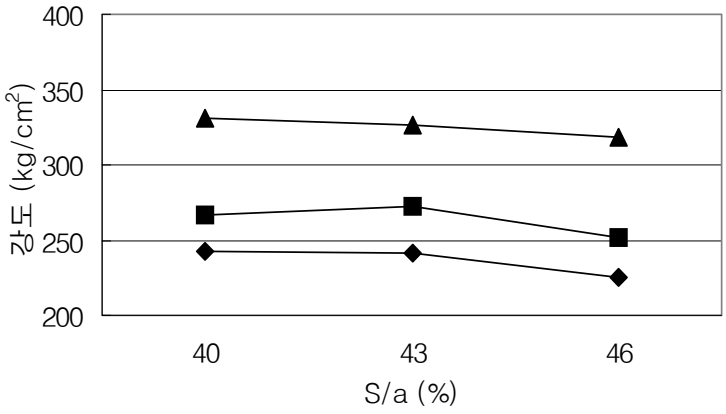
굴패각 대체율이 10%(B 굴패각 사용)인 경우의 결과를 그림 2.6에 나타내어 비교하였다. 그림 2.6에 의하면 잔골재율에 따른 변화를 보였으나 A 굴패각을 사용한 결과만큼 잔골재율에 따른 시공성의 변화가 발생하지는 않았다. 한편 압축강도 특성을 비교하면 잔골재율 46%에서 감소하는 경향을 뚜렷이 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 종합적으로 판단할 때 잔골재율의 증가에 따른 굴패각의 다량 혼합은 콘크리트의 시공성 및 역학적 특성에 바람직하지 않은 것으로 판단된다.



(a) slump



(b) 공기량

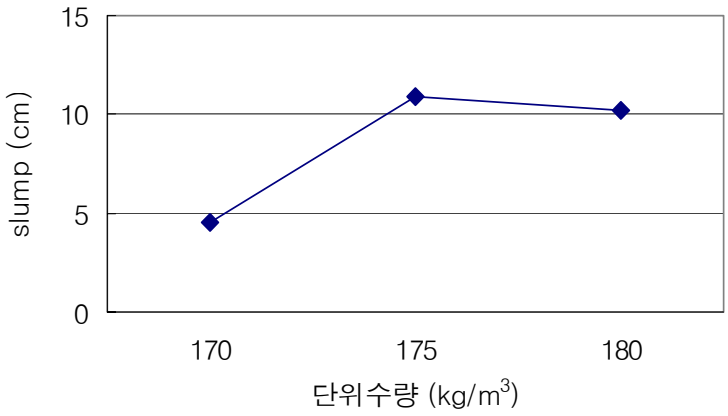


(c) 압축강도

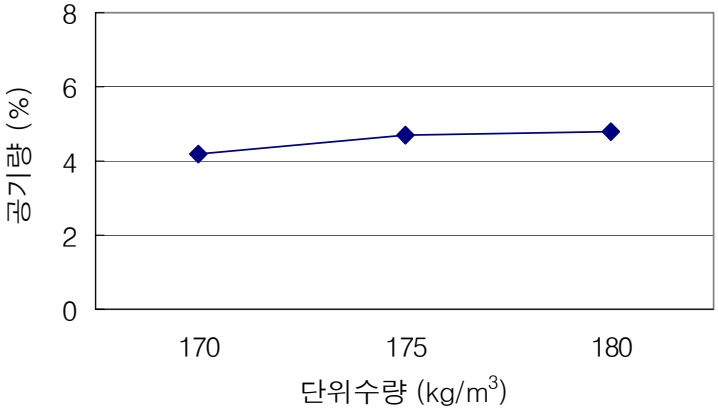
그림 2.6 잔골재율 변화에 따른 특성변화

(2) 단위수량의 영향

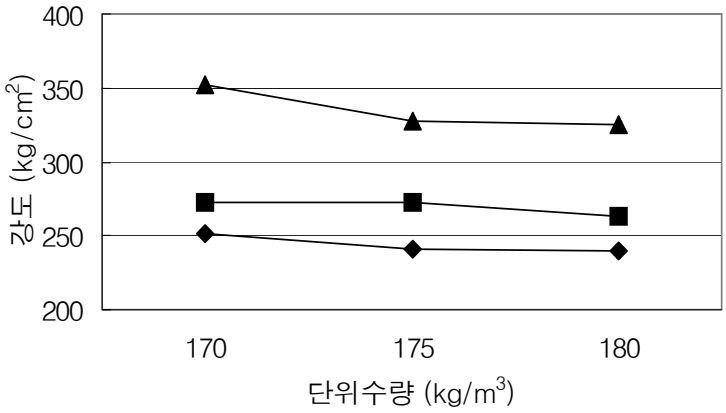
굴패각 대체율 10%(B 굴패각) 경우의 단위수량 변화에 따른 슬럼프, 공기량 및 압축강도 발현 상태를 각각 나타내면 그림 2.7과 같다.



(a) slump



(b) 공기량



(c) 압축강도

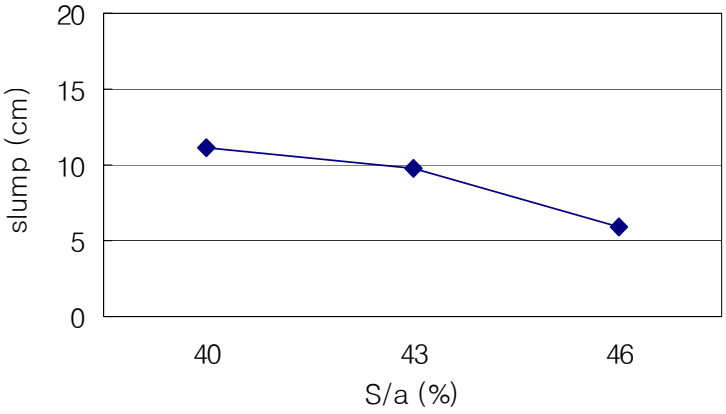
그림 2.7 단위수량 변화에 따른 특성변화

그림 2.7에 따르면 그림 2.5에서 서술한 바와 같이 단위수량이 증가할수록 슬럼프와 공기량이 모두 증가하는 경향을 보였다. 이에 비해 압축강도의 경우에는 단위수량 증가에 따라 압축강도가 저하하는 경향이 있음을 알 수 있다. 이러한 압축강도의 저하는 배합의 내포 공기량과 관련이 있는 것으로 판단된다.

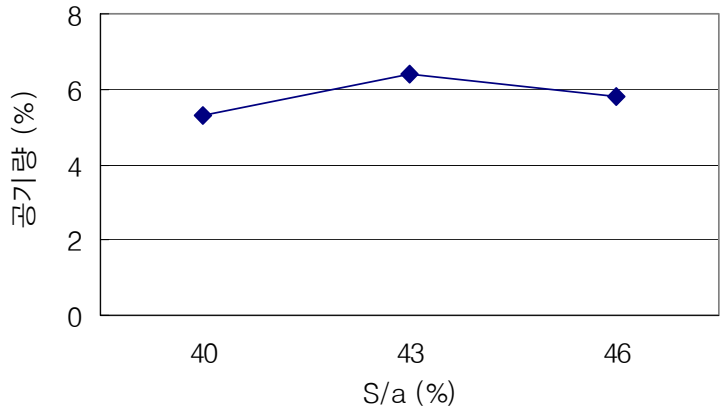
다. 굴패각 대체율 20% 경우 (A 굴패각 사용)

(1) S/a의 영향

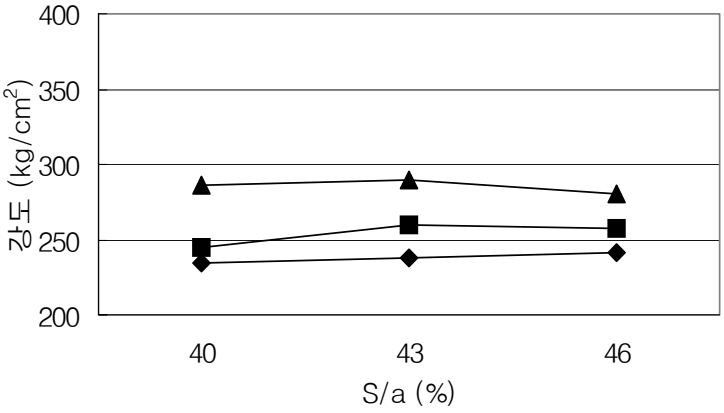
굴패각 대체율이 20%(A 굴패각 사용)인 경우의 결과를 그림 2.8에 나타내었으며 그 결과는 굴패각 대체율이 10%인 경우와 거의 동일하였다.



(a) slump



(b) 공기량



(c) 압축강도

그림 2.8 잔골재율 변화에 따른 특성변화

(2) 단위수량의 영향

단위수량 변화에 따른 슬럼프, 공기량 및 압축강도 발현 상태를 나타내면 그림 2.9와 같다. 그림 2.9의 결과를 살펴보면 그림 2.5 및 그림 2.7의 결과와 동일한 결과임을 보였다.

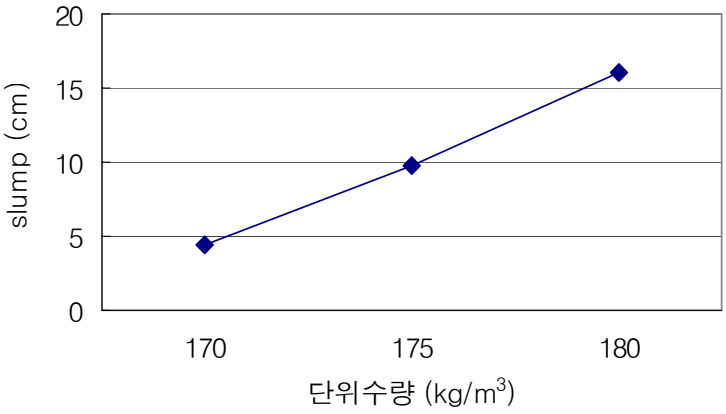
라. 종합의견

굴패각의 대체율 및 굴패각 종류에 따른 각 배합에서 잔골재율과 단위수량이 굴패각 혼합 콘크리트의 특성에 미치는 영향을 검토하여 정리하면 다음과 같다.

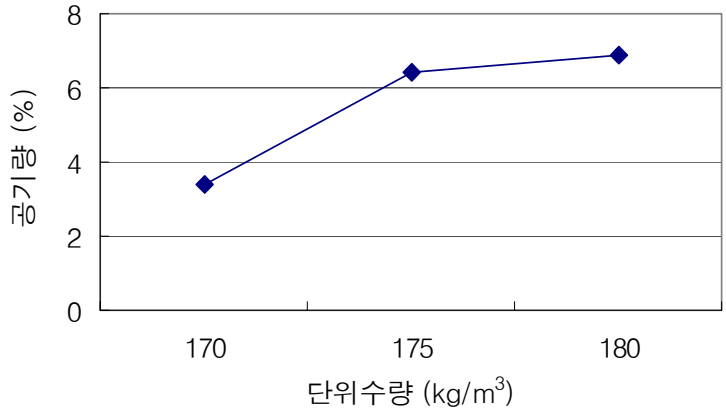
첫째, 잔골재율이 증가할수록 콘크리트의 작업성은 증가하지만 공기량은 감소하였으며, 압축강도는 크게 변화하지 않았다.

둘째, 단위수량이 증가하면 작업성 및 공기량은 크게 향상되지만 압축강도는 다소 감소하는 것으로 나타났다.

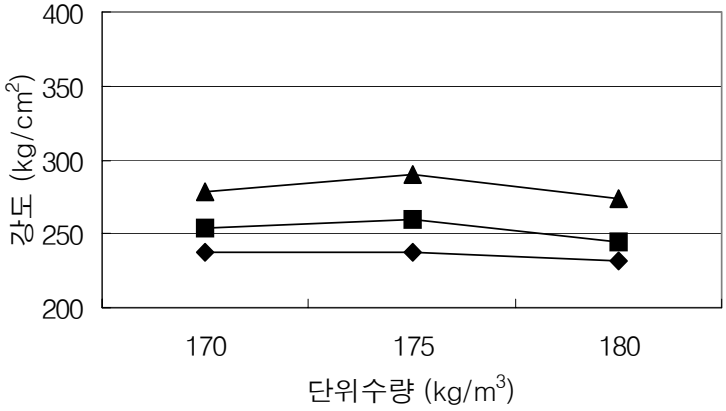
셋째, 굴패각의 대체율 증가에 따른 압축강도의 감소는 보이지 않았으며 본 연구의 범위에서는 굴패각의 조립율이 작을 경우에 작업성은 저하하지만 보다 높은 압축강도 발현을 나타내었다.



(a) slump



(b) 공기량



(c) 압축강도

그림 2.9 단위수량 변화에 따른 특성변화

3) 선정된 최적 배합비

앞에서 검토한 결과를 종합하여 이번 실험결과의 범위에서 결정된 최적 배합비를 나타내면 표 2.9와 같다.

지금까지 정리된 실험결과를 비교하여 보면 Ⅱ배합의 경우 감수제의 증가만으로 Ⅰ배합과 크게 다르지 않은 콘크리트를 만들 수 있는 것으로 판단된다. 이에 비해 Ⅲ배합, Ⅳ배합과 같이 굴패각의 조립율이 작아지고 대체율이 증가할 경우 굴패각에 포함된 미립분의 증가로 인하여 잔골재율을 다소 감소하는 것이 시공적 측면 및 역학적 측면에서 바람직 한 것으로 사료되나 잔골재율을 그대로 유지한 경우와 그 결과가 크게 다르지 않고 이번 결과의 범위에서 잔골재를 감소시켜야만 하는 근거가 명확치 않으므로 잔골재율을 그대로 유지하기로 결정하였다. 또한 단위수량의 경우는 연구의 범위 내에서 175 kg/m^{3}이 최적인 것으로 판명되었으므로 이를 반영하였다.

표 2.9 선정된 최적 배합비

배합명	w/c (%)	S/a (%)	단위량 (kg/m^3)					AE제 (%)	WRA (%)	SP (%)
			W	C	S	G	O.S			
Ⅰ	45	43	175	389	723	1021	-	0.02	0.25	-
Ⅱ	45	43	175	389	651	1021	70	0.03	1.00	-
Ⅲ	45	43	175	389	651	1021	70	0.03	1.15	-
Ⅳ	45	43	175	389	578	1021	140	0.02	-	1.6

제 3 절 굴패각 혼합 콘크리트의 장기거동

1. 실험 목적

분쇄한 굴패각을 잔골재 대체재로 사용한 콘크리트의 단기적인 특성을 살펴 본 전년도의 연구 결과에 따르면 굴패각의 대체율 증가에 따라 시공성이 저하하는 특성이 있으나 초기재령에서의 강도증진이 빠르고 재령 28일 압축강도는 일반 콘크리트 압축강도 이상으로 측정되는 것을 알 수 있었다. 또한 굴패각의 대체에 따른 역학적 특성을 정량화 함으로써 굴패각의 활용성을 제시할 수 있는 것으로 판단되었다.

그러나, 이러한 시공적 및 역학적 특성을 분석하였다 하더라도 기존의 수행된 결과가 단기재령에 대한 결과에 국한되므로 시간의 경과 즉 장기재령에서의 특성에 대한 지속적인 연구의 필요성은 간과될 수 없다고 사료된다. 따라서 이러한 장기재령에 대한 연구 필요성을 고려하여 굴패각을 혼합한 콘크리트의 장기특성을 정량화 할 수 있는 실험 및 분석을 실시하였으며 굴패각의 잔골재 대체가 콘크리트의 장기재령 특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 장기재령 특성실험

잔골재 일부를 굴패각으로 대체한 콘크리트의 장기재령 특성을 정량화하기 위한 실험으로는 장기재령 압축강도, 건조수축량 및 크리프 변형률 측정을 실시하였으며 사용한 콘크리트 배합은 제2장에서 결정된 각 굴패각 대체율별 최적배합비를 사용하였다. 각 실험의 상세를 살펴보면 다음과 같다.

1) 장기재령 압축강도

일반적으로 콘크리트의 압축강도는 시간이 경과함에 따라 증가하는 것으로 알려져 있으며 이러한 압축강도의 증가는 콘크리트 구조물의 안전도를 증가시켜주는 것으로 평가되고 있다. 그러나 산업폐기물과 같이 콘크리트와 다른 물질을 혼합하였을 경우 콘크리트의 압축강도가 감소하는 경향이 있다고 하는 연구성과물들이 보고되고 있어 굴패각의 잔골재 대체가 콘크리트의 장기재령 압축강도에 미치는 영향에 대한 영향 파악과 이에 대한 정량화를 실시할 필요가 있다.

따라서, 굴패각의 대체율에 따른 장기재령 압축강도의 변화를 비교 실험하였으며 실험의 변수 및 측정항목은 표 3.1과 같다. 이때 사용하는 시험체는 Φ10×20cm 실린

더를 사용하였으며 각 경우당 3개를 측정하여 평균값을 취하였다. 굴패각 대체 콘크리트의 장기재령 압축강도특성을 위한 실험에서는 모두 54개의 시험체를 제작하였다. 콘크리트의 압축강도 측정은 KS F 2405에 따라 실시하였다. 압축강도 실험에 관련된 사항을 사진 3.1, 사진 3.2에 나타내었다.

표 3.1 실험변수 및 측정항목

항목	내용	상세
실험변수	굴패각 대체율 측정재령	0, 10, 20 % 7일, 14일, 28일, 2개월, 3개월, 6개월, 1년
측정항목	압축강도 탄성계수	KS F 2405 응력-변형률 곡선(재령 14일, 28일)

사진 3.1 장기재령 압축강도 시험체

사진 3.2 압축강도 시험 전경

2) 건조수축 특성 실험

콘크리트의 건조수축 특성은 콘크리트의 체적 변화에 따른 균열발생 등 콘크리트 구조물의 장기거동을 파악하는데 필수적인 재료성질이며, 특히 건조수축은 사용하는 재료에 따라 크게 특성이 변화하는 것을 고려할 때, 굴패각을 잔골재로 대체함에 따른 구조물의 건조수축 변화는 반드시 검토되어야 할 사항이라 판단된다.

따라서 이러한 체적변화의 특성을 비교 검토하기 위하여 굴패각의 잔골재 대체율에 따른 콘크리트의 건조수축량을 측정하였으며 측정값을 기존의 코드에서 제안하는 모델식과 비교하여 건조수축 변화를 정량화하고자 하였다. 실시한 실험의 세부사항은 표 3.2와 같다. 시험체는 10×10×40cm 각주 시험체를 사용하였으며 시험체의 양 측면에 측정을 위한 측정점을 각각 25cm 간격으로 설치하였다. 측정에는 다이얼식 demec gage (최소눈금 : 1 ㎛)를 사용하여 계획된 재령에서의 길이변화를 측정하였다. 측정재령은 초기의 건조수축이 활발한 것을 고려하여 1주일까지는 1일간격, 1개월까지는 2일간격, 그 후로는 1주일 간격 등 건조수축의 발생 추이를 고려하여 계측 재령을 조절하였다. 한편 시험체의 건조수축량은 각 경우당 시험체 2개의 평균값으로부터 구하였다. 건조수축 측정에 대한 사항을 사진 3.3, 사진 3.4에 나타내었다.

표 3.2 건조수축 측정 세부사항

항목	내용	상세
실험변수	굴패각 대체율	0, 10, 20 %
측정항목	길이변화	항온(23±1℃), 항습(50±3%) 유지
기준재령	건조개시일	재령 7일

사진 3.3 건조수축 시험체 전경

사진 3.4 건조수축 측정 전경

3) 크리프 특성실험

콘크리트의 장기거동을 결정하는 또다른 주요 특성값으로 크리프 변형을 들 수 있다. 크리프는 지속하중에 의해 시간 경과와 함께 변형률이 계속적으로 증가하는 현상으로, 고정하중이 재하되어 크리프가 발생하면 각 부재의 응력이 재분배되고 크리프에 의한 처짐 증가 등 구조물의 안정성은 물론 사용성에도 지대한 영향을 미치게 된다. 특히 굴패각과 같이 콘크리트의 물성과 다른 재료를 사용할 경우 크리프가 증가할 가능성이 커지므로 굴패각의 대체율에 따른 크리프 변형을 비교하여 향후 구조물의 거동 예측시에 활용할 수 있는 정량화된 자료의 수집이 필요하다.

따라서 이러는 목적을 만족하기 위하여 크리프 특성을 파악할 수 있는 시험을 실시하였다. 크리프 시험은 크게 건조수축을 배제한 basic creep과 건조수축을 포함하는 creep 시험으로 분류되며 건조수축을 포함할 경우 pickett effect에 의해 크리프가 증가되므로 이번 실험에서는 시험체의 건조를 배제한 basic creep시험을 실시하였다.

크리프 시험에는 스프링 재하식 시험기(용량 : 30 tonf)를 사용하였으며 시험체로는 Φ10×20cm 실린더를 길이방향으로 3개 연립하여 하중을 재하하였다. 재하하중은 시험당시의 압축강도 측정값을 고려하여 측정값의 30% 범위에서 선정하였다. 이를 위해 크리프 시험에 앞서 Φ10×20cm 실린더에 대한 압축강도 및 탄성계수를 측정하였다. 한편, 시험체는 건조수축을 방지하기 위하여 시험체 외부면을 랩으로 피복하여 실험을 실시하였다.

표 3.3 크리프 측정 세부사항

항목	내용	상세
실험변수	굴패각 대체율	0, 10, 20 %
측정항목	길이변화 압축강도, 탄성계수	3연 시험체의 평균값 재하하중 수준 결정 및 탄성변형률 계산
하중재하	재하개시일 하중수준	재령 14일 7 ton (압축강도의 약 30%)

사진 3.5 크리프 시험체 전경

사진 3.6 크리프 측정 장비

3. 기존의 장기재령 특성 예측모델

1) 건조수축

가. ACI 모델식

공시체가 시간 t_0 에서 공기중에 노출되었을 때, 시간 t 에서의 건조수축량은 아래 식(3.1)에 의해 구한다.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{(t-t_0)}{\alpha+(t-t_0)} \varepsilon_{sh,u} \qquad (3.1)$$

여기서, α는 콘크리트의 양생조건에 따른 상수로서 7일간 수중양생인 경우 35, 1~3일간의 증기양생인 경우에는 55를 각각 사용한다. 즉, 건조수축을 예측하는 식은 양생방법에 따라 다음 식(3.2) 및 (3.3)과 같이 주어진다.

7일 동안 습윤 양생된 콘크리트에 대해서,

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{(t-t_0)}{35+(t-t_0)} \varepsilon_{sh,u} \qquad (3.2)$$

1~3일 동안 증기 양생된 콘크리트에 대해서,

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{(t-t_0)}{55+(t-t_0)}\varepsilon_{sh,u} \quad (3.3)$$

이며, t는 콘크리트의 재령(일)을 말하며 $\varepsilon_{sh,u}$는 시간이 무한히 지났을 때의 건조수축량을 나타낸다. 이 $\varepsilon_{sh,u}$는 여러 가지 요인에 의해 그 크기가 변화하며 각 요인에 따른 변화 C_{sh}는 다음 식(3.4) 및 (3.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{sh,u} = -780\times10^{-6}C_{sh} \quad (3.4)$$

$$C_{sh} = C_{cp}\ C_h C_t C_s C_f C_a C_c \quad (3.5)$$

식(3.5)의 각 요인에 따른 계수는 아래와 같다.

(1) 양생 기간에 따른 보정, C_{cp}

식(3.2)는 7일 동안의 표준 습윤양생에 대한 예측식이며, 7일 이외의 양생기간에 대해서는 아래 표 3.4에 주어진 값에 따라 보정한다.

표 3.4 보정계수 C_{cp}

습윤양생기간(일)	1	3	7	14	28	90
보정계수 C_{cp}	1.2	1.1	1.0	0.93	0.86	0.75

(2) 공기의 상대습도, C_h

구조물이 놓인 환경의 상대습도에 따라 콘크리트의 건조수축은 크게 변화하며 다음 식(3.6)과 같다.

$$C_h = \begin{cases} 1.40-0.010H & (40\%\le H\le 80\%\text{일 때}) \\ 3.00-0.030H & (80\%\le H\le 100\%\text{일 때}) \end{cases} \quad (3.6)$$

여기서 H는 공기중의 상대습도를 의미하며, 단위는 %이다.

(3) 부재의 두께, C_t

식(3.2) 및 (3.3)은 평균두께 6*inch*(15*cm*)에 대한 것으로서 그 밖의 두께에 대한 보정이 필요하며 이에 대한 보정 방법은 2가지가 있다.

① 평균두께방법

평균두께가 6*inch*(15*cm*) 이상 15*inch*(38*cm*) 이하인 경우에 다음 식(3.7)을 적용할 수 있다.

$$C_t = \begin{cases} 1.23 - 0.038t & (t \leqq 1\text{년에 대해서}) \\ 1.17 - 0.029t & (\text{극한건조수축에 대하여}) \end{cases} \qquad (3.7)$$

여기서 t는 평균 두께로서 단위는 *inch*이다. 두께 t를 *cm*단위로 하면 다음 식(3.7a)와 같이 표현할 수 있다.

$$C_t = \begin{cases} 1.23 - 0.0015t & (t \leqq 1\text{년에 대해서}) \\ 1.17 - 0.0114t & (\text{극한건조수축에 대하여}) \end{cases} \qquad (3.7a)$$

② 부피-표면적 비 방법

수분이 발산할 수 있는 표면적에 대한 전체 콘크리트 부피비로 이 계수를 정할 수 있으며 아래 식(3.7b)와 같다.

$$C_t = 1.2\exp(-0.12\,v/s) \qquad (3.7b)$$

여기서 v/s의 단위는 *inch*이고, *cm* 단위일 때에는 식(3.7c)와 같다.

$$C_t = 1.2\exp(-0.0472\,v/s) \qquad (3.7c)$$

(4) 슬럼프치, C_s

콘크리트의 슬럼프에 따른 보정이 필요하며 C_s는 슬럼프치 S(*inch*)에 따라 변하는 계수이다.

$$C_s = 0.89 + 0.041S \quad (3.8)$$

그리고 슬럼프 S의 단위가 cm인 경우에는 다음 식(3.8a)와 같다.

$$C_s = 0.89 + 0.0161S \quad (3.8a)$$

(5) 잔골재량, C_f

C_f는 전체 골재량에 대한 잔골재(fine aggregate)량의 중량비 s/a(%)에 따라 변하는 계수이다.

$$C_f = \begin{cases} 0.30 + 0.014\ s/a & (s/a \leq 50\%\text{일 때}) \\ 0.90 + 0.002\ s/a & (s/a > 50\%\text{일 때}) \end{cases} \quad (3.9)$$

(6) 공기량, C_a

C_a는 공기량 A(%)에 따라 변하는 계수이다.

$$C_a = 0.95 + 0.008\ A \quad (3.10)$$

(7) 단위 시멘트량, C_c

C_c 는 단위시멘트량 $c(lb/yd^3)$에 따라 변하는 계수이다.

$$C_c = 0.75 + 0.00036c \quad (3.11)$$

그리고 단위 시멘트량 c의 단위가 $pcf(lb/ft^3)$일 때에는 아래 식(3.11a)와 같고, kg/m^3일 때에는 식(3.11b)와 같다.

$$C_c = 0.75 + 0.00972c \quad (3.11a)$$

$$C_c = 0.75 + 0.00061c \quad (3.11b)$$

나. CEB-FIP 모델식

건조수축에 대한 모델식은 크리프에 대한 식과 유사하게 시간이 무한히 흘렀을 때의 최종수축량에 시간에 따른 함수를 곱하여 나타내고 있다. 즉 전체 수축변형도 또는 팽창 변형도는 식(3.12)와 같이 규정되고 있다.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_o) = \varepsilon_{sho}\beta_s(t-t_o) \tag{3.12}$$

여기서, ε_{sho}는 개념수축계수(notional shrinkage coefficient), $\beta_s(t-t_o)$는 수축이 시작된 후의 시간에 따른 수축변형도의 변화를 나타내는 함수이고, t_o는 수축이 시작되는 시간(일)이다. 또한 여기서 개념수축계수는 ε_{sho}는 아래 식(3.13)과 같이 정의된다.

$$\varepsilon_{sho} = \varepsilon_s(f_{cm})\beta_{RH} \tag{3.13}$$

또 $\varepsilon_s(f_{cm})$과 β_{RH}는 다음 식과 같이 각각 나타난다.

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = [160 + 10\beta_{sc}(9-f_{cm}/f_{cmo})]\times 10^{-6} \tag{3.14}$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1.55\beta_{sRH} & (40\% \le RH \le 99\%\text{에 대해서}) \\ 0.25 & (RH \ge 99\%\text{에 대해서}) \end{cases} \tag{3.15}$$

$$\beta_{sRH} = 1-\left(\frac{RH}{100}\right)^3 \tag{3.16}$$

여기서, f_{cm}은 28일 평균압축강도(MPa), $f_{cm0}=10MPa$, β_{sc}값은 시멘트 종류에 따라 중용열시멘트(SL)에 대해 4, 보통시멘트(N)와 조강시멘트(R)에 대해서는 5, 조강고강도시멘트(RS)에 대해서는 8이다. 그리고 RH는 외기의 상대습도(%)이다. 또 식(3.12)에서 $\beta_s(t-t_o)$는 다음 식(3.17)로 규정되고 있다.

$$\beta_s(t-t_o) = \sqrt{\frac{\frac{(t-t_{o)}}{t_1}}{\beta_{SH}+\frac{(t-t_o)}{t_1}}} \tag{3.17}$$

이 식에서 $t_1=1$일, $\beta_{SH}=350(h/h_0)^2$, $h_0=100mm$, $h=2A_c/u(mm)$이다. 그리고 외기의 온도가 20℃가 아닌 경우에 대해서 CEB-FIP Model code에서는 위의 식(3.15)의 β_{RH}항을 다음 식(3.18)과 같이 보정하고 식(3.17)속의 β_{SH}항은 식(3.19)의 $\beta_{SH,T}$항을 사용하도록 하고 있다.

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH}\left[1 + \left(\frac{8}{103-RH}\right)\left(\frac{T-20}{40}\right)\right] \tag{3.18}$$

$$\beta_{SH,T} = \beta_{SH}\ \exp\ [-0.06(T-20)] \tag{3.19}$$

식(3.18)과 (3.19)의 T는 온도를 의미하며 단위는 ℃이다.

다. BP 모델식

이 모델식은 수분의 비선형 확산에 근거하여 유도되었으며, 각 배합인자 및 환경 등에 따른 영향에 대해서는 다른 모델식과 마찬가지로 실험치의 회귀 분석에 의해 계수를 결정하였다. 이 모델식도 건조수축 예측을 단면의 평균적인 값으로 예측하고 있으며 다음 식(3.20)와 같이 나타내고 있다.

$$\varepsilon_{sh}(t,t_o) = \varepsilon_{sh\infty}\, k_h S(t-t_o) \tag{3.20}$$

여기서, $\varepsilon_{sh\infty}$는 무한한 시간이 흘렀을 때의 건조수축량을 나타내며, 부재의 두께에 따라 약간 다른 값을 나타내나 그 차이는 크지 않으며, 두께에 영향을 받지 않는 아래 식(3.22)의 $\varepsilon_{s\infty}$와 거의 비슷한 값이다. 그리고 k_h는 공기중의 상대습도, $S(t-t_o)$는 시간에 따른 건조수축량의 경향을 나타내는 함수들이다.

$$\varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_{s\infty}\frac{E_c(7+700)}{E_c(t_o+\tau_{sh})} \tag{3.21}$$

이 식에서 $E_c(t)$는 시간 t에서 콘크리트의 탄성계수를 나타내며, t_o는 건조가 시작하는 시간(일)이고, τ_{sh}는 아래식(3.25)에 의해 구할 수 있다. 그리고, $\varepsilon_{s\infty}$는

$$\varepsilon_{s\infty} = -(1210-880y)\times 10^{-6} \tag{3.22}$$

과 같고, y는 콘크리트 배합에 따른 영향을 나타내는 값이다.

$$y = 1/(390/z^4+1) \tag{3.23}$$

$$z = \left[\left\{1.25\sqrt{\frac{a}{c}}+0.5(g/s)^2\right\}\left(\frac{1+s/c}{w/c}\right)^{1/3}\sqrt{f_c'/1000}\right]-12 \geqq 0 \tag{3.24}$$

여기서 a는 단위 골재량, g는 단위 조골재량, s는 단위 세골재량, c는 단위 시멘트량 그리고 w는 단위 수량을 나타내며, f_c'은 콘크리트 압축강도로서 단위는 *psi.* 이다. 그리고 이렇게 계산된 z값은 0이상으로 취해야 한다.

식(3.25)의 τ_{sh}는 shrinkage square half time 이라고 불리는데 식은 다음과 같다.

$$\tau_{sh} = 600\left(\frac{k_s}{150}(25.4D)\right)^2\frac{10}{C_1(t_o)} \tag{3.25}$$

여기서, k_s는 shape factor, D는 부재의 평균두께를 나타내는 개념으로서,

$$k_s = \begin{cases} 1.0 & \text{(무한한 크기의 슬래브판)} \\ 1.15 & \text{(무한한 길이의 원주 기둥)} \\ 1.25 & \text{(무한한 길이의 정사각형 단면 기둥)} \\ 1.30 & \text{(구 (}sphere\text{))} \\ 1.55 & \text{(정육면체)} \end{cases} \tag{3.26}$$

$$D = 2v/S \tag{3.27}$$

이며, D의 단위는 $inch$이다. 그리고 $C_1(t_o)$는 다음 식(3.28)과 같다.

$$C_1(t_o) = C_7 k_T' (0.05 + \sqrt{6.3/t_o}) \tag{3.28}$$

$$C_7 = 2c(w/c) - 12 \qquad (\text{단, 여기서 } 7 \le C_7 \le 21) \tag{3.29}$$

$$k_T' = \frac{T}{T_o} \exp\left(\frac{5000}{T_o} - \frac{5000}{T}\right) \tag{3.30}$$

위 식에서 c는 단위 시멘트량으로 단위는 $pcf(lb/ft^3)$이고 T와 T_o의 단위는 절대온도 (K)이고, T_o 는 상온으로서 296K를 사용할 수 있다.

식(3.31)의 k_h는 공기중의 상대습도에 따라 건조수축이 어떻게 일어나는가에 대한 것으로서,

$$k_h = \begin{cases} 1 - h^3 & (h \le 0.98\text{에 대하여}) \\ -0.2 & (h = 1.0\text{에 대하여}) \\ \text{직선보간} & (0.98 \le h \le 1.0\text{에 대하여}) \end{cases} \tag{3.31}$$

이고, $S(t-t_o)$의 함수는 다음과 같다.

$$S(t - t_o) = \sqrt{\frac{t - t_o}{\tau_{sh} + (t - t_o)}} \tag{3.32}$$

2) 크리프

가. ACI 모델식

(a) 작용하중에 의한 변형

ACI 기준에서는 작용하중에 대한 특별한 언급은 없으나 중첩의 원리가 유지되기

위해서는 $0.4f_c'(t')$ 혹은 $0.5f_c'(t')$ 정도 이하의 응력이 작용할 때 적용할 수 있다. 그리고 환경조건도 특수한 경우가 아닌 일반적인 경우에 한하며, 특수한 경우에는 그에 따른 검토가 필요하다. 또 ACI 기준에서는 크리프 함수 $J(t,t')$이 정의되어 있지 않고 크리프계수 $\phi(t,t')$이 정의되어 있으며, 그 관계는 아래식과 같다.

$$J(t,t') = \frac{1}{E_c(t')}\ [1+\phi(t,t')] \tag{3.33}$$

여기서, $E_c(t')$은 시간 t'(일)에서의 콘크리트의 탄성계수(secant modulus)를 나타내고, $\phi(t,t')$은 크리프 계수를 나타낸다.

따라서, 시간 t'에서 $\sigma_c(t')$이 작용했을 때, 시간 t(일)에서 전체 변형도 $\varepsilon_c(t,t')$은 다음 식(3.33)과 같이 주어진다.

$$\varepsilon_c(t,t') = \sigma_c(t')\ J(t,t') \tag{3.33}$$

(b) 크리프 계수

ACI 모델의 크리프계수는 다음 식(3.34)과 같이 표현된다.

$$\phi(t,t') = \frac{(t-t')^{0.6}}{10+(t-t')^{0.6}}\phi_u \tag{3.34}$$

여기서, t는 크리프 변형을 구하고자 시간, t'은 하중이 작용하는 시간을 각각 나타내며, 단위는 일(day)이다. ϕ_u는 극한 크리프계수(final creep coefficient)로서 외부환경 및 콘크리트의 배합조건에 따라 아래 식(3.35)로 구한다. 단, 표준조건하에서는 ϕ_u = 2.35를 사용할 수 있다.

$$\phi_u = 2.35\ C_{cu}C_hC_tC_sC_fC_a \tag{3.35}$$

여기서, 각 계수는 아래와 같다.

(1) 양생조건, C_{cu}

C_{cu}는 양생조건에 따라 변하는 계수로서, 습윤양생과 증기양생에 따라 다른 값을 가지며, 아래 식(3.36)와 같다.

$$C_{cu} = \begin{cases} 1.25t'^{-0.118} & \text{(습윤양생에 대해서)} \\ 1.13t'^{-0.094} & \text{(증기양생에 대해서)} \end{cases} \quad (3.36)$$

여기서, 수중양생일 때 t'는 7일 보다, 증기양생일 때는 3일 보다 커야 한다.

(2) 공기중의 상대습도, C_h

C_h는 상대습도 H(%)에 따라 변하는 계수이며, 40% 전후에 따라 아래 식(3.37)과 같이 각각 나타난다.

$$C_h = \begin{cases} 1.27 - 0.0067H & (H \geq 40\%\text{일 때}) \\ 1.0 & (H \leq 40\%\text{일 때}) \end{cases} \quad (3.37)$$

(3) 부재의 두께, C_t

① 평균두께 방법

평균두께가 15*inch* 이하인 경우에 이 식의 적용이 가능하며, 이때의 보정계수 C_t 값은 다음과 같다.

$$C_t = \begin{cases} 1.14 - 0.023t & \text{(하중이 가해진 후 1년까지)} \\ 1.10 - 0.017t & \text{(그 이후)} \end{cases} \quad (3.38)$$

여기서 t의 단위는 *inch*이고, *cm* 단위로 하면 아래 식(3.38a)와 같다.

$$C_t = \begin{cases} 1.14 - 0.0092t & \text{(하중이 가해진 후 1년까지)} \\ 1.10 - 0.0067t & \text{(하중이 가해진 1년 이후부터)} \end{cases} \quad (3.38a)$$

② 부피-표면적비 방법

건조수축에서와 마찬가지로 부피-표면적비에 따라 이 C_t값을 결정할 수 있으며, 다음 식(3.38b)와 같다.

$$C_t = \frac{2}{3}[1+1.13\exp(-0.54\,v/s)] \tag{3.38b}$$

여기서 v/s의 단위는 *inch*이고, *cm* 단위일 때에는 다음 식(3.38c)와 같다.

$$C_t = \frac{2}{3}[1+1.13\exp(-0.213\,v/s)] \tag{3.38c}$$

(4) 슬럼프치, C_s

C_s는 슬럼프치 S(*inch*)에 따라 변하는 계수이다. 그리고 S의 단위가 *cm*인 경우에는 (3.39a)와 같다.

$$C_s = 0.82+0.067\,S \tag{3.39}$$

$$C_s = 0.82+0.0264\,S \tag{3.39a}$$

(5) 잔골재량, C_f

C_f는 전체 골재량에 대한 잔골재(fine aggregate)량의 중량비 s/a(%)에 따라 변하는 계수이다.

$$C_f = 0.88+0.0024\ s/a \tag{3.40}$$

(6) 공기량, C_a

C_a는 공기량 A(%)에 따라 변하는 계수이다.

$$C_a = 0.46 + 0.09A \quad (\text{단}, \ C_a \leq 1.0) \tag{3.41}$$

나. CEB-FIP 모델식

(a) 작용하중에 의한 변형

작용응력이 $0.4f_{cm}(t')$이하일 경우 경우 중첩의 원리를 이용할 수 있으며, 이때 시간 t'에서 $\sigma_c(t')$의 응력이 작용할 때 크리프만에 의한 변형률은 다음 식(3.42)과 같이 나타난다.

$$\varepsilon_{cc}(t,t') = \frac{\sigma_c(t')}{E_{ci}}\phi(t,t') \tag{3.42}$$

여기서, $\phi(t,t')$는 크리프 계수(creep coefficient)라고 하는데, 그 의미는 28일 재령의 콘크리트의 즉시변형(instantaneous strain)에 대한 크리프만에 의한 변형의 비를 의미하며, E_{ci}는 28일 재령 콘크리트 초기접선 탄성계수를 나타낸다. 따라서 시간 t'에서의 즉시변형을 더한 응력으로 전체 변형률은

$$\varepsilon_{c\sigma}(t,t') = \sigma_c(t')\left[\frac{1}{E_{ci}(t')} + \frac{\phi(t,t')}{E_{ci}}\right] = \sigma_c(t')J(t,t') \tag{3.43}$$

이 되고 여기서 $E_{ci}(t')$는 재하시의 콘크리트의 초기 접선 탄성계수를 나타내고, $J(t,t')$는 크리프 함수(creep function 또는 creep compliance)라고 말하며 단위응력이 시간 t'에 작용했을 때, 시간 t에서의 그 응력에 의한 전체 변형률을 의미한다. 따라서 $J(t,t')$와 $\phi(t,t')$의 관계식은 다음 식(3.44)과 같으며, CEB-FIP 모델에서는 크리프 계수 $\phi(t,t')$를 정의하고 있다.

$$\begin{aligned} J(t,t') &= \frac{1}{E_{ci}(t')} + \frac{\phi(t,t')}{E_{ci}} \\ &= \frac{1}{E_{ci}(t')}\left[1 + \frac{E_{ci}(t')}{E_{ci}}\phi(t,t')\right] \end{aligned} \tag{3.44}$$

(b) 기본적인 크리프 계수

여기서 '기본적인'이란 의미는 보편적인 상황에서의 의미이고, 특별한 시멘트를 사용한 경우이거나, 고온 또는 저온에서 양생되거나 구조물이 특수한 환경에 놓여 있는 경우 등에 대한 것은 다음에서 서술한다. 이와 같이 보편적인 상황에서의 크리프에 대한 기본식은 다음과 같다.

$$\phi(t,t') = \phi_0 \beta_c(t-t') \tag{3.45}$$

여기서, ϕ_0는 개념 크리프 계수(notional creep coefficient)라고 하며, 크리프 계수가 최대가 될 수 있는 값이다. 즉 수렴값이고, $\beta_c(t-t')$는 재하후에 시간에 따른 크리프 변화를 나타내는 계수이다. 또 개념 크리프 계수 ϕ_0는,

$$\phi_0 = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t') \tag{3.46}$$

로 나타낼 수 있고, 여기서

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{RH_o}}{0.46 \left(\frac{h}{h_o}\right)^{1/3}} \tag{3.47}$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{f_{cmo}}}} \tag{3.48}$$

$$\beta(t') = \frac{1}{0.1 + \left(\frac{t'}{t_1}\right)^{0.2}} \tag{3.49}$$

이고, 여기서, RH는 공기의 상대습도(%), RH_0=100%, f_{cm}은 28일 평균 압축강도

(MPa), f_{cm0}=10MPa, t_1=1일, h_0=100mm, 그리고 $h=2A_c/u(mm)$인데, 이 h를 개념 부재치수(notional size of member)라고 하며 A_c는 단면적이고, u는 외기와 접촉하는 단면둘레를 의미한다.

또 $\beta_c(t-t')$는 1보다 작은 값으로 이는 CEB-FIP 1990 code도 ACI code와 마찬가지로 콘크리트의 크리프는 어느 점에 접근한다는 것을 의미하며, 이 값은 식(3.50)과 같이 주어진다.

$$\beta_c(t-t') = \left[\frac{\frac{(t-t')}{t_1}}{\beta_H + \frac{(t-t')}{t_1}} \right]^{0.3} \qquad (3.50)$$

여기서도 $t_1=1$일이며 β_H는 아래 식(3.51)과 같다.

$$\beta_H = 150\left[1+(1.2\frac{RH}{RH_o})^{18}\right]\frac{h}{h_o} + 250 \le 1500(\text{일}) \qquad (3.51)$$

위 식(3.51)에서 $RH_o=100\%$, $h_o=100mm$이고, $h=2A_c/u(mm)$이다.

(c) 양생온도 및 시멘트 종류에 따른 보정

위에서 정의된 크리프 계수는 양생온도가 20℃이고, 하중이 가해진 후에도 외기의 기온이 20℃인 경우를 기준으로 삼은 값이다. 따라서 양생하는 동안 온도의 변화가 있거나 20℃가 아닌 온도에 구조물이 노출되어 있는 경우에 t와 t'는 보정이 필요하다. 즉, 아래 식(3.52)에 의해 t를 t_T로 보정하고, 식(3.53)에 의해 t_o를 보정한다.

$$t_T = \sum_{i=1}^{n} \triangle t_i \exp\left(-\frac{4000}{273+T(\triangle t_i)}+13.65\right) \qquad (3.52)$$

여기서 $T(\triangle t_i)$는 $\triangle t_i$기간(일)동안 지속된 온도(℃)이고, $\triangle t_i$는 일정한 온도가 지속된 기간(일)을 의미하며, n은 일정한 온도를 유지한 단계의 수를 의미한다.

$$t_o = t_{o,T}\left[\frac{9}{2+\sqrt{\frac{t_{o,T}}{t_{1,T}}}}+1\right]^{\alpha} \geq 0.5(\text{일}) \tag{3.53}$$

여기서, $t_{1,T}=1$일, $t_{0,T}$는 식(3.52)에 의해 t_o(일)까지 보정한 값이며, α는 시멘트의 종류에 따른 계수로 다음과 같다.

$$\alpha = \begin{cases} -1 & (\text{ 중용열 시멘트}(SL)\text{에 대해서}) \\ 0 & (\text{ 보통 또는 조강 시멘트}(N,R)\text{에 대해서}) \\ 1 & (\text{ 조강 고강도 시멘트}(RS)\text{에 대해서}) \end{cases} \tag{3.54}$$

여기서 시멘트는 구성성분에 따라 CEB-FIP기준에서는 다음 표 3.5와 같이 분류하고 있다.

표 3.5 구성성분에 따른 시멘트 분류

분류명	약칭	성분
포틀랜드 시멘트 (Portland Cement)	CE 1	클링커량 95% 이상
포틀랜드 혼합 시멘트 (Portland Compodsition Cement)	CE 2	65%≤클링커량≤80% 고로 슬래그≤35% 자연 또는 인공 포졸란≤28% 석회성분≤20%
고로 시멘트 (Blast Furnace Cement)	CE 3	20%≤클링커량 고로슬래그≤80%
포졸란 시멘트 (Pozzolanic Cement)	CE 4	60%≤클링커량 자연 또는 인공 포졸란≤40%

(d) 높은 응력 ($0.4f_{cm}(t') \leq |\sigma_c| \leq 0.6f_{cm}(t')$)에 대한 보정

작용응력 σ_c의 크기가 $0.4f_{cm}(t')$이상이고 $0.6f_{cm}(t')$이하인 경우 약간의 비선형성을 보이게 되므로, 앞의 식(3.45)의 개념크리프 계수 ϕ_0의 값 대신에 다음 식(2.66)의 $\phi_{0,k}$값을 대입하여 구할 수 있다. 물론 이 $\phi_{0,k}$의 값은 항상 ϕ_0값 보다는

크다. 즉 높은 응력이 작용하는 경우 콘크리트 내의 균열 등에 의해 최종의 크리프(개념 크리프)가 증가하기 때문이다.

$$\phi_{o,k} = \phi_o \exp[1.5(k_\sigma - 0.4)] \tag{3.55}$$

여기서, $k_\sigma = |\sigma_c| / f_{cm}(t')$ 로서 시간 t'에서의 압축강도에 대한 작용응력의 비이다.

(e) 온도변화에 대한 보정

하중이 가해지는 동안의 온도가 5°C에서 80°C까지 변화할 때의 크리프 계수는 다음과 같이 구하도록 하고 있다.

$$\phi(t, t', T) = \phi_o \beta_c(t - t') + \triangle\phi_{T,trans} \tag{3.56}$$

여기서, ϕ_o와 $\beta_c(t - t')$은 식(3.45)의 값과 같으나, 식(3.46)의 ϕ_{RH}와 식(3.50)의 β_H를 다음 식(3.57)의 $\phi_{RH,T}$와 식(3.59)의 $\beta_{H,T}$의 값으로 대체시켜야 한다. 즉,

$$\phi_{RH,T} = \phi_T + (\phi_{RH} - 1)\phi_T^{1.2} \tag{3.57}$$

$$\phi_T = \exp[0.015(T - 20)] \tag{3.58}$$

$$\beta_{H,T} = \beta_H \beta_T \tag{3.59}$$

$$\beta_T = \exp\left[\frac{1500}{273 + T} - 5.12\right] \tag{3.60}$$

또, $\triangle\phi_{T,trans}$는 온도상승에 따른 추가되는 변형으로서 식(3.61)에 의해 계산한다.

$$\triangle \phi_{T,\,trans} = 0.0004(T-20)^2 \tag{3.61}$$

다. BP 모델식

BP 모델식에서는 공시체의 수분 발산이 일어나지 않고 온도가 일정한 경우의 기본 크리프(basic creep)와 수분의 외부 발산이 일어나고 온도가 일정한 건조 크리프(drying creep)로 나누어 식을 제시하고 있다.

(a) 기본 크리프 (basic creep)

크리프 함수 $J(t,t')$이 정의되고 있으며, 순간 탄성 변형률과 크리프 변형의 합으로 나타난다.

$$J(t,t') = \frac{1}{E_o} + \frac{\phi_1}{E_o}(t'^{-m} + \alpha)(t-t')^n \tag{3.62}$$

여기서, ϕ_1, m, n, α등은 콘크리트 배합에 따라 정해지는 값으로 아래와 같다.

$$\phi_1 = \frac{10^{3n}}{2(28^{-m} + \alpha)} \tag{3.63}$$

$$\alpha = \frac{1}{40(w/c)} \tag{3.64}$$

$$m = \frac{0.82}{(f_c'/1000)^2} \tag{3.65}$$

$$n = \begin{cases} 0.12 + \dfrac{0.07x^6}{5130 + x^6} & (x>0\text{에 대해서}) \\ 0.12 & (x \leqq 0\text{에 대해서}) \end{cases} \tag{3.66}$$

$$x=\left[2.1\times\frac{a/c}{(s/c)^{1.4}}+0.1\left(\frac{f_c'}{1000}\right)^{1.5}(w/c)^{1/3}(a/g)^{2.2}\right]a_1-4 \qquad (3.67)$$

여기서, f_c'은 콘크리트 압축강도로 단위는 *psi.*이고, *a, g, s, c, w*는 각각 단위골재량, 단위조골재량, 단위세골재량, 단위시멘트량 및 단위수량을 나타낸다. 그리고 a_1은 시멘트 종류에 따른 값으로 다음과 같다.

$$a_1 = \begin{cases} 1.0 & (1\text{종 및 } 2\text{종 시멘트에 대해서}) \\ 0.93 & (3\text{종 시멘트에 대해서}) \\ 1.05 & (4\text{종 시멘트에 대해서}) \end{cases} \qquad (3.68)$$

(b) 건조 크리프 (drying creep)

앞서 말한 바와 같이 건조 크리프란 외기 중으로 콘크리트내의 수분의 발산이 가능하나, 외기가 일정한 경우의 크리프 변형을 의미한다. 그래서 기존 크리프에 추가항이 있는 아래 식(3.69)과 같다.

$$J(t,t')=\frac{1}{E_o}+C_o(t,t')+C_d(t,t',t_o)-C_p(t,t',t_o) \qquad (3.69)$$

여기서 앞의 두항 $\frac{1}{E_o}+C_o(t,t')$은 앞의 기본 크리프와 같고, $C_d(t,t',t_o)$와 $C_p(t,t',t_o)$는 다음 식(3.70) 및 (3.78)과 같다.

$$C_d(t,t',t_o)=\frac{\phi_d'}{E_o}t'^{-m/2}k_h'\varepsilon_{sh\infty}S_d(t,t') \qquad (3.70)$$

$$\phi_d' = \frac{\phi_d}{\sqrt{1+\frac{t'-t_o}{10\tau_{sh}}}} \qquad (3.71)$$

$$k_h' = |h_o^{1.5} - h^{1.5}| \tag{3.72}$$

$$S_d(t,t') = \frac{1}{\left(1+\frac{10\tau_{sh}}{t-t'}\right)^{n\cdot C_d}} \tag{3.73}$$

위 식에서 $\varepsilon_{sh\infty}, \tau_{sh}, m, n$은 앞의 식(3.21), (3.25), (3.65) 및 (3.66)과 각각 같으며, h_o는 시간 t_o까지의 양생 중의 상대함수로 0.98~1.0 의 값이며 h는 외기의 상대습도이다. 그리고 ϕ_d와 C_d의 값은 아래식과 같다.

$$\phi_d = \begin{cases} 0.008+0.027u & (r>0\text{에 대해서}) \\ 0.008 & (r\leqq 0\text{에 대해서}) \end{cases} \tag{3.74}$$

$$u = 1/[1+(0.7/r^{1.4})] \tag{3.75}$$

$$r = 56000(s/a)^{0.3}(f_c'/1000)^{0.3}(g/s)^{1.3}\left(\frac{w/c}{\varepsilon_{sh\infty}\times 10^6}\right)^{1.5} - 0.85 \tag{3.76}$$

$$C_d = 2.8 - 7.5n \tag{3.77}$$

여기서, f_c'의 단위는 *psi.*이다.

그리고 식(2.69)의 $C_p(t,t',t_o)$는 다음 식(3.78)과 같다.

$$C_p(t,t',t_o) = 0.83k_h'' S_p(t,t_o)C_o(t,t') \tag{3.78}$$

$$k_h'' = h_o^2 - h^2 \tag{3.79}$$

$$S_p(t,t_o) = \frac{1}{\left(1+\frac{100\tau_{sh}}{t-t_o}\right)^n} \tag{3.80}$$

그리고 $C_o(t,t')$은 기본 크리프의 값을 나타낸다.

(c) 기본 크리프의 온도에 따른 보정

일정한 온도가 아닌 경우에는 다음에 따라 보정하여 이용한다.

$$J(t,t') = \frac{1}{E_o} + \frac{\phi_T}{E_o}(t_e'^{-m} + \alpha)(t-t')^{n_T} \tag{3.81}$$

즉, 기본 크리프의 ϕ, t'^{-m}, n 대신에 $\phi_T, t_e'^{-m}, n_T$ 를 사용하면 된다.

$$\phi_T = \phi_1(1+C_T) \tag{3.82}$$

$$C_T = c_T \tau_T C_o$$

$$c_T = \frac{19.4}{1+[100/(T-253.2)]^{3.5}} - 1 \tag{3.83}$$

$$\tau_T = \frac{1}{1+60/t_T'^{0.69}} + 0.78 \tag{3.84}$$

$$C_o = \frac{1}{8}(w/c)^2(a/c)a_1 \tag{3.85}$$

식(3.83)의 T는 절대온도(K)이고, 식(3.84)의 t_T' 는 온도 T(K)가 가해질 때의 콘크리트의 재령(일)이고, a_1은 식(3.68)과 같다.

$$t_e' = \int_0^{t'} \beta_T dt'' \tag{3.86}$$

$$\beta_T = \exp[\frac{4000}{T_o} - \frac{4000}{T}] \tag{3.87}$$

T_o는 상온에서의 절대온도 (293。K)이며, T의 단위도 절대온도 (。K)이다.

그리고 n_T는 아래 식(3.88)에 의해 구할 수 있다.

$$n_T = B_T \cdot n \tag{3.88}$$

$$B_T = \frac{0.25}{1+[74/(T-253.2)]^7} + 1 \tag{3.89}$$

4. 장기재령 특성 결과 분석

1) 장기재령 압축강도

굴패각을 잔골재 대체재로 사용한 콘크리트의 장기재령에서의 압축거동을 파악하기 위하여 각 실험변수에 대해 실시한 결과를 정리하여 나타내면 표 3.6, 그림 3.1 및 그림 3.2와 같다. 표 3.6에서 알 수 있는 바와 같이 압축강도 측정은 3개월 강도까지 진행된 상태이며 추후의 측정은 지속될 예정이다.

표 3.6 및 그림 3.1의 결과에 따르면, 굴패각의 잔골재 대체가 콘크리트의 재령 28일까지의 압축강도에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었으나(이 결과는 전년도에 확인한 결과와 동일함), 재령 28일 이후의 압축강도에는 영향이 있는 것으로 나타났다. 즉, 굴패각의 대체율이 10%일 경우, 28일 이후의 압축강도 발현이 상당히 발생하여 15% 정도의 강도가 증가하였으며 이 값은 굴패각을 대체하지 않은 경우의 결과와 일치하였다. 이에 비해 굴패각 대체율이 20%인 경우에는 강도의 증가가 거의 나타나지 않는 결과를 보였다. 향후 지속적인 장기재령에서의 압축강도를 대체율별로 측정하여 이에 대한 정량화를 제시할 필요가 있으나, 지금까지의 결과에 따르면 굴패각이 10% 대체된 경우와 20% 대체된 경우에 압축강도에 미치는 영향이 크게 다르며 굴패각 대체를 할 수 있는 임계비율에 있어 일정 한도 이상의 굴패각 대체는 콘크리트의 장기재령 강도에 악영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

굴패각을 다량 대체한 경우의 장기재령 강도 저하는 콘크리트 속에 존재하는 굴패각이 상대적으로 낮은 강도를 가지므로 인한 응력 집중의 효과가 작용하는 것으로 판단되며, 이러한 경우에는 28일 이후의 압축강도 증가를 기대하기 어려울 것으로 사료된다. 한편, 굴패각의 대체에 따른 탄성계수의 저하는 대체율이 증가할수록 대체율에 거의 비례하여 저하하였으며 굴패각 대체율 20%에서 탄성계수는 10~15% 범위에서 저하하였다.

재령 28일에서 측정한 응력-변형률 곡선을 굴패각 대체율별로 비교하여 보면 그림 3.3과 같다. 이 결과에 의하면 굴패각의 대체에 따른 최대변형률의 변화 등 에너

지 흡수능력에 대한 영향은 없는 것으로 판단된다. 이때, 콘크리트의 길이방향 변형률 측정에는 전기저항식 콘크리트 변형률 게이지(측점거리:60mm)를 사용하였으며 시험체의 양 측면에 설치하여 평균값을 구하였다.

표 3.6 장기재령에서의 압축거동 측정 결과

재령 / 대체율	압축강도 (kgf/cm^2)					탄성계수 ($\times 10^5$) (kgf/cm^2)	
	7일	14일	28일	2개월	3개월	14일	28일
0%	263	298	299	343	345	3.47	3.41
10%	258	293	297	325	345	3.04	3.18
20%	255	302	302	318	306	2.91	3.05

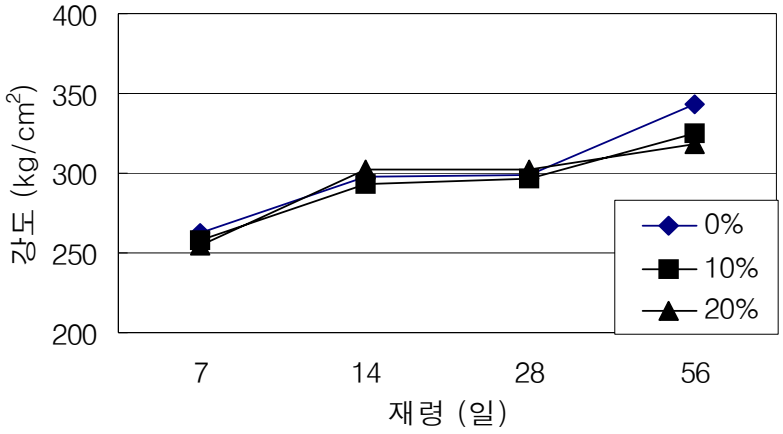


그림 3.1 굴패각의 대체에 따른 압축강도 변화

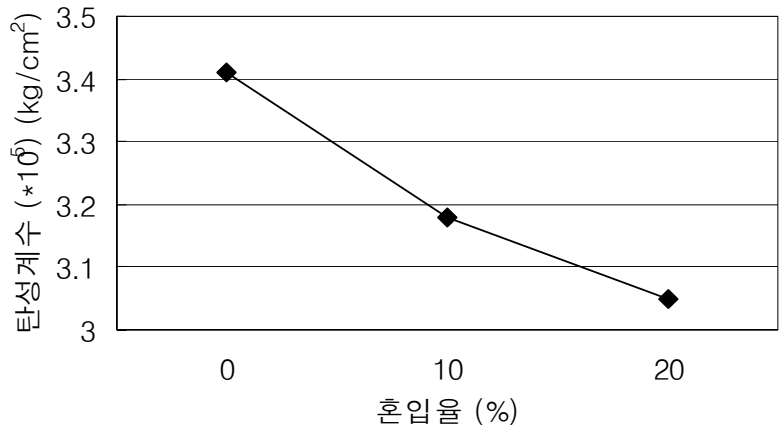
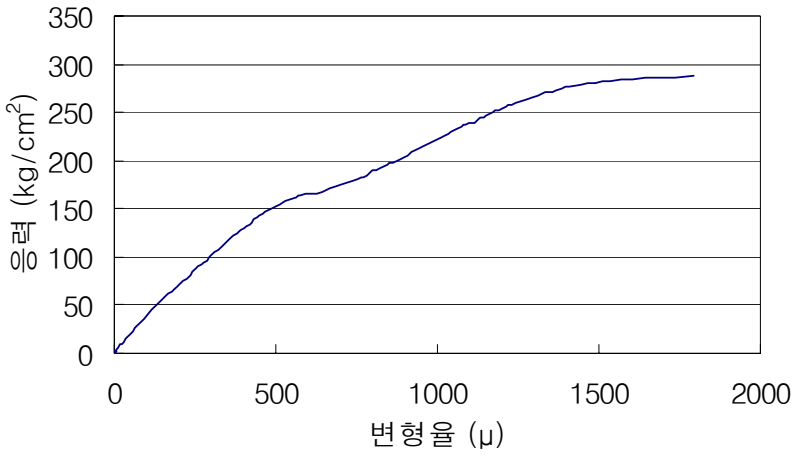
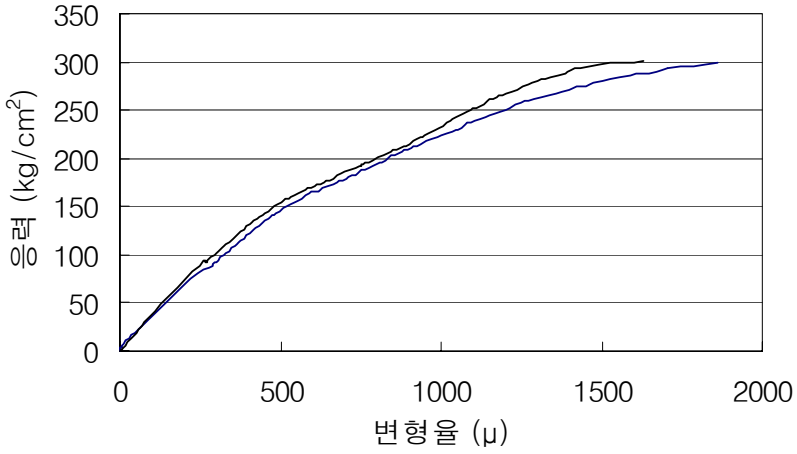


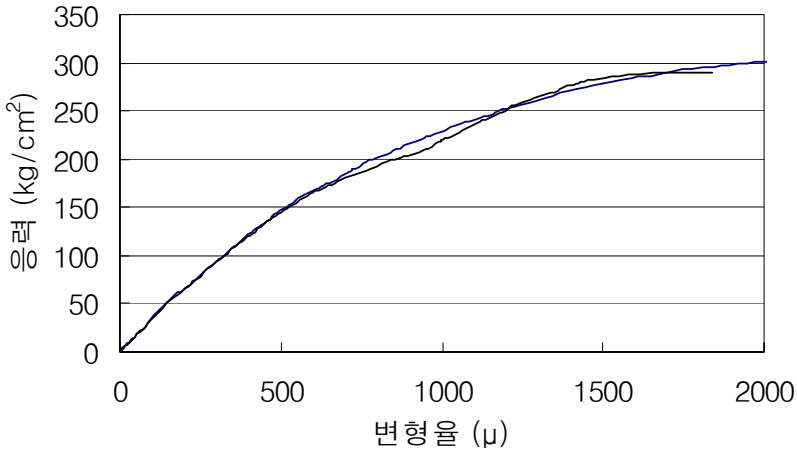
그림 3.2 굴패각의 대체에 따른 탄성계수 변화 (재령 28일)



(a) 굴패각 대체율 : 0%



(b) 굴패각 대체율 : 10%



(c) 굴패각 대체율 : 20%

그림 3.3 굴패각의 대체에 따른 응력-변형율 곡선 변화

2) 굴패각 혼합 콘크리트의 건조수축 특성

굴패각을 잔골재 대체재로 사용한 콘크리트의 건조수축 거동을 파악하기 위하여 각 실험변수에 대해 실시한 결과를 정리하여 나타내면 그림 3.4, 그림 3.5, 그림 3.6 및 그림 3.7과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 그림 3.4, 그림 3.5, 그림 3.6은 각각 대체율 0, 10, 20%인 경우에 대한 결과를 정리한 것이며, 또한 측정한 실험결과는 물론 건조수축을 예측하는데 일반적으로 사용되는 각 CODE (ACI Model, CEB-FIP Model, BP Model)의 예측 결과를 함께 비교하였다.

