R&D / 06건설핵심036

순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법 개발 연구보고서

2010. 3. 18.

주관연구기관 / (주)평원엔지니어링
협동연구기관 / 명지전문대학
(주)이산
한국해양연구원
한국건자재시험연구원
위탁연구기관 / 초석건설산업(주)

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

Land Transport and Maritime R&D Report

제 출 문

국토해양부 장관(건설교통기술평가원장) 귀하

이 보고서를 “순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법 개발에 관한 연구“과제의 보고서로 제출합니다.

2010 . 3 . 18 .

주관연구기관명 : (주)평원엔지니어링
주관연구책임자 : 조 성 민
연 구 원 : 이 정 완
〃 : 심 민 보
〃 : 이 응 준
〃 : 이 창 민
협동연구기관명 : 명지전문대학
협동연구책임자 : 유 승 경
연 구 원 : 윤 영 철
〃 : 박 현 찬
〃 : 김 주 현
〃 : 권 혁 준
협동연구기관명 : (주)이산
협동연구책임자 : 김 효 철
연 구 원 : 김 의 성
〃 : 오 상 규
〃 : 이 학 주
협동연구기관명 : 한국건자재시험연구원
협동연구책임자 : 정 현 오
연 구 원 : 송 무 근
〃 : 조 병 영
〃 : 유 남 재
〃 : 정 철 후
〃 : 배 현 철
〃 : 황 석 호
〃 : 윤 동 균

협동연구기관명 : 한국해양연구원
협동연구책임자 : 윤 길 림
연 구 원 : 김 홍 연
〃 : 배 윤 신
위탁연구기관명 : 초석건설산업(주)
위탁연구책임자 : 김 일 곤
연 구 원 : 원 병 호
〃 : 홍 정

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>06건설핵심
C06</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td colspan="2">2008.06.17
~ 2009.12.16</td><td>단 계 구 분</td><td>(3단계) /
(총 3단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="5">건설기술혁신사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="5">-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="5">순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="5">순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">조 성 민</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 28명
내부 : 23명
외부 : 5명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td colspan="2">정부 : 443,000천원
기업 : 176,100천원
계 : 619,100천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 82명
내부 : 67명
외부 : 15명</td><td>총연구비</td><td colspan="2">정부 : 752,000천원
기업 : 284,200천원
계 : 1,036,200천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">(주)평원엔지니어링
명지전문대, (주)이산
한국건자재시험연구원
한국해양연구원</td><td>참여기업명</td><td colspan="3">(주)평원엔지니어링
(주)이산</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="6">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="6">연구기관명 : 초석건설산업(주) 연구책임자 : 김일곤</td></tr>
<tr><td colspan="5">요약</td><td>보고서면수</td><td>624</td></tr>
<tr><td colspan="7">1차년도에는 국내외 지반개량을 위한 다짐말뚝 현황조사, 문제점 및 한계성 분석과 대안 도출, 개발공법 재료의 지반개량현장 적용성 평가 및 특성 분석, 순환골재를 활용한 다공질 콘크리트말뚝공법 개발 및 요소기술 분석, 개발공법으로 개량된 연약지반의 거동특성 규명을 위한 실내모형토조 제작 및 수치해석을 수행하였다. 2차년도에는 순환골재의 활용을 위한 품질기준 제시, 순환골재 다공질 콘크리트말뚝과 혼합재료를 배합한 다짐말뚝의 지반개량효과 검증 및 문제점 분석, 연약지반의 공학적 안정화를 위한 순환골재를 활용한 지반개량공법의 개발, 개발공법으로 개량된 연약지반의 안정화 평가, 현장장비 적용성 및 경제성 분석, 현장시험시공 계획수립을 수행하였다. 3차년도에는 개발공법의 현장 적용성 및 시공성 평가, 현장에 시공된 개발공법의 재료적 품질확인 시험 및 분석, 개발공법으로 개량된 연약지반의 개량효과, 안정성 평가 및 최적설계기준 제시, 개발공법의 최적설계프로그램 개발 및 제반 기준 제시를 수행하였다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="5">순환골재, 재활용, 지반개량, 다공질 콘크리트말뚝, 다짐말뚝</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="5">Recycled aggregate, Recycle, Ground improvement,
Porous concrete pile, Compaction pile</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구의 목적은 최근 기하급수적으로 증가하고 있는 건설폐기물의 발생에 의한 환경처리 문제와 막대한 건설재료 수급으로 인한 천연자원의 고갈에 대처함과 동시에 기존의 연약지반개량기술 중 다짐말뚝공법의 공학적 및 기능적 단점을 보완하기 위한 새로운 친환경 연약지반개량 기술을 개발함에 있다.

본 연구개발의 최종목표는 천연자원의 고갈에 대처함과 동시에 기존의 지반개량공법의 치명적인 공학적 및 기능적 단점을 보완하기 위하여 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법을 개발하는 것이다. 본 공법을 개발하기 위해서는 국내외 지반개량을 위한 공법들의 문제점 및 한계성 등의 현황을 엄밀히 분석하여 대안을 도출하고 이론적인 해석, 실내모형실험, 수치해석, 현장시험시공 및 계측을 체계적으로 수행하여 총괄적인 시공성, 경제성 및 안정성을 평가 검증하여야 한다. 현황분석과 이론적 해석, 성공적인 모형실험을 위한 예비실험단계를 수행하기 위해 1년간의 연구기간이 필요하고, 개발된 공법의 적용성과 안정성을 검증하기 위한 실내모형실험과 그에 대한 수치해석, 결과 분석 및 설계법 제시 등의 과제를 수행하기 위해 1년간의 연구기간이 필요하게 된다. 최종적으로 현장의 적용성 평가를 위한 시험시공 및 계측, 최적 시공법과 안정관리 지침 제시 등의 과제를 수행하기 위해 1년간의 연구기간이 소요되게 되므로 본 연구개발 과제는 총 3년의 수행기간이 필요할 것으로 예상된다. 본 연구개발팀의 연구책임자들은 연약지반개량 설계 및 시공, 건설재료 분야에서 국내 최고의 전문가들로서 경제적 측면, 시공기술 측면, 설계기법 측면, 안정관리 측면 등의 타당성을 엄밀히 증명할 수 있으며, 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법을 개발하여 국내외 연약지반개량 및 설계, 시공기술의 선진화에 이바지 하고자 한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

최근 우리나라에서는 건축 구조물의 노후화로 인한 재건축 등으로 기존의 콘크리트 구조물의 해체 및 폐기가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 현장에서 매년 기하급수적으로 다량 발생되고 있는 폐콘크리트 등의 건설폐기물 처리가 새로운 사회적 문제로 부각되고 있는 실정이다. 환경부에서 발표하는 환경통계연감에 따르면, 우리나라의 건설폐기물 일평균 발생량은 1996년 28,425톤에서 2001년에는 약 4배인 108,520톤으로 급격하게 증가되고 있다. 건설폐기물의 발생량은 IMF에 의한 경제 침체기였던 1998년도를 제외하면 해마다 증가하고 있다. 건설폐재류의 성상별 발생추이를 살펴보면 콘크리트용 순환골재로 재활용이 가능한 콘크리트류는 약 67%를 차지한다. 이와 같은 증가추세를 선형적 증가로 가정하면 2020년에는 폐콘크리트의 연간 발생량이 9천만 톤이 될 것으로 추정된다. 건설기술연구원의 연구보고서에서도 2020년도의 폐콘크리트 발생량이 1억 톤을 넘어설 것으로 예측한 바 있으므로, 국내의 폐콘크리트 발생량 저감 및 재활용은 환경적 측면 및 자원재활용의 측면에서 매우 시급히 해결해야할 사안임에 틀림없다. 따라서 천연자원의 고갈에 대비하고 지구의 환경파괴를 극소화시키며 건설폐기물을 재활용할 수 있는 재료로써 폐콘크리트로부터 얻을 수 있는 순환골재를 이용할 필요가 있다. 건설폐기물로부터 얻은 순환골재를 연약지반개량의 재료로 적용하는 기술을 개발하고 실현화하는 단계를 본 연구개발의 범위로 하고 있으며, 세부적인 내용으로 지반개량재로로서의 순환골재의 적용성 평가, 순환골재를 이용한 친환경 지반개량공법의 개발, 실내모형실험 및 수치해석을 통한 개량된 지반의 거동 및 안정성 평가 및 합리적 설계기법 제시, 현장시험시공을 통한 개발된 공법의 실용화로 구성된다.

본 연구개발의 범위는 건설폐기물로부터 얻은 순환골재를 연약지반개량공법의 재료로 적용하는 시스템을 개발하는 것이다. 이를 위해 순환골재를 시멘트와 적절히 배합하여 제작한 다공질 콘크리트의 역학적 특성을 분석함과 동시에 이를 이용하여 제작한 다공질 콘크리트말뚝의 지지력 및 역학적 특성을 조사한다. 또한 연약지반 중에 존재하는 간극수의 배출을 위한 다공질 콘크리트말뚝의 투수성능을 실험을 통해 정량적으로 평가하여 본 공법의 설계 지침서를 제시한다. 한편, 개발된 다공질 콘크리트말뚝공법을 연약지반에 적용하였을 경우 발생하는 연약지반의 압밀촉진거동, 하중재하로 인한 말뚝의 팽창파괴에 대한 보강효과, 연약지반의 측방유동과 활동파괴에 대한 전단보강효과를 규명하기 위

하여 실내모형압밀실험 및 실내토조실험 및 그에 대한 수치해석을 실시한다. 또한 본 공법의 국내 현장시험시공 및 계측을 실시하여 시공성 및 현장 적용성을 평가한다. 최종적으로 이러한 일련의 결과들을 분석하여 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법의 최적설계기법과 시공 프로그램을 개발한다.

Ⅳ. 연구개발결과

본 연구에서 수행한 연구성과는 다음과 같다.

1. 1차년도 연구성과

(1) 국내외 지반개량을 위한 다짐말뚝공법 현황조사, 문제점 및 한계성 분석과 대안 도출

① 국내외 다짐말뚝공법 7개 현장사례 수집 및 분석 수행

② 다짐말뚝공법 관련 기존 이론 및 설계법 고찰 수행

- 설계절차, 치환율, 안정계산, 파괴 메커니즘 등

③ 기존 다짐말뚝공법에 대한 연구동향 분석

- 실내시험 및 수치해석을 통한 역학거동 파악

④ 기존 다짐말뚝공법의 한계성 분석

- 기능성(관입파괴, 전단파괴, 팽창파괴, 간극막힘현상)과 설계법(압밀중 응력분담, 물성치의 불확실성), 재료적 한계성(천연자원 고갈, 경제성 불리) 중심의 한계성 파악

⑤ 다짐말뚝공법의 대응책 제시

- 말뚝강성을 고려한 혼합재료 사용, 다공질 콘크리트말뚝공법 개발 필요 등

(2) 순환골재를 활용한 다짐말뚝 건설재료의 지반개량현장 적용성 평가 및 특성분석

① 국내외 혼합재료 적용사례 분석

② 혼합재료에 의한 지지력 특성 분석

- 다짐말뚝의 극한하중은 재료 내부마찰각, 점성토 전단강도에 크게 의존

- 재료특성에 따라 파라미터 변화만 고려 필요(모래:쇄석=10:0~8:2 변화시 내부

마찰각 증대, 이후 현저히 감소)

- 현장재하시험을 통한 지지력 결정 필요

③ 혼합재료에 의한 압밀촉진효과 분석

- 혼합재료(모래, 쇄석)는 모래말뚝과 과잉간극수압 소산특성이 유사하게 나타남

④ 순환골재를 활용한 다공질 콘크리트말뚝과 모래다짐말뚝 및 쇄석다짐말뚝 재료의 공학적 특성평가를 위한 실내시험계획 수립

(3) 순환골재를 활용한 다공질 콘크리트말뚝공법 개발 및 요소기술 분석

① 순환골재 발생현황조사 및 재활용에 따른 경제성 분석

- 2003년 16백만 톤 중 9.5% 사용 중, 2006년 순환골재 비용은 1/3~1/5 수준의 경제성을 확보함

② 순환골재의 재료적 적용성 평가

- 순환골재 종류 평가 : 배합설계시 40mm 이하의 굵은골재 사용
- 순환골재 품질 평가 : 흡수율에 의해 밀도 증가, 내구성 저하

③ 순환골재를 활용한 다공질 콘크리트말뚝의 역학특성 및 투수특성 평가

- 예비실험 : 단위중량 2회, 물-시멘트비 3회 등 총 12회 수행
- 본실험 : 총 144회 수행
- 역학적 특성은 단위중량에 의해 영향을 받지 않고 일정한 값을 나타냄
- 투수특성은 단위중량, 물-시멘트비의 영향을 받지 않고 일정한 값을 나타냄

(4) 순환골재를 활용한 지반 개량체로 개량된 연약지반의 거동특성 규명을 위한 실내모형토조 제작 및 수치해석의 수행

① 원형토조 압밀실험장치 제작 및 예비실험

- 토조 : 직경×높이 = 480×480mm
- 가압판 : 직경×두께 = 480×35mm
- 수직도를 위한 케이싱 제작

② 실내모형토조 실험장치 제작 및 예비실험

- 토조 : 가로×세로×높이 = 0.75×0.15×0.7m
- 진동압입이 가능한 말뚝 조성용 유압실린더 제작
- 수직도를 위한 케이싱 제작

③ 순환골재를 이용한 다공질 콘크리트말뚝의 역학적 물성치 고찰 및 결정

④ 원형토조 압밀시험 및 실내모형토조에 대한 수치해석 수행

- 다차원 축대칭 압밀해석 수행
- 복합지반의 응력분담 특성 예측(시간에 따른 침하, 과잉간극수압 및 유효응력의 변화)

2. 2차년도 연구성과

(1) 친환경 지반개량을 위한 건설재료로써 순환골재의 활용을 위한 품질기준 제시

① 예비시험 : 주도시험 4회, 플로우시험 4회, 슬럼프시험 3회 수행(W/C=25%, 27.5%, 30%)

② 본시험 : 시험별 공시체 제작 18개(W/C=25%, 30%, 35%, P/G=24%, 32%, 42%)

- 압축강도시험 18회 수행을 통한 강도특성 평가
- 투수시험(ø150×h300, ø100×h200) 36회 수행을 통한 투수특성 평가
- 공극률시험(ø150×h300, ø100×h200) 36회 수행을 통한 공극률 평가

③ 최적배합비 결정 : W/C=30% 이상, P/G=24% 이상 선정

④ 건설폐기물 관련제도 현황, 순환골재 관련제도 현황 조사

⑤ 투수콘크리트용 순환골재 품질기준 제시

- 절대건조밀도 2.2g/cm^3 이상
- 흡수율 7.0% 이하
- 안정성 12% 이하

(2) 순환골재 다공질 콘크리트말뚝과 혼합재료를 배합한 다짐말뚝의 지반개량효과 검증 및 문제점 분석

① 치환율(15%, 35%, 60%)에 따른 삼축압축시험(CIU) 9회 수행을 통한 다공질 콘크리트말뚝과 혼합재료를 이용한 말뚝의 강도특성 평가

② 치환율에 따른 강도정수(c, $ø_{cu}$) 평가

- 개발공법 : c≒580kPa, ø=19~34°
- SCP 공법 : c=4~18kPa, ø=27~35°

③ 순환골재를 활용한 다공질 콘크리트말뚝의 장래발생량 예측을 통한 경제성 평가

④ 개발공법의 건설신기술 적용계획 초안 수립

(3) 연약지반의 공학적 안정화를 위한 순환골재를 활용한 친환경 지반개량공법 개발

① 원형토조 압밀실험 7회 수행

② 침하량, 과잉간극수압, 연직응력증분 분석을 통한 압밀촉진효과 평가

③ 복합지반의 응력분담 특성 예측(응력분담비, 압밀도)

- 말뚝파괴 전 응력분담비 n은 파괴후 대비 2배 이상 수준, 압밀도는 이론해보다 느리게 거동

④ 다공질 콘크리트말뚝과 SCP에 대한 각각 5가지 수치 시뮬레이션 수행

- 치환율 5%, 10%, 25%, 30%, 40%

(4) 순환골재를 활용한 다공질 콘크리트말뚝공법으로 개량된 연약지반의 안정화 평가 및 최적설계 기준 제시

① 실내모형토조실험 4회 수행

② 지표침하량, 지표융기량, 연직응력증분 및 과잉간극수압 변화 양상 분석

③ 하중재하에 의한 변형거동 및 전단보강효과 규명

- 하중재하 말뚝 : 연직응력증분 발생
- 하중미재하 말뚝 : 연직응력증분 미발생

④ 모형토조실험에 대한 수치시뮬레이션을 통한 안정성 평가

- 치환율 : 5%, 10%, 25%
- 안전율 : 1.213~1.890

(5) 현장장비 적용성 및 경제성 분석, 현장시험시공 계획 수립

① 기존 시공장비(SCP 시공장비 및 무진동 무소음 다짐말뚝장비)에 대한 적용성 검토

② 장비 적용성 및 타설용이성 검토를 위한 총 3공의 현장시험시공 수행

- 무다짐공 2공(⌀400mm)
- 다짐공 1공(⌀700mm)

③ 현장시험시공을 위한 부지조사 수행

- 인천 송도국제도시 OO공구
- 전남 영암 OO부지 조성공사

④ 장비 및 투입비용 산출을 통한 경제성 검토

⑤ 개발공법에 대한 단가산출서 작성 및 기존 다짐공법과의 경제성 비교(11~15% 감소)

(6) 현장장비 적용성 및 경제성 분석, 현장시험시공 계획 수립

① 현장시험시공 규모 산출

- 시험시공 규모 : 74×16m
- 양생일별 품질확인용 4공
- 개발공법(치환율 2종) / GCP / SCP 각각 3×3공, 총 36공

② 현장시험시공 비용산출

- 각종 재료비, 시공비 및 부대비용 등 비용 산출
- 지반조사 및 품질/개량확인시험 비용 산출
- 지표침하판, 토압계, 경사계 등 계측 비용 산출

3. 3차년도 연구성과

(1) 순환골재 및 다공질 콘크리트말뚝공법의 현장 적용성 및 시공성 평가

① 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 시험시공 수행

- 다공질 콘크리트말뚝공법(치환율 10%, 30%), GCP 공법(치환율 30%), SCP 공법(치환율 30%)에 대하여 4개 구간 총 64공 타설
- 직경 ø700mm, 타설깊이 15m
- 쇄석층 0.7m, 성토 4.7m 등 총 5.0m 재하성토
- 2009.4~2009.10(총 6개월간 수행)

② 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 개량효과 판정을 위한 계측 수행

- 간극수압계(GL.-5m, GL.-8m)
- 지표침하판(말뚝)
- 층별침하계(지표면, GL.-5m, GL.-8m)
- 토압계(원지반, 말뚝)
- 지중경사계 및 지하수위계
- 자동계측방식 적용(2시간 간격 데이터 수령)
- 2009.4~2009.10(총 6개월간 수행)

③ 기존 다짐말뚝공법의 사례와 비교분석하여 개발공법의 시공성 및 개량효과 평가

- 계측결과 분석을 통한 개발공법과 기존 다짐말뚝공법간의 시공성 및 개량효과 검토

(2) 현장에 시공된 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 재료적 품질확인 시험 및 분석

① 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 코아 채취 및 역학시험에 의한 품질확인

- 현장시험시공구간에 대한 다공질 콘크리트말뚝의 코아채취 및 압축강도시험 수행

② 연약지반의 시료채취 및 역학시험에 의한 개량효과 확인

- 현장시험시공 구간에 대한 사전조사 및 확인조사를 통한 시료채취, 물성시험 및 역학시험 수행

③ 순환골재 다공질 콘크리트말뚝에 사용된 순환골재의 품질시험 기준안 정립

- 현장시험시공시 사용된 순환골재에 대한 품질기준안 정립

(3) 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법으로 개량된 연약지반의 개량효과, 안정성 평가 및 최적 설계기준 제시

① 원형토조 압밀실험을 통한 연약지반 개량효과 검토

- 투수콘크리트말뚝 : 치환율 5%, 7.5%, 10%
  - ▸하중재하 단계에 따른 치환율별 침하량, 과잉간극수압, 연직응력 증분 검토
  - ▸시간경과에 따른 치환율별 복합지반의 응력분담비 변화 검토
- GCP 말뚝 : 치환율 5%, 10%
  - ▸하중재하 단계에 따른 침하량, 과잉간극수압, 연직응력 증분 검토
  - ▸시간경과에 따른 복합지반의 응력분담비 변화 검토
- 수치해석을 통한 모형실험 결과와의 비교 검토

② 모형토조실험을 통한 안정성 평가

- 다공질 콘크리트말뚝 : 치환율 5%, 7.5%, 10%
  - ▸하중단계에 따른 치환율별 침하량, 지표융기량, 지반변위 양상, 연직응력증분 검토
  - ▸치환율별 시간에 따른 과잉간극수압 검토
  - ▸치환율별 응력분담비 및 침하저감계수 검토
- 수치해석을 통한 모형실험 결과와의 비교 검토

③ 다짐말뚝의 점토혼입 양상에 관한 모형실험 수행

- RAPP, SCP, GCP, Sandy GCP 검토(치환율 10%)
- 상재하중에 의한 점토혼입 양상 검토
- 원지반 구속에 의한 점토혼입 양상 검토

(4) 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 최적 설계프로그램 개발 및 제반기준 제시

① 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 설계정수 결정 및 설계프로그램 개발

- 실내역학시험결과를 고려한 설계정수 결정
- 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법에 대한 설계프로그램 개발(RAPP ver. 1.0 for Windows)

② 개발공법의 합리적 시공방법, 성능평가 기준 제시

- 다공질 콘크리트말뚝공법 시방서 및 단가산출서 작성

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

본 연구는 건설폐기물을 재활용하는 기술을 개발하는 것을 주목적으로, 순환골재를 다짐말뚝의 재료로 사용하는 새로운 기술이다. 한편, 적절히 배합된 다공질 콘크리트를 적용하여 팽창파괴 및 말뚝표면의 간극막힘현상 등 기존의 다짐말뚝에서 발생하는 치명적 단점을 해결할 수 있다.

최근 우리나라에서는 국가 경쟁력 향상의 전략 중 하나로 항만공사와 배후단지 조성을 위한 국토개발 건설사업에 주력하고 있어 막대한 양의 건설재료의 수급이 요구되고 있으나 천연자원의 고갈과 환경파괴 문제로 인한 문제점이 대두되고 있는 실정이다. 이에 본 개발기술은 건설 폐기물을 재활용한 새로운 건설재료의 개발로 건설비용의 절감이라는 경제적 효과와 지구의 환경파괴문제 저감이라는 일석이조의 효과를 얻을 수 있다.

이러한 본 연구개발을 통해 다음과 같은 활용이 기대된다.

- 건설폐기물인 순환골재를 연약지반개량분야의 다짐말뚝 기술에 활용
- 순환골재와 시멘트를 활용한 새로운 다짐말뚝 기술의 도입
- 다공질 콘크리트말뚝의 설계법 확립과 그에 따른 시공성 확대

SUMMARY

Ⅰ. Title

Development of pro-environmental ground improvement method using recycled aggregate

Ⅱ. Purpose and Necessity of research and development

The purpose of this research is the development of new pro-environment soft ground improvement technology complementing defects of existing compaction pile method for engineering and technical side. The existing compaction pile method uses a large quantity of natural aggregate, hence gives rise to environmental treatment problem due to construction wastes and exhaustion of natural resources.

The final purpose of this research and development is the development of pro-environmental ground improvement method coping with exhaustion of natural resources and complementing engineering and technical defects of existing compaction pile method.

For the development of this method, it is necessary that analysis of problem and limit and propose of alternative of existing compaction pile method.

Also, by achievement of theoretical analysis, model test in laboratory, numerical analysis, site test execution, measurement, the overall items of construction, economy and stability are should be estimated.

For accomplishing state analysis, theoretical analysis and successful model test, one year is needed, and for model test in laboratory, numerical analysis, results analysis and propose of design method, one year is needed. Finally for accomplishing site test execution for site applicability, measurement and proposing the optimum method, one year is needed.

Ⅲ. Content and scope of research and development

Recently it is actively progressing the demolition of structures for rebuilding due to aging of building. In this site, it is social problem that the treatment of a large quantity of construction wastes occurring yearly.

The scope of this research is that the development of system applying material for soft ground improvement using recycled aggregate obtained from construction wastes.

For this purpose, analyze mechanical characteristics of porous concrete made of mixing recycled aggregate and porous cement and at the same time examine bearing capacity and mechanical characteristics of porous concrete pile made of porous concrete. also, Estimating permeability of porous concrete pile for draining of water in soft ground, propose design criterion for this method.

In case of applying developed porous concrete pile to soft ground, for examining the consolidation acceleration behavior, reinforcement effect of bulging failure by loading, lateral flow and shear reinforcement effect for sliding failure, model test in laboratory, soil box test and numerical analysis are performed. also, by site test executing and measurement, estimate executing and applicability. finally for analyzing these results, develop the optimum design criterion and program of pro-environment ground improvement method using recycled aggregate.

Ⅳ. Results of research and development

1. Results of Research(First period)

(1) Survey the present state of compaction pile method for soft ground improvement at home and abroad, analysis the problem and limit and presentation the countermeasure

① Collection and analysis for example of compaction pile method at home and abroad

② Examination on existing theory and design method for compaction pile method

③ Analysis on present state of research of existing compaction pile method

④ Limit analysis on skill

⑤ Present the countermeasure of compaction pile method

(2) Estimation the site applicability and analysis the characteristics of material for compaction pile using recycled aggregate

① Analysis on applying example of mixed material at home and abroad

② Analysis on bearing capacity by mixed material

③ Analysis on the consolidation promotion effect by mixed material

④ Plan for the estimation the engineering characteristics of porous concrete pile using recycled aggregate, sand compaction pile and gravel compaction pile

(3) Porous concrete compaction pile using recycled aggregate development and analysis on the element skill

① Survey the occurrence state of recycled aggregate and analysis the economical effect

② Estimation the material applicability of recycled aggregate

③ Estimation the mechanical and permeable characteristics of porous concrete pile using recycled aggregate

(4) Making the soil box and performance the numerical analysis for examining the characteristics of soft ground improved by recycled aggregate

① Making the circular consolidation test and pretest

② Making the soil box in laboratory and pretest

③ Estimation and determination the material property of porous concrete compaction pile using recycled aggregate

④ Perform the numerical analysis for circular consolidation test and soil box test

2. Results of Research(Second period)

(1) Presentation the quality criteria for using the recycled aggregate as the construction material for pro-environmental soft ground improvement

① Pretest : flow test etc.(W/C=25%, 27.5%, 30%)

② Test : W/C=25%, 30%, 35%, P/G=24%, 32%, 42%

③ Determination the optimum mixing ratio : W/C≥30%, P/G≥24%

④ Presentation the quality criteria of recycled aggregate for porous concrete

(2) Estimation the effect of soft ground improvement of recycled aggregate porous concrete pile and compaction pile using the mixed material

① Estimation the strength characteristics of pile using porous concrete pile and pile using mixed material by triaxial compression test nine times for replacement ratio(15%, 35%, 60%)

② Estimation the strength property(c, ϕ_{cu}) as replacement ratio

- Recycled porous concrete pile method : c≒580kPa, ϕ=19~34°
- Sand compaction pile method : c=4~18kPa, ϕ=27~35°

③ Estimation the economy through prediction the quantity for the future of porous concrete pile using recycled aggregate

④ Plan the application for construction new technology of developed method

(3) Development the pro-environmental soft ground improvement using recycled aggregate for engineering stability of soft ground

① Performance the circular consolidation test seven times

② Estimation the consolidation promotion effect by analysis the settlement, excess porewater pressure and vertical stress increasing

③ Expectation the stress division characteristics of mixed ground

④ Performance the numerical analysis(five cases) for porous concrete pile sand compaction pile

(4) Estimation the stability of soft ground improved by porous concrete pile method using recycled aggregate and presentation the optimum design criteria

① Performance the soil box test in laboratory four times

② Analysis the settlement, upheaval, vertical stress increasing and excess pore-water pressure

③ Examination the deformation behavior by loading and shear reinforcement effect

④ Estimation the stability by numerical simulation for soil box test

(5) Site equipment applicability, economy analysis and plan for site test execution

① Examination the applicability of existing construction equipment

② Performance the site test execution for equipment applicability and easiness of penetration

③ Performance the site survey for site test execution

④ Examination the economy by equipment and input cost

(6) Analysis the applicability and economy, plan for site test execution

① Estimation the size of site test execution

② Estimation the cost of site execution

3. Results of Research(Third period)

(1) Estimation the site applicability and construction of recycled aggregate porous concrete pile method

① Performance the site test execution of recycled aggregate porous concrete pile method

② Performance the measuring for determining the effect of recycled aggregate porous concrete pile method

③ Estimation the construction and improvement effect of recycled aggregate porous concrete pile method comparing with existing compaction pile method

(2) Test and analysis the recycled porous concrete pile

① Collection the core of recycled aggregate porous concrete pile and estimation the quality by mechanical test

② Undisturbed sampling of soft ground and estimation the effect by mechanical test

③ Presentation the quality test criteria of recycled aggregate used for recycled aggregate porous concrete pile

(3) Improvement efect by recycled aggregate porous concrete pile method, estimation the stability and presentation the optimum design criteria

① Examination the improvement effect by circular consolidation test

② Estimation the stability by soil box test

③ Performance the test for clay intrusion trend of compaction pile

(4) Development the optimum design program of recycled aggregate porous concrete pile method and presentation the criteria

① Determination the property of recycled aggregate porous concrete pile method and development the design program

② Presentation the resonable construction method, capacity estimation criteria

Ⅴ. Utilizing plan of research and development results

The main purpose of this research is that development of method recycling construction wastes and this method is the new technology that recycled aggregate is used for compaction pile material. bulging failure, clogging that is the critical defect of existing compaction pile is able to be solved by use of proper mixed porous concrete.

Recently a large quantity of construction material is needed as the nation is promoting the national construction development as like harbor construction and site development. but the problem as the exhaustion of natural resources and environment

demolition. so this method is expected to save construction cost by use of development of the new construction material recycling construction wastes.

By this research and development, these are expected.

- Utilize the recycled aggregate to compaction pile technology in field of soft ground improvement
- Introduce the new compaction pile method utilizing recycled aggregate and porous cement
- Establish the design criterion and expand the construction applicability

목 차

제 1 장 연구개발의 개요 ····· 1

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 1
1. 연구개발의 목적 ····· 1
2. 연구개발의 필요성 ····· 3
3. 국내외 기술 및 산업동향 ····· 5

제 2 절 연구개발의 목표 및 범위 ····· 19
1. 연구개발의 범위 ····· 19
2. 연구개발의 목표 및 내용 ····· 20

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 29

제 1 절 다짐말뚝에 의한 연약지반개량공법의 개발동향 ····· 29
1. 다짐말뚝공법의 종류 및 특징 ····· 29
2. 다짐말뚝공법 설계법 ····· 38
3. 기존 다짐말뚝공법에 대한 연구동향 ····· 60

제 2 절 순환골재의 활용현황 및 현장적용 사례 ····· 67
1. 순환골재의 재료적 적용성 평가 ····· 67
2. 국내 순환골재의 발생현황 및 활용분야 ····· 70
3. 순환골재 관련제도 현황 ····· 72
4. 국내외 순환골재의 현장적용 사례 ····· 81

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 85

제 1 절 기존 다짐말뚝의 한계성 분석 ····· 85
1. 기능성에 대한 한계성 분석 ····· 85
2. 설계법에 대한 한계성 분석 ····· 92
3. 재료적 한계성 분석(환경성 및 경제성) ····· 96

제 2 절 순환골재 다공질 콘크리트의 재료적 특성 평가 ····· 98
1. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 재료특성 예비평가 ····· 98
2. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 최적배합비 결정 ····· 111
3. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 품질기준 제시 ····· 137

제 3 절 혼합재료(모래)와 순환골재의 역학적 특성 분석 ····· 145
1. 모래다짐말뚝 및 순환골재 다공질 콘크리트말뚝에 대한 삼축압축시험 ····· 145
2. 모래다짐말뚝 및 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 역학적 특성 분석 ····· 166

제 4 절 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 개량효과 분석 ····· 172
1. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 실내원형토조 압밀실험 ····· 172
2. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법에 대한 수치해석 ····· 211

제 5 절 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 안정성 평가 ····· 240
1. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 실내모형실험 ····· 240
2. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법에 대한 수치해석 ····· 290

제 6 절 순환골재 다공질 콘크리트말뚝 공법의 점토혼입 영향 분석 ····· 348
1. 상재하중을 고려한 점토혼입 효과에 대한 모형실험 및 수치해석 ····· 348
2. 원지반 구속을 고려한 점토혼입 효과에 대한 모형실험 및 수치해석 ····· 367
3. 점토혼입 영향에 대한 종합분석 ····· 385

제 7 절 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 현장시험시공 ····· 387
1. 현장장비 적용성에 따른 시험시공 ····· 387
2. 현장시험시공 계획 ····· 398
3. 현장시험시공 ····· 416
4. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 개량효과 판정 ····· 450
5. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 시공기준 제시 ····· 483

제 8 절 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 최적 설계프로그램 개발 ····· 501
1. RAPP 공법 설계프로그램 일반 ····· 501
2. RAPP 공법 설계프로그램 사용법 ····· 504
3. RAPP 공법 설계프로그램 결과 ····· 535

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 546

제 1 절 연구개발 목표의 달성도 ····· 546
1. 1차년도 연구개발 목표의 달성도 ····· 546
2. 2차년도 연구개발 목표의 달성도 ····· 548
3. 3차년도 연구개발 목표의 달성도 ····· 551

제 2 절 관련분야에의 기여도 ····· 553
1. 기술적 측면 ····· 553
2. 사회·경제적 측면 ····· 553
3. 타 산업에 미치는 효과 ····· 554

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획 ····· 555

제 1 절 개요 ····· 555
제 2 절 연구결과 활용계획 ····· 555

제 6 장 연구개발 과정에서의 수집된 해외과학기술정보 ····· 566

제 1 절 일본의 폐기물 재활용 현황 및 기술동향 ····· 566
제 2 절 유럽의 건설폐기물 재활용 현황 및 기술동향 ····· 567

제 7 장 참고문헌 ····· 570

CONTENTS

Chapter 1. Introduction of research and development ····· 1

Section 1. Purpose and necessity of research and development ····· 1
1. Purpose of research and development ····· 1
2. Necessity of research and development ····· 3
3. Technical and industrial trend at home and abroad ····· 5

Section 2. Purpose and scope of research and development ····· 19
1. Scope of research and development ····· 19
2. Purpose and content of research and development ····· 20

Chapter 2. Technical development trend at home and abroad ····· 29

Section 1. Development trend of soft ground improvement by compaction pile ····· 29
1. Types and characteristics of compaction pile method ····· 29
2. Theory and design method of compaction pile ····· 38
3. Present state of research of existing compaction pile method ····· 60

Section 2. Present state of using recycled aggregate and example of site application ··· 67
1. Estimation on material applicability of recycled aggregate ····· 67
2. Occurrence state of recycled aggregate and application field at home ····· 70
3. Present state of related system on recycled aggregate ····· 72
4. Example of site application of recycled aggregate at home and abroad ····· 81

Chapter 3. Contents and Results of research and development ····· 85

Section 1. Limit analysis on existing compaction pile ····· 85
1. Limit analysis on skill ····· 85
2. Limit analysis on design method ····· 92
3. Limit analysis on material limit for environmental and economy ····· 96

Section 2. Estimation on material characteristics of recycled aggregate porous concrete ····· 98
1. Pre-estimation on material characteristics of porous concrete pile using recycled aggregate ····· 98
2. Determination on optimum mixing ratio of recycled aggregate porous concrete pile ····· 111
3. Proposal of quality criterion for recycled aggregate porous concrete pile ····· 137

Section 3. Analysis on recycled aggregate and mixed material(sand) ····· 145
1. Triaxial compression test for sand compaction pile and recycled aggregate porous concrete pile ····· 145
2. Mechanical property analysis for sand compaction pile and recycled aggregate porous concrete pile ····· 166

Section 4. Estimation for improvement effect of recycled aggregate porous concrete pile ····· 172
1. Circular consolidation test in laboratory of recycled aggregate porous concrete pile ····· 172
2. Numerical analysis for recycled aggregate porous concrete pile ····· 211

Section 5. Stability analysis for recycled aggregate porous concrete pile ····· 240
1. Soil box test in laboratory for recycled aggregate porous concrete pile ····· 240
2. Numerical analysis for recycled aggregate porous concrete pile ····· 290

Section 6. Modelling test on clay intrusion of compaction pile ····· 348
1. Model test and Numerical analysis for clay intrusion effect considering loading ···· 348
2. Model test and Numerical analysis for clay intrusion effect considering ground constraint ····· 367
3. Total estimation for clay intrusion effect ····· 385

Section 7. Site test execution of recycled aggregate porous concrete pile ····· 387
1. Site test execution for equipment applicability ····· 387
2. Plan for site test execution ····· 398
3. Site test execution ····· 416
4. Estimation for improvement effect of recycled aggregate porous concrete pile ···· 450
5. Suggestion of construction method for recycled aggregate porous concrete pile ··· 483

Section 8. Development of optimum design program of recycled aggregate porous concrete pile ····· 501
1. Introduction of RAPP program ····· 501
2. Utility method of RAPP program ····· 504
3. Result of RAPP program ····· 535

Chapter 4. Accomplishment of research and development purpose and contribution to related field ····· 546

Section 1. Accomplishment of research and development purpose ····· 546
1. Accomplishment of research and development of 1st period ····· 546
2. Accomplishment of research and development of 2nd period ····· 548
3. Accomplishment of research and development of 3rd period ····· 551

Section 2. Contribution to related field ····· 553
1. Technical side ····· 553
2. Social and economical side ····· 553

3. Effect to other industry ····· 554

Chapter 5. Utilizing plan of research and development results ····· 555

Section 1. Introduction ····· 555
Section 2. Utilizing plan for the future ····· 555

Chapter 6. Science technical information of foreign countries during research and development process ····· 566

Section 1. Recycle state and technical trend of Japan ····· 566
Section 2. Recycle state and technical trend of Europe ····· 567

Chapter 7. References ····· 570

그 림 목 차

<그림 1.1.1> 건설폐기물 발생 추이 ····· 1
<그림 1.1.2> 건설폐재류 발생 추이 ····· 1
<그림 1.1.3> 모래다짐말뚝과 쇄석말뚝의 팽창현상 ····· 3
<그림 1.1.4> 다짐말뚝 시공현황(2001년~2006년 현재) ····· 8
<그림 1.1.5> 다짐말뚝 연도별 시공액(2001년~2006년 현재) ····· 8
<그림 1.1.6> 모래 대체재 사용현황 ····· 16
<그림 1.1.7> DJM 말뚝적용 실적(일본) ····· 16
<그림 1.1.8> 해외건설 수주 추이 ····· 18
<그림 2.1.1> 조립재의 입도분포 ····· 33
<그림 2.1.2> DCM 공법의 적용 공사 ····· 37
<그림 2.1.3> 쇄석다짐말뚝의 등변삼각형 배치 ····· 44
<그림 2.1.4> 이상화된 단위 셀 ····· 45
<그림 2.1.5> 균질한 연약층에서의 단일 쇄석다짐말뚝 파괴 메커니즘 ····· 47
<그림 2.1.6> 비균질 연약지반에서 단일 쇄석말뚝의 파괴 메커니즘 ····· 47
<그림 2.1.7> DCM 공법 설계 흐름도 ····· 52
<그림 2.1.8> 처리기 고유의 유효폭 ····· 54
<그림 2.1.9> 접합면 ····· 54
<그림 2.1.10> 개량체에 작용하는 외력 ····· 56
<그림 2.1.11> 해상 SCP 전용선 전경 ····· 60
<그림 2.1.12> DCM 공법 시공실적 ····· 65
<그림 2.1.13> DCM 공법에 의한 항만구조물 기초의 종류 ····· 65
<그림 2.1.14> DCM 용도별 적용 ····· 66
<그림 2.1.15> 항만구조물 기초의 DCM 개량형식 ····· 66
<그림 2.2.1> 순환콘크리트 골재의 밀도에 따른 흡수율 ····· 68
<그림 2.2.2> 순환골재의 시멘트 페이스트 부착율과 흡수율과의 관계 ····· 68
<그림 2.2.3> 폐콘크리트 및 순환골재 활용량 예측치 ····· 70

<그림 2.2.4> 고품질 순환골재를 이용한 철근 콘크리트 구조물의 공사개요 ····· 84
<그림 3.1.1> 쇄석말뚝의 관입파괴 형태 ····· 85
<그림 3.1.2> 쇄석말뚝의 팽창파괴 형태 ····· 86
<그림 3.1.3> 쇄석말뚝의 전단파괴 형태 ····· 87
<그림 3.1.4> 수치해석 절차 ····· 92
<그림 3.1.5> 시공단계에 따른 침하량(모래다짐말뚝을 시공하지 않은 경우) ····· 94
<그림 3.1.6> 시공단계에 따른 침하량(모래다짐말뚝이 시공된 경우) ····· 94
<그림 3.1.7> 성토고 및 시공일수에 따른 침하량 ····· 95
<그림 3.2.1> 다공질 콘크리트 공시체 제작을 위한 재료 계량 ····· 98
<그림 3.2.2> 다공질 콘크리트 공시체 제작 ····· 100
<그림 3.2.3> 투수시험용 공시체 제작 ····· 100
<그림 3.2.4> 일축압축시험기 ····· 101
<그림 3.2.5> 투수시험 모식도 및 시험전경 ····· 102
<그림 3.2.6> 순환골재 입도분포 곡선 ····· 105
<그림 3.2.7> 공시체 파괴형상(전면) ····· 105
<그림 3.2.8> 공시체 파괴형상(윗면) ····· 105
<그림 3.2.9> 물-시멘트비와 일축압축강도와의 관계 ····· 106
<그림 3.2.10> 물-시멘트비와 E_{50}의 관계 ····· 107
<그림 3.2.11> 단위중량과 일축압축강도와의 관계 ····· 108
<그림 3.2.12> 단위중량과 E_{50}의 관계 ····· 108
<그림 3.2.13> 일축압축강도와 E_{50}의 관계 ····· 109
<그림 3.2.14> 투수계수와 일축압축강도와의 관계 ····· 109
<그림 3.2.15> 주도시험 전경 ····· 111
<그림 3.2.16> 흐름시험 전경 ····· 112
<그림 3.2.17> 예비시험 배합 및 슬럼프 시험 전경 ····· 114
<그림 3.2.18> 예비시험 공시체 제작 ····· 115
<그림 3.2.19> 압축강도시험 전경 ····· 115
<그림 3.2.20> 공시체 제작 전경 ····· 117
<그림 3.2.21> 슬럼프 시험 전경 ····· 117
<그림 3.2.22> 강도시험 전경 ····· 120

<그림 3.2.23> 투수시험 전경 ····· 120
<그림 3.2.24> 공극율 및 코어링 작업 전경 ····· 120
<그림 3.2.25> 양생일수에 따른 물-시멘트비와 압축강도와의 관계 ····· 121
<그림 3.2.26> 물-시멘트비와 압축강도와의 관계 ····· 121
<그림 3.2.27> 물-시멘트비와 양생일수에 따른 압축강도와의 관계 ····· 121
<그림 3.2.28> 시멘트 페이스트와 압축강도와의 관계(W/C=30%) ····· 122
<그림 3.2.29> 양생일수에 따른 시멘트 페이스트와 압축강도와의 관계(W/C=30%) ····· 122
<그림 3.2.30> 양생일수에 따른 시멘트 페이스트와 압축강도와의 관계(W/C=30%) ····· 122
<그림 3.2.31> 공시체 150×300의 투수시험 결과 ····· 123
<그림 3.2.32> 공시체 100×200의 투수시험 결과 ····· 123
<그림 3.2.33> P/G비와 공시체 150×300의 투수시험 결과 ····· 123
<그림 3.2.34> P/G비와 공시체 100×200의 투수시험 결과 ····· 124
<그림 3.2.35> 3일 양생 W/C=25%에 대한 강도시험 결과 ····· 124
<그림 3.2.36> 3일 양생 W/C=30%에 대한 강도시험 결과 ····· 125
<그림 3.2.37> 3일 양생 W/C=35%에 대한 강도시험 결과 ····· 125
<그림 3.2.38> 3일 양생 P/G=24%에 대한 강도시험 결과 ····· 126
<그림 3.2.39> 3일 양생 P/G=42%에 대한 강도시험 결과 ····· 126
<그림 3.2.40> 7일 양생 W/C=25%에 대한 강도시험 결과 ····· 127
<그림 3.2.41> 7일 양생 W/C=30%에 대한 강도시험 결과 ····· 127
<그림 3.2.42> 7일 양생 W/C=35%에 대한 강도시험 결과 ····· 128
<그림 3.2.43> 7일 양생 P/G=24%에 대한 강도시험 결과 ····· 128
<그림 3.2.44> 7일 양생 P/G=42%에 대한 강도시험 결과 ····· 129
<그림 3.2.45> 28일 양생 W/C=25%에 대한 강도시험 결과 ····· 129
<그림 3.2.46> 28일 양생 W/C=30%에 대한 강도시험 결과 ····· 130
<그림 3.2.47> 28일 양생 W/C=35%에 대한 강도시험 결과 ····· 130
<그림 3.2.48> 28일 양생 P/G=24%에 대한 강도시험 결과 ····· 131
<그림 3.2.49> 28일 양생 P/G=42%에 대한 강도시험 결과 ····· 131
<그림 3.2.50> 양생일에 따른 일축압축강도시험 결과 ····· 133
<그림 3.2.51> 시멘트량에 따른 일축압축강도시험 결과 ····· 133
<그림 3.2.52> 양생일에 따른 탄성계수 결과 ····· 133

<그림 3.2.53> 시멘트량에 따른 탄성계수 결과 ····· 134
<그림 3.2.54> 양생일에 따른 투수계수 시험 결과 ····· 134
<그림 3.2.55> 양생일에 따른 지역별 압축강도 시험 결과 ····· 136
<그림 3.2.56> 양생일에 따른 지역별 투수시험 결과 ····· 136
<그림 3.3.1> 사용시료의 입도분포곡선 ····· 146
<그림 3.3.2> 재성형 시료 제작 장치 ····· 147
<그림 3.3.3> 모래시료의 제조 및 치환율별 동결된 모래시료 ····· 148
<그림 3.3.4> 점토시료의 성형 및 케이싱 삽입 ····· 149
<그림 3.3.5> 모래말뚝 삽입 및 복합토 조성완료 ····· 149
<그림 3.3.6> 다공질 콘크리트 시료의 제조 및 치환율별 다공질 콘크리트말뚝 ····· 150
<그림 3.3.7> 점토시료 성형 및 케이싱 삽입 ····· 150
<그림 3.3.8> 다공질 콘크리트 삽입 및 복합토 조성완료 ····· 150
<그림 3.3.9> 삼축압축시험의 가압장치 ····· 151
<그림 3.3.10> 압밀완료 후 전단시험 전경 ····· 151
<그림 3.3.11> 전단시험에 의해 파괴된 시료 ····· 151
<그림 3.3.12> 치환율별 모래-점토 복합지반의 응력-변형률 관계 ····· 154
<그림 3.3.13> 구속압별 모래-점토 복합지반의 응력-변형률 관계 ····· 155
<그림 3.3.14> 치환율별 순환골재-점토의 응력-변형률 관계 ····· 156
<그림 3.3.15> 구속압별 순환골재-점토의 응력-변형률 관계 ····· 157
<그림 3.3.16> 치환율별 모래-점토 복합지반의 간극수압-변형률 관계 ····· 159
<그림 3.3.17> 구속압별 모래-점토 복합지반의 간극수압-변형률 관계 ····· 160
<그림 3.3.18> 치환율별 순환골재-점토 복합토의 간극수압-변형률 관계 ····· 161
<그림 3.3.19> 구속압별 순환골재-점토 복합토의 간극수압-변형률 관계 ····· 162
<그림 3.3.20> 치환율별 모래-점토 복합지반의 Mohr-Coulomb의 파괴포락선 ····· 164
<그림 3.3.21> 치환율별 순환골재-점토 복합지반의 Mohr-Coulomb의 파괴포락선 ····· 165
<그림 3.3.22> 치환율별 응력-변형률 관계 ····· 167
<그림 3.3.23> 구속압별 응력-변형률 관계 ····· 168
<그림 3.3.24> 치환율별 간극수압-변형률 관계 ····· 170
<그림 3.3.25> 구속압별 간극수압-변형률 관계 ····· 171
<그림 3.4.1> 원통형 압밀실험장치 개요도 ····· 172

<그림 3.4.2> 원통형 압밀실험 전경 ····· 173
<그림 3.4.3> 원형토조 압밀실험 순서 ····· 175
<그림 3.4.4> 원형토조 압밀실험장치 ····· 179
<그림 3.4.5> 원형토조 압밀실험 전경 ····· 179
<그림 3.4.6> 원형토조의 계측기 위치 및 제원 ····· 180
<그림 3.4.7> 배합장치와 배합 제어장치 ····· 181
<그림 3.4.8> 배합장치 상세도 ····· 181
<그림 3.4.9> 케이싱 관입장치 ····· 181
<그림 3.4.10> 원지반 조성 예비압밀과정 ····· 186
<그림 3.4.11> 원지반 조성 예비압밀단계에서의 계측 및 하중재하 프로그램의 가동 ···· 190
<그림 3.4.12> 다공질 콘크리트말뚝 제작 및 삽입 과정 ····· 191
<그림 3.4.13> 복합지반 조성 예비압밀단계에서의 계측 및 하중재하 프로그램의 가동 ·· 193
<그림 3.4.14> 치환율별 말뚝 삽입 ····· 194
<그림 3.4.15> 치환율별 하중재하 후의 말뚝의 변화 ····· 195
<그림 3.4.16> 시간경과에 따른 침하량의 변화(RAPP-As-5%) ····· 196
<그림 3.4.17> 모형지반의 거동(RAPP-As-5%) ····· 197
<그림 3.4.18> 시간경과에 따른 침하량의 변화(RAPP-As-7.5%) ····· 198
<그림 3.4.19> 모형지반의 거동(RAPP-As-7.5%) ····· 199
<그림 3.4.20> 시간경과에 따른 침하량의 변화(RAPP-As-10%) ····· 200
<그림 3.4.21> 모형지반의 거동(RAPP-As-10%) ····· 201
<그림 3.4.22> 치환율별 하중재하 후의 말뚝의 변화 ····· 202
<그림 3.4.23> 시간경과에 따른 침하량의 변화(GCP-As-5%) ····· 202
<그림 3.4.24> 모형지반의 거동(GCP-As-5%) ····· 203
<그림 3.4.25> 시간경과에 따른 침하량의 변화(GCP-As-10%) ····· 204
<그림 3.4.26> 모형지반의 거동(GCP-As-10%) ····· 205
<그림 3.4.27> 하중단계에 따른 침하저감계수 ····· 206
<그림 3.4.28> 시간경과에 따른 복합지반의 응력분담비 변화(As-5%) ····· 207
<그림 3.4.29> 시간경과에 따른 복합지반의 응력분담비 변화(As-7.5%) ····· 208
<그림 3.4.30> 시간경과에 따른 복합지반의 응력분담비 변화(As-10%) ····· 208
<그림 3.4.31> 시간경과에 따른 복합지반의 응력분담비 변화(As-5%) ····· 209

<그림 3.4.32> 시간경과에 따른 복합지반의 응력분담비 변화(As-10%) ····· 209
<그림 3.4.33> 하중단계에 따른 응력분담비 ····· 210
<그림 3.4.34> 실내모형실험장치 상세도 ····· 215
<그림 3.4.35> 실내모형실험의 개요 ····· 218
<그림 3.4.36> 수치해석 모델 ····· 218
<그림 3.4.37> 시간경과에 따른 침하량의 변화 ····· 220
<그림 3.4.38> 시간 vs. 과잉간극수압 ····· 222
<그림 3.4.39> 시간 vs. 연직응력증분 ····· 222
<그림 3.4.40> 시간경과에 따른 침하량의 변화 ····· 231
<그림 3.4.41> 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화 ····· 232
<그림 3.4.42> 시간경과에 따른 말뚝 내의 유효응력증분의 변화 ····· 233
<그림 3.4.43> 시간경과에 따른 점토의 유효응력증분의 변화 ····· 234
<그림 3.4.44> 시간경과에 따른 복합지반의 압밀도 변화 ····· 235
<그림 3.4.45> 시간경과에 따른 응력분담비의 변화 ····· 236
<그림 3.4.46> 다짐말뚝에 의한 복합지반의 압밀도와 응력분담비의 관계 ····· 237
<그림 3.5.1> 실내모형토조실험장치 개요 및 실험 전경 ····· 241
<그림 3.5.2> 모형토조 실험 전경 ····· 242
<그림 3.5.3> 모형토조실험기 하중재하장치 ····· 243
<그림 3.5.4> 계측기 설치위치 ····· 244
<그림 3.5.5> 말뚝관입장치 및 관입 전경 ····· 245
<그림 3.5.6> 시료배합기 ····· 245
<그림 3.5.7> 치환율에 따른 모형말뚝 직경 및 배치 ····· 247
<그림 3.5.8> 모형토조실험 순서 ····· 250
<그림 3.5.9> 시간경과에 따른 누적 침하량의 변화 ····· 255
<그림 3.5.10> 시간경과에 따른 재하단계별 침하량의 변화 ····· 255
<그림 3.5.11> 시간경과에 따른 누적 침하량의 변화 ····· 256
<그림 3.5.12> 시간경과에 따른 누적 침하량의 변화 ····· 256
<그림 3.5.13> 시간경과에 따른 재하단계별 침하량의 변화 ····· 256
<그림 3.5.14> 시간경과에 따른 재하단계별 침하량의 변화 ····· 257
<그림 3.5.15> 하중단계별 침하량의 변화 ····· 257

<그림 3.5.16> LVDT 설치 위치 ····· 258
<그림 3.5.17> 시간경과에 따른 누적 융기량의 변화 ····· 258
<그림 3.5.18> 하중단계별 융기량의 변화 ····· 259
<그림 3.5.19> 하중단계별 융기량의 변화 ····· 260
<그림 3.5.20> 시간경과에 따른 누적 융기량의 변화 ····· 261
<그림 3.5.21> 하중단계별 융기량의 변화 ····· 261
<그림 3.5.22> 시간경과에 따른 단계별 하중재하시 지반변위 변위 양상(치환율 5%) ·· 263
<그림 3.5.23> 시간경과에 따른 단계별 하중재하시 지반변위 변화 양상(치환율 7.5%) 264
<그림 3.5.24> 시간경과에 따른 단계별 하중재하시 지반변위 변화 양상(치환율 10%) 265
<그림 3.5.25> 토압계 설치 위치 ····· 267
<그림 3.5.26> 시간경과에 따른 말뚝하단부 누적 연직응력 증분의 변화 ····· 267
<그림 3.5.27> 시간경과에 따른 점토부 누적 연직응력 증분의 변화 ····· 267
<그림 3.5.28> 시간경과에 따른 말뚝하단부 연직응력 증분의 변화 ····· 268
<그림 3.5.29> 시간경과에 따른 점토부 연직응력 증분의 변화 ····· 269
<그림 3.5.30> 시간경과에 따른 말뚝하단부 연직응력 증분의 변화 ····· 270
<그림 3.5.31> 시간경과에 따른 점토부 연직응력 증분의 변화 ····· 270
<그림 3.5.32> 시간경과에 따른 말뚝하단부 연직응력 증분의 변화 ····· 271
<그림 3.5.33> 시간경과에 따른 말뚝하단부 연직응력 증분의 변화 ····· 272
<그림 3.5.34> 시간경과에 따른 말뚝하단부 누적 연직응력 증분의 변화 ····· 273
<그림 3.5.35> 시간경과에 따른 점토부 누적 연직응력 증분의 변화 ····· 273
<그림 3.5.36> 시간경과에 따른 점토부 연직응력 증분의 변화 ····· 273
<그림 3.5.37> 시간경과에 따른 점토부 연직응력 증분의 변화 ····· 275
<그림 3.5.38> 간극수압계 설치 위치 ····· 276
<그림 3.5.39> 시간경과에 따른 누적 과잉간극수압의 변화 ····· 277
<그림 3.5.40> 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화(치환율 5%) ····· 278
<그림 3.5.41> 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화(치환율 7.5%) ····· 279
<그림 3.5.42> 시간경과에 따른 누적 과잉간극수압의 변화 ····· 280
<그림 3.5.43> 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화(치환율 10%) ····· 280
<그림 3.5.44> 하중단계별 응력분담비에 대한 실험결과와 수치해석 결과 비교 ····· 282
<그림 3.5.45> 하중단계별 침하저감계수에 대한 실험결과와 수치해석 결과 비교 ····· 284

<그림 3.5.46> 시간경과에 따른 1단계 하중재하시 지반변위 변화 양상 ····· 285
<그림 3.5.47> 시간경과에 따른 2단계 하중재하시 지반변위 변화 양상 ····· 285
<그림 3.5.48> 시간경과에 따른 3단계 하중재하시 지반변위 변화 양상 ····· 286
<그림 3.5.49> 시간경과에 따른 1단계 하중재하시 지반변위 변화 양상 ····· 286
<그림 3.5.50> 시간경과에 따른 2단계 하중재하시 지반변위 변화 양상 ····· 287
<그림 3.5.51> 시간경과에 따른 3단계 하중재하시 지반변위 변화 양상 ····· 287
<그림 3.5.52> 시간경과에 따른 1단계 하중재하시 지반변위 변화 양상 ····· 288
<그림 3.5.53> 시간경과에 따른 2단계 하중재하시 지반변위 변화 양상 ····· 288
<그림 3.5.54> 시간경과에 따른 3단계 하중재하시 지반변위 변화 양상 ····· 289
<그림 3.5.55> 시간경과에 따른 4단계 하중재하시 지반변위 변화 양상 ····· 289
<그림 3.5.56> 모형토조의 개요 ····· 290
<그림 3.5.57> 활동에 대한 안정성 검토(치환율 5%) ····· 292
<그림 3.5.58> 활동에 대한 안정성 검토(치환율 10%) ····· 292
<그림 3.5.59> 활동에 대한 안정성 검토(치환율 25%) ····· 293
<그림 3.5.60> 하중재하에 따른 모형지반의 변형 거동(치환율 5%) ····· 295
<그림 3.5.61> 하중재하에 따른 모형지반의 변형 거동(치환율 10%) ····· 295
<그림 3.5.62> 하중재하에 따른 모형지반의 변형 거동(치환율 25%) ····· 295
<그림 3.5.63> 하중재하에 따른 모형지반의 변위 벡터 변화(치환율 5%) ····· 296
<그림 3.5.64> 하중재하에 따른 모형지반의 변위 벡터 변화(치환율 10%) ····· 296
<그림 3.5.65> 하중재하에 따른 모형지반의 변위 벡터 변화(치환율 25%) ····· 296
<그림 3.5.66> 하중재하에 따른 모형지반의 유효응력 변화(치환율 5%) ····· 297
<그림 3.5.67> 하중재하에 따른 모형지반의 유효응력 변화(치환율 10%) ····· 297
<그림 3.5.68> 하중재하에 따른 모형지반의 유효응력 변화(치환율 25%) ····· 297
<그림 3.5.69> 하중재하에 따른 모형지반의 국소안전율 변화(치환율 5%) ····· 298
<그림 3.5.70> 하중재하에 따른 모형지반의 국소안전율 변화(치환율 10%) ····· 298
<그림 3.5.71> 하중재하에 따른 모형지반의 국소안전율 변화(치환율 25%) ····· 298
<그림 3.5.72> 하중증가에 따른 모형지반 침하량 ····· 299
<그림 3.5.73> 하중증가에 따른 모형지반 최대 수평변위량 ····· 299
<그림 3.5.74> 수치해석 모델 및 메쉬 ····· 301
<그림 3.5.75> 치환율 5% 변위 분포도 ····· 304

<그림 3.5.76> 치환율 7.5% 변위 분포도 ····· 305
<그림 3.5.77> 치환율 10% 변위 분포도 ····· 306
<그림 3.5.78> 하중재하에 따른 변위 분포(치환율 5%) ····· 307
<그림 3.5.79> 하중재하에 따른 변위 분포(치환율 7.5%) ····· 308
<그림 3.5.80> 하중재하에 따른 변위 분포(치환율 10%) ····· 309
<그림 3.5.81> 하중재하에 따른 유효응력 분포(치환율 5%) ····· 310
<그림 3.5.82> 하중재하에 따른 유효응력 분포(치환율 7.5%) ····· 311
<그림 3.5.83> 하중재하에 따른 유효응력 분포(치환율 10%) ····· 312
<그림 3.5.84> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 5%) ····· 313
<그림 3.5.85> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 7.5%) ····· 317
<그림 3.5.86> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 10%) ····· 321
<그림 3.5.87> LVDT 설치 위치 ····· 325
<그림 3.5.88> 치환율 5%에 대한 단계별 하중재하시 침하량 비교 ····· 326
<그림 3.5.89> 치환율 10%에 대한 단계별 하중재하시 침하량 비교 ····· 327
<그림 3.5.90> 하중재하시 융기량 비교(LVDT-1) ····· 328
<그림 3.5.91> 하중재하시 융기량 비교(LVDT-2) ····· 329
<그림 3.5.92> 하중재하시 융기량 비교(LVDT-3) ····· 330
<그림 3.5.93> 하중재하시 융기량 비교(LVDT-1) ····· 331
<그림 3.5.94> 하중재하시 융기량 비교(LVDT-2) ····· 332
<그림 3.5.95> 하중재하시 융기량 비교(LVDT-3) ····· 333
<그림 3.5.96> 간극수압계 설치 위치 ····· 334
<그림 3.5.97> 하중재하시 과잉간극수압 비교(치환율 5%) ····· 335
<그림 3.5.98> 하중재하시 과잉간극수압 비교(치환율 10%) ····· 336
<그림 3.5.99> 하중재하시 침하저감 효과 비교 ····· 337
<그림 3.5.100> 하중재하시 침하저감 효과 비교 ····· 338
<그림 3.5.101> 하중단계별 응력분담비에 대한 실험결과와 수치해석 결과 비교 ····· 339
<그림 3.5.102> 하중단계별 침하저감계수에 대한 실험결과와 수치해석 결과 비교 ····· 340
<그림 3.5.103> 무보강시(원지반) ····· 341
<그림 3.5.104> As-5% ····· 341
<그림 3.5.105> 원지반에 대한 하중재하시 수평변위 ····· 342

<그림 3.5.106> 치환율 5%에 대한 하중재하시 수평변위 ····· 343
<그림 3.5.107> As-7.5% ····· 344
<그림 3.5.108> As-10% ····· 344
<그림 3.5.109> 치환율 7.5%에 대한 하중재하시 수평변위 ····· 345
<그림 3.5.110> 치환율 10%에 대한 하중재하시 수평변위 ····· 346
<그림 3.6.1> 실내모형실험장치 전경 ····· 350
<그림 3.6.2> 실내모형실험장치 상세도 ····· 350
<그림 3.6.3> 모형실험의 계측기 설치 위치 ····· 351
<그림 3.6.4> 모래 및 쇄석의 입도분포시험 결과 ····· 352
<그림 3.6.5> 모형지반의 제작 과정 ····· 354
<그림 3.6.6> 시간경과에 따른 침하량의 변화 ····· 358
<그림 3.6.7> 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화 ····· 359
<그림 3.6.8> 실험 완료 후 복합지반의 상부 모습 ····· 360
<그림 3.6.9> 복합지반의 분해 작업 ····· 361
<그림 3.6.10> 압밀 종료 후 복합지반의 단면 모습 ····· 361
<그림 3.6.11> 수치해석 모델 ····· 363
<그림 3.6.12> 시간경과에 따른 침하량의 변화 ····· 364
<그림 3.6.13> 시간경과에 따른 복합지반의 압밀도의 변화 ····· 365
<그림 3.6.14> 실내모형실험과 수치해석으로부터 얻은 복합지반의 압밀시간 ····· 366
<그림 3.6.15> 실내모형실험장치 모습 ····· 367
<그림 3.6.16> 실내모형실험장치 상세도 ····· 367
<그림 3.6.17> 내부토조 상세도 ····· 368
<그림 3.6.18> 점토의 혼입 양상 및 구속압 작용 ····· 368
<그림 3.6.19> 계측장치 ····· 369
<그림 3.6.20> 압력조절장치 및 콤프레셔 ····· 370
<그림 3.6.21> 사용시료의 입도분포곡선 ····· 370
<그림 3.6.22> 원지반 조성 예비압밀과정 ····· 374
<그림 3.6.23> 복합지반 조성 및 구속압 작용 과정 ····· 375
<그림 3.6.24> 실험종료 후 압밀도별 말뚝의 모습 ····· 376
<그림 3.6.25> 시간경과에 따른 배수량 측정 ····· 377

<그림 3.6.26> 원지반 압밀도에 따른 점토혼입률과 치환저감율(심도 2m) ····· 378
<그림 3.6.27> 원지반 압밀도에 따른 점토혼입률과 치환저감율(심도 4m) ····· 378
<그림 3.6.28> 원지반 압밀도에 따른 점토혼입률과 치환저감율(심도 8m) ····· 378
<그림 3.6.29> 심도별 구속압에 따른 치환저감율 ····· 379
<그림 3.6.30> 심도별 구속압에 따른 치환저감율(SCP) ····· 379
<그림 3.6.31> 시간경과에 따른 압밀도의 변화(심도 2m) ····· 380
<그림 3.6.32> 시간경과에 따른 압밀도의 변화(심도 4m) ····· 381
<그림 3.6.33> 시간경과에 따른 압밀도의 변화(심도 8m) ····· 382
<그림 3.6.34> 압밀도에 따른 압밀시간 ····· 383
<그림 3.6.35> 압밀도에 따른 압밀시간 지연계수 ····· 384
<그림 3.7.1> 기존 다짐말뚝 시공장비의 주요 구성 ····· 388
<그림 3.7.2> 믹서트럭 및 이동식 배치 플랜트 ····· 389
<그림 3.7.3> 시공 전경 ····· 392
<그림 3.7.4> Wheel loader & Skip Bucket ····· 392
<그림 3.7.5> Air Compressor ····· 392
<그림 3.7.6> Hopper ····· 393
<그림 3.7.7> 이동식 Batch Plant(예정) ····· 393
<그림 3.7.8> Dump Truck ····· 393
<그림 3.7.9> Cement Silo 및 물탱크 ····· 393
<그림 3.7.10> 타설기록지 ····· 395
<그림 3.7.11> 다공질 콘크리트 운반 및 슬럼프 시험용 시료 채취 ····· 396
<그림 3.7.12> 슬럼프 시험 전경 및 시험결과 ····· 396
<그림 3.7.13> Wheel loader를 이용한 다공질 콘크리트 투입 ····· 396
<그림 3.7.14> 다공질 콘크리트말뚝 타설 전경 ····· 397
<그림 3.7.15> ø400mm 다공질 콘크리트말뚝 타설 후 말뚝 직경 확인 ····· 397
<그림 3.7.16> ø700mm 다공질 콘크리트말뚝 타설 후 말뚝 직경 확인 ····· 397
<그림 3.7.17> 연약지반 분포 현황 ····· 398
<그림 3.7.18> 심도별 연약층 분포 현황 ····· 399
<그림 3.7.19> 현장시험시공 부지 현황 ····· 400
<그림 3.7.20> 현장시험시공 위치도 ····· 401

<그림 3.7.21> 사전조사 위치 ····· 402
<그림 3.7.22> 표준관입시험 모식도 ····· 404
<그림 3.7.23> 베인시험기 모식도 ····· 406
<그림 3.7.24> 전기식 피에죠 콘 모식도 ····· 407
<그림 3.7.25> 피스톤 샘플러 모식도 ····· 408
<그림 3.7.26> 예비시험 결과 ····· 415
<그림 3.7.27> 말뚝 타설 전경 ····· 416
<그림 3.7.28> 재하성토 전경 ····· 417
<그림 3.7.29> 계측기 설치 현황 ····· 418
<그림 3.7.30> 계측기 설치 단면도 ····· 419
<그림 3.7.31> 계측기 설치 ····· 421
<그림 3.7.32> 자동계측시스템 ····· 422
<그림 3.7.33> 원격계측시스템 ····· 422
<그림 3.7.34> 시간경과에 따른 과잉간극수압의 발생 현황(GL.-5m) ····· 424
<그림 3.7.35> 시간경과에 따른 과잉간극수압의 발생 현황(GL.-8m) ····· 427
<그림 3.7.36> 시간경과에 따른 토압 발생 현황(원지반) ····· 430
<그림 3.7.37> 시간경과에 따른 토압 발생 현황(말뚝) ····· 433
<그림 3.7.38> 시간경과에 따른 침하량 발생 현황(지표면) ····· 436
<그림 3.7.39> 시간경과에 따른 침하량 발생 현황(GL.-5m) ····· 439
<그림 3.7.40> 시간경과에 따른 침하량 발생 현황(GL.-8m) ····· 442
<그림 3.7.41> 하중단계별 계측결과(RAPP 10%) ····· 445
<그림 3.7.42> 하중단계별 계측결과(GCP 30%) ····· 446
<그림 3.7.43> 하중단계별 계측결과(SCP 30%) ····· 447
<그림 3.7.44> 하중단계별 계측결과(RAPP 30%) ····· 448
<그림 3.7.45> 쌍곡선법 ····· 451
<그림 3.7.46> Asaoka 방법 ····· 453
<그림 3.7.47> Tominaga-Hashimoto 방법 ····· 454
<그림 3.7.48> Matsuo-Kawamura 방법 ····· 454
<그림 3.7.49> 쌍곡선법에 의한 최종침하량 예측(RAPP 10%) ····· 456
<그림 3.7.50> 쌍곡선법에 의한 최종침하량 예측(GCP 30%) ····· 456

<그림 3.7.51> 쌍곡선법에 의한 최종침하량 예측(RAPP 30%) ····· 457
<그림 3.7.52> Asaoka 방법에 의한 최종침하량 예측(RAPP 10%) ····· 458
<그림 3.7.53> Asaoka 방법에 의한 최종침하량 예측(GCP 30%) ····· 458
<그림 3.7.54> Asaoka 방법에 의한 최종침하량 예측(RAPP 30%) ····· 458
<그림 3.7.55> 최종침하량 분석 ····· 459
<그림 3.7.56> Tominaga-Hashimoto 방법에 의한 안정성 예측(RAPP 10%) ····· 460
<그림 3.7.57> Tominaga-Hashimoto 방법에 의한 안정성 예측(GCP 30%) ····· 460
<그림 3.7.58> Tominaga-Hashimoto 방법에 의한 안정성 예측(RAPP 30%) ····· 461
<그림 3.7.59> Matsuo-Kawamura 방법에 의한 안정성 예측 ····· 461
<그림 3.7.60> 공법별 안정성 분석 결과 ····· 462
<그림 3.7.61> 공법별 수평변위 계측결과 ····· 463
<그림 3.7.62> 공법별 응력분담비 분석 결과 ····· 464
<그림 3.7.63> 지층단면도 ····· 467
<그림 3.7.64> 심도별 일축압축강도 ····· 480
<그림 3.7.65> 삼축압축시험(UU) 결과 ····· 480
<그림 3.7.66> 코어 공시체 압축강도 시험결과 ····· 482
<그림 3.7.67> 삼축투수시험 결과 ····· 482
<그림 3.7.68> 다짐말뚝공법 경제성 비교 ····· 486
<그림 3.7.69> DCM 시공 후 pH 측정사례 ····· 500
<그림 3.8.1> RAPP 공법 해석프로그램 메인 화면 ····· 500
<그림 3.8.2> RAPP 공법 해석프로그램 초기 화면 ····· 504
<그림 3.8.3> 로그인 화면 ····· 505
<그림 3.8.4> 접속 DB 설정 ····· 505
<그림 3.8.5> RAPP 공법 해석프로그램 메인 화면 ····· 507
<그림 3.8.6> 우측 메뉴 ····· 508
<그림 3.8.7> 해석단면/입력 및 해석결과 ····· 509
<그림 3.8.8> 입력데이터 화면 ····· 510
<그림 3.8.9> 데이터 입력 ····· 511
<그림 3.8.10> 설계조건 ····· 512
<그림 3.8.11> 일반정보 ····· 512

<그림 3.8.12> 해석단면 정보 ····· 513
<그림 3.8.13> 해석 기본정보 ····· 513
<그림 3.8.14> 지지력 계산에 대한 안전율 ····· 514
<그림 3.8.15> 지층구성 ····· 515
<그림 3.8.16> 성토체 재료특성 ····· 516
<그림 3.8.17> 지층구성 ····· 516
<그림 3.8.18> 지하수위 조건 ····· 517
<그림 3.8.19> 성토하중 방치기간 ····· 517
<그림 3.8.20> 해석 기본정보 ····· 518
<그림 3.8.21> 기반면 배수조건 ····· 518
<그림 3.8.22> 지층물성치 ····· 520
<그림 3.8.23> 배수재 제원 ····· 521
<그림 3.8.24> 연직배수재 삼각형 배치형태 ····· 522
<그림 3.8.25> 연직배수재 사각형 배치형태 ····· 523
<그림 3.8.26> Well Resistance Effect ····· 523
<그림 3.8.27> Smear Effect ····· 524
<그림 3.8.28> 연직배수재에 대한 기본입력사항 ····· 524
<그림 3.8.29> 연직배수재에 대한 세부 입력사항 ····· 525
<그림 3.8.30> 기본 설계값 입력 결과 ····· 526
<그림 3.8.31> 지지력 검토 ····· 527
<그림 3.8.32> 해석방법 ····· 528
<그림 3.8.33> 지지력 검토 화면확대 ····· 528
<그림 3.8.34> 배합비 설계 ····· 529
<그림 3.8.35> 해석단면 관리 ····· 530
<그림 3.8.36> 화면 제어창 ····· 530
<그림 3.8.37> 화면제어 결과 ····· 532
<그림 3.8.38> 입력데이터 ····· 533
<그림 3.8.39> 해석결과 ····· 534
<그림 3.8.40> 해석단면 ····· 535

표 목 차

<표 1.1.1> 항만시설 관련공사 현황 ····· 6
<표 1.1.2> 육상 SCP 시공량(2001년~2006년 현재) ····· 7
<표 1.1.3> 육상 GCP 시공량(2001년~2006년 현재) ····· 7
<표 1.1.4> 해상 SCP 시공량(2001년~2006년 현재) ····· 7
<표 1.1.5> 해상 GCP 시공량(2001년~2006년 현재) ····· 8
<표 1.1.6> 국내 인프라 수준 ····· 9
<표 1.1.7> 국내 인프라 수준 ····· 10
<표 1.1.8> 국내 기술개발 수준 ····· 11
<표 1.1.9> 세계시장 선도업체 ····· 17
<표 1.2.1> 연구개발과제의 핵심어 ····· 21
<표 1.2.2> 1차년도 연구목표 및 내용 ····· 24
<표 1.2.3> 2차년도 연구목표 및 내용 ····· 26
<표 1.2.4> 3차년도 연구목표 및 내용 ····· 27
<표 2.1.1> 진동다짐공법과 치환공법의 지반에 따른 적용성 ····· 31
<표 2.1.2> 채움재인 쇄석의 입도분포(FHWA, 1983) ····· 33
<표 2.1.3> 추천된 응력집중계수와 내부마찰각(Bergado & Lam, 1987) ····· 34
<표 2.1.4> 지반조건, 개량목적, 구조물 형식에 따른 치환율 범위 ····· 40
<표 2.1.5> 치환율과 응력분담비(일본지반공학회, 1988) ····· 43
<표 2.1.6> 비배수 전단강도에 따른 쇄석다짐말뚝의 직경 ····· 63
<표 2.1.7> DCM 개량형식의 비교 ····· 65
<표 2.2.1> 순환골재의 종류 ····· 67
<표 2.2.2> 골재종류에 따른 특성분석 ····· 69
<표 2.2.3> 연간 폐기물 발생량(전국 폐기물 발생 및 처리현황, 2003, 환경부) ····· 70
<표 2.2.4> 천연골재 수요량(제2차 골재수급 기본계획, 2000, 건설교통부) ····· 70
<표 2.2.5> 순환골재 사용량(환경부·건설교통부 통계자료, 2003) ····· 71
<표 2.2.6> 국내 건설폐기물 및 폐콘크리트 재활용 관련 제도 현황 ····· 73

〈표 2.2.7〉 순환골재 사용시 용적율 완화 기준 ····· 78
〈표 2.2.8〉 일본 도시공단의 해체콘크리트 발생량과 리사이클량 ····· 82
〈표 2.2.9〉 재생콘크리트를 이용한 중력식 옹벽의 타설현황(일본 도시공단 내) ····· 83
〈표 2.2.10〉 고품질 순환골재를 이용한 철근콘크리트 구조물의 공사개요 ····· 84
〈표 3.1.1〉 압력에 따른 해성점토의 모래 및 골재에서의 관입량 ····· 89
〈표 3.1.2 〉 해성점토 함수비의 변화에 따른 13mm 골재에서의 해성점토 관입량 ····· 90
〈표 3.1.3〉 개략적인 모래 및 쇄석에 대한 역학 파라미터 ····· 93
〈표 3.1.4〉 천연골재 수요량(제2차 골재계획 기본계획, 2000, 건설교통부) ····· 96
〈표 3.1.5〉 순환골재 가격비교(골재협회 자료, 2004) ····· 97
〈표 3.2.1〉 순환골재 다공질 콘크리트의 배합량 설계치 ····· 99
〈표 3.2.2〉 순환골재 다공질 콘크리트의 시험조건 ····· 103
〈표 3.2.3〉 순환골재의 물리적 특성 시험결과 ····· 104
〈표 3.2.4〉 주도시험 및 흐름시험 결과 ····· 112
〈표 3.2.5〉 시멘트의 물리적 성질 ····· 113
〈표 3.2.6〉 시멘트의 화학적 성질 ····· 113
〈표 3.2.7〉 예비시험 재령 3일 압축강도시험 결과 ····· 116
〈표 3.2.8〉 콘크리트 배합표 ····· 116
〈표 3.2.9〉 물-시멘트비에 따른 시험결과 ····· 118
〈표 3.2.10〉 P/G비에 따른 시험결과 ····· 119
〈표 3.2.11〉 시멘트량에 따른 콘크리트 배합표 ····· 132
〈표 3.2.12〉 압축강도시험 결과 ····· 132
〈표 3.2.13〉 투수시험 결과 ····· 132
〈표 3.2.14〉 압축강도시험 결과 ····· 135
〈표 3.2.15〉 투수시험 결과 ····· 135
〈표 3.2.16〉 순환골재의 품질기준(KS F) ····· 137
〈표 3.2.17〉 순환골재의 입도기준(KS F 2502) ····· 138
〈표 3.2.18〉 순환굵은골재의 품질관리 방법 ····· 139
〈표 3.2.19〉 순환잔골재의 품질관리 방법 ····· 139
〈표 3.2.20〉 다공질 콘크리트말뚝용 순환골재의 품질기준(안) ····· 141
〈표 3.2.21〉 순환골재의 물리적 성질 ····· 143

〈표 3.2.22〉 순환골재의 입도 ····· 143
〈표 3.3.1〉 시험에 사용된 재료의 특성치 ····· 146
〈표 3.3.2〉 삼축압축시험 조건 ····· 152
〈표 3.3.3〉 치환율별 강도정수 ····· 163
〈표 3.3.4〉 치환율별 강도정수 ····· 163
〈표 3.4.1〉 점토의 물리적 특성 ····· 182
〈표 3.4.2〉 표준사의 물리적 특성 ····· 182
〈표 3.4.3〉 단계별 재하하중 ····· 183
〈표 3.4.4〉 치환율별 말뚝직경 ····· 184
〈표 3.4.5〉 다공질 콘크리트 및 GCP 실험횟수 ····· 184
〈표 3.4.6〉 점토의 물리적 특성 ····· 216
〈표 3.4.7〉 모래의 물리적 특성 ····· 216
〈표 3.4.8〉 실험케이스와 실험조건 ····· 217
〈표 3.4.9〉 모형지반의 초기상태에 대한 정수 ····· 219
〈표 3.4.10〉 말뚝에 대한 역학 파라미터 ····· 225
〈표 3.4.11〉 점토에 대한 역학 파라미터 ····· 229
〈표 3.4.12〉 수치해석 조건 ····· 230
〈표 3.5.1〉 측정항목 및 계측장비 현황 ····· 244
〈표 3.5.2〉 점토의 물리적 특성 ····· 246
〈표 3.5.3〉 표준사의 물리적 특성 ····· 246
〈표 3.5.4〉 실험케이스와 실험조건 ····· 247
〈표 3.5.5〉 수치해석 조건(안정성 검토) ····· 292
〈표 3.5.6〉 수치해석 조건(응력-변형 해석) ····· 294
〈표 3.5.7〉 재료별 토질 역학적 특성 ····· 302
〈표 3.5.8〉 해석사용 파라미터 ····· 302
〈표 3.5.9〉 점토의 물리적 특성 ····· 302
〈표 3.5.10〉 모래의 물리적 특성 ····· 302
〈표 3.5.11〉 실험 케이스 하중 조건 ····· 303
〈표 3.6.1〉 측정항목과 계측기 ····· 351
〈표 3.6.2〉 자연점토의 물리적 특성 ····· 352

〈표 3.6.3〉 실험조건 ····· 358
〈표 3.6.4〉 모래, 쇄석, RAPP에 대한 역학 파라미터 ····· 362
〈표 3.6.5〉 점토의 물리적 특성 ····· 370
〈표 3.6.6〉 모형실험 조건 ····· 372
〈표 3.7.1〉 기존 다짐말뚝 장비 현황 ····· 387
〈표 3.7.2〉 다공질 콘크리트 장비 개발 계획안 ····· 389
〈표 3.7.3〉 기존 SCP 시공장비 개요 ····· 390
〈표 3.7.4〉 무진동 무소음 시공장비 개요 ····· 391
〈표 3.7.5〉 공법 비교 ····· 391
〈표 3.7.6〉 타설용이성 검토를 위한 다공질 콘크리트 배합표 ····· 394
〈표 3.7.7〉 지층분포 현황 ····· 398
〈표 3.7.8〉 구역별 연약층 심도 현황 ····· 399
〈표 3.7.9〉 지층분포 현황 ····· 400
〈표 3.7.10〉 사전지반조사 항목별 수량 현황 ····· 402
〈표 3.7.11〉 시추조사 장비 ····· 403
〈표 3.7.12〉 시험항목 규격 ····· 409
〈표 3.7.13〉 실내시험 장비 ····· 409
〈표 3.7.14〉 시험항목별 수량 현황 ····· 409
〈표 3.7.15〉 시험항목 및 규격 ····· 410
〈표 3.7.16〉 시험항목 및 결과활용 ····· 411
〈표 3.7.17〉 다공질 콘크리트말뚝공법(치환율 10%) 수량 현황 ····· 411
〈표 3.7.18〉 다공질 콘크리트말뚝공법(치환율 30%) 수량 현황 ····· 412
〈표 3.7.19〉 GCP 공법(치환율 30%) 수량 현황 ····· 412
〈표 3.7.20〉 SCP 공법(치환율 30%) 수량 현황 ····· 412
〈표 3.7.21〉 양생일별 말뚝품질확인 ····· 413
〈표 3.7.22〉 다공질 콘크리트말뚝용 순환골재의 품질기준(안) 및 시험결과 ····· 414
〈표 3.7.23〉 현장시험시공에 사용된 다공질 콘크리트 배합표 ····· 414
〈표 3.7.24〉 공법별 계측기 수량 현황 ····· 420
〈표 3.7.25〉 성토재하 단계 ····· 423
〈표 3.7.26〉 공법별 과잉간극수압 발생 현황(GL.-5m) ····· 426
〈표 3.7.27〉 공법별 과잉간극수압 발생 현황(GL.-8m) ····· 429

〈표 3.7.28〉 공법별 토압 발생 현황 ····· 432
〈표 3.7.29〉 공법별 토압 발생 현황(말뚝) ····· 435
〈표 3.7.30〉 공법별 토압 발생 현황(지표면) ····· 438
〈표 3.7.31〉 공법별 침하량 발생 현황(GL.-5m) ····· 441
〈표 3.7.32〉 공법별 침하량 발생 현황(GL.-8m) ····· 444
〈표 3.7.33〉 Matsuo-Kawamura 방법의 계수 ····· 455
〈표 3.7.34〉 공법별 최종 침하량 예측 결과 ····· 459
〈표 3.7.35〉 공법별 안정성 예측 결과 ····· 462
〈표 3.7.36〉 시추공별 지층분포상태(사전조사) ····· 466
〈표 3.7.37〉 시추공별 지층분포상태(확인조사) ····· 466
〈표 3.7.38〉 표준관입시험결과(사전조사) ····· 470
〈표 3.7.39〉 표준관입시험결과(확인조사) ····· 470
〈표 3.7.40〉 공내지하수위 측정결과 ····· 471
〈표 3.7.41〉 현장베인시험 결과(BH-2, 사전조사) ····· 471
〈표 3.7.42〉 현장베인시험 결과(확인조사) ····· 472
〈표 3.7.43〉 콘관입시험 결과 ····· 473
〈표 3.7.44〉 BH-2(사전조사)에 대한 흙분류 결과 ····· 474
〈표 3.7.45〉 BH-1(확인조사)에 대한 흙분류 결과 ····· 475
〈표 3.7.46〉 BH-4(확인조사)에 대한 흙분류 결과 ····· 476
〈표 3.7.47〉 비배수 전단강도(Su) 및 과압밀비(OCR) 산정 결과 ····· 477
〈표 3.7.48〉 실내물성시험 결과(사전조사) ····· 478
〈표 3.7.49〉 실내물성시험 결과(확인조사) ····· 478
〈표 3.7.50〉 실내역학시험 결과(사전조사) ····· 479
〈표 3.7.51〉 실내물성시험 결과(확인조사) ····· 479
〈표 3.7.52〉 코어 공시체 압축강도 시험결과 ····· 481
〈표 3.7.53〉 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법 단가산출서 ····· 483
〈표 3.7.54〉 순환골재 품질요구 조건 ····· 488
〈표 3.7.55〉 Cr^{6+} 관련법규 ····· 499
〈표 3.7.56〉 Cr^{6+} 성분분석 결과 ····· 499
〈표 3.7.57〉 국내 해양환경기준 ····· 500
〈표 4.1.1〉 1차년도 연구개발 목표의 달성도 ····· 546

〈표 4.1.2〉 2차년도 연구개발 목표의 달성도 ····· 548
〈표 4.1.3〉 3차년도 연구개발 목표의 달성도 ····· 551
〈표 5.2.1〉 다공질 콘크리트말뚝용 순환골재의 품질기준(안) ····· 557
〈표 5.2.2〉 순환골재 품질기준 비교 ····· 558
〈표 5.2.3〉 다공질 콘크리트말뚝공법 설계를 위한 설계정수 결정방법 ····· 563
〈표 5.2.4〉 다공질 콘크리트말뚝 품질요구기준 ····· 563
〈표 5.2.5〉 국내 연약지반개량공사 현황(2008년~2009년, 초석건설산업) ····· 564

제 1 장 연구개발의 개요

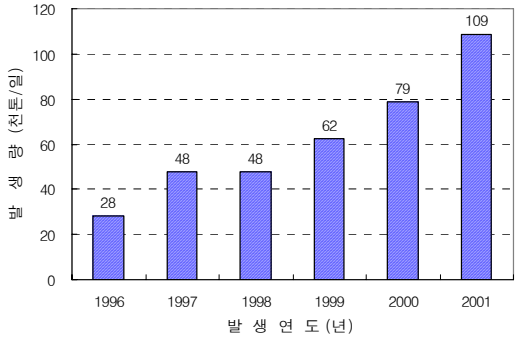
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

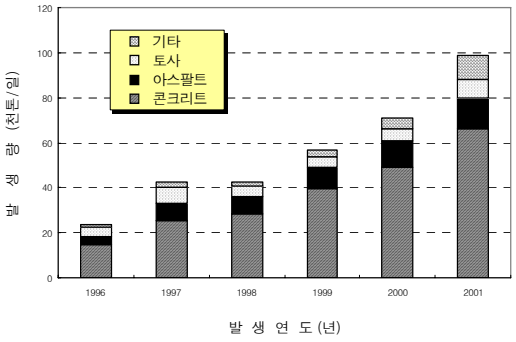
가. 연구개발의 배경

최근 우리나라에서는 건축 구조물의 노후화로 인한 재건축 등으로 기존 콘크리트 구조물의 해체 폐기가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 현장에서 매년 기하급수적으로 다량 발생되고 있는 폐콘크리트 등의 건설폐기물 처리가 새로운 사회적 문제로 부각되고 있는 실정이다.

환경부에서 발표하는 환경통계연감에 따르면, 우리나라의 건설폐기물 일평균 발생량은 1996년 28,425톤에서 2001년에는 약 4배인 108,520톤으로 급격하게 증가되고 있다.



<그림 1.1.1> 건설폐기물 발생 추이



<그림 1.1.2> 건설폐재류 발생 추이

<그림 1.1.1>에 나타낸 바와 같이 건설폐기물의 발생량은 IMF에 의한 경제 침체기였던 1998년도를 제외하면 해마다 증가하여 왔음을 알 수 있다. <그림 1.1.2>는 건설폐재류의 성상별 발생추이를 나타낸 것으로 콘크리트용 순환골재로 재활용이 가능한 콘크리트류는 약 67%를 차지한다. 이와 같은 증가추세를 선형적 증가로 가정하면 2020년에는 폐콘크리트의 연간 발생량이 9천만 톤이 될 것으로 추정된다. 건설기술연구원의 연구보고서에서

도 2020년도의 폐콘크리트 발생량이 1억 톤을 넘어설 것으로 예측한 바 있으므로, 국내의 폐콘크리트 발생량 저감 및 재활용은 환경적 측면 및 자원 재활용의 측면에서 매우 시급히 해결해야할 사안임에 틀림없다. 따라서 천연자원의 고갈에 대비하고 지구의 환경파괴를 극소화시키며 건설폐기물을 재활용할 수 있는 재료로써 폐콘크리트로부터 얻을 수 있는 순환골재를 이용할 필요가 있다.

한편, 21세기의 국가 경쟁력을 높이기 위하여 전국적으로 국토개발 건설사업이 진행되고 있는 현 시점에서 건설재료의 품귀현상으로 인한 건설비용 상승의 문제점이 대두되고 있다. 그중에서도 지반개량에 사용되는 천연모래와 자갈, 쇄석 등은 자연재료라는 측면에서 천연자원의 고갈과 환경파괴라는 커다란 문제점을 안고 있기 때문에 그 적용의 한계에 다다르고 있는 실정이다.

나. 연구개발의 목적

본 연구개발의 목적은 최근 기하급수적으로 증가하고 있는 건설폐기물의 발생에 의한 환경문제와 막대한 건설재료 수급으로 인한 천연자원의 고갈에 대처함과 동시에 기존의 지반개량공법 중 다짐말뚝공법의 팽창파괴(Bulging Failure)와 간극막힘(Clogging)현상 등과 같은 치명적인 공학적 및 기능적 단점을 보완하기 위하여 새로운 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법을 개발함에 있다.

본 연구개발의 최종목표는 천연자원의 고갈에 대처함과 동시에 기존의 지반개량공법의 치명적인 공학적 및 기능적 단점을 보완하기 위하여 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법을 개발하는 것이다. 본 공법을 개발하기 위해서는 국내외 지반개량을 위한 공법들의 문제점 및 한계성 등의 현황을 엄밀히 분석하여 대안을 도출하고 이론적인 해석, 실내모형실험, 수치해석, 현장 시험시공 및 계측을 체계적으로 수행하여 총괄적인 시공성, 경제성 및 안정성을 평가 검증하여야 한다. 현황분석과 이론적 해석, 성공적인 모형실험을 위한 예비실험단계를 수행하기 위해 1년간의 연구기간이 필요하고, 개발된 공법의 적용성과 안정성을 검증하기 위한 실내모형실험과 그에 대한 수치해석, 결과 분석 및 설계법 제시 등의 과제를 수행하기 위해 1년간의 연구기간이 필요하게 된다. 최종적으로 현장의 적용성 평가를 위한 시험시공 및 계측, 최적 시공법과 안정관리 지침 제시 등의 과제를 수행하기 위해 1년간의 연구기간이 소요되게 되므로 본 연구개발 과제는 총 3년의 수행기간이 필요할 것으로 예상된다. 본 연구개발팀의 연구책임자들은 연약지반개량

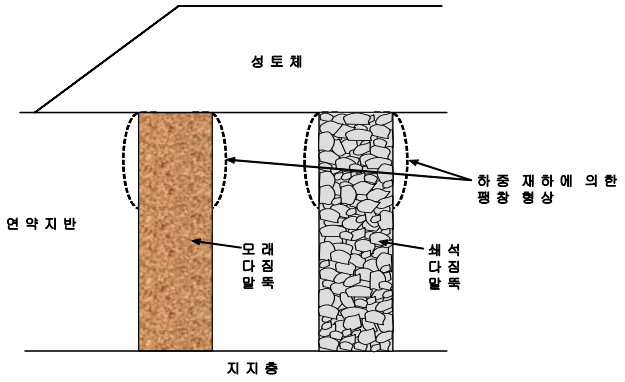
설계 및 시공, 건설재료 분야에서 국내 최고의 전문가들로서 경제적 측면, 시공기술 측면, 설계기법 측면, 안정관리 측면 등의 타당성을 엄밀히 증명할 수 있으며, 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법을 개발하여 국내외 연약지반개량 및 설계, 시공기술의 선진화에 이바지 하고자 한다.

2. 연구개발의 필요성

가. 기술적 측면의 중요성

최근 건설폐기물 발생의 급증으로 인해 이의 처리 및 재활용 대책이 국가적으로 시급한 사회적 문제가 되고 있는 실정이다. 이에 본 사업은 건설폐기물을 재활용하는 기술을 개발하는 것을 주목적으로 순환골재를 건설재료로 사용하는데 있어 그 용도를 확장하는 기술을 개발하는 것이다. 즉, 순환골재를 블록, 도로포장재 등 단순한 콘크리트 제품 제작에 사용하던 기존의 기술을 연약지반개량의 건설재료, 특히 다짐말뚝의 재료로써 그 용도를 확장하여 적용하는 새로운 기술을 개발하는 것이다. 한편, 기존의 연약지반개량 다짐말뚝공법은 상부하중 재하로 인한 말뚝의 팽창파괴(Bulging Failure, <그림 1.1.3> 참조)와 주변 연약지반의 흙입자 침투로 인한 말뚝표면의 간극막힘(Clogging) 현상이 발생하는 등의 커다란 문제점을 안고 있다.

따라서, 본 기술에서는 순환골재를 단순히 연약지반 중에 다져넣는 다짐말뚝재료로 사용하는 것이 아니라 시멘트를 적절히 배합하여 다공질 콘크리트말뚝의 형태로 적용함으로써 기존의 다짐말뚝 기술의 치명적인 공학적, 기능적 단점을 해결하는 혁신적 기술을 개발한다.



<그림 1.1.3> 모래다짐말뚝과 쇄석말뚝의 팽창현상

본 개발공법은 재료적으로 골재를 사용하고 있어 연성말뚝(유사말뚝)의 요소를 가지고 있으나, 기존공법에서 발생되는 문제점들을 극복할 수 있는 강성말뚝(구조물 지지말뚝)의 장점을 내포하고 있다. 따라서 본 공법은 연약지반의 강도를 증진시키기 위한 복합지반의 개념에 구조물을 지지할 수 있는 강성말뚝의 특성이 부가된 형태라 할 수 있다.

나. 경제·산업적 측면의 중요성

최근 우리나라에서는 국가 경쟁력 향상의 전략 중 하나로 해안지역을 중심으로 항만공사와 배후단지 조성을 위한 국토개발 건설사업에 주력하고 있다. 따라서 막대한 양의 건설재료의 수급이 요구되고 있으나 천연자원의 고갈과 환경파괴 문제로 인해 건설재료비의 급상승과 환경보호의 문제점이 대두되고 있는 실정이다. 따라서 본 개발기술의 목적인 건설폐기물을 재활용한 새로운 건설재료의 개발로 건설비용 절감이라는 경제적 효과와 지구의 환경파괴문제 저감이라는 일석이조의 효과를 얻을 수 있다.

다. 사회·문화적 측면의 중요성

토목을 비롯한 각종 대·소규모 건설공사는 그 특성상 환경파괴와 개발이라는 두 가지 측면에서 대립하여 왔으며 천연자원의 고갈을 통한 인간생활 영역의 확산이라는 동전의 양면성을 가지고 있다. 이러한 문제를 일소할 수는 없으나 점차 환경파괴를 최소화하고 생태환경 보존을 최대화 하고자하는 노력이 꾸준히 이루어지고 있는 실정이다. 본 연구는 이러한 시대적 흐름에 발맞추어 건설폐기물에서 재활용된 순환골재를 주요 자원으로 활용함으로서 천연자원 및 생태환경 훼손의 최소화를 이룰 수 있어 자원의 재사용이라는 측면에서 높은 가치를 지닌다고 할 수 있다.

3. 국내외 기술 및 산업동향

가. 국내동향

(1) 개요

본 기술의 주요 핵심과제는 “순환골재를 재활용한 신기술 창출”로서 최근 국내건설산업은 환경과 자원이라는 주제를 간과할 수 없는 상황에 있으며 건설산업에서의 환경과 자원은 친환경 건설공사의 수행이라는 용어로 표현되고 있다. 친환경 건설공사의 수행은 건설교통부 정책추진의 큰 맥락중의 하나로 건설폐기물의 재활용은 2003년 12월 “건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률”이 제정됨으로써 순환골재의 재활용과 관련된 건설산업이 부각되고 있는 실정이다. 건설폐기물은 그 발생량이 급격히 증가하고 있어 1996년 1,030만 톤이 2002년에는 4,400만 톤으로 연평균 70%의 증가율을 보여 우려의 대상이 되고 있는 실정이다(대한건설순환자원협회, 대한전문건설협회). 그러나 건설폐기물은 90% 정도가 폐콘크리트, 폐아스팔트, 토사로 이루어져 있어 적절한 분리, 선별, 처리과정을 통해 새로운 골재자원으로 이용할 수 있다. 또한 “건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률”에 따라 순환골재를 사용하도록 규정하고 있는 대형공사장에서는 순환골재를 의무적으로 사용해야 하기 때문에 순환골재를 이용한 신기술, 신공법에 대한 관심이 고조되고 있다.

현재까지 순환골재는 주로 기층(보조)재료나 콘크리트용, 아스팔트용으로 분류되어 도로공사에 적용되고 있으며, 본 개발공법과 같은 순환골재를 활용한 새로운 분야로의 연구를 활성화하여 적용영역을 점차 확대시키고자 하는 노력이 힘을 얻고 있는 실정이다.

(2) 국내시장 현황 및 예측

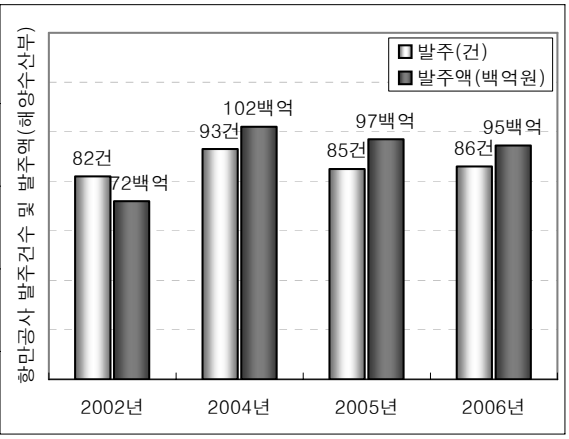
본 공법의 기술적 핵심사항인 연약지반개량을 위한 다짐말뚝공법 기술은 해마다 그 사용량이 늘고 있으며 육상시공은 물론 해상시공까지 국내외적으로 광범위하게 적용되고 있다.

해양수산부에서 발표한 보고서에 의하면 2005년 한해에만 총 85건 9,694억 원의 비용이 주요 항만공사에 책정되었다. 또한, 2006년에 들어서는 1/4분기에 책정 항만건설공사

총 86건 9,449억 원 중 57건 7,756억 원(82%)을 조기 발주할 예정으로 되어 있다(자료, 「2005년 항만건설공사 조기발주 집행현황 보고서」, 「2006년 항만공사 조기발주 계획」, 해양수산부). 최근 5년간 해양수산부가 발주한 항만시설 관련공사 사항은 다음 <표 1.1.1>과 같다.

<표 1.1.1> 항만시설 관련공사 현황

년도	발주(계획) 건 수	발주(계획) 금 액
2002년[주1)]	82건	7,172억원
2004년[주2)]	93건	1조 200억원
2005년[주3)]	85건	9,694억원
2006년[주4)]	86건	9,449억원



주1) 건설일보, 2002년 2월 2일자 관련기사

주2) 2004년 항만공사 조기발주 계획, 해양수산부

주3) 2005년 항만공사 조기발주 집행현황 보고서, 해양수산부

주4) 2006년 항만공사 조기발주 계획, 해양수산부

통상적으로 해안 및 항만공사에서 연약지반 처리비용은 총 공사비의 25~30% 정도를 차지하며, 이중 15~20% 가량인 360~580억 원 가량이 기초처리분야(연약지반개량 다짐말뚝공법)에 소요된다고 할 수 있다. 다짐말뚝은 해상뿐만 아니라 육상에서 보다 활발히 적용되고 있는 공법이며, 최근 5년간 모래다짐말뚝(SCP) 및 자갈다짐말뚝(GCP)의 육상, 해상 시공실적을 분석해 보면 다음과 같다. 본 분석자료는 국내 3대 다짐말뚝 시공 전문기업의 협조를 받아 작성된 5년간 실제 시공한 물량과 금액에 대한 자료이다.

<표 1.1.2> 육상 SCP 시공량(2001년~2006년 현재)

년도	초석건설산업(주)		A사		B사		소 계	
	건	수량(m)	건	수량(m)	건	수량(m)	건	수량(m)
2001년	2	333,836	3	201,940	-	-	5	535,776
2002년	6	984,436	-	-	11	1,194,512	17	2,178,948
2003년	2	83,379	1	83,705	1	70,282	4	237,366
2004년	5	678,589	5	497,605	6	98,874	16	1,375,068
2005년	4	1,018,871	3	275,281	2	89,990	9	1,384,142
2006년	6	714,846	1	362,860	5	647,361	12	1,725,067
합 계	25	3,813,957	13	1,421,391	25	2,201,019	63	7,436,367
발주금액	7,436,367m × 22,000원/m ≒ 1,636억 원							

<표 1.1.3> 육상 GCP 시공량(2001년~2006년 현재)

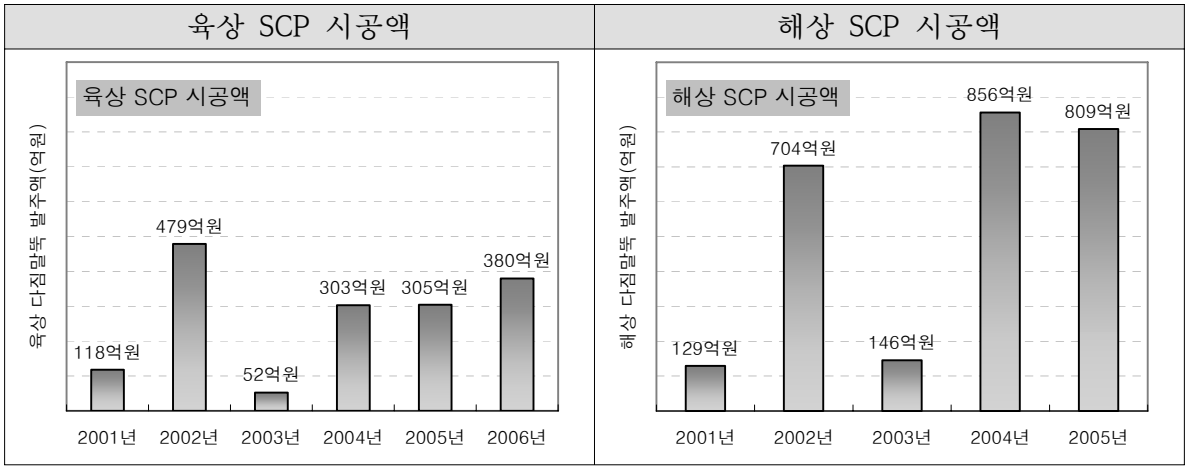
년도	초석건설산업(주)		A사		B사		소 계	
	건	수량(m)	건	수량(m)	건	수량(m)	건	수량(m)
2001년	-	-	-	-	-	-	-	-
2002년	-	-	1	13,617	-	-	1	13,617
2003년	-	-	-	-	-	-	-	-
2004년	-	-	2	257,587	1	170,161	3	427,748
2005년	-	-	1	6,509	1	56,902	2	63,411
2006년	1	8,733	1	199,989	4	399,060	6	607,782
합 계	1	8,733	5	477,252	6	626,123	12	1,112,108
발주금액	1,112,108m × 22,000원/m ≒ 245억 원							

<표 1.1.4> 해상 SCP 시공량(2001년~2006년 현재)

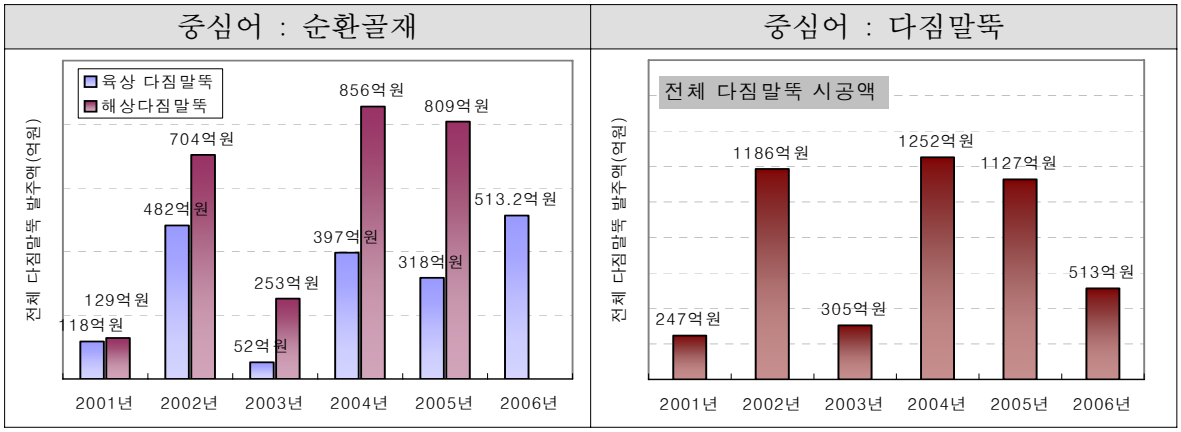
년도	초석건설산업(주)		A사		B사		소 계	
	건	수량(m)	건	수량(m)	건	수량(m)	건	수량(m)
2001년	1	64,685	-	-	-	-	1	64,685
2002년	3	258,767	1	93,114	-	-	4	351,881
2003년	2	36,818	2	36,070	-	-	4	72,888
2004년	-	-	1	427,878	-	-	1	427,878
2005년	5	149,798	2	127,259	2	127,259	9	404,316
2006년	-	-	-	-	-	-	-	-
합 계	11	510,068	6	684,321	2	127,259	19	1,321,648
발주금액	1,321,648m × 200,000원/m ≒ 2,643억 원							

<표 1.1.5> 해상 GCP 시공량(2001년~2006년 현재)

년도	초석건설산업(주)		A사		B사		소 계	
	건	수량(m)	건	수량(m)	건	수량(m)	건	수량(m)
2001년	-	-	-	-	-	-	-	-
2002년	-	-	-	-	-	-	-	-
2003년	-	-	1	53,417	-	-	1	53,417
2004년	-	-	-	-	-	-	-	-
2005년	-	-	-	-	-	-		-
2006년	-	-	-	-	-	-	-	-
합 계	-	-	1	53,417	-	-	1	53,417
발주금액	53,417m × 200,000원/m ≒ 107억 원							



<그림 1.1.4> 다짐말뚝 시공현황(2001년~2006년 현재)



<그림 1.1.5> 다짐말뚝 연도별 시공액(2001년~2006년 현재)

위의 통계에서 보듯이 2001년부터 2006년 현재까지 연 247억 원~1,250억 원 가량을 시공하였으며, 최근 6년간의 육상 및 해상 다짐말뚝 시공액은 4,630억 원에 달한다.

현재 정부에서는 7대 신항만, 6대 권역별 거점항만 개발이라는 항만건설관련 주요정책 아래 동북아 물류중심기지 조기구축을 위해 매진하고 있다. 또한, 전 세계적으로 항만 및 해상구조물이 거대화되고 점차 외해로 뻗어 나가면서 토질조건이 불리해지고 연약지반의 심도는 깊어져 연약지반 처리비용이 증가되고 있는 추세이다. 아울러 다짐말뚝 기술은 해상공사 뿐만 아니라 육상공사에서 보다 활발하게 적용되는 점을 감안할 때, 본 기술과 관련된 연간 국내 시장규모는 900억 원~1,000억 원 이상으로 예측된다.

(3) 국내 주요 관련업체

<표 1.1.6> 국내 인프라 수준

업체명	업체별 능력	비 고
초석 건설산업(주)	<시공능력공시액> 토공 57,248,800천원 비계 53,105,667천원 <관련 신기술 및 특허> •해상 모래다짐 말뚝시공시 케이싱 양면 개폐장치와 공기가압 장치 적용 공법 (건설교통부)	<출처> •대한전문건설협회 www.ksca.or.kr 시공능력공시액 (2006년 업체평가) •건설교통전자정보관 www.codil.or.kr •특허청 www.kipo.go.kr
A사	<시공능력공시액> 토공 1,911,140천원 비계 5,303,493천원	
B사	<시공능력공시액> 토공 10,502,202천원 비계 23,725,343천원	
C사	<시공능력공시액> 토공 25,201,891천원 비계 19,989,371천원	

국내에서 육상다짐말뚝과 해상다짐말뚝을 시공하는 업체는 몇몇 전문시공업체에 국한되며 그 중 상위 3개 업체가 90% 가량을 소화하고 있다. 본 연구의 협동연구기관으로 참

여하고 있는 초석건설산업주식회사는 국내에서 시공능력, 보유장비, 시공 품질면에서 최고, 최대 수준으로 현재 국내 시공능력공시액 평가 1위를 차지하고 있다. 최대 70m까지 시공이 가능한 SCP(모래다짐말뚝) 해상전용장비 3대를 비롯하여 다양한 해상 및 육상 다짐말뚝장비를 보유하고 있어 본 연구분야의 협동연구기관으로서 충분한 자질을 보유하고 있는 업체이다.

(4) 국내연구 인프라 수준

본 연구와 관련된 분야는 연약지반개량공법 및 신기술개발 분야, 순환골재 재활용분야, 친환경 공법 및 기술로 대분할 수 있으나 현재 국내의 설비 및 연구시설은 그리 높은 편이 아니다. 연구시설 및 산학공동 연구분야는 선진국보다 다소 부족하며 기술이전 및 거래 부분에 있어서는 매우 부족한 수준이라 할 수 있다. 이에 본 연구와 같은 실질적인 기술의 개발 및 연구의 활성화를 통한 실리를 추구해야 국가 경쟁력은 물론 관련기술 분야에 대한 활발한 투자가 이루어질 수 있다.

<표 1.1.7> 국내 인프라 수준

기술분야	인프라 항목	선진국 대비 인프라 수준				
		부족	다소 부족	동등	우월	보다 우월
•연약지반개량공법 및 신기술개발 •순환골재 활용분야 •친환경공법기술	1. 연구실설 2. 산학협동연구 3. 기술이전 및 거래	◉	◉ ◉			

(5) 국내 기술개발 수준

국내에서 현재 설계 및 시공되는 관련기술은 모래다짐말뚝이 가장 많이 활용되고 있는 실정으로 연구소나 대학을 중심으로 연구개발 되어 왔으나, 최근 모래부족으로 인하여 쇄석을 사용하거나 자갈을 활용하고 있다. 그러나 이러한 대체재료 역시 부족한 실정에 직면해 있다. 그러므로 매년 급증하는 건설자재의 부족을 해결하기 위해서는 건축분야의 재개발과 재건축으로 인해 엄청난 양의 폐콘크리트가 발생하므로 이러한 순환 가능재료를 적극적으로 활용해야 한다. 이러한 활용기술의 개발은 시기적으로 매우 적절한 것으로 판단된다.

<표 1.1.8> 국내 기술개발 수준

세부기술 내용	국외현황 (주요 선진국명)	국내 개발 현황	수준 (국외대비)
모래 및 쇄석 자갈 다짐말뚝공법	일본 : 독보적 기술 보유	선진국 기술도입/모방	70%
지반재생재료 활용기술	미국 : 국가의 최우선 정책	경제성 문제로 착수수준	60%
친환경공법 개발	유럽 : 국가주도의 연구개발	경제성 문제로 시초단계	65%

선진국에서는 일본을 필두로 상당한 규모의 순환골재의 연구가 과거 10여 년간 진행되어 일부 사업화를 추진 중에 있으며 정부에서도 이를 적극적으로 육성하는 추세에 있다. 미국에서도 주정부차원에서 의무적으로 순환골재를 공사시 일정부분 사용하도록 권장하는 추세이며, 유럽은 공동연구를 통하여 지반환경에 적극적으로 대처하는 추세에 있다.

나. 국외 동향

(1) 일본의 건설폐기물 재활용 현황 및 기술동향

일본은 환경문제에 대한 국민적 관심이 높아지면서 1985년 7월에 “시가지 토목공사 공중재해방지 대책요강”을 전면적으로 개정하여 신고항목을 설치하고 잔토와 폐기물에 관한 처리계획, 위탁처리, 운반경로, 운행관리에 필요한 조치를 강구하였다.

한편, 잔토 이외의 건설폐기물 대책은 1990년 2월 종합적인 건설폐기물 대책연구회를 설치하여 환경청, 건설청, 통산성 등 8개 부처의 공동법안으로 1991년 재활용법 및 건설부산물 적정처리 추진요강 등을 제정하여 건설부산물 재활용을 추진하였다. 여기에는 건설폐기물에 관한 재활용 내용을 상세하게 명시하고 있으며, 일본에서 추진하는 건설폐기물 대책의 3가지 과제로서 부산물의 발생억제, 리싸이클 추진, 부산물의 적정관리라는 측면을 중점적으로 관리하고 있으며, 그중에서 리싸이클의 추진에 더 많은 비중을 두고 있다.

일본은 덴마크에서 열린 제3차 RILEM 심포지엄에도 여러 편의 논문을 발표하였다. 이중 Kasai는 일본에서 철거된 콘크리트의 재활용에 관한 현재 실태와 재활용 지침안을 제시하였고, Kikuchi et al.(1994), Yagishita et al.(1994), Sano et al.(1994), Yanagi et al.(1994) 등의 연구자들도 콘크리트의 재활용에 관한 논문을 발표하여 일본의 높은 재활용 관심도를 보여주었다.

이밖에도 현재 일본에서는 많은 연구와 실용화가 이루어지고 있는 것으로 보고되고 있다. 1994년 4월에는 2000년을 목표로 한 “건설부산물 대책 행동계획(재활용계획 21)”을 발표하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

① 설계의 연구 등에 의한 철저한 발생원 규제
② 공사간의 정보교환 등에 의한 최대한의 재활용 추진
③ 재활용이 곤란한 폐기물의 적정처리 추진
③ 적극적인 기술개발 추진

이 계획은 2000년까지 건설폐기물을 예측 발생량의 약 10%를 감소시키고, 또한 아스팔트 콘크리트 덩어리, 콘크리트 덩어리의 재활용률을 1990년의 50%에서 90%로, 건설폐기

물 전체의 재활용률을 42%에서 80%로 증가시키는 것을 목표로 하고 있다. 이러한 목표를 달성할 경우에는 현재와 비교하여 재생쇄석의 사용량을 연간 4,000만톤(덤프 330만대 분량) 증가시킴으로써 자연산 쇄석 사용 절감 등의 효과를 기대하고 있다.

(2) 유럽의 건설폐기물 재활용 현황 및 기술동향

일본과 함께 건설폐기물의 재활용이 잘 추진되고 있는 나라가 독일이다. 독일의 경우 일찍부터 건설폐기물에 대한 재활용 촉진대책을 마련하여 시행하였다. 1951년에는 폐벽돌 재활용 기준을 고시하여 폐벽돌을 콘크리트골재로 재활용하는데 기여하였다. 서독의 연방통계국의 발표에 따르면 1987년 발생한 산업 및 특수폐기물(Special Waste)은 약 2억 600만 톤이고 이중 건설업과 관련된 토사, 건설폐기물이 1억 2,000만 톤으로 가장 많아 전체의 60% 정도를 점유하고 있다. 산업별 폐기물 발생량에서 건설산업이 차지하는 비율은 1977년 54.2%, 1982년 59.3%, 1987년 53% 등으로 항상 50% 이상이었다.

독일의 Schulz(1988)는 독일의 폐콘크리트 재활용에 관한 논문을 발표하였고, 네덜란드의 Hendricks와 함께 벽돌 파쇄재료를 재활용하는 연구를 공동으로 수행하였다. 콘크리트와 달리 파쇄벽돌로부터 얻어진 골재는 그 특성이 다르다. 따라서 그것의 재활용에 따른 연구는 별도로 취급하였다. 여기서 말하는 벽돌이란 건물의 벽체 재료로 사용된 벽돌, 시멘트 벽돌, 경량 벽돌, 붉은 벽돌 등을 모두 포함하며 경우에 따라서 타일 부스러기도 포함된다.

이들은 결론에서 독일이나 네덜란드에서 벽돌 파쇄 재료를 콘크리트용 재료로 사용할 수 있도록 규정하고 있으나, 사용되는 재료의 다양성 때문에 철저한 시험을 거쳐야 한다고 언급하였다. 또한 그는 독일에서 건물 파쇄물을 콘크리트용 골재로 사용하는 과정을 소개하였다. 독일의 “DIN 4266 Part 2”는 벽돌 재활용 재료에 불순물 한계치를 규정하고 있다. 벽돌 재활용 콘크리트 단위중량은 경량 콘크리트와 보통 콘크리트의 중간 정도로 측정되었으며, 수축계수와 크리프가 큰 것으로 나타났다. 1989년 통독 이후에는 구동독 지역의 개발과 함께 이 지역으로부터 건설폐재 발생량이 급격히 증가하였다. 통일 후 독일 연방정부는 1990년 “건설폐기물 억제를 위한 목표 결정안”을 마련하여 건설폐기물의 재활용 대책을 강구하였다. 이 대책의 내용을 보면, 재활용의 촉진을 위하여 시공자, 건설업자, 관청 등에서 해체 및 건설공사가 체계적으로 연계되도록 하였으며 폐기물의 감량목표를 설정하여 이의 달성에 역점을 두었다.

다른 유럽 국가들의 건설폐기물 재활용 현황을 보면 영국의 Nixson(1978)은 RILEM 기술위원회 1차 회의 위원으로 콘크리트 재활용에 관한 논문을 Material and Structure에 게재하였다. 여기에서 그는 그간의 여러 연구를 몇 가지 분야로 구분하여 항목별로 분류하였다. 그는 2차 대전 직후 1946년 구소련의 Glushge의 연구와 1946년 독일의 Graf의 연구를 최초의 콘크리트 재활용 사례로 소개하고 있다. 2차 대전 직후 당시의 문헌에 의하면 각종 벽돌이 건축물 재료로 가장 널리 사용되었음을 Nixon(1978)은 기술하고 있다. 하지만 당시에는 이 분야에 대한 깊이 있는 연구가 별로 없었고, 1970년대에 접어들면서 전후 또는 그 이전에 지은 노화된 콘크리트 구조물의 철거와 새로운 건설 물량의 증가와 일부에서의 미래 천연골재의 고갈에 대한 우려가 시작되면서 폐콘크리트를 골재로 사용하기 위한 관심이 증가되었다.

O'Mahony(1991)는 영국의 Milligan과 함께 파쇄 폐콘크리트의 재활용을 위한 연구를 수행하였다. Collins(1994)는 영국에서 해체 폐기물의 약 40%가 재활용되고 있으나 그중 대부분은 채움재 등과 같은 저급의 재료로 쓰이며 콘크리트 등과 같은 고급 재료로의 사용은 미약하다고 하였다. 그는 그 이유를 적절한 규정의 부족에 기인한다고 지적하였다. Wainwright 등(1994)은 재생 굵은골재와 잔골재를 사용한 재생 콘크리트의 성능을 고유동화재, Pulverised Fuel Ash(PFA) 및 천연모래를 사용하여 개선하는 연구를 수행하였다.

영국은 매년 2,000만 톤 이상의 건설폐재가 발생되고 있으며 그중 콘크리트가 50~55%, 폐벽돌이 30~40%에 달하고 있다. 현재 영국의 경우 대부분의 건설폐기물이 재생골재로 재활용되고 있으며 천연골재의 고갈, 자원 및 에너지 절약의 중요성이 재인식되면서 건설폐기물의 재활용이 증가되고 있다.

덴마크는 폐콘크리트를 1929년에 도로포장, 1959년에는 공항에서의 도로포장, 1969년에는 자동차용 도로포장에 활용하였다. 덴마크의 Hansen(1994)은 Narud(1983)와 1983년에 3편의 연구논문을 발표하였다. 그중 하나는 파쇄 콘크리트의 굵은골재로 만든 재생 콘크리트의 강도에 관한 연구이며 나머지 둘은 재생 콘크리트와 Silica Fume, 그리고 Fly Ash를 이용하여 Calcium Silicate 벽돌을 개발한 연구이다. 그는 Silica Fume을 첨가하여 상당한 압축강도의 증진을 얻었으며 Autoclave 양생방법을 사용하였다. Hansen의 다른 연구에서는 재생골재의 성질이 본래 콘크리트의 혼화제에 따르는 영향, 재생콘크리트의 탄성과 건조수축에 관한 연구, 토질의 개질재료로써 파쇄 잔골재의 재활용에 관한 연구 등이 있다. 그 외에도 덴마크에는 많은 연구자들이 있다. 재활용 재료를 효율적으로 확보할 수 있는 구조물 해체(Demolition) 방법에 관한 경험적 연구가 Lauritzen과 Jannerup(1994)에

의하여 수행되었다. 또 다른 Hansen(1994)은 벽돌 파쇄물을 전체 다 재활용하는 기술을 제시하였다. 그는 진흙 벽돌과 몰탈을 한꺼번에 900℃ 이상의 고온으로 가열하여 이를 칼슘 실리카질로 변화시켜 재활용에 사용하는 방법을 발표하였다. 이와 유사하게 진흙 벽돌을 다시 구워서 100% 재활용하는 연구를 Kristensen(1994)이 발표하였다. Gottfredsen과 Thogersen(1994)는 악조건 하에서의 콘크리트 재활용에 관한 연구에서 Fly Ash가 알칼리 반응 등을 저지시켜 준다고 보고하였다.

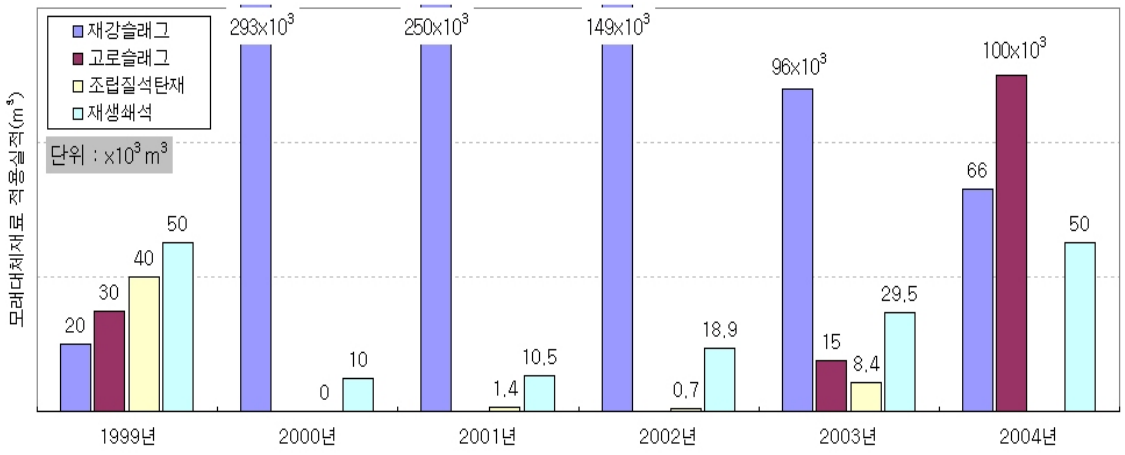
네덜란드의 Barth(1994)는 건설폐기물의 재활용에 따른 경제적, 사회적, 정치적 면에서의 문제점 등을 기술하고 있다. 한편 네덜란드의 재활용 규정 초안에는 종이, 플라스틱 등 불순물이 중량과 용적으로 1% 미만이어야 한다고 규정하고 있다.

프랑스에서는 1976년 파리근교의 자동차 도로 보조기층과 노반재에 사용된 이후 현재 파리지역에서는 일상적으로 사용되고 있다. Marlet와 Pimienta(1994)가 콘크리트의 역학적 특성과 물리·화학적 특성을 연구하였는데 그들은 특히 재생 콘크리트는 건조수축이 크며, 물의 이동과 탄산화(Carbonation)의 비율도 크다고 지적하였다.

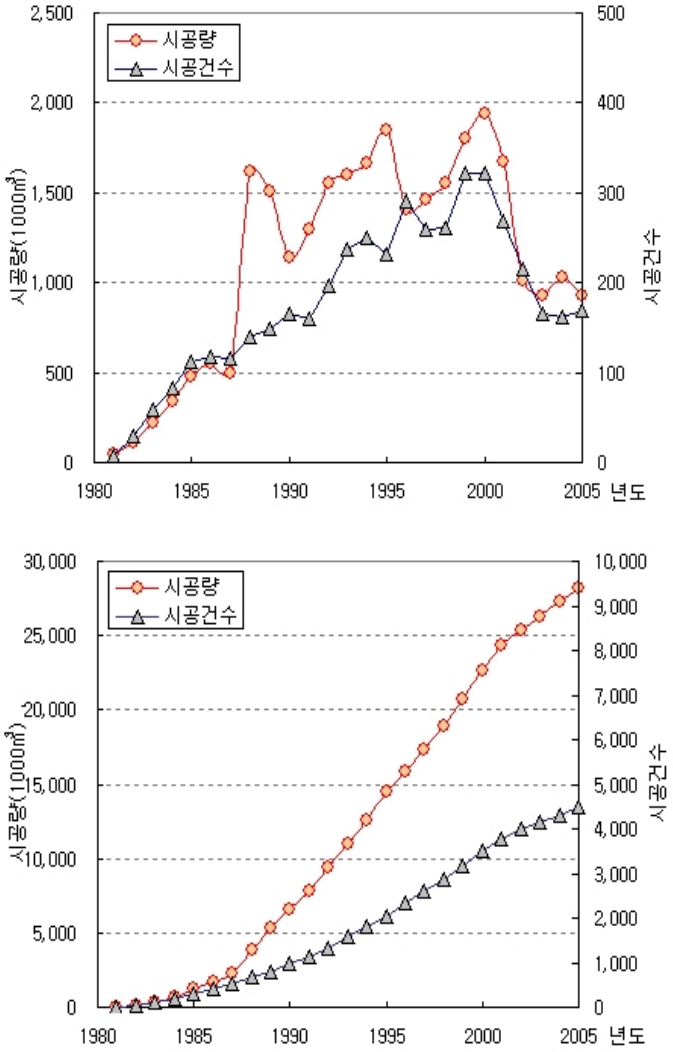
(3) 연약지반 관련기술

(가) 주요국가의 시장규모

다짐말뚝 공법 관련한 주요 국가 중 시공실적이 많은 일본의 경우는 1956년 이후 모래다짐말뚝(SCP)의 시공실적이 해마다 증가하다 2001년 이후 연간 시공실적은 다소 주춤하는 경향을 보이고 있다. 2003년까지 일본에서는 총 360,000,000m가 시공되었다. 최근에는 양질의 천연모래자원의 고갈로 인한 환경적, 경제적 문제로 인해 점차 모래 대체 재료의 활용이 증가하고 있는 추세이다.



<그림 1.1.6> 모래 대체재 사용현황



<그림 1.1.7> DJM 말뚝적용 실적(일본)

(나) 세계시장을 선도하는 주요업체

연약지반개량공법과 관련된 세계시장을 선도하는 주요 업체는 다음과 같다.

<표 1.1.9> 세계시장 선도업체

업체명(국적)	업체별 능력	중점분야
HUESKER International (영국, 독일, 프랑스 등)	GEC(Geosynthetic Encased Column) 공법 개발	토목섬유관련 제품개발/생산/판매
Cofra사(네델란드)	Augeo pile 공법 개발/설계/시공 토목섬유 관련 제품 생산/판매	생산/판매/설계/시공
不動건설(일본)	지반개량(침수대책, 액상화 대책, 토양지하수 대책), 내진공사(SAVE 콘포장, CI-CMC, PROP 공법) 토양지하수 오염대책(고화공법, 오염물질 제어공법)	설계/시공
카토건설(일본)	지반개량(DJM 공법, CDM 공법) 기초말뚝공사(아반링 공법, PC 웰 공법, VSL 공법)	설계/시공
三信건설공업(일본)	지반개량(DJM 공법)	설계/시공
竹中토목(일본)	지반개량(DCM 공법, CDM 공법)	설계/시공
일본기초기술(일본)	지질토질조사, 토사재해 감시시스템, 지반개량공사, 지반보강공사	설계/시공
국토종합건설(일본)	지반개량(KS-EGG 공법, KS-BMIX 공법, 생분해성 연직배수공법, SDP 공법, 다공케이슨 공법)	설계/시공
테노쿠스(일본)	지반개량(테크노람 공법)	설계/시공

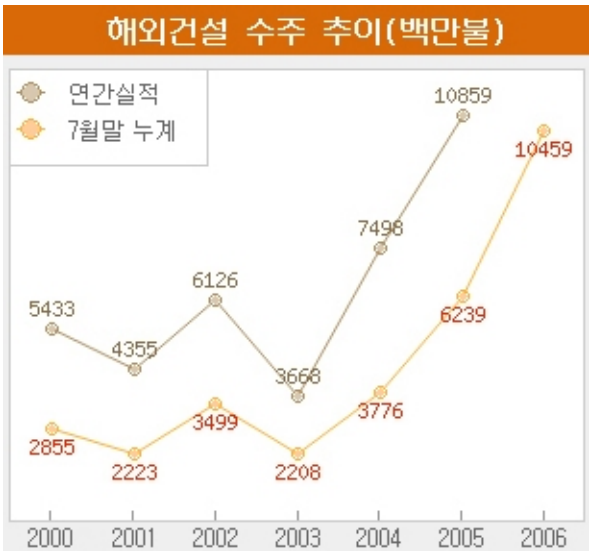
(다) 해외시장 예측 및 발전전망

국내 건설사의 품질 및 기술력은 세계적인 수준이며 해외 대규모 공사수주는 꾸준히 증가하여 아시아는 물론 중동 및 아프리카까지 그 활동영역이 넓어지고 있는 실정이다. 앞서 밝힌 바와 같이 본 개발공법은 연약지반개량을 위한 기초공법으로 항만 및 해양공사에 있어 필수적으로 적용되는 분야이며 국내외 항만건설공사의 발주 및 수주량이 관련 분야의 직접적인 시장규모라 할 수 있다.

국내 H건설사는 2006년 6월 2억 260만 달러(한화1951억 원) 규모의 아랍에미리트(UAE) 두바이 제벨알리 컨테이너터미널 1단계 배후부지 조성 및 관련 공사를 동시에 수주했다. 추후 UAE 두바이 항만청에서 추가 발주할 공사는 총140억 달러(한화 13조 4204억 원)에 달하는 엄청난 규모의 국가기간사업으로 알려지고 있다.

이외에 최근 국내 건설사의 해외 항만공사 수주현황을 살펴보면 다음과 같다.(출처: 건설일보, www.cdaily.co.kr, 2006.6.27일자)

① 쿠웨이트 슈아이바 항만공사 수주(2006년 4월) : 4,500만 달러(430억 원), H건설
② 아랍에미리트 두바이 제벨알리 컨테이너 터미널 안벽공사(2005년 8월)
: 6,800만 달러(한화650억 원), H건설
③ 크로아티아 리예카 항만공사 수주(2001년 4월) : 3,400만 달러(325억 원), S건설



<그림 1.1.8> 해외건설 수주 추이

제 2 절 연구개발의 목표 및 범위

1. 연구개발의 범위

최근 들어 콘크리트 구조물의 해체 폐기가 활발하게 진행되고 있으며, 이러한 현장에서 매년 기하급수적으로 다량 발생되고 있는 폐콘크리트 등의 건설폐기물 처리가 새로운 사회적 문제로 부각되고 있는 실정이다(대한주택공사, 1997; 배규웅, 1993; 서상교, 1996). 환경부에서 발표하는 환경통계연감에 따르면, 우리나라의 건설폐기물 일평균 발생량은 1996년 28,425톤에서 2001년에는 약 4배인 108,520톤으로 급격하게 증가되고 있다. 2020년에는 폐콘크리트의 연간 발생량이 9천만 톤이 될 것으로 추정된다. 상기 추세를 감안하여 국내의 폐콘크리트 발생량 저감 및 재활용은 환경적 측면 및 자원재활용의 측면에서 매우 시급히 해결해야 할 사안임에 틀림없다. 따라서 천연자원의 고갈에 대비하고 지구의 환경파괴를 극소화시키며 건설폐기물을 재활용할 수 있는 재료로써 폐콘크리트로부터 얻을 수 있는 순환골재를 이용할 필요가 있다(김광우, 1994; 서성원, 1995; 신희덕, 1993). 건설폐기물로부터 얻은 순환골재를 연약지반개량의 재료로 적용하는 기술을 개발하고 실현화하는 단계를 본 연구개발의 범위로 하고 있으며, 세부적인 내용으로 지반개량재료로써의 순환골재의 적용성 평가, 순환골재를 이용한 친환경 지반개량공법의 개발, 실내모형시험 및 수치해석을 통한 개량된 지반의 거동 및 안정성 평가 및 합리적 설계기법 제시, 현장시험시공을 통한 개발된 공법의 실용화로 구성된다(이진용, 1998).

본 연구개발의 범위는 건설폐기물로부터 얻은 순환골재를 연약지반개량공법의 재료로 적용하는 시스템을 개발하는 것이다. 이를 위해 순환골재를 시멘트와 적절히 배합하여 제작한 다공질 콘크리트의 역학적 특성을 분석함과 동시에 이를 이용하여 제작한 다공질 콘크리트말뚝의 지지력 및 역학적 특성을 조사한다. 또한 연약지반 중에 존재하는 간극수의 배출을 위한 다공질 콘크리트 말뚝의 투수성능을 실험을 통해 정량적으로 평가하여 본 공법의 설계 지침서를 제시한다. 한편, 개발된 다공질 콘크리트말뚝공법을 연약지반에 적용하였을 경우 발생하는 연약지반의 압밀촉진거동, 하중재하로 인한 말뚝의 팽창파괴에 대한 보강효과, 연약지반의 측방유동과 활동파괴에 대한 전단보강효과를 규명하기 위하여 실내모형압밀시험 및 실내토조실험, 그에 대한 수치해석을 실시한다. 또한, 본 공법의 국내 현장시험시공 및 계측을 실시하여 시공성 및 현장 적용성을 평가한다. 최종적으

로 이러한 일련의 결과들을 분석하여 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법의 최적 설계기법과 시공 프로그램을 개발한다.

본 기술 개발로 완성되는 다공질 콘크리트 말뚝은 연약지반에 설치되어 기존의 다짐말뚝과 같은 지지력 증가 기능과 연약지반 속의 간극수를 배출시키는 배수기능을 충분히 발휘하여야 한다. 또한 기존의 다짐말뚝들의 공학적 단점인 팽창파괴와 기능적 단점인 간극막힘현상을 극소화시켜야 한다. 이를 위해 본 사업에서는 이러한 기능들을 발휘시킬 수 있는 순환골재를 재활용한 다공질 콘크리트말뚝을 개발하고 정량적인 제작방법과 설계지침을 확립하고자 한다.

2. 연구개발 목표 및 내용

가. 연구개발의 최종목표

(1) 최종목표

① 친환경 지반개량을 위한 건설재료로써 순환골재의 적용성 평가와 품질기준의 확립
② 연약지반의 공학적 안정화를 위한 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법의 개발과 실용화 검증
③ 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법의 합리적 설계기법 및 설계프로그램 개발
④ 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법의 최적 시공기술 및 성능평가기준 제시

(2) 최종목표의 성격 및 설정 근거

(가) 최종목표의 성격 : 제품개발과 공정 개발

(나) 최종목표의 설정 근거

본 연구개발의 최종목표는 천연자원의 고갈에 대처함과 동시에 기존의 지반개량공법의 치명적인 공학적 및 기능적 단점을 보완하기 위하여 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법을 개발하는 것이다.

순환골재와 관련된 기존의 주요 연구내용은 자원의 재활용이라는 측면의 환경적 요소에 크게 치중해 왔으나 본 연구에서는 환경적 요소 외에 토목분야의 새로운 기술의 개발이라는 추가적인 주요 목표를 가지고 있어 한발 진일보된 연구목적을 가지고 있다. 따라서 지반공학적 관점의 이론근거를 바탕으로 순환골재의 활용성을 검증하고 실용화 방안에 매진할 계획이다.

본 공법을 개발하기 위해서는 국내외 지반개량을 위한 공법들의 문제점 및 한계성 등의 현황을 엄밀히 분석하여 대안을 도출하고 이론적인 해석, 실내모형실험, 수치해석, 현장시험시공 및 계측을 체계적으로 수행하여 총괄적인 시공성, 경제정 및 안정성을 평가·검증하여야 한다. 현황분석과 이론적 해석, 성공적인 모형실험을 위한 예비실험단계를 수행하기 위해 1년간의 연구기간이 필요하고, 개발된 공법의 적용성과 안정성을 검증하기 위한 실내모형실험과 그에 대한 수치해석, 결과 분석 및 설계법 제시 등의 과제를 수행하기 위해 1년간의 연구기간이 필요하게 된다. 최종적으로 현장 적용성 평가를 위한 시험시공 및 계측, 최적 시공법과 안정관리 지침 제시 등의 과제를 수행하기 위해 1년간의 연구기간이 소요되게 되므로 본 연구개발과제는 총 3년의 수행기간이 필요할 것으로 예상된다.

본 연구개발팀의 연구책임자들은 연약지반개량 설계 및 시공, 건설재료 분야에서 국내 최고의 전문가들로서 경제적 측면, 시공기술 측면, 설계기법 측면, 안정관리 측면 등의 타당성을 엄밀히 증명할 수 있으며 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법을 개발하여 국내외 연약지반개량 및 설계, 시공기술의 선진화에 이바지 하고자 한다.

(2) 연구개발과제의 핵심어(keyword)

<표 1.2.1> 연구개발과제의 핵심어

핵심어	핵심어1	핵심어2	핵심어3	핵심어4	핵심어5
국문	순환골재	재활용	지반개량	다공질 콘크리트말뚝	다짐말뚝
영문	Recycled aggregate	Recycle	Ground improvement	Porous concrete pile	Compaction pile

나. 연차별 연구목표 및 내용

(1) 총괄 연구목표 및 내용

(가) 총괄연구목표

본 연구개발과제는 최근 기하급수적으로 증가하고 있는 건설폐기물의 발생에 의한 환경처리 문제와 막대한 건설재료 수급으로 인한 천연자원의 고갈에 대처함과 동시에 기존의 연약지반 기술 중 다짐말뚝공법의 치명적인 공학적 및 기능적 단점을 보완하기 위한 새로운 친환경 연약지반개량기술을 개발하는 것을 연구목표로 하고 있으며, 총 3차년도에 걸쳐 수행하는 것으로 각 연차별 연구목표 및 내용은 다음과 같다.

1차년도에는 국내외 다짐말뚝공법 현황을 분석하고, 순환골재를 활용한 다짐말뚝 재료의 현장 적용성을 평가하며, 적용공법의 개발기술 및 요소기술을 분석하고자 하였다. 또한 적용공법으로 개량된 연약지반의 가동특성 규명을 위한 실내모형토조 제작 및 예비수치해석을 수행하는 것을 연구목표로 설정하였다. 2차년도에는 순환골재의 활용을 위한 품질기준을 제시하고, 개량말뚝의 지반개량효과를 검증하고 이에 따른 문제점을 제시하고자 한다. 또한, 친환경 지반개량공법 개발을 위한 다양한 평가를 수행하고, 안정성 평가 및 설계기준을 제시하고자 한다. 3차년도에는 개량공법의 현장 적용 및 시공성을 평가하고, 현장에 적용된 재료의 품질확인시험 등을 수행하여 최적의 품질을 확보하고자 한다. 또한, 최적설계 및 시공프로그램을 개발하고 이에 대한 검증을 실시하고자 한다.

(나) 연구내용

최근 우리나라에서는 건축 구조물의 노후화로 인한 재건축 등으로 기존 콘크리트 구조물의 해체 폐기가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 현장에서 매년 기하급수적으로 다량 발생되고 있는 폐콘크리트 등의 건설폐기물 처리가 새로운 사회적 문제로 부각되고 있는 실정이다. 환경부에서 발표하는 환경통계연감에 따르면, 우리나라의 건설폐기물 일평균 발생량은 1996년 28,425톤에서 2001년에는 약 4배인 108,520톤으로 급격하게 증가되고 있다(한국콘크리트학회; 이세현, 2004, 2006). 건설폐기물의 발생량은 IMF에 의한 경제 침체기였던 1998년도를 제외하면 해마다 증가하고 있다. 건설폐재류의 성상별 발생추이를

살펴보면 콘크리트용 재생골재로 재활용이 가능한 콘크리트류는 약 67%를 차지한다. 이와 같은 증가추세를 선형적 증가로 가정하면 2020년에는 폐콘크리트의 연간 발생량이 9천만 톤이 될 것으로 추정된다. 건설기술연구원의 연구보고서에서도 2020년도의 폐콘크리트 발생량이 1억 톤을 넘어설 것으로 예측한 바 있으므로, 국내의 폐콘크리트 발생량 저감 및 재활용은 환경적 측면 및 자원재활용의 측면에서 매우 시급히 해결해야할 사안임에 틀림없다. 따라서 천연자원의 고갈에 대비하고 지구의 환경파괴를 극소화시키며 건설폐기물을 재활용할 수 있는 재료로써 폐콘크리트로부터 얻을 수 있는 순환골재를 이용할 필요가 있다(농림수산부, 1995; 한국자원재생공사, 1996). 건설폐기물로부터 얻은 순환골재를 연약지반개량의 재료로 적용하는 기술을 개발하고 실현화하는 단계를 본 연구개발의 범위로 하고 있으며, 세부적인 내용으로 지반개량재로로서의 순환골재의 적용성 평가, 순환골재를 이용한 친환경 지반개량공법의 개발, 실내모형실험 및 수치해석을 통한 개량된 지반의 거동 및 안정성 평가 및 합리적 설계기법 제시, 현장시험시공을 통한 개발된 공법의 실용화로 구성된다.

본 연구개발의 범위는 건설폐기물로부터 얻은 순환골재를 연약지반개량공법의 재료로 적용하는 시스템을 개발하는 것이다. 이를 위해 순환골재를 시멘트와 적절히 배합하여 제작한 다공질 콘크리트의 역학적 특성을 분석함과 동시에 이를 이용하여 제작한 다공질 콘크리트말뚝의 지지력 및 역학적 특성을 조사한다. 또한 연약지반 중에 존재하는 간극수의 배출을 위한 다공질 콘크리트말뚝의 투수성능을 실험을 통해 정량적으로 평가하여 본 공법의 설계 지침서를 제시한다. 한편, 개발된 다공질 콘크리트말뚝공법을 연약지반에 적용하였을 경우 발생하는 연약지반의 압밀촉진거동, 하중재하로 인한 말뚝의 팽창파괴에 대한 보강효과, 연약지반의 측방유동과 활동파괴에 대한 전단보강효과를 규명하기 위하여 실내모형압밀실험 및 실내토조실험 그리고 그에 대한 수치해석을 실시한다. 또한 본 공법의 국내 현장 시험시공 및 계측을 실시하여 시공성 및 현장 적용성을 평가한다. 최종적으로 이러한 일련의 결과들을 분석하여 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법의 최적설계기법과 시공 프로그램을 개발한다.

① 1차년도 연구목표 및 내용

<표 1.2.2> 1차년도 연구목표 및 내용

연구목표	연구내용
•국내외 지반개량을 위한 다짐말뚝공법 현황조사, 문제점 및 한계성 분석과 대안 도출	•국내외 다짐말뚝공법의 현장적용사례의 수집 및 분석 •다짐말뚝공법의 설계를 위한 기존 이론의 조사 및 분석 •국내 현황을 고려한 다짐말뚝공법의 한계성 분석 및 대응책 제시
•순환골재를 활용한 다짐말뚝 건설재료의 지반개량현장 적용성 평가 및 특성 분석	•순환골재 및 모래와의 혼합재료에 대한 연약지반개량 적용성 분석 연구 •순환골재 및 혼합재료를 이용한 다짐말뚝의 연약지반개량효과에 대한 검토
•순환골재를 활용한 다공질 콘크리트 말뚝공법 개발 및 요소기술 분석	•국내외 순환골재발생 현황조사 및 분석 •순환골재의 재료적 적용성 평가 •순환골재를 활용한 다공질 콘크리트의 역학특성 및 투수성 평가
•순환골재를 활용한 지반개량체로 개량된 연약지반의 거동특성 규명을 위한 실내모형토조 제작 및 수치해석의 수행	•개량된 연약지반의 거동특성 규명을 위한 모형토조실험 계획수립 및 시험장치 제작 •제반 모형실험에 대한 예비 수치해석

1차년도에는 본 연구의 최종적 성과물에 의한 현장기술 지원효과와 환경문제에 대한 기여도, 건설산업의 경제적 파급효과에 대하여 엄밀한 검증과 제시를 위하여 현재까지의 국내외 지반개량을 위한 다짐말뚝공법 현황조사, 문제점 및 한계성 분석과 대안도출을 시작으로 순환골재의 지반개량 건설재료로써의 적용성을 분석 평가한다. 또한 기존의 지반개량공법인 다짐말뚝공법의 치명적 단점을 해결하기 위하여 순환골재와 시멘트를 빈배합하여 제작하는 다공질 콘크리트말뚝공법을 개발한다. 개발된 공법의 공학적 신뢰성을 검증하기 위하여 우선 다공질 콘크리트에 대한 요소시험을 실시한다. 즉, 일반적인 강도시험용 몰드를 이용한 다공질 콘크리트 공시체를 제작하여 압축강도시험을 비롯한 역학시험을 실시하여 말뚝의 강성특성을 면밀히 분석하고, 투수성 시험을 실시하여 그 결과

들을 정량적으로 평가 분석한다. 또한 연속공극의 구현 및 효과검증을 위해 본 연구에서는 순환골재와 시멘트 페이스트의 다양한 배합비에 대한 실내시험을 수행하여 최적의 배합비를 도출할 계획이며, 신뢰성 높고 풍부한 시험자료를 확보할 예정이다. 순환골재는 크게 순환잔골재와 순환굵은골재로 나눌 수 있으며 그 용도에 따라서도 1종과 2종으로도 구분할 수 있으나, 본 연구에서는 19mm 이상의 순환굵은골재를 사용할 계획이며, 강도특성 및 투수특성 등의 연구를 진행하면서 가장 적절한 크기와 종류의 골재를 선택할 계획이다.

한편, 본 연구개발의 2차년도 수행단계인 개발된 공법으로 개량된 연약지반의 거동특성 규명을 위하여 실내모형토조시험 장치제작을 시작하고, 이를 위한 예비 수치해석을 실시한다. 실내모형토조시험은 두 가지 방법으로 계획하여 실시하게 되는데 첫 번째는 직경이 50cm, 높이 100cm인 대형 원형토조에 단일 개량지반을 형성시켜 개량된 연약지반의 압밀거동과 투수콘크리트말뚝의 기능성을 검토하게 된다. 두 번째는 폭 100cm, 높이 80cm, 너비 20cm 규격을 갖는 모형토조를 제작하여 개발된 공법이 적용된 연약지반 전체의 거동특성을 조사 분석하게 된다. 또한 성공적인 실내모형실험을 준비하기 위하여 이들 제반의 모형실험조건에 대한 예비 수치해석을 실시하여 적절한 해석모델을 분석한다.

② 2차년도 연구목표 및 내용

2차년도에는 1차년도의 연구결과를 토대로 하여 친환경 지반개량을 위한 건설재료로써의 순환골재의 활용을 위한 품질기준을 제시하고 순환골재의 효율적 활용의 극대화를 위한 방법에 대하여 조사 분석한다. 이를 위해 순환골재를 모래와 같은 혼합재료와 배합하여 제작한 다짐말뚝과 시멘트와 빈배합하여 제작한 다공질 콘크리트말뚝에 의한 개량효과를 연구개발 2차년도에 준비하고, 검증한 실내모형실험 및 수치해석을 실시하여 기능성과 공학적 안정성을 비교 분석한다. 이를 위해 타 관련 연구자 및 단체와의 기술세미나 및 공동연구 관련회의를 개최할 예정이며, 이를 통해 다양한 이론과 정보를 공유하여 현실적인 설계해석 프로그램을 개발할 계획이다. 이때 개량된 연약지반의 안정성 평가를 위해 실시하는 이론 및 수치해석적 검토는 연약지반의 장기거동을 평가하기 위하여 탄소성 이론을 근거를 실시하도록 한다.

한편, 3차년도에서 수행할 계획인 본 공법의 현장 적용성 평가를 준비하기 위해 개발

공법의 시공장비 적용성을 분석하고 계획한다. 이때 시공의 효율성과 경제성을 극대화하기 위하여 지반개량의 국내 전문시공업체에서 사용하고 있는 기존의 시공장비를 본 공법에 응용 적용하는 방안을 중심으로 검토한다. 또한 본 공법의 단가산출을 실시하여 경제성 평가를 검토한다.

<표 1.2.3> 2차년도 연구목표 및 내용

연구목표	연구내용
•친환경 지반개량을 위한 건설재료로써 순환골재의 활용을 위한 품질기준 제시	•연약지반개량을 위한 순환골재 지반개량체의 최적 배합비 결정 •순환골재를 활용한 지반개량체 품질기준 제시
•순환골재 다공질 콘크리트말뚝과 혼합재료를 배합한 다짐말뚝의 지반개량효과 검증 및 문제점 분석	•순환골재를 활용한 다공질 콘크리트 말뚝과 혼합재료를 이용한 다짐말뚝의 공학적 특성 및 경제성에 대한 비교 평가 분석 •모형실험 및 수치해석 결과를 통한 다공질 콘크리트말뚝공법의 우수성 평가
•연약지반의 공학적 안정화를 위한 순환골재를 활용한 친환경 지반개량공법의 개발	•다공징 콘크리트말뚝으로 개량된 연약지반의 압밀촉진효과 및 침하저감효과의 규명 •다공질 콘크리트 말뚝으로 인한 연약지반의 지지력 증가효과, 간극막힘현상 및 팽창파괴에 대한 평가
•순환골재 활용 다공질 콘크리트 말뚝공법으로 개량된 연약지반의 안정성 평가 및 최적설계기준 제시	•다공질 콘크리트 말뚝으로 개량된 연약지반의 하중재하에 의한 변형거동의 규명 •다공질 콘크리트 말뚝에 의한 연약지반의 측방유동억지에 대한 보강효과와 활동파괴에 대한 전단보강효과 규명
•현장장비 적용성 및 경제성 분석, 현장 시험시공 계획 수립	•신공법에 대한 기존 시공장비 적용성 검토 •신공법 적용시 발생되는 장비 및 투입비용 산출을 통한 경제성 검토 •개발공법의 현장 적용성 검토를 위한 시험시공 계획 수립

③ 3차년도 연구목표 및 내용

<표 1.2.4> 3차년도 연구목표 및 내용

연구목표	연구내용
•순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 현장 적용성 및 시공성 평가	•순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 현장시험시공 수행 •순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 개량효과 판정을 위한 계측 수행 •기존 다짐말뚝공법의 사례와 비교 분석하여 개발공법의 시공성 및 개량효과 평가
•현장에 시공된 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 재료적 품질확인 시험 및 분석	•순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 코아 채취 및 역학시험에 의한 품질확인 •연약지반의 시료채취 및 역학시험에 의한 개량효과 확인 •순환골재 다공질 콘크리트말뚝에 사용된 순환골재의 품질기준 기준안 정립
•순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법으로 개량된 연약지반의 개량효과, 안정성 평가 및 최적설계기준 제시	•실내모형토조실험 및 수치해석결과 비교 분석을 통한 연약지반 개량효과 및 안정성 평가 •순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 최적 치환율의 결정 •탄소성 이론에 의한 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 연약지반 개량효과 산정법 제시
•순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 최적설계프로그램 개발 및 제반 기준 제시	•순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 설계정수 결정 및 설계프로그램 개발 •시험시공현장의 계측결과를 통한 개발 설계프로그램의 검증 •개발공법의 합리적 시공방법 및 성능평가 기준 제시

3차년도에는 1차년도 및 2차년도에서 수행한 실내모형실험과 수치해석 결과를 바탕으로 개발공법을 현장에 적용하여 그 시공성과 개량효과, 경제성을 최종적으로 검토한다. 이를 위해 적절한 시험시공 현장을 선택하고 본 연구과제의 위탁연구기관인 전문시공업체에 의해 검토된 시공시스템을 이용하여 개발된 공법을 적용한 후 개량효과의 정량적

평가를 위해 계측기를 설치한다. 이때 시험시공은 2차년도 연구결과를 바탕으로 확립된 배합비 등에 의거하여 실시하고, 계측은 개량지반의 침하량, 간극수압, 유효응력 및 소정의 위치에서의 변위 등에 대해 중점적으로 실시한다.

또한, 현장에 시공된 개발공법의 재료적 품질확인 시험결과를 분석하고, 실내모형실험을 통해 개발공법으로 개량된 연약지반의 개량효과, 안정성 평가 및 최적설계 기준을 제시한다.

현장시험시공 과정과 시공 후 계측결과들을 종합하여 국내외 기존 지반개량공법의 시공 및 계측 사례와의 비교 분석을 통해 개발공법의 시공성, 경제성, 개량효과의 정량적 분석을 실시하고 본 개발공법의 설계프로그램을 검증한다. 또한 시험시공 현장의 계측결과를 바탕으로 개발된 공법의 합리적 시공방법 및 성능평가 기준을 제시한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 다짐말뚝에 의한 연약지반개량공법의 개발동향

1. 다짐말뚝공법의 종류 및 특징

가. 모래다짐말뚝(SCP)

(1) SCP 공법의 개요

SCP(Sand Compaction Pile : 모래다짐말뚝) 공법은 모래 또는 점토로 구성된 연약지반에 모래를 압입하여 큰 직경의 다져진 모래와 복합지반을 만들어 강도증가는 물론 샌드드레인으로서 압밀촉진을 기대할 수 있는 지반개량공법이다. 또한, 해저 등의 지반에서는 SCP를 촘촘히 타설하는 것으로 해저지반을 압축된 단단한 모래지반으로 강제치환이 가능하다.

따라서 지반의 단위중량이 증대되어 액상화의 방지나 지지력의 증가를 기대할 수 있다. SCP 공법은 동일한 시공기계로 모래지반 뿐만 아니라 점성토지반에서도 적용된다. 시공은 진동식 해머로 케이싱 파이프를 지중에 관입하고, 이것을 통하여 모래를 공급하여 다지면서 모래기둥을 조성한다.

SCP 공법을 이용할 수 있는 지반은 사질토, 시라스, 화산회토 등의 사질계 지반, 점성토, 피트, 산호혼합 점성토 등의 점성토계 지반, 게다가 사질토계 지반과 점성토계 지반의 호층지반 등 소위 연약지반 전체가 그 개량대상이 되고, 지역적으로는 충적평야, 소택지, 산간부 계곡의 퇴적토, 인조매립지, 해저 등의 연약지반지대가 된다.

또한, 대상구조물로서는 연약지반에 건설되는 건축물(건물, 창고 등), 탱크 기초(오일탱크, LNG, LPG 등), 흙구조물(고속도로, 철도성토, 하천제방, 간척제방, 필댐, 해안제방 등), 제철소에서의 야드, 항만구조물(호안, 안벽, 방파제, 돌핀 등), 교량, 지중구조물(매설관, 박스컨버트 등), 수처리 시설 등의 다방면에 걸치고 있다.

(2) 공법의 특징

① 사질토, 점성토에 대한 적용성이 양호하다.
② 강력한 개량공법 요구시 유효하다.
③ 모래기둥의 응력집중현상으로 인하여 압밀량 저감효과를 기대할 수 있다.
④ 잔류침하를 조기에 완료할 수 있다.

(3) 치환율과 모래말뚝 간격

모래말뚝은 정방형이나 삼각형 및 구형으로 치환율(a_s)은 다음 식에 의해 산정한다.

① 정방형, 구형배치 : $a_s = A_s/A = A_s/x^2$ 또는 $A_s/(x_1 \times x_2)$ (식 2.1.1)
② 정삼각형 배치 : $a_s = A_s/A = (2/\sqrt{3}) \times (A_s/x^2)$ (식 2.2.1)

여기서, A_s : 모래말뚝 단면적
A : 모래말뚝 1개가 분담하는 면적
x : 파일 피치

치환율(a_s)은 원지반을 1.0으로 할 경우 모래말뚝의 체적비율로 개량한 정도를 나타내는 지수로 일반적인 치환율은 다음과 같다.

① 사질토나 육상의 점성토의 개량 : 0.4 이하
② 해저의 점성토 : 0.15

(4) 응력분담비

복합지반의 응력분담비 n은 다음 식에 의해 산정한다.

$$n = \frac{\overline{\Delta\sigma_z^p}}{\overline{\Delta\sigma_z^c}} \quad \text{(식 2.1.3)}$$

여기서, $\overline{\Delta\sigma_z^p}$: 모래다짐말뚝에 의한 연직유효응력 증분

$\overline{\Delta\sigma_z^c}$: 점토부에 작용하는 연직유효응력 증분

나. 쇄석다짐말뚝공법(GCP)

(1) GCP 공법의 원리 및 특징

쇄석다짐말뚝공법은 압밀촉진공법과 같이 연직배수재로서의 기능을 가지기 때문에 기초나 지진하중의해 발생되는 간극수압을 소산시키며, 연약지반 지지력의 향상, 기초의 침하감소, 압밀효과의 증진, 기초 크기의 축소, 사면의 안정을 유도하는 등 장점이 크다. 특히, 진동치환공법(Vibro-replacement)은 교각 주변 지반의 안정화나 얕은 기초의 시공, 액상화 경감에 적절한 공법으로 잘 알려져 있다. 쇄석다짐말뚝은 Vibro-compaction, Vibroflotation, Vibro-replacement 등 다양한 시공방법이 개발되어 시공되고 있으며, 원지반의 토질조건에 따라서 적절한 시공방법을 결정하여야 한다. 그리고 GCP 공법은 유류탱크나 물탱크와 같은 연성기초의 지지력 문제, 도로성토·단지성토 등의 원호활동문제, 보일러실과 엔진실의 접속부와 같은 구조물간의 민감한 부등침하문제, 지하수 유동을 허용하면서 지지력 증대를 필요로 하는 경우 등에 적용할 수 있다. 쇄석다짐말뚝공법은 이러한 다양한 장점을 갖고 있기 때문에 현재 사용 빈도가 증가하고 있는 추세이다.

(2) 원지반의 입도분포 및 전단강도

진동다짐공법(Vibro-compaction)과 진동치환공법(Vibro-replacement) 적용지반은 <표 2.1.1>과 같다.

<표 2.1.1> 진동다짐공법과 치환공법의 지반에 따른 적용성

지반형태	진동다짐공법	진동치환공법
모래	대단히 양호	대단히 양호
실트질 모래	양호한 편	대단히 양호
실트	불충분	양호
점토	비적용	양호한 편
Mine spoils(폐광)	양호	양호
Dumped fill	채움재의 자연상태로 결정	양호
Garbage(쓰레기)	비적용	비적용

쇄석다짐말뚝은 원지반의 전단강도가 7kN/m^2 이하이고, 예민비가 5이상인 지반에서는 형성이 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 연약 또는 매우 연약한 지반에서는 시추공벽의 붕괴 가능성, 시공기법상의 문제, 쇄석다짐말뚝 주변지반과의 상호작용 등이 공법 적용시 주요 검토사항이 되고, 매우 낮은 강도를 갖는 지반에서는 쇄석다짐말뚝 사이의 틈으로 연약한 흙이 들어가는 현상이 발생할 수 있다.

쇄석다짐말뚝은 실트성분이 많은 점성토 또는 모래자갈 섞인 점토지반에서 지반개량의 효과가 크며, 투수성이 작고 비배수 전단강도가 15~50kN/m^2 범위의 점성토 지반에 적용하기에 적합하다. 그러나 단단한 점성토 지반에서는 진동기의 관입이 어려워 적용하기가 곤란하다.

점성토 지반에서 진동으로 인한 영향이 크지 않아 연직배수(Vertical drain) 공법에서 배수재 타설시 발생하는 스미어(Smear)의 영향은 GCP 공법에서는 무시될 만큼 작다.

이것은 심하게 교란된 영역이 진동과 압력수에 의해 원지반으로부터 탈락·분출되고 그 공간은 쇄석으로 채워 다져지며 그 외의 부분은 거의 영향이 없는 것으로 보고 있다.

(3) 쇄석의 입도분포 및 내부마찰각

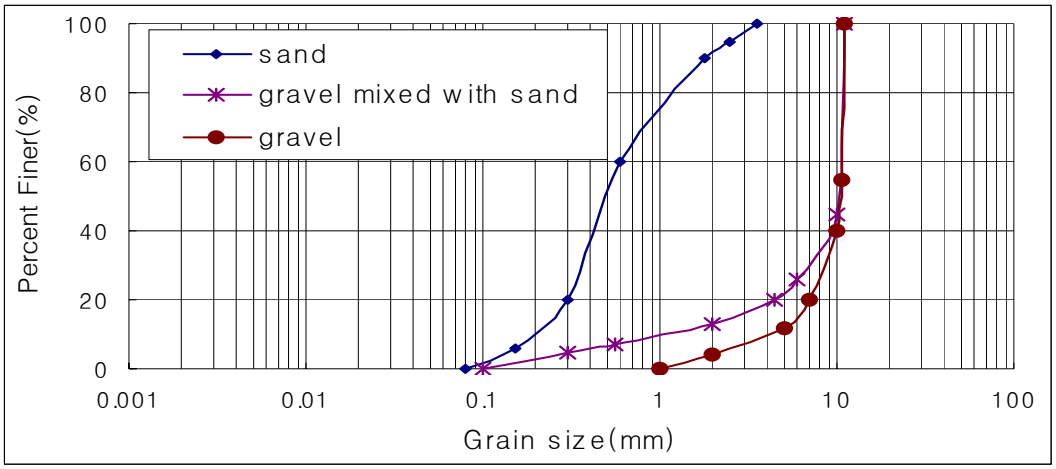
쇄석다짐말뚝 시공에 채움재로 사용되는 골재 크기는 보통 12~75mm로 다양하며 모래질 정도 크기의 입자는 물분사시 시추공의 바닥에 제대로 안착되기 힘들어 vibroflotation으로 시공되는 기둥에서는 사용하기가 어렵다.

매우 연약한 지반에서는 쇄석다짐말뚝의 간극 사이로 연약한 흙입자가 유입할 가능성이 있으므로 주의하여야 하며 입도가 양호하여야 한다. 채움재로서 입도분포에 대한 기준은 여러 가지가 있으나, 진동치환공법에 의한 쇄석다짐말뚝의 재료조건에 대해 미연방도로국(FHWA, 1983)에서 제시한 기준은 <표 2.1.2>와 같다.

일반적으로 대체재 No.1 또는 No.3이 쇄석다짐말뚝의 채움재로 추천되고 있으며, No.2 또는 No.4는 큰 입경의 재료가 없을 때 사용할 수 있다. 전단강도가 12kN/m^2 이상인 지반에서는 대체재 No.1 또는 No.3과 비슷한 입경의 사용을 추천하고, 전단강도가 12kN/m^2 이하인 지반에서는 보다 가는 입경분포인 No.2나 No.4 또는 모래와 같은 세밀한 입경이 사용될 수 있다.

<표 2.1.2> 채움재인 쇄석의 입도분포(FHWA, 1983)

체크기(mm)	통과율			
	대체재 No.1	대체재 No.2	대체재 No.3	대체재 No.4
101.6	-	-	100	-
88.9	-	-	90~100	-
76.2	90~100	-	-	-
63.5	-	-	25~100	100
50.8	40~90	100	-	65~100
38.1	-	-	0~60	-
25.4	-	2	-	20~100
19.05	0~10	-	0~10	10~55
12.7	0~5	-	0~5	0~5



<그림 2.1.1> 조립재의 입도분포

쇄석의 내부마찰각은 시공방법이나 재료의 입도분포에 따라 큰 차이가 있으며 어느 특정 값만을 사용할 수 없다. 그러므로 중요한 구조물에 대해서는 현장에서 직접 특정시험에 의해 결정하여야 할 것이다. Bergado & Lam(1987)은 <그림 2.1.1>에 나타낸 재료로 시공한 쇄석다짐말뚝의 마찰각을 측정하기 위해서 현장조건과 동일한 함수비 및 단위중량을 실내 직접전단시험을 실시하여 <표 2.1.3>과 같은 결과를 제시하였다.

일반적으로 설계에 사용되는 쇄석다짐말뚝에 대한 설계상수는 응력집중계수(n)가 2~2.5, 쇄석재의 내부마찰각(ø)이 38~45° 의 값이 추천된다.

<표 2.1.3> 추천된 응력집중계수와 내부마찰각(Bergado & Lam, 1987)

기 관	응력집중계수(n)	내부마찰각
Vibroflotation Foundation Company	2.0	42
GKN Keller	2.0	45(부순돌) 40(자갈)
PBQD	1.0 ~ 2.0	42

다. DCM 공법

(1) DCM 공법의 개요

연약지반 대책으로서 오래전부터 살출에 의한 치환, 섶나무 깔기, 통나무 깔기 혹은 단계재하공법 등이 경험적으로 사용되어 왔다. 1950년대 이후, 미국에서 기술을 도입한 이후 기술의 개량·개선과 일본 독자적인 기술개발 등에 의해 많은 연약지반 대책공법이 사용되고 있으며 이것을 세분하면 수 십 종에 이른다.

DCM 공법은 이중에서 고결공법에 해당하는 것으로, 일본에서 독자적으로 기술 개발되어 최근 10년 동안 수많은 실적을 쌓아 왔다. 점성토에 석회 등을 혼합하여 흙을 고결시키는 방법은 일본의 흙다짐이나 삼화토(三和土)라는 경험적 방법으로 알려져 있다. 1955년경에는 도로의 노반재료 개량이나 철도 노상의 분니 방지를 위해 석회를 채용했었지만, 표층혼합 처리공법으로써 일반적으로 보급된 것은 1970년대이다.

항만지역의 연약 점성토를 심층에 도달할 때까지 화학적 안정재를 공급하면서 교반날개 등으로 강제적으로 혼합하는 소위 심층혼합처리공법에 관한 개발연구는 운수성 항만기술 연구소에서 생석회 및 소석회를 안정재로 쓰면서 시작되었다. 1967년부터 모형실험이 이루어져 1974년에 DLM 공법(Deep Lime Mixing Method)으로 실용화되었다.

DCM 공법(Deep Cement Mixing Method)은 1973년부터 상기 기술을 토대로 안정재로 시멘트 슬러리(또는 시멘트 페이스트)를 사용하여, 실내 모형실험, 육상 실험공사, 해상 실험공사를 거쳐 1975년에 이르러 실용화되었다. 지금까지 해상, 육상에서 수많은 공사 경험을 가지고 있다.

(2) DCM 공법의 특징

① 공기단축

단기간에 소요강도를 얻을 수 있어 공기가 대폭 단축된다.

② 소요강도 확보

대상지반의 토질성상에 알맞은 안정재 첨가량을 설정함으로써 소요강도의 개량토를 얻을 수 있다.

③ 변형(침하)이 미소

재하에 따른 개량지반의 변형이 극히 적어 상부공에 영향을 주지 않는다.

④ 적용범위가 넓다.

육상, 해상에 관계없이 시공이 가능하고, 특히 종래 공법에서는 제약을 받았던 조건(토질, 심도, 기설구조물 근접지역 등)에서도 시공이 가능하여 그 적용범위가 넓다. 또한, 구조물 기초, 성토의 안정, 액상화 방지 대책, 지수 대책, 실드 안정굴진 등 다양한 용도로 이용할 수 있다.

⑤ 무공해

원지반을 그대로 원위치에서 고화시켜 이용하기 때문에 연약토의 준설, 제거, 투기량이 미소하다. 또한, 수질오염의 우려가 거의 없고 저진동, 저소음 공법이기 때문에 주변지역에 영향을 미치지 않는다.

⑥ 신뢰성 높은 시공 관리와 품질

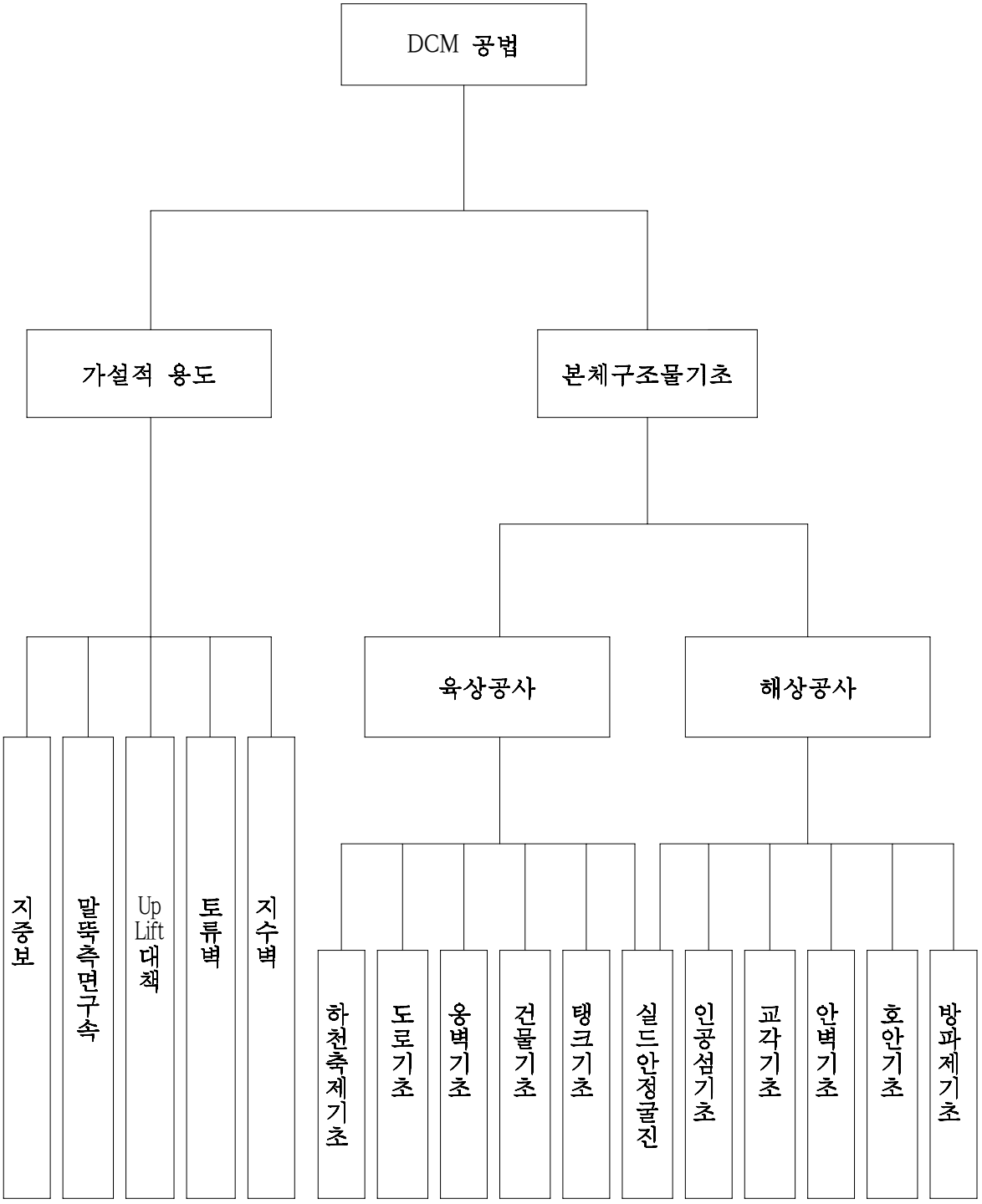
처리기와 플랜트에서 시공상태의 변화를 자동적으로 데이터를 수집해서 조작실에서 집중제어하기 때문에 확실한 시공 관리와 신뢰성 높은 지반개량이 가능하다.

⑦ 자원의 유효 이용

종래의 공법처럼 대량의 모래를 사용하지 않고 원지반을 이용하는 공법이기 때문에 자원보호에 공헌한다.

(3) DCM 공법의 적용성

DCM공법은 각종 구조물 기초지반개량으로 사용하는 것 외에 <그림 2.1.2>와 같이 지수벽, 토류벽 등 굴착시 지반의 안정확보와 같은 가설적인 용도도 있다.



<그림 2.1.2> DCM 공법의 적용 공사

2. 다짐말뚝공법 설계법

가. 모래다짐말뚝(SCP)

(1) 일반적인 설계절차

SCP 공법의 설계는 개량 후 지반특성이 모래말뚝의 강도, 치환율, 개량범위, 외력 조건, 원지반 강도 및 구속압력, 모래말뚝 타설에 의한 지표면 융기 등의 영향을 받게 되므로 매우 복잡한 과정을 거쳐야 한다.

(가) 개량범위 또는 모래말뚝 치환율의 결정

지반개량의 목적은 축조하는 구조물에 대하여 지반이 충분한 지지력을 얻도록 하는 것이다. 지지력에는 크게 나누어서 연직방향과 수평방향의 두 방향이 있다. 연직방향에 대해 충분한 지지력을 얻기 위한 지반개량의 범위 및 모래말뚝 치환율은 기초의 지지력 검토 외에 구조물을 포함한 지반전체의 원형활동에 대한 안정성을 검토하여야 한다. 일반적으로는 원호활동의 안전율이 소정의 안전율이 되도록 개량깊이나 폭을 변화시켜 개량범위를 결정한다. 수평방향의 지지력 증대를 목표로 하는 경우에는 개량범위를 결정하는 명확한 방법이 확립되지 않은 상태이다.

치환율(a_s)이란 모래말뚝 체적의 개량 원지반 체적에 대한 비를 말하며, 개량의 정도를 나타내는 정수이다. 모래말뚝은 그 중심위치가 정사각형, 삼각형 및 직사각형으로 배치된다. 치환율과 개량된 지반강도와의 관계에 대해서는 여러 가지 제안식이 있으며, 그 가운데 적절한 공식을 선택한 후 지지력 검토 또는 원호활동 계산시 사용하면 된다.

(나) 지반개량 후의 형상 예측

모래말뚝 타설 후 지반은 부풀어 오르게 된다. 이 지반의 융기 높이에 대해서는 많은 연구가 있으나 지반의 융기높이를 엄밀하게 추정하는 것은 어려우며 기존의 시공사례를 통계적으로 분석해서 융기율(μ, 융기토량/설계투입 모래량)을 이용하여 설계에 이용하는 경우가 보통이다.

(다) 복합지반의 설계법과 정수 산정

SCP에 의해서 지반개량을 하면 성질이 다른 점성토와 모래말뚝으로 이루어진 복합지반이 형성되므로, 지반은 점성토와 모래의 중간적 성질을 가지고 있으므로 토질공학적으로 어떻게 다루는가는 매우 어려운 문제이다.

재하시 모래말뚝과 점성토가 받은 응력은 응력분담비($n=\sigma_s/\sigma_c$)와 치환율(a_s)을 매개변수로 하여 결정할 수 있다. 일반적으로 응력분담비는 현장실측 데이터에서 역해석한 결과를 바탕으로 대략 2~6의 범위 값을 쓰는 경우가 많다.

(라) 안정성 검토

개량지반의 안정해석을 위해서는 원호활동 계산, 지지력 계산, 침하량 계산, 토압 계산, 횡방향 지반반력 계산 등을 수행해야 하는데, 그중에서 가장 중요하게 고려하고 있는 것은 원호활동에 대한 안정성 검토와 침하에 대한 검토이다.

(2) SCP 공법의 치환율

치환율(a_s)이란 지반면적과 모래말뚝이 차지하는 부분의 면적비로 정의되고, 주로 모래말뚝 타설간격에 의해 결정된다. 성토 등 상부구조물이 비교적 경량인 경우에는 치환율(a_s)이 20~40% 정도인 저치환율 SCP 공법이 많이 사용되고 있다.

한편 항만공사 등 모래말뚝 자체로 지지력, 전단강도 증가효과 등을 발휘해야 하는 경우에는 치환율(a_s)이 70% 정도인 고치환율 SCP 공법이 사용된다. 그러나 항만공사에서 주로 사용하던 고치환율 SCP 공법은 모래의 부족현상으로 인해서 치환율 30~40% 정도인 저치환율 SCP 공법으로 대체중이다. 저치환율 SCP 공법 사용의 문제점으로 고치환율 SCP 공법에 비해 모래말뚝 사이 점성토의 압밀에 의한 강도 증가, 모래말뚝과 점성토의 응력분담비(n) 등이 해명되지 않은 상태이다.

치환율은 원지반 면적을 1.0으로 한 모래말뚝의 단면적 비율로서 개량한 정도를 나타내는 값이다. 일반적으로 모래나 육상의 점성토 개량에는 0.4 이하, 해저의 점성토 개량에는 0.15~0.8의 범위로 하는 경우가 많다.

모래말뚝의 배치는 정방형이나 삼각형 및 평행사변형으로 시공되고 치환율은 다음 식에 의해서 구할 수 있다.

정사각형, 평행사변형 배치

$$a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{x^2} = \frac{A_s}{x_1 \times x_2} \quad \text{(식 2.1.4)}$$

삼각형 배치

$$a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{A_s}{x^2} \quad \text{(식 2.1.5)}$$

여기서, A_s : 모래말뚝 단면적

A : 모래말뚝 1개가 분담하는 면적(분담면적)

x : 말뚝 중심간 거리

<표 2.1.4> 지반조건, 개량목적, 구조물 형식에 따른 치환율 범위

지반조건	목적	구조물 형식	치환율(a_s)
해상점토	안정, 침하	중력식 호안, 방파제	0.3~0.8
육·해상 모래	액상화	널말뚝	0.05~0.25
육상점토	안정, 침하	성토	0.1~0.3
육상점토, 모래	안정, 침하, 횡방향 지반반력계수, 액상화	교대, 교각, 배면성토	0.1~0.3
육상점토, 모래	액상화, 침하, 안정, 횡방향 지반반력계수	탱크 건설	0.05~0.3
육상점토, 모래	액상화, 토압, 융기	지하매설물	0.05~0.3

<표 2.1.4>는 지반조건, 개량목적 그리고 시공되는 구조물 형식에 따른 일반적인 치환율 범위이다. 육상공사에서는 모래말뚝 지름이 60~80cm(표준 70cm), 해상공사의 점성토 지반개량에서는 100~200cm(표준은 160cm 또는 200cm), 해상공사의 모래지반개량에서는 80~120cm 정도가 일반적으로 많이 사용된다. 또한 육상공사에서는 최근 시공시 진동 및 소음을 감소시키기 위해서 35~45cm의 지름을 사용하는 경우도 있다. 모래말뚝의 지름은

시공기계의 능력과 지반의 강도, 주변 환경에 미치는 영향 등을 고려하여 적절하게 선정되어야 한다.

SCP 공법은 대부분 원호활동에 대한 안전율을 확보하기 위해 선택되었는데, 가장 많이 사용된 치환율은 70~80%이며, 20~30%, 50~60% 순으로 나타났다. 중력식 구조물에 있어서 사용된 치환율은 항만 구조물 전체의 경향과 마찬가지로 70~80%, 20~30%, 50~60% 순이나 빈도는 큰 차이가 없다. 또한 10~40%의 저치환율을 사용한 시공예도 많았다. 널말뚝 구조물의 치환율 빈도는 70~80%의 고치환율이 가장 많이 사용되었고, 20~30%의 저치환율도 비교적 많이 사용되었다.

(3) 점성토 지반에 대한 설계법

모래다짐말뚝공법은 모래지반에 적용하여 지진시 액상화 방지를 주목적으로 개발되었다. 하지만 현재에는 점성토지반에 모래말뚝을 타설하여 복합지반을 조성하는 공법으로 많이 이용되고 있다.

(가) 기본개념

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 복합지반 위에 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, 지지력증대, 침하감소 등의 효과가 나타나게 된다.

복합지반은 복합지반위에 평균응력 σ가 재하되어 지반반력으로 말뚝에 σ_s, 점성토에 σ_c의 응력이 발생하고, 각각의 면적 A_s, A_c의 범위 내에서 응력이 일정하다고 하면 다음 식이 얻어진다.

$$\sigma A = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c \qquad \text{(식 2.1.6)}$$

응력분담비(n= σ_s/σ_c)를 이용하여 이 식을 변형하면,

$$\sigma A = n\cdot\sigma_s\cdot A_s + \sigma_c\cdot A_c = \sigma_c\cdot(n\cdot A_s + A_c) \quad \text{(식 2.1.7)}$$

이것으로,

$$\frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{A}{nAs+Ac} = \frac{1}{(n-1)a_s+1} = \mu_c \quad \text{(식 2.1.8)}$$

$$\frac{\sigma_s}{\sigma} = \frac{nA}{nAs+Ac} = \frac{n}{(n-1)a_s+1} = \mu_s \quad \text{(식 2.1.9)}$$

여기서, $a_s = \frac{\sigma_s}{\sigma} = \frac{A_s}{A}$ (치환율), μ_c와 μ_s는 상재압에 의해 각각 점토층과 모래말뚝에 발생하는 응력비이다.

(나) 복합지반의 안정계산

SCP 복합지반의 안정계산방법은 Mohr-Coulomb의 전단강도 공식을 기본으로 하여 복합지반의 조건을 고려한 원호활동 또는 선형활동해석으로 검토하는 방법이 일반적이다.

원호활동에 대한 안정해석은 컴퓨터 프로그램으로 수행되는데 상용화된 해석프로그램을 복합지반해석에 사용하기 위해서는 입력 데이터를 사전에 별도로 가공하여 준비해야 한다. 복합지반 사면활동해석법으로는 다음과 같은 방법이 있다.

① 가상지층 설정법(profile method)

이 방법은 컴퓨터 프로그램을 사용하여 사면안정해석을 실시할 때 모래말뚝을 보강재로 고려하여 모래말뚝 하나하나의 위치를 입력하여 해석하는 방법이다. 2차원 해석시 모래말뚝은 폭의 모래벽체로 대체되어야 한다.

또한, 모래말뚝에 응력이 분담되는 것을 고려하기 위해 가상지층을 제방과 원지반 사이에 설치한다. 사면 안정해석시 모래말뚝의 응력분담은 고려하지 않고 해석하는 경우가 많은데 SCP 공법 또는 스톤컬럼공법을 사용하는 경우에는 응력분담이 크기 때문에 이를 고려하는 것이 경제적인 설계가 된다.

② 평균전단강도법

복합지반의 전단강도를 모래와 점토지반의 치환율에 비례하여 각각의 전단강도를 가중평균하여 사용하는 방법으로서, 모래와 점토에 발생하는 응력(응력분담비)을 고려하는가, 압밀진행에 따라 발생하는 점토의 전단강도 증가를 고려하는가의 여부에 따라 몇 가지 공식이 제안되어 있다.

<표 2.1.5> 치환율과 응력분담비(일본지반공학회, 1988)

치환율(a_s)	$\varnothing_s$	n
0 ~ 0.4	30	3
0.4 ~ 0.7	30	2
0.7 이상	30 ~ 35	1

(다) 복합지반의 압밀계산법

복합지반에서 압밀계산은 샌드드레인과 큰 차이가 없지만 설계방법이 다르다. 침하에 대한 문제는 현장에서 시공결과에 따라 관측되고, 경험적으로도 어느 정도 정량적으로 파악되고 있는데 일반적으로 무처리 지반 침하량의 1/3~2/3로 감소되는 것으로 알려져 있다. 이 원인은 원지반의 개량효과와 복합지반으로서의 특성에 의한 것으로 본다.

복합지반의 침하량은 점성토에 작용하는 연직응력에 의하여 결정되면, (식 2.1.10)을 이용하여 계산할 수도 있다. 압밀도를 구하는 경우는 모래다짐말뚝이 연직배수재 말뚝으로서 작용한다고 생각하여 계산하는 것이 보통이다. 침하계산에는 근사계산법과 탄성론 또는 소성론을 이용한 FEM 해석법이 있다.

$$S_{of} = m_v \cdot \Delta\sigma \cdot H \qquad \text{(식 2.1.10)}$$

나. 쇄석다짐말뚝(GCP)

쇄석다짐말뚝은 사각형배열(square pattern)로 시공되기도 하지만 일반적으로 정삼각형 배열(triangular pattern)로 시공된다. 정삼각형 배열은 주어진 지역에서 가장 조밀한 치환을 할 수 있는 배열이다. 정삼각형 배열에 관한 쇄석다짐말뚝의 전형적인 배치도는 <그림 2.1.3>에 나타나 있다.

