건설핵심기술연구개발사업 최종보고서

R&D/05핵심기술 C20

대심도 연약지반 개량을 위한 석션드레인(Suction Drain)공법과 설계기법의 개발

2007. 7. 28.

주관연구기관 / (주)지구환경전문가그룹

위탁연구기관 / 한양대학교 산학협력단

건 설 교 통 부

한국건설교통기술평가원

제 출 문

건설교통부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 "대심도 연약지반 개량을 위한 석션드레인(Suction Drain)공법과 설계기법의 개발" (총 연구기간 : 2005년 7월 29일 ~ 2007년 7월 28일)의 최종보고서로 제출합니다.

2007 . 7. 28.

주관연구기관 : (주)지구환경전문가그룹

대표이사 정 승 용

■ 총 괄 연 구 책 임 자	/ 대	표	이 사	정 승 용 연구총괄
■ 주관연구기관 참여연구원	/ 이		사	홍 상 기 석션드레인 시스템 분석
	/ 차		장	신 현 영 현장시험시공 총괄
	/ 차		장	정 재 현 석션드레인 수치해석
■ 위탁연구기관 참여연구원	/ 교		수	김 수 삼 위탁연구 총괄
	/ 연	구	원	한 상 재 석션드레인 Process 총괄
	/ 박	사 과	정	김 기 년 실내실험 분석/수정
	/ 박	사 과	정	김 종 윤 실내실험 영향인자 분석
	/ 석	사 과	정	박 상 규 영향인자 산정 실험
	/ 석	사 과	정	이 상 일 지반개량효과 파악
	/ 석	사 과	정	윤 명 석 배수재 선정 실험
	/ 석	사 과	정	안 동 욱 현장시험시공
	/ 석	사 과	정	김 대 호 현장시험시공
	/ 석	사 과	정	김 대 라 현장시험시공

요 약 문

Ⅰ. 제 목

대심도 연약지반 개량을 위한 석션드레인(Suction Drain)공법과 설계기법의 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

일반적인 압밀촉진공법(성토재하공법, 연직배수공법)의 경우, 성토하중으로 인한 작업량 및 공사비의 상승, 시공깊이의 제한, 부등침하, 전단파괴 등 여러 가지 문제를 야기할 수 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 진공압밀(대기압 재하)공법이 제안되었으나, 이 또한 기밀시트의 파손, 시간경과에 따른 펌프의 효율감소, 타설 심도의 제한 등의 많은 문제점을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 압밀촉진공법 보다 지반개량효과가 탁월하고 대심도 지반에도 적용이 가능하며, 시공이 용이한 공법의 개발을 위해 성토하중 및 기밀시트 등이 필요치 않은 석션드레인(Suction Drain) 공법을 개발하여 기존에 제안된 압밀촉진공법대비 약 3~5배 정도 공기를 감소시키면서 효율을 극대화시킬 수 있는 공법을 개발하고자 하였다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 기존의 압밀촉진공법의 단점을 개선시킨 대심도 연약지반 개량을 위한 석션드레인 공법의 개발을 위해 배수재의 종류/코어 형상에 따른 효율/코어와 필터의 부착형태 등을 실내 실험을 통해 파악하여, 진공압 및 대심도 조건에 부합되는 최적의 배수재를 선정한다. 이렇게 선정된 배수재를 바탕으로 진공압 펌프, 석션튜브, 결속시스템 등과 접목한 석션드레인 공법을 기획하여 타설 심도/타설 간격/배치형상/처리기간/적정 진공압/지반개량효과/시간 경과에 따른 배수재 효율 감소/기존 공법 대비 비용 절감 효과/대심도 연약지반 적용가능 여부 등을 실내 Column 실험 및 Pilot Scale 실험을 통해 파악하고 적절한 인자를 도출한다. 실내 실험을 통해 도출된 영향인자를 바탕으로 석션드레인 공법의 현장적용성 평가를 위한 현장시험시공을 수행하여 공법의 설계절차를 제시하고, 현장운영 매뉴얼과 처

리 지반의 해석 tool을 개발한다. 현장시험시공의 경제성 분석을 통해서 개발된 기술의 사업화 가능성을 평가한다

Ⅳ. 연구개발결과

- 대심도 연약지반의 개량을 위한 석션드레인 공법과 설계기법의 개발
  1) 실내모형실험을 통한 진공압/처리기간/배수재 종류/단계진공압/배수재 간격/타설 형상 등의 영향인자 산정 및 설계 인자 도출
  2) 기존 결속부의 문제점을 개선시킬 수 있는 새로운 결속방법 제안
  3) 상용 유한요소 프로그램을 이용한 실제 지반에의 적용성 검증과 새로운 석션드레인 해석 프로그램의 개발
  4) 기존이론과 새로운 이론을 접목시킨 해석기법 및 설계프로세스의 제안

- 석션 드레인 공법에 최적화된 해석기법의 개발
  1) 석션드레인 공법의 설계 및 해석 프로세스 개발
  2) 실험을 통해 도출된 석션드레인 공법의 영향인자의 수치화
  3) 실제 지반에의 적용여부 파악
  4) 석션드레인 공법 해석을 위한 유한요소 프로그램의 개발

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

본 공법의 개발을 통해 기존 압밀촉진 공법들의 단점을 보완할 수 있으며, 대심도 연약지반의 개량에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다. 본 연구에서 제안된 석션드레인 공법을 이용한 적용가능 대상지반을 열거해 보면 다음과 같다.

- 진공배수에 의한 성토사면 안정화, 국부적인 연약지반 개량
- 도심지 굴착 시 차수효과, 대심도 연약지반 개량
- 도심지 소규모 지반 개량, 저습답의 농지 개량
- 상부구조물이 존재하는 연약지반 개량, 진공압을 이용한 효율적인 지하수위저하
- 제방 아래 연약지반의 안정화
- Soil Flushing 공법과 석션드레인 공법을 접목한 오염 지반 정화
- 폐기물 매립지의 배수

S U M M A R Y

Ⅰ Title

Developments of suction drain method and design technique for improvement of thick soft ground

Ⅱ. Purpose and necessity of research and development

In case of conventional pre-loading method, has several problem causing rising of the cost of construction and amount of work by surcharge load, restriction of construction depth, differential settlement, shear failure etc. Vacuum consolidation method proposed to supplement the shortcoming of the conventional method. But, this method has several problem including tears of the sealing sheet, reduction of pump efficiency by passed time, restrict of construction depth etc. So, development of a new method which improved soft ground better compared with conventional methods, is applicable in thick soft ground and is easy to construct is required. Therefore, in this study, suction drain method which does not need a surcharge load and a sealing sheet to improved thick soft ground is suggest. This method reduces a term of works about 3~5 times compared with conventional method (pre-loading method and vacuum consolidation method).

Ⅲ. A Content and extent in research and development

In this study, impact factor of kind of PVD, efficiency depending on the shapes of cores, adhesion formation between core and filter etc would be determinated by the column test to develop suction drain method supplementing the shortcomings of conventional consolidation acceleration method, and then the optimum drainage corresponding with suction pressure and depth may be chosen. Based on above the results, through planing the suction drain method,

which is composed of vacuum pump, suction tube, and combination system, efficiency reduction of drainage, effect of drop in cost in comparison with conventional method and application for thick soft ground depending on the optical improvement depth, improvement spacing, shape of arrangement, period of treatment, vacuum pressure, efficiency of ground improvement etc would be determined by Column test and Pilot scale test, and then appropriate factors may be derived from those processes. In accordance with those factors, in order to estimate application of suction drain method in situ, field test is conducted, and a design process of the method is presented. The field manual for the method and an analysis tool of treated ground are developed. The capability of commercial use for the advanced method through estimating the economical efficiency of the suction drain method in situ is estimated.

Ⅳ. Results of research and development

- Developments of suction drain method and design technique for improvement of thick soft ground.

1) Calculation of impact and design factor of vacuum pressure, period of treatment, type of PVD, stage vacuum pressure, spacing of each PVD, and shape of arrangement of PVD etc.
2) Suggestion of new coupling method between PVD and suction tube that improve the defects of former connection of method.
3) Verification of the application of the suction drain method & Development of new suction drain analysis program.
4) Suggestion of analytic technique and design processes both traditional vacuum theory and new suction theory.

- Development of the optimum analytic technique for the suction drain method.

1) Design of the suction drain method & Development of analysis process.
2) Numerical value conversion of impact factor through conducting experiments for the suction drain method.
3) Determination to apply to fields.
4) Development of finite element method program to analyze suction drain method.

Ⅴ. Practical plan for research results

This method supplements the shortcoming of conventional consolidation acceleration method and would be used in thick soft ground. Therefore, applied ground foe suction drain method is as follows

- Stabilization of embankment slope by vacuum drain, improvement of local soft ground.
- Effect of cut off water in excavation of the central area of a town, improvement of thick soft ground.
- Soil improvement of the central area of a town, improvement of low and moist agricultural land.
- Soft ground improvement which the upper structure exists, reduction of water table using vacuum pressure.
- Under embankment, stabilization of soft ground
- Remediation of contaminated sites by both soil flushing and suction drain method.
- Drain of landfill

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

제 1 절 연구배경 및 목적 ····· 1

제 2 절 연구개발의 목표 및 범위 ····· 3

1. 최종목표 ····· 3

2. 평가방법 및 평가항목 ····· 4

3. 연차 별 주요 사업 내용 ····· 6

4. 연차별 연구흐름 추진도 ····· 7

제 2 장 국내·외 기술개발 현황 ····· 8

제 1 절 국내기술동향 ····· 8

제 2 절 국외기술동향 ····· 12

제 3 절 국내외 기술동향 분석 결과 ····· 22

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 24

제 1 절 Suction Drain 공법의 기본 이론 ····· 24

1. 공법의 개요 ····· 24

2. 지반내 응력분포 ····· 26

제 2 절 Suction Drain 공법의 해석 이론 ····· 29

1. 방사형 압밀 이론 ····· 29

2. Suction Drain 공법의 영향인자 ····· 46

제 3 절 배수재 특성 ····· 69

제 4 절 Suction Drain 공법의 영향인자 파악을 위한 실내실험 ····· 75

1. 실험 목적 및 범위 ····· 75

2. 시료특성 ····· 75

3. Suction Drain 실험장치의 구성 ····· 76

4. 실험 조건 및 방법 ····· 82

제 5 절 Suction Drain 실내실험결과 ····· 90
1. 실내 Column Test 결과 ····· 90
2. 배수재 간격 결정 실험 ····· 193
3. 실험결과 및 요약 ····· 204
제 6 절 배수재와 진공튜브 결속방법의 개발 ····· 207
1. 현재까지 제안된 결속방법의 특징 ····· 207
2. 석션드레인 기법에 최적화된 결속방법의 제안 ····· 208
제 7 절 Suction Drain 공법의 현장시험시공 ····· 212
1. 개요 ····· 212
2. 현장시험시공 대상 부지의 선정 ····· 212
3. 배수재의 선정 ····· 215
4. 석션드레인 시스템 ····· 216
5. 진공압의 조절 ····· 222
6. 배수재 배치 간격 및 설치수량의 결정 ····· 226
7. 현장시험시공 실시간 모니터링 시스템 ····· 228
8. 시험 시공 세부 작업 과정 ····· 242
제 8 절 Suction Drain 현장시험시공 결과 ····· 246
1. 침하량 및 수평변위 분포 결과 ····· 246
2. 성토조건과의 비교 결과 ····· 257
3. 진공압 분포 결과 ····· 259
4. 간극수압 분포 결과 ····· 265
5. 현장시험시공 결론 ····· 268
제 9 절 Suction Drain 공법의 적용성 검증을 위한 유한요소해석 ····· 269
1. 상용프로그램을 이용한 현장조건 모사 ····· 269
2. 새로운 수치해석 기법의 개발 ····· 275
3. 개발된 Suction-CAIN 프로그램의 민감도 분석 ····· 293
4. Suction-CAIN 프로그램의 적용성 검토 ····· 321
5. Suction-CAIN을 이용한 PDB공법과 Suction Drain 공법의 비교 ····· 336
6. Suction-CAIN 프로그램을 이용한 대심도 연약지반 해석 ····· 373
7. 결론 ····· 390

제 10 절 석션드레인 공법의 경제성 분석 ····· 392
제 11 절 석션드레인 공법의 설계 프로세스 개발 ····· 398
1. 일반사항 ····· 398
2. 조사 ····· 402
3. 설계 ····· 409
4. 품질관리의 계획 ····· 430
5. 설계 세목 ····· 439
6. 시공 ····· 448
7. 시공 관리 ····· 455
제 12 절 결론 및 요약 ····· 459

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 463
제 1 절 연구개발 수행 진도율 ····· 463
1. 1차년도 진도율 ····· 463
2. 2차년도 진도율 ····· 464
제 2 절 연구개발 목표의 달성도 ····· 465
제 3 절 관련분야의 기술발전에의 기여도 ····· 466
1. 특허 ····· 466
2. 국외학술지 ····· 466
3. 국내학술지 ····· 467
4. 국외학술발표 ····· 467
5. 국내학술발표 ····· 468

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 470

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 473

제 7 장 참고문헌 ····· 475

부록 1. Suction-CAIN Program 간편 매뉴얼 ····· 480

부록 2. 현장시험시공 관련 사진 ····· 498

첨부. 자체평가의견서 ····· 509

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction ····· 1

Section 1 Background and object of this study ····· 1

Section 2 Purpose and scope ····· 3

1. Purpose ····· 3

2. Process and articles of evaluation ····· 4

3. Contents of each year ····· 6

4. Research flow diagram for each year ····· 7

Chapter 2 The current aspect of domestic and international technology ····· 8

Section 1 The trend of technical development in the domestic ····· 8

Section 2 The trend of technical development in the abroad ····· 12

Section 3 Result of analysis for the trend of technical development in the domestic and abroad ····· 22

Chapter 3 The contents and results of research condition ····· 24

Section 1 Basic theory of suction drain method ····· 24

1. The outline of the method ····· 24

2. Stress distribution through application of the method ····· 26

Section 2 Analytic theory of suction drain method ····· 29

1. Radial consolidation theory ····· 29

2. Impact factors of suction drain method ····· 46

Section 3 Properties of drains ····· 69

Section 4 Laboratory test for determining impact factors of suction drain method ····· 75

1. Purpose and scope ····· 75

2. Characteristics of sample ····· 75
3. Constitution of apparatus of suction drain method ····· 76
4. Test condition and method ····· 82
Section 5 The results of laboratory test of suction drain method ····· 90
1. The results of laboratory Column test ····· 90
2. Experiment of determination of spacing of each drain ····· 193
3. Conclusion and summary ····· 204
Section 6 Development of coupling method between drain and suction tube ··· 207
1. Characteristic of coupling methods which have been suggested ····· 207
2. Suggestion of the optimum coupling method for suction drain method ····· 208
Section 7 Field Test ····· 212
1. Introduction ····· 212
2. Selection of target site ····· 212
3. Selection of drain ····· 215
4. System of Suction drain method ····· 216
5. Control of vacuum pressure ····· 222
6. Determine gap between drains and amount of drains ····· 226
7. Realtime Monitoring System ····· 228
8. Details process of field test ····· 242
Section 8 Results of field test ····· 246
1. Results of settlement and horizontal displacement ····· 246
2. Results of comparison with pre-loading method ····· 257
3. Vacuum pressure distribution ····· 259
4. Pore pressure distribution ····· 265
5. Conclusions ····· 268
Section 9 Finite element analysis for verifying Suction-Drain method ····· 269
1. Analysis for field section ····· 269
2. Development of new FE program ····· 275
3. Responsiveness analysis for Suction-CAIN program ····· 293
4. Examination for Suction-CAIN program ····· 321

5. Comparison between Surcharge method and Suction Drain method using Suction-CAIN program ····· 336
6. Analysis for thick soft ground using Suction-CAIN program ····· 373
7. Conclusions ····· 390
Section 10 Economical efficiency analysis of suction drain method ····· 392
Section 11 Development of design and analysis process ····· 398
1. General concept ····· 398
2. Examination ····· 402
3. Design ····· 409
4. Quality control plan ····· 430
5. Details of design ····· 439
6. Construction ····· 448
7. Construction control ····· 455
Section 12 Conclusion and summary ····· 459

Chapter 4 Accomplishment level for research goal and contribution to related research field ····· 463
Section 1 Degree of progress ····· 463
Section 2 Achievement degree of the object ····· 465
Section 3 Contribution degree of related fields ····· 466
1. Patent application and a practical new device ····· 466
2. Abroad journals ····· 466
3. Domestic journals ····· 467
4. Abroad proceedings ····· 467
5. Domestic proceedings ····· 468

Chapter 5 Plan for application of research results ····· 470

Chapter 6 Abroad information connecting for this study ····· 473

Chapter 7 Reference ····· 475

Supplement #1 Suction-CAIN program manual ····· 480

Supplement #2 Pictures during field construction ····· 498

Appendix : Statement of self-evaluation ····· 509

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 목적

대규모의 연약지반을 처리하고자 할 때, 일반적인 선행 압밀 재하 공법의 경우(Pre-Loading 공법) 상당량의 토사가 필요하다. 그러나 최근 들어 환경에 대한 인식이 대두되고 있는 실정에서 토사확보에 따른 환경파괴는 상당히 곤란한 문제로 작용할 수 있다. 또한 재하된 상재하중으로 인한 갑작스런 전응력의 증가는 지반의 국부적인 전단 파괴를 유발할 수 있으므로 이를 피하기 위해 장시간에 걸친 단계재하가 이루어져야 하는데, 이는 오늘날 인건비 등 시공에 필요한 제반 경비들의 상승, 시공전이나 후에 상재하중을 가하고 제거하는데 필요한 막대한 작업량, 단계성토로 인한 공사기간의 연장, 성토되는 하중의 무게에 의한 전단파괴 또는 부등침하 등 여러 가지 면에서 많은 결점을 내포하고 있다.

연직배수공법은 지반 내에 투수층 재료를 연직으로 촘촘하게 타설하고, 점성토층의 배수거리를 짧게 하여 압밀침하를 촉진시켜 단기간 내에 지반을 개량하는 공법으로 1926년 샌드드레인 공법이 최초로 개발되었으며, 이후 기술의 발전과 함께 PDB(Plastic Drain Board)가 개발되어 현재까지 사용되고 있다. 그러나 연직배수의 효과는 재하압력에 따라 발휘되기 때문에 성토재하가 반드시 필요하며, 이는 토사확보 및 부등침하문제, 부분재하를 받는 기초지반에서의 재하면 단부 부근 연약층에 큰 전단응력이 유발되는 문제, 재하와 동시에 현저한 형상변형을 일으켜 효과적인 압밀이 발생하지 않는 문제 등 여러 가지 문제점을 야기한다. 또한 시공깊이는 일반적으로 20m정도가 한도이기 때문에 그 이상이 되면 시공이 곤란해지고 공비도 급격히 증가한다(박병기, 1995).

기존 압밀촉진공법의 단점을 보완하고 공기를 줄이기 위해 1952년 스웨덴의 Kjellman에 의해 진공압밀(대기압재하) 공법이 제안되었다. 그러나 이 공법은 진공유지를 위해 사용되는 기밀시트가 고가이고 잦은 파손이 발생하며, 대규모 부지에 적용할 경우 복잡한 배수파이프의 연결로 공사에 상당한 어려움이 수반될 뿐만 아니라, 진공펌프의 장시간 가동에 의한 펌프의 효율감소 등 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 또한 이론적으로 Sealing이 충분히 유지되었을 때, 적용 진공압 대비 약

60~75% 정도의 효율만이 유지된다(Cortlever, 2002). 시공깊이는 Menard 공법의 경우, 최대 40m 정도라고 제시(Masse F. et al., 2001)하고 있으나 낮은 효율성과 현장 적용성을 유지하기 힘들다는 면을 고려해 볼 때, 최대 약 25~30m 정도가 적정 타설 깊이라고 판단되므로 대심도 연약지반에 본 공법을 적용하기는 어렵다. 이외에도 진공압을 이용한 지반개량 공법으로 네덜란드에서 개발된 Beau Drain 공법이 있으나 수평배수재의 설치를 위하여 일정 심도까지 굴착을 해야하고 수평배수재를 설치해야 하는 단점을 내포하고 있다.

이러한 대심도 연약지반의 기초 타설시 대체적으로 지반의 기반암까지 말뚝을 타설하는 공법이 사용되고 있으며, 이러한 공법의 사용은 공사비의 막대한 증가를 야기할 뿐만 아니라 부 마찰력의 발현으로 많은 위험 요소를 내포하고 있다.

따라서 앞서 제시한 기존의 공법들 보다 지반개량효과가 탁월하고 대심도 지반에도 적용이 가능하며, 시공이 용이한 공법의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 대심도 연약지반을 목적에 맞게 개선하기 위한 방법으로 성토하중 및 기밀시트 등이 필요치 않은 Suction Drain 공법을 개발하여 기존에 제안된 압밀촉진공법대비 약 3~5배 정도 공기를 감소시키면서 효율을 극대화시킬 수 있는 공법을 개발하는데 그 목적이 있다.

본 연구에서 개발될 “Suction Drain 공법” 이란, 지반 내 연직배수재를 타입하고 직접 진공을 가하게 되면 전응력이 일정한 상태에서 간극수가 배출되며 유효응력이 증가하게 되고, 이로 인해 강도가 증가되며 압밀이 진행되는 원리를 이용한 공법이다. 이는 기존의 성토재하공법 및 연직배수공법과는 다르게 성토하중을 필요로 하지 않으며, 진공압밀(대기압재하) 공법의 단점으로 지적되었던 펌프효율의 감소 문제, 굴착 및 수평배수재 설치로 인한 경제적·시간적 손실의 문제 및 Sealing 재료 및 유지관리의 문제 등을 획기적으로 개선시킬 수 있으며, 이로 인해 대심도 연약지반에 가장 적합한 공법이다.

제 2 절 연구개발의 목표 및 범위

1. 최종목표

- 대심도 연약지반개량을 위한 석션드레인(Suction Drain) 공법과 설계기법의 개발

가. 대심도 지반에 최적화된 석션드레인 설계기법 개발

전통적인 성토하중 공법 및 연직배수공법과 진공압밀공법의 단점을 보완하고 개량효과 및 효율을 높이기 위해 석션드레인(Suction Drain) 기법을 개발하여 실용화한다. 이를 위해 실내 실험을 실시하여 관련 영향인자를 도출하고 실험결과를 통해 해석 및 설계프로세스를 개발한다.

나. 석션드레인 공법에 적합한 배수재의 선정 및 결속방법의 개발

드레인재의 배수효과를 높이면서, 진공유지에 적합한 배수재를 선정하기 위해 영향인자를 고려한 실내 실험을 실시한다. 이를 통해 석션드레인 공법에 최적화된 배수재 및 배수재와 진공펌프와의 결속방법 등을 선정/개발한다.

다. 현장시험 시공을 통한 실용화 기술 개발

개발된 석션드레인 공법을 실제 대심도 연약지반에 적용하여 그 적용성 및 시공순서 등을 결정한다. 이를 통해 개발된 기술의 문제점 등을 파악하여, 기술의 사업화/실용화 가능성을 타진하여, 관련 산업으로의 기술이전을 꾀한다.

2. 평가방법 및 평가항목

가. 대심도 지반에 최적화된 석션드레인 설계기법 개발

(1) 석션드레인 기법의 영향인자 규명

- 개량심도결정 및 심도에 따른 개량여부
- 배수재 타설 간격/배치형상 결정
- 처리기간/처리효과 파악
- 지층구조 및 특성에 따른 시스템 구축
- 개량범위 및 개량속도 파악
- 해석 및 설계 프로세스 개발

(2) 진공압 효율의 극대화

- 진공압 펌프와 배수재 상호 간 결속방법 및 연결 시스템 개발
- 최적의 진공압 산정
- 석션배수에 의한 지반개량여부 파악
- 석션드레인 배수재 기준 제시

나. 석션드레인 공법에 적합한 배수재의 선정 및 결속방법의 개발

- 토질 별 적정 배수재 선정
- 배수재 굴곡 및 변형에 따른 필터의 입경변화 파악
- Smear effect 및 Clogging 현상에 의한 효율저하 특성 파악
- 배수재 형상, 재료, 필터특성에 따른 배수효과 파악
- 장기 운용시 석션 배수재의 특성 변화 및 효율 변화
- 석션드레인 시스템에 최적화된 결속부 및 결속방법 규명

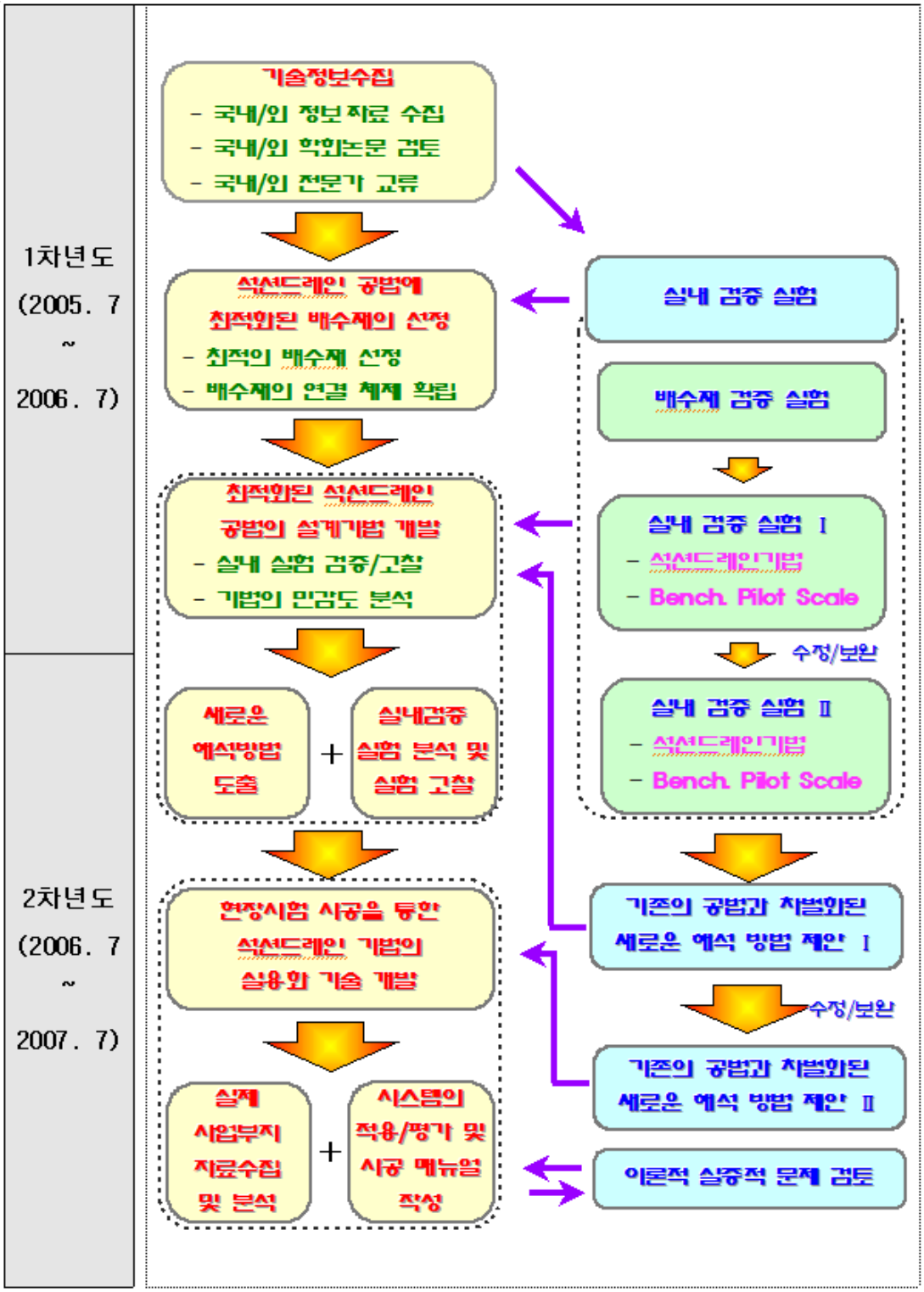
다. 현장시험 시공을 통한 실용화 기술 개발

- 실제 대심도 연약지반에 적용 시 시공순서 결정
- 최적 시스템의 현장 적용성 및 개발된 기술의 문제점 파악
- 새로운 해석 방법의 도출
- 현장 전문가들의 자문을 통한 문제점 파악
- 시스템의 수정, 보완 및 관련 자료 공개
- 석션드레인 현장운영 메뉴얼 작성
- 설계 Process 및 체크리스트 작성
- 처리지반 해석 Tool 개발 및 예제설정
- 경제성분석

3. 연차 별 주요 사업 내용

연 차	주요 사업내용 및 범위	연구 목표
1차년도	‣ 배수재의 타설간격 / 배치형상 / 개량심도 결정 ‣ 시간 경과에 따른 배수재 효율 감소 요인 파악 ‣ 적정 처리기간 및 진공압 결정 ‣ 기존 압밀촉진 공법에 대한 진공압밀공법의 공기 단축 및 비용 절감 효과 ‣ 대심도 연약지반에의 적용 가능 여부 파악 ‣ 석션드레인 기법에 최적화된 배수재의 선정 ‣ 배수재의 재질/형상 결정 ‣ 배수재와 진공펌프 간 결속방법 결정 ‣ 지반강도 증진효과 파악 ‣ 개량범위 및 개량속도 파악 ‣ 실제 지반에의 적용성 파악 ‣ 기존공법과의 경제성 분석	‣ 대심도 연약지반개량을 위한 석션드레인 기법의 최적 시스템 결정 ‣ 석션드레인 기법에 최적화된 배수재의 선정 ‣ 지반개량효과 파악 ‣ 해석 및 설계 프로세스 개발 ‣ 경제성 분석 ‣ 타 공법에의 적용성 파악
2차년도	‣ 현장 시험 시공을 통한 실제 대심도 지반의 적용가능여부 및 지반개량효과 파악 ‣ 개발된 기술의 검증 및 보완 ‣ 현장 매뉴얼 및 해석 Tool 설정 ‣ 개발된 기술의 실용화 가능성 평가	‣ 현장시험시공을 통한 기법의 실용화 기술개발 ‣ 처리지반 해석 Tool 개발 ‣ 시공 매뉴얼 작성 ‣ 시스템의 적용성 평가 ‣ 기술성 및 장래성 평가 ‣ 기존공법과의 경제성 분석

4. 연차별 연구흐름 추진도



제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 국내기술동향

국내에 지반개량 기술이 최초로 도입된 시기는 1950년대이지만, 이 시기에는 이전에 시행한 형태를 모방한 시대로 독자적인 기술로 사업을 수행하지는 못하였다. 하지만 1960년대에 이르러 목포 영산강 간척사업의 조사와 서남해안 간척 적지조사 및 강화간척에서의 시범사업 등 준설매립에 대한 선진 기술의 이론이 정립된 이후, 준설매립 지반의 개량을 위해 샌드 드레인(Sand Drain), 팩 드레인(Pack Drain) 등을 이용한 연직배수 공법이 주로 적용되었다. 또한 1974년에 국내에서 최초로 본 연구의 위탁연구책임자에 의해 종이형태의 부직포인 페이퍼 드레인(Paper Drain)이 창원 적현단지 조성공사에 선행재하공법(Pre-loading Method)과 함께 연약 지반개량공법으로 병행(김수삼, 1974)되었다.

하지만 배수재의 통수능력 저하와 성토하중에 의한 지반의 전단파괴 등 기존 선행재하 배수공법의 많은 문제점이 노출되어 새로운 배수공법의 필요성이 절실히 요구되었다. 1970년대 말에는 석유화학제품의 급속한 발전에 힘입어 플라스틱을 이용한 배수재의 사용이 전 세계적으로 널리 확대되었으며, 국내에는 1980년대에 플라스틱 연직배수재(Plastic Vertical Drain)와 진공압밀(대기압재하)공법(Vacuum Consolidation Method)이 최초로 도입되었다.

진공압밀(대기압재하)공법은 성토선행재하 공법과는 달리 성토재료가 많이 필요하지 않고, 급격한 재하에 의한 전단파괴 위험성이 없다는 공법상의 장점을 가지고 있으나, 대기압을 재하하는 시공상의 어려움, 멤브레인 제작기술의 부족, 진공상태의 유지문제, 경제적인 문제와 기존의 연직배수공법을 적용하는 방법보다 크게 뛰어나지 못하다는 이유 등으로 인해 국내 실제 현장에는 활발하게 적용되지 못 하였다(홍원표 등, 2000). 그러나 환경문제의 대두로 인한 토취장 확보의 문제를 해결하고, 진공압밀 관련 장비의 발달, 제반기술의 발전 등으로 인해 1990년대 이후에는 국내에서도 진공압밀(대기압재하) 공법의 적용성에 대한 연구가 진행되었다. 그러나 대부분 수치해석과 실내 검증실험을 통한 유효성 검증 수준이었다. 2000년대

이후에는 현장적용성에 대한 검토를 통해 실제 적용을 꾀하고자 하였으나, 효율성 문제 등 여러 가지 문제점이 발생하였다. 실제로 OO사에서 메나드 진공압밀(대기압재하)공법을 OO 하수종말처리장에 적용한 바 있으나, 실제 시공의 어려움, 기밀성 유지 문제 등의 문제가 발생되었다고 보고되었다(이기남, 2000). 따라서 기존에 제시된 여러 압밀촉진공법의 문제점들을 효과적으로 개선할 수 있는 공법의 필요성이 대두되고 있다.

현재까지 연구된 진공압밀 공법과 관련된 연구 동향을 Table 2.1.1.1에 정리하여 나타내었으며, Table 2.1.1.2에는 진공을 이용한 압밀촉진공법 관련 국내에 출원된 특허를 제시하였다. 대부분 진공압밀(대기압재하) 공법 적용 시 발생하는 효율 문제를 극복하기 위해 적정 배수재를 선정하여 적용시킨 경우가 상당히 많았으나, 본 주제와 직접 관련된 공법 사항은 나타나지 않았다.

Table 2.1.1.1 진공압밀공법의 국내 연구동향

연구자	연구 년도	내 용
윤상영	1992	진공재하와 상재하중재하 두 가지 방법으로 대형 압밀실험을 실시하여 압밀거동특성을 비교하였다.
이 송	1996	진공재하 공법의 실내시험을 통해, 진공재하 공법 적용시의 지반의 거동을 분석하고 진공재하 공법의 이론적인 검토와 문제점 등을 분석하였다. 또한 진공재하 공법을 이용하여 연약지반의 개량 및 설계, 시공시에 고려해야 할 문제들에 대하여 분석하고, 드레인 종류 및 드레인 직경의 크기, 지반의 초기 간극비 변화에 따른 압밀 특성을 파악하였다.
이규환	1996	진공압밀공법의 압밀-침하거동에 대한 예측을 위해 유한변형률 압밀이론에 근거한 유한차분 해석을 실시하였다.
김형주 등	1997	Kjellman(1952)이 제안한 진공압밀공법을 슬러리 상태의 준설매립지반까지 확장 적용하면서 그 유효성을 대형압밀실험에 의해 확인하고, 그 실험결과를 선형포텐셜 압밀이론과 비교 검토하였다.

Table 2.1.1.1 진공압밀공법의 국내 연구동향(계속)

연구자	연구 년도	내 용
이기남	2000	진공압밀공법의 현장적용성 검토를 위해 수행된 OO 하수 종말처리장 공사에서 시공상의 어려움과 기밀시트의 품질 유지, 진공펌프 효율성 등의 문제가 발생되었다고 보고하였다.
홍원표	2000	진공압밀공법을 적용한 국내 현장을 대상으로 각종 계측시스템을 설치하여 지반의 개량 효율, 지반의 침하와 측방 변위에 따른 변형거동 특성을 조사하여 진공압밀공법의 지반 개량 효과와 적용지반의 안정성을 분석하고 고심도 연약지반 개량시 합리적이고 경제적인 공법임을 확인하였다.
백승남	2001	진공압밀구간으로 지반을 개량했을 때 현장의 계측데이터를 이용하여 지반의 변형특성에 대해 분석하고, Pre-loading 공법으로 개량한 구간과의 비교를 통해 지반의 개량효과를 분석하였다.
정연인	2004	실내에서 진공압밀배수공법을 적용시킬 경우 발생되는 Hardening Zone의 범위를 측정하여, 실제 현장에서 진공압밀배수공법을 실시할 때의 적정 진공압과 배수재 간격을 산정하는데 도움이 되는 자료를 제공하는 목적으로 실내시험을 실시하였다. 그 결과 고진공압 상태에서는 배수재의 막힘현상과 배수재 부근에서 빠르게 생성되는 Hardening Zone 등으로 인하여 배수층으로 간극수의 흐름이 방해되어 저진공압 상태에서보다 Hardening Zone의 범위가 확산되지 않았다.
양시봉	2005	진공압밀공법의 설계 및 시공사례 분석을 통해 진공압밀공법의 문제점과 대책 그리고 품질관리에 관한 방법에 대한 연구를 수행하였다.

Table 2.1.1.2 국내 특허 현황(대한민국 특허청, 2007)

출원인	발명자	발명의 명칭
(주)한국종합엔지니어링 유영을/임철웅	임철웅	원형 연성주름관과 과물하중을 이용한 연약 점성토 지반의 진공압밀 탈수촉진공법
(주)한국종합엔지니어링 유영을/임철웅	임철웅	원형주름관을 이용한 준설토 투기장의 진공 압밀 탈수 촉진시공법
임철웅	임철웅	부직포를 피착시킨 중공보드드레인을 이용한 준설토 투기장의 진공 압밀 탈수 촉진시공법
임철웅	임철웅	진공압밀 하중을 이용한 준설토 연약 지반의 조기 개량 시공법 및 그 부상 매트 슬라브
(주) 케이씨지오컨설턴트	정구영/ 김윤상	고화토로 처리된 지오텍스타일을 이용한 진공 압밀 공법
(주) 케이씨지오컨설턴트	정구영/ 김윤상	고화토-지오텍스타일 복합체를 이용한 진공 압밀공법
임준호	임준호	깊은주름 소구경구조의 후렉시블드레인 및 볏짚드레인을 이용한 연약지반의 진공압밀 탈수촉진공법 및 그 물건
임철웅	임철웅	볏짚을 이용한 점성토 연약지반의 압밀 탈수 촉진공법 및 볏짚 드레인
(주) 대한아이엠	윤윤모	진공압밀 탈수촉진 공법 및 그 배수파이프
(주) 상지엔지니어링	임철웅	원통형 유공주름드레인과 지표점토층의 진공 차단막을 이용한 연약지반의 지중진공압밀탈수촉진공법
(주) 상지엔지니어링	임철웅	날개드레인과 지표점토층의 진공차단막을 이용한연약지반의 지중진공압밀탈수촉진공법 및 날개드레인과탈수흡출구의 결합구조

제 2 절 국외기술동향

최초의 연직배수공법은 1925년 Daniel E. Moran에 의해 연구되었으며, 비교적 깊은 심도의 연약지반을 개량할 목적으로 샌드 드래인(Sand Drain)을 타입하고 선행재하공법을 적용함으로써 연약지반의 압밀을 촉진하는 방법을 제안하였다. 그 이후, 많은 연구자들에 의해 다양한 공법이 연구되었는데, Walter Kjellman(1952)은 배수재(Wick Drain)를 타입한 후에 성토하중을 가하고 지표를 플라스틱이나 고무멤브레인으로 밀봉한 후, 진공펌프를 이용하여 강제 탈수시키는 방법을 제안하였다. 1960년대에 미공병단에서는 Hydraulic Fill에서의 진공압밀의 가능성을 연구하였으며 그 후 20년간 진공압밀에 관한 연구가 진행되었다(Halton et al.,1965; Holtz, 1975). 이러한 진공압밀(대기압재하)공법은 Sealing 재료와 진공효율의 문제로 많이 사용되지 못하다가 90년대 들어 기술의 발전에 따른 재료의 고급화로 인해 그동안 제기되어 왔던 문제점을 해결하기 위한 새로운 진공압밀공법이 개발되어 왔는데, 그 대표적인 예가 네덜란드에서 개발된 굴착형 진공압밀공법과 네덜란드와 일본 등에서 개발된 캡(Cap)형 진공압밀공법이다.

굴착형 진공압밀공법은 특수장비를 이용하여 진공압밀 배수시스템을 설치하는 공법으로 기존의 진공압밀공법을 개량한 공법이다. 이 공법은 연약점토지반의 상부에 일정깊이로 홈을 굴착하여 배수시스템을 설치하는데 Fig. 2.2.1.1에 나타낸 것과 같은 특수 장비를 이용하는 것이 본 공법의 특징이다.

Fig. 2.2.1.1에 나타낸 특수 장비는 기존 플라스틱드레인보드(PDB) 설치 장비를 개량한 장비로 지반에 홈을 굴착할 수 있는 쟁기(plough) 형태의 장치가 부착되어 있으며, 연직배수재와 수평배수재를 동시에 설치할 수 있는 장비가 함께 장착되어 있다. 시공 순서는 먼저 쟁기형태의 장치를 이용하여 Fig. 2.2.1.2와 같이 지표면으로부터 약 3m 깊이로 연약점토지반의 상부까지 홈을 굴착한 후 일정 간격으로 연직배수재를 설치하고, 연직배수재 위에 Fig. 2.2.1.3과 같은 수평배수관을 설치한다. 이와 같은 일련의 과정은 앞서 소개한 특수 장비를 이용하여 한번에 순차적으로 진행하기 때문에 시공속도는 매우 빠른 것으로 알려져 있다. 굴착형 진공압밀공법은 시공 후 수평배수재 주변 지반의 점토층이 자연적으로 허물어져 수평배수재를 덮어주기 때문에 지오멤브레인과 함께 막을 형성하여 진공압밀시스템을 이루는 것

이 큰 특징이라고 할 수 있다. 대표적인 굴착형 진공압밀공법으로는 네덜란드에서 개발한 BeauDrain 등이 있다. Fig. 2.2.1.4는 굴착형 진공압밀공법의 설치 과정을 나타내는 지반 단면을 나타낸 것이다.



Fig. 2.2.1.1 굴착형 진공압밀공법 설치 장비



Fig. 2.2.1.2 굴착형 진공압밀공법의 지반 굴착 전경



Fig. 2.2.1.3 수평배수관

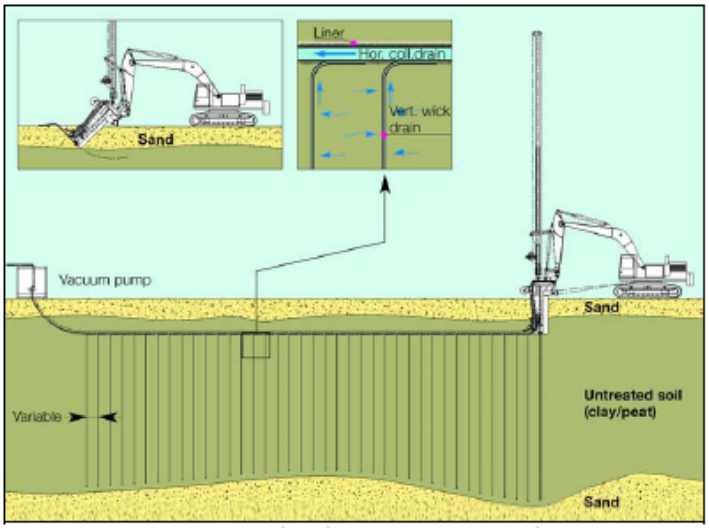


Fig. 2.2.1.4 굴착형 진공압밀공법의 설치 전경

굴착형 진공압밀공법은 주로 네덜란드에서 많이 시공되고 있는데, Fig. 2.2.1.5는 네덜란드 Zevenhuizen 지역에서 수행한 굴착형 진공압밀공법의 적용 결과를 나타낸 것이다. 이 지역에서는 동일 지반 조건에서 두 지역으로 나누어 한 지역은 연직배수재만을 설치하였고 다른 한 지역은 굴착형 진공압밀공법시스템을 적용하였다. 두 지역의 초기 성토고는 1.5m이었으며, 시공이 시작된 지 100일 후에는 두 지역 모두 3m까지 성토를 수행하였다. Fig. 2.2.1.5에도 나타나 있듯이 연직배수재만 설치한 지역보다는 굴착형 진공압밀공법을 설치하여 운영한 지역의 압밀침하가 훨씬 빠르게 진행된 것을 알 수 있다.

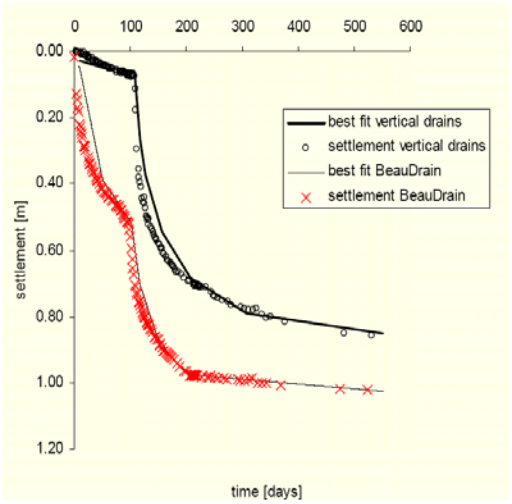


Fig. 2.2.1.5 Zevenhuizen 지역의 압밀침하 결과 (Nooy 등)

Fig. 2.2.1.6은 Zevenhuizen 지역에서 연직배수재만 설치한 지역(오른쪽)과 굴착형 진공압밀공법이 설치된 지역(왼쪽)의 현장사진을 나타낸 것이다. Fig. 2.2.1.5의 결과에서 나타낸 것과 같이 연직배수재만 적용한 오른쪽 지반보다 굴착형 진공압밀공법을 설치한 왼쪽의 지반이 더 많이 침하한 것을 알 수 있다. Zevenhuizen 지역에서 굴착형 진공압밀공법에 대한 펌핑은 시공시작 후 206일만에 중지하였으며, 시험자료를 근거로 역해석을 수행한 결과 총대기압의 50%정도 즉, 50kPa정도의 압력이 추가 성토에 해당하는 것으로 판단되었다.



Fig. 2.2.1.6 Zevenhuizen지역의 침하 사진 (Nooy 등)

캡형 진공압밀공법 역시 기존의 진공압밀공법 적용시 문제가 되는 지오멤브레인 차단막의 기밀성 유지 확보를 위해 개발된 진공압밀공법이다. 캡형 진공압밀공법은 연직배수재 상부에 캡을 씌우고 호스로 상부의 수평관과 연결시키고 수평관과 펌프를 연결시켜 지반의 간극수를 배출하는 방법으로 현재까지 개발된 제품으로는 일본의 캡부착 진공압밀공법과 네덜란드의 Beau-Drain-S 등이 있다(Fig. 2.2.1.7). 이 공법은 종래의 공법과 비교해 현지 작업이 비교적 간단해 시공비용을 절감시키고 공사 기간을 단축시키는 장점이 있다.

Fig 2.2.1.8은 캡형 진공압밀공법의 시공 단면도를 나타낸 것으로 캡형 진공압밀공법의 시공은 먼저 공장 제작 단계에서 소정 길이의 배수구에 배수 호스 캡을 설치하고 롤 모양으로 현장에 반입한 후 이 롤을 배수구 타설기에 부착시켜 타입하고 지표면에 나온 배수 호스를 개별적으로 지상의 집수관에 설치해 진공 펌프에 연결한다.

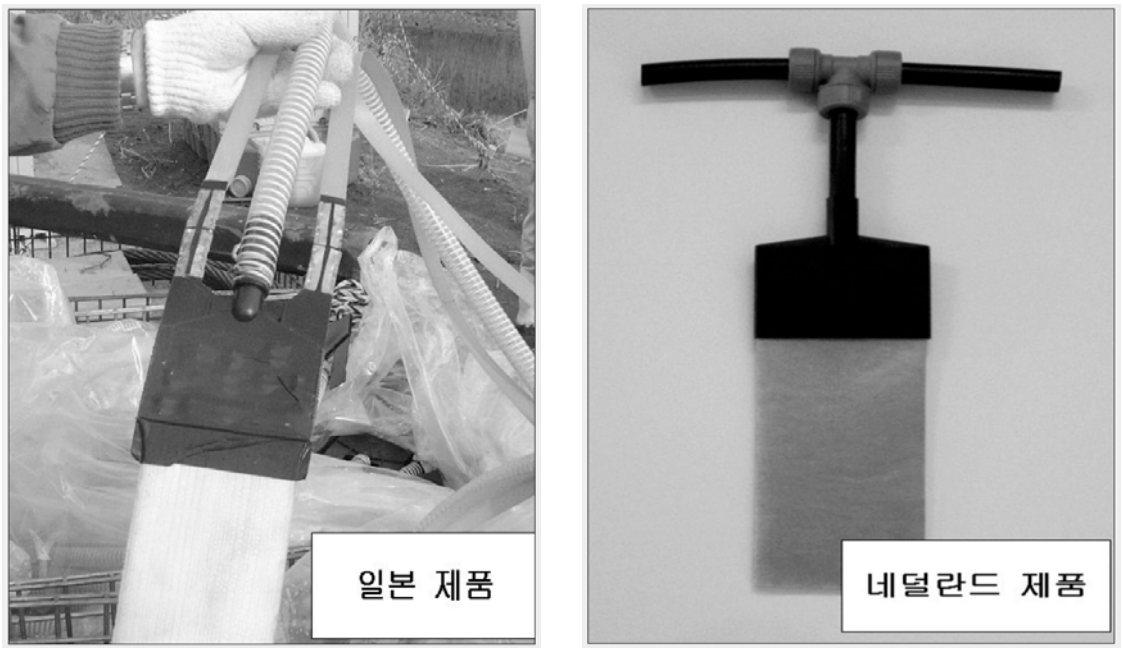


Fig 2.2.1.7 캡형 진공압밀공법에 사용되는 캡, 배수재, 연결호스

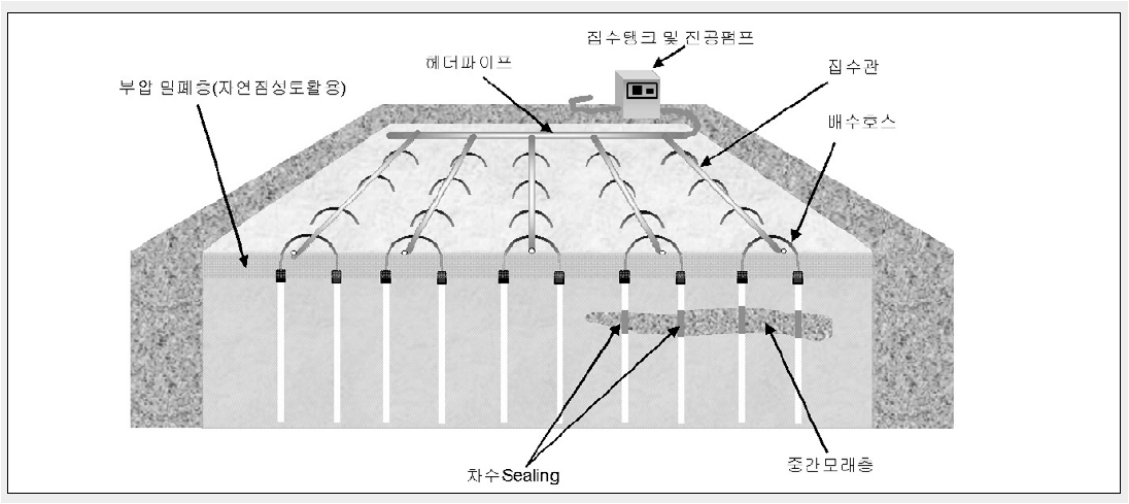
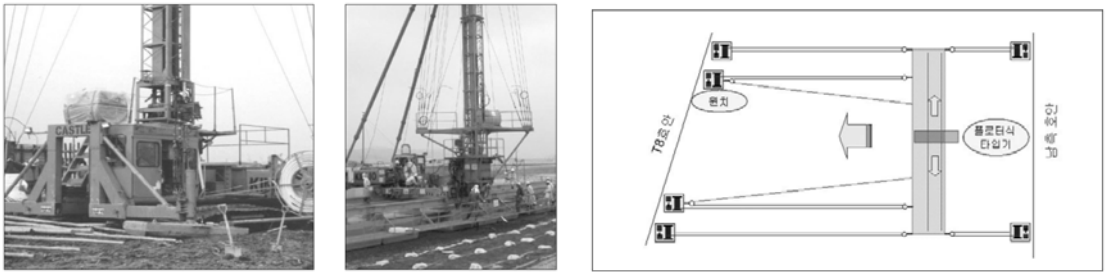


Fig. 2.2.1.8 캡형 진공압밀공법의 시공단면도

배수재의 타설은 육상시공의 경우 자주식 배수재 타설기(Fig. 2.2.1.9(a))를 이용하며, 표층강도가 매우 작은 초연약 점토지반 또는 수상시공의 경우에는 Float type 타설기(Fig. 2.2.1.9(b))를 이용하며, 타설기의 이동은 Fig. 2.2.1.9(c)와 같이 윈치를 사용한다.

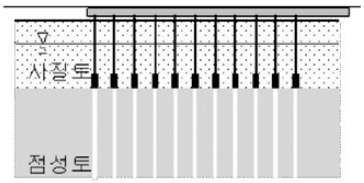
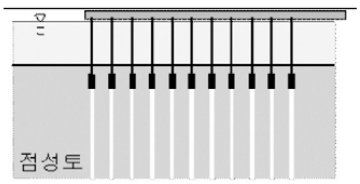
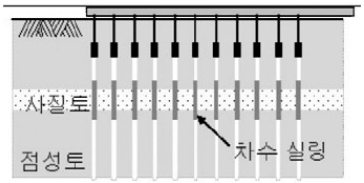


(a) 자주식 타설기 (b) 플로터식 타설기 (c) 타입기 이동용 윈치 배치도

Fig. 2.2.1.9 배수재 타입기와 이동용 윈치(winch) 배치도

캡형 진공압밀공법의 경우 기존의 진공압밀공법 시공시 기밀성을 유지하기 위한 지오멤브레인 차단막이나 샌드매트 등의 수평배수재는 사용하지 않는 것이 특징이며, Table 2.2.1.1과 같은 조건에서도 시공이 용이하다.

Table 2.2.1.1 캡드레인 공법의 적용

표층에 두터운 모래층이 있는 경우	수면하 지반 (해저지반)	중간 모래층이 있는 경우
		
- 배수호스를 길게 함	- 캡부분이 점토층 내에 1~2m의 깊이로 관입되도록 배수재를 타설	- 모래층을 통과하는 배수재 부분에 차수실링

이와 같은 여러 장점이 있는 캡형 진공압밀공법은 최근 유럽을 비롯해 동남아, 일본 등지에서 이미 시공되었거나 또는 시공 중에 있는데, 대표적으로 태국의 Suvarnabhumi 국제공항에서는 약 420,000m^{2}에 시공된 사례가 있으며, 일본의 경우 도쿠야마(德山)항에서 약 11,700m^2, 야마구치시 가와니시 정수센터건설공사 등에서는 약 13,000m^{2}의 면적에 시공된 사례가 있다.

H. Yoneya et al.(2006)은 일본에서 수행된 캡드레인 진공압밀공법의 시험시공사례와 실제 적용사례를 국내에 소개한 바 있다. 시험시공은 25m×25m의 정방형 영

역을 대상으로 실시되었으며, 대상지반의 단면도는 Fig. 2.2.1.10과 같다. 지반개량은 원지반 점토층과 매립점토층을 대상으로 20m의 캡드레인을 1m간격의 정방형 배치로 625공을 타설하였으며, 상부2m를 부압실링층으로 사용하였다.

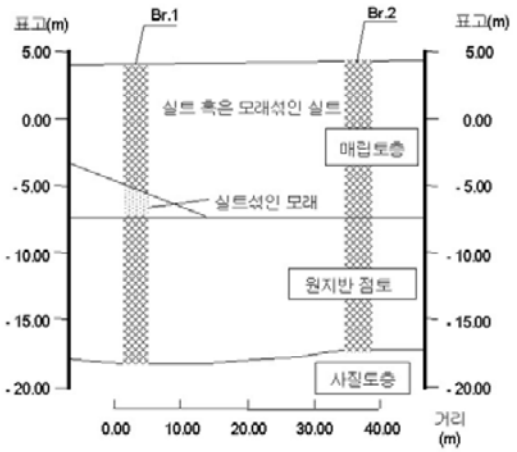
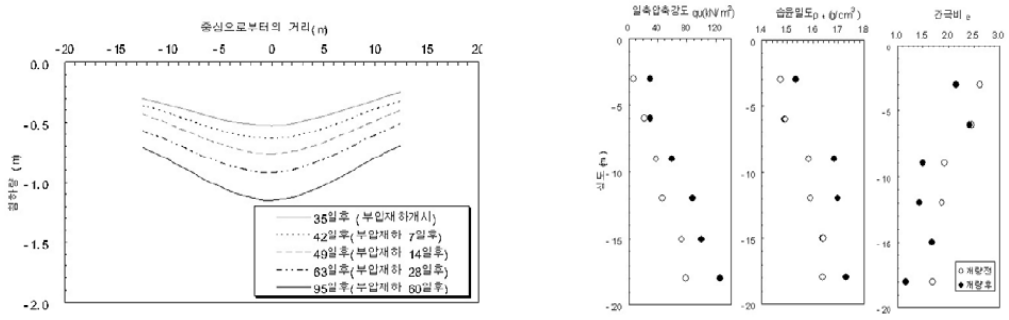


Fig. 2.2.1.10 캡드레인 진공압밀 공법 시험시공 현장의 단면도

시험시공 결과 침하는 개량구간 중앙부에서 가장 크고 단부에서 약간 작은 결과를 나타냈으며, 중앙부에서는 평균 1.14m, 단부에서는 평균 0.85m로 나타났다(Fig. 2.2.1.11). 개량영역 중앙부에서 채취된 시료에 대한 실내실험결과 일축압축강도는 평균 30kN/m^2 정도 증가하였으며, 개량 전에 비하여 습윤밀도는 증가하고 간극비가 감소하였다(Fig. 2.2.1.12).



(a) 침하거동의 형상 (b) 압밀개량효과

Fig. 2.2.1.12 캡드레인 진공압밀 공법의 현장시험시공 결과

현재까지 아시아권을 중심으로 굴착형 진공압밀공법과 캡드레인 진공압밀공법이 시공되어 왔으나, 두 공법 역시 심도에 제약을 받으며 대심도 지반에 적용한 사례는 거의 없다.

현재까지 국외에서 연구된 진공압밀공법 관련 연구동향을 Table 2.2.1.2에 나타내었다.

Table 2.2.1.2 진공압밀공법의 국외 연구동향

연구자	연구 년도	내 용
W. Kjellman	1952	배수재를 타입하고 상부에 sand mat를 시공한 후, 상부에 기밀시트를 덮어 지반을 밀폐시켜 진공펌프에 의해 강제 탈수시키는 공법인 대기압을 이용한 진공압밀공법을 제안하였다.
Muromachi et al.	1970	일본의 Hazawa역 근처 도로공사를 위해 연약한 Peat층으로 이루어진 Drowned valley 지역에 진공압밀공법을 적용하였다. 이 때 개량 전과 개량 후 일축압축강도와 Dutch cone 실험을 한 결과 상당한 효과를 보였다고 보고되었다.
T. Umezaki et al.	2000	기존 진공압밀공법에서 sand mat를 대신해 수평 drain을 부설하고, 성토를 병행한 공법을 이용하여 시공면의 개선 및 그 지반 개량 효과에 대해 검토를 하였다.
T. Umezaki et al.	2000	기존의 샌드 매트(Sand Mat)를 대신하여 수평 배수재를 타설하고, 성토를 병용한 공법을 사용하여, 개량효과의 확보에 필요한 일정한 진공압(負壓)을 확인하였고(지표면에서 -75kPa～-85kPa), 단계성토공법보다 더 급속히 압밀을 촉진시킬 수 있었다. 또한 압밀응력이 연직 배수재의 타설심도까지 거의 감소하지 않고 전달되었고, 심도 20m까지의 개량 효과를 확인하였다.

Table 2.2.1.2 진공압밀공법의 국외 연구동향(계속)

연구자	연구 년도	내 용
Mohamedel -hassan et al.	2002	진공압과 상재-진공 하중에 의한 일차원압밀 모델을 세우고, 새로 개발된 진공압밀 기구를 이용하여, 진공압을 적용시킨 상태에서 시간-의존적인 과잉간극수압과 연약점토의 거동 변위를 연구하였다. 그리고 상재-진공 하중 상태에서의 토질 변수를 증명하고자 하였으며, 진공압, 상재하중 그리고 상재-진공 하중 상태 하에 점토의 압밀 거동을 비교하였다.
H. Takahashi et al.	2002	진공압밀공법의 강도 증가 및 변형의 사전 예측 방법을 확립하기 위하여, NSF-clay에 대한 삼축압축 실험을 수행하여 완속성토공법을 실시한 실험과 강도 변형 거동을 비교하였다.
S. Nakagawa et al.	2003	진공압밀공법에서 진공압의 재하와 해제를 사용하는 개량메카니즘의 규명이나 개량지반의 침하 및 안정성의 예측에 대한 문제점을 해결하고자, 진공압밀공법에 의해 개량된 점토지반의 압밀거동을 유동곡면이력변수모델을 이용하여 압밀해석 기법에 의해 검토하였다.
H. Yoneya et al.	2003	캡 드레인(Cap Drain)을 사용한 진공압밀공법에 대한 연구에서, 상부의 점토를 작용진공압의 누출을 차단시키려는 목적의 Sealing-up Layer로 이용하여, 하부 점토 지반을 진공압으로 더욱 조밀하게 개량하는 공법에 대한 실험을 실시하였다. 종래의 진공압밀공법에서는 지반 표면을 기밀시트로 가릴 필요가 있지만, 캡 드레인 공법에서는 점토층의 기밀성을 이용하는 것으로써, 기밀시트가 필요하지 않은 특징이 있으므로 용적을 축소화 할 수 있었다.
N. Abe et al.	2003	진공압밀공법에 의해 개량된 점토 지반의 압밀거동을 탄점소성 모델을 이용하여 압밀해석 기법에 의해 검토를 하였다.

Table 2.2.1.2 진공압밀공법의 국외 연구동향(계속)

연구자	연구 년도	내 용
A. Kozai et al.	2003	기존의 삼축압축실험에 의한 시뮬레이션 실험에 추가적으로 진공 해제에 의한 지반 파괴를 상정한 실험을 실시하여, 진공압밀 중 지반의 강도변화 및 진공 해제 후의 강도 변화를 어떻게 평가해야할 것인가 검토하였다.
Indraratna et al.	2004	수정 Cam-Caly 모델을 이용한 2차원 평면변형 유한요소 모델을 기초로 하여, 진공하중에 의해 영향을 받는 단일 연직 배수재의 배수 경계가 불포화일 때의 영향을 설명하였다. 또한 복합-배수재 분석(Multidrain Analysis)은 진공하중을 이용한 연직 배수재에 의해 안정화된 제방의 거동을 연구하였고, 현장 계측과 수치해석을 통해 예측한 값들과 비교 하였다.
Chai et al.	2005	진공압에 의한 하중과 일반적인 상재하중을 포함하는 실내 Oedometer 시험 결과를 비교하였으며, 이들 시험결과를 바탕으로 진공압밀에 의해 발생되는 지반의 측방변위와 침하량을 계산하기 위한 방법을 제시하였다.

진공압밀(대기압재하)공법에 대한 특허출원연도별 출원건수를 살펴보면, 1970년대 후반부터 일본을 중심으로 특허가 출원되기 시작하였으며, 1990년대에 들어서면서 장비의 발달과 기타 제반기술의 발전으로 인해 출원건수가 계속 증가세에 있다. 또한 국가별 출원동향을 살펴보면, 전체 진공압밀(대기압재하) 특허 출원 45건 중 일본이 출원한 특허건수는 41건으로 92%를 차지하고 있으며, 이는 본 기술이 외국의 존도가 매우 높음을 말해준다. 또한 진공압밀(대기압재하)의 특허출원 주요기술은 크게 멤브레인을 사용한 진공 유지 기술, 배수재 재료, 배수재와 진공펌프의 연결기술 및 수평배수재를 이용한 진공압밀(대기압재하)기술 등의 시공기술과 진공펌프의 효율을 높이는 기술, 지중 간극수 제거 시스템, 진공압밀(대기압재하) 공법 시공을 위한 부상매트 슬래브 장비 등의 장비기술로 분류 가능하며, 시공기술에 관련된 특허의 비율이 상당히 높음을 알 수 있다. 따라서 진공압을 이용한 공법의 국내 활용 및 응용을 통한 독자적인 공법기술의 개발이 요구되는 실정이다.

제 3 절 국내외 기술동향 분석 결과

기존의 성토재하공법 및 연직배수공법의 단점을 보완하고자 진공압밀(대기압재하)공법이 개발되었으나, 진공유지를 위한 멤브레인 기술의 부족과 시공상의 어려움 및 장비의 낙후로 인해 그 적용성에 한계를 드러냈다. 1990년 이후에는 통수능력을 향상시킨 다양한 배수재의 개발과 강력한 진공펌프의 개발 등 관련 장비의 첨단화에 힘입어 다시금 진공압밀(대기압재하)공법에 대한 새로운 연구가 진행되었다. 그러나 이러한 주변여건의 변화에도 불구하고 멤브레인의 파손과 배수재의 Clogging 현상에 따른 배수효율의 감소로 인한 처리심도의 감소, 시공 상의 막대한 비용으로 인해 그 활용에는 큰 제약이 있었다. 또한 진공압 적용시 배수재로부터 가까운 주변 지반의 강도가 급격히 증가하여 구근을 형성하는 경화영역의 발생으로 인하여 그 외곽 지반의 배수효율이 급격히 감소하는 현상이 발생하여 지반의 균일한 개량을 방해하는 현상이 발생하였다. 이러한 진공압밀 공법의 문제점은 최종적으로 진공압 효율의 감소로 귀결되어 실제 가하여준 진공압에 비하여 지반에 전달되는 진공압의 크기가 매우 작아지는 문제점을 발생시킨다. 따라서 기존 압밀촉진공법의 문제점을 효과적으로 해결하고 진공압 효율을 극대화할 수 있는 새로운 공법의 개발이 필요하다.

본 연구진이 제시하는 대심도 연약지반의 개량을 위한 석션드레인 공법의 경우 배수재와 진공펌프를 직접 연결하고 성토하중과 멤브레인을 전혀 사용하지 않기 때문에, 굴착을 필요로 하는 Beau Drain 공법과 같은 기존의 대기압 재하하중 및 단순연직드레인 압밀촉진공법과는 전혀 다른 신기술이다. 배수재와 진공호스의 연결시 진공압의 손실을 억제하며 시공이 간편한 새로운 커넥터를 개발하였으며, 잦은 파손으로 인한 진공압 손실의 주요 원인이 되었던 멤브레인을 사용하지 않고 상부 일정심도(약 1m)까지 배수재를 타입함으로써 진공압의 손실을 최대한 억제하고자 하였다. 또한 경화영역의 발생을 억제하기 위한 최적의 단계진공압 기간을 산정하여 지반이 균일하게 개량되도록 하고자 하였다.

석션드레인 공법이 개발되면 기존 압밀침하공법의 문제점(성토제하에 따른 환경파괴, 부등침하, 전단파괴, 멤브레인 파손과 Clogging에 의한 진공배수 효율 감소, 막대한 비용 소요 및 깊이에 따른 비균질한 개량효과, 경화영역의 발생으로 인한 지반의 불균일

한 개량)을 모두 해결하여 대심도 연약지반에 효과적으로 적용할 수 있을 것이다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 Suction Drain 공법의 기본 이론

1. 공법의 개요

본 연구에서 제안하는 Suction Drain 공법은 성토하중이나 기밀 시트 없이 진공압만을 이용하여 지반을 개량하기 때문에 기존의 성토재하공법과 진공압밀(대기압재하)공법의 단점들을 동시에 극복할 수 있고, 이 공법에 적합한 배수재의 선정을 통해 진공효율을 극대화 시킬 수 있다. 또한, 기존에 제시된 압밀 촉진공법의 개량심도가 20~30m 이내인 반면, Suction Drain 공법은 배수재와 진공펌프의 직접적인 연결을 통해 대심도 연약지반에 적용이 가능하다. Fig 3.1.1.1은 본 연구에서 제안한 Suction Drain 공법의 개념도이다.

배수재와 진공펌프를 직접 연결하는 Suction Drain 공법은 진공효율을 극대화 시킬 수 있고 균일한 진공압을 지반에 적용 시킬 수 있기 때문에, 지반 내 부등침하 및 전단 파괴를 방지할 수 있다. 따라서 이로 인해 시공 상 위험요소를 방지할 수 있다.

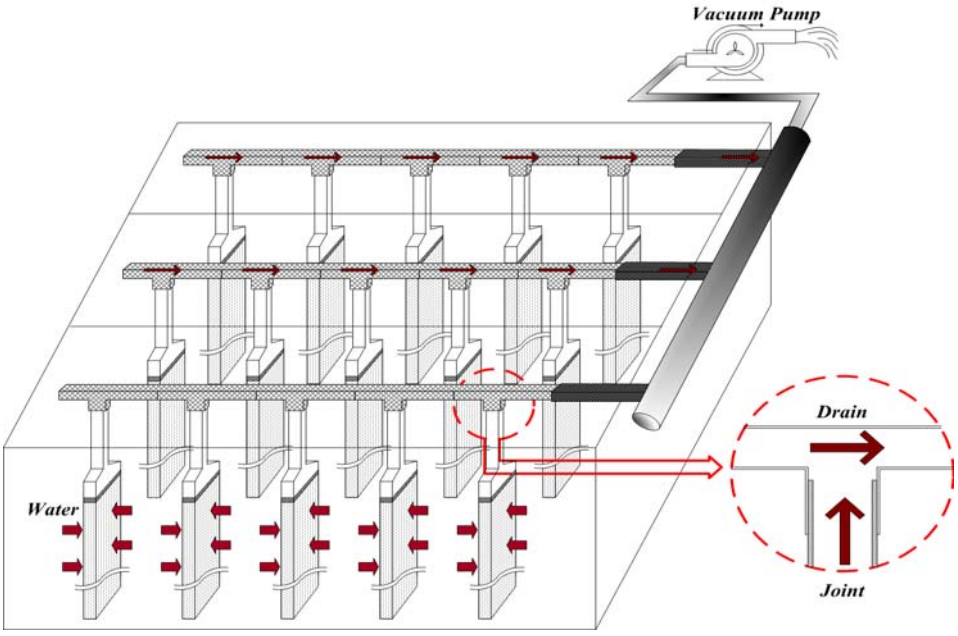
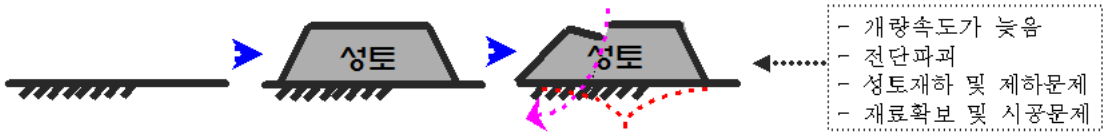
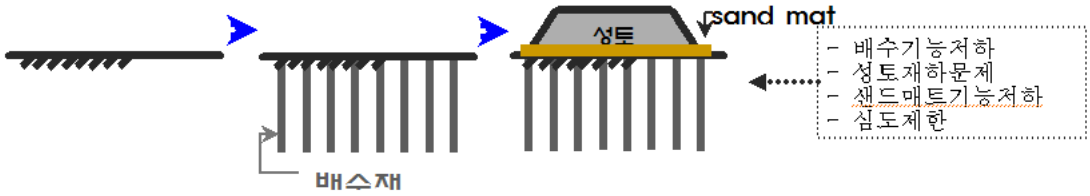


Fig 3.1.1.1 Suction Drain 기술의 현장 적용 개념도

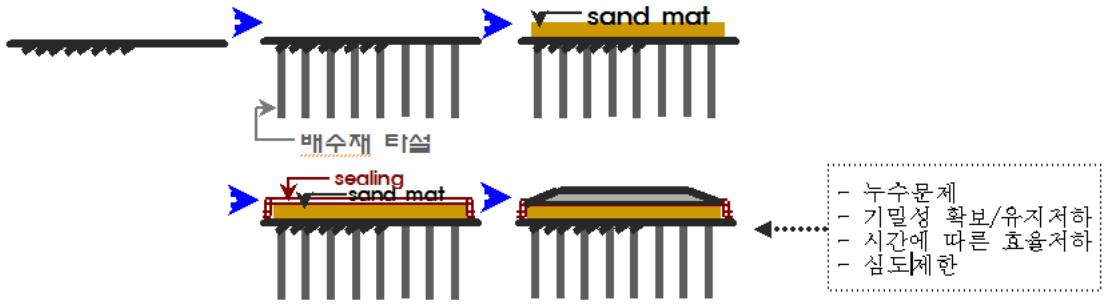
기존의 진공압밀공법은 개량지반내의 기밀성을 유지하기 위해, 지표면을 기밀시트로 덮어야 했으나, 이 공법은 성토하중이나 기밀 시트 없이 진공압만을 이용하여 지반을 개량하기 때문에 기존의 성토재하공법과 진공압밀공법의 단점들을 동시에 극복할 수 있다. 또한 배수재와 진공펌프를 직접 연결하고 배수재가 타입되는 깊이를 조절하여 sealing 층의 두께를 자유자재로 조절할 수 있기 때문에, 진공효율을 극대화 시킬 수 있고 균일한 진공압을 지반에 적용 시킬 수 있으며, 이로 인해 지반 내 부등침하 및 전단 파괴를 방지할 수 있다. Fig 3.1.1.2에는 기존 제시된 압밀촉진공법의 시공 단계 및 이로 인해 유발되는 여러 가지 문제점을 나타내었다.



(a) 선행재하(Pre-loading)공법



(b) 연직배수 (PDB) 공법



(c) 진공압밀(대기압재하)공법

Fig 3.1.1.2 기존에 제시된 압밀촉진공법의 공정 및 이에 따른 단점

2. 지반내 응력분포

성토재하압밀과 진공압밀의 가장 큰 차이점은 지반내의 응력변화 상태를 파악하면 알 수 있다. Fig. 3.1.2.1에서 응력변화 상태에서 재하압밀의 경우 압밀 종료 시, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P + \triangle p' = (p' + \triangle p') + u \qquad (3.1.2.1)$$

여기서 P : 재하전의 전응력

p' : 재하전의 유효응력

$\triangle p'$: 압밀응력의 증가

u : 간극수압

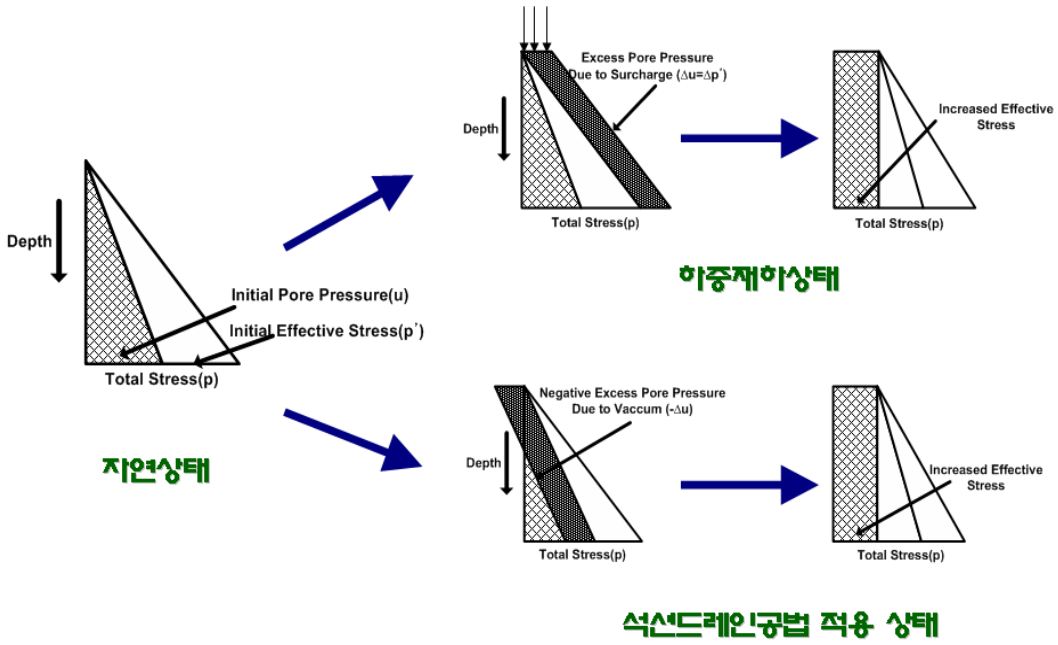


Fig 3.1.2.1 석션드레인 & 연직배수공법

재하압밀에서는 압밀 완료 후 전응력은 $\triangle p'$만큼 증가하게 된다. 반면에, 진공압밀에 있어서 간극수압을 자연 상태에서 감소시킨 량을 $\triangle u$라 하면 식 (3.1.2.2)와 같다.

$$\triangle u = \triangle p' \qquad (3.1.2.2)$$

이다. 즉, 증가하는 압밀하중은 간극수압의 감소값이 같고, 석션드레인 공법의 경우 압밀 종료시, 식 (3.1.2.3)과 같다.

$$P = (p' + \triangle p') + (u - \triangle u) \qquad (3.1.2.3)$$

이 상태에서 압밀에 작용하는 응력은 모두 $\triangle p'$만큼 증가한다. 그러나 재하압밀은 전응력이 $\triangle p'$만큼 증가하지만 진공압밀의 경우 전응력의 변화가 전혀 없다.

Fig. 3.1.2.2에는 성토재하공법과 석션 공법의 적용시 이론적인 응력경로를 나타내었다. 성토재하공법 적용시 하중재하를 멈추고 압밀이 시작되면서 소산된 간극수압의 정도에 따라 σ'_V와 σ'_H는 증가하게 되므로, 이때 응력경로는 BC 경로를 따르게 된다. 따라서 성토재하공법에 의한 응력경로는 성토하중 재하시 AB 경로를 따르다가 압밀시에는 BC경로를 따르게 됨을 알 수 있다.

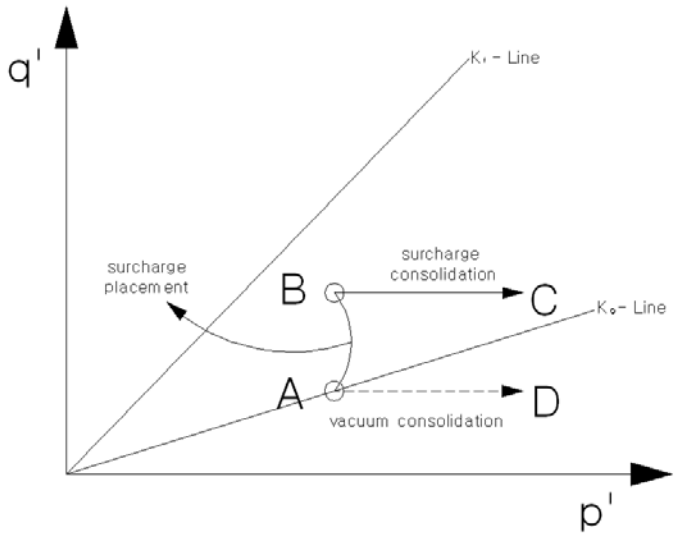


Fig. 3.1.2.2 재하압밀과 석션의 응력경로

성토재하공법에 의한 응력경로 ABC는 파괴포락선 근처에 존재하기 때문에 항상 파괴의 가능성을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나 진공압밀의 경우에는 진공하중에 의한 압밀촉진과 동시에 대기압 크기의 응력이 최대주응력, 최소주응력에 같은 크기로 가해지기 때문에 성토재하공법에서처럼 AB응력경로를 따르지 않는다. 따라서 진공하중에 의한 압밀촉진 현상에 의해 소멸되는 과잉간극수압에 따라 지중의 σ'_V와 σ'_H는 증가하게 되는데, 대기압 진공하중은 등방압축이므로 증가되는 유효응력의 크기는 같다. 따라서 AD 경로를 따르게 되므로 응력경로는 파괴포락선으로부터 점점 멀어짐을 알 수 있다. 즉, 석션은 수직, 수평방향을 동시에 압축변형을 시키므로 이로 인해 전단에 의한 원호활동 파괴가 발생하지 않는다.

Fig. 3.1.2.3에 나타난 바와 같이 간극수압의 변화는 개량영역의 상부에서부터 배수재의 상부까지는 간극수압이 서서히 감소하여 배수재의 상부에서는 적용시켜준 진공압에 도달하고, 이후 연직배수재의 타설심도까지 일정하게 감소하는 경향을 나타낸다.

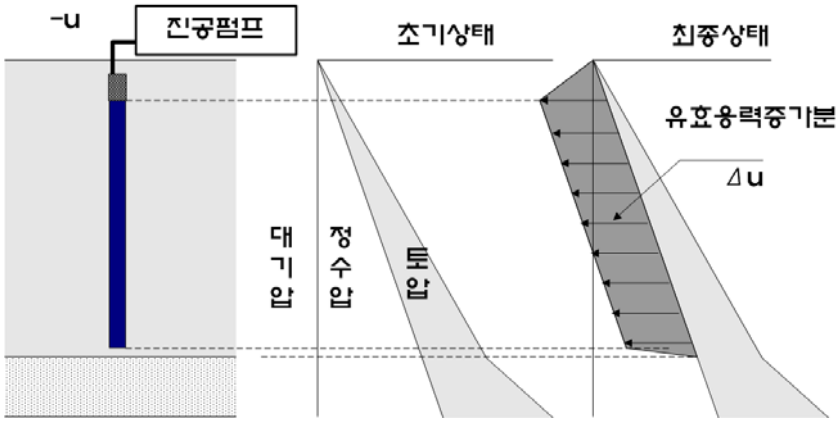


Fig. 3.1.2.3 Suction Drain 공법에 의한 지반 내 이론적 응력 변화

제 2 절 Suction Drain 공법의 해석 이론

1. 방사형 압밀 이론

연직배수재와 관련된 현재까지의 이론적인 흐름은 Terzaghi(1925)의 1차원압밀이론의 제시이후 방사형의 배수재 설치에 대한 연구로서 대체적으로 Barron(1948), Yoshikuni(1974, 1979), Hansbo(1979), Onoue(1988)로 이어지는 연구가 현재까지의 배수재 적용에 관한 연구의 주축이라고 할 수 있다(Table 3.2.1.1 참조).

현재 알려지고 있는 연직배수재에 대한 해석은 모두 Terzaghi의 기본가정을 사용하고 있으며, 또한 현장조건을 대표하는 다음의 두 가지 가정조건에 따라 그 해석결과나 해를 구하는 방법이 현저하게 다르다.

Table 3.2.1.1 연직배수이론의 역사 (Kang, 1999)

Terzaghi(1925)	One-dimensional consolidation theory
Rendulic(1935)	Radial consolidation theory
Carillo(1942)	Radial consolidation theory
Kjellman(1937, 1948)	Simplified solution for radial consolidation on the equal strain hypothesis
Barron(1948)	Solution for centripetal Consolidation by vertical drains considering finite permeability of drain and smear considering both equal and free strain conditions
Hansbo(1960)	Bringing up of questions for the validity of Darcy's law
Yoshikuni and Nakanodo(1974)	A rigorous solution for radial consolidation Considering finite permeability of drains
Hansbo(1979)	An approximate solution for radial consolidation with the consideration of smear zone and well resitance
Yoshikuni(1979)	An approximate solution for radial consolidation with the consideration of well resitance
Onoue(1988)	A rigorous solution for radial consolidation considering smear zone and well resistance reviewing the Yoshikuni and Nakanodo's solution

가. 일정변형율 (equal strain) 조건

지표면에 작용하는 상재하중이 강성인 경우 지표면의 침하는 균등하나 응력분포는 균등하지 않다.

실제 현장에서의 조건은 자유변형율 조건에 가깝다고 할 수 있으나, 이러한 조건에 따른 이론적인 해를 구하는 방법은 매우 복잡한 계산과정을 필요로 한다. 이에 비하여 일정변형율 조건은 계산과정이 단순하고 명확하지만 이러한 조건이 적용될 수 있는 것은 실내시험에서 강성재하판을 사용하는 경우와 배수재의 타설간격에 비하여 타설심도가 매우 큰 경우이다.

드레인웰(drain well), 즉 배수재를 중앙에 설치한 원통형 토괴를 도해적으로 설명한 것이 Fig. 3.2.1.1이다. 여기서, r_w, r_s, r_e 및 d_w, d_s, d_e는 각각 배수재, 스미어 존(smear zone) 및 영향원의 반경과 직경을 나타낸 것이고, k_h, k_s, k_w는 각각 수평방향에서의 불교란지반에 대한 투수계수와 스미어 존의 투수계수 그리고 배수재의 투수계수를 나타낸다. C_h는 불교란토의 수평방향흐름에 대한 압밀계수이다.

Terzaghi의 1차원압밀이론 이후 간극수의 흐름을 연직방향만이 아닌 수평방향의 흐름을 고려한 다음의 방사형 압밀방정식이 Rendulic(1935)에 의해 처음 제시되었다.

토층내의 3차원흐름에 의한 압밀에 대하여 다음과 같은 편미분방정식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{k_h}{r_w}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+\frac{k_v}{r_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}=\frac{a_v}{1+e}\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right) \qquad (3.2.1.1)$$

여기서, k_h : 수평방향 흐름에 대한 투수계수

a_v : 압축계수 ($=-de/d\sigma$)

만일 중앙에 배수재를 설치한 원통형 토괴인 경우에 한하여 생각한다면 중심축방향으로의 축대칭흐름 조건으로 볼 수 있기 때문에 식 (3.2.1.1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{k_h}{r_w}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}\right)+\frac{k_z}{r_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}=\frac{a_v}{1+e}\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right) \qquad (3.2.1.2)$$

여기서, u : 임의의 위치와 시간의 과잉간극수압

t : 전 연직응력의 증가이후의 시간

r : 동심원상의 중심으로부터 고려하고자 하는 지점의 거리

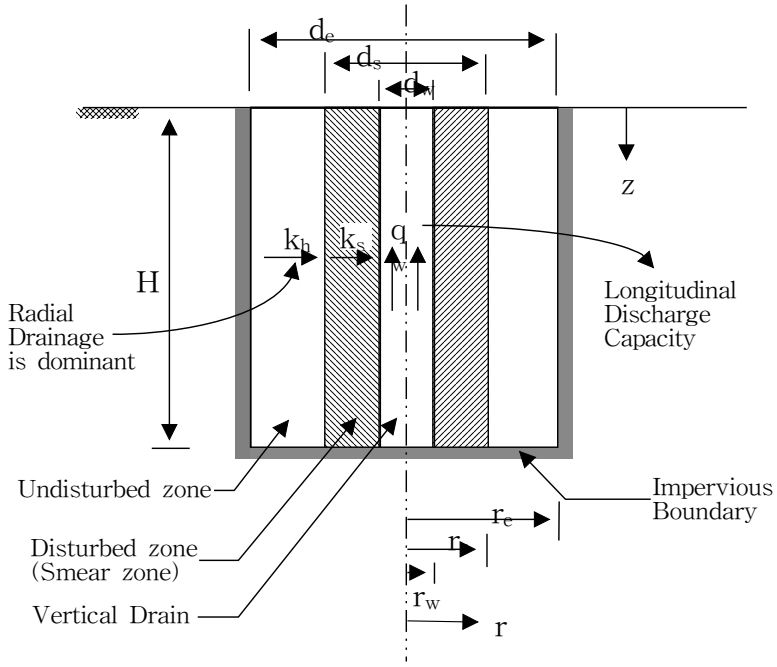


Fig. 3.2.1.1 연직배수 방사형 압밀의 개념도

일반적으로 방사형압밀에 대한 이론적인 분석은 배수재의 길이에 비하여 타설간격이 현저하게 작기 때문에 원통형 토괴내 과잉간극수압에 의한 간극수의 흐름이 동은 연직방향을 무시하고 수평방향의 흐름만을 가정할 수 있다. 따라서 윗 식은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t}=C_h\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right) \qquad (3.2.1.3)$$

여기서, C_h : = $k_h/m_v\gamma_w$, m_v: 체적압축계수 = $a_v/(1+e)$

이 방사형압밀방정식에 대한 해를 구하기 위한 최초의 시도가 Kjellman(1937)에 의해 이루어졌으며, 그는 일정변형율 조건을 가정하여 수평방향의 변형은 발생되지

않고 배수재의 투수성이 무한하며, 타설에 의한 교란은 발생하지 않는다는 이상적인 조건에 대하여 다음의 간편해를 제시하였다. 또한, Darcy의 법칙이 그대로 적용되었다.

$$\overline{U_h} = 1 - \frac{\overline{u}}{u_o} = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{\mu}\right) \qquad (3.2.1.4a)$$

$$\mu = \frac{n^2}{n^2-1}\left(\ln n - \frac{3}{4} + \frac{1}{n^2} - \frac{1}{4n^4}\right) \qquad (3.2.1.4b)$$

여기서, $\overline{u}$: 원통토괴내의 평균과잉간극수압

T_h : 방사방향흐름에 대한 시간계수 (= C_{ht}/de)

n : 간격비 (= d_e/d_w)

식 (3.2.1.4b)의 μ값에 대하여 다음과 같이 미소한 항을 제거하여 간략히 나타낼 수 있다.

$$\mu = \ln n - \frac{3}{4} \qquad (3.2.1.4c)$$

하지만, Kjellman(1937)이 위에서 제시한 이상적인 조건은 현실적이지 못한 것으로 실제의 현장조건을 과대평가할 수 있는 가능성이 크다. 즉, 배수재의 투수성은 유한한(finite) 특성을 가지고 있고 이로 인하여 배수재내 흐름 저항이 발생되면서 배수지연에 의한 압밀소요시간이 증가할 수 있다. 또, 배수재를 타설함에 따라 배수재 주변지반은 교란되고 이로 인한 투수성, 압축성 등과 같은 공학적 특성은 현저히 달라질 수밖에 없다.

지금까지 가장 전형적이면서 연직배수재의 적용을 위한 실제적인 연구로서 받아들여지는 것이 바로 Barron(1948)이 제시한 이론이다. 그가 제시한 일정변형율 조건에 대한 이상화된 배수재에 대한 해는 현재까지도 수많은 현장이나 연구에 그대로 적용되고 있을 만큼 유명하다.

그는 자유변형율 조건과 일정변형율 조건에 대해서 모두 해를 구하고자 하였고, 이와 더불어 스미어 존과 배수저항(well resistance)의 영향을 고려할 수 있는 식을 제시하고 있다.

Barron(1948)은 Terzaghi(1925)의 1차원 압밀방정식의 전개과정을 인용하면서, 방사형 압밀방정식의 해를 구하기 위하여 다음과 같은 부분에 대한 기본적인 가정들을 설정하고 있다.

1) 모든 연직하중은 초기에 과잉간극수압, u에 의해 지지된다.
2) 모든 압축변형은 연직방향으로만 발생된다.
3) 각 배수재의 영향이 미치는 영역은 원형이다.
4) 이 영역에 미치는 하중은 균등하게 작용한다.

이상의 가정들로부터 Barron(1948)는 일정변형율 조건에 있어서 이상적인 배수재를 이용한 지반의 평균 과잉간극수압을 다음과 같이 표현하였다.

$$\overline{u} = u_o \exp(\lambda) \qquad (3.2.1.5a)$$

$$\lambda = \frac{-8T_h}{F(n)} \qquad (3.2.1.5b)$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2-1}\ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2} \qquad (3.2.1.5c)$$

여기서, u_0 : 초기 과잉간극수압

Barron(1948)은 정수압상태에서의 과잉간극수압의 분포는 균등하지 않다고 가정하고 r이 r_e일 때 최대가 되고 배수재의 반경, r_w일 때 궁극적으로 0이 되는 포물선적인 분포를 가정하였다.

식 (3.2.1.5c)의 F(n) 항은 Kjellman(1937)의 μ값에 해당하는 것으로서 둘 다 배수재의 간격만의 함수로 이에 따른 영향정도를 고려하는 식이다.

Barron(1948)은 스미어 존을 고려하는 경우 $F(n)$항을 다음의 v로 대체하고 있다.

$$\overline{u_r} = u_o \exp(\xi) \qquad (3.2.1.6a)$$

$$\xi = \frac{-8T_h}{v} \qquad (3.2.1.6b)$$

$$\nu = [\frac{n^2}{n^2-s^2}\ln(\frac{n}{s}) - \frac{3}{4} + \frac{s^2}{4n^2} + \frac{k_h}{k_s}\frac{n^2-s^2}{n^2}\ln s] \quad (3.2.1.6c)$$

여기서, s : 스미어비 (= γ_s/γ_w)

k_s : 스미어 존에서의 수평방향 투수계수

하지만, 여기서 스미어 존을 고려하기 위하여, 스미어 존의 두께는 일정하며, 균질한 것으로 가정하였고, 스미어 존이 배수재와 인접해 있기 때문에 압밀이 매우 빠르게 진행된다고 보고 이 영역에서의 압밀은 무시하고 이를 비압축성 재료로 간주하는 비현실성을 내포하고 있다.

그는 배수저항에 대한 영향도 고려하고 있으나 자유변형율에 대해서는 다루지 못하였고 일정변형율 조건에 대해서만 다음과 같이 제시하였다.

$$\overline{\overline{u_z}} = u_o \exp(\xi f(z)) \quad (3.2.1.7a)$$

$$f(z) = \frac{\exp(\beta(z-2H)) + \exp(-\beta z)}{1+\exp(-2\beta H)} \quad (3.2.1.7b)$$

$$\beta = [\frac{2k_h(n^2-s^2)}{k_w r_e^2 \nu}]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2.1.7c)$$

여기서, k_w : 배수재의 투수계수

자유변형율 조건과 일정변형률 조건의 Barron(1948)식을 비교해보면 대부분의 현장조건이라고 할 수 있는 배수재 설치 간격비, $n = d_e/d_w$가 5이상이고 시간계수, $T_h > 0.1$인 경우, Fig. 3.2.1.2에서 보는 바와 같이 거의 비슷한 압밀도를 나타냄으로서 자유변형율에 의한 해가 일정변형율 조건에 비하여 복잡하기 때문에 좀더 간단한 일정변형율 조건의 해를 사용하는 것이 유리할 수 있다.

이상의 Barron(1948)이 여러 가지 조건에 대하여 제시한 해 중 특히 이상적인 경우에 대한 식 (3.2.1.5)는 현재 배수재 타설지반 설계의 기본이론으로서 사용되고 있으나, 현장에서의 전단강도, 간극수압 및 침하속도 등이 계측자료와의 상당한 차이를 나타내는 경우가 종종 있다. 대다수의 연구에서는 이러한 차이를 스미어 존과 배수저항의 문제로 그 원인을 찾고 있다.

또한, Barron(1948)이 제시하고 있는 자유변형율 조건에서의 해는 Bessel 함수를 포함하고 있어 실용적이지 못한데다가 실제로는 일정변형율 조건과 다르지 않은 가정 사항을 그대로 설정하였기 때문에, 현재는 이를 자유변형율 조건에 의한 해로 인정하지는 않고 있다(Yoshikuni and Nakanodo, 1974). 따라서, 이들 가정사항들 때문에 Barron의 식은 엄밀해(rigorous solution)라고 보는 것 보다는 근사해(approximate solution)에 가깝다고 할 수 있다.

그의 이론 중에서 가장 모순되는 사항 중의 하나는 원통형토괴의 측방변형이 없다고 가정함으로서 연직변형율은 반경, r에 대하여 독립적인 관계로, 다시 말해서 체적변형율이 반경, r과 무관하다고 본 것이다(Fig. 3.2.1.2).

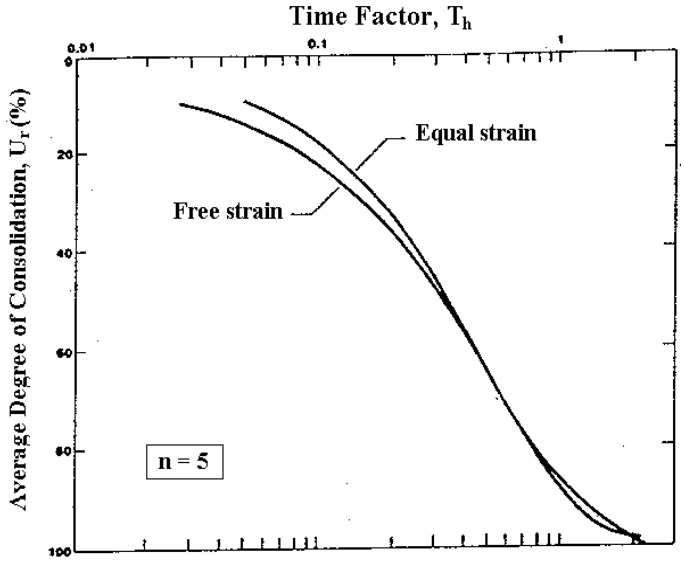


Fig. 3.2.1.2 자유변형율 조건과 일정변형율 조건의 평균압밀도 비교 (n = 5, after Trautwein, 1980)

일반적으로 스미어 존과 배수저항의 문제를 고려한 방사형압밀의 엄밀해를 구한다는 것은 매우 힘들고 까다로운 작업일 수 밖에 없다. 특히, 이들 두 조건과 관련된 가정사항이 복잡하고 일부는 가정하는 대상에 따라 결과로 나타나는 해가 완전히 달라질 수도 있기 때문이다.

Yoshikuni and Nakanodo(1974)도 스미어 존의 문제는 스미어 존의 두께와 스미어 존에서의 압축성에 대한 실제적인 연구가 선행된 후에야 고려할 수 있다고 전

제하면서, 배수저항을 고려한 엄밀해를 일정변형율 조건에 대하여 구하고 있다. 그들은 Biot의 3차원압밀에 대한 가정사항을 그대로 따르면서 원통형토괴의 경계면은 매끄러운(smooth) 표면을 가지고 있으며, 배수재의 투수계수는 유한한 것으로 간주하였다. 또한, 이들은 배수재 자체의 강성은 고려하지 않고 있으며, 원통형토괴의 상부표면에 작용하는 하중은 일정하다고 가정하였다.

식 (3.2.1.2)는 수평압밀계수, C_h와 연직압밀계수, C_v가 동일하다는 가정 하에서 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_h\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \qquad (3.2.1.8)$$

이 방정식은 $\gamma = \gamma_w$에서의 간극수압이 시간 의존적이기 때문에 정적으로 해를 결정한다는 것은 불가능하다. 따라서 이 방정식을 완전하게 풀기 위해서는 또 다른 조건의 방정식이 추가되어야 한다.

압밀과정 중 배수재내 간극수압의 거동을 표현하기 위하여 배수재내의 한 요소를 고려하고, 이때의 배수재 요소의 반경을 r_w, 높이를 d_z 라고 할 때, 미소거리, d_z 내의 유입면과 유출면의 배수량변화, d_{q1}은 다음과 같이 나타내어진다.

$$dq_1 = \frac{\pi r_w^2 k_w}{\gamma_w}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)_{r=r_w} dz\,dt \qquad (3.2.1.9)$$

여기서, k_w : 배수재의 투수계수

반대로 반경방향으로 흙요소에서 빠져나오는 간극수의 유출속도, dq_2는

$$dq_2 = \frac{2\pi r_w k_h}{\gamma_w}\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)_{r=r_w} dz\,dt \qquad (3.2.1.10)$$

로 표현된다.

만약, 배수재가 완전히 포화되어 있다고 가정하고 연속조건을 따른다면,

$$dq_1 + dq_2 = 0 \qquad (3.2.1.11)$$

이고, 식 (3.2.1.11)에 식 (3.2.1.9)와 식 (3.2.1.10)을 대입하면 다음과 같은 배수재내의 간극수압에 대한 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{r_w} + \frac{r_w}{2}\frac{k_w}{k_h}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)_{r_w} = 0 \qquad (3.2.1.12)$$

Yoshikuni and Nakanodo(1974)는 위의 방정식을 이용하여 다음의 경계 및 초기조건으로부터 배수재내의 흐름을 고려한 압밀해를 구하고자 하였다(Fig. 3.2.1.3 참조).

1) $\text{Y} = \text{Y}_e$ 일 때 $\frac{\partial u}{\partial r} = 0$

2) 시간 $t = t$이고, $z = 0$일 때, $u = 0$

3) 시간 $t = t$이고, $z = 2H$ 일 때, $u = 0$

4) $\text{Y} = \text{Y}_w$ 이고 $z = z$ 일 때, $\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{r_w} + \frac{r_w}{2}\frac{k_w}{k_h}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)_{r_w} = 0$

5) $t = 0$이고 $\text{Y} = \text{Y}$, $z = z$ 일 때 $u = u_0(constant)$

이들은 위의 경계조건으로부터 전체 원통형토괴의 평균 과잉간극수압을 다음과 같이 매우 복잡한 해로 구하였다.

$$\overline{u}(T_h) = \frac{4}{\pi}\frac{2n^2}{n^2-1}\frac{1}{L}\sum_{M}^{\infty}\sum_{N}^{\infty} C_{MN}\frac{M}{\alpha_{MN}^2 \cdot r_e^2} \qquad (3.2.1.13)$$
$$D_o(\alpha_{MN} r_e^2) \cdot \exp\left[-\left(4\alpha_{MN}^2 \cdot r_e^2 + \left(\frac{M\pi r_e^2}{H}\right)^2\right) T_h\right]$$

여기서, M, N : 임의의 정수, C, D : 적분상수, L : 배수저항계수 (coefficient of well resistance)

$$= \frac{32}{\pi^2}\frac{k_h}{k_w}\left(\frac{H}{d_w}\right)^2 \qquad (3.2.1.14)$$

여기서, k_w : 배수재의 투수계수

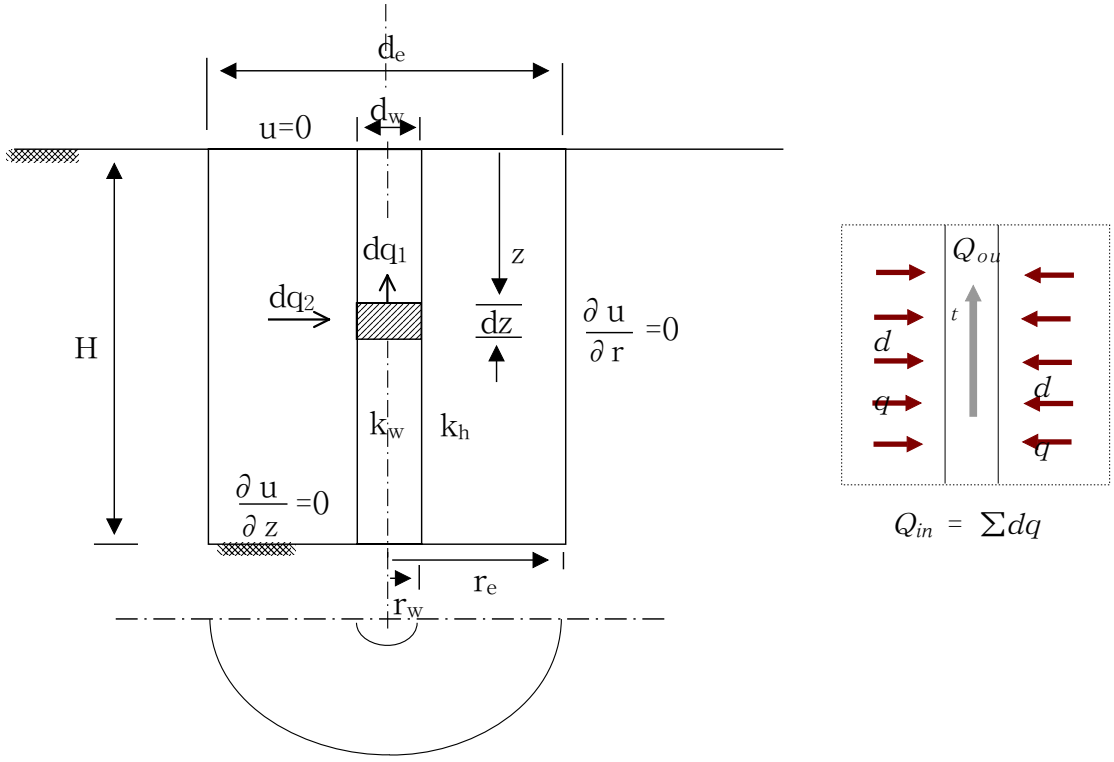


Fig. 3.2.1.3 드레인 웰에서 간극수의 거동 양상

하지만 이들이 구한 엄밀해 또한 Barron(1948)의 해와 마찬가지로 Bessel 함수를 포함하는 복잡한 식으로서 일반 대다수 현장에서 사용되기에는 매우 까다롭고 번거로운 식이라 할 수 있다.

Hansbo(1979)는 Kjellman(1937)이 사용한 간편해의 유도과정을 인용하면서 토층 내 임의의 깊이, z에서의 압밀도, $U_h(z, T_h)$의 항으로서 스미어 존과 배수저항의 영향을 모두 고려하여 다음과 같이 해석적이면서 단순한 간편해를 유도하였다. Hansbo(1979)는 그가 제시한 간편해가 Yoshikuni and Nakanodo(1974)가 제시한 해와 비교할 때 매우 유사함을 보임으로서 자신의 해를 적용함에 있어 간편성을 강조하고 있다.

$$U_h(z, T_h) = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F}\right)$$

$$F = F(n) + F(s) + F(w) \qquad (3.2.1.15)$$

여기서, $F(n)$: 배수재 간격에 의한 영향계수

$F(s)$: 스미어 효과에 의한 영향계수

$F(w)$: 배수저항에 의한 영향계수

그리고, 간격비 n이 20이상인 경우에 대하여 간격비 계수(spacing ratio factor)는 다음과 같이 단순화 시킬 수 있고,

$$F(n) = \ln\left(\frac{d_e}{d_w}\right) - \frac{3}{4} = \ln(n) - 0.75 \tag{3.2.1.16}$$

그리고, 그 밖의 영향계수는 다음과 같이 표현된다.

$$F_s = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1\right)\ln\frac{d_s}{d_w} \tag{3.2.1.17}$$

$$F_w = \pi z(2H - z)\frac{k_h}{q_w} \tag{3.2.1.18}$$

여기서, k_h/k_s : 교란에 의한 투수계수의 감소비 (= η)

q_w : 배수재의 통수능 (= $\pi r_w^2 k_w$)

r_s/r_w : 스미어 존의 반경비 (= S)

H : 배수재의 길이 (일면배수 즉, 배수가 배수재의 한쪽에서 발생할 경우)

(단, 양면배수인 경우 H는 1/2값을 사용)

물론, Hansbo(1979)의 모델은 Barron(1948)의 해와 비교할 때 스미어 존의 지반은 압축성이라고 가정함으로서 다분히 현실적이라고 할 수는 있으나, 여전히 스미어 존의 압축성이 불교란영역과 동일하다는 가정 사항을 세우고 있다.

또한, 배수재의 통수능(즉, 투수계수)이 매우 커서 배수저항이 무시할 정도로 작으면, Hansbo(1979)의 해로부터 전체 평균압밀도 $U_h(T_h)$를 고려한 해를 구하기가 어려운데 이러한 특정한 경우에 대해서 Yoshikuni(1979)는 다음과 같은 간편해를 제안하였다.

$$U_h(T_h) = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n) + 0.8L}\right) \quad (3.2.1.19)$$

여기서, L : 배수저항계수 ($=8/(\pi R)$), k_w : 배수재의 투수계수

위 식은 배수저항을 고려하면서 Barron(1948)의 방정식을 변형한 식이다. 이 식을 이용하여 Onoue(1988)는 배수저항과 스미어 존을 모두 고려하면서 일반적이고 간단한 방정식을 $U_h(T_h)$항으로서 다음과 같이 나타내었다.

$$U_h(T_h) = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n') + 0.8L}\right) \quad (3.2.1.20)$$

여기서, n' : 환산간격비 ($= nS^{\eta - 1}$)

스미어 존이 존재하는 경우 즉, $\eta = k_h/k_s > 1$ 일 때의 압밀곡선이 형태상으로 $U_h - \log T_h$ 곡선상의 균등한 흙($\eta = 1$)의 압밀곡선과 비슷하기 때문에 η 값의 변화는 근사적으로 간격비 n의 변화와 같은 역할을 한다.

가장 최근에 배수재의 적용이론으로서 제시된 것 중의 하나가 Zeng and Xie(1989)가 제시한 간편해이다. 이들은 관입된 배수재의 배수저항과 스미어 효과를 고려한 방사형 배수에 대하여 Hansbo(1979)의 가정조건과 같은 방법으로 다음과 같은 근사해를 제시하였다.

$$\overline{U_r} = 1 - \exp(-\beta_r t) \quad (3.2.1.21)$$

여기서, $\beta_r = 8C_h/(F + \pi G)/d_e^2$이고,

$$F = \ln\left(\frac{n}{S}\right) + \frac{k_h}{k_s}\ln(S) - \frac{3}{4} \quad (3.2.1.22)$$

여기서, $G = \frac{k_h}{k_w}\left(\frac{H}{d_w}\right)^2$: 배수저항계수

이들이 제시하고 있는 간편해는 비교적 간단한 과정을 통하여 유도된 것으로 Hansbo(1979)나 Yoshikuni(1974)와 비교하여도 거의 유사한 경향을 보여주고 있어

그 적용상 편리한 이론으로 받아들여지고 있으나, 아직까지는 그들 식의 적용성이 보편화된 것은 아니다.

이상의 연직배수재에 의한 방사형압밀방정식을 각 이론이 개발된 연대적인 흐름과 각 이론상의 가정 및 경계조건의 개선 및 발전방향에 맞추어 정리하면 다음과 같다.

Table 3.2.1.2 Kjellman (1937)

가정사항	일정변형율 조건을 가정하여 수평방향의 변형이 발생되지 않고 배수재의 투수성이 무한하여, 타설에 의한 교란은 전혀 고려하지 않는 이상적인 조건에 대하여 간편해를 제시
기본압밀해	$\overline{U_h} = 1 - \frac{u}{u_0} = 1 - \exp(\frac{-8T_h}{\mu})$ $\mu = \frac{n^2}{n^2-1}(\ln n - \frac{3}{4} + \frac{1}{n^2} - \frac{1}{4n^4}) \rightarrow$ 간략하게 $\mu = \ln n - \frac{3}{4}$ 여기서, u : 원통토괴내의 평균과잉간극수압 T_h : 방사방향흐름에 대한 시간계수 $(= c_h \cdot t / d_e^2)$ n : 간격비 $(= d_e / d_w)$
한계점	위에서 제시한 이상적인 조건은 현실적이지 못한 것으로 실제의 현장조건을 과대평가할 수 있는 가능성이 큼. 즉, 배수재의 투수성은 유한한 특성을 가지고 있고 이로 인하여 배수재내 흐름 저항이 발생되면서 배수지연에 의한 압밀소요시간이 지연될 수 있다. 또, 배수재를 타설함에 따라 배수재 주변지반은 교란되고 이로 인한 투수성, 압축성 등과 같은 공학적 특성은 현저히 달라질 수밖에 없음.

Table 3.2.1.3 Barron (1948)

가정사항	모든 연직하중은 초기에 과잉간극수압, u에 의해 전부 지지되고, 모든 압축변형은 연직방향으로만 발생됨. 각 배수재의 영향이 미치는 영역은 원형으로, 이 영역에 미치는 하중은 균등하게 작용함.
기본 압밀해	$\overline{u} = u_0 \exp(\lambda),\ \lambda = \frac{-8T_h}{F(n)},\ F(n) = \frac{n^2}{n^2-1} ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2}$ 여기서, u_0 : 초기 과잉간극수압
스미어존을 고려하는 경우	F(n)항을 ν로 대체함. $\overline{u_r} = u_0 \exp(\xi),\quad \xi = \frac{-8T_h}{\nu},$ $\nu = [\frac{n^2}{n^2-1} ln(\frac{n}{s}) - \frac{3}{4} + \frac{s^2}{4n^2} + \frac{k_h}{k_s}\frac{n^2-s^2}{n^2} lns]$ 여기서, s : 스미어비($= r_s/r_w$) k_s: 스미어 존에에서의 수평방향 투수계수
배수저항을 고려하는 경우	$\overline{u_z} = u_0 \exp(\xi f(z)),\quad f(z) = \frac{\exp(\beta(z-2H)) + \exp(-\beta z)}{1+\exp(-2\beta H)}$ $\beta = [\frac{2k_h(n^2-s^2)}{k_w r_e^2 \nu}]^{1/2},$ 여기서, k_w : 배수재의 투수계수
한계점	스미어 존을 고려하기 위하여, 스미어 존의 두께는 일정하며, 균질한 것으로 가정하였고, 스미어 존이 배수재와 인접해 있기 때문에 압밀이 매우 빠르게 진행된다고 보고 이 영역에서의 압밀은 무시하고 이를 비압축성 재료로 간주하는 비현실성을 내포하고 있음. 본 제안식에서는 배수저항(well resistance)에 대한 영향도 고려하고 있으나 자유변형율 조건에 대해서만 적용할 수 있음. 이론상의 모순점으로 원통형 토괴의 측방변형이 없다고 가정함으로서 연직변형율은 반경, r에 대해 독립적인 관계로, 다시 말해서 체적변형률이 반경 r과 무관하다고 보고 있음.

Table 3.2.1.4 Yoshikuni & Nakanodo (1974)

가정 사항	배수저항을 고려한 엄밀해를 일정변형율 조건에 대하여 구하였음. Biot의 3차원압밀에 대한 가정사항을 그대로 따르면서 원통형토괴의 경계면은 매끄러운(smooth) 표면이며, 배수재의 투수계수는 유한한 것으로 간주하였음. 또한, 이들은 배수재 자체의 강성은 고려하지 않고 있으며, 원통형토괴의 상부표면에 작용하는 하중은 일정하다고 가정하였음.
기본 압밀해	$\overline{u}(T_h)=\frac{4}{\pi}\frac{2n^2}{n^2-1}\frac{1}{L}\sum_{M}^{\infty}\sum_{M}^{\infty}C_{MN}\frac{M}{\alpha_{MN}^2 r_e^2}$ $D_0(\alpha_{MN}r_e^2)\cdot\exp[-(4\alpha_{MN}^2 r_e^2+(\frac{M\pi r_e^2}{H})^2)T_h]$ 여기서, M,N : 임의의 정수, C, D : 적분상수 L : 배수저항계수$=\frac{32}{\pi^2}\frac{k_h}{k_w}(\frac{H}{d_w})^2)$ k_w : 배수재의 투수계수
한계점	Bessel 함수를 포함하는 복잡한 식으로서 일반 대다수 현장에서 사용되기에는 매우 까다롭고 번거로움.

Table 3.2.1.5 Yoshikuni (1979)

특 징	배수재의 통수능이 매우 커서 배수저항(well resistance)이 무시할 정도로 작으면, Hansbo(1979)의 해로부터 전체 평균압밀도 $U_h(T_h)$를 고려한 해를 구하기가 어려운데 이러한 특정한 경우에 대해서 간편해를 제안하였음.
기본 압밀해	$U_h(T_h)=1-\exp(\frac{-8T_h}{F(n)+0.8L})$ 여기서, L : 배수저항(well resistance)계수 $(=8/(\pi R_e))$ k_w : 배수재의 투수계수 $F(n)=\frac{n^2}{n^2-1}ln(n)-\frac{3n^2-1}{4n^2}$

Table 3.2.1.6 Hansbo (1979)

특 징	Kjellman(1937)이 사용한 간편해의 유도과정을 인용하면서 토층내 임의의 깊이, z에서의 압밀도, $U_h(z,\ T_h)$의 항으로서 스미어 존과 배수저항의 영향을 모두 고려하여 해석적이면서 단순한 간편해를 유도하였음.
기본 압밀해	$U_h(z,\ T_h) = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F}\right)$ $F = F(n) + F(s) + F(w)$ 여기서, $F(n)$: 배수재 간격에 의한 영향계수 $F(s)$: 스미어 효과에 의한 영향계수 $F(w)$: 배수저항에 의한 영향계수
특 징	간격비, n이 20이상인 경우에 대하여 간격비 계수(spacing ratio factor)는 다음과 같이 단순화 될 수 있음. $F(n) = \ln\left(\frac{d_e}{d_w}\right) - \frac{3}{4} = \ln(n) - 0.75$ $F(s) = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1\right)\ln\frac{d_s}{d_w}, \quad F(w) = \pi z(2H - z)\frac{k_h}{q_w}$ 여기서, k_h/k_s : 교란에 의한 투수계수의 감소비($=\eta$) q_w : 배수재의 통수능($=\pi r^2_{/k_w w}$) r_s/r_w : 스미어 존의 반경비($=s$) H : 배수재의 길이 (양면 배수인 경우 H는 1/2값을 사용)

Table 3.2.1.7 Onoue (1988)

특 징	Yoshikuni(1979)의 제안식은 배수저항을 고려하면서 Barron(1948)의 방정식을 변형한 것으로 이 식을 이용하여 Onoue(1988)는 배수저항과 스미어 존을 모두 고려하면서 일반적이고 간단한 방정식을 $U_h(T_h)$항으로서 제안하였음.
기본 압밀해	$U_h(T_h) = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n)' + 0.8L}\right)$ 여기서, n' : 환산간격비 ($= nS^{\eta-1}$) η : k_h/k_s (교란에 의한 투수계수의 감소비) S : 배수재 타설간격 L : 배수저항계수 ($= 8/(\pi R_e)$)

Table 3.2.1.8 Zeng & Xie (1989)

특 징	관입된 배수재의 배수저항과 스미어효과를 고려한 방사형 배수에 대하여 Hanbo(1979)의 가정조건과 같은 방법으로 지배방정식의 근사해를 제시
기본 압밀해	$\overline{U_r} = 1 - \exp(-\beta_r t)$ 여기서, $\beta_r = 8c_h/(F+\pi G)/d_e^2$ 이고 $F = \ln\left(\frac{n}{S}\right) + \frac{k_h}{k_s} ln(S) - \frac{3}{4}$ 여기서, G : 배수저항계수 $= \frac{k_h}{k_w}\left(\frac{H}{d_w}\right)^2$ H : 배수재의 길이 (배수가 배수재의 한쪽에서 발생할 경우) 단, 양쪽면 배수인 경우 H는 1/2값을 사용
한계점	비교적 간단한 과정을 통하여 유도된 것으로 Hansbo(1979)나 Yoshikuni(1974)와 비교하였을 경우 거의 유사한 경향을 보여주고 있어 적용상 편리한 이론으로 받아들여지고 있으나, 아직까지 본 식의 적용성이 보편화되지 못했음.

나. 자유변형율 (free strain) 조건

지표면에 작용하는 상재하중이 연성인 경우 지표면의 하중은 등분포로 존재하나 침하는 균등하지 않다. 즉, 부등침하가 발생한다. 현장에 적용되는 모든 압밀촉진공법은 자유변형율 조건에 가깝다고 할 수 있으나, 이러한 조건에 따른 이론적인 해를 구하는 방법은 매우 복잡한 계산과정을 필요로 한다.

2. Suction Drain 공법의 영향인자

Chen과 Bao(1989)에 의하면 진공압(負壓)에 의한 압밀은 양압(陽壓)에 의한 압밀과 단지 경계조건에서 차이가 날 뿐 그 원리는 같다고 제시한 바 있다. 따라서 일반적인 연직배수재의 타입 시 발생할 수 있는 영향인자와 Suction Drain 공법에서의 영향인자는 유사하다. 또한, 연직배수공업의 영향인자 외에도 Suction 압의 유지를 위한 Sealing 층의 두께, Hardening Zone의 영향 등을 추가적으로 고려해 주어야 한다.

가. 배수저항에 의한 통수능 변화

Suction Drain 공법의 주목적은 압축성이 크고 투수계수가 작은 연약지반에서 배수거리를 인위적으로 단축하여 침하속도를 촉진시키는 동시에 전단강도를 증진시키는 것이다. 이러한 효과를 얻기 위해서는 배수재의 충분한 통수능(Q_w)을 확보하여 압밀속도에 영향을 주지 않아야 된다. 따라서, 배수재에 있어서 종방향 투수계수(Longitudinal Permeability) k_w, 또는 통수능(배수성능) Q_w는 매우 중요한 요소이다.

Oostveen 등(1990)은 배수재의 통수능에 영향을 미치는 요인으로 다음과 같은 사항을 기술하고 있다.

1) 배수재 단면을 압축하는 수평 토압(측압)
2) 압밀에 따른 배수재의 형태 변화
3) 단위시간당 통수량
4) 배수재 재료의 크리프 변형과 열화

Mesri et al.(1991)에 의하면 배수저항의 영향은 다음과 같이 배수재의 통수능, Q_w에 비례하고 지반의 투수계수 k_h와 배수재 타입길이(개량토층의 두께, H)의 제곱에 반비례하는 관계로 표현하고 있다.

$$\text{배수저항의 영향} \propto \frac{k_h H^2}{Q_w} \qquad (3.2.2.1)$$

朴(1994)은 이들의 영향을 종합적으로 검토하기 위하여 7종의 배수재를 대상으로 4종의 측압조건(σ_3=49, 147, 294 및 392kPa), 4종의 동수경사 조건(i=0.1, 0.2, 0.5, 0.9)및 5종의 변형 조건(직립, 15% 자유변형, 20% 자유변형, 1개소 강제절곡 및 2개소 강제절곡)에 대한 실험을 실시하였다. Fig. 3.2.2.1은 朴(1994)이 i=0.9인 경우에 대하여 결정된 측압(σ_3)과 Q_w 관계를 다른 연구결과(嘉門・伊藤(1984), Jamiolkowski et al.(1983), Hansbo(1986), Holtz et al.(1989) 등과 함께 나타낸 것이다. Table 3.2.2.1은 PDB재의 배수저항에 미치는 내・외적인 요인을 분류 하였다.

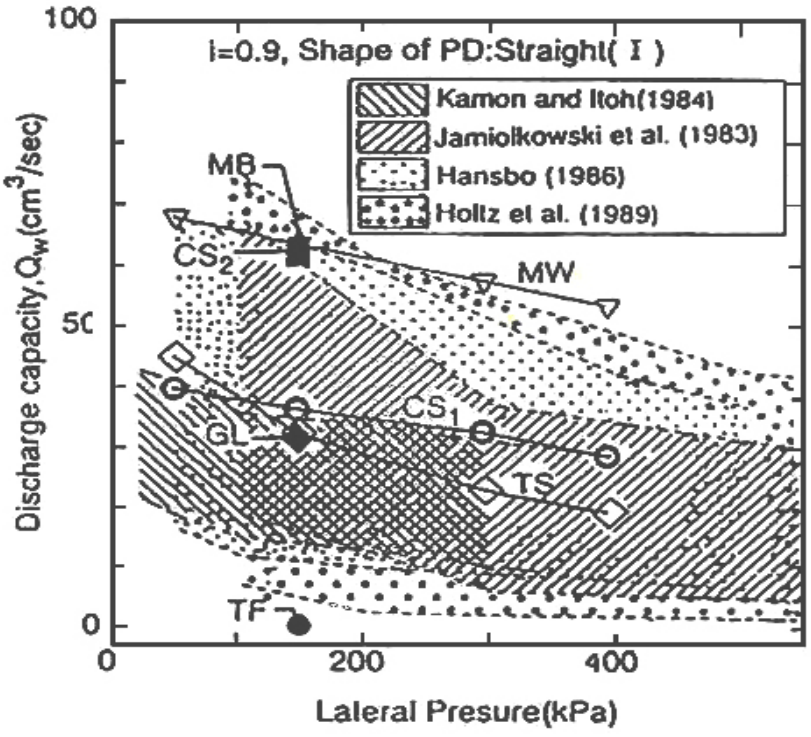


Fig. 3.2.2.1 측압에 따른 통수능의 변화 (Park, 1994)

Table 3.2.2.1 배수재의 배수저항에 미치는 내·외적인 요인 (Park, 1994)

요 소		메카니즘	배수저항 영향 값
외적 요소	측압 (σ_3)	PBD가 지반중에 타설후 단기간에 σ_3에 의한 통수 단면적 A_f의 감소	σ_3 : 50kPA → 400kPA 증가시; Q_w → (0.3~0.85) Q_w
	PBD재의 변형	주위지반의 압밀에 기인하여 PBD재에 굴곡 등의 변형발생으로 A_f의 감소 및 공기(기포)누적가능	PBD 직립상태 → 2개소 강제절곡 Q_w → (0.25~0.6) Q_w
	지중온도 (T)	물의 동점성계수차이에 따른 통수능 변화	T : 20℃ ~ 15℃; Q_w → (0.9) Q_w
	세립자의 이동	PBD재 내부에 주위지반의 세립자 침입에 따른 영향	영향치 무시 가능
	공기(기포)	물의 상방향 이동에 따라 구속압의 해방에 기인하여 간극수속의 용존공기(기포)의 환원	PBD재의 굴곡부에 누적될 경우 그 영향이 심각함. 극단적으로 Q_w가 0 까지 저하
	동수경사 (i)	PBD재속의 물의 흐름이 동수구배가 커지면 난류화 되어 통수능의 저하유발	i : 0.2 → 0.9 Q_w → (0.6~0.85) Q_w
내적 요소	재질	장기간 PBD필터의 흡습에 기인된 크리프 변형으로 통수단면적의 감소	Q_w의 초기치 → 2~60일 경과시; Q_w → (0.55~0.7) Q_w
	통수단면적 (A_f)	PBD재 내부의 겉보기 단면과 통수가능한 순단면적의 차이	A_f → (0.35~0.75) A_t L_{CWR} → (1.5~2.5) L_{CWR}
	배수재의 길이(L)	길이증가에 따라 배수저항(마찰손실수두)의 증가	H : 5m → 50m; L_{CWR} → (95) L_{CWR}

나. 스미어 존

Suction Drain 공법으로 지반개량시 배수재를 지반내에 타설하기 위하여 표층에서 전달되는 타설장비의 영향과 멘드렐의 관입·인발로 인하여 주변지반은 상당한 교란이 발생된다. 멘드렐을 관입시 주위지반은 멘드렐 단면적 만큼 방사형으로 위치이동 되면서 소성변형이 발생하게 되고, 인발시에는 멘드렐과 배수재 사이에 빈 공간이 생겨 흙이 다시 섞이는 과정에서 재차 교란이 발생하게 된다(Fig. 3.2.2.2). 이러한 여러 가지 요인으로 인하여 멘드렐에 인접한 지반상태의 투수계수는 원지반 상태의 투수계수 보다 현저히 저하되어 결과적으로 압밀속도에 큰 영향을 미치게 된다. 즉, 배수재 타설시에 발생하는 스미어 존은 지반조건에 상관없이 배수속도에 큰 영향을 미친다(Casagrande and Poulos, 1969; Akagi, 1977; 網干, 1985;

McDonald, 1985; Aboshi and Inoue, 1986; 三浦 등, 1993). 기존의 연직배수공법의 현장 시공 사례를 볼 때 스미어 존의 영향을 과소평가 하거나 무시하는 경우가 많았으며, 배수저항에만 국한하여 현장설계에 반영한 예가 많았다. 또, 외국의 경우도 스미어 존의 영향을 직접적인 관계가 없는 것으로 보고 안전율을 어느 수준 이상으로 높게 설정해주는 정도로 하고 있는 것이 현실이었다. 그러나 Jamiolkowski et al.(1981)은 스미어 존의 영향은 멘드렐 환산직경의 2.5~3배, Hansbo(1987)는 2배라고 제안하였고 Bergado et al.(1991)의 경우 Bangkok clay에 대하여 실내 및 현장시험을 실시하고 스머어 존의 범위가 멘드렐 직경의 2배가 된다고 하였고, 시험성토에서 멘드렐이 큰 경우가 스미어 영향이 크게 된다고 보고함으로서 멘드렐의 크기에 대한 영향을 언급하고 있다. 이후에 朴(1994)은 멘드렐 타입에 의한 스미어 존의 범위를 실내시험을 통하여 재압밀의 경우 멘드렐 직경의 2.0~2.5배, 불교란시료의 경우 2.5~3.0배의 범위를 제시한바 있다. 또한 소형포켓콘을 사용하여 교란영역과 불교란 부분의 콘지수에 대한 비(q_{cs}/q_{co})가 0.75이하인 경우를 스미어 존으로 구분하는 방법을 제안하고 현장시험을 통하여 확인한 바 있으나 멘드렐 형태에 의한 영향은 고려하지 않았다.

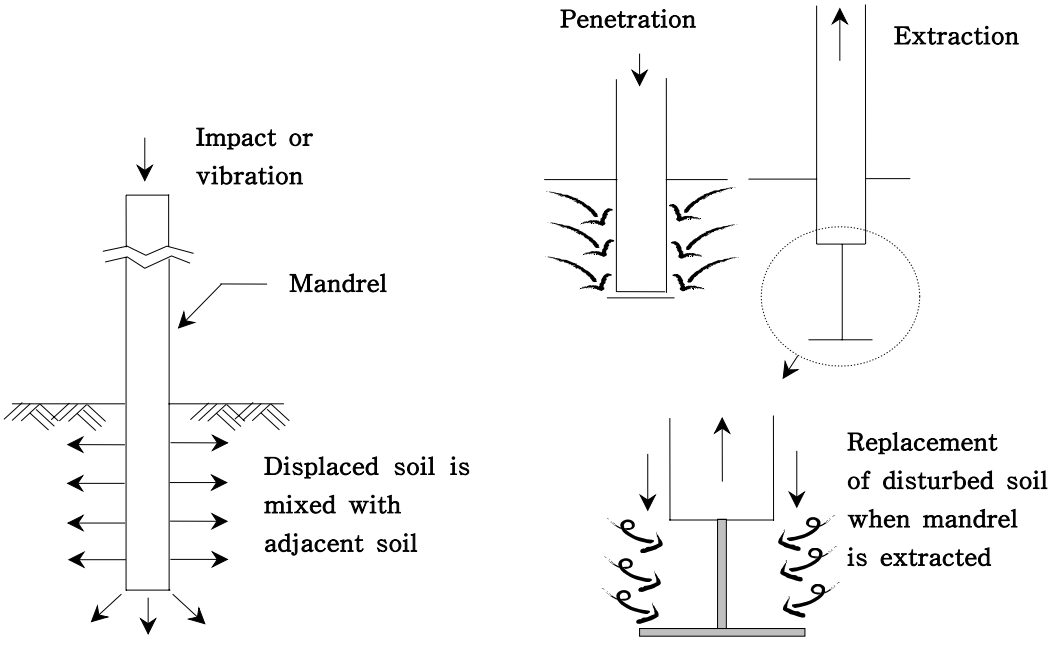


Fig. 3.2.2.2 멘드렐 타설에 의한 스미어 존 발생개념 (Kang, 1999)

교란에 따른 연약한 점성토 지반의 압밀특성 변화에 관한 연구는 지금까지 많이 수행되어 있다(Schmertman, 1958; Hansbo, 1960; Simons, 1965; Davis and Polous, 1966; Casagrande and Polous, 1969; Lo, 1972; Okumura, 1974; 田澤・若命, 1976; 森・赤木, 1983; 安藤 등, 1983; 尾上, 1991(b); 三浦・朴・Madhav, 1993). Casagrande and Polous(1969)는 유기질토의 완전 교란에 의하여 투수계수가 정규압밀 영역에서도 불교란시료의 1/15이 된 예를 보고하고 있다. Okumura (1974)는 유효응력의 변화의 정도를 나타내는 완전 불교란 상태에서의 등방적인 유효응력 σ_p'과 교란된 상태에서의 등방적인 잔류유효응력 σ_r'의 비로 정의한 교란도 R(=선행압밀압력/교란에 의해 저감된 잔류유효응력, $\sigma_{p'}/\sigma_{r'}$)을 제안하고, 교란도 R이 크게 될수록 투수계수 k_h가 작아지는 것을 기술하고 있다. 大西(1985) 및 田澤・若命(1976)는 점토시료에 각종의 교란을 주어 $\log p' \sim \log c_v$의 관계를 조사해서, 교란도의 증가에 따라 압밀계수가 저하하는 것을 나타냈다. 赤木・石田(1989)는 연약점토 지반층의 토층 일부를 신월 샘플러(thin wall sampler)로 채취하여 샘플러 속에서 직접 투수시험을 실시하는 실용적인 시험방법을 제안하고 전체 토층의 투수계수를 이용하는 경우 k_h가 k_v값의 수십 배에서 수백 배를 상회하는 케이스가 적지 않음을 지적했다.