그림 3.4, 그림 3.5, 그림 3.6에 따르면 각 CODE값은 CEB-FIP, ACI, BP 순으로 점점 큰 값을 예측하였으며 특히 BP의 초기 예측값이 크게 나타났다. 한편 실험결과와 예측값을 비교하여 보면 초기의 경향이 CEB-FIP의 예측값에 가장 근접하는 결과를 보였다.

한편, 굴패각의 대체율에 따른 건조수축 발생량을 비교 검토하기 위하여, 각 실험결과의 편차를 소거하고 각 실험결과를 대표할 수 있도록 회귀분석을 실시하여 구한 곡선을 비교하여 나타내면 그림 3.7과 같다. 그림에 따르면 굴패각의 대체율이 증가할수록 건조수축이 증가함을 나타내었으며 대체율이 증가할수록 건조수축량의 절대값은 물론 증가율도 크게 나타남을 보였다. 이러한 건조수축의 증가는 굴패각의 높은 흡수율 및 차지하는 체적의 낮은 강성 등에 기인한다고 판단된다. 특히 산업폐기물을 활용한 재료에서 이러한 경향이 나타나는 것으로 보고되고 있다.

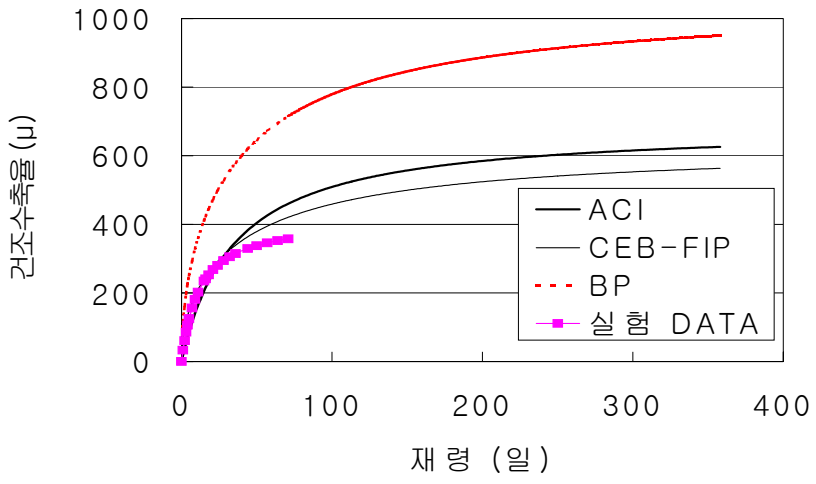


그림 3.4 굴패각 혼합 콘크리트의 건조수축 변형률 변화 (대체율=0%)

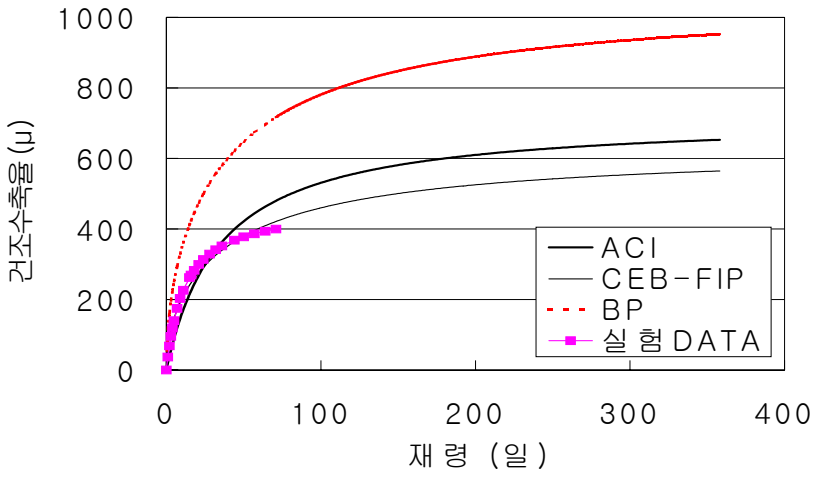


그림 3.5 굴패각 혼합 콘크리트의 건조수축 변형률 변화 (대체율=10%)

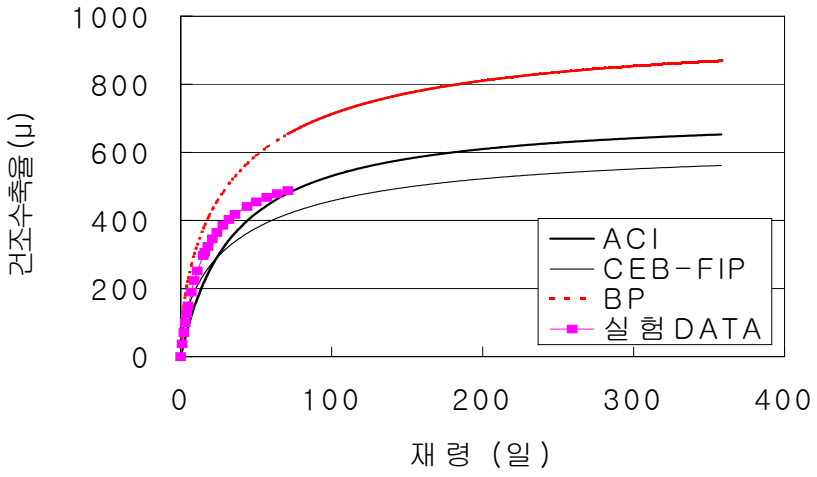


그림 3.6 굴패각 혼합 콘크리트의 건조수축 변형률 변화 (대체율=20%)

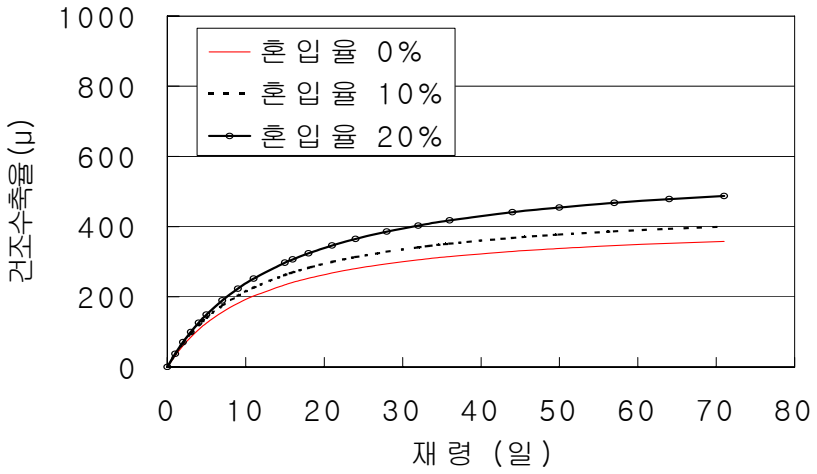


그림 3.7 굴패각 혼합 콘크리트의 건조수축 변형률 비교

앞에서 밝힌 바와 같이 건조수축 발생량에 대한 실험은 장기간에 걸친 측정이 요구되지만, 현재의 측정값은 2개월 남짓한 것으로 굴패각의 대체가 콘크리트의 건조수축에 미치는 영향을 정량적으로 판단하기는 어려운 상태이다. 그러나, 지금까지의 실험결과 및 검토사항을 종합하여 보면 다음과 같다.

먼저, 굴패각의 대체율이 증가할수록 건조수축량은 증가하며 특히 굴패각 혼합 콘크리트 체적변화가 구조물에 악영향을 미칠 수 있는 경우에는 이에 대한 대책수립 및 대체율의 제한이 요구될 수 있다. 둘째, 굴패각 대체로 인한 건조수축의 증가는 대체율에 비례적으로 증가하는 것으로 예상되며 기존의 CODE는 이러한 산업폐기물의 대체에 따라 변화하는 건조수축의 특성을 정확히 파악하지 못하고 있으므로 이에 대한 추가적인 연구개발이 요구된다. 셋째, 굴패각의 대체가 콘크리트 건조수축에 미치는 영향을 정량화 하기 위해 건조수축의 측정이 지속되어야 할 것으로 판단된다.

3) 굴패각 혼합 콘크리트의 크리프 특성

굴패각을 잔골재 대체재로 사용한 콘크리트의 크리프 거동을 파악하기 위하여 각 실험변수에 대해 실시한 결과를 정리하여 나타내면 그림 3.8, 그림 3.9, 그림 3.10 및 그림 3.11과 같다. 그림에 나타낸 바와 같이 그림 3.8, 그림 3.9, 그림 3.10은 각각 대체율 0, 10, 20%인 경우에 대한 결과이며, 또한 측정한 실험결과와의 비교를 위하여 크리프 변형률 예측에 널리 사용되는 각 CODE (ACI Model, CEB-FIP Model, BP Model)의 예측값을 함께 비교하였다.

그림 3.8, 그림 3.9, 그림 3.10에 따르면 각 CODE값은 건조수축의 경우와는 다르게 BP, CEB-FIP, ACI 순으로 점점 큰 값을 예측하였으며 ACI Model의 경우 굴패각의 대체에 따른 예측값의 변화가 크게 나타남을 보였다. 이에 비해 다른 Model의 경우 굴패각의 대체에 따른 영향이 크게 나타나지 않음을 보였다. 한편, 실험결과와 비교하여 살펴보면 실험결과는 초기에는 대체적으로 ACI의 예측값과 잘 일치하였으며 굴패각의 대체에 따른 변화를 ACI Model이 잘 표현하는 것으로 나타났다. 그러나, 굴패각을 대체한 콘크리트의 경우, 재령이 결과할수록 크리프의 발생경향은 CEB.FIP 및 BP Model의 경향에 근접하는 것으로 나타났다. 따라서 굴패각을 대체하지 않은 콘크리트의 크리프 예측은 기존의 모델식에 관계없이 정도 높게 예측할 수 있는 것으로 나타났으며, 굴패각을 대체한 콘크리트의 크리프 특성은 사용 모델에 따라 예측값이 다르고 하나의 모델식으로 그 특성을 만족할 정도로 예측하기는 어려울 것으로 판단된다. 즉, 굴패각 대체 콘크리트의 크리프 특성을 고려한 모델식

의 수정이 필요할 것으로 사료된다.

한편 굴패각의 대체율에 따른 크리프 특성을 비교한 그림 3.11을 살펴보면, 초기의 크리프 발생은 대체율이 증가할수록 크지만 재령이 경과할수록 그 발생비율이 점차 감소하는 것으로 사료된다. 이에 비해 굴패각을 포함하지 않은 콘크리트의 경우는 초기의 크리프 발생은 적으나 장기재령에서의 크리프 발생비율이 굴패각 대체 콘크리트에 비해 크게 나타나는 것으로 사료된다. 따라서, 이에 대한 정확한 검증 및 정량화를 위해서는 보다 장기적인 크리프 특성의 계측이 요망되며 굴패각의 건설재료로써의 활용을 위해서는 본 실험을 포함하여 이와 같은 실험적 연구를 지속적으로 수행할 필요가 있다고 판단된다.

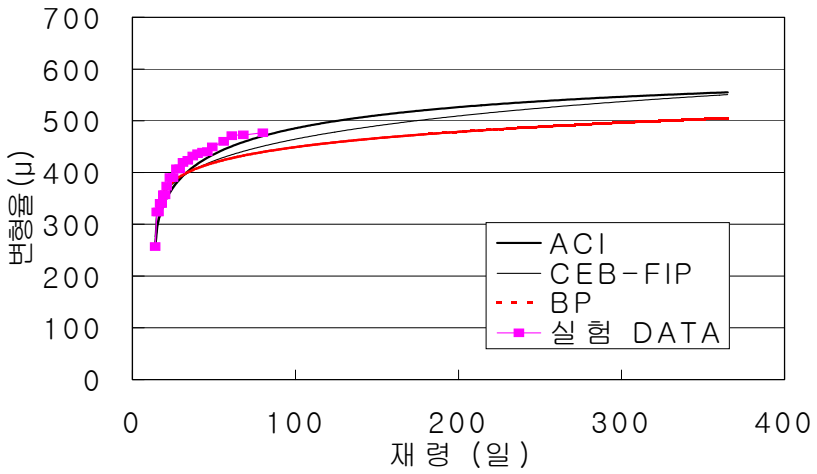


그림 3.8 굴패각 혼합 콘크리트의 크리프 변형률 변화 (대체율=0%)

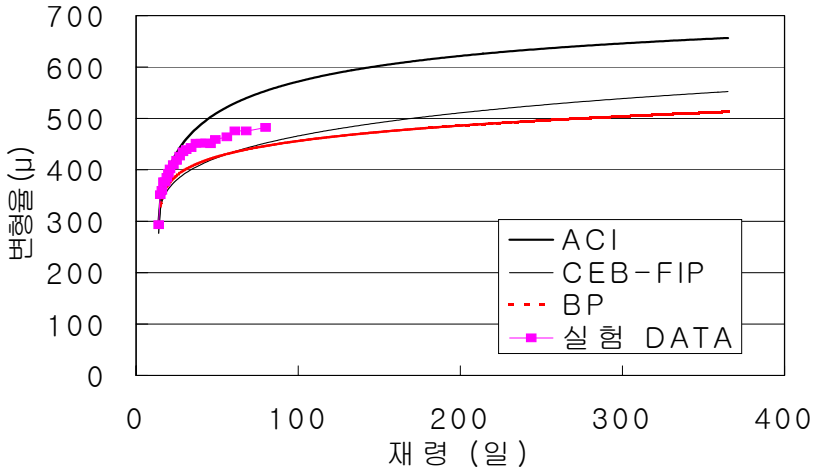


그림 3.9 굴패각 혼합 콘크리트의 크리프 변형률 변화 (대체율=10%)

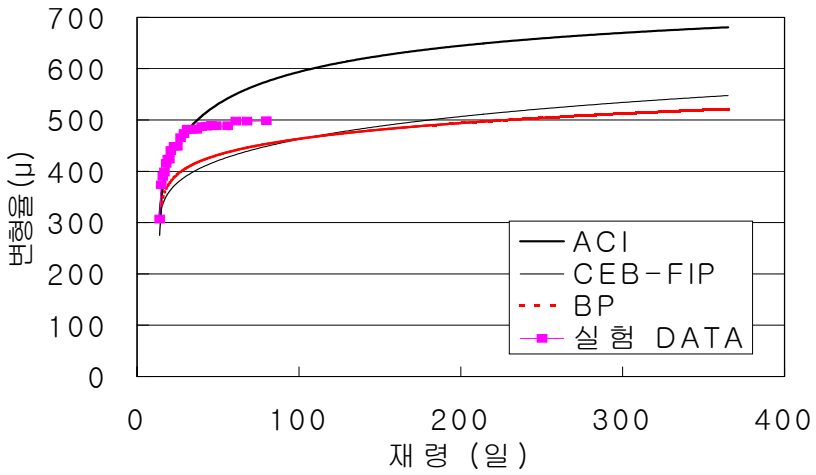


그림 3.10 굴패각 혼합 콘크리트의 크리프 변형률 변화 (대체율=20%)

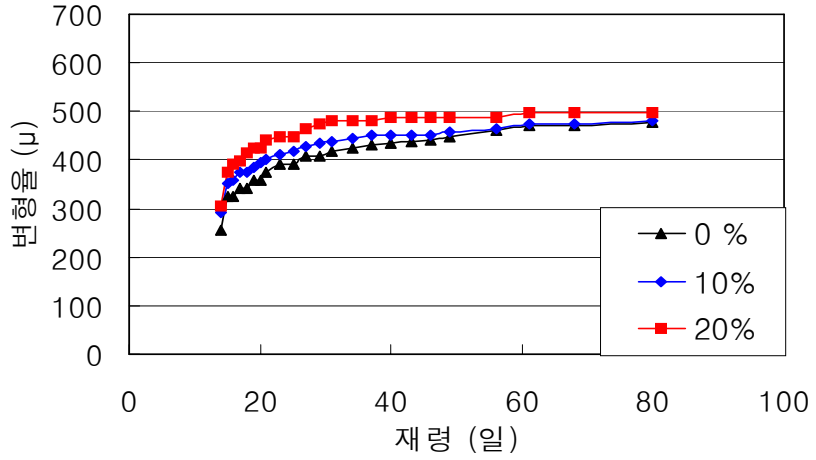


그림 3.11 굴패각 혼합 콘크리트의 크리프 변형률 비교

제4절 굴패각 혼합 콘크리트의 내구성 검토

1. 실험 목적

앞장의 굴패각 혼합 콘크리트의 장기재령 특성에서 밝힌 바와 같이 분쇄한 굴패각을 콘크리트의 잔골재 대체재료로 사용하고자 할 경우, 단기간의 특성 변화 외에 장기재령에서의 콘크리트 특성을 검증하지 않고는 굴패각 혼합 콘크리트를 실제 적용하기 어렵다. 이를 위해서는 시간에 따른 역학적 특성 및 체적변화 등의 특성 외에도 외부 환경과 여건에 의한 물리적 및 화학적 저항성 등을 검토할 필요가 있다.

최근 콘크리트의 이러한 특성을 분석하기 위한 방법의 일환으로 콘크리트의 각종 내구성을 측정하는 장비 및 측정방법이 제안되고 있으며 그 특성에 대한 연구가 매우 활발히 보고되고 있다. 이러한 연구의 흐름은 강도만이 만족되면 된다는 기존의 생각이 변화되고 있으며 실제 대상 구조물의 손상 또는 열화 정도를 분석하고 그 수명까지도 예측하고자 하는 요구를 만족시키기 위한 기본 사항이라고 판단된다.

특히, 이번 연구와 같이 산업폐기물로 분류되는 굴패각을 콘크리트의 잔골재 대체재료로 활용하고자 할 경우, 장기특성 특히 내구성에 대한 평가는 반드시 검토되어야 할 사항이라고 판단된다. 따라서 이 장에서는 굴패각을 혼합한 콘크리트의 내구성을 평가할 수 있는 각종 비교시험을 실시하고 그 결과를 검토함으로써 굴패각의 대체가 콘크리트의 내구성에 미치는 영향을 정량화 하여 굴패각의 활용에 대한 기초자료로써 활용하고자 한다. 이를 위해 다음과 같은 사항에 대하여 검토를 실시하였다.

2. 실험 종류

1) 동결융해에 대한 저항성

콘크리트 구조물은 노출되는 기상작용의 영향을 받으며, 특히 저온 한랭지에 있어서는 콘크리트 중의 수분이 동결함에 의하여 체적이 팽창하고, 미소균열이 발생함으로써 콘크리트 열화는 물론 심할 경우에는 표면에 박리현상(剝離現像)이 일어날 수 있다. 이러한 동결융해의 저항성을 평가하는 방법은 KS F 2456에 규정되어 있으며 규정에 따르면 동결융해 시험은 2가지 시험과정으로 실시할 수 있다. 먼저 시험 방법 A는 수중에서 급속으로 동결융해를 실시하는 시험방법이며, 시험방법 B는 공기 중에서 급속 동결하여 수중에서 융해하는 시험 방법으로 본 시험에서는 수

중 급속 동결융해 시험인 A방법으로 실시하였다.

사용한 동결융해 시험기의 형상 및 내부 전경은 사진 4.1, 사진 4.2와 같다.

사진 4.1 동결융해시험기

사진 4.2 동결융해시험기 내부

(1) 시험기구

- 동결융해장치: 동결융해 장치는 공시체가 소정의 동결융해 사이클을 받는데 적당한 챔버(chamber), 동결 및 가열장치, 소정의 요구 온도하에서 연속적이고 자동적으로 재현성 사이클을 발생시킬 수 있는 조절장치로 구분된다. 방법 A에서는 공시체를 동결융해 사이클 동안 언제나 3㎜ 정도의 물로 완전히 둘러싸여 있어야 한다. 열고환 매체의 온도는 동결과 융해가 바뀌는 순간을 제외하고는 모든 공시체의 표면 어느 곳에서 언제 측정하더라도 3.3℃ 이내로 균등하여야 한다.

- 온도 측정 장치: 온도 측정장치는 온도계, 저항온도계 또는 열전대로 구성되어 있고 공시체 용기 내의 여러점과 조절용 공시체의 중심점 온도를 1.1℃ 이내까지 측정할 수 있어야한다

- 동적 시험장치: 동적 시험장치는 KS F 2437의 규정에 맞는 것이어야 한다.

(2) 시험 방법

① 적당한 온도 측정장치가 묻혀 있는 시험용 공시체의 유사한 콘크리트를 만들고 조절용 공시체의 온도측정에 관한 동결융해 시험의 조건과 일치 시킨다. 공시체의 캐비닛 내의 각점에서 온도변화의 극치를 찾아낼 수 있도록 조절용 공시체의 위치를 여러 번 변경시킨다.

② 정상적인 동결융해 사이클은 공시체의 온도를 2시간 내지 4시간 사이에서 교

대로, 4℃에서 -18℃로 떨어뜨리고 다음에 -18℃로 4℃로 상승시키는 것이다. 시험방법 A에서는 융해시간을 총 시간의 25%보다 적게 사용해서는 안된다. 냉각기간이 끝나는 순간의 공시체의 중심온도는 -18±2℃이어야 하며 가열이 끝나는 순간의 온도는 4±2℃이어야 하고 언제라도 공시체의 온도가 -19℃ 이하 또는 6℃ 이상이 되어서는 안된다.

③ 공시체의 중심온도와 표면의 온도차는 항상 28℃를 초과해서는 안 된다.

④ 동결융해에서 상태가 바뀌는 순간의 시간이 10분을 초과해서는 안된다.

⑤ 이 시험에 소요되는 공시체는 각주 공시체는 각주 공시첼 하고 KS F2403(시험실에서 콘크리트의 압축 및 휨강도 시험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법)에 따라 공시체를 만들고 양생하여야 하다.

⑥ 경화된 콘크리트로부터 원주 또는 각주형으로 절단 채취된 공시체를 사용 할 수도 있다. 이때 습윤상태를 구조물의 습윤상태 이하고 건조시켜서는 안된다.

⑦ 소정의 양생기간이 끝나면 즉시 공시체를 6±3℃의 상태로 옮겨, 가로 1차 주파수시험을 하고, 무게를 알고 KS F 2437에 따라 측정한다. 공시체믐 양생이 끝나는 시간부터 동결융해 사이클이 개시되는 기간까지 함수량이 변하지 않게 보호한다.

⑧ 사이클중 동결상태의 초기에 융해수 내에 공시체를 넣고 동결융해 시험을 시작한다. 동결융해 사이클이 36사이클이 초과하지 않는 범위의 간격으로 융해상태에서 장치로부터 공시체를 꺼낸다. 다음에 바로 6±3℃의 온도조건 하에서 가로 1차 주파수시험을 하고, 무게를 단 후 다시 시험 장치에 넣는다.각 공시체는 특별한 제한 없는 한 300사이클이 될 때까지 또는 초기의 최초 시험시에 측정한 탄성계수의 60%가 될 때까지 시험을 계속해야 한다.

⑨ 30, 60, 90, 120 간격으로 300사이클까지 1차 공명주파수를 측정하여 동탄성계수를 계산한다.

(3) 판단기준

동결융해시험에 의해 측정되는 각종 동탄성계수 변화, 중량감소 및 길이변화 등을 다음의 식에 따라 성능저하를 판단한다.

- 동탄성계수 변화

$$P_c = (n_1^2 / n^2) \times 100 \qquad (4.1)$$

여기서, P_c : 동결융해 C 사이클 후의 상대 동탄성계수 (%)

n : 동결융해 0 사이클에서의 가로 1차 진동주파수

n_1 : 동결융해 C 사이클 후의 가로 1차 진동주파수

- 내구성지수

$$DF = \frac{C \times N}{M} \tag{4.2}$$

- 중량감소율

$$W_{ratio} = \frac{W_0 - W_n}{W_n} \times 100 \tag{4.3}$$

여기서, C : N회 반복에서의 상대 동탄성계수 (%)

N : 동결융해시험을 마친 사이클 수

W_0 , W_n : 동결융해 개시직전과 N사이클 반복 후의 공시체질량 (%)

M : 원칙적으로 300회

한편, 실시하는 동결융해 시험의 조건을 정리하여 나타내면 표 4.1과 같다.

표 4.1 동결융해시험 조건

복합법		최저온도	최고온도	융해에 요하는 시간(1사이클 공정)	1사이클의 소요시간
A법	수중동결 수중융해	18±2℃	5±2℃	25% 이상	3-4 시간
				20% 이상	

2) 중성화에 대한 저항성

철근콘크리트 구조물의 실태조사에 의하면 일반 환경조건에 있는 구조물의 철근 부식은 중성화 깊이와 피복두께의 영향을 크게 받는 것으로 보고되고 있다. 특히 콘크리트의 중성화가 진행되면 염소이온의 투과성을 상승시킨다는 보고도 발표되고 있어 콘크리트의 중성화상태를 검토하는 것은 내구성 검증에 중요한 자료를 제공하게 된다.

이러한 중성화의 판별 방법으로는 공시체의 파단면에 1% 페놀프탈레인-알콜 용

액을 분무하여 변색의 여부를 관찰하는 방법이 가장 일반적이며, 무색이면 중성화한 것으로 적색으로 변화하면 비중성화(알칼리) 부분으로 구분하게 된다. 중성화 시험시의 콘크리트 공시체는 코어 공시체나 연마된 공시체를 그대로 사용하는 것은 좋지 않다. 특히 코어 공시체 등은 표면에 공시체 채취시의 미립분이 붙어 있어 중성화부분의 판별이 어려워진다. 따라서, 콘크리트 공시체 등은 압축강도시험기 등을 이용하여 할열파단 시킨 뒤 파단면에 분무하여 시험하는 것이 정확한 결과를 얻을 수 있다.

시험에는 이산화탄소 농도가 10%로 설정된 중성화시험기를 사용하였으며, 사용한 중성화시험기의 전경 및 중성화 시험시편의 예를 나타내면 사진 4.3, 사진 4.4와 같다.

사진 4.3 중성화 시험기

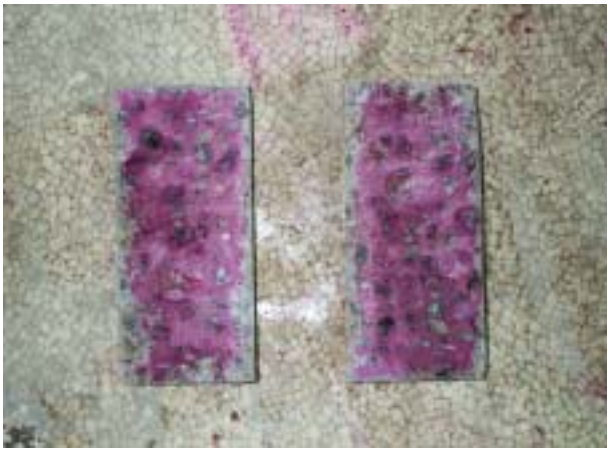


사진 4.4 중성화 시험실시 예

중성화 진행속도는 콘크리트 표면으로부터 상술한 중성화 부분과 비중성화 부분화 부분의 경계면까지의 길이(이하 중성화 깊이)와 경과한시간의 함수로서 나타내며, 중성화 깊이와 경과년수와의 관계는 일반적으로 식 (4.4)와 같이 나타낸다.

$$X = R\sqrt{t} \qquad (4.4)$$

여기서 X : 기준이 되는 콘크리트 중성화 깊이(㎝)

t : 경과년수(년)

R : 중성화 상수

이때, R은 실험에 위해 구할 수 있다.

이 식은 중성화 속도를 나타내는 가장 기본적인 식으로 보고되고 있으며, 일반적으로 물시멘트비 60%를 기준으로 하여 상수가 변동하므로 식 (4.4)를 수정한 다음의 중성화속도 식이 사용되고 있다.

· 물시멘트비가 60% 이상인 경우

$$t=\frac{0.3(1.15+3W)X^2}{R^2(W-0.25)} \quad (4.5)$$

· 물시멘트비가 60% 이하인 경우

$$t=\frac{7.2X^2}{R^2(4.6W-1.76)^2} \quad (4.6)$$

여기서 W: 물시멘트비 (%)

X : 중성화 깊이 (㎝)

t : 기간(년)

R : 중성화율 (=rc×ra×rs)

rc, ra, rs : 시멘트, 골재, 혼화제의 종류에 관한 계수

3) 화학약품에 대한 저항성

화학작용에 대한 콘크리트의 저항성은 다른 내구성능 저하요인들의 작용에 비해 미약하며 실제 구조물의 콘크리트가 일반 환경조건에서 심한 화학작용을 받는 경우는 많지 않다. 일반적인 환경에서의 화학적 침식은 시멘트 성분의 용출 및 유산염, 해수 혹은 지하수 중의 산성수 등에 의한 침식이 있고, 특수한 환경조건의 콘크리트는 각종 산, 염류, 염화물, 알카리류 혹은 특수 유지를 취급하는 공장이나 이러한 공장에서 배출되는 폐수에 접하는 콘크리트 구조물로써 화학적 침식을 받게 된다.

(1) 산류(酸類)의 작용

포틀랜드시멘트 경화체는 다량의 수산화칼슘을 생성하여 강알카리성을 나타내지만 산과 접하면 중화하여 가종의 염류를 생성하게 된다. 이러한 염의 용출이나 결

정화에 의해 콘크리트의 내부가 다공화하거나 염의 결정성장 압력으로 균열이 발생하여 파괴된다. 또한 강산의 종류에 따라서는 시멘트 경화체의 주된 성분인 알루민산수화물이나 규산수화물까지도 분해시키는 경우가 있다. 콘크리트를 침식시키는 산은 무기산(황산, 염산, 질산, 불산 등)과 유기산(초산, 낙산, 개미산, 주석산, 수산 등)으로 분류되며 이러한 산류는 정도의 차이는 있으나 콘크리트를 침식한다.

(2) 염류의 작용

염류는 산류만큼 침식의 정도가 심하지는 않지만 수산화칼슘과 반응하여 가용성 물질을 생성, 용출시켜 침식하는 경우나 가용성 물질이 칼슘알루미네이트와 반응하여 에트링가이트를 생성하고 그 체적팽창에 의한 압력으로 콘크리트를 분괴시키기도 한다.

또한 칼륨, 나트륨, 칼슘계의 질산염은 거의 콘크리트에 무해하지만 암모늄, 알루미늄계의 질산염은 콘크리트 중의 수산화칼슘과 반응하여 가용성의 질산칼슘을 생성하여 콘크리트를 침식시킨다.

(3) 염화물의 작용

염화물은 황산염 등에 비해 그 침식성은 적지만 유해한 것도 있다. 염화마그네슘은 수산화칼슘, 규산칼슘, 알루민산칼슘과 반응하여 그들의 마그네슘염 또는 수산화알루미늄 등의 불용성 콜로이드 상의 물질을 생성하여 콘크리트를 붕괴시킨다. eh한 염화칼슘은 농도가 진할 경우, 시멘트 중의 알루민산칼슘과 반응하여 복염을 만들어 침식한다. 철이나 그 외의 금속염화물은 수산화칼슘과 반응하여 금속의 수산화물과 수용성염화칼슘을 생성하여 침식한다.

이밖의 알카리류의 침식 및 유류의 영향을 포함한 콘크리트 침식에 의한 열화정도를 검토하는 데는 여러 가지 방법이 제안되고 있다.

따라서 본 시험에서는 그 피해정도가 크고 일반적으로 실시되는 황산 및 염산에 대한 침지 시험을 실시하고 침지 시간에 따른 중량변화를 비교함으로써 굴패각의 잔골재 대체가 콘크리트의 화학저항성에 미치는 효과를 검증하고자 한다. 시험에 사용한 산으로는 황산과 염산을 사용하며 황산 5% 용액과 염산 2% 용액의 챔버에 콘크리트 시험체를 침지시키고 시간 경과에 따른 중량변화를 측정한다.

황산 및 염산에 대한 침식저항 실험을 실시한 과정을 사진 4.5 및 사진 4.6에 나타내었다.

사진 4.5 황산용액을 제조하는 장면

사진 4.6 밀봉한 시험체 전경

4) 투수에 대한 저항성

콘크리트의 투수성은 그 내부조직을 물이 통과하는 성질로 재료, 배합, 양생방법 등 품질의 양부와 콘크리트 타설, 다짐 등 시공의 양부에 관계된다. 따라서, 투수시험에 의해 얻어진 자료는 콘크리트의 수밀성과 내구성을 판단하는 기준이 되기도 한다.

투수시험에는 여러 가지 방법이 있으며 크게 분류하면 2가지로 나눌 수 있다. 먼저, 일정한 압력으로 공시체에 가한 물이 단위시간에 단위면적에서 유출하는 양을 측정하여 압력과 유출량의 관계로부터 콘크리트의 투수성을 구하는 아웃풋(OUT PUT) 방법이 있고, 다음으로 일정한 압력에서 일정한 시간동안 공시체에 압입된 물의 침투면적, 침투깊이 등으로부터 콘크리트의 투수성을 평가하는 인풋(IN PUT) 방법이 있다. 아웃풋방법은 일반적으로 시험에 장기간을 요하므로 초기재령의 공시체 시험에 적용하기 어려우며 공시체를 얇게 하거나 수압을 매우 크게 할 필요가 있다. 이에 비해 인풋방법은 이러한 제한은 없으나 투수에 대한 해석에 어려움이 있다. 즉, 인풋방식에 의한 방법은 초기 건조상태에서의 투수와 흡수가 진행됨에 따른 거동에 차이가 있으므로 각 방식에 대한 사항을 검토한 후 선택하여 실시할 필요가 있다.

본 연구에서는 굴패각의 잔골재 대체에 따른 콘크리트의 투수성능에 대한 영향을 검토하는 것이 목적이므로 장시간을 요하는 아웃풋방법의 적용보다 인풋방법의 결과 분석을 통한 비교 실험이 적절할 것으로 판단하였다.

(1) 시험체 제작 및 양생방법

시험체의 거푸집은 안지름 150mm, 안높이 40mm의 금속제 또는 플라스틱제로 하고, 내면은 평활하게 다듬질한다. 성형은 KS L 5105에 따라 실시하며 사용 모르타르는 흐름시험에서 100~115mm를 만족하는 것이어야 한다.

양생은 시험체 성형후 48시간 경과하여 탈형하고 그 후 19일간 온도 20±3℃, 습도 80% 이상의 습기함 속에 넣어둔다. 양생이 끝난 시험체는 그 양면의 중앙부 50mm 이상에 가볍게 솔질하여 겉껍질 부분을 제거하고, 약 80℃에서 일정한 무게가 될 때까지 건조시킨다.

(2) 시험 및 평가방법

투수시험은 우선 건조한 시험체의 무게 (W)를 측정한 후 시험체 측면을 파라핀 또는 에폭시 수지 등으로 방수 처리한다. 방수처리재가 완전히 경화한 후에 시험체의 무게 (W_1)를 측정한 후 투수시험장치(사진 4.9)를 사용하여 시험체의 위 아래 양면의 중앙에 지름 50mm의 원형 투수 구멍이 있는 두께 약 10mm 이상의 고무 개스킷을 대고 균일하게 단단히 조인 후, 성형할 때의 윗면으로부터 1 N/cm^2 (0.1 kgf/cm^2)의 수압을 1시간 가한다. 그리고 수압을 가한 시험체를 투수시험장치에서 꺼내어 표면의 물기를 제거한 후 무게 (W_2)를 측정한다. 투수 시험평가는 각 경우의 결과를 평균값으로 나타낸다. 투수량 및 투수비의 평가는 다음식으로 나타낸다.

$$\text{투수량(g)} = W_2 - W_1 \tag{4.7}$$

$$\text{투수비(\%)} = \frac{\text{비교 시험체의 투수량}(g)}{\text{기준 시험체의투수량}(g)} \times 100 \tag{4.8}$$

여기서

W_1 : 시험체 측면에 방수처리재 도포 후 24시간 기건양생한 후의 무게 (g)

W_2 : 1시간 1 N/cm^2 (0.1 kgf/cm^2) 수압을 가한 직후의 무게 (g)

결과에는 비교를 위하여 탈형 직후의 무게 (W)를 부기한다.

사진 4.7 흐름시험 과정

사진 4.8 시편제작 과정

사진 4.9 투수시험 장치

3. 실험 계획

1) 실험변수 상세

굴패각을 혼합한 콘크리트의 내구성을 비교 검토하기 위해 실시하는 각종 시험의 실험변수 및 시험에 사용한 시험체의 형상, 시험체 수 및 측정항목을 정리하면 다음의 표 4.2와 같다.

표 4.2 실험변수 상세

실험종류	항목	구분	내용
동결융해	실험변수	굴패각 대체율	0, 10, 20 %
		동결융해 횟수	300회까지 30회 주기
	시험체	형상	10×10×40cm
		시험체 수	대체율별 2개 (합 6개)
	측정항목	동탄성계수	1차공명진동수
		중량	재령별 중량변화
		체적	재령별 길이변화
중성화	실험변수	굴패각 대체율	0, 10, 20 %
		중성화 재령	1, 3, 5주
	시험체	형상	ϕ10×20cm cylinder
		시험체 수	대체율(3)×재령(3) ×동일조건(2)=18개
	측정항목	중성화깊이	페놀프탈레인 용액 변색 깊이
화학침식	실험변수	굴패각 대체율	0, 10, 20 %
		재령	황산 (1,2,3,4,5주) 염산 (1,2,3주)
	사용 산류	황산	5% 용액
		염산	2% 용액
	시험체	형상	ϕ10×20cm cylinder
		시험체 수	대체율(3)×산류(2) ×동일조건(6)=36개
	측정항목	중량	재령별 중량변화
투수성	실험변수	굴패각 대체율	0, 10, 20 %
	시험체	형상	ϕ150×4cm cylinder
		시험체 수	대체율별 2개 (합 6개)
	측정항목	투수비	경우별 투수량

표 4.2에 나타낸 바와 같이 4종류의 실험에 대하여 전체적으로 굴패각 대체율을 0, 10, 20%로 변화시켰으며, 실험의 목적 및 측정항목에 따라 시험체의 형상, 측정재령 및 시험체 수를 변화시켰다.

2) 실험 배합비

굴패각의 잔골재 대체율에 따른 내구성 변화를 비교 검토하기 위해 실시한 실험에 사용한 각종 시험체는 앞장에서 사용한 동일재료 및 동일상태의 제조과정에 따라 제작하였으며 콘크리트 제조에 사용한 잔골재 대체율별 배합은 선정된 최적배합비를 참조하였으며 표 4.3과 같다.

내구성 시험용 콘크리트 배합비는 표 4.3에 나타낸 바와 같이 단위수량과 시멘트량 및 굵은골재량이 동일하며 잔골재에 대한 대체율과 이에 따른 시공성 보정을 위한 혼화제량이 다른 배합임을 알 수 있다. 또한 사용한 굴패각은 조립율 2.8의 A 굴패각을 기준으로 하였다.

표 4.3 내구성 시험용 콘크리트 배합비

대체율 (%)	w/c (%)	S/a (%)	단위량 (kg/m^3)					AE제 (%)	WRA (%)	SP (%)
			W	C	S	G	O.S			
0	45	43	175	389	723	1021	-	0.02	0.25	-
10	45	43	175	389	651	1021	70	0.03	1.00	-
20	45	43	175	389	578	1021	140	0.02	-	1.6

4. 실험 결과 및 고찰

1) 동결융해 저항성

굴패각 대체율의 변화에 따른 동결융해 비교 실험을 실시하여 구한 각 대체율별 동결융해 사이클수에 따른 동탄성계수, 중량변화 및 길이변화량을 정리하여 나타내면 표 4.4와 같다.

표 4.4에서 알 수 있는 바와 같이 실험은 현재 진행 중이며 지금까지 측정된 실험결과를 기준으로 동탄성계수변화, 중량변화 및 길이변화에 대해 각각 그림으로 나타내면 그림 4.1, 그림 4.2 및 그림 4.3과 같다.

표 4.4 동결융해 실험결과 일람

동결융해횟수 (cycle)	대체율 (%)	동탄성계수 ($\times 10^6$) (kgf/cm^2)	중량 (g)	길이 (cm)
0	0	5.34	9495.1	40.02
	10	4.76	9294.1	40.04
	20	5.11	9416.5	40.03
30	0	5.05	9472.7	40.01
	10	4.48	9280.1	40.04
	20	4.82	9398.8	40.02
60	0	4.79	9453.1	39.95
	10	4.47	9261.8	40.03
	20	4.63	9378.5	40.01
90	0	4.92	9439.7	39.95
	10	4.59	9250.5	40.04
	20	4.81	9372.5	40.02
120	0	4.84	9417.8	40.00
	10	4.54	9249.8	40.04
	20	4.79	9371.0	40.01

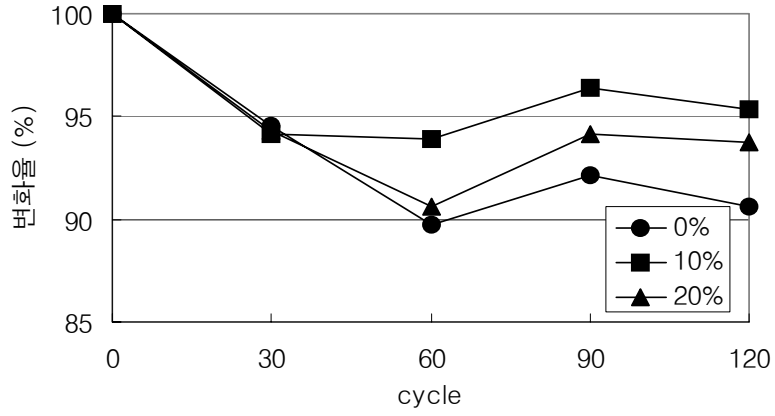


그림 4.1 동결융해 사이클에 따른 동탄성계수 변화 특성

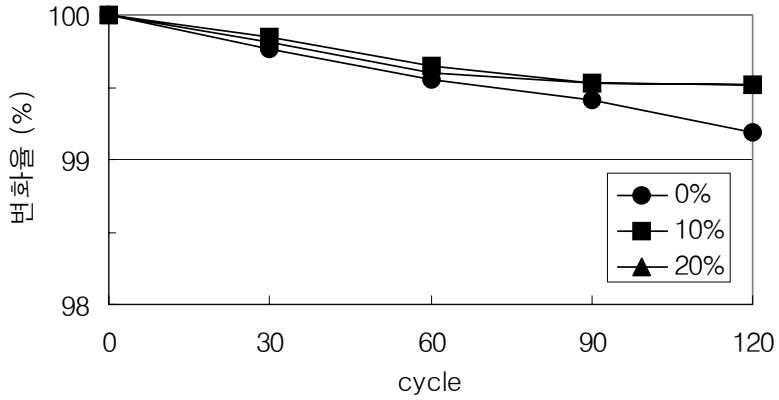


그림 4.2 동결융해 사이클에 따른 중량 변화 특성

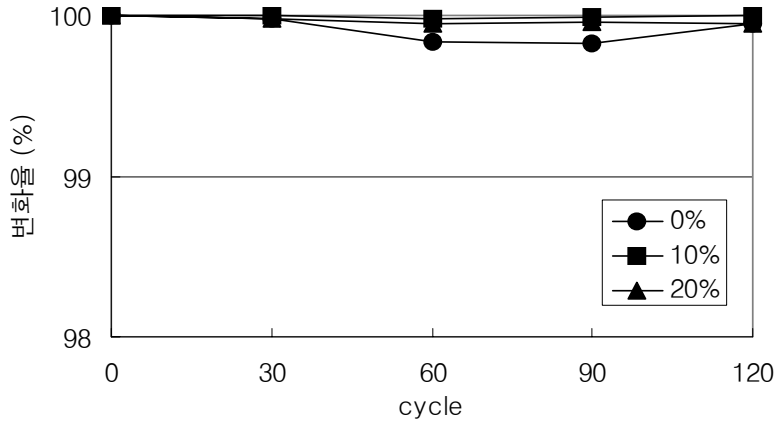


그림 4.3 동결융해 사이클에 따른 길이 변화 특성

그림 4.1, 그림 4.2 및 그림 4.3에 따르면 동결융해 횟수 120사이클의 범위에서는 동결융해 횟수가 증가할수록 굴패각 대체율에 관계없이 동탄성계수 및 중량이 저하하는 것을 알 수 있다. 이에 비해 길이변화는 동결융해에 의해 크게 영향받지 않는 것으로 나타났다. 한편 굴패각의 대체율에 따른 영향은 모든 결과에서 거의 나타나고 있지 않았으며 굴패각의 대체가 콘크리트의 동결융해 저항성과는 무관한 것으로 판단된다.

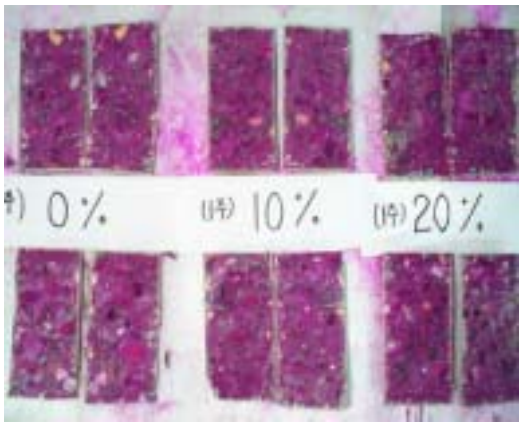
2) 중성화 저항성

굴패각 대체율이 콘크리트의 중성화 특성에 미치는 영향을 검토하기 위해 이산화탄소 10%의 환경에서 중성화촉진 실험을 실시하고 해당 재령에서 할열인장파괴 시킨 후에 공시체의 파단면에 1% 페놀프탈레인-알콜 용액을 분무하여 변색된 부분의 깊이를 측정하였다. 현재 실험결과는 3주까지의 결과가 수집되었으며 그 결과를 정리하여 나타내면 다음과 같다.

실험결과에 따르면 중성화 재령이 증가할수록 중성화 깊이는 커지는 것을 나타냈으며, 굴패각의 대체율에 관계없이 동등 정도의 중성화 속도를 보였다. 즉, 중성화 속도에는 굴패각의 대체율이 영향을 미치지 않는 것을 보이는 결과로 판단된다.

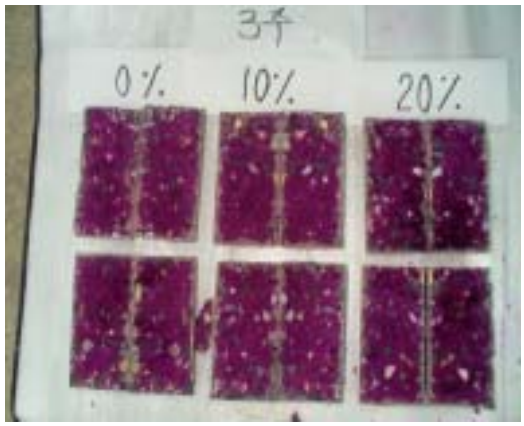
표 4.5 굴패각 대체율별 중성화 깊이

재령 (주) / 대체율 (%)	1	3
0	0.5 cm	0.75 cm
	0.4 cm	0.6 cm
10	0.5 cm	0.8 cm
	0.4 cm	0.6 cm
20	0.3 cm	0.5 cm
	0.2 cm	0.5 cm



(a) 재령 1주

사진 4.10 (a) 중성화 깊이 측정 결과



(b) 재령 3주

사진 4.10 (b) 중성화 깊이 측정 결과

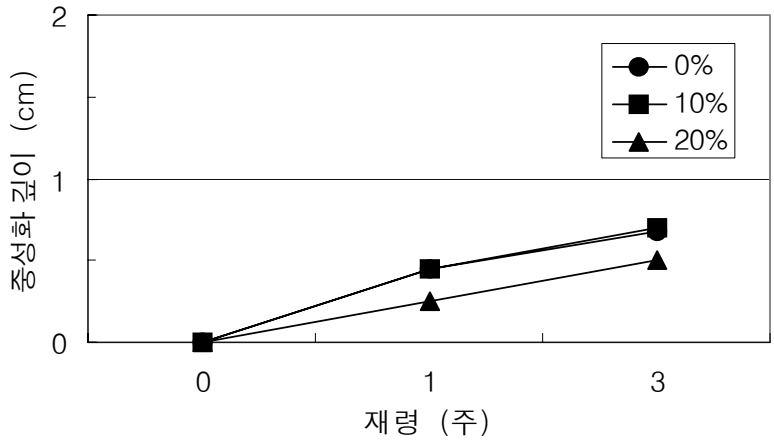


그림 4.4 굴패각 대체율에 따른 중성화 깊이 변화

3) 화학침식 저항성

굴패각 대체에 따른 콘크리트의 화학침식 저항성의 변화를 검토하기 위하여 황산 5% 용액 및 염산 2% 용액에 콘크리트 시험체를 침지시키고 재령 경과에 따른 중량변화를 측정하였다. 한편 각 해당 재령에서 꺼낸 공시체의 표면상태를 살펴보기 위하여 각각의 경우에 대하여 사진을 촬영하였으며 그 결과를 보이면 각각 사진 4.11, 사진 4.12와 같다.

(a) 재령 1주

(b) 재령 2주

(c) 재령 3주

(d) 재령 4주

사진 4.11 황산용액 침식에 의한 공시체 상태 변화

(a) 재령 1주

(b) 재령 2주

사진 4.12 염산용액 침식에 의한 공시체 상태 변화

사진 4.11과 사진4.12에 나타난 공시체 표면의 상태를 살펴보면 황산용액 및 염산용액의 경우 모두 침지 재령이 증가할수록 콘크리트의 침식이 점점 증가함을 나타내었다. 그러나 공시체 표면의 상태를 비교하여 보면 굴패각의 대체율에 따른 차이는 크지 않은 것으로 판단된다.

한편, 측정 재령에서 각각의 공시체에 대하여 실시한 중량변화 결과를 황산용액 및 염산용액별로 나타내면 표 4.6 및 표 4.7과 같다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 화학침식에 대한 결과는 실험이 진행된 재령까지의 결과만을 나타내었다. 또한 표 4.6과 표 4.7의 결과를 사용하여 재령에 따른 중량변화를 그림 4.5 및 그림 4.6에 나타내었다. 그림 4.5, 그림 4.6은 각각 황산 및 염산용액의 침식에 의한 중량변화를 굴패각 대체율별로 비교한 것으로써 초기중량을 기준으로 하는 백분율로 비교하였다.

표 4.6 황산용액에 의한 중량변화

(단위 : g)

재령 (주) / 대체율 (%)	0	1	2	3	4	5
0	3732.0	3643.1	3553.1	3488.5	3392.1	
	3755.1	3662.0	3573.9	3499.6	3400.3	
	3772.1	3684.1	3598.2	3510.8	3399.9	
	3769.4	3693.2	3592.6	3506.3	3391.9	
	3735.1	3649.6	3553.0	3459.0	3342.9	
	3744.7	3654.9	3569.4	3492.4	3379.8	
10	3608.0	3527.9	3448.9	3389.5	3294.6	
	3632.2	3533.4	3457.8	3381.2	3287.7	
	3637.0	3541.1	3473.9	3388.0	3290.8	
	3627.5	3530.1	3470.3	3378.4	3278.8	
	3636.4	3537.2	3466.2	3384.3	3286.4	
	3629.2	3532.3	3468.7	3399.0	3293.5	
20	3654.8	3566.9	3498.4	3432.0	3334.6	
	3682.0	3582.5	3514.6	3440.2	3337.6	
	3671.8	3563.6	3495.6	3418.0	3326.4	
	3660.7	3556.8	3490.2	3411.7	3315.1	
	3636.3	3531.1	3468.4	3384.3	3279.7	
	3642.1	3536.4	3474.7	3409.0	3316.1	

표 4.7 염산용액에 의한 중량변화

(단위 : g)

재령 (주) / 대체율 (%)	0	1	2	3
0	3710.1	3620.2	3446.6	
	3707.8	3617.0	3439.0	
	3687.2	3613.0	3463.6	
	3741.8	3667.5	3509.3	
	3710.1	3633.0	3463.5	
	3691.6	3604.9	3406.8	
10	3570.1	3485.6	3295.9	
	3603.2	3518.5	3341.0	
	3651.1	3574.0	3396.0	
	3626.2	3544.4	3373.9	
	3591.5	3506.3	3323.1	
	3626.8	3548.7	3348.8	
20	3630.3	3529.2	3293.2	
	3649.1	3559.7	3343.3	
	3584.4	3502.7	3316.8	
	3594.5	3518.8	3335.0	
	3598.3	3518.1	3318.8	
	3602.0	3516.9	3282.0	

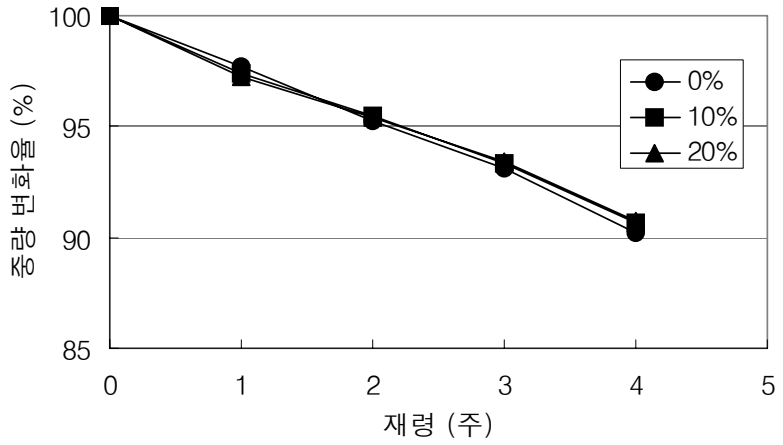


그림 4.5 황산용액에 의한 중량 백분율 변화

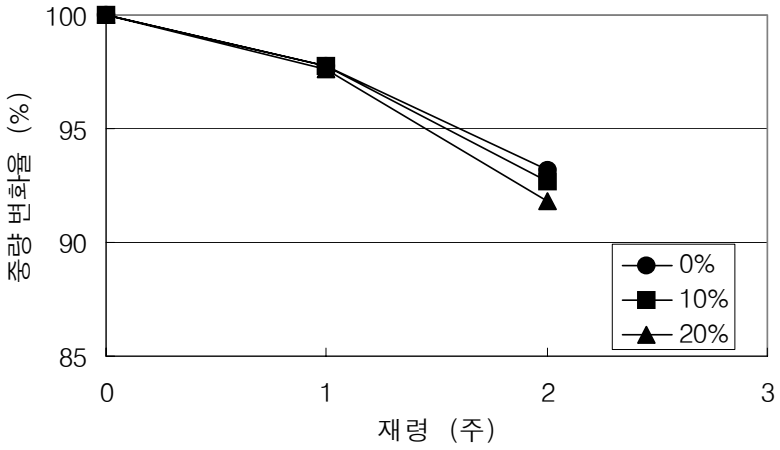


그림 4.6 염산용액에 의한 중량 백분율 변화

그림 4.5와 그림 4.6에서 알 수 있는 바와 같이 황산용액 및 염산용액은 콘크리트의 중량을 저하시키는 침식작용을 일으키며 염산의 경우가 더욱 현저함을 보인다. 그림에 따르면 콘크리트 중량이 약 10% 감소하는데 5% 황산용액의 경우는 4주, 2% 염산용액의 경우는 2주정도 소요되는 것으로 나타났다.

그러나 앞 절의 결과와 마찬가지로 굴패각의 대체율에 따른 변화는 거의 보이지 않았으며 콘크리트의 화학적 침식 저항성은 굴패각의 영향을 받지 않음을 확인하였다.

4) 투수 저항성

콘크리트의 내구성은 콘크리트 내부의 공극구조와 치밀성에 의해 크게 영향을 받으므로 본 연구에서는 이러한 특성을 비교하기 위해 굴패각 대체율에 따른 투수 저항성을 비교하였다. 특히 투수 저항성의 경우 공극의 크기 및 공극분포 등에 의해 변화하므로 콘크리트의 부식 저항성과도 크게 관련이 되는 것으로 판단된다. 따라서 앞에서 설명한 바와 같이 각 변수에 대한 실험을 실시하여 얻은 결과를 정리하면 표 4.8과 같다.

표 4.8 굴패각 대체율별 투수특성

대체율 (%)	초기중량 (g)	건조무게 (g)	투수무게 (g)	투수량 (g)	평균투수량 (g)	투수비
0	1530.98	1483.50	1486.11	2.61	2.845	-
	1510.27	1463.40	1466.48	3.08		
10	1478.78	1426.00	1426.52	0.52	0.64	0.22
	1474.24	1423.20	1423.96	0.76		
20	1353.61	1304.90	1305.34	0.44	0.525	0.185
	1350.59	1301.80	1302.41	0.61		

표 4.8의 결과에 따르면 굴패각의 잔골재 대체로 인하여 투수저항성이 크게 향상하는 결과를 보이고 있다. 즉, 대체율에 따른 투수비를 살펴보면 굴패각을 대체한 콘크리트가 기준 콘크리트의 약 20% 정도를 보이고 있어 굴패각에 의한 투수저항성의 매우 큰 향상을 보인다. 한편 표 4.8에서 보인 대체율 0%의 결과는 일반 콘크리트의 경우와 비교하여 크게 차이가 나지 않는 값으로써 당 실험결과의 타당성을 간접적으로 확보하고 있다고 판단된다. 따라서 측정된 결과에 따르면 굴패각의 대체가 콘크리트의 투수성에 나쁜 영향을 미치지는 않을 것으로 예상된다. 그러나 본 실험의 경우 실험변수가 적고 실험결과의 타당성을 확정하기에 너무 적은 시험체의 결과만을 보이므로 결과의 검증 및 정량화를 위해서는 추가적인 검토가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

제 5 절 결 론

이 연구에서는 굴패각을 잔골재 대체재료로의 활용을 위해 요구되는 다음과 같은 사항에 대하여 검토하였다. 먼저, 굴패각을 혼합한 콘크리트가 배합변수에 따라 나타나는 시공적, 역학적 특성 비교, 둘째, 굴패각의 대체가 콘크리트의 장기재령 거동에 미치는 영향 그리고 셋째, 각종 내구성에 미치는 영향을 정량적으로 검토하였다. 이번 연구의 범위에서 도출된 결과를 정리하여 서술하면 다음과 같다.

■ 배합변수에 따른 특성 변화

- 콘크리트 제조 조건을 만족하는 배합에서의 혼화제량은 분쇄한 굴패각의 조립율이 작을수록, 굴패각 대체율이 증가할수록 증가한다. 특히 AE제보다 감수제 및 고성능감수제의 첨가량이 크게 증가한다. 따라서 이에 대한 경제성 평가가 이루어져야 한다.
- 굴패각은 다량의 미분이 포함되어 있고 또한 판상구조가 대부분이어서 콘크리트의 배합에 점성이 증가된다.
- 굴패각 혼합 콘크리트의 작업성은 잔골재율, 단위수량에 의해 크게 영향을 받는 것에 비해 압축강도는 상대적으로 적은 영향을 받는다.
- 혼합하는 굴패각의 조립율이 증가할수록 시공성은 저하하지만 강도에는 유리하게 작용하였다.

■ 장기재령 거동 특성변화

- 굴패각 대체율 10%까지는 28일 이후의 압축강도 증진이 확인되었으나 대체율 20%에서는 강도증진이 거의 없었다. 즉, 일정한도 이상의 굴패각 대체는 장기재령 강도에 나쁜 영향을 미칠 수 있는 가능성이 있다.
- 굴패각 대체에 따른 탄성계수 저하는 대체율에 거의 비례적으로 저하하였으며 굴패각 대체율 20%에서 약 10~15% 저하하였다.
- 굴패각 대체율이 증가할수록 건조수축 발생량은 증가하였으며 기존의 건조수축 모델식은 굴패각 증가에 따른 영향을 잘 반영하지 못하였고 이에 대한 예측식의 보정이 필요하다.
- 굴패각 대체율이 증가할수록 크리프 변형률도 증가하였으나, 대체율이 클수록 장기재령에서의 크리프 발생률이 점점 작아져 크리프 변형률 차이가 점차 감

소하였다. 한편 기존 모델식은 굴패각을 혼합하지 않은 배합의 크리프를 정도 높게 예측하였지만 굴패각의 대체에 따른 효과는 반영하지 못하였다.

■ 내구성 변화

- 동결융해 횟수가 증가할수록 콘크리트의 동탄성계수 및 중량은 저하하였으나, 굴패각의 대체율에 따른 변화는 확인되지 않았다.
- 중성화 깊이는 중성화 시험기간이 증가할수록 증가하였으며, 중성화 속도에는 굴패각의 대체율이 영향을 미치지 않았다.
- 황산용액 및 염산용액에 침지된 콘크리트 시험체의 중량은 재령에 거의 비례적으로 감소하였으나 굴패각 대체율에 따른 차이는 보이지 않았다.
- 굴패각의 대체로 인하여 콘크리트 시험체의 투수 저항성은 매우 크게 개선되는 결과를 보였으며 이에 대해서는 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1) 한국공업표준협회, “한국공업규격(KS)″

2) 대한토목학회(1996), “콘크리트 표준시방서”

3) 한국콘크리트학회(1997), “콘크리트 혼화재료”, pp.257

4) 한국콘크리트학회(2000), “콘크리트 구조설계기준・해설”, pp.413

5) 해양수산부(2000), “굴패각을 혼합한 특수콘크리트 개발”, pp.192

6) 해양수산부(1999), “항만 콘크리트구조물의 내구성 증진 실용화 기초연구”, pp.122,

7) 정재동(1996), “콘크리트 재료공학”, pp.539

8) 박승범(1996), “토목재료실험”, pp.435

7) ACI Committee 201(1992), ″Guide to Durable Concrete″, ACI Manual of Concrete Practice, part1, ACI 201, pp.39

9) A.M. Neville(1997), ″Properties of Concrete″, pp.844

10) S. Mindess and J.F. Young(1981), ″Concrete″, pp.671

11) CEB(1992), ″Durable Concrete Structures″, Thomas Telford, pp.112

12) Z.P. Bazant and F.H. Wittmann(1982), ″creep and Shrinkage in Concrete Structures″, John Wiley & Son, pp.363

13) A.M. Neville, W.H. Dilger and J.J. Brooks(1983), ″Creep of Plain and Structural Concrete″, Construction Press, pp.361

14) J.P. Broomfield(1997), ″Corrosion of Steel in Concrete″, E & FN Spon, pp.240

15) 日本建築學會(1991), “高耐久性鐵筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解說”

16) 日本土木學會(1995), “コンクリート構造物の耐久設計指針(案)”

제 3 장 굴패각 고화재의 개발

본 과제에서는 굴 껍질을 무기질 소재의 CaO원으로 활용하고자 하는 기초연구로서 굴 껍질의 기본적인 성상(원료 단계의 광물상 및 미세구조)과 열적 성질(열분해 특성과 열처리물의 특성) 및 수화 분위기를 이용한 활용성(Silica 성분과의 수화 반응 특성과 경화체의 특성)을 알아보고자 하였다.

적절히 열처리하여 부분적으로 탈탄산된 굴 껍질과 적정비율의 SiO_2 원료를 혼합하여 저온에서 수화반응 시킴으로서 미분해된 $CaCO_3$와 미반응 SiO_2를 골재로 하고 Tobermorite나 Xonotlite를 결합상으로 하는 여러 가지 용도의 수화 경화체를 합성을 고찰하였으며, 특히 본 연구는 굴패각을 이용한, 석회 등의 원재료를 이용한 고화재로서 고화시키기 어려운 고함수비토양, 고유기질 토양 및 산업폐기물등을 토질이나 현장의 개량 목적 조건에 대응시키기 위하여 개발된 것이다. 또한 산업폐기물인 플라이애쉬, 고로슬래그를 원재료로 하여 유효하게 이용함으로서 사회 환경에 크게 공헌하는 것이다.