(1) 단위 셀 개념(unit cell concept)

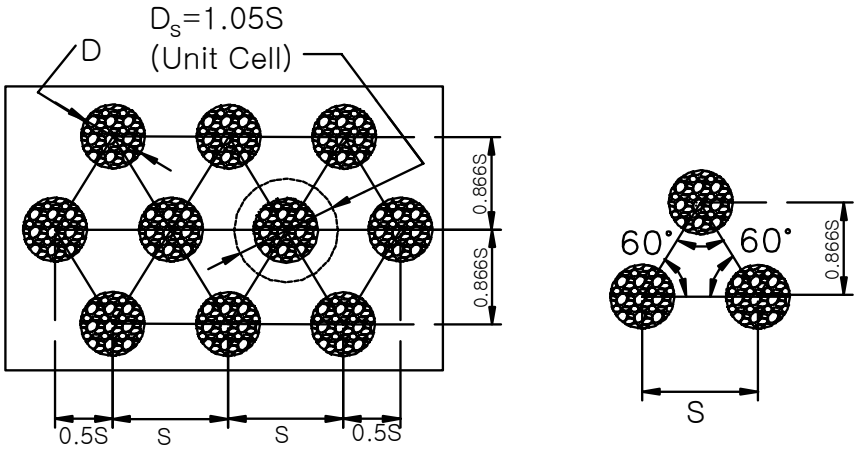
(가) 등가직경(Equivalent Diameter)

침하와 안정해석에서는 <그림 2.1.4>에 보이는 것과 같이 쇄석다짐말뚝과 주변지반을 복합적으로 고려하는 것이 편리하다. <그림 2.1.4>와 같이 쇄석다짐말뚝에 대한 영향면적이 정육각형(Regular hexagon) 형태를 이루지만 등가원으로 고려할 수 있다. 쇄석다짐말뚝의 등가원에 대한 유효직경(D_e)은 다음과 같다(Goughnour, 1983; Bergado et al., 1996).

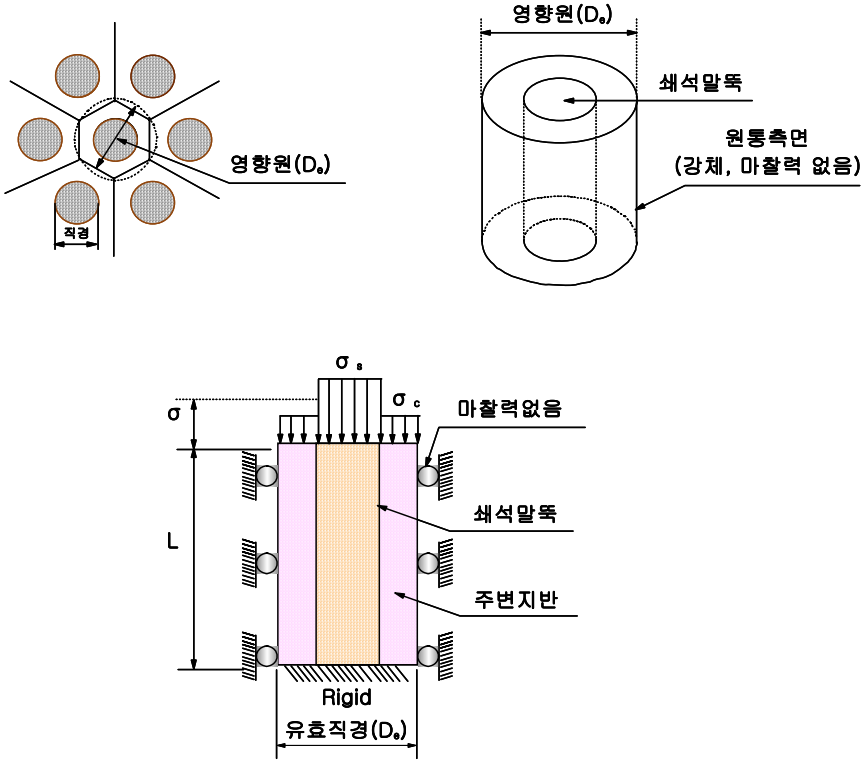
삼각형 배열 : $D_e = 1.05s$ (식 2.1.11)

사각형 배열 : $D_e = 1.13s$ (식 2.1.12)

여기서, s : 쇄석다짐말뚝 간격



<그림 2.1.3> 쇄석다짐말뚝의 등변삼각형 배치



<그림 2.1.4> 이상화된 단위 셀(Unit Cell)

(나) 면적치환율

쇄석다짐말뚝으로 치환된 흙의 체적은 지반개량 효과에 중요한 영향을 미친다. 치환율 a_s는 쇄석다짐말뚝의 영향면적에 대한 쇄석다짐말뚝으로 치환된 면적의 비로서 다음과 같이 정의한다(Bergado et al., 1996; Balaam & Booker, 1981)

$$a_s(\%) = \frac{A_s}{A} \times 100\% = C_1 (\frac{D}{s})^2 \times 100\% \qquad \text{(식 2.1.13)}$$

여기서, A_s : 다진 후에 쇄석다짐말뚝의 면적

A : 단위 셀 내의 전체면적

D : 다진 쇄석다짐말뚝의 직경

s : 쇄석다짐말뚝의 중심간격

C_1 : 쇄석다짐말뚝의 배치형태에 관한 상수

(사각형 배치 : $\pi/4$, 등방삼각형 배치 : $\pi/2\sqrt{3}$)

(2) 쇄석기둥의 파괴 메커니즘

쇄석기둥은 일반적으로 연약층을 통과하여 지지층에 도달되도록 설계·시공하며, 연약층 심도가 깊은 경우에 선단이 연약층 내에 있도록 하는 경우도 있다. 실제 시공에서는 선단이 지지층에 도달하는 선단지지형식이 대부분이다.

쇄석기둥의 파괴형상은 단일기둥(single column) 또는 기둥그룹(column group)에 따라 차이가 있고, 짧은기둥(short column) 또는 긴기둥(long column)에 따라 차이가 있다.

(가) 단일 쇄석기둥의 파괴 메커니즘

① 균질한 지반

단일 기둥의 파괴형상은 <그림 2.1.5>와 같이 팽창파괴, 전단파괴, 관입파괴의 세 가지 형상으로 구분할 수 있다.

ⓐ 말뚝길이가 말뚝직경의 2~3배 이상 되는 길이가 긴 쇄석기둥의 경우는 팽창파괴가 일어난다.

ⓑ 쇄석기둥의 선단이 단단한 지지층에 지지된 길이가 짧은 기둥은 지표면 부근에서 전단파괴가 일어난다.

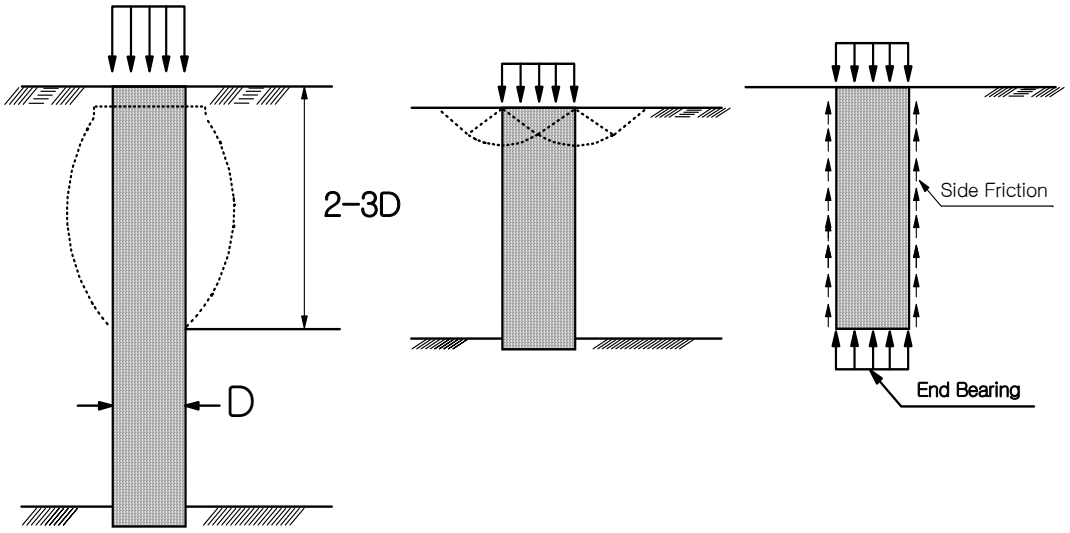
ⓒ 쇄석기둥의 선단이 연약층 내에 있고 짧은 경우는 관입파괴가 일어난다.

② 비균질 지반

지층이 비균질적이고 상당히 연약한 지층이 존재할 경우의 파괴형태는 <그림 2.1.6>과 같다.

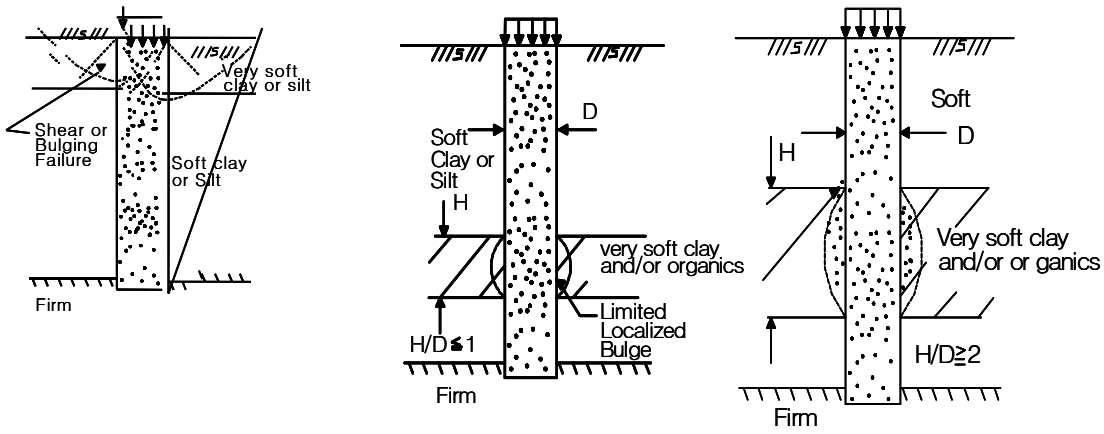
ⓐ 상부층이 하부층에 비해 상당히 연약한 경우 지지력과 침하에 상당한 영향을 미친다.

ⓑ,ⓒ 연약층 중간에 이탄토 같은 매우 연약한 층이 존재할 경우 쇄석기둥 형성에 심각한 영향을 줄 수 있다.



(a) 긴말뚝(팽창파괴) (b)짧은말뚝(전단파괴) (c)짧은 마찰말뚝(펀칭파괴)

<그림 2.1.5> 균질한 연약층에서의 단일 쇄석다짐말뚝 파괴 메커니즘



(a) 지표면 근처가 연약할 경우 (b) 매우 연약한 층이 (c) 매우 연약한 층이

-벌징 또는 전단파괴 얇을 경우 두꺼울 경우

-모형실험을 통한 파괴거동 - 제한된 국부 벌징 파괴 - 국부 벌징 파괴

<그림 2.1.6> 비균질 연약지반에서 단일 쇄석말뚝의 파괴 메커니즘

대부분의 시공된 쇄석기둥은 직경에 대한 길이의 비가 4~6보다 크거나 같으므로, 일반적으로 쇄석기둥의 선단이 단단한 지지층에 있거나 연약한 흙에 떠있든 간에 팽창파괴(bulging failure)가 발생한다.

Hughes와 Withers(1974)에 의해 측정된 연약한 점토에 떠있는 단일 모형 쇄석기둥의 팽창파괴를 보여주고 있다. 팽창은 지표아래 직경의 2~3배 깊이에서 발생한다. 이 Small-scale 모형 시험은 직경 12.5~38mm 모래기둥에 길이 150mm를 사용하여 수행했다. 연약한 kaolin clay는 19.1kN/m^2의 전단강도를 갖는다. 변형에 대한 계측은 Lead marker를 갖은 Radiograph를 사용하여 측정된 변위로부터 복합 지반에서 결정하였다.

(3) 쇄석기둥 그룹의 파괴 메커니즘

쇄석기둥으로 개량된 지반에 성토하중이 재하되는 경우 성토하부의 지반은 성토 바깥쪽 측방으로 이동하게 되는데 이와 같은 현상을 퍼짐(spreading)이라 하고, 측방유동 또는 수평변위와 같은 개념이다. 이러한 퍼짐현상이 발생하면 침하량은 더욱 증가하게 된다. 여래 개의 쇄석기둥의 선단이 지지되어 있으면 상부에서 팽창 또는 전단파괴가 일어날 수 있고, 길이가 짧은 경우에는 쇄석기둥의 거동을 짧은 기둥과 긴 기둥으로 분리해 비교·검토해 보면 다음과 같다.

(가) 짧은 기둥의 거동

① 길이가 짧은 기초에서 기둥과 기둥 저면이 점토지반 아래로 관입한다.
② 기둥 저면의 관입은 기초의 중심 아래에서 반경에 따라 변한다.
③ 중앙의 기둥이 가장 적게 변하고, 기둥의 측방 변위는 중심에 위치한 기둥에서 멀어질수록 증가한다.
④ 파괴는 가장자리에서 시작하여 안쪽방향으로, 그리고 아랫방향으로 전이가 되어서 거의 변화가 일어나지 않는 기초 아래에서 원뿔형의 형태가 된다.

(나) 긴 기둥의 거동

짧은 기둥과는 달리 점토지반으로의 기초저면 관입이 없다. 그러나 팽창면적과 비교적

작은 원뿔형의 지역은 짧은 기둥과 비슷하게 일어난다. 긴 기둥의 측방변위가 좀 더 크며, 이것은 긴 기둥이 전단에 의한 것보다는 팽창에 의해 파괴가 더 가능하다는 것을 보여준다.

(4) 쇄석 기둥의 극한하중 해석

점성토 지반에서 쇄석기둥의 극한하중은 쇄석재료의 내부마찰각과 주변 점성토의 전단강도에 크게 의존한다. 쇄석기둥에 작용하는 응력항태는 지표면에 작용하는 하중에 의한 유효수직응력과 지반의 수평응력에 의한 유효방사응력으로 표현되는 삼축상태로 비교된다. 쇄석기둥의 거동에 영향을 주는 요소는 다음과 같다.

① 지반의 비배수 전단강도
② 지반의 방사항향 응력-변형특성
③ 초기 쇄석기둥의 직경
④ 쇄석기둥 재료의 응력-변형 특성과 내부마찰각
⑤ 하중이 작용할 때 발생되는 지반압밀은 무시

쇄석기둥의 극한하중을 구하는 방법은 여러 제안식이 있고 단일 쇄석기둥과 쇄석기둥 그룹으로 나누어 개략적으로 설명하면 아래와 같으며 이런 제안식으로부터 얻은 지지력은 차이가 있으므로 주요 구조물인 경우에는 현장 재하시험을 통해 설계지지력을 결정하는 것이 요구된다.

(가) 단일 쇄석기둥의 극한하중

쇄석기둥은 대부분 파괴형태는 팽창파괴이며, 쇄석기둥을 지지하는 수평구속압은 극한수동 저항으로 표현된다. 발표된 이론의 대부분은 연약한 흙에 의해 둘러진 독립된 단일 쇄석기둥의 극한하중을 예상하기 위한 것이었다. 초기 거동 해석에 대한 해법의 대부분은 쇄석기둥에 응력이 삼축상태로 존재하고 쇄석기둥과 주변 흙 모두가 파괴한다고 가정한다.

쇄석기둥을 지지하는 측방구속응력 σ_3는 일반적으로 주변 흙이 쇄석기둥이 흙에 대해

밖으로 부풀음과 같이 모형화 할 수 있는 극한 수동저항과 같이 사용한다. 쇄석기둥이 파괴상태에 가정되었기 때문에, 최대수직응력(σ_1)은 쇄석기둥의 수동토압계수(K_p)에 측방구속응력(σ_3)을 곱한 것과 같다고 할 수 있다. 고전적인 소성이론은 다음과 같이 설명할 수 있다.

$$\sigma_1/\sigma_3 = \frac{1+\sin\Phi_s}{1-\sin\Phi_s} \qquad \text{(식 2.1.14)}$$

여기서 $\varnothing_s$는 쇄석기둥의 내부마찰각이고, 응력비 σ_1/σ_3는 쇄석기둥에 대한 수동토압계수 K_p이다. 유한요소 해석에서 윗 식은 좋은 접근법이라는 것은 알 수 있다. Greenwood (1970)와 Wong(1975)은 주변 흙의 측방 저항은 긴 옹벽 뒤에 모형화된 흙에 수평적으로 전달하는 수평저항과 같다고 전개할 수 있는 임시적인 해석법을 가정하였다. 이와 같은 접근은 평면변형 하중으로 가정했고, 이로 인해 단일 기둥의 3차원 기하학은 사실적으로 고려할 수 없으나 최종형태에서 Wong의 설계접근은 쇄석기둥 그룹의 측정된 반응의 양호한 상호관계를 나타낸다. 쇄석기둥의 극한지지력에 대한 제안식은 Vesic 등의 공동확장이론, Brauns 등 각종 제안식 등이 있다.

다. DCM 공법

(1) 안정처리토 배합설계

① 비교설계의 단계에서는 기존의 시공사례에 의해 강도를 설정할 수 있다.
② 실내 배합시험 결과에서 현장 강도를 예측하는 경우에는 실내 배합강도와 현장강도의 상관관계에 관한 기존 데이터를 충분히 검토하여 선정할 필요가 있다.(寺師昌明 外, 1983)
③ 시공조건이 엄격한 경우 또는 과거에 사용한 실적이 있는 시공기계를 이용하는 경우는 현장시험을 실시하는 것이 바람직하다.

(2) 개량체의 허용응력

(가) 허용압축응력

허용압축응력 σ_{ca}는 일축압축강도를 기준으로 하고 다음 식에서 구한다.

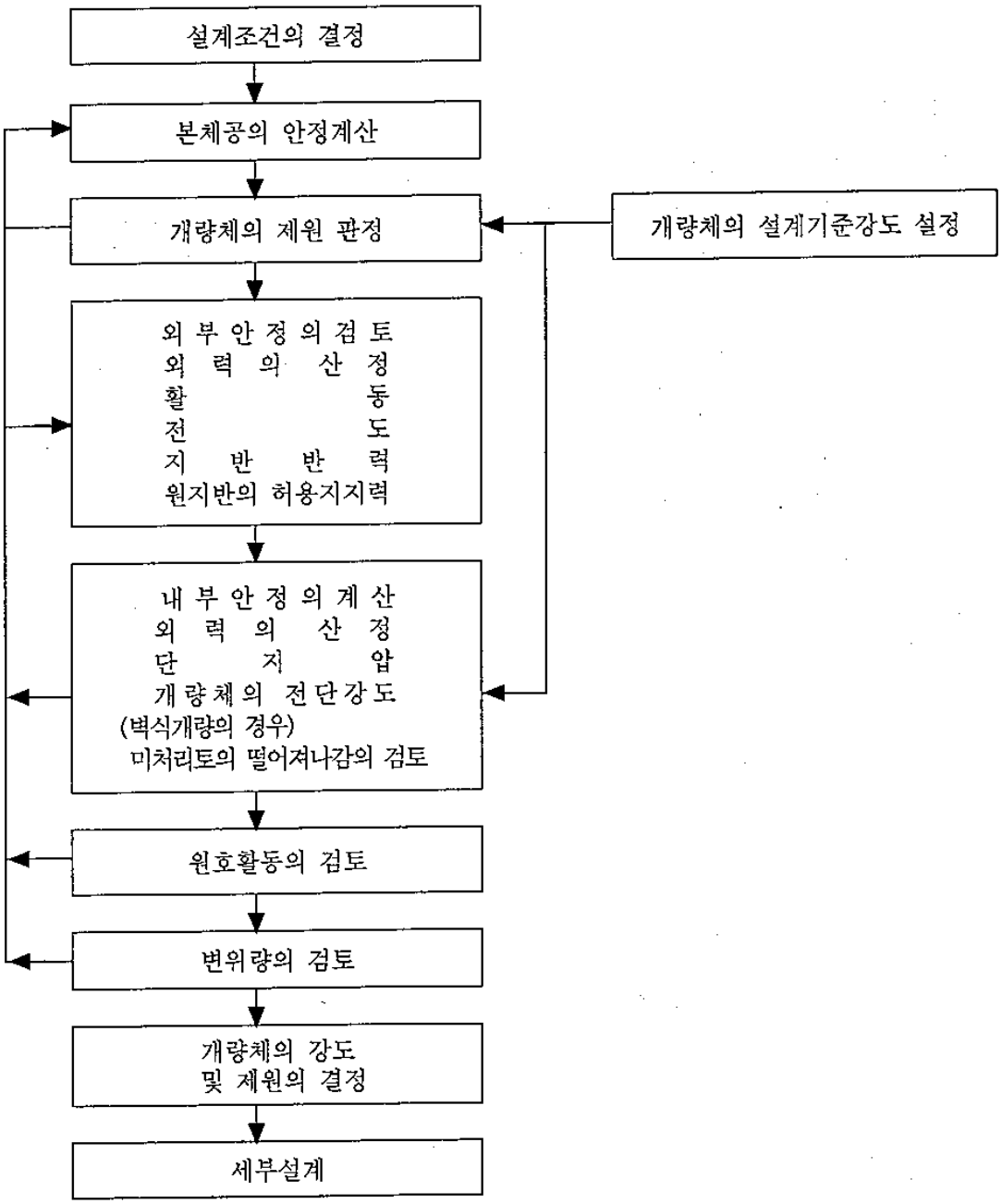
$$\sigma_{ca} = \frac{1}{F}(\alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot q_{uf}) \qquad \text{(식 2.1.15)}$$

여기서, σ_{ca} : 허용압축응력(kN/m^2) F : 안전율
α : 단면유효계수 β : 중첩부분의 신뢰도 계수
γ : 현장 강도계수
q_{uf} : 현장 처리토의 일축압축강도의 평균치(kN/m^2)

(나) 개량체의 내부응력

개량체의 내부응력은 허용전단응력 τ_a와 허용인장응력 σ_{ta}로 나타낸다.

$$\tau_a = \sigma_{ca} / 2$$
$$\sigma_{ta} = 0.15\,\sigma_{ca} \leq 200\text{kN/m}^2$$



<그림 2.1.7> DCM 공법 설계흐름도

(다) 안전율 F 및 각 계수

안전율 및 각 계수는 안정처리토를 균일한 강도의 지반으로서 고려할 수 있는 저감계수로서 다음 사항을 고려하여 설정한다.

① 재료의 안전율 F

허용압축응력 σ_{ca}는 일축압축강도를 기본으로 하기 때문에 크리이프, 반복재하의 영향을 고려함과 동시에 구조물의 중요성, 하중의 종류, 설계계산방법 및 재료의 신뢰성을 고려하여 적절한 값을 선정하여야 한다. 안전율 F는 상시에 3.0, 지진시에 2.0을 사용하는 경우가 많다.

② 단면유효계수 α

복수의 교반날개를 갖는 시공기계로 개량을 하는 경우의 개량체에서는 <그림 2.1.8>과 같이 개량체의 단면은 복수의 원주를 구성하게 된다. 또한 블록식 개량 및 벽식개량에서는 <그림 2.1.9>와 같이 말뚝 본체의 안정처리토를 중첩시켜서 개량체를 형성하므로 중첩부분은 다른 곳보다 접합부분이 좁게 된다. 단면유효계수 α는 미처리 부분을 보정하기 위한 계수이다. 이 계수를 구하는 방법은 대상으로 하는 외력의 방향 또는 종류(압축, 인장, 전단)에 따라 다르다.

③ 유효폭에 의한 단면유효계수 α_1

유효폭에 의한 α_1은 (식 2.1.16)과 (식 2.1.17)에 의해 구한 값 중 작은 값으로 한다.

㉮ 시공기계에 의해 결정하는 경우

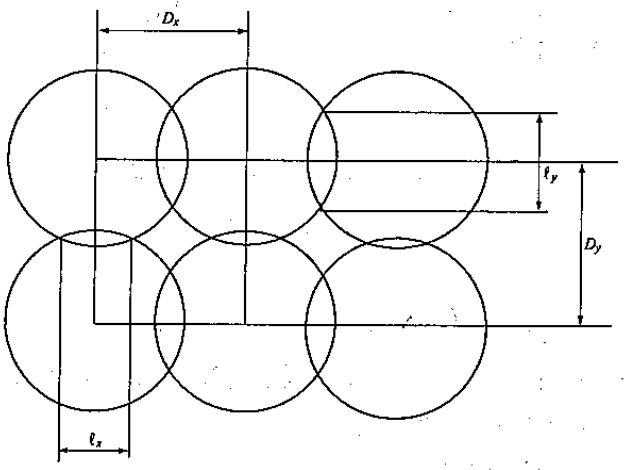
<그림 8.8.9>에서 시공기계의 축간폭을 D_x 및 D_y로 하고 원주가 겹쳐진 길이를 l_x 및 l_y로 하면 시공기계에 의해 결정되는 α_1은 (식 2.1.16)에 의해 구하며 이들 중 작은 값으로 한다.

$$\alpha_1 = \min\left(\frac{l_x}{D_x}, \frac{l_y}{D_y}\right) \qquad \text{(식 2.1.16)}$$

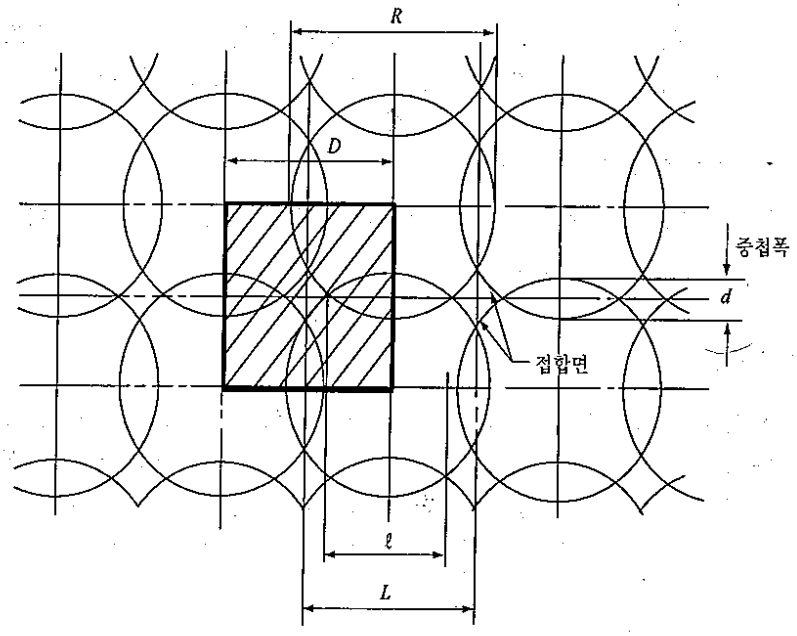
㉯ 중첩에 의해 결정하는 경우

<그림 2.1.9>에서 D는 축간폭, R은 교반날개의 직경, d는 중첩폭(25cm로 하는 경우가 많다.)으로 하면 중첩에 의해 결정하는 α_1은 (식 2.1.17)에 의해 구한다.

$$\alpha_1 = \frac{1}{D}\sqrt{2 \cdot R \cdot D - d^2} \qquad \text{(식 2.1.17)}$$



<그림 2.1.8> 처리기 고유의 유효폭



<그림 2.1.9> 접합면

④ 유효면적에 의한 단면유효계수 α_2

유효면적에 의한 단면유효계수 α_2는 (식 2.1.18)에 의해 구한다.

$$\alpha_2 = \frac{A_2}{A_1} \quad \text{(식 2.1.18)}$$

여기서, A_1 : <그림 2.1.9>의 굵은 선으로 표시한 면적

A_2 : <그림 2.1.9>의 사선으로 나타나는 면적

⑤ 중첩부 신뢰도 계수 β

중첩부 신뢰도계수는 중첩면의 강도와 개량체의 강도의 비이며, 기존의 말뚝본체와 결합시키기까지의 시간간격, 처리장비의 교반능력, 안정재의 토출법 등에 따라 다르지만, β=0.8~0.9 정도로 설정해도 좋다.

⑥ 현장강도계수 γ

현장에서 타설된 안정처리토의 강도를 샘플링에 의한 일축압축강도로 조사해보면 상당한 편차가 확인된다. 현장강도계수는 이 편차를 고려하는 계수이다.

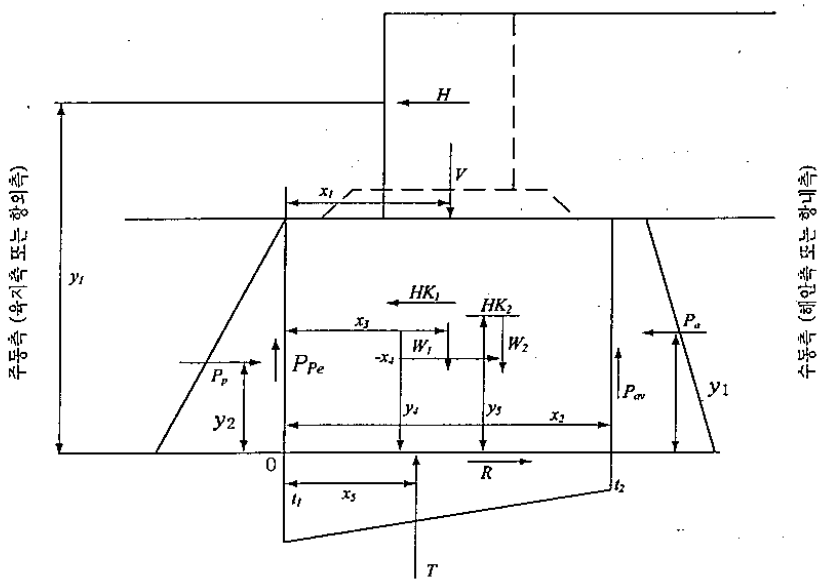
(라) 실내배합시험과 현장처리토의 강도

현장처리토의 일축압축강도의 평균 q_{uf}는 실내배합에 의한 공시체의 일축압축강도의 평균치 q_{ul}에서 (식 2.1.19)에 의해 연관시킨다.

$$q_{uf} = \lambda \cdot q_{ul} \quad \text{(식 2.1.19)}$$

보통포틀랜드시멘트 또는 고로슬래그시멘트를 안정재로 한 해상공사에서는 λ=1로 보아도 좋다. 그러나 실내배합시험에서 구한 강도와 현장에서 구한 강도의 관계는 일반적으로 안정재의 종류, 대상토의 종류, 시공조건, 양생환경, 비교하는 재령 등 많은 인자에 의해 좌우된다. 허용압축응력도와 실내강도의 비가 1/6에서 1/10 정도라고 하는 예가 많다.

(3) 개량체에 작용하는 외력



<그림 2.1.10> 개량체에 작용하는 외력

여기서, V : 본체공의 자중, 상재하중 등에 의해 개량체에 작용하는 연직응력(kN/m^2)

H : 본체공에 작용하는 토압 혹은 지진시의 관성에 의해서 발생하는 수평력(kN/m)

P_a : 개량체의 주동측(호안에서 육지측, 방파제에서는 항외측)에 작용하는 토압의 합력(kN/m)

P_{av} : 개량체의 주동측 측면에 작용하는 연직전단력(kN/m)

P_p : 개량체의 수동측(바다측 혹은 항내측)에 작용하는 토압합력(kN/m)

P_{pv} : 개량체의 수동측 측면에 작용하는 연직전단력(kN/m)

W_1 : 개량체의 유효중량(kN/m)

HK_1 : 개량체에 작용하는 지진시 관성력(kN/m)

R : 개량체 저면에 작용하는 전단저항력(kN/m)

T : 개량체 저면에 작용하는 지반반력(kN/m)

t_1, t_2 : 단부의 지반반력강도(kN/m)

다음의 외력은 벽식의 경우만 고려한다.

W_2 : 긴 벽간의 미개량토의 유효중량(kN/m)

K_2 : 긴 벽간의 미개량토의 지진시 관성력(kN/m)

또한 x, y는 각각의 외력의 작용점과 <그림 2.1.10>에 나타낸 개량체의 좌측하단(O로 표시)과의 거리를 나타낸다.

(4) 개량체의 외부안정

개량체의 외부안정을 위해서는 활동, 전도, 개량체 저면의 현지반 지지력에 대해서 충분히 안전해야 한다.

(가) 활동에 대한 안정

활동에 대한 안전율은 (식 2.1.20)으로 구한다. 활동에 대한 안전율은 상시에는 1.2 이상, 지진시에는 1.0 이상이다.

$$F = (P_p + R) / (H + HK_1 + HK_2 + P_a) \quad \text{(식 2.1.20)}$$

(나) 전도에 대한 안정

전도에 대한 안전율은 (식 2.1.21)로 구한다. 전도에 대한 안전율은 상시에는 1.2 이상, 지진시에는 1.1 이상이다.

$$F = (P_a y_2+Hy_1+HK_1 y_4+HK_2 y_5)/(P_p y_3+Vx_1+W_1 x_3+W_2 x_4) \quad \text{(식 2.1.21)}$$

(다) 지지력에 대한 안정

개량체 저면에 작용하는 R과 T로부터 현지반의 지지력을 검토한다. 벽식개량의 경우 지지력 검토는 단부의 t_1, t_2가 (식 2.1.22)로 구한 허용지지력 t_a보다 적게 되는 것을 확인하는 것이다. 하층의 기초지반이 사질토인 경우 지반의 허용지지력을 구하는 방법은 다음과 같다.(寺師昌明 外, 1987)

$t_a = q_{aq} + q_{ar1}$ ($1/\eta \geq 3$인 경우) (식 2.1.22)

$t_a = q_{aq} + q_{ar}$ ($1 \leq 1/\eta < 3$인 경우)

여기서, $q_{aq} = P_0 \cdot N_q/F + P_0$

$q_{ar1} = \gamma' \cdot L_1 \cdot N_r/2F$

$q_{ar2} = \gamma' \cdot B \cdot N_r/2F$

$q_{ar} = q_{ar1} + 0.5(q_{ar2} - q_{ar1}) \cdot (3 - 1/\eta)$

N_q, N_r : 지지력 계수

P_0 : 기초지반 모래층의 유효토피압(kN/m^2)

γ' : 기초지반 모래층의 유효단위체적중량(kN/m^3)

F : 안전율은 평상시 2.5 이상, 지진시 1.5 이상으로 한다.

L_1 : 긴 벽의 법선방향 길이(m)

L_2 : 짧은 벽의 법선방향 길이(m)

(5) 개량체의 내부안정 검토

외력에 의해 개량체에 생기는 응력은 안정터리토의 허용전단응력 및 허용인장응력을 초과해서는 안된다.

(6) 흙의 압축 검토

(가) 긴 벽 사이의 미개량토의 압출에 대한 안전율

긴 벽 사이의 미개량토의 압출에 대한 안전율은 (식 2.1.23)에 의해 구한다. 그러나 F_1이 최소로 되기까지 D_1을 변화시켜서 반복 계산한다.

$$F_1 = \frac{[2(L_s + D_1)c_u B + P_p']}{P_a' + k_h \gamma_2 B D_1 L_s + h_w \gamma_w D_1 L_s} \quad \text{(식 2.1.23)}$$

여기서, D_1 : 짧은 벽 하단에서 검토단면까지의 깊이(m)

c_u : 미개량토의 평균전단강도(짧은 벽 하단과 검토단면의 중간깊이)

γ_2 : 미개량토의 단위체적중량(공기중 중량)(kN/m^3)

k_h : 설계진도

h_w : 잔류수위

γ_w : 해수의 단위체적중량(kN/m^3)

$P_{a'}$, $P_{p'}$: 긴 벽 사이의 미개량토에 작용하는 주동 혹은 수동토압합력(kN)
(짧은 벽 하면에서 D_1까지의 깊이)

(나) 소요안전율

압출파괴에 대한 상기의 검토방법은 상당히 안전측의 값이 실험적으로 확인되고 있다. 따라서, 소요안전율은 평상시 1.2 이상, 지진시 1.0 이상으로 한다.

(7) 원호활동 검토

개량체는 원호활동에 대해 충분히 안전하여야 한다. 검토방법은 일반적 원호활동면의 안정해석에 준한다. 개량체의 강도는 크기 때문에 일반적으로 개량체를 통과하는 원호활동의 검토는 생략할 수 있다.

(8) 변위량 검토

개량체가 부상형인 경우 측방이동 혹은 압밀에 의한 변위가 예상되는데 이들의 변위를 검토하고 이용상 지장을 초래하지 않는 대책을 사전에 검토한다.

개량체의 활동에 대한 안전율 또는 원호활동의 안전율에 여유가 있으면 측방이동 등에 의한 즉시변위량은 일반적으로 적으므로 측방이동에 대한 검토의 필요성은 이들의 안전율에 의해서 판단할 수 있다. 또 개량체 바로 밑의 미개량토의 층두께가 일정하고 수평방향의 이동이 이용상 지장이 없는 범위라고 판단되는 경우에는 압밀침하량만을 검토하여도 좋다.

개량체가 착저형으로 되어도 지지층 아래에 점성토층이 존재할 경우에는 재하에 의한 압밀침하 등의 변형이 염려되므로 신중한 검토가 필요하다.

3. 기존 다짐말뚝공법에 대한 연구동향

가. SCP 공법

모래다짐말뚝(SCP ; Sand Compaction Pile) 공법은 느슨한 모래나 점성토 연약지반에서 모래를 다지면서 압입하여 비교적 지름이 큰 모래말뚝을 조성하는 지반개량공법으로서, 모래지반의 경우에는 밀도의 증대와 액상화 방지, 수평저항력 등을 증가시키고, 점토지반에서는 원지반과 다져진 모래말뚝으로 이루어진 복합지반을 형성함으로써 지반의 전단강도 및 지지력 증대, 측방변위 억제, 압밀침하 저감 등의 효과를 목적으로 한다.

SCP 공법은 1955년 일본의 岡隆一이 개발한 후, 1957년 충격식 말뚝 시공법 도입, 1959년 진동기 개발, 1960년 진동식 모래다짐말뚝의 타설기 개발에 따라 시공능률의 향상으로 육상에서의 연약지반 개량공법으로 확대 시공되었으며, 1967년 이후 해상에서 SCP 시공이 가능하게 되었다. 최근의 경우 모래수급의 어려움으로 경제성을 고려한 저치환 SCP의 확대적용 및 고로 수제슬래그, 굴패각 등의 재료원 다양화를 꾀하고 있다.

국내에 SCP 공법의 시공이 적용된 것은 1984년 광양제철 부지조성공사에서 일본기술을 도입하여 SD(Sand Drain)와 SCP 공법을 병용한 지반개량공법이 처음이며, 그 효과가 인정되어 인천 LNG 인수기지 부지조성공사(1993), 부산항 7부두 확장공사(1993), 삼호공단 부지조성공사(1994), 마산항 철강중계기지 조성공사(1994~1996), 서해안 고속도로 연약지반 처리공사(1995~1996), 인천국제공항 부지조성공사(1996~1998), 인천남항 지반개량공사(2001) 현장에서 대규모로 시공되고 있다.



<그림 2.1.11> 해상 SCP 전용선 전경

일반적으로 사용되는 모래말뚝의 직경은 육상의 경우 70~100cm, 해상의 경우 160~200 cm 정도이며, 적용목적과 대상 구조물, 지반조건 등에 따라 타설범위와 타설간격 등을 변화시켜 모래말뚝을 조성한다.

SCP 공법의 핵심기술은 지반개량 목적에 부합되는 개량지반의 지지력과 전단강도를 결정하는 것으로서 모래다짐말뚝과 원지반의 응력분담비와 전체 지반에서 모래말뚝이 차지하는 비율인 치환율의 관계, 복합지반의 거동특성 등을 명확하게 알아야 한다.

현재 SCP 설계법에서 사용하는 응력분담비는 실험실과 시험시공, 현장계측결과 등을 통하여 경험적으로 결정되어진 값들을 사용하고 있다.

또한 치환율은 적용목적에 따라 모래말뚝의 타설간격으로 결정되어지며, 육상의 경우 10~30%, 해상의 경우 성토 등 상부 구조물이 비교적 경량인 경우를 제외하고는 대부분의 해양구조물에서는 70% 정도의 고치환율이 적용되어지고 있다.

그러나, 공법의 경제성, 모래수급의 어려움 등으로 인하여 모래말뚝을 수평배수층으로 한 압밀에 의한 점성토의 강도증가를 전제로 치환율 30% 정도의 저치환율 SCP 공법의 필요성이 대두되었으며, 근래에 들어 항만공사에서 주로 사용하던 고치환율 SCP 공법은 항만구조물에 따라 치환율 30~40% 정도인 저치환율 SCP 공법으로 대체되고 있는 경향이다. 이 경우에도 적절한 치환율을 결정하는데 있어서 현재의 기술수준은 아직 치환율에 대하여 신뢰성 있는 설계지침이 제시되지 못하고 있는 실정으로 대부분 경험에 의한 설계지침이 적용되고 있는 실정이다.

최근 이러한 SCP 복합지반의 거동을 해석하는데 있어서 Prooshasb et al.(1996)과 Alamgir et al.(1996)이 탄성적인 해석을 통한 모래말뚝 및 지반의 응력-침하에 관한 식을 제시한 바 있으며, 국내에서도 박용원 등(2000), 김재권(2003) 등이 치환율과 복합지반의 응력분담비, 침하저감효과, 모래다짐말뚝의 거동특성을 규명한 바 있다.

저치환율 SCP 공법을 적용하여 연약지반을 개량하고자 할 경우에는 모래말뚝 자체의 전단강도 외에 모래말뚝 사이 점성토의 강도증가를 고려하는 공법이기 때문에 해상 SCP의 품질확인 및 평가방법의 적정성에 대한 검토가 중요하다.

일반적으로 SCP 공법을 적용한 개량지반의 품질관리방법으로서, 표준관입시험 등에 의한 다짐도의 확인 외에 말뚝기초를 위한 지반개량에서는 찌바(千葉), 토미쯔(富津)의 사례와 같이 공내수평재하시험을 실시해서 개량지반의 품질을 확인하는 경우도 있다.

따라서, 향후에는 SCP 공법의 적용상 가장 핵심기술인 응력분담비와 치환율을 적절히 결정하기 위하여 모래말뚝과 지반의 상호작용 및 응력분담비와 변위의 관계를 분석하여

최적의 치환율을 결정하기 위하여 모래말뚝과 지반의 상호작용 및 응력분담비와 변위의 관계를 분석하여 최적의 치환율을 결정할 수 있는 합리적인 설계지침을 확립하고, 또한 모래수급의 어려움에 따른 다양한 재료원의 확보를 위하여 대체재의 개발이 필요하며, 시공성 확보를 위한 품질관리와 시공관리 및 실측에 의한 검증을 통해 보다 경제적이고 안정적인 SCP 공법을 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되어야 한다.

나. GCP 공법

조립토 다짐말뚝공법은 다양한 연약지반 처리공법 중 적정한 크기의 상부구조물 하중을 지지하기 위한 연약지반보강에 효율적이고 경제적인 공법으로 알려져 있다. 그러나 국내에서는 조립토를 이용한 연약지반 처리공법 중 모래다짐말뚝공법을 많이 활용하고 있지만, 모래자원의 고갈과 단가상승으로 인하여 적용이 제한되고 있어 대체공법이 필요한 실정이다.

쇄석다짐말뚝공법은 연약 점성토 지반 및 실트질 지반이나 사질토 지반에 모두 적용이 가능한 공법으로 말뚝과 같은 원주형 개량체를 지중에 형성하여 지지력의 증가, 침하량의 감소, 압밀도의 증가 그리고 연약하거나 느슨한 퇴적지반에서의 액상화 방지 등을 목적으로 사용되어질 수 있는 공법이다.

특히, 쇄석다짐말뚝공법은 기존의 모래다짐말뚝공법에 비하여 지지력 증대 또는 복합지반효과를 극대화 할 수 있는 경제적인 공법이다.

일반적으로 쇄석다짐말뚝의 직경은 주변 지반의 종류에 따라 결정된다. <표 2.1.6>은 주변지반의 비배수 전단강도에 따른 쇄석다짐말뚝의 직경을 평가하는데 사용되는 예비적인 지침이다.

쇄석다짐말뚝의 배치는 대체로 정방형과 등변삼각형을 사용하고 있으며, 정방향과 등변삼각형 배치인 경우, 말뚝간의 배치 간격은 2.1~2.4m, 1.8~2.7m의 범위를 사용하고 있다.

최근 국내에서도 대형 항만공사에 SCP 공법의 대안으로 GCP(Gravel Compaction Pile) 공법을 적용하고자 하는 사례가 증가하고 있으며, 2002년에는 수영 3호교 현장에 연약지반 강도증가를 위해서 CCP 공법을 시공하였다.

GCP 공법으로 보강된 복합지반의 거동 해석시 가장 중요한 사항은 치환율별 지지능력과 응력분담비를 결정하는 것이다. 최근에 이민희, 최용규(2002) 등이 대규모 현장재하실

험을 치환율별로 수행하여 쇄석다짐말뚝의 지지력의 우수성과 응력분담비 특성을 발표한 사례가 있다.

향후에 GCP 공법을 국내 현장에 적용하기 위해서는 국내 지반조건을 고려한 대규모 현장실험을 실시하여 지반 조건별로 가장 적합한 치환율을 결정하고, 치환율별 응력 분담비와 지지능력의 관계를 분석하여 경제적인 설계법을 개발하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

<표 2.1.6> 비배수 전단강도에 따른 쇄석다짐말뚝의 직경

비배수 전단강도 (tf/m^2)	표준 직경 (mm)	직경의 변화		
		개략적인 완성된 쇄석기둥 직경 (mm)	Probe 직경 (mm)	Jetting 압력 (tf/m^2)
< 0.974	1219.2~1295.4	1066.8 1066.8~1219.2 1143~1295.4	406.4~457.2 457.2~482.6 457.2~48/2.6	52.73~56.25 52.73~56.25 87.88~91.40
0.974~1.9528	1066.8~1219.2	990.6 1066.8~1143 1219.2	457.2~482.6 457.2~482.6 457.2~482.6	52.73~56.25 87.88~91.40 87.88~91.40
1.9528~2.9292	990.6~1143	914.4 990.6~1066.8 1066.8~990.6	457.2~482.6 457.2~482.6 457.2~482.6	52.73~56.25 87.88~91.40 87.88~91.40
2.9292~3.9056	914.4~990.6	762~914.4 838.2~914.4 914.4~990.6	406.4~457.2 457.2~482.6 457.2~482.6	52.73~56.25 87.88~91.40 87.88~91.40
3.9056~4.882	685.8~914.4	685.8~914.4	457.2~508	87.88~91.40

다. DCM 공법

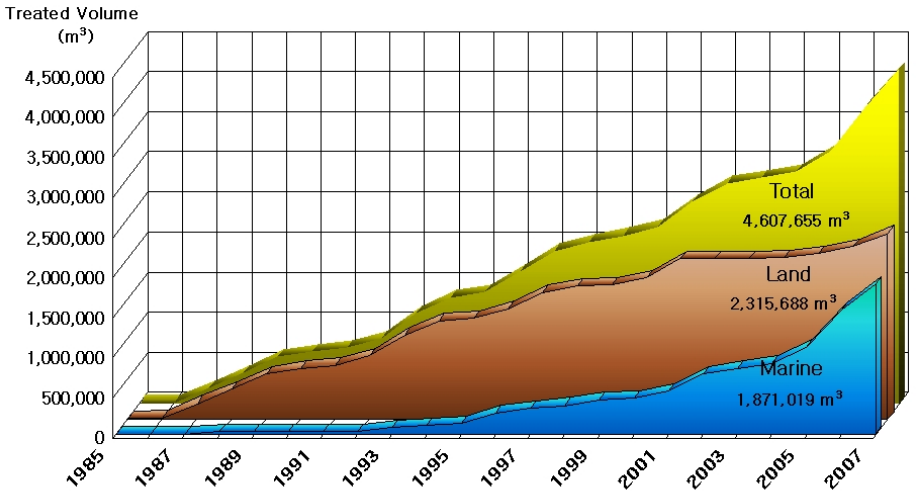
점성토에 석회 등을 혼합하여 흙을 고결시키는 방법은 일본의 흙다짐이나 삼화토(三和土)라는 경험적 방법으로 알려져 있다. 1955년경에는 도로의 노반재료 개량이나 철도 노상의 분니(墳泥) 방지를 위해 석회를 채용했지만, 표층혼합 처리공법으로서 일반적으로 보급된 것은 1970년대로 비교적 최근이다.

항만지역의 연약 점성토를 심층에 도달할 때까지 화학적 안정재를 공급하면서 교반날개 등으로 강제적으로 혼합하는 소위 심층혼합처리공법 개발연구는 일본 운수성 항만기술 연구소에서 생석회 및 소석회를 안정재로 쓰면서 시작되었다. 1967년부터 모형실험이 이루어져 1974년에 DLM 공법(Deep Lime Mixing Method)으로 실용화되었다.

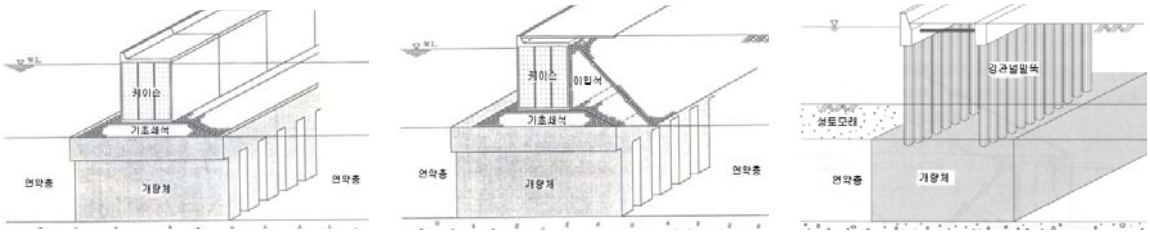
DCM 공법(Deep Cement Mixing Method)은 1973년부터 상기 기술을 토대로 안정재로 시멘트 슬러리(또는 시멘트 페이스트)를 사용하여, 실내 모형실험, 육상 실험공사, 해상 실험공사를 거쳐 1975년에 이르러 실용화되었다. 지금까지 육상 및 해상에서 수많은 공사실적을 가지고 있다.

1985년 일본에서 SEC(Special Earth Concrete) 공법으로 도입(박성재, 1986) 되었는데, 현시점에서 판단하면 특별한 목적의 혼화제를 첨가하는 경우를 제외하면 경제적이고 안정된 재료인 포틀랜트 또는 고로 시멘트를 주로 사용하고 있다. 1988년 경상남도 창원시 삼미특수강 신설부두 호안구조물 축조공사에 처음으로 적용된 해상 DCM은 육상용 파일 드라이버를 대선(Barge)에 탑재한 조합선의 2축 1연 방식으로 시공하였으며, 2004년 중반기에 부산의 OO 시설공사에서 최초로 4축 1연으로 48m까지 해상 조합선으로 시공하였다. <그림 2.1.12>는 국내 전문건설업체인 동아지질에서 시공한 DCM 공법의 시공실적을 나타낸 것으로, 1993년 이후 해상실적이 점차적으로 증가하며, 2002년 이후에는 해상에서의 처리실적이 급격히 증가함을 알 수 있다.

깊은 심도와 파랑의 영향이 커지는 외해에서 시공되는 구조물의 증가로 국내에서도 수차례에 걸쳐 DCM 전용선의 필요성이 제기되었으나 경제성 문제로 실행단계에 이르지 못했지만, 골재가격의 상승과 더불어 2004년에 4축 3연의 독자적인 한국형 DCM 전용선을 개발하여 2005년에 울산신항 남방파제 현장에 적용하였다. 그 후에 전용선 2호를 개발하여 시공에 적용하고 있다.



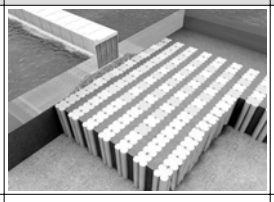
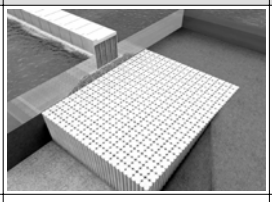
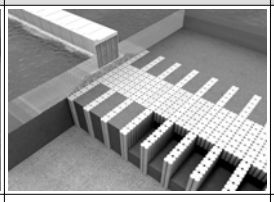
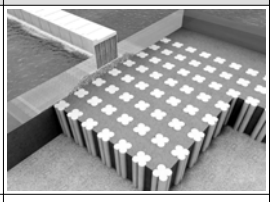
<그림 2.1.12> DCM 공법 시공실적



(a) 방파제 기초 (b) 안벽 기초 (c) 호안 기초

<그림 2.1.13> DCM 공법에 의한 항만구조물 기초의 종류

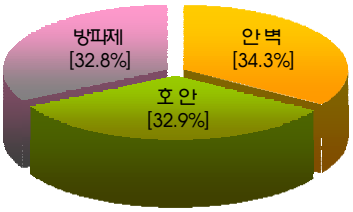
<표 2.1.7> DCM 개량형식의 비교

구 분	접원식	블록식	벽 식	말뚝식
개념도				
특 징	•장주를 법선방향으로 접하게 하여 일정간격으로 배치 •벽식보다 시공관리가 용이	•개량체를 일체로 접합하여 중력식 구조물과 유사하게 개량 •90% 이상 개량으로 공기 증가	•장주·단주를 법선의 직각방향으로 접하면서 번갈아 배치 •중첩부 시공관리가 중요	•개량체를 일정한 간격의 군말뚝 형상으로 시공 •시공성은 좋으나 수평저항에서 불리

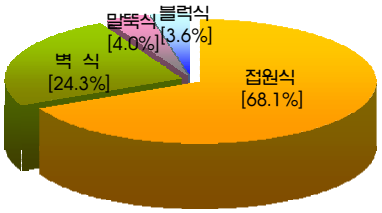
DCM은 <그림 2.1.13>과 같이 방파제, 안벽, 호안 등 항만구조물의 기초로 적용되며, 개량형식은 <표 2.1.7>과 같이 크게 접원식, 블록식, 벽식, 말뚝식 등으로 구분하고, 구조물 양식의 안정성, 경제성, 시공성 등을 검토하여 적절하게 선정해야 한다.

<그림 2.1.14>는 동아지질에서 시공한 국내 해상공사 중 적용된 상부구조물의 형식에 따른 DCM 기초처리량(m^3)을 비율로 나타낸 것으로 안벽기초로 시공한 사례가 가장 많으며, 호안과 방파제 기초에 적용된 처리량은 유사하다.

<그림 2.1.15>는 항만구조물 기초에 적용된 DCM 개량형식을 처리량(m^3)에 따른 비율로 나타낸 것으로 접원식으로 시공한 경우가 가장 많지만, 현재 설계 및 시공되고 있는 현장의 개량형식은 벽식(또는 벽식의 개량형인 격자식)의 적용사례가 증가하고 있는 추세이다.(정경완 등, 2006)



<그림 2.1.14> DCM 용도별 적용



<그림 2.1.15> 항만구조물 기초의 DCM 개량형식

벽식의 경우 각 개량벽의 결합이 일체화되어 저항하므로 안정성이 높은 반면, 접원식은 수평력이 크지 않은 경우에 적합한 형식으로 개량체간에는 확실한 접원이 필요하고, 개량체 사이의 원지반의 특성 분석을 통한 전체적인 안정성 검토가 필요하다.

제 2 절 순환골재의 활용현황 및 현장적용 사례

1. 순환골재의 재료적 적용성 평가

가. 순환골재의 정의 및 종류

순환골재란 건설폐기물을 파쇄, 선별, 입자 조정 등 물리적, 화학적 처리과정 등을 거쳐 법률이 정한 품질기준에 적합하게 하여 다시 건설, 토목공사에 사용하게 한 것으로 규정하고 있는 재활용 목적에 적합하게 처리하되 최대 직경 100mm 이하, 부피기준 이물질 함유량 1% 이하로 관리해야 한다.

<표 2.2.1> 순환골재의 종류

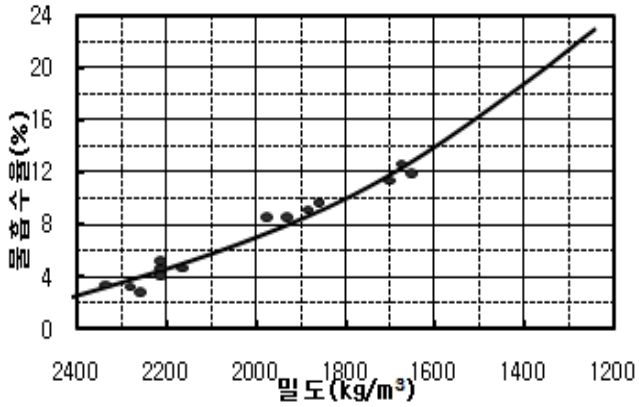
종 류	구 분	제조방법
순환 굵은골재	1종	•Jaw Crusher로 40mm 이하 크기로 파쇄된 것을 굵은골재 순환기에서 5~25mm 크기로 가공한 굵은 골재
	2종	•Jaw Crusher로 40mm 이상의 크기로 단순 파쇄된 굵은 골재(순환공정을 거치지 않은 것)
	3종	•Jaw Crusher로 40mm 이상의 크기로 거칠게 파쇄한 것
순환 잔골재	1종	•Impact Crusher에 의해 10mm 이하로 파쇄된 것을 잔골재 순환기에서 0.25~5mm 크기로 가공한 잔골재
	2종	•1차 및 2차 파쇄과정에서 만들어진 0.25~5mm 크기의 잔골재(순환기를 거치지 않은 거친 상태의 잔골재)

나. 재료특성

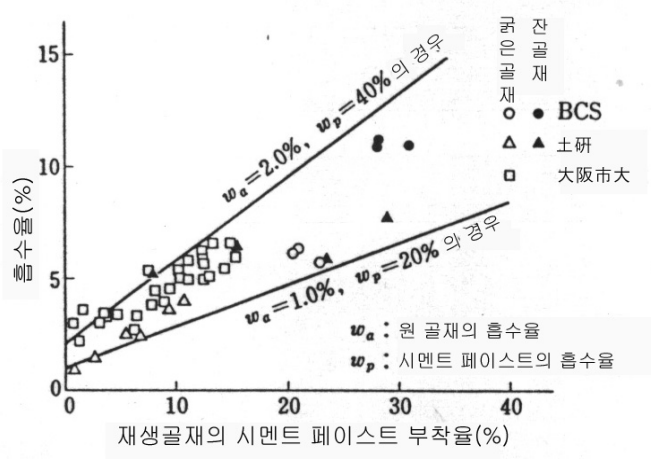
(1) 흡수율

보통골재와 비교하여 순환골재의 물리적 특성의 가장 큰 차이점은 높은 흡수성이며, 흡수율이 높은 골재를 사용할 경우 나타나는 가장 큰 문제점으로는 동결융해에 대한 내구성 저하이다. 순환굵은골재의 흡수율은 원콘크리트의 품질에 관계없이 최대 크기

4.8mm 재료인 경우 8.7%이고, 16~32mm 크기의 재료인 경우 3.7% 정도이다. 한편, 다른 문헌에 따르면 순환굵은골재의 흡수율은 3.6~8.0%이고, 순환잔골재의 흡수율은 8.3~12.1%인 것으로 보고하고 있다.



<그림 2.2.1> 순환콘크리트 골재의 밀도에 따른 흡수율



<그림 2.2.2> 순환골재의 시멘트 페이스트 부착율과 흡수율과의 관계

순환골재의 흡수율이 높은 것은 원골재 입자에 붙어있는 오래된 시멘트 페이스트의 높은 흡수율 때문인 것으로 분석된다. 순환골재의 흡수율의 증가는 밀도의 감소를 의미하므로 골재의 품질을 악화시키는 주요 요인이 된다. 시멘트 페이스트의 흡수율은 시멘트 페이스트의 부착율과 흡수율의 관계로부터 역산하여 보면 약 20~40% 정도임을 알 수 있다.

(2) 밀도

순환굵은골재를 사용한 순환콘크리트와 원콘크리트의 밀도는 <표 2.2.2>와 같다. 시멘트 페이스트의 밀도는 약 2,000kgf/m^3으로 나타나고 있는데, 이는 밀도가 2,380~2,401 kgf/m^3의 경화콘크리트와 비교하면 훨씬 낮은 수치이다.

Hasaba 등은 5~25mm 순환굵은골재의 밀도는 2,430kgf/m^3 정도이고, 원콘크리트의 품질과 무관하다는 것을 발견하였다. 5mm 이하의 순환굵은골재의 밀도는 2,310kgf/m^3이고, 원골재의 밀도는 2,700kgf/m^3이다.

<표 2.2.2> 골재종류에 따른 특성분석

골재의 종류		밀도(SSD) (kgf/m^3)	흡수율 (%)	B.S 파쇄치	B.S 조립율	황산염 안정도	시멘트 페이스트 함유율
15mm 이하 천연골재		2,700	1.14	-	-	-	-
25mm 이하 순환골재	W/C=0.42	2,430	6.76	23.0	23.0	133	38.4
	W/C=0.53	2,430	6.93	23.1	23.1	130	36.7
	W/C=0.74	2,430	7.02	24.6	24.6	113	35.5
순환잔골재<5mm		2,310	10.9	-	-	-	-

일본 연구결과에 의하면, 순환굵은골재 건조밀도는 2,120~2,430kgf/m^3이고, 순환잔골재의 건조밀도는 1,890~2,140kgf/m^3의 범위로 보고되고 있어 일반적인 골재에 비하면 매우 낮은 수준인데 이는 원골재 입자에 붙어있는 구 시멘트 페이스트의 낮은 밀도 때문인 것으로 분석하고 있다.

(3) 파쇄강도 및 마모감량

순환잔골재의 40ton 파쇄치는 25~35%로 천연 강자갈보다 크지만 인공경량골재나 연암보다는 약간 작은 값이다. 순환골재는 가압시 시멘트 페이스트 부분이 쉽게 부서지나 원콘크리트에 사용된 잔골재가 저항하기 때문에 부서지기 어려운 상태로 된다. 로스앤젤레스 마모손실율의 범위는 원콘크리트의 강도가 높은 경우 22.4%, 낮은 경우 41.4%를 넘지 않으면 콘크리트 제품에 사용될 수 있다고 되어 있으며, 도로공사용 골재의 경우에는 40%로 규정하고 있는 것으로 보아 일반적인 콘크리트에 적용이 가능함을 알 수 있다.

2. 국내 순환골재의 발생현황 및 활용분야

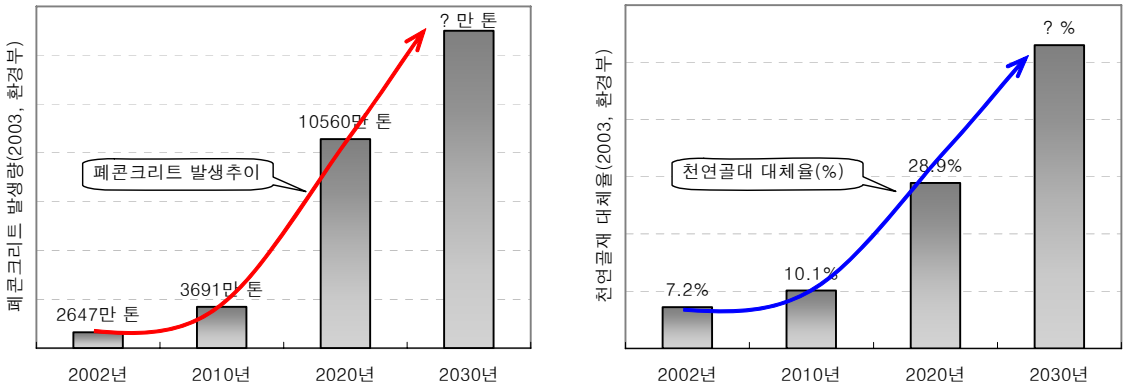
국내의 연간 건설폐기물 발생량은 2003년 기준으로 2,647만톤이며, 향후 2010년과 2020년에 각각 3,691만톤, 1억 560만톤으로 급증할 것으로 예상되고 있다.(전국폐기물 발생 및 처리현황, 2003, 환경부)

<표 2.2.3> 연간 폐기물 발생량(전국 폐기물 발생 및 처리현황, 2003, 환경부)

구 분	2002년	2010년	2020년
폐콘크리트 발생량	2,647만톤	3,691만톤	1억 560만톤
천연골재 대체율	7.2%	10.2%	28.9% 이상

<표 2.2.4> 천연골재 수요량(제2차 골재수급 기본계획, 2000, 건설교통부)

<table>
<tr><td rowspan="2">천연골재
수요량</td><td>모래</td><td>약 1억 7,620만톤</td><td rowspan="2">총 3억
6,720만톤</td></tr>
<tr><td>자갈</td><td>약 1억 9,100만톤</td></tr>
<tr><td rowspan="2">용도별 사용량
(모래+자갈)</td><td>레미콘용</td><td colspan="2">2억 6,658만톤</td></tr>
<tr><td>기타용도
(건축기초, 아스콘,
콘크리트, 도로포장용)</td><td colspan="2">1억 62만톤</td></tr>
</table>



(a) 폐콘크리트 발생량 (b) 천연골재 대체율

<그림 2.2.3> 폐콘크리트 및 순환골재 활용량 예측치

폐콘크리트의 발생추이는 급격한 비선형 증가세를 보이고 있는 반면, 1997년 한국지질자원연구원의 자료에 따르면 천연골재 부존량은 100억m^3이며 이중 채취가능한 골재량은 55억m^3으로 향후 20년 이내에 고갈될 것이라고 나타나 있다. 이는 매년 여의도 면적(850 m^2)의 103배에 달하는 산림과 자연환경이 파괴되고 있는 것으로 현재 대체자원개발이 시급함을 시사하고 있다.

이러한 측면에서 "순환골재의 재활용"이라는 개념은 천연자원 보존은 물론 기하급수적으로 늘어나는 건설폐기물의 처리라는 측면에서 그 가치는 매우 높다. 하지만 현재 순환골재의 활용범위는 성토, 복토용으로 다량 사용되고 있으며, 고부가가치 순환골재의 활용실적은 10%를 밑돌고 있는 실정이다.

이에 따라 대한건설순환자원협회에서는 고품질의 순환골재 생산을 위한 기술개발 및 시설투자는 물론 정부차원에서 제3의 골재자원으로 관리하고, 사용활성화를 위한 적극적인 시행을 권하고 있다. 또한 향후 324개의 건설폐기물 처리업체 중 200개 업체가 1일 600m^3의 모래를 270일 가동하여 생산할 경우 전체 모래 수요량의 30%까지 대체가 가능하며 이러한 천연골재를 순환골재로 활용할 경우 국가이익과 사회경제적 효과는 40배 이상의 이익창출이 가능한 것으로 분석하였다(대한건설순환자원협회).

〈표 2.2.5〉 순환골재 사용량(환경부·건설교통부 통계자료, 2003)

총발생량 (톤)	고부가가치 사용량				
	도로기층	콘크리트용	제품제조용	기 타	합 계
16,703,345	1,529,210	6,227	22,470	34,688	1,592,595 (총발생량의 9.5%)

주) 2003년 건설폐재 중점관리대상 사업자 579개사의 재활용 실적임, 579개사에서 발생한 건설폐기물 1,670만톤 중 도로기층용 이상 사용실적은 9.5%에 불과함

3. 순환골재 관련제도 현황

가. 개요

최근 건설폐기물의 발생량 급증과 함께 천연골재자원의 대체재로 폐기콘크리트를 활용한 순환골재의 사용에 국가·사회적인 관심이 집중되면서, 이에 대한 관리 및 적정처리에 대한 사회적 중요성이 대두되었으며, 향후 골재자원의 수급 불균형 문제에 대비한 장기적 자원수급대책 등을 위하여 자원의 효율적 이용과 절약, 폐기물의 발생규제 및 재활용 촉진을 통한 환경보존 등에 대한 관심의 증가에 따라 <표 3.23>에 나타낸 바와 같이 건설교통부 및 환경부 등 정부 중앙행정부서의 폐기물관련법령과 각 지방자치단체의 폐기물관리지침 등이 입법화되어 시행되고 있다.

이러한 배경에서 건설교통부에서는 순환골재 사용시 사용비율에 따른 건축물 용적률 완화규정을 적용하고 있고, 환경부에서는 순환골재의 사용을 의무화한「건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률」이 시행되고 있으며 건설교통부에서는「순환골재 품질기준」제안되어 순환골재의 재활용 촉진을 위한 정책으로 적극 추진 및 장려되고 있다.

나. 건설폐기물 관련 제도 현황

(1) 폐기물 관리법

「폐기물관리법」은 1986년에 종전의 오물청소법의 내용과 환경보전법상의 산업폐기물 관리부분을 종합하여 폐기물 전반을 다루는 하나의 독립된 폐기물 관리에 관한 법으로 제정되었으며, 주요 내용은 생활폐기물, 사업장폐기물, 지정폐기물 등에 대한 수집, 운반, 처리와 폐기물 처리시설의 주변 환경지역의 지원, 폐기물처리업자 등에 대한 지도, 감독, 부칙 및 벌칙 등의 내용으로 이루어져 있다.

이중 건설폐기물 관련항목에 대해 살펴보면 그동안 폐기물을 유해성 기준으로 분류하고 있던 것을 발생원기준으로 바꾸어 폐기물을 발생지에서 처리하게 하였으며, 일반폐기물로 분류하였던 건설폐기물을 사업장폐기물로 분류하고 기존의 특정폐기물을 지정폐기물로 명칭을 바꾸어 사업장폐기물의 범위에 포함시키고 있다. 여기에서 사업장폐기물이란 대기환경보전법, 수질환경보전법 또는 소음, 진동규제법의 규정에 의하여 배출시설을

설치, 운영하는 사업장, 기타 대통령령이 정하는 사업장에서 발생되는 폐기물로서 지정폐기물을 배출하는 사업장이나, 일반폐기물을 일평균 300kg 이상 배출하는 사업장 및 제 1호의 자로서 일반폐기물을 1회에 1톤 이상 배출하거나 일련의 공사작업 등 연속되는 행위에 의하여 1주일에 1톤 이상 배출하는 사업장 등이 이에 해당된다.

<표 2.2.6> 국내 건설폐기물 및 폐콘크리트 재활용 관련 제도 현황(계속)

법령 및 지침명	담 당	연 도	주요내용
건설폐재 배출 사업자의 재활용 지침	건 설 교통부	1997	•토사, 콘크리트, 아스팔트, 벽돌 및 건축폐목재를 배출하는 지정부산물 배출업자가 재활용을 촉진하기 위하여 준수하여야 할 사항을 규정 •건설폐기물을 재활용하고자 하는 경우에는 제7조의 규정에 적합하여야 하며, 용도별로 한국산업규격(KS) 및 설계시공지침을 준수하여 파쇄·재활용하여야 함
건설폐기물의 재활용 요령	건 설 교통부	1999	•건설폐기물의 처리 및 관리에 관한 제도현황을 체계적으로 관리하고, 건설폐기물의 재활용 용도별로 구체적인 품질 및 시공기준을 정립
자원의 절약과 재활용 촉진에 관한법률	환경부	1999	•지정부산물(토사, 폐기콘크리트, 폐아스콘 등)을 규정하고, 중점관리대상 건설업체에 대하여 지정부산물에 대한 재활용 계획 수립과 재활용 의무를 부여
건축법	건 설 교통부	1999	•건축폐자재의 사용비율에 따라 용적률 및 높이 등에서 건축기준의 완화를 규정 •시행령 및 제91조 제5항을 개정하고 건축폐자재의 활용기준을 규정하여, 건축시 사용량의 중량 비율에 따라 건축물의 높이와 용적물 및 높이를 최고 15%까지 완화

〈표 2.2.6〉 국내 건설폐기물 및 폐콘크리트 재활용 관련 제도 현황

법령 및 지침명	담 당	연 도	주요내용
폐기물 관리법	환경부	1999	•건설폐기물의 처리방법, 재활용 자재의 품질기준 등을 규정 •폐기콘크리트 등과 같은 건설폐기물을 성토용, 복토용으로 재활용하고자 할 경우 최대직경은 100 mm 이하, 이물질 함유량은 부피기준으로 1% 이하가 되도록 규정
공공기관의 폐기물 재활용 촉진을 위한 지침	국 무 총리실	1999	•폐기물 재활용을 촉진하기 위한 공공기관의 의무를 규정
건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률	환경부/ 건교부	2005	•건설폐기물 관련 단일 법률을 입법화하여 발주자 등에 대하여 순환골재의 사용 의무화 •제35조~제40조에 순환골재의 품질기준 및 사용촉진에 대한 규정 명시

이 외에도 사업장배출자의 의무(제24조 제9항, 시행규칙 제10조)에 따라 건설업자를 사업장 폐기물배출자로 규정하고 준수사항을 정하였다.

또한 건설폐기물을 배출예정일 7일 전까지 관할 시, 군, 구의 장에게 신고하여야 하며, 제25조(사업장폐기물의 처리)에서 사업장폐기물 배출자는 해당 사업장에서 발생하는 폐기물을 스스로 처리하거나 폐기물처리업자, 폐기물을 순환처리하는 자 또는 폐기물을 설치, 운영하는 자에게 위탁처리함으로써 배출자가 스스로 처리하는 책임을 지도록 하였다. 이 외에도 건설폐기물의 적정관리와 처리를 위하여 다른 폐기물의 처리기준과 별도로 분리하여 수집, 운반, 보관, 처리기준을 규정하였으며, 건설폐기물의 부적정 처리를 예방하기 위한 각종 제재를 포함하였다.

(2) 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률

「자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률」은 자원의 효율적 이용과 폐기물의 발생규제, 자원의 절약 및 재활용 촉진을 통하여 환경을 보존하는 것을 목적으로 제정된 법률로서, 건설폐기물을 배출하는 사업자는 환경부 장관과 주무장관이 대통령령으로 정하는 기본방침과 절차에 통합, 고시하는 지침을 준수하도록 하였다.

이 법률에 의하면 건설폐기물도 일반폐기물과 같이 폐기물관리 기본방향과 목표를 자원재순환형 사회구조의 구축에 두고, 자원의 감량화, 재활용화 및 안전처리의 3개 추진항목을 설정하였으며, 이중 감량화에서는 폐기물 배출억제를 발생원뿐만 아니라 생산, 유통, 소비 등 경제활동 과정에서부터 폐기물의 발생을 최소화하고 감량화를 유도함과 동시에 발생억제를 통한 비용부담원칙 등의 경제적 유인수단을 강화하고, 재활용은 분리수거체계를 정비하여 재활용 시설확충 및 재활용품 시장수요확대 등으로 재활용 촉진 기반을 조성하는 방향으로 하였다. 이에 대한 세부항목으로 주요 품목별 재활용 목표설정, 재활용 산업육성 및 시설확충, 재활용 제품 시장 수요확대 등에 대한 내용과 안전처리항목의 경우 위생적인 소각처리 및 매립 시설의 확충을 통한 시설 설치, 관리주체의 안전처리 책임의식 강화, 사회간접자본시설로서의 인식 정착 및 투자확충 등의 내용으로 구성되었다.

특히 법률 제2조에 의하면 지정부산물을 전부 또는 일부를 재활용하는 것이 자원의 효율적 이용을 위하여 필요한 것으로서 대통령령으로 정하는 부산물로 정의하고 있으며 시행령 제5조에 의하면 건설폐기물중 토사(토석), 폐기콘크리트 덩어리, 폐아스팔트 콘크리트를 지정부산물로 정하고 있어 대부분의 건설업체가 지정부산물 다량배출업자가 된다. 따라서 사업자는 자원재활용을 촉진하기 위하여 노력해야 하며, 국가 또는 지방자치단체가 이 법의 목적을 달성하기 위하여 행하는 조치에 협력해야 하고(법률 제6조), 동법 시행령 제11조 「지정부산물 배출사업자에 대한 기본방침」에 의하여 연간 시공금액이 250억 원 이상의 건설업자는 토사, 폐기콘크리트, 폐아스팔트 콘크리트 덩어리 등의 재활용이 중점적으로 추진될 수 있도록 하여야 한다.

또한 지정부산물배출업자는 발생되는 지정부산물의 재활용을 위하여 분리, 파쇄, 선별 및 순환할 수 있는 시설을 설치, 운영하는 등 지정부산물의 형성, 배출특성과 국내 기술수준을 고려하여 시행령에서 정하는 재활용 방안을 준수하여야 하고, 지정부산물의 재활용 계획을 작성하여 그 실적을 기록·유지하여야 한다.

한편 정부가 계획하고 있는 재활용 목표율을 보면 체적합계가 1,000m^3 이상 또는 총중량이 1,600톤 이상의 토사나 체적합계 500m^3 이상 또는 총중량이 1,000톤 이상의 폐기콘크리트 덩어리, 체적합계 200m^3 이상 또는 총중량이 400톤 이상의 아스팔트 콘크리트 덩어리 및 건설폐기물의 합계가 1,000m^3 이상 또는 중량합계가 1,600톤 이상인 경우 매년 건설폐기물의 재활용 계획을 수립하여 시행 사항을 기록하고 5년간 보존하도록 되어 있다.

따라서 건설업자는 1996년도부터는 토사의 45%, 폐기콘크리트 덩어리는 35%, 폐아스팔트 콘크리트 덩어리는 25% 이상을 각각 재활용하여야 하며 1998년 재활용하도록 하고 있으나, 이러한 재활용 목표율에도 불구하고 폐기콘크리트와 같은 지정부산물을 이용한 재활용골재가 발주자의 사용기피와 이에 대한 명확한 사용기준이 없어 사용실적이 전무한 형편이므로 1996년 6월 건설업체에게만 재활용지침 적용을 받도록 의무화하던 것을 방침을 바꾸어 앞으로는 발주자에게 적용하도록 하고 이를 위하여 이 법의 개정을 입법예고하여 시행할 전망이다.

(3) 건설폐재 배출사업자의 재활용 지침

「건설폐재 배출사업자의 재활용 지침」은 자원의 절약과 촉진에 관한 법률 제12조 및 동법 시행령 제11조 규정에 의하여 지정부산물 배출사업자가 토사, 폐기콘크리트 덩어리의 재활용을 촉진하기 위하여 준수해야 할 지침을 고시한 것으로 건설폐기물에 대한 용어정의와 함께 재활용 계획시 건설폐기물의 발생 예정량, 건설폐기물의 재활용 방법 및 용도, 재활용 촉진을 위한 설비개선 및 확보에 관한 사항 등이 보다 구체적으로 언급되어 있다.

이중 주요사항을 보면 제2조에서 토사는 재활용실적에서 제외시키고 건설공사시 발주자의 협조사항으로 발주자가 공사의 계획, 조사, 설계단계에서부터 재활용방법, 비용 등을 검토한 후 이를 설계도서에 반영하며, 공사 중 중점관리 대상업자가 이를 준수하도록 지도 및 감독할 수 있도록 하였으며, 제5조에는 중점관리건설업자의 건설폐기물을 공사현장으로부터 반출하는 건설공사를 대상으로 하여 매년 건설폐기물의 재활용 계획의 내용 및 실적의 기록과 보존에 대한 내용으로, 재활용 계획시 건설폐기물의 발생예상량, 건설공사에서 발생하는 건설폐기물의 재활용 목표율, 건설폐기물의 재활용방법 및 용도, 재활용 후 남은 건설 폐기물의 처리에 관한 사항, 재활용촉진을 위한 기술개발 및 설비개

선, 확보에 관한 사항 이외에 중점관리대상 건설업자의 준수사항에 대한 이행계획 등을 포함하고 있다.

한편 제6조에는 중점관리대상 건설업자가 건설폐기물의 재활용 용도확대 및 품질 향상을 위하여 해야 될 사항을 내용으로 구성하였고, 제9조에는 준수사항의 원활한 시행을 위한 발주자와의 협의사항에 대한 내용을 규정하고 있으며, 제11조에는 자원의 절약과 재활용촉진에 의한 법률 제34조(보고 및 검사 등)의 규정에 의한 재활용 실태 및 지도점검에 대한 세부사항을 규정하고 있으나 향후 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률 개정이 진행되고 있으므로 이 부분에서도 개정이 뒤따를 것으로 생각된다. 또한 이 법률에는 별표에 건설폐기물의 재활용 용도에 비고를 신설하여 성토용, 복구용에 대한 단순 재활용 범위를 명확하게 하였다.

(4) 건설폐기물 배출사업자의 관리지침

「건설폐기물배출사업자의 관리지침」은 건설폐기물의 발생현장으로부터 최종처리까지의 적정관리에 필요한 사항을 규정함으로써 건설폐기물의 불법처리를 방지하고 재활용을 활성화하기 위한 지침으로 주요내용을 살펴보면, 이 지침은 폐기물관리법 제2조 제3항에 해당하는 자에 적용되고, 지침의 기본방향은 발생 현장에서 건설폐기물의 성상별로 분리배출 및 보관, 건설폐기물류의 순환처리 적극 추진 및 기타 폐기물은 성상별로 재활용 또는 위탁처리(자가처리)로서 사업장폐기물배출자의 의무, 건설현장관리, 수집운반관리, 중간, 최종처리 또는 순환처리 및 재활용에 대한 지침으로 구성되어 있다.

또한 건설현장관리에서 폐기물의 성상별 분류, 현장에서 분리, 배출이 용이하고 현장처리를 위한 분리, 선별작업 및 파쇄시설, 소각시설의 설치와 운영을 권장하고 있으며, 수집, 운반관리에서는 자가처리와 위탁처리시의 수집, 운반에 대한 사항, 파쇄처리시의 파쇄물 규격 및 재활용시 갖추어야 할 서류 등을 규정하고 있다.

(5) 서울시 건축물 폐재류 업무처리지침

이 지침은 서울시가 관할하는 일선 행정기관의 건설폐기물처리에 대한 업무지침으로 건설폐기물에 대한 처리체계 및 부서별 업무 소관, 처리방법 및 처리업자의 수집, 배출, 운반기준 이외에 처리업의 허가와 지도감독사항 및 서울특별시 일반폐기물 관리조례 등

으로 구성되어 있다.

이중에서 폐기물관리 특히 건설폐기물의 배출과 수집, 운반, 처리에 관련된 업체의 처리방법(위탁처리 및 자가처리)과 처리체계 및 폐기물 발생에 관련된 각종 인허가와 다량 배출자의 관리자료 통보, 건축물 철거, 멸실 및 착공신고, 적법처리제도, 부적정 처리자 고발조치 등에 대한 내용이 수록되어 있으며, 다량 배출자는 폐기물관리법에 의한 다량 배출자 규정에 의하여 각종 건축, 토목공사 등에 따라 건축물 폐기물류를 발생시키는 경우, 공사행위를 한 자(시공업자)가 다량 배출자가 되며 건축주 등 공사발주자가 직접 시공하는 경우 공사발주자가 됨을 명시하고 있다. 이외에도 다량 배출자의 신고의무 및 의무불이행시에 대한 벌칙, 건설폐기물에 대한 처리체계, 부서별 업무 소관, 조치 및 행정사항 등이 수록되어 있다.

<표 2.2.7> 순환골재 사용시 용적률 완화 기준

건축폐자재의 사용량의 중량비율	기준완화 적용범위(%)
골조공사시 골재량에 대한 순환골재 15% 이상 사용	5
골조공사시 골재량에 대한 순환골재 20% 이상 사용	10
골조공사시 골재량에 대한 순환골재 25% 이상 사용	15

(6) 건설기술관리법

이 법규는 발주자 및 건설업체의 재활용 의무, 폐기물 처리비의 산정기준을 규정하기 위한 것으로, 시행규칙 제45조를 개정하여 발주청이 공사별로 평가한 시공평가 평점 합계에서 건설 폐자재의 물량과 재활용률이 일정 수준 이상일 때에는 1.5점을 가산하도록 조치하는 것을 주요내용으로 하고 있다.

다. 순환골재 관련 제도 현황

(1) 건축법

이 법규는 건축폐자재의 사용비율에 따라 용적률 및 높이 등에서 건축기준의 완화를 규정하는 것을 기본내용으로 하여, 시행령 제91조 제5항을 개정하고, 건축폐자재의 활용기준을 규정하여 건축물의 골조공사에 건축폐자재를 사용하여 건물을 지을 경우, <표 3.24>에 나타낸 바와 같이 사용량의 중량 비율에 따라 건축물의 용적률 및 높이를 최고 15%까지 완화하도록 하고 있다.

(2) 건설폐기물 재활용 촉진에 관한 법률

2003년 12월 국회 본회의를 통과하여 2005년 1월 1일부터 시행되고 있는 이 법률은 건설폐기물 관련 단일 법률을 입법화함으로써 건설폐기물을 친환경적으로 적정처리하고 양질의 순환골재생산을 유도하기 위한 것이며, 발주자를 대상으로 순환골재 생산 유도 및 사용 의무화 등 필요한 근거 규정을 마련함으로써 골재의 공급을 안정적으로 확보하기 위한 법률로 이중 순환골재에 관한 주요내용을 살펴보면 다음과 같다.

① 순환골재의 품질기준 등(법 제35조)

건설교통부 장관은 환경부 장관과 협의하여 건설폐기물의 재활용을 촉진하기 위하여 순환골재의 용도별 품질기준 및 설계·시공지침 등에 관하여 필요한 기준을 정하여야 한다.

② 순환골재의 품질인증 등(법 제36조)

건설교통부 장관은 순환골재의 품질을 확인하기 위하여 인증(이하 “품질인증”이라 한다)을 부여할 수 있다.

③ 순환골재의 사용 의무(법 제38조)

발주자는 순환골재의무사용건설공사를 발주함에 있어 건설업자에게 제35조의 규정에 의거한 품질기준에 적합한 순환골재를 사용하도록 하여야 한다. 다만, 순환골재의 사용으

로 인하여 건설공사의 품질확보가 곤란한 경우 또는 도서지역 등 지역의 특성으로 인하여 순환골재의 수급이 곤란하다고 판단되는 경우에는 그러하지 아니하다.

발주자가 제1항 단서의 규정을 적용함에 있어서는 설계 등 용역업자, 건설업자 및 감리자의 검토의견서를 제출받아「건설기술관리법」제5조의 규정에 의한 건설기술심의위원회의 심의를 받거나 동법 제5조 2의 규정에 의한 설계자문위원회의 자문을 받아야 한다.

제1항의 규정에 의한 순환골재의 사용량 등 필요한 사항은 환경부장관과 건설교통부장관이 정하여 고시하는 바에 따른다.

④ 순환골재의 사용에 관한 권고 및 시정조치(법 제39조)

환경부장관 또는 건설교통부장관은 순환골재의무사용건설공사의 발주자가 제38조의 규정에 의한 순환골재를 적극적으로 사용하지 아니하였다고 판단되는 경우에는 권고 및 시정조치를 하여 순환골재의 사용이 촉진될 수 있도록 하여야 한다.

⑤ 재활용실적 관리 및 제출(법 제40조)

배출자는 당해 건설공사가 완료된 경우 건설폐기물의 처리 및 재활용실적을 관리하여야 하며, 그 실적을 당해 건설공사의 인·허가 또는 승인권자에게 제출하여야 한다.

4. 국내외 순환골재의 현장적용사례

경제성장과 더불어 국민생활의 향상과 함께 지속적인 산업폐기물의 증가는 21세기의 가장 큰 환경문제로 대두되고 있는 가운데, 폐기물처리시설 및 최종처분장 등의 확보가 사회적 문제로 부각되면서 폐기물의 재자원화에 대한 관심이 점차 높아지고 있다.

특히 산업폐기물 가운데 건설폐기물이 가장 많이 발생하고 있는데, 최근 재건축 및 재개발 사업 등에 의해 점차 그 발생량이 증가하고 있는 추세이다.

이러한 건설폐기물 중에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 폐콘크리트 등의 재이용은 단순히 골재부족에 따른 재활용에서 벗어나 자원순환 차원에서의 재자원화라는 점에서 점차 관심이 높아지면서 사회적인 문제로 대두되고 있는 실정이다.

일본에서는 폐기물의 최종처리장의 부족과 폐기물의 불법투기에 의한 폐기물 문제가 사회적 문제로 인식되면서 해체콘크리트를 콘크리트용 순환골재로 이용하고자 하는 움직임이 시작되었다(한국콘크리트학회, 2004).

이러한 재생골재로의 이용에 관한 검토는 1974년 (사)건축업협회가 연구를 시작하여, 1981년 건설성 종합기술 프로젝트 “건설산업으로의 폐기물 이용기술의 개발”을 수행하여 순환골재에 관한 기술개발을 축적하고, 1991년 4월에는 “재생자원 이용촉진에 관한 법률(일명 : 리사이클법)”을 제정하게 되었으며, 1999년에는 (재)일본건축센터의 “건축구조용 순환골재 인정기준”, 2000년에는 JIS의 전단계인 표준정보 TR A 0006 “순환골재를 이용한 콘크리트”가 공표되어지고, 2002년 5월에는 “건설공사에 관련되는 자재의 재자원화에 관한 법률(일명 : 건설 리사이클법)”이 본격적으로 시행되게 되었다.

이러한 법 제정에 힘입어 2000년도 조사에서는 건설분야에서의 폐기물인 콘크리트 해체재의 96%를 재생재로 하여 주로 노반에 이용하게 되었다. 이것은 단순히 법 제정에 따른 결과라기보다는 장기적으로 자원순환으로의 유효한 이용을 도모하기 위한 것으로 장기적 폐기물의 재활용에 관한 적극적인 검토의 필요성을 인식한 결과일 것이다.

이러한 폐기물 중에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 해체 콘크리트를 재이용한 순환골재 콘크리트에 관한 연구는 지금까지 연구소 및 대학 그리고 기업에서 적극적인 재활용에 관심을 가지고 연구를 진행해 왔으며, 상당히 많은 기초 데이터가 구축되어 있다.

가. 도시공단의 재생콘크리트 적용 사례

일본 도시기반 정비공단(도시공단)에서는 1955년대에 건설된 임대주택(약 16만호)을 대상으로 단지의 재개발사업을 1980년도부터 착수하여 구조물 해체에 의해 발생한 많은 양의 건설부산물의 유효이용에 관심을 가지게 되었다. 그중 콘크리트 폐재에 대한 리사이클 연구가 1991년부터 진행되고 있는데, 부순콘크리트를 쇄석골재로 이용한 프리팩트 콘크리트공법의 실제 구조물에 대한 시험적용이 이루어져 시공성에 관한 문제를 해결함과 동시에 실용의 단계에 접어들고 있다.

일본 도시공단에서 발생한 해체콘크리트의 재이용 용도를 살펴보면 주로 재생쇄석(순환골재)으로 이용하고 있고, 골재 입경에 따라 그 사용부위와 각각 용도를 달리하고 있다. 그러나 이러한 재생골재의 사용에 있어서 가장 문제가 되는 품질에 대해서는 현지의 재생플랜트에서 각종 골재시험을 실시하여 천연쇄석 골재에 비해 비중과 흡수율이 떨어지지만 마모율, 입도분포는 큰 차이가 없어 적용상 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 재생쇄석의 제조와 동시에 발생하는 미립분은 비교적 발생량은 적었지만 유효활용을 위해 가설구조물·건축기초 버림자갈, 매립재 등으로 주로 사용되었고, 가설도로·중력식 옹벽·철근콘크리트 옹벽 등에 시험적으로 적용함으로써 전량을 재이용하였다.

<표 2.2.8> 일본 도시공단의 해체콘크리트 발생량과 리사이클량

구분	1992년	1993년	1994년	1995년	1996년	1997년	1998년	1999년	2000년
발생량 (m^3)	96,100	185,000	134,000	72,100	155,900	121,700	165,000	150,200	119,000
리사이클량 (m^3)	-	184,000	134,000	71,700	154,700	121,000	164,600	150,200	118,500
리사이클률 (%)	-	99.5	100.0	99.4	99.2	99.4	99.8	100.0	99.6
재생사용량 (m^3)	61,000	118,000	122,000	81,400	139,500	84,700	95,600	104,000	129,200
재생사용률 (%)	-	63.8	90.8	102.9	89.5	69.6	57.9	69.2	108.4

나. 간이 콘크리트 포장 적용 사례

간이 콘크리트 포장은 1993년도와 1996년도에 실규모의 시공실험을 수행하였다. 1993년에는 재생쇄석을 기초 다짐한 후에 모르타르를 주입한 공법을 적용하였고, 1996년도에는 전술한 방법과 더불어 콘크리트 플랜트 제조방식을 이용하여 동경건설폐재처리 협동조합의 제조법에 의해 제조한 재생콘크리트(재생굵은골재, 잔골재 사용)와 현장비빔에 의한 재생콘크리트(천연잔골재 사용)를 적용하였다.

비록 시공사례가 2개소에 그치지만, 시공 후 1년이 경과한 다음 코어를 채취하여 강도를 확인한 결과 표준양생 재령 28일 강도보다 높은 강도발현을 나타내었고, 시공 및 경화 후의 문제점은 발생하지 않았다.

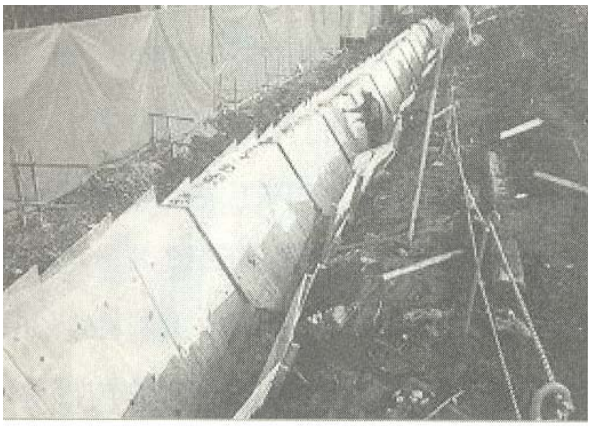
다. 중력식 옹벽에의 적용

중력식 옹벽은 비용을 절약하기 위해 재생콘크리트를 5개소에 프리팩트공법에 의해 실제로 타설하였다. 규모는 도시공단 내의 택지조성에 따른 높이의 단차를 처리할 목적으로 시공한 것으로 높이는 1~1.5m 정도로 타설하였다. 1994년도에 도시공단기술센터에 2곳, 1995년도에 A단지, B단지, 1996년도에 C단지에 건설하였다.

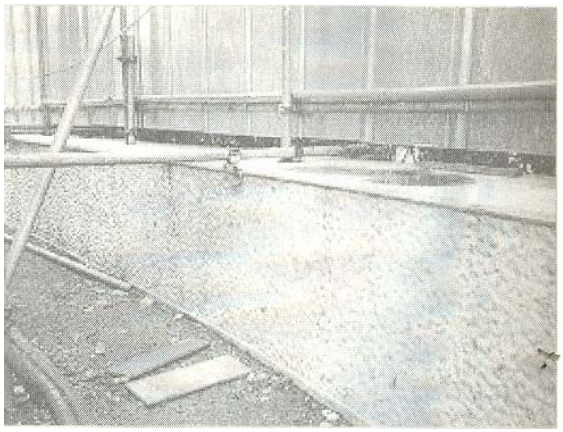
타설된 옹벽은 전체적으로 약간의 미세 크랙과 표면불량 현상이 있었지만, 강도에 있어서 160MPa을 만족시키는 결과를 얻었다. 시공 후 2년에서 4년이 경과된 시점에서 코어를 채취하여 강도를 확인하였는데 대부분 초기의 강도와 비교하여 강도가 증진된 것을 알 수 있었다. 그리고 사용재료와 시공방법의 차이에 따른 영향은 두드러지게 나타나지는 않았다. 이것은 시공시 충실한 모르타르 주입과 세심한 배려에 의한 시공을 하면 적용상 큰 문제는 없다는 것을 나타내고 있다.

<표 2.2.9> 재생콘크리트를 이용한 중력식 옹벽의 타설현황(일본 도시공단 내)

구 분	시공연장길이(m)	높이(m)	완 공
A단지	28	0.9	1995
B단지	70	0.8	1995
C단지	60	1.0	1996



(a) A단지



(b) B단지

<그림 2.2.4> 재생콘크리트를 이용한 중력식 옹벽

라. 고품질 순환골재 콘크리트 적용 사례

고품질의 순환골재를 얻기 위해 새롭게 개발된 방법 중의 하나가 가열분리방법으로 파쇄콘크리트를 약 300℃로 가열함으로써 원골재에 함유되어 있는 시멘트 수화물을 탈수시켜 취약화한 다음 튜브 밑을 통해 약간의 충격을 주어 원골재와 미분발을 분리시켜서 얻는 방법이다.

<표 2.2.10> 고품질 순환골재를 이용한 철근콘크리트 구조물의 공사개요

공사명	공사기간	건축면적	층수	구조
청수건설 기술연구소 음향실험동 증개축공사	2000년 11월 ~ 2001년 9월	363.41m^2	지상 3층	RC조, 일부 S조

본 공사에 사용한 순환골재는 두 곳의 시설로부터 얻어진 해체콘크리트를 가열분리법에 의해 제조하였고, 해체콘크리트로부터의 평균 회수율은 질량비로 A시설이 굵은골재 27%, 잔골재 34%, B시설이 굵은골재 37%, 잔골재 24%였다. 또한 공정 부산물인 미분말을 시멘트 원료로 활용하였다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 기존 다짐말뚝의 한계성 분석

1. 기능성에 대한 한계성 분석

가. 파괴 메커니즘

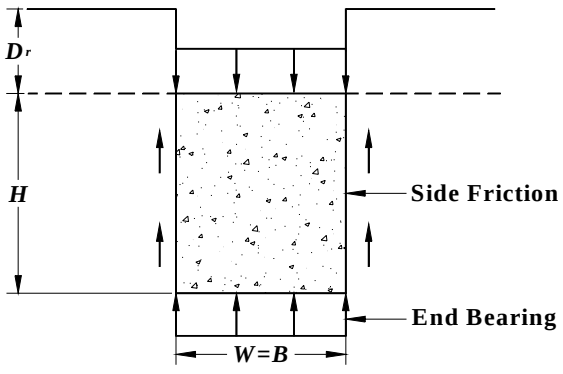
단일쇄석말뚝의 파괴형태는 현장시험과 실내모형실험을 통해 관입파괴와 팽창파괴, 국부전단파괴의 유형으로 발생되는 것으로 알려져 있다.

(1) 관입파괴

쇄석말뚝의 길이가 지름의 2~3배 미만인 짧은 쇄석말뚝의 파괴형태는 대부분 관입파괴에 속하며, 관입파괴 형태는 말뚝의 연직응력과 말뚝 선단부의 지지력 및 말뚝 주면 마찰저항력의 합력으로 이루어진다.

<그림 3.1.1>은 관입파괴의 유형으로 Skempton(1951)은 주어진 조립물질의 깊이 H에 대한 극한지지력 q_{ult}를 (식 3.1.1)과 같이 제안하였다.

$$q_{ult} = 5c_u[1+0.2(H/B)] + 2(H/B)c_u \leq 9c_u + 2(H/B)c_u \quad \text{(식 3.1.1)}$$



<그림 3.1.1> 쇄석말뚝의 관입파괴 형태

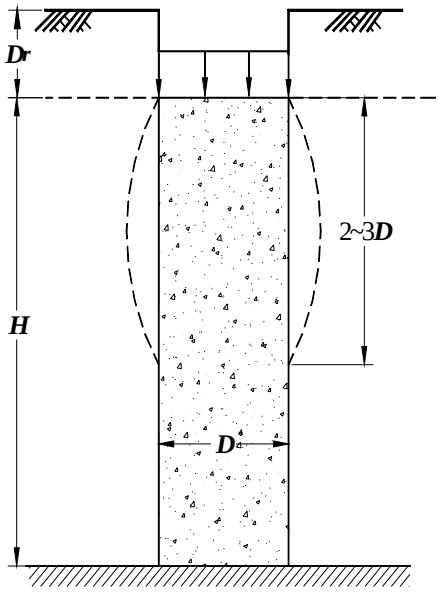
(2) 팽창파괴

쇄석말뚝의 길이가 지름의 2~3배인 긴 쇄석말뚝의 파괴형태는 일반적으로 팽창파괴에 속하며 팽창파괴시의 단일말뚝의 극한지지력은 말뚝주변의 횡방향 구속압력 즉, 주변토사의 수동저항에 의존한다.

횡방향 구속압의 크기는 최소주응력과 최대주응력의 관계로부터 (식 3.1.2)와 같이 나타낼 수 있다(Hughes et al., 1975).

$$q_{u(\max)} = k_p(\gamma_c D_f + 2c_u) \qquad \text{(식 3.1.2)}$$

여기서, q_u는 최대주응력, k_p는 수동토압계수, D_f는 기초의 깊이, γ_c는 주변토사의 단위중량, c_u는 주변 토사의 점착력이다.



<그림 3.1.2> 쇄석말뚝의 팽창파괴 형태

Vesic(1972)은 "팽창이 발생되는 구역을 XY 평면상의 원형으로 가정하고 팽창을 일으키는 말뚝내의 압력이 반경방향으로 균등하게 분포되며 축방향으로 대칭이다"와 같이 가정하고, 하중이 균등하게 재하될 때 소성파괴를 일으키는 한계압을 극한공동압이라 하여 (식 3.1.3)과 같이 제안하였다.

$$P_{ult} = F_q \cdot q + F_c \cdot c \qquad \text{(식 3.1.3)}$$

여기서, P_{ult}는 극한공동압, c는 지반의 점착력, q는 임의의 지점에서의 연직토압이다.

공동 확장이론에 의한 극한지지력은 극한공동압을 사용해서 (식 3.1.4)로 표현된다.

$$Q_{ult} = (F_q \cdot + F_c \cdot c)\left(\frac{1+\sin\Phi_p}{1-\sin\Phi_p}\right)A_s \qquad \text{(식 3.1.4)}$$

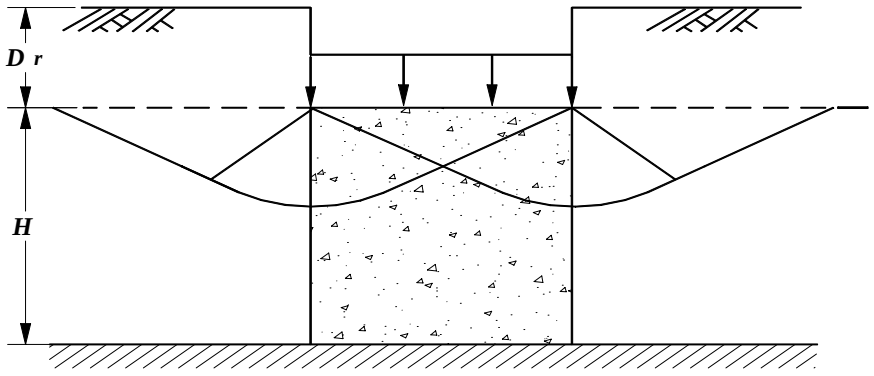
여기서, $\varnothing_p$는 쇄석말뚝의 내부마찰각, A_s는 말뚝의 단면적이다.

(3) 전단파괴

<그림 3.1.3>은 Madhav와 Vitkar(1978)에 의해 제안된 전반전단파괴 양상으로 연약지반에 조성된 조립재의 파괴형태를 전반전단파괴로 가정하여 (식 3.1.5)와 같이 제안하였다.

$$q_u(\max) = c_u N_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma_c BN_\gamma \qquad \text{(식 3.1.5)}$$

여기서, N_c, N_q, N_γ는 입상물질의 마찰각에 좌우되는 지지력 계수이다.



<그림 3.1.3> 쇄석말뚝의 전단파괴 형태

쇄석 단일말뚝의 파괴유형은 대부분의 말뚝이 지름의 2배 이상으로 시공되고 있어 팽창파괴를 발생시키고 있으며, 지반의 전단강도가 최소인 지점에서 파괴가 발생되는 것으로 알려져 있다. Huges와 Withers(1974)는 모형실험을 통해 쇄석말뚝의 주된 파괴형태로 팽창파괴를 제안한 바 있으며, 주변지반의 구속압이 지반의 파괴점을 지난 이후에는 더 이상 증가되지 않으므로 파괴하중을 상회하는 하중이 작용하는 경우 팽창파괴가 발생된다고 제안하였다. 지금까지의 연구결과를 요약해 보면 일반적인 팽창파괴의 심도는 말뚝 지름의 1~3배에서 나타나는 것으로 고찰되었다.

나. 간극막힘현상(Clogging)

(1) 개요

쇄석다짐말뚝은 연약한 점토지반이나 느슨한 사질토 지반에 쇄석을 적절한 상대밀도로 다지면서 압입하여 원지반에 일정한 지름을 가진 쇄석말뚝을 조성하는 지반개량공법이다. 점토지반에서는 원지반과 다져진 말뚝으로 이루어진 복합지반을 형성하여 지반의 전단강도 및 지지력 증대, 측방변위 억제 그리고 압밀 침하기간 단축 및 압밀침하를 저감시키고, 사질토 지반의 경우 밀도증대와 액상화 방지, 수평저항력 증가 등의 효과를 목적으로 시공한다.(이창호 등, 2005)

쇄석다짐말뚝을 형성하는 쇄석은 모래나 천연자갈에 비해 경제적이며 소요강도를 지니고 있어서 연약지반개량 현장뿐만 아니라 댐, 항만시설, 철도노반 및 도로노반 등에 활발히 사용되고 있다. 특히 쇄석다짐말뚝의 내부마찰각은 쇄석다짐말뚝의 지지력에 영향을 가장 크게 미치는 것으로 알려져 있다.(Barksdale et al., 1983). 따라서 쇄석다짐말뚝의 지지력 및 강도특성을 평가하기 위해서는 쇄석다짐말뚝의 내부마찰각을 평가하는 것이 필요하다.

쇄석다짐말뚝공법은 배수성능이 우수하여 연약지반 개량공법으로 많이 사용되고 있으나, 배수시 미세한 점토입자가 쇄석다짐말뚝의 공극 속으로 침투하는 clogging 현상이 발생하여 배수능이 저하된다.(고용일 등, 2004)

또한 쇄석은 이러한 clogging의 영향으로 연직배수 및 말뚝체 형성이 불가능한 상태까지 발전할 수 있어 침하량 감소와 지지력 증가의 역할에 의문이 제기될 수 있다.

(2) 배수저항 실험결과 및 고찰

지반개량을 목적으로 광범위한 연약점토지반의 압밀·배수를 촉진하기 위하여 하중재하공법과 병행하여 국내외적으로 가장 많이 활용되고 있는 vertical drain 공법, pack drain 공법, sand compaction drain 공법 등에 사용되는 모래와 gravel drain 공법이나 gravel compaction pile 공법 등에 사용되는 쇄석 및 자갈을 대상으로 연직배수/말뚝체의 반경축소 현상의 원인인 배수저항(clogging) 현상에 대하여 실험한 clogging 시험기로 실험을 하였다.

가압시간을 48시간으로 하여 압력을 0kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa으로 변경하였을 때의 모래(해사, 표준사) 및 골재(13mm, 25mm, 40mm)에서 해성점토의 관입량(mm)을 측정하면 <표 3.1.1>과 같다. 이때 해사와 표준사에 대해서는 해성점토의 함수비 w를 72% 뿐만 아니라 91%와 63%에 대하여도 같은 조건에서 실험을 실시하였다.

배수저항 실험결과에 의하면, 해사나 표준사에서의 해성점토의 관입량은 압력의 크기나 함수비의 변화에도 불구하고 0mm로 기록되었다. 따라서 최대입경이 4.75mm 이하이면서 투수계수 1×10^{2}cm/s보다 큰 모래의 경우는 세립토의 관입에 의한 배수저항 현상은 전혀 없을 것으로 판단되며, 배수재로서의 투수성은 확보하면서 물다짐에 의한 모래기둥의 전단강도는 크게 증대한 것으로 관찰되었다.

<표 3.1.1> 압력에 따른 해성점토의 모래 및 골재에서의 관입량(mm)
(가압시간 48시간 기준)

압력의 크기 / 배수재 종류	무압 (w=72%)	100kPa (w=72%)	200kPa (w=72%)	300kPa		
				w=91%	w=72%	w=63%
해사	0	0	0	0	0	0
표준사	0	0	0	0	0	0
13mm 골재	6	25	62	-	84	85
25mm 골재	6	35	75	-	95	-
40mm 골재	11	-	-	-	-	-

(w : 해성점토의 함수비)

골재의 경우 골재의 최대입경이 클수록 해성점토의 관입량은 증대하고, 같은 골재라도 압력이 클수록 해성점토의 관입량은 증대함을 알 수 있다. 특히, 40mm 골재에서는 100 kPa의 압력에서도 실험상의 40mm 골재층 두께 200mm를 완전히 관통할 정도의 해성점토가 관입되어, 세립토 지반에서 40mm 골재의 배수재 효과는 전혀 기대할 수 없을 것으로 여겨진다.

한편, 13mm 골재를 대상으로 해성점토의 함수비를 63%, 56.18%, 46.71% 등으로 변화시키면서 최대압력 300kPa로 48시간 이상 가하면서 측정한 해성점토의 관입량은 <표 3.2>와 같다.

<표 3.1.2>에 의하면, 13mm 골재에 해성점토가 관입되는 현상은 해성점토의 액성한계(48%)를 기준으로 현저하게 차이가 있다. 즉, 해성점토의 함수비가 액성한계보다 클 경우에는 함수비의 변화에 따른 해성점토의 골재에 관입되는 양은 비슷하게 측정되었으나, 해성점토의 함수비가 액성한계보다 작아지는 경우에는 해성점토의 골재에 관입되는 양은 1/3 정도로 감소함을 알 수 있다.

따라서 자연함수비가 큰 연약한 세립토 지반에서 쇄석이나 자갈골재를 사용하는 Gravel drain 공법 및 Gravel compaction pile 공법 등과 같은 연성기초개념의 공법의 사용은 좀 더 신중을 가할 필요가 있을 것으로 사료된다.

<표 3.1.2> 해성점토 함수비의 변화에 따른 13mm 골재에서의 해성점토 관입량
(압력 300kPa, 가압시간 48시간 기준)

해성점토 함수비	72%	63%	46.71%	비 고
관입량(mm)	84	85	30	해성점토 액성한계 48%

(3) 결론

① 해사나 표준사에서 해성점토의 관입량은 압력의 크기나 함수비의 변화에도 불구하고 0mm로, 배수저항 현상은 전혀 없는 것으로 여겨지며 오히려 물다짐에 의한 모래 배수/말뚝체의 전단강도가 크게 증대한 것으로 보인다.

② 골재의 경우 골재의 최대 입경이 클수록 해성점토의 관입량은 증대하고, 같은 골재라도 압력이 클수록 해성점토의 관입량은 증대함을 알 수 있다.

③ 특히, 40mm골재에서는 100kPa의 압력에서도 실험상의 40mm보다 큰 골재의 배수효과는 전혀 기대할 수 없을 것으로 여겨진다.

④ 액성한계를 기준으로, 점토의 함수비가 액성한계보다 클 경우에는 함수비의 변화에 따른 점토의 골재에 관입되는 양은 비슷하게 측정되었으나, 액성한계보다 작아지는 경우에는 점토의 골재에 관입되는 양은 1/3 정도로 크게 감소함을 알 수 있다.

⑤ 자연함수비가 큰 연약한 세립토 지반에서 쇄석이나 자갈 골재를 사용하는 gravel drain 공법 및 gravel compaction pile 공법 등과 같은 연성기초개념의 공법의 사용은 좀 더 신중을 기할 필요가 있을 것으로 사료된다.

⑥ 조립토에 대한 clogging 현상의 실험적 규명은 효과적인 조립토 말뚝공법의 선정과 사용되는 조립토의 적합성 판정에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

⑦ 이러한 다짐말뚝 공법은 실험에 의해서는 골재의 효과적인 사용 등으로 간극막힘 현상을 최소화 할 수 있으나 실제 현장에서는 현지반의 불확실성으로 인한 정확한 파악이 어렵다. 이에 따라, 상부하중 재하로 인한 말뚝의 간극막힘(clogging)현상이 발생하는 커다란 문제점을 안고 있다. 따라서 순환골재를 단순히 연약지반 중에 다져 넣는 다짐말뚝 재료로 사용하는 것이 아니라 투수시멘트를 적절히 배합하여 투수콘크리트 말뚝의 형태로 적용함으로써 기존의 다짐말뚝 기술의 치명적인 공학적, 기능적 단점을 해결하는 혁신적 기술을 개발하는 것이다.

2. 설계법에 대한 한계성 분석

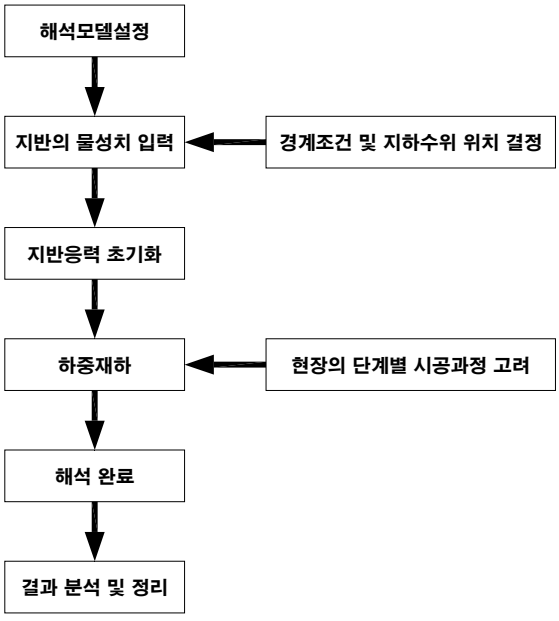
가. 모래다짐말뚝의 수치해석

(1) 개요

유한요소(FEM) 해석기법을 이용하여 모래다짐말뚝이 설치된 복합지반의 거동을 해석하고, 이때 원지반과 모래기둥에 의한 복합지반의 침하량 및 깊이별 수평변위를 파악한다. 또한 유한요소해석 프로그램을 사용하여 모래다짐말뚝공법이 미 시공된 지반과 시공된 지반의 과잉간극수압 발생정도를 분석하고 이를 통하여 시공과정에 따른 압밀도를 분석할 수 있다.

(2) 수치해석 절차

수치해석에서 실제 현장의 시공과정을 모델링하여 시공단계별 지반의 거동을 확인을 한다. 수치해석은 <그림 3.1.4>와 같은 절차로 수행하며 단계별 시공과정에 따른 침하 및 과잉간극수압, 압밀정도를 분석할 수 있다.



<그림 3.1.4> 수치해석 절차

(3) 해석단면 모델링 및 입력치

<표 3.1.3> 개략적인 모래 및 쇄석에 대한 역학 파라미터

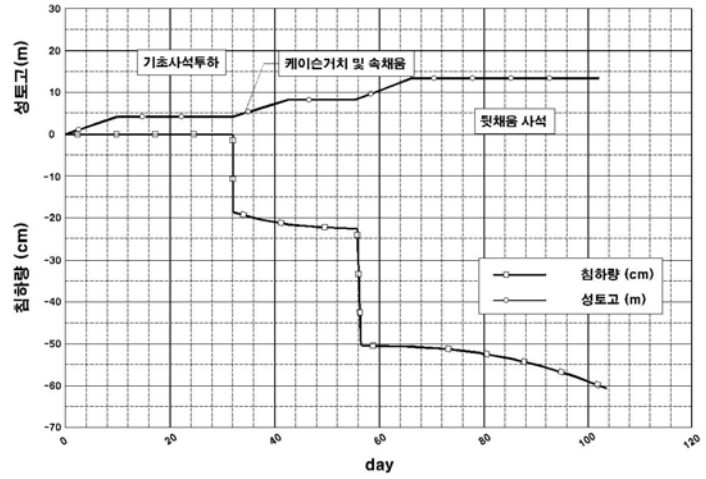
Parameters		Sand	Gravel
Elastic modulus at reference state(kPa)	E_o	2.54×10^{-4}	7.84×10^{-4}
Mean effective stress at reference state(kPa)	p_o'	98.0	98.0
Material constant	m	0.6	0.6
Internal friction angle(°)	$\varnothing'$	36.0	42.0
Plastic strain increment ratio	η_d	0.15	0.15
Poisson's ratio	ν	0.30	0.27

해석 대상으로 하고 있는 다짐말뚝재료 즉, 모래 및 쇄석에 대한 탄소성 모델화를 위해서는 재료의 탄성적 역학거동을 표현하는 체적탄성계수, 다일러턴시의 특성을 표현하는 소성변형증분비, 파괴기준에 대한 파라미터인 내부마찰각과 점착력 등의 결정이 필요하다. 한편, 점토의 모델화를 위해서는 압축지수, 팽창지수, 한계상태에서의 유효응력비, 이차압밀계수, 기준체적변형속도 등 구성모델의 역학 파라미터와 초기간극비, 투수계수, 투수계수 변화지수 등의 지반 상태량을 결정할 필요가 있다. 따라서 본 검토에서는 지반재료의 역학특성 및 지반의 상태에 대한 파라미터 값들을 현장에서 얻은 정보와 이를 활용하여 기존에 제안되고 있는 방법에 의해 다음과 같이 결정한다.

(4) 수치해석 결과

(가) 모래다짐말뚝을 시공하지 않은 경우

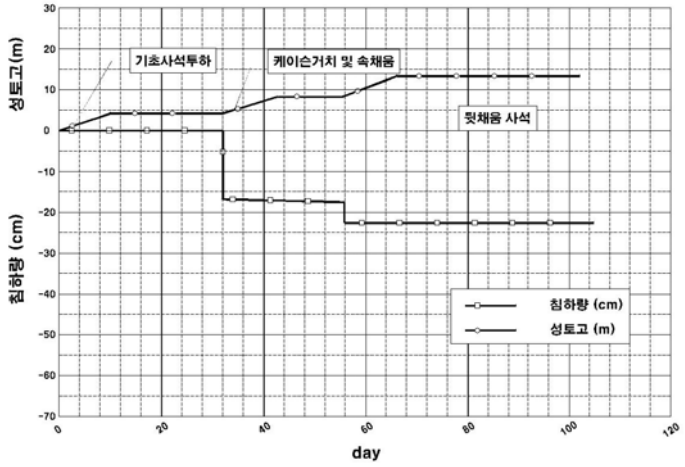
모래다짐말뚝을 시공하지 않았을 경우에 대하여 수치해석을 검토시 <그림 3.1.5>와 같다. 시공단계에 따른 시공일수별 침하량을 나타내었는데, 기초사석투하 후 케이슨 거치 전까지의 침하량은 약 1cm 정도로 나타난 것으로 되었고, 케이슨 거치 및 속채움 후 뒷채움 사석 전까지의 침하량은 약 23cm 정도로 나타났다. 그리고 뒷채움 사석시공 후 침하량은 약 50cm 정도로 나타나고 있다.



<그림 3.1.5> 시공단계에 따른 침하량(모래다짐말뚝을 시공하지 않은 경우)

(나) 모래다짐말뚝을 시공한 경우

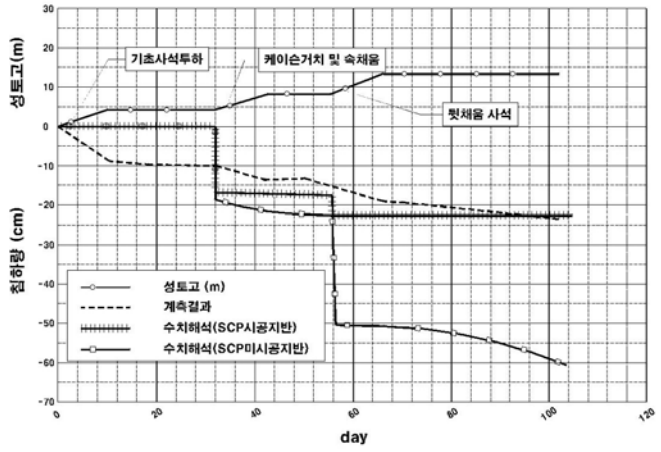
모래다짐말뚝을 시공한 경우에 대하여 수치해석을 수행한 결과는 <그림 3.1.6>에 타나내었다. 시공단계에 따른 시공일수별 침하량을 나타내었는데, 기초사석투하 후 케이슨 거치 전까지의 침하량은 약 1cm 정도로 나타났고, 케이슨거치 및 속채움 후 뒷채움 사석 전까지의 침하량은 약 17cm 정도로 나타났다. 그리고 뒷채움 사석시공 후 침하량은 약 22cm 정도로 나타나고 있었다. 모래 다짐말뚝을 시공하지 않은 경우에 비해서 현격히 침하량이 줄어드는 것을 알 수 있었다. <그림 3.1.6>은 시공일수별 과잉간극수압의 정도를 나타내고 있다.



<그림 3.1.6> 시공단계에 따른 침하량(모래다짐말뚝이 시공된 경우)

(다) 결과분석

① <그림 3.1.7>은 현장에서의 실제 계측된 침하량 및 모래다짐말뚝의 미시공된 지반과 시공된 지반을 모델링한 수치해석을 통한 침하량은 도시한 것이다. 케이슨 거치 및 속채움 후 뒷채움 사석 시공을 하는 과정에서 실제 계측된 침하량과 수치해석을 통한 지반의 침하량은 비슷한 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 하지만 기초사석투하 초기 단계에서의 침하량은 실제침하량과 상이한 양상을 보이고 있었다. 모래 다짐말뚝이 미시공된 지반에서의 침하량은 모래다짐말뚝이 시공된 지반에 비하여 2.5배 정도의 큰 침하가 발생하는 것으로 나타났다.



<그림 3.1.7> 성토고 및 시공일수에 따른 침하량

② 모래 다짐말뚝이 미시공된 지반에서의 침하량은 모래다짐말뚝이 시공된 지반에 비하여 2.5배 정도의 큰 침하가 발생하는 것으로 나타났으며, 따라서 모래다짐말뚝의 시공에 의한 지반강도 증진효과가 우수하여 침하가 작게 발생한다는 것을 알 수 있다

③ 이와 같은 결과들로부터 다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담 거동은 압밀이 진행됨에 따라서 그 특성이 변화함을 알 수 있었다. 그러나 모래말뚝에 의한 응력분담 메커니즘은 이미 규명된 바 있으나(유승경, 2003), 쇄석말뚝에 의한 복합지반의 응력분담메커니즘에 대하여는 아직 불명확한 부분이 많으며 따라서 이에 대한 실험적, 해석적 고찰이 필요하다고 판단된다.

3. 재료적 한계성 분석(환경성 및 경제성)

가. 환경성 측면

2000년 현재 천연골재 수요량과 용도별 사용량은 약 3억 6,720만톤으로 균형이 잡혀 있으나, 천연골재 사용증가에 따른 수급측면에서는 2004년 수도권 모래파동 등에 의해 북한모래의 반입 등이 이루어지고 있는 실정이다. 북한모래는 2004년 28만m^3, 2005년 350만m^3, 2006년 9월까지 554만m^3 등 총 932만m^3이 수입되어 해마다 반입량이 증가하고 있는 실정이다.

<표 3.1.4> 천연골재 수요량(제2차 골재수급 기본계획, 2000, 건설교통부)

천연골재 수요량	모래	약 1억 7,620만톤	총 3억 6,720만톤
	자갈	약 1억 9,100만톤	
용도별 사용량 (모래+자갈)	레미콘용	2억 6,658만톤	
	기타용도 (건축기초, 아스콘, 콘크리트, 도로포장용)	1억 62만톤	

국내의 연간 건설폐기물 발생량은 2003년 기준으로 2,647만톤이며, 향후 2010년과 2020년에 각각 3,691만톤, 1억 560만톤(전국 폐기물 발생 및 처리현황, 2003, 환경부)으로 급증할 것으로 예상되고 있다. 이와 같이 폐콘크리트의 발생추이는 급격한 비선형 증가세를 보이고 있는 반면, 1997년 한국지질자원연구원의 자료에 따르면 천연골재 부존량은 100억m^3이며, 이중 채취 가능한 골재량은 55억m^3으로 향후 20년 이내에 고갈될 것으로 나타나 있다. 이는 매년 여의도 면적(850m^2)의 103배에 달하는 산림과 자연환경이 파괴되고 있는 것으로 현재 대체자원개발이 시급함을 시사하고 있다. 또한, 바닷모래를 채취하는 경우 해양생태계를 원상태로 복원하는데 5,000년에서 6,000년이 걸릴 것으로 예상하고 있다.(일간건설신문, 2006. 10. 17)

국내 연약지반 다짐말뚝공법의 주재료로 사용되고 있는 천연골재는 향후 채취가능한 골재량이 고갈되는 추세이며, 이는 산림파괴, 해양생태계 교란으로 연결되어 생태계 복원에 크나큰 영향을 줄 것이다.

나. 경제성 측면

2006년 국내 천연골재의 가격은 지역별로 큰 차이는 없으나, 서울지역의 경우 천연골재는 종류에 따라 다르지만 대체로 15,000~22,000원/m^3이다. 지방의 경우 12,000~16,000원/m^3에 가격이 형성되어 있다. 천연골재의 1/3~1/5 수준으로 순환골재의 가격은 저렴하다. 흔히 기술을 평가할 때 경제적 가치의 우위를 가장 우선시 비교하며 그 후순위로 기술적, 사회문화적 가치의 평가를 내리게 된다.

<표 3.1.5> 순환골재 가격비교(원)(골재협회 자료, 2004)

구 분			서울	경기/여주	대전	대구	광주
한국	천연골재	자연자갈	22,000	14,000	16,000	14,000	15,000
		쇄석골재	17,000	15,000	15,000	14,000	14,000
		혼합골재	15,000	15,000	12,000	14,000	12,000
	순환골재		4,000원~6,000원				

최근 5년간 국내의 지반개량공법 분야에 발주된 금액은 1조 3천억원으로서 이중 다짐말뚝공법은 약 35%를 차지하고 있어 약 4천 6백억원의 시장규모를 형성하고 있다. 이중 골재비용(재료:시공비=3:7)은 약 1천 4백억원 정도로 이것을 순환골재 재료로 대체할 경우 재료비의 70%를 절감(대한건설순환자원협회 자료참고, 2006) 할 수 있을 것으로 판단되어 5년 기준으로 약 1천억원 즉, 연간 200억원의 건설비 절감효과로 이어진다. 이러한 결과는 향후 천연골재 파동에 따른 북한산, 중국산 모래수입과 부존량 감소에 따른 가격상승, 순환골재 개발에 따른 가격차이 등으로 천연골재에 의한 다짐말뚝공법은 경제성 측면에서 한계성을 지닐 수밖에 없을 것으로 판단된다.

제 2 절 순환골재 다공질 콘크리트의 재료적 특성평가

1. 순환골재 다공질 투수콘크리트말뚝의 재료특성 예비평가

가. 역학시험을 위한 공시체 제작

입경 19~40mm 크기의 순환골재를 사용하여 일반적인 다공질 콘크리트 단위중량인 1,800kgf/m^3, 2,000kgf/m^3 및 일반적인 콘크리트 단위중량인 2,300kgf/m^3의 3종류로 나누어 단위목표중량을 설정하였다. 그리고 각 단위중량별로 물-시멘트비를 35%, 40%, 45% 및 50%로 설정하였고, 양생기간은 3일, 7일, 14일 및 28일의 4단계로 변화를 주어 단위중량, 물-시멘트비 및 양생기간별로 강도특성 및 투수특성을 알아보기 위하여 배합설계를 실시하였다.



(a) 시멘트 (b) 물 (c) 순환골재

<그림 3.2.1> 다공질 콘크리트 공시체 제작을 위한 재료 계량

또한 다공질 콘크리트의 목표단위중량에 대한 오차를 줄이기 위하여 순환골재, 시멘트, 물의 배합량을 단위체적을 기준으로 적용하여 배합량 설계를 산정하였으며, <표 3.2.1>은 본 시험에 사용된 배합량이다.

본 시험에서 순환골재를 이용한 다공질 콘크리트의 강도시험을 위한 공시체의 크기는 순환골재의 최대입경을 고려하여 직경 15cm, 높이 30cm의 몰드를 사용하였다.

공시체의 제작을 위해 준비된 몰드의 내면에 콘크리트가 부착되는 것을 방지하기 위하여 광유를 얇게 도포한 후 배합비에 따른 시료를 주입하였다. 이때 시료는 3층으로 나누어 채우고 각 층을 다짐봉을 이용하여 25회 다짐을 실시하였다. 시험체는 150mm×300mm의 원통형 공시체로서 제작 1일 후 탈형하고 20±2℃에서 2일간 수중양생을 실시하였다. 시험체의 압축강도는 KS F 2405(콘크리트의 압축강도시험)의 방법으로 수행하였다.

순환골재를 이용한 다공질 콘크리트 공시체는 양생기간을 3일, 7일, 14일 및 28일로 압축강도를 계획하였고, 몰드를 떼어내기 전에 시멘트 페이스트를 이용하여 윗면 마무리를 실시하였다.

<표 3.2.1> 순환골재 다공질 콘크리트의 배합량 설계치

목표단위중량 (tf/m^3)	W/C (%)	공시체 1개당 중량(kg)		
		물	시멘트	순환골재
1.8	35	0.65	1.86	7.98
	40	0.72	1.79	
	45	0.78	1.73	
	50	0.84	1.68	
2.0	35	0.66	1.88	8.07
	40	0.73	1.81	
	45	0.79	1.75	
	50	0.85	1.69	
2.3	35	0.72	2.06	9.41
	40	0.749	1.99	
	45	0.86	1.92	
	50	0.93	1.86	

<그림 3.2.2>는 본 연구에서 제작한 공시체를 나타낸 것이다. 한편 공시체 중 투수시험용 공시체는 <그림 3.2.3>에 나타낸 바와 같이 공시체 측면의 배수를 차단하기 위하여 멤브레인으로 감싼 후 테이프로 단단히 고정시켰다.





<그림 3.2.2> 다공질 콘크리트 공시체 제작



<그림 3.2.3> 투수시험용 공시체 제작

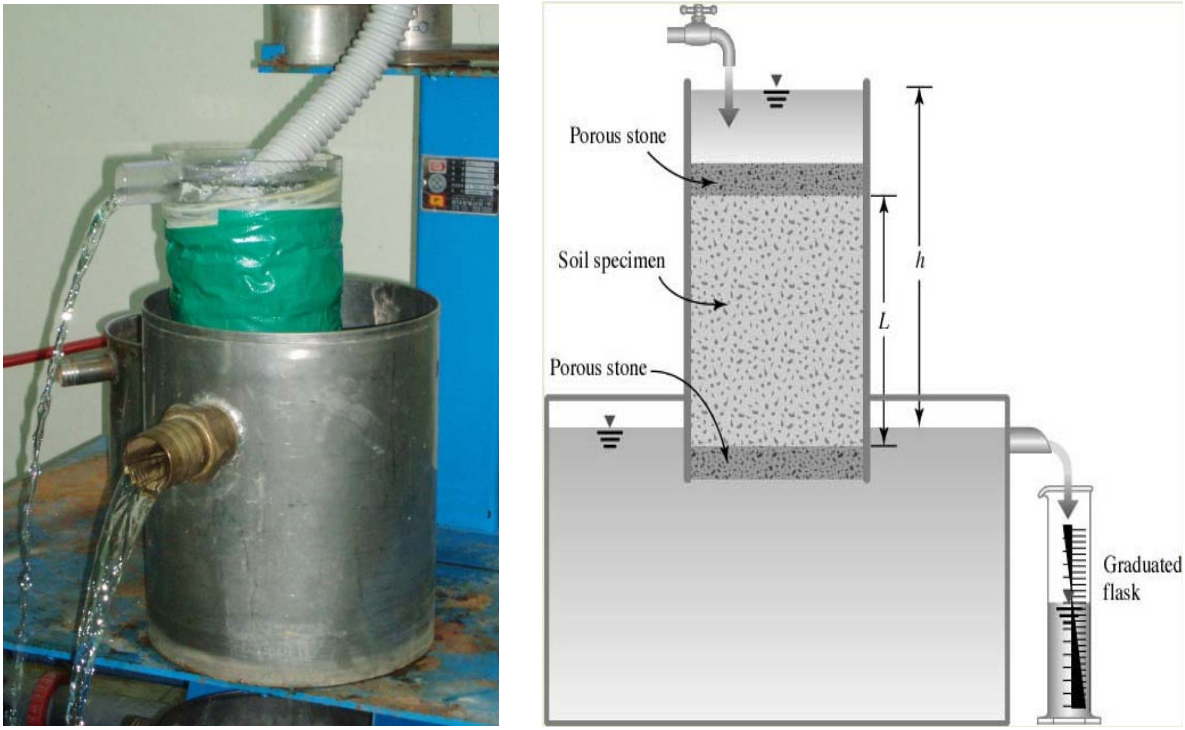
나. 시험장치

<그림 3.2.4>는 본 시험에서 사용한 일축압축시험기를 나타내고 있다. 본 시험기는 재하용 프레임과 재하판, 로드셀, 다이얼 게이지 및 재하 콘트롤 박스로 구성되어 있으며, 스피드 콘트롤(Speed Control)을 규정속도에 맞춰놓고 앞 조정판의 컴프레션 스위치를 위로 올리면 가압판이 올라가 몰드를 압축하게 된다. 또한, 본 시험기의 변형속도는 0.5~1.9mm/min의 범위에서 조정이 가능하다.

한편, <그림 3.2.5>는 본 시험에서 사용한 실내 정수두 투수시험기를 나타내고 있다. 본 시험기는 흙에 대한 투수시험기를 응용하여 자체 제작한 것으로 물을 공급하는 입구를 조정함으로써 실험하는 시간동안 물의 입구와 출구 사이의 수두차를 일정하게 유지하도록 하고 있다.



<그림 3.2.4> 일축압축시험기



<그림 3.2.5> 투수시험 모식도 및 시험전경

다. 시험방법 및 조건

일축압축강도시험은 KS F 2405의 기준에 따라 수행하였다. 실내시험에서는 미리 계획된 배합조건에 따라 제작한 공시체를 재하판 사이에 설치한 후, 1%/min의 압축변형이 발생하도록 연속적으로 재하하였다. 이때 발생하는 공시체의 변형량과 압축하중은 다이얼게이지와 로드셀에 의해 측정하였다. 한편, 공시체에 대한 재하는 압축하중이 최대값을 경과한 후에 그 최대값의 약 50%에 해당하는 압축하중에서 시험을 종료하였다.

한편, 투수시험에서는 물의 흐르는 양이 일정하게 되었을 때 물을 일정한 시간동안 실린더에 집수하였다. 집수된 총 유량은 (식 3.2.1)과 같이 계산되며, 이를 이용하면 공시체의 투수계수를 구할 수 있다.

$$Q = AVt = A(ki)t \qquad \text{(식 3.2.1)}$$

여기서, Q : 집수량　　A : 공시체의 단면적

k : 투수계수　　i : 동수경사　　t : 집수시간

<표 3.2.2> 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 시험조건

단위중량(tf/m^3)	W/C(%)	시험종류	Test Case	양생일(Day)
1.8	35	압축강도	18-35-C-1	3, 7, 14, 28
			18-35-C-2	
		투수성	18-35-P-1	
	40	압축강도	18-40-C-2	3, 7, 14, 28
			18-40-C-2	
		투수성	18-40-P-1	
	45	압축강도	18-45-C-1	3, 7, 14, 28
			18-45-C-2	
		투수성	18-45-P-1	
	50	압축강도	18-50-C-1	3, 7, 14, 28
			18-50-C-2	
		투수성	18-50-P-1	
2.0	35	압축강도	20-35-C-1	3, 7, 14, 28
			20-35-C-2	
		투수성	20-35-P-1	
	40	압축강도	20-40-C-1	3, 7, 14, 28
			20-40-C-2	
		투수성	20-40-P-1	
	45	압축강도	20-45-C-1	3, 7, 14, 28
			20-45-C-2	
		투수성	20-45-P-1	
	50	압축강도	20-50-C-1	3, 7, 14, 28
			20-50-C-2	
		투수성	20-50-P-1	
2.3	35	압축강도	23-35-C-1	3, 7, 14, 28
			23-35-C-2	
		투수성	23-35-P-1	
	40	압축강도	23-40-C-1	3, 7, 14, 28
			23-40-C-2	
		투수성	23-40-P-1	
	45	압축강도	23-45-C-1	3, 7, 14, 28
			23-45-C-2	
		투수성	23-45-P-1	
	50	압축강도	23-50-C-1	3, 7, 14, 28
			23-50-C-2	
		투수성	23-50-P-1	

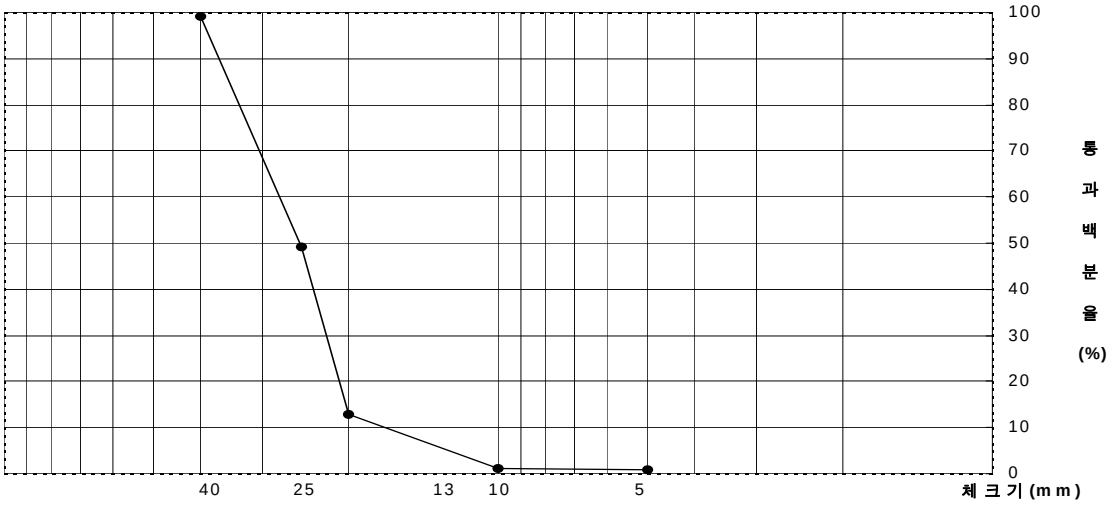
라. 연구결과

(1) 물리적 특성

본 연구에 사용된 순환골재는 19mm 이상 최대입경 40mm이며, Crusher로 파쇄된 것으로 물리적 특성시험은 「순환골재 품질기준 제정 및 인증제도 시행방안 연구(건설교통부, 2006)」에서 제시한 순환골재 품질검사 기준의 콘크리트용 기준으로 수행하였으며 그 결과는 다음의 <표 3.2.3>에 나타낸 바와 같다.

<표 3.2.3> 순환골재의 물리적 특성 시험결과

시험항목		시험방법	시험결과
입도(%)	40mm	KS F 2502 : 2002	99.1
	25mm		49.1
	20mm		12.9
	10mm		1.2
	5mm		0.8
절대건조밀도 (g/cm^3)		KS F 2503	2.28
흡수율 (%)			3.6
입자모양판정실적율 (%)		KS F 2527	56.8
마모감량 (%)		KS F 2508	35.4
0.08mm체 통과량시험에서 손실된 양 (%)		KS F 2511	0.2
점토 덩어리양 (%)		KS F 2512	0.02
안정성 (%)		KS F 2507	6.7
유기이물질 함유량 (%)		KS F 2576	0.08



<그림 3.2.6> 순환골재 입도분포 곡선

(2) 역학적 특성 및 투수특성

일축압축강도를 위한 실내시험은 KS F 2405의 기준에 따라 수행하였다. 실내시험에서는 미리 계획된 배합조건에 따라 공시체를 재하판 사이에 설치한 후 1%/min의 압축변형이 발생하도록 연속적으로 재하하였다. 한편, 공시체에 대한 재하는 압축하중이 최대값을 경과한 후에 그 최대값의 약 50%에 해당하는 압축하중에서 시험을 종료하였다. <그림 3.2.7>과 <그림 3.2.8>은 공시체의 전형적인 파괴형상과 단면형상을 나타내고 있다.



<그림 3.2.7> 공시체 파괴형상(전면)

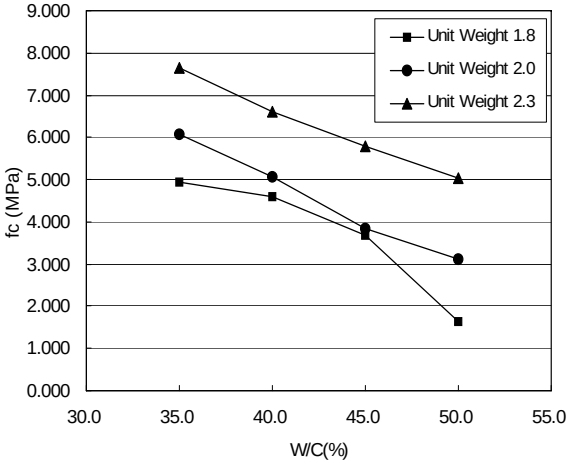


<그림 3.2.8> 공시체 파괴형상(윗면)

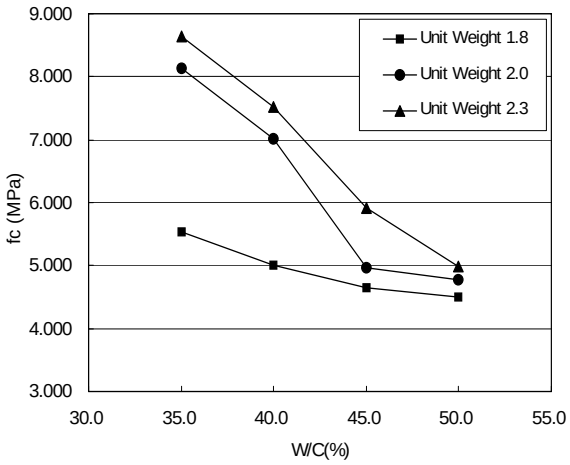
(가) 역학특성에 미치는 물-시멘트비의 영향

<그림 3.2.9>는 순환골재 다공질 콘크리트의 물-시멘트비와 일축압축강도의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 단위중량이 증가할수록 일축압축강도는 증가하고, 물-시멘트비가 증가할수록 일축압축강도는 감소하고 있음을 알 수 있다.

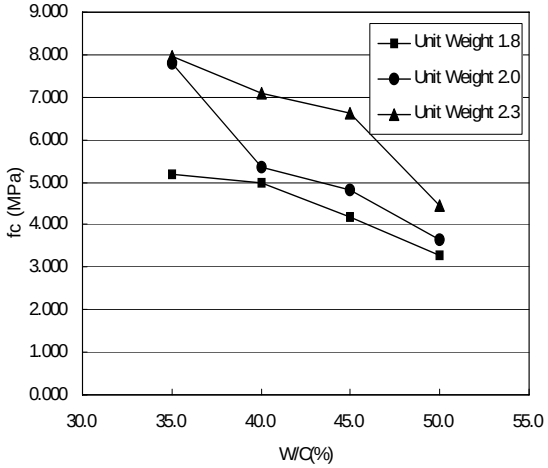
<그림 3.2.10>은 순환골재 다공질 콘크리트의 물-시멘트비와 E_{50}의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 단위중량에서 물-시멘트비가 45%인 경우 E_{50}은 최대값을 보이고 있다.



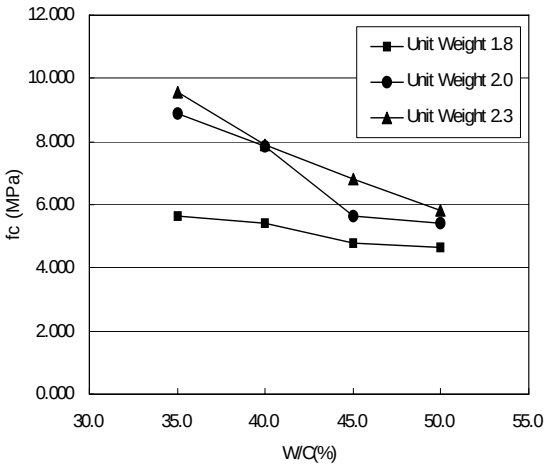
(a) 3일 양생



(b) 7일 양생

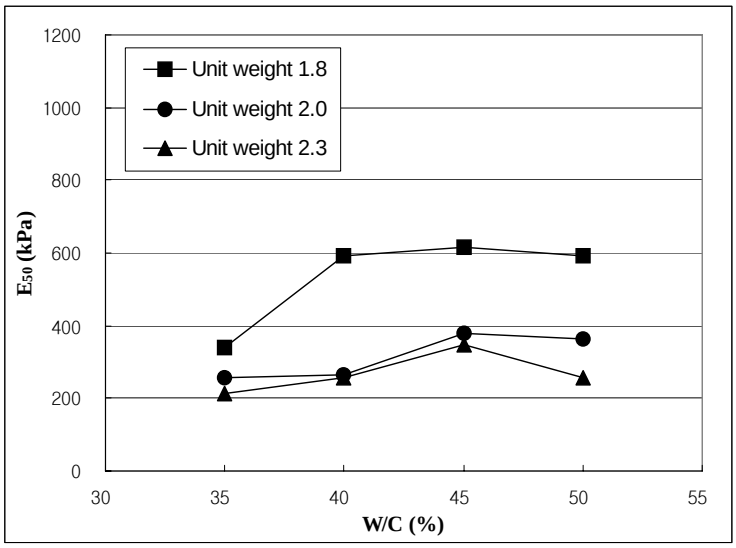


(c) 14일 양생



(d) 28일 양생

<그림 3.2.9> 물-시멘트비와 일축압축강도와의 관계

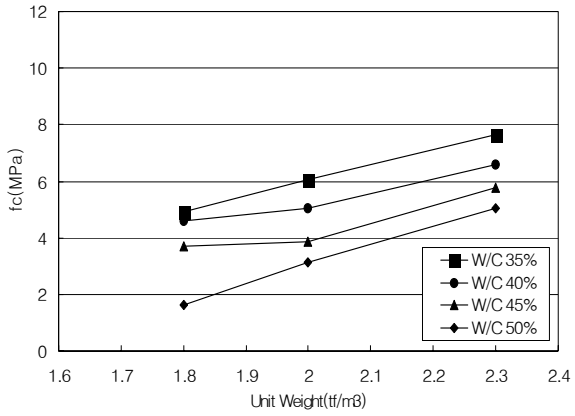


<그림 3.2.10> 물-시멘트비와 E_{50}의 관계

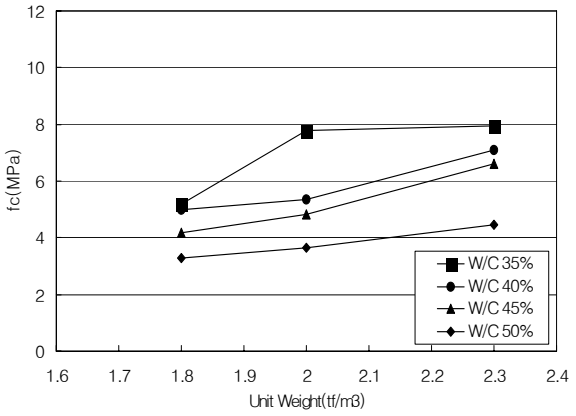
(나) 역학특성에 미치는 단위중량의 영향

<그림 3.2.11>은 순환골재를 이용한 다공질 콘크리트의 단위중량과 일축압축강도와의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 물-시멘트비가 증가할수록 일축압축강도는 감소하고, 단위중량이 증가할수록 일축압축강도는 증가하고 있음을 알 수 있다.

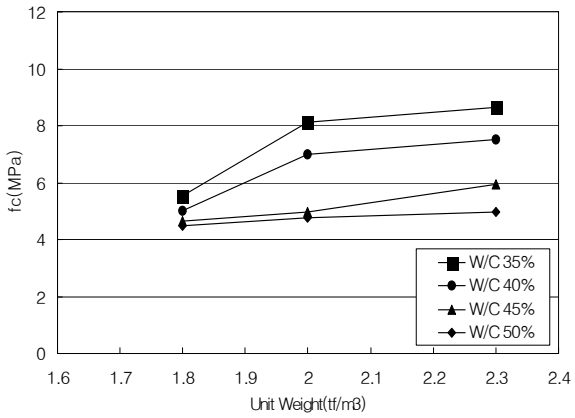
<그림 3.2.12>는 순환골재 다공질 콘크리트의 단위중량과 E_{50}의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 물-시멘트비의 경우에 대하여 일축압축강도의 경우와 마찬가지로 E_{50}은 단위중량이 1.8tf/m^3인 경우가 그 외의 단위중량의 경우보다 큼을 알 수 있다.



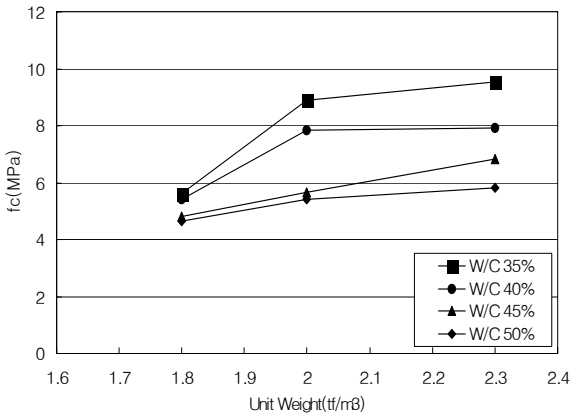
(a) 3일 양생



(b) 7일 양생

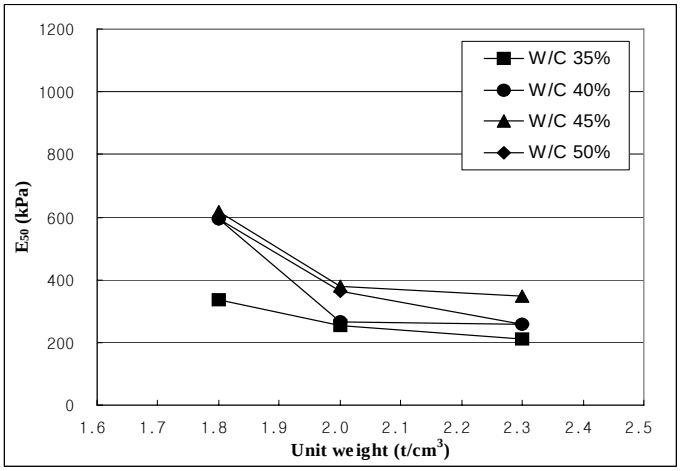


(c) 14일 양생



(d) 28일 양생

<그림 3.2.11> 단위중량과 일축압축강도와의 관계

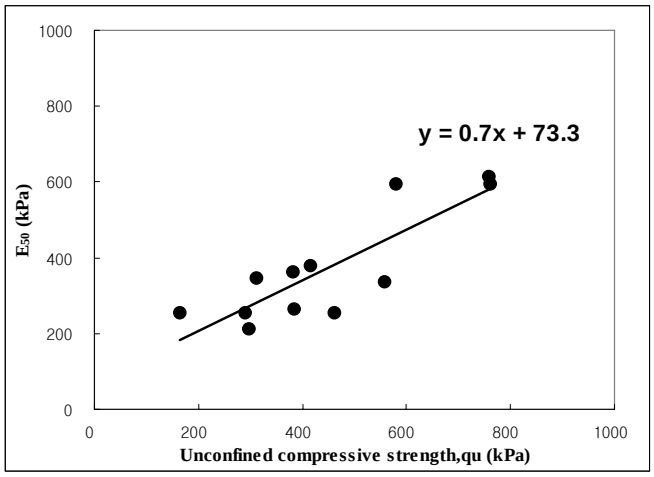


<그림 3.2.12> 단위중량과 E_{50}의 관계

(다) 일축압축강도와 E_{50}의 관계

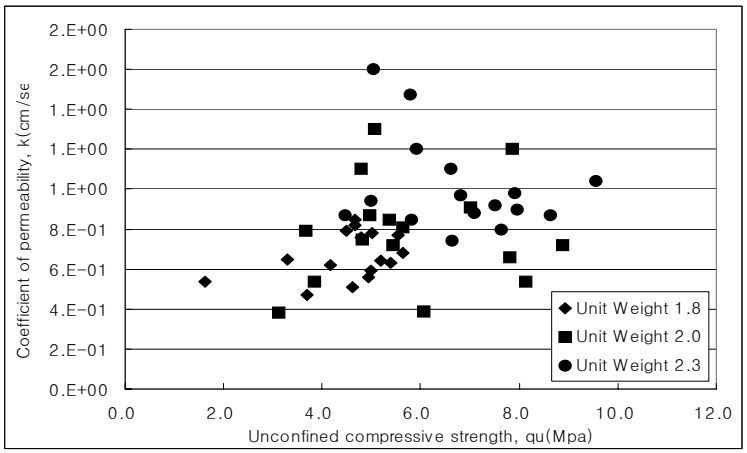
<그림 3.2.13>은 순환골재 다공질 콘크리트의 3일 양생 일축압축강도와 E_{50}의 관계를 나타내고 있다. 일축압축강도가 증가할수록 E_{50}이 커짐을 알 수 있으며, 이를 선형적인 관계로 가정하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$E_{50} = 0.7q_u + 73.3 \qquad \text{(식 3.2.2)}$$



<그림 3.2.13> 일축압축강도와 E_{50}의 관계

(라) 순환골재 다공질 콘크리트의 투수특성



<그림 3.2.14> 투수계수와 일축압축강도와의 관계

<그림 3.2.14>는 순환골재 다공질 콘크리트의 투수계수와 일축압축강도와의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 투수계수는 다소 그 값의 편차를 보이고 있으나, 물-시멘트비와 단위중량의 크기에 관계없이 평균적으로 0.8×10^{0}cm/s의 값을 나타내고 있다.

마. 결론

순환골재를 이용한 다공질 콘크리트 공시체를 3일, 7일, 14일 및 28일간 양생하여 일축압축시험과 투수시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 순환골재 다공질 콘크리트의 일축압축강도는 단위중량이 증가함에 따라 증가하고, E_{50}은 물-시멘트비가 45%인 경우에 최대값을 나타내었다.
② 순환골재 다공질 콘크리트의 일축압축강도와 E_{50}은 물-시멘트비에 관계없이 단위중량이 1.8tf/m^3인 경우 최대값을 나타내었다.
③ 순환골재 다공질 콘크리트의 일축압축강도와 E_{50}의 관계는 $E_{50}=0.7q_u+73.3$과 같음을 확인하였다.
④ 순환골재 다공질 콘크리트의 투수계수는 물-시멘트비와 단위중량의 크기에 관계없이 평균적으로 0.8×10^{0}cm/s의 값을 나타내었다.

2. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 최적배합비 결정

가. 예비시험

본 시험에서의 시행착오를 줄이고자 사전에 물-시멘트 비에서 주도 및 흐름값의 경향을 파악하고 이를 바탕으로 공시체를 제작하여 3일 강도시험을 실시하였다.

(1) 주도시험

시멘트의 풍화와 이물질의 혼입 등에 의해 비정상적으로 된 경우 시멘트의 응결시험으로 이것을 확인할 수 있고 KS L 5108에 규정되어 있다.

시멘트의 응결(setting)과정이 적절해야만 실제 시공에 편리하므로 여러 가지 시멘트에 대해서 시멘트가 물과 혼합된 후 유동성을 잃고 경화하기 시작할 때까지 응결의 시작(initial set)과 끝날 때(final set)를 측정할 필요가 있고, 또한 시멘트의 응결시간을 측정함으로써 콘크리트의 응결시간도 측정할 수 있기 때문에 운반, 타설, 다짐 등의 시공계획을 세울 때 참고가 된다.



<그림 3.2.15> 주도시험 전경

(2) 플로우 시험

모르타르의 유동성을 검토하기 위한 플로우 시험은 KS L 5111에 준하여 <그림 3.2.16>과 같이 플로우 테이블과 모르타르용 플로우 콘을 이용하여 낙하운동을 가한 후 정지한 상태에서 모르타르의 변형이 종료한 시점에서 2방향의 직경을 측정하여 그 평균값으로 산출하였다.



<그림 3.2.16> 흐름시험 전경

<표 3.2.4> 주도시험 및 흐름시험 결과

W/C	흐름값		주도값		관입깊이			비 고
	W	C	W	C	T-1	T-2	T-3	
25	375	1,500	162.5	650	9	9.5	9.0	변화없음
26	390	1,500	169.0	650	12	15	18	시간에 따라 증가
27.5	413	1,500	178.8	650	13	16.5	21	시간에 따라 증가
30	450	1,500	195.0	650	21	24	30	시간에 따라 증가

<표 3.2.4>에서 흐름값의 변화는 W/C 25%까지는 나타나지 않고 W/C 26%부터 나타나기 시작하여 예비시험에서 W/C값의 기준은 25%로 설정하였다.

(3) 사용재료

본 연구에 사용된 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트이며 시멘트의 물리적 성질과 화학적 성질은 <표 3.2.5> 및 <표 3.2.6>에 나타낸 바와 같다. 또한 순환골재는 38mm를 통과하고 19mm체에 잔류하는 크기의 입경으로 절대건조밀도 2.219(g/cm^3), 표면건조밀도 2.357, 흡수율 6.26%이다.

<표 3.2.5> 시멘트의 물리적 성질

시멘트 종류	비 중	분말도	응결도(h:m)		강열	안정성	압축강도(MPa)		
			초결	종결	감량(%)	(%)	3일	7일	28일
1종 보통 포틀랜드 시멘트	3.15	3,200 ~ 3,400	180 ~ 220분	5:00 ~ 6:30	1.2 ~ 2.0	0.08 ~ 0.13	18 ~ 21	24 ~ 27	34 ~ 40

<표 3.2.6> 시멘트의 화학적 성질

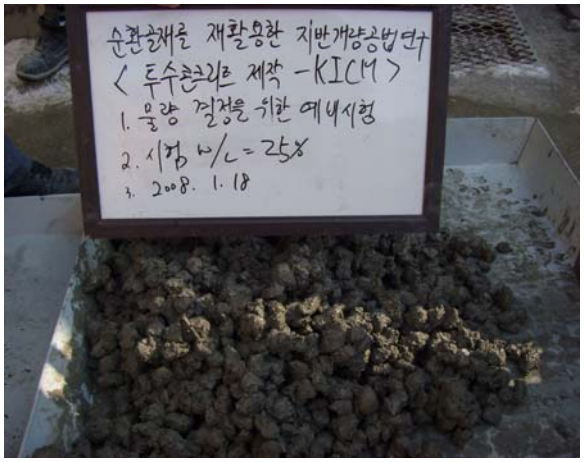
구 분	화학성분(%)							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_3O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	기 타
함 량	21.1~21.4	5.0	3.2	61	3.0	2.1	1.0	-

(4) 공시체 제작

압축강도를 평가하기 위한 공시체는 KS F 2403 『콘크리트의 강도시험용 공시체 제작방법』에 준하여 ø15, 높이 30cm의 원주형 공시체를 제작하였으며, 약 24시간 후 탈형하여 소요의 재령까지 20±3℃에서 표준수중양생을 실시하였고, 측정시 상면을 시멘트 페이스트로 평활하게 마감하였다.

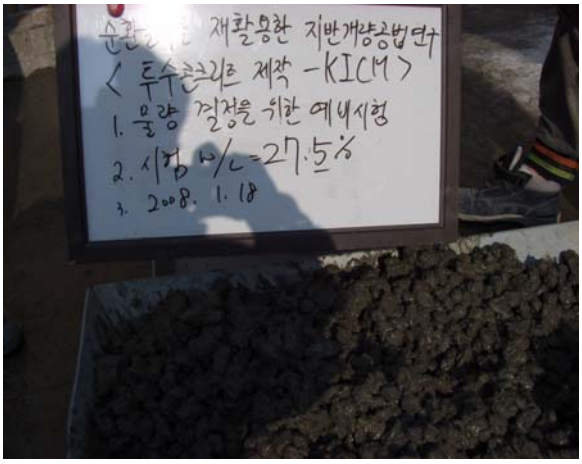
(5) 슬럼프 시험

슬럼프 시험은 <그림 3.2.17>과 같이 KS F 2402 『포틀랜드시멘트 콘크리트의 슬럼프 시험방법』에 준하여 실시하였다



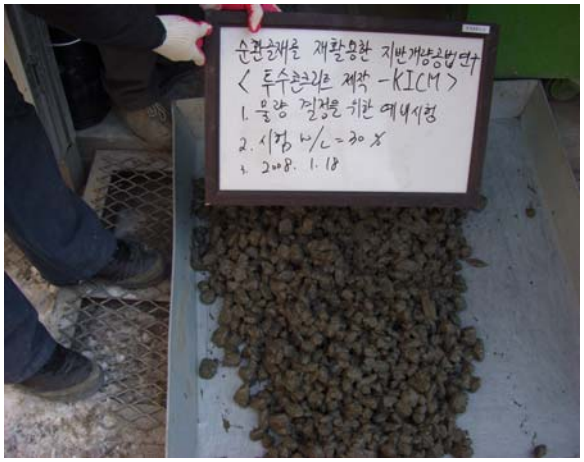


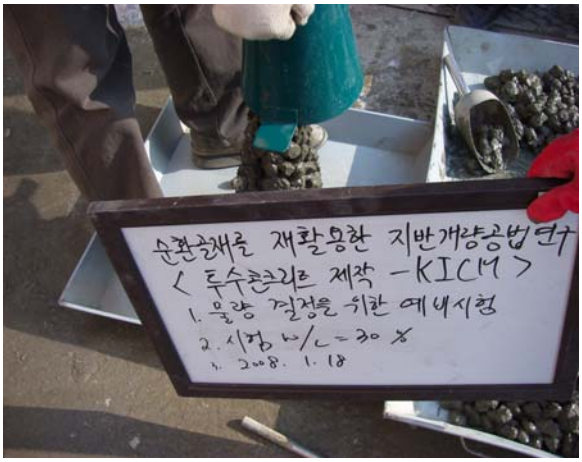
(a) W/C=25%





(b) W/C=27.5%





(c) W/C=30%

<그림 3.2.17> 예비시험 배합 및 슬럼프 시험 전경




<그림 3.2.18> 예비시험 공시체 제작

(6) 압축강도

압축강도 시험은 공시체(150×300)를 제작하여 <그림 3.2.19>와 같이 UTM(Universal Test Machine)을 이용하여 최대하중을 측정한 후 (식 3.2.3)에 의하여 압축강도를 산정하였다 .

$$f_{ck} = \frac{P}{A} \qquad \text{(식 3.2.3)}$$

여기서, f_{ck} : 압축강도(MPa)

P : 최대하중(N)

A : 공시체의 단면적(mm^2)




<그림 3.2.19> 압축강도시험 전경

(7) 정탄성계수

경화콘크리트의 정탄성계수는 KS F 2438 『콘크리트 원주 시험체의 정탄성계수 및 포아송비 시험방법』에 준하여 재령 28일에서 압축강도 측정시 응력과 변위를 각각 산출한 후 최대응력의 1/3 지점에서의 시컨트 모듈러스(Secant Modulus)로 산정하였다.

<표 3.2.7> 예비시험 재령 3일 압축강도시험 결과

구 분	W/C = 25%	W/C = 27.5%	W/C = 30%
압축강도(MPa)	10.46	9.71	8.86

예비시험결과 W/C=25%에서 압축강도가 가장 크게 나타났으며 W/C=30%에서 작업성이 우수한 것으로 판단된다.

다. 본시험

(1) 시험계획

본 연구의 실험계획 및 방법은 <표 3.2.8>에 나타낸 바와 같이 물-시멘트비를 25%, 30%, 35%로 설정하고, 사용 순환골재의 입도는 38mm체를 통과하고 19 mm체에 잔류하는 것을 사용하였다.

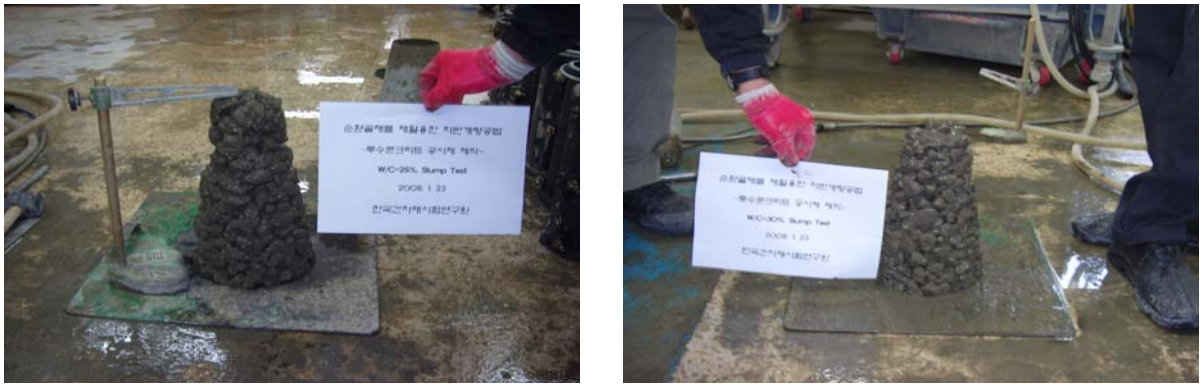
<표 3.2.8> 콘크리트 배합표

구 분		물(kg)	시멘트(kg)	골재(kg)	단위용적(kg/m^3)	비 고
W/C (%)	25	96.4	385.7	1,251.9	1,734.1	
	30	96.4	321.4	1,300,0	1,717.9	
	35	96.4	275.5	1,334.4	1,706.3	
P/G (%)	24	76.4	254.8	1,397.1	1,728.3	W/C=30%
	32	96.4	321.4	1,300.0	1,717.9	W/C=30%
	42	116.4	388.0	1,203.1	1,707.5	W/C=30%

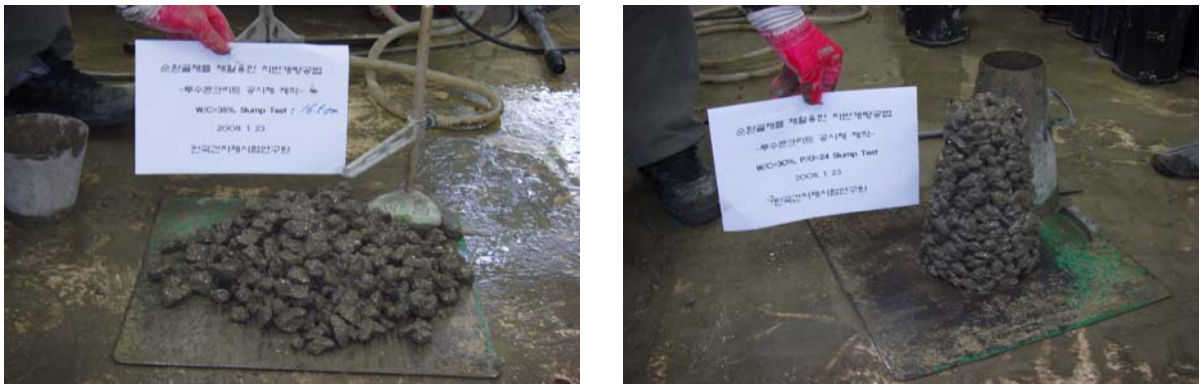
물-시멘트 비율을 결정하기 위해서 물의 양을 일정하게 유지하고 시멘트의 양을 조절하는 방법을 이용하여 공시체를 제작하였으며 물-시멘트 비율이 30%일 때 시멘트 페이스트와 골재의 비율을 변화시켜 공시체를 제작하였으며 공학적 특성을 검토·분석하기 위하여 3일, 7일, 28일 강도를 기준으로 하여 압축강도 및 투수계수 시험을 실시하였다.



<그림 3.2.20> 공시체 제작 전경



(a) W/C=25% (b) W/C=30%



(c) W/C=35, P/G=24%

<그림 3.2.21> 슬럼프 시험 전경

(2) 시험결과

물-시민트비와 P/G비에 따른 압축강도, 탄성계수, 투수계수 및 공극율 시험결과를 <표 3.2.9>와 <표 3.2.10>에 나타내었다. 물-시멘트비가 증가하면 압축강도가 떨어지고 같은 물-시멘트비에서 양생일의 증가와 더불어 강도의 증가를 확인할 수 있다.

탄성계수의 변화는 물-시멘트비가 증가하면 탄성계수는 감소하고 동일한 물-시멘트 비에서는 양생일이 증가하면 탄성계수가 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 양생일 3일에서 7일의 경우보다는 7일에서 28일의 경우에서 더 큰 증가량을 나타내고 있다.

투수계수시험은 제작한 공시체를 가지고 시험한 경우와 현장에서 시험시공을 실시할 경우 골재입자의 크기를 고려한 현장코어상태와 동일한 조건이 되도록 코아링을 실시하여 시험을 실시하였으며, 투수시험결과 공시체 상태와 코어상태에서 시험한 경우 약 10배 정도 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

이는 공시체 상태에서는 옆면과 코아링을 실시한 경우의 옆면의 형상의 차이에서 발생하는 것으로 판단된다.

<표 3.2.9> 물-시멘트비에 따른 시험결과

구 분		압축강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	투수계수(cm/s)		공극율(%)	
				150×300	100×200	150×300	100×200
3일	W/C=25%	11.00	9.87	2.874	0.285	18.887	17.113
	W/C=30%	9.38	8.93	2.337	0.330	17.489	11.901
	W/C=35%	5.47	6.67	2.263	0.427	18.083	9.478
7일	W/C=25%	12.63	11.97	2.560	0.340	18.527	15.380
	W/C=30%	10.85	10.44	2.562	0.107	17.962	13.714
	W/C=35%	7.21	8.60	2.229	0.434	19.141	9.347
28일	W/C=25%	13.47	19.12	2.717	0.319	18.295	15.191
	W/C=30%	12.17	17.57	2.451	0.149	18.376	12.188
	W/C=35%	9.64	13.17	2.100	0.412	20.620	9.937

<표 3.2.10>은 물-시멘트비가 30%일 때 시멘트 페이스트-골재비에 따른 시험결과를 나타내고 있다. 압축강도 및 탄성계수는 P/G=42%일 때 가장 큰 값을 보이고 있는 반면, 투

수성에서는 현저히 떨어지는 결과를 보이고 있고, 공시체를 코어링한 경우 공극율이 떨어지고 투수시험의 수행이 매우 어려운 것으로 나타났다.

<표 3.2.10> P/G비에 따른 시험결과

구 분		압축강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	투수계수(cm/s)		공극율(%)	
				150×300	100×200	150×300	100×200
3일	P/G=24%	7.08	6.94	3.087	0.741	22.096	22.905
	P/G=32%	9.38	8.93	2.337	0.330	17.489	11.901
	P/G=42%	11.84	10.13	0.937	-	7.805	3.772
7일	P/G=34%	7.75	7.81	3.016	0.706	22.899	23.835
	P/G=32%	10.85	10.44	2.562	0.107	17.962	13.714
	P/G=42%	15.90	13.32	0.637	-	7.523	3.497
28일	P/G=24%	9.79	13.64	3.114	0.664	22.136	21.907
	P/G=32%	12.17	17.57	2.451	0.149	18.376	12.188
	P/G=42%	17.74	26.17	0.748	-	7.060	3.230

(3) 최적배합비 결정

시험결과를 분석하면 물-시민트비 25%와 30%에서 압축강도와 투수계수가 비슷한 결과를 나타내고 있다. 공시체 제작과정에서 물-시멘트비 25%에서는 작업성이 현저히 떨어지는 반면 물-시멘트비 30%에서는 매우 우수한 것으로 나타났다. 그리고 물-시멘트비 30% 조건에서 시멘트 페이스트-골재비가 24%인 경우가 투수성이 매우 양호한 결과를 보이고 있다.

따라서 본 연구에서는 물-시멘트비 30%, 시멘트 페이스트-골재비 24%를 순환골재를 활용한 다공질 콘크리트 말뚝의 배합비로 제안하고자 한다.