Suction Drain 공법과 연직배수공법 모두 스미어 존의 영향은 배수재를 타입할 때 발생하는 현상이므로 차이가 없다고 할 수 있다. 그러므로 Suction Drain 공법에 연직배수공법에 사용하였던 스미어 존에 대한 이론을 적용하여도 될 것이라 판단된다.

다. 등가경

Suction Drain 공법에 밴드 형태의 PDB(Prefabricated Drain Board)를 사용하는 경우 단면이 판형이기 때문에 이를 그대로 적용하는 경우 치수와 형상에 따라 분석이 복잡해지기 때문에 이를 단순화하고자 하여 배수이론에 적용할 수 있도록 배수재의 등가경(equivalent diameter), d_w를 구하여 사용하여야 한다.

배수재의 등가경을 구하기 위해서는 보통 두 가지 개념이 사용되고 있다. 즉, 원형이 아닌 배수재의 면적과 원형 배수재의 면적이 같다는 개념(동일 면적 개념)과

배수재의 외곽표면 즉, 외주면이 같다는 개념(동일 외주면 개념)이다. 그러나, 대부분의 연구가 배수재의 기능을 지배하는 인자는 배수재의 외주면이므로 동일 외주면에 대한 가정이 옳다는 것에 동의하고 있고, 지금까지도 이러한 가정을 기본으로 제시한 방법이 많이 사용되고 있다.

Hansbo(1979)는 배수재의 둘레길이와 원형의 둘레가 같다는 기하학적 원리를 이용함으로서 다음과 같은 식을 제안하고 있다.

$$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \qquad (3.2.2.2)$$

여기서, a, b : 배수재의 폭과 두께

이에 대하여 Jansen and Hoedt(1983)은 배수재내 물의 흐름에 대한 유효성에 의문을 제시하면서 아래와 같이 수정하여 사용할 것을 권장하였다. 이 방법은 현재 배수재의 현장적용 설계 시 널리 사용되고 있는 방법 중의 하나이다.

$$d_w = \frac{\pi}{4}\,\frac{2(a+b)}{\pi} \qquad (3.2.2.3)$$

Fellenius and Castonguay(1985)는 실험과 현장에서 구한 Ch값의 불명확성, 침하량과 간극수압측정에 의한 압밀도의 차이 등에 대해 실제 배수재의 등가경은 Jansen and Hoedt이 제시한 식의 d_w보다 오히려 1.5~3.0배 정도 클 것으로 예측하였다. 또한 Hansbo(1983)와 Rixer et al.(1986)는 실제로 적용할 때의 d_w는 유한요소해석 결과 다음과 같이 사용할 수 있다고 제안한 바 있다.

$$d_w = \frac{(a+b)}{\pi} \qquad (3.2.2.4)$$

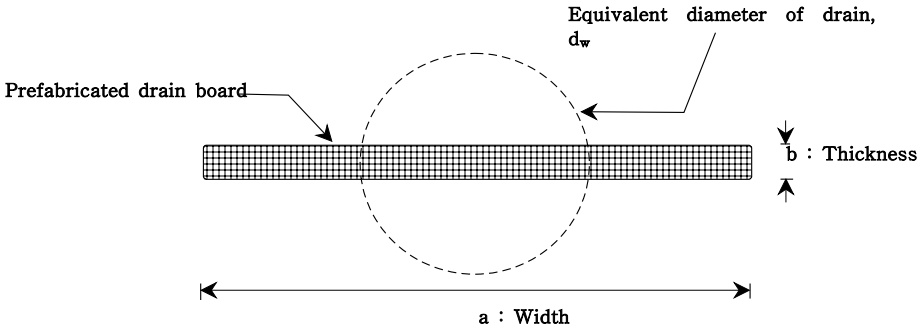


Fig. 3.2.2.3 PDB의 등가경

朴(1994)은 대형압밀시험 장치(직경: 45cm, 높이: 50cm)를 이용하여 실험적인 검증을 실시하여 배수재의 등가경 d_w는 $2(a+b)/\pi \geq d_w > (a+b)/2$의 범위에 존재함을 제시하였으며 Hansbo 제안식의 90%가 합당하다고 주장하고 있다. 또한, 及川(1989)은 현장시험을 통하여 배수재의 등가경을 60mm($2(a+b)/\pi$의 94%)를 취한 경우 예측에 가까운 거동을 나타낸다고 보고하고 있다.

이상과 같은 다양한 등가경 산정식을 정리하면 다음의 Table 3.2.2.2와 같다.

Table 3.2.2.2 연구자에 의해 제안된 d_w값

Researchers	Proposed d_w
Hansbo(1979)	$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi}$
Jansen and Hoedt(1983)	$d_w = \frac{\pi}{4}\frac{2(a+b)}{\pi}$
Fellenius and Castonguay(1985)	$d_w = (1.5\sim3.0)\times\frac{2(a+b)}{\pi}$
Suits et al.(1986)	38~64 mm
Rixer et al.(1986), Hansbo(1983)	$d_w = \frac{(a+b)}{\pi}$
朴(1994)	$d_w = \frac{1.8(a+b)}{\pi}$

라. 배치방법 및 설치간격

배수재를 지반에 타설할 때 가장 경제적인 배치방법으로 삼각형배치(Barron, 1948)와 실제 현장조건에서 적용하기가 편리한 정방형배치(Kjellman, 1948)를 많이

사용하고 있는데 배수재 도입 초기단계에서는 정삼각형 배열이 많이 적용되었으나 최근에는 정방형배열이 현장에서 많이 적용되고 있다. 두 방법 모두 배수재 적용지반의 해석시에는 계산상의 복잡성을 고려하여 단일의 환산원형 배수재에 의해 방사형 배수가 발생하는 원통형 토괴의 환산직경, 즉, 배수재의 영향원(effective diameter)이라고 불리우는 d_e로 환산결정하여 해석에 이용된다. 배수재의 영향원 d_e를 간격, S로부터 산정할 경우 연직배수재의 배치형태에 따른 기하학적인 관계로부터 구할 수 있다(Fig. 3.2.2.4 참조).

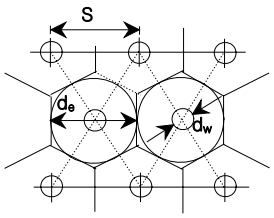
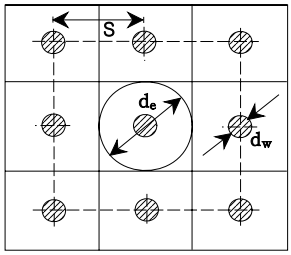
배열	영향원 직경	배열	영향원 직경
정삼각형	1.05S	장방형	1.128S
			

Fig. 3.2.2.4 드레인재의 배치 방법

즉, 환산 원통형 토괴의 직경에 의한 면적과 배수재 설치방법에 의해 결정되는 면적이 동일하다는 가정 하에서 다음과 같이 구할 수 있다.

사각형배치 $$\frac{\pi d_e^2}{4} = S^2 \quad \rightarrow \quad d_e = 1.128S \qquad (3.2.2.5)$$

삼각형배치 $$\frac{\pi d_e^2}{4} = \frac{\sqrt{3}}{2} S^2 \rightarrow \quad d_e = 1.05S \qquad (3.2.2.6)$$

여기서, S : 배수재의 배치간격

d_e : 배수재에 의한 영향원

따라서 이러한 개념을 만족하는 배수재의 최소간격을 결정하는 것이 필요하다.

마. 배수재의 변형

일반적으로 지중이 타설된 배수재의 변형 메카니즘에 영향을 미치는 것은 전적으로 마찰력(하향성의 인장력)의 작용에 의해서다. 인장력이 배수재의 한계굴곡하중을 넘게 되면 배수재는 휘게 된다. 배수재의 강성은 매우 작기 때문에 국부적인 손상이나 재질의 흠집이 있는 부분에 대해서 꺾임이 생길 수 있다. 배수재의 굴곡특성은 기둥이나 말뚝의 좌굴현상과는 메카니즘이 다소 상이하며, 외압에 의해 임의의 굴곡이 발생하고 배수재에 하향의 인장력이 작용하여 굴곡이 된다.

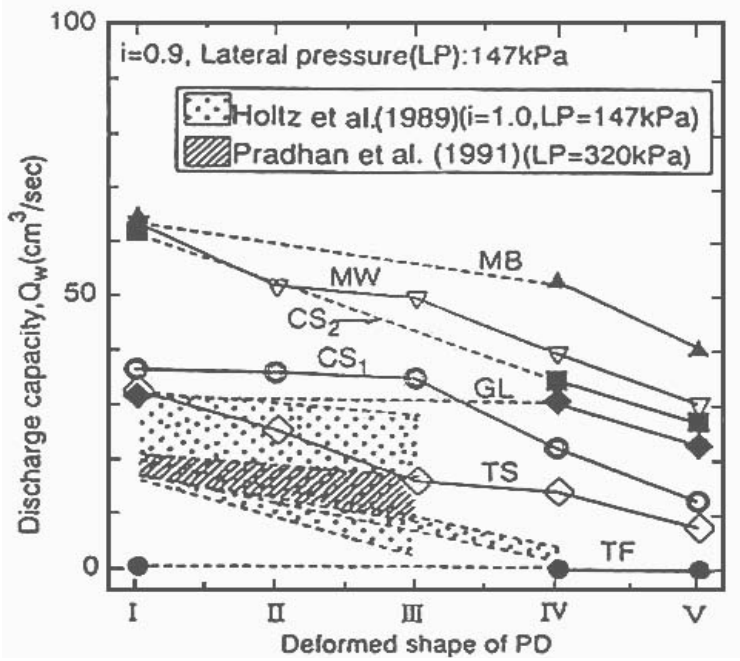


Fig. 3.2.2.5 PDB의 변형형상에 따른 통수능의 변화 (Park, 1994)

배수재의 변형은 만곡하는 경우와 국부적인 꺾임으로 분류할 수 있다. 朴(1994)은 꺾임에 의한 영향으로 인한 종방향 통수능(Q_w)의 저하는 만곡에 의한 Q_w의 저하보다 크다고 기술하고 있다. 배수재의 종방향 변형에 의한 Q_w의 변화는 Fig. 3.2.2.5에 나타냈다(朴, 1994). 이 그림에서는 20% 자유변형까지의 다른 연구결과(Holtz et al., 1989; Pradhan et al., 1991)와 같이 나타내고 있으며, 자유변형부터 2개소 강제절곡까지 5조건에 대해 Q_w는 점점 저하하여 가장 영향이 큰 경우의

Q_w는 직립조건의 26%까지 저하했다고 보고하고 있다.

Kremer et al.(1983)은 지반의 침하량이 층두께의 약 15~20%를 상회할 경우 배수재는 꺾임이 크게 발생하여 통수능이 크게 저하한다고 보고하고 있다. Van Zanten(1986)은 만곡이나 꺾임이 생기는 경우 배수재의 통수능은 작고 직립의 경우에 비해 약 75%이상을 유지하고 있다고 기술하고 있다. Holtz and Christoper(1987)은 배수재의 통수능 저하에 영향을 미치는 요인으로 연직방향의 큰 변형에 의한 만곡이나 꺾임에 영향을 강조하고 있다. Table 3.2.2.3에 제시된 바와 같이 배수재의 변형조건에 따른 배수재의 통수능 감소율에서도 배수재에 변형이 발생되면 초기의 직립조건에 비해 통수능이 감소하며, 동일한 변형조건에서 배수재 코어의 형상에 따라 통수능 감소율이 다른 것을 알 수 있다(Bergado, 1996).

Lawrence and Koerner(1988)은 Fig. 3.2.2.6에 나타낸 바에 의하면 큰 변형으로 생긴 배수재의 다른 형상을 가정하고 있다. 균일한 휨(a), 정현곡선형의 휨(b), 국부적 휨(c), 국부적인 꺾임(d) 및 다수의 꺾임(e)의 형상이 발생 가능한 배수재의 변형형상이다. 그러나, 많은 연구자들이 실내모형시험에 의한 압밀후에 측정한 배수재의 형상은 Lawrence and Koerner(1988)가 가정한 형상과 다르다. 따라서 배수재의 변형에 관한 예측을 수행 할 필요가 있다.

Table 3.2.2.3 배수재의 변형조건에 따른 통수능의 감소율(Bergado, 1996)

배수재	10%굴곡	20%굴곡	90°비틀림	180°비틀림	20%굴곡 (one-clamp)	30%굴곡 (two-clamp)
Alidrain	34%	34%	42%	45%	52%	51%
Amerdrain	18%	32%	32%	50%	47%	75%
Castleboard	19%	22%	22%	25%	27%	34%
Colboard	25%	31%	38%	44%	37%	45%
Desol	27%	28%	40%	85%	96%	99%
Fiberdrain	66%	78%	78%	79%	84%	86%
Flodrain	14%	26%	23%	44%	52%	81%
Geodrain	28%	36%	31%	45%	62%	70%
Hongplast	35%	28%	27%	46%	54%	91%
Mebradrain	38%	40%	59%	59%	61%	67%

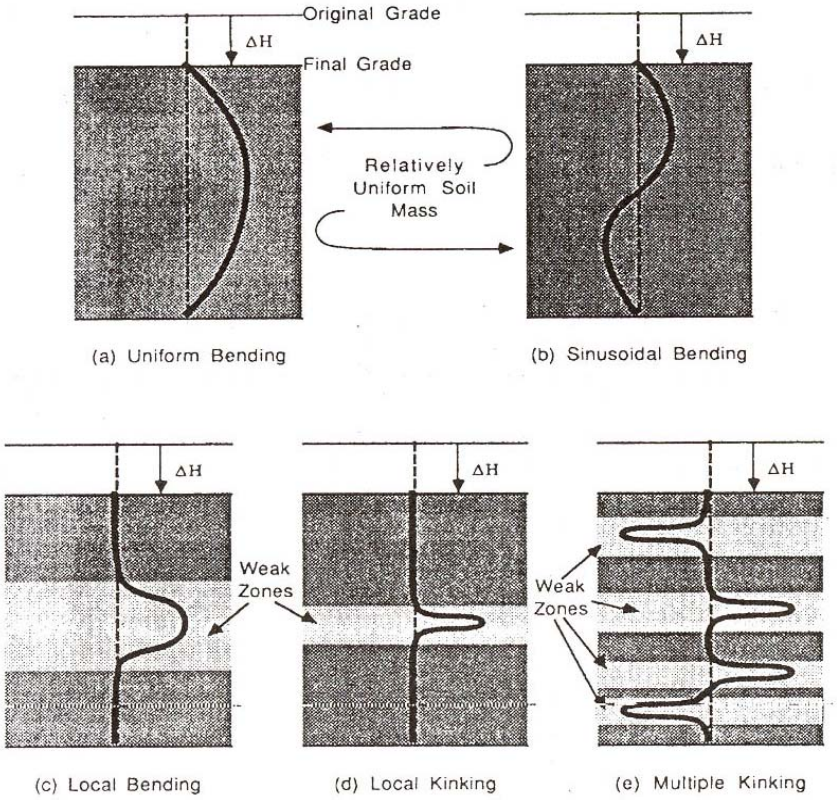


Fig. 3.2.2.6 배수재의 변형 형상의 가정 (Lawrence and Koerner(1988))

바. 배수재 길이의 영향

배수재의 통수능 측정을 위한 실내시험시료의 길이는 연구자에 따라서 각양각색이며, 현장에서 타설되는 실제 길이의 1/50～1/100의 범위에서 실험을 하는 경우가 많다. 시료의 길이는 가능한 실제와 동일한 조건으로 하는 것이 바람직하지만 여건상 쉽지 않다.

Fig. 3.2.2.7에는 동수구배 i=0.4인 경우 길이별 통수능의 차이를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 3종의 측압조건에서 배수재의 길이가 증가함에 따라서 Q_w가 저하하는 동일한 경향을 나타내고 있으며, 이는 길이의 증가에 따른 배수재 내부의 마찰손실수두가 증가되는 것을 의미한다.

측압 2.0kgf/㎠에서 배수재의 길이를 L=0.7m에서 2m로 약 3배 정도 증가시켰을 경우, 통수능이 Q_w=28㎤/sec에서 14㎤/sec로 약 50% 저하하였고, L=2m에서 4m로

다시 2배 증가 시켰을 경우에는 Q_w=12.5㎤/sec를 나타내어 11%의 저하를 보여 길이의 증가분에 대하여 작은 Q_w의 저하를 보였다.

위의 결과로 길이 증가에 대하여 직선적으로 Q_w가 저하되지 않음을 알 수 있다. 따라서, 지금까지 배수재 내부의 마찰특성에 기인되는 손실수두는 배수재의 길이와 직선적인 반비례관계가 있다고 알려져 있으나, 본 실물대형시험 결과 길이가 긴 실제의 대형 배수재에서는 Q_w의 저하특성이 직선적인 변화 경향을 나타내지 않기 때문에 현장에서 배수재의 타설길이는 크게 우려할 사항이 되지 않음을 알 수 있다.

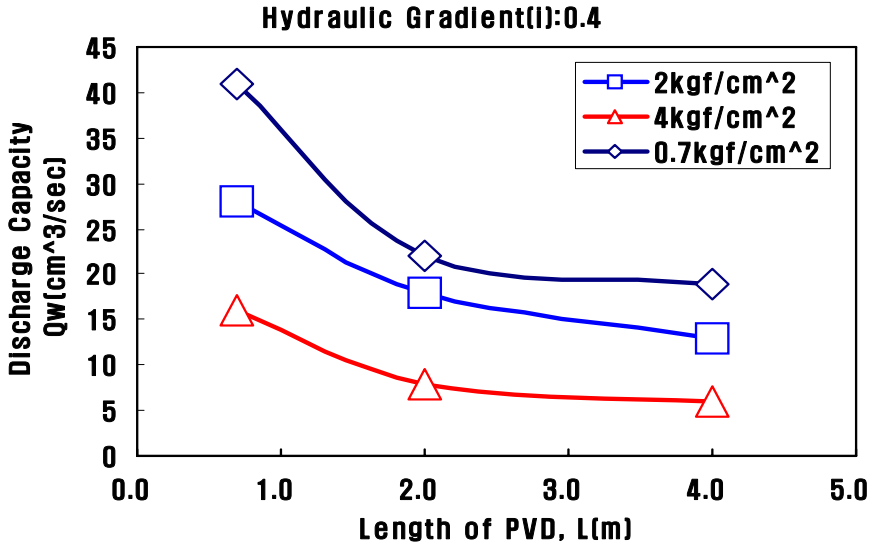


Fig. 3.2.2.7 길이에 따른 Q_W의 차이 (박영목, 1997)

사. 막힘 현상

배수재에서 코어를 감싸고 있는 필터재의 간극은 흙의 미세립자가 통과하지 않아야 하는 동시에 흙으로부터 유출되는 간극수의 유입이 방해받아서는 않되는 양면적인 기능을 가져야만 한다. 현장에 타설된 배수재는 필터의 섬유사이를 이동하는 세립자와 침전물, 유기물질 등에 의하여 수리적 특성이 변화될 수 있는데, 이와 같이 흙입자나 유기물질, 염분, 미생물의 침전 및 성장 등 여러 가지 이유로 필터의

간극이 막히거나 필터 내에 토립자 등이 쌓여 유로가 줄어든 현상을 막힘(clogging)이라 한다(Fig. 3.2.2.8 참조). Clogging은 흙입자와 필터 구멍크기의 상호 관계에 따라 다음과 같이 세 가지로 구분할 수 있다.

(1) Cake filtration

흙입자가 필터 구멍크기보다 클 때 발생하며 Fig. 3.2.2.9와 같이 토립자가 필터의 위에서 구멍을 막는 현상으로, 필터 저항은 Fig. 3.2.2.10과 같이 직선적으로 증가한다.

(2) Blocking filtration

흙입자가 필터 구멍크기와 거의 같을 때 발생하며 토립자가 필터의 구멍 사이에 끼여서 막는 현상으로, 필터저항은 급격히 증가할 수 있다.

(3) Deep filtration

필터 구멍보다 흙입자가 작을 때 발생하며 미세한 토립자들이 필터의 구멍 속으로 들어가 쌓이는 현상으로, Filtration이 시작될 때 필터저항이 증가하고, 압력이 증가하면 토립자들이 떨어져 나가 필터저항이 감소하는 과정을 반복한다.

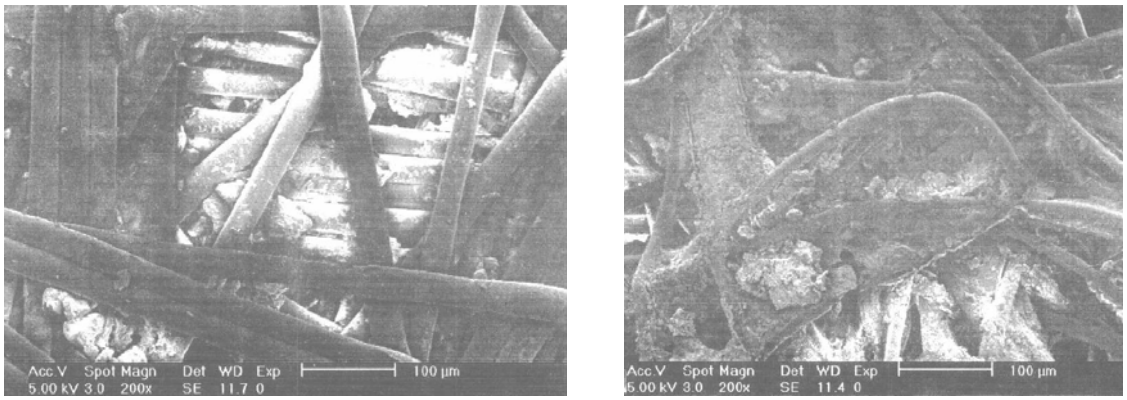


Fig. 3.2.2.8 Clogging 전경

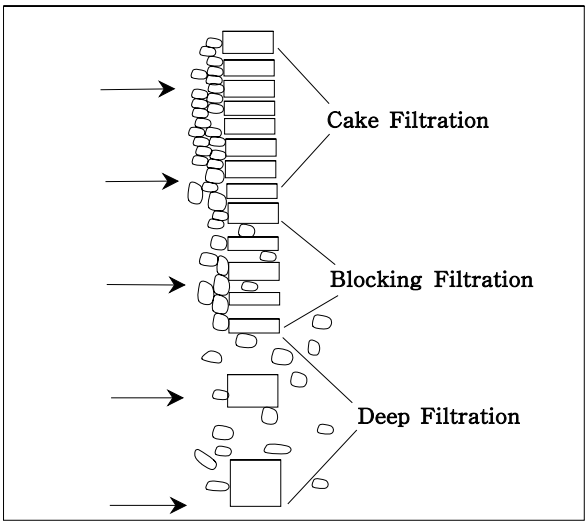


Fig. 3.2.2.9 Filtration의 종류 및 구조 (Vreekdn et al., 1983)

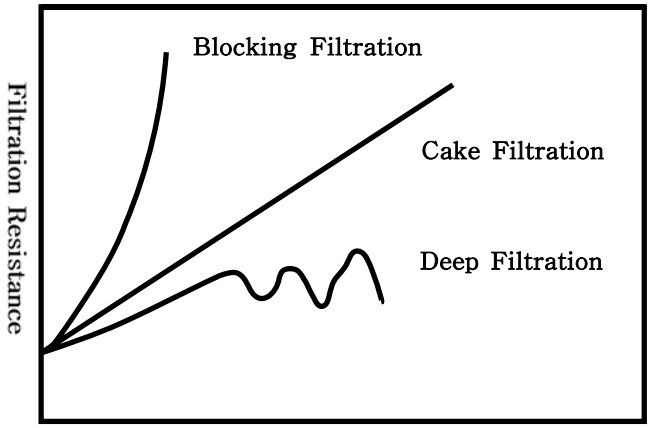


Fig. 3.2.2.10 Filtration 시간과 저항의 관계 (Vreekdn et al., 1983)

아. Sealing 층의 두께

Suction Drain 공법은 종래의 진공압밀공법이 개량지반 표면을 기밀 시트로 막아 줌으로써, 진공압을 유지 시켰던 것과 달리, 상부에 존재하는 점토층을 Sealing 층으로 이용하여 기밀을 유지시킨다. 따라서 특별한 기밀 시트가 필요하지 않은 대신 Sealing 층의 개량두께가 진공압을 유지시키는데 중요한 인자로 작용할 수 있다. 또한 이러한 두께가 시공성 및 공사비 증가에도 영향을 미칠 수 있기 때문에, 적절한 Sealing 층의 두께를 산정하는 것은 중요하다.

Yoneya, et al.은 2003년 본 연구의 Sealing 층과 비슷한 개념의 차수층 두께를 결

정하기 위하여 실내 실험결과와 Sealing층에서의 간극수압 분포는 삼각형으로 형성된다는 가정 하에 e-log p 곡선으로 계산된 예측치를 비교 하였다(Fig. 3.2.2.12). 또한, 50kN/m^2의 일정한 진공압을 Sealing 층 두께를 달리하여(0.5m, 1.0m, 1.5m)에 적용하였을 때의 차이를 파악하고자 하였다.

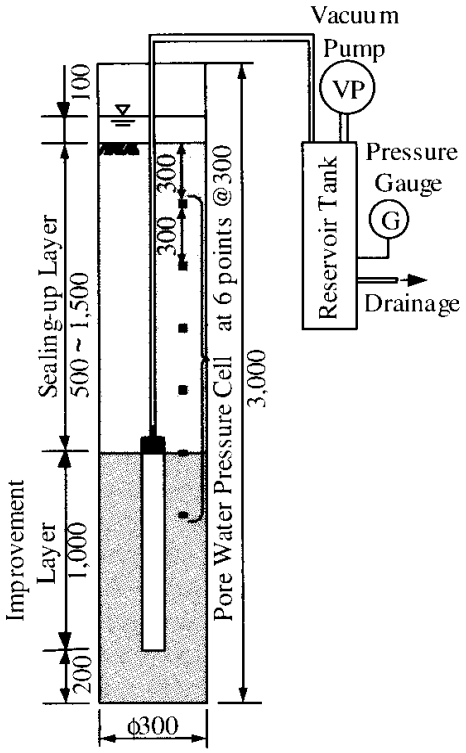


Fig. 3.2.2.11 시험기 모식도
(Yoneya, et al., 2005)

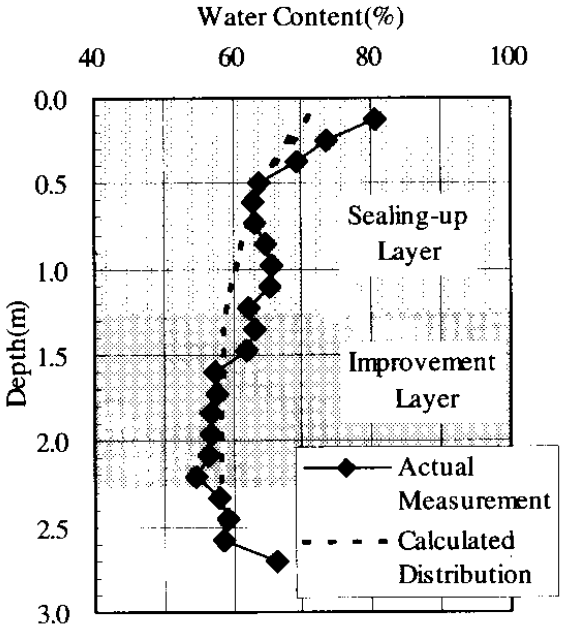


Fig. 3.2.2.12 함수비 분포
(Yoneya, et al., 2005)

실험결과 실측치와 계산치 모두 최상층의 함수비는 초기값인 80%로 유지되었고, 개량영역의 함수비는 55~60%로 나타났다(Fig. 3.2.2.12). Fig. 3.2.2.13에는 개량영역의 최종침하량을 각 차수층 두께에 따른 침하곡선의 관측치와 Barron 식으로 예측된 침하곡선을 비교하였다. 비교 결과 계산치와 실측치의 결과가 거의 같게 나타났다. 또한 본 결과에서는 차수층 두께가 두꺼울수록 개량영역의 최종침하량이 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

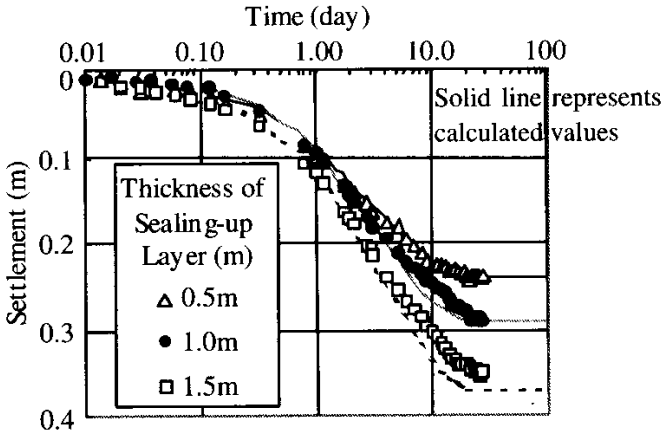
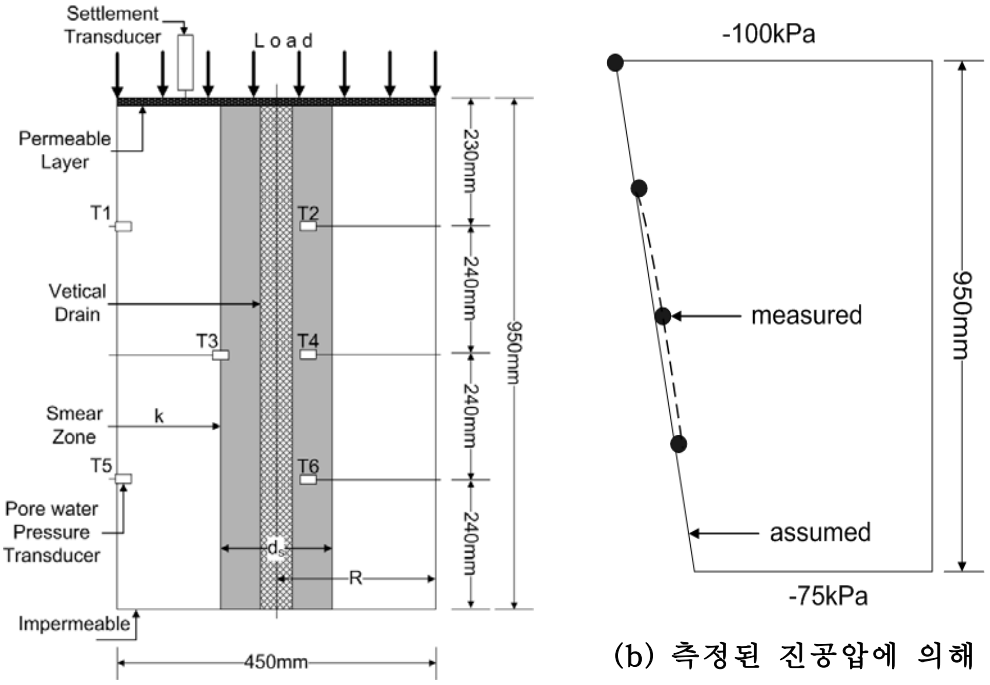


Fig. 3.2.2.13 시간의 경과에 따른 침하량(Yoneya, et al., 2005)

자. 진공압 심도에 따른 영향

Indraratna et al.(2004)는 진공압을 배수재에 가하면, 여러 가지 영향인자로 인해 배수재의 길이에 따라 진공압의 효율이 감소됨을 실험적으로 제안하였다 배수재의 길이에 따른 진공압 효율 평가 실험에 사용한 시험기는 Fig. 3.2.2.14(a)와 같다. 본 실험에서는 대형압밀실험기를 이용하여 배수재를 따라 심도 별로 진공압을 측정한 결과, 진공압은 배수재 길이에 따라 다르게 분포되는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 배수재길이에 따라 발생된 진공압 분포를 예측하였다. 또한 이러한 결과는 Choa(1989)에 의해 제시된 현장 계측 자료와 거의 일치함을 제시하였다. 따라서 배수재의 길이에 따른 진공압 분포 효율은 기밀유지와 개량 지반 토질의 종류에 의존하며, 배수재 길이에 따라 선형적으로 변화하는 진공압의 영향을 파악하는 것은 Suction Drain 공법의 적용에 있어서 배수효율 측면에서 중요한 요소로 작용한다.



(a) 압밀시험기의 개략도 (b) 측정된 진공압에 의해 예측된 진공압

Fig. 3.2.2.14 배수재의 길이에 따른 진공압 효율 평가(Indraratna, 2004)

차. 경화영역(Hardening Zone)

배수재에 진공압을 가하여 압밀을 촉진시키는 공법의 경우, 고압의 진공압을 배수재에 급작스럽게 적용하게 되면 배수재 주변의 투수계수가 감소되며, 경화되는 현상이 발생하는데 이렇게 발생된 배수재 인접부근의 경화구간은 Hardening Zone (정연인, 2004)으로 정의 될 수 있다. Hardening Zone이 발생된 지반은 간극이 줄어들고, 투수계수가 감소하기 때문에 배수재를 통한 간극수의 배출효과를 현격히 저하시킬 수 있다. 따라서 이러한 Hardening Zone의 범위를 줄이거나 억제하는 것은 석션드레인 공법의 효율적인 적용 측면에 있어서 중요한 인자이다. 지반 내 발생되는 Hardening Zone의 범위는 개량기간이 증가되면서 증가되는데, 이렇게 증가된 Hardening Zone의 범위를 정확히 파악하는 것은 매우 어려우며, 실제적인 측정은 거의 불가능하다.

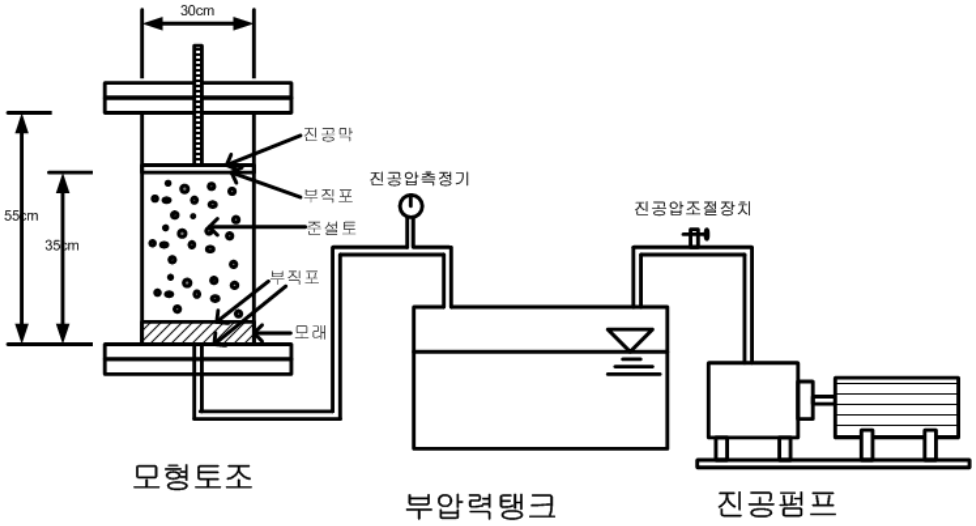
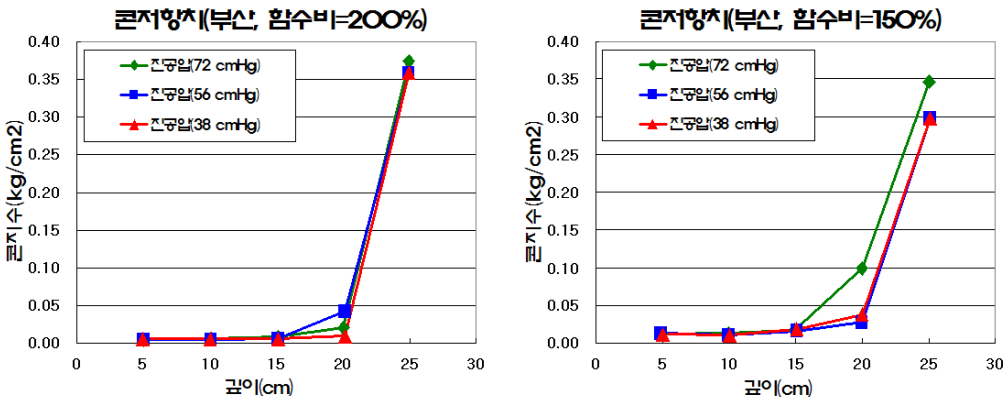
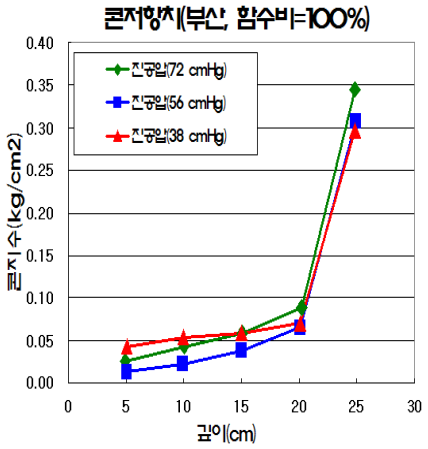


Fig. 3.2.2.15 Hardening Zone 모형실험장치(정연인 등, 2004)

Fig. 3.2.2.15는 진공압밀배수공법에서 Hardening zone을 측정하기 위한 모형실험장치이다. 각각의 현장에서 채취한 시료를 No.10번체를 통과시켜 24시간동안 바닷물에 수침시킴으로 완전포화상태로 조성하였다. Fig. 3.2.2.16와 Fig. 3.2.2.17은 실내실험을 통해 얻은 결과를 나타낸 것이다. 실내실험의 결과, 일시적으로 가해진 고진공압은 배수재의 막힘현상과 배수재 부근에서 빠르게 생성되는 Hardening Zone을 유발하며, 이는 배수층으로 간극수의 흐름을 방해하기 때문에 저진공압 상태에서보다 Hardening Zone의 범위가 크게 나타남을 알 수 있었다(정연인, 2004). 또한 함수비가 높은 경우 고진공압에서 콘저항치가 크게 나타나고 함수비가 낮을 경우 저진공압에서 콘저항치가 크게 나타나는 경향도 파악할 수 있었다(정연인, 2004).



(a) 함수비 200%　　(b) 함수비 150%



(c) 함수비 100%

Fig. 3.2.2.16 함수비와 진공압 변화에 따른 콘저항치 곡선(정연인 등, 2004)

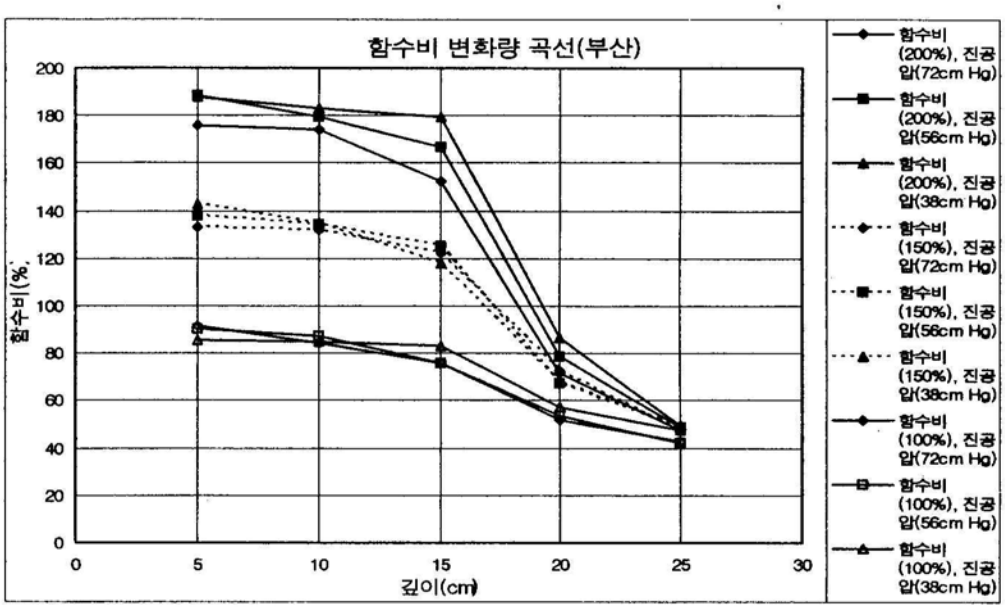


Fig. 3.2.2.17 시료의 함수비, 진공압 변화에 따른 함수비 변화량 곡선 (정연인 등, 2004)

카. 측방변위의 영향

지반에 진공압을 적용하여 압밀을 진행하면, 일반적으로 내부 측방 변위가 발생하여 개량구간과 미개량구간의 경계면에 균열이 발생될 수 있다. 따라서 진공을 이용

하여 지반을 개량시키고자 할 때에는 압밀에 의해 발생되는 지반의 측방변위와 침하량을 예측하기 위한 정확한 기법이 필요하다. Chai et al.(2005)은 현장구속압 조건을 모사한 이방 삼축압축실험, 압밀실험, 현장실험 결과를 이용하여, 측방변위를 통해 균열이 발생되는 범위를 예측할 수 있는 기법을 제시한 바 있다.

Fig. 3.2.2.18(a)에서 설명하는 것과 같이, 표면에서 진공압에 의해 발생된 내부 측방 변위는 깊이 Z_c에서 인장 균열의 원인이 된다. Z_c보다 낮은 깊이에 위치한 흙의 요소에서, 응력상태는 Fig. 3.2.2.18(b)과 같이 나타낼 수 있다. 이는 k_o 상태를 유지하기 위해 요구되는 측방 응력보다 더 큰 진공압을 이용한 Oedometer 시험과 같은 상태이다. 그러나 측방 변위를 일으키지 않는, Z_c 아래와 Z_l 위에서, 측방유효응력은 두 부분으로 구성 된다.: 하나는 진공압이고 다른 하나는 인접한 토체에 의한 토압이다. 이 지역에서, 수평 토압은 정지와 주동 상태에 대응하는 값 사이에 존재한다. k_o와 같은, 이 지역의 토압계수를 나타내면 전형적인 흙 요소의 응력상태는 Fig. 3.2.2.18(c)와 같다. Fig. 3.2.2.18(b)와 Fig. 3.2.2.18(c)에서, σ'_{vo}와 $\triangle\sigma_{vac}$, 같은 표시는 초기 연직응력과 적용된 진공압을 나타내지만, 그들의 수치적인 값은 각각의 경우에서 다르게 될 수 있다. k_{ao}의 값은 Z_c 바로 아래의 깊이에서 주동토압계수(k_a)와 Z_l 바로 위의 깊이에서 현장토압계수 k_o와 가까워야 한다. 현장상태에 적합한 k_{ao}값을 결정할 때 고려되어야 할 다른 요인은, 측방변위를 가지지 않는 깊은 층은 상부층의 내부 측방 변위를 억제하는 경향이 있다는 점이다. 이들 요인을 고려할 때, k_{ao}는 다음과 같이 제안될 수 있다.

$$k_{ao} = \beta k_a + (1-\beta)k_o \qquad (3.2.2.7)$$

여기서, β=경험적인 요인. 계산된 측방 변위와 현장 측정치 사이의 비교를 바탕으로, β는 일반적으로 0.67~1.0 사이의 범위의 값을 정해야 할 것이라고 제안하였다.

Rankine 토압이론에서, 지하수위가 지표면 아래 z_w에 있다고 가정하면, 균열되는 깊이 z_c는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_c = \frac{2c'}{r_t\sqrt{K_a}}, \quad \text{for} \quad z_c < z_w \tag{3.2.2.8a}$$

$$z_c = \frac{1}{(r_t - r_w)}\left(\frac{2c'}{\sqrt{k_a}} - r_w z_w\right), \quad \text{for} \quad z_c > z_w \tag{3.2.2.8b}$$

여기서, r_t= 총단위중량; r_w=간극수의 단위중량; c'와Φ'는 흙의 대표적인 유효점착력과 유효마찰각, 그리고 $k_a = \tan^2(45 - \Phi'/2)$ = 주동토압계수

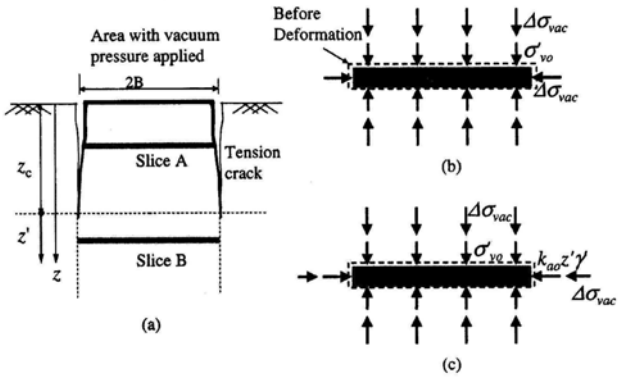


Fig. 3.2.2.18 진공압밀이 적용된 지반의 층별 응력상태와 변형 패턴 ; (a) 지반의 모식도; (b) 인장균열된 상부지반의 거동 ; (c) 인장균열 하부지반의 거동(Chai et al., 2005)

타. 진공압 크기의 영향

석션드레인 공법을 현장 지반에 적용할 경우, 배수재에 작용된 진공압의 분포와 크기는 지반개량 시 중요한 인자로 작용할 수 있다. 따라서, 진공압 크기에 따른 침하거동 등에 대한 인자에 대한 해석적인 연구가 필요하다. Buddhima et al(2005)은 진공압밀공법의 진공압 크기를 변화시키며, FEM 해석을 실시하였는데, Fig. 3.2.2.19에 나타낸 바와 같이 진공압의 크기가 커짐에 따라 지반의 침하량이 커짐을 해석적으로 나타낸 바 있다.

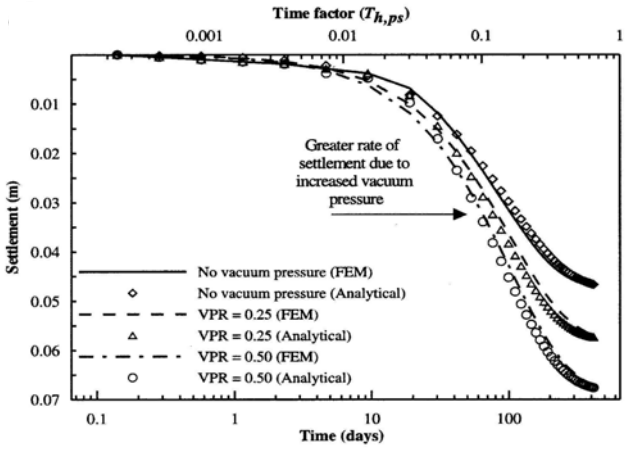
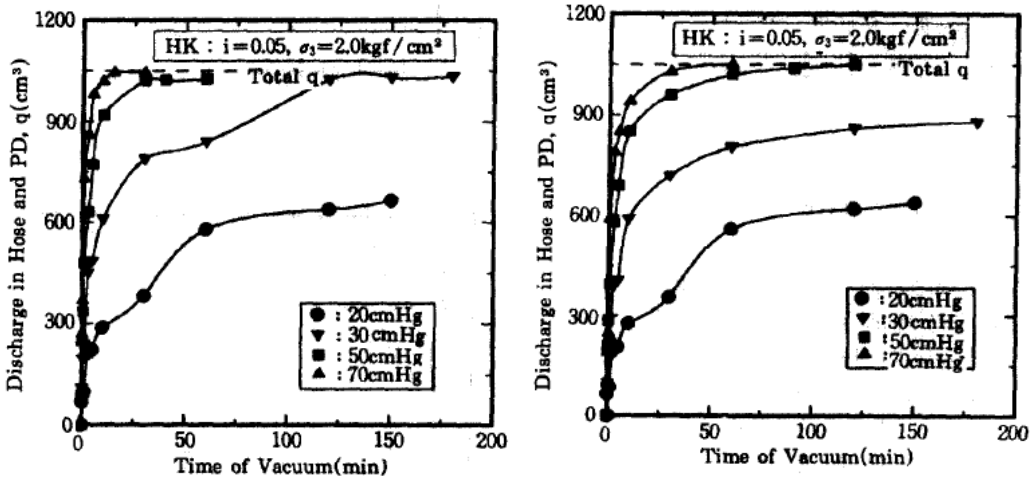
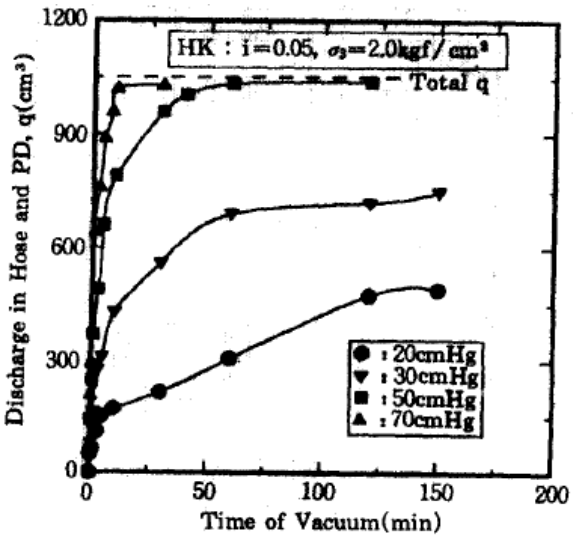


Fig. 3.2.2.19 등가평면모델을 사용한 FEM 해석결과에 의한 침하량 차이(Buddhima et al., 2005)

박영목(1997)은 현장에서 실제 시공되고 있는 PBD재의 진공압과 진공시간의 효과를 고찰하기 위해 국내에 시판중인 배수재를 이용하여 3가지 변형조건(직립조건, 30%자유변형, 1개소 강제 절곡)으로 실험을 수행 하였다. 그 결과(Fig. 3.2.2.20) 동일 시간동안 진공압을 크게 해주는 것이 배수효율적인 측면에서 더 효과적임을 제시하였다.



(a) 직립조건 (b) 30% 자유변형조건



(c) 1개소 강제 절곡 조건

Fig. 3.2.2.20 진공압 및 시간에 따른 배수량의 변화(박영목, 1997)

제 3 절 배수재 특성

일반적으로 여러 가지 형태의 배수재가 존재하지만, 대부분의 연직배수재는 기본적으로 폭 100mm와 두께 4~6mm를 갖으며, 코어(core)와 필터 덮개로 이루어져있다. 또한 이러한 배수재는 제조회사에 따라 그 특성 및 형상이 틀리다. 여러 종류의 연직배수재 별 특징을 Table 3.3.1.1과 Table 3.3.1.2에 나타내었다. 이러한 배수재의 Core는 다양한 형상을 갖게 되는데, 대부분의 배수재에서 나타나는 형태의 배수재 코어의 단면 형상을 Fig. 3.3.1.1에 나타내었다. 본 연구에서는 적용 진공압의 효율이 최대한 유지될 수 있는 배수재 Core의 형상 및 필터의 재질 등의 특성을 파악하여 배수재를 선택하고, 이를 통해 여러 가지 영향인자에 따른 지반개량 특성을 실내 Column 실험을 통해 검증하였다.

Table 3.3.1.1 현재 미국에서 상용되고 있는 연직배수재의 상표별 제원(Bo et al., 2003)

Type	Core Material	Filter Material	Dimension (mm)
Kjellman	Paper	Paper	100×3
PVC	PVC	None	100×2
Geodrain	PE	Cellulose	95×4
Mebradrain	PP	PP or PES	93×4
Alidrain	PE	PES	100×6
Colband	PES	PES	100×6
Hitek	PE	PP	100×6
Castle Board	PL	PES	100×4
Ameridrain	PP	PP	100×3
Flexidrain	PP	PP	100×4
Flodrain	PE	PE	100×4
Tafnel	NIL	PP	100×7.5
Hongplast	PP	PP	100×3.8
Technodrain	PV	PP	100×3.5
Aliwick	PE	PP	100×3.0
Bidim	NIL	PES	100×4.0
Desol	PL	NIL	98×2~3
Fibredrain	4 Core Strands	2 Jute Burlog	80~100×5~100
Bando	Paper	PVC	96×2.9
OV Drain	PES	PES	103
Solpac Charbonneay	PES	PES	105
CN drain	PVC	PP	100

Table 3.3.1.2 AIT에서 실험된 여러 배수재의 특성 (Bergado, 1994)

Drain Type	Weight (g/m)	Discharge Capacity			Tensile Properties		Filter	
		ASTM D4716-87	Modified Triaxial (Straight)	Modified Triaxial (20% Compression Free bending)	Strength (kN)	Elongation (%)	Permeability (cm/s)	Pore Size (mm)
Alidrain	200				2(Core) 0.24(Fil)	NA	3×10^{-4}	50(AOS) 60(EOS)
Alidrain 'S'	100				1(Core) 0.24(Fil)	NA NA	3×10^{-4}	50(AOS) 80(EOS)
Alidrain 'Si'	100				1(Core) NA(Fil)	NA NA	1×10^{-2}	210(AOS)
Aliwick	NA				NA	NA	2×10^{-4}	18(AOS)
Ameridrain								100(AOS)
407	93				0.65	116	3.1×10^{-2}	70(EOS)
408	92	2120	1780	1445	4.0	40	7×10^{-2}	90(EOS)
Blidim	83				NA	NA	NA	NA
Castle Board	90	1415	1610	1305	2.5	NA	$(1.5\sim2)\times10^{-2}$	<75 for O_{95}
Colbond	70	1670	985	505	1.8	22.5	10×10^{-2}	85 for O_{95}
CX-1000								85 for O_{95}
Desol	60				1.2	11	1×10^{-2}	200
Fibredrain	NA				5.0	27	0.1×10^{-2}	
Flodrain	80				2.0	50	$(5\sim7)\times10^{-1}$	140 for O_{95}
FD-4							ITF/De Voorst	NF-G38-017
FD4-EX	90	1620	690	435	2.0	50	1×10^{-1}	70 for O_{95}
Hongplast	75				> 8 dry > 4 dry	< 10	2×10^{-1}	< 78(O_{95})
Geodrain								
L Type	100±10	1685	985	870	1.75	4~9	1×10^{-2}	< 75
T Type	NA				NA	NA	1×10^{-4}	NA
Kjellman	200				NA	NA	1×10^{-3}	NA
Mebra								
MD 7007	89	2340	2115	1270	3.5	35	6.5×10^{-4}	75 for O_{95}
MD 7407	77				2.5	28	7×10^{-4}	131 for O_{95}
MD 7107	94				3.1	35	6.5×10^{-4}	NA
MD 7417	82				2.1	28	7×10^{-2}	NA
MD 88	85				2.7	28	1.7×10^{-3}	75 for O_{95}
Tafnel	NA				1.7	NA	0.01~0.1	NA
Technodrain	85				1.37	10	50×10^{-2}	

Modified traiaxial : Discharge capacity 200kPa and hydraulic gradient of 1, m^3/yr (Straight)

Modified traiaxial : Discharge capacity 200kPa and hydraulic gradient of 1, m^3/yr (20% Compression, Free bending)

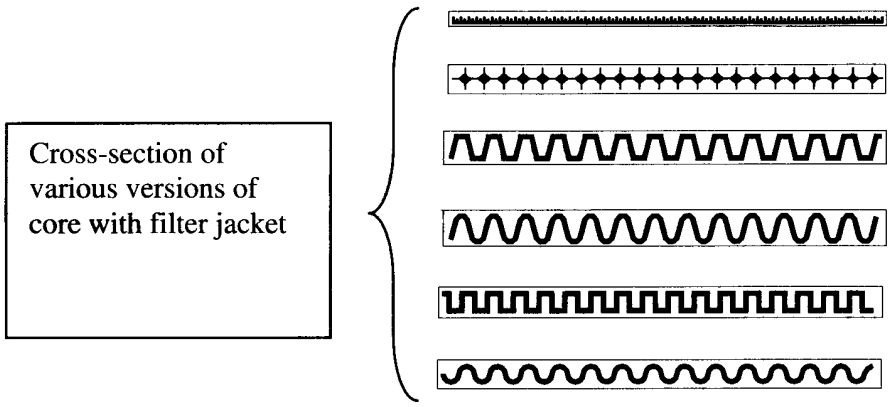


Fig. 3.3.1.1 다양한 배수재 코어의 형상

Table 3.3.1.3에는 2007년 5월 현재 국내에서 가장 많이 시판되는 배수재의 형상별 종류를 제시하였다. 국내의 경우 하모니카형 모양의 배수재를 많이 사용하는 추세이며, 최근에 시판되는 배수재는 대부분 포켓식의 형태로 시판되는 경우가 많았다.

Table 3.3.1.3 국내에서 시판 중인 배수재의 종류(2007 현재)

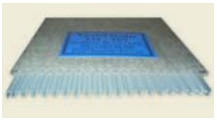
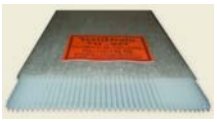
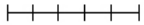
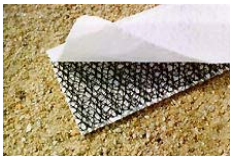
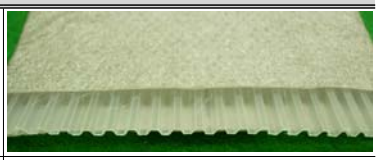
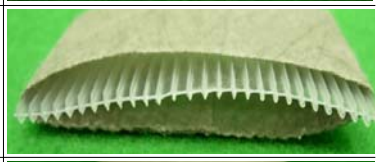
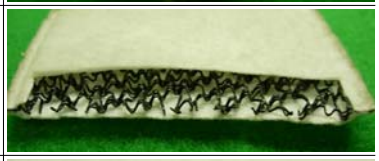
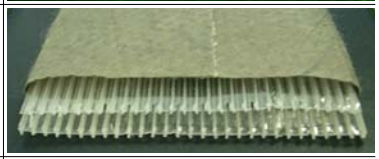
배수재명(형식)	코어+필터	코어재질	배수재와 코어형상
A (하모니카형)	포켓식	PE 또는 PP	
	특징		
	폭 95mm 내외 두께 3mm		
배수재명(형식)	코어+필터	코어재질	배수재와 코어형상
V1 (성곽형)	포켓식	PE 또는 PP	
	특징		
	일반용		
배수재명(형식)	코어+필터	코어재질	배수재와 코어형상
V2 (하모니카형)	포켓식	PE 또는 PP	
	특징		
	일반용		
배수재명(형식)	코어+필터	코어재질	배수재와 코어형상
V3 (하모니카형)	포켓식	PE 또는 PP	
	특징		
	일반용		
배수재명(형식)	코어+필터	코어재질	배수재와 코어형상
M (원형주름)	포켓식	PE 또는 PP	
	특징		
	원형의 코어		

Table 3.3.1.3 국내에서 시판 중인 배수재의 종류(2007 현재) - 계속

배수재명(형식)	코어+필터	코어재질	배수재와 코어형상
K1 (하모니카형)	포켓식	PE	
	특징		
	뼈대의 간격이 좁음		
배수재명(형식)	코어+필터	코어재질	배수재와 코어형상
K2 (하모니카형)	포켓식	PE	
	특징		
	뼈대의 간격이 중간		
배수재명(형식)	코어+필터	코어재질	배수재와 코어형상
K3 (하모니카형)	포켓식	PE	
	특징		
	뼈대의 간격이 넓음		
배수재명(형식)	코어+필터	코어재질	배수재와 코어형상
C (코일형)	포켓식	PES	
	특징		
	수세미형 코어		
배수재명(형식)	코어+필터	코어재질	배수재와 코어형상
D1 (하모니카형)	포켓식	PE	
	특징		
	주문생산가능 (사이즈 조절 가능)		
배수재명(형식)	코어+필터	코어재질	배수재와 코어형상
D2 (하모니카형)	포켓식	PE	
	특징		
	주문생산가능 (사이즈 조절 가능)		
배수재명(형식)	코어+필터	코어재질	배수재와 코어형상
S1 (하모니카형)	포켓식	PP	
	특징		
	연성의 코어		
배수재명(형식)	코어+필터	코어재질	배수재와 코어형상
S2 (하모니카형)	포켓식	PP	
	특징		
	강성의 코어		

본 실험에서는 국내에 시판중인 배수재 중 대표적인 형상을 선택하여 실험에 적용하였다. 또한 국내에 시판되는 배수재들은 대부분 포켓식 형태이기 때문에 열융착식 배수재와의 비교를 위해 국외 O사의 성곽형 배수재 역시 실험에 적용하였다. Table 3.3.1.4에는 본 실험에 적용된 배수재 종류 별 Core 형상을 나타내었다.

Table 3.3.1.4 본 실험에 적용된 배수재 타입 및 형상

No	필터와 배수재의 접합부	Name	배수재 타입	
1	포켓식	국내 M사 V-Drain	성곽형	
2	포켓식	국내 K사 K-Drain	하모니카형	
3	포켓식	국내 M사 M-Drain	원통형	
4	포켓식	국내 C사 C-Drain	코일형	
5	열융착식	국외 O사 G-Drain	성곽형	
6	포켓식	국내 H사 O-Drain	이중코어	
7	포켓식	국내 S사 W-Drain	날개형	
8	포켓식	국내 S사 S-Drain	나선코어 원형	

제 4 절 Suction Drain 공법의 영향인자 파악을 위한 실내 실험

1. 실험 목적 및 범위

본 연구에서는 배수재의 종류 및 진공압의 크기에 따른 개량 효율을 평가하고 타설 간격, 배치형상, 영향원 반경 등을 결정하여 그 효율성을 검증·평가하기 위한 실내 모형실험을 실시하였다. 또한, 기법의 처리기간을 산정하고 배수재에 가해지는 진공압의 효율감소를 최소화 하기 위한 방안을 도출하여, 최종적으로 Field Scale 지반을 개량하기 위한 설계인자와 운전인자를 파악하기 위해 Pilot Scale 실험을 실시하였다.

2. 시료특성

본 연구에서는 경기도 화성시 소재 ○○ 방조재 부근에 매립된 해성점토를 채취하여 사용하였다. 먼저 채취된 시료의 물리적인 특성을 파악하기 위해, Table 3.4.2.1과 같은 물리역학적 실험을 실시하여, 지반공학적인 특성을 파악하였다.

시료조성 시, 액성한계가 44%이므로 완전포화체로 재조성하면서 실험기에 좀 더 용이하게 타설하기 위해 액성한계보다 1.5배 높은 함수비(66%)를 갖도록 교반하여 실험을 실시하였다.

Table 3.4.2.1 실험에 사용된 시료의 토질공학적 특성 결과

Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plastic Index (%)	Specific Gravity	Passing 200 Sieve(%)	USCS	Compression Index(C_c)	Coefficient of Consolidation (C_v, cm^2/sec)
44	21.7	22.3	2.66	99.3	CL	0.27	8×10^{-3}

3. Suction Drain 실험장치의 구성

가. Column 실험기

본 실험에서 사용된 Column 실험기의 일반적인 구성은 Fig. 3.4.3.1과 같다. 실험기는 개량시료를 담을 수 있는 부분과 Seal 층의 두께를 조절할 수 있는 부분으로 나누어져 있다. 본 실험기는 원통형으로 구성되어 있으며, 시료 내 압력변화에 견딜 수 있도록 철재로 제작하였다. 각 지점 별 간극수압 및 진공압 변화를 측정할 수 있도록 실험기 본체 측면에는 포트를 설치하였다.

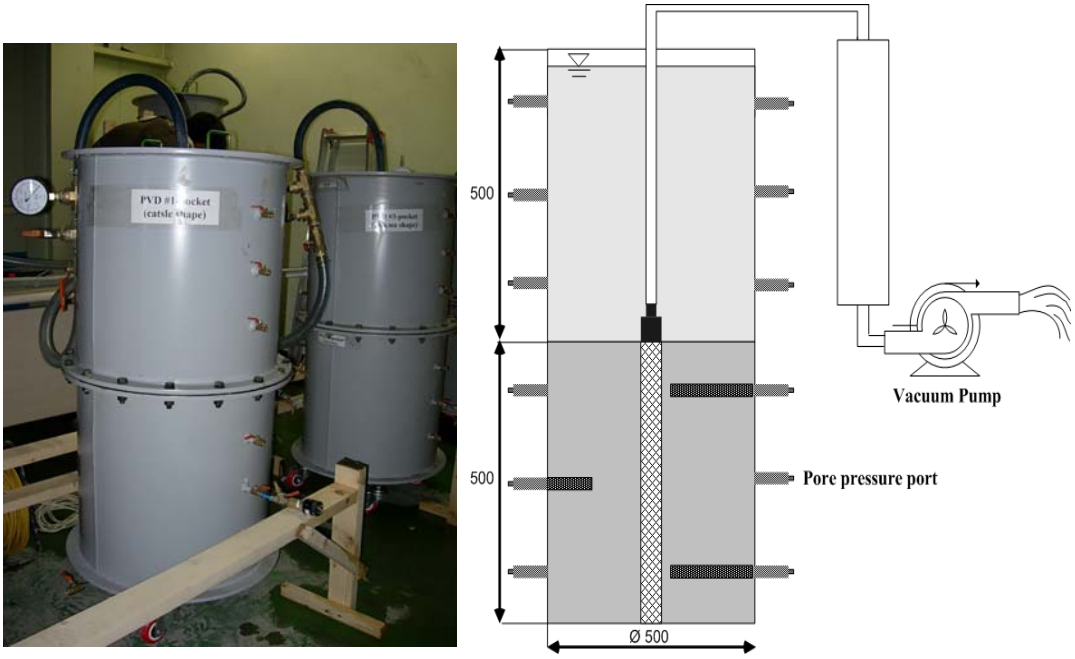


Fig. 3.4.3.1 Schematic of suction drain test column

나. Pilot Scale 실험기

Pilot Scale 실험의 경우(Fig. 3.4.3.2), Column 실험에서 선정된 여러 가지 영향인자(적용기간, 진공압, Sealing 층 두께 등)를 고려하여 실험을 실시하였다. 또한 본 실험에서는 배수재의 간격 및 심도에 따른 영향 등을 파악하였다.

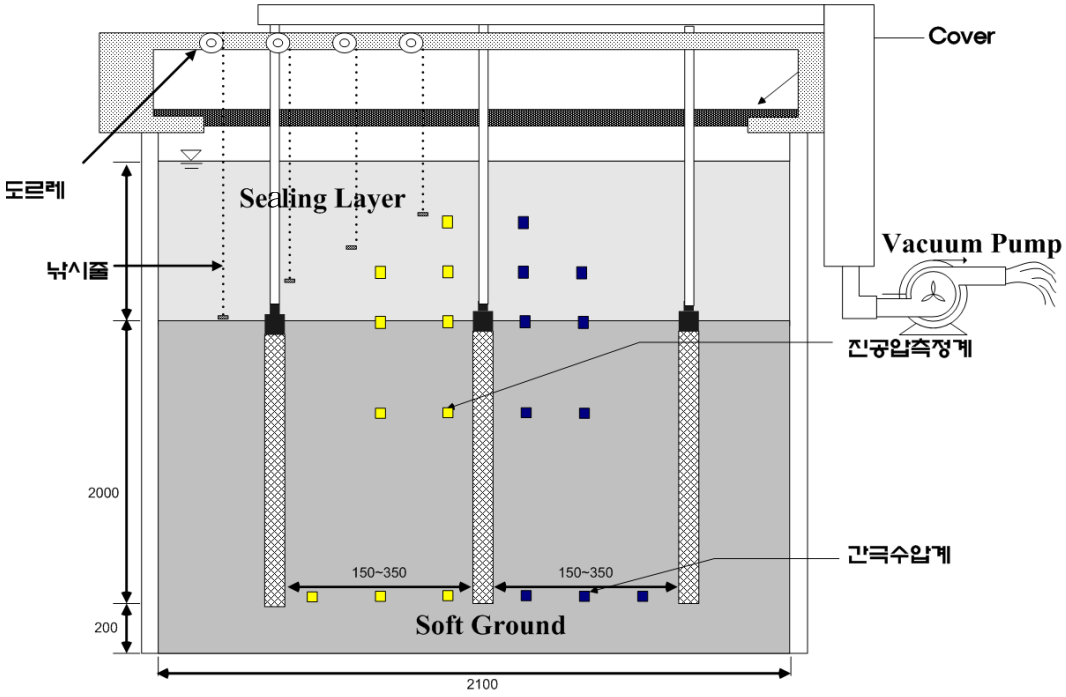


Fig. 3.4.3.2 Pilot Scale 실험기 모식도 (단위 : mm)

다. 진공펌프

작업에 필요한 진공 펌프의 선정은, 작업의 특성이나 환경에 따라 달라지며, 일반적으로 고려해야 할 사항들은 아래와 같다.

- 작업진공도에 맞는 진공펌프의 최대진공도
- 토중에서 진공압을 가하므로 수증기나 수분을 함유한 기체의 배기에 적합해야 함
- 소음과 진동이 적어 정숙한 운전을 해야 함
- 마찰부분이 적어 고장요인이 적은 것을 선정해야 함
- 작업 완료 시간 내에 작업을 끝낼 수 있는 진공펌프의 배기량

이상과 같은 조건을 만족하는 30마력의 진공펌프를 선정하였다. 설치된 진공펌프의 본체는 원형케이싱 및 임펠러로 구성되어 있으며, 임펠러는 케이싱과 편심한 위치에 취부 되어 있다. 케이싱 내에 적당량의 물을 회전시키면 무거운 물은 원심력에 의해 케이싱내벽을 따라 대체로 같은 두께의 링 상태가 된다. 이 봉수링의 내벽

과 임펠러 날개에 둘러싸여 있는 공동의 용적이 회전위치에 따라 변화하는 것을 이용하여 측벽 또는 임펠러의 내벽에 설계되어 있는 흡, 배기구를 통해서 흡, 배기 작용이 발생하게 된다. 물은 흡기측으로부터 들어온 기체가 반드시 배기 되게끔 실링의 역할을 하게 된다(Fig. 3.4.3.3).

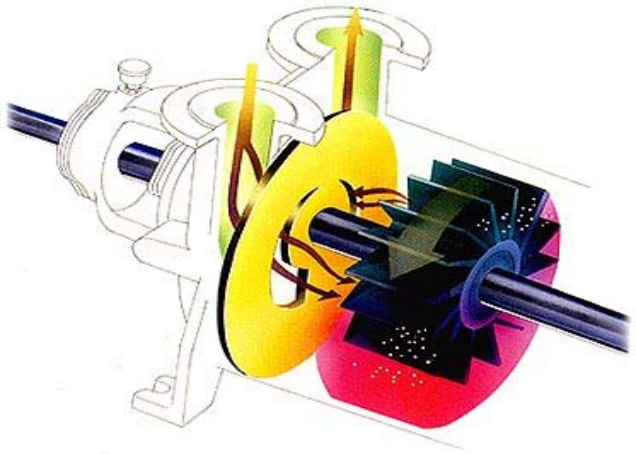


Fig. 3.4.3.3 진공펌프 작동 개념도

본 실험에서 사용된 진공펌프의 사양 및 특성은 Table 3.4.3.1과 같다.

Table 3.4.3.1 진공펌프의 사양 및 특성

형 식	SWSP-100V
배기속도	4200 ℓ /min
도달압력	2.3×10^{3}(17) PA(Torr)
회 전 수	1750 r.p.m
전 동 기	7.5 kW
봉 수 량	15 ℓ /min
흡 입 구	2″ P.T
배 기 구	2″ P.T
중 량	221 Kg

Fig. 3.4.3.4에는 실험에 사용된 진공펌프와 배수튜브 연결 상태를 나타내었다.



(a) 진공펌프



(b) 배수재 및 커넥터



(c) 진공압 조절 레귤레이터

Fig. 3.4.3.4 진공시스템 및 배수시스템 전경

라. 간극수압계 및 인디케이터

배수재 부근의 간극수압을 측정하기 위하여 배수재 필터 부분에 근접하게 Porous Tip을 설치하고, 이를 간극수압계에 연결하여 인디케이터를 통해 배수재에 작용하고 있는 진공압을 측정하였다. Fig. 3.4.3.5에 간극수압계와 인디케이터를 나타내었다.

인디케이터의 감도가 실제 간극수압계 측정값의 크기에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 3.4.3.6과 같이 진공펌프에 진공압게이지와 간극수압계를 직렬로 연결하여, 간극수압계 감도 측정 실험을 실시하였다.



Fig. 3.4.3.5 간극수압계 (kgf/cm^2) 및 인디케이터

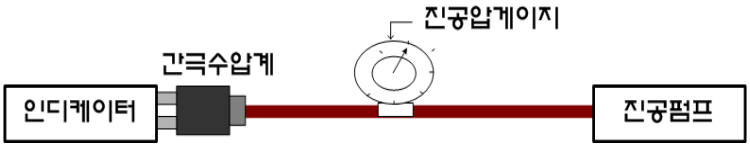


Fig. 3.4.3.6 간극수압계 감도 측정 실험 모식도

측정결과 Fig. 3.4.3.7에 나타난 것과 같이 간극수압계를 통해 측정된 값이 진공압게이지에서 측정된 값보다 약 5~10% 작게 측정되었다. 따라서, 배수재의 길이에 따른 효율산정시, 간극수압계의 감도에 따른 영향을 다음 관계식을 통해 보정하였다.

$$P_P = 0.93P_G - 0.49 \qquad (3.4.3.1)$$

여기서, P_P : 간극수압계로 측정한 진공압

P_G : 진공압게이지로 측정한 진공압

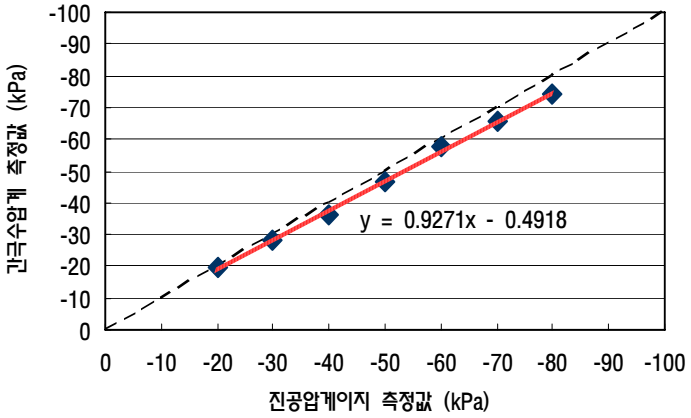


Fig. 3.4.3.7 간극수압계 측정값과 진공압게이지 측정값의 관계

마. 콘 관입 시험기

석션드레인에 의한 지반개량 효과를 파악하고자 실험 종료 후, 콘 관입 시험기를 이용하여 지반의 강도를 측정하였다. 본 실험에 사용한 콘 관입 시험기의 최대 측정 하중은 200kgf, 콘의 단면적은 6.16cm^{2}으로, 최대 32.47kgf/cm^{2}까지 측정 가능하다. Table 3.4.3.2와 Fig. 3.4.3.8에는 본 실험기의 사양과 전경을 나타내었다.

Table 3.4.3.2 콘 관입 시험기의 사양

최대 측정 하중	콘의 직경	콘의 단면적	콘 관입 속도
200kgf	2.8cm	6.16cm^2	4cm/min



Fig. 3.4.3.8 콘 관입 시험기

4. 실험 조건 및 방법

가. 실내 Column 실험

본 연구에서는 실내 Column 실험을 실시하여, 배수효율 및 영향인자를 파악하고자 하였다. Test 1-1에서는 배수재 종류에 따른 배수효율을 산정하기 위해서, 국내에서 시판되고 있는 다양한 종류의 배수재를 선택하여, 총 8가지의 실험군으로 나누어 실험을 실시하였다(Table 3.4.4.1). 이를 통해, Suction Drain 공법에 적합한 배수재를 산정하였다. Test 1-2에서는 Sealing 층의 두께를 50~150cm로 달리하여 Sealing 층의 두께에 따른 진공압 효율 및 침하 특성을 파악하고자 하였다(Table 3.4.4.2). Sealing 층은 지반의 기밀 유지를 위한 배수재 커넥터 상부의 미개량 원지반 점토층으로써, 배수재 전체를 지반내에 타입하여 조성된다. Test 1-3에서는 적용기간을 4, 8, 12, 16, 20일로 변화시킨 후, 처리기간에 따라 개량된 지반의 특성을 파악하고자 하였다(Table 3.4.4.3). Test 1-4에서는 적용 진공압에 따른 개량 효율을 파악하기 위하여 동일한 배수재와 기간을 설정하고, 진공압의 크기를 -0.2kg/cm^2, -0.4kg/cm^2, -0.6kg/cm^2, -0.8kg/cm^{2}로 바꾸어 가며 실험을 수행하였다(3.4.4.4). Test 1-5에서는 단계진공압의 영향을 파악하기 위해 적용 진공압을 Table 3.4.4.5와 같이 5가지 조건으로 적용시켰다. 이를 통해, 최적의 진공압 적용 Step 및 각 Step 별 처리기간을 산정하고, 모든 실험 간 매설된 계측기를 통해, 침하특성을 파악하였다. 또한 실험 종료 후 각 지점 별 함수비 및 개량강도를 측정하였다.

Table 3.4.4.1 배수재 종류에 따른 효율특성 산정 실험(Test 1-1)

고정인자					변동인자
시료종류	적용기간 (Day)	배수재 길이	Sealing 층 두께	적용진공압 (-kg/cm^2)	배수재 종류
CL	28	50cm	50cm	0.8	포켓식 성곽형
					포켓식 하모니카형
					포켓식 원형
					포켓식 코일형
					포켓식 2중 하모니카형
					포켓식 날개형
					포켓식 나선코어 원형
					열융착식 하모니카형

Table 3.4.4.2 Sealing 층 두께 산정 실험(Test 1-2)

고정인자				변동인자		
시료 종류	적용기간 (Day)	배수재길이	적용진공압 ($-kg/cm^2$)	Sealing 층 두께(cm)		
CL	12	50cm	0.8	50	100	150

Table 3.4.4.3 적용기간에 따른 지반개량 특성파악 실험(Test 1-3)

고정인자				변동인자				
시료 종류	Sealing 층 두께	배수재길이	적용진공압 ($-kg/cm^2$)	적용기간(Day)				
CL	50cm	50cm	0.8	4	8	12	16	20

Table 3.4.4.4 적용 진공압에 따른 개량 효율 평가 실험 (Test 1-4)

고정인자					변동인자
시료 종류	적용기간 (Days)	배수재 길이	Sealing 층 두께	배수재 종류	적용 진공압 ($-kg/cm^2$)
CL	16	50cm	50cm	열융착식 하모니카형	0.2
					0.4
					0.6
					0.8

Table 3.4.4.5 단계진공압에 따른 특성 파악 실험 (Test 1-5)

고정인자				변동인자	
시료 종류	Sealing 층 두께	배수재 길이	적용기간 (Day)	적용진공압 ($-kg/cm^2$)	
CL	50cm	50cm	16	Case 1	0.1(1일)→0.2(1일)→0.4(1일)→0.6(1일)→0.8(12일)
				Case 2	0.1(2일)→0.2(2일)→0.4(2일)→0.6(2일)→0.8(8일)
				Case 3	0.1(1일)→0.2(2일)→0.4(3일)→0.6(4일)→0.8(12일)
				Case 4	0.2(2일)→0.4(4일)→0.8(10일)
				Case 5	0.1(4일)→0.4(6일)→0.8(6일)

실내 Column 실험의 실험 방법 및 절차를 정리하면 다음과 같다(Fig. 3.4.4.1, Fig. 3.4.4.2)

a) 배수재 및 배수시스템 실험기 내 설치

b) 간극수압 측정을 위한 측정단자 설치

c) 시료타입

d) 상판설치

e) 진공압을 가하기 위한 배관 설치

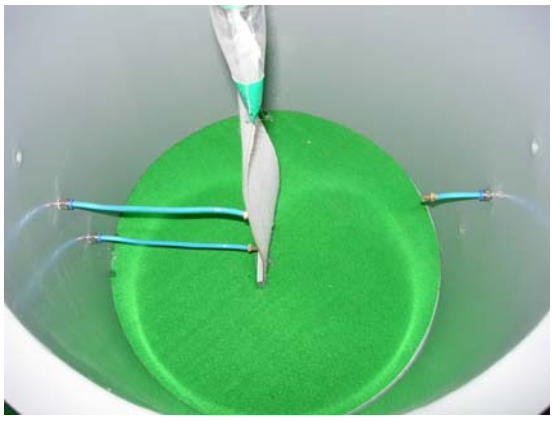
f) 간극수압계 설치

g) LVDT 설치

h) 최종설치 완료



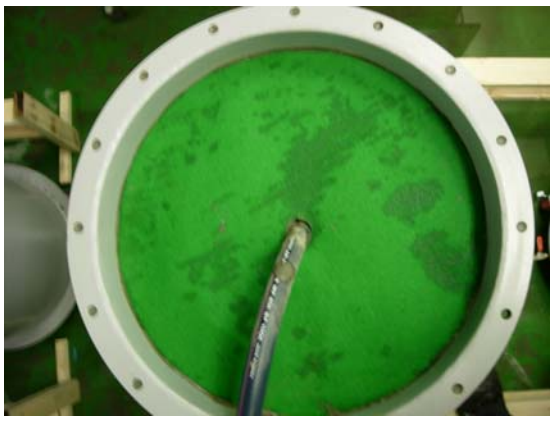
(a) 배수재 설치



(b)측정단자 매설



(c) 시료타설



(d) 상판설치



(e) 배관설치



(f) 간극수압계 설치



(g) LVDT 설치



(h) 설치완료

Fig. 3.4.4.1 실내 Column 실험순서 및 방법

실험 종료 후의 개량 효율을 파악하기 위하여 콘 저항치와 함수비를 측정하였다. Fig. 3.4.4.3에 콘 저항치 및 함수비 측정 위치를 나타내었다. 연직 방향으로는 Fig. 3.4.4.3 (a)에 나타낸 것과 같이 실험기 상단을 기준으로 20cm, 40cm, 50cm, 60cm, 70cm, 80cm의 6개 층에서 측정을 실시하였고, 수평 방향으로는 24개 지점에서 측정하였다(Fig. 3.4.4.3(b)). 또한 Contour Area에서의 수평 방향 콘 저항치 및 함수비 변화 경향을 통해 배수재로부터의 거리에 따른 수평 방향의 개량 효율을 파악하였다.

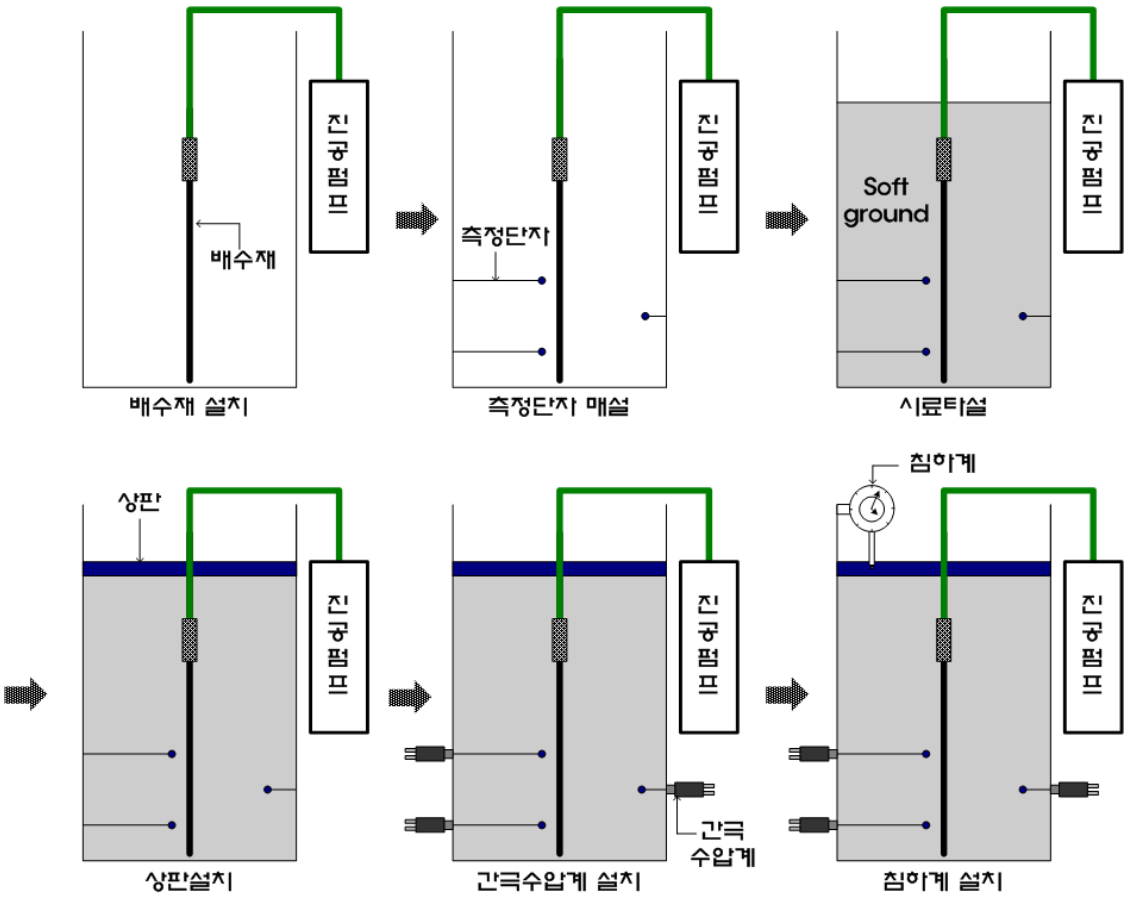
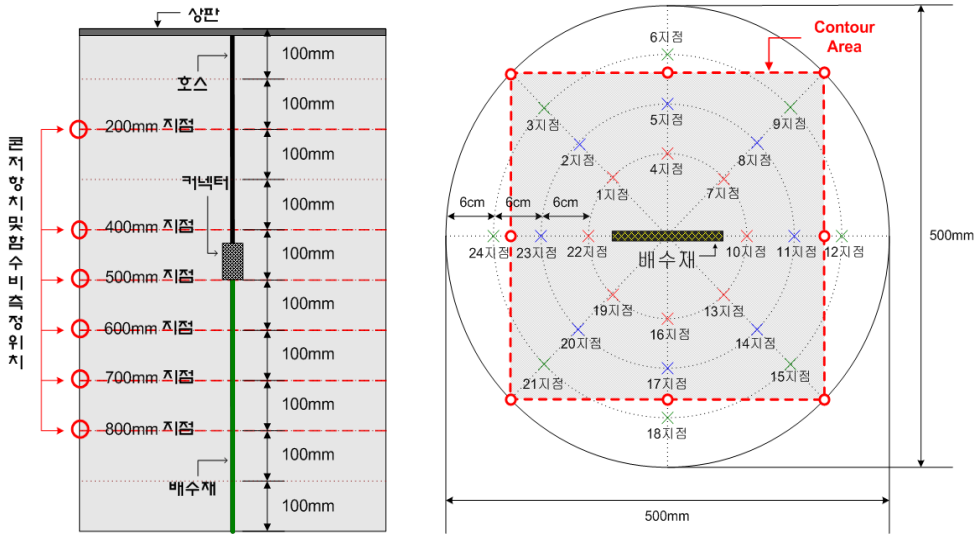


Fig. 3.4.4.2 실내 Column 실험순서 모식도



(a) 연직 방향 측정 위치 (b) 수평 방향 측정 위치

Fig. 3.4.4.3 콘 저항치 및 함수비 측정 위치

나. 대형모형실험(Pilot Scale Test)

당해년도 최종 목표는 실내에서 수행된 모든 실험결과를 토대로 하여 최적의 조건을 설정하여 현장에 적용시 보다 경제적이고 효율적으로 적용할 수 있는 설계 영향인자를 도출하는데 있다. 따라서 Unit Cell 실험에서 도출된 결과를 바탕으로 Pilot Scale 실험을 실시하였다.

Sealing 층의 형성방법 및 타설 간격에 따라서 진공배수 효율이 달라질 수 있다. 따라서 본 실험에서는 Column 실험과 같은 방식으로 Sealing 층을 조성하고, 배수재의 배치형상을 조절한 실험(Test 3-1)과 배수재 간격을 조절한 실험(Test 3-2)으로 나누어 실험을 실시하였다. Test 3-1의 경우 Unit Cell 실험의 결과를 통해 영향원을 설정한 후, 배수재의 간격 및 배치형상을 파악하기 위해 일반적인 연직배수 이론에서 사용되는 배수재의 영향원 개념을 사용하고, 환산 원통형 토괴의 직경에 의한 면적과 배수재 설치방법에 의해 결정되는 면적이 동일하다는 가정 하에서 다음과 같은 공식을 이용하였다. Table 3.4.4.6에 배수재 배열에 따른 영향원의 직경을 도식적으로 나타내었다.

사각형배치 $$\frac{\pi d_e^2}{4} = S^2 \quad \rightarrow \quad d_e = 1.128S \qquad (3.4.4.1)$$

삼각형배치 $$\frac{\pi d_e^2}{4} = \frac{\sqrt{3}}{2} S^2 \quad \rightarrow \quad d_e = 1.05S \qquad (3.4.4.2)$$

여기서, S : 배수재의 배치간격

d_e : 배수재에 의한 영향원

Table 3.4.4.6 배수재 배열에 따른 영향원의 직경

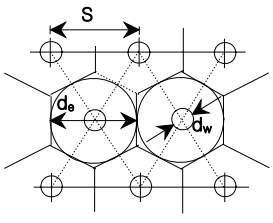
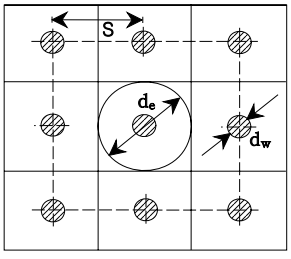
배열	영향원 직경	배열	영향원 직경
정삼각형	1.05S	장방형	1.128S
			

Table 3.4.4.7에는 Test 3-1의 실험 조건을 나타내었다. 각 실험 간 계측기를 매설하여 적용기간에 따른 간극수압 및 침하특성 등을 파악하였으며, 실험 종료 후 함수비 분포 및 전단강도 증가양상을 파악하여, 지반개량효과를 정량적으로 나타내고자 하였다. Table 3.4.4.8에는 Test 3-2의 실험 조건을 나타내었다. 실내 Column 실험 결과를 바탕으로 배수재 간 간격을 22, 30cm로 고정하여 실험을 실시 하였다.

Table 3.4.4.7 배수재의 배치형상에 따른 효율 특성 실험 (Test 3-1)

고정인자					변동인자	
시료 종류	Sealing 층 (현장시료) 두께	배수재 길이	적용진공압 (-kg/cm^2)	적용기간	배수재 배치형상	
CL	50cm	2m	0.8	16일	삼각형	사각형

Table 3.4.4.8 배수재 배치간격 산정 실내 실험 (Test 3-2)

고정인자				변동인자	
시료종류	배수재길이	적용진공압 (-kg/cm^2)	적용기간	배수재 간 간격	
CL	80cm	0.8	16일	22cm	30cm

Fig. 3.4.4.4에는 실내 Plot 실험기의 단면도를 나타냈으며, 실내 Pilot 실험의 실험방법 및 절차를 Fig. 3.4.4.5에 나타내었다.

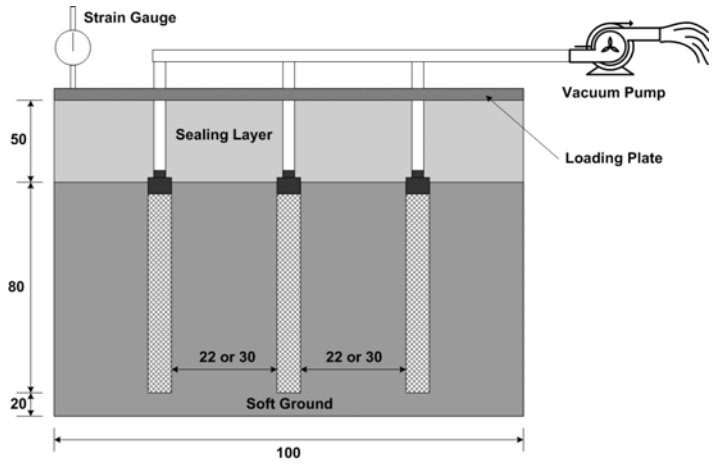
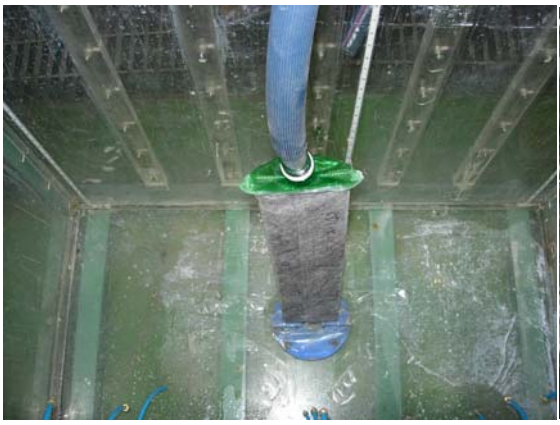


Fig. 3.4.4.4 실내 Plot 실험기 단면도



(a)배수재 설치



(b) 시료 타설 및 재조성



(c) 석션 배관 설치



(d) 설치 완료

Fig. 3.4.4.5 실내 Pilot 실험 설치 전경

제 5 절 Suction Drain 실내실험결과

1. 실내 Column Test 결과

가. 배수재 선정 실험

(1) 배수재 종류에 따른 침하량

Fig. 3.5.1.1에는 배수재 종류에 따른 실험(Test 1-1) 중 개량 정도가 비교적 좋았던, 열융착식 성곽형 배수재와 포켓식 원형 배수재, 나선코어 원형 배수재, 2중코어 하모니카형 배수재의 시간경과에 따른 침하양상을 나타내었다.

차정일(2003)은 지반 내 큰 진공압을 한번에 가하면, 그 효율이 떨어질 수 있음을 제시한 바 있다. 따라서 본 실험에서는 낮은 진공압에서 높은 진공압으로 단계적($-0.2kg/cm^2 \rightarrow -0.4kg/cm^2 \rightarrow -0.6kg/cm^2 \rightarrow -0.8kg/cm^2$)으로 증가시켜 시료에 적용하였는데, 이러한 변화로 인해 그 지점에서 비교적 급격한 침하가 발생하였다. 8가지 종류의 배수재 중 나선코어 원형 배수재와 포켓식 원형 배수재의 침하량이 가장 크게 발생하였으며, 열융착식 성곽형 배수재와 2중코어 하모니카형 배수재의 침하량도 비교적 크게 발생하였다. Fig. 3.5.1.1에 나타난바와 같이 4가지 배수재 모두 약 650시간이 경과하면서 침하량의 증가량이 거의 나타나지 않고 일정한 값에 수렴됨을 알 수 있었다.

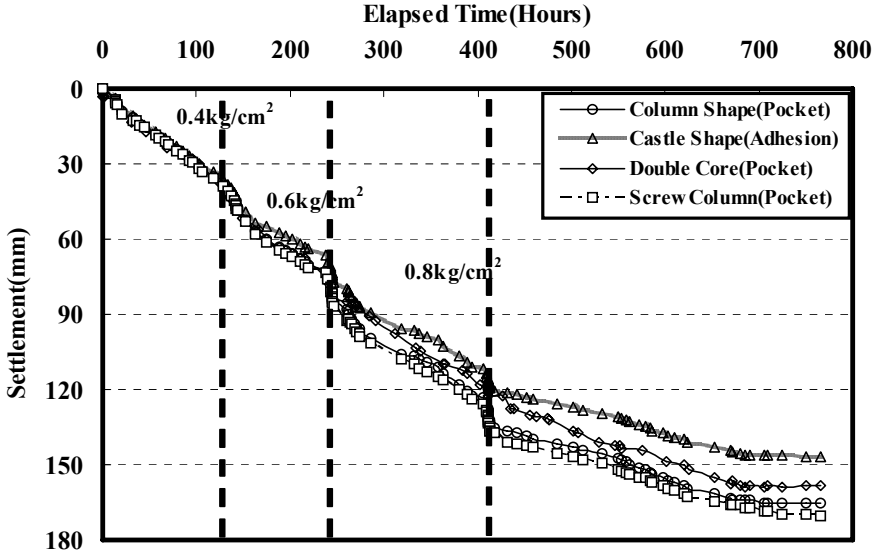


Fig. 3.5.1.1 배수재의 종류에 따른 침하량

Fig. 3.5.1.2는 실험기 단면적과 진공압 적용 기간을 고려하여 침하량으로부터 역산된 각 배수재별 배수 속도를 나타낸 그래프이다. 각 단계에서 진공압이 가해진 직후에는 배수 속도가 크게 발생하였으며, 압밀이 진행됨에 따라 그 속도가 점점 감소하는 경향을 나타냈다.

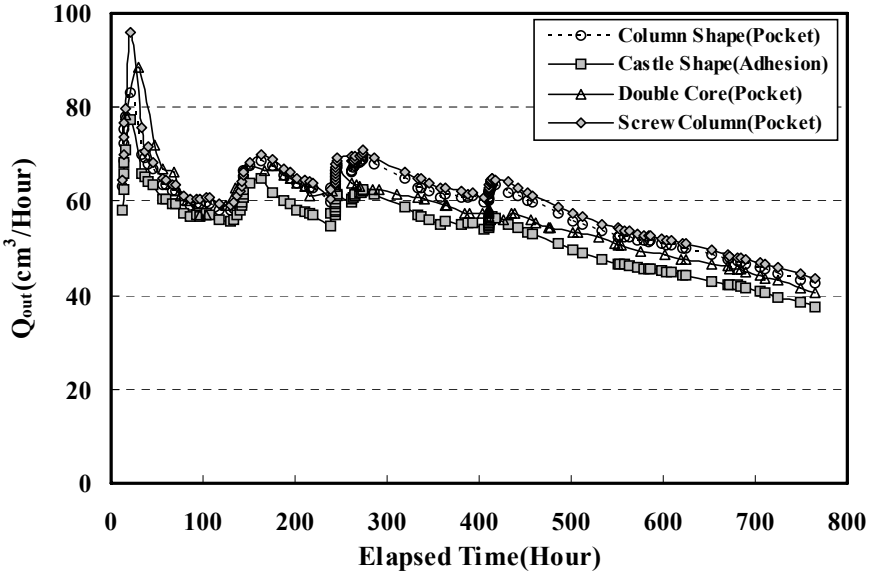
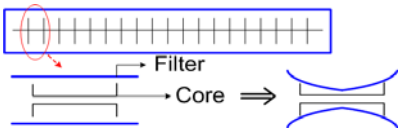


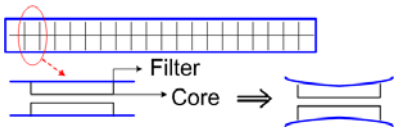
Fig. 3.5.1.2 배수재의 종류에 따른 배수속도

(2) 배수재 종류에 따른 강도특성

Fig. 3.5.1.5 ~ 3.5.1.12에는 실험에 사용된 각 배수재(포켓식 성곽형, 코일형, 하모니카 형, 원형, 2중코어 하모니카형, 날개형, 나선코어 원형 및 열융착식 성곽형배수재) 별 심도에 따른 평균 콘관입 저항치를 나타내었다. 모든 케이스에서 심도 30~40cm까지는 실링층으로써 진공압의 영향이 미치치 않아서 강도의 증가가 거의 발생하지 않았으며, 심도가 깊어질수록 강도가 증가하는 경향을 나타냈다. 심도에 따라 강도가 증가한 이유는 초기 시료가 약 66%의 고함수비로 재조성되었기 때문에 자중의 영향이 크게 작용했기 때문인 것으로 판단된다. 실험결과 나선코어 원형 배수재와 포켓식 원형 배수재의 강도가 가장 크게 나타났으며, 열융착식 성곽형 배수재, 2중코어 하모니카형 배수재의 강도 역시 비교적 크게 나타났다. 열융착식 배수재의 경우, 필터가 Core에 직접적으로 붙어 있기 때문에 필터와 Core 사이에 공간이 존재하는 포켓식 배수재에 비해 진공으로 인한 배수재 유로 단면적의 감소가 상대적으로 작게 발생하였으며(Fig. 3.5.1.3), 2중코어 하모니카형 배수재의 경우에는 유로 단면적이 다른 배수재에 비하여 2배 가량 컸기 때문에 배수 효율이 크게 나타났다. 원형 배수재의 경우, 사용된 다른 판형의 배수재에 비해 진공압을 방사형으로 동일하게 적용시킬 수 있었기 때문에, 다른 배수재에 비해 배수효율이 비교적 크게 나타났다(Fig. 3.5.1.4).

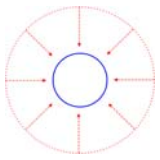


(a) 포켓식 배수재의 경우

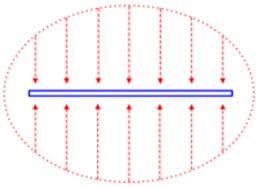


(b) 열융착식 배수재의 경우

Fig. 3.5.1.3 진공압으로 인한 배수 단면적의 감소 형상



(a) 원형 배수재의 영향원



(b) 판형 배수재의 영향원

Fig. 3.5.1.4 배수재 Core 형상 별 적용 영향 범위 모식도

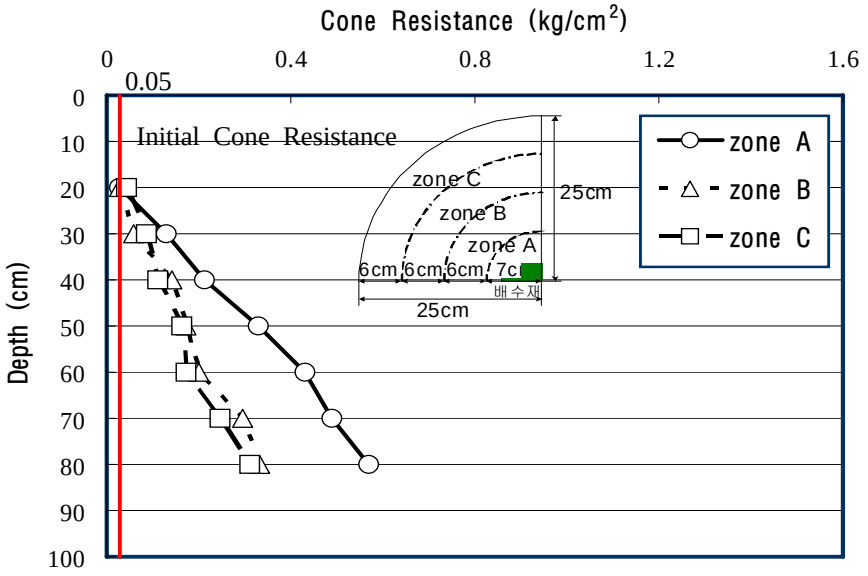


Fig. 3.5.1.5 포켓식 성곽형 배수재의 심도에 따른 지점별 콘저항치의 변화

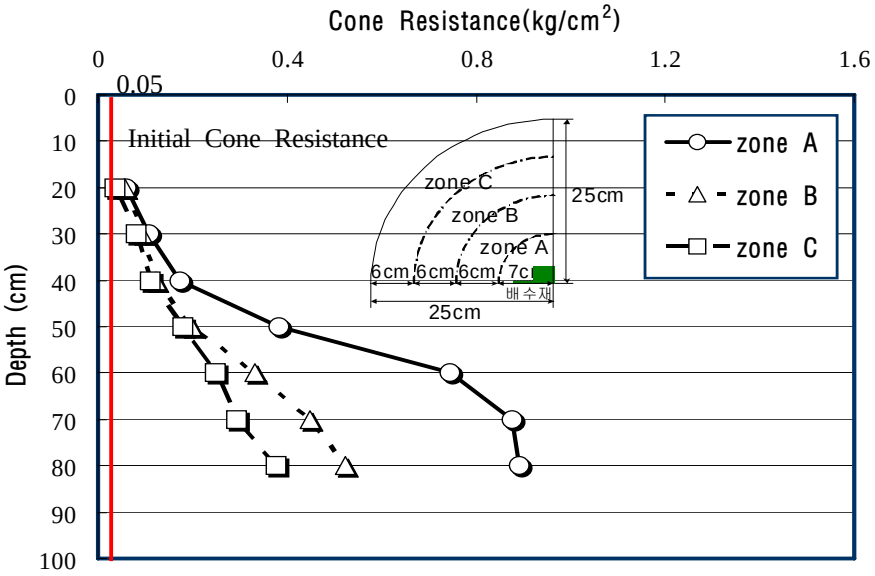


Fig. 3.5.1.6 포켓식 하모니카형 배수재의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

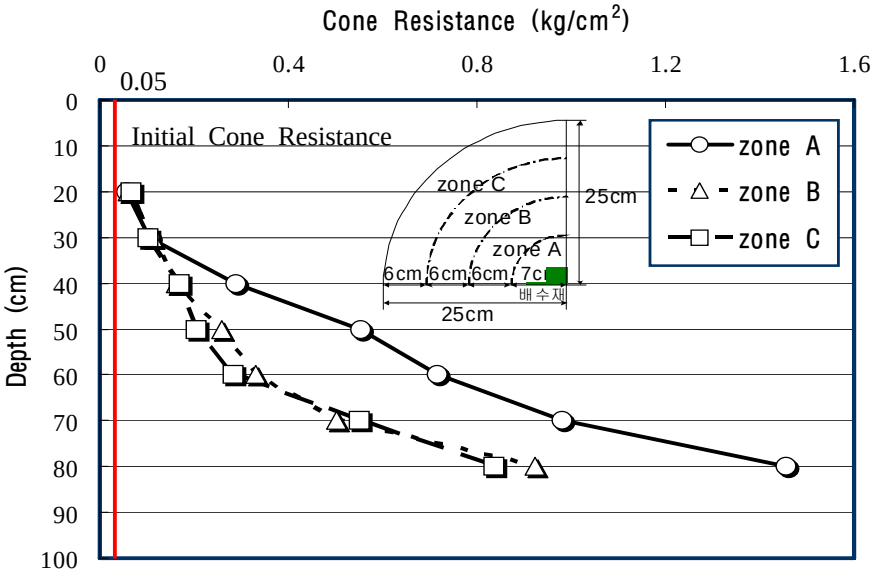


Fig. 3.5.1.7 포켓식 원형 배수재의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

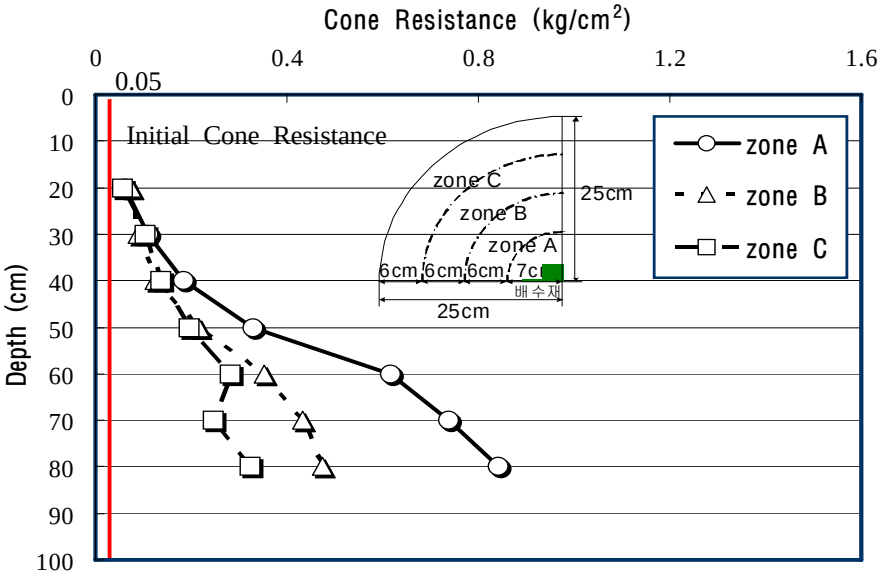


Fig. 3.5.1.8 포켓식 코일형 배수재의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

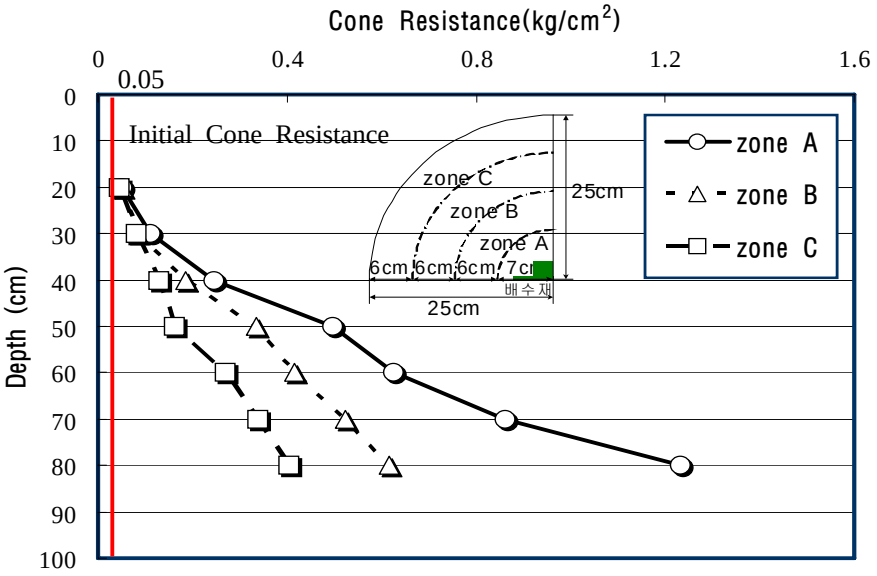


Fig. 3.5.1.9 포켓식 2중코어 성곽형 배수재의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

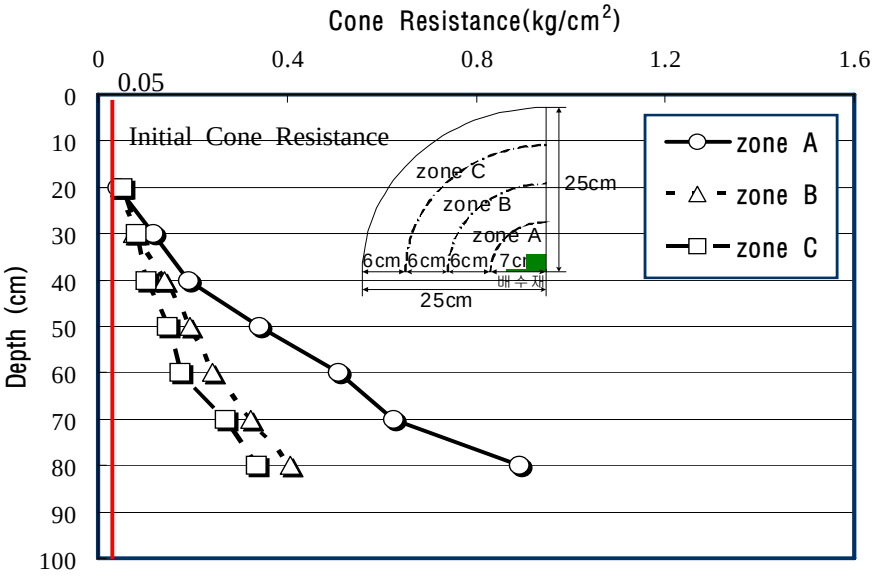


Fig. 3.5.1.10 포켓식 날개형 배수재의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

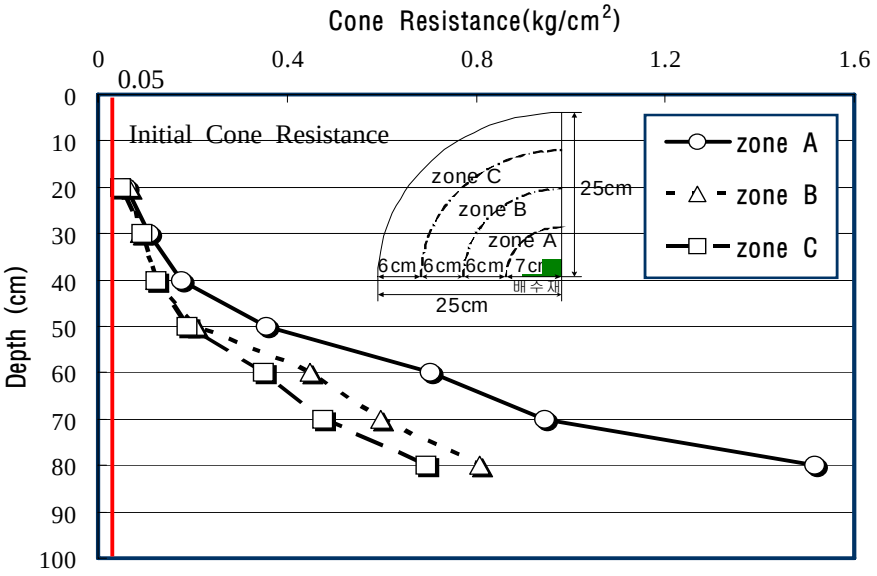


Fig. 3.5.1.11 포켓식 나선코어 원형 배수재의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

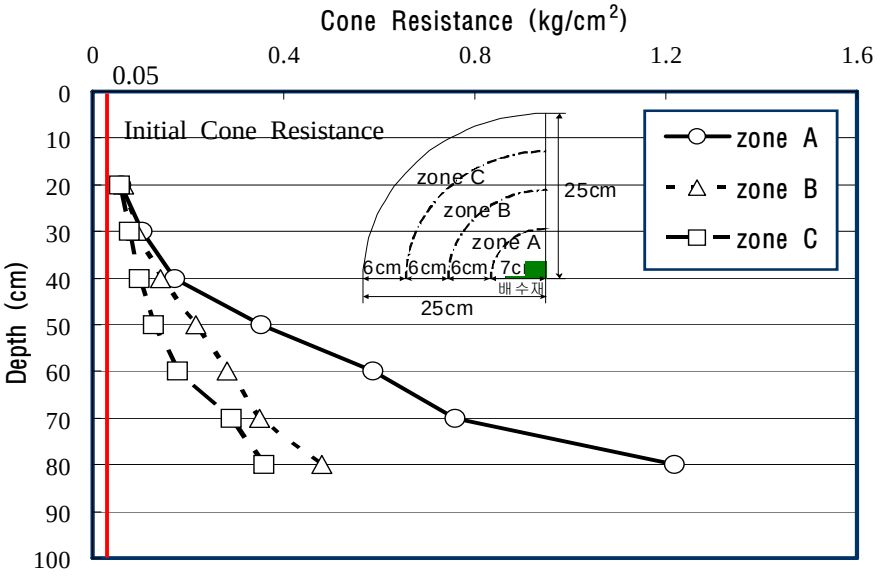


Fig. 3.5.1.12 열융착식 성곽형 배수재의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

Fig. 3.5.1.13 ~ 3.5.1.20에는 각 배수재 별 심도에 따른 수평 방향의 강도분포를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 심도가 깊어질수록 배수재 주위의 강도 Contour가 더욱 넓어지는 경향을 보였다. 특히 포켓식 원형배수재와 나선코어 원형배수재에서의 강도 Contour의 증가변화가 크게 나타났다.

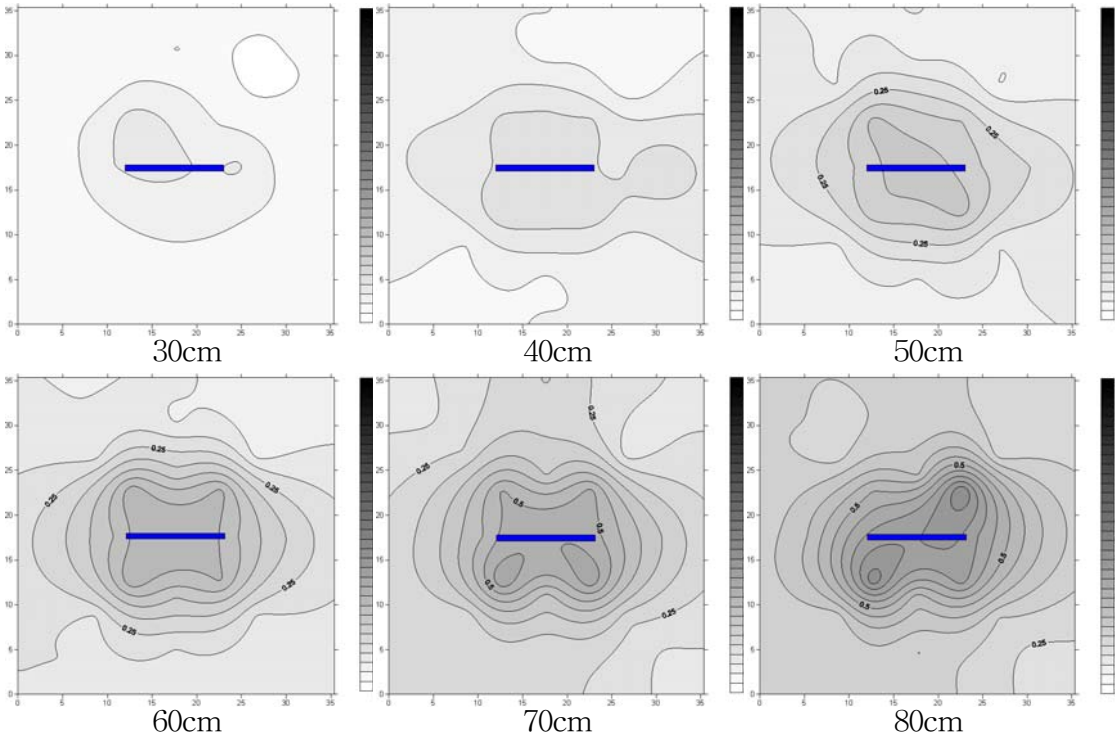


Fig. 3.5.1.13 포켓식 성곽형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

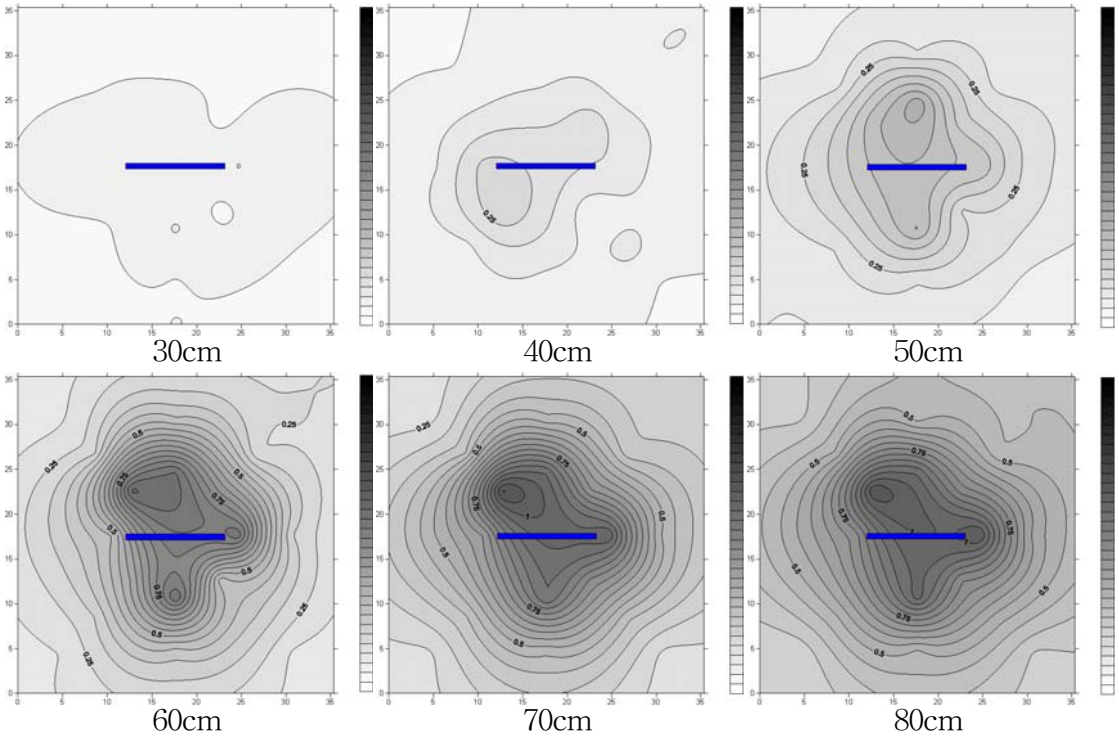


Fig. 3.5.1.14 포켓식 하모니카형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

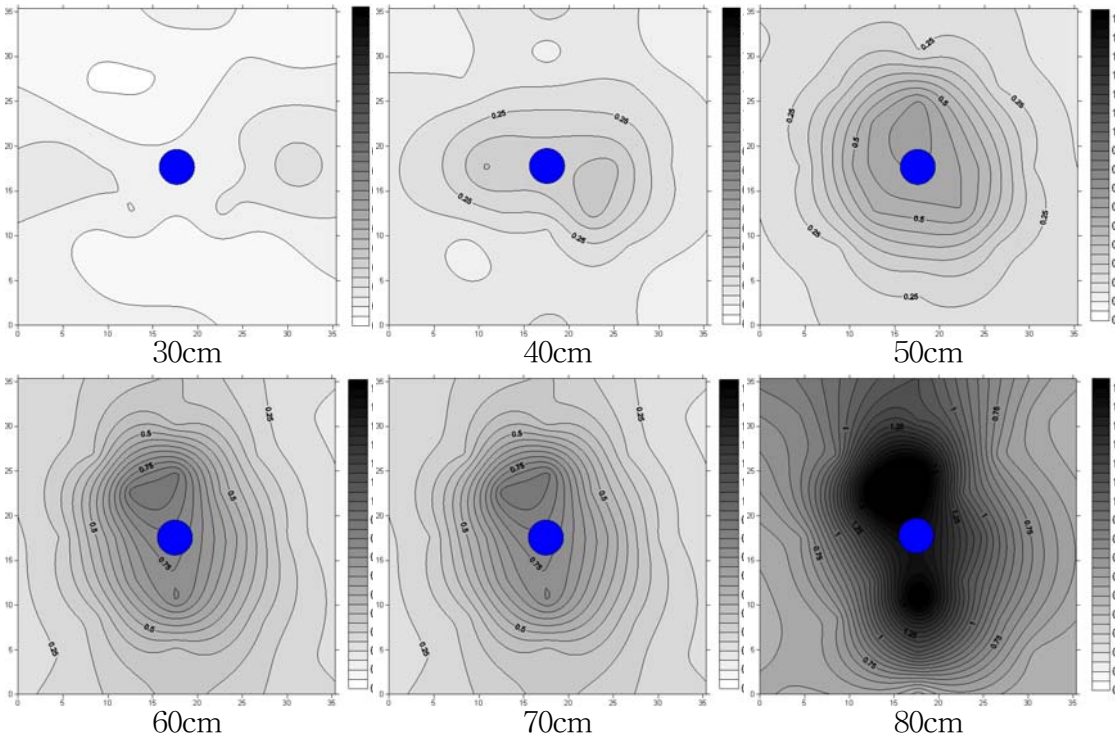


Fig. 3.5.1.15 포켓식 원형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

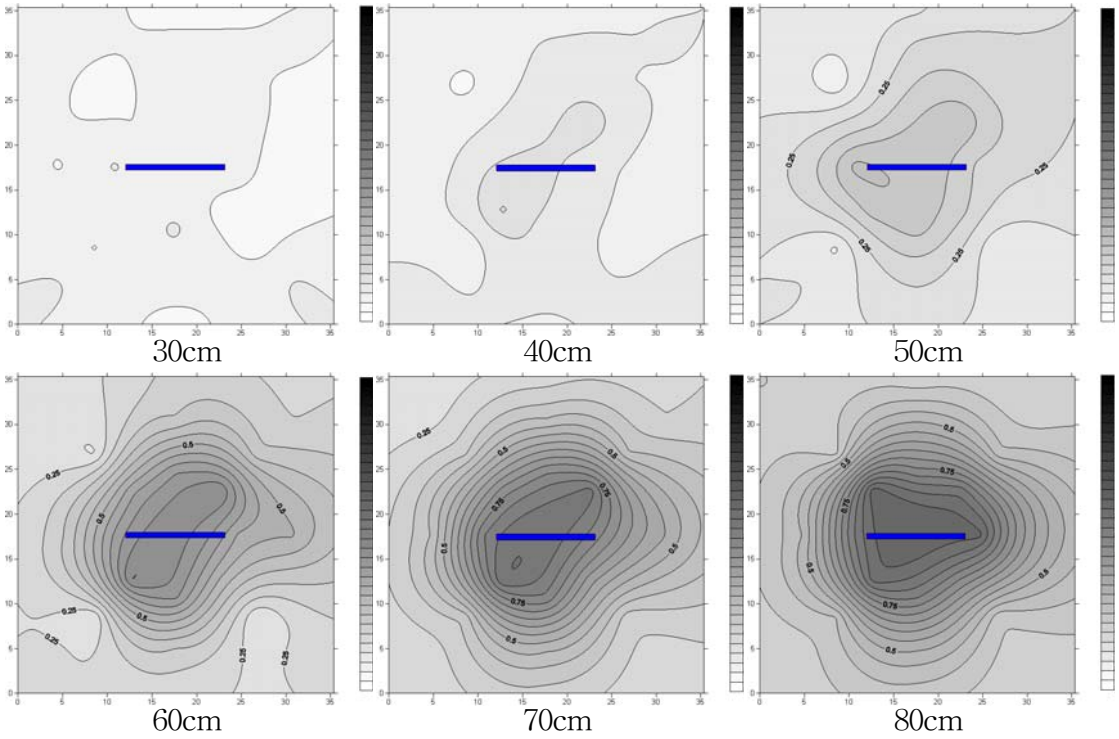


Fig. 3.5.1.16 포켓식 코일형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

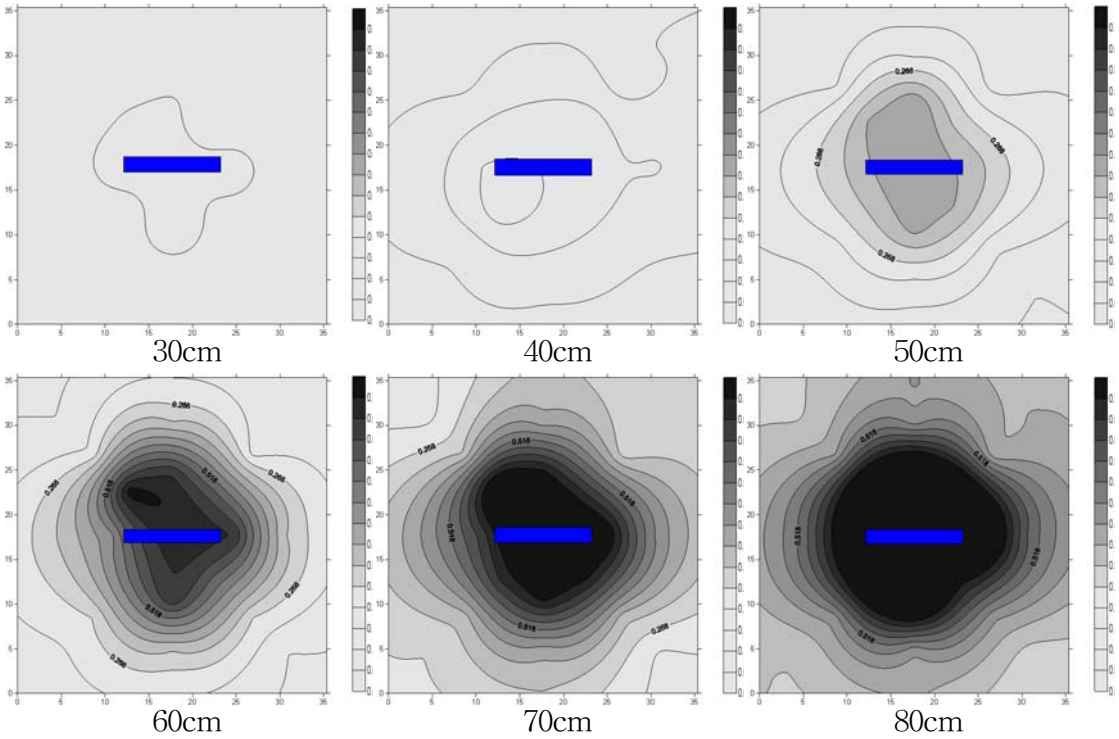


Fig. 3.5.1.17 포켓식 2중코어 하모니카형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

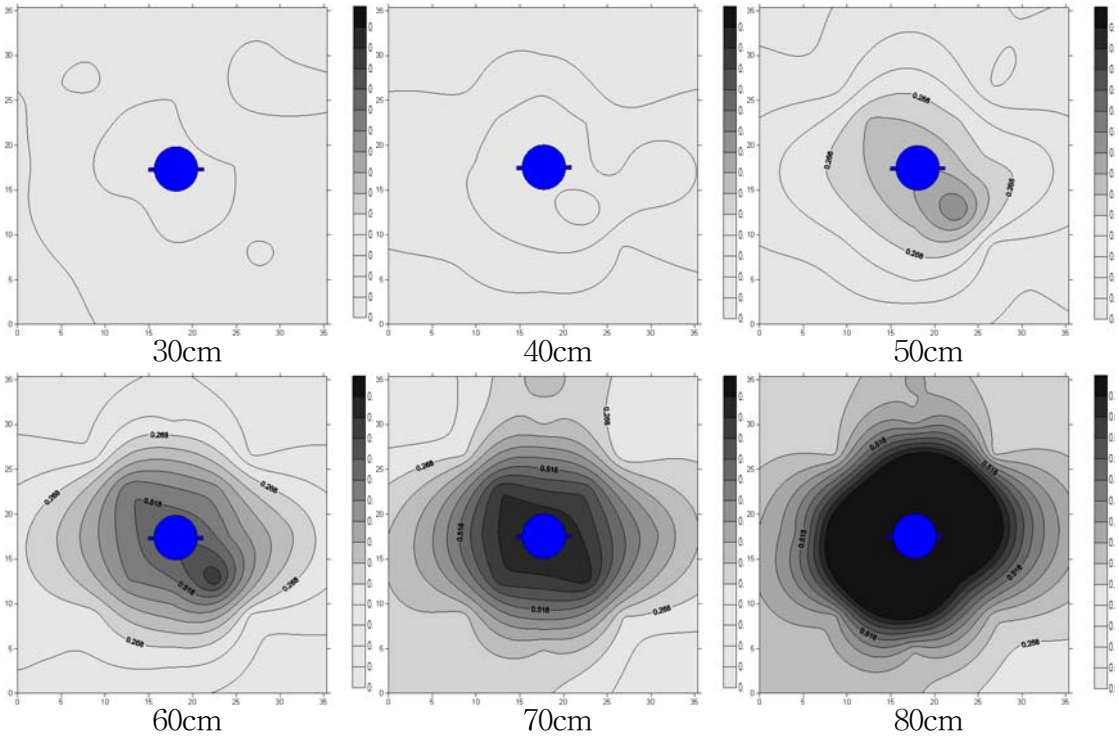


Fig. 3.5.1.18 포켓식 날개형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

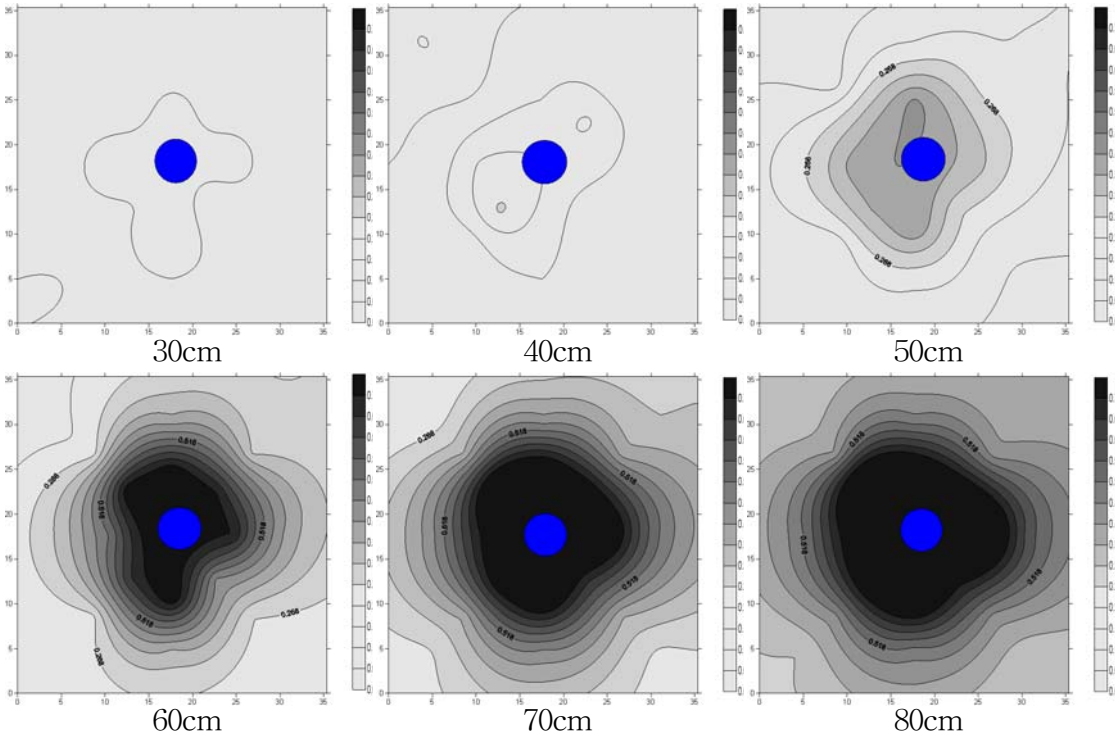


Fig. 3.5.1.19 포켓식 나선코어 원형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

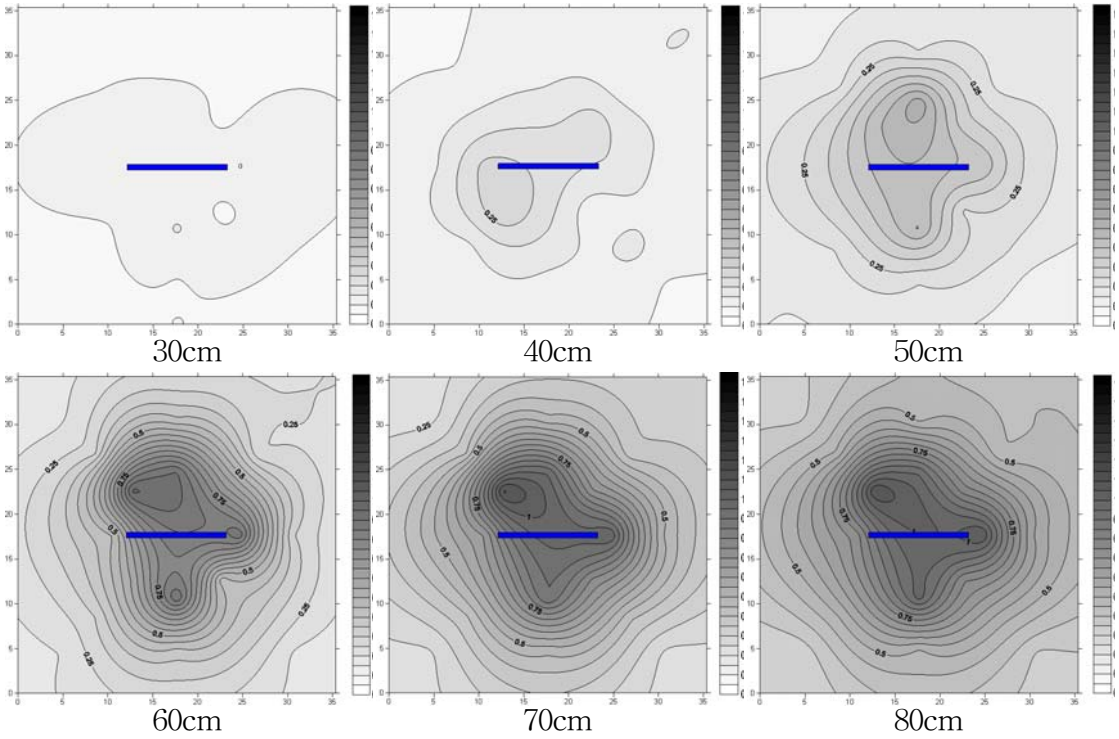


Fig. 3.5.1.20 열융착식 성곽형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

(3) 배수재 종류에 따른 함수비 변화특성

Fig. 3.5.1.21~3.5.1.28에는 각 배수재에 따른 심도 별 함수비 분포를 나타내었다. 대부분 초기 함수비 보다 약 10~30% 정도 감소하는 경향이 나타났으며, 심도가 감소할수록 증가하는 경향이 나타났다. 또한 Sealing 층에 비해 개량영역에서 함수비 감소 경향은 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 이를 통해 본 공법으로 인해 배수효율이 증대됨을 파악할 수 있었다. 그러나 이러한 경향은 시간경과에 따라 발생되는 진공압에 의한 배수필터의 막힘 현상 및 배수재 유로 단면적의 감소 효과 등에 의해 배수재로 부터의 거리가 멀어짐에 따라 그 감소폭이 비교적 작게 나타났다.