지반개량형 고화재를 제조하는 방법에 관한 것으로, 굴패각을 세척하여 염분을 제거하는 단계, 굴패각을 연소시켜 이산화탄소를 제거함으로써 생석회(산화칼슘)를 생성하거나 그 생석회를 물과 반응시켜 소석회(수산화칼슘)를 생성하는 전처리단계, 전 처리된 석회나 수산화칼슘을 분쇄하는 단계, 분쇄된 석회나 수산화칼슘을 소정의 입도로 분말화하는 분급단계, 석회(CaO) 분말이나 수산화칼슘$(CaOH)_2$ 분말을 플라이애쉬(Al_2O_3 SiO_2)와 석고($CaSO_4$), 고로슬래그 등과 반응시키는 고화 단계로 되어, 굴패각을 재활용하여 환경오염을 줄일 수 있고, 지반개량공사 등의 건축재로 사용 가능하여 천연시멘트를 일부 대체함으로써 자원을 절약할 수 있을 뿐만 아니라, 하폐수의 슬러지를 고형화 시킬 수 있어 환경 오염을 줄일 수 있을 것으로 본다.

제 1 절 화학성분 분석시험 (XRF, XRD)

XRF는 유기물과 무기물에 대한 원소의 정성 및 정량분석을 하는데 사용된 분석장비는 PHILIPS PW2400이다. 분석방법은 시료에 1차 X선을 조사하여 발생하는 형광 X선을 보통 분광결정에 의하여 분광하여, 그 강도를 검출기로 측정함으로써 정성 또는 정량분석을 하는 방법이다 (그림 3.1참조). 형광 X선 스펙트럼은 원소에 고유한 선스펙트럼이 있어, 파장과 원자번호간의 관계를 나타낸 모스리(Moseley)의 법칙이 이 분석의 기초가 된다. 이 관계를 이용하여 정성분석을 할 수 있고, 또 스펙트럼의 강도는 그 원소의 함유량에 원칙적으로 비례하므로 이를 이용해 정량분석을 할 수가 있다. 본 시험은 고화재의 성분을 분석하여 그 성상을 파악하는데 그 목적이 있으며, 분석항목은 표 3.1에 표시하였다.

표 3.1 XRF를 이용한 고화재의 화학성분 분석항목

시험 항목	강열감량	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3
비 고	단위 (%)								

(A) XRF 시험기

(B) XRD 시험기

그림 3.1. 화학성분 분석용 XRF, XRD 장비

제 2 절 토성시험 및 대상토 분석

시험에 사용되는 시료는 경남 김해 한림 화포천 산업폐기물 매립장 안정화사업지역에서 채취한 점성토(CL)를 선정하였다. 경남 김해에서 채취한 이 대상토를 비중, 자연 함수비, 액성한계, 소성지수, 입자날지름분석을 KS F 2301, KS F 2306, KS F 2324기준에 의거하여 본 채취시료의 토성시험을 실시하였다. 그림 3.2는 채취시료에 대한 토성시험 과정중 다짐하는 장면이다.

그림 3.2 채취시료에 대한 토성시험 과정 중 다짐시험

제 3 절 배합 설계 시험

1. 굴패각 생석회

표 3.2 굴패각 생석회와 대상토의 배합표

시 료 명	대상토 함수비 (%)	Batch No.	습윤 단위 중량 (g/㎤)	조 합 비 (%)						생석회:물
				광 양 준설토	화포천 점성토	황토	법 수 사질토	표준사	생석회	
준설토 + 생석회	43.93	S-69	1.693	90	-	-	-	-	10	1 : 1
		S-70		80	-	-	-	-	20	1 : 1
		S-71		70	-	-	-	-	30	1 : 1
화포천 + 생석회	37.09	S-72	1.515	-	90	-	-	-	10	1 : 1
		S-73		-	80	-	-	-	20	1 : 1
		S-74		-	70	-	-	-	30	1 : 1
황 토 + 생석회	44.28	S-75	1.774	-	-	90	-	-	10	1 : 1
		S-76		-	-	80	-	-	20	1 : 1
		S-77		-	-	70	-	-	30	1 : 1
함안법수 사 질 토 + 생 석 회	11.55	S-78	1.842	-	-	-	90	-	10	1 : 1
		S-79		-	-	-	80	-	20	1 : 1
		S-80		-	-	-	70	-	30	1 : 1
표준사 + 생석회	12.90	S-81	1.921	-	-	-	-	90	10	1 : 1
		S-82		-	-	-	-	80	20	1 : 1
		S-83		-	-	-	-	70	30	1 : 1

2. 시멘트계 고화재

표 3.3 시멘트계 고화재와 대상토의 배합표

시 료 명	대상토 함수비 (%)	Batch No.	습 윤 단위중량 (g/㎤)	조 합 비 (%)			고화재:물
				화포천 대상토	굴패각 고화재	水	
김해 화포천 + 시멘트계고화재	50.26	K-901	1.515	95	5	4	1 : 0.8
		K-902		95	5	5	1 : 1.0
		K-903		95	5	6	1 : 1.2
		K-904		90	10	8	1 : 0.8
		K-905		90	10	10	1 : 1.0
		K-906		90	10	12	1 : 1.2
		K-907		85	15	12	1 : 0.8
		K-908		85	15	15	1 : 1.0
		K-909		85	15	18	1 : 1.2
		K-910		80	20	16	1 : 0.8
		K-911		80	20	20	1 : 1.0
		K-912		80	20	24	1 : 1.2
		K-913		75	25	20	1 : 0.8
		K-914		75	25	25	1 : 1.0
		K-915		75	25	30	1 : 1.2

3. 굴패각 고화재

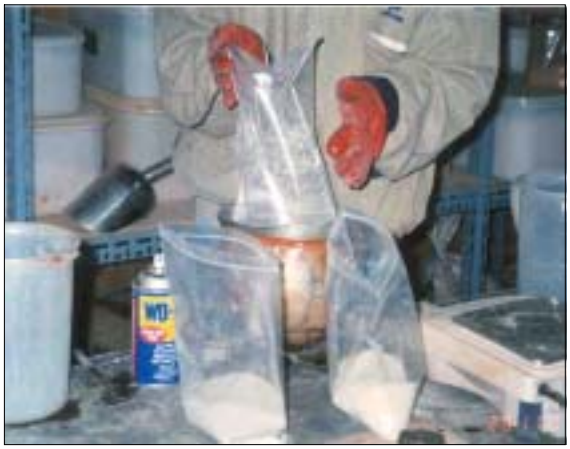
표 3.4 굴패각 고화재와 대상토의 배합표

시 료 명	대상토 함수비 (%)	Batch No.	습 윤 단위중량 (g/㎤)	조 합 비 (%)			고화재:물
				화포천 대상토	굴패각 고화재	水	
김해 화포천 + 굴패각고화재	50.26	K-916	1.515	95	5	4	1 : 0.8
		K-917		95	5	5	1 : 1.0
		K-918		95	5	6	1 : 1.2
		K-919		90	10	8	1 : 0.8
		K-920		90	10	10	1 : 1.0
		K-921		90	10	12	1 : 1.2
		K-922		85	15	12	1 : 0.8
		K-923		85	15	15	1 : 1.0
		K-924		85	15	18	1 : 1.2
		K-925		80	20	16	1 : 0.8
		K-926		80	20	20	1 : 1.0
		K-927		80	20	24	1 : 1.2
		K-928		75	25	20	1 : 0.8
		K-929		75	25	25	1 : 1.0
		K-930		75	25	30	1 : 1.2

제 4 절 공시체 제작

공시체 제작에서는 우선 결정된 습윤단위중량을 기준으로 하여 재료에 따른 포화상태의 함수비에 해당하는 양만큼의 물을 계량하여 여기에 슬러리를 만드는데 필요한 수량에 고화재를 섞어 흙에 고르게 혼합하였다. 공시체 제작시 몰드안에 큰 공동이 형성되지 않을 정도로만 가는 철사를 이용하여 20회 내외로 몰드안을 다져주면서, 소정의 시료가 몰드안에 다 들어가도록 주의하여 표 3.2와 3.3의 고화재 배합표에 따라 성형된 공시체를 제작하였다. 공시체 제작에 관한 내용은 그림 3.3과 같다. 삼축투수시험용 공시체는 시험기의 규격에 따라 제작하였으며(표 3.5 참조), 시험의뢰기관이 달라 공시체 제작시 시험자의 오차가 존재할 수 있으므로 투수시험기관(한국건자재시험연구원)에서 동일한 조건으로 같은 날 제작, 양생시킨 후 측정하였다.

(a) 대상토



(b) 고화재 투입장면

(c) 고화재와 대상토를 혼합하는 장면

(d) 공시체 몰드에 혼합한 슬러리를 투입하는 장면

그림 3.3 일축압축강도 및 투수계수 측정용 공시체

표 3.5 공시체의 규격

구 분	공시체의 규격	공시체의 수	비 고
일축압축강도시험	ø50×100㎜	재령 7일 : 3개 재령 28일 : 3개	항온항습기사용 양생 23±1℃ 상대습도96%
삼축투수시험	ø100×50㎜	재령 28일 : 3개	

제 5 절 일축압축강도 시험

공시체는 KS F 2314과 KS F 2329 규정에 따라 지름 50㎜, 높이 100㎜로 제작하여 강도 측정용 공시체를 몰드속에 둔채로 습윤양생기(온도 23 ±1 ℃, 상대습도 96%) 양생시키고 탈형 후, 다시 공시체를 온도 23 ±1 ℃의 항온항습기에서 양생하면서 재령에 따라서 일축압축강도 실험을 실시하였다.[13)-14)] 압축강도 측정 전에 공시체 단면의 요철이 0.05㎜이상이 되는 흠은 석고반죽을 이용하여 캡핑하였다. 캡핑 후 공시체가 파괴되지 않도록 23 ±1 ℃에서 3시간정도 양생시켰다.

압축강도 측정 전에 공시체 단면의 요철이 0.05㎜이상이 되는 흠은 석고반죽을 이용하여 캡핑하였다. 캐핑 후 공시체가 파괴되지 않도록 23 ±1 ℃에서 3시간정도 양생시켰다. 재령일수 7일, 28일별로 3개의 공시체를 제작하여 항온수조에서 23±1℃에서 수중 양생시킨 공시체를 대상으로 최소눈금 0.1kg/㎠까지 판독이 가능한 전동식 일축압축시험기를 이용하여 변형률 제어방식에 의한 압축을 실시하였고, KS F 2314의 규정에 따라 각사별로 양생일수에 따른 일축압축강도시험을 실시하였다.

일축압축강도실험은 5 Ton 용량의 만능재료시험기(그림 3.4)를 이용하여 수행하였고, 변형제어방식으로 재하 속도는 1mm/min이며, 이 때 실내온도는 18~24℃를 유지하였다.

그림 3.4 일축압축강도 측정용 만능재료 시험기

제 6 절 삼축압축형 투수시험

본 시험은 포화상태에 있는 흙속의 층류(層流) 상태로 침투할 때 투수계수를 구하는 것이며 KSF 2322규정에 따라 실시되었다. 공시체는 지름 100㎜, 높이 50㎜로 제작하여 온도 23±1℃, 상대습도 96%를 유지시킬수 있는 습윤양생기에서 1일간 양생시키고 탈형 후에 온도 23±1℃의 수조에서 수중양생하면서 재령 28일에서 투수실험을 실시하였다. 투수실험은 그림 3.5와 같은 삼축압축시험기(triaxial compression testing machine)를 이용하여 연성벽 투수시험을 수행하였고, 이 때 실내온도는 18~24℃를 유지시켰다. [15)]

시험방법은 샘플을 만들어 셀안에 설치한 후에 시험기의 압력장치를 이용하여 압력을 가하여 동수경사를 높여서 투수시험을 실시한다. 적당한 구속압을 가해서 샘플을 압밀 시키고 배압을 적용시켜서 포화를 시킨후에 투수시험을 실시하며 압력장치에 의해서 동수 경사를 일정하게 유지시킨다. 투수계수는 2개의 공시체에 대해서 측정한 값의 평균을 사용하였다.

본 실험에서는 대상토를 굴패각을 이용한 고화재로 고결된 흙의 일반적인 투수계수를 알아보기 위하여 실내에서 연성벽시험기를 이용한 투수 실험을 실시하였다. 고화재 첨가량은 100, 200, 300 kg/㎥로 하였으며 7, 14, 28일 경과에 따른 투수계수를 구하였다

그림 3.5 삼축압 투수 시험기

제 7 절 고화재 용출수의 TCLP 실험

이 시험은 보통 용해성이 낮은 중금속을 포함하고 있는 지반을 고화 처리하는 경우에 적용된다. 용출시험은 EPA에서 사용하고 있는 TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) 실험방법에 의해서 실시하였으며, 우선 양생된 공시체를 잘게 분쇄하여 9.5㎜체를 통과한 시료 25g을 준비하여 사전에 준비한 500㎖의 용출용액(extraction solution)이 들어있는 유리병에 시료를 담근다. 용출용 용액은 PH가 4.9 ±0.2인 Sodium Acetate Solution을 사용하였다. 유리병을 30rpm의 속도로 17시간동안 흔들어 준다. 용출과정이 완료되면 유리병 내부의 흙과 용액을 진공압을 가하여 0.7㎜ 필터지를 통과시켜 고체성분은 분리시키고 액체성분만을 ICP(Inductively Coupled Plasma)장치를 이용하여 성분분석을 실시하였다. ICP는 고온(6000K)의 아르곤 프라즈마(Argon Plasma)로 원자를 들뜨게 하고, 이때 방출되는 법을 분광하여 무기 및 유기화합물의 금속, 비금속 원소등의 정량분석에 이용되는 장치이다. 본연구에서 사용한 장치는 Jobin Yvon사의 JY 138 ultrace 모델이었다.

용출실험의 시험항목은 표 3.6과 같다. 흙이나 침출수내에 있던 중금속 성분의 농도의 변화를 관찰하였으며, N.D 표시는 중금속이 함유되어 있지 않은 것으로 나타났다.

또한, 용출조작 방법은 상온, 상압하에서 진탕회수가 매분 약 200회, 진폭이 4~5㎝의 진탕한 후, 0.1㎛의 유리섬유 여과지로 여과하고 여과액을 적당량 취하여 검정용 시료로 하였고, 여과가 곤란 한 경우에는 진탕한 시료액을 원심분리기를 사용하여 매분당 3,000회전 이상으로 20분이상 원심 분리시킨 후 그 중 적당량 취하여 검정용 시료로 하였다.

표 3.6 중금속 용출 시험항목

시험항목	Pb	Cd	Cu	Cr^{6+}	CN	Hg	As	pH (20℃)
비 고	폐기물공정시험법, 단위 ㎎/ℓ							

제 8 절 굴패각 생석회 시험결과

1. 대상토의 조건

본 연구에서 굴패각을 최대한 활용하기 위하여 각 대상토별 첨가 범위 및 물리적 특성을 예비적 고찰로 실험을 실시하였다.

굴패각 생석회를 적용하기 위하여 5가지 대상토를 선정하였으며, 각 대상토별 토성시험결과는 다음 표 3.7과 같다.

표 3.7 굴패각 생석회 적용 대상토 조건

구 분	광양준설토	화포천	황 토	법수천	표준사
비 중	2.744	2.555	-	2.758	2.805
자연함수비	47.8%	50.26%	44.28%	11.64%	11.46%
액성한계	43.2%	48.8%	31.2%	-	-
소성한계	23.4%	25.8%	25.4%	-	-
조성지수	19.8	23.0	-	-	-
최대날지름	9.52m	19.0mm	-	19.0/19.0mm	0.6mm
60%날지름	0.022mm	0.0042mm	-	0.25/0.125mm	0.125mm
10%날지름	-	-	-	-	-
균등계수	-	-	-	2.26/2.93	-
#10통과율	95.6%	98.1%	99.5%	99.3%	99.3%
#40통과율	84.0%	93.1%	84.2%	94.8%	-
#200통과율	69.6%	86.9%	64.2%	7.3%	-
통일분류	CL	CL	CH	SP-SM	SP
투수계수	-	-	-	-	-
염분농도	0.6%	-	-	-	-
습윤단위중량	1.693	1.515	1.774	1.880	1.912
최대다짐밀도	-	-	1.7	1.660	1.672

2. 굴패각 생석회 적용시험 결과

2.1 일축 압축 강도 시험 결과

굴패각 생석회 혼합처리토의 양생일 및 굴패각 생석회 배합비에 따른 지반강도 증대효과를 알아보기 위하여 재령별 압축강도를 측정하여 다음 표 3.8에 나타내었다. 광양준설토, 화포점성토, 황토의 경우 생석회 투입량이 증가함에 따라 강도가 저하 되었으며, 황토의 경우 그 차이가 뚜렸하게 나타나고 있다. 사질토, 표준사의 경우는 20% 배합비에서 강도가 높게 나타났다.

각 대상토별로 재령에 따른 압축강도의 변화를 굴패각 생석회를 10%, 20%, 그리고 30%를 혼합한 경우에 대하여 도시하면 그림 3.6 ~ 3.8과 같다.

표 3.8 굴패각 생석회의 재령에 따른 압축강도 측정 결과

구 분	7 일 강 도			14일 강 도			28일 강 도		
	9:1	8:2	7:3	9:1	8:2	7:3	9:1	8:2	7:3
준설토	1.53	0.64	0.38	3.95	2.68	1.51	9.68	3.06	2.93
점성토	0.25	0.25	0.51	0.51	0.76	1.27	4.59	2.68	2.42
황 토	20.51	12.87	8.03	23.06	17.76	8.7	33.0	19.11	9.81
사질토	1.78	3.06	0.51	3.31	4.97	1.27	2.17	7.65	3.57
표준사	1.02	1.78	1.66	1.27	1.91	2.55	0.64	2.65	2.04

(1) 굴패각 생석회 10% 적용

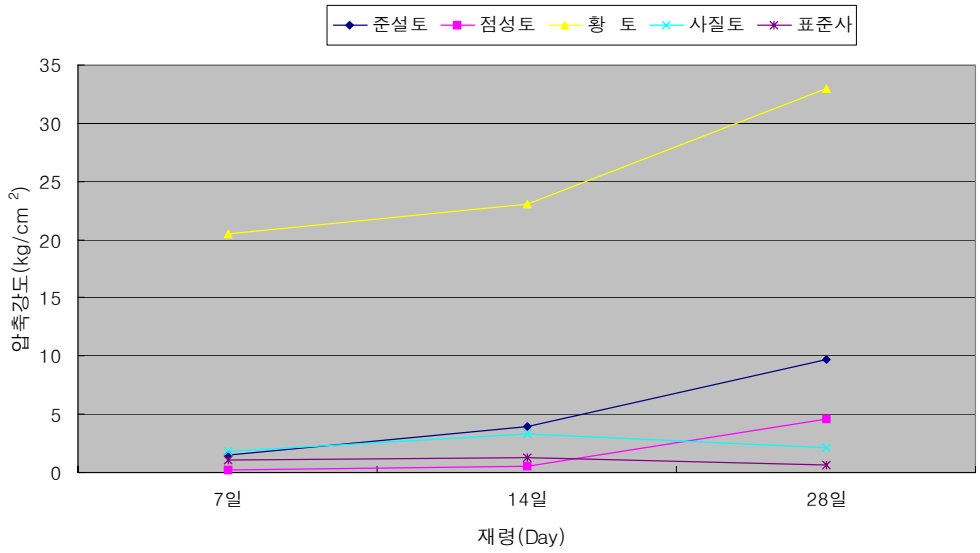


그림 3.6 굴패각 생석회 10%적용에 따른 압축강도 변화

(2) 굴패각 생석회 20% 적용

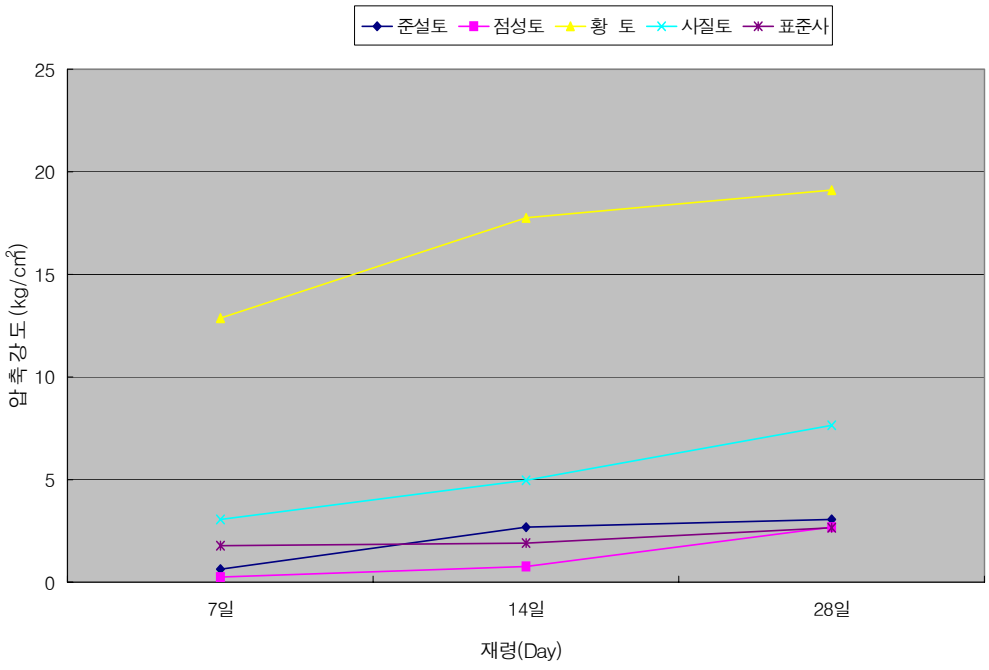


그림 3.7 굴패각 생석회 20%적용에 따른 압축강도 그래프

(3) 굴패각 생석회 30% 적용

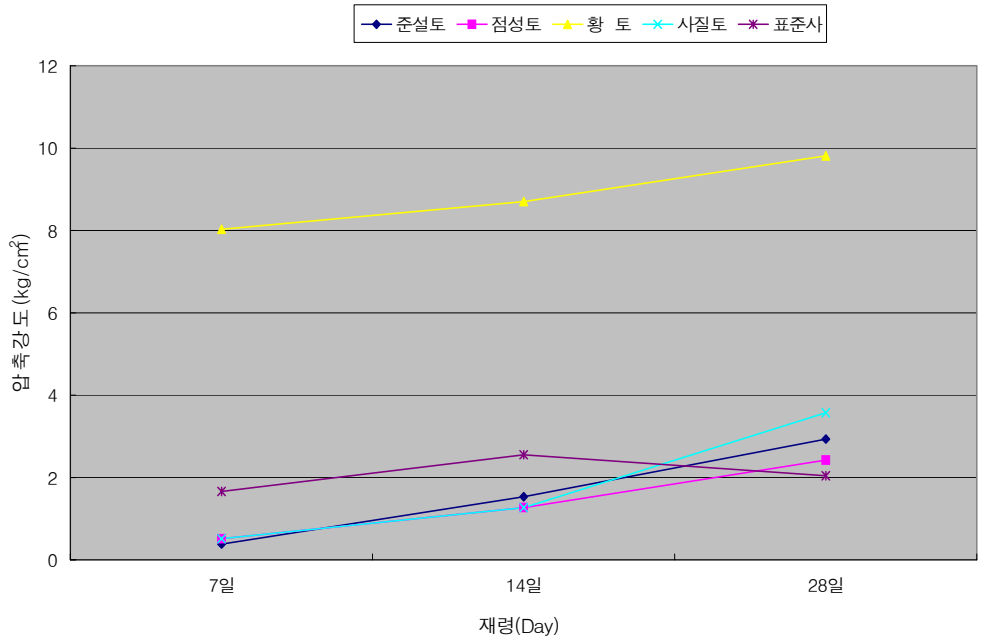


그림 3.8 굴패각 생석회 30%적용에 따른 압축강도 그래프

2.2 함수비 변화 측정 결과

각 대상토별 굴패각 생석회 적용 시험결과로 함수비를 각 재령에 따른 측정을 실시한 결과 다음 표 3.9에 나타내었다. 함수비 저감은 초기의 생석회 수화 반응에 따른 발열에 의해 크게 나타난후 시간의 경과에 따라 일정하게 감소하고 있다.

각 대상토별로 재령에 따른 함수비의 변화를 굴패각 생석회를 10%, 20%, 그리고 30%를 혼합한 경우에 대하여 도시하면 그림 3.9 ~ 3.11과 같다.

표 3.9 굴패각 생석회의 재령에 따른 함수비 변화 측정 결과

구 분		조합후	1일	3일	7일	28일
준설토	원토	43.73	39.59	38.10	34.98	9.55
	9:1	40.76	35.92	31.76	29.23	9.24
	8:2	40.24	33.85	28.28	23.77	4.37
	7:3	38.28	31.58	25.46	20.65	4.81
점성토	원토	37.94	35.18	31.08	26.11	2.58
	9:1	35.44	30.68	23.58	19.70	2.08
	8:2	34.79	30.17	26.17	20.58	2.84
	7:3	34.20	30.46	26.47	23.40	5.02
황 토	원토	43.92	41.00	35.71	29.87	5.31
	9:1	41.07	36.98	33.57	30.45	8.92
	8:2	39.97	36.38	33.71	30.69	17.25
	7:3	39.32	33.54	30.72	27.14	12.86
사질토	원토	9.92	6.67	5.11	4.70	0.74
	9:1	13.41	10.61	7.87	7.40	0.55
	8:2	17.20	12.61	8.83	7.05	1.00
	7:3	15.67	12.78	7.10	5.61	0.70
표준사	원토	6.77	4.95	3.77	3.15	0.42
	9:1	11.27	7.70	5.06	4.42	0.07
	8:2	14.63	9.18	5.60	4.55	0.33
	7:3	15.10	12.65	8.32	5.94	0.61

(1) 굴패각 생석회 10% 적용

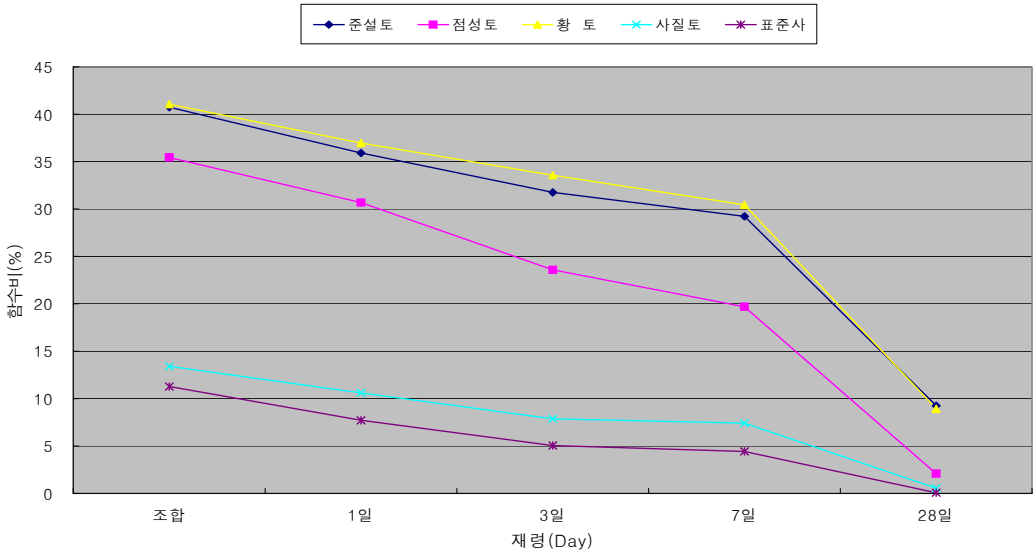


그림 3.9 굴패각 생석회 10%적용에 따른 함수비 변화

(2) 굴패각 생석회 20% 적용

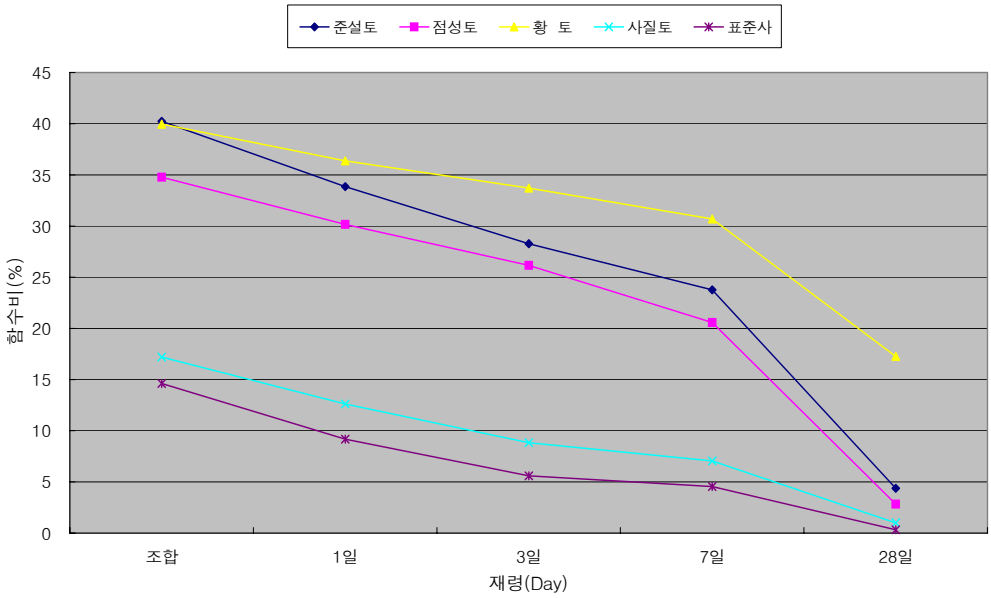


그림 3.10 굴패각 생석회 20%적용에 따른 함수비 변화 그래프

(3) 굴패각 생석회 30% 적용

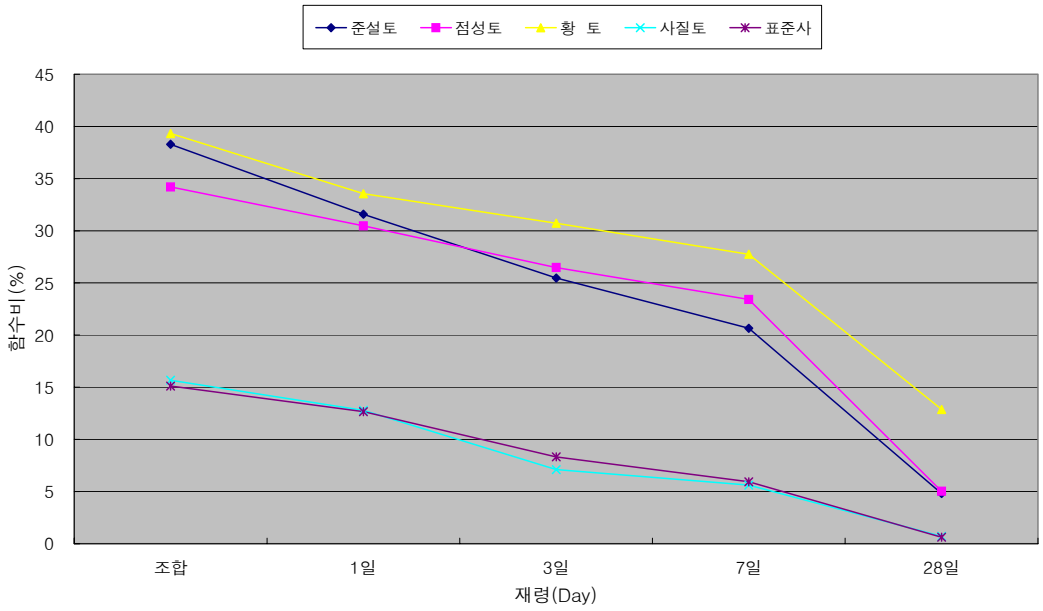


그림 3.11 굴패각 생석회 30%적용에 따른 함수비 변화 그래프

2.3 온도 변화 측정 결과

굴패각 생석회를 각 비율로 적용하여 온도 변화를 조합직후와 1시간 경과후 결과를 측정한 결과 다음 표 3.10과 같다. 생석회 투입량의 증가(9:1,8:2,7:3 배합)에 따라 온도가 급격하게 증가하고 있으며, 함수비가 적은 표준사,사질토에서 발열량이 크게 나타내었다.

각 대상토별로 재령에 따른 온도의 변화를 굴패각 생석회를 10%, 20%, 그리고 30%를 혼합한 경우에 대하여 도시하면 그림 3.12 ~ 3.14와 같다.

표 3.10. 굴패각 생석회의 시간 경과에 따른 온도 변화 측정 결과

구 분	원 토		9 : 1		8 : 2		7 : 3	
	조합후	1hr	조합후	1hr	조합후	1hr	조합후	1hr
준설토	17.8	22.2	27.5	21.0	40.8	28.5	51.9	35.2
점성토	19.3	22.2	33.7	23.0	49.0	36.0	63.0	37.5
황 토	22.2	22.2	38.8	22.1	54.8	35.5	65.8	40.0
사질토	20.3	21.2	42.7	24.1	64.4	39.5	87.3	32.9
표준사	20.3	20.4	41.5	25.3	77.0	31.0	98.9	38.9

(1) 굴패각 생석회 10% 적용

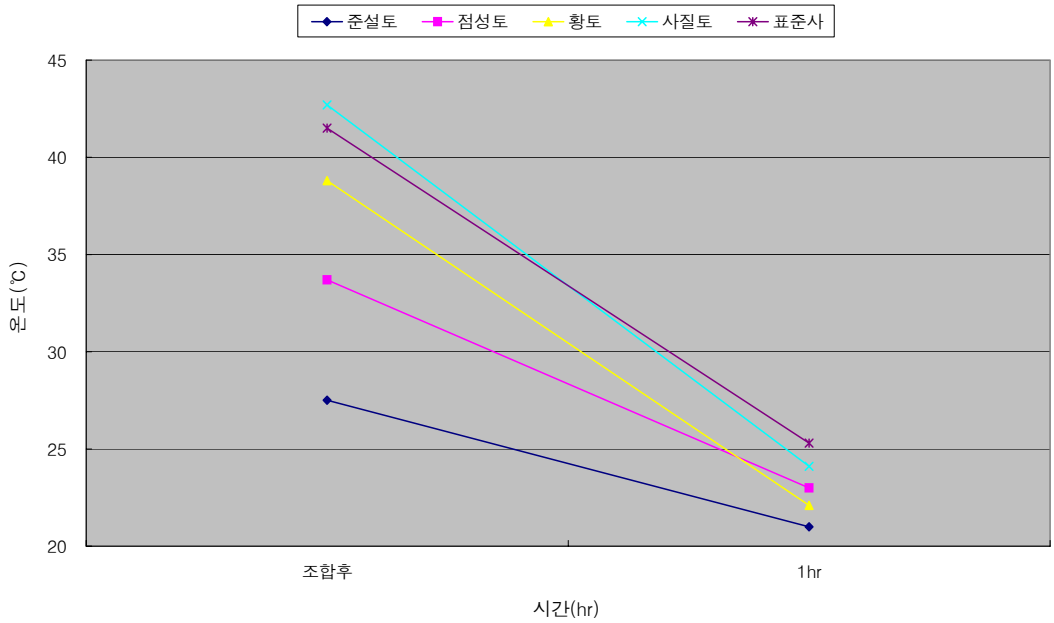


그림 3.12. 굴패각 생석회 10%적용에 따른 온도 변화

(2) 굴패각 생석회 20% 적용

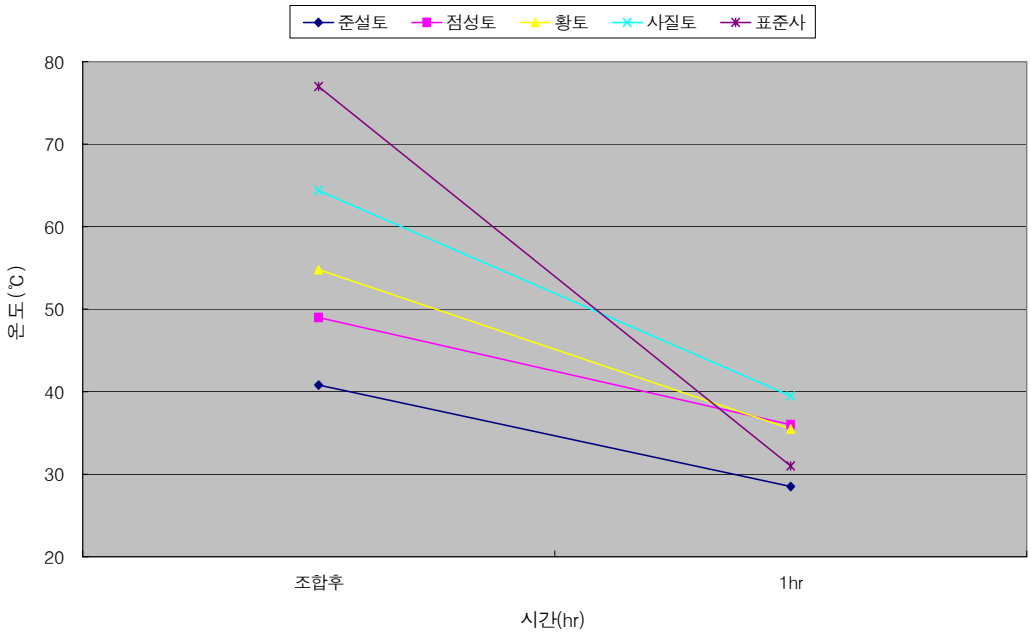


그림 3.13 굴패각 생석회 20%적용에 따른 온도 변화

(3) 굴패각 생석회 30% 적용

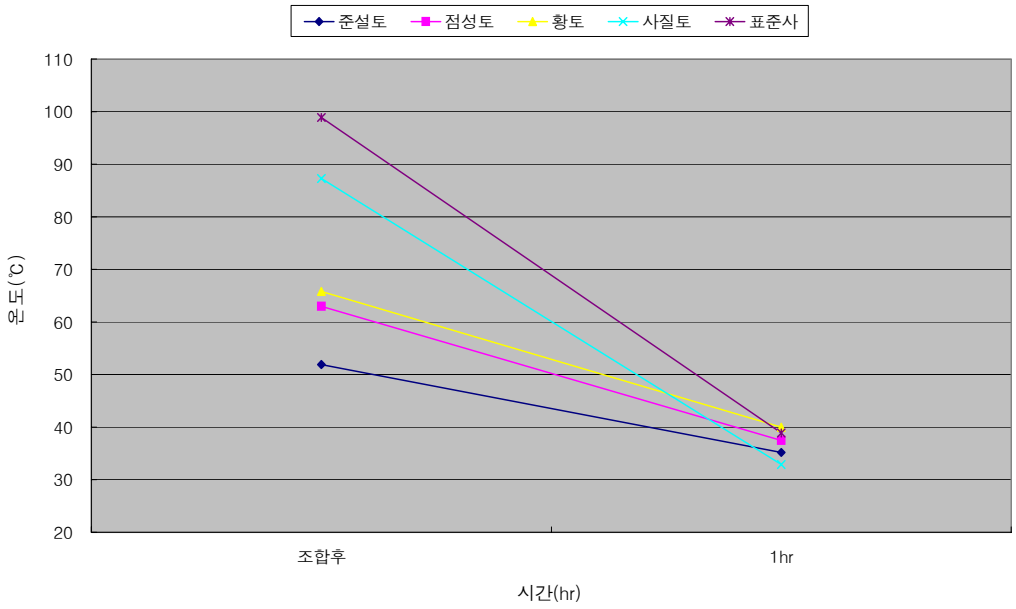


그림 3.14 굴패각 생석회 30%적용에 따른 온도 변화

수화열 측정기(ComReg 506L)를 활용하여 대상토별 굴패각 생석회 적용시 시간에 따른 수화작용에 의한 온도변화 측정결과는 다음 그림 3.15와 같다. 굴패각 생석회량 증가에 따른 그 변화가 뚜렷하게 나타났다. 황토와 광양 준설토의 경우 최대 온도가 다소 낮게 분포하고 있으나, 법수 사질토의 경우 최대 107℃까지 상승하였다.

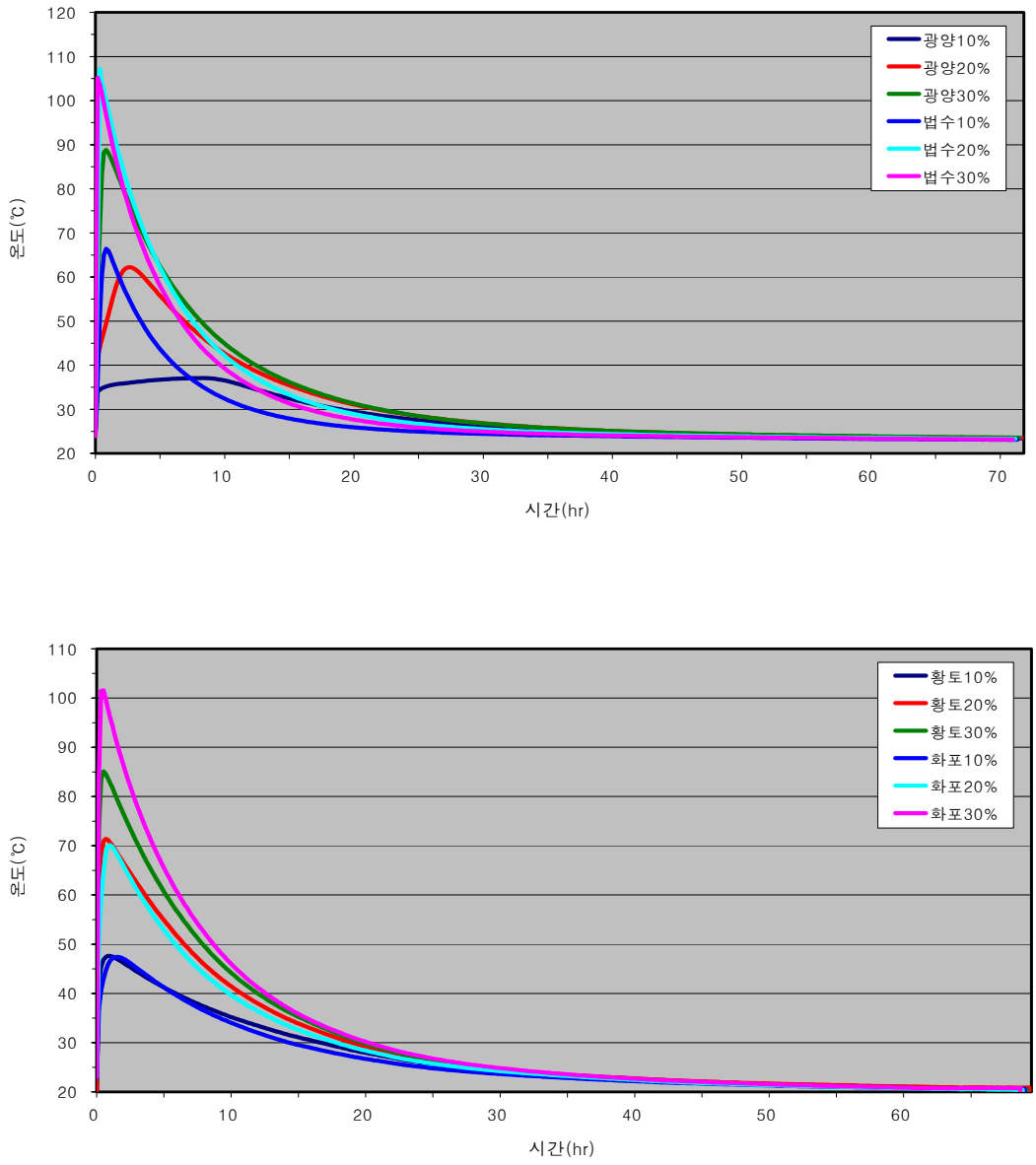


그림 3.15 대상토별 굴패각 생석회 적용에 따른 온도 변화

2.4 수축율 변화 측정 결과

길이몰드 시편을 제작하여 수축율 변화를 측정한 결과 다음 표 11에 나타내었다. 함수비가 높은 준설토, 점성토, 황토의 경우 생석회 투입비가 증가할수록 수축율 변화량이 감소하는 경향을 보였고, 사질토, 표준사의 경우 양생과정에서 수분흡수 등의 원인으로 수축율 변화가 일정하지 않다

표 3.11 굴패각 생석회의 수축율 변화 측정 결과 (28일)

구 분	원 토	9 : 1	8 : 2	7 : 3
준설토	9.346	3.549	0.623	1.371
점성토	6.044	4.673	3.801	3.623
황 토	4.424	2.677	0.999	0.625
사질토	-	0.189	-0.188	-0.062
표준사	-	-0.375	0.125	0.124

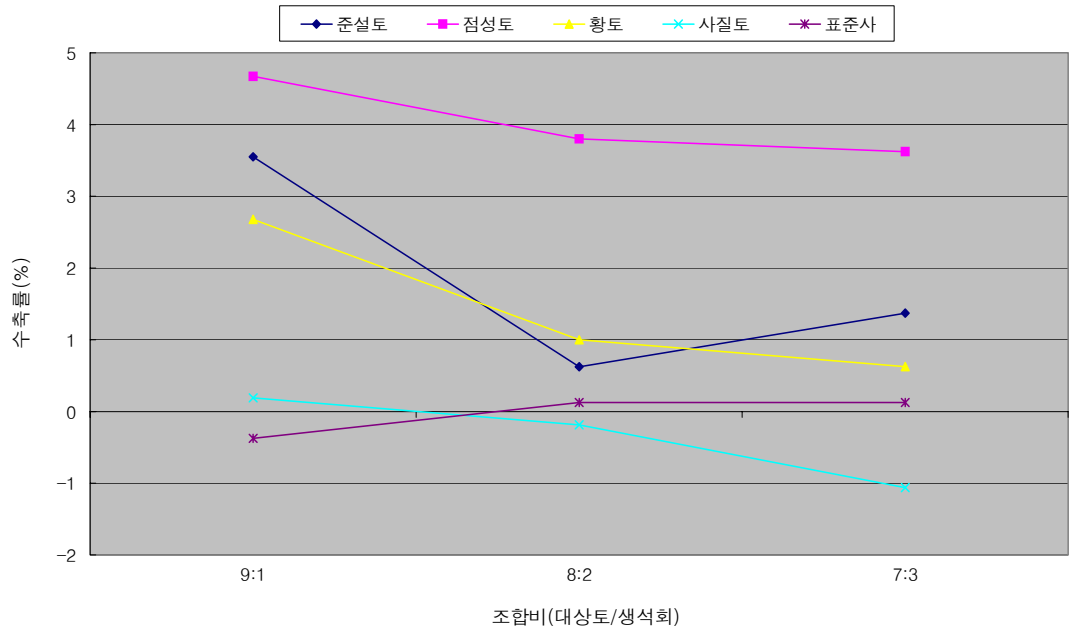


그림 3.16 굴패각 생석회 적용에 따른 수축율 변화

3. 굴패각 생석회 대상토 적용성 시험 결과 및 고찰

초기 수화반응 촉진으로 경화가 조기에 일어나지만, 굴패각 생석회와 대상토의 강도 및 결합력이 고화재와 비교시 현저히 떨어진 것을 알 수 있다. 굴패각 생석회와 대상토의 결합후 1~2분내 경화가 시작되므로 시공상의 문제가 제기 되며, 특히 사질토의 경우 수분을 흡수한 경우 대상토의 분리현상이 발생하였다.

본 실험 대상토중 광양 준설토의 경우 황토를 제외한 타대상토에 비해 강도발현 및 함수비 저감 효과가 우수하나 기존고화재 보다 떨어지고 대상토 대비 굴패각 생석회의 투입량 절감에 대한 방안이 필요한 것으로 판단된다.

4. 굴패각 생석회를 대상토별 적용 결과 검토 의견

본 연구를 통하여 굴패각 생석회를 대상토 5가지에 대한 적용결과를 토대로 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 굴패각 생석회의 수화 작용에 의한 심한 발열현상으로 온도 상승 및 균열이 발생하여, 이에 따른 보완이 필요하다.
- 굴패각 생석회를 시공할 경우 생석회의 화학적 특성상 강한 활성 상태로 직접 시공시 품질 및 특성의 변화가 심할것으로 사료된다.
- 또한, 굴패각 생석회의 품질확보 및 시공조건이 상황에 따라 많은 변수가 존재하므로 이에 따른 문제점을 사전에 해결해야 할것으로 판단된다(생석회의 탄산화 및 수화반응).
- 따라서 본 생석회의 적용을 대상토별로 실시 하였으나, 이러한 문제점을 제거하기 위해서는 생석회의 첨가조건을 고려한 굴패각 고화재의 배합설계 및 적용시험이 요구된다.

제 9 절 실내시험 결과 및 고찰

1. 고화재 성분분석 결과

1) 성분분석 (XRF)

표 3.7의 성분 분석결과 시멘트 고화재의 경우는 강열감량이 적고, 당사가 개발한 굴패각 고화재의 경우는 6.9%로 높은 현상을 나타내고 있다. 이것은 굴패각의 $CaCO_3$ 성분이 CO_2의 분해로 볼 수 있다.

표 3.12 고화재의 화학성분 비교표

화학성분	시멘트계 고화재	굴패각 고화재	굴패각 생석회
MgO	1.16	1.58	0.27
Al_2O_3	7.89	3.95	1.04
SiO_2	16.96	10.38	1.32
$CaSO_4$	16.20	14.42	-
K_2O	0.77	0.19	0.17
CaO	52.89	62.54	95.90
TiO_2	0.61	0.42	-
Fe_2O_3	-	-	0.87
Na_2O	-	-	0.16
ZrO_2	-	-	0.27
Ig loss (%)	3.52	6.52	-
비 고		굴패각 활용	굴패각 생석회

2) 고화재의 X-선 회절분석 비교

그림 3.17에서 나타난 바와 같이 개발된 굴패각 고화재와 시멘트 고화재의 XRD를 분석한 결과 시멘트 고화재 C_3S, C_2S의 Cement 주결정상이 나타나고 있으며, 굴패각을 이용한 고화재는 $CaCO_3$의 Pick의 결정상으로 나타남으로 고화재의 물리적인 특성에서도 차이가 나타남을 알 수있다.

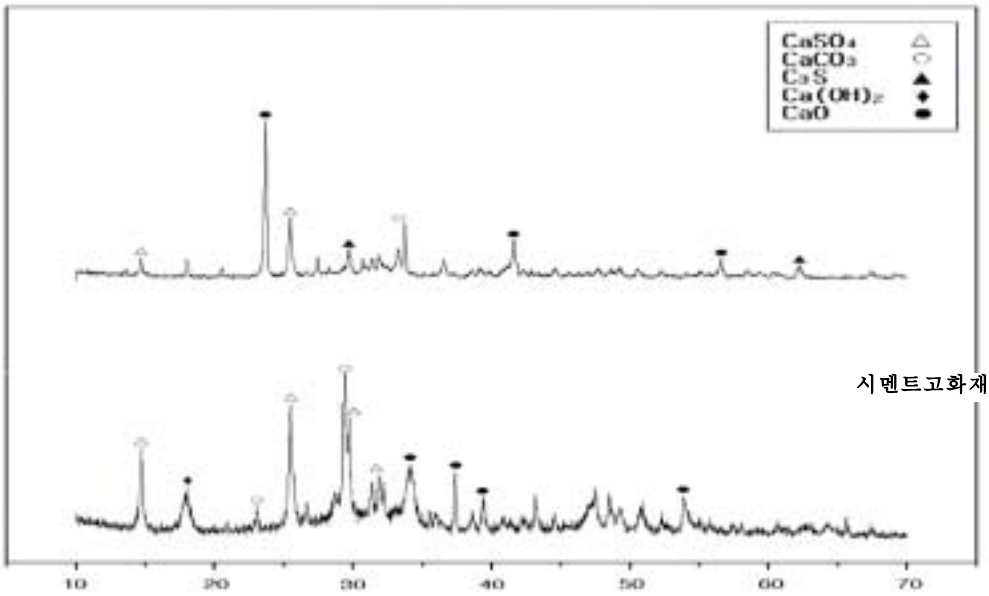
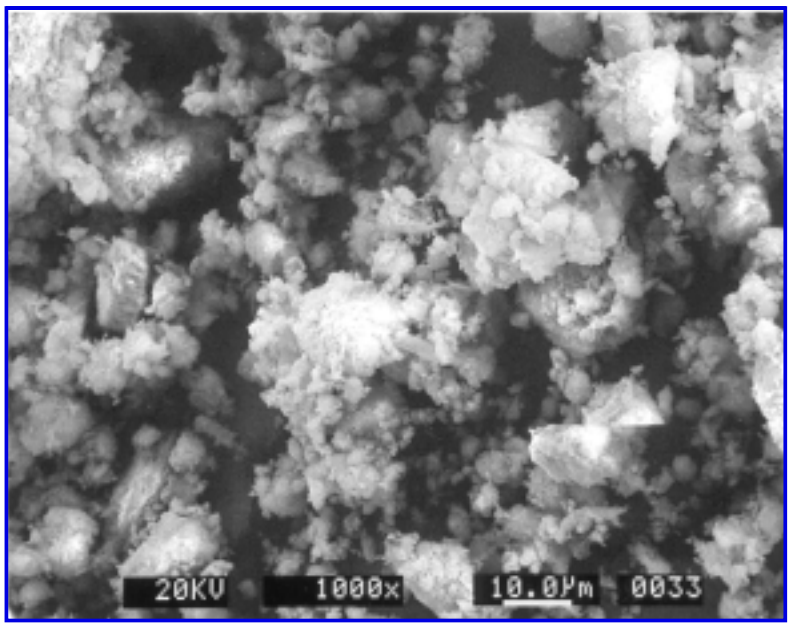


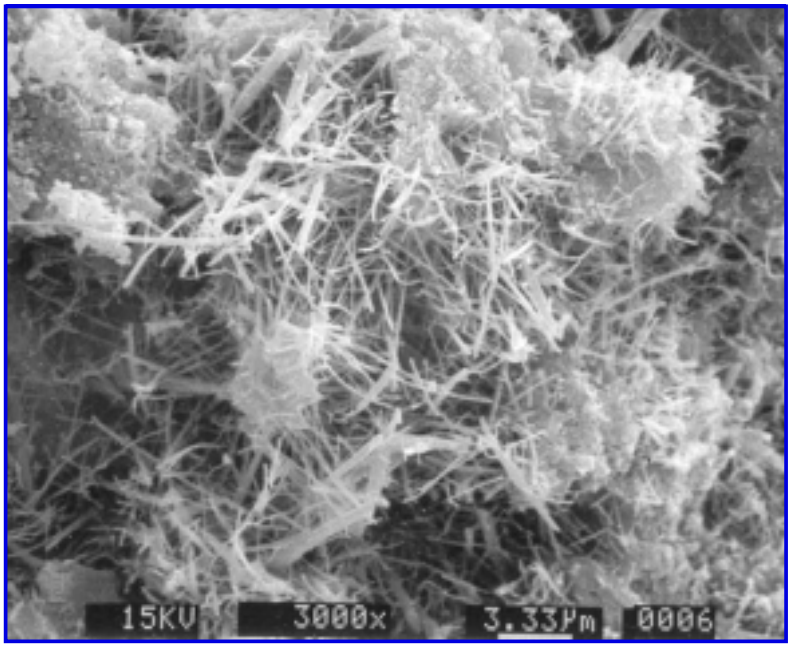
그림 3.17 굴패각 고화재와 시멘트계 고화재의 X-선 회절분석 결과

3) 고화재의 미세구조 관찰결과 특성

일축압축강도를 측정한 시료를 고화 처리한 대상토의 미세구조를 SEM (Sanning Electron Microscope)을 이용하여 관찰하였다. 대상토의 경우는 미세공극이 많은 자연상태로 된 것이 그림 3.18-(A)에서 나타내고 있으며 고화처리하여 높은 강도를 보이는 결과는 그림 3.18-(B)의 SEM 사진으로 나타내었다. 그림 3.18-(B)의 경우를 살펴보면 Ettringite 반응의 침상결정과 C-S-H gel상의 수화물로 인하여 대단히 많은 Pozzolan 반응으로 인하여 내부가 치밀하게 메워 주는 것으로 사료된다.



(a) 굴패각 고화처리전 SEM사진



(b) 굴패각 고화처리후 SEM사진

그림 3.18 고화재의 고화처리 전후의 SEM사진 비교분석

2. 토성시험 및 대상토 분석결과

김해 한림지역에서 채취된 대상토는 연약지반을 구성하는 토사로서 외력에 의해 매우 큰 침하가 발생하며, 공극수에 의한 연화현상에 의해 큰 파괴를 일으킬 수 있는 흙이다. 또한, 0.01㎜ 이하 통과율이 50%이상으로 극히 미세하며, 소성지수가 20%이상에 달하므로 소성이 매우 커서 하중에 대해 매우 민감한 흙이다.

위의 대상토에 구조물이나 단지 조성을 위한 지반개량을 행하였을 때의 각 재료 첨가에 따른 영향을 알아보기 위하여 시멘트 고화재와 굴패각 고화재를 동일 조건의 배합 설계를 특성을 분석하였다.

대상토에 대한 각종 토성시험에 의하여 얻어진 결과들을 요약하면 표 3.13과 같으며, 대상토의 입도분포 곡선은 그림 3.19와 같다.

표 3.13 대상토 토성시험

(KS F 2301,2302-'92,2303～2306-'2000,2308-'96,2309-'95,2324-'96)

비 중	2.555	최대 날지름	19.0 ㎜	40번체통과율	93.1 %
자연함수비	50.26 %	60%날 지 름	0.0042 ㎜	200번체통과율	86.9 %
액 성 한 계	48.8 %	10%날 지 름	-	통일 분류	CL
소 성 한 계	25.8 %	균 등 계 수	-	습윤단위중량	1.515
소 성 지 수	23.0	10번체통과율	98.1 %	염분농도	-

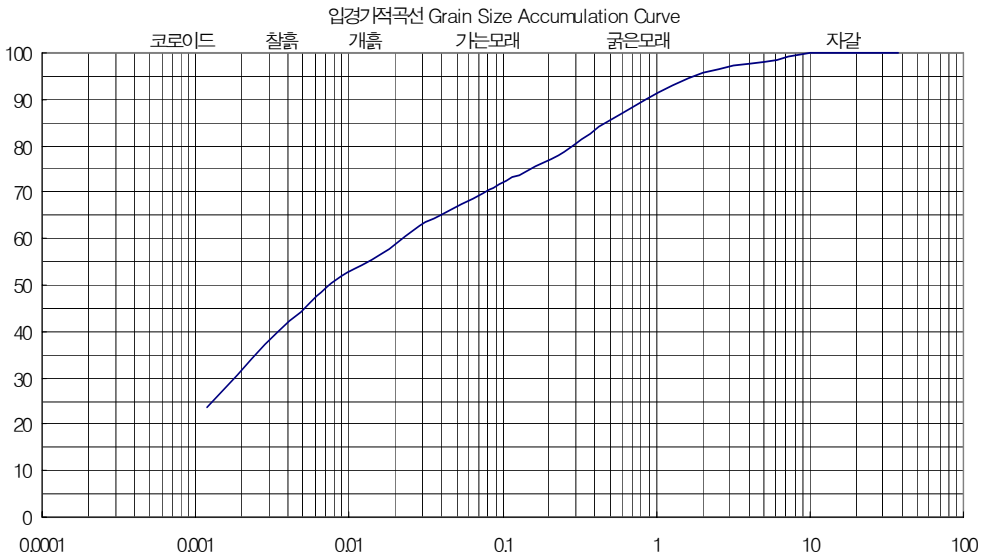


그림 3.19 대상토의 입경분포 곡선(Grain Size Accumulation Curve)

3. 일축압축강도 시험 결과

그림 3.20, 3.21, 3.22에서 나타난 것과 같이 시멘트계 고화재와 굴패각 고화재의 일축압축강도 특성을 확인하기 위하여 고화재량을 5.0%~25%까지의 변화와 물:고화재(물/고화재 비)를 각각 0.8:1, 1:1, 1.2:1로 변화하여 재령 7일, 28일 양생한 후 일축압축강도를 측정하였다.

그 결과 굴패각과 시멘트계의 특성을 살펴보면 물 배합과 함량에 관계없이 전체적으로 초기강도 7일에서는 굴패각은 30kgf/㎠이하의 강도를 나타내고 시멘트계는 최고38kgf/㎠ 이상의 강도가 나타나고 있다. 즉 굴 패각은 초기강도는 시멘트계 보다 낮은 강도 특성을 보이고 있으나 28일 양생 후의 특성은 반전되는 효과를 나타내고 있다. 고화재의 함량이 증가할수록 강도는 증가하겠으나 전체적인 양상은 동일하게 보이며, 특히 25%(0.8/1)경우를 보면 굴패각은 65kgf/㎠으로써 시멘트계의 43kgf/㎠보다 22kgf/㎠정도 낮게 나타났다.

이것은 굴패각 고화재는 원재료의 구성에서 슬래그의 반응성의 원인으로 보이며 28일 양생의 경우는 잠재수경성 반응이 일어나면서 강도가 증가된 것으로 사료된다.

물/고화재의 비율을 조정한 결과는 물의 함량이 적은 0.8/1의 경우가 강도특성이 가장 높게 나타나는 것을 그림 3.20에서 보여준다. 즉 고화재의 함량이 증가할수록, 물/고화재의 비율은 낮을수록 높은 특성을 나타내고 있으나, 현장의 작업성과 경제성을 고려하여 시방기준에 적합한 배합이 도출되어야 한다.

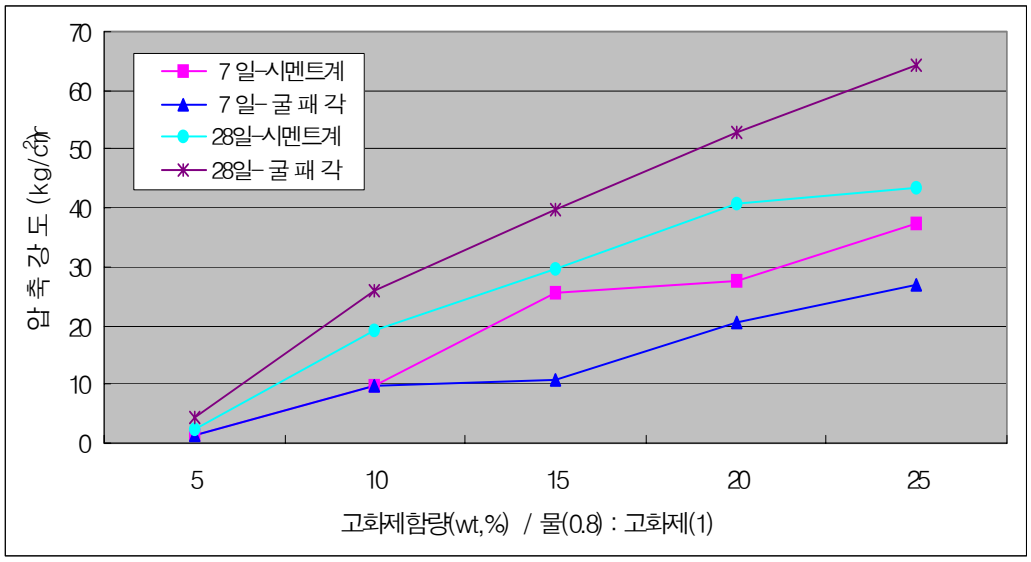


그림 3.20 고화재의 물/고화재 비=0.8인 경우 함량에 따른 일축압축강도 변화

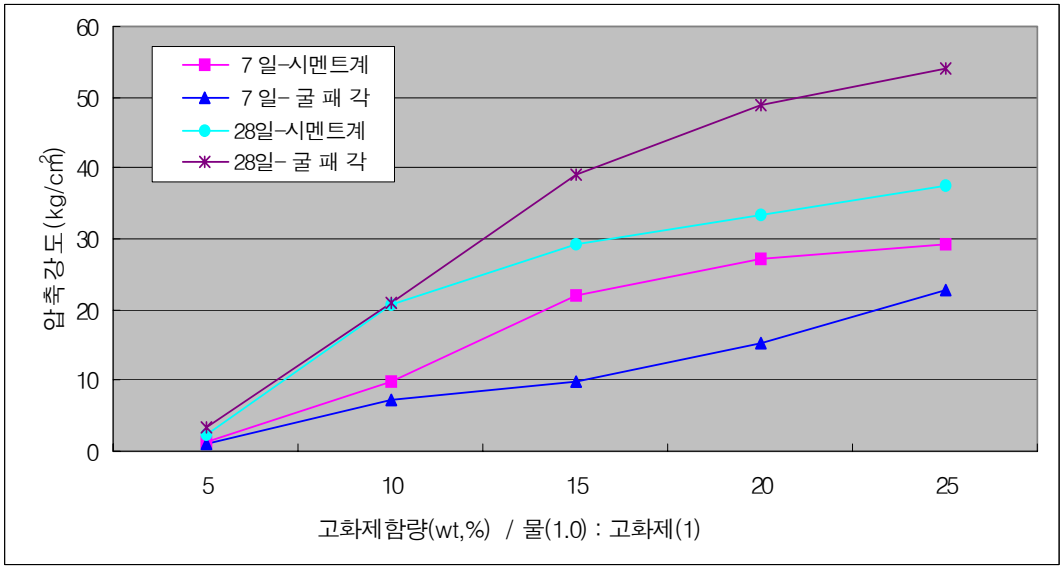


그림 3.21 고화재의 물/고화재 비=1.0인 경우 함량에 따른 일축압축강도 변화

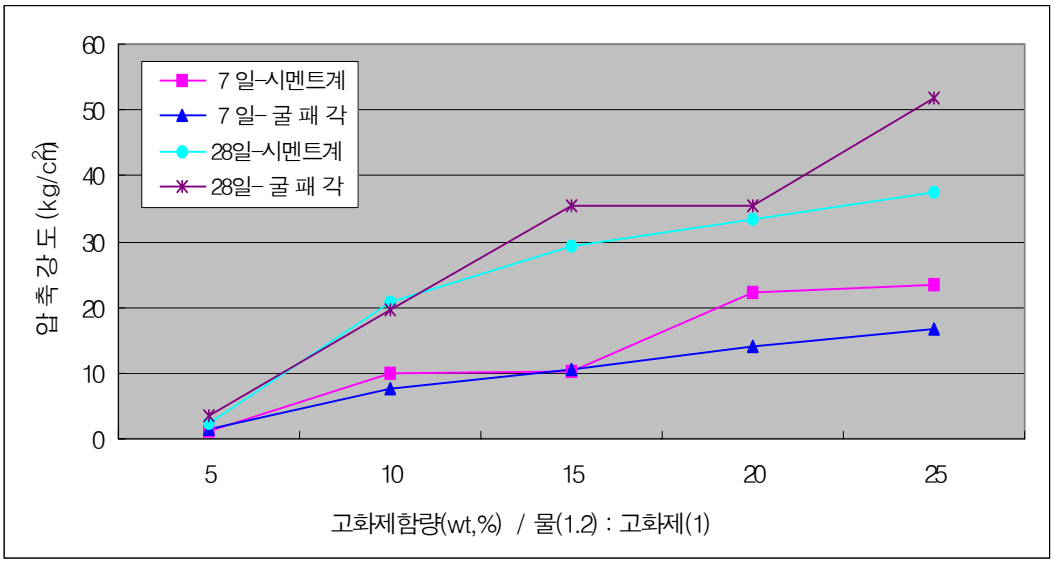


그림 3.22 고화재의 물/고화재 비=1.2인 경우 함량에 따른 일축압축강도 변화

4. 삼축투수시험 결과

삼축투수시험은 그림 3.23와 같이 1/㎥당 100, 200, 300kg의 굴패각 고화재를 첨가한 배합에서 목표투수계수 1.0 ×10^{-7}㎝/sec를 기준으로 살펴보면, 7일의 경우 100kg/㎥는 미흡하고 200kg/㎥이상에서 만족하고 있으며, 28일 양생의 경우는 모두 만족하는 것으로 나타났다.