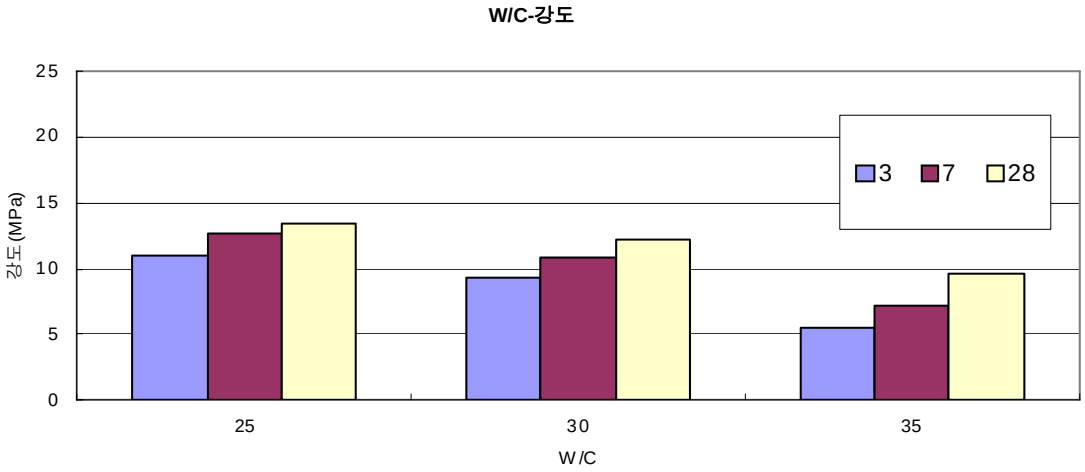
<그림 3.2.22> 강도시험 전경



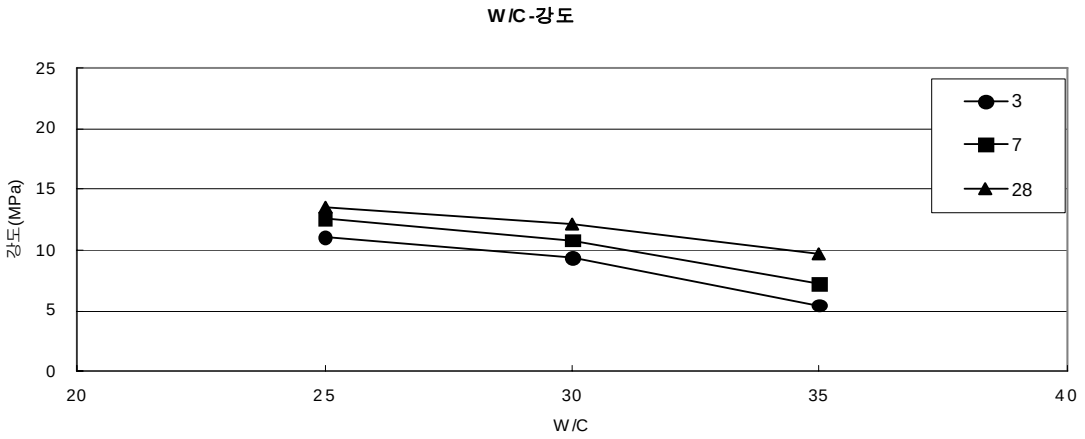
<그림 3.2.23> 투수시험 전경



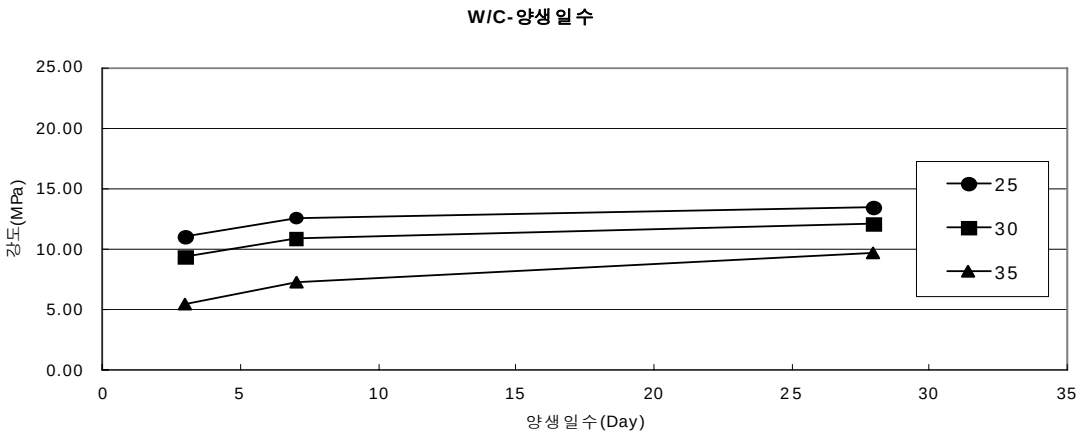
<그림 3.2.24> 공극율시험 및 코어링 작업 전경



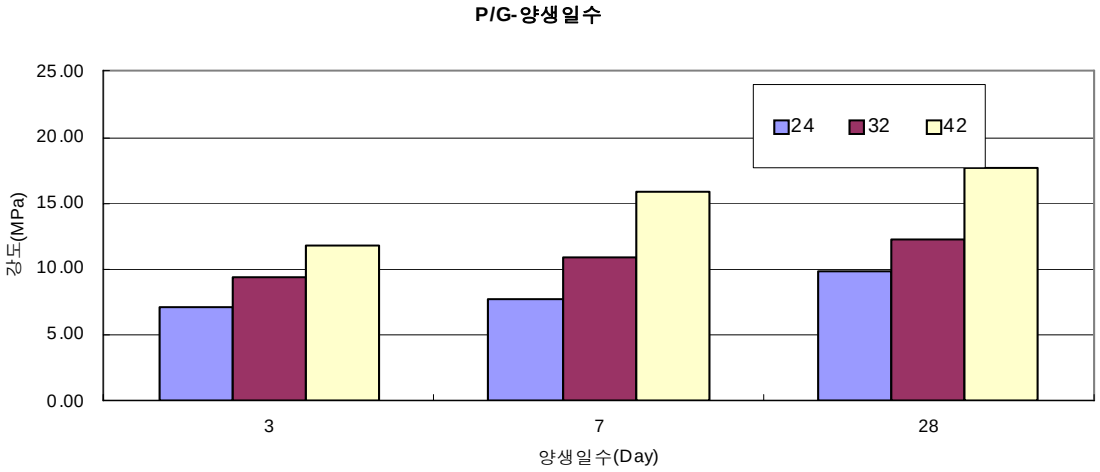
<그림 3.2.25> 양생일수에 따른 물-시멘트비와 압축강도와의 관계



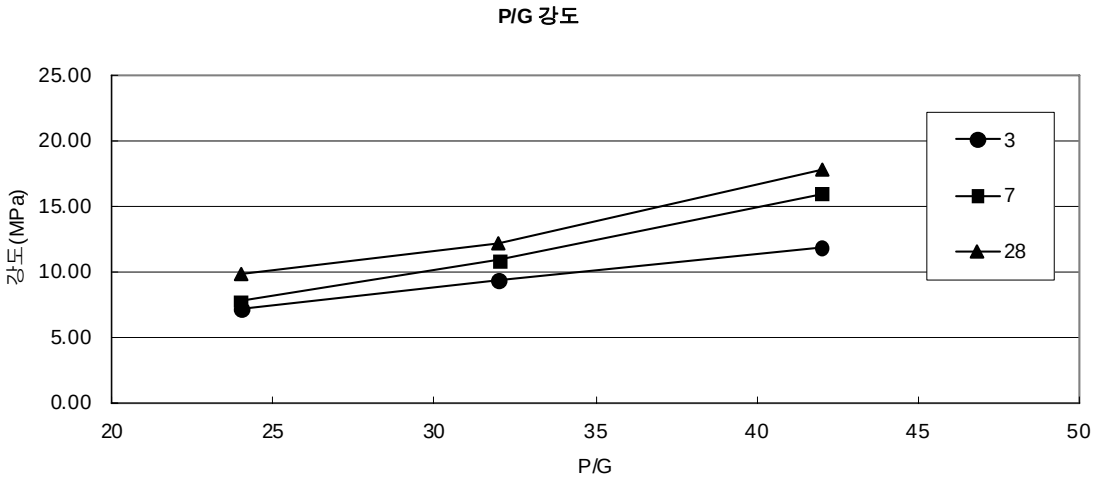
<그림 3.2.26> 물-시멘트비와 압축강도와의 관계



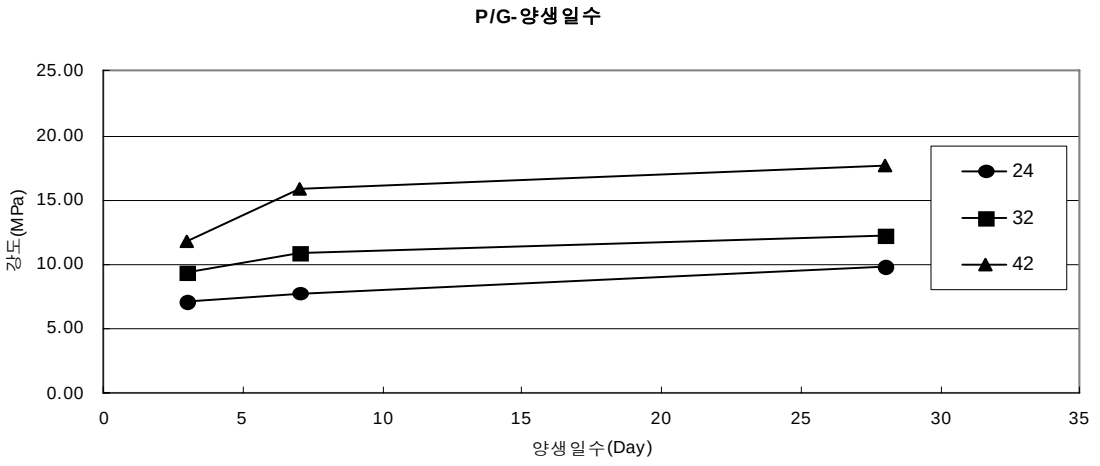
<그림 3.2.27> 물-시멘트비와 양생일수에 따른 압축강도와의 관계



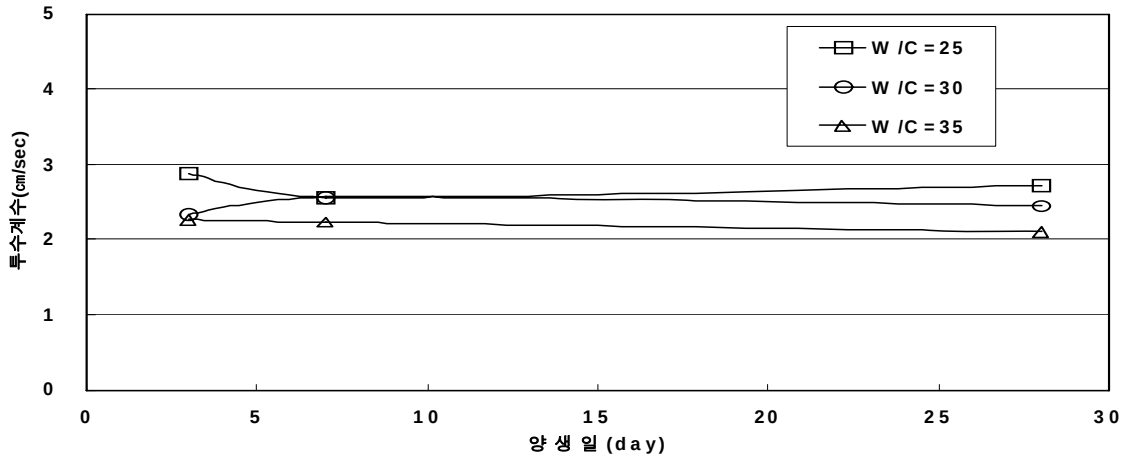
<그림 3.2.28> 시멘트 페이스트와 압축강도와의 관계(W/C=30%)



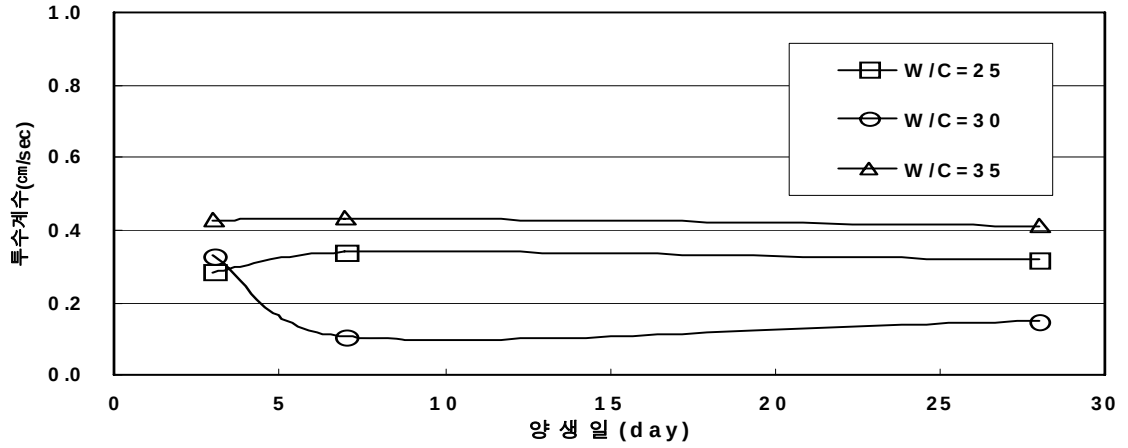
<그림 3.2.29> 양생일수에 따른 시멘트 페이스트와 압축강도와의 관계(W/C=30%)



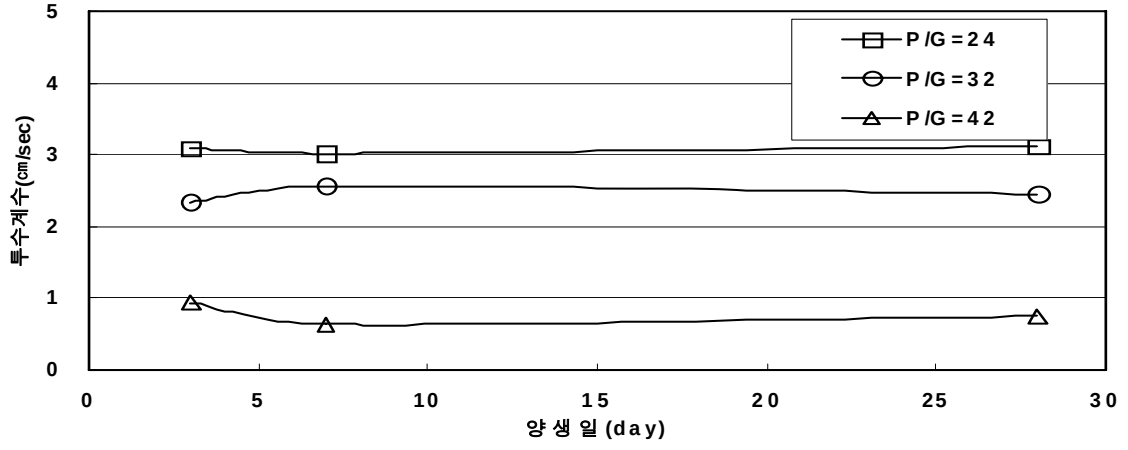
<그림 3.2.30> 양생일수에 따른 시멘트 페이스트와 압축강도와의 관계(W/C=30%)



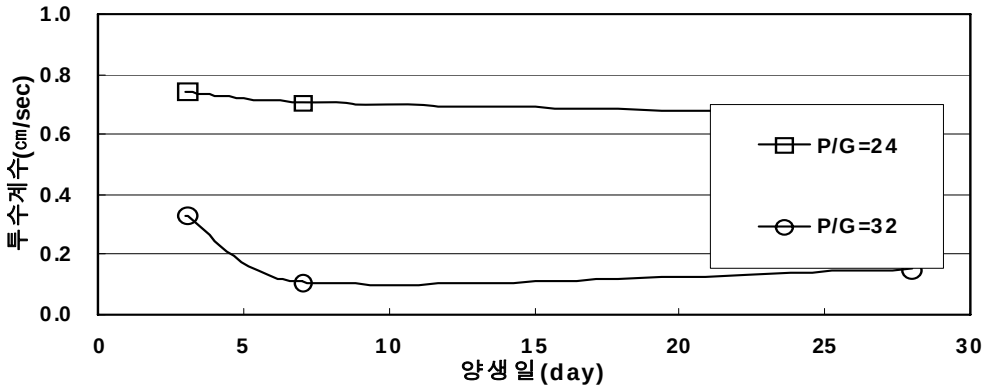
<그림 3.2.31> 공시체 150×300의 투수시험 결과



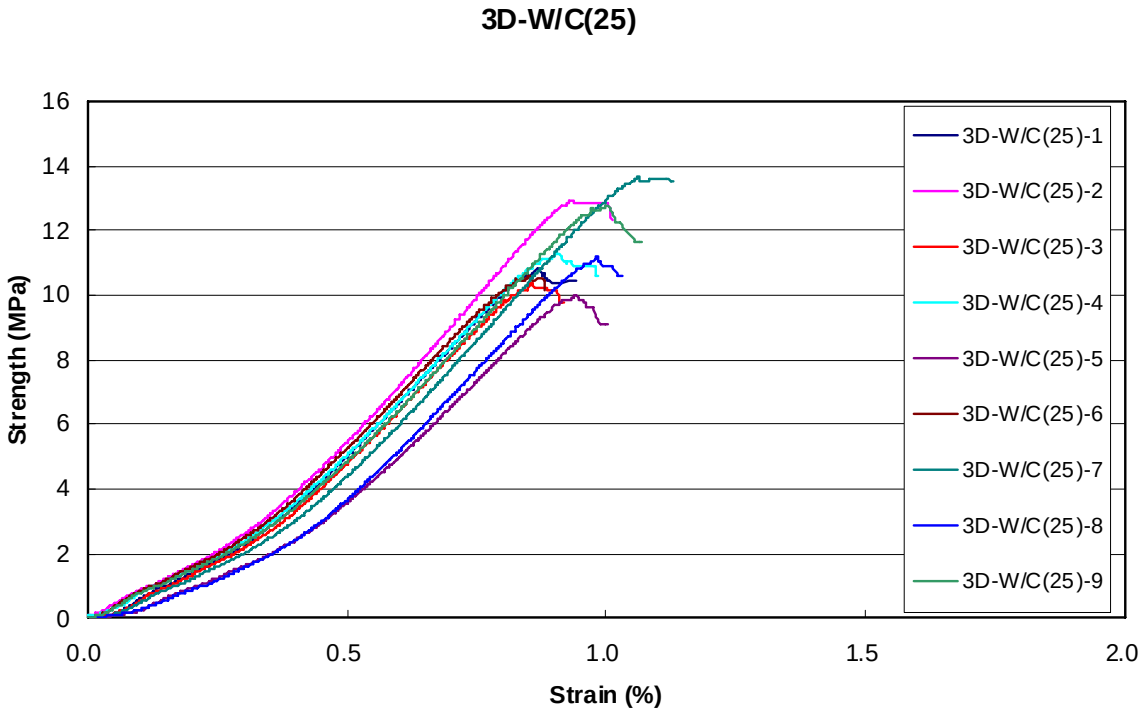
<그림 3.2.32> 공시체 100×200의 투수시험 결과



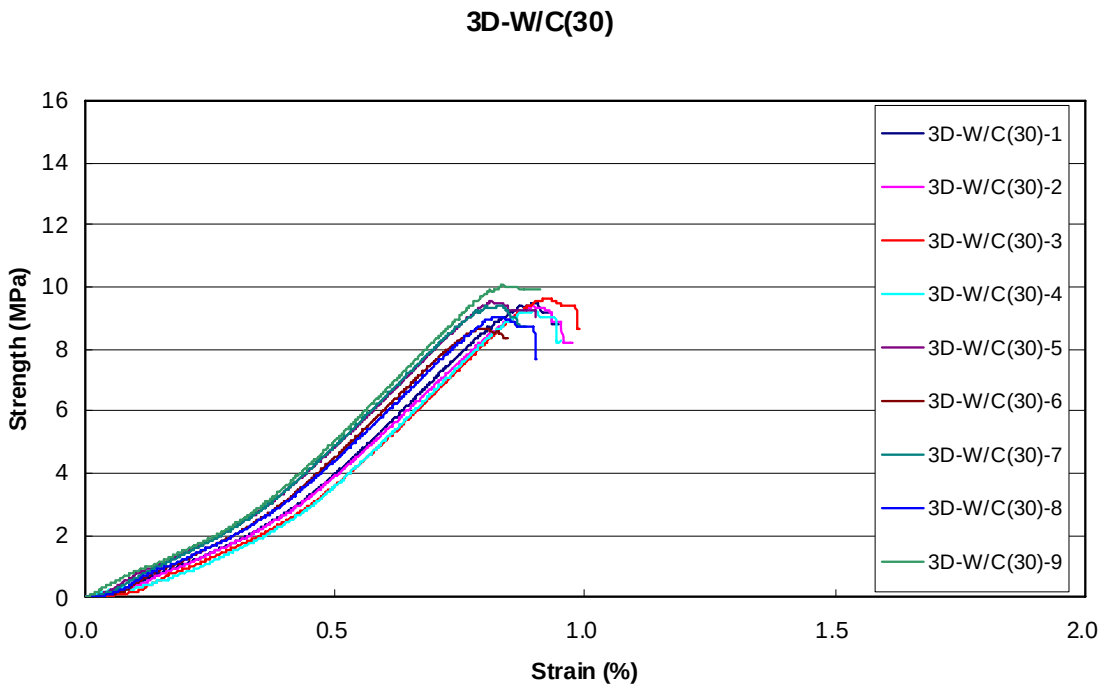
<그림 3.2.33> P/G비와 공시체 150×300의 투수시험 결과



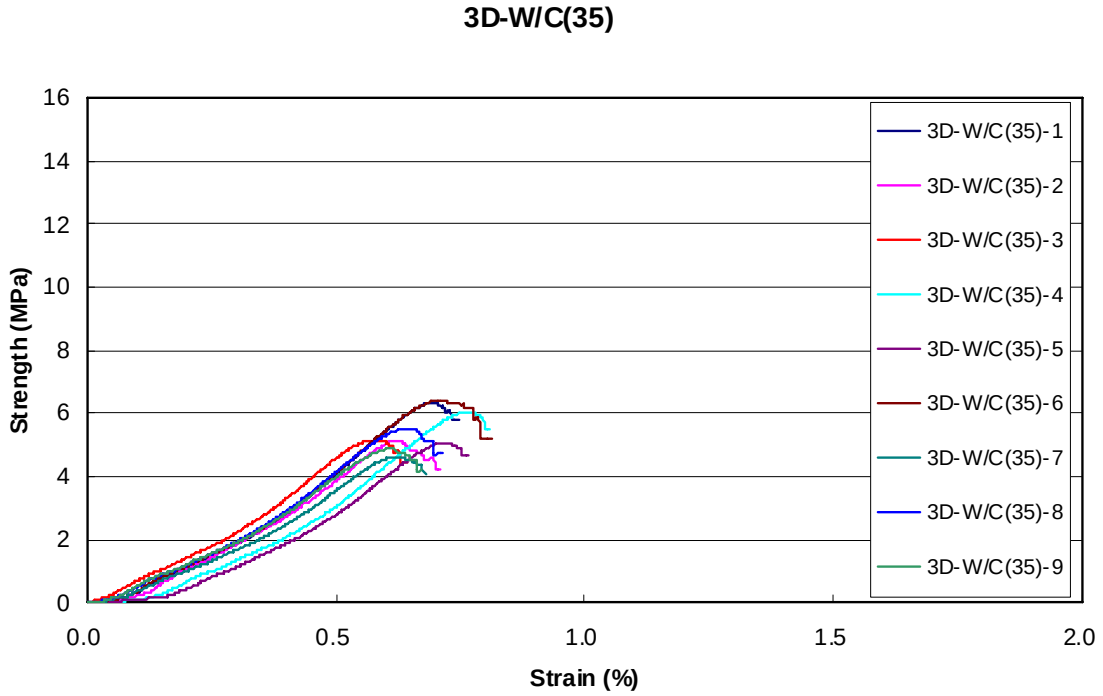
<그림 3.2.34> P/G비와 공시체 100×200의 투수시험 결과



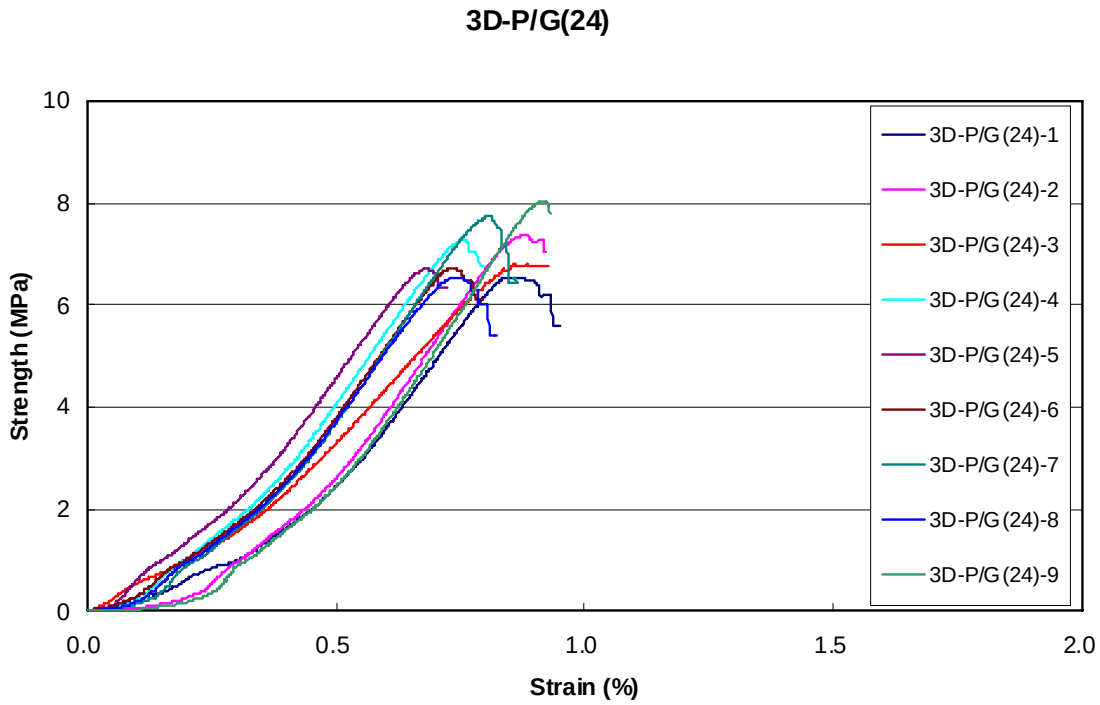
<그림 3.2.35> 3일 양생 W/C=25%에 대한 강도시험 결과



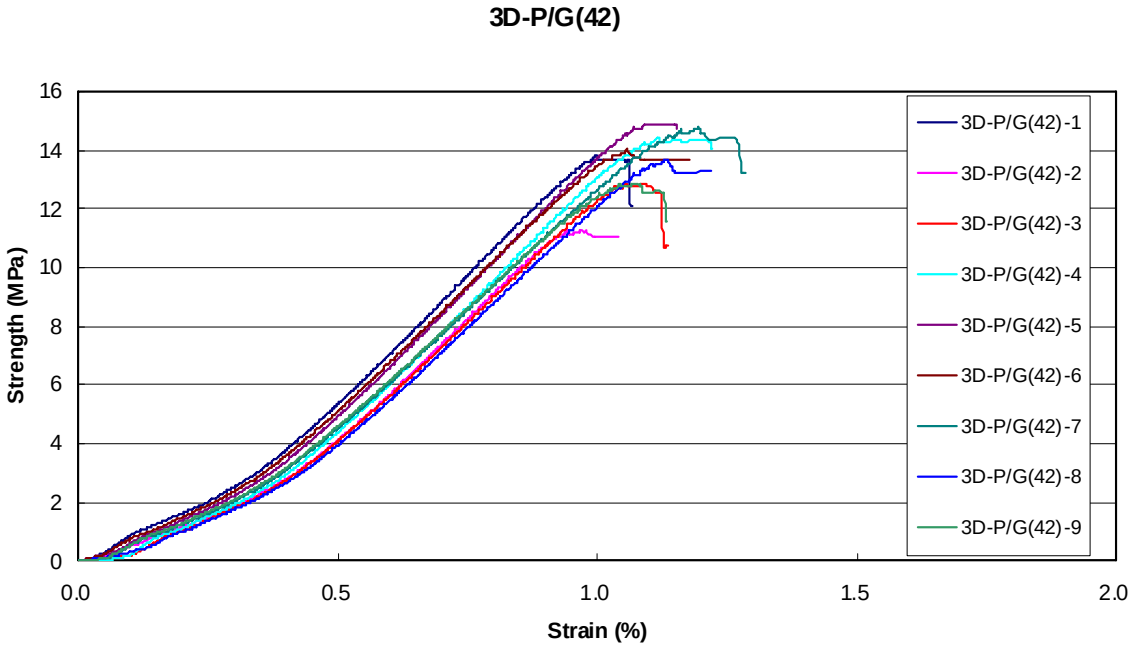
<그림 3.2.36> 3일 양생 W/C=30%에 대한 강도시험 결과



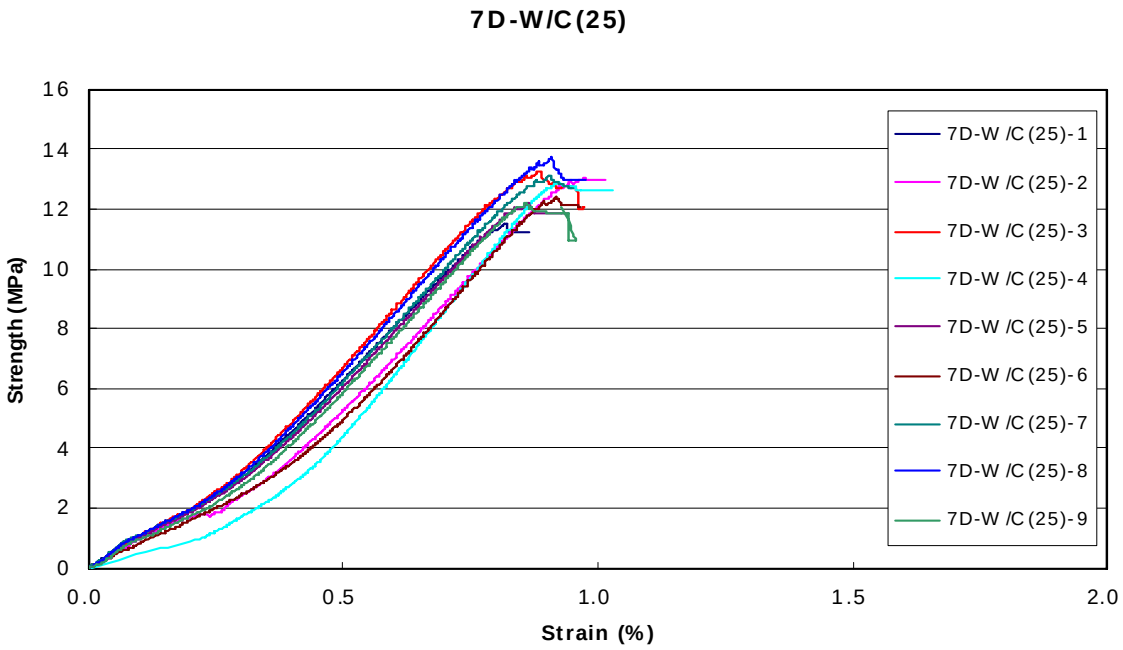
<그림 3.2.37> 3일 양생 W/C=35%에 대한 강도시험 결과



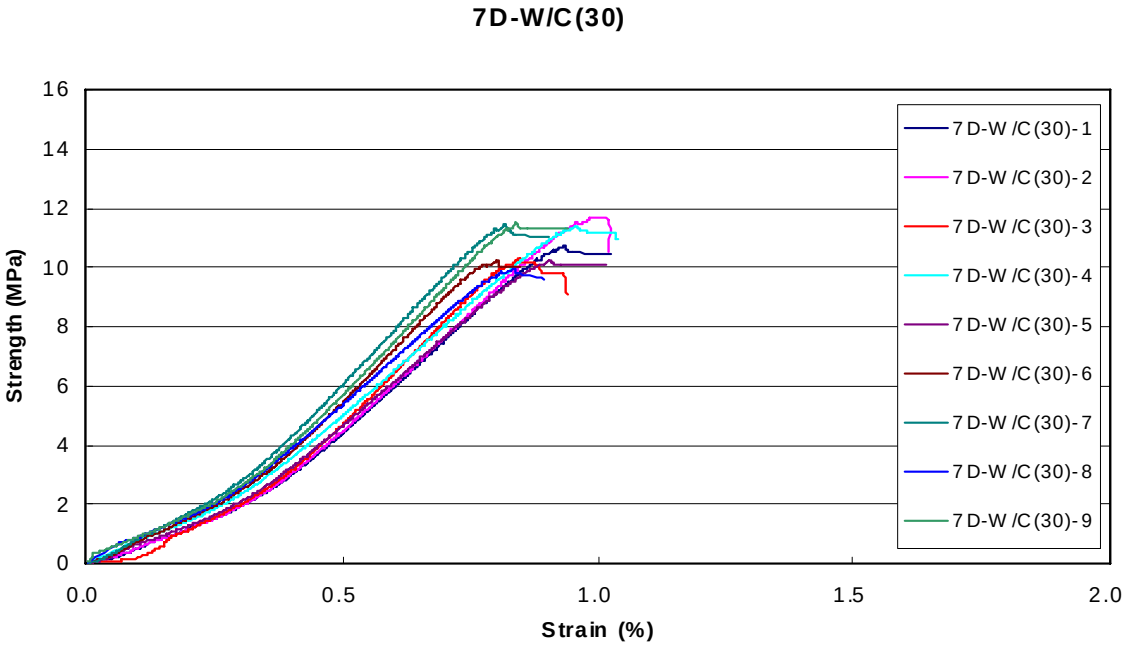
<그림 3.2.38> 3일 양생 P/G=24%에 대한 강도시험 결과



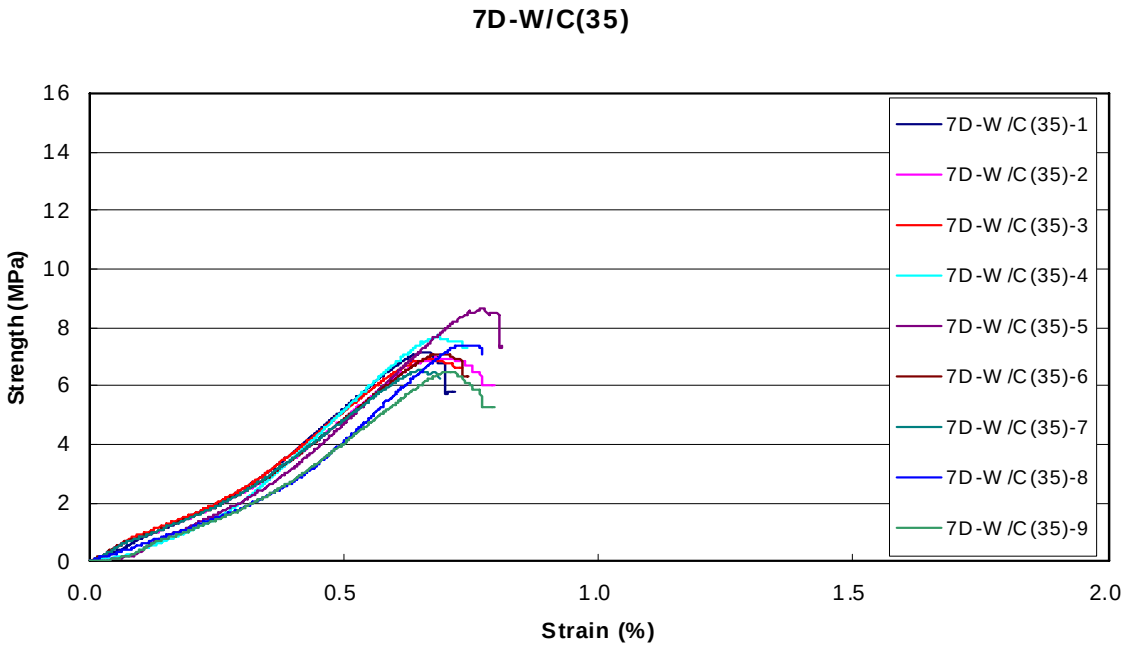
<그림 3.2.39> 3일 양생 P/G=42%에 대한 강도시험 결과



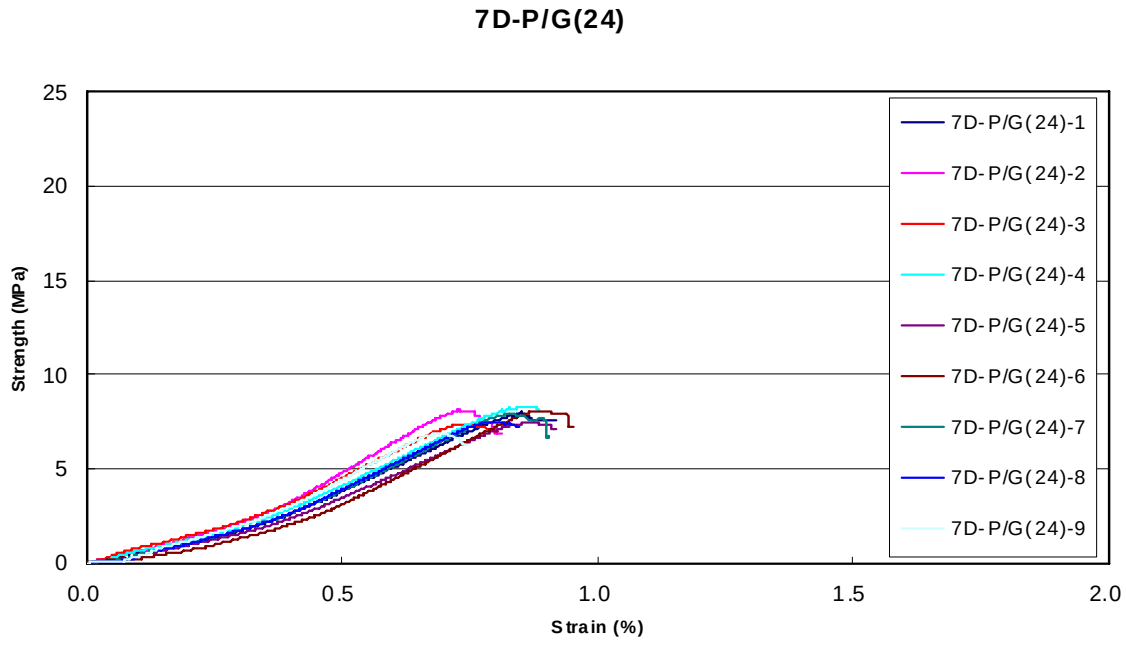
<그림 3.2.40> 7일 양생 W/C=25%에 대한 강도시험 결과



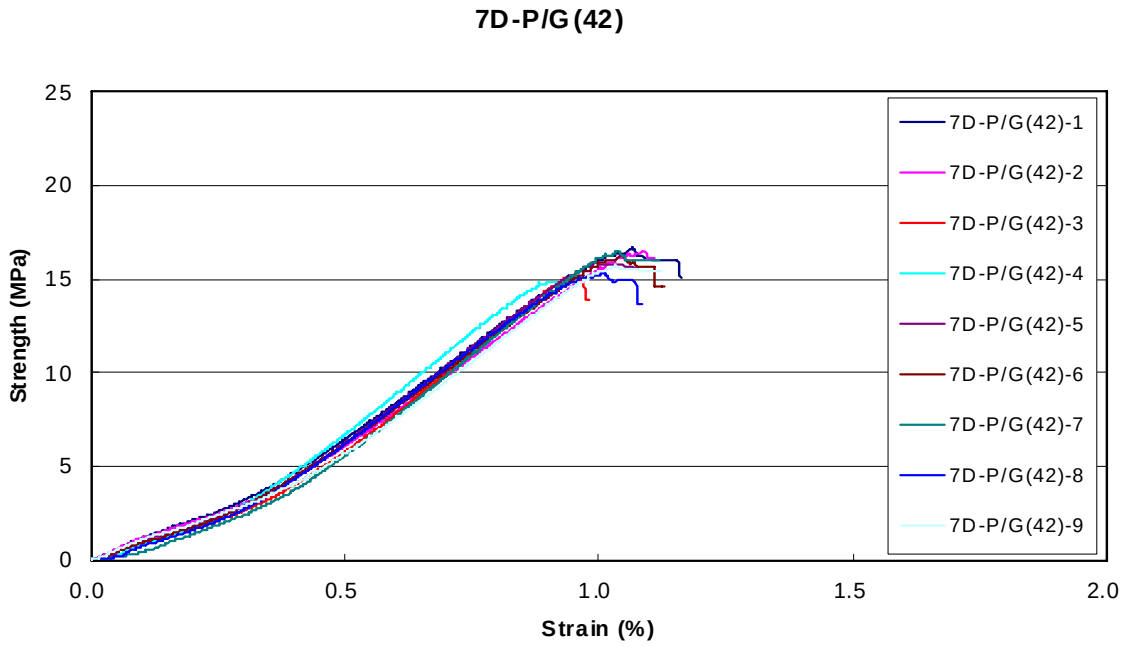
<그림 3.2.41> 7일 양생 W/C=30%에 대한 강도시험 결과



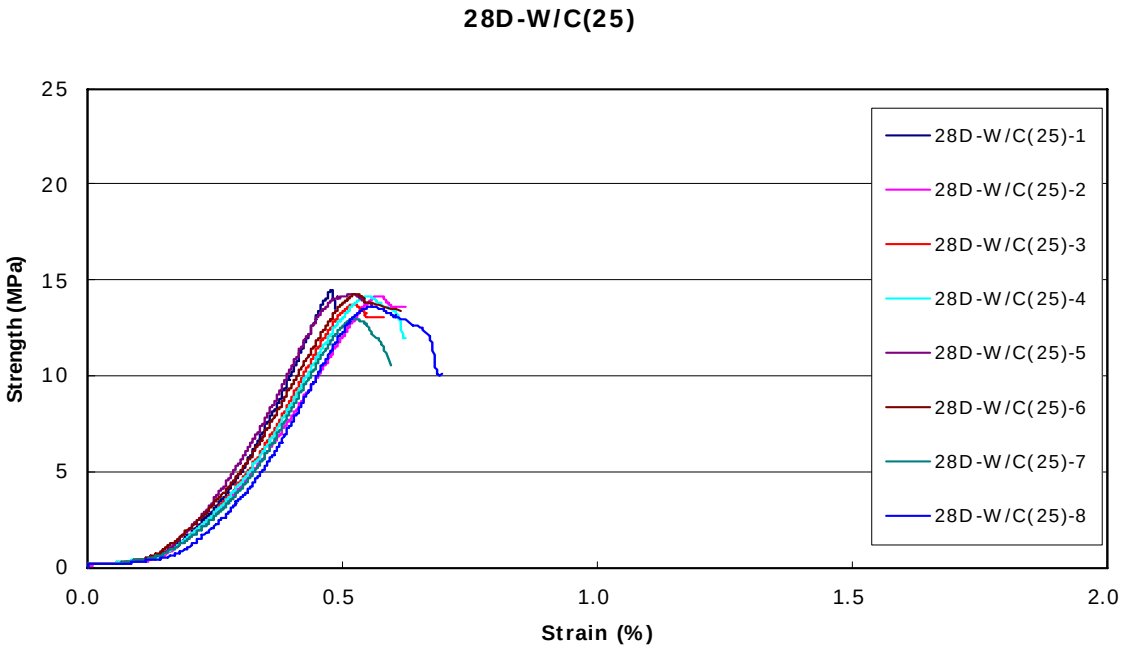
<그림 3.2.42> 7일 양생 W/C=35%에 대한 강도시험 결과



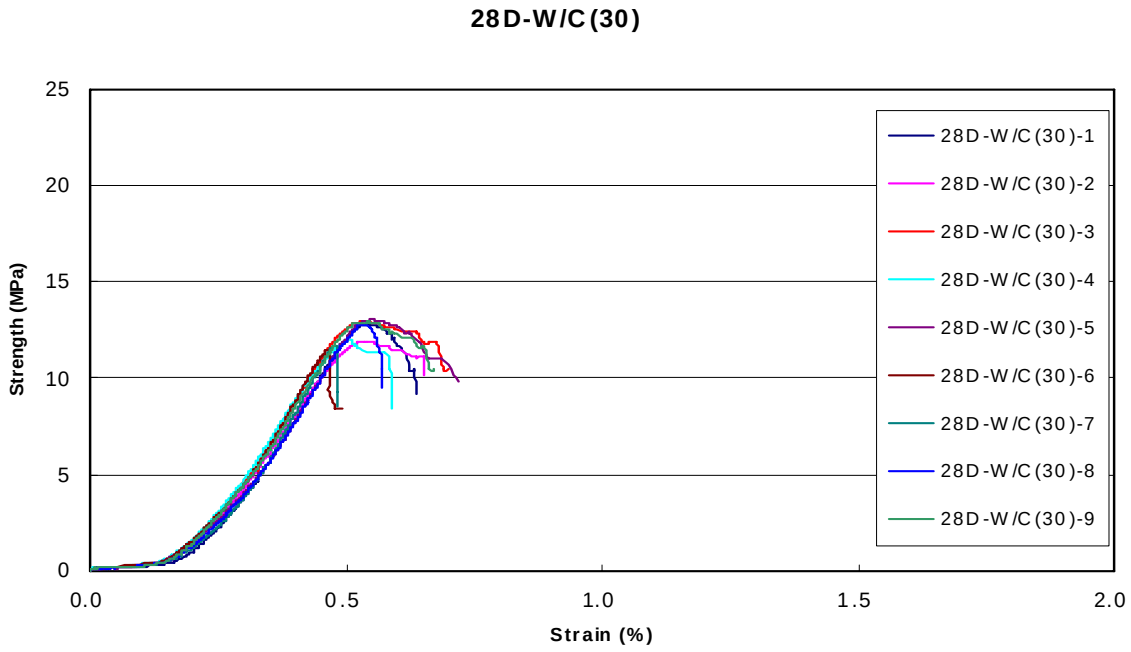
<그림 3.2.43> 7일 양생 P/G=24%에 대한 강도시험 결과



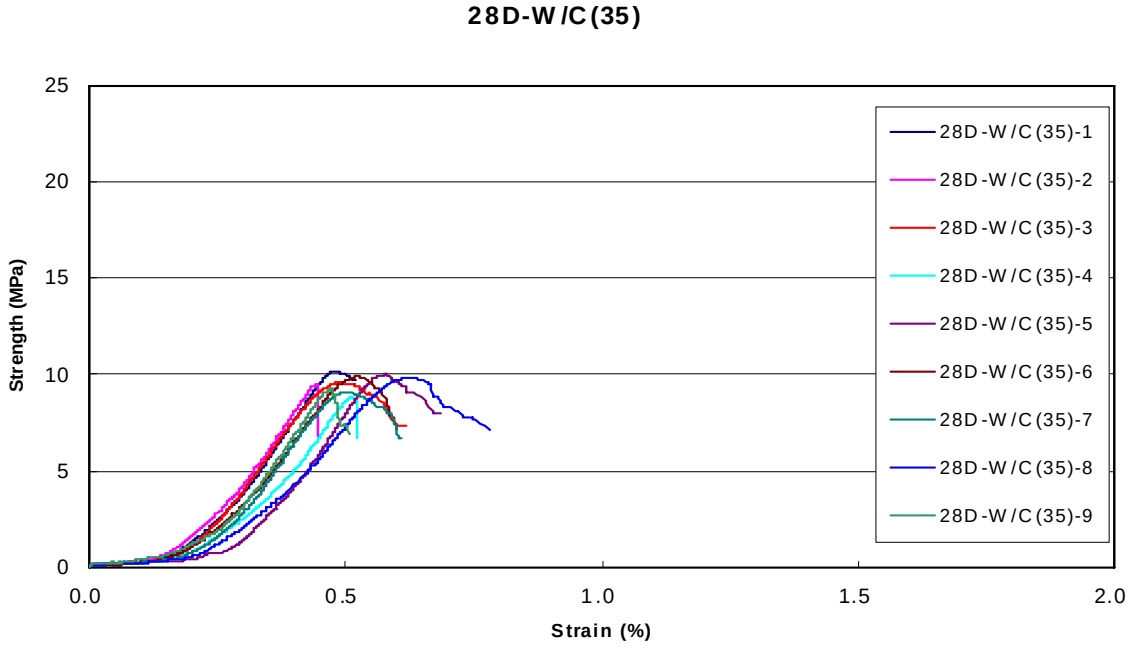
<그림 3.2.44> 7일 양생 P/G=42%에 대한 강도시험 결과



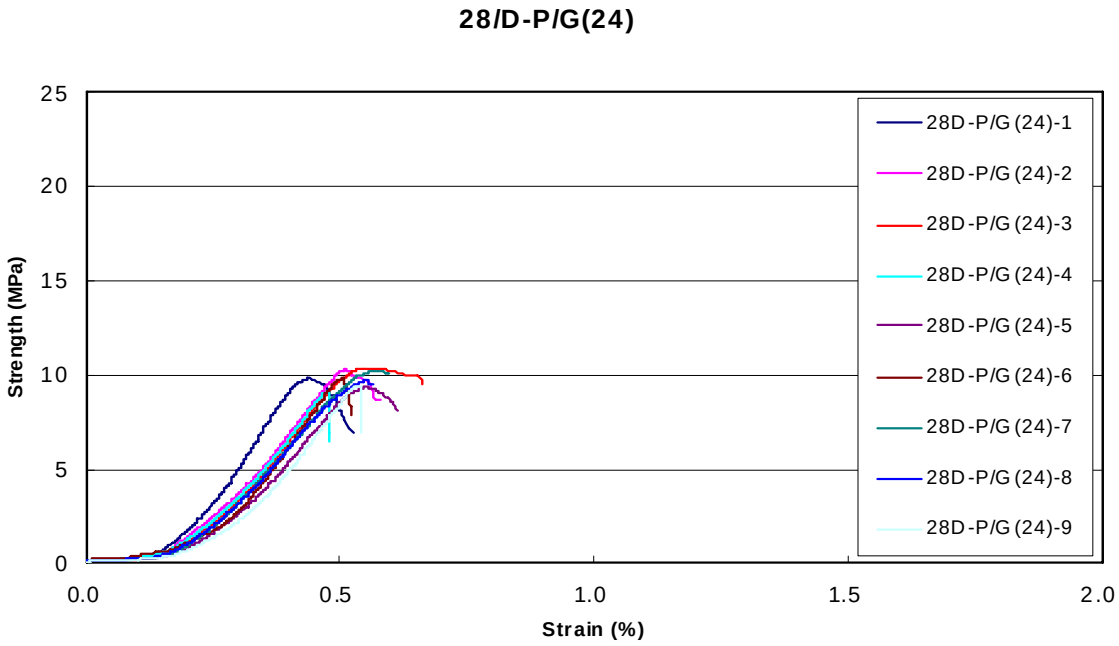
<그림 3.2.45> 28일 양생 W/C=25%에 대한 강도시험 결과



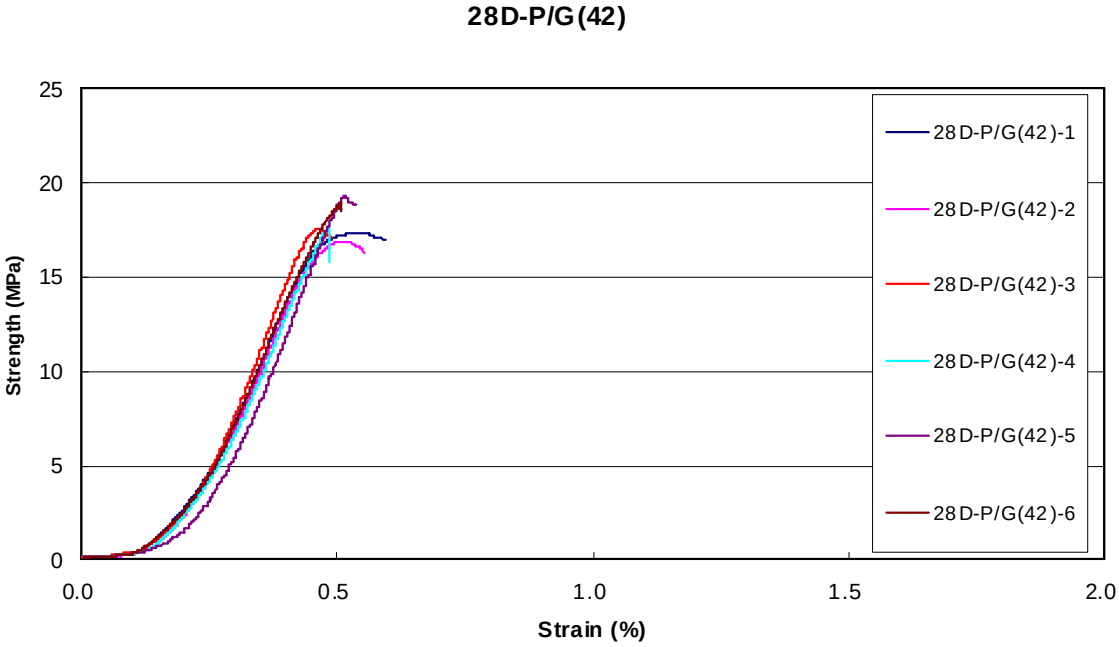
<그림 3.2.46> 28일 양생 W/C=30%에 대한 강도시험 결과



<그림 3.2.47> 28일 양생 W/C=35%에 대한 강도시험 결과



<그림 3.2.48> 28일 양생 P/G=24%에 대한 강도시험 결과



<그림 3.2.49> 28일 양생 P/G=42%에 대한 강도시험 결과

라. 다공질 콘크리트말뚝의 강도 및 투수특성 검토

(1) 시멘트량에 따른 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 강도 및 투수특성 평가

다공질 콘크리트말뚝 조성시 투입되는 시멘트량에 따른 강도 및 투수특성을 평가하기 위하여 <표 3.2.11>과 같이 배합을 실시하여 공시체를 제작하였으며, 결과는 다음과 같다.

<표 3.2.11> 시멘트량에 따른 콘크리트 배합표

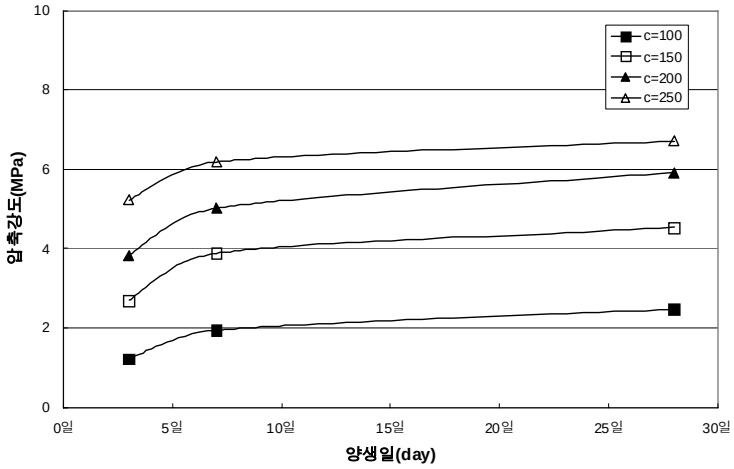
구 분	C=100kg	C=150kg	C=200kg	C=250kg
물(kg)	30.0	45.0	60.0	75.0
시멘트(kg)	100.0	150.0	200.0	250.0
골재(kg)	1,599.8	1,549.5	1,473.6	1,404.1
단위용적(kg)	1,729.8	1,744.5	1,733.6	1,729.1

<표 3.2.12> 압축강도시험 결과

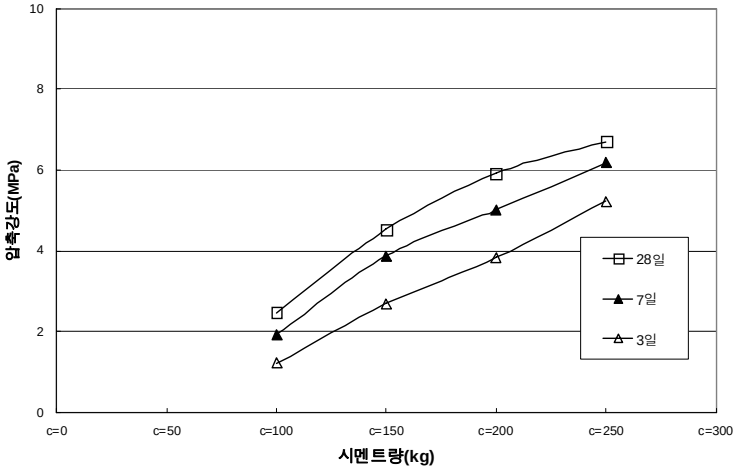
구 분	압축강도(MPa)		
	재령일 3일	재령일 7일	재령일 28일
C=100kg	1.218	1.937	2.470
C=150kg	2.690	3.882	4.534
C=200kg	3.834	5.016	5.921
C=250kg	5.230	6.182	6.709

<표 3.2.13> 투수시험 결과

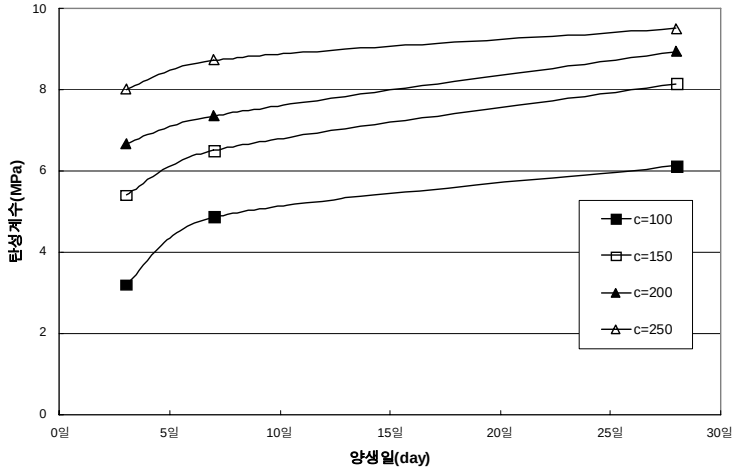
구 분	투수계수(cm/s)		
	재령일 3일	재령일 7일	재령일 28일
C=100kg	-	-	-
C=150kg	3.18	2.46	2.11
C=200kg	0.92	0.83	0.74
C=250kg	0.78	0.71	0.62



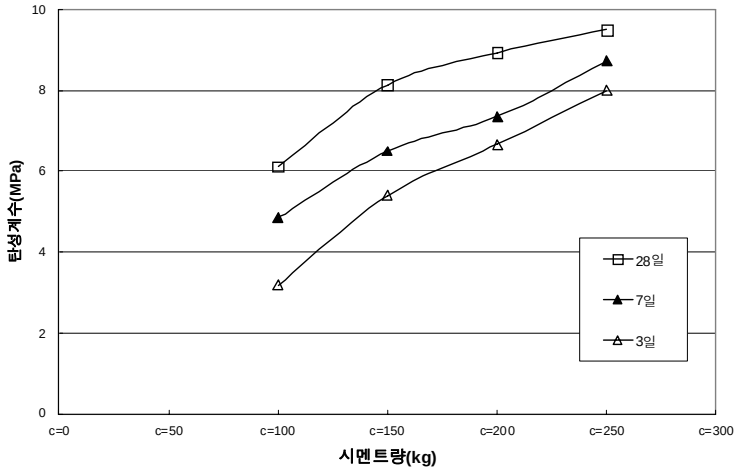
<그림 3.2.50> 양생일에 따른 일축압축강도시험 결과



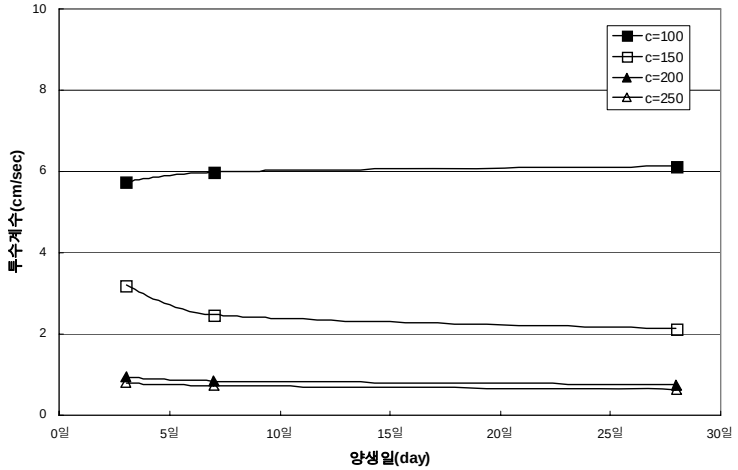
<그림 3.2.51> 시멘트량에 따른 일축압축강도시험 결과



<그림 3.2.52> 양생일에 따른 탄성계수 결과



<그림 3.2.53> 시멘트량에 따른 탄성계수 결과



<그림 3.2.54> 양생일에 따른 투수계수 시험 결과

(2) 지역별 순환골재 다공질 콘크리트의 강도 및 투수특성 평가

지역별로 순환골재에 대하여 C=100kg을 기준으로 다공질 콘크리트말뚝 공시체를 제작하여 강도 및 투수특성을 검토하였으며, 결과는 다음과 같다.

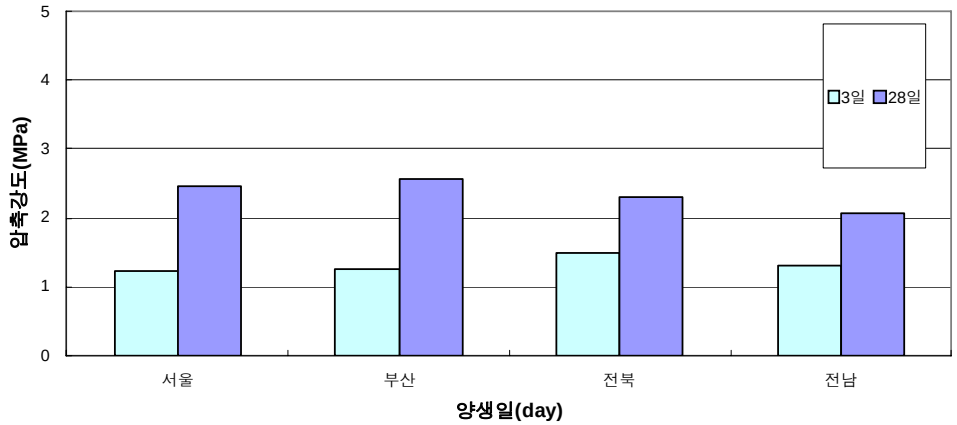
<표 3.2.14> 압축강도시험 결과

구 분	압축강도(MPa)	
	재령일 3일	재령일 28일
서 울	1.218	2.470
부 산	1.268	2.567
전 북	1.489	2.302
전 남	1.315	2.071

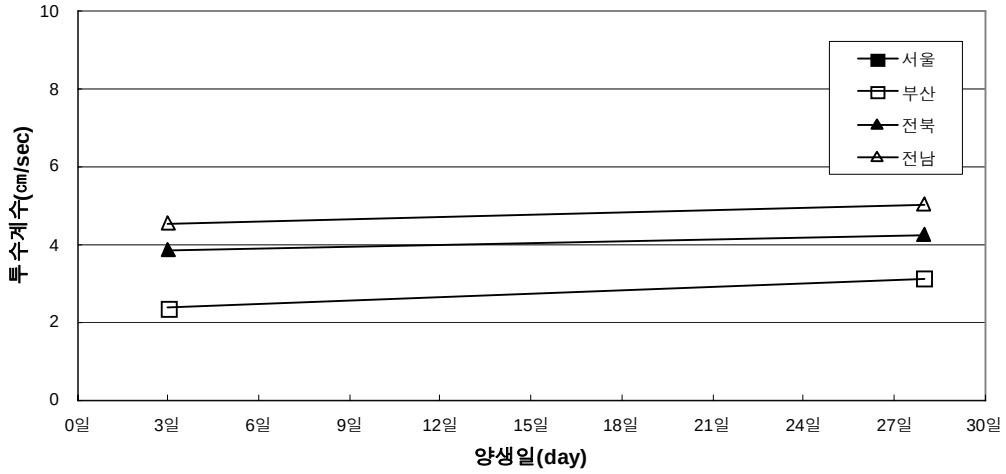
<표 3.2.15> 투수시험 결과

구 분	투수계수(cm/s)	
	재령일 3일	재령일 28일
서 울	-	-
부 산	2.37	3.12
전 북	3.85	4.24
전 남	4.53	5.03

지역별 순환골재를 사용하여 제작한 다공질 콘크리트말뚝 공시체에 대한 압축강도 및 투수계수 산정결과, 재령일 28일을 기준으로 압축강도는 2.1~2.6MPa의 범위를 보이고 있으며 투수계수는 3.1~5.0cm/s의 범위를 나타내고 있어 지역별로 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.



<그림 3.2.55> 양생일에 따른 지역별 압축강도시험 결과



<그림 3.2.56> 양생일에 따른 지역별 투수시험 결과

3. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 품질기준 제시

가. 콘크리트용 순환골재의 품질

① 순환골재의 생산을 위하여 투입되는 폐콘크리트는 환경에 유해한 화학물질, 악취, 콘크리트 품질에 나쁜 영향을 미치지 않는 것을 사용하여야 하며, <표 3.2.16>의 품질기준과 <표 3.2.17> 또는 KS F 2526(콘크리트용 골재)에서 규정하는 입도를 만족하여야 한다.

② 순환골재의 유기이물질 함유량은 KS F 2576(순환골재의 이물질 함유량 시험방법)에 의하여 골재 속에 포함된 비닐, 플라스틱, 목재, 종이 등의 함유량을 확인하고 그 결과치가 총 골재 용적의 1.0% 이하를 만족하여야 한다.

③ 순환골재에 혼합된 폐아스콘, 유리, 슬레이트, 자기류, 적벽돌 등의 무기이물질 함유량은 KS F 2576(순환골재의 이물질 함유량 시험방법)에 따라 이물질을 분리·선별한 후 질량을 측정하여 그 결과치가 총 골재질량의 1.0% 이하를 만족하여야 한다.

<표 3.2.16> 순환골재의 품질기준(KS F)

구 분		순환굵은골재	순환잔골재
절대 건조밀도(g/cm^3)		2.5 이상	2.2 이상
흡수율(%)		3.0 이하	5.0 이하
마모감량(%)		40 이하	-
입자모양판정실적률(%)		55 이상	53 이상
0.08mm체 통과량 시험에서 손실된 양(%)		1.0 이하	7.0 이하
알칼리 골재 반응		무해할 것	
점토 덩어리양(%)		0.2 이하	-
안정성(%)		12 이하	10
이물질 함유량(%)	유기이물질	1.0 이하(용적)	
	무기이물질	1.0 이하(질량)	

<표 3.2.17> 순환골재의 입도기준(KS F 2502)

체의 호칭			통과중량백분율(%)										
			40 mm	25 mm	20 mm	15 mm	10 mm	5 mm	2.5 mm	1.2 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm
순환 굵은 골재	최대 치수 (mm)	25	100	95 ~ 100	-	25 ~ 60	-	0 ~ 10	0 ~ 5	-	-	-	-
		20	-	100	90 ~ 100	-	20 ~ 55	0 ~ 10	0 ~ 5	-	-	-	-
순환잔골재			-	-	-	-	100	90 ~ 100	80 ~ 100	50 ~ 90	25 ~ 65	10 ~ 35	2 ~ 15

나. 순환골재의 운반 및 저장

① 순환골재의 운반 및 저장은 가능한 골재의 종류, 품종별로 분리하며, 대소의 입자가 분리되지 않도록 한다. 또한, 프리웨팅(pre-wetting)이 가능하도록 살수설비를 갖추는 것이 필요하며 저장설비의 바닥은 콘크리트 등으로 하고 적당한 경사를 두어 배수를 고려하며 순환골재를 사용한 콘크리트의 최대 출하량의 1일분 이상에 해당하는 양의 골재를 저장할 수 있도록 한다.

② 순환골재 사용시 골재의 혼입율을 확인할 수 있는 별도의 계량 및 관리방안을 마련하여야 한다.

③ 순환골재의 저장설비 및 저장설비에서 배치플랜트(Batch plant)까지의 운반설비는 골재를 균일하게 공급할 수 있는 것이어야 한다.

다. 순환골재의 품질관리방법

① 순환골재 생산 및 사용자는 본 기준에 따라 품질을 관리해야 하며, 그 책임자를 정하고 담당원의 승인을 받아야 한다.

② 순환골재 생산업체 및 순환골재를 사용하여 콘크리트를 제조하는 자는 KS A ISO

2859-0(계수값 검사에 대한 샘플링 검사 절차)에 따라 시료를 채취하고, 당사자 간의 협의에 따라 순환굵은골재는 <표 3.2.18>, 순환잔골재는 <표 3.2.19>와 같이 시험을 실시하고, <표 3.2.16>의 품질기준과 <표 3.2.17> 또는 KS F 2526(콘크리트용 골재)에서 정하는 입도에 적합한 것을 사용하여야 한다.

③ 순환골재를 생산 및 사용하는 자는 순환골재의 산지 및 종류, 치환율 등을 구입자에게 제시하여야 한다.

<표 3.2.18> 순환굵은골재의 품질관리 방법

항 목		시험 및 검사방법	시기 및 횟수
입 도		KS F 2502	공사 시작 전, 공사중 1회/월 이상 및 산지(순환골재 제조 전의 폐콘크리트)가 바뀐 경우
절대건조밀도(g/cm^3)		KS F 2503	
흡수율(%)			
마모감량(%)		KS F 2508	
입자모양판정실적율(%)		KS F 2527	
0.08mm체 통과량 시험에서 손실된 양(%)		KS F 2511	
점토 덩어리양(%)		KS F 2512	
알카리 골재반응		KS F 2545	공사 시작 전, 공사 중 1회/6개월 이상 및 산지가 바뀐 경우
안정성(%)		KS F 2507	
이물질 함유량	유기이물질	KS F 2576	공사 시작 전, 공사 중 1회/월 이상 및 산지가 바뀐 경우
	무기이물질		

<표 3.2.19> 순환잔골재의 품질관리 방법

항 목		시험 및 검사방법	시기 및 횟수
입 도		KS F 2502	공사 시작 전, 공사 중 1회/월 이상 및 산지(순환골재 제조 전의 폐콘크리트)가 바뀐 경우
절대건조밀도(g/cm^3)		KS F 2503	
흡수율(%)			
입자모양판정실적율(%)		KS F 2527	
0.08mm체 통과량 시험에서 손실된 양(%)		KS F 2511	
알카리 골재반응		KS F 2545	공사 시작 전, 공사중 1회/6개월 이상 및 산지가 바뀐 경우
이물질 함유량	유기이물질	KS F 2576	공사 시작 전, 공사중 1회/월 이상 및 산지가 바뀐 경우
	무기이물질		

라. 순환골재의 적용

① 순환골재를 사용할 경우에는 담당원의 승인을 받아야 하며, 천연골재와 혼합하여 사용하는 것을 원칙으로 한다.
② 순환골재를 계량할 경우 1회 계량 분량에 대한 계량오차는 ±4%로 한다.
③ 순환골재를 사용함에 있어서 용도의 제한은 없으나, 일반 콘크리트와 레디믹스트 콘크리트를 제외한 특수 콘크리트에는 사용하지 않는다. 다만, 서중 및 한중 콘크리트에는 순환골재를 적용할 수 있다.
④ 순환골재를 사용한 콘크리트의 최대 설계기준 강도는 27MPa 이하로 한다.
⑤ 순환골재를 사용하여 설계기준강도 21MPa 이상 27MPa 이하의 콘크리트를 제조할 경우, 순환굵은골재의 최대량은 투입되는 총 굵은골재 용적의 30% 이하로 치환하여 사용할 것을 권장한다.
⑥ 순환골재를 사용하여 설계기준강도 21MPa 미만의 콘크리트를 제조할 경우에 사용되는 순환골재의 최대량은 순환골재의 종류에 관계없이 총 골재용적의 30% 이하로 치환하여 사용할 것을 권장한다.
⑦ 사용하는 순환굵은골재 최대치수는 20mm 또는 25mm 이하로 하되, 가능한 20 mm 이하를 권장한다.
⑧ 순환골재를 사용하여 제조한 콘크리트의 공기량 시험결과는 KS F 4009(레디 믹스트 콘크리트)의 경량콘크리트 공기량 규정인 5.0±1.5%를 만족하도록 한다.
⑨ 순환골재를 사용하여 콘크리트를 제조할 때 사용하는 시멘트는 KS L 5201(포틀랜드 시멘트), KS L 5210(고로 슬래그 시멘트), KS L 5211(플라이애쉬 시멘트)에서 규정한 시멘트를 사용하거나 플라이애쉬(KS L 5405), 고로 슬래그 미분말(KS F 2563) 등을 혼합하여 사용할 수 있다.
⑩ 순환골재 콘크리트 제조에 사용되는 혼화재료는 KS F 4009(레디 믹스트 콘크리트)의 규정에 적합한 재료를 사용하여야 한다.

마. 다공질 콘크리트용 순환골재 품질기준(안)

2005년 1월부터 시행된「건설폐기물 재활용 촉진에 관한 법률」제35조에서는 건설교통부장관은 환경부장관과 협의하여 건설폐기물의 재활용을 촉진하기 위해 순환골재의 용도별 품질기준 및 설계시공지침 등을 마련하도록 규정하고 있다.

본 연구에서는 이러한 지침에서 마련된 콘크리트용 순환골재 품질기준과 연구수행에서 확보한 자료를 근거로 다공질 콘크리트용 말뚝의 순환골재 품질기준(안)과 시험(안)을 제안하고자 한다.

<표 3.2.20> 다공질 콘크리트말뚝용 순환골재의 품질기준(안)

구 분		단 위	순환굵은골재	비 고
절대건조밀도		g/cm^3	2.2 이상	
흡수율		%	7.0 이하	
마모감량		%	40 이하	
입자모양판정 실적율		%	55 이상	
알카리 골재 반응		-	무해할 것	
점토 덩어리량		%	0.2 이하	
안정성		%	12 이하	
이물질 함유량	유기 이물질	%	1.0 이하(용적)	
	무기 이물질	%	1.0 이하(질량)	

① 순환골재를 사용할 경우에는 담당원의 승인을 받아야 하며, 천연골재와 혼합하여 사용하는 것을 원칙으로 한다.
② 순환골재를 계량할 경우, 1회 계량 분량에 대한 계량오차는 ±4%로 한다.
③ 사용하는 순환굵은골재 최대치수는 19~40mm로 하며, 최대치수는 40mm로 한다.
④ 순환골재를 사용하여 콘크리트를 제조할 때 사용하는 시멘트는 KS L 5201(포틀랜트 시멘트)을 사용한다.

[첨부] 다공질 콘크리트말뚝용 순환골재 규격(안)

1. 적용범위

이 규격(안)은 다공질 콘크리트용 말뚝으로 사용되는 폐콘크리트[(1)]로부터 생산된 순환 굵은골재에 대하여 규정한다.[(2)]

주[(1)] 기존 콘크리트 구조물의 철거로부터 얻어지는 콘크리트 또는 파괴된 콘크리트

[(2)] 재생골재에 천연골재가 혼합되어 있는 경우, 혼합골재는 각각의 규격을 만족하여야 한다.

비고 이 규격에서 사용하는 체의 호칭 치수는 KS F 2523에 규정한 것이다.

2. 인용규격

다음에 나타내는 규격은 이 규격에 인용됨으로써 이 규격의 규정 일부를 구성한다. 이러한 인용규격은 그 최신판을 적용한다.

KS A 3101 샘플링 검사 통칙
KS A 5101 시험용 체
KS F 2405 콘크리트용 압축강도 시험 방법
KS F 2501 골재의 시료 채취 방법
KS F 2502 골재의 체가름 시험 방법
KS F 2503 굵은골재의 밀도 및 흡수율 시험 방법
KS F 2508 로스엔젤리스 시험기에 의한 굵은골재의 마모 시험 방법
KS F 2523 골재에 관한 용어의 정의
KS F 2527 콘크리트용 부순 골재

3. 일반적 성질

3.1 순환골재는 알맞은 입도를 가지며 유기 불순물 등 콘크리트의 품질에 나쁜 영향을 미치는 해로운 양의 물질을 함유하지 말아야 한다.

4. 물리적 성질

4.1 순환굵은골재의 물리적 성질은 <표 3.2.21>과 같다.

<표 3.2.21> 순환골재의 물리적 성질

종 목 / 항 목	순환굵은골재
흡수율(%)	7.0 이하
절대건조밀도(g/cm^3)	2.2 이상
마모감량(%)	40 이하
입자모양 판정 실적율(%)	55 이상

5. 입도

5.1 순환골재의 입도는 <표 3.2.22>의 범위를 표준으로 한다.

<표 3.2.22> 순환골재의 입도

체를 통과하는 질량 백분율(%)			
골재의 종류	체의 호칭치수[(3)](mm) / 체의 크기(mm)	40	20
순환굵은골재	40	100	-
	20	-	0

주 (3) 여기에서 체는 각각 KS A 5101에 규정한 표준 망체 37.5mm, 19mm에 해당된다.

6. 시료채취 및 시험방법

특별한 규정이 없는 한, 다음 방법에 따라 시료를 채취하고 시험해야 한다. 시험은 시험규정에 맞고, 또 다공질 콘크리트에 사용될 입도에 맞는 대표적인 시료에 대하여 한다.

6.1 시료채취방법 KS F 2501에 따른다.

6.2 입도시험 KS F 2502에 따른다.

6.3 절대건조밀도 및 흡수율 시험	KS F 2503과 KS F 2504에 따른다.
6.4 입자모양 판정 실적율 시험	KS F 2527에 따른다.
6.5 압축강도시험	KS F 2405에 따른다.
6.6 마모감량시험	KS F 2508에 따른다.

7. 검사

검사는 KS A 3101 또는 당사자 간의 협정에 따른 로트의 크기를 결정하고, 합리적인 샘플링 검사방법에 따라 시료를 채취하여 6.의 시험방법으로 시험하고, 4.~5.의 규정에 적합한 것을 합격으로 한다.

8. 표시

다공질 콘크리트용 순환골재의 납품서에는 다음 사항을 표시하여야 한다.

a) 명칭 및 종류

보기 다공질 콘크리트용 순환굵은골재 1종

- 1종: 콘크리트용 순환골재의 흡수율에 의한 분류
- 다공질 콘크리트용 순환굵은골재: 콘크리트용 순환골재의 종류

b) 제조자명 또는 채취장소

c) 출하 연월일

d) 질량 또는 부피

e) 납품 장소명

9. 보고

생산자는 구입자로부터 요구가 있을 경우에는 시험성적서를 제출하여야 한다.

제 3 절 혼합재료(모래)와 순환골재의 역학적 특성 분석

1. 모래다짐말뚝 및 순환골재 다공질 콘크리트말뚝에 대한 삼축압축시험

가. 시험목적

다공질 콘크리트말뚝의 공학적 특성을 평가하여 기존 다짐말뚝공법과의 비교분석을 위하여 인위적으로 다공질 콘크리트-점토 및 모래-점토의 복합지반을 조성하여 비배수 조건에 의한 삼축압축시험을 치환율과 구속압을 변경하여 실시하였으며, 복합지반의 응력-변형률 관계, 과잉간극수압, 강도정수 등을 정량화하여 다공질 콘크리트말뚝에 의하여 조성된 복합지반의 전단거동특성을 규명하고 공학적 우수성을 평가하였다.

나. 사용재료

(가) 사용재료의 공학적 특성

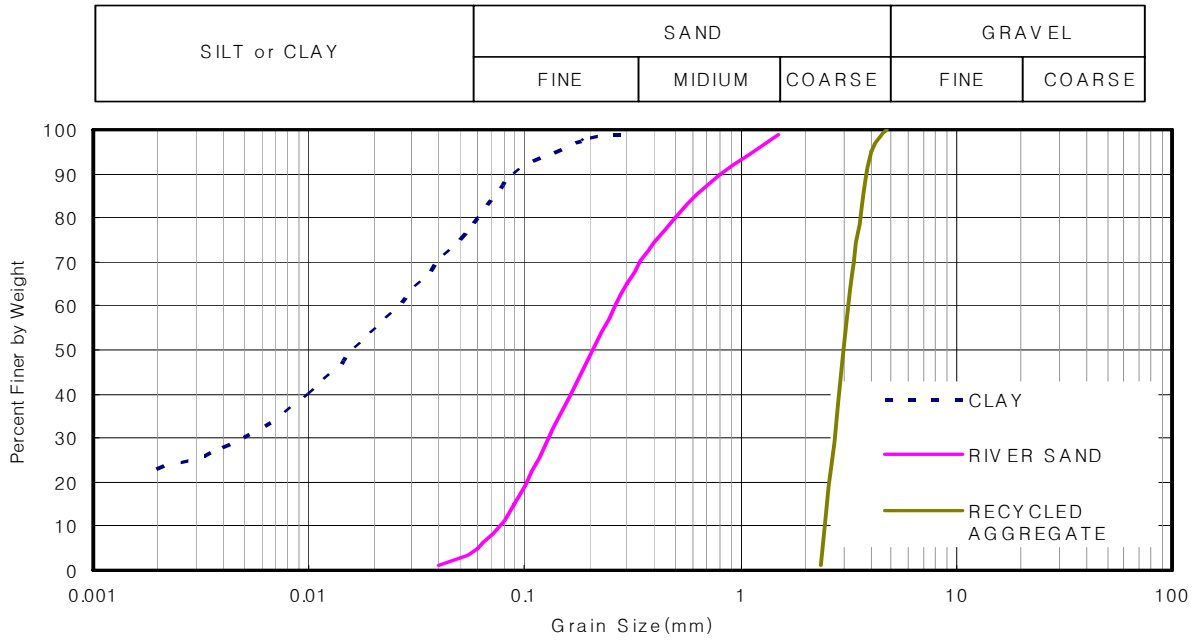
삼축시험에는 연약지반을 재현하기 위한 점토와 치환재로서 모래 및 다공질 콘크리트를 사용하기 위해서 점토는 인천 OO지구에서 구한 카오리나이트(Kaolinite) 성분의 실트질 점토로서 시험에는 #200체 통과분을 사용하였다. 모래는 일반 강모래를 시험사용에 적당하도록 2mm 이상의 입자를 제거하여 사용하였다. 순환골재의 경우 시험의 규모를 고려하여 10mm 이하 순환잔골재를 사용하였다.

모래 및 순환골재 시료의 최대건조단위중량(γ_{dmax})은 몰드의 외벽을 타격봉으로 두드려 다짐하는 타격봉 시험으로 가장 조밀한 상태의 건조단위중량을 구했으며, 최소건조단위중량(γ_{dmin})은 몰드 바닥에서 깔때기를 대고 시료를 채우는 깔때기 채우기 시험으로 가장 느슨한 상태의 건조단위중량을 구하였다(이상덕, 1996).

이들 시료의 특성치를 <표 3.3.1>에 정리하였으며, 입도분포는 <그림 3.3.1>에 도시하였다.

<표 3.3.1> 시험에 사용된 재료의 특성치

Soil Type	Mechanical Characteristics							
	Atterberg Limit		US CS	Permeability (cm/s)	Coefficient of Consolidation, C_v(cm^2/s)	Dry Density		Relative Density, D_r(%)
	LL(%)	PI				Max. (kN/m^3)	Min. (kN/m^3)	
Clay	23.1	9.3	CL	-	4.2×10^{-4}	-	-	-
River Sand	-	-	SP	3.1×10^{-3}	-	17.5	12.8	71.2
Recycled Aggregate	-	-	GP	3.8×10^{-1}	-	16.1	14.6	69.8



<그림 3.3.1> 사용시료의 입도분포곡선

다. 시험방법

(1) 점토시료 성형

본 연구에서는 불교란시료 채취의 어려움이 있어 재성형 시료를 제작하였다. 이에 점토지반인 인천 OO지구 시료를 사용하여 재성형 시료를 제작하였다.

시료의 액성한계 2배의 함수비로 시료를 반죽하여 충분히 교반한 후 슬러리 상태로 만들었다. 그 상태로 증발되지 않도록 포장을 한 후 2일간 방치하여 포화를 시켜 재성형 장치에 슬러리를 천천히 투입하였다.

그 후 양면배수상태로 상재하중을 가하여 재성형 시료를 만들었다. 이때 상재하중은 표준압밀시험과 마찬가지로 10kPa, 20kPa, 40kPa 순으로 하중증가비를 2로 하고 배수거리를 고려하여 36시간 동안 압밀을 시켰다.

또한 심도에 맞추어 최대상재하중을 계산하여 최종하중까지 가하였다. 압밀이 완료된 시료는 공시체 규격에 맞게 해체하여 항온항습기에 보관하여 필요한 실험에 사용하였다.

<그림 3.3.2>는 재성형 시료 제작장치에 담긴 슬러리의 모습을 보여준다.



<그림 3.3.2> 재성형 시료 제작 장치

(2) 삼축압축시험용 복합토의 조성(모래-점토)

점토시료 안에 소정의 상대밀도로 조성된 모래말뚝을 설치하여 모래-점토 복합토를 조성하였다.

모래말뚝은 각 치환율별로 조성된 투명케이싱에 상대밀도 약 70%로 다짐봉을 이용하여 다지면서 조성하였으며(<그림 3.3.3(a)>), 다짐시 물을 첨가하여 모래가 완전히 포화되도록 하였다.

그리고 복합토를 조성할 때 발생할 수 있는 시료교란을 줄이고자 조성된 모래말뚝을 냉장고에 얼려 사용하였다. <그림 3.3.3(b)>는 본 연구에서 사용한 동결된 모래말뚝을 보여주고 있다.

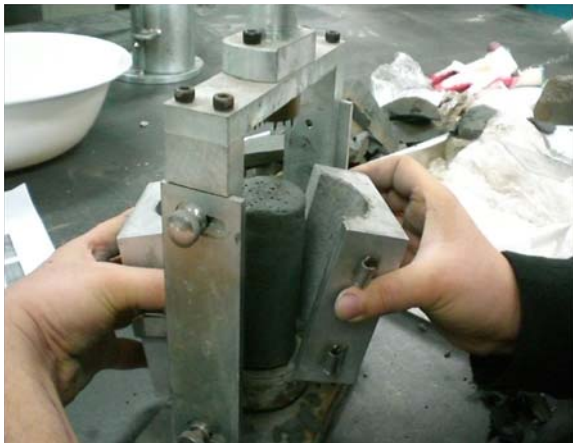
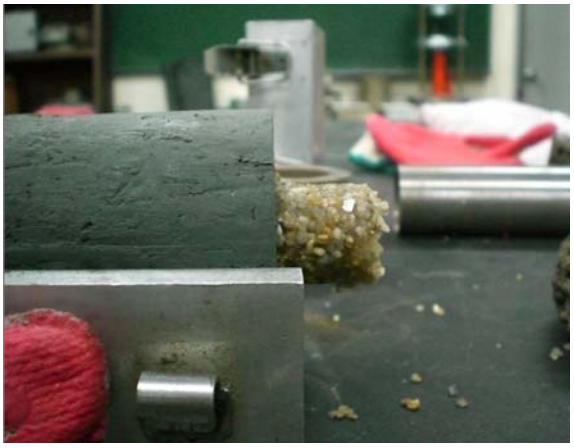


(a) (b)

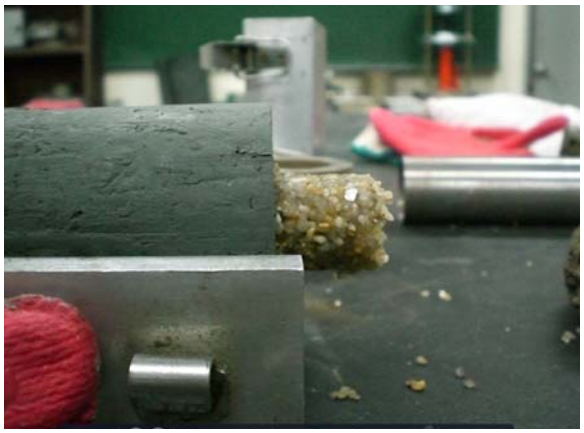
<그림 3.3.3> 모래시료의 제조 및 치환율별 동결된 모래시료

동결된 모래말뚝을 점토시료에 설치하는 방법은 기제작된 마이터박스와 상하부캡을 이용하였다. 치환율에 맞게 제작된 케이싱을 점토 중앙에 삽입한 후 점토시료가 교란되지 않도록 천천히 인발한다.

그 후 점토 안에 생긴 공동 안에 얼린 모래말뚝을 천천히 밀어 넣어 모래-점토 복합토를 치환율별로 조성한 후, 동결된 모래말뚝이 해동될 때까지 방치한 뒤에 시험을 실시하였다. <그림 3.3.4>~<그림 3.3.5>는 복합토 조성과정을 나타내었다.

<그림 3.3.4> 점토시료의 성형 및 케이싱 삽입




<그림 3.3.5> 모래말뚝 삽입 및 복합토 조성완료

(3) 삼축압축시험용 복합토의 조성(순환골재-점토)

다공질 콘크리트말뚝의 경우 1종 순환골재를 사용하여 각 치환율별로 시료를 제작한 후 물/시멘트비 35%, 단위중량 1.8tf/m^3로 다공질 콘크리트말뚝을 조성하여 3일간 양생을 시켰다.

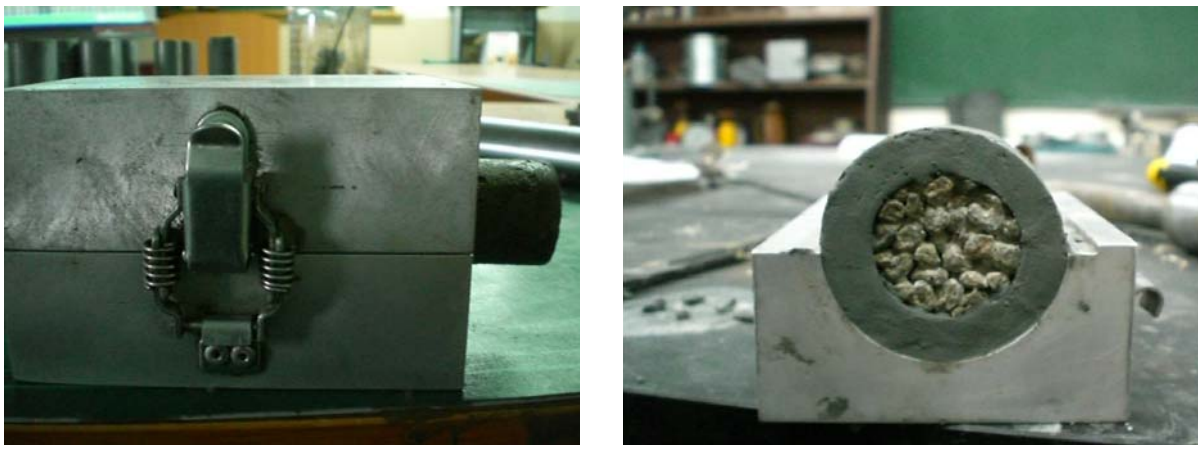
다공질 콘크리트를 점토시료에 설치하는 방법은 기제작된 마이터박스와 상하부캡을 이용하였다. 치환율에 맞게 제작된 케이싱을 점토 중앙에 삽입한 후에 점토시료가 교란되지 않도록 천천히 인발한다. 그 후 점토 안에 생긴 공동 안에 기제작된 다공질 콘크리트말뚝을 천천히 밀어 넣어 순환골재-점토 복합토를 치환율별로 조성한 후 삼축압축시험을 실시하였다. <그림 3.3.6>~<그림 3.3.8>은 복합토 조성과정을 나타내었다.



<그림 3.3.6> 다공질 콘크리트시료의 제조 및 치환율별 다공질 콘크리트말뚝



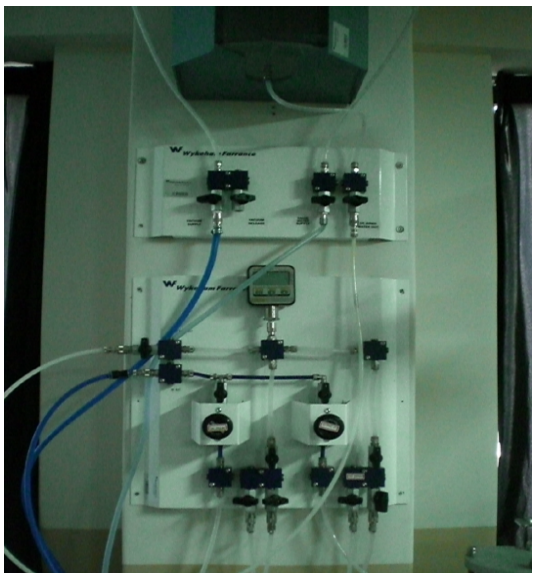
<그림 3.3.7> 점토시료 성형 및 케이싱 삽입



<그림 3.3.8> 다공질 콘크리트말뚝 삽입 및 복합토 조성완료

라. 시험장치

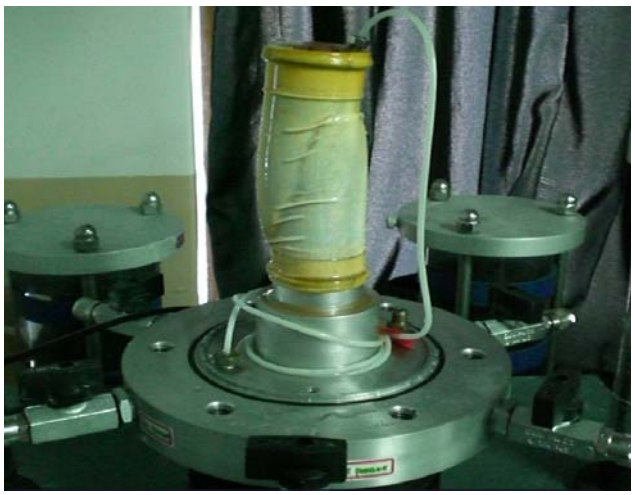
실내시험으로 연약지반개량을 재현하기 위하여 비배수조건으로 실험하고 현장응력상태를 재현할 수 있는 삼축압축시험이 현장여건에 가장 적합하다고 판단되어 복합지반에 대한 삼축압축시험을 수행하였으며 치환재의 입도를 고려하여 시료의 직경은 50mm, 높이는 100mm를 기준으로 시험을 실시하였다. 치환율 및 구속압 조건을 달리하여 전단거동을 파악하였다.



<그림 3.3.9> 삼축압축시험의 가압장치



<그림 3.3.10> 압밀완료 후 전단시험 전경



<그림 3.3.11> 전단시험에 의해 파괴된 시료

공시체를 제작한 후 공시체의 포화를 위하여 약 4kPa의 압력으로 이산화탄소를 공시체의 하부 캡으로 주입시키고 상부 캡을 통하여 공기가 빠져나가 시료 내에 이산화탄소로 치환되도록 1시간 정도 순환시켰다.

시료 내의 공기를 일정압력 이상에서 물에 잘 녹는 이산화탄소로 치환함으로써 시료의 포화도를 거의 100%까지 높일 수 있으며, 이산화탄소 치환이 끝나게 되면 동수경사를 이용하여 탈기수를 시료 내부로 완전히 순환될 때까지 주입시켰다. 모든 순환이 종료되면 삼축장비에 Cell을 장착하여 포화단계로 넘어가게 된다.

포화시에 구속압과 배압을 단계별로 증가시켜 Skempton의 B-value가 0.95 이상이 될 때까지 압력을 증가시켰다. 이에 만족할 경우 구속압을 고정하고 배압을 낮추어 배수시킴으로써 압밀을 하였다.

원하는 구속압에 도달하게 되면 비배수상태로 0.1%/min의 변형률로 전단을 하여 변형률에 따른 축차응력, 간극수압을 측정하였다.

이와 같은 시험을 구속압을 50kPa, 100kPa, 200kPa로 달리 하여 3회 이상 반복함으로써 응력-변형률, 간극수압-변형률 및 파괴포락선을 작성하여 각 시료별 강도정수를 구하였다. 시험조건을 정리하면 <표 3.3.2>와 같다.

<표 3.3.2> 삼축압축시험 조건

치환율(%)	시료의 제원(mm)	배수조건	적용구속압(kPa)	제어방식
15(19.5)	50(직경) 100(높이)	CIU	50 100 200	Strained Controlled Test
35(29.5)				
60(39.0)				

주) 치환율의 ( )안은 사용된 치환재의 직경(mm)을 나타냄. 즉, 치환율은 치환재의 단면적/점토의 단면적

마. 시험결과

(1) 응력-변형율 관계

(가) 모래-점토 복합지반

모래-점토 복합토에 대한 압밀 비배수 삼축압축시험의 응력-변형률 관계는 전반적으로 치환율과 구속압이 증가할수록 파괴시 변형률이 증가하는 변형경화(strain hardening)의 거동양상을 보였다.

구속압이 상대적으로 낮은 경우는 거의 정규압밀점토에 가까운 거동을 보이나 구속압이 증가할수록 파괴시 변형률은 계속 증가하는 거동양상을 보였는데, 이것은 비배수 전단시에는 부피변화가 발생하지 않아야 하지만 복합시료 내부의 치환재로 사용된 모래의 부피가 팽창하려는 다일러턴시(dilatancy) 현상으로 인하여 시료가 계속 파괴에 저항하기 때문인 것으로 판단된다.

<그림 3.3.12>에 치환율별 CIU 시험의 복합토 응력-변형률 관계를 나타내었으며, <그림 3.3.13>의 경우 구속압별 응력-변형률 관계를 나타내었다.

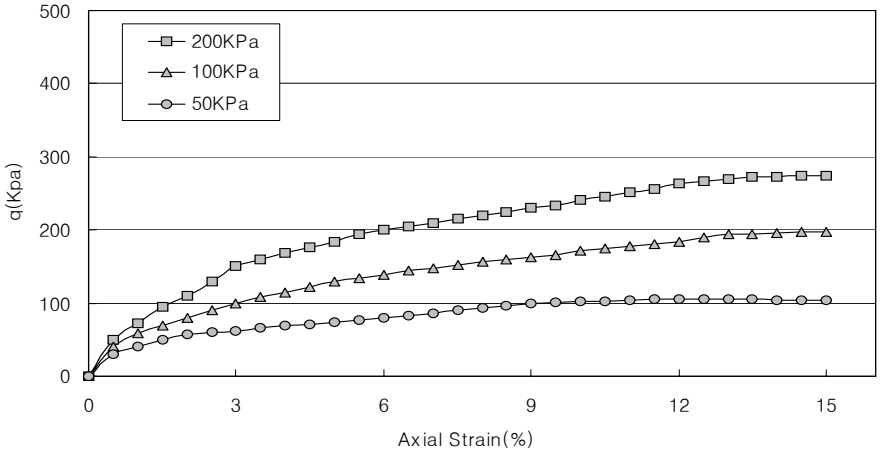
(나) 순환골재-점토 복합지반

순환골재-점토 복합토에 대한 압밀 비배수(CIU) 삼축압축시험의 응력-변형률 관계는 전반적으로 치환율과 구속압이 증가할수록 파괴시 취성파괴의 거동을 보였다.

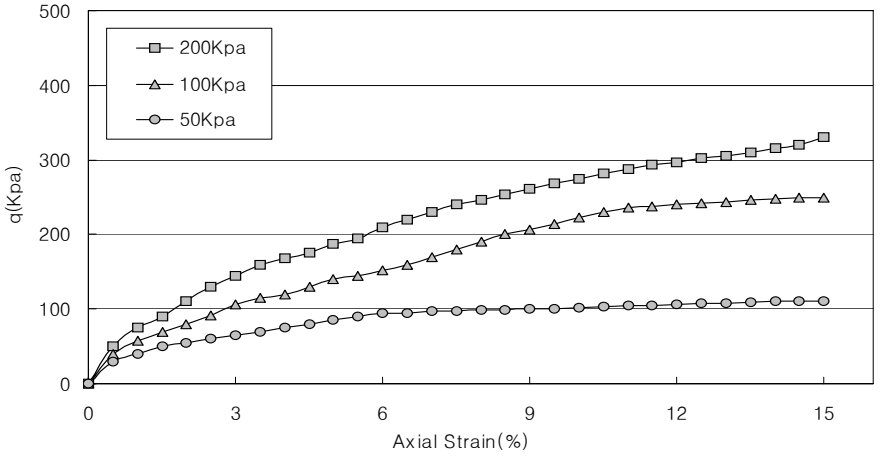
구속압이 증가할수록 파괴시 변형률은 계속 증가하다가 최대주응력의 peak점을 지난 후 계속 감소하는 변형연화(strain softening) 현상을 보였다. 또한 구속압의 변화에 비해 응력증가는 크게 발생하지 않았으며 이것은 비배수 전단시에는 복합시료 내부의 강도보다는 치환재로 사용된 다공질 콘크리트말뚝의 강도에 크게 지배하는 것으로 판단된다.

치환율별로 15%에서는 최대주응력이 구속압별 최소 1,600~1,800kPa까지 나타났으며, 치환율 35%는 1,900~2,100kPa, 치환율 60%는 2,300~2,700kPa까지 나타났다.

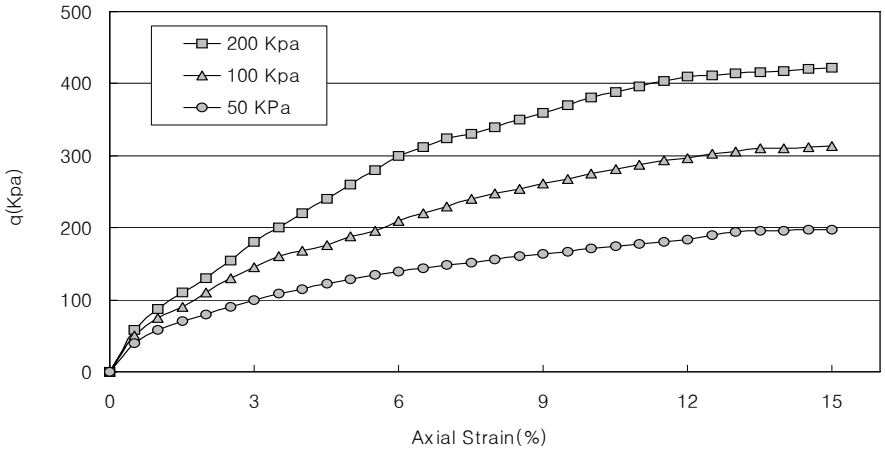
<그림 3.3.14>의 경우 구속압에 따른 응력-변형률 관계를 나타내었다.



(a) 치환율 15%

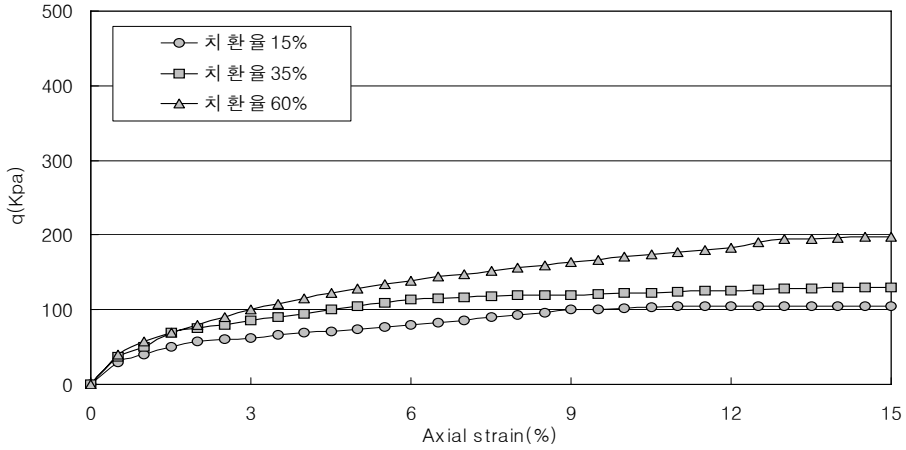


(b) 치환율 35%

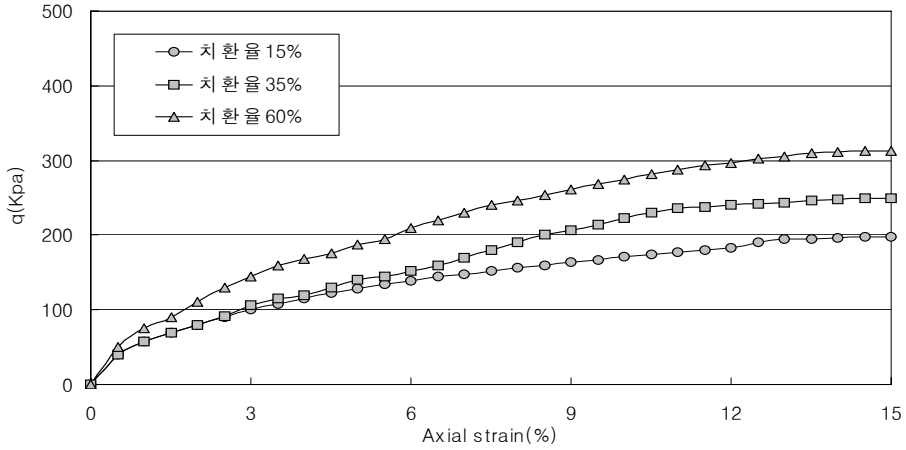


(c) 치환율 60%

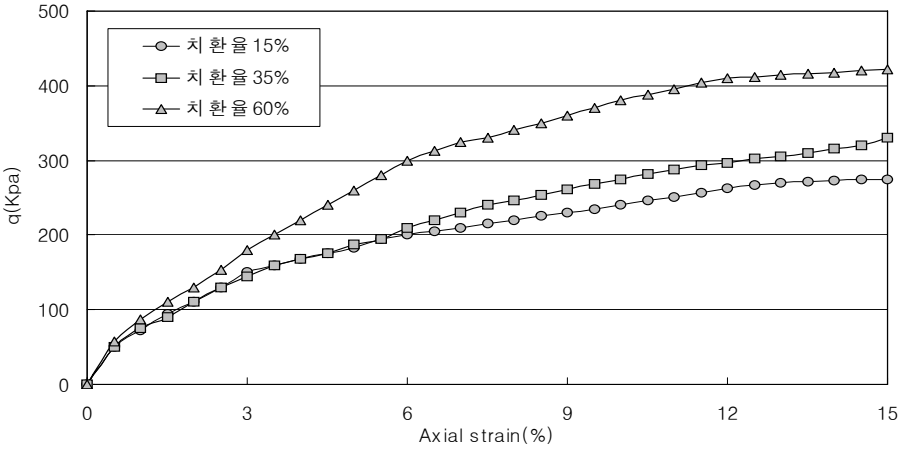
<그림 3.3.12> 치환율별 모래-점토 복합지반의 응력-변형률 관계



(a) 구속압 50kPa

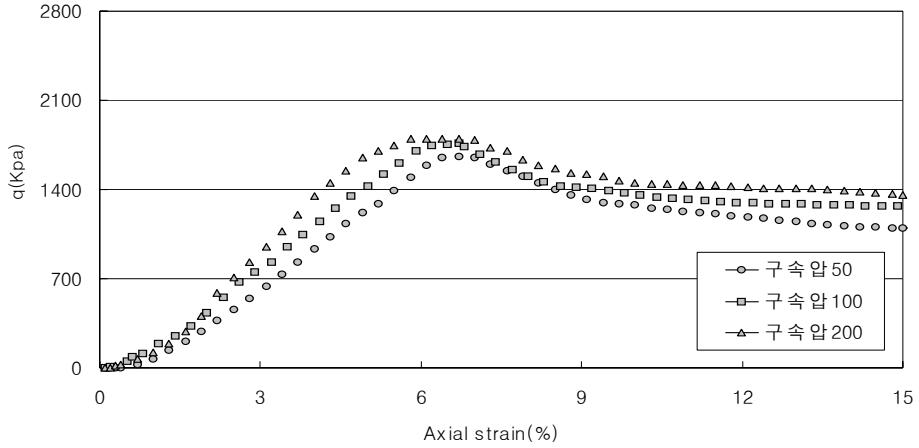


(b) 구속압 100kPa

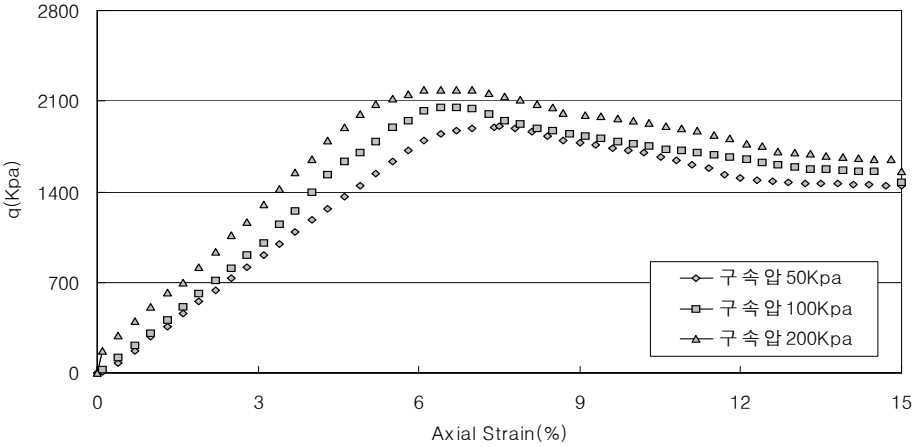


(c) 구속압 200kPa

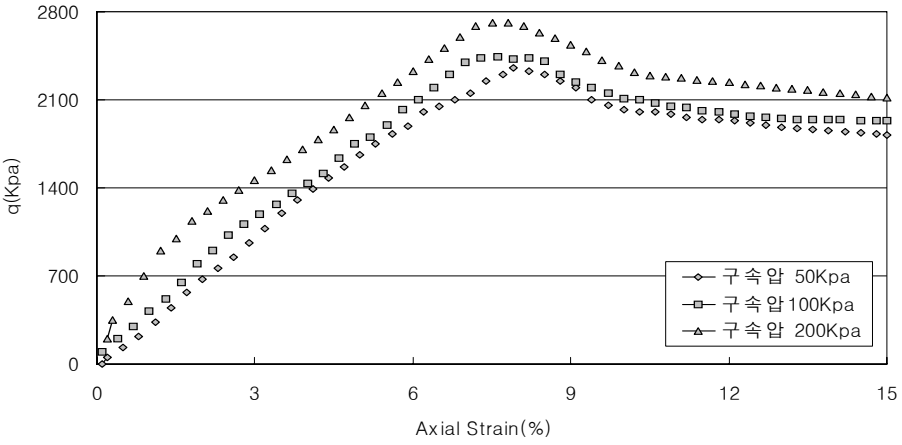
<그림 3.3.13> 구속압별 모래-점토 복합지반의 응력-변형률 관계



(a) 치환율 15%

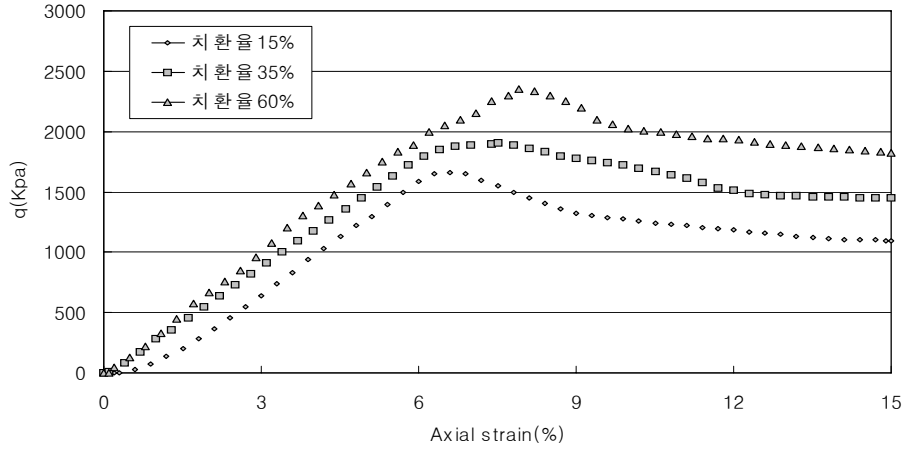


(b) 치환율 35%

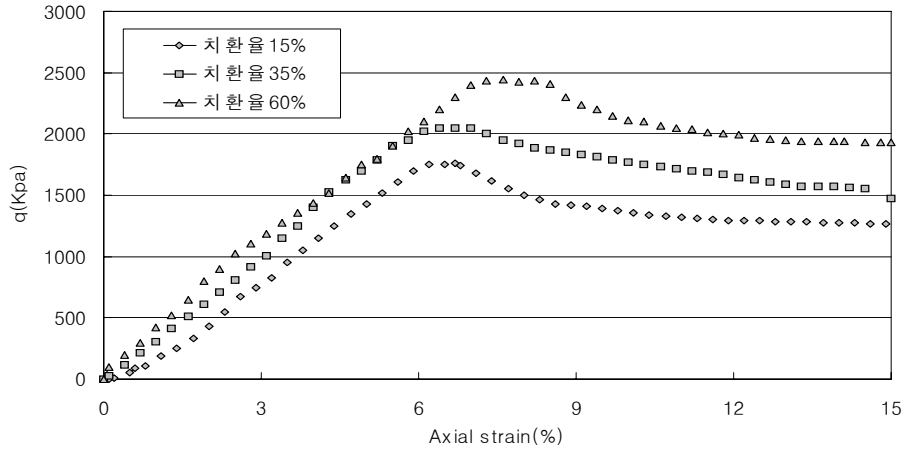


(c) 치환율 60%

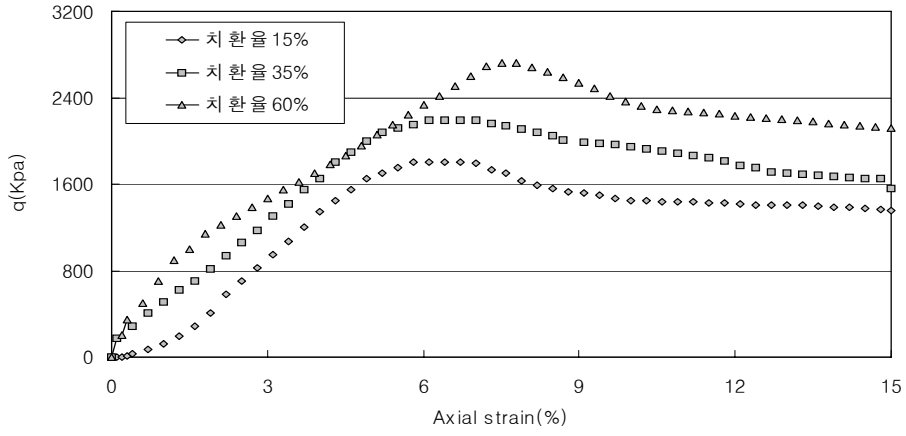
<그림 3.3.14> 치환율별 순환골재-점토의 응력-변형률 관계



(a) 구속압 50kPa



(b) 구속압 100kPa



(c) 구속압 200kPa

<그림 3.3.15> 구속압별 순환골재-점토의 응력-변형률 관계

(2) 간극수압-변형률 관계

(가) 모래-점토 복합지반

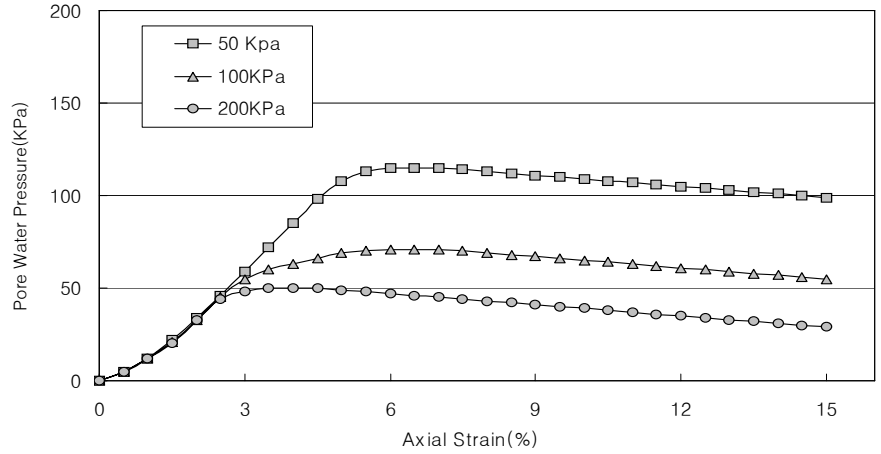
CIU 시험의 간극수압-변형률 관계를 정리하면 <그림 3.3.16>과 같다. <그림 3.3.16>에서 보는 것처럼 간극수압의 크기는 치환율이 커질수록 변형이 진행되면서 점점 감소하는 양상을 보여준다.

또한 간극수압-변형률 관계에서 모래말뚝의 경우 간극수압이 점차 증가하다가 어떤 peak점을 지난 이후에는 점차 감소하였고, 치환율이 높을수록 간극수압이 다소 낮게 나타났다. 특히 치환율 60%의 200kPa의 경우 0에 가까운 값을 나타내었다. 또한 치환율이 클수록, 구속압이 작을수록 간극수압은 비교적 작게 측정되었다.

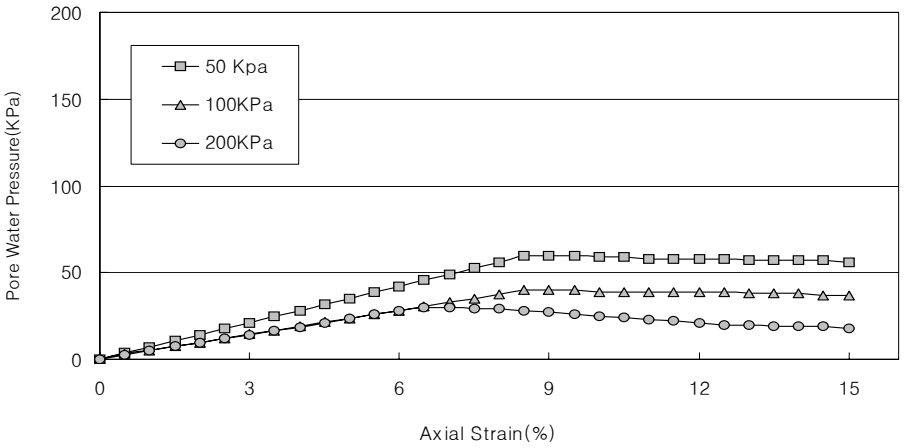
<그림 3.3.17>은 구속압에 따른 간극수압-변형률 관계를 보여주고 있다.

(나) 순환골재-점토 복합지반

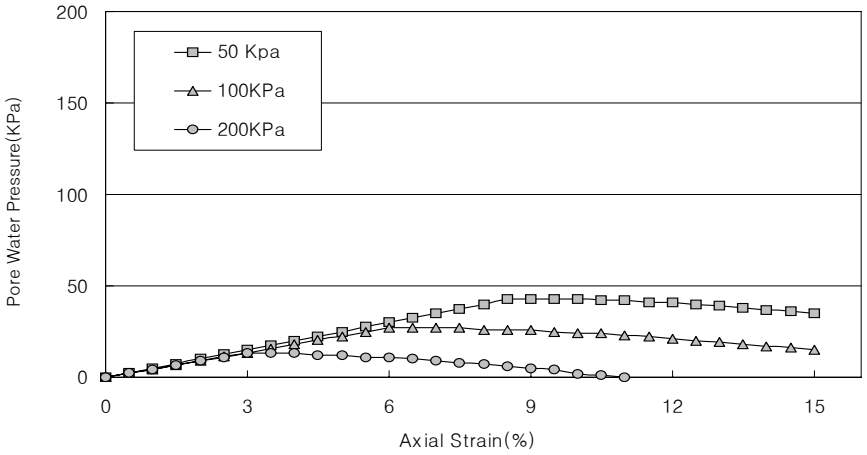
CIU 시험의 순환골재-점토 복합지반의 간극수압-변형률 관계를 정리하면 <그림 3.3.18>과 같다. <그림 3.3.18>에서 보는 것처럼 간극수압의 크기는 치환율이 커질수록 변형이 진행되면서 점점 감소하는 양상을 보여준다. 또한 간극수압-변형률 관계에서 투수콘크리트말뚝의 경우 모래말뚝과 같이 간극수압이 점차 증가하다가 어떤 peak점을 지난 이후에는 점차 감소하였고, 치환율이 높을수록 또한 간극수압이 다소 낮을수록, 구속압이 작을수록 간극수압은 작게 측정되었다. 또한 투수콘크리트의 경우 모든 간극수압에서 peak점을 지난 후 크게 감소하다가 0에 가까운 값을 나타내었다.



(a) 치환율 15%

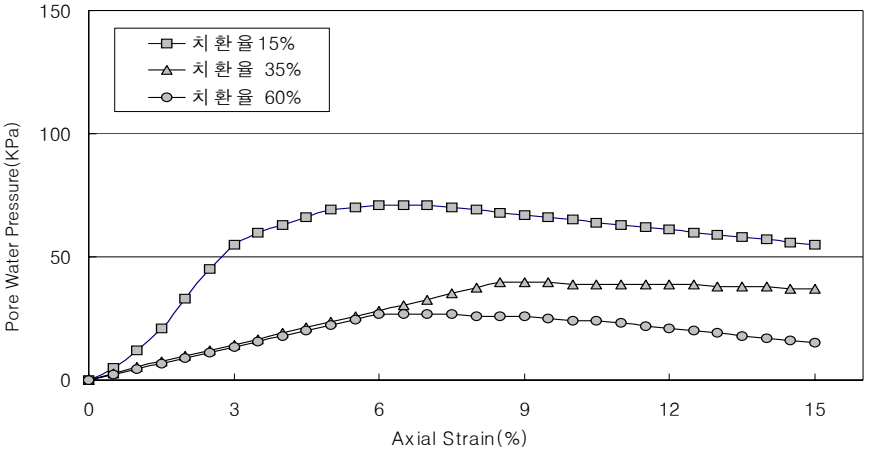


(b) 치환율 35%

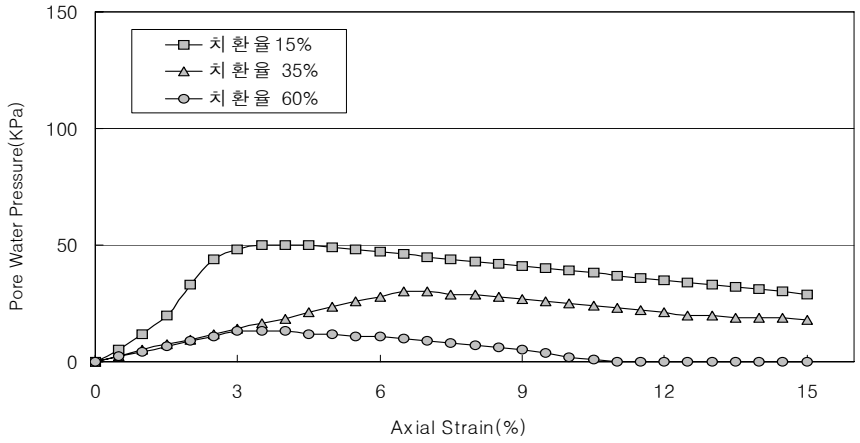


(c) 치환율 60%

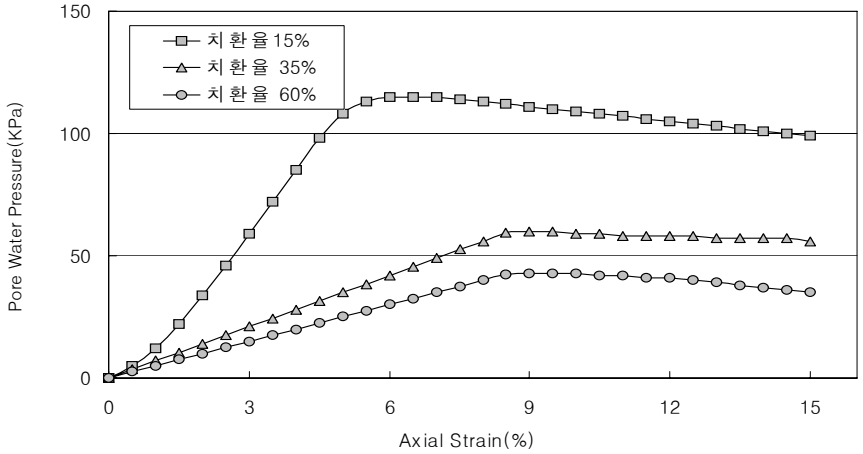
<그림 3.3.16> 치환율별 모래-점토 복합지반의 간극수압-변형률 관계



(a) 구속압 50kPa

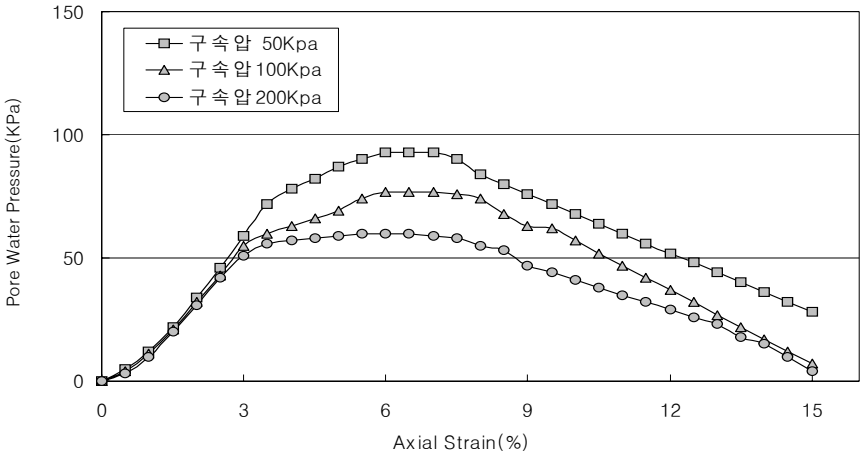


(b) 구속압 100kPa

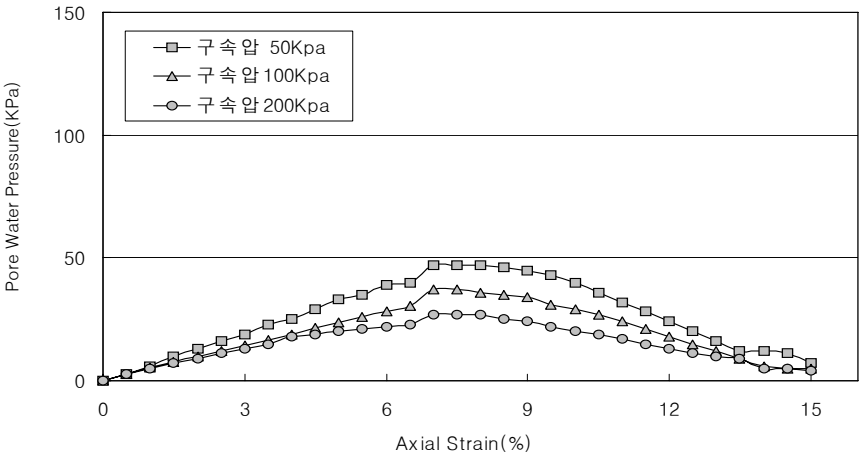


(c) 구속압 200kPa

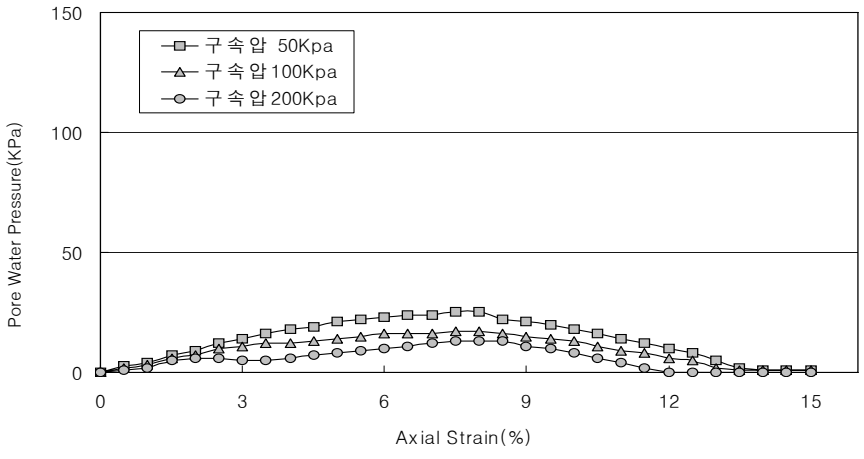
<그림 3.3.17> 구속압별 모래-점토 복합지반의 간극수압-변형률 관계



(a) 치환율 15%

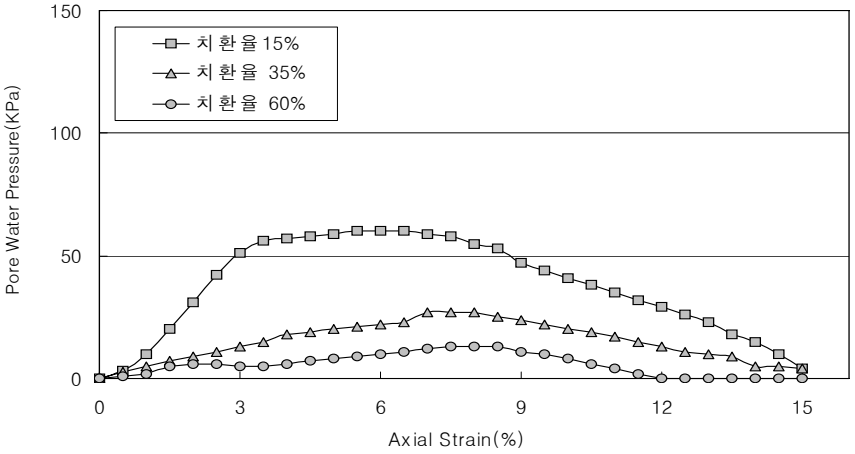


(b) 치환율 35%

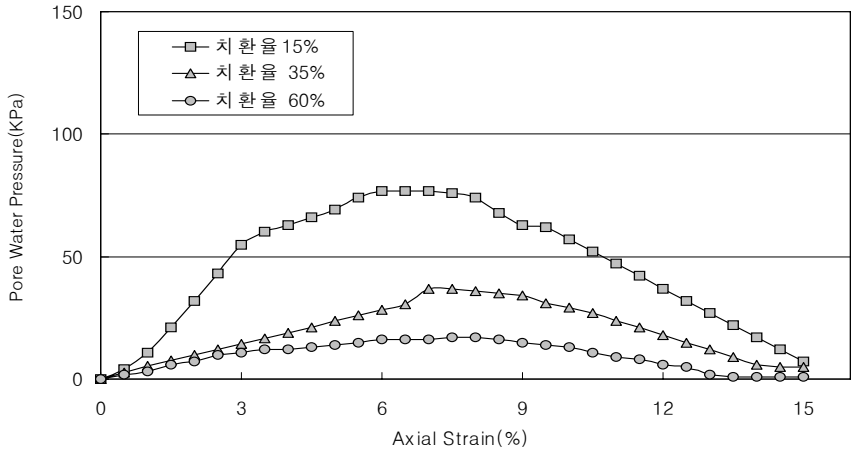


(c) 치환율 60%

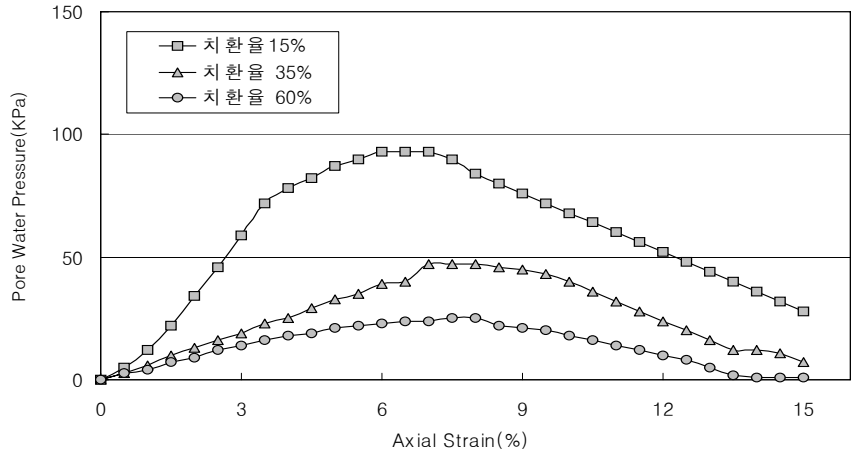
<그림 3.3.18> 치환율별 순환골재-점토 복합토의 간극수압-변형률 관계



(a) 구속압 50kPa



(b) 구속압 100kPa



(c) 구속압 200kPa

<그림 3.3.19> 구속압별 순환골재-점토 복합토의 간극수압-변형률 관계

(3) 강도정수

(가) 모래-점토 복합지반

배수 및 비배수 삼축압축시험으로 구한 강도정수를 구하기 위하여 재료의 파괴를 정의하는 여러 가지 이론들 중 Mohr-Coulomb의 파괴이론을 적용하여 강도 정수를 산출하였다. 본 실험에서 비배수내부마찰각(ϕ_{cu})은 치환율이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 시험결과 나타난 복합토의 강도정수를 정리하면 비배수내부마찰각(ϕ_{cu})은 26.8~35° 의 범위로 나타났으며, 유효내부마찰각(ϕ'_{cu})은 27.2~35.0° 의 범위로 나타났다. 또한 CIU 시험에서 치환율이 증가함에 따라 치환재의 배수능으로 인한 부분배수로 점토의 강도가 증가하여 점착력이 4.0~18.1kPa의 범위로 나타났다.

<표 3.3.3> 치환율별 강도정수

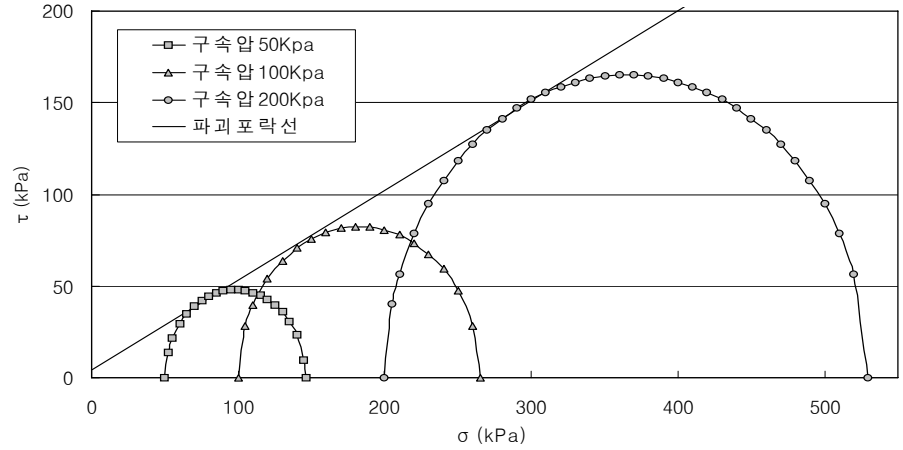
치환율(%)	CIU Test		B-value
	c(kPa)	ϕ_{cu}(°)	
15	4.0	27.2	0.96
35	9.3	30.9	0.97
0	18.1	35.0	0.98

(나) 순환골재-점토 복합지반

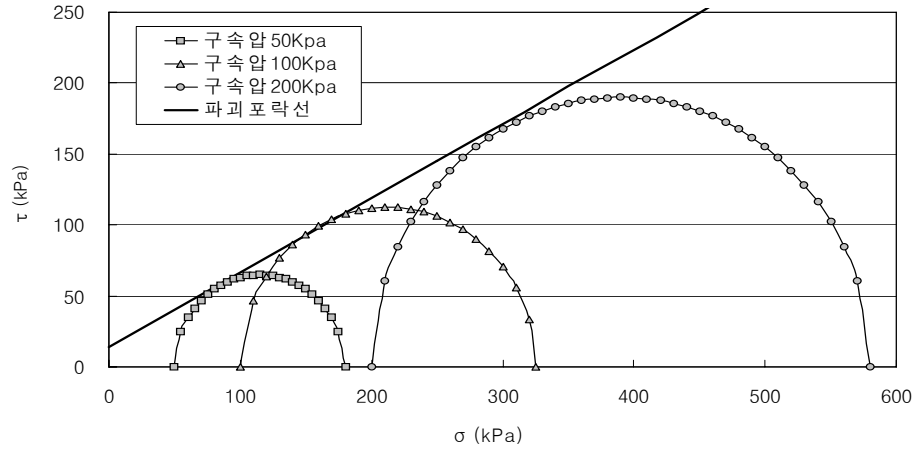
시험결과 나타난 복합토의 강도정수를 정리하면 비배수내부마찰각(ϕ_{cu})은 18.9~33.9° 의 범위로 나타났으며 또한 CIU 시험에서 치환율이 증가함에 따라 치환재의 배수능으로 인한 점착력이 581.2~587.8kPa까지 증가하는 것으로 나타났다.

<표 3.3.4> 치환율별 강도정수

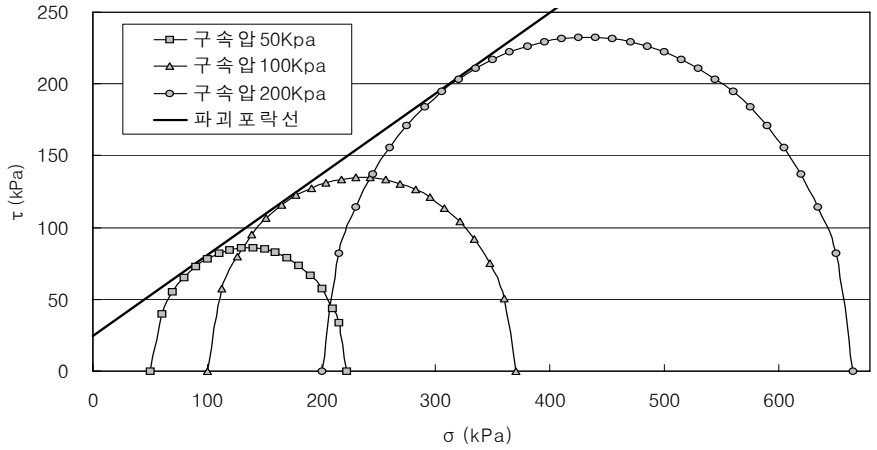
치환율(%)	CIU Test		B-value
	c(kPa)	ϕ_{cu}(°)	
15	581.2	18.9	0.97
35	583.2	27.7	0.98
60	587.8	33.9	0.99



(a) 치환율 15%

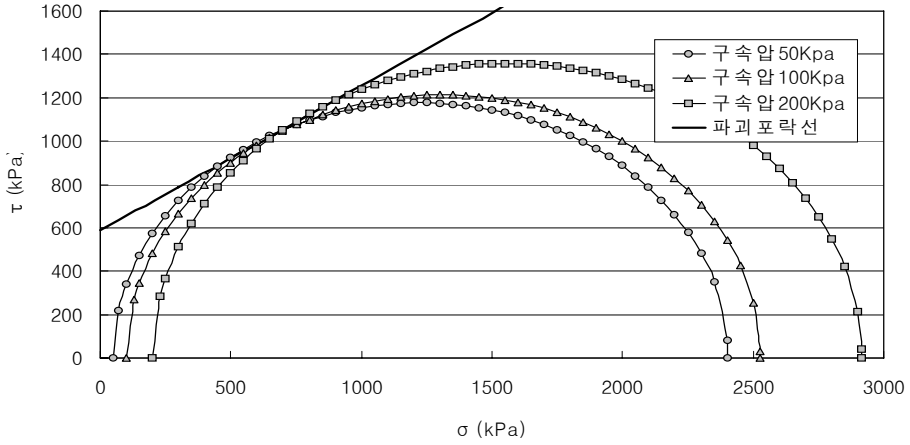


(b) 치환율 35%

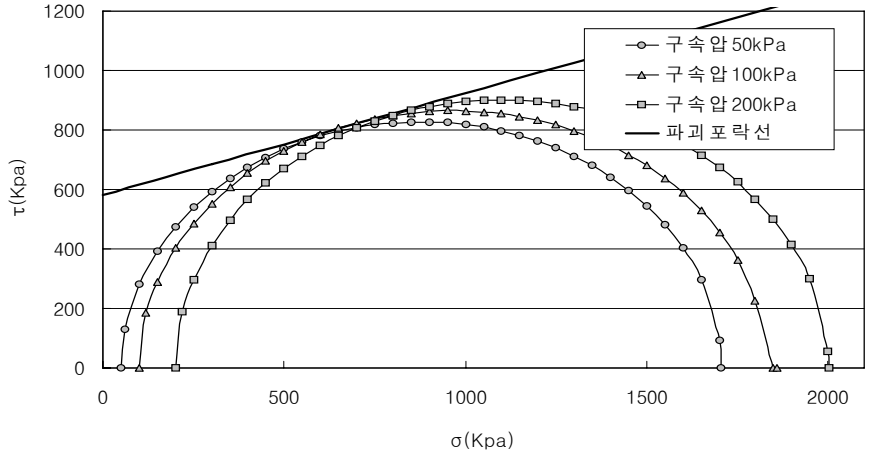


(c) 치환율 60%

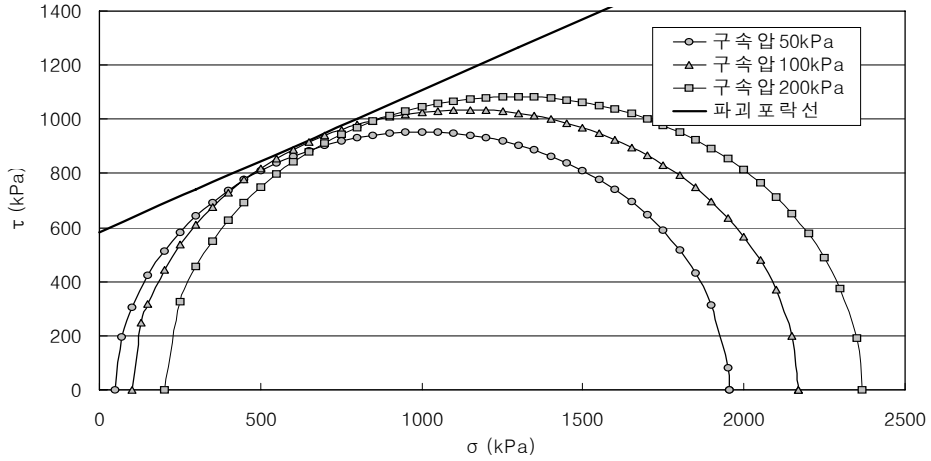
<그림 3.3.20> 치환율별 모래-점토 복합지반의 Mohr-Coulomb의 파괴포락선



(a) 치환율 15%



(b) 치환율 35%



(c) 치환율 60%

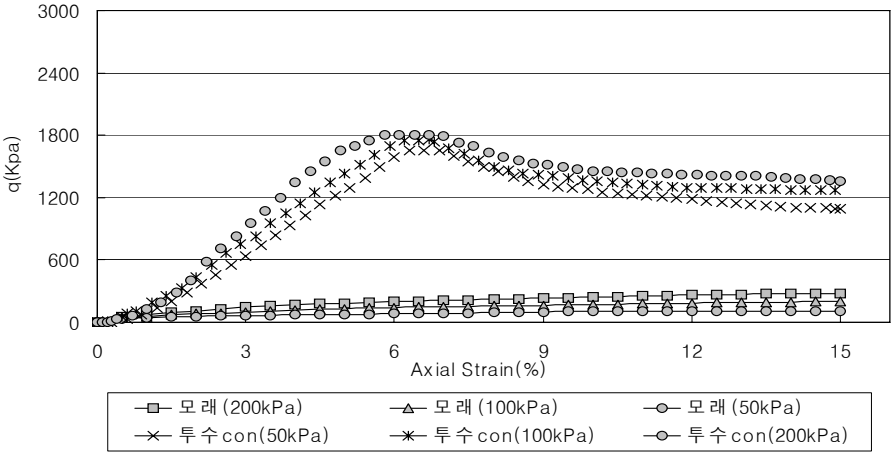
<그림 3.3.21> 치환율별 순환골재-점토 복합지반의 Mohr-Coulomb의 파괴포락선

2. 모래다짐말뚝 및 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 역학적 특성 분석

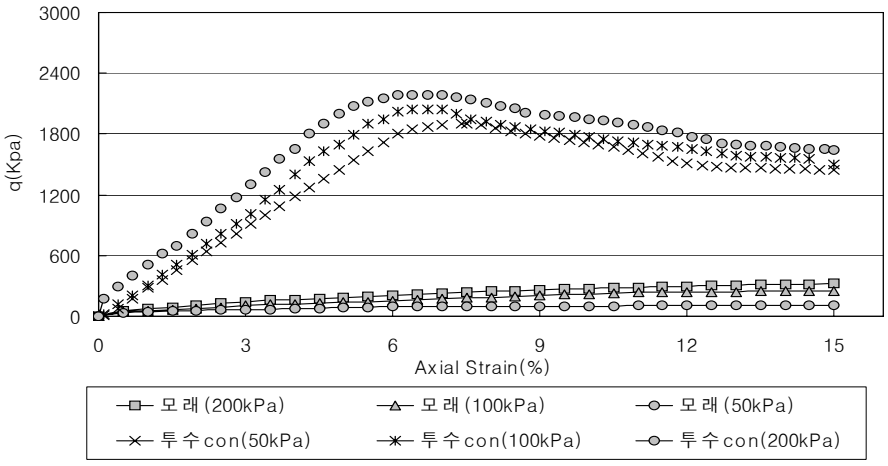
연약지반내 기존의 다짐말뚝의 대체재료로서 다공질 콘크리트말뚝의 우수성을 평가하고자 인위적으로 조성된 시료 내에 모래 및 다공질 콘크리트말뚝을 치환율에 따라 설정한 후 구속압에 따라 비배수조건에서 삼축압축시험을 실시하였다.

① 모래와 점토로 구성된 복합토의 압밀비배수(CIU) 삼축압축시험 결과 응력-변형률 관계는 전반적으로 치환율과 구속압이 증가할수록 파괴시 변형률이 증가하는 변형경화(strain hardening)의 거동양상을 보였다. 구속압이 상대적으로 낮은 경우는 거의 정규압밀점토에 가까운 거동을 보이나 구속압이 증가할수록 파괴시 변형률은 계속 증가하는 거동양상을 보였는데, 이것은 비배수 전단시에는 부피변화가 발생하지 않아야 하지만 복합시료 내부의 치환재로 사용된 모래의 부피가 팽창하려는 다일러턴시(dilatancy) 현상으로 인하여 시료가 계속 파괴에 저항하기 때문인 것으로 판단된다.

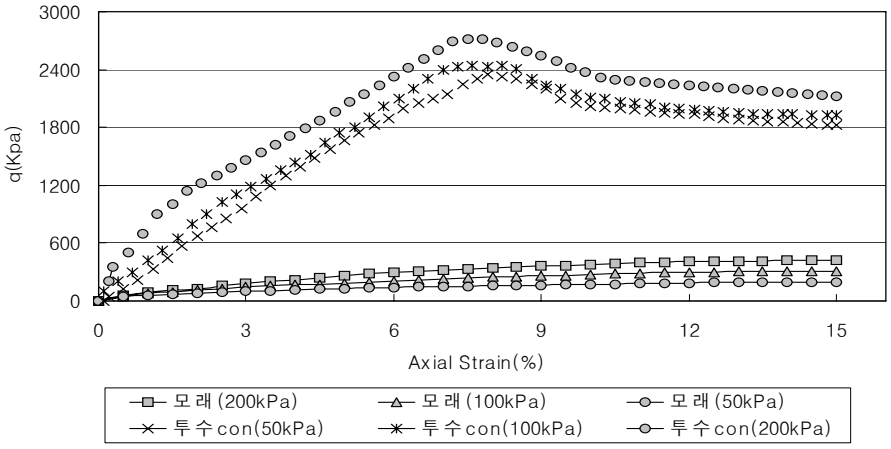
② 순환골재-점토 복합토에 대한 압밀 비배수 삼축압축시험의 응력-변형률 관계는 전반적으로 치환율과 구속압이 증가할수록 파괴시 취성파괴의 거동 양상을 보였다. 구속압이 증가할수록 파괴시 변형률은 계속 증가하다가 최대주응력의 peak점을 지난 후 계속 감소하는 경향을 보였으며 이는 시멘트의 Bonding 효과 발생 후 골재가 응력에 저항하는 것으로 판단된다. 또한 구속압에 변화에 비해 응력증가는 크게 발생하지 않았으며 이것은 비배수 전단시에는 복합시료내부의 강도보다는 치환재로 사용된 다공질 콘크리트 말뚝의 강도에 크게 지배하는 것으로 판단된다.



(a) 치환율 15%

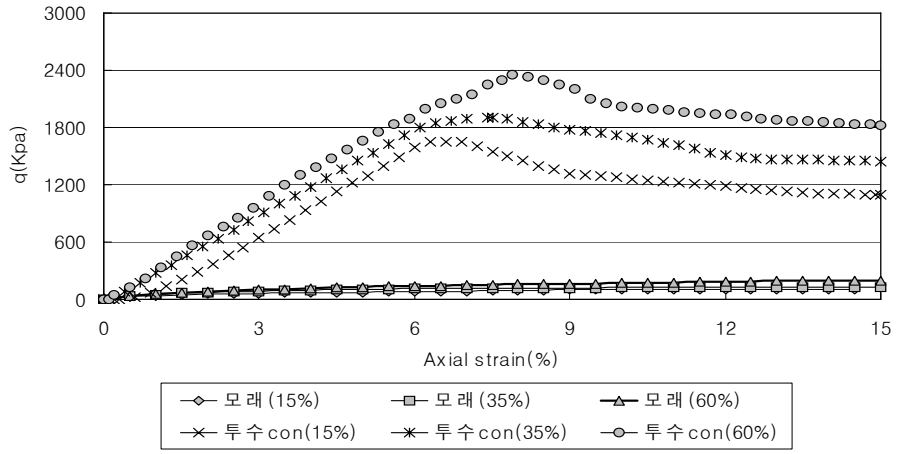


(b) 치환율 35%

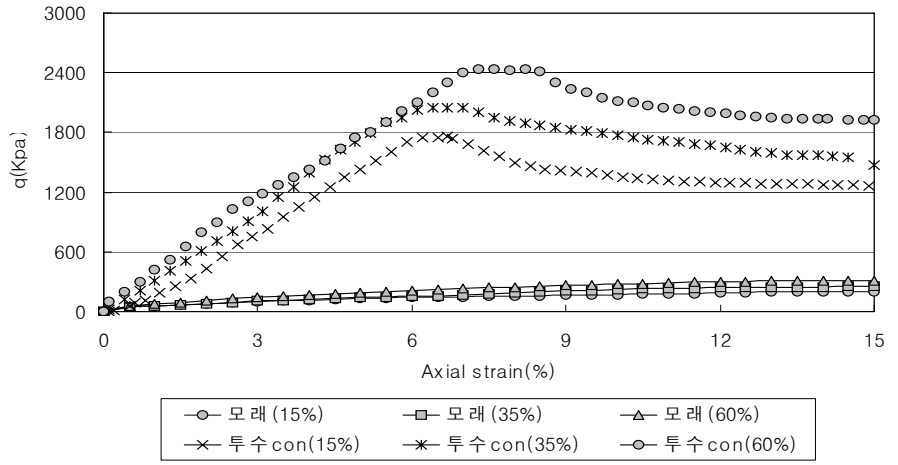


(c) 치환율 60%

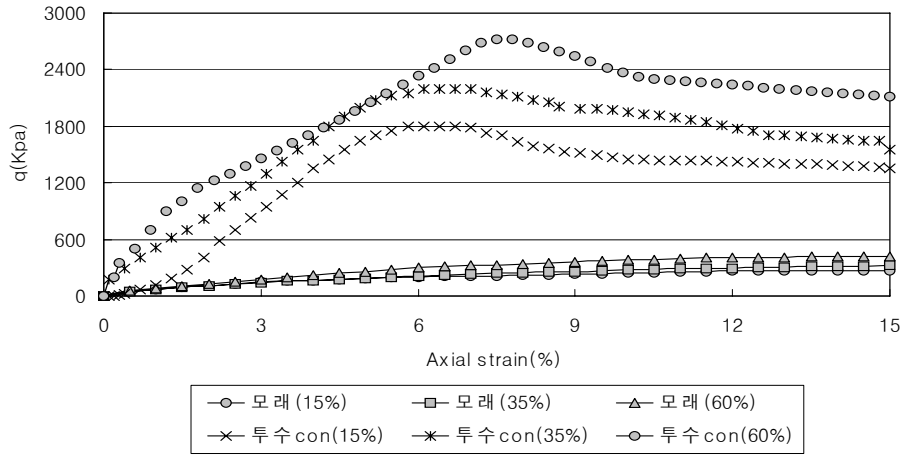
<그림 3.3.22> 치환율별 응력-변형률 관계



(a) 구속압 50kPa



(b) 구속압 100kPa



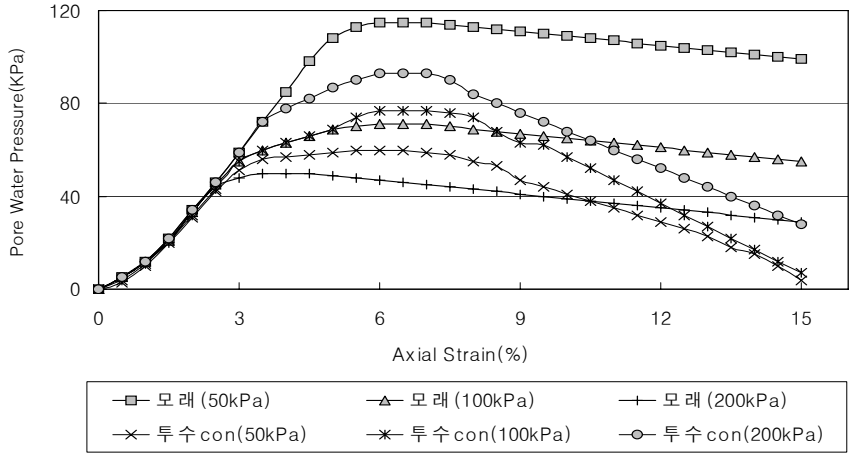
(c) 구속압 200kpa

<그림 3.3.23> 구속압별 응력-변형률 관계

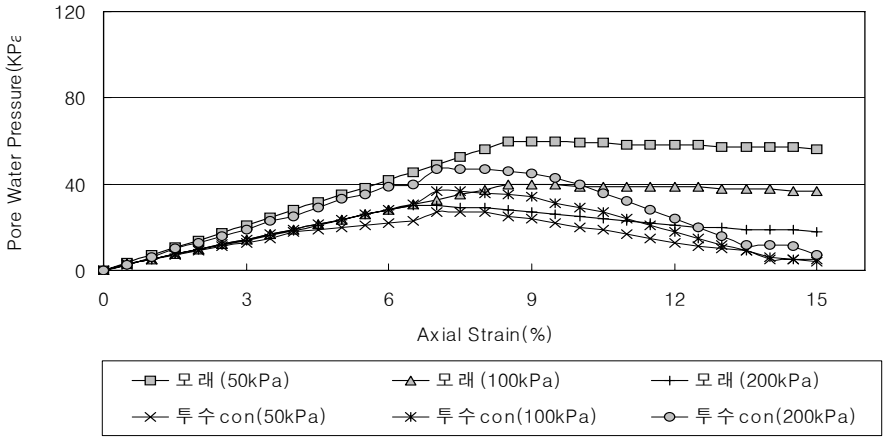
③ 모래-점토 복합토 비배수조건의 간극수압-변형률 관계는 변형률에 따라 증가하다가 어느 peak점 도달 후 감소하였고, 60% 이상의 치환율에서 거의 0에 수렴하여 치환재에 의하여 배수가 원활한 것으로 나타났다. 또한 순환골재-점토 복합토의 비배수 조건에서의 간극수압-변형률 관계는 치환율이 높을수록, 구속압이 작을수록 간극수압은 작게 측정되었다. 순환골재-점토의 경우 모든 간극수압에서 peak점을 지난 후 크게 감소하다가 0에 가까운 값을 나타내었다.

④ 모래-점토 복합토의 전단강도에서 점착력의 경우 치환율의 증가에 따라 부분배수로 인하여 점착력이 크게 증가하였다. 강도정수를 정리하면 비배수 내부마찰각(ϕ_{cu})은 26.8~35° 의 범위로 나타났으며, 유효내부마찰각(ϕ'_{cu})은 27.2~35.0° 의 범위로 나타났다. 또한 CIU 시험에서 치환율이 증가함에 따라 치환재의 배수능으로 인한 부분배수로 점토의 강도가 증가하여 점착력이 4.0~18.1kPa의 범위로 나타났다.

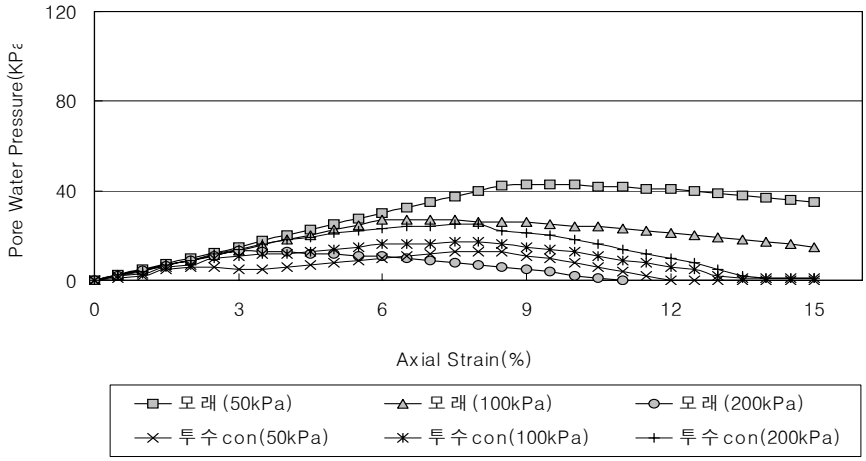
⑤ 순환골재-점토 복합토의 전단강도에서 치환율이 증가함에 따라 강도정수값도 증가하였다. 시험결과 나타난 복합토의 강도정수를 정리하면 비배수 내부마찰각(ϕ_{cu})은 18.9~33.9° 의 범위로 나타났으며, 또한 CIU 시험에서 치환율이 증가함에 따라 치환재의 배수능으로 인한 부분배수로 점토의 강도가 증가하여 점착력이 581.2~587.8kPa의 범위로 나타났다.



(a) 치환율 15%

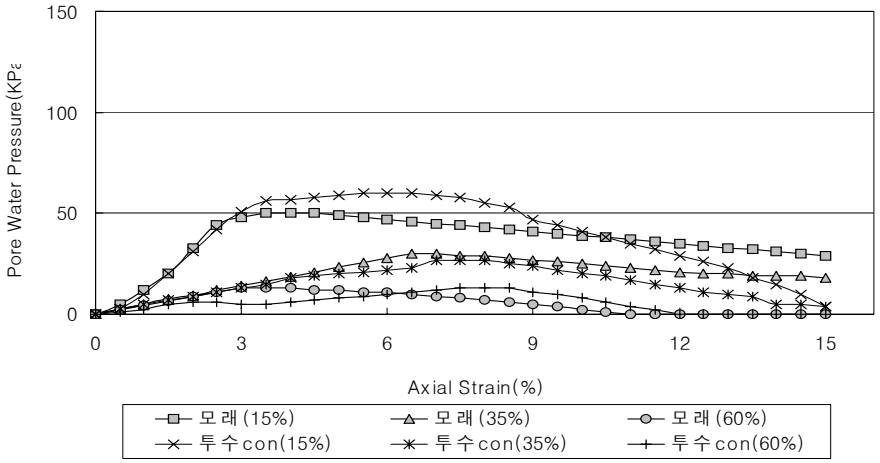


(b) 치환율 35%

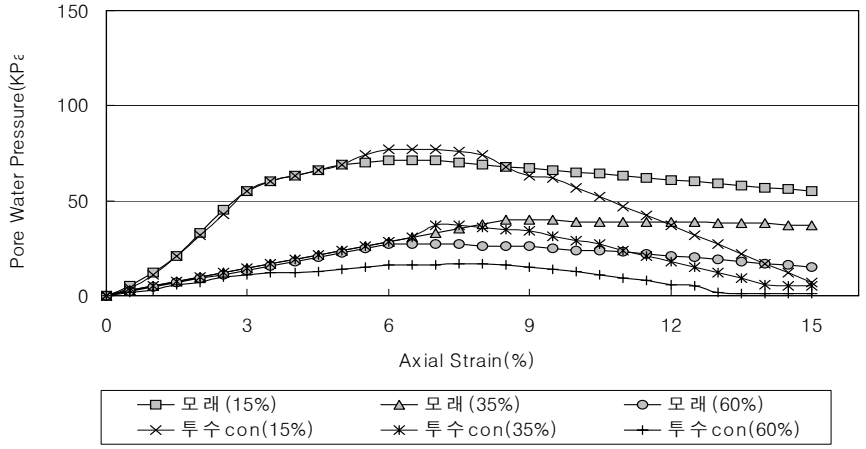


(c) 치환율 60%

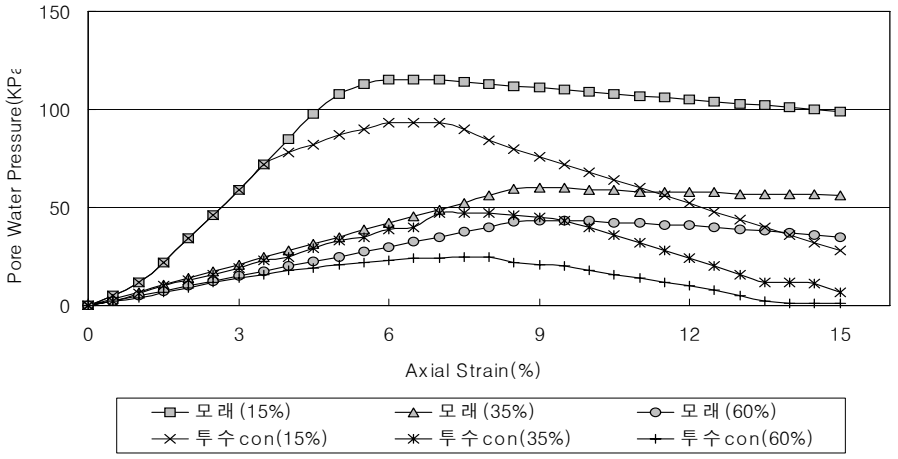
<그림 3.3.24> 치환율별 간극수압-변형률 관계



(a) 구속압 50kPa



(b) 구속압 100kPa



(c) 구속압 200kPa

<그림 3.3.25> 구속압별 간극수압-변형률 관계

제 4 절 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 개량효과 분석

1. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 실내원형토조 압밀실험

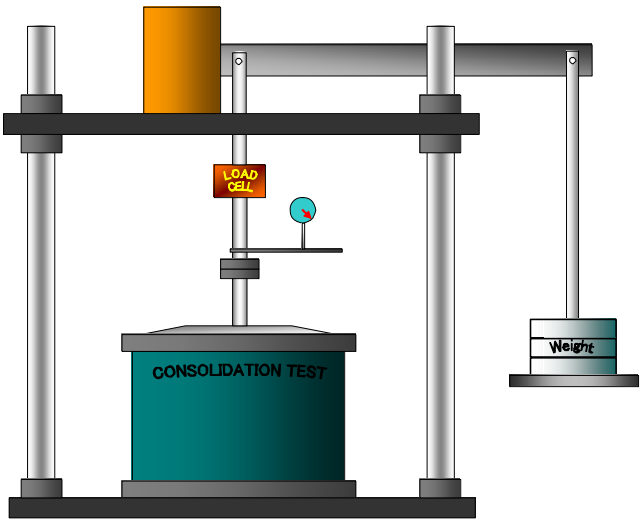
가. 예비실험

1차년도에는 기존에 보유하고 있는 원형토조 압밀실험 장치를 이용하여 예비실험을 수행하였으며, 본 시험에 사용할 각종 계측기의 보정을 완료하였다. 또한, 추가적인 원통형 압밀실험 장치 및 계측장비를 제작 중에 있으며 데이터 분석을 위한 기존의 모형실험에 대한 고찰을 실시하였다.

(1) 원통형 압밀실험 장치

(가) 개요

하중 재하축과 재하판과의 길이 1:10의 지렛대의 원리로 제작되었으며 하중 10kg을 재하판에 재하할 경우 토조 가압판에는 약 100kg의 하중이 작용하게 된다.



<그림 3.4.1> 원통형 압밀실험장치 개요도

소정의 말뚝길이를 확보하기 위해서는 직경만큼이나 토조의 높이가 중요하다. 가압판 주위면과 토조 벽면의 마찰력을 줄이기 위해 토조 벽면을 크롬처리 하였다. 하중재하축 모터에 자동센서를 설치하여 과도한 하중재하로 인한 예상치를 벗어난 압밀침하가 발생하는 경우 고장을 불러 올 우려가 있으므로 자동으로 동작이 멈추게 제작하였다.

또한, 모터 스핀들의 속도를 사용자가 쉽게 조절할 수 있도록 수동으로 수평을 맞추는 경우 시간을 단축시킬 수 있도록 제작하였으며, 하중재하시에는 자동으로 설정하여 스핀들의 속도를 줄여 미세한 침하량도 감지할 수 있도록 제작하였다.



<그림 3.4.2> 원통형 압밀실험 전경

(나) 기본장비 제원

원통형 압밀실험장치의 제원은 다음과 같다.

① 전장 : 1,500×1,500×1,500mm(가로×세로×높이)

② 재하판 거리 : 1,800mm

③ 토조 : 480×480mm(직경×높이)

④ 가압판 : 480mm(직경), 35mm(두께)

⑤ 계측기 : Load Cell(10kN, 향후 100kN으로 교체 예정, 가압판 상부 1개)
토압계(1MPa, 토조바닥 중앙 1개, 우측면 1개)
간극수압계(200kPa, 좌측면 1개, 우측면 1개)

LVDT(침하계)(100mm, 가압판 상부 1개)

Data Logger(10CH, 1식으로 계측 컴퓨터와 연결)

⑥ 계측 프로그램 : Excute MEAS(실시간 계측 프로그램)

Reproduce MEAS(데이터 편집 프로그램)

(2) 원통형 압밀실험장치 규모 및 경계조건

(가) 원통형 압밀시험장치의 규모

이 실험은 빈배합 순환골재 말뚝의 투수성과 이에 따른 최적의 응력분담비를 구하는데 목적을 두고 있으며, 실제 투수성 말뚝의 치환율(개량율)이 일반적으로 약 10~35%로 시공되는 점을 감안하여 목표 치환율인 5%, 10% 및 25%의 치환율에 맞추어 말뚝의 환산단면적을 고려하고 점토의 압밀침하량에 따른 말뚝의 길이확보와 1:10 비율의 토조에 압력을 가하는 지렛대 원리의 방식이므로 축에 비례하여 하중 재하판의 길이를 고려하여 전체적인 시험장치의 규모를 결정하였다.

(나) 경계조건

① 배수경계조건 : 일면배수 또는 양면배수 경계조건

이번 시험에서는 일면배수 조건을 만족시키기 위해 모형토조 하부를 구속하였으며, 토압계 및 간극수압계의 위치 확보와 모형복합지반의 투수성 및 압력분포를 위하여 샌드매트와 토목섬유를 설치하였다.

② 압밀경계조건 : 일차원 압밀 및 다차원 압밀에 대한 경계조건

실험실 내에서 다차원 압밀을 실시할 정도의 넓은 공간이 부족하므로 일차원 압밀시험 실시하였다.

③ 압밀침하량에 대한 경계조건

logt법, root t법 등을 이용하여 압밀침하량을 판단하고 단계적으로 하중재하를 실시하였다.

(다) 원통형 압밀실험 순서



(a) 순환골재, 시멘트, 물 준비



(b) 믹서에 의한 혼합



(c) 다짐작업



(d) 계측기 및 하부 배수재 설치

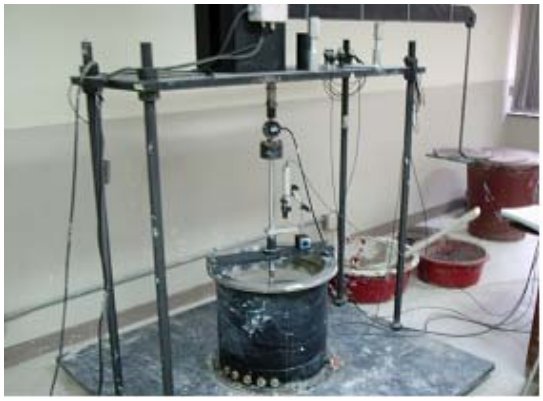


(e) 점토시료 충진



(f) 재하판 설치

<그림 3.4.3> 원형토조 압밀실험 순서(계속)



(g) 변위계 설치 후 재하



(h) 예비압밀 후 재하판 제거



(i) 케이싱 가이드 설치



(j) 케이싱 관입



(k) 말뚝의 탈형



(l) 말뚝의 삽입

<그림 3.4.3> 원형토조 압밀실험 순서(계속)



(m) 말뚝의 포화



(n) 말뚝 상부 부직포 설치



(o) 말뚝상부 모래 타설



(p) 상부 배수재 설치



(q) 재하판 및 변위계 설치



(r) 계측 시작

<그림 3.4.3> 원형토조 압밀실험 순서

나. 본실험

(1) 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구개발은 다공질 콘크리트말뚝으로 개량된 연약지반의 압밀배수촉진 및 침하저감효과의 규명을 목적으로 진행하였으며 기존 다짐말뚝 공법에서의 간극막힘현상 및 팽창파괴에 대한 개선을 규명하기 위하여 연구를 진행하였다. 샌드드레인공법(SD공법)이나 고치환율의 샌드콤팩션파일공법(SCP공법)과 비교하여 저치환율의 순환골재를 재활용한 복합지반의 역학적 거동은 다공질 콘크리트말뚝과 점토지반의 역학적 상호작용의 영향을 보다 크게 받는다. 따라서 침하저감효과와 다공질 콘크리트말뚝과 점토의 강도증가 등을 정확히 분석 및 평가하기 위해서는 복합지반 내부에서의 다공질 콘크리트말뚝과 점토와의 역학적 상호작용을 분명히 해석해야할 필요성이 있다.

본 연구에서는 저치환율의 다공질 콘크리트말뚝이 타설된 복합지반에 대한 일련의 모형실험을 통하여 압밀 중에 발생되는 다공질 콘크리트말뚝과 점토 각각의 역학거동과 복합지반 내부에 대한 응력분담거동에 대하여 실험하였다.

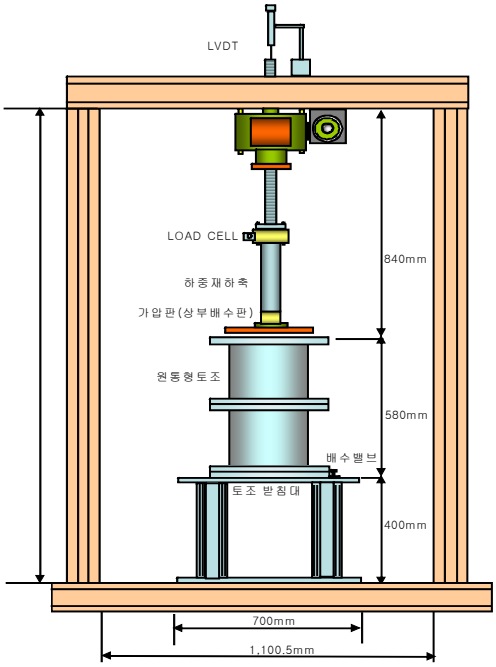
본 연구를 통해 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법을 합리적으로 설계하기 위해서 압밀 중에 발생하는 복합지반 내부의 말뚝과 점토의 상호작용으로 발생되는 응력을 분석하고 일련의 수치해석을 실시하였고 Barron의 이론해를 적용하여 복합지반의 압밀거동을 고찰하였다. 또한 수치해석 결과의 분석을 통하여 압밀 중에 변화하는 점토부의 체적압축거동특성을 고려하여 원형토조 압밀실험을 진행하였다.

(2) 실험장치

(가) 원형토조 압밀실험장치

<그림 3.4.4>는 원형토조 압밀실험장치의 실험전경이며 기존에 보유하고 있었던 원형토조 압밀실험장치를 보완 및 수정하여 새로운 원형토조를 신설하여 정확한 하중 제어 및 계측 프로그램의 개선을 통하여 높은 정밀도의 압밀실험을 진행할 수 있는 실험 장치이다. 본 압밀실험에 사용된 원형토조 압밀실험장치(<그림 3.4.6>)는 하중제어 프로그램과 하중 전달축을 이용하여 기존의 원형토조 압밀실험장치보다 정확한 하중 제어와 계측이

가능하며 실시간 데이터 관측이 가능하여 압밀실험의 정밀도를 높일 수 있었다. 또한 하중 재하축의 모터에 자동센서를 설치하여 예상치 못한 하중재하가 발생하면 하중재하를 자동으로 멈추게 제작하여 압밀실험장치의 고장 및 실험 데이터의 손상을 최소화 하였다. 또한 원형토조 내경은 280mm이며 토조 내면과 재하판에서 발생되는 저항을 최소화하고 실험 진행 중에 발생되는 토조 내부면의 산화를 방지하기 위해 크롬으로 도금 처리를 하였다. 하중을 전달하는 Load Cell과 재하판의 연결은 원형토조의 최상단과의 수평을 유지하도록 하여 편심을 최소화하고 침하량의 정확한 계측을 위해 하중전달의 중심부에서 침하량을 계측하였다. 또한 점토의 압밀침하량에 따른 말뚝의 길이확보와 Load cell에 의해 압력을 가하는 원리를 통하여 원형토조 압밀실험장치의 규모를 결정하였다.



<그림 3.4.4> 원형토조 압밀실험장치

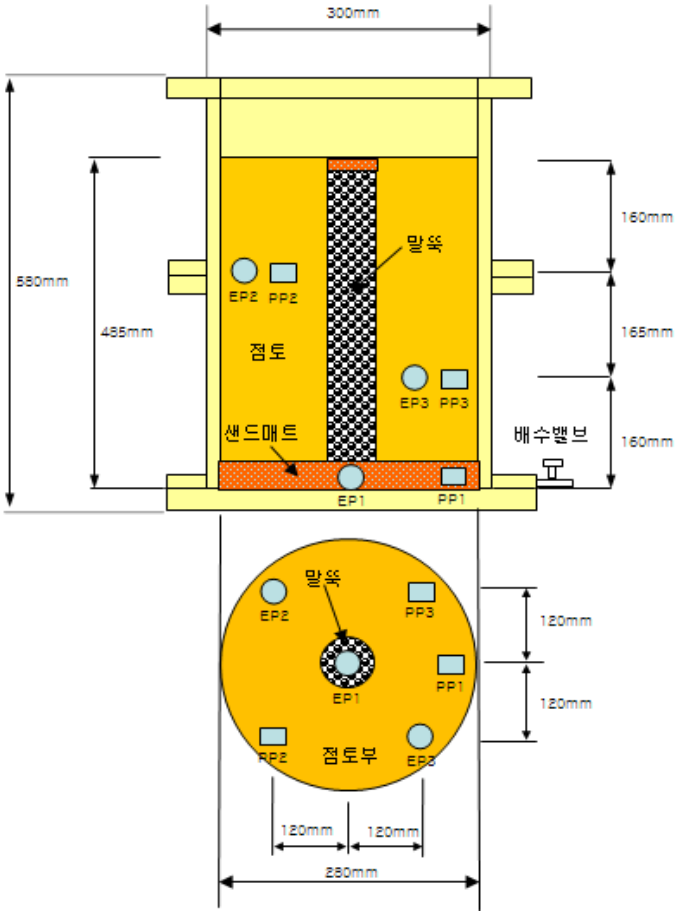


<그림 3.4.5> 원형토조 압밀실험 전경

(나) 계측장치

원형토조의 내부에는 <그림 3.4.6>과 같이 총 6개의 계측기가 설치되며 토조 하단부의 계측기는 말뚝의 중심부에 5MPa의 토압계를, 배수밸브와 수평한 위치에 200kPa의 간극수압계를 설치하였다. 이를 통해 말뚝 하단부에 응력집중이 예상되어 점토부의 계측기보다 용량이 큰 계측기를 설치하여 Data 손실 및 계측기의 오작동을 예방하였다. 계측기의

위치 결정은 점토부의 원지반 형성을 위한 예비압밀 종료 후의 높이에서 세부분으로 분할하여 <그림 3.4.6>과 같이 토압계와 간극수압계를 각 1개씩 설치하였다.





침하량계 : LVDT



Load-cell



EP2,EP3 : BER-A-1MPa 토압계



EP1 : BER-A-5MPa 토압계



PP1 : BED-A-500kPA 간극수압계



PP2,PP3 : BED-A-200kPa 간극수압계

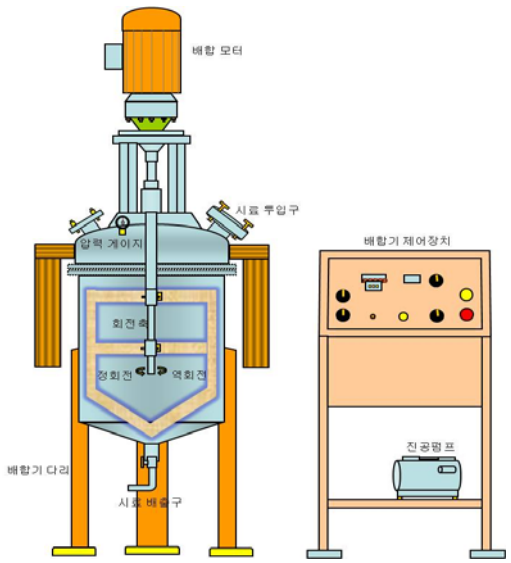
<그림 3.4.6> 원형토조의 계측기 위치 및 제원

(다) 배합장치 및 케이싱 관입 장치

<그림 3.4.7>과 같이 균질한 시료 배합을 위해서 시료 배합장치를 제작하였다. 시료 배합시에 배합장치 안을 진공상태로 유지할 수 있도록 진공펌프를 장착하고 진공상태를 확인할 수 있도록 압력게이지를 토조 외부에 설치하였다. 또한 배합기 내부 배합날은 모터를 통해서 정회전과 역회전 그리고 속도를 조절할 수 있도록 하였으며 배합된 시료는 공기압을 이용하여 토조 내부로 압송할 수 있도록 제작하였다.



<그림 3.4.7> 배합장치와 배합 제어장치



<그림 3.4.8> 배합장치 상세도



<그림 3.4.9> 케이싱 관입장치

<그림 3.4.9>는 복합지반을 형성하기위해 제작된 케이싱 관입장치이다. 케이싱 관입장치는 공기압을 이용한 실린더를 원형토조 Frame에 고정시킨 후 말뚝설치 지점에 케이싱을 관입하고 점토를 제거한 후 다공질 콘크리트말뚝을 설치하여 주변지반 교란에 따른 영향을 최소화 할 수 있는 케이싱관입장치(35×30×126cm)를 이용하여 개량지반을 조성하였다.

(3) 원형토조 압밀실험의 사용시료 및 실험조건

(가) 사용시료

① 점토 및 표준사

모형토조실험에서는 시판 중인 카오린(Kaolin) 점토를 사용하여 지반을 조성하였으며, 본 점토의 물리적 특성은 <표 3.4.1>에 나타낸 바와 같다. <표 3.4.1>에서 알 수 있듯이 점토는 통일분류법상 소성과 압축성이 큰 점토로 분류된다.

배수용 샌드매트와 연성기초 조건을 만족시키기 위한 상부제체는 표준사를 사용하였으며, 표준사의 물리적 특성을 <표 3.4.2>에 나타내었다.

<표 3.4.1> 점토의 물리적 특성

구 분	G_s	C_c	w	S	e_o
값	2.70	0.87	80%	100%	2.16

<표 3.4.2> 표준사의 물리적 특성

구 분	G_s	e_{max}	e_{min}	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_g
값	2.64	0.87	0.58	0.17	0.30	0.63	3.71	0.84

② 다공질 콘크리트말뚝

본 압밀실험은 빈배합의 순환골재를 재활용한 다공질 콘크리트말뚝의 투수성과 이에 따른 최적의 응력분담비를 구하는데 목적을 두고 있으며, 실제 투수말뚝의 치환율이 일반적으로 약 10~35%로 시공되는 점을 감안하여 목표 치환율인 5, 7.5, 10%의 치환율에 맞추어 말뚝의 환산단면적을 고려하였다.

(나) 실험조건

① 배수경계조건 : 양면배수조건

본 실험은 양면배수 조건을 만족시키기 위해 모형토조 하단부의 배수밸브를 연결하였고 재하판에 2mm의 배수구멍을 다수 뚫었다. 배수밸브와 재하판의 배수구멍을 통해 간극수가 배수되도록 하였다. 토압계와 간극수압계의 위치확보와 모형복합지반의 투수성 및 압력분포가 균등하도록 모형토조의 최상단부와 최하단부에 샌드매트와 토목섬유를 설치하였다.

② 압밀경계조건 : 단계별 하중재하 조건

단위지반의 압밀을 진행하기위해 원형토조를 제작하였고 수평변위를 구속하여 수직변위만 발생되도록 실험을 진행하였다. 또한 원형토조 안에 삽입된 점토 및 말뚝에 총 4단계의 하중으로 증분을 가하였으며 그 증분은 <표 3.4.3>과 같다.

<표 3.4.3> 단계별 재하하중

하중단계	증분(kPa)	하중(kPa)
원지반 조성 예비압밀	0	9.8
복합지반 조성 예비압밀	0	9.8
복합지반 조성 후 1단계 하중	29.4	39.2
복합지반 조성 후 2단계 하중	29.4	68.6
복합지반 조성 후 3단계 하중	29.4	98.0
복합지반 조성 후 4단계 하중	29.4	127.4

③ 치환율별 경계조건 : 다공질 콘크리트말뚝 직경 조건

원형토조의 내경은 280mm, 높이는 58mm이다. 말뚝의 직경은 원형토조 내경의 환산직경으로 계산되었으며 5, 7.5, 10%의 직경은 <표 3.4.4>와 같다. 점토부의 중앙에 순환골재 말뚝을 삽입하기 위하여 3일 양생조건의 말뚝을 제작하여 케이싱 관입장치를 이용하여 관입하였다.

<표 3.4.4> 치환율별 말뚝직경

치환율(%)	As-5	As-7.5	As-10
말뚝직경(mm)	62.61	76.68	88.5

(다) 실험횟수

다공질 콘크리트말뚝 및 GCP에 대한 적용 치환율을 <표 3.4.5>에 나타내었다.

<표 3.4.5> 다공질 콘크리트 및 GCP 실험횟수

구 분	치환율(%)	비 고
다공질 콘크리트말뚝	5, 7.5, 10	
GCP	5, 10	

(4) 원형토조 압밀실험 방법

(가) 준비사항

① Kaolinite 2포(45.36kg), 물(36.29kg), 모래(표준사)
② 토압계 3개, 간극수압계 3개, LVDT 1개 , 테이터 로거
③ 계측기 고정용 평철 10개, 고무패커 5개, 토목섬유(배수재)

(나) 실험방법

① 원지반 조성 예비압밀

본 실험은 원형토조의 압밀실험을 목적으로 진행하였으며 계측은 과잉간극수압, 점토부의 전응력, 말뚝부의 전응력 그리고 침하량을 계측하기 위하여 실시하였다. 원형토조를 조립하기에 앞서 계측기의 제원과 위치를 파악하고 <그림 3.4.10(b)>와 <그림 3.4.10(c)>와 같이 간극수압계는 캡을 수침시켜 포화상태를 유지한다. 계측기는 총 7개로 간극수압계 3개, 토압계 3개, 침하량계(LVDT) 1개를 사용하였다. 말뚝의 중앙부는 5MPa의 토압계를 사용하였고 양면배수 조건을 확인하기 위해 하단부에 설치한 간극수압계는 500kPa의 간극수압계를 설치하였다. 점토부의 원지반 조성이 완료된 후 점토부의 높이를 침하량 산정식으로 계산하고 점토부의 높이를 세부분으로 나누어 <그림 3.4.10(g)>와 같이 각 위치에 간극수압계와 토압계를 각 1개씩 설치한다.

원형토조는 3단으로 분리가능하며, 상·중·하단부로 구분된다. 최하단부에는 토조 받침대와 계측기를 설치할 수 있는 원형판이 있으며 중앙부에는 원형토조의 중앙부로 점토 및 말뚝 그리고 계측기가 위치하게 된다. 상단부는 점토 및 말뚝에 하중을 재하 할 수 있는 재하판이 설치된다. 재하판은 양면배수 조건 중 상단 배수가 가능하도록 배수판으로 제작하였다. <그림 3.4.10(h)>는 원형토조를 조립하는 단계를 나타내고 있다. 원형토조의 세부분을 조립하고 원형판에 5cm 가량의 표준사를 포설한 후 토목섬유(배수재)를 2~3겹으로 설치하여 배수에 관한 조건을 충족시켰다. 원형토조와 중심축과의 중심을 맞추기 위해서 토조 받침대에 설치된 레일을 이용하여 원형토조의 중심을 맞춘다. 하중전달 중심축의 최상단부에 침하량을 계측할 수 있는 침하량계(LVDT)를 <그림 3.4.10(l)>과 같이 설치한다. 컴퓨터에 설치된 계측 프로그램을 통해 Data를 실시간 모니터링을 할 수 있도록 <그림 3.4.10(m)>과 같이 간극수압계와 토압계의 케이블을 Data-Logger에 연결시킨다. 원형토조의 셋팅이 완료되면 Kaolinite와 물을 배합비 80%로 배합한다. <그림 3.4.10(o)>와 같이 배합기, Kaolinite, 물을 준비한다. 배합기에 물과 점토를 넣고 정회전을 실시하며 점토의 고른 배합을 위해 2~3시간에 걸쳐 배합한다. 원형토조의 압밀실험을 위해 Kaolinite 45.36kg과 물 36.29kg을 배합하고 정회전과 역회전을 반복하여 배합을 실시한다. 배합이 완료되면 원형토조에 배합된 점토시료를 넣기 위해 재하판을 제거한다. 시료를 넣는 동안 계측기의 위치가 변동되지 않도록 주의해야하며 <그림 3.4.10(u)>와 같이

토조의 최상단부까지 시료가 채워지면 토목섬유(배수재)를 2~3겹으로 설치한다. 분리된 재하판을 <그림 3.4.10(w)>와 같이 재하축과 재결합하고 원형토조와 수평을 유지하도록 재하판을 설치한다. 재하판의 설치가 종료되면 계측프로그램을 가동시키고 정해진 하중 9.8kPa을 재하한다.



(a) 간극수압계의 준비



(b) 간극수압계의 상단부 캡 제거



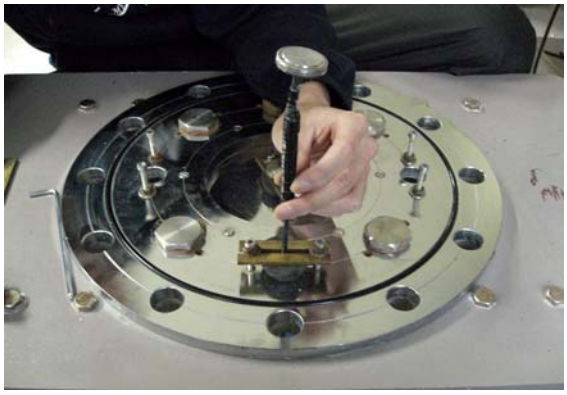
(c) 간극수압계 상단부 수침



(d) 원토조의 하단부 설치

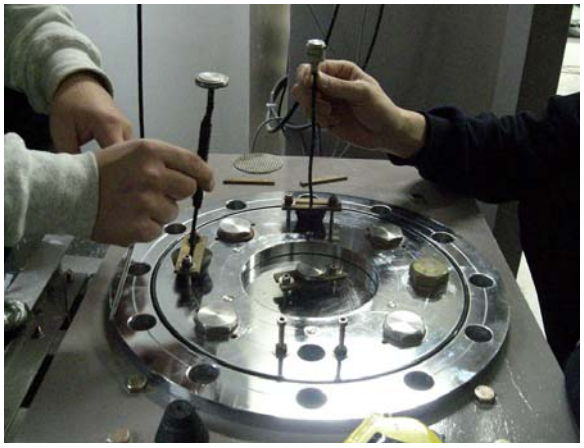


(e) 하단 중앙부 토압계 설치

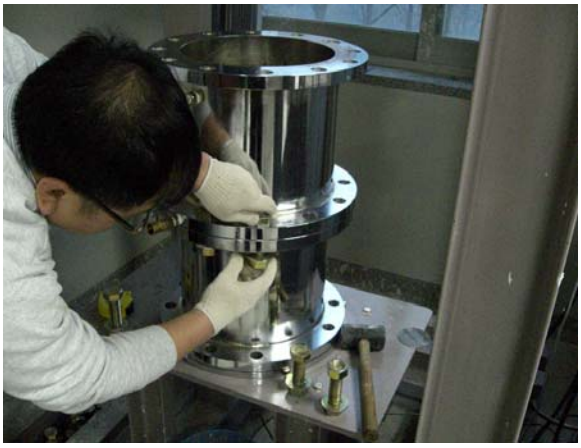


(f) 중앙부 및 상단부 토압계 설치

<그림 3.4.10> 원지반조성 예비압밀과정(계속)



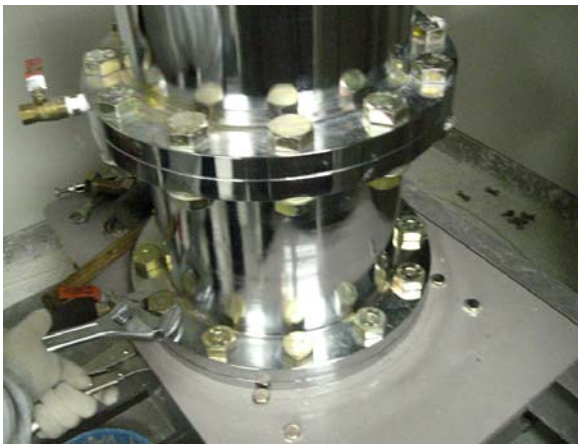
(g) 간극수압계 상·중·하단부 설치



(h) 원형토조 조립



(i) 재하판 설치



(j) 원형토조 조립 확인



(k) 표준사 포설 및 간극수압계 상단캡 연결



(l) 배수재(토목섬유) 설치

<그림 3.4.10> 원지반조성 예비압밀과정(계속)



(m) 침하량계 설치



(n) 케이블 연결



(o) 배합준비



(p) 물과 카오린나이트 배합기 삽입



(q) 정회전으로 배합



(r) 정회전과 역회전을 반복

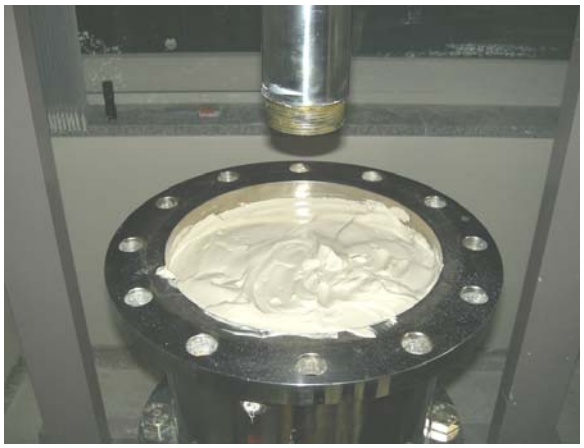
〈그림 3.4.10〉 원지반조성 예비압밀과정(계속)



(s) 배합상태 확인



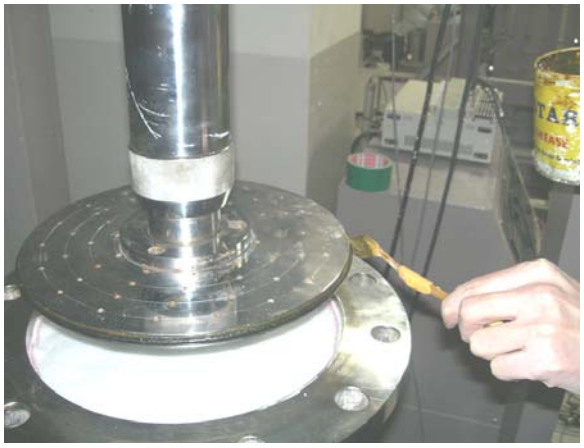
(t) 배합된 점토를 토조에 삽입



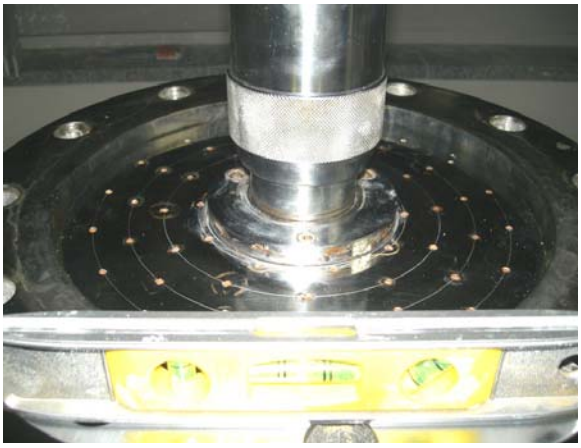
(u) 최상단부까지 점토 삽입



(v) 배수재 설치

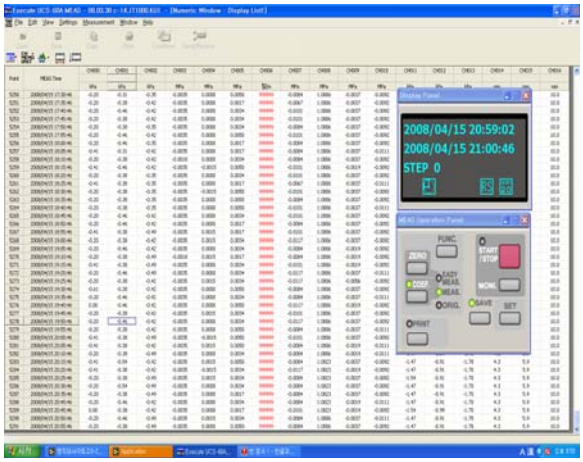


(w) 재하판 설치

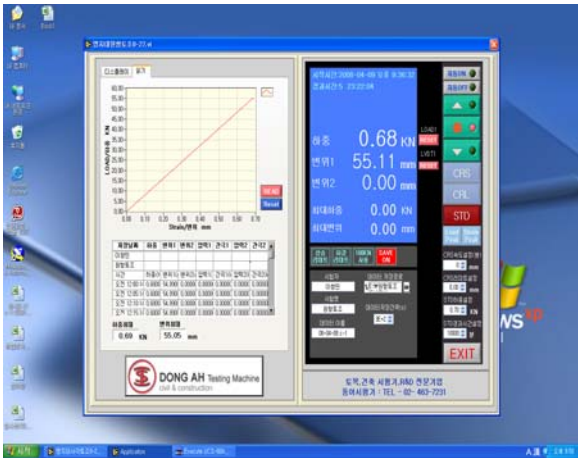


(x) 토조 및 재하판 수평 확인

〈그림 3.4.10〉 원지반조성 예비압밀과정



(a) 계측프로그램의 가동



(b) 하중재하 프로그램의 가동

<그림 3.4.11> 원지반 조성 예비압밀 단계에서의 계측 및 하중재하 프로그램의 가동

② 말뚝제작 및 복합지반 조성 예비압밀

순환골재를 이용한 다공질 콘크리트의 말뚝 제작은 3일 양생을 기준으로 제작한다. 치환율에 맞추어 몰드를 제작하였으며 <그림 3.4.12(a)>와 같이 순환골재를 24시간 수침시켜 포화상태를 만들었다.

W/C는 35%로 맞추어 배합하였으며 순환골재는 체가름 시험을 통해 15mm 통과 9mm 잔류인 골재를 사용하였다. 순환골재의 배합이 완료(<그림 3.4.12(b)>)되면 준비된 몰드에 <그림 3.4.12(c)>와 같이 다짐을 통해 배합된 골재를 넣는다.

3일간의 양생이 종료되면 원지반 조성시 점토의 높이를 측정하여 <그림 3.4.12(c)>와 같이 말뚝의 길이를 절단하는데, 이때 말뚝의 상·하 단면이 굴곡이 없도록 주의를 기울이어야 한다. 정해진 길이에 맞춰진 말뚝을 수침시켜 말뚝이 포화상태가 되도록 한다.

<그림 3.4.12(e)>는 복합지반을 형성하기 위해 준비된 다공질 콘크리트말뚝을 점토 중앙부에 삽입하기 위해 재하판을 제거한 그림이다.

재하판이 원형토조와 분리되면 토목섬유(배수재)를 제거하고 미리 제작된 케이싱을 케이싱 관입장치에 설치한다. 케이싱의 지름은 치환율의 직경과 동일한 크기로 제작되었으며 관입장치는 유압을 이용해 관입되도록 제작되었다. 관입장치를 원형토조의 최상단부에 고정시켜 점토부에 케이싱이 수직으로 관입되도록 <그림 3.4.12(g)>와 같이 설치한다.

유압을 통해 관입된 케이싱 내부의 점토를 제거하고 점토부에 삽입된 케이싱도 제거한

다. 복합지반을 형성하기 위해 준비된 말뚝을 <그림 3.4.12(j)>와 같이 점토부의 중앙에 삽입한다.

말뚝이 점토부 중앙에 위치되면 말뚝을 포화상태로 유지하기 위해 <그림 3.4.12(k)>와 같이 물을 넣고 <그림 3.4.12(l)>과 같이 표준사를 1cm의 높이로 포설한다. 이후 재하판을 결합하고 점토부의 최상단까지 재하판을 내린다. 단계별 하중을 재하하면서 과잉간극수압, 토압증분 그리고 침하량을 계측하고 실시간의 모니터링을 통해 원형토조 압밀실험을 진행한다. 또한 단계별 하중을 재하하면서 양면배수의 조건을 수시로 확인하며 계측된 Data를 이용하여 압밀진행을 파악한다.