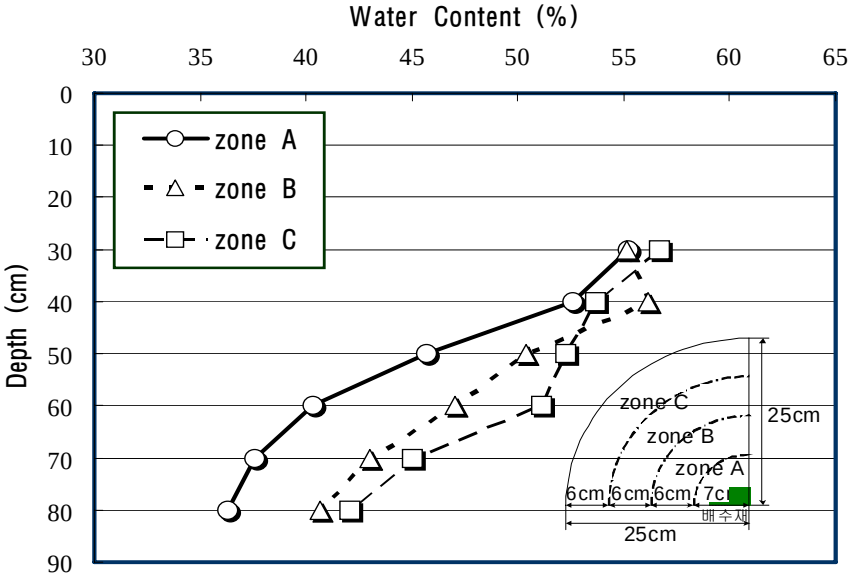


Fig. 3.5.1.21 포켓식 성곽형 배수재의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

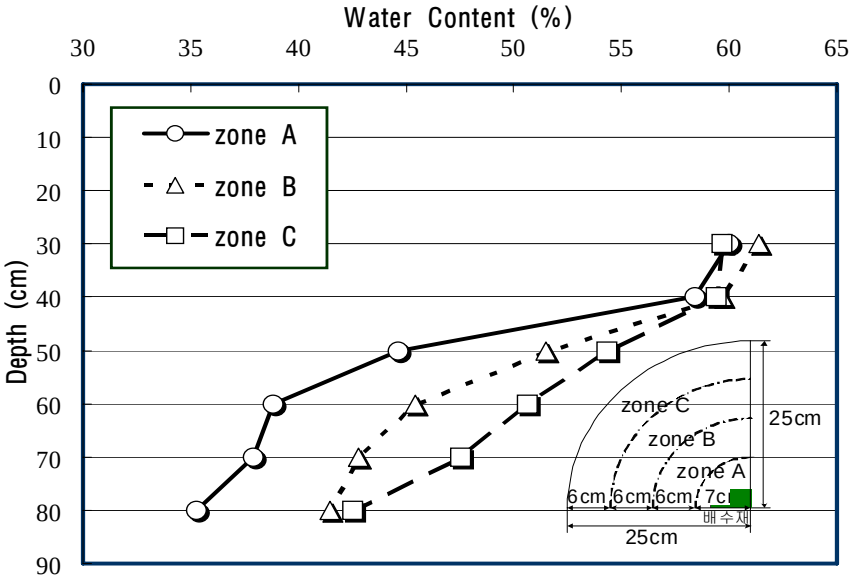


Fig. 3.5.1.22 포켓식 하모니카형 배수재의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

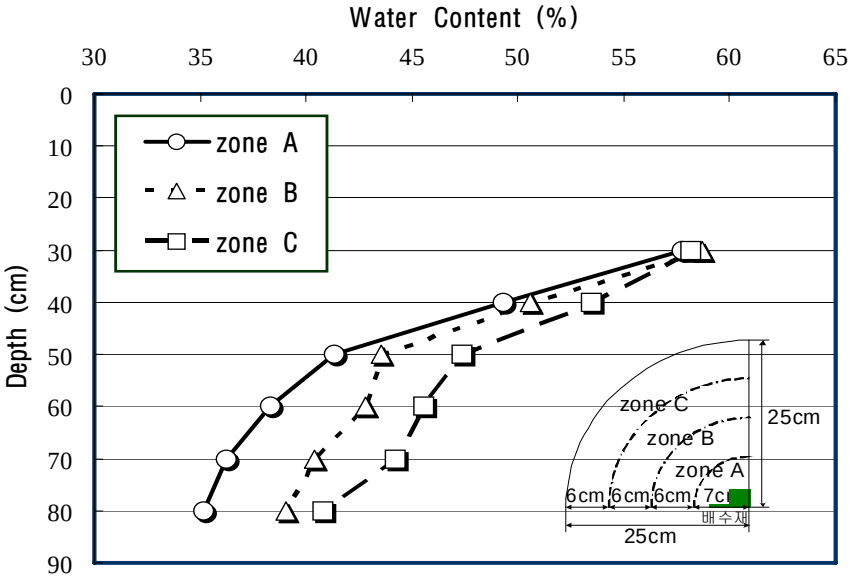


Fig. 3.5.1.23 포켓식 원형 배수재의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

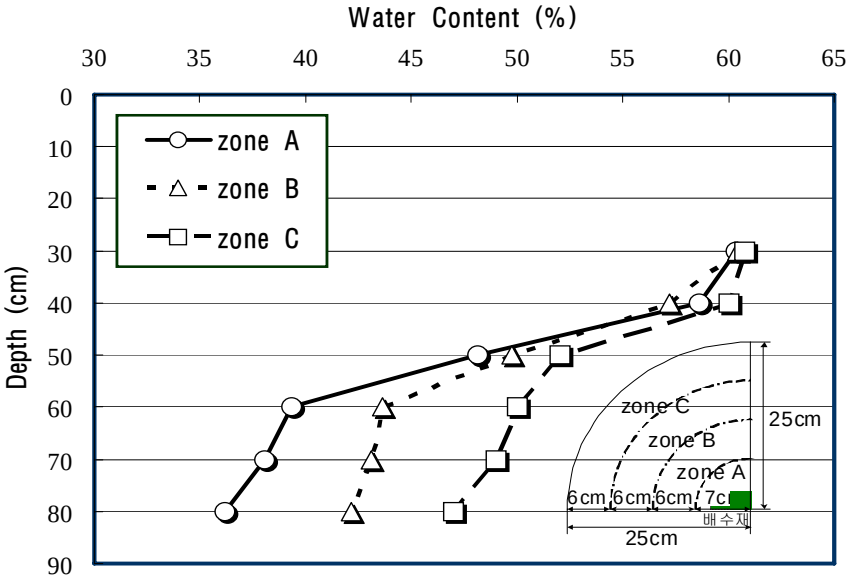


Fig. 3.5.1.24 포켓식 코일형 배수재의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

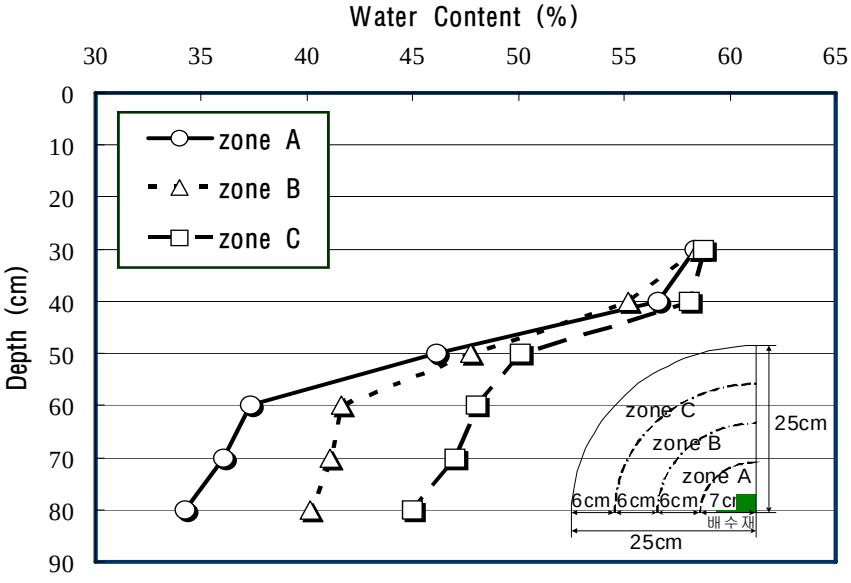


Fig. 3.5.1.25 포켓식 2중코어 하모니카형 배수재의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

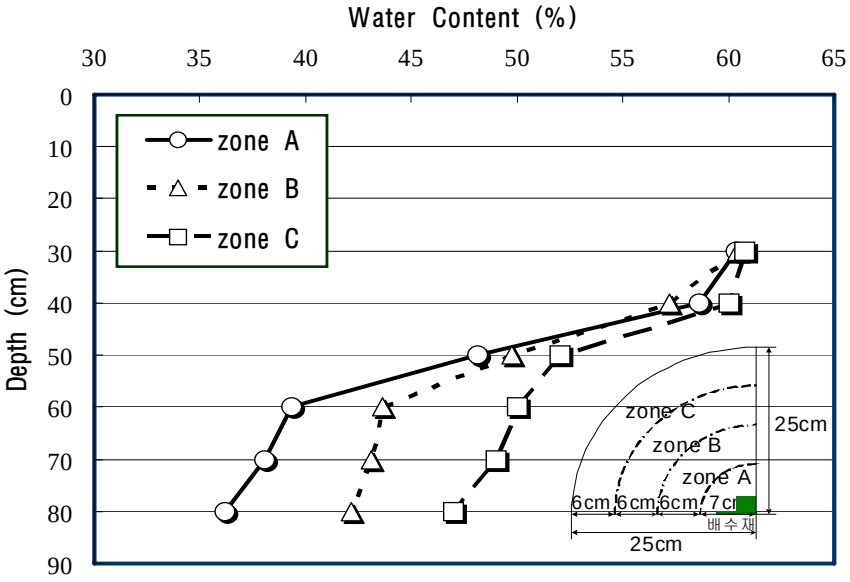


Fig. 3.5.1.26 포켓식 날개형 배수재의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

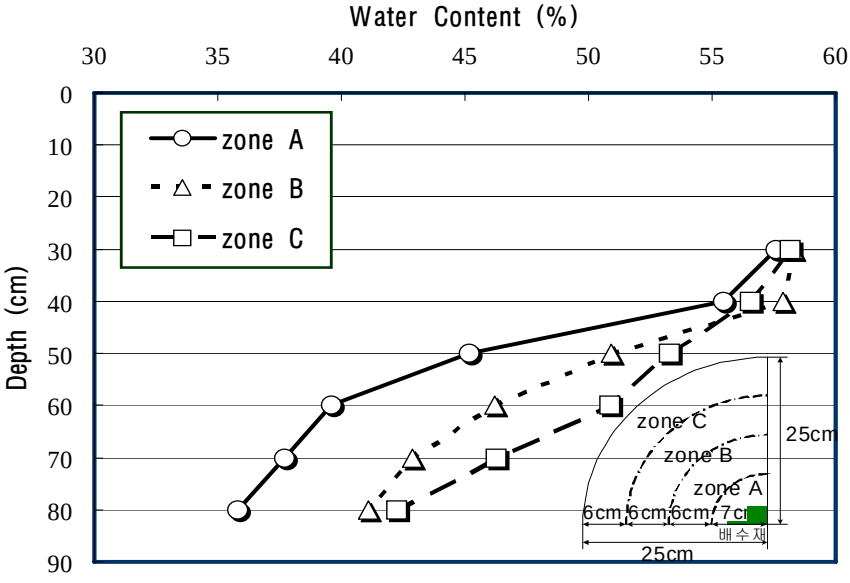


Fig. 3.5.1.27 포켓식 나선코어 원형 배수재의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

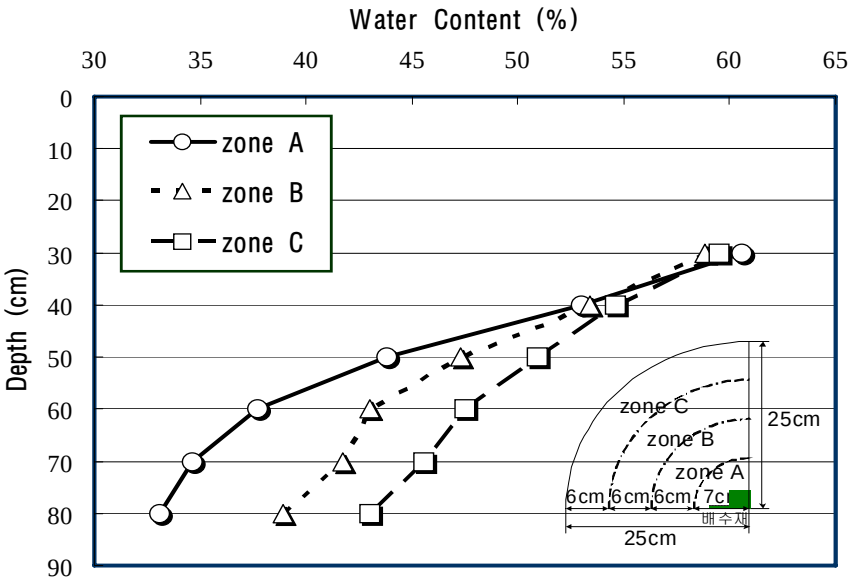


Fig. 3.5.1.28 열융착식 성곽형 배수재의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

Fig. 3.5.1.29~3.5.1.36에는 각 심도 별 수평방향으로의 함수비 분포를 나타내었다. 모든 실험조건에서 심도의 증가와 함께 함수비가 감소하였으며, 시료 전반적으로 유사한 경향이 나타났다. 따라서 이 결과를 통해 하부층일수록 개량정도가 커짐을 알 수 있었으며, 이는 강도결과와도 부합된다.

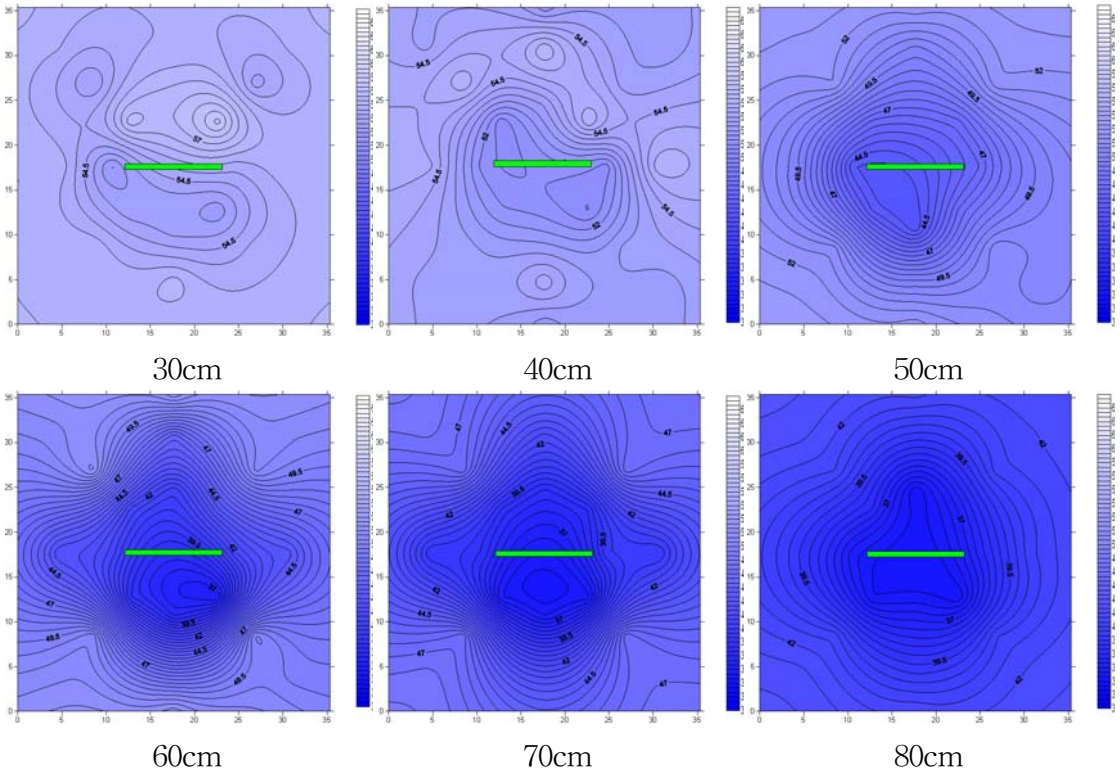


Fig. 3.5.1.29 포켓식 성곽형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

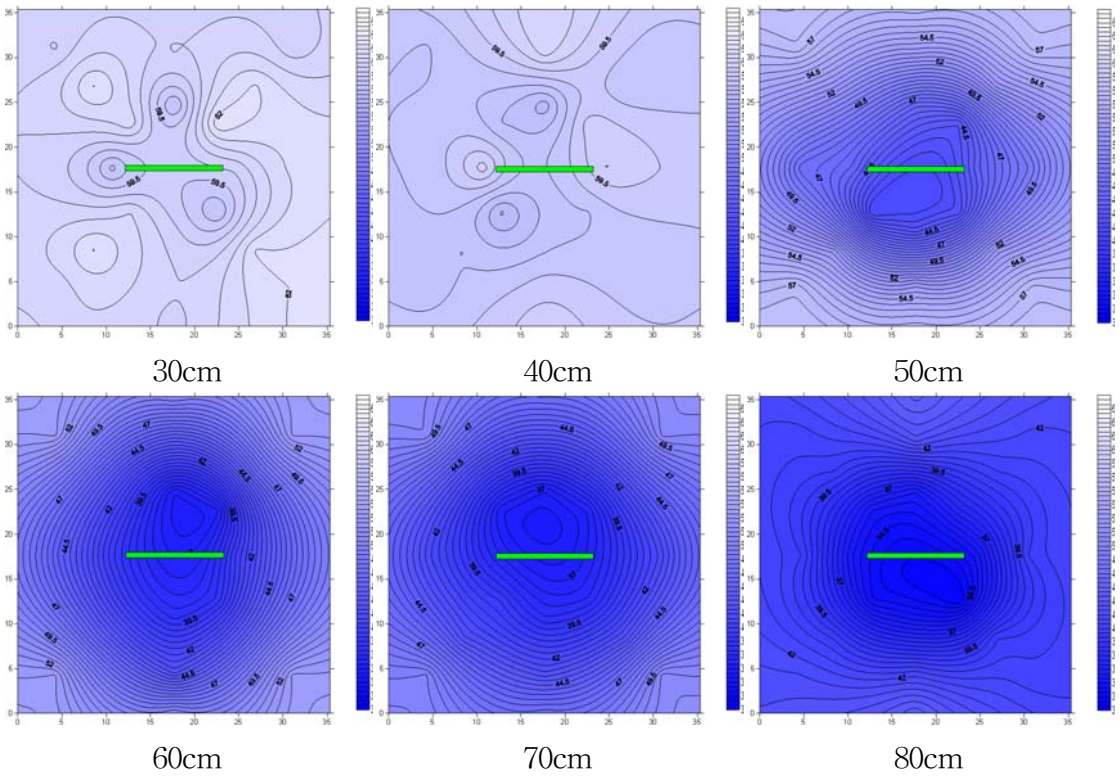


Fig. 3.5.1.30 포켓식 하모니카형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

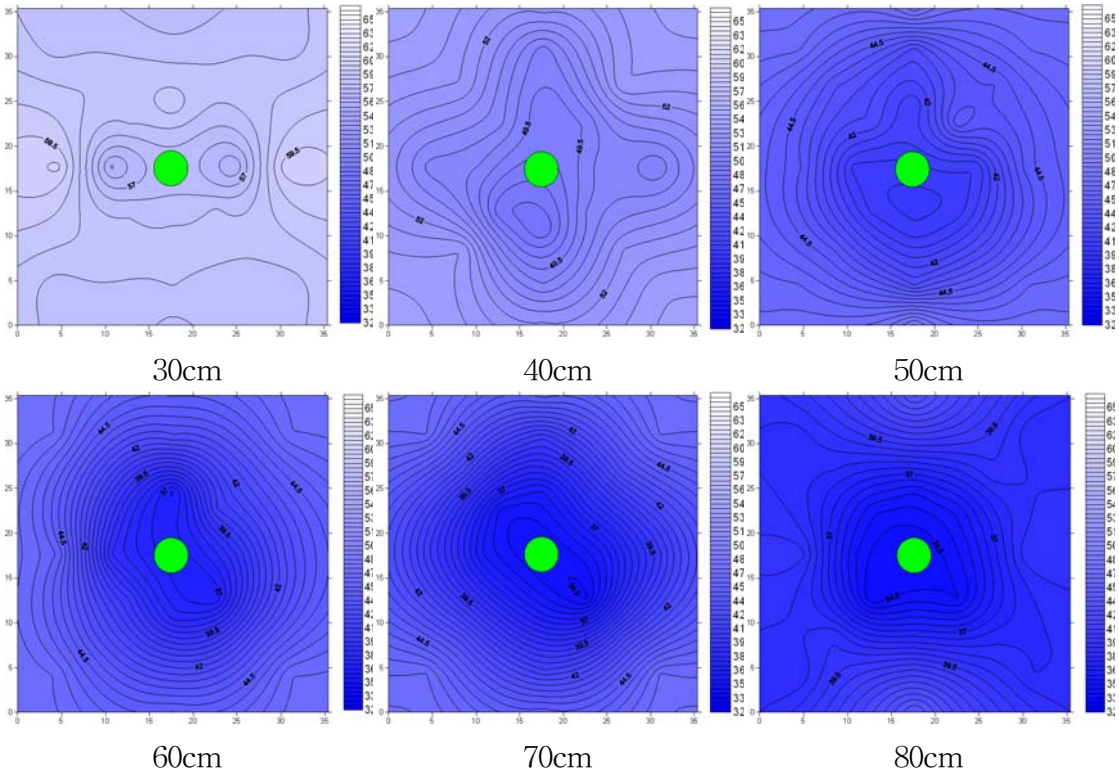


Fig. 3.5.1.31 포켓식 원형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

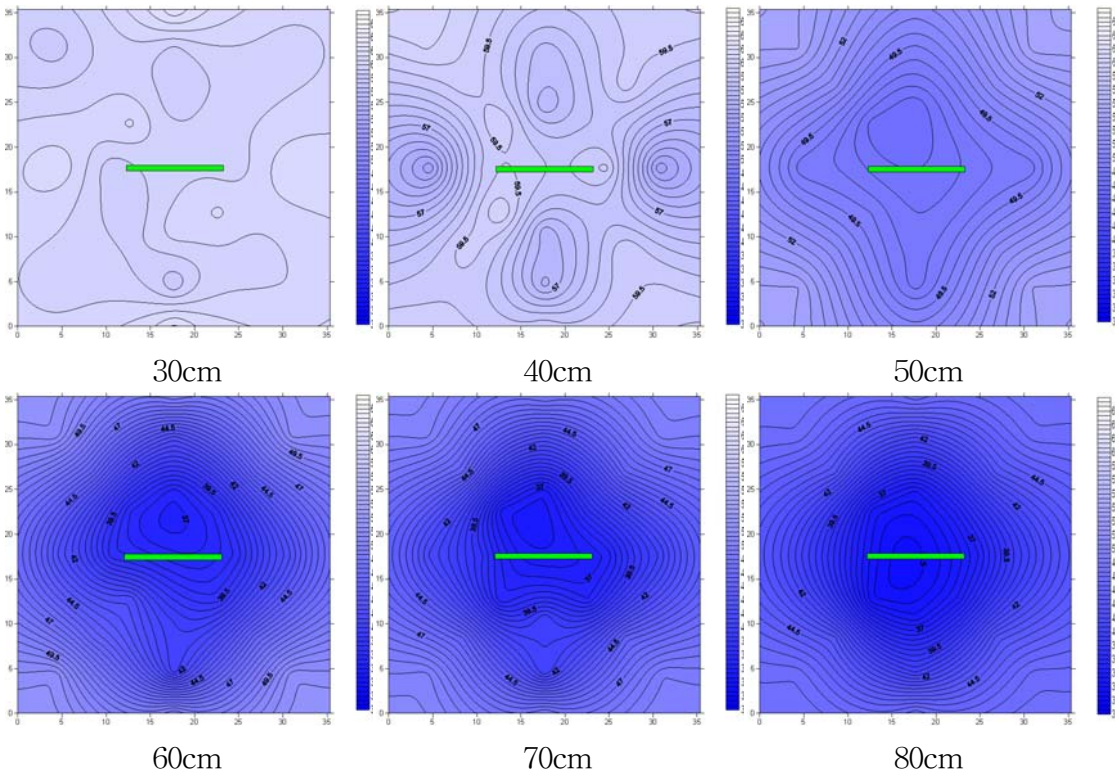


Fig. 3.5.1.32 포켓식 코일형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

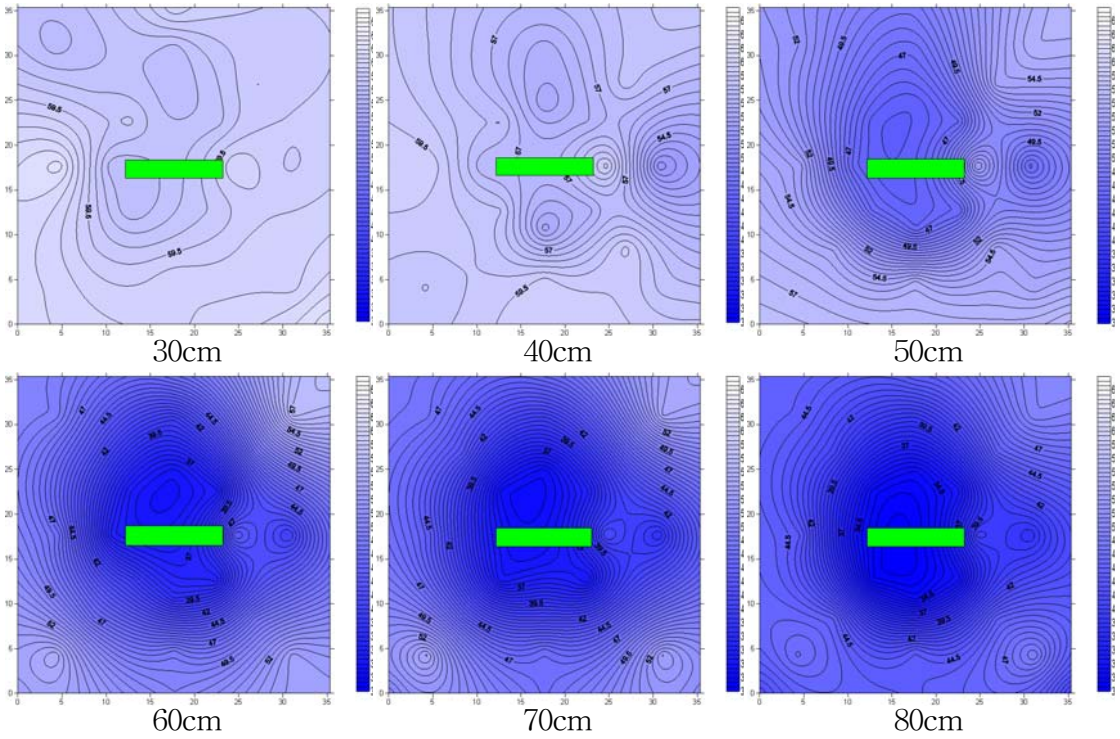


Fig. 3.5.1.33 포켓식 2중코어 하모니카형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

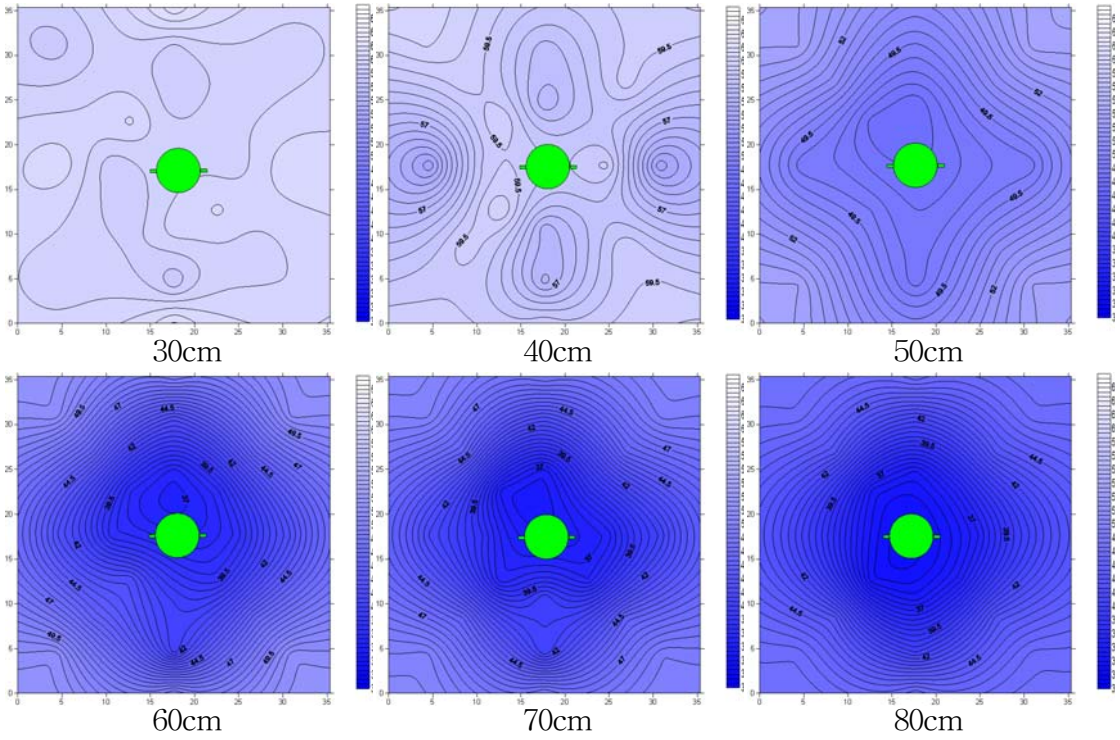


Fig. 3.5.1.34 포켓식 날개형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

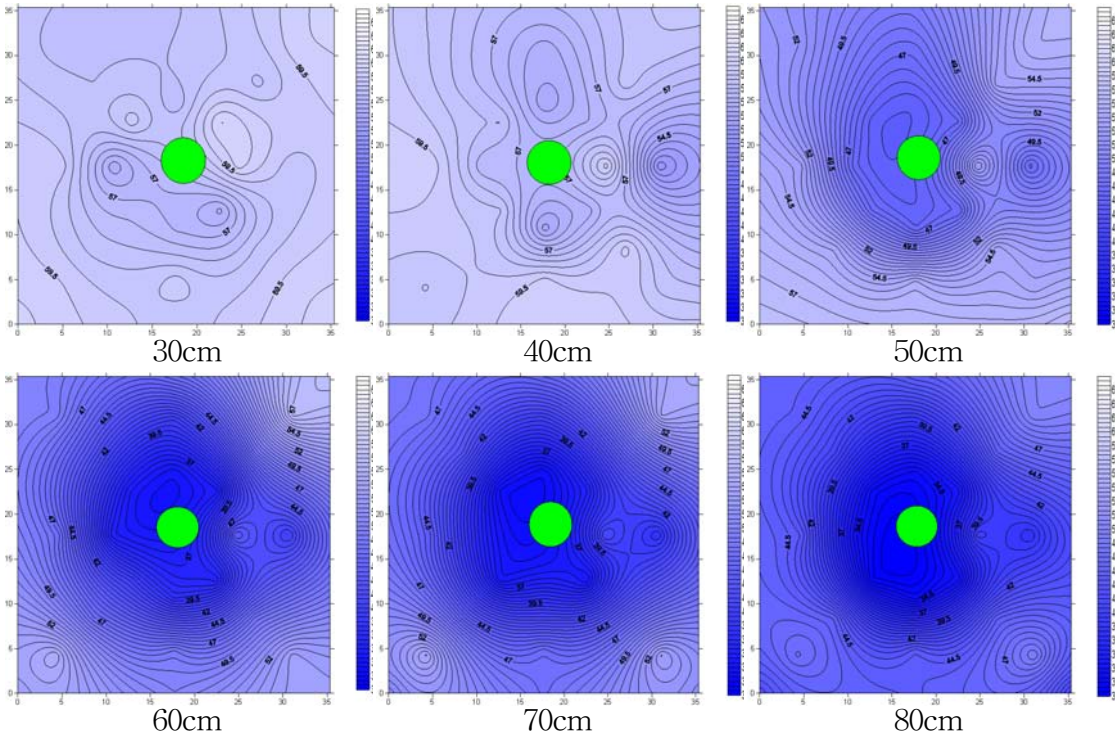


Fig. 3.5.1.35 포켓식 나선코어 원형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

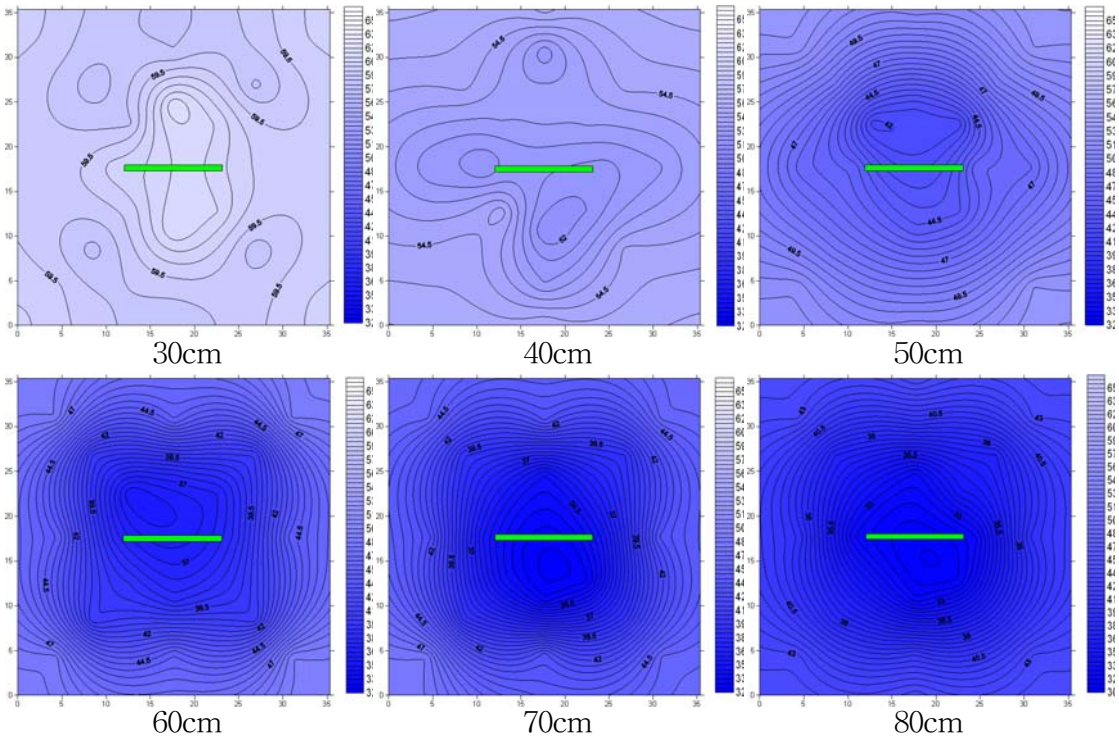


Fig. 3.5.1.36 열융착식 성곽형 배수재의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

Fig. 3.5.1.37에는 개량영역(심도 50cm 이하)에서 각 배수재 별 초기 함수비(66%)로 정규화된 함수비 분포를 나타내었다. 모든 배수재 조건에서 초기함수비 대비 약 25%정도의 함수비 감소가 나타났다. 특히, 포켓식 원형 배수재와 열융착식 성곽형 배수재에서 약 37%정도의 함수비 감소가 나타났으며, 포켓식 나선코어 원형 배수재의 경우 약 40%정도의 가장 큰 함수비 감소를 나타냈다.

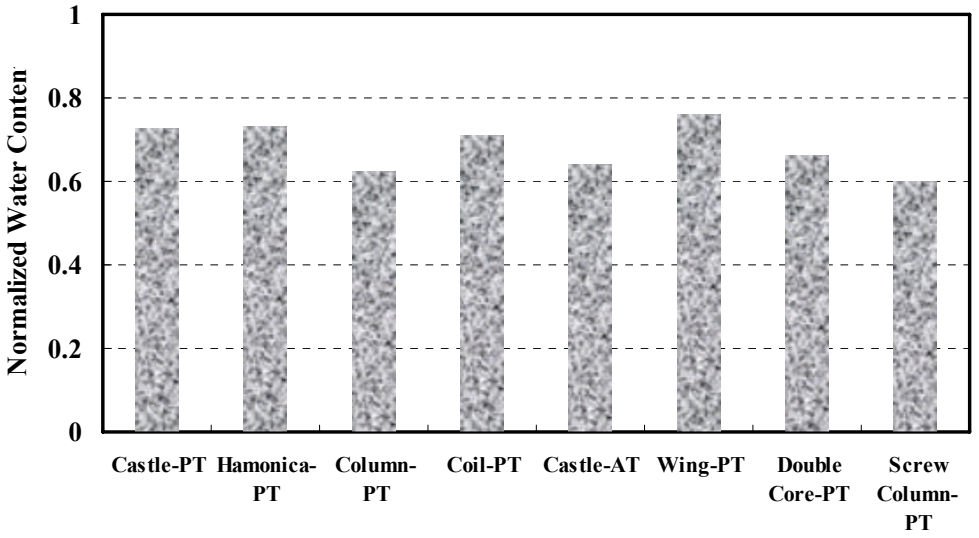


Fig. 3.5.1.37 개량영역에서 초기 함수비로 정규화된 각 배수재 별 함수비 분포

(4) 배수재 종류에 따른 영향인자 분석

Fig. 3.5.1.38는 실험 종료 후 각 배수재 조건 별 초기 강도 대비 증가된 강도비와 최종 함수비 분포를 나타내었다. 모든 배수재에서 대략 10~20배 정도의 강도증진 효과가 나타났으며, 포켓식 원형 배수재와 나선코어 원형 배수재의 경우 약 24배로 가장 큰 강도증진효과가 나타났는데, 이는 각 배수재에서 발생한 함수비 감소에 기인한다. 따라서 현장시험시공시에는 맨드릴의 내경과 현장 적용성 등을 감안하여 포켓식 나선코어 원형 배수재와 포켓식 2중코어 하모니카형 배수재를 사용하였다.

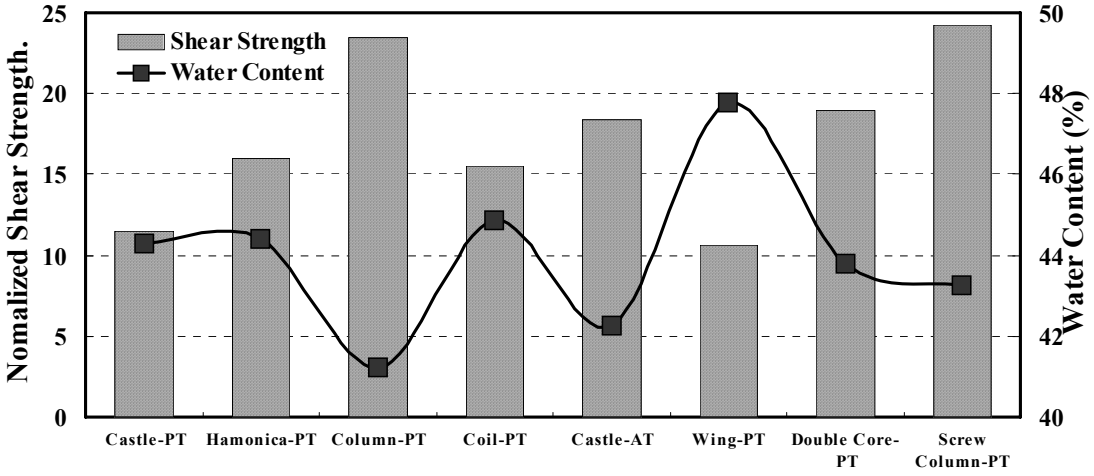


Fig. 3.5.1.38 개량영역에서의 각 배수재별 정규화된 평균 강도

Fig. 3.5.1.39에는 시료 내 배수재로 부터의 거리에 따른 평균 강도값의 변화를 나타내었다. 그 결과 모든 실험조건에서 배수재로부터 약 11cm의 거리가 떨어진 지점까지 강도값이 계속 감소하다가 일정한 값으로 수렴하는 경향이 나타났다. 이러한 실내실험의 결과로부터, 석션드레인 공법을 이용하여 지반을 개량하는 경우에는 약 11cm 내에서 Hardening Zone이 발생함을 파악 할 수 있었다.

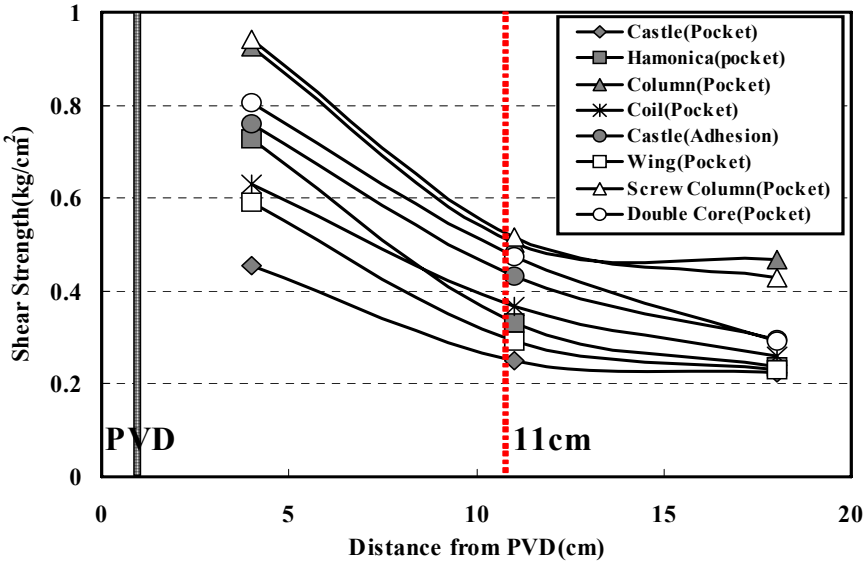


Fig. 3.5.1.39 배수재로부터의 거리에 따른 강도특성

나. Sealing 층 두께에 따른 개량효율 산정 실험

(1) Sealing 층 두께에 따른 침하량

Fig. 3.5.1.40에는 열융착식식 성곽형 배수재를 사용하여 Sealing 층 두께(0.5m, 1.0m, 1.5m)에 따른 실험을 진행하였을 때의 침하양상을 나타내었다. 실험결과 Sealing 층의 두께가 두꺼울수록 침하량은 증가하는 경향이 나타났지만, 그 차이는 그다지 크게 발생되지 않았다.

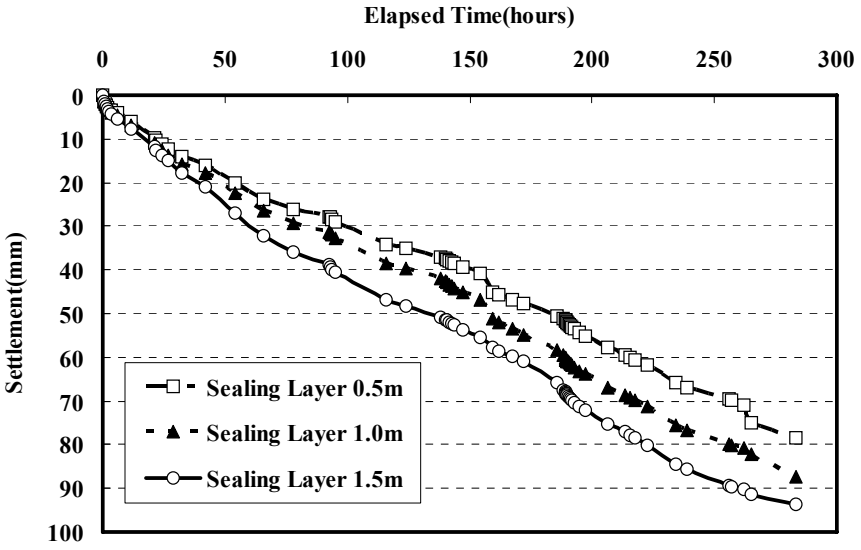


Fig. 3.5.1.40 Sealing 층 두께에 따른 침하량

(2) Sealing 층 두께에 따른 강도특성

Fig. 3.5.1.41 ~ 3.5.1.43에는 Sealing 층 별 심도에 따른 평균 콘 관입저항치를 나타내었다. 실험결과 Sealing 층 두께가 두꺼울수록 전반적인 강도치가 증가 하였다. 그러나 그 차이는 그다지 크게 발생하지 않았다. 또한 배수재에서 가장 가까운 Zone A에서의 개량효과가 더 좋았고, Zone B와 Zone C의 강도개량 효과는 Sealing 층의 두께에 크게 영향을 받지 않았다.

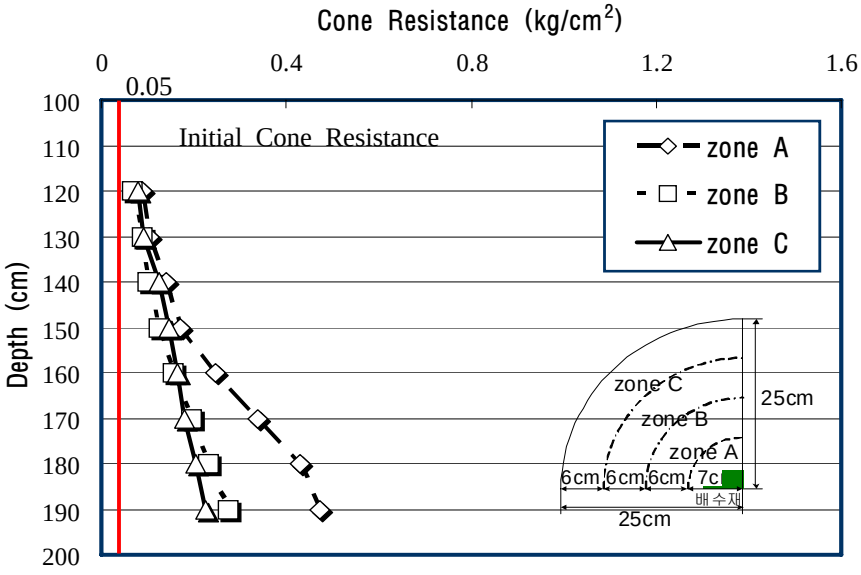


Fig. 3.5.1.41 0.5m Sealing 층의 심도에 따른 지점별 콘 저항치 변화

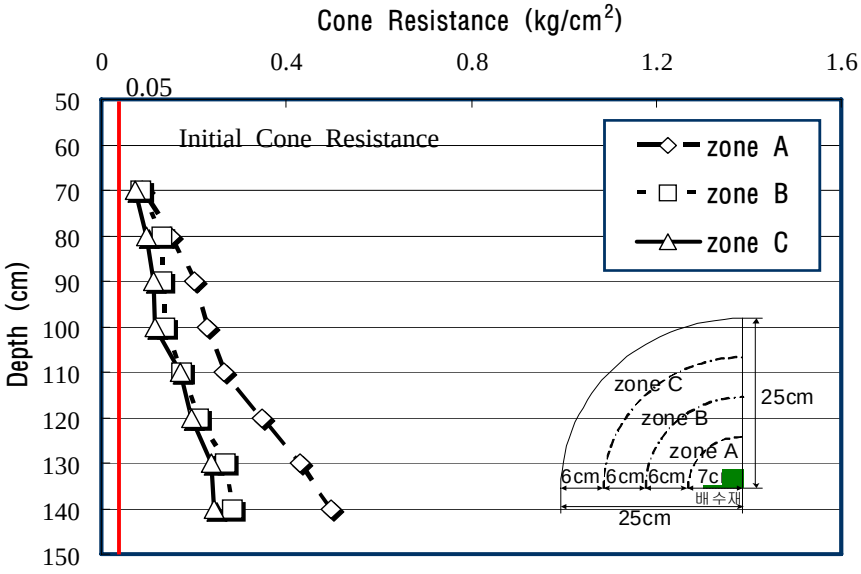


Fig. 3.5.1.42 1.0m Sealing 층의 심도에 따른 지점별 콘 저항치 변화

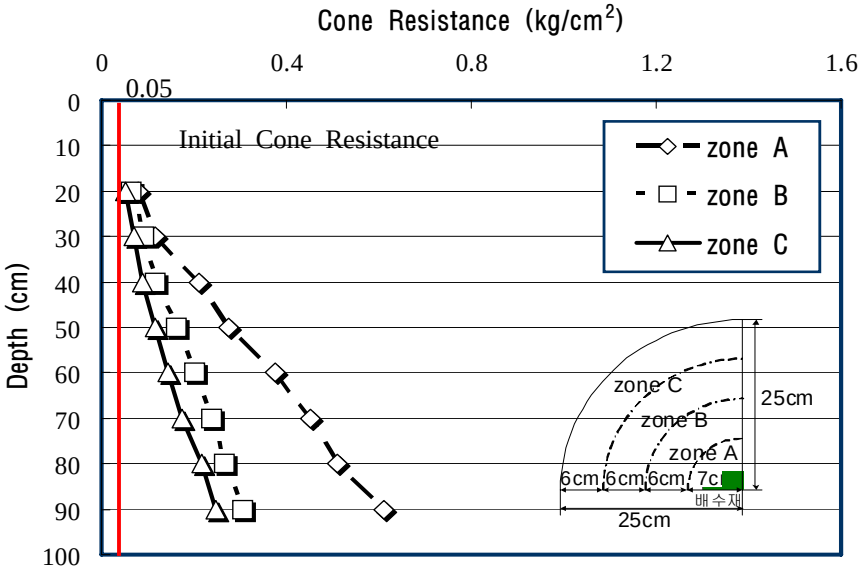


Fig. 3.5.1.43 1.5m Sealing 층의 심도에 따른 지점별 콘 저항치 변화

Fig. 3.5.1.44 ~ 3.5.1.46에는 Sealing 층 두께에 따른 강도증가현상을 파악하기 위해, 배수재로부터의 거리에 따른 각 조건별 콘관입 저항치를 나타내었다. 그 결과, 배수재에서 가까운 부분에서는 Sealing 층의 두께가 두꺼울수록 강도가 비교적 크게 나타났지만, 그 차이는 크지 않았으며 모든 조건에서 거의 비슷한 경향을 나타냈다. 또한 배수재에서의 거리가 멀어지면, 각 조건 별로 거의 비슷한 경향을 나타냈다.

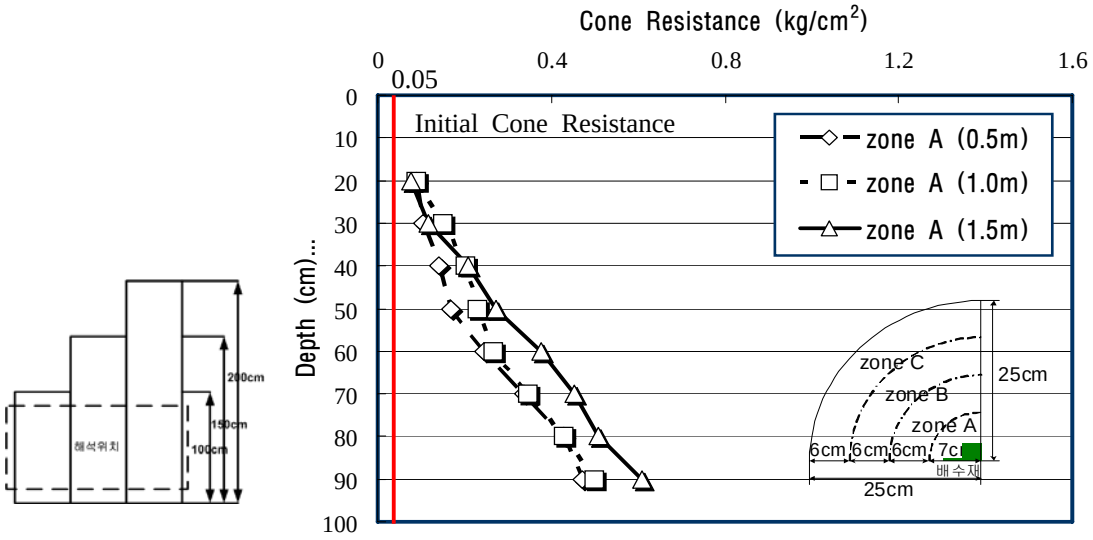


Fig. 3.5.1.44 Zone A에서의 Sealing 층 두께에 따른 지점별 콘 저항치 변화

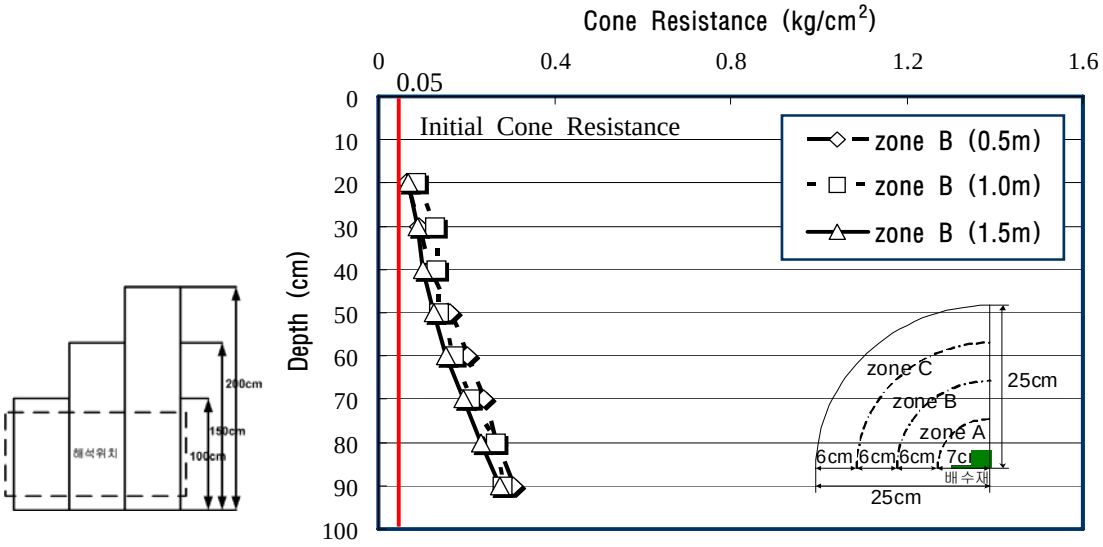


Fig. 3.5.1.45 Zone B에서의 Sealing 층 두께에 따른 지점별 콘 저항치 변화

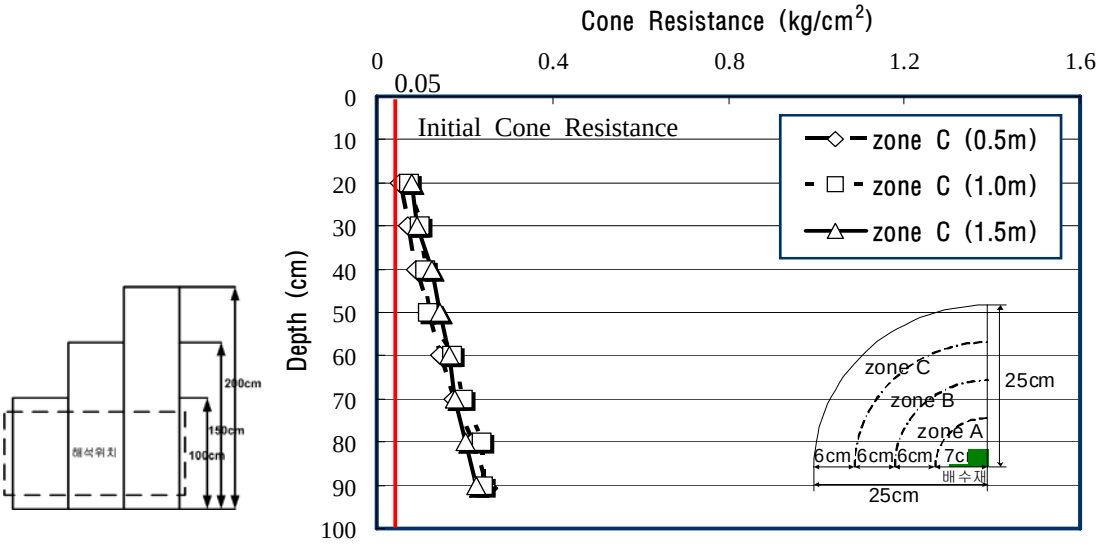


Fig. 3.5.1.46 Zone C에서의 Sealing 층 두께에 따른 지점별 콘 저항치 변화

Fig. 3.5.1.47 ~ 3.5.1.49은 Sealing 층 별 각 심도에서의 수평 방향의 개량효과에 따른 강도분포를 나타낸 것이다. 3가지 실험조건에서 동일하게 Sealing 층에서는 전반적으로 낮은 콘관입 저항치를 나타냈으며, 심도가 깊어질수록 배수재 주위에서의 강도 증가 현상이 뚜렷하게 나타났다.

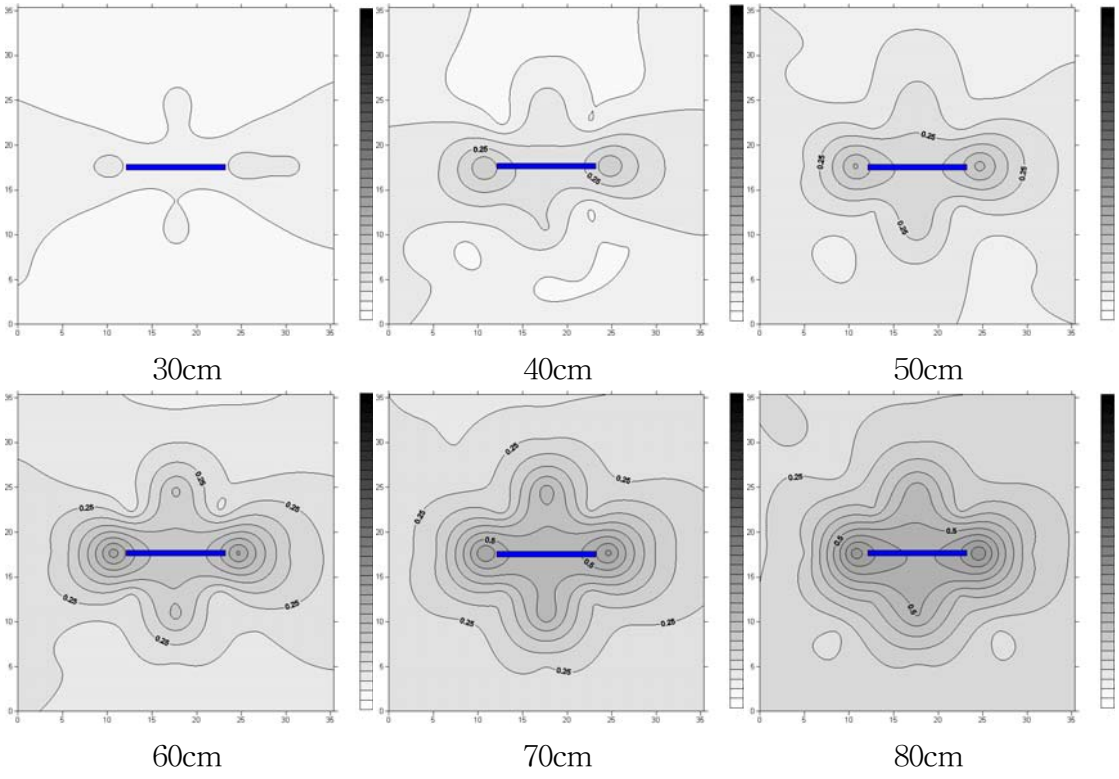


Fig. 3.5.1.47 0.5m Sealing 층의 일정심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

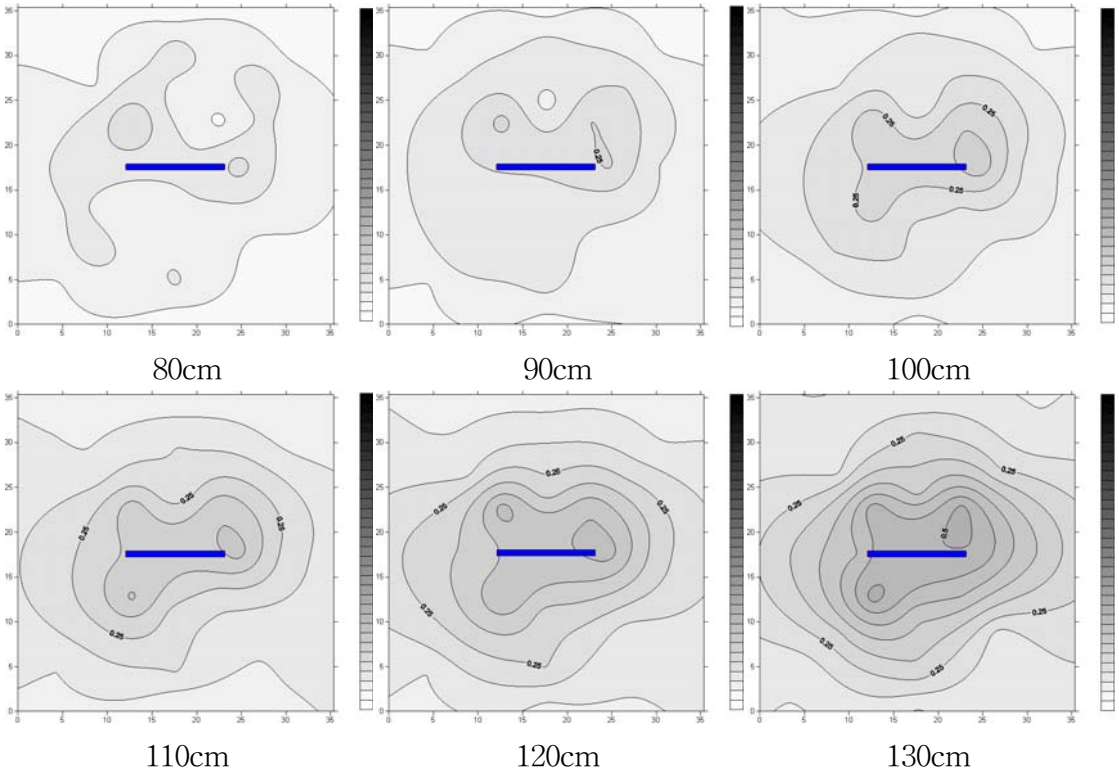


Fig. 3.5.1.48 1.0m Sealing 층의 일정심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

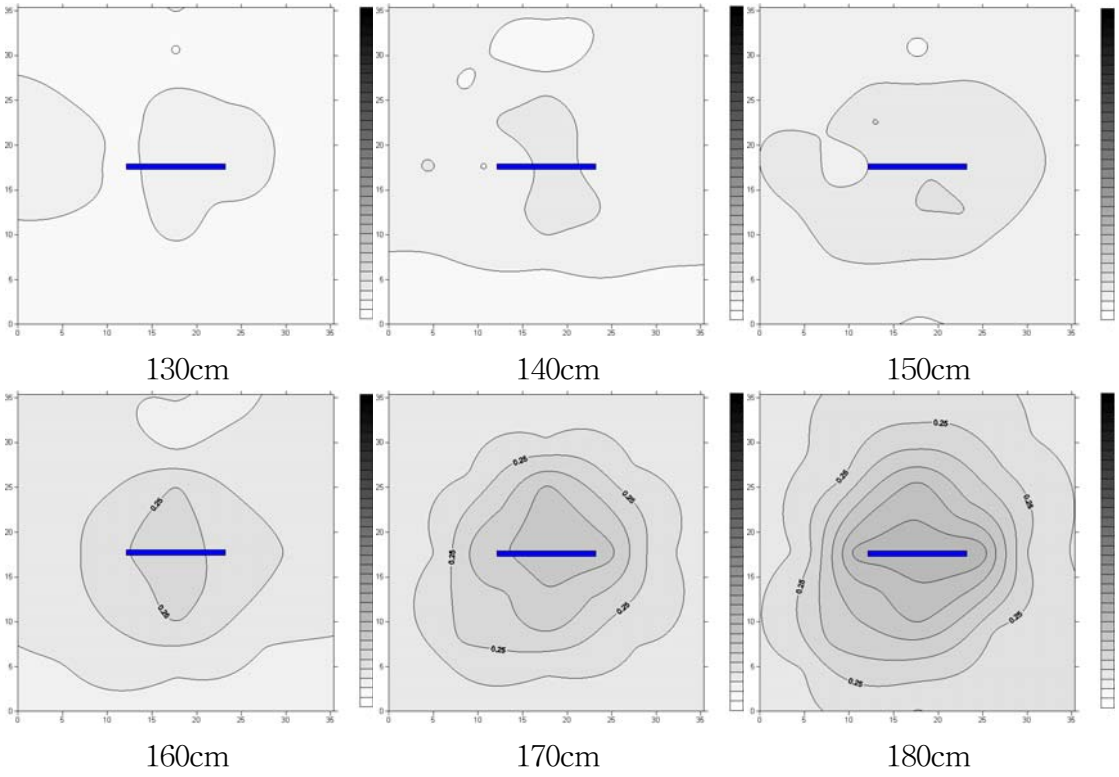


Fig. 3.5.1.49 1.5m Sealing 층의 일정심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

(3) Sealing 층 두께에 따른 함수비 변화특성

Fig. 3.5.1.50 ~ 3.5.1.52은 Sealing 층 두께에 따른 심도 별 함수비 분포를 나타내었다. 3가지 실험조건에서 거의 비슷한 경향을 나타내었고, 심도가 깊어지고 배수재에서 가까울수록 함수비 감소는 더욱 뚜렷하게 나타났다. Sealing 층에서는 그 차이가 크진 않았지만 Sealing 층의 두께가 두꺼울수록 함수비 감소가 작게 나타났고, 초기 조성 함수비 66% 보다 평균 4~6%의 함수비 감소가 발생하였다. 위치에 따른 영향은 Sealing 층에서는 거의 없었지만, Sealing 층과 배수재 층의 경계인 50cm 지점부터 Zone A, B, C에서의 함수비 차이가 발생했다.

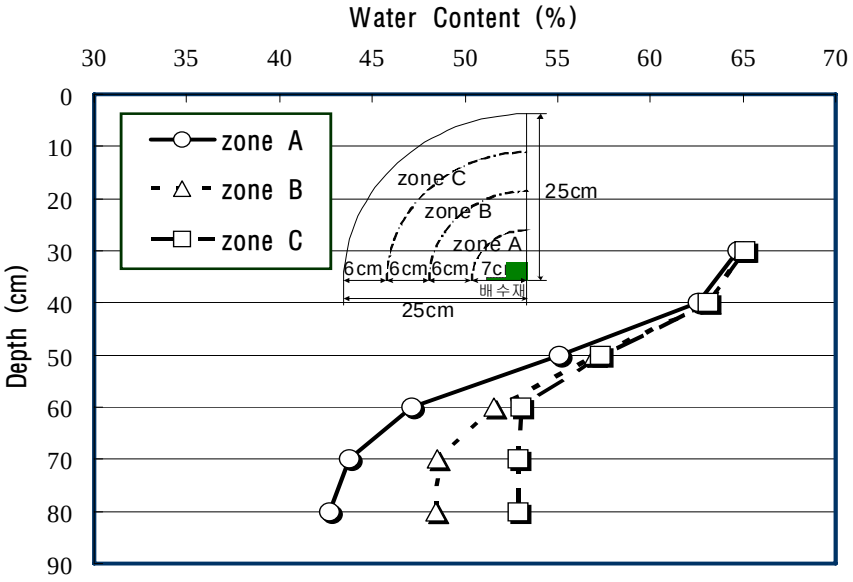


Fig. 3.5.1.50 0.5m Sealing 층의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

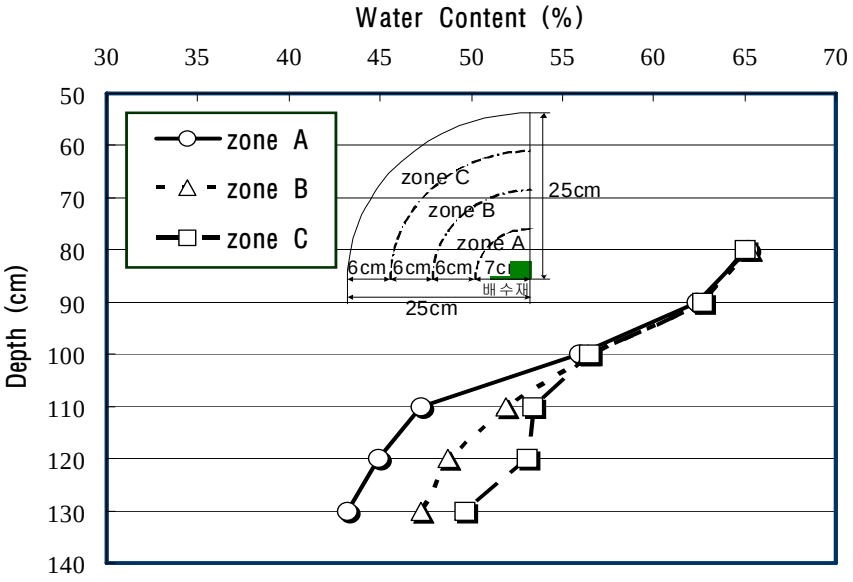


Fig. 3.5.1.51 1.0m Sealing 층의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

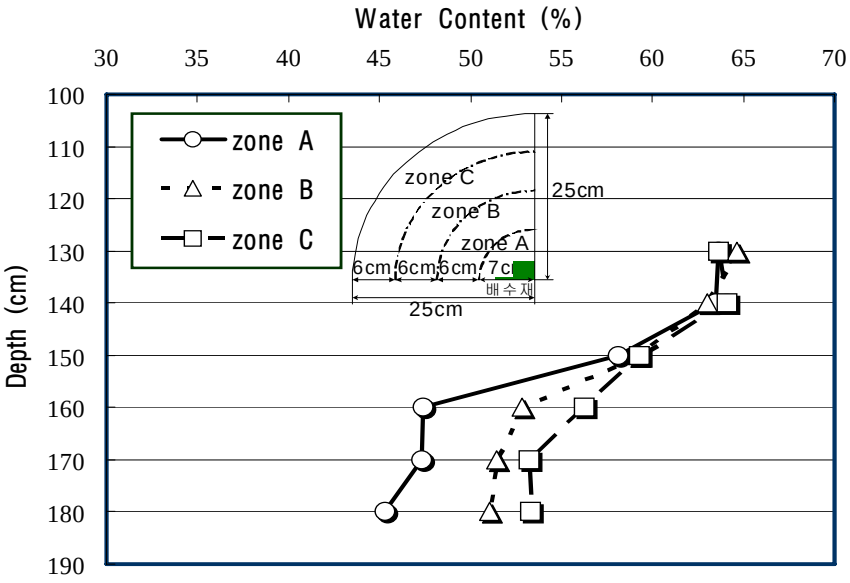


Fig. 3.5.1.52 1.5m Sealing 층의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

Fig. 3.5.1.53 ~ 3.5.1.55에는 Sealing 층 두께에 따른 함수비변화 양상을 파악하기 위해, 배수재로부터의 거리에 따른 각 조건별 함수비를 나타내었다. 그 결과, 모든 조건에서 거의 비슷한 경향을 나타냈다. 그러나, 배수재로부터 거리가 가까운 Zone A의 함수비 감소가 Zone B, C의 함수비 감소경향보다는 더 크게 나타났다.

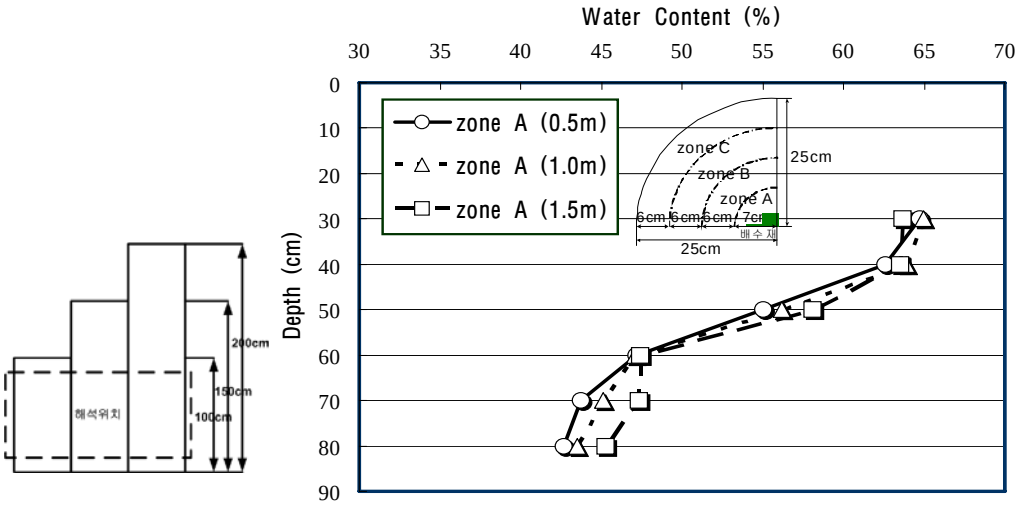


Fig. 3.5.1.53 Zone A에서의 Sealing 층 두께에 따른 지점별 함수비 변화

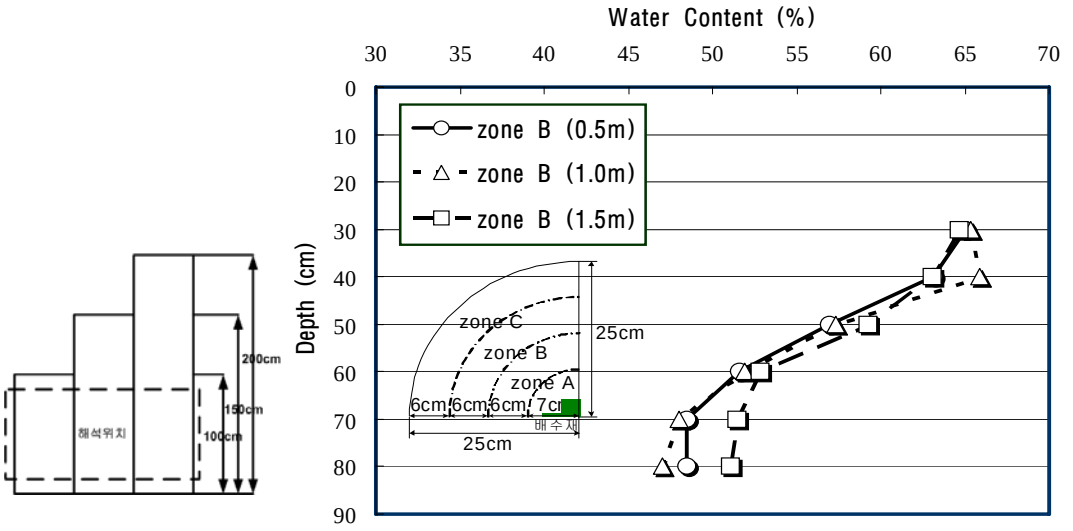


Fig. 3.5.1.54 Zone B에서의 Sealing 층 두께에 따른 지점별 함수비 변화

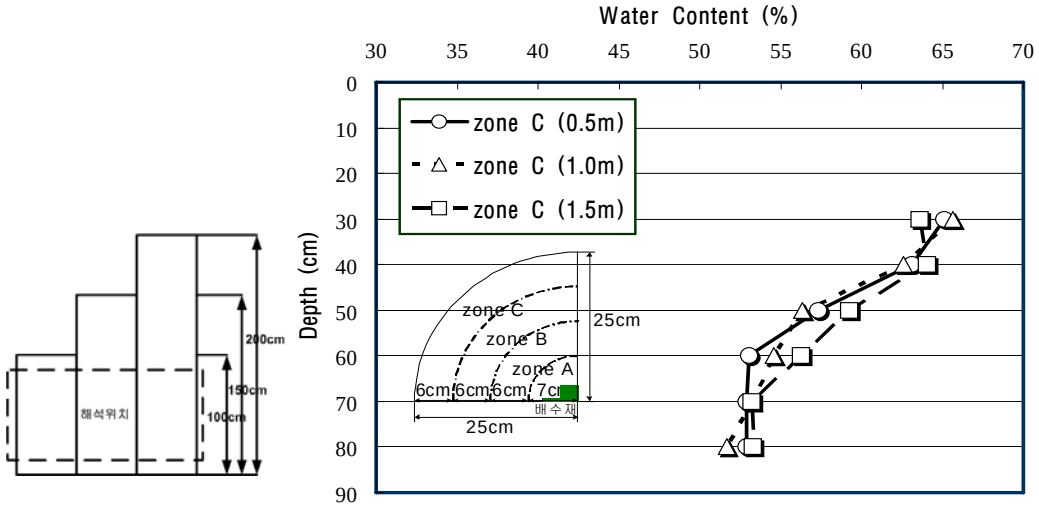


Fig. 3.5.1.55 Zone C에서의 Sealing 층 두께에 따른 지점별 함수비 변화

Fig. 3.5.1.56 ~ 3.5.1.58는 Sealing 층 두께에 따른 각 심도 별 수평방향의 함수비 분포를 나타내었다. Sealing 층의 두께에 관계없이 3가지 실험조건에서 심도가 깊어짐에 따라 함수비 감소가 나타났고, 이러한 함수비 감소는 배수재에서 가까운 영역부터 발생하였다.

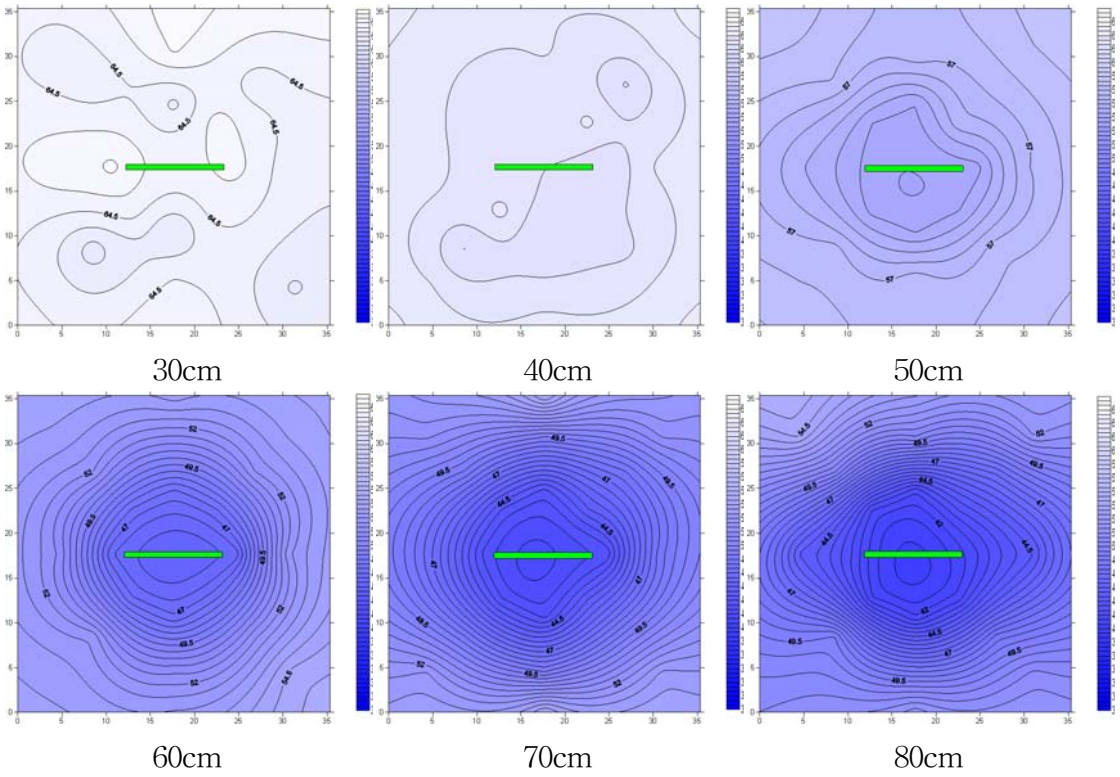


Fig. 3.5.1.56 0.5m Sealing 층의 일정심도에서의 수평방향 함수비 변화

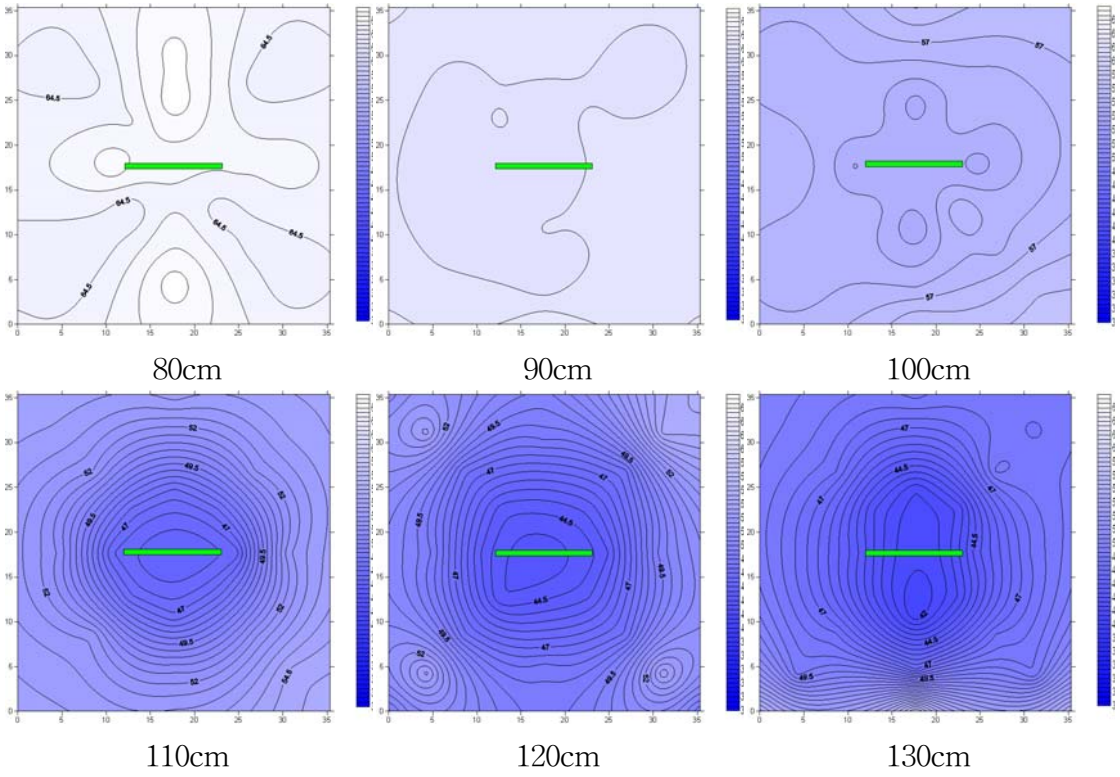


Fig. 3.5.1.57 1.0m Sealing 층의 일정심도에서의 수평방향 함수비 변화

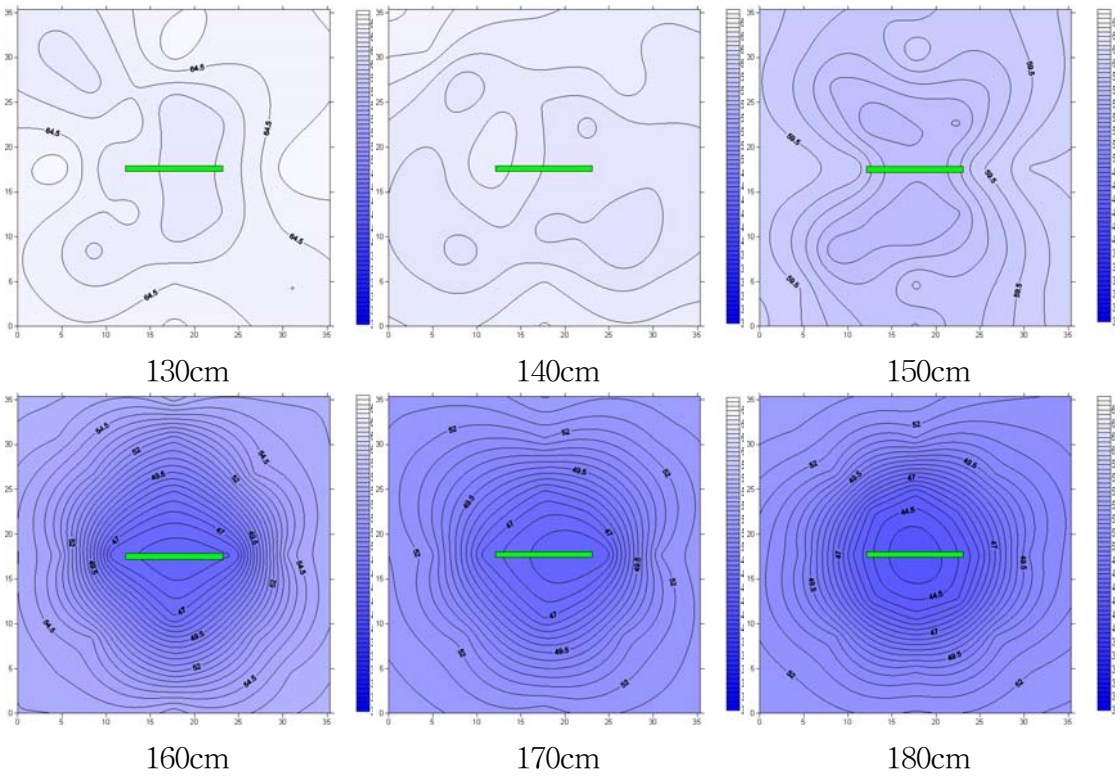


Fig. 3.5.1.58 1.5m Sealing 층의 일정심도에서의 수평방향 함수비 변화

(4) Sealing 층 두께에 따른 영향 분석

Fig. 3.5.1.59에는 Sealing 층 두께에 따른 개량영역의 전단강도 증가비 및 함수비 분포를 나타내었다. Sealing 층의 두께가 증가할수록 배수효율이 증가하는 경향이 나타났지만 그 차이는 크지 않았으며, Sealing 층의 두께가 1m 이상인 경우 함수비 저감효과가 더 이상 나타나지 않았다. 따라서 석션드레인 공법 적용시 진공압 유지를 위한 최적의 Sealing 층 두께는 1m인 것으로 판단하였다. 그러나 현장지반에 본 공법을 적용하는 경우에는 진공펌프의 용량, 지반조건 등에 따라 Sealing 층 두께가 개량층에 미치는 영향이 실내 실험결과와 상이하게 발생될 수 있다.

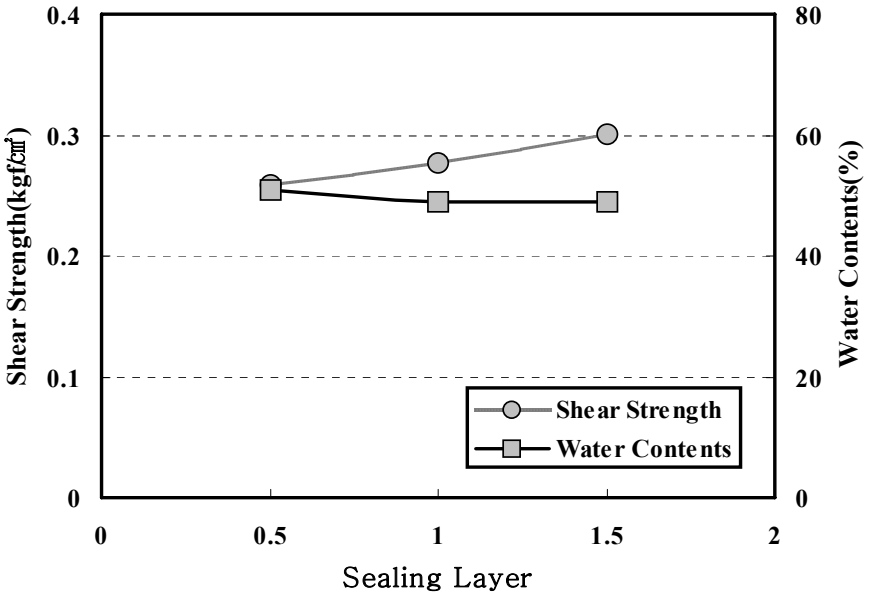


Fig. 3.5.1.59 개량영역의 전단강도 증가비 및 함수비 분포

다. 적용기간에 따른 지반개량 특성파악 실험

(1) 적용기간에 따른 침하량

Fig. 3.5.1.60은 적용기간을 4, 8, 12, 16, 20일로 다르게 했을 경우 발생되는 침하량의 차이를 나타내었다. 적용기간이 증가함에 따라, 침하량은 증가하는 양상을 나

타냈으며, 16일 이후에는 점차적으로 수렴하는 경향이 나타났다. Fig. 3.5.1.61에는 Test 4의 결과와 Test 1-5(열융착식 성곽형배수재 28일적용)의 최종 침하량을 이용하여 기간에 따른 최종 침하량의 변화를 나타내었다. 그 결과, 적용기간이 16일이 경과되면, 침하량의 감소가 작아지며, 일정한 값으로 수렴하는 양상이 나타났다. 이는 일반적인 방사형 압밀이론의 압밀도-시간 곡선의 경향을 보임을 보여준다.

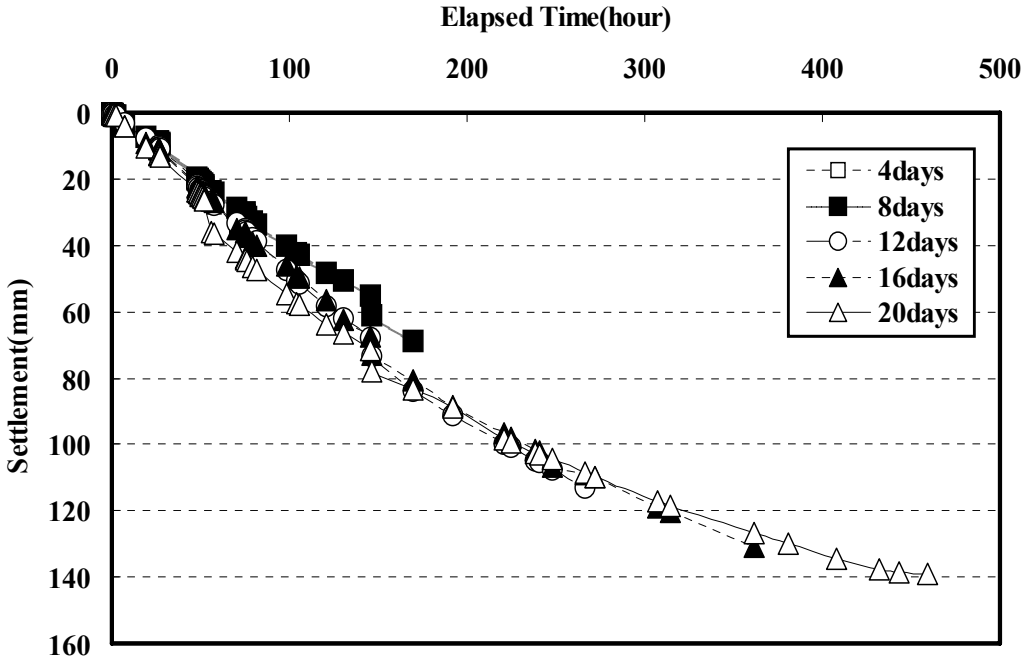


Fig. 3.5.1.60 적용기간에 따른 침하량

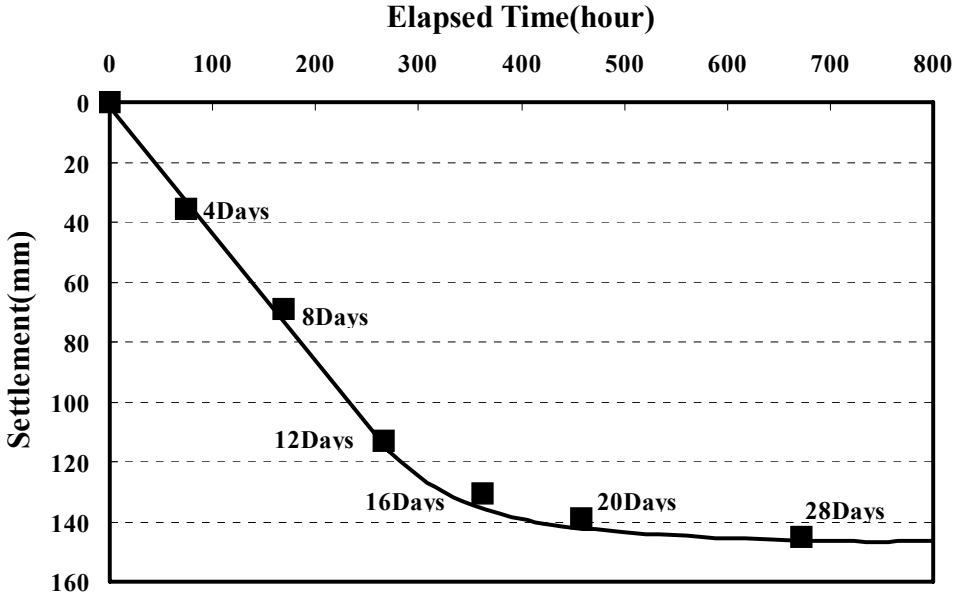


Fig. 3.5.1.61 기간별 최종침하량

Fig. 3.5.1.62에는 장기침하예측기법인 쌍곡선법을 이용하여 최종침하량을 예측한 후, 각 침하량 별 압밀도를 계산한 결과와 동일 압밀도에서 Barron의 근사해를 사용하여 예측된 시간-압밀도 관계를 나타내었다. 그 결과 동일 압밀도에 도달되기 위한 시간은 Barron의 방사형 압밀이론을 이용한 경우가 더 빠르게 나타났다.

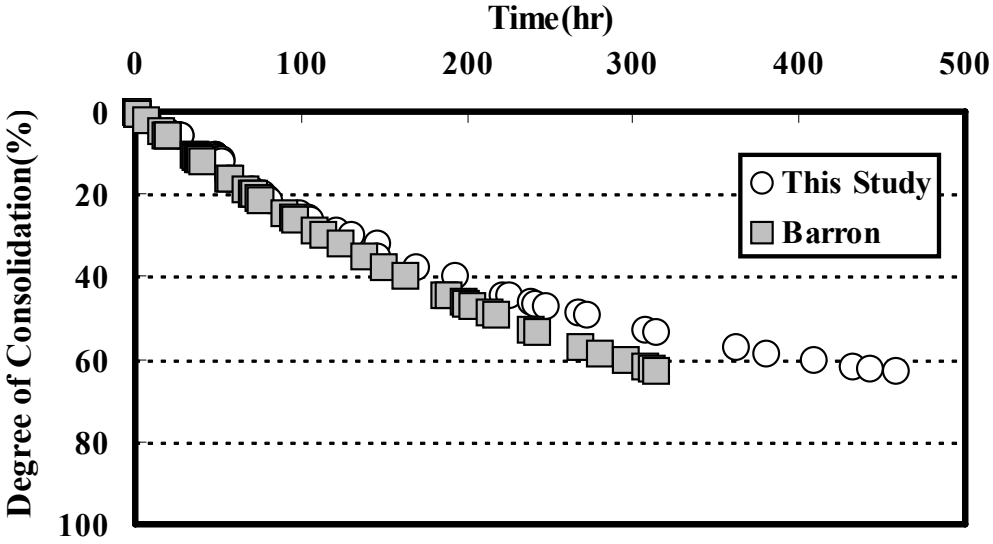


Fig. 3.5.1.62 Barron의 근사해를 이용한 압밀도와
본 연구에서 발생된 압밀도의 비교

Fig. 3.5.1.63는 침하량을 이용하여 역산된 배수 속도를 나타낸 그래프이다.

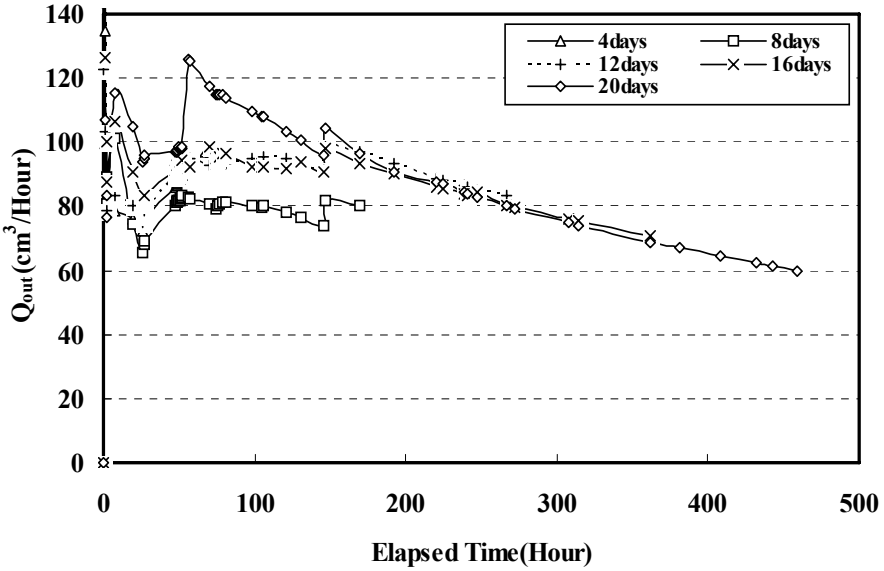


Fig. 3.5.1.63 적용기간에 따른 배수 속도

(2) 강도특성

Fig. 3.5.1.65 ~ 3.5.1.69은 개량기간에 따른 각 심도별 콘저항치를 나타내었다. 개량기간이 증가할수록 강도증가가 뚜렷하게 나타났는데, 이러한 강도 증가현상은 개량기간이 증가할수록 점차 줄어들었고, 16일과 20일의 강도 차이는 비슷한 양상을 보였다(Fig 3.5.1.64). 따라서 실내 Column 실험의 경우, 대략 16~20일 정도이상이면 큰 변화가 없다.

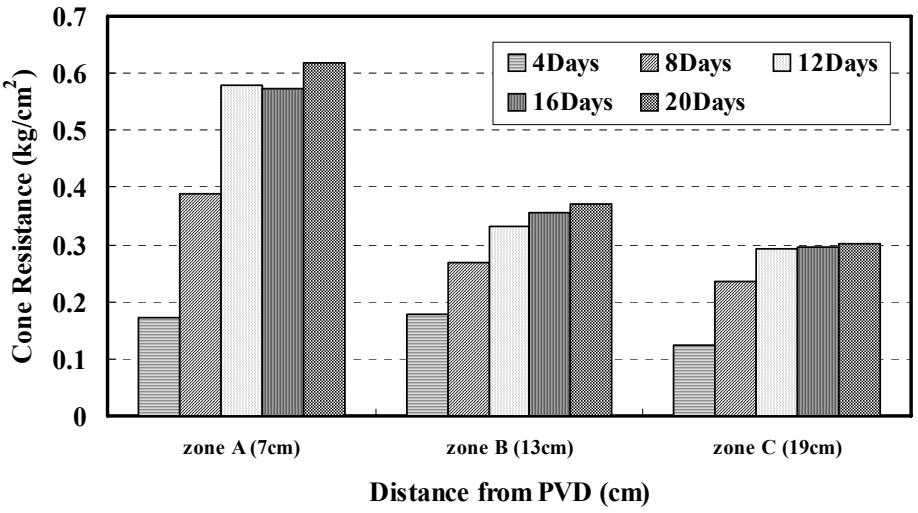


Fig 3.5.1.64 배수재로 부터의 거리에 따른 처리기간 별 강도분포

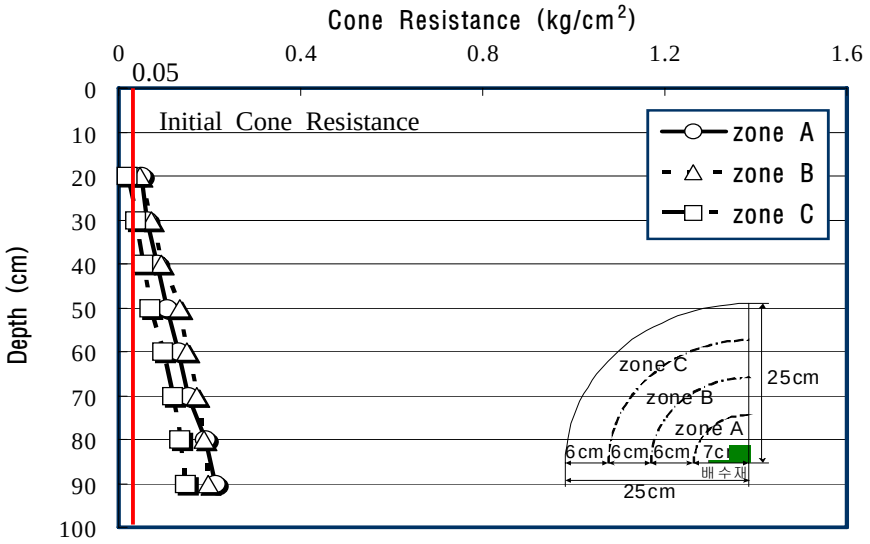


Fig. 3.5.1.65 적용기간 4일의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

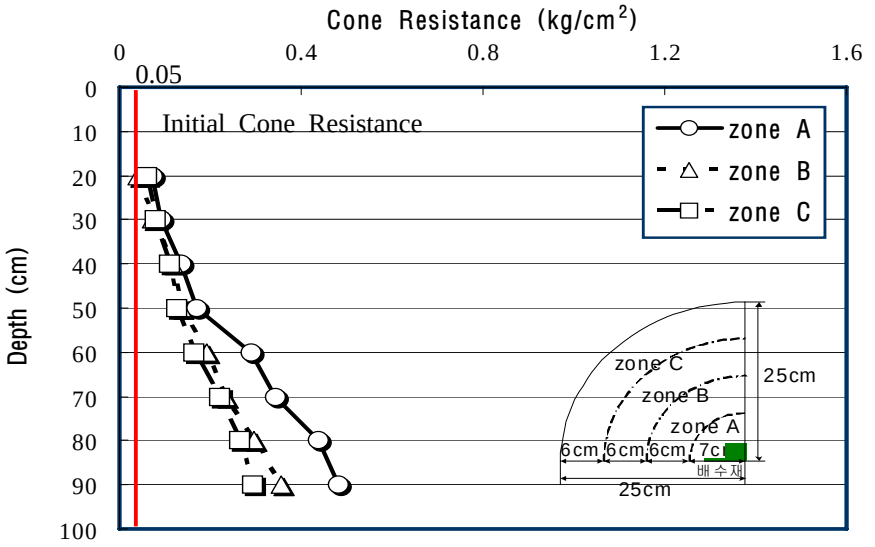


Fig. 3.5.1.66 적용기간 8일의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

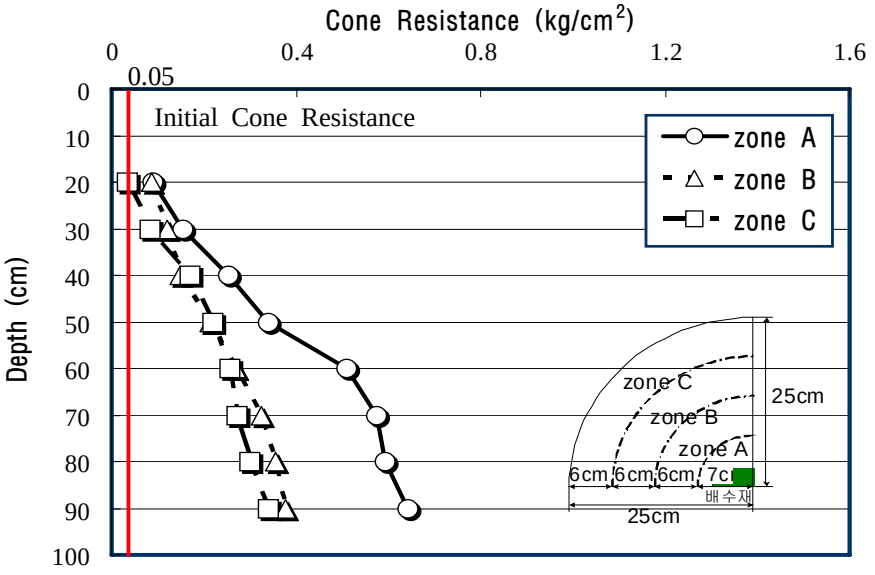


Fig. 3.5.1.67 적용기간 12일의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

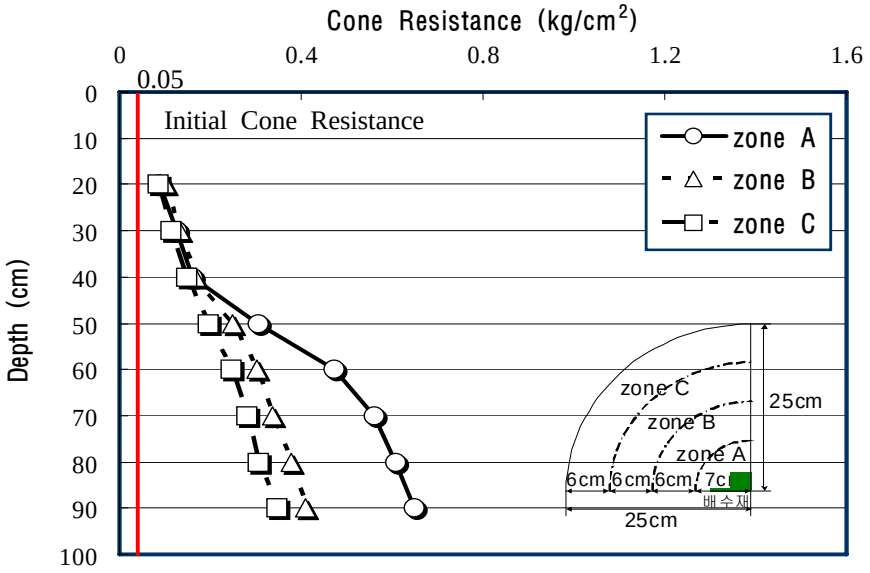


Fig. 3.5.1.68 적용기간 16일의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

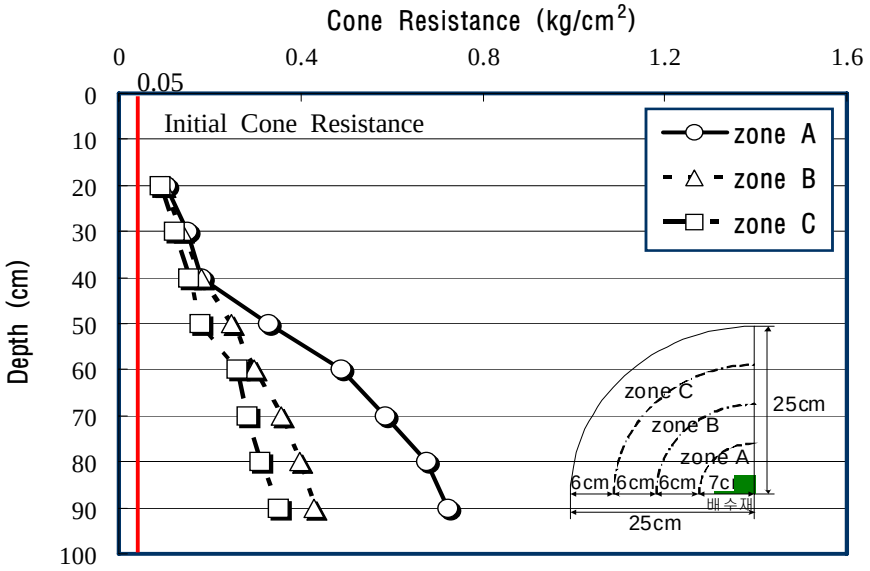


Fig. 3.5.1.69 적용기간 20일의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

Fig. 3.5.1.70 ~ 3.5.1.74는 각 개량기간에 따른 심도별 수평방향의 콘저항치를 나타내었다. 강도 증가 경향은 개량기간에 상관없이 심도가 깊어지고 배수재에 근접할수록 증가하였다.

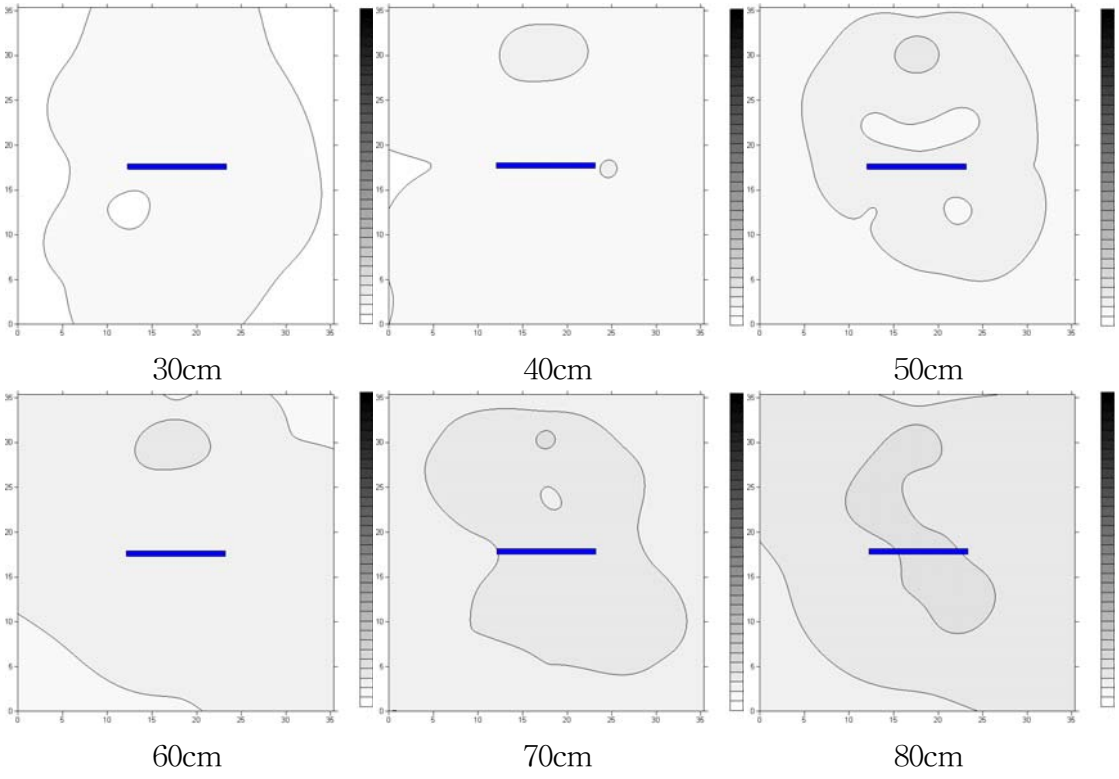


Fig. 3.5.1.70 적용기간 4일의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

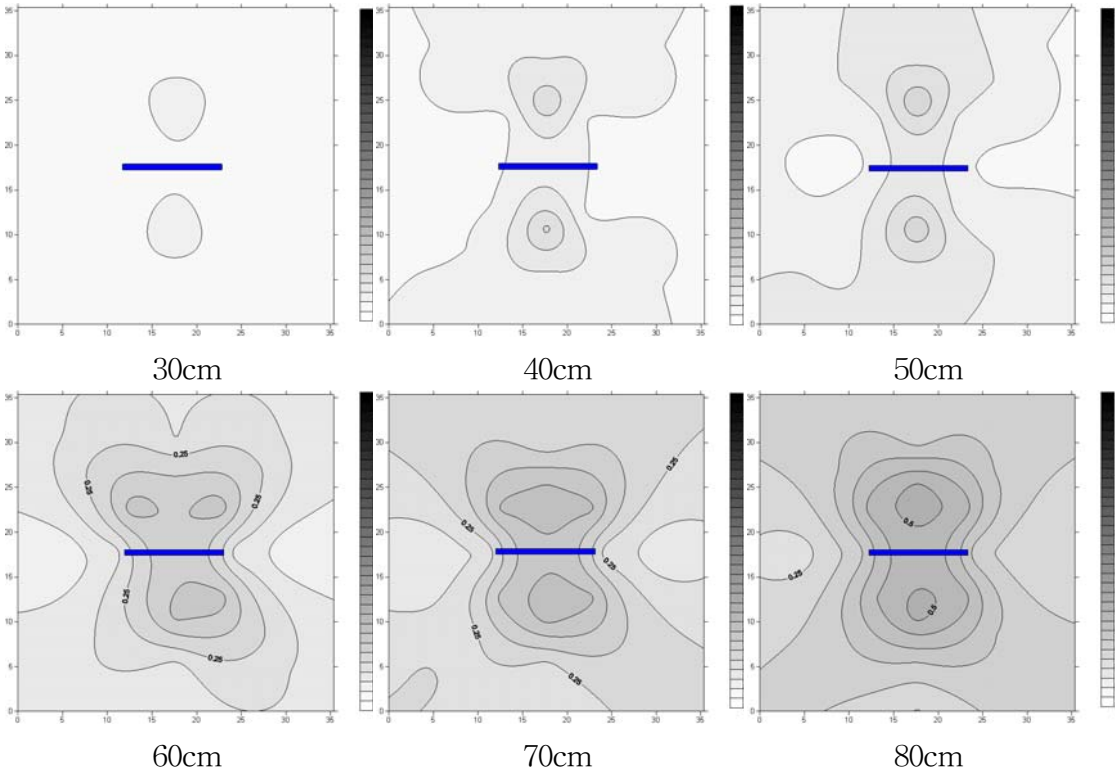


Fig. 3.5.1.71 적용기간 8일의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

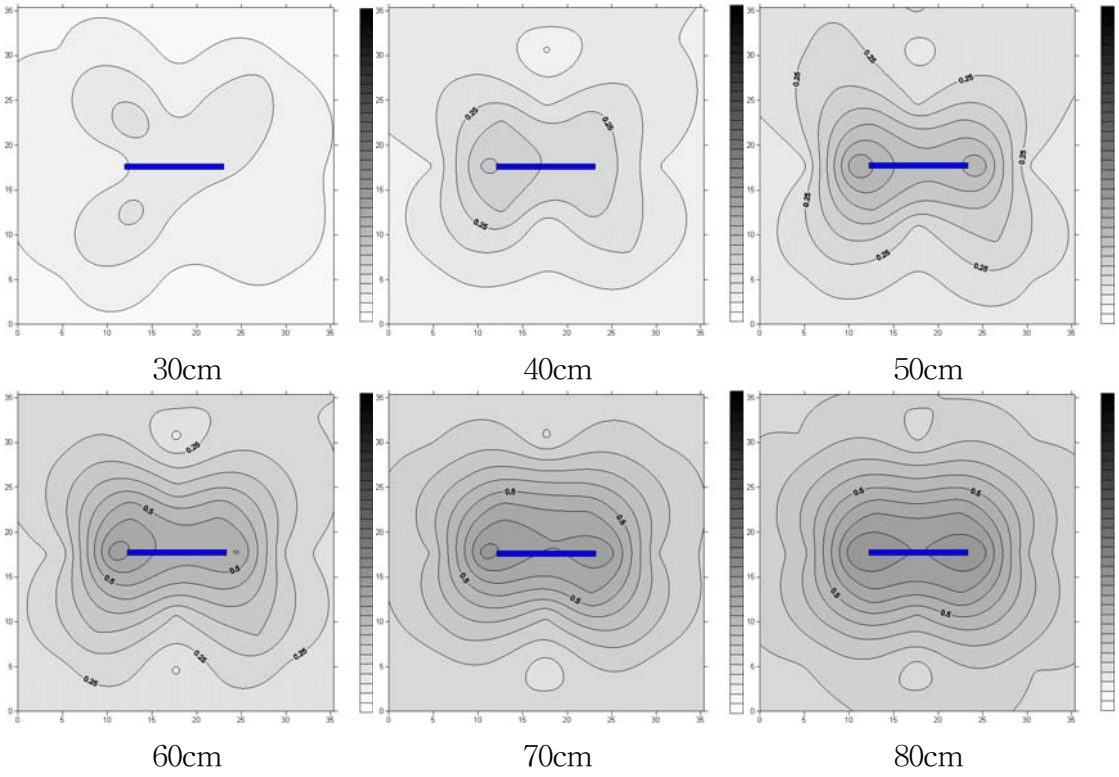


Fig. 3.5.1.72 적용기간 12일의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

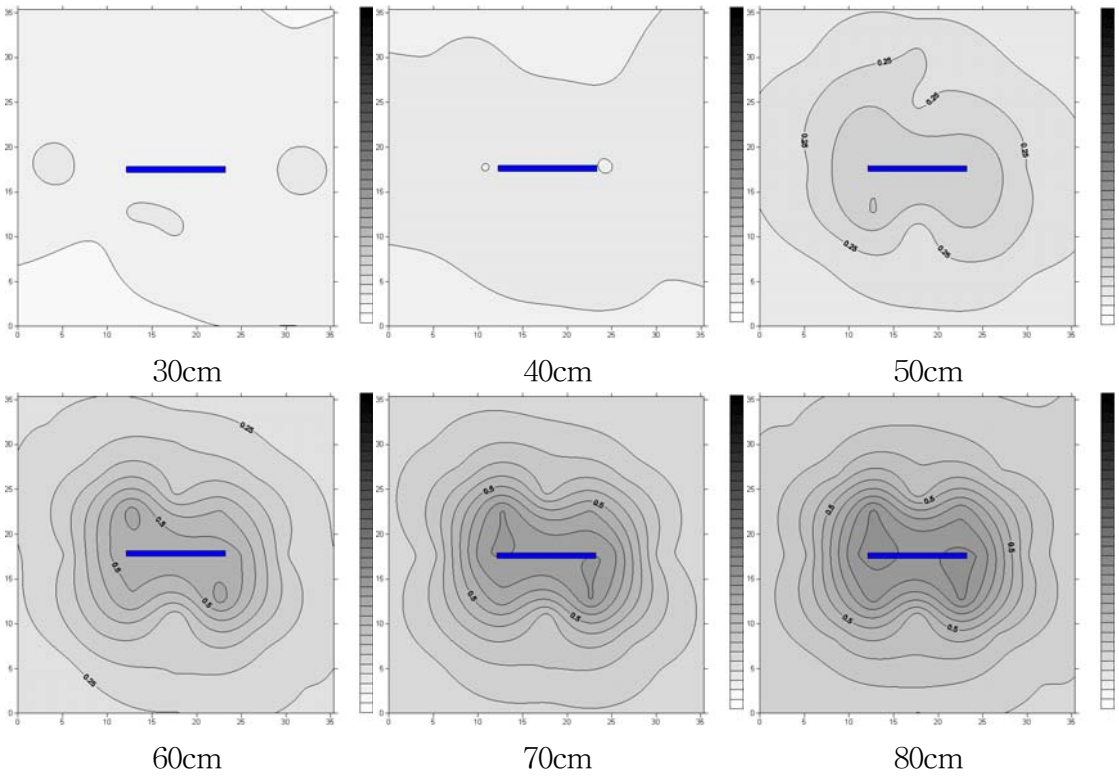


Fig. 3.5.1.73 적용기간 16일의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

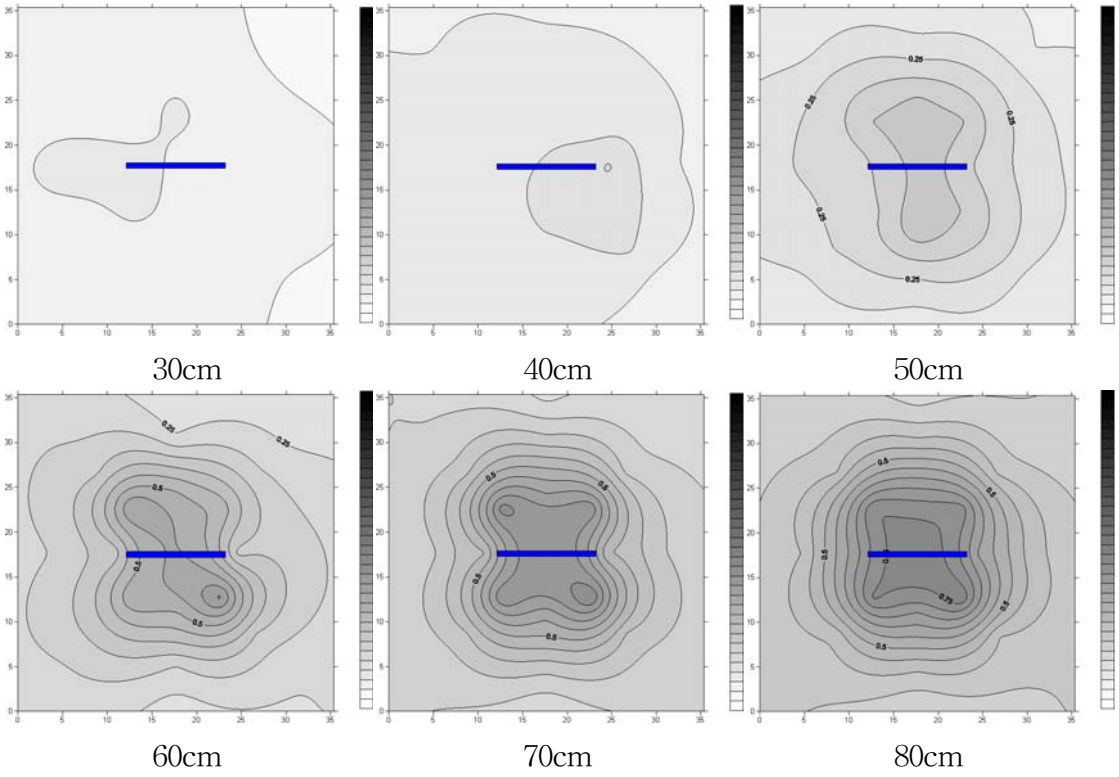


Fig. 3.5.1.74 적용기간 20일의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

(3) 심도에 따른 함수비 변화특성

Fig 3.5.1.75에는 배수재로 부터의 거리에 따른 개량기간 별 함수비 분포를 나타내었다. 개량기간의 증가와 함께 함수비 감소량은 증가하는 경향이 나타났으며, 이러한 경향은 배수재에서 가까운 부분에서 더 뚜렷하게 나타났다.

Fig. 3.5.1.76 ~ 3.5.1.80은 개량기간에 따른 심도별 함수비 분포를 나타내었다. 심도의 증가와 함께 함수비 감소 경향은 증가했으며, 개량기간이 늘어날수록 이러한 경향은 더욱 증가했다.