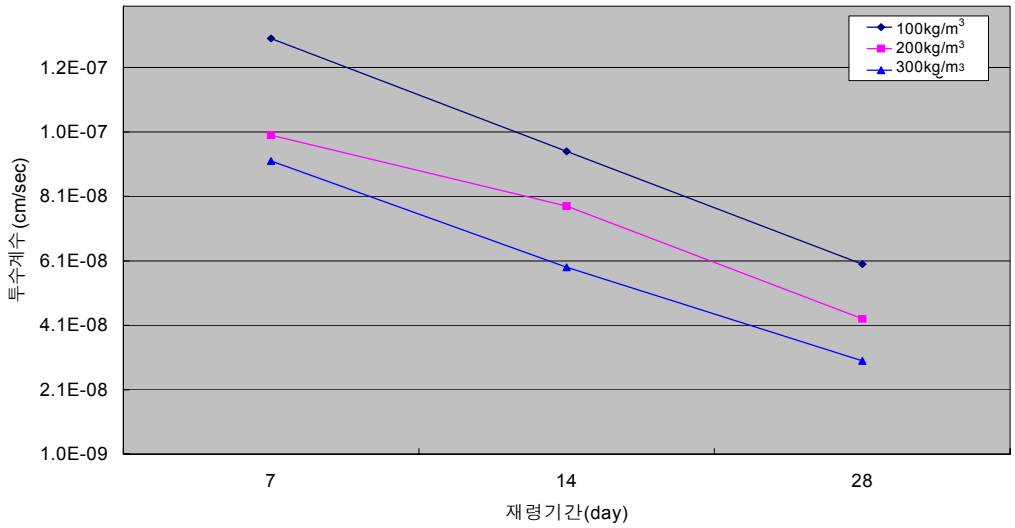


그림 3.23 양생기간에 따른 고화재량에 따른 투수계수 그래프

5. 고화재 용출수의 TCLP 실험결과

굴패각 및 시멘트계 고화재 경화체의 중금속용출시험을 실시하였으며, 표 3.14에서와 같이 중금속용출 기준에는 모두 문제가 없으며, 시멘트계의 경우는 Cr^{6+}이 미량인 0.02ppm과 Cu 0.55, Pb 0.15ppm이 용출된 것으로 나타났다.

표 3.14 시멘트 고화재와 굴패각 고화재의 중금속 용출시험 비교 결과표

시험결과		시멘트계 고화재	굴패각 고화재	시험방법
유해물질 용출량 (ppm)	Cu	0.55	0.01	폐기물 공정시험법
	Pb	0.15	N.D	
	Cr^{6+}	0.02	N.D	
	Cd	N.D	N.D	
	As	N.D	N.D	
	Hg	N.D	N.D	

6. 실내 시험 결과 및 고찰

본 연구에서 실내실험의 결과를 고찰하면, 고화재의 화학분석결과 시멘트 고화재의 경우는 강열감량이 적고, 당사가 개발한 굴패각 고화재의 경우는 6.9%로 높은 현상을 나타내고 있다. 이것은 굴패각의 $CaCO_3$ 성분의 CO_2 분해로 볼 수 있다.

미세구조는 SEM 분석결과 대상토의 경우는 미세 공극이 많은 자연상태이며 고화처리하여 높은 강도를 보이는 결과는 Ettringite 반응의 침상결정과 C-S-H gel상의 수화물로 인하여 대단히 많은 Pozzolan 반응으로 인하여 내부가 치밀하게 메워주는 것으로 사료된다.

채취된 대상토는 연약지반을 구성하는 토사로서 외력에 의해 매우 큰 침하가 발생하며, 공극수에 의한 연화현상에 의해 큰 파괴를 일으킬 수 있는 흙이다.

또한, 0.01㎜ 이하 통과율이 50%이상으로 극히 미세하며, 소성지수가 20%이상에 달하므로 소성이 매우 커서 하중에 대해 매우 민감한 흙이다.

위의 대상토에 지반개량을 하였을 때의 각 재료 첨가에 따른 영향을 알아보기 위하여 시멘트 고화재와 굴패각 고화재를 동일 조건의 배합 설계를 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 일축압축강도에서 굴패각의 초기강도는 시멘트계보다 낮은 강도 특성을 보이고 있으나, 28일 양생 후의 특성은 반전되는 효과를 나타내고 있다. 고화재의 함량이 증가할수록 강도는 증가하겠으나 전체적인 양상은 동일하게 보이며, 특히 25%(0.8/1)경우를 보면 굴패각은 65kgf/㎠으로 시멘트계의 43kgf/㎠이며 22kgf/㎠정도 낮게 나타났다. 굴패각 고화재는 원재료의 구성에서 슬래그의 반응성이 원인으로 보이며, 28일 양생의 경우는 잠재수경성 반응이 일어나면서 강도가 증가된 것으로 사료된다. 물/고화재의 비율을 조정한 결과는 물의 함량이 적은 0.8/1의 경우가 강도특성이 가장 높게 나타났다. 즉 고화재의 함량이 증가할수록, 물/고화재의 비율이 낮을수록 높은 특성을 나타내고 있으나 현장의 작업성과 경제성을 고려하여 시방기준에 적합한 배합이 도출되어야 한다.

(2) 삼축투수시험은 1/㎥당 100, 200, 300kg의 굴패각 고화재를 첨가한 배합에서 목표투수계수 1.0 $\times 10^{-7}$를 기준으로 살펴보면 7일의 경우 100kg/㎥은 미흡하고 200 kg/㎥이상에서는 만족하고 있으며, 28일 양생의 경우는 모두 만족하는 것으로 나타났다.

(3) 굴패각 및 시멘트계 고화재 경화체의 중금속용출시험을 실시하였으나, 중금속용출 기준에는 모두 문제가 없으나 시멘트계의 경우는 Cr^{6+}이 미량인 0.02ppm과 Cu 0.55ppm, Pb 0.15ppm이 용출된 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 굴수하식 양식 수산업 협동조합, 1998, “굴패각 처리 대책방안에 대하여”.
2. 김순호., 무기혼화재를 첨가한 황토모르타르의 특성에 관한 연구, P. 2-17(2000).
3. 녹색신문, 2001, “굴패각 건설부자재 대량 재활용”
4. 송태웅. 김희래., 양식 굴패각을 사용한 기능성 건자재의 합성, 시멘트 심포지음, (2000)
5. 장복기. 정창주. 이종호. 임용무., 시멘트 재료화학, 전남대학교 출판부, P. 79-90, 169-185(1998).
6. 정인준, 김명모, 1997, “토질공학 원론”.
7. 천병식, 유한규, 1997, “토질실험 및 지반조사”, 구미서관.
8. 최상흘. 오희갑. 지정식. 엄태선., 무수석고-고로슬래그계의 수화반응 , Journal of Korean Ceramic Society, Vol. 17, No. 4, P. 217 -222(1997).
9. KS F 2314 흙의 일축 압축 시험 방법
10. KS F 2329 시험실에서 흙 시멘트의 일축 및 휨 강도 시험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법
11. KS F 2322 흙의 투수 시험 방법
12. Okumura,T. & Kobayashi,M., 1996, "Oyster shell-sand mixture as material of sand compaction piles, Proc. of The Second International Congress on Environmental Geotechnics, pp.863～pp.868.
13. Okumura,T. & Miyaji,Y., 2000, "Geo-material properties of wasted oyster shell-sand mixture and its application as material for sand compaction piles, Coastal Geotechnical Engineering in Practice, pp.675～pp.680.
14. 運輸省第二港灣建設局, “石卷港建設資材報告書”, 1993.
15. 羽臟美德, 水野, 後臟孝治, 出口敏明, "スラグーセッコウーセメント系 混合 セメントを用りたコンクリートの蒸氣養生特性", セメント技術年報, No. 32, P. 127-131(1978).
16. 依田彰彦. 横室隆, "高爐水碎 スラグ 碎砂を 用いた モルタルコンクリートの オトクレーブ 養生に 關する 硏究", 第2回 コンクリート工學 年次講演會論文集, Vol. 53, P. 53-56(1980).
17. Boynton, R.S. "Chemistry and technology of lime and limestone", John Wilsy & Sons, Inc. (1980)

18. Arai, Y., and Yasue, T. "Equilibrium and crystal structure in the system CaO-H_2O", Gypsum & Lime, No.171 (1981)
19. Eto, H. "Synthesis of high purity calcium car-bonate", Gypsum & Lime, No.219 (1989)
20. Hiroshi Nakahara, "Mollusc shell Microstructure, Suggestive to Materals Technology" Journal of Japan Society, Mechanical Engineers Vol.97 No.902 (1994)
21. Lee, In-Gon "A study on the environment of waste shell and its recycling method" Journal of the Korean sociation of Crystal Growth, Vol.10 No.2 (2000)
22. Kim, Pan-Chae "Shape control of calcium car-bonate prepared from shell resoureces" Journal of the Korean Association of Crystal Growth, Vol.10 No.2 (2000)
23. Lee, In-Gon and Kim, Pan-Chae "A study on the preparation of phosphatic calcium compounds using the shell resources" Journal of the Korean Association of Crystal Growth, Vol.10 No.2 (2000)

제 4 장 굴패각 혼합토의 모형 및 현장실험

제 1 절 서론

1. 연구배경

우리나라의 남해 및 서해 연해에서 이루어지는 굴양식은 주변 어민의 주요 소득원이 되고 있으나 양식된 굴의 출하에 있어서는 대부분의 경우 굴의 껍질을 제거한 후에 내용물만을 판매하고 있어 굴 집하장 주변에는 막대한 굴패각이 폐기물로서 남게 된다 (예: 거제시와 통영시의 경우 약30만 톤/년). 굴패각은 현재 굴 채묘 및 비료 등으로 일정량이 재활용되고 있기는 하지만 재활용의 양적 한계 및 처리시의 집하장 확보, 살포 후 토질응결 및 경제성 등의 문제점이 거론되어 재활용의 활성화가 지연되고 있어 양식되는 대부분의 굴패각은 재활용되지 않고 매립하거나 주변에 적재하는 형식으로 처리되고 있는 실정이다. 그러나 굴패각을 매립할 경우 매립지의 확보곤란은 물론 매립에 따른 매립지 처리와 누출수에 의한 환경피해 및 환경오염의 근원지가 되고 있으며, 주변 적재의 경우는 심각한 악취와 오염으로 혐오재료로써 인식됨은 물론 위생과 주거환경에 지대한 악영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편 굴패각을 매립하거나 주변에 적재할 경우에도 한계가 있으며, 경제적, 환경적 문제를 내포하고 있어 굴패각의 처리에 대단한 곤란을 겪고 있어 어민의 민원이 계속적으로 발생하고 있다.

최근 정부의 주도 아래 대규모 예산을 투자하여 칼슘공장 및 비료공장 등이 건설되어 굴패각의 재활용량을 증가시키려는 노력이 시도되고 있으나 투자비용에 비해 처리효율이 문제시되고 있어서 굴패각의 적절한 대량처리를 위한 새로운 해결 방안의 제시가 시급한 실정이라 할 수 있다. 특히 굴패각은 유기물을 부착하고 있으며 염분을 포함하고 있어 재활용하고자 할 경우 이에 대해 충분히 배려된 기법의 개발이 요구되고 있으며 기존의 처리비용에 경쟁할 수 있어야 할 것으로 판단된다.

굴패각의 처리에 대한 연구는 일본의 경우 연약지반 개량재, 샌드파일재, 안벽 등의 뒷채움재로서 활용하고자하는 연구가 추진된 바 있으며 특히 세계적으로 자원의 재활용에 대한 관심이 점점 증가하고 있어 해양폐기물에 대한 연구필요성은 날로 증가하고 있다. 한편 국내의 건설시장에 있어서는 건설재료의 부족 현상이 날로 심각한 문제점으로 대두되고 있으며 이에 대한 막대한 연구 투자가 실시되고 있다. 이러한 상호여건을 고려하여 볼 때 우리현실에 적합하고 실용적인 대안 개발의 하나로서 굴패각을 건설용 재료인 모래의 대체재로서 활용하기 위한 연구가 성공적으로 수행된다면 건설공사의 특성상 대량

처리가 가능한 장점이 있다. 또한 연약지반이 대부분 해안에 위치하고 있어서 저렴한 운반비용으로 폐자원을 처리할 수 있는 장점을 가지고 있다.

이와 같이 굴패각이 건설재료로서의 활용성이 입증될 경우 지금까지 굴패각의 매립 또는 적재에 필요한 경비의 절감은 물론 굴패각의 처리를 통한 2차적 수입원 가능성과 이에 따른 관련 산업의 발전 등으로 풍요로운 환경조성을 예상할 수 있으며 양식장 주변의 위생 개선으로 어민의 건강 향상에 기여할 수 있음은 물론 사회적 안정을 기대할 수 있다. 또한 산업폐기물의 재활용에 따른 자원의 중요성을 제고하는 풍토를 마련하게 된다.

2. 연구 목적 및 내용

연약지반 개량공법 중 시공실적도 많고 앞으로도 많은 현장에서 사용될 것으로 판단되는 Sand Compaction Pile(SCP)공법은 주된 재료로 일반적으로 모래를 사용하고 있다. 그러나 모래는 가격이 비싸고 수급 또한 용이하지 않기 때문에 대체할 수 있는 연구가 이루어져 오고 있다. 그리하여 본 연구는 굴패각의 모래 대체재로서의 활용성을 검토 및 검증하고 효율적으로 이용하기 위해서 필요한 기초자료를 제시하고자 시도되었다.

모래다짐 말뚝에 사용되는 모래의 대체재료로서 굴패각은 강도면에서 모래와 유사한 값을 나타내어 유용한 재료이나 굴패각을 작은 입자로 분쇄하여 사용할 경우 처리비용이 증대되며 굴패각의 입자가 크면 침하량이 증대되는 단점이 있다(한국해양연구소, 2000). 따라서 그 동안의 국내와 일본 등의 실험결과를 참고로 하여 모래와 굴패각을 일정한 혼합비로 조성하여 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

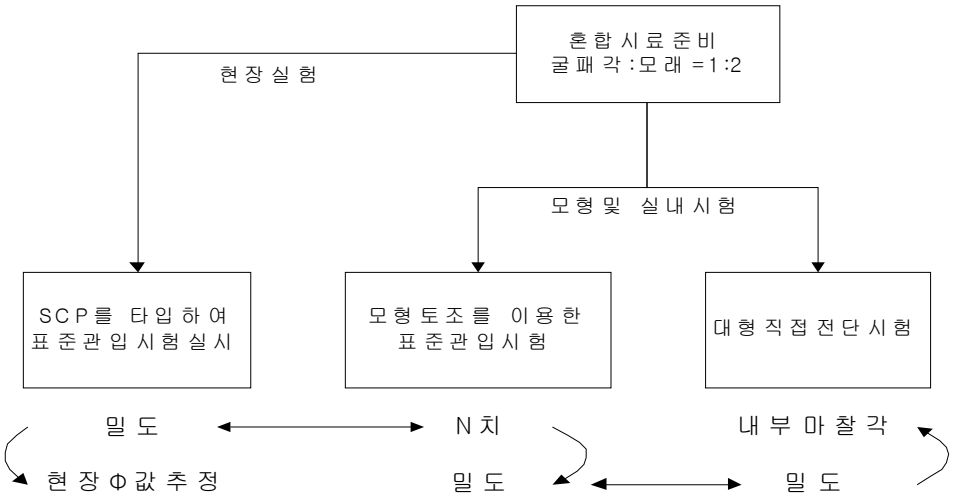


그림 1.1.1 실험과정과 강도정수 결정

본 연구에서는 굴패각과 모래를 혼합한 혼합재의 시료를 조성하여 대형직접전단시험을 실시하여 전단강도를 구하고 같은 단위체적중량으로 모형토조 내에서 다짐정도와 상재압을 달리하여 표준관입시험을 실시하여 표준관입시험치와 전단강도를 상관시킨다. 그리고 현장에서 SCP장비로 혼합재에 의한 말뚝을 조성하고 표준관입시험을 실시하여 사용하중에 대한 침하량 검토 등을 실시한다. 현장에서의 표준관입시험 결과에 대해 상재하중에 의한 고려를 위하여 등가 환산식을 이용한 등가N치를 구하여 실내시험 및 모형토조시험 결과와 비교한다. 등가N치와 토조시험 및 대형직접전단시험 결과를 이용하여 간접적으로 현장 굴패각혼합말뚝의 강도를 추정할 수 있다. 위에 설명한 과정을 그림으로 나타내면 다음과 같다.

제 2 절 굴패각 혼합토의 이론적 배경

1. 굴패각의 물리적 특성

굴패각의 건설재료로서의 물리적 특성을 조사하기 위하여, 기존의 문헌자료 및 연구보고서를 통해 보고된 특성을 비교 검토하여 다음과 같이 정리하였다.

가. 1992년도 일본 이시노마키항의 건설자재활용조사보고서(1993)
나. 한국해양연구원(KORDI)의 굴패각을 혼합한 특수콘크리트 개발(2000)

1) 시험시료 및 시험방법

그림 2.2.1에 굴패각 시료의 입도는, Φ 30 mm 정도로 파쇄 굴패각의 시료(일본)및 최대입경이 20 mm를 통과한 시료(한국해양연구원)를 나타냈다. 모래와 굴패각의 혼합체적비율이 2 : 1인 혼합재의 입도분포도 나타내었다.

굴패각, 모래, 세사 및 혼합재에 대하여 각각의 실내시험을 실시하였으며, 한국해양연구원는 파쇄한 시료 중에 최대입경이 20 mm를 통과한 시료에 대해서 나타내었다.

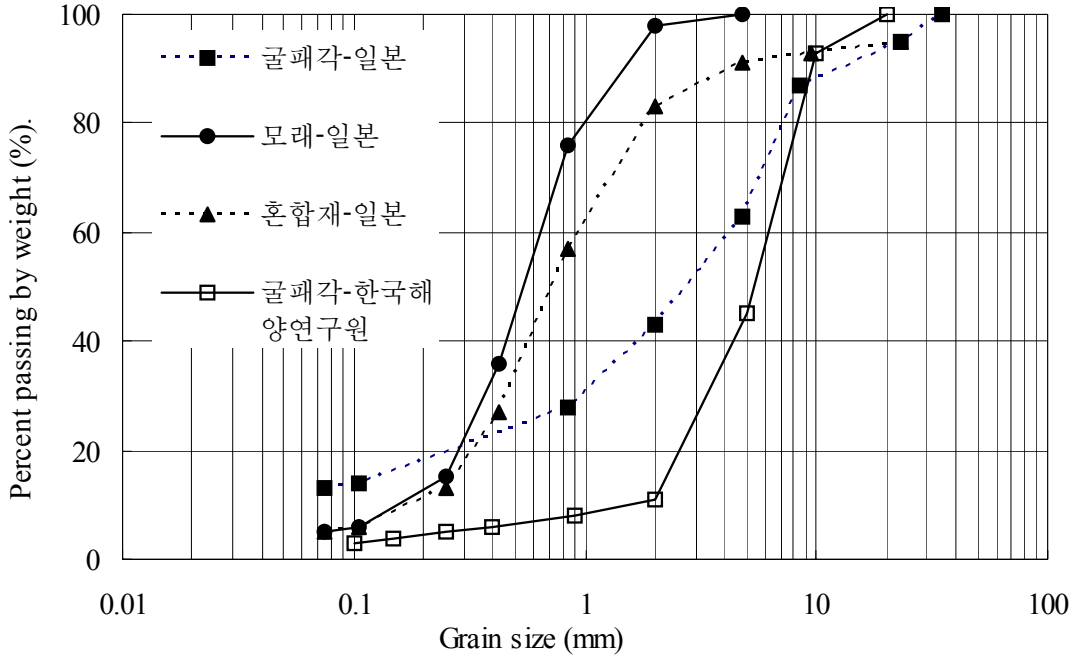


그림 2.2.1 각 시료의 입도분포곡선

시료에 대한 각각의 시험방법은 표 2.2.1에 나타내었다. 굴패각 시료는 간극이 크고 입자가 크기 때문에 시험 과정 중 파쇄가 발생하기도 하지만 각각의 실험은 통상적인 시험

의 기본적 규정을 적용하여 실시되었다.

표 2.2.1 굴패각 실험 적용조건의 비교

분 류	일 본			한국해양연구원
	모래	굴패각	혼합재(1:2)	굴패각
습윤단위중량	대형용기 사용하여 느슨한 상태의 측정			-
건조단위중량				
비중	JISA1202	대형용기 사용하여 JISA1202에 준하여 실시		KSF2308
함수비	JISA1203			KSF2306
입도분포	JISA1204			-
최대최소 단위중량	대형장치를 사용하여 JSFT161에 준하여 실시			-

2) 시험결과 및 비교

일본과 한국해양연구원의 시료의 차이 및 각각의 시험 방법으로 인하여, 실험결과 값의 차이가 어느 정도 발생하고 있다. 1992년도 일본 이시노마키항 보고서의 굴패각의 비중은 2.702이고 1991년도의 보고서에는 D_{max} = 30 mm인 경우 2.174로 나타나고 있는데, 한국해양연구소의 2.35와는 비교적 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 굴패각의 입경에 따라 비중값이 달라지기 때문이며, 1992년도 이시노마키항 보고서(1993)의 비중값은 굴패각의 입경이 작을 때이며, 주성분인 탄산칼슘의 비중 2.71에 접근하는 것으로 나타났다.

단위중량값은 약간의 차이를 보이지만 γ_{dmax} / γ_{dmin} 비는 거의 같게 나타나고 있으며 내부마찰각의 범위 또한 비슷하게 나타나고 있다. 압밀에 의한 침하량을 예측할 수 있는 압축지수는 1992년도 일본 이시노마키항 보고서의 경우는 굴패각과 모래의 혼입비율 및 다짐정도에 따라 0.750 ~ 0.033범위로 나타나고 있으며, 한국해양연구원의 보고서(2000)에는 굴패각의 파쇄 정도에 따라 파쇄가 많이 될 수록 일본과 한국해양연구원의 시험결과를 표 2.2.2에 정리하였다.

표 2.2.2 굴패각 실험 결과의 비교

분 류	일 본			해양연구원
	굴패각	모래	혼합재	굴패각
γ_t (g/cm^3)	0.907	1.281	1.159	-
γ_t (g/cm^3)	0.731	1.112	1.011	-
비중 G_s	2.702	2.698	2.699	2.35
함수비 ω_n (%)	24.0	15.2	14.6	6.5
γ_{dmax} (g/cm^3)	1.081	1.550	1.452	0.948
γ_{dmin} (g/cm^3)	0.804	1.263	1.108	0.706
$\gamma_{dmax}/\gamma_{dmin}$	1.34	1.23	1.31	1.34
C_c	-	0.044	0.750~0.175	0.305~0.248
내부마찰각(°)	25 ~ 55	-	35 ~ 50	35 ~ 42

2. 표준관입시험 (Standard Penetration Test)

1) 표준관입시험의 정의

Raymond의 spoon sampler에 착안하여 Terzaghi와 Peck이 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)이라고 명명하고 타격횟수와 각종 토성과의 관계를 많은 자료로부터 경험적으로 도출하여 기초구조물의 설계 자료로 이용할 수 있도록 제시하였다.

“Soil Mechanics in Engineering Practice” (1948)에서는 표준관입시험에 의한 N치와 흙의성질, 지반의 지지력등 실제적 이용법을 발표한 이래 일반에 널리 알려지게 되었으며, 동시에 흙의 시료를 육안으로 볼 수 있다는 장점 때문에 널리 사용되게 되었다.

1970년대 들어오면서 DeMello, Schmertmann, Miki 등에 의해 시각을 달리하는 활발한 연구들이 이루어졌으며, 표준관입시험과 흙의 동적인 거동을 관련하여, 횡파의 속도나 흙의 액상화 등에 관련된 연구도 이루어졌다.

현재 우리나라에 있어서는 KSF2318로 규정되어 있으며, ASTM, JIS, Terzaghi & Peck의 원안과는 다소 규격상의 차이가 있으나, 실용상 동일한 결과를 얻을 수 있을 정도의 근소한 차이다.

KSF2318에 의하면 표준관입시험은 “스플릿 배럴 샘플러를 지반에 관입시켜 그 저항치

를 기록하고, 동시에 토질 분류시험 및 실내시험을 위한 대표적 시료를 채취하는 방법"이라고 규정되어 있으며, N치는 중량 64 kg의 추를 76 cm높이에서 자유낙하시켜 관입시험용 샘플러를 지반에 30 cm관입시키는데 필요한 타격횟수로 정의되어 있다(ICSMFE : W = 63.5 ± 0.5 kg, h = 76 ± 2 cm).

2) N치의 수정 및 해석

현장에서 계측된 N치는 흙의 상태와 Rod길이 및 상재압에 대하여 적절히 수정하여 설계용 N값으로 사용하게 되는데, 이들의 수정에 관한 여러 가지 제안들을 분류하여 정리하면 다음의 표 2.2.3과 같다.

표 2.2.3에서 알 수 있듯이 N치는 상재압의 변화에 따라 N치가 변화하게 된다. N치가 상재압에 의해서 변화하는 것은 많은 연구에 의해 실내실험으로 확인되었다. 그림 2.2.2는 그 중에서 가장 많이 알려져 있는 것으로 Gibbs & Holtz의 제안식을 도식한 것으로, 동일한 상대밀도에서도 상재압에 따라 N치가 크게 변화하는 것을 알 수 있다.

표 2.2.3 흙의 상태, Rod길이 및 상재압을 고려한 수정N값

수정조건	제안식	제안자	비고
흙의 상태수정	$N' = 15 + (N-15)/2$ N=N` (N<15인 경우)	Terzaghi & Peck (1948)	N: 측정치 N`: 흙의상태에 따른 수정치 $N``$: Rod길이에 따른 수정치 X : rod 길이(m)
Rod길이 수정	$N`` = N`(1-X/200)$	Yoshinaka (1967)	
상재압에 대한 수정	$(N)_{0.66} = \frac{N - 1.828(\sigma_v` - 0.66)}{0.399(\sigma_v` - 0.66) + 1}$ $N_1 = [1 - 1.25\log(\sigma_0 / \sigma_1]N$ $N_1 = N \times 0.77\log(20/\sigma_v')$	항만기술기준 (일본, 1986) Gibbs&Holtz(1957) Peck(1974)	$2 \le (N)_{0.66} \le 40$ $0 \le \sigma_v'(kgf/cm^2) \le 3$ $(N)_{0.66}, N_1$:수정치 N: 측정치

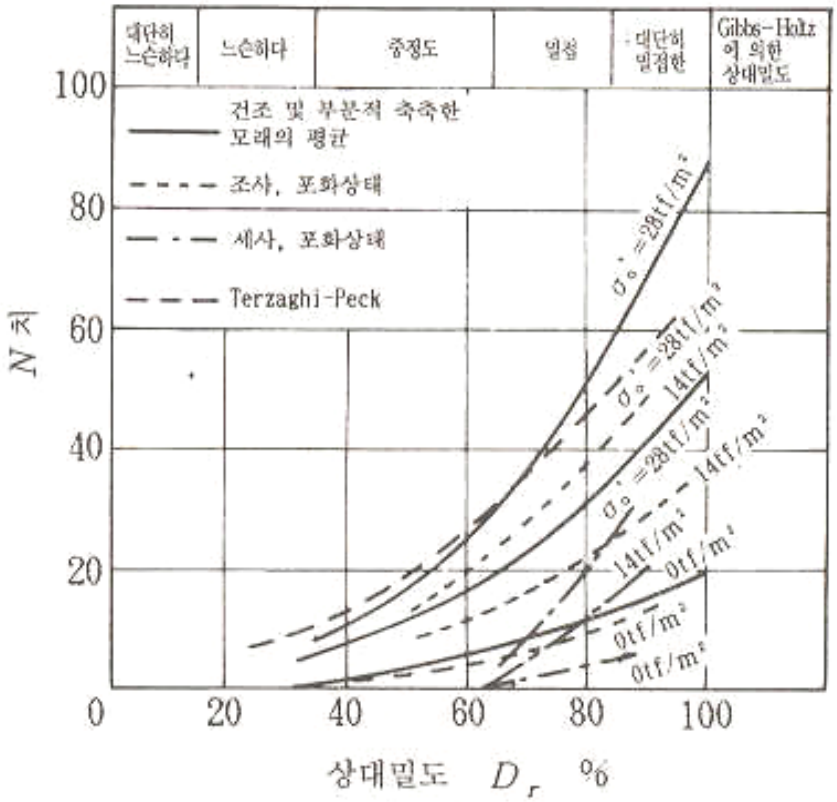


그림 2.2.2 동일한 상대밀도에서의 상재압과 N치의 관계

표준관입시험은 보링(Boring)과 동시에 이루어지므로, 그 결과로 얻어지는 토층의 판별과 N치 및 시료의 분류특성 등의 자료를 이용하여, 여러 가지 사항을 추정 또는 산정할 수 있는 방법들이 제안되어 있다. 특히 많이 이용되고 있는 것이 N치와 모래의 내부마찰각 및 지지력의 관계이지만, 같은 N치라도 토질에 따라 공학적 성질이 매우 다른 것에는 주의할 필요가 있다. 표 2.2.4에는 N값으로부터 추정할 수 있는 물성치를 나타내었다.

표 2.2.4 N치로부터 추정할 수 있는 토질의 물성치

사질지반	점성토 지반	일반사항
상대밀도 내부마찰각 지반의 지지력 액상화 가능성	Consistency 일축압축강도	지반의 극한지지력 말뚝의 연직지지력 지반반력계수 횡파속도

3. 모래다짐말뚝공법

1) 모래다짐말뚝의 개요

지반개량 공법의 원리에는 치환, 압밀배수, 다짐, 고결, 보강 등이 있는데 모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile, SCP)공법은 다짐과 보강 및 압밀배수를 기본원리로 느슨한 모래나 점성토 연약지반에 큰 지름의 모래 말뚝을 다지면서 압입하여 지중에 조성하여 지반을 개량하는 공법이다. 모래지반의 개량목적은 지지력 증가, 침하저감, 액상화 방지, 수평저항 증가 등을 들 수 있으며, 점성토 지반에서는 지지력 증가, 압밀시간 단축, 침하량 저감을 목적으로 한다.

표 2.2.5 SCP공법과 각종 배수공법의 비교

공법	공법의 효과						시공					
	침하대책		안정대책									
	압밀촉진	침하감소	전단변형억제	강도증가촉진	활동저항	액상화방지	대상토질	개량효과	공기	공비	시공한계	표준모래말뚝직경(mm)
샌드드레인	●	X	○	○	○	X	점성토	○	중	보통	타설깊이:30m	400 - 500
모래다짐말뚝	●	●	○	○	●	○	점성토 사질토	●	단 - 중	약간 높음	타설깊이:30m	700
팩드레인	●	X	○	○	X	X	점성토	○	중	보통	타설깊이:20m	120
페이퍼드레인	●	X	○	○	X	X	점성토	○	중	보통	타설깊이:20m	50

SCP 공법은 일본에서 실용화 된 것은 1956년이며, 그 후 1960년에 진동식 시공법이 개발됨으로써 시공능률 향상과 해상시공법 적용이 가능해 짐에 따라 육상과 해상의 연약지

반 개량공법으로 많이 적용되고 있다. 우리나라에서도 1984년 광양제철소 기초지반 조성 시 모래다짐말뚝과 샌드드레인(sand drain)을 병용한 지반개량공법을 처음 채택한 이래 고속도로·교량 기초지반 개량, 항만 구조물 등의 기초지반 개량공법 등에 널리 사용되고 있다.

SCP공법과 유사한 공법으로는 샌드드레인(sand drain), 팩드레인(pack drain), 페이퍼드레인(paper drain)공법 및 stone column공법 등이 있으며 주로 점성토 지반의 압밀촉진 공법으로만 사용되는 각종 배수공법과 SCP공법을 종합 비교하면 표 2.2.5와 같다.

2) 모래다짐말뚝(SCP)공법의 개념

모래지반인 경우 조밀화에 의한 원지반 강도증가는 명확하지 않으며, 점성토에 적용되었을 때에는 점성토와 모래말뚝으로 이루어진 복합지반으로서의 효과를 고려한 이론에 의하여 설명되고 있다. 모래다짐말뚝이 연약한 점성토층에 다수 조성되어 이루어진 복합지반위에 하중이 재하된 경우 점성토와 압축 조성된 모래말뚝과는 그 물리적, 역학적 성질이 서로 다르기 때문에 각각 분담하는 응력이 다르며, 이는 모래말뚝 쪽으로 응력이 분담되는 원인이 된다. 이 때문에 점성토에 걸리는 응력이 대폭 감소하게 되고, 지지력 증대, 침하감소 등의 효과가 나타나게 된다.

복합지반은 그림 2.2.3과 같이 복합지반위에 평균응력 σ가 재하되어 지반반력으로 말뚝에 σ_s, 점성토에 σ_c의 응력이 발생하고, 각각의 면적A_s, A_c의 범위 내에서 응력이 일정하다고 하면 다음 식이 얻어진다.

$$\sigma A = \sigma_S A_S + \sigma_C A_C \tag{2.2.1}$$

응력분담비 ($m = \sigma_s / \sigma_c$)를 이용하여 이 식을 변형하면,

$$\sigma A = m\sigma_c A_s + \sigma_c A_c = \sigma_c (mA_s + A_c) \tag{2.2.2}$$

식(2.2.1)과 파일 치환율 ($a_s = A_s / A$)로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\sigma_C}{\sigma} = \frac{A}{mA_s + A_c} = \frac{1}{(m-1)a_s + 1} = \mu_c \tag{2.2.3}$$

$$\frac{\sigma_S}{\sigma} = \frac{mA}{mA_s + A_c} = \frac{m}{(m-1)a_s + 1} = \mu_s \qquad (2.2.4)$$

여기서 , μ_S: 응력집중계수

μ_C: 응력저감계수 단, $\mu_S + \mu_C = 1$

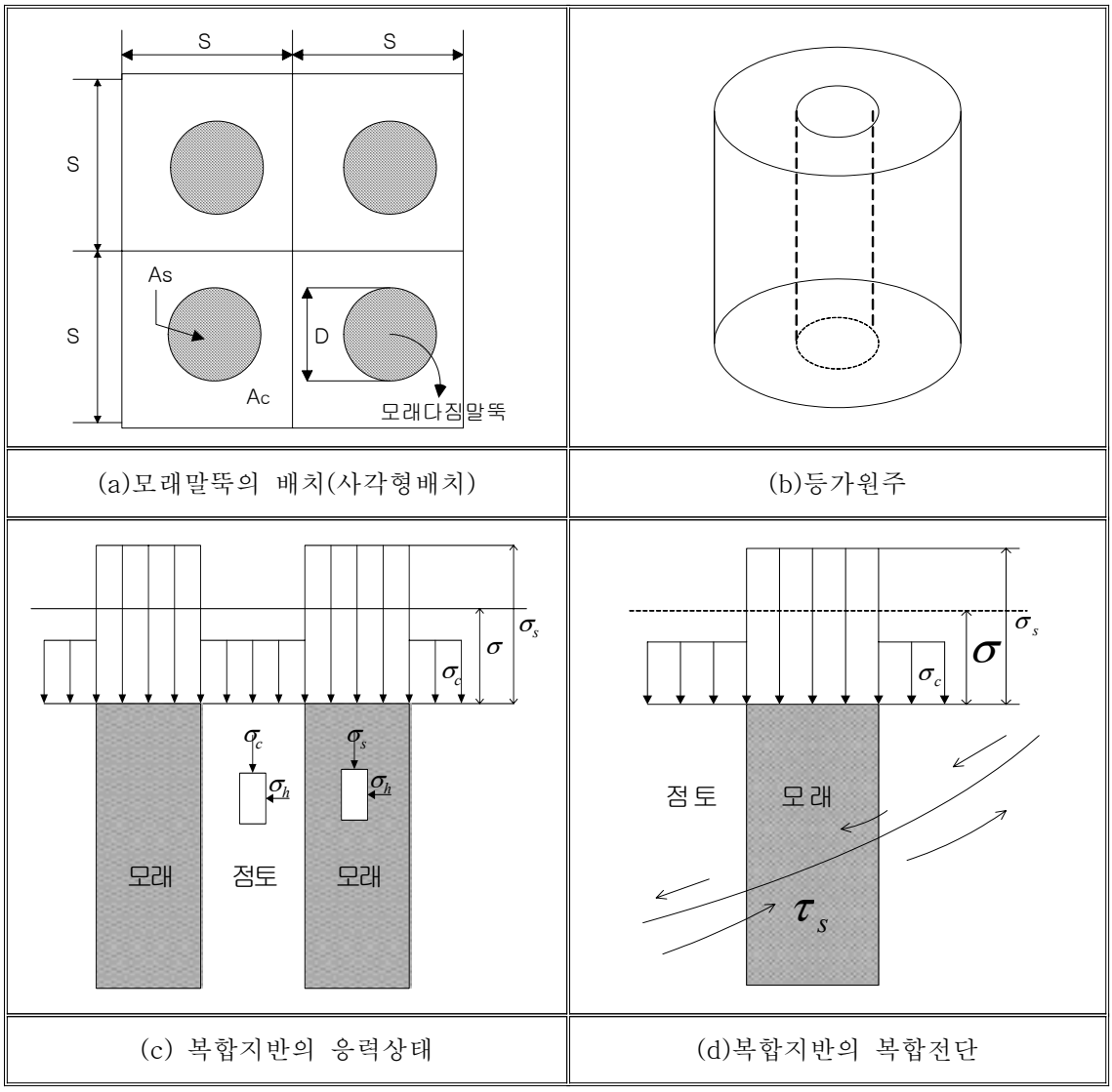


그림 2.2.3 복합지반의 기본 개념

식 (2.2.3)과 식 (2.2.4)는 m > 1, a_s > 0일 때, 파일에 응력이 집중하여 점성토에 가해지는 응력은 경감되는 것으로 나타난다. 즉, 응력분담은 SCP의 복합지반거동(지지력, 안정해석, 침하)에 매우 중요한 요소이며, 이와 같은 고려에서 현재 일반적으로 실시되고 있는 설계방법이 성립된다고 하면 복합지반에 대한 설계계산이 가능해 진다.

그림 2.2.4 과 표 2.2.6에는 일반적으로 사용하고 있는 치환율과 응력분담비의 관계를 나타내었다.

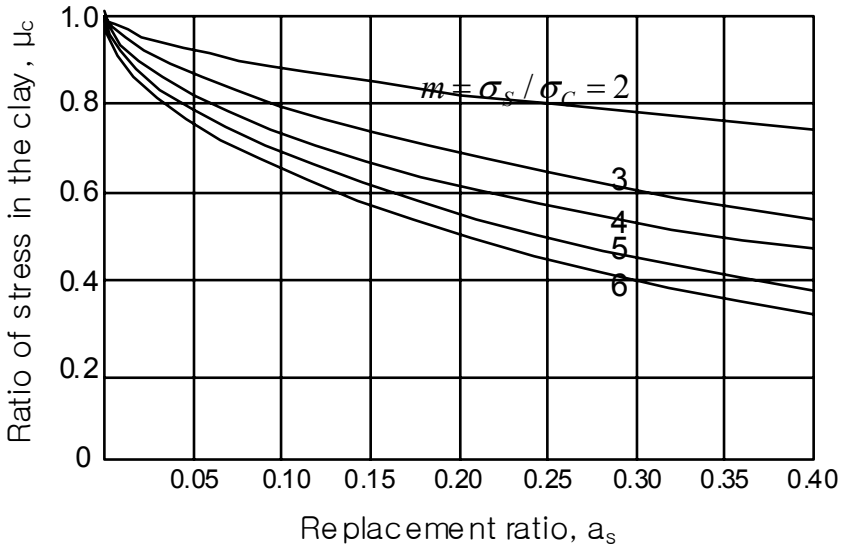


그림 2.2.4 치환율과 응력분담비의 관계

표 2.2.6 치환율에 따른 모래다짐말뚝의 내부마찰각과 응력분담비의 관계

치환율	모래다짐말뚝의 내부마찰각(ϕ_s)	응력분담비(m)
0~0.4	30°	3
0.4~0.7	30°	2
0.7~	30~35°	1

SCP 복합지반의 안정계산방법은 Mohr-Columb의 전단강도 공식을 기본으로 복합지반의 조건을 고려한 원호활동 또는 선형활동 해석법으로 검토하는 방법이 일반적이다. 원호활동에 대한 안정해석은 상용화된 컴퓨터 프로그램으로 수행되며, 해석프로그램을 복합지반에 사용하기 위해서는 입력데이터를 사전에 별도로 가공하여 준비해야 한다.

원호 활동의 경우 그림 2.2.4(d)에서와 같이 깊이 Z에서 수평면과 θ의 각을 이루는 전단면이 전단저항을 발휘하는 것으로 하며, 모래와 점토지반의 치환율과 응력분담비 및 압밀에 따른 점토의 전단강도 증가를 고려하여 복합지반의 전단저항(τ_{sc})을 구할 수 있으며 다음과 같이 표 2.2.7에 정리하였다.

표 2.2.7 안정해석에 있어서의 복합지반의 전단저항

①복합지반

$$\tau_{sc} = (1-a_s)(C_u + \Delta C) + (\gamma_S^{'} \cdot z + \mu_S \cdot \sigma_z) \cdot a_s \cdot \tan\phi_s \cdot \cos^2\theta$$

$$\Delta C = c/p(\gamma_c^{'} \cdot z + \mu_c \cdot \sigma_Z - p_c) \cdot U$$

②사질지반(c, ϕ_m)을 갖는 지반

$$\tau_{sc} = (1-a_s)(C_u + \Delta C) + (\gamma_m^{'} \cdot z + \sigma_z) \cdot \mu_s \cdot a_s \cdot \tan\phi_s \cdot \cos^2\theta$$

③ϕ_m 을 가지는 모래지반

$$\tau_{sc} = (\gamma_m^{'} \cdot z + \sigma_z) \cdot \mu_s \cdot a_s \cdot \tan\phi_s \cdot \cos^2\theta$$

τ_{SC} : 개량지반의 전단저항, C_u :점성토의 점착력

c/p : 점착력 증가계수 (=0.11+0.0037PI), $\gamma_s^{'}$: 모래의 수중단위체적중량

$\gamma_m^{'}$:개량지반의 평균 수중단위체적중량(=$(1-a_s)\gamma_c^{'} + a_s\gamma_s^{'}$), μ_S, μ_C :응력집중(저감)계수

$\mu_C = \frac{1}{(m-1)a_s + 1}$ $\mu_S = \frac{m}{(m-1)a_s + 1}$, m:응력분담비, p_c :선행압밀응력

SCP개량지반의 전단저항의 고려방법	m	$\phi_S(°)$	$\gamma_S^{'}(t/m^3)$	안전율	비 고
①복합지반	3 ~ 5 (모래말뚝:3 자갈말뚝:4)	30°(모래) ~ 35°(자갈)	1.0	1.2 ~ 1.3	· 육상공사에서의 적용예가 많다. ·모든치환율에 적용 가능
②사질지반(c, ϕ_m)을 갖는 지반	1	30° ~ 33.4°	1.0	1.1이상	$\cdot a_S \rangle 0.3$
	2			1.2	
③ϕ_m 을 가지는 모래지반	1	34° ~ 35°	1.0	1.25~1.30	$\cdot a_S \geq 0.7$
	2	30°			

ϕ_s :모래말뚝의 내부마찰각, ϕ_m :개량지반의 평균적인 내부 마찰각(=$\tan^{-1}(a_s \cdot \mu_s \cdot \tan\phi_s)$)

a_s :치환율 , ΔC :압밀에 따른 증가 점착력 , Z:흙피복깊이

σ_z :재하에 의한 응력증가, U:압밀도 θ :미끄럼면이 수평면과 이루는 각

*표 중의 단위체적중량은 개량지반이 수면아래에 있을때의 수중단위 체적중량으로 표시. 개량지반이 수면 위에 있는 경우는, 습윤단위체적중량을 사용한다.

3) 모래다짐말뚝의 시공방법

모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile 이하 SCP)공법은 시공은, 바이브로해머 (vibro hammer)로서 케이싱 파이프를 지중에 관입하고, 케이싱 파이프를 통해서 모래를 공급하는 것으로 실시된다. 시공방법을 그림 2.2.5에 나타내었다.

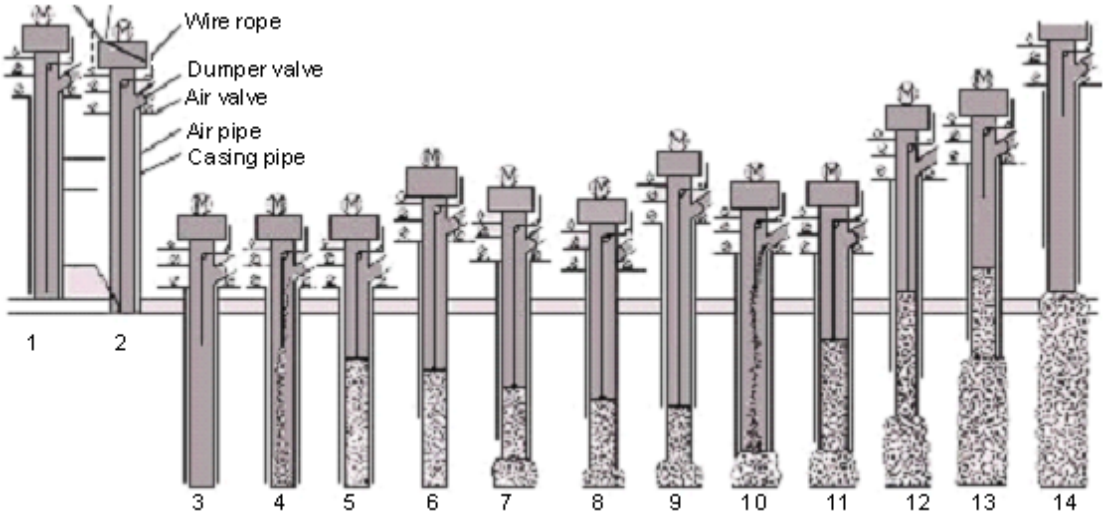


그림 2.2.5 모래다짐말뚝의 시공단계

1. 타설위치에 Casing을 설치, Casing의 선단을 지표면과 동일하게 하고 사면계 및 심도계를 '0'점에 일치시킨다

2. Hammer를 작동하여 타설전류계 심도계를 확인하며 타설

3. Casing이 지면으로부터 5m정도 관입되었을 때 사면추를 G.L로부터 3m정도내려 정지

4. Casing내의 압력이 떨어지도록 Valve를 열고 압력이 떨어지면 모래투입.

5. 사면계를 계측상태로 둠.

6. Casing인발개시, 사면계 지시침을 보고 조금씩 내려가는 것을 확인하면서 인발

7. Casing 내의 사면도가 1.5m정도

되면 인발멈춤

8~9. 사면계 추를 감아올리고 모래투입, 사면계 추를 내려 다시 계측 상태

12. 사면계 지시침을 확인하면서 인발(규정길이 3m)

13. 6~11과정을 반복

14. 심도계 지시침이 지표면 1m정도 가까워지면 Casing내의 압기 Valve를 닫고 Air jet 정지, Casing선단이 지표면에서 완전히 격리될 때까지 인발.

4. 현장타설 굴패각다짐말뚝의 마찰각 및 침하량 검토방법

연약지반 현장에서 굴패각과 모래를 혼합한 시료를 SCP타설 장비를 이용하여 타입한다. 타입전에 입도분포시험을 실시하고, 타입후 SCP시험을 실시하여 각 심도별로 굴패각 시료를 채취하여 입도분포 시험을 실시한다. SCP결과에 의한 N치 및 사용한 시료의 무게와 타입체적에 의한 γ_{dc}에 의해 현장에서의 굴패각 혼합재 시료에 대한 내부마찰각을 추정한다. 그리고 타입전후의 입도분포변화를 비교한다.

현장에서의 상재하중과 N치를 이용하여 전단시험 결과와 토조시험 결과를 종합적으로, 현장에서의 값을 추정한다.

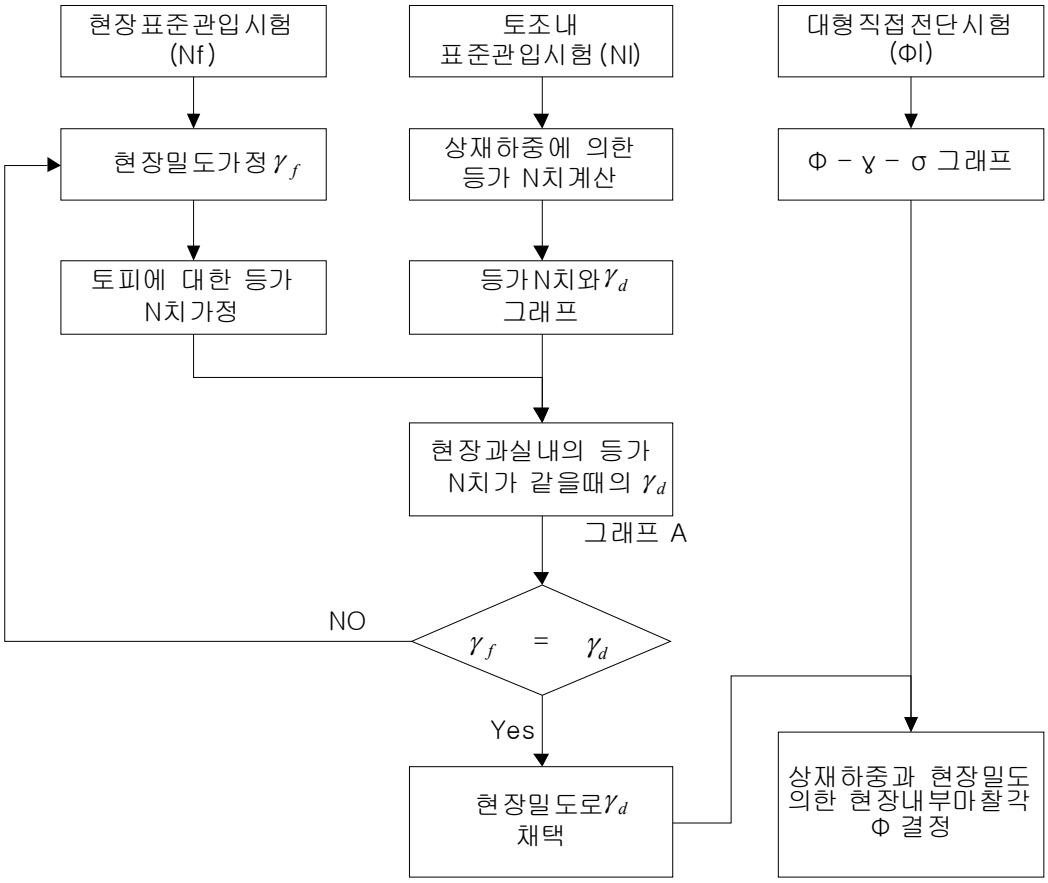


그림 2.2.6 현장타설 굴패각다짐말뚝의 내부마찰각 추정

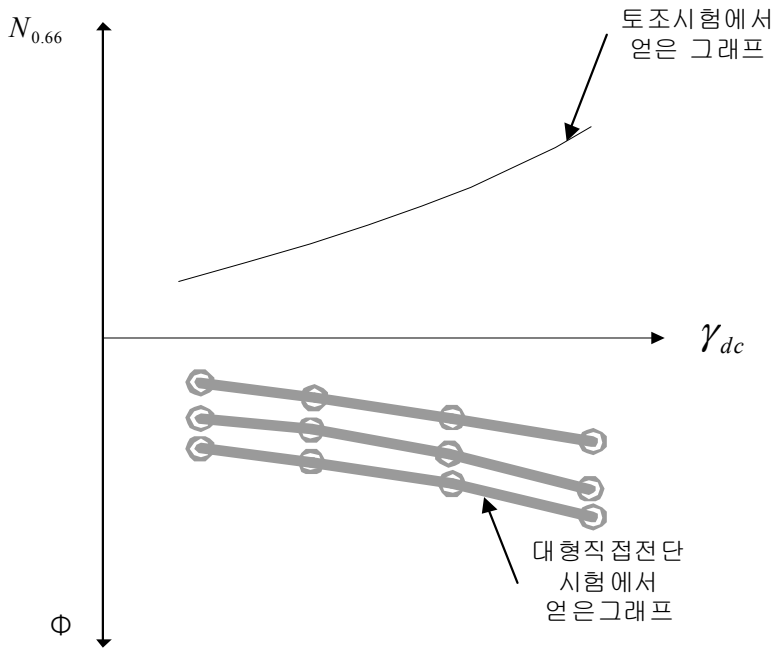


그림 2.2.7 타입체적에 의한 N치와 내부마찰각의 비교

제 3 절 굴패각 혼합토의 모형 및 현장시험

1. 시험개요

본 연구에 사용된 시료는 통영지역에서 운반된 굴패각과 인천송도 모래를 각각 자연상태에서 건조시켜 사용하였다. 굴패각의 입경은 30 mm정도가 되는 것을 사용하였으며, 모래의 경우 원사나 세사의 구분은 없는 것으로 생각하여 실질적으로 굴패각과 모래의 혼합비율은 중량비에 의한 1 : 2의 비율로 하였다.

모래 및 혼합재에 대해서 체분석 및 함수비시험을 실시하여 그 결과를 그림 3.1.1과 표 3.1.1에 나타내었다. 각각의 자연건조상태시료를 다음의 그림과 같이 큰 통에 시료를 중량비로 준비한 후 최대한 균질하게 교반을 실시하여 그림 3.1.2및 그림 3.1.3과 같이 준비하여 시험을 실시하였다. 시료를 3개 층에 나누어 각 층마다 중량비로 준비하여 혼합하였으며 각층은 3회에 나누어서 시료의 초기단위체적중량을 조성하였다. 시료 초기 단위체적중량을 3종류로 하여, 각각에 대하여 수직응력을 가하여 압밀을 실시하였으며 실험종료후의 시료를 채취하여 입도분포시험 및 함수비시험을 실시하였다.

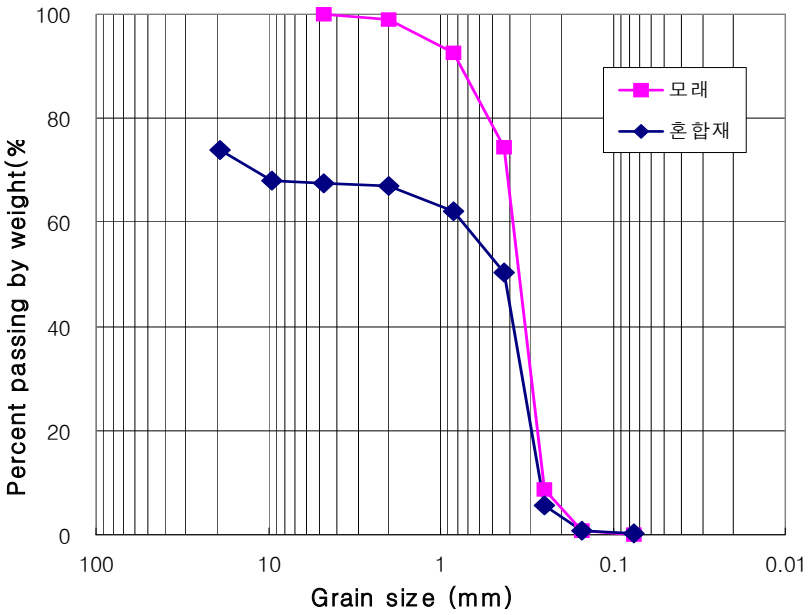


그림 3.1.1 모래와 굴패각혼합토의 입도분포

표 3.1.1 모래와 굴패각혼합토의 물리적 특성

분 류	자연건조 함수비 (%)	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	C_u	C_g
모래	3	0.28	0.37	1.07	1.07
모래&굴패각 혼합재	1.5	0.29	0.325	2.48	0.59

그림 3.1.2 대형직접전단시험의 시료준비

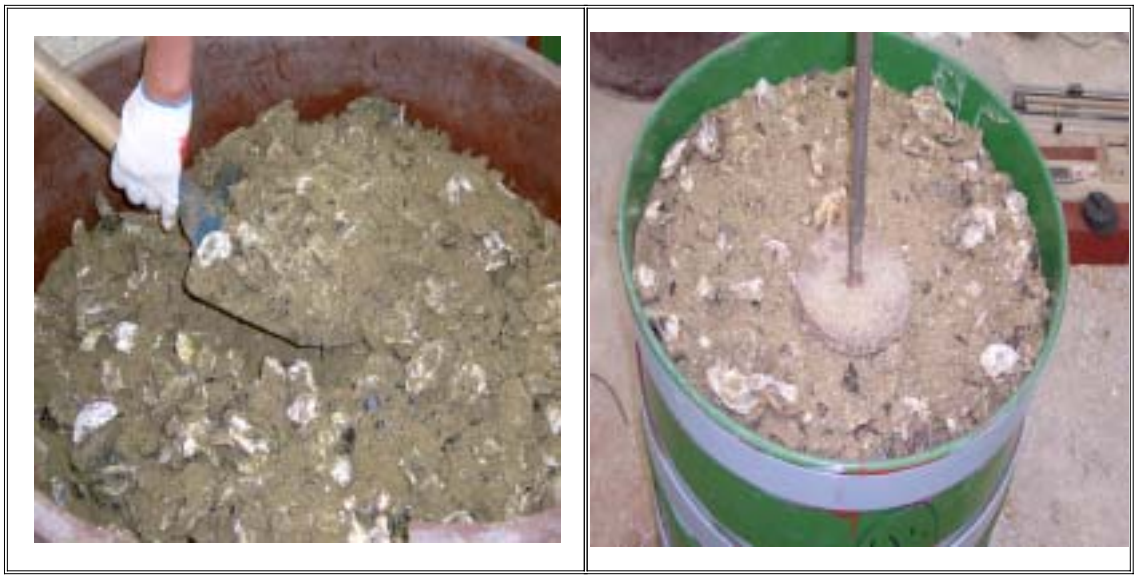


그림 3.1.3 SPT의 시료준비

2. 굴패각 혼합토의 물리/역학적 특성 시험

1) 대형직접전단시험

시료 초기 단위체적중량을 3종류로 하여 각각에 대하여 전단상자에서 구속압축시험을 수행한 후에 수직응력 0.4 ,0.8, 1.6, 3.2 kg/cm^{2}에 대하여 대형직접전단시험을 실시하였으며 실험조건은 표 3.2.1과 같다.

본 연구에서는 굴패각의 전단강도를 알기위해서 KSF2343에 의거하여 대형직접전단시험을 실시하였다. 대형직접전단시험기의 그림 및 제원은 다음과 같으며 전단속도는 변형율 제어방법으로 평균 0.8 mm/min (0.78 ~ 0.82 mm/min)로 실시하였다

표 3.2.1 대형직접전단실험의 시험조건

초기단위체적중량 (자연함수비) (g/cm^3)	수직하중 (kg/cm^2)	압밀후 건조단위체적중량 (g/cm^3)	시료분류
γ_t=1.05	0.4	1.05	DS1(0.4)
	0.8	1.08	DS1(0.8)
	1.6	1.11	DS1(1.6)
γ_t=1.20	3.2	1.14	DS1(3.2)
	0.4	1.20	DS2(0.4)
	0.8	1.21	DS2(0.8)
γ_t=1.40	1.6	1.25	DS2(1.6)
	3.2	1.28	DS2(3.2)
	0.4	1.38	DS3(0.4)
	0.8	1.40	DS3(0.8)
	1.6	1.43	DS3(1.6)
	3.2	1.44	DS3(3.2)

.

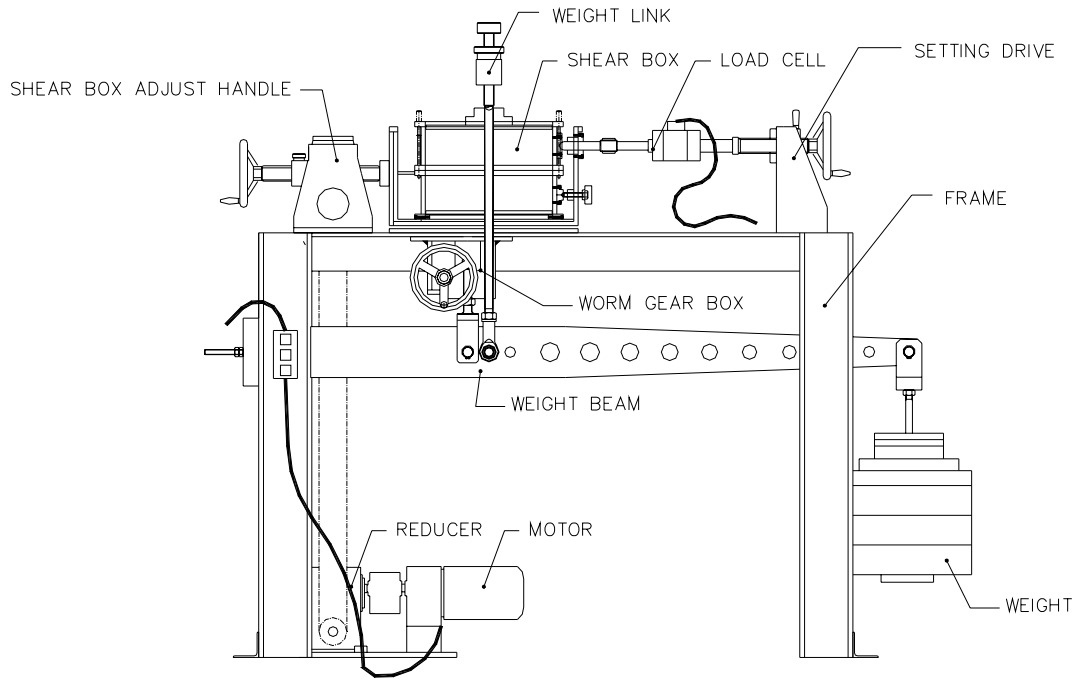


그림 3.2.1 대형직접전단실험기와 제원

항 목		내 용
전단상자	단면적(cm)	30×30
	높이(cm)	19.5
최대수직하중(kg/cm^2)		3.2
평균전단속도(mm/min)		0.8

직접전단시험기는 수직하중이 가해진 상태에서 수평변위의 속도를 일정하게 유지하며 전단응력을 가하는 변형율 제어 방법을 일반적으로 사용한다. 그러나 대형직접전단시험에서는 초기에 정한 수평변형률이 일정하게 유지되지 못하고 그림 3.2.2 같이 수평변형 증가에 따라 변화하게 된다(Head,1994). 그러므로 전단시험 과정 중 평균변형속도(OA-line)를 유지하기 위하여 시험 과정 중 수평변형속도를 지속적으로 체크하여 그림의 P점처럼 수평변위속도가 OA-line의 아래에 존재하면 속도를 증가시키고, Q점과 같은 경우는 반대로 수평변위속도를 감소시켜 미리 계산된 평균변형속도를 유지해야 한다. 본 시험에서는 변형속도 0.78 ~ 0.82 mm/min 범위에서 평균 변형속도 0.8 mm/min로 실시하였다.