(a) 순환골재 세척 및 포화상태 유지



(b) 순환골재 배합



(c) 몰드에 배합된 골재 삽입 및 다짐



(d) 3일 양생 후 몰드 제거 및 절단

<그림 3.4.12> 다공질 콘크리트말뚝 제작 및 삽입 과정(계속)



(e) 원형토조의 재하판 제거



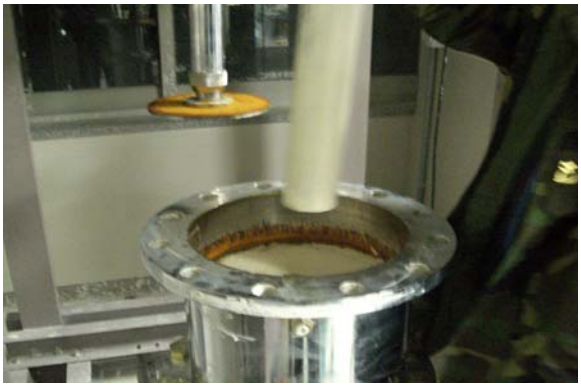
(f) 토목섬유 제거



(g) 케이싱을 점토 중앙에 관입



(h) 케이싱 내의 점토 제거



(i) 케이싱과 케이싱 내의 점토 제거

<그림 3.4.12> 다공질 콘크리트말뚝 제작 및 삽입 과정(계속)



(j) 점토 중앙부에 말뚝 삽입



(k) 말뚝의 포화상태 유지

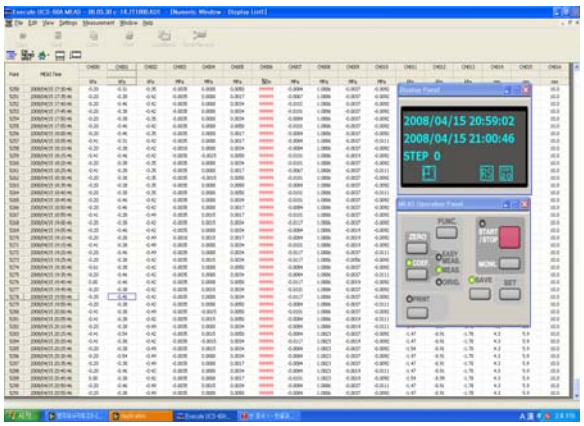


(l) 말뚝 상단부에 표준사 포설

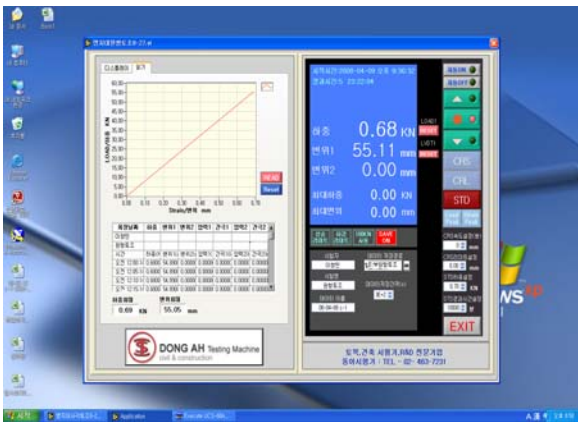


(m) 토목섬유 설치 후 재하판 설치

<그림 3.4.12> 다공질 콘크리트말뚝 제작 및 삽입 과정



(a) 계측프로그램의 가동



(b) 하중재하 프로그램의 가동

<그림 3.4.13> 복합지반 조성 예비압밀 단계에서의 계측 및 하중재하 프로그램 가동

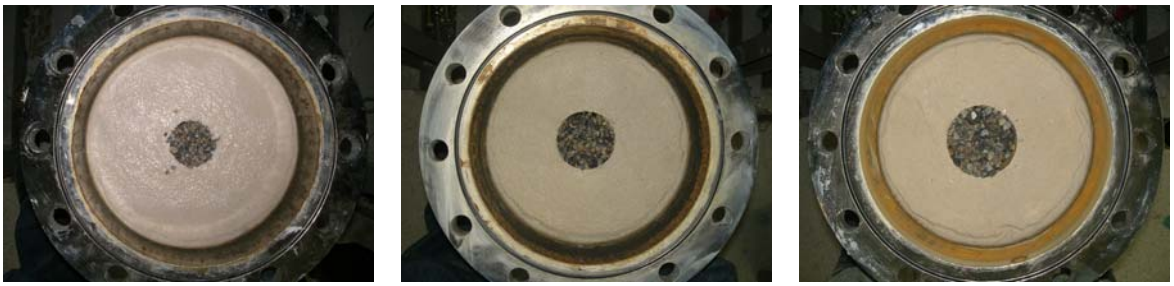
다. 원형토조 압밀실험의 결과 및 분석

(1) 모형지반의 거동

<그림 3.4.14>는 모형지반의 거동을 위한 원형토조 압밀실험의 치환율별 말뚝 삽입 후의 토조내부의 모습이다.

RAPP 5%, RAPP 7.5%, RAPP 10%의 세 가지 치환율 변화에 따른 모형지반의 거동을 평가하고자 하였으며 치환율을 제외한 실험조건은 모두 동일한 조건으로 실험을 진행하였다. 또한 순환골재 다짐말뚝 5%, 순환골재 다짐말뚝 10%에 대한 원형토조 압밀실험을 추가적으로 실시하여 모형지반의 거동을 RAPP와 비교·평가하고자 하였다.

<그림 3.4.15>는 원형토조 압밀실험이 종료된 후 말뚝의 형상을 보여주고 있다.



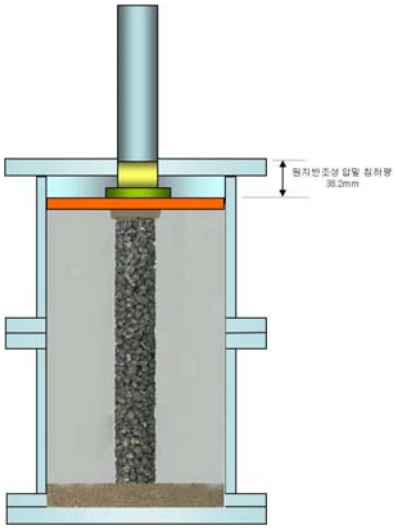
(a) RAPP 5% 삽입 (b) RAPP 7.5% 삽입 (c) RAPP 10% 삽입

<그림 3.4.14> 치환율별 말뚝 삽입

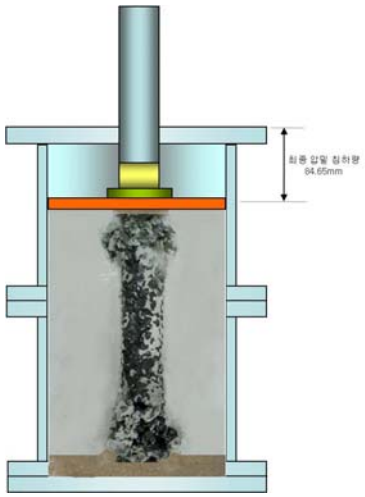
(가) 다공질 콘크리트말뚝(RAPP)

<그림 3.4.16>은 모형실험 As-5에 대한 각 재하단계에서의 시간에 따른 침하량 변화를 보여주고 있다. 모든 하중 단계에서의 침하는 압밀침하양상을 보이고 있으며, 이는 복합지반의 거동특성을 나타내고 있음을 보여주고 있다.

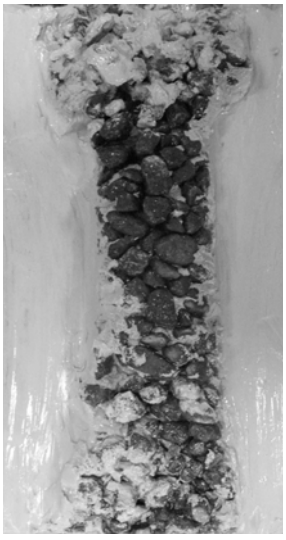
하중 단계별 침하량을 살펴보면, 1단계에서 가장 많은 침하가 발생하였고 단계가 증가할수록 침하량은 감소하고 있는 것을 알 수 있다.



(a) 하중 재하 전



(b) 말뚝 파괴 후

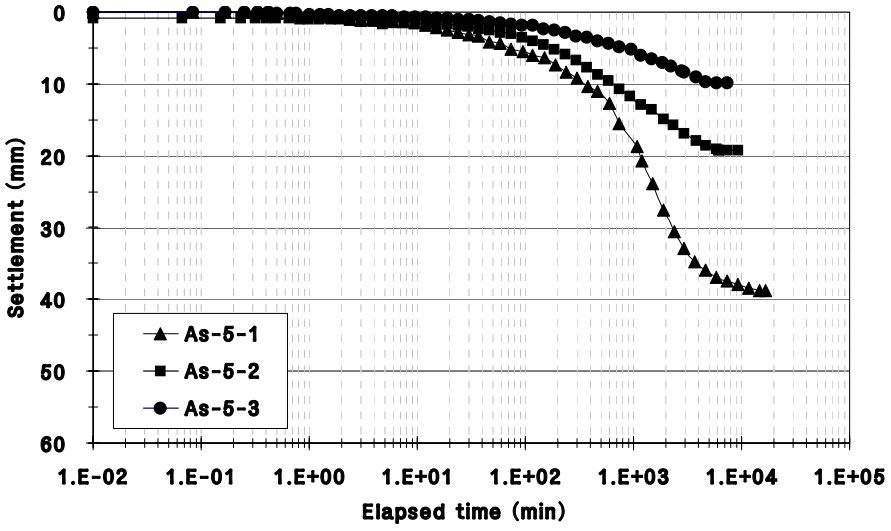






(c) RAPP 5% 토조 해체 후 (d) RAPP 7.5% 토조 해체 후 (e) RAPP 10% 토조 해체 후

<그림 3.4.15> 치환율별 하중재하 후의 말뚝의 변화



<그림 3.4.16> 시간경과에 따른 침하량의 변화(RAPP-As-5%)

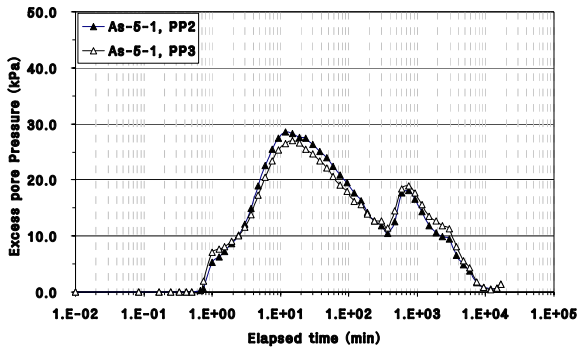
<그림 3.4.17(a), (c), (e)>는 모형실험 As-5에 대한 각 재하단계에서의 점토부 상·하부에 설치된 간극수압계(PP2, PP3)가 계측한 값을 시간경과에 따라 나타낸 그래프이다.

상·하부에 대칭적으로 설치된 간극수압계들로부터 계측된 과잉간극수압의 시간에 따른 변화는 서로 간에 거의 일치하고 있으며, 따라서 본 모형실험에서는 모형지반의 상부면과 하부면의 배수조건에 의해서 모형지반의 상하부에 대칭적으로 과잉간극수압의 소산거동이 발생하였음을 알 수 있다.

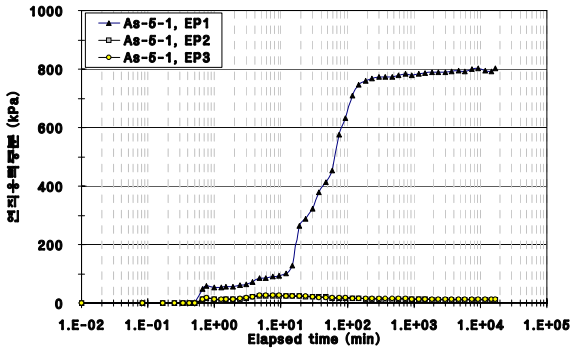
과잉간극수압은 모든 재하단계에서 약 10분까지 증가하다가 그 후로 점차 소산되는 경향을 보이고 있으며 간극수압의 소산 시점은 각 재하단계별 침하 종료 시점과 거의 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

<그림 3.4.17(b), (d), (f)>는 모형실험 As-5에 대한 각 재하단계에서의 점토부(EP2, EP3)와 말뚝 하단부(EP1)의 연직응력증분의 변화를 나타내고 있다. 그래프로부터 점토부의 연직응력증분에 비해 말뚝에서의 연직응력증분이 상대적으로 높음을 알 수 있다. 이를 통해 말뚝과 점토로 이루어진 복합지반에서 재하하중에 따라 말뚝으로의 응력 집중이 발생되고 있음을 알 수 있다.

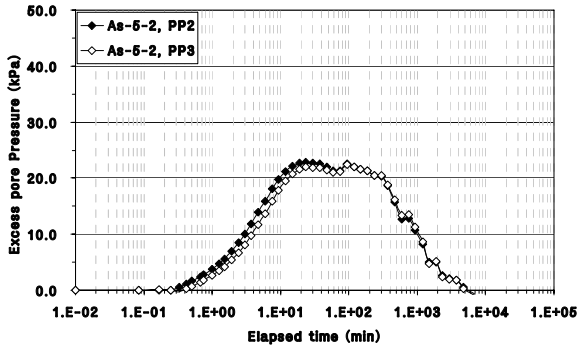
모든 재하단계에서 시간에 따른 점토부의 응력은 비슷한 값을 나타내고 있지만 말뚝부의 응력은 시간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 과잉간극수압 소산에 따른 압밀거동으로 인해 재하하중이 말뚝으로 집중되어 나타나는 결과라고 할 수 있다.



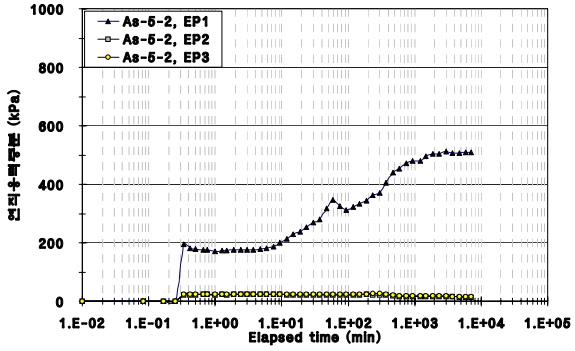
(a) 과잉간극수압의 변화(1단계)



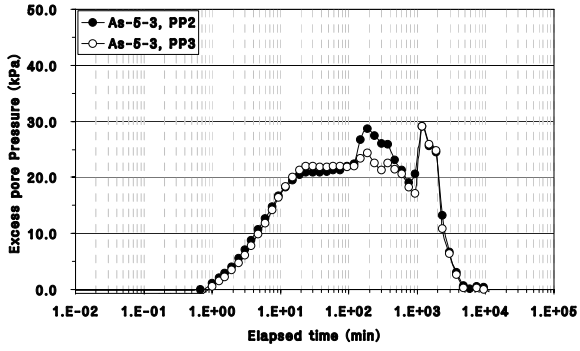
(b) 연직응력증분의 변화(1단계)



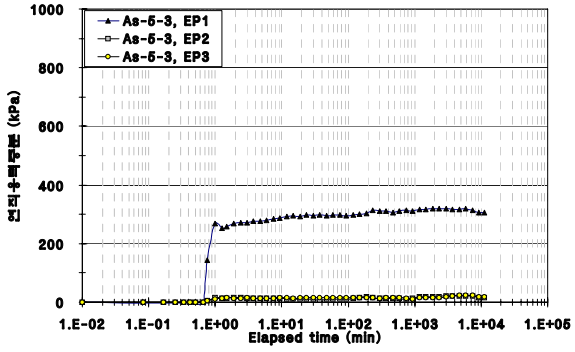
(c) 과잉간극수압의 변화(2단계)



(d) 연직응력증분의 변화(2단계)

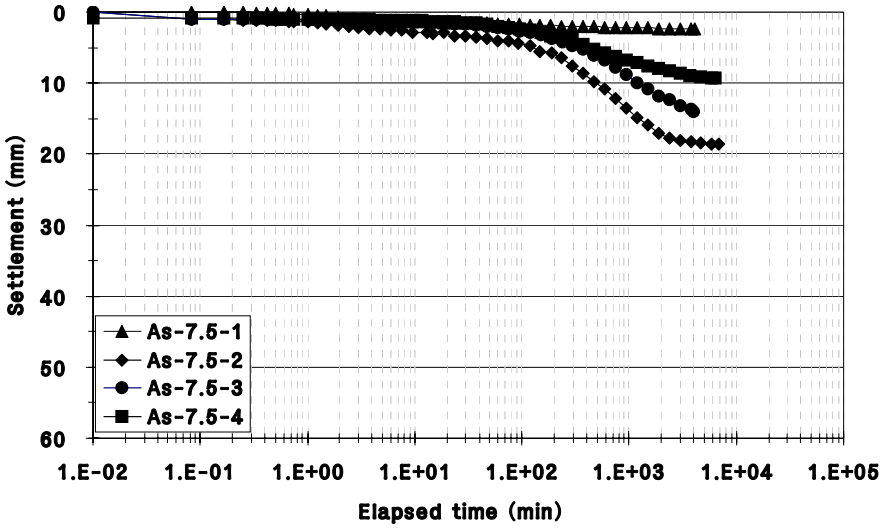


(e) 과잉간극수압의 변화(3단계)



(f) 연직응력증분의 변화(3단계)

<그림 3.4.17> 모형지반의 거동(RAPP-As-5%)



<그림 3.4.18> 시간경과에 따른 침하량의 변화(RAPP-As-7.5%)

<그림 3.4.18>은 As-7.5에서의 시간경과에 따른 침하량의 변화를 나타내고 있다. As-7.5에서는 1단계 재하에서 침하가 거의 발생하지 않은 것으로 보아 말뚝이 하중을 지지하고 있음을 알 수 있다.

2단계 재하시에 가장 많은 침하가 발생되었으며 이때 말뚝이 재하하중에 의해 소성변형이 발생된 것으로 예측된다.

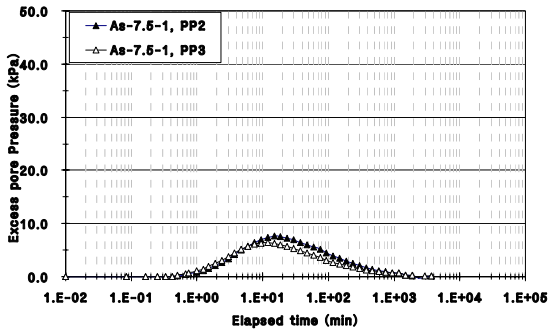
3단계에서는 소성변형이 종료되면서 말뚝을 구성하는 골재의 재배열 과정으로 인해 안정적인 침하거동을 나타내고 있다고 판단되며 4단계에서도 3단계와 비슷한 침하양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

<그림 3.4.19>는 As-7.5에서의 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화와 점토부와 말뚝부에 발생하는 연직응력증분을 나타낸 그래프이다.

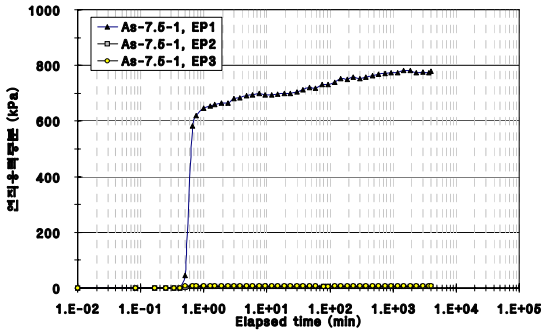
1단계 재하시 말뚝이 하중을 지지하는 양상을 보이고 있으므로 말뚝으로의 응력집중현상이 발생하고 있으며 이에 따라 과잉간극수압도 크게 증가되지 않고 소산하는 모습을 보이고 있다.

2단계에서는 말뚝의 소성변형이 발생하면서 1단계보다 높은 과잉간극수압이 계측되었으며, 말뚝부의 연직응력증분 역시 1단계보다 감소된 모습을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

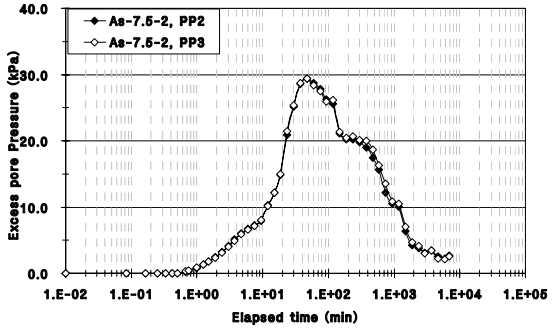
3단계와 4단계에서는 다소 안정적인 압밀침하거동으로 인해 시간경과에 따라 말뚝부의 연직응력증분이 점차 증가하고 있음을 알 수 있다.



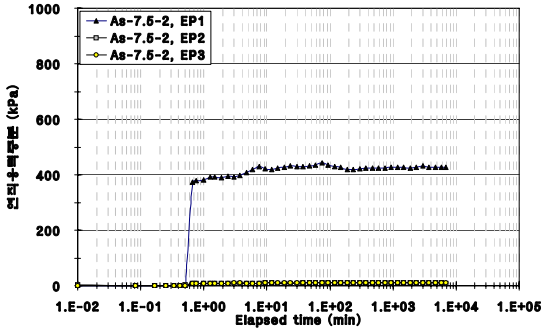
(a) 과잉간극수압의 변화(1단계)



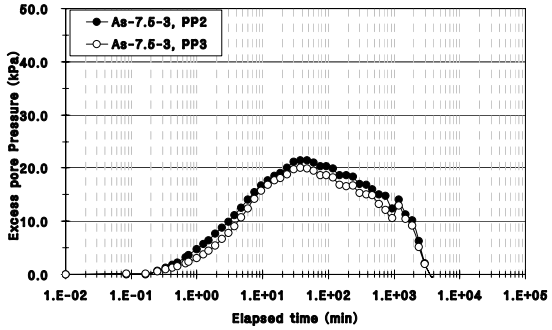
(b) 연직응력증분의 변화(1단계)



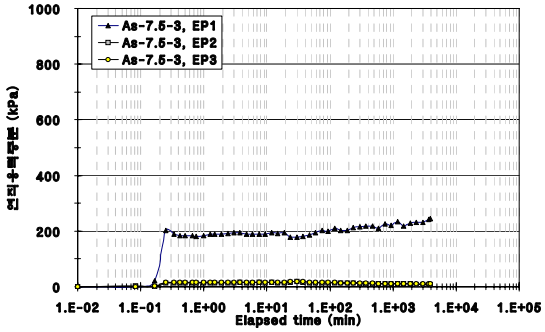
(c) 과잉간극수압의 변화(2단계)



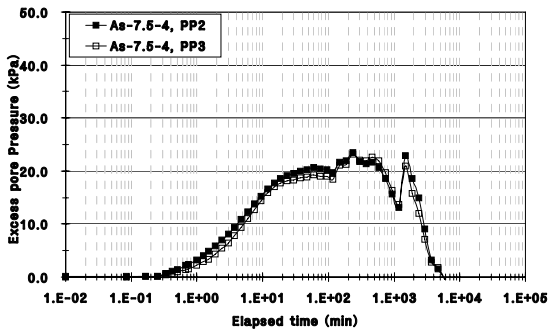
(d) 연직응력증분의 변화(2단계)



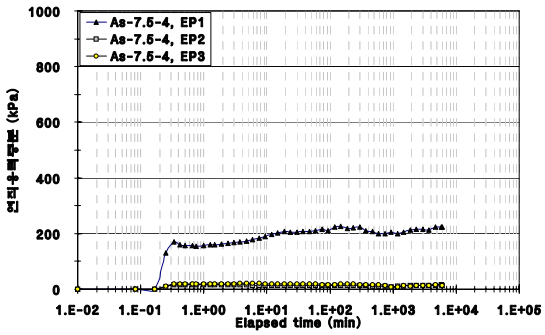
(e) 과잉간극수압의 변화(3단계)



(f) 연직응력증분의 변화(3단계)

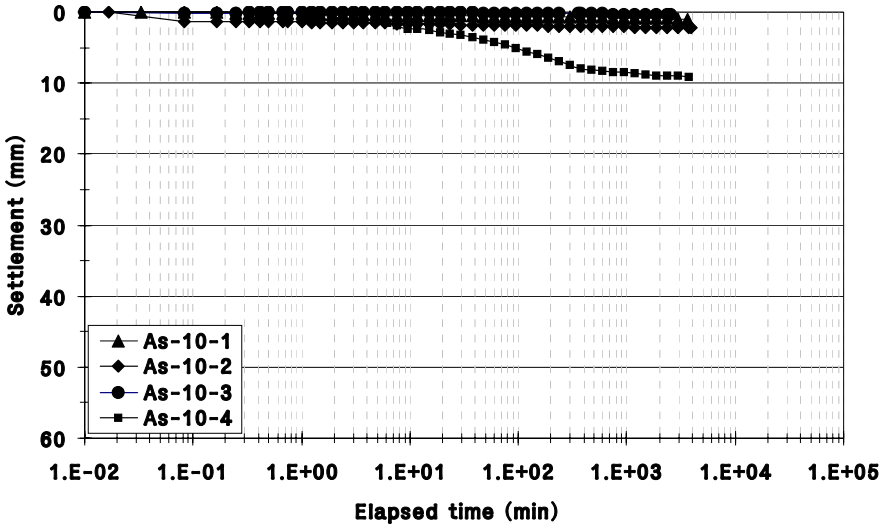


(g) 과잉간극수압의 변화(4단계)



(h) 연직응력증분의 변화(4단계)

<그림 3.4.19> 모형지반의 거동(RAPP-As-7.5%)



<그림 3.4.20> 시간경과에 따른 침하량의 변화(RAPP-As-10%)

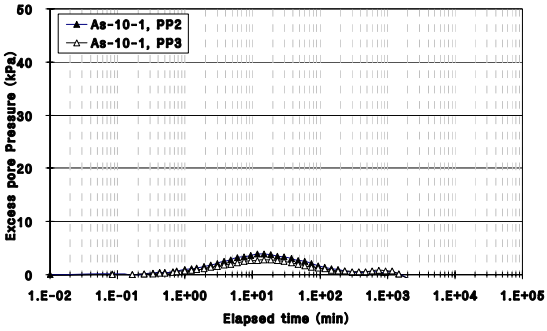
<그림 3.4.20>은 As-10에서 시간경과에 따른 침하량의 변화를 나타낸 그래프이다.

치환율 10%의 경우 3단계 재하까지 침하가 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있으며 이는 5%, 7.5% 보다 증가된 치환율 때문인 것으로 판단할 수 있다. 4단계에서는 말뚝의 소성변형으로 인한 압밀침하거동이 나타나고 있음을 알 수 있다.

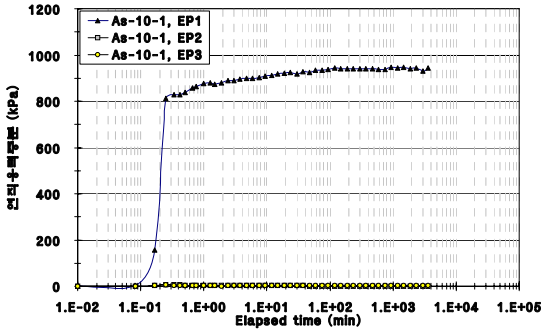
<그림 3.4.21>은 As-10에서의 시간경과에 따른 과잉간극수압과 연직응력증분의 변화를 나타낸 그래프이다.

침하량 변화에서 확인한 바와 같이 3단계까지는 말뚝이 하중을 지지하면서 높은 연직응력증분 값을 보이고 있으며 과잉간극수압도 거의 발생하지 않은 것을 볼 수 있다.

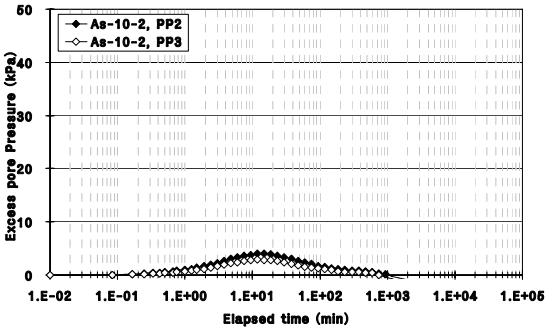
소성변형이 일어나는 4단계에서는 점토부의 응력과 과잉간극수압 전 단계에 비해 높은 값은 나타내고 있으며 시간의 경과에 따라 말뚝부의 응력이 점차 증가함으로써 소성변형 발생 후 안정적인 복합지반의 거동을 보이고 있음을 알 수 있다.



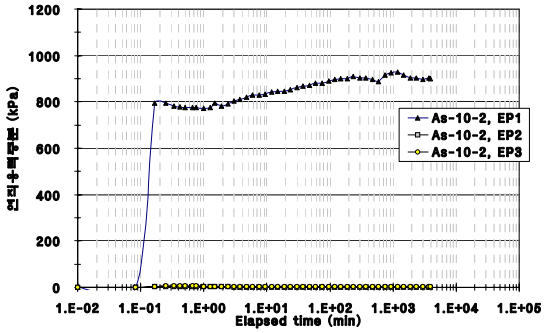
(a) 과잉간극수압의 변화(1단계)



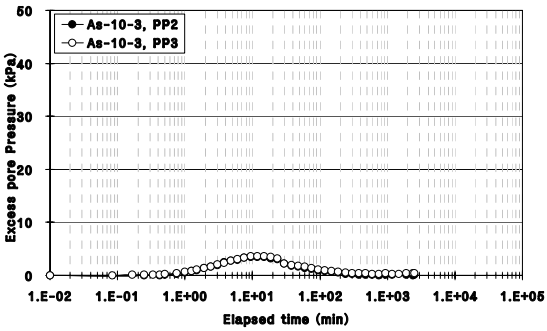
(b) 연직응력증분의 변화(1단계)



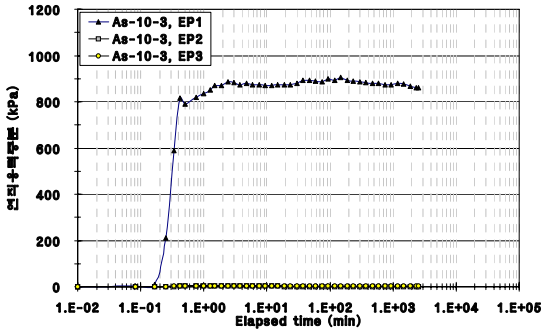
(c) 과잉간극수압의 변화(2단계)



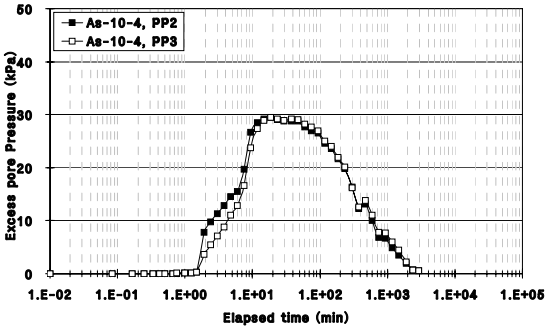
(d) 연직응력증분의 변화(2단계)



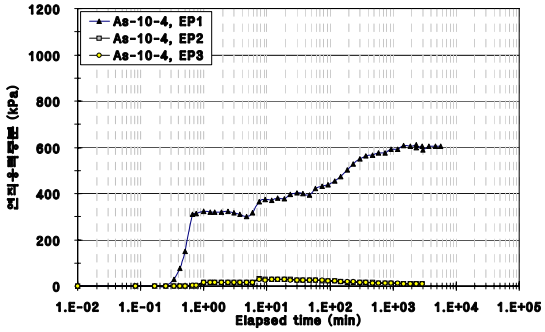
(e) 과잉간극수압의 변화(3단계)



(f) 연직응력증분의 변화(3단계)



(g) 과잉간극수압의 변화(4단계)

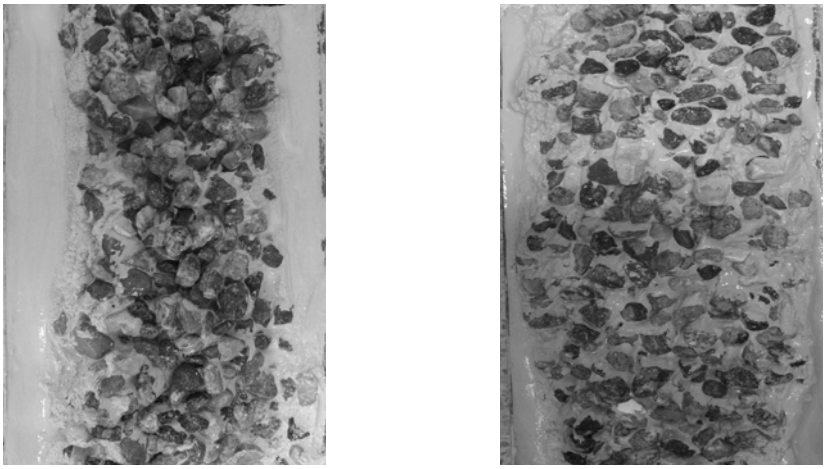


(h) 연직응력증분의 변화(4단계)

<그림 3.4.21> 모형지반의 거동(RAPP-As-10%)

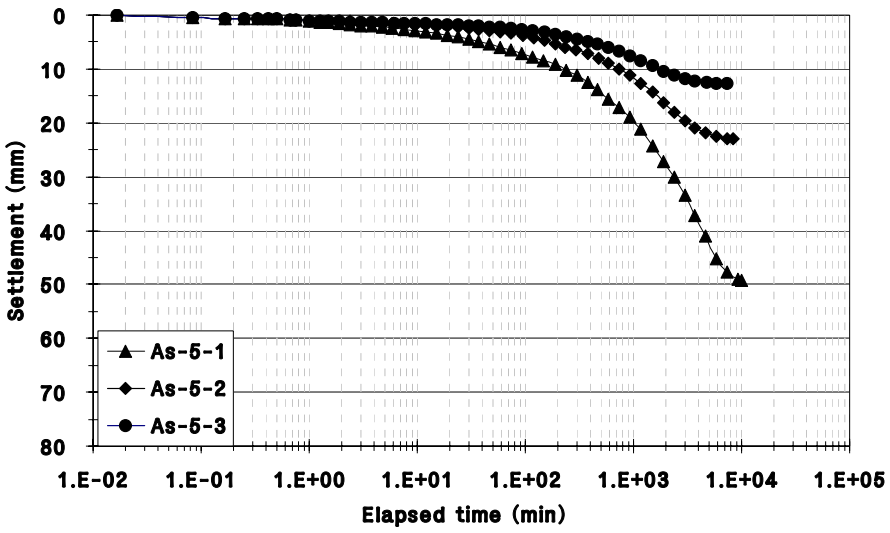
(나) 순환골재 다짐말뚝(GCP)

순환골재를 사용한 다짐말뚝에 대하여 원형토조 압밀실험을 실시하여 침하거동 특성과 복합지반의 응력분담거동을 RAPP와 비교·분석하고자 하였다. <그림 3.4.22>는 실험 종료 후 말뚝의 모습을 나타낸 것이다.



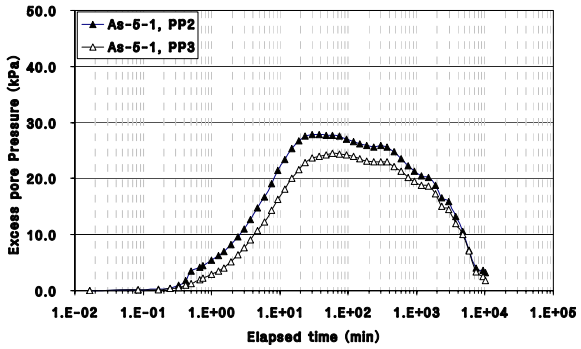
(a) GCP 5% 토조 해체 후 (b) GCP 10% 토조 해체 후

<그림 3.4.22> 치환율별 하중재하 후의 말뚝의 변화

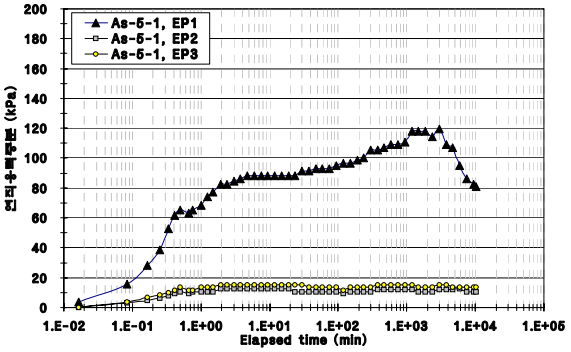


<그림 3.4.23> 시간경과에 따른 침하량의 변화(GCP-As-5%)

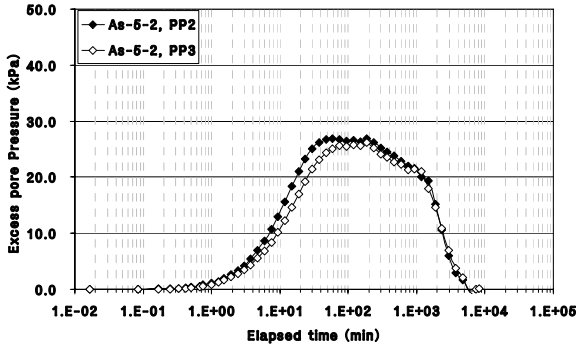
<그림 3.4.23>은 GCP의 치환율 5%에 대한 침하량의 경시변화를 나타낸 그래프이다. 모든 재하단계에서의 침하는 압밀침하곡선의 모습을 보이고 있으며 이는 말뚝의 강성에 의해 하중을 지지하는 RAPP와는 다른 양상의 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다.



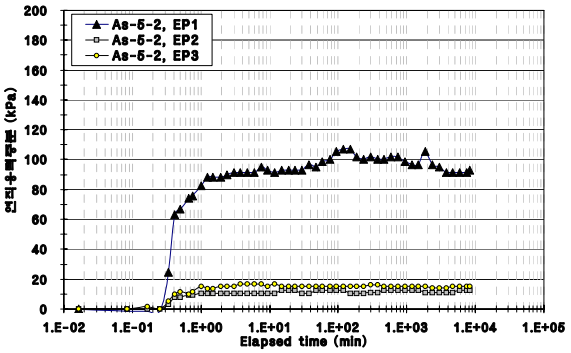
(a) 과잉간극수압의 변화(1단계)



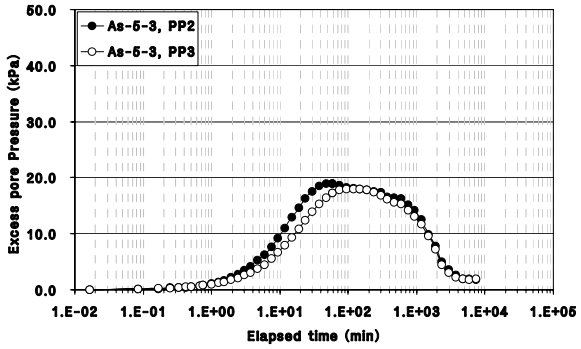
(b) 연직응력증분의 변화(1단계)



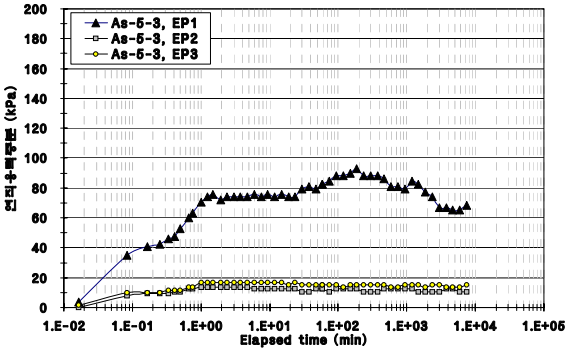
(c) 과잉간극수압의 변화(2단계)



(d) 연직응력증분의 변화(2단계)



(e) 과잉간극수압의 변화(3단계)



(f) 연직응력증분의 변화(3단계)

<그림 3.4.24> 모형지반의 거동(GCP-As-5%)

1단계 하중단계에서 가장 많은 침하가 발생한 것을 확인할 수 있는데, 이는 초기에 가해진 하중으로 인해 말뚝이 더욱 조밀하게 다져지는 현상 때문인 것으로 판단된다.

침하량은 하중단계가 증가할수록 순차적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다.

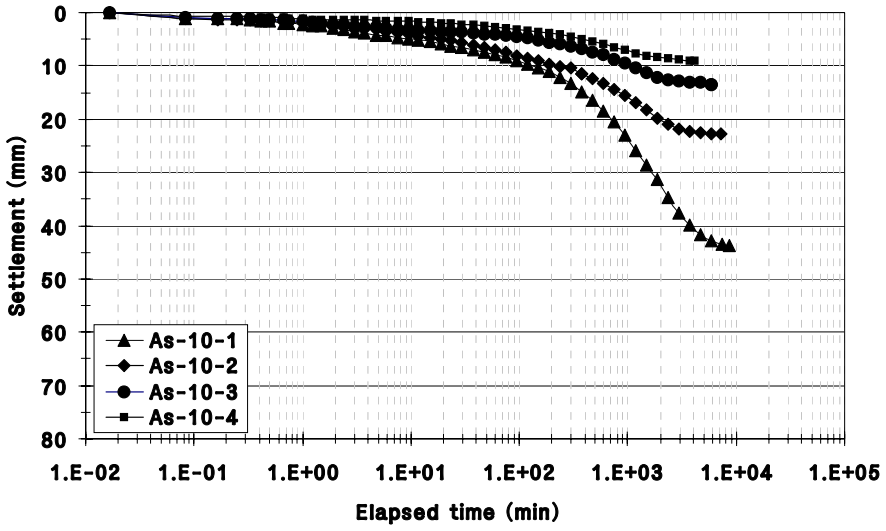
<그림 3.4.24>는 치환율 5%에서 각 하중단계별 시간에 따른 과잉간극수압과 점토부와 말뚝부의 연직응력증분 값을 나타낸 그래프이다.

과잉간극수압은 재하단계가 증가할수록 감소하고 있으며 소산시점 역시 단계가 증가할수록 줄어드는 모습을 보이고 있다.

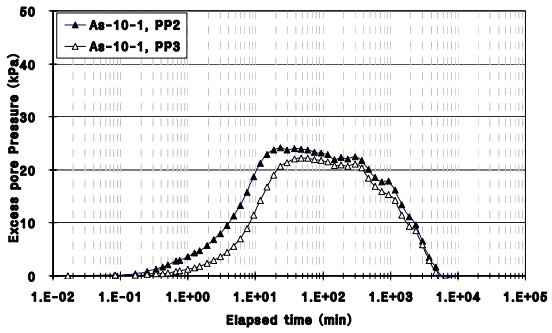
말뚝부와 점토부의 연직응력증분은 비교적 일정한 값을 유지하고 있는 것을 알 수 있으며 하중단계 증가에 따라 말뚝부에 작용하는 응력증분은 점차 감소하고 있음을 확인할 수 있다.

<그림 3.4.25>는 As-10에 대한 GCP의 시간경과에 따른 침하량의 변화를 나타낸 그래프이다. 10% 또한 5%와 비슷한 침하 양상을 보이고 있으며 전체적인 침하량은 5%보다 작은 것을 알 수 있다.

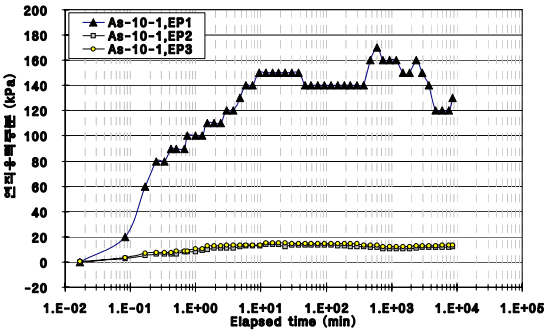
<그림 3.4.26>은 As-10에 대한 시간경과에 따른 과잉간극수압과 연직응력증분을 나타낸 그래프이다. 전체적인 양상은 5%의 경우와 비슷한 모습을 보이고 있으며 말뚝부에 작용하는 연직응력증분 값은 치환율의 증가에 따라 5%의 경우보다 큰 값을 나타내고 있다.



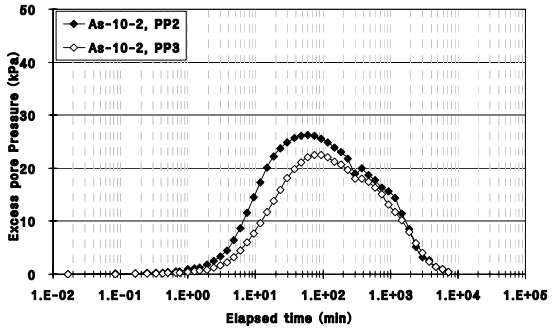
<그림 3.4.25> 시간경과에 따른 침하량의 변화(GCP-As-10%)



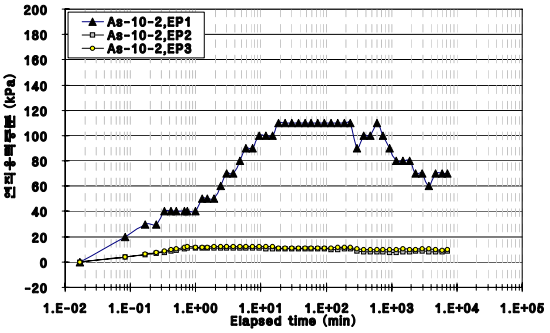
(a) 과잉간극수압의 변화(1단계)



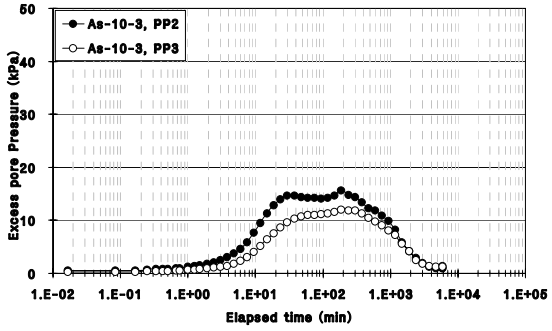
(b) 연직응력증분의 변화(1단계)



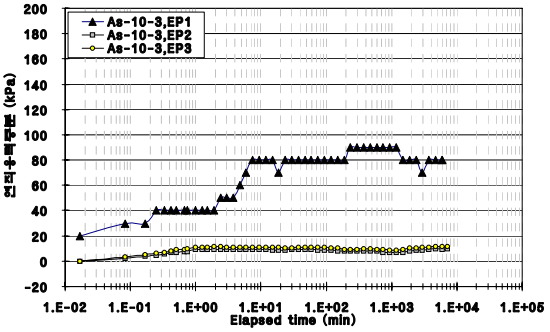
(c) 과잉간극수압의 변화(2단계)



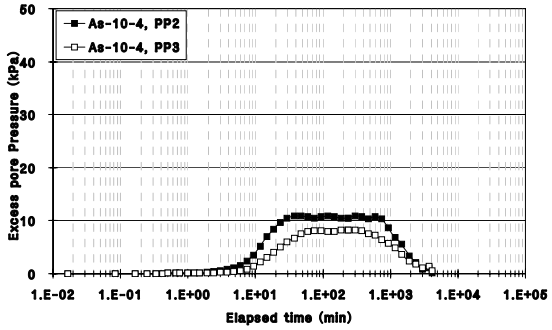
(d) 연직응력증분의 변화(2단계)



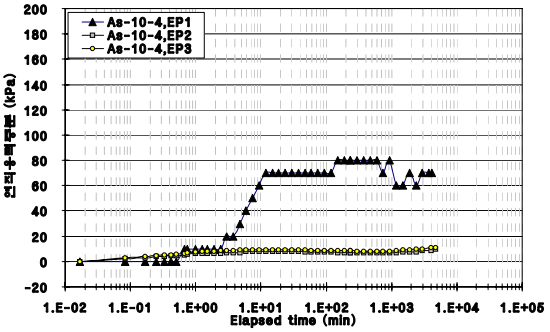
(e) 과잉간극수압의 변화(3단계)



(f) 연직응력증분의 변화(3단계)



(g) 과잉간극수압의 변화(4단계)



(h) 연직응력증분의 변화(4단계)

〈그림 3.4.26〉 모형지반의 거동(GCP-As-10%)

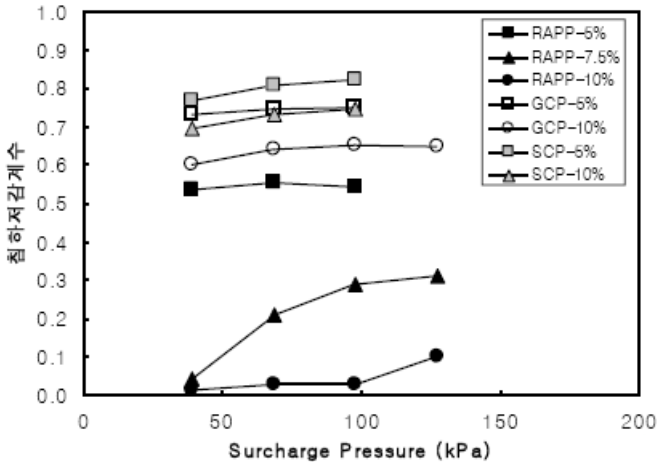
(2) RAPP 공법과 GCP 공법의 침하특성

RAPP와 GCP로 개량된 복합지반의 침하 특성을 분석하기 위하여 실험을 통해 얻은 침하량과 무보강 상태의 점토 지반 침하량을 비교하였다. 무보강 상태에 대한 침하량은 Terzaghi의 1차 압밀 침하량 공식(식 3.4.1)으로 산정하였다. 여기서, S는 압밀침하량, H는 초기 점토 높이, C_c는 압축지수, P_0 및 ΔP는 각각 점토지반의 초기 응력과 응력증분을 나타내고 있으며 이들 값은 전술한 모형실험 조건을 사용하였다. <그림 3.4.27>은 하중단계별 발생된 누적 침하량을 이용하여 (식 3.4.2)로 산정한 침하저감계수를 나타내고 있다. 여기서, S_0 및 S는 각각 무보강 지반의 침하량과 복합지반의 침하량을 나타낸다.

$$S = \frac{C_c}{1+e_0} H \log\left(\frac{P_0+\Delta P}{P_o}\right) \quad \text{(식 3.4.1)}$$

$$\beta = \frac{S}{S_0} \quad \text{(식 3.4.2)}$$

RAPP와 GCP 두가지 경우 모두 치환율이 증가할수록 침하저감효과가 우수하다는 것을 알 수 있다. RAPP으로 개량된 복합지반의 경우 소성변형이 발생한 재하단계에서도 비교적 낮은 침하저감계수를 나타내고 있으며 같은 치환율 별로 GCP와 비교했을 경우에도 GCP보다 우수한 침하저감효과를 보이고 있음을 알 수 있다.



<그림 3.4.27> 하중단계에 따른 침하저감계수

(3) RAPP 공법과 GCP 공법의 응력분담특성

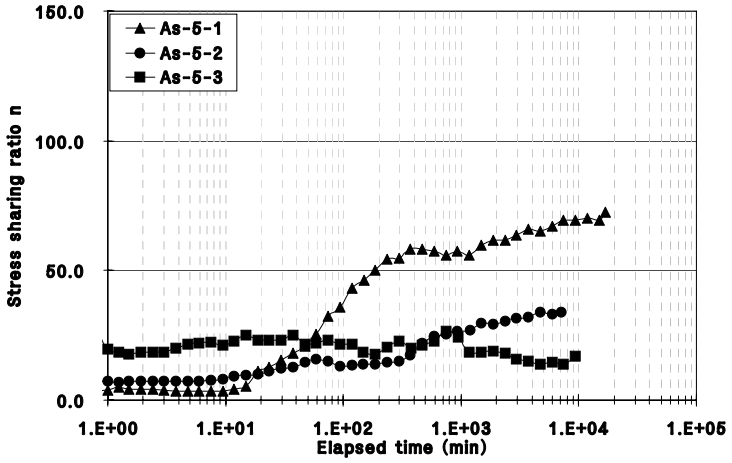
(가) 시간경과에 따른 복합지반의 응력분담비 변화(RAPP)

<그림 3.4.28>은 RAPP의 치환율 5%에 대하여 시간경과에 따른 복합지반의 응력분담비(n) 변화를 나타낸 그래프이다. 응력분담비(n)는 (식 3.4.3)과 같이 산정하였다.

$$n = \frac{\Delta\sigma_z^P}{\Delta\sigma_z^c} \qquad \text{(식 3.4.3)}$$

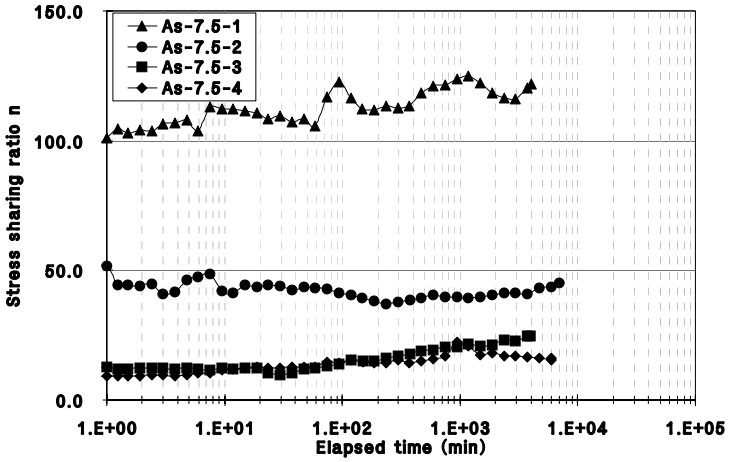
여기서, $\Delta\sigma_z^P$ 는 말뚝에 작용한 연직응력증분, $\Delta\sigma_z^c$ 는 점토부에 작용한 연직응력증분

<그림 3.4.28>에서와 같이 치환율 5%의 경우 말뚝이 하중을 지지하는 양상을 보이지 않기 때문에 비교적 낮은 응력분담비를 보이고 있다. 또한 1단계 및 2단계의 경우 말뚝의 소성변형으로 인해 입자의 재배열이 일어나면서 점차 응력분담비가 증가하고 있는 모습을 볼 수 있다.

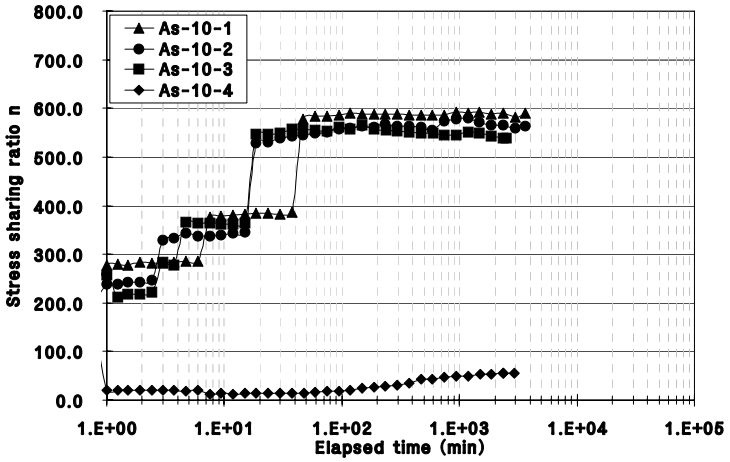


<그림 3.4.28> 시간 경과에 따른 복합지반의 응력분담비 변화(As-5%)

<그림 3.4.29>에서 보는 바와 같이 치환율 7.5%인 경우의 응력분담비는 말뚝이 하중을 지지하고 있는 1단계에서 약 120 정도의 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 소성변형이 발생하는 2, 3, 4단계에서는 50 미만의 낮은 응력분담비를 보이고 있다. 또한, 하중단계가 증가할수록 응력분담비는 점차 감소하고 있음을 확인할 수 있으며 이는 복합지반으로써의 거동 특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. <그림 3.4.30>은 치환율 10%의 시간에 따른 응력분담비 변화를 나타내고 있다. 말뚝이 하중을 지지하는 1, 2, 3단계에서는 약 600 정도의 높은 응력분담비를 보이고 있으며 말뚝이 파괴되는 4단계에서는 침하가 발생하면서 비교적 낮은 응력분담비를 보이다가 점차 말뚝으로 응력이 다시 집중되는 양상을 보이고 있다.



<그림 3.4.29> 시간경과에 따른 복합지반의 응력분담비 변화(As-7.5%)

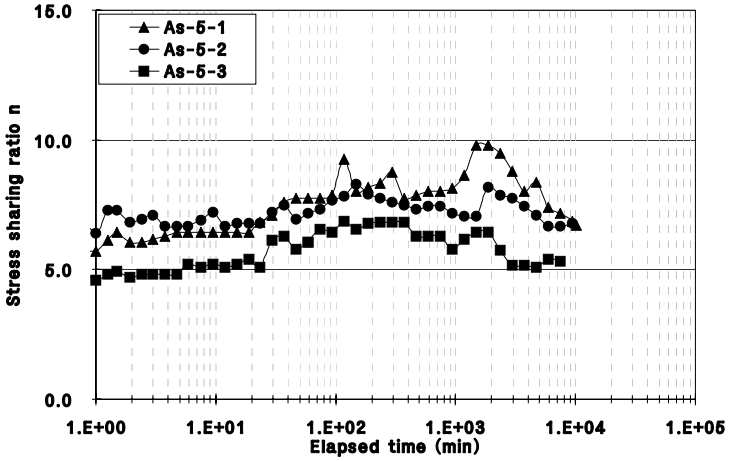


<그림 3.4.30> 시간경과에 따른 복합지반의 응력분담비 변화(As-10%)

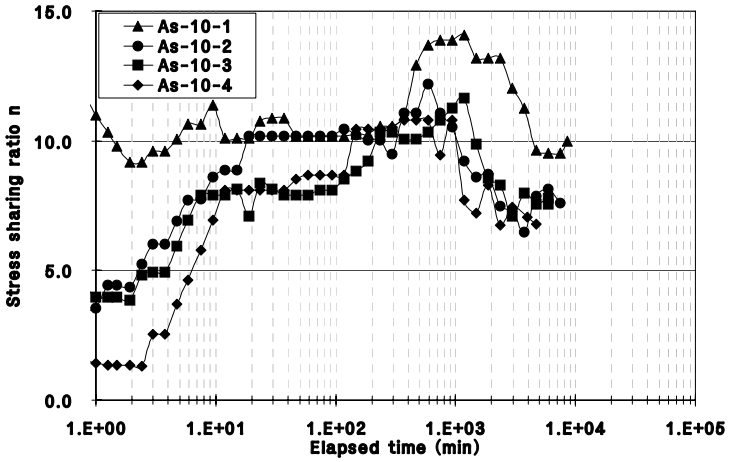
(나) 시간경과에 따른 복합지반의 응력분담비 변화(GCP)

<그림 3.4.31>은 GCP에 대하여 치환율 5%인 경우의 응력분담비의 변화를 나타내고 있다. 높은 응력분담비를 보이는 RAPP와는 달리, GCP는 5~10 정도의 응력분담비값을 나타내고 있으며 시간에 따라 일정한 값을 유지하고 있는 것을 알 수 있다.

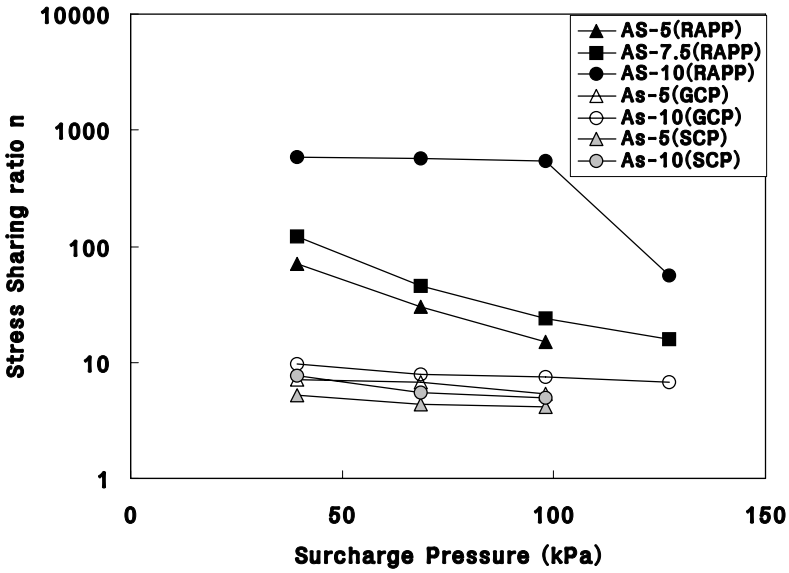
<그림 3.4.32>는 치환율 10%인 경우의 응력분담비 변화를 나타내고 있다. 대체적으로 5%일 때의 응력분담비보다 높은 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있는데, 이는 말뚝의 치환율이 증가함에 따라 말뚝으로 집중되는 응력이 더 커진다는 것을 보여주고 있다.



<그림 3.4.31> 시간경과에 따른 복합지반의 응력분담비 변화(As-5%)



<그림 3.4.32> 시간경과에 따른 복합지반의 응력분담비 변화(As-10%)



<그림 3.4.33> 하중단계에 따른 응력분담비

<그림 3.4.33>은 RAPP와 GCP가 설치된 복합지반에 적용된 재하압력과 압밀종료시의 응력분담비(n)와의 관계를 나타내고 있다. 그림에서는 SCP의 치환율 5%와 10%에 대한 결과(유승경, 2003)를 함께 도시하여 세 가지 말뚝에 대한 비교를 수행하고자 하였다.

모든 치환율에 대해서 복합지반의 n값은 하중단계가 증가함에 따라 단순히 감소하고 있으며, 치환율이 클수록 큰 값을 나타내고 있다.

또한, 말뚝의 강성이 큰 RAPP에서 높은 n값을 보이고 있으며, SCP가 가장 낮은 n값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

2. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법에 대한 수치해석

가. 수치해석 개요

본 연구에서는 순환골재 다공질 콘크리트말뚝에 의한 복합지반에 대한 보다 정확한 응력분담거동을 규명하기 위하여 다짐말뚝의 탄소성 거동과 연약지반의 이차압밀거동을 표현할 수 있는 구성모델을 이용한 다차원 축대칭 압밀해석을 실시하였다. 즉, 다짐말뚝재료의 역학모델로는 Drucker-Prager 타입의 파괴기준을 항복함수로 하는 구성모델을 사용하였으며, 점토의 역학거동은 Matsui-Abe(1986)에 의하여 제안된 탄점소성 구성모델에 의해 표현하였다.

또한, 본 연구에서의 수치해석은 탄점소성 축대칭 다차원 압밀 유한요소해석법(Matsui et al., 1996)을 적용하여 지반재료가 파괴상태에 도달한 후에도 안정적인 해석이 가능하도록 하였다. 한편, 본 해석방법의 유용성은 SCP에 의해 개량된 연약 점토지반의 압밀거동에 관한 연구를 통하여 실시한 모형실험(유승경, 2003a) 결과를 재현함으로써 검증하였다.

수치해석에 사용하는 지반재료의 역학특성 및 지반의 상태에 대한 파라미터 값들은 기존 연구성과에서 얻은 정보와 이를 활용하여 기존에 제안되고 있는 방법에 의해 결정하였다.

(1) 다공질 콘크리트말뚝 재료의 탄소성 모델화

본 연구에서는 말뚝재료의 역학모델로서 (식 3.4.4)에 나타낸 Drucker-Prager 타입의 파괴기준을 항목함수(f)로 하는 구성모델을 사용하였다. 이 구성모델을 적용한 이유는 파괴에 따르는 비선형 거동과 양(+)의 다일러턴시 거동의 표현이 가능하고, 지반재료에 대한 강성의 구속압 의존성을 고려할 수 있는 비교적 간단한 모델이기 때문이다. 또한 구성모델의 파라미터의 물리적, 공학적 의미가 명확함과 동시에 그것들은 통상의 삼축압축시험이나 기존 연구에 의한 참고값으로부터 간단히 결정할 수 있는 장점을 지니고 있다. 단, 이 구성모델은 파괴에 의한 비선형거동에 주목한 모델이기 때문에 파괴에 도달하기 전까지의 비탄성 거동을 고려할 수 없으며, 등방적인 모델이기 때문에 이방적인 변형 및 강도특성을 표현할 수는 없다.

$$f = q - \frac{6\sin\phi'}{3-\sin\phi'} p' - \frac{6\cos\phi'}{3-\sin\phi'} c' = 0 \quad \text{(식 3.4.4)}$$

여기서, ø′ 및 c′ 은 각각 유효응력에 기준하는 내부마찰각 및 점착력을 나타내고 있다. 또한 p′ 및 q는 각각 평균유효응력(Mean effective stress) 및 일반화 전단응력(Mises equivalent stress)을 나타내고 있으며 (식 3.4.5)와 (식 3.4.6)에 의해 구할 수 있다.

$$p' = \frac{\sigma'_r + \sigma'_z + \sigma'_\theta}{3} \quad \text{(식 3.4.5)}$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}\left[(\sigma'_r - \sigma'_z)^2 + (\sigma'_z - \sigma'_\theta)^2 + (\sigma'_\theta - \sigma'_r)^2 + 6\tau^2_{rz}\right]} \quad \text{(식 3.4.6)}$$

여기서, σ_r' , σ_z' 및 σ_θ' 는 각각 반경방향, 연직방향 및 원주방향의 수직유효응력을 나타내고 있으며, $\tau_{\gamma z}$는 전단응력을 나타내고 있다. 소성변형률 증분은 (식 3.4.7)에 나타내는 소성포텐셜함수(g)와 흐름법칙에 의해 결정된다.

$$g = q - \alpha_{dil} p' \quad \text{(식 3.4.7)}$$

여기서, α_{dil}은 소성변형률 증분비를 나타내고 있으며, (식 3.4.8)에 의해 정의된다.

$$\alpha_{dil} = -\frac{dv^p}{d\gamma^p} \quad \text{(식 3.4.8)}$$

여기서, d_v^p 및 d_γ^p는 각각 소성 체적변형률 증분 및 소성 전단변형률 증분을 나타내고 있다. 또한 모래의 강성에 대한 구속압 의존특성은 (식 3.4.9)에 의해 표현된다.

$$K = K_0 \left(\frac{p'}{p'_0}\right)^m \quad \text{(식 3.4.9)}$$

여기서, K 및 m은 각각 체적탄성계수 및 재료정수, 첨자의 0는 기준상태의 값

(2) 연약점토 지반재료의 탄점소성 모델화

일반적으로 연약점토지반은 고함수비, 저응력 상태이므로 상재하중이 재하될 경우 일차압밀 뿐만 아니라 이차압밀을 포함하는 탄점소성 압밀침하 거동이 나타나게 된다. 따라서 기존의 탄소성 이론을 이용한 압밀침하해석(일차압밀)으로는 연약지반의 정확한 압밀침하거동의 재현이 불가능하다. 또한 연약점토지반의 역학거동은 재하시간이나 재하속도 등 시간 의존성에 의한 영향이 큰 것으로 알려져 있다. 그러나 흙의 탄소성 모델을 이용하여서는 이러한 영향을 고려할 수 없기 때문에 어떠한 형태로든 점토의 시간 의존적 거동을 흙의 구성식에 반영하려는 노력이 진행되어 왔다. 이러한 배경으로 점토의 소성과 점성을 동시에 고려할 수 있는 탄점소성 구성 이론을 바탕으로 한 점토의 구성식이 몇몇 제안되어 왔다.

본 검토대상 지반을 구성하고 있는 점토의 역학거동은 Matsui-Abe(1996)에 의하여 제안된 탄점소성 구성모델에 의해 표현하였다. 본 구성식에서는 시간에 의존하지 않는 탄소성변형과 시간의존적 특성을 갖는 점성변형특성을 구분하여 표현함으로써 점성토의 시간 의존적 변형특성을 고려하고 있다. 즉, 소성 체적변형률과 점성 체적변형률의 합으로 얻어지는 점소성 체적변형률을 산정하여 이것을 변형률 경화 파라미터로 이용한다. 본 모델의 유동곡면(f)은 (식 3.4.10)에 의해 표현된다.

$$f=\mu \ln\left|\frac{1}{\delta}\left[\left\{1-\exp\left(-\frac{\delta \dot{v}_r^{vp}}{\mu}t\right)\right\}\exp\left(\frac{v^{vp}}{\mu}\right)+\delta\exp\left(-\frac{\delta \dot{v}_r^{vp}}{\mu}t\right)\right]\right|-v^{vp}=0 \quad \text{(식 3.4.10)}$$

여기서, v^{vp}, μ, $\dot{v}_r^{vp}$, δ 및 t는 각각 점소성 체적변형률, 이차원 압밀계수, 기둔 점성 체적변형률속도, 내부구속변형률 및 시간을 나타내고 있다. 또한 v^p는 소성체적변형률이고 (식 3.4.11)과 (식 3.4.12)에 의해 정의된다.

(주동측) $\eta \geq \eta_{Ko}$

$$v^p=\frac{\lambda-\kappa}{1+e}\left[\ln\left(\frac{p'}{p'_{yo}}\right)+\left(\frac{\alpha_a}{\alpha_a-1}\right)\ln\left(\frac{M_a+(\alpha_a-1)\eta}{M_a+(\alpha_a-1)\eta_{K_o}}\right)\right] \quad \text{(식 3.4.11)}$$

(수동측) $\eta \leq \eta_{Ko}$

$$v^p = \frac{\lambda-\kappa}{1+e}\left[\ln\left(\frac{p'}{p'_{yo}}\right)+\left(\frac{\alpha_p}{1-\alpha_p}\right)\ln\left(\frac{M_p+(\alpha_p-1)\eta_{K_o}}{M_p+(\alpha_p-1)\eta}\right)\right] \qquad \text{(식 3.4.12)}$$

여기서, λ, k, e 및 η는 각각 압축지수, 팽창지수, 간극비 및 응력비를 나타내고 있으며, 첨자의 K_o는 K_o 상태에 대한 값임을 나타내고 있다.

한편 M 및 a는 각각 한계상태에 대한 응력비 및 소성증분비 파라미터이며 또한 첨자의 a 및 p는 각각 주동상태 및 수동상태의 값임을 나타내고 있다.

(3) 탄점소성 축대칭 다차원압밀 유한요소해석법의 검증

본 검토에서의 수치해석은 탄점소성 축대칭 다차원압밀 유한요소해석법(Matsui et al., 1996)을 적용하였다.

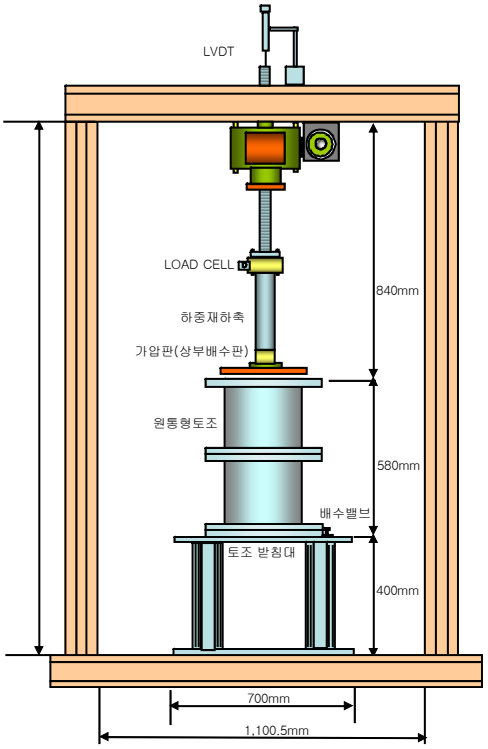
본 해석방법에는 리턴매핑기법(Return mapping procedure)을 적용하여 지반재료가 파괴상태에 도달한 후에도 안정적인 해석이 가능하다(Ortiz et al., 1986). 한편 본 해석방법의 유용성은 SCP에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 연구를 통하여 실시한 모형실험(유승경, 2003) 결과를 재현함으로써 검증하였다.

(가) SCP에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 실내모형실험

① 실험장치

<그림 3.4.34>는 실내모형실험장치의 상세도를 나타내고 있다. 실험에 사용된 토조는 내경 280mm, 내부심도 625mm이고 토조 내부의 측면마찰을 저감시키기 위해 크롬으로 표면처리를 하였다. 토조하부는 배수용 파이프를 설치하여 모형지반의 하부로부터 배수를 가능하게 하였다.

또한, 재하판에는 직경 2mm의 구멍을 다수 만들어 모형지반 하부로부터 배수를 가능하게 하였다. 모형지반에 대한 재하는 복동식의 벨로프레임 실린더를 사용해 재하봉과 재하판을 통해 실시하였다.



<그림 3.4.34> 실내모형실험장치 상세도

② 사용시료 및 모형지반의 제작

모형실험에서는 시판 중인 카올린(Kaolin) 점토를 사용하였으며, 본 점토의 물리적 특성은 <표 3.4.6>에 나타낸 바와 같다.

<표 3.4.6>에서 보는 바와 같이 본 점토는 통일분류법상 소성과 압축성이 큰 점토로 분류된다. <표 3.4.7>은 모래말뚝과 배수용 부설모래에 사용된 모래의 물리적 특성을 나타내고 있다. 문헌에 의하면 본 실험에 사용된 모래는 배수재로서 그 기능을 충분히 발휘할 수 있음을 알 수 있다(일본지반공학회, 1988).

본 실험에서는 다음의 순서에 의해 모형지반을 제작하였다. 우선 점토를 그 액성한계의 약 2배에 해당되는 150%의 함수비로 반죽하고, 약 50mm 높이의 배수용 모래층을 설치한 토조 내에 550mm의 높이가 되도록 충진하였다. 그때 소정의 위치에 토압계와 간극수압계를 설치하였다. 그 다음, 재하압력 2.16kPa과 9.8kPa의 조건에서 2단계로 나누어 예비압밀을 실시하여 약 2.72의 간극비를 갖는 점토지반을 제작하였다. 그 후 점토지반의 중심에 치환율에 상당하는 원형 케이싱을 삽입하면서 주변의 점토가 교란되지 않도록 주

의하며 굴삭하였고, 소정의 심도에 토압계를 설치하면서 수중낙하법에 의해 모래말뚝을 형성하였다.

사전의 예비실험에서 같은 방법으로 제작한 모래 공시체의 간극비는 약 0.72이었다. 따라서 모래말뚝의 상대밀도는 약 52%로 추정된다. 모래말뚝 타설 후, 다시 상재압 9.8kPa로 압밀을 실시함으로써 모래말뚝타설에 의한 응력변동을 제거하여 모형지반의 제작을 완료하였다.

<표 3.4.6> 점토의 물리적 특성

구 분	G_s	W_n(%)	WP(%)	PI	C_c
물성치	2.62	82.6	28.6	54.0	0.87

<표 3.4.7> 모래의 물리적 특성

구분	G_s	e_{max}	e_{min}	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_g
물성치	2.64	0.87	0.58	0.17	0.30	0.63	3.71	0.84

③ 실험케이스와 실험조건

<표 3.4.8>은 실험케이스와 실험조건을 나타내고 있다. 실험은 복합지반의 치환율이 5%, 10% 및 25%인 3가지의 시리즈에 대해 실시하였다.

각각의 시리즈에서는 소정의 재하응력에 도달하기까지 3~4단계로 나누어 단계재하를 실시하였다.

<표 3.4.8> 실험케이스와 실험조건

Test Series	Replacement Area Ratio (%)	Test Case	Loading Stage	Pressure Before Applying Surcharge (kPa)	Total Surcharge (kPa)	Increment Pressure (kPa)	Initial Height of Model Ground (mm)
As-5	5	As-5-1	1	9.8	39.2	29.4	379
		As-5-2	2	39.2	68.6	29.4	
		As-5-3	3	68.6	98.0	29.4	
As-10	10	As-10-1	1	9.8	39.2	29.4	377
		As-10-2	2	39.2	68.6	29.4	
		As-10-3	3	68.6	98.0	29.4	
As-25	25	As-25-1	1	9.8	49.0	39.2	394
		As-25-2	2	49.0	88.2	39.2	
		As-25-3	3	88.2	127.4	39.2	
		As-25-4	4	127.4	161.7	34.3	

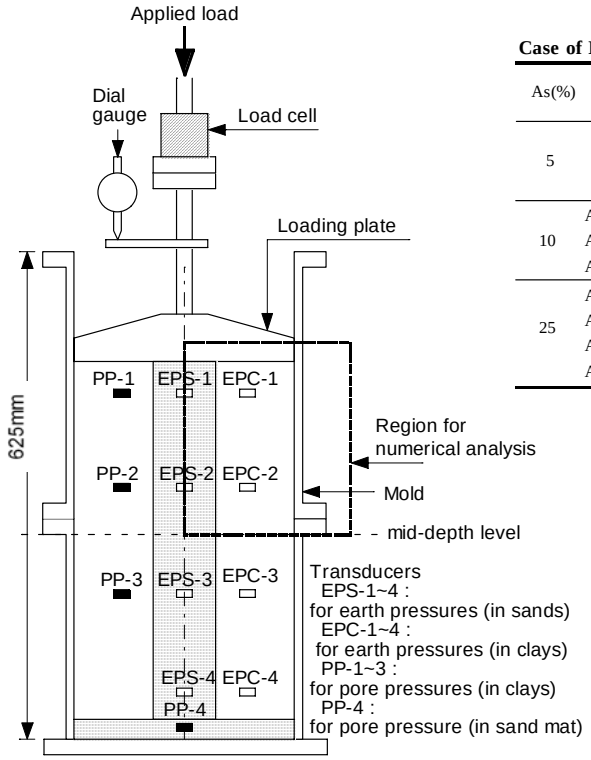
(나) 실내모형실험에 대한 수치해석

① 수치해석의 개요

본 연구에서 수행한 수치해석의 해석모델은 <그림 3.4.35>에 나타낸 저치환율 SCP에 의해 개량된 복합지반의 압밀거동에 대한 일련의 모형실험을 대상으로 작성하였으며, 해석모델에 대한 개요는 <그림 3.4.36>과 같다.

모형지반 압밀거동의 대칭성을 고려하여 <그림 3.4.35>에서 파선으로 둘러싸여 있는 부분을 수치해석 대상으로 하였다. 이 모델에는 모형실험에서와 같이 중심부에 1본의 모래말뚝이 표현되어 있고 그 주위는 연약점토에 의해 둘러싸여 있는 축대칭 모델이다. 또한 모형지반의 점토부만 다차원 압밀해석을 적용하였으며, 간극수에 관한 경계조건은 해석모델의 측면 및 저면에 대하여 비배수, 재하판과 모래말뚝에 접하는 부분의 경계를 배수조건으로 하였다.

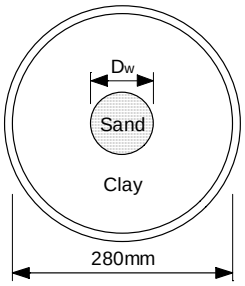
한편 <그림 3.4.34>의 모델 중 요소 A는 선행 모형실험에서의 EPC-2와 EPC-3의 계측기 설치위치와 대응되고 있으며, 요소 B는 EPC-2와 EPC-3, 그리고 PP-2와 PP-3의 계측기 설치위치와 대응되고 있다.



(a) Cross section

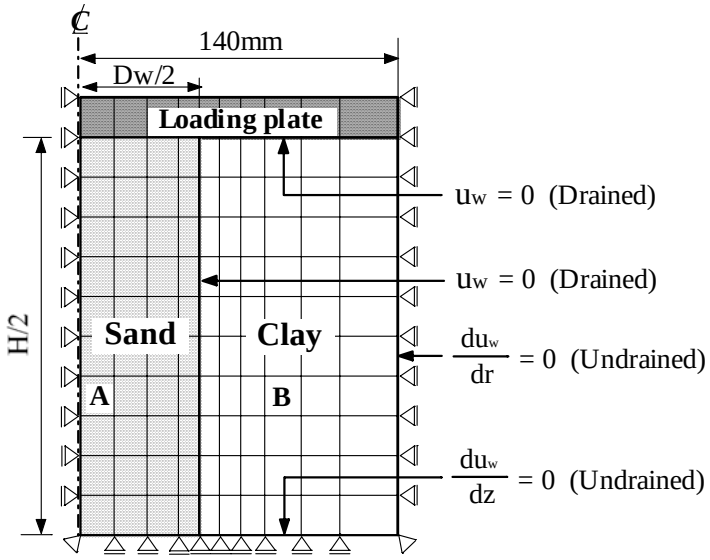
Case of Model Tests

As(%)	Case	Initial Height of Model Ground (mm)	Total (kPa)	Increment Pressure (kPa)
5	As-5-1	379	39.2	29.4
	As-5-2		68.6	29.4
	As-5-3		98.0	29.4
10	As-10-1	377	39.2	29.4
	As-10-2		68.6	29.4
	As-10-3		98.0	29.4
25	As-25-1	394	49.0	39.2
	As-25-2		88.2	39.2
	As-25-3		127.4	39.2
	As-25-4		161.7	34.3



(b) Plane view

<그림 3.4.35> 실내모형실험의 개요



<그림 3.4.36> 수치해석 모델

② 모형지반의 초기응력상태

수치해석에서는 선행 모형실험의 예비압밀 종료시점을 초기상태로 하였다. 따라서 연직방향의 초기응력(σ_{zo}')은 예비압밀시의 재하압력(9.8kPa)과 같은 값으로 결정하였으며, 반경방향 및 원주방향의 초기응력(σ_{ro}' 및 σ_{eo}')은 모래말뚝의 타설에 의한 응력변화가 미미하다고 판단하여 정지토압계수 K_o를 사용함으로써 (식 3.4.13)에 의해 결정하였다.

$$\sigma_{ro}' = \sigma_{eo}' = K_o \ \sigma_{zo}' \qquad \text{(식 3.4.13)}$$

<표 3.5.9>는 수치해석에 사용된 모형지반의 초기상태에 대한 정수를 나타내고 있다.

<표 3.4.9> 모형지반의 초기상태에 대한 정수

Items		Value
Coefficient of earth pressure at rest	K_o	0.518
Void ratio at reference state	e_o	2.74
Coefficient of permeability at reference state(cm/min)	k_o	0.529×10^{-4}
Permeability change index	C_k	0.524

③ 수치해석 조건

수치해석은 저치환율 SCP에 의해 개량된 복합지반의 압밀거동에 대한 일련의 모형실험에서와 같이 치환율의 변화 즉, A_s가 5%, 10% 및 25%인 경우에 대해서 하중단계별로 모두 10가지의 경우에 대하여 수행하였다(<그림 3.4.36> 참조).

또한 수치해석에서는 재하단계 중 제1단계의 초기상태만 <표 3.4.11>에 나타낸 상태에 있음으로 하였고, 2단계 이후는 각각 전단계의 수치해석 최종단계를 초기상태로 하였다.

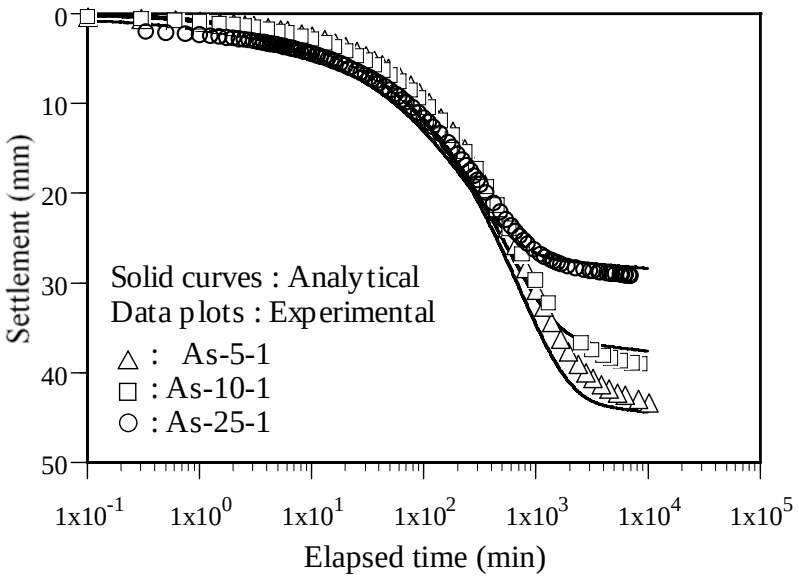
(다) 수치해석에 의한 모형실험결과의 재현

본 연구에서 사용한 수치해석 기법의 신뢰성을 검증하기 위해 수치해석결과와 선행의 모형실험 결과 즉, 복합지반의 침하량, 점토의 과잉간극수압 및 모래말뚝과 점토의 연직 응력증분에 대해 그것들의 시간에 따른 변화를 비교하였다.

① 시간에 따른 침하량의 변화

<그림 3.4.37>은 모형실험 As-5-1, As-10-1 및 As-25-1에 대한 침하량의 시간에 따른 변화와 그것에 대한 수치해석 결과를 나타내고 있다.

모든 경우에서 수치해석에 의한 결과는 모형지반의 침하량의 시간에 따른 변화와 최종 침하량을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.



<그림 3.4.37> 시간경과에 따른 침하량의 변화

② 시간에 따른 과잉간극수압의 변화

<그림 3.4.38>은 모형실험 As-5-1, As-10-1 및 As-25-1에서의 PP-2와 PP-3에 의한 과잉간극수압과 그것들의 설치위치에 상응하는 수치해석모델의 요소 B(<그림 3.4.35>)의 과잉간극수압의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다.

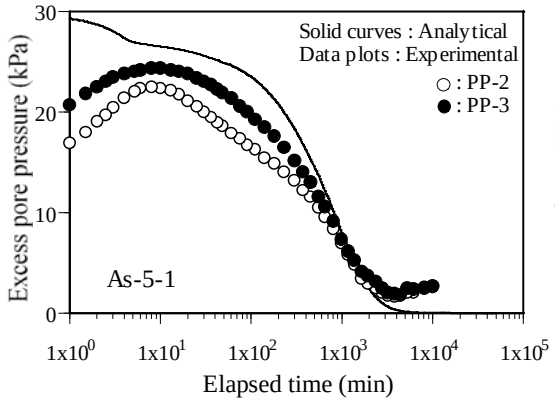
모형실험에서 과잉간극수압은 재하직후로부터 약 10분 정도까지 증가하지만 그 후 감소로 전환하고 있다. 이것은 모형지반 중 간극수압 측정계에 미소량의 기포가 존재하여 완전하게 포화되지 못했기 때문이라고 판단된다. 그러나 압밀의 경과시간 약 10분 정도 이후에는 모형실험과 수치해석의 결과들이 모든 경우에서 거의 일치하고 있다.

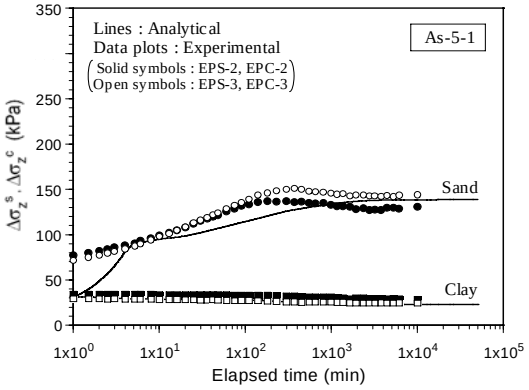
③ 시간에 따른 연직응력증분의 변화

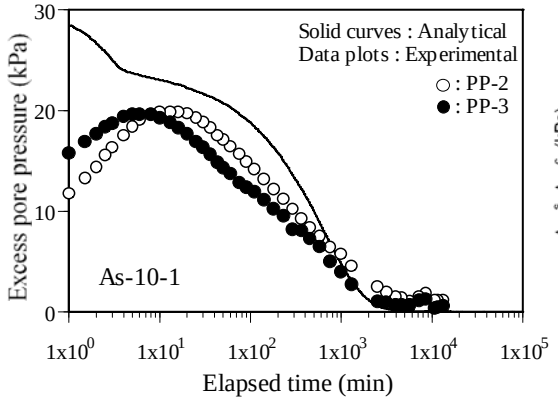
<그림 3.4.39>는 As-5-1, As-10-1 및 As-25-1에서의 모래말뚝과 점토 각각의 연직방향의 수직응력증분($\Delta\sigma_z^s$와 $\Delta\sigma_z^c$)의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 단, $\Delta\sigma_z^s$와 $\Delta\sigma_z^c$는 각각 <그림 3.4.36>의 요소 A와 요소 B에 대한 값들이며, 전응력에 의한 예비압밀 압력으로부터의 증분이다.

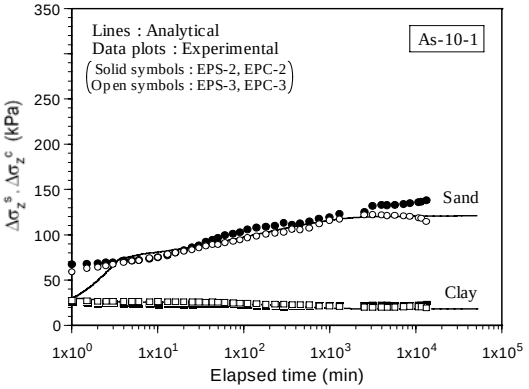
$\Delta\sigma_z^s$는 모형실험 As-5-1과 As-10-1의 재하 후 약 5분 정도까지를 제외하면 모든 실험결과와 수치해석결과는 거의 일치하고 있다.

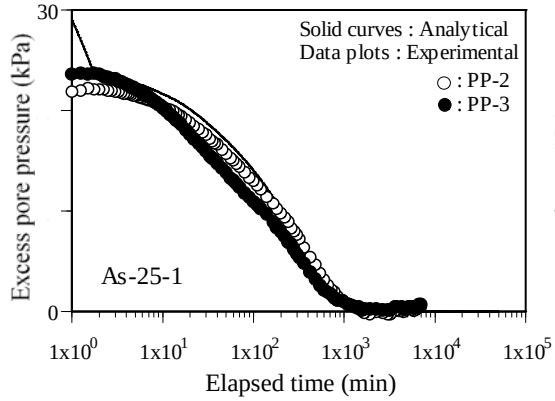
한편 수치해석에 의한 $\Delta\sigma_z^c$의 시간에 따른 변화는 모든 경우에서 모형실험의 EPC-2와 EPC-3의 중간적인 거동을 나타내며 잘 일치하고 있다. 이상의 결과로부터 모형실험과 수치해석의 결과들을 비교함으로써 본 연구에서 사용하는 수치해석기법의 신뢰성을 검증할 수 있다.

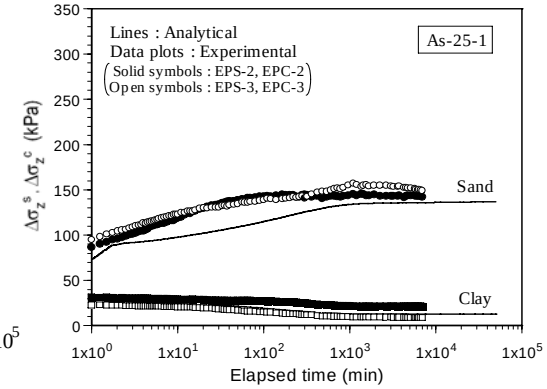












〈그림 3.4.38〉 시간 vs. 과잉간극수압　〈그림 3.4.39〉 시간 vs. 연직응력증분

(4) 해석대상 지반의 역학 파라미터의 결정

본 연구에서 해석대상으로 하고 있는 다공질 콘크리트말뚝 재료에 대한 탄소성 모델화를 위해서는 재료의 탄성적 역학거동을 표현하는 체적탄성계수, 다일러턴시의 특성을 표현하는 소성변형증분비, 파괴기준에 대한 파라미터인 내부마찰각과 점착력 등의 결정이 필요하다. 한편, 점토의 모델화를 위해서는 압축지수, 팽창지수, 한계상태에서의 유효응력비, 이차압밀계수, 기준 체적변형속도 등 구성모델의 역학 파라미터와 초기간극비, 투수계수, 투수계수 변화지수 등의 지반 상태량을 결정할 필요가 있다. 따라서 본 검토에서는 지반재료의 역학특성 및 지반의 상태에 대한 파라미터 값들을 현장에서 얻은 정보와 이를 활용하여 기존에 제안되고 있는 방법에 의해 다음과 같이 결정하였다.

(가) 말뚝재료에 대한 탄소성 역학 파라미터의 결정

본 연구에서 해석대상으로 하는 말뚝에 대한 역학 파라미터는 각각 기존의 연구에서 사용한 값을 사용하였다. 다음에는 말뚝에 대하여 참고한 물성치들을 이용하여 본 연구에서 사용하는 각각의 파라미터 결정방법에 대하여 설명하였다.

① 기준상태에 대한 체적탄성계수(K_o)

재료의 강성에 대한 구속압 의존 특성은 다음 식에 의해 표현된다. 즉,

$$E = E_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^m \qquad \text{(식 3.4.14)}$$

여기서, E, E_o, P_o 및 m은 각각 탄성계수, 기준상태에서의 탄성계수, 기준상태에서의 응력 및 재료정수를 나타낸다. 한편, 체적탄성계수 K는 다음의 관계식으로부터 얻을 수 있다.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \qquad \text{(식 3.4.15)}$$

② 소성변형증분비(α_{dil})

재료에 발생하는 응력비가 최대 응력비의 상태에 도달했을 때 발생하는 전단변형률과 체적변형률 모두가 소성성분이라고 가정한다면 다음과 같은 식으로 소성변형증분비(α_{dil})를 구할 수 있다.

$$\alpha_{dil} = -\frac{dv^p}{d\gamma^p} \qquad \text{(식 3.4.16)}$$

여기서, d_v^p와 d_γ^p는 각각 소성체적변형증분과 소성전단변형증분을 나타낸다.

③ 내부마찰각(ø′)과 점착력(c′)

일반적으로 지반재료의 파괴기준에 대한 파라미터인 ø′와 c′는 삼축압축시험을 통하여 결정할 수 있으며, (식 3.5.14)와 같은 관계를 갖는다.

본 연구에서는 다짐말뚝재료의 ø′와 c′를 기존에 일반적으로 사용되고 있는 값들을 적용하였다.

$$\phi' = \sin^{-1}\left(\frac{3\eta_{max}}{6+\eta_{max}}\right) \qquad \text{(식 3.4.17)}$$

여기서, η_{max}는 최대응력비를 나타낸다.

④ 포와송비(ν)

포와송비 ν는 체적탄성계수 K와 전단탄성계수 G의 관계로부터 얻을 수 있다. 여기서 G를 구하기 위해서는 우선 응력비와 전단변형률의 관계곡선에서 초기 기울기를 직선화하여 초기전단탄성계수 G_o를 구한다.

K와 G는 모두 응력레벨에 의존하기 때문에 해석대상으로 하는 응력단계인 p′를 대응시켜 다음의 관계식들로부터 계산한다.

$$K = K_0 \left(\frac{p'}{p_0'} \right)^m \quad \text{(식 3.4.18)}$$

$$G = G_0 p' \quad \text{(식 3.4.19)}$$

계산된 K와 G를 다음의 관계식에 대입하여 포와송비 ν를 구한다.

$$\nu = \frac{3K - 2G}{6K + 2G} \quad \text{(식 3.4.20)}$$

이상에서 설명한 방법으로 결정한 말뚝에 대한 역학 파라미터를 <표 3.4.10>에 정리하였다.

<표 3.4.10> 말뚝에 대한 역학 파라미터

Parameters		Value
Elastic modulus at reference state(kPa)	E_o	7.84×10^4
Mean effective stress at reference state(kPa)	p_o'	98.0
Material constant	m	0.6
Internal friction angle(°)	$\varnothing'$	42.0
Plastic strain increment ratio	η_d	0.15
Poisson ratio	ν	0.27

(나) 점토에 대한 탄점소성 역학 파라미터의 결정

본 연구에서 해석대상으로 하는 점토에 대한 기본적인 역학 파라미터는 본 사업의 검토대상인 연약지반에 대한 물성치를 참고로 하여 결정하였다.

한편, 점토의 점성적 성질에 대한 역학특성은 기존의 연구결과(유승경, 2003)를 참고하여 결정하였다. 다음에는 점토에 대하여 참고한 물성치들을 이용하여 본 연구에서 사용하는 각각의 파라미터 결정방법에 대하여 설명한다.

① 압축지수(λ)와 팽윤지수($\varkappa$)

표준압밀시험으로부터 얻은 결과로부터 다음과 같은 관계를 이용하여 압축지수 λ와 팽윤지수 $\varkappa$를 산정하였다.

$$\lambda = -\frac{de}{d\ln(\sigma'_v)} = 0.434\,C_c \qquad \text{(식 3.4.21)}$$

$$\kappa = -\frac{de}{d\ln(\sigma'_v)} = 0.434\,C_s \qquad \text{(식 3.4.22)}$$

② 한계상태에서의 유효응력비(M)

한계상태에 대한 유효응력비 M은 서로 다른 유효압밀압력 조건에서 비배수 삼축압축시험을 실시하여 한계상태에 도달한 포인트를 응력공간상에서 연결함으로써 구할 수 있다. 기존의 연구에 의하면 점토지반의 평균적 M값은 1.1~1.4 정도로 나타난다고 보고되고 있다.

③ K_o 상태에서의 유효응력비(η_{Ko})

K_o 상태에서의 유효응력비 η_{Ko}는 정지토압계수 K_o를 이용하여 다음과 같은 관계로부터 산정할 수 있다.

$$\eta_{K_o} = \frac{3(1-K_o)}{1+2K_o} \quad \text{(식 3.4.23)}$$

상기의 관계식으로부터 유효응력비 η_{Ko}를 결정하기 위해서는 본 검토대상지반에 대한 정지토압계수 K_o를 결정할 필요가 있다. Jacky는 모래에 대한 실험결과로부터 다음과 같은 관계를 제시하였다.

$$K_o = 1-\sin\phi' \quad \text{(식 3.4.24)}$$

여기서 ϕ'는 유효내부마찰각을 나타낸다. 이 관계식은 모래뿐만 아니라 점토에 대해서도 그 적용성이 검증되어 있으므로 본 검토의 대상지반에 적용하였다.

한편, 유효내부마찰각 ϕ'는 한계상태에서의 유효응력비 M을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sin\phi' = \frac{3M}{6+M} \quad \text{(식 3.4.25)}$$

④ 포아송비(ν)

포아송비 ν는 다음과 같은 관계식으로부터 정지토압계수 K_o를 이용하여 구할 수 있다.

$$\nu = \frac{K_o}{1+K_o} \quad \text{(식 3.4.26)}$$

⑤ 2차압밀계수(μ)

2차압밀계수 μ는 장기압밀시험을 실시하여 대수축의 경과시간에 대한 변형량의 관계로부터 다음과 같은 식을 이용하여 산정한다.

$$\mu = \frac{dv}{d\ln(t)} \qquad \text{(식 3.4.27)}$$

그러나, 현실적으로 장기압밀시험을 실시하는 것은 매우 어려운 일이므로 과거의 사례를 참고하여 가능한 합리적으로 2차압밀계수를 결정할 필요가 있다. 따라서 본 검토에서는 (식 3.5.25)에 나타낸 바와 같이 2차압밀계수 μ는 일차압밀거동을 지배하는 압축지수 λ와 팽윤지수 κ와의 상관관계로부터 산정하였다.

$$\mu = \frac{\lambda - \kappa}{(1+e)m'} \qquad \text{(식 3.4.28)}$$

여기서, m′ 는 점소성 파라미터를 나타낸다.(참고값 28.8)

⑥ 기준점성체적변형속도($\dot{v}_r^v$)

2차압밀계수 μ와 기준점성체적변형속도 $\dot{v}_r^v$의 비는 특정시간 t_c를 의미하며, 일반적인 개념으로 특정시간 t_c는 일차압밀이 종료되는 시간으로 간주한다. 따라서 본 검토에서는 기존에 실시한 1차원 압밀해석의 결과로부터 특정시간을 참고로 하여 다음과 같은 관계식으로부터 기준점성체적변형속도 $\dot{v}_r^v$를 산정하였다.

$$\dot{v}_r^v = \frac{\mu}{t_c} \qquad \text{(식 3.4.29)}$$

⑦ 초기간극비(e_o)

점토의 초기간극비는 본 연구의 대상지반에서 조사한 값인 1.08을 적용하였다.

⑧ 점토지반의 투수계수(k)와 투수계수 변화지수(C_k)

투수계수 k는 점토지반의 평균적 투수계수를 적용하였다. 한편, 투수계수 k와 투수계수 변화지수 C_k는 표준압밀시험결과로부터 결정할 수 있다. 여기서 투수계수 변화지수 C_k는 간극비와 투수계수의 관계로부터 다음의 식을 이용하여 정의된다(Tavenas et al., 1983).

$$C_k = \frac{e - e_o}{\log\left(\frac{k}{k_o}\right)} \qquad \text{(식 3.4.30)}$$

본 검토에서는 기존연구에 의한 일반적인 점토에 대한 투수계수 변화지수 C_k값을 적용하였다.

이상에서 설명한 방법으로 결정한 점토에 대한 역학 파라미터를 <표 3.4.11>에 정리하였다.

<표 3.4.11> 점토에 대한 역학 파라미터

Parameters		Value
Compression index	λ	0.4166
Swelling index	κ	0.056
Stress ratio at critical state	M	1.15
Stress ratio at K_o state	η_{Ko}	0.71
Poisson ratio	ν	0.33
Coefficient of secondary compression(1/min)	μ	2.4×10^{-3}
Reference viscous volumetric(1/min)	$\dot{v}_r^v$	8.3×10^{-9}
Internal confining strain	δ	0.001
Coefficient of earth pressure at rest	K_o	0.518
Void ratio at reference state	e_o	1.89
Coefficient of permeability at reference state (cm/min)	k_o	0.3×10^{-5}
Permeability change index	C_k	0.524

(5) 말뚝을 포함한 해석대상 지반의 축대칭 모델화

본 연구에서 수행한 수치해석은 앞 절에서 설명한 실내모형실험을 대상으로 한 수치해석 모델을 그대로 사용하였다. 즉, 수치해석 모델은 중심부에 1본의 다짐말뚝이 표현되어 있고 그 주위는 연약점토에 의해 둘러싸여 있는 축대칭 모델이다.

다짐말뚝은 다공질 콘크리트말뚝에 대한 역학 파라미터를 이용하여 표현하였다. 또한 모형지반의 점토부만 다차원 압밀해석을 적용하였다.

(가) 수치해석 조건

본 연구에서의 수치해석은 다공질 콘크리트말뚝에 의해 개량된 복합지반의 압밀거동에 대하여 실시하였다.

수치해석은 두 종류의 다짐말뚝에 대하여 치환율의 변화 즉, A_s가 5%, 10% 및 25%인 경우에 대해 모두 3가지의 경우에 대하여 수행하였으며, 복합지반의 초기상태에 대한 재하압력증분은 29.4kPa로 하였다.

<표 3.4.12>는 본 연구에서 실시한 수치해석 조건을 나타내고 있다.

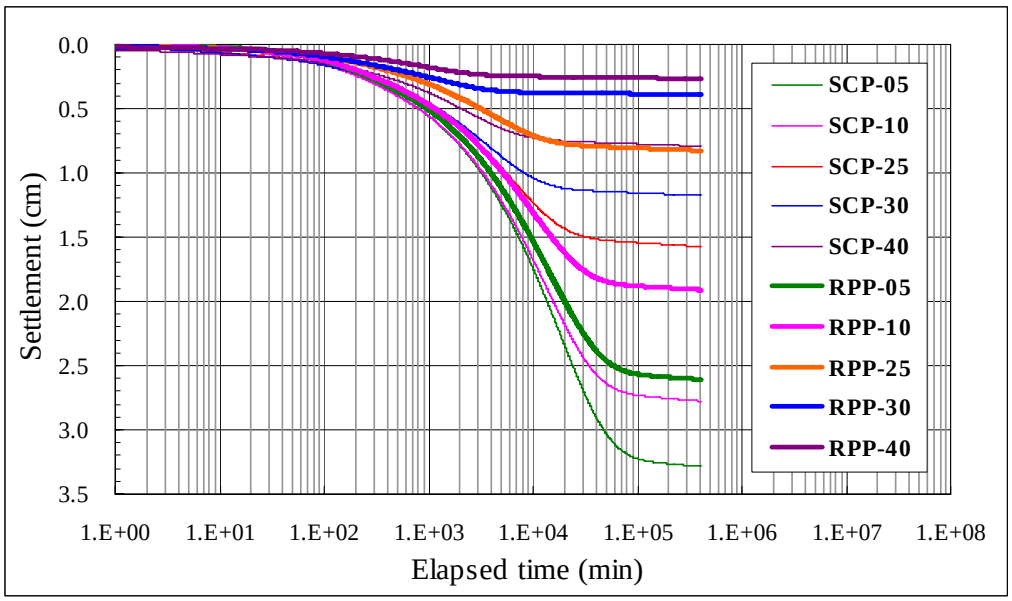
<표 3.4.12> 수치해석 조건

Pile	Case	As(%)	Loading Stage	Pressure Before Applying Surcharge (kPa)	Incremental Pressure (kPa)	Initial Height of Model Ground H/2 (cm)
투수 콘크리트 말뚝	RPP-05	5	1	9.8	29.4	20
	RPP-10	10				
	RPP-25	25				

나. 개량지반의 압밀촉진효과에 대한 평가

(1) 시간에 따른 복합지반 침하의 변화

<그림 3.4.40>은 수치해석 결과로부터 얻은 복합지반의 시간경과에 따른 지표면 하량의 변화를 나타내고 있다. 개발공법에 의한 복합지반에서의 침하량의 변화로부터 복합지반 중 점토부에서의 압밀현상에 의한 체적변화가 일어나고 있음을 알 수 있으며, 두 결과 모두 일차압밀현상이 종료된 후에도 2차압밀거동이 완만하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 두 경우 모두 치환율이 증가할수록 일차압밀의 종료가 빠르게 나타나고 있으며, 복합지반의 침하량도 적게 나타나고 있다. 한편, 모래말뚝과 개발공법의 치환율이 같은 각각의 경우 상대적으로 강성이 큰 쇄석말뚝에 의한 복합지반의 침하량이 적게 나타나고 있음을 알 수 있다.



<그림 3.4.40> 시간경과에 따른 침하량의 변화

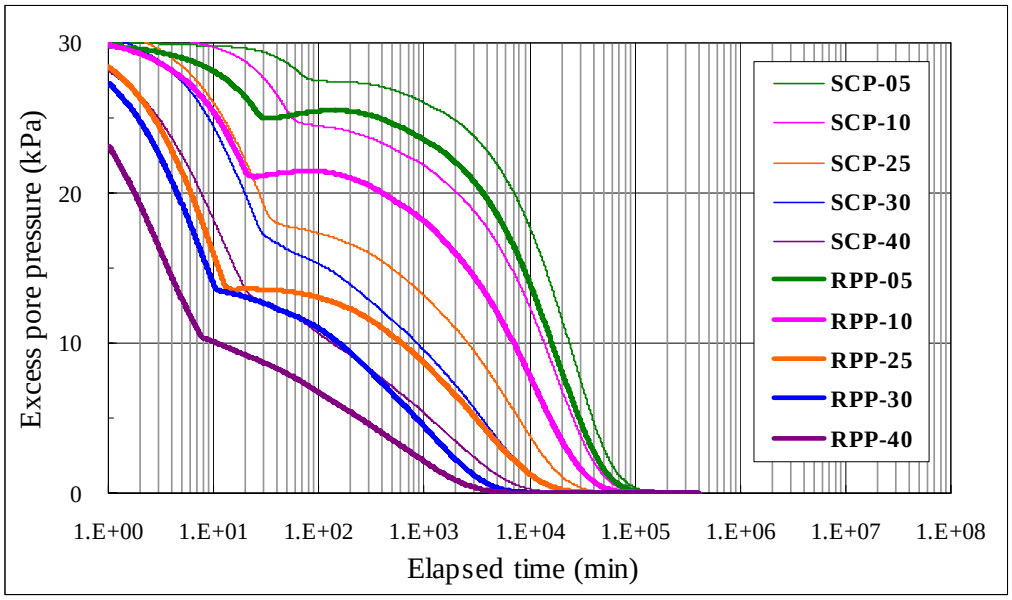
(2) 점토부의 과잉간극수압의 시간에 따른 변화

<그림 3.4.41>은 수치해석 결과로부터 얻은 복합지반 중 점토부의 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화를 나타내고 있다.

복합지반에서는 모래말뚝과 개발공법에 의한 배수효과로 재하로 인해 발생한 점토부의 과잉간극수압이 시간이 경과함에 따라 소산되고 있음을 알 수 있다. 또한, 두 경우 모두 치환율이 증가할수록 점토부의 과잉간극수압 소간이 빠르게 진행되고 있음을 알 수 있다.

한편, 두 경우 모두 과잉간극수압 소산의 진행곡선에서 각각 그 속도가 급격히 변하는 변곡점을 나타내고 있다. 이는 기존의 연구에서 고찰한 바와 같이 다짐말뚝의 재료적 파괴점을 나타낸 것으로서 이 시점을 전후로 하여 다짐말뚝 및 점토부의 체적변화와 그에 따른 과잉간극수압 변화양상이 크게 변화한다. 이러한 이유로부터 모래말뚝과 개발공법으로 형성된 복합지반 중 점토부의 과잉간극수압은 그 변화 양상에 정성적으로 차이를 보인다고 판단된다.

말뚝에 대한 메커니즘에 대하여는 아직 불명확한 부분이 많으며 따라서 이에 대한 실험적, 해석적 고찰이 필요하다고 판단된다.



<그림 3.4.41> 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화

(3) 유효응력증분의 시간에 따른 변화

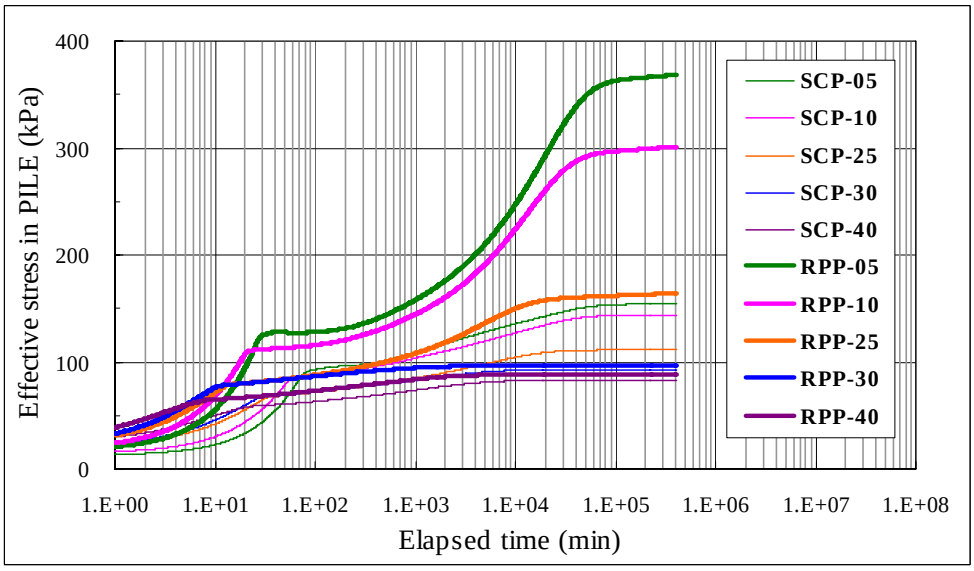
<그림 3.4.42>와 <그림 3.4.43>는 다짐말뚝과 점토지반 내부의 유효응력증분의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 점토지반의 평균유효응력증분은 다음과 같은 식으로 산정하였다.

$$\Delta \overline{p'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \Delta p_i' \qquad \text{(식 3.4.31)}$$

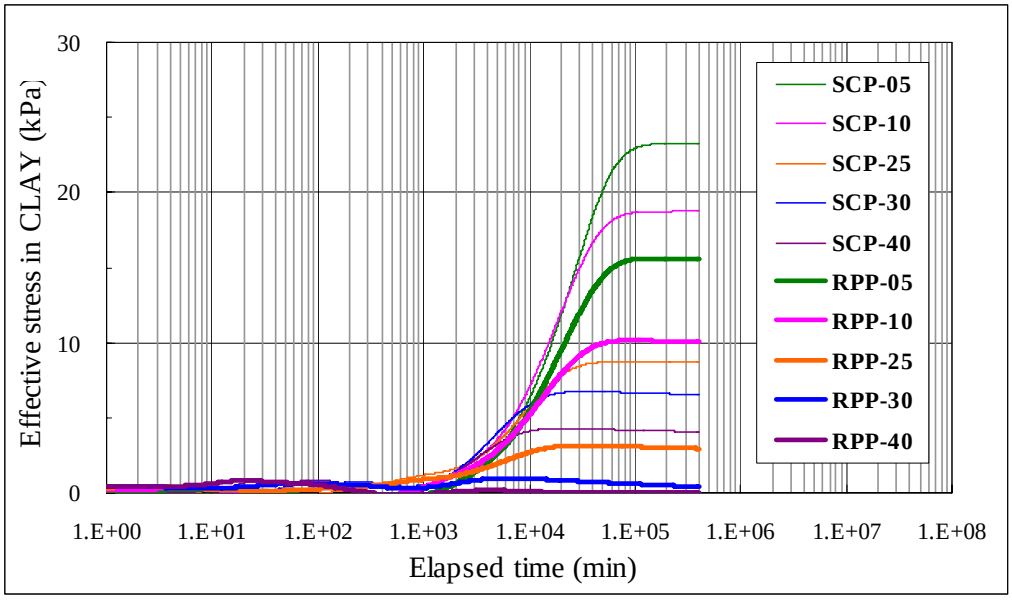
$$\Delta p_i' = \frac{\Delta\sigma_{ri}' + \Delta\sigma_{zi}' + \Delta\sigma_{\theta i}'}{3} \qquad \text{(식 3.4.32)}$$

여기서, $\Delta\sigma_{ri}'$, $\Delta\sigma_{zi}'$, $\Delta\sigma_{ei}'$ 는 각각 i번째 점토 요소의 반경방향, 연직방향, 원주방향의 연직유효응력의 초기값으로부터의 증분이다.

<그림 3.4.41>로부터 알 수 있듯이 모든 경우의 다짐말뚝의 평균유효응력증분은 시간이 경과함에 따라 증가하고 있으며, 재료의 파괴시점을 전후로 하여 급격한 변화를 보이고 있다. 이러한 경향은 개발공법의 경우 더욱 현저하게 나타나고 있다. 한편, 개발공법 말뚝 내부의 경우가 모래말뚝의 경우보다 더 큰 유효응력의 증가를 보였으며 이는 치환율이 작을수록 현저함을 알 수 있다.



<그림 3.4.42> 시간경과에 따른 말뚝 내의 유효응력증분의 변화



<그림 3.4.43> 시간경과에 따른 점토의 유효응력증분의 변화

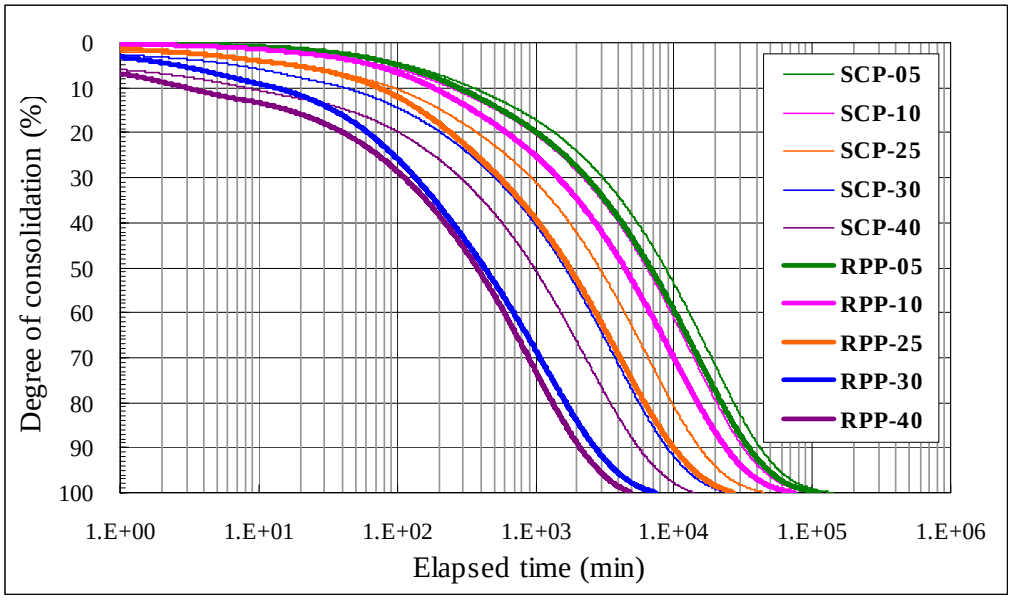
<그림 3.4.43>으로부터 알 수 있듯이 모든 경우의 점토부의 평균유효응력증분은 시간이 경과함에 따라 증가하고 있으나, 어느 시점에 도달하면 그 값이 일정하게 유지되는 정상상태를 보이고 있다.

또한, 다짐말뚝의 종류에 관계없이 치환율이 적을수록 정상상태에서의 유효응력증분은 크게 나타나고 있는데, 이는 저치환율일수록 점토부가 분담하는 응력분담율이 커짐을 나타낸다.

한편, 점토부의 일차압밀이 종료된 후의 유효응력증분을 비교해 보면 모래말뚝에 의한 복합지반의 경우가 개발공법의 경우보다 크게 증가하였음을 알 수 있다.

이는 앞에서 설명한 모래말뚝과 개발공법 말뚝 내부에서 유효응력증분의 비교와 반대되는 현상으로 모래말뚝에 의한 복합지반의 점토부가 개발공법의 경우보다 응력분담율이 큼을 알 수 있다.

(4) 복합지반 압밀도의 시간에 따른 변화



<그림 3.4.44> 시간경과에 따른 복합지반의 압밀도 변화

<그림 3.4.44>는 본 수치해석으로부터 얻은 복합지반의 압밀도가 시간의 경과에 따라 변화하는 양상을 보여주고 있다. 여기서 압밀도 U_s는 복합지반의 침하량의 시간에 따른 변화로부터 산정하였으며, 일차압밀 종료시간은 점토부의 과잉간극수압이 거의 소산된 시점의 경과시간으로 결정하였다.

$$U_s(\%) = \frac{s}{s_f} \times 100 \qquad \text{(식 3.4.33)}$$

여기서, s 및 s_f는 각각 임의의 시간에서의 침하량과 일차압밀종료시점에서의 침하량을 나타낸다.

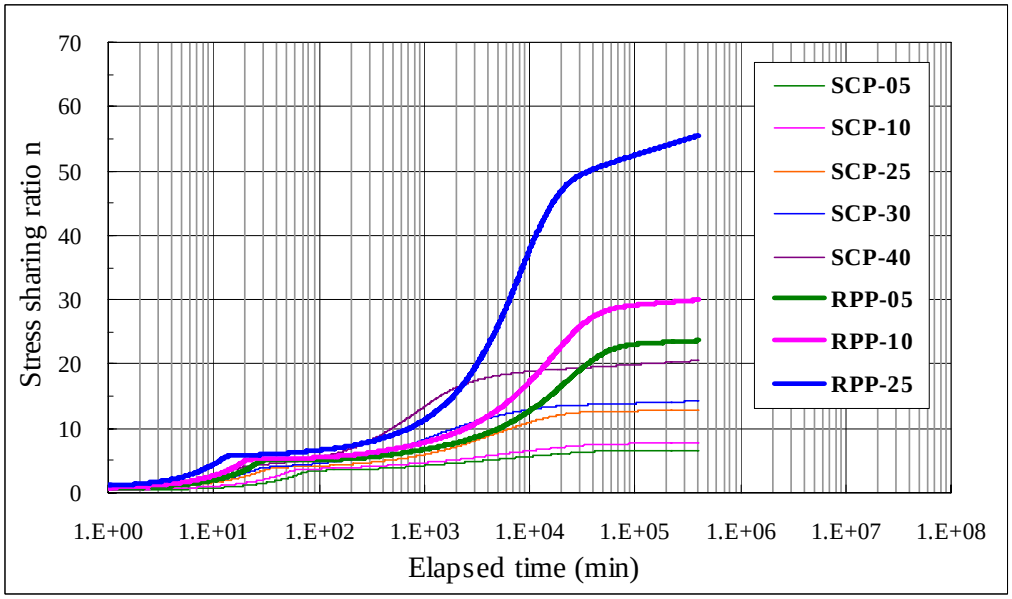
그림에서 알 수 있듯이 모래다짐말뚝과 개발공법에 의한 복합지반 모두 치환율이 커질수록 압밀이 빠르게 진행됨을 알 수 있다.

다. 개량지반의 응력분담효과에 대한 평가

(1) 복합지반 응력분담비의 시간에 따른 변화

<그림 3.4.45>는 수치해석 결과로부터 얻은 복합지반의 응력분담비의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 여기서 응력분담비 n은 다음에 나타낸 식으로 산정하였다. 여기서, $\Delta\sigma_z^s$와 $\Delta\sigma_z^c$는 각각 다짐말뚝 요소와 점토부 요소의 연직응력증분을 나타낸다.

$$n = \frac{\Delta\sigma_z^s}{\Delta\sigma_z^c} \qquad \text{(식 3.4.34)}$$



<그림 3.4.45> 시간경과에 따른 응력분담비의 변화

그림으로부터 모래말뚝과 개발공법에 의한 저치환율 복합지반에서 응력분담비 n은 치환율에 관계없이 복합지반의 압밀이 진행됨에 따라서 그 값이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 고치환율 복합지반의 경우와는 달리 저치환율 복합지반의 경우는 상대적으로 많은 부분을 차지하고 있는 점토부의 압밀현상이 응력분담 메커니즘에 큰 영향을 미치고 있기 때문이라고 판단된다.(유승경, 2003 a,b)

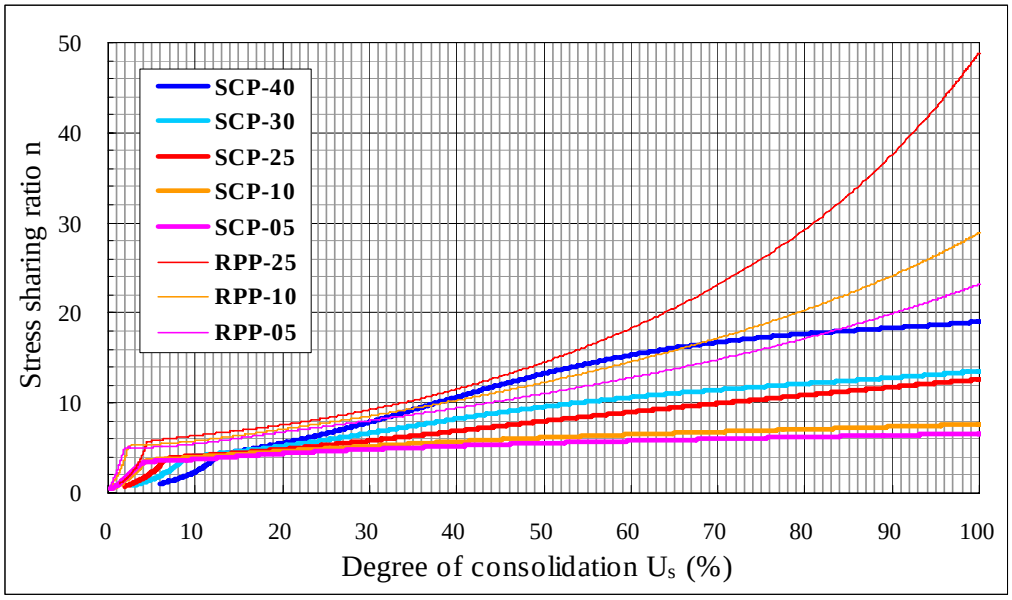
또한, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 치환율이 감소함에 따라서 복합지반의 응력분담비는 감소하고 있다. 이러한 현상은 복합지반의 치환율이 작을수록 다짐말뚝에 집중되는 응력증분의 크기는 증가하지만 상대적으로 점토부에 발생하는 압밀진행에 따른 유효응력 또한 증가하여 그것들의 증가비율의 변화에 의해 응력분담비가 감소한다고 판단된다.

(2) 복합지반의 압밀도와 응력분담비의 관계

<그림 3.4.46>은 모래 및 개발공법에 의한 복합지반의 압밀도와 응력분담비의 관계를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 모래 및 개발공법에 의한 복합지반의 응력분담비는 압밀초기에서 모두 급격한 증가를 보이고 있으며, 이러한 현상은 RPP말뚝의 경우가 더 현저하게 나타나고 있다. 즉, 복합지반의 응력분담비는 다짐말뚝재료의 파괴 시점까지 급격한 증가를 보임을 알 수 있다. 또한, 각각의 복합지반에서 다짐말뚝재료의 파괴시점에서의 응력분담비는 치환율에 관계없이 거의 비슷함을 알 수 있다.

한편, 복합지반의 다짐말뚝재료가 파괴된 이후에는 복합지반 전체의 압밀이 진행됨에 따라서 응력분담비가 완만하게 근사선형적으로 증가하고 있으며, 각각의 다짐말뚝에 의한 복합지반에서 치환율이 클수록 응력분담비의 증가율이 커짐을 알 수 있다.



<그림 3.4.46> 다짐말뚝에 의한 복합지반의 압밀도와 응력분담비의 관계

라. 결 론

본 연구에서는 다짐말뚝에 의한 복합지반에 대한 보다 정확한 응력분담거동을 규명하기 위하여 다짐말뚝의 탄소성거동과 연약지반의 이차압밀거동을 표현할 수 있는 구성모델을 이용한 다차원 축대칭 압밀해석을 실시하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 모래말뚝과 다공질 콘크리트말뚝에 의한 복합지반에서의 침하량의 변화로부터 복합지반 중 점토부에서의 압밀현상에 의한 체적변화가 일어나고 있음을 알 수 있으며, 두 결과 모두 일차압밀현상이 종료된 후에도 2차압밀거동이 완만하게 나타났다. 또한, 두 경우 모두 치환율이 증가할수록 일차압밀의 종료가 빠르게 나타났으며, 복합지반의 침하량도 적게 나타났다. 한편, 모래말뚝과 다공질 콘크리트말뚝의 치환율이 같은 경우 상대적으로 강성이 큰 RPP 말뚝에 의한 복합지반의 침하량이 적게 나타났다.

② 모래말뚝과 다공질 콘크리트말뚝에 의한 복합지반에서는 두 경우 모두 치환율이 증가할수록 점토부의 과잉간극수압 소산이 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 한편, 다짐말뚝의 재료적 파괴시점을 전후로 하여 복합지반 중 점토부의 과잉간극수압의 소산거동이 변화함을 알 수 있었다.

③ 모래다짐말뚝과 다공질 콘크리트말뚝의 평균유효응력증분은 압밀시간이 경과함에 따라 증가하였으며 재료의 파괴시점을 전후로 하여 급격한 변화를 보였다. 이러한 경향은 다공질 콘크리트말뚝의 경우 더욱 현저하게 나타났다. 한편, 다공질 콘크리트말뚝 내부의 경우가 모래말뚝의 경우보다 더 큰 유효응력의 증가를 보였으며 이는 치환율이 작을수록 현저함을 알 수 있었다.

④ 복합지반에서 점토부의 평균유효응력증분은 시간이 경과함에 따라 증가하고 있으나, 어느 시점에 도달하면 그 값이 일정하게 유지되는 정상상태를 보였다. 또한, 다짐말뚝의 종류에 관계없이 치환율이 적을수록 정상상태에서의 유효응력증분은 크게 나타났는데 이로부터 저치환율 일수록 점토부가 분담하는 응력분담율이 커짐을 알 수 있었다. 한편, 점토부의 일차압밀이 종료된 후의 유효응력증분은 모래

말뚝에 의한 복합지반의 경우가 다공질 콘크리트말뚝의 경우보다 크게 증가하였음을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 모래말뚝에 의한 복합지반의 점토부가 다공질 콘크리트말뚝의 경우보다 응력분담율이 큼을 알 수 있었다.

⑤ 모래말뚝과 다공질 콘크리트말뚝에 의한 저치환율 복합지반에서 응력분담비는 치환율에 관계없이 복합지반의 압밀이 진행됨에 따라서 그 값이 증가하였다. 이는 고치환율 복합지반의 경우와는 달리 저치환율 복합지반의 경우는 상대적으로 많은 부분을 차지하고 있는 점토부의 압밀 현상이 응력분담 메커니즘에 큰 영향을 미치고 있기 때문이라고 판단된다.

본 연구에서의 저치환율 복합지반에서 치환율이 감소함에 따라 응력분담비는 감소하였다. 그 이유는 복합지반의 치환율이 작을수록 다짐말뚝에 집중되는 응력증분의 크기는 증가하지만 상대적으로 점토부에 발생하는 압밀진행에 따라서 유효응력 또한 증가하여 그것들의 증가비율이 변화하기 때문이라고 판단된다.

모래 및 다공질 콘크리트말뚝에 의한 복합지반의 응력분담비는 다짐말뚝재료의 파괴시점까지 모두 급격한 증가를 보였으며, 이러한 현상은 RPP말뚝의 경우가 더 현저하게 나타났다.

또한, 각각의 복합지반에서 다짐말뚝재료의 파괴시점에서의 응력분담비는 치환율에 관계없이 거의 비슷한 값을 나타냈다.

한편, 복합지반의 다짐말뚝재료가 파괴된 이후에는 복합지반 전체의 압밀이 진행됨에 따라서 응력분담비가 근사선형적으로 증가하였으며, 각각의 다짐말뚝의 치환율이 클수록 응력분담비의 증가율이 커짐을 알 수 있었다.

이와 같은 결과들로부터 저치환율 다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담 거동은 압밀이 진행됨에 따라서 그 특성이 변화함을 알 수 있었다. 그러나 모래말뚝에 의한 응력분담 메커니즘은 이미 규명된 바 있으나(유승경, 2003), 투수콘크리트말뚝에 의한 복합지반의 응력분담 메커니즘에 대하여는 아직 불명확한 부분이 많으며 따라서 이에 대한 실험적, 해석적 고찰이 필요하다고 판단된다.

제 5 절 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 안정성 평가

1. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 실내모형실험

가. 실험의 목적 및 필요성

본 연구개발의 목적은 순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법의 최적 설계기법 제시를 위하여 실내모형토조실험을 실시하여 순환골재를 활용한 다공질 콘크리트말뚝공법으로 개량된 연약지반의 안정성을 정량적으로 분석·평가하는 것이다.

실내모형토조실험은 장기간에 걸쳐 개량지반의 압밀거동과 변형거동을 계측하고 그 결과들을 분석하여 개발된 공법에 의한 연약지반의 측방유동에 대한 보강효과와 활동파괴에 대한 전단보강효과를 규명하고 안정성을 평가하기 위하여 실시하였다.

순환골재를 활용한 다공질 콘크리트말뚝공법으로 개량된 연약지반의 거동은 원지반 조건, 말뚝의 재료특성, 설치간격, 치환율 및 파괴각 등 여러 인자에 의해 영향을 받게 되며, 말뚝과 연약지반의 상호작용을 평가하여야 한다.

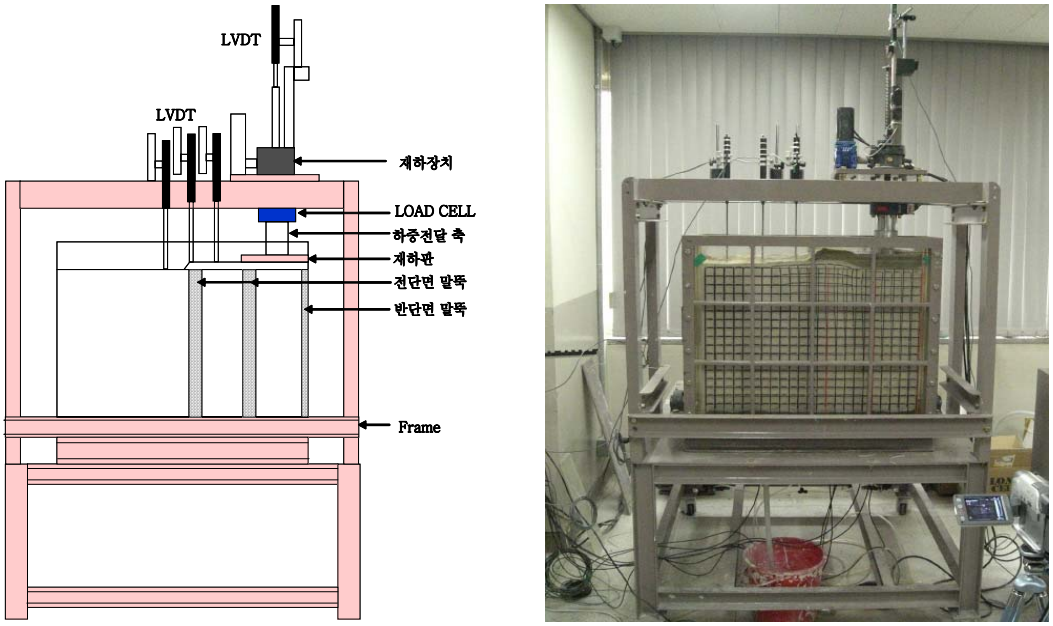
따라서, 본 실내모형토조실험에서는 말뚝의 치환율에 따른 응력분담 특성과 변형거동 및 전단보강 효과에 영향을 미치는 인자들을 평가하였다.

또한 실내시험 결과를 기존 이론식과 비교하였으며, 수치해석을 통하여 파괴거동을 평가하고 이를 통해 실내모형토조실험의 타당성을 검증하였다.

나. 실내모형토조실험

실내모형토조 재하시험은 하중제어 프로그램을 이용하여 정확한 하중제어와 계측이 가능한 하중재하법으로 계획하였으며, 토조에는 특수 제작한 말뚝관입장치를 이용하여 지반교란을 최소화하여 모형말뚝 복합지반을 조성한 후 하중을 재하하였다.

이때 개량지반 거동의 대칭성을 고려하여 <그림 3.5.1>에 나타낸 바와 같이 재하판을 중심으로 반단면에 대한 모형실험장치를 제작하여 사용하였다. 또한 정확한 하중제어 및 계측 프로그램을 사용하여 높은 정밀도의 실험을 실시하였다.



<그림 3.5.1> 실내모형토조실험장치 개요 및 실험 전경

(1) 실험장치

(가) 모형토조

모형실험용 토조의 규격은 재하판 폭에 상당하는 깊이까지의 영역에서 대부분의 전단응력이 발생한다고 제안한 Das(1984)의 이론에 근거하여 모형토조의 높이를 결정하였으며, 폭 0.15m×가로 0.75m×높이 0.7m의 크기로 제작하였다. 모형토조의 각 면은 두께 2cm의 투명 아크릴판 재질로 조립 및 해체가 가능하며, 측면부에는 투명 메쉬 판을 부착하여 지반의 변형거동을 관찰할 수 있게 하였다. 모형토조 벽면의 마찰에 의한 영향을 줄이기 위해 토조 벽면에 오일을 바르고 부드럽고 얇은 비닐 랩을 부착하였다. 또한 영상촬영과 사진촬영을 통해 실시간으로 지반의 변형거동을 모니터링 하였다. 모형토조는 <그림 3.5.2>와 같이 측면 아크릴판을 제거하고 수평상태에서 원지반을 조성한 후 측면 아크릴판을 다시 부탁한다. 이후 공기압 실린더를 이용하여 수직으로 설치하여 실험의 편의성 및 조성된 지반의 균질성을 향상시켰다. 또한 모형토조 하부에는 배수와 계측을 위한 연결홈을 제작하였으며, 누수에 의한 영향을 배제시키기 위하여 고무팩커와 실리콘 방수제를 이중으로 설치하였다.



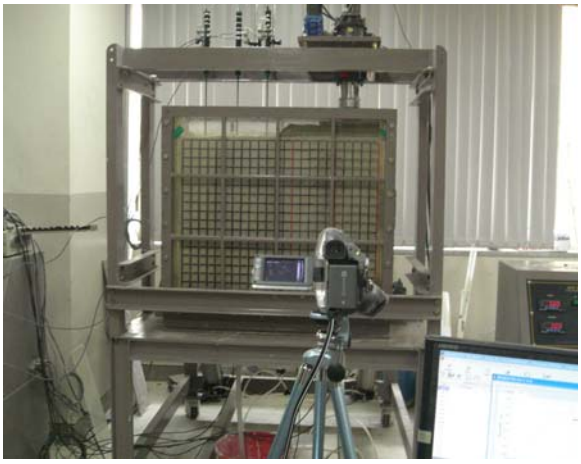
(a) 수평상태 원지반 조성



(b) 모형토조 수직 설치



(c) 계측기 연결부 이중 방수



(d) 실시간 영상자료 촬영

<그림 3.5.2> 모형토조 실험 전경

(나) 하중재하장치

하중재하시 편심하중에 의한 영향을 최소화하기 위하여 <그림 3.5.3>과 같이 2차 모멘트가 큰 단면의 가압판을 제작하여 하중전달축과 연결하였으며, 하중제어장치와 제어프로그램을 이용하여 정밀한 하중재하가 가능하도록 하였다.

또한 하중 재하축의 모터에 자동센서를 설치하여 예상하지 못한 하중 발생시 하중재하를 자동으로 멈추게 제작하여 압밀실험장치의 고장 및 실험 데이터의 손상을 최소화하였다.



(a) 가압판



(b) 하중제어장치



(c) 하중재하 시스템



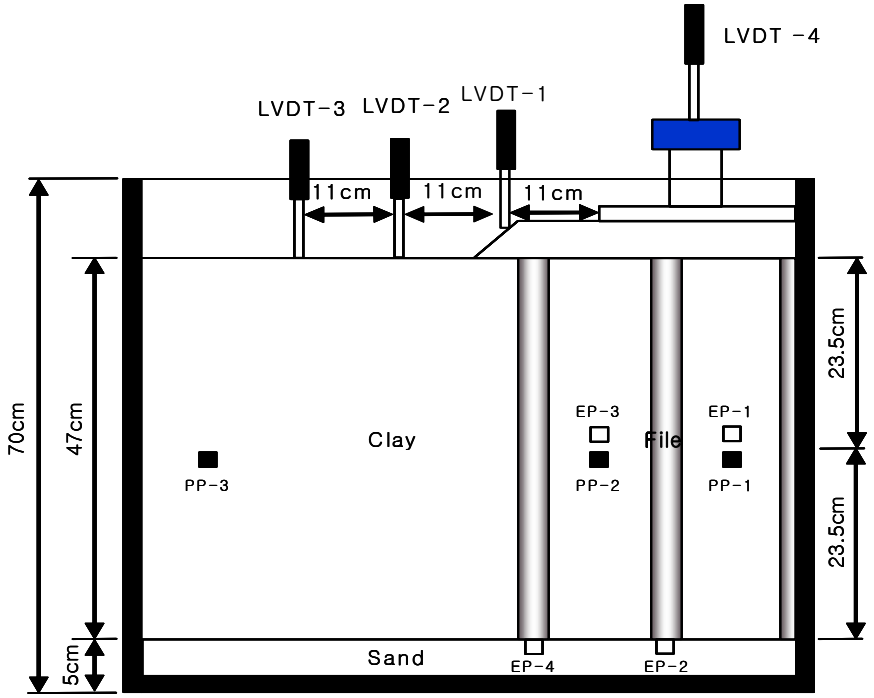
(d) 하중제어 프로그램

<그림 3.5.3> 모형토조실험기 하중재하장치

(다) 계측장치

다공질 콘크리트말뚝이 설치된 복합지반의 정밀한 침하량 측정을 위하여 재하장치 중심축에 LVDT를 설치하였다. 미개량부의 지표면 융기량은 <그림 3.5.4>와 같이 소정의 위치에 설치한 LVDT를 이용하여 계측하였다.

또한 말뚝과 연약지반에 토압계를 설치하여 하중분담율을 산정할 수 있도록 하였으며, 개량부와 미개량부에 간극수압계를 설치하여 하중재하에 따른 압밀정도를 측정하여 개량공법의 압밀촉진 효과를 분석할 수 있도록 계획하였다.



<그림 3.5.4> 계측기 설치위치

<표 3.5.1> 측정항목 및 계측장비 현황

측정항목	계측장치
재하하중	Load Cell
작용하중	토압계 BER-A-1MPa (EP-1~EP-4)
과잉간극수압	간극수압계 BED-A-200kPa (PP-1~PP-3)
지반침하 및 융기	침하량계(LVDT)

(라) 말뚝관입장치

공기압을 이용한 실린더를 모형토조 프레임에 고정시킨 후 말뚝설치 지점에 케이싱을 관입하고 점토를 제거한 후 투수콘크리트말뚝을 설치하여 말뚝 설치시 주변지반 교란에 따른 영향을 최소화 할 수 있는 케이싱 관입장치(35×30×126cm)를 이용하여 개량지반을 조성하였다.




(a) 실린더를 이용한 케이싱 관입 (b) 케이싱 관입장치

<그림 3.5.5> 말뚝관입장치 및 관입 전경

(마) 시료배합기



<그림 3.5.6> 시료배합기

<그림 3.5.6>과 같이 균질한 시료배합을 위해서 시료 배합기를 제작하였다. 시료 배합시에 배합기 내를 진공상태로 유지할 수 있도록 진공펌프를 장착하고 진공상태를 확인할 수 있도록 압력게이지를 토조 외부에 설치하였다. 또한 배합기 내부 배합날은 모터를 통해서 정회전과 역회전 그리고 속도를 조절할 수 있도록 하였으며, 배합된 시료는 공기압을 이용하여 토조 내부로 압송할 수 있도록 하였다.

(2) 사용시료 및 실험조건

(가) 사용시료

모형실험에서는 시판 중인 카오린(Kaolin) 점토를 사용하여 지반을 조성하였으며, 본 점토의 물리적 특성은 <표 3.5.2>에 나타낸 바와 같다. <표 3.5.2>에서 알 수 있듯이 본 점토는 통일분류법상 소성과 압축성이 큰 점토로 분류된다.

배수용 샌드매트와 연성기초 조건을 만족시키기 위한 상부제체는 표준사를 사용하였으며, 표준사의 물리적 특성은 <표 3.5.3>에 나타낸 바와 같다.

<표 3.5.2> 점토의 물리적 특성

G_s	C_c	Wn(%)	S(%)	e_o
2.70	0.87	120	100	2.16

<표 3.5.3> 표준사의 물리적 특성

G_s	e_{max}	e_{min}	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_g
2.64	0.87	0.58	0.17	0.30	0.63	3.71	0.84

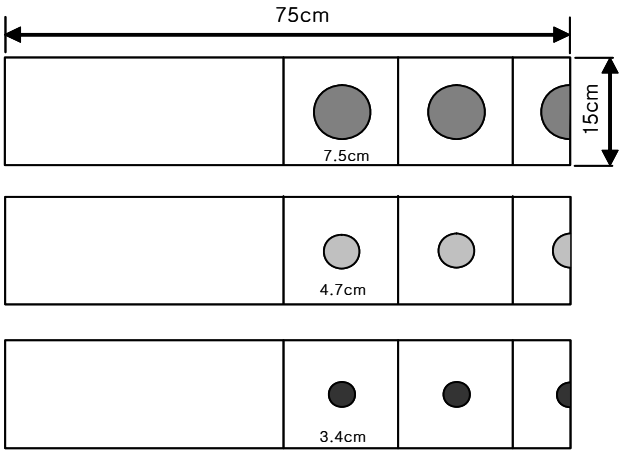
(나) 실험조건

모형토조 하부에는 원활한 배수를 위하여 샌드매트를 설치하였으며, 상부에는 P.P Mat를 설치하고 가압판을 이용하여 하중을 재하함으로써 모형복합지반에 투수성 및 압력이 분포되게 하였다. 또한 단계별 하중 재하시 연성기초 조건의 실험을 위하여 50mm 두께의 표준사를 모형지반 상부에 포설하여 제체를 형성하고 제체 상단에 가압판을 설치하여 하중을 재하하였다. <표 3.5.4>는 본 모형토조실험의 조건을 나타내고 있다.

모형토조 실험시 다공질 콘크리트말뚝의 치환율을 5%, 7.5% 및 10%로 변화시켜 모형복합지반을 형성하였으며, 치환율에 따른 말뚝의 직경 및 배치는 <그림 3.5.7>에 나타내었다.

<표 3.5.4> 실험 케이스와 실험조건

Test Series	Replacement Area Ratio (%)	Test Case	Loading Stage	Pressure Before Applying Surcharge(kPa)	Total Surcharge (kPa)	Increment Pressure (kPa)
As-5	5	As-5-1	1	9.8	39.2	29.4
		As-5-2	2	39.2	68.6	29.4
		As-5-3	3	68.6	98.0	29.4
As-7.5	7.5	As-7.5-1	1	9.8	39.2	29.4
		As-7.5-2	2	39.2	68.6	29.4
		As-7.5-3	3	68.6	98.0	29.4
As-10	10	As-10-1	1	9.8	39.2	39.2
		As-10-2	2	39.2	68.6	29.2
		As-10-3	3	68.6	98.0	29.2
		As-10-4	4	127.4	127.4	34.3



<그림 3.5.7> 치환율에 따른 모형말뚝 직경 및 배치

(다) 실험방법

① 준비사항

㉮ Kaolin 2.5포(56.7kg), 물(68.04kg), 모래(표준사)
㉯ 토압계 4개, 간극수압계 3개, LVDT 4개, 데이터 로거
㉰ 계측기 고정용 평철 10개, 고무패커 개, Mesh(줄), P.P Mat, 비닐 랩

② 실험순서

㉮ 준비된 카오린과 물을 함수비 120% 배합기를 사용하여 진공상태에서 배합한다. 이 때 균질한 배합을 위해서 약 3~4시간 가량 배합한다.
- 공기압 실린더 장치를 사용하여 모형토조를 수평으로 눕히고 전면 보강재와 아크릴판을 제거한다.
- 준비된 계측기를 토조 바닥면에 가공되어 있는 홈에 설치한다.
- 토조 내부 벽면에 오일을 바르고 비닐 랩을 부착하여 모형지반의 유동시 벽면의 마찰을 최소화 시킨다.
- 전면 보강재와 아크릴판을 부착 조립시킨다. 이 때 누수방지 목적으로 아크릴판 사이에 고무패킹을 삽입하였으며 추가로 실리콘으로 마감하여 누수를 방지한다.
- 토조를 공압장치를 사용하여 세운후에 토조내부 바닥에 모래 5cm를 포설하고 배수재 (부직포)를 설치한다.
- 점토표면에 배수재(부직포)를 설치하고 가압판과 LOAD CELL, LVDT를 설치한다. 이때 가압판 테두리에 점토시료 누수방지 목적으로 고무패킹을 부착하고 고무패킹에 GREASE를 발라 토조 내부 벽면과의 마찰을 최소화한다.

㉯ 재하 프로그램에 각 계측기의 보정계수 값을 입력하고 9.8kPa에 해당하는 하중으로 원지반 조성 예비압밀을 실시한다. 이때 가압판은 하중 재하 전 점토표면과 맞닿을 수 있도록 위치를 조정 후 하중 재하를 시작한다.
- 각 계측값과 변위량 측정은 계측 프로그램으로 5분간격으로 측정될 수 있도록 설정하고 계측한다.

㉰ 원지반 조성 예비압밀이 끝난 후 케이싱 관입기를 설치하고 치환별 직경에 맞

는 온단면 및 반단면 케이싱을 관입기에 설치하여 말뚝이 설치될 위치에 점토지반에 관입, 속파기를 하고 제작된 말뚝을 삽입한다. 이때 점토지반의 높이를 측정하여 약 1cm작게 말뚝을 절단한다.

- 공압장치를 사용하여 토조를 눕힌 후 보강제와 아크릴판을 제거하고, Mesh삽입용 틀(상하좌우 3cm간격의 아크릴판)을 사용하여 점토시료표면에 Mesh를 삽입할 수 있게 Line표시를 하고 표시된 Line을 따라 Mesh(군화줄)를 삽입하여 표점을 마련한다.
- 토조 전면 보강재와 아크릴판을 부착 조립시킨다. 이때 전면 아크릴판 내부 벽면에 오일을 바르고 Vinyl Wrap을 부착하고, 누수방지 목적으로 아크릴판 사이에 고무패킹을 삽입 하고 추가로 실리콘으로 마감하여 누수를 방지한다.
- 공압장치를 사용하여 토조를 세운 후 말뚝을 포화시키고 점토지반 높이에 맞춰서 모래를 포설하고 배수재 (부직포)를 설치하고 가하판과 LOAD CELL, LVDT를 설치한다. 이때 가압판 테두리에 점토시료의 누수방지 목적으로 고무패킹을 부착하고 고무패킹에 GREASE를 발라 토조 내부 벽면과의 마찰을 최소화 한다.
- 재하 프로그램에 각 계측기의 보정계수 값을 입력하고 9.8kPa에 해당하는 하중으로 복합지반 조성 예비압밀을 실시한다.
- 각 계측값과 변위량 측정은 계측 프로그램으로 5분 간격으로 측정될 수 있도록 설정하고 계측한다.

㉮ 복합지반 예비압밀 종료후 가하판과 LOAD CELL, LVDT를 제거하고 점토 지반 표면 말뚝상단부에 연성기초의 조건을 만족시키기 위하여 5cm 높이의 모래층을 포설하고 가하판과 LOAD CELL, LVDT를 설치한다. 또한 점토지반 표면의 융기량을 측정하기 위하여 가압판으로부터 11cm 간격으로 LVDT를 설치한다.

- 토조 정면 1m지점에 촬영장비를 설치한다. 이때 촬영장비의 초점이 움직이지 않게 고정한다.
- 하중 재하 프로그램으로 39.2kPa에 해당하는 하중을 입력하여 1단계 하중 재하를 실시한다. 이때 하중재하 시작 전 촬영을 시작하여 Mesh의 이동을 촬영한다.

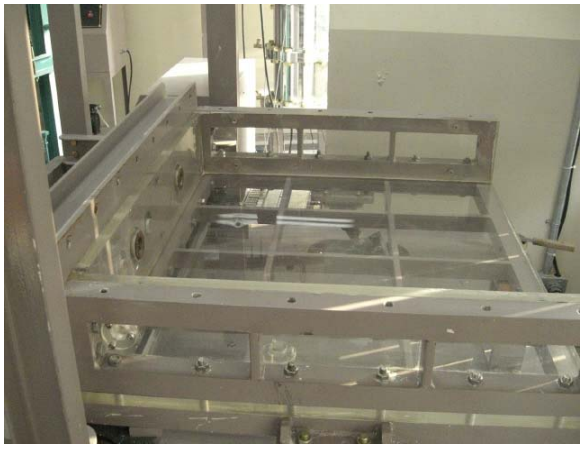
이상과 같은 순서에 의하여 하중은 모형지반에 ΔP=29.4kPa의 크기로 각 단계별로 재하를 하게 된다.



(a) 배합기내 재료충진



(b) 진공상태에서 점토시료 교반



(c) 전면보강재 및 아크릴 제거



(d) 계측기 설치(정면)



(e) 계측기 설치(하부)



(f) 토조 내부 오일 도포

<그림 3.5.8> 모형토조실험 순서(계속)



(g) 토조 내부 랩 설치(완료)



(h) 전면 아크릴 랩 설치



(i) 전면 보강재 및 아크릴 설치



(j) 하부 배수재 설치(모래 5cm)

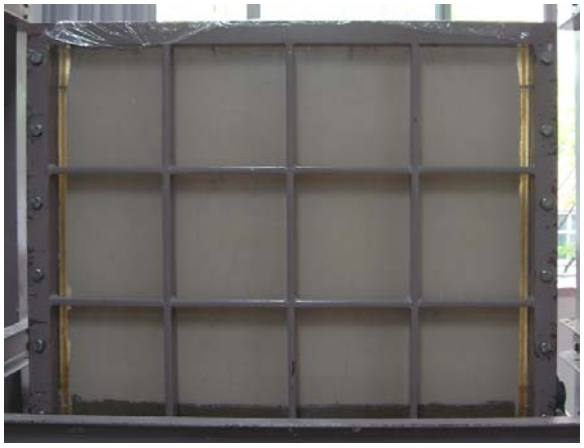


(k) 하부 배수재 설치(부직포)

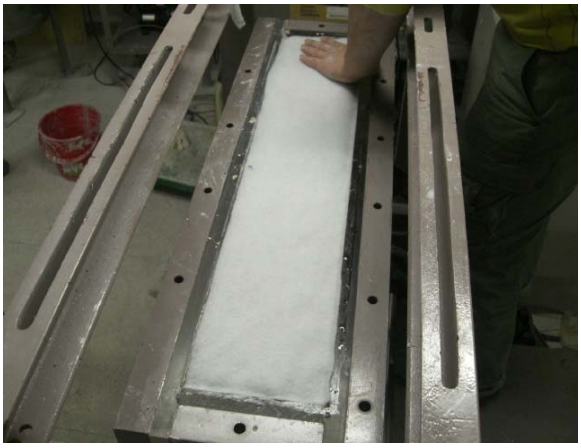


(l) 점토시료 충진

<그림 3.5.8> 모형토조실험 순서(계속)



(m) 점토시료 충진 완료



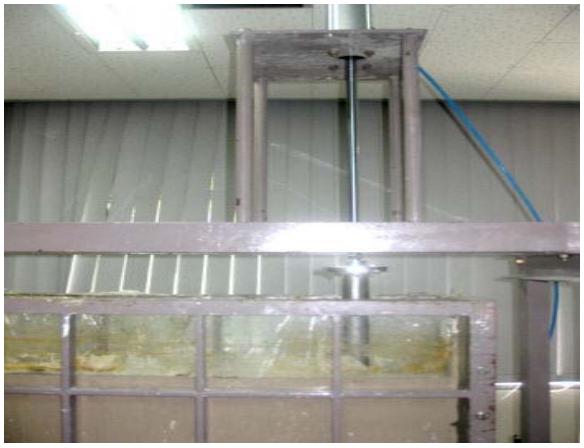
(n) 상부 배수재 설치(부직포)



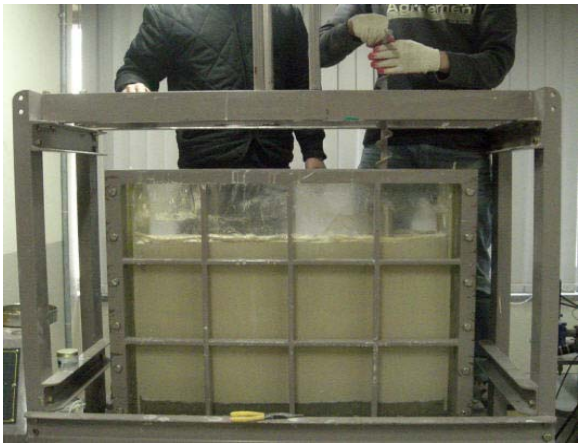
(o) LVDT 설치 후 재하(예비압밀)



(p) 예비압밀 완료후 케이싱 관입기 설치

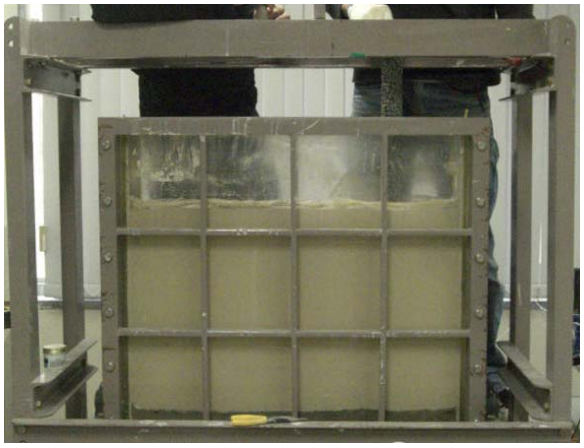


(q) 케이싱관입



(r) 케이싱관입 후 속파기

<그림 3.5.8> 모형토조실험 순서(계속)



(s) 말뚝 타설 및 양생



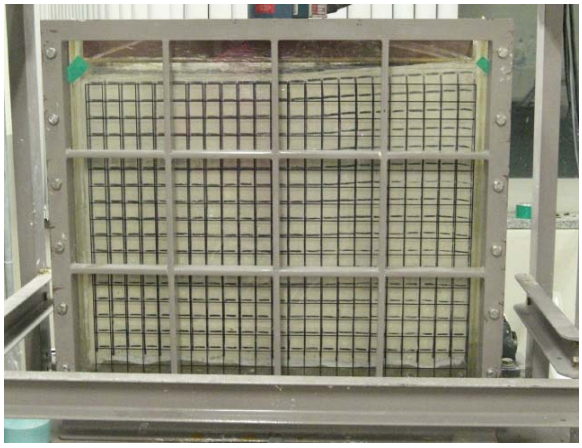
(t) 말뚝 설치 후 보강재 및 아크릴 제거



(u) 메쉬 설치(상하좌우 3cm 간격)



(v) 전면 아크릴 랩 설치

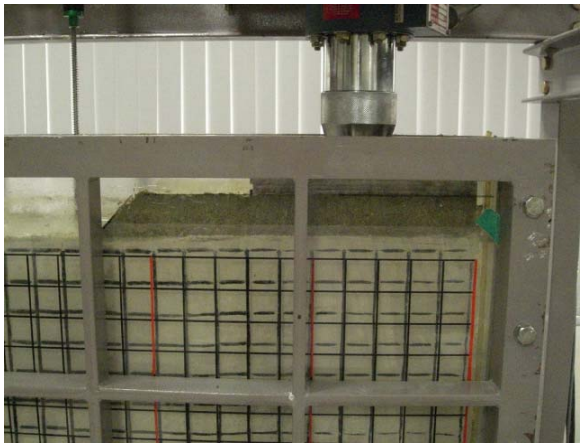


(w) 복합지반 예비압밀

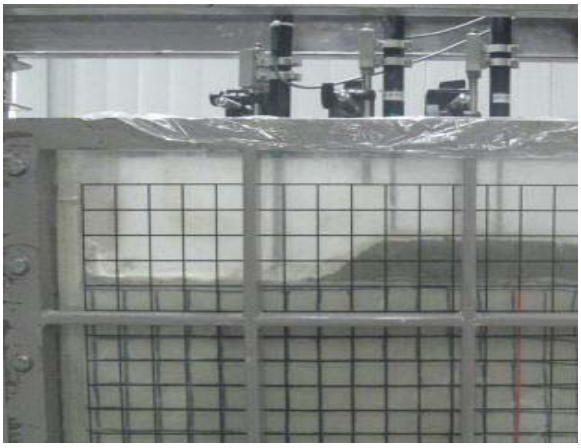


(x) 모래층 형성

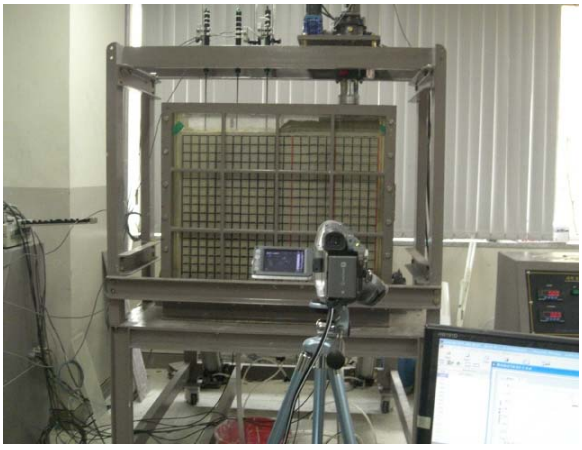
<그림 3.5.8> 모형토조실험 순서(계속)



(y) 가압판 및 재하장치 설치



(z) LVDT 설치



(z-1) 촬영장비 설치

<그림 3.5.8> 모형토조실험 순서

다. 치환율에 따른 실험결과 및 분석

본 실험결과는 <표 3.5.4>에 나타낸 실험조건에 대한 실험결과로 다공질 콘크리트말뚝 치환율 5%, 7.5% 및 10%에 대하여 각 단계별 하중재하시 지반의 거동을 분석하였다.

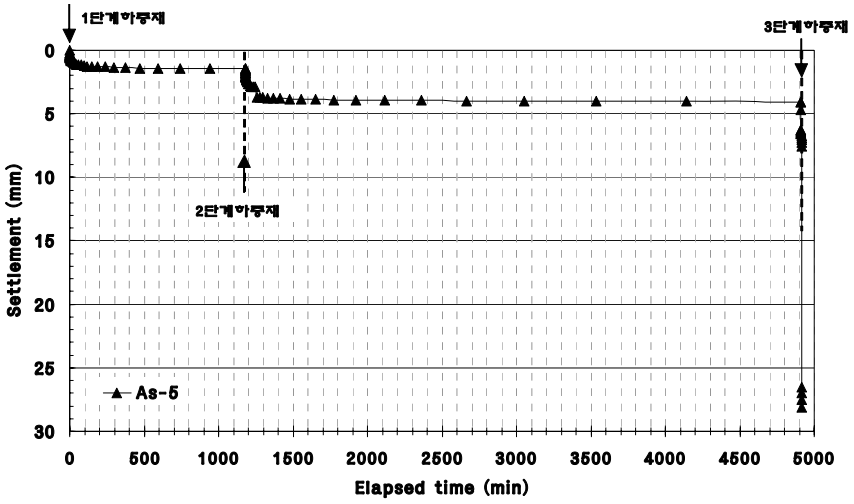
(1) 지표침하량

<그림 3.5.9>는 치환율 5%에 대한 누적 침하량을 나타낸 것으로 총 재하하중 98.0kPa인 3단계 하중재하시 다공질 콘크리트말뚝이 파괴되어 급격한 침하가 발생하였으며 총 침하량은 28.14mm가 발생하였다.

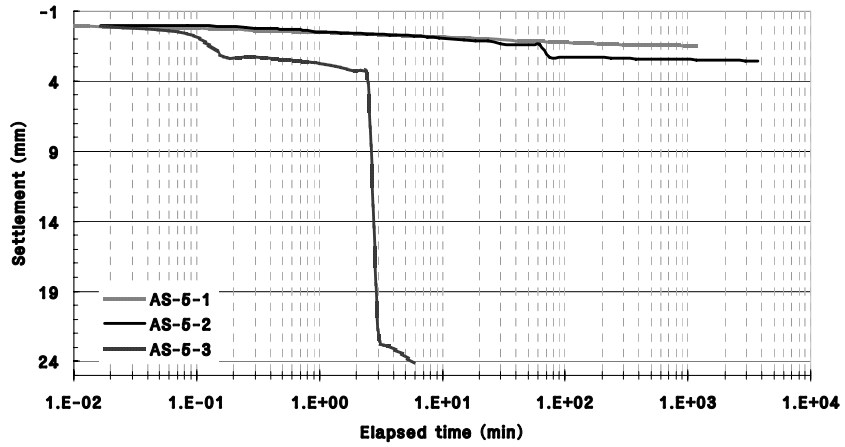
<그림 3.5.11>은 치환율 7.5%의 누적 침하량을 나타낸 것으로 모형지반에 말뚝타설시 균질한 말뚝을 형성하지 못하여 과다한 침하가 발생한 것으로 판단되며, 재하 종료시 115.99mm의 침하가 발생하였다.

<그림 3.5.13>는 치환율 10%의 누적침하량으로 하중재하 4단계 총 재하하중 127.4kPa까지 RAPP 말뚝이 파괴되지 않았으며, 각 단계 하중별 침하량은 유사하게 나타났으며, 4단계 하중재하 종료시 총 침하량은 6.49mm 발생하였다.

(가) 치환율 5%

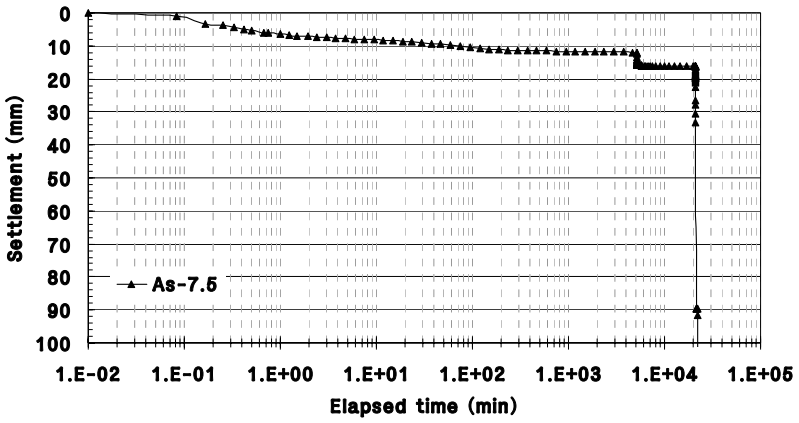


<그림 3.5.9> 시간경과에 따른 누적 침하량의 변화

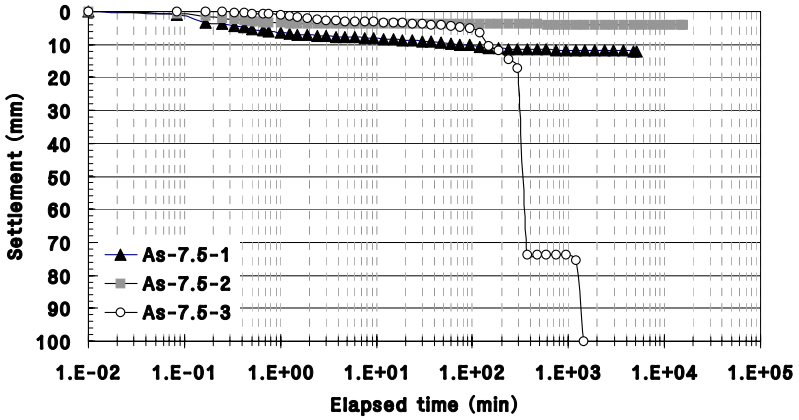


<그림 3.5.10> 시간경과에 따른 재하단계별 침하량의 변화

(나) 치환율 7.5%

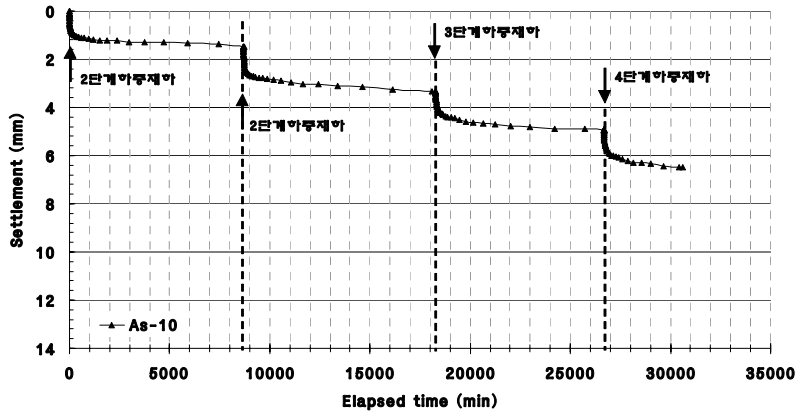


<그림 3.5.11> 시간경과에 따른 누적 침하량의 변화

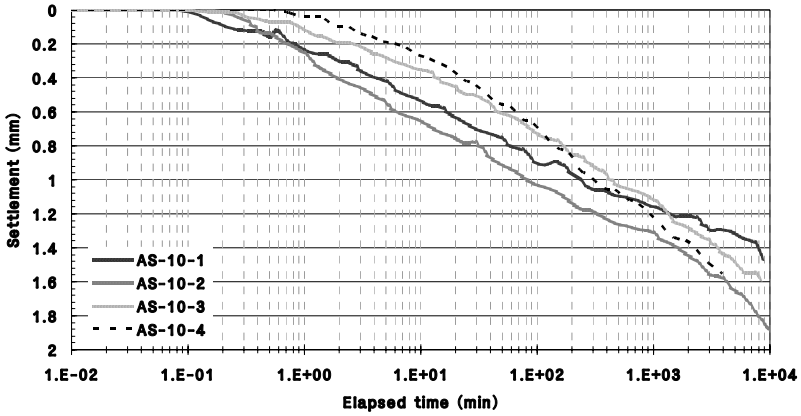


<그림 3.5.12> 시간경과에 따른 누적 침하량의 변화

(다) 치환율 10%

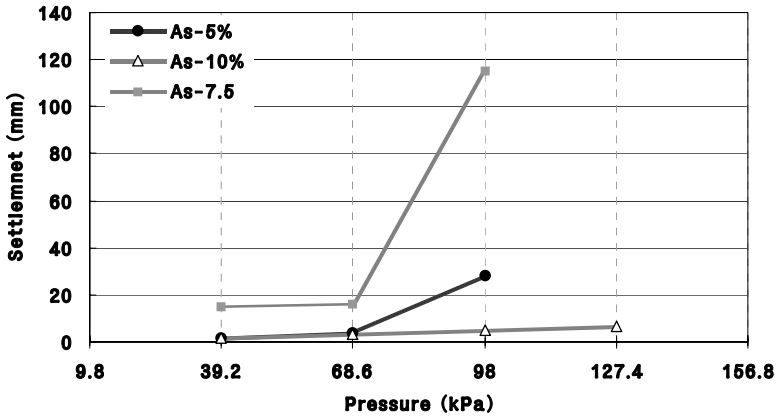


<그림 3.5.13> 시간경과에 따른 재하단계별 침하량의 변화



<그림 3.5.14> 시간경과에 따른 재하단계별 침하량의 변화

(다) 치환율에 따른 하중단계별 침하량

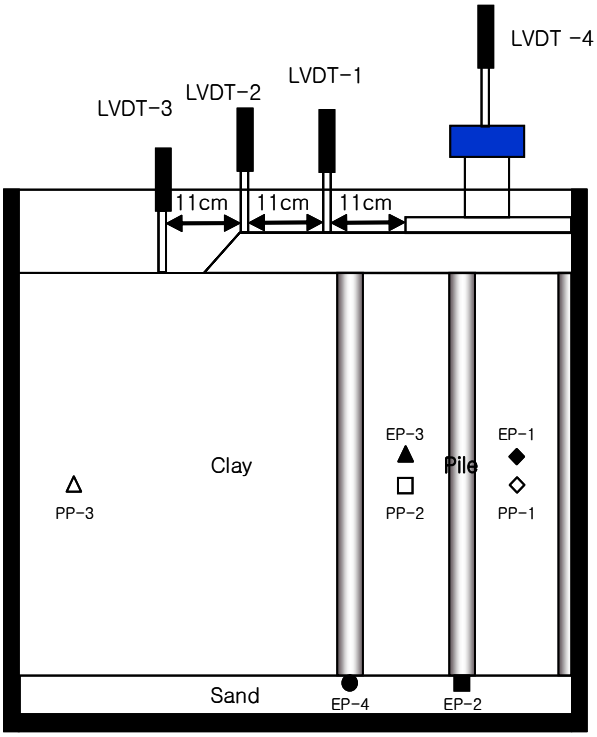


<그림 3.5.15> 하중단계별 침하량의 변화

(2) 지표융기량

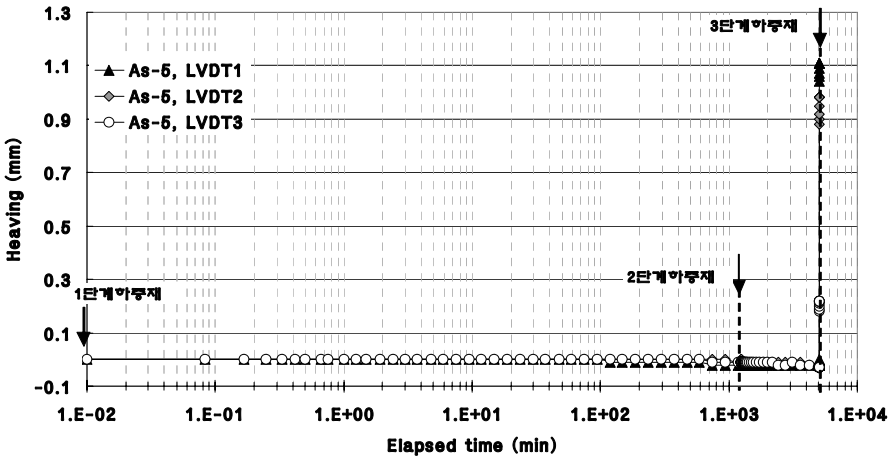
<그림 3.5.16>는 하중재하시 지반융기량을 측정하기위한 LVDT의 설치위치를 나타낸 그림으로 재하판에서 각각 11cm 거리에 LVDT를 설치하여 융기량을 측정하도록 하였다. 치환율 5%의 경우 <그림 3.5.17>에 나타난 바와 같이 LVDT-1에서 최대 1.13mm의 지반융기가 발생하였으며, 치환율 7.5%의 경우는 <그림 3.5.19>에 나타난 바와 같이 1단계 하중재하시 LVDT-3에서 최대 38.937mm의 지반융기가 발생하였는데 이는 말뚝 타설시 균질한 말뚝이 형성되지 못하여 침하가 많이 발생하면서 융기량이 많이 발생한 것으로 판

단된다. 치환율 10%의 경우는 <그림 3.5.20>에 누적 융기량의 변화를 나타냈으며, 3개의 LVDT에서 측정된 누적 융기량이 모두 (-)값을 나타내어 침하가 발생한 것으로 나타났으며, 최대값은 LVDT-2에서 0.07mm 발생한 것으로 나타났다.

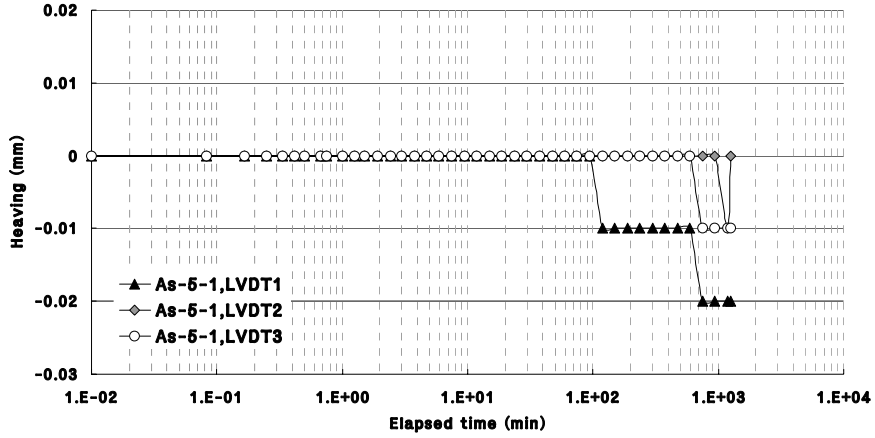


<그림 3.5.16> LVDT 설치 위치

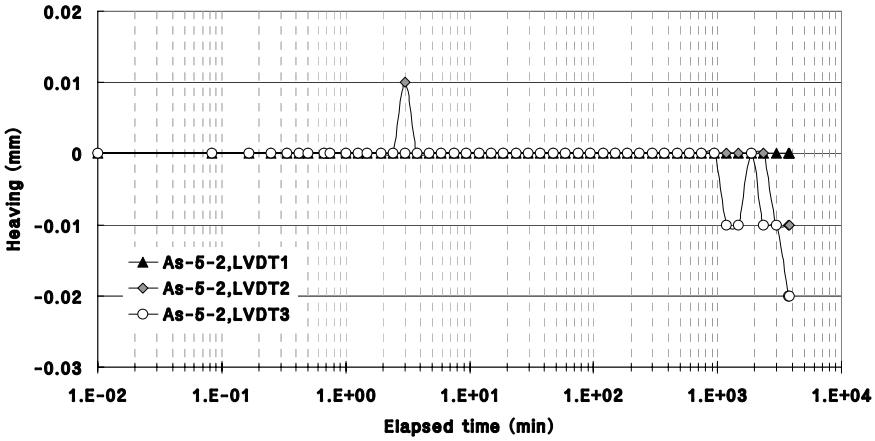
(가) 치환율 5%



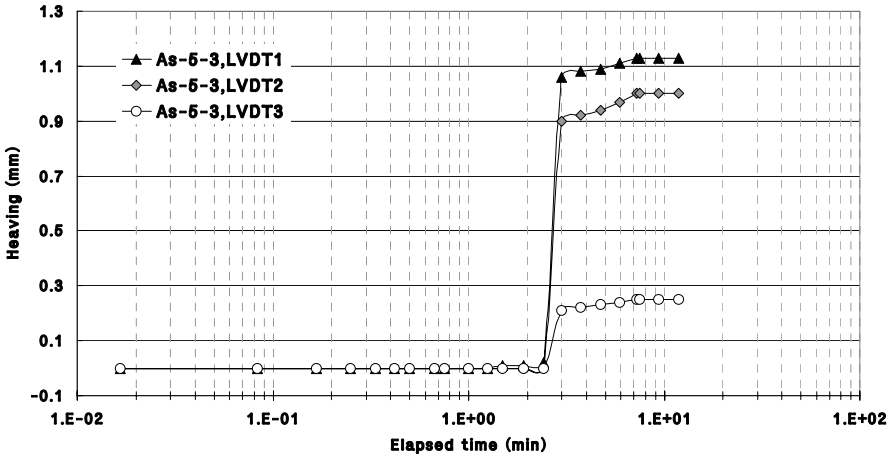
<그림 3.5.17> 시간경과에 따른 누적 융기량의 변화



(a) 1단계 하중



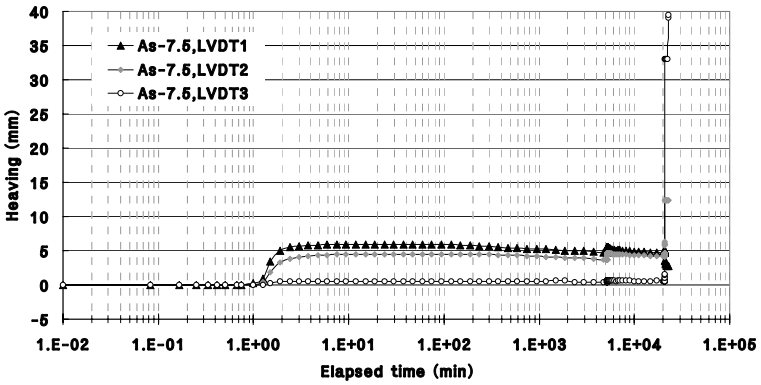
(b) 2단계 하중



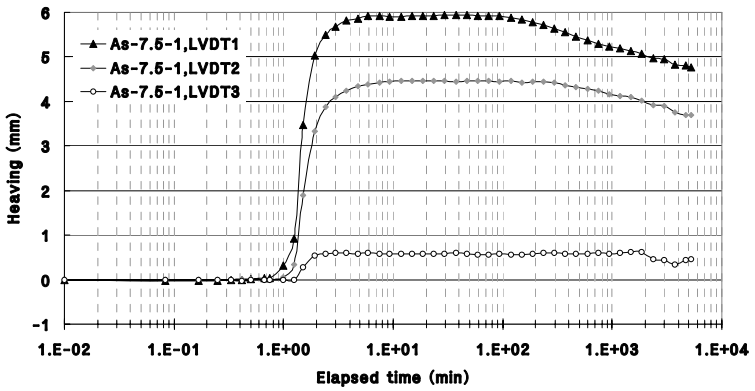
(c) 3단계 하중

<그림 3.5.18> 하중단계별 융기량의 변화

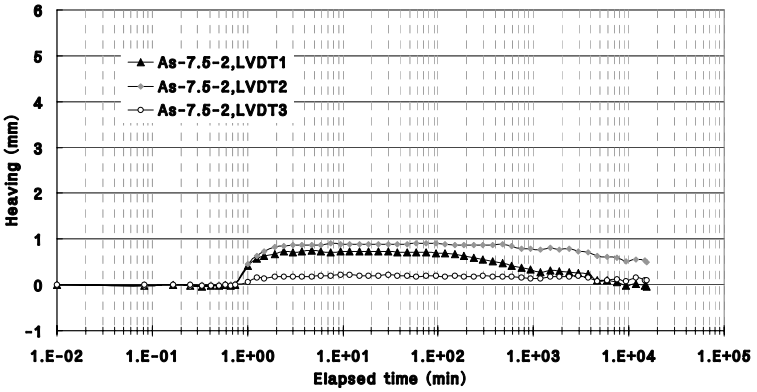
(나) 치환율 7.5%



<그림 3.5.19> 시간경과에 따른 누적 융기량의 변화

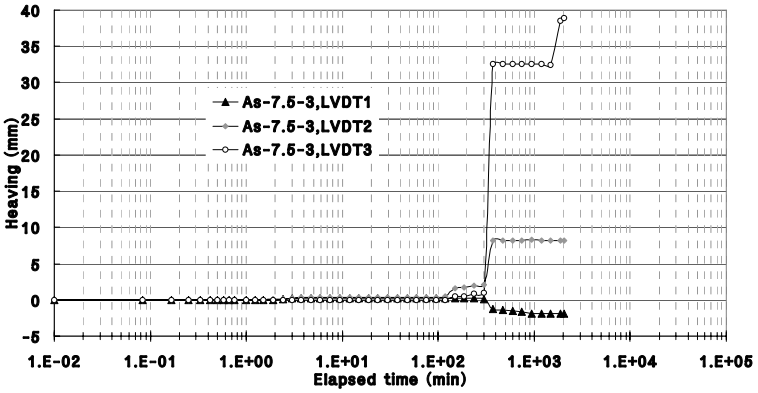


(a) 1단계 하중



(b) 2단계 하중

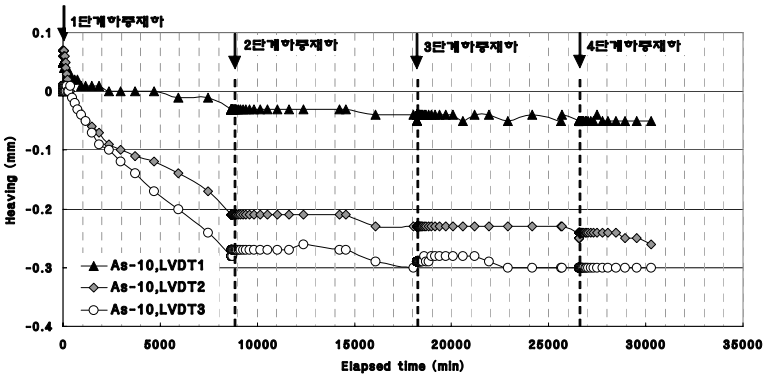
<그림 3.5.19> 하중단계별 융기량의 변화(계속)



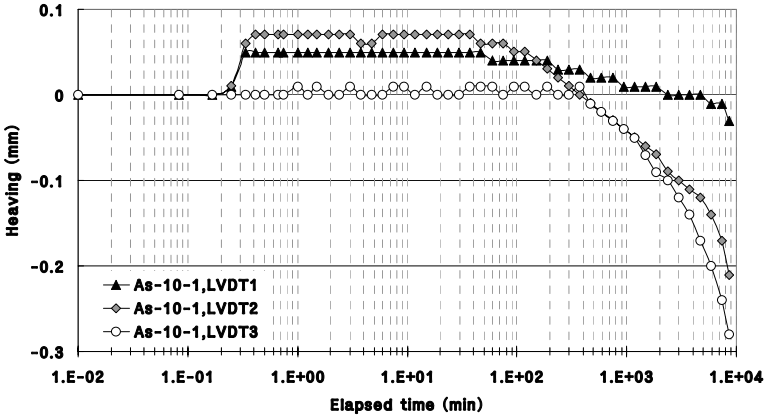
(c) 3단계 하중

<그림 3.5.19> 하중단계별 융기량의 변화

(다) 치환율 10%

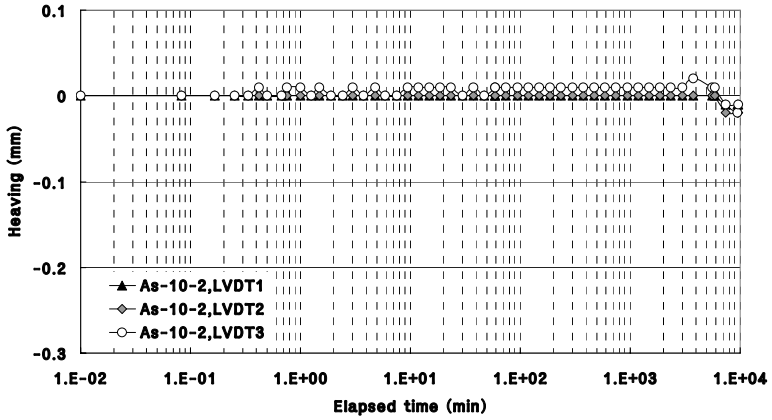


<그림 3.5.20> 시간경과에 따른 누적 융기량의 변화

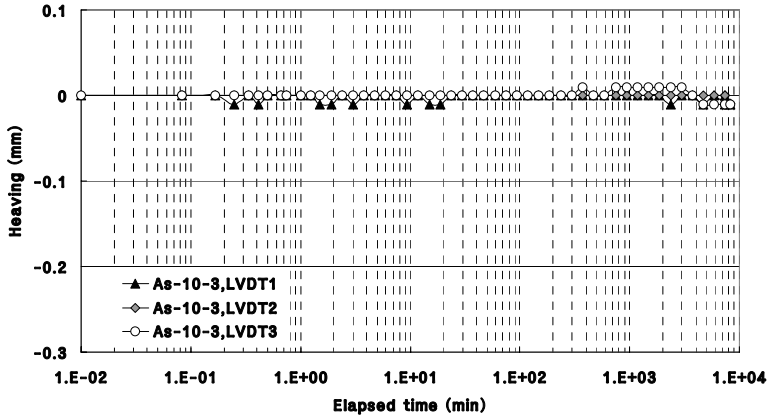


(a) 1단계 하중

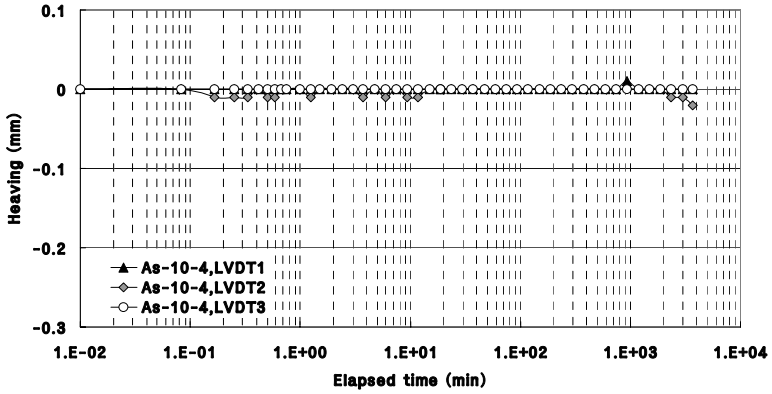
<그림 3.5.21> 하중단계별 융기량의 변화(계속)



(b) 2단계 하중



(c) 3단계 하중



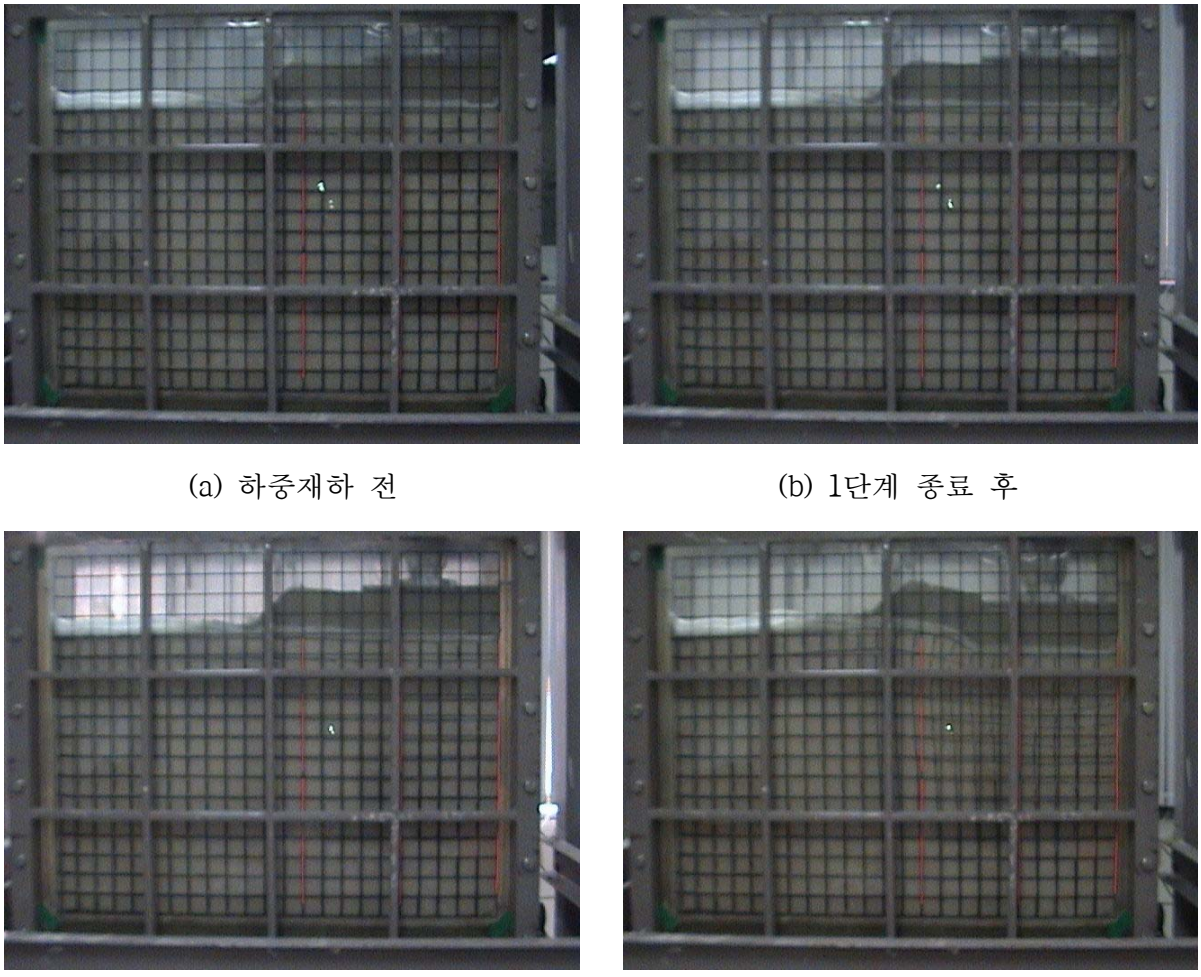
(d) 4단계 하중

<그림 3.5.21> 하중단계별 융기량의 변화

(3) 지반변위량

<그림 3.5.22>~<그림 3.5.24>은 영상장비를 이용하여 하중재하시 지반융기 등 지반변위 양상을 기록한 결과들이다. As-5%의 경우 2단계 종료 후 까지 지반융기나 지반 변위가 미미하나, 3단계 종료 후 말뚝이 파괴되면서 융기와 지반 변위가 생겼으며, As-7.5%의 경우 1단계 하중 재하시험으로부터 지반의 변위가 생겼으며, 3단계 종료후에는 지반이 완전히 무너지면서 융기와 지반변위가 생겼다. As-10%의 경우 4단계 종료 후에도 지반 융기나 지반변위가 미미하다.