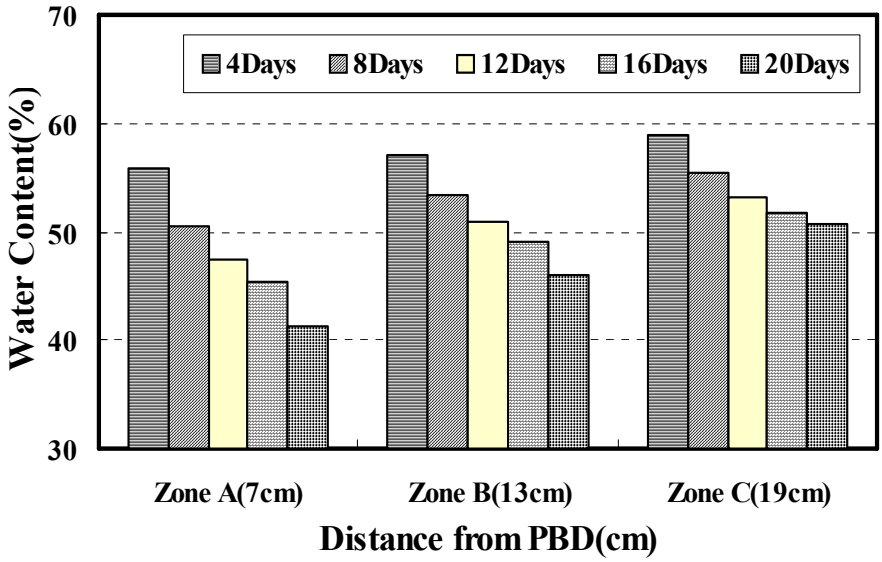


Fig. 3.5.1.75 배수재로 부터의 거리에 따른 개량 기간 별 함수비 변화

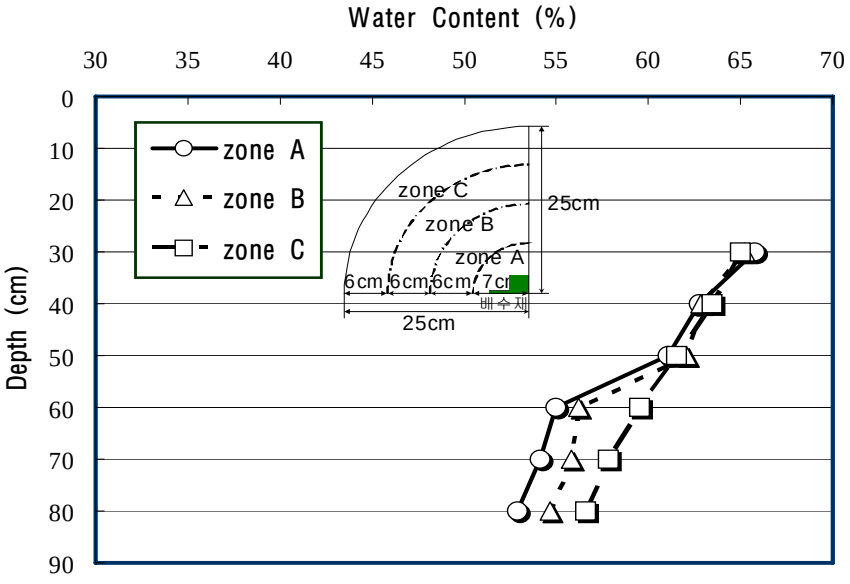


Fig. 3.5.1.76 적용기간 4일의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

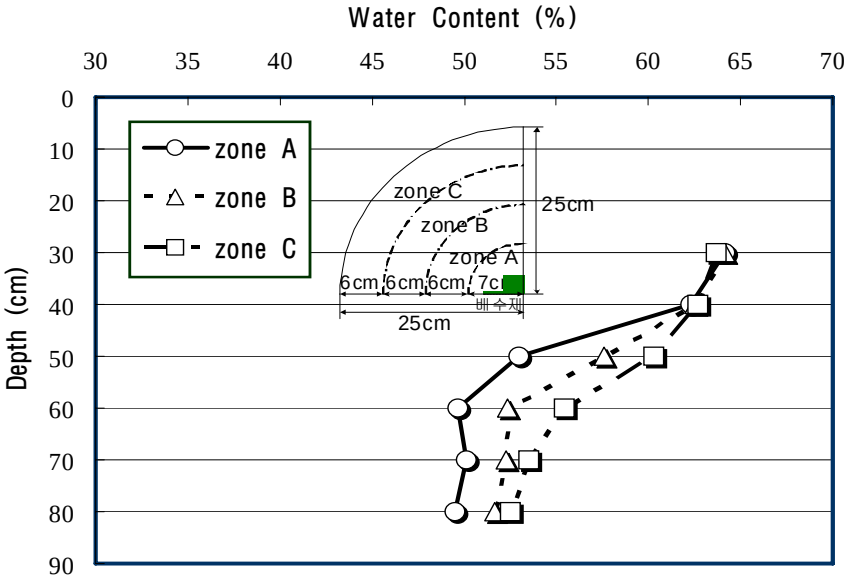


Fig. 3.5.1.77 적용기간 8일의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

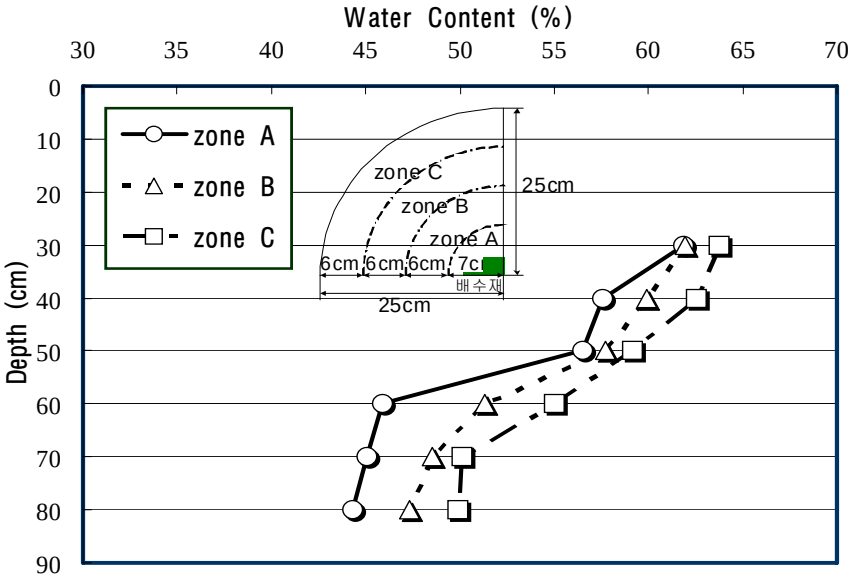


Fig. 3.5.1.78 적용기간 12일의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

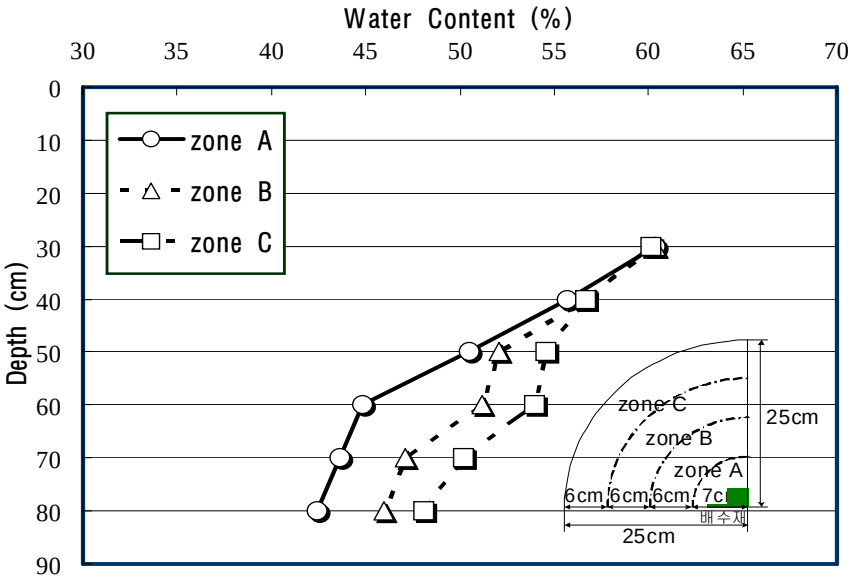


Fig. 3.5.1.79 적용기간 16일의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

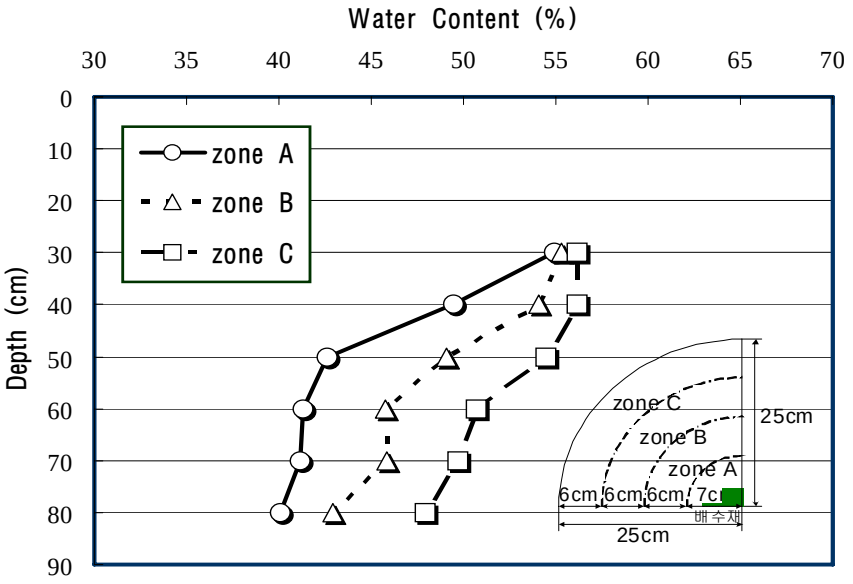


Fig. 3.5.1.80 적용기간 20일의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

Fig. 3.5.1.81 ~ 3.5.1.85에는 각 심도 별 수평방향으로의 함수비 분포를 나타내었다. 모든 실험조건에서 심도가 깊어지면서 함수비의 감소와 함께 수평방향으로도 비슷해지는 경향이 나타났다.

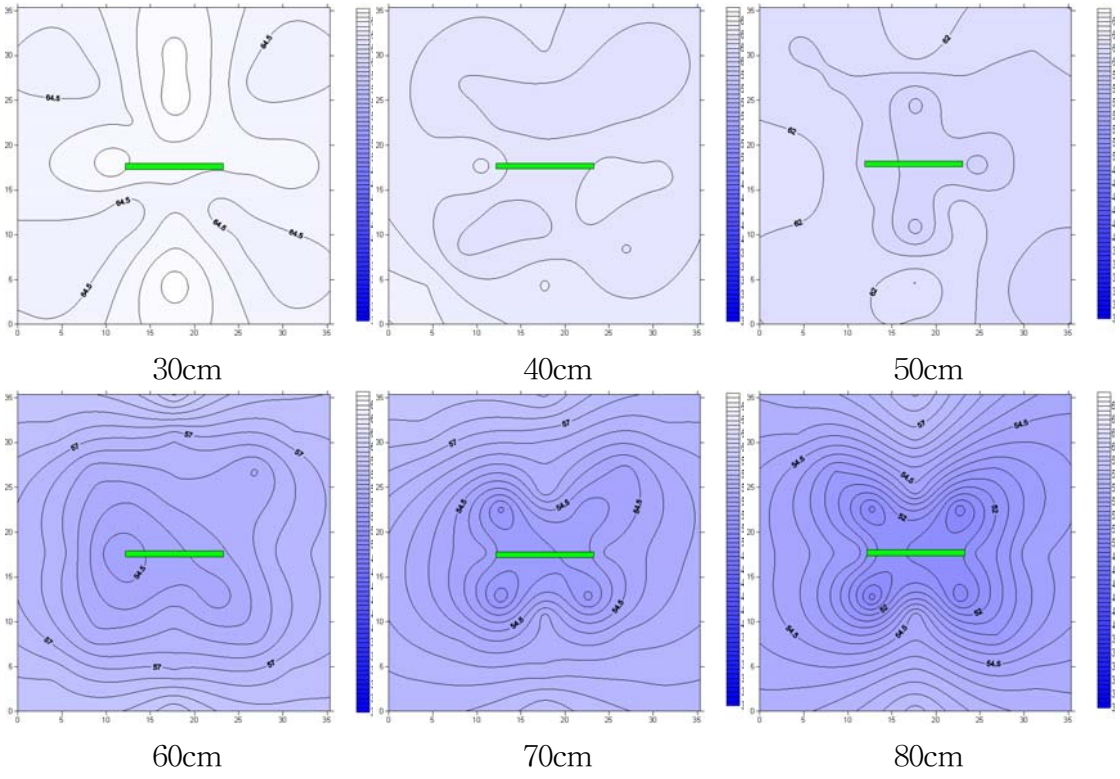


Fig. 3.5.1.81 적용기간 4일의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

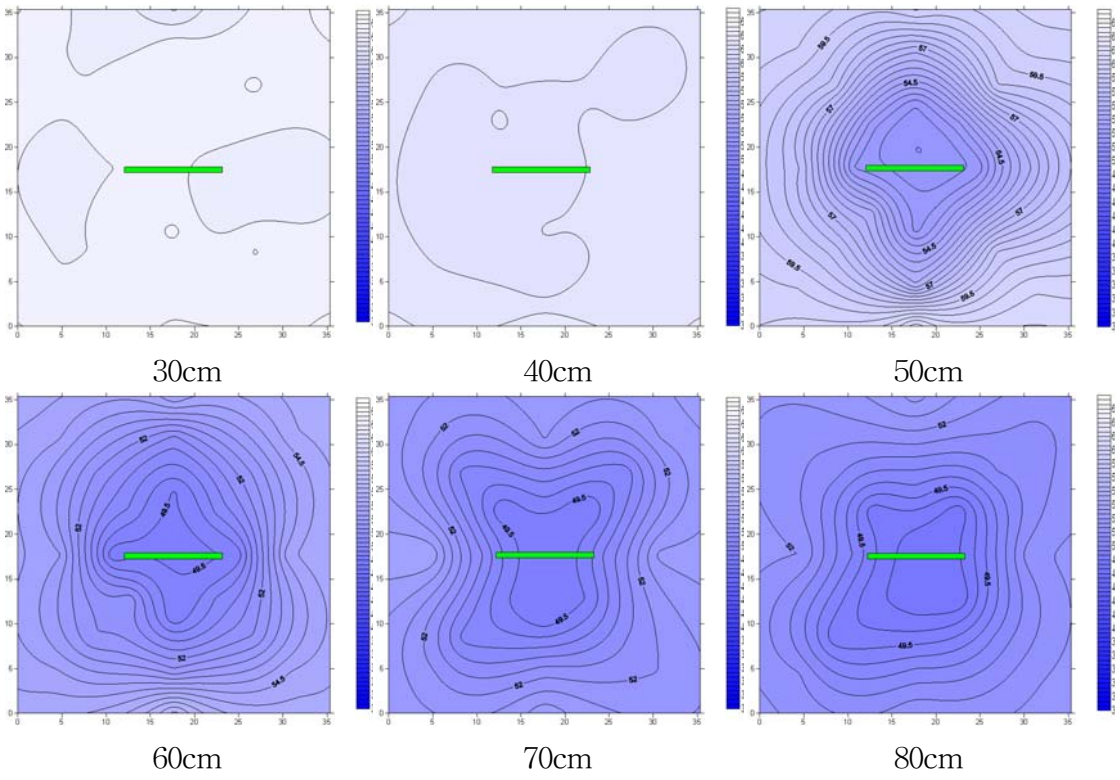


Fig. 3.5.1.82 적용기간 8일의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

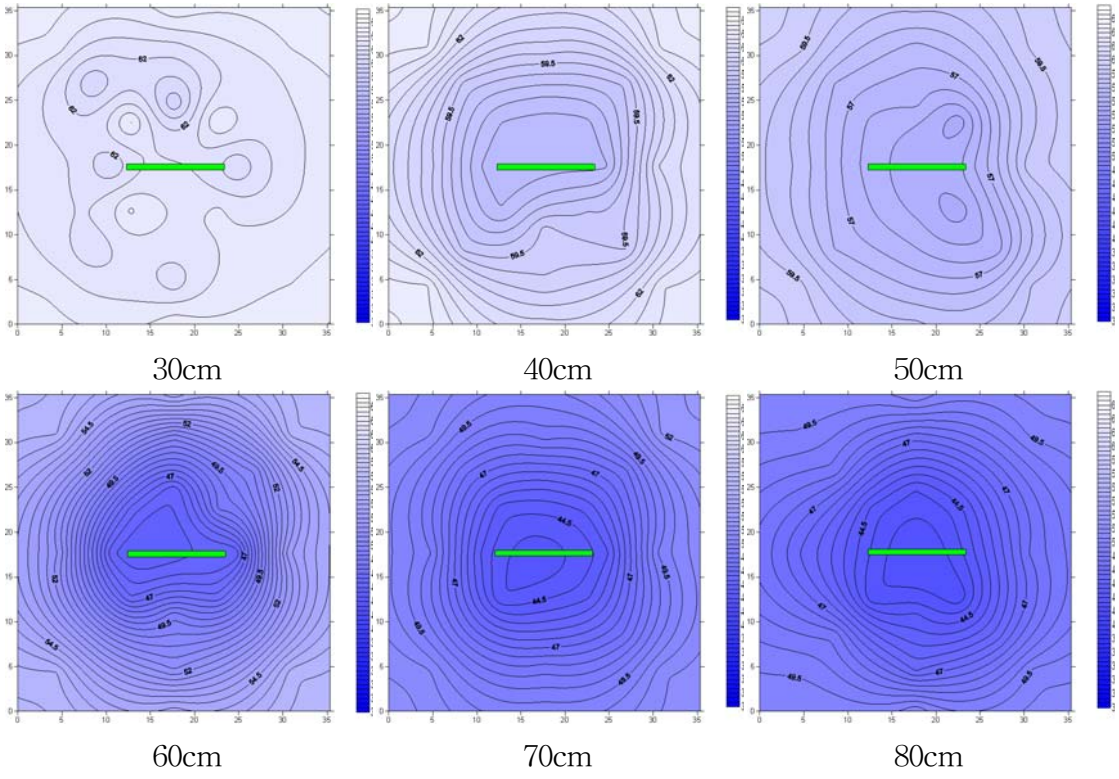


Fig. 3.5.1.83 적용기간 12일의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

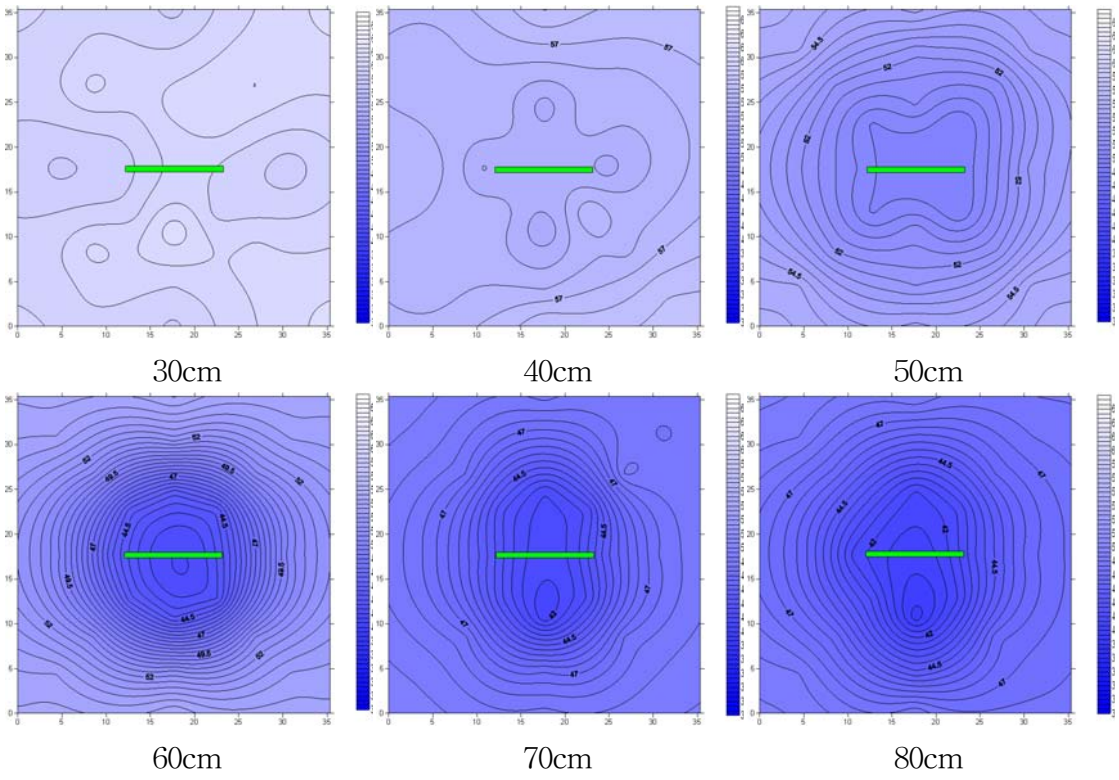


Fig. 3.5.1.84 적용기간 16일의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

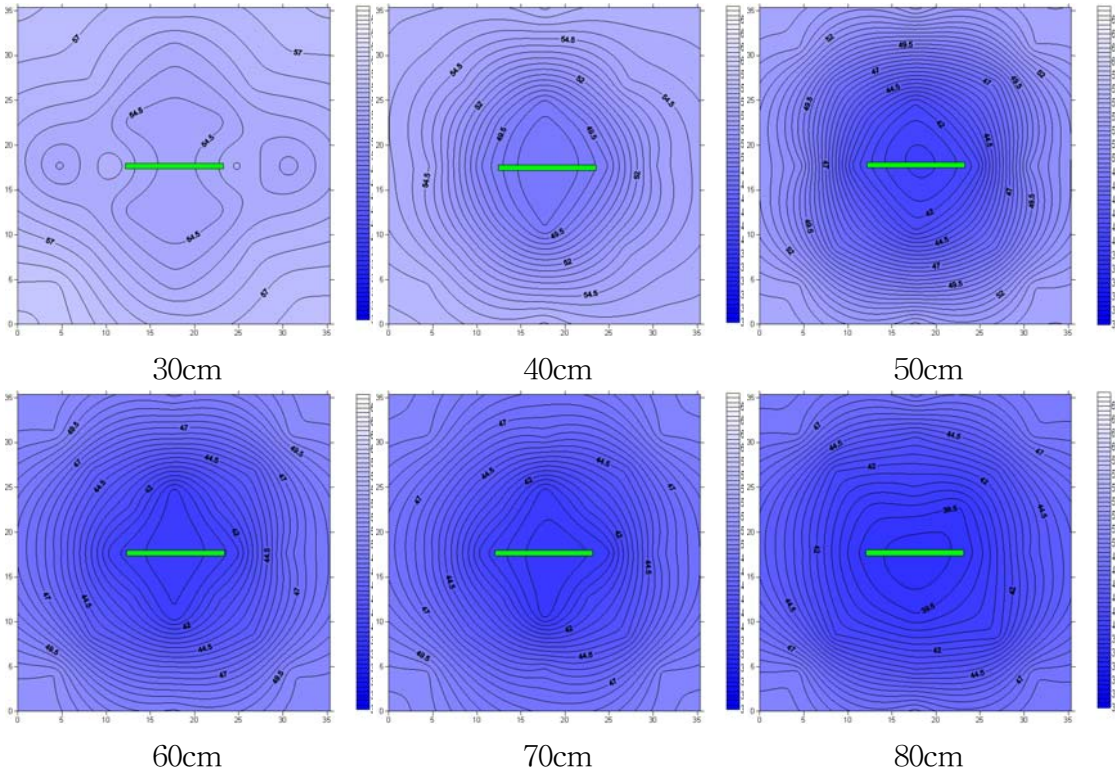
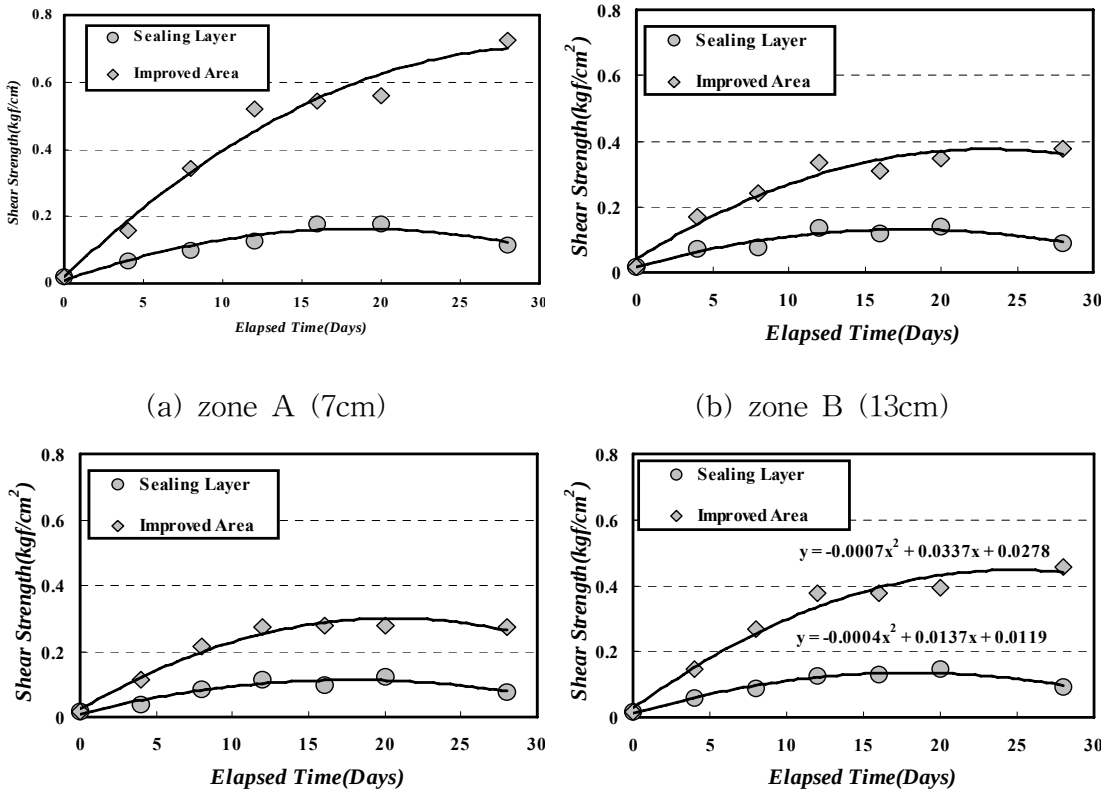


Fig. 3.5.1.85 적용기간 20일의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

(4) 개량기간에 따른 영향 분석

1) 강도특성

Fig. 3.5.1.86에는 개량영역과 Sealing 층에서 개량기간에 따른 전체 평균 강도치를 나타내었다. 개량영역에서는 배수재에서 가까운 Zone A에서 더 큰 강도증가 현상을 보였지만 Sealing 층에서는 zone A, B, C의 차이가 거의 없었다. 또한 개량영역의 경우 배수재에서 가까운 부분에서는 처리기간이 길어지면, 강도치가 증가하는 양상이 나타났지만 배수재에서의 거리가 멀어짐에 따라 강도치가 일정한 값으로 수렴하는 경향이 나타났다. Sealing 층의 경우 모든 조건에서 일정한 값이 나타났다.



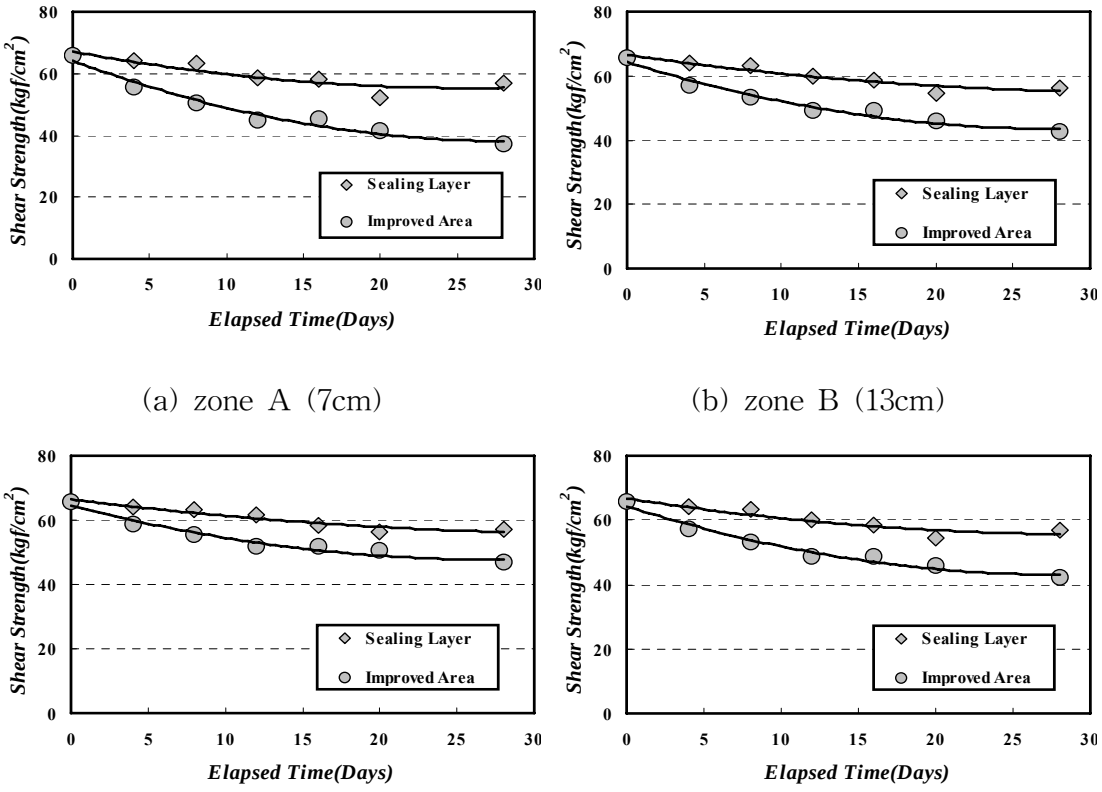
(a) zone A (7cm) (b) zone B (13cm)

(c) zone C (19cm) (d) Average

Fig. 3.5.1.86 적용기간과 강도와의 관계

2) 함수비 특성

Fig. 3.5.1.87에는 개량영역과 Sealing 층으로 나누어 개량기간에 대한 배수재로 부터의 거리에 따른 전체 평균 함수비의 변화 양상을 나타내었다. 개량영역에서는 배수재에서 멀어질수록 함수비 저감 효과가 감소하였으며, 평균 15~20%의 함수비 감소가 일어났다. Sealing 층에서는 Sealing 층의 두께와 배수재로 부터의 거리에 관계없이 거의 비슷한 함수비 감소를 보여, Sealing 층에는 직접적으로 진공압에 의한 영향이 미치지 않음을 알 수 있었다.



(a) zone A (7cm) (b) zone B (13cm)

(c) zone C (19cm) (d) Average

Fig. 3.5.1.87 적용 기간과 함수비와의 관계

3) 기간과 배수재로 부터의 거리에 따른 강도특성

Fig. 3.5.1.88에는 배수재로부터의 거리에 따라 발생된 개량영역의 평균 강도분포를 가해준 진공압으로 정규화 하여(Cu/P) 나타내었다. 그 결과 처리기간이 증가함에 따라 강도증가비는 커졌다. 그러나 배수재로부터 약 11cm 이상의 거리에서는 강도증가비가 일정한 값으로 수렴하는 경향이 나타났다. 또한 배수재로부터의 거리가 가까운 부분에서는 처리기간이 증가함에 따라 강도증가비가 증가했지만, 배수재로부터의 거리가 멀어짐에 따라 처리기간 약 16일 이후가 경과되면 더 이상의 강도증가 현상은 발생하지 않았다. 이는 약 16일 이후부터 배수재 측에서 발생된 진공영향범위에 기인한다.

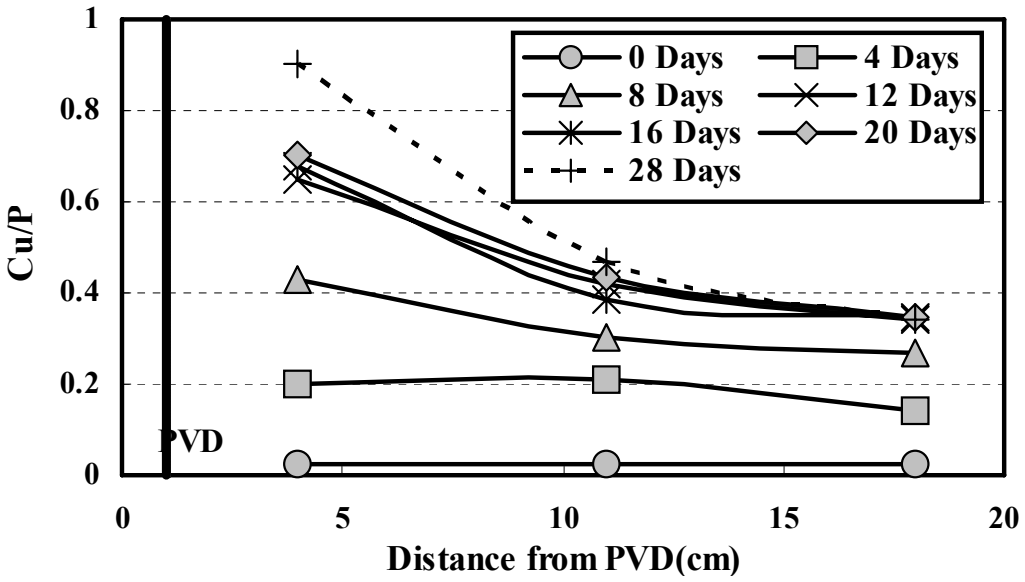


Fig. 3.5.1.88 가해진 진공압으로 정규화된 강도와
배수재로 부터의 거리에 따른 상관관계

라. 적용 진공압에 따른 개량효율 분석

(1) 침하 특성

Fig. 3.5.1.89에는 -0.2kg/cm^2, -0.4kg/cm^2, -0.6kg/cm^2, -0.8kg/cm^{2}의 진공압 조건에 대하여 열융착식 하모니카형 배수재의 시간 경과에 따른 침하 거동을 나타내었다. 저진공압 적용시의 침하량보다 고진공압 적용시의 침하량이 더욱 크게 발생하였다. 그러나 진공압의 증가에 선형적으로 비례하여 침하량이 증가하지 않고, 진공압이 증가할수록 침하량의 증가 폭이 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 시간에 따른 침하 거동은 모든 실험 조건에서 시간 경과에 따라 동일한 시간동안 발생한 침하량이 조금씩 줄어들었으며, 서서히 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 적용되는 진공압이 높을수록 배수재 주변에서 발생하는 국부적인 압밀 현상이 심화되어 적용된 진공압에 비해 그 효율이 상대적으로 많이 감소하는 것으로 판단된다.

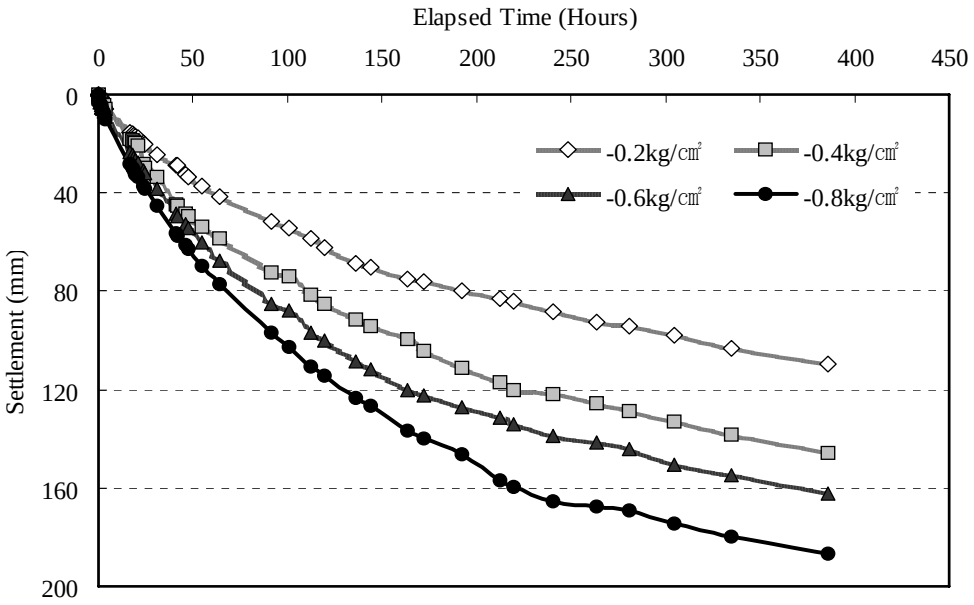


Fig. 3.5.1.89 적용 진공압에 따른 침하량

Fig. 3.5.1.90는 적용 진공압에 따른 배수 속도를 침하량을 통해 역산해서 나타낸 그래프이다. 적용 진공압이 클수록 배수 속도는 더욱 큰 경향을 나타냈다.

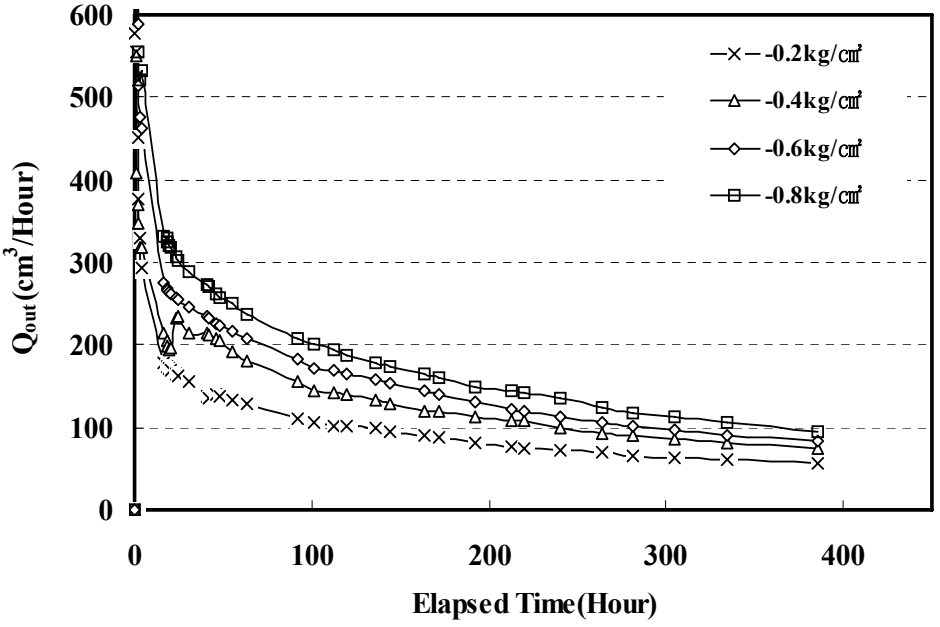


Fig. 3.5.1.90 적용 진공압에 따른 배수속도

(2) 적용 진공압에 따른 강도 특성 및 함수비 변화 특성

1) 연직 방향으로의 영향

Fig. 3.5.1.91~3.5.1.94에 각각의 진공압 조건(-0.2kg/cm^2, -0.4kg/cm^2, -0.6kg/cm^2, -0.8kg/cm^2)에 따른 강도 증가 및 함수비 변화 경향을 배수재의 심도에 따라 나타내었다. 콘 저항치 및 함수비는 앞서 제시한 것과 같이, 배수재로부터의 거리에 따라서 크게 Zone A(60mm), Zone B(130mm), Zone C(190mm)로 나누어 측정하였다. 콘 저항치를 통해 파악한 강도 증가 현상은 심도가 깊어질수록, 그리고 배수재에 가까울수록 경향이 뚜렷하게 나타났고, 함수비 감소 현상 역시 심도가 깊어지고 배수재에 가까울수록 크게 나타났다. 개량영역과 기밀영역을 비교해보면, 기밀영역에 비해 개량영역에서 강도 증가 및 함수비 감소 경향이 더욱 뚜렷하게 나타났고, 특히 기밀영역의 상단부로 부터 심도 약 400mm 지점, 즉 0~400mm 지점까지는 모든 실험 조건에서 배수재로부터의 거리에 의한 차이가 거의 나타나지 않았다.

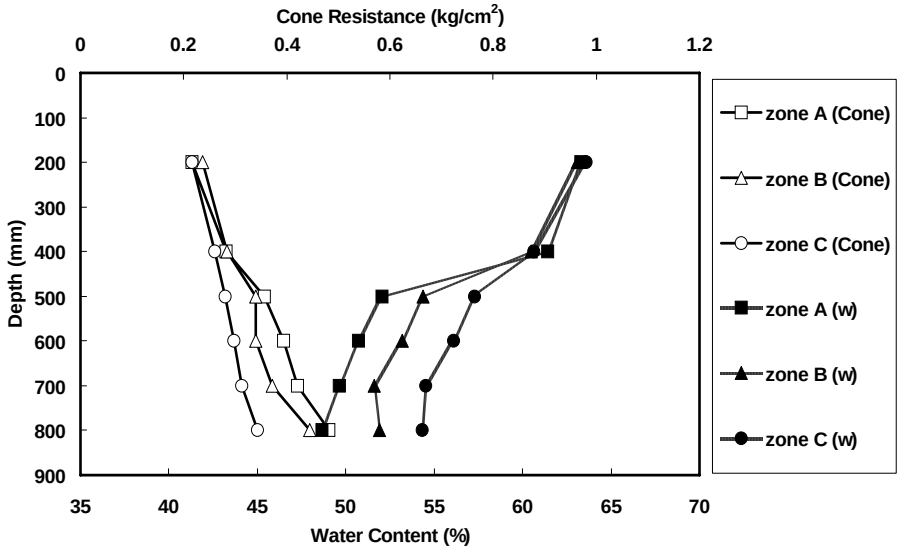


Fig. 3.5.1.91 -0.2kg/cm^{2}의 진공압 적용시 심도에 따른 콘 저항치 및 함수비 변화

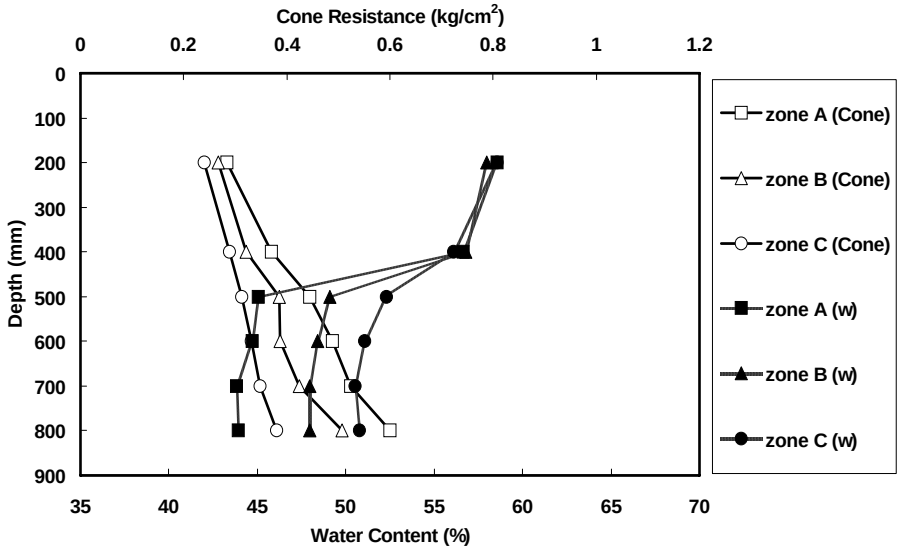


Fig. 3.5.1.92 -0.4kg/cm^{2}의 진공압 적용시 심도에 따른 콘 저항치 및 함수비 변화

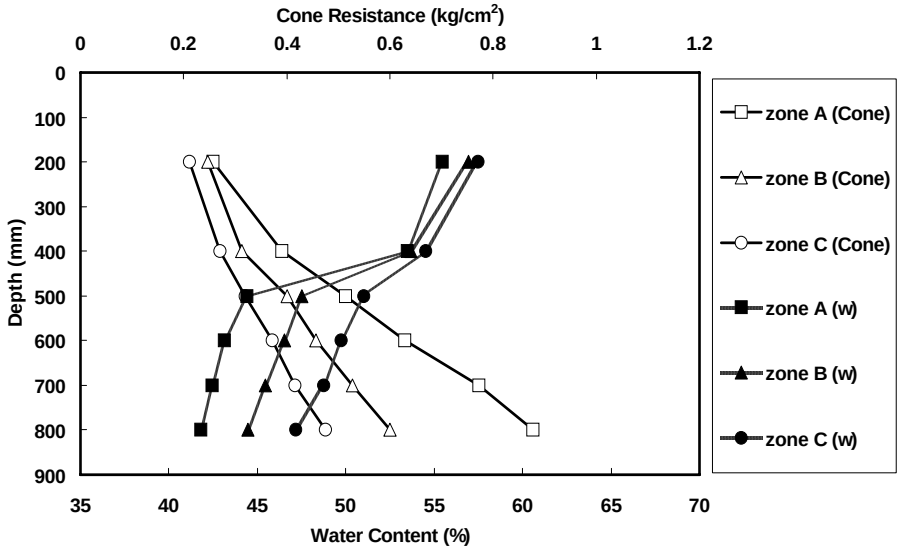


Fig. 3.5.1.93 -0.6kg/cm^{2}의 진공압 적용시 심도에 따른 콘 저항치 및 함수비 변화

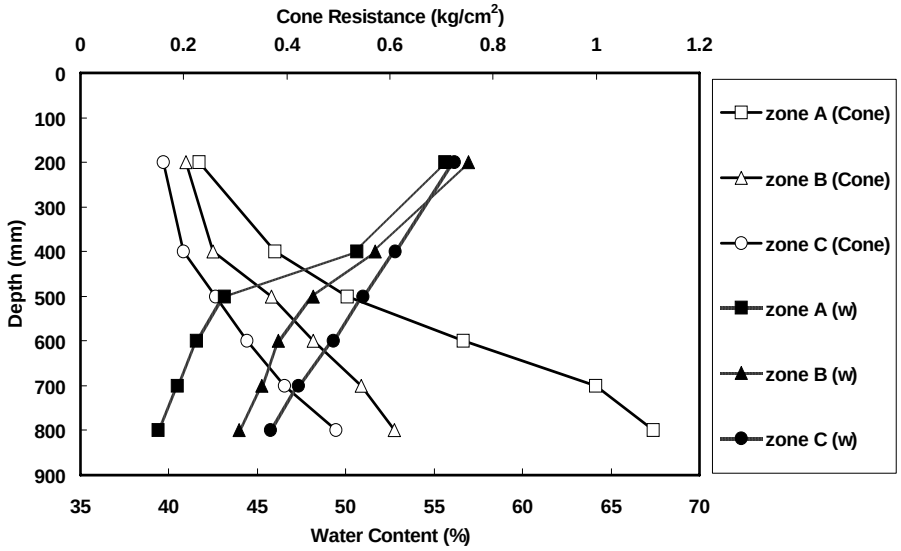


Fig. 3.5.1.94 -0.8kg/cm^{2}의 진공압 적용시 심도에 따른 콘 저항치 및 함수비 변화

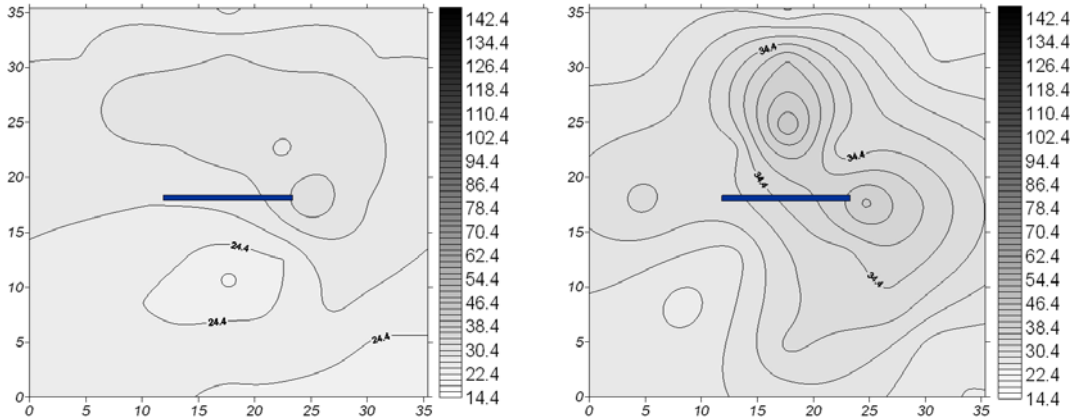
2) 수평 방향으로의 영향

Fig. 3.5.1.95~3.5.1.98은 본 연구에서 측정지점으로 제시한 Contour Area의 일정한 심도에서 수평방향으로의 콘 저항치 변화를 나타낸 것이다. 모든 실험 조건에서 심도가 깊어지고 배수재에 가까워질수록, 그리고 고진공압일수록 강도 증가 현상이 뚜렷하게 발생하였다.

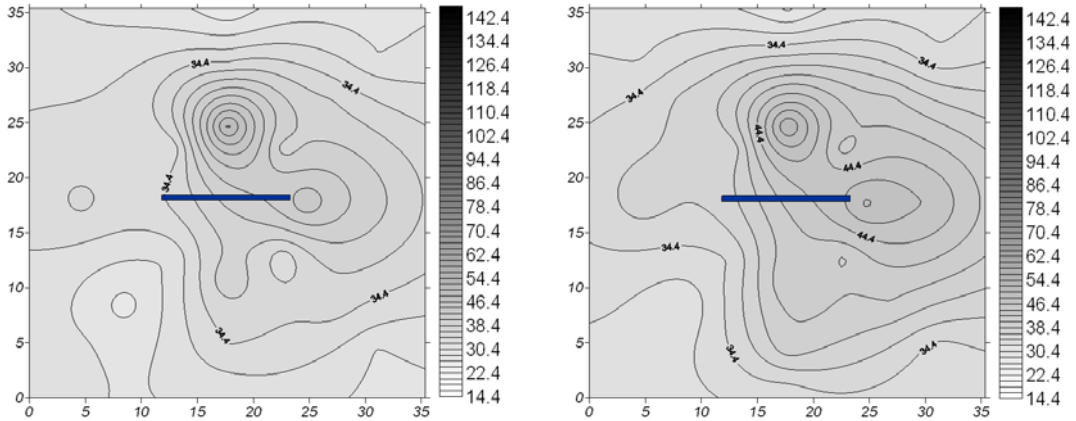
Fig. 3.5.1.99~3.5.1.102에는 일정한 심도에서 수평방향으로의 함수비 변화를 나타내었다. 함수비 변화 경향 역시 콘 저항치 변화와 비슷한 결과를 나타냈고, 심도가 깊어질수록 함수비 감소 현상이 증가하였다.

개량영역과 기밀영역을 비교하면, 개량영역에서는 배수재에 가까운 쪽으로 갈수록 동일한 심도에서 수평 방향으로의 콘 저항치 증가와 함수비 감소 경향이 크게 나타난 반면, 기밀영역에서는 그 차이가 크지 않았다는 것을 알 수 있었다. 이러한 경향은 기밀영역의 상단으로 갈수록 더욱 뚜렷하게 나타났고, 이와 같은 결과를 통해 진공압의 영향이 기밀영역에는 많은 영향을 주지 않는 다는 것을 파악하였다.

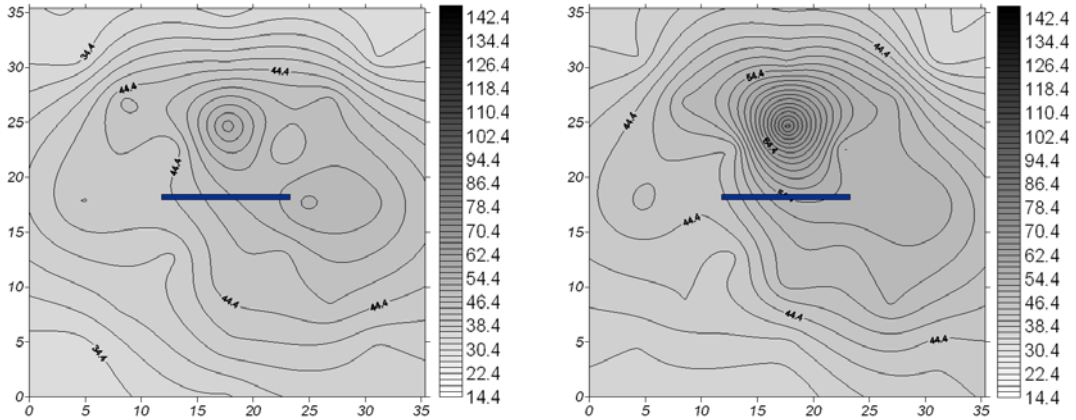
또한 콘 저항치와 함수비의 수평 방향으로의 분포 경향을 통해, 압밀이 진행되면서 콘 저항치가 집중적으로 크게 측정된 부분과 함수비가 집중적으로 작게 측정된 부분으로 배수재의 변형이 일어남을 알 수 있었다.



(a) 200mm (b) 400mm

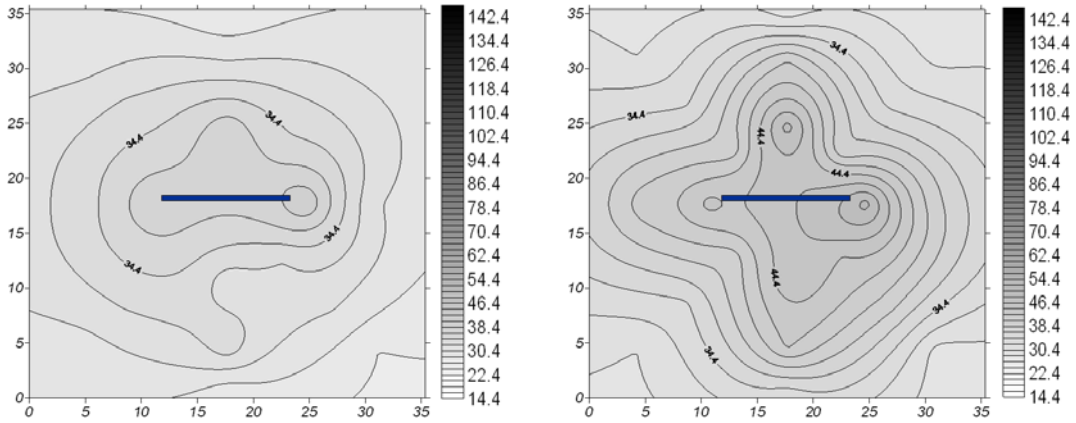


(c) 500mm (d) 600mm

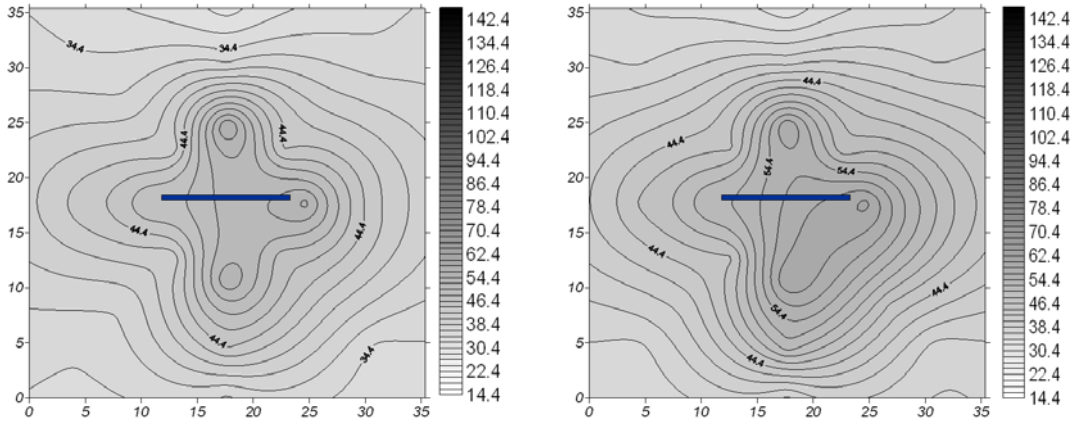


(e) 700mm (f) 800mm

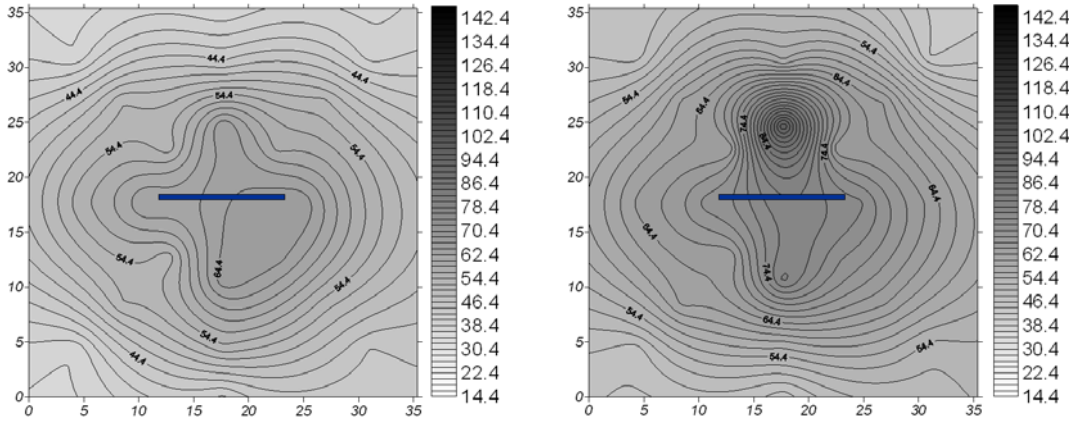
Fig. 3.5.1.95 -0.2kg/cm^{2}의 진공압 적용시 일정 심도에서의 수평방향 콘 저항치 변화



(a) 200mm (b) 400mm

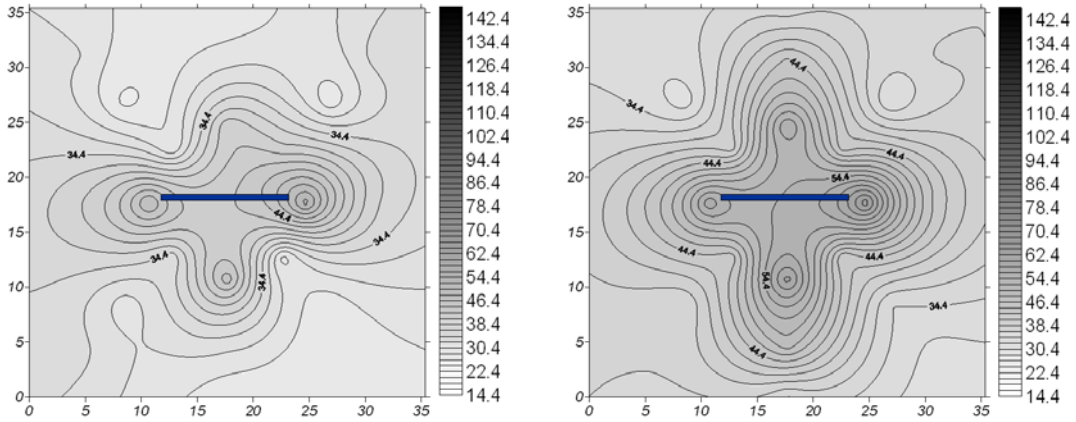


(c) 500mm (d) 600mm

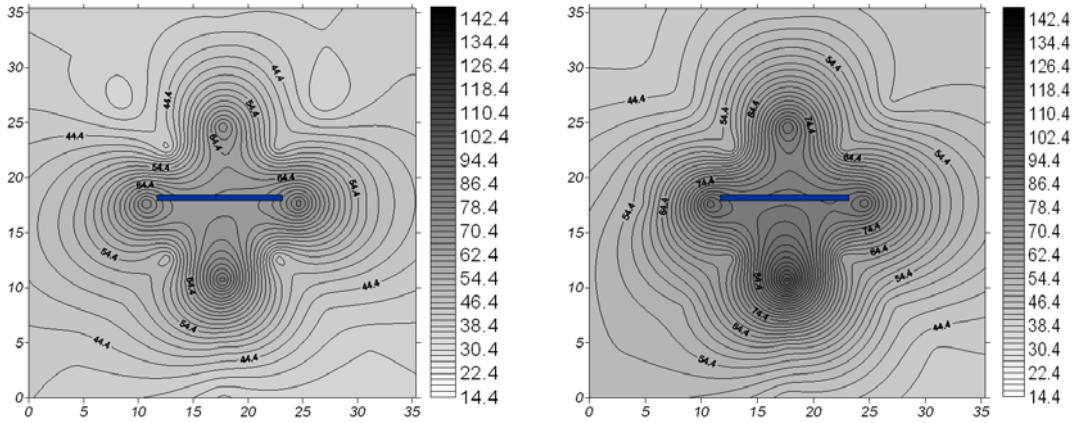


(e) 700mm (f) 800mm

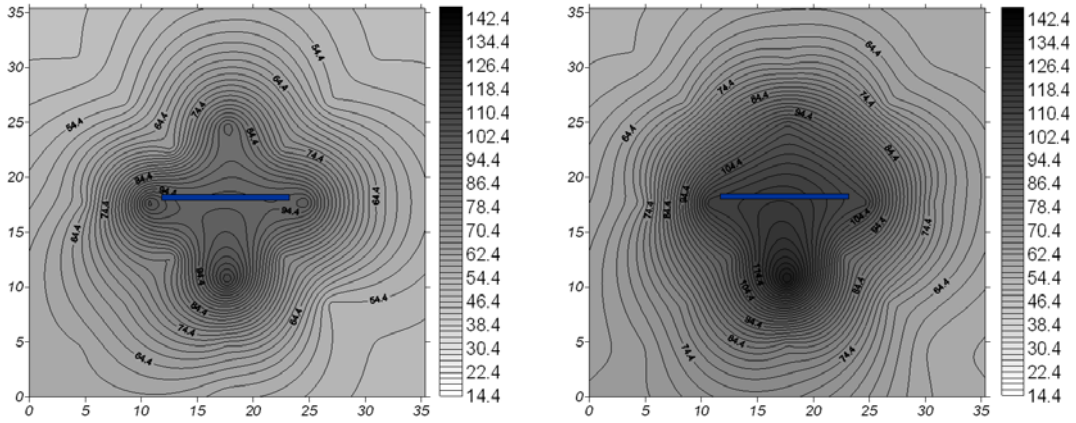
Fig. 3.5.1.96 -0.4kg/cm^{2}의 진공압 적용시 일정 심도에서의 수평방향 콘 저항치 변화



(a) 200mm (b) 400mm

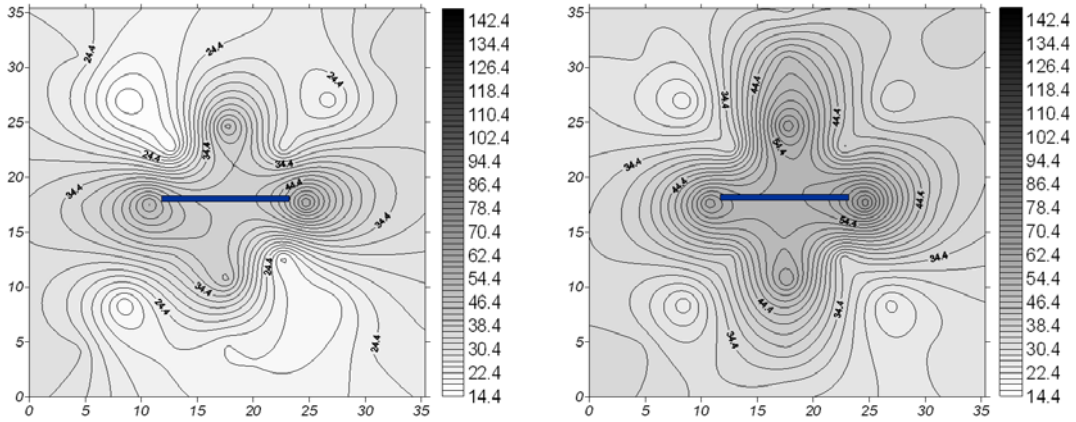


(c) 500mm (d) 600mm

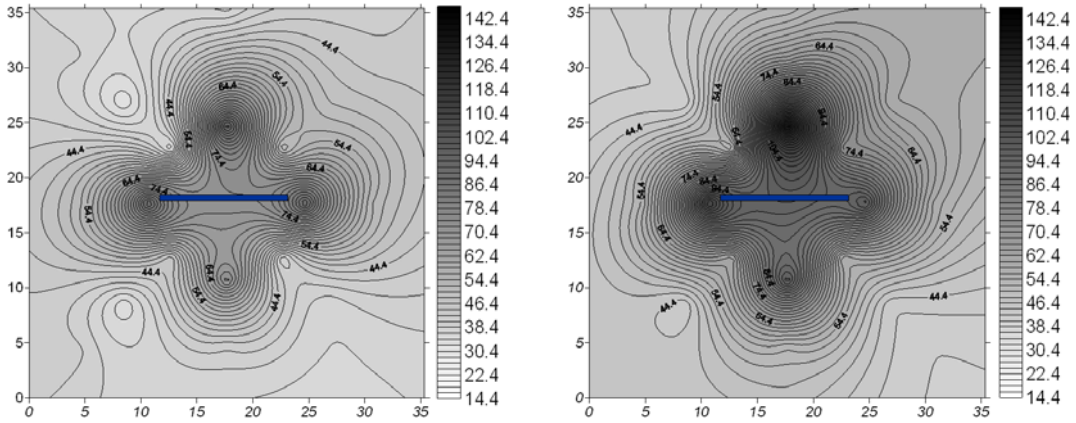


(e) 700mm (f) 800mm

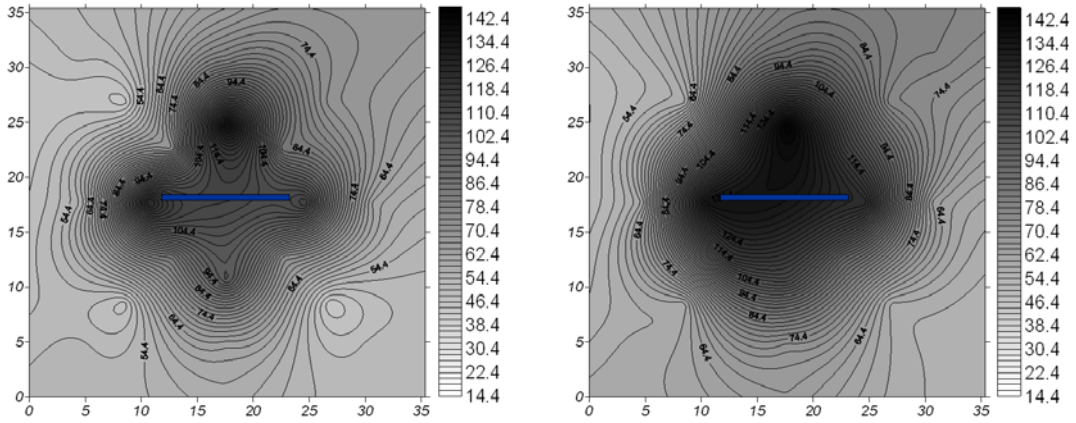
Fig. 3.5.1.97 -0.6kg/cm^{2}의 진공압 적용시 일정 심도에서의 수평방향 콘 저항치 변화



(a) 200mm (b) 400mm

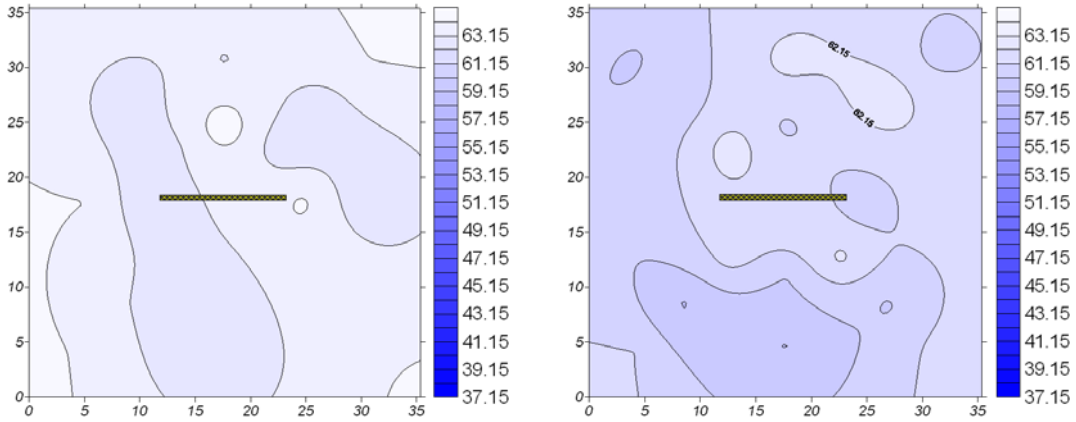


(c) 500mm (d) 600mm

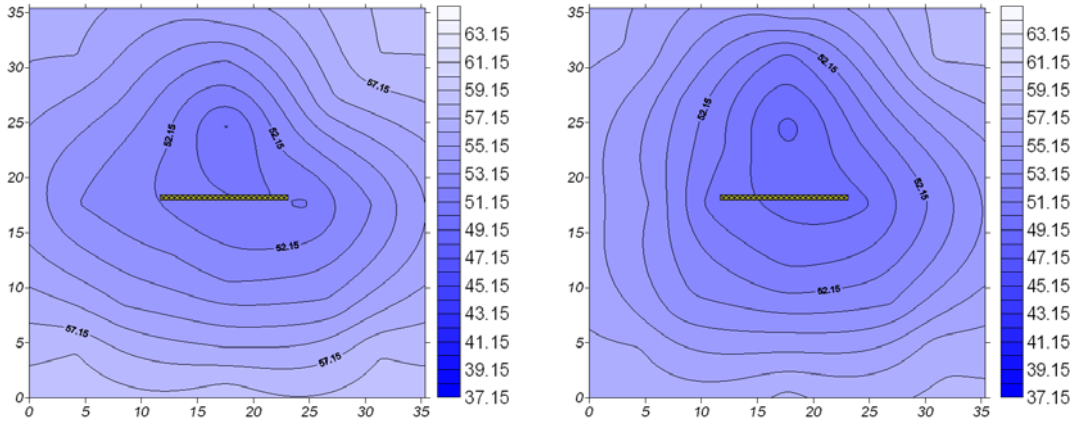


(e) 700mm (f) 800mm

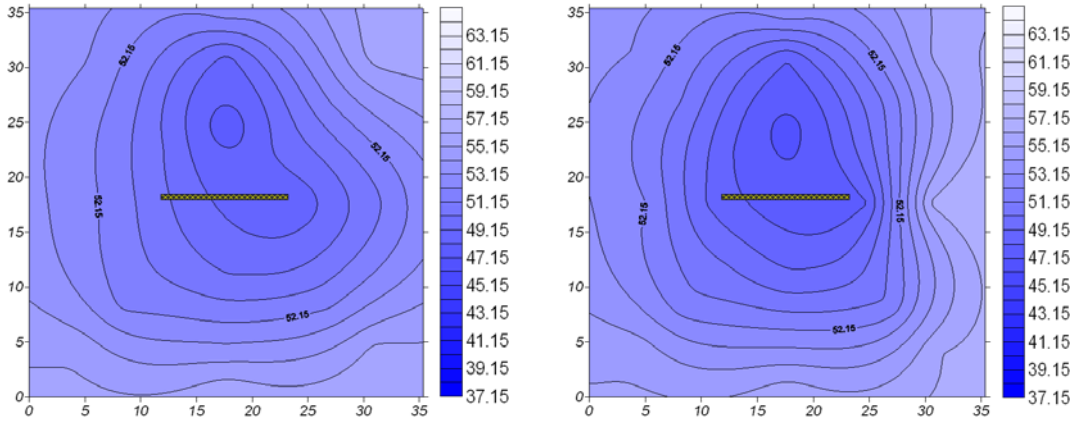
Fig. 3.5.1.98 -0.8kg/cm^{2}의 진공압 적용시 일정 심도에서의 수평방향 콘 저항치 변화



(a) 200mm (b) 400mm

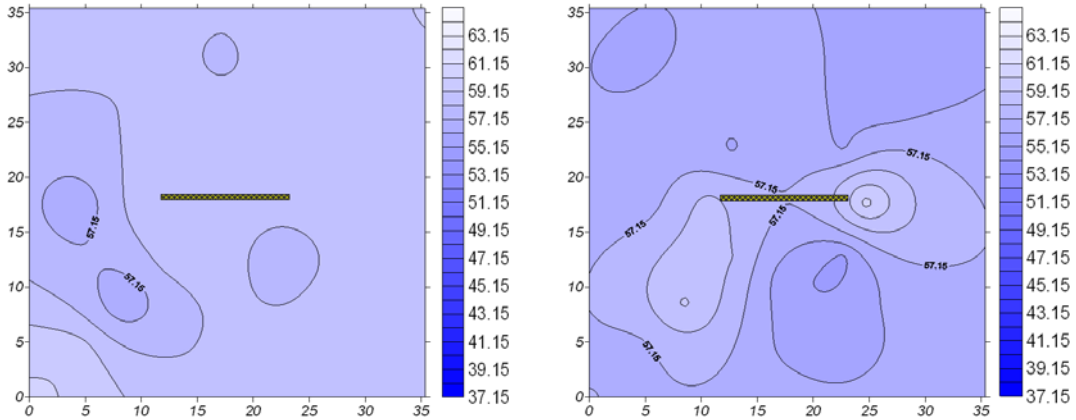


(c) 500mm (d) 600mm

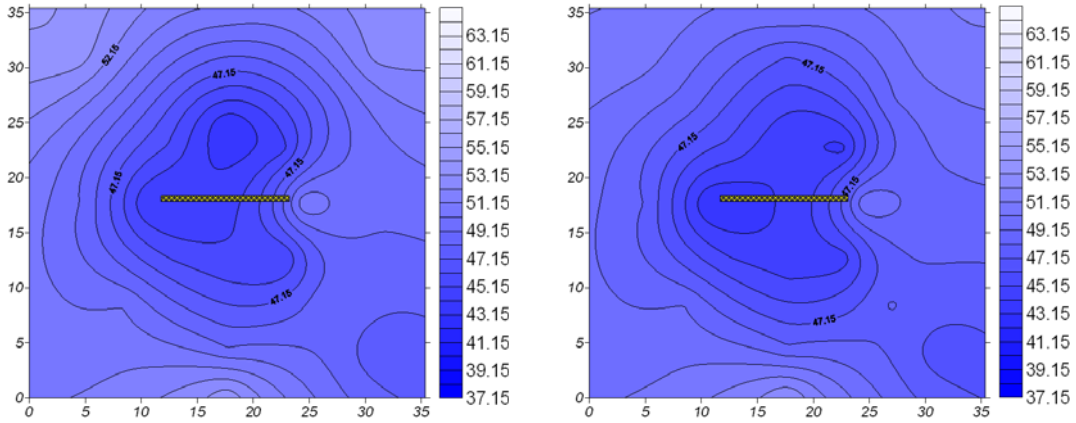


(e) 700mm (f) 800mm

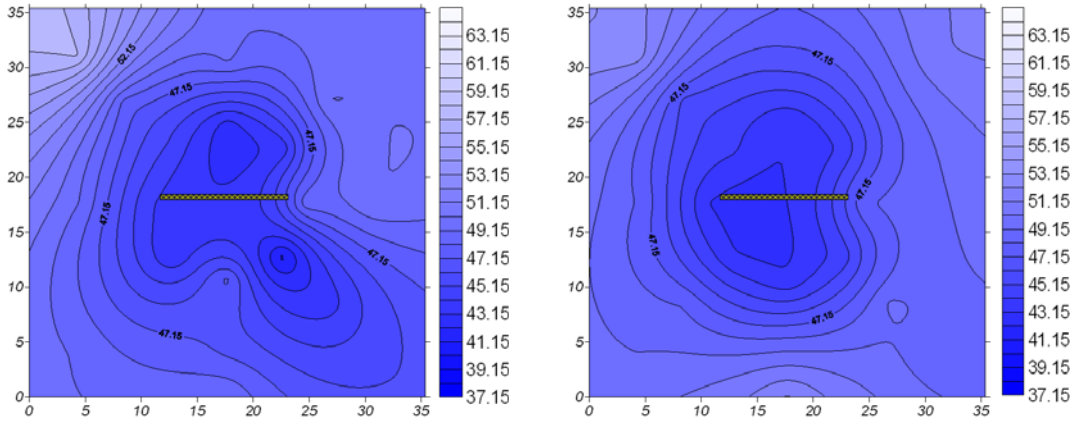
Fig. 3.5.1.99 -0.2kg/cm^{2}의 진공압 적용시 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화



(a) 200mm (b) 400mm

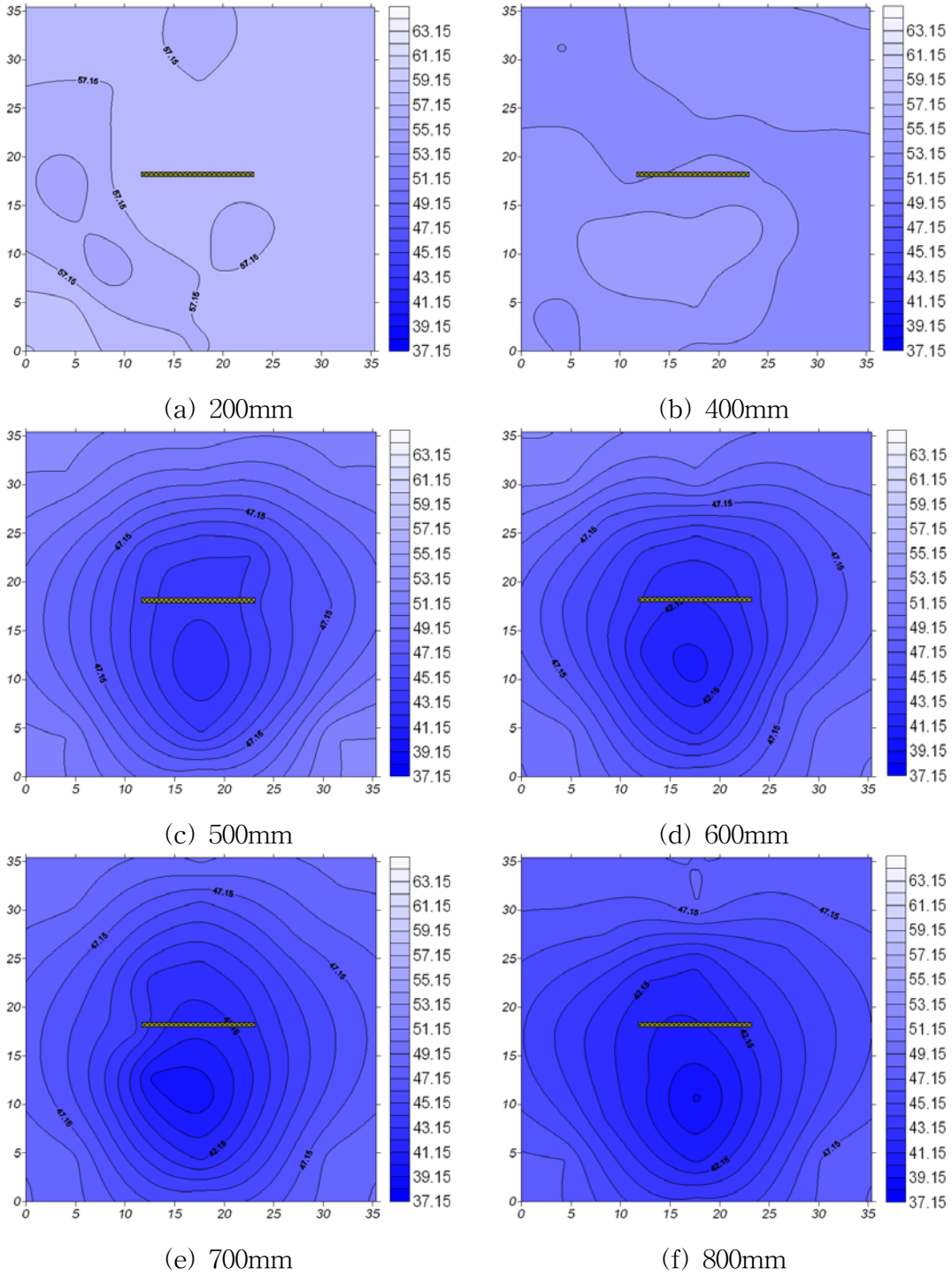


(c) 500mm (d) 600mm



(e) 700mm (f) 800mm

Fig. 3.5.1.100 -0.4kg/cm^{2}의 진공압 적용시 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

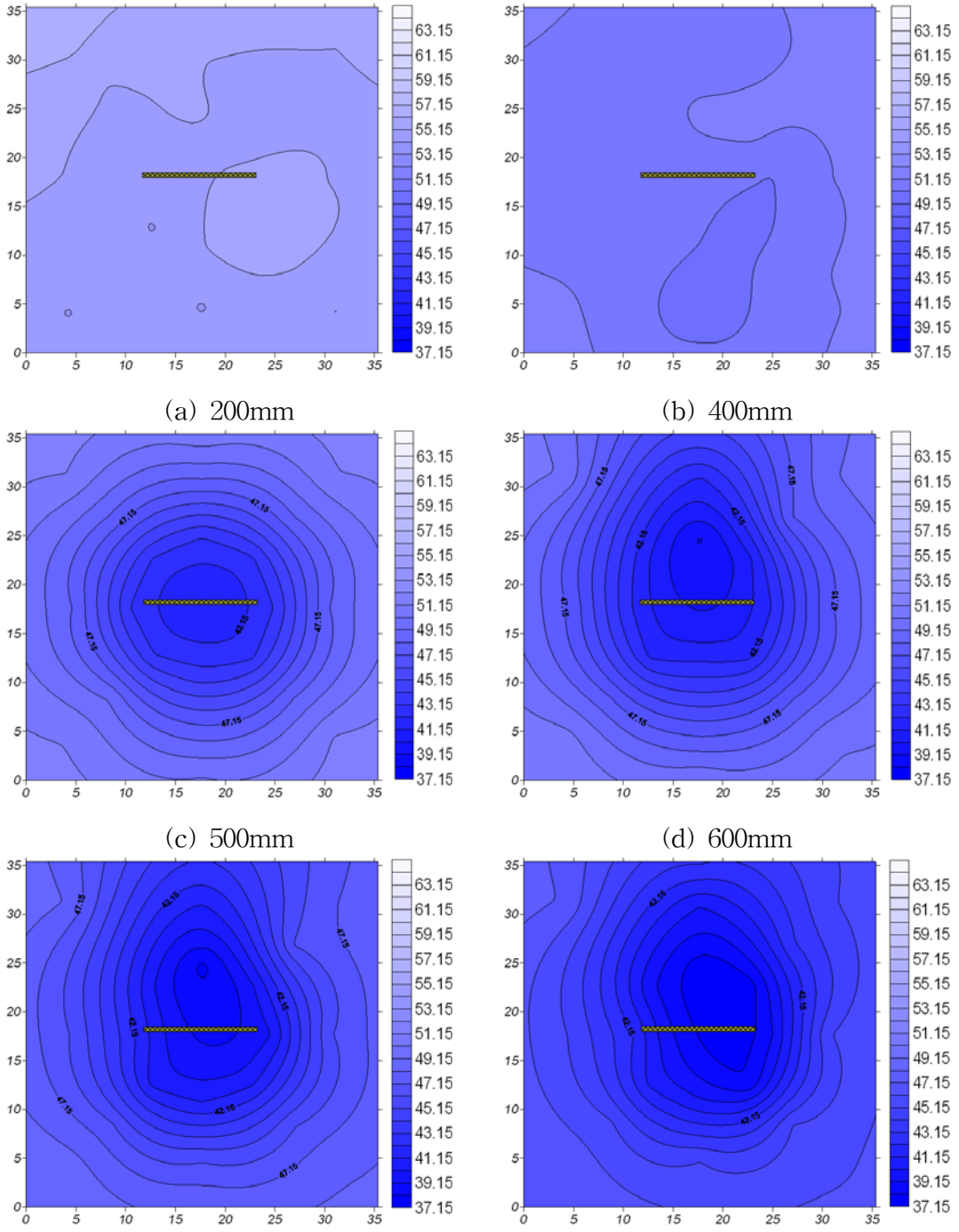


(a) 200mm (b) 400mm

(c) 500mm (d) 600mm

(e) 700mm (f) 800mm

Fig. 3.5.1.101 -0.6kg/cm^{2}의 진공압 적용시 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화



(a) 200mm (b) 400mm

(c) 500mm (d) 600mm

(e) 700mm (f) 800mm

Fig. 3.5.1.102 -0.8kg/cm^{2}의 진공압 적용시 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

(3) 배수재의 길이에 따른 적용 진공압의 효율 평가

본 실험에서는 길이 500mm의 배수재 필터 부분에 3개의 진공압 측정단자를 부착하고 이를 간극수압계와 연결하여, 시간경과에 따른 진공압의 변화 경향을 파악하고자 하였다. 진공압 측정단자의 부착 위치는 Top(배수재 하단으로부터 450mm 지점), Middle(배수재 하단으로부터 250mm 지점), Bottom(배수재 하단으로부터 50mm 지점)으로 나누어 설치하였다(Fig. 3.5.1.103).

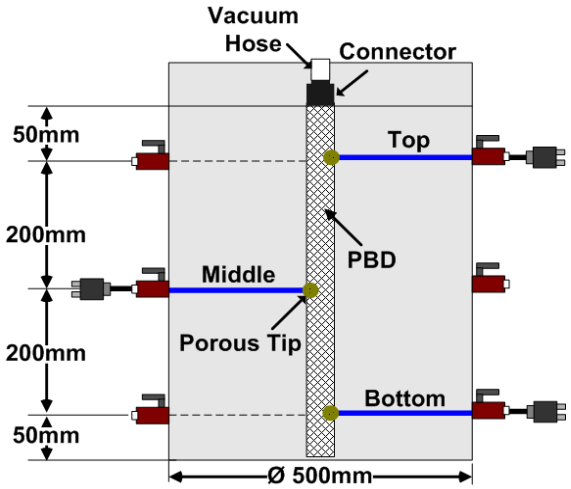


Fig. 3.5.1.103 진공압 측정단자를 부착 위치

Fig. 3.5.1.104~3.5.1.107는 각각의 진공압 적용시, 배수재 길이에 따른 진공압 변화 경향을 나타낸 것이다. 모든 실험 조건에서 작용 진공압은 배수재의 길이와 상관없이 적용 초기가 후기에 비해 상대적으로 불안정한 상태를 보였고, 진공압의 크기가 클수록 뚜렷하게 나타났다. 이러한 현상은 시간이 경과할수록 안정된 상태의 진공압이 작용하면서 점차 줄어들었고, 한 값에 일정하게 수렴하는 경향을 나타냈다. 전반적으로 Top 부분에서 측정된 진공압이 Bottom 부분보다 약간 크게 나타났는데, 이러한 차이는 고진공압을 적용하였을 때 더 뚜렷하게 나타났다. 위의 결과와 같이, 진공압이 초반의 불안정한 상태에서 점차 안정된 상태의 일정한 진공압으로 수렴되는 것은, 시간이 경과함에 따라 배수재 주변 지반에서 국부적으로 압밀이 진행되는데, 이러한 현상이 배수재로부터 진공압이 손실되는 것을 차단해 주는 역할을 하기 때문이라고 판단된다.

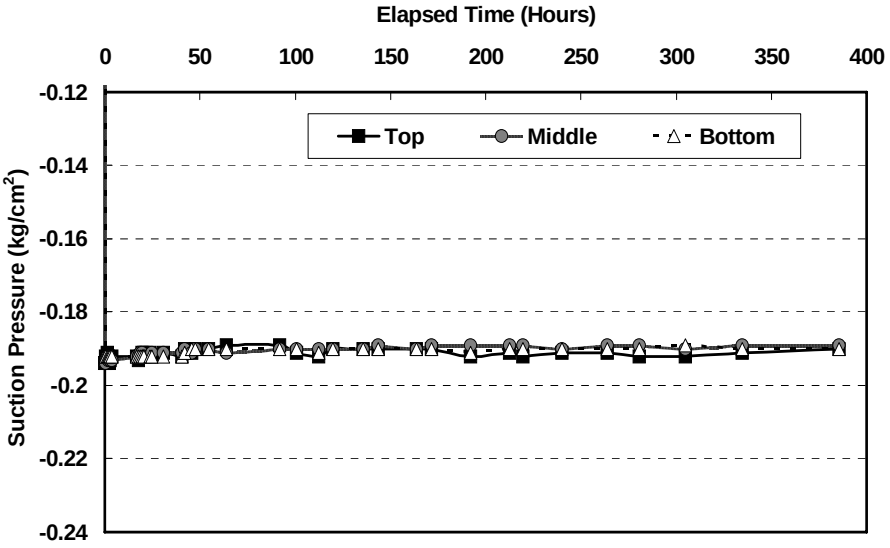


Fig. 3.5.1.104 -0.2kg/cm^{2}의 진공압 적용시, 배수재 길이에 따른 진공압 변화 경향

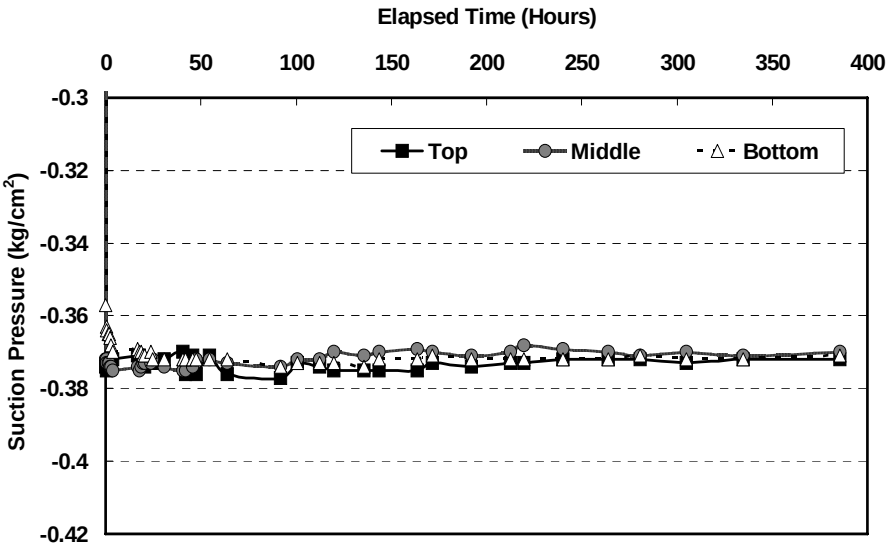


Fig. 3.5.1.105 -0.4kg/cm^{2}의 진공압 적용시, 배수재 길이에 따른 진공압 변화 경향

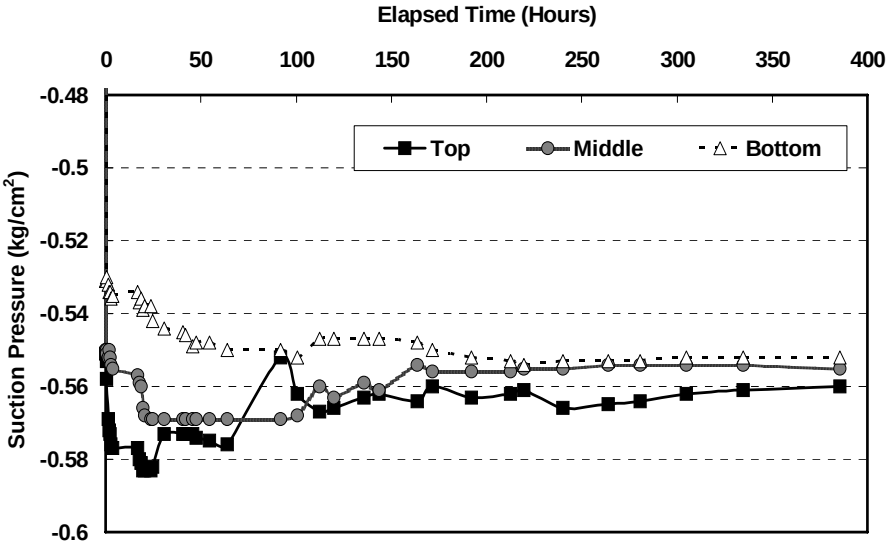


Fig. 3.5.1.106 -0.6kg/cm^{2}의 진공압 적용시, 배수재 길이에 따른 진공압 변화 경향

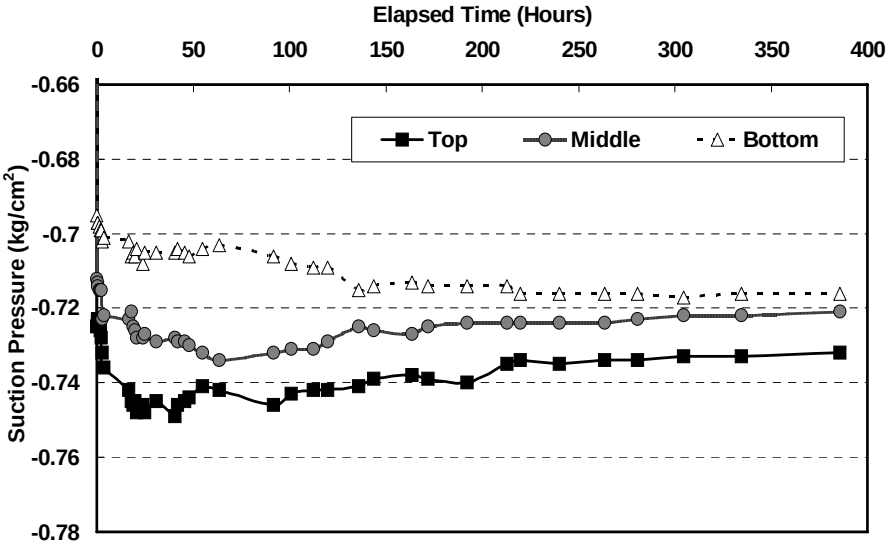


Fig. 3.5.1.107 -0.8kg/cm^{2}의 진공압 적용시, 배수재 길이에 따른 진공압 변화 경향

진공압을 크게 공급한 적용 진공압(Applied Vacuum Pressure; AVP)과 안정화된 후 배수재에 작용 중인 유효 진공압(Effective Vacuum Pressure; EVP)으로 구분하여, 두 진공압 사이의 상관관계를 도출하여 배수재 길이에 따른 진공압의 효율을 파악하였다. 이 때 AVP는 간극수압계와 진공압게이지의 감도에 따른 차이를 고려하고자 식 (3.4.3.1)을 사용하여, -0.2(-0.191)kg/cm^2, -0.4(-0.376) kg/cm^2, -0.6(-0.563)kg/cm^2, -0.8(-0.749)kg/cm^{2}로 보정하였다. Fig. 3.5.1.108에 배수재 길이에 따른 EVP/AVP의 관계를 나타내었다. 그 결과, -0.2kg/cm^2, -0.4kg/cm^2, -0.6kg/cm^{2}에서는 배수재 길이에 의한 진공압의 효율 감소는 거의 발생하지 않았으나, -0.8kg/cm^{2}의 고진공압에서는 상대적으로 Bottom 부분에서의 진공압 효율이 Top 부분에서의 진공압의 효율에 비해 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 이러한 효율 감소는 크지 않았고, -0.6kg/cm^{2}까지는 모든 지점에서 최소 98% 이상의 효율을 보였다. -0.8kg/cm^{2}에서도 배수재의 길이에 따라서 그 효율이 상대적으로 감소하는 경향이 나타났지만, 역시 95% 이상의 높은 효율을 나타냈다.

따라서 저진공압으로 지반을 개량할 경우, 배수재의 길이에 따른 진공압의 효율이 감소하는 문제는 거의 발생하지 않는다는 것을 실내 실험을 통해 파악하였고, -0.8kg/cm^{2}의 고진공압을 적용하면 배수재의 길이가 깊어질수록 진공압의 효율이 점차 감소하는 경향을 파악할 수 있었으나 그 정도는 크지 않음을 알 수 있었다.

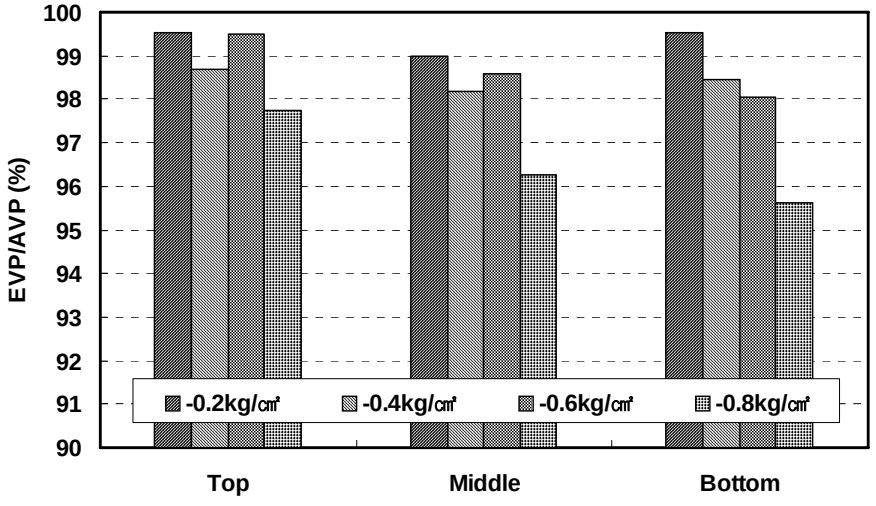


Fig. 3.5.1.108 진공압의 크기에 따른 배수재 길이별 진공압 효율

(4) 최종 침하량 예측을 통한 진공압의 크기에 따른 압밀도 산정

본 연구에서는 쌍곡선법과 Asaoka법의 장기침하예측법을 이용하여 최종 침하량을 산정하고 이를 통해 각각의 진공압에 따른 압밀도를 산정하였고, 이로써 압밀촉진효과를 검토해보았다. 압밀도는 장기침하예측기법을 통해 예측한 최종침하량에 대한 실측된 침하량의 비로서 산정하였다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$U = \frac{S}{S_f} \times 100(\%) \qquad (3.5.1.1)$$

여기서, U : 압밀도

S : 실측 침하량

S_f : 장기침하예측기법을 통해 예측한 최종침하량

1) 쌍곡선법에 의한 최종 침하량과 압밀도

쌍곡선법을 통해 각 진공압 크기에 따른 최종 침하량을 예측한 결과 Table 3.5.1.1과 같은 결과를 얻게 되었다.

Table 3.5.1.1 쌍곡선법에 의한 최종 침하량과 압밀도

적용 진공압 (-kg/cm^2)	α	β	쌍곡선법에 의한 최종 침하량 (mm)	실측 침하량 (mm)	압밀도 (%)
0.2	0.0079	0.8155	126.58	109.77	86.72
0.4	0.0055	0.6544	181.82	145.50	80.03
0.6	0.0052	0.5062	192.31	162.35	84.42
0.8	0.0044	0.4395	227.27	186.48	82.05

Fig. 3.5.1.109은 쌍곡선법에서 각 진공압에서의 시간경과에 따른 압밀도 변화를 나타내었다. 모든 실험 조건에서 압밀도는 큰 차이 없이 거의 유사한 경향을 보였으며, 시간이 경과하면서 점차 수렴하는 경향을 나타냈다.

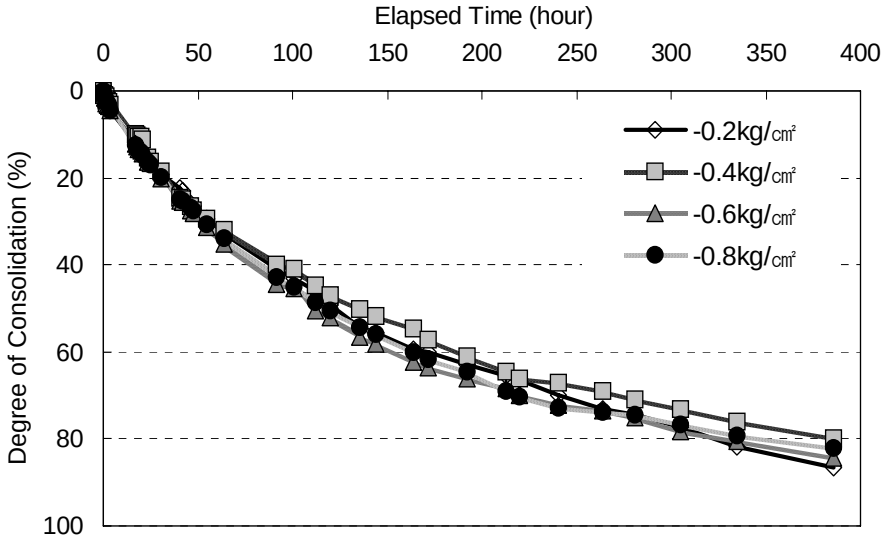


Fig. 3.5.1.109 각 진공압에서의 시간경과에 따른 압밀도 변화 (쌍곡선법)

2) Asaoka법에 의한 최종 침하량과 압밀도

Asaoka법을 사용하여 각 진공압 크기에 따른 최종 침하량을 예측한 결과는 쌍곡선법에 의하여 예측한 값보다 약간 더 크게 나타났고, Table 3.5.1.2에 그 결과를 나타내었다.

Table 3.5.1.2 Asaoka법에 의한 최종 침하량과 압밀도

적용 진공압 ($-kg/cm^2$)	β_0	β_1	Asaoka법에 의한 최종 침하량 (mm)	실측 침하량 (mm)	압밀도 (%)
0.2	12.985	0.9159	150.40	109.77	71.09
0.4	18.336	0.9054	193.83	145.50	75.07
0.6	21.826	0.8936	205.13	162.35	79.14
0.8	25.418	0.8916	234.48	186.48	79.53

Fig. 3.5.1.110는 Asaoka법에 의해 예측한 시간에 따른 압밀도 변화이다. 쌍곡선법의 경우와 같이 압밀도는 모든 실험 조건에서 큰 차이 없이 거의 유사한 경향을 보였으나, Asaoka법에 의해 예측된 최종 침하량이 쌍곡선법에 의해 예측된 최종 침하량보다 더

컸기 때문에 전반적으로 압밀도는 쌍곡선법에 의한 결과보다 작게 나타났다.

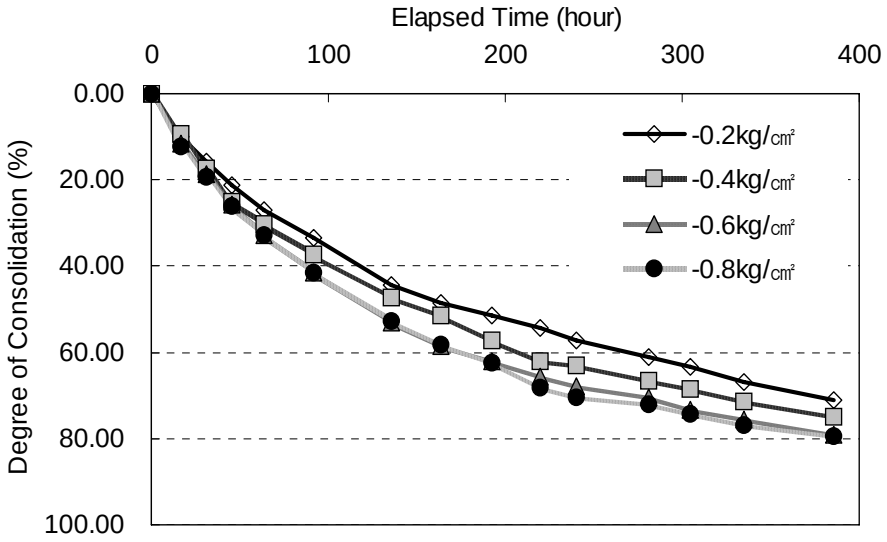


Fig. 3.5.1.110 각 진공압에서의 시간경과에 따른 압밀도 변화 (Asaoka법)

마. 단계 진공압에 따른 지반개량 특성파악 실험

Table 3.5.1.3은 단계 진공압에 대한 개량 특성을 파악하기 위한 5가지 실험 조건을 나타내었다. 최종 진공압을 -0.8kg/cm^{2}으로 설정하고, 각 실험 조건에 따라 단계진공압 조건을 가하여 실험을 실시하였다.

Table 3.5.1.3 단계 진공압에 따른 지반개량 특성파악 실험조건

CASE	개량기간 / 적용진공압	1일	2일	3일	4일	5일	6일	7일	8일	9일	10일	11일	12일	13일	14일	15일	16일
1	-0.1kg/cm^2	■															
	-0.2kg/cm^2		■														
	-0.4kg/cm^2			■													
	-0.6kg/cm^2				■												
	-0.8kg/cm^2					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2	-0.1kg/cm^2	■	■														
	-0.2kg/cm^2			■	■												
	-0.4kg/cm^2					■	■										
	-0.6kg/cm^2							■	■								
	-0.8kg/cm^2									■	■	■	■	■	■	■	■
3	-0.1kg/cm^2	■															
	-0.2kg/cm^2		■	■													
	-0.4kg/cm^2				■	■	■										
	-0.6kg/cm^2							■	■	■	■						
	-0.8kg/cm^2											■	■	■	■	■	■
4	-0.2kg/cm^2	■	■														
	-0.4kg/cm^2			■	■	■	■										
	-0.8kg/cm^2							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5	-0.1kg/cm^2	■	■	■	■												
	-0.4kg/cm^2					■	■	■	■	■	■						
	-0.8kg/cm^2											■	■	■	■	■	■

(1) 단계 진공압에 따른 침하량

Fig. 3.5.1.111은 적용 진공압을 최종 진공압인 -0.8kg/cm^{2}까지 5가지 조건으로 단계적으로 증가시켰을 때, 모든 조건에 대한 침하량을 나타낸 것이다. 실험결과 -0.8kg/cm^{2}의 최종 진공압까지 비교적 빠른 시간에 진공압을 증가한 Case 1, 2, 4의 침하량이 비교적 크게 나타났다. 따라서 이러한 결과로부터 석션드레인 기법을 지반에 적용할 때에는 낮은 진공압에서 큰 진공압으로의 상향기간을 적절하게 올려주어 완충 기간을 설정하고 이후 최대 진공압을 유지시키는 진공압 시스템이 배수 효율의 측면에서 더 좋을 것으로 판단되며, 최적의 조합을 여러 경우의 실험을 통해 산정할 필요가 있다.

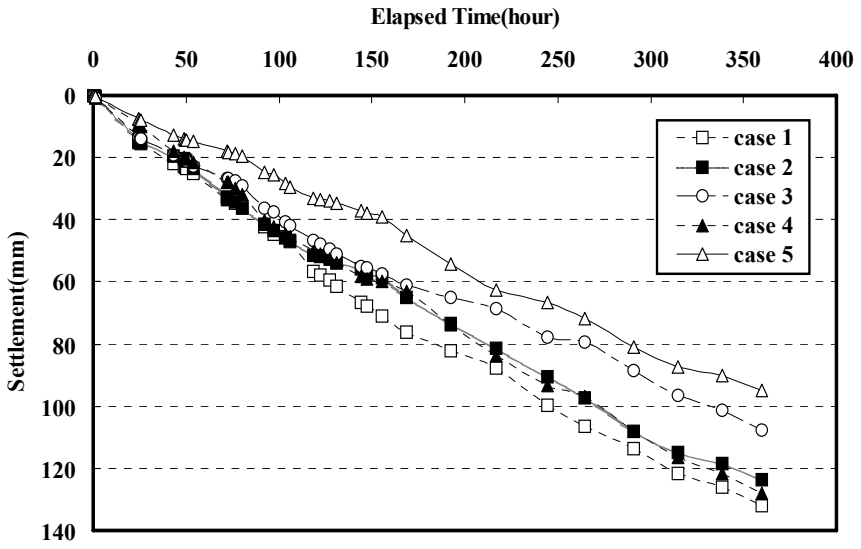


Fig. 3.5.1.111 단계 진공압에 따른 침하량

Fig. 3.5.1.112는 단계 진공압에 따른 배수 속도를 침하량을 통해 역산하여 나타낸 그래프이다. 배수 속도는 가장 큰 침하량을 나타낸 Case 1이 가장 크게 나타났으며 침하량이 작을수록 배수 속도도 작게 나타났다.

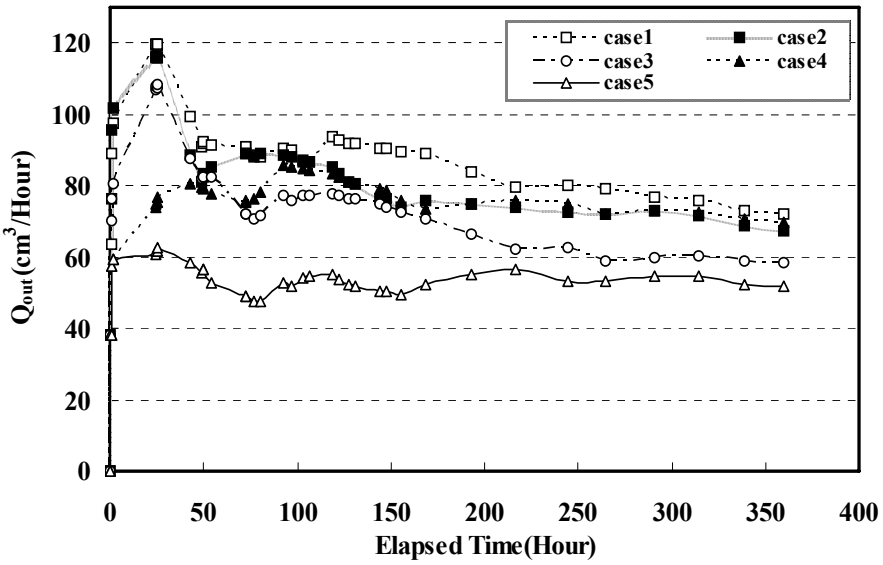


Fig. 3.5.1.112 단계 진공압에 따른 배수 속도

(2) 강도특성

Fig. 3.5.1.113 ~ 3.5.1.117은 적용 진공압을 최종 진공압인 -0.8kg/cm^{2}까지 5가지 조건으로 단계적으로 증가시켰을 때, 각각의 경우에 대해 심도별 강도특성 나타내었다. 침하량이 크게 발생된 Case 1, 2, 4가 전반적으로 강도 증가율도 크게 발생하였으며 배수재에서 가깝고, 심도가 깊어질수록 강도가 점차 증가하는 경향을 보였다.

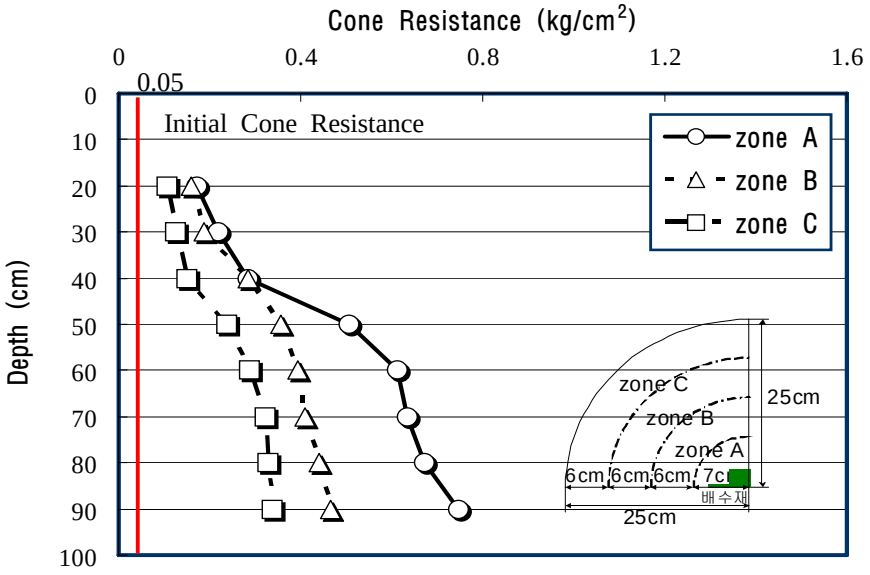


Fig. 3.5.1.113 Case 1의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

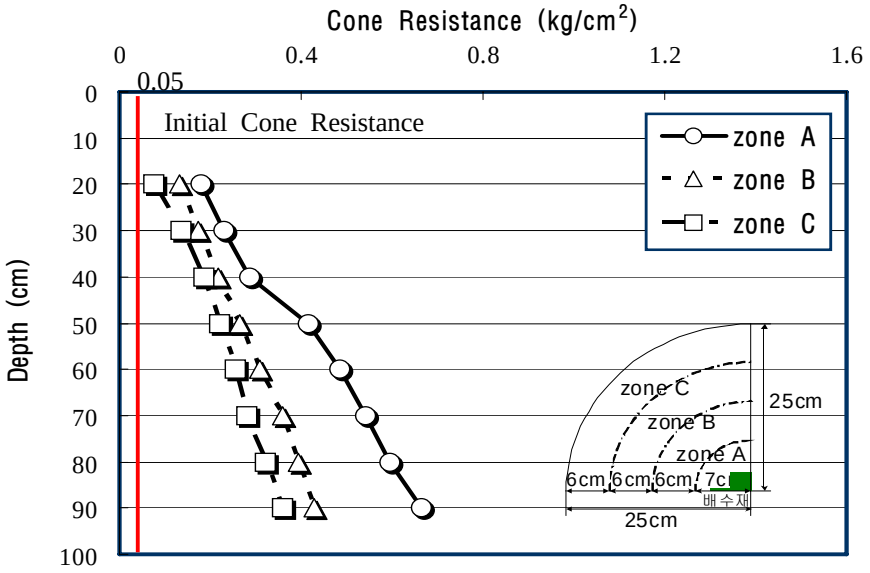


Fig. 3.5.1.114 Case 2의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

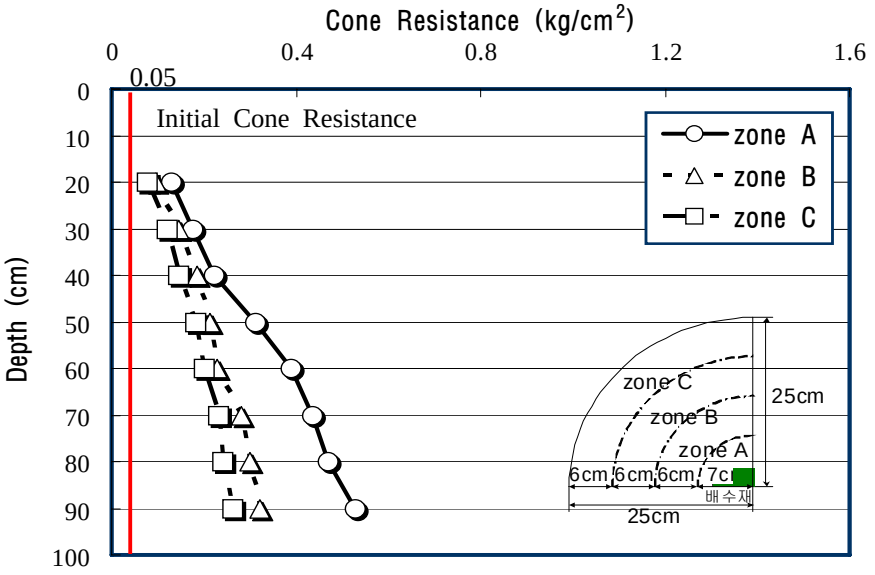


Fig. 3.5.1.115 Case 3의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

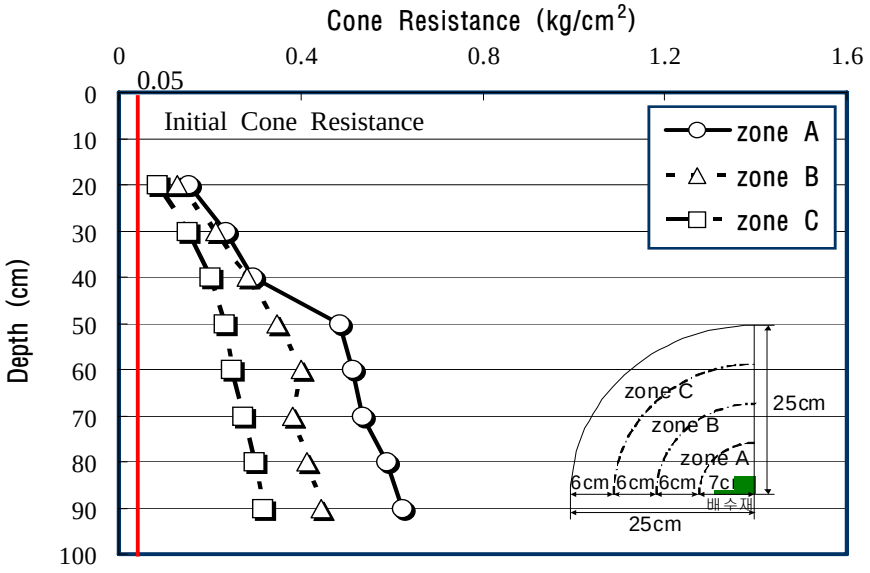


Fig. 3.5.1.116 Case 4의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

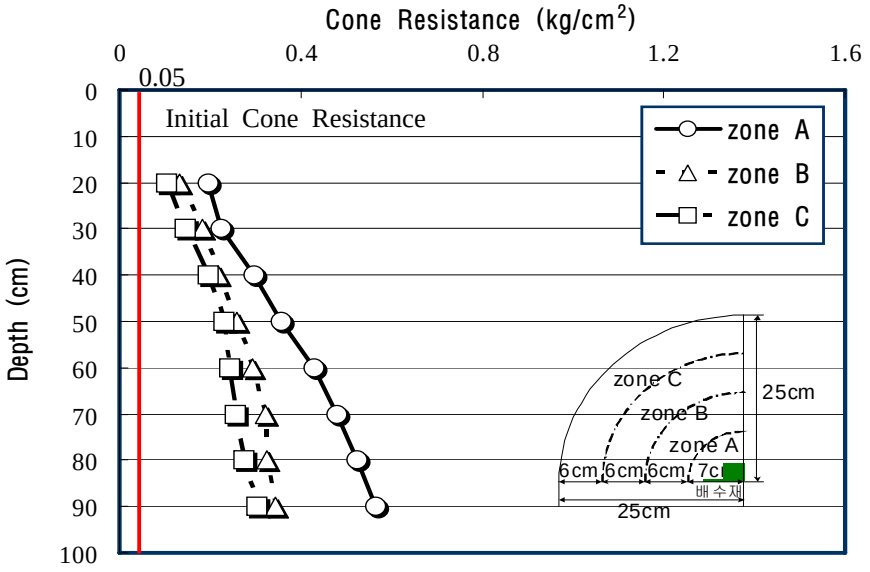


Fig. 3.5.1.117 Case 5의 심도에 따른 지점별 콘저항치 변화

Fig. 3.5.1.118 ~ 3.5.1.122은 5가지 실험 조건에 대해 일정심도에서의 수평방향으로의 강도증가 현상을 나타내었다. Sealing 층에서는 배수재로부터의 거리에 따른 특별한 경향을 보이진 않지만, 개량영역에서는 배수재로 부터의 거리가 가까울수록 강도증가도 크게 일어났다.

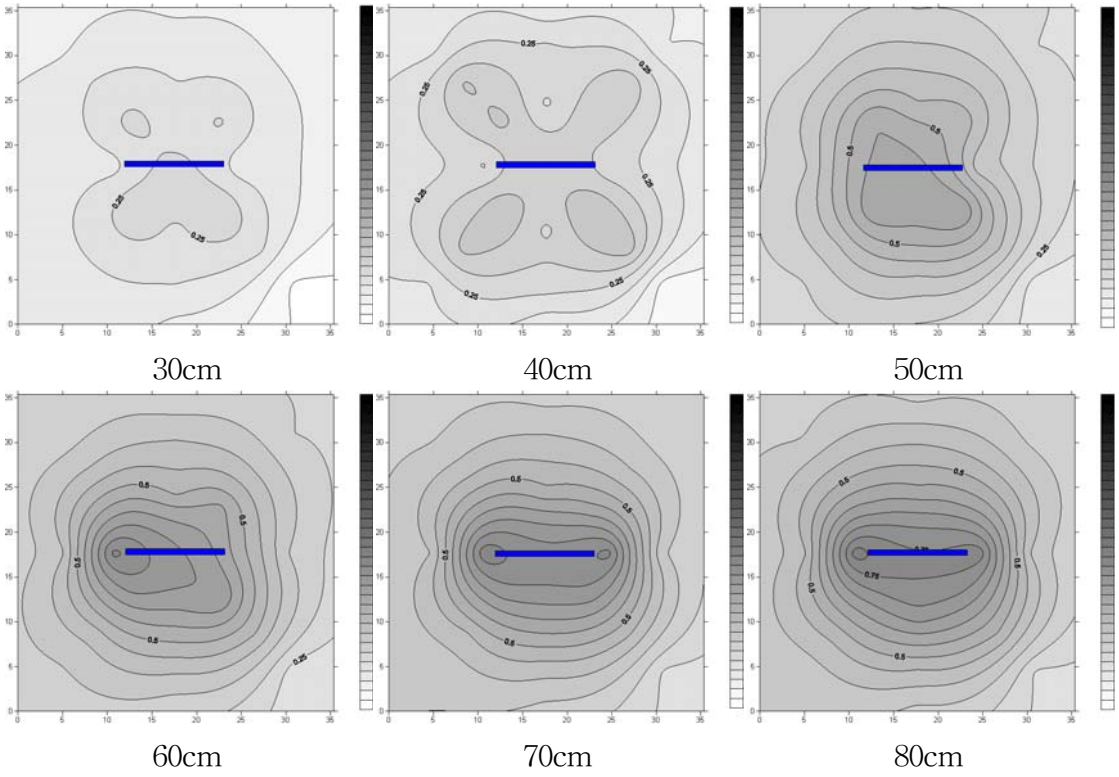


Fig. 3.5.1.118 Case 1의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

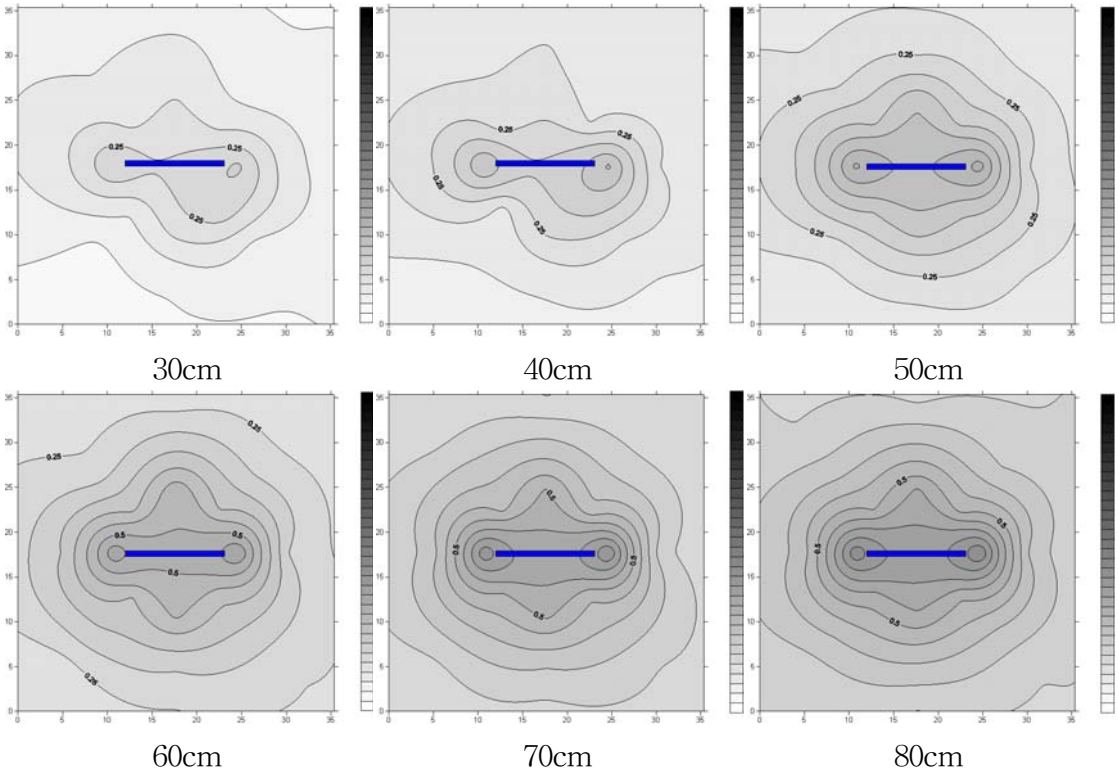


Fig. 3.5.1.119 Case 2의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

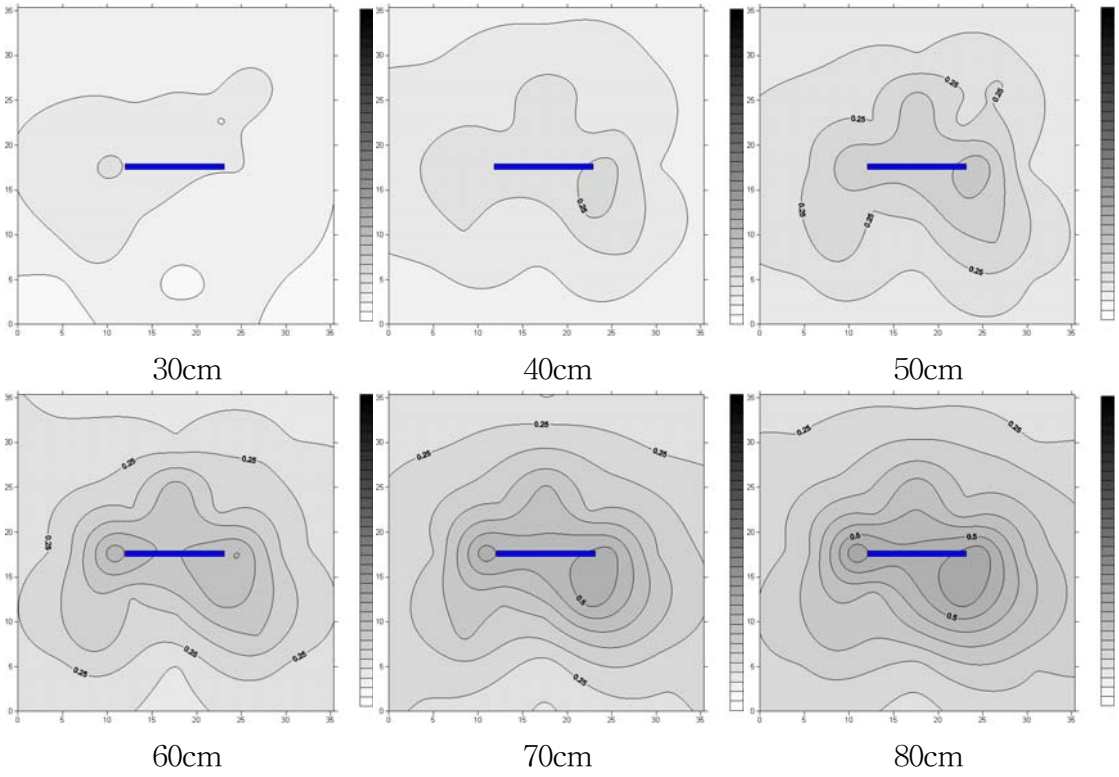


Fig. 3.5.1.120 Case 3의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

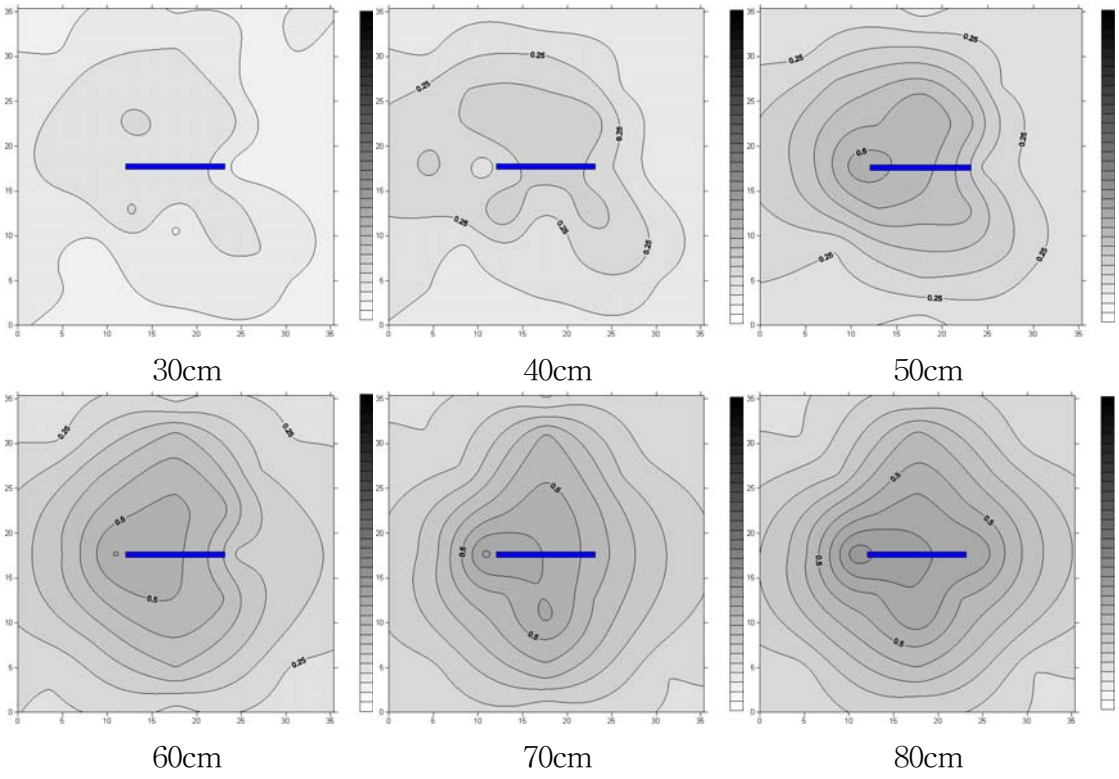


Fig. 3.5.1.121 Case 4의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

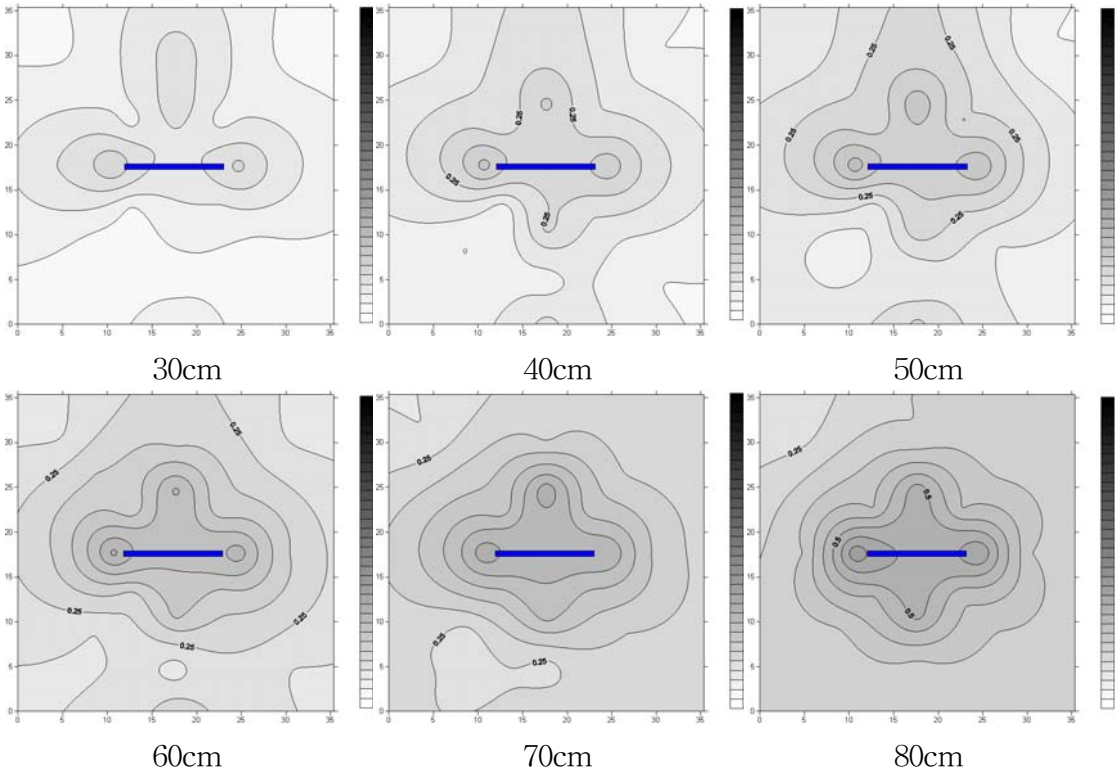


Fig. 3.5.1.122 Case 5의 일정 심도에서의 수평방향 콘저항치 변화

(3) 심도에 따른 함수비 변화특성

Fig. 3.5.1.123 ~3.5.1.127에는 각 실험 조건에 따라 배수재로부터의 거리를 기준으로 각 심도에서 발생된 함수비 분포를 나타내었다. Sealing 층에서는 Zone A, B, C에서의 함수비 감소가 거의 동일하지만, 개량영역의 경우 배수재에서 가깝고 심도가 깊어질수록 더 큰 함수비 감소가 발생하였다.