최대전단응력은 수평변위가 증가하여도 더 이상 전단응력이 증가하지 않거나 감소할 경우 첨두값을 최대전단응력으로 결정하였고, 첨두점이 나타나지 않고 변형율이 증가할수록 전단응력이 증가하는 경우에는 수평변형율 10%일때인 수평변위 30mm일때의 값을 최대전단응력으로 정하였다.

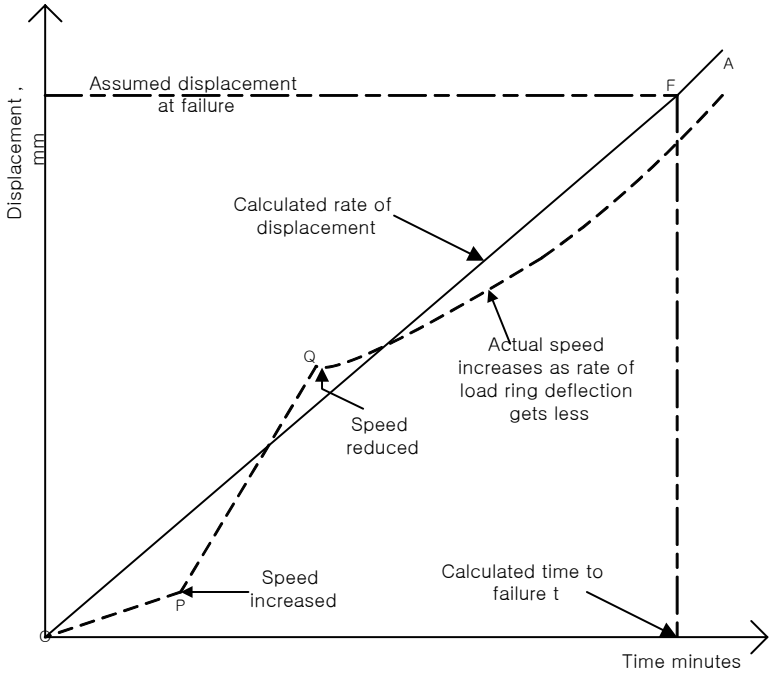


그림 3.2.2 시간에 따른 변형속도의 변화곡선

2) 토조내의 표준관입시험(SPT)

굴패각과 모래의 무게비로 혼합비 1 : 2로 준비하여 초기단위체적중량 3종류로 조성하여 자연건조상태와 포화상태에 대하여 상재하중을 가하여 각각의 표준관입시험을 통한 N치를 측정하였으며 실험조건은 표 3.2.2와 같다.

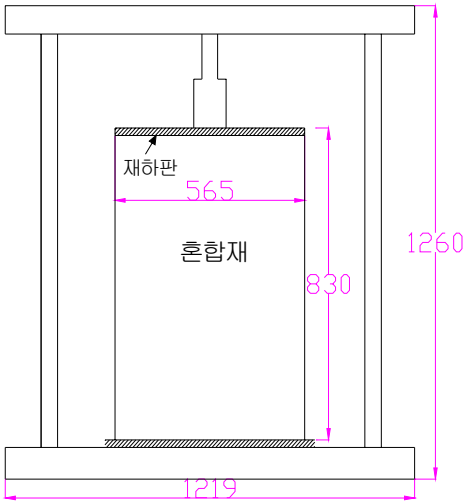
토조의 체적에 대한 시료무게를 사용하여 단위체적중량을 각각 계산하여 초기단위체적중량을 구하였으며 수평변위의 구속에 의하여 수평방향의 팽창은 없다고 가정하고 압밀하중을 가한후 수직 침하량을 측정하여 압밀후의 단위체적중량을 계산하였다.

포화시료의 경우는 시료 조성후 밸브를 닫고 물을 부어서 물이 더 이상 흡수되지 않을 때까지 방치시켜 만들었다. 또한 각각의 실험종료 후 시료를 채취하여 함수비를 측정하고 SPT sampler의 시료 및 토조에서 시료를 채취하여 체분석 시험 및 함수비시험을 실시하였다.

표 3.2.2 SPT 시험조건

분 류	초기단위체적중량 (kg/cm^3)	수직하중 (kg)	수직응력 (kg/cm^2)
자연함수비 / 포화상태	γ_t=1.05	1000	0.41
		2000	0.81
		3000	1.21
		4000	1.62
	γ_t=1.20	1000	0.41
		2000	0.81
		3000	1.21
		4000	1.62
	γt=1.40	1000	0.41
		2000	0.81
		3000	1.21
		4000	1.62

시험장치는 크게 나누어서 밀도측정가능 토조, 토층에 상재하중을 작용시키는 재하장치 및 표준관입시험 장치로 구성되어 있다. 그림 3.2.3과 같이 토조는 200리터의 드럼통으로 제작하여 바닥판의 변형을 막기위해서 2 cm의 철판을 덧대었으며 아래부분에는 밸브를 설치하여 포화가 가능하게 하였다. 재하판 중앙에는 10 cm의 구멍을 뚫어서 표준관입시험 sampler가 통과할 수 있도록 하였으며 수평변위를 억제하기 위해서 토조외부에 금속띠를 사용하여 구속하였다. 초기단위체적중량에 의한 시료조성후 재하판 위의 유압잭을 통해 응력을 가하여 침하가 완료된 후에 표준관입시험을 실시하여 N치를 측정하였다.



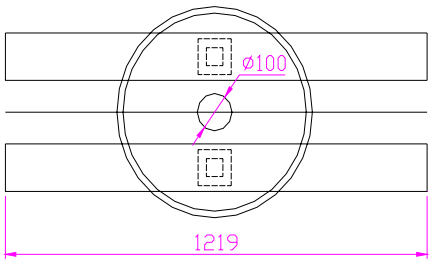


그림 3.2.3 SPT 시험과 제원

3. 시험결과 및 분석

1) 표준관입시험

표준관입시험은 초기단위체적중량 1.05, 1.20, 1.40 g/cm^{3}의 자연건조상태 및 포화상태의 시료를 제작하여, 수직응력 0.41, 0.81, 1.21, 1.62 kg/cm^{2}의 상재하중을 가하여 침하량을 측정하였다. 초기단위체적중량에 대하여 침하량의 측정에 의한 단위체적중량변화를 계산하고 각각에 대하여 표준관입시험을 실시하여 N치를 측정하였다. 그 결과를 그림 3.3.1 ~ 그림 3.3.4 및 표 3.3.1에 정리하여 나타내었다.

초기단위체적중량 γ_t 가 1.05 ~ 1.40 g/cm^{3}의 범위에서 N치는, 자연건조상태에서 2 ~ 12회, 포화상태에서 1 ~ 10회로 나타났다. 단위체적중량이 증가할수록 N치는 증가하며, 자

연건조상태에서의 N치가 포화상태보다 약 1 ~ 2회 정도 크게 나타났다. 이유는 시료 사이의 물의 윤활작용에 의한 rod의 마찰력 감소 때문이라고 생각된다. 또한 초기단위체적중량이 클수록 하중에 의한 단위체적중량변화가 작게 나타났으며 N치의 증가는 약간 크게 나타났다.

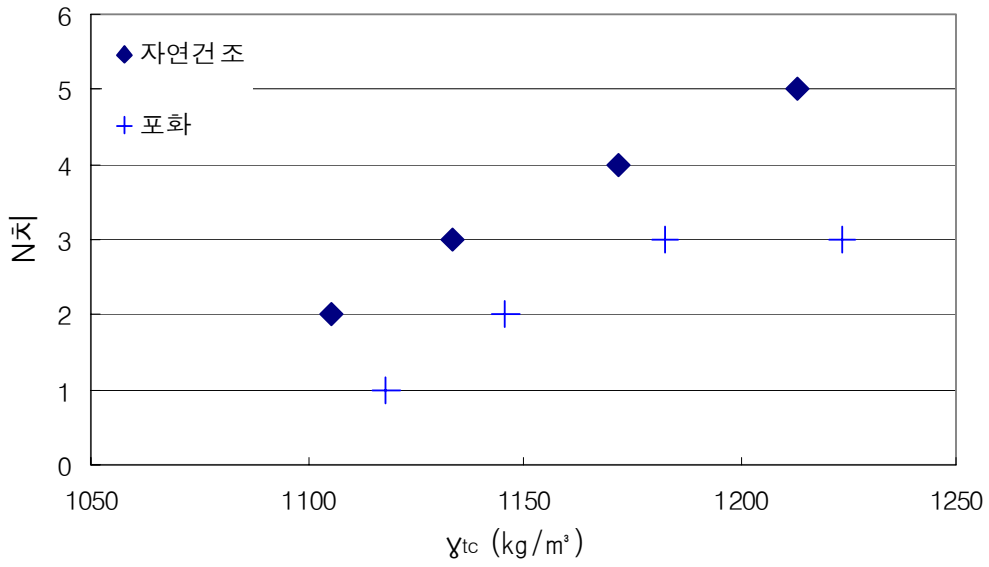


그림 3.3.1 포화조건에 따른 단위체적중량과 SPT의 N치의 관계 (γ_t=1.05 g/cm^3)

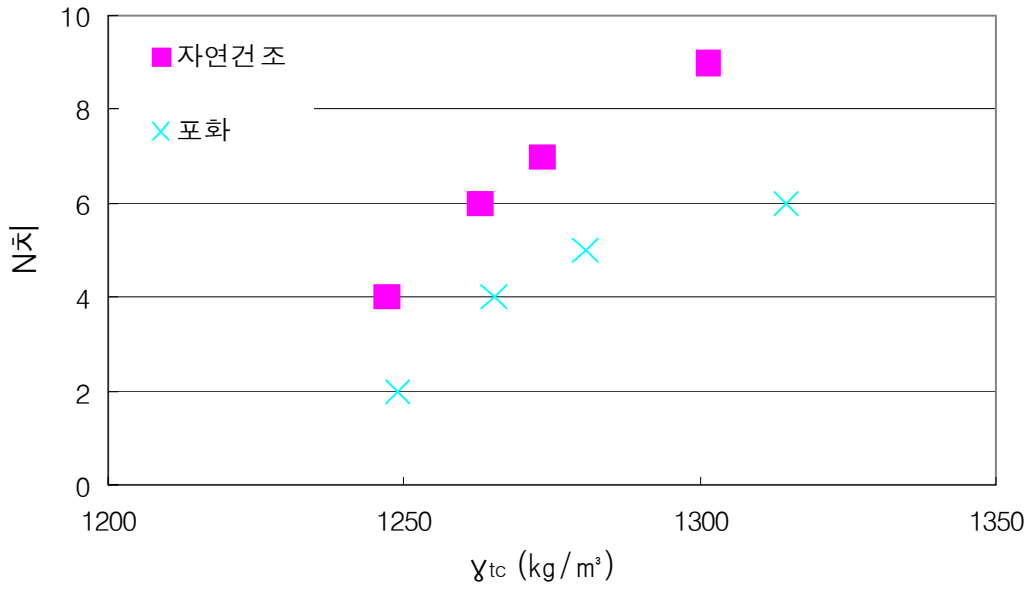


그림 3.3.2 포화조건에 따른 단위체적중량과 SPT의 N치의 관계 (γ_t=1.20 g/cm^3)

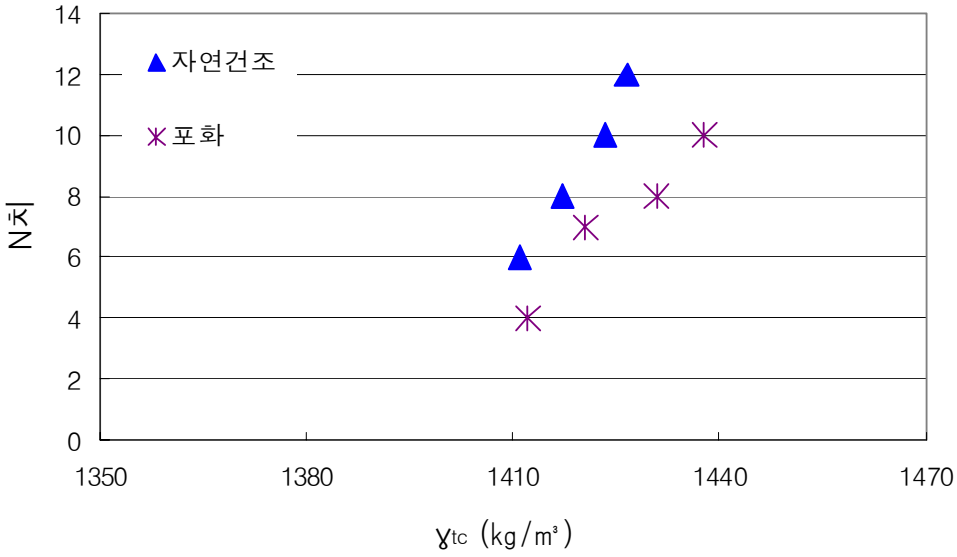


그림 3.3.3 포화조건에 따른 단위체적중량과 SPT의 N치의 관계(γ_t=1.40 g/cm^3)

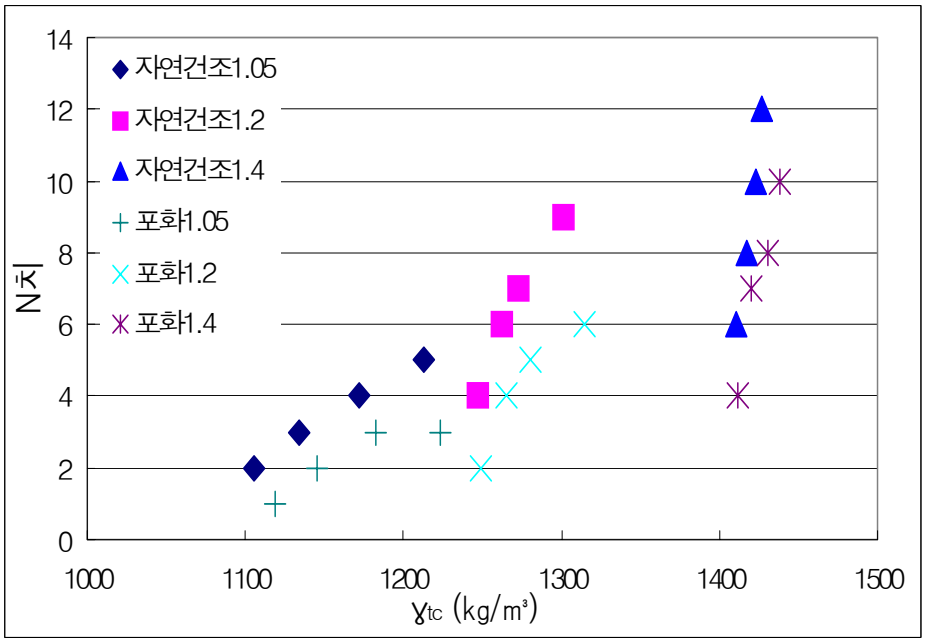


그림 3.3.4 포화조건에 따른 단위체적중량과 SPT의 N치의 관계

각각의 실험결과 N치에 대하여 상재하중을 고려하여 다음의 식에 의하여 등가N치를 구하였으며 그 결과는 그림 3.3.5와 그림 3.3.6과 같다.

$$(N)_{0.66} = \frac{N - 1.828(\sigma_v' - 0.66)}{0.399(\sigma_v' - 0.66) + 1} \qquad (\text{일본항만기술기준, 1986})$$

$$N_1 = N \times 0.77 \log(20/\sigma_v') \qquad (\text{Peck, 1974})$$

Peck식에 의한 등가N치는 단위체적중량이 작은 경우는 일본항만기술기준에 의한 값과 거의 유사하나 단위체적중량이 증가할수록 약간 크게 계산되어 초기 단위체적중량 γ_t=1.40 g/cm^{3}인 경우에는 약 2회 정도가 크게 나타났다.

상재하중을 고려한 등가N치의 결과는 Peck에 의한 등가N치가 좀더 일치하는 결과를 나타내었으며, 자연건조 및 포화상태에 대해서는 각각 단위체적중량에 대하여 비슷하게 등가N치가 감소하는 경향을 나타내었다.

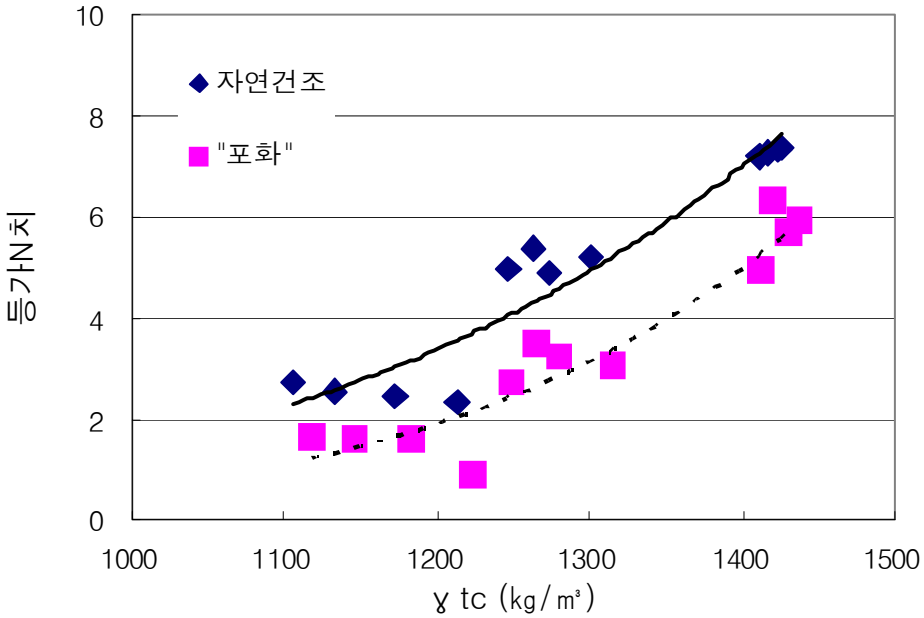


그림 3.3.5 단위체적중량과 N치의 관계에 대한 실험값과 제안식의 비교 (일본항만기술기준)

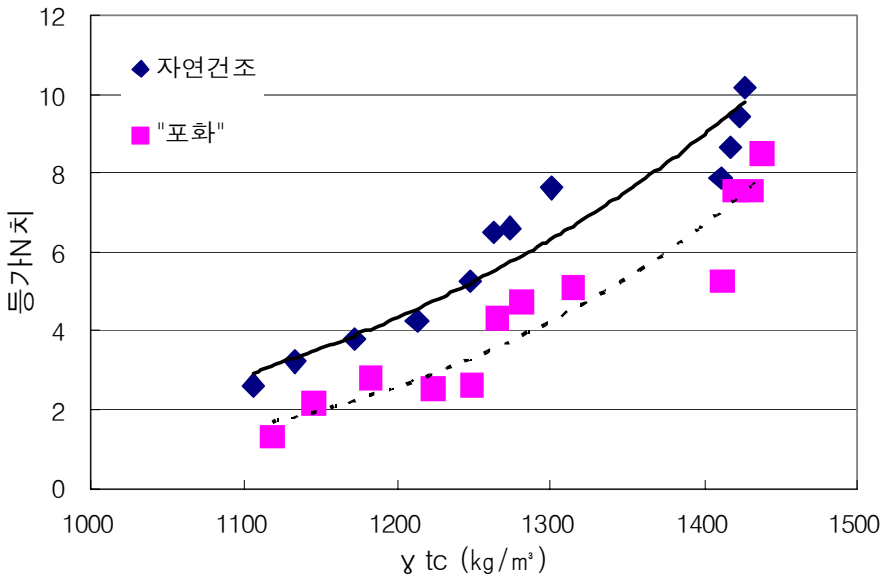


그림 3.3.6 단위체적중량과 N치의 관계에 대한 실험값과 제안식의 비교 (Peck)

2) 대형직접전단시험

대형직접전단 시험은 초기단위체적중량 γ_t, = 1.05, 1.2, 1.4 g/cm^{3}에 대하여 초기 시료 높이 16.5 cm로 조성하였다. 수직하중을 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 kg/cm^{2}로 가하여 압밀침하를 완료한 후에 평균전단속도 0.8 mm/min으로 전단시험을 실시하였다.

대형직접전단시험을 통하여 굴패각과 모래 혼합재의 내부마찰각 및 역학적 특성에 관하여 고찰하였으며 또한 전단시험 종료 후에 시료를 채취하여 체분석 시험을 실시하여 입도분포변화를 관찰하였다. 전단응력 수평변위 관계에 있어서 일반적인 모래의 경우 느슨한 경우에는 첨두점이 발생하지 않고 변위의 증가와 함께 완만하게 전단강도가 증가하지만, 조밀한 경우에는 초기변위의 증가와 함께 급격하게 전단응력이 증가한 후 일정변위 이후 전단강도가 감소하는 첨두점이 나타난다. 최대전단응력은 수평변위가 증가하여도 더 이상 전단응력이 증가하지 않거나 감소할 경우, 첨두값을 최대전단응력으로 결정하였고, 첨두점이 나타나지 않고 변형율이 증가할수록 전단응력이 증가하는 경우에는 변형율 10%일 때인 수평변위 30mm일 때의 값을 최대전단응력으로 정하였다.

그림 3.3.7 ~ 그림 3.3.9에 굴패각 혼합토에 대한 전단응력과 수평변위의 관계를 나타냈다. 수평변위의 증가와 함께 계속해서 전단응력이 증가하는 경화거동을 보였으며, 이것은 느슨한 시료의 전단거동과 유사하다고 볼 수 있다.

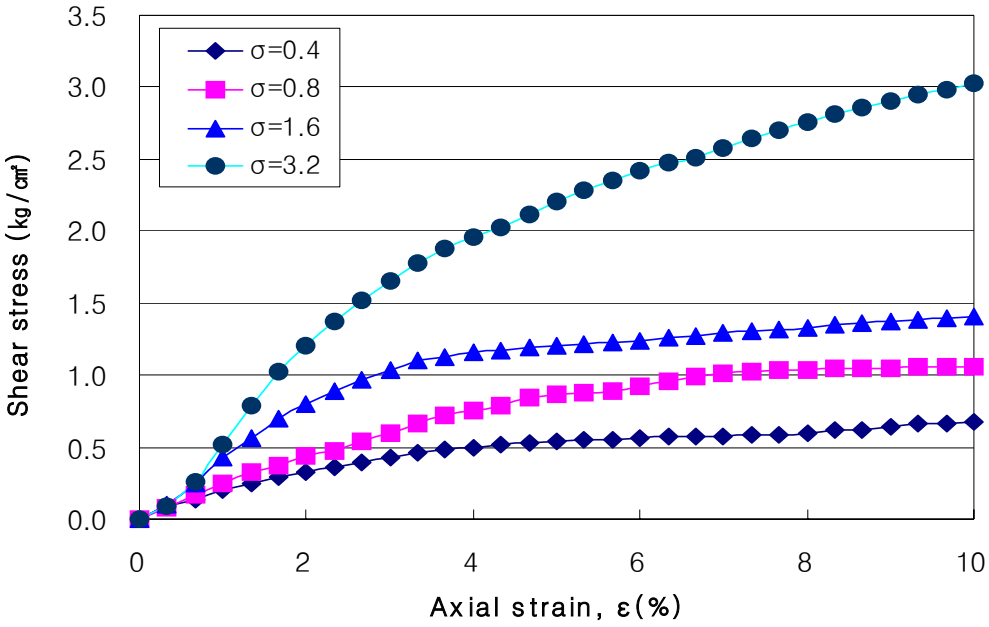


그림 3.3.7 굴패각 혼합토에 대한 전단응력과 수평변형의 관계 (γ_t=1.05 g/cm^3)

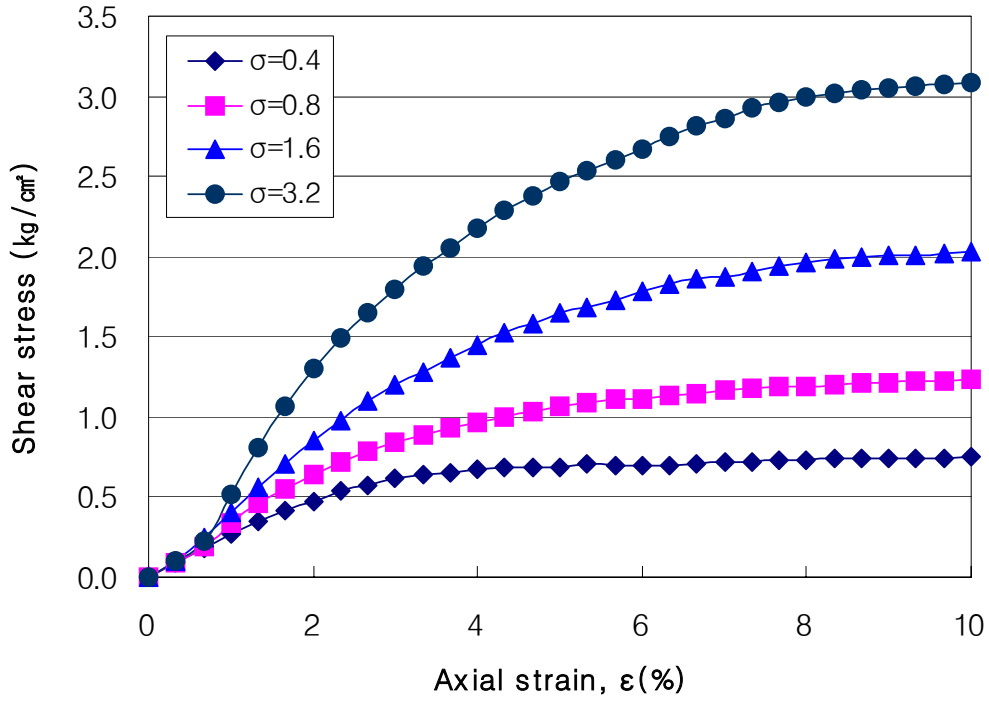


그림 3.3.8 굴패각 혼합토에 대한 전단응력과 수평변형의 관계 (γ_t=1.20 g/cm^3)

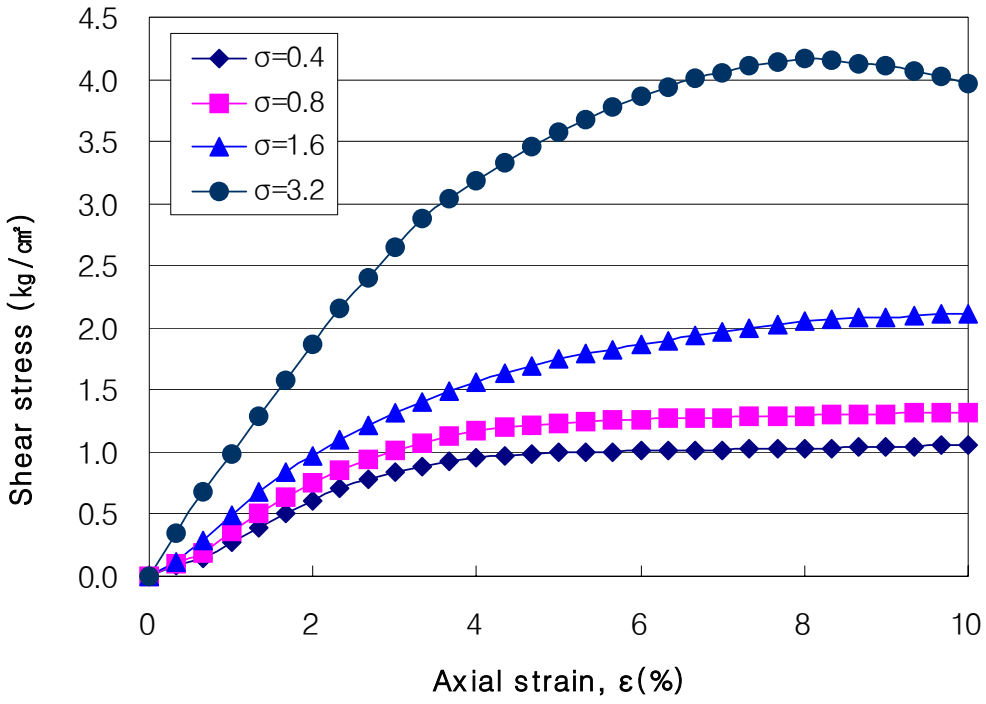


그림 3.3.9 굴패각 혼합토에 대한 전단응력과 수평변형의 관계 (γ_t=1.40 g/cm^3)

표 3.3.1과 그림 3.3.10, 그림 3.3.11 ~ 그림 3.3.13에는 전단시험의 결과를 정리하였다. 시험결과 내부마찰각 Φ는 40 ~ 55° 범위에 있으며, 단위체적중량이 증가할수록 증가하는 경향을 나타낸다.

그림 3.3.14에는 각각의 수직응력에 대한 내부마찰각의 변화를 나타내었다. 초기 수직응력이 작은 경우 내부마찰각 Φ값은 크지만 수직응력이 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 수직응력이 작을 때는 판형인 굴패각의 특징적 형상에 의하여 내부 마찰각이 크게 나타났으며, 파쇄가 수직응력에 의하여 진행되면 비로소 재료특성에 의한 내부마찰각이 일정하게 나타는 것으로 판단된다. 즉, 단위체적중량에 따라 약간은 다르지만 수직하중 0.8 ~ 1.5 kg/cm^{2}의 범위에서 파쇄특성이 변화하는 변곡점이 발생한다(한국해양연구원, 2000).

또한 그림 3.3.15에는 압밀침하후의 단위체적중량과 내부마찰각의 관계를 나타내었다.

표 3.3.1 초기단위체적중량과 내부마찰각과의 관계

초기단위체적중량 (kg/cm^2)	내부마찰각(°)
1.05	43.8
1.20	46.7
1.40	53.2

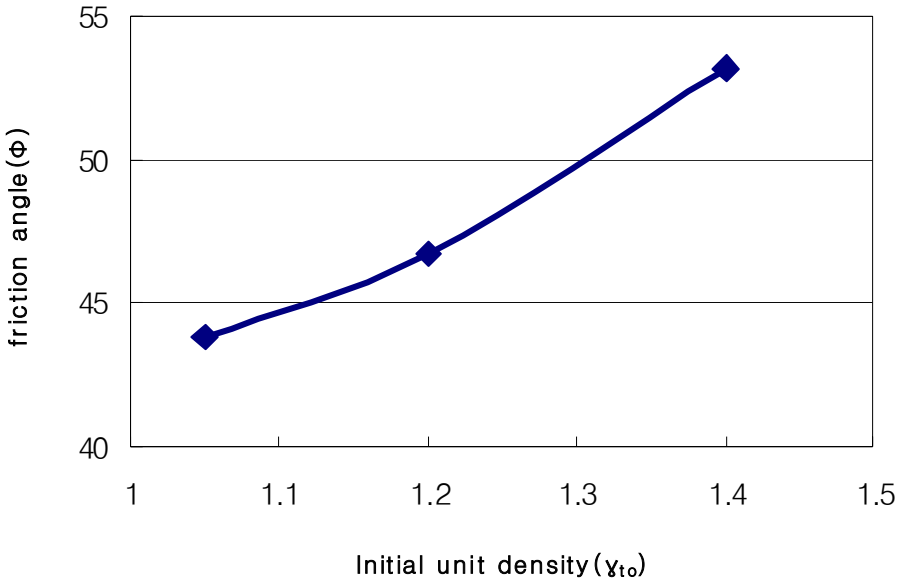


그림 3.3.10 초기단위체적중량과 내부마찰각과의 관계

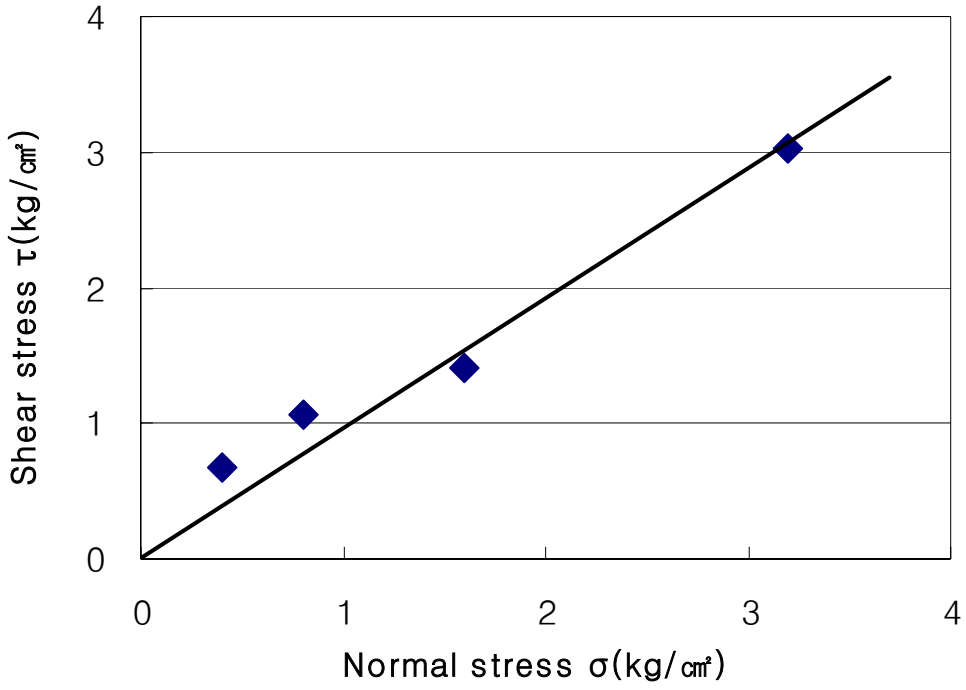


그림 3.3.11 최대전단응력과 수직응력 곡선 (τ_{to} = 1.05 kg/cm^2)

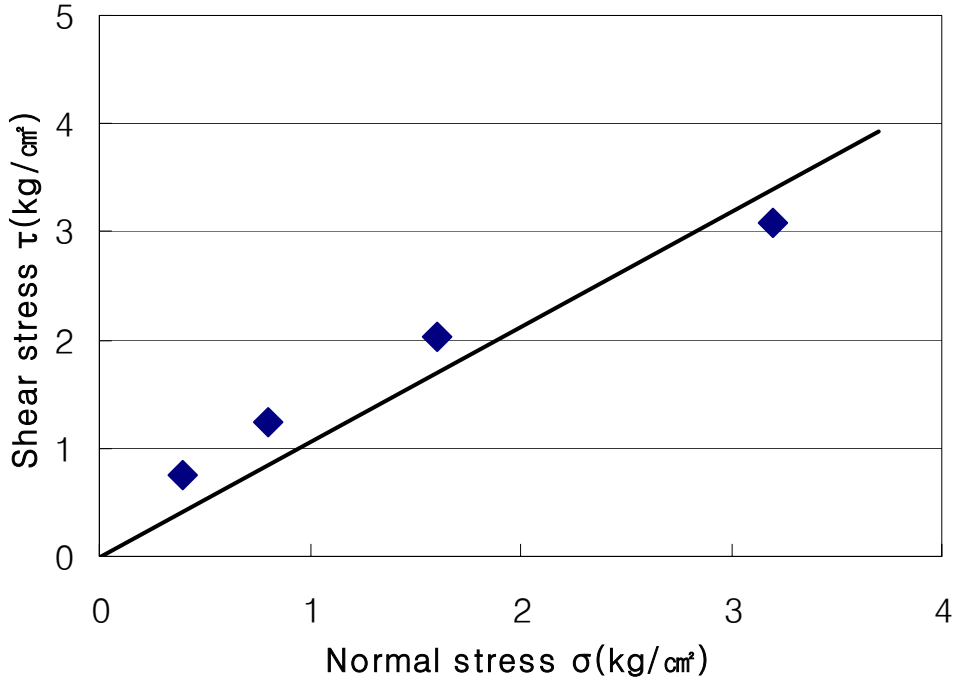


그림 3.3.12 최대전단응력과 수직응력 곡선 (τ_{to} = 1.20 kg/cm^2)

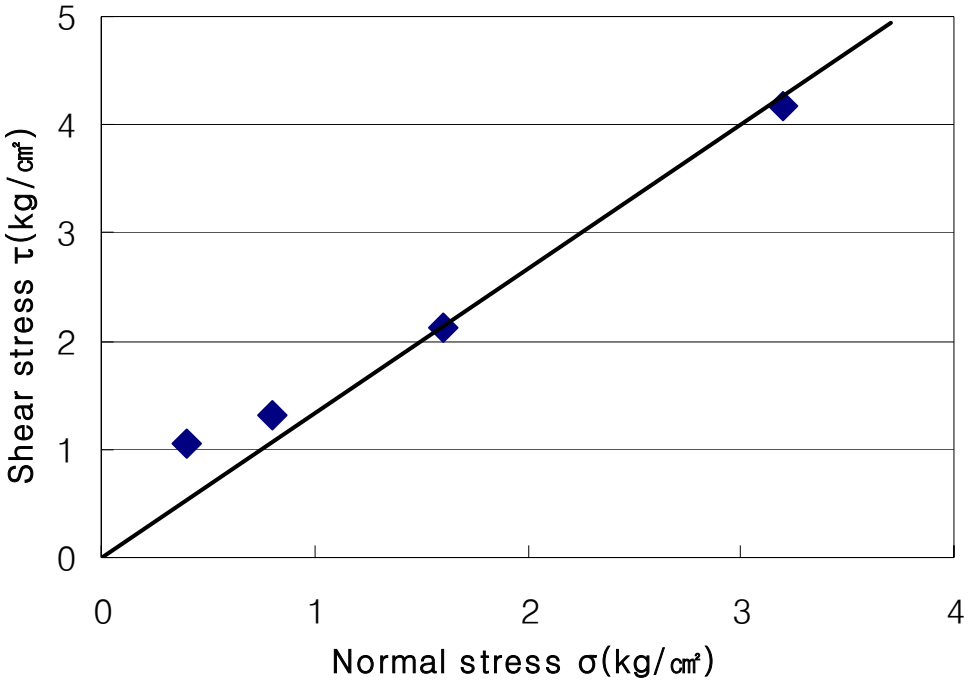


그림 3.3.13 최대전단응력과 수직응력 곡선 (τ_{to} = 1.40 kg/cm^2)

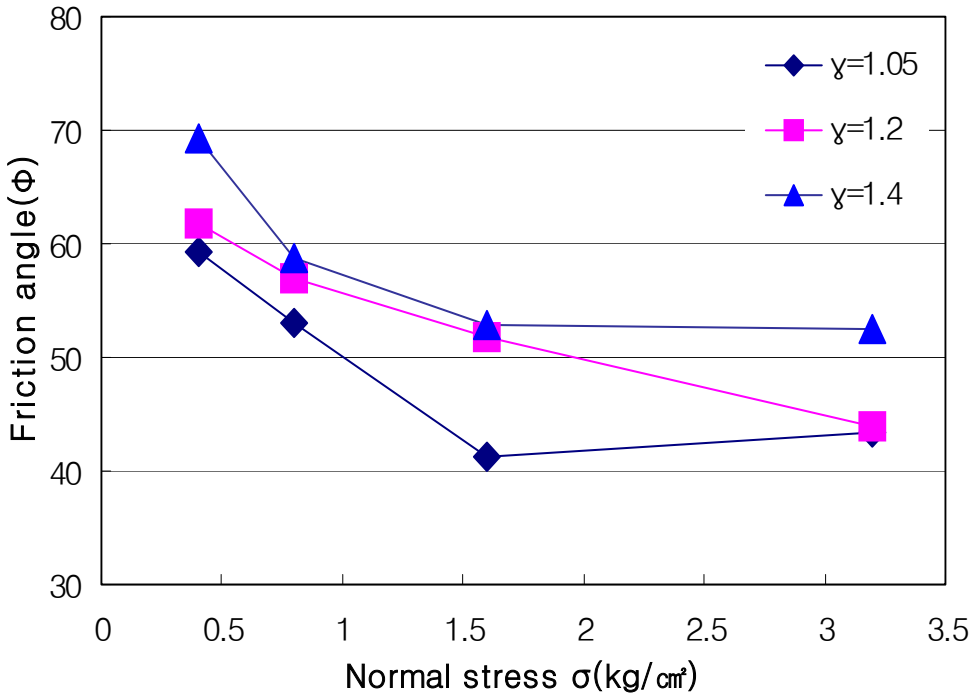


그림 3.3.14 수직응력과 내부마찰각 곡선

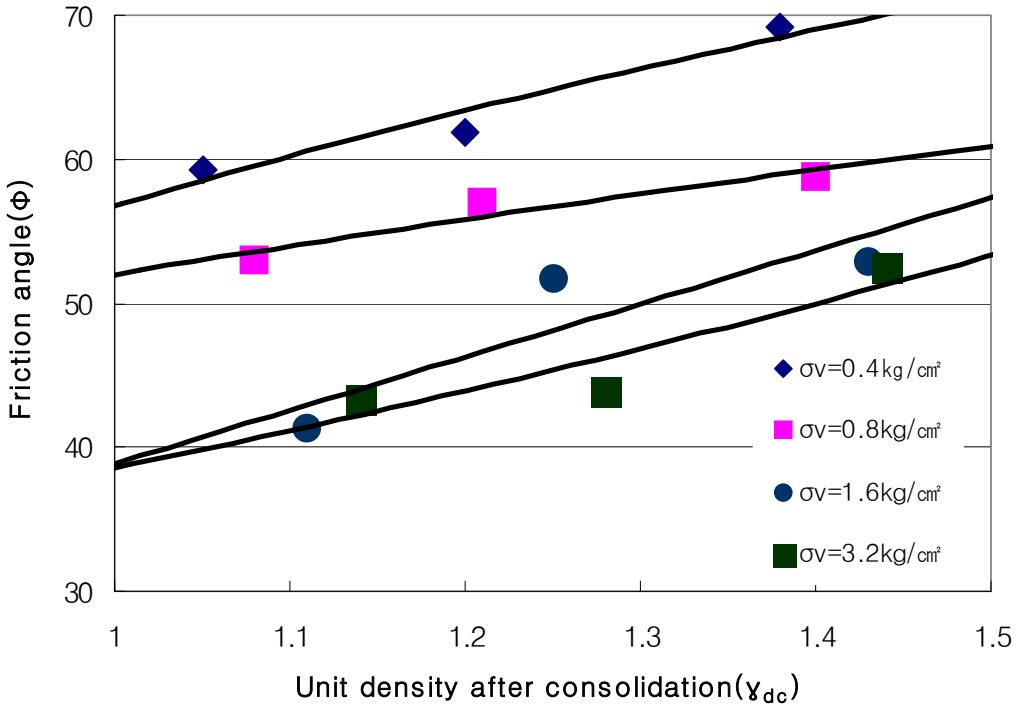


그림 3.3.15 압밀침하후의 단위체적중량과 내부마찰각의 관계

그림 3.3.16 ~ 그림 3.3.18은 각각의 단위체적중량 및 수직응력에 단계에 따른 체적변형률 관계를 나타내었다. 단위체적중량이 작은 경우엔 체적이 계속하여 감소하였으나, 초기단위체적중량이 큰 경우는 전단변형에 따른 체적증가가 일부 발생하였다. 굴패각 혼합 시료의 경우, 압밀후의 단위중량이 1.2 g/cm^{3}과 수직응력 0.4 kg/cm^{2}부근을 경계로 체적의 증가 또는 감소가 나타났다.

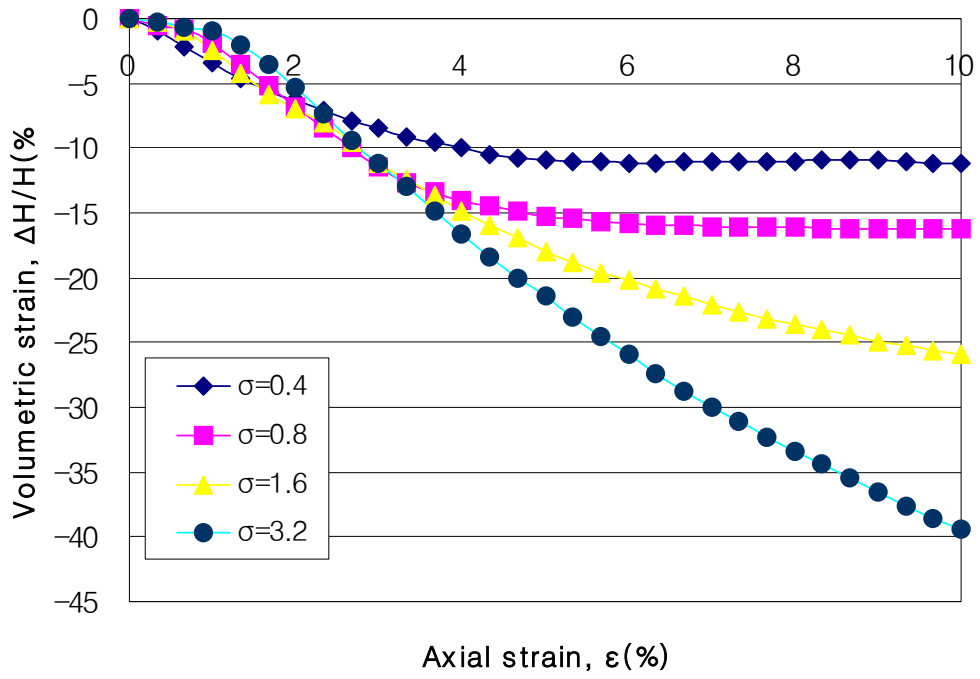


그림 3.3.16 수평변위에 따른 체적변형율 (σ_{to} = 1.05 kg/cm^2)

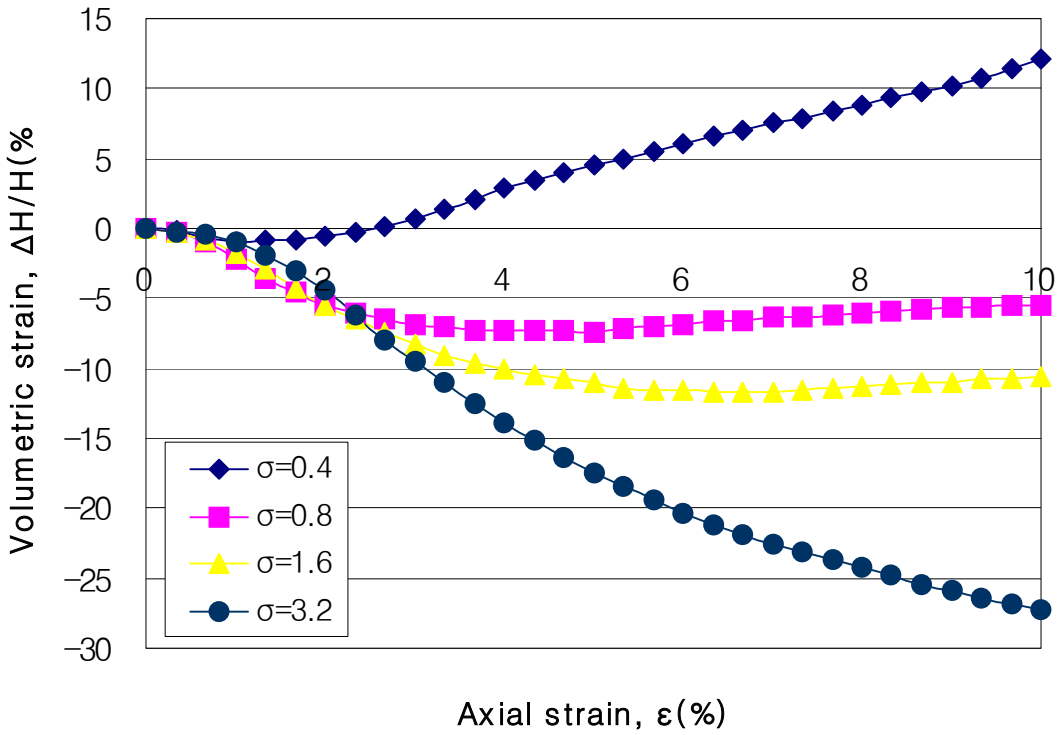


그림 3.3.17 수평변위에 따른 체적변형율 (σ_{to} = 1.20 kg/cm^2)

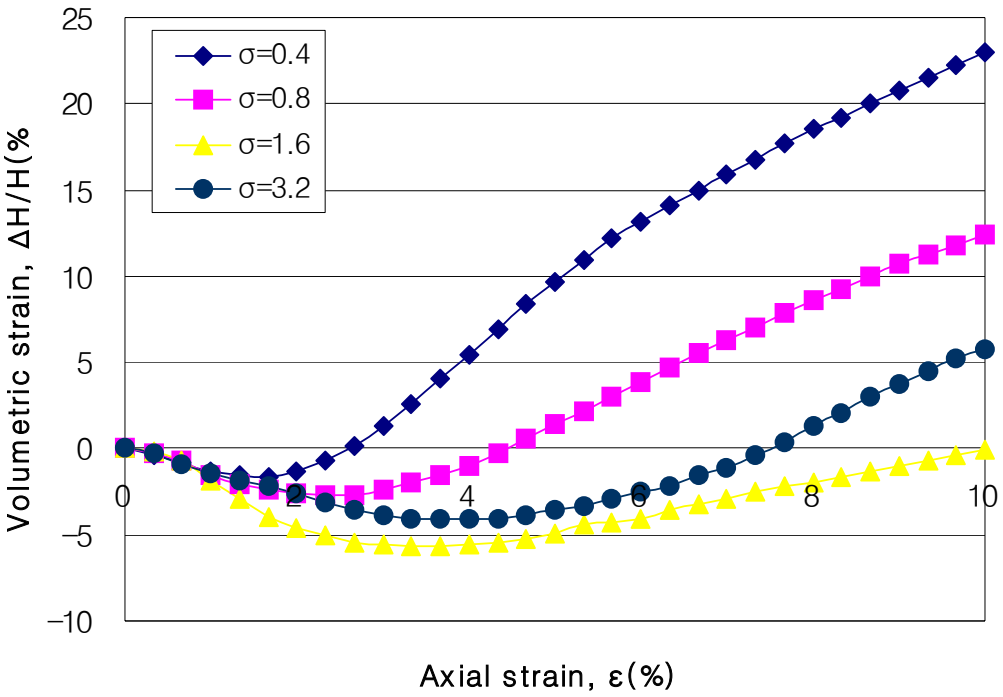


그림 3.3.18 수평변위에 따른 체적변형율 (σ_{to} = 1.40 kg/cm^2)

3) 입도분포 시험

각각 다른 초기 단위체적중량과 수직하중 조건하에서 굴패각의 파쇄에 의한 입도분포 변화를 알기 위해서 자연 건조시킨 모래와 굴패각 혼합재를 2 : 1로 최대한 균질하게 교반하여 표준관입시험 및 대형직접전단시험을 실시한 후에 각각의 시료를 채취하여 입도분포 시험을 하였다.

균일하게 혼합된 시료를 채취하기 위해서 각각 약 1.5 kg정도의 시료를 전단면 및 SPT rod부근에서 채취하여 건조시킨 후 입도분포시험을 실시하였으며, 단위체적중량 및 상재하중에 의한 입도분포 변화결과는 그림 3.3.19, 그림 3.3.20과 같다.

대형직접전단시험, 표준관입시험에서는, 시험과정 중의 입도분포변화는 크게 발생하지는 않았으며 굴패각의 입도에 해당되는 19.1mm 및 9.52mm 의 #4번체 이상에 해당되는 입경에 대하여 입도분포 변화가 약간 발생하였다. 모래와 굴패각이 혼합된 시료는 시험과정 중 다짐에 의해 일부파쇄가 발생하며 수직하중이 작용하는 압축, 침하과정 및 전단시험과정 중에서도 또한 일부가 파쇄된다.

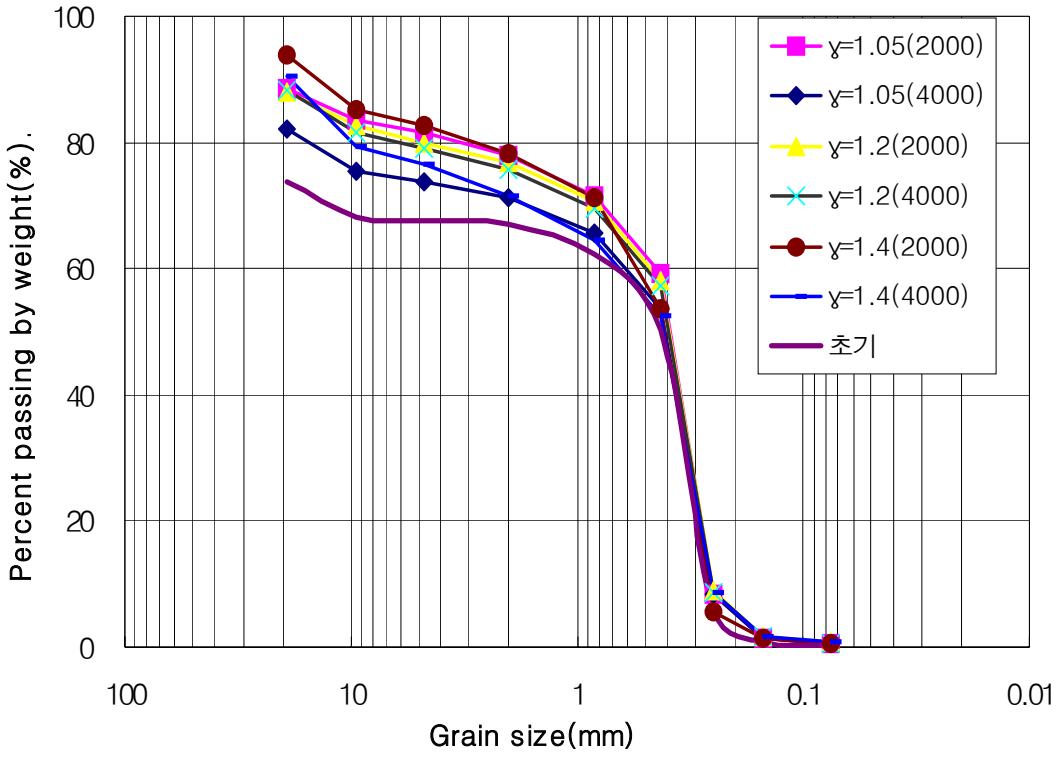


그림 3.3.19 SPT시험후의 입도분포

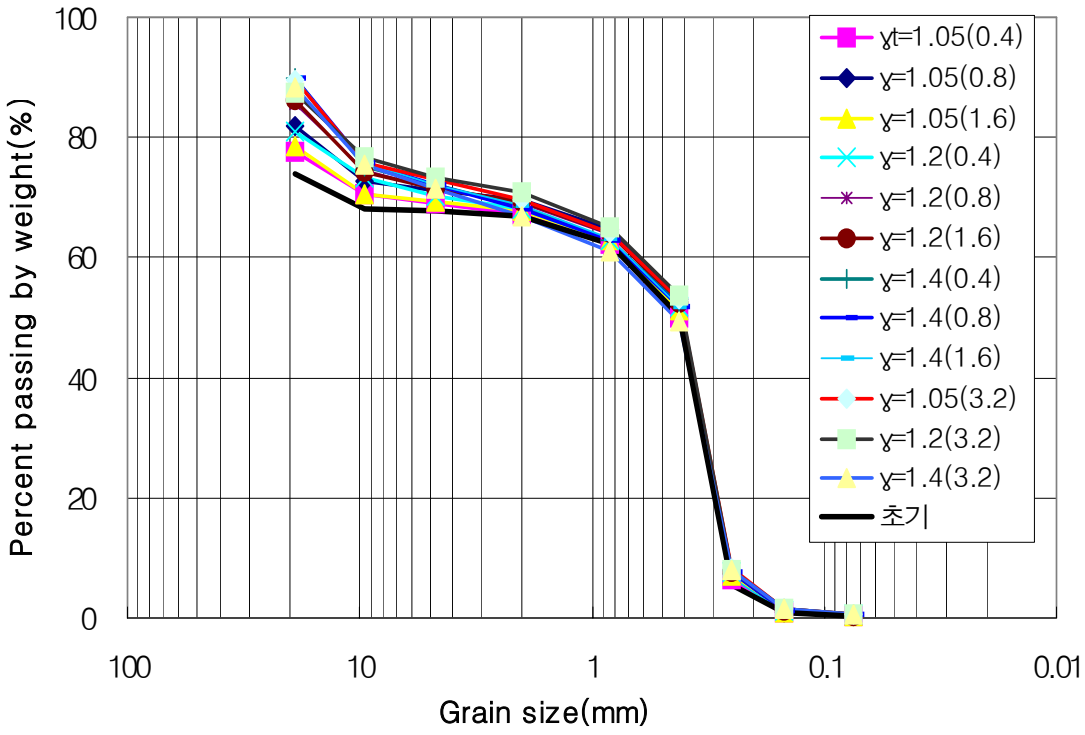


그림 3.3.20 대형직접전단 시험후의 입도분포

그림 3.3.21 ~ 그림 3.3.24는 표준관입시험에서의 동일한 수직하중에 대한 각각의 시료 단위체적중량에 대한 입도분포를 나타내었다.

그림 3.3.25 ~ 그림 3.3.28은 대형직접전단시험에서의 동일한 단위체적중량에 대한 각각의 수직하중에 따른 입도분포결과를 나타낸 것이다. 수직응력이 증가할 때와 단위체적중량이 증가할 때의 입도분포변화 경향은 비슷하게 나타나며, 수직응력이 3.2 kg/cm^{2}일 때와 단위체적중량이 1.4 g/cm^{3}일 때의 입도분포는 거의 같다. 모래보다 혼합재의 경우에 침하가 더 크게 나타나지만 굴패각의 파쇄에 의한 직접적인 영향이라기보다는 본 연구의 단위체적중량범위와 수직하중 범위에서는 굴패각의 파쇄에 의한 침하의 발생보다는 굴패각 및 모래의 간극이 감소하면서 발생하는 침하가 더 크다고 생각된다.

더불어 그림 3.33는 SPT시험과정 중 sampler에 의해 채취된 시료의 입도분포곡선을 나타낸 것이다. Sampler에 의해 채취된 시료의 입도분포 변화는 다른 시험결과의 입도분포와 다른 경향을 나타내고 있으며 이유는 일반적인 sampler의 직경이 작아서 굴패각의 파쇄가 되지 않으면 채취가 될 수 없기 때문이라고 생각된다.