(가) 치환율 5%

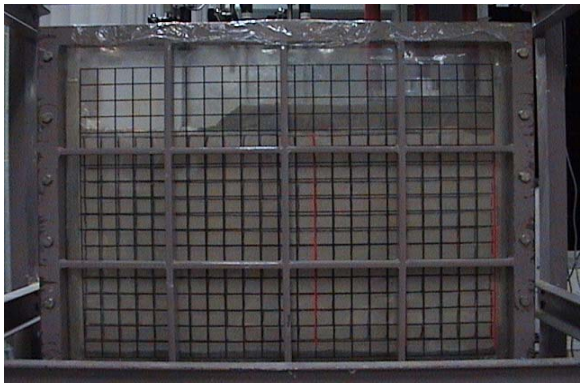


(a) 하중재하 전 (b) 1단계 종료 후

(c) 2단계 종료 후 (d) 3단계 종료 후

<그림 3.5.22> 시간경과에 따른 단계별 하중재하시 지반변위 변화 영상(치환율 5%)

(나) 치환율 7.5%



(a) 하중재하 전



(b) 1단계 종료 후



(c) 2단계 종료 후



(d) 3단계 종료 후

<그림 3.5.23> 시간경과에 따른 단계별 하중재하시 지반변위 변화 영상(치환율 7.5%)

(나) 치환율 10%



(a) 하중재하 전



(b) 1단계 종료 후



(c) 2단계 종료 후



(d) 3단계 종료 후



(e) 4단계 종료 후

<그림 3.5.24> 시간경과에 따른 단계별 하중재하시 지반변위 변화 영상(치환율 10%)

(4) 연직응력 증분

<그림 3.5.25>은 토압계 설치위치를 나타낸 그림으로서 말뚝하단에 EP-2와 EP-4를 설치하였으며, 말뚝사이의 점토층에 EP-1과 EP-3을 설치하였다.

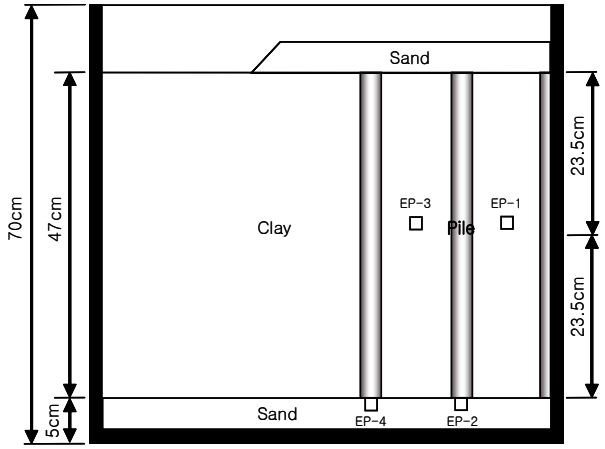
치환율 5% 개량지반에 대한 재하시간 경과에 따른 연직응력 증분은 <그림 3.5.26>~<그림 3.5.29>에 나타내었다. 그림에서와 같이 최대 누적연직응력 증분은 말뚝하단부(EP-2)에서 3단계 하중재하시 최대 1477kPa로 나타났으며, 하중재하 초기에 응력이 발생하여 점차적으로 증가하는 경향을 보인다. 이때 3단계 하중재하 중에 연직응력이 갑자기 감소한 것은 말뚝이 파괴되어 나타난 현상으로 판단된다.

EP-4에 위치한 말뚝은 지반의 측방유동에 대한 보강효과를 규명하기 위해서 설치한 말뚝으로 재하에 직접적인 연직하중 영향범위에 위치하지 않으므로 연직응력 증분은 거의 나타나지 않았다.

점토지반에 설치한 EP-1과 EP-3에서 측정된 최대연직응력 증분은 8.7kPa로 나타났는데, 이는 하중에 의해 발생한 말뚝하단부의 응력증분에 비하면 작은 값으로써 아칭효과에 의하여 점토에 전달되는 응력이 말뚝으로 전이되어 나타난 것으로 판단되며, 위치에 따른 연직응력 증분의 경향성은 명확하게 나타나지 않았다.

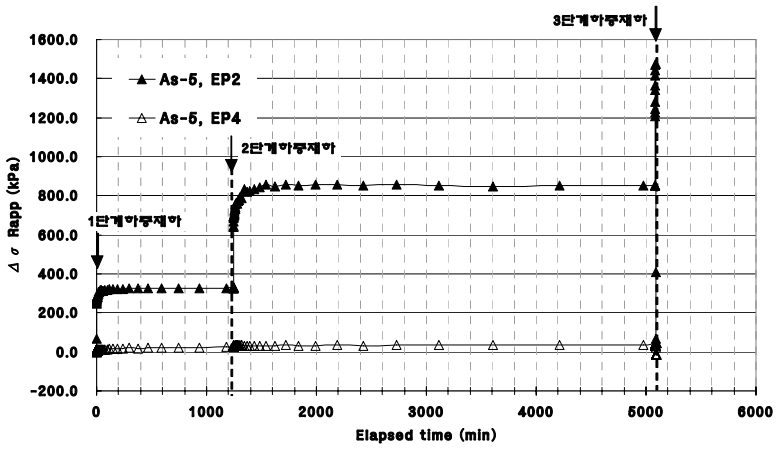
치환율 7.5% 개량지반에 대한 재하시간 경과에 따른 연직응력 증분은 <그림 3.5.30>~<그림 3.5.33>에 나타내었다. 말뚝하단부(EP-2)에서 최대 426kPa를 나타내었으며, 3단계 종료시에는 말뚝이 파괴되면서 (-)값을 기록하였다.

또한, <그림 3.5.34>~<그림 3.5.37>은 치환율 10% 개량지반에 대한 재하시간 경과에 따른 연직응력 증분을 나타내었는데 그림에서 알 수 있듯이, 치환율 10% 개량지반 또한 연직응력 증분의 거동이 5% 개량지반과 유사하게 나타났으며, 말뚝하단부(EP-2)에서 최대 2670kPa를 나타내었으며 점토부에서 발생한 연직응력 증분의 경우 EP-1에서는 응력증분이 (-)를 나타내고, EP-3에서는 (+)값을 나타내어 시간경과에 따른 경향성 없는 결과를 나타내었으며, 최대 5.4kPa을 나타내었다.

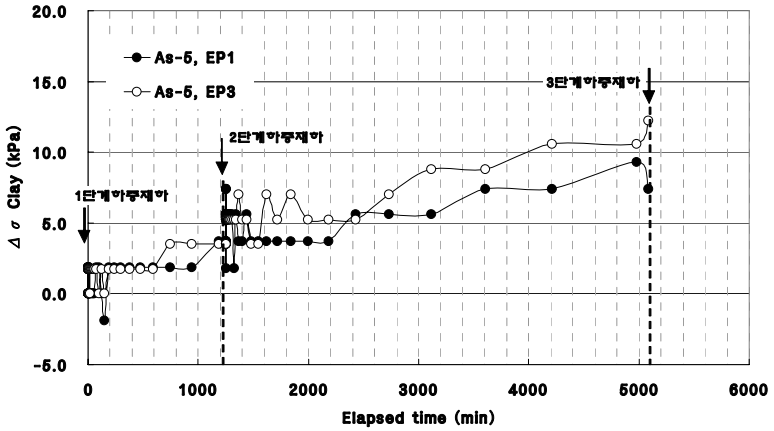


<그림 3.5.25> 토압계 설치 위치

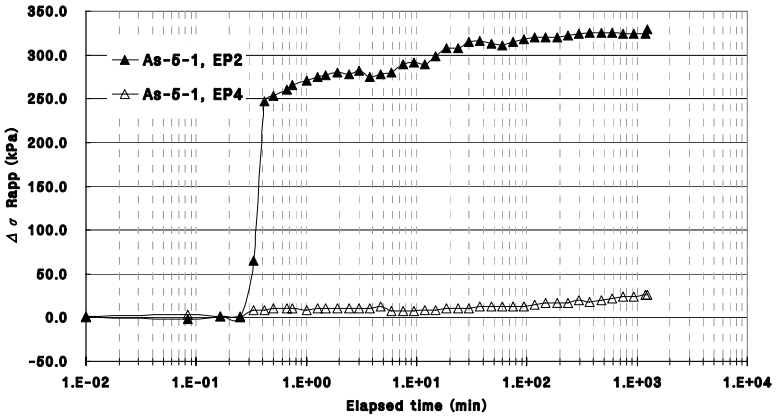
(가) 치환율 5%



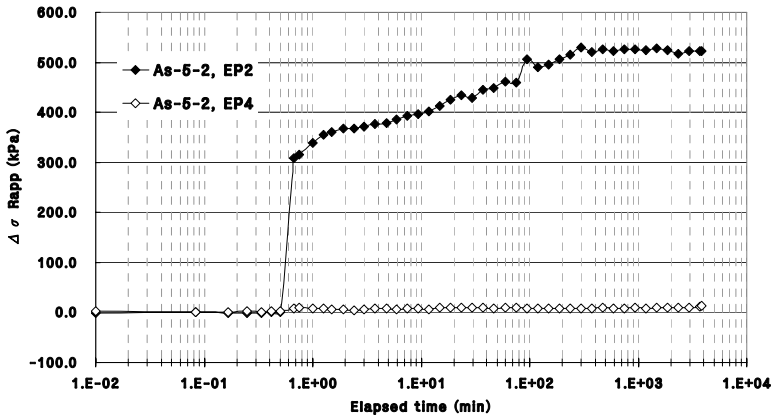
<그림 3.5.26> 시간경과에 따른 말뚝하단부 누적 연직응력 증분의 변화



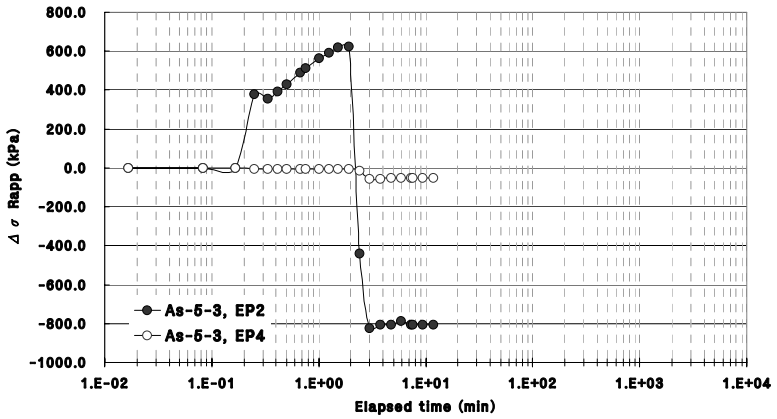
<그림 3.5.27> 시간경과에 따른 점토부 누적 연직응력 증분의 변화



(a) 1단계 하중

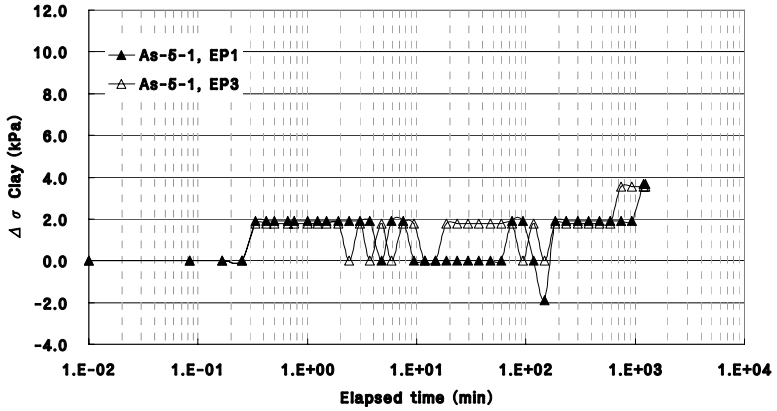


(b) 2단계 하중

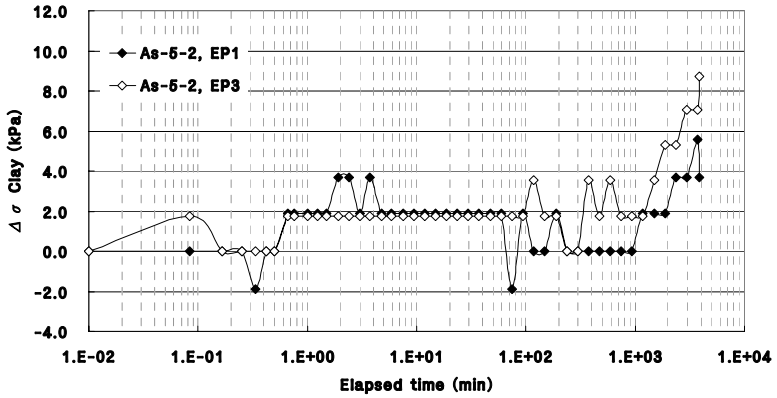


(3) 3단계 하중

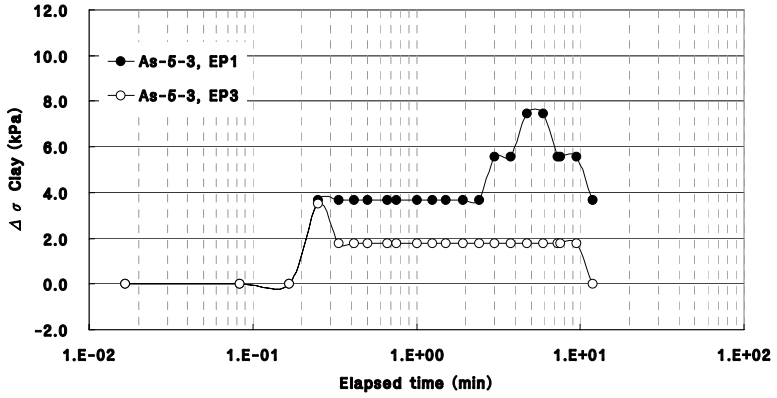
〈그림 3.5.28〉 시간경과에 따른 말뚝하단부 연직응력 증분의 변화



(a) 1단계 하중



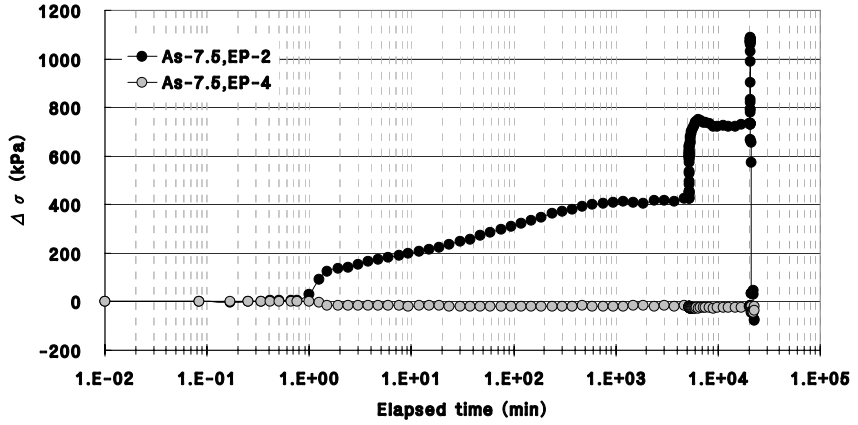
(b) 2단계 하중



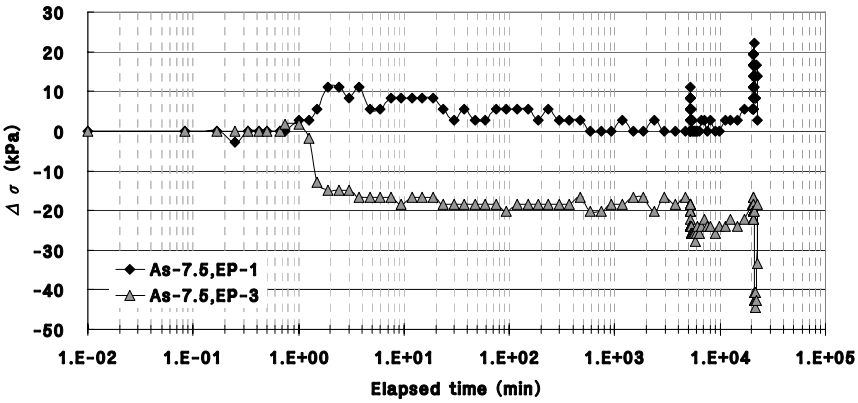
(c) 3단계 하중

<그림 3.5.29> 시간경과에 따른 점토부 연직응력 증분의 변화

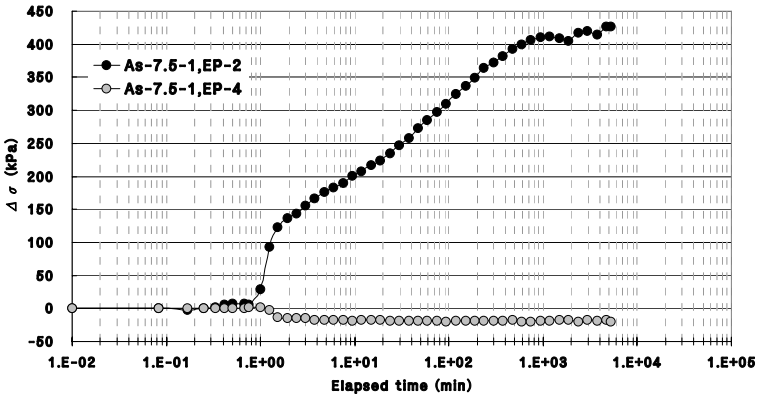
(나) 치환율 7.5%



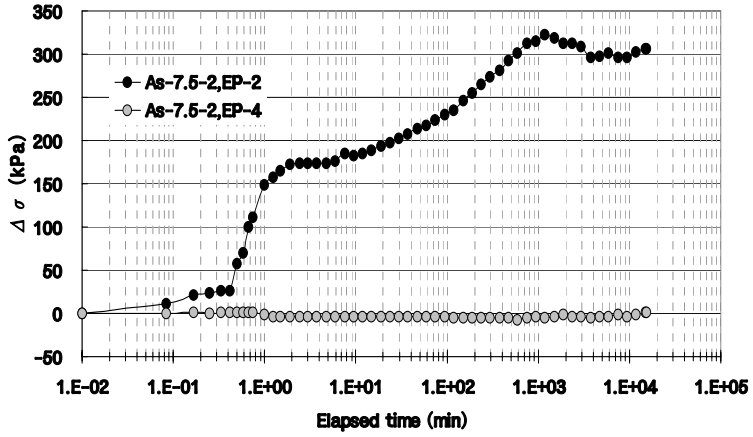
<그림 3.5.30> 시간경과에 따른 말뚝하단부 누적 연직응력 증분의 변화



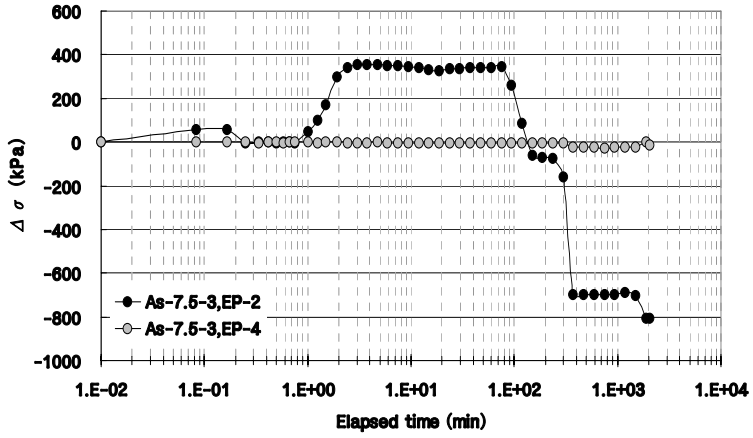
<그림 3.5.31> 시간경과에 따른 점토부 누적 연직응력 증분의 변화



(a) 1단계 하중

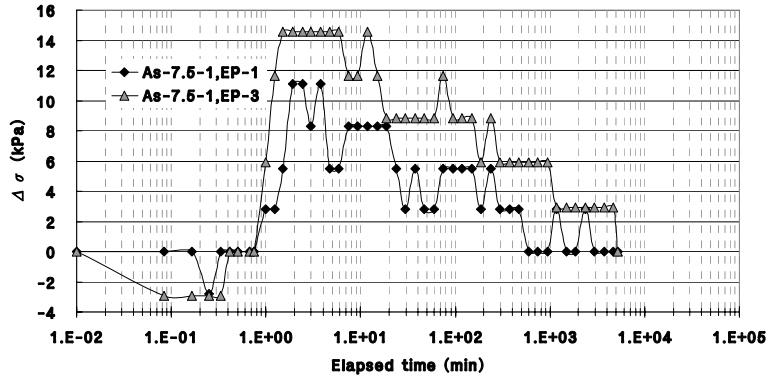


(b) 2단계 하중

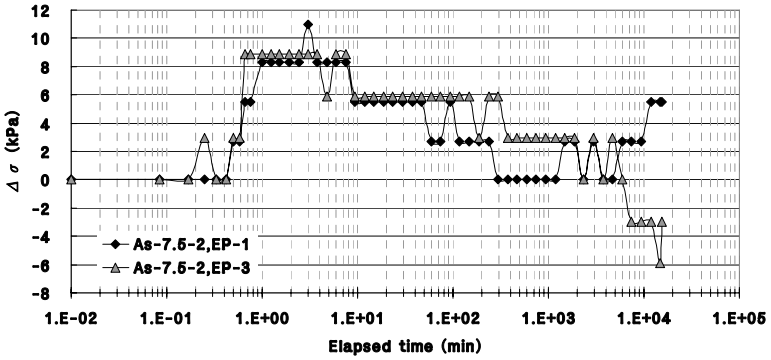


(c) 3단계 하중

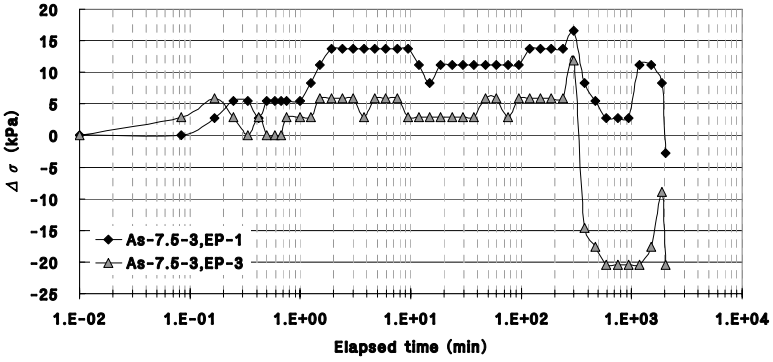
<그림 3.5.32> 시간경과에 따른 말뚝하단부 연직응력 증분의 변화



(a) 1단계 하중



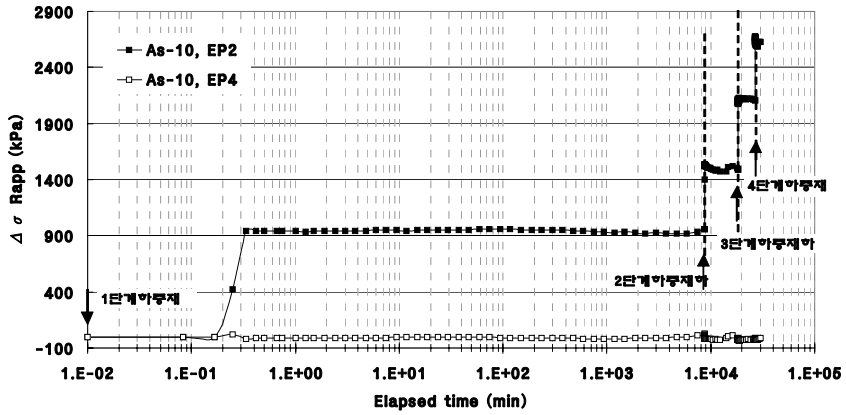
(b) 2단계 하중



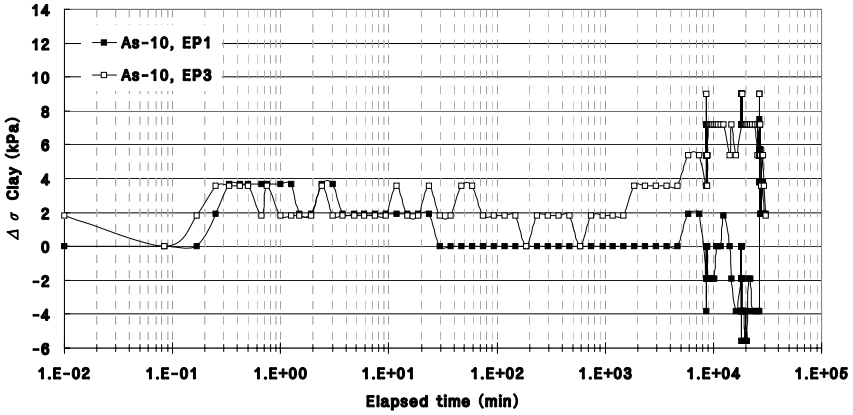
(c) 3단계 하중

<그림 3.5.33> 시간경과에 따른 말뚝하단부 연직응력 증분의 변화

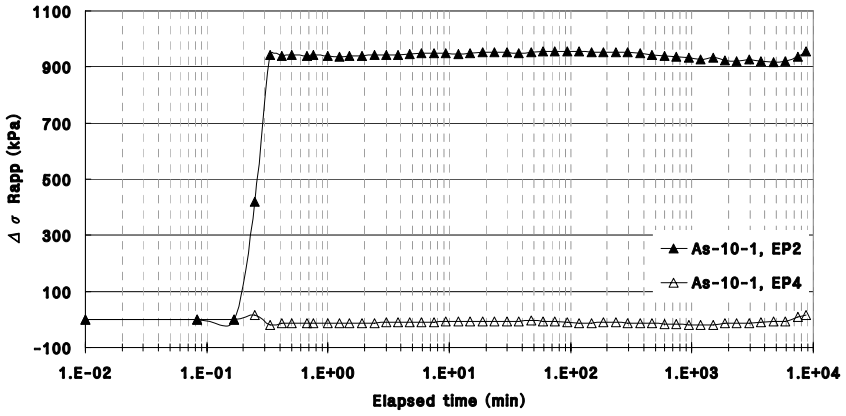
(다) 치환율 10%



<그림 3.5.34> 시간경과에 따른 말뚝하단부 누적 연직응력 증분의 변화

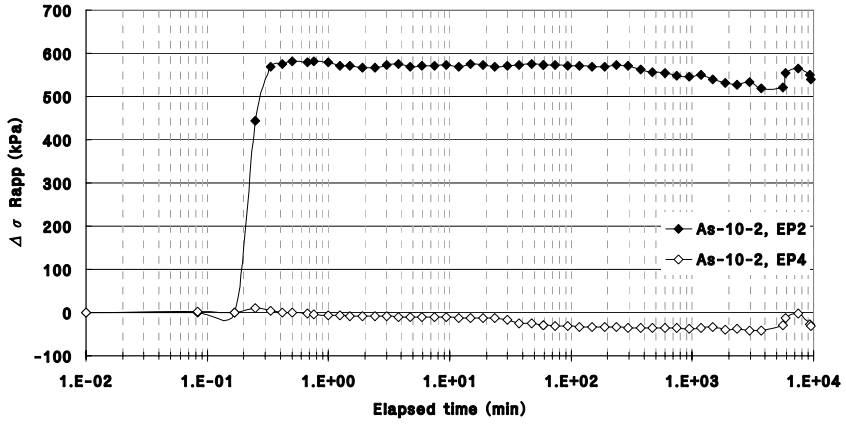


<그림 3.5.35> 시간경과에 따른 점토부 누적 연직응력 증분의 변화

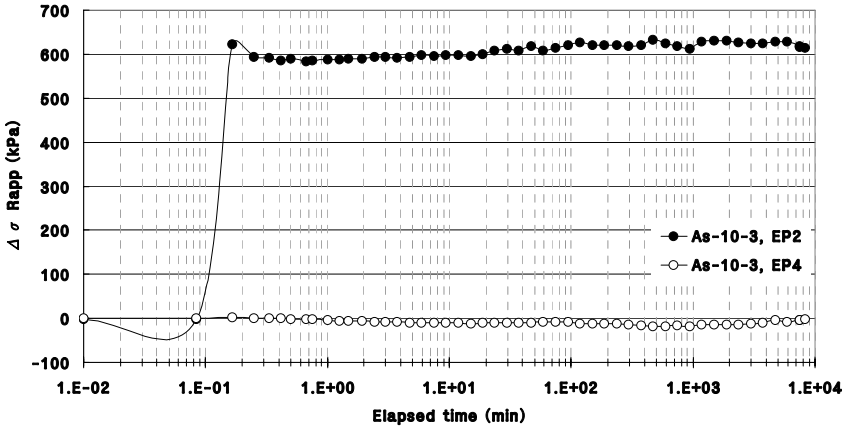


(a) 1단계 하중

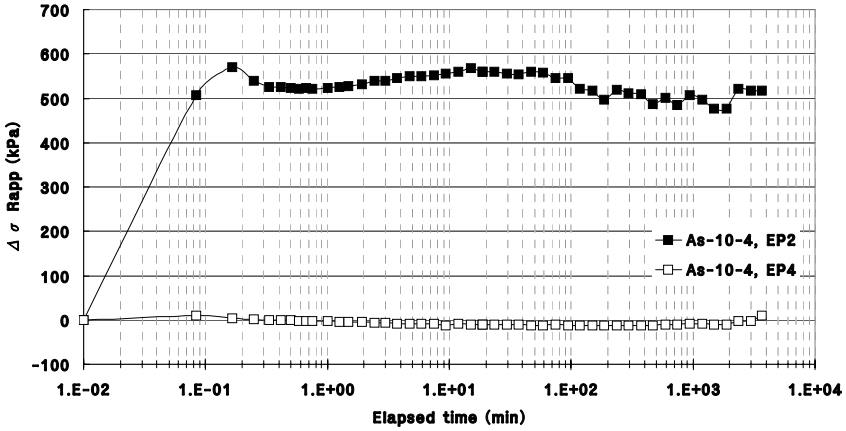
<그림 3.5.36> 시간경과에 따른 점토부 연직응력 증분의 변화(계속)



(b) 2단계 하중

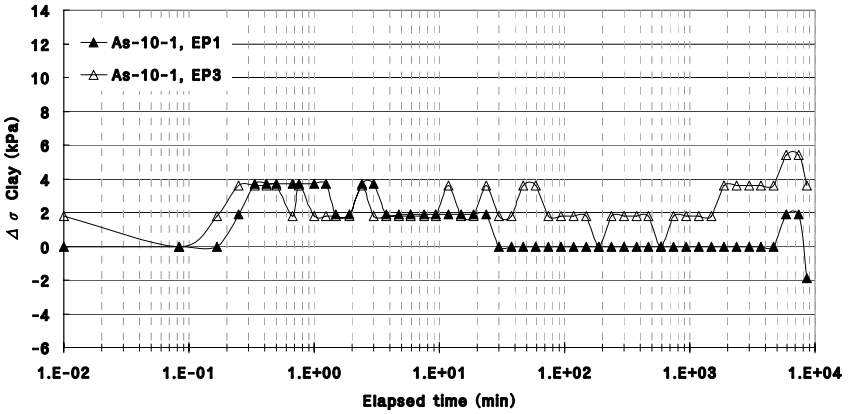


(c) 3단계 하중

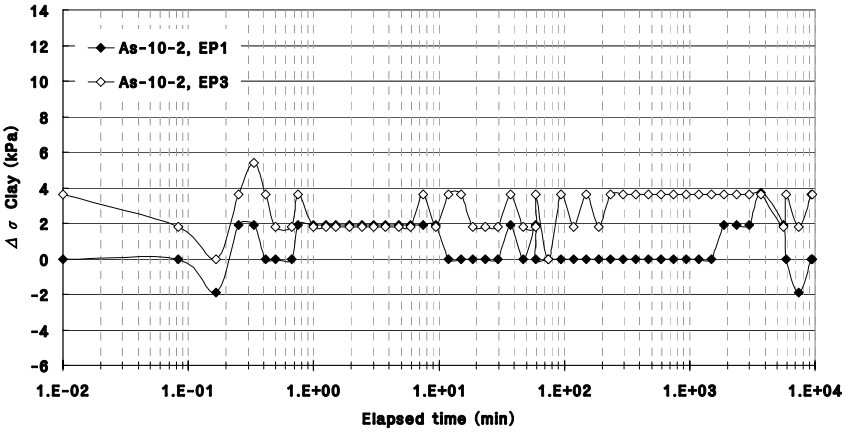


(d) 4단계 하중

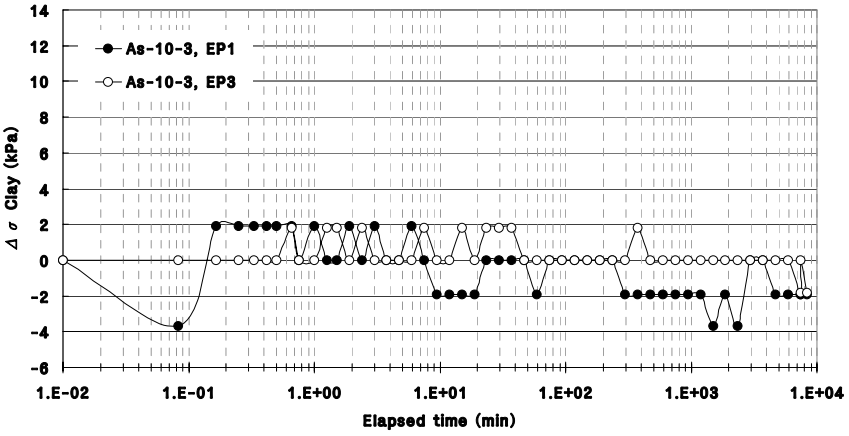
〈그림 3.5.36〉 시간경과에 따른 말뚝하단부 연직응력 증분의 변화



(a) 1단계 하중

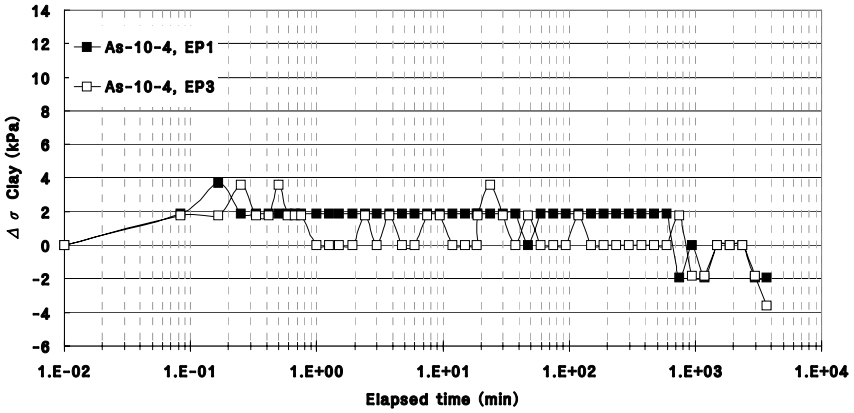


(b) 2단계 하중



(c) 3단계 하중

<그림 3.5.37> 시간경과에 따른 점토부 연직응력 증분의 변화(계속)

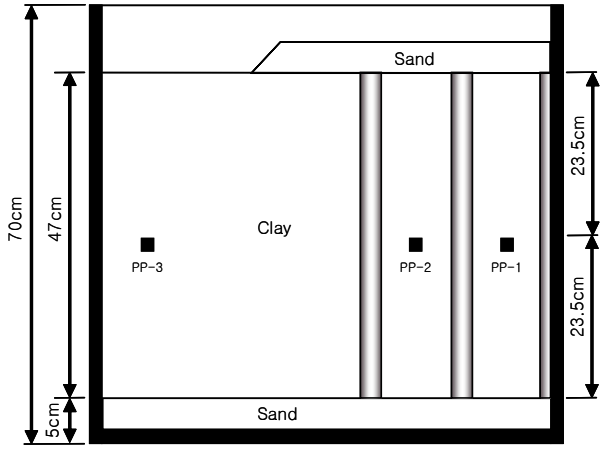


(d) 4단계 하중

<그림 3.5.37> 시간경과에 따른 점토부 연직응력 증분의 변화

(5) 과잉간극수압

<그림 3.5.38>은 간극수압계 설치위치를 나타낸 그림으로서 말뚝사이에 PP-1과 PP-2를 설치하였으며, 하중재하에 영향을 직접적으로 받지 않는 위치에 PP-3을 설치하였다.



<그림 3.5.38> 간극수압계 설치 위치

치환율 5%에 대한 누적 과잉간극수압의 변화는 <그림 3.5.39>에 나타내었으며, PP-2에서 최대값 5.26kPa이 나타났으며, PP-3에서는 (-)간극수압이 발생한 것으로 나타났다.

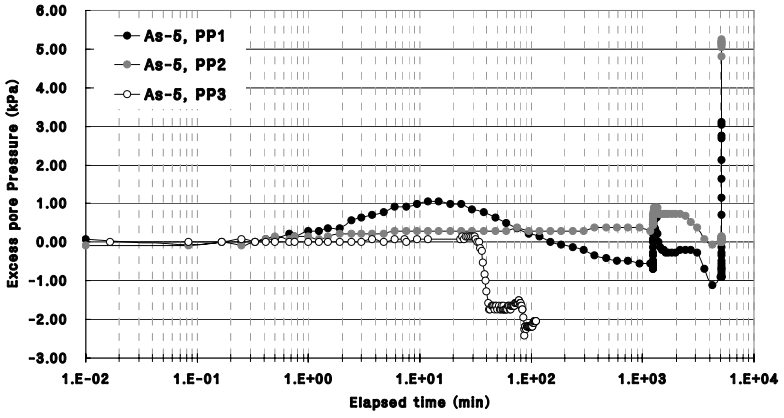
단계별 하중재하시 재하시간 경과에 따라 초기에는 과잉간극수압이 증가하다가 PP-1에서는 약 10분 경과 후부터 간극수압이 소산되었으며, PP-2와 PP-3에서는 과잉간극수압 발생량이 적어 뚜렷한 간극수압 소산 시점은 나타내지 않았다.

치환율 7.5%에 대한 과잉간극수압의 변화는 <그림 3.5.41>에 나타내었으며, 3단계 하중시에 PP-3에서 최대 15.58kPa의 과잉간극수압이 발생하였다.

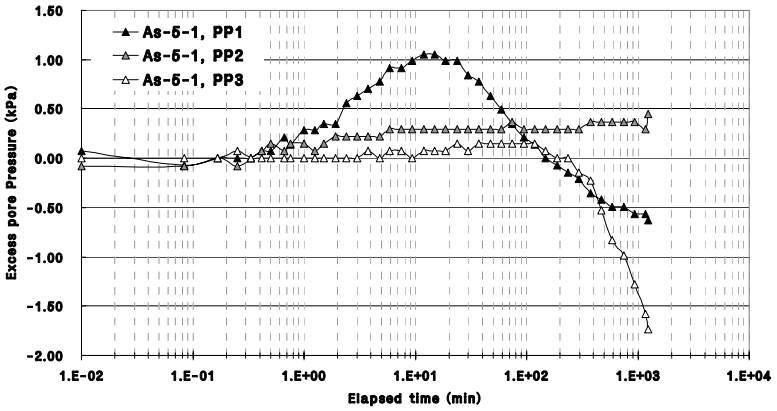
치환율 10%에 대한 누적 과잉간극수압의 변화는 <그림 3.5.42>에 나타내었으며, 각 위치별로 하중 재하초기에는 과잉간극수압이 증가하다가 시간 경과 후 간극수압이 소산되는 것으로 나타났으며 명확한 소산 시점을 나타내지는 않았다.

1단계 하중재하시는 PP-2에서 최대 0.99kPa 이 나타났으며, 2단계 하중시는 PP-2에서 최대 1.68kPa, 3단계 하중재하시는 PP-1에서 최대 0.77kPa, 4단계 하중재하시는 PP-3에서 0.54kPa의 과잉간극수압이 발생하였다.

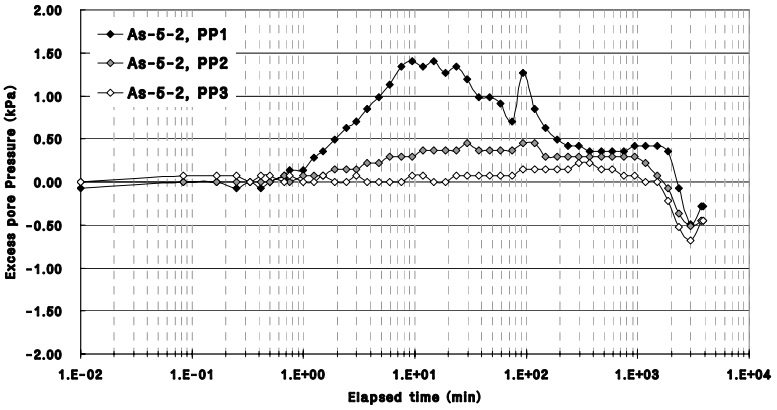
(가) 치환율 5%



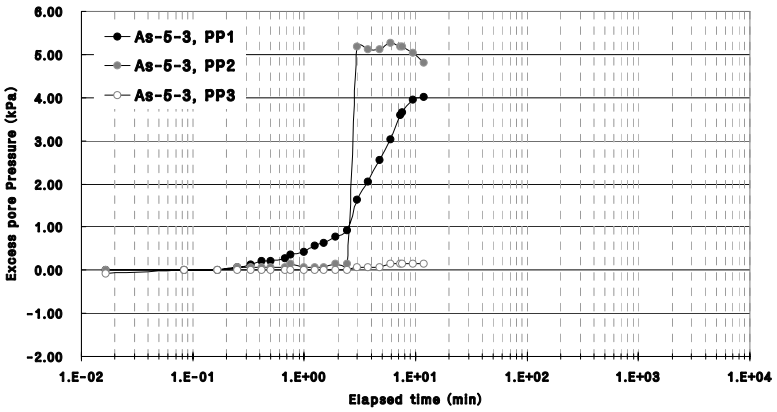
<그림 3.5.39> 시간경과에 따른 누적 과잉간극수압의 변화



(a) 1단계 하중



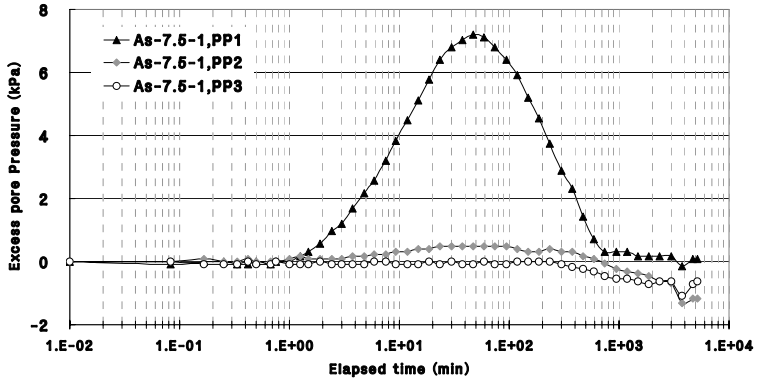
(b) 2단계 하중



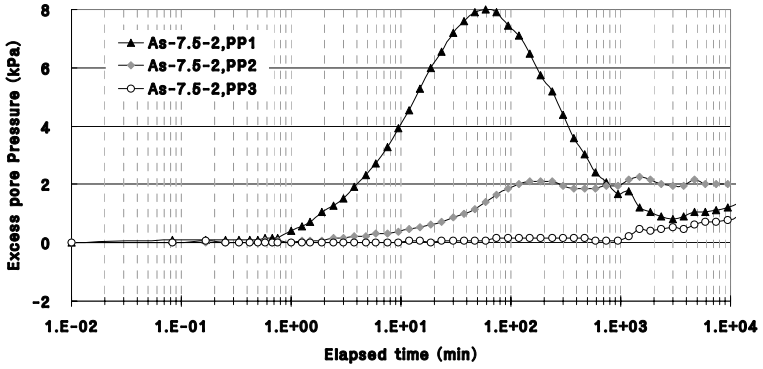
(c) 3단계 하중

<그림 3.5.40> 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화(치환율 5%)

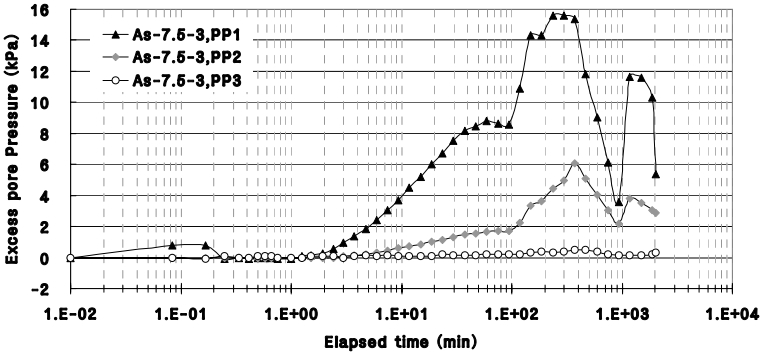
(나) 치환율 7.5%



(a) 1단계 하중



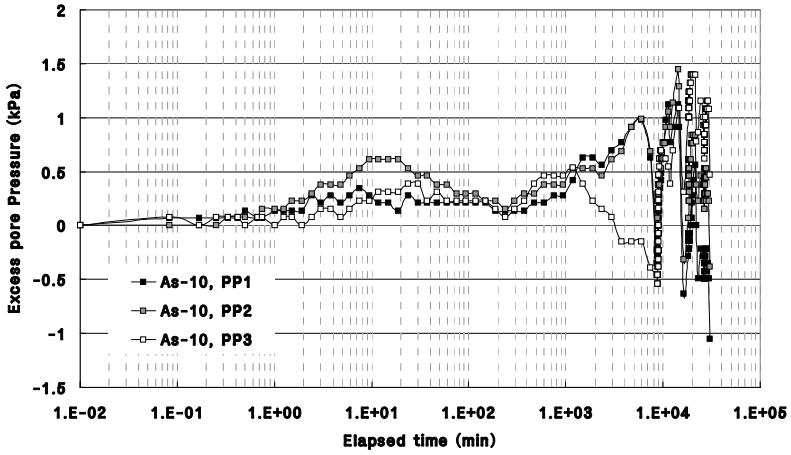
(b) 2단계 하중



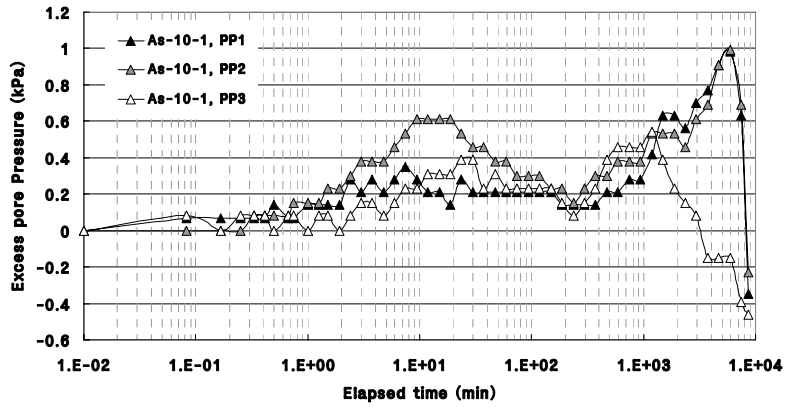
(c) 3단계 하중

<그림 3.5.41> 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화(치환율 7.5%)

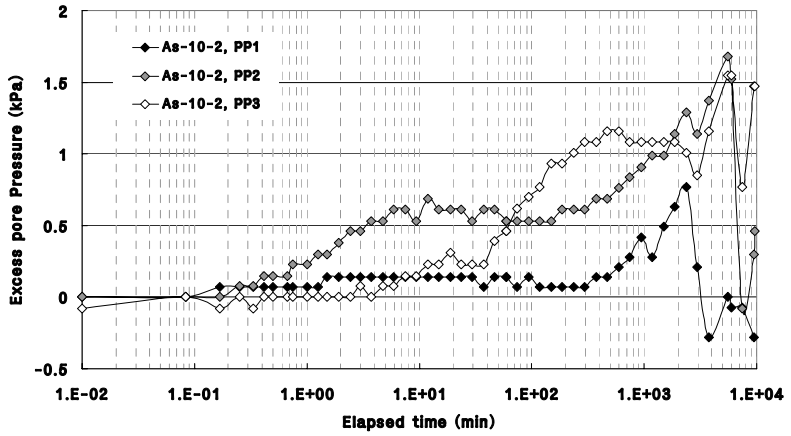
(다) 치환율 10%



<그림 3.5.42> 시간경과에 따른 누적 과잉간극수압의 변화

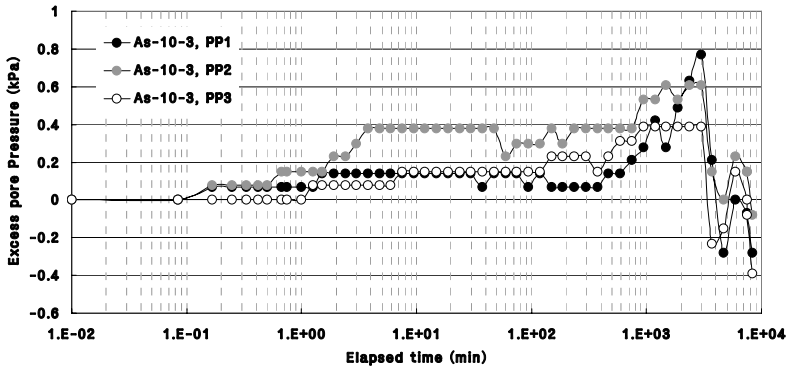


(a) 1단계 하중

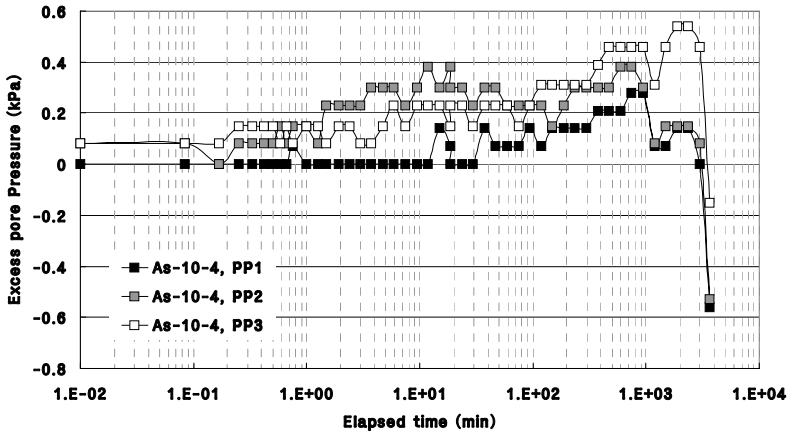


(b) 2단계 하중

<그림 3.5.43> 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화(치환율 10%)(계속)



(c) 3단계 하중



(d) 4단계 하중

<그림 3.5.43> 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화(치환율 10%)

(6) 응력분담비 및 침하저감계수

(가) 응력분담비(n)

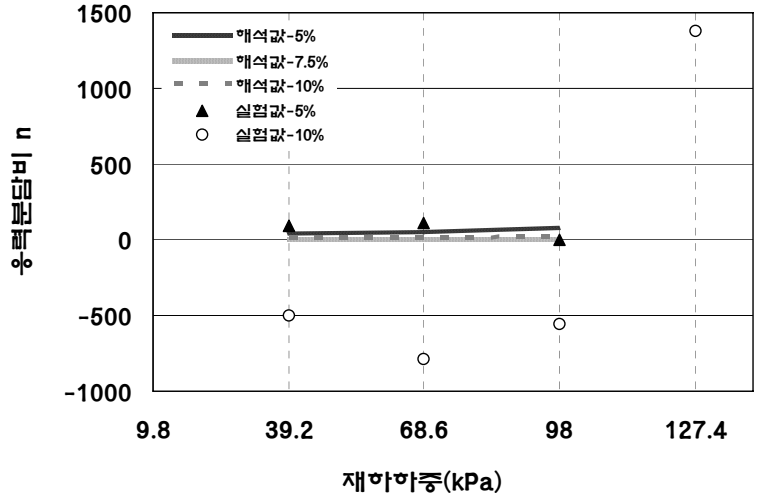
다공질 콘크리트말뚝에 의해 보강된 지반에 하중이 작용하는 경우, 작용하중은 원지반과 RAPP 말뚝에 서로 다른 크기로 분산되어 작용하게 된다.

일반적으로 조립의 말뚝재료는 강성이 주변 흙의 강성보다 매우 크기 때문에 작용하중은 동일한 크기로 지반과 말뚝에 분배되는 것이 아니라 말뚝 상부로 더 큰 응력이 집중되는 응력집중 현상이 발생한다. 이때 원지반이 받는 응력과 다공질 콘크리트말뚝이 받는 응력의 비인 응력분담비를 식으로 표현하면 다음의 (식 3.5.1)과 같다.

$$n = \sigma_s / \sigma_c \qquad \text{(식 3.5.1)}$$

여기서, σ_s : 다공질 콘크리트말뚝의 응력, σ_c : 주변 점토지반의 응력

하중단계별 응력분담비를 모형토조 실험결과와 수치해석 결과에 대하여 각각 산정하였으며, 그 결과는 다음의 <그림 3.5.44>와 같다. 수치해석 결과로 산정한 응력분담비는 치환율 5%일 경우 재하하중 증가에 따른 증가 양상이 뚜렷하게 나타났으며, 모형토조 실험결과로 산정한 응력분담비는 경향성을 판단하기 어렵게 나타났다.



<그림 3.5.44> 하중단계별 응력분담비에 대한 실험결과와 수치해석 결과 비교

(나) 침하저감계수(β)

다공질 콘크리트말뚝을 설치한 지반에서의 침하량은 무처리시에 발생하는 침하량보다 감소하게 되는데 그 원인은 다공질 콘크리트말뚝이 어느 정도의 하중을 분담하여 압밀 지반에 작용하는 응력을 감소시키기 때문이다. 침하저감계수를 식으로 표현하면 (식 3.5.2)와 같다.

$$\beta = \frac{S}{S_o} \quad \text{(식 3.5.2)}$$

여기서, S 및 S_0는 각각 복합지반의 침하량과 무보강 지반의 침하량을 나타낸다.

$$S = \beta \cdot S_o = \frac{1}{1+(n-1)a_s} \cdot S_o \quad \text{(식 3.5.3)}$$

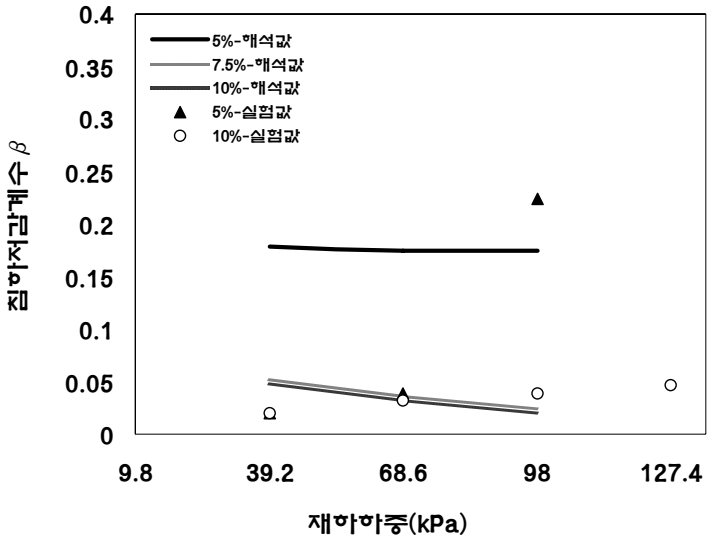
$$n = \frac{1}{a_s}\left(\frac{S_o}{S} - 1\right) + 1 \quad \text{(식 3.5.4)}$$

여기서, n : 응력분담비, a_s : 치환율

원지반 상태의 압밀침하량에 대하여 수치해석결과 산정된 침하량과 보강지반의 압밀침하량을 비교하여 침하저감계수를 산정하였으며 그 결과는 다음의 <그림 3.5.45>와 같다.

수치해석 결과로부터 산정된 침하저감계수는 치환율 5%에 대한 결과는 하중에 상관없이 일정한 값을 나타내었으며 치환율 10%의 경우는 치환율 5%와 비교하여 침하저감계수가 작게 나타났으며 하중증가에 따라 약간 감소하는 유사한 결과를 나타내었다.

모형토조 실험결과로부터 산정된 침하저감계수는 치환율 5%의 경우는 하중재하 1단계와 2단계는 유사한 결과를 보였으나 3단계 하중재하시 침하저감계수가 상당히 증가하는 형태로 나타났으며, 치환율 10%에 대한 결과는 하중증가에 상관없이 비교적 일정한 값을 나타내고 있다.



<그림 3.5.45> 하중단계별 침하저감계수에 대한 실험결과와 수치해석 결과 비교

(7) 시간경과에 따른 지반변위

<그림 3.5.46>~<그림 3.5.48>은 As-5%일 때 지반변위를 사진촬영 기록한 것으로, 3단계 하중을 재하한 후 1분후부터 급속한 지반의 변위가 발생하였는데, 이는 말뚝이 파괴되면서 나타나는 현상으로 판단이 된다.

<그림 3.5.52>~<그림 3.5.55>는 As-10%일 때의 지반변위를 사진촬영 기록한 것으로 4단계 종료 후 까지 지반변위가 미미한 것으로 나타났다.

(가) 치환율 5%



(a) 초기상태 (b) 1분 경과 (c) 5분 경과



(d) 10분 경과 (e) 20분 경과 (f) 1,500분 경과

<그림 3.5.46> 시간경과에 따른 1단계 하중재하시 지반변위 변화 영상



(a) 초기상태 (b) 1분 경과 (c) 5분 경과



(d) 10분 경과 (e) 20분 경과 (f) 3,700분 경과

<그림 3.5.47> 시간경과에 따른 2단계 하중재하시 지반변위 변화 영상



(a) 초기상태 (b) 1분 경과 (c) 2분 경과



(d) 5분 경과 (e) 10분 경과 (f) 60분 경과

<그림 3.5.48> 시간경과에 따른 3단계 하중재하시 지반변위 변화 영상

(나) 치환율 7.5%



(a) 초기상태 (b) 1분 경과 (c) 5분 경과



(d) 10분 경과 (e) 20분 경과 (f) 4100분 경과

<그림 3.5.49> 시간경과에 따른 1단계 하중재하시 지반변위 변화 영상



(a) 초기상태 (b) 1분 경과 (c) 5분 경과



(d) 10분 경과 (e) 20분 경과 (f) 4600분 경과

<그림 3.5.50> 시간경과에 따른 2단계 하중재하시 지반변위 변화 영상



(a) 초기상태 (b) 1분 경과 (c) 5분 경과



(d) 10분 경과 (e) 20분 경과 (f) 4600분 경과

<그림 3.5.51> 시간경과에 따른 3단계 하중재하시 지반변위 변화 영상

(다) 치환율 10%에 대한 단계별 하중재하시 지반변위



(a) 초기상태 (b) 1분 경과 (c) 5분 경과



(d) 10분 경과 (e) 20분 경과 (f) 7200분 경과

<그림 3.5.52> 시간경과에 따른 1단계 하중재하시 지반변위 변화 영상



(a) 초기상태 (b) 1분 경과 (c) 5분 경과



(d) 10분 경과 (e) 20분 경과 (f) 4000분 경과

<그림 3.5.53> 시간경과에 따른 2단계 하중재하시 지반변위 변화 영상



(a) 초기상태 (b) 1분 경과 (c) 5분 경과



(d) 10분 경과 (e) 20분 경과 (f) 1600분 경과

<그림 3.5.54> 시간경과에 따른 3단계 하중재하시 지반변위 변화 영상



(a) 초기상태 (b) 1분 경과 (c) 5분 경과



(d) 10분 경과 (e) 20분 경과 (f) 2800분 경과

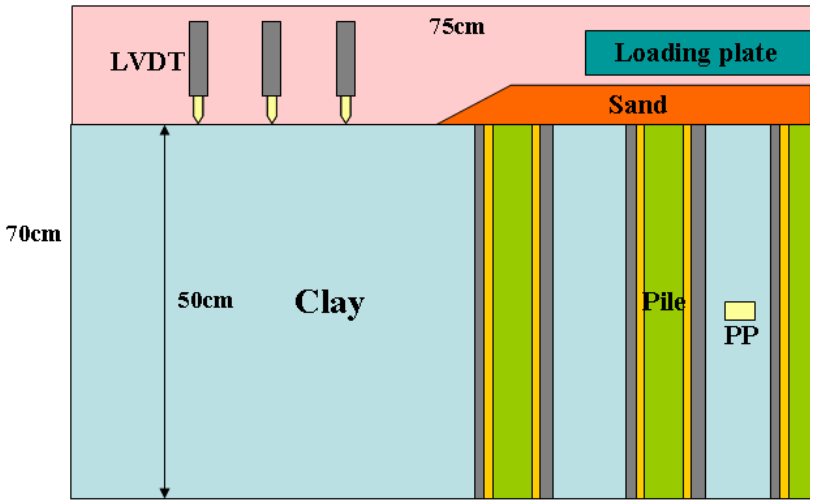
<그림 3.5.55> 시간경과에 따른 4단계 하중재하시 지반변위 변화 영상

2. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법에 대한 수치해석

가. 실내모형실험에 대한 예비 수치해석

(1) 개요

성공적인 모형실험을 수행하기 위하여 실내모형토조실험에 대한 예비수치해석을 수행하였다. 수치해석은 모형실험에서 계획하고 있는 상재하중에 대하여 모형지반의 안정성을 검토하였고, 계측의 범위와 규모를 결정하기 위하여 하중재하에 의한 모형지반의 응력과 변형상태를 조사하였다.



<그림 3.5.56> 모형토조의 개요

(2) 활동안정성 검토

실내모형실험에서의 모형지반의 활동에 대한 안정성을 검토하기 위하여 본 수치해석에서는 범용 사면안정해석 프로그램인 SLOPILE(Ver. 3.0)을 사용하였다. 본 프로그램의 해석은 먼저, 해석대상지반의 해석을 위해 전체 사면을 일정한 분할요소로 구분한 후 사면한정해석법을 선택한다. 그리고 설정된 사면 안정해석법에 따라 평면파괴해석(무한사면해석)과 원호파괴해석으로 구분하여 실행되도록 하였다.

원호파괴면 해석법의 경우 가상원호활동면의 원점으로 예상되는 부분에 원점망을 작성

하여 원점망의 각 절점을 중심점으로 무수한 가상원호활동면에 대하여 사면안전율 계산을 반복하여 최소사면안전율이 구해지는 원점과 가상원호활동면을 찾는다. 사면안전율 계산은 한계평형원리에 입각한 절편법을 사용하였고, 각각의 가상원호활동면에 대하여 사면의 활동모멘트와 지반의 전단저항에 의한 저항모멘트를 계산하여 기억시킨다.

활동억지시스템이 설치되어 있지 않으면 곧바로 활동모멘트와 저항모멘트로 사면안전율을 계산한다. 그러나 활동억지시스템에 의한 사면보강이 필요한 경우 억지말뚝, 앵커 및 쏘일네일링을 선정하여 이를 고려한 사면안전율을 계산한다.

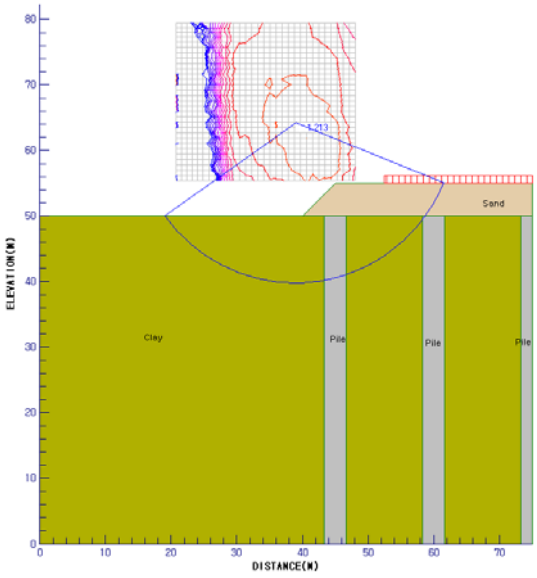
만약 활동억지시스템 가운데 억지말뚝이 설치되어 있으면, 먼저 말뚝에 작용하는 측방토압식을 사용하여 측방토압을 산정한다. 그 다음으로 원호활동면상부의 말뚝부분은 활동토괴로부터 측방토압을 받고 이 측방토압에 의하여 발생될 말뚝의 수평변위에 대하여, 말뚝이 지반으로부터 지반반력을 받도록 한다. 또한, 말뚝머리와 선단의 구속조건을 고려하여 말뚝의 강성매트릭스를 작성한다.

말뚝의 휨응력과 전단응력 및 변위량을 계산하여 말뚝의 안전율을 계산한다. 만약 말뚝의 안전율이 소요안전율보다 낮으면 측압부가계수를 수정하여 말뚝의 측방토압을 줄여 계산을 반복한다. 이러한 작업을 말뚝의 안전율이 소요안전율 이내가 될 때까지 반복한다. 말뚝의 안전율이 소요안전율보다 크게 되면 말뚝의 안정에 사용한 측방토압을 사용하여 가상 원호활동면의 원점을 기준으로 추가적인 저항모멘트를 구한다. 앵커 및 쏘일네일링의 경우도 마찬가지로 앵커 및 쏘일네일링의 안정성을 검토한 이후 가상 원호활동면의 원점을 기준으로 추가적인 저항모멘트를 구한다. 사면안전율 계산시 구하였던 사면파괴면에서의 전단저항에 의한 저항모멘트에 활동억지시스템에 의한 저항모멘트를 가산하여 사면안전율을 계산하여 활동억지시스템의 사면안정효과를 산정한다. 이러한 계산작업은 다른 가상 원호활동면에 대하여도 반복 실시하여 한 원점에 대한 무수한 가상 원호 활동면 중 최소안전율을 가지는 활동면과 안전율을 구한다. 또한 이 원점을 원점망상의 각 절점으로 이동시키면서 동일한 계산을 반복한다.

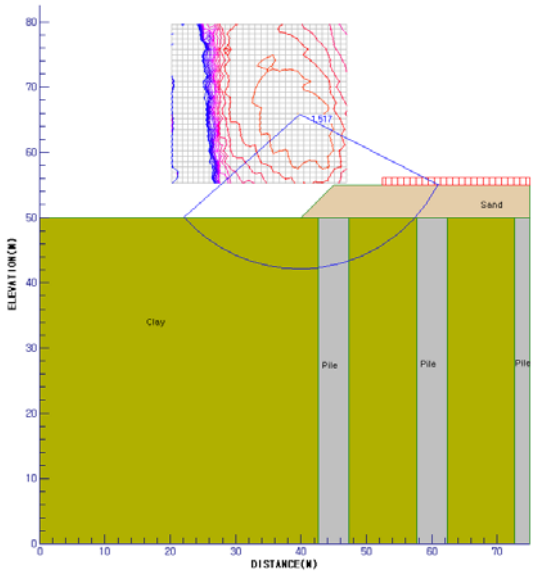
수치해석은 <표 3.5.5>와 같은 조건으로 수행하였다. 즉, 모형실험의 단면을 그대로 모델링하고 각각 지반재료 및 말뚝재료는 일반적 물성치를 적용하였으며, 하중은 모형실험에서 계획 중인 최대하중을 적용하였다. <그림 3.5.57>~<그림 3.5.59>는 각각 말뚝의 치환율이 5%, 10%, 25%인 경우에 대한 해석결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 계획하고 있는 최대하중에서 개량된 모형지반은 1 이상의 안전율을 보이고 있으며 따라서 모형실험을 안정적으로 실시할 수 있음을 판단하였다.

<표 3.5.5> 수치해석 조건(안정성 검토)

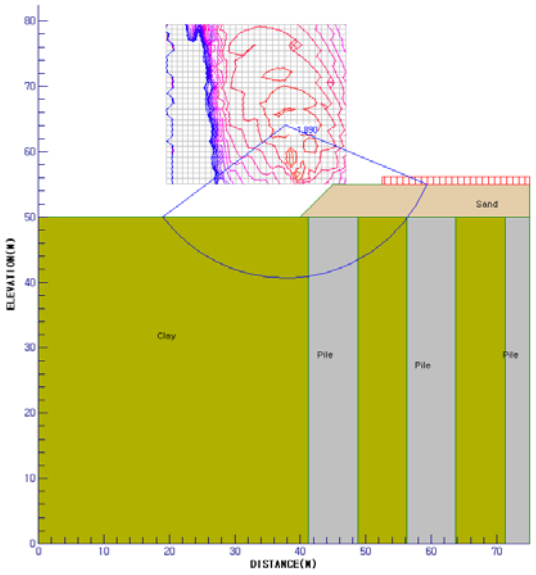
구 분		ø(°)	C(tf/m^2)	γ_t(tf/m^3)	비 고
SLOPILE	sand	35	1	1.8	하중 : 2.0tf/m^2
	clay	0	2	1.7	
	pile	35	5	2.0	



<그림 3.5.57> 활동에 대한 안정성 검토(치환율 5%)



<그림 3.5.58> 활동에 대한 안정성 검토(치환율 10%)



<그림 3.5.59> 활동에 대한 안정성 검토(치환율 25%)

(3) 응력과 변형 거동에 대한 수치해석

실내모형실험에서의 모형지반의 응력과 변형 거동을 예측하기 위하여 본 연구에서의 수치해석은 Plaxis 8.2라는 범용 유한요소해석 프로그램을 이용 하였다.

Plaxis 8.2는 네덜란드 PLAXIS사에서 개발한 2차원 지반공학 전용 유한요소해석 프로그램이다. PLAXIS는 연약지반의 압밀거동 뿐만 아니라 과압밀 점토 그리고 사질토 및 암반지반에도 적용이 가능한 다양한 재료모형을 갖고 있다. 연약지반에 강하다는 점은 매우 작은 전단강도의 지반에 굴착 또는 성토하는 경우에 지반의 붕괴를 포함한 변형해석이 가능할 뿐만 아니라 압밀침하 및 점성침하 등의 복잡한 지반변형을 계산할 수 있음을 의미한다. <표 3.5.6>은 본 검토에서 실시한 수치해석의 조건을 나타내고 있다.

<그림 3.5.60>~<그림 3.5.62>는 각각 하중 재하에 따른 모형지반의 변형거동을 치환율에 따라 나타내고 있다. 재하하중이 증가할수록 모형지반의 변형이 급격히 발생되고 있음을 알 수 있으며 개량말뚝의 치환율이 증가할수록 그 변형이 저감되고 있음을 알 수 있다.

<그림 3.5.63>~<그림 3.5.65>는 각각 하중 재하에 따른 모형지반의 변위 벡터의 변화를 치환율에 따라 나타내고 있다. 상기에 설명한 바와 같이 재하하중이 증가할수록 모형지반의 변형이 급격히 발생되고 있음을 알 수 있으며 개량말뚝의 치환율이 증가할수록 그

변형이 저감되고 있음을 알 수 있다. 또한 치환율이 증가할수록 재하하중 증가에 따른 원지반의 측방유동량이 현저히 저감됨을 알 수 있다.

<표 3.5.6> 수치해석 조건(응력-변형 해석)

구 분		ø(°)	C(kN/m^2)	γ_t(kN/m^3)	E(kN/m^2)	ν
PLAXIS	sand	35	10	19	1.0E+03	0.3
	clay	0	20	17	6.0E+02	0.3
	pile	35	50	20	3.0E+04	0.2
	철판	-	-	18	1.0E+08	0.2
	재하하중	29.4, 58.8, 88.2 (kPa)				

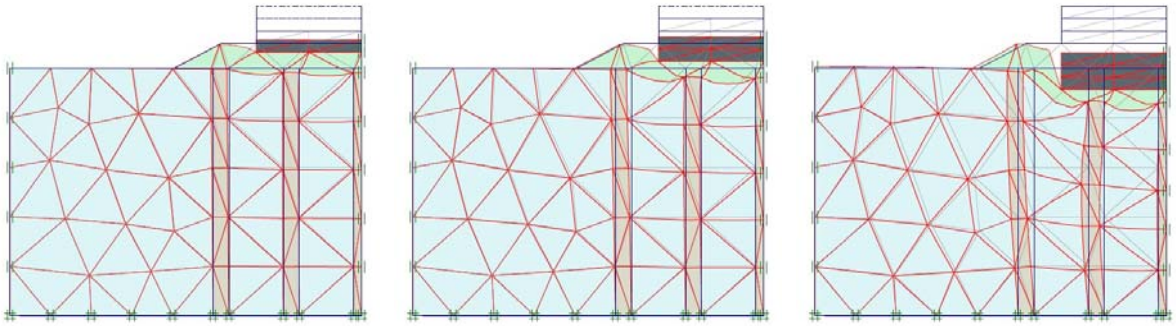
<그림 3.5.66>~<그림 3.5.68>은 각각 하중 재하에 따른 모형지반의 유효응력의 변화를 치환율에 따라 나타내고 있다. 모든 치환율에 대해서 재하하중이 증가할수록 개량말뚝부에서 발생하는 응력이 증가함을 알 수 있으나 점토부에서는 상대적으로 적은 유효응력의 증가현상을 보이고 있다.

한편, 모든 치환율에 대해서 말뚝부에서의 응력은 재하하중의 중심에서 가장 크게 발생되고 있으며 재하 중심에서 멀어질수록 상대적으로 적은 응력 증가를 보이고 있다.

<그림 3.5.69>~<그림 3.5.71>은 각각 하중 재하에 따른 모형지반의 국소안전율의 변화를 치환율에 따라 나타내고 있다. 여기서 국소안전율은 해석요소의 응력상태가 소성한계상태에 도달되었음을 알 수 있는 인자로 정의하고 있다.

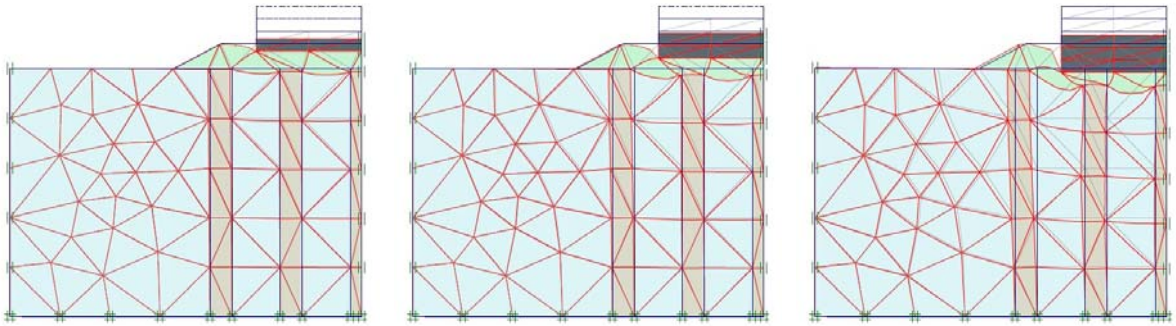
수치해석 결과로부터 치환율의 크기에 상관없이 하중 증가에 따른 소성한계점의 분포는 커다란 차이가 없음을 알 수 있으나, 각각의 치환율에 대해서 재하하중이 증가할수록 소성한계점이 증가함을 알 수 있다.

그러나 하중이 증가하여도 소성한계점의 분포형상이 지반의 파괴 원호를 나타내지 않고 있으므로 모델지반의 활동파괴에 대하여 안정한 상태를 나타낸다고 생각할 수 있다.



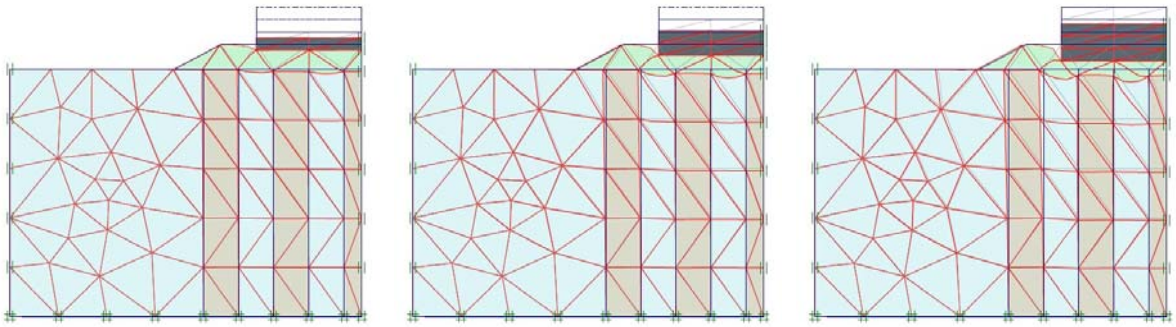
(a) 1단계 하중 (b) 2단계 하중 (c) 3단계 하중

<그림 3.5.60> 하중재하에 따른 모형지반의 변형 거동(치환율 5%)



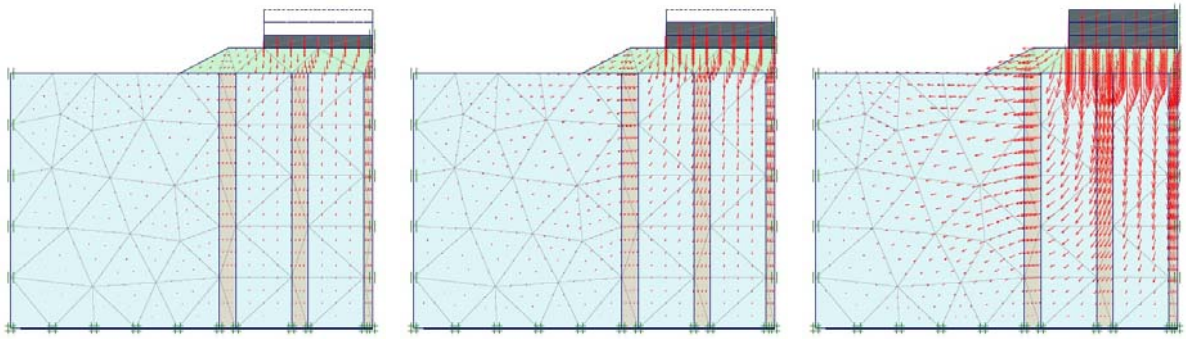
(a) 1단계 하중 (b) 2단계 하중 (c) 3단계 하중

<그림 3.5.61> 하중재하에 따른 모형지반의 변형 거동(치환율 10%)



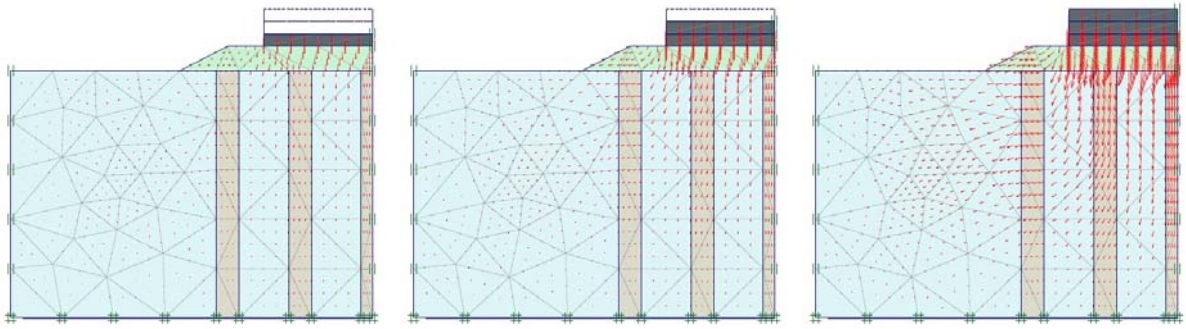
(a) 1단계 하중 (b) 2단계 하중 (c) 3단계 하중

<그림 3.5.62> 하중재하에 따른 모형지반의 변형 거동(치환율 25%)



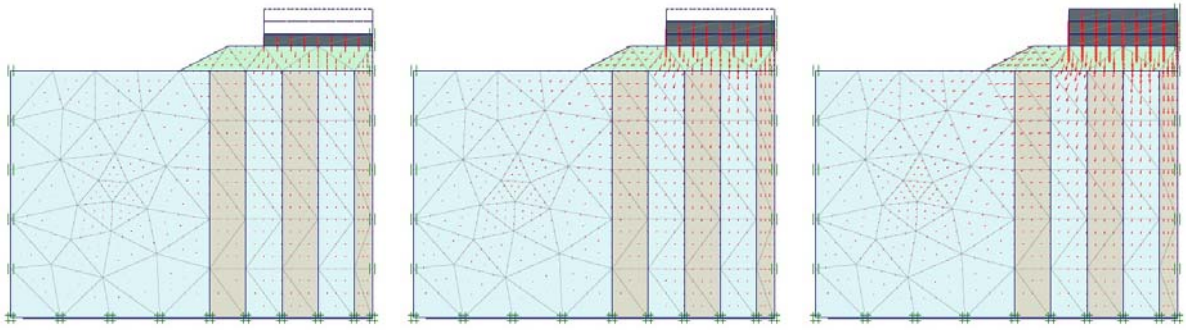
(a) 1단계 하중 (b) 2단계 하중 (c) 3단계 하중

<그림 3.5.63> 하중재하에 따른 모형지반의 변위 벡터 변화(치환율 5%)



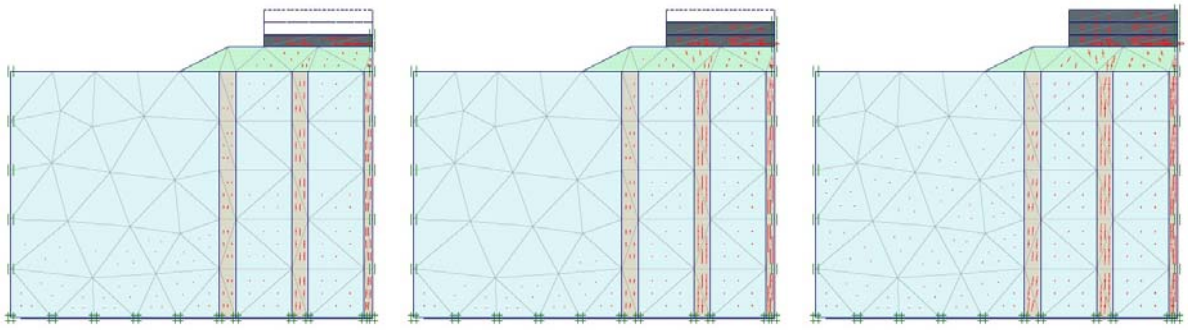
(a) 1단계 하중 (b) 2단계 하중 (c) 3단계 하중

<그림 3.5.64> 하중재하에 따른 모형지반의 변위 벡터 변화(치환율 10%)



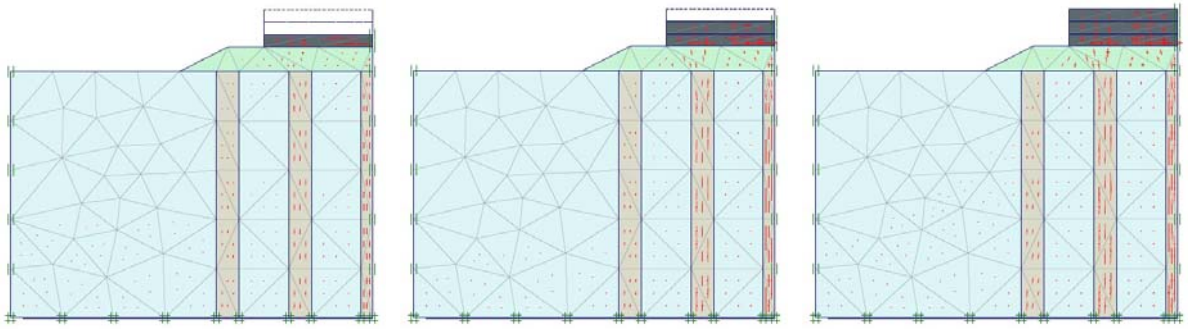
(a) 1단계 하중 (b) 2단계 하중 (c) 3단계 하중

<그림 3.5.65> 하중재하에 따른 모형지반의 변위 벡터 변화(치환율 25%)



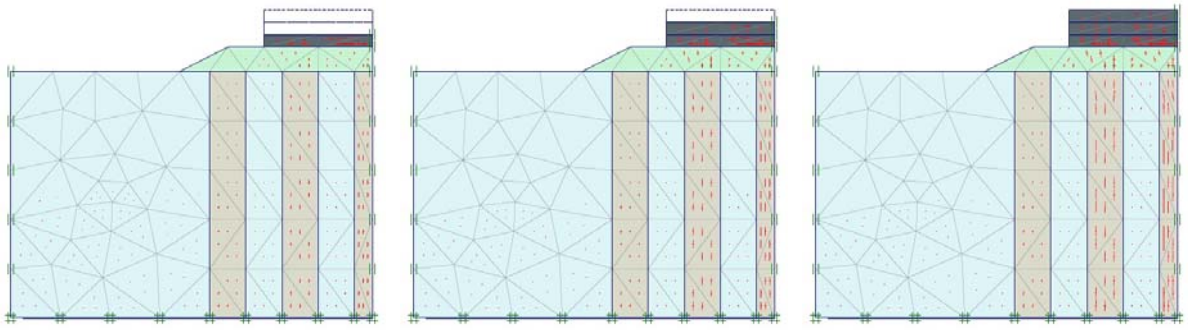
(a) 1단계 하중 (b) 2단계 하중 (c) 3단계 하중

<그림 3.5.66> 하중재하에 따른 모형지반의 유효응력 변화(치환율 5%)



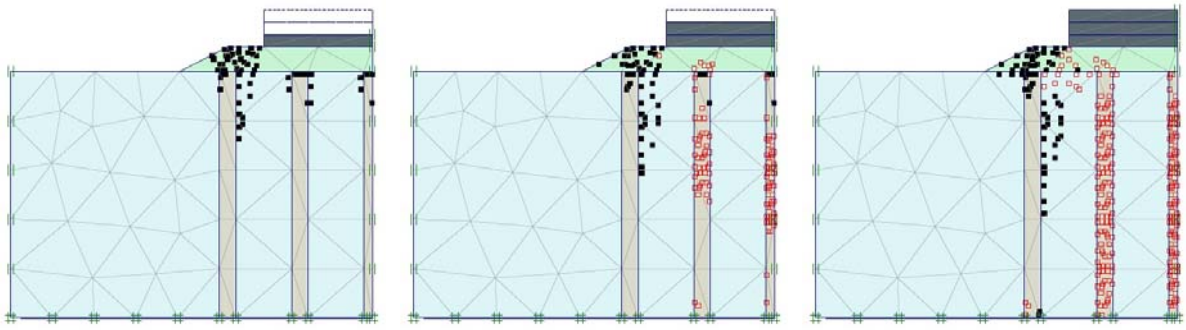
(a) 1단계 하중 (b) 2단계 하중 (c) 3단계 하중

<그림 3.5.67> 하중재하에 따른 모형지반의 유효응력 변화(치환율 10%)



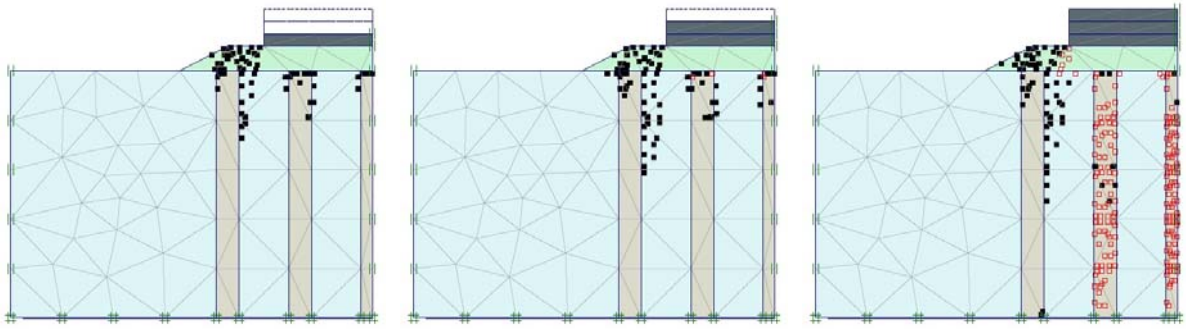
(a) 1단계 하중 (b) 2단계 하중 (c) 3단계 하중

<그림 3.5.68> 하중재하에 따른 모형지반의 유효응력 변화(치환율 25%)



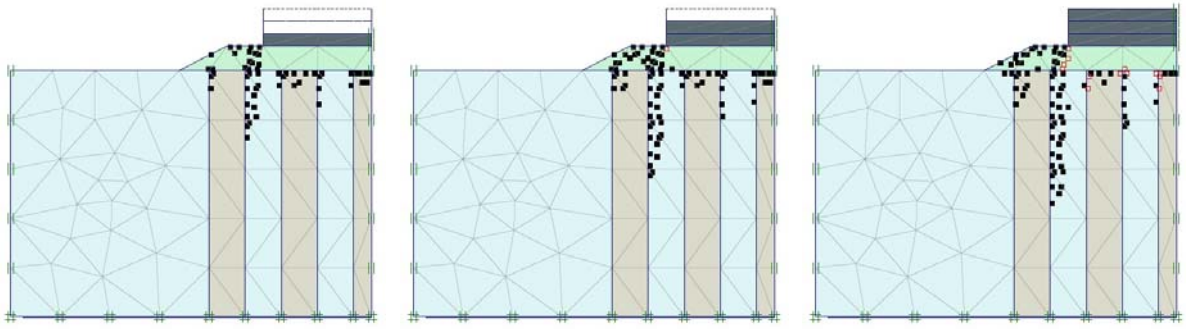
(a) 1단계 하중 (b) 2단계 하중 (c) 3단계 하중

<그림 3.5.69> 하중재하에 따른 모형지반의 국소안전율 변화(치환율 5%)



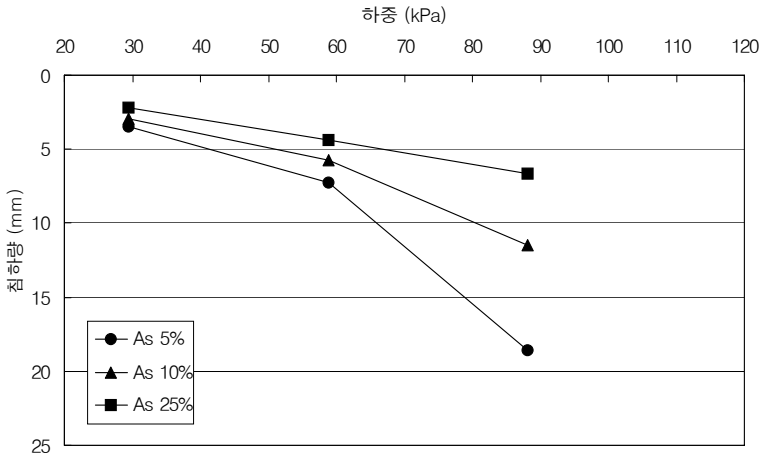
(a) 1단계 하중 (b) 2단계 하중 (c) 3단계 하중

<그림 3.5.70> 하중재하에 따른 모형지반의 국소안전율 변화(치환율 10%)

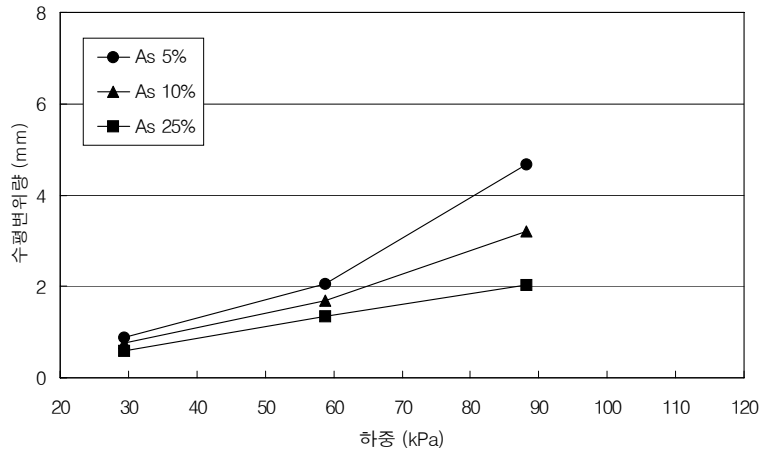


(a) 1단계 하중 (b) 2단계 하중 (c) 3단계 하중

<그림 3.5.71> 하중재하에 따른 모형지반의 국소안전율 변화(치환율 25%)



<그림 3.5.72> 하중 증가에 따른 모형지반 침하량



<그림 3.5.73> 하중 증가에 따른 모형지반 최대 수평변위량

<그림 3.5.72>는 모델지반의 재하위치 중심에서의 하중 증가에 따른 지표면 침하량의 변화를 치환율별로 나타낸 것이다. 재하하중이 증가할수록 모형지반의 침하가 증가하고 있으며 이러한 현상은 치환율이 낮을수록 현저히 나타남을 알 수 있다. 특히 치환율이 5%인 경우에는 상재하중이 약 60kPa 이상일 때 급격한 침하량의 증가현상이 나타나고 있다. 본 수치해석에서의 최대 수평 변위는 모델 지반 중 가장 바깥 부분에 설치된 말뚝부에 인접하는 점토부의 상단에서 발생하였다. <그림 3.5.73>은 모델지반의 하중 증가에 따른 최대 수평변위량의 변화를 치환율별로 나타낸 것이다. 재하하중이 증가할수록 모형지반의 변형이 급격히 발생되고 있음을 알 수 있으며 치환율이 증가할수록 재하하중 증가에 따른 원지반의 측방유동량이 현저히 저감됨을 알 수 있다.

나. 모형실험에 대한 수치해석 방법 및 모델링

(1) 수치해석방법

본 연구의 수치해석에서는 유한요소해석 프로그램인 Midas GTS(ver 2.5.1)를 사용하였으며 초연약지반 및 표층 보강재의 변형거동을 파악하기 위해 실내 모형실험에 기초한 3단계의 수치해석을 실시하였다. 1단계 수치해석에서는 무보강 실내모형실험을 통한 하중-변위 관계와 수치해석의 결과를 비교, 검토하여 초연약지반의 적합한 물성치를 결정하였다. 수치해석 2단계에서는 1단계에서 결정한 초연약지반의 모델링에 추가하여 표층보강재를 모델링하였다. 마지막으로 3단계에서는 2단계의 수치해석 모델에 RAPP 말뚝을 모델하여 표층보강재에 대한 수치해석 모델과 비교를 통하여 실내실험과의 거동을 비교하였다.

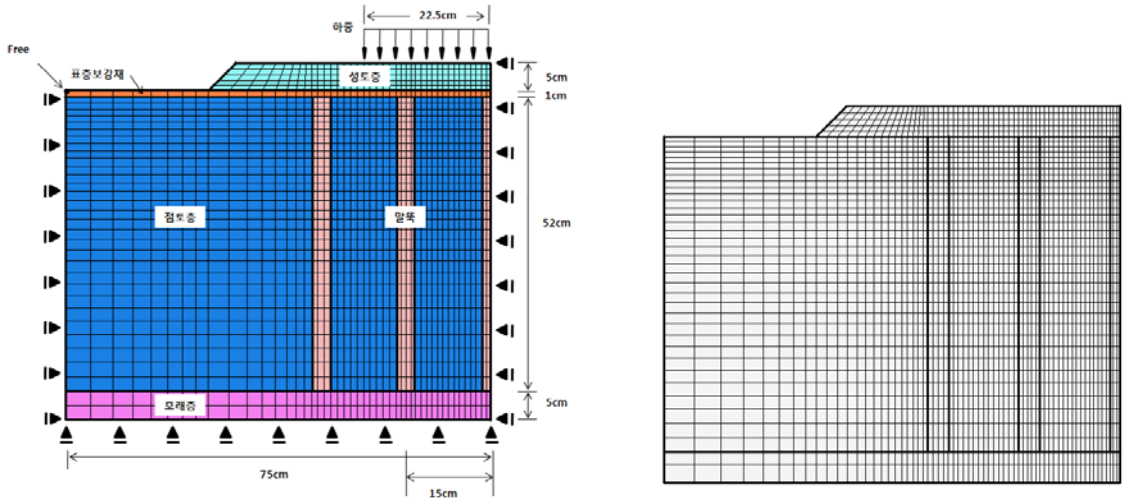
(2) 수치해석 모델

(가) 경계 및 배수조건

양단면 대칭을 해석하여 반단면을 해석하였다. 수치해석 모델은 RAPP 말뚝을 배수경계로 처리하지 않고 지반과 투수계수의 차이에 의한 압밀 해석을 수행하였으며 시간에 따른 압밀 침하량을 분석하였다. 점토층 상·하면으로 배수가 이루어지는 양면배수조건을 모사하였으며 점토층 상면은 지하수위 Nodal Head를 가하여 과잉간극수압이 발생하지 않도록 지정해 주었습니다. 수치해석모델에서는 실내모형실험에서 보강재의 양단부를 자유롭게하여 실험한 것을 모사하기 위하여 보강재의 좌측면을 수직 및 수평 변위를 자유롭게 하였으며 우측면은 수직 및 수평변위를 고정하여 해석하였다.

(나) 지반 상태

실내 시험과 같은 상태로 해석하기 위해 지반은 예비압밀이 종료된 초연약지반의 점토층과 표층처리지반인 모래층 가시설도로인 성토층을 표준사로 사용하여 모델링 하였다.



(a) 수치해석 모델 (b) 수치해석 메쉬

<그림 3.5.74> 수치해석 모델 및 메쉬

(3) 재료의 모델화

(가) 파라미터 재료

한계상태 이론은 영국 캠브리지 대학의 연구진에 의해 제안되었다. 점성토를 계속 전단하게 되면 응력의 변화나 체적의 변화가 없는데도 무한한 변위가 발생하는 상태에 이르게 된다. 이 상태를 한계상태라 정의하고 이것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$q=Mp \quad \text{(식 3.5.5)}$$

$$dp = dq = dev = 0 \quad \text{(식 3.5.6)}$$

Cam-Clay 이론의 예측치들은 변형률을 과대평가하고 dilatancy ratio가 유한한 값을 갖는 모순점을 지니고 있어 실제의 실험 결과와 정확히 일치하지 않는다. 본 수치해석에서는 초연약지반의 비배수 상태에서의 단기 변형 거동을 확인하기 M.C.C모델을 사용하였다.

말뚝의 경우 순환골재 품질기준 제시 실험에서 최적의 효과를 나타낸 물-시멘트비가 30%이고 시멘트 페이스트-골재비가 24%의 배합비에서 나타난 투수계수를 적용하였다.

표층 보강재로 사용된 geotextile에 대한 해석모델은 표층처리공법으로 개량된 초연약 지반의 침하거동에 미치는 영향인자분석(2008년 12월, 유승경)의 일반적인 geogrid 요소를 적용하여 사용하였다. 본 수치해석에서는 표층보강재를 소정의 두께를 가진 유한요소로 가정하고 elastic 모델을 구성모델로 적용하였다.

<표 3.5.7> 재료별 토질 역학적 특성

종 류	구성모델	탄성계수 (KN/㎡)	프아송비 (KN/㎡)	단위중량 (KN/㎡)	점착력 (KN/㎡)	내부마찰각 (KN/㎡)	투수계수 (m/sec)
점 토	M.C.C	4100	0.38	15.38	20	0	5.3E-07
모 래	Mohr Coulomb	34500	0.3	16.17	0	35	0.006
말 뚝	Elastic	78400	0.27	20			8.9E-03
보강재	Elastic	80000	0.1	17			

<표 3.5.8> 해석사용 파라메타

종 류	구성모델	OCR	Lanmda	K	M	Γ
점 토	M.C.C	1	0.4166	0.056	1.15	4

<표 3.5.9> 점토의 물리적 특성

G_s	C_c	w	S	e_0
2.70	0.87	80%	100%	2.16

<표 3.5.10> 모래의 물리적 특성

G_s	e_{max}	e_{min}	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_g
2.64	0.87	0.58	0.17	0.30	0.63	3.71	0.84

(나) 수치해석 조건

본 수치해석에서는 초연약지반의 비배수 상태에서의 단기 변형 거동을 확인하기 M.C.C모델을 사용하였다.

말뚝의 경우 순환골재 품질기준 제시 실험에서 최적의 효과를 나타낸 물-시멘트비가 30%이고 시멘트 페이스트-골재비가 24%의 배합비에서 나타난 투수계수를 적용하였다.

표층 보강재로 사용된 geotextile에 대한 해석모델은 표층처리공법으로 개량된 초연약지반의 침하거동에 미치는 영향인자분석(2008년 12월, 유승경)의 일반적인 geogrid 요소를 적용하여 사용하였다.

본 수치해석에서는 표층보강재를 소정의 두께를 가진 유한요소로 가정하고 elastic 모델을 구성모델로 적용하였다.

<표 3.5.11> 실험 케이스 하중 조건

1단계 하중	2단계 하중	3단계 하중
39.2 (KPa)	68.6 (KPa)	98.0 (KPa)

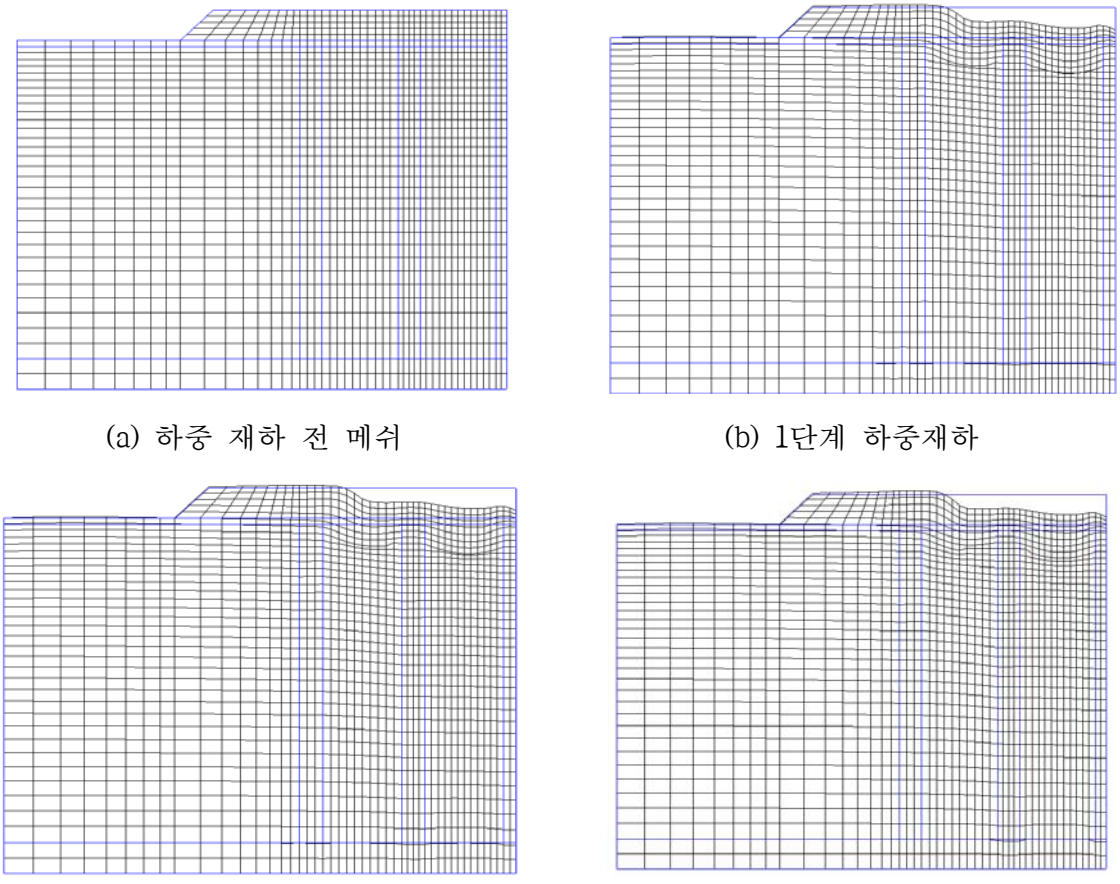
다. 모형실험에 대한 수치해석 결과

(1) 모델지반의 변위 분포

(가) 치환율 5%

치환율 5%에 대한 수치해석 결과는 아래 그림과 같이 나타났다.

1단계 하중재하시 대부분의 변위가 발생하였으며, 점토지반의 응력이 말뚝부로 전이되면서 아칭효과에 의한 침하저감 효과를 확인할 수 있다.



(a) 하중 재하 전 메쉬　(b) 1단계 하중재하

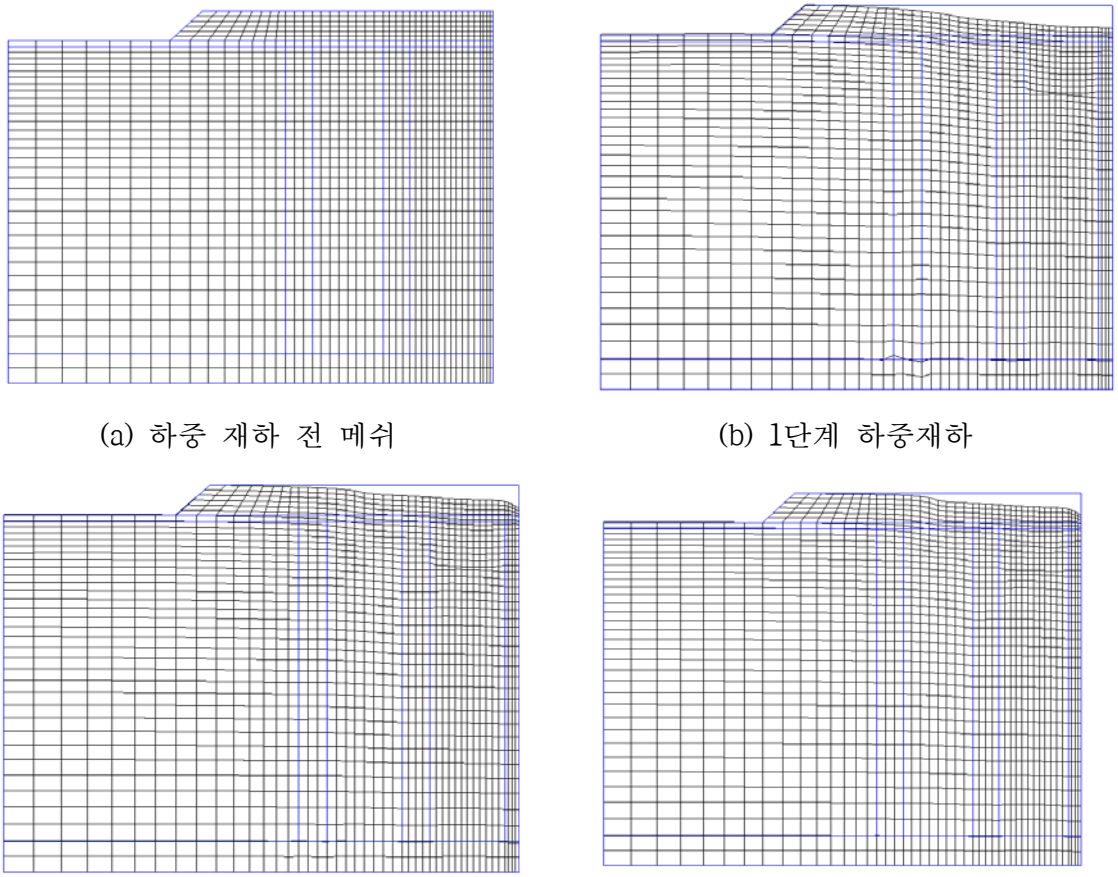
(c) 2단계 하중재하　(d) 3단계 하중재하

<그림 3.5.75> 치환율 5% 변위 분포도

(나) 치환율 7.5%

치환율 7.5%에 대한 수치해석 결과는 아래 그림과 같이 나타났다.

1단계 하중재하시 대부분의 변위가 발생하였으며, 점토지반의 응력이 말뚝부로 전이되면서 아칭효과에 의한 침하저감 효과를 확인할 수 있다.



(a) 하중 재하 전 메쉬 (b) 1단계 하중재하

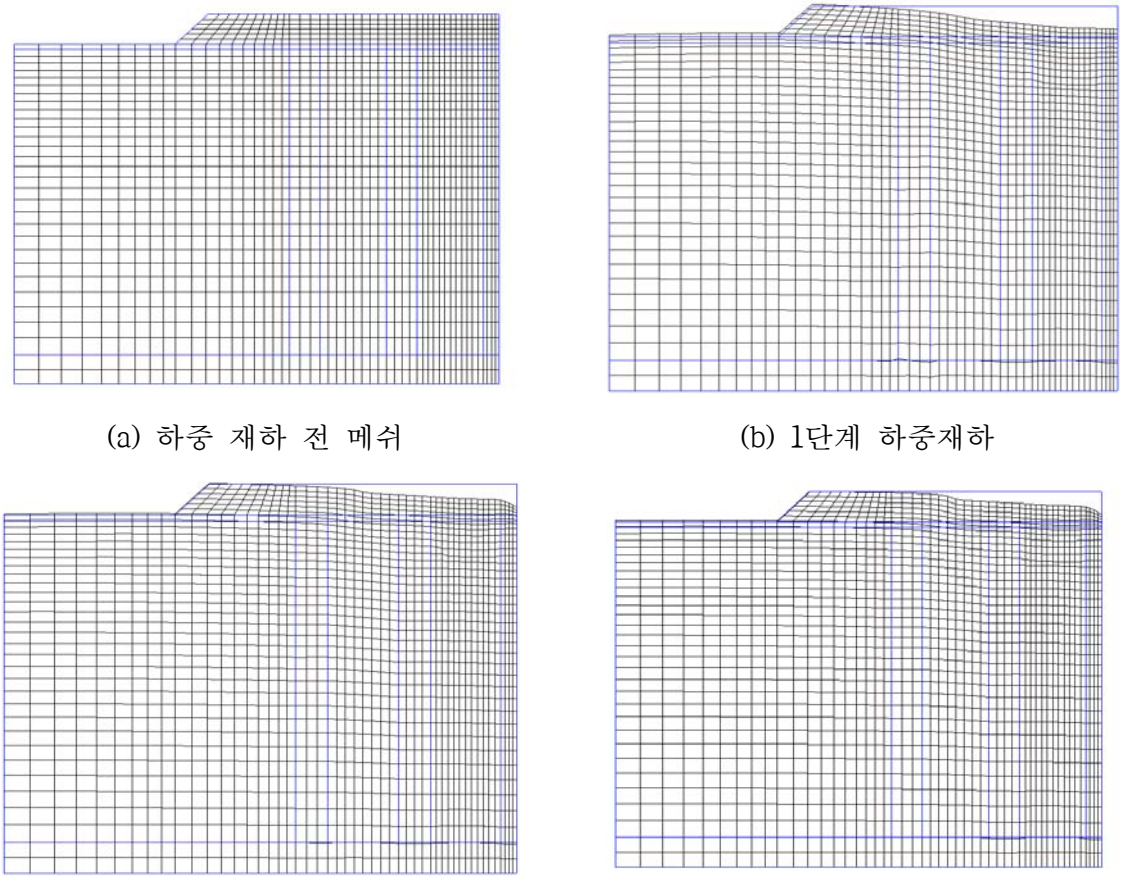
(c) 2단계 하중재하 (d) 3단계 하중재하

<그림 3.5.76> 치환율 7.5% 변위 분포도

(다) 치환율 10%

치환율 10%에 대한 수치해석 결과는 아래 그림과 같이 나타났다.

1단계 하중재하시 대부분의 변위가 발생하였으며, 점토지반의 응력이 말뚝부로 전이되면서 아칭효과에 의한 침하 저감효과를 확인할 수 있다.



(a) 하중 재하 전 메쉬 (b) 1단계 하중재하

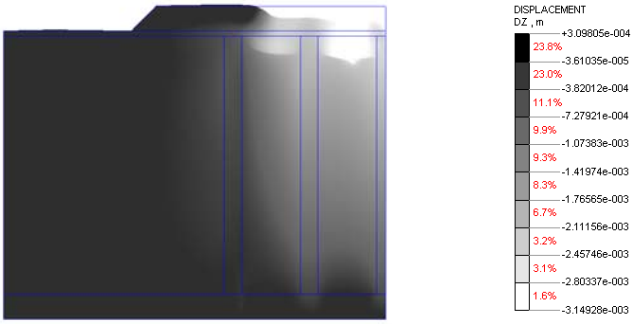
(c) 2단계 하중재하 (d) 3단계 하중재하

<그림 3.5.77> 치환율 10% 변위 분포도

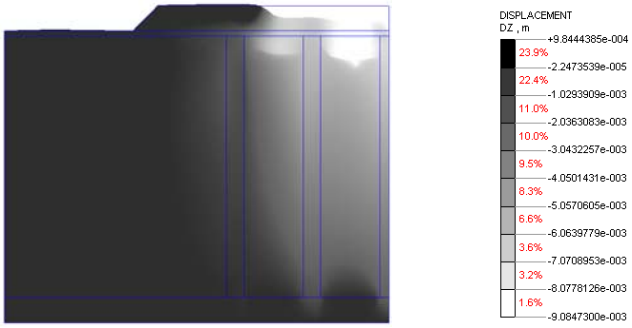
(2) 모델지반의 연직변위 분포

(가) 치환율 5%

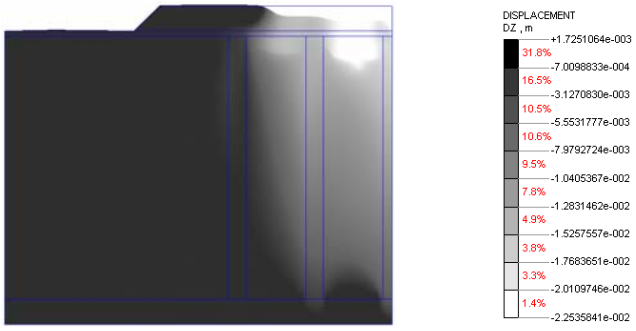
치환율 5%에 대한 수치해석 결과는 아래 그림과 같이 나타났다. 점토지반의 응력이 말뚝부로 전이되면서 아칭효과에 의한 침하저감 효과를 확인할 수 있다.



(a) 1단계 하중재하시



(b) 2단계 하중재하시

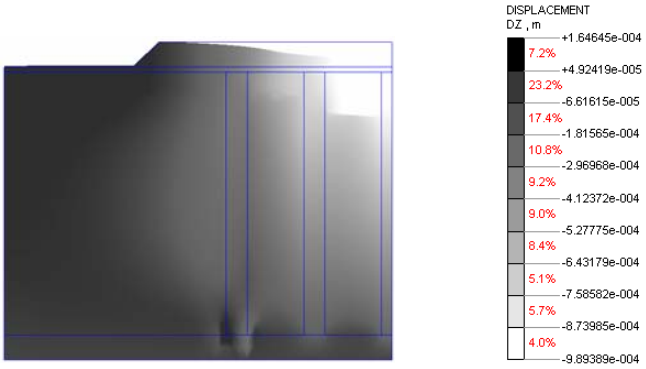


(c) 3단계 하중재하시

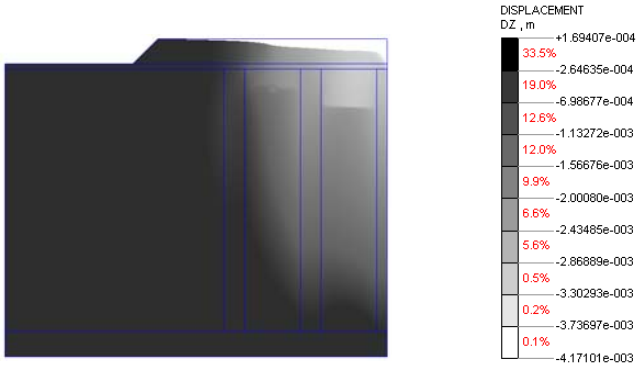
<그림 3.5.78> 하중재하에 따른 변위분포(치환율 5%)

(나) 치환율 7.5%

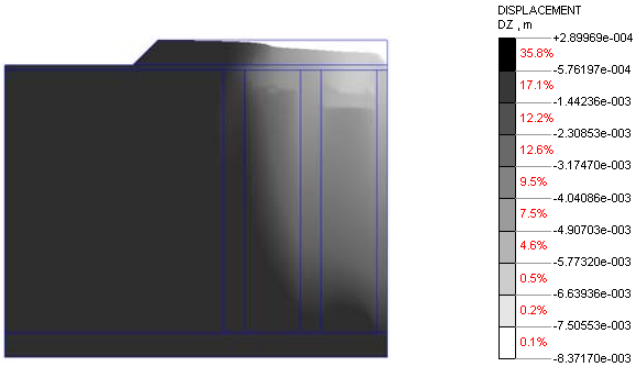
치환율 7.5%에 대한 수치해석 결과는 아래 그림과 같이 나타났다. 점토지반의 응력이 말뚝부로 전이되면서 아칭효과에 의한 침하저감 효과를 확인할 수 있다.



(a) 1단계 하중재하시



(b) 2단계 하중재하시

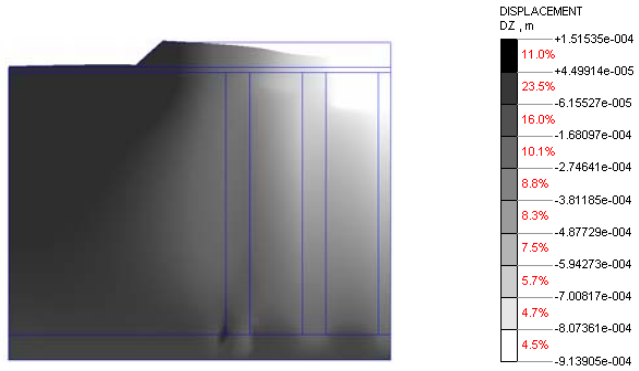


(c) 3단계 하중재하시

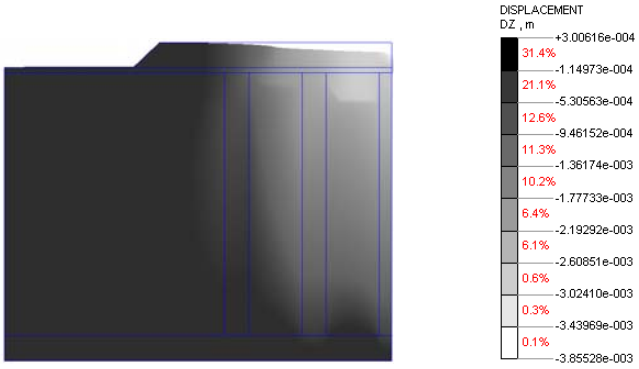
<그림 3.5.79> 하중재하에 따른 변위분포(치환율 7.5%)

(다) 치환율 10%

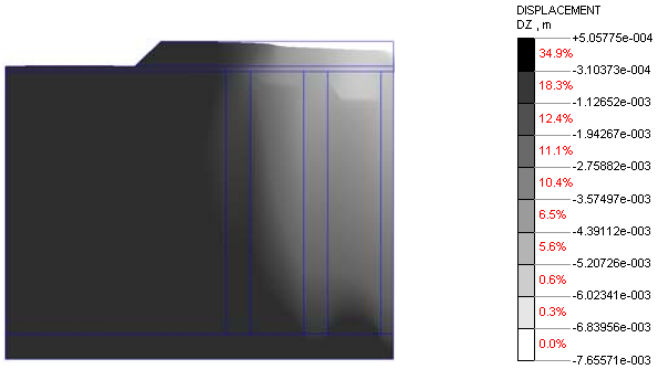
치환율 10%에 대한 수치해석 결과는 아래 그림과 같이 나타났다. 점토지반의 응력이 말뚝부로 전이되면서 아칭효과에 의한 침하저감 효과를 확인할 수 있다.



(a) 1단계 하중재하시



(b) 2단계 하중재하시



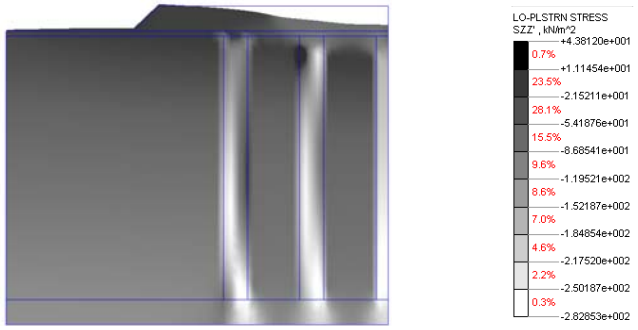
(c) 3단계 하중재하시

<그림 3.5.80> 하중재하에 따른 변위분포(치환율 10%)

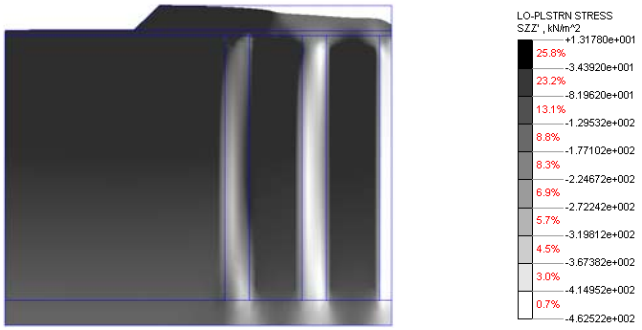
(3) 모델지반의 유효응력 분포

(가) 치환율 5%

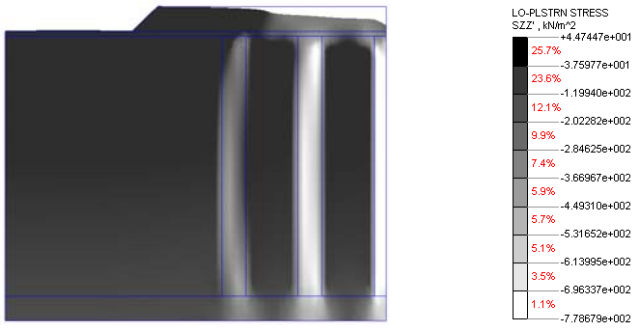
단계별 하중재하시 말뚝으로의 간극수압이 소산되면서 하중증가로 인하여 말뚝주변부의 점토지반에서 유효응력 증가현상이 나타났다.



(a) 1단계 하중재하시



(b) 2단계 하중재하시

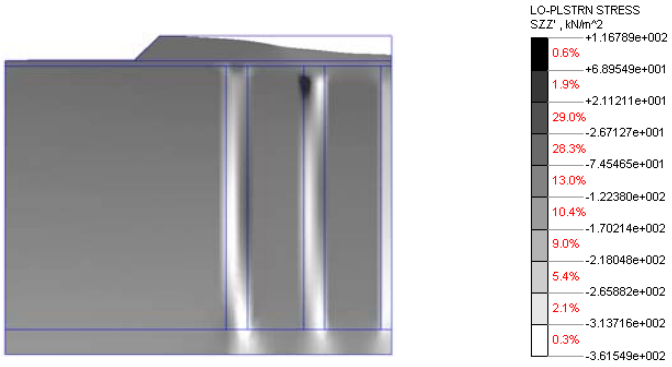


(c) 3단계 하중재하시

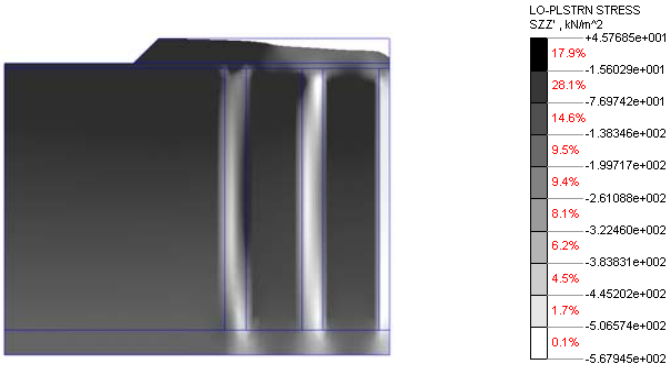
<그림 3.5.81> 하중재하에 따른 유효응력 분포(치환율 5%)

(나) 치환율 7.5%

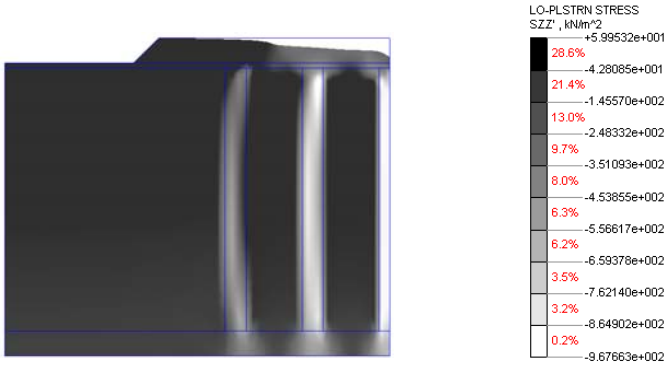
단계별 하중재하시 말뚝으로의 간극수압이 소산되면서 하중증가로 인하여 말뚝주변부의 점토지반에서 유효응력 증가현상이 나타났다.



(a) 1단계 하중재하시



(b) 2단계 하중재하시

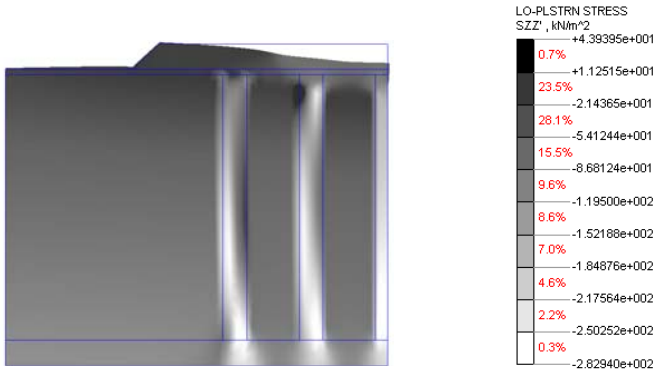


(c) 3단계 하중재하시

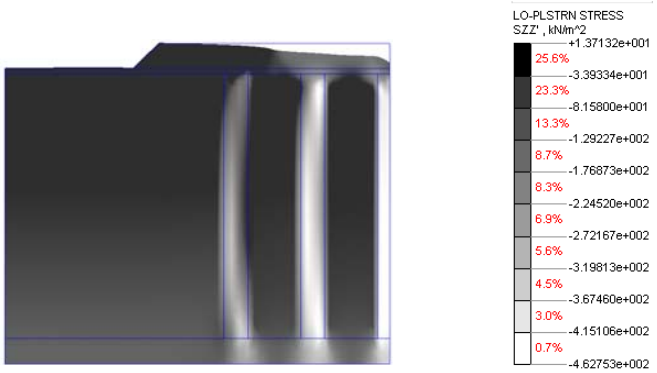
<그림 3.5.82> 하중재하에 따른 유효응력 분포(치환율 7.5%)

(다) 치환율 10%

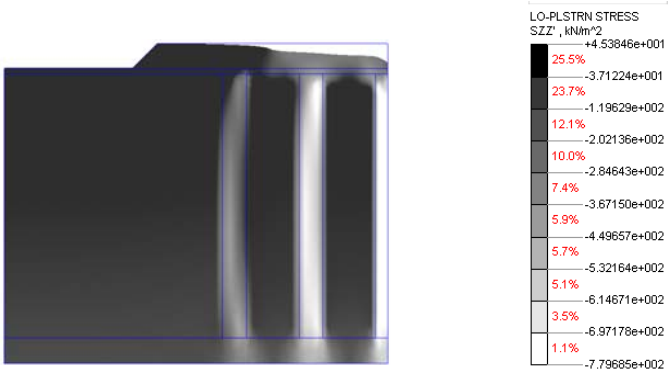
단계별 하중재하시 말뚝으로의 간극수압이 소산되면서 하중증가로 인하여 말뚝주변부의 점토지반에서 유효응력 증가현상이 나타났다.



(a) 1단계 하중재하시



(b) 2단계 하중재하시



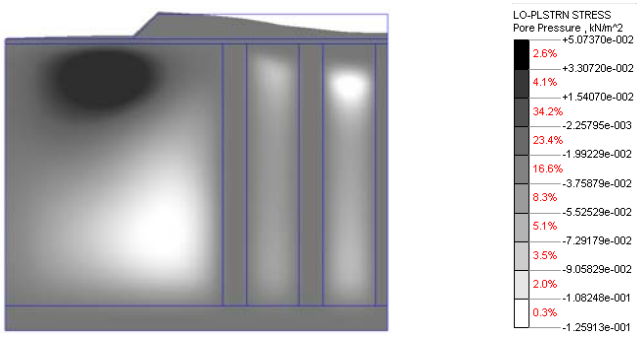
(c) 3단계 하중재하시

<그림 3.5.83> 하중재하에 따른 유효응력 분포(치환율 10%)

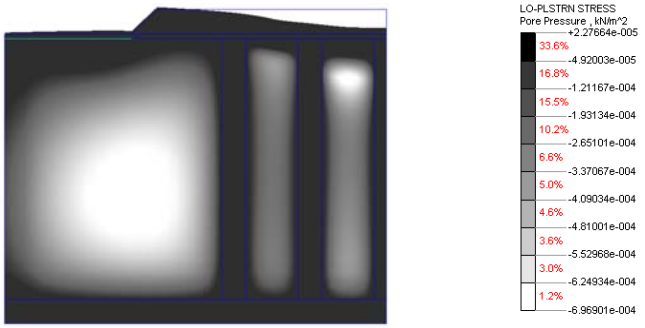
(4) 모델지반의 간극수압 분포

(가) 치환율 5%

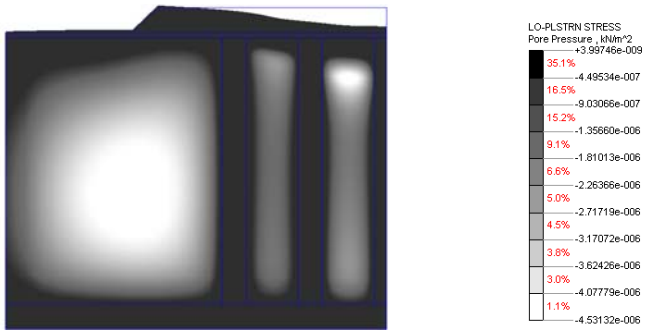
단계별 하중재하시 말뚝으로의 간극수압이 소산되면서 하중증가로 인하여 말뚝주변부의 점토지반에서 간극수압이 감소하는 것으로 나타났다.



(a) 1단계 하중(1분)

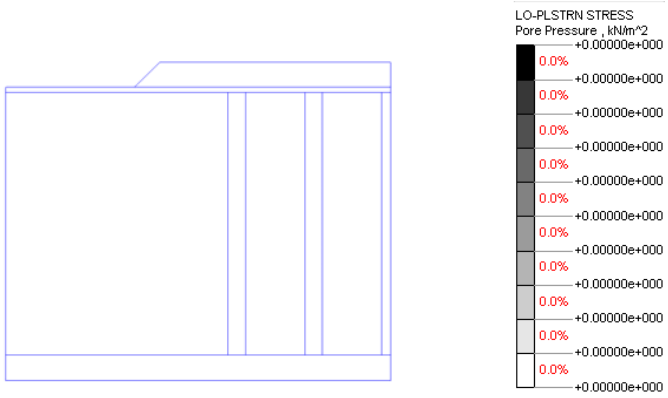


(b) 1단계 하중(1시간 34분)

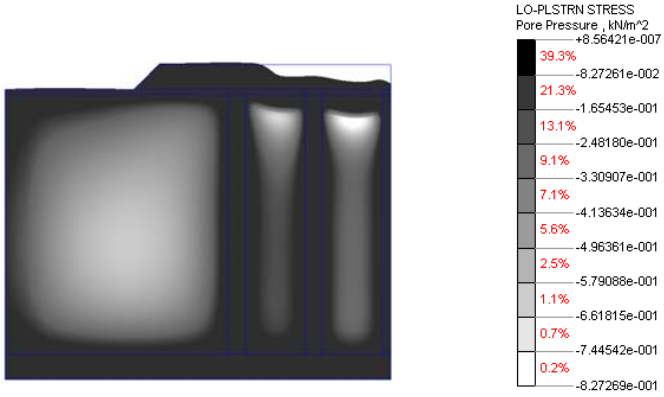


(c) 1단계 하중(2일 14시간 15분)

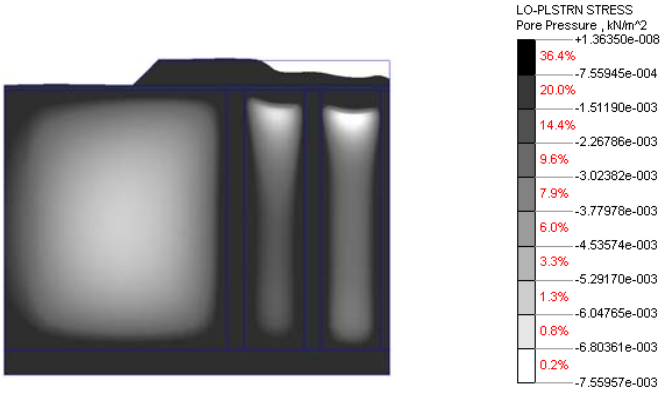
<그림 3.5.84> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 5%)(계속)



(d) 1단계 하중(4일 1시간)

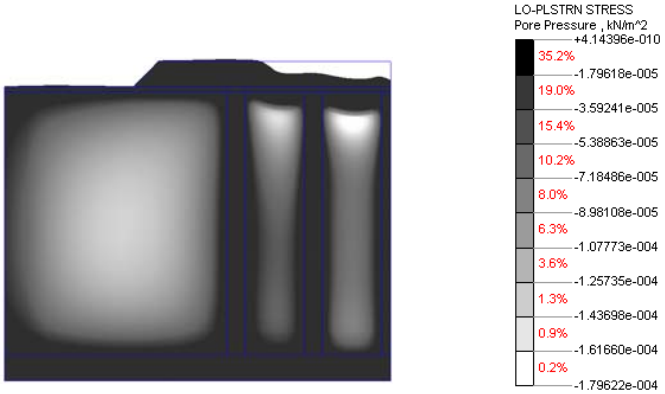


(e) 2단계 하중(1분)

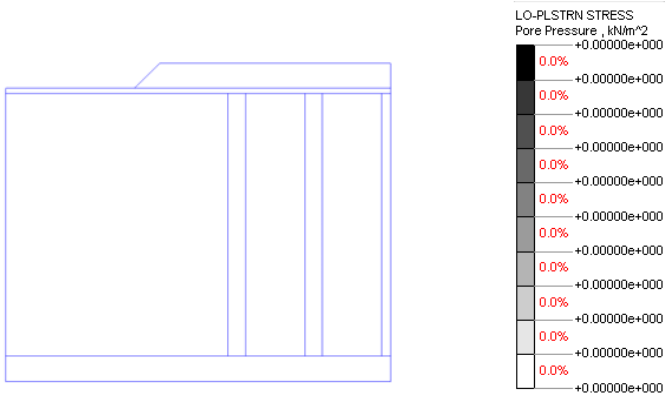


(f) 2단계 하중(1시간 34분)

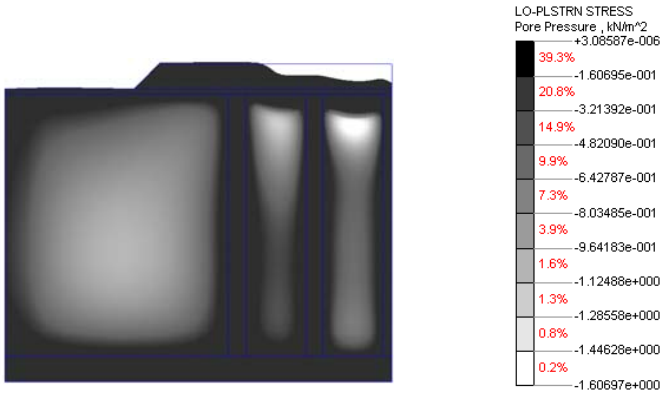
<그림 3.5.84> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 5%)(계속)



(g) 2단계 하중(2일 4시간 15분)

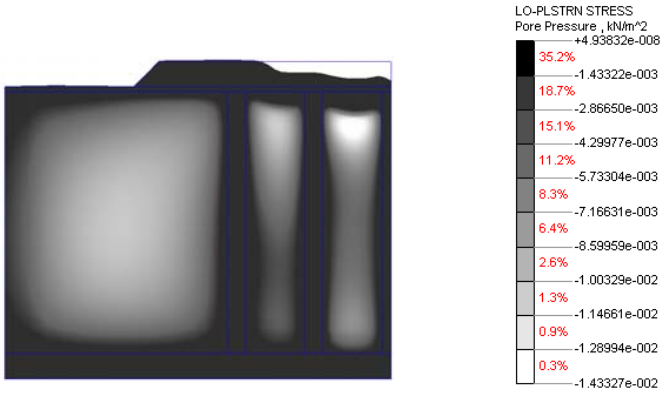


(h) 2단계 하중(4일 1시간)

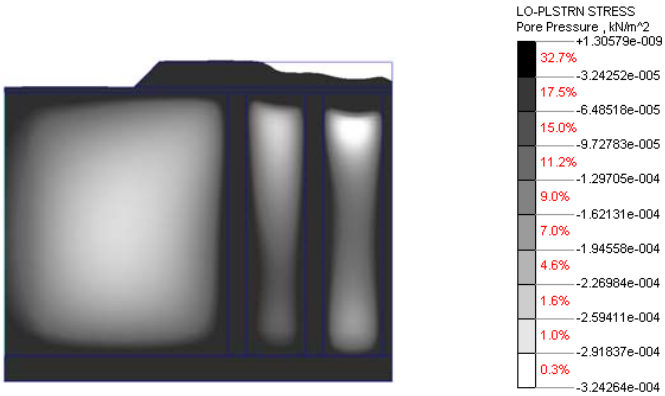


(i) 3단계 하중(1분)

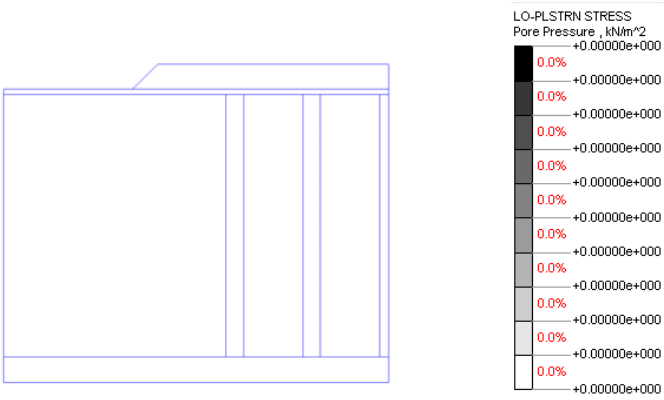
<그림 3.5.84> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 5%)(계속)



(j) 3단계 하중(1시간 34분)



(k) 3단계 하중(2일 14시간 15분)

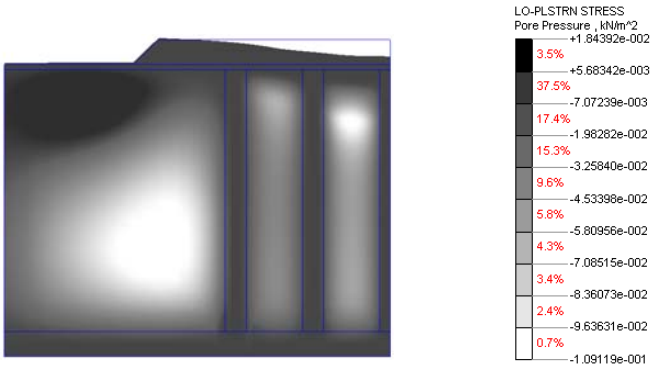


(l) 3단계 하중(4일 1시간)

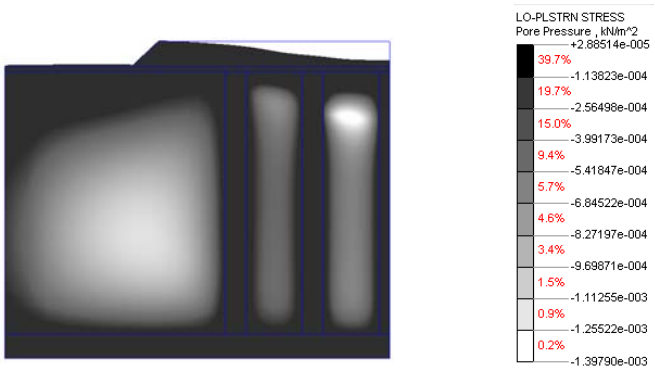
<그림 3.5.84> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 5%)(계속)

(나) 치환율 7.5%

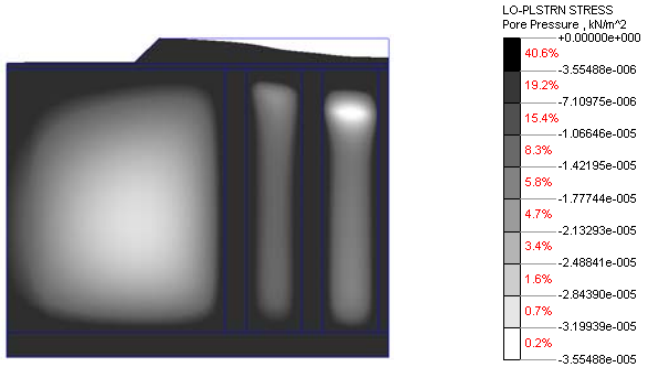
단계별 하중재하시 말뚝으로의 간극수압이 소산되면서 하중증가로 인하여 말뚝주변부의 점토지반에서 간극수압이 감소하는 것으로 나타났다.



(a) 1단계 하중(1분)

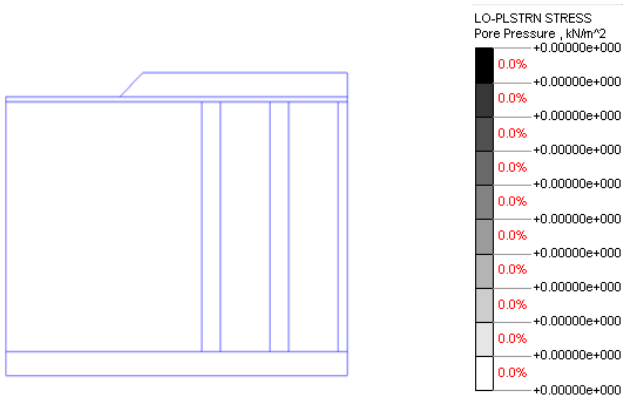


(b) 1단계 하중(1시간 34분)

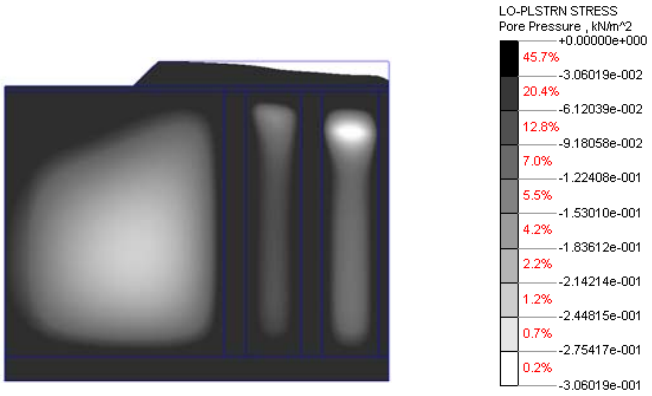


(c) 1단계 하중(2일 14시간 15분)

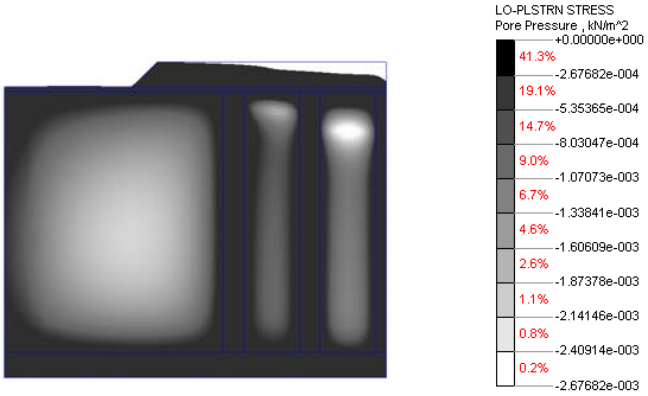
<그림 3.5.85> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 7.5%)(계속)



(d) 1단계 하중(4일 1시간)

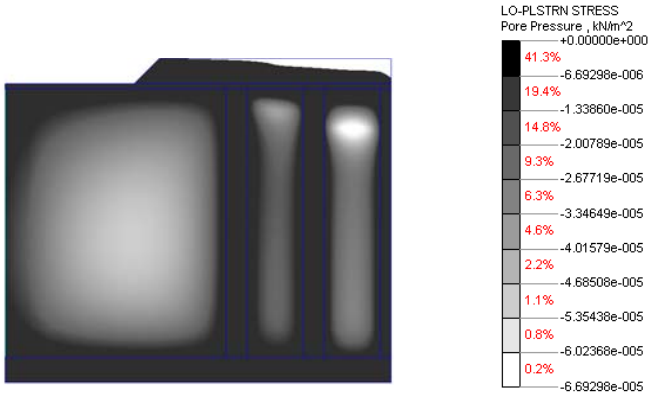


(e) 2단계 하중(1분)

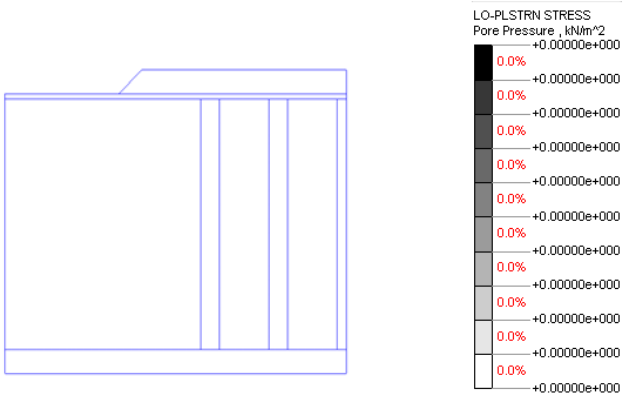


(f) 2단계 하중(1시간 34분)

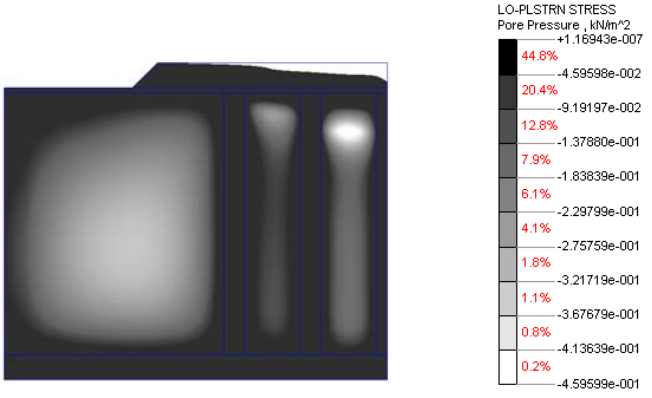
<그림 3.5.85> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 7.5%)(계속)



(g) 2단계 하중(2일 14시간 15분)

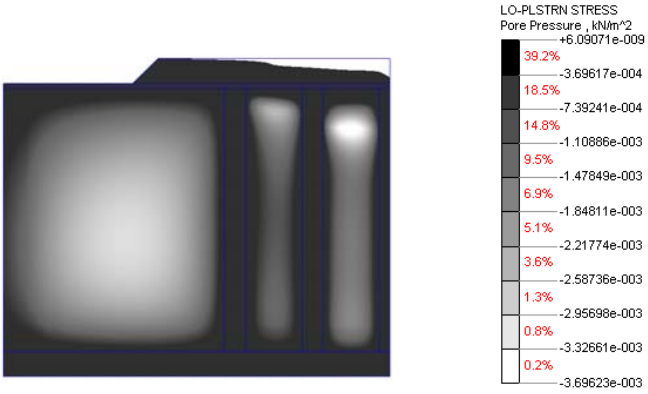


(h) 2단계 하중(4일 1시간)

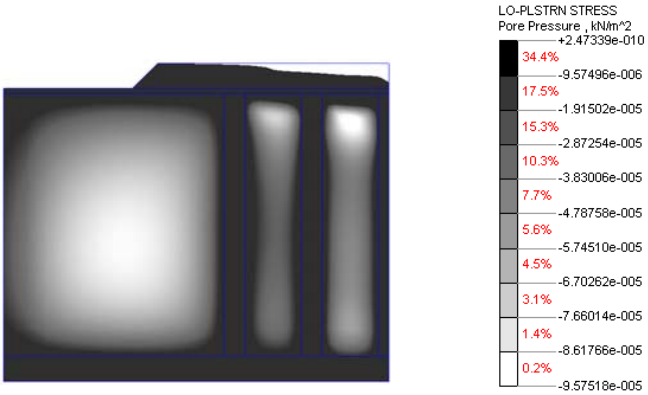


(i) 3단계 하중(1분)

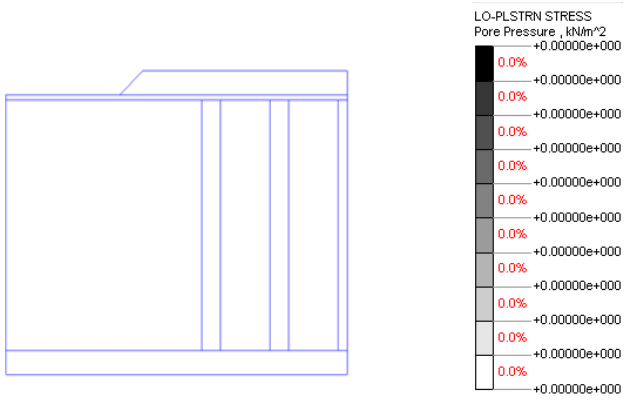
<그림 3.5.85> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 7.5%)(계속)



(j) 3단계 하중(1시간 34분)



(k) 3단계 하중(2일 14시간 15분)

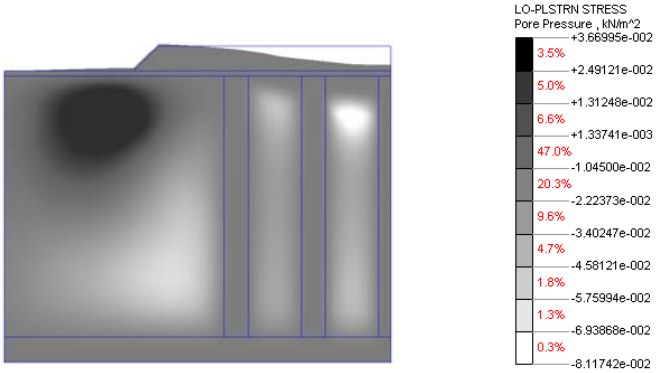


(l) 3단계 하중(4일 1시간)

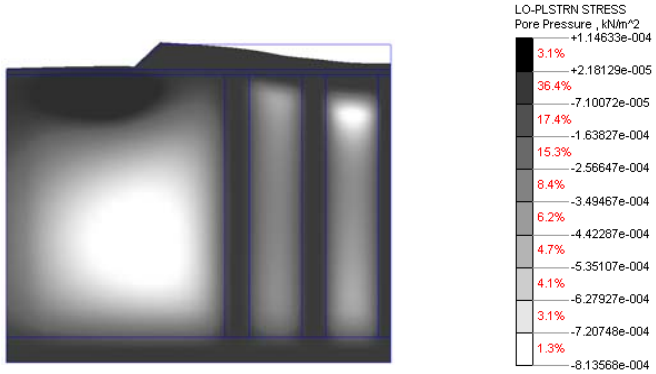
<그림 3.5.85> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 7.5%)(계속)

(다) 치환율 10%

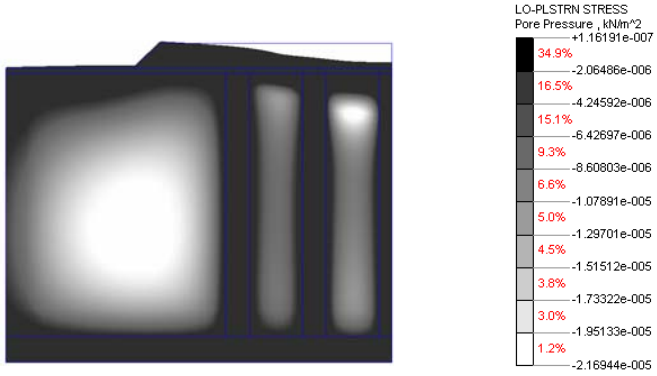
단계별 하중재하시 말뚝으로의 간극수압이 소산되면서 하중증가로 인하여 말뚝주변부의 점토지반에서 간극수압이 감소하는 것으로 나타났다.



(a) 1단계 하중(1분)

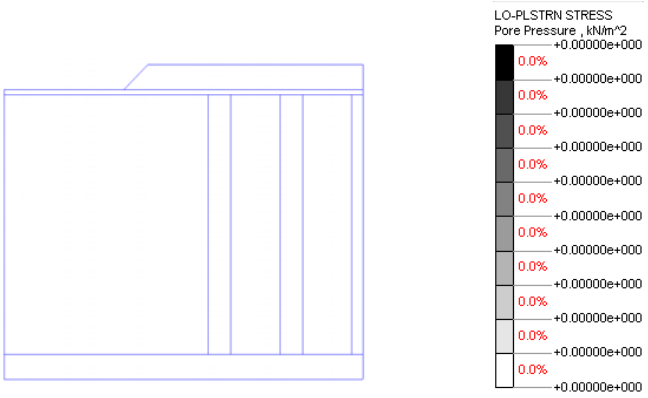


(b) 1단계 하중(1시간 34분)

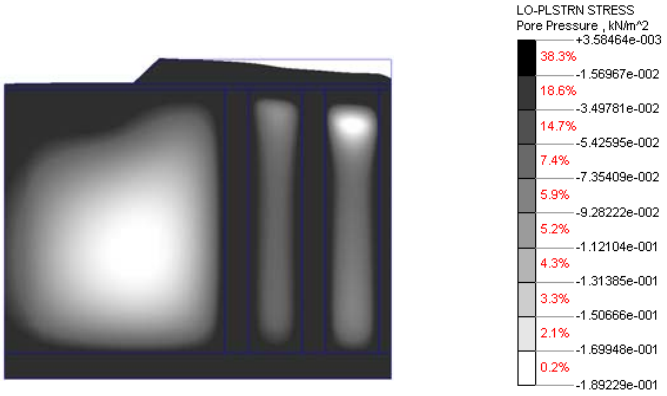


(c) 1단계 하중(2일 14시간 15분)

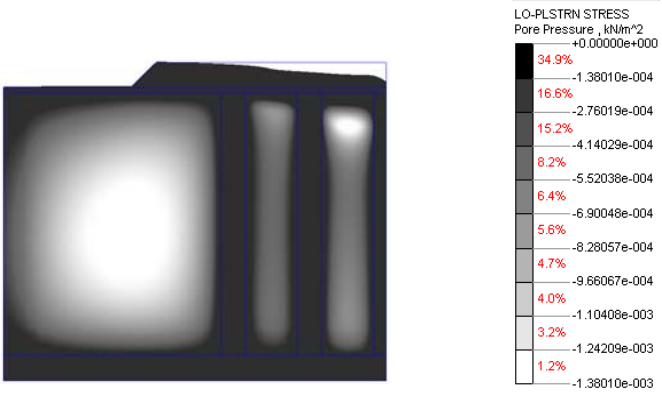
<그림 3.5.86> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 10%)(계속)



(d) 1단계 하중(4일 1시간)

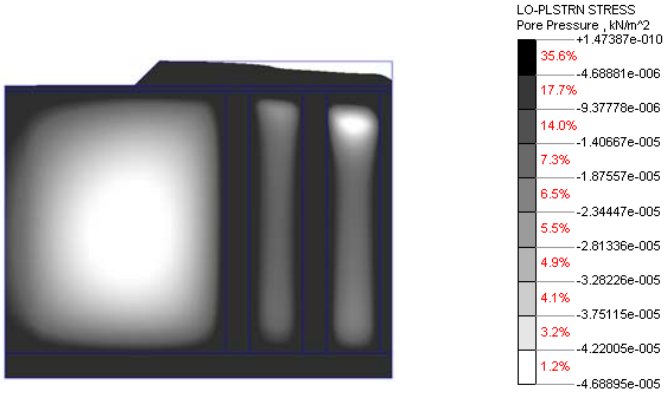


(e) 2단계 하중(1분)

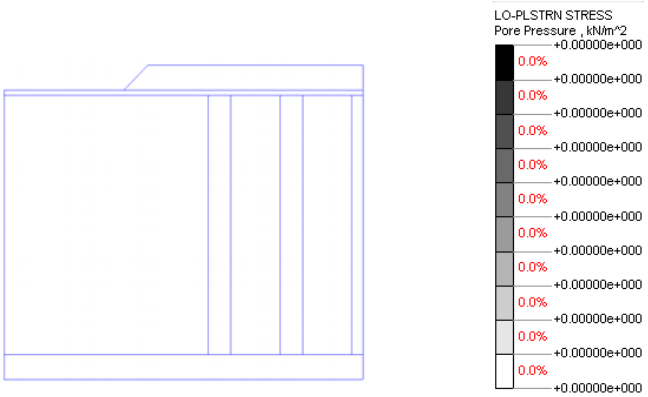


(f) 2단계 하중(1시간 34분)

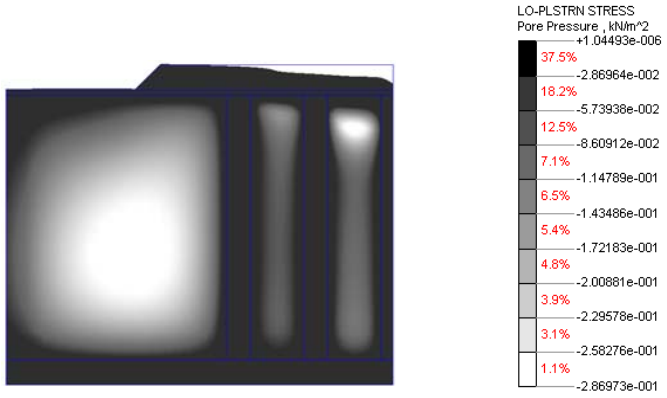
<그림 3.5.86> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 10%)(계속)



(g) 2단계 하중(2일 14시간 15분)

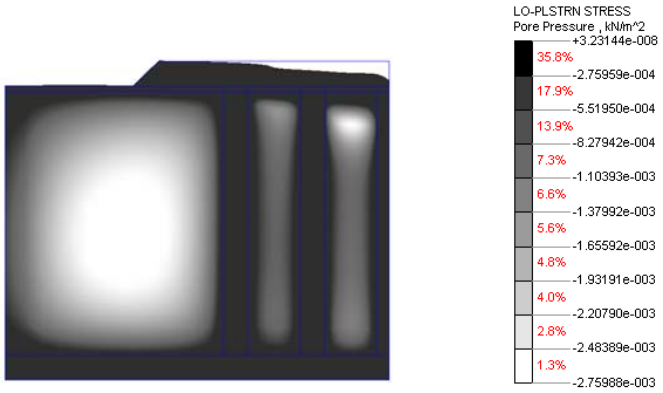


(h) 3단계 하중(4일 1시간)

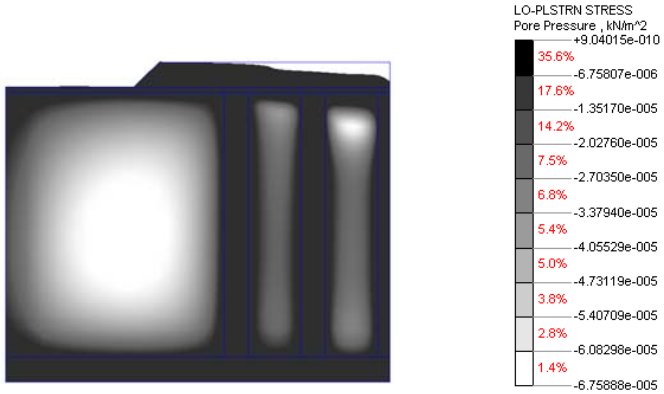


(i) 3단계 하중(1분)

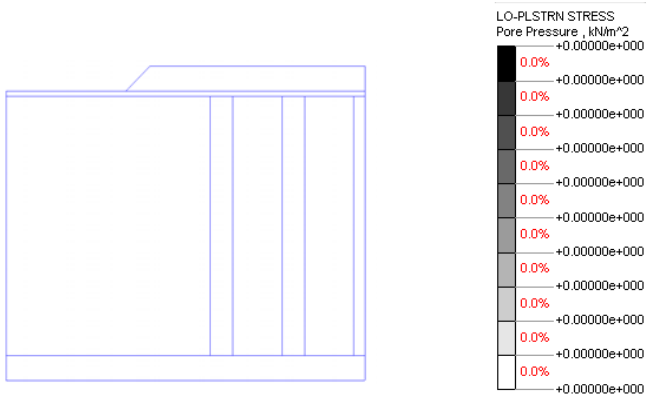
<그림 3.5.86> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 10%)(계속)



(j) 3단계 하중(1시간 34분)



(k) 3단계 하중(2일 14시간 15분)



(l) 3단계 하중(4일 1시간)

<그림 3.5.86> 시간경과에 따른 간극수압 분포(치환율 10%)

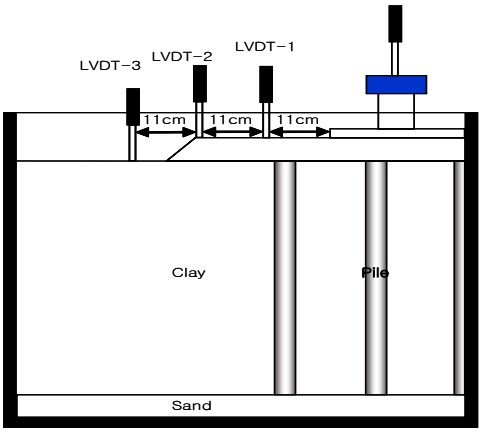
라. 수치해석 결과의 검증

(1) 치환율에 따른 침하량 비교

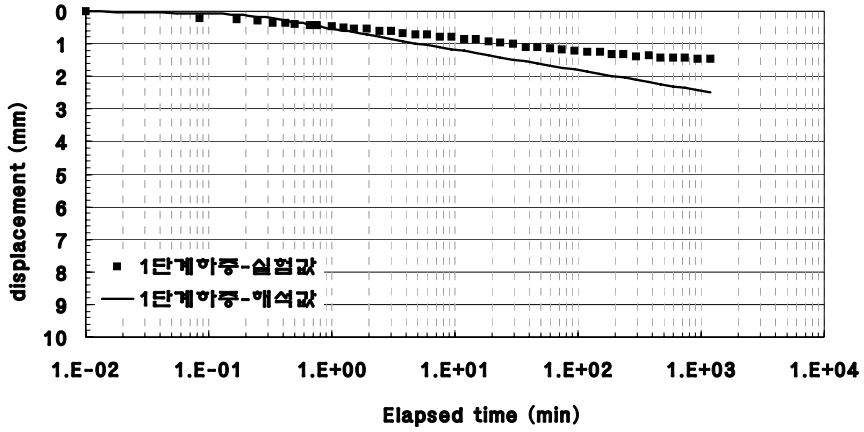
치환율 5%의 경우 비교적 하중이 작은 1단계 하중재하시에는 비교적 침하양상이 비슷하게 나타났으나 2단계 하중재하시에는 실험값이 해석결과보다 작게 나타났다. 이는 모형토조에서 발생할 수 있는 실험적 한계로 인하여 실험값이 적게 나타난 것으로 판단되며, 3단계 하중재하시에는 하중 초기에는 비교적 일치하는 경향을 보였으나 시간경과후 말뚝의 파손으로 인하여 침하가 많이 발생한 것으로 판단된다. 치환율 10%의 경우 치환율 5%의 결과보다 많은 침하가 발생하였으며 각 단계별 실험값이 해석결과와 일치하는 경향을 나타내었다.

(2) 치환율에 따른 융기량 그래프

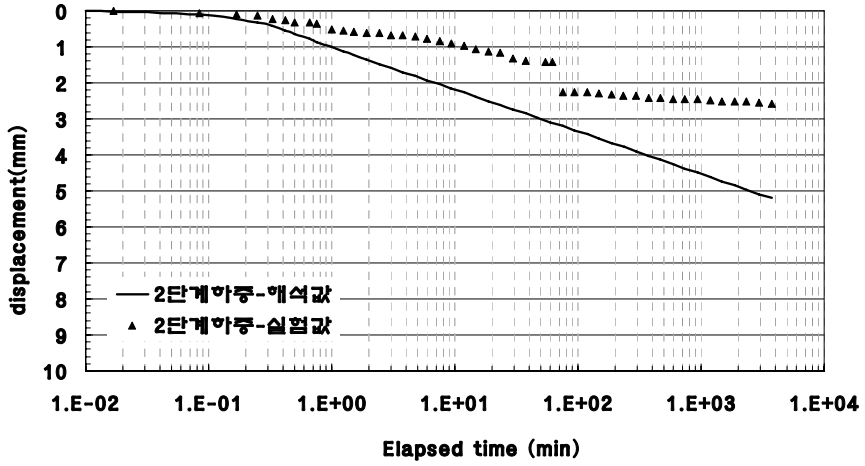
치환율 5%의 경우 LVDT-1, 2, 3의 경우 비슷한 경향을 나타내었으며 1, 2단계 하중재하시 실험결과는 거의 융기가 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 3단계 하중재하시는 일정시간 경과후 급격한 융기가 발생하였다. 이는 모형토조의 점토 다짐시 불균질한 지반형성에 기인한 것으로 판단된다. 치환율 10%의 경우도 LVDT-1, 2, 3의 경우 비슷한 경향을 보였으며, 1단계 하중재하시는 융기가 발생하는 것으로 나타나는 수치해석 결과와 상이하게 침하가 발생하는 것으로 나타났으며, 2, 3단계 하중재하시는 실험결과 융기가 거의 발생하지 않았으며, 이는 수치해석 결과와 상이하게 나타났다.



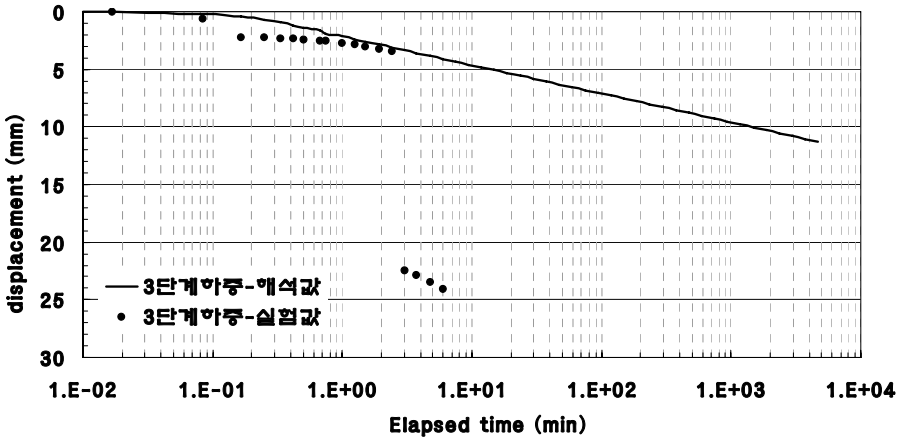
<그림 3.5.87> LVDT 설치 위치



(a) 1단계 하중재하시

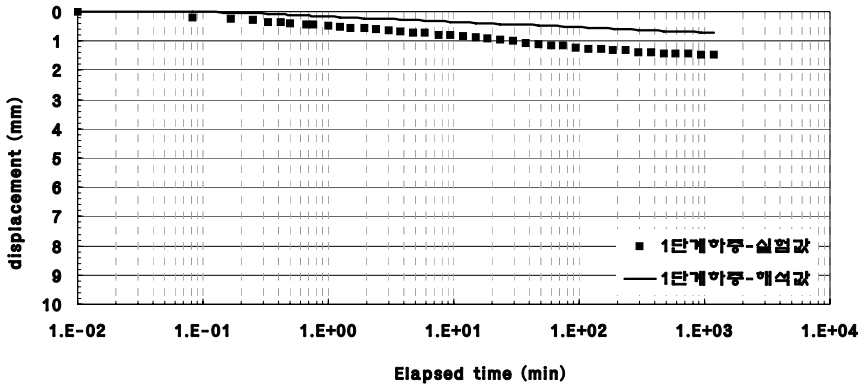


(b) 2단계 하중재하시

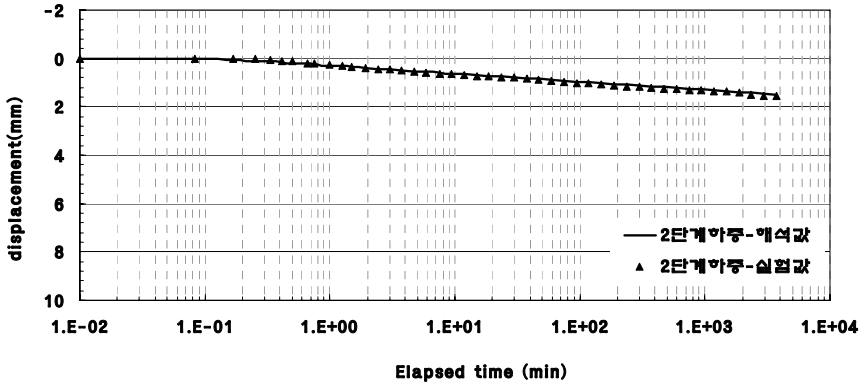


(c) 3단계 하중재하시

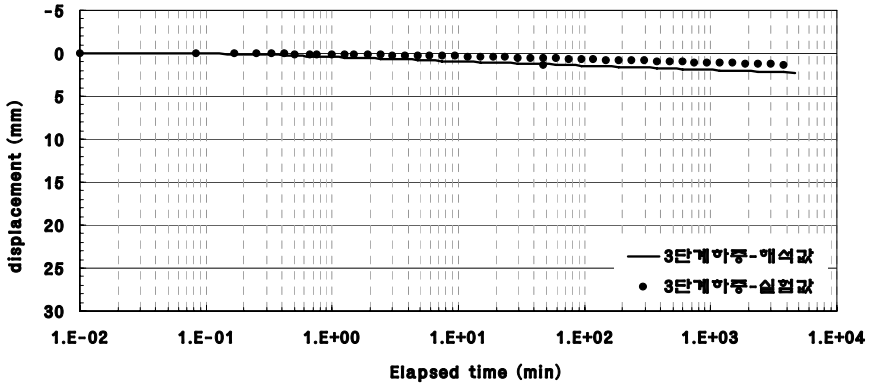
<그림 3.5.88> 치환율 5%에 대한 단계별 하중재하시 침하량 비교



(a) 1단계 하중재하시



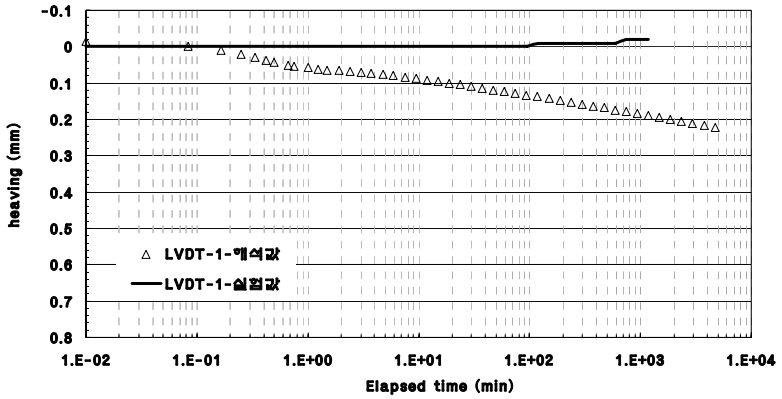
(b) 2단계 하중재하시



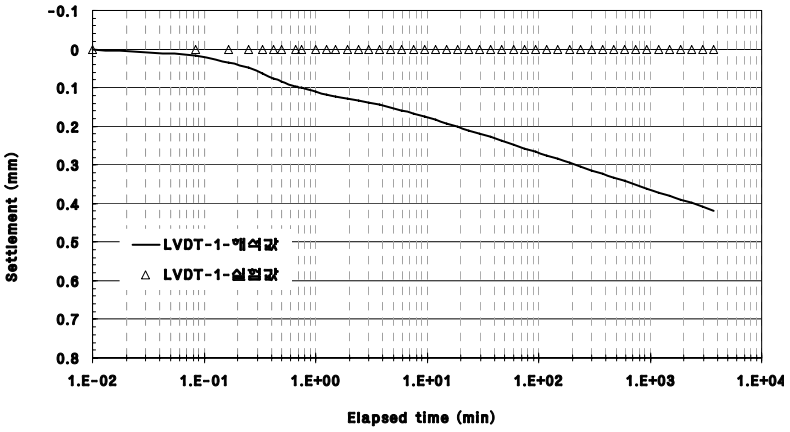
(c) 3단계 하중재하시

<그림 3.5.89> 치환율 10%에 대한 단계별 하중재하시 침하량 비교

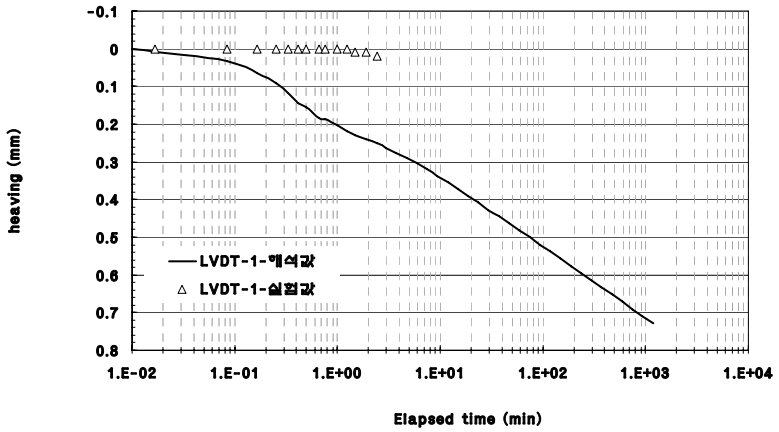
(가) 치환율 5%



(a) 1단계 하중재하시

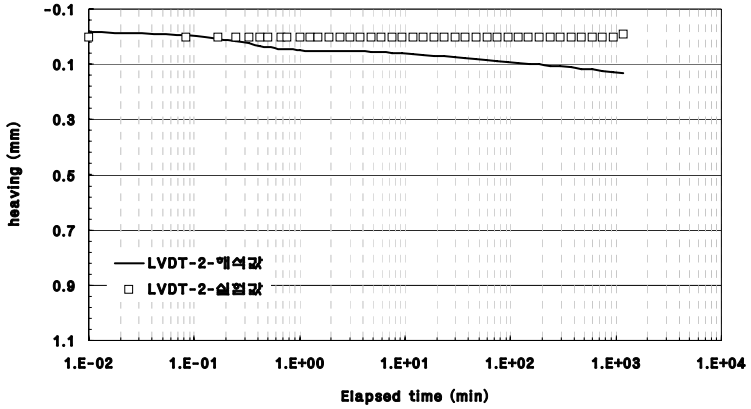


(b) 2단계 하중재하시

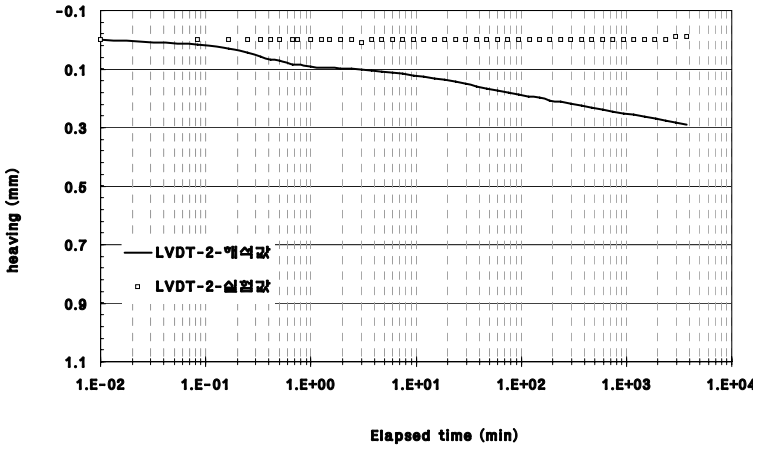


(c) 3단계 하중재하시

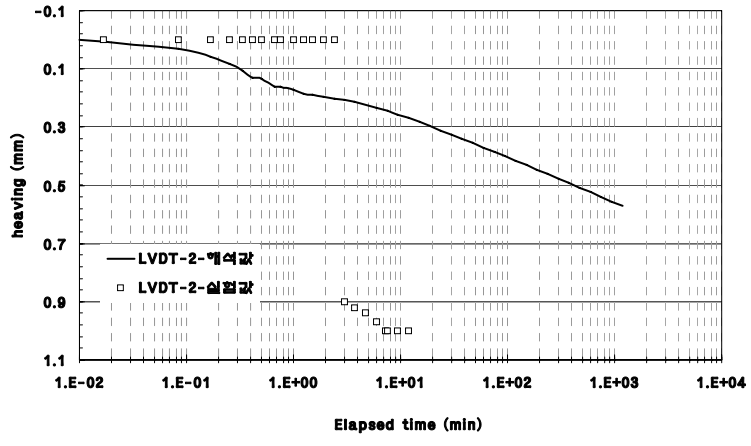
<그림 3.5.90> 하중재하시 융기량 비교(LVDT-1)



(a) 1단계 하중재하시

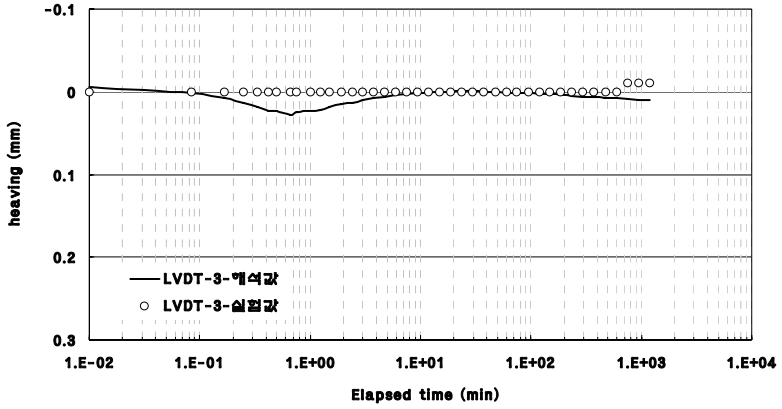


(b) 2단계 하중재하시

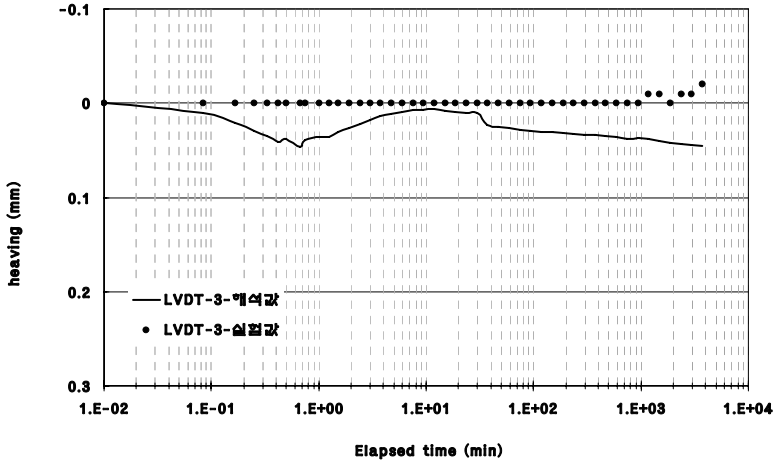


(c) 3단계 하중재하시

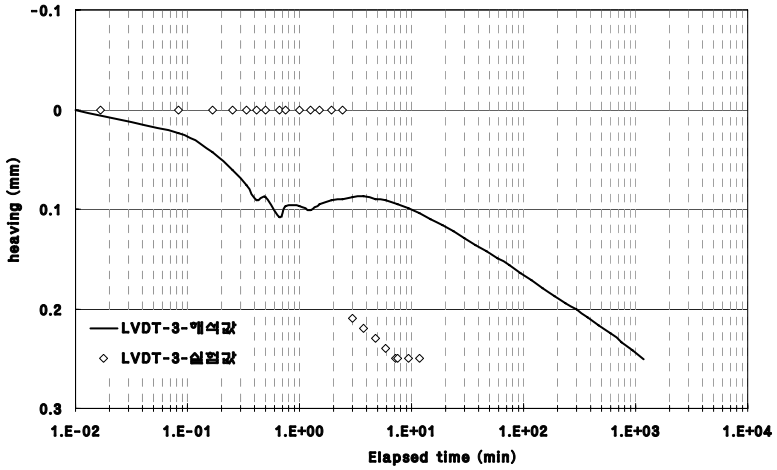
<그림 3.5.91> 하중재하시 융기량 비교(LVDT-2)



(a) 1단계 하중재하시



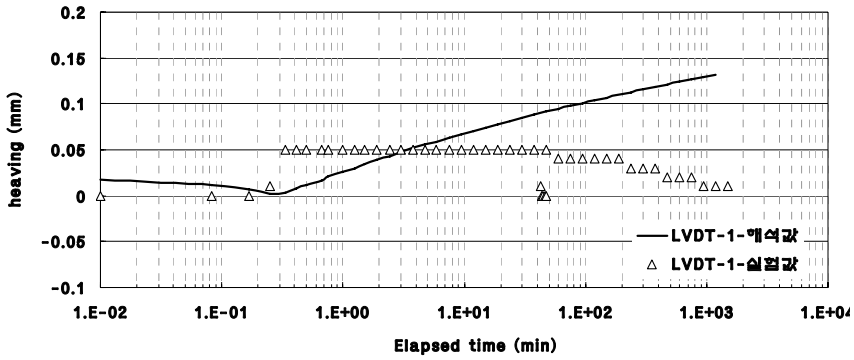
(b) 2단계 하중재하시



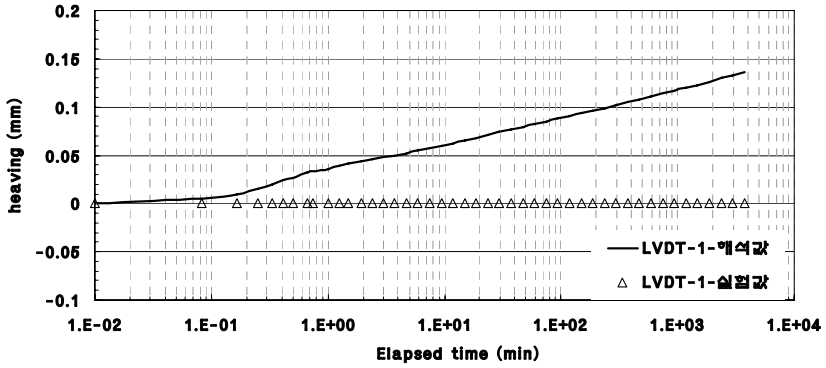
(c) 3단계 하중재하시

<그림 3.5.92> 하중재하시 융기량 비교(LVDT-3)

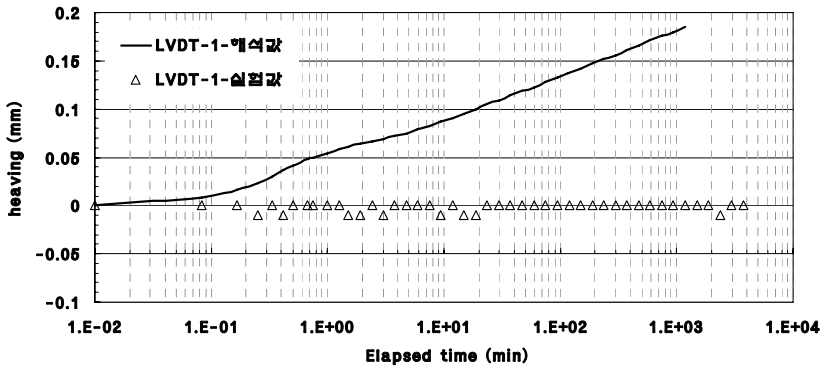
(나) 치환율 10%



(a) 1단계 하중재하시

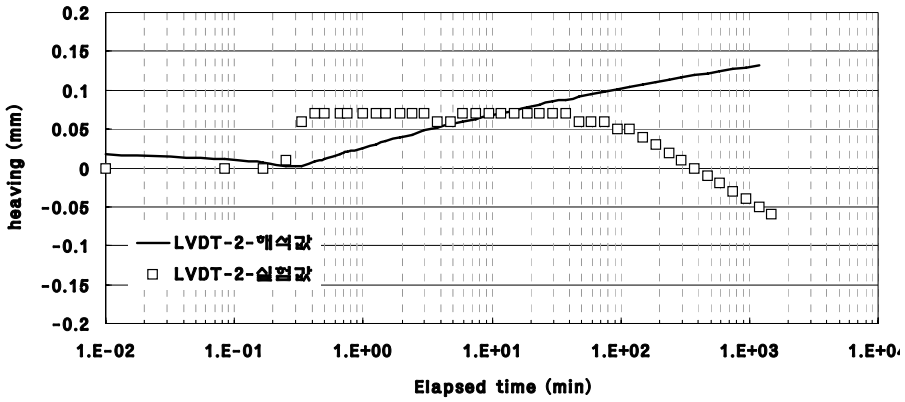


(b) 2단계 하중재하시

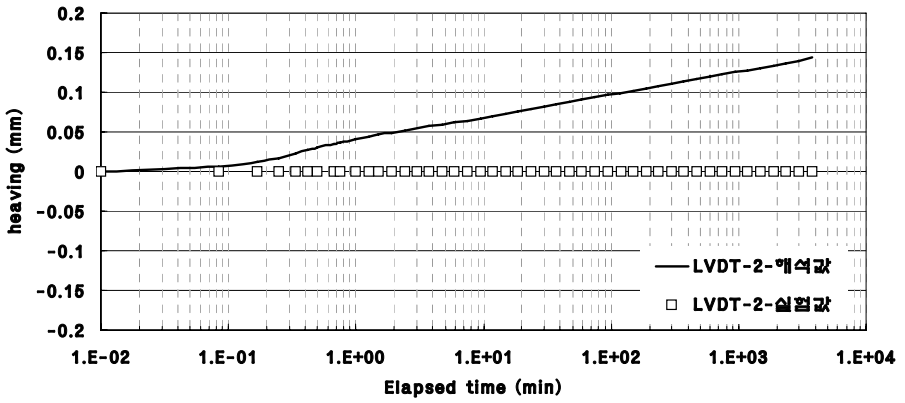


(c) 3단계 하중재하시

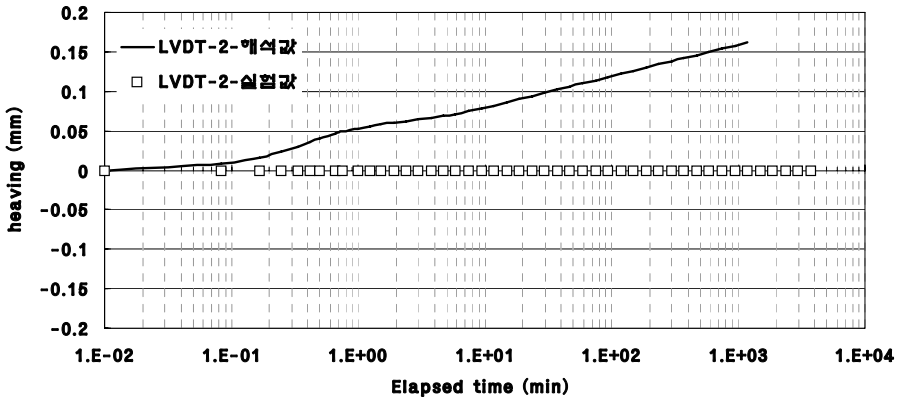
<그림 3.5.93> 하중재하시 융기량 비교(LVDT-1)



(a) 1단계 하중재하시

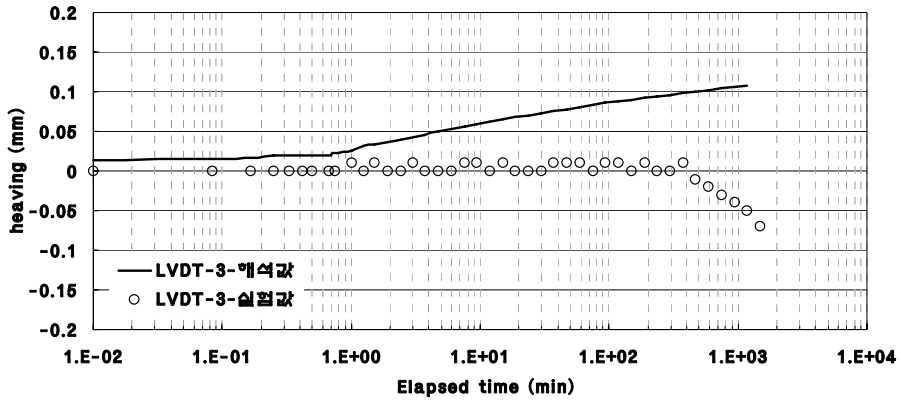


(b) 2단계 하중재하시

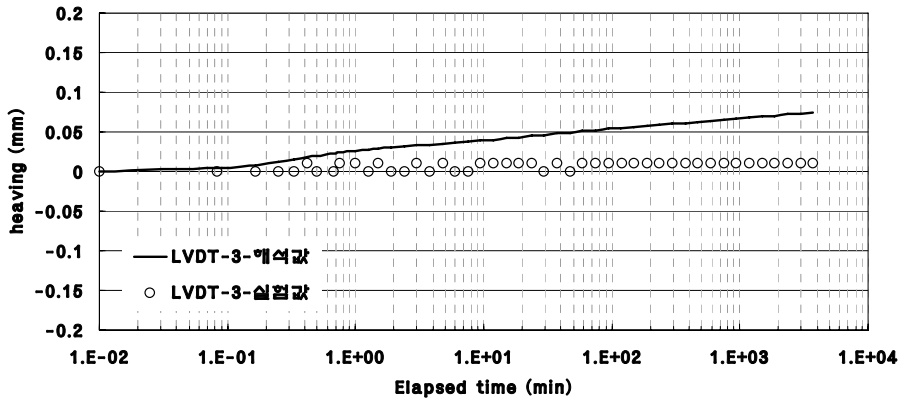


(c) 3단계 하중재하시

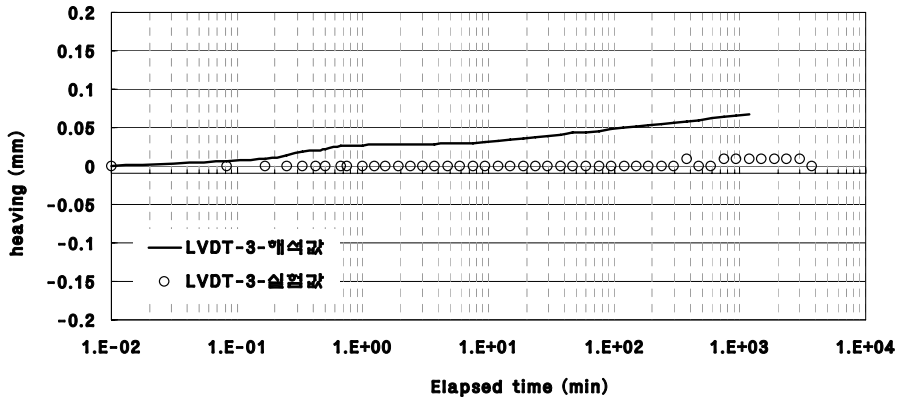
<그림 3.5.94> 하중재하시 융기량 비교(LVDT-2)



(a) 1단계 하중재하시



(b) 2단계 하중재하시



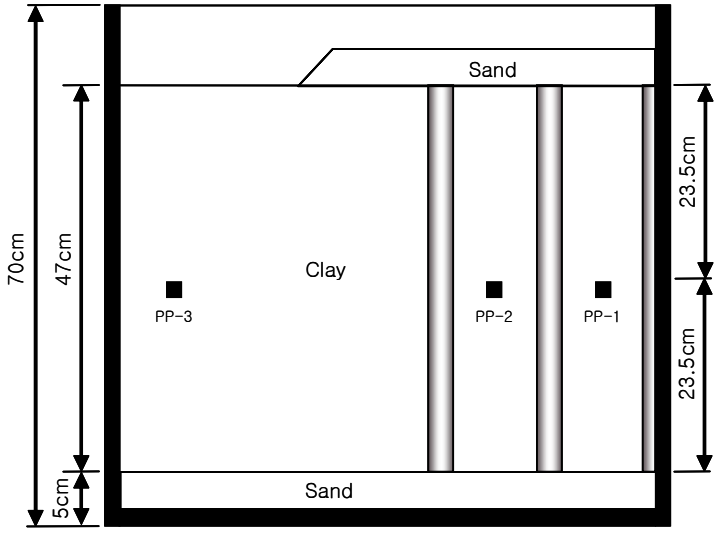
(c) 3단계 하중재하시

<그림 3.5.95> 하중재하시 융기량 비교(LVDT-3)

(3) 치환율에 따른 단계하중별 과잉간극수압

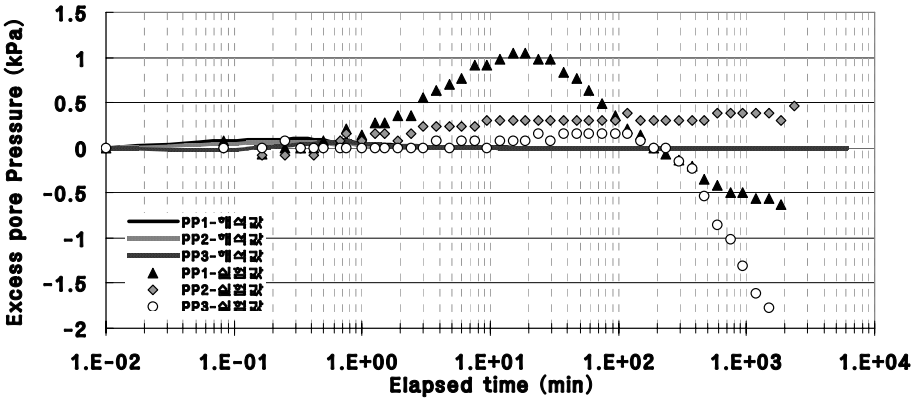
수치해석 결과, 치환율 5%와 비슷한 경향을 보이는데, 수치해석 결과는 치환율 5%와 비슷한 재하후 10분 정도 후에 간극수압이 소산이 시작되는 것으로 나타났으며, 실험결과는 치환율 5%와 다르게 PP-2의 소산 시점이 가장 빠르게 나타났으며 3단계 하중재하시는 간극수압이 계속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

이는 간극수압계 부근에서 국부적으로 하중재하로 인하여 발생한 과잉간극수압이 소산되지 못하여 발생한 것으로 판단된다.