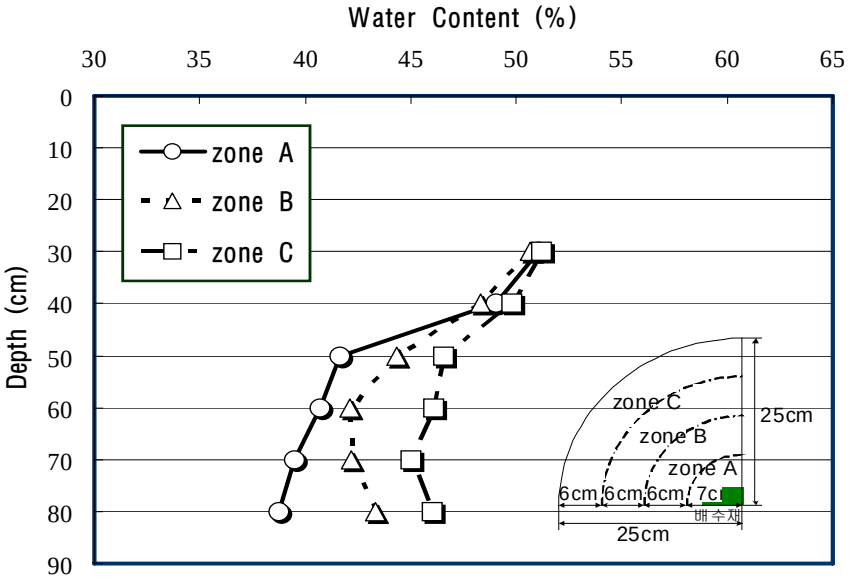


Fig. 3.5.1.123 Case 1의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

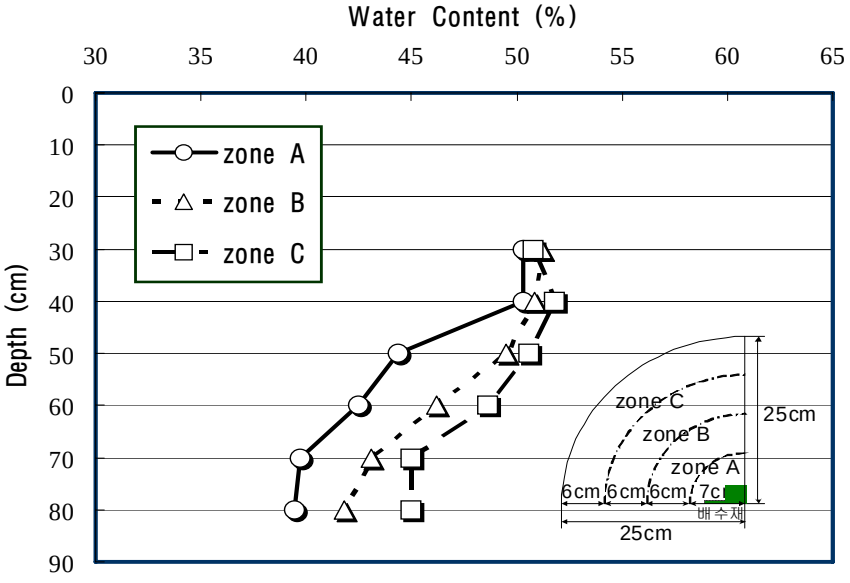


Fig. 3.5.1.124 Case 2의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

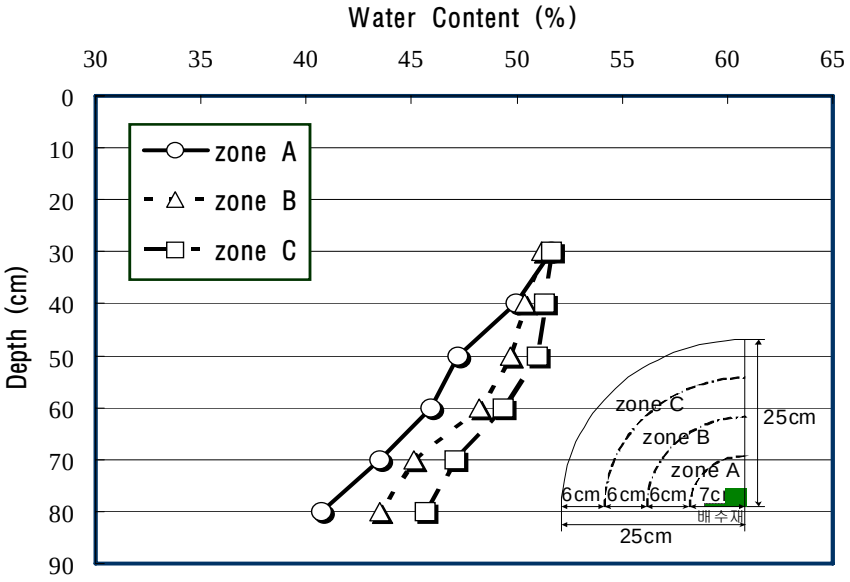


Fig. 3.5.1.125 Case 3의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

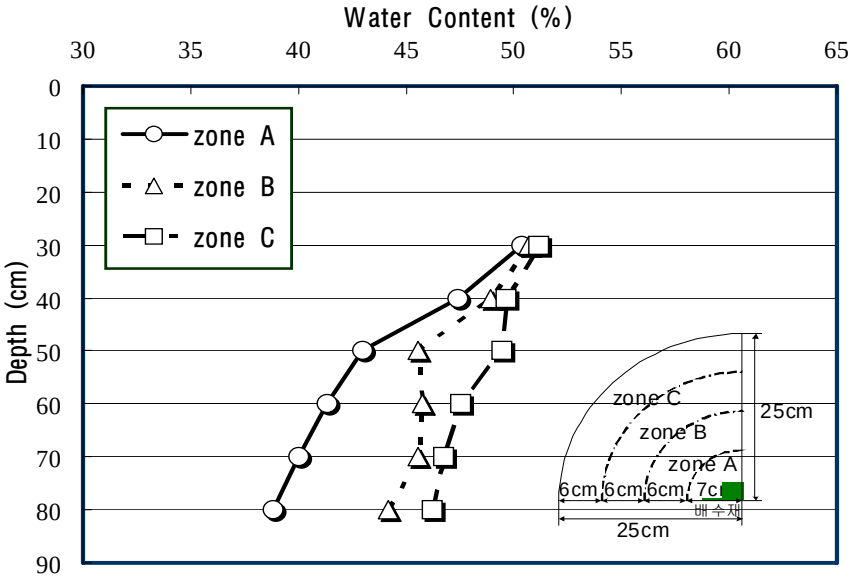


Fig. 3.5.1.126 Case 4의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

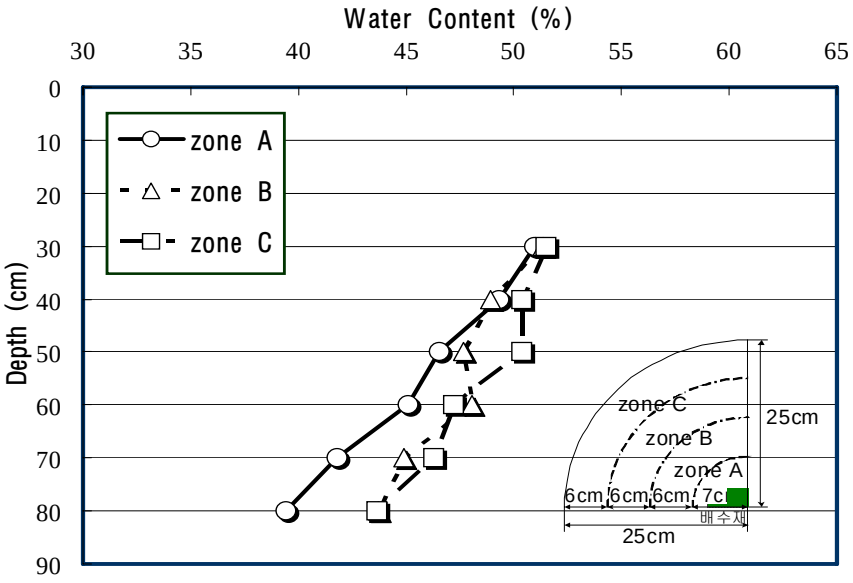


Fig. 3.5.1.127 Case 5의 심도에 따른 지점별 함수비 변화

Fig. 3.5.1.128은 각 단계진공압 조건 별 개량영역에서의 평균 함수비 분포를 나타내었다. 그 결과 전체적으로 대략 20% 정도의 함수비 감소효과가 발생하였으며, -0.8kg/cm^2 진공압까지에 도달되는 시간이 비교적 짧았던 Case 1, Case 2, Case 4에서의 함수비가 비교적 작게 나타났다. 특히, -0.8kg/cm^{2}에 도달되는 시간이 가장 짧았던 Case 1에서 함수비 분포가 가장 작게 나타났다.

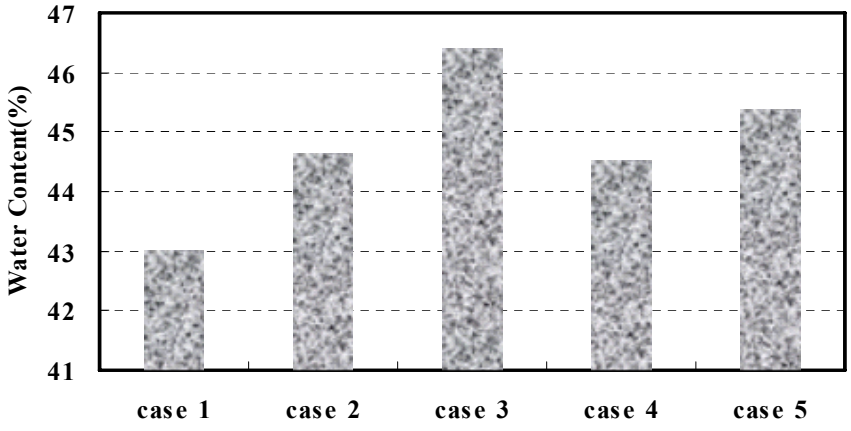


Fig. 3.5.1.128 각 실험 조건 별 함수비 분포

Fig. 3.5.1.129 ~ 3.5.1.133는 적용 진공압을 최종 진공압인 -0.8kg/cm^{2}까지 5가지 조건으로 단계적으로 증가시켰을 때, 각 경우에 대해 심도 변화에 따른 수평적 함수비 감소 현상을 나타내었다. Sealing 층에서 보다 개량영역에서의 함수비 감소가 더 많이 발생하였고, 개량영역에서는 배수재에서 가깝고, 심도가 깊어질수록 더 많은 함수비 감소가 발생하였다.

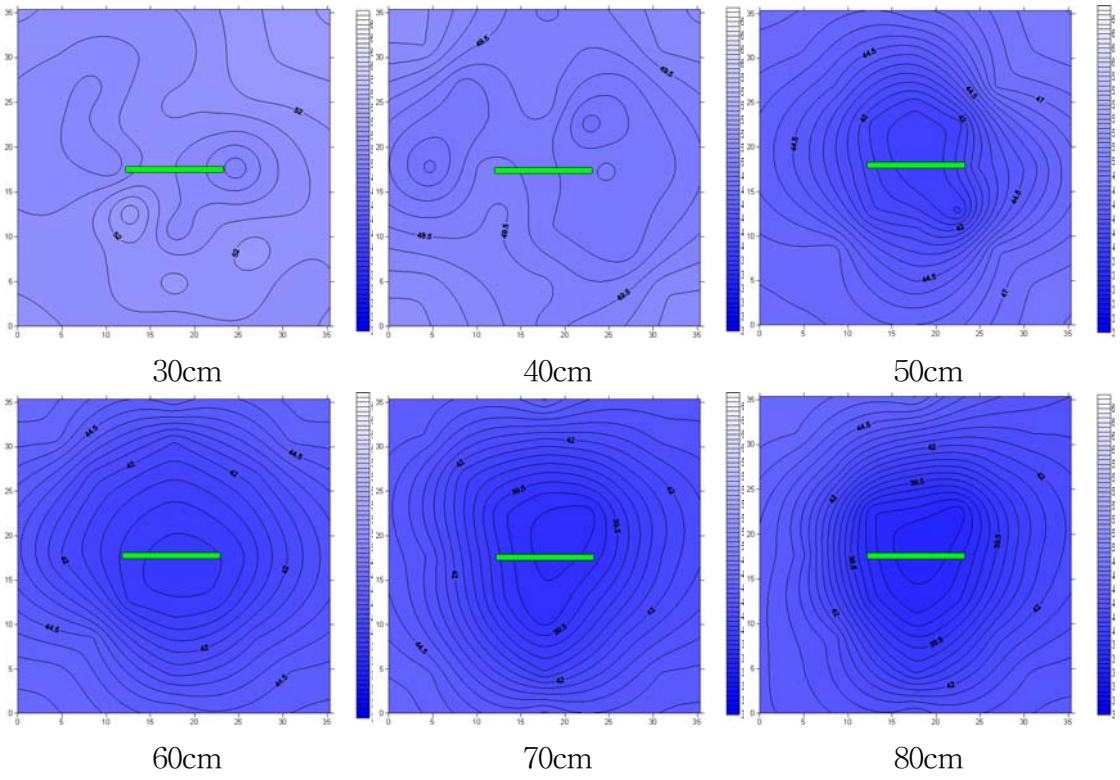


Fig. 3.5.1.129 Case 1의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

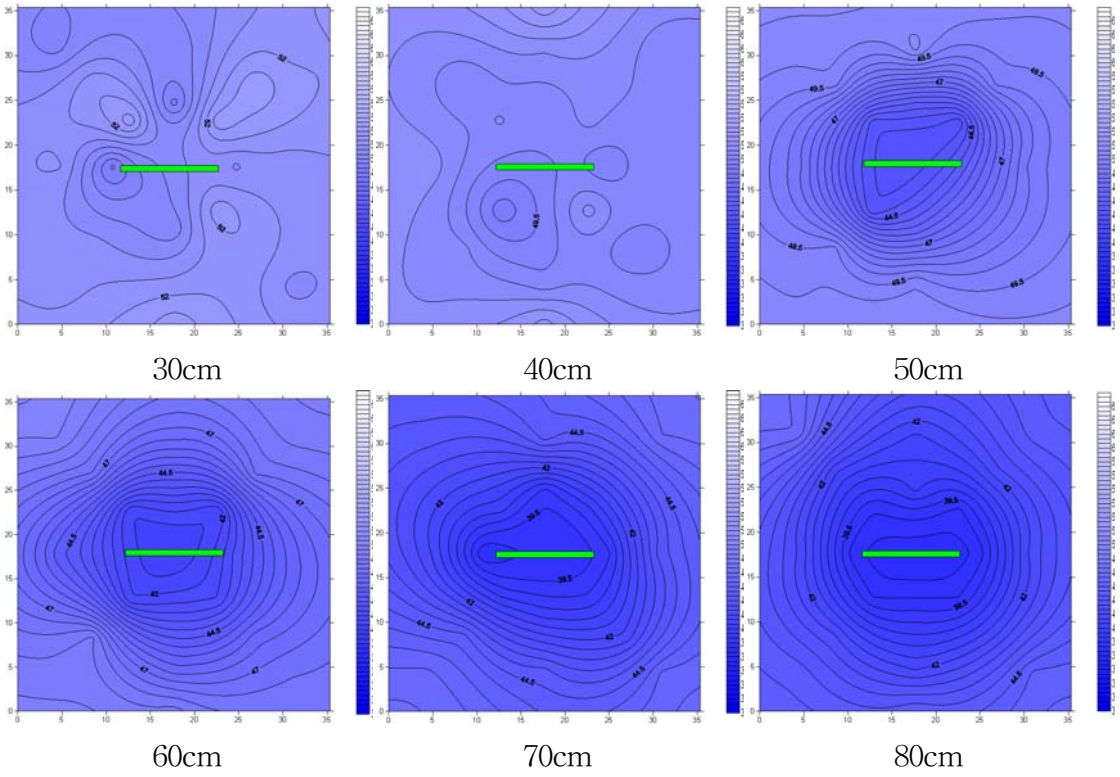


Fig. 3.5.1.130 Case 2의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

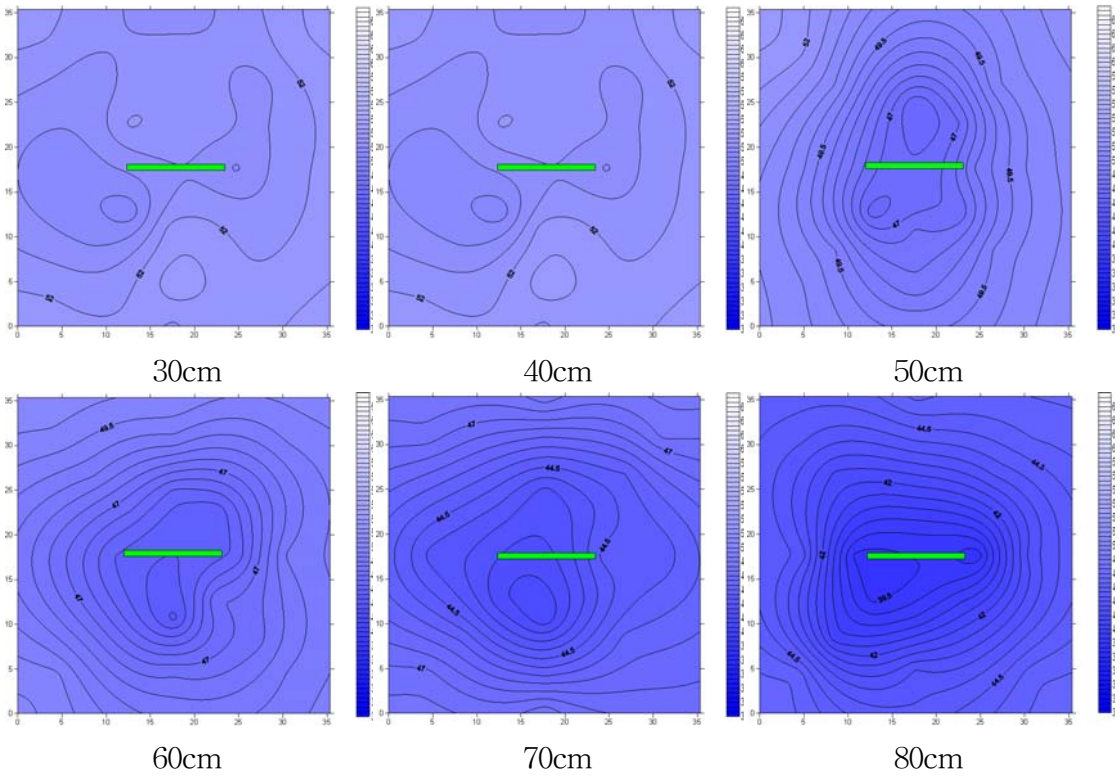


Fig. 3.5.1.131 Case 3의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

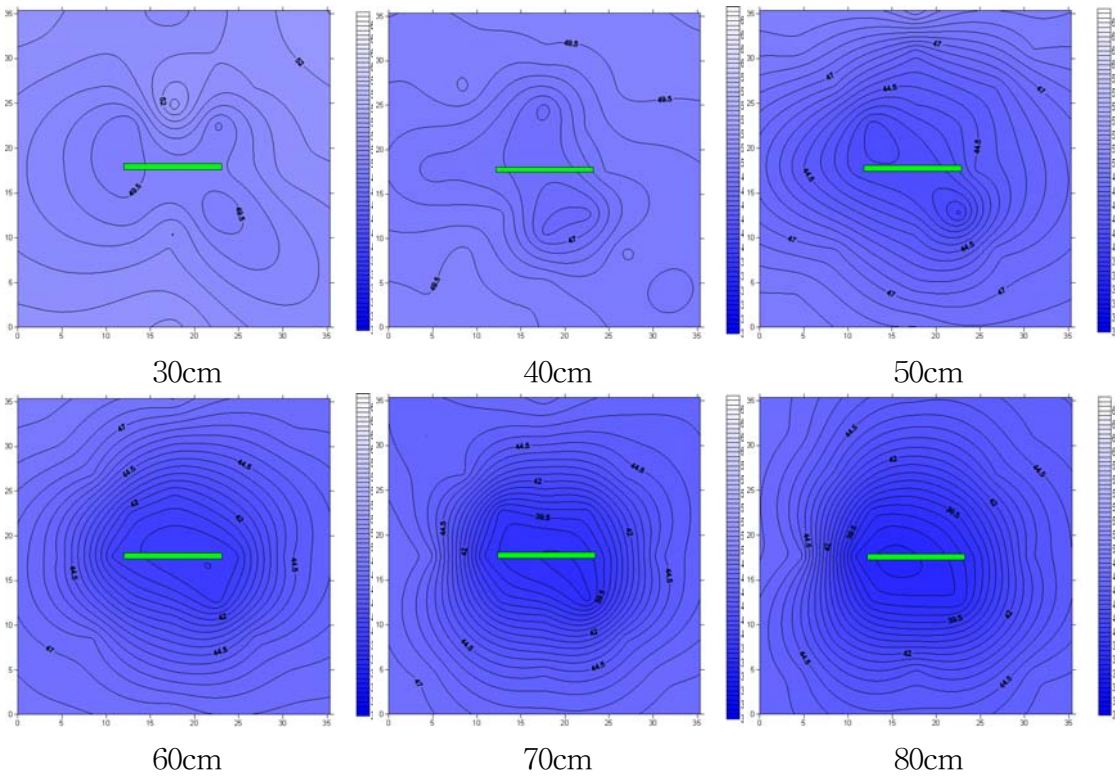


Fig. 3.5.1.132 Case 4의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

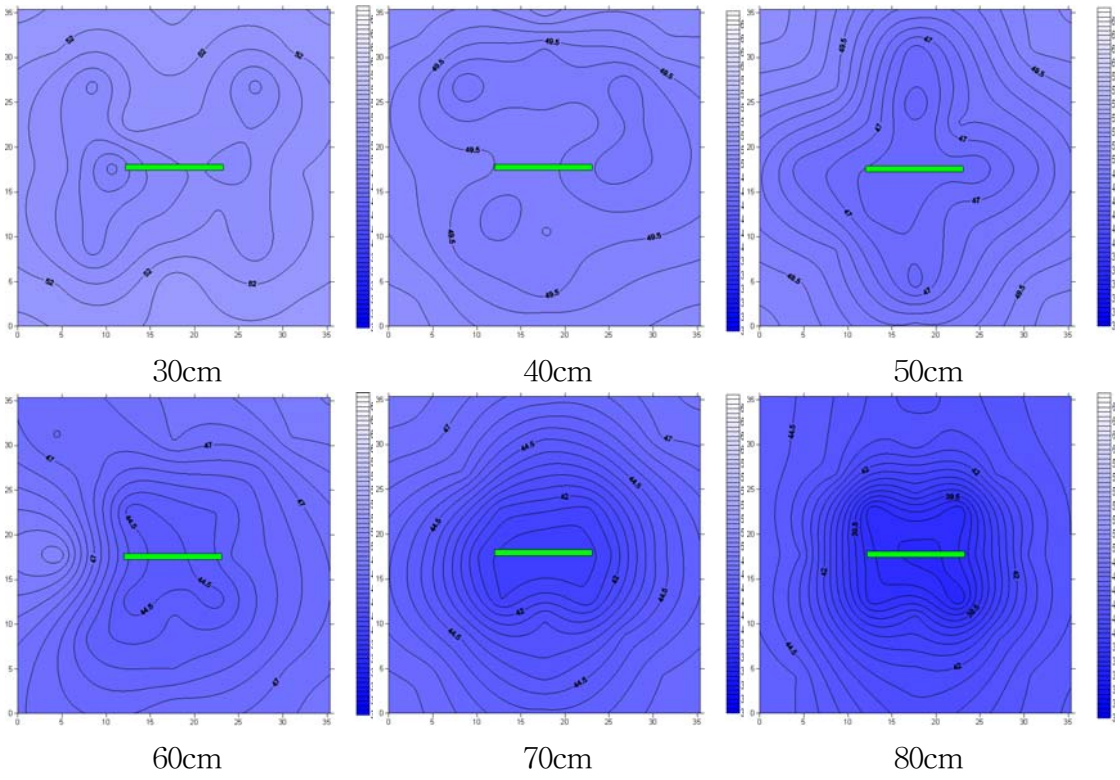


Fig. 3.5.1.133 Case 5의 일정 심도에서의 수평방향 함수비 변화

(4) 단계진공압에 따른 영향분석

Fig. 3.5.1.134에는 각 단계진공압 조건에서 시료 내 발생된 전단강도 분포를 가해준 진공압으로 정규화 시켜서 나타낸 그림이다. 모든 조건에서 배수재로부터의 거리가 멀어질수록 강도비는 선형적으로 감소하는 경향이 나타났다.

Case 4를 제외하면, 거의 비슷한 강도증가 현상을 나타내었으며, 진공압 -0.8kg/cm^{2}으로의 도달기간이 가장 짧았던 Case 1에서의 효율이 가장 좋게 나타났다. 따라서 이러한 결과를 통해 실제 지반에 Suction Drain 기법을 적용하는 경우, 단계 진공압 조건 적용 시 낮은 진공압을 적용하는 기간을 적절하게 유지시켜 진공압 상승의 완충기간을 둔 후 최대 진공압으로 설정해야 할 것으로 판단된다.

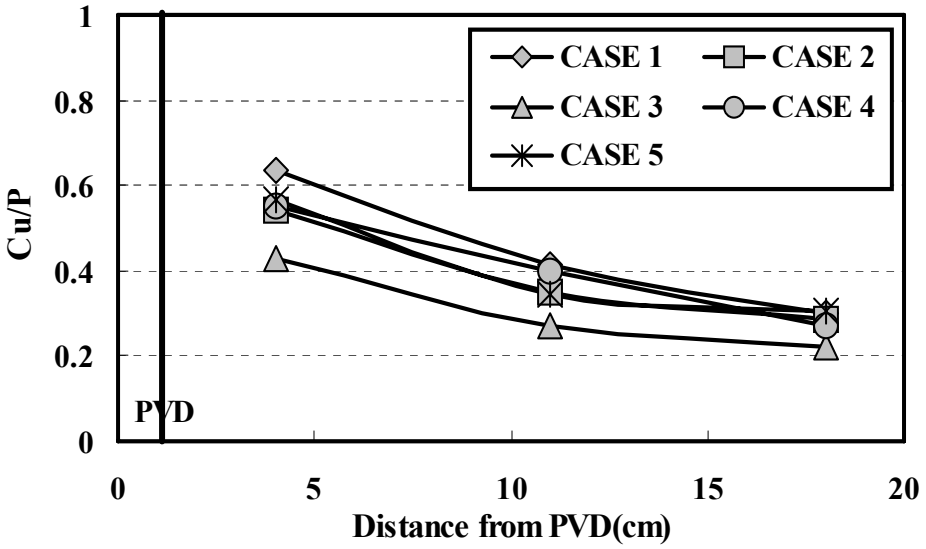


Fig. 3.5.1.134 단계진공압에 따라 발생된 시료 내 전단강도 증가비

(5) 최적의 단계진공압 결정

단계진공압 조건 실험에서 각 단계 진공압 조건이 지반의 압밀도에 미치는 영향을 비교하기 위해 모든 실험 조건에서 Moden(1967)의 시산법을 통해 산정된 압밀도를 각 진공압(-0.1, -0.2, -0.4, -0.6, -0.8kg/cm^2) 단계 별로 분리하여 나타내면, Table 3.5.1.4와 같다. 이 때, 각 진공압 단계 이전에 가해진 진공압이 이후 단계에

미치는 영향은 무시하였으며, 각 단계에 나타난 압밀도만을 나타내었다.

Table 3.5.1.4 진공압 단계에 따른 압밀도(Test 6～11)

단계 별	진공압 단계에 따른 압밀도(%)				
적용기간(Days)	-0.1	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8
0	0	0	0	0	0
1	6.53	3.74	7.4	3.81	-
2	9.48	8.82	13.25	-	-
3	-	-	-	10.22	-
4	11.98	-	17.79	10.72	-
6	-	-	20.1	-	13.60
8	-	-	-	-	23.52
10	-	-	-	-	32.75
12	-	-	-	-	40.94

이러한 압밀도 분포를 Fig. 3.5.1.135, 3.5.1.136에 나타내었다. 그 결과 각 단계진공압 조건 별로 발생되는 압밀도의 분포가 대체적으로 시간의 경과에 따라 증가되는 경향이 나타났으며, 일정기간이 지나면, 비교적 큰 변화가 발생되는 변곡점이 발생하여 일정한 값으로 수렴되는 경향을 나타냈다.

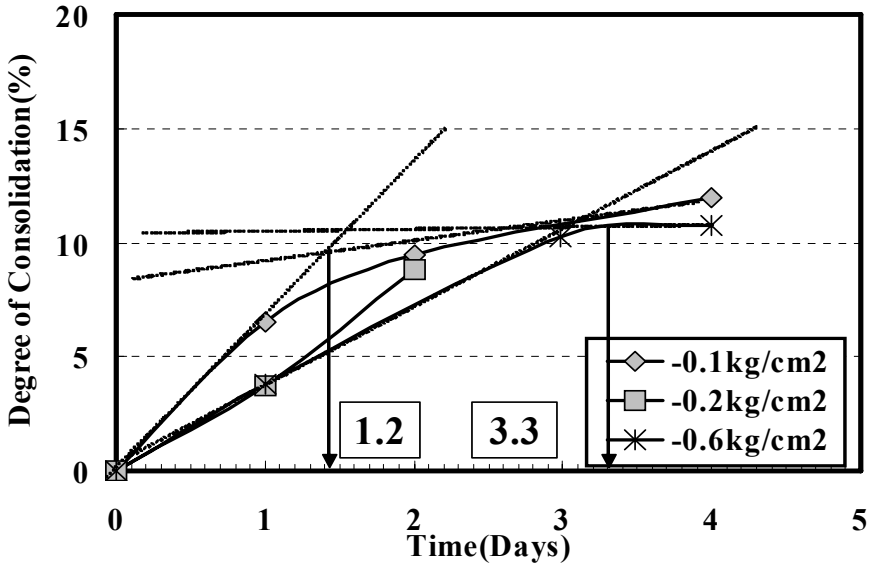


Fig. 3.5.1.135 각 단계진공압에 따른 압밀도와 적용기간의 관계(-0.1, -0.2, -0.6kg/cm^{2}의 단계진공압이 적용된 경우)

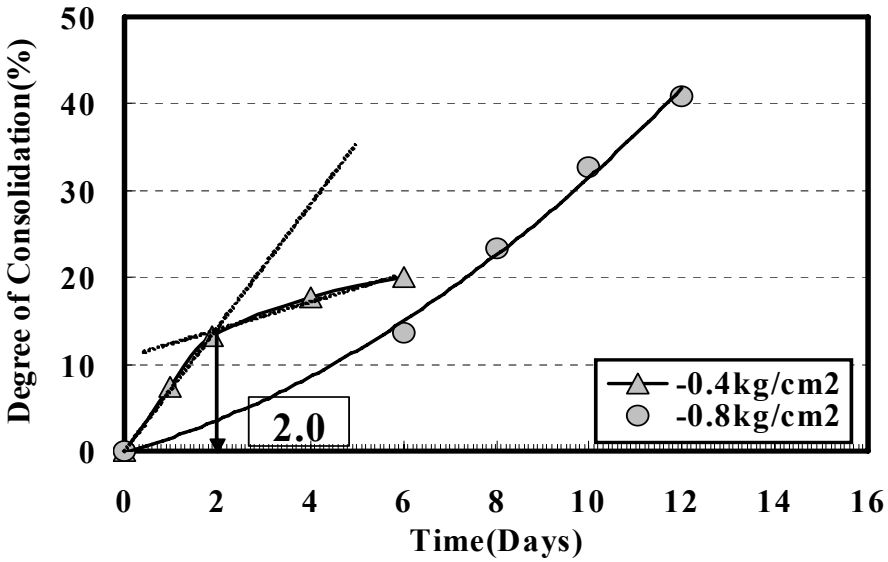


Fig. 3.5.1.136 각 단계진공압에 따른 압밀도와 적용기간의 관계(-0.4, -0.8kg/cm^{2}의 단계진공압이 적용된 경우)

따라서 실내 실험을 통해 각 단계진공압 단계에서의 최적 적용기간을 산정하기 위해서, 진공압 적용기간에 따라 각 단계진공압 조건에서 발생되는 압밀도의 변화가 감소되어 수렴되는 부분의 연장선과 적용초기에 발생된 압밀도 곡선의 연장선이 만나는 점을 압밀효과를 극대화 시킬 수 있는 적용기간으로 가정했을 때, 각 진공압 단계 별로 발생되는 적용 기간을 Fig. 3.5.1.135, 3.5.1.136을 통해 -0.1kg/cm^2→1.2일, -0.4kg/cm^2→2일, -0.6kg/cm^2→3.5일로 산정할 수 있다. -0.8kg/cm^{2}의 경우 적용기간의 증가에 따라 거의 직선적으로 압밀도가 증가하는 경향이 나타났기 때문에 최적의 기간을 산정할 수 없었지만, 최종 진공압적용 기간이 증가할수록 배수효율이 증가하는 경향을 띠었기 때문에(Fig. 3.5.1.136), 본 실험조건에서 가장 적용기간이 길었던 8일을 적용하였다. 그러나 실제적으로는 본 실험의 종료 시점에서의 압밀도가 약 60%였던 점을 감안할 때, 최종 단계인 -0.8kg/cm^{2}의 경우, 1차 압밀 종료 시점까지를 적용 기간으로 적용해야 할 것으로 판단된다. -0.2kg/cm^{2}를 적용한 경우에서는 적용기간에 따른 압밀도 조건이 두 지점밖에는 없었기 때문에 최적의 적용기간을 제시할 수 없었다. 따라서 -0.2g/cm^2 조건의 경우, 최대 적용기간인 2일로 최적기간을 가정하였다.

Fig. 3.5.1.135, 3.5.1.136에서 산정된 적용기간 결과를 통해 각 단계진공압 별 최적의 적용기간을 산정해보면, Fig. 3.5.1.137, 3.5.1.138과 같이 나타낼 수 있다. 그림에 나타난 바와 같이 최종 단계진공압까지의 도달기간이 본 연구에서 제안된 단계 진공압의 조건의 왼쪽에 존재하는 Case 1, 2, 4의 효율이 비교적 크게 나타났다. 이는 최종 제안된 단계 진공압 조건 보다 최종 진공압(-0.8kg/cm^2)에 도달하기 위한 기간이 비교적 짧았던 경우에 해당되는데, 이러한 결과를 통해 실제 지반에 석션드레인 공법을 적용하는데 있어서 본 연구에서 제안된 단계 진공압 조건을 기준으로 단계진공압 기간을 설정할 수 있다.

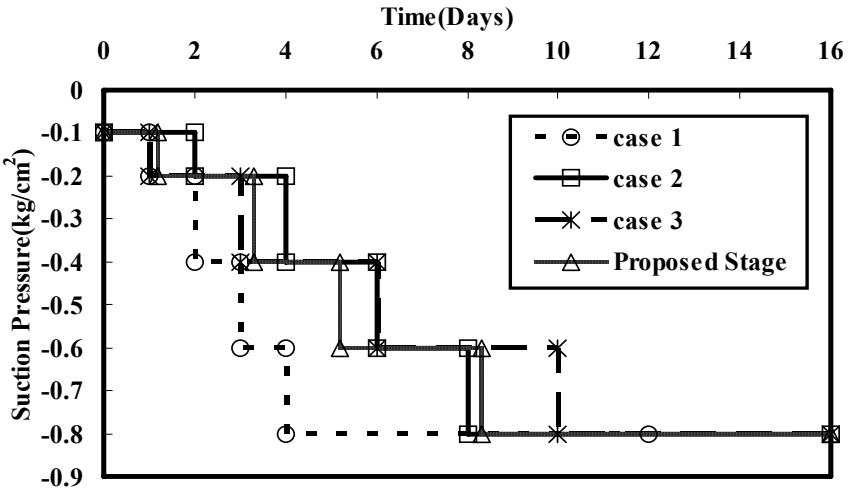


Fig 3.5.1.137 본 연구에서 제안된 단계 진공압 조건 및 각 실험에서 수행된 단계 진공압의 비교(Case 1, 2, 3의 경우)

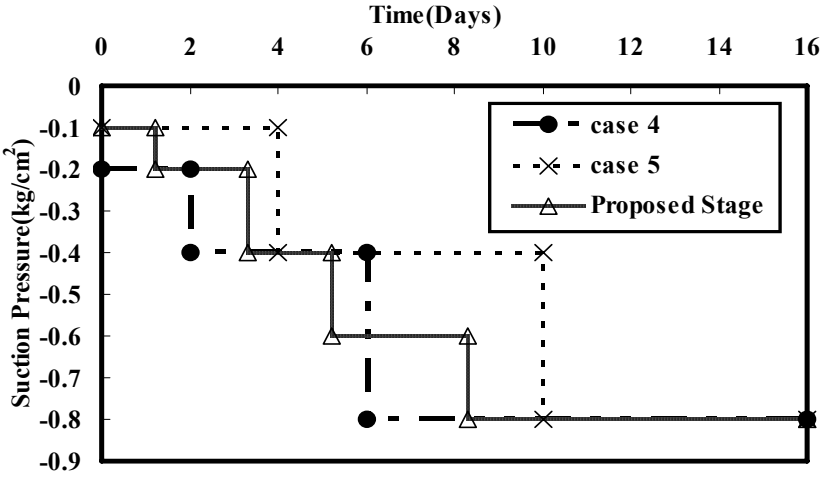


Fig 3.5.1.138 본 연구에서 제안된 단계 진공압 조건 및 각 실험에서 수행된 단계 진공압의 비교(Case 4, 5의 경우)

제안된 진공압 조건을 바탕으로 최적의 적용기간 별 압밀도 분포를 나타내 보면, Fig. 3.5.1.139와 같다. 실내 실험을 통해 예측된 단계진공압 조건으로 바탕으로 현장지반에 적용할 경우에는 전체 침하량을 지반의 물성치 및 현장조건으로 예측한 후, 실제 발생되는 침하량 추이를 바탕으로, 각 단계별로 발생되는 압밀도가 0.1kg/cm^2 → 약 10%, 0.2kg/cm^2 → 약 22%, 0.4kg/cm^2 → 약 35%, 0.6kg/cm^2 → 약 45%, 0.8kg/cm^2 → 목표압밀도 도달 시까지 이를 때 진공압을 조절해주면, 최적의 조건에 도달할 수 있을 것으로 판단된다.

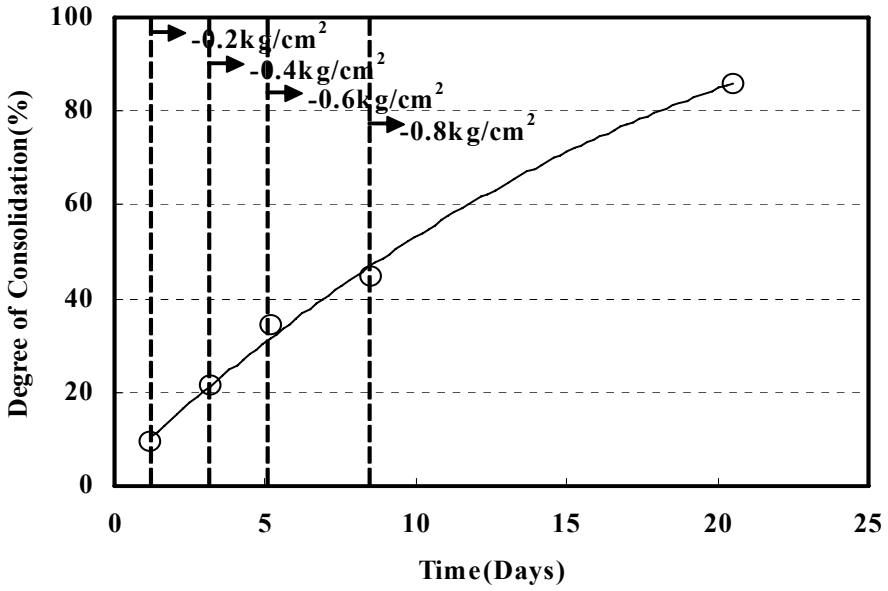


Fig. 3.5.1.139 본 연구에서 제안된 단계진공압 조건으로 예측된 시간에 따른 압밀도 분포

바. 경화영역(Hardening Zone) 예측

Fig. 3.5.1.140에는 Test 1-3에서 처리기간 20일의 경우 시간 경과에 따라 측정된 침하량을 바탕으로 Monden(1963)의 시산법으로 최종침하량을 추정하여 압밀도를 나타내었고, Fig. 3.5.1.141에는 Test 1-4에서 각 적용 진공압에 따른 Monden(1963)의 시산법으로 추정하여 압밀도를 나타내었다. 그 결과 실험 종료 시점까지 Test 1-3의 처리기간 20일의 경우와 Test 1-4에서 각 압밀도는 84, 86, 90, 92, 93%로 모두 80% 이상의 압밀도가 나타났다. 적용기간이 Test 1-4보다 길었던, Test 1-3

의 처리기간 20일의 경우 발생압밀도가 오히려 작게 나타났는데, 이는 Test 1-3의 경우, 모든 조건에서 낮은 진공압에서 높은 진공압으로 단계적(-0.2kg/cm^2→-0.4kg/cm^2→-0.6kg/cm^2→-0.8kg/cm^2) 으로 증가시켜 시료에 적용하였기 때문에 발생된 결과이다. 차정일(2003)은 지반 내 큰 진공압을 한 번에 가하면, 배수재 주위에 발생되는 경화구간의 급속한 발생을 촉진시킴으로써 배수 효율이 떨어질 수 있음을 제시한 바 있다.

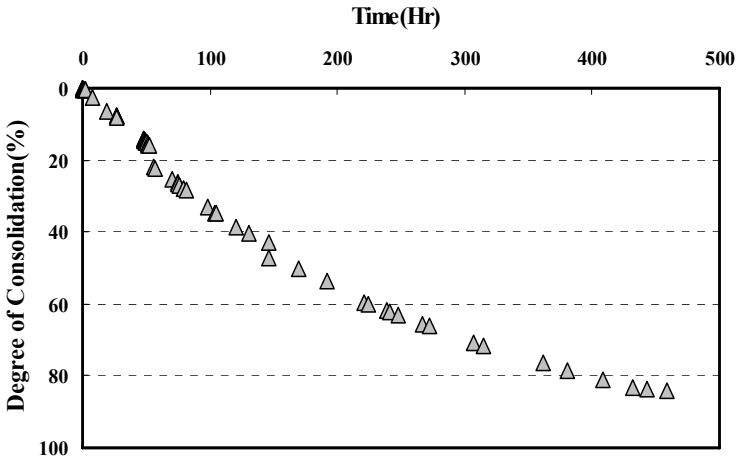


Fig. 3.5.1.140 시간경과에 따른 압밀도 분포(Test 1-3, 적용기간 20days)

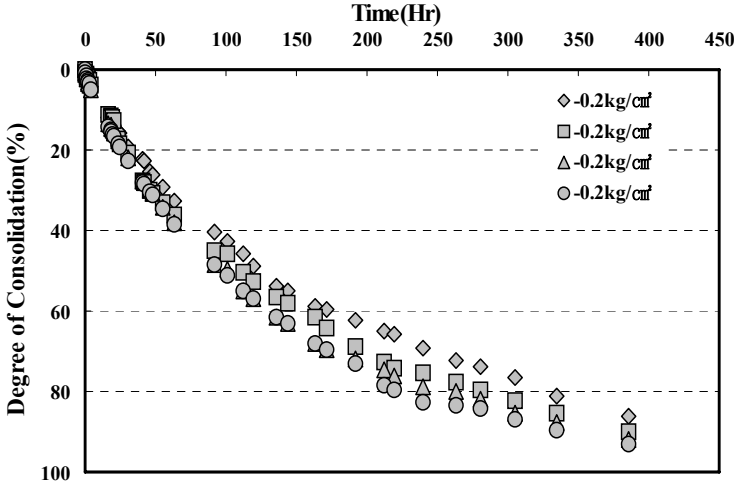


Fig. 3.5.1.141 시간경과에 따른 압밀도 분포(Test 1-4)

Fig. 3.5.1.142에는 Test 1-3에서 발생되는 함수비의 차이를 배수재로부터 정규화된 거리(측정지점의 길이/전체개량길이)에 따라 나타내었고, Fig. 3.5.1.143에는 Test 1-4에서 발생되는 함수비 분포를 나타내었다. Test 1-3의 경우, 개량기간의 증가와 함께 함수비는 감소하는 경향이 나타났으며, 이러한 경향은 배수재에서 가까운 부분에서 더 뚜렷하게 나타났지만, 배수재로 부터의 거리가 멀어질수록 개량기간에 따른 함수비 감소효율은 저하되었다. 또한 처리기간 12일 이후에는 함수비 저하효율에 큰 차이를 나타내지 않았으며, 16일과 20일 적용효율은 거의 같은 경향을 나타내었다. Test 1-4의 경우, 적용 진공압의 증가와 함께 함수비가 감소하는 경향이 나타났다. 그러나 배수재로부터의 거리가 멀어질수록 감소경향은 작아졌으며, 배수재로부터 이격된 거리 7cm지점에서는 적용 진공압 -0.6kg/cm^{2}과 -0.8kg/cm^{2}의 결과가 거의 같게 나타났다. 따라서 이러한 결과를 통해 배수재로부터 이격된 거리 4~7cm 이내에 Hardening Zone이 존재함을 간접적으로 확인할 수 있다.

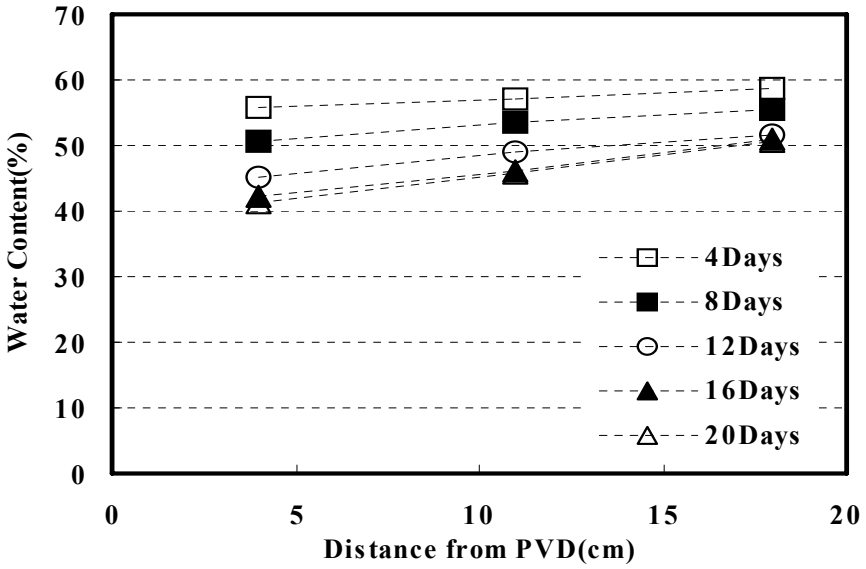


Fig. 3.5.1.142 시료 내 평균 함수비 분포(Test 1-3)

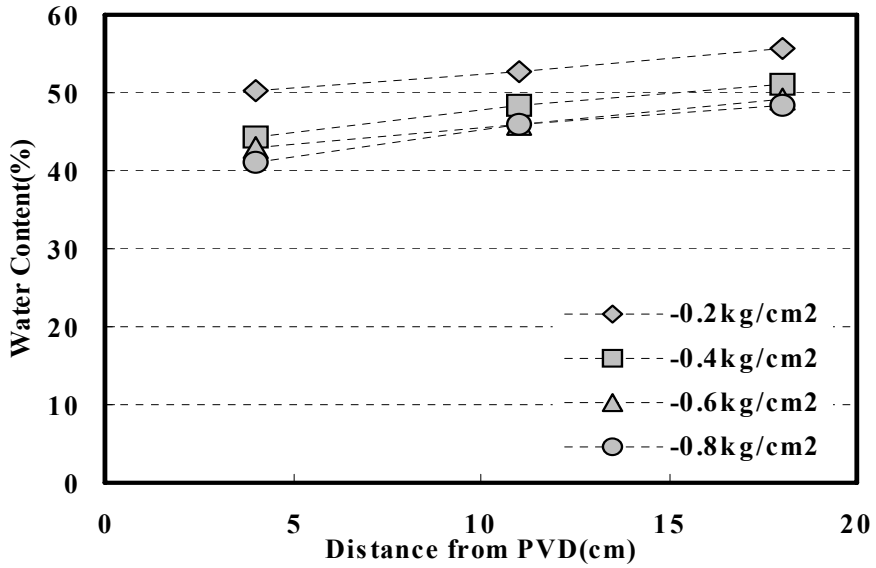


Fig. 3.5.1.143 시료 내 평균 함수비 분포(Test 1-4)

Fig. 3.5.1.144와 3.5.1.145에는 개량기간(Test 1-3)과 적용진공압(Test 1-4)에 따른 시료 내 위치별(Zone A, Zone B, Zone C) 강도 분포를 나타내었다. Test 1-3의 경우, 그림에 나타난 바와 같이 개량기간이 증가할수록 강도는 점차적으로 증가하였는데, 이러한 강도 증가현상은 개량기간이 증가할수록 그 차이가 점차 줄어들었고, 적용기간을 12일 이상으로 적용한 경우 발생된 강도 차이는 비슷한 양상을 보였다. 이때, Monden(1963)의 시산법을 통해 예측된 최종 침하량을 통해 역산된 압밀도는 약 65% 정도에 도달되었음을 알 수 있었다. Test 1-4의 경우, 적용 진공압이 커질수록 개량도는 점차적으로 증가하였는데, Zone A의 경우, 선형적인 증가양상을 보인 반면, Zone B와 Zone C의 경우, 증가경향이 매우 작게 나타났다. 따라서 시간과 진공압의 차이에 따라 발생되는 강도경향을 통해 지반 내 발생하는 Hardening Zone의 존재를 파악할 수 있었다.

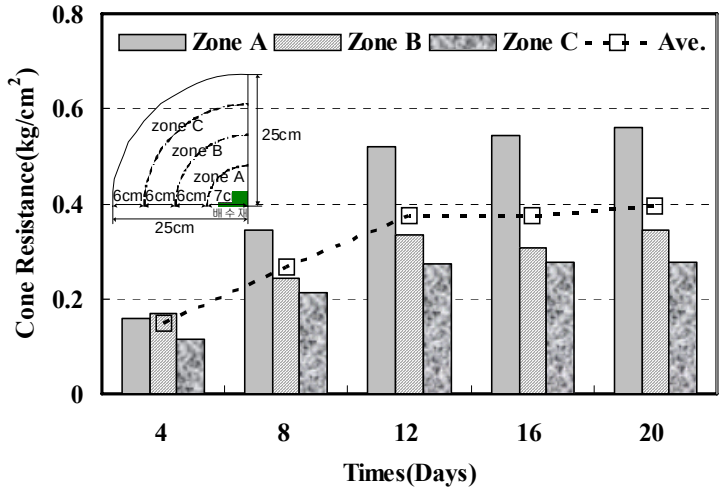


Fig. 3.5.1.144 적용기간에 따른 강도 분포(Test 1-3)

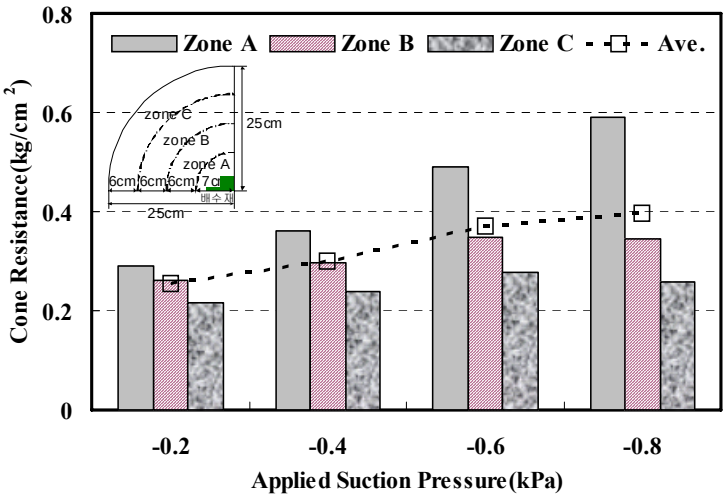


Fig. 3.5.1.145 적용진공압에 따른 강도 분포(Test 1-4)

Fig. 3.5.1.146와 3.5.1.147에는 각 실험별 배수재로부터의 거리에 따라 발생된 강도분포를 나타내었다. Test 1-3의 경우, 처리기간이 증가함에 따라 강도는 커지는 경향이 나타났으나, 배수재로부터의 멀어질수록 강도는 감소하여 일정한 값으로 수렴하는 경향이 나타났다. Test 1-4의 경우, 적용진공압이 커질수록 강도가 커지는 경향이 나타났으나, 배수재로부터의 거리가 멀어질수록 강도는 감소하였다. 또한 배수재로부터 7cm 이격된 거

리에서는 적용진공압의 크기에 따른 영향이 비교적 작게 나타났다.

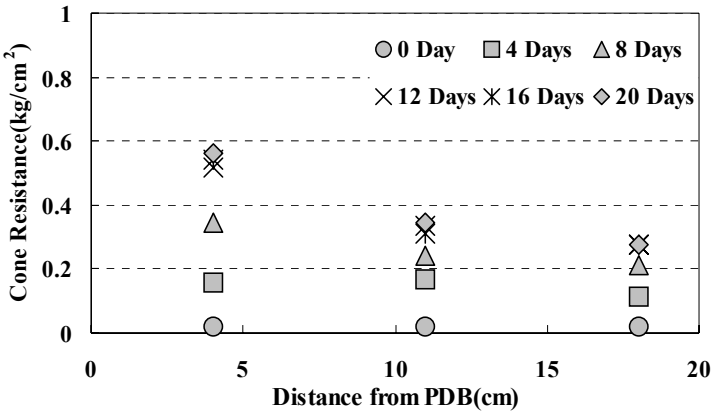


Fig. 3.5.1.146 배수재로 부터의 거리에 따른 강도 분포(Test 1-3)

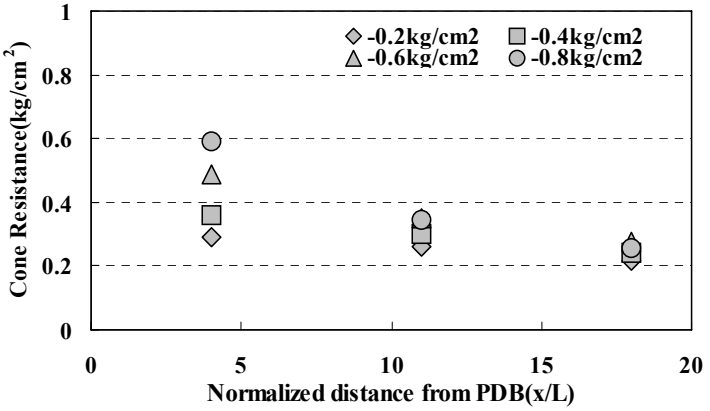


Fig. 3.5.1.147 배수재로 부터의 거리에 따른 강도 분포(Test 1-4)

Lambe & Whitman(1969)은 투수계수와 $e^3/(1+e)$는 선형관계임을 실험적으로 제시한 바 있다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$k_2 = k_1 \frac{e_2^3/(1+e_2)}{e_1^3/(1+e_1)} \qquad (3.5.1.2)$$

이를 다시 정리하면,

$$k_2/k_1 = \frac{e_2^3/(1+e_2)}{e_1^3/(1+e_1)} \qquad (3.5.1.3)$$

따라서 식 (3.5.1.3)를 통해, 초기간극비와 간극비의 변화를 알면, 초기 투수계수에 따른 투수계수의 변화율을 알 수 있다.

시료 내 가해지는 진공압은 배수재 인접부위의 투수성을 감소시키고 이로 인해 Hardening Zone이 발생되게 된다. 따라서 배수재 인접부근의 투수계수의 변화 양상을 파악할 수 있다면, Hardening Zone의 범위를 예측할 수 있다. 실험 결과를 통해 개량 전후의 함수의 함수비가 액성한계(44%) 부근에서 형성됨을 감안해볼 때, 개량 후, Column 내 시료를 완전포화체(포화도 S=1)로 가정하면, 다음과 같은 식이 성립된다.

$$e = Gs \times W \qquad (3.5.1.4)$$

여기서, e : 간극비, Gs : 비중, W : 함수비

따라서 Test 1-3, Test 1-4의 함수비 측정결과를 통해 각 실험 조건에서의 지점 별 간극비를 추정할 수 있으며, 추정된 간극비를 통해 투수계수의 저하양상을 역산할 수 있다.

Fig. 3.5.1.148와 3.5.1.149는 처리기간(Test 1-3)과 적용진공압(Test 1-4) 크기에 따른 각 지점 별 정규화된 거리와 $(e^3/(1+e))/(e_0^3/(1+e_0))$의 관계(Fig 3.5.1.149)와 처리기간의 변화에 따른 $(e^3/(1+e))/(e_0^3/(1+e_0))$의 관계(Fig. 3.5.1.148)를 나타내었다. Test 1-3의 경우, $(e^3/(1+e))/(e_0^3/(1+e_0))$는 식 (3.5.1.3)에 따라 k(개량후 투수계수)/k_0(개량전 투수계수)로 산정될 수 있으며, 이를 통해 처리기간에 따른 투수계수 감소비를 산정해보면, 약 0.3~0.8의 범위를 형성하는 것을 파악할 수 있다. 또한, 개량 기간이 증가함에 따라 투수계수 감소비는 점차적으로 감소하여 일정한 값으로 수렴하는 경향이 나타났으며, 개량기간 16일 이후에는 일정한 값으로 수렴되는 경향이 나타났다. 따라서 이를 통해 실내 실험 시 발생되는 Hardening Zone은 처리기간 16일 이후에 발생되어 인접 지반의 개량도를 감소시킴을 파악할 수 있었다.

Test 1-4의 경우, 적용된 진공압이 저압(-0.2kg/cm^2 -0.4kg/cm^2)일 때에는 투수계수 저하 경향이 비교적 작게 나타난 반면, 적용된 진공압이 고압(-0.6kg/cm^2, -0.8kg/cm^2)이면, 비교적 큰 투수계수 저하 경향을 나타내었다. 또한 배수재로부터 이격된 거리 7cm 이후

에서는 -0.6kg/cm^{2}과 -0.8kg/cm^{2}의 거리에 따른 투수계수 저하 경향은 거의 동일한 거동을 나타내었다. 따라서 이를 통해, -0.6kg/cm^2 이상의 진공압을 가해준 실험 조건에서는 배수재로부터 이격된 거리 4~7cm 이내에서 Hardening Zone이 발생되었음을 확인할 수 있었다.

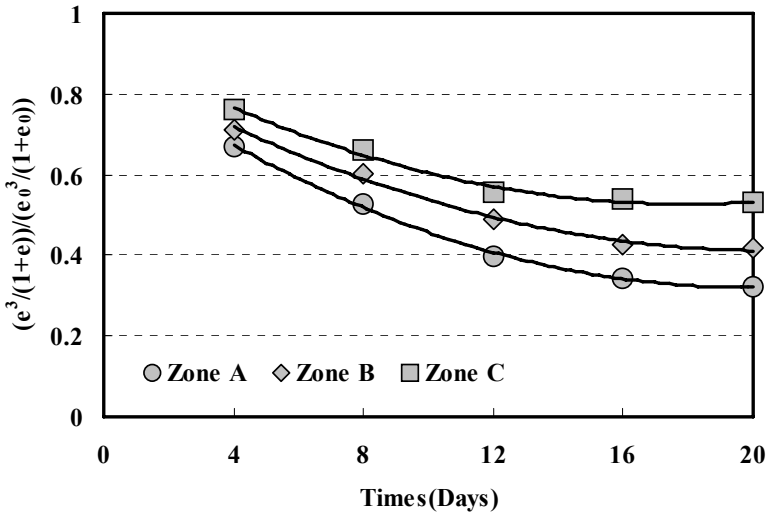


Fig. 3.5.1.148 (e3/(1+e))/(e03/(1+e0))와 개량기간의 관계(Test 1-3)

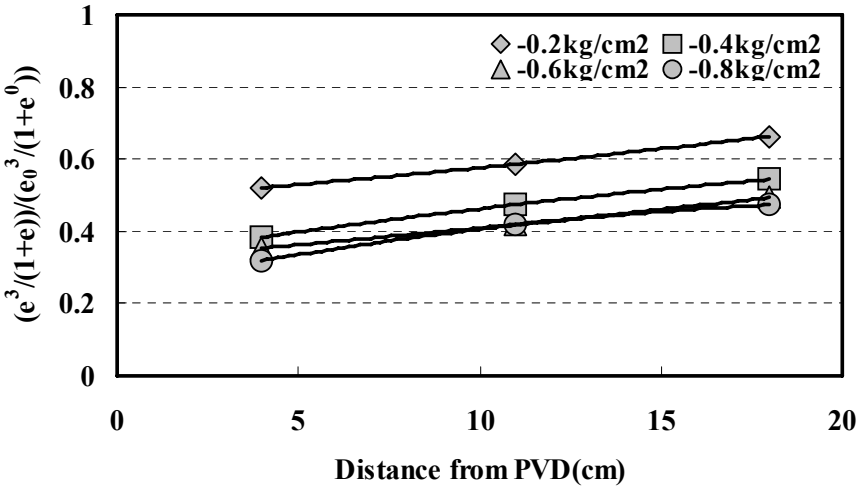


Fig. 3.5.1.149 (e3/(1+e))/(e03/(1+e0))와 적용진공압의 관계(Test 1-4)

연약지반의 압밀을 촉진하기 위하여, 배수재에 진공압을 가하게 되면 시간 경과와 함께

배수재 부근에서 함수비가 감소되고 투수계수가 저하되는 지역이 발생되게 된다 (Hardening Zone). 실제 발생되는 Hardening Zone의 범위를 수치적으로 유추하기 위해, Hansbo(1981)가 제안한 방사형 압밀이론을 이용하여 스미어존의 항을 Hardening Zone에 의한 영향으로 고려하여 식을 변형시켜 실제 실험결과(Test 1-3, 적용기간 20days)와 비교하였다. 이를 위해 Hansbo(1981)의 방사형 압밀이론식을 다음에 제시하는 식 (3.5.1.5)~(3.5.1.9)와 같이 변형하여 나타내었다.

Madhav et. al(1993)은 현장에서 멘드렐 관입후 비교란 시료를 채취하여 압밀실험을 실시한 결과를 이용하여 스미어존의 투수계수(k_s)는 원지반의 투수계수보다 최대 약 1/5까지 저하됨을 제시하였다. 따라서 본 연구에 적용되는 투수계수 감소비(k_h/k_H)는 최대 5이하로 설정하였다.

$$U_h(z, T_h) = 1 - \exp(\frac{-8T_h}{F}) \tag{3.5.1.5}$$

$$F = F(n) + F(H) + F(w) \tag{3.5.1.6}$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2-1} ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2} \tag{3.5.1.7}$$

(배수재 간격에 관한 영향계수)

$$F(H) = \left(\frac{k_h}{k_H} - 1\right) \ln \frac{d_s}{d_w} \tag{3.5.1.8}$$

(Hardening Zone 효과에 의한 영향계수)

$$F(w) = \pi z(2H - z)\frac{k_h}{q_w} \tag{3.5.1.9}$$

(배수저항에 의한 영향계수)

여기서, k_h/k_H : Hardening Zone에 의한 투수계수의 감소비, n : 간격비 (=d_e/d_w), d_s : 드레인 타설간격, d_w : 드레인의 직경, d_e : 배수재의 등가직경, q_w : 배수재의 통수능 (= $\pi r_w^2 k_w$), d_s/d_w : 스미어 존의 반경비 (= S), H : 배수재의 길이 (일면배수 즉, 배수가 배수재의 한쪽에서 발생할 경우. 단, 양면배수인 경우 H는 1/2값을 사용)

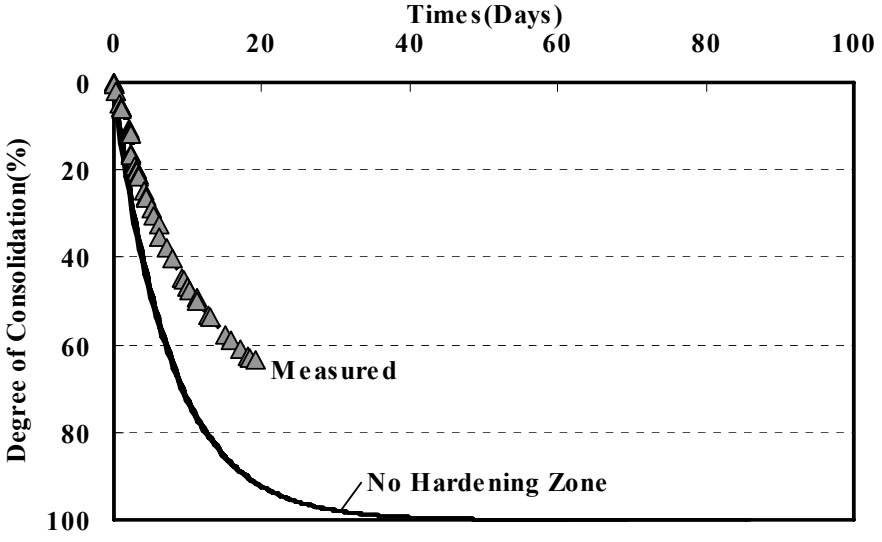


Fig. 3.5.1.150 Hardening Zone을 고려하지 않은 경우 발생된 압밀도 분포

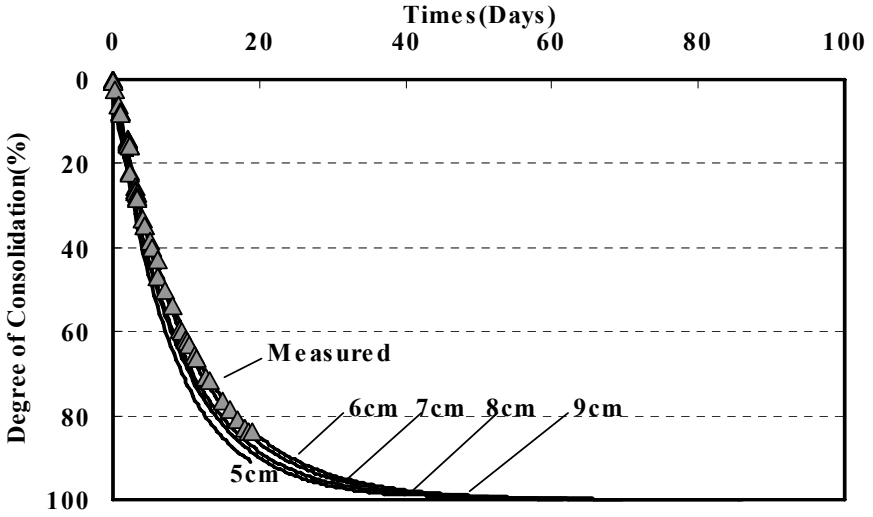


Fig. 3.5.1.151 kh/kH=2인 경우의 Hardening Zone 발생 구간에 따른 압밀도 분포

Hardening Zone의 영향을 고려하기 위해, 식(3.5.1.5)~(3.5.1.9)를 이용하여 배수저항과 배수재 간격을 일반적인 값으로 가정하고 Hardening Zone으로 인해 발생되는 투수계수 감소비(원지반의 수평투수계수/진공으로 인해 저하된 투수계수=kh/kH)를 조절하여 발생된 압밀도와 실측된 결과를 Hardening Zone 발생범위(최대 25cm)에 따라 비교/분석하였다(Fig. 3.5.1.150~3.5.1.153). 그 결과 Hardening Zone의 투수계수 감소비를 2이하로 설정한 결과를 제외하면, Hardening Zone의 범위 6~8cm 정도로 고려한 결과에서 실측치

에 부합되는 압밀도 경향이 나타났다. 실험을 통해 도출된 강도 및 투수계수저하비 결과를 고려해 볼 때, 배수재로부터 4~11cm 정도 이격된 구간에서 Hardening Zone이 발생됨을 간접적으로 파악할 수 있었으므로, 최종 압밀도 분포를 고려하면 Hardening Zone의 투수계수 감소비를 3으로 설정한 경우에서 실측치에 가장 부합되는 결과가 나타났다(Fig. 3.5.1.152). Fig. 3.5.1.152의 결과를 통해 진공압 적용 시 발생되는 투수계수 저하구간은 배수재로부터 약 7cm 이내로 정의 될 수 있다, 또한 실험결과를 통해 배수재로부터 이격된 거리 4~7cm에서 역산된 투수계수 저하비가 약 0.3~0.6 범위 내에서(Fig. 3.5.1.148) 발현되었으며 이를 kh/kH 비로 환산해보면, 약 1.67~3.53의 범위로 나타내어지므로, 본 연구에서 Hardening Zone으로 예측된 투수계수 저하비(kh/kH=3)는 실험결과와도 일치되는 결과가 나타났다.

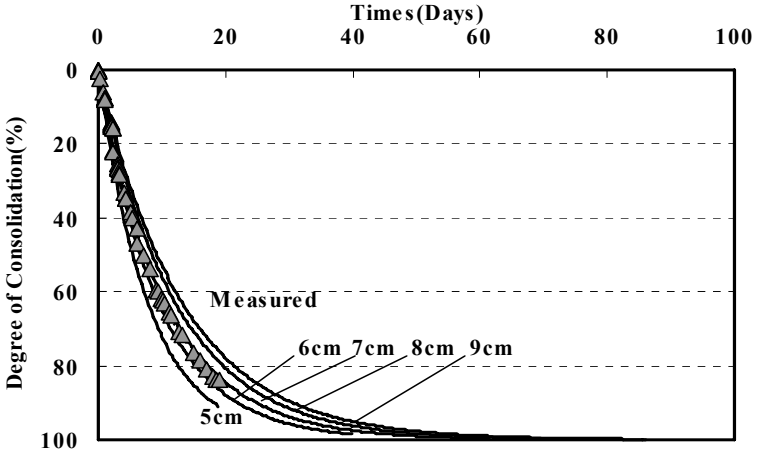


Fig. 3.5.1.152 kh/kH=3인 경우의 Hardening Zone 발생 구간에 따른 압밀도 분포

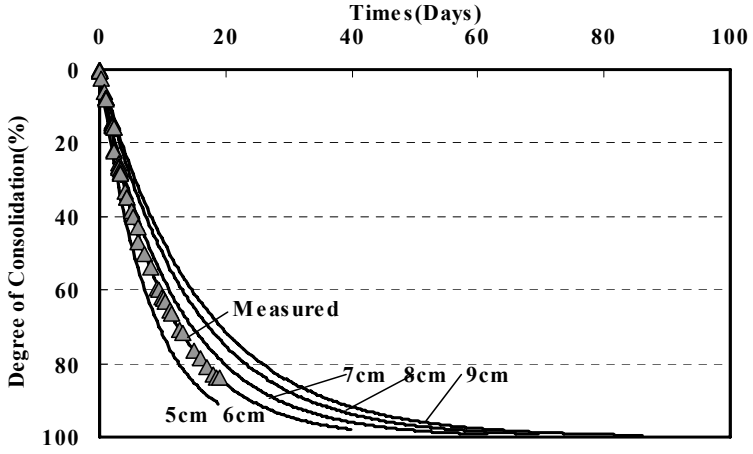


Fig. 3.5.1.153 kh/kH=4인 경우의 Hardening Zone 발생 구간에 따른 압밀도 분포

2. 배수재 간격 결정 실험

가. 침하량 분포

Fig. 3.5.2.1에는 대형토조실험기를 이용하여 배수재간 타설간격을 22, 30cm로 다르게 했을 경우 발생되는 침하량의 차이를 나타내었다. 적용기간이 증가함에 따라, 침하량은 증가하는 경향을 나타내었으며, 처리기간 약 9일 이후에는 일정한 값으로 수렴하였다.

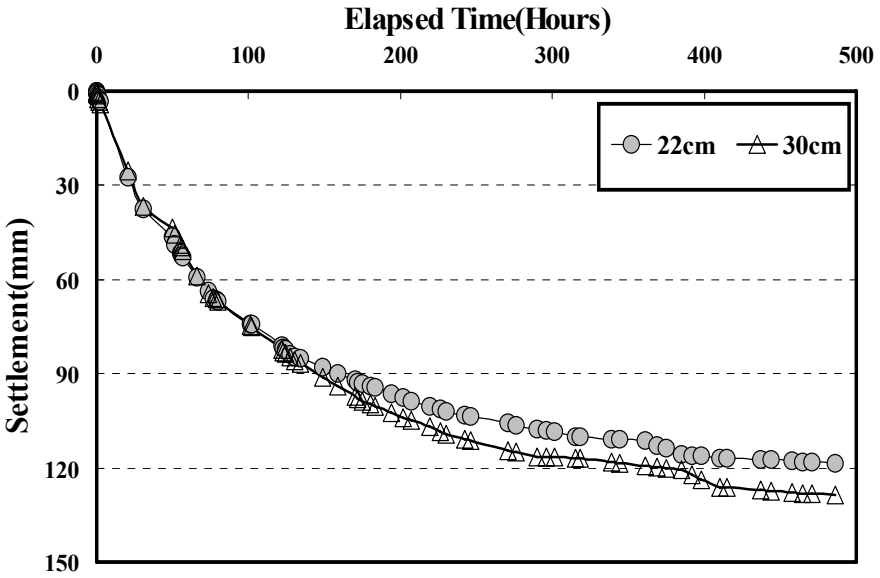


Fig. 3.5.2.1 배수재 배치 간격에 따른 침하양상

Fig. 3.5.2.2는 장기침하예측기법인 쌍곡선법을 이용하여 타설 간격 22cm와 30cm에 대한 각각의 최종침하량을 예측한 후, 각 침하량 별 압밀도를 계산한 결과를 나타내었다. 그 결과 22cm와 30cm의 타설 간격에서 모두 약 90% 정도의 압밀도가 나타났다. 본 실험 결과, 20일의 개량기간 동안 22cm와 30cm에서 모두 약 90%의 압밀도에 도달하였기 때문에 시공상의 경제성 및 용이성 등을 감안하여 배수재의 설치간격은 22cm보다 30cm가 더 효율적이라 판단된다. 그러나 현장의 조건 등을 감안한 추가 간격 실험이 필요하며, 추가 실험을 통해 이를 규명할 필요가 있다.

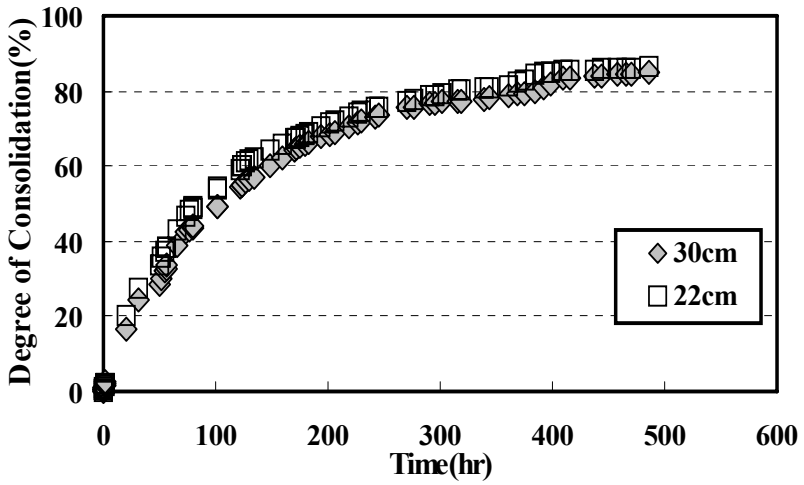


Fig. 3.5.2.2 쌍곡선법에 의한 타설간격에 따른 각 침하량 별 압밀도

나. 타설 간격에 따른 강도특성

Fig. 3.5.2.3과 3.5.2.4는 타설 간격에 따른 심도별 콘저항치를 나타낸 것이다. 22cm의 타설 간격의 경우, 30cm의 타설 간격보다 배수재와 배수재의 사이가 가깝기 때문에 zone A의 개량정도가 크게 나타났다. zone B와 zone C에서는 개량영역이 상대적으로 넓은 30cm의 배치 간격이 더 많이 개량되었으나 그 차이는 크지 않았다.

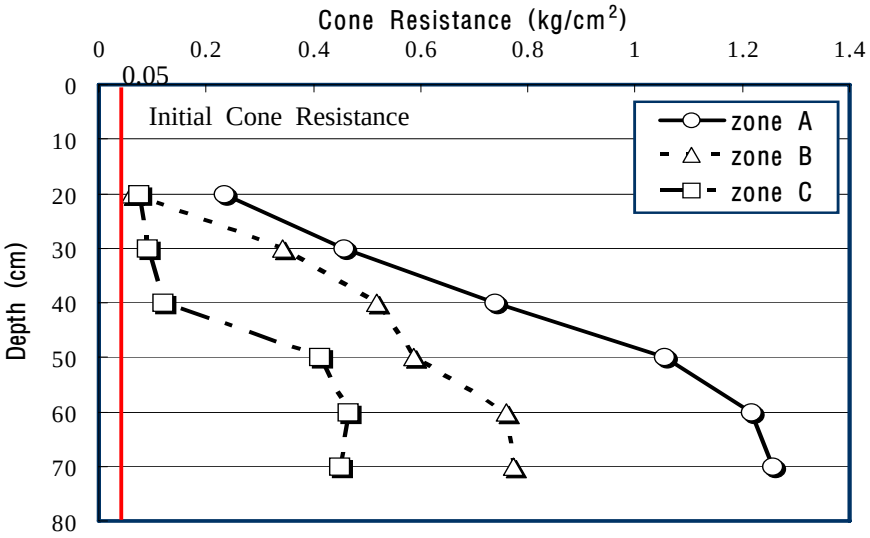


Fig. 3.5.2.3 타설간격 22cm일 때의 심도에 따른 콘저항치 변화

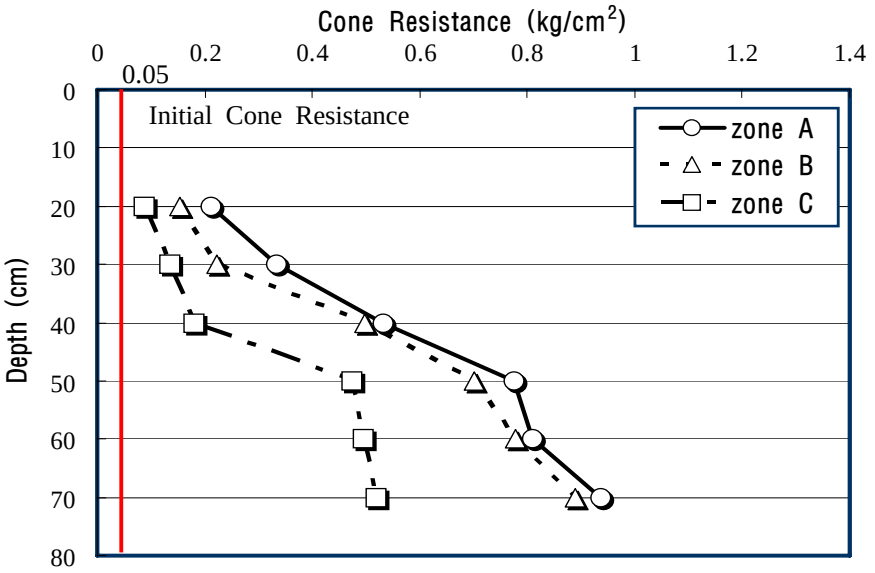


Fig. 3.5.2.4 타설간격 30cm일 때의 심도에 따른 콘저항치 변화

Fig. 3.5.2.5 ~ 3.5.2.12는 각 타설 간격에 따른 심도별 수평방향의 콘저항치를 나타내었다. 강도 증가 경향은 심도가 깊어지고 배수재에 근접할수록 증가하였다. 특히, 두 배수재 사이의 강도 개량효과가 크게 나타났고, 이러한 경향은 22cm와 30cm의 타설 간격에서 모두에서 유사하게 나타났다. 타설 간격에 따른 차이를 비교해보면, 타설간격 22cm의 경우 개량이 된 범위가 비교적 좁게 형성된 반면, 배수재와 배수재 사이의 강도증가는 상대적으로 크게 나타났다. 타설 간격 30cm의 경우, 개량범위가 전 개량영역에 고르게 형성되었고, 타설 간격 22cm일 때와 비교하여 배수재 주변 영역과 벽면측의 콘관입치 차이가 적게 나타났다.

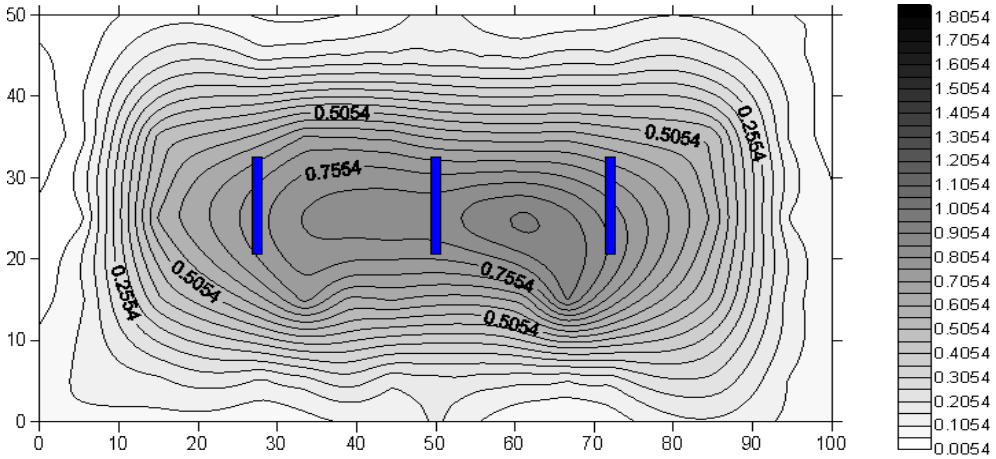


Fig. 3.5.2.5 타설간격 22cm의 40cm 지점에서의 수평방향 콘저항치 변화

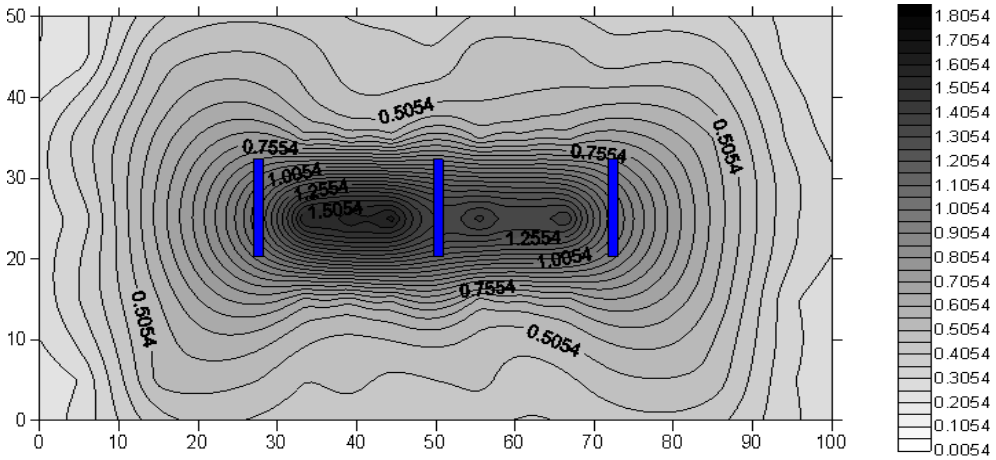


Fig. 3.5.2.6 타설간격 22cm의 50cm 지점에서의 수평방향 콘저항치 변화

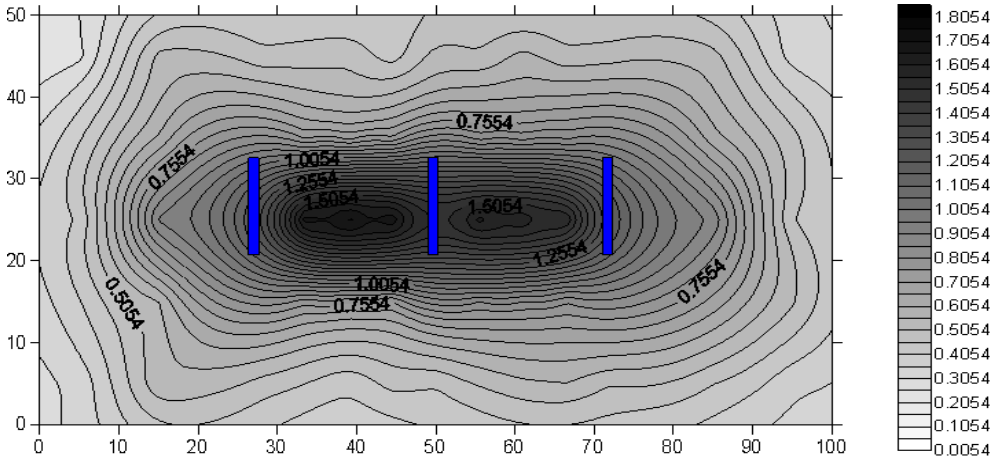


Fig. 3.5.2.7 타설간격 22cm의 60cm 지점에서의 수평방향 콘저항치 변화

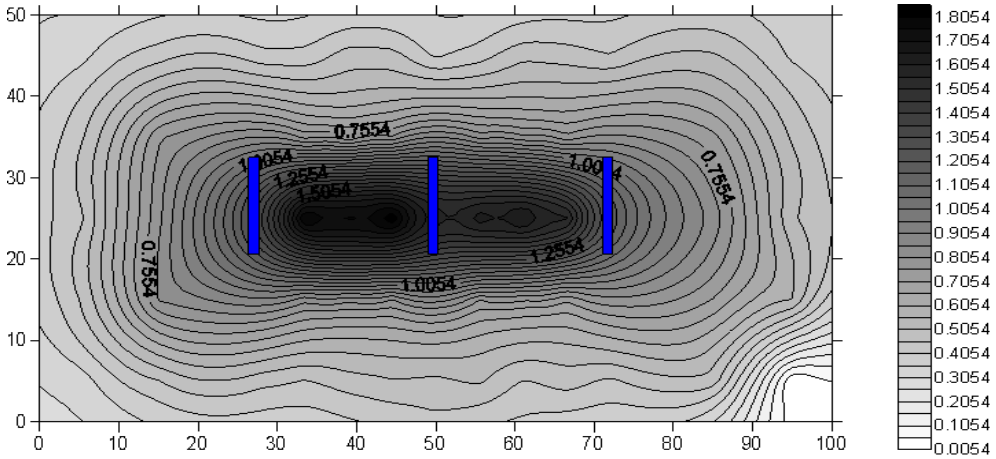


Fig. 3.5.2.8 타설간격 22cm의 70cm 지점에서의 수평방향 콘저항치 변화

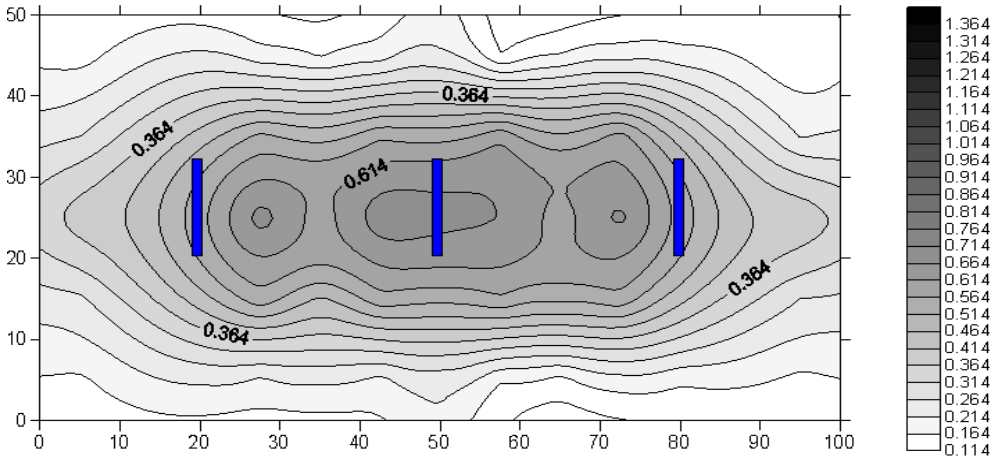


Fig. 3.5.2.9 타설간격 30cm의 40cm 지점에서의 수평방향 콘저항치 변화

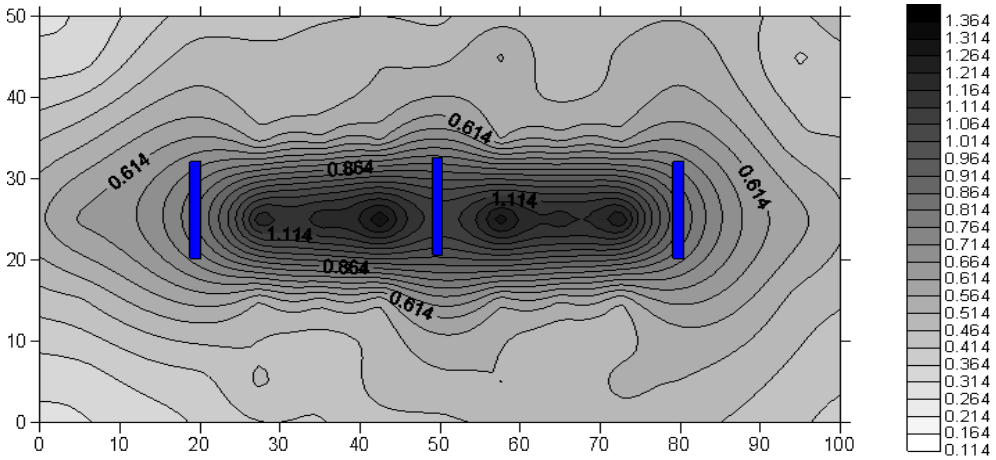


Fig. 3.5.2.10 타설간격 30cm의 50cm 지점에서의 수평방향 콘저항치 변화

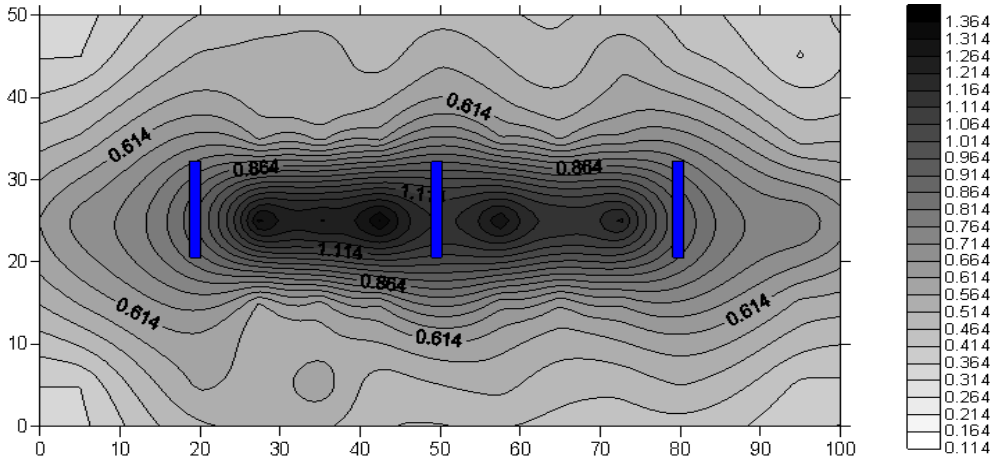


Fig. 3.5.2.11 타설간격 30cm의 60cm 지점에서의 수평방향 콘저항치 변화

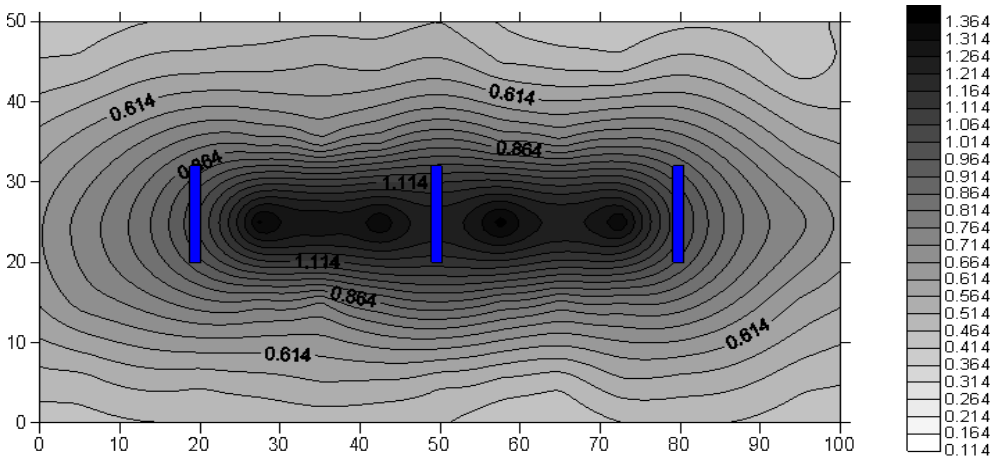


Fig. 3.5.2.12 타설간격 30cm의 70cm 지점에서의 수평방향 콘저항치 변화

다. 타설 간격에 따른 함수비 변화특성

Fig. 3.5.2.13과 3.5.2.14는 타설 간격에 따른 심도별 함수비 변화특성을 나타낸 것이다. 콘관입저항치와 마찬가지로 2가지 경우에서 모두 zone A의 함수비 감소가 크게 나타났고, zone B와 zone C에서의 함수비 변화 경향은 거의 비슷하게 나타났다.

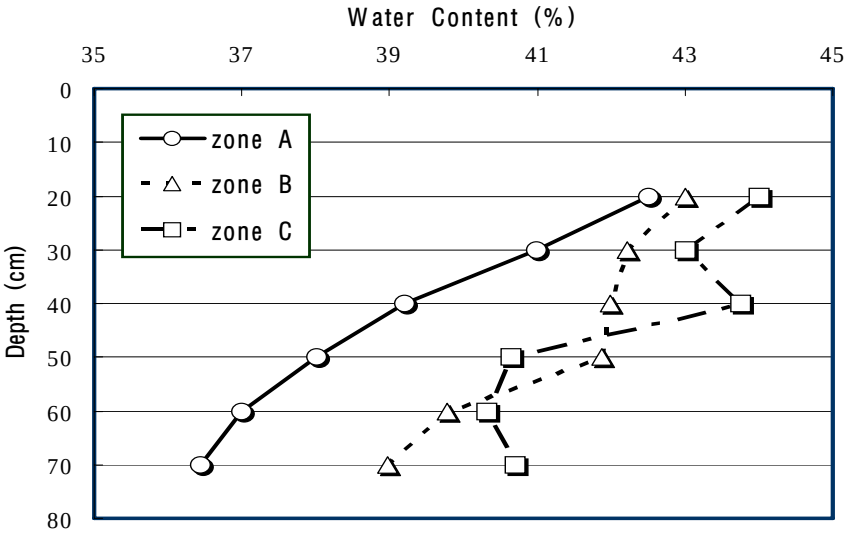


Fig. 3.5.2.13 타설간격 22cm일 때의 심도에 따른 함수비 변화

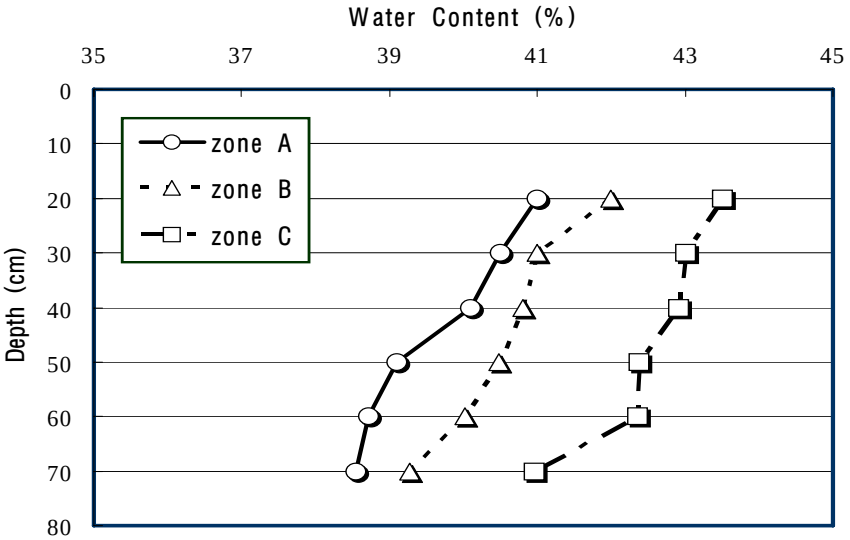


Fig. 3.5.2.14 타설간격 30cm일 때의 심도에 따른 함수비 변화

Fig. 3.5.2.15 ~ 3.5.2.22는 각 타설간격에 따른 심도별 수평방향의 함수비 변화를 나타내었다. 함수비 감소 현상 역시 심도가 깊어지고 배수재에 근접할수록 감소량이 크게 나타났다. 타설간격에 따른 차이를 비교해보면, 타설간격 22cm의 경우, 함수비가 감소한 범위가 비교적 좁게 형성된 반면, 타설간격 30cm의 경우, 함수비 감소 현상이 전 개량영역에 고르게 나타났다.

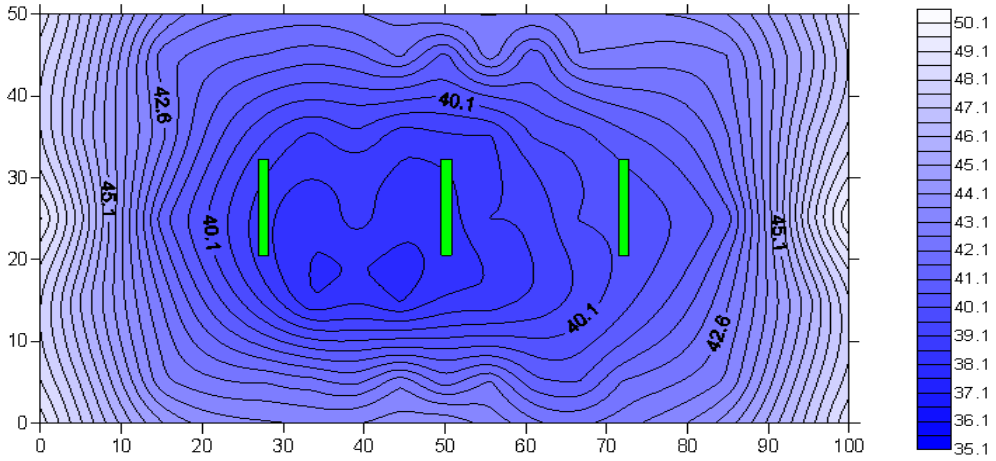


Fig. 3.5.2.15 타설간격 22cm의 40cm 지점에서의 수평방향 함수비 변화

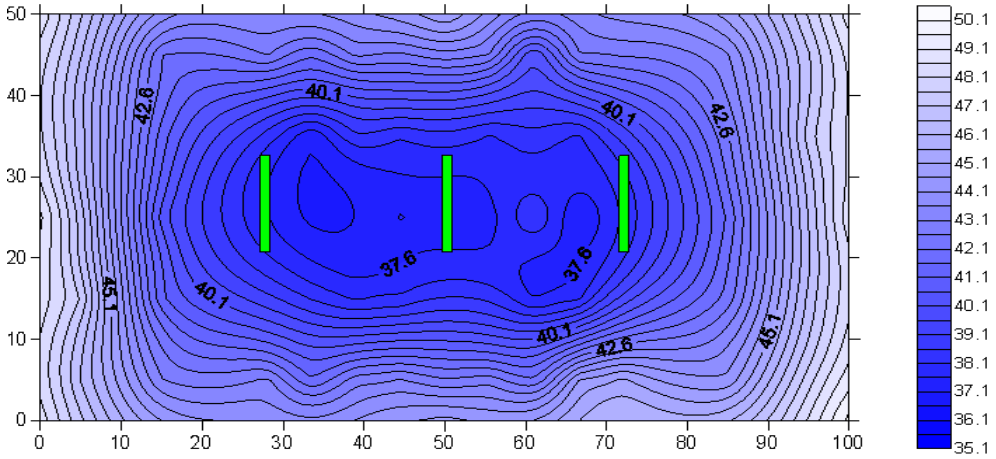


Fig. 3.5.2.16 타설간격 22cm의 50cm 지점에서의 수평방향 함수비 변화

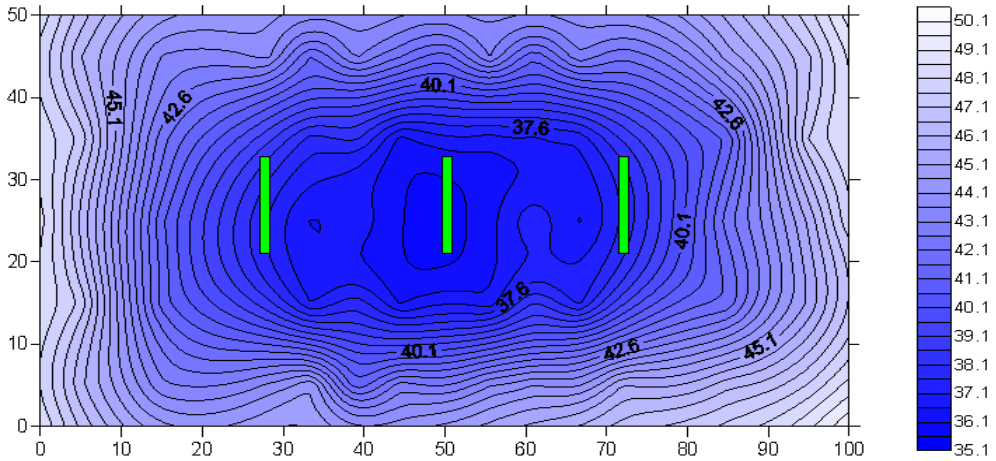


Fig. 3.5.2.17 타설간격 22cm의 60cm 지점에서의 수평방향 함수비 변화

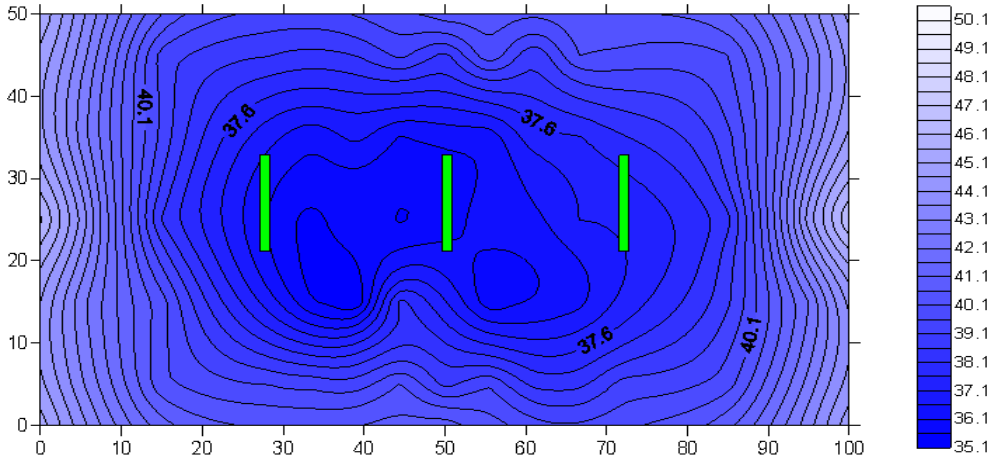


Fig. 3.5.2.18 타설간격 22cm의 70cm 지점에서의 수평방향 함수비 변화

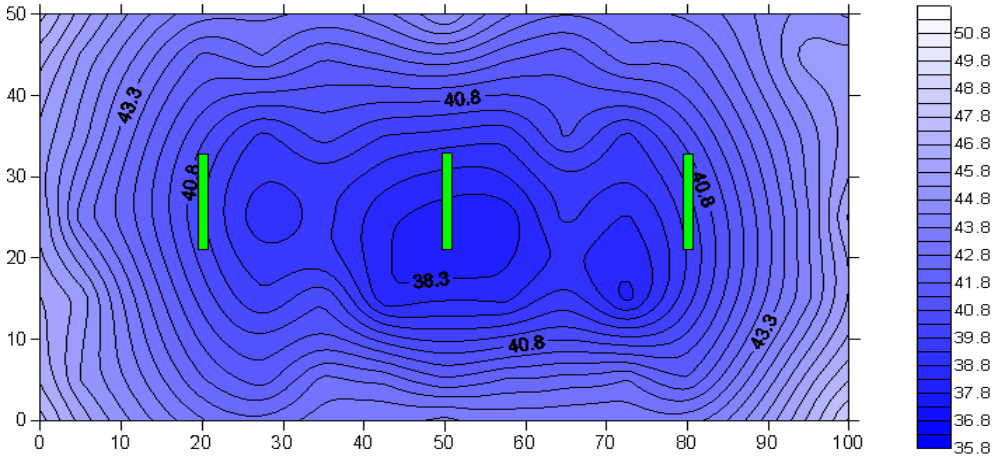


Fig. 3.5.2.19 타설간격 30cm의 40cm 지점에서의 수평방향 함수비 변화

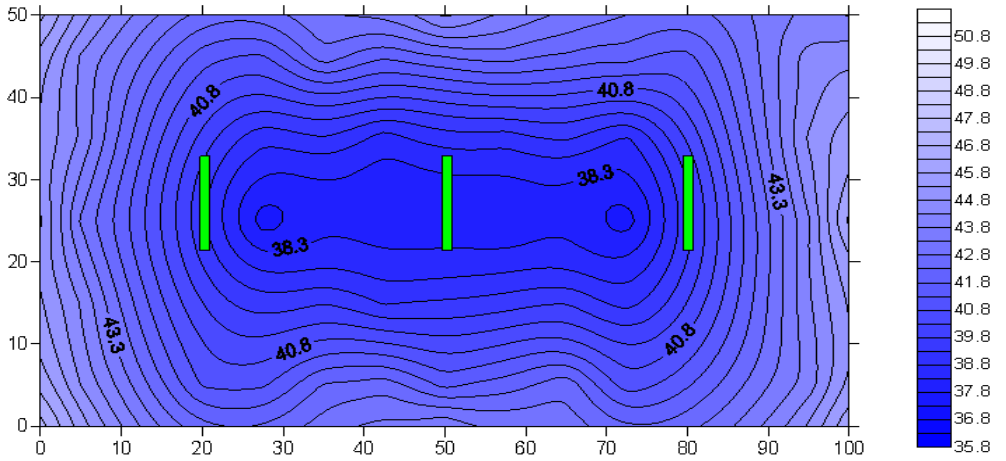


Fig. 3.5.2.20 타설간격 30cm의 50cm 지점에서의 수평방향 함수비 변화

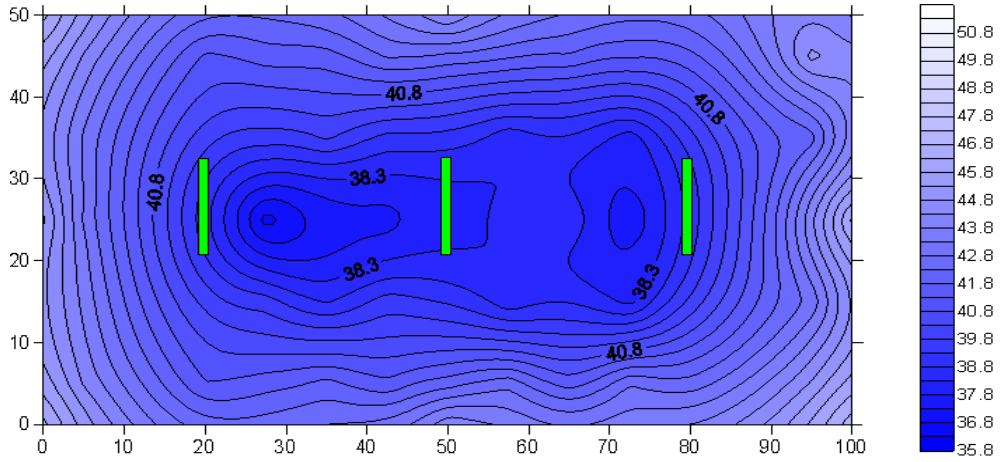


Fig. 3.5.2.21 타설간격 30cm의 60cm 지점에서의 수평방향 함수비 변화

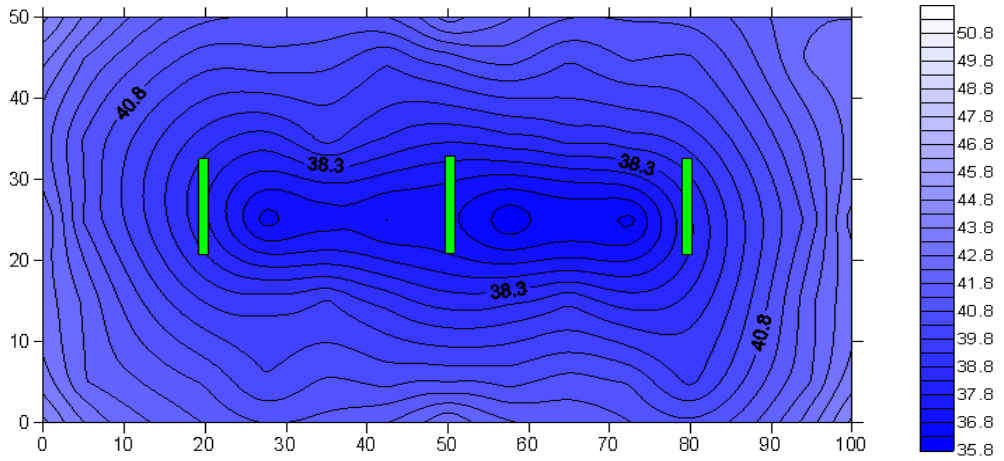


Fig. 3.5.2.22 타설간격 30cm의 70cm 지점에서의 수평방향 함수비 변화

라. 타설 간격에 따른 영향 분석

Fig. 3.5.2.23에는 각 조건(간격 22cm, 30cm) 별 정규화된 거리에 따른 강도변화를 나타내었다. 그 결과 두 조건에서의 강도차이가 많이 발생하지 않았다. 그러나 현장 조건 등에 따라 개량영역에서 배수재 배치 간격으로 인한 영향이 발생될 것으로 판단된다.

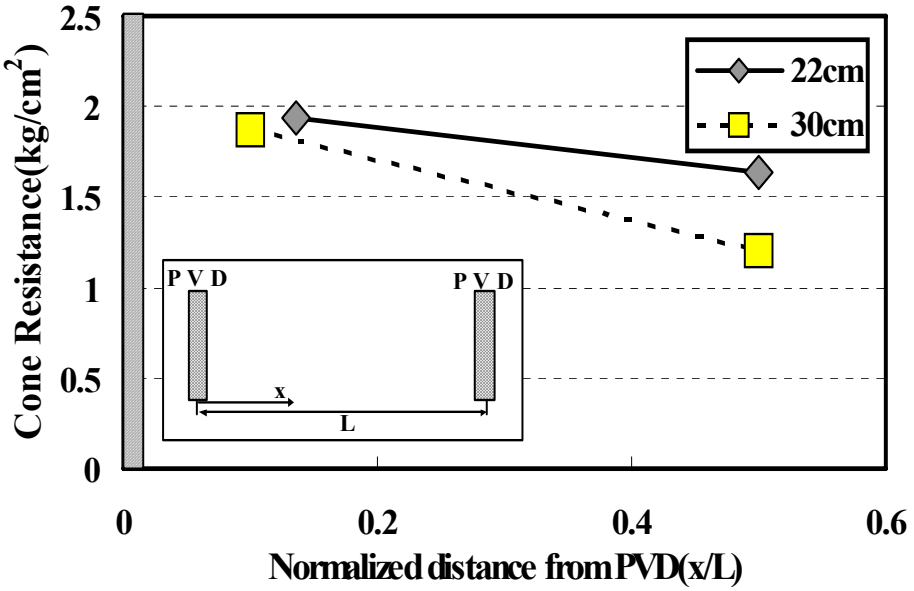


Fig. 3.5.2.23 정규화된 배수재간 간격에 따른 콘관입 저항치 분포

3. 실험결과 및 요약

실내 Column 실험, 경화영역 결정 실험과 대형모형실험(Pilot Scale Test) 결과를 통해 석션드레인기법의 영향인자를 파악할 수 있었으며, 결과를 나열하면 다음과 같다.

1) 각 배수재(포켓식 성곽형, 코일형, 하모니카 형, 원형, 2중코어 하모니카형, 날개형, 나선코어 원형 및 열융착식 성곽형배수재) 종류에 따른 개량 효과를 파악하기 위한 실험 결과, 포켓식 원형배수재와 나선코어 원형배수재의 배수효율이 가장 좋게 나타났으며, 판형 배수재 중에서는 열융착식 성곽형 배수재와 2중코어 하모니카형 배수재의 효율이 가장 좋게 나타났다. 포켓식 원형배수재와 나선코어 원형 배수재의 경우 판형의 배수재에 비해 진공압을 방사형으로 동일하게 적용시킬 수 있었기 때문에, 다른 배수재에 비해 배수효율이 비교적 크게 나타났다. 열융착식 배수재의 경우, 필터가 Core에 직접적으로 붙어 있기 때문에 필터와 Core 사이에 공간이 존재하는 포켓식 배수재에 비해 진공으로 인한 배수재 유로 단면적의 감소가 상대적으로 작게 발생하였으며, 2중코어 하모니카형 배수재의 경우 유로 단면적이 다른 판형 배수재보다 2배가량 크기 때문에 배수효율이 크게 나타났다.

2) 모든 실험조건의 결과에서 적용된 진공압으로 개량도를 정규화(Cu/P) 시킨 결과, 배수재로부터의 약 7cm 이상 이격되면 강도증가율이 현격이 감소하는 경향이 나타났는데, 이는 시간경과에 따라 발생되는 진공압에 의한 배수필터의 막힘 현상 및 배수재 유로 단면적의 감소, 진공압에 의해 지반 내 발생된 Hardening Zone 등에 기인한 결과이다.

3) 모든 실험에서 초기 함수비 보다 약 10~30% 정도 감소하는 경향이 나타났으며, 심도가 감소할수록 증가하는 경향이 나타났다. 또한 Sealing 층에 비해 개량영역에서 함수비 감소 경향은 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 이를 통해 본 공법으로 인한 진공배수효과를 파악할 수 있었다. 그러나 이러한

경향은 시간경과에 따라 발생되는 진공압에 의한 배수필터의 막힘 현상 및 배수재 유로 단면적의 감소 효과 등에 의해 배수재로 부터의 거리가 멀어짐에 따라 그 감소폭이 비교적 작게 나타났다.

4) Sealing 층의 두께에 따른 실험 결과, Sealing 층에 두께가 두꺼워 질수록 배수효율이 증가하는 경향이 나타났지만, 그 차이는 그다지 크지 않았다. 따라서 시공성과 현장 적용성을 고려하여 현장시험시공시 Sealing 층의 두께는 약 1m가 적절한 것으로 판단하였다.

5) 진공압 크기에 따른 진공배수 효율 평가 실험 결과, 낮은 진공압을 가한 경우가 높은 진공압을 가한 경우보다 가해준 진공압 대비 강도 증가효과가 더 크게 나타났다. 그러나 절대적인 강도증가율은 높은 진공압을 가해준 경우에서 더 크게 나타났다. 따라서 실제 지반에 본 공법을 적용하는 경우, 개량 목적에 따라 적절한 최종진공압을 선택해야 한다.

6) 개량기간에 따른 개량도 평가 실험 결과, 개량기간이 늘어날수록, 배수재에 인접한 부분에서의 개량도는 증가하였으나, 배수재에서 멀어질수록 개량도는 감소하다가 일정한 값으로 수렴하는 경향이 나타났다.

7) 단계 진공압에 따른 진공효율 평가 실험 결과, 최종 진공압인 -0.8kg/cm^2까지 단계적으로 압을 올려준 경우에서 효율이 더 크게 나타났다. 따라서 이러한 결과를 통해 실제 지반에 Suction Drain 기법을 적용하는 경우, 단계 진공압 조건 적용 시 낮은 진공압에서 높은 진공압으로 증가시키는 완충기간을 토질특성에 맞게 설정해야 한다.

8) 개량기간에 따라 발생된 함수비결과를 통해 투수계수감소비를 역산해보면, 적용기간 12일 이후에서 일정한 값으로 수렴하는 경향이 나타났으며, -0.8kg/cm^2이상의 진공압을 적용한 경우, 배수재로부터 이격된 거리 4~7cm 내에서 Hardening Zone이 발생됨을 확인할 수 있었다.

9) 배치 간격에 따른 진공효율 평가 실험 결과 적용된 두 가지 조건(22, 30cm)에서의 전반적인 개량도 차이가 그리 크지 않았다. 그러나 이는 지반의 물리적 특성 및 시공 시 발생될 수 있는 영향인자에 의해 차이가 발생될 수 있으므로, 현장시공 시 이를 감안하여 시공을 진행하였다.

제 6 절 배수재와 진공튜브 결속방법의 개발

1. 현재까지 제안된 결속방법의 특징

진공을 이용하여 지반을 효과적으로 개량하기 위해서는 진공배수 효율을 최대화 시키는 것이 중요하다. 이를 위해서는 배수재와 진공튜브 간의 직접적인 연결 시 기밀성을 최대한 유지시켜 진공압의 감소를 원천적으로 막을 수 있는 연결방법이 필요하다. 기존의 대표적인 공법으로 일본에서 개발된 캡형 진공압밀공법과 네덜란드에서 개발된 Beau-Drain 공법이 있다. 이 공법들 역시 기존의 진공압밀공법 적용시 문제가 되는 지오멤브레인 차단막의 단점을 보완하기 위해 제안된 방법들로, 연직배수재 상부에 캡을 씌우고 호스로 상부의 수평관과 연결시킨 후, 수평관과 펌프를 연결시켜 지반의 간극수를 배출시킬 수 있는 메카니즘을 가지고 있다(Fig. 3.6.1.1). 이 공법들은 종래의 공법과 비교해볼 때, 현지 작업이 비교적 간단해 시공비용을 절감시키고 공사 기간을 단축시키는 장점이 있다. 일본제품의 경우 공장에서 연결부를 사전에 제작하여 타설 시키는 방법이며, 네덜란드 제품의 경우 현장에서 배수재를 타설한 후 연결부를 직접 조립할 수 있다. 그러나 이러한 공법들도 역시 단점을 내포하고 있는데, 일본제품의 경우, 기밀유지가 잘되기 때문에 진공압을 유지시키기에는 적합하지만, 배수재와 연결부위를 사전 제작한 제품을 사용하기 때문에 지반조건에 따라 유동적으로 배수재의 길이를 조절할 수 없다는 단점이 있다. 또한 네덜란드 제품의 경우, 비교적 시공이 간편하고 배수재의 길이를 유동적으로 변화시킬 수 있으나, 진공압유지를 위해 트렌치를 파고 다시 되메우는 방법을 취하기 때문에 공비 및 공기의 증가를 야기한다. 따라서 이러한 단점들을 개선시킬 수 있는 결속방법을 개발하는 것이 중요하다.

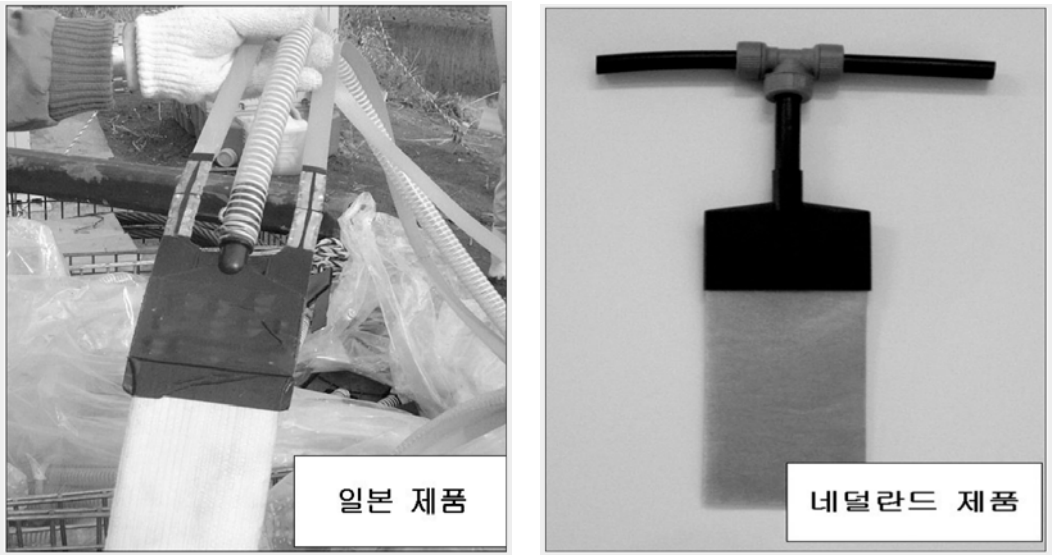


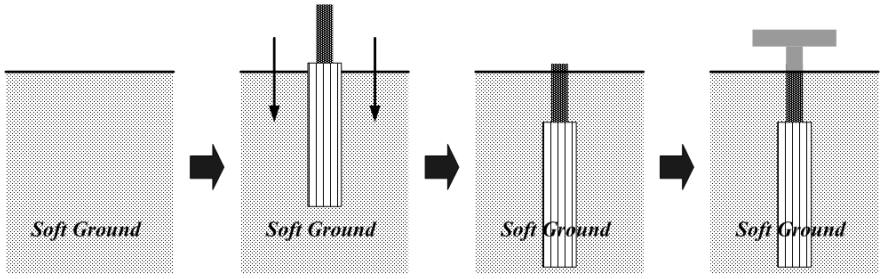
Fig. 3.6.1.1 캡형 진공압밀공법에 사용되는 캡, 배수재, 연결호스

2. 석션드레인 기법에 최적화된 결속방법의 제안

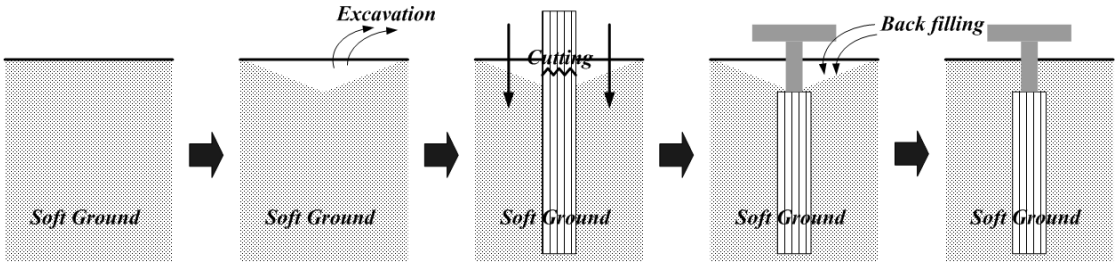
Fig. 3.6.2.1에는 기존의 대표적인 공법들의 현장 시공 모식도 및 결속방법을 나타내었다. 기존에 제시된 결속방법들은 크게 길이를 미리 제작한 사전 제작형 시스템과 트렌치를 파서 다시 되메우는 방식의 방법이 사용되고 있는데, 이러한 방법들은 배수재 길이를 유동적으로 조절할 수 없고(Cap drain 시스템), 공비 및 공기증가(Beau drain 시스템) 등의 몇 가지 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 개선시킬 수 있는 연결부 및 배수시스템을 개발하고자 하였다. 실제 석션드레인 기법을 이용하여 현장에 시공하고자 할 때에는 다음과 사항을 고려해야 한다.

1. Suction Drain 기법을 통해 연약지반을 개량하는 경우, 지반에 존재하는 불확실성(지층에 존재하는 샌드심, 지하수위조건, 지질조건 등)에 가변적으로 대처할 수 있어야 한다.
2. 진공펌프로 발생되는 진공압을 지반에 효율의 최소로 유지하며 지반에 전달 할 수 있어야 한다.
3. 배수재와 진공튜브간의 Connecter의 결속방법이 쉬워야 하며, 기밀성이 확보되어야 한다.

4. 전반적인 공법의 시공이 간편해야 한다.



(a) Cap Drain 공법(일본)



(b) Beau Drain 공법(네덜란드)

Fig. 3.6.2.1 기존 공법들의 현장시공 모식도 및 결속방법

본 연구에서 제안된 판형 배수재의 결속방법 및 시공 모식도를 Fig. 3.6.2.2에 제시 하였다. 본 연구에서 제안된 결속시스템은 현장에서 배수재와 진공튜브를 결속하기 때문에 시공 시 발생될 수 있는 지반의 불확실성에 대한 대처가 가능하며, Sealing Connector에 배수재를 삽입하여 배수재를 강하게 결속 시키고 효율을 극대화할 수 있다.

판형 배수재의 커넥터는 배수재의 관입 이후 지반의 불확실성에 의한 탈착이나 휨 변형의 방지를 위해서 우레탄 소재의 연성 재질로 제작되었다(Fig. 3.6.2.3). 커넥터의 상부에는 석션호스의 연결을 위해 호스의 내경과 동일한 유출구를 제작하였으며, 하부는 판형 배수재가 삽입될 수 있도록 속이 빈 직사각형 형태로 제작하였다. 본 연구에서 수행된 현장시험시공에서는 시공상 편의를 위하여 배수재를 미리 절단하고 커넥터를 연결한 이후에 지반에 타설하였다.

나선코어 원형 배수재를 사용하여 시공하는 경우(Fig 3.6.2.4), 실내 제작과정에서

타설 깊이에 따라 Sealing Connector의 효과를 낼 수 있도록, 배수재 상부에는 배수구멍을 뚫리지 않은 무공 상태로 제작하였다. 또한 무공배수재와 유공배수재, 그리고 배수호스를 열융착 방법으로 공장에서 롤 형식으로 제작하여 판형배수재와 같이 현장에서 직접 절단하여 배수재의 타입이 손쉽고 빠르게 진행될 수 있도록 하였다. 따라서 이로 인해 Sealing Connector를 제작비용을 줄일 수 있고 공기가 단축되므로 시공의 편이성, 경제성 측면에서 탁월한 효과를 발휘할 것으로 판단된다. 나선코어 원형 배수재의 모습을 Fig. 3.6.2.5에 나타내었다.