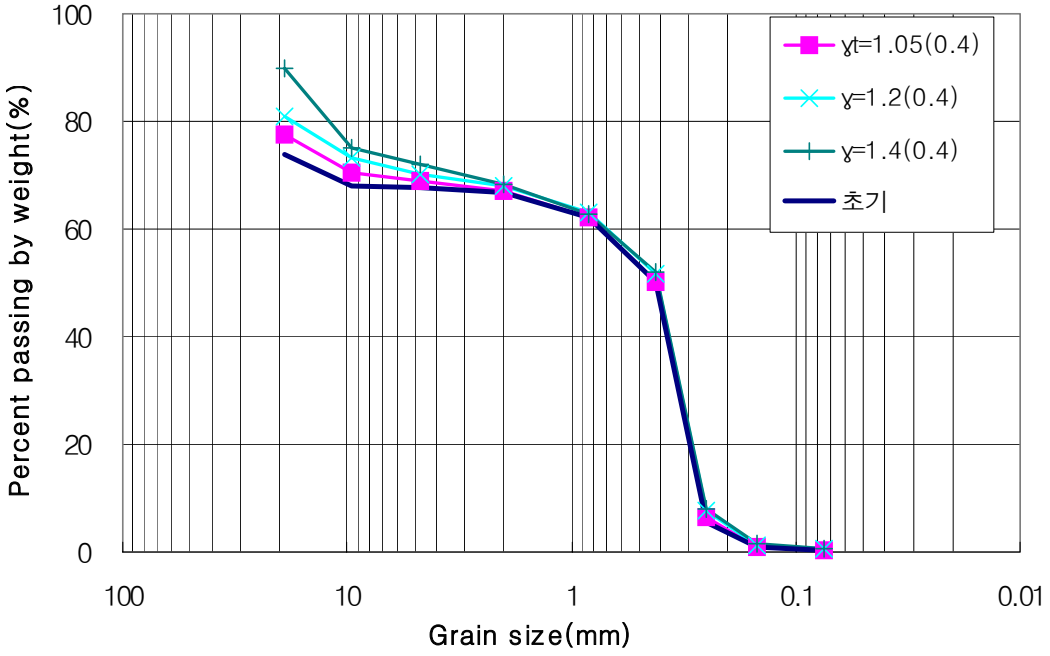


그림 3.3.21 대형직접전단 시험후의 입도분포 (σ'_v = 0.4 kg/cm^2)

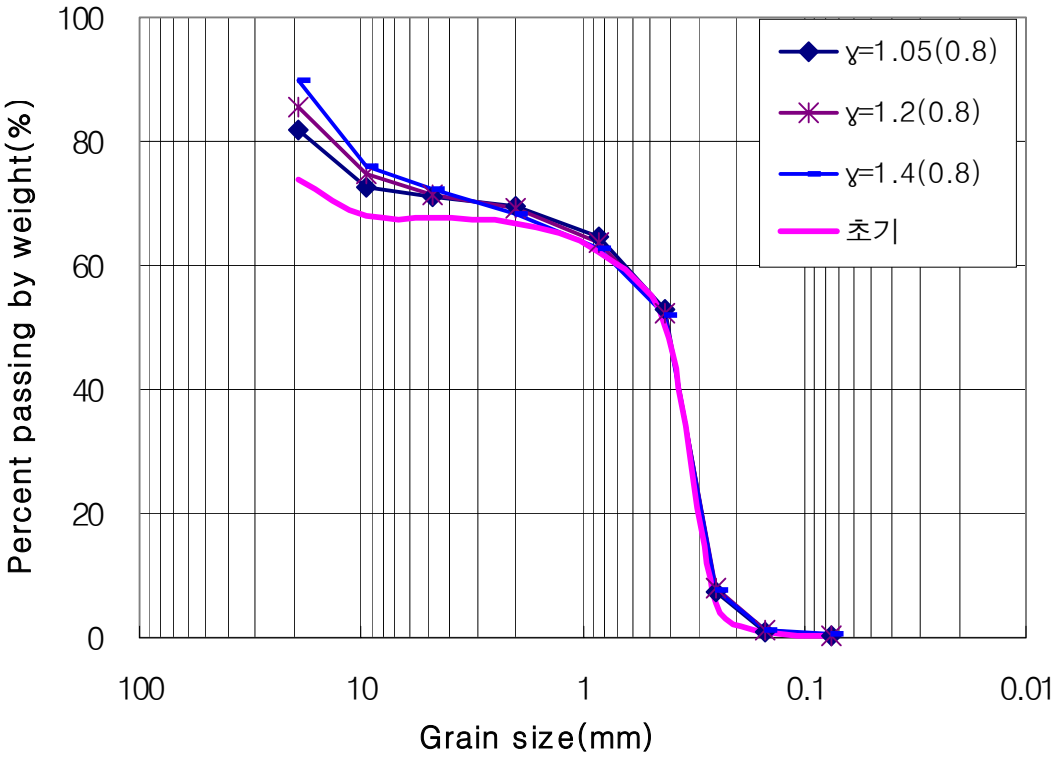


그림 3.3.22 대형직접전단 시험후의 입도분포 (σ'_v = 0.8 kg/cm^2)

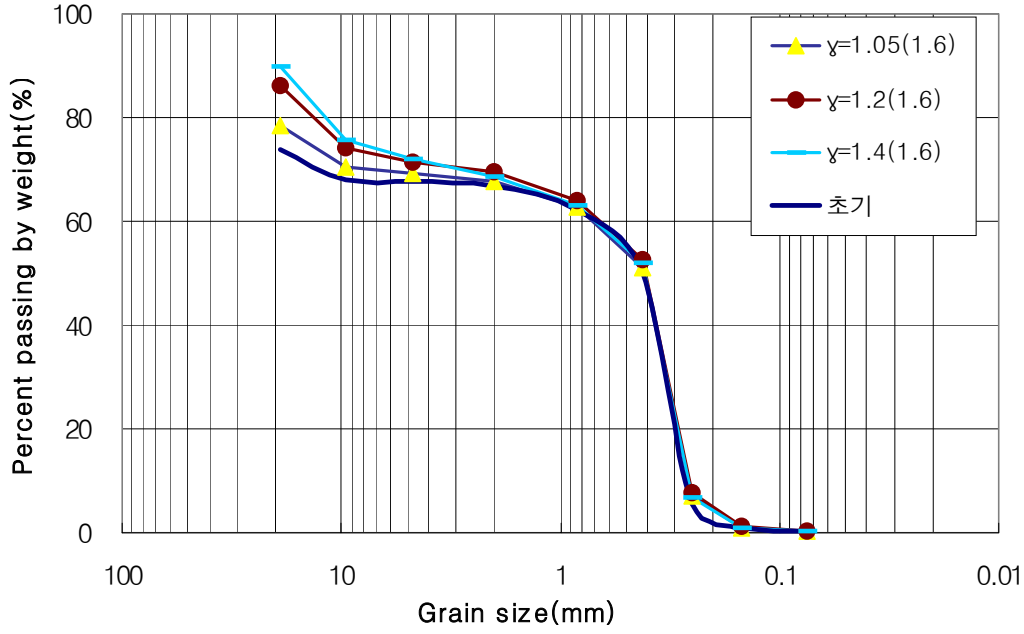


그림 3.3.23 대형직접전단 시험후의 입도분포 (σ'_v = 1.6 kg/cm^2)

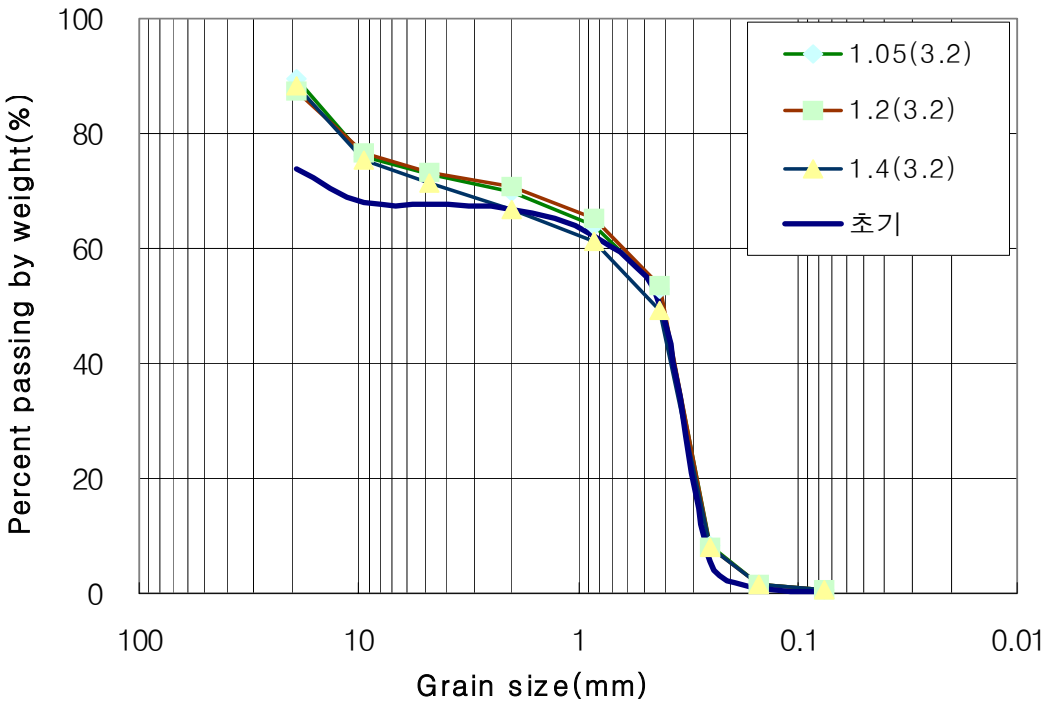


그림 3.3.24 대형직접전단 시험후의 입도분포 (σ'_v = 3.2 kg/cm^2)

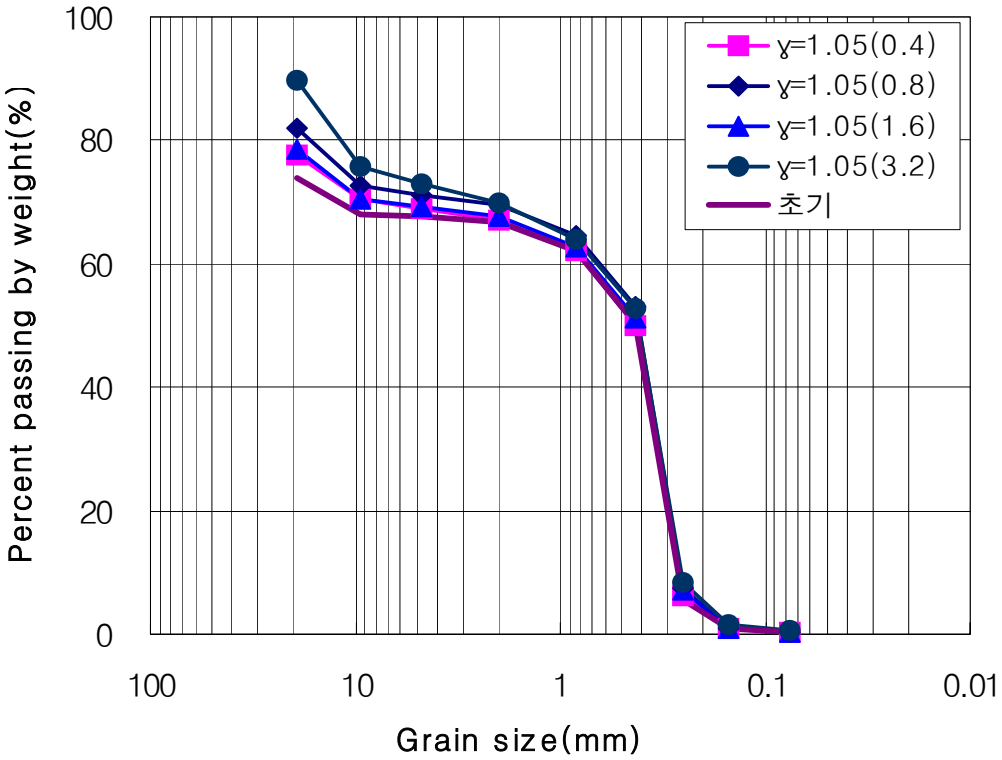


그림 3.3.25 대형직접전단 시험후의 입도분포 (γ_{to} = 1.05 kg/cm^2)

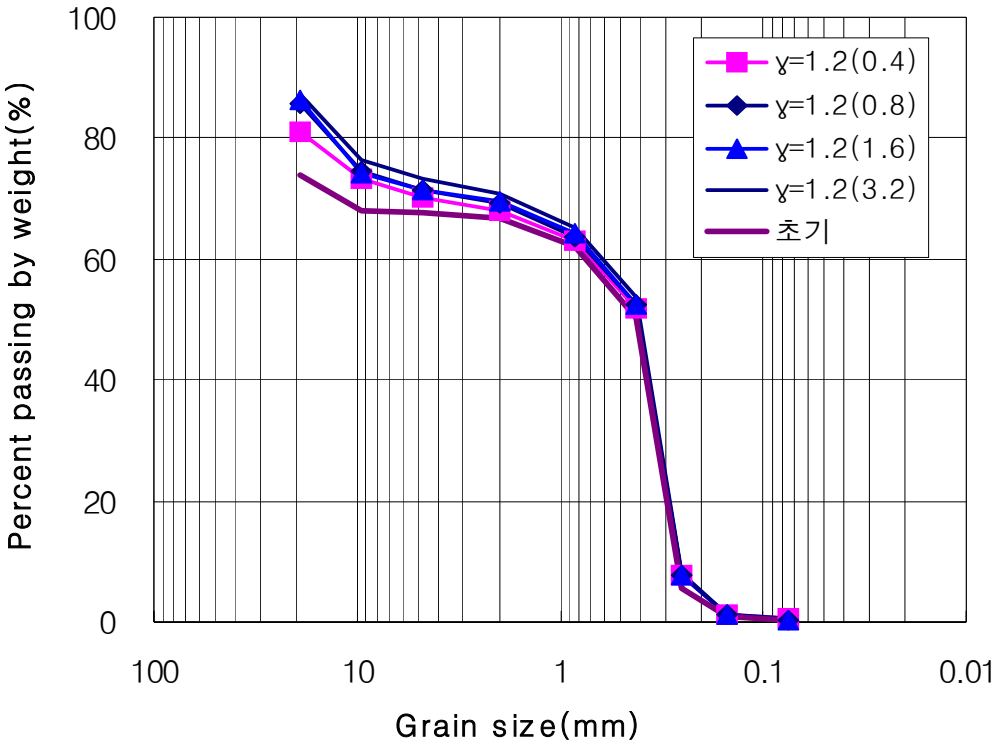


그림 3.3.26 대형직접전단 시험후의 입도분포 (γ_{to} = 1.20 kg/cm^2)

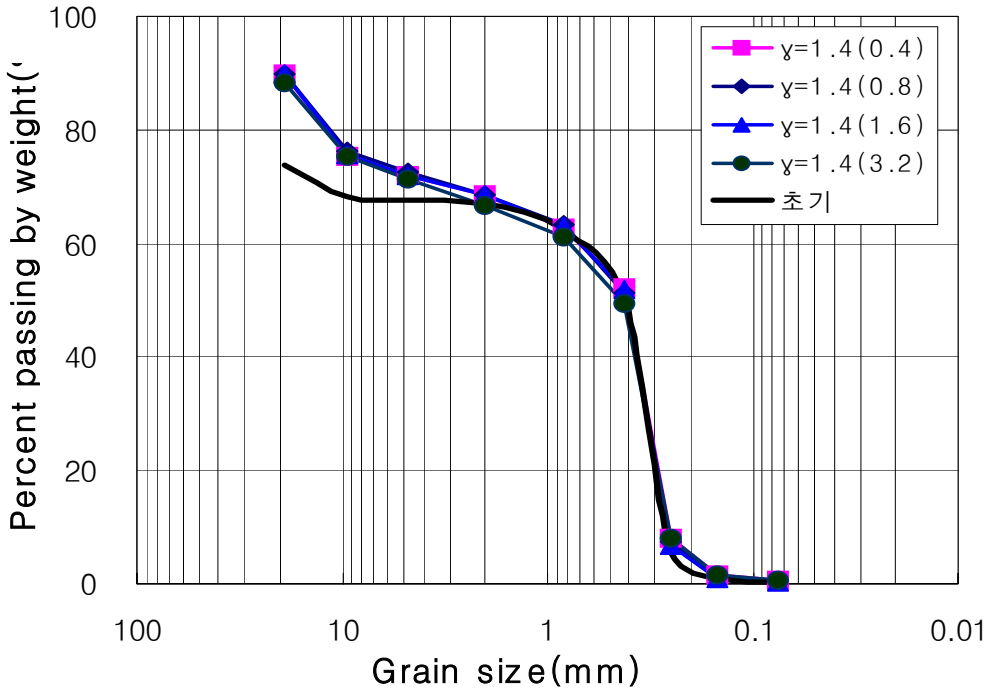


그림 3.3.27 대형직접전단 시험후의 입도분포 (γ_{to} = 1.40 kg/cm^2)

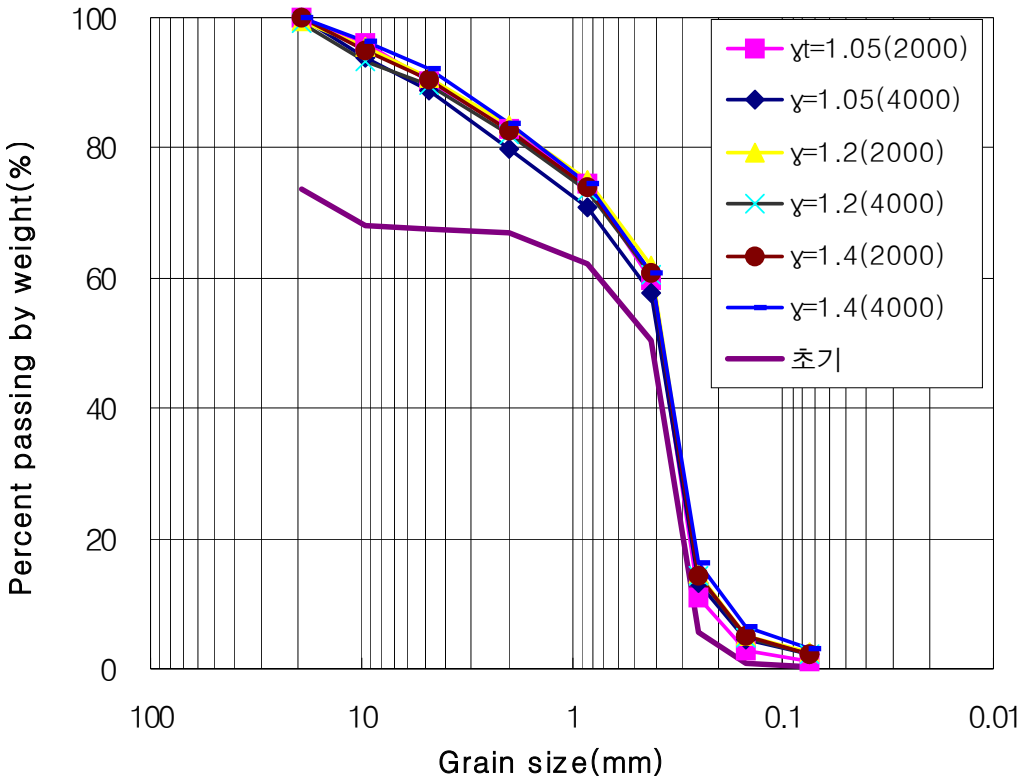


그림 3.3.28 SPT 샘플에서 채취한 시료의 입도분포

4) 구속압축시험

구속압축시험은 대형직접전단시험상자에 30 × 30 × 15.6(가로×세로×높이)의 3종류의 초기 단위체적중량에 대하여 수직하중을 0.1 ~ 3.2 kg/cm^{2}로 점진적으로 증가시키며 수직침하량을 측정하였다. 하중재하시간은 각 하중에 대하여 30분으로 하여 침하량을 기록하였으며, 초기침하 이후에 발생하는 잔류침하에 대해서는 침하가 거의 발생하지 않았으므로 무시하였다.

굴패각은 모래에 비하여 간극이 크고 파쇄가 쉬운 재료이기 때문에 압축에 의한 변화가 클 것으로 예상된다. 따라서 초기단위체적중량이 다른 시료에 대하여 각각 구속압축시험을 실시하여 수직하중 증가에 따른 침하량을 그림 3.3.29에 나타내었다.

굴패각과 모래의 혼합재 시료의 압축지수 Cc, 체적압축계수 m_v 및 항복하중 σ_p를 정리하여 표 3.3.2에 나타내었다.

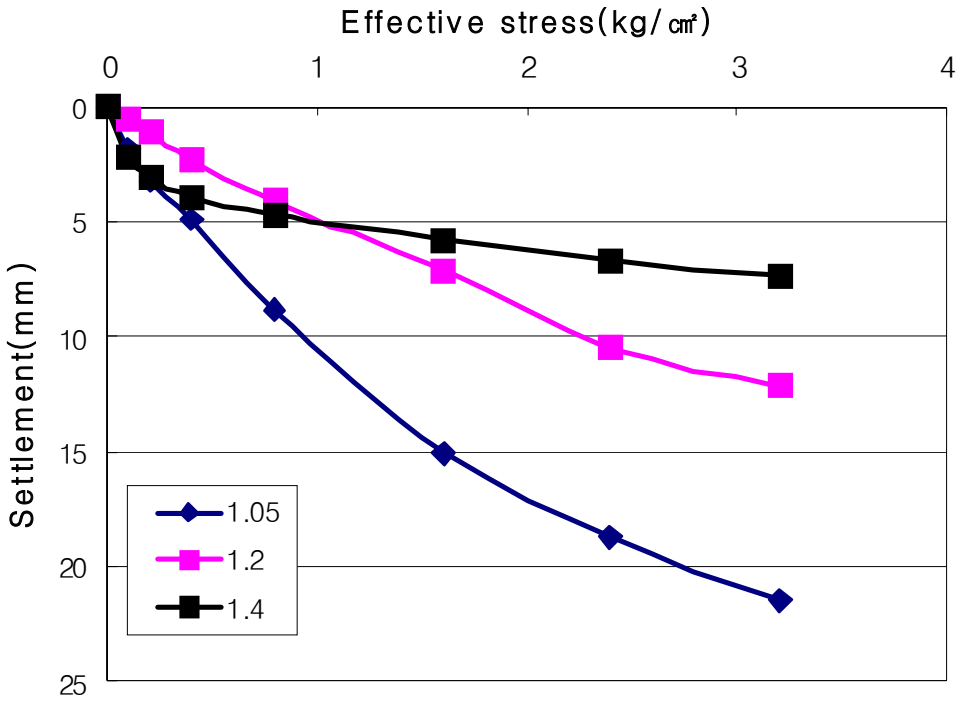


그림 3.3.29 수직하중 증가에 따른 침하량곡선

표 3.3.2 구속압축시험에서 얻어진 Cc, Cc` , m_v , σ_p

	압축지수 (초기기울기) C_c	압축지수 (2차 기울기) C_c`	C_c`- C_c	체적압축계수 m_v	σ_p (kg/cm2)
γ_{to} = 1.05	0.083	0.349	0.266	0.041	0.7
γ_{to} = 1.20	0.033	0.267	0.234	0.025	1.1
γ_{to} = 1.40	0.044	0.066	0.022	0.010	-

굴패각과 모래의 혼합재 시료의 압축지수 Cc, 체적압축계수 m_v 및 항복하중 σ_p를 정리하여 표 3.3.3에 나타내었다.

그림 3.3.30 ~ 그림 3.3.32에 간극비와 수직하중의 관계를 나타내었다.

그림 3.3.33 ~ 그림 3.3.35에 나타내어 수직하중과 체적변형률과의 관계를 비교하고 분석하였다.

압축지수 Cc는 e - log P의 곡선의 기울기를 나타내며, Cc는 초기기울기를 Cc'은 2차 기울기를 나타낸다. 일반적인 과압밀 점토의 경우는 e - logP곡선은 선행압밀하중을 기준으로 곡선의 기울기가 변화한다. 본 시험에서 점토의 압밀곡선의 선행압밀응력을 구하는 방법에 의하여σ_p를 구하였으나 σ_p는 선행압밀응력을 의미하지는 않으며, 굴패각의 파쇄가 완만히 나타나는 하중과 비교적 급격하게 나타나는 하중의 경계를 나타낸다(한국해양연구소, 2002). 초기 단위체적중량이 작을수록 변곡점이 뚜렷이 나타나는데, 그것은 변곡점의 부근의 응력범위에서 (0.6 ~ 1.0 kg/cm^2) 굴패각의 모서리부분의 파쇄가 급격히 발생하기 때문이라고 생각된다. 초기단위체적중량이 작을수록 Cc, Cc', m_v는 값이 크며 초기단위체적중량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다.

단위체적중량 변화에 따른 압축관련 지수의 변화를 알아보기 위하여 이를 그림 3.3.36에 나타내었다. 표 3.3.3에서 초기 단위체적중량이 클수록 압축지수 Cc 및 m_v는 감소하고 있으나, 단위체적중량이 큰 γ_t=1.40 g/cm^3인 경우는 Cc, Cc'의 구분이 거의 없다. 특히 변곡점 이후의 압축지수 Cc'은 초기단위체적중량이 증가할수록 감소하여 Cc' Cc의 값은 점점 작아져서 단위체적중량이 커지면 파쇄에 의한 압축지수의 변화는 크지 않을 것으로 예상된다. 다짐 및 수직하중에 의한 압축으로 단위체적중량이 증가되는 것은 모래의 간극감소와 굴패각의 파쇄 및 간극감소에 의해 발생하지만 상대적으로 모래보다는 굴패각의 파쇄 및 간극감소의 영향이 더 크다.

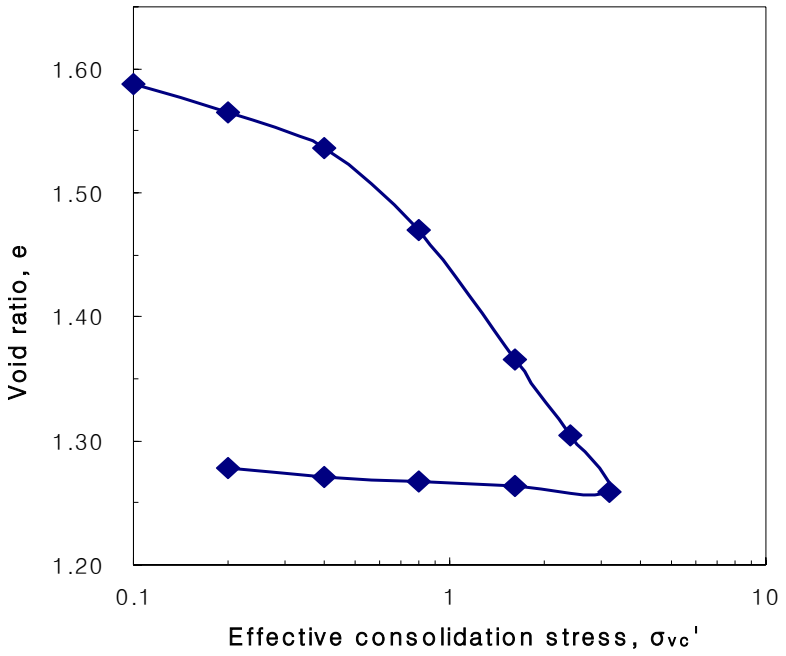


그림 3.3.30 수직하중과 간극비의 관계 (γ_t = 1.05 kg/cm^2)

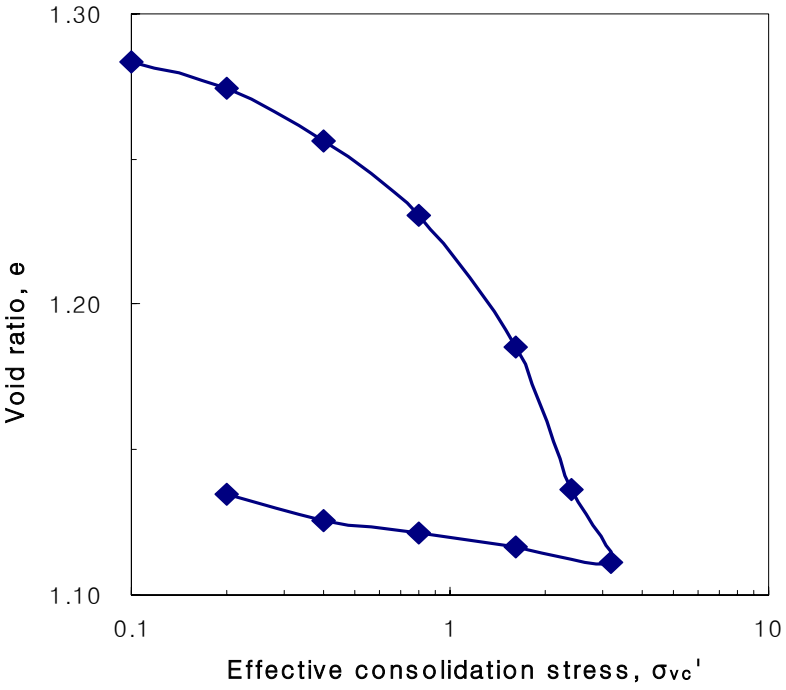


그림 3.3.31 수직하중과 간극비의 관계 (γ_t = 1.20 kg/cm^2)

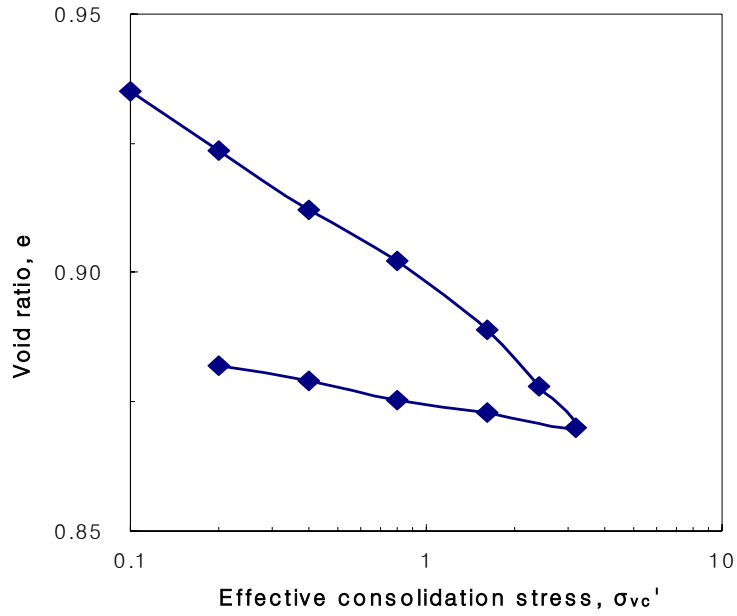


그림 3.3.32 수직하중과 간극비의 관계 (γ_t = 1.40 kg/cm^2)

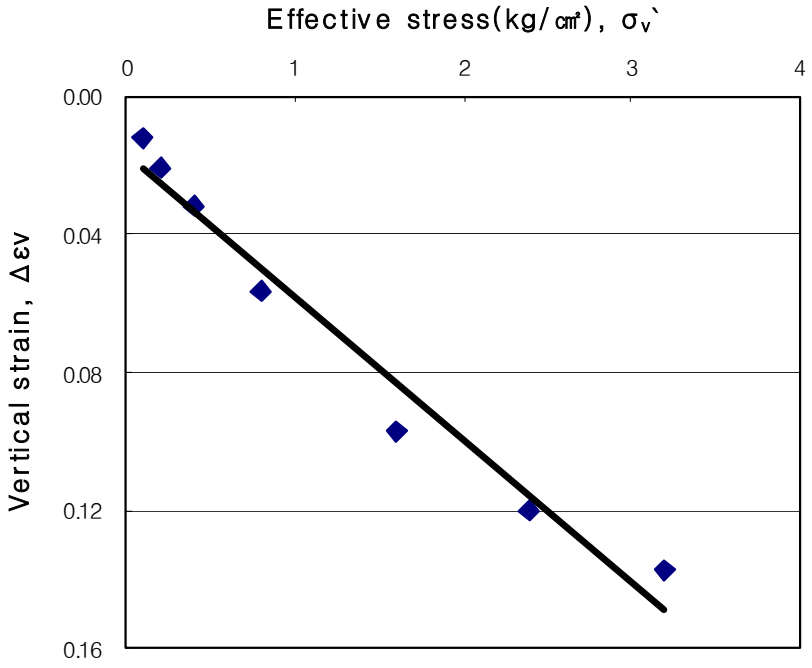


그림 3.3.33 수직하중과 체적변형률의 관계 (γ_t = 1.05 kg/cm^2)

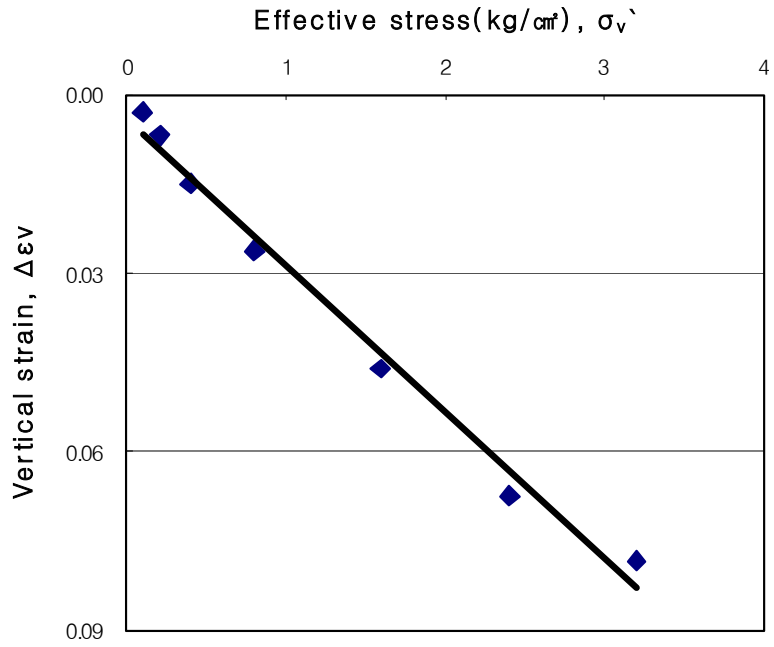


그림 3.3.34 수직하중과 체적변형률의 관계 (γ_t = 1.20 kg/cm^2)

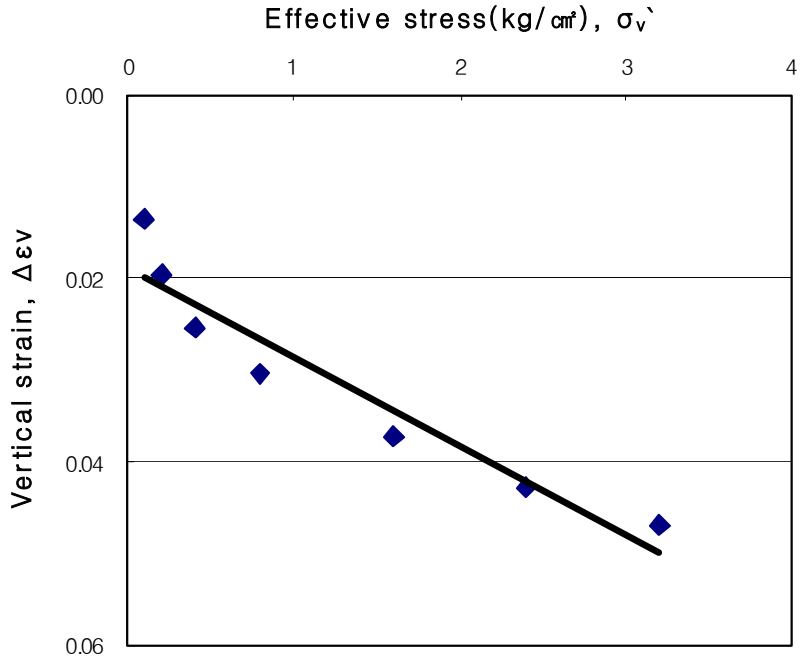


그림 3.3.35 수직하중과 체적변형률의 관계 (γ_t = 1.40 kg/cm^2)

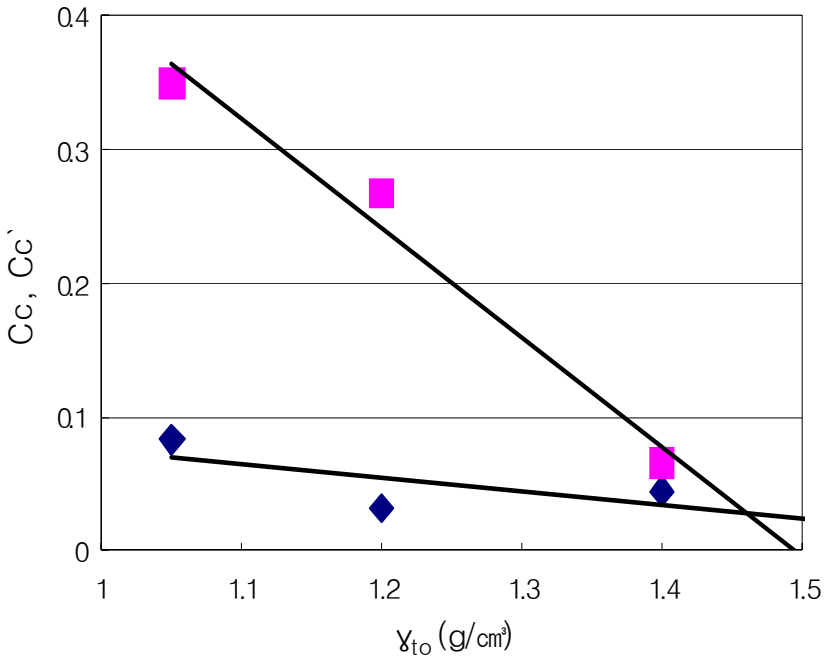


그림 3.3.36 단위체적중량 변화에 따른 압축관련 지수의 변화 (Cc, Cc')

제 4 절 결 론

자연건조상태의 모래와 굴패각을 2:1로 혼합한 재료를 초기밀도 수직하중을 변화시키며 표준관입시험, 대형전단시험, 입도분포시험 및 압밀시험을 통하여 강도, 침하특성 및 파쇄특성을 확인하였다. 시험결과 혼합재의 내부마찰각은 모래보다 크게 나타났으며, 우려되는 굴패각의 파쇄는 초기밀도가 큰 경우 그다지 크게 발생하지는 않았으며, 시험의 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1. 표준관입시험치(N치)는 자연건조상태에서 밀도의 변화에 따라 2 ~ 12회, 포화상태에서는 1 ~ 10회정도로 변화하였다. 밀도가 증가할수록 N치는 증가하며, 자연건조상태에서 1 ~ 2회정도 크게 나타났다.

2. 상재하중을 고려한 Peck식 및 일본항만기준에 의한 등가N치는 Peck식에 더 일치하는 것으로 나타났다.

3. 혼합재의 내부마찰각은 39 ~ 50°범위로 초기밀도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타냈으며, 수직응력이 작을수록 크게 나타났다. 수직응력이 증가할수록 내부마찰각은 감소하여 수직응력이 σ_p = 0.7 ~ 1.1 kg/cm^{2}이상이 되면 일정하게 수렴하는 경향을 나타냈다. 이것은 수직응력이 작을 때는 판형인 굴패각의 특징적 형상에 의하여 내부 마찰각이 크게 나타났으며, 파쇄가 수직응력에 의하여 진행되면 비로소 재료특성에 의한 내부마찰각이 일정하게 나타는 것으로 판단된다.

4. 동일 초기밀도에서 수직응력이 증가할수록 파쇄가 많이 발생하나 초기밀도가 크면 수직응력의 영향은 그리 크지 않으며 또한 다른 초기밀도조건에서 수직하중이 동일할 때 밀도가 작을수록 파쇄가 많이 발생하지만 수직하중이 크면 초기밀도의 영향은 그리 크지 않았다. 수직응력이 증가할때와 초기밀도가 증가할때의 입도분포변화경향은 거의 유사하며, 초기밀도 1.4 g/cm^{3}일때와 수직응력 3.2 kg/cm^{2}일때의 입도분포는 거의 일치한다. 또한, 표준관입시험시 같이 시행되는 sampler에 의한 시료채취는 직경이 너무 작아서 입도분포 경향을 대표할 수 없다.

5. 간극비와 수직응력의 관계를 변곡점을 전후하여 압축지수 C_c 및 C_c`으로 구분하였으며, 체적변형률과 수직하중의 관계를 체적압축계수 $m_v$로 나타내었다. $C_c$는 0.08 ~ 0.04, Cc`은 0.35 ~ 0.06, m_v는 0.05 ~ 0.01의 범위로 각각 나타났으며, 초기밀도가 작을수록 압축지수 및 체적압축계수는 크게 나타나며, 초기밀도의 증가에 따라 감소하였다. 또한 밀도가 클수록 C_c 및 C_c`의 값의 차이는 감소하여 초기밀도가 1.40 g/cm^3 경우, 거의 변곡점이 나타나지 않았다.

6. 굴패각의 파쇄는 다짐 및 수직하중에 의해 거의 유사하게 발생하므로 항복하중인 σ_p = 0.7 ~ 1.1 kg/cm^{2}이상의 하중으로 다짐을 실시하여 γ_{to} = 1.40 g/cm^3 이상의 밀도를 가지는 시료를 조성하면 입자파쇄로 인한 급격한 침하는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1.굴패각을 혼합한 특수 콘크리트 개발 (2000), 한국해양연구소보고서, 해양수산부.

2.신방웅, 신은철, Barksdale, k. Richard (1990), “다짐모래말뚝에 의한 연약지반 개량에 관한 연구”, 건설기술연구소논문집, 제 8권, 2호, pp. 15～30.

3.윤길림 외 4인 (2000), "모래치환율에 따른 모래다짐말뚝(SCP)지반의 거동특성" , 대한토목학회 2000년도 학술발표회 논문집, 제 2호, pp. 243～246.

4.윤길림 외 5인 (2000), "모래다짐말뚝(SCP)의 치환율 변화에 따른 거동 특성 연구", 한국지반공학회 논문집 제 16권, 제 4호 pp. 117～128.

5.일본토질공학회, “현장기술자를 위한 흙과 기초 시리즈 16 , 연약지반 대책공법 설계에서 시공까지” , 도서출판 과학기술 pp. 165～203.

6.지반공학시리즈 6, "연약지반", 사단법인 한국지반공학회.

7.편집부 엮음 (1999), 연약지반 대책공법 설계에서 시공까지, 도서출판 과학기술. pp. 165～204.

8.Gibbs, H. J and Holtz, W.G. (1957), “Research on Determination density of sand by spoon penetration test” proc. of 4th ICSMFE , Vol 1, pp. 35～39 .

9.K H Head (1994), Manual of soil laboratory testing volume2, John WILEY&SONS, New York, pp. 189～267.

10.Ichimoto, A. (1981) “Construction and design of sand compaction piles” Soil improvement, General civil Engineering laboratory, vol 5, June (in Japanese).

11.T. Okamura, M.Kobayashi (1996), "Oyster shell"]sand mixture as material of sand compaction pile" proc, of Environmental Geotechinics, Balkema, Rotterdam, pp. 863～868.

12.Y. Miyahi, T. Okamura (2000), "Geo"]material properties of wasted oyster shell"]sand mixture and its aplication a s material for sand compaction pile" proc, of Coatal Geotechincal Engineering in Practice, Balkema, Rotterdam, pp. 675～680.

13.강병희, 박병기 (1997), “비배수 전단강도 및 삼축압축시험”, 지반공학 시리즈 1, 한국지반공학회, 도서출판 구미서관, pp. 134～225.

14.김병규, 황진영 (1999), “점토와 석회의 혼합에의한 반응생성물과 물성변화”,한국지반공학회, 학술발표회논문집, pp. 505～512.

15.김용필 외 5인 (2000), “지반공학 시험법 및 응용”, 문형진, 도서출판 세진사, pp. 1～138.

16.김주범, 박병기, 이승래 (1997), “연약지반”, 지반공학 시리즈 6, 한국지반공학회, 도서출판 구미서관, 1997, pp. 25～101.
17.도덕현, 공길용, 오창목, 유찬 (1995), “고화제를 이용한 천층 및 심층혼합처리공법의 현지 적용성에관한 연구”, 대한토목학회논문집 제15권 4호, pp. 1003～1013.
18.도덕현, 이인형, 조현래 (1994), “심층혼합처리공법에 의한 연약지반상의 물양장기초의 시공 사례”, 한국지반공학회, 학술발표회 논문집, pp. 93～108.
19.박건태, 김주철, 윤길림, 이종규 (2002), “경량기포혼합 준설토의 강도특성”,한국지반공학회 학술발표회 논문집, pp. 483～490.
20.박성용 외 3인 (1994), “국내 해안 연약지반의 공학적 특성 평가”,한국건설기술연구원, pp. 5～59.
21.윤길림 (2001), “굴패각 혼입 특수콘크리트 개발(Ⅱ)”, 한국해양연구원, 해양수산부, pp. 87～140.
22.윤길림 (2002), “준설토 재활용 방안 연구(Ⅱ)”, 한국해양연구원, 해양수산부, pp. 19～76.
23.윤길림, 김병탁, 김준형, 채영수 (2001), “굴패각 혼합토의 강도특성에 관한 연구”,대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 1～4.
24.이기호, 박준범 (2001), “굴패각을 포함한 혼합토의 전단 · 변형 특성 평가를 위한 균질화법의 적용”,한국지반공학회논문집 제17권 4호, pp. 183～190.
25.이기호, 한종옥 (2001), “굴패각 혼합토의 압밀 및 투수특성”,대한토목학회논문집 제21권 4호, pp. 375～384.
26.이영수, 이병두, 박정일 (1999), “흙의 탄소성 해석”, 도서출판 구미서관, pp. 207～211.
27.이용안, 김유성 (2001), “PFA 지반안정재 혼합토의 공학적 특성”,대한토목학회, 학술발표회 논문집, pp. 1～4.
28.임해식, 김경민 (2002), “한국산 고화재에 의한 연약지반의 개량효과”,지반환경공학회지 제3권 2호, pp. 11～19.
29.임해식, 조병기 (1998), “연약지반 개량공법 적용에 관한 연구”, 주택연구소, 대한주택공사, pp. 29～53.
30.조성정 (1983), “흙의 입도분포가 석회혼합토의 강도특성에 미치는 영향”,충북대학교 대학원 박사학위논문.
31.정하익 (1999), “연약지반의 압밀특성에 관한 연구”, 한국건설기술연구원, 한국토지공사, pp. 9～358.

32.천병식, 임해식, 전진규 (2000), “시멘트계 고화재에 의해 혼합처리된 지반의 설계정수에 관한 연구”,한국지반공학회 논문집 제16권 제2호, pp. 79～89.

33.천병식, 최기성 (1996), “열악한 지반조건에서 고결공법의 지반보강효과증대에 관한 연구”,한국지반공학회지, pp. 115～130.

34.三木博史 (1994), “혼합토 복합토의 이용기술”,토목기술 제2권 1호, pp. 25～36.

35.D. de Bruyn, J. F. Fhimus (1996), "The Influence of Temperature on Mechanical Characteristics of Boom Clay: The Results of an Initial Laboratory Programme", Engineering Geology 41, pp. 117～126.

36.G. Rajasekaran, S. Narasimha Rao (2002), "Compressibility Behaviour of Lime-Treated Marine Clay", Ocean Engineering 29, pp. 545～559.

37.Gary X. Tang, James Graham, James Blatz, Malcolm Gray, R. K. N. D. Rajapakse (2002), "Suctions, Stresses and Strengths in Unsaturated Sand-Bentonite", Engineering Geology 64, pp. 147～156.

38.Hu Shuguang, Li Yue (1999), "Research on the Hydration, Hardening Mechanism, and Microstructure of High Performance Expansive Concrete", Cement and Concrete Research 29, pp. 1013～1017.

39.Ian Jefferson, Christopher David Foss Rogers (1998), "Liquid Limit and the Temperature Sensitivity of Clays", Engineering Geology 49, pp. 95～109.

40.Linchang Miao, Songyu Liu, Yuanming Lai (2002), "Research of Soil-Water Characteristics and Shear Strength Features of Nanyang Expansive Soil", Engineering Geology 65, pp. 261～267.

41.Naser A.Al-Shayea (2001), "The Combined Effect of Clay and Moisture Content on the Behavior of Remolded Unsaturated Soils", Engineering Geology, pp. 319～342.

42.R. H. C Emmerson, M. D. Scrimshaw, J. W. Birkett, J. N. Lester (2001), "Solid Phase Partitioning of Metals in Managed Realignment Soils: Laboratory Studies in Timed Soil Sea-Water Batch Mixtures", Applied Geochemistry 16, pp. 1621～1630.

43.Shenbaga R. Kaniraj, Vasant G. Havanagi (1999), "Compressive Strength of Cement Stabilized Fly Ash-Soil Mixtures", Cement and Concrete Research 29, pp.673～677.

44.Tao-Wei Feng, Jia-Yih Lee, Yi-Jiuan Lee (2001), "Consolidation Behavior of a Soft Mud Treated with Small Cement Content", Engineering Geology, pp. 327～335.

제 5 장 굴패각 혼합토의 모래다짐말뚝(SCP)현장시험

제 1 절 실내시험

본 연구에 사용된 시료는 고성지역에서 운반된 굴패각과 모래를 자연상태에서 건조시켜 사용하였다. 굴패각 집하장에서 1차파쇄한 굴패각을 추가 파쇄하지 않고 실험에 사용하였다. 굴패각 혼합토는 체적비를 기준으로 굴패각 혼합비율을 각각 20%, 30%, 40%, 50%로 달리하여 시료를 준비하였고, 모래만의 시료를 준비하여 총 5개의 시료에 대해 시험을 수행하였다. 그림 5.1.1과 5.1.2에서 나타낸 것과 같이 시료의 혼합비율에 따른 비중시험과 체분석 실험을 실시하였고, 그 결과를 그림 5.1.3과 표 5.1.1에 나타내었다. 표 5.1.1에서 나타나는 것과 같이, 균등계수(C_u)의 범위는 247 - 3.25로, 굴패각의 혼합비율이 증가할수록 균등계수는 증가하는 양상을 보이고 있다. 균등계수가 작을수록 균등한 입도분포를 이루고 있는 것으로 굴패각혼합토의 경우에는 굴패각의 혼합비가 증가할수록 시료의 입도분포는 불균등해지는 경향이다. 곡률계수의 경우에(C_g)는 0.69 - 1.08의 범위를 나타내고 있으며, 굴패각의 혼합비가 감소할수록 곡률계수가 증가하였다.

그림 5.1.1 굴패각 혼합토의 비중시험

그림 5.1.2 굴패각 혼합토의 체분석실험

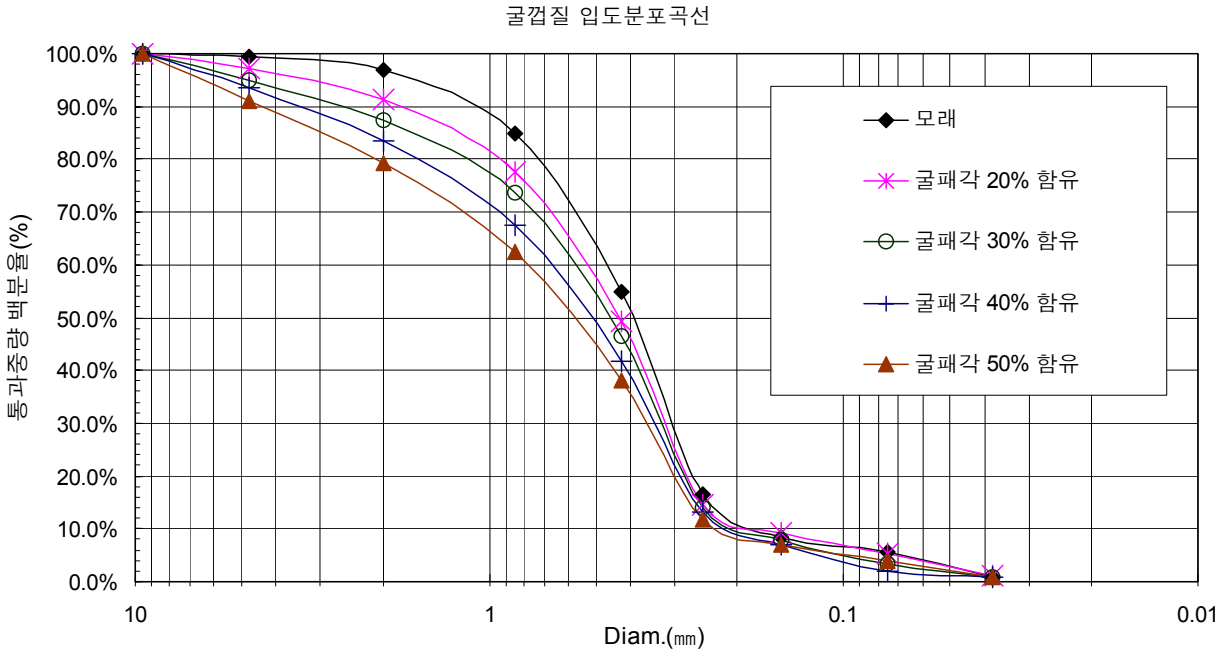


그림 5.1.3 모래 굴패각의 입도분포

표 5.1.1 모래와 굴패각의 물리적 특성

시료		비중	D_{10}(mm)	D_{30}(mm)	D_{60}(mm)	C_u	C_g
모래		2.681	0.19	0.31	0.47	2.47	1.08
굴패각 함율비 (%)	20	2.687	0.2	0.32	0.53	2.65	0.97
	30	2.695	0.22	0.33	0.57	2.59	0.87
	40	2.709	0.22	0.35	0.66	3.00	0.84
	50	2.714	0.24	0.36	0.78	3.25	0.69

제 2 절 굴패각 혼합토의 모래다짐말뚝(SCP) 현장타설실험

1. 현장실험의 위치

본 조사는 부산광역시 부산신항 배후도로(2공구)현장에 모래와 굴패각의 배합비율을 달리하여 모래다짐말뚝을 타설하였다. 현장실험의 위치를 그림 5.2.1에 나타내었다.

그림 5.2.2에서 나타내는 것과 같이, SCP장비는 직경 700mm로 본 실험의 목표심도인 약10m까지 시공하였다. SCP 홀의 중심간 간격을 3.2m로 타설하였다.

그림 5.2.1 실험현장의 위치

그림 5.2.3의 실험에 사용된 굴패각은 통영지역의 굴패각 매립장에서 입수한 것으로, 1차파쇄된 것을 그대로 사용하였으며 각 입자의 입도상태가 일정하지 않았다. 시험시공의 위치에서 10-20m에 근접하여 현장에 반입하였다. 또한, 반입된 시료에서 입경분포 등을 확인할 실내시험을 위한 샘플시료를 채취하였다.

그림 5.2.4와 같이 굴패각과 모랭의 혼합토는 현장에서 페이로더에 의해서 혼합하였다. 사용한 모래는 양질의 을숙도사로서, 굴패각 시료가 반입된 곳에 근접하여 혼입되지 않도록 유의하여 반입하였다. 또한, 모래의 입경분포 등의 실내실험에 사용하기 위해 샘플을 채취하였다.

그림 5.2.2 SCP타설 장비

그림 5.2.3 실험에 사용된 굴패각

그림 5.2.4 모래와 굴패각의 혼합과정

제 3 절 표준관입시험 (SPT) 및 확인보링 지반조사

1. 표준관입시험 (SPT)의 개요

1) 위치선정

모래와 굴패각의 배합비율을 달리하여 직경 700mm의 SCP가 기시공된 상태이며, 중심간 간격이 3.2m로 하여 6개소 및 시험시공 부지에 인접한 원지반에서 지반조사를 실시하였다. 지반조사위치와 번호는 그림 5.3.1와 그림 5.3.2 및 표5.3.1과 같다.

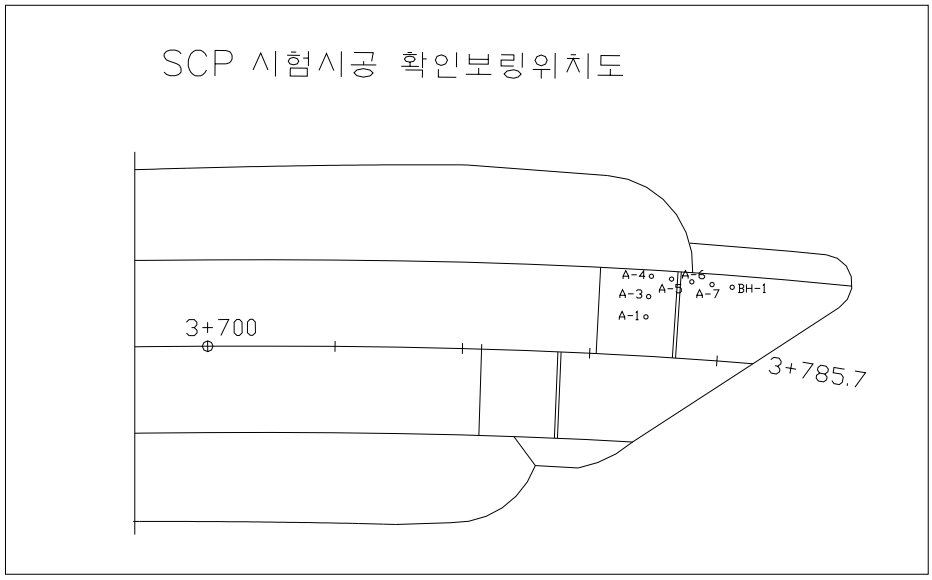


그림 5.3.1 지반조사 위치도

그림 5.3.2 조사위치 전경

표 5.3.1 조사위치별 SCP 모래 및 굴패각의 배합비

공번	굴패각 혼합비
A-1	0% (모래)
A-3	10%
A-4	20%
A-5	30%
A-6	40%
A-7	50%
BH-1	원지반

2) 지반조사

그림 5.3.3과 그림 5.3.4에 나타낸 것과 같이 시추 작업은 회전식 굴진 방식에 따라 진행되었으며, 공벽을 보호하여 작업을 원활히 수행하고 표준관입시험시 정확한 결과를 얻기 위하여 굴진 심도에 따라 케이싱을 삽입하였다. 모든 시추는 NX 구경(Ø76mm)으로 작업하였으며, 시추심도는 SCP 시공심도가 G.L,-10m 정도이므로, 이 심도를 기준으로 굴진속도와 회수된 슬라임 상태를 파악하여 현장에서 원지반으로 판단되면 시추를 종료하였다.

그림 5.3.3 SPT 장비

그림 5.3.4 SPT의 케이싱 삽입 작업

3) 표준관입시험

시추작업과 병행하여 지반의 개략적인 상대밀도 및 구성 성분을 파악하고 교란된 시료를 채취하기 위하여 표준관입시험을 한국공업규격(KS F 2307)에 따라 실시하였다.

4) 지하수위측정

조사지역의지하수위 측정은 현장에서 관리 중인 지하수위 관측정에서 실시되었다. 그림 5.3.5에서 나타낸 것과 같이 조사위치에 인접한 3개의 관측정에서 측정 후 지하수위를 결정하였다.

그림 5.3.5 지하수위 측정을 위한 관측공

2. 지형 및 지질개요

본 조사지역 일원의 지질은 중생대 백악기 유천층군의 안산암질 화산각력암과 이를 관입 하고 있는 불국사 관입암류인 각섬석화강섬록암으로 구성되어 있으며, 일부 지역을 신생대 제 4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다. 충적층은 낙동강 하구에 넓고 두껍게 분포하고 있으며 낙동강 하구에 분포해 있는 본 층은 모래, 뻘, 점토 등의 상당한 층후를 가지고 퇴적되어 있으며 낙동강 하구쪽 해안에는 해수의 운동으로 길쭉한 사구(砂丘)(Sand Dune)가 많이 발달해 있다(부산・가덕 도폭 1:50,000, 한국동력자원연구소, 1983년, 참조). 조사지역 지질개요를 그림 5.3.6에 나타내었다.

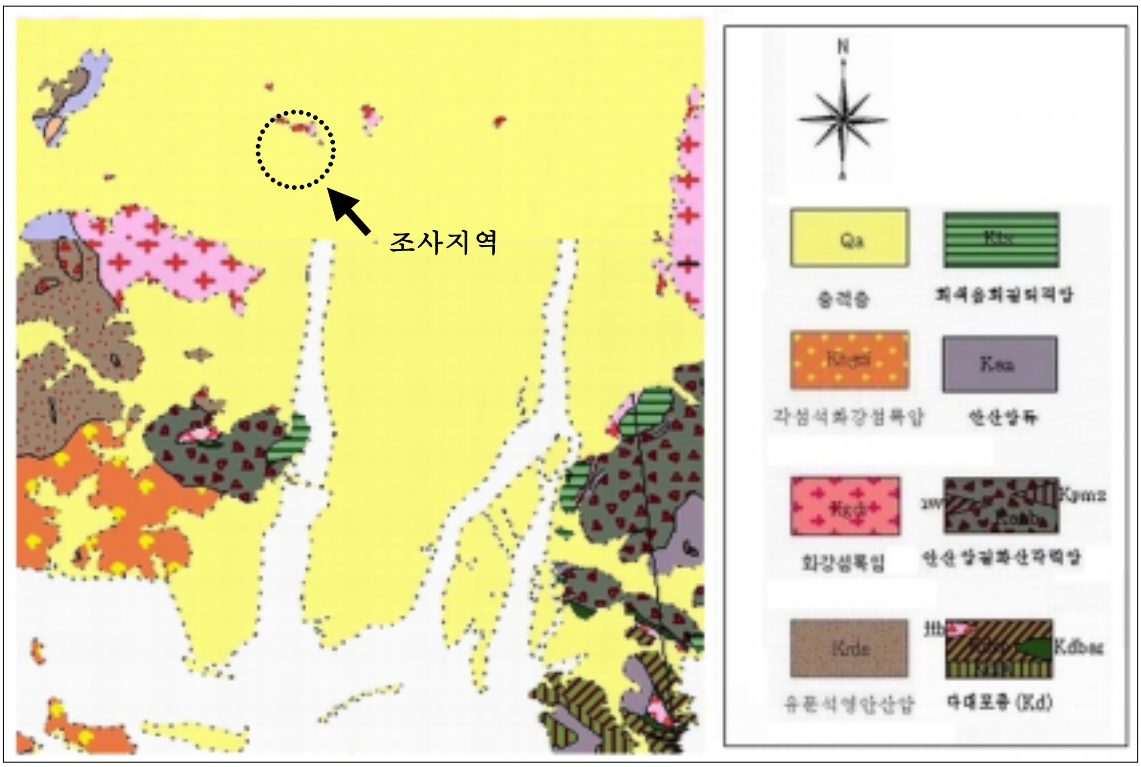


그림 5.3.6 조사지역 지질개요

1) 지층개요

본 조사시 원지반에 대해 실시된 BH-1번공의 지반조사 결과에 의하면 상부에 매립층이 분포하고 있으며, 그 아래로 퇴적층인 점토층과 모래 또는 모래자갈층이 분포하며, 기반암의 풍화대인 풍화토(Weathered soil)층 및 풍화암(Weathered rock)층이 분포하고 있는 것으로 나타난다. BH-1번공을 기준으로 현장의 지층 분포상태는 표 5.3.2와 같다.

표 5.3.2 지층의 분포 상태(BH-1번공 기준)

지 층		토 질	층 후(m)
매립	모래층	인위적인 모래의 매립	0.4
	자갈질모래	점토, 모래, 자갈의 매립층	0.9
점토층		실트질 점토층	5.1
모래층		중, 세립질의 모래층	2.7
풍화토층		기반암의 풍화토층	2.0
풍화암층		기반암의 풍화암층	0.4

A) 매립층(Fills)

본 층은 매립층으로서 0.4m 두께의 인위적인 모래의 매립층과 0.9m 두께의 점토, 모래,자갈의 매립층으로 구분된다. 본 층의 색조는 전반적으로 담갈색을 나타낸다.

B) 퇴적층(Alluvial deposits)

가) 실트질점토층(Silty Clays)

본 층은 실트질 점토층으로 매립층 하부에 분포하며 5.1m의 층후로 나타난다. 본 층의 색조는 담회색을 띤다. 시추조사시 병행한 표준관입시험 결과, N치는 0/30～1/30회의 분포범위를 나타낸다.

나) 모래층(Sands)

본 층은 모래층으로 2.7m의 층후로 나타난다. 본 층의 구성성분은 중,세립질의 모래층으로 패각 및 실트질모래가 일부 함유되어 있다. 본 층의 색조는 전반적으로 담갈색을 나타낸다. 표준관입시험 결과, N치는 2/30～10/30을 나타내었으며, 보통 굳은(Medium Stiff) 연경도를 나타낸다.

C) 풍화대층(Weathered zone)

일반적으로 풍화대층은 풍화잔류토층과 풍화암층으로 구분할 수 있다. 풍화잔류토층은 상부에서 암석이 완전 풍화(completely weathered)된 이후 암석의 구조 및 조직이 대부분 파괴되어 육안으로 관찰할 수 없는 상태이며, 장석 및 유색광물이 점토화되어 있는 상태이다. 한편 풍화암층은 우선 풍화정도에 의한 기준으로는 암석이 완전 풍화(completely weathered) 상태로서 장석 및 유색광물들이 원위치에서 와해되어 응집력이 약화되었으나, 모암의 조직 및 구조를 유지하고 있는 상태이다.

가) 풍화토층(Weathered soil)

본 층은 기반암인 흑운모화강암이 완전풍화(completely weathered)된 풍화토층으로 대체로 상부는 모암의 조직 및 구조가 파괴되어 있으나, 하부에는 부분적으로 모암의 조직 및 구조가 잔존해 있는 상태이다. 황갈색의 색조를 띠는 본 층은 2.0m의 두께로 파악되었다.

나) 풍화암층(Weathered rock)

본 층의 상부에서는 부분적으로 모암의 조직 및 구조가 파괴되어 있으나, 대부분 모암의 조직 및 구조를 유지하고 있는 상태이다. 조사목적상 풍화암 0.4m 굴진 후 종료하였으며, 색조는 황갈색을 띤다.

2) 표준관입시험결과

금번조사에서 시추조사와 병행하여 실시한 표준관입시험 결과를 기술하면 표 5.3.3 및 그림 5.3.7과 같다. 단, 비교의 목적상 원지반 시험결과인 BH-1번공의 퇴적층(점토층과 모래층)에 대해서만 정리하였다. 또한 샘플러를 통하여 얻어진 시료에 대하여 그림 5.3.8과 그림 5.3.9에 나타내었다.

표 5.3.3 표준관입시험결과

공 번	모래배합비율	N치 범위
A-1	모래 100%	3/30～16/30
A-3	패각 10%	4/30～14/30
A-4	패각 20%	5/30～10/30
A-5	패각 30%	7/30～22/30
A-6	패각 40%	3/30～7/30
A-7	패각 50%	7/30～14/30
BH-1	원지반	0/30～10/30

그림 5.3.7 원지반 시료채취

그림 5.3.8 굴패각혼합시료채취

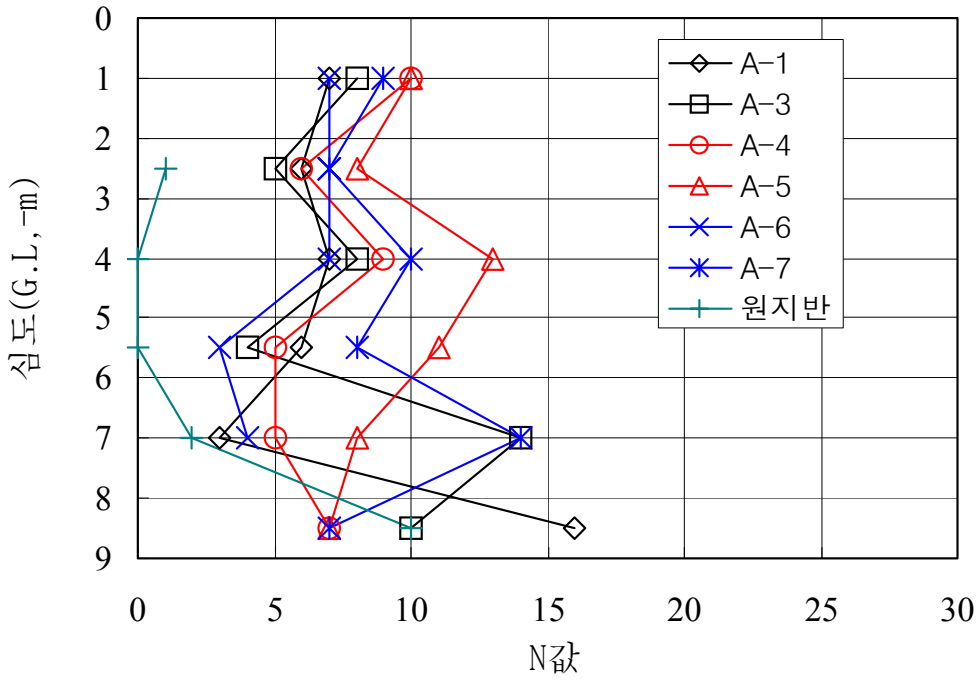


그림 5.3.9 표준관입시험 결과

3) 지하수위측정결과

본 조사위치 인근에 위치한 3개소의 지하수위 관측정에서 실시한 지하수위 측정결과는 표 5.3.4와 같다.