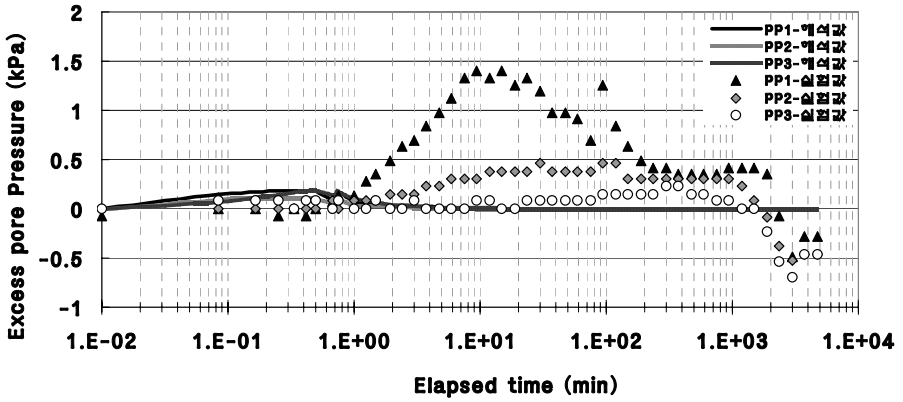


<그림 3.5.96> 간극수압계 설치위치

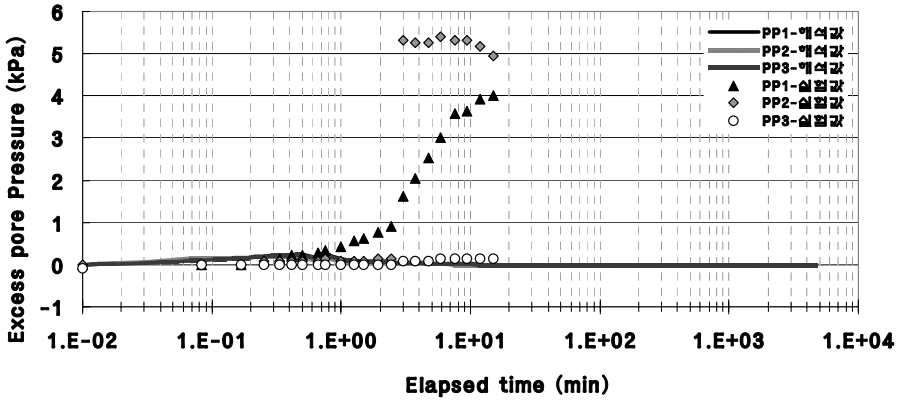
(가) 치환율 5%



(a) 1단계 하중재하시



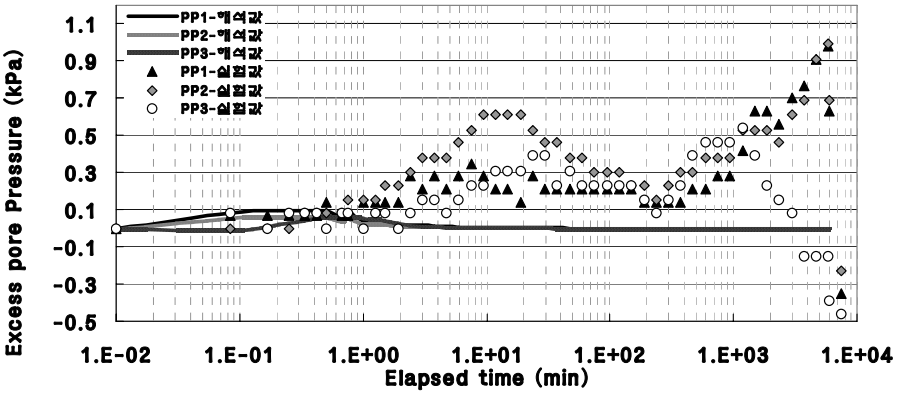
(b) 2단계 하중재하시



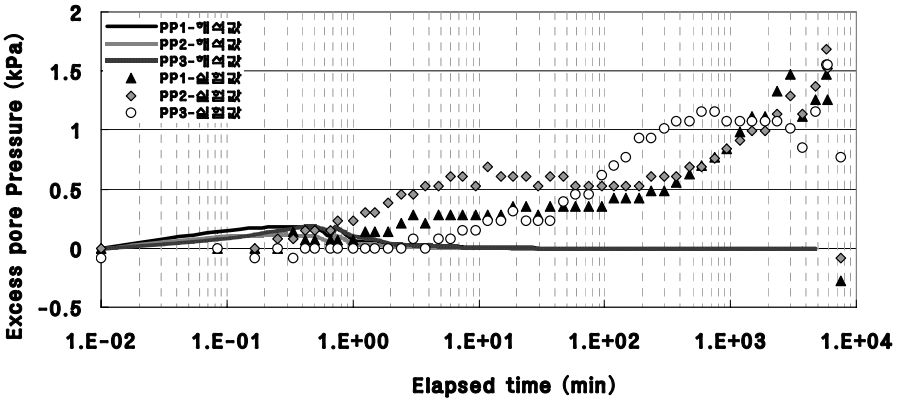
(c) 3단계 하중재하시

<그림 3.5.97> 하중재하시 과잉간극수압 비교(치환율 5%)

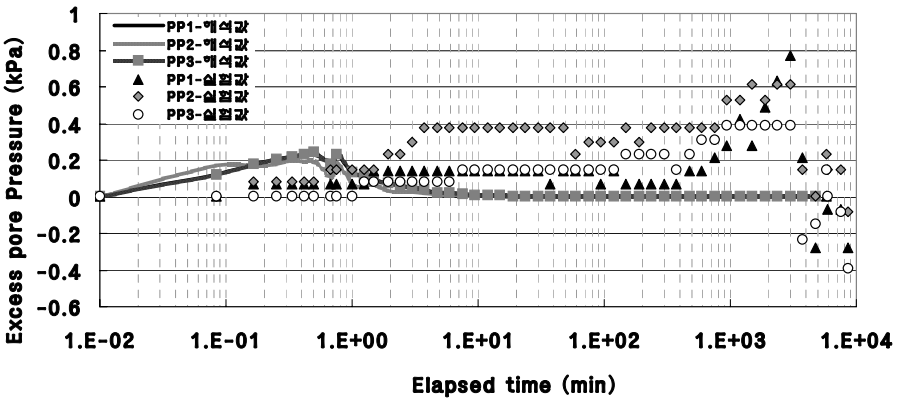
(나) 치환율 10%



(a) 1단계 하중재하시



(b) 2단계 하중재하시



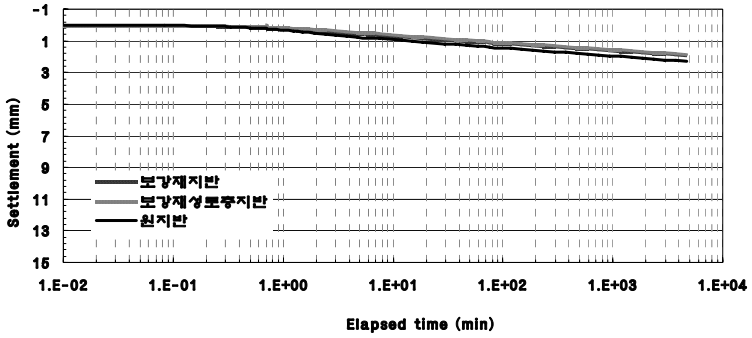
(c) 3단계 하중재하시

<그림 3.5.98> 하중재하시 과잉간극수압 비교(치환율 10%)

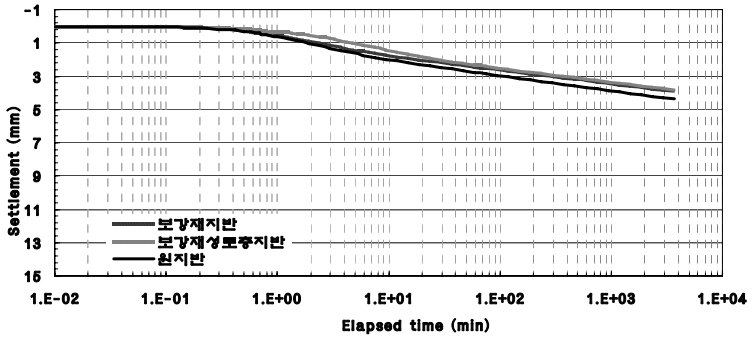
(4) 모델 지반의 역학적 거동

(가) 침하저감 효과

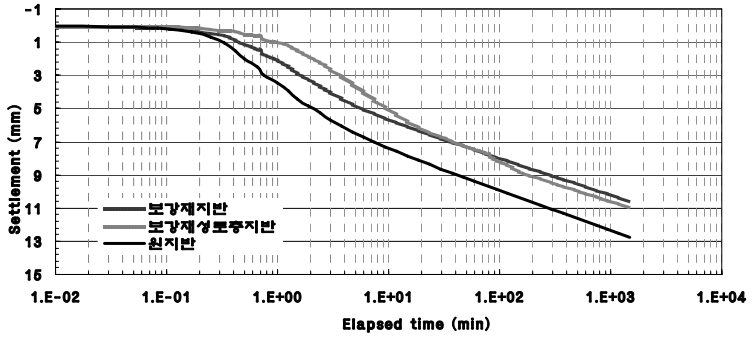
① 보강재 지반 및 성토층 지반과 원지반의 비교



(a) 1단계 하중재하시



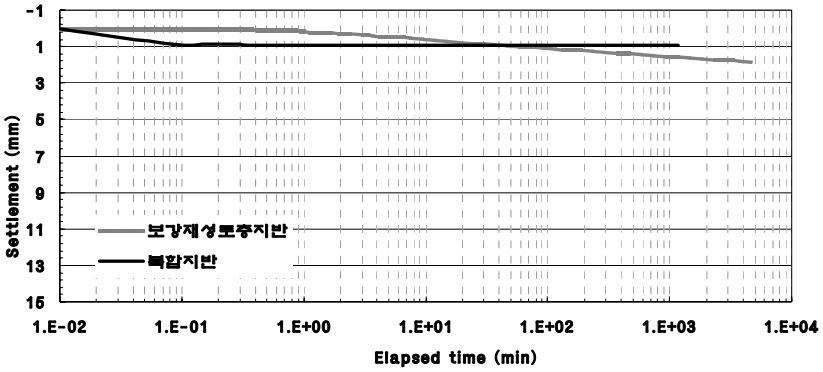
(b) 2단계 하중재하시



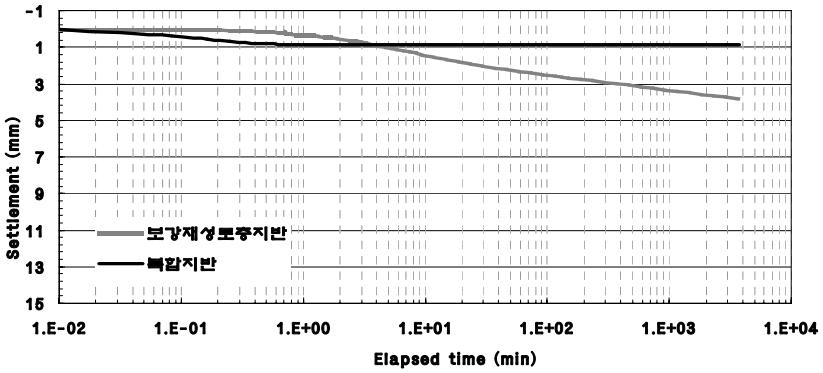
(c) 3단계 하중재하시

<그림 3.5.99> 하중재하시 침하저감 효과 비교

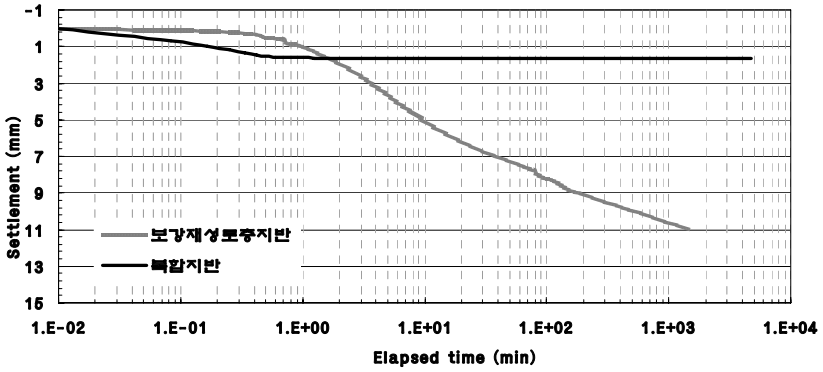
② 원지반과 복합지반의 침하량 비교



(a) 1단계 하중재하시



(b) 2단계 하중재하시



(c) 3단계 하중재하시

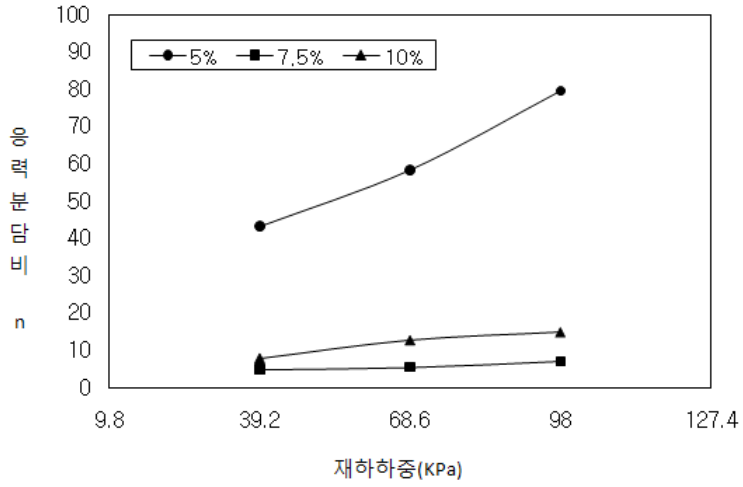
<그림 3.5.100> 하중재하시 침하저감 효과 비교

(나) 치환율별 응력 분담비

① 응력분담비(n)

RAPP 말뚝에 의해 보강된 지반에 하중이 작용하는 경우, 작용하중은 원지반과 RAPP 말뚝에 서로 다른 크기로 분산되어 작용하게 된다. 일반적으로 조립의 말뚝재료는 강성이 주변 흙의 강성보다 매우 크기 때문에 작용하중은 동일한 크기로 지반과 말뚝에 분배되는 것이 아니라 말뚝 상부로 더 큰 응력이 집중되는 응력집중 현상이 발생한다.

하중단계별 응력분담비를 모형토조 실험결과와 수치해석 결과에 대하여 각각 산정하였으며, 그 결과는 다음의 <그림 3.5.101>과 같다. 수치해석 결과로 산정한 응력분담비는 치환율 5%일 경우 재하하중 증가에 따른 증가 양상이 뚜렷하게 나타났으며, 치환율 7.5%와 10%의 경우에는 약간 증가하는 형태로 나타났다. 모형토조 실험결과로 산정한 응력분담비는 경향성을 판단하기 어렵게 나타났다.



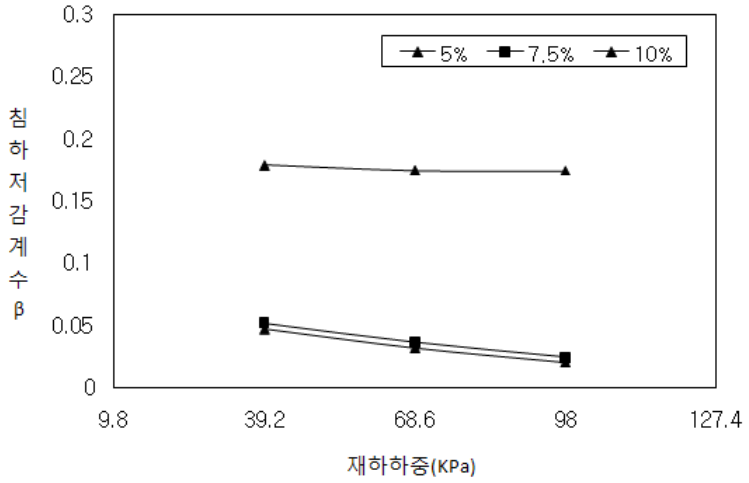
<그림 3.5.101> 하중단계별 응력분담비에 대한 실험결과와 수치해석 결과 비교

② 침하저감계수(β)

다공질 콘크리트말뚝을 설치한 지반에서의 침하량은 무처리시의 발생하는 침하량보다 감소하게 되는데 그 원인은 다공질 콘크리트말뚝이 어느 정도의 하중을 분담하여 압밀지반에 작용하는 응력을 감소시키기 때문이다.

원지반 상태의 압밀침하량에 대하여 수치해석결과 산정된 침하량과 보강지반의 압밀침하량을 비교하여 침하저감계수를 산정하였으며 그 결과는 다음의 <그림 3.5.102>와 같다. 수치해석 결과로부터 산정된 침하저감계수는 치환율 5%에 대한 결과는 하중에 상관없이 일정한 값을 나타내었으며 치환율 7.5%와 10%의 경우는 치환율 5%와 비교하여 침하저감계수가 작게 나타났으며 하중증가에 따라 약간 감소하는 유사한 결과를 나타내었다.

모형토조 실험결과로부터 산정된 침하저감계수는 치환율 5%의 경우는 하중재하 1단계와 2단계는 유사한 결과를 보였으나 3단계 하중재하시 침하저감계수가 상당히 증가하는 형태로 나타났으며, 치환율 10%에 대한 결과는 하중증가에 상관없이 비교적 일정한 값을 나타내고 있다.

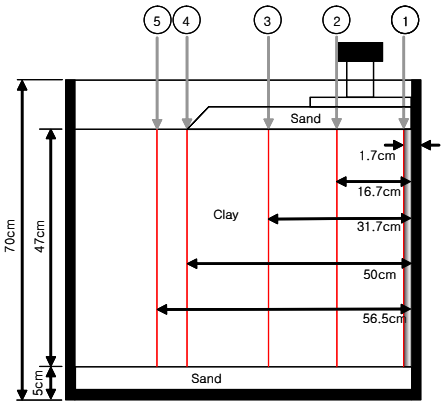


<그림 3.5.102> 하중단계별 침하저감계수에 대한 실험결과와 수치해석 결과 비교

(다) 치환율에 따른 말뚝 주변부 최대 수평변위

① 무보강시 말뚝 주변부 최대 수평변위

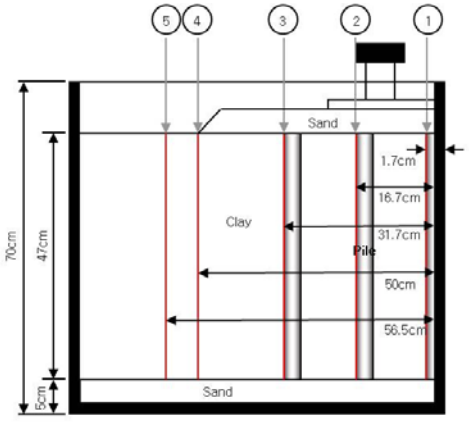
원지반에 대한 수평변위에 대한 수치해석 결과 각 하중단계에서 수평변위량은 하중재하판 바로 아래에 위치한 ②위치에서 가장 많이 발생하였으며, 토조벽면에 위치한 ①위치에서 가장 적은 수평변위량을 나타내었다. 이는 토조벽면에 아칭효과로 인하여 하중의 일부를 토조벽면에서 저항하여 발생한 것으로 판단된다.



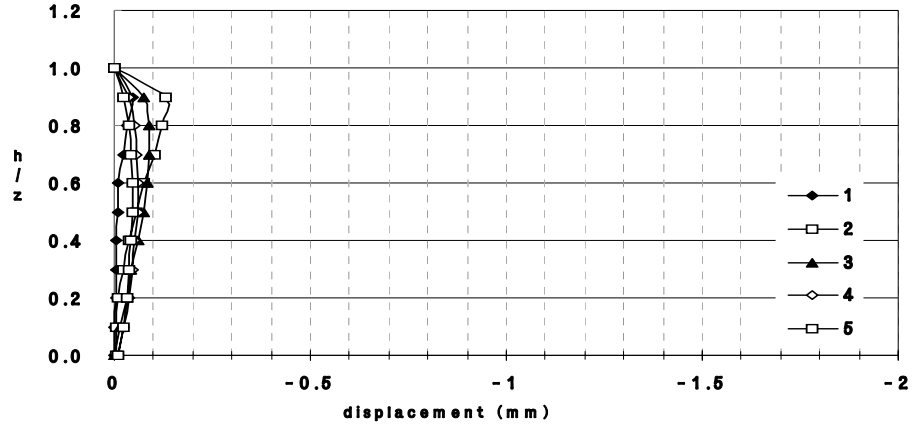
<그림 3.5.103> 무보강시(원지반)

② 치환율 5%에 대한 말뚝 주변부 최대 수평변위

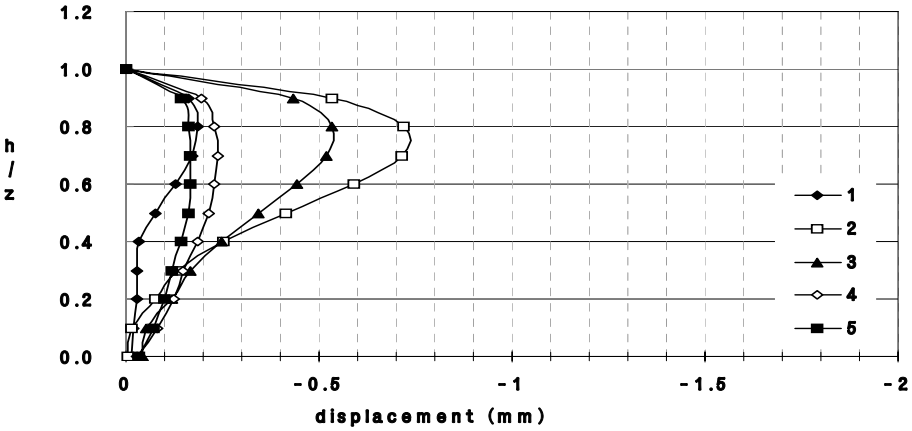
치환율 5%에 대한 수평변위량 해석결과 ②위치에서는 재하판에 작용하는 하중이 RAPP 말뚝의 축방향 압축력으로 저항하면서 수평변위량이 ③위치보다 적게 발생한 것으로 판단되며, 무보강시와 같이 ①에서 가장 적은 수평변위가 발생한 것으로 나타났다.



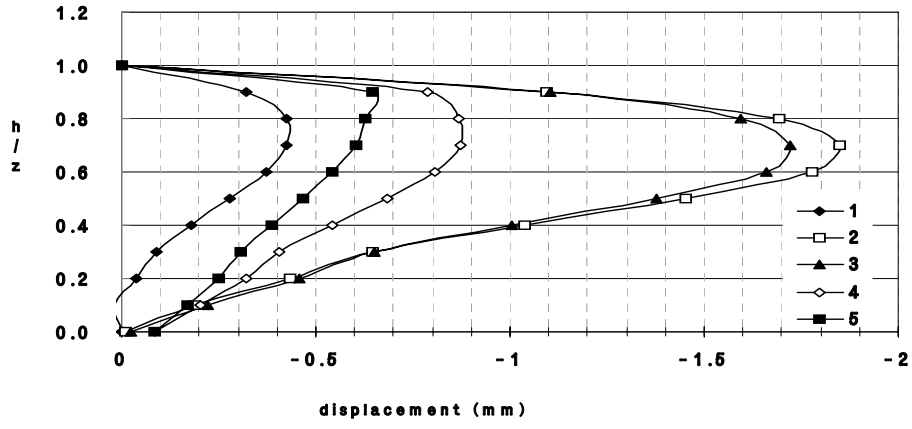
<그림 3.5.104> As-5%



(a) 1단계 하중재하시

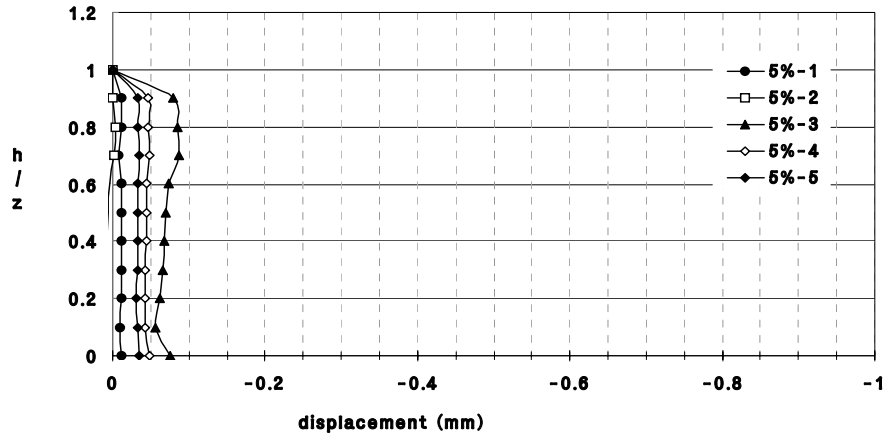


(b) 2단계 하중재하시

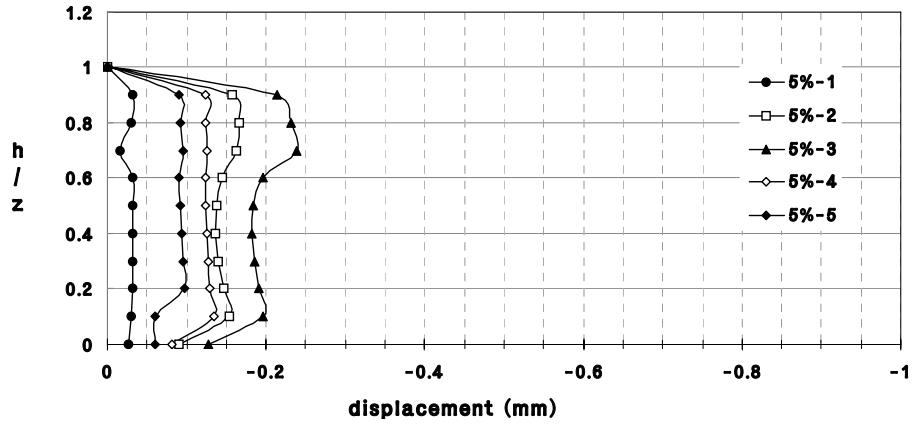


(c) 3단계 하중재하시

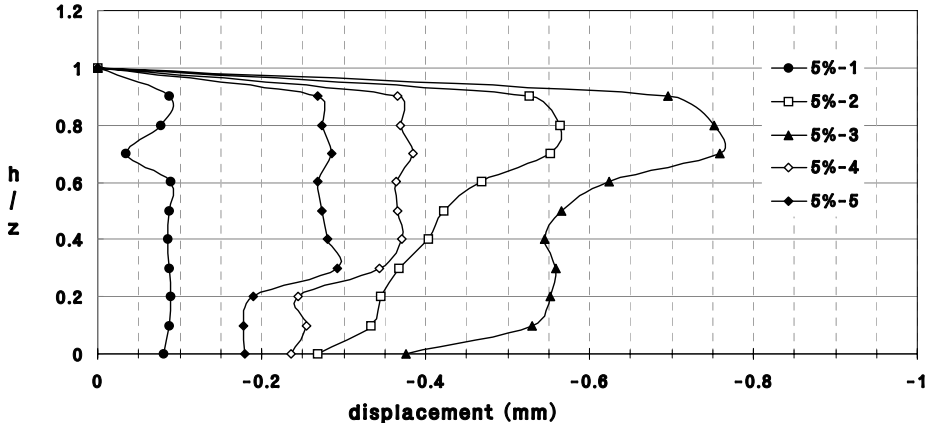
<그림 3.5.105> 원지반에 대한 하중재하시 수평변위



(a) 1단계 하중재하시



(b) 2단계 하중재하시

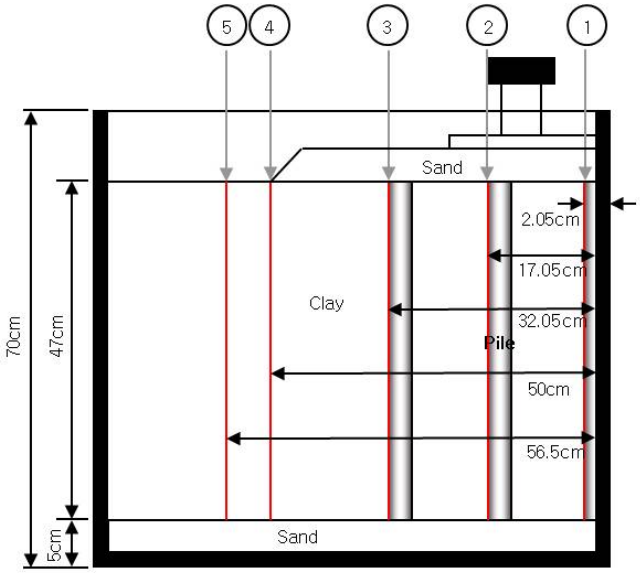


(c) 3단계 하중재하시

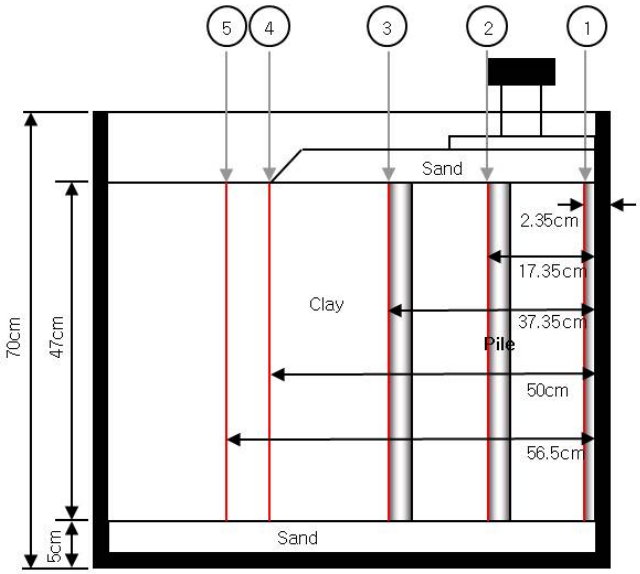
<그림 3.5.106> 치환율 5%에 대한 하중재하시 수평변위

③ 치환율 7.5% 및 10%에 대한 말뚝 주변부 최대 수평변위

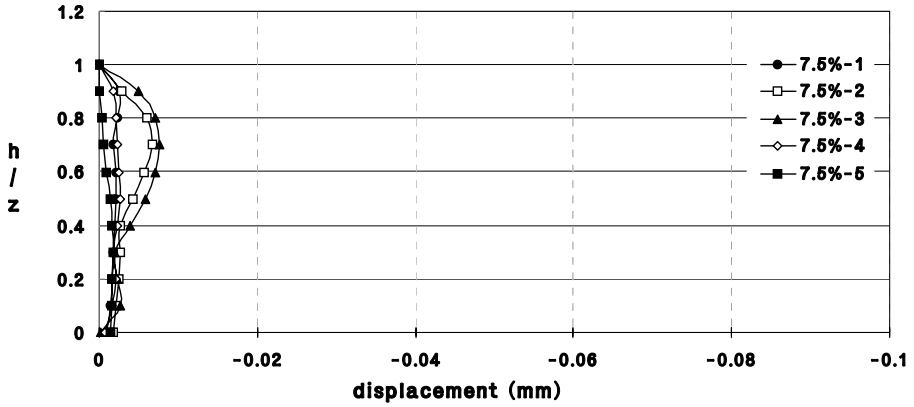
치환율 7.5% 및 10%에 대한 수치해석 결과 수평변위량은 아주 미소하게 발생하는 것으로 나타났으며, 치환율 7.5% 이상의 경우에는 측방유동에 대한 저항력이 크게 발휘되어 측방유동에 대한 보강효과가 확실한 것으로 나타났다.



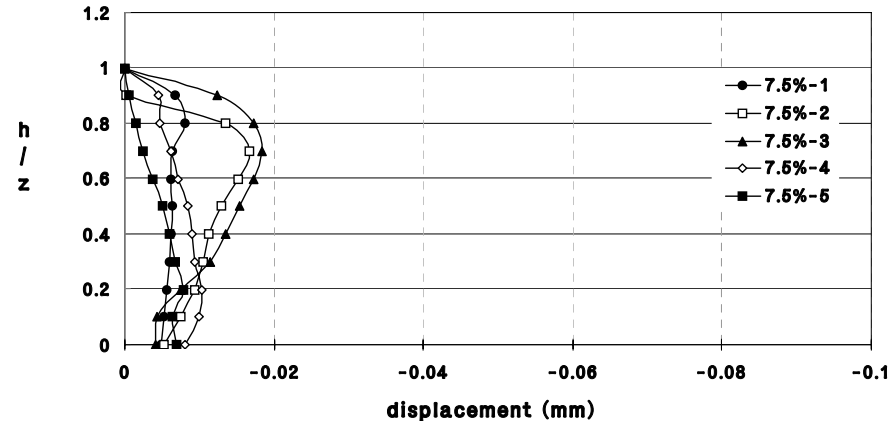
<그림 3.5.107> As-7.5%



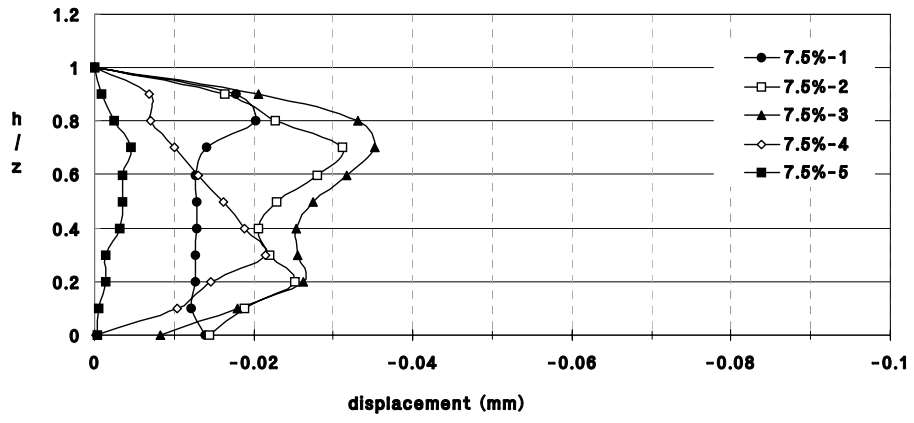
<그림 3.5.108> As-10%



(a) 1단계 하중재하시

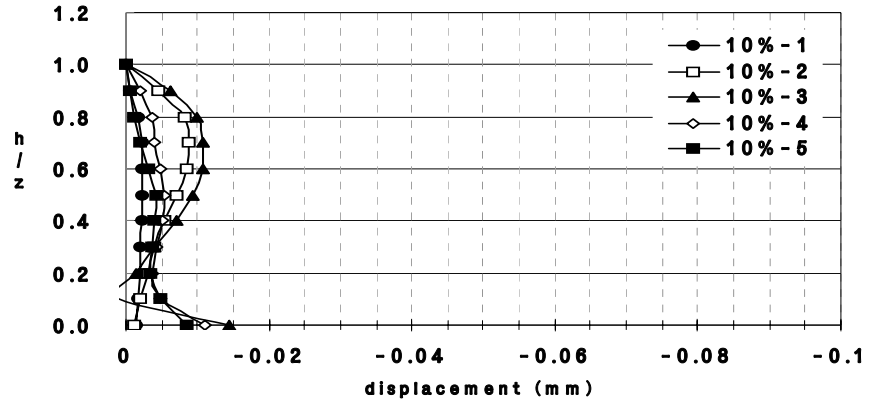


(b) 2단계 하중재하시

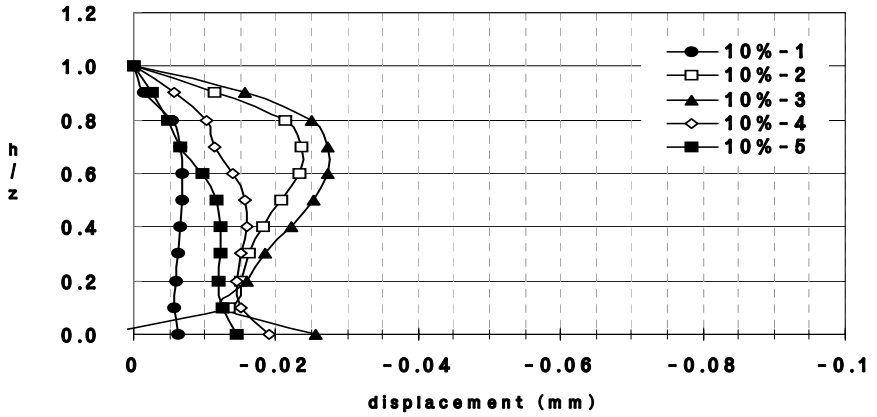


(c) 3단계 하중재하시

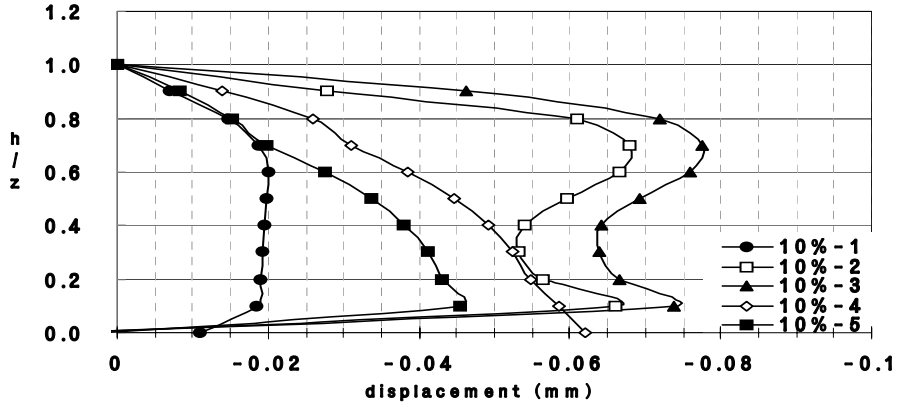
<그림 3.5.109> 치환율 7.5%에 대한 하중재하시 수평변위



(a) 1단계 하중재하시



(b) 2단계 하중재하시



(c) 3단계 하중재하시

<그림 3.5.110> 치환율 10%에 대한 하중재하시 수평변위

(5) 결 론

① 치환율에 따른 단계 하중별 침하는 치환율 5%일 경우 모형실험 결과가 수치해석 결과보다 작게 나타났으며, 10%일 경우는 1단계 하중재하시는 시험값이 수치해석 결과보다 크게 나왔으나, 2, 3단계 하중재하시는 유사한 결과를 나타내었다.

② 융기량에 대한 결과는 실험결과는 융기가 발생이 잘 일어나지 않는 것으로 나타났으나, 수치해석 결과 치환율 증가에 따라 융기량이 감소하는 것으로 나타나 하중재하에 따른 융기량 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

③ 치환율에 따른 응력분담 효과는 실험결과 뚜렷한 경향을 찾기 힘들었으며, 해석결과는 치환율 7.5%와 10%는 효과가 거의 비슷하게 나타났다.

④ 치환율에 따른 침하저감 효과도 응력분담 효과와 유사하게 치환율 5%에서 가장 적은 효과를 나타내었으며 치환율 7.5%와 10%는 효과가 거의 비슷하게 나타났다.

⑤ 치환율에 따른 말뚝 주변부 최대 수평변위에 대한 수치해석결과 무보강 지반과 비교하여 치환율 5%일 경우는 약 50%정도 저감 효과가 나타났으며, 치환율 7.5%와 10%에서는 수평변위가 거의 발생하지 않는 것으로 나타나 RAPP 말뚝으로 인한 측방유동 저항 효과가 확실한 것으로 나타났다.

제 6 절 순환골재 다공질 콘크리트공법의 점토혼입 영향 분석

1. 상재하중을 고려한 점토혼입 효과에 대한 모형실험 및 수치해석

가. 실험의 목적 및 필요성

본 연구에서 개발된 다공질 콘크리트말뚝공법(이하 RAPP 공법)은 기존의 GCP 공법이나 SCP 공법과 비교하여 조성된 다짐말뚝의 강성이 크기 때문에 지지력 증대나 침하저감 효과가 우수하다고 할 수 있다.

그러나 이러한 공법 모두 저치환율로 시공될 경우 개량된 연약점토지반은 복합지반의 특성을 갖게 되고 그에 따라 연약지반에서는 다짐말뚝으로 인한 압밀촉진현상이 발생되게 되는데 이때 상기의 다짐말뚝공법들의 통수능 차이에 대하여는 아직 충분히 규명되어 있지 않다.

특히 RAPP 공법이나 GCP 공법의 경우 다짐재료의 입경이 상대적으로 크기 때문에 주변 연약점토에 의한 말뚝표면의 간극막힘(Clogging) 현상을 우려하고 있지만 아직 공학적으로 명확히 밝혀지지 않은 현상이다.

실무에서는 GCP 공법의 간극막힘현상을 극소화시키고자 하는 노력의 일환으로 쇄석에 소정 비율의 모래를 혼합하여 다짐말뚝을 생성시키는 방법 등을 적용하고 있지만 이 또한 경험적 방법으로 수행되고 있는 실정이며 그 효과에 대해서는 아직 정량적으로 명확히 규명되어 있지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 저치환율의 RAPP와 SCP, GCP, GCP에 소정의 모래를 혼합한 형태(이하 Sandy GCP라고 칭함)의 공법이 적용된 복합지반에 상재하중을 의해 발생되는 압밀모형실험과 일련의 수치해석을 실시하여 이들 공법에 의한 압밀거동을 재현하고 각각의 다짐말뚝으로 인한 압밀촉진효과를 분석하고 이들 공법에 의한 다짐말뚝의 통수능력을 비교 · 평가하고자 한다.

또한 다짐말뚝의 점토 혼입은 상재하중과 원지반의 구속압에 의해 발생되기 때문에 심도별 구속압을 통해 다짐말뚝에 혼입되는 점토를 측정하였다. 구속압에 의해 혼입되는 점토는 다짐말뚝 치환율 변화의 원인이며 이에 따른 통수능력의 저감이 발생되기 때문에 점토 혼입 양상이 다짐말뚝에 미치는 영향을 실내모형실험을 통해 알아보고자 하였다.

모형실험에서는 심도 4m의 응력상태를 갖는 지반을 각기 다른 압밀도(50%, 75%, 100%

)로 조성하여 각각의 다짐말뚝에 대하여 치환율이 29%인 복합지반을 조성하였다. 또한 각각의 복합지반에 심도 4m에 상응하는 구속압을 가한 후 포화된 말뚝으로부터 빠져나온 배수량을 측정하여 다짐말뚝으로 혼입된 점토의 양을 추정하였으며 원지반의 압밀정도에 따라 구속압에 의한 말뚝부의 연직배수 통수 단면적의 변화를 관찰하였다. 심도별 점토 혼입 양상을 살펴보기 위해 추가적으로 심도 2m와 8m에 상응하는 지반을 조성한 후 RAPP와 GCP에 대하여 같은 실험을 진행하였다.

나. 모형실험 장치 및 계측 시스템

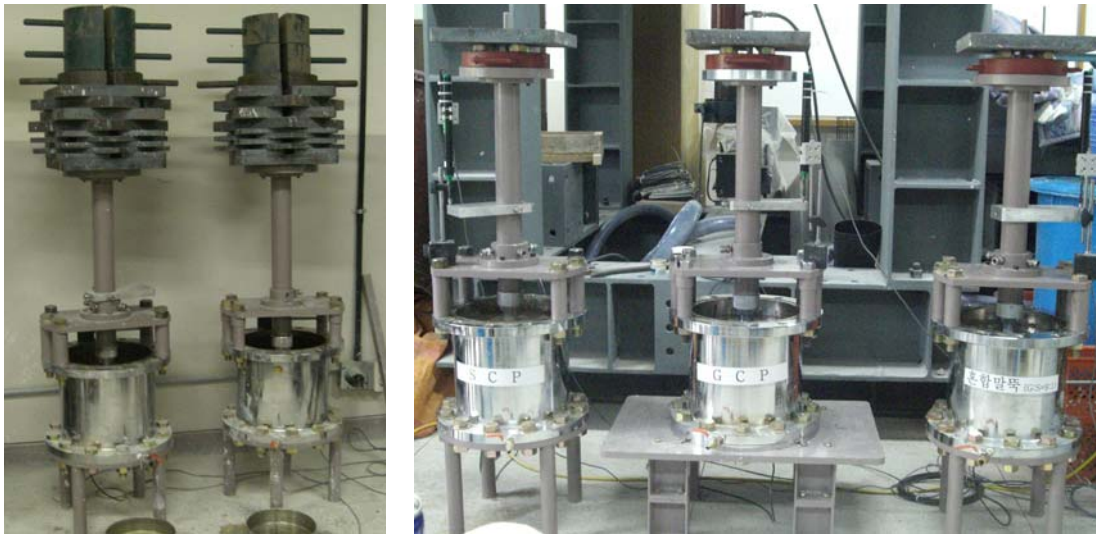
(1) 모형실험 장치

<그림 3.6.1>과 <그림 3.6.2>는 각각 본 연구에서 사용한 실내모형실험장치의 모습과 상세도를 나타내고 있다.

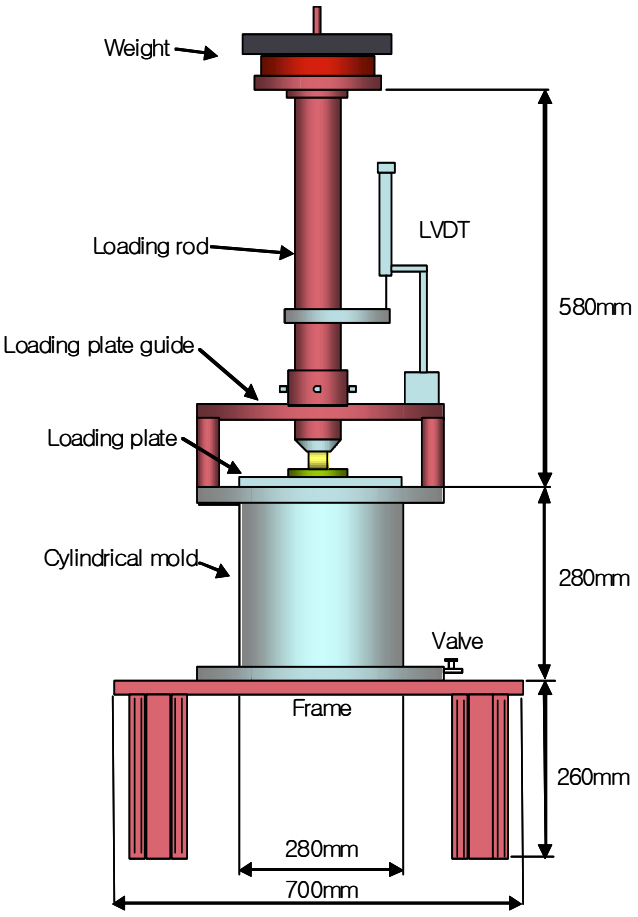
실험에 사용된 원형토조는 내경 280mm, 내부심도 280mm이고 토조 내부의 측면마찰을 저감시키기 위해 크롬으로 표면처리를 하였다.

토조의 하부는 배수용 파이프를 설치하여 모형지반의 하부로부터 배수를 가능하게 하였다. 또한, 재하판에는 직경 2mm의 구멍을 다수 만들어 모형지반 상부로부터의 배수성을 확보하였다. 모형지반에 대한 하중 재하는 동일한 무게의 추를 이용하여 재하축에 전달된 하중이 가압판을 통해 모형지반에 전달되도록 설치하였다.

하중이 전달되는 재하축과 가압판의 연결은 원형 토조의 최상단과의 수평을 유지하도록 하여 편심을 최소화하였고 침하량의 정확한 계측을 위해 재하축에 고정된 블록을 이용하여 침하량을 계측하였다. 재하축의 유동성 방지와 LVDT의 정확한 계측을 위해 토조에 고정된 가이드를 이용하였다.



<그림 3.6.1> 실내모형실험장치 전경



<그림 3.6.2> 실내모형실험장치 상세도

(2) 계측 시스템

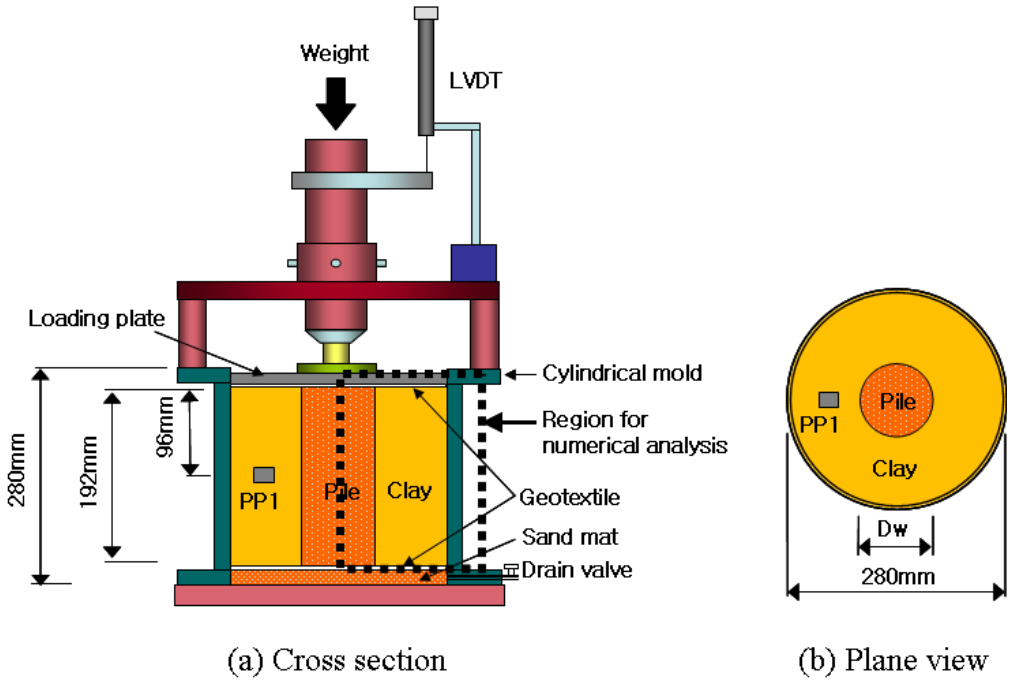
<표 3.6.1>은 모형실험에서의 측정항목과 각각의 항목에 대응하는 계측기를 명시하였고 <그림 3.6.3>은 모형실험에서의 계측기들의 설치위치를 나타내고 있다.

원형토조 내부에는 간극수압계를 모형지반의 중간 심도에 설치하였다. 특히, 점토부에 계측기를 설치할 때는 수압면을 소정의 위치와 방향이 되도록 신중히 설치하였으며 설치 후 점토의 충진은 가능한 한 균등하게 소량으로 실시하여 점토 충진에 따른 계측기의 이동을 최대한 방지하였다.

또한, 본 실험을 수행하기 전에 압력용기를 이용하여 간극수압계의 캘리브레이션을 위한 예비실험을 실시한 후 각각의 교정계수를 산정하였다.

<표 3.6.1> 측정항목과 계측기

Measuring items	Measuring instruments
Applied load	Weight
Settlement	LVDT
Excess pore pressure	Pore pressure transducer (BED-A-200kPa)



(a) Cross section (b) Plane view

<그림 3.6.3> 모형실험의 계측기 설치 위치

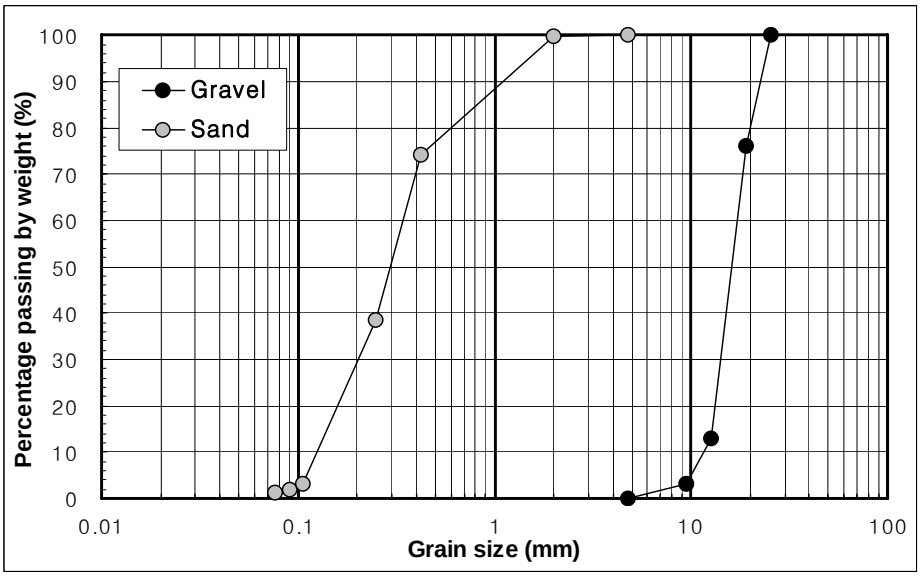
다. 사용시료 및 모형지반의 제작

(1) 사용시료

모형실험에서는 본 과업의 대상이 되는 현장 지역의 자연점토를 사용하였으며, 본 점토의 물리적 특성은 <표 3.6.2>에 나타낸 바와 같다. 한편, <그림 3.6.4>는 RAPP, SCP, GCP, Sandy GCP에 사용된 모래 및 쇄석의 입도분포시험 결과이다.

<표 3.6.2> 자연점토의 물리적 특성

G_S	W_L	W_P	I_P	C_c
2.68	41.8%	20.2%	21.6	0.5535



<그림 3.6.4> 모래 및 쇄석의 입도분포시험 결과

(2) 모형지반의 제작

본 실험에서는 다음의 순서에 의해 모형지반을 제작하였다. 우선, 자연상태에 있던 점토의 이물질을 제거하기 위해 4.76mm의 체로 체가름을 실시하였고 균등한 함수비를 갖는 시료 조성을 위해 진공상태로 배합할 수 있는 교반기를 이용하여 85%의 함수비로 반죽하였다.

토조 바닥부에 약 30mm 높이의 배수용 모래층을 포설하고 토조 내부에 240 mm의 높이가 되도록 교반된 자연점토를 충진 하였으며 이때에 점토부의 소정의 위치에 간극수압계를 설치하였다.

그 후 9.8kPa의 조건에서 예비압밀을 실시하여 약 1.34의 간극비를 갖는 점토지반을 조성하였다. 그 후 점토지반의 중심에 치환율에 상당하는 원형 케이싱을 삽입하면서 주변의 점토가 교란되지 않도록 굴삭하고 생성된 원형의 구멍에 미리 준비된 다짐말뚝 재료를 다져 넣어 복합지반을 제작하였다.

다짐말뚝의 조성 후 다시 상재압 9.8kPa로 압밀을 실시함으로써 말뚝타설에 의한 응력변동을 제거하여 모형지반의 제작을 완료하였다. <그림 3.6.5>는 모형지반의 제작과정을 나타내고 있다.



(a) 자연점토 배합



(b) 불순물 제거



(c) 간극수압계 설치



(d) 원형토조 조립



(e) 토조 바닥에 토목섬유 포설



(f) 토조에 점토 삽입



(g) 점토 위에 토목섬유 포설

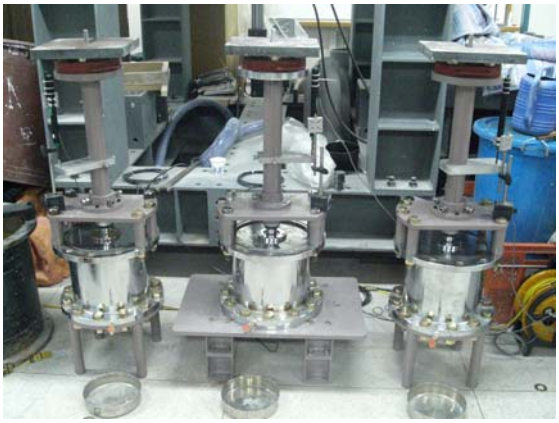


(h) 가압장치 설치

〈그림 3.6.5〉 모형지반의 제작과정



예비압밀(RAPP) 및 천공장치 설치



예비압밀(SCP, GCP, SandGCP)



하중재하(9.8kPa, 예압밀)

(i) 하중재하(9.8kPa, 예비압밀) 및 천공장치 설치



(j) 천공용 케이싱 관입



(k) 점토 굴삭용 스크류 삽입

<그림 3.6.5> 모형지반의 제작과정(계속)



(l) 점토 제거



(m) 다짐재료 충진



(n) 5층 다짐



(o) RAPP 충진 완료



(p) GCP 충진 완료



(q) Sandy GCP 충진 완료



(r) SCP 충진 완료



(s) 다짐말뚝의 포화

<그림 3.6.5> 모형지반의 제작과정(계속)



(t) 상부 배수재 설치



(u) 재하판 설치





(v) 하중재하

<그림 3.6.5> 모형지반의 제작과정(계속)

라. 실험조건

<표 3.6.3>은 본 연구에서 수행한 실험조건을 나타내고 있다. 모형실험은 복합지반의 치환율이 10%인 경우에 대하여 실시하였다. 본 실험에서는 동일한 하중 및 치환율에서 RAPP, SCP, GCP, Sandy GCP의 지반개량 효과를 비교하기 위해서 실시하였다.

마. 모형지반의 거동

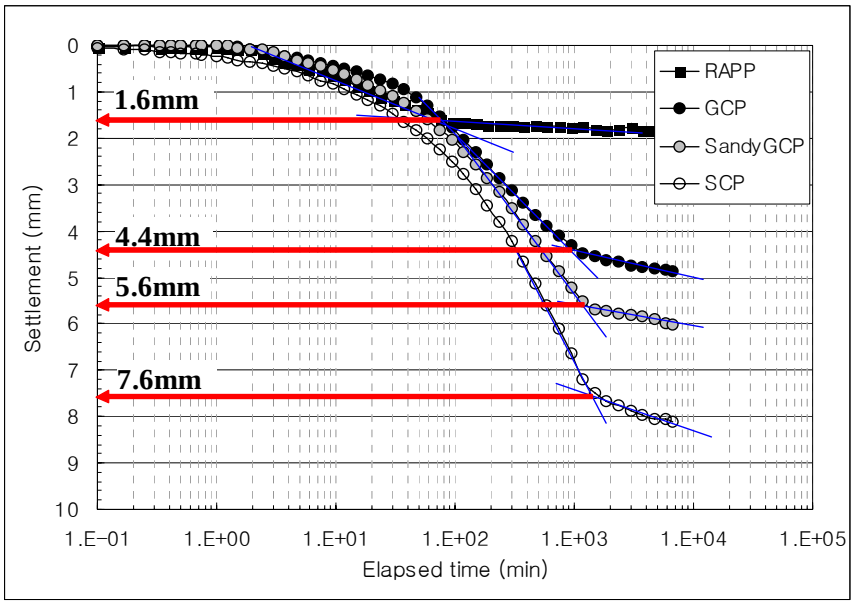
(1) 침하량의 시간에 따른 변화

<그림 3.6.6>은 모형실험에서 계측한 복합지반의 침하량의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 모든 경우에서 침하량의 시간에 따른 변화 양상은 복합지반의 압밀거동을 보이고 있으며 발생된 침하량은 SCP, Sandy GCP, GCP, RAPP의 순으로 크게 발생되고 있지

만 일차압밀이 종료되는 시점은 그와 반대로 RAPP, GCP, Sandy GCP, SCP의 순으로 관측되고 있다. 한편 모든 경우의 복합지반에서는 일차압밀침하가 종료된 이후에도 2차압밀이 발생되고 있음을 알 수 있으며 발생된 2차 압밀 침하량은 SCP, Sandy GCP, GCP, RAPP의 순으로 크게 발생되고 있다. 이러한 사실들로부터 RAPP에 의해 개량된 복합지반에서 일차압밀에 대한 침하저감효과가 비교적 탁월함을 알 수 있으며 2차 압밀 침하에 대해서도 저감효과가 크게 나타남에 따라 압밀침하거동에 대한 장기적 안정성 확보에 유리함을 알 수 있다.

<표 3.6.3> 실험조건

Test Case	Replacement Area Ratio (%)	Loading Stage	Pressure before Applying Surcharge (kPa)	Total Surcharge (kPa)	Increment Pressure (kPa)	Initial Height of Model Ground (mm)
RAPP	10	1	9.8	39.2	29.4	221
SCP				20.0	10.2	222
GCP						221
Sandy GCP						220



<그림 3.6.6> 시간경과에 따른 침하량의 변화

(2) 과잉간극수압의 시간에 따른 변화

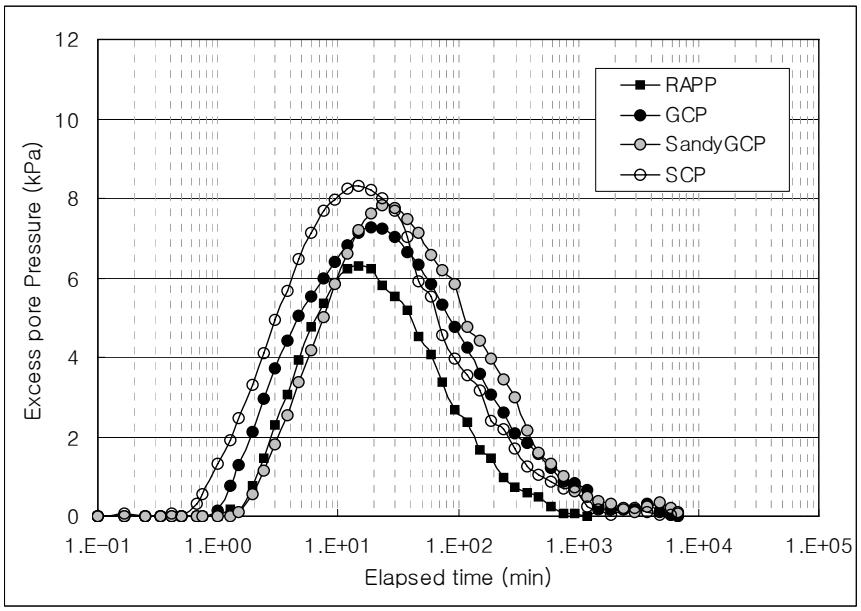
<그림 3.6.7>은 모형실험에서 계측한 복합지반 점토부에서의 과잉간극수압의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다.

모형실험에서 과잉간극수압은 재하 직후로부터 약 10분 정도까지 증가하지만 그 후 감소로 전화하고 있다. 이것은 모형지반 중 간극수압 측정계에 미소량의 기포가 존재하여 완전하게 포화되지 못했기 때문이라고 생각된다.

그러나 경과시간 약 10분 정도 이후부터는 모형지반에서 발생된 과잉간극수압이 소산되면서 복합지반에서 압밀이 진행되고 있음을 알 수 있다.

한편 각각의 모형지반에서 발생된 최대 과잉간극수압의 크기는 SCP, Sandy GCP, GCP, RAPP의 순으로 크게 발생되고 있다.

이는 침하량의 변화특성에서 알 수 있듯이 복합지반의 압밀 변형량이 SCP, Sandy GCP, GCP, RAPP의 순으로 크게 발생되었기 때문에 그에 상응하여 점토부의 과잉간극수압도 같은 순서로 크게 발생되었다고 판단된다.



<그림 3.6.7> 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화

바. Clogging에 대한 확인

본 연구의 목적 중의 하나는 각종 다짐말뚝(RAPP, GCP, Sandy GCP, SCP)으로 개량된 복합지반에서 압밀이 진행됨에 따라 각각의 다짐말뚝에 의한 통수성능의 차이가 발생되느냐에 대한 여부를 확인하는 것이다. 현재까지 다짐말뚝에 의한 배수촉진 기능성에 대하여 여러 가지 추측이 난무하지만 명확히 규명되어 있지 않은 상황이며 특히 RAPP나 GCP의 경우 복합지반의 압밀 진행에 따라서 SCP에 비하여 상대적으로 큰 간극을 갖는다는 이유로 주변 점토입자가 다짐말뚝의 표면 간극을 막는 Clogging 현상에 대한 우려가 주장되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 사항에 대한 검토를 수행하고자 실내모형실험이 완료된 후 모형실험 장치를 해체하여 각각의 다짐말뚝과 주변 점토부의 형상을 확인하였다. <그림 3.6.8>은 본 연구에서 수행한 실내모형실험이 완료된 후 재하판을 제거하고 복합지반의 상부를 촬영한 사진이다. 모든 다짐말뚝에 대하여 주변 점토의 혼입 형상은 확인 할 수 없으며 원형의 배수 말뚝 형상을 잘 유지하고 있음을 알 수 있다.



(a) RAPP에 의한 복합지반 상부 모습



(b) GCP에 의한 복합지반 상부 모습



(c) Sandy GCP에 의한 복합지반 상부 모습



(d) SCP에 의한 복합지반 상부 모습

<그림 3.6.8> 실험 완료 후 복합지반의 상부 모습

<그림 3.6.9>는 복합지반의 내부 형상을 확인하기 위한 작업을 보여주고 있다. 작업에서는 복합지반에 소정의 직경을 갖는 케이싱을 관입하여 토조와 다짐말뚝의 주변 점토를 제거할 때 다짐말뚝이 교란되는 것을 방지하였다. <그림 3.6.10>은 각각의 다짐말뚝에 의한 복합지반의 압밀 종료 후의 단면 모습을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 다짐말뚝에 대해서 주변 점토의 혼입 경향은 관찰할 수 없었으며 따라서 금번 실내모형실험에서는 압밀 초기부터 종료시까지 모든 다짐말뚝의 통수성능이 일정하게 유지되었음을 알 수 있다.



(a) 케이싱 관입 (b) 토조 및 점토 제거

<그림 3.6.9> 복합지반의 분해 작업



(a) RAPP (b) GCP (c) Sandy GCP (d) SCP

<그림 3.6.10> 압밀 종료 후 복합지반의 단면 모습

사. 수치해석 개요

본 수치해석은 해석 대상 재료인 점토와 다짐말뚝에 대하여 3장 4절에서 설명한 방법과 동일한 역학모델을 각각 적용함으로써 수행하였다.

한편, 본 연구에서 해석 대상으로 하고 있는 다짐말뚝재료 즉, 모래 및 쇄석, 순환골재를 활용한 다공질 콘크리트에 대한 탄소성 모델화를 위해서는 재료의 탄성적 역학거동을 표현하는 체적탄성계수, 다일러턴시의 특성을 표현하는 소성변형증분비, 파괴기준에 대한 파라메터인 내부마찰각과 점착력 등의 결정이 필요하다.

점토의 모델화를 위해서는 압축지수, 팽창지수, 한계상태에서의 유효응력비, 이차압밀계수, 기준체적변형속도 등 구성모델의 역학 파라메터와 초기간극비, 투수계수, 투수계수 변화지수 등의 지반 상태량을 결정할 필요가 있다.

따라서 본 검토에서는 지반재료의 역학특성 및 지반의 상태에 대한 파라메터 값들을 현장에서 얻은 정보와 이를 활용하여 기존에 제안되고 있는 방법에 의해 <표 3.6.4>와 같이 결정하였다.

<표 3.6.4> 모래, 쇄석, RAPP에 대한 역학 파라미터

Parameters		Sand	Gravel	RAPP
Elastic modulus at reference state (kPa)	E_0	2.54×10^4	7.84×10^4	4.52×10^5
Mean effective stress at reference state (kPa)	p_o'	98.0	98.0	98.0
Material constant	m	0.6	0.6	0.6
Internal friction angle (°)	ϕ'	36.0	42.0	42.0
Plastic strain increment ratio	η_d	0.15	0.15	0.15
Poisson ratio	ν	0.30	0.27	0.23

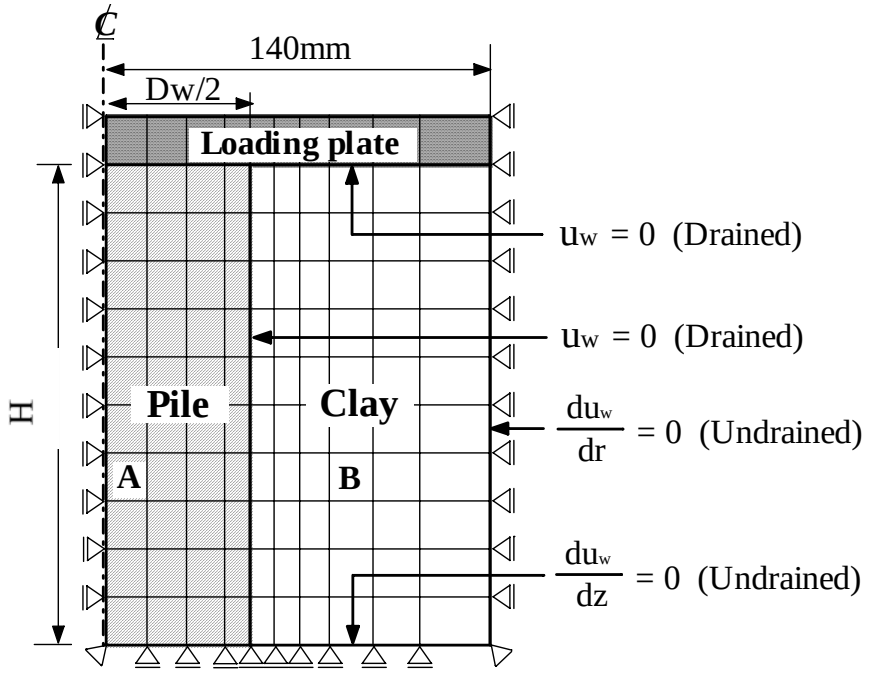
(1) 다짐말뚝을 포함한 해석 대상 지반의 축대칭 모델화

본 연구에서 수행한 수치해석의 해석모델에 대한 개요는 <그림 3.6.11>과 같다. 해석모델은 <그림 3.6.3>에 나타낸 다짐말뚝에 의해 개량된 복합지반의 압밀거동에 대한 일련의 모형실험을 대상으로 작성하였으며, 모형지반 압밀거동의 대칭성을 고려하여 <그림 3.6.3>에서 파선으로 둘러싸여 있는 부분을 수치해석 대상으로 하였다.

이 모델에는 모형실험에서와 같이 중심부에 1본의 다짐말뚝이 표현되어 있고 그 주위는 연약점토에 의해 둘러싸여 있는 축대칭모델이다.

또한 모형지반의 점토부만 다차원 압밀해석을 적용하였으며, 간극수에 관한 경계조건은 해석모델의 측면 및 저면에 대하여 비배수, 재하판과 다짐말뚝에 접하는 부분의 경계를 배수조건으로 하였다.

한편, <그림 3.6.11>의 모델 중 요소 A와 B는 각각 다짐말뚝부와 점토부의 연직응력증분과 과잉간극수압의 변화를 검토한 위치를 나타내고 있으며 특히 요소 B는 모형실험에서 과잉간극수압계(PP1)의 설치위치와 대응되고 있다.



<그림 3.6.11> 수치해석 모델

(2) 수치해석 조건

본 연구에서의 수치해석은 RAPP, GCP, Sandy GCP, SCP에 의해 개량된 복합지반의 압밀 거동에 대하여 각각 실시하였다.

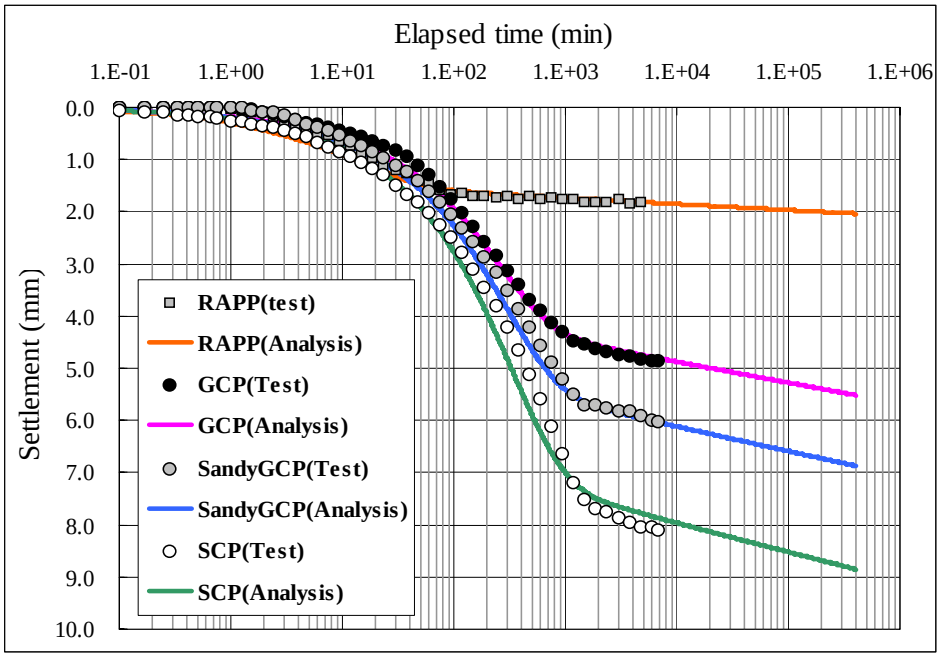
수치해석은 네 종류의 다짐말뚝에 대하여 치환율이 10%인 경우에 대하여 복합지반의 시간 경과에 따른 지표면 침하량의 변화, 다짐말뚝의 통수능 비교·분석, 압밀시간의 비교·분석으로 모두 3가지의 경우에 대하여 수행하였다.

또한 복합지반의 초기상태에 대한 재하압력증분은 <표 3.6.3>에 나타낸 실내모형실험의 조건과 동일하게 상정하여 수행하였다.

아. 수치해석 검증 및 결과 분석

(1) 복합지반 침하의 시간에 따른 변화

<그림 3.6.12>는 수치해석 결과로부터 얻은 복합지반의 시간 경과에 따른 지표면 침하량의 변화를 나타내고 있다.

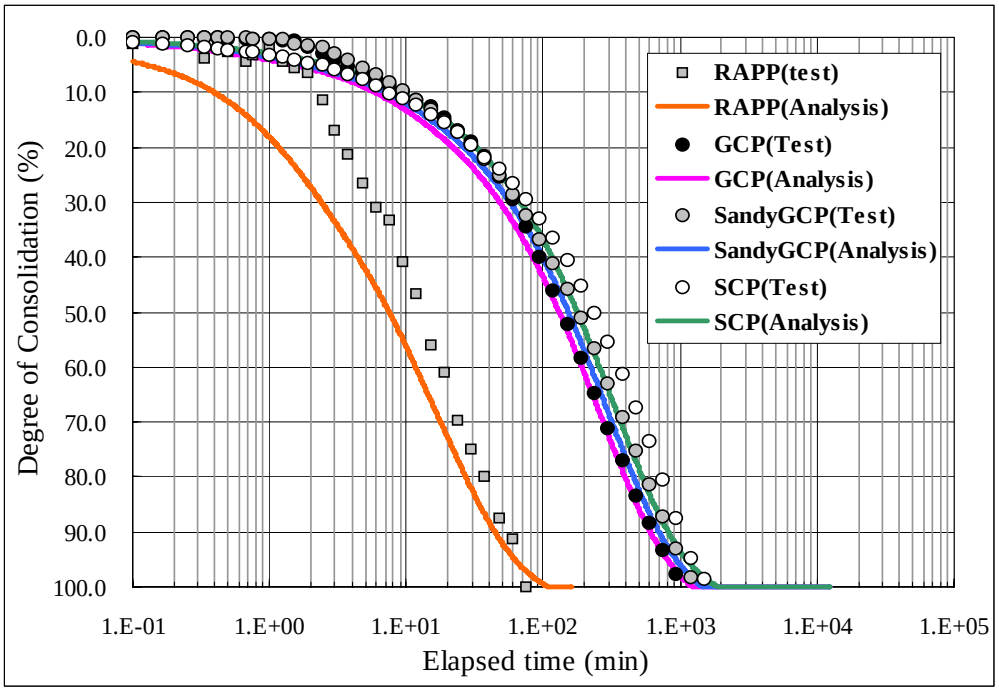


<그림 3.6.12> 시간경과에 따른 침하량의 변화

그림에는 본 연구에서 수행한 수치해석 방법의 신뢰성 검증을 위하여 실내모형실험 결과를 함께 도시하여 비교하였다. 모든 경우에 대하여 수치해석의 결과는 실내모형실험의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 각각의 다짐말뚝에 의한 복합지반에서의 침하량의 변화로부터 복합지반 중 점토부에서의 압밀현상에 의한 체적변화가 일어나고 있음을 알 수 있으며, 두 결과 모두 일차압밀현상이 종료된 후에도 2차 압밀거동이 완만하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 한편, 상대적으로 강성이 큰 다짐말뚝에 의한 복합지반의 침하량이 적게 나타나고 있음을 알 수 있다.

(2) 점토지반에 타설된 RAPP의 통수능 비교 · 분석

<그림 3.6.13>은 실내모형실험과 수치해석으로부터 얻은 복합지반의 압밀도가 시간의 경과에 따라 변화하는 양상을 보여주고 있다. 여기서 압밀도 U_s는 복합지반의 침하량의 시간에 따른 변화로부터 산정하였으며, 일차압밀종료시간은 점토부의 과잉간극수압이 거의 소산된 시점의 경과시간으로 결정하였다.



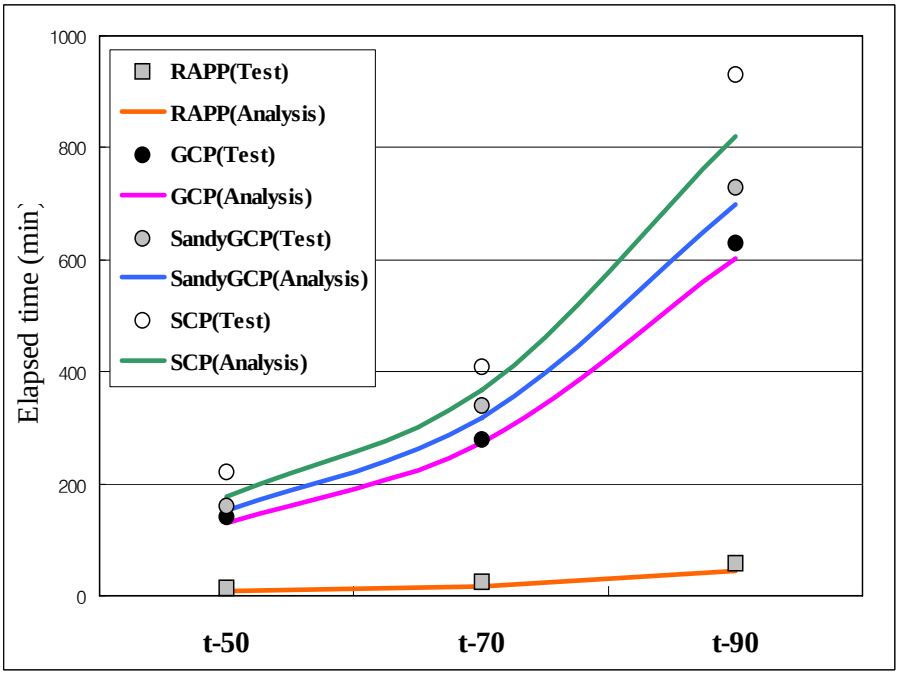
<그림 3.6.13> 시간경과에 따른 복합지반의 압밀도 변화

$$U_s(\%) = \frac{s}{s_f} \times 100 \qquad \text{(식 3.6.1)}$$

여기서, s 및 s_f는 각각 임의의 시간에서의 침하량과 일차압밀종료시점에서의 침하량을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 RAPP, GCP, Sandy GCP, SCP에 의한 복합지반 순으로 압밀이 빠르게 진행됨을 알 수 있다.

(3) 압밀시간의 비교 · 분석

<그림 3.6.14>는 본 연구에서 수행한 실내모형실험과 수치해석으로부터 얻은 복합지반의 압밀시간을 나타내고 있다. 즉, 각각의 경우에 대하여 압밀도 50%인 경우의 시간 (t-50), 압밀도 70%인 경우의 시간 (t-70), 압밀도 90%인 경우의 시간 (t-90)을 나타내었다. 수치해석의 결과로부터 얻은 압밀시간은 모형실험으로부터 얻은 결과보다 약간 작은 값을 나타내고 있지만 두 경우 모두 RAPP, GCP, Sandy GCP, SCP의 순으로 빠른 압밀시간을 보이고 있다. 따라서 복합지반에서의 압밀은 RAPP로 개량된 경우가 가장 신속하게 발생되고 있음을 판단할 수 있다.



<그림 3.6.14> 실내모형실험과 수치해석으로부터 얻은 복합지반의 압밀시간

2. 원지반 구속을 고려한 점토혼입 효과에 대한 모형실험 및 수치해석

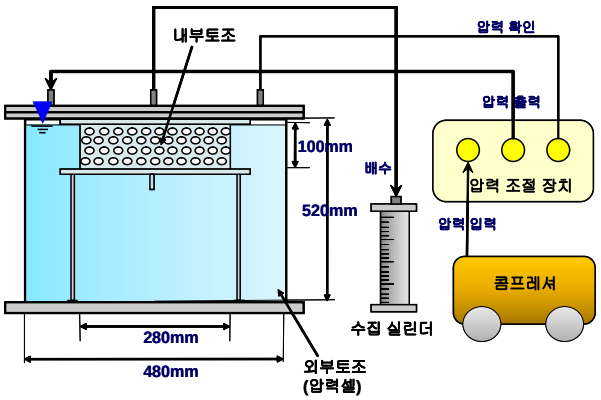
가. 실험장치

(1) 모형토조

<그림 3.6.15>와 <그림 3.6.16>은 점토 혼입 양상에 대한 실험의 모습과 실험장치의 상세도를 나타내고 있다.



<그림 3.6.15> 실내모형실험장치 모습



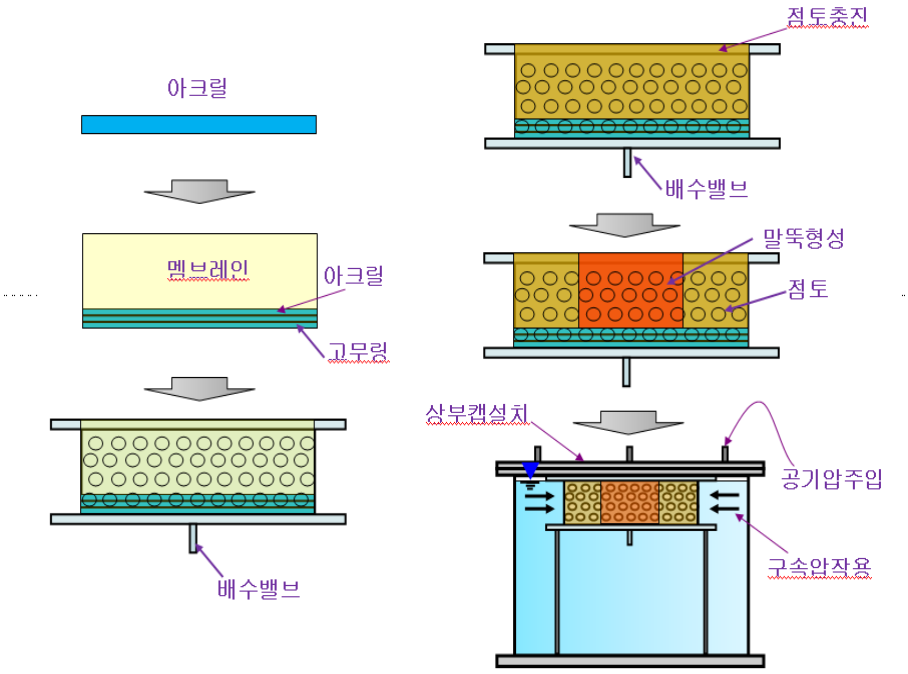
<그림 3.6.16> 실내모형실험장치 상세도

본 실험에 사용된 내부토조는 내경 280mm, 높이 100mm이며 측면에 직경 10mm의 구멍을 다수 만들어 압력조절장치로부터 외부토조에 채워진 물로 전해진 압력이 내부토조 내의 점토에 구속압으로 균등하게 전달될 수 있도록 하였다.

또한, 압력 조절 장치를 사용하여 콤프레셔로부터 전달된 압력을 소정의 구속압으로 조절이 가능하도록 하였다.

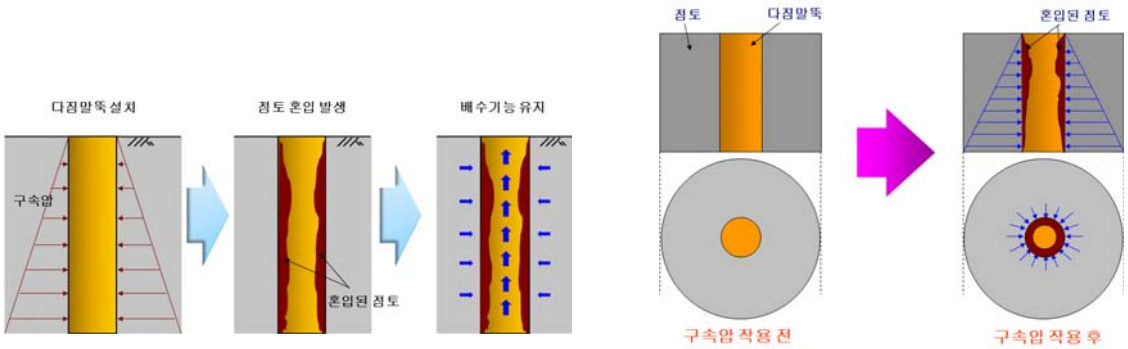
점토시료에 가해진 구속압에 의해 토조 내부의 포화된 다짐말뚝으로부터 배수되는 물의 양을 측정하기 위해 수집실린더를 사용하였으며, 압력셀의 상부에는 압력 공급 벨브와 배수용 벨브 이외에 압력셀로 전달된 압력이 일정하게 유지되고 있는 지 확인하기 위한 압력 확인용 벨브를 추가로 제작하였다.

<그림 3.6.17>은 복합지반이 설치되는 내부토조의 결합순서와 외부토조에 거치되는 일련의 과정을 나타내고 있다.



<그림 3.6.17> 내부토조 상세도

<그림 3.6.18(a)>은 원지반의 구속압을 통해 다짐말뚝 표면에서 발생되는 점토 혼입 양상을 묘사하였으며 <그림 3.6.18(b)>는 실내모형실험을 통해 구속압이 점토로 전달되어 다짐말뚝에 혼입되어지는 과정을 그림으로 나타내었다.

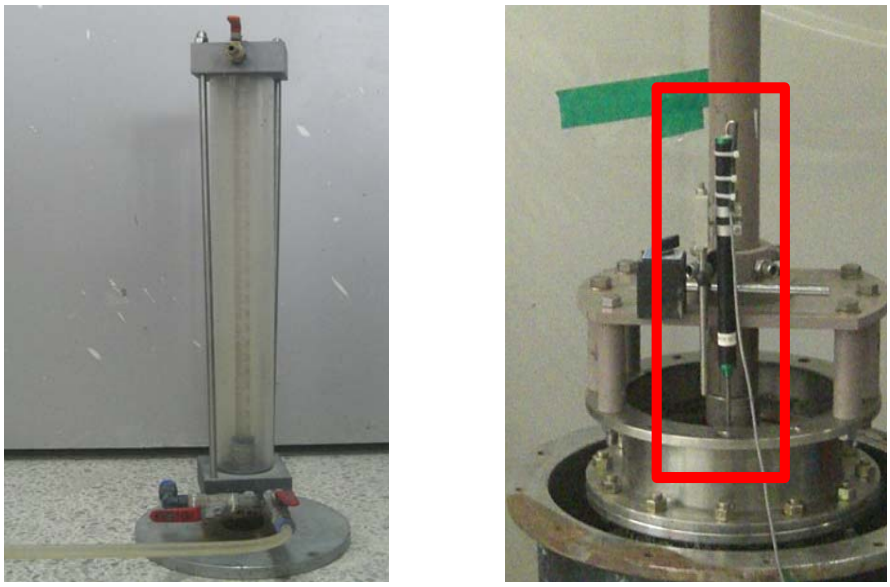


(a) 점토의 혼입 양상 (b) 구속압 작용

<그림 3.6.18> 점토의 혼입 양상 및 구속압 작용

(2) 계측장치

원지반을 조성하기 위한 예비압밀을 실시할 때 압밀종료 시점과 최종 침하량을 계측하기 위하여 침하량계를 <그림 3.6.19>와 같이 하중재하판 위에 설치하여 예비압밀을 진행하였다. 그리고 포화된 말뚝으로부터 구속압에 의해 배수되는 물의 양을 정확하게 측정하기 위하여 수집실린더를 사용하였다.



(a) 수집실린더 (b) 침하량계

<그림 3.6.19> 계측장치

(3) 압력조절장치 및 콤프레셔

콤프레셔는 압력조절장치로 압력을 전달하는 역할을 하게 되며 압력조절장치에서는 콤프레셔로부터 전해진 압력을 소정의 압력으로 조절하여 밸브를 통해 외부토조에 채워진 물로 전달하는 역할을 한다.

또한 압력확인용 밸브를 별도로 설치하여 토조 내부에 작용하는 압력을 확인할 수 있도록 하였다.



(a) 압력조절장치



(b) 콤프레셔

<그림 3.6.20> 압력조절장치 및 콤프레셔

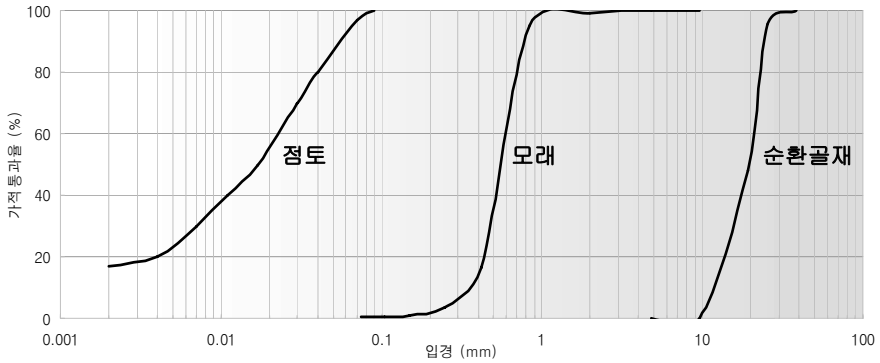
나. 사용시료 및 실험조건

(1) 사용시료

점토 혼입 양상에 관한 모형실험을 위해 광양지역에서 채취한 자연점토를 사용하였으며, 점토의 물리적 특성은 <표 3.6.5>에 나타낸 바와 같다. <그림 3.6.21>은 점토 및 말뚝에 사용된 순환골재와 모래의 입도분포 곡선을 나타낸 것이다.

<표 3.6.5> 점토의 물리적 특성

G_S	W_L	W_P	I_P	흙분류
2.65	56.5 %	31.2 %	25.3	CH



<그림 3.6.21> 사용시료의 입도분포곡석

(2) 실험조건

본 실험은 4m 심도의 지중응력 상태를 가지는 지반을 각기 다른 압밀도(50%, 75%, 100%)로 조성한 후 실험을 진행하여 지반의 압밀도에 따른 점토의 혼입 양상을 비교·분석하고자 하였으며, SCP와 GCP, RAPP 등 각기 다른 세 가지 종류의 말뚝을 사용하여 말뚝의 종류에 따른 점토 혼입 양상을 비교하고자 하였다.

또한 심도별 점토 혼입 양상을 살펴보기 위해 2m, 8m 심도의 지중응력 상태를 가지는 지반을 100% 압밀도로 조성한 후GCP와 RAPP에 대하여 각각 실험을 진행하였다.

각 심도별 구속압과 예비압밀압력은 (식 3.6.2)와 (식 3.6.3)과 같이 산정하였다. 정지토압계수는 일반적인 포화조밀점토의 값인 0.36을 사용하여 구속압을 산정하였다.

<표 3.6.6>은 각 실험의 조건을 정리한 것이다.

$$\sigma_h = K_0 \cdot \gamma_{sub} \cdot h + \gamma_w \cdot h \qquad \text{(식 3.6.2)}$$

$$\sigma_v = \gamma_{sub} \cdot h \qquad \text{(식 3.6.3)}$$

여기서, K_0 : 정지토압계수

γ_{sub} : 수중단위중량

h : 심도

<표 3.6.6> 모형실험 조건

실험 케이스	말뚝 종류	원지반 심도 (m)	예비압밀압력 (kPa)	구속압 (kPa)	원지반 압밀도 (%)	치환율 (%)	말뚝높이 (mm)
G-2-050	GCP	2	22.5	26	50	29	80
S-2-050	SCP						
R-2-050	RAPP						
G-2-075	GCP				75		
S-2-075	SCP						
R-2-075	RAPP						
G-2-100	GCP				100		
S-2-100	SCP						
R-2-100	RAPP						
G-4-050	GCP	4	45	52	50		
S-4-050	SCP						
R-4-050	RAPP						
G-4-075	GCP				75		
S-4-075	SCP						
R-4-075	RAPP						
G-4-100	GCP				100		
S-4-100	SCP						
R-4-100	RAPP						
G-8-050	GCP	8	90	104	50		
S-8-050	SCP						
R-8-050	RAPP						
G-8-075	GCP				75		
S-8-075	SCP						
R-8-075	RAPP						
G-8-100	GCP				100		
S-8-100	SCP						
R-8-100	RAPP						

다. 실험 방법

(1) 준비사항

① 점토, 골재(19-40mm), 모래(표준사)
② 멤브레인, 토목섬유(배수재)
③ 예비압밀용 가이드, 예비압밀용 추, LVDT 1개

(2) 실험방법

(가) 원지반 조성 예비압밀

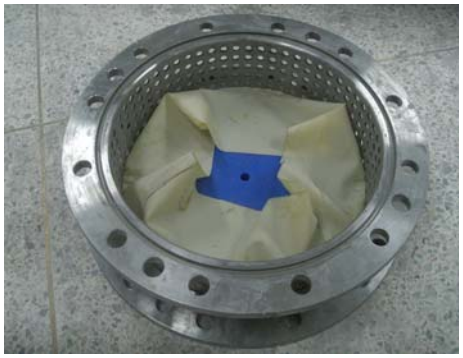
<그림 3.6.22(a)>와 같이 아크릴에 멤브레인을 고정시켜 점토와 말뚝이 설치될 내부 토조에 결합시키고 외부 토조에 <그림 3.6.22(c)>와 같이 거치시킨 후 예비압밀용 상부 토조를 조립하여 점토를 충진시킨다. 심도 2m와 4m의 지반에 작용하는 응력을 각각 산정하여 그에 상응하는 하중을 <그림 3.6.22(f)>와 같이 추를 이용하여 예비압밀을 실시한다. 심도 8m의 경우는 큰 예비압밀압력이 필요하므로 원형토조 하중 재하 시스템을 통해 예비압밀을 실시하였다.

(나) 복합지반 조성 및 구속압 작용

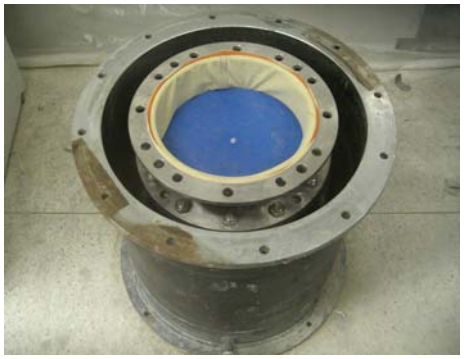
예비압밀이 끝난 점토에 대하여 <그림 3.6.23(a)>와 같이 직경 150mm의 케이싱 장비를 이용하여 말뚝이 설치될 부분의 점토를 제거한다. 미리 제작된 RAPP를 <그림 3.6.23(c)>와 같이 설치한 후 포화시켜 복합지반을 조성하고, 압력조절장치로부터 전해진 압력을 구속압 형태로 복합지반에 전달할 수 있도록 외부 토조에 물을 가득 채워 넣는다. GCP와 SCP의 경우 점토를 제거한 부분에 소정의 다짐에너지로 주변 점토가 교란되지 않게 다져 넣은 후 실험을 실시하였으며, 말뚝을 포화 시킬 때 측정한 물의 양으로 말뚝의 간극비를 계산하여 각 말뚝이 일정한 간극비를 가지도록 말뚝을 조성하였다. 조성이 완료된 토조의 상부에 캡을 조립하고 <그림 3.6.23(e)>와 같이 압력밸브를 연결한 후 압력조절장치를 이용하여 구속압을 작용시키고 포화된 말뚝으로부터 수집실린더로 배출된 물의 양을 측정한다.



(a) 멤브레인 고정



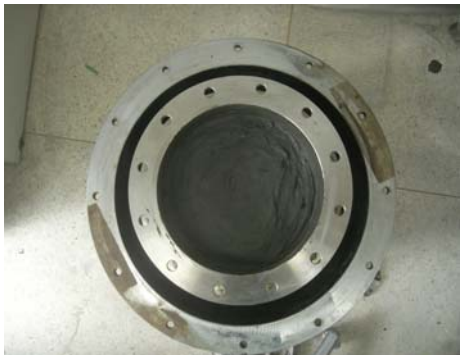
(b) 내부토조에 설치



(c) 외부 토조에 거치



(d) 배수재 포설 및 상단토조 설치



(e) 시료 충진



(f) 예비압밀 실시

<그림 3.6.22> 원지반 조성 예비압밀과정



(a) 케이싱 관입



(b) 말뚝부 점토 제거



(c) 말뚝 설치



(d) 말뚝 포화



(e) 상부캡 설치 및 구속압 작용



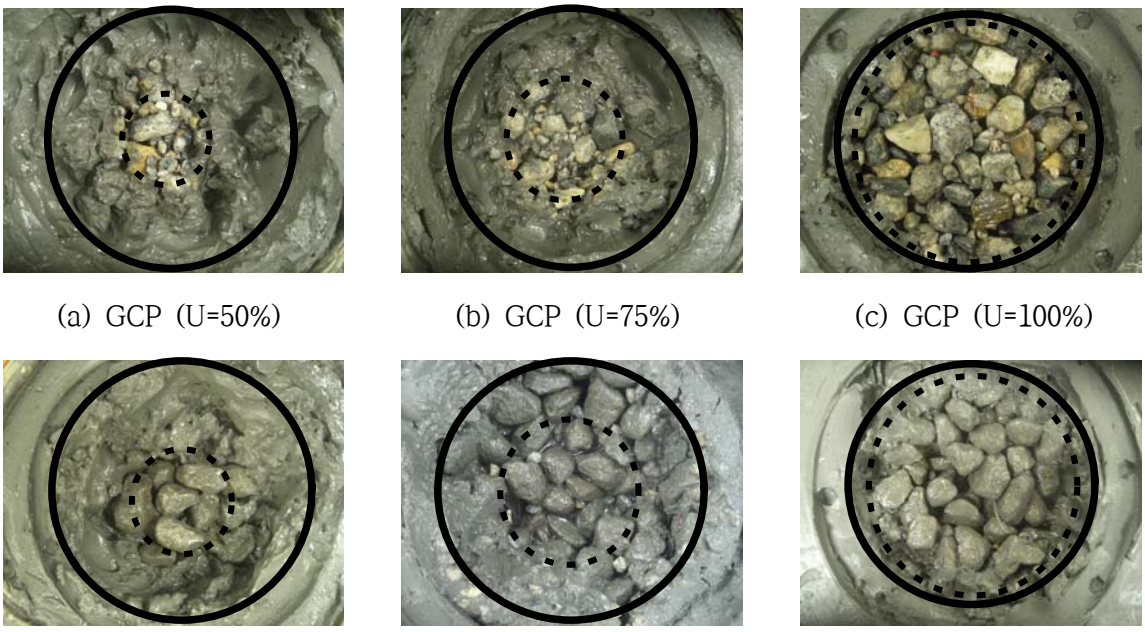
(f) 배수량 측정

<그림 3.6.23> 복합지반 조성 및 구속압 작용 과정

라. 모형실험 결과 및 분석

(1) 점토의 혼입에 의한 말뚝 치환율의 변화

<그림 3.6.24>는 실험종료 후 말뚝의 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 압밀도가 낮아질수록 혼입되는 점토의 양이 많아지는 것을 확인할 수 있다.



(a) GCP (U=50%) (b) GCP (U=75%) (c) GCP (U=100%)

(d) RAPP (U=50%) (e) RAPP (U=75%) (f) RAPP (U=100%)

<그림 3.6.24> 실험종료 후 압밀도별 말뚝의 모습

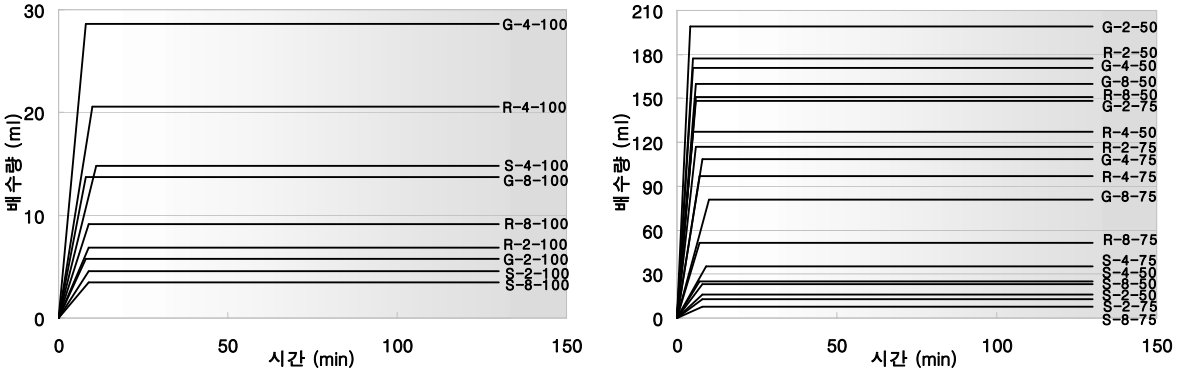
말뚝의 간극으로 혼입된 점토의 양은 포화된 말뚝으로부터 구속압에 의해 빠져나온 물의 양과 같다고 볼 수 있다. 말뚝 포화시 사용된 물의 양을 통해 말뚝의 간극비를 측정하여 말뚝 간극의 체적에 대한 점토의 혼입양을 산정하였다. 점토의 혼입으로 인해 변화된 치환율을 이용하여 (식 3.6.4)와 같이 치환저감율(R_d)을 산정하였다. 치환저감율은 점토의 혼입에 의한 치환율의 저감 양상을 수치화 한 것이다.

$$R_d = \frac{As_d}{As_o} \qquad \text{(식 3.6.4)}$$

여기서, R_d : 치환저감율 A_{sd} : 변화된 치환율 A_{s0} : 초기 치환율(29%)

<그림 3.6.25>는 구속압에 의해 포화된 말뚝으로부터 배수된 물의 양을 측정한 그래프이다.

그림에서와 같이 압밀도 100%에서는 압밀도 50%와 75%에 비해 비교적 적은 양의 물이 배수된 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 압밀도가 증가할수록 혼입되는 점토의 양이 적다는 것을 알 수 있다.



(a) 압밀도 100%시 배수량 (b) 압밀도 50%, 75%시 배수량

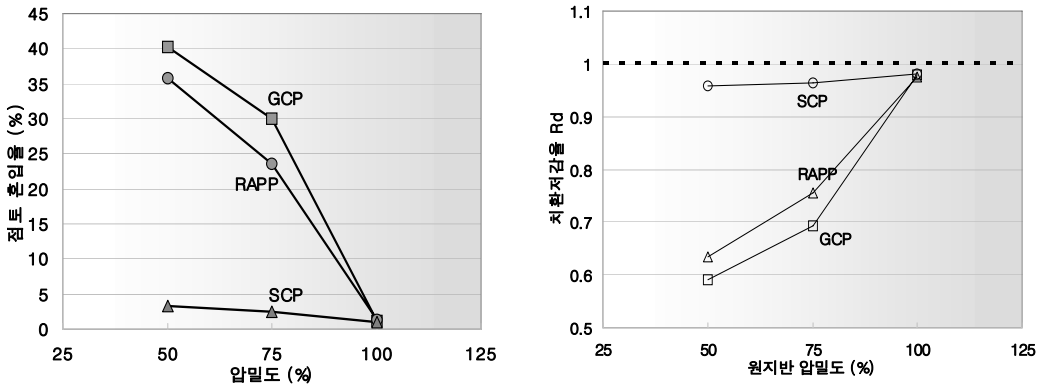
<그림 3.6.25> 시간경과에 따른 배수량 측정

(가) 원지반의 압밀정도에 따른 점토의 혼입 양상

원지반 심도 2m와 4m, 8m에 상응하는 구속압을 작용시켜 말뚝의 간극 체적에 대한 점토의 혼입율과 치환저감율을 나타낸 결과는 <그림 3.6.26>~<그림 3.6.28>과 같다.

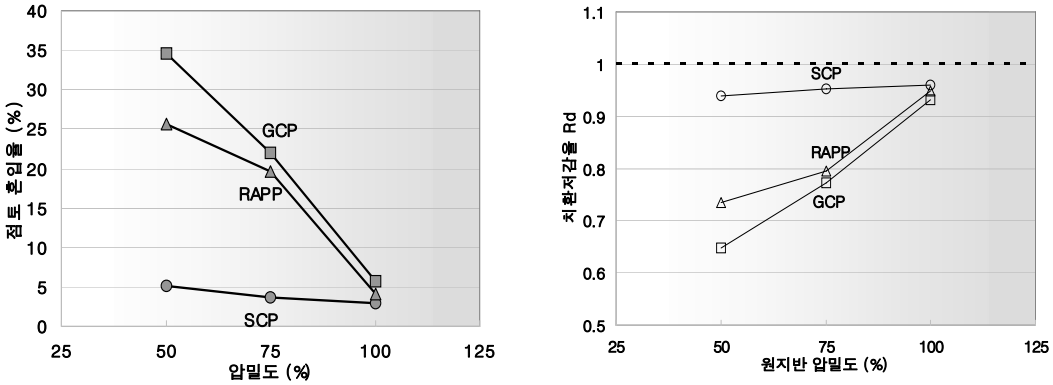
<그림 3.6.26>과 같이 2m의 구속압을 작용시킨 경우에 대하여 말뚝의 종류별로 점토의 혼입 양상을 살펴본 결과 GCP가 점토 혼입 양이 가장 많았으며 RAPP와 SCP 순으로 적은양의 점토가 혼입된 것을 알 수 있었으며, 원지반의 압밀정도가 낮아질수록 점토의 혼입양은 증가하는 경향을 보였다.

이 같은 결과는 심도별로 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있으며, SCP의 경우 비교적 작은 간극으로 인해 점토의 혼입은 거의 발생하지 않았다는 사실을 확인할 수 있다.



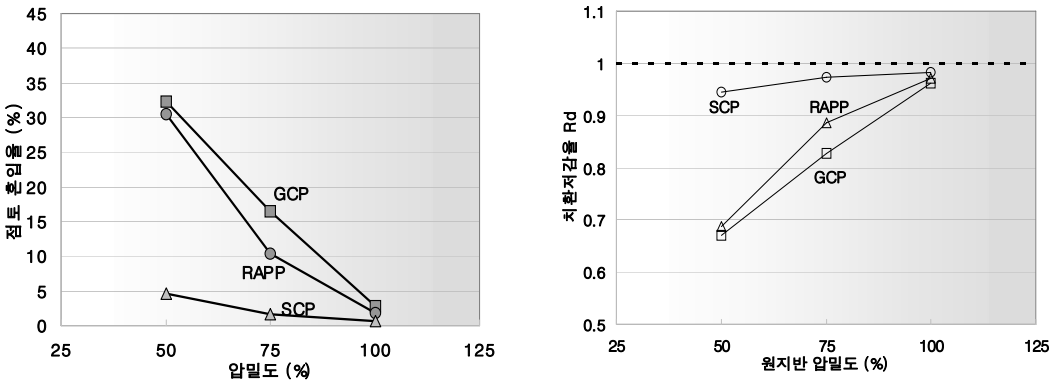
(a) 점토혼입률 (b) 치환저감율

<그림 3.6.26> 원지반 압밀도에 따른 점토혼입률과 치환저감율(심도 2m)



(a) 점토혼입률 (b) 치환저감율

<그림 3.6.27> 원지반 압밀도에 따른 점토혼입률과 치환저감율(심도 4m)



(a) 점토혼입률 (b) 치환저감율

<그림 3.6.28> 원지반 압밀도에 따른 점토혼입률과 치환저감율(심도 8m)

(나) 심도별 구속압에 따른 점토의 혼입 양상

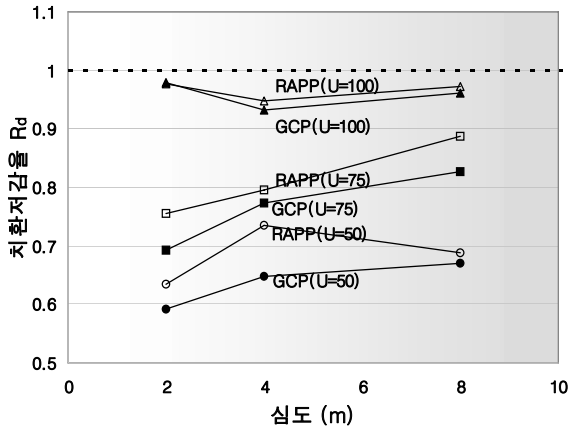
지반의 심도별로 혼입되는 점토의 양상을 살펴보기 위해 2m, 4m, 8m에 상응하는 구속압을 작용시켜 각각 실험을 진행하였으며 그 결과는 <그림 3.6.29>와 같다.

압밀도 100%의 경우에 대하여 RAPP와 GCP의 심도별 점토의 혼입 양은 4m 구속압 작용 시 가장 크게 나타났으며 2m와 8m로 갈수록 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다.

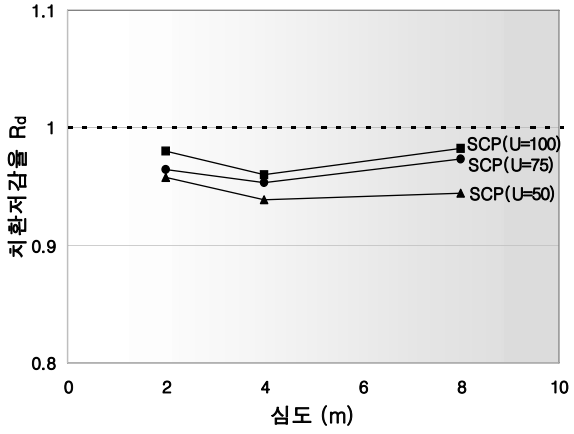
추가적으로 원지반 압밀도가 50%와 75%인 경우 RAPP와 GCP에 대한 심도별 치환저감율을 함께 도시하여 압밀도와 심도별 치환저감율을 비교하였고 그림과 같이 원지반 압밀도가 감소할수록 점토 혼입양이 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

또한, 압밀도 75%의 경우 4m의 경우와는 달리 심도가 낮아질수록 점토의 혼입양은 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 압밀도 50%인 경우에 8m에서의 혼입양은 4m에서와 비슷한 결과를 나타내고 있고 2m에서 가장 많은 양의 점토가 혼입되었다는 사실을 알 수 있다.

<그림 3.6.30>은 SCP의 결과를 나타낸 그래프로써, 모든 실험에서 치환저감율 0.9 이상의 값을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 GCP와 RAPP에 비해 비교적 작은 간극을 가지는 SCP의 특성 때문인 것으로 판단된다.



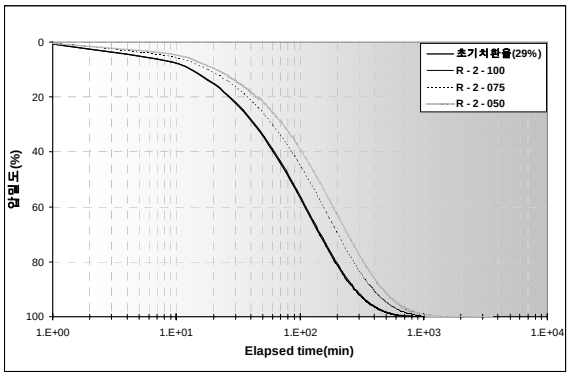
<그림 3.6.29> 구속압에 따른 치환저감율



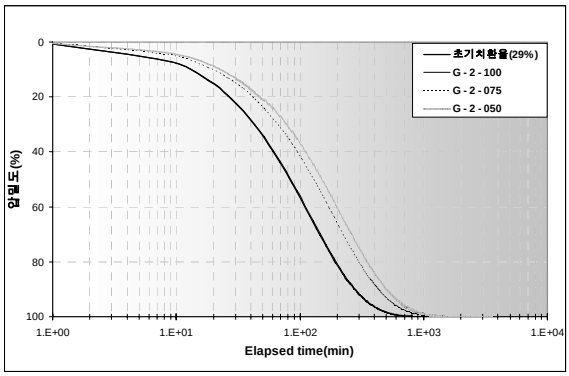
<그림 3.6.30> 구속압에 따른 치환저감율(SCP)

(2) 점토혼입에 의한 압밀시간의 변화

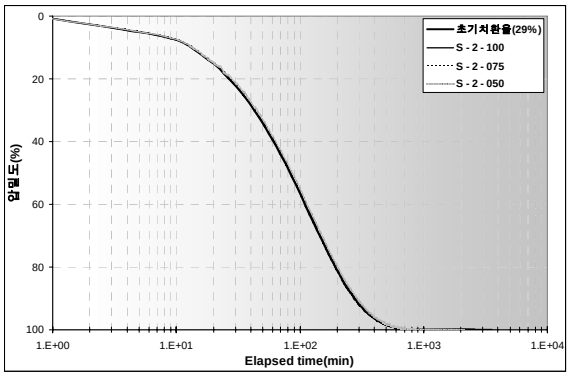
변화된 치환율이 압밀시간에 미치는 영향을 정성적으로 알아보기 위해 Barron의 압밀이론식을 이용하여 RAPP에 대한 시간에 따른 압밀도 변화를 <그림 3.6.31>과 같이 나타내었다.



(a) RAPP



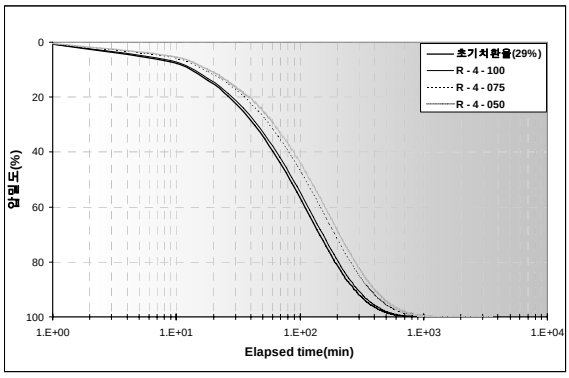
(b) GCP



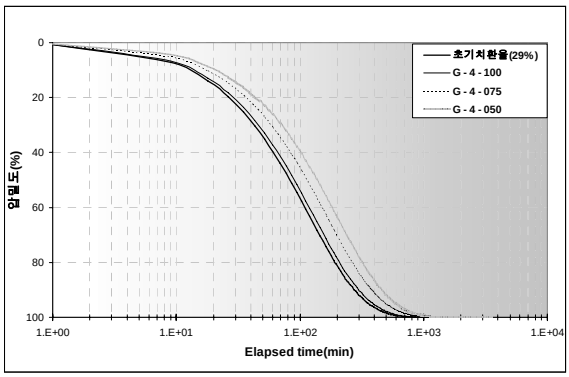
(c) SCP

<그림 3.6.31> 시간경과에 따른 압밀도의 변화(심도 2m)

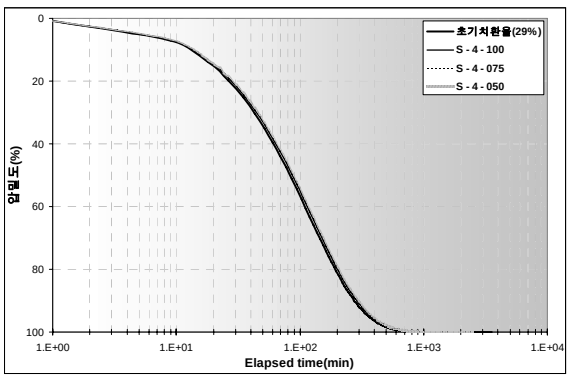
<그림 3.6.31>은 각각 GCP와 RAPP, SCP에 대해 심도 2m의 구속압을 작용시켜 변화된 치환율을 Barron의 압밀 이론식에 적용시킨 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 SCP의 경우 점토 혼입에 따른 치환율의 변화가 크지 않기 때문에 압밀시간에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 또한, RAPP와 GCP의 시간에 따른 압밀도 변화를 비교해보면 GCP가 RAPP보다 다소 큰 압밀시간의 지연 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. <그림 3.6.32>와 <그림 3.6.33>은 각각 4m와 8m에 대한 시간에 따른 압밀도를 나타낸 그림이다.



(a) RAPP

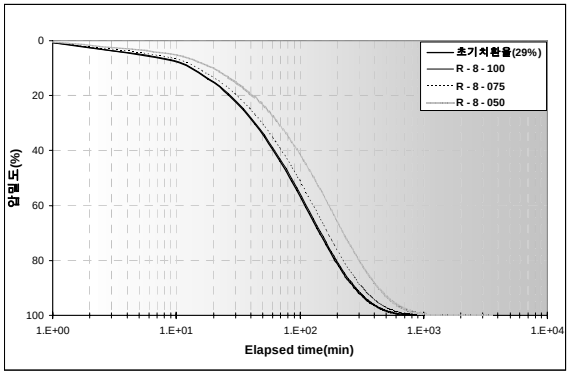


(b) GCP

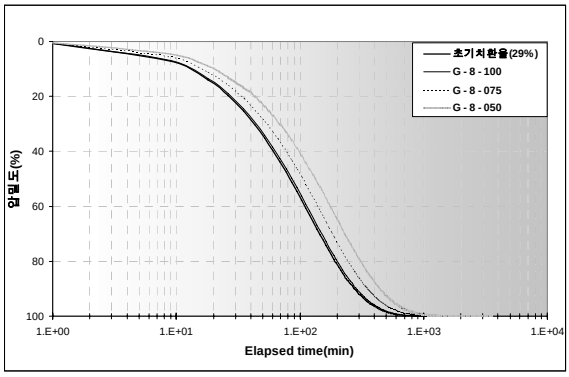


(c) SCP

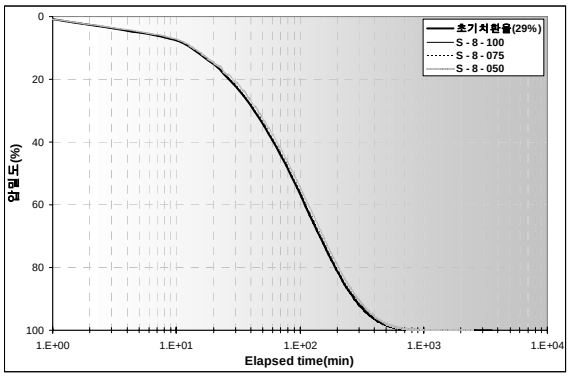
<그림 3.6.32> 시간경과에 따른 압밀도의 변화(심도 4m)



(a) RAPP



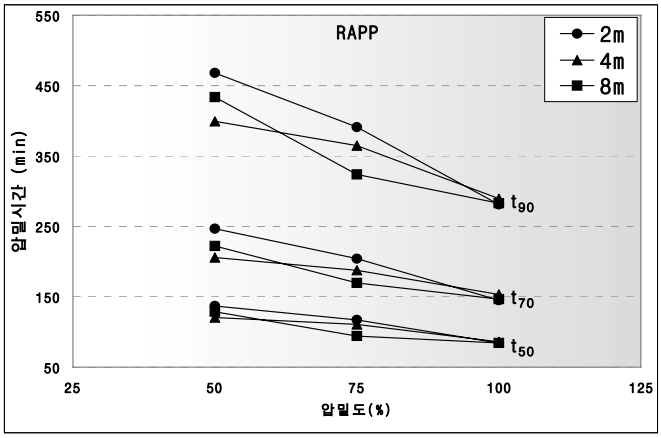
(b) GCP



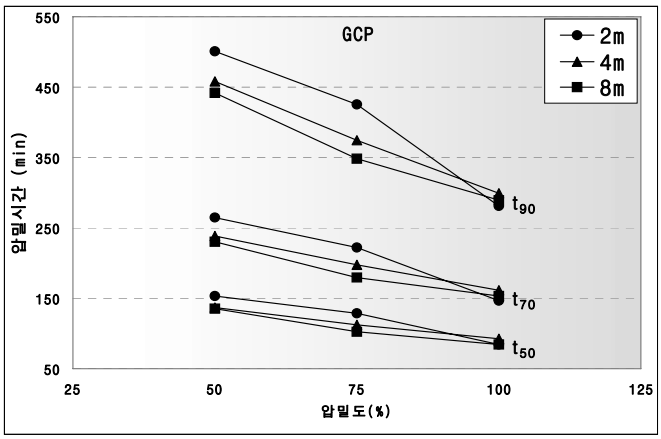
(c) SCP

<그림 3.6.33> 시간경과에 따른 압밀도의 변화(심도 8m)

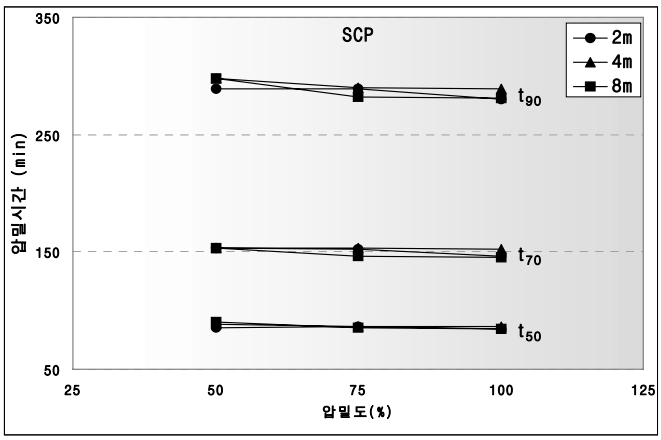
심도별 시간경과에 따른 압밀도의 변화에서 얻은 결과를 바탕으로 압밀도에 따라 t_{50}, t_{70}, t_{90}의 변화 양상을 알아보았으며 그 결과는 <그림 3.6.34>와 같다. 압밀도가 감소할수록 압밀시간은 점차 증가하고 있으며, 심도별로 비슷한 증가 양상을 나타내고 있다. 이는 점토혼입에 의해 변화된 치환율이 압밀지연효과를 유발하는 것을 나타내고 있다.



(a) RAPP

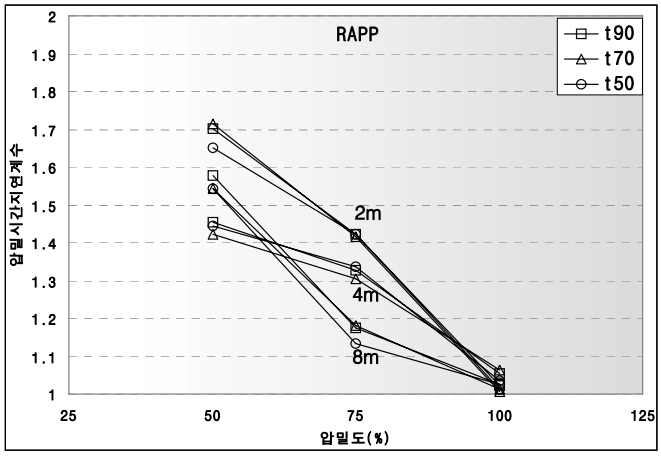


(b) GCP

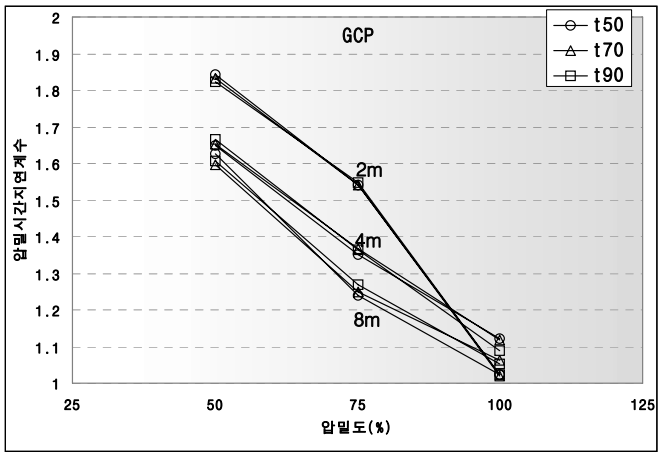


(c) SCP

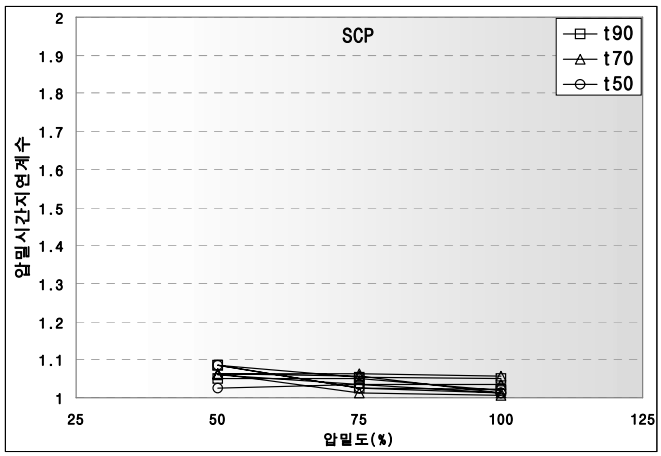
<그림 3.6.34> 압밀도에 따른 압밀시간



(a) RAPP



(b) GCP



(c) SCP

<그림 3.6.35> 압밀도에 따른 압밀시간 지연계수

<그림 3.6.34>에서 나타낸 결과와 말뚝의 초기치환율(29%)에 대한 압밀시간을 이용하여 혼입된 점토에 의한 압밀지연의 양상을 알아보고자 (식 3.6.5)를 통해 압밀시간지연계수(D_t)를 산정하였으며, 그 결과는 <그림 3.6.35>와 같다.

$$D_t = \frac{t_d}{t_0} \qquad \text{(식 3.6.5)}$$

여기서, t_d : 변화된 치환율에 대한 압밀시간, t_0 : 초기 치환율에 대한 압밀시간

치환저감율과 원지반의 압밀도가 낮아질수록 압밀시간은 지연되고 있음을 알 수 있으며, RAPP와 GCP에 대해 심도 2m에서 압밀시간지연효과가 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3. 점토혼입 영향에 대한 종합분석

본 연구에서는 저치환율의 RAPP와 GCP, Sandy GCP, SCP에 의한 복합지반의 압밀거동을 분석하고 각각의 다짐말뚝에 대한 통수능력을 비교 평가하기 위하여 원통형 실내모형 압밀실험과 다짐말뚝의 탄소성거동과 연약지반의 이차압밀거동을 표현할 수 있는 다차원 축대칭 압밀해석을 실시하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 실내모형실험의 결과로부터 복합지반의 침하량은 SCP, Sandy GCP, GCP, RAPP의 순서로 크게 발생되었지만 일차압밀이 종료되는 시점은 그와 반대로 RAPP, GCP, Sandy GCP, SCP의 순으로 빠르게 나타남을 알 수 있었다.

② 실내모형실험의 결과로부터 모든 경우의 복합지반에서는 일차압밀침하가 종료된 이후에도 2차압밀이 지속적으로 발생되고 있음을 알 수 있었으며 발생된 2차 압밀 침하량은 SCP, Sandy GCP, GCP, RAPP의 순으로 크게 발생됨을 확인하였다.

③ 실내모형실험에서 복합지반의 침하 거동을 분석한 결과 RAPP에 의해 개량된 복합지반에서 일차압밀에 대한 침하저감효과가 탁월함을 알 수 있으며 2차 압밀 침하에 대해서도 저감효과가 크게 나타남에 따라 RAPP공법이 GCP나 Sandy GCP

공법, SCP공법에 비하여 압밀침하거동에 대한 단기적 안정성 및 장기적 안정성 확보에 유리함을 알 수 있었다.

④ 실내모형실험에서 복합지반의 일차압밀이 종료 된 후 복합지반의 상부와 종단면의 모습을 확인한 결과 모든 다짐말뚝에 주변 점토가 혼입된 모습을 관찰할 수 없었다. 따라서 금번 실내모형실험에서는 다짐말뚝에 대한 Clogging 현상이 발생되지 않았으며 압밀 초기부터 종료 시 까지 모든 다짐말뚝의 통수성능이 일정하게 유지되었음을 알 수 있었다.

⑤ 각각의 다짐말뚝에 대한 실내모형실험과 수치해석으로부터 얻은 복합지반의 압밀도를 산정하여 비교한 결과 RAPP, GCP, Sandy GCP, SCP에 의한 복합지반 순으로 압밀이 빠르게 진행됨을 알 수 있었다. 또한 각각의 다짐말뚝에 의한 압밀의 진행에 따른 압밀시간을 산정하여 비교한 결과 압밀도 50%, 70%, 90%인 경우의 시간 모두 RAPP, GCP, Sandy GCP, SCP에 의한 복합지반 순으로 빠르게 나타났다. 따라서 복합지반에서의 압밀은 RAPP로 개량된 경우가 가장 신속하게 발생되고 있음을 판단할 수 있었다.

⑥ 이상의 결과들을 종합적으로 판단해 보면 본 연구의 범위에서 RAPP에 의한 지반개량효과가 가장 탁월하다는 것을 알 수 있다. 즉, 비교적 큰 강성을 갖는 RAPP에 의한 복합지반에서 침하저감효과와 응력분담비가 가장 크게 나타났으며 이러한 결과로부터 복합지반의 점토부에 가장 적은 과잉간극수압과 체적변화가 발생하게 되었다. 따라서 다짐말뚝의 간극 속으로 점토부의 간극수를 유입 시키려고 하는 과잉압력이 작고 측방으로 소성 유동되는 점토의 양이 적기 때문에 다짐말뚝의 간극으로 유입되려는 점토의 양도 매우 적게 될 것으로 생각되며 결국 RAPP 공법의 경우 타 공법에 비해 다짐말뚝의 간극은 비교적 크지만 Clogging 현상에 의한 통수성능 저하는 발생되지 않으리라 판단된다.

제 7 절 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 현장시험시공

1. 현장장비 적용성에 따른 시험시공

가. 장비개발 계획안

2차년도에는 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법에 대한 기존 시공장비의 적용성을 검토하였다. 기존 다짐말뚝 시공장비의 현황에 대해 살펴보면 다음과 같다.

(1) 기존 다짐말뚝 장비 현황

기존 다짐말뚝 시공장비의 주요 구성은 <그림 3.7.1>에 나타낸 바와 같이 Crane, Skip Bucket, Hopper, Wheel Loader, Casing 및 Air Compressor 등으로 구성되어 있다.

<표 3.7.1> 기존 다짐말뚝 장비 현황

NO.	명 칭	규 격	단위	수량	비고
1	Crane	70~80ton	대	1	Crawler
2	Leader Set	L=36m	Set	1	
3	Casing	D406mm t=20mm	Set	1	
4	Skip Bucket	1.0m^3	Set	1	
5	Hopper	1.0m^3	Set	1	
6	Vibro Hammer	120kW	대	1	
7	Generator	350kW	대	1	
8	Air Compressor	25m^3/min	대	1	
9	Wheel Loader	2.0m^3	대	2	
10	Recorder	-	대	1	
11	Accessory	-	식	1	



(a) Crane



(b) Skip Bucket



(c) Hopper



(d) Wheel Loader



(e) Casing



(f) Air Compressor

<그림 3.7.1> 기존 다짐말뚝 시공장비의 주요 구성

(2) 다공질 콘크리트말뚝 장비 개발 계획안

다공질 콘크리트말뚝 장비에 대한 개발계획안은 <표 3.7.2>와 같다. 기본적으로는 기존의 시공장비와 동일한 제원을 갖고 있으나, 2차년도의 연구성과를 바탕으로 기존 시공장비의 적용성을 검토하여 개발공법의 시공장비 개발시 활용하고자 한다.

<표 3.7.2> 다공질 콘크리트 장비 개발 계획안

NO.	명 칭	규 격	단위	수량	비고
1	Crane	70~80ton	대	1	Crawler
2	Leader Set	L=36m	Set	1	
3	Casing	D406mm t=20mm	Set	1	
4	Skip Bucket	1.0m^3	Set	1	
5	Hopper	1.0m^3	Set	1	
6	Vibro Hammer	120kW	대	1	
7	Generator	350kW	대	1	
8	Air Compressor	25m^3/min	대	1	
9	Wheel Loader	2.0m^3	대	2	
10	Recorder	-	대	1	
11	Accessory	-	식	1	



(a) 믹서 트럭 (b) 이동식 배치 플랜트(예정)

<그림 3.7.2> 믹서트럭 및 이동식 배치 플랜트

나. 기존장비의 현장장비 적용성 검토

다공질 콘크리트말뚝공법 시공을 위해 기존 시공장비인 SCP 말뚝 시공장비 및 무진동 무소음 말뚝공법 시공장비에 대해 검토하였다.

(1) 기존 SCP 시공장비 적용시 고려사항

(가) 기존 SCP 시공장비 개요

<표 3.7.3> 기존 SCP 시공장비 개요

No.	명 칭	규 격	단 위	수 량	비 고
1	Crane	70~80ton	대	1	Crawler
2	Leader Set	L=36m	Set	1	
3	Casing	D406mm, T=20mm	Set	1	
4	Sip Bucket	1.0m^3	Set	1	개조 : 방수작업실시
5	Hopper	1.0m^3	Set	1	보강 및 개조
6	Generator	350kW	대	1	
7	Air Compressor	25m^3/min	대	1	진동식
8	Wheel Loader	2.0m^3	대	2	
9	Recorder	-	대	1	
10	이동식 Batch Plant	15m^3/hr	대	1	
11	Silo	60m^3/hr	대	1	
12	물탱크	-	대	1	
13	운반용 Truck	-	대	2	
14	Accessory	-	식	1	
15	Back hoe	1.0m^3	대	1	

(나) Skip Bucket 방수작업 : 순환골재를 시멘트와 배합한 후 장비에 투입함에 있어 이동중 수분의 누수를 방지하기 위하여 Skip Bucket에 고무 개스킷을 설치하여 누수를 방지한다.

(다) Hopper gate 보강 및 Casing 세척작업 : 순환골재 부산물에 의한 게이트 틈새 발

생을 방지하기 위하여 게이트 세척작업 및 작업 후 케이싱 내부 부산물 세척작업을 실시한다.

(라) 순환골재를 배합한 후 이송함에 있어 낮은 슬럼프로 인하여 레미콘 트럭을 이용한 이동이 불가능할 것으로 판단되어 트럭을 이용한 운반을 고려한다.

(2) 무진동 무소음 시공장비

<표 3.7.4> 무진동 무소음 시공장비 개요

No.	명 칭	규 격	단 위	수 량	비 고
1	무한궤도 Crane	70~100톤	대	1	Crawler
2	Auger	150~200Hp	대	1	
3	Leader	31~41m	대	1	
4	Casing	23~33m	대	1	
5	Skip Bucket	1.0m^3	대	1	
6	Air Compressor	10.3~17m^3	대	1	
7	Generator	350kW	대	1	
8	Loader	1.34m^3	대	1	
9	Recorder	250m/m형	대	1	SL, GL, A표시형

(3) 기존 SCP 공법 및 무진동 무소음 다짐말뚝공법의 특징

<표 3.7.5> 공법 비교

구 분		SCP 공법	무진동 무소음 다짐말뚝공법
장 비	크레인	60~80톤	70~100톤
	케이싱 관입방법	Vibro Hammer	오거의 회전력과 자중 (오거+케이싱)
다짐방법		•압축공기와 Vibro Hammer에 의한 케이싱 내부 모래다짐 •케이싱 인발높이 : 3.0m •재관입 깊이 : 2.0m	•오거의 자중(케이싱, 호퍼, 감속기)에 의한 모래다짐 •케이싱 인발높이 : 2.5m •재관입 깊이 : 1.0m

SCP 공법 시공장비와 무진동 무소음 다짐말뚝공법 시공장비에 대해 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 적용성을 검토한 결과, SCP 공법 시공장비의 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법 시공장비 적용성을 확인하기로 하였으며, 타설 용이성을 검토하기 위해 3공(무다짐 말뚝 ø400mm 2공, 다짐말뚝 ø700mm 1공)의 현장시험시공을 수행하였다.

(4) 다공질 콘크리트말뚝공법의 주요 장비





<그림 3.7.3> 시공 전경



<그림 3.7.4> Wheel loader & Skip Bucket



<그림 3.7.5> Air Compressor



<그림 3.7.6> Hopper



<그림 3.7.7> 이동식 Batch Plant(예정)



<그림 3.7.8> Dump Truck(자재운반)



<그림 3.7.9> Cement Silo 및 물탱크

다. 장비적용성 및 타설용이성 검토를 위한 시험시공

(가) 개요

전남 영암 OO부지 조성공사 현장에서 기존 SCP 시공장비를 이용하여 장비 적용성 및 다공질 콘크리트의 타설용이성을 확인하기 위한 시험시공을 실시하였다.

OO부지 조성공사 현장에서 실시된 현장시험시공은 W/C 30%로 배합된 다공질 콘크리트를 사용하여 3공에 대한 시공을 실시하였다. 현장에 있는 SCP 시공장비를 이용하여 무다짐말뚝 ø400mm 2공과 다짐말뚝 ø700mm 1공을 시공하여 기존장비의 적용성 및 투수콘크리트의 타설용이성을 검토하였다.

(나) 시험시공 현황

W/C 30%로 배합된 다공질 콘크리트를 덤프트럭을 이용하여 시험시공 현장으로 반입한 후 다공질 콘크리트의 배합상태 확인을 위하여 슬럼프시험을 수행하였다.

장비적용성 및 타설용이성을 위한 현장시험시공 결과, 기존 SCP 시공장비를 이용하여 다공질 콘크리트말뚝의 시공이 가능하다는 것을 확인하였다.

또한, 다공질 콘크리트 배합시 골재의 상태를 고려한 물 투입량 조절에 대한 세밀한 검토와 기존 SCP 시공장비를 이용하여 다공질 콘크리트말뚝을 타설함에 있어 추가적으로 고려할 문제점들에 대해 보다 심도 있는 검토가 이루어져야 할 것으로 판단되며, 이를 통해 보다 상세한 현장시험시공 계획을 수립하여 보완할 예정이다.

타설용이성 검토를 위한 현장시험시공시 적용된 배합표는 <표 3.7.6>에 제시되어 있으며, <그림 3.7.10>에 말뚝타설 기록지를 나타내었다.

<표 3.7.6> 타설용이성 검토를 위한 다공질 콘크리트 배합표(단위중량 1,728.3kg/m^3 기준)

물(l)	시멘트(kg)	순환골재(kg)
30.0	254.8	1,397.1

<그림 3.7.10>에 제시된 타설기록지를 살펴보면, 관입깊이 10m에 대해 처음 두 차례에 걸쳐 ø400mm 무다짐말뚝이 2공 시공되었고, 그 후에 ø700mm 다짐말뚝이 관입과 인발을 반복하면서 시공된 것을 확인할 수 있다. <그림 3.7.10>의 윗부분의 상부는 타입된 순환골재의 양을 나타내고 있고, 하부는 근입된 케이싱 심도 변화를 나타내고 있다. <그림 3.7.10>의 아랫부분에 위치한 그림은 말뚝 시공시 Vibro Hammer의 전류변화를 나타내고 있다.



<그림 3.7.10> 타설기록지



<그림 3.7.11> 다공질 콘크리트 운반 및 슬럼프 시험용 시료 채취



<그림 3.7.12> 슬럼프 시험 전경 및 시험결과



<그림 3.7.13> Wheel loader를 이용한 다공질 콘크리트 투입



〈그림 3.7.14〉 다공질 콘크리트말뚝 타설 전경



〈그림 3.7.15〉 ø400mm 다공질 콘크리트말뚝 타설 후 말뚝 직경 확인



〈그림 3.7.16〉 ø700mm 다공질 콘크리트말뚝 타설 후 말뚝 직경 확인

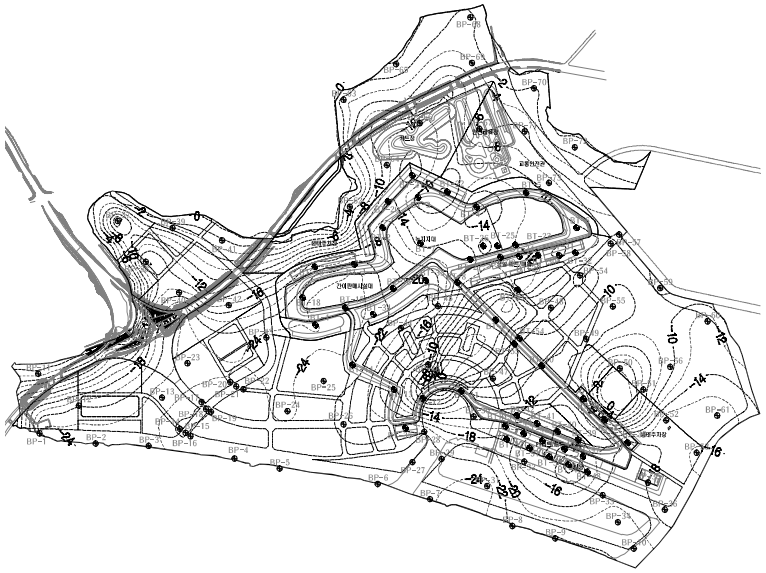
2. 현장시험시공 계획

가. 부지조사 및 선택

다공질 콘크리트말뚝의 현장시험시공을 위한 부지조사를 3개 현장에 대해 실시하였으며, 각 조사대상 부지의 현황은 다음과 같다.

(1) 전남 영암 OO 부지조성공사

2007년 4월에 조사를 수행하였으며, 본 부지에 대해 기존에 수행한 시추조사 및 시험성과와 인근지역 자료를 종합 분석한 결과, 부지내 연약지반 분포현황은 다음과 같다.



<그림 3.7.17> 연약지반 분포 현황

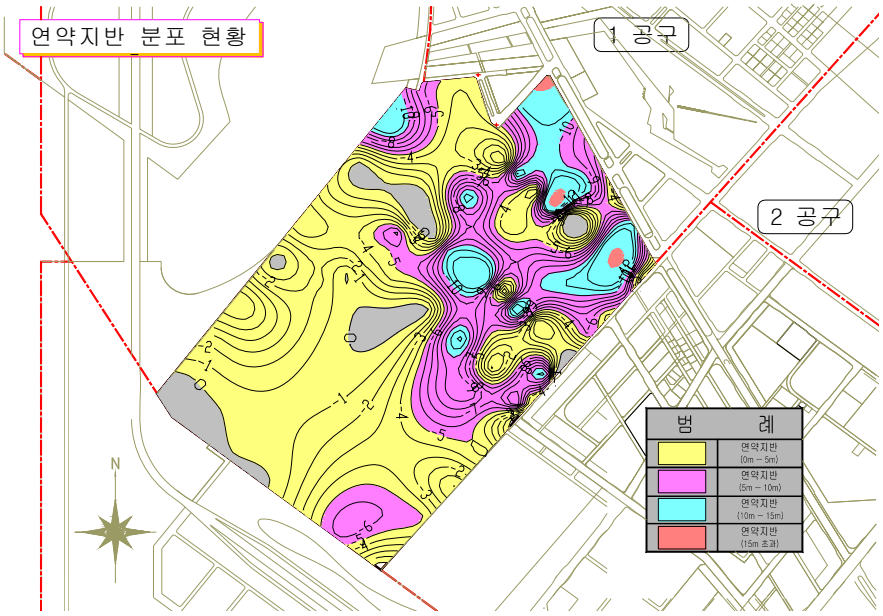
<표 3.7.7> 지층분포 현황

구 분	매립층 (점토/모래/자갈)	퇴적층		
		상 부 실트질 점토	하 부 실트질 점토	하 부 모래자갈
층후(m)	0.2~2.6	1.0~25.3 EL.(+)0.8~EL.(-)3.6	0.7~14.3 EL.(-)2.5~EL.(-)23.3	0.5~3.8 EL.(-)22.3~EL.(-)25.9
SPT N값	0/30~3/30	0/30~8/30	2/30~31/30	6~50

(2) 인천 송도국제도시 OO공구

2008년 4월에 조사를 수행하였으며, 본 부지에 대한 기존의 시추조사 수행 결과, 지층분포는 상부로부터 매립층, 퇴적층, 풍화대(잔류토, 풍화암), 연암의 순으로 수직분포를 보이고 있다.

본 지역의 연약지반 두께는 대략 15.0m 이하로 시추위치에 따라 상당히 큰 차이를 보이고 있어, 지층의 구성상태는 매우 불규칙한 것으로 나타나고 있다.



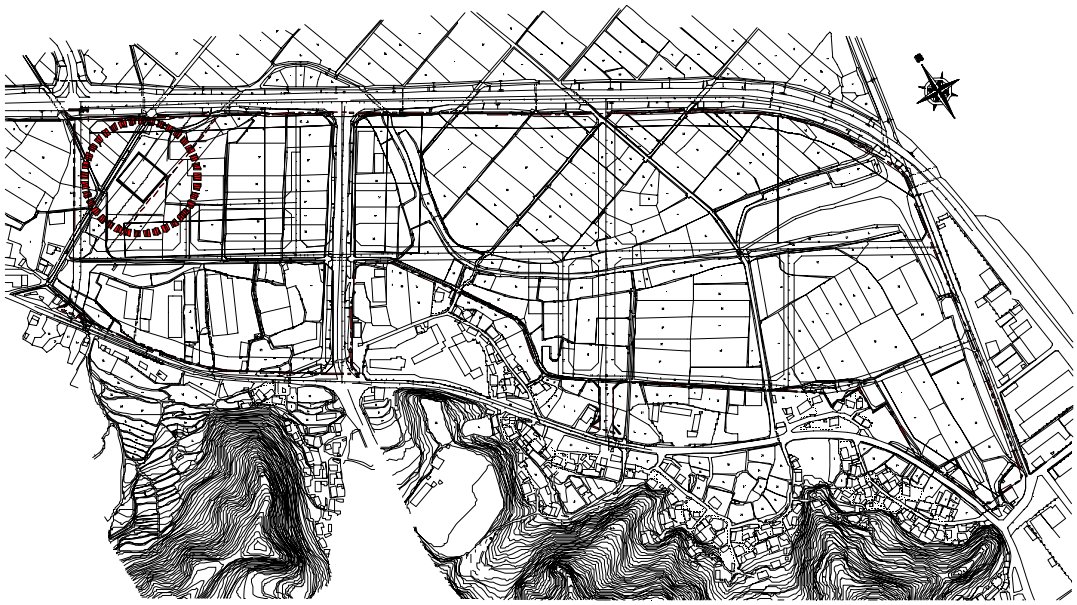
<그림 3.7.18> 심도별 연약층 분포 현황

<표 3.7.8> 구역별 연약층 심도 현황

구 분	연약 1구간	연약 2구간	연약 3구간	연약 4구간
연약층 심도	11.0m 초과	6.0~10.0m	5.0m 미만	깎기구간

(3) 광양 OO 산업단지 조성현장

2009년 4월에 조사를 수행하였으며, 본 구간에 대한 시추조사 결과 연약층이 약 15m 정도 분포하는 것으로 조사되었다. 시험시공 대상구간으로 고려한 지역의 경우 연약층 분포가 일정한 것으로 나타났으며, 현장시험시공 관련 제반 사항들이 양호하여 본 현장을 3차년도 현장시험시공을 수행하기로 결정하였다.



<그림 3.7.19> 현장시험시공 부지 현황

<표 3.7.9> 지층분포 현황

구 분	매 립 층	퇴 적 층			풍 화 토
		점 토	모 래	자 갈	
층후(m)	0.0~1.0	0.6~14.8	14.5~18.5	18.4~20.6	19.8~23.0

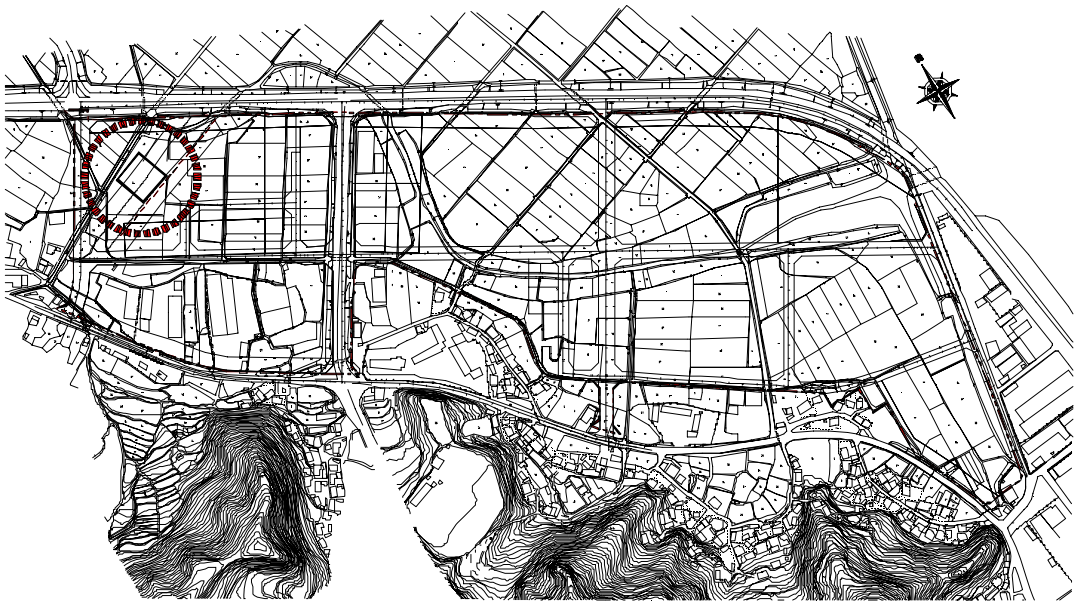
나. 현장시험시공 개요

순환골재를 이용한 다공질 콘크리트말뚝공법과 기존 다짐말뚝공법간의 침하특성 등 공학적 특성을 비교하기 위해 다공질 콘크리트말뚝공법(치환율 10% 및 30%), GCP 공법(치환율 30%) 및 SCP 공법(치환율 10%)의 현장시험시공을 수행하였다.

또한, 재령일수(3일, 7일, 14일, 28일)에 따른 다공질 콘크리트말뚝의 공학적 특성을 파악하기 위하여 추가적으로 4공을 타설하였다.

현장시험시공은 다공질 콘크리트말뚝공법 2가지, GCP 공법 1가지, SCP 공법 1가지 등 총 4가지 경우에 대하여 쇄석매트 0.7m, 성토높이 4.3m 등 총 5.0m의 재하성토를 적용하여 수행하였다.

현장시험시공 위치는 전라남도 광양시 옥곡면 신금리 OO산업단지 조성공사 현장으로 2009년 4월~10월까지 총 6개월 동안 현장시험시공을 진행하였다.

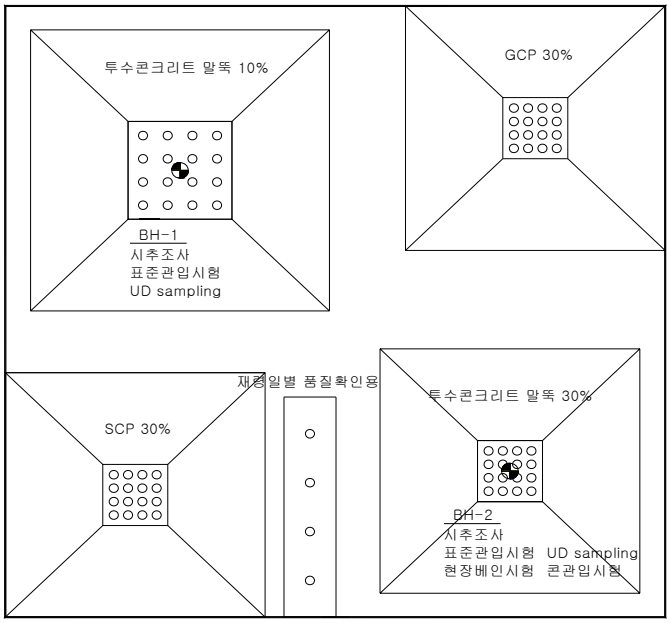


<그림 3.7.20> 현장시험시공 위치도

다. 연약지반 특성분석

현장시험시공 대상부지의 연약지반 특성분석을 위해 사전조사를 계획하였으며, 조사위치 및 조사항목별 수량은 다음과 같다.

(1) 조사위치



<그림 3.7.21> 사전조사 위치

(2) 조사항목별 수량

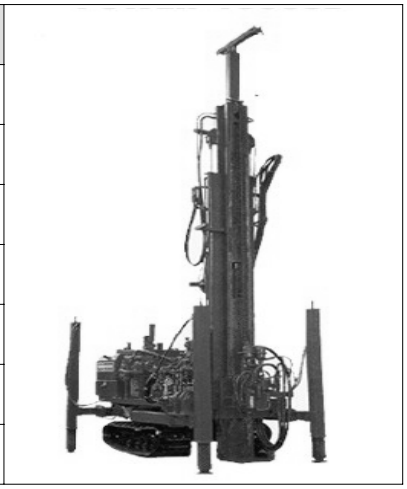
<표 3.7.10> 사전지반조사 항목별 수량 현황

구 분	단 위	수 량	비 고
시 추 조 사	공	2	NX
표준관입시험	회	30	1.0~1.5m 간격 시행
지하수위측정	회	2	24시간 후 측정
베인전단시험	회	10	1.5m 간격 시행
피죠콘관입시험	회	1	측정 간격 2.5cm
실내토질시험	식	1	물성시험, 역학시험

(3) 조사장비

본 조사는 회전수세식(Rotary-Wash) 시추기를 이용하여 NX 규격(6개소)에 대하여 실시하였으며 비고결층 구간에서는 Casing을 설치하여 공벽의 붕괴를 예방하였고 굴진 깊이는 풍화토층까지 실시하였다.

<표 3.7.11> 시추조사 장비

장 비 명	형식 및 규격	수량	단위	
Boring Machine	유압 회전수세식	1	대	
Pump	-	1	대	
Engine	-	1	대	
표준관입시험기구	KS F 2307	1	조	
기타부대기구	-	1	식	
베인전단시험기	-	1	조	
전기식 피죠콘시험기	-	1	조	

(4) 현장시험

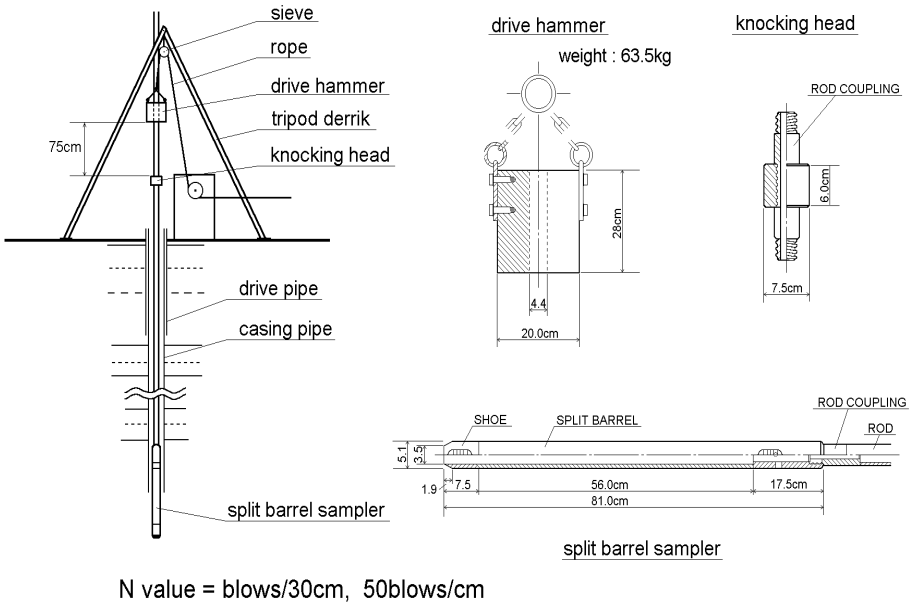
① 표준관입시험

시추조사와 병행하여 실시되는 표준관입시험(Standard Penetration Test)은 매립층, 퇴적층, 풍화토를 대상으로 지반의 지내력, 토질의 구성성분을 파악하기 위하여 행하여지는 원위치 동적 Sounding의 한 방법이다.

본 표준관입시험은 시료의 채취, 연약지반의 유무 및 각 지층의 Compactness와 Consistency의 파악을 목적으로 하여 시추작업시 병행하여 실시하였다. 한국산업규격(KS F 2307) 규정에 의해 본 시험은 매 1.0m 마다, 또는 지층이 변할 때마다 행하는 것을 원칙으로 하였으며, 지층상 의미가 없을 경우 무시하고 행하였다.

표준관입저항 N값은 외경 5.1cm, 길이 81.0cm의 Split Spoon Sampler를 Boring Rod 끝에 붙여서 63.5±0.5kg의 드라이브 해머를 76±1cm 높이에서 자유낙하 시킬 때 매 15cm

관입되는데 소요되는 타격횟수를 3회 반복 실시하여 최초 15cm는 교란시료로 판단 예비박기로 간주하고 나머지 30cm의 본박기를 관입하는데 소요되는 타격횟수를 통산하여 N치로 한다.(타격횟수/30) 단, 예비박기 및 본박기에서 누계 관입량이 각각 15cm, 30cm미만으로 타격횟수가 50회에 도달한 경우, N값은 50이상으로 하고 분자에 50, 분모에 누계 관입량의 분수형(타격횟수/cm)으로 기록한다.



<그림 3.7.22> 표준관입시험 모식도

② 공내지하수위 측정

지하수의 존재는 기초문제에 큰 영향을 주며 그 영향은 기초공법의 변경과 같은 유리한 결과를 얻지 못하게 되고 공사비 상승의 결과로서 나타날 수도 있는데 특히 풍화토 및 풍화암에 있어서는 주의가 요청된다. 건설 중에서는 비록 건조하게 보일지라도 세립토층, 혹은 망상의 틈과 같은 존재에 의해 기초 피트가 물에 잠길 때가 있으며, 비록 표준관입시험에 의해 안정한 지층강도를 나타낸다 하더라도 물에 접촉될 경우 세립질의 풍화된 입자들은 점토화가 되어 지층강도가 현저하게 감소될 수 있다. 또한 잘못된 지하수위의 위치를 바탕으로 해서 비탈면의 안정해석, 토압, 지지력 등을 산정한다면 엄청난 오

차를 유발할 수 있으며, 특히 지하실의 바닥을 설계하는 경우 지하수위를 무시하는 경우가 가끔 있는데 만일 폭우로 인해 지하수위가 상승된다면 양압력이 작용하여 바닥이 들뜰 수가 있다. 자연 지하수위란 지표하의 굴착 및 조사를 시행할 시에 더 이상 지하수위의 유동이 없는 지점을 토층의 자연수위라 한다.

일반적인 자연수위는 통상 시추조사 완료 24시간 경과 후 측정하며, 공내지하수위는 지형, 지질상태, 계절 및 우천에 의한 영향이 크므로 이를 고려하여 반영하여야 할 것으로 사료된다.

③ 현장베인시험

㉮ 시험목적

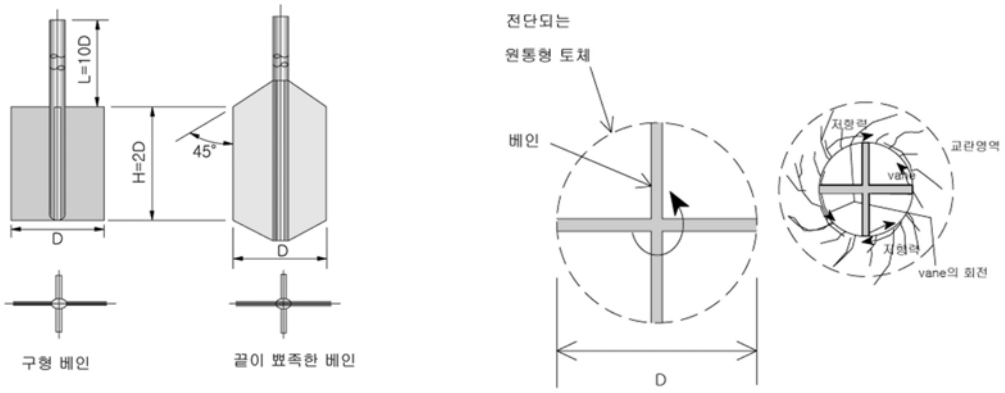
•점성토 지반의 원위치 비배수 전단강도(S_u)를 측정
•원지반 및 교란된 지반의 비배수 전단강도(S_u)값에 의한 지반의 조성상태 추정 및 예민비 산정

㉯ 시험방법

•한국산업규격(KS F-2342)에 의거 변형율 제어 방식으로 수행
•대상심도 50cm 상부까지 베인날을 보호관과 같이 관입시킨 후 베인날만 추가적으로 50cm 관입
•폭 50mm, 높이 100mm의 베인날을 약 0.1° /초(6° /분)의 일정한 각속도로 회전
•흙을 전단시킨 후 빠른 속도로 베인을 25회 회전하여 교란된 흙에 대한 베인시험을 실시하여 예민비 산정

$$S_u = \frac{6T}{7\pi D^3} \qquad \text{(식 3.7.1)}$$

여기서, T : 파괴시 최대토크(kg·cm), D : 베인날의 회전직경(cm)



(a) 베인시험기 형상 (b) 시험 모식도 및 교란영역

<그림 3.7.23> 베인시험기 모식도

④ 콘관입시험

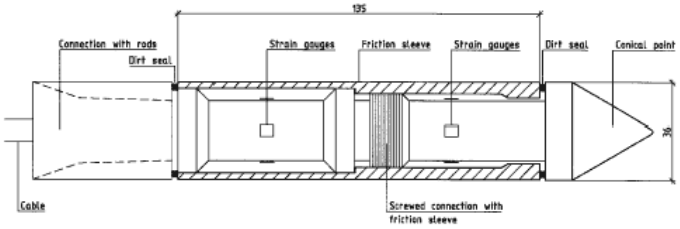
㉮ 시험목적

지반조사 결과와 병행하여 관입시험을 통한 지반의 선단저항치, 마찰력, 간극수압 측정으로 연속적인 지반의 비배수 전단강도, 과압밀비 등 설계·시공에 필요한 지반정수 값을 산정한다.

㉯ 시험개요

콘관입시험은 사용되는 콘의 종류에 따라 기계식 콘, 전기식 콘, 피에죠콘 등이 있다. 기계식 콘은 일반적으로 마찰 맨틀콘이라고 불리는 것으로 원추와 마찰 슬리브가 이중관으로 분리되어 있어 원추 관입저항력과 마찰저항력을 분리 측정하는 것이며, 피에죠콘은 콘 내부에 전기식 로드셀을 설치하여 콘 관입과 함께 원추관입저항력과 마찰저항력 및 간극수압을 연속적으로 측정할 수 있는 장비로서, 기계식 콘에 비해 연속적이고 정확한 값을 얻을 수 있고 간극수압을 이용하여 보다 정확하게 지반의 특성을 추정할 수 있으며, 지반의 투수특성 및 압밀특성을 파악할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 현재 북미 및 유럽지역에서 연약지반에 가장 많이 사용되고 있는 현장시험 중의 하나이다. 피에죠콘(Piezocone)은 연약지반의 조사장비로 널리 사용되고 있는 기존의 Dutch cone을 개

량하여 간극수압 및 간극수압 소산속도를 측정할 수 있도록 1970년 초에 Sweden에서 개발되었다. 이후 1973년에 NGI(Norwegian Geotechnical Institute)에서 개량시켰으며, 1974년에 Janbu 등에 의해 간극수압과 함께 콘 저항치를 측정할 수 있게 개량하였고 그 후 콘 저항치(Resistance)와 마찰력(Friction), 간극수압(Porepressure)을 동시에 측정할 수 있는 현재와 같은 장비가 개발되었다. 이외에 음파를 이용하는 음향콘과 탄성파를 이용하여 지반의 동적특성을 파악하는 탄성파콘, 전기전도율을 이용하여 흙에 포함된 간극수의 성분을 파악하는 전기전도율 측정콘, 방사능을 이용하여 지반의 밀도를 측정하는 방사능 콘 등이 개발되어 지반조사는 물론 지반환경분야 외 기타 특수목적을 위해 사용되고 있다. 본 시험에서 사용된 콘은 Geotch AB, Sweden사에서 개발된 음향콘으로 일련의 연결 롯드 끝에 음향콘을 장착하고 유압관입기에 의해서 압입하며 (압입속도 ASTM 3441규정 2.0cm/s±0.5), 발생되는 음향(마이크로파)에 의해서 콘 선단저항치와 슬리브의 마찰력, 간극수압을 연속적으로 임의의 심도까지 측정할 수 있는 첨단 지반조사 장비이다.



<그림 3.7.24> 전기식 피에죠 콘 모식도

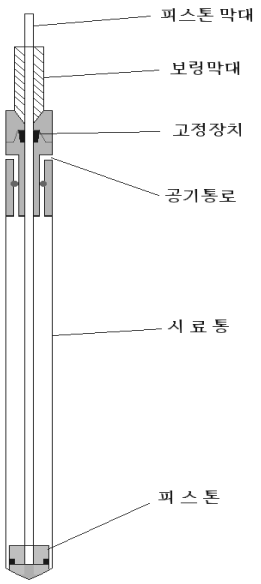
⑤ 자연시료 채취

시추조사와 병행하여 실시하며 흙입자의 배열과 구조가 자연상태를 유지하도록 하고, 구조상태와 함수비의 변화가 없도록 하여 채취하여 물성시험 및 일축압축시험, 삼축압축시험, 압밀시험의 역학시험을 수행하는데 필요한 시료가 되도록 하는데 있다.

자연시료 채취는 KS F 2317의 규정에 의하여 Piston Sampler를 사용하여 아래와 같이 실시한다.

- Piston sampler에 thin wall tube(얇은 동관)를(을) 끼운다.
- Piston sampler를 이미 굴착된 시추공 바닥 면에 도달하도록 한 후 고정시킨다.

- 수압을 이용하여 Piston sampler 내의 동관을 연약지반에 삽입시킨다. 이때 피스톤은 느슨한 흙이나 물 등이 동관(얇은 관) 내부로 들어오는 것을 막는 역할을 한다.
- 시료가 sampler 안으로 진입하면서 피스톤과 시료 사이에 진공상태가 발생하는데 이 진공상태는 시료의 낙하를 방지한다.
- Piston sampler를 꺼내어 동관을 분리한 후 상부와 하부의 시료를 25mm 가량 걷어낸다. 동관의 상부와 하부를 밀납하고 얼지 않도록 포장하여 운반한다. 특히 운반시 충격에 주의한다.



<그림 3.7.25> 피스톤 샘플러 모식도

⑥ 실내물성시험

- 각 지층의 물리적·역학적 특성파악과 흙의 분류(통일분류법)를 위해 실시함
- 시험에 사용된 시료는 불교란시료 채취시 얻어진 시료 중 대표적인 시료를 선정
- 시험방법은 한국산업규격(KS F)에 의거하여 시행

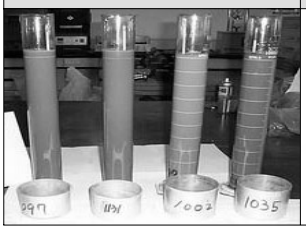
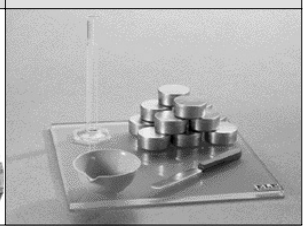
㉮ 시험항목 및 규격

〈표 3.7.12〉 시험항목 규격

시 험 항 목	시 험 규 격	시 험 항 목	시 험 규 격
함수비 시험	KS F 2306	체분석 시험	KS F 2309
비 중 시 험	KS F 2308	액성한계시험	KS F 2303
입도분석시험	KS F 2302	소성한계시험	KS F 2304

㉯ 시험장비

〈표 3.7.13〉 실내시험 장비

비중시험	액성한계	체분석	비중계분석
			

㉰ 시험수량 및 결과활용

〈표 3.7.14〉 시험항목별 수량 현황

시험항목	시험결과값	시험결과 활용
함수비 시험	함수비	•지반의 함수상태 파악
비 중 시 험	비 중	•지반의 비중 측정
액성한계시험	액성한계	•흙의 분류 및 공학적 성질 추정
소성한계시험	소성한계	
입도분석시험	입도분포 곡 선	•지반의 입도조성 파악
체분석 시험		•흙의 통일분류

⑦ 실내역학시험

㉮ 시험항목 및 규격

<표 3.7.15> 시험항목 및 규격

시 험 항 목	시 험 규 격	시 험 항 목	시 험 규 격
일축압축시험	KS F 2314	표준압밀시험	KS F 2316
삼축압축시험	KS F 2346		

㉯ 시험방법

- 일축압축시험
  - 점성토의 불교란시료에 대한 비배수 전단강도 파악
  - 교란된 시료의 강도저하를 나타내는 예민비 산정
  - 시료에 가압판을 통해 압축력을 가하고 압축력이 최대로 되고나서 계속해서 변형이 2% 생기거나, 압축력이 최대값의 2/3 정도로 감소하거나 또는 압축변형이 15%에 달하면 종료

- 표준압밀시험
  - 흙 시료를 링 속에 넣고 하부로 압밀하중 가함
  - 처음 9.8kPa을 24시간 가한 후 침하량 기록한 후 2배 하중가함
  - 동일한 방법으로 1260kPa까지 가한 후 하중제거
  - Terzaghi의 1차원 압밀이론 : 흙이 하중을 받게 되면 체적이 감소하게 되는데, 이때 토체를 이루고 있는 흙 입자, 간극, 공기 중에서 흙 입자와 물은 비압축성이므로 공기의 압축, 용해 또는 간극수가 간극으로부터 빠져나감

- 삼축압축시험
  - 과업구간 점성토 연약지반층의 강도정수(c, ø) 파악
  - 시험편을 삼축압축챔버에 넣고 일정한 측압을 가한 후 수직으로 하중을 가하여 파괴강도를 얻으며, 전응력으로 Mohr 원으로 표시하여 포락선으로 C_u를 구함

㉰ 시험수량 및 결과활용

<표 3.7.16> 시험항목 및 결과활용

시 험 항 목	시험결과 값	시험결과 활용	수 량(회)
일축압축시험	c, ø, q_u	•지반의 강도정수 선정 •기초의 지지력 검토	18
삼축압축시험(UU)			18
표준압밀시험	C_c, P_c, e	•연약 점성토의 특성 분석	18

라. 현장시험시공 수량산출 및 배합기준

(1) 현장시험시공 수량 산출

현장시험시공시 다공질 콘크리트말뚝공법, GCP 공법 및 SCP 공법에 대한 수량 현황은 다음과 같다.

<표 3.7.17> 다공질 콘크리트말뚝공법(치환율 10%) 수량 현황

치환율	직경	타설깊이	말뚝본수	말뚝간격	총말뚝길이
10%	0.7m	15m	16본	1.9×1.9m	240m

구 분	산출내역
순환골재량(톤)	$(\pi \times 0.7^2/4)m^2 \times 15m \times 16$본 = $92.4m^3$ 할증 20% 적용 : $92.4m^3 \times 1.2$ = $110.9m^3$ $1m^3$당 소요 순환골재량 : 1,599.8kg ∴ $110.9m^3 \times 1,599.8kg/m^3$ = 177.4톤
시멘트량(톤)	$1m^3$당 소요 시멘트량 : 100kg $110.9m^3 \times 100kg/m^3$ = 11.1톤 ≒ 278포대(40kg 기준)

<표 3.7.18> 다공질 콘크리트말뚝공법(치환율 30%) 수량 현황

치환율	직경	타설깊이	말뚝본수	말뚝간격	총말뚝길이
30%	0.7m	15m	16본	1.1×1.1m	240m

구 분	산출내역
순환골재량(톤)	(π × 0.7²/4)m²×15m×16본 = 92.4m³ 할증 20% 적용 : 92.4m³×1.2 = 110.9m³ 1m³당 소요 순환골재량 : 1,599.8kg ∴ 110.9m³×1,599.8kg/m³ = 177.4톤
시멘트량(톤)	1m³당 소요 시멘트량 : 100kg 110.9m³×100kg/m³ = 11.1톤 ≒ 278포대(40kg 기준)

<표 3.7.19> GCP 공법(치환율 30%) 수량 현황

치환율	직경	타설깊이	말뚝본수	말뚝간격	총말뚝길이
30%	0.7m	15m	16본	1.1×1.1m	240m

구 분	산출내역
골재량(m³)	(π ×0.7²/4)m²×15m×16본 = 92.4m³ 할증 20% 적용 : 92.4m³×1.2 = 110.9m³

<표 3.7.20> SCP 공법(치환율 30%) 수량 현황

치환율	직경	타설깊이	말뚝본수	말뚝간격	총말뚝길이
30%	0.7m	15m	16본	1.1×1.1m	240m

구 분	산출내역
모래량(m³)	(π ×0.7²/4)m²×15m×16본 = 92.4m³ 할증 20% 적용 : 92.4m³×1.2 = 110.9m³

<표 3.7.21> 양생일별 말뚝품질확인

구 분	직경	타설깊이	말뚝본수	말뚝간격	총말뚝길이
투수콘크리트말뚝	0.7m	15m	4본	1.1×1.1m	60m

구 분	산출내역
순환골재량(톤)	$(\pi \times 0.7^2/4)m^2 \times 15m \times 4본 = 23.1m^3$ 할증 20% 적용 : $23.1m^3 \times 1.2 = 27.7m^3$ $1m^3$당 소요 순환골재량 : 1,599.8kg $\therefore 27.7m^3 \times 1,599.8kg/m^3 = 44.3톤$
시멘트량(톤)	$1m^3$당 소요 시멘트량 : 100kg $27.7m^3 \times 100kg/m^3 = 2.8톤 \fallingdotseq 70포대(40kg 기준)$

(2) 배합설계

현장시험시공에 사용될 순환골재에 대한 물리적 성질시험과 그 결과를 바탕으로 배합설계를 수행하였다. 현장시험시공에 앞서 예비시험 과정을 통하여 표면건조 포화상태와 공기건조 포화상태에서의 강도 비교 및 배합시간에 따른 강도변화를 파악할 수 있도록 시험을 실시하였다.