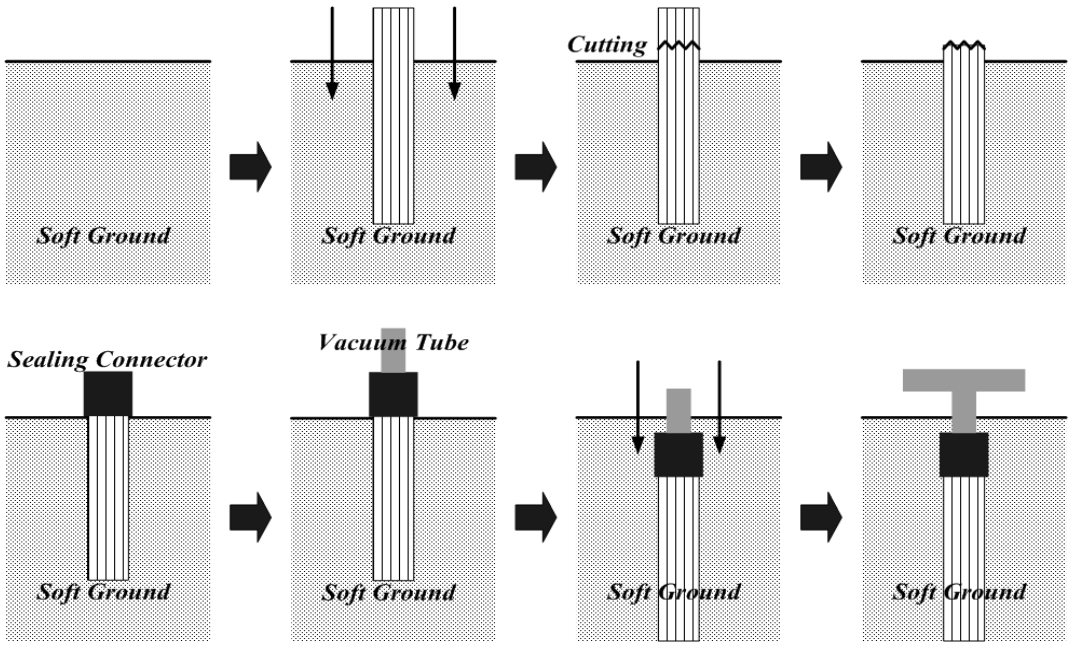


Fig. 3.6.2.2 본 연구에서 제안된 결속 방법 및 시공 모식도

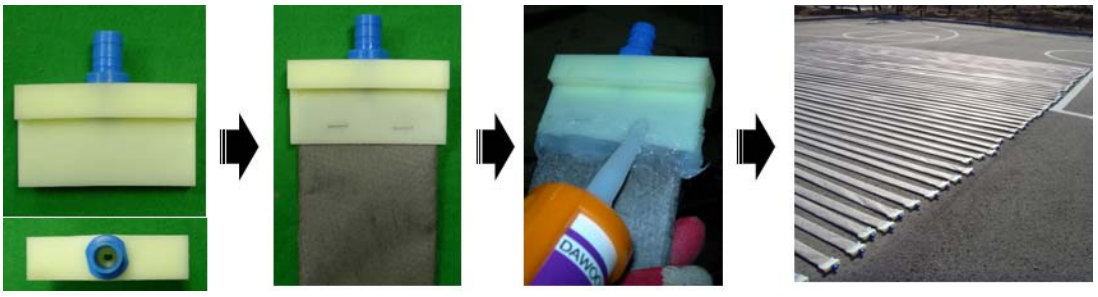


Fig. 3.6.2.3 Sealing Connector 모식도 및 배수재와의 결속 방법

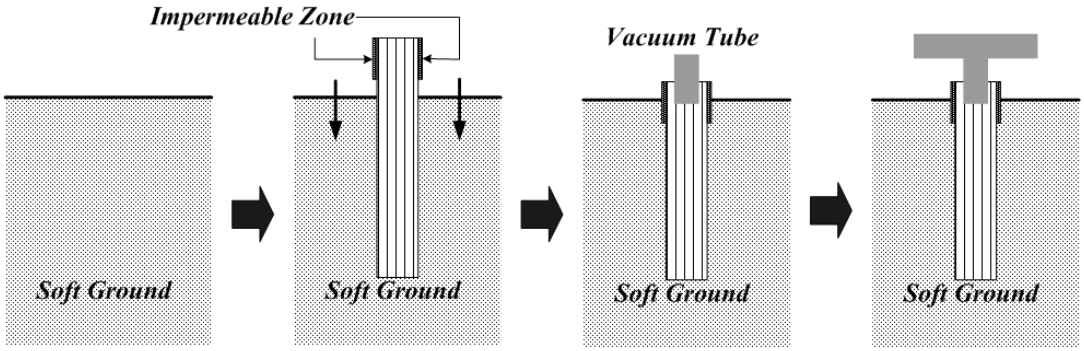


Fig. 3.6.2.4 나선코어 원형 배수재의 결속방법 및 현장시공 모식도



Fig. 3.6.2.5 나선코어 원형 배수재

제 7 절 Suction Drain 공법의 현장시험시공

1. 개요

본 연구에서 제안된 석션드레인 공법은 배수재와 진공펌프의 직접적인 연결을 통해 대심도 연약지반의 효과적인 개량이 가능하다. 또한 진공효율을 극대화 시킬 수 있는 균일한 진공압을 지반에 적용 시킬 수 있기 때문에, 지반 내 부등침하 및 전단 파괴를 방지할 수 있다.

선정된 대상지반은 비교적 균질하고 깊은 심도까지 연약지반이 분포된 지역을 선정하여 비교적 정확한 결과치를 도출 하고자 하였다. 또한, 본 공법의 경우 육상 또는 해상지역에 모두 사용할 수 있으나, 대상지반은 시공여건이 좋은 지역 및 배수재 타설기의 원활한 이동이 가능한 지역을 우선으로 고려하였다.

2. 현장시험시공 대상 부지의 선정

국내의 연약지반은 대부분 준설에 의한 매립지나 해안 근처 해성퇴적토로 이루어진 간척지가 대다수를 이룬다. 본 연구에서는 해안 근처 간척지를 개량할 대상지반으로 고려하였으며, 경기도 화성시 소재 OO방조제 부지 내에 존재하는 간척지를 대상지반으로 설정(Fig 3.7.2.1, 관 1지점)하였다. Fig 3.7.2.2에는 시험시공 대상 부지의 심도 별 강도 분포를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 연약지반은 대략 10m 내외에 존재하였으므로, 본 연구의 대상 심도를 10m 이내로 설정하였다.

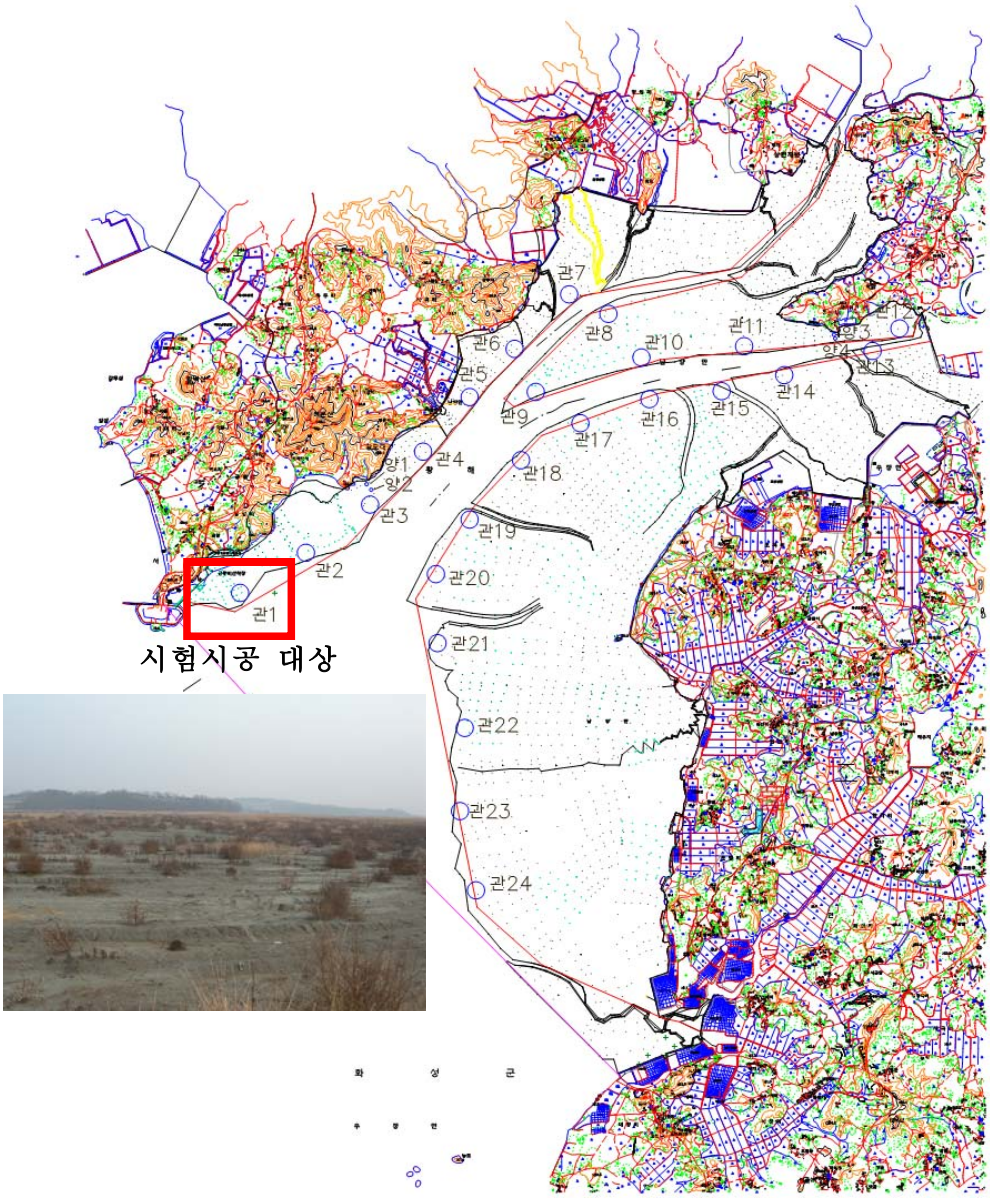


Fig 3.7.2.1 OO방조제 현장 개요도

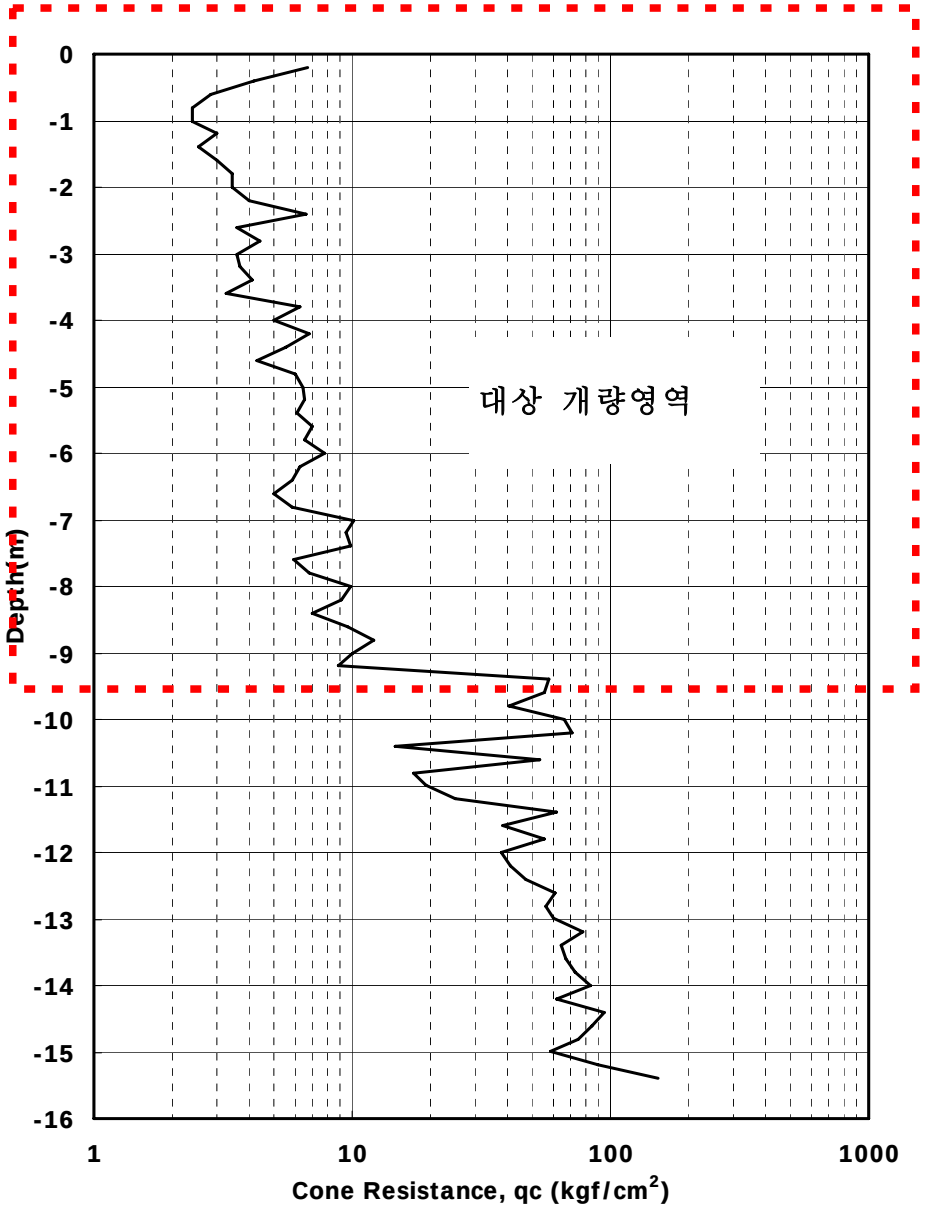
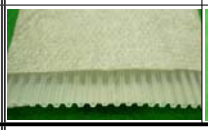
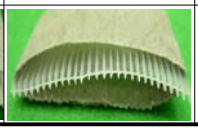


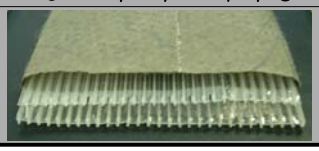
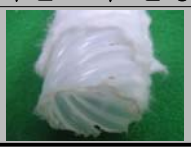
Fig 3.7.2.2 대상지반의 심도 별 콘관입치 분포

3. 배수재의 선정

Table 3.7.3.1에 나타낸 대표 배수재 중 실내 실험을 통해 나선코어 원형 배수재의 효율이 가장 크게 나타났으며, 포켓식 원형 배수재와 열융착식 성곽형 배수재, 2중코어 하모니카형 배수재의 효율이 비교적 크게 나타났음을 파악하였다. 본 시험시공에서는 배수재 종류에 따른 대조군을 설정하고, 순수 국내에서 생산되는 배수재 중 배수 효율이 가장 좋으며 본 공법에 최적화된 두 가지 배수재를 선택하였다. 이때, 시공성 및 경제성(배수재 당 단가)을 고려하여, 나선코어 원형 배수재와 2중코어 하모니카형 배수재를 선택하였다.

Table 3.7.3.1 본 실험에 적용된 배수재 타입 및 형상

필터 접합 형식	포켓식(비접착식)				열융착식
Code No.	P-Castle	P-Harmonica	P-Column	P-Coil	A-Castle
Core 형태	성곽형	하모니카형	원통형	코일형	성곽형
형 상					

필터 접합 형식	포켓식(비접착식)		
Code No.	P-Double Harmonica	P-Wing	P-Screw Column
Core 형태	2중코어 하모니카형	날개형	나선코어 원형
형 상			

4. 석션드레인 시스템

가. 석션드레인 시스템의 개요

본 연구에서는 석션드레인 공법의 대심도 연약지반현장 적용 및 실용화를 목적으로 하고 있기 때문에, 이러한 목적에 맞게 실내에서 개발된 배수시스템과 선정된 배수재를 이용하여 석션드레인 공법의 실제 지반에의 적용성을 파악하고자 하였다. Fig 3.7.4.1은 2차년도 시험시공 적용 모식도이다. 이 때, 비교 대조군을 2가지(판형, 원형 배수재)로 설정하여 각 공법간의 차이를 비교 분석하였다.

나. 석션드레인 시스템의 시공과정 및 배치 형태

(1) 시공과정

본 연구에서 시험시공에 사용될 부지는 타설장비의 이동이 원활하고, 심도가 약 10m 정도인 비교적 얕은 지반이다. 따라서 장비의 이동성 보다는 공법 타설의 정확성에 초점을 맞추었다. 본 연구에서 제시한 석션드레인 공법의 시공과정을 나타내면 Fig. 3.7.4.1, 3.7.4.2, 3.7.4.3과 같다. 판형 배수재의 경우(Fig 3.7.4.1), 배수재와 석션호스 사이에서 효율 저감 없이 진공압을 전달할 수 있는 커넥터를 연결하여 하기 때문에, 시공시 비교적 복잡한 과정을 필요로 한다. 그러나 나선코어 원형 배수재를 사용하여 시공하는 경우(Fig 3.7.4.2), 실내 제작과정에서 타설 깊이에 따라 Sealing Connector의 효과를 낼 수 있도록, 배수재 상부에는 배수구멍을 뚫지 않은 상태로 제작한다. 따라서 이로 인해 Sealing Connector를 사용하지 않아도 되므로, 시공의 편이성, 경제성 측면에서 비교적 양호하였다.

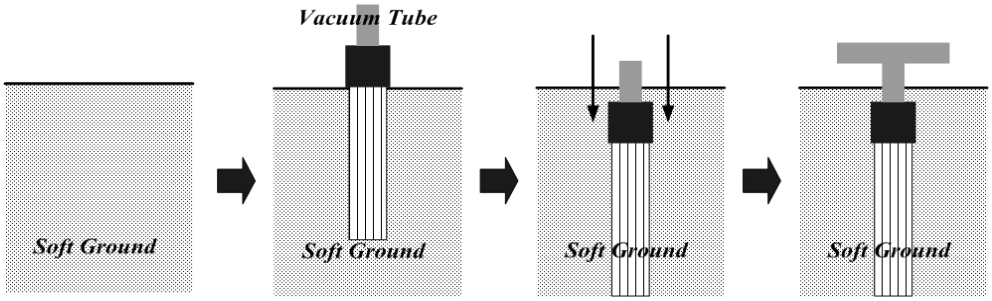


Fig. 3.7.4.1 Suction Drain 공법의 배수재 시공 모식도

(2중코어 포켓식 배수재 사용 시)

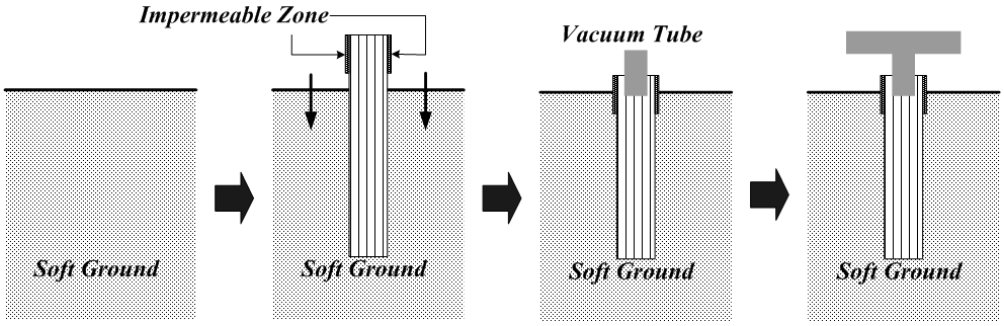


Fig. 3.7.4.2 Suction Drain 공법의 배수재 시공 모식도

(나선코어 원형 배수재 사용 시)

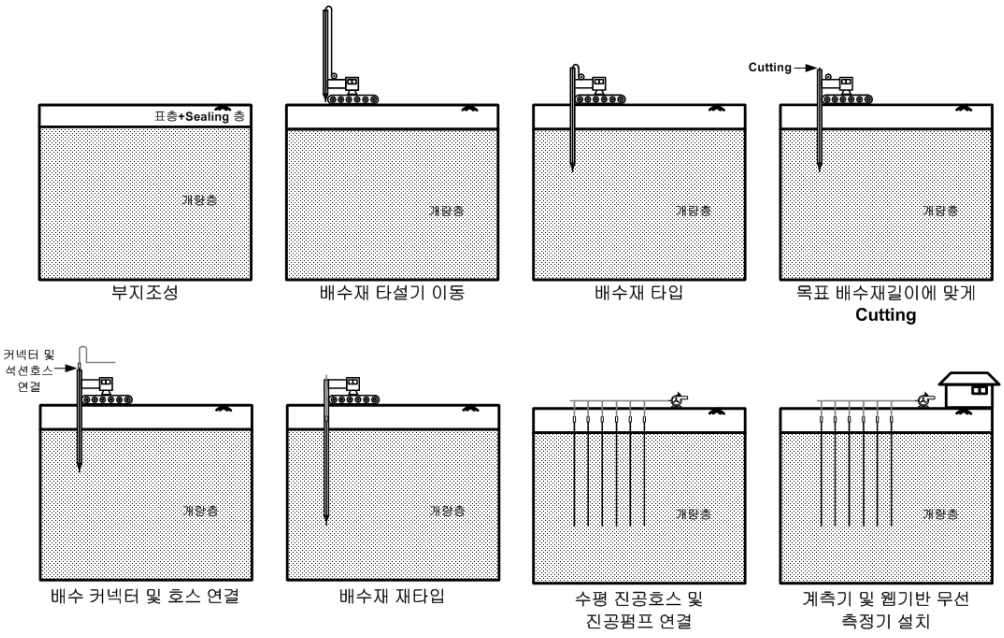


Fig 3.7.4.3 석션드레인 시스템 설치 모식도

Suction Drain 공법의 시공순서를 간략히 정리해보면, 다음과 같다.

① 대상 부지 정리
② 배수재 타설기를 이용하여 목표 심도까지 배수재 타설
③ 배수재 내부에, 석션호스 삽입 또는 커넥터와 배수재, 석션호스 연결
④ 배수재에서 나온 석션호스와 진공호스를 연결
⑤ 연결된 진공호스와 배수시스템을 연결
⑥ 배수시스템과 진공펌프 연결 및 가동

(2) 대상 부지의 현장시험시공 배치도

대상부지의 총규모는 가로 70m, 세로 20m 깊이 10m로 설정(30m×10m×2Section, 10m)하였으며, 대상 부지의 초기지반조사 실험 결과를 바탕으로 공기 및 배수재 간격을 결정하였다. 각 섹션 당 10m의 간격을 두어 석션 배수 시스템 장비의 원활한 이동 및 각 섹션 간 발생될 수 있는 중첩 효과를 미연에 방지하였다. 또한 시스템 중앙(미처리 지층)에 집수기를 진공펌프 위치를 고려하여 설치하였다(진공압 효율 감소 인자 차단). 이 때, 집수기 내 수위계를 설치하고 일정 높이 이상에 도달하면, 집수기 내 설치된 수중 펌프가 가동되어 배수된 물이 진공펌프 내로 유입되지 못하게 미연에 방지하였다. 또한 수위계의 설치로 인해 시간경과에 따른 배수량 역시 파악할 수 있었다. Fig 3.7.4.4, 3.7.4.5, 3.7.4.6에 시험 대상 부지의 현장 배치 모식도를 나타내었다.

현장시험시공에 사용되는 석션호스의 경우, 진공압을 견디면서 배수된 물의 유입량이 충분히 확보될 수 있어야 한다. 따라서 배수재와 직접적으로 연결되는 석션호스의 경우, 압축고무재질로 구성된 내경 20mm 호스(Type A)를 사용하고, 진공펌프 및 배수재 연결호스와 다시 연결되는 호스(Type B)는 용량을 더 크게 설정하였다(내경 30mm). Table 3.7.4.1은 시험시공에 사용되는 석션 호스의 제원을 나타내었다.

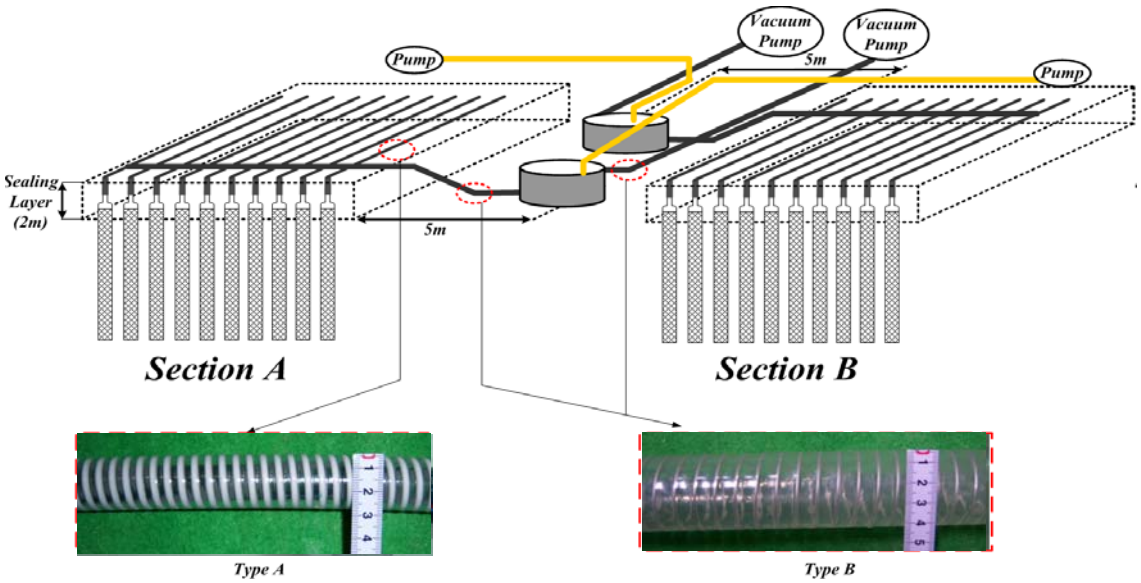


Fig 3.7.4.4 현장 배치 모식도

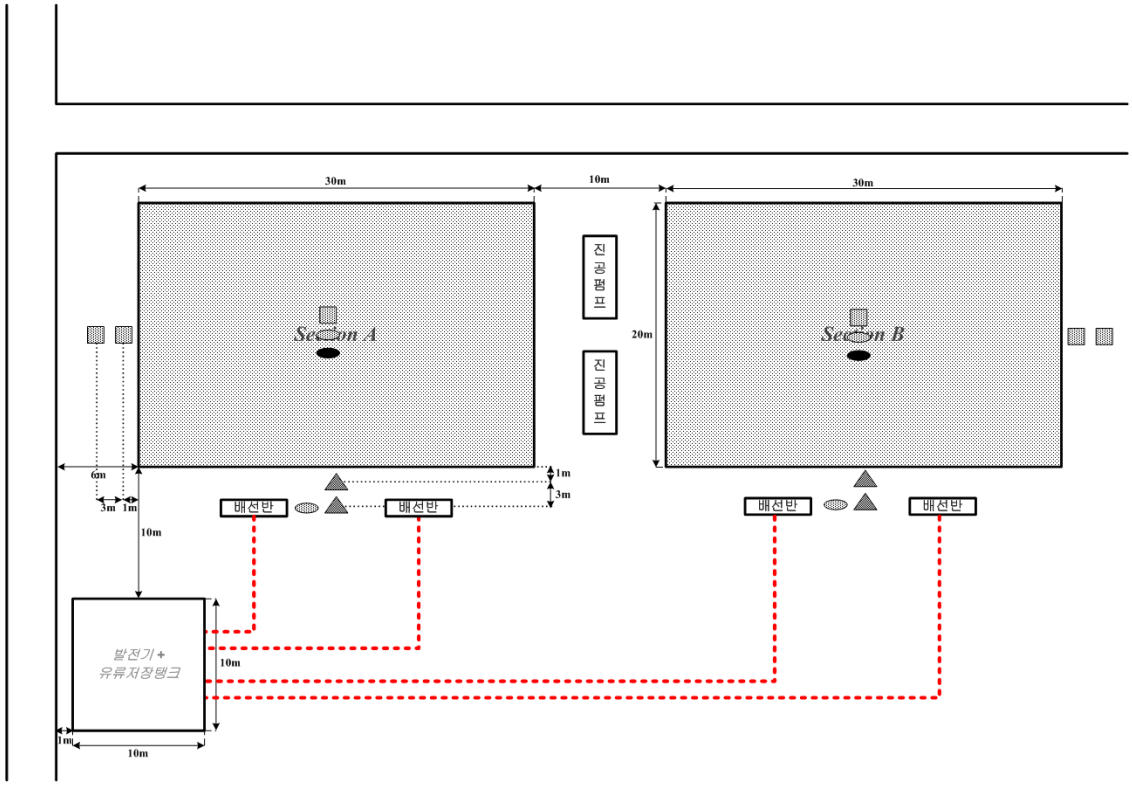


Fig 3.7.4.5 현장 배치 모식도(평면도)

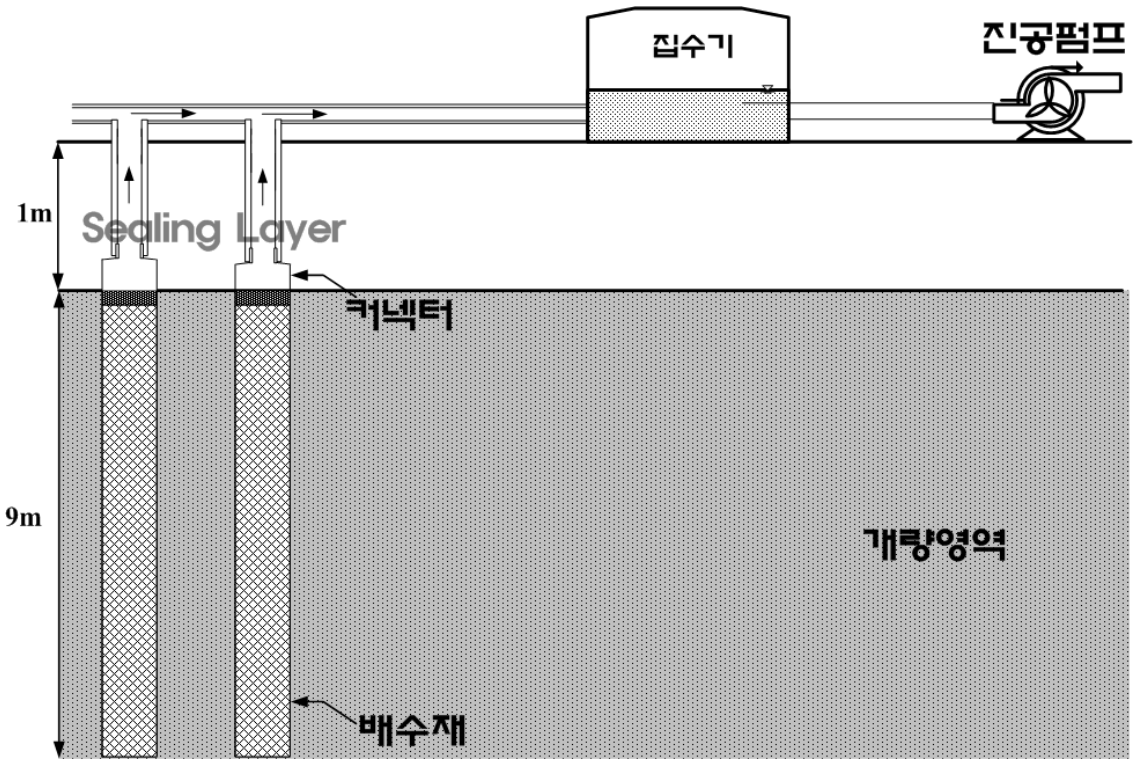


Fig 3.7.4.6 배수 시스템

Table 3.7.4.1 석션호스 제원

Type	내경(mm)	외경(mm)	재질
Type A	ϕ20	ϕ25	PPE
Type B	ϕ30	ϕ35	PPE

다. 현장 시험 시공 조건

본 시험 시공에서는 총 2개의 Case으로 구분하여 실험을 실시하고자 하였다 (Table 3.7.4.2). 이때, 실내 실험을 통해 선정된 나선코어 원형 배수재와 2중코어 포켓식 배수재를 이용하여 석션드레인 공법 적용시 발생되는 효율을 산정하고자 하였다. 적용되는 단계진공압의 경우, 실내실험결과를 바탕으로 -0.2kg/cm^{2}에서 ~ -0.8kg/cm^{2}로 조절하였다.

Table 3.7.4.2 현장 시험 시공 조건

Case	시공조건	배수재 타입	적용 단계진공압(-kg/cm^2)
Case A	Suction Test 1	2중코어 포켓식(판형) 배수재	0.2→0.4 →0.6→0.8
Case B	Suction Test 2	나선코어 원형 배수재	0.2→0.4 →0.6→0.8

5. 진공압의 조절

가. 진공펌프의 선정

진공펌프의 일반적인 사용목적은 대기압보다 낮은 압력을 가진 상태로 만들기 위하여 기체로 채워진 진공용기로부터 기체분자들을 제거하기 위한 것이다. 진공의 압력범위는 대기압부터 극고진공까지 매우 광범위하나 전 영역에 사용할 수 있는 진공펌프는 아직 개발되지 않았다.

따라서 공정에 알맞는 펌프를 사용하여야 하는데 이것은 제품의 품질과 작업의 효율성에 직결되며, 펌프의 수명에도 영향을 미친다.

따라서 진공펌프 선정 시 다음의 사항을 고려하여 선정하여야 한다.

(1) 작업진공도 체크

각공정에서 요구되는 진공도를 체크한다. 각공정마다 원할한 작업을 위해 요구되는 최적의 진공도가 있게 되는데 생산공정에 관한 DATA를 가지고 충분히 검토한다.

(2) 펌프의 최대진공도 체크

위에서 체크한 작업진공도를 무리없이 도달해 낼 수 있는 펌프의 최대진공도를 체크한다. 일반적으로 작업진공도가 펌프의 최대진공도의 80% 이내가 되도록 펌프의 최대진공도를 결정한다.

(3) 진공용적의 양

작업진공까지 걸리는 시간을 배관의 흐름저항 및 Leak를 고려하여 체크한다.

(4) 요구 진공도 도달 및 유지시간 체크

요구진공도까지 도달하는 시간과 발생하는 가스의 양을 고려한 진공도 유지여부를 체크한다.

(5) 펌프의 용량 계산

$$S = Fs \times 2.303 \times (V/T) \times Log(P1/P2) \quad (3.7.5.1)$$

여기서, S : 진공펌프의 용량(m^3/min)

V : 드레인재, 배수재, 집수펌프 내 공기의 총량(m^3)

T : 진공도달시간(min)

P1 : 초기진공도(일반적으로 대기압 1.0kgf/cm^2)

P2 : 연약지반에 작용되는 진공압(본 연구의 경우, 0.8kgf/cm^2)

Fs : 안전율, 통상적으로 5를 사용함.

나. 시험시공에서 소요되는 진공용량 계산 예

시험 시공시 요구되는 펌프의 용량이 계산되어야만 실제 시공시 소요되는 펌프의 대수를 산정할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 2개 Section에서 소요되는 진공용량이 동일하게 요구된다고 가정하면, 1개 Section 당 소요되는 진공펌프의 용량은 식 3.7.5.1을 이용하여 Table 3.7.5.1 및 3.7.5.2와 같이 계산될 수 있다.

Table 3.7.5.1 진공펌프 용량 계산 예(1개의 Section의 경우 = 10m×20m×30m, 직경 3cm 원형배수재의 경우)

배수재의 면적(cm^2) - 직경 3cm	배수재의 총 예상 소요 길이(cm) 260본 × 10m	배수재의 총 용량(cm^3)-①
7.1	260,000	1,837,831
배수호스 내경 면적(cm^2, 내경 ϕ20)	내경 ϕ20배수호스의 총 예상 소요 길이(cm)-각 배수재 당 50cm 가정	내경 ϕ20 배수호스의 총 용량(cm^3)-②
3.14	13,000	40,840
배수호스 내경 면적(cm^2, 내경 ϕ30)	내경 ϕ30배수호스의 총 예상 소요 길이(cm)-각 배수재 당 10m 가정	내경 ϕ30 배수호스의 총 용량(cm^3)-②
7.1	260,000	1,837,831
진공압이 걸리기 위해 소요되는 시간(min) - T - ⑤	안전율 - Fs - ⑥	집수통의 용량(cm^3), 500L-③
1	5	500,000
초기진공도 - P1(kgf/cm^2) - ⑦	적용진공도 - P1(kgf/cm^2) - ⑧	드레인재, 배수재, 집수펌프 내 공기의 총량(m^3)-①+②+③=④
1.0	0.8	4,216,504
요구되는 총 진공펌프의 용량(⑥×2.303×(④/⑤)×log(⑦/⑧))		**4.70m^3/min**

Table 3.7.5.2 진공펌프 용량 계산 예(1개의 Section의 경우 = 10m×20m×30m, 판형배수재의 경우)

배수재의 면적(cm^2) - 가로 10cm, 세로 0.5cm	배수재의 총 예상 소요 길이(cm) 260본 × 10m	배수재의 총 용량(cm^3)-①
5	260,000	1,300,000
배수호스 내경 면적(cm^2, 내경 ϕ20)	내경 ϕ20배수호스의 총 예상 소요 길이(cm)-각 배수재 당 50cm 가정	내경 ϕ20 배수호스의 총 용량(cm^3)-②
3.14	13,000	40,840
배수호스 내경 면적(cm^2, 내경 ϕ30)	내경 ϕ30배수호스의 총 예상 소요 길이(cm)-각 배수재 당 10m 가정	내경 ϕ30 배수호스의 총 용량(cm^3)-②
7.1	260,000	1,837,831
진공압이 걸리기 위해 소요되는 시간(min) - T - ⑤	안전율 - Fs - ⑥	집수통의 용량(cm^3), 500L-③
1	5	500,000
초기진공도 - P1(kgf/cm^2) - ⑦	적용진공도 - P1(kgf/cm^2) - ⑧	드레인재, 배수재, 집수펌프 내 공기의 총량(m^3)-①+②+③=④
1.0	0.8	3,678,672
요구되는 총 진공펌프의 용량(⑥×2.303×(④/⑤)×log(⑦/⑧))		**4.10m^3/min**

다. 진공압의 조절

1차년도 실내 실험 결과를 통해, 저진공압에서 고진공압으로 단계적으로 압을 올려줌으로써 배수효율이 증가됨을 파악할 수 있었다. 따라서 각 단계별로 측정되는 침하량의 추이를 통해 압밀도를 예측하여, 80%의 압밀도에 이를때까지 각 단계 별 진공압을 충분히 가하였다(Table 3.7.5.3).

Table 3.7.5.3 각 Case 별 적용되는 단계 진공압 조건

Case	하중 단계	적용 일수	진공적용빈도
Case A & Case B	-0.2kg/cm^2	압밀도 80%에 이를때까지	실험 종료시까지 계속 유지
	-0.4kg/cm^2	압밀도 80%에 이를때까지	
	-0.6kg/cm^2	압밀도 80%에 이를때까지	
	-0.8kg/cm^2	실험 종료시까지	

6. 배수재 배치 간격 및 설치수량의 결정

배수재의 타설간격을 결정하기 위해 다음과 같은 식을 사용할 수 있다.

$$\overline{u} = u_0 \exp(\lambda) \qquad (3.7.6.1)$$

여기서, $\lambda = \dfrac{-8T_h}{F(n)}$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2-1} ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2}$$

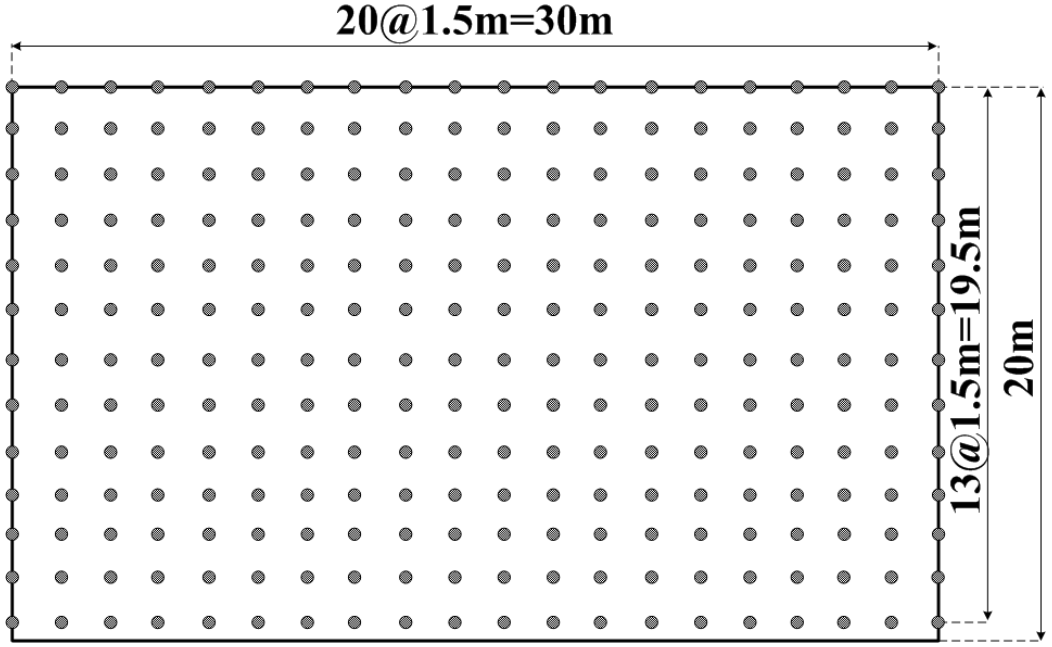
$$T_h = -\frac{F(n)\ln(1-U_p/100)}{8}$$

$$t_u = \frac{d_e^2}{C_h} T_h$$

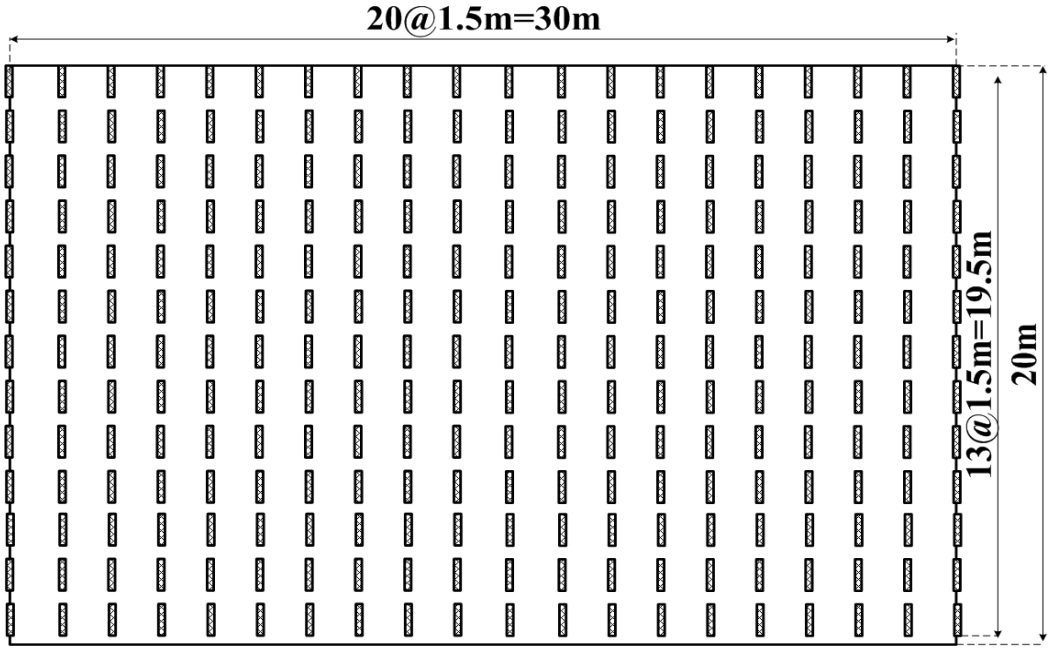
식 (3.7.6.1)을 바탕으로 개량일수 및 소요 배수재 길이 등을 감안할 때 본 연구에서는 배수재 타설 간격을 1.1m로 설정하는 것이 적절할 것으로 판단되지만 원형배수재의 경우, 실내 실험에 의하면, 판형배수재보다 실제 배수되는 양은 더 크게 발생되었다. 그러므로, 시공의 편의성 및 실내 실험에서의 효율을 바탕으로 실제 타설간격은 1.5m로 결정하였다(Fig 3.7.6.1).

▶ 2개 섹션에서 소요되는 배수재 개수

10m 길이의 배수재 260본/Section = Total 520본(원형, 판형 합계, 각 각 260본 소요)



(a) 원형 배수재



(b) 판형 배수재

Fig 3.7.6.1 사각형 배치에 따른 배수재 간 실제 간격(각 섹션 당 260본 소요)

7. 현장시험시공 실시간 모니터링 시스템

가. 개요

현장 시험 시공 적용부지는 인적이 드물고 관리자의 접근이 용이하지 않기 때문에, 관리 계측, 문제점 인지/해결 등의 작업이 용이하도록 하기 위하여 자동계측 시스템을 도입하였다.

자동계측 시스템을 위해서는 표준화된 계측값을 나타낼 수 있는 센서, 센서로부터 계측된 데이터를 수집 및 저장이 가능한 데이터로거, 계측값을 분석 및 상황에 맞게 처리할 수 있는 서버컴퓨터, 데이터로거에 수집된 정보를 서버컴퓨터까지 전달이 가능하게 하는 통신장치가 필요하며, 이를 운용하기 위해서는 현장제어용 프로그램이 필요하다.

표준화된 계측값을 나타내는 센서로는 일반적으로 0~5V, 0~10V, 4~20mA의 전압 또는 전류값으로 변위를 표현하는 전기저항식 센서나 현을 진동시켜 생기는 자유진동수를 이용하여 측정하는 진동현식센서가 있으며, 본 연구에서는 전기저항식 센서를 사용하였다.

센서로부터 계측된 데이터의 수집 및 저장이 가능한 데이터로거는 본 연구에 사용되는 센서의 개수가 많고, 실외에 장기간 설치 및 유지되어야 함을 감안하여 채널확장이 용이하며, 악조건의 기상에서도 사용이 가능한 데이터로거를 사용하였다.

서버컴퓨터는 윈도우기반인 Windows 2000 Server를 OS로 하는 펜티엄4 컴퓨터를 사용하였으며, 데이터로거에 수집된 정보를 서버컴퓨터까지 전송하기 위해서 CDMA 방식을 사용하는 무선모듈을 사용하였다.

현장 제어용 프로그램은 (주)지구환경전문가그룹이 2001년 제작한 데이터 로거 제어 및 실시간 자동화계측 프로그램인 ELSYS V2.0을 사용하였다.

본 연구에서는 상기 필요장치 및 현장 제어용 프로그램을 사용하여 실시간 모니터링 시스템을 구성하였으며, 그 구성도는 다음의 Fig 3.7.7.1에 나타내었다.

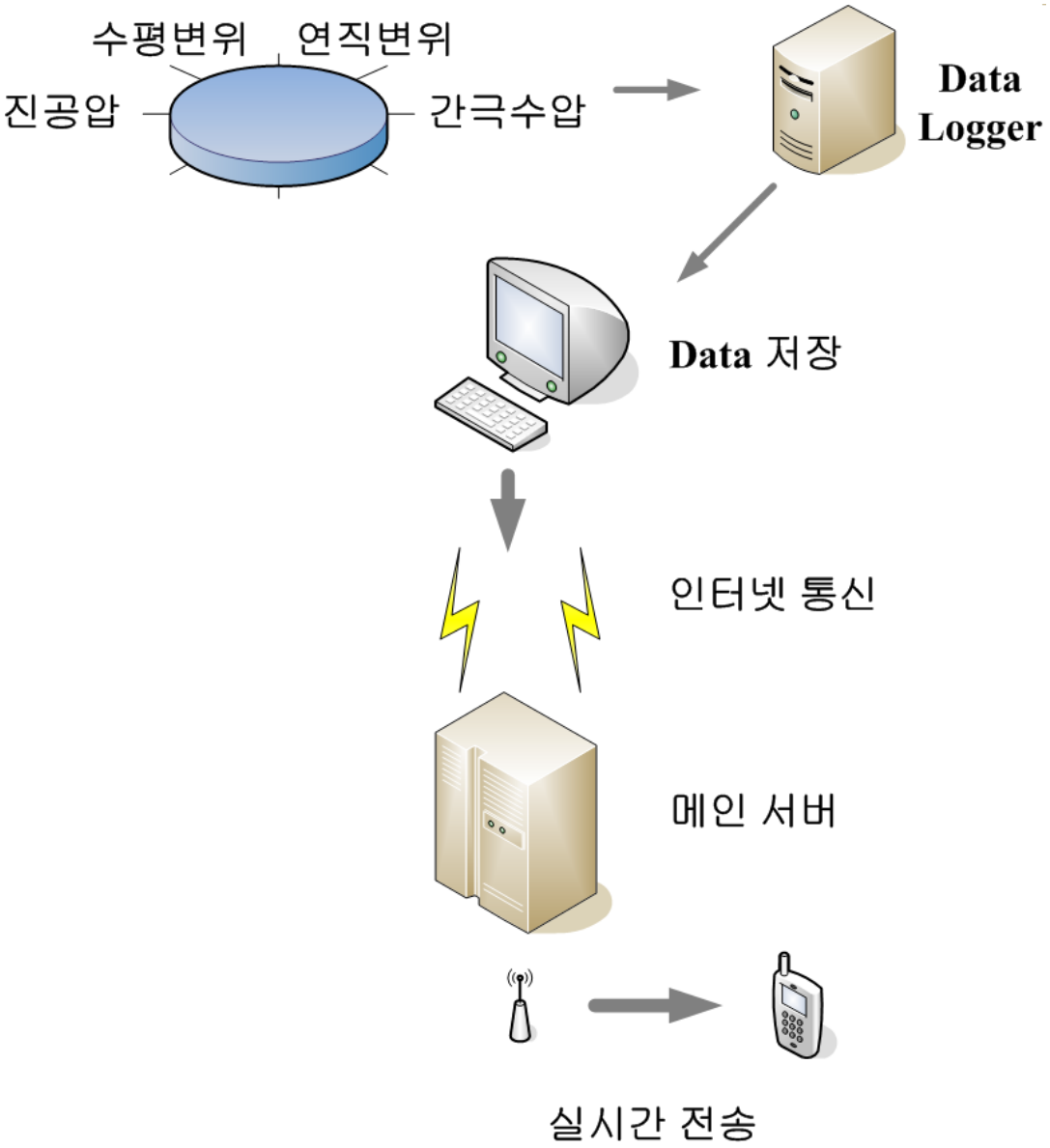


Fig 3.7.7.1 실시간 모니터링 시스템 구성도

나. 계측센서

본 연구에서는 현장 시험 시공 후 처리기간 경과에 따라 발생되는 지반 내 변화 및 시험시공 조건을 파악하기 위하여 진공압 센서, 간극수압계, 침하계 및 경사계를 설치하였다. 본 연구에 설치·운용한 계측센서의 상세정보는 다음과 같다.

(1) 진공압센서(진공탱크 설치)

· 진공탱크의 내부에 진공압 계측 · 계측범위 : 0 ~ -760mmHg · 공급전원 : 11 ~ 28 VDC · 출력범위 : 4 ~ 20mA · 설치개수 : 2 EA	

(2) 진공압센서(배수재 내부 설치)

· 배수제 내부에 위치하여 지반에 전달되는 진공압 계측 · 계측범위 : -1 ~ 3.5kg/㎠ - 센서에 미치는 토압을 고려하여 측정범위 설정 · 공급전원 : 12 ~ 40 VDC · 출력범위 : 4 ~ 20mA · 설치개수 : 8 EA	

(3) 간극수압계

· 지반 내 간극수압의 변화를 통한 개량양상 파악 · 계측범위 : 0 ~ 3.5kg/㎠ · 공급전원 : 24 ~ 40 VDC · 출력범위 : 4 ~ 20mA · 설치개수 : 12 EA	

(4) 침하계

· 지반 내 개량으로 인한 침하량 계측 · 계측범위 : 0 ~ 10m · 공급전원 : 24 ~ 40 VDC · 출력범위 : 4 ~ 20mA · 설치개수 : 10 EA	

(5) 경사계

· 지반 내 개량으로 인한 주변지역의 수평변위 계측 · 계측범위 : 0 ~ 10° · 공급전원 : 9 ~ 12 VDC · 출력범위 : -250 ~ 250mV · 설치개수 : 8 EA	

다. 계측센서의 설치위치 및 심도

Fig 3.7.7.2와 Fig. 3.7.7.3에는 각 계측기의 설치 위치 및 심도를 나타내었다. 진공압계는 심도에 따른 진공압 효율을 파악하기 위하여 심도 1m, 5.5m, 9m 지점에서 배수재 내부에 직접 설치하였다. 간극수압계 또한 동일한 심도의 지반 내부에 설치하였으며, 개량영역 내부와 외부의 간극수압 차이를 파악하기 위하여 개량영역 끝단으로부터 1m 떨어진 지점에도 간극수압계를 설치하였다. 침하계는 개량영역 중앙부에서 심도 1m, 4m, 7.5m 지점에 각각 설치하였으며, 개량영역으로부터 거리에 따른 침하 특성을 파악하기 위하여 개량영역 끝단으로부터 각각 1m, 3m 떨어진 지점에도 침하계를 설치하였다. 수평변위계는 개량영역 끝단으로부터 1m 떨어진 지점에 설치하여 진공압 적용에 따른 측방변형 거동을 파악할 수 있도록 하였다.

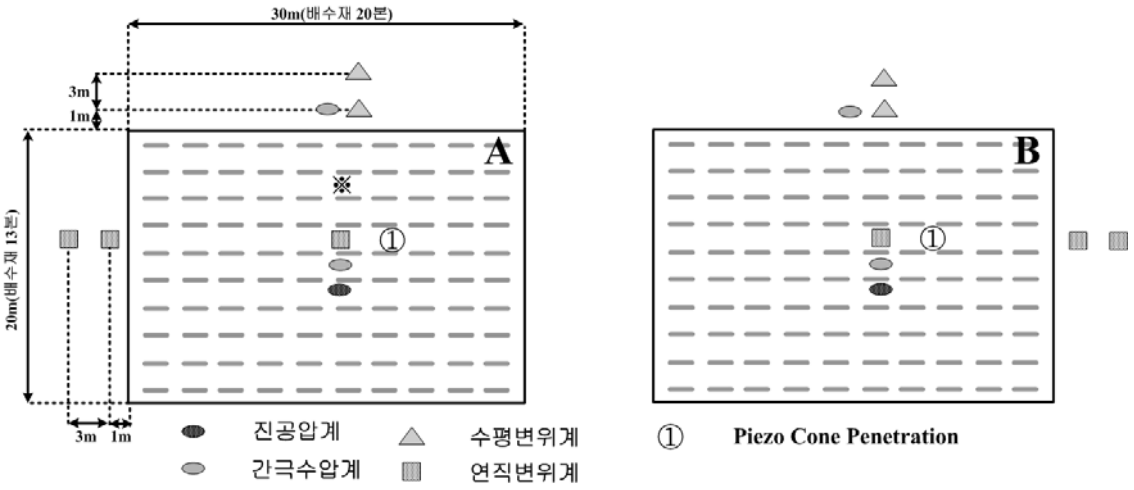
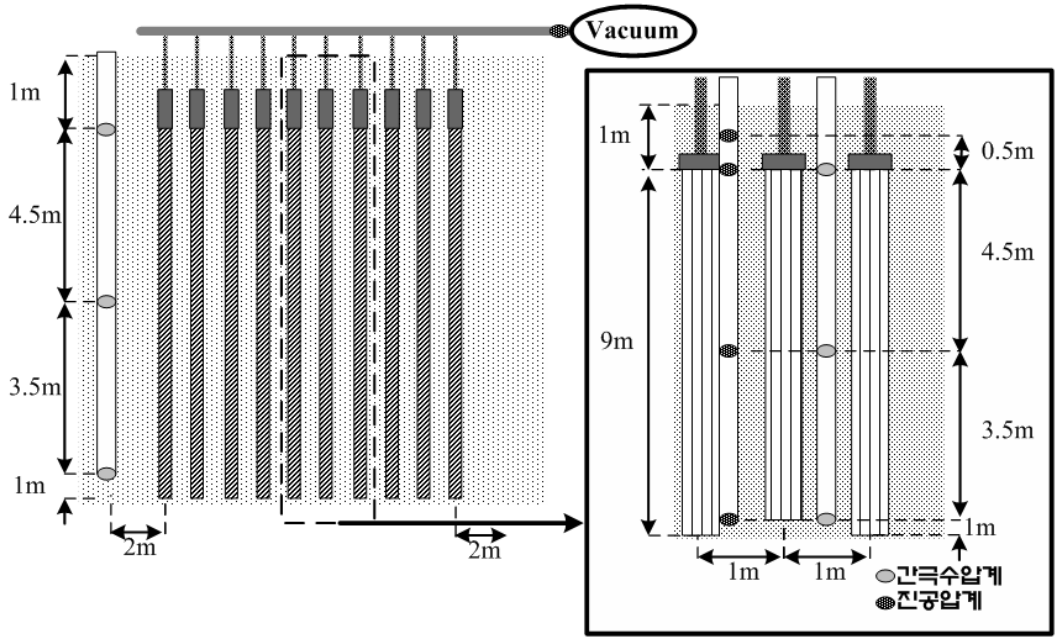
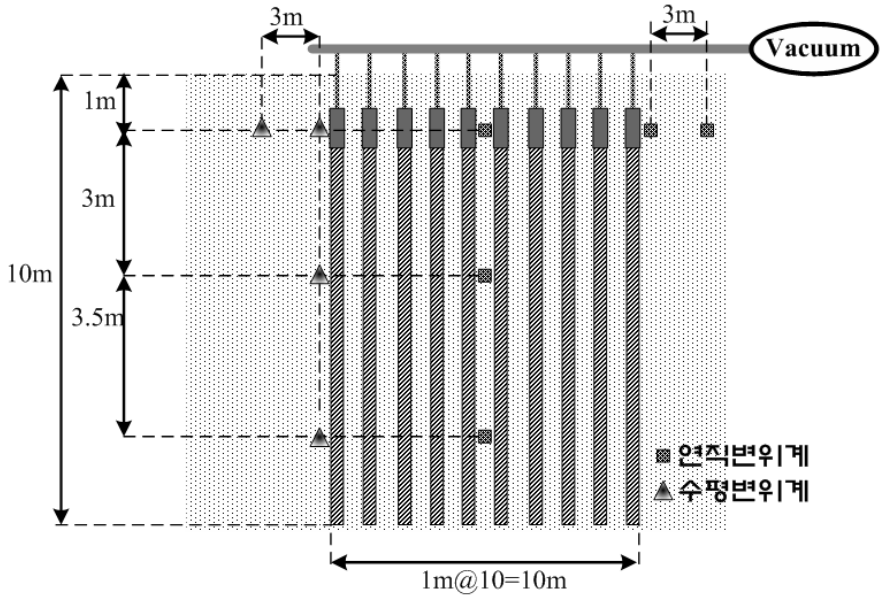


Fig 3.7.7.2 현장 시험 시공 계측기 매설 상세도(평면도)



(a) 간극수압계, 진공압계



(b) 변위계(연직, 수평)

Fig 3.7.7.3 현장 시험 시공 계측기 매설 상세도(단면도)

라. 현장 제어용 프로그램(ELSYS V2.0)

본 연구에서 사용된 현장제어용 프로그램인 ELSYS는 (주)지구환경전문가그룹이 2001년 제작한 데이터 로거 제어 및 실시간 자동화계측 프로그램으로 9종류의 데이터 로거 및 RS-232C, 전화모뎀, TCP/IP 등의 다양한 통신방식을 지원하는 프로그램이다. 스케줄러 기능으로 시각별 또는 시간 간격별 계측을 지원하며, Calibration기능으로 단순계측 뿐만 아니라 센서별 Calibration을 적용하므로 정확한 데이터의 분석이 가능하다. 현재는 ELSYS V2.0이 개발되었다.

(1) 메인화면

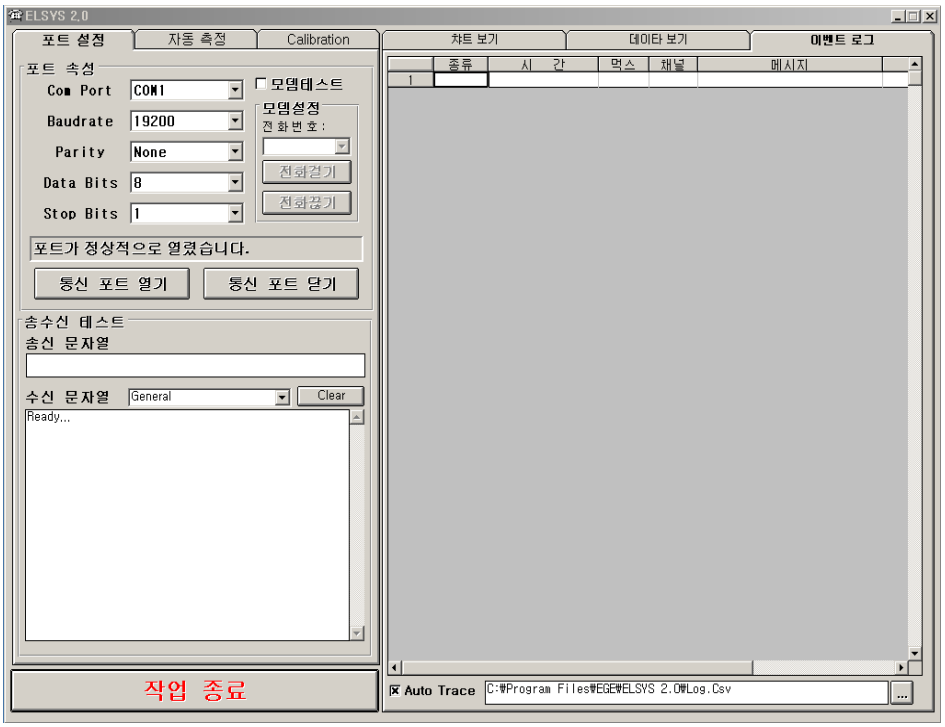


Fig 3.7.7.4 현장 제어 프로그램 메인화면

Fig. 3.7.7.4는 현장 제어프로그램의 메인화면으로, 그림 왼쪽부분은 시스템을 구성하고 있는 각종 장비들로부터 수집된 정보의 송수신시 이를 통합하여 관리할 수 있도록 하기 위하여 각각의 장비들에 대한 통신환경을 설정하는 작업수행을 나타내었다. 즉, 각각의 계측장비로 연결된 각 센서와 연결된 기기의 통신에 관련된 내

용을 설정하는 곳으로 각 센서와의 통신을 위해 TCP/IP 방식에서는 IP 및 Port 설정, RS-232C에서는 통신속도와 통신규약을 설정할 수 있다. 그림 우측은 각종 센서 및 프로그램의 실행 데이터의 주요 변화를 실시간으로 보여주는 창으로, 계측데이터의 실시간 확인과 계측장비와의 통신상태 및 센서문제에 의한 경고사항과 측정상태를 실시간으로 확인할 수 있다.

① 포트 설정

Fig. 3.7.7.5는 포트설정 부분으로 RS-232C의 통신방식을 사용하는 데이터로거와 통신하기 위한 설정 부분이다.

Com Port의 경우는 RS-232C 통신방식을 사용하는 직렬 포트로 선택한다. 일반적으로는 COM1이나 COM3가 많이 사용된다.

Baudrate는 전송속도를 나타내며, Parity는 에러체크용 Parity Bit이다. 요즘은 거의 사용하지 않으므로 None을 기본 값으로 사용한다. Data Bits는 8, Stop Bits : 1 선택한다.

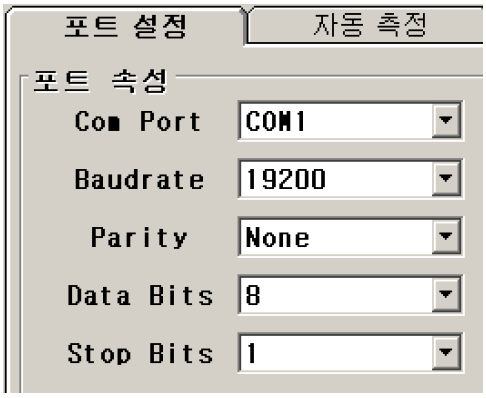


Fig. 3.7.7.5 포트설정

② 모뎀 테스트

통신시설이 열악하여 인터넷망이 보급되지 않는 지역에서는 전화모뎀을 사용하여 데이터 로거와 연결할 수 있다.

Fig. 3.7.7.6은 모뎀테스트 부분으로 전화모뎀 설치시 연결상태를 확인하기 위하여 테스트하는 곳이다. 사용 방법은 통신포트가 열려있는 상태에서 상대방 모뎀의 전

화번호를 입력 후 전화 걸기 버튼을 눌러 전화번호에 설정된 상대편 데이터 로거(모뎀)에 접속하게 되고 이렇게 모뎀 연결 테스트를 끝내면 전화 끊기 버튼으로 테스트를 종료하며 모뎀 연결을 끊을 수 있다.

모뎀에 연결된 상태에서는 수동으로 계측명령을 내려 현재 값을 받아들일 수 있다. 모뎀의 테스트뿐만 아니라, 센서의 연결 상태나 데이터 확인 등에 쓰일 수 있다.

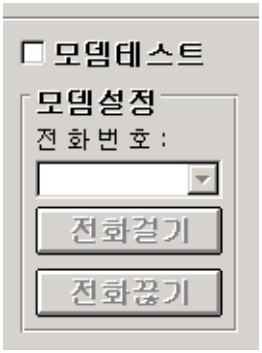


Fig. 3.7.7.6

모뎀테스트 부분

③ 통신포트 열기 및 닫기



Fig. 3.7.7.7 통신포트 제어

㉮ 통신포트 열기

Fig. 3.7.7.7은 위에서 설정한 RS-232C통신 설정을 근거로 하여 통신의 시작과 끝을 컨트롤 할 수 있는 곳으로서 프로그램 시작시 "포트가 열렸습니다"란 메시지가 표시되어 있으면 포트 열기가 된 상태로 시작이 된다. 여기서 통신포트 열기 단추를 누르면 포트정보표시창의 메시지를 확인하여야 하는데 “포트가 열렸습니다”란 표시가 뜨면 포트열기를 성공한 것으로서 정상적인 데이터를 받을 수 있는 상태를 말하며 “포트를 열 수가 없습니다”란 표시가 뜨면 포트열기 실패한 상태를 말한다.

포트가 열리지 않을 경우의 대처 방법으로는, 설정된 포트속성의 설정내용을 확인하여 간단한 설정상의 오류를 체크하고 그 후에도 통신 포트에 이상이 있다면 하드웨어적 이상유무를 확인하여야 한다. 이를 위하여 하이퍼 터미널로 포트를 열고 닫아봄으로써 확인할 수 있다.

㉯ 통신포트 닫기

통신포트 닫기 버튼을 누르면 포트 정보 표시 창에 정상적인 포트 닫기가 성공하였을 경우 “포트가 정상적으로 닫혔습니다”란 메시지가 뜨며 포트 닫기에 실패한 경우 “포트를 닫을 수 없습니다”란 메시지가 뜬다. 포트가 닫히지 않을 경우에는 현재 사용중인 포트를 확인하여야 한다.

④ 송수신 테스트

송수신 테스트는 통신방식이 RS-232C일 경우 사용자가 현재 데이터 로거와의 접속 상태를 자동으로 확인할 수 없기 때문에 계속된 송수신 테스트로 데이터 로거와의 접속 유무를 확인할 수 있는 기능을 가지고 있다.
송신문자열창에 각각의 데이터 로거 형식에 맞게 계측명령이나 상태확인 명령을 보낼 수 있다. 일반적으로 송신 후 최대 응답시간이 3초 이내이므로 데이터 로거에서 3초 이내에 응답이 없는 경우 데이터 로거와의 연결상태나, 센서의 연결 상태 등을 확인해 볼 수 있다. Fig. 3.7.7.8은 송수신 테스트창의 화면이다.

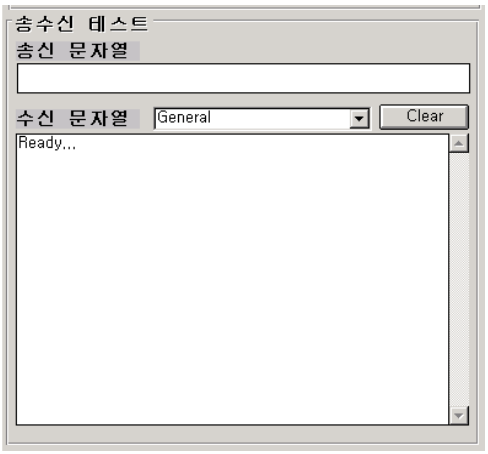
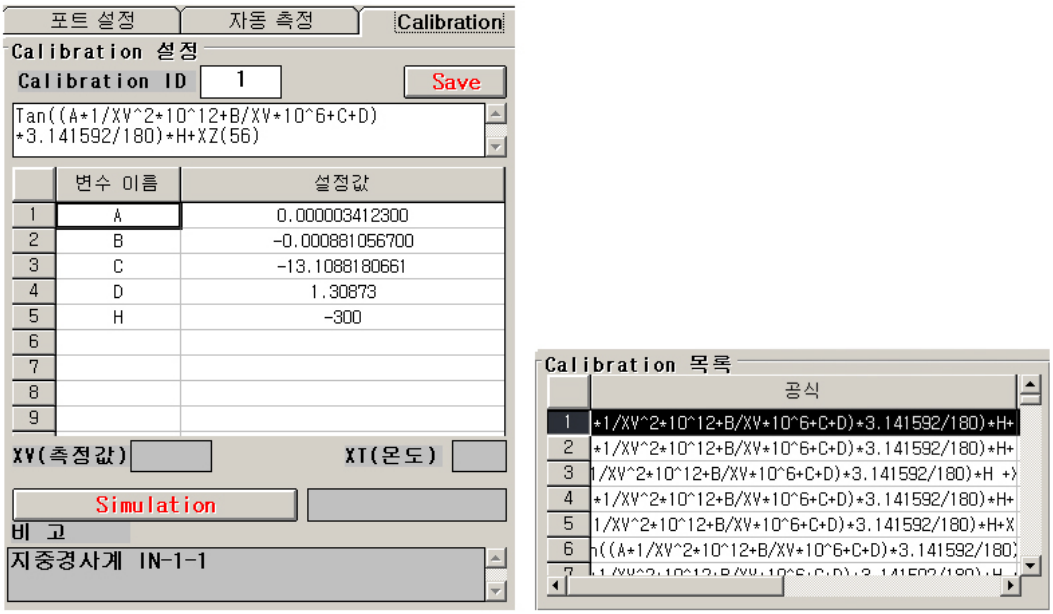


Fig. 3.7.7.8 송수신 테스트

(2) Calibration

ELSYS에서의 Calibration은 데이터 로거에서 측정된 원래 데이터의 값을 사용 목적에 맞게 변환하는 기능이다.



(a) (b)

Fig. 3.7.7.9 Calibration 설정

Fig. 3.7.7.9의 (a)는 값을 변경하여 주는 공식을 입력하고 변경할 수 있는 곳으로서 추후 데이터의 변동(사용 계측 장비의 변동 등)이 있을 때, 이 Calibration 공식만을 교체하여주는 작업만으로 종전과 동일한 값을 얻을 수 있는 곳이다.

사용 방법은 Calibration ID란 곳에 편집하고 싶은 Calibration식의 ID를 숫자로 넣고 Calibration식 창에 변경 혹은 추가하고자 하는 Calibration식을 넣은 후 변수 설정 창에서 미리 예약된 예약어 외의 변수들을 설정한다.

Calibration식의 정확성을 측정하기 위해 저장하기 전 테스트 할 수 있는 곳으로서는 XY(측정값)혹은 XT(온도)란에 임의의 값을 입력하여 공식의 정확함을 확인할 수 있다. 그 외 기존에 저장 되어있던 Calibration식의 세부 내용은 하부의 비고란에서 확인할 수 있다.

Fig. 3.7.7.9의 (b)는 현재 데이터베이스에 저장되어 있는 Calibration 목록을 보여

주는 창으로서 자신이 필요한 Calibration을 선택·판단하는데 많은 도움을 준다.

(3) 자동 측정

Fig. 3.7.7.10은 현재 연구에서 이 프로그램을 선택한 가장 큰 장점 중에 하나로 계측 장비로부터 데이터 값을 실시간으로 받을 수 있으며 이를 앞에서 언급한 Calibration식을 통해 즉각 관리자가 알아 볼 수 있는 수치 데이터를 뽑을 수 있도록 한 부분이다. 이곳을 대략적으로 설명하자면 일단, 먹서/채널은 현재 연결된 센서번호(먹서), 채널번호를 나타내며, 호출시간은 자동 측정시의 시간간격을 설정하는 곳이며, Cal은 현재 행에 적용될 Calibration ID를 표시한 부분이다. 이밖에도 "측정"은 즉시 측정을 말하는 것으로서 예정된 시간이 아닌 자신이 원할 때 바로 측정을 할 경우에 이를 사용한다.

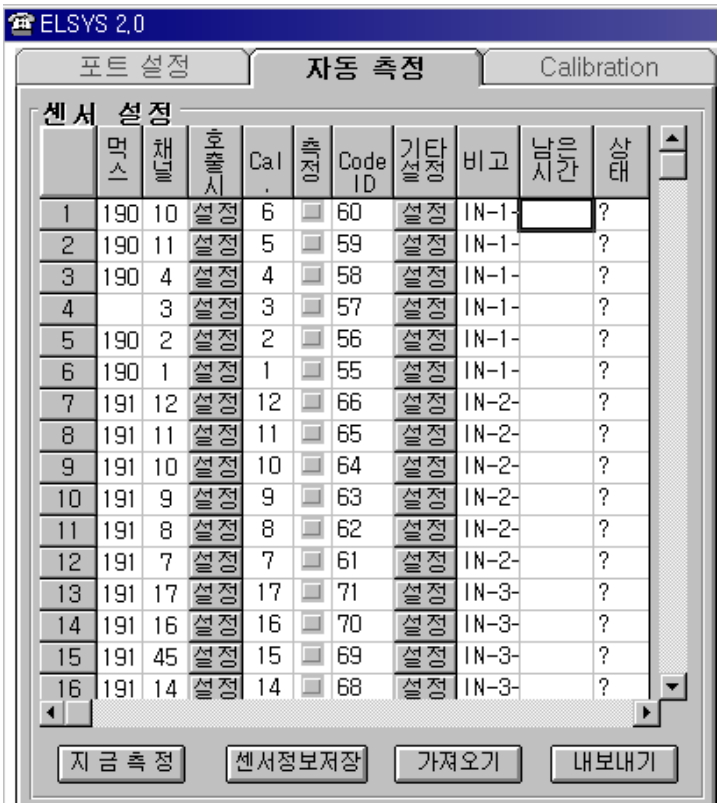


Fig. 3.7.7.10 자동측정

(4) 기타 설정



Fig. 3.7.7.11 기타설정 화면

Fig. 3.7.7.11은 기타 설정 창으로서 현장 제어용 프로그램의 여러 설정을 변경하는 기능을 가지고 있다. 먼저 경고값 설정 항목은 현 시스템의 가장 중요한 부분에 해당하는데, 수위의 변동에 따른 최대 수위를 산정하고 이를 설정하는 곳으로서 최고 수위를 초과할 경우 현장 제어용 프로그램에 의해 Fig. 3.7.7.11 우측하단에 보이는 경고 대상자에게 즉시 연락이 되도록 설계되어 있다.

그 외 통신방법설정 및 로거설정은 이 프로그램의 또 하나의 장점으로서 통신상태가 열악한 지역환경을 고려하여 위에 나열한 통신 방법 중 가장 알맞은 통신 방법을 채택함으로써 간단한 조작 한번으로 통신 방법을 바꿀 수 있으며 다양한 개수의 로거를 직접 적용 사용할 수 있다.

(5) 시간 설정

Fig. 3.7.7.12는 현재 측정되고 있는 자동 측정에 관한 제어를 손쉽게 할 수 있는 곳으로서 “자동측정중지” 선택시 모든 자동측정이 중지되며 중앙 데이터베이스와의 연동하여 현재까지 작업한 모든 측정 자료들을 저장하고 저장 시간 간격을 설정할

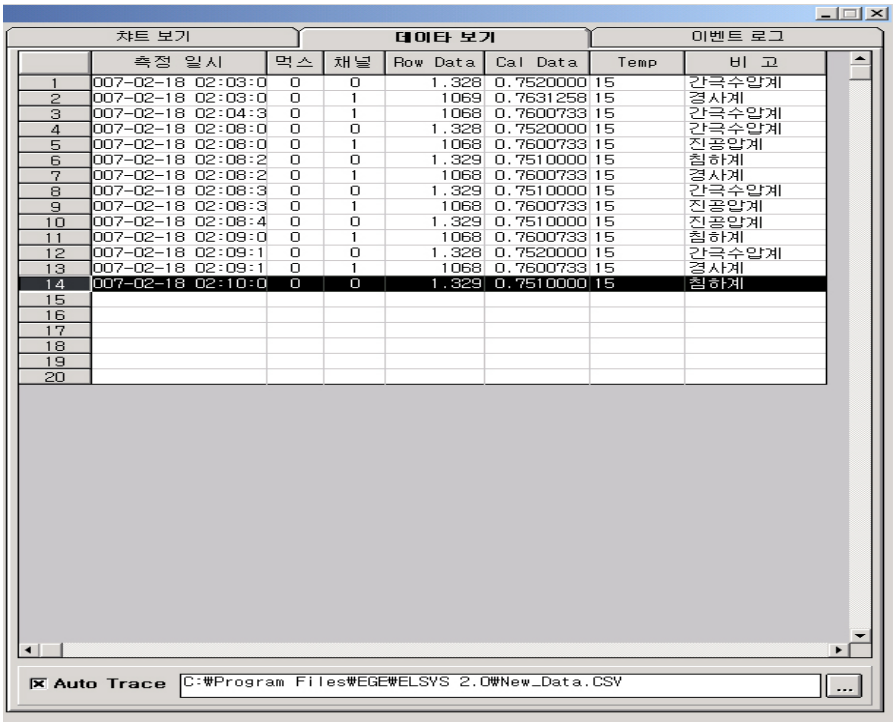
수 있는 곳이다.



Fig. 3.7.7.12 시간 설정

(6) 데이터 보기

Fig. 3.7.7.13은 현재 자동 측정 중인 각각 센서의 데이터 값을 실시간으로 확인할 수 있는 곳으로 측정일시는 측정된 날짜, 시간, 분, 초를 표시하며 “Row Data”값이란 로거에서 측정된 Calibration이 되지 않은 Source Data를 말하며 “Cal Data”는 Row Data를 근거로 하여 Calibration된 데이터 값을 표시한다. 이는 자신이 측정하고 싶은 시각에 현재의 수위 높이를 실시간으로 확인할 수 있는 중요한 데이터가 된다.



	측정 일시	먹스	채널	Row Data	Cal Data	Temp	비 고
1	007-02-18 02:03:0	0	0	1.328	0.7520000	15	간극수압계
2	007-02-18 02:03:0	0	1	1069	0.7631258	15	경사계
3	007-02-18 02:04:3	0	1	1068	0.7600733	15	간극수압계
4	007-02-18 02:08:0	0	0	1.328	0.7520000	15	간극수압계
5	007-02-18 02:08:0	0	1	1068	0.7600733	15	진공압계
6	007-02-18 02:08:2	0	0	1.329	0.7510000	15	침하계
7	007-02-18 02:08:2	0	1	1068	0.7600733	15	경사계
8	007-02-18 02:08:3	0	0	1.329	0.7510000	15	간극수압계
9	007-02-18 02:08:3	0	1	1068	0.7600733	15	진공압계
10	007-02-18 02:08:4	0	0	1.329	0.7510000	15	진공압계
11	007-02-18 02:09:0	0	1	1068	0.7600733	15	침하계
12	007-02-18 02:09:1	0	0	1.328	0.7520000	15	간극수압계
13	007-02-18 02:09:1	0	1	1068	0.7600733	15	경사계
14	007-02-18 02:10:0	0	0	1.329	0.7510000	15	침하계
15							
16							
17							
18							
19							
20							

Fig. 3.7.7.13 데이터 보기

(7) 이벤트 로그

Fig. 3.7.7.14는 현장 제어용 프로그램의 현재 상태를 나타내는 곳으로 현재 현장 제어용 프로그램에 일어나는 모든 이벤트를 실시간으로 확인 할 수 있는 곳으로 측정 상태 및 센서와의 연결 상태를 상세히 보여주는 창이다.

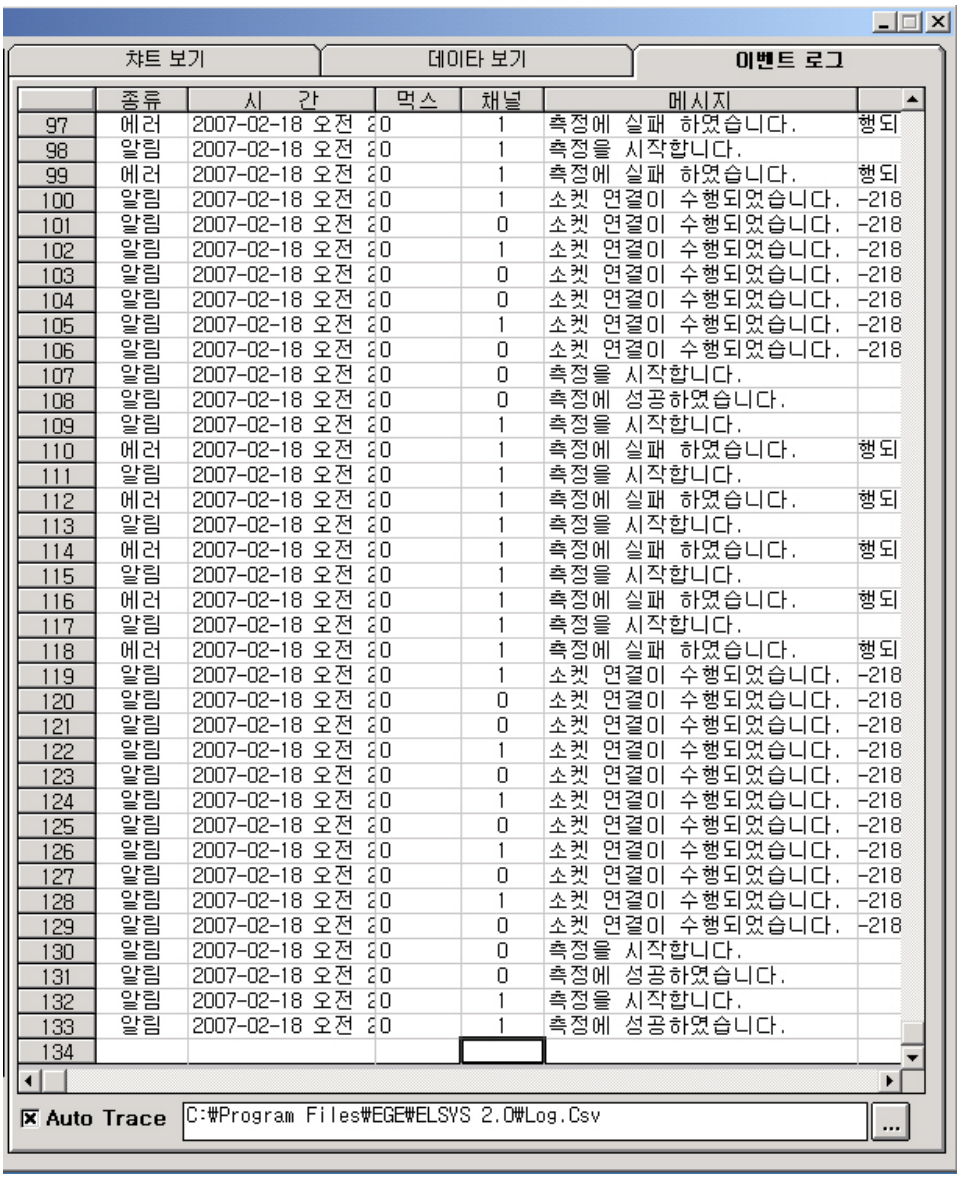


Fig. 3.7.7.14 이벤트 로그

8. 시험 시공 세부 작업 과정

현장 시험시공은 부지정리 및 성토, 배수재 타설, 계측개의 매설, 발전기 및 진공펌프 시스템 설치, 진공호스 계통 설치, 예비가동, 그리고 본가동의 총 7단계로 진행되었다. 각 단계에서의 세부 작업 과정은 다음과 같다.

Step 1. 부지 정리, 접지압확보를 위한 성토, 기본 계획 수립(Fig. 3.7.8.1(a))

: 시공의 편의성을 위하여 부지정리를 실시하고, 백호우 및 배수재 타설장비 등 시공장비의 접지압 확보를 위하여 약 50cm의 성토를 실시한다.

Step 2. 배수재 타설(Fig. 3.7.8.1(b))

: 각각의 섹션에 원형 배수재와 판형 배수재를 타입한다. 타설 간격은 1.5m이며 각 센셩당 260본의 배수재를 타입한다.

Step 3. 계측기 설치(Fig. 3.7.8.1(c))

: 심도에 따른 침하거동과 간극수압 및 진공압을 계측하기 위하여 침하계, 간극수압계, 그리고 진공압계를 설치한다. 진공압계는 배수재 내부에 설치하여 배수재에 직접 가해지는 진공압을 측정할 수 있도록 한다. 개량영역 외부에는 측방변위를 측정하기 위하여 경사계를 설치한다.

Step 4. 발전기, 유류저장통, 진공펌프, 집수기 정 위치에 설치(Fig. 3.7.8.1(d))

: 발전기, 유류저장탱크 및 진공펌프 설치시 장기간 운영에 따른 침하가 발생할 것에 대비하여 접지압을 확보하기 위해 설치 위치에 사석을 포설한다.

Step 5. 진공호스와 배수재 결합, 진공호스와 진공펌프 결합, 전원시스템 연결, 계측시스템(서버, 프로그램 등) 설치, 전원 시스템 최종 마무리(Fig. 3.7.8.1(e))

: 발전기와 전원시스템 및 계측시스템을 연결하고 진공펌프와 진공호스를 모두 연결하여 최종 시스템을 완성한다.

Step 6. 예비 가동

: 약 20일 동안 예비 가동을 실시하여 시스템의 가동상태 및 위험요소 등을 점검한다.

Step 7. 본 가동(Fig. 3.7.8.1(f))

: 예비가동을 통해 현장 시스템의 점검이 완료된 이후 본 가동을 수행한다.

Fig 3.7.8.1에는 각 Step 별 시공 모식도를 나타내었다.



(a) Step 1



(b) Step 2



(c) Step 3



(d) Step 4



(e) Step 5



(f) Step 6, Step 7

Fig 3.7.8.1 각 Step 별 현장 시험 시공 전경

제 8 절 Suction Drain 현장시험시공 결과

1. 침하량 및 수평변위 분포 결과

Fig. 3.8.1.1과 Fig. 3.8.1.2에는 각각 판형 배수재(Section A)와 원형 배수재(Section B)가 타입된 지반의 경과기간에 따른 침하량 분포를 나타내었다. 총 최종 침하량은 판형 배수재가 사용된 지반에서 약 26cm, 원형 배수재가 사용된 지반에서 약 34cm 정도 나타났다. 판형 배수재(Section A)가 사용된 지반의 총 침하량이 원형 배수재(Section B)가 사용된 지반보다 약 8cm 가량 작게 나타났다.

누적 처리기간 31일 이후 약 3일간은 폭우와 낙뢰로 인한 시스템의 손상을 방지하기 위하여 펌프의 가동을 중단하고 발전기의 전원을 차단했다. 이 기간 동안 약간의 침하 지연이 발생하였지만 지반의 팽창(Swelling)은 거의 발생하지 않았으며, 펌프를 재가동 시킨 이후 침하량은 초기의 추세와 유사한 거동이 나타났다.

각 진공압 단계별 총 침하량을 비교해 보면 진공압 단계가 높을수록 총 침하량이 감소하는 경향이 나타났는데, 이는 낮은 진공압 단계에서 압밀이 지속적으로 발생하여 지반의 간극비가 감소하면서 흙 입자 사이가 조밀해지며 투수계수의 감소가 발생되었기 때문이다. 따라서 이러한 효과로 인하여 시간경과에 따라 펌프를 통해 가해준 진공압에 대한 배수재 내부의 진공압 효율이 감소되는 경향이 나타났다. 나선코어 원형배수재의 개량효과가 이중코어 판형배수재 보다 크게 나타난 이유는 원형의 Core 형태로 인해 진공을 적용시킬 수 있는 실제 공기의 통로가 판형 Core 형태 보다 더 컸기 때문에 나타난 결과이며, 이로 인해 지반 내 진공압을 더 효율적으로 적용 시킬 수 있었다.

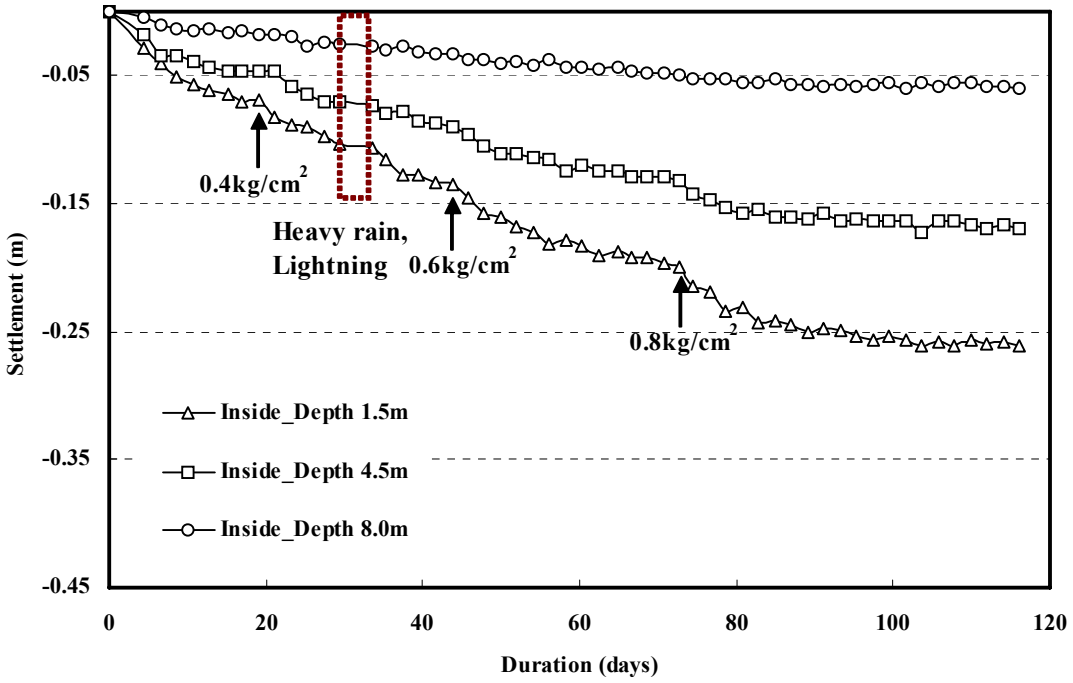


Fig. 3.8.1.1 진공압 기간에 따른 침하량 (Section A)

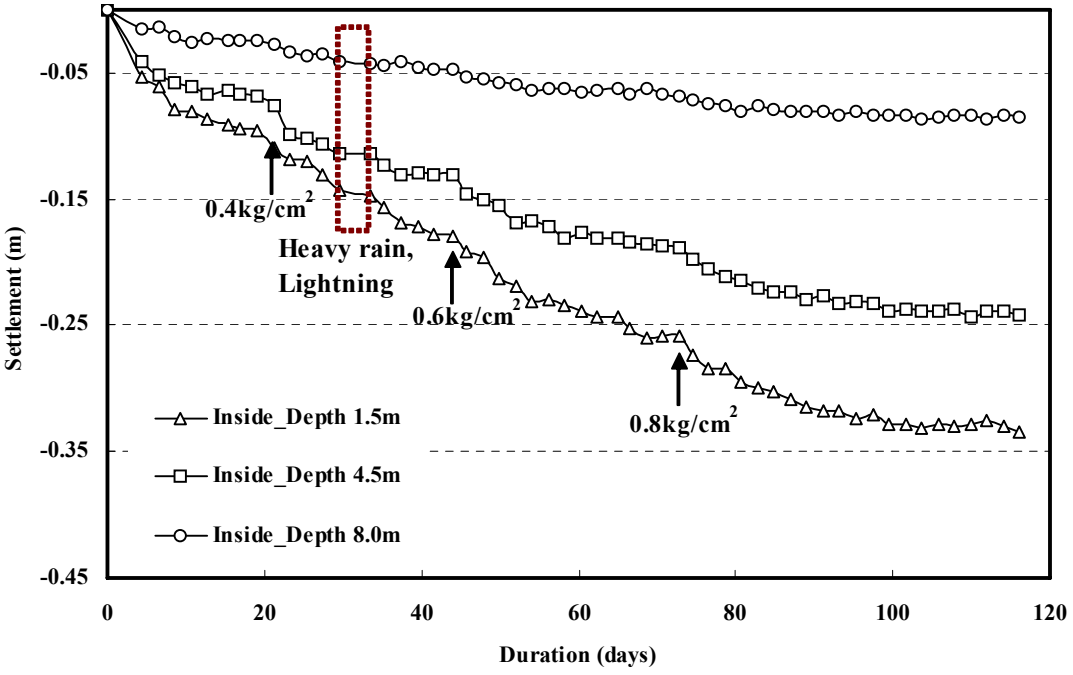


Fig. 3.8.1.2 진공압 기간에 따른 침하량 (Section B)

Fig. 3.8.1.3과 Fig. 3.8.1.4에는 각각 판형 배수재(Section A)와 원형 배수재(Section B)가 타입된 지반의 경과기간에 따른 배수속도 분포를 나타내었다. 석션 드레인 공법의 경우 지반의 수평변위가 개량영역 안쪽으로 발생하지만, 지반의 자중에 의하여 개량영역 바깥쪽으로 발생하려는 수평변위와 상쇄되기 때문에 실제 측정결과 약 4~5cm의 작은 수평변위만이 발생하였다. 따라서 개량대상 지반의 변위가 연직방향으로만 발생하고 수평방향으로는 발생하지 않는다고 가정하여, 대상 지반의 면적(30×20m)과 침하량을 토대로 배수속도를 역산하였다($Q_{out}(m^3/day) = \frac{30m \times 20m \times settlement(m)}{duration(day)}$).

Section A의 경우 배수속도는 초기 3.88m^3/day에서 압밀이 진행됨에 따라 시험시공 종료시에는 1.35m^3/day로 감소하였으며, Section B의 경우에는 7.03m^3/day에서 1.73m^3/day로 감소하였다. 배수속도는 Section B가 Section A에 비해서 크게 나타났는데, 이는 Section A의 경우 원형배수재를 사용하여 방사방향으로 배수가 원활하게 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

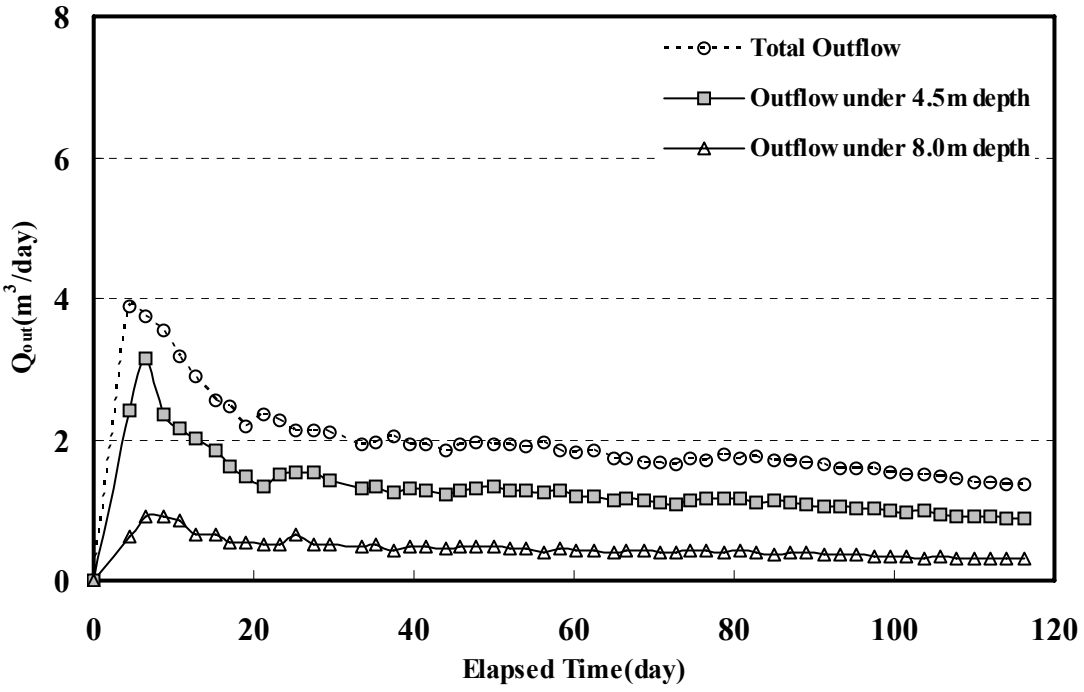


Fig. 3.8.1.3 진공압 기간에 따른 배수속도 (Section A)

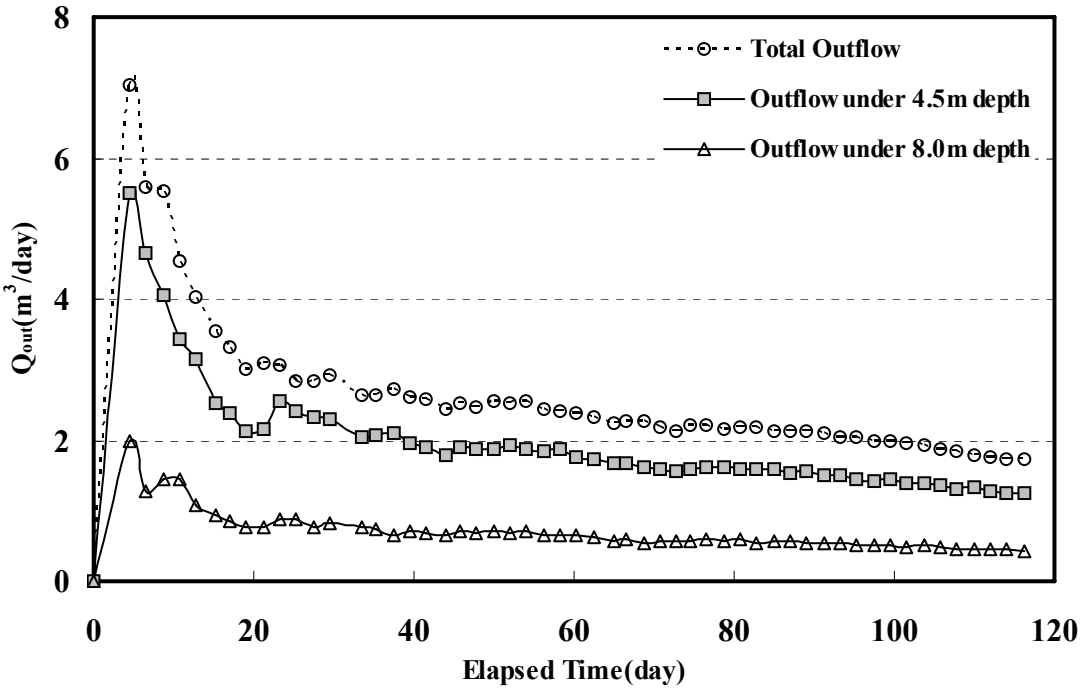


Fig. 3.8.1.4 진공압 기간에 따른 배수속도 (Section B)

Fig 3.8.1.4와 Fig 3.8.1.5에는 각각 Section A와 Section B의 개량영역 중심에서 측정된 침하량과 개량영역으로부터 1m, 3m 떨어진 지점에서 측정된 침하량 분포를 비교하여 나타내었다. 그 결과 개량영역으로부터 멀어질수록 진공압의 영향이 작아지면서 침하량이 급격히 감소하였다. 판형배수재가 사용된 Section A의 경우 개량영역으로부터 1m 지점에서 측정된 침하량은 약 5cm로 나타났으며, 3m지점의 경우 약 1cm 내외로 진공압의 영향이 거의 미치지 않은 것으로 나타났다.

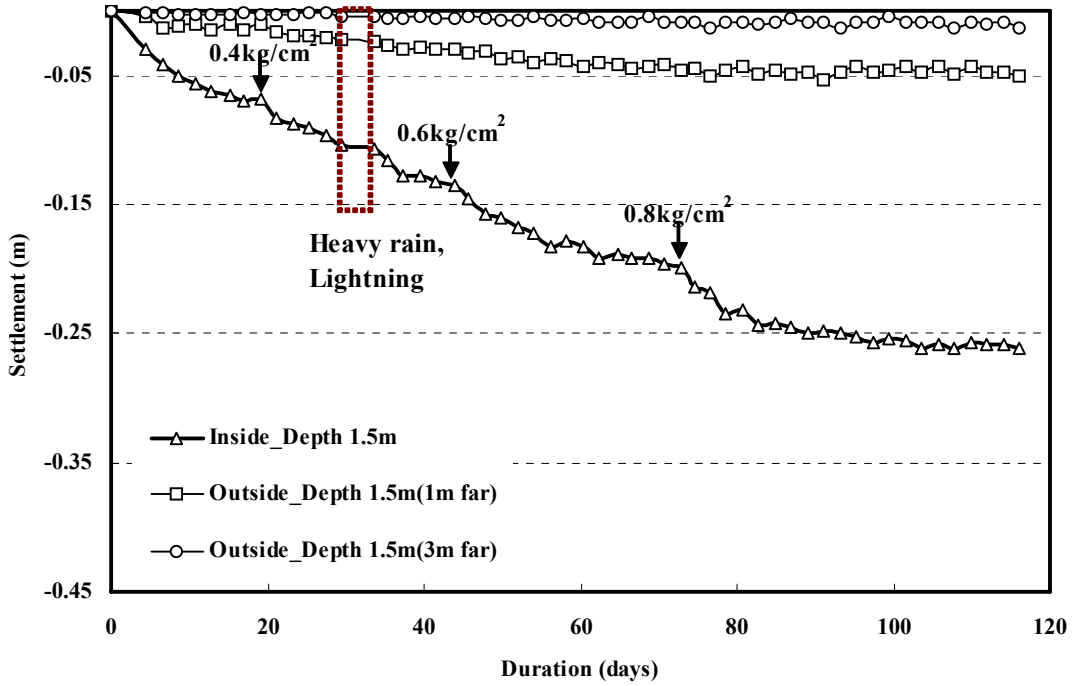


Fig. 3.8.1.4 개량영역 내·외부 침하량 분포(Section A)

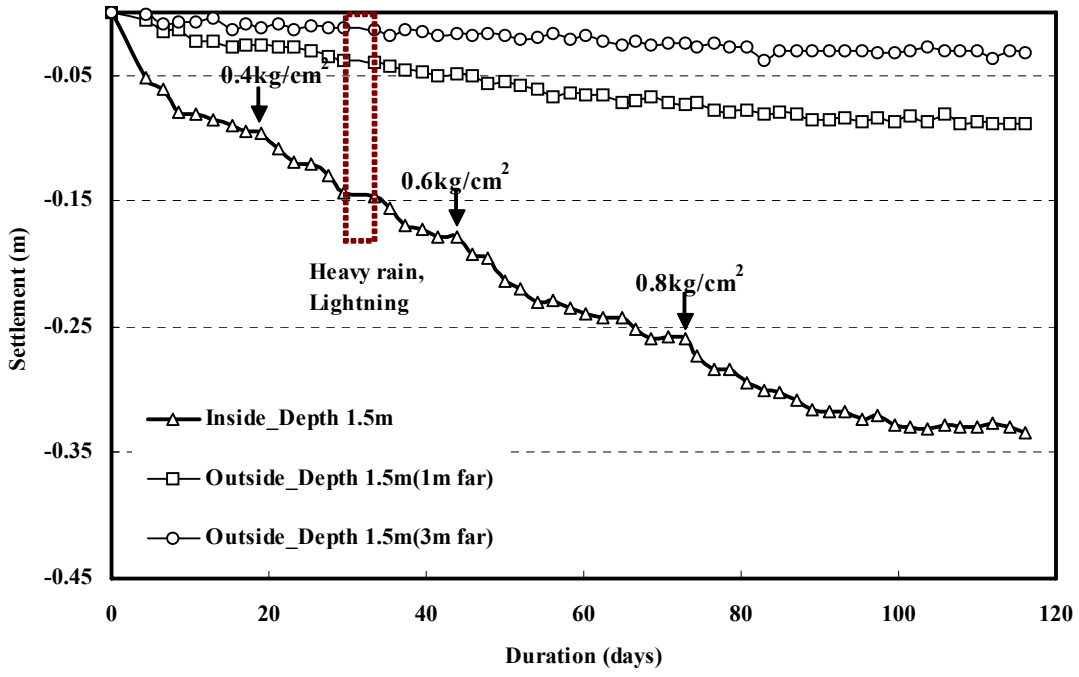


Fig. 3.8.1.5 개량영역 내·외부 침하량 분포(Section B)

Fig. 3.8.1.6 ~ Fig. 3.8.1.9는 Section A의 경우에서 나타난 침하량 추이와 Asaoka의 장기침하예측기법으로 예측된 최종침하량을 바탕으로 각 단계에서 발생된 압밀도 분포를 나타낸 그래프이며, Fig. 3.8.1.10 ~ Fig. 3.8.1.13는 Section B에서의 압밀도 분포를 나타낸 그래프이다. 각각의 단계별로 진공압 기간은 -0.2kg/cm^{2}에서 약 20일, -0.4kg/cm^{2}에서 약 25일, -0.6kg/cm^{2}에서 약 29일, -0.8kg/cm^{2}에서 약 43일이었으며, 모든 단계에서 약 80% 이상의 압밀도가 나타났다.

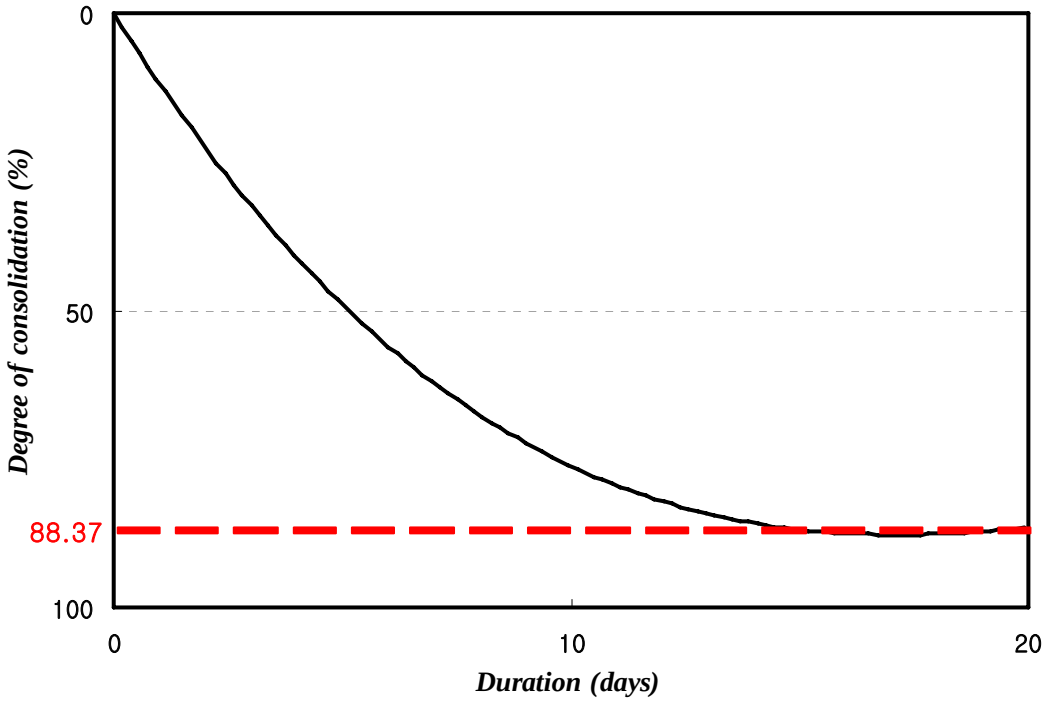


Fig. 3.8.1.6 Section A에서 진공압 기간에 따른 압밀도 분포 (-0.2kg/cm^2)

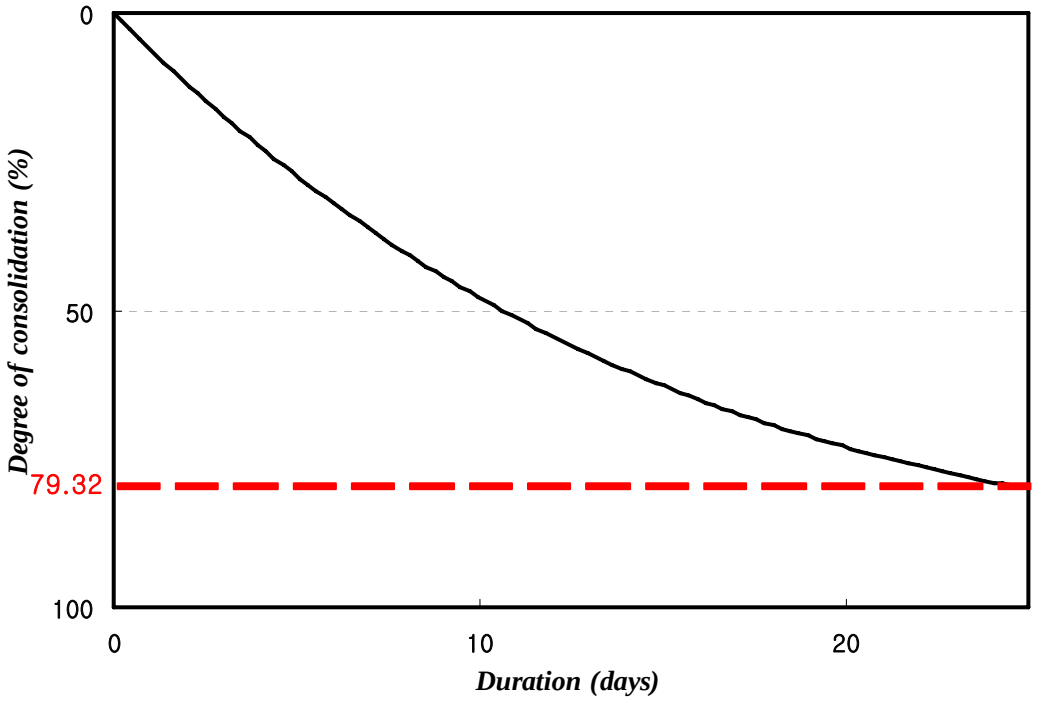


Fig. 3.8.1.7 Section A에서 진공압 기간에 따른 압밀도 분포 (-0.4kg/cm^2)

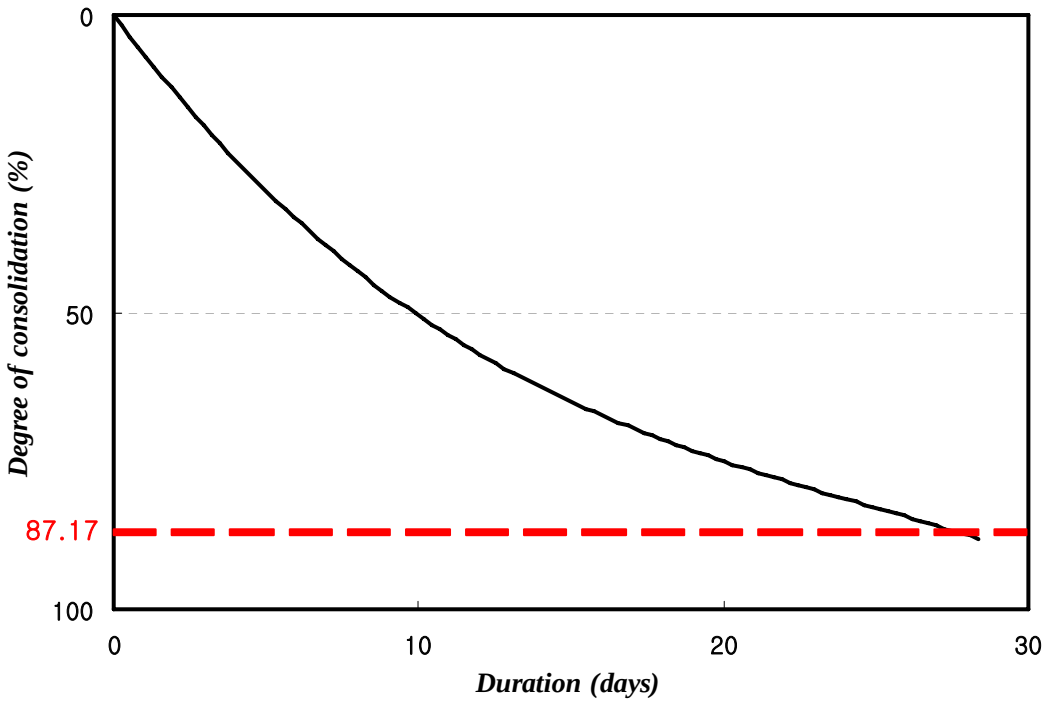


Fig. 3.8.1.8 Section A에서 진공압 기간에 따른 압밀도 분포 (-0.6kg/cm^2)

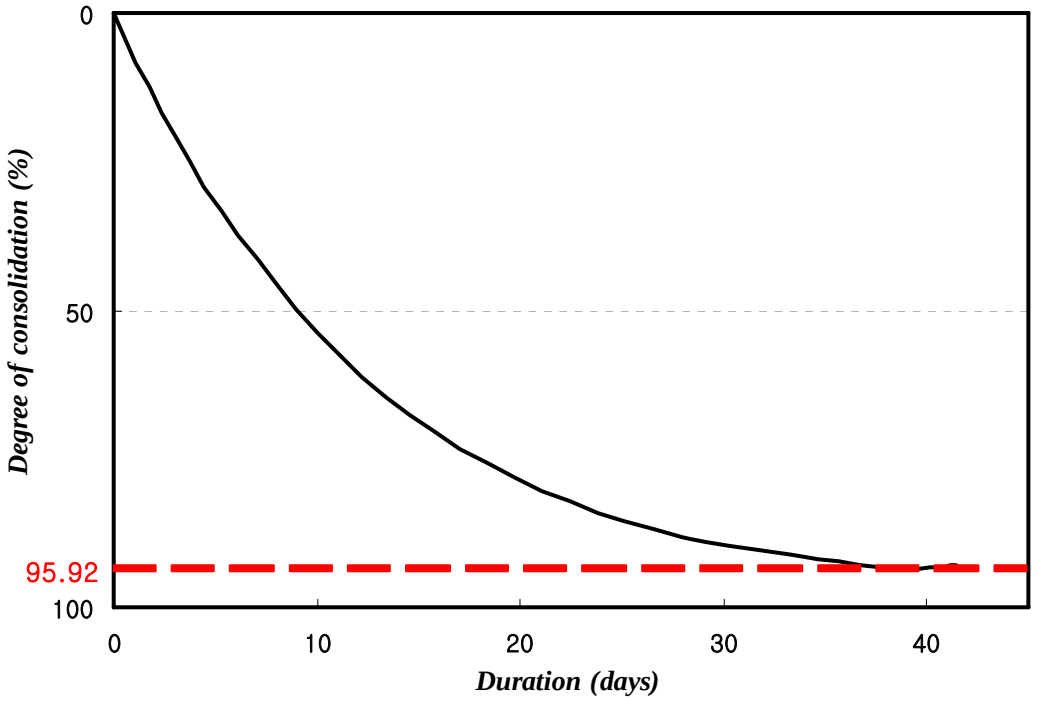


Fig. 3.8.1.9 Section A에서 진공압 기간에 따른 압밀도 분포 (-0.8kg/cm^2)

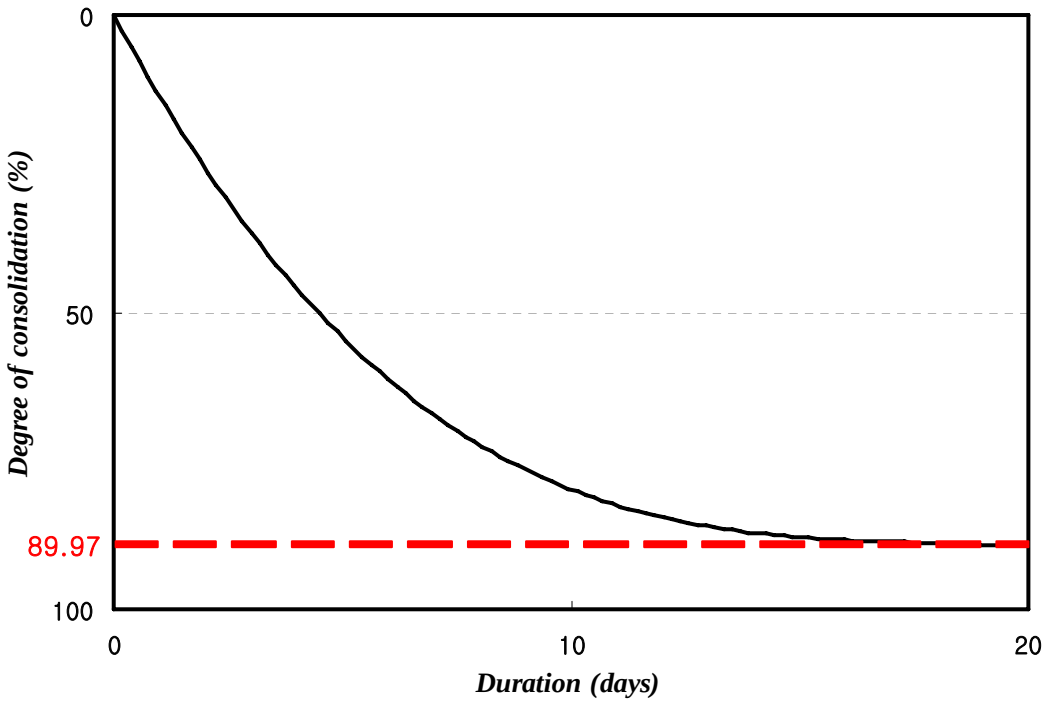


Fig. 3.8.1.10 Section B에서 진공압 기간에 따른 압밀도 분포 (-0.2kg/cm^2)

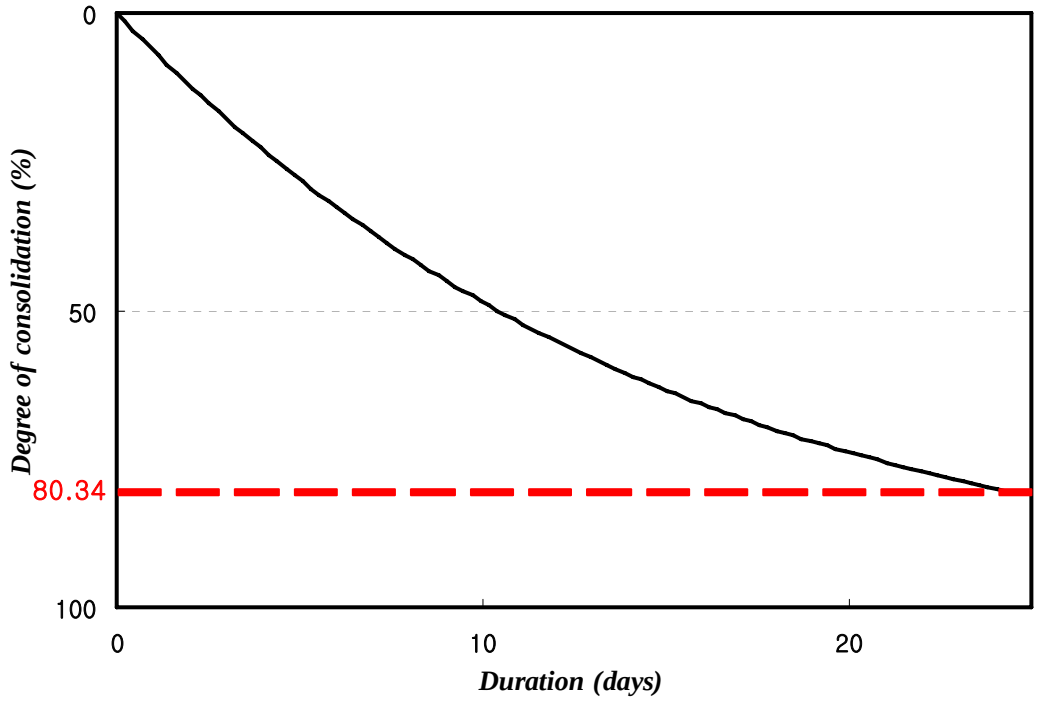


Fig. 3.8.1.11 Section B에서 진공압 기간에 따른 압밀도 분포 (-0.4kg/cm^2)

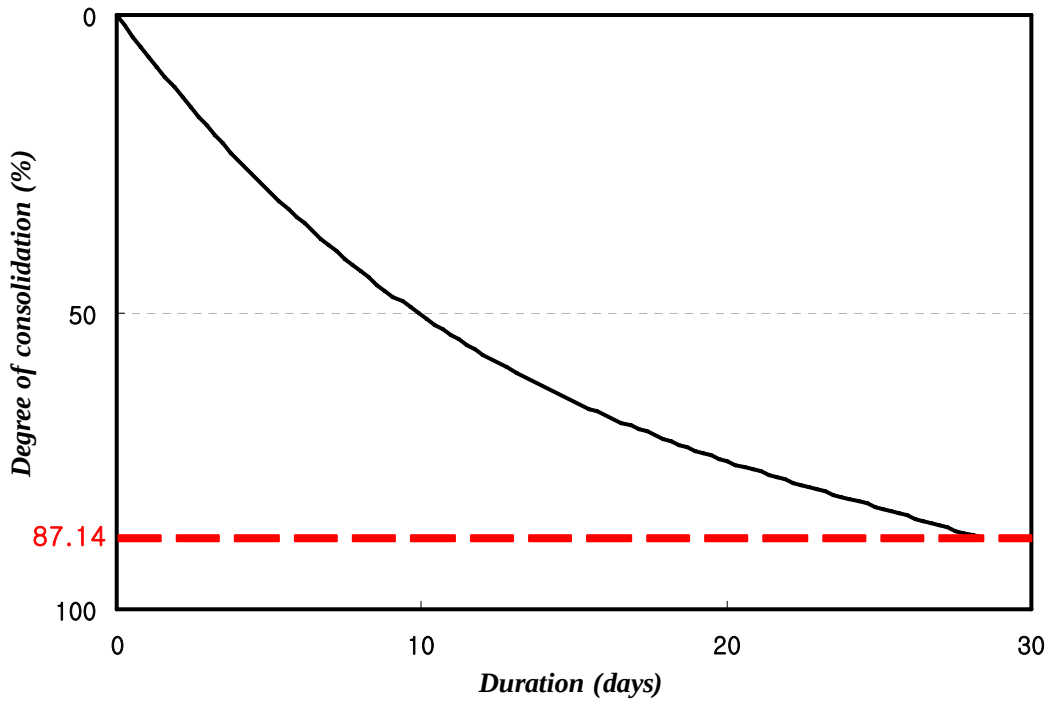


Fig. 3.8.1.12 Section B에서 진공압 기간에 따른 압밀도 분포 (-0.6kg/cm^2)

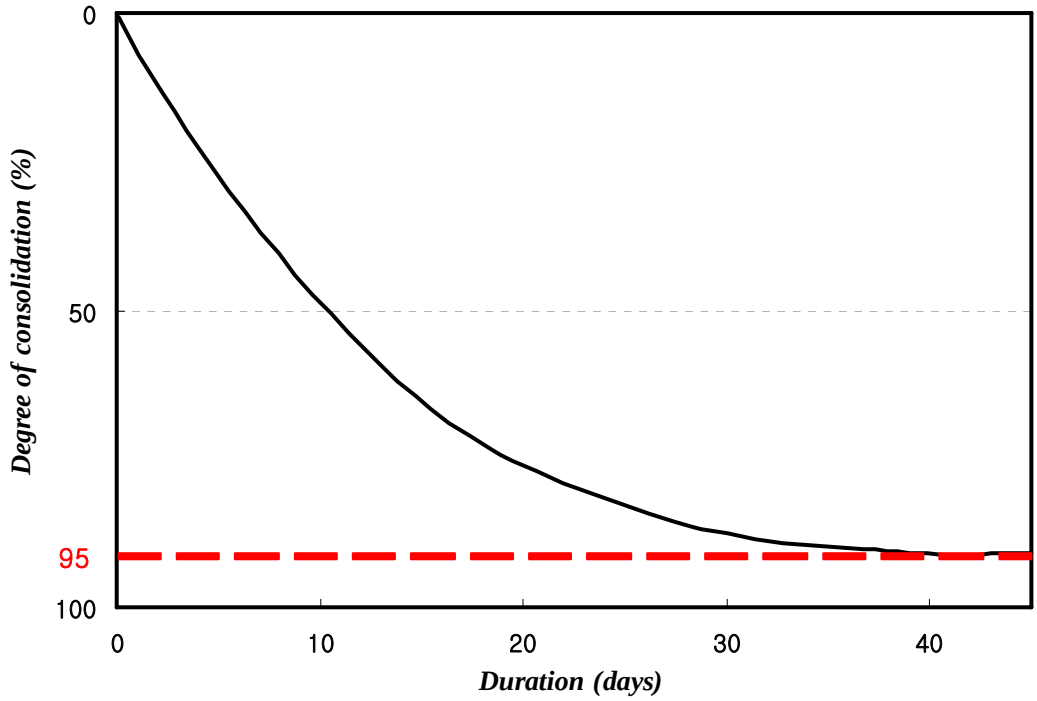


Fig. 3.8.1.13 Section B에서 진공압 기간에 따른 압밀도 분포 (-0.8kg/cm^2)

Fig 3.8.1.14와 Fig. 3.8.1.15는 Section A와 Section B의 개량영역 경계지점에서 측정된 수평변위 분포를 심도별로 나타낸 그래프이다. Section A의 경우 지표에서 측정된 최대 수평변위는 약 3.8cm로 나타났으며, Section B에서는 약 5.3cm로 나타났다. 일반적인 성토재하 공법의 경우와는 반대로 석션드레인 공법의 경우 지반 내 가해진 진공압으로 인해 미개량 영역의 지반이 개량영역 방향으로 밀려들어오면서 수평변위가 개량영역 내부 방향으로 발생하였다. 또한 수평변위는 심도가 깊어짐에 따라 급격히 감소하는 분포를 나타났다.

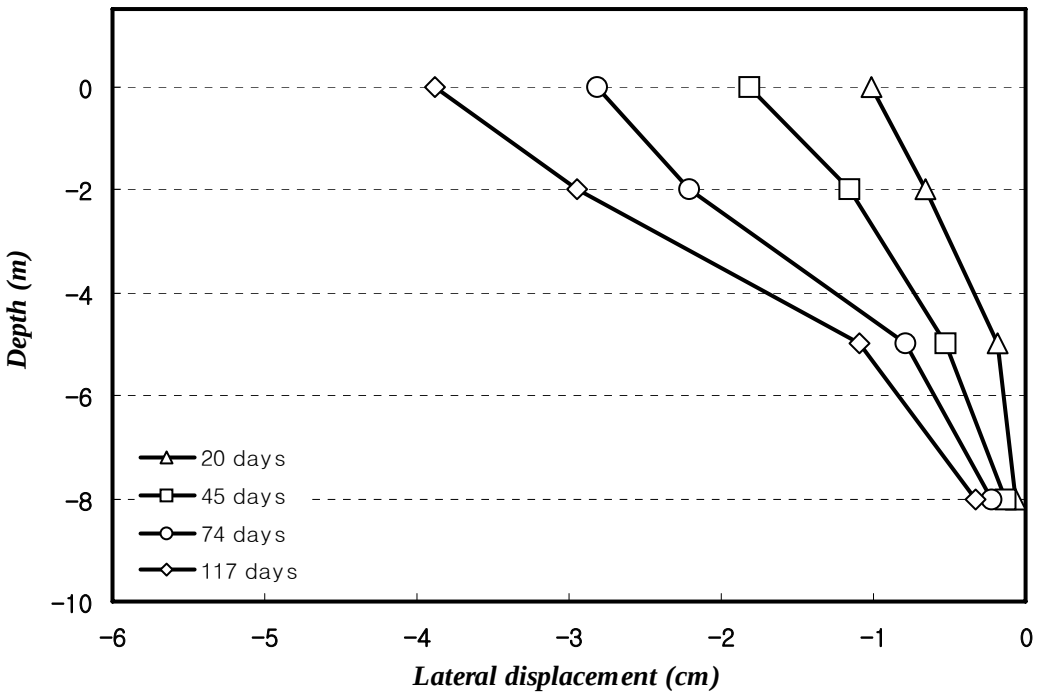


Fig. 3.8.1.14 심도에 따른 수평변위 분포 (Section A)

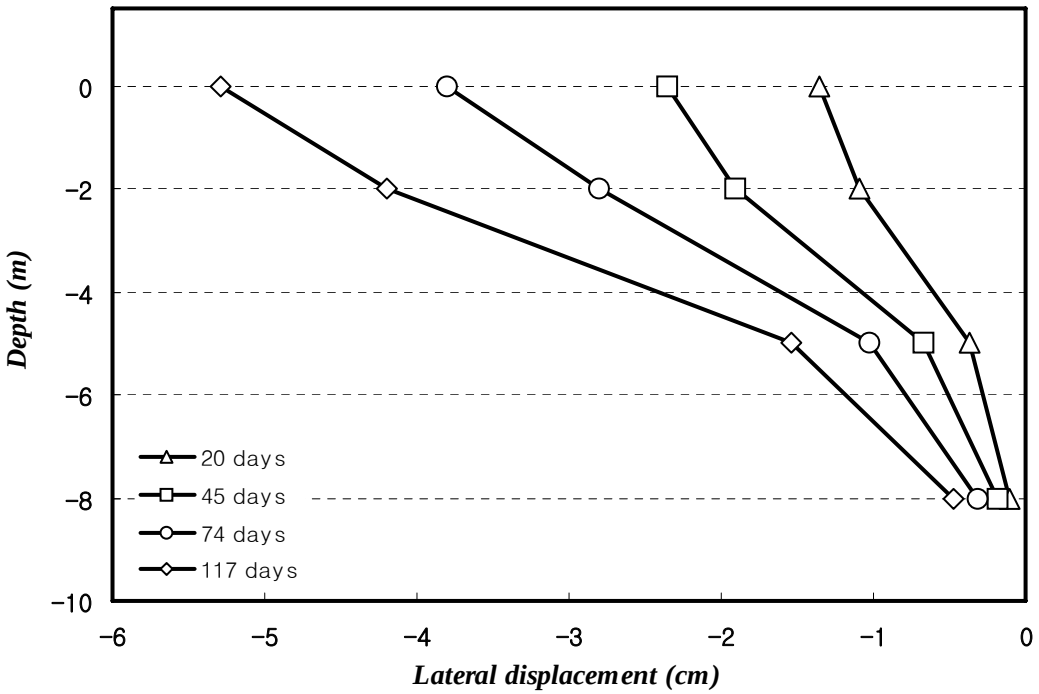
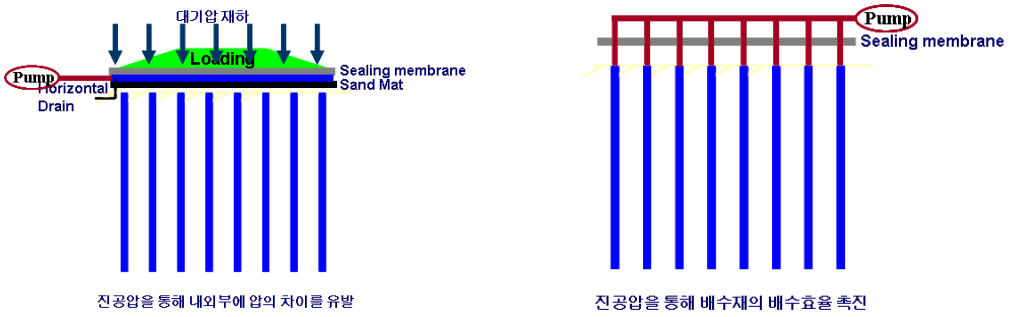


Fig. 3.8.1.15 심도에 따른 수평변위 분포 (Section B)

2. 성토조건과의 비교 결과

석션드레인 공법은 배수재에 직접적인 진공압을 가하여 배수를 촉진시키는 공법으로서 진공압밀공법(대기압 재하공법)의 개량 메커니즘과는 다르다(Fig 3.8.2.1). 이는 성토재의 단위중량과 성토고 높이로 인해 유발되는 개량효과와 동일한 크기의 진공압이 유발하는 개량도의 크기가 같지 않음을 의미한다. 따라서 PBD공법에서의 몇 m의 성토고가 석션드레인공법의 진공압 효과와 동일한 개량효과를 나타내는지 파악하기 위해, 배수재에 직접적인 부압을 가한 경우(석션드레인공법)와 성토재를 재하 했을 때(PBD공법) 발생된 개량추이를 검토하였다. 이를 위해, 본 연구의 시험시공에서 계측된 침하량과 여러 가지 하중 단계 별로 발생된 예측된 최종 침하량을 비교/분석하였다(Fig 3.8.2.1, Fig 3.8.2.2). 이때, Barron의 방사형 압밀이론을 이용하여 1.5m 간격의 배수재가 타입된 경우 발생된 시간계수와 압밀도의 관계를 통해 침하량과 시간관계를 예측하여 도시하였다.