표 5.3.4 지하수위 측정결과

측정위치	지하수위(G.L,m)
No.1	-6.9
No.2	-7.0
No.3	-7.0

제 4 절 정재하시험

1. 실험준비 및 실험개요

그림 5.4.1에 굴패각 혼합 SCP말뚝의 지지력을 측정하기 위하여 시험 시공되는 말뚝재하시험의 모식도를 나타내었다. 또한, 그림 5.4.2에서 그림 5.4.5까지 각 재하시험 단계에서 계측에 필요한 재하장비 및 sensor에 대하여 나타내었다.

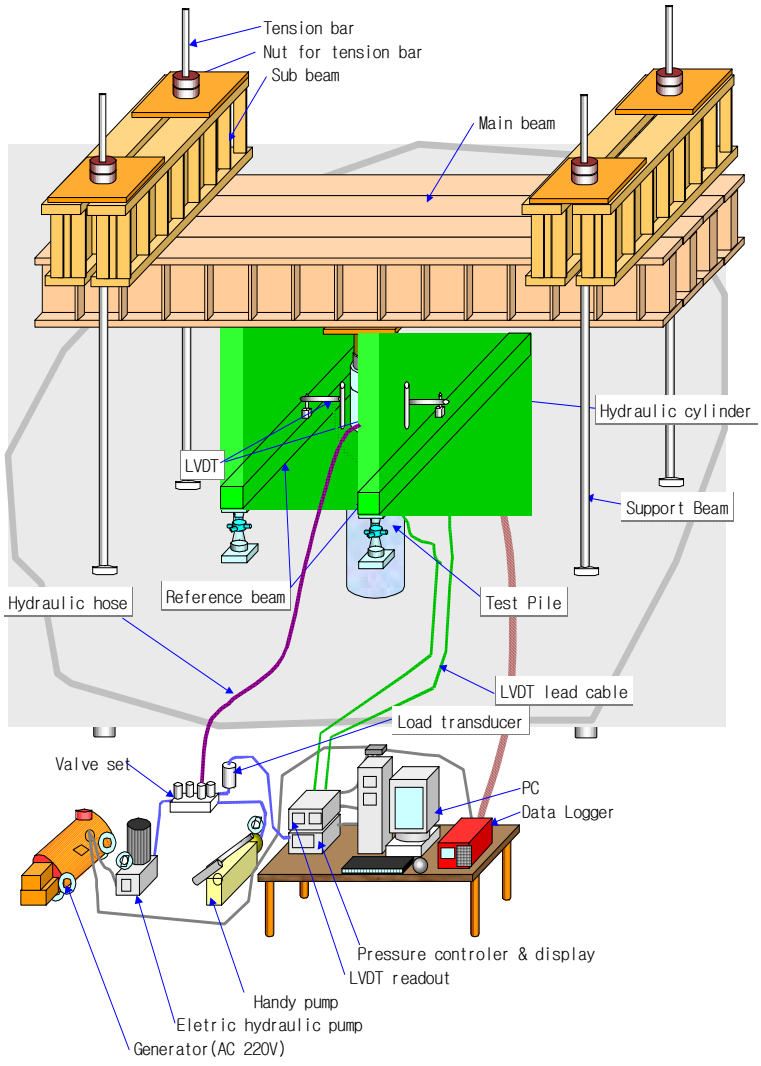


그림 5.4.1 재하시험 모식도

재하시험의 준비과정은 다음과 같다.

1) 재하방법은 실하중을 재하하는 방법과 반력을 이용하는 방법 두가지가 있다. 본 현장에서는 앵커의 반력을 이용하여 하중을 재하한다. 따라서 시험말뚝 시공 후 시험말뚝 4면에 앵커를 시공한다.

2) 재하대및 Main-Beam은 총 200ton이상의 하중이 작용하며 재하시험 중 Main-Beam이 변위가 발생되지 않도록 특별 제작한다.

3) 시험말뚝 두부를 정지작업을 하고, Bearing Plate를 설치한다.

4) Bearing Plate 위에 Hydraulic cylinder를 설치한다.

5) Main beam을 설치하고 Sub Beam을 연직방향으로 설치한다.

6) Tension Bar를 이용하여 Anchor와 Sub Beam을 연결한다.

7) Reference Beam을 설치하고 LVDT와 다중침하계를 설치한다.

8) 재하시험 실시 현장에는 야간시험에 안전하도록 조명장치를 하여 재하시험 실시에 만전을 기한다.

9) 재하는 재하대 위에 좌우대칭이 되도록 하여 편심이 발생하지 않도록 세심한 주의를 하여 재하한다.

그림 5.4.2 재하시험 전경

그림 5.4.3 Tension bar (앵커의 반력을 이용한 재하)

그림 5.4.4 Bearing plate(재하판)의 계측기 설치

그림 5.4.5 다중침하계(지중침하계측용)

2. 시험방법

Pile 재하시험은 다음의 하중재하 방법 및 규정에 의거 시행한다.

1) 시험은 KSF - 2445 및 ASTM D -1143의 규정을 적용하여 실시하고, 보완사항은 일본 토질공학의 T - 71 및 관계규정을 참고한다.

2) 시험은 4th Cycle Type, Stress Control Method (Maintained Load Test)에 의함(표 5.4.1 참조).

3). 변위측정은 1/100mm감도의 Dial Indicator 2개를 Test Pile에서 일정간격 떨어져 설치된 기재대에 부착하여 측정한다. 부상식 바지선을 이용하여 측정한다.

4) 재하는 표준재하 방식을 적용하였으며, 최대시험하중을 10단계로 나누어 재하방식을 채택하여, 1단계하중 (Step Load)을 5ton으로 하고, 시험최대하중은 극한하중 또는 400mm 변위시까지 한다.

5) 침하측정 시간간격은 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20분으로 하며, 추가측정은 이에 비례하여 측정간격을 적용한다.

6) 침하는 시간당 침하량으로 환산하여 0.25mm보다 적을 때까지 측정하며, 최종하중 단계에서는 침하상태에 따라 시간을 조정하여 측정한다.

7) 하중제거는 재하의 역순으로 시행하며, 단계마다 10분 동안의 Unloading량을 측정한다.

표 5.4.1 정재하시험 주기표

구 분	1주기		2주기		3주기		4주기	
	하중 (ton)	관측시간 (분)	하중 (ton)	관측시간 (분)	하중 (ton)	관측시간 (분)	하중 (ton)	관측시간 (분)
Loading	0	0						
	5	10	5	10	5	10	5	10
	10	10	10	10	15	10	10	10
			15	10	20	10	15	10
			20	10	25	10	20	10
					30	10	25	10
							30	10
							40	10
Unloading								
							30	10
					20	10	20	10
			10	10	10	10	10	10
	5	10						
	0	10	0	10	0	10	0	10

그림 5.4.6에서 그림 5.4.11은 각 시험단계별 준비작업 및 sensor의 위치를 나타내었다. 시험 전에 SCP두부를 확인한 후, 주위지반을 평탄작업을 한다. 심도 2, 4, 6, 8m의 깊이로 매설한 다중침하계의 두부를 설치한 후에 재하판과 각각의 계측기를 설치한다. 그림 5.4.11은 재하시험후의 지반침하를 보여주고 있다.

그림 5.4.6 시험전 지반평탄 작업

그림 5.4.7 시험전 다중침하계의 두부 설치

그림 5.4.8 재하판 설치

그림 5.4.9 시험전경

그림 5.4.10 계측기 설치

그림 5.4.11 시험후 지반침하

3. 정재하 시험 결과

본 시험의 결과 분석방법은 다음과 같다.

① 극한하중에 의한 분석법

② 항복하중에 의한 분석법[하중-침하 곡선법, LogP-LogS 곡선법, S-Logt 곡선법, P-dS/d(Logt) 곡선법]

③ 침하량에 의한 분석법(전침하량에 의한 분석, 잔류침하량에 의한 분석)으로 시행한다.

1) A-1 case(굴패각 혼합비 0%)

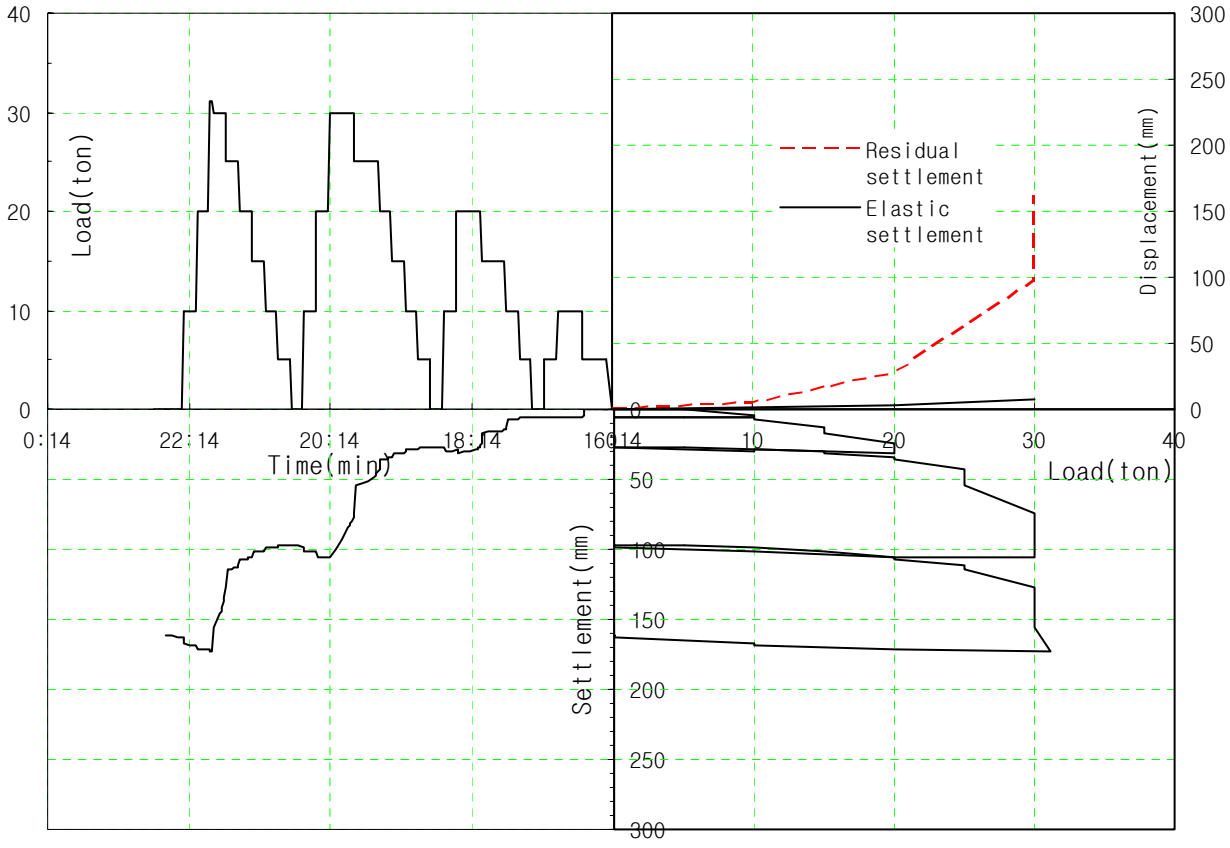


그림 5.4.12 하중-침하-시간 곡선 (A-1 case)

가) 하중-침하결과의 분석

● P-S 곡선법

시험하중 30ton 이후 재하 시 급격한 침하를 나타내었다. 최대시험하중은 31.1ton이었으며, 변위가 급격히 발생되어, 항복하중은 23.6ton에서 39㎜로 나타났으며 안전율 2.0을 적용하면 허용지지력은 11.8ton이며, 31.1ton을 극한하중으로 보면 안전율 3.0 적용시에는 허용지지력은 10ton으로 나타났다.

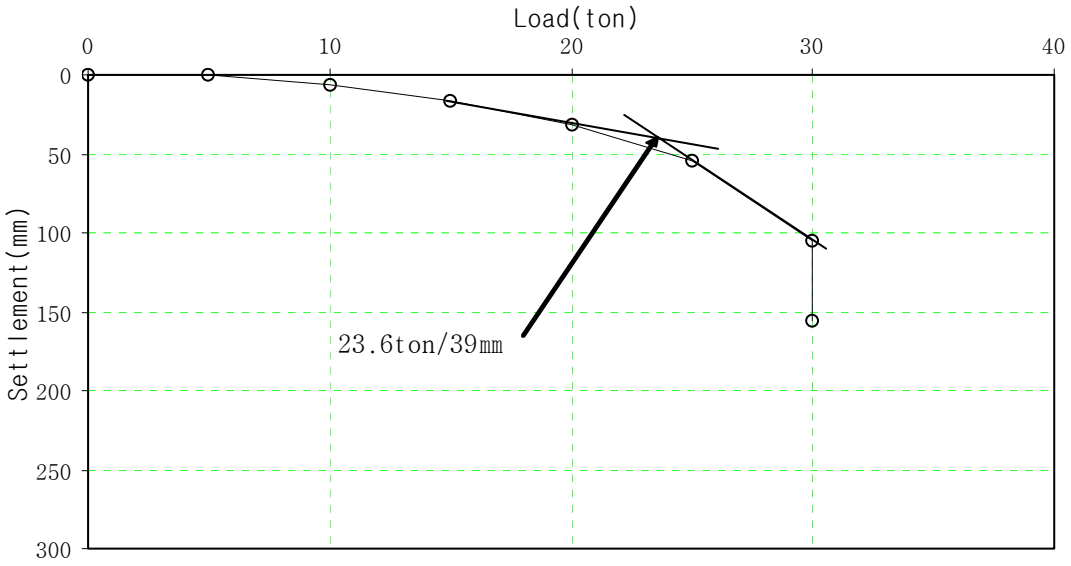


그림 5.4.13 P-S Curve (A-1 case)

● LogP-LogS 곡선법

LogP-LogS 곡선법에 의한 해석결과 23ton에서 항복점이 나타나 안전율 2.0 을 적용하면, 허용지지력 11.5ton으로 나타났으며, 31ton을 극한하중으로 보면 안전율 3.0을 적용 시 허용지지력이 10ton으로 나타났다.

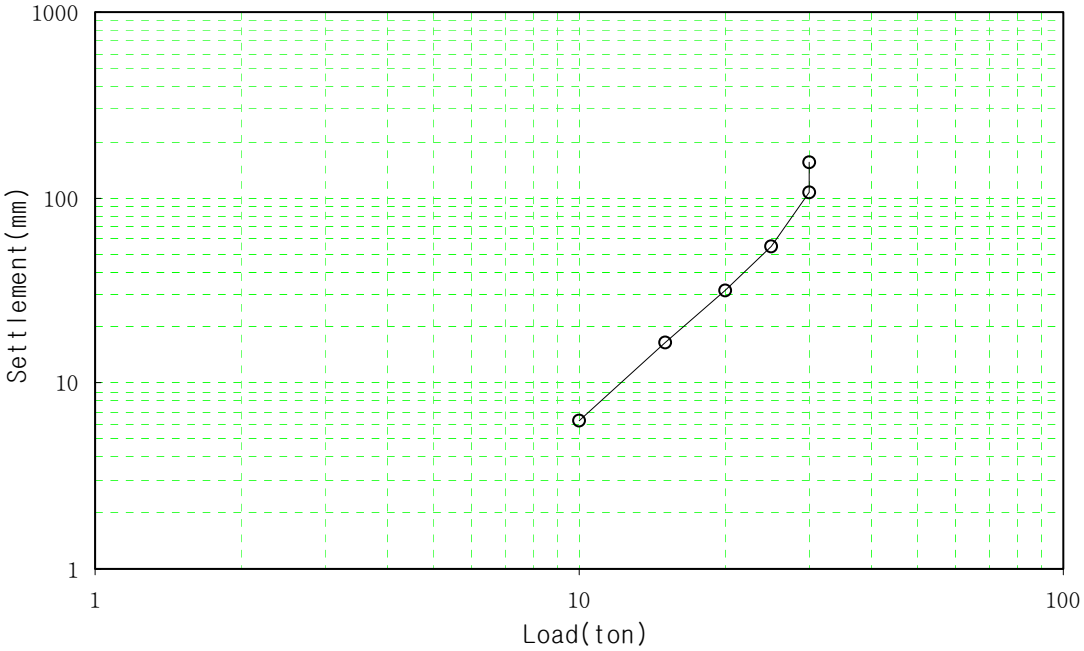


그림 5.4.14 LogP-LogS Curve (A-1 case)

● S-Logt 곡선법

각 하중 단계에서 침하경향을 보면 20ton 이후 기울기 변화를 나타내고 있다 따라서 안전율 2.0을 고려한 허용지지력은 10ton으로 나타났다.

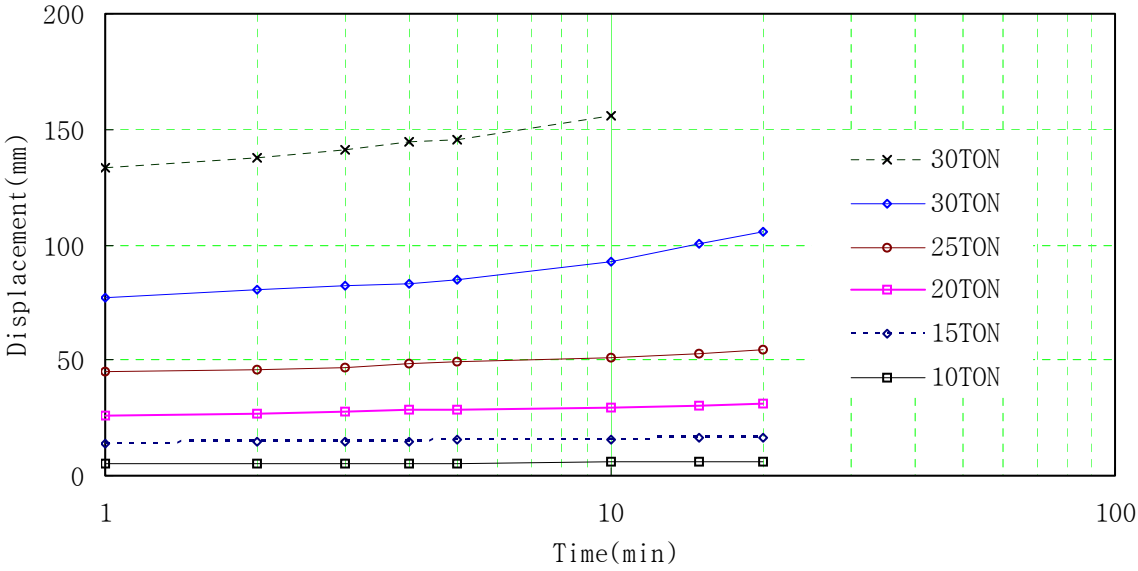


그림 5.4.15 S-Logt Curve (A-1 case)

● P-dS/dLogt 곡선법

본 해석법은 2개의 직선이 급변하는 점에서의 하중을 항복하중으로 판정하는 방법으로 23.4ton에서 변위가 발생되었으며, Creep Coefficient는 재하하중 15ton에서 2.06을 나타내었다.

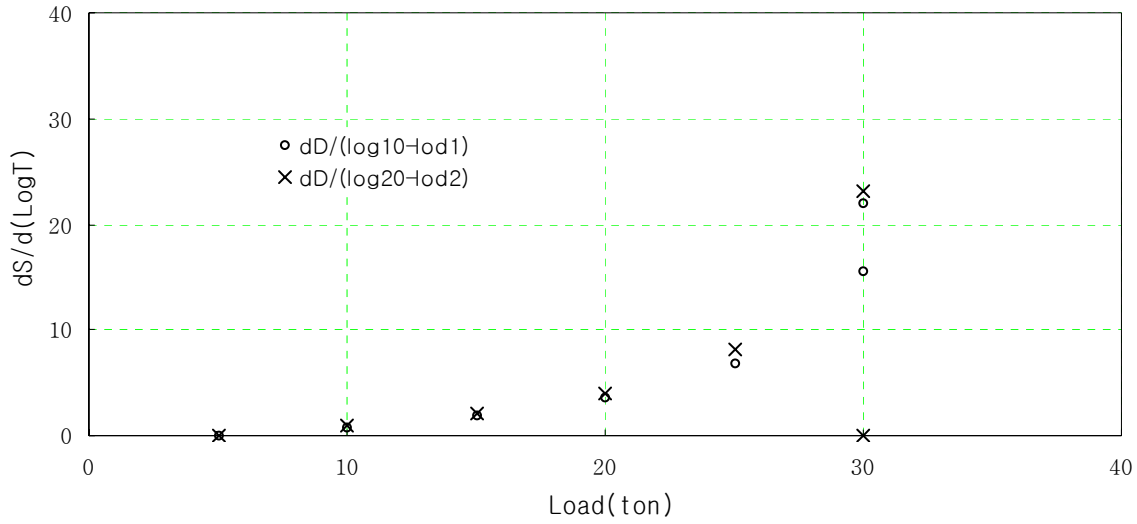


그림 5.4.16 P-dS/dLogt Curve (A-1 case)

● 침하량 분석 결과

분석결과 전침하량에 대해 Terzaghi/Peck와 뉴욕시 기준등에서 정하고 있는 1inch 때의 하중을 극한하중으로 적용 시 17.8ton으로 나타나며, 잔류침하량 1/2inch 때의 하중을 적용하면 13.2ton으로 나타났다.

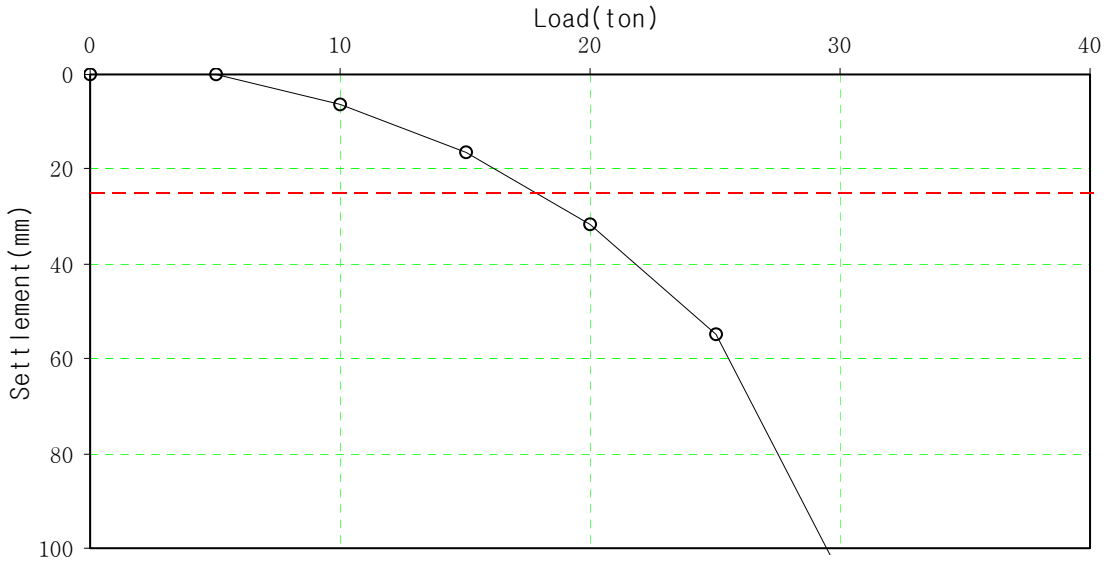


그림 5.4.17 P-S Curve(전침하량 분석) (A-1 case)

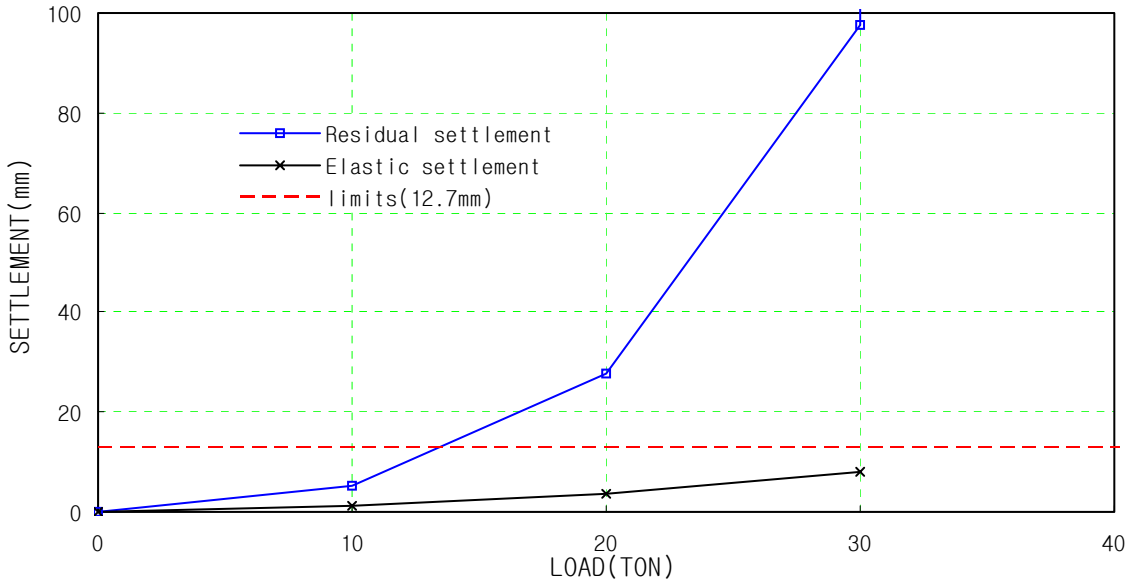


그림 5.4.18 Residual & Elastic settlement curve (A-1 case)

● 지중 침하량 분석 결과

지중침하량의 경우 G.L.(-)2.0m에서 15ton이후 급격한 변위를 발생하였으며, G.L.(-)4.0m ~ (-)8.0m의 경우 일관성이 없는 데이터를 나타내었다.

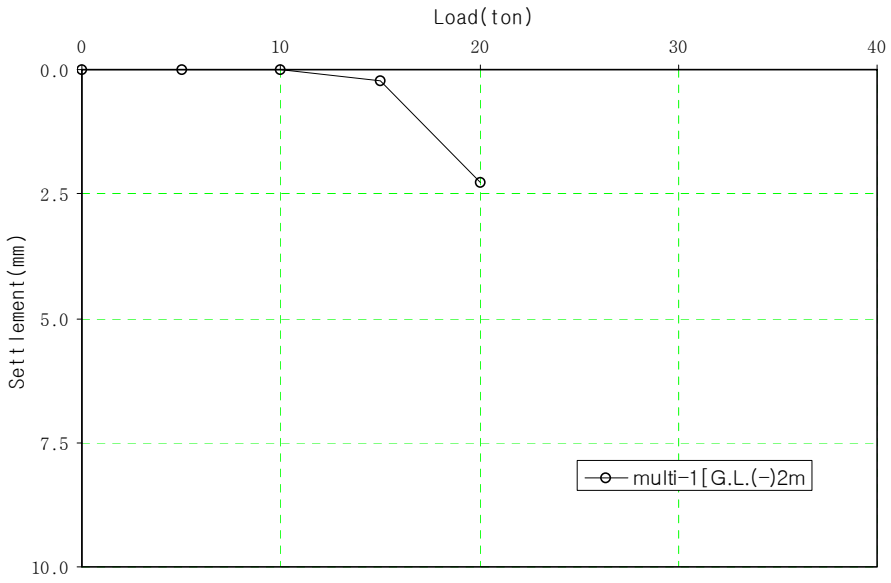


그림 5.4.19 Multi-settlement curve (A-1 case)

2) A-4 case (굴패각 혼합비 20%)

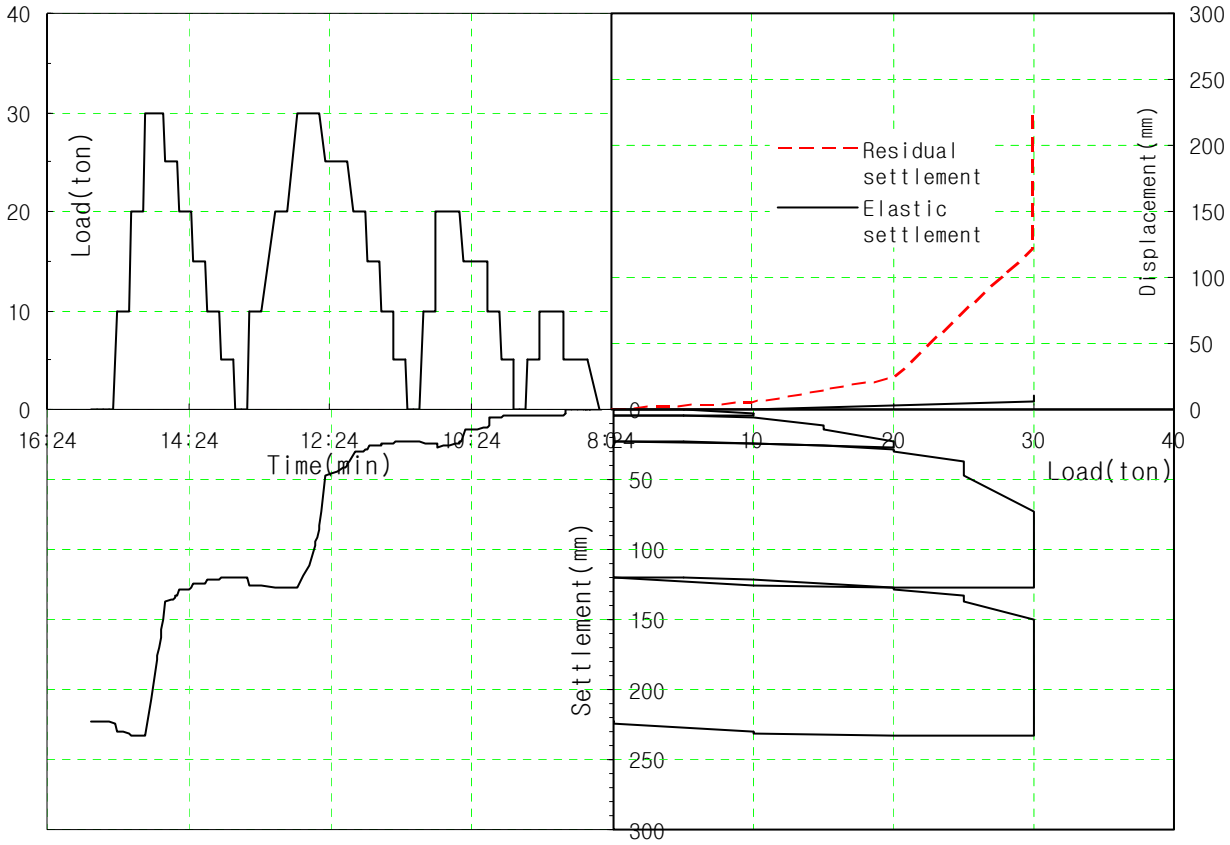


그림 5.4.20 하중-침하-시간 곡선 (A-2 case)

● P-S 곡선법

시험하중 30ton 이후 재하 시 급격한 침하를 나타내었으며, 최대시험하중은 30ton이었으며, 변위가 급격히 발생되어, 항복하중은 24.3ton에서 39㎜로 나타났으며 안전율 2.0을 적용하면 허용지지력은 12.1ton이며, 30ton을 극한하중으로 보면 안전율 3.0 적용시 허용지지력은 10ton으로 나타났다.

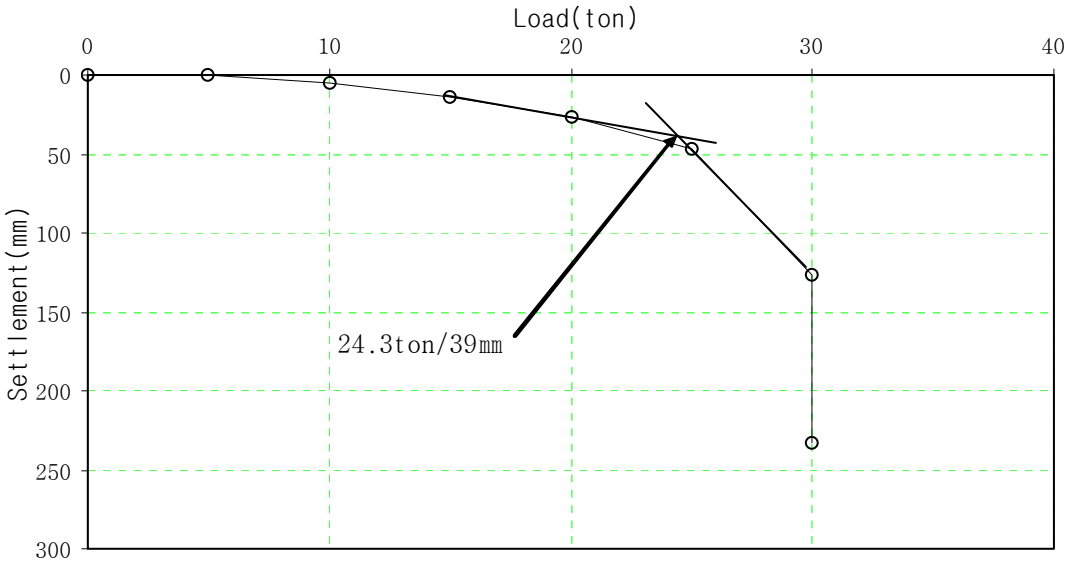


그림 5.4.21 P-S Curve (A-2 case)

● LogP-LogS 곡선법

LogP-LogS 곡선법에 의한 해석결과 24ton에서 항복점이 나타나 안전율 2.0을 적용하면, 허용지지력 12ton으로 나타났으며, 30ton을 극한하중으로 보면 안전율 3.0을 적용 시 허용지지력이 10ton으로 나타났다.

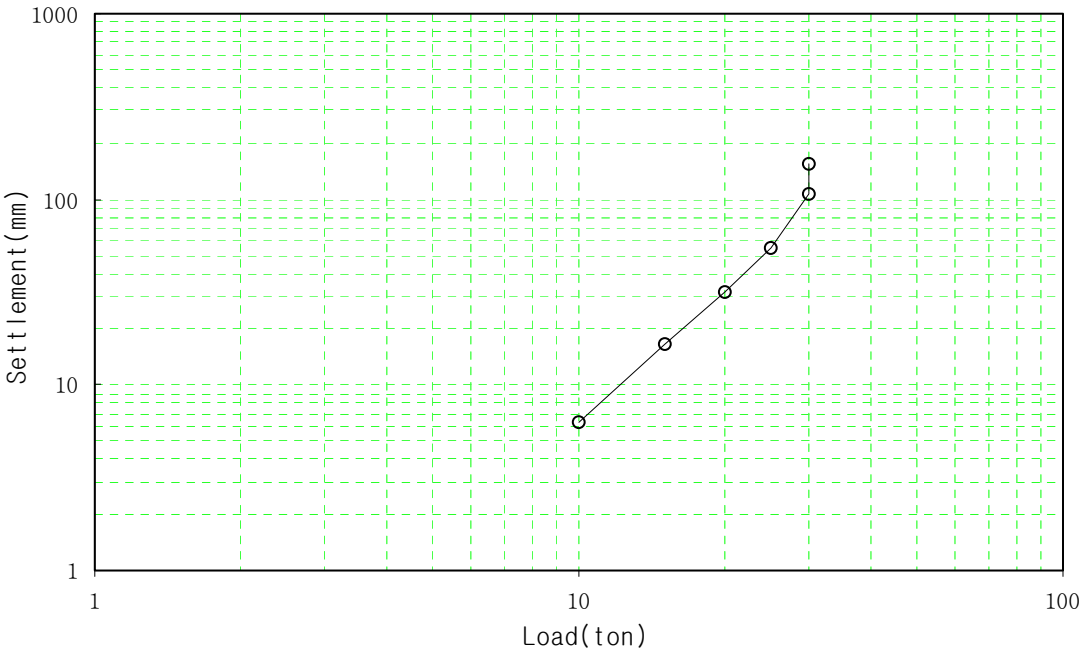


그림 5.4.22 LogP-LogS Curve(A-2 case)

● S-Logt 곡선법

각 하중 단계에서 침하경향을 보면 20ton 이후 기울기 변화를 나타내고 있다 따라서 안전율 2.0을 고려한 허용지지력은 10ton으로 나타났다.

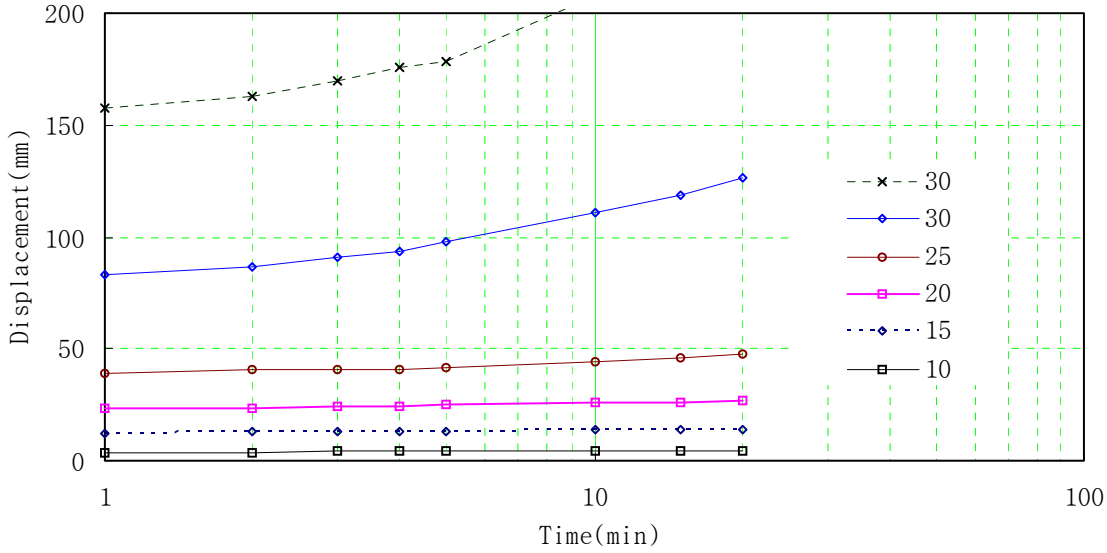


그림 5.4.23 S-Logt Curve (A-2 case)

● P-dS/dLogt 곡선법

본 해석법은 2개의 직선이 급변하는 점에서의 하중을 항복하중으로 판정하는 방법으로 23.4ton에서 변위가 발생되었으며, Creep Coefficient는 재하하중 20ton에서 2.37을 나타내었다.

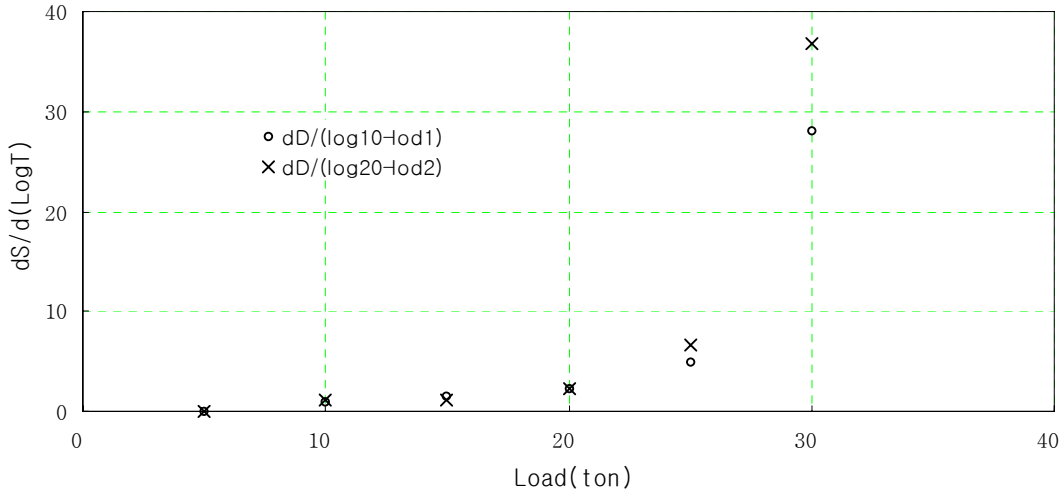


그림 5.4.24 P-dS/dLogt Curve (A-2 case)

● 침하량 분석 결과

분석결과 전침하량에 대해 Terzaghi/Peck와 뉴욕시 기준등에서 정하고 있는 1inch 때의 하중을 극한하중으로 적용 시 17.8ton으로 나타나며, 잔류침하량 1/2inch 때의 하중을 적용하면 13.2ton으로 나타났다.

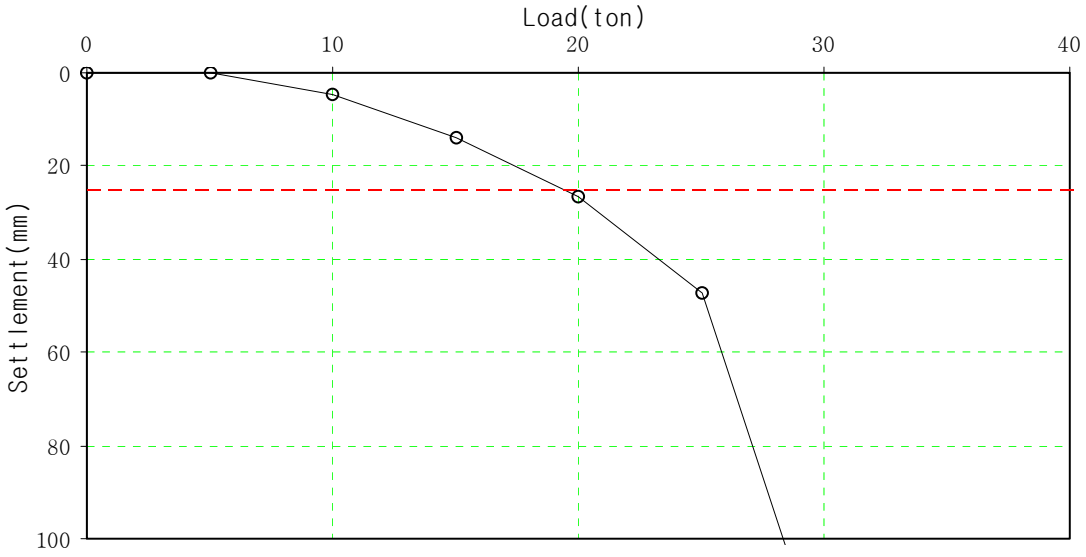


그림 5.4.25 P-S Curve(전침하량 분석) (A-2 case)

● 지중 침하량 분석 결과

지중침하량의 경우 G.L.(-)2.0m에서 20ton 이후 급격한 변위를 발생하였으며, G.L.(-)4.0m~(-)8.0m의 경우 일관성이 없는 데이터를 나타내었다.

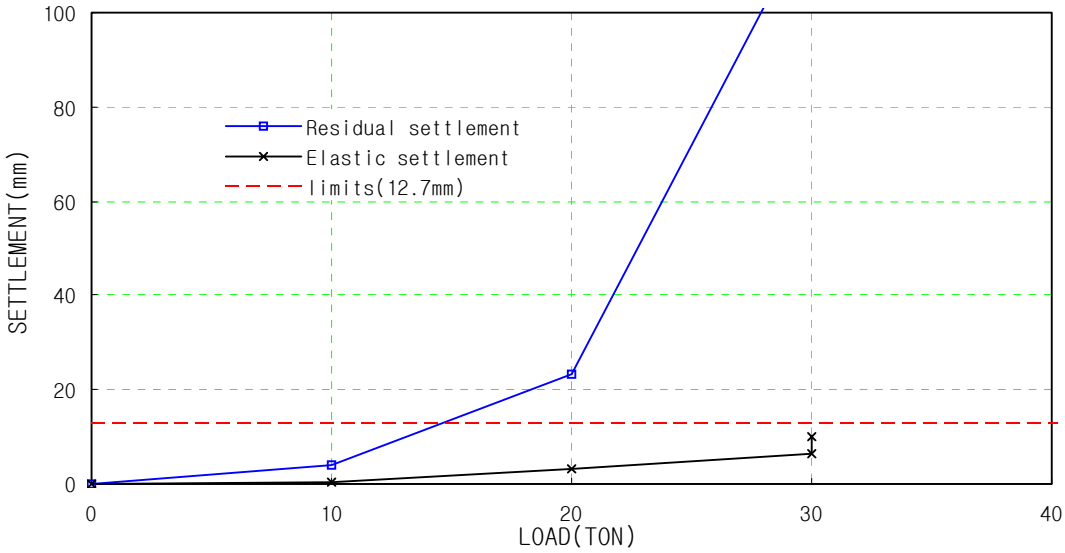


그림 5.4.26 Residual & Elastic settlement curve (A-2 case)

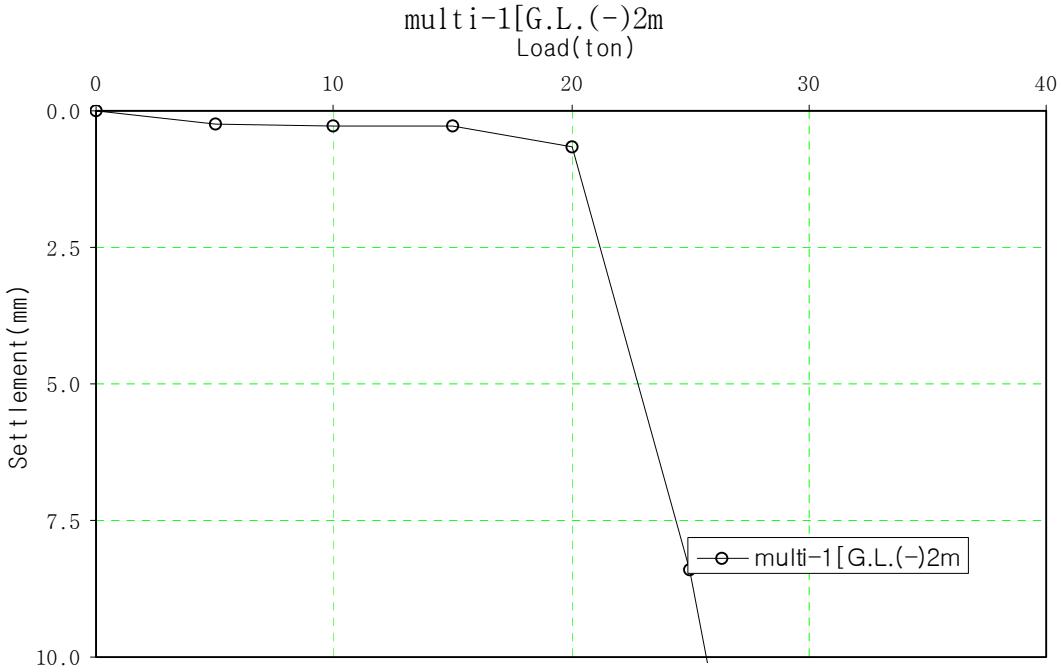


그림 5.4.27 Multi-settlement curve (A-2 case)

3)A-5case(굴패각혼합비30%)

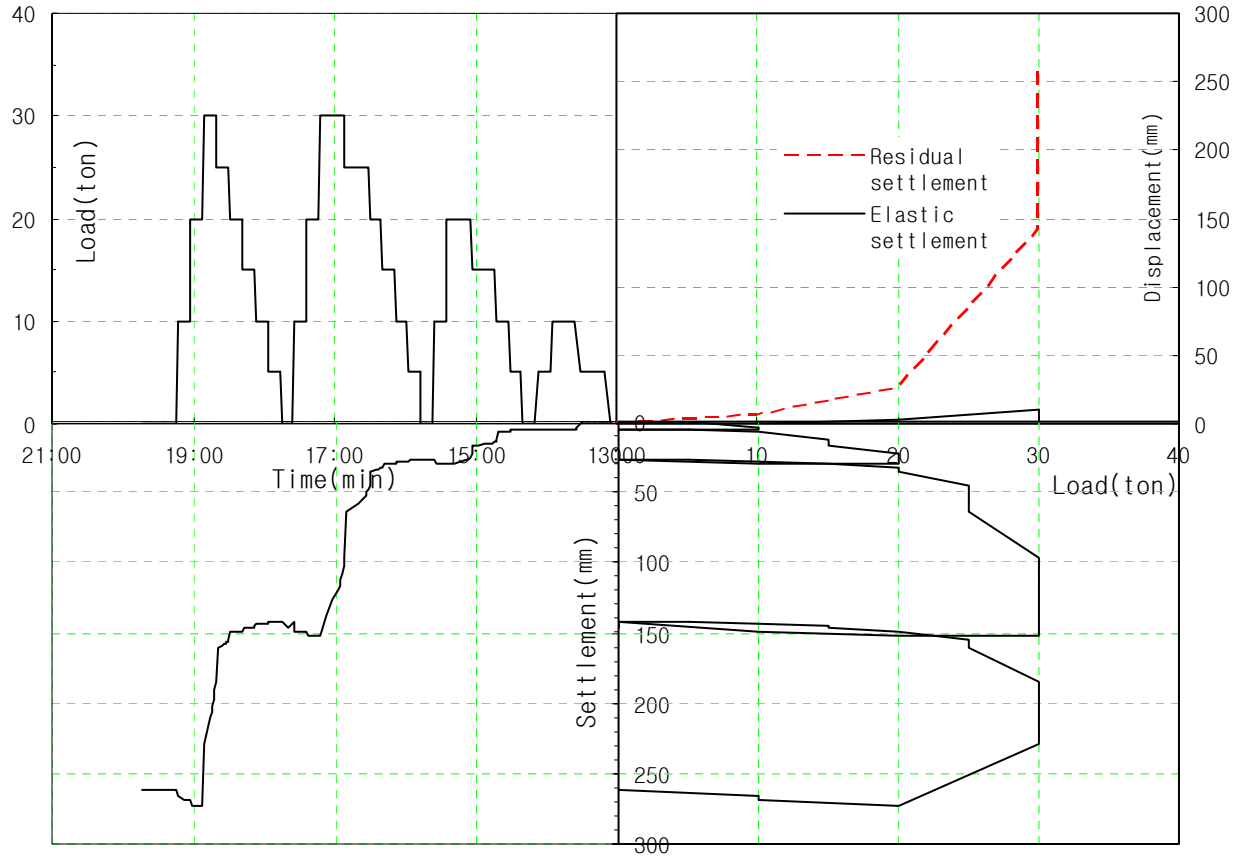


그림 5.4.28 하중-침하-시간 곡선 (A-5 case)

● P-S 곡선법

시험하중 30ton 이후 재하 시 급격한 침하를 나타내었으며, 최대시험하중은 30ton이었으며, 변위가 급격히 발생되어, 항복하중은 23.7ton에서 40㎜로 나타났으며 안전율 2.0을 적용하면 허용지지력은 11.8ton이며, 30ton을 극한하중으로 보면 안전율 3.0 적용시 허용지지력은 10ton으로 나타났다.

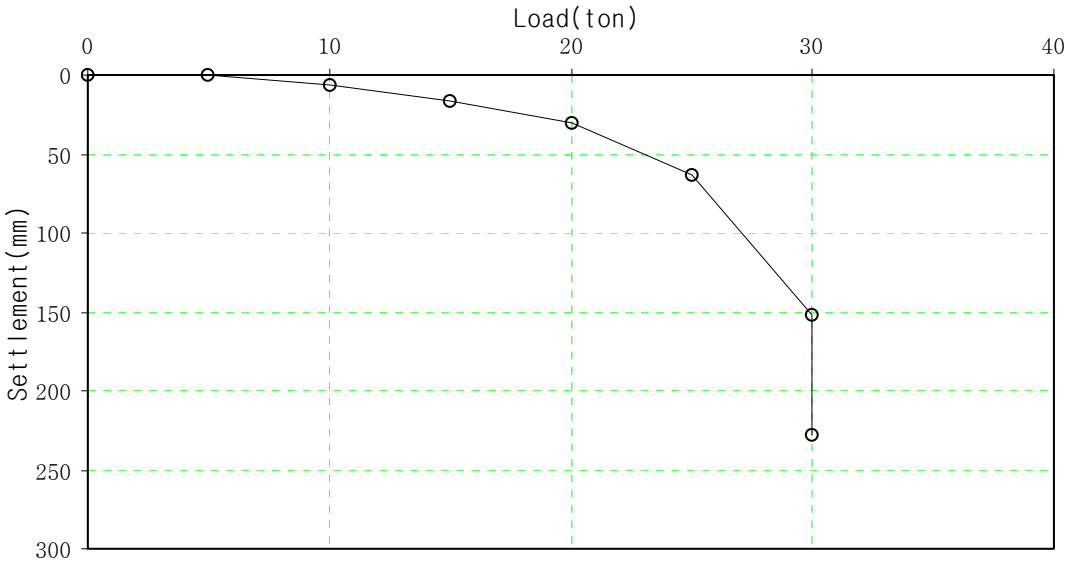


그림 5.4.29 P-S Curve (A-5 case)

● LogP-LogS 곡선법

LogP-LogS 곡선법에 의한 해석결과 22ton에서 항복점이 나타나 안전율 2.0을 적용하면, 허용지지력 11ton으로 나타났으며, 30ton을 극한하중으로 보면 안전율 3.0을 적용 시 허용지지력이 10ton으로 나타났다.

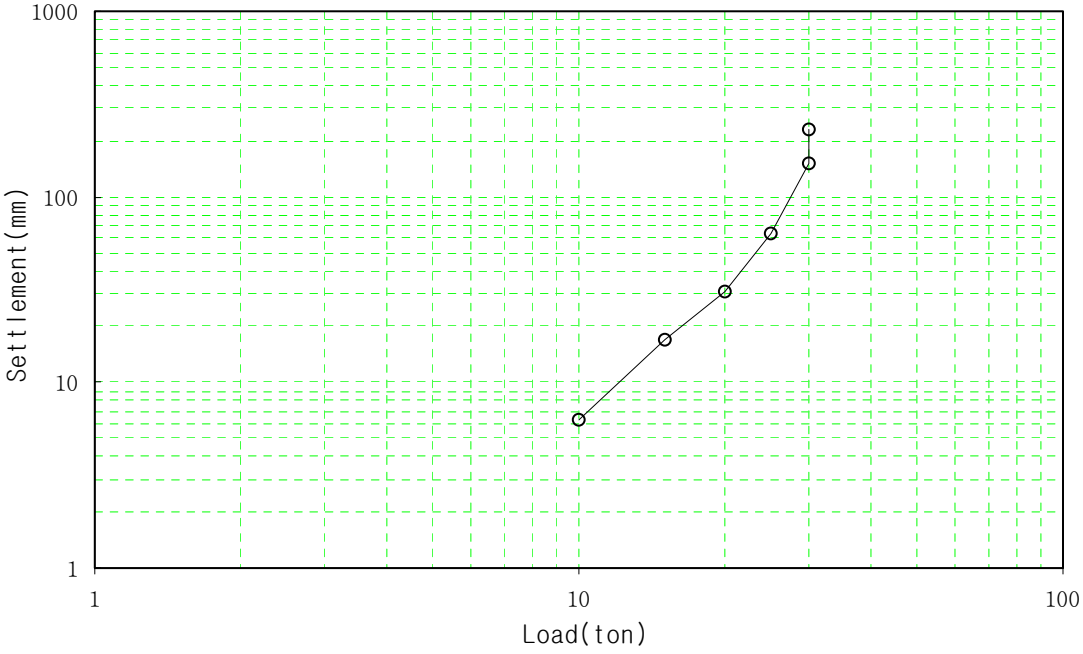


그림 5.4.30 LogP-LogS Curve (A-5 case)

● S-Logt 곡선법

각 하중 단계에서 침하경향을 보면 15ton 이후 기울기 변화를 나타내고 있다 따라서 안전율 2.0을 고려한 허용지지력은 7.5ton으로 나타났다.

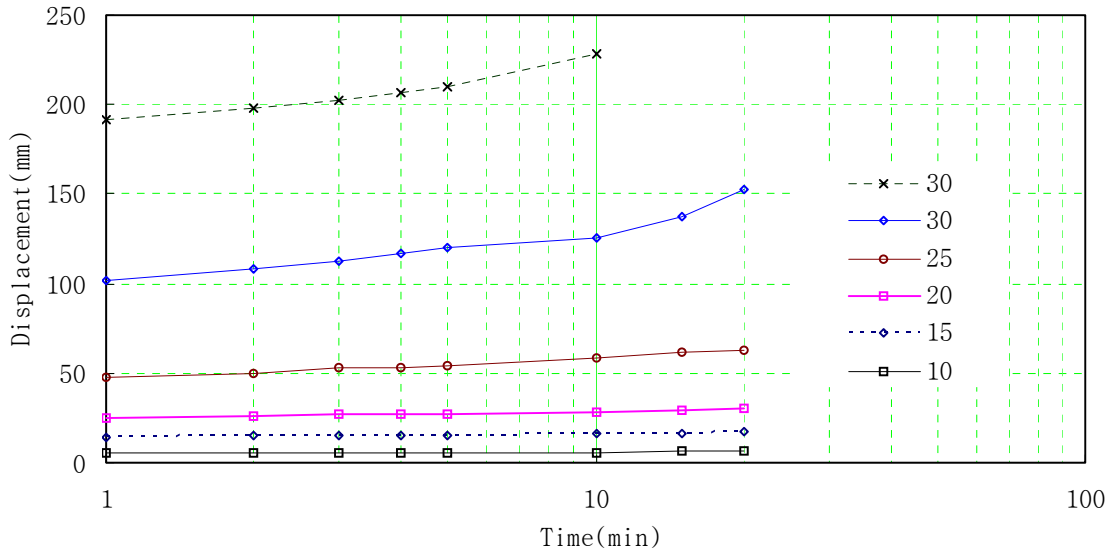


그림 5.4.31 S-Logt Curve (A-5 case)

● P-dS/dLogt 곡선법

본 해석법은 2개의 직선이 급변하는 점에서의 하중을 항복하중으로 판정하는 방법으로 23.2ton에서 변위가 발생되었으며, Creep Coefficient는 재하하중 15ton에서 2.11을 나타내었다.

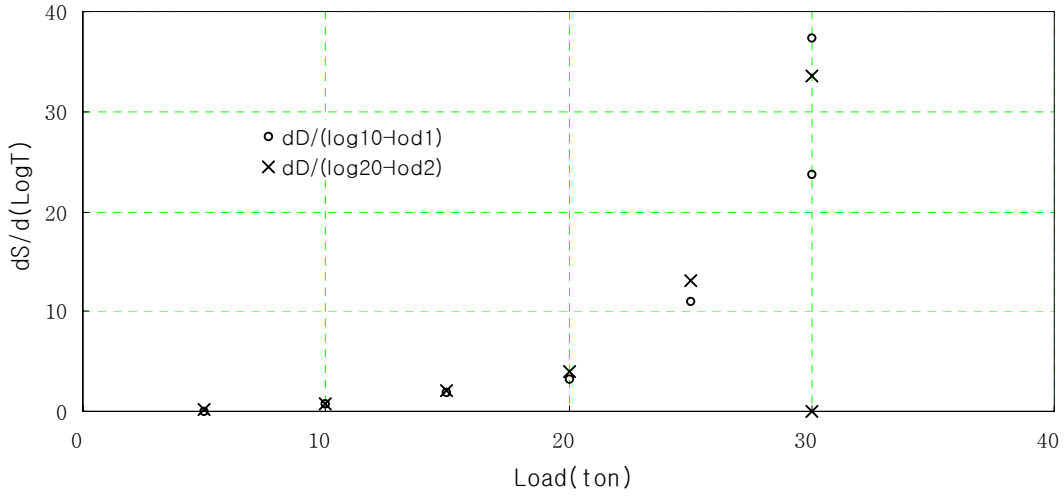


그림 5.4.32 P-dS/dLogt Curve (A-5 case)

● 침하량 분석 결과

분석결과 전침하량에 대해 Terzaghi/Peck와 뉴욕시 기준등에서 정하고 있는 1inch 때의 하중을 극한하중으로 적용 시 18.1ton으로 나타나며, 잔류침하량 1/2inch 때의 하중을 적용하면 13.3ton으로 나타났다.

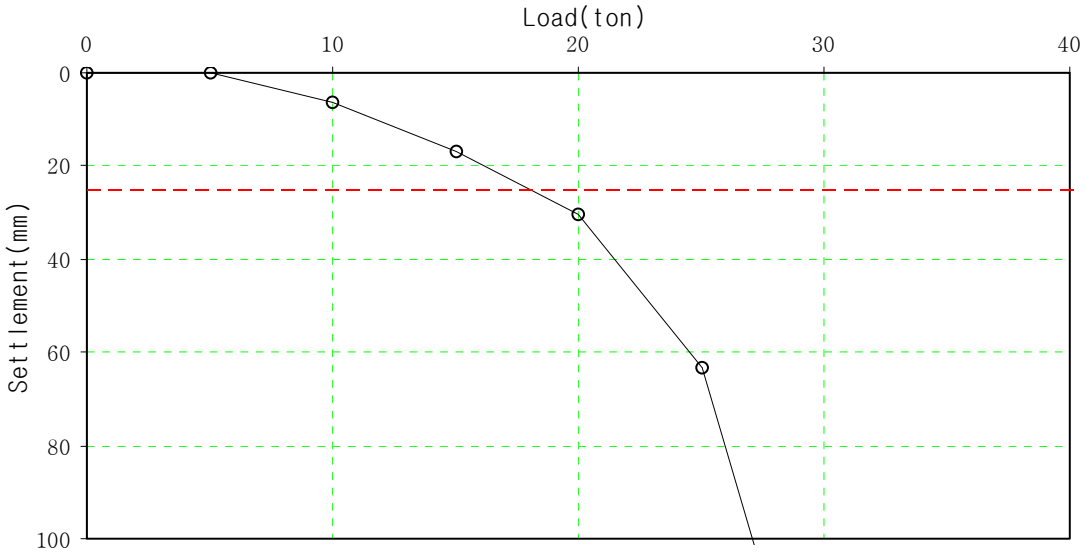


그림 5.4.33 P-S Curve(전침하량 분석) (A-5 case)

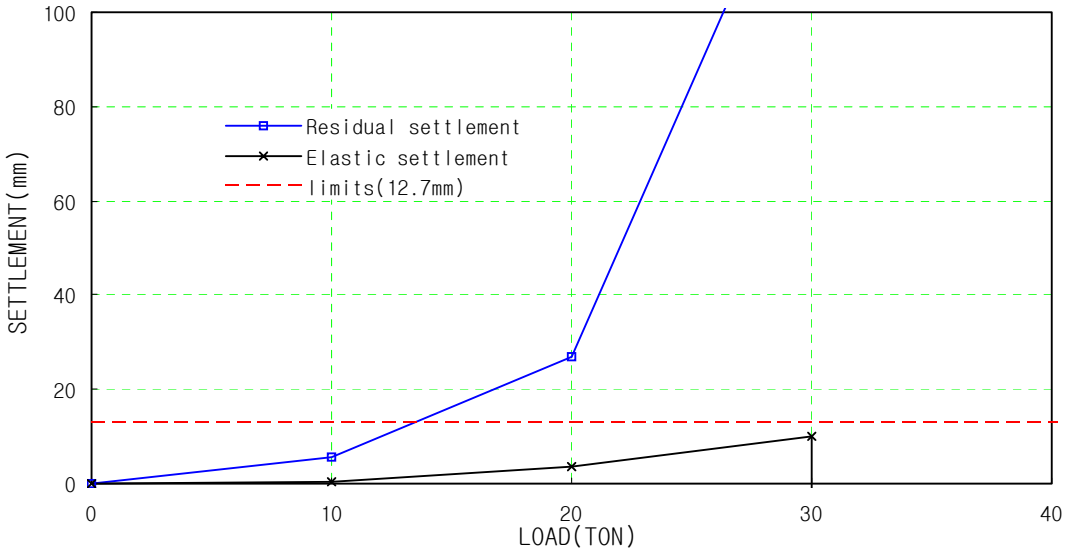


그림 5.4.34 Residual & Elastic settlement curve (A-5 case)

4)A-6case(굴패각혼합비40%)

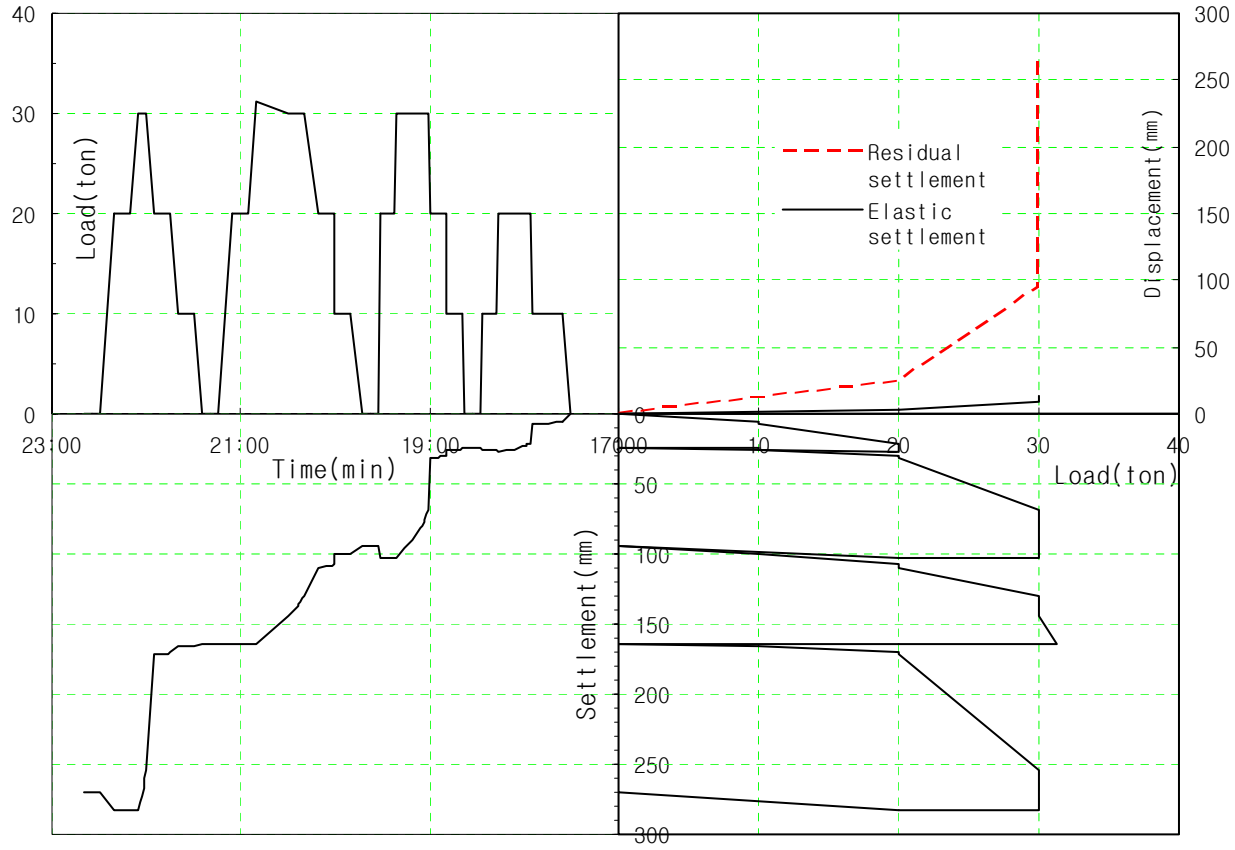


그림 5.4.35 하중-침하-시간 곡선 (A-6 case)

● P-S 곡선법

시험하중 30ton 이후 재하 시 급격한 침하를 나타내었으며, 최대시험하중은 30ton이었으며, 변위가 급격히 발생되어, 항복하중은 25.2ton에서 38㎜로 나타났으며 안전율 2.0을 적용하면 허용지지력은 12.6ton이며, 31.3ton을 극한하중으로 보면 안전율 3.0 적용시 허용지지력은 10.6ton으로 나타났다.