(가) 현장시험시공에 사용된 다공질 콘크리트용 순환골재의 물리적 성질

본 연구에서 현장시험시공에 사용될 재료는 현장 인근 OO사에서 생산된 제품으로 이에 대한 품질시험은 2차년도에 수행된 품질기준(안)을 기초로 하여 물리적 시험을 수행하였으며, 그 결과를 기준(안)과 비교하여 <표 3.7.22>에 나타내었다.

(나) 배합설계

현장시험시공에서 배합설계는 2차년도 연구결과에서 제시된 물/시멘트비(W/C)를 30% 및 순환골재의 흡수율을 고려하여 설계에 적용하였으며 배합표는 <표 3.7.23>과 같다.

<표 3.7.22> 다공질 콘크리트말뚝용 순환골재의 품질기준(안) 및 시험결과

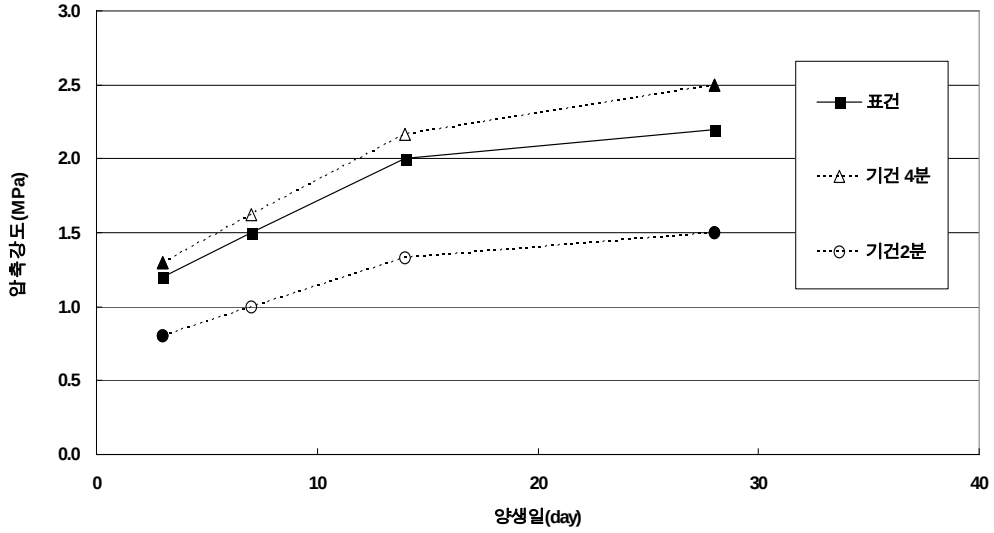
구 분		단 위	기준(안)	시험결과
절대건조밀도		g/cm^3	2.2 이상	2.226
흡수율		%	7.0 이하	7.11
마모감량		%	40 이하	33.5
입자모양판정 실적율		%	55 이상	57.6
알카리 골재 반응		-	무해할 것	무해함
점토 덩어리량		%	0.2 이하	0.06
안정성		%	12 이하	6.7
이물질 함유량	유기 이물질	%	1.0 이하(용적)	0.13
	무기 이물질	%	1.0 이하(질량)	0.86

<표 3.7.23> 현장시험시공에 사용된 다공질 콘크리트 배합표

구분	값	비고
1) 목표 공기량	A = 25%	
2) 단위수량 결정 ; 콘크리트 배합설계 40㎜ 일때의 값	W = 51.4kg	
3) 단위수량 보정값 ; 단위수량×단위수량 보정량	W = 30.0kg	
① 슬럼프에 따른 단위수량 보정값	S = -9.6%	
② 공기량에 따른 단위수량 보정값	A = -61.5%	
4) 단위시멘트량(kg) C=(보정단위수량/물시멘트비)	C = 100.0kg	
5) 시멘트의 절대용적	Vc = 31.8 Liter	
6) 공기량(ℓ) ; (1000×목표공기량%)	A = 250.0 Liter	
7) 골재의 절대용적(ℓ) a=[1000-(보정단위수량+시멘트절대용적+공기량)]	a = 688.2 Liter	
8) 단위굵은골재량(kg) G=(골재의 절대용적×골재의 표건비중)	G = 1640.6kg	

(다) 배합설계 시험결과

순환골재의 표면건조 포화상태를 기본으로 3일, 7일, 14일, 28일의 양생일과 공기건조 포화상태일 때의 배합시간을 2분 및 4분으로 나누어 예비시험을 수행하였으며, 그 결과는 <그림 3.7.26>과 같다.



<그림 3.7.26> 예비시험 결과

표면건조 포화상태에서 시험한 결과 재령 3일에서 14일까지는 강도증가가 뚜렷하나 14일에서 28일까지는 완만하게 증가하는 것을 알 수 있다.

그리고 표면건조 포화상태에서의 배합을 표준배합으로 정의하여 공기건조 포화상태에서 배합시간이 2분에서는 일축압축강도값이 작지만 배합시간을 4분으로 하면 일축압축강도 값은 더 크게 나타나고 있다.

이러한 결과는 공기건조 포화상태에서 배합시간이 충분하면 배합수가 순환골재에 내부에 충분히 흡수되어 배합이 잘된 결과로 판단된다.

따라서 본 예비시험결과 공기건조상태의 순환골재를 이용한 투수콘크리트 말뚝을 배합하기 위한 최소시간은 4분 또는 그 이상의 믹싱시간이 필요할 것으로 판단된다.

3. 현장시험시공

가. 현장시험시공 순서

현장시험시공시 공법별 말뚝타설 전경은 <그림 3.7.27>과 같다.



(a) 다공질 콘크리트 준비



(b) 다공질 콘크리트 투입



(c) 다공질 콘크리트말뚝 타설



(d) 쇄석골재 준비



(e) 쇄석골재 투입



(f) GCP 말뚝 타설



(g) 모래 준비



(h) 모래 투입



(i) SCP 말뚝 타설

<그림 3.7.27> 말뚝 타설 전경

<그림 3.7.28>과 같이 쇄석골재 0.7m 포설 후 1단계 1.0m, 2단계 1.5m, 3단계 1.8m 등 총 3단계에 걸쳐 총 5.0m의 재하성토를 수행하였다.



(a) 쇄석골재 포설(H=0.7m)



(b) 1단계 성토(H=1.7m)



(c) 2단계 성토(H=3.2m)



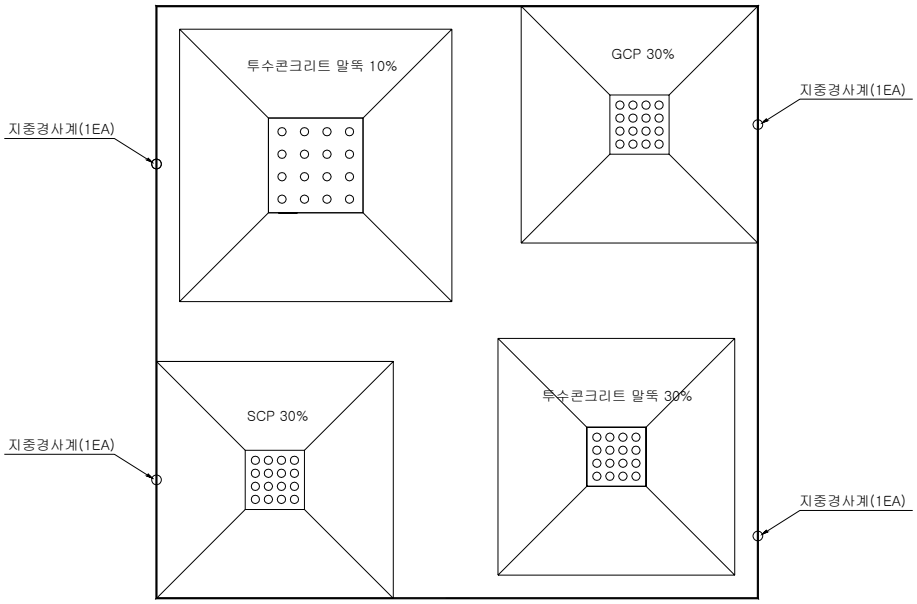
(d) 3단계 성토(H=5.0m)

<그림 3.7.28> 재하성토 전경

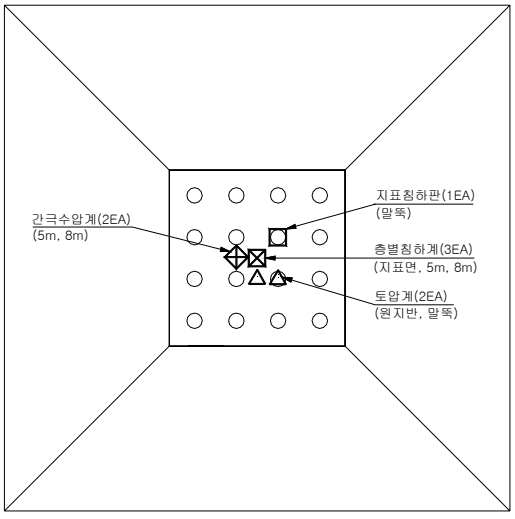
나. 계측기 배치현황

현장시험시공시 각 공법별 침하특성 및 역학적 특성을 파악하기 위하여 계측기를 설치하였으며, 계측기 설치현황은 <그림 3.7.29>와 같다.

(1) 계측기 설치 평면도



(a) 지중경사계 설치 현황(지하수위계는 외부에 설치)



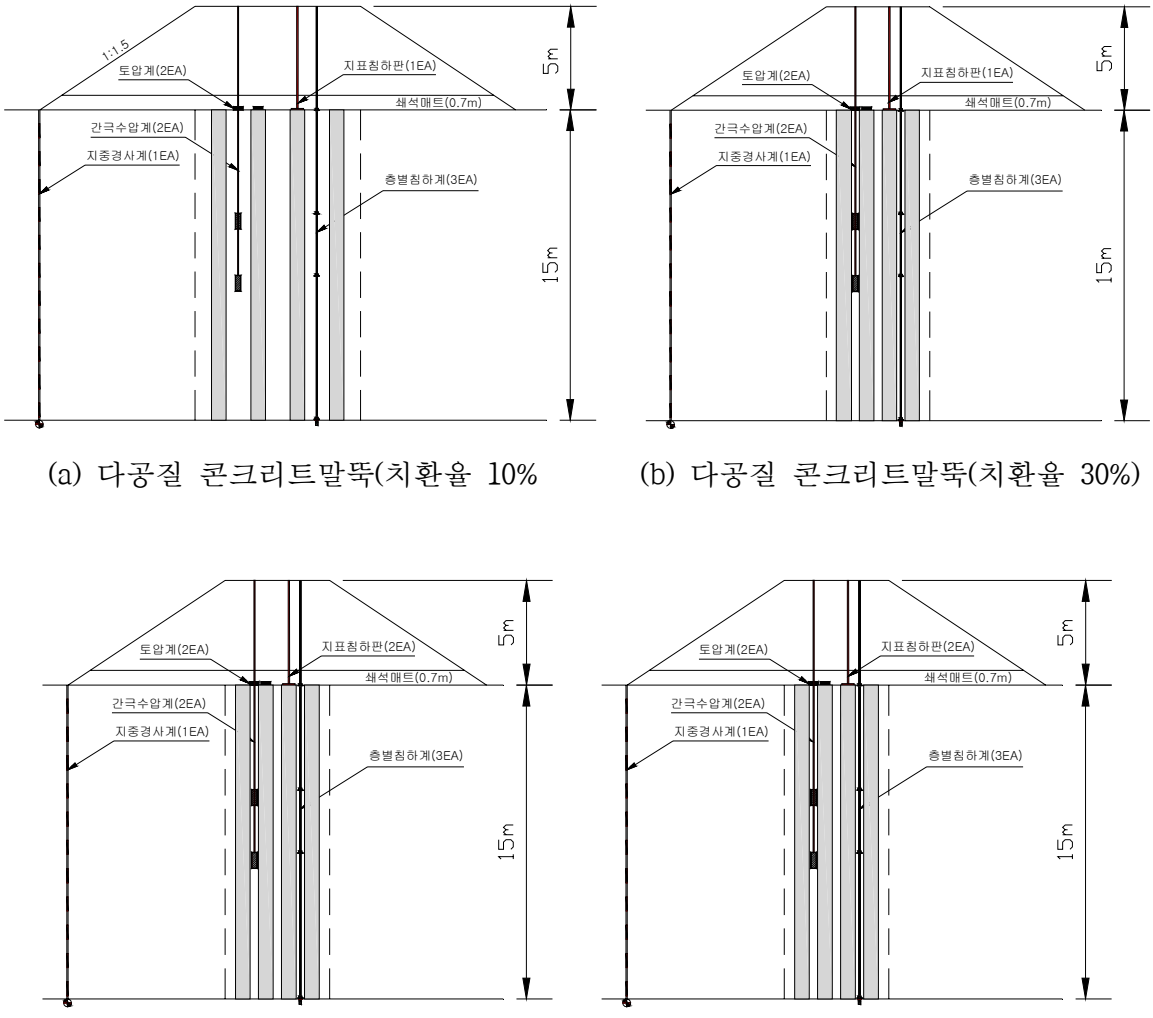
(b) 간극수압계, 지표침하판, 층별침하계, 토압계 설치 현황

<그림 3.7.29> 계측기 설치 현황

(2) 계측기 설치 단면도

토압계는 원지반 1개소 및 말뚝 1개소, 지표침하판은 말뚝 1개소, 층별침하계는 지표면, GL.-5m 및 GL.-8m에 각각 1개소, 간극수압계는 GL.-5m 및 GL.-8m에 각각 1개소, 지중경사계는 각 계량공법별 비탈면 끝단에 1개소를 설치하였다. 또한 지하수위계는 재하구역 인근에 1개소를 설치하였다.

각 공법별 계측기 설치 단면도는 <그림 3.7.30>과 같다.



(a) 다공질 콘크리트말뚝(치환율 10%

(b) 다공질 콘크리트말뚝(치환율 30%)

(c) GCP 말뚝(치환율 30%)

(d) SCP 말뚝(치환율 30%)

<그림 3.7.30> 계측기 설치 단면도

(3) 계측기 수량 현황

공법별 계측기 수량현황은 <표 3.7.24>와 같다.

<표 3.7.24> 공법별 계측기 수량 현황

구 분	치환율	간극수압계 (GL.-5m, -8m)	지표침하판 (말뚝)	지중경사계
다공질 콘크리트말뚝공법	10%	2	1	1
다공질 콘크리트말뚝공법	30%	2	1	1
GCP 공법	30%	2	1	1
SCP 공법	30%	2	1	1
합 계		8	4	4

구 분	치환율	층별침하계 (원지반,GL-5m, -8m)	토압계 (원지반, 말뚝)	지하수위계
다공질 콘크리트말뚝공법	10%	3	2	1
다공질 콘크리트말뚝공법	30%	3	2	
GCP 공법	30%	3	2	
SCP 공법	30%	3	2	
합 계		12	8	1

(4) 계측빈도

계측기별 계측빈도는 성토중 및 성토후 단계로 나누어 계측하였으며, 자동계측방식을 적용하여 2시간 간격으로 계측하였다. 층별침하계의 경우 재하성토 완료후부터는 2주 간격으로 계측을 수행하였다.

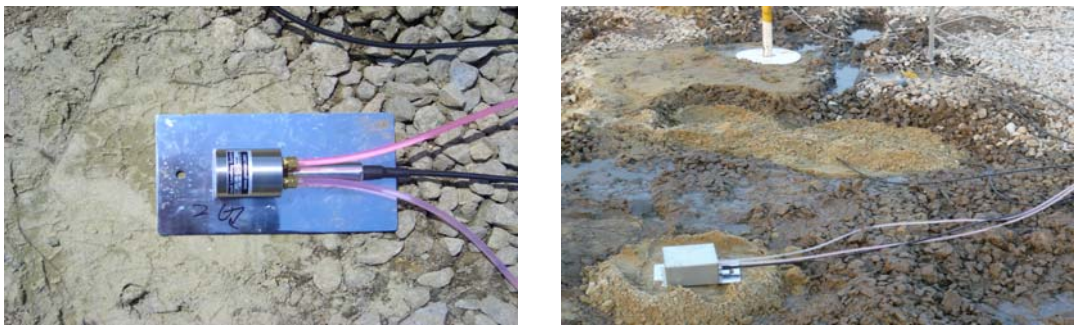
(5) 계측기 설치



(a) 간극수압계



(b) 층별침하계



(c) 지표침하판(액상침하계)



(d) 토압계

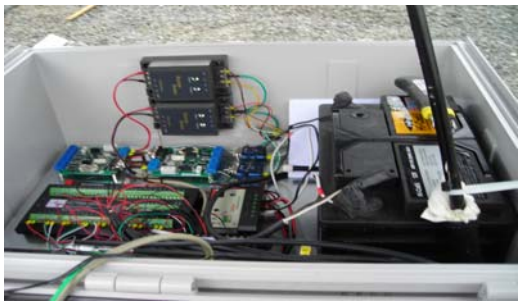
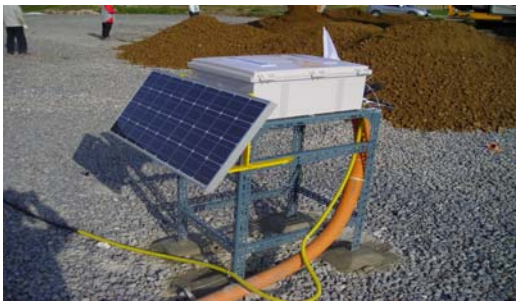
<그림 3.7.31> 계측기 설치(계속)




(e) 지중경사계

<그림 3.7.31> 계측기 설치

(6) 자동계측 시스템

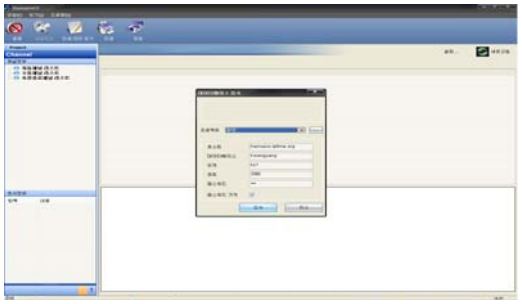
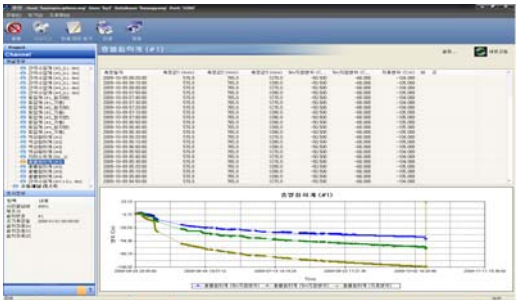



(a) 콘크롤 박스 내부 (b) 콘트롤 박스 외부

<그림 3.7.32> 자동계측시스템

(7) 원격 계측관리

계측결과는 인터넷을 이용한 원격계측방식을 통해 원격지에서 실시간으로 확인이 가능한 방식으로 2시간 간격으로 계측결과를 확인할 수 있다.

(a) 접속 초기화면 (b) 계측결과

<그림 3.7.33> 원격계측시스템

다. 계측결과

3차년도 현장시험시공은 성토고를 5m로 계획하여 총 3단계의 재하성토를 통해 3가지의 다짐말뚝공법을 비교하였다.

연약지반개량공법으로는 다공질 콘크리트말뚝(RAPP) 10% 및 30%, SCP 말뚝 30%, GCP 말뚝 30%를 적용하였으며, 160일 동안의 계측결과를 통해 각각의 다짐말뚝공법의 지반개량효과를 비교 분석하였다.

0.7m의 쇄석골재 포설 후 1단계에서부터 3단계까지 성토고를 1.5m, 2.5m, 4.3m로 총 5.0m를 재하였다.

<표 3.7.25> 성토재하 단계

성토단계	단계일수	단위중량	ΔH	ΔP	H_T	P_T
1	3일	1.9tf/m^3	1.0	1.9	1.0	1.9
2	7일	1.9tf/m^3	1.5	2.85	2.5	4.75
3	150일	1.9tf/m^3	1.8	3.42	4.3	8.17

말뚝과 원지반의 침하양상을 측정하기 위해 각 공법별로 간극수압계 2개, 토압계 2개, 층별침하계 3개, 액상침하계 1개를 설치하였고, 지중경사계와 지하수위 측정을 통해 원지반의 측방유동 및 수위 변화를 측정하였다.

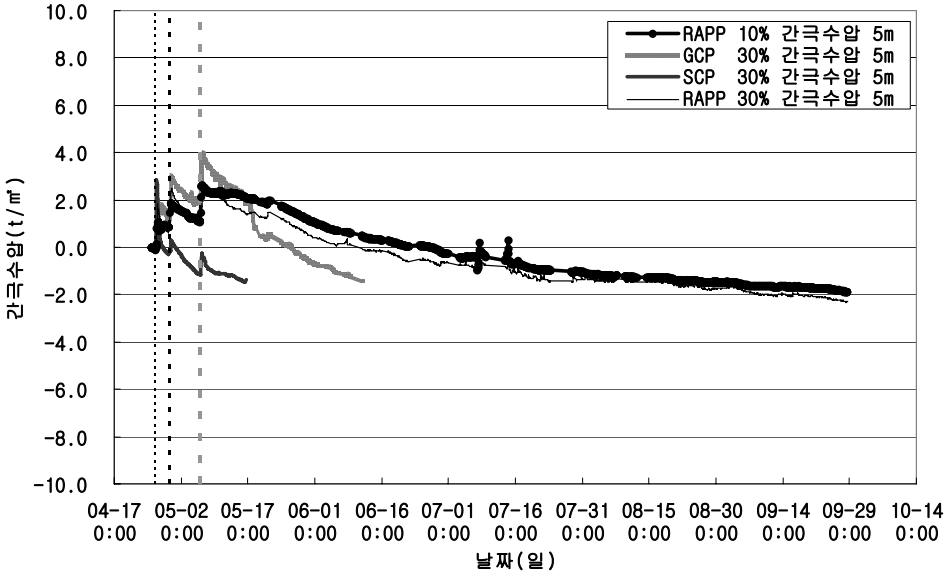
성토하중에 의한 과잉간극수압의 변화를 측정하기위해 말뚝이 타설된 지반의 지표에서부터 원지반 5m 지점과 8m 지점에 간극수압계를 설치하였고 말뚝과 지반의 연직응력증분의 변화를 측정하기 위해 말뚝타설 이후 말뚝의 상단면과 원지반에 토압계를 설치하였다.

원지반의 침하를 측정하기 위해 지표면, 지표하 5m 및 8m 지점에 층별침하계를 설치하였다.

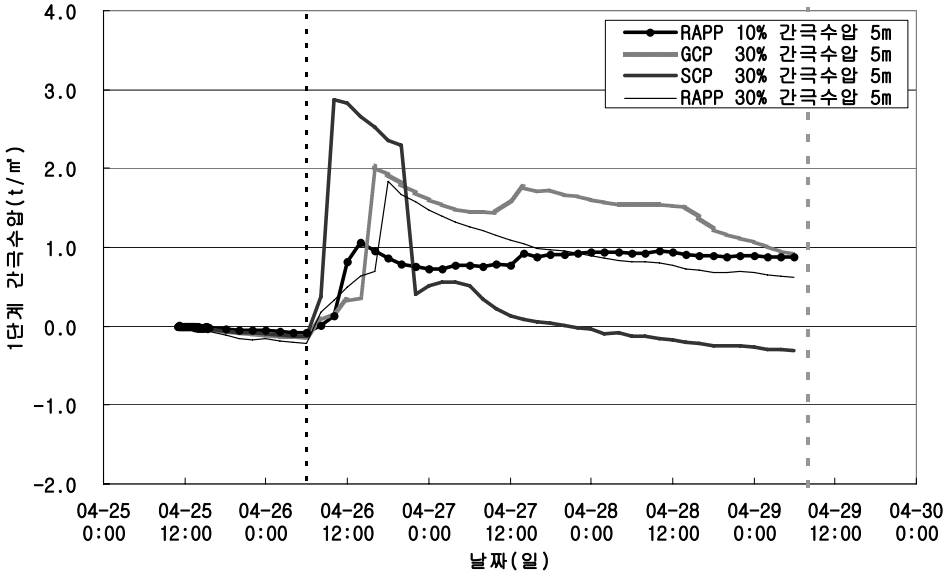
(1) 계측항목에 따른 공법별 계측결과

(가) 과잉간극수압 계측결과

① GL.-5m

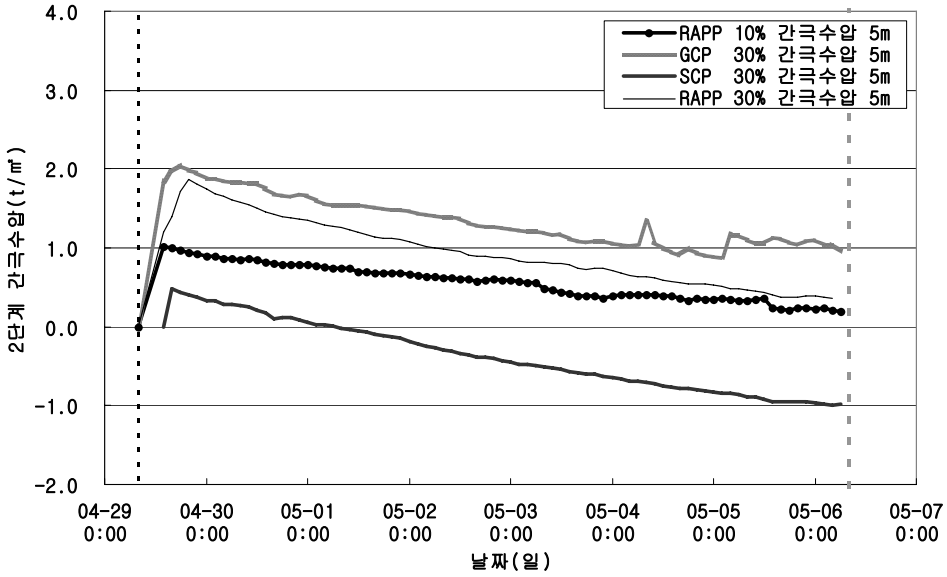


(a) 공법별 과잉간극수압 발생 현황

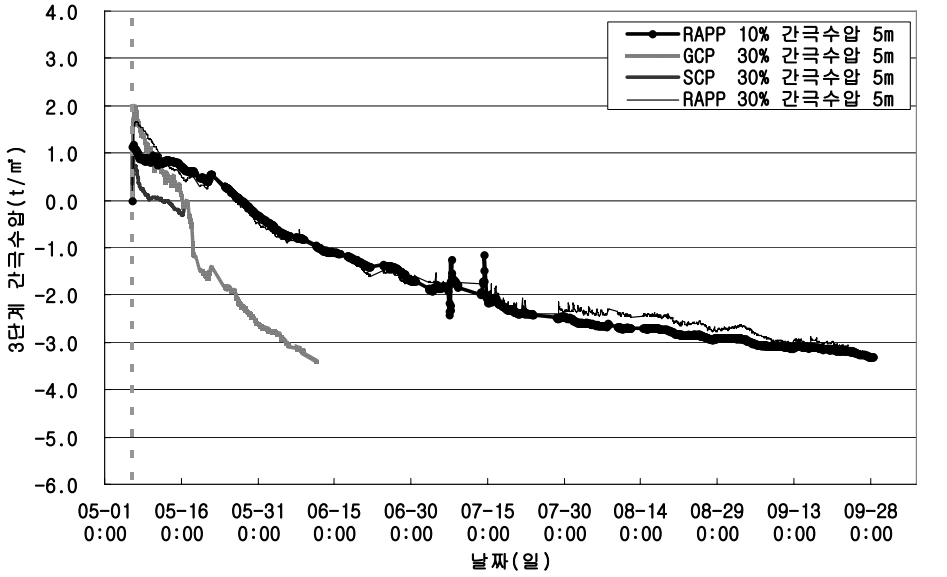


(b) 1단계 성토재하시 과잉간극수압 발생 현황

<그림 3.7.34> 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화(GL.-5m)(계속)



(c) 2단계 성토재하시 과잉간극수압 발생 현황



(d) 3단계 성토재하시 과잉간극수압 발생 현황

<그림 3.7.34> 시간경과에 따른 과잉간극수압 발생 현황(GL.-5m)

<표 3.7.26> 공법별 과잉간극수압 발생 현황(GL.-5m)

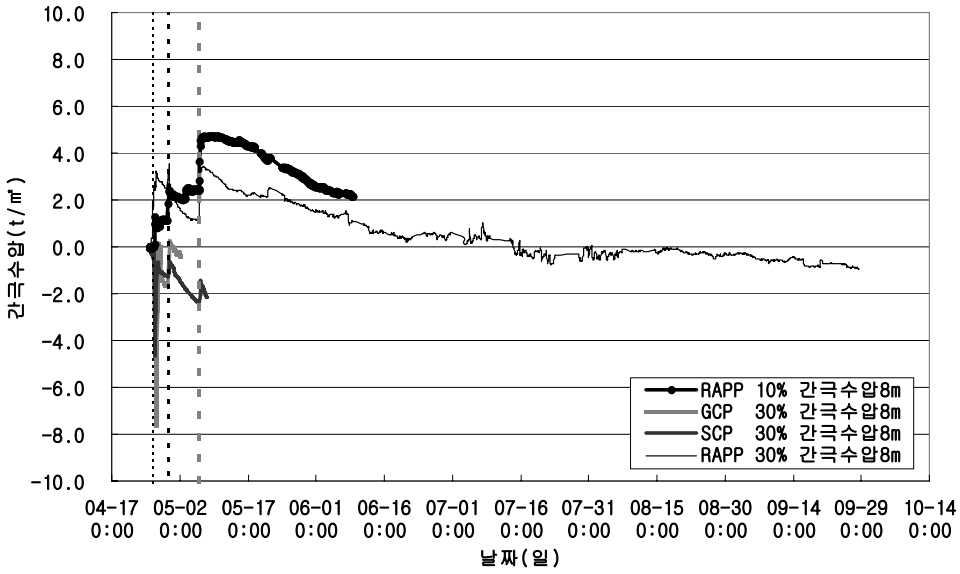
단계	계측기	지점	말뚝	최대과잉간극수압
1단계 (3일)	간극수압	GL.-5m	RAPP 10%	1.06
			GCP 30%	2.03
			SCP 30%	2.87
			RAPP 30%	1.84
2단계 (7일)	간극수압	GL.-5m	RAPP 10%	1.02
			GCP 30%	2.05
			SCP 30%	0.48
			RAPP 30%	1.87
3단계 (150일)	간극수압	GL.-5m	RAPP 10%	1.18
			GCP 30%	1.98
			SCP 30%	0.92
			RAPP 30%	1.66

지표하 5m 지점의 과잉간극수압의 변화는 지표하 8m 지점에서보다 다소 크게 나타났다.

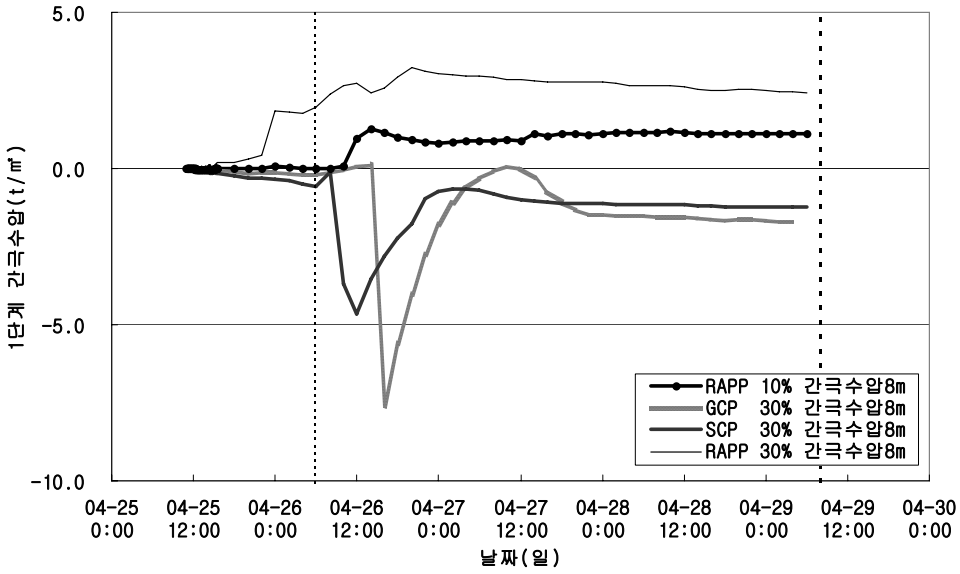
1단계에서 SCP 30%는 가장 급격한 변화를 나타내었으며 최대과잉간극수압은 2.87 t/m^2 이다. 하지만 2단계에서의 SCP 30%의 과잉간극의 소산은 $0t/m^2$ 이하로 측정되었고, 3단계 초반 이후부터는 데이터 수신이 단절되었다.

GCP 30%는 1단계와 2단계에서 RAPP 10%와 RAPP 30%보다 과잉간극수압의 소산 속도는 늦게 나타나고 있으며 3단계 성토 이후 3일이 경과되면서 데이터 수신이 단절되었다.

② GL.-8m

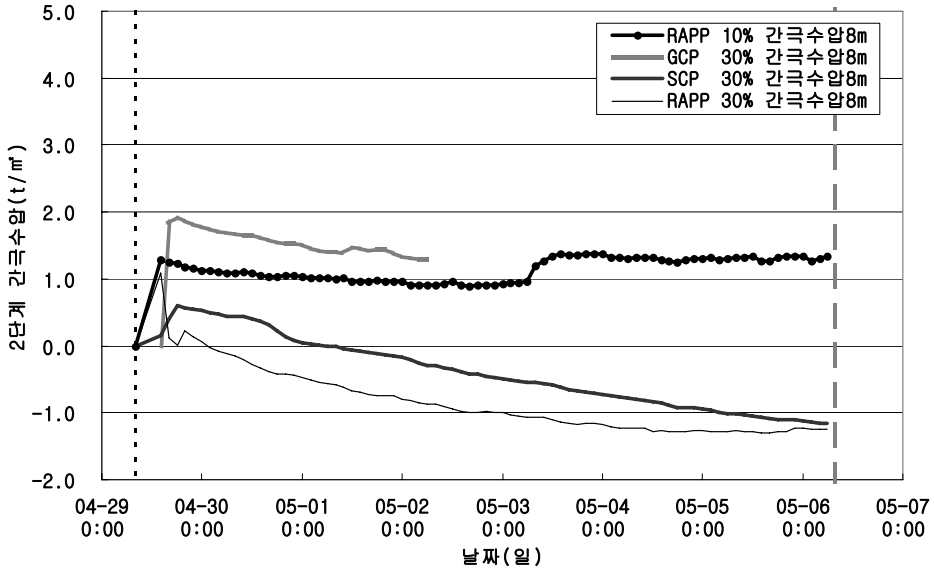


(a) 공법별 과잉간극수압 발생 현황

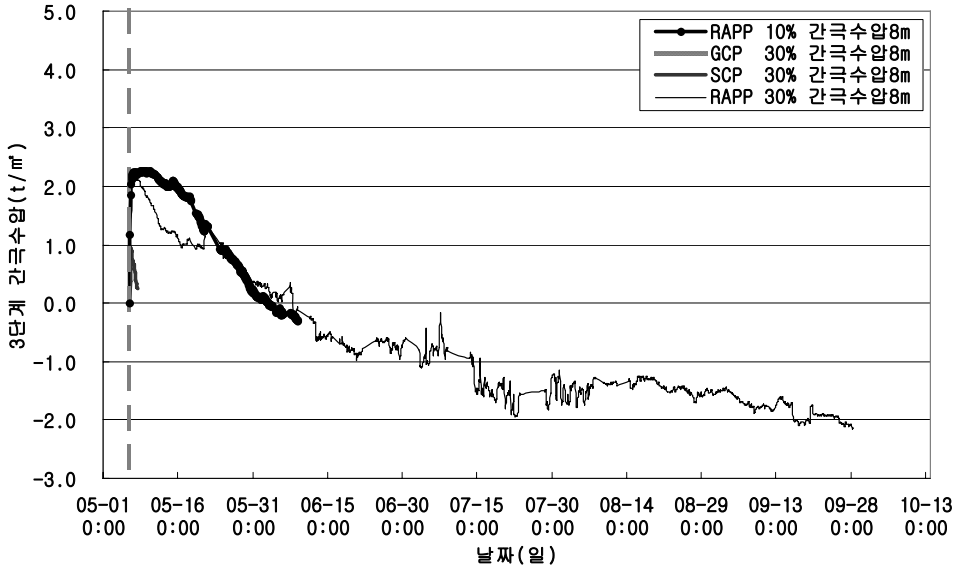


(b) 1단계 성토재하시 과잉간극수압 발생 현황

<그림 3.7.35> 시간경과에 따른 과잉간극수압 발생 현황(GL.-8m)(계속)



(c) 2단계 성토재하시 과잉간극수압 발생 현황



(d) 2단계 성토재하시 과잉간극수압 발생 현황

<그림 3.7.35> 시간경과에 따른 과잉간극수압 발생 현황(GL.-8m)

<표 3.7.27> 공법별 과잉간극수압 발생 현황(GL.-8m)

단계	계측기	지점	말뚝	최대과잉간극수압
1단계 (3일)	간극수압계	GL-8m	RAPP 10%	1.263
			GCP 30%	0.118
			SCP 30%	0
			RAPP 30%	3.238
2단계 (7일)	간극수압계	GL-8m	RAPP 10%	1.38
			GCP 30%	1.93
			SCP 30%	0.61
			RAPP 30%	1.09
3단계 (150일)	간극수압계	GL-8m	RAPP 10%	2.27
			GCP 30%	-
			SCP 30%	0.95
			RAPP 30%	2.23

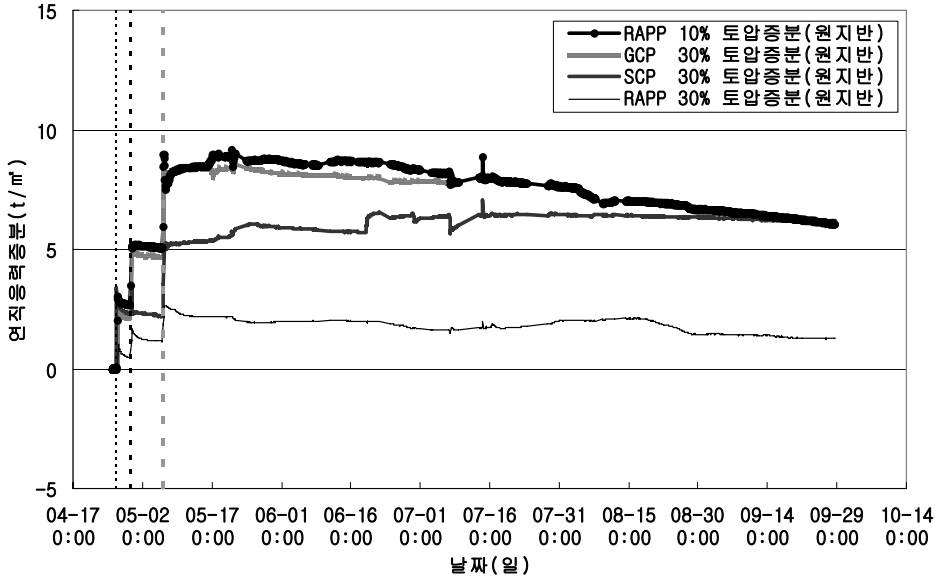
성토하중 1.9t/㎡의 1단계에서 최대과잉간극수압은 RAPP 치환율 10%와 30%에서 1.26 t/m^2와 3.24t/m^2으로 측정되었다.

또한 GCP 치환율 30%는 0.118t/m^2로 성토 하중에 비해 낮은 수치를 나타내었고 SCP 치환율 30%는 0이하의 수치를 보였다. GCP 치환율 30%와 SCP 치환율 30%의 과잉간극수압이 0 이하로 나타나는 것은 간극수압계 설치시 압입방법에서 발생된 초기 압력차 때문으로 판단된다.

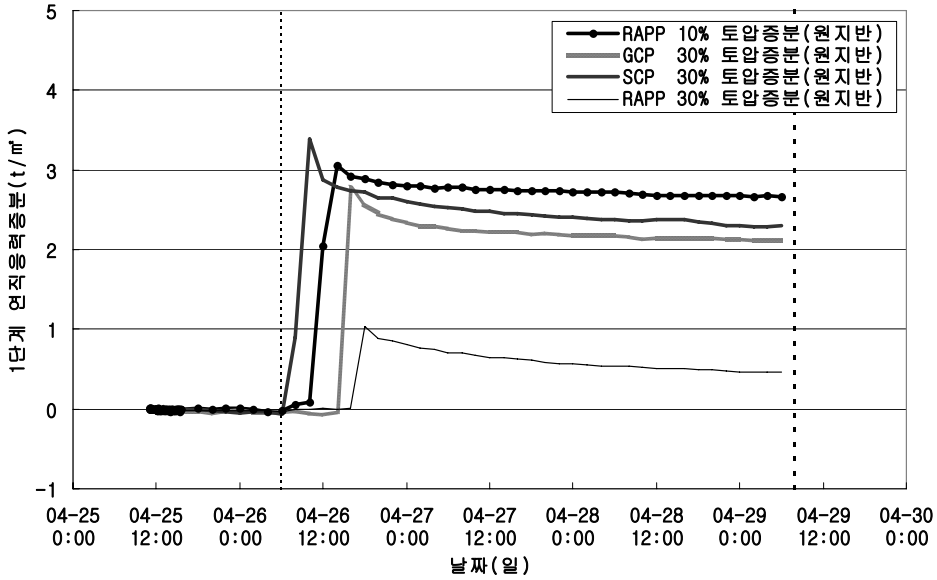
2단계 성토 후 RAPP 10%에 설치된 간극수압계는 최대과잉간극수압 1.38t/m^2을 나타내었고 나머지 3종류의 말뚝에서는 0이하로 소산되거나 계측이 단절되었다. 3단계 성토시 RAPP 10% 및 30%의 과잉간극수압은 초반에 급격히 상승하였고 최대과잉간극수압은 각각 2.27t/m^2, 2.23t/m^2으로 계측되었다.

(나) 토압계 계측결과

① 원지반

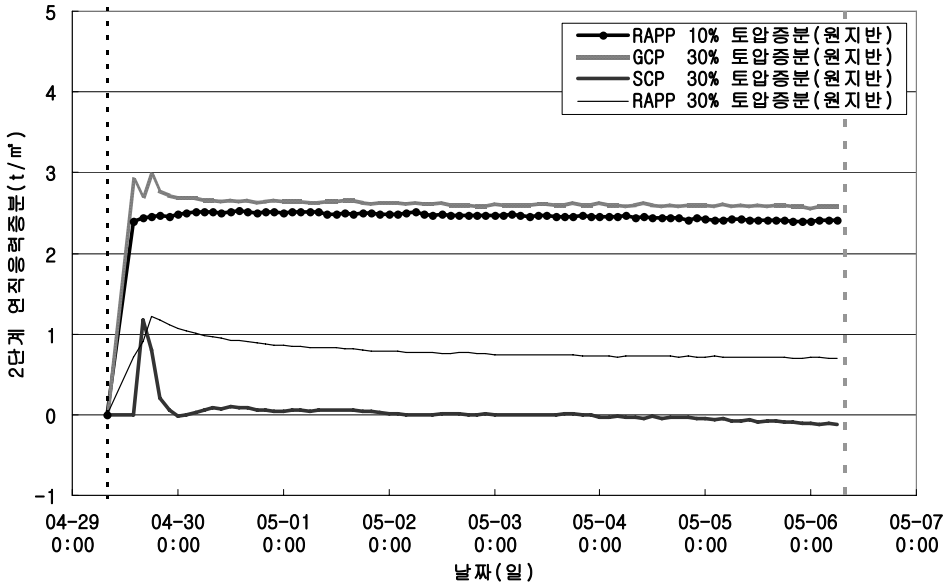


(a) 공법별 토압 발생 현황

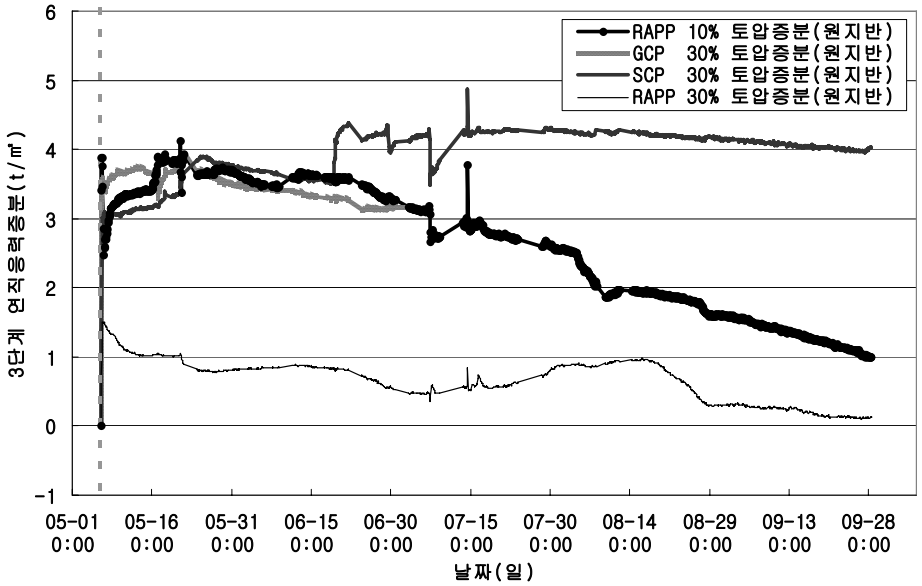


(b) 1단계 성토재하시 토압 발생 현황

<그림 3.7.36> 시간경과에 따른 토압 발생 현황(원지반)(계속)



(c) 2단계 성토재하시 토압 발생 현황



(d) 3단계 성토재하시 토압 발생 현황

<그림 3.7.36> 시간경과에 따른 토압 발생 현황(원지반)

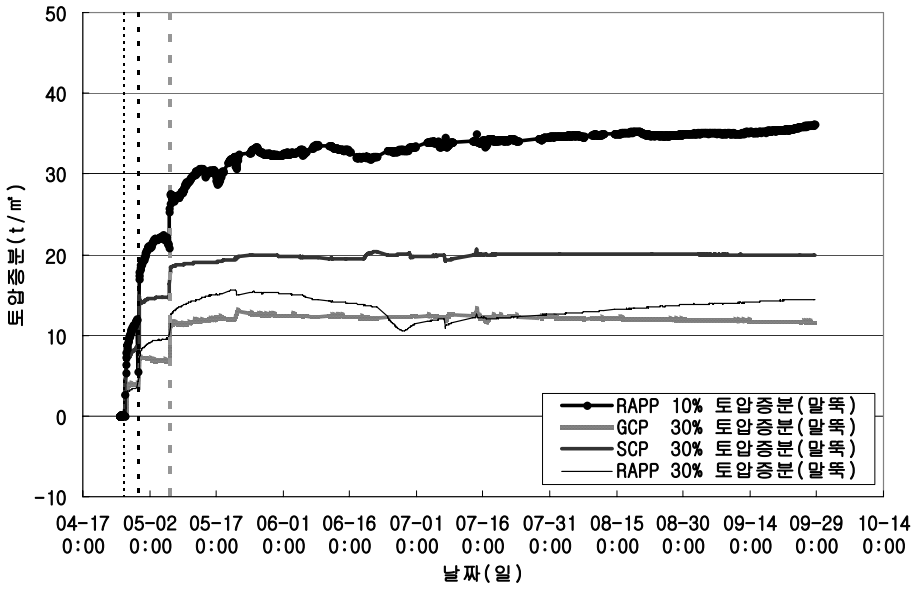
<표 3.7.28> 공법별 토압 발생 현황(원지반)

단계	계측기	지점	말뚝	원지반 연직응력증분
1단계 (3일)	토압계	원지반	RAPP 10%	3.05
			GCP 30%	2.77
			SCP 30%	3.39
			RAPP 30%	1.03
2단계 (7일)	토압계	원지반	RAPP 10%	1.38
			GCP 30%	1.93
			SCP 30%	0.61
			RAPP 30%	1.09
3단계 (150일)	토압계	원지반	RAPP 10%	2.27
			GCP 30%	-
			SCP 30%	0.95
			RAPP 30%	2.23

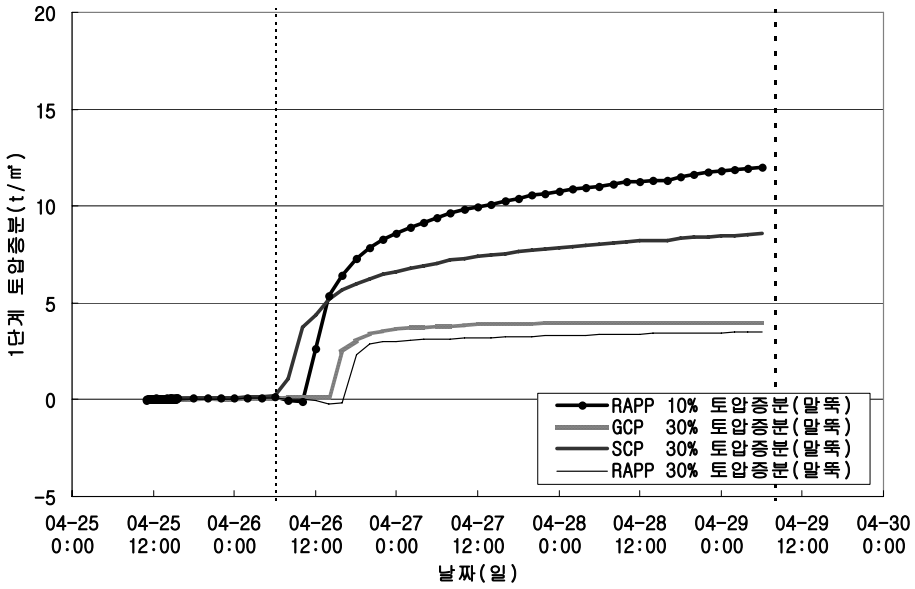
성토 1단계의 원지반 연직응력증분은 SCP 30%가 3.39로 가장 크게 나타났고 RAPP 30%는 1.03으로 가장 작게 나타났다.

1단계와 2단계에서 GCP 30%는 다공질 콘크리트말뚝 10%와 유사한 경향을 갖고 있으며 RAPP 30%로 개량된 지반에서의 연직응력증분은 1단계에서 1.03t/m^2, 2단계에서 1.09 t/m^2로 비교적 작은 수치를 나타내고 있다.

② 말뚝

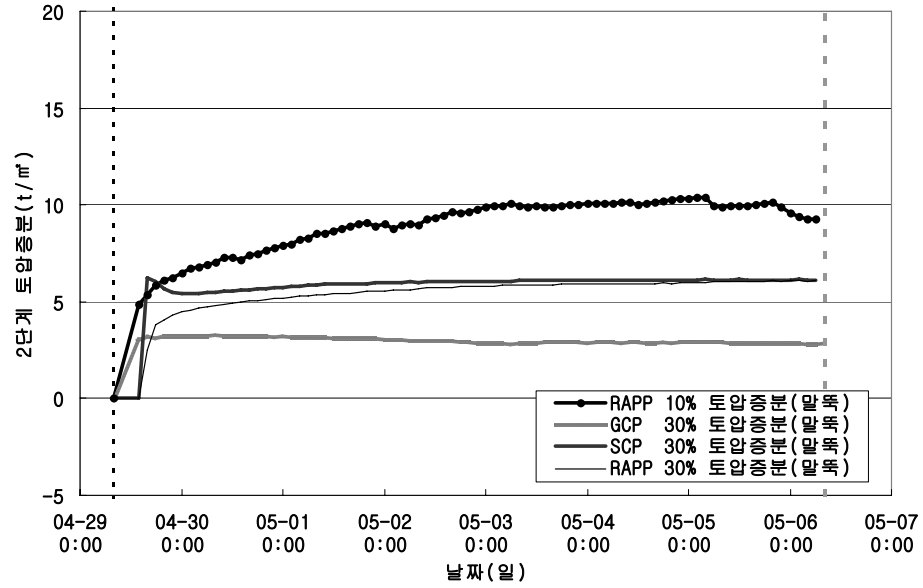


(a) 공법별 토압 발생 현황

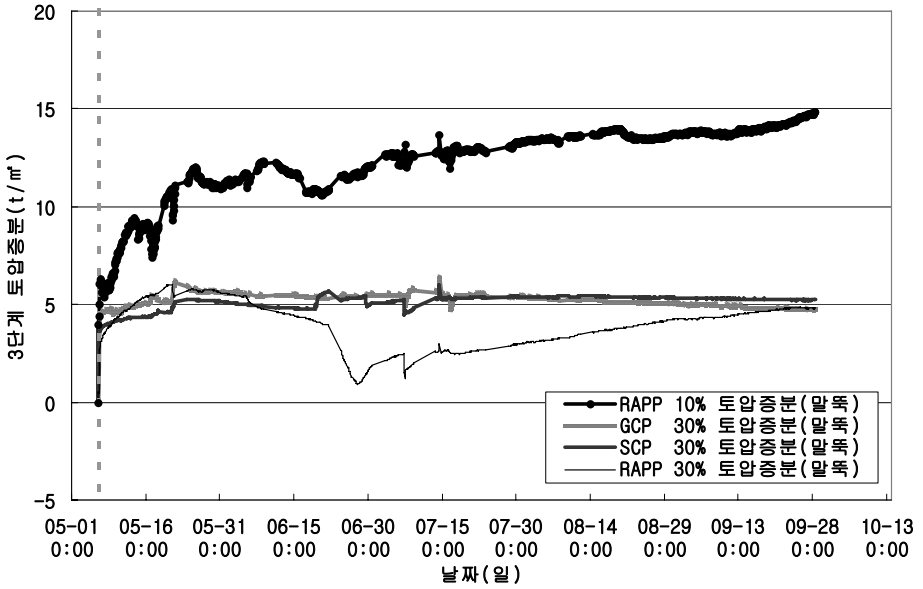


(b) 1단계 성토재하시 토압 발생 현황

<그림 3.7.37> 시간경과에 따른 토압 발생 현황(말뚝)(계속)



(c) 2단계 성토재하시 토압 발생 현황



(d) 3단계 성토재하시 토압 발생 현황

<그림 3.7.37> 시간경과에 따른 토압 발생 현황(말뚝)

<표 3.7.29> 공법별 토압 발생 현황(말뚝)

단계	계측기	지점	말뚝	원지반 연직응력증분
1단계 (3일)	토압계	말뚝	RAPP 10%	12.00
			GCP 30%	4.01
			SCP 30%	8.56
			RAPP 30%	3.50
2단계 (7일)	토압계	말뚝	RAPP 10%	10.38
			GCP 30%	3.28
			SCP 30%	6.25
			RAPP 30%	6.09
3단계 (150일)	토압계	말뚝	RAPP 10%	14.83
			GCP 30%	6.39
			SCP 30%	5.97
			RAPP 30%	6.02

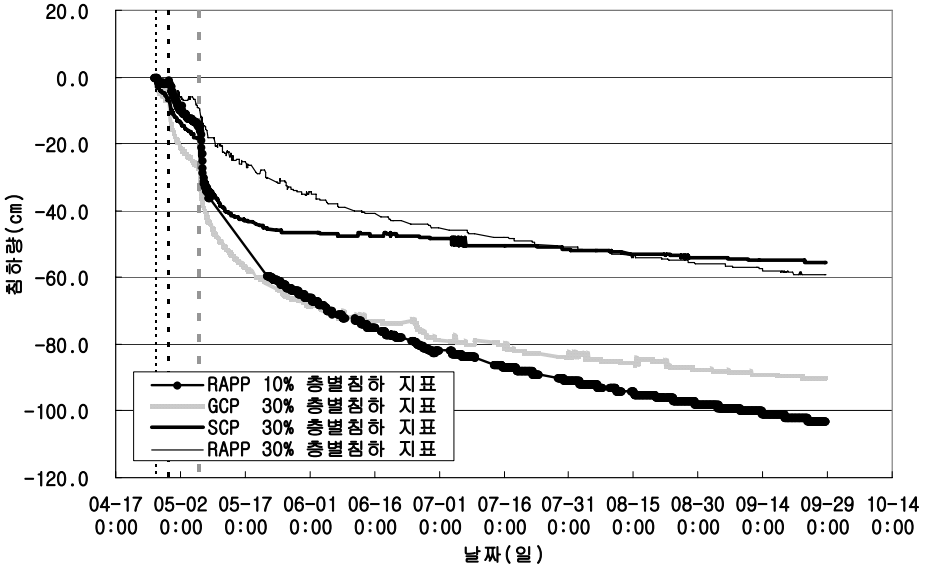
RAPP 10%는 각 단계별로 말뚝의 연직응력증분이 가장 크게 나타나고 있으며, GCP 30%와 SCP 30%보다 1.5~3배 이상의 지지력 효과를 얻고 있다.

RAPP 30%의 경우 계측기 설치 후 지반의 이동 및 1단계 성토시 계측기 이동으로 인해 말뚝부의 토압계가 원지반으로 이동하였다고 예상되며 안정적인 계측 데이터는 나타나지만 말뚝부의 연직응력증분으로 판단되기는 어렵다.

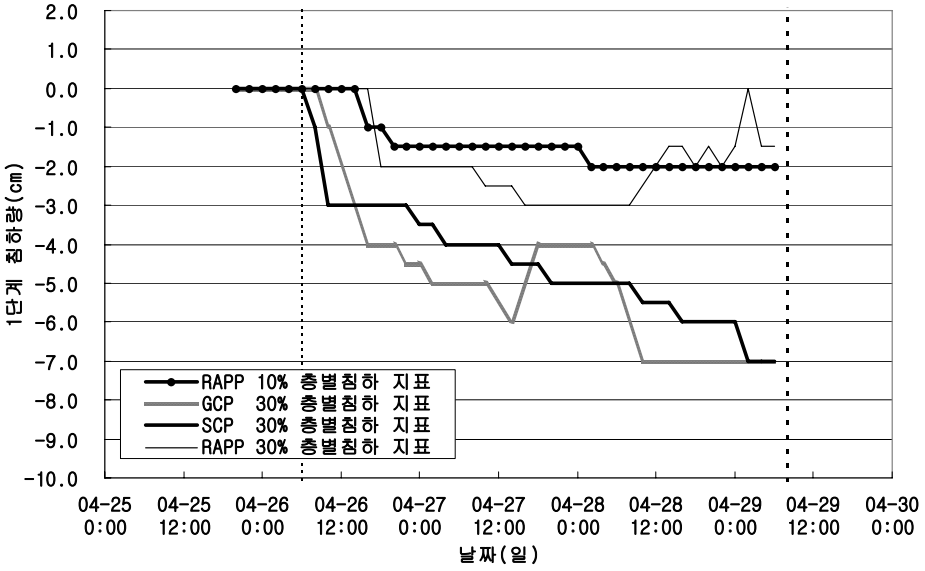
1단계 및 2단계에서 GCP 30%가 SCP 30%보다 낮은 연직응력증분을 나타내는 것도 이와 동일한 원인으로 분석되며 3단계에서 GCP와 SCP가 유사한 경향을 나타내는 것은 3단계 성토 후 SCP 30% 말뚝의 지지력 효과 상실, 말뚝의 측방유동, 그리고 급격한 침하 발생으로 인한 연직응력증분의 감소라고 판단된다.

(다) 층별침하계 계측결과

① 지표면

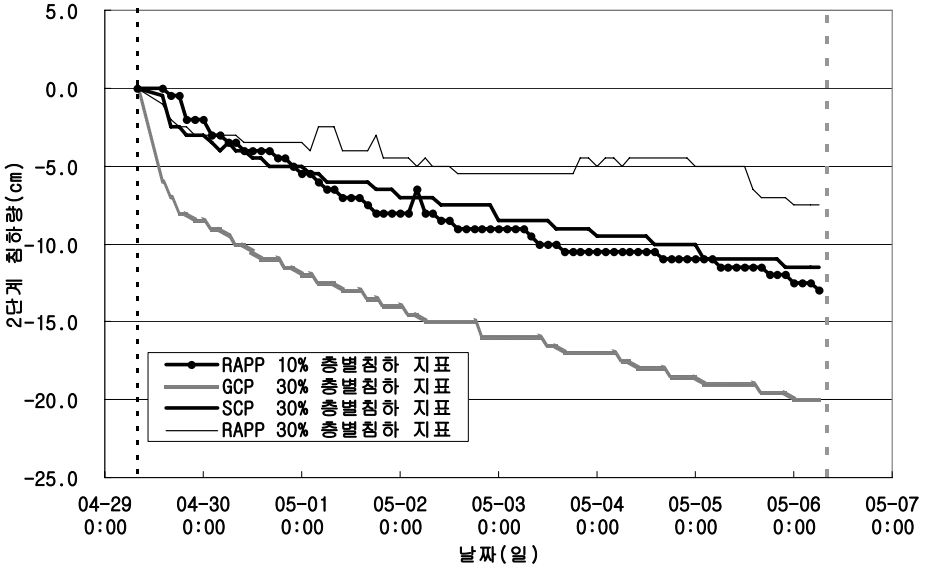


(a) 공법별 침하량 발생 현황

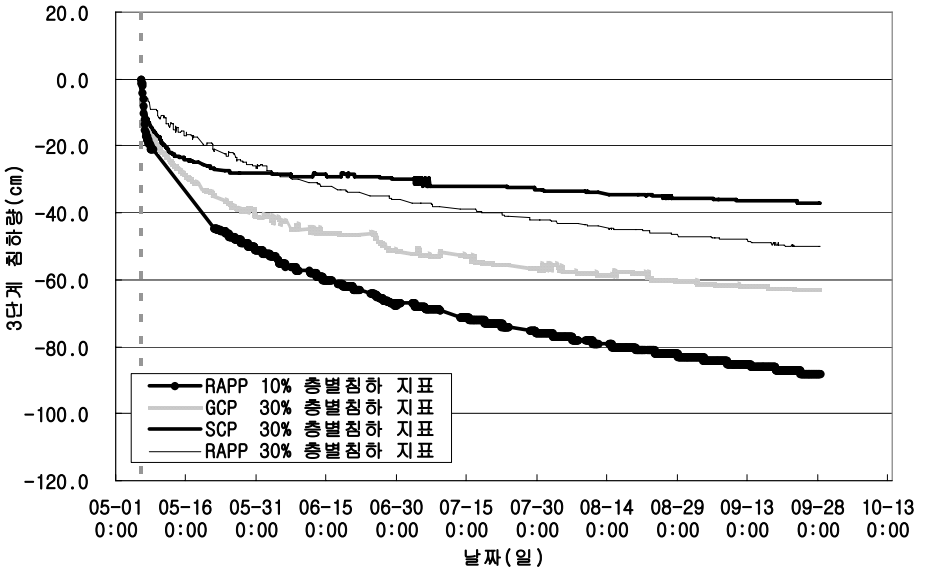


(b) 1단계 성토재하시 침하량 발생 현황

<그림 3.7.38> 시간경과에 따른 침하량 발생 현황(지표면)(계속)



(c) 2단계 성토재하시 침하량 발생 현황



(d) 3단계 성토재하시 침하량 발생 현황

<그림 3.7.38> 시간경과에 따른 침하량 발생 현황(지표면)

<표 3.7.30> 공법별 침하량 발생 현황(지표면)

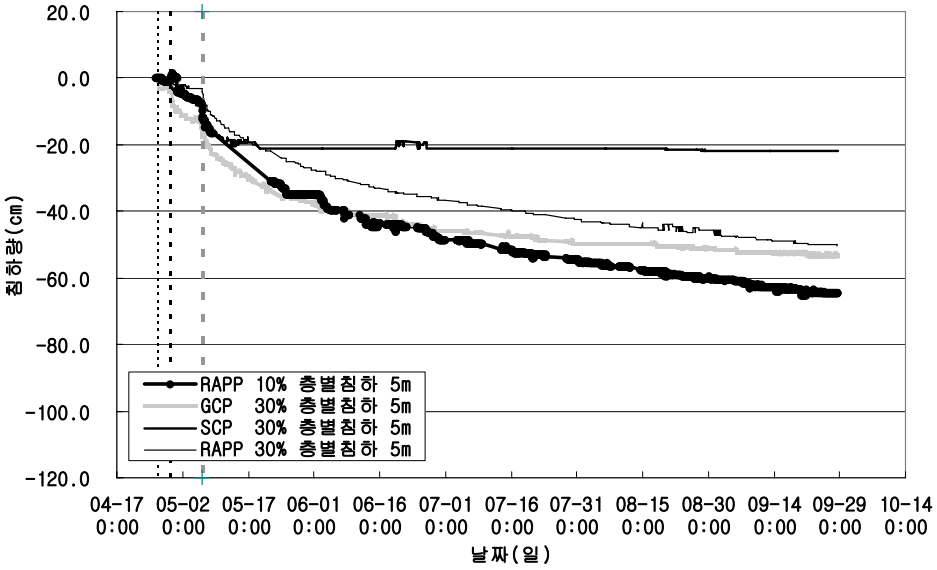
단계	계측기	지점	말뚝	최대침하량(cm)
1단계 (3일)	층별침하계	지표면	RAPP 10%	-2.0
			GCP 30%	-7.0
			SCP 30%	-7.0
			RAPP 30%	-3.0
2단계 (7일)	층별침하계	지표면	RAPP 10%	-13.0
			GCP 30%	-20.0
			SCP 30%	-11.5
			RAPP 30%	-7.5
3단계 (150일)	층별침하계	지표면	RAPP 10%	-88.0
			GCP 30%	-63.0
			SCP 30%	-37.0
			RAPP 30%	-50.0

1단계와 2단계에서 최대 침하량이 가장 크게 나타난 공법은 GCP 30%에서 27cm의 침하가 발생되었다.

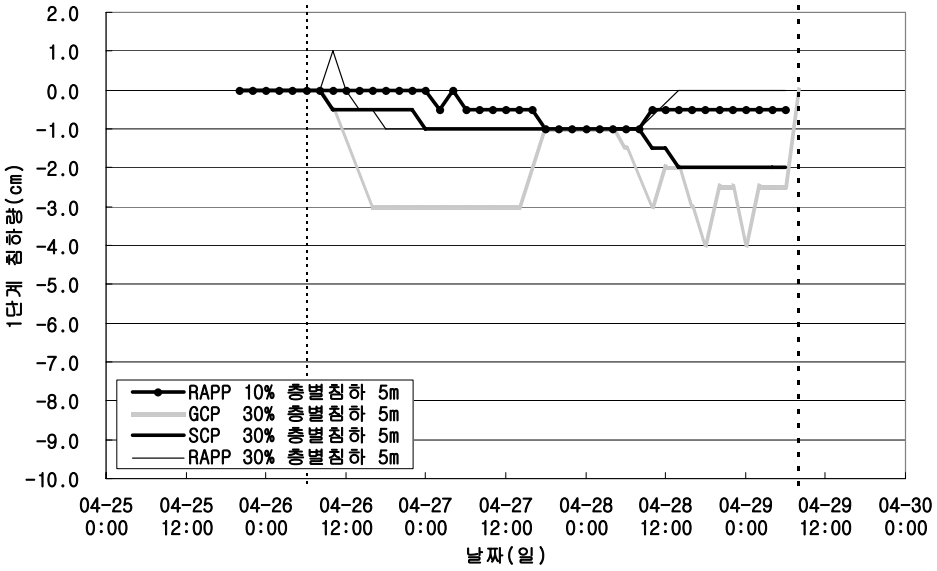
SCP 30%의 경우도 18.5cm의 침하로 RAPP 10%의 침하량 15cm와 RAPP 30%의 침하량 10.5cm의 비해 비교적 큰 침하량을 나타내었다.

지표에서의 RAPP 30%의 침하량은 50cm로 GCP 30%에 비해 13cm가 작게 나타났으며 RAPP 10%에서의 침하량은 88cm로 비교적 큰 수치를 나타내었다.

② GL.-5m

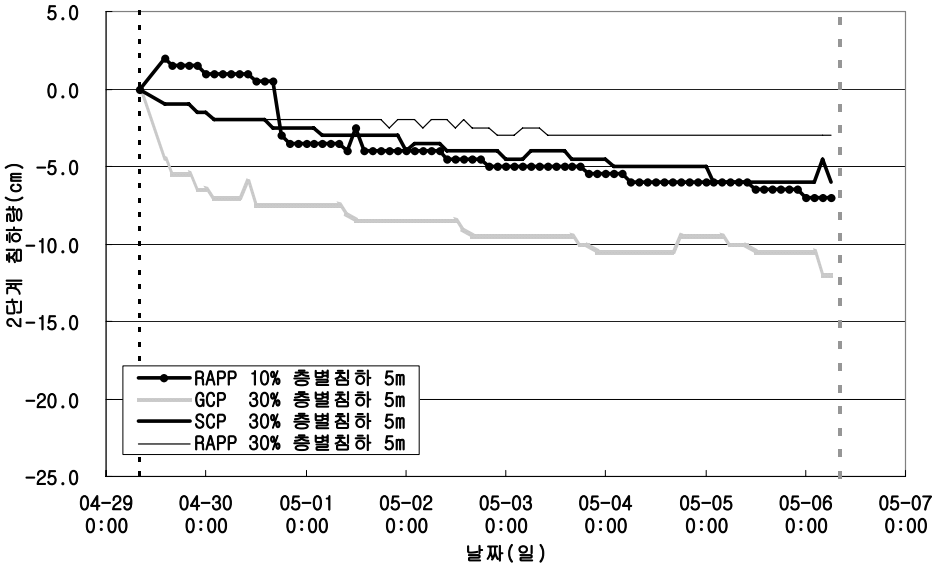


(a) 공법별 침하량 발생 현황

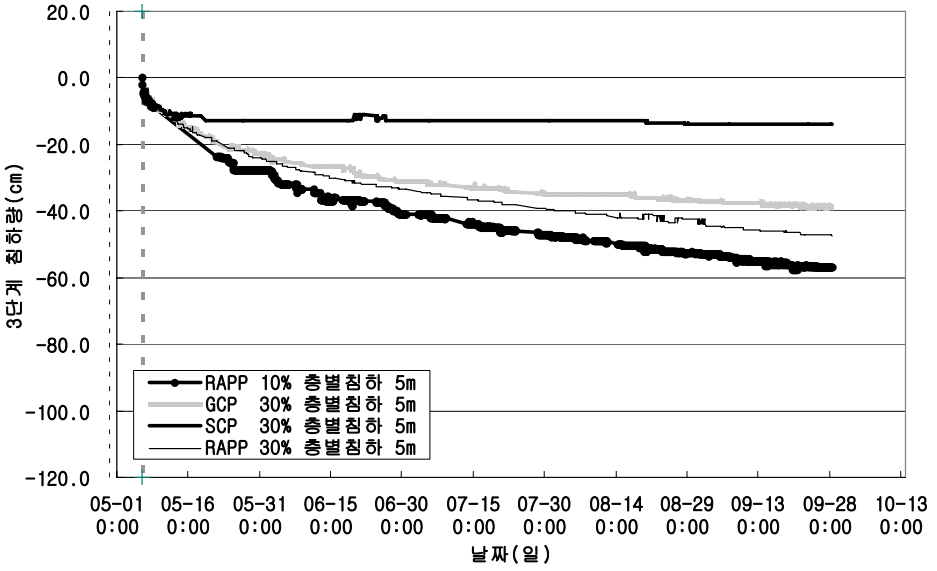


(b) 1단계 성토재하시 침하량 발생 현황

<그림 3.7.39> 시간경과에 따른 침하량 발생 현황(GL.-5m)(계속)



(c) 2단계 성토재하시 침하량 발생 현황



(d) 3단계 성토재하시 침하량 발생 현황

<그림 3.7.39> 시간경과에 따른 침하량 발생 현황(GL.-5m)

<표 3.7.31> 공법별 침하량 발생 현황(GL.-5m)

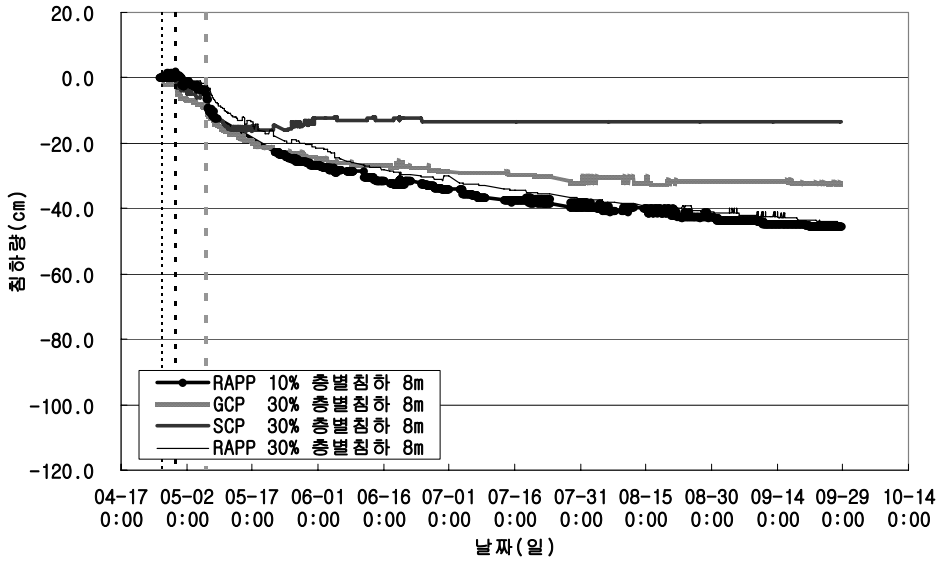
단계	계측기	지점	말뚝	최대침하량(cm)
1단계 (3일)	층별침하계	GL-5m	RAPP 10%	-1.0
			GCP 30%	-4.0
			SCP 30%	-2.0
			RAPP 30%	-1.0
2단계 (7일)	층별침하계	GL-5m	RAPP 10%	-7.0
			GCP 30%	-12.0
			SCP 30%	-6.0
			RAPP 30%	-3.0
3단계 (150일)	층별침하계	GL-5m	RAPP 10%	-57.5
			GCP 30%	-39.0
			SCP 30%	-14.0
			RAPP 30%	-50.0

1단계와 2단계에서의 RAPP 30%의 침하량은 1cm와 3cm로 다른 공법에 비해 침하량이 극히 작으며 RAPP 10%는 2단계 성토 이후 침하량이 급격히 증가하였다.

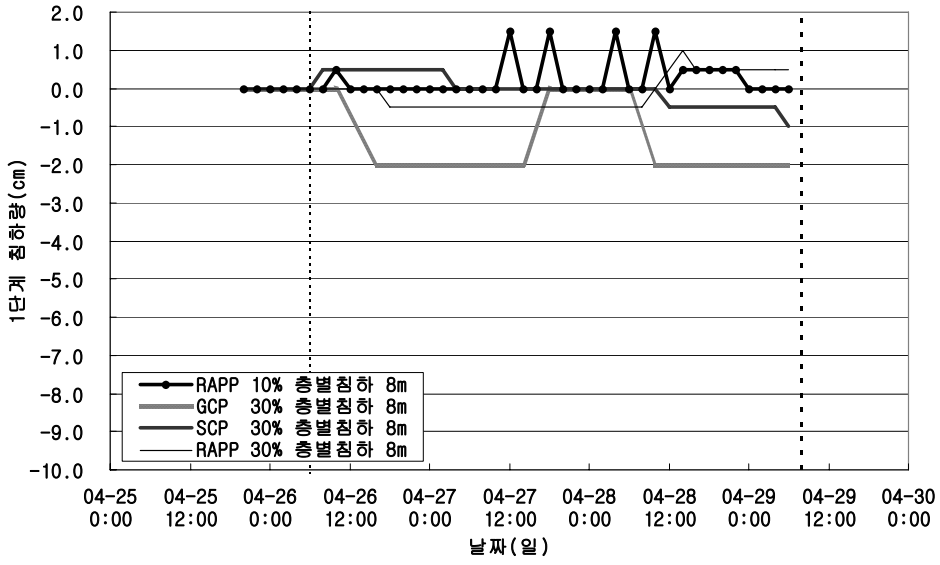
SCP 30%의 층별침하계는 3단계 성토 이후 계측기의 고장으로 인해 계측 데이타의 신뢰성이 매우 작으며, 타공법의 데이터와의 분석이 불가능한 것으로 판단되어 SCP 30%의 침하량은 제외하기로 한다.

GCP 30%, RAPP 30%, RAPP 10% 순으로 침하량이 작게 나타났다. 2단계에서 가장 많은 침하량을 보였던 GCP 30%는 3단계에서 RAPP보다 10cm이상의 차이로 침하량이 작게 나타났다.

③ GL.-8m

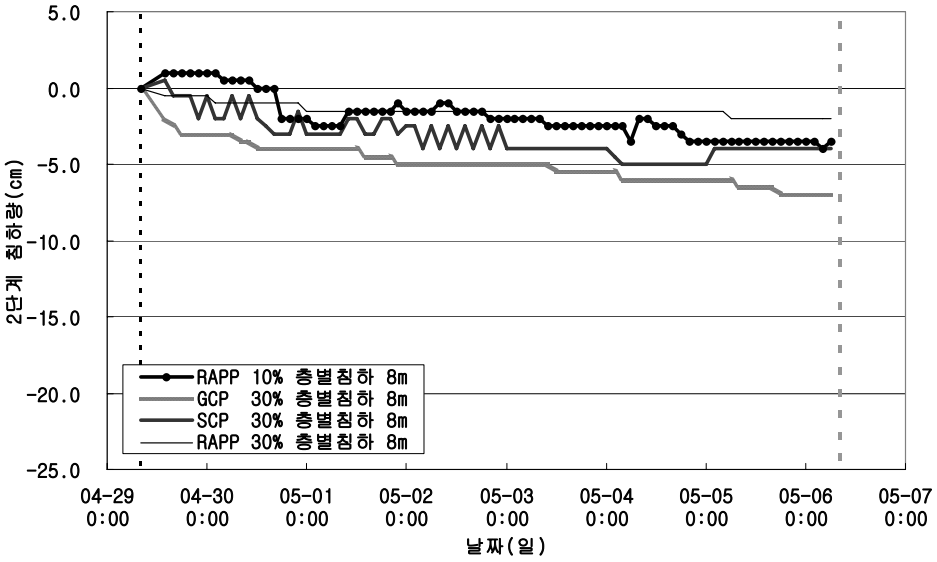


(a) 공법별 침하량 발생 현황

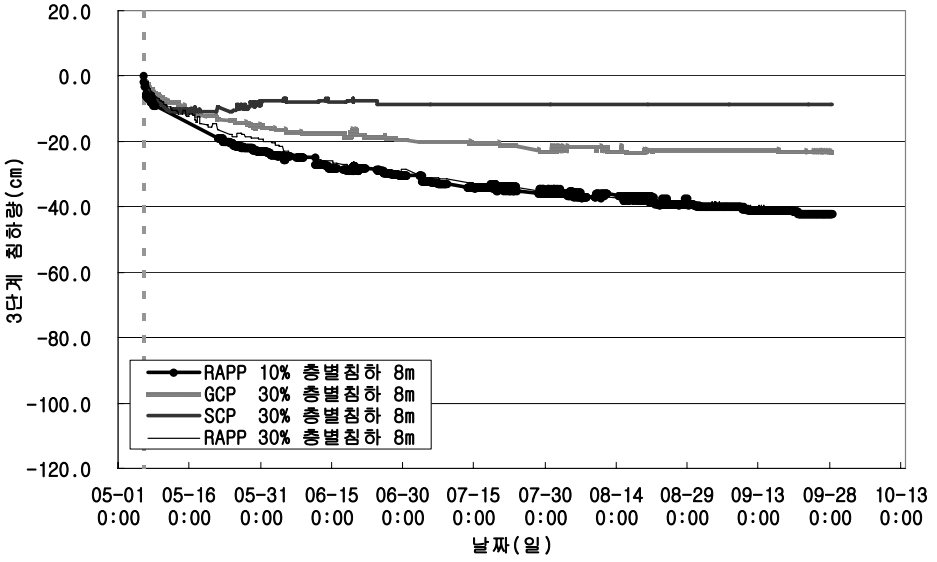


(b) 1단계 성토재하시 침하량 발생 현황

<그림 3.7.40> 시간경과에 따른 침하량 발생 현황(GL.-8m)(계속)



(c) 2단계 성토재하시 침하량 발생 현황



(d) 3단계 성토재하시 침하량 발생 현황

<그림 3.7.40> 시간경과에 따른 침하량 분포 현황(GL.-8m)

<표 3.7.32> 공법별 침하량 발생 현황(GL.-8m)

단계	계측기	지점	말뚝	최대침하량(cm)
1단계 (3일)	층별침하계	GL-8m	RAPP 10%	0.0
			GCP 30%	-2.0
			SCP 30%	-1.0
			RAPP 30%	-0.5
2단계 (7일)	층별침하계	GL-8m	RAPP 10%	-4.0
			GCP 30%	-7.0
			SCP 30%	-5.0
			RAPP 30%	-2.0
3단계 (150일)	층별침하계	GL-8m	RAPP 10%	-42.0
			GCP 30%	-23.5
			SCP 30%	-11.5
			RAPP 30%	-43

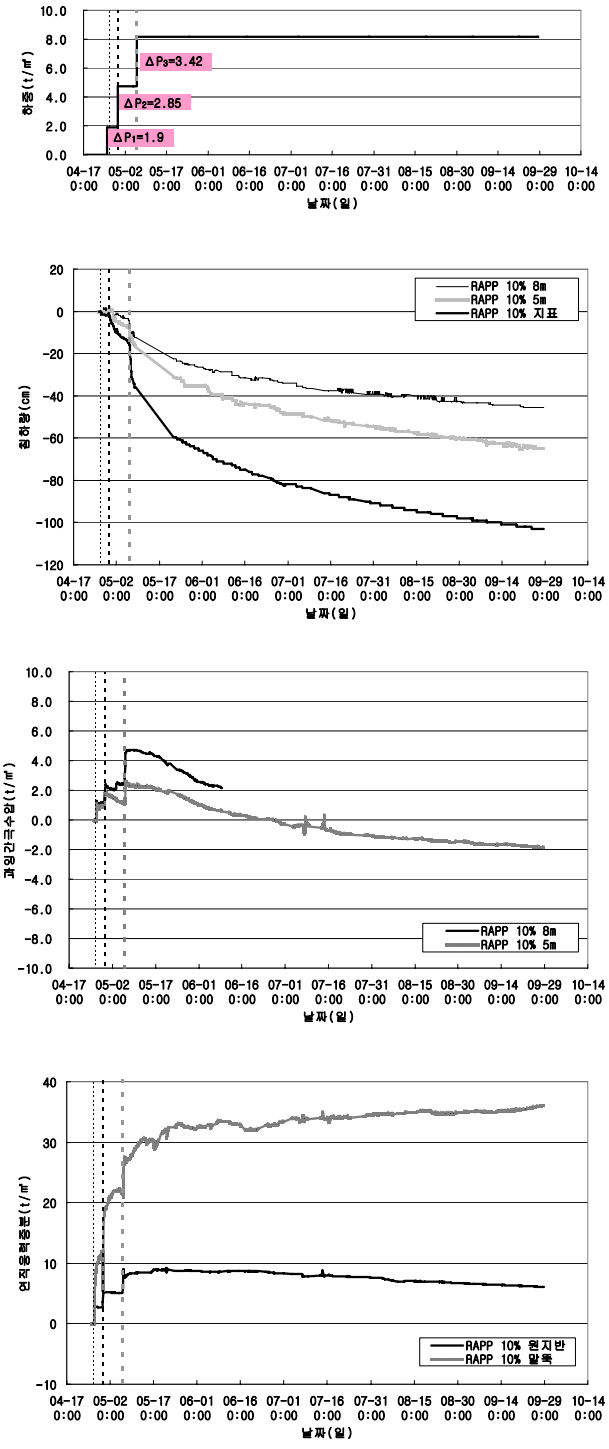
1단계에서의 침하량은 4공법 모두 2cm 이하의 극히 작은 값을 나타내고 있지만 2단계 성토 이후 GCP 30%와 SCP 30%는 5cm이상의 침하량을 나타내고 있다.

반면 RAPP 10%와 RAPP 30%는 5cm이하의 침하량을 보이고 있다. 3단계 성토이후 160일 동안 SCP 30%는 침하량이 수렴하는 경향을 나타내고 있으며, GCP 30%는 16.5cm의 침하량을 보이고 있다.

RAPP 10%, RAPP 30%의 경우 총 침하량은 유사한 침하양상을 나타내고 있다.

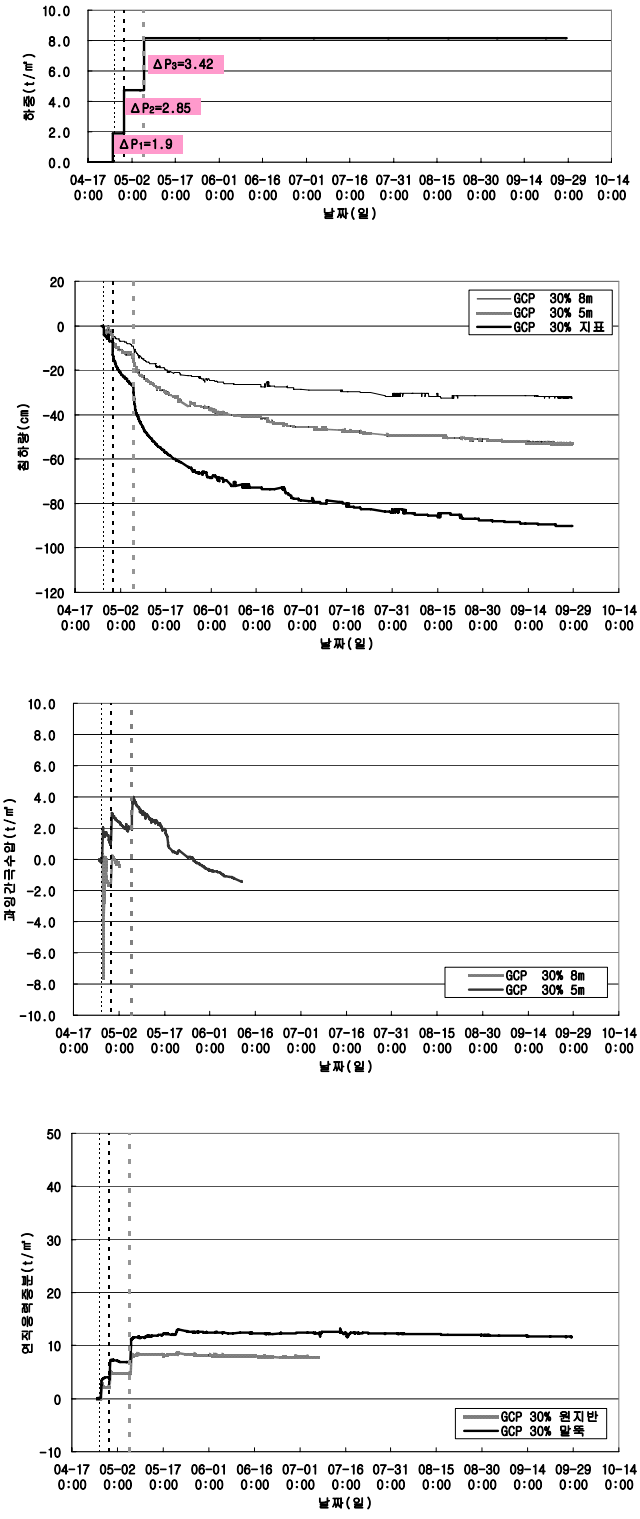
(2) 공법별 계측결과

(가) RAPP 공법(치환율 10%)



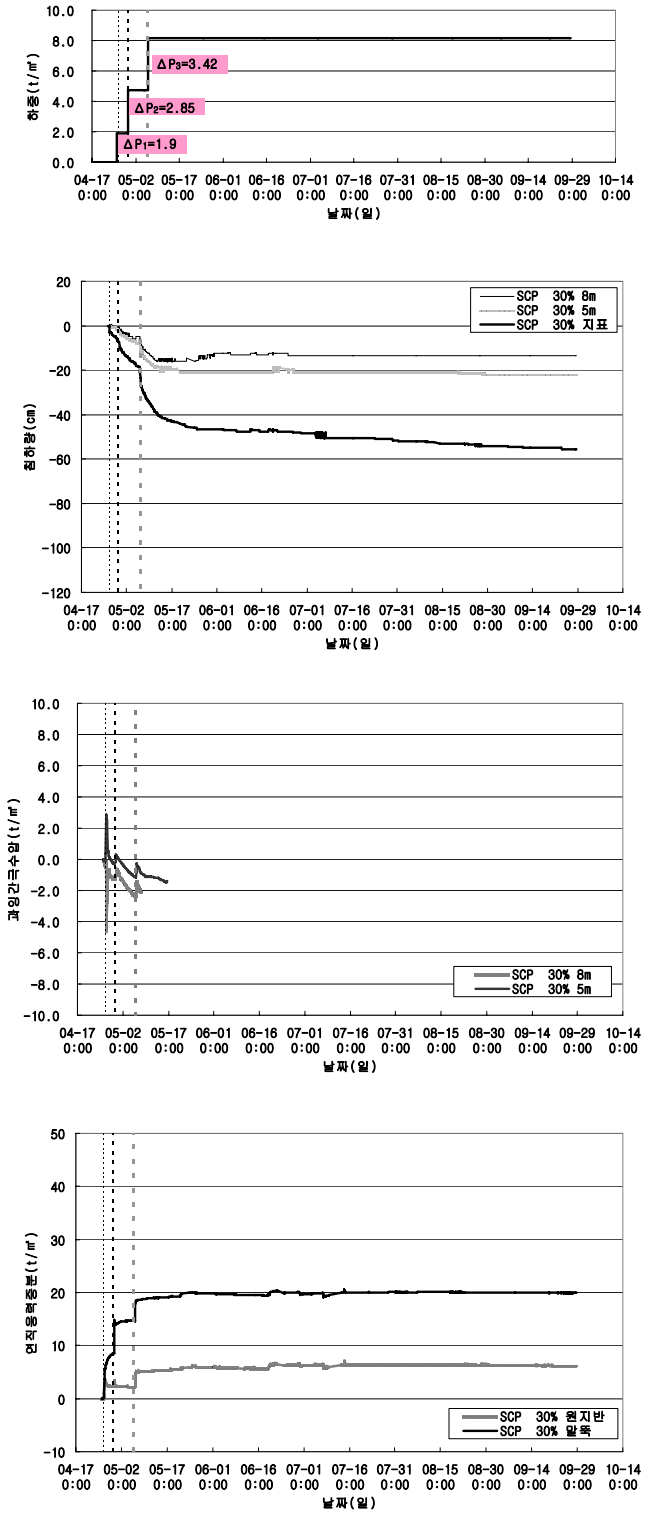
<그림 3.7.41> 하중단계별 계측결과(RAPP 10%)

(나) GCP 공법(치환율 30%)



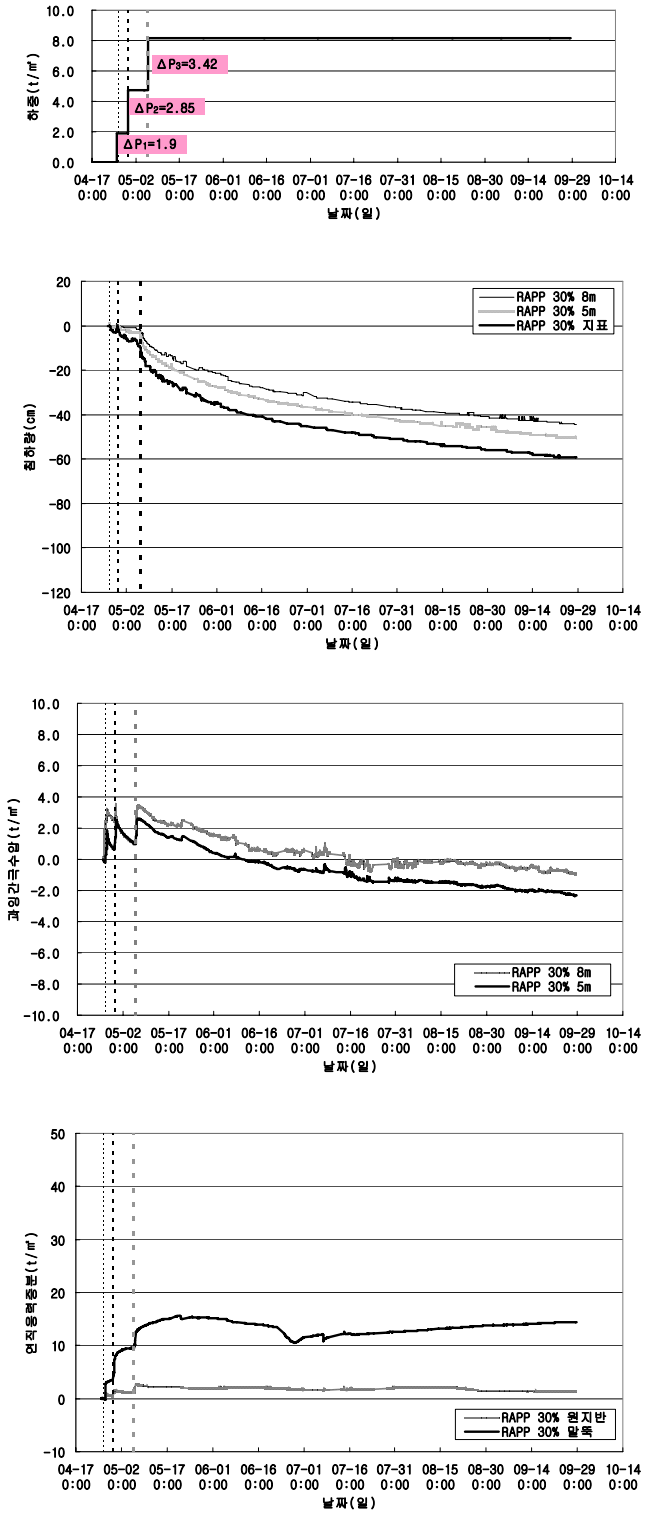
<그림 3.7.42> 하중단계별 계측결과(GCP 30%)

(다) SCP 공법(치환율 30%)



<그림 3.7.43> 하중단계별 계측결과(SCP 30%)

(라) RAPP 공법(치환율 30%)



<그림 3.7.44> 하중단계별 계측결과(RAPP 30%)

(마) 결과분석

RAPP 10%로 개량된 연약지반의 최대침하량은 지표면의 경우 103cm이며 GL.-5m 지점은 64.5cm, GL.-8m 지점은 45.5cm이다.

지표면의 침하량은 하중재하 3단계의 경우 최대침하량은 88cm이며, 심도가 깊어질수록 구속압에 의해 침하량이 작아지는 양상을 보이고 있다. 하중재하단계의 증가로 인한 GL.-8m 지점에서의 최대과잉간극수압은 하중재하 1단계에서 1.26t/m^2, 2단계에서 1.38 t/m^2, 3단계에서 2.27t/m^2이 기록되었다.

원지반의 연직응력증분이 9t/m^2에 비해 RAPP 10%의 연직응력증분은 36t/m^2으로 RAPP 10% 말뚝부에 응력집중현상이 발생되었음을 알 수 있다.

GCP 30%로 개량된 연약지반의 최대침하량은 지표면의 경우 90cm, GL.-5m 지점은 53cm, GL.-8m지점은 32.5cm가 발생하였다. 하중재하 3단계 이후 급격하게 침하가 발생되었다. GL.-8m 지점에 설치된 간극수압계는 3단계 성토 5월 7빌 이후로 계측이 중단되었으며, GL.-5m 지점에 설치된 간극수압계는 6월 11일 이후 계측이 중단되었다.

연직응력증분의 변화량은 말뚝부에서 최대 12.5t/m^2까지 증가하였으며 RAPP 10%보다 30% 미만의 값을 나타내고 있다. GCP 30%로 개량된 원지반의 연직응력증분은 3단계 성토 이후 7월 7일부터 계측이 되지 않았으며 7월 7일 이전의 최대 연직응력증분은 8.0t/m^2이다.

SCP 30%로 개량된 연약지반의 최대침하량은 RAPP와 GCP보다 비교적 작은 값을 나타내고 있다. 최대침하량은 지표면의 경우 55.5cm, GL.-5m 지점은 22cm, GL.-8m 지점은 16.5cm로 계측되었다. SCP 30%의 말뚝부는 최대 20t/m^2의 연직응력증분을 나타내고 있으며 원지반의 경우 6.5t/m^2로 계측되었다.

RAPP 30%로 개량된 연약지반의 최대침하량은 다른 공법과 마찬가지로 지표면에서 발생되었다. 지표면의 경우 59cm로 RAPP 10% 및 GCP 30%의 침하량에 비해 0.57 ~ 0.66배에 이른다. 또한 GCP 30%와 같은 급격한 침하양상은 보이지 않으며 GL.-5m 지점에서 50.5cm, GL.-8m 지점에서는 44.5cm의 침하량이 발생되었다.

최대 과잉간극수압은 3.5t/㎡으로 측정되었으며 그 시점은 3단계 성토 직후에 발생되었다. 지표면에 설치된 토압계는 3t/m^2의 낮은 수치를 나타내고 있으며 SCP 30%, GCP 30%가 적용된 원지반의 연직응력증분보다 비교적 작은 수치를 보이고 있다.

4. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 개량효과 판정

가. 계측결과 종합분석

(1) 계측관리 방법

(가) 침하 및 안정관리 방법

① 침하 관리의 목적

연약지반상의 성토를 축조하는 경우 시공중 성토량 파악 및 장차 생기는 침하에 대한 장애를 경감하기 위한 계획높이 또는 토공의 폭원 여유, 선행하중 방치기간을 검토하기 위해 침하의 경시변화를 파악해둘 필요가 있다.

또한 공사가 완공된 다음으로는 추가 잔류침하에 의해 여러 가지 장애가 생기므로 이에 대한 보수 계획을 수립하기 위해서도 장차 침하를 예측할 필요가 있다.

침하관리는 안정관리와 통상 함께 수행하며 사용하는 계기도 공통으로 사용하는데, 침하관리의 목적은 다음과 같다.

- 장래 침하량을 예측하여 토량, 성토단면 형상의 수정, 토공 계획고와 지중구조물의 장기 침하량을 결정한다.
- 선행하중의 재하기간과 제거시기를 결정한다.
- 선행하중의 재하기간과 제거시기를 결정한다.
- 공사부지를 포함한 주변지반의 변형, 수로 등 기존구조물의 변위 등을 측정하여 장애가 발생하지 않도록 관리한다.

② 실측치를 이용한 침하관리

㉮ 쌍곡선법

이 방법은 침하속도가 쌍곡선적으로 감소한다는 가정에 따른 것으로서 침하-시간곡선

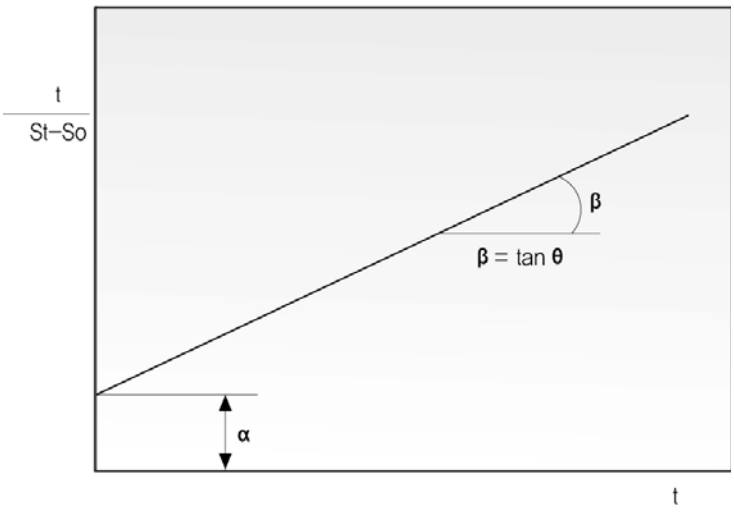
은 다음과 같다.

성토 시공 중에 현장계측에 의하여 얻어진 침하-시간관계에서 장래침하량을 추정하는 방법중에 "침하의 평균속도가 시간에 대하여 쌍곡선으로 변한다"는 가정하에 제안된 방법이다. 그림과 같이 $\frac{t}{S_t - S_0}$를 종축에, t를 횡축에 도시하면 종축절편 α와 기울기 β를 갖는 1개의 직선으로 표시된다. 이 그림으로부터 임의의 시간 t에서의 침하량과 시간이 무한대일 때의 최종침하량(100% 압밀시)은 다음과 같은 식으로 표시될 수 있다.

$$S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta \times t} \qquad \text{(식 3.7.2)}$$

$$S_\infty = S_0 + \frac{1}{\beta} \qquad \text{(식 3.7.3)}$$

여기서, S_t : 임의의 시간 t에서의 침하량, S_0 : 초기 침하량,
S_∞ : 시간 ∞에서의 침하량(최종침하량), α : 종축절편, β : 기울기



<그림 3.7.45> 쌍곡선법

이 방법을 적용하여 추정한 침하량은 초기에는 실측치에 비하여 작고 후반부의 직선부분에서는 일치하는 경향이 있으므로 압밀도가 약 50% 정도 도달해야만 어느 정도 근사치에 접근할 수 있는 것으로 알려져 있다.

㉯ Asaoka 방법

Asaoka는 1차원 압밀방정식을 이용하여 현장 침하자료로부터 임의의 시점에서의 침하량을 구할 수 있는 도식적 방법을 제안하였다.

측정된 침하자료를 일정한 시간 간격으로 끊어서 이때의 침하량을 각각 S_1, S_2, S_3, S_4, S_n, S_∞라 하고, S_n을 종축에 S_{n-1}을 횡축에 도시한다. 도시된 S_n-S_{n-1}의 관계는 일정한 기울기(β)를 갖는 직선형태를 나타내다가 시간이 무한대가 되면 $S_n = S_{n-1}$의 직선과 교차되어 최종침하량 S_∞를 구할 수 있다.

$$S_\infty = \frac{S_0}{1-\beta} \qquad \text{(식 3.7.4)}$$

여기서, S_∞ : 시간 ∞에서의 침하량(최종침하량), S_0 : 초기 침하량, β : 기울기

또한, 임의의 시간 t에서의 침하량은 아래 식을 이용하여 예측할 수 있다.

$$S_t = S_\infty - \left[(S_\infty - S_0) e^{\left(-\frac{t}{a}\right)} \right] \qquad \text{(식 3.7.5)}$$

여기서, S_t : 임의의 시간 t에서의 침하량, $a = \left(\frac{5}{12}\right) \times \left(\frac{H^2}{C_v}\right)$,

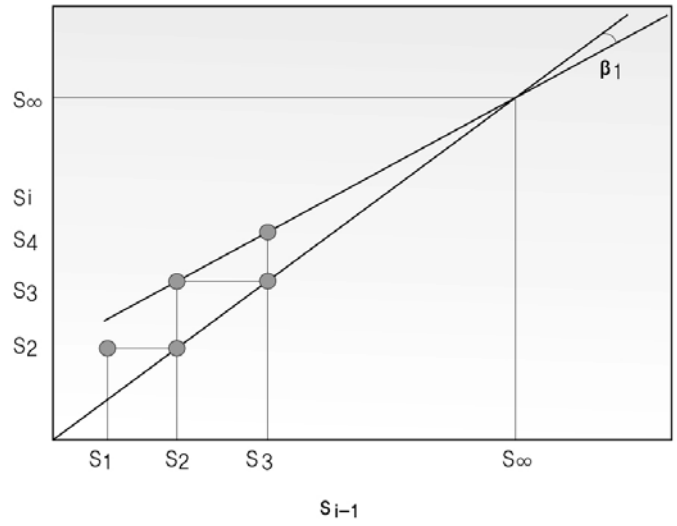
H : 압밀층의 두께

<그림 3.7.46>에서 β를 알면 압밀계수는 다음 식으로부터 산정할 수 있다.

$$C_v = -\frac{5}{12} \cdot H^2 \cdot \frac{\ln\beta}{\Delta t} \qquad \text{(식 3.7.6)}$$

여기서, Δt : 시간간격

Asaoka 방법은 성토기간이 길면 β값이 커진다. 또한 시간간격 Δt를 길게 잡을수록 정확도가 높다. 그리고 압밀도 60% 정도에서 비교적 장래침하량을 잘 예측할 수 있는 것으로 알려져 있다.



<그림 3.7.46> Asaoka 방법

③ 실측치를 이용한 안정관리

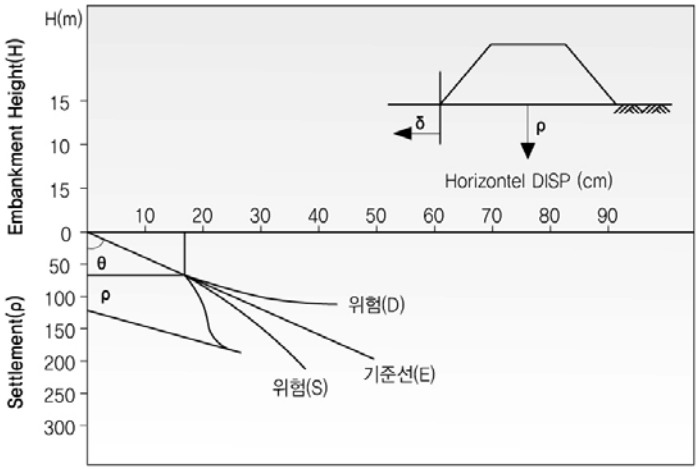
㉮ Tominaga-Hashimoto 방법(S-δ 관리법)

富永 등이 제안한 방법으로 성토진행에 따라 S(연직침하량)-δ(수평변위량)의 관계를 표시하여 안정관리를 하는 방법이다.

S-δ의 관계는 S축에 대하여 임의의 기울기 α를 갖는 직선 E상에 있게 된다. 성토가 진행되면서 δ/S가 급증하면 전단변형이 현저하므로 불안정하게 되고, 감소하는 경우 δ/S는 압밀침하중이므로 안정하다고 판단된다.

성토가 파괴에 근접하면 S 의 증가에 비해 δ의 증가가 현저하므로 수평방향으로 기울면서 불안정하게 된다.

이때 직선의 변곡선에서 수직선을 그려보면 α_1, α_2의 관계를 고려할 수 있는데, 변곡점 이후의 기울기 $\alpha_2 \geq 0.7$ 또는 $\alpha_2 \geq \alpha_1 + 0.5$이면 불안정하다고 판단한다.

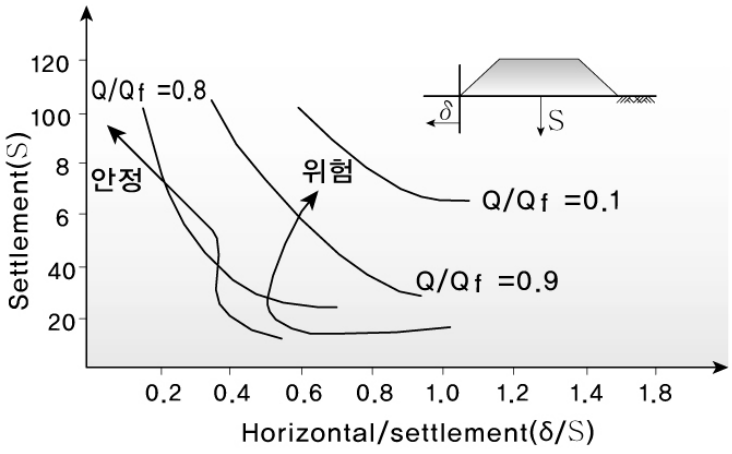


<그림 3.7.47> Tominaga-Hashimoto 방법

㉰ Matsuo-Kawamura 방법(S-δ/S 관리법)

성토중앙부의 침하량(S)에 대해서 성토사면부의 수평변위(δ)를 이용하여 S - δ/S 관계를 도시하고 시공중 S-δ/S 관계가 파괴기준선에 근접하면 파괴가 발생되고, 멀어지면 안정한 상태를 의미한다.

지반이 파괴에 도달될 때까지의 성토하중의 이력과 지반의 변위를 관련시켜 최종적인 파괴하중(Q_f)과 거기에 도달할 때까지의 성토 시공중의 하중(Q)의 비의 관계를 하중비(Q/Q_f)로서 나타내고 있다.



<그림 3.7.48> Matsuo-Kawamura 방법

Q/Q_f=1.0인 곡선은 파괴기준선을 나타내고, Q/Q_f=0.8, 0.9인 곡선은 S-δ/S의 관계가 해당곡선 근처에 도달할 경우 성토하중은 파괴시의 80% 또는 90%를 나타낸다. 따라서 이 방법의 근본적인 원리는 동일한 시간에 성토중앙부의 침하량(=압밀침하량)보다 수평변위량이 크게 발생하면 성토제체는 불안정한 상태가 된다는 것을 의미한다. 그러나 이 방법은 성토중앙부의 침하량이 40cm 이상일 경우에만 적용해야 하는 단점이 있다.

Matsuo 등은 S-δ/S 관계를 수치해석과 현장계측결과를 기초로 다음과 같은 회귀분석을 이용하여 계수를 제안하였다.

$$S = a \cdot e^{\left[b \cdot \left(\frac{\delta}{S}\right)^2 + c \cdot \left(\frac{\delta}{S}\right)\right]} \qquad \text{(식 3.7.7)}$$

<표 3.7.33> Matsuo-Kawamura 방법의 계수

Q / Q_f	a	b	c	δ / S 의 범위
1.0	5.93	1.28	-3.41	$0 < \delta / S \leq 1.4$
0.9	2.80	0.40	-2.49	$0 < \delta / S \leq 1.2$
0.8	2.94	4.52	-6.37	$0 < \delta / S \leq 0.8$
0.7	2.66	9.68	-9.97	$0 < \delta / S \leq 0.6$
0.6	0.98	5.93	-7.37	$0 < \delta / S \leq 0.6$

이러한 관리 방법은 시공과정 중에 성토가 안전상 상대적으로 어떤 상태에 있는지, 불안정한 경향으로 향하는지 등을 파악하는데 효과적이다.

(2) 침하관리 분석

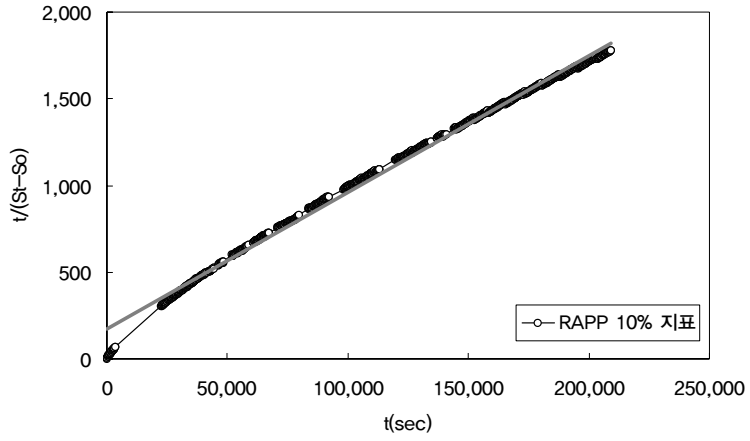
① 쌍곡선법

쌍곡선법에 의한 예측된 최종 침하량은 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법(RAPP 공법, 개량율 10%), 쇄석다짐말뚝공법(GCP공법, 개량율 30%), 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법(RAPP공법, 개량율 30%) 각각에 대하여 141.1cm, 165.6cm, 82.0cm이다. 모래다짐말뚝

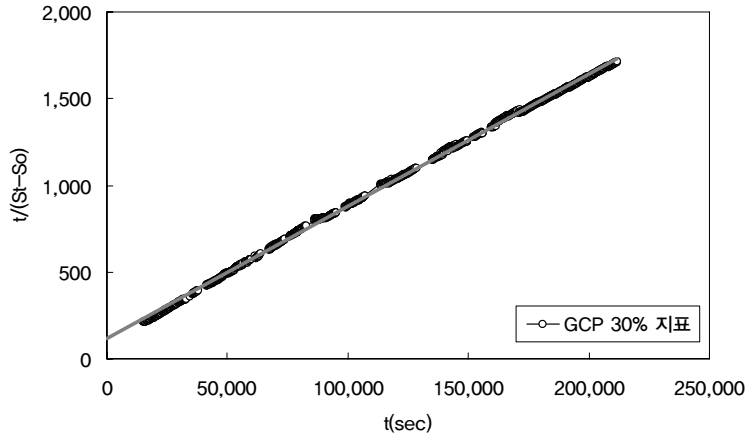
공법은 개량층 심도변화 등에 의하여 쇄석다짐말뚝공법에 비하여 최종 침하량 예측치가 낮게 평가되었다.

최종 침하량 예측 결과 GCP 공법의 개량율 30%는 RAPP공법의 개량율 10%에 비하여 다소 높게 평가되었으며, RAPP 공법의 개량율 30%는 개량율 10%에 비해 60% 수준의 침하량이 예측되었다. 또한, RAPP 공법의 개량율 30%는 GCP 공법의 개량율 30%에 비하여 최종침하량이 50% 수준으로 나타났다.

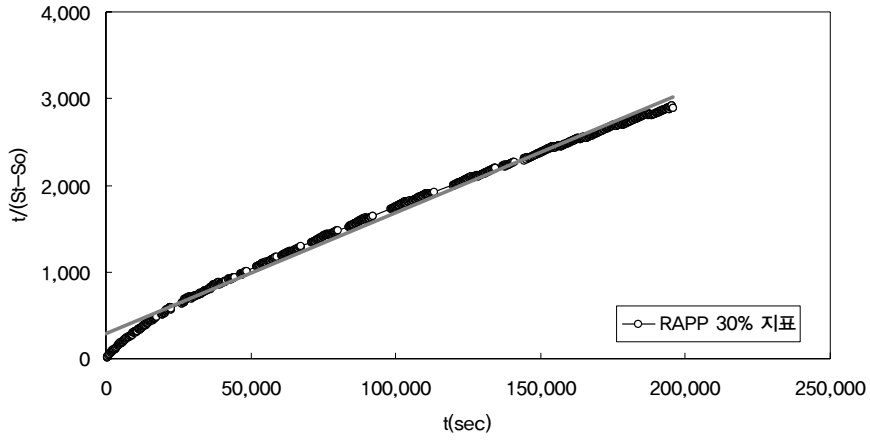
상기 결과를 종합하여 볼 때, RAPP공법의 개량율은 GCP공법의 약 1/3 수준이며, 동일한 개량율에서는 침하량이 1/2 수준으로 예측되었다.



<그림 3.7.49> 쌍곡선법에 의한 최종침하량 예측(RAPP 10%)



<그림 3.7.50> 쌍곡선법에 의한 최종침하량 예측(GCP 30%)



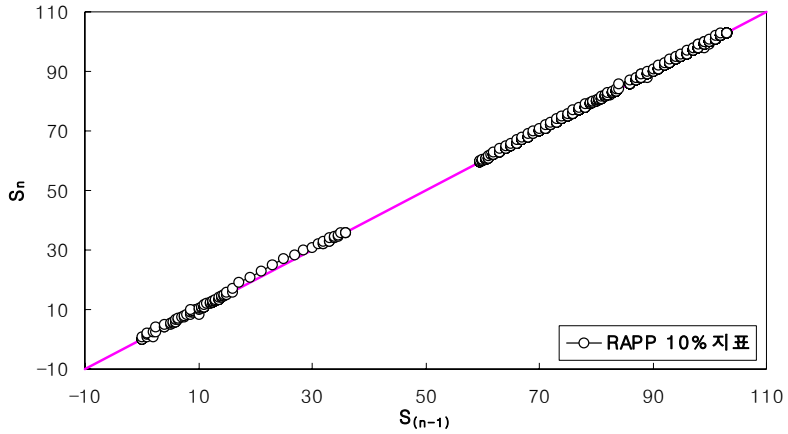
<그림 3.7.51> 쌍곡선법에 의한 최종 침하량 예측(RAPP 30%)

② Asaoka 방법

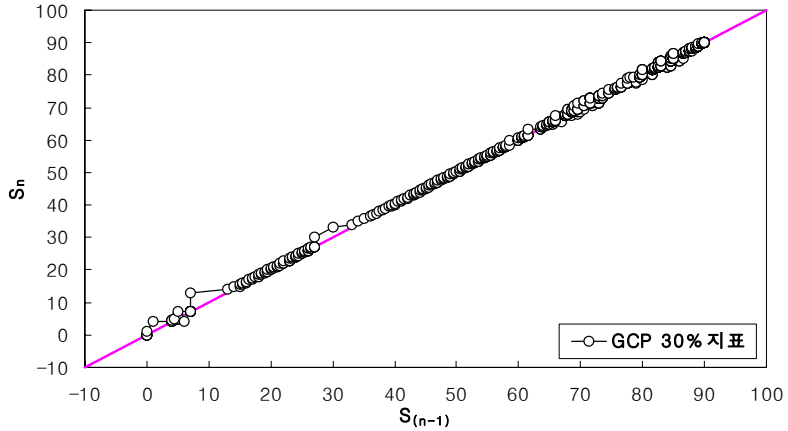
Asaoka 방법에 의한 예측된 최종침하량은 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법(RAPP 공법, 개량율 10%), 쇄석다짐말뚝공법(GCP 공법, 개량율 30%), 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법(RAPP 공법, 개량율 30%) 각각에 대하여 104.4cm, 86.6cm, 59.7cm이다. 모래다짐말뚝공법은 개량층 심도변화 등에 의하여 쇄석다짐말뚝공법에 비하여 최종 침하량 예측치가 낮게 평가되었다.

최종 침하량 예측 결과 GCP 공법의 개량율 30%는 RAPP 공법의 개량율 10%에 비하여 다소 낮게 평가되었으며, RAPP 공법의 개량율 30%는 개량율 10%에 비해 60% 수준의 침하량이 예측되었다. 또한, RAPP 공법의 개량율 30%는 GCP 공법의 개량율 30%에 비하여 최종침하량이 70% 수준으로 나타났다.

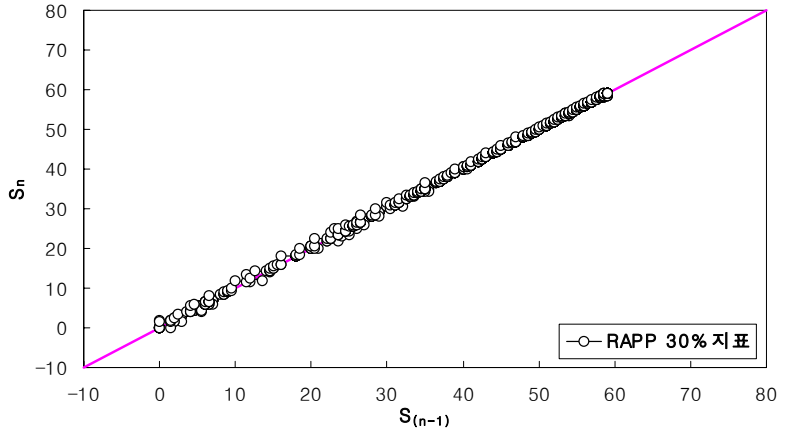
상기 결과를 종합하여 볼 때, RAPP 공법의 개량율은 GCP 공법의 약 1/3 수준이며, 동일한 개량율에서는 침하량이 2/3 수준으로 예측되었다.



<그림 3.7.52> Asaoka 방법에 의한 최종침하량 예측(RAPP 10%)



<그림 3.7.53> Asaoka 방법에 의한 최종침하량 예측(GCP 30%)



<그림 3.7.54> Asaoka 방법에 의한 최종침하량 예측(RAPP 30%)

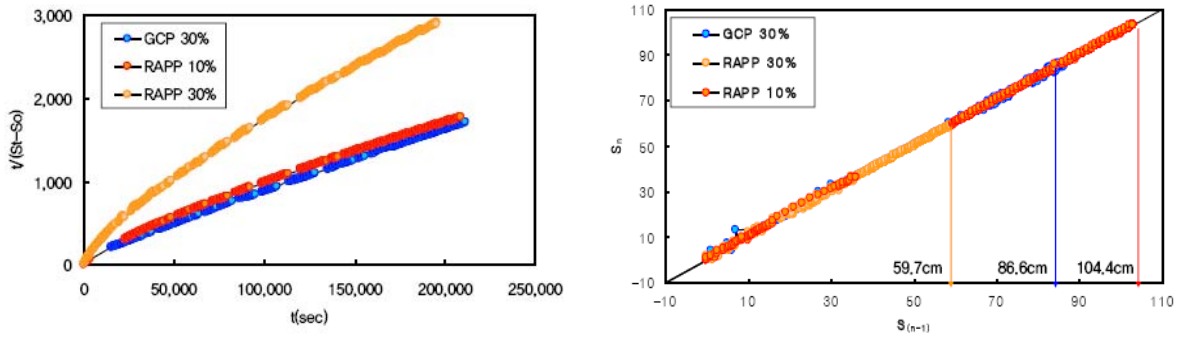
③ 분석 결과

장래 침하량 예측결과 SCP 공법을 제외하고 쌍곡선법에 의한 예측 침하량이 큰 것으로 나타났다. 최종침하량 예측 결과 GCP 공법의 개량율 30%는 RAPP 공법의 개량율 10%와 유사하게 평가되었으며, RAPP 공법의 개량율 30%는 개량율 10%에 비해 60% 수준의 침하량이 예측되었다.

또한, RAPP 공법의 개량율 30%는 GCP 공법의 개량율 30%에 비하여 최종침하량이 65% 수준으로 나타났다.

상기 결과를 종합하여 볼 때, RAPP 공법의 개량율은 GCP 공법의 약 1/3 수준이며, 동일한 개량율에서는 침하량이 2/3 수준으로 예측되었다.

RAPP 공법 및 GCP 공법에 대한 최종침하량 분석 결과 GCP 공법 30%와 RAPP 공법 10%의 침하량이 거의 동일하게 발생되는 것으로 나타났다.



(a) 쌍곡선법 (b) Asaoka법

<그림 3.7.55> 최종침하량 분석

<표 3.7.34> 공법별 최종 침하량 예측 결과

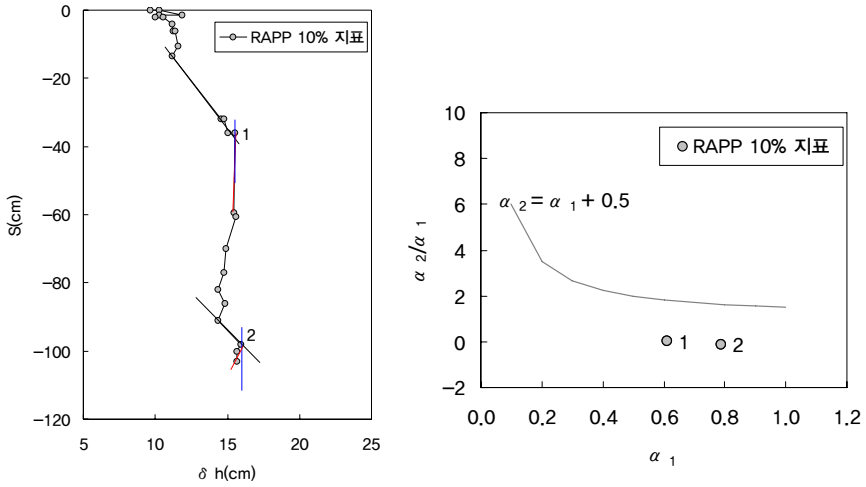
구 분	RAPP 10%	GCP 30%	RAPP 30%
쌍곡선법	141.1cm	165.6cm	82.0cm
Asaoka법	104.4cm	86.6cm	59.7cm
침하량 평균	122.7cm	128.6cm	70.9cm

(3) 안정 관리 분석

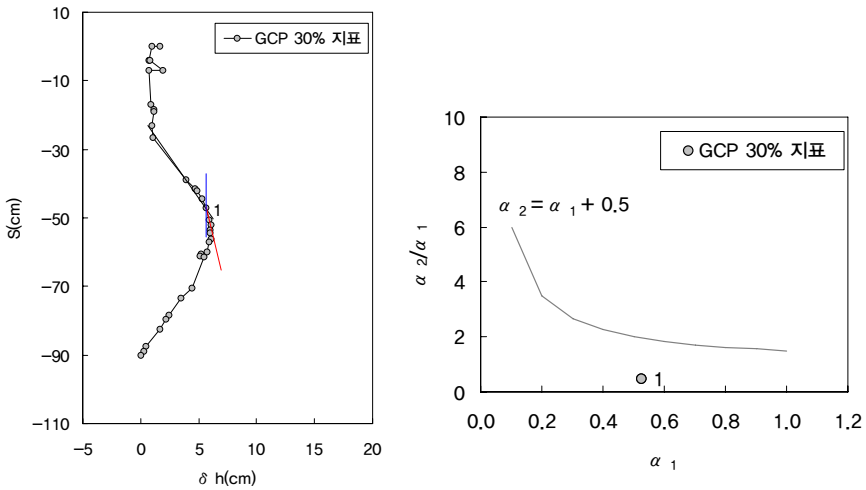
① Tominaga-Hashimoto 방법(S-δ 관리법)

안정관리 결과 RAPP 공법의 개량율 10%, GCP 공법의 개량율 30%, RAPP 공법의 개량율 30% 모두 안정한 것으로 나타났다.

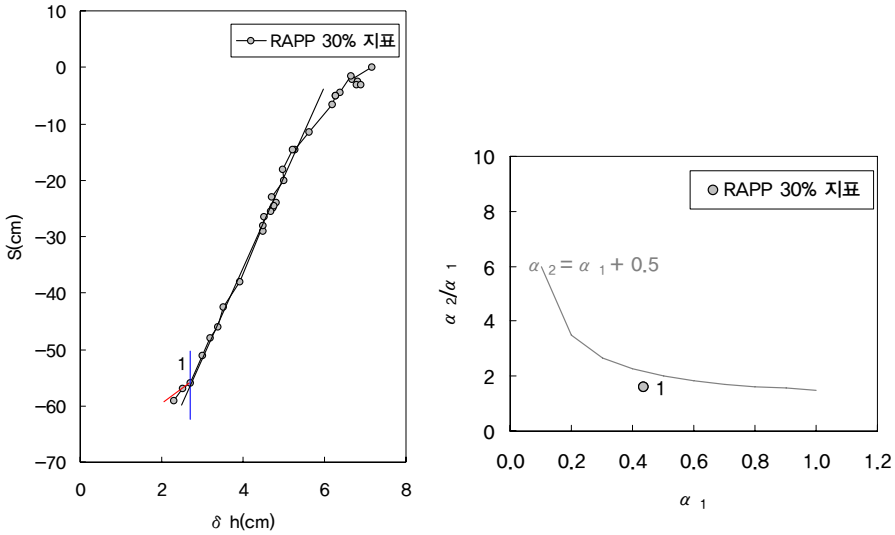
모래다짐말뚝공법의 경우 현장조건상 수로 옆에 시공되어 다소 불안정한 것으로 나타났으나, 육안 관찰상 안정한 것으로 나타났다.



<그림 3.7.56> Tominaga-Hashimoto 방법에 의한 안정성 예측(RAPP 10%)



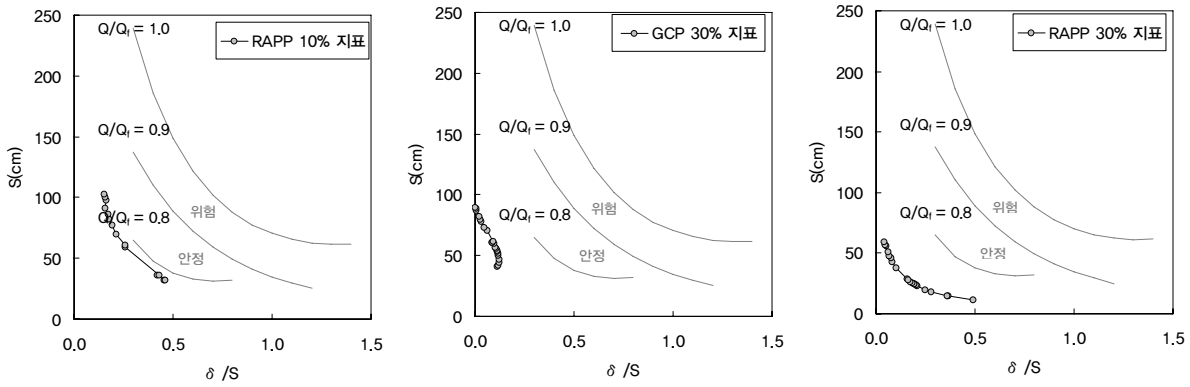
<그림 3.7.57> Tominaga-Hashimoto 방법에 의한 안정성 예측(GCP 30%)



<그림 3.7.58> Tominaga-Hashimoto 방법에 의한 안정성 예측(RAPP 30%)

② Matsuo-Kawamura 방법

Matsuo-Kawamura 방법은 동일한 시간에 성토중앙부의 침하량보다 수평변위량이 크게 되면 성토제체는 불안정한 상태로 된다는 것을 의미한다. GCP 공법의 개량율 30%는 RAPP 공법의 개량율 10%와 유사한 안정성을 갖는 것으로 평가되었으며, RAPP 공법의 개량율 30%는 RAPP 공법의 개량율 10%, GCP 공법의 개량율 30%에 비하여 안정성이 향상되는 것으로 나타났다. 상기 결과를 종합하여 볼 때, RAPP 공법의 개량율은 GCP 공법의 약 1/3 수준이며, 동일한 개량율에서는 안정성이 매우 향상되는 것으로 예측되었다.

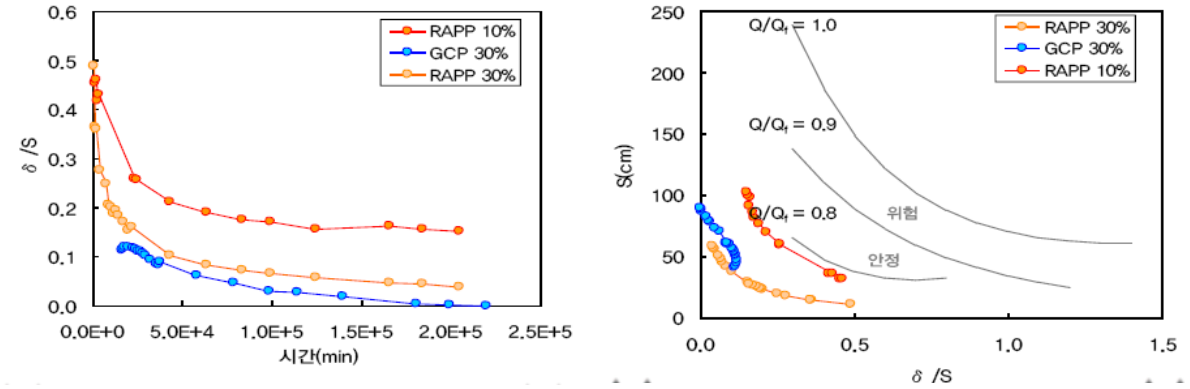


(a) RAPP 10% (b) GCP 30% (c) RAPP 30%

<그림 3.7.59> Matsuo-Kawamura 방법에 의한 안정성 예측

③ 분석 결과

안정성 분석결과 모두 안정한 상태인 것으로 나타났다. Matsuo-Kawamura 방법에 의한 안정성 예측 결과, RAPP 공법의 개량율은 GCP 공법의 약 1/3 수준이며, 동일한 개량율에서는 안정성이 매우 향상되는 것으로 예측되었다.



(a) 시간-δ/S (b) Matsuo-Kawamura 방법

<그림 3.7.60> 공법별 안정성 분석 결과

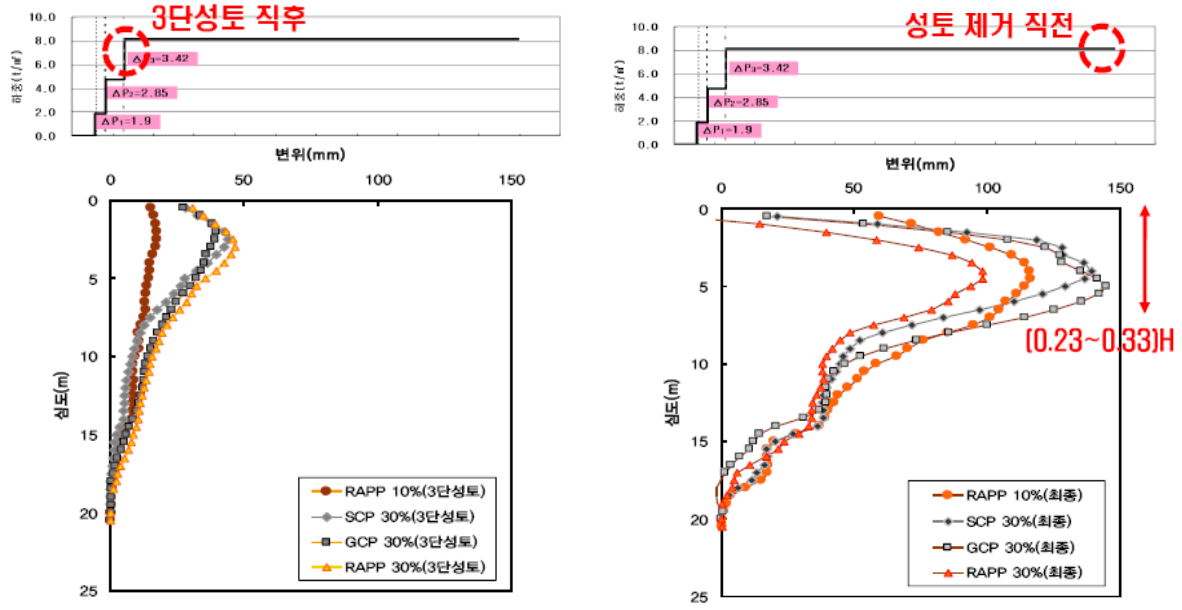
<표 3.7.35> 공법별 안정성 예측 결과

구 분	RAPP 10%	GCP 30%	RAPP 30%
Tominaga-Hashimoto 방법	안 정	안 정	안 정
Matsuo-Kawamura 방법	안 정	안 정	안 정

시간경과에 따라 수평변위(δ)/침하량(S)은 감소하는 경향을 나타내고 있으며, Matsuo-Kawamura 방법에 의한 분석 결과 RAPP 공법 30%는 타공법에 비하여 안정적인 거동을 나타내는 것으로 평가되었다.

(4) 수평변위 분석

지중경사계를 이용한 수평변위 계측결과를 분석하여 공법별 수평변위 발생경향을 파악하였다.



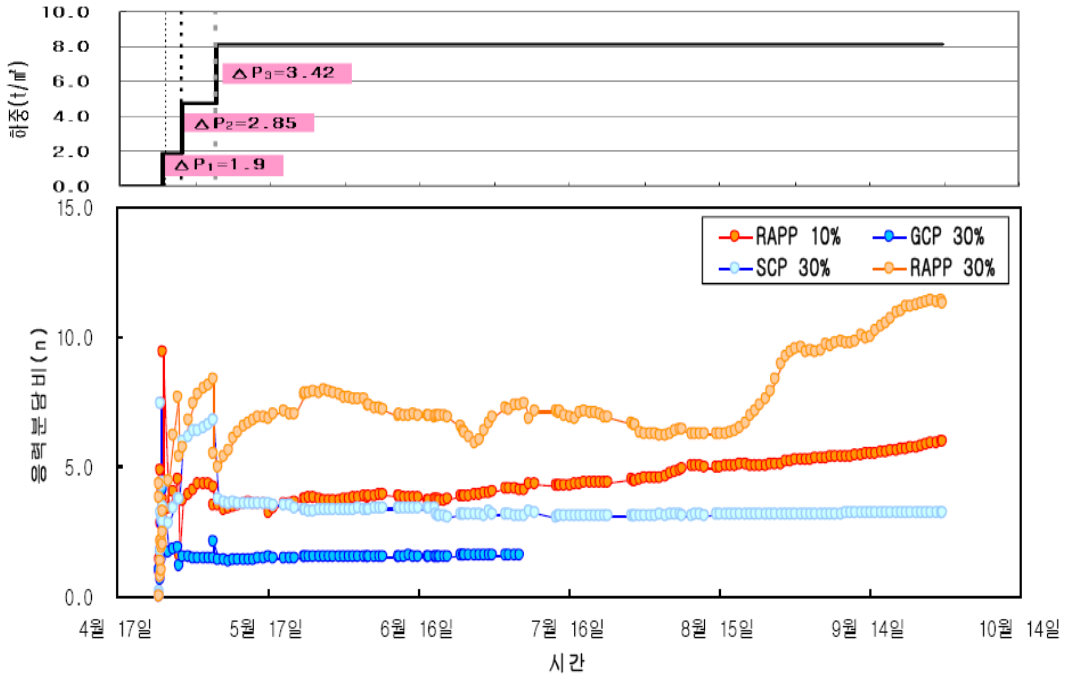
(a) 3단계 성토 직후 (b) 성토체 제거 직전

<그림 3.7.61> 공법별 수평변위 계측결과

3단계 성토 직후에는 공법별로 뚜렷한 경향이 발생하지는 않았으며, 성토체 제거 직전의 계측데이터를 분석한 결과 GCP 공법 30% = SCP 공법 30% > RAPP 공법 10% > RAPP 공법 30%의 순서로 수평변위량이 발생한 것으로 나타났다.

(5) 응력분담비 분석

현장시험시공시 계측결과를 분석하여 성토단계에 따른 공법별 응력분담비를 분석한 결과는 다음과 같다.



<그림 3.7.62> 공법별 응력분담비 분석 결과

응력분담비 분석결과, GCP 공법 및 SCP 공법의 경우의 2~4, RAPP 공법 10%의 경우 4~6, RAPP 공법 30%의 경우 5~11의 범위로 산정되어 RAPP 공법이 기존 다짐말뚝공법에 비해 응력분담비가 높게 산정되었다.

나. 시료채취 및 역학시험에 의한 개량효과 확인

연약지반에 타설된 다공질 콘크리트말뚝의 개량효과를 확인하기 위하여 현장시험시공 전 사전지반조사와 시험시공 후 확인조사를 실시하였다.

(1) 지형 및 지질

본 조사지역은 행정구역상 전라남도 광양시 옥곡면 신금리 일원에 위치하며, 지리 좌표상의 위치는 동경 127° 42′ 53.89″ 북위 34° 58′ 35.72″ 일대에 위치한다.

본역의 중앙북부에는 국사봉(531.8m)-369m 고지-구봉화산(472.9m)을 연결하는 능선이 대략 남북방향으로 발달되어 있다.

기타 지역에는 고립핵상의 고지가 산재되어 있는데 이에는 봉화산(355.3m), 일자봉(407.8m), 태방산(295m), 가야산(497.3m), 앵무산(343.4 m), 국사봉(290.9m) 등이 있다.

일부 고립핵상 고지는 화산암의 분포와 관련이 있는 것으로 보인다. 즉 본역의 서북우 봉화산, 태방산 및 남부의 앵무산은 산체가 각각 단일 화산암으로 구성되어 있으며 특히 남부의 수암산은 수암산유문암이 정상 부근에 국한하여 피복되어 있어 특이한 산세를 형성하였다.

일반적으로 변성암 분포지역에는 능선이 발달된 산체가 형성된 반면 화산암은 상기한 바와 같은 산체를 형성시켰다.

광양읍 남부지역 및 진상면, 진월면 일대에는 8km^2 이상의 해안평야가 발달되어 있으며 대소하천이 대략 남류하여 광양만으로 유입된다.

골약면과 진월면 지역의 일부 해안에는 극히 소규모의 충적층이 발달되어 있는데 이러한 지역에는 하천이 형성되어 있지 않다. 이러한 사실은 본 역의 평야가 해안침식에 의해서가 아니라 하천에 의한 침식 및 퇴적작용으로 이루어진 것이며 전기한 골약면, 진월면 지역의 해안지형으로 보아 본역 전반은 성인적으로 침강에 연유된 익곡(溺谷)해안으로 볼 수 있다.

굴곡이 심한 해안선은 이러한 사실을 입증한다. 전반적으로 보아 노년기초의 지형으로 사료된다.

본역의 지질은 선캠브리아시대에 속하는 변성암류, 이를 부정합으로 덮는 경상누층군의 신동층군, 유천층군과 후기에 이들을 관입한 불국사 화성암류로 구성되어 있다.

(2) 시추조사 결과

(가) 지층분포 현황

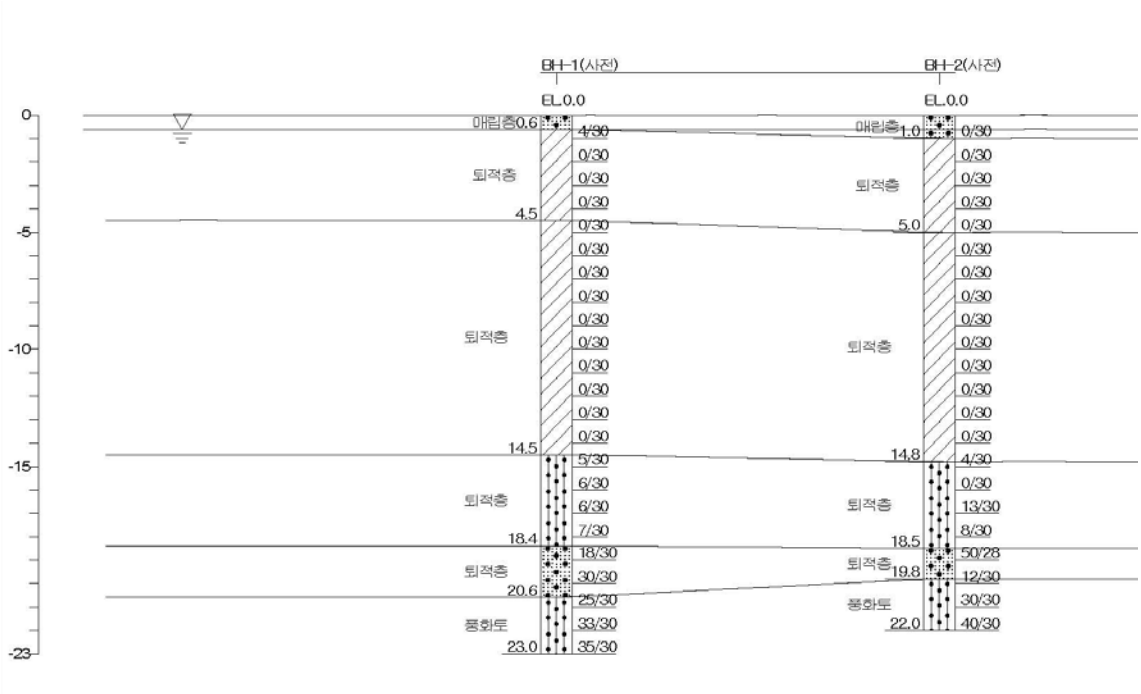
금번 실시한 지반조사 결과에 의하면 조사부지는 지표로부터 매립층, 퇴적층(점토, 모래, 자갈), 풍화토 순으로 분포하고 있다. 조사지역의 각 지층별 특징을 종합해 보면 <표 3.7.36>, <표 3.7.37>과 같다.

<표 3.7.36> 시추공별 지층분포상태(사전조사)

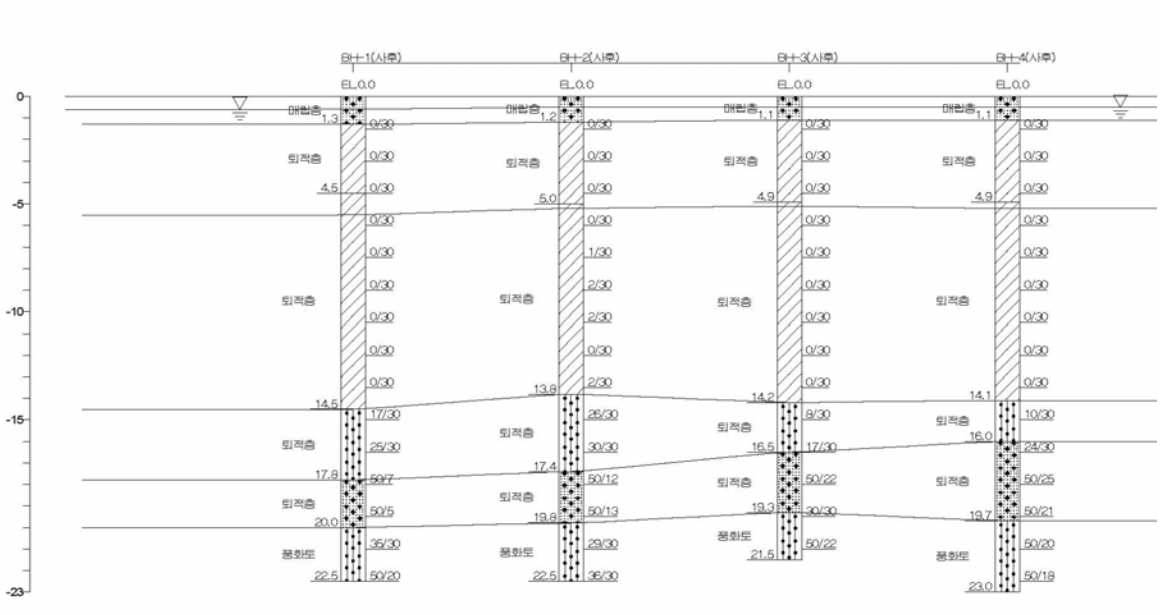
지층(m) (층후) / 공 번	Soil & Geology(m)					총계 (m)	S.P.T (회)
	매 립 층	퇴 적 층			풍 화 토		
		점 토	모 래	자 갈			
BH - 1 (사전)	0.0~0.6 (0.6)	0.6~14.5 (13.9)	14.5~18.4 (3.9)	18.4~20.6 (2.2)	20.6~23.0 (2.4)	23.0	23
BH - 2 (사전)	0.0~1.0 (1.0)	1.0~14.8 (13.8)	14.8~18.5 (3.7)	18.5~19.8 (1.3)	19.8~22.0 (2.2)	23.0	22

<표 3.7.37> 시추공별 지층분포상태(확인조사)

지층(m) (층후) / 공 번	Soil & Geology(m)					총계 (m)	S.P.T (회)
	매 립 층	퇴 적 층			풍 화 토		
		점 토	모 래	자 갈			
BH - 1 (사후)	0.0~1.3 (1.3)	1.3~14.5 (13.2)	14.5~17.8 (3.3)	17.8~20.0 (2.2)	20.0~22.5 (2.5)	22.5	15
BH - 2 (사후)	0.0~1.2 (1.2)	1.2~13.8 (12.6)	13.8~17.4 (3.6)	17.4~19.8 (2.4)	19.8~22.5 (2.7)	22.5	15
BH - 3 (사후)	0.0~1.1 (1.1)	1.1~14.2 (13.1)	14.2~16.5 (2.3)	16.5~19.3 (2.8)	19.3~21.5 (2.2)	21.5	14
BH - 4 (사후)	0.0~1.1 (1.1)	1.1~14.1 (13.0)	14.1~16.0 (1.9)	16.0~19.7 (3.7)	19.7~23.0 (3.3)	23.0	15



(a) 사전조사



(b) 확인조사

〈그림 3.7.63〉 지층단면도

① 매립층

본 과업지역에서 최상부에 위치하고 있는 지층으로 0.6m~1.3m의 얕은 층후를 보이는 것으로 조사되었다.

색조는 대체로 회색을 띠며, 구성성분은 토사 및 자갈(3~10cm)로 매립되었다. 통일분류법으로 GP 정도로 판단되며 습윤(Moist)상태를 나타낸다.

② 퇴적층

㉮ 점토층

본 조사지역에서 퇴적층의 상부에 위치하고 있는 지층으로 12.6～13.9m의 층후를 보이는 것으로 조사되었다.

색조는 대체로 암회색을 띠며, 젖은(Wet) 상태로 보이는 모래 섞인 점토와 실트질 점토로 채취되었다. 표준관입시험결과 N값은 0/30~2/30(회/㎝)으로 나타났으며, 매우 연약(Very soft)한 연경도를 나타내었다.

㉯ 모래층

본 조사지역에서 퇴적층의 중간부에 위치하고 있는 지층으로 1.9~3.9m의 층후를 보이는 것으로 조사되었다.

색조는 대체로 암회색을 띠며, 습윤(Moist)～젖은(Wet) 상태로 보이는 실트질 모래(부분적 3~5cm 정도의 잔자갈 혼재)로 채취되었다.

표준관입시험결과 N값은 0/30~30/30(회/㎝)으로 나타났으며, 매우 느슨(Very loose)~조밀(Dense)한 상대밀도를 나타내었다.

㉰ 자갈층

본 조사지역에서 퇴적층의 하부에 위치하고 있는 지층으로 1.3~3.7m의 층후를 보이는 것으로 조사되었다.

색조는 대체로 갈색을 띠며, 습윤(Moist)~젖은(Wet) 상태로 보이는 실트질 모래(부분적 3~5cm 정도의 잔자갈 혼재)로 채취되었다.

표준관입시험결과 N값은 18/30~50/5으로 나타났으며, 보통 조밀(Medium dense)~매우 조밀(Very dense)한 상대밀도를 나타내었다.

㉮ 풍화대

일반적으로 풍화대는 풍화토와 풍화암으로 구분할 수 있다. 풍화토는 기반암이 완전풍화(Completely weathered)에 의해 구조 및 조직이 대부분 파괴되어 눈으로 관찰 할 수 없는 상태이며, 장석 및 유색광물이 점토화되어 유기물질이 함유되어 있기도 한 상태이다.

풍화암은 기반암이 완전풍화(Completely weathered)~심한풍화(Highly weathered)에 의해 장석 및 유색광물들이 변질되어 응집력이 약화되었으나, 모암의 조직 및 구조는 잔존해 있는 상태로서, 상부는 물에 담그면 풍화가 심한 장석 및 유색광물들은 쉽게 와해되어 흐트러지는 경향을 보인다.

그러나 조사지역에서 풍화대의 구분은 상기의 조건보다는 표준관입시험에 의한 N값에 근거, 50회 타격시 10㎝ 이상 관입하면 풍화토층, 그 이하로 관입되면 풍화암층으로 구분하였다.

㉯ 풍화토층

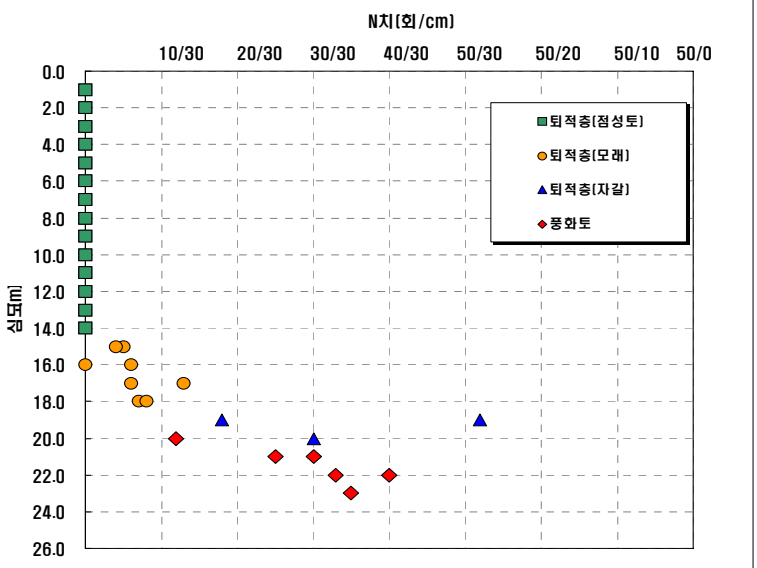
본 조사지역에서 풍화대의 상부를 이루는 풍화토층은 기반암의 완전풍화(CW)되어 있는 지층으로 2.2~3.3m의 층후를 확인하였다.

황갈색의 색조를 띠며, 습윤(Moist)상태를 보이는 암편 섞인 실트질 모래로 채취되었다. 표준관입시험결과 N값은 12/30~50/18(회/㎝)로 나타났으며, 보통 조밀(Medium dense)~조밀(Dense)한 상대밀도를 나타내었다.

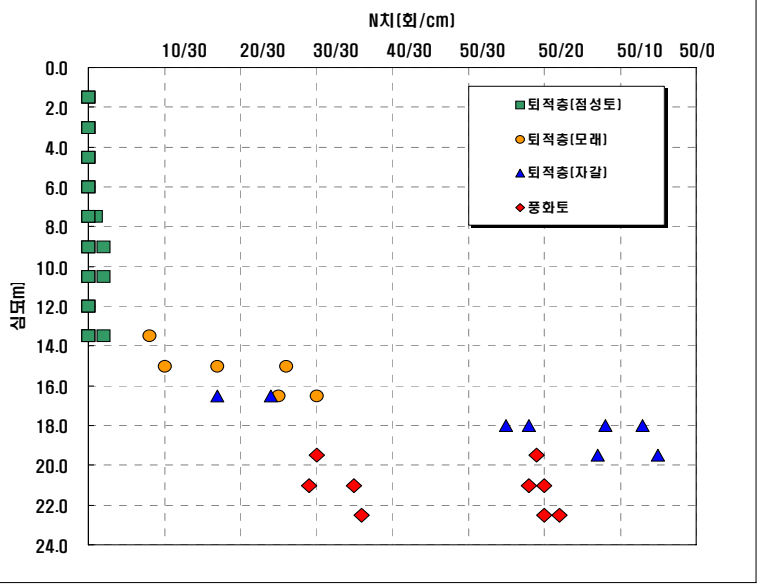
(3) 현장시험 결과

(가) 표준관입시험 결과

<표 3.7.38> 표준관입시험결과(사전조사)

지 층		N(회/cm)	지층별 N값 분포도
퇴적층	점 토	0/30	
	모 래	0/30~13/30	
	자 갈	18/30~50/28	
풍 화 토		12/30~40/30	

<표 3.7.39> 표준관입시험 결과(확인조사)

지 층		N(회/cm)	지층별 N값 분포도
퇴적층	점 토	0/30~2/30	
	모 래	8/30~30/30	
	자 갈	17/30~50/5	
풍 화 토		29/30~50/18	

(나) 공내지하수위 측정

<표 3.7.40> 공내지하수위 측정결과

공 번	지하수위 (GL.-m)	비 고	공 번	지하수위 (GL.-m)	비 고
BH - 1 (사전)	0.6	매 립 층	BH - 1 (사후)	0.6	매 립 층
BH - 2 (사전)	0.6	매 립 층	BH - 2 (사후)	0.5	매 립 층
-	-	-	BH - 3 (사후)	0.5	매 립 층
-	-	-	BH - 4 (사후)	0.5	매 립 층

주) 현지반고를 기준으로 측정한 값임

(다) 현장베인시험 결과

<표 3.7.41> 현장베인시험 결과(BH-2, 사전조사)

심도(m)	비교란최대강도 (kPa)	교란최대강도 (kPa)	예민비
2.0	17.347	2.570	6.75
3.5	18.203	2.784	6.54
5.0	20.131	3.212	6.27
6.5	24.200	4.069	5.95
8.0	23.129	4.069	5.68
9.5	25.699	4.711	5.45
11.0	33.409	6.853	4.88
12.5	34.051	7.067	4.82
14.0	40.690	7.924	5.14

<표 3.7.42> 현장베인시험 결과(확인조사)

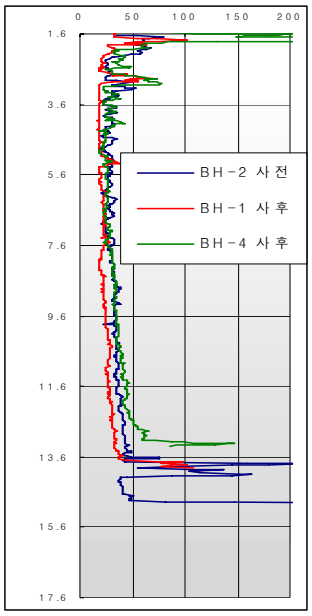
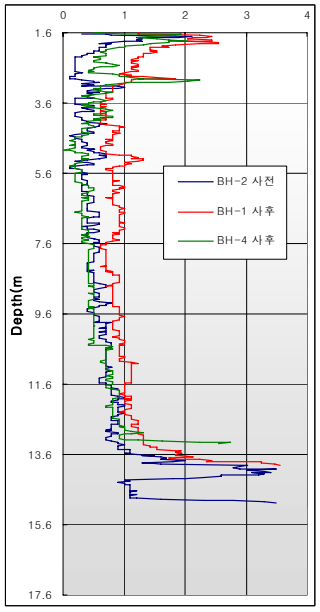
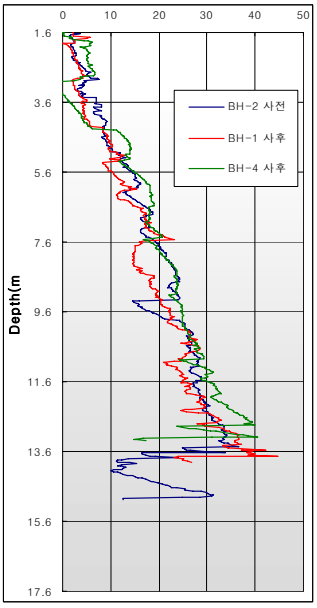
심도 (m)	BH-1			BH-2			BH-3			BH-4		
	S_u (kPa)	S_{ur} (kPa)	S (%)	S_u (kPa)	S_{ur} (kPa)	S (%)	S_u (kPa)	S_{ur} (kPa)	S (%)	S_u (kPa)	S_{ur} (kPa)	S (%)
1.5	18.418	2.998	6.14	19.277	3.212	6.00	20.376	3.427	5.95	23.923	3.855	6.21
3.0	18.632	2.891	6.44	18.073	3.105	5.82	20.247	3.427	5.91	16.740	2.998	5.58
4.5	22.345	3.427	6.52	21.407	3.641	5.88	24.596	3.641	6.76	20.122	3.641	5.53
6.0	27.297	4.283	6.37	22.580	4.283	5.27	25.945	4.497	5.77	21.226	4.069	5.22
7.5	28.217	4.497	6.27	29.768	5.782	5.15	34.352	5.996	5.73	31.256	6.211	5.03
9.0	29.348	5.140	5.71	29.691	4.497	6.60	34.044	5.140	6.62	30.816	5.568	5.53
10.5	36.349	7.067	5.14	34.895	6.853	5.09	41.874	7.496	5.59	38.384	7.067	5.43
12.0	37.082	7.496	4.95	35.598	6.853	5.19	42.718	7.710	5.54	39.158	7.924	4.94
13.5	45.573	8.352	5.46	43.750	8.138	5.46	47.556	9.637	4.93	47.556	8.995	5.29

(라) 콘관입시험 결과

본 조사지역의 지반특성 조사를 위해서 사전조사에서는 BH-2 그리고 확인조사에서는 BH-1, BH-4 시추위치에서 관입시험을 실시하였다.

① 콘관입시험 결과

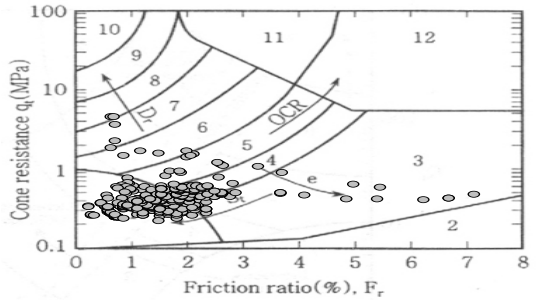
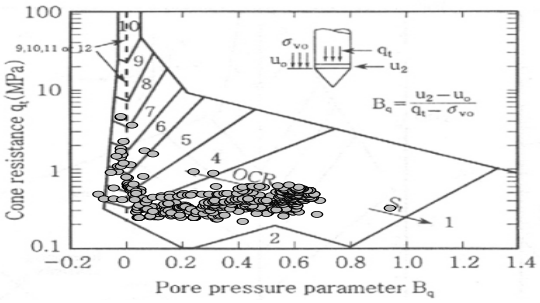
<표 3.7.43> 콘관입시험 결과

분석항목		선단저항치(q_c : tf/m^2)	마찰력(f_s : tf/m^2)	간극수압(u : tf/m^2)
BH-2 (사전) BH-1 (사후) BH-4 (사후)				
BH-2 사전	범 위	19 ~ 220	0.1 ~ 3.5	1.5 ~ 36.7
	평 균	37.7	0.7	18.0
BH-1 사후	범 위	3.8 ~ 109.1	3.6 ~ 6.0	3.1 ~ 44.7
	평 균	26.5	1.0	19.2
BH-4 사후	범 위	18.4 ~ 146.8	0.0 ~ 2.8	0.0 ~ 40.6
	평 균	35.7	5.0	20.9

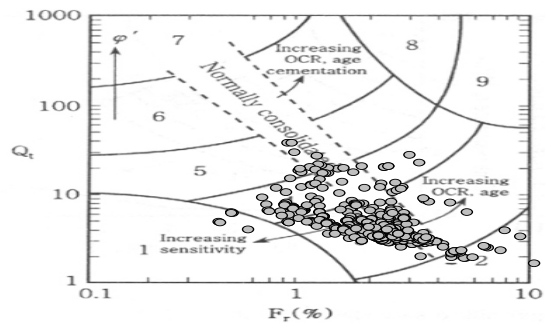
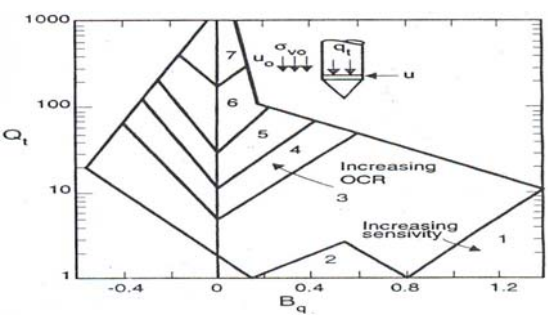
② 흙분류

㉮ BH-2(사전조사)

<표 3.7.44> BH-2(사전조사)에 대한 흙분류 결과

Friction ratio(Fr)-1986	Porepressure parameter(Bq)-1986
	

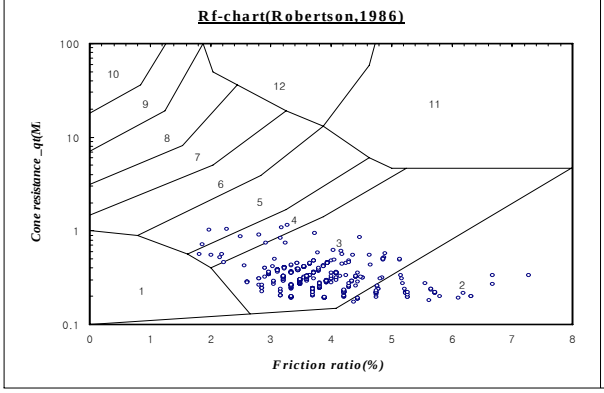
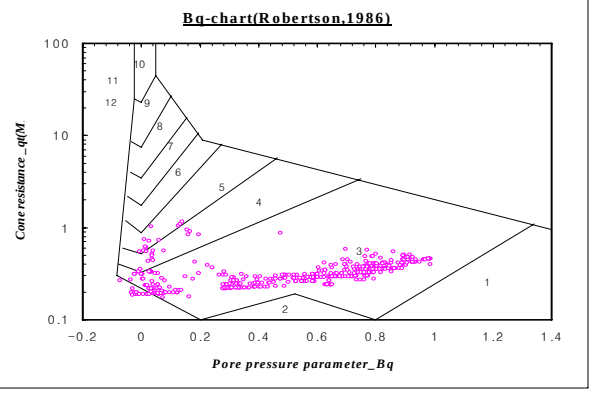
Zone	Soil Behaviour Type	Zone	Soil Behaviour Type
1	예민한 세립토	7	실트질 모래 내지 모래질 실트
2	유기질토	8	모래 내지 실트질 모래
3	점토	9	모래
4	실트질 점토 내지 점토	10	자갈질 모래 내지 모래
5	점토질 실트 내지 실트질 점토	11	매우 굳은 세립토*
6	모래질 실트 내지 점토질 실트	12	모래 내지 점토질 모래*

Friction ratio(Fr)-1990	Porepressure parameter(Bq)-1990
	

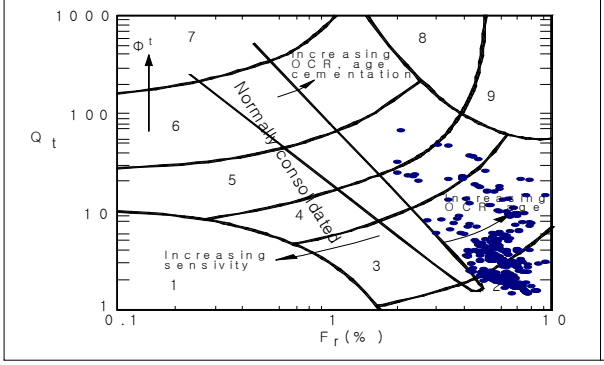
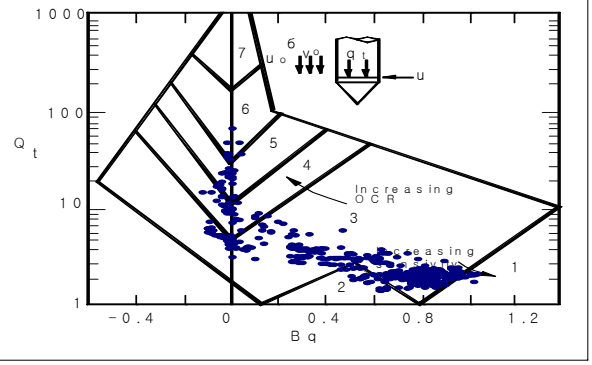
Zone	Soil Behaviour Type	Zone	Soil Behaviour Type
1	예민한 세립토	7	모래 내지 자갈
2	유기질토	8	점토질 모래 내지 조밀한 모래
3	점토	9	매우 견고한 세립토
4	실트질 점토 내지 점토질 실트		
5	모래질 실트 내지 실트질 모래		
6	실트질 모래 내지 모래		

㉯ BH-1(확인조사)

<표 3.7.45> BH-1(확인조사)에 대한 흙분류 결과

Friction ratio(Fr)-1986	Porepressure parameter(Bq)-1986
	

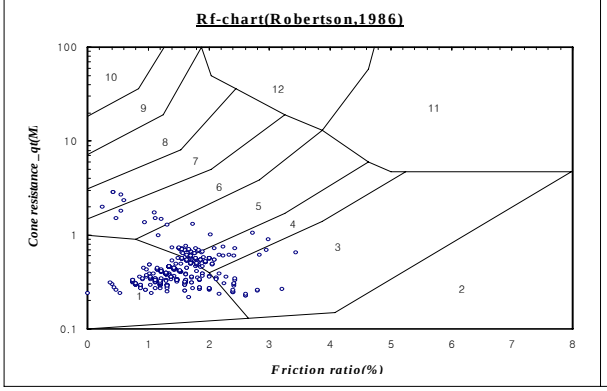
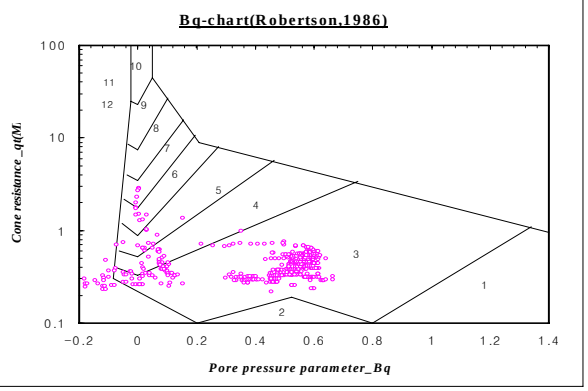
Zone	Soil Behaviour Type	Zone	Soil Behaviour Type
1	예민한 세립토	7	실트질 모래 내지 모래질 실트
2	유기질토	8	모래 내지 실트질 모래
3	점토	9	모래
4	실트질 점토 내지 점토	10	자갈질 모래 내지 모래
5	점토질 실트 내지 실트질 점토	11	매우 굳은 세립토*
6	모래질 실트 내지 점토질 실트	12	모래 내지 점토질 모래*

Friction ratio(Fr)-1990	Porepressure parameter(Bq)-1990
	

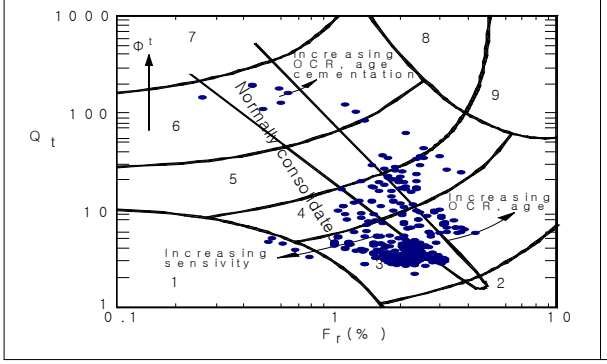
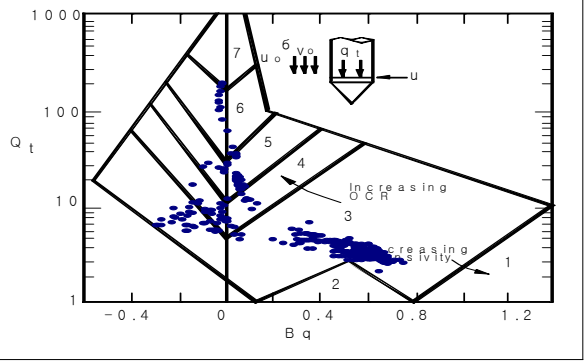
Zone	Soil Behaviour Type	Zone	Soil Behaviour Type
1	예민한 세립토	7	모래 내지 자갈
2	유기질토	8	점토질 모래 내지 조밀한 모래
3	점토	9	매우 견고한 세립토
4	실트질 점토 내지 점토질 실트		
5	모래질 실트 내지 실트질 모래		
6	실트질 모래 내지 모래		

㉮ BH-4(확인조사)

<표 3.7.46> BH-4(확인조사)에 대한 흙분류 결과

Friction ratio(Fr)-1986	Porepressure parameter(Bq)-1986
	

Zone	Soil Behaviour Type	Zone	Soil Behaviour Type
1	예민한 세립토	7	실트질 모래 내지 모래질 실트
2	유기질토	8	모래 내지 실트질 모래
3	점토	9	모래
4	실트질 점토 내지 점토	10	자갈질 모래 내지 모래
5	점토질 실트 내지 실트질 점토	11	매우 굳은 세립토*
6	모래질 실트 내지 점토질 실트	12	모래 내지 점토질 모래*

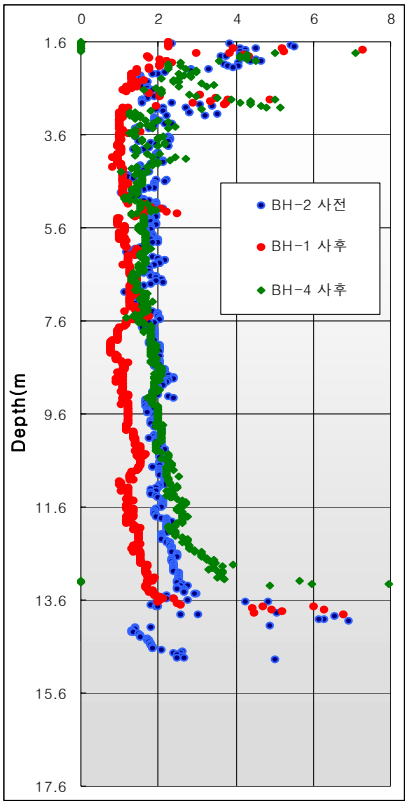
Friction ratio(Fr)-1990	Porepressure parameter(Bq)-1990
	

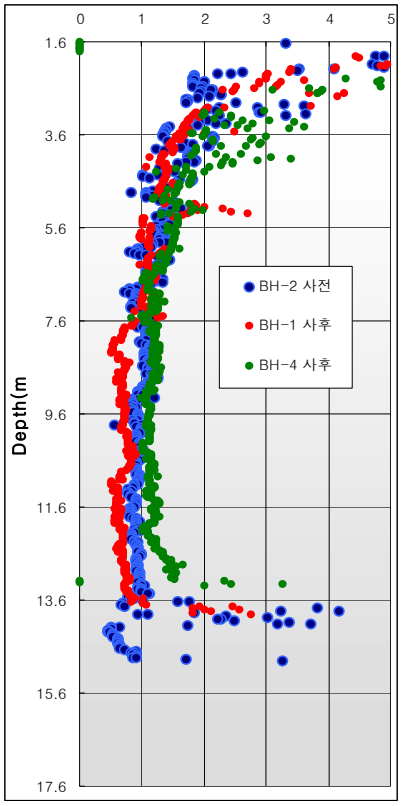
Zone	Soil Behaviour Type	Zone	Soil Behaviour Type
1	예민한 세립토	7	모래 내지 자갈
2	유기질토	8	점토질 모래 내지 조밀한 모래
3	점토	9	매우 견고한 세립토
4	실트질 점토 내지 점토질 실트		
5	모래질 실트 내지 실트질 모래		
6	실트질 모래 내지 모래		

⑤ 비배수 전단강도(S_u), 과압밀비(OCR) 분석

콘관입시험 결과에 의한 조사지역의 콘계수(N_{kt})값은 10~20 중 15를 적용하여 비배수 전단강도(S_u)값 및 과압밀비(OCR)를 산정하였다.

<표 3.7.47> 비배수 전단강도(S_u) 및 과압밀비(OCR) 산정 결과

시험위치	BH-2(사전), 1(사후), 4(사후)
비배수 전단강도(Su) 그래프	
연약지반구간 (GL.-m)	1.6 ~ 14.9
BH-2 사전 범 위	1.0 ~ 14.4
BH-2 사전 평균값	2.2
BH-1 사후 범 위	0.8 ~ 6.8
BH-1 사후 평균값	1.3
BH-4 사후 범 위	0.0 ~ 8.0
BH-4 사후 평균값	2.0
콘계수 (N_{kt})	14

시험위치	BH-2(사전), 1(사후), 4(사후)
고압밀비 (OCR) 그래프	
연약지반구간 (GL.-m)	1.6 ~ 14.9
BH-2 사전 범 위	0.5 ~ 7.6
BH-2 사전 평균값	1.4
BH-1 사후 범 위	5.2 ~ 27.5
BH-1 사후 평균값	9.8
BH-4 사후 범 위	0.0 ~ 36.1
BH-4 사후 평균값	14.0
평 가	정규압밀

(4) 실내 물성 및 역학시험 결과

(가) 실내물성시험 결과

<표 3.7.48> 실내물성시험 결과(사전조사)

Boring No.	Depth (m)	Wn (%)	Gs	Atterberg Limit		Grain Size Distribution(%)				USCS
				LL(%)	PI	No.10	No.40	No.200	2 μm	
BH-1	5.0~5.8	39.5	2.704	39.3	16.7	100.0	99.9	92.4	9.3	CL
BH-1	10.0~10.8	23.2	2.691	41.5	20.3	100.0	100.0	85.2	10.6	CL
BH-1	13.5~14.3	35.9	2.702	49.8	26.3	100.0	96.5	50.8	5.4	CL
BH-2	7.0~7.8	40.3	2.695	49.0	24.4	100.0	92.3	83.6	37.9	CL
BH-2	9.0~9.8	31.5	2.699	38.4	14.5	91.4	82.2	78.0	18.8	CL
BH-2	12.0~12.8	34.9	2.711	44.0	22.6	96.7	89.4	80.4	21.6	CL

<표 3.7.49> 실내물성시험 결과(확인조사)

Boring No.	Depth (m)	W_n (%)	G_s	Atterberg Limit		Grain Size Distribution (%)				USCS
				LL (%)	PI	No.10	No.40	No.200	2 μm	
BH-1	5.0~5.8	59.8	2.697	47.6	26.2	99.8	99.3	97.4	13.4	CL
	10.0~10.8	57.1	2.700	45.5	21.8	99.9	99.9	97.7	16.4	CL
	13.5~14.3	45.2	2.707	43.9	18.7	97.6	93.0	81.3	11.2	CL
BH-2	5.0~5.8	56.8	2.704	47.9	23.6	99.2	97.2	90.0	10.5	CL
	10.8~10.8	56.8	2.702	45.4	21.4	100.0	99.8	98.2	14.1	CL
	13.5~14.3	38.3	2.708	40.8	16.5	90.9	86.9	81.3	16	CL
BH-3	7.0~7.8	59.2	2.701	48.7	26.2	98.3	95.6	87.5	87.5	CL
	9.0~9.8	49.7	2.699	46.3	25.2	99.5	99	96.1	96.1	CL
	12.0~12.8	44.6	2.709	47.7	22.0	99.5	99.1	96.5	96.2	CL
BH-4	4.0~4.8	59.4	2.694	48.4	23.8	96.8	92.1	89.5	12.3	CL
	8.0~8.8	46.4	2.702	45.1	21.4	99.9	99.2	90.4	18	CL
	12.0~12.8	44.2	2.707	43.8	21.3	98.6	97.8	93.8	12.9	CL

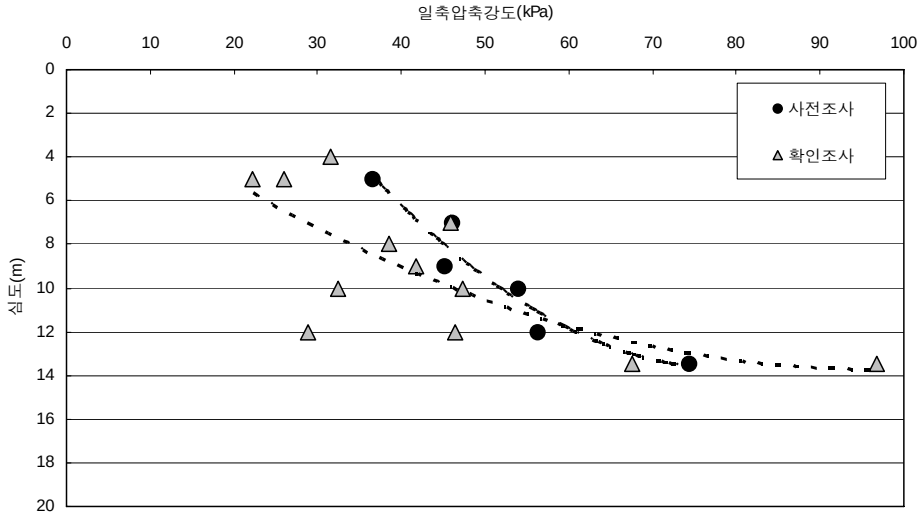
(나) 실내역학시험 결과

<표 3.7.50> 실내역학시험 결과(사전조사)

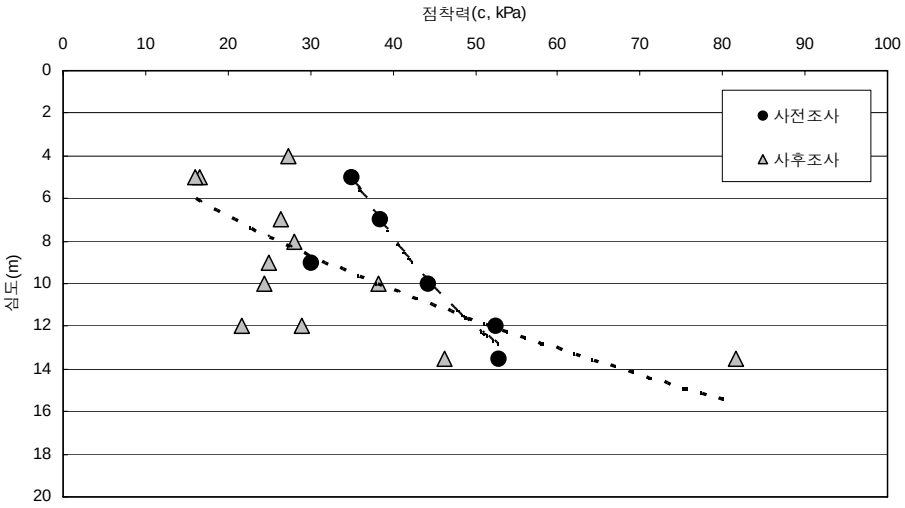
Boring No.	Depth (m)	Uncomfined Comp.			Triaxial comp. UU		Consolidation Test		USCS
		q_u (kPa)	q_{ur} (kPa)	S_t	c (kPa)	ø (°)	C_c	P_c (kPa)	
BH-1	5.0~5.8	36.5	5.7	6.4	35.0	0	0.656	45.6	CL
BH-1	10.0~10.8	53.9	13.6	4.0	44.3	0	0.588	71.7	CL
BH-1	13.5~14.3	74.3	14.2	5.2	52.8	0	1.274	82.3	CL
BH-2	7.0~7.8	46.0	7.6	6.0	38.5	0	0.612	78.5	CL
BH-2	9.0~9.8	45.1	10.9	4.1	30.1	0	0.273	54.9	CL
BH-2	12.0~12.8	56.3	13.3	4.2	52.4	0	0.396	70.9	CL

<표 3.7.51> 실내역학시험 결과(확인조사)

Boring No.	Depth (m)	Uncomfined Comp.			Triaxial comp. UU		Consolidation Test		USCS
		q_u (kPa)	q_{ur} (kPa)	S_t	c (kPa)	ø (°)	C_c	P_c (kPa)	
BH-1	5.0~5.8	22.2	-	-	16.6	0	0.523	45.6	CL
	10.0~10.8	32.4	-	-	24.4	0	0.639	66.1	CL
	13.5~14.3	67.5	-	-	46.3	0	0.473	121.6	CL
BH-2	5.0~5.8	26.0	-	-	16.0	0	0.475	65.7	CL
	10.8~10.8	47.4			38.3	0	0.572	100.4	CL
	13.5~14.3	96.7	-	-	81.6	0	0.440	235.9	CL
BH-3	7.0~7.8	45.8	-	-	26.5	0	0.574	54.7	CL
	9.0~9.8	41.8	-	-	25.0	0	0.553	73.1	CL
	12.0~12.8	46.5	-	-	28.9	0	0.513	71.1	CL
BH-4	4.0~4.8	31.6	-	-	27.4	0	0.543	62.5	CL
	8.0~8.8	38.5			28.0	0	0.547	69.5	CL
	12.0~12.8	28.9	-	-	21.7	0	0.578	63.0	CL



<그림 3.7.64> 심도별 일축압축강도



<그림 3.7.65> 삼축압축시험(UU) 결과

시험시공 전·후의 조사결과를 비교 분석한 결과 사전조사에서는 심도증가에 따른 강도의 증가를 쉽게 확인할 수 있지만, 확인조사에서는 심도증가에 따른 강도증가가 완만하고 5~12m의 심도에서 일축압축강도 값의 범위는 20~50kPa, 점착력은 20~40kPa의 분포를 나타내고 있다. 이는 확인조사시 성토체를 제거한 후 조사위치의 중심부가 말뚝개량체에서 조금 떨어진 영향으로 판단되며, 하부지반의 강도증가 확인은 현장시험 결과 및 계측결과에서 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

(5) 다공질 콘크리트말뚝 코어채취 및 실내역학시험 결과

① 다공질 콘크리트말뚝 코어 채취 목적

배합설계시 다공질 콘크리트말뚝 공시체를 제작하여 압축강도시험 및 투수시험을 수행한 결과와 현장에서 타설한 코어공시체를 채취하여 강도 및 투수시험 결과를 비교 분석하여 연약지반의 개량 정도 및 현장 시공성을 확인하고자 한다.

② 코어 공시체 채취

시추기를 사용하여 다공질 콘크리트 말뚝체를 타설한 후 7일, 14일, 21일, 28일 공시체를 수압 및 공압을 가하고 회전하여 코어채취를 시도하였으나 7일~21일까지의 공시체는 시추기에서 발생하는 회전력에 의해 말뚝체가 부수러지는 현상이 발생하여 코어 획득에는 실패하였지만 28일 코어채취는 성공하였다.

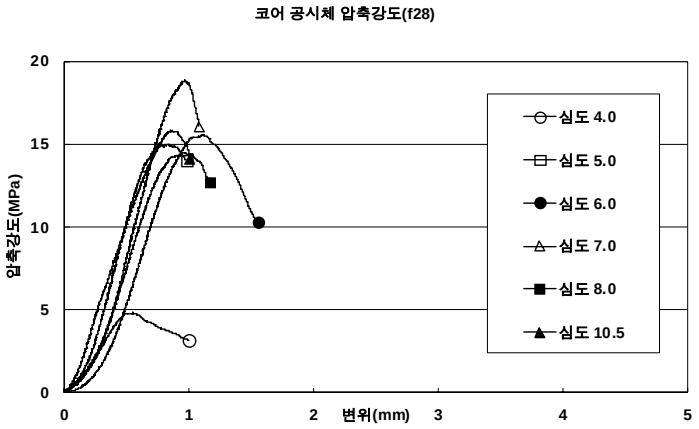
한편, 상재하중 제거 후 실시한 코어 공시체 채취에서는 토피 제거시 지하수위가 지표면위로 상승하여 원지반에 타설한 다공질 콘크리트 말뚝의 형상을 알 수 없어 타설위치로 추정되는 곳에서 시추를 시도하였으나 상재하중 재하 후 압밀에 의한 연약지반의 거동으로 인하여 코어회수가 불가능하였다.

③ 코어 공시체 압축강도 시험결과

다공질 콘크리트 타설 후 28일에 채취한 다공질 콘크리트 말뚝의 압축강도는 4.8~18.9 MPa의 값을 나타내었으며, 투수시험 결과는 <표 3.7.52>와 같다.