(a) 진공압밀공법(대기압재하공법) (b) 석션드레인공법

Fig. 3.8.2.1 진공압밀공법과 석션드레인공법의 비교

Fig. 3.8.2.2와 Fig. 3.8.2.3에는 각 성토단계 별로 Barron의 방사형 압밀이론과 예측된 최종 침하량을 이용하여 구해진 시간에 따른 침하량을 현장시험시공 결과와 함께 도시하였다. 각 성토단계 별 압밀 시간은 현장시험 시공의 진공압 단계기간과 동일하게 설정하였다. Section A(판형 배수재)의 경우 침하추이는 약 0.7m의 성토고에 의해 유발된 침하추이와 유사하게 나타났으며, Section B(원형 배수재)의 경우에는 약 1.0m의 성토고에 의한 침하량과 유사한 것으로 나타났다. 그러나 Barron의 방사형 압밀이론은 수평변위를 고려하지 않은 이론으로써, 정확한 성토고

산정을 위해서는 현장의 다양한 인자 및 수평변위를 고려한 해석이 수행되어야 할 것으로 판단된다. 이에 따라 본 연구에서는 석션드레인 공법 전용 해석 프로그램을 이용하여 감량화 측면 및 개량도 측면에서 석션드레인 공법과 동일한 효과를 나타내는 성토고를 결정하였으며, 이는 제 3장 9절에 나타내었다.

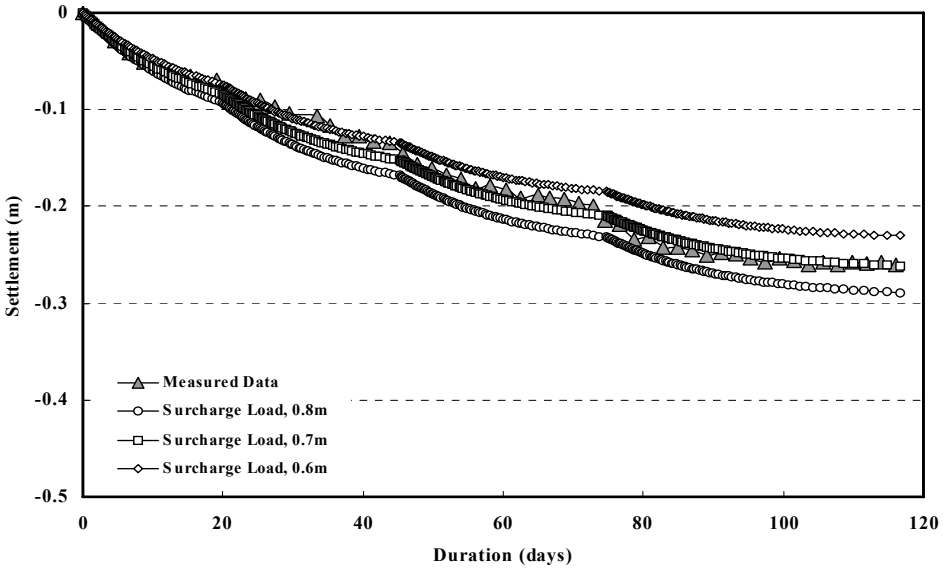


Fig 3.8.2.1 진공압과 동일한 조건의 성토고로 예측된 침하량과 측정된 침하량의 비교(Section A)

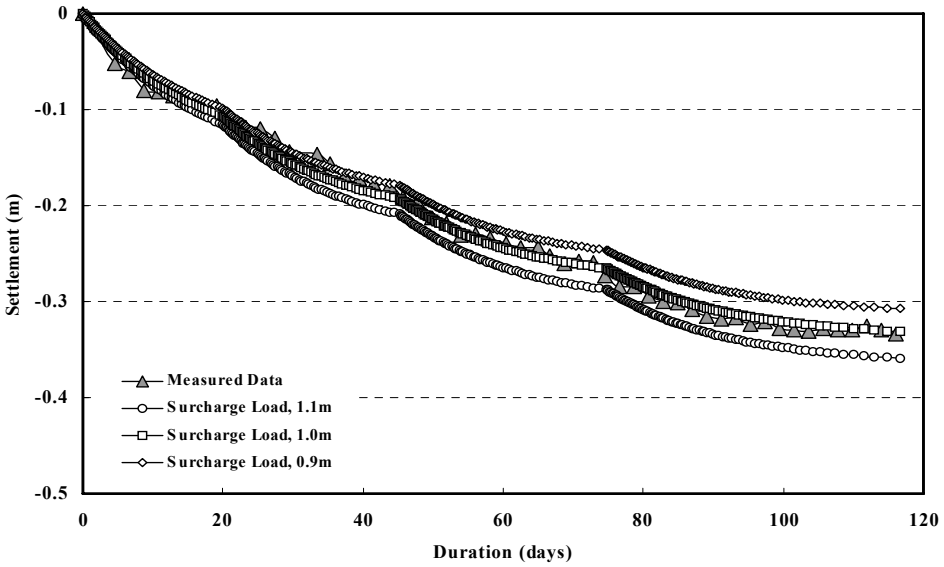


Fig 3.8.2.2 진공압과 동일한 조건의 성토고로 예측된 침하량과 측정된 침하량의 비교(Section B)

3. 진공압 분포 결과

Fig. 3.8.3.1과 Fig. 3.8.3.2에는 Section A와 Section B에서 측정된 진공압 분포를 나타내었다. 심도가 증가함에 따라 효율의 감소로 인하여 측정된 진공압의 크기가 감소하는 경향을 나타냈다.

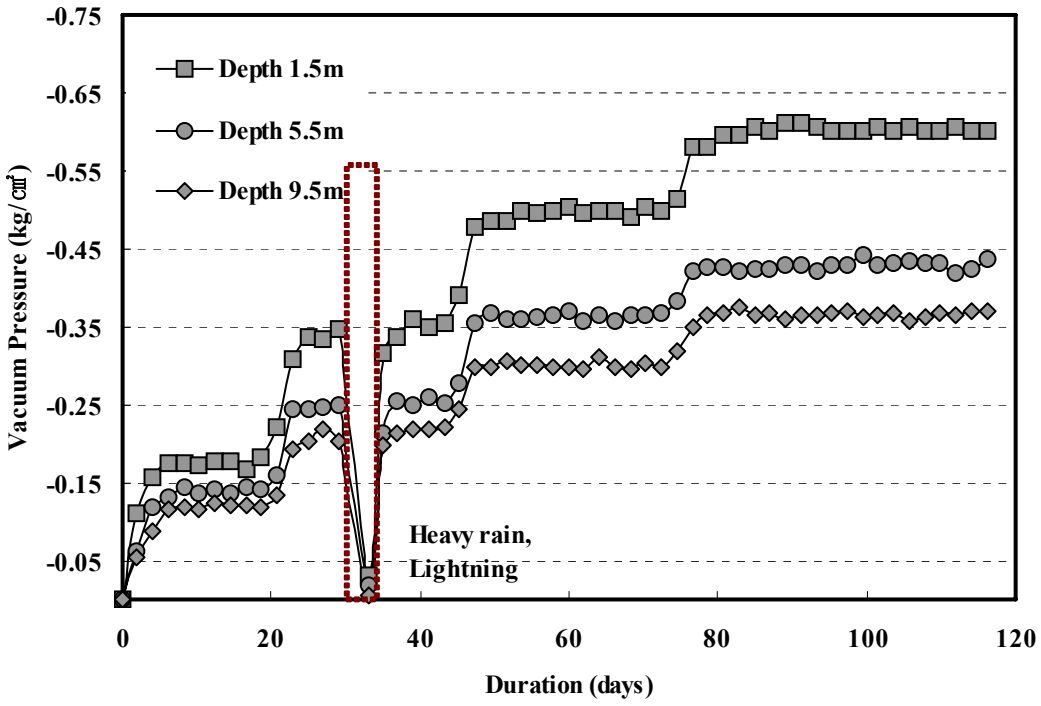


Fig. 3.8.3.1 시간에 따른 진공압 분포 (Section A)

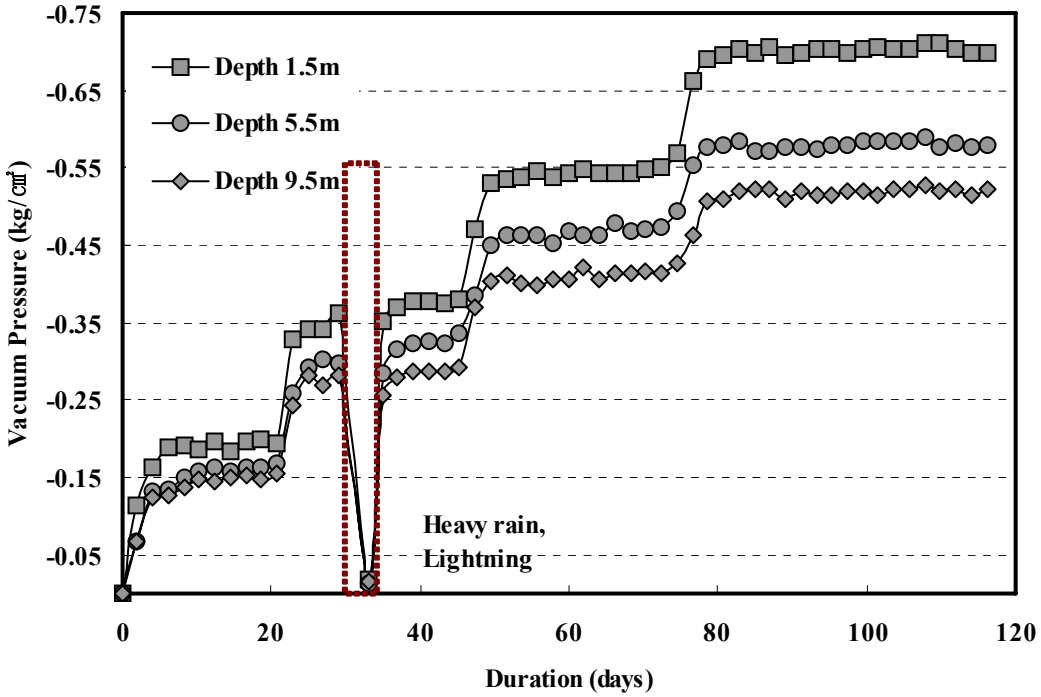


Fig. 3.8.3.2 시간에 따른 진공압 분포 (Section B)

Fig. 3.8.3.3과 3.8.3.4는 각각 진공압 단계별 진공압 효율을 나타낸 그래프이다. Section A의 경우 진공압 효율은 심도 1.5m 지점에서 평균 약 85% 정도로 나타났으며 심도 9.5m 지점에서는 약 48% 정도로 감소되었다. Section B의 경우 진공압 효율은 심도 1.5m 지점에서 약 90%, 심도 9.5m 지점에서 약 70% 정도로 판형 배수재에 비해서 진공압 효율이 크게 나타났다. 이는 배수재와 호스가 직접 연결 가능한 원형 배수재와는 달리 판형 배수재의 경우 연결이 복잡하여 진공압의 유지가 잘 이루어지지 않았기 때문이다. 폭우로 인하여 시스템의 가동이 중단된 이후에 측정된 진공압은 차츰 증가하여 원상태를 회복하였다.

원형 배수재의 경우 진공압 효율은 심도 1.5m 지점에서 최대 98%정도로 나타났으며, 진공압의 크기가 커질수록 그 효율은 조금씩 감소하는 경향을 보였다. 심도 1.5m 지점에서는 진공압의 손실이 거의 발생하지 않았는데, 이는 진공펌프로부터 가장 가까우며 실링층의 기밀이 완벽하게 유지되었기 때문이다. 심도 9.5m에서 산정된 진공압 효율은 최대 74%로 실링층과 복토층을 제외하고 심도가 8m 증가하는 동안 24%의 효율 감소가 발생하였다. 판형 배수재의 경우 심도 1.5m 지점에서 측

정된 평균 진공압 효율은 약 85% 정도로 원형배수재보다 9% 가량 효율이 낮은 결과를 보였으며, 심도가 깊어짐에 따라 효율의 차이는 더욱 크게 발생하였다. 심도 9.0m에서의 진공압 효율은 약 47%로 심도가 8m 깊어지는 동안 효율은 약 38% 감소하였다.

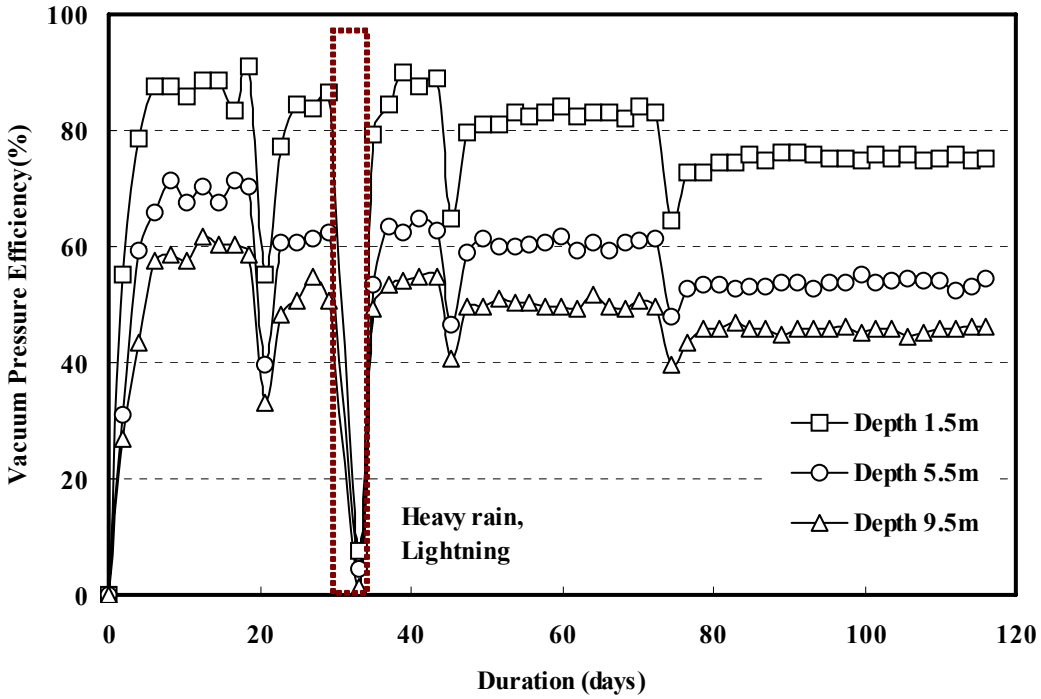


Fig. 3.8.3.3 시간에 따른 진공압 효율 분포 (Section A)

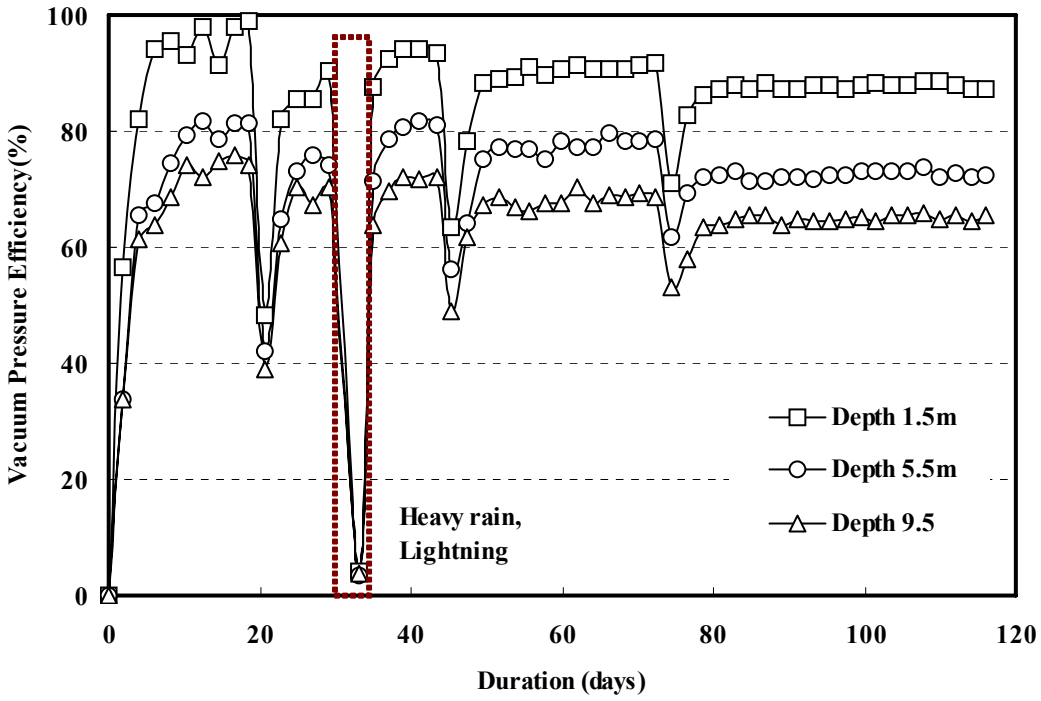


Fig. 3.8.3.4 시간에 따른 진공압 효율 분포 (Section B)

Fig. 3.8.3.5와 Fig. 3.8.3.6은 Section A와 Section B에서 시간에 따른 평균 진공압 효율 분포를 이용하여 배수재가 40m의 대심도 까지 타설된 경우 진공압 효율을 예측한 그래프이다. 평균 진공압 효율은 심도에 따라 지수적으로 감소하는 경향을 보였으며, 심도 40m에서 진공압 효율은 판형 배수재의 경우 약 5%, 원형 배수재의 경우 약 25%를 나타낼 것으로 예측되었다. 따라서 원형 배수재를 사용할 경우 대심도 연약지반에 석션드레인 공법의 적용에 유리하게 작용할 것으로 판단된다.

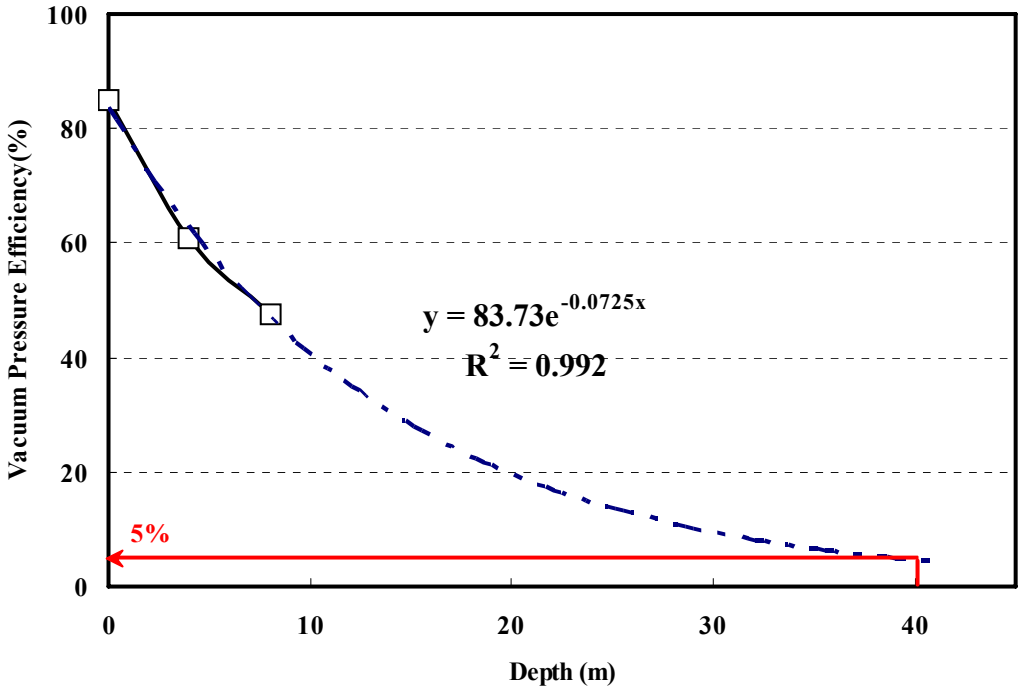


Fig. 3.8.3.5 심도에 따른 진공압 효율 예측 (Section A)

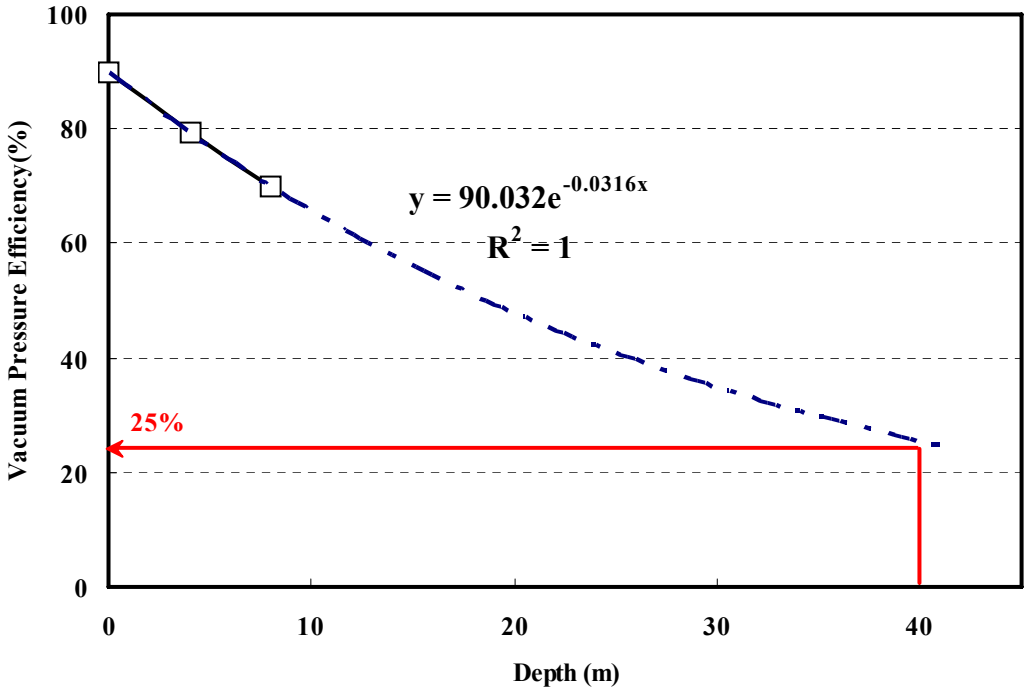


Fig. 3.8.3.6 심도에 따른 진공압 효율 예측 (Section B)

Fig. 3.8.3.7과 Fig. 3.8.3.8에는 각각 Section A와 Section B의 진공압 분포를 심도에 따라 나타내었다. 진공압 단계가 커질수록 심도에 따른 효율의 저하가 커지는 것을 알 수 있다.

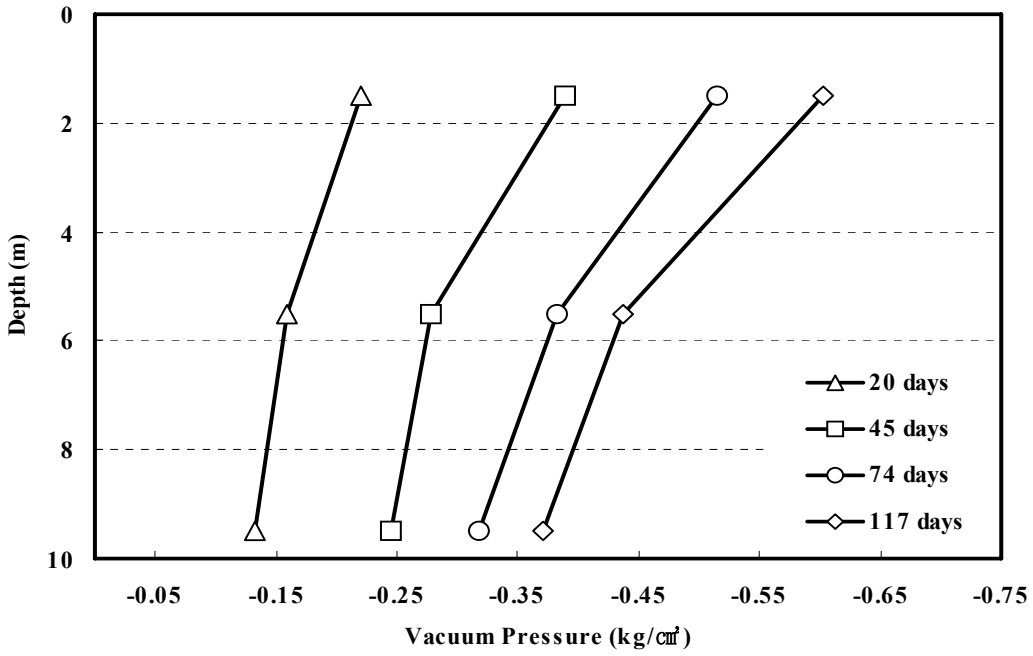


Fig. 3.8.3.7 심도에 따른 진공압 분포 (Section A)

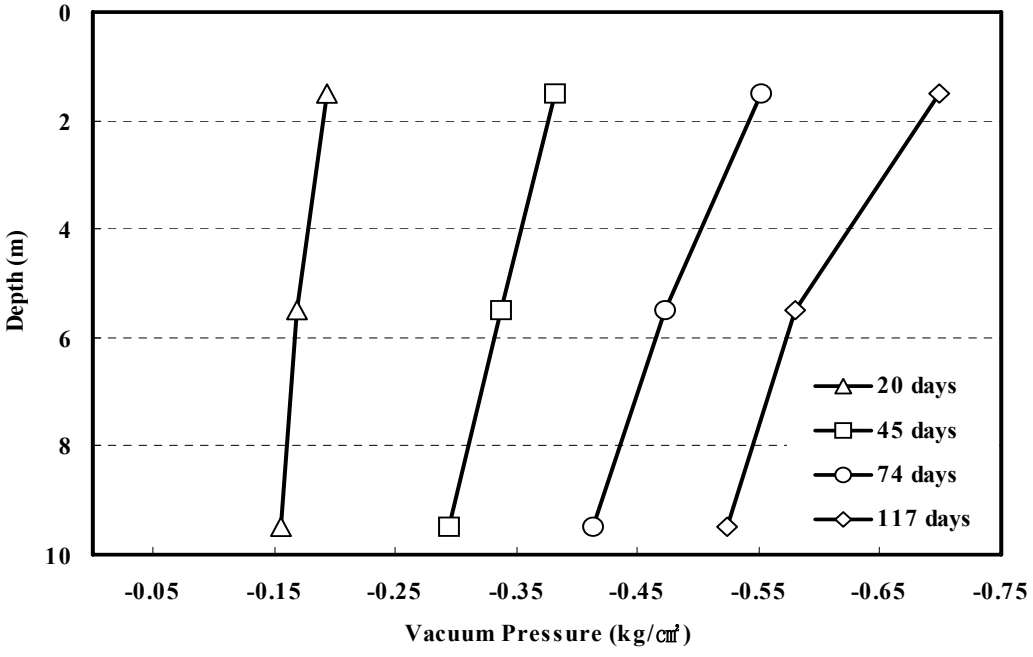


Fig. 3.8.3.8 심도에 따른 진공압 분포 (Section B)

4. 간극수압 분포 결과

Fig. 3.8.4.1과 Fig. 3.8.4.2에는 각각 Section A와 Section B의 중심부 지반에서 측정된 간극수압을 나타내었다. 간극수압은 진공압의 영향으로 시간에 따라 감소하는 경향이 나타났다. 간극수압과 초기 정수압의 차이로 계산된 배수재와 배수재 사이의 진공압은 배수재에서 가해진 진공압의 약 50~58%로 나타났다.

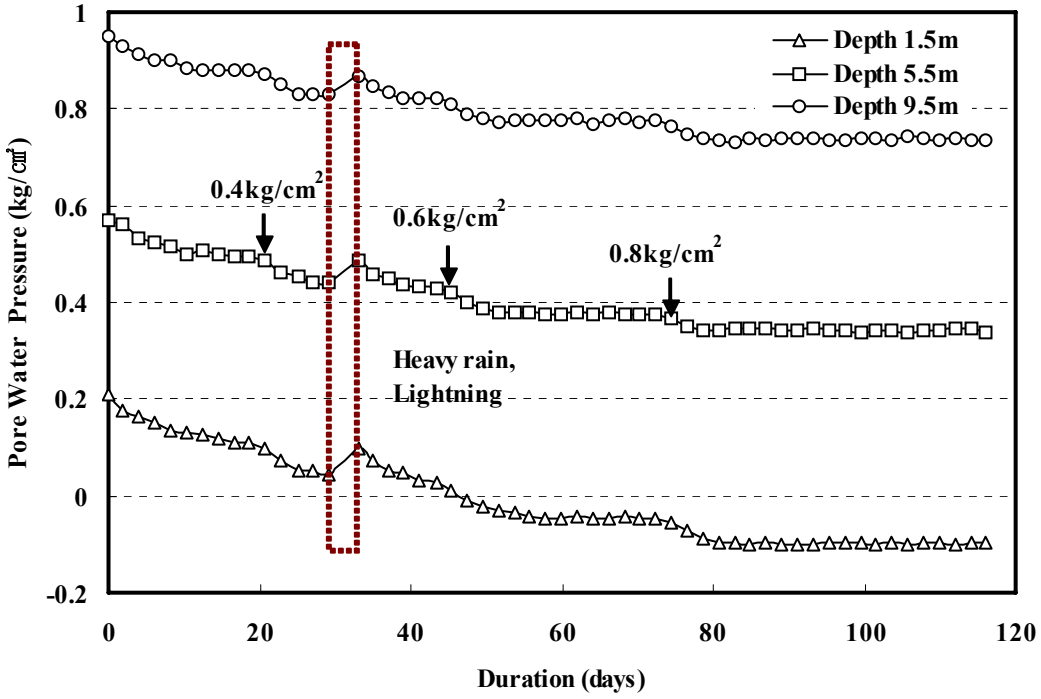


Fig. 3.8.4.1 시간에 따른 간극수압 분포 (Section A)

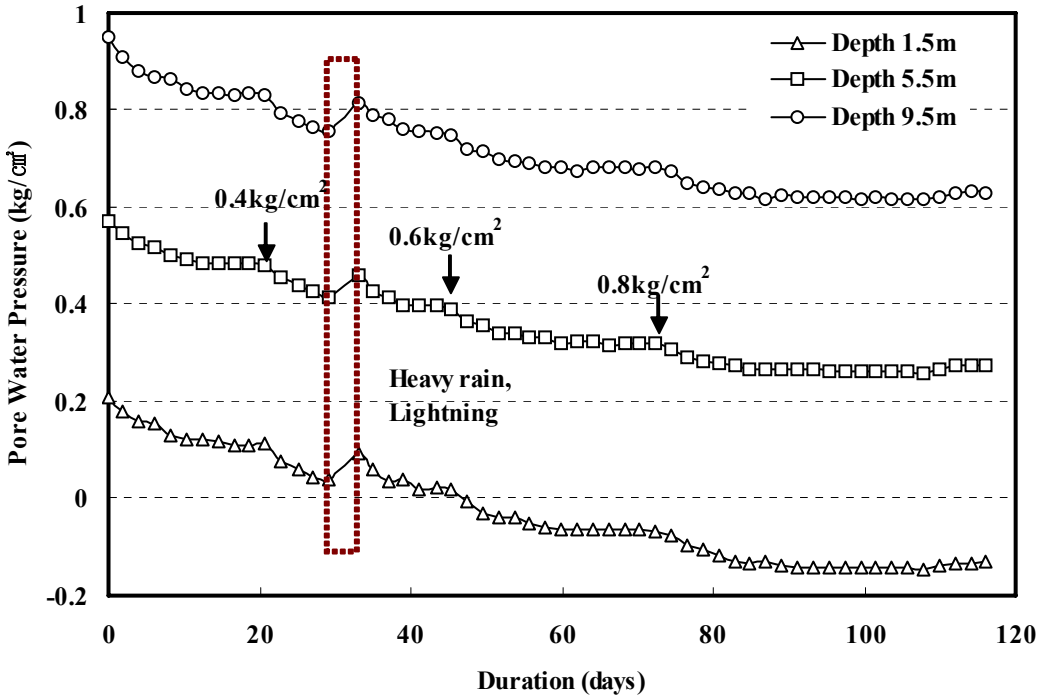


Fig. 3.8.4.2 시간에 따른 간극수압 분포 (Section B)

Fig. 3.8.4.3과 Fig. 3.8.4.4에는 각각 Section A와 Section B에서 측정된 간극수압 분포를 심도별로 나타내었다. 간극수압은 심도가 깊어짐에 따라 정수압에 가까워지는 경향을 보였으나 그 차이는 미미한 것으로 나타났다.

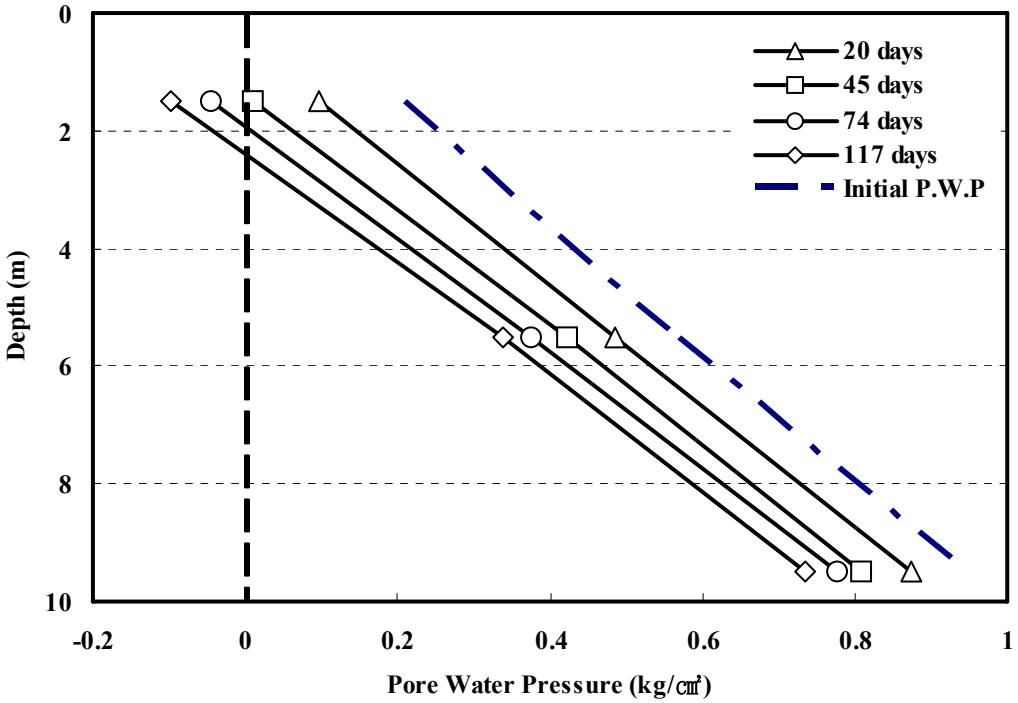


Fig. 3.8.4.3 심도에 따른 간극수압 분포 (Section A)

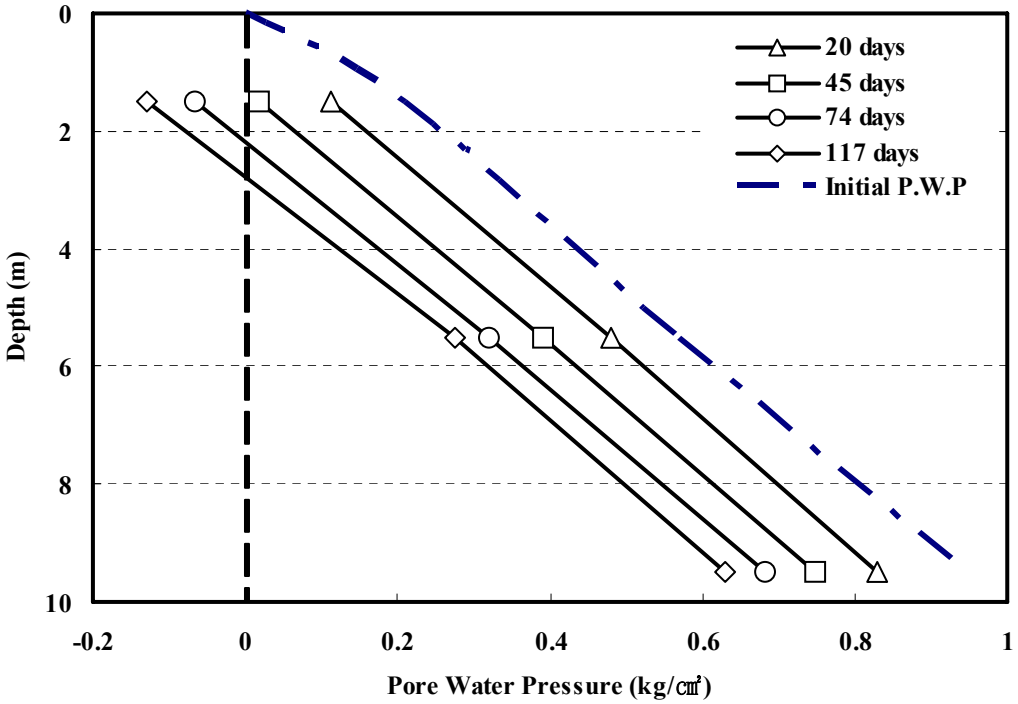


Fig. 3.8.4.4 심도에 따른 간극수압 분포 (Section B)

5. 현장시험시공 결론

본 연구에서는 배수재 종류에 따른 Suction Drain 공법의 현장시험시공을 통하여 침하량 및 수평변위, 진공압, 간극수압 거동을 측정하였으며, 이를 통해 지반 내 압밀 거동 및 변형양상을 비교/검토하였다. 현장시험시공결과 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) -0.2kg/cm^{2}에서 -0.8kg/cm^{2}까지 단계적으로 진공압을 가해준 결과, 판형배수재와 원형배수재가 타설된 지반에서 각각 약 26cm, 34cm의 침하량이 발생하였다. 이는 원형배수재의 지반 내 진공압 효율이 판형배수재를 타설한 경우보다 평균 약 20%이상 크게 나타났기 때문에 발생된 결과이다.

2) 측방변위의 경우, 일반적인 PBD 공법은 통상 개량영역에서 비개량영역 방향으로 나타난 반면 Suction Drain 공법에서는 개량영역 안쪽으로 나타났다. 이는 Suction Drain 공법을 적용함에 따라 발현된 응력증가가 지반에 등방적으로 작용하기 때문에 발생되는 현상이다.

3) 진공압 분포의 경우, 판형배수재 및 원형배수재가 타설된 지반의 심도 1.5m지점에서 각각 평균 94%, 85%의 효율을 보였으며, 9.5m지점에서는 평균 70%, 47%로 진공압 효율이 감소하였는데, 이러한 감소효율은 판형배수재에서 크게 나타났다. 지반 내부에서 산정된 진공압은 배수재에 가해지는 진공압의 약 50~58%로 나타났다.

4) 시간경과에 따라 심도별로 측정된 진공압 효율을 이용하여 배수재가 40m의 대심도 까지 타설된 경우의 진공압 감소효과를 예측해보면, 진공압 효율은 심도에 따라 지수적으로 감소하는 경향을 보였으며, 심도 40m에서 진공압 효율은 판형배수재의 경우 약 5%, 원형 배수재의 경우 약 21%가 나타났다. 따라서 대심도 지반의 개량에 있어서, 원형 배수재의 사용이 배수효율 측면에 있어서 유리하게 작용될 것으로 판단된다.

제 9 절 Suction Drain 공법의 적용성 검증을 위한 유한요소해석

본 절에서는 석션드레인 공법의 현장 적용 해석시 지반거동 및 공학적특성 등을 분석하기 위하여 상용프로그램(Sage CRISP)과 석션드레인 공법 해석을 위한 새로운 유한요소 프로그램(Suction-CAIN)을 개발하여 현장계측데이터와 비교/검토하였다. 또한 검토된 데이터를 바탕으로 실제 대심도 연약지반에 대한 해석을 수행하였다.

1. 상용프로그램을 이용한 현장조건 모사

본 절에서는 상용프로그램인 Sage CRISP을 이용하여 석션드레인 공법이 적용된 연약지반의 해석을 수행하였다. Sage CRISP은 지반공학문제를 해석하기 위한 유한요소 프로그램으로써, 1차원 압밀해석을 적용할 수 있는 프로그램이다. 또한 지반의 과잉간극수압과 응력분포 및 연직배수재(Vertical Drain)가 설치된 지역에서의 압밀해석이 가능하다. 외부하중은 시간증분에 따라 일정하게 증가시킬 수 있으며, 시공 단계를 고려하여 실제 현장상황과 거의 유사하게 재현할 수 있다.

가. 해석단면 및 경계조건

본 연구에서는 Suction Drain 공법의 침하 양상을 실제 현장계측데이터와 비교분석하기 위한 수치해석을 수행하였다. 해석을 위한 수행에 있어서 필요한 매개변수들은 현장의 물성치를 바탕으로 Table 3.9.1.1과 같이 도출되었다. 개량층의 해석시 수정 Cam-Clay 모델을 사용하였다. 지반조건은 현장조건과 동일하게 개량층의 두께를 9m, Sealing 층의 두께를 1m로 설정하였다. 또한 현장조건과 동일하게 압축지반의 저면은 불투수층으로 가정하여 일면배수만을 허용하였으며, 배수재는 1.5m 간격의 사각형 배치로 설정하여 해석을 수행하였다 Fig. 3.9.1.1에는 두 공법의 영향인자 분석을 위해 구성한 유한 요소망을 도시하였다. 각 단계 별 해석 기간은 현장조건과 동일하게, -0.2kg/cm^2→ 20일, -0.4kg/cm^2→ 25일, -0.6kg/cm^2→ 29

일, -0.8kg/cm^2→ 43일의 총 117일간 수행되었다. 또한 각 단계별로 적용된 진공압의 경우, 현장 데이터를 바탕으로 효율을 감안하여, 전체적으로 약 80%정도의 진공압만을 가하였다.

Table 3.9.1.1 Clay 지반에 적용한 수정 Cam-Clay 매개 변수

κ	λ	e_{cs}	M	v′	γ_{bulk}(kN/m^3)	γ_w(kN/m^3)	k(cm/sec)
0.0234	0.117	2.09	1.042	0.3	17.5	9.81	5.73×10^{-6}

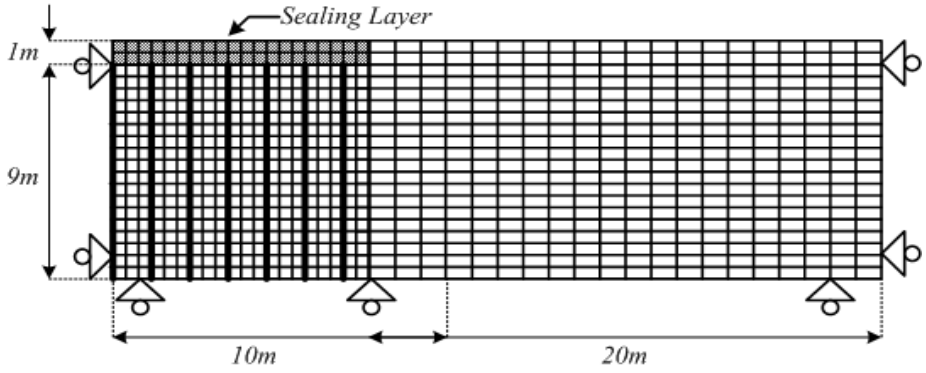


Fig. 3.9.1.1. 유한요소망 및 경계조건

나. 해석결과 및 분석

(1) 연직변위거동

Fig 3.9.1.2와 3.9.1.3에는 개량영역 중앙부와 개량영역 외측 1.5m 지점에서 단계 진공압의 변화에 따라 발생된 Suction Drain 공법의 침하양상과 원형배수재가 적용된 지반의 현장데이터를 비교하여 나타내었다. 그 결과 실제 계측된 침하량 분포와 변화양상은 동일한 거동이 나타났으나, 최종 침하량의 크기에서 비교적 큰 차이가 나타났다. 이는 본 프로그램으로는 구현될 수 없는 여러 가지 문제점에 기인하는데 그 원인을 파악해 보면 다음과 같이 몇 가지로 찾을 수 있다.

첫째, 유한요소해석시 배수재의 타설로 인한 스미어존이 고려되지 못했기 때문에, 실제 침하량에 비해 크기가 다소 크게 나타났다.

둘째, 현장 데이터의 경우 진공압을 배수재에 가할 때, 시간경과에 따라 점차적으

로 증가하는데 반해 해석 시에는 고려되지 못했기 때문에 침하량이 크게 나타났다. 마지막으로, 현장데이터를 통해 진공압 감소율을 감안하여 평균 진공압을 지반 내 적용시켰으나, 심도에 따라 발생되는 진공압 효율의 감소가 반영 되지 않았기 때문에 전반적으로 침하량이 크게 발생되었다. 따라서 이러한 문제점을 개선시킬 수 있는 프로그램의 개발이 요구되었다.

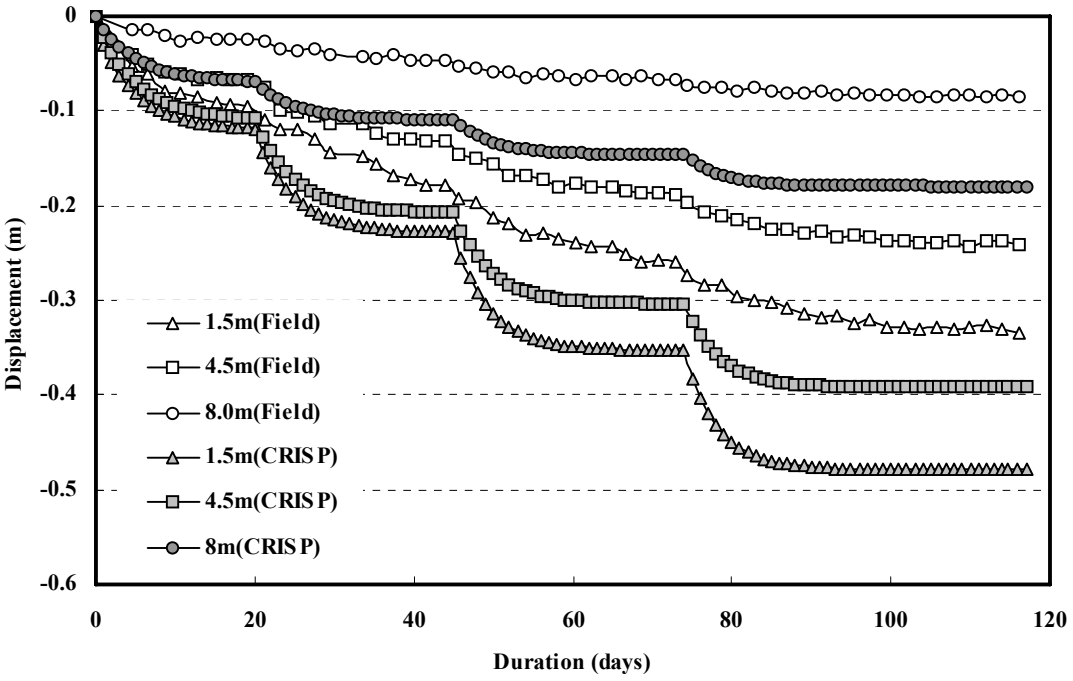


Fig 3.9.1.2 상용프로그램으로 예측된 침하량과 실제 계측된 침하량의 비교(내부)

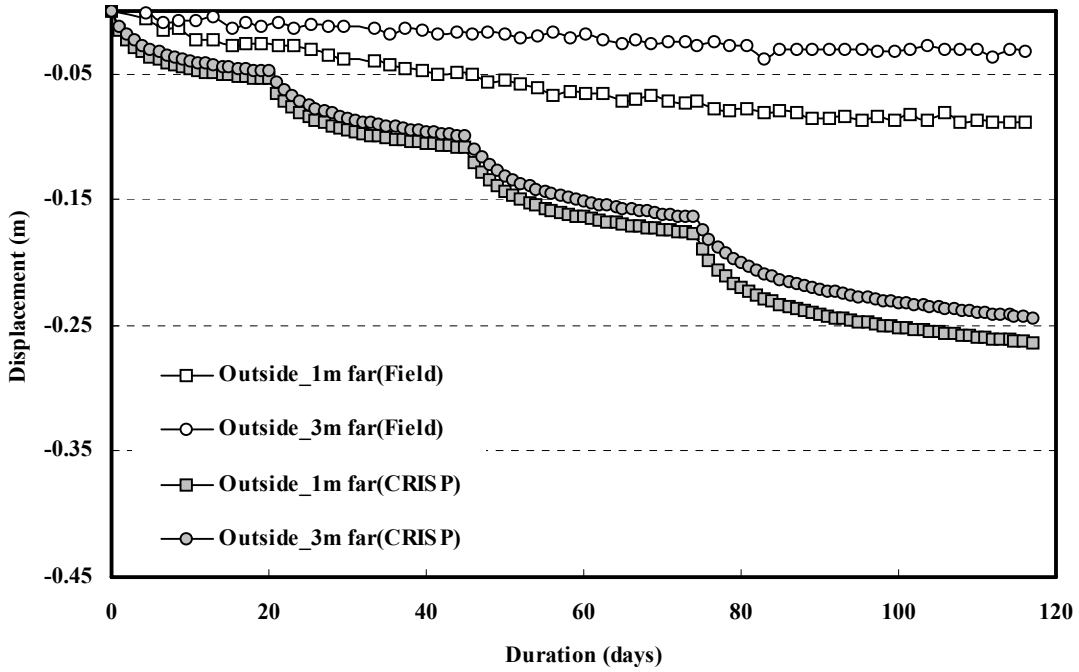


Fig 3.9.1.3 상용프로그램으로 예측된 침하량과 실제 계측된 침하량의 비교(외부)

(2) 수평변위거동

Fig 3.9.1.4에는 원형배수재를 적용한 지반의 현장 수평변위 계측결과와 상용프로그램으로 예측된 수평변위 결과를 비교하여 나타내었다. 그 결과 상용프로그램으로 예측된 변위량이 다소 크게 나타났는데, 이는 침하량과 마찬가지로 진공압 효율의 감소를 고려하지 못했기 때문에 나타난 결과이다.

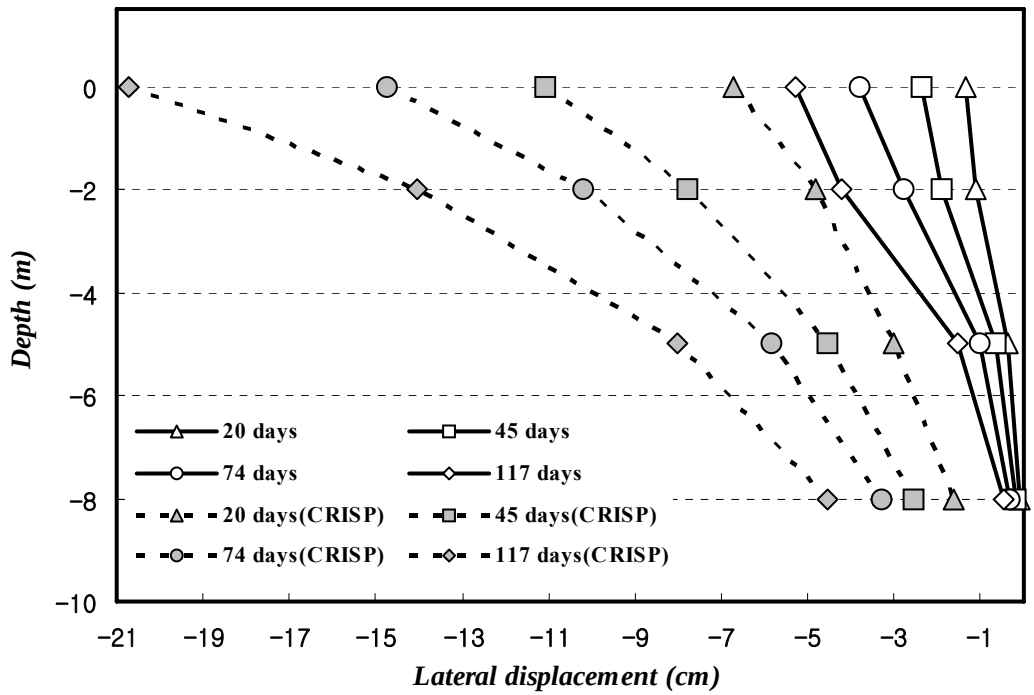


Fig 3.9.1.4 상용프로그램으로 예측된 수평변위와 실제 계측된 수평변위의 비교

(3) 진공압 분포

Fig 3.9.1.5에는 시간경과에 따라 예측된 진공압 분포와 현장에서 계측된 데이터를 비교한 결과이며, Fig 3.9.1.6에는 심도에 따라 발생된 진공압 분포를 수치해석결과와 현장계측결과를 비교하여 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이, 현장 계측데이터의 경우 심도에 따라 진공압의 감소가 발생된 반면 수치해석으로 예측된 진공압 분포의 경우 심도에 따라 진공압의 감소가 전혀 발생되지 않고 일정한 값으로 나타났는데, 이는 CRISP 프로그램의 특성상 경계조건에 진공압을 부여하는데 한계가 있기 때문으로 판단된다. 따라서 이러한 결과가 프로그램의 해석후 발생되는 모든 Data값의 크기를 현장 계측치보다 크게 발생되게 하는 요인으로 작용했다.

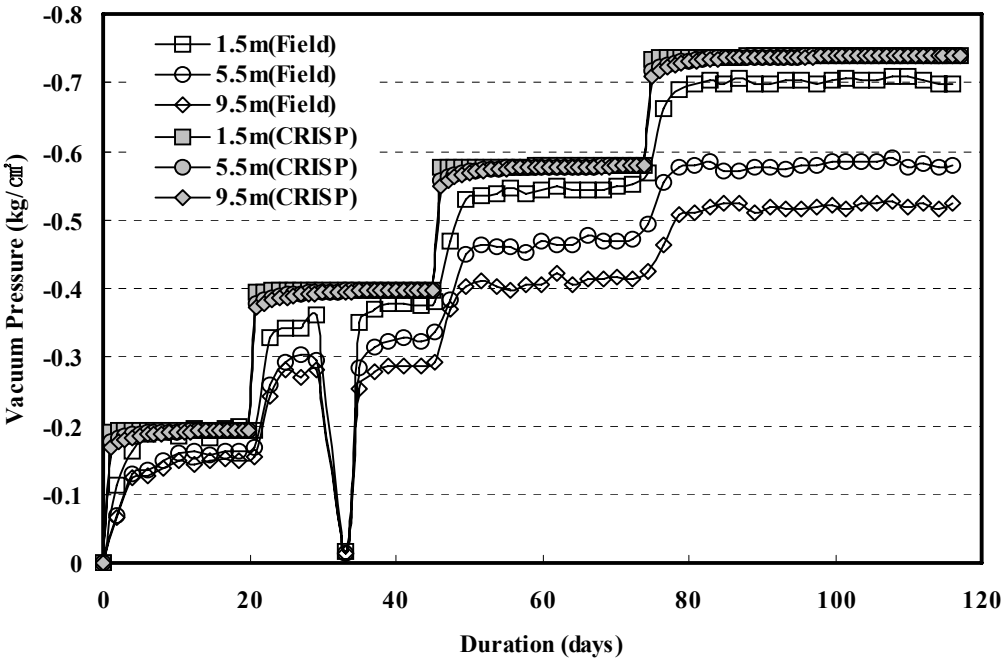


Fig 3.9.1.5 시간경과에 따라 상용프로그램으로 예측된 진공압 분포와 현장 진공압 계측 데이터의 비교

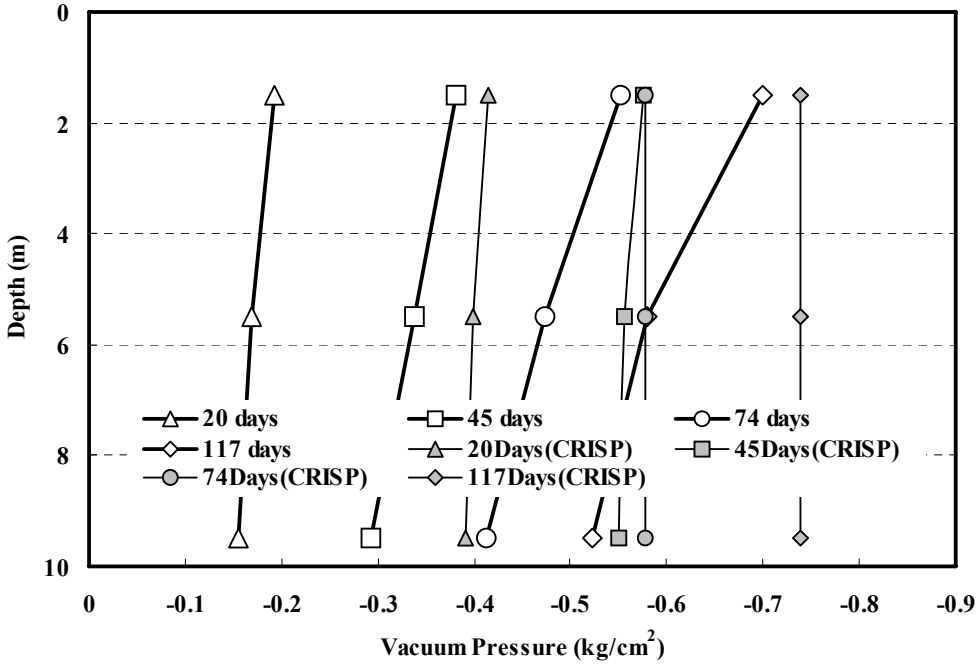


Fig 3.9.1.6 각 진공압 단계 별 심도에 따른 진공압 분포 비교 결과

2. 새로운 수치해석 기법의 개발

본 연구에서는 석션드레인 공법의 해석을 위하여 새로운 연직배수 공법 전용 해석 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램은 이차원 유한요소 해석 프로그램으로써, 프로그램 개발 후 다양한 조건별 수치해석을 통해 민감도 분석을 실시하고 기존의 범용 지반해석 프로그램 해석결과와의 비교를 통해 개발 프로그램의 신뢰성을 확인하였다. 또한 실제 현장 데이터를 바탕으로 역해석을 수행한 후, 현장 지반에 대한 입력파라미터를 재산정하여 개량효과에 대한 예측을 실시하였다. 본 프로그램은 일반적인 유한요소 프로그램에서 제공하는 기능 이외에도 Drainage Element를 포함한 자동 요소분할 기능과 Hird(1992)의 제안식을 이용한 이차원 평면변형률 해석을 위한 등가환산단면적 및 투수계수 자동 산정기능, 최대 침하량 및 최대 횡변위 발생위치 자동추적 기능, 입력 파라미터에 대한 역해석 기능 등이 있다.

가. 프로그램 개발배경 및 목적

수치해석 결과를 설계에 적용하는 경우, 해석의 신뢰성 여부가 매우 중요한 역할을 하고 있다. 기존의 범용 수치해석 프로그램들은 연속체 역학의 범주 내에서 지반을 모델링하고 고유의 구성모델을 이용한 해석결과를 제시하기는 하지만, 해석의 특수 범주에 속하는 배수재가 타설된 복합지반에 대한 적용성은 신뢰할 수 없는 상태이다. 그 이유는 배수재가 타설된 지반은 배수재와 지반이 연직 방향으로 혼재하고 있어 연속체 내부에서 재료특성과 경계조건이 변화하게 되어 이에 따른 수치적 오류가 크게 발생하기 때문이다. 또한 진공을 이용하여 배수를 촉진시키는 공법에 대한 해석 프로그램이 전무하기 때문에, 본 연구의 수행에 있어서는 Suction Drain 전용 해석프로그램이 반드시 필요하다.

일반적으로 유한요소 해석에 있어서 해를 구하는 과정은 NR법(Newton-Raphson법)이나 MNR (Modified Newton-Raphson법)을 이용한 반복계산을 수행하게 되는데, 이 때 두 인접절점 사이에 변위의 불일치가 발생하게 되면 이를 보간하여 작용응력을 재계산하고, 과부족 또는 초과되는 응력을 다음 단계에서 추가로 재하하는 형태를 취한다. 특히 재료의 구성모델이 바뀌는 경계면에서는 이러한 오류가 심각

하게 발생하므로 이를 보정하는 과정에서 발생하는 오차가 해석결과에 큰 영향을 미치는 실정이다.

이러한 이유로 개량구간을 개별 요소로 해석하지 아니하고 하나의 새로운 지층으로 구성하는 블록 해석법이 널리 이용되고 있으나 이 경우에는 별도의 해석 파라미터를 다시 산정해야 하는 문제점이 존재한다.

따라서 본 연구에서는 석션드레인 공법 적용시 개량지반의 효과적인 해석을 위해 배수재와 점토부를 각각 모델링하는 기법을 적용하였고, 역해석 기법의 개발 등을 통해 위에서 언급한 문제점들을 보완하여 해석의 신뢰성을 높였다. 또한 개별적인 유한요소 생성의 번거로움을 줄이기 위해, 개량영역 내에서 배수재의 파라미터와 진공압 입력후, 자동으로 요소가 생성되도록 편의를 기하였다.

나. 프로그램의 특징 및 구성

본 연구에서 개발한 프로그램(이하 Suction-CAIN)은 기존의 이차원 유한요소 프로그램이 가지고 있는 모든 기능의 수행은 물론, 석션드레인 공법을 포함한 연직배수 공법 적용지반의 해석 분야에 있어서 다음과 같은 차별화된 특징을 가지고 있다.

Ⅰ. 성토, 굴착, 진공적용공법에 적용 가능한 범용 FEM 연약지반 해석 프로그램
Ⅱ. 사용자 위주의 편의성을 고려한 효율적인 프리 프로세서와 포스트 프로세서
Ⅲ. 역해석 기법의 도입에 의한 최적화된 설계 물성치 도출 가능
Ⅳ. 지반의 배수, 비배수, 압밀거동. 배수선요소를 이용한 연직배수재 구현
Ⅴ. 초기응력의 이차원 평형조건 고려 : 최적의 현장지반조건 구현
Ⅵ. 이차원 등가 평면변형률 해석법(Hird's method)을 적용한 연직배수공법 해석
Ⅶ. 다양한 해석결과 검토 및 분석을 위한 후처리 모듈

(1) 프로그램 순서도

Suction-CAIN 프로그램은 크게 전처리모듈과 후처리모듈로 나뉘어 있으며 그 순서도는 다음과 같다.

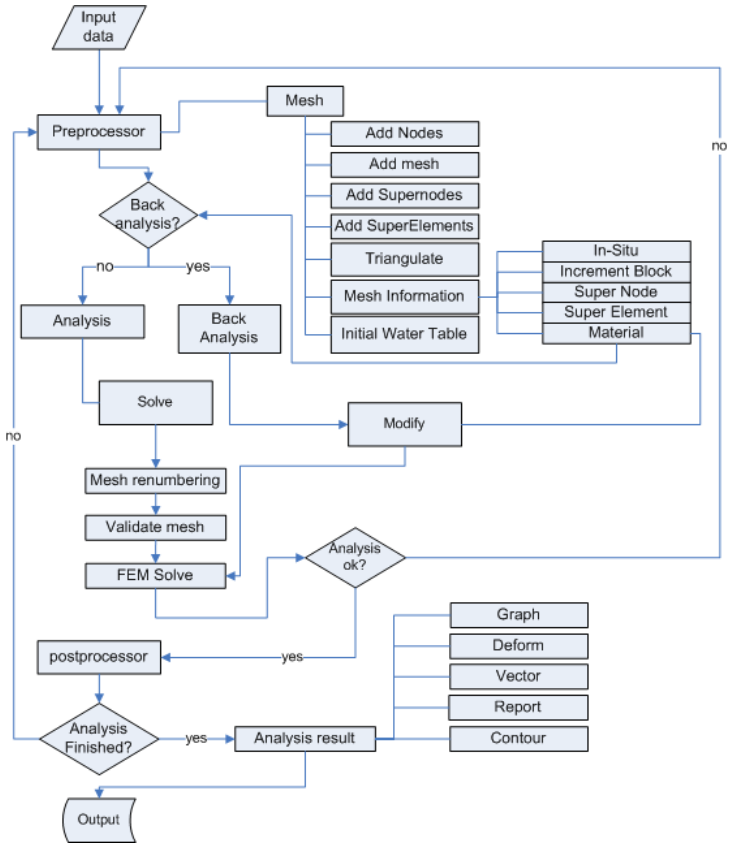


Fig. 3.9.2.1. Suction-CAIN 프로그램 순서도

(2) Modified Cam Clay 구성이론

Suction-CAIN 프로그램은 Modified Cam Clay(Roscoe & Burland, 1968)에 기반을 두고 개발되었으며, 한계상태토질역학을 기반으로 한다. Fig. 3.9.2.2는 Suction-CAIN 프로그램에 적용된 한계상태의 항복면(Yield Locus)을 나타낸 그래프이다. Modified Cam Clay 모델에 사용되는 토질 파라미터는 다음과 같다.

- λ : $e-\ln(p')$ 평면에서의 정규압밀곡선의 기울기
- κ : $e-\ln(p')$ 평면에서의 제하곡선의 기울기
- e_{cs}: $p'=1$일 때, 한계상태선의 간극비
- M : 한계상태선의 기울기, $M=\frac{6\sin\phi'}{3-\sin\phi'}$
- G : 전단탄성계수

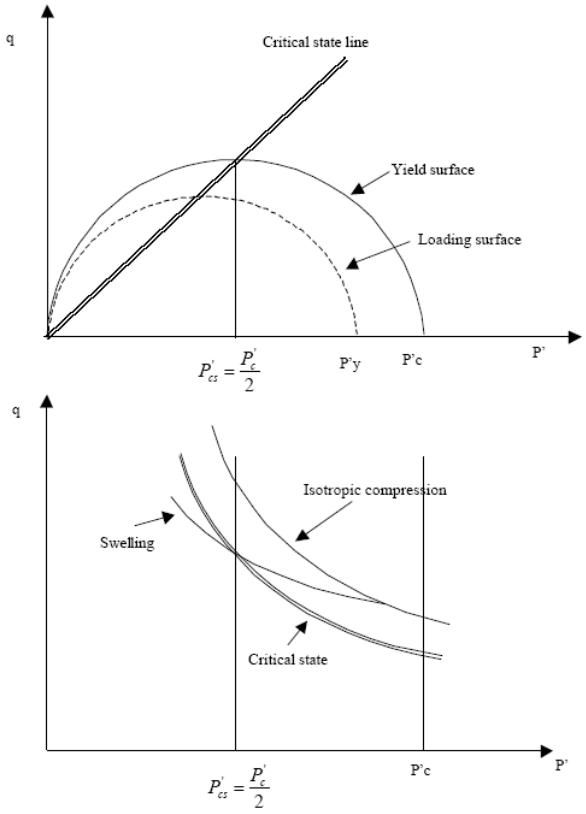


Fig. 3.9.2.2 Modified Cam Clay Model

Modified Cam Clay 모델에 사용되는 한계상태토질역학의 주요 변수는 유효주응력 p', 축차응력 q, 간극비 e로써, 각 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$p'=\frac{1}{3}(\sigma_1'+\sigma_2'+\sigma_3') \tag{3.9.2.1}$$

$$q=\sqrt{\frac{1}{2}\left[(\sigma_1'-\sigma_2')^2+(\sigma_2'-\sigma_3')^2+(\sigma_3'-\sigma_1')^2\right]} \tag{3.9.2.2}$$

$$dv = -\frac{de}{1+e} \tag{3.9.2.3}$$

여기서, de와 dv는 각각 간극비와 체적증분의 변형률을 의미한다.

응력상태가 탄성일 때, 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} dp' \\ dq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dv \\ d\varepsilon \end{bmatrix} \tag{3.9.2.4}$$

여기서, $K = \frac{(1+e)p'}{\kappa}$

Modified Cam Clay 모델에 사용된 관계식은 다음과 같다.

$$q^2 = M^2 p'(p_c' - p') \tag{3.9.2.5}$$

여기서, p_c'는 선행압밀하중

응력상태가 항복면 함수를 만족할 때, 소성변형이 발생하는데 체적증분변형률에서의 영구변형은 다음과 같이 정의된다.

$$dv^p = \left(\frac{\lambda-\kappa}{1+e}\right)\frac{dp_c'}{p_c'} \tag{3.9.2.6}$$

각각의 응력상태는 재하면을 갖는데 이를 정리하면,

$$p_y' = p' + \left(\frac{q}{M}\right)^2 \frac{1}{p'} \tag{3.9.2.7}$$

성토체가 재하될 때, 다음의 조건을 따르게 되는데

$dp_y' = dp_c' > 0$일 때, 경화모델

$dp_y' = dp_c' < 0$일 때, 연화모델

소성거동이 발생하는 동안 항복면(Yield Locus)이 변하지 않는 중립재하(Neutral loading)조건에서 $dp_y' = dp_c' = 0$이며, 항복면(Yield Locus)의 변화는 다음의 수식을 따른다.

$$\frac{dp_c'}{p_c'} = \frac{dp_y'}{p_y'} \tag{3.9.2.8}$$

항복이 발생하는 동안의 응력-변형률 증분법칙(increment stress-strain law)은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} dv \\ d\epsilon \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dp' \\ dq \end{Bmatrix} \tag{3.9.2.9}$$

여기서, $C_{11} = \frac{(\lambda-\kappa)}{(1+e)}\frac{a}{p'} + \left(\frac{\kappa}{1+e}\right)\frac{1}{p'}$, $C_{12} = C_{21} = \frac{(\lambda-\kappa)}{(1+e)}\left(\frac{1-a}{p'}\right)$,

$C_{22} = \frac{(\lambda-\kappa)}{(1+e)}\left(\frac{b}{p'}\right) + \frac{1}{3G}$, $a = \frac{M^2-\eta^2}{M^4+\eta^4}$, $b = \frac{4\eta^4}{M^4-\eta^4}$, $\eta = \frac{q}{p}$

(3) 배수 선요소

1) 압밀을 위한 유한요소 정식화

압밀해석을 위하여 다음과 같이 유한요소 해석 기법을 도입하였다. 압밀을 위한 기본 행렬방정식(matrix equation)은 평형 차분방정식과 적합 차분방정식으로부터 시작된다. 2차원 문제에 대한 평형 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = w_x \tag{3.9.2.10}$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = w_y \tag{3.9.2.11}$$

연속체의 2차원 차분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{k_x}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial x^2} + \frac{k_y}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \qquad (3.9.2.12)$$

유한요소 행렬방정식을 얻기 위해, 평형 방정식과 연속방정식에 Galerkin의 가중잔차법을 차례로 적용하였다. 평형방정식으로 계산된 방정식은 가상일의 원리와 동일하므로 연속방정식에 동일한 작업을 수행하는 것이 또 다른 형태의 가상일의 원리를 내포한다고 할 수 있다. 첫 번째 단계는 평형방정식에 x-와 y-에 따라 변화하는 임의의 스칼라를 곱한다. 이 스칼라량은 임의의 또는 가상의 간극수압이다. 이 때, 식(3.9.2.12)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\int_V u^* \cdot \left[\frac{k_x}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial x^2} + \frac{k_y}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial v}{\partial t} \right] d(vol) = 0 \qquad (3.9.2.13)$$

이 방정식에 다음의 Zienkiewicz-Green 이론을 적용하면

$$\int_A \frac{\partial g}{\partial x} dxdy = -\int_A g \frac{\partial f}{\partial x} dxdy + \int_S f g n_x dS \ ,$$

$$\int_A f \frac{\partial g}{\partial y} dxdy = -\int_A g \frac{\partial f}{\partial y} dxdy + \int_S f g n_y dS$$

$$-\int_V = \left[\frac{k_x}{\gamma_w} \frac{\partial u^*}{\partial x} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \frac{k_y}{\gamma_w} \frac{\partial u^*}{\partial y} \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} \right] d(vol) - \int_S u^* v_n d(area) + \int_V u^* \frac{\partial v}{\partial t} d(vol) = 0$$

(3.9.2.14)

여기서, n_x, n_y는 영역 A로 둘러싸인 폐곡선 S에 대한 외향법선 n의 방향여현, v_n은 경계에 수직한 침투속도이다. 이 방정식이 유한요소 방정식에 대해 "가상힘의 원리(principle of virtual power)"로 고려될 수 있으며, 이는 응력 해석을 위한 유한요소 방정식을 구하는데 이용되는 가상일의 원리와 매우 유사하며, 유한요소 방정식을 얻기 위한 시작점에 해당한다.

주어진 수식에 유한요소 이산화(discretisation)를 적용시키고, 변위(displacement)는 다음의 식을 따라 유한요소 매쉬에 걸쳐 변화한다고 가정한다.

$$\boldsymbol{d} = \boldsymbol{N}\boldsymbol{a} \tag{3.9.2.15}$$

과잉간극수압은 동일한 메쉬에서 다음의 식과 같이 변화된다고 가정한다.

$$\overline{u} = \overline{\boldsymbol{N}}b \tag{3.9.2.16}$$

변위와 과잉간극수압에 대해 서로 다른 형상함수(행렬 N과 $\overline{N}$)가 정의됨에 유의할 필요가 있다. 예를 들어, 변위는 하나의 요소에 대해 2차함수의 형태로 변화하고, 간극수압은 선형으로 변화한다. 과잉간극수압과 동일한 형태의 함수를 따라 변화하는 가상의 과잉간극수압을 가정하면,

$$u^* = \overline{\boldsymbol{N}}b^* \tag{3.9.2.17}$$

일반적으로, 변형률은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon = Ba \tag{3.9.2.18}$$

그리고 과잉간극수압 경사는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\partial \overline{u}}{\partial x} \\ \dfrac{\partial \overline{u}}{\partial y} \end{bmatrix} = Eb \tag{3.9.2.19}$$

여기서, 행렬 E의 항은 $\overline{N}$을 차분하여 얻는다. 벡터 m은 다음과 같이 정의된다.

$$m = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.9.2.20}$$

즉, $\sigma = \sigma' + \mu$ (3.9.2.21)

그리고 $v = m^T \epsilon$ (3.9.2.22)

이를 가상일의 원리에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$b^{*T} \cdot \int_V \overline{N}^T m^T B d(vol) \frac{d(a)}{dt} - b^{*T} \int_V E^T \frac{kE}{\gamma_w} d(vol) b = b^{*T} \int_S \overline{N}^T v_n d(area) \tag{3.9.2.23}$$

여기서, k는 투수계수 행렬 $k = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix}$

이 방정식으로부터 가상의 간극수압은 소거할 수 있으며, 치환을 진행하면,

$$L = \int_V B^T m \overline{N} d(vol) \quad \text{그리고,} \quad \Phi = \int_V E^T \frac{kE}{\gamma_w} d(vol)$$

따라서, $L^T \frac{d(a)}{dt} - \Phi b = \int_S \overline{N}^T v_n d(area)$ (3.9.2.24)

이는 일차 차분방정식으로, 시간 t에서부터 $t + \Delta t$까지 적분을 수행한다.

$$\int_t^{t+\Delta t} L^T \frac{d(a)}{dt} dt - \Phi \int_t^{t+\Delta t} b dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_S \overline{N}^T v_n d(area) dt \tag{3.9.2.25}$$

이 적분을 수행함에 있어서, $\int_t^{t+\Delta t} b dt = \{(1-\theta) b_1 + \theta b_2 \quad \Delta t\}$로 근사화할 수 있다. 여기서, $b_1 = b(t)$이고, $b_2 = b(t + \Delta t)$이다. θ의 값은 시간간격(time interval) 동안 b가 변화하는 경로를 정의하는 것으로, 예를 들어, $\theta = \frac{1}{2}$은 선형 변화에 해당하고 마름모꼴(trapezoidal) 적분원리를 따른다. v_n의 적분에도 유사한 근사화를 사용하는데, 식 (3.9.2.25)을 치환하면, 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$L^T = [a]_t^{t+\Delta t} - \Phi \{(1-\theta) b_1 + \theta b_2\} \Delta t = \int N^T \{(1-\theta) v_{n1} + \theta v_{n2}\} \Delta t d(area)$$

(3.9.2.26)

Booker and small(1975)은 서로 다른 θ의 값을 사용하여 적분기법의 안정성을 고려한 결과 $\theta \geqq \frac{1}{2}$에서 안정함을 제시하였다. 여기서는, $\theta = 1$의 원리를 채택하였다. 식 (3.9.2.26)을 치환하고 $\Delta a = a(t+\Delta t) - a(t)$와 $\Delta b = b_2 - b_1$을 정의하면, 다음의 식을 얻게 된다.

$$L^T \Delta a - \Phi \Delta t \cdot \Delta b = \Phi \Delta t \cdot b_1 + \int_S N^T v_{n2} \Delta t d(area) \qquad (3.9.2.27)$$

이제, 평형방정식으로 되돌아가서 가상일의 증분형태를 직접 사용하면,

$$\int \epsilon^{*T} \Delta \sigma d(vol) = \int d^T \Delta \tau d(area) + \int d^{*T} \Delta w d(vol) \qquad (3.9.2.28)$$

앞서 전응력에 대한 가상일의 원리를 사용하였다. 선형탄성시스템에 대한 중첩의 원리(principle of superposition)로부터 증분 형태가 유용하다는 사실을 유추할 수 있다. 실제로, 전응력의 항과 감차(subtracting)의 항으로 구성된 방정식에 의해 알 수 있듯이, 증분의 형태는 비선형 시스템에서도 유용하다.

$\Delta \sigma = \Delta \sigma' + m \Delta u$ 이고, $\Delta u = \Delta \overline{u}$임을 고려하면, $\Delta \sigma = \Delta \sigma' + m \Delta \overline{u}$이므로 이상의 상관관계와 일반적인 유한요소 대체식을 고려하면 다음과 같다.

$$\Delta \epsilon = B \Delta a, \; d^* = N a^*, \; \Delta \overline{u} = \overline{N} \Delta b$$

이를 이용하여 다음의 방정식을 얻는다.

$$a^{*T} \int_v B^T D B d(vol) \Delta a + a^{*T} \int (B^T m \overline{N}) d(vol) \Delta b = a^{*T} \int_S N^T \Delta \tau d(area)$$

(3.9.2.29)

a^{*T}는 소거 가능하므로, 앞서 수립한 표기법을 사용하면,

$$K\triangle a + L\triangle b = \int_s N^T \triangle \tau d(area) \qquad (3.9.2.30)$$

여기서, $K = \int [B^T DB] d(vol)$

식(3.9.2.27)과 (3.9.2.30)은 시간 t 에서의 해부터 시간 $t+\Delta t$ 에서의 해를 구하는 데 사용된다. 따라서, 해는 시간 $t=0$으로부터의 "전진법(marched forward)"에 해당한다. 요약하면, 방정식들은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K & L \\ L^T & -\Phi\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta a \\ \Delta b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\gamma_1 \\ \Delta\gamma_{12} \end{bmatrix} \qquad (3.9.2.31)$$

식 (3.9.2.31)에서의 사각행렬은 변위와 간극수압의 곱으로 나타나며, 일반적으로 강성행렬(stiffness matrix)이라 부른다. 식 (3.9.2.31)의 첫 번째 방정식은 평형방정식의 근사만족을 나타내고 두 번째 방정식은 연속방정식의 근사 만족을 나타낸다. 우항의 Δr_1은 일반적인 유한요소 증분하중의 항으로 구성된다. Δr_2는 경계상에서 지정된 침투에 대한 하중의 항으로 구성된다.

$$\int_s \overline{N} v_n^2 d(area)$$

그리고, 해로써 추가적인 항($\Phi\Delta t . b_1$)의 계산이 진행된다.

2) 배수재 모델 정식화

본 Suction-CAIN 프로그램은 해석의 신뢰성을 높이기 위해 전처리과정인 프리프로세서에 다음의 Drainge Bar Element를 채용하였다.

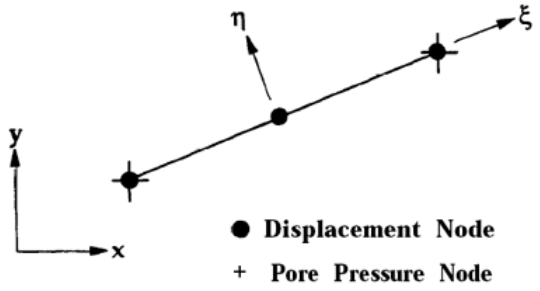


Fig. 3.9.2.3 Drainage Bar Element

식(3.9.2.32)에서 도출된 수식에서 선요소는 강성매트릭스, 커플링매트릭스, 투수매트릭스를 형상함수을 이용하여 구하게 된다.

$$\begin{bmatrix} K & L \\ L^T & -\Phi\Delta t \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Delta a \\ \Delta b \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \Delta\gamma_1 \\ \Delta\gamma_{12} \end{bmatrix} \tag{3.9.2.32}$$

변위 절점의 형상함수 매트릭스(N Matrix)는 다음과 같다.

$$N=[0.5\xi(\xi-1),0.5\xi(\xi+1),(1-\xi^2)] \tag{3.9.2.33}$$

$$N^{'}=B=\frac{2}{h}[(0.5-\xi),-(0.5+\xi),2\xi] \tag{3.9.2.34}$$

여기서, $d'=N'a \Leftrightarrow \varepsilon=Ba$ 이므로

$$N'=B=\frac{2}{h}[\ (0.5-\xi)\quad -(0.5+\xi)\quad 2\xi\ ] \tag{3.9.2.35}$$

단, $\varepsilon_y=\varepsilon_z=0,\ \sigma_x=\left(\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}\right)\varepsilon_x$

과잉간극수압의 형상함수 매트릭스($\overline{N}$ Matrix)는 다음과 같다.

$$\overline{N}=[0.5(1-\xi),0.5(1+\xi)] \tag{3.9.2.36}$$

여기서, $\overline{u}=\overline{N}b \Leftrightarrow \frac{\partial\overline{u}}{\partial x}=\frac{\partial\overline{N}}{\partial x}b=Eb$

$$\overline{N'}=E=[-0.5,0.5] \tag{3.9.2.37}$$

강성 매트릭스(K Matrix)는 다음과 같다.

$$K=\int[B^TDB]d(vol) \tag{3.9.2.38}$$

여기서, $K=\frac{DA}{3h}\begin{bmatrix}7 & 1 & -8\\ 1 & 7 & -8\\ -8 & -8 & 16\end{bmatrix}$

커플링 매트릭스(L Matrix)는 다음과 같다.

$$L=\int_V B^Tm\overline{N}d(vol) \tag{3.9.2.39}$$

투수 매트릭스(Φ Matrix)는 다음과 같다.

$$\Phi=\int_V E^T\frac{kE}{\gamma_w}d(vol) \tag{3.9.2.40}$$

(4) 이차원 등가 평면변형률 모델 및 투수계수 산정

연직배수재를 사용하는 흙의 압밀에 대한 비개방형 해석(Closed form solution)은 대개 단순화된 경계조건하의 축대칭형 단위셀(단일 드레인을 둘러싼 흙 원통) 조건으로 고려될 수 있다. Fig. 3.9.2.4는 외부반경이 R, 연직배수재의 반경이 r_w로 고정되어있고, 내부길이가 1인 단위셀을 나타낸 그림이다. 불투수성 하부경계가 연직방

향의 거동을 허용하지 않는데 반해 투수성 상부경계는 일정응력조건(자유변형률조건)하에서 자유로이 변형을 허용하거나 단일한 변형(등변형률조건)을 허용한다. 본 연구에서는 등변형률 조건보다 통계학적으로 보다 편리한 자유변형률 조건을 가정하였는데, 흙 내부로의 배수는 연직방향과 원호방향 둘 다에서 발생할 것이다. 그러나 연직방향으로의 흐름은 무시할 수 있다고 가정하는 것이 합리적이며, 흙의 투수계수 k는 배수재 타설의 결과로 스미어존의 반경 r_s내에서 k_s의 낮은 값으로 줄어들 것이다. 배수재 내부에서의 흐름은 연직으로 상부를 향하며 배수재의 투수계수 k_w에 의해 영향을 받는다.

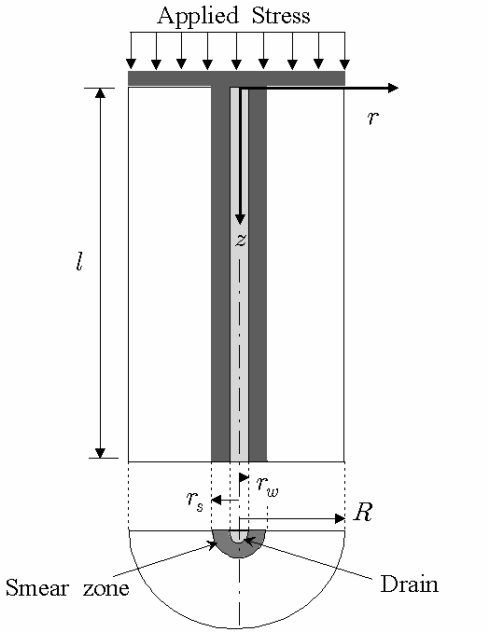


Fig. 3.9.2.4 비개방형 해석을 위해 채택된 단위셀

정밀도와 복잡성의 정도에 따라 사용가능한 이론은 다양하다. Hansbo(1981)의 방사형 압밀 이론을 적용하는데 있어서 Hird et al.(1992)에 의해 제안된 이론을 따르는 것이 상대적으로 쉽고 단순하며, 본 논문에서 언급된 증명절차에 이를 사용하였다. Hansbo의 이론은 웰레지스턴스와 스미어효과를 고려하지만 단위셀에서의 연직방향 흐름은 존재하지 않는다고 가정하였다. 표면에서 일시적으로 일어나는 재하단계에서 깊이 z, 시간 t에서의 수평면의 평균압밀도 U_h는 Hansbo에 의해 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{\mu}\right) \tag{3.9.2.41}$$

여기서 T_h는 원호방향 배수에 대한 시간인자이고 μ는 다음과 같이 정의된다.

$$T_h = \frac{C_v t}{4R^2} \tag{3.9.2.42}$$

$$\mu = \ln\left(\frac{n}{s}\right) + \left(\frac{k}{k_s}\right)\ln(s) - \frac{3}{4} + \frac{z(2l-z)^2 k}{k_w r_w^2} \tag{3.9.2.43}$$

위 식에서 μ, n, s는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$n = \frac{R}{r_w},\ s = \frac{r_s}{r_w} \tag{3.9.2.44}$$

평면변형률해석에서 배수재의 영향를 모델링하는 것은 평면변형률과 축대칭조건하에서 수평방향 배수에 의해 발생하는 압밀도와 시간의 관계를 찾아내는 것이다. 따라서 웰레지스턴스의 효과는 무시된다.

$$\frac{T_{hpl}B^2}{k_{pl}} = \frac{T_{hax}R^2}{h_{ax}} \tag{3.9.2.45}$$

여기서 $2B$는 평면에서의 배수재의 간격이고 첨자 pl과 ax는 각각의 조건을 나타낸다. 배수재의 간격과 흙의 투수계수 모두 식 (3.9.2.45)를 만족시키기 위해 조정이 가능하다. 식 (3.9.2.45)를 사용함에 있어서, 간격과 투수계수의 결과적인 값이 선택된 압밀도외에 다른 요인을 적용하지 못한다. 이는 t_{hpl}/T_{hax}이 일정하지 않고 압밀도에 따라 변화하기 때문이다. 더욱이 제한된 웰레지스턴스로 인해 압밀도는 깊이에 따라 변화한다. 유한요소해석과 Hansbo의 이론 사이에서 Hird et al.(1992)은 평면변형률에 대한 Hansbo의 이론을 적용함으로서 더 바람직한 연관절차를 제안했

다. 이들은 압밀조건하에서 평면에 연직방향에서 단위길이당 통수능 Q_w를 갖는 배수재의 절반의 폭이 B인 평면변형률 단위셀을 고려하였다. 이 단위셀은 Fig. 3.9.2.5와 같다. 배수재는 두께는 무시할 수 있으며, 스미어존은 없는 것으로 가정하였다.

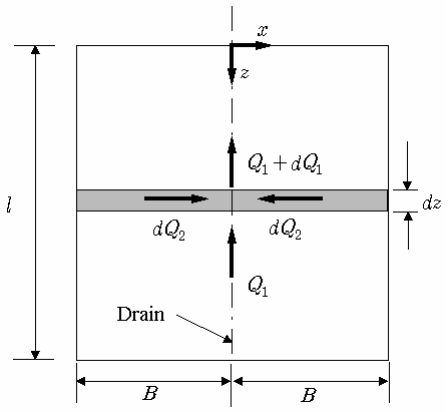


Fig. 3.9.2.5 평면변형률 단위셀

Russell(1990)의 유도식을 기반으로, Hird et al.(1992)은 평면변형률 단위셀의 평균압밀도를 다음의 식으로 제안했다.

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{\mu}\right) \tag{3.9.2.46}$$

여기서 T_h와 μ는 다음과 같이 정의된다.

$$T_h = \frac{C_h t}{4B^2} \tag{3.9.2.47}$$

$$\mu = \left[\frac{2}{3} + \frac{2k}{BQ_w}(2lz - z^2)RIGHT\right] \tag{3.9.2.48}$$

식 (3.9.2.46)은 축대칭 단위셀에 대한 압밀도를 정의하는데 있어 식 (3.9.2.41)과 정확히 일치한다. 연관되는 평면변형과 축대칭 단위셀의 압밀비로 인해, 단위셀의

매 회 및 매 단계에서의 평균압밀도를 일정하게 할 필요가 있다. 따라서,

$$U_{hpl} = U_{hax} \tag{3.9.2.49}$$

식 (3.9.3.41)과 식 (3.9.3.46)으로부터 다음의 식을 도출할 수 있다.

$$\frac{T_{hpl}}{\mu_{hpl}} = \frac{T_{hax}}{\mu_{hax}} \tag{3.9.2.50}$$

$$\frac{C_{hpl}}{B^2\mu_{pl}} = \frac{C_{hax}}{R^2\mu_{ax}} \tag{3.9.2.51}$$

만일 흙의 재료특성이 각 경우에 동일하다고 하면,

$$B^2\mu_{pl} = R^2\mu_{ax} \tag{3.9.2.52}$$

μ_{pl}과 μ_{ax}에 대한 적절한 표현식은 식 (3.9.2.52)에서 대용할 수 있으며 이들 용어를 재배열하면 다음과 같다.

$$\frac{2}{3}B^2 - R^2\left[\ln\left(\frac{n}{s}\right) + \left(\frac{k}{k_s}\right)\ln(s) - \frac{3}{4}\right] = \left[\left(\frac{\pi R^2 k}{q_w}\right) - \left(\frac{2Bk}{Q_w}\right)\right](2lz - z^2) \tag{3.9.2.53}$$

기하학적 적합성에 대한 조건은 거의 무시할 수 있을 정도의 웰레지스턴스의 경우를 고려함으로써 얻을 수 있을 것이다(q_w와 $Q_w \to \infty$). 따라서, 스미어존의 효과를 포함한 기하학적 접근은 다음의 가정으로 완성된다.

$$B = R\sqrt{\frac{3}{2}\left[\ln\frac{n}{s} + \frac{k}{k_s}ln(s) - \frac{3}{4}\right]} \tag{3.9.2.54}$$

웰레지스턴스의 영향은 다음의 경우에는 독립적으로 연관된다.

$$\left(\frac{\pi R^2 k}{q_w}\right) - \left(\frac{2Bk}{Q_w}\right) = 0 \tag{3.9.2.55}$$

또는

$$Q_w = \left(\frac{2B}{\pi R^2}\right) q_w \tag{3.9.2.56}$$

식 (3.9.2.54)와 식 (3.9.2.56)으로 대표되는 조건들은 흙의 투수계수가 평면변형조건과 축대칭조건에서 같다고 가정한다. 다시 말하면, 연관식은 투수계수가 배수재 간격에 대신하여 변화한다는 가정하에 만들어질 수 있다. k_{pl}이 k_{ax}와 다를 때, 식 (3.9.2.52)는 다음으로 대체될 수 있다.

$$\left(\frac{k_{pl}}{B^2 \mu_{pl}}\right) = \left(\frac{k_{ax}}{R^2 \mu_{ax}}\right) \tag{3.9.2.57}$$

$B = R$이고 먼저와 같은 논리를 따른다면, 투수계수와 웰레지스턴스의 연관요건은 다음과 같다.

$$k_{pl} = \frac{2k_{ax}}{-\left[\ln\left(\frac{n}{s}\right) + \left(\frac{k_{ax}}{k_s}\right)\ln(s) - \frac{3}{4}\right]} \tag{3.9.2.58}$$

$$Q_w = \left(\frac{2}{\pi R}\right) q_w \tag{3.9.2.59}$$

3. 개발된 Suction-CAIN 프로그램의 민감도 분석

본 연구에서 개발한 Suction-CAIN 프로그램을 이용하여 다양한 현장 조건에서 발생될 수 있는 문제점 및 현장 적용성 검토를 수행하기 위한 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석은 일반적이고 단순한 형태의 가상 단면을 선정·적용하였으며, 입력 파라미터는 OO시 관내 국도대체 우회도로 공사 시험시공에서 사용된 데이터의 산술평균값을 이용하였다. 해석단면은 상부에 장비의 진입이 가능하도록 지층위 접지압 확보를 위한 예비성토를 모사하기 위하여 0.09kg/cm^{2}의 등분포하중을 가하여 주었으며, 총 100일간 배수재에 -0.8kg/cm^{2}의 진공압 조건을 구현하였다. 민감도 분석을 위하여 각 조건별 침하량, 수평변위, 지반 내 간극수압, 배수재에 형성되는 진공압과 변위거동을 비교/검토하였다. 민감도 분석에 사용된 해석 단면을 Fig. 3.9.3.1에 나타내었다.

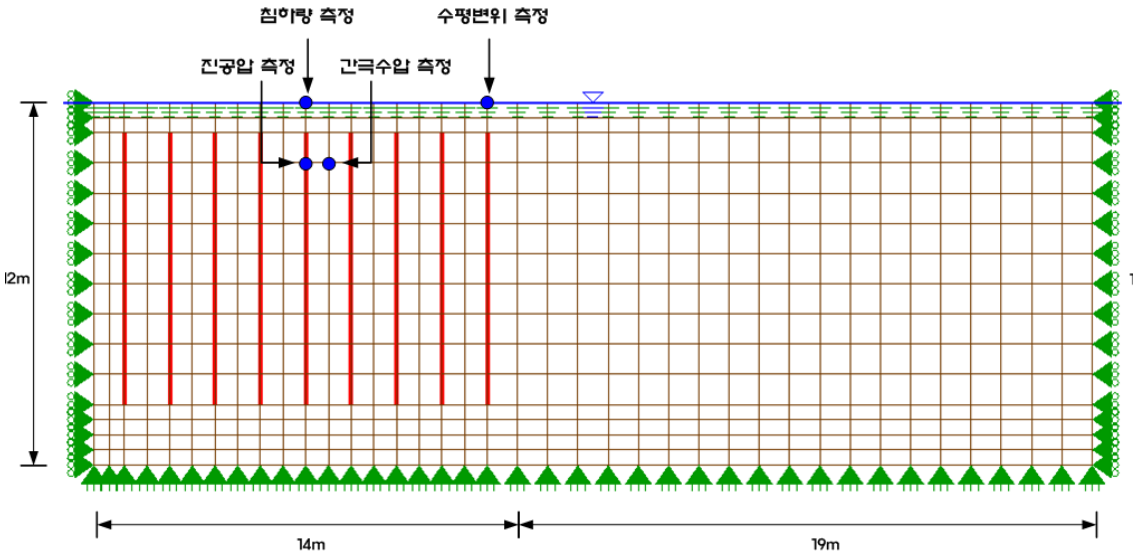


Fig. 3.9.3.1 Suction-CAIN 프로그램의 민감도 분석을 위한 단면

Table 3.9.3.1에는 민감도 분석을 위한 해석의 일반적인 순서를 제시하였고, Table 3.9.3.2에는 본 연구에서 실시한 민감도 분석의 검토 항목을 요약하였다. Table 3.9.3.3에는 민감도 분석에 사용된 입력 파라미터를 제시하였다.

Table 3.9.3.1 민감도 분석의 일반적인 해석순서

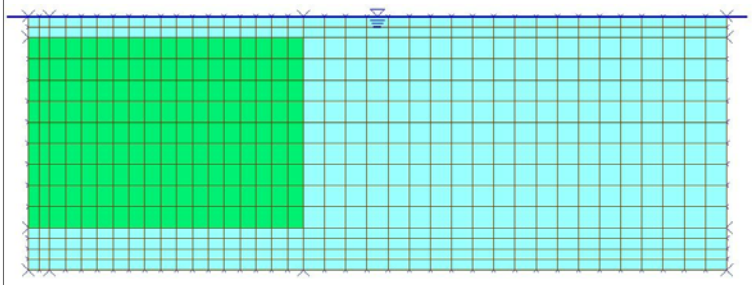
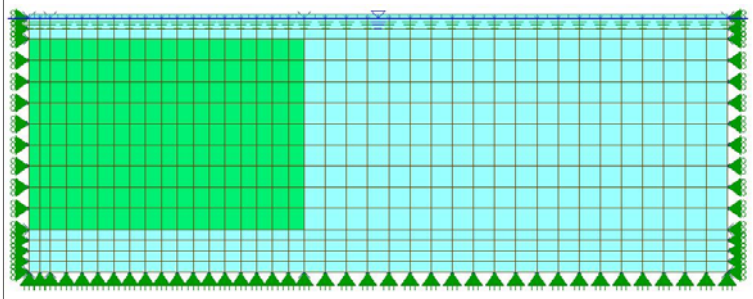
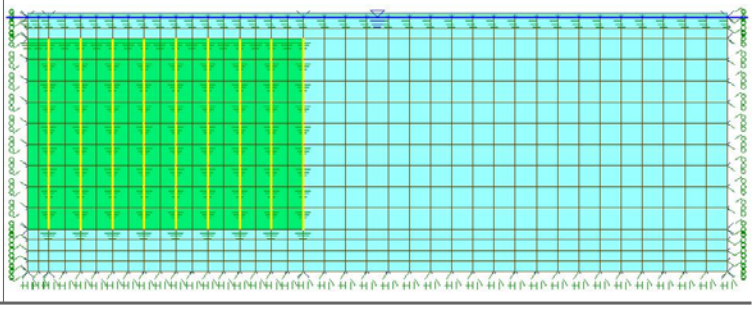
No.	단계	단면형태 예시
0	초기상태	
1	경계조건 설정	
2	진공압 적용 (100 days)	

Table 3.9.3.2 민감도 분석의 검토항목

요소의 형상	Drain 배치형상	Drain 간격 (m)	Drain 통수능 (cm^3/sec)	Drain 타설갯수 (EA)	교란영역, η	진공압 ($-kg/cm^2$)
사각형 삼각형	사각형 삼각형	1B(1.5) 2B(3.0) 4B(6.0)	5 10 15	9 7 5	1 3 6	0.2 0.4 0.6 0.8

Table 3.9.3.3 민감도 분석을 위한 입력 파라미터

Clay-Hird		Clay-Origin		PDB	
Modified Camclay		Modified Camclay		Bar	
E_0 (tonf/m^2)	400	E_0 (tonf/m^2)	400	E_0 (tonf/m^2)	0.0001
ν	0.33	ν	0.33	ν	0.30
γ_{bulk} (tonf/m^2)	1.81	γ_{bulk} (tonf/m^2)	1.81	γ_{bulk} (tonf/m^2)	1.81
γ_w (tonf/m^2)	1	γ_w (tonf/m^2)	1	γ_w (tonf/m)	1
κ	0.02	κ	0.02	κ	-
λ	0.22	λ	0.22	λ	-
e_{cs}	2.10	e_{cs}	2.10	e_{cs}	-
M	0.90	M	0.90	M	-
k_x (m/s)	개별 적용	k_x (m/s)	1.94E-9	k_x (m/s)	개별 적용
k_y (m/s)	개별 적용	k_y (m/s)	0.97E-10	k_y (m/s)	개별 적용
배수조건	압밀	배수조건	압밀	배수조건	압밀

가. 요소 형상에 따른 영향

유한요소해석에 있어 요소 형상의 차이는 근본적으로 수치해석에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 Hird의 제안식을 이용한 이차원 등가 변형률 해석에서 요소 형상의 차이가 개량지반의 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 요소 형태를 삼각형 요소와 사각형 요소로 구분하여 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. Table 3.9.3.4에는 요소 형상의 영향 해석조건을 나타냈으며, Table 3.9.3.5에는 Hird의 제안식을 통해 재산정된 등가 투수계수를 정리하여 나타내었다. Table 3.9.3.6에는 각 해석 조건에 따른 해석단면을 나타내었다.

Table 3.9.3.4 요소 형상에 따른 영향 해석조건

요소의 형상	Drain 배치형상	Drain 간격 (m)	Drain 통수능 (cm^3/sec)	Drain 타설갯수 (EA)	교란영역, η	진공압 (-kg/cm^2)
사각형 삼각형	사각형	1B(1.5)	5	9	3	0.8

Table 3.9.3.5 요소 형상에 따른 영향 평가를 위해 Hird의 제안식에서 산출한 등가 투수계수

요소 형상	배수재 타설구간 점토		PDB	
	k_x(m/sec)	k_y(m/sec)	k_x(m/sec)	k_y(m/sec)
사각형	1.634E-005	8.171E-006	1.407E+002	
삼각형	1.634E-005	8.171E-006	1.407E+002	

Table 3.9.3.6 요소 형상의 영향 해석단면

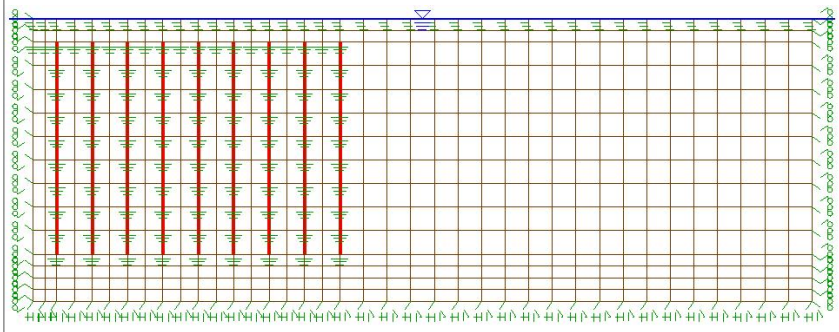
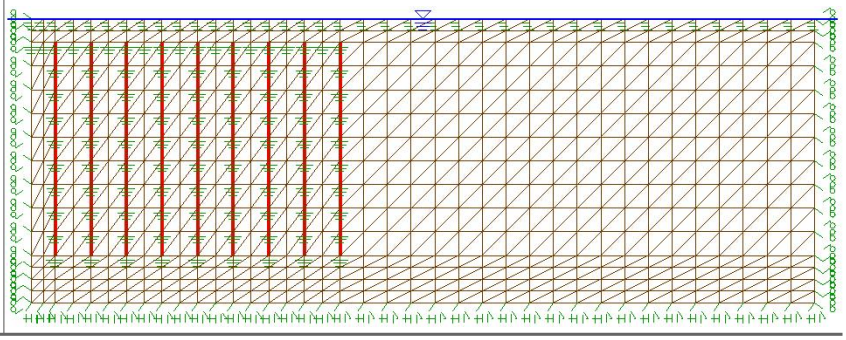
구분	해석단면
사각형	
삼각형	

Fig. 3.9.3.2에서 Fig. 3.9.3.5는 요소 형상에 따른 민감도 분석결과를 도시한 것으로 사각형 요소의 경우 성토재하 단계에서 발생하는 침하량이 삼각형 요소의 경우보다 작은 값을 나타냈으나 그 차이는 미미하였으며 간극수압의 분포 또한 유사하게 나타났다. 따라서 본 Suction-CAIN 프로그램의 사용에 있어 요소 형상의 차이에 따른 해석값의 변화는 미미하므로 두 경우 모두의 적용이 가능하다고 판단된다.

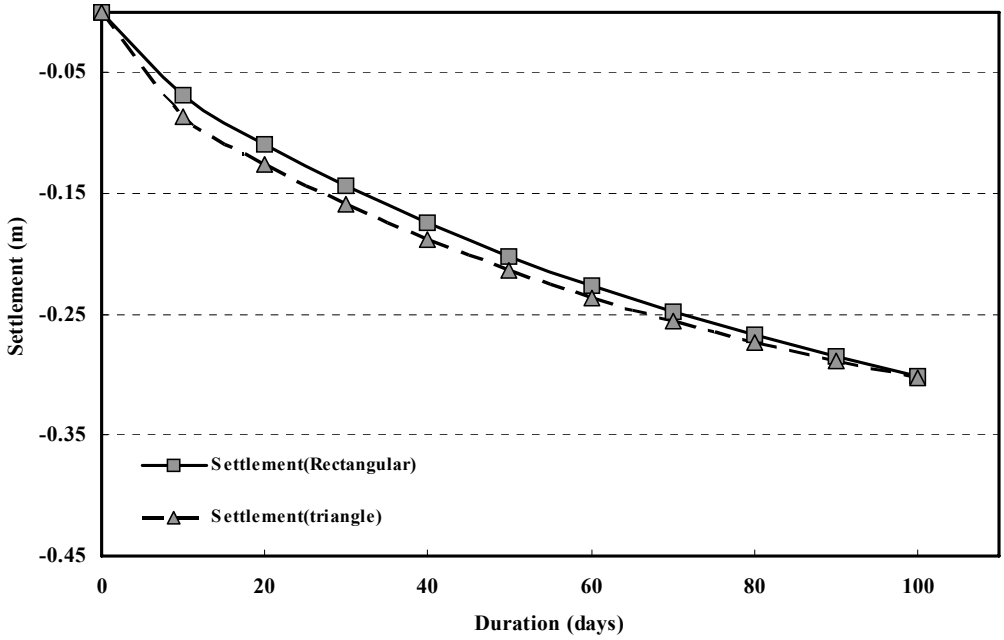


Fig. 3.9.3.2 요소 형상에 따른 침하량 변화

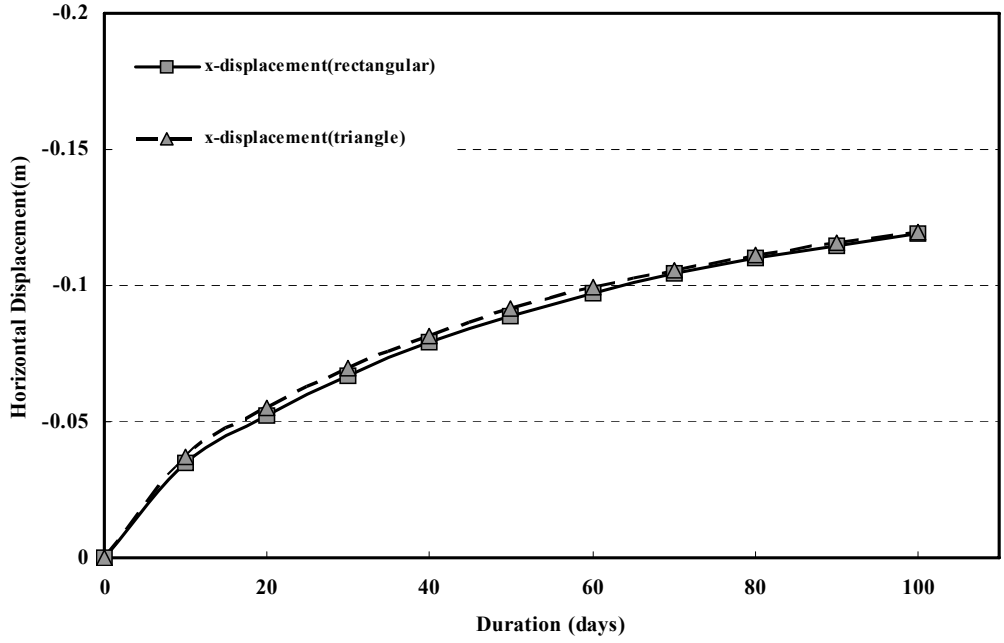


Fig. 3.9.3.3 요소 형상에 따른 수평변위 변화

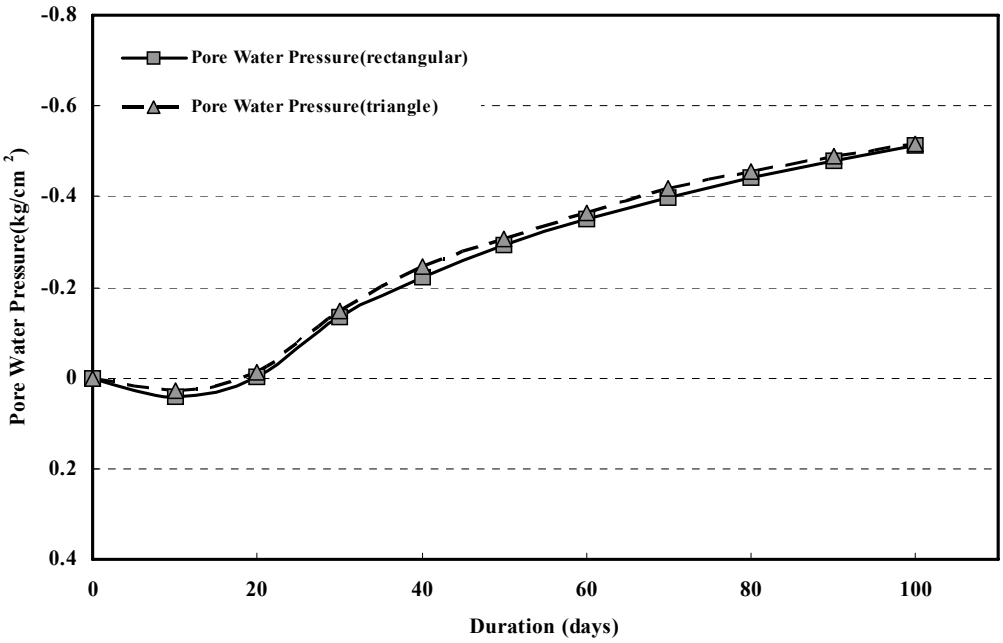


Fig. 3.9.3.4 요소 형상에 따른 간극수압 변화

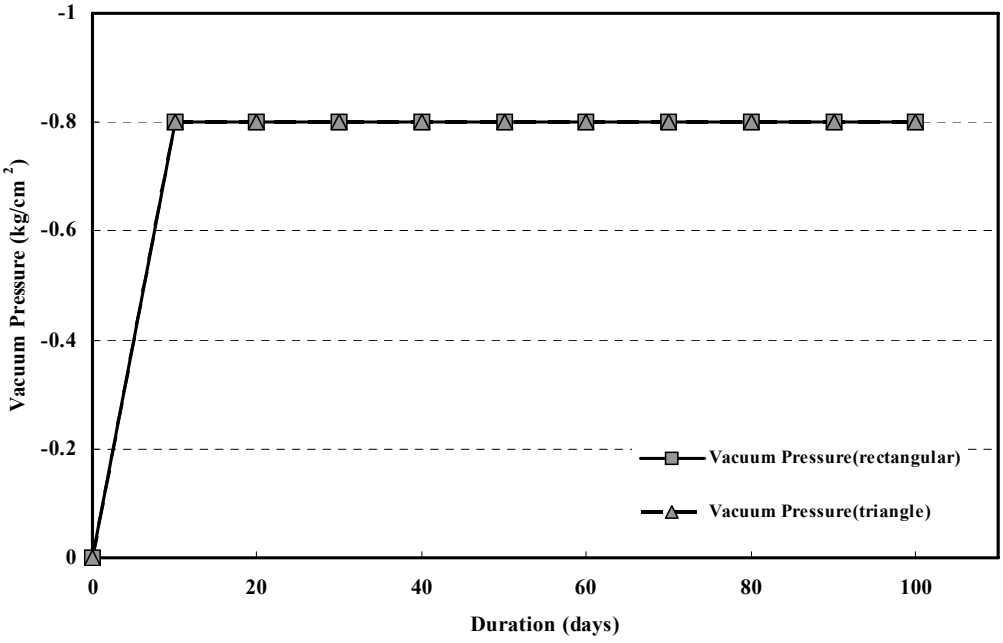


Fig. 3.9.3.5 요소 형상에 따른 배수재 내부 진공압의 변화

나. Drain 배치형상에 따른 영향

Table 3.9.3.7에는 배수재 배치형상 검토를 위한 해석 조건을 제시하였고 Table 3.9.3.8에는 배수재의 배치형상에 따라 Hird의 제안식을 통해 재산정된 등가 투수계수를 정리하여 나타내었다. Table 3.9.3.9은 배수재 배치형상의 영향 검토를 위한 해석 단면을 나타내고 있다. 석션드레인 공법을 포함한 연직배수 공법 적용시 배수재의 배치 형상은 배수재 영향원의 크기를 변화시키며 배수 효율의 차이를 가져온다. 배수재의 사각형 배치와 삼각형 배치는 Hird의 제안에 의해 2차원으로 고려시 단순히 투수계수의 차이로 해석되며, 해석 단면은 배수재의 배치형상과 무관하게 동일하다.

Table 3.9.3.7 Drain 배치형상에 따른 영향 해석조건

요소의 형상	Drain 배치형상	Drain 간격 (m)	Drain 통수능 (cm^3/sec)	Drain 타설갯수 (EA)	교란영역, η	진공압 (-kg/cm^2)
사각형	사각형 삼각형	1B(1.5)	5	9	3	0.8

Table 3.9.3.8 Drain 배치형상에 따른 영향 평가를 위해 Hird의 제안식에서 산출한 등가 투수계수

Drain 배치형상	배수재 타설구간 점토		PDB	
	k_x(m/sec)	k_y(m/sec)	k_x(m/sec)	k_y(m/sec)
사각형	1.634E-005	8.171E-006	1.407E+002	
삼각형	1.921E-005	9.606E-006	1.630E+002	

Table 3.9.3.9 Drain 배치형상의 영향 해석단면

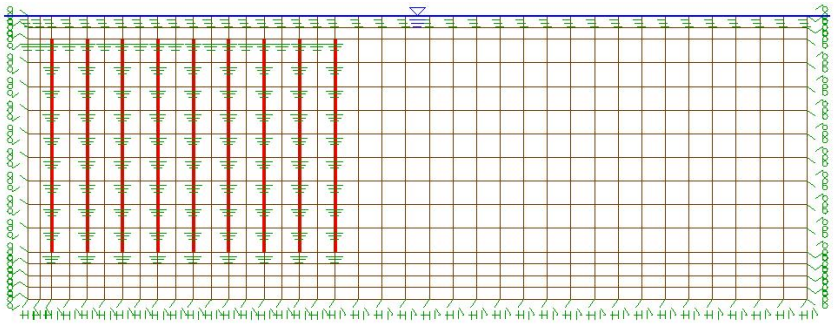
구분	해석단면
사각형 삼각형	

Fig. 3.9.3.6에서 Fig. 3.9.3.9는 배수재 배치형상에 따른 해석결과를 제시한 것으로 배치 형상에 따라 침하량과, 수평변위 및 간극수압이 민감한 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 사각형 배치에 비해서 삼각형 배치의 경우 침하량과 수평변위가 크게 발생하며 지반내에 가해지는 진공압 또한 크게 발생하여 간극수압이 작게 나타났다. 배수재 내에 가해지는 진공압은 경계조건으로 가해준 진공압이 그대로 작용되므로 해석조건의 변화와 상관없이 동일하게 발생하였다.

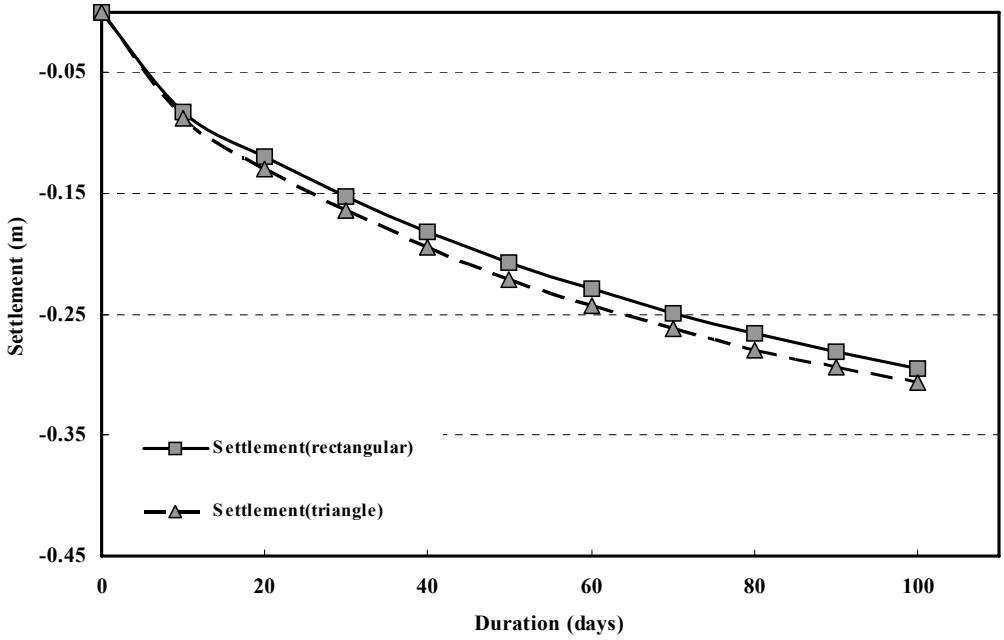


Fig. 3.9.3.6 Drain 배치형상에 따른 침하량 변화

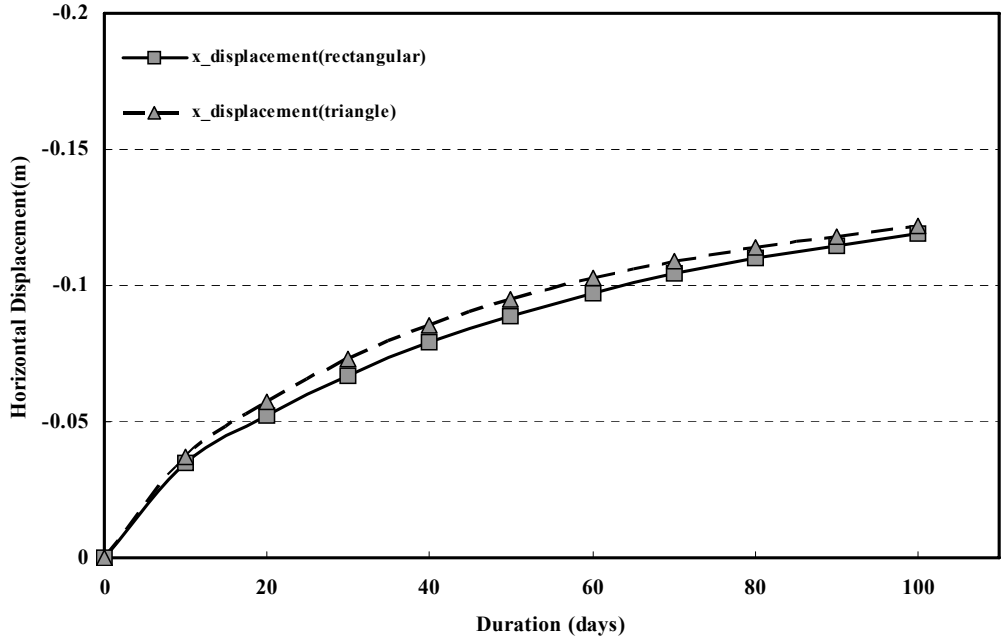


Fig. 3.9.3.7 Drain 배치형상에 따른 수평변위 변화

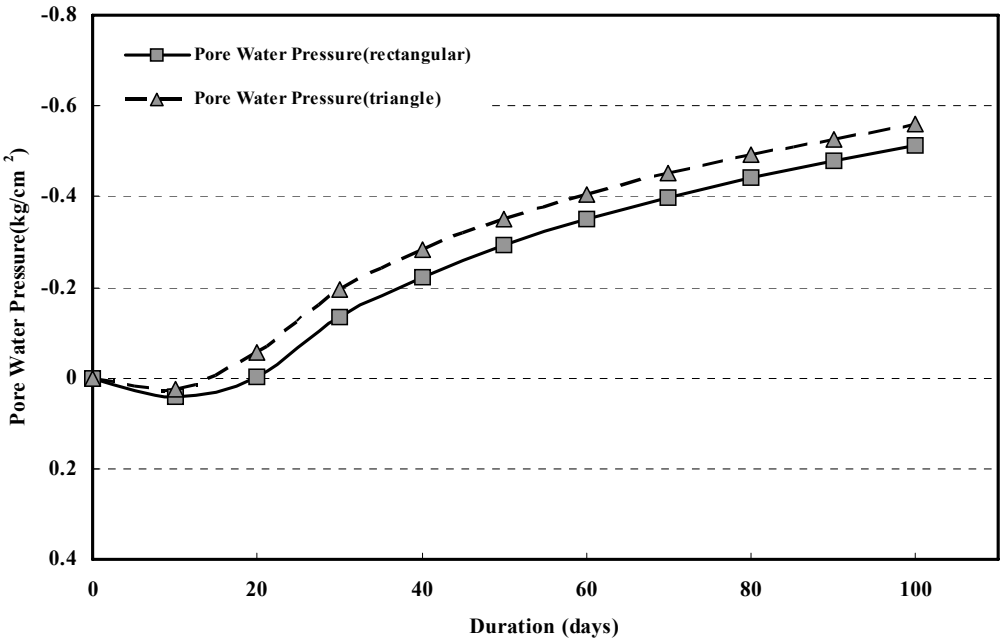


Fig. 3.9.3.8 Drain 배치형상에 따른 간극수압의 변화

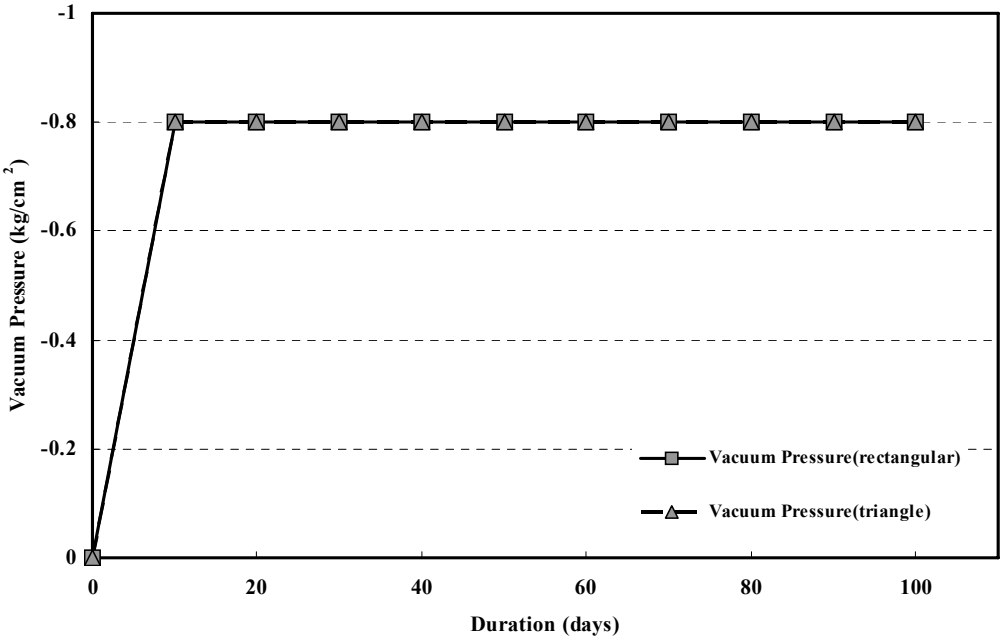


Fig. 3.9.3.9 Drain 배치형상에 따른 배수재 내부 진공압의 변화

다. Drain 간격에 따른 영향

Table 3.9.3.10에는 배수재 타설간격의 영향을 검토하기 위한 해석 조건을 제시하였고 Table 3.9.3.11에는 배수재의 타설간격별 등가 투수계수 산정결과를 정리하였다. 여기서 언급되는 배수재의 타설간격은 이차원 등가 모델 자체의 타설간격이 아닌 동일한 등가 유한요소 구성내에서의 실제 배수재의 타설간격을 조절한 경우에 해당한다. 따라서 1.5m, 3.0m, 6.0m의 타설간격은 실제 배수재의 타설간격에 해당하며 그 결과 동일한 유한요소 격자망이 구성된 상태에서 실제 배수재의 타설간격은 단순히 투수계수의 차이로 해석된다. Table. 3.9.3.12에는 Drain 간격에 따른 영향 해석을 위한 단면을 나타내었다.

Table 3.9.3.10 Drain 간격에 따른 영향 해석조건

요소의 형상	Drain 배치형상	Drain 간격 (m)	Drain 통수능 (cm^3/sec)	Drain 타설갯수 (EA)	교란영역, η	진공압 (-kg/cm^2)
사각형	사각형	1B(1.5) 2B(3.0) 4B(6.0)	5	9	3	0.8

Table 3.9.3.11 Drain 간격에 따른 영향 평가를 위해 Hird의 제안식에서 산출한 등가 투수계수

Drain 간격(m)	배수재 타설구간 점토		PDB	
	k_x(m/sec)	k_y(m/sec)	k_x(m/sec)	k_y(m/sec)
1.5	1.634E-005	8.171E-006	1.407E+002	
3.0	3.585E-006	1.792E-006	3.519E+001	
6.0	7.987E-007	3.993E-007	8.798E+000	

Table 3.9.3.12 Drain 간격의 영향 해석단면

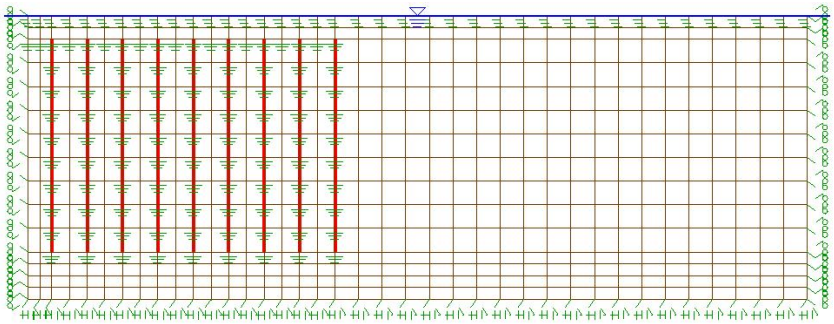
구분	해석단면
1.5m 3.0m 6.0m	

Fig 3.9.3.14 ~ Fig 3.9.3.17은 Drain 간격의 변화에 따라 발생된 수치해석 결과를 제시한 것으로 Drain 간격이 증가함에 따라 침하량과 수평변위 및 간극수압 모두 민감한 영향을 받고 있음을 알 수 있었으며 동일한 유한요소 단면내에서 실제 배수재의 타설간격 변화에 따른 투수계수 변화가 침하량과 과잉간극수압 소산에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 따라서 Hird의 제안식을 이용한 Suction-CAIN 프로그램의 경우, 유한요소 해석의 기하구조보다 파라미터의 조절을 통해 간단히 현장 조건을 구현할 수 있다.