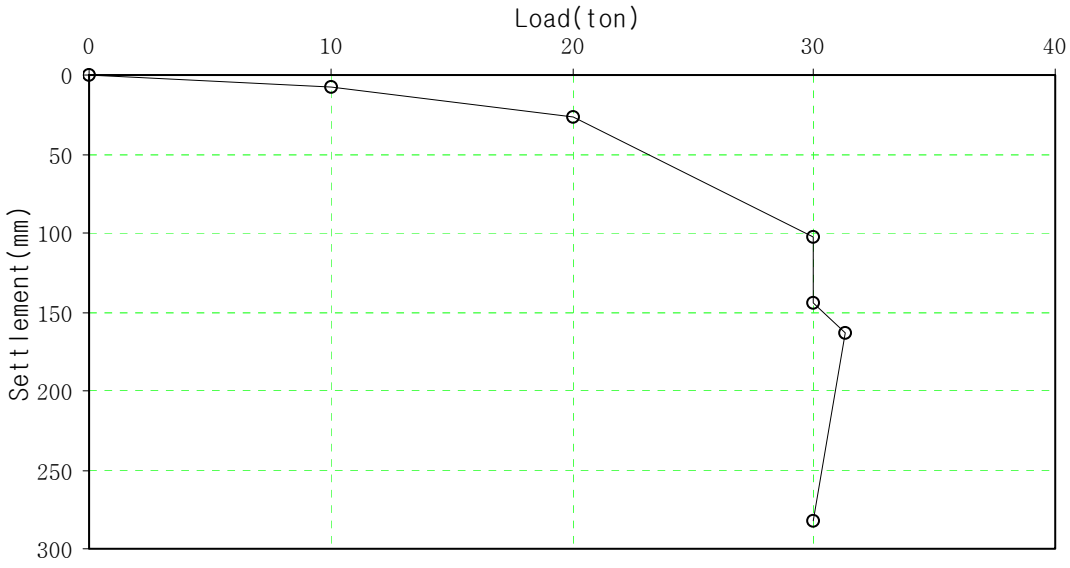


그림 5.4.36 P-S Curve (A-6 case)

● LogP-LogS 곡선법

LogP-LogS 곡선법에 의한 해석결과 23ton에서 항복점이 나타나 안전율 2.0을 적용하면, 허용지지력 11.5ton으로 나타났으며, 30ton을 극한하중으로 보면 안전율 3.0을 적용 시 허용지지력이 10ton으로 나타났다.

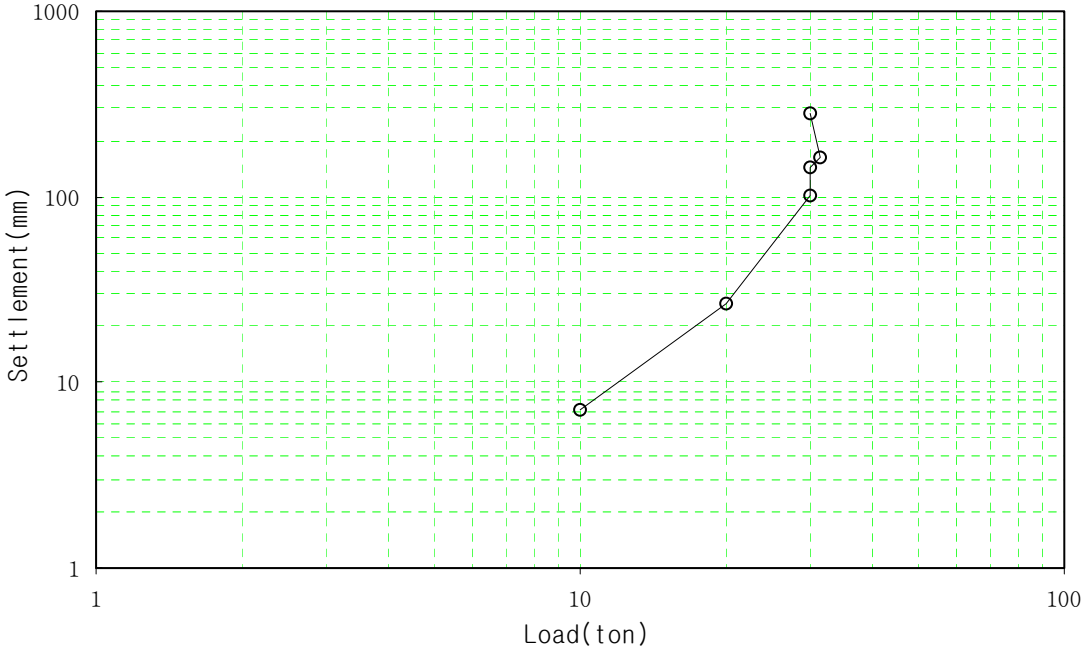


그림 5.4.37 LogP-LogS Curve (A-6 case)

● S-Logt 곡선법

각 하중 단계에서 침하경향을 보면 20ton 이후 기울기 변화를 나타내고 있다 따라서 안전율 2.0을 고려한 허용지지력은 10ton으로 나타났다.

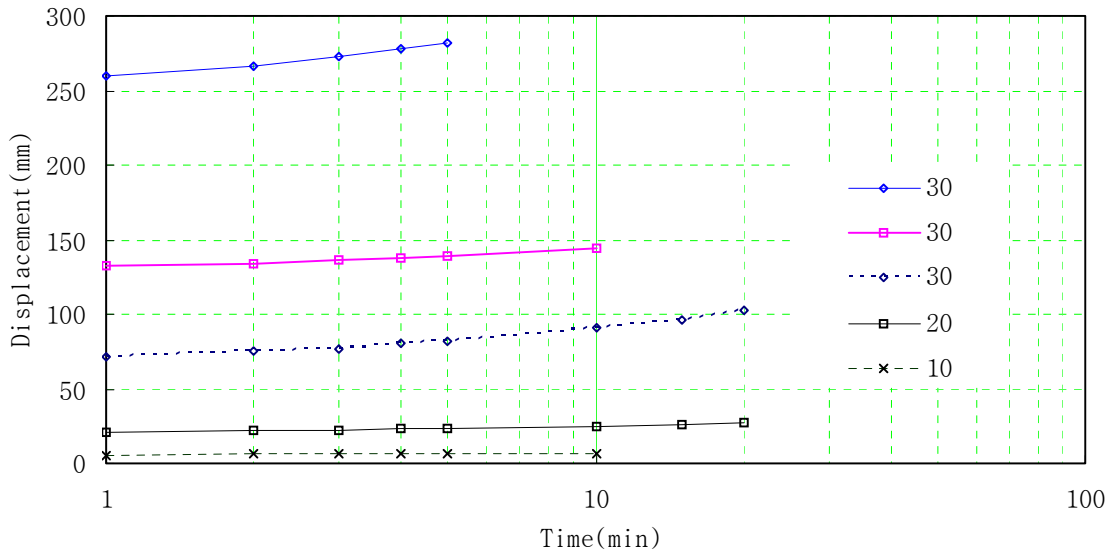


그림 5.4.38 S-Logt Curve (A-6 case)

● P-dS/dLogt 곡선법

본 해석법은 2개의 직선이 급변하는 점에서의 하중을 항복하중으로 판정하는 방법으로 20ton에서 변위가 발생되었으며, Creep Coefficient는 재하하중 20ton에서 9.1을 나타내었다.

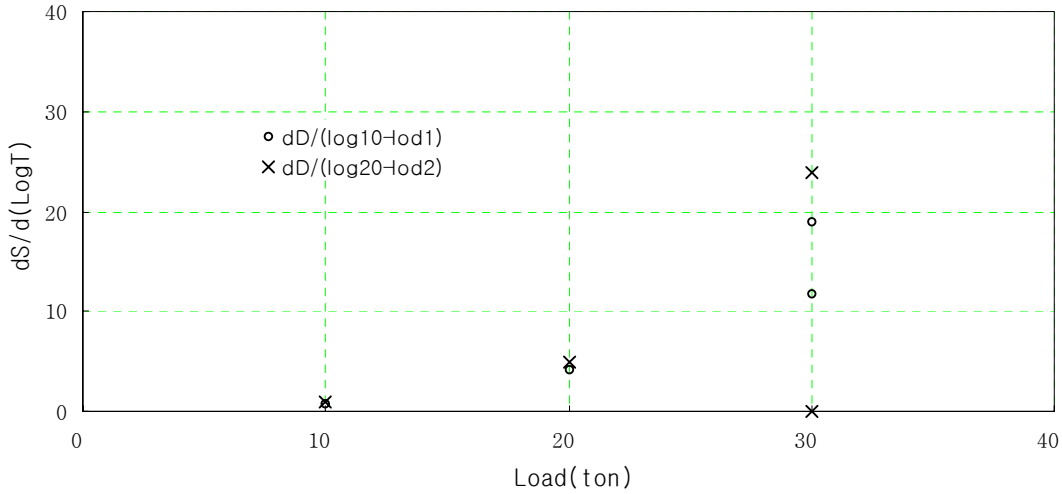


그림 5.4.39 P-dS/dLogt Curve (A-6 case)

● 침하량 분석 결과

분석결과 전침하량에 대해 Terzaghi/Peck와 뉴욕시 기준등에서 정하고 있는 1inch 때의 하중을 극한하중으로 적용 시 17.8ton으로 나타나며, 잔류침하량 1/2inch 때의 하중을 적용하면 13.2ton으로 나타났다.

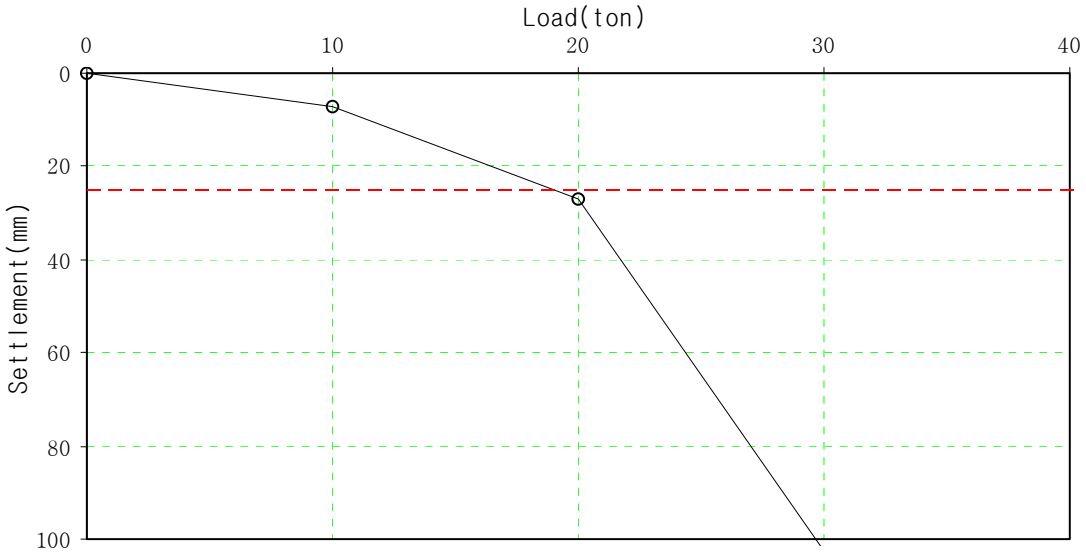


그림 5.4.40 P-S Curve(전침하량 분석) (A-6 case)

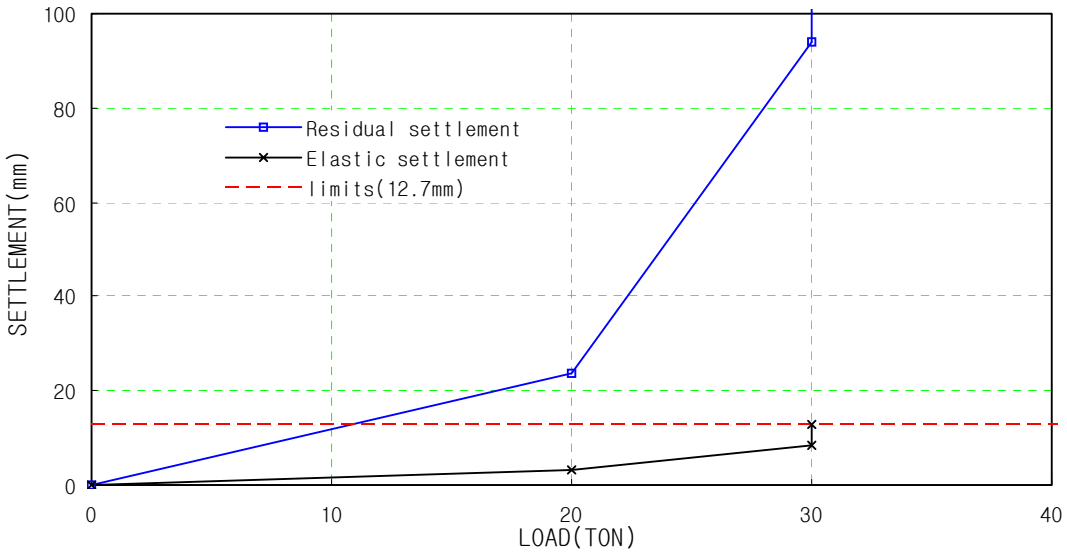


그림 5.4.41 Residual & Elastic settlement curve (A-6 case)

● 다중 침하량 분석 결과

지중침하량의 경우 G.L.(-)2.0m에서 20ton 이후 급격한 변위를 발생하였으며, G.L.(-)4.0m~(-)8.0m의 경우 일관성이 없는 데이터를 나타내었다.

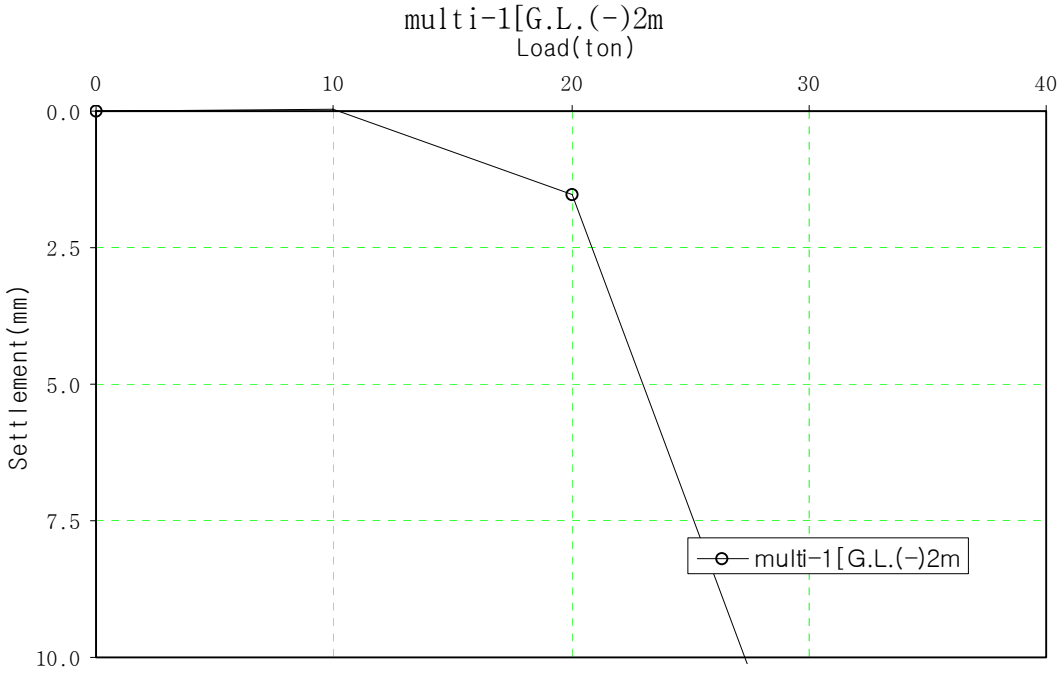


그림 5.4.42 Multi-settlement curve (A-6 case)

5)A-7case(굴패각혼합비50%)

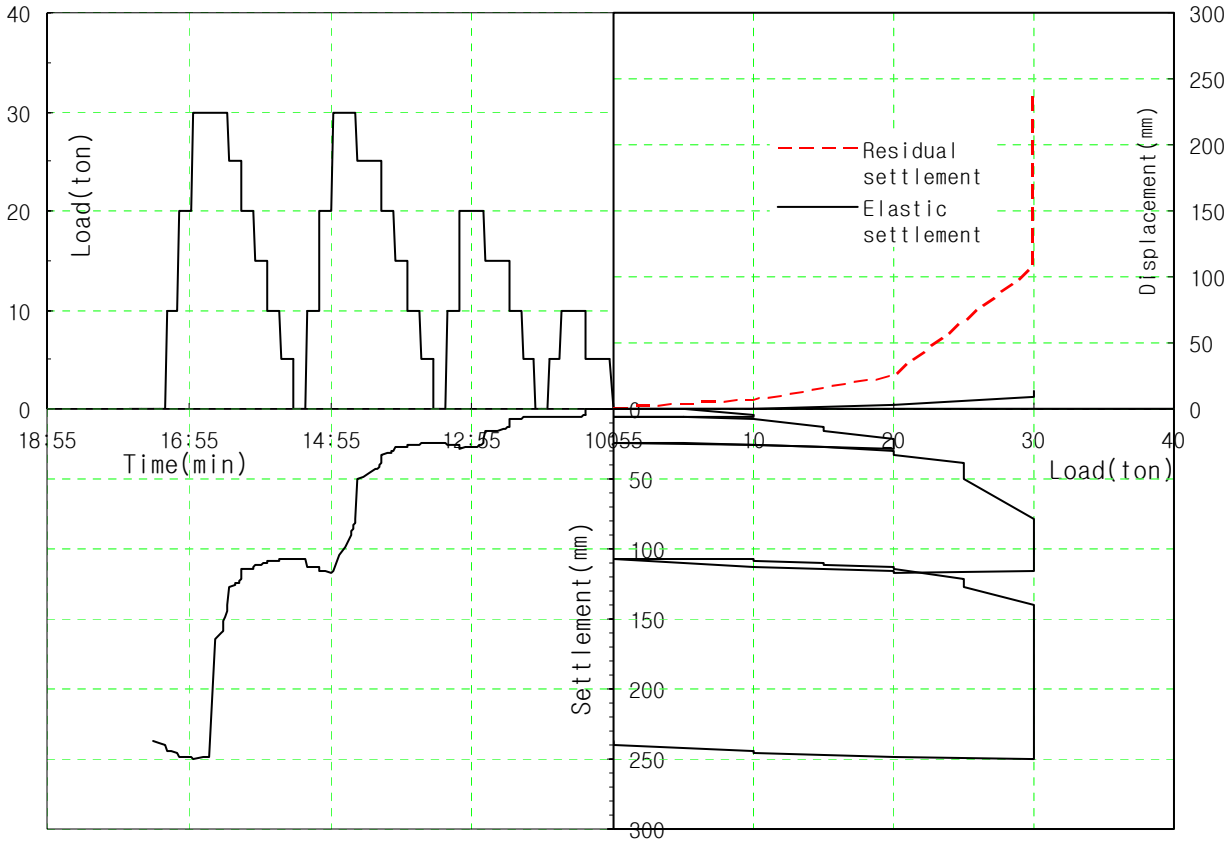


그림 5.4.43 하중-침하-시간 곡선 (A-7 case)

● P-S 곡선법

시험하중 30ton 이후 재하 시 급격한 침하를 나타내었으며, 최대시험하중은 30ton이었으며, 변위가 급격히 발생되어, 항복하중은 23.9ton에서 38㎜로 나타났으며 안전율 2.0을 적용하면 허용지지력은 11.9ton이며, 30ton을 극한하중으로 보면 안전율 3.0 적용시 허용지지력은 10ton으로 나타났다.

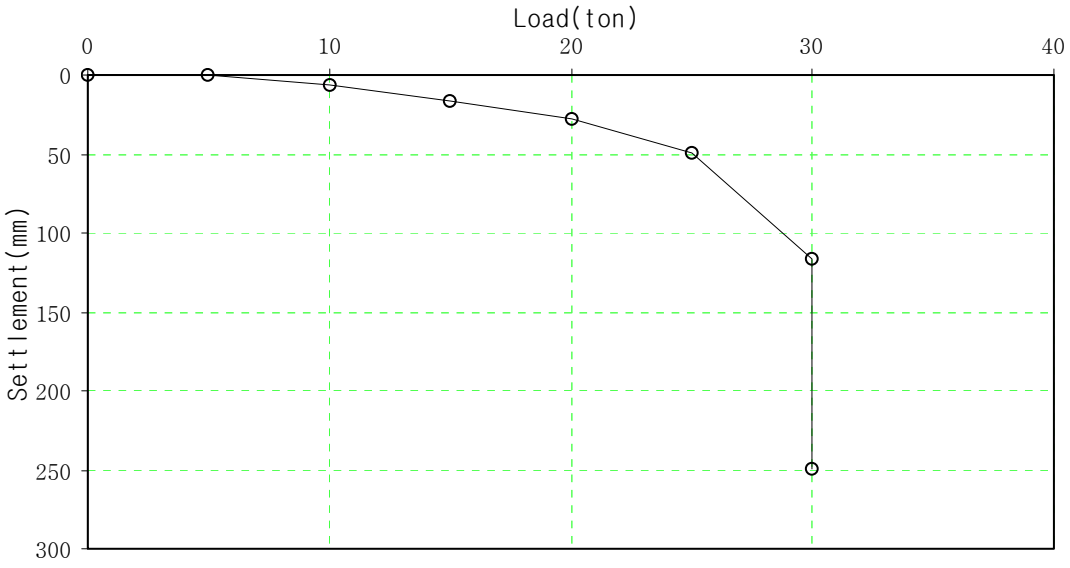


그림 5.4.44 P-S Curve (A-7 case)

● LogP-LogS 곡선법

LogP-LogS 곡선법에 의한 해석결과 23ton에서 항복점이 나타나 안전율 2.0을 적용하면, 허용지지력 11.5ton으로 나타났으며, 30ton을 극한하중으로 보면 안전율 3.0을 적용 시 허용지지력이 10ton으로 나타났다.

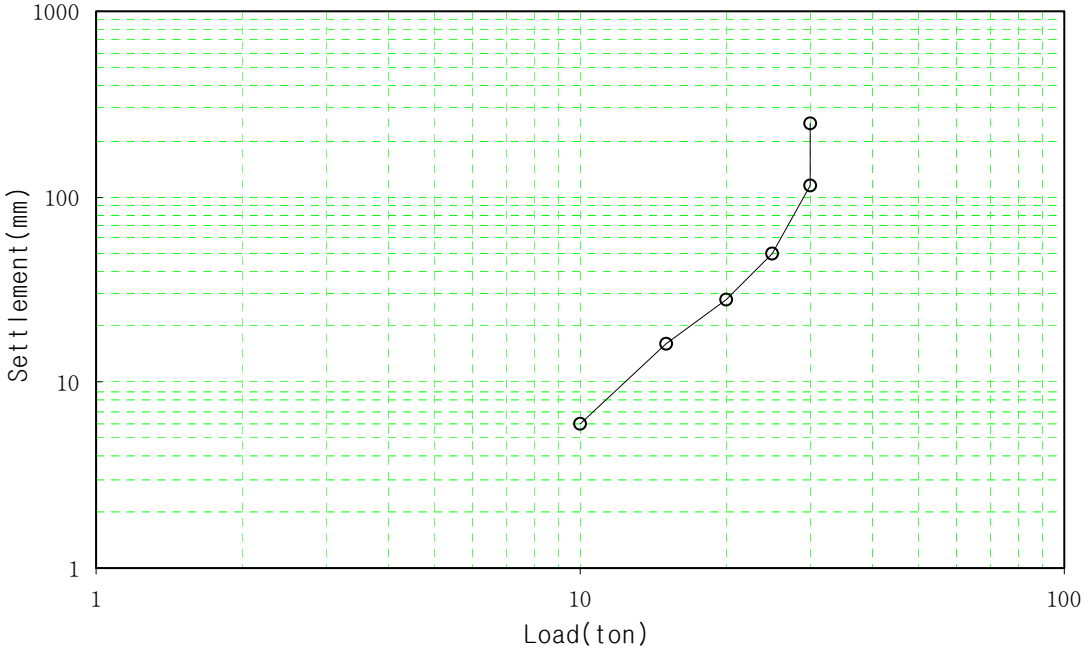


그림 5.4.45 LogP-LogS Curve (A-7 case)

● S-Logt 곡선법

각 하중 단계에서 침하경향을 보면 15ton 이후 기울기 변화를 나타내고 있다 따라서 안전율 2.0을 고려한 허용지지력은 7.5ton으로 나타났다.

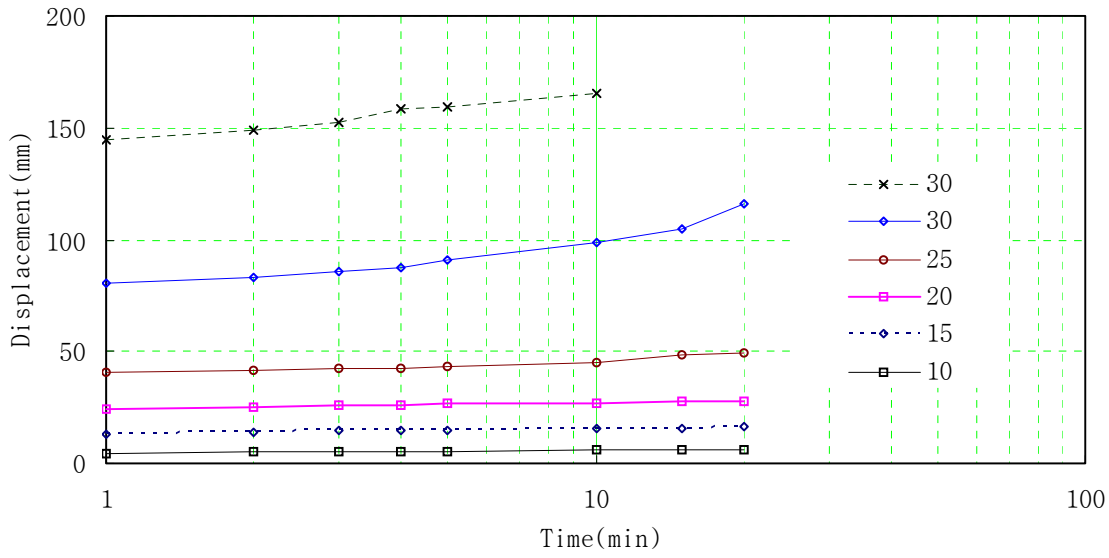


그림 5.4.46 S-Logt Curve (A-7 case)

● P-dS/dLogt 곡선법

본 해석법은 2개의 직선이 급변하는 점에서의 하중을 항복하중으로 판정하는 방법으로 23.2ton에서 변위가 발생되었으며, Creep Coefficient는 재하하중 15ton에서 1.95을 나타내었다.

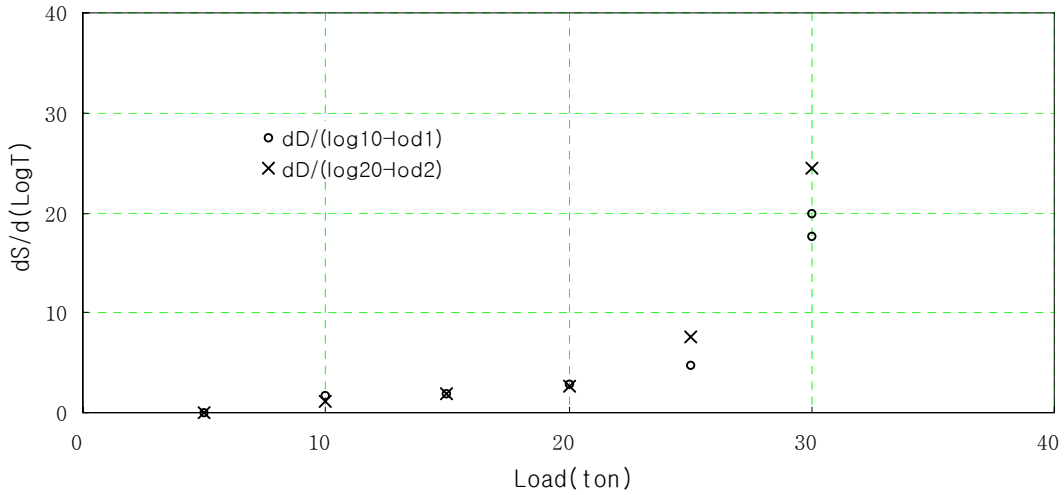


그림 5.4.47 P-dS/dLogt Curve (A-7 case)

● 침하량 분석 결과

분석결과 전침하량에 대해 Terzaghi/Peck와 뉴욕시 기준등에서 정하고 있는 1inch 때의 하중을 극한하중으로 적용 시 17.8ton으로 나타나며, 잔류침하량 1/2inch 때의 하중을 적용하면 13.2ton으로 나타났다.

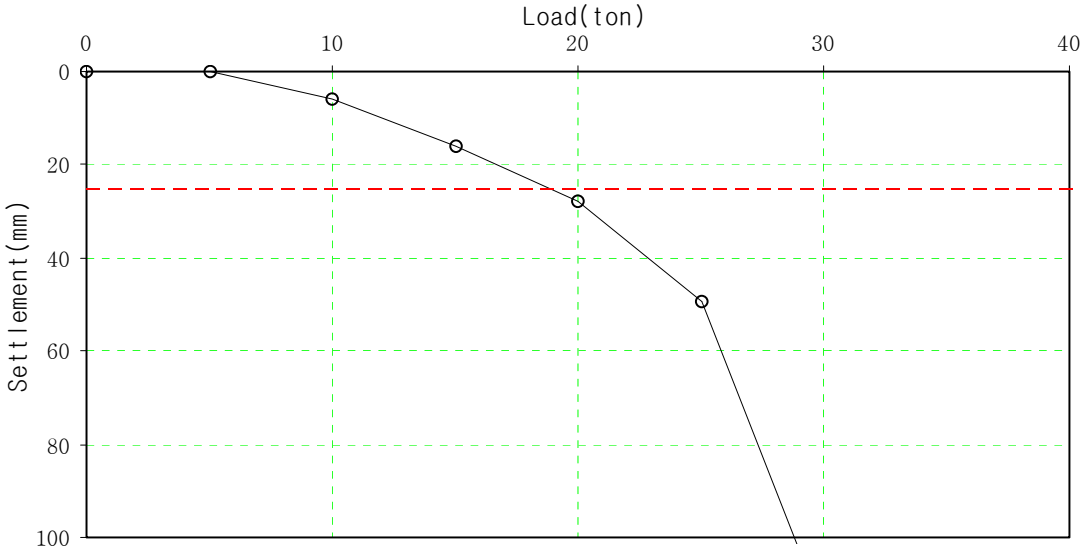


그림 5.4.48 P-S Curve(전침하량 분석) (A-7 case)

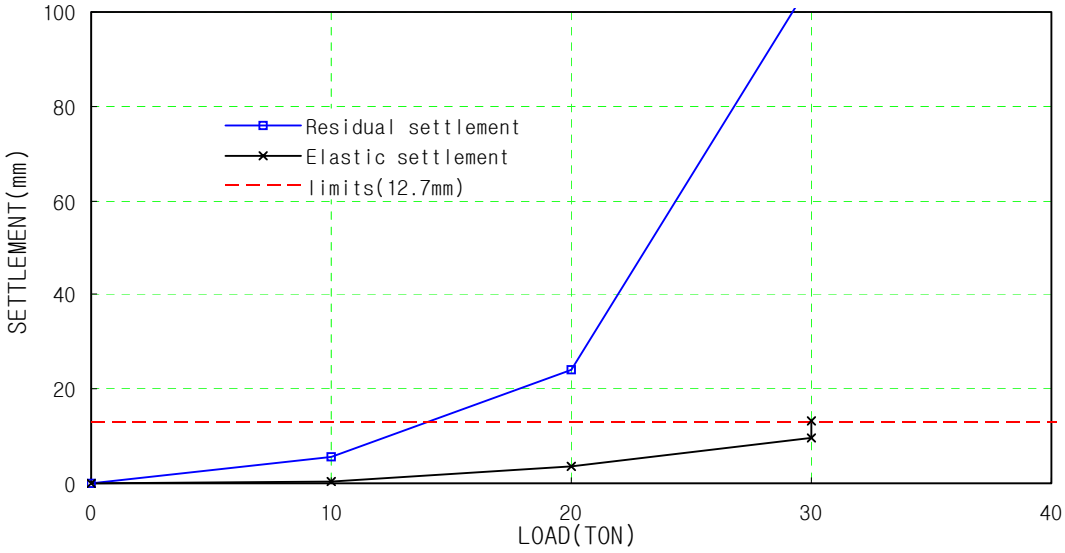


그림 5.4.49 Residual & Elastic settlement curve (A-7 case)

● 다중 침하량 분석 결과

지중침하량의 경우 G.L.(-)2.0m에서 25ton 이후 급격한 변위를 발생하였으며, G.L.(-)4.0m~(-)8.0m의 경우 일관성이 없는 데이터를 나타내었다.

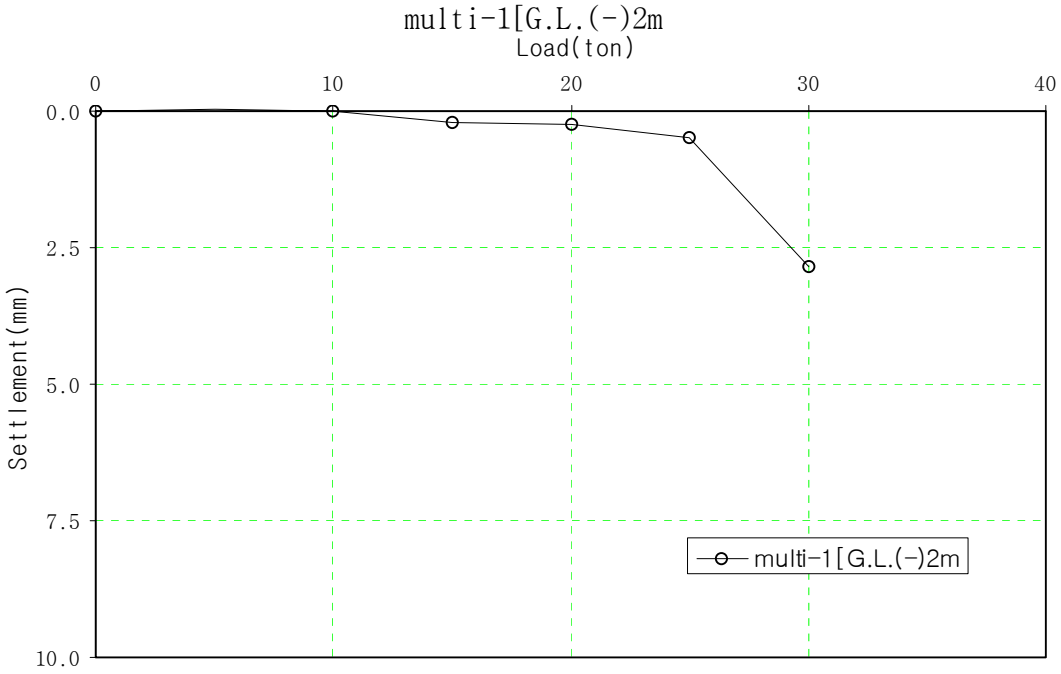


그림 5.4.50 Multi-settlement curve (A-7 case)

4. 시험 결과 및 검토

1) 정재하 시험 결과의 정리

표 5.4.2 (a) 정재하 시험 결과

시험말뚝번호	굴패각혼입율(%)	재하최대하중(ton)	최종침하량(㎜)	항복하중에 의한 분석법(하중-변형)								
				P-S		logP-logS		S -logt		P-dS/d(logt)	최소항복하중(ton)	극한하중(ton)
				항복하중(ton)	침하량(㎜)	항복하중(ton)	침하량(㎜)	항복하중(ton)	침하량(㎜)	항복하중(ton)		
A-1	0%	31.1	162	24	39	23	42	(20)	31	23.4	23.0	31.1
A-4	20%	30.0	223	24	39	24	44	(20)	27	23.4	23.4	30.0
A-5	30%	30.0	262	24	40	22	41	(15)	17	23.2	22.0	30.0
A-6	40%	31.3	269	25	38	23	36	(20)	27	20.0	20.0	31.3
A-7	50%	30.0	238	24	38	23	39	(15)	16	23.2	23.0	30.0

표 5.4.2 (b) 정재하 시험 결과

시험말뚝번호	굴패각혼입율(%)	침하량에 의한 분석법		허용지지력(ton/본)	Step Load(ton)	항복압력 (tonf/㎡)		임의하중에서의 혼입량별 침하량(tonf/㎡)		
		전침하량에 의한 분석	잔류침하에 의한 분석			극한하중시	25.4㎜ 전침하시	20	40	60
A-1	0%	17.8	13.2	6.6	5	59.76	46.25	3.8	17.6	43.6
A-4	20%	19.5	14.5	7.3	5	60.80	50.67	5.5	17.7	49.8
A-5	30%	18.1	13.3	6.7	5	57.17	47.03	2.9	17.8	46.6
A-6	40%	19.2	10.9	5.5	10	51.97	49.89	3.7	16.9	38.5
A-7	50%	19.1	14.0	7.0	5	59.76	49.63	2.0	14.9	36.6

-. S-logt의 경우 Step load에서 선정된 값으로 5ton 간격의 값이 결정되므로, 극한하중 값 선정에서 제외함.

-. PLT-1 굴패각 40% 혼입말뚝은 Step load가 10ton이며, 그외의 경우는 Step Load가

5ton으로 시험하였음.

-. 하중 재하시 처녀하중은 20분 경과 시 반복하중은 10분 경과시 다음 단계 재하를 실시함.

-. 2004년 11월 16~19일 실시한 SCP 및 굴패각 혼입말뚝 4개소에 대한 정재하시험 결과 위표와 같은 결과를 얻었으며,허용지지력은 하중-침하 분석 및 극한하중분석, 전 침하량 1inch, 잔류침하량 1/2inch 기준에서 최소값으로 산정하였다.

-. 본 말뚝은 30ton 부근에서 극한하중값을 나타냄.

-. 본시험의 결과는 단항의 결과임.

2) 시험결과의 검토

본 시험은 SCP 와 굴패각이 혼입된 시험체 (혼입율 20 ~ 50%)에서 실시 하였으며, 타설전 원지반은 N값이 2~3정도의 초 연약지반이었다.(지반 조사서 참조)

가) 하중- 침하 곡선

본 시험의 결과 하중-침하 곡선을 도시하면 , 그림 5.4.1과 같다. 하중 침하 양상은 혼입율 대비시 비슷한 유형을 나타내었으며, 특이사항을 발견하기 힘들었다.

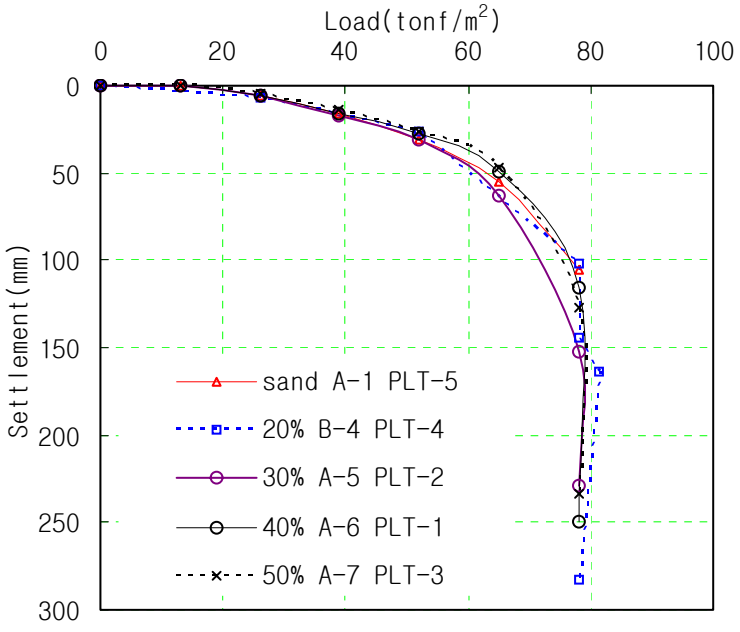


그림 5.4.51 혼입율 변화에 따른 재하하중-침하량 관계 곡선

나) 항복압력

혼입율별 항복압력의 경우 52~61tonf/㎡으로 나타났으며, 전침하량 25.4㎜에서의 압력의 경우에도 46~51tonf/㎡으로 나타났다.

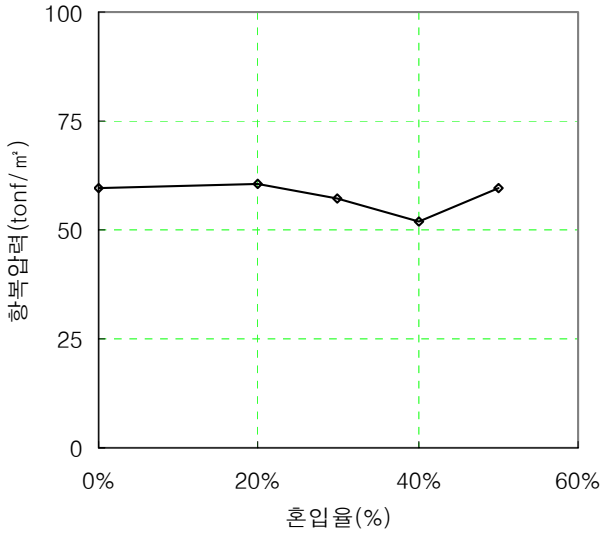


그림 5.4.52 혼입율별 항복압력

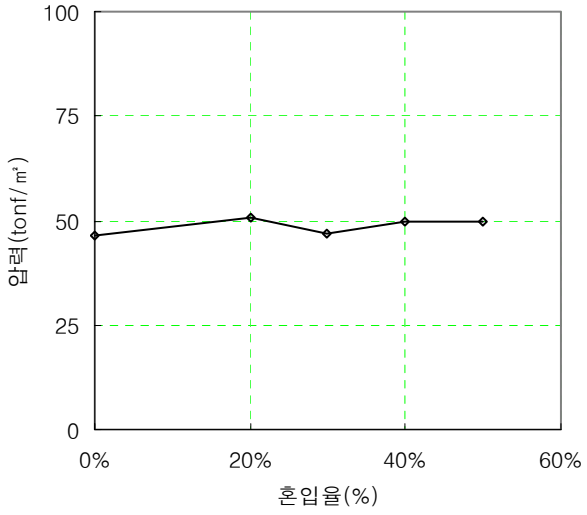


그림 5.4.53 전침하량 25.4㎜일때의 압력

임의 하중에서의 혼입율별 침하량의 경우 관계도는 그림 5.4.4에 도시하였으며 침하량의 분포가 다소 있으나 커다란 차이점을 발견할 수 없다.

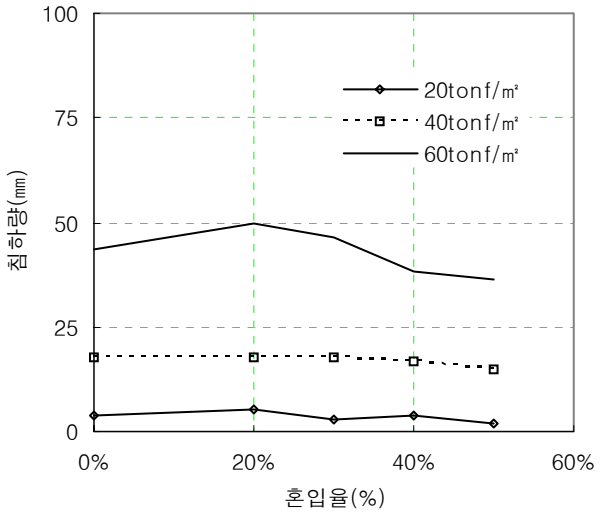


그림 5.4.54 임의하중에서의 혼입율별 침하량 관계도

다) 지중 침하의 양상

지중 침하의 경우 GL(-) 2.0m 시험체 중심의 침하량을 비교하면 그림 5.4.5와 같다. 혼입율별 하중증가에 따른 침하량은 G.L.(-) 2.0m의 경우 52~78 tonf/㎡에서 급격하게 증가되었으며, 이는 시험체에 하중 증가에 따라 시험체 두부의 파괴 또는 시험체의 좌굴등의 요인보다 시험체 상부를 포함한 G.L.(-)2.0m 아래까지의 침하를 동반하는 것으로 파악되었으며, G.L.(-)4m, 6m, 8m에서의 침하량은 5㎜ 내외의 변화와 매우 불규칙한 양상을 나타 내었다. 이는 시험체의 N값 조사를 위한 시추 및 침계 설치에 따른 이완등의 영향이 반영된 결과로 그림 5.4.5의 정량성을 인정하기에는 불확정한 요인이 크므로 정성적인 결과만을 반영하는 것이 바람직하다고 본다. 따라서 시험체 1본당 극한하중 77.95tonf/㎡(30tonf/본) 에서 침하된 정도는 G.L.(-) 2.0m에서 10 ~ 30%수준에 도달하고 있다.

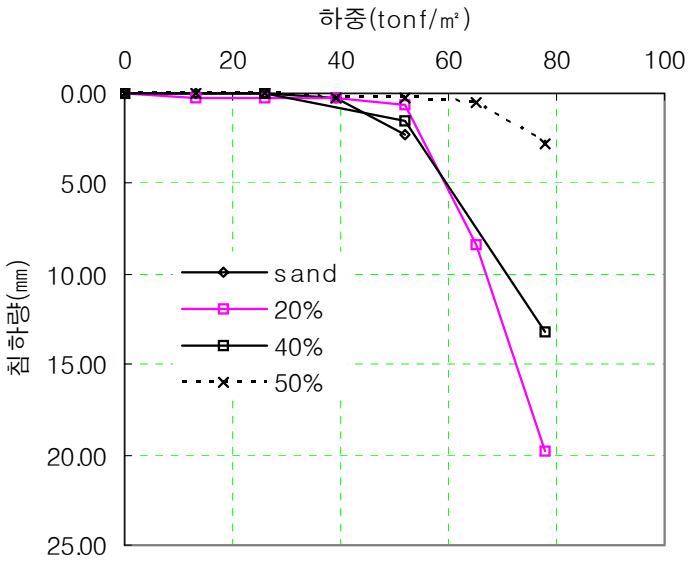


그림 5.4.55 시험체 G.L.(-)2.0m에서의 혼입율별 하중별 침하량

참 고 문 헌

1. 윤길림, 윤여원, 채광석 (2004), “SCP공법 적용을 위한 굴패각-모래 혼합토의 전단과 압축특성”,한국지반공학회 논문집 제20권9호 pp.1-7.
2. 윤길림, 채광석, 유한규 (2004), “굴패각-모래 혼합토의 실험적 특성 연구”, 대한토목학회 학회지, 제24권 제5C, pp. 283-288.
3. 조인성, 김동후 (2004), “해상 쇄석다짐말뚝의 설계 및 시공 사례”, 지반구조물 설계 시공 사례집 2004, pp. 429～448.
4. 김동민, 장민철, 김태현 (2004), “동치환공법에 의한 대구경 쇄석말뚝기초의 현장시공사례”, 지반구조물 설계 시공 사례집 2004, pp. 449～457.
5. 일본토질공학회, “현장기술자를 위한 흙과 기초 시리즈 16 , 연약지반 대책공법 설계에서 시공까지” , 도서출판 과학기술 pp. 165～203.
6. 윤길림 외 4인 (2000), ″모래치환율에 따른 모래다짐말뚝(SCP)지반의 거동특성″ , 대한토목학회 2000년도 학술발표회 논문집, 제 2호, pp. 243～246.
7. 윤길림 외 5인 (2000), ″모래다짐말뚝(SCP)의 치환율 변화에 따른 거동 특성 연구″, 한국지반공학회 논문집 제 16권, 제 4호 pp. 117～128.
8. 김병규, 황진영 (1999), “점토와 석회의 혼합에의한 반응생성물과 물성변화”,한국지반공학회, 학술발표회논문집, pp. 505～512.
9. 김용필 외 5인 (2000), “지반공학 시험법 및 응용”, 문형진, 도서출판 세진사, pp. 1～138.
10. 김주범, 박병기, 이승래 (1997), “연약지반”, 지반공학 시리즈 6, 한국지반공학회, 도서출판 구미서관, 1997, pp. 25～101.
11. 박건태, 김주철, 윤길림, 이종규 (2002), “경량기포혼합 준설토의 강도특성”,한국지반공학회 학술발표회 논문집, pp. 483～490.
12. 박성용 외 3인 (1994), “국내 해안 연약지반의 공학적 특성 평가”,한국건설기술연구원, pp. 5～59.
13. 이기호, 박준범 (2001), “굴패각을 포함한 혼합토의 전단 · 변형 특성 평가를 위한 균질화법의 적용”,한국지반공학회논문집 제17권 4호, pp. 183～190.
14. 이기호, 한종옥 (2001), “굴패각 혼합토의 압밀 및 투수특성”,대한토목학회논문집 제21권 4호, pp. 375～384.
15. 조성정 (1983), “흙의 입도분포가 석회혼합토의 강도특성에 미치는 영향”,충북대학교 대학원 박사학위논문.
16. 정하익 (1999), “연약지반의 압밀특성에 관한 연구”, 한국건설기술연구원, 한국토지공사, pp. 9～358.

17. D. de Bruyn, J. F. Fhimus (1996), "The Influence of Temperature on Mechanical Characteristics of Boom Clay: The Results of an Initial Laboratory Programme", Engineering Geology 41, pp. 117～126.
18. G. Rajasekaran, S. Narasimha Rao (2002), "Compressibility Behaviour of Lime-Treated Marine Clay", Ocean Engineering 29, pp. 545～559.
19. Ian Jefferson, Christopher David Foss Rogers (1998), "Liquid Limit and the Temperature Sensitivity of Clays", Engineering Geology 49, pp. 95～109.
20. Naser A.Al-Shayea (2001), "The Combined Effect of Clay and Moisture Content on the Behavior of Remolded Unsaturated Soils", Engineering Geology, pp. 319～342.
21. R. H. C Emmerson, M. D. Scrimshaw, J. W. Birkett, J. N. Lester (2001), "Solid Phase Partitioning of Metals in Managed Realignment Soils: Laboratory Studies in Timed Soil Sea-Water Batch Mixtures", Applied Geochemistry 16, pp. 1621～1630.
22. Tao-Wei Feng, Jia-Yih Lee, Yi-Jiuan Lee (2001), "Consolidation Behavior of a Soft Mud Treated with Small Cement Content", Engineering Geology, pp. 327～335.

부 록

1. 토질 주상도(SCP 확인보링)

토 질 주 상 도

용 역 명	SCP 시험시공 확인보링			공 번	A-1	시작일자 종료일자	2004. 10. 26 2004. 10. 28	SAMPLE
위 치	부산광역시 강서구 봉림동 일원			조사목적	지반조사	표 고	지표면 기준	▩ U. D.
심 도	9.50M	조사방법	회전수세식	조 사 자	김환홍	지하수위	GL. 0.70M	◎ S.P.T.
좌 표	X: Y:	조사장비	유압-200	천 공 자	박민수	공 경	NX	● CORE
								▽ VANE

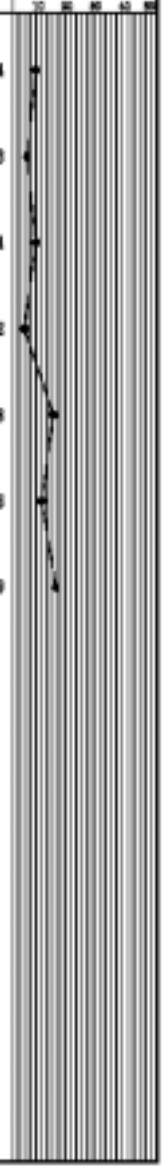
표고 (m)	심도 (m)	두께 (m)	기호	도심명	색	설 명	풍화정도	시료채취상태	시료번호	S. P. T. 심도	N/cm	N 15	N 15	S.P.T. D.P.T.
						모래층		◎		1.0	7/30	3	4	
								◎		2.5	6/30	2	4	
								◎		4.0	7/30	3	4	
				모래	담갈			◎		5.5	6/30	3	3	
								◎		7.0	5/30	2	1	
								◎		8.5	16/30	6	10	
	9.2	9.2												
	9.5	0.3		자갈섞임	담갈									
						시추종료 : 9.50M								

토 질 주 상 도

페이지 1 의 1

용 역 명	SCP 시험시공 확인보링			공 번	A-3	시작일자 종료일자	2004. 10. 25 2004. 10. 25	SAMPLE
위 치	부산광역시 강서구 봉림동 일원			조사목적	지반조사	표 고	지표면 기준	▨ U. D. ◎ S.P.T. ● CORE ▽ VANE
심 도	10.30M	조사방법	회전수세식	조 사 자	김찬홍	지하수위	GL. 0.70M	
좌 표	X: Y:	조사장비	유압-200	천 공 자	박민수	공 정	NX	

표고 (m)	심도 (m)	두께 (m)	기호	토질명	색	설명	통일분류	시료채취방법	시료번호	S.P.T. 심도	N/cm	N 15	N 15
				모래	담갈	모래층 패각 및 자갈이 함유되어 있음		◎		1.0	8/30	4	4
								◎		2.5	5/30	2	3
								◎		4.0	8/30	4	4
								◎		5.5	4/30	2	2
								◎		7.0	14/30	5	8
								◎		8.5	10/30	4	6
	10.0	10.0						◎		10.0	15/30	5	9
	10.3	0.3	△ △ △	풍화토	황갈	기반암의 풍화토							
						시추종료 : 10.30M							



토 질 주 상 도

페이지 1 의 1

용 역 명	SCP 시험시공 확인보링			공 번	A-4	시작일자 종료일자	2004. 10. 26 2004. 10. 26	SAMPLE
위 치	부산광역시 강서구 봉림동 일원			조사목적	지반조사	표 고	지표면 기준	▨ U. D. ◎ S.P.T. ● CORE ▽ VANE
심 도	9.60M	조사방법	회전수세식	조 사 자	김찬홍	지하수위	GL. 0.70M	
좌 표	X: Y:	조사장비	유압-200	천 공 자	박민수	공 정	NX	

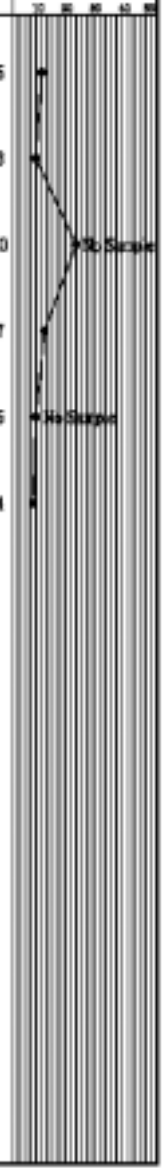
표고 (m)	심도 (m)	두께 (m)	기호	토질명	색	설명	통일분류	시료채취방법	시료번호	S.P.T. 심도	N/cm	N 15	N 15	S.P.T. / D.P.T.
				모래	담갈	모래층 패각 및 자갈이 함유되어 있음		◎		1.0	10/30	5	5	
								◎		2.5	6/30	3	3	
								◎		4.0	9/30	5	4	
								◎		5.5	5/30	2	3	No Sample
								◎		7.0	5/30	1	4	
								◎		8.5	7/30	3	4	
	9.3	9.3												
	9.6	0.3		모래자갈	담갈									
						시추종료 : 9.60M								

토 질 주 상 도

페이지 1 의 1

용 역 명	SCP 시험시공 확인보링			공 번	A-5	시작일자 종료일자	2004. 10. 26 2004. 10. 26	SAMPLE
위 치	부산광역시 강서구 봉림동 일원			조사목적	지반조사	표 고	지표면 기준	▨ U. D. ◎ S.P.T. ● CORE ▽ VANE
심 도	9.90M	조사방법	회전수세식	조 사 자	김찬홍	지하수위	GL. 0.70M	
좌 표	X: Y:	조사장비	유압-200	천 공 자	박민수	공 정	NX	

표고 (m)	심도 (m)	두께 (m)	기호	토질명	색	설명	통일분류	시료채취방법	시료번호	S.P.T. 심도	N/cm	N 15	N 15
				모래	담갈	모래층 패각 및 자갈이 함유되어 있음		◎		1.0	10/30	5	5
								◎		2.5	8/30	5	3
								◎		4.0	22/30	12	10
								◎		5.5	11/30	4	7
								◎		7.0	8/30	3	5
								◎		8.5	7/30	3	4
	9.6	9.6											
	9.9	0.3		모래자갈	담갈								
						시추종료 : 9.90M							

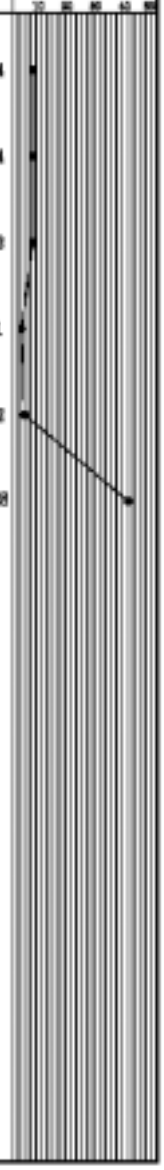


토 질 주 상 도

페이지 1 의 1

용 역 명	SCP 시험시공 확인보링			공 번	A-6	시작일자 종료일자	2004. 10. 26 2004. 10. 26	SAMPLE
위 치	부산광역시 강서구 봉림동 일원			조사목적	지반조사	표 고	지표면 기준	▨ U. D. ◎ S.P.T. ● CORE ▽ VANE
심 도	8.50M	조사방법	회전수세식	조 사 자	김찬홍	지하수위	GL. 0.70M	
좌 표	X: Y:	조사장비	유압-200	천 공 자	박민수	공 정	NX	

표고 (m)	심도 (m)	두께 (m)	기호	토질명	색	설명	통일분류	시료채취방법	시료번호	S.P.T. 심도	N/cm	N 15	N 15
				모래	담갈	모래층 패각 및 자갈이 함유되어 있음		◎		1.0	7/30	3	4
								◎		2.5	7/30	3	4
								◎		4.0	7/30	4	3
								◎		5.5	3/30	2	1
								◎		7.0	4/30	2	2
	8.2	8.2											
	8.5	0.3	^ ^ ^	풍화토	황갈	기반암의 풍화토		◎		8.5	40/30	12	28
						시추종료 : 8.50M							



토 질 주 상 도

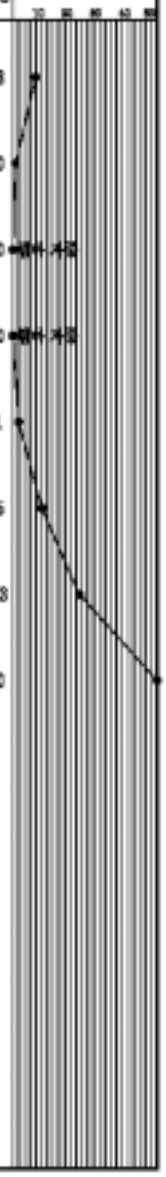
페이지 1 의 1

용 역 명	SCP 시험시공 확인보링			공 번	A-7	시작일자 종료일자	2004. 10. 26 2004. 10. 26	SAMPLE
위 치	부산광역시 강서구 봉림동 일원			조사목적	지반조사	표 고	지표면 기준	▨ U. D. ◎ S.P.T. ● CORE ▽ VANE
심 도	9.10M	조사방법	회전수세식	조 사 자	김찬홍	지하수위	GL. 0.70M	
좌 표	X: Y:	조사장비	유압-200	천 공 자	박민수	공 정	NX	

표고 (m)	심도 (m)	두께 (m)	기호	토질명	색	설명	통일분류	시료채취방법	시료번호	S.P.T. 심도	N/cm	N 15	N 15
				모래	담갈	모래층 패각 및 자갈이 함유되어 있음		◎		1.0	9/30	4	5
								◎		2.5	7/30	3	4
								◎		4.0	10/30	5	5
								◎		5.5	8/30	4	4
								◎		7.0	14/30	7	7
	8.8	8.8						◎		8.5	7/30	1	6
	9.1	0.3	△ △ △	풍화토	황갈	기반암의 풍화토							
						시추종료 : 9.10M							

토 질 주 상 도

페이지 1 의 1

용 역 명	SCP 시험시공 확인보링			공 번	BH-1	시작일자 종료일자	2004. 10. 26 2004. 10. 26	SAMPLE
위 치	부산광역시 강서구 봉림동 일원			조사목적	지반조사	표 고	지표면 기준	▩ U. D. ◎ S.P.T. ● CORE ▽ VANE
심 도	11.50M	조사방법	회전수세식	조 사 자	김찬홍	지하수위	GL. 0.70M	
좌 표	X: Y:	조사장비	유압-200	천 공 자	박민수	공 정	NX	

표고 (m)	심도 (m)	두께 (m)	기호	토질명	색	설명	통일분류	시료채취방법	시료번호	S.P.T. 심도	N/cm	N 15	N 15
	0.4	0.4		모래	담갈	매립층							
	1.3	0.9		매립	담갈	점토,모래,자갈의 매립층 자갈 약 10%		◎		1.0	8/30	5	3
	6.4	5.1		점토	담회	실트질 점토		◎		2.5	1/30	1	0
								◎		4.0	0/30	0	0
								◎		5.5	0/30	0	0
	9.1	2.7		모래	담갈	중,세립질의 모래층 패각 및 실트질 모래 소량 함유 8.4m~8.5m : 자갈 함유		◎		7.0	2/30	1	1
								◎		8.5	10/30	5	5
	11.1	2.0		풍화토	황갈	기반암의 풍화토				10.0	23/30	10	13
	11.5	0.4		풍화암	황갈	기반암의 풍화암				11.5	50/7	50	0
						시추종료 : 11.50M