<표 3.7.52> 코어 공시체 압축강도 시험결과

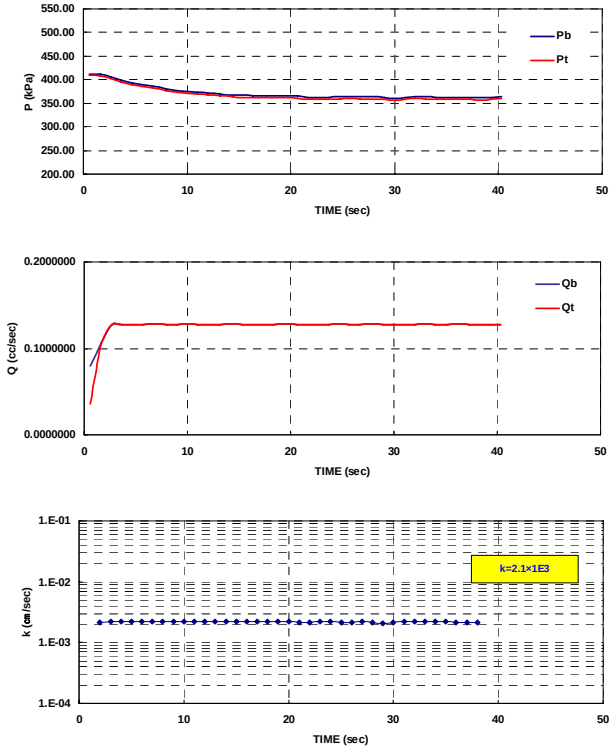
심도 (m)	4	5	6	7	8	10.5
압축강도(MPa)	4.8	15.0	15.6	18.9	14.5	15.8



<그림 3.7.66> 코어 공시체 압축강도 시험결과

④ 코어 공시체 삼축투수시험 결과

심도 5m에서 채취한 코어 공시체를 이용하여 삼축투수시험을 수행한 결과 투수계수는 $k=2.1\times10^{-3}$cm/s로 나타났다.



<그림 3.7.67> 삼축투수시험 결과

5. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 시공기준 제시

가. 단가산출서 작성 및 공법별 치환율 비교

(1) 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법 단가산출서

〈표 3.7.53〉 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법 단가산출서(계속)

산출근거	합 계	노무비	재료비	경 비
#다공질 콘크리트말뚝(L=20.0m)/[M] 가. 장비조합 및 작업조 구성 1) 장비조합 크레인(무한궤도) 70ton + 진동파일햄머 90kW + 발전기 350kW + 공기압축기 17.0m^3/min + 로우더(타이어) 1.34m^3 + 호퍼 1.0m^3 + 리더(고정형) 36.0m + 케이싱 24.0m + 스킵버킷 1.0m^3 + 에어호스 3/4인치 + 백호우 0.6m^3 + 이동식 배치플랜트(60m^3/hr) + 덤프트럭(15ton) 2) 작업조 작업반장 1인 + 비계공 1인 + 용접공(일반) 1인 + 특별인부 1인 + 보통인부 1인 3) 평균 타입길이 L=20.0m 나. 다공질 콘크리트말뚝 L = 20.0m E = 0.6 Cm = 2 + 1.1 × L = 2 + 1.1 × 20 = 24min Q = (60 × L × E) / Cm = (60 × 20 × 0.6) / 24 = 30m/hr				
1) 크레인(무한궤도) 70ton 노무비 : 22,701 ÷ 30 = 756.7 재료비 : 23,218 ÷ 30 = 773.9 경 비 : 54,529 ÷ 30 = 1,817.6	756.7 773.9 1,817.6	756.7	773.9	1,817.6
2) 진동파일햄머 90kW 경 비 : 40,275 ÷ 30 = 1,342.5	1,342.5			1,342.5
3) 발전기 350kW 노무비 : 14,455 ÷ 30 = 481.8 재료비 : 74,768 ÷ 30 = 2,492.2 경 비 : 11,927 ÷ 30 = 397.5	481.8 2,492.2 397.5	481.8	2,492.2	397.5
4) 공기압축기 17.0m^3/min 노무비 : 18,855 ÷ 30 = 628.5 재료비 : 30,666 ÷ 30 = 1,022.2 경 비 : 4,656 ÷ 30 = 155.2	628.5 1,022.2 155.2	628.5	1,022.2	155.2

<표 3.7.53> 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법 단가산출서(계속)

산출근거	합 계	노무비	재료비	경 비
5) 에어호스 3/4인치 노무비 : 54 ÷ 30 = 1.8	1.8	1.8		
6) 케이싱 ø406 × 24.0m 경 비 : 9,674 ÷ 30 = 322.4	322.4			322.4
7) 리더(고정형) 36.0m 경 비 : 16,684 ÷ 30 = 556.1	556.1			556.1
8) 호퍼 1.0m^3 경 비 : 1,812 ÷ 30 = 60.4	60.4			60.4
9) 스킵버킷 1.0m^3 경 비 : 829 ÷ 30 = 27.6	27.6			27.6
10) 유압파워팩 75kW 경 비 : 11,280 ÷ 30 = 376.0	376.0			376.0
11) 자동기록장치 경 비 : 5,340 ÷ 30 = 178.0	178.0			178.0
12) 소 계	11,390.4	1,867.0	4,288.3	5,235.1
다. CASING 속채움 순환골재, 시멘트 공급 및 투입				
1) 순환골재, 시멘트 수량 및 구입(별도계상) D = 0.7m L1 = 20.0m V = π × D^2 / 4 = π × 0.7^2 / 4 = 0.3848m^3/m 할증(20%) = 0.3848 × 1.2 = 0.4618m^3/m ※ 시간당 작업량 0.46176m^3/m × 30m/hr = 13.85m^3/hr				
2) 로우더(타이어) 1.34m^3 q = 1.34m^3 k = 1.2 f = 0.78 E = 0.75 Cm = m × 1 + t1 + t2 = 1.8 × 8 + 6 + 14 = 34.4 Q = (3600 × q × k × f × E) / Cm = (3.600 × 1.34 × 1.2 × 0.78 × 0.75) / 34.4 = 98.44 C(작업효율) = 13.85 ÷ 98.44 = 0.141 노무비 : 22,701 ÷ 30 = 756.7 재료비 : 12,473 ÷ 30 × 0.141 = 58.6 경 비 : 17,503 ÷ 30 = 583.4	756.7 58.6 583.4	756.7	58.6	583.4
3) 배치플랜트(이동식, 60m^3/hr) 노무비 : 14,455 ÷ 30 = 481.8 재료비 : 21,545 ÷ 30 = 718.1 경 비 : 31,596 ÷ 30 = 1,053.2	481.8 718.1 1,053.2	481.8	718.1	1,053.2
4) 굴삭기(타이어) 0.6m^3 q = 0.6m^3 k = 1.1 f = 0.78 E = 0.90 Cm : 180° 기준 23sec Q = (3600 × q × k × f × E) / Cm = (3600 × 1.34 × 1.1 × 0.78 × 0.90) / 23 = 161.96 C(작업효율) = 13.85 ÷ 161.96 = 0.086 노무비 : 18,855 ÷ 30 = 628.5 재료비 : 16,181 ÷ 30 × 0.086 = 46.3 경 비 : 20,079 ÷ 30 = 669.3	628.5 46.3 669.3	628.5	46.3	669.3

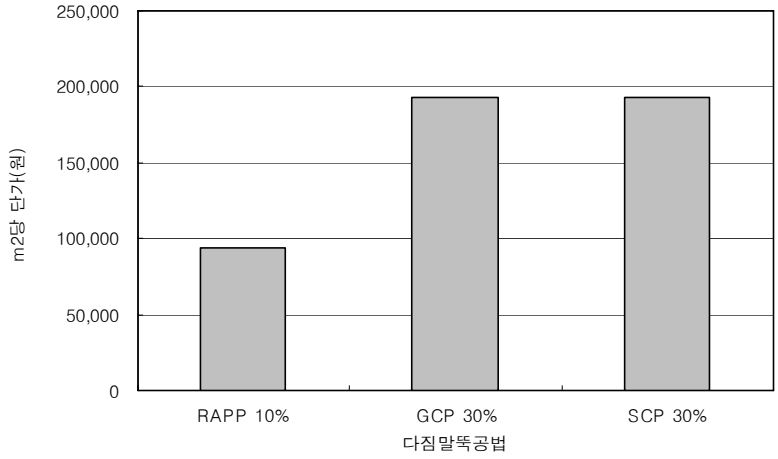
<표 3.7.53> 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법 단가산출서

산출근거	합 계	노무비	재료비	경 비
5) 사일로 7.0kW				
경 비 : 4,044 ÷ 30 = 134.8	134.8			134.8
6) 물탱크				
노무비 : 18,855 ÷ 30 = 628.5	628.5	628.5		
재료비 : 13,600 ÷ 30 = 453.3	453.3		453.3	
경 비 : 7,824 ÷ 30 = 260.8	260.8			260.8
7) 덤프트럭(15ton)				
노무비 : 18,855 ÷ 30 = 628.5	628.5	628.5		
재료비 : 24,683 ÷ 30 = 822.7	822.7		822.7	
경 비 : 14,383 ÷ 30 = 479.4	479.4			479.4
8) 소 계	8,403.9	3,124.0	2,099.0	3,180.9
라. 조력인부				
H = 8hr Q = 68.6m/hr				
작업반장 : 1인 × 90,786 ÷ 8 ÷ 30 = 378.2	378.2	378.2		
비 계 공 : 1인 × 116,264 ÷ 8 ÷ 30 = 484.4	484.4	484.4		
용 접 공 : 1인 × 102,522 ÷ 8 ÷ 30 = 427.1	427.1	427.1		
특별인부 : 1인 × 84,686 ÷ 8 ÷ 30 = 352.8	352.8	352.8		
보통인부 : 1인 × 66,622 ÷ 8 ÷ 30 = 277.5	277.5	277.5		
소 계	1,920.0	1,920.0		
마. 제잡비 : 합계의 3% 적용	651.4			651.4
바. 총금액	22,365.7	6,911.0	6,387.3	9,067.4
적 용	22,366.0	6,911.0	6,387.0	9,067.0

(2) 다짐말뚝공법별 치환율 비교

현장시험시공 계측 자료를 분석한 결과 순환골재 다공질 콘크리트말뚝 치환율 10% 개량효과에 해당하는 GCP 공법 및 SCP 공법의 치환율은 약 30% 정도인 것으로 분석되었다.

이에 대해 각 다짐말뚝공법에 대해 m^2당 경제성을 평가하였으며 <그림 3.7.68>에 결과를 나타내었다.



<그림 3.7.68> 다짐말뚝공법별 경제성 비교

m^2당 단가를 분석한 결과, 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법에 비해 GCP 공법 및 SCP 공법이 약 2배 정도 높아 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법이 기존 다짐말뚝공법에 비해 경제성 측면에서 매우 유리한 것으로 나타났다.

나. 다공질 콘크리트말뚝공법 시방서 제시

[다공질 콘크리트말뚝공법 시방서]

1 일반사항

가. 적용범위

본 시방은 연약한 기초지반의 지지력을 확보하기 위하여 다공질 콘크리트말뚝(RAPP)을 설치하는 공사에 적용한다. 다만, 경제성 및 시공성에서 우수한 기능을 발휘하기에 설계시에 다공질 콘크리트말뚝을 적용하였으나, 시공시에 동등이상의 성능 및 경제성을 확보한 공법으로 발주자대리인의 승인을 얻어 변경할 수 있으며 공법변경시에는 성능 및 경제성을 검토한 자료를 제출하여 발주자대리인의 승인을 얻어야 한다.

나. 참조규격

① KS A 3101 샘플링 검사 통칙
② KS A 5101 시험용 체
③ KS F 2405 콘크리트용 압축강도 시험 방법
④ KS F 2051 골재의 시료 채취 방법
⑤ KS F 2502 골재의 체가름 시험 방법
⑥ KS F 2503 굵은골재의 밀도 및 흡수율 시험 방법
⑦ KS F 2508 로스엔젤리스 시험기에 의한 굵은골재의 마모 시험 방법
⑧ KS F 2523 골재에 관한 용어의 정의
⑨ KS F 2527 콘크리트용 부순 골재

다. 제출물

(1) 시공계획서를 작성하여 제출하여야 한다.
(2) 다음 사항을 추가로 제출하여야 한다

① 계측계획서

② 시공보고서

2. 재료 및 장비

가. 재료

(1) 다공질 콘크리트말뚝 품질요구조건

① 말뚝강도 : 6~15kgf/cm^2

② 투수계수 : 1×10^{-3}cm/s 이상

③ 단위시멘트량 : 80~150kg/m^3

④ 물-시멘트비 : 1:0.2~1:0.4

⑤ 시멘트 배합량, 물-시멘트 중량비는 시험시공을 실시하여 최종 확정한다.

⑥ 순환골재를 사용하여 콘크리트를 제조할 때 사용하는 시멘트는 KS L 5201(포틀랜드 시멘트)

(2) 순환골재 품질요구 조건

<표 3.7.54> 순환골재 품질요구 조건

구 분		단 위	순환굵은골재	비 고
절대건조밀도		g/cm^3	2.2 이상	
흡수율		%	7.0 이하	
마모감량		%	40 이하	
입자모양판정 실적율		%	55 이상	
알카리 골재 반응		-	무해할 것	
점토 덩어리량		%	0.2 이하	
안정성		%	12 이하	
이물질 함유량	유기 이물질	%	1.0 이하(용적)	
	무기 이물질	%	1.0 이하(질량)	

① 순환골재를 사용할 경우에는 담당원의 승인을 받아야 하며, 천연골재와 혼합하여 사용하는 것을 원칙으로 한다.
② 순환골재를 계량할 경우, 1회 계량 분량에 대한 계량오차는 ±4%로 한다.
③ 사용하는 순환굵은골재 치수는 19~40mm로 하며, 최대치수는 40mm로 한다.

나. 장비

(1) 안전한 접지압을 가진 장비를 선택하여 공사 중에 장비가 연약지반에 빠지거나 쓰러지는 사고가 발생하지 않아야 하며, 또 지반을 교란시키지 않도록 하여야 된다. 투수콘크리트말뚝 타입작업은 기 부설된 모래(쇄석)매트상에서 타입기를 설치하고 지반의 안정성 여부 및 응력변화 등 작업이 가능한가를 판단한 후 타입기를 투입하여야 하며, 필요시 접지압을 설계서에 산정한 값 이하로 낮추는 방법을 강구한 후 이를 발주자대리인의 승인을 얻어 투입하여야 한다.

(2) 다공질 콘크리트말뚝 설치시 진동으로 인하여 원지반이 교란되지 않도록 가급적 진동이 없는 장비를 사용한다.

(3) 다공질 콘크리트말뚝 타입기계는 타입길이 및 투입재료의 양을 자체 기록할 수 있는 장치를 준비하여야 한다.

(4) 다공질 콘크리트말뚝 타입장비는 현장반입시 발주자 대리인의 승인을 얻어야 한다.

(5) 다공질 콘크리트말뚝 타입장비에는 다음의 시공관리계측 계기를 완비한 것이어야 하며 또한 시험시공을 실시하고 시공심도의 결정, 관입 능력, 자동기록기의 정도 및 바켓용량에 대해 감리원의 검사를 받아야 한다.

① Casing 심도계 : Casing Pipe 선단의 궤적을 시간적으로 확인할 수 있는 것.
② 사면계 : 다공질 콘크리트말뚝의 심도마다 배출량을 계측하고, Casing 내의 다공질 콘크리트면의 높이를 시간적으로 확인할 수 있는 것
③ 전류계 : 사항 타설하중에 사용되는 전류를 시간적으로 확인할 수 있는 것

④ 상기의 ①, ②, ③의 계측계기의 기록장치는 계측된 결과가 자동적으로 기록될 수 있는 것이어야 한다.

3. 배합설계 및 시험시공

가. 배합설계

(1) 시멘트, 물 등의 단위 재료량은 실내 배합설계 결과에 의해 시공성을 고려하여 결정한다.
(2) 개량토의 실내배합강도는 설계기준강도를 만족할 수 있는 일축압축강도 이상으로 한다.
(3) 재료는 중량으로 계량하고 혼합시간 등은 높은 강도를 얻을 수 있도록 한다.
(4) 1재령에 대한 공시체의 수는 3개를 표준으로 하며, 재령별 기준은 7일, 14일, 28일 및 장기강도(29~91일) 등 4종류로 구분하며, 배합조건에 따라 적정 재령일수를 결정하며 시험에 반영한다.
(5) 배합설계에 필요한 순환골재는 배합설계가 되도록 충분량을 공급하여야 한다.
(6) 배합설계는 KS F 2405(콘크리트용 압축강도 시험방법)에 준하되 사전에 공사감독자와 협의하여 결정한다.
(7) 시험결과는 다음 항목에 대하여 정리한다.
① 시멘트, 물, 혼화제 등 단위 재료량 결정
② 말뚝의 일축압축강도
③ 시멘트 첨가율과 말뚝의 일축압축 강도와의 관계

나. 시험시공

(1) 수급인은 조립된 장비의 시운전, 지층의 상이 여부 등을 측정하기 위하여 시험시공을 실시하여야 한다.
(2) 시험시공 위치, 심도, 시공량에 대하여는 공사감독자와 협의하여 정한다.
(3) 시험시공한 말뚝은 28일 후 확인보링을 통하여 채취된 시료에 대한 일축압축강도 시험을 실시하여 강도를 판단한다.

(4) 현장에서 채취된 시료에 대한 일축압축강도는 후속공종 착수 전 설계기준강도를 만족할 수 있는 일축압축강도 조건 이상을 기준으로 한다.

(5) 수급인은 시험시공 완료 후 분석 보고서를 공사감독자에게 제출해야 한다.

4. 시 공

가. 시공일반

(1) 기계 운전원은 운전 지시계에 의하여 상기의 조작을 실시하지만 Casing의 인발속도는 인발 중에 항상 사면계에 의하여 소정량의 다공질 콘크리트가 지반 중에 투입되고 있는가를 확인하여 조정하여야 한다.

(2) 다공질 콘크리트말뚝의 사양

(가) 다공질 콘크리트말뚝의 사양은 다음과 같다.

① 다공질 콘크리트말뚝의 Pile 간격 : 1.7m(설계도서를 참조하여 배치)
② 다공질 콘크리트말뚝의 Pile 배열 : 정방형 배치
③ 다공질 콘크리트말뚝의 Pile 직경 : Φ700mm 이상

(3) 다공질 콘크리트말뚝의 타입시 케이싱관의 인발높이 및 재관입 깊이는 다음을 기준으로 하되 시험시공을 통해 합리적인 대안을 마련했을 경우에는 발주자대리인의 승인을 얻어 이를 대신 적용할 수 있다.

(가) 심도가 6m 이상인 경우

① 케이싱관의 인발높이 : 3.0m
② 재관입 깊이 : 2.0m

(나) 심도가 6m 이하인 경우

① 케이싱관의 인발높이 : 1.5m
② 재관입 깊이 : 1.0m

(4) 케이싱 내부 다공질 콘크리트의 높이와 케이싱 선단부와의 차이는 1.5m 이상을 유지하여야 한다.

(5) 발주자대리인 지시 또는 승인하에 동일한 개량효과를 발휘하는 공법으로 변경할 수 있다. 그러나 이때 발주자대리인의 승인하에 시행될 경우 추가되는 비용은 수급인의 부담이다.

나. 시공

(1) 다공질 콘크리트말뚝의 시공방법은 다음의 기본동작에 따른다.

① Casing을 타설위치에 세운다.
② 진동기를 작동하여 Casing을 지중에 관입시킨다. 이 때, 진동기만으로 관입이 불가능할 경우는 발주자대리인의 승인을 받아 선단의 사수 Nozzle을 이용하여 병용할 수 있다.
③ 소정의 깊이까지 Casing을 관입시키면서 상부 Hopper에 의해 Casing 내에 일정량의 다공질 콘크리트 투입과 Casing을 규정높이로 인발하면서 Casing 내의 다공질 콘크리트를 압축공기로 천공부에 압출시킨다.
④ Casing을 다시 규정깊이까지 관입시켜 투입된 다공질 콘크리트를 진동에 의하여 다지고 다시 Casing을 규정높이까지 인발하여 다공질 콘크리트를 투입한다.
⑤ 이상의 조작을 되풀이하면서 Casing을 지상까지 인발하면서 Pile을 완성한다.

다. 현장 품질관리

(1) 시공전 관리사항

(가) 시공전 지반조사를 시행한 후 설계시 계획된 지반조건과 비교하여야 된다.

(나) 사용재료의 품질관리로서 선정시험 및 입도시험, 강도시험

(다) 시공플랜트의 검사

① 시공기계의 작동상태 확인
② 장비부품의 규격 및 사양과 치수확인
㉮ 케이싱의 간격 확인
㉯ 케이싱의 형상 확인
㉰ 케이싱 심도계 확인
- 케이싱 전면부에 육안으로 확인이 가능하도록 5m마다 표식한다.
- 케이싱 하단을 지표면에 고정하여 0점을 확인하고, 케이싱을 5m씩 하강과 인발을 하여 계기의 정도를 확인한다.
- 오차가 발생할 경우, 수회 반복 실시하여 계기를 검정함으로써 실측치와 같아지도록 한다.

(라) 다공질 콘크리트 Level Gauge의 정도 및 작동 확인을 하고 기록계와 기록치가 일치하도록 0점 조정한다.

(마) 다공질 콘크리트말뚝 시공위치

① 다공질 콘크리트말뚝 타설 전에 발주자대리인의 지시에 따라 타설주위에 기준점을 설치하고 이를 기준으로 타설 Pitch에 맞도록 Tapping 하여 길이 30~50cm의 목항(Paint를 도포한 대나무 또는 할목)으로 타설위치를 표시하여야 한다.
② 타설 Line은 반드시 Theodolite로 타설 위치를 확인하여야 하며, 타설위치의 표시

시설이 증기 등에 의하여 손상 또는 이동되었을 경우에는 즉시 재설치하여야 한다.

③ 타설이 완료된 다공질 콘크리트말뚝의 위치는 발주자대리인이 지시하는 방법에 따라 특수한 목인(目印, Tape 등 사용)을 발주자대리인 입회하에 설치하여야 하며, 감리원의 승인 없이는 철거할 수 없다.

(2) 시공중 관리사항

(가) 자동기록장치에 기록되는 다공질 콘크리트말뚝 길이, 투입량, 말뚝의 연속성 등을 면밀히 점검한다.

(나) 타설위치를 확인한다.

(다) 발주자대리인이 필요하다고 인정하는 경우에는 다공질 콘크리트말뚝의 위치 등을 확인하여야 한다.

(라) 케이싱의 관입저항과 다공질 콘크리트말뚝의 조성형태를 확인하여야 한다.

(마) 다공질 콘크리트말뚝의 타설은 반드시 발주자대리인의 입회하에 실시하여야 하며 시공관리 계측기기의 고장시는 타설할 수 없다.

(바) 다공질 콘크리트말뚝 타설시에는 반드시 Leader로 Casing 연직도를 확인한 후 발주자대리인의 승인을 얻어 실시하여야 한다.

(사) Casing의 관입을 촉진시키기 위하여 준비한 Water Jet는 상부 모래층에 대해서만 사용할 수 있으며 반드시 사용 전에 발주자대리인의 승인을 받아야 한다. 또한 운전원은 Water Jet 사용시 Casing의 관입에 대하여 특별히 주의하여 상부 모래층의 관입종료 단계에는 즉시 Water Jet 장치를 정지하여야 한다.

(아) 타설 장비의 운전은 반드시 운전 및 관리의 지도를 받은 운전원으로서 발주자대리인이 승인한 자만이 할 수 있다.

(자) 타설 순서는 토질조건과 주변조건을 고려하여 결정하여야 하며 반드시 발주자대리인의 승인을 얻어 결정하여야 한다.

(차) 다공질 콘크리트말뚝의 증항이 필요한 경우는 감리원의 지시에 따라 이유 없이 작업에 임하여야 한다.

(카) 다공질 콘크리트말뚝의 타설시에는 타설기 주위에 항상 100m^3 정도의 투입 다공질 콘크리트를 확보해 두어야 하며, 원지반 Level 이하의 다공질 콘크리트말뚝을 사용해서는 안 된다.

(타) 다공질 콘크리트말뚝 타설시 시공 허용범위는 다음과 같다.

① 항중심 간격 : 30 cm 이내
② Casing 의 연직도 : 2° 이하

(파) 발주자대리인이 추가 지반조사, 배치 변경 등에 의거 타설지역, 심도간격, 공법 등의 변경이 불가피하다고 판단하여 변경지시를 할 시에는 이에 응해야 한다.

(3) 시공후 관리사항

(가) 확인보링

① 목적 및 위치선정
㉮ 다공질 콘크리트말뚝 시공완료 후 및 preloading에 의한 지반개량 완료후 지반의 강도증가 여부와 말뚝의 연속성 등을 확인한다.
㉯ 확인보링의 위치는 사전조사의 위치와 일치 또는 근접된 곳으로 하며, 개량된 지반의 심도별 N값을 확인한 후, 사전 지반조사와 비교하여 지반개량효과를 확인한다.

② 다공질 콘크리트말뚝 품질관리기준

㉮ 다공질 콘크리트말뚝 타설 후 또는 프리로딩에 의한 연약지반 개량 완료 후 다공질 콘크리트말뚝은 확인 보링(트리플 코어링)을 통한 일축압축강도시험을 수행하여 소정의 강도를 발휘하는지 여부를 확인하여야 하며, 대상 지반에 대하여 확인보링과 SPT 시험을 실시하여 설계시 개량목표를 확인하여야 한다.

㉯ 다공질 콘크리트말뚝은 처음 타설되는 구간에 대하여 10m×10m 정도 선시공후 확인보링을 실시한다.

㉰ 다공질 콘크리트말뚝 타설후 실시되는 확인보링의 위치는 말뚝중심 및 말뚝과 말뚝사이에서 수행한다.

㉱ Preloading에 의한 연약지반 개량 완료 후 수행되는 확인보링 및 SPT 시험결과 복합지반의 N값은 0.0~5.0m까지 평균 N값은 14 이상, 그 이하는 평균 10 이상이 되어야 한다.

㉲ 확인조사 및 시험결과가 개량목표를 확보하지 못할 경우 발주자대리인과 협의하여 다공질 콘크리트말뚝 간격 조정 등 적정 대책을 수립하여야 한다.

㉳ 상기 N값은 설계 예상치이며, 따라서 적정한 현장시험을 수행하는 경우 수정 사용할 수 있다.

㉴ 추가시험은 발주자대리인 입회하에 시행하고, 그 결과는 24시간 이내에 보고하여야 한다.

㉵ 2개소의 조사결과가 기준치를 모두 만족하면 해당 시공구역의 말뚝은 모두 합격으로 간주하나, 2개소의 조사결과 중 1개소라도 기준치를 만족하지 못하면 이 지역을 재시공 또는 보강 시공하여야 한다.

㉶ 추가 지반조사에 의하여 시공위치, 심도, 간격, 공법 등의 변경이 불가피하다고 판단될 경우에는 발주자대리인에게 즉시 보고하여야 한다.

(나) 확인보링은 SPT를 기본으로 하나 이와 동등한 다른 시험 방법(CPT 또는 Dynamic Cone Test 등)을 사용하고자 한다면 발주자대리인과 협의하여 당 현장의 적용성을 확인한 후 사용할 수 있다.

(4) 검수

다공질 콘크리트말뚝의 검수는 시공관리 기록을 기준으로 소정 본수의 다공질 콘크리트말뚝이 설계도서 및 시방서대로 정확하게 시공되었는가를 확인 검수하며, 다공질 콘크리트말뚝의 연속성에 대해서는 시공관리 기록과 본 공사 이외로 시행되는 Check Boring 결과를 참고하여 판정한다.

(5) 시공 불완전의 판정

시공결과가 다음 항목에 해당될 경우에는 시공 불완전으로 판정하며, 시공자 부담으로 발주자대리인 지시에 따라 재시공 또는 추가 공사를 실시하여야 한다.

① 다공질 콘크리트말뚝의 타설위치가 30cm 이상 상이할 때
② Casing의 관입을 2° 이상 경사되게 하여 타설한 때
③ 다공질 콘크리트말뚝이 지시된 깊이까지 도달하지 않았을 때
④ 기록지에 의하여 다공질 콘크리트말뚝이 절단되었다고 확인되었을 때
⑤ 고의적 또는 과실로 시공관리 기록지를 제출하지 않을 때
⑥ 발주자대리인의 승인 없이 과재하로 지반 파괴가 발생할 때
⑦ 발주자대리인이 명확하게 시공불량이라고 판정되거나 시공내용상 의혹이 있을 때

(6) 기타

(가) 다공질 콘크리트말뚝은 바이브로 햄머와 압축공기로 다공질 콘크리트를 지반 속에 강제로 압입하고 다지면서 다공질 콘크리트말뚝을 형성시키는 공법으로 시공시 발생되는 소음, 진동, 주변지반의 변위, 인접 구조물에 피해가 가지 않도록 조치하여야 하며, 필요시 발주자대리인과 협의 후 진동, 소음측정을 하여야 한다.

라. 시공관리 기록

(1) 다공질 콘크리트말뚝의 타설은 다음의 시공관리 계측기기에 의하여 시공중 자동적

으로 연속 기록하여야 하며, 이 기록지에 따라 실 시공량이 정산되므로 깨끗이 정리하여 발주자대리인에게 제출하여야 한다.

① Casing 의 심도계
② Casing 의 사면계
③ Vibro Moter의 전류계

(2) 다공질 콘크리트말뚝의 타설에 대한 시공관리 기록은 기록서 원본에 다음 사항을 기록하여 발주자대리인에게 제출하여야 한다.

① Casing의 타입심도
② 투입된 투수콘크리트량
③ 타입직전의 현 지반고
④ 다공질 콘크리트말뚝의 타설위치, 소요기간, 타설장, 기타 시공에 관한 제기록
⑤ 시공관리계측 계기의 기록
⑥ 타설기계 운전원 및 시공 책임기사

(3) 시공관리 기기에 필요한 기록지는 수급인의 부담으로 한다.

6. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 환경에 대한 영향 검토

순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법 적용시 시멘트 페이스트에 의한 지반 및 지하수의 오염문제에 대해 시멘트를 개량지반 속에 삽입하여 시멘트 말뚝체를 형성하여 연약지반을 개량하는 심층혼합처리공법인 DCM(Deep Cement Mixing) 공법의 현장 적용사례를 통해 Cr^{6+}(6가 크롬)에 대한 토양오염 및 수질오염에 대한 사항을 검토하였다.

시멘트 경화시 발생하는 Cr^{6+}과 관련된 국내 법규들을 살펴보면 다음과 같다.

<표 3.7.55> Cr^{6+} 관련법규

관련법규		Cr^{6+} 기준치
토양환경 보전법	토양오염 우려기준	4~12mg/kg
	토양오염 대책기준	10~30mg/kg
해양오염 방지법	고상폐기물 기준	0.5mg/ℓ 이하
	액상폐기물 기준	5mg/ℓ 이하
폐기물관리법	2등급 이하의 수질지역 공단폐수종말처리지역 농공단지지역	5mg/ℓ 이하

부산 주변의 해안지역(신선대, 감천만 부두) 및 육상지역(김해 내외지구) 그리고 전남 해안지역(광양 및 나로도)에 대한 조사결과는 다음과 같으며, 미량의 Cr^{6+}이 함유되어 있으나 관리기준치 이하로 판정되었다.

<표 3.7.56> Cr^{6+} 성분분석 결과

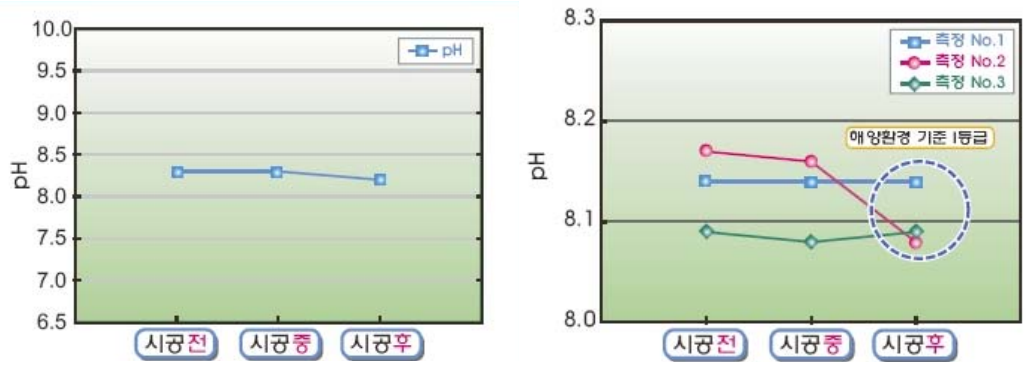
구 분	Cr^{6+} 분석결과(mg/kg, mg/ℓ)	판정결과	성분분석기관
시멘트	검출안됨	기준치 이하	한국건자재시험연구원
토 양	검출안됨~0.08	기준치 이하	한국화학시험연구원
개량토	검출안됨~0.24	기준치 이하	한국화학시험연구원

또한 시멘트로 인한 수질오염과 관련된 국내 해양환경기준을 살펴보면 다음과 같다.

<표 3.7.57> 국내 해양환경기준

구 분	수소이온 농 도 (pH)	화학적 산소요구량 (COD) (mg/ℓ)	용 존 산소량 (DO) (mg/ℓ)	대장균 균 수 (MPN/100mℓ)	용매추출유분 (mg/ℓ)	총질소 (mg/ℓ)	총인 (mg/ℓ)
I	7.8~8.3	1.0 이하	7.5 이상	1,000 이하	0.01 이하	0.3 이하	0.03 이하
II	6.5~8.5	2.0 이하	5.0 이상	1,000 이하	0.01 이하	0.6 이하	0.05 이하
III	6.5~8.5	3.0 이하	2.0 이상	-	-	1.0 이하	0.09 이하

수질분석 사례를 분석한 결과 다음과 같으며, 전남 외나르도항의 경우 시공후 pH값이 해양환경 기준 1등급에 만족하는 것으로 나타났다.



(a) 일본 운송성 제2항만 건설국 (b) 전남 외나르도항

<그림 3.7.69> DCM 시공후 pH 측정사례

국외 일본의 현황을 살펴보면, 공공기관이 시공한 34개 지점에 대해 현지 Sampling 조사를 실시하여 Cr^{6+} 성분분석을 실시하였다. 그 결과 용출기준을 초과한 경우는 발생하지 않았으며, 토양환경기준을 초과하는 개량토의 경우에도 주변토양 및 인근 지하수에 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다.

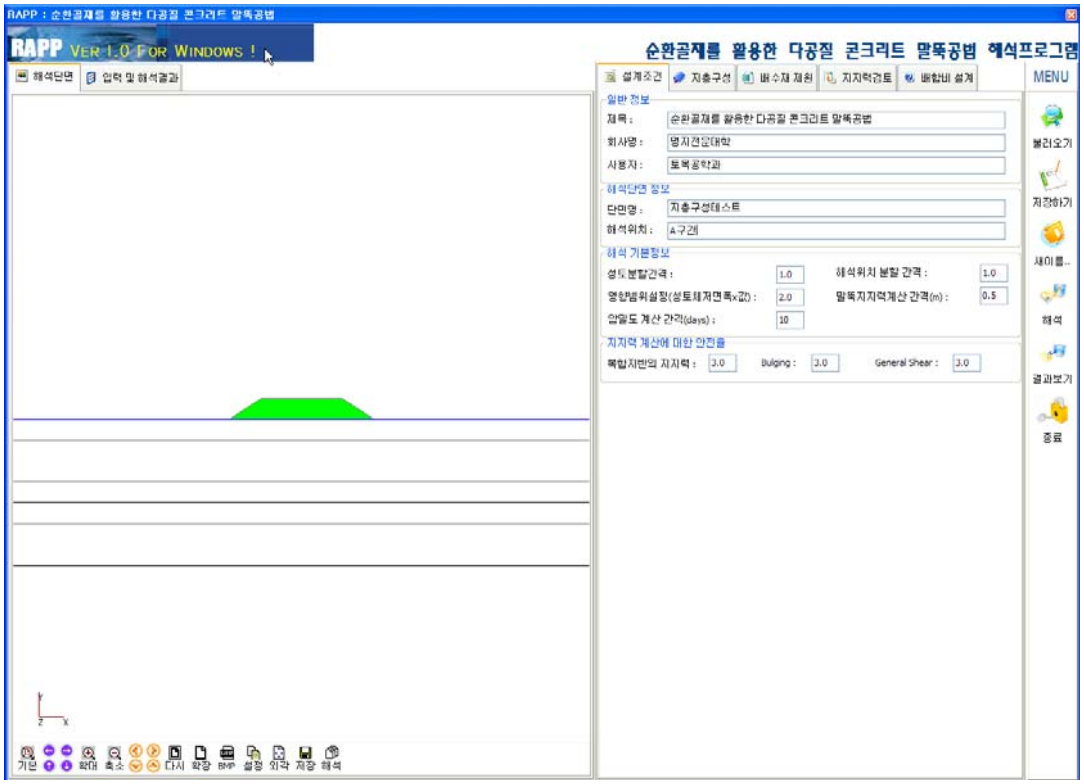
본 개발공법은 심층혼합처리공법인 DCM(Deep Cement Mixing)공법에 비해 상당히 적은 양의 시멘트가 사용되므로, 위와 같은 결과들을 종합해 볼 때 개발공법 적용에 따른 지반의 오염문제는 없을 것으로 판단된다.

제 8 절 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 최적 설계프로그램의 개발

1. RAPP 공법 설계프로그램 일반

가. RAPP 공법 설계프로그램 개요

RAPP(Recycled-Aggregate Porous Concrete Pile) 공법 설계프로그램(RAPP Ver 1.0 For Windows)은 연약지반개량공법으로 모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile, SCP) 및 쇄석다짐말뚝(Granular Compaction Pile, GCP)공법 등을 많이 사용하고 있으며, 이 공법은 원지반과 다짐으로 인하여 밀도가 조밀해진 모래 및 쇄석에 의해 복합지반을 조성하여 강도의 증가 및 압축성 즉, 침하량 등의 공학적 성질을 개선하기 위한 공법이다(Barksdale & Bachus, 1983). 국내에서의 모래다짐말뚝의 경우, 최근 들어 점차 양질의 모래가 고갈되어 감에 따라 경제성이 떨어지고 있으며, 이에 따라 대체 자원이 필요한 실정이다.



<그림 3.8.1> RAPP 공법 설계프로그램 메인화면

최근 우리나라에서는 건축 구조물의 노후화로 인한 재건축 등으로 기존의 콘크리트 구조물의 해체 폐기가 활발하게 진행되고 있다. 여기서 발생하는 건설폐기물 중 90% 정도가 폐콘크리트, 폐아스콘, 토사로 이루어져 있다. 건설폐기물의 효율적인 재활용을 하기 위해 적절한 분리, 선별, 처리 과정을 통하여 새로운 골재자원인 순환골재를 얻을 수 있다. 이 순환골재를 이용하여 현재 연약지반에서 많이 사용되고 있는 기존의 지반개량공법 중 다짐말뚝공법에 순환골재를 이용하면 천연자원의 고갈에 대비하고 골재채취로 인한 환경파괴를 경감시킬 수 있다고 판단된다. 또한 최근 “건설폐기물 재활용촉진에 관한 법률“ 에 따라 대형 공사현장에서는 순환골재를 의무적으로 사용해야 하기 때문에 순환골재를 이용한 연약지반 개량공법의 그 활용도가 양호할 것으로 판단된다(이세현, 2006).

따라서 친환경 지반개량공법을 개발하는데 기본자료로 활용하고자 천연자원을 대체할 수 있는 순환골재를 이용한 다공질 콘크리트 말뚝(Recycled Aggregate Porous concrete Pile, RAPP)의 연약지반의 침하량 및 압밀속도, 연직배수재의 지지력 및 배수재의 배합비를 산정하여 순환골재를 활용한 다공질 콘크리트 말뚝(RAPP)공법의 최적 설계프로그램을 개발하였다.

나. RAPP 공법 설계프로그램 주요기능

RAPP 공법 설계프로그램은 크게 설계단면 생성기능, 입력 및 설계결과 출력기능, 각종 설계데이터 입력으로 구성되어 있으며 각 항목이 수행하는 주요기능은 다음과 같다.

(1) 설계단면 생성기능

입력된 설계데이터를 이용하여 설계단면의 기본 모양을 실시간으로 생성해 주는 기능을 수행한다.

① 설계단면 확대, 축소, 이동 기능
② 설계단면 결과물 이미지 저장기능
③ 도면영역 확대 및 축소 기능

(2) 입력 및 설계결과 출력기능

대상물을 입력하여 설계한 결과는 화면에 직접 출력하는 기능으로 실시간으로 해석결과를 바로 확인하고 출력 및 저장할 수 있는 기능을 수행한다.

① 입력 및 설계 데이터 저장기능
② 입력 및 설계 데이터 인쇄기능

(3) 설계 데이터 입력 기능

설계에 필요한 설계조건, 지층구성, 배수재 제원, 지지력 검토, 배합비 설계를 항목별로 정리하여 사용자가 편리하게 입력할 수 있도록 하는 기능을 수행한다.

① 설계조건
② 지층구성
③ 배수재 제원
④ 지지력 검토
⑤ 배합비 설계

다. RAPP 공법 설계프로그램 사용 환경

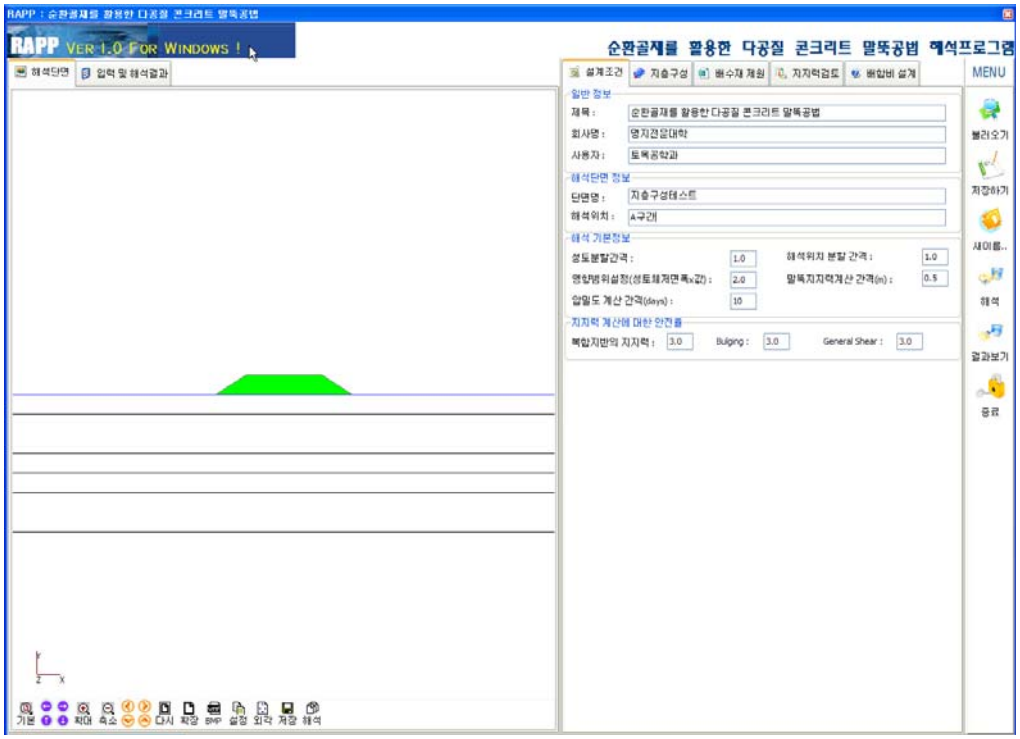
① 개발언어 : Delphi 2007
② 개발운영체제 : Windows XP
③ 개발 그래픽 해상도 : 1280×1024
④ 사용가능 운영체제 : Windows 호환운영체제(NT, 2000, XP)
⑤ 사용가능 그래픽 해상도 : 최소 1280×1024 이상, 권장 1280×1024

2. RAPP 공법 설계프로그램 사용법

가. RAPP 공법 설계프로그램 개요

RAPP 공법 설계프로그램(RAPP Ver 1.0 For Windows)은 연약지반개량공법인 RAPP 공법의 침하량, 압밀속도, 지지력, 배합비 설계 등을 설계하는 프로그램이다.

RAPP 공법 설계프로그램의 전체 구성은 우측에 설계조건, 지층구성, 배수재 제원, 지지력검토, 배합비 설계를 입력할 수 있는 입력데이터와 파일 불러오기, 저장하기, 해석, 결과보기, 종료 등의 기능을 수행하는 메뉴, 우측에 입력된 데이터에 대한 설계단면 및 입력 및 설계결과 창으로 구성되어 있다.



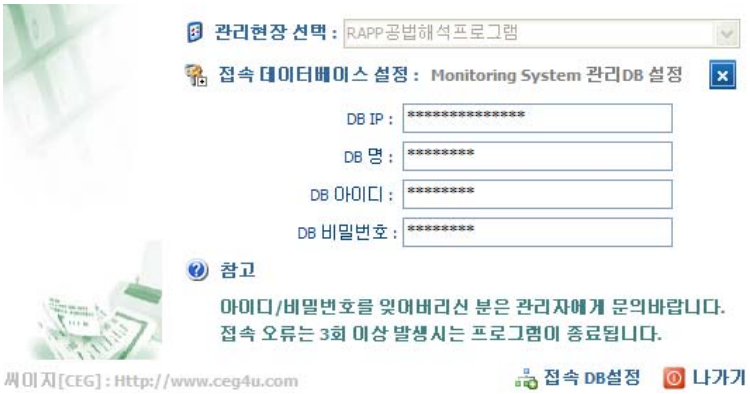
<그림 3.8.2> RAPP 공법 설계프로그램 초기화면

RAPP 공법 설계프로그램(RAPP Ver 1.0 For Windows)은 입력된 데이터를 직관적으로 확인할 수 있도록 좌측 설계단면 창에서 즉시 확인이 가능하도록 구성되어 있으며 또한 해석결과에 대한 기본적인 형상을 출력함으로써 사용자가 편리하게 입력할 수 있도록 되어 있다.

나. 로그인 화면



<그림 3.8.3> 로그인 화면



<그림 3.8.4> 접속 DB 설정

RAPP 공법 설계프로그램에 접속을 하기위해서는 먼저 프로그램 실행시 생성되는 로그인 화면에서 각종 정보를 입력한 후 사용자 아이디와 비밀번호를 입력하여 인증을 받아야 한다. 로그인 화면에서 입력하여야 하는 항목은 다음과 같다.

① 아이디 : 사용자 아이디

② 비밀번호 : 사용자 비밀번호

③ DB IP 주소 : 사용자 정보가 저장된 데이터베이스의 IP 주소 입력

④ DB 명 : 사용자 정보가 저장된 데이터베이스의 경로 및 명칭

⑤ DB 아이디 : 데이터베이스 접근 아이디

⑥ DB 비밀번호 : 데이터베이스 접근 비밀번호

위의 입력 항목 중 ③~⑥번까지는 초기에 프로그램 및 데이터베이스 설치시 모든 구성요소가 결정되며 사용자가 특별한 경우를 제외하고는 수정할 필요는 없으나 ①번과 ②번 항목은 각 사용자마다 고유한 아이디와 비밀번호가 존재하므로 해당 사용자에 따라서 수정한 후 입력하여야 한다.

사용자가 RAPP 공법 설계프로그램을 사용하기 위해서는 사용자 정보를 프로그램을 관리하는 담당자에게 문의하여 새로운 아이디와 비밀번호를 제공받아야 한다.

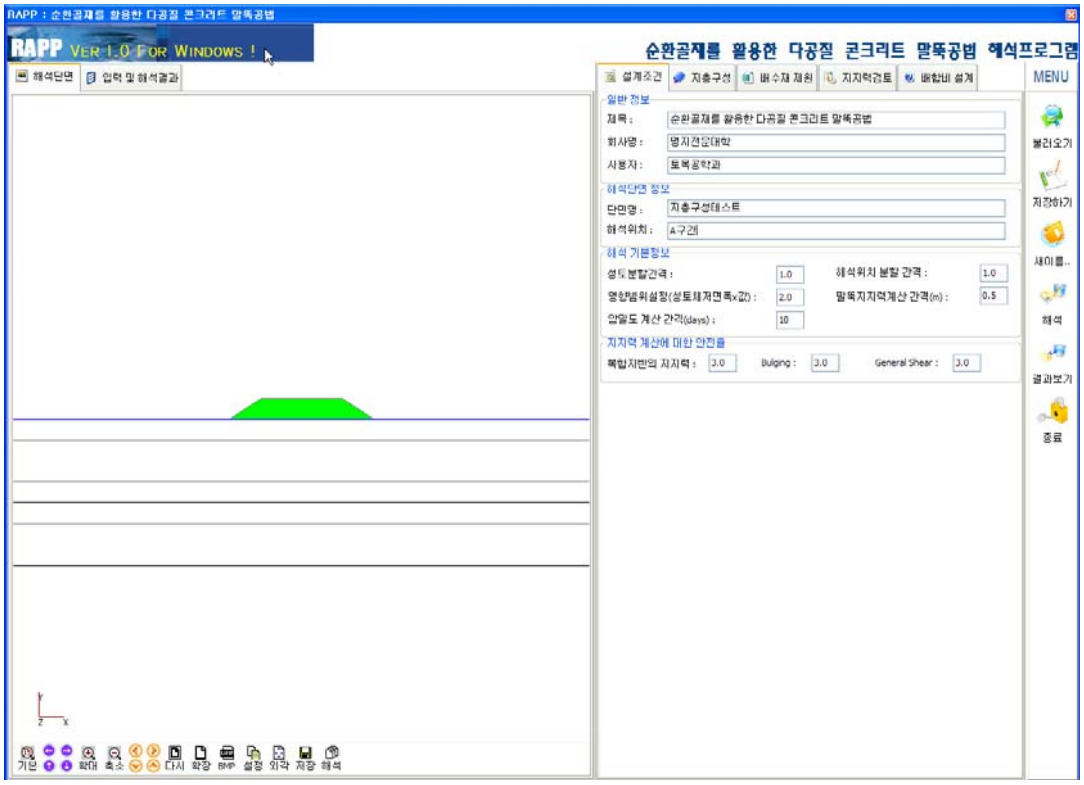
다. RAPP 공법 설계프로그램 메인

(1) RAPP 공법 설계프로그램 초기화면

사용자인증을 받은 후 RAPP 공법 설계프로그램이 실행되면 다음과 같은 초기화면이 생성되며 초기화면에서 기본적으로 설계데이터인 설계조건, 지층구성, 설계제원, 배수재 제원, 지지력검토, 배합비 설계 등에 의해서 단면이 생성된다.

사용자는 기본 데이터를 이용하여 해당 설계현장에 적합한 데이터를 입력하고 해석을 수행하며 입력된 데이터 및 해석결과를 확인한다. 해석방법 선택과 데이터입력 방법에 대해서는 차후에 다시 상세하게 설명한다. 해석을 원활히 수행하기 위해서는 기본적인 해석조건에 대한 내용은 사전에 준비하여야 하며 대표적인 내용은 다음과 같다.

① 각종 해석 기본정보 및 기준안전율
② 해석 단면에 대한 지층형상
③ 해석 단면에 대한 기초지반 및 성토재료의 지반 특성
④ 사용할 연직배수재에 대한 제원
⑤ 지지력 검토항목
⑥ 배합비 설계를 위한 골재, 물, 시멘트 등에 대한 정보



<그림 3.8.5> RAPP 공법 설계프로그램 메인화면

(2) 우측 메뉴

우측메뉴에서는 기본적인 파일관리, 해석, 결과보기, 종료와 같이 기본적인 메뉴로 이루어져 있으며 각 메뉴 항목에 대한 처리내용은 다음과 같다.

참고로 ④해석메뉴를 선택하면 입력된 데이터를 사용하여 해석을 수행한 후 그 결과를 입력 및 해석결과 탭에 출력이 이루어진다. 그러나 ⑤결과보기 메뉴를 선택하면 해석을 수행하지 않고 이전에 해석한 결과를 입력 및 해석결과 탭에 다시 출력하여 준다.

저장하기 메뉴의 경우에는 기존에 불러오기 또는 저장이 이루어진 상태가 아니면 새로운 파일을 생성할 수 있도록 대화상자가 생성되며, 기존에 파일이 열려 있는 상태의 경우에는 기존 파일이름으로 저장이 이루어진다.



① 불러오기 : 저장된 파일을 불러 온다.

② 저장하기 : 현재 입력된 데이터를 저장한다.

③ 새이름...: 다른 파일이름으로 저장한다.

④ 해석 : 입력된 데이터를 이용하여 계산을 수행한다.

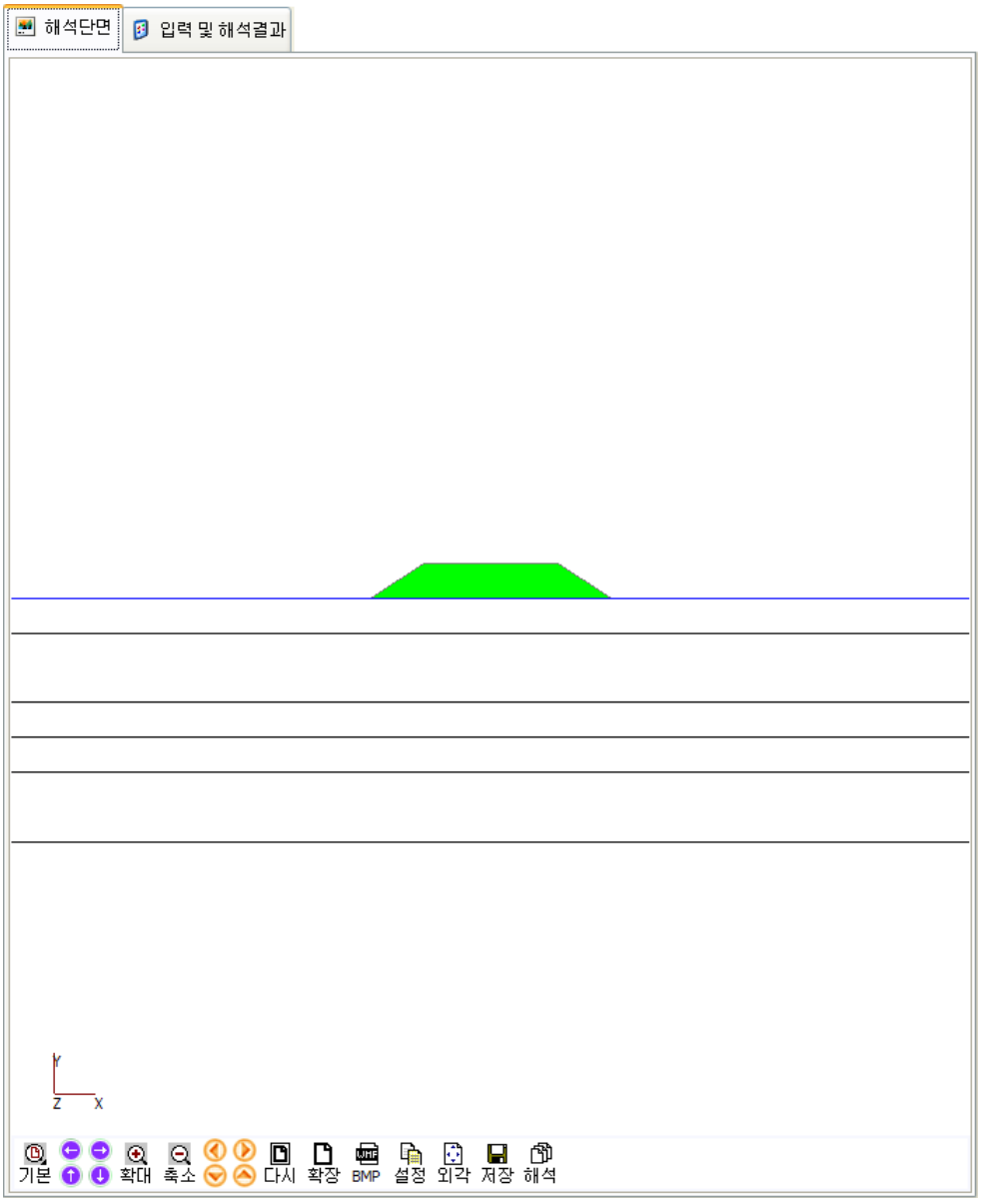
⑤ 결과보기 : 해석된 결과를 출력한다.

⑥ 종료 : 프로그램을 끝낸다.

<그림 3.8.6> 우측 메뉴

(3) 해석단면과 입력 및 해석결과

좌측의 화면에는 기본적으로 해석단면 탭이 생성되며 해석단면 탭의 하부에는 해석단면을 제어할 수 있는 각 종 버튼이 존재하여 이 버튼을 이용하여 해석단면을 확대, 축소, 이동 등 화면제어와 다시, 확장, BMP, 설정, 외각, 저장, 해석 등의 버튼은 해석단면에 입력 및 해석된 항목에 대한 내용을 표시해 주는 역할을 수행하다. 자세한 사용법은 차후에 상세히 설명한다.



<그림 3.8.7> 해석단면 입력 및 해석결과

해석단면 탭 옆의 입력 및 해석결과 탭의 경우는 우측 데이터입력 창에서 입력된 내용과 해석을 수행한 후 생성되는 결과를 보여준다. 해석결과 내용을 사용하여 현재 해석단면의 안정성 검토 결과를 확인하고 안정 또는 불안정을 판단한 후 불안정할 경우에는 입력데이터를 수정하여 재해석을 수행한다.

(4) 입력데이터 창

입력데이터 창에는 설계조건, 지층구성, 설치제원, 배수재 제원, 지지력검토, 배합비 설계 등 각 종 해석에 필요한 옵션 및 연약지반 특성 및 설치제원 등 해석에 필요한 데이터를 입력한다.



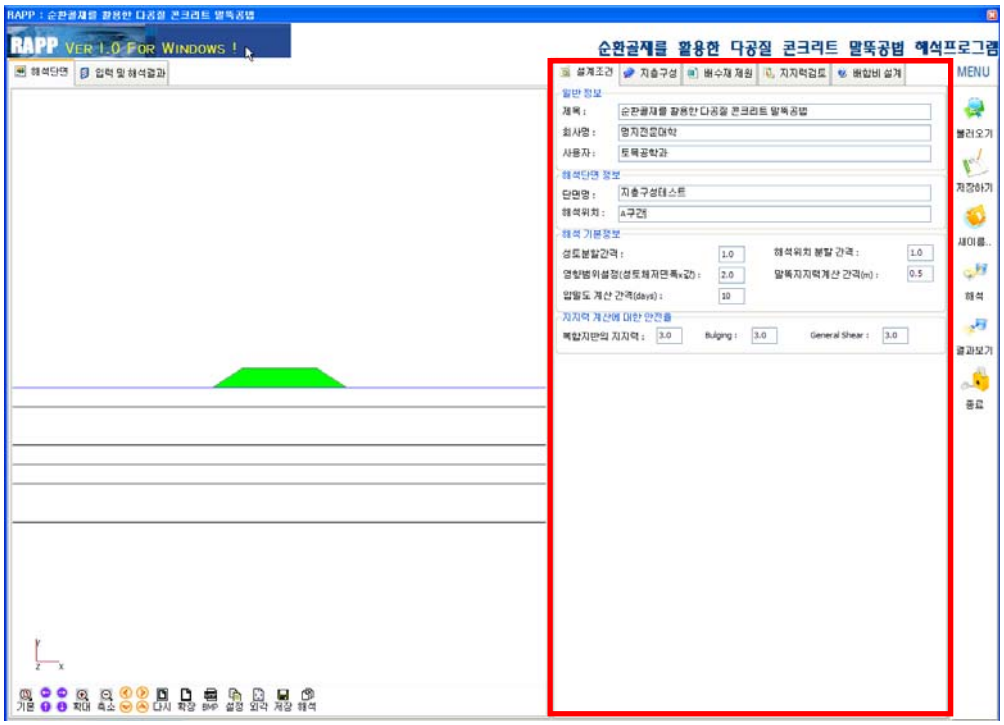
<그림 3.8.8> 입력데이터 화면

입력데이터 창에서는 항목별로 구분되어 있는 각 종 입력데이터를 직관적으로 입력할 수 있도록 되어 있으며 해석단면의 지층상태, 사용할 연직배수재의 특성, 제원 등에 대해서는 사전에 사용자가 필히 준비하여야 한다. 기본으로 입력되어 있는 사항은 해당 단면에 대해 특수한 경우이므로 반드시 사용자의 확인이 필요하다.

입력데이터 창에 대한 각 종 입력방법은 다음 장에서 항목별로 자세하게 설명한다.

라. 데이터입력

데이터입력 항목에서는 설계자료에 대한 설계조건, 지층구성, 배수재 제원, 지지력검토, 배합비 설계로 구성되어 있으며 자세한 사용법은 다음과 같다.



<그림 3.8.9> 데이터 입력

(1) 설계조건

설계조건에서 입력되는 일반적인 항목은 일반정보, 해석단면 정보, 해석 기본정보, 지지력 계산에 대한 안전율 등으로 자세한 입력사항에 대한 설명은 다음과 같다.

① 일반 정보 : 제목, 회사명, 사용자에 대한 정보 입력

② 해석단면 기본정보 : 단면명, 해석위치에 대한 정보 입력

③ 해석 기본정보 : 성토분할간격, 해석위치 분할간격, 영향범위설정, 말뚝지지력계산 간격, 압밀도 계산 간격에 대한 정보 입력

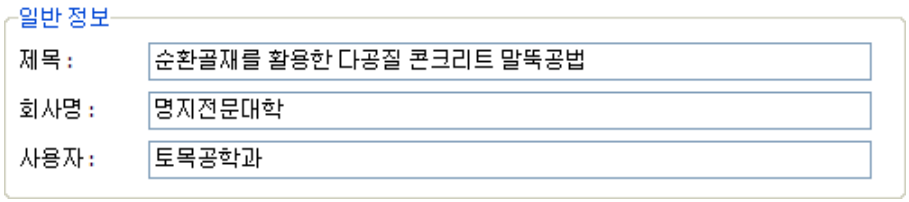
④ 지지력 계산에 대한 안전 : 지지력 검토 시 사용되는 기준 안전율 입력



<그림 3.8.10> 설계조건

설계조건에 대한 대표적인 입력방법에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

(가) 일반정보



<그림 3.8.11> 일반정보

일반정보에 대한 입력사항과 예는 다음과 같다.

① 제 목 : 해석단면에 대한 제목

② 회사명 : 해석을 수행하는 회사명

③ 사용자 : 해석을 수행하는 사용자명

(나) 해석단면 기본정보

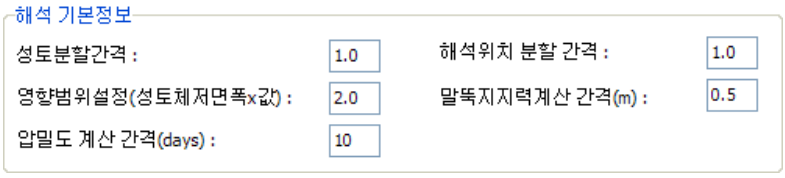


<그림 3.8.12> 해석단면 정보

해석단면 기본정보에 대한 입력사항은 다음과 같다.

① 단 면 명 : 해석단면에 대한 명칭을 입력한다.
② 해석위치 : 해석단명의 도면상 또는 위치를 입력한다.

(다) 해석 기본정보



<그림 3.8.13> 해석 기본정보

해석 기본정보에 대한 입력사항은 다음과 같다.

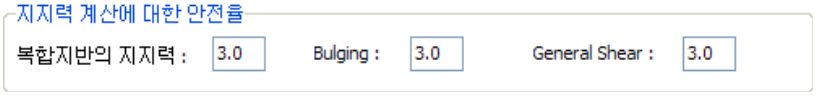
① 성토분할간격 : 성토체에 의한 하중 증가량을 계산하기 위하여 분할간격을 입력한다. 성토체의 분할은 성토체의 중앙부분을 기준으로 하여 성토분할 간격으로 분할하면 성토상부와 성토하부는 자동으로 분할한다. (참고. 성토분할간격은 1.0보다 적은 값을 입력한다.)
② 해석위치 분할간격 : 연약지반에 대한 침하량을 산정할 위치를 설정하기 위하여 분할 간격을 입력한다. 해석위치 분할 간격은 가능한 성토분할간격과 동일한 간격을 입력한다.
③ 영향범위설정 : 해석을 수행할 연약지반의 범위를 설정한다. 영향범위설정값을 입력하면 성토체 저면폭에 영향범위 설정값을 곱하여 해석단면에

적용한다.

④ 말뚝지지력계산 간격(m) : 지지력계산 시 말뚝의 분할 간격을 입력한다. 말뚝지지력 계산시 직경에 비례하여 1D, 2D, 3D ...와 같이 계산을 수행하는 경우에는 말뚝지지력계산 간격을 말뚝 직경으로 한다.

⑤ 압밀도 계산 간격(days) : 압밀도 계산을 위하여 성토체 방치기간에 대하여 일정한 시간 간격으로 계산을 수행할 수 있도록 한다.

(라) 지지력 계산에 대한 안전율



<그림 3.8.14> 지지력 계산에 대한 안전율

RAPP 공법에서 말뚝체에 작용하는 하중에 따른 지지력을 검토하기 위한 안전율을 입력한다. 지지력 검토 방법에는 복합지반의 극한지지력의 경우에는 개량된 복합지반의 지지력은 복합지반 중에 하중이 작용할 경우 말뚝내의 연직응력(σ_s)과 연약지반 내의 연직응력(σ_c)에 의한 응력분담의 차이로 인하여 말뚝을 주동파괴, 점성토를 수동파괴로 가정하여 극한지지력을 계산하는 방법과 단일말뚝의 지지력으로 계산하는 방법으로 분류된다.

복합지반의 극한지지력의 경우에는 Murayama(1957) 등에 의하면 복합지반의 응력상태를 소성평형 상태로 보고, 복합지반에 하중 σ가 재하되면 강성의 차이로 σ는 말뚝에 집중하여 압축상태가 되고, 말뚝은 벌징(Bulging)이 발생하게 된다. σ_h는 주응력 상태에서 있을 때 최대값을 가지므로 말뚝은 주동파괴, 점토는 수동파괴로 가정하여 말뚝에 대한 안전율을 구하여 복합지반의 지지력에 대한 안전율과 검토한다.

또한, 단일 말뚝의 극한지지력의 경우에는 말뚝의 파괴형태는 벌징파괴(Bulging Failure), 전단파괴(Shear Failure), 관입파괴(Punching Failure)로 구분할 수 있다. 개량된 복합지반의 응력상태를 소성평형상태로 보고, 복합지반에 하중이 재하되면 강성의 차이로 하중은 말뚝에 집중하여 압축상태가 되고 수평구속응력은 주응력상태에 있을 때 최대값을 가지므로 말뚝은 주동파괴, 점토는 수동파괴로 가정하여 말뚝의 극한지지력을 평가한다.

(2) 지층구성



<그림 3.8.15> 지층구성

지층구성에서 일반적인 항목은 성토재 재료특성, 지하수위 조건, 성토하중 방치기간, 기반면 배수조건, 지반특성, 압밀특성 등으로 자세한 입력사항에 대한 설명은 다음과 같다.

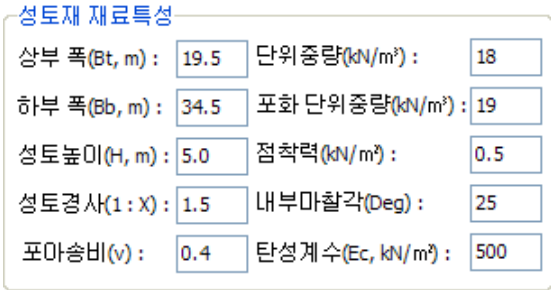
① 성토재 재료특성 : 성토재에 대한 제원 및 재료특성을 입력한다.

② 지하수위 조건 : 지하수위 높이 및 물의 단위중량을 입력한다.

③ 성토하중 방치기간 : 성토재의 방치기간을 입력한다.

④ 기반면 배수조건 : 최하층 기반면의 배수조건을 입력한다.

(가) 성토재 재료특성



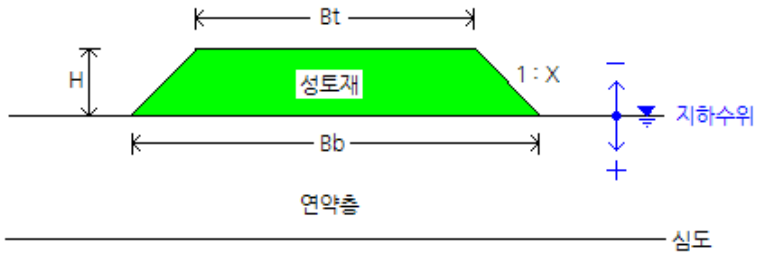
<그림 3.8.16> 성토체 재료특성

① 상부 폭(Bt,m) : 성토재의 상부 폭을 입력한다.

② 하부 폭(Bb,m) : 성토재의 하부 폭을 입력한다.

③ 성토높이(H,m) : 성토높이를 입력한다.

④ 성토경사(1:X) : 성토경사를 입력한다.



<그림 3.8.17> 지층구성

⑤ 단위중량(kN/m^3) : 성토재의 전체단위중량을 입력한다.

⑥ 포화단위중량(kN/m^3) : 성토재의 포화단위중량을 입력한다.

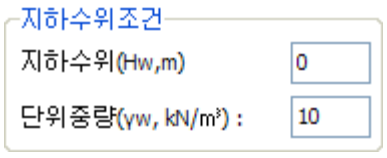
⑦ 점착력(kN/m^2) : 성토재의 점착력을 입력한다.

⑧ 내부마찰각(Deg) : 성토재의 내부마찰각을 입력한다.

⑨ 탄성계수(E_c, kN/m^2) : 성토재의 탄성계수를 입력한다.

⑩ 포아송비(ν) : 성토재의 포아송비를 입력한다.

(나) 지하수위조건

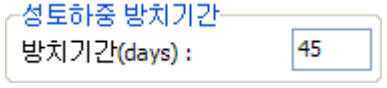


<그림 3.8.18> 지하수위 조건

① 지하수위(H_w, m) : 지하수위를 입력한다. 원지반면을 기준으로 하여 상부는 (-)값을 입력하고 하부는 (+)값을 입력한다.

② 단위중량(γ_w, kN/m^3) : 물의 단위중량을 입력한다. 이 값은 지하수위 상하부에 대한 지층의 유효응력 계산시 적용된다. 예) 지하수위 하부의 경우 적용단위중량은 $\gamma_{sat}-\gamma_w$를 적용한다.

(다) 성토하중 방치기간

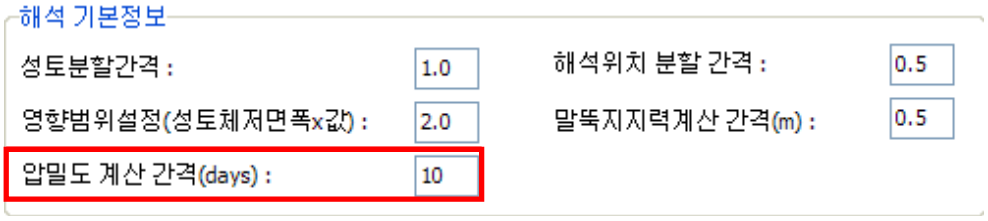


<그림 3.8.19> 성토하중 방치기간

성토하중에 대한 방치기간을 입력한다. 단위는 days로 입력하며 연약지반의 압밀도를 계산할 때 사용된다. 입력시 주의할 점은 해석 기본정보의 압밀도 계산 간격(days)을 고려하여 입력한다.

예를 들면 압밀도 계산간격이 '10' 인 경우에는 성토하중 방치기간은 40, 50, 100, ...과 같이 성토하중 방치기간을 압밀도 계산간격으로 나누었을 때 나머지가 없어야 한다.

다른 예로 압밀도 계산 간격이 '5' 인 경우에는 성토하중 방치기간은 5, 10, 15, 115, 120, ...과 같이 입력한다.



<그림 3.8.20> 해석 기본정보

(라) 기반면 배수조건



<그림 3.8.21> 기반면 배수조건

기반면의 배수조건을 선택한다. 기반면의 배수조건이 비배수이면 단면배수, 배수이면 양면배수 조건으로 해석을 수행한다.

(마) 지층물성치 입력

지층물성치 입력 그리드 상자는 각 층에 대한 대표적인 입력값을 나타내며 지층물성치에 대한 내용은 다음과 같다.

① 지층명 : 지층이름을 입력한다.
② 배수조건 : 각 층에 대한 배수조건을 입력한다.
③ 압밀층여부 : 일반층과 압밀층으로 구분하여 입력한다. 일반층의 경우에는 사질토의 경우로 침하량 계산시 입력된 N값을 이용하여 De Beer법에 의해서 즉시침하량을 계산하며 압밀층의 경우에는 압밀특성에 입력된 m_v법 또는 C_c 값을 이용하여 1차압밀 침하량을 계산한다.
④ 심도(m) : 각 층의 하단 심도를 입력한다.
⑤ 전체 단위중량(kN/m^3) : 각 층의 전체단위중량을 입력한다.
⑥ 포화 단위중량(kN/m^3) : 각 층의 포화단위중량을 입력한다.
⑦ 점착력(kN/m^2) : 각 층의 점착력을 입력한다.

⑧ 내부마찰각(Deg) : 각 층의 내부마찰각을 입력한다.

⑨ 탄성계수(E_c, kN/m^2) : 각 층의 탄성계수를 입력한다.

⑩ 포아송비(ν) : 각 층의 포아송비를 입력한다.

⑪ 체적압축계수(m_v) : 체적압축계수를 입력한다. 0일 경우에는 C_c법에 의해서 1차 압밀침하량을 계산하며, m_v>0 일 경우에는 m_v에 의해 1차 압밀침하량을 계산한다.

⑫ 압축지수(C_c) : 압축지수를 입력한다.

⑬ 초기간극비(e_0) : 초기간극비를 입력한다.

⑭ 팽창지수(C_s) : OCR > 1.0 인 경우 과압밀 점토로 압밀 침하량을 계산한다.

⑮ OCR : 정규압밀점토와 과압밀 점토의 여부를 결정한다.

⑯ 선행압밀응력(P_c, kN/m^2) : 선행압밀응력을 입력한다. 정규압밀점토인 경우는 필요 없음.

⑰ 2차 압축지수(C_r) : 2차 압밀 침하량을 계산하기 위해 입력한다.

⑱ Time Rate($\frac{t_{sec}}{t}$) : 2차 압밀 침하량을 계산하기 위해 입력한다. t_{sec}는 2차 압밀 시간(가정시간)이며 t는 1차압밀 종료시간이다.

⑲ 압밀계수(C_v, cm^2/s) : 압밀도를 계산하기위해 입력한다.

⑳ 수평투수계수(k_h, cm/s) : 각 층의 수평투수계수를 입력한다.

각 층에 대한 입력값을 적용하기 위하여 4개의 버튼을 이용하여 초기화, 추가, 수정, 삭제 작업을 수행한다.

① 초기화 : 지층물성치 목록 전체를 지운다.

② 추 가 : 지층물성치 목록에 새로운 층을 추가한다.

③ 수 정 : 선택된 지층물성치를 수정한다.

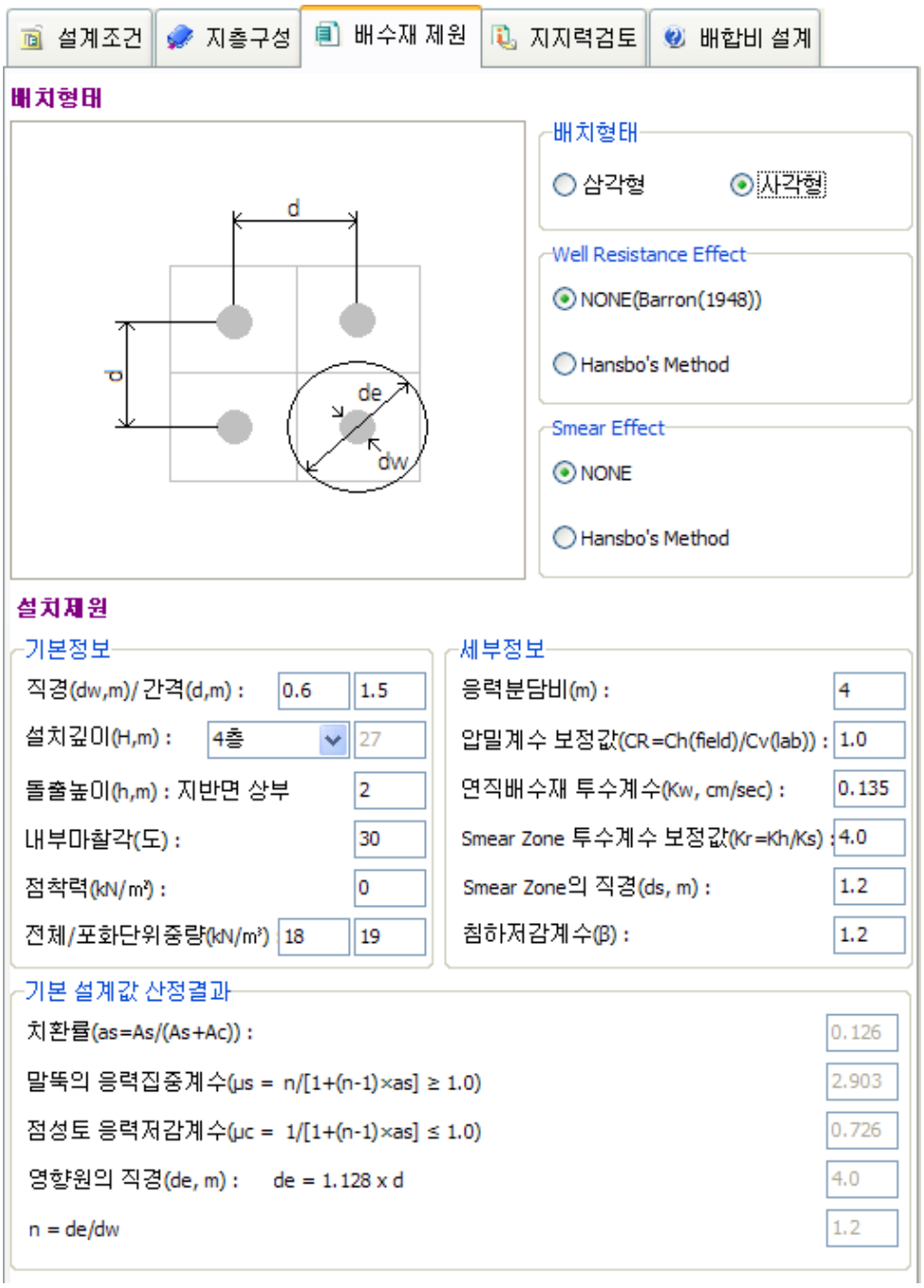
④ 삭 제 : 선택된 치층물성치 내용을 삭제한다.



<그림 3.8.22> 지층물성치

(3) 배수재 제원

배수재 제원에서 일반적인 항목은 배치형태, Well Resistance Effect와 Smear Effect 고려여부, 기본정보, 세부정보 등으로 자세한 입력사항에 대한 설명은 다음과 같다.



<그림 3.8.23> 배수재 제원

① 배치형태 : 연직배수재의 배치형태를 선택한다.

② Well Resistance Effect : Well Resistance Effect 고려여부를 선택한다.

③ Smear Effect : Smear Effect 고려여부를 선택한다.

④ 기본 정보 : 연직배수재의 직경, 간격, 설치깊이, 돌출높이, 내부마찰각, 점착력, 전체/포화단위중량 등을 입력한다.

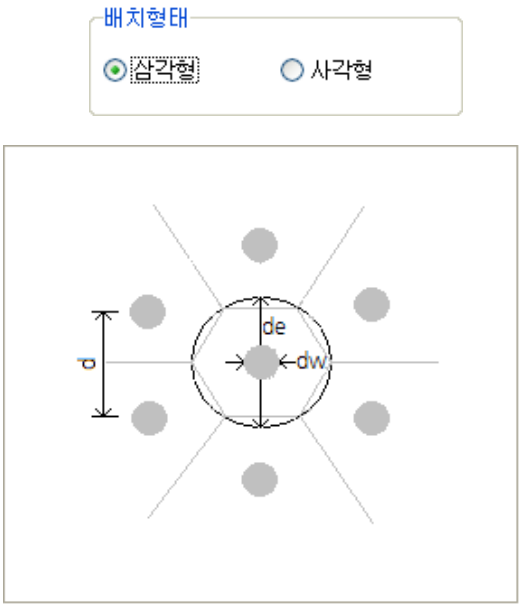
⑤ 세부정보 : 응력분담비, 압밀계수 보정값, 연직배수재 투수계수, Smear Zone 투수계수 보정값, Smear Zone의 직경 등을 입력한다.

⑥ 기본 설계값 산정결과 : 기본 정보와 세부정보에서 입력한 데이터를 이용하여 치환률, 말뚝의 응력집중계수, 점성토의 응력저감계수, 영향원의 직경 등의 기본 설계값을 산정하여 표시한다.

(가) 배치형태

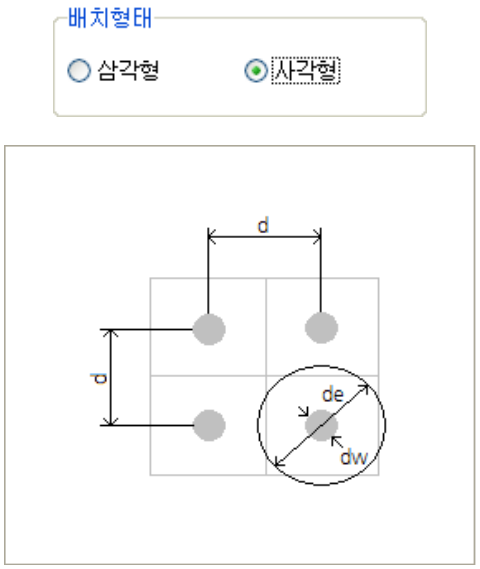
배치형태 선택항목에서 삼각형 또는 사각형을 선택하면 좌측에 있는 이미지가 변경되며 직경, 간격 등을 도식하여 준다.

① 삼각형 선택시 이미지



<그림 3.8.24> 연직배수재 삼각형 배치형태

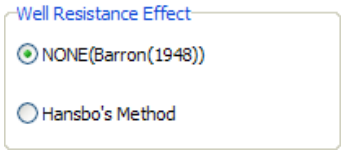
② 사각형 선택시 이미지



<그림 3.8.25> 연직배수재 사각형 배치형태

(나) Well Resistance Effect

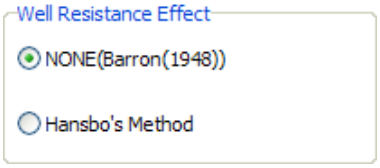
Well Resistance Effect 고려여부를 선택한다. NONE(Barron(1948)) 선택 시에는 Well Resistance Effect를 고려하지 않으며 Hansbo's Method를 선택할 경우에는 Well Resistance Effect를 고려하여 연직배수재에 대한 수평압밀도를 계산한다.



<그림 3.8.26> Well Resistance Effect

(다) Smear Effect

Smear Effect 고려여부를 선택한다. NONE 선택시에는 Well Resistance Effect를 고려하지 않으며 Hansbo's Method를 선택할 경우에는 Smear Effect를 고려하여 연직배수재에 대한 수평압밀도를 계산한다.



<그림 3.8.27> Smear Effect

(라) 기본정보

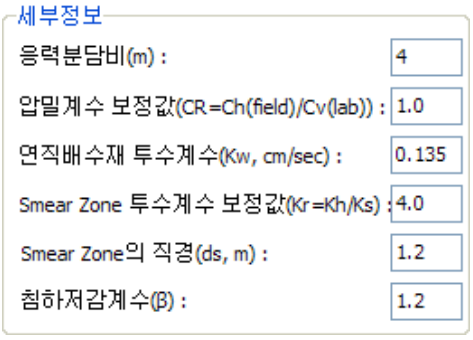


<그림 3.8.28> 연직배수재에 대한 기본입력사항

연직배수재에 대한 기본적인 입력사항을 다음과 같다.

① 직경(d_w, m) : 연직 배수재의 직경을 입력한다.
② 간격(d, m) : 연직 배수재의 설치 간격을 입력한다.
③ 설치깊이(H, m) : 목록에서 지층번호를 선택하면 해당지층의 심도가 자동으로 기입된다.
④ 돌출높이(h, m) : 원지반 상부에 연직배수재 설치 전 매립이 이루어질 경우에 입력한다.(+)값을 입력한다.
⑤ 전체 단위중량(kN/m^3) : 연직배수재의 전체단위중량을 입력한다.
⑥ 포화 단위중량(kN/m^3) : 연직배수재의 포화단위중량을 입력한다.
⑦ 점착력(kN/m^2) : 연직배수재의 점착력을 입력한다.
⑧ 내부마찰각(Deg) : 연직배수재의 내부마찰각을 입력한다.

(마) 세부정보



<그림 3.8.29> 연직배수재에 대한 세부 입력사항

연직배수재에 대한 세부정보 입력사항을 다음과 같다.

① 응력분담비(m) : 응력분담비를 입력한다.

② 압밀계수 보정값(CR) : 압밀계수 보정값을 입력한다. $CR = \frac{C_{h(field)}}{C_{v(lab)}}$

③ 연직배수재 투수계수(k_w) : 연직배수재의 투수계수를 입력한다.

④ Smear Zone 투수계수 보정값 : Smear Zone투수계수 보정값을 입력한다.

$$K_r = \frac{k_h}{k_s}$$

⑤ Smear Zone의 직경(d_s, m) : Smear Zone의 직경을 입력한다.

참고로 d_s : 드레인 주위의 교란영역의 직경(Hansbo : $d_s = 2 \cdot d_m$)

d_m : Cone, Casing의 직경

⑥ 침하저감계수(β) : 침하저감계수를 입력한다.

참고 : 침하저감계수(β)

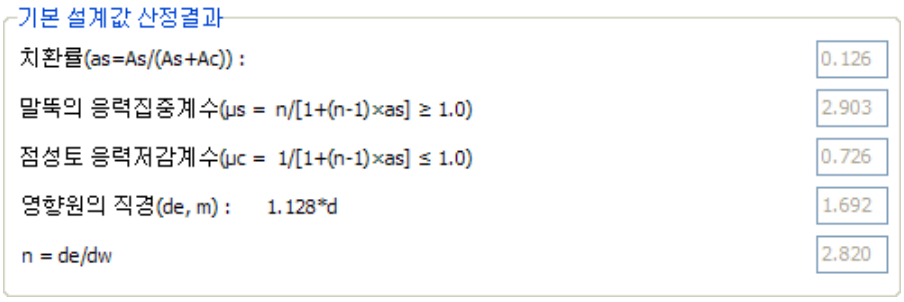
침하저감계수 β는 저치환 개량에서 응력분담효과, 고치환 개량에서는 치환효과를 기대하여 다음 식으로 계산한다.

- 저치환개량의 경우 : $\beta = \mu_c = \frac{1}{1+(m-1)\cdot a_s}$

- 고치환개량의 경우 : $\beta = 1 - a_s$

여기서, a_s<0.5의 경우 m=3을 사용하여 저치환 개량의 경우로 하고, a_s>0.5인 경우 고치환 개량의 경우를 이용하는 것이 추천된다.

(바) 기본 설계값 산정결과



<그림 3.8.30> 기본 설계값 입력 결과

기본설계값 산정결과는 연직 배수재의 기본정보와 세부정보를 입력하면 해당 산정식에 따라 계산을 수행한다. 수행한 내용은 다음과 같다.

① 치환율(a_s) : 치환율을 계산한다. $a_s = \frac{A_s}{A_s + A_c}$

② 말뚝의 응력집중계수(μ_s) : 응력집중계수를 계산한다.

$$\mu_s = \frac{m}{1 + (m-1) \cdot a_s} \geq 1.0$$

③ 점성토의 응력저감계수(μ_c) : 응력저감계수를 계산한다.

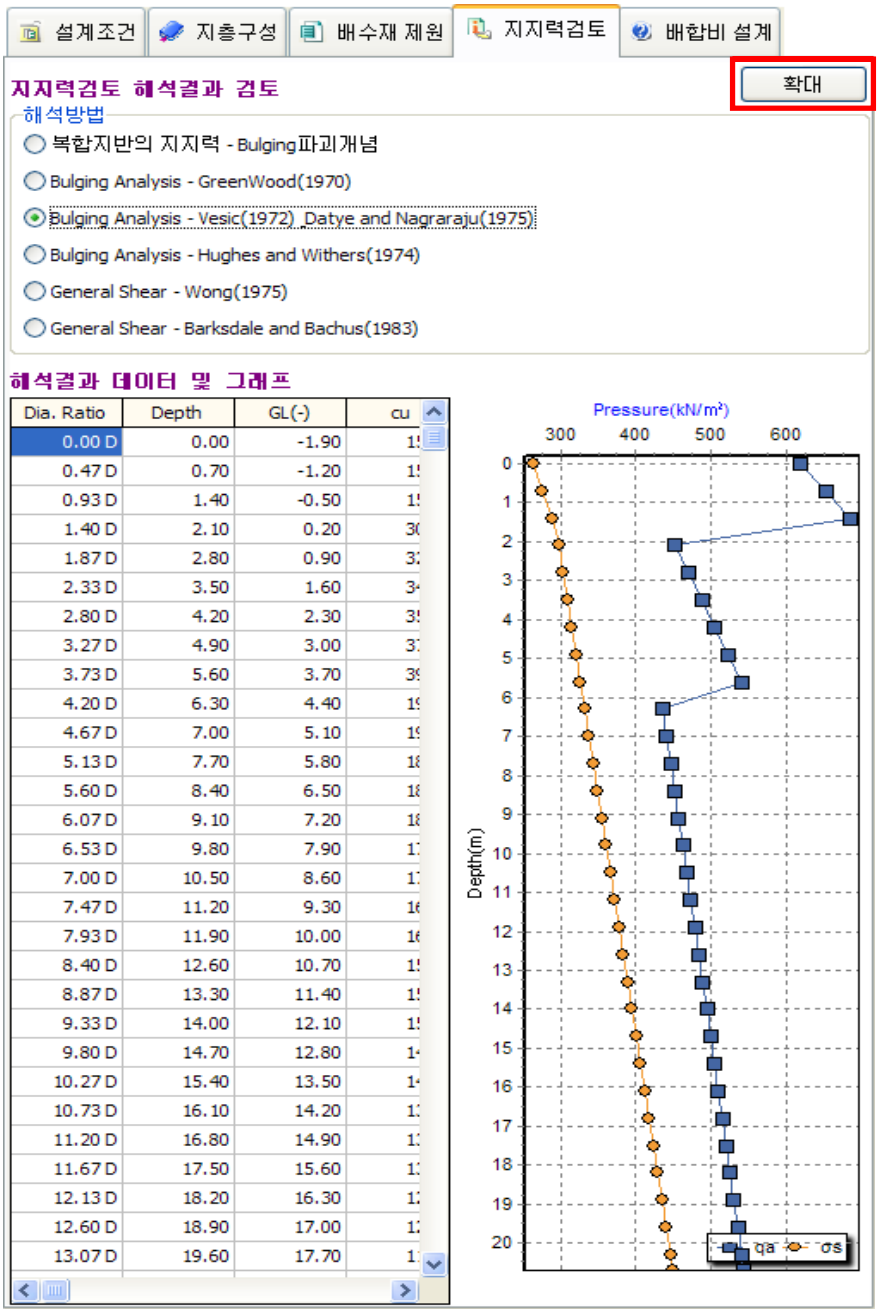
$$\mu_c = \frac{1}{1 + (m-1) \cdot a_s} \leq 1.0$$

④ 영향원의 직경(d_e, m) : 배치형태에 따라 계산을 한다.

㉮ 사각형 : d_s = 1.128·d

㉯ 삼각형 : d_s = 1.050·d

(4) 지지력 검토



<그림 3.8.31> 지지력 검토

지지력 검토에서는 설계조건, 지층구성, 배수재 제원에서 입력한 내용을 이용하여 각종 지지력 산정식에 의해서 계산을 수행한 결과를 보여주는 것으로 이에 대한 설명은 다음과 같다.

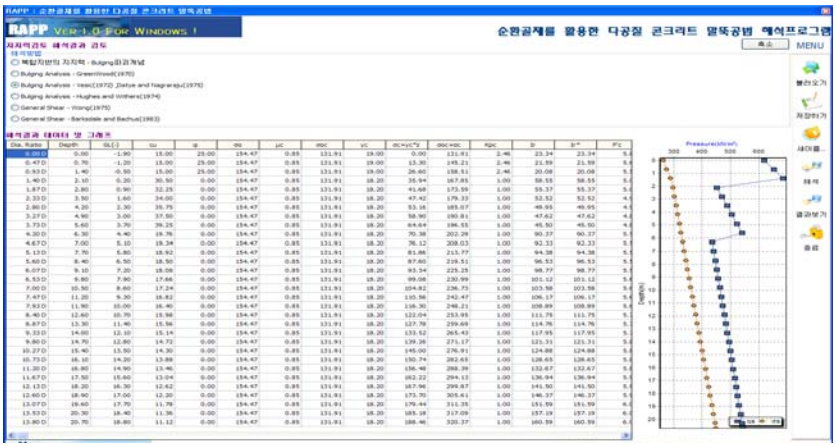


<그림 3.8.32> 해석방법

지지력 해석방법을 선택하면 각 종 식에 의해 계산된 결과를 데이터와 그래프로 나타낸다. 현재 지지력 해석방법은 다음과 같다.

① 복합지반의 지지력 : Bulging 파괴개념
② Bulging Analysis : GreenWood(1970)
③ Bulging Analysis : Vesic(1972), Datye and Nagraraju(1975)
④ Bulging Analysys : Hughes and Withers(1974)
⑤ General Shear : Wong(1975)
⑥ General Shear : Barksdale and Bachus(1983)

지지력 해석결과 데이터를 보다 자세하게 확인하고자 한다면 우측상단에 있는 확대 버튼을 클릭하면 다음과 같은 화면이 활성화된다.



<그림 3.8.33> 지지력검토 화면 확대

(5) 배합비 설계

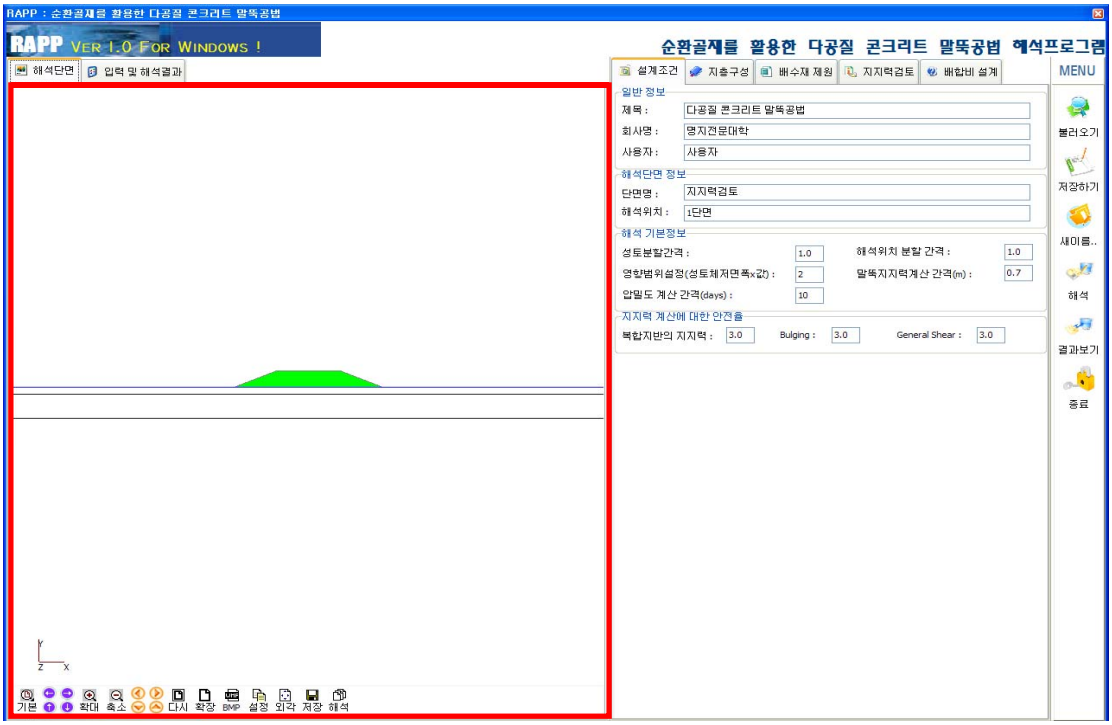
배합비 설계 항목은 W/C, 골재, 기타입력사항을 입력하면 배합결과를 출력해 준다.



<그림 3.8.34> 배합비 설계

마. 해석단면 관리

지금까지 해석단면에 대한 데이터를 입력하고 해석을 수행하는 것에 대하여 설명하였다. 지금부터는 해석을 수행한 각 단면에 대한 해석단면도를 보고 이 해석단면도를 변경하여 원하는 결과를 출력하는 방법에 대해 설명하기로 한다.



<그림 3.8.35> 해석단면 관리

(1) 화면 제어창 설명



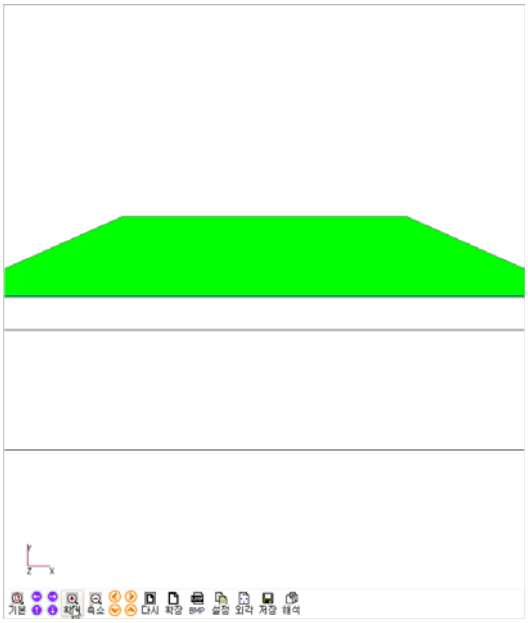
<그림 3.8.36> 화면 제어창

화면 제어창에서는 지층형상 및 성토체의 형상 등 각 종 입력된 결과를 이용하여 적용된 단면에 대한 정보를 화면에 표시해주는 기능을 한다. 또한 이 화면에 대한 각종 아이

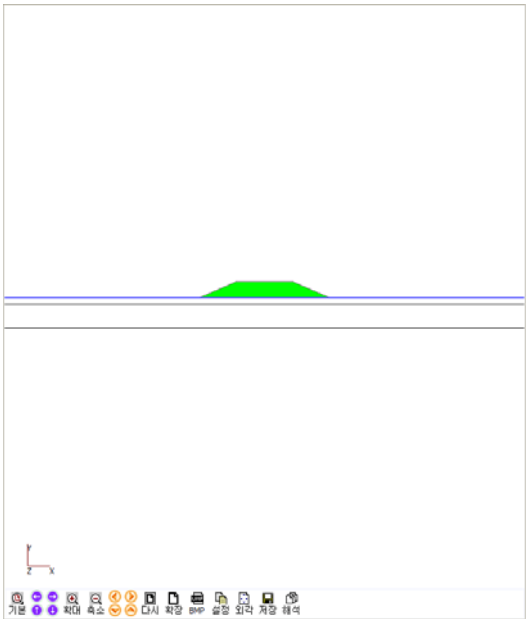
콘을 이용하여 확대, 축소, 이동 및 BMP 파일 생성 등의 기능을 수행한다. 각 아이콘에 대한 기본적인 설명은 다음과 같다.

① 기본 : 기본으로 설정된 화면 크기로 도면생성, 최초 작업 시 기본으로 선택
② 축소/확대 세부지정 : 상하좌우 영역을 맞추어 축소/확대 한다.
③ 확대 : 현재 기준점에서 단면을 확대
④ 다시 : 도면을 다시 생성한다.
⑤ 확장 : 해석도면영역을 확대함
⑥ BMP : BMP파일 생성
⑦ 설정 : 각종 단면에 대한 치수 등에 대한 세부 값을 지정한다.
⑧ 외각 : 현재 단면의 외각 영역을 그린다.
⑨ 저장 : 데이터 파일을 저장한다.
⑩ 해석 : 입력된 데이터를 사용하여 해석을 실시한다.

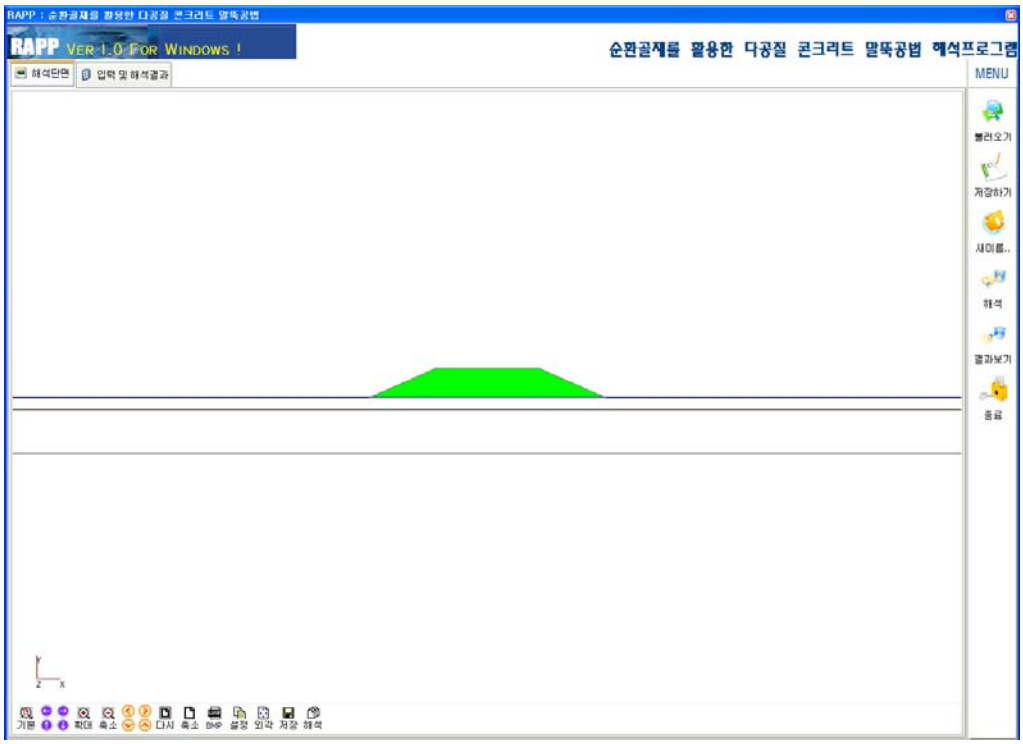
(2) 화면창 제어 결과



(a) 확대



(b) 축소



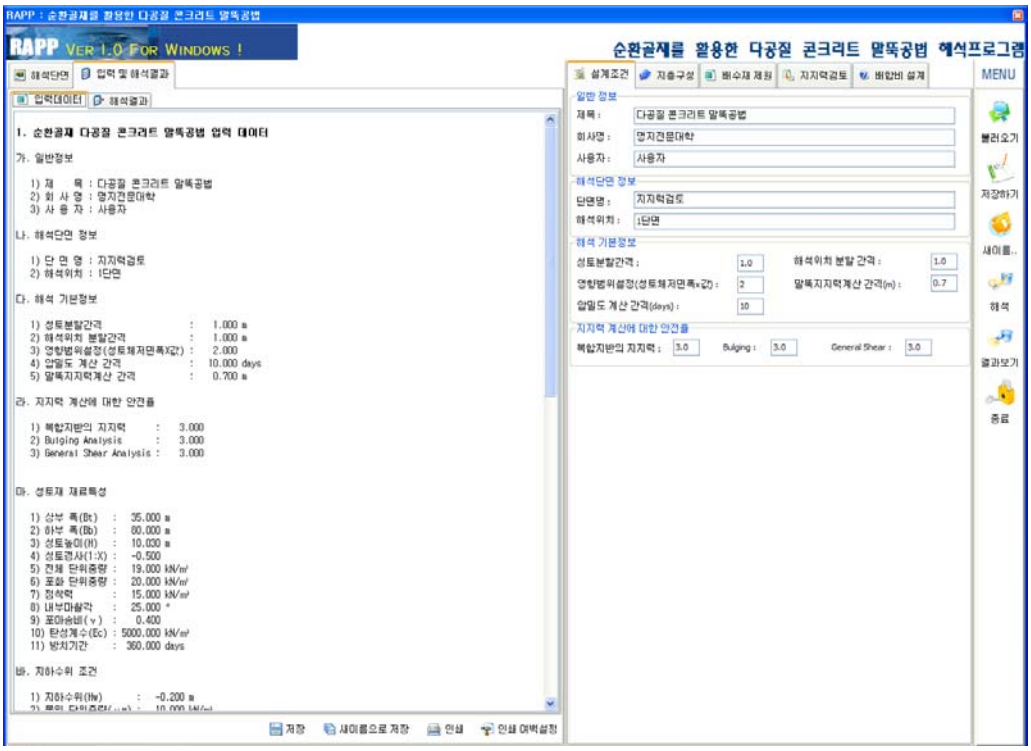
(c) 화면 확장하기

<그림 3.8.37> 화면제어 결과

바. 입력 및 해석결과

아래의 내용은 해석을 수행한 후 입력데이터 및 해석결과를 보고 안정성 여부를 판단할 수 있는 결과물 출력 부분에 대해 설명한다.

(1) 입력데이터



<그림 3.8.38> 입력데이터

입력 및 해석결과 탭에서 입력데이터 탭은 우측 데이터 입력창에서 입력한 각 종 설정값을 출력한다.

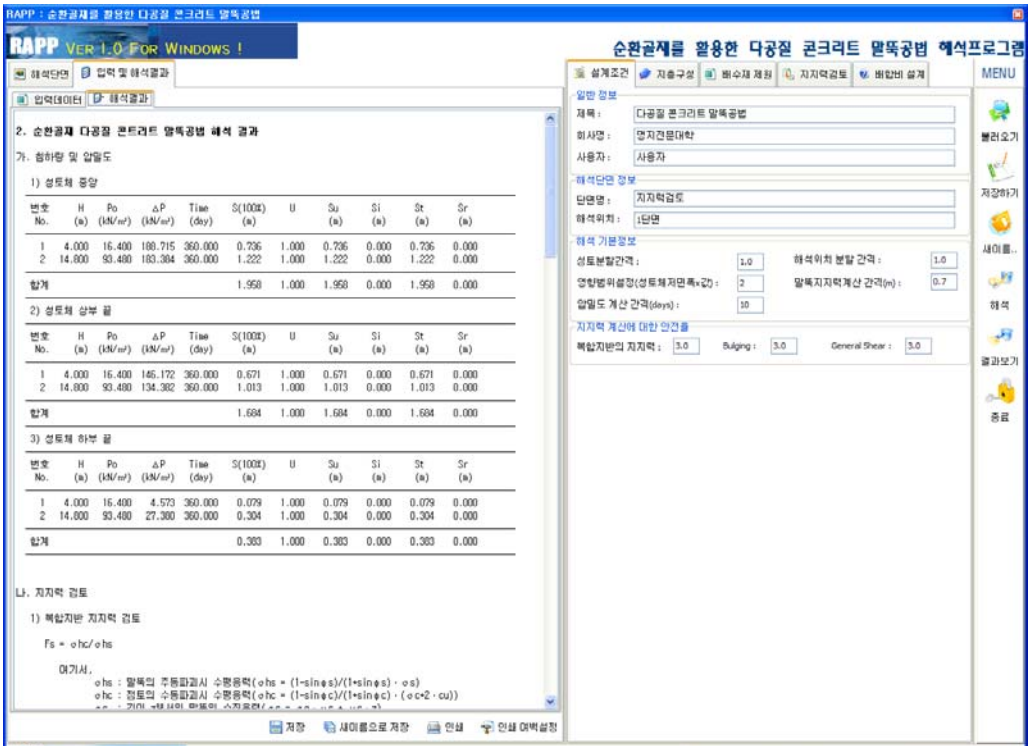
① 저장 : 입력데이터를 저장한다.

② 새이름으로 저장 : 새로운 파일을 생성한다.

③ 인쇄 : 출력한다.

④ 인쇄여백설정 : 인쇄 여백을 설정한다.

(2) 해석결과 예



<그림 3.8.39> 해석결과

입력 및 해석결과 탭에서 해석결과 탭은 우측 메뉴의 해석 버튼을 클릭하면 해석을 수행한 후 해석결과를 우측 창에 출력한다. 이때 해석결과 탭의 제목이 현재 해석을 수행한 하중상태 및 최소안전율 기준을 표시한다.

① 저장 : 입력데이터를 저장한다.

② 새이름으로 저장 : 새로운 파일을 생성한다.

③ 인쇄 : 출력한다.

④ 인쇄여백설정 : 인쇄 여백을 설정한다.

3. RAPP 공법 설계프로그램 결과

아래의 내용은 RAPP 공법 설계프로그램을 사용하여 기준 단면에 대한 입력데이터와 해석결과를 나타낸 것이다.



<그림 3.8.40> 해석단면

가. 입력데이터 예

(1) 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝공법 입력 데이터

(가) 일반정보

① 제목 : 다공질 콘크리트 말뚝공법
② 회사명 : OO 엔지니어링
③ 사용자 : 홍길동

(나) 해석단면 정보

① 단면명 : 지지력검토
② 해석위치 : 1단면

(다) 해석 기본정보

① 성토분할간격 : 1.000 m
② 해석위치 분할간격 : 1.000 m

③ 영향범위설정(성토체 저면폭) : 2.000

④ 압밀도 계산 간격 : 10.000 days

⑤ 말뚝지지력계산 간격 : 0.700 m

(라) 지지력 계산에 대한 안전율

① 복합지반의 지지력 : 3.000

② Bulging Analysis : 3.000

③ General Shear Analysis : 3.000

(마) 성토재 재료특성

① 상부 폭(Bt) : 35.000 m

② 하부 폭(Bb) : 80.000 m

③ 성토높이(H) : 10.030 m

④ 성토경사(1:X) : -0.500

⑤ 전체 단위중량 : 19.000 kN/m^3

⑥ 포화 단위중량 : 20.000 kN/m^3

⑦ 점착력 : 15.000 kN/m^2

⑧ 내부마찰각 : 25.000 °

⑨ 포아송비(ν) : 0.400

⑩ 탄성계수(E_c) : 5000.000 kN/m^2

⑪ 방치기간 : 360.000 days

(바) 지하수위 조건

① 지하수위(H_w) : -0.200 m

② 물의 단위중량(γ_w) : 10.000 kN/m^3

참고 : 지하수위는 원지반면 상부인 경우 (-)값, 하부인 경우 (+)값을 입력한다.

(사) 지층물성치 입력

① 기반면의 배수조건 : 1.000 (0 : 비배수, 1 : 배수)

② 지반특성

번호 No.	지층명	심도 (m)	단위중량(kN/㎥) 전체	습윤	점착력(kN/㎡) 상부	하부	내부마찰각(도) 상부	하부	N값	포아송비	탄성계수 (kN/㎡)	배수조건	압밀층 여 부
1	점토층	4.000	18.200	18.200	30.000	20.000	0.000	0.000	0.000	0.400	5000.000	2	1
2	점토층	18.800	18.200	18.200	20.000	28.880	0.000	0.000	0.000	0.400	5000.000	2	1

③ 압밀특성

번호 No.	체적압축 계수(mv)	압축지수 (Cc)	초기간극비 (eo)	팽창지수 (Cs)	OCR	선행압밀응력 (kN/㎡)	2차압축 지수(Cr)	TimeRate (tsec/t)	압밀계수 (Cv,㎠/sec)	수평투수계수 (Kh,cm/sec)
1	0.000	0.330	1.100	0.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.001	0.000
2	0.000	0.330	1.100	0.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.001	0.000

(아) 연직 배수재 설치제원

① 배치형태 및 해석방법

㉮ 배치형태 : 1 (0 : 삼각형, 1 : 사각형)

㉯ Well Resistance Effect : 0 (0 : NONE, 1 : Hansbo's Method)

㉰ Smear Effect : 0 (0 : NONE, 1 : Hansbo's Method)

② 기본정보

㉮ 직경(d_w) : 0.700 m

㉯ 간격(d) : 1.500 m

㉰ 설치깊이(H) : 20.700 m

㉱ 돌출높이(h) : 1.900 m

③ 배수재 물성치

㉮ 점착력 : 0.000 kN/m^2

㉯ 내부마찰각 : 38.000 °

㉰ 전체단위중량 : 18.000 kN/m^3

㉱ 포화단위중량 : 18.000 kN/m^3

④ 세부정보

㉮ 응력분담비(m) : 2.000

㉯ 압밀계수 보정값($C_R=C_{h(field)}/C_{v(lab)}$) : 1.000

㉰ 연직배수재 투수계수(k_w) : 0.135 cm/s

㉱ Smear Zone 투수계수 보정값($k_r=k_h/k_s$) : 4.000

㉲ Smear Zone의 직경(d_s) : 1.200 m

㉳ 침하저감계수(β) : 1.200

나. 해석결과(예)

(1) 순환골재 다공질 콘트리트 말뚝공법 해석 결과

(가) 침하량 및 압밀도

① 성토체 중앙

번호 No.	H (m)	Po (kN/㎡)	ΔP (kN/㎡)	Time (day)	S(100%) (m)	U	Su (m)	Si (m)	St (m)	Sr (m)
1	4.000	16.400	188.715	360.000	0.736	1.000	0.736	0.000	0.736	0.000
2	14.800	93.480	183.384	360.000	1.222	1.000	1.222	0.000	1.222	0.000
합계					1.958	1.000	1.958	0.000	1.958	0.000

② 성토체 상부 끝

번호 No.	H (m)	Po (kN/㎡)	ΔP (kN/㎡)	Time (day)	S(100%) (m)	U	Su (m)	Si (m)	St (m)	Sr (m)
1	4.000	16.400	146.172	360.000	0.671	1.000	0.671	0.000	0.671	0.000
2	14.800	93.480	134.382	360.000	1.013	1.000	1.013	0.000	1.013	0.000
합계					1.684	1.000	1.684	0.000	1.684	0.000

③ 성토체 하부 끝

번호 No.	H (m)	Po (kN/㎡)	ΔP (kN/㎡)	Time (day)	S(100%) (m)	U	Su (m)	Si (m)	St (m)	Sr (m)
1	4.000	16.400	4.573	360.000	0.079	1.000	0.079	0.000	0.079	0.000
2	14.800	93.480	27.380	360.000	0.304	1.000	0.304	0.000	0.304	0.000
합계					0.383	1.000	0.383	0.000	0.383	0.000

(나) 지지력 검토

① 복합지반 지지력 검토

$Fs = \sigma_{hc} / \sigma_{hs}$

여기서, σ_{hs} : 말뚝의 주동파괴시 수평응력($\sigma_{hs} = (1-\sin\phi_s)/(1+\sin\phi_s)\cdot\sigma_s$)

σ_{hc} : 점토의 수동파괴시 수평응력($\sigma_{hc} = (1-\sin\phi_c)/(1+\sin\phi_c)\cdot(\sigma_c+2\cdot c_u)$)

σ_s : 깊이 z에서의 말뚝의 수직응력($\sigma_s = \sigma_o\cdot\mu_s + \gamma_s\cdot z$)

σ_c : 깊이 z에서의 점토의 수직응력($\sigma_c = \sigma_o\cdot\mu_c + \gamma_c\cdot z$)

σ_o : 성토체에 의한 하중 증가량

μ_s : 응력집중계수

μ_c : 응력저감계수

㉮ 안전율 범위(Fs) : 3.061 ~ 6.756

㉯ 최소 안전율 발생위치

- Dia. Ratio : 4.200 D
- 배수재 심도 : 6.300 m
- 원지반 심도 : 4.400 m

㉰ 판정 결과 : 3.061 > 3.000 ... O.K

② Bulging 검토 : Green Wood(1970)

$$q_{ult} = (\gamma_c \cdot z \cdot K_{pc} + 2 \cdot c_u \cdot \sqrt{K_{pc}}) \cdot \frac{(1+\sin\phi_s)}{1-\sin\phi_s}$$

여기서, γ_c : 점토의 단위중량

z : 복합지반의 깊이

K_{pc} : 점토의 수동토압계수($K_{pc} = (1+\sin\phi_c)/(1-\sin\phi_c)$)

c_u : 점토의 비배수 전단강도

ϕ_s : 말뚝의 내부마찰각

σ_c : 깊이 z에서의 점토의 수직응력($\sigma_c = \sigma_o \cdot \mu_c + \gamma_c \cdot z$)

σ_o : 성토체에 의한 하중 증가량

μ_c : 응력저감계수

$$Fs = \frac{q_{ult}}{\sigma_s}$$

여기서, q_{ult} : 말뚝의 극한지지력

σ_s : 깊이 z에서의 말뚝의 수직응력($\sigma_s = \sigma_o \cdot \mu_s + \gamma_s \cdot z$)

μ_s : 응력집중계수

㉮ 안전율 범위(Fs) : 3.061 ~ 6.365

㉯ 최소 안전율 발생위치

- Dia. Ratio : 4.200 D
- 배수재 심도 : 6.300 m
- 원지반 심도 : 4.400 m

㉰ 판정 결과 : 3.061 > 3.000 ... O.K

③ Bulging 검토 : Vesic(1972), Datye & Nagaraju(1975)

$$q_{ult} = (F_0' \cdot c_u + F_q' \cdot q_{avg}) \cdot \frac{1+\sin\phi_s}{1-\sin\phi_s}$$

여기서, c_u : 점토의 비배수 전단강도

ϕ_s : 말뚝의 내부마찰각

q_{avg} : 등가파괴심도에서의 평균(등방)응력($q_{avg} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_s)/3$)

따라서, $q_{avg} = (\sigma_c + 2 \cdot \sigma_c \cdot K_o)/3$을 적용한다.

F_q',F_c' : 말뚝 지름에 대한 팽창계수(공동확장계수)

$F_q' = (1+\sin\phi_c) \cdot (I_{rr}' \cdot \sec\phi_c)^{(\sin\phi c/(1+\sin\phi c))}$

$F_c' = (F_q' - 1) \cdot \cot\phi_c$

여기서, $\phi_c = 0$ 이면 $F_q' = 1$, $F_c' = \ln I_r + 1$

I_{rr}' : 감소강도지수($I_{rr}' = I_r / (1 + I_r \cdot \nabla \cdot \sec\phi_c) = \xi_v' \cdot I_r$)

체적변형율 ∇을 무시하고 $I_{rr}' = I_r$을 적용한다.

I_r : 강도지수($I_r = E_c / (2 \cdot (1+\nu_c) \cdot (c_u + q \cdot \tan\phi_c)$)

ξ_v' : 실린더형 공동의 체적변화계수

∇ :소성영역에서의 체적변형율

E_c : 공동확장이 발생된 주변 지반의 탄성계수

ν_c : 주변지반의 포아슨비

q : 파괴 지역 속의 평균응력(지반의 초기응력 + 상재하중)

따라서, $q = \sigma_c$를 적용한다.

σ_c : 깊이 z에서의 점토의 수직응력($\sigma_c = \sigma_o \cdot \mu_c + \gamma_c \cdot z$)

σ_o : 성토체에 의한 하중 증가량

μ_c : 응력저감계수

$$FS = \frac{q_{ult}}{\sigma_s}$$

여기서, q_{ult} : 말뚝의 극한지지력

σ_s : 깊이 z에서의 말뚝의 수직응력($\sigma_s = \sigma_o \cdot \mu_s + \gamma_s \cdot z$)

μ_s : 응력집중계수

㉮ 안전율 범위(Fs) : 3.623 ~ 7.117

㉯ 최소 안전율 발생위치

- Dia. Ratio : 13.800 D
- 배수재 심도 : 20.700 m
- 원지반 심도 : 18.800 m

㉰ 판정 결과 : 3.623 > 3.000 ... O.K

④ Bulging 검토 : Hughes & Withers(1975)

$$q_{ult} = (\sigma_{ro}' + 4 \cdot c_u) \cdot \frac{1+\sin\phi_s}{1-\sin\phi_s}$$

여기서, c_u : 점토의 비배수 전단강도

ϕ_s : 말뚝의 내부마찰각

σ_{ro}' : 프레셔미터에 의한 초기 방사상 유효응력($\sigma_{ro}' = K_o(\gamma_c \cdot z + p)$

p : 상재하중

따라서, $\sigma_{ro}' = K_o \cdot \sigma_c$

K_o : 정지토압계수($K_o = 1 - \sin\phi_c$)

σ_c : 깊이 z에서의 점토의 수직응력($\sigma_c = \sigma_o \cdot \mu_c + \gamma_c \cdot z$)

σ_o : 성토체에 의한 하중 증가량

μ_c : 응력저감계수

$$Fs = \frac{q_{ult}}{\sigma_s}$$

여기서, q_{ult} : 말뚝의 극한지지력

σ_s : 깊이 z에서의 말뚝의 수직응력($\sigma_s = \sigma_o \cdot \mu_s + \gamma_s \cdot z$)

μ_s : 응력집중계수

㉮ 안전율 범위(Fs) : 2.170 ~ 4.554

㉯ 최소 안전율 발생위치

- Dia. Ratio : 0.000 D
- 배수재 심도 : 0.000 m
- 원지반 심도 : -1.900 m

㉰ 판정 결과 : 2.170 < 3.000 ... N.G

⑤ 전단파괴 검토 : Wong(1975)

$$q_{ult} = 2 \cdot A_s \cdot (K_{pc} \cdot q_0 + 2 \cdot c_u \cdot \sqrt{K_{pc}}) + \frac{1}{K_{as}} \cdot \left[3 \cdot d_s \cdot K_{pc} \cdot \gamma_c \cdot \frac{1-(3 \cdot d_w)}{2 \cdot L} \right]$$

여기서, A_s : 말뚝의 단면적

c_u : 점토의 비배수 전단강도

q_o : 상재유효하중 (따라서, $q_o = \sigma_c$를 적용)

σ_c : 깊이 z에서의 점토의 수직응력($\sigma_c = \sigma_o \cdot \mu_c + \gamma_c \cdot z$)

σ_o : 성토체에 의한 하중 증가량

μ_c : 응력저감계수

K_{pc} : 점토의 수동토압계수

K_{as} : 말뚝의 주동토압계수

d_w : 말뚝의 직경

L : 말뚝의 길이

㉮ 안전율 범위(Fs) : 0.925 ~ 2.573

㉯ 최소 안전율 발생위치

- Dia. Ratio : 13.800 D
- 배수재 심도 : 20.700 m
- 원지반 심도 : 18.800 m

㉰ 판정 결과 : 0.925 < 3.000 ... N.G

⑥ 전단파괴 검토 : Barkdale and Bachus(1983)

$$q_{ult} = 0.5 \cdot \gamma_c \cdot B \cdot \tan^3(\Psi) + 2 \cdot c_u \cdot \tan^2(\Psi) + 2 \cdot (1 - a_s) \cdot c_u \cdot \tan(\Psi)$$

여기서, a_s : 치환율

c_u : 점토의 비배수 전단강도

μ_c : 응력저감계수

$\varnothing_s$: 말뚝의 내부마찰각

$\psi = 45 + \mathrm{ArcTan}(\mu_s \cdot a_s \cdot \tan\varnothing_s)/2$

㉮ 안전율 범위(Fs) : 3.317 ~ 5.977

㉯ 최소 안전율 발생위치

- Dia. Ratio : 13.800 D
- 배수재 심도 : 20.700 m
- 원지반 심도 : 18.800 m

㉰ 판정 결과 : 3.317 > 3.000 ... O.K

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구개발 목표의 달성도

1. 1차년도 연구개발 목표의 달성도

<표 4.1.1> 1차년도 연구개발 목표의 달성도(계속)

연구목표	달성도 (%)	내 용
•국내외 지반개량을 위한 다짐말뚝공법 현황조사, 문제점 및 한계성 분석과 대안 도출	100	•국내외 다짐말뚝공법 7개 현장사례 수집 및 분석 수행 •다짐말뚝공법 관련 기존이론 및 설계법 고찰 수행 - 설계절차, 치환율, 안정계산, 파괴 메커니즘 등 •기존 다짐말뚝공법에 대한 연구동향 분석 - 실내시험 및 수치해석을 통한 역학거동 파악 •기존 다짐말뚝공법의 한계성 분석 - 기능성(관입파괴, 전단파괴, 팽창파괴, 간극막힘현상)과 설계법(압밀중 응력분담, 물성치의 불확실성), 재료적 한계성(천연자원 고갈, 경제성 불리) 중심의 한계성 파악 •다짐말뚝공법의 대응책 제시 - 말뚝강성을 고려한 혼합재료 사용, 다공질 콘크리트말뚝공법 개발 필요 등
•순환골재를 활용한 다짐말뚝 건설재료의 지반개량현장 적용성 평가 및 특성 분석	100	•국내외 혼합재료 적용사례 분석 •혼합재료에 의한 지지력 특성 분석 - 다짐말뚝의 극한하중은 재료 내부마찰각, 점성토 전단강도에 크게 의존 - 재료특성에 따라 파라미터 변화만 고려 필요 (모래:쇄석=10:0~8:2 변화시 내부마찰각 증대, 이후 현저히 감소) - 현장재하시험을 통한 지지력 결정 필요 •혼합재료에 의한 압밀촉진효과 분석 - 혼합재료(모래, 쇄석)는 모래말뚝과 과잉간극수압 소산특성이 유사하게 나타남

<표 4.1.1> 1차년도 연구개발 목표의 달성도

연구목표	달성도 (%)	내 용
•순환골재를 활용한 다짐 말뚝 건설재료의 지반개량현장 적용성 평가 및 특성 분석	100	•순환골재를 활용한 다공질 콘크리트말뚝과 모래다짐말뚝 및 쇄석다짐말뚝 재료의 공학적 특성평가를 위한 실내시험계획 수립
•순환골재를 활용한 다공질 콘크리트 말뚝공법 개발 및 요소기술 분석	100	•순환골재 발생현황조사 및 재활용에 따른 경제성 분석 - 2003년 16백만 톤 중 9.5% 사용중, 2006년 순환골재 비용은 1/3~1/5 수준의 경제성을 확보함 •순환골재의 재료적 적용성 평가 - 순환골재 종류 평가 : 배합설계시 40mm 이하의 굵은골재 사용 - 순환골재 품질기준 평가 : 흡수율에 의해 밀도증가, 내구성 저하 •순환골재를 활용한 다공질 콘크리트말뚝의 역학특성 및 투수특성 평가 - 예비실험 : 단위중량 2회, 물-시멘트비 3회 등 총 12회 수행 - 본실험 : 총 144회 수행 - 역학적 특성은 단위중량에 영향을 받지 않으며, 물-시멘트비의 영향을 더 받음 - 투수특성은 단위중량, 물-시멘트비의 영향을 받지 않고 일정한 값을 나타냄
•순환골재를 활용한 지반개량체로 개량된 연약지반의 거동특성 규명을 위한 실내모형토조 제작 및 수치해석의 수행	100	•원형토조 압밀실험장치 제작 및 예비실험 - 토조 : 직경×높이 = 480×480mm - 가압판 : 직경×두께 = 480×35mm - 수직도를 위한 케이싱 제작 •실내모형토조 실험장치 제작 및 예비실험 - 토조 : 가로×세로×높이 = 0.75×0.15×0.7m - 진동압입이 가능한 말뚝 조성용 유압실린더 제작 - 수직도를 위한 케이싱 제작 •순환골재를 이용한 다공질 콘크리트말뚝의 역학적 물성치 고찰 및 결정 •원형토조 압밀시험 및 실내모형토조 실험에 대한 수치해석 수행 - 다차원 축대칭 압밀해석 수행 - 복합지반의 응력분담 특성 예측(시간에 따른 침하, 과잉간극수압, 유효응력 변화)

2. 2차년도 연구개발 목표의 달성도

<표 4.1.2> 2차년도 연구개발 목표의 달성도(계속)

연구목표	달성도(%)	내 용
•친환경 지반개량을 위한 건설재료로써 순환골재의 활용을 위한 품질기준 제시	100	•예비시험 : 주도시험 4회, 플로우 시험 4회, 슬럼프 시험 3회 수행(W/C=25, 27.5, 30%) •본시험 : 시험별 공시체 제작 18개 (W/C=25, 30, 35%, P/G=24, 32, 42%) - 압축강도시험 18회 수행을 통한 강도특성 평가 - 투수시험(ø150×h300, ø100×h200) 36회 수행을 통한 투수특성 평가 - 공극률시험(ø150×h300, ø100×h200) 36회 수행을 통한 공극률 평가 •최적배합비 결정 : W/C=30% 이상, P/G=24% 이상 선정 •건설폐기물 관련 제도 현황, 순환골재 관련 제도 현황 조사 •다공질 콘크리트용 순환골재 품질기준 제시 - 절대건조밀도 2.2g/cm^3 이상 - 흡수율 7.0% 이하 / 안정성 12% 이하
•순환골재 다공질 콘크리트말뚝과 혼합재료를 배합한 다짐말뚝의 지반개량효과 검증 및 문제점 분석	100	•치환율(15, 35, 60%)에 따른 삼축압축시험(CIU) 9회 수행을 통한 다공질 콘크리트말뚝과 혼합재료를 이용한 말뚝의 강도특성 평가 •치환율에 따른 강도정수(c, $ø_{cu}$) 평가 - 개발공법 : c≒580kPa, ø=19~34° - SCP 공법 : c=4~18kPa, ø=27~35° •순환골재를 활용한 다공질 콘크리트말뚝의 장래 발생량 예측을 통한 경제성 평가 •개발공법의 건설신기술 적용계획 초안수립

<표 4.1.2> 2차년도 연구개발 목표의 달성도(계속)

연구목표	달성도(%)	내 용
•연약지반의 공학적 안정화를 위한 순환골재를 활용한 친환경 지반개량공법의 개발	90	•원형토조 압밀실험 7회 수행 •침하량, 과잉간극수압, 연직응력증분 분석을 통한 압밀촉진효과 평가 •복합지반의 응력분담 특성 예측(응력분담비, 압밀도) - 말뚝파괴전 응력분담비 n은 파괴후 대비 2배 이상 수준, 압밀도는 이론해보다 느리게 거동 •다공질 콘크리트말뚝과 SCP에 대한 각각 5가지 수치시뮬레이션 수행 - 치환율 5, 10, 25, 30, 40%
•순환골재 활용한 다공질 콘크리트 말뚝공법으로 개량된 연약지반의 안정화 평가 및 최적설계 기준 제시	90	•모형토조실험 4회 수행 •지표침하량, 지표융기량, 연직응력증분 및 과잉간극수압 변화 양상 분석 •하중재하에 의한 변형거동 및 전단보강효과 규명 - 하중재하 말뚝 : 연직응력증분 발생 - 하중미재하 말뚝 : 연직응력증분 미발생 •모형토조실험에 대한 수치시뮬레이션을 통한 안정성 평가 - 치환율 : 5, 10, 25% - 안전율 : 1.213~1.890
•현장장비 적용성 및 경제성 분석, 현장시험시공 계획 수립	100	•기존 시공장비(SCP 시공장비 및 무진동 무소음 다짐말뚝장비)에 대한 적용성 검토 •장비 적용성 및 타설용이성 검토를 위한 총 3공의 현장시험시공 수행 - 무다짐공 2공(⌀400mm) - 다짐공 1공(⌀700mm) •현장시험시공을 위한 부지조사 수행 - 인천 송도국제도시 OO공구 - 전남 영암 OO 부지조성공사 •장비 및 투입비용 산출을 통한 경제성 검토 •개발공법에 대한 단가산출서 작성 및 기존다짐공법과의 경제성 비교(11~15% 감소)

<표 4.1.2> 2차년도 연구개발 목표의 달성도

연구목표	달성도(%)	내 용
•현장장비 적용성 및 경제성 분석, 현장시험시공 계획 수립	100	•현장시험시공 규모 산출 - 시험시공 규모 : 74×16m - 양생일별 품질확인용 4공 - 개발공법(치환율 2종) / GCP / SCP 각각 3×3공, 총 36공 •현장시험시공 비용산출 - 각종 재료비, 시공비 및 부대비용 등 비용산출 (직접비 162,000천원) - 지반조사 및 품질/개량확인시험 비용산출 (직접비 60,500천원) - 지표침하판, 토압계, 경사계 등 계측 비용산출 (직접비 55,000천원)

3. 3차년도 연구개발 목표의 달성도

<표 4.1.3> 3차년도 연구개발 목표의 달성도(계속)

연구목표	달성도(%)	내 용
•순환골재 및 다공질 콘크리트말뚝공법의 현장 적용성 및 시공성 평가	100	•순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 시험시공 수행 - 다공질 콘크리트말뚝공법(치환율 10%, 30%), GCP 공법(치환율 30%), SCP 공법(치환율 30%)에 대하여 4개 구간 총 64공 타설 - 직경 ø700mm, 타설깊이 15m - 쇄석층 0.7m, 성토 4.7m 등 총 5.0m 재하성토 - 2009.4~2009.10(총 6개월간 수행) •순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 개량효과 판정을 위한 계측 수행 - 간극수압계(GL.-5m, GL.-8m) - 지표침하판(말뚝) - 층별침하계(지표면, GL.-5m, GL.-8m) - 토압계(원지반, 말뚝) - 지중경사계 및 지하수위계 - 자동계측방식 적용(2시간 간격 데이터 수령) - 2009.4~2009.10(총 6개월간 수행) •기존 다짐말뚝공법의 사례와 비교 분석하여 개발공법의 시공성 및 개량효과 평가 - 계측결과 분석을 통한 개발공법과 기존 다짐말뚝공법간의 시공성 및 개량효과 검토
•현장에 시공된 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 재료적 품질확인 시험 및 분석	100	•순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 코아 채취 및 역학시험에 의한 품질확인 - 현장시험시공 구간에 대한 다공질 콘크리트말뚝의 코아 채취 및 압축강도시험 수행 •연약지반의 시료채취 및 역학시험에 의한 개량효과 확인 - 현장시험시공 구간에 대한 사전조사 및 확인조사를 통한 시료채취 및 물성·역학시험 수행 •순환골재 다공질 콘크리트말뚝에 사용된 순환골재의 품질시험 기준안 정립 - 현장시험시공시 사용된 순환골재에 대한 품질기준안 정립

<표 4.1.3> 3차년도 연구개발 목표의 달성도

연구목표	달성도(%)	내 용
•순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법으로 개량된 연약지반 개량효과, 안정성 평가 및 최적 설계기준 제시	100	•원형토조 압밀실험을 통한 연약지반 개량효과 검토 - 다공질 콘크리트말뚝 : 치환율 5%, 7.5%, 10% ▸하중재하 단계에 따른 치환율별 침하량, 과잉간극수압, 연직응력 증분 검토 ▸시간경과에 따른 치환율별 복합지반의 응력분담비 변화 검토 - GCP 말뚝 : 치환율 5%, 10% ▸하중재하 단계에 따른 침하량, 과잉간극수압, 연직응력 증분 검토 ▸시간경과에 따른 복합지반의 응력분담비 변화 검토 - 수치해석을 통한 모형실험 결과와의 비교 검토 •모형토조실험을 통한 안정성 평가 - 다공질 콘크리트말뚝 : 치환율 5%, 7.5%, 10% ▸하중단계에 따른 치환율별 침하량, 지표융기량, 지반변위 양상, 연직응력 증분 검토 ▸치환율별 시간에 따른 과잉간극수압 검토 ▸치환율별 응력분담비 및 침하저감계수 검토 - 수치해석을 통한 모형실험 결과와의 비교 검토 •다짐말뚝의 점토혼입 양상에 관한 모형실험 수행 - RAPP, SCP, GCP, Sandy GCP 검토(치환율 10%) - 상재하중에 의한 점토혼입 양상 검토 - 원지반 구속에 의한 점토혼입 양상 검토
•순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 최적 설계프로그램 개발 및 제반기준 제시	100	•순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법의 설계정수 결정 및 설계프로그램 개발 - 실내역학시험결과를 고려한 설계정수 결정 - 순환골재 다공질 콘크리트말뚝공법에 대한 설계프로그램 개발(RAPP ver. 1.0 for Windows) •개발공법의 합리적 시공방법, 성능평가 기준 제시 - 다공질 콘크리트말뚝공법 시방서, 단가산출서 작성 및 기존 다짐말뚝공법과의 경제성 비교

제 2 절 관련분야에의 기여도

1. 기술적 측면

본 기술은 건설폐기물로부터 얻은 순환골재의 새로운 적용분야를 확장·개발하는 것으로써 건설폐기물의 재활용 효과를 극대화시키는 효과를 얻을 수 있다. 즉, 순환골재를 이용하여 단순한 건설재료를 제작하는 기존의 기술을 확장하여 연약지반개량분야의 다짐말뚝재료로 적용시킬 수 있는 체계적이고 정량적인 새로운 설계·관리지침을 확립할 수 있다.

천연자원 적용으로 인한 골재부족으로 건설현장의 애로사항을 해결할 수 있는 효과를 얻을 수 있으며, 친환경공법의 기술개발을 통한 산학연 협력을 강화할 수 있다.

또한 기존의 연약지반개량의 다짐말뚝 기술에 순환골재와 다공질 콘크리트를 도입함으로써 기존의 다짐말뚝 기술의 치명적인 기능적 한계성(관입파괴, 전단파괴, 팽창파괴, 간극막힘현상 등), 설계법의 한계성(압밀중 응력분담, 물성치의 불확실성 등), 재료적 한계성(천연자원 고갈, 순환골재에 비해 경제성 불리 등)을 해결하는 혁신적 기술개발 효과를 얻을 수 있다.

2. 사회·경제적 측면

최근 우리나라에서는 국가 경쟁력 향상의 전략 중 하나로 항만공사와 배후단지 조성을 위한 국토개발 건설사업에 주력하고 있어 막대한 양의 건설재료의 수급이 요구되고 있으나 천연자원의 고갈과 환경파괴 문제로 인한 문제점이 대주되고 있는 실정이다.

이에 본 개발기술은 건설 폐기물을 재활용한 새로운 건설재료의 개발로 건설비용 절감이라는 경제적 효과와 지구의 환경파괴문제 저감이라는 일석이조의 효과를 얻을 수 있다.

최근 5년간의 국내의 지반개량공법 분야에 발주된 금액은 1조 3천억원으로서 이 중 다짐말뚝 공법은 약 35%를 차지하고 있어 약 4천 6백억원의 시장 규모를 형성하고 있다. 이 중 골재비용(재료:시공비=3:7)은 약 1천 4백억원 정도로 이것을 순환골재 재료로 대체할 경우 재료비의 70%를 절감(대한건설순환자원협회 자료참고, 2006)할 수 있을 것으로

판단되어 5년 기준으로 약 1천억원의 절감효과가 있을 것으로 판단된다. 이는 본 공법의 100% 적용시 연간 200억원의 건설비 절감효과로 이어진다.

또한, 건설폐기물 처리비용의 감소로 이어져 건설비 절감효과는 극대화될 것으로 보인다. 건설비용 절감에 대한 효과는 본 연구과제를 수행함에 따라 더욱 상세한 현황분석 및 재료비 산출근거를 바탕으로 추가적인 결과를 도출할 계획이다.

골재비용 약 1천 400억원은 930만m^3의 골재사용량에 해당하며, 단위중량 2.0tf/m^3 적용시 순환골재 사용량은 1,860만톤에 해당한다. 이는 본 공법의 100% 적용시 연간 370만톤의 순환골재 소비로 이어지며, 순환골재 발생량의 약 22%에 해당하는 규모이다.

3. 타 산업에 미치는 효과

본 개발공법은 공학적으로는 “연약지반개량을 위한 다짐말뚝분야”지만 재료적 특성으로 본다면 “건설폐기물의 순환골재 활용”이라는 제2의 산업과의 연계성이 뚜렷한 성격을 가진다. 최근 건교부 관계자는 국회 세미나에서 건설폐기물 재활용사업의 활성화에 대한 주제발표를 가졌으며 대한주택공사에서는 2004년부터 건설폐기물 재활용 세미나를 개최해 오고 있을 정도로 근래에 들어 건설폐기물의 재활용, 순환골재의 가치자원화에 대한 사회적, 정책적 관심이 상승하고 있는 실정이다. 그러나 관심의 상승만으로는 탁상공론이나 1회성의 논란주제로 끝나기 쉬워 현실적인 순환골재의 활용처와 적용 장소가 절실히 요구되고 있다. 현재는 일정 공공공사에서 도로포장의 보조기층재로 사용되고 있어 그 적용요소가 매우 한정적이라 하겠다.

본 연구결과를 통해 순환골재의 활용이 연간 500억원 가량의 연약지반 개량공사로 확대될 수 있어 순환골재 생산 산업 및 건설폐기물 처리사업의 활성화가 기대되며 아울러 골재의 처리 및 운반에 필요한 물류산업에도 일조할 수 있을 것으로 예상된다.

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

제 1 절 개요

국내는 물론 국외에서도 다짐말뚝과 관련된 기술 및 공법은 예전부터 연구되어 왔으나 본 개발연구의 핵심은 “순환골재의 새로운 활용요소”라는 측면에서 그 가치가 매우 높다. 현재 국내 및 국외에서도 본 공법과 같이 순환골재를 활용한 다짐말뚝 사례는 없으며 시험시공 사례도 없는 것으로 조사되었다.

이에 본 연구의 최종적인 목표는 공법의 실용화 및 가치화이며 이를 위해 국내외 특허 및 신기술 등록을 통해 토목분야 원천기술로서의 가치를 높이고자 한다. 이를 위한 구체적인 활용방안으로 순환골재를 재활용한 지반개량공법으로의 건설신기술을 신청하고, 설계용역에 적극반영하고, 개발기술의 전문시공협회 조직, 개발기술의 국내외 홍보, 기술교류 확대방안 수립 및 현장 적용 시스템 구축 등을 수립할 것이다.

제 2 절 연구결과 활용계획

국내는 물론 국외에서도 다짐말뚝과 관련된 기술 및 공법은 예전부터 연구되어 왔으나 본 개발연구의 핵심은 순환골재의 새로운 활용요소라는 측면에서 그 가치가 매우 높다.

현재 국내 및 국외에서도 본 공법과 같이 순환골재를 활용한 다짐말뚝 사례는 없으며 시험시공 사례도 없는 것으로 조사되었다.

이에 본 연구의 최종적인 목표는 공법의 실용화 및 가치화이며 이를 위해 국내외 특허 및 신기술 등록을 통해 토목분야 원천기술로서의 가치를 높이고자 한다.

본 연구개발결과 성공시 순환골재 사용처는 발생량의 22%(연간 370만톤) 활용으로 천연골재 채취에 따른 민원문제를 해결할 수 있으며, 건설공사는 재료를 70%를 절감하여 5년간 1,000억원의 절감효과가 있을 것으로 판단된다.

1. 개발공법의 건설신기술 적용계획 수립

가. 건설신기술의 개념

국토해양부에서 운영하고 있는 신기술지정제도는 민간에서 개발한 건설신기술을 지정·보호함으로써 기술을 개발한 기업에 어느 정도의 인센티브를 주어 민간업체의 기술개발 의욕을 고취시킴으로써 국내 건설기술의 발전을 도모하고 국가경쟁력을 제고하기 위해 1989년 건설신기술관리법 제18조를 신설하여 1990년부터 현재까지 본격적으로 운영하고 있다.

또한, 신기술이라함은 건설기술관리법에 의하면 “국내에서 최초로 개발한 건설기술 또는 외국에서 도입하여 소화·개량한 것으로서 국내에서 신규성, 유일성, 진보성이 있다고 판단되는 건설기술에 대하여 이를 개발한 자의 요청이 있을 경우로서 당해 기술의 보급이 필요하다고 인정되는 경우에는 당해 기술을 새로운 건설기술(이하 신기술이라고 한다.)로 지정, 고시할 수 있다.” 라고 규정되어 있다.

나. 건설신기술 지정절차

신기술업무 처리절차는 신청, 심의, 지정 및 사후관리단계로 이루어진다. 신기술을 개발 또는 개량한 자(신청자)가 신청서류를 작성하여 국토해양부에 제출하면 국토해양부에서는 요건심사를 하여 심사결과 하자가 없는 경우 관계기관 의견조회 및 공고를 하게 된다. 공고기간(30일 이상) 중 이해관계자는 이해관계자임을 증명할 수 있는 서류를 제출한다. 국토해양부에서는 이러한 의견서를 취합하여 한국건설교통기술평가원(이하 건기평이라 한다.)으로 신청서를 이송하게 된다.

건기평은 전문기관으로서 의견서를 검토한 후, 건기평의 신기술센터는 심의업무를 주관하여 신기술 심의를 위한 심사위원회를 개최하고 그 결과를 국토해양부 장관에게 보고한다. 국토해양부 장관은 최종결정을 하며 지정된 신기술에 대해 관보에 고시함과 동시에 신기술 지정증서를 발급한다.

신기술 지정업체는 신기술의 내용을 건기평 건설신기술 정보마당에 등록하고, 개선권고사항에 대한 보완, 진행여부 및 활용실적을 제출해야 하며, 국토해양부 장관은 지정사항의 변경, 신기술 등록내용 관리, 신기술 지정취소 등 사후관리를 실시한다.

다. 신기술 신청 계획

본 개발공법에 대해 현장시공 및 관련실험을 추가적으로 실시하여 설계기준의 보완 및 실시공 사례 분석을 통한 개발공법의 지반개량특성을 보다 명확하고 구체적으로 규명하고자 한다.

향후 연약지반개량시 설계에 반영하고, 추가적인 현장시공을 수행하여 장기간의 계측을 통한 충분한 계측자료의 확보 및 분석을 통해 본 개발공법의 공학적 특성을 확립하여 이를 토대로 건설신기술을 신청할 예정이다.

2. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝 공법 관련 기준 제안

본 연구개발 결과 도출된 다공질 콘크리트말뚝용 순환골재의 품질기준, 배합기준 및 설계기준 등 관련 기준들을 국토해양부(국토관리청, 해양항만청), 지식경제부 등 발주기관의 각종 공사시방서, 재료시방서 등에 시방 및 품질기준으로 제안할 예정이다.

<표 5.2.1>은 다공질 콘크리트말뚝용 순환골재의 품질기준(안)을 나타낸 것이다.

<표 5.2.1> 다공질 콘크리트말뚝용 순환골재의 품질기준(안)

구 분		단 위	순환굵은골재	비 고
절대건조밀도		g/cm^3	2.2 이상	
흡수율		%	7.0 이하	
마모감량		%	40 이하	
입자모양판정 실적율		%	55 이상	
알카리 골재 반응		-	무해할 것	
점토 덩어리량		%	0.2 이하	
안정성		%	12 이하	
이물질 함유량	유기 이물질	%	1.0 이하(용적)	
	무기 이물질	%	1.0 이하(질량)	

① 순환골재를 사용할 경우에는 담당원의 승인을 받아야 하며, 천연골재와 혼합하여 사용하는 것을 원칙으로 한다.

② 순환골재를 계량할 경우, 1회 계량 분량에 대한 계량오차는 ±4%로 한다.

③ 사용하는 순환굵은골재 최대치수는 19~40mm로 하며, 최대치수는 40mm로 한다.

④ 순환골재를 사용하여 콘크리트를 제조할 때 사용하는 시멘트는 KS L 5201(포틀랜트 시멘트)을 사용한다.

<표 5.2.2>는 일반 순환골재와 다공질 콘크리트말뚝용 순환골재의 품질기준을 비교한 것으로 흡수율에서 일반 순환골재에 비해 적용기준을 완화되었다.

<표 5.2.2> 순환골재의 품질기준 비교

구 분	순환굵은골재	순환잔골재	RAPP용
절대건조밀도(g/cm^3)	2.5 이상	2.2 이상	2.2 이상
흡수율(%)	3.0 이하	5.0 이하	7.0 이하
마모감량(%)	40 이하	-	40 이하
입자모양판정실적률(%)	55 이상	53 이상	55 이상
안정성(%)	12 이하	10 이하	12 이하

또한, 다공질 콘크리트말뚝용 순환골재의 시험규격(안)에 대해 다음과 같이 제안하고자 한다.

다공질 콘크리트말뚝용 순환골재 시험규격(안)

1. 적용범위

이 규격(안)은 다공질 콘크리트용 말뚝으로 사용되는 폐콘크리트(1)로부터 생산된 순환굵은골재에 대하여 규정한다.(2)

주(1) 기존 콘크리트 구조물의 철거로부터 얻어지는 콘크리트 또는 파괴된 콘크리트

(2) 재생골재에 천연골재가 혼합되어 있는 경우, 혼합골재는 각각의 규격을 만족하여야 한다.

비고 이 규격에서 사용하는 체의 호칭 치수는 KS F 2523에 규정한 것이다.

2. 인용규격

다음에 나타내는 규격은 이 규격에 인용됨으로써 이 규격의 규정 일부를 구성한다. 이러한 인용규격은 그 최신판을 적용한다.

KS A 3101 샘플링 검사 통칙
KS A 5101 시험용 체
KS F 2405 콘크리트용 압축강도 시험 방법
KS F 2501 골재의 시료 채취 방법
KS F 2502 골재의 체가름 시험 방법
KS F 2503 굵은골재의 밀도 및 흡수율 시험 방법
KS F 2508 로스엔젤리스 시험기에 의한 굵은골재의 마모 시험 방법
KS F 2523 골재에 관한 용어의 정의
KS F 2527 콘크리트용 부순 골재

3. 일반적 성질

3.1 순환골재는 알맞은 입도를 가지며 유기 불순물 등 콘크리트의 품질에 나쁜 영향을 미치는 해로운 양의 물질을 함유하지 말아야 한다.

4. 물리적 성질

4.1 순환굵은골재의 물리적 성질은 <표 1>과 같다.

<표 1> 순환골재의 물리적 성질

종 목 / 항 목	순환굵은골재
흡수율(%)	7.0 이하
절대건조밀도(g/cm^3)	2.2 이상
마모감량(%)	40 이하
입자모양 판정 실적율(%)	55 이상

5. 입도

5.1 순환골재의 입도는 <표 2>의 범위를 표준으로 한다.

<표 2> 순환골재의 입도

체를 통과하는 질량 백분율(%)			
골재의 종류	체의 호칭치수[3](mm) / 체의 크기(mm)	40	20
순환굵은골재	40	100	-
	20	-	0

주 [3] 여기에서 체는 각각 KS A 5101에 규정한 표준 망체 37.5mm, 19mm에 해당된다.

6. 시료채취 및 시험방법

특별한 규정이 없는 한, 다음 방법에 따라 시료를 채취하고 시험해야 한다. 시험은 시험규정에 맞고, 또 다공질 콘크리트에 사용될 입도에 맞는 대표적인 시료에 대하여 한다.

6.1 시료채취방법 KS F 2501에 따른다.
6.2 입도시험 KS F 2502에 따른다.
6.3 절대건조밀도 및 흡수율 시험 KS F 2503과 KS F 2504에 따른다.
6.4 입자모양 판정 실적율 시험 KS F 2527에 따른다.
6.5 압축강도시험 KS F 2405에 따른다.
6.6 마모감량시험 KS F 2508에 따른다.

7. 검사

검사는 KS A 3101 또는 당사자 간의 협정에 따른 로트의 크기를 결정하고, 합리적인 샘플링 검사방법에 따라 시료를 채취하여 6.의 시험방법으로 시험하고, 4.~5.의 규정에 적합한 것을 합격으로 한다.

8. 표시

다공질 콘크리트용 순환골재의 납품서에는 다음 사항을 표시하여야 한다.

a) 명칭 및 종류

보기 다공질 콘크리트용 순환굵은골재 1종

- 콘크리트용 순환골재의 흡수율에 의한 분류
- 콘크리트용 순환골재의 종류

b) 제조자명 또는 채취장소

c) 출하 연월일

d) 질량 또는 부피

e) 납품 장소명

9. 보고

생산자는 구입자로부터 요구가 있을 경우에는 시험성적서를 제출하여야 한다.

다공질 콘크리트말뚝공법의 시방기준을 다음과 같은 형식으로 국토해양부, 지식경제부 등 발주기관에 제안하는 방안을 진행하고 있다.

예) 도로공사 표준시방서

제 4 장 지반개량공사

4-1 연약지반개량공사 적용범위

4-2 토목섬유 매트깔기공

4-3 샌드매트 포설공

4-4 연직배수공

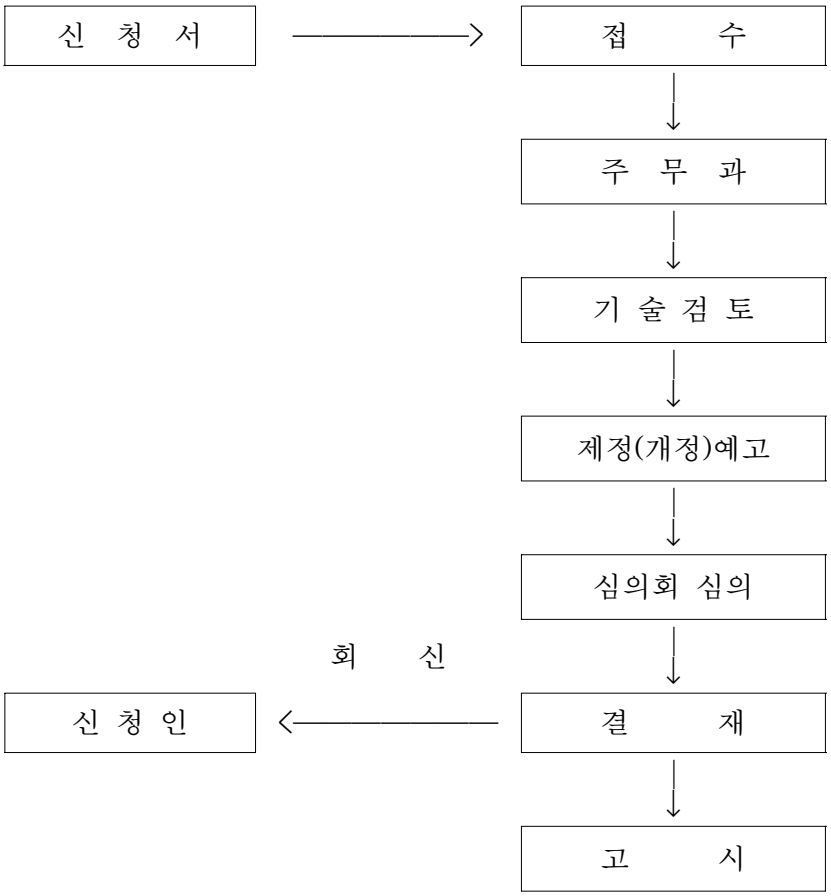
4-5 샌드콤팩션 파일공

4-6 혼합처리공

4-7 다공질 콘크리트말뚝공(3장 7절 p.487~498 참조)

1. 일반사항
2. 재료 및 장비
3. 배합설계 및 시험시공
4. 시공

위와 같은 다공질 콘크리트말뚝 관련된 시험기준안 제정은 생산기반시설이 완비되어 제품으로 출하되기 전에 [다공질 콘크리트말뚝용 순환골재 시험(안)]을 지식경제부 기술표준원의 개발·관리업무 중에서 한국산업규격 토건(KS F) 분야에 표준개발협력기관(COSD)인 한국건자재시험연구원을 통하여 규격제정에 관한 일련의 업무를 다음의 <그림 5.2.1>의 절차에 따라서 진행할 예정이다.



<그림 5.2.1> 규격제정 신청절차

다공질 콘크리트말뚝공법 설계를 위한 설계정수 결정방법에는 <표 5.2.3>과 같은 시험들이 있으며, 각 실험을 통해 획득하는 설계정수 및 관련항목은 다음과 같다.

<표 5.2.3> 다공질 콘크리트말뚝공법 설계를 위한 설계정수 결정 방법

구 분		획득 설계정수	관련항목
기본물성시험		단위중량, 흡수율	제3장 제2절
실내배합시험	일축압축시험	일축압축강도	제3장 제2절
	투수시험	투수계수	제3장 제2절
실내역학시험	삼축압축시험	강도정수(c, ø)	제3장 제3절
실내모형실험	원형토조	응력분담비(n)	제3장 제4절
	모형토조		제3장 제5절

본 연구에서 위와 같은 실험들을 통해 다공질 콘크리트말뚝공법 관련 설계정수를 산정하였으며, <표 5.2.4>에 품질요구조건을 제시하였다.

<표 5.2.4> 다공질 콘크리트말뚝 설계기준

구 분	기준범위	비 고
말뚝강도	6~15kgf/cm^2	일축압축시험
투수계수	1×10^{-3}cm/sec 이상	투수시험
단위시멘트량	80~150kg/m^3	실내배합시험
물-시멘트비	1:0.2~1:0.4	

여기서, 물-시멘트비 및 단위시멘트량은 실내배합시험에서 제작한 공시체에 대한 일축압축시험, 삼축압축시험 및 투수시험을 통해 소요 말뚝강도를 확인하여 결정한다.

3. 개발공법의 적용한계 및 실용화 범위

본 개발공법은 연약지반개량을 위해 순환골재와 시멘트 페이스트를 배합하여 다공질 콘크리트 말뚝체를 형성하는 공법으로서, 지중에서 순환골재와 시멘트 페이스트와의 경화를 통해 말뚝체를 형성하기 때문에 자갈층 지반에서는 적용성이 떨어진다. 또한 현재 장비 상황을 고려해 볼 때 해상구간에서는 적용이 불가능하며, 육상구간에서만 적용이 가능한 실정이다. 따라서 본 개발공법의 적용 및 실용화는 육상구간의 점성토 연약지반 및 느슨한 사질토 지반을 대상으로 한다고 할 수 있다.

4. 현장적용 계획

<표 5.2.5> 국내 연약지반개량공사 현황(2008년~2009년, 초석건설산업)

공사명	수량(m)		평균 심도(m)
	SCP	GCP	
• F1 경기장 조성사업	-	324,010	17
• 송도국제도시 3공구 기반시설(3-2공구) 건설공사	173,541	-	22
• 송도 1공구 기반시설 1-2공구 건설공사	13,987	-	22
• 군산 조선소 도크 및 안벽축조공사	-	37,158	10
• 석문-가곡 도로건설공사	157,513	-	8
• 송도국제도시 진입도로 건설공사	164,505	-	24
• 고속국도 제 104호선 냉정-부산간 확장공사(제 3-2공구)	41,329	-	25
• 울산신일반산업단지 조성공사	4,254	103,772	15
• 고속국도 제104호선 냉정-부산간 확장공사(3-1공구)	82,002	-	25
• 송도국제도시 5-3공구 기반시설 건설공사	21,221	-	22
• 송도국제도시 5-1공구 기반시설 건설공사	223,347	-	24

<표 5.2.5>에 제시된 바와 같이 국내 연약지반 개량공사는 육상구간에서의 단지 및 도로에서 주로 이루어지고 있는데, 평균적인 개량심도는 대체적으로 약 20m 전후로 분포하고 있다.

이와 같이 현재 진행되고 있는 연약지반개량공사 현황파악을 통하여 향후 개발공법의 적용을 위한 계획수립을 진행하고 있다.

5. 연구성과 보급방안

추가적인 실내시험 및 현장시험을 통해 도출된 연구성과를 정리하여 시방기준 및 품질기준 제안, 설계반영, 학술회의 논문발표, SCI 논문 발표 및 홍보 Booth 설치, 관련 학술지에 기사 게재, 산학연 세미나 개최 등을 통해 연구성과의 대내외적인 보급에 노력할 것이다.

또한 개발기술의 전문시공협회 조직, 개발기술의 국내외 홍보, 기술교류 확대방안 수립 및 현장적용 시스템 구축 등을 수립할 것이다.

제 6 장 연구개발 과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 일본의 건설폐기물 재활용 현황 및 기술동향

일본은 환경문제에 국민적 관심이 높아지면서 1985년 7월에 “시가지토목공사 공중재해방지 대책요강”을 전면적으로 개정하여 신고 항목을 설치하고 잔토와 폐기물에 관한 처리 계획, 위탁 처리, 운반 경로, 운행 관리에 필요한 조치를 강구하였다. 한편 잔토 이외의 건설폐기물 대책은 1990년 2월 종합적인 건설폐기물 대책 연구회를 설치하여 환경청, 건설청, 통산성 등 8개 부처의 공동 법안으로 1991년 재활용법 및 건설부산물 적정처리 추진 요강 등을 제정하여 건설부산물 재활용을 추진하였다. 여기에는 건설폐기물에 관한 재활용 내용을 상세히 명시하고 있으며, 일본에서 추진하는 건설폐기물 대책의 3가지의 과제로써 부산물의 발생억제, 리싸이클 추진, 부산물의 적정관리라는 측면을 중점적으로 관리하고 있으며, 그 중에서 리싸이클의 추진에 더 많은 비중을 두고 있다.

일본은 덴마크에서 열린 제3차 RILEM 심포지엄에도 여러 편의 논문을 발표하였다. 이중 Kasai 는 일본에서 철거된 콘크리트의 재활용에 관한 현재 실태와 재활용 지침안을 제시하였고, 다른 연구자들 Kikuchi 등(1994), Yagishita 등(1994), Sano 등 (1994), Yanagi 등(1994)이 콘크리트의 재활용에 관한 논문을 발표하여 일본의 높은 재활용 관심도를 보여주었다. 이 이외에도 현재 일본에서는 많은 연구와 실용화가 이루어지고 있는 것으로 보고되고 있다. 1994년 4월에는 2000년을 목표로 한 “건설 부산물 대책 행동 계획(재활용계획 21)”을 발표하였으며 그 내용은 다음과 같다.

① 설계의 연구 등에 의한 철저한 발생원 규제
② 공사간의 정보 교환 등에 의한 최대한의 재활용 추진
③ 재활용이 곤란한 폐기물의 적정 처리 추진
④ 적극적인 기술개발 추진

이 계획은 2000년까지 건설 폐기물을 예측 발생량의 약 10% 감소시키고, 또한 아스팔트 콘크리트 덩이, 콘크리트 덩이의 재활용율을 1990년의 50%에서 90%로, 건설폐기물 전체의 재활용 율을 42%에서 80%로 증가시키는 것을 목표로 하고 있다. 또한 목표를 달성할 경우에는, 현재와 비교하여 재생 쇄석의 사용량을 연간 4,000만톤(덤프 330만대 분) 증가시킴으로 자연산 쇄석 사용 절감 등의 효과를 기대하고 있다.

제 2 절 유럽의 건설폐기물 재활용 현황 및 기술동향

일본과 함께 건설폐기물의 재활용이 잘 추진되고 있는 나라가 독일이다. 독일의 경우 일찍부터 건설폐기물에 대한 재활용 촉진대책을 마련하여 시행하였다. 1951년에는 폐벽돌 재활용기준을 고시하여 폐벽돌을 콘크리트골재로 재활용하는데 기여하였다. 서독의 연방통계국의 발표에 따르면 1987년 발생한 산업 및 특수폐기물(Special Waste)은 약 2억 600백만톤이고 이중 건설업과 관련한 토사, 건설폐기물이 1억 2,000만톤으로 가장 많아 전체의 60% 정도를 점유하고 있다. 산업별 폐기물 발생량에서 건설업이 차지하는 비율은 1977년 54.2%, 1982년 59.3%, 1987년 53% 등으로 항상 50% 이상이었다.

독일의 Schulz는(1988년) 독일의 폐콘크리트 재활용에 관한 논문을 발표하였고, 네덜란드의 Hendricks와 함께 벽돌 파쇄 재료를 재활용하는 연구를 공동 수행하였다. 콘크리트와 달리 파쇄 벽돌로부터 얻어진 골재는 그 특성이 다르다. 따라서 그것의 재활용에 따른 연구는 별도로 취급되었다. 여기서 말하는 벽돌이란 건물의 벽체 재료로 사용된 벽돌, 시멘트 벽돌, 경량 벽돌, 붉은 벽돌 등을 모두 포함하며 경우에 따라서 타일 부스러기도 포함된다. 그들은 결론에서 독일이나 네덜란드에서 벽돌 파쇄 재료를 콘크리트용 재료로 사용할 수 있도록 규정하고 있으나, 사용되는 재료의 다양성 때문에 철저한 시험을 거쳐야 한다고 언급하였다. 또한 그는 독일에서 건물 파쇄물을 콘크리트용 골재로 사용하는 과정을 소개하였다. 독일의 “DIN 4226 Part 2”는 벽돌 재활용 재료에 불순물 한계치를 규정하고 있다. 벽돌 재활용 콘크리트 단위 중량은 경량 콘크리트와 보통 콘크리트의 중간 정도로 측정되었으며, 수축계수와 크리프가 큰 것으로 나타났다. 1989년 통독 후에는 구동독 지역의 개발과 함께 이 지역으로부터 건설폐재 발생량이 급격히 증가하였다. 통일 후 독일 연방정부는 1990년 “건설폐기물 억제를 위한 목표 결정안”을 마련하여 건설폐기물의 재활용 대책을 강구하였다. 이 대책의 내용을 보면 재활용의 촉진을 위하여

시공자, 건설업자, 관청 등에서 해체 및 건설공사가 체계적으로 연계되도록 하였으며 폐기물의 감량 목표를 설정하여 이의 달성에 역점을 두었다.

다른 유럽국가들의 건설폐기물 재활용 현황을 보면 영국의 Nixson(1978)은 RILEM 기술위원회 1차 회의 위임으로 콘크리트 재활용에 관한 논문을 Material and Structure에 게재하였다. 여기에서 그는 그간의 여러 연구를 몇 가지 분야로 구분하여 항목별로 분류하였다. 그는 2차대전 직후 1946년 구소련의 Glushge의 연구와 1946년 독일의 Graf의 연구를 최초의 콘크리트 재활용 사례로 소개하고 있다. 2차 대전 직후 당시의 문헌에 의하면 각종 벽돌이 건축물 재료로 가장 널리 사용되었음을 Nixon(1978)은 기술하고 있다. 하지만 당시에는 이 분야에 대한 깊이 있는 연구가 별로 없었고, 1970년대에 접어들면서 전후 또는 그 이전에 지은 노화된 콘크리트 구조물의 철거와 새로운 건설 물량의 증가와 일부에서의 미래 천연골재의 고갈에 대한 우려가 시작되면서 폐콘크리트를 골재로 사용하기 위한 관심이 증가되었다.

O'Mahony(1991)는 영국의 Milligan과 함께 파쇄 폐콘크리트의 재활용을 위한 연구를 수행하였다. Collins(1994)는 영국에서 해체 폐기물의 약 40%가 재활용되고 있으나 그중 대부분은 채움재 등과 같은 저급의 재료로 쓰이며 콘크리트 등과 같은 고급 재료로의 사용은 미약하다고 하였다. 그는 그 이유를 적절한 규정의 부족에 기인한다고 지적하였다. Wainwright 등(1994)은 재생 굵은골재와 잔골재를 사용한 재생 콘크리트의 성능을 고유동화재, Pulverised Fuel Ash(PFA) 및 천연모래를 사용하여 개선하는 연구를 수행하였다.

영국은 매년 2,000만톤 이상의 건설폐재가 발생되고 있으며 그 중 콘크리트가 50 ~ 55%, 폐벽돌이 30 ~ 40%에 달하고 있다. 현재 영국의 경우 대부분의 건설폐기물이 재생골재로 재활용되고 있으며 천연골재의 고갈, 자원 및 에너지 절약의 중요성이 재인식되면서 건설폐기물의 재활용이 증가되고 있다.

덴마크는 폐콘크리트를 1929년에 도로포장, 1959년에는 공항에서의 도로포장, 1969년에는 자동차용 도로포장에 활용하였다. 덴마크의 Hansen은 Narud와 1983년에 3편의 연구 논문을 발표하였다. 그 중 하나는 파쇄 콘크리트의 굵은골재로 만든 재생 콘크리트의 강도에 관한 연구이며 나머지 둘은 재생 콘크리트와 Silica Fume, 그리고 Fly Ash를 이용하여 Calcium Silicate 벽돌을 개발한 연구이다. 그는 Silica Fume을 첨가하여 상당한 압축강도의 증진을 얻었으며 Autoclave 양생방법을 사용하였다. Hansen의 다른 연구에서는 재생골재의 성질이 본래 콘크리트의 혼화제에 따르는 영향, 재생콘크리트의 탄성과 건조수축에 관한 연구, 토질의 개질 재료로써 파쇄 잔골재의 재활용에 관한 연구 등이 있다.

그 외에도 덴마크에는 많은 연구자들이 있다. 재활용 재료를 효율적으로 확보 할 수 있는 구조물 해체(Demolition) 방법에 관한 경험적 연구가 Lauritzen과 Jannerup(1994)에 의하여 수행되었다. 또 다른 Hansen(1994)은 벽돌 파쇄물을 전체 다 재활용하는 기술을 제시하였다. 그는 진흙 벽돌과 몰탈을 한꺼번에 900℃ 이상의 고온으로 가열하여 이를 칼슘 실리카질로 변화시켜 재활용에 사용하는 방법을 발표하였다. 이와 유사하게 진흙 벽돌을 다시 구워서 100% 재활용하는 연구를 Kristensen(1994)이 발표하였다. Gottfredsen과 Thogersen(1994)은 악조건 하에서의 콘크리트 재활용에 관한 연구에서 Fly Ash가 알칼리 반응 등을 저지시켜 준다고 보고하였다.

네덜란드의 Barth(1994)는 건설폐기물의 재활용에 따른 경제적, 사회적, 정치적인 면에서의 문제점 등을 기술하고 있다. 한편 네덜란드의 재활용 규정초안에는 종이, 플라스틱 등 불순물이 중량과 용적으로 1% 미만이어야 한다고 규정하고 있다.

프랑스에서는 1976년 파리근교의 자동차 도로 보조기층과 노반재에 사용된 이후 현재 파리지역에서는 일상적으로 사용되고 있다. Marlet와 Pimienta(1994)가 콘크리트의 역학적 특성과 물리·화학적 특성을 연구하였는데 그들은 특히 재생 콘크리트는 건조수축이 크며, 물의 이동과 탄산화(Carbonation)의 비율도 크다고 지적하였다.

제 7 장 참고문헌

1. 건설교통 전자정보관, www.codil.or.kr
2. 건설교통부 홈페이지, www.moct.go.kr
3. 건설교통부(2000), 도로설계편람(II), 건설교통부
4. 건설사업장의 폐기물 관리요령, 환경부, 1999
5. 건설폐기물의 자원화 및 처리 http://www.biocycle.org/indus/recycle_10.htm
6. 건설폐기물의 처리 및 재활용방안 연구(1), 대한주택공사 주택연구소, 1997
7. 국내 순환골재의 생산 및 활용현황 http://dongbang.bitdream.net/program/mun _data/
8. 군장국가산업단지(장항지구) 호안도로 축조공사 토질시험보고서 제 8권 복합지반 역학거동 특성분석
9. 김경수, 원심모형실험에 의한 모래다짐말뚝의 지지력 산정식 연구, 강원대학교 대학원
10. 김광우, 연규석, 박제선, 이봉학, 콘크리트 재활용 실태 및 연구동향,한국 콘크리트학회지, 제6권 6호, 1994
11. 김동환, 폐콘크리트용 고강도 시멘트질 몰탈의 개발에 관한 연구, 중앙대학교 건설대학원, 1996
12. 김무한, 김종흡, 건설산업 폐기물의 리싸이클링시스템 및 재활용 기술에 관한 연구, '94 건설교통부 연구개발사업 최종보고서,1997
13. 김무한, 재생골재 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 재생골재 혼합조건의 영향에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제5권 제1호, pp.16~25, 1993
14. 김문섭, 임경택, 윤현도, 정수영, 재생골재 콘크리트의 역학적 특성, 대한건축학회문집, 13권 9호, 통권 107호, 1997
15. 김상규 (1991), 토질역학 -이론과 응용-, 청문각
16. 김성인, 구자갑, 연약지반공학 -이론과 대책-, 과학기술
17. 김윤하, 연약지반상 청죽매트부설지반의 즉시침하량 추정, 전남대학교 대학원
18. 김인배, 이현주, 안진선, 폐콘크리트를 이용한 시멘트 벽돌로의 재활용, 한국폐기물학회지, 제 16호 제 1호, pp.22~28, 1999
19. 김팔규 등, 최신토질역학원론, 학연사
20. 김현성, 건설부산물의 배출량 원단위산정에 관한 연구, 중앙대학교 대학원, 1996

21. 김홍열, 채창우, 이세현, 양관섭, 재생골재를 사용한 시멘트벽돌의 제조 및 성능평가에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 제 12권 11호, 통권 97호, 1996
22. 대한건설순환자원협회(KORAS) 홈페이지, www.koras.org
23. 대한전문건설협회 홈페이지, www.ksca.or.kr
24. 대한주택공사, 재생콘크리트의 품질관리기반 조사분석 연구, 2003
25. 디지털 건설일보, www.cmnews.co.kr
26. 박재로, 건설폐기물 관리기법 연구(1), 첨단환경기술, 4(9), pp.117~123, 1996
27. 박태순, 김무일, 재생 콘크리트 골재 기층 및 보조기층의 성능 및 특성, 제 17권 제 Ⅲ-4호, pp.349-361, 1997
28. 배규웅, 폐콘크리트의 재생 및 재활용방안, 레미콘, 25, pp.26~35, 1993.
29. 서상교, 폐콘크리트로부터 얻은 재생미분말의 재활용 방안, 레미콘, 48, pp.12~16, 1996.
30. 서성원, 건축부산물의 배출량 예측에 관한 연구, 중앙대학교 대학원, 1995.
31. 시멘트계 심층혼합처리공법 DCM 설계와 시공 매뉴얼, (주)동아지질, pp.1.
32. 신희덕, 건설폐기물의 리싸이클 현황과 대책, 자원리싸이클링, 제 2권 제1호, 1993.
33. 유승경(2003a), 저치환율 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담거동에 대한 실험적 연구, 한국지반공학회 논문집, 제19권 제5호, pp.253~261. 2003
34. 유승경(2003b), 저치환율 SCP에 의한 복합지반의 압밀과정 중에 발생하는 응력분담거동과 그 메커니즘, 한국지반공학회 논문집, 제19권 제5호, pp.301~310, 2003
35. 유승경, 홍원표, 윤길림, 이영생, 모래다짐말뚝(SCP)에 의한 복합지반의 응력분담 및 거동연구, 한국지반공학회 연약지반 기술위원회 학술발표회, pp.97~108, 2003.
36. 유승경, 松井 保, 홍원표, 윤길림, 저치환율 SCP에 의한 복합지반의 응력분담 메커니즘에 관한 연구, 한국지반공학회 학술발표회, pp.197~202, 2004.
37. 유승경, 홍원표, 윤중만, 김태형, 저치환율 SCP에 의한 복합지반의 압밀도 평가에 관한 연구, 대한토목학회 정기학술대회, pp.1718~1721, 2004.
38. 유승경, 모래말뚝이 타설된 연약점토지반의 압밀정수결정에 관한 연구, 한국지반공학회 논문집, 제21권 제5호, pp.45~50, 2005.
39. 유승경, 조성민, 김지용, 심민보, 모래와 쇄석을 이용한 저치환율 다짐말뚝공법의 응력분담특성에 관한 비교 연구, 한국지반공학회 공동 학술대회 논문집, 2005.
40. 유승경 (2003), PBD에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 연구, 대한토목

학회 논문집, 제23권 제6C호, pp.399~406.

41. 유승경, 조성민, 김지용, 심민보(2005), “모래와 쇄석을 이용한 저치환율 다짐말뚝공법의 응력분담특성에 관한 비교 연구“, 한국지반공학회 공동 학술대회 논문집, pp.305
42. 유승경, 모래와 쇄석을 이용한 다짐말뚝공법의 응력분담특성, 명지전문대학 산업기술연구소 논문집, pp.63~71, 2005.
43. 유승경(2002), プラスチックボ-ドドレ-ンによる壓密促進効果の評価手法に關する硏究. 博士學位論文, 大阪大學.
44. 윤중수, 김영진, 지반공학분야에서의 폐기물 재활용기술, 토목, 46(8), pp.34~39, 1998.
45. 이문수 등, 연직배수 공법의 설계와 시공관리, 새론
46. 이봉학, 김광우, 박제선, 김진영, 재생 폐콘크리트의 성능 향상에 관한 연구, 콘크리트 학회지, 제7권 2호, pp. 136~145, 1995.
47. 이세현, 건설공사에서의 순환골재 재활용 기술과 정책현황, 대한토목학회지, 제54권 제4호, pp.135~140, 2006.
48. 이세현, 국내 건설폐기물 처리현황과 순환골재 정책의 문제점 및 개선방향, 한국건설기술연구원 보고서, 2004.
49. 이진용, 이인대, 김광우, 배성용, 재생 콘크리트의 강도발현 및 동결융해 저항성 특성, 콘크리트학회지, 제 10권 4호, 1998.
50. 이진용, 폐콘크리트의 재활용 기술, 토목학회지, 46(12), pp.11~16, 1998.
51. 장용채 등, 연약지반에서의 토질공학, 새론
52. 전성기 (1998), 실무자를 위한 연약지반 설계실무편람, 과학기술
53. 정경환, 김용완, 신민식, 한경태, 김재현, “울산신항 남방파제 기초의 DCM 공법 적용사례”, 한국지반공학회 준설매립기술위원회 학술발표회, 2007
54. 정두영, 건설잔토와 콘크리트 폐재의 처리대책, 토목, 제 45권 제 3호, 1997.
55. 정명채, 우리나라 건설폐기물 발생억제 및 재생이용기술에 관한 고찰, ttp://venus.Semyung.ac.kr/~jmc65, 2000/6/26.
56. 정철호(2006), 석재기둥보강 도로성토사면의 안정해석 기법, 대한토목학회지 제54권 제1호, pp79~89.
57. 조윤선, 산처리에 의한 폐콘크리트로부터 골재분리에 관한 연구, 중앙대학교 대학원, 1994.
58. 콘크리트 리사이클링에 대한 해외동향 http://www.krmcia.or.kr/data/tech_ 17. hwp.

59. 콘크리트의 재활용, 한국콘크리트학회, pp.199~223, 2004
60. 토목공법연구회 역, 지반개량공법-조사•설계•시공, 창우출판
61. 특허청 홈페이지, www.kipo.go.kr
62. 폐콘크리트 및 아스팔트를 재활용한 농어촌 도로포장 공법의 개발(1), 농림수산부, 1995.
63. 폐콘크리트의 재활용기술 개발방안에 관한 연구, 한국자원재생공사, 1996.
64. 한국지반공학회(1997), 연약지반, 한국지반공학회, 구미서관
65. 한국지반공학회(1997), 구조물기초설계기준, 한국지반공학회, 구미서관
66. 한국지반공학회(2002), 구조물기초설계기준, 한국지반공학회, 구미서관
67. 한국지반공학회(2003), 구조물기초설계기준해설, 한국지반공학회, 구미서관
68. 한국지반공학회(2004), 기초 연구 및 기술동향, 기초기술위원회, p.238~241, 2004
69. 한국 콘크리트학회 홈페이지 http://www.kci.or.kr
70. 해양수산부 홈페이지, www.momaf.go.kr
71. 해양수산부(2001), 모래다짐말뚝과 쇄석말뚝의 설계 및 시공 지침서, 해양수산부
72. 환경부 홈페이지, www.me.go.kr
73. Bergado DT and Lam, FL, Full Scale Load Test of Granular Piles with Different Densities and Different. Proportions of Gravel and Sand in the Soft Bangkok Clay, Soils and Foundations Jnl., Vol 27, No.1, 86~93, 1987.
74. Barth, H.P., Financial, Economical and Political Aspects of the Reuse of Construction and Demolition Waste, Proc. 3rd Int'l RILEM Symp, 1994
75. BRAJA M.DAS, 토질공학특론, 구미서관
76. Buck, A. D., Recycled Concrete, Highway Research Record 430, HRB, pp.1~8, 1973.
77. Collins, R. J., Reuse of Demolition Materials in Relation to Specifications in the U.K., Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, 1994.
78. DECALTO Version 10.1 레퍼런스 매뉴얼, (주)연엔지니어링
79. Franklin Associates, Ltd., Characterization of Building-related Construction and Demolition debris in the United States, Prepared for U.S.EPA 530-R-98- 010, 1998.
80. Frondistous-Yannas, S. and Itoh, T., Economic Feasibility of Concrete Recycling, Journal of Structural Engineering Div., ASCE, April, pp.885~889, 1977.
81. Gottfredsen, F.R. and Thogersen, F., Recycling of Concrete : Aggressive

Environmental, Proc. 3rd Int'l RILEM Symp, 1994.

82. Hansbo, S. 1994. Foundation Engineering. Amsterdam. Elsevier Science B. V.
83. Hansen, H., A Method for Total Reutilization of Masonry by Crushing, Burning, Shaping and Autoclaving, Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, pp.407~410, 1994.
84. Hansen, T. C. and Narud H., Strength of Recycled Concrete made Crushed Concrete Aggregate, Concrete International, Jan., pp.79~83, 1983.
85. Hughes, J. M. O. & Withers, N. J., Reinforcing of soft cohesive soils with Stone column, Ground Engineering, Vol.7, No.3, May, pp.42~49, 1974.
86. Kasai, Y., Hisaka, M., and Yanagi, K., Durability of Concrete Using Recycled Coarse Aggregate, Reuse of Demolition Waste, Proc., 2nd Int'l RILEM Symp, 1988
87. Kibert, C.J., Concrete/Masonry Recycling Progress in the USA, Proc. 3rd Int'l RILEM Symp, 1994
88. K. Oda, T. Yoshida, K. Tokida, T. Matsui, S. K. You, One-dimensional consolidation modeling on non-linear relationship between viscous strain and logarithm of visvous strain rate for quasi-overconsolidated clays, The Proceedings of International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.474~479, 2005.
89. Kikuchi, M., Yasunaga, A. and Ehara, K., The Total Evaluation of Containing Recycled Aggregate and Recycled Concrete, Proc., 3rd Int'l RILEM Symp,1994.
90. Kim, K.W., Lee, B.H., Park, J.S. and Doh, Y.S, Performance of Crushed Waste Concrete as Aggregate in Structural Concrete, ASCE, 1992.
91. Kristensen, P., Recycling of Clay Bricks, Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, 1994.
92. Lauritzen, E.K. and Jannerup, M., Guidelines and Experience from the Demolition of House in connection with Oresund link between Denmark and Sweden, Proc. 3rd Int'l RILEM Symp, 1994.
93. Marlet, J.D. and Pimientia, P., Mechanical and Physico-Chemical Properties of Concrete Produced with Coarse and fine Recycled Concrete Aggregates, Proc. 3rd Int'l RILEM Symp, 1994.
94. Matsui, T. and Abe, N. (1986), Flow Surface Model of Viscoplasticity for Normally Consolidated Clay, Proc. 2nd Int. Symp. Num. Models Geotech. Ghent, pp. 157~164.
95. Matsui, T. , Oda, K. and Nabeshima(1996), Analytical Study on Settlement

Behavior of Soft Ground Improved by SCP, Proceedings of ISOPE '96, Vol. 4, pp. 582~587.

96. Nixon, P. J., Recycled Concrete as an Aggregate for Concrete-a review, Material and Structure, Vol. 11. No. 65, pp.371~378, 1978.
97. O'Mahony, M. M. and Milligan, G. W. E., Recycling of Construction Waste, Waste Materials in Construction, Proceedings, International Conference on Environmental Implication of Construction with Waste Material, Studies in Environmental Science 48, pp.225~231, 1991.
98. Ortiz, M. and Simo, J. C. (1986), An Analysis of a New Class of Integration Algorithms for Elastoplastic Constitutive Relations, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 23, pp. 353~366.
99. Ray, G.K, Recycling Portland Cement Concrete Pavement, Paper for Worldwide Air Force pavement conference, 1978.
100. Sano, M., Yagishita, F. and Yamada, M., Recycling Powdered Concrete Waste, Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, 1994.
101. Schulz, R. R., Concrete with Recycled Rubble-Developments in West Germany", Proc., 2nd Int'l RILEM Symp, pp.500~509, 1988.
102. Skempton, A. W. The bearing capacity of clays, Proceedings, Building Research Congress, 1, 180-9. [9]. 1951.
103. S. K. You, K. Oda, T. H. Kim(2006), "Stress Sharing Behavior and Its Mechanism during Consolidation Process in Composite Ground Improved by Sand Compaction Piles with Low Replacement Area Ratio", Marine Georesources and Geotechnology, Volume 24, Number 4, pp.287~304.
104. Tavenas, F.,Origine de la. préconsolidation des argiles du Saguenay, Québec. Canadian. Geotechnical Journal, 20: 315~328, 1983.
105. Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P. and Leroueil, S. (1983), The permeability of natural soft clays. Part II : Permeability characteristics. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, pp. 645~660.
106. Topcu, I. B., Physical and Mechanical Properties of Concretes produced with Waste Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 12, pp.1817~1823, 1997.

107. Vesic, A. S. 1972. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass. American Society Civil Engineers, J. Soil Mech. and Foundations Div. 98, 265~290.

108. Wainwright. P.J., Trevorrow, A., Yu, Y. and Wang, Y., Modeling the Performance of Concrete Made with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates, Proc. 3rd Int'l RILEM Symp, 1994.

109. Yagishita, F., Sano, M. and Yamada, M., Behavior of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Aggregate, Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, 1994.

110. Yanagi, K., Hisaka, M. and Kasai, Y., Physical Properties of Recycled Concrete Using Recycled Coarse Aggregate Made of Concrete with Finishing Materials, Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, 1994.

111. 小田和廣, 松井 保, 柳 承庚 (2000), PDを含む軟弱粘土地盤の壓密擧動と壓密度に關する解析的考察, 土木學會第55回年次學術講演會, III-B197.

112. 岡 二三生 (2000), 地盤の彈粘塑性構成式, 森北出版社, pp.44~71.

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.