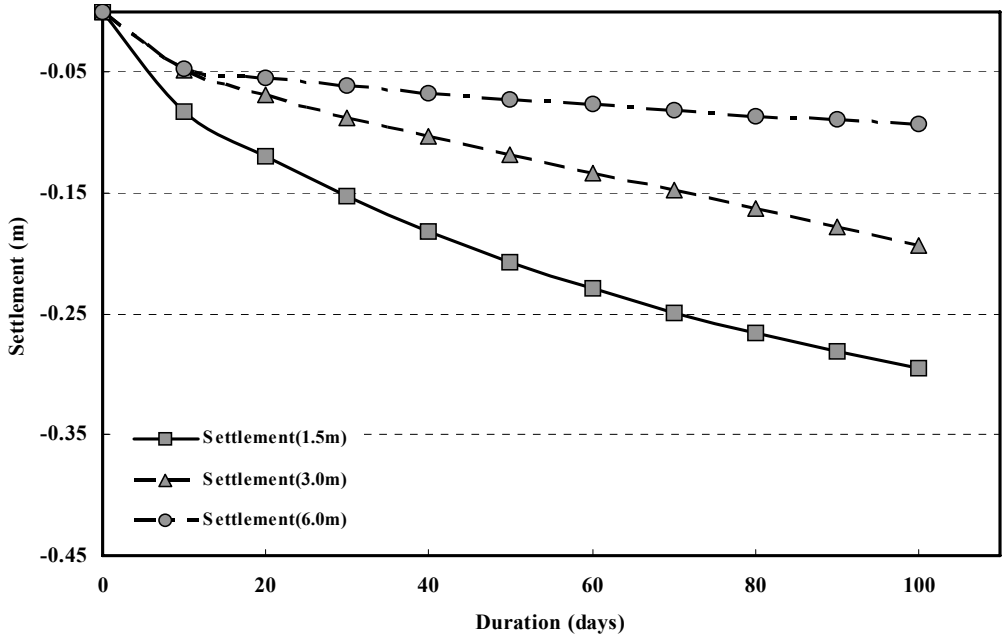


Fig. 3.9.3.14 Drain 간격에 따른 침하량의 변화

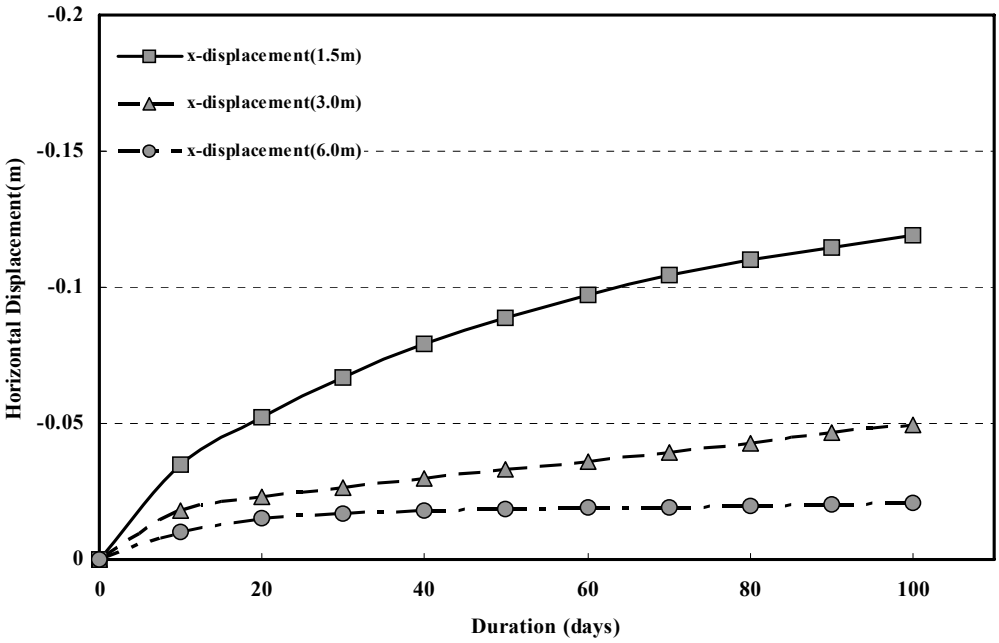


Fig. 3.9.3.15 Drain 간격에 따른 수평변위의 변화

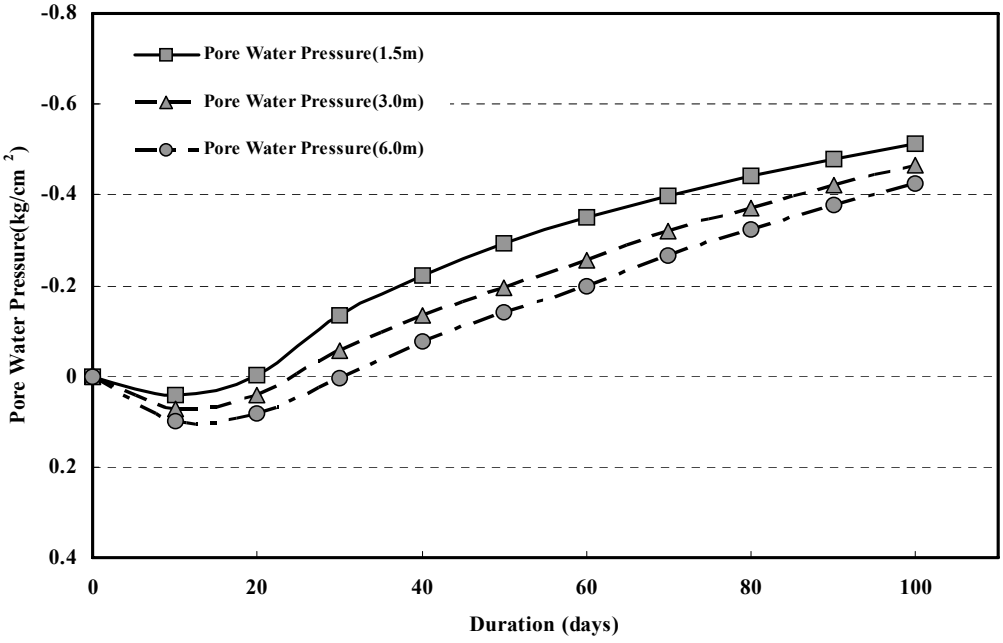


Fig. 3.9.3.16 Drain 간격에 따른 간극수압의 변화

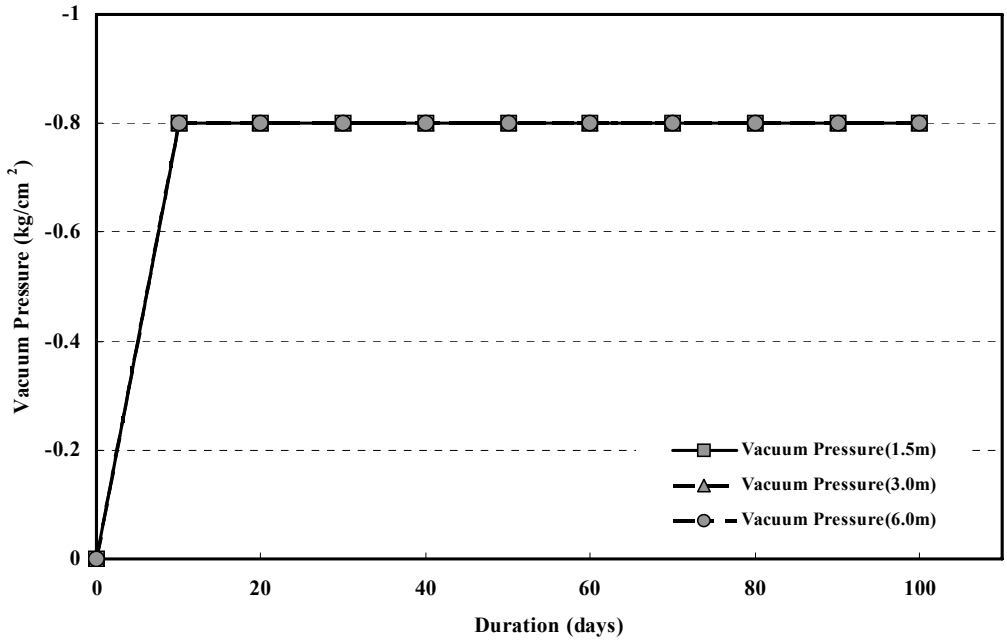


Fig. 3.9.3.17 Drain 간격에 따른 배수재 내부 진공압의 변화

라. Drain 통수능의 영향

배수재의 투수계수는 통수능의 함수이며 Hird의 제안식에 따르면 배수재의 투수계수가 변화하여도 원지반의 등가 환산투수계수에는 차이를 보이지 않는다. 본 해석의 단면은 앞서 제시한 기준단면을 대상으로 하였으며, 배수재의 통수능을 5, 10, 15 cm^3/sec의 세 Case로 변화시켜 해석을 수행하였다.

Table 3.9.3.13 Drain 통수능에 따른 영향 해석조건

요소의 형상	Drain 배치형상	Drain 간격 (m)	Drain 통수능 (cm^3/sec)	Drain 타설갯수 (EA)	교란영역, η	진공압 ($-kg/cm^2$)
사각형	사각형	1B(1.5)	5 10 15	9	3	80

Table 3.9.3.14 Drain 통수능에 따른 영향 평가를 위해 Hird의 제안식에서 산출한 등가 투수계수

Drain 통수능 (cm^3/s)	배수재 타설구간 점토		PDB	
	k_x(m/sec)	k_y(m/sec)	k_x(m/sec)	k_y(m/sec)
5	1.634E-005	8.171E-006	1.407E+002	
10	1.634E-005	8.171E-006	2.815E+002	
15	1.634E-005	8.171E-006	4.223E+002	

Table 3.9.3.15 Drain 통수능의 영향 해석단면

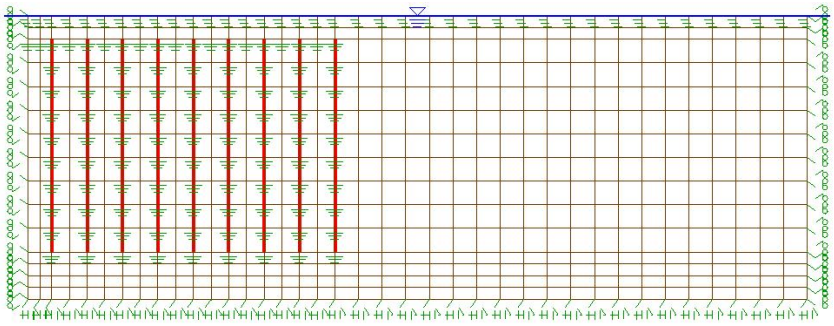
구분	해석단면
$5cm^3/s$ $10cm^3/s$ $15cm^3/s$	

Fig. 3.9.3.18 ~ Fig. 3.9.3.21은 통수능 조건 변화에 따른 수치해석 결과를 제시한 것으로 배수재의 통수능, 즉 투수계수가 변화하여도 해석결과의 침하량과 수평변위 및 간극수압에는 큰 차이를 나타내지 않는 것을 볼 수 있었다. 이는 Hird의 제안식에서 등가환산 투수계수의 값은 원지반의 절대적인 값이 미치는 영향이 상대적으로 크고, 등가 배수재와 원지반 투수계수의 상대적인 차이가 일정 수준에 도달하면 해석결과에 큰 차이가 없다는 것을 의미한다. 배수재 내에 진공압은 경계조건으로 적용시킨 진공압이 그대로 작용되므로 해석조건의 변화와 상관없이 동일하다.

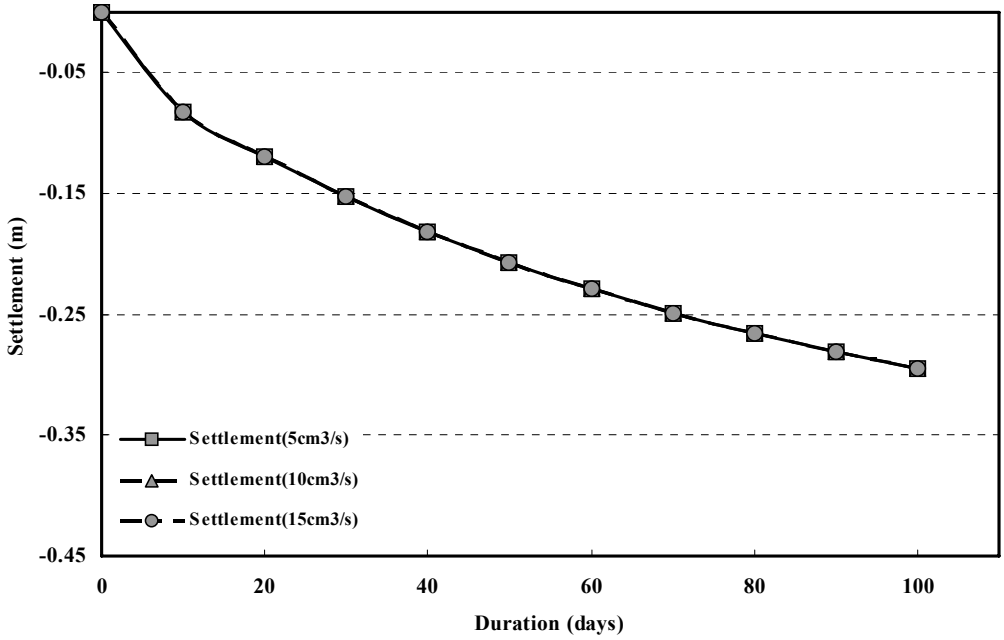


Fig. 3.9.3.18 Drain 통수능에 따른 침하량의 변화

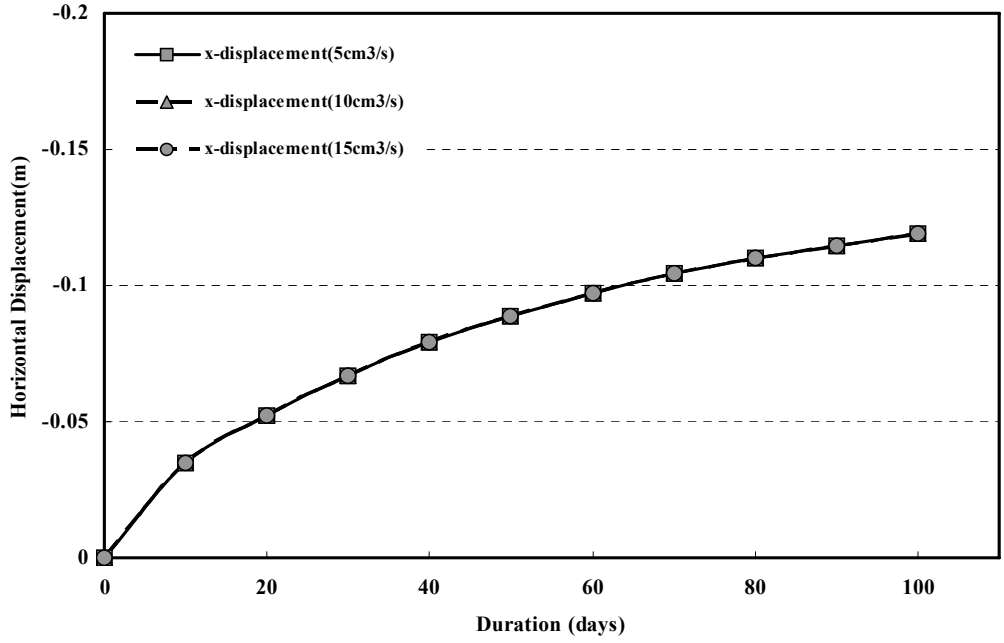


Fig. 3.9.3.19 Drain 통수능에 따른 수평변위의 변화

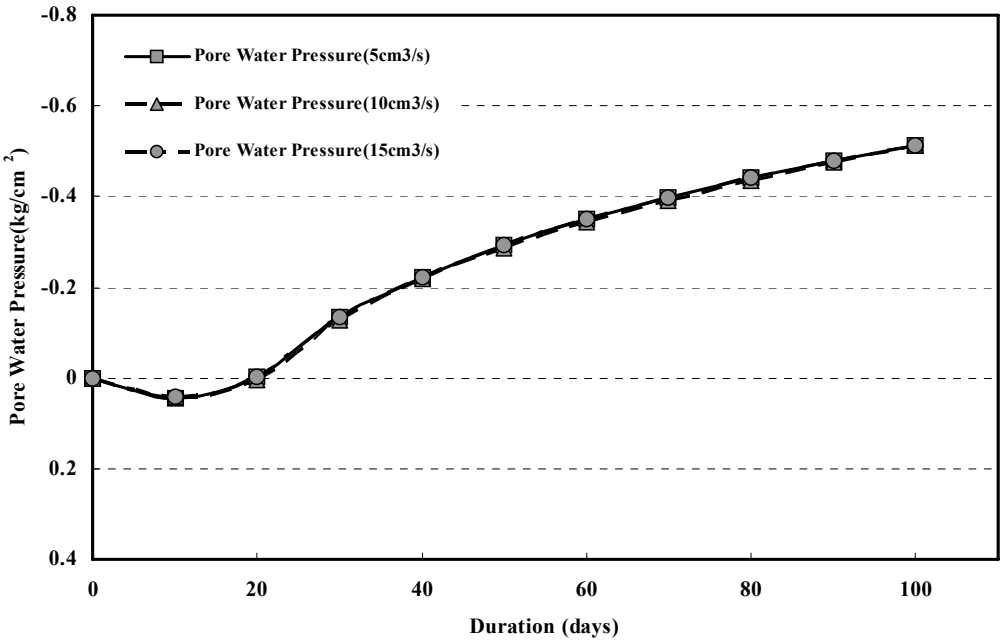


Fig. 3.9.3.20 Drain 통수능에 따른 간극수압의 변화

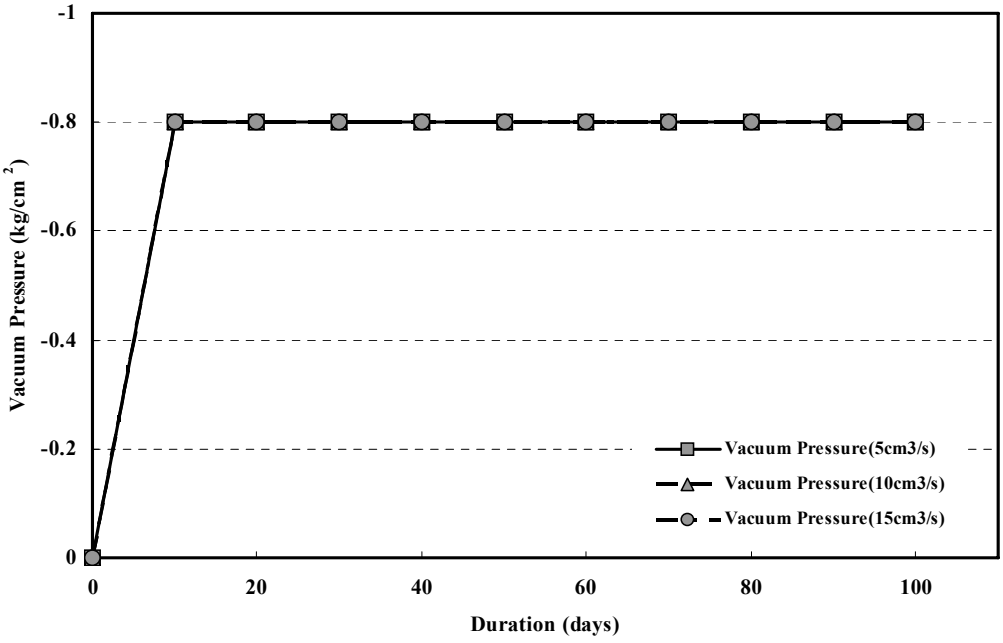


Fig. 3.9.3.21 Drain 통수능에 따른 배수재 내부 진공압의 변화

마. Drain 타설개수에 따른 영향

Hird의 제안식 이용시 동일한 개량폭을 갖는 경우에도 배수재의 타설개수가 변화하면 원지반의 환산투수계수가 변화하게 되나 이들의 조합으로 인해 실제 해석결과에는 차이가 없어야만 한다. 이러한 영향을 검토하기 위해 실제 배수재의 타설간격을 1.5m로 고정하고(즉 실제 현장조건에서의 타설갯수는 일정) 이차원 등가 환산단면에서의 타설갯수는 9EA와 7EA, 5EA로 변화시켜 해석을 수행하고 그 결과를 검토하였다.

Table 3.9.3.16 Drain 타설갯수에 따른 영향 해석조건

요소의 형상	Drain 배치형상	Drain 간격 (m)	Drain 통수능 (cm^3/sec)	Drain 타설갯수 (EA)	교란영역, η	진공압 (-kg/cm^2)
사각형	사각형	1B(1.5)	5	9 7 5	3	0.8

Table 3.9.3.17 Drain 타설갯수에 따른 영향 평가를 위해 Hird의 제안식에서 산출한 등가 투수계수

Drain 타설갯수 (EA)	배수재 타설구간 점토		PDB	
	k_x(m/sec)	k_y(m/sec)	k_x(m/sec)	k_y(m/sec)
9	1.634E-005	8.171E-006	1.407E+002	
7	2.956E-005	1.478E-005	1.893E+002	
5	6.765E-005	3.382E-005	2.864E+002	

Table 3.9.3.18 Drain 타설갯수의 영향 해석단면

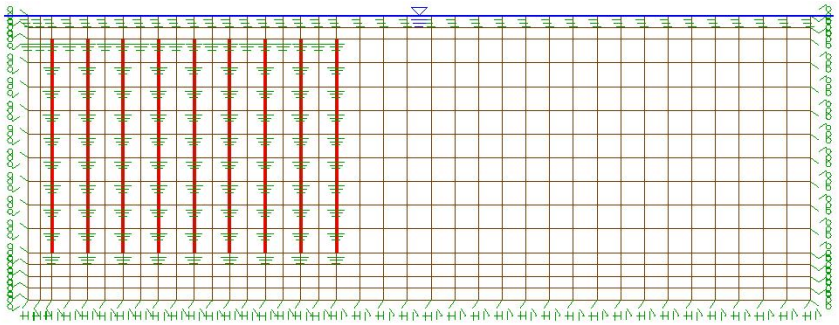
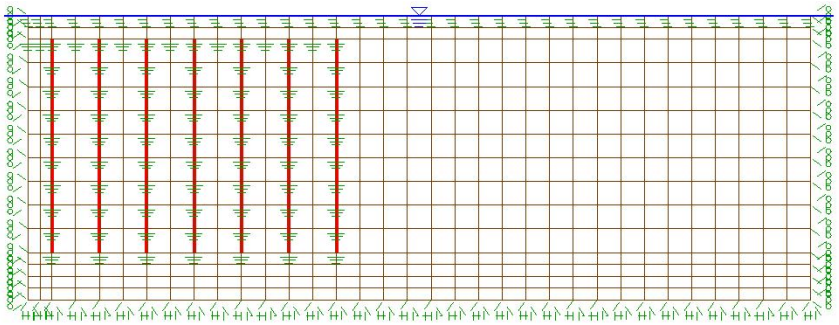
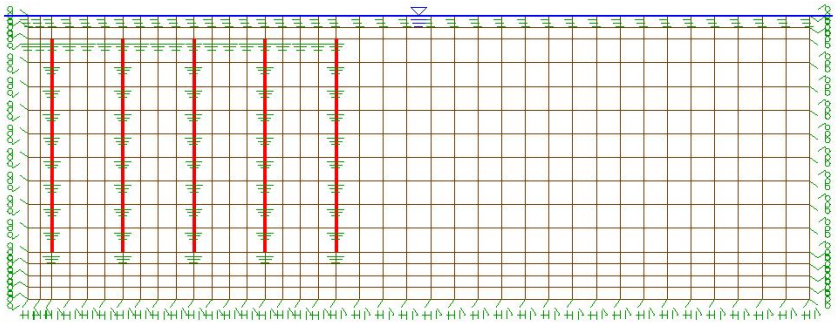
구분	해석단면
9EA	
7EA	
5EA	

Fig. 3.9.3.22 ~ Fig. 3.9.3.25은 Drain 타설 갯수에 따른 해석결과를 제시한 것으로 검토결과 타설갯수가 변화함에 따라 침하량과 수평변위 및 간극수압은 거의 변화가 없었다. 따라서 Hird의 제안식에서 동일한 개량폭을 갖는 경우에 배수재의 타설갯수가 변화하여도 원지반의 환산투수계수를 변화시켜 결국 실제 해석결과에는 차이가 없게 됨을 알 수 있다.

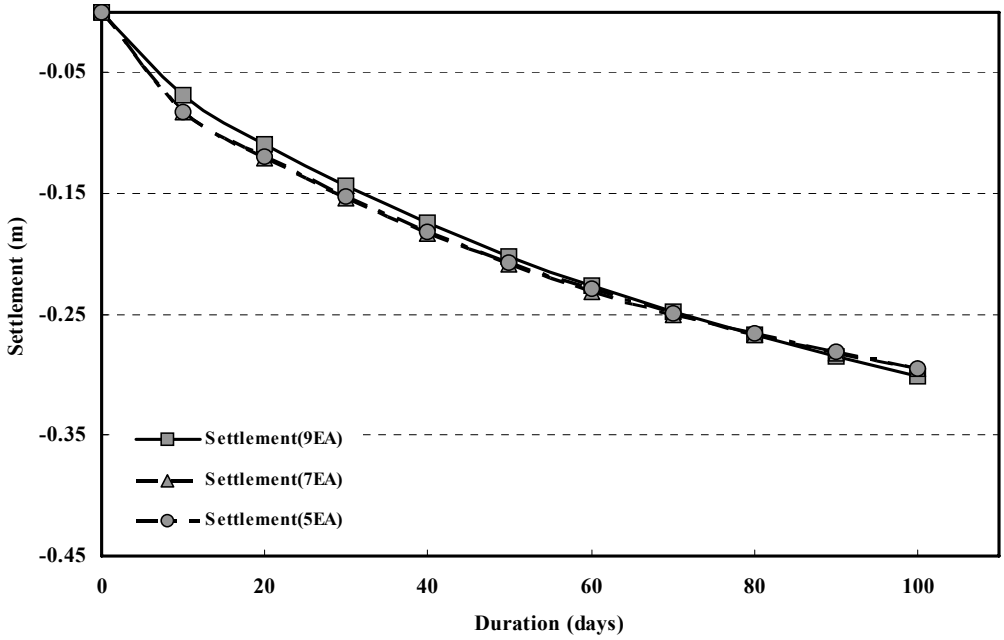


Fig. 3.9.3.22 Drain 타설갯수에 따른 침하량의 변화

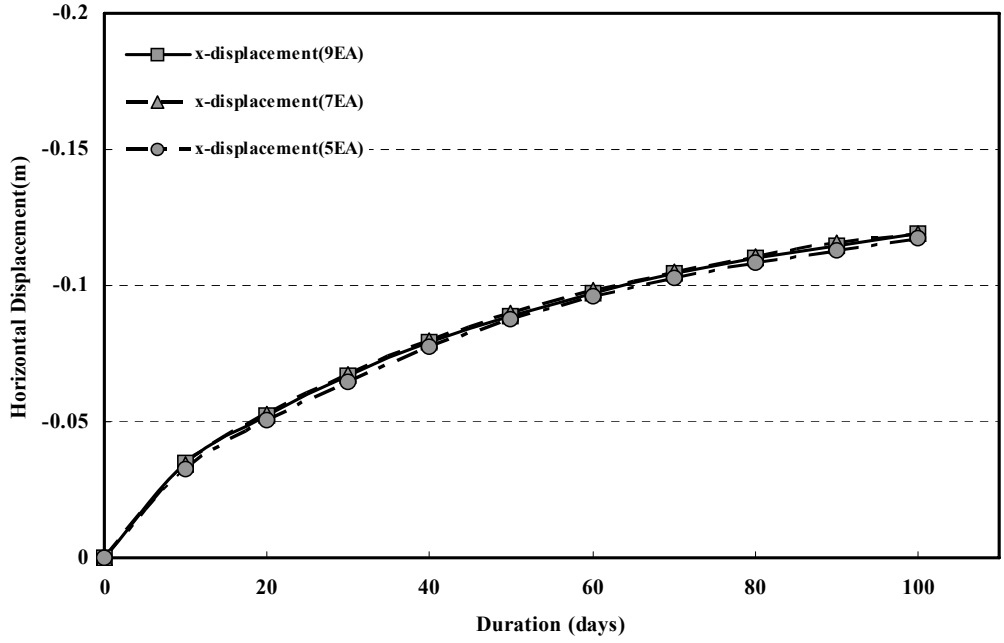


Fig. 3.9.3.23 Drain 타설갯수에 따른 수평변위의 변화

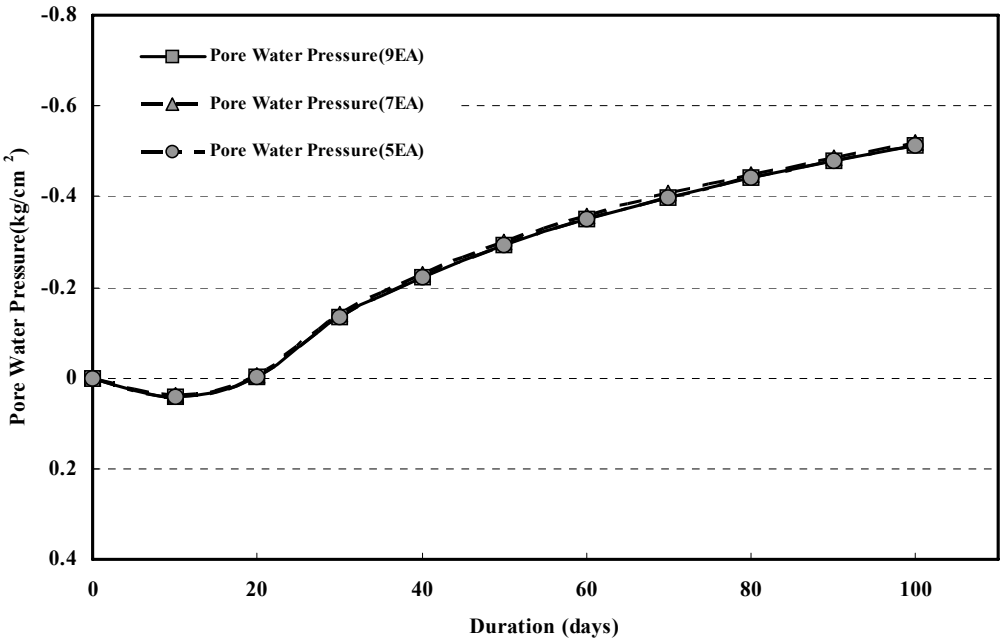


Fig. 3.9.3.24 Drain 타설갯수에 따른 간극수압의 변화

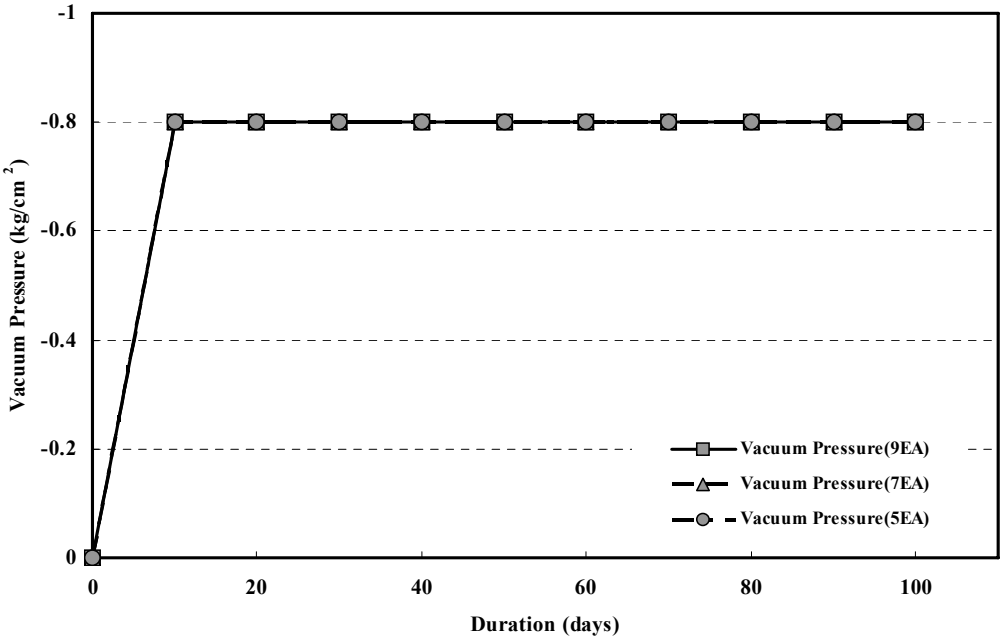


Fig. 3.9.3.25 Drain 타설갯수에 따른 배수재 내부 진공압의 변화

바. 스미어존과 하드닝존을 포함한 교란영역 범위에 따른 영향

배수재의 타설시 발생하는 스미어존에 대해서는 많은 연구자들이 연구를 수행한 바 있으나 그 의견은 다양하다. 이들 연구를 종합하면 배수재의 등가경에 대한 스미어존의 직경비는 대략 3~6 정도의 값을 갖는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서 구해진 하드닝 존의 범위 또한 유사한 값으로 나타났다. Hird의 제안식은 간극비의 함수로써 교란영역의 효과를 고려하고 있어 배수재 등가경에 대한 교란영역의 직경비, η에 따라 원지반의 투수계수가 변화되어 지반의 압밀거동에 영향을 미친다. 본 해석에서는 기준 단면에 대해 교란 효과를 고려하지 않은 η=1의 조건으로부터 η=3과 η=6의 세 가지 경우에 대한 해석을 수행하여 Hird의 제안식을 이용하는 경우 스미어 영역이 지반의 압밀거동에 미치는 영향을 검토하였다.

Table 3.9.3.19 교란영역의 범위에 따른 영향 해석조건

요소의 형상	Drain 배치형상	Drain 간격 (m)	Drain 통수능 (cm^3/sec)	Drain 타설갯수 (EA)	교란영역, η	진공압 (-kg/cm^2)
사각형	사각형	1B(1.5)	5	9	1 3 6	0.8

Table 3.9.3.20 교란영역의 범위에 따른 영향 평가를 위해 Hird의 제안식에서 산출한 등가 투수계수

교란영역, η	배수재 타설구간 점토		PDB	
	k_x(m/sec)	k_y(m/sec)	k_x(m/sec)	k_y(m/sec)
1	2.929E-005	1.464E-005	1.407E+002	
3	1.634E-005	8.171E-006	1.407E+002	
6	1.277E-005	6.389E-006	1.407E+002	

Table 3.9.3.21 교란영역의 범위의 영향 해석단면

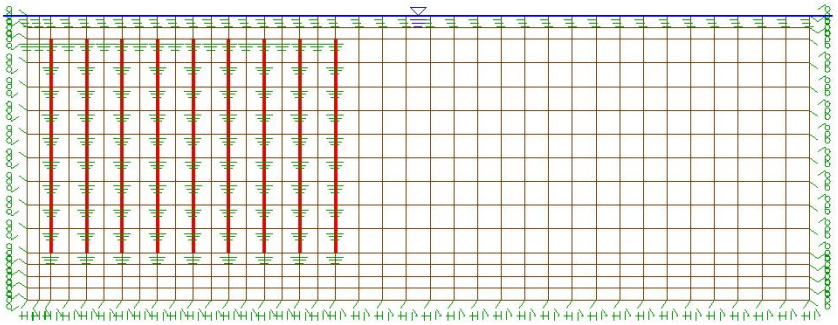
구분	해석단면
η=1 η=3 η=6	

Fig. 3.9.3.26 ~ Fig. 3.9.3.29는 교란영역의 범위의 변화 조건에 따른 수치해석 결과를 제시한 것으로 교란영역이 증가할수록 동일한 개량 시간에서 침하량과 수평변위가 작게 나타나며, 진공압으로 인한 배수효과도 지연되는 것으로 보아 압밀지연현상이 두드러지게 발생하는 것으로 나타났다. 이로부터 교란효과에 대하여 Hird의 제안식이 적용될 수 있음을 알 수 있다.

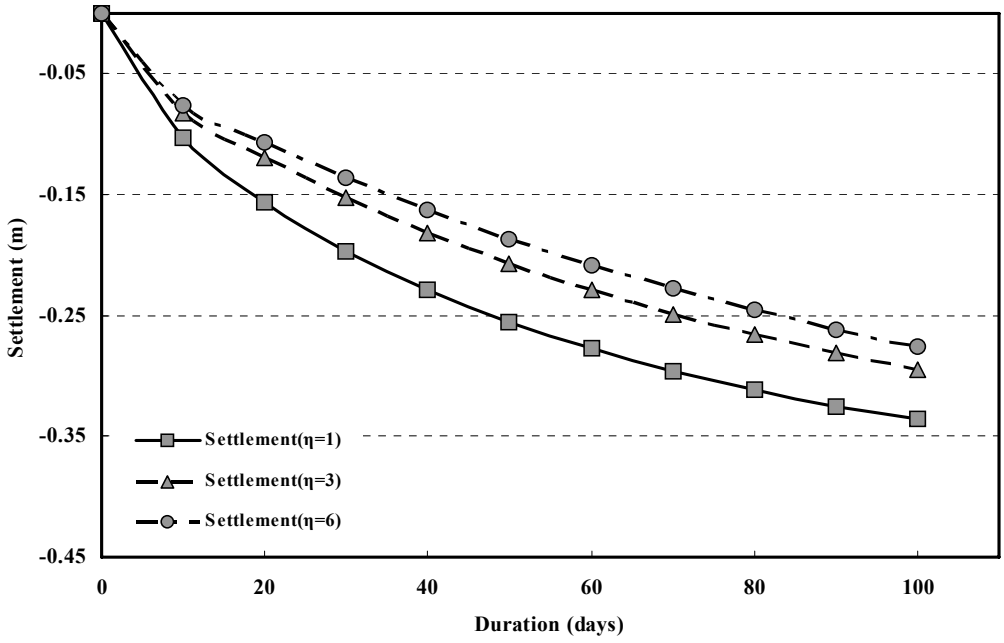


Fig. 3.9.3.26 교란영역의 범위에 따른 침하량의 변화

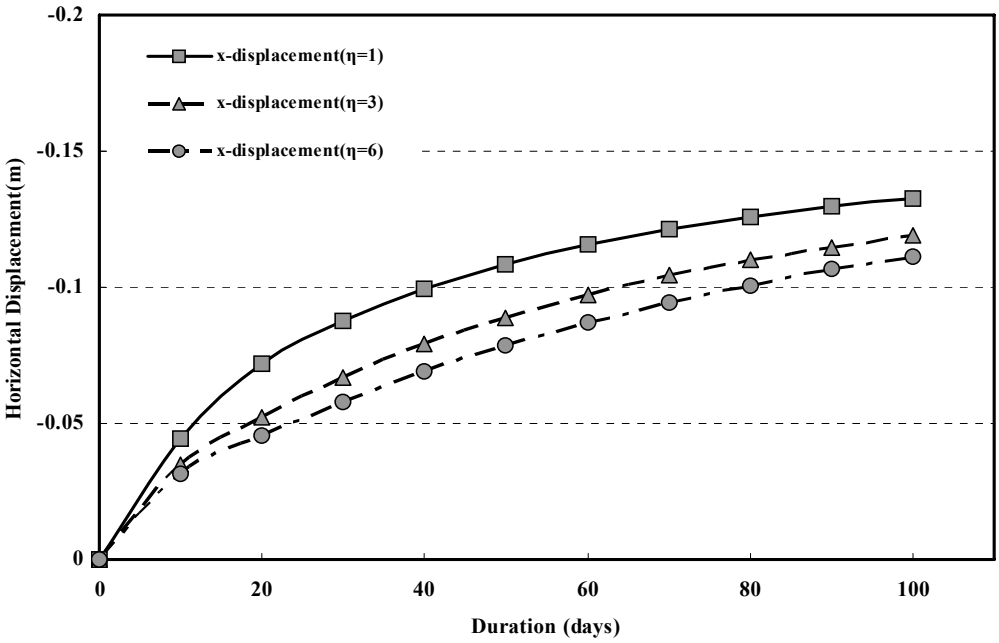


Fig. 3.9.3.27 교란영역의 범위에 따른 수평변위의 변화

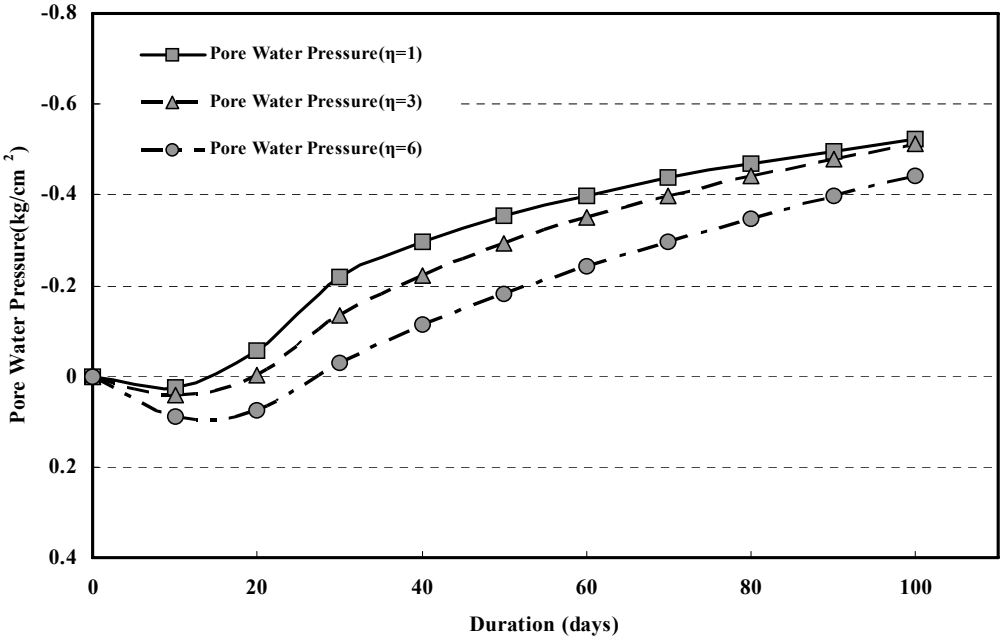


Fig. 3.9.3.28 교란영역의 범위에 따른 간극수압의 변화

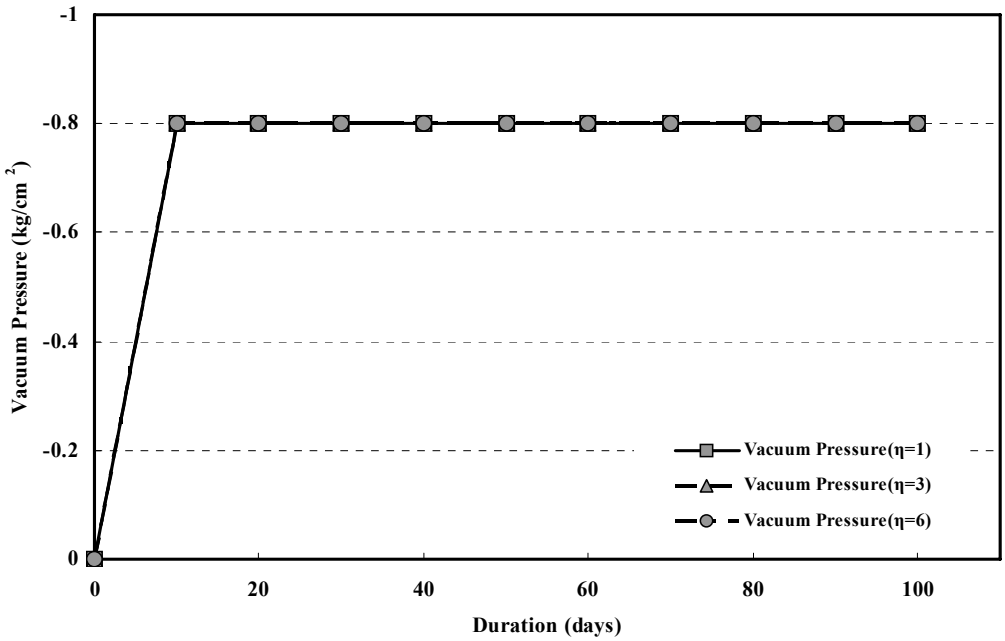


Fig. 3.9.3.29 교란영역의 범위에 배수재 내부 진공압의 변화

사. 진공압 크기의 영향

석션드레인 공법 적용시 진공압의 크기는 지반의 거동에 직접적인 영향을 미친다. 본 해석에서는 배수재 경계면에 가하는 진공압의 크기를 -0.2kg/cm^2, -0.4kg/cm^2, -0.6kg/cm^2, -0.8kg/cm^{2}로 바꾸어 가며 적용시켰다. 본 해석에서는 진공압의 크기만을 바꾸어 주었기 때문에 Hird의 제안식에 의한 환산투수계수의 차이는 없었으며, 해석 단면도 모두 동일하였다.

Table 3.9.3.22 진공압 크기에 따른 영향 해석조건

요소의 형상	Drain 배치형상	Drain 간격 (m)	Drain 통수능 (cm^3/sec)	Drain 타설갯수 (EA)	교란영역, η	진공압 (-kg/cm^2)
사각형	사각형	1B(1.5)	5	9	3	0.2 0.4 0.6 0.8

Table 3.9.3.23 진공압 크기에 따른 영향 평가를 위해 Hird의 제안식에서 산출한 등가 투수계수

진공압 ($-kg/cm^2$)	배수재 타설구간 점토		PDB	
	k_x(m/sec)	k_y(m/sec)	k_x(m/sec)	k_y(m/sec)
0.2	1.634E-005	8.171E-006	1.407E+002	
0.4	1.634E-005	8.171E-006	1.407E+002	
0.6	1.634E-005	8.171E-006	1.407E+002	
0.8	1.634E-005	8.171E-006	1.407E+002	

Table 3.9.3.24 진공압 크기의 영향 해석단면

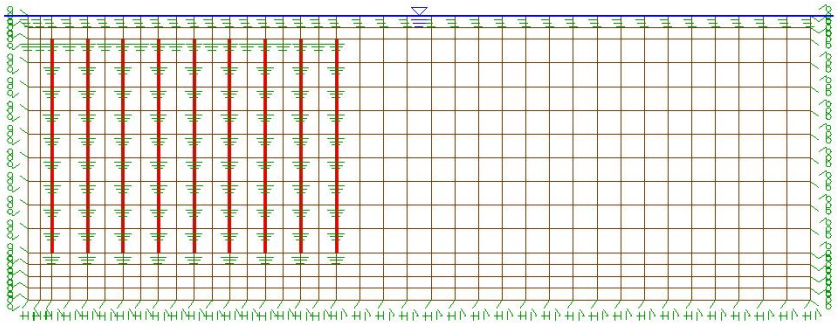
구분	해석단면
$-0.2kg/cm^2$ $-0.4kg/cm^2$ $-0.6kg/cm^2$ $-0.8kg/cm^2$	

Fig. 3.9.3.30 ~ Fig. 3.9.3.33는 진공압 크기에 따른 해석결과를 제시한 것으로 진공압의 크기가 증가할수록 침하량과 수평변위가 크게 나타나며, 간극수압의 크기에도 민감한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

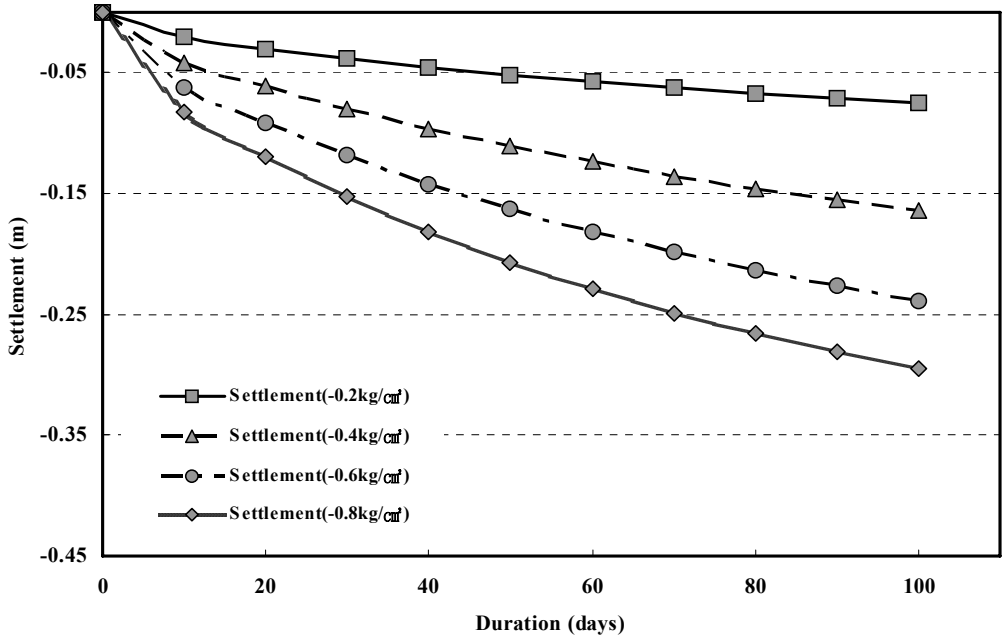


Fig. 3.9.3.30 진공압 크기에 따른 침하량의 변화

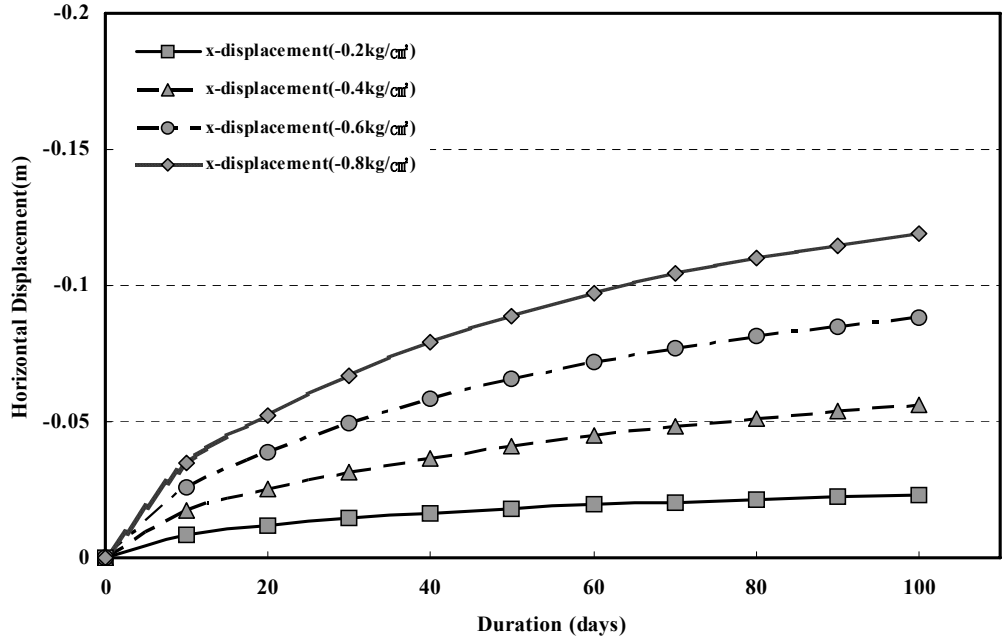


Fig. 3.9.3.31 진공압 크기에 따른 수평변위의 변화

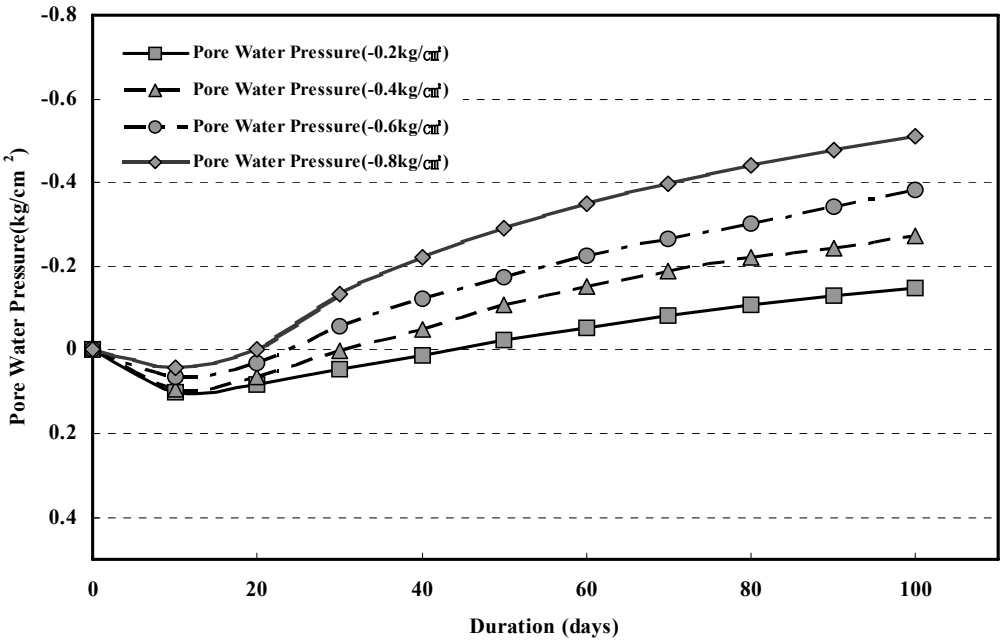


Fig. 3.9.3.32 진공압 크기에 따른 간극수압의 변화

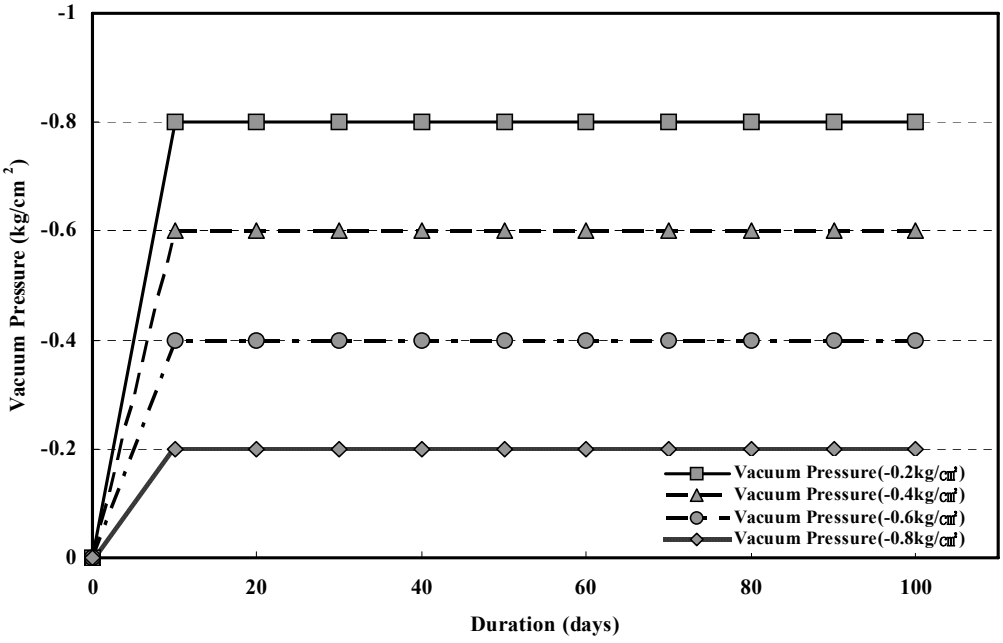


Fig. 3.9.3.33 진공압 크기에 따른 배수재 내부 진공압의 변화

4. Suction-CAIN 프로그램의 적용성 검토

가. 해석단면 및 경계조건

본 연구에서는 Suction-CAIN 프로그램의 현장 적용성을 검토하기 위하여 2차년도에 수행된 시험시공 현장과 동일한 단면에 대한 해석을 수행하였으며, 상용프로그램(Sage CRISP) 및 현장시험시공 결과와 비교 분석하였다. 해석을 위해 필요한 매개변수들은 현장의 물성치를 바탕으로 Table 3.9.4.1과 같이 도출되었으며, 개량층의 해석 시 수정 Cam-Clay 모델을 사용하였다. 해석 단면은 현장조건과 동일하게 Sealing층의 두께를 1m, 개량층의 두께를 9m, 배수재의 배치형상은 사각형 배치로 설정하였으며, 배수재 타입 지반의 물성은 Hird의 산정식을 통해 자동으로 수정되어 입력되었다. 배수는 상부로의 일면배수만을 허용하였으며, 배수재의 간격은 1.5m로 현장과 동일하게 배치하였다. 본 해석에서 구성한 유한요소망은 Fig. 3.9.4.1과 같다. 각 단계 별 해석 기간은 현장조건과 동일하게, -0.2kg/cm^2→ 20일, -0.4kg/cm^2→ 25일, -0.6kg/cm^2→ 29일, -0.8kg/cm^2→ 43일의 총 117일간 수행되었다. 배수재에 가해지는 진공압은 현장시험시공시 측정된 진공압을 바탕으로 각 하중 단계별, 심도별 효율을 고려하여 현장과 동일하게 입력하였다(Fig. 3.9.4.2).

Table 3.9.4.1 Clay 지반에 적용한 수정 Cam-Clay 매개 변수

κ	λ	e_{cs}	M	ν′	γ_{bulk}(tonf/m^3)	γ_w(tonf/m^3)	k(cm/sec)
0.0234	0.117	2.09	1.042	0.3	1.75	1	5.73×10^{-8}

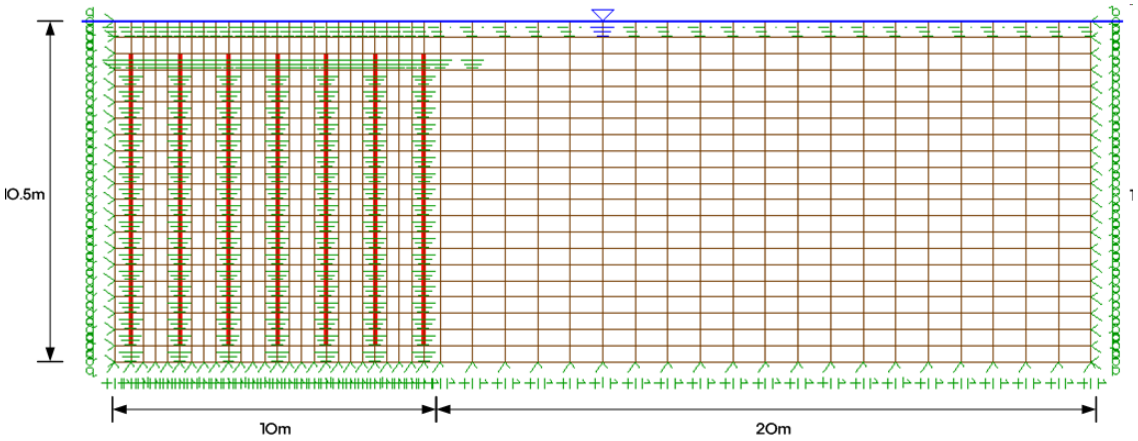


Fig. 3.9.4.1 유한요소망 및 경계조건

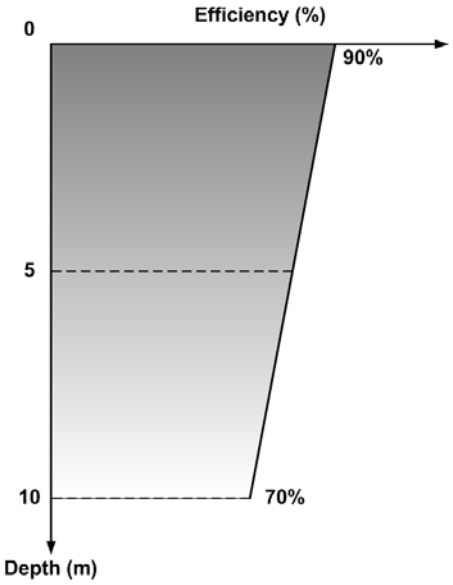


Fig. 3.9.4.2 심도별 하중 효율

나. 해석결과 및 분석

(1) 변위 거동

Fig. 3.9.4.3~Fig. 3.9.4.6에는 각 하중 단계별 해석 단면의 변형 거동을 나타내었다. 진공압의 증가에 따라 개량영역의 침하량이 증가하며, 개량영역에서 멀어질수록 진공압의 영향이 감소하여 침하량이 감소하는 경향을 나타냈다. 수평변위는 개

량영역의 진공압의 영향으로 외부의 지반이 개량영역 방향으로 밀려들어오는 거동을 보였다.

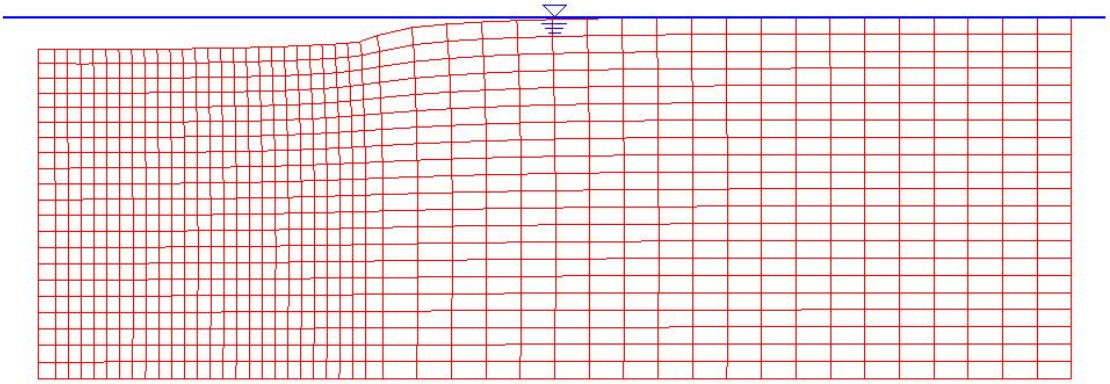


Fig. 3.9.4.3 진공압 -0.2kg/cm^2 적용후 단면의 변형

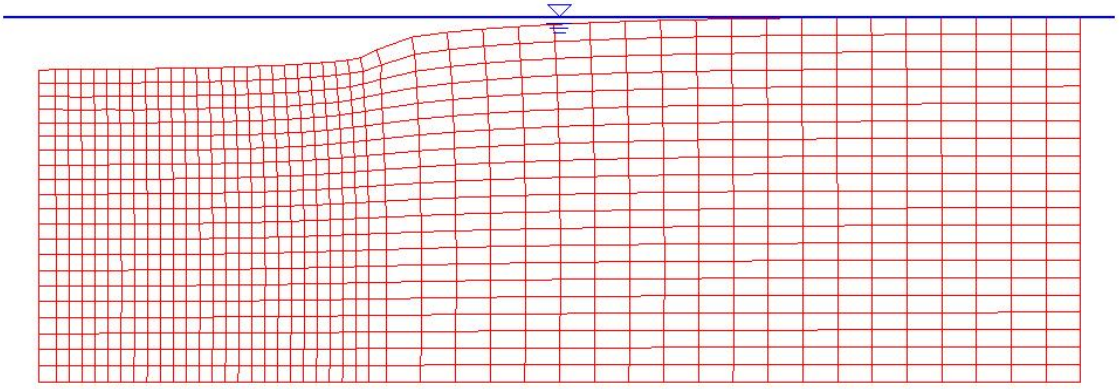


Fig. 3.9.4.4 진공압 -0.4kg/cm^2 적용후 단면의 변형

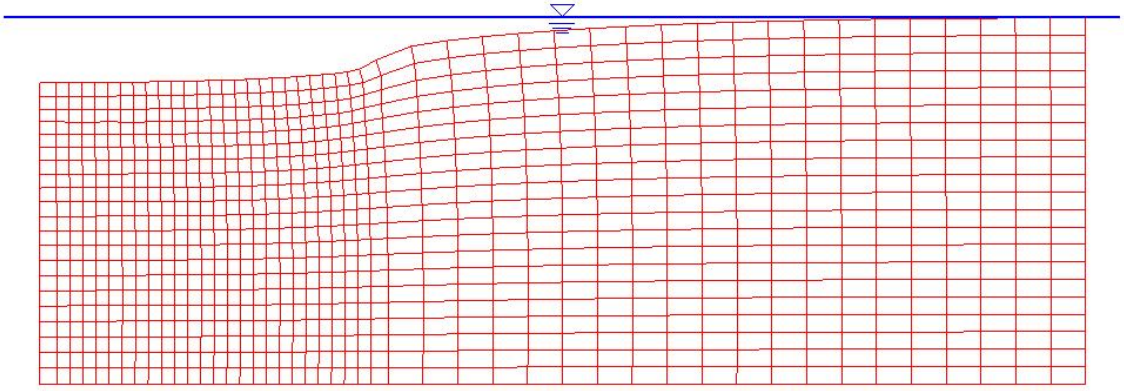


Fig. 3.9.4.5 진공압 -0.6kg/cm^2 적용후 단면의 변형

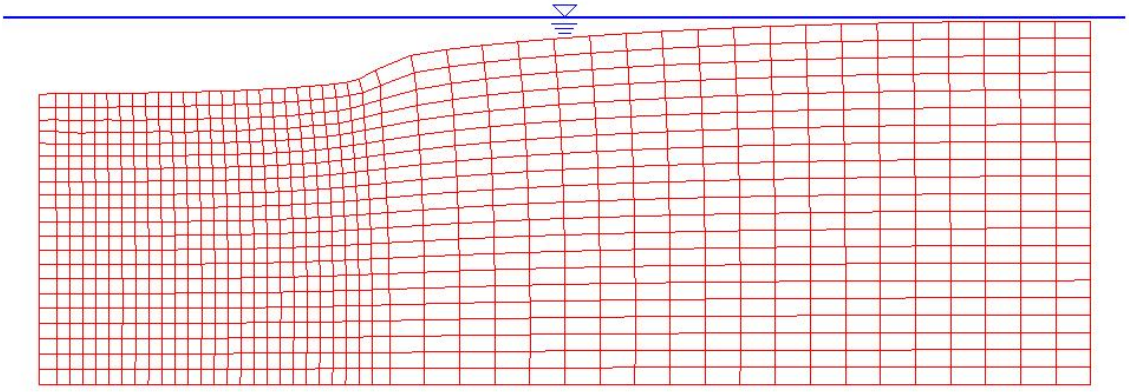


Fig. 3.9.4.6 진공압 -0.8kg/cm^2 적용후 단면의 변형

1) 침하량

Fig 3.9.4.7은 개량영역 중앙부에서 단계 진공압의 변화에 따라 발생된 Suction Drain 공법의 침하양상과 원형배수재가 적용된 지반의 현장데이터를 깊이별로 비교하여 나타내었다. Suction-CAIN을 통해 예측된 최종 침하량은 실제 계측된 침하량과 거의 유사하게 나타났다. 각 진공압 단계별 침하량의 경우에도 진공압이 낮은 단계에서 침하량이 크고, 진공압 단계가 증가할수록 전 단계에서의 압밀로 인하여 침하량이 점차 줄어드는 거동을 보였으며, 이는 실제 현장 데이터와도 일치하였다. Fig. 3.9.4.8은 현장 계측값과 상용프로그램(Sage CRISP) 및 Suction-CAIN을 통해 예측된 총 침하량 값을 비교하여 나타낸 그래프이다. 상용프로그램의 경우 진공압의 효율과 스미어존 등을 고려하지 못하여 침하량이 크게 나타났으며, 각 진공압 단계에서 침하량의 거동도 상이한 결과를 나타냈다.

그러나 Suction -CAIN을 통해 예측된 하중 단계별, 심도별 진공압 효율과 Hird법을 이용한 스미어존의 고려를 통해 CRISP보다 실측데이터에 더욱 근사한 값으로 나타났으며, 이러한 결과를 통해 Suction-CAIN 프로그램의 적용성을 검토할 수 있었다.

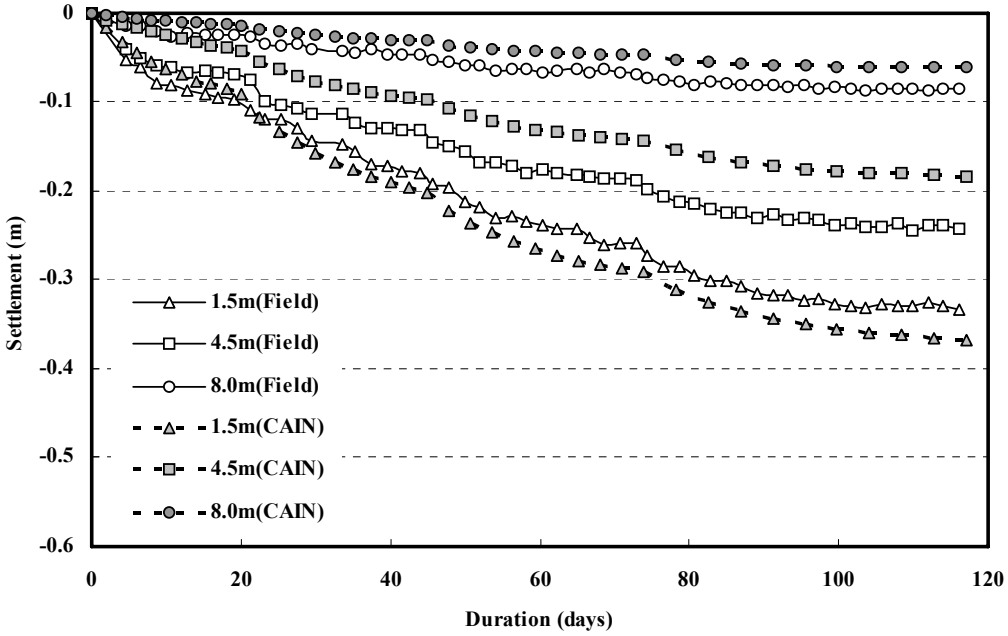


Fig 3.9.4.7 Suction-CAIN으로 예측된 침하량과
실제 계측된 침하량의 비교 (심도별)

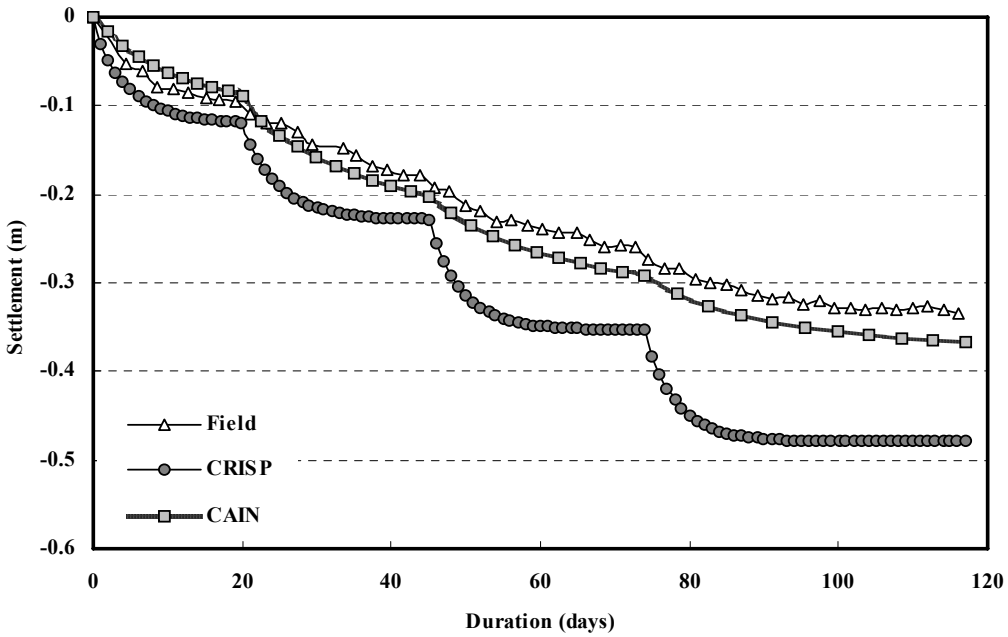
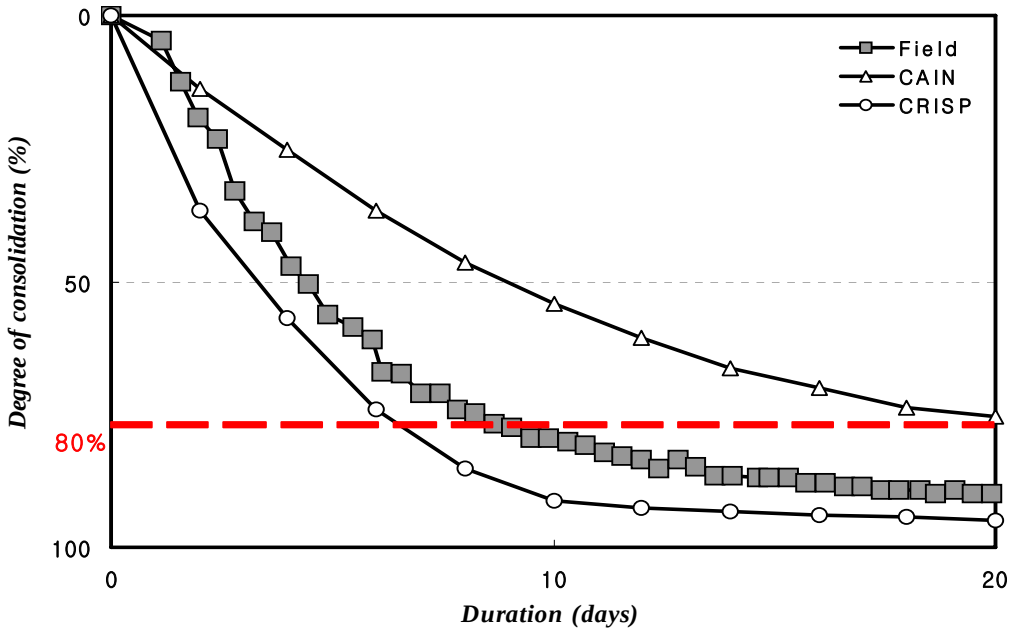
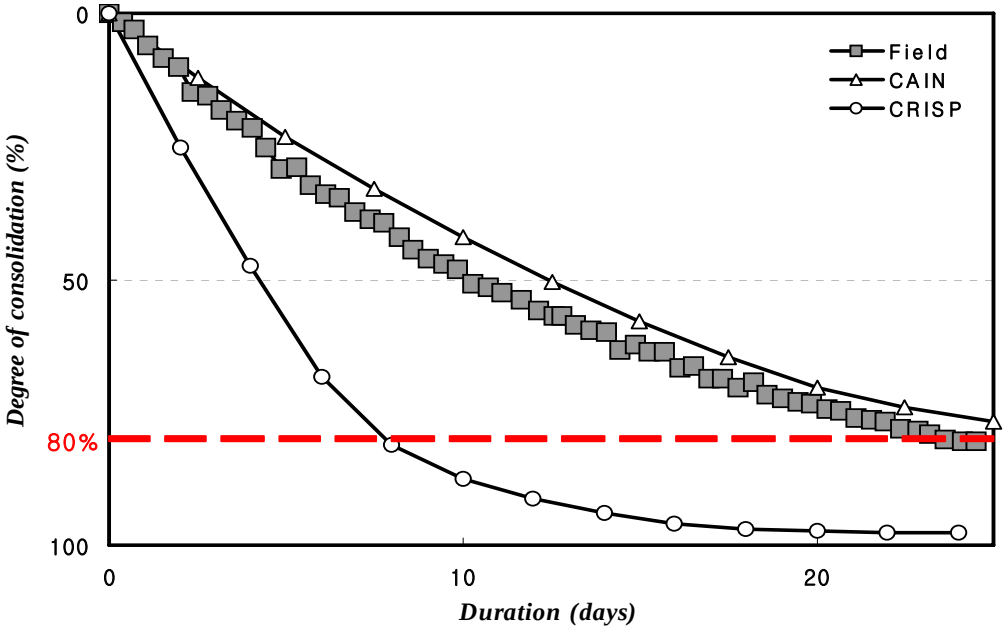


Fig 3.9.4.8 상용프로그램 및 Suction-CAIN으로 예측된 침하량과
실제 계측된 침하량의 비교 (총 침하량)

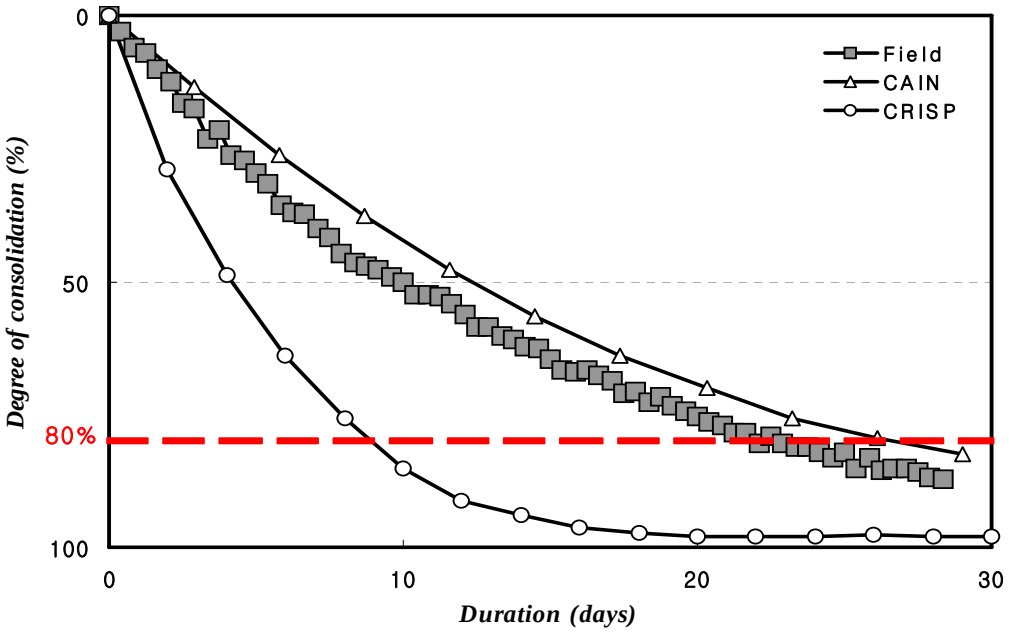
Fig. 3.9.4.9는 현장 데이터, Suction-CAIN, 그리고 상용프로그램의 침하량 결과를 이용하여 각 진공압 단계별로 Asaoka법을 통해 예측된 최종침하량을 바탕으로 시간에 따른 압밀도 분포를 나타낸 그래프이다. Suction-CAIN의 압밀도 분포는 저진공압 단계(-0.2kg/cm^2)를 제외하고 현장의 압밀도 분포와 유사한 거동을 나타냈다. 상용프로그램의 경우 압밀도는 현장 및 Suction-CAIN의 압밀도 분포에 비하여 급격히 증가하였으며, 최종 압밀도의 크기 또한 매우 크게 나타났다. 이러한 결과로부터, 침하량 뿐만 아니라 압밀 속도 거동에 있어서도 Suction-CAIN 프로그램의 적용성을 확인할 수 있었다.



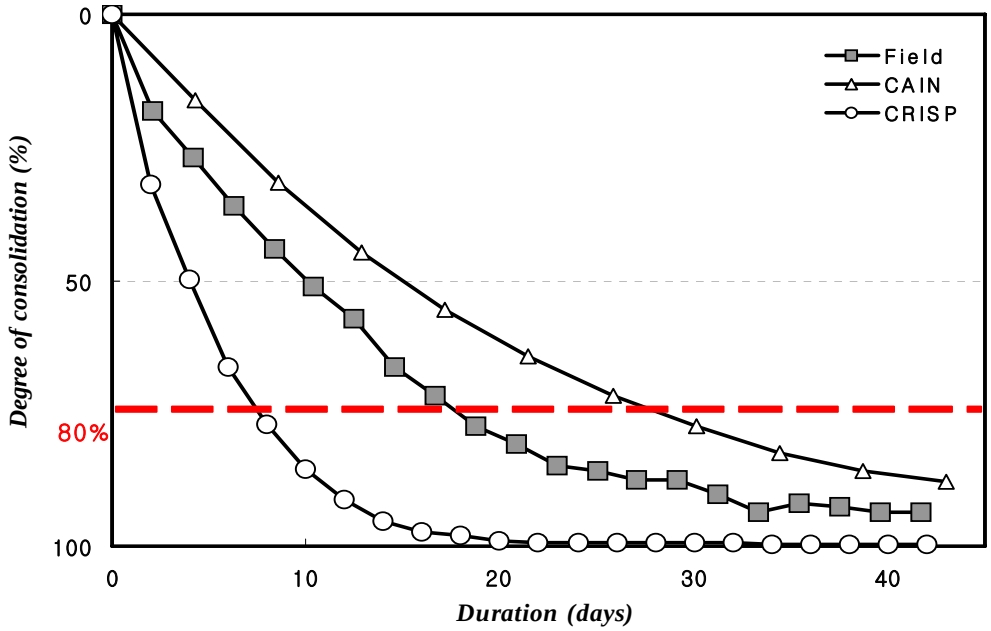
(a) 진공압 -0.2kg/cm^2



(b) 진공압 -0.4kg/cm^2



(c) 진공압 -0.6kg/cm^2



(d) 진공압 -0.8kg/cm^2

Fig. 3.9.4.9 현장, Suction-CAIN, 상용프로그램의 압밀도 분포 비교

2) 수평변위

Fig 3.9.4.10에는 원형배수재를 적용한 지반의 현장 수평변위 계측결과와 Suction-CAIN 프로그램으로 예측된 수평변위 결과를 비교하여 나타내었으며, Fig. 3.9.4.11에는 현장 계측결과와 상용프로그램, Suction-CAIN 결과중 최종 수평변위분포를 나타내었다. 그 결과 예측된 변위량이 다소 크게 나타났으나 그 차이(최대 약 4cm)는 매우 작은 것을 알 수 있다. 그러나 상용프로그램으로 예측된 변위 거동은 실제 현장거동과 비교적 큰 차이를 보였다.

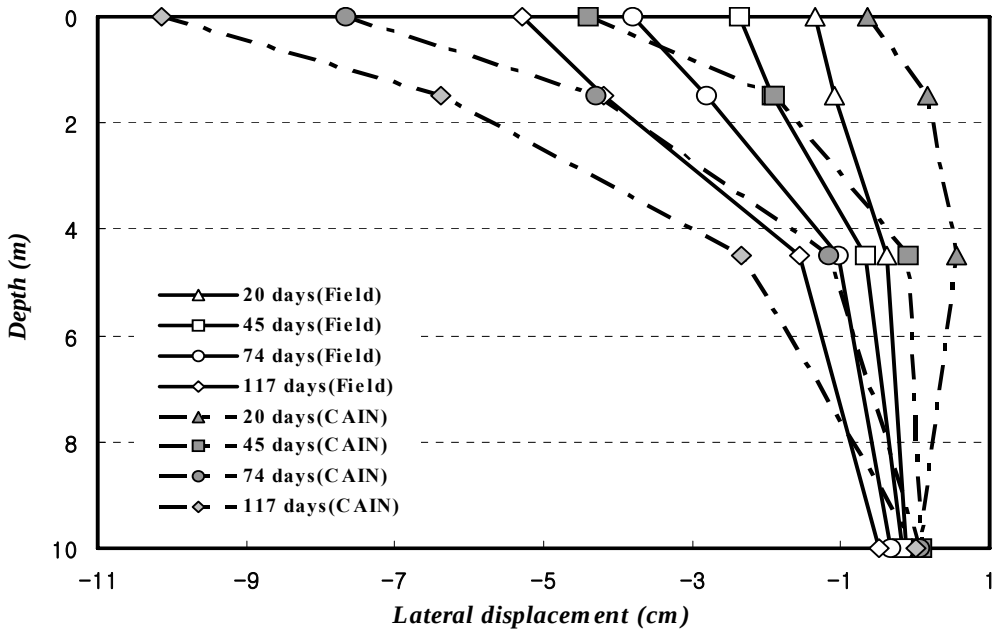


Fig 3.9.4.10 Suction-CAIN으로 예측된 수평변위와 실제 계측된 수평변위의 비교

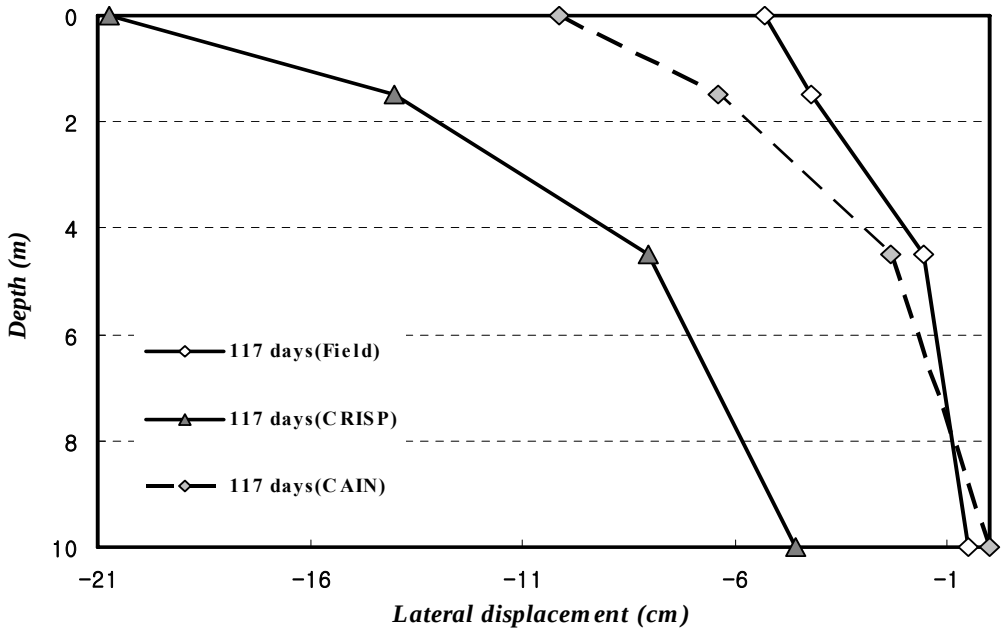


Fig 3.9.4.11 상용프로그램 및 Suction-CAIN으로 예측된 최대 수평변위와 실제 계측된 최대 수평변위의 비교

(2) 진공압 분포

Fig 3.9.4.12는 시간경과에 따라 상용프로그램과 Suction-CAIN으로 예측된 진공압 분포와 현장에서 계측된 데이터를 비교한 결과이며, Fig 3.9.4.13은 심도에 따라 발생된 진공압 분포를 수치해석결과와 현장계측결과를 비교하여 나타낸 그래프이다. 현장 계측데이터의 경우 심도에 따라 효율이 줄어들면서 진공압의 감소가 발생하였다. Suction-CAIN 프로그램에서 배수재의 진공압 분포는 현장에서 측정된 진공압을 하중 단계별, 심도별 효율을 고려하여 입력하였기 때문에 현장과 동일한 진공압 분포를 나타냈다. 반면 상용프로그램의 경우 심도에 따라 진공압의 감소효과를 고려하지 못하여 일정한 값으로 나타났다. 이러한 결과는 상용프로그램의 해석후 발생되는 모든 Data값의 크기가 현장 계측치와 Suction-CAIN 결과보다 크게 발생되게 하는 요인으로 작용했다.

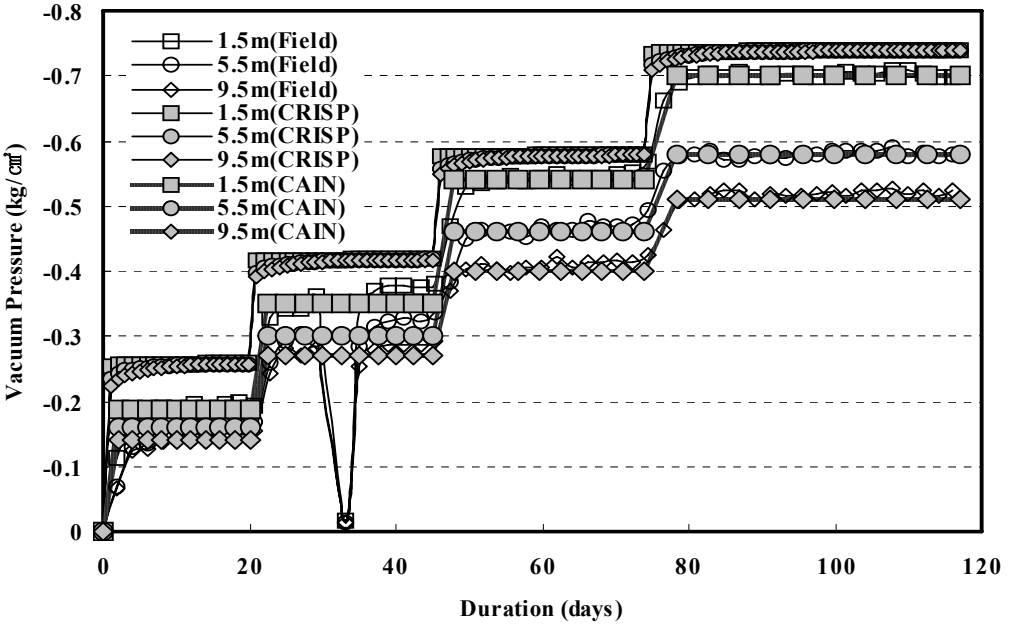


Fig 3.9.4.12 시간경과에 따라 상용프로그램과 Suction-CAIN으로 예측된 진공압 분포와 현장 진공압 계측 데이터의 비교

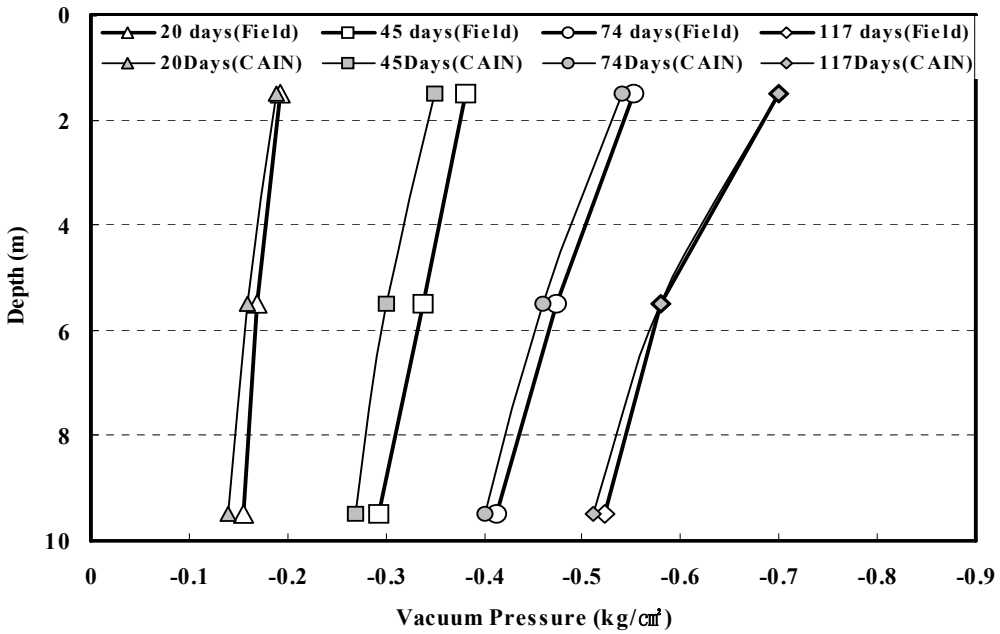
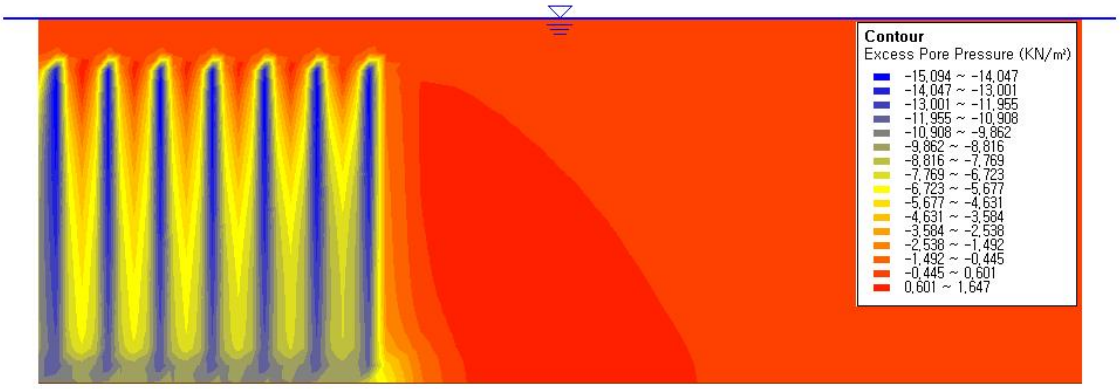
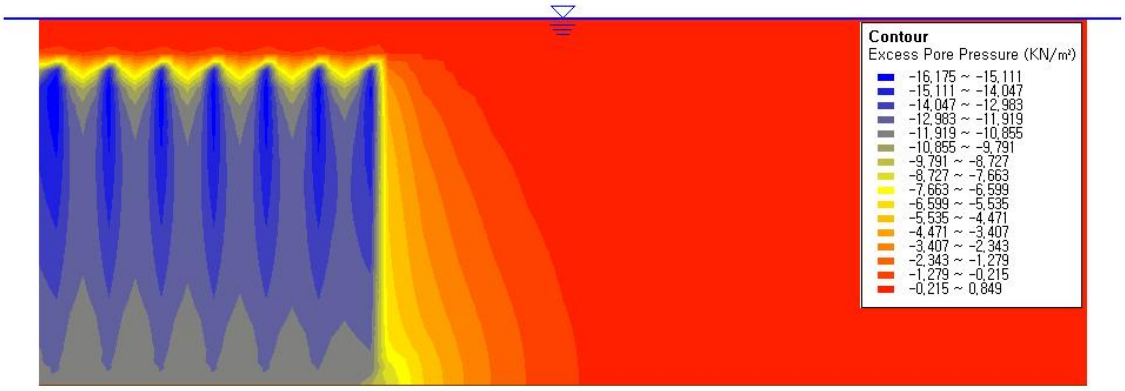


Fig 3.9.4.13 Suction-CAIN에서 입력된 각 진공압 단계 별 심도에 따른 진공압 분포와 현장 계측 데이터의 비교

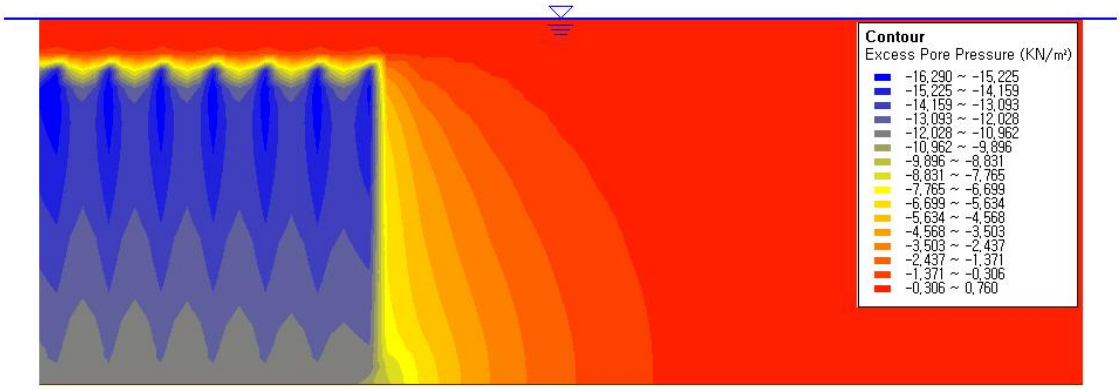
Fig. 3.9.4.14~Fig. 3.9.4.17에는 대상 지반의 각 하중 단계별 시간에 따른 진공압 분포를 등고선(Contour)으로 나타내었다. 각 하중 단계에서 진공압은 시간이 지남에 따라 배수재로부터 가까운 지점부터 점차 먼 지점까지 영향을 미치며, 압밀 종료시에는 전체 지반에 배수재에서 가해준 진공압이 일정하게 분포되는 경향이 나타났다.



(a) 진공압 재하 직후

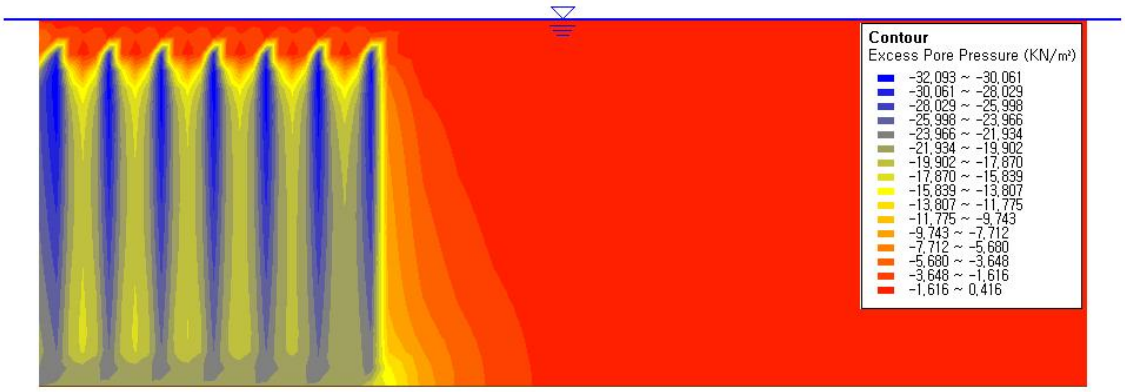


(b) 압밀중

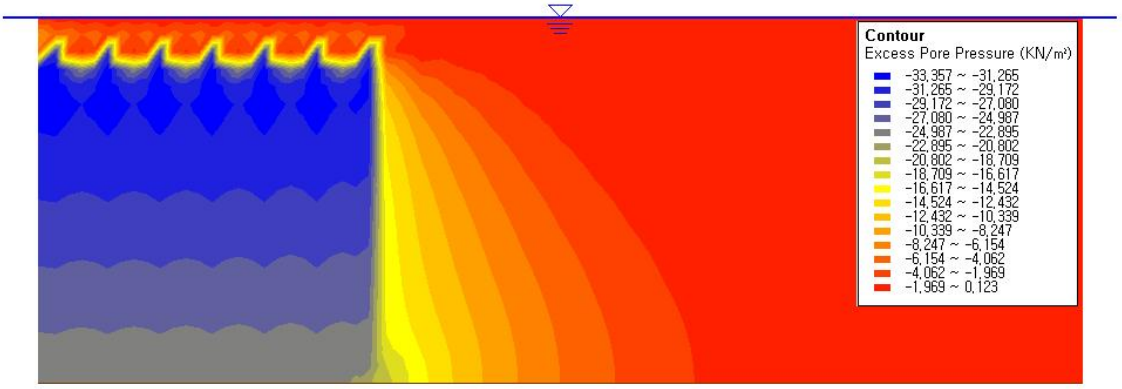


(c) 압밀종료시점

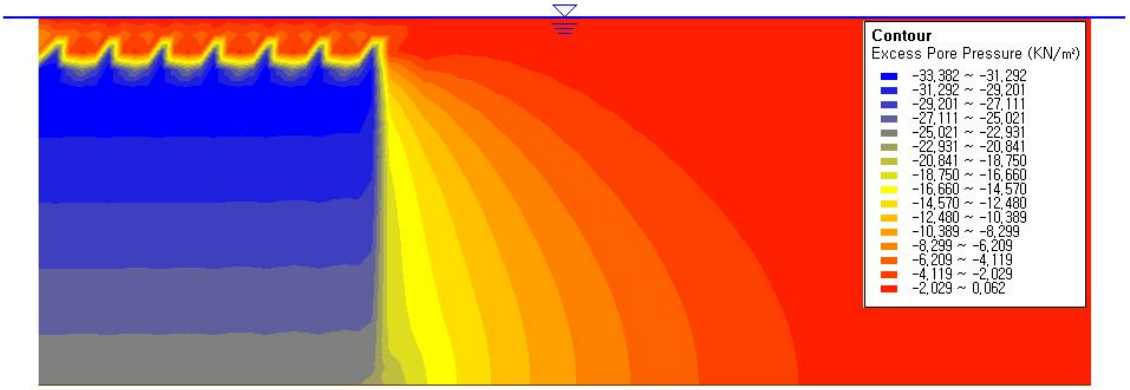
Fig. 3.9.4.14 시간에 따른 지반내 과잉간극수압 분포(-0.2kg/cm^2)



(a) 진공압 재하 직후

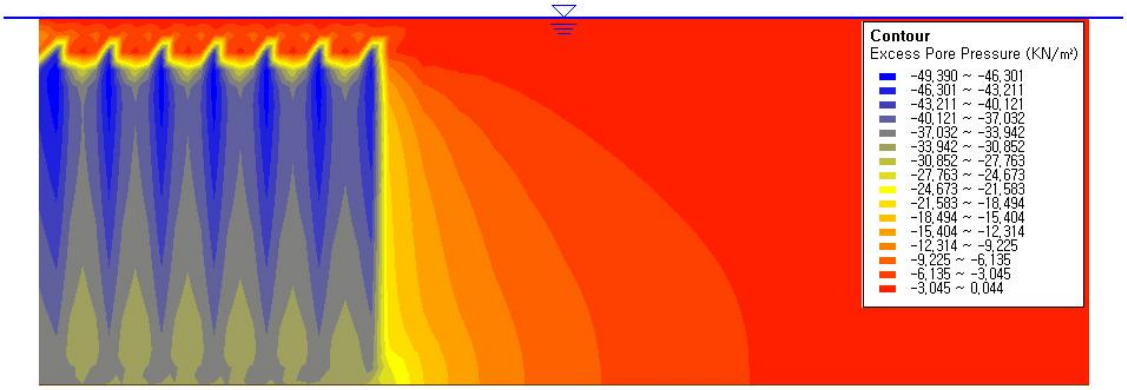


(b) 압밀중

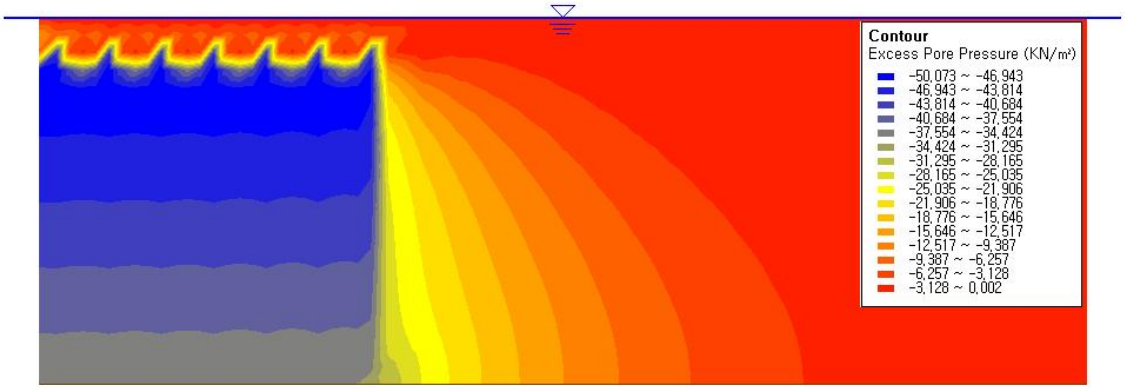


(c) 압밀종료시점

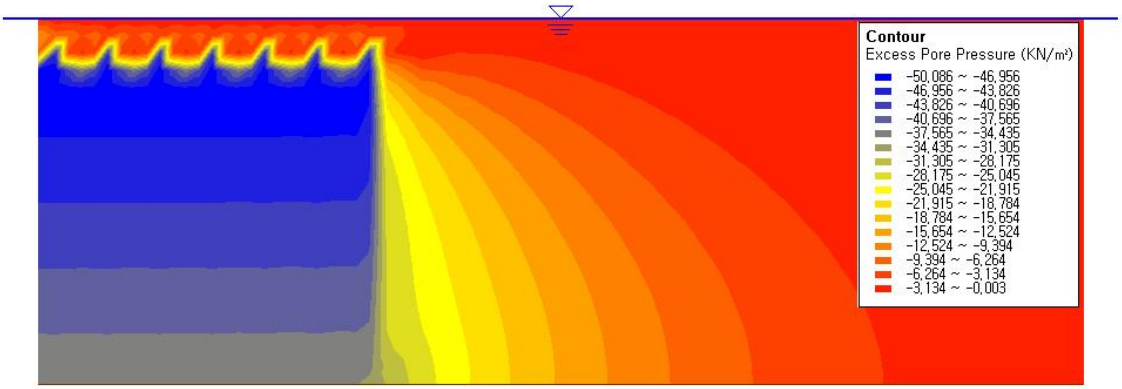
Fig. 3.9.4.15 시간에 따른 지반내 과잉간극수압 분포(-0.4kg/cm^2)



(a) 진공압 재하 직후

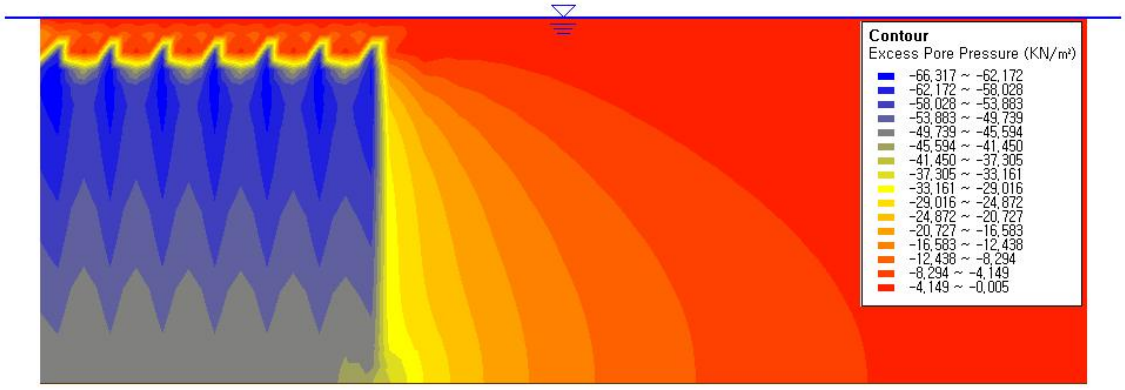


(b) 압밀중

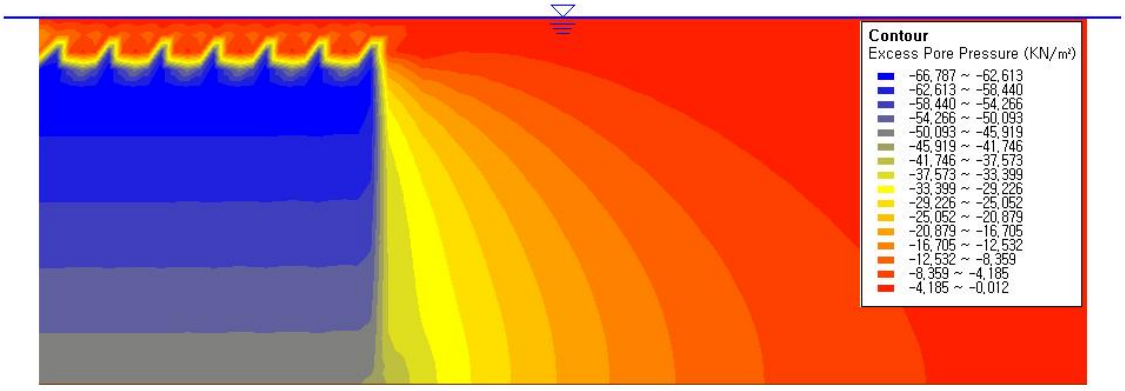


(c) 압밀종료시점

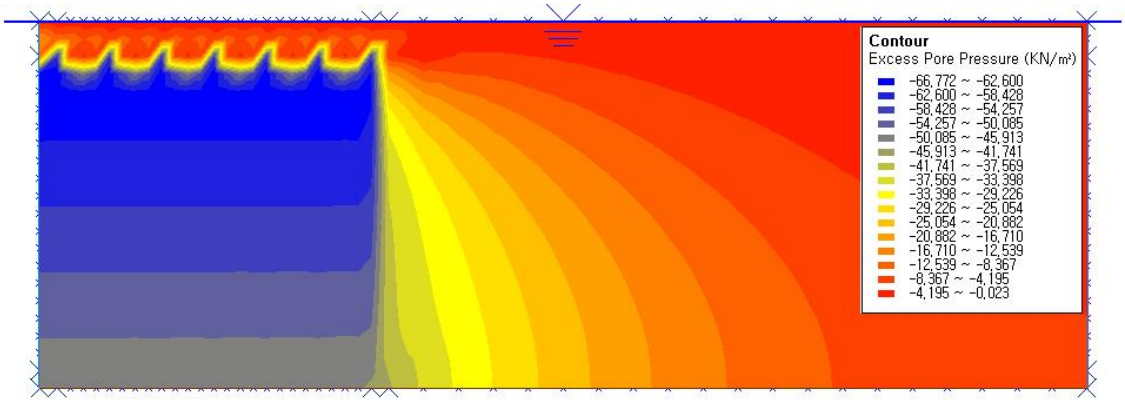
Fig. 3.9.4.16 시간에 따른 지반내 과잉간극수압 분포(-0.6kg/cm^2)



(a) 진공압 재하 직후



(b) 압밀중



(c) 압밀종료시점

Fig. 3.9.4.17 시간에 따른 지반내 과잉간극수압 분포(-0.8kg/cm^2)

5. Suction-CAIN을 이용한 PDB공법과 Suction Drain 공법의 비교

석션드레인공법과 연직배수공법의 거동차이를 분석하기 위해, Suction-CAIN 프로그램을 이용하여 석션드레인 공법의 진공압과 감량화 측면 및 강도증가 측면에서 동일한 연직배수공법의 성토고를 결정한 후 유한요소 수치해석을 수행하여 두 공법의 결과를 비교 검토하였다.

가. 해석단면 및 경계조건

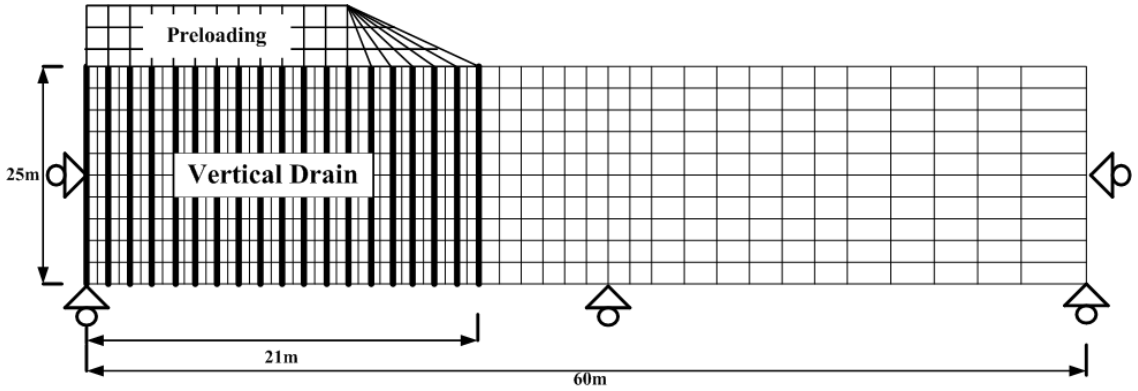
본 연구에서는 Suction Drain 공법의 침하 양상을 연직배수공법과 비교분석하기 위한 수치해석을 수행함에 있어서 필요한 매개변수들을 현장시험시공 물성치를 바탕으로 Table 3.9.5.1과 Table 3.9.5.2와 같이 도출하였다. 개량층의 해석 시 수정 Cam-Clay 모델을 사용하였으며, 성토층의 경우 등방 탄성모델을 사용하였다. 지반조건은 연직배수공법의 경우 배수재가 타입 되는 압축지반의 두께를 25m로 설정하였고, Suction Drain 공법의 경우는 개량층의 두께를 24m, sealing층을 1m로 설정하였다. 또한 지하수위는 지표면에 위치하는 것으로 가정하였으며, 압축지반의 저면은 불투수층으로 가정하여 일면배수만을 허용하였다. 더불어 배수재는 1.5m 간격의 사각형 배치로 간주하였다. Fig. 3.9.2.1에는 두 공법의 영향인자 분석을 위해 구성한 유한 요소망을 도시하였다. 연직배수공법의 경우(Fig. 3.9.5.1(a)), 성토높이를 0.6m, 1.2m, 1.8m, 2.4m와 1.0m, 2.0m, 3.0m, 4.0m 및 1.5m, 3.0m, 4.5m, 6.0m로 변화시키며, 세 케이스의 해석을 수행하였다. 각 단계 별로 30일간의 압밀해석을 실시하였으며, 최종 단계에서는 210일의 압밀기간을 두어 총 300일간의 압밀해석을 실시하였다. 연직배수공법의 경우 각 단계별 최초 5일간 성토를 수행하였다. Suction Drain 공법의 경우(Fig. 3.9.5.1(b)), 진공압 조건(-0.2, -0.4, -0.6, -0.8kg/cm^2)을 구현하기 위해 각 배수재 선요소에 부(-)의 간극수압을 가하였으며, 현장시험시공 결과로 두출된 심도에 따른 진공압 효율 감소 추세를 감안하여 상부에서 90%, 하부(25m)에서 40%로 진공압이 선형적으로 감소하도록 진공압을 가하였다.

Table 3.9.5.1 Clay 지반에 적용한 수정 Cam-Clay 매개 변수

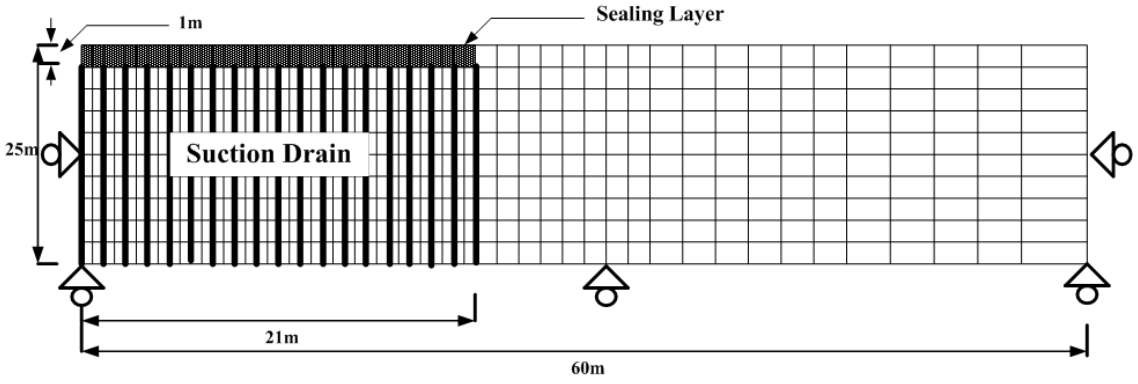
κ	λ	e_{cs}	M	ν′	γ_{bulk}(tonf/m^3)	γ_w(tonf/m^3)	k(cm/sec)
0.0234	0.117	2.09	1.042	0.3	1.75	1	5.73×10^{-8}

Table 3.9.5.2 성토 지반에 적용한 Elastic 매개 변수

E(tonf/m^2)	ν′	γ_{bulk}(tonf/m^3)	γ_w(tonf/m^3)
2500	0.3	1.8	1



(a) 연직배수공법



(b) Suction Drain 공법

Fig. 3.9.5.1. 유한요소망 및 경계조건(해석단면)

나. 연직배수공법의 성토고 결정

(1) 개량도(유효응력증가) 측면

석션드레인 공법과 동일한 개량효과를 나타내는 연직배수 공법의 성토고를 결정하기 위하여 최종 성토고를 3.2m, 4.0m와 6.0m로 달리한 세 케이스에 대해서 해석을 수행하였으며, 평균 유효응력(p') 값을 석션드레인 공법의 해석 결과와 비교하였다. 개량도 측면에서 석션드레인 공법과 일반적인 연직배수공법의 비교를 위해서 석션드레인 공법과 연직배수 공법의 평균 유효응력 결과를 이용하였다.

Fig. 3.9.5.2 ~ Fig. 3.9.5.4는 석션드레인 공법과 연직배수공법의 시간에 따른 평균 유효응력 값을 비교한 그래프이며, Fig. 3.9.5.5 ~ Fig. 3.9.5.7은 심도에 따른 평균 유효응력 값을 비교한 그래프이다. 석션드레인 공법의 경우 300일 후 지반내 평균 유효응력 값은 심도 5m에서 1.68kg/cm^2, 15m에서 1.3kg/cm^2, 25m에서 0.88kg/cm^{2}로 평균 1.29kg/cm^{2}으로 나타났으며, 성토고 4m의 연직배수 공법의 경우 각각 1.74kg/cm^2, 1.3kg/cm^2, 0.8kg/cm^{2}로 평균 1.28kg/cm^{2}로 유사하게 나타났다. 성토고 3.2m와 6.0m인 경우에 평균 유효응력은 약 1.19kg/cm^{2}와 1.48kg/cm^{2}로 석션드레인 공법의 평균 유효응력과 큰 차이를 보였다. 따라서 심도 25m의 연약지반 개량시 심도별 진공압 효율을 고려한 석션드레인 공법의 경우 성토고 4m의 연직배수 공법과 개량 정도가 동일한 것으로 나타났다(Fig. 3.9.5.8).

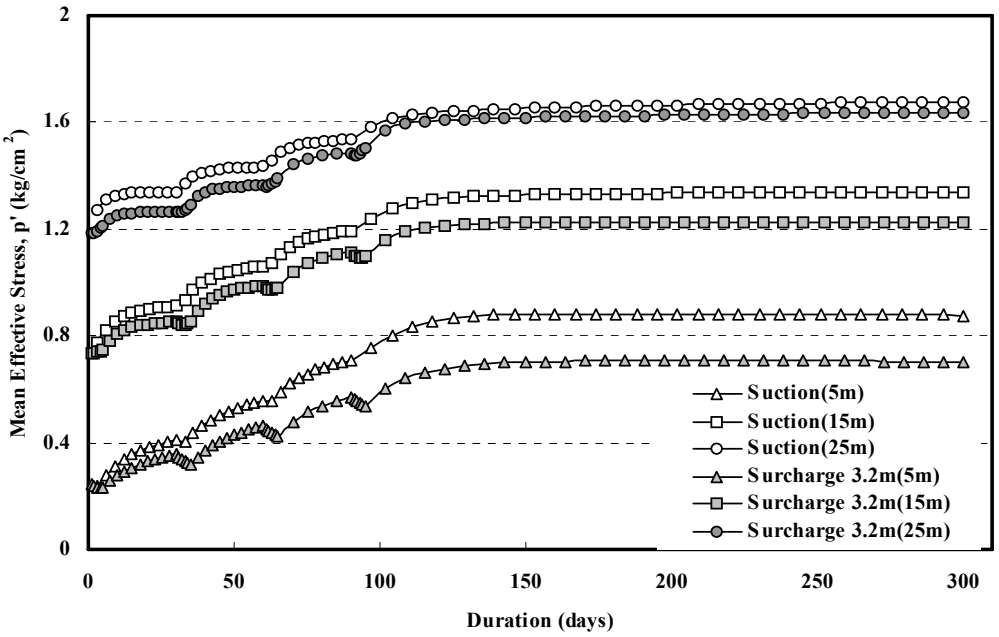


Fig. 3.9.5.2 석션드레인 공법과 연직배수 공법(성토 3.2m)의
시간에 따른 평균 유효응력 비교

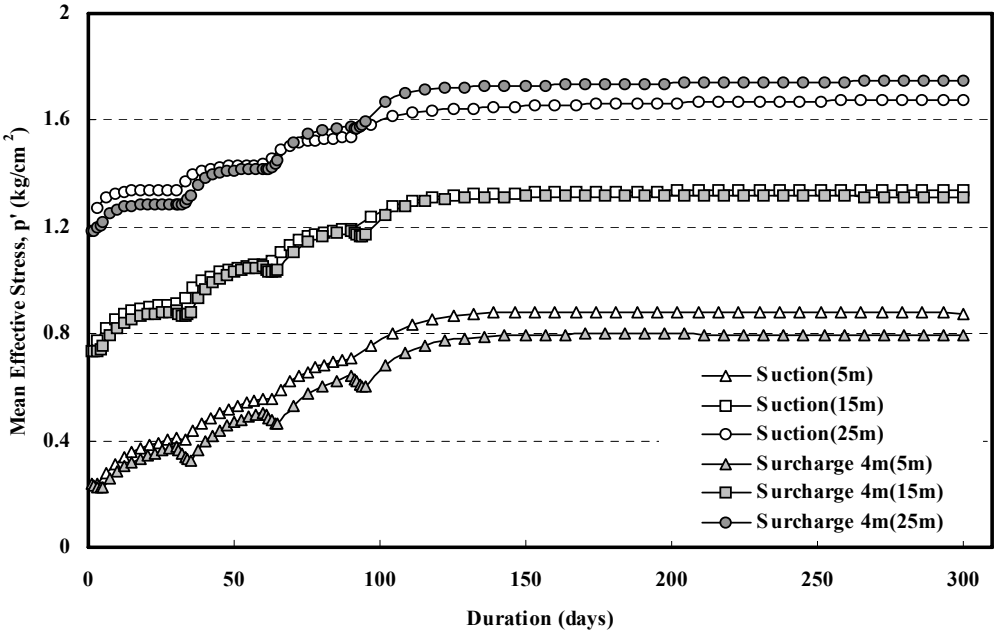


Fig. 3.9.5.3 석션드레인 공법과 연직배수 공법(성토 4m)의
시간에 따른 평균 유효응력 비교

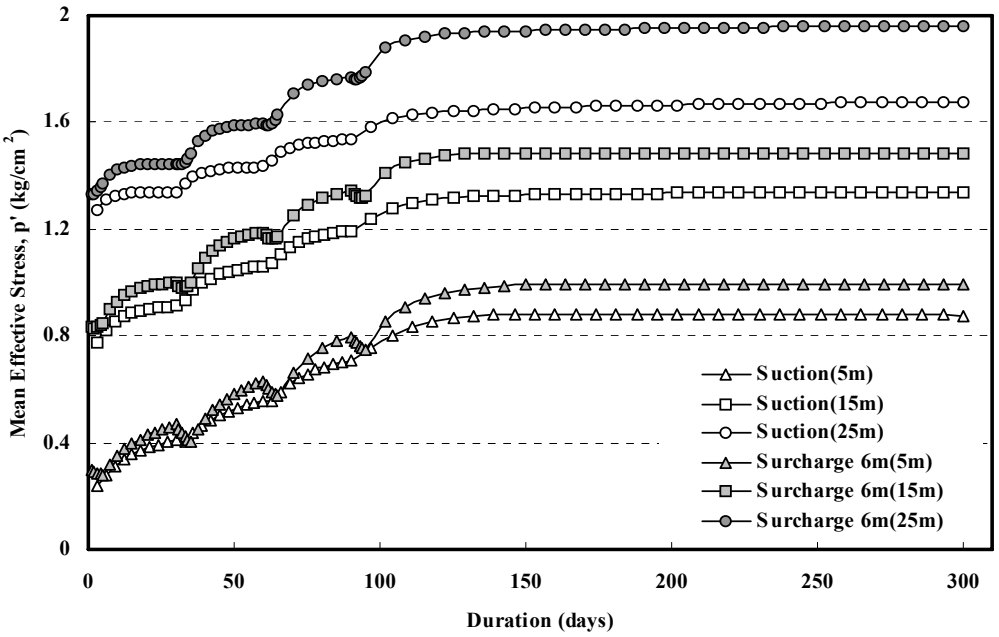


Fig. 3.9.5.4 석션드레인 공법과 연직배수 공법(성토 6m)의
시간에 따른 평균 유효응력 비교

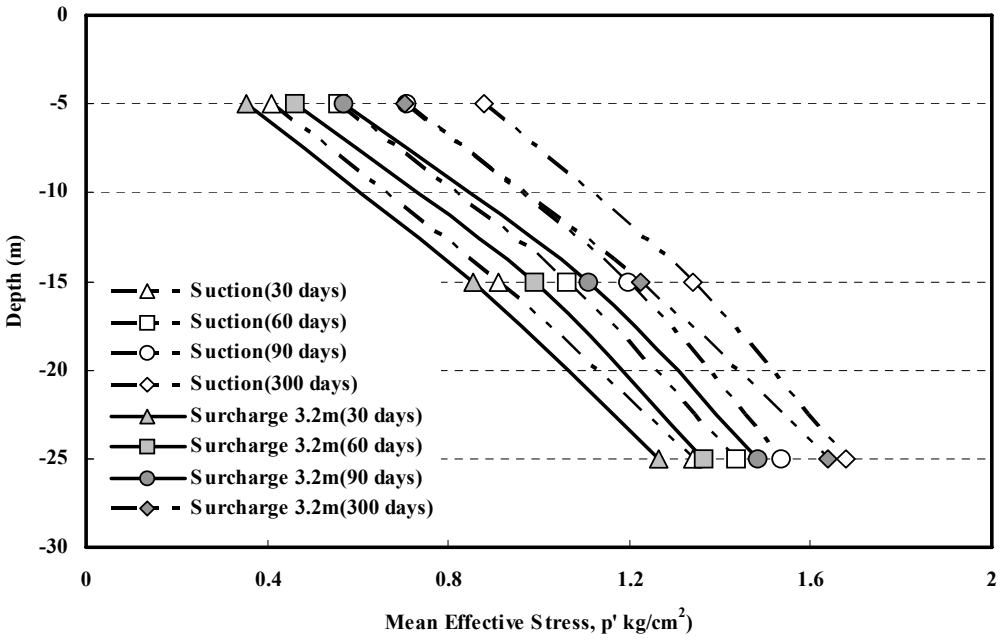


Fig. 3.9.5.5 석션드레인 공법과 연직배수 공법(성토 3.2m)의
심도에 따른 평균 유효응력 비교

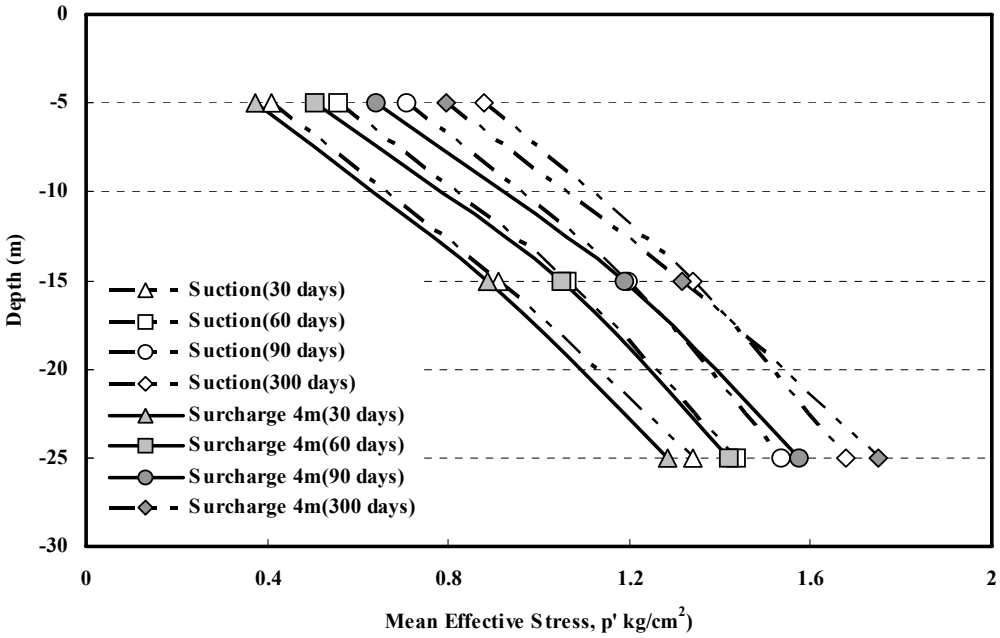


Fig. 3.9.5.6 석션드레인 공법과 연직배수 공법(성토 4m)의 심도에 따른 평균 유효응력 비교

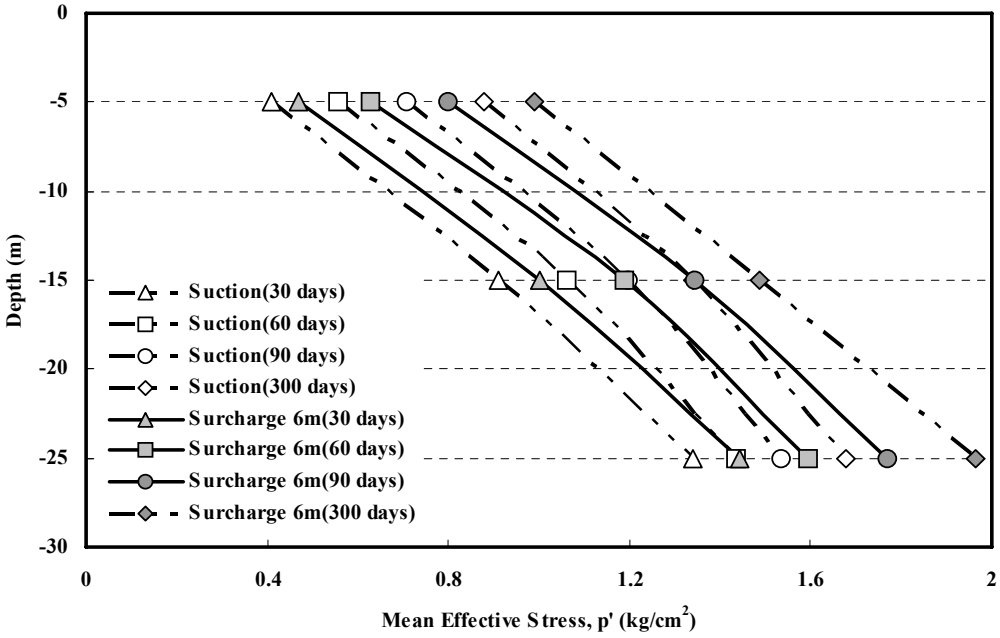


Fig. 3.9.5.7 석션드레인 공법과 연직배수 공법(성토 6m)의 심도에 따른 평균 유효응력 비교

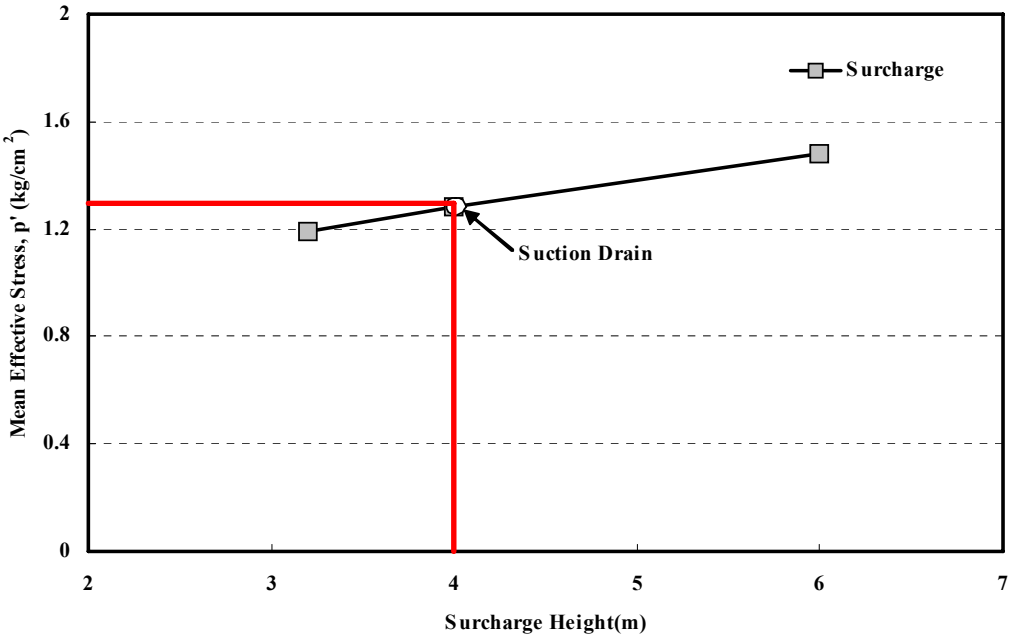


Fig. 3.9.5.8 개량도 측면에서 석션드레인 공법과 동일한 연직배수공법의 성토고 결정

석션드레인 공법과 동일한 개량효과를 나타내는 연직배수공법의 성토고 높이를 결정하였다(Fig. 3.9.5.8). 이 때, 개량 심도가 석션드레인 공법의 진공압 단계와 연직배수공법의 성토공에 미치는 영향을 파악하기 위하여 개량심도(10m, 25m, 40m)에 따라 발생된 각 공법별 해석 결과를 Fig. 3.9.5.9에 도시하였다. 그 결과 연약지반의 심도에 상관없이 최종 진공압 -0.8kg/cm^{2}와 동일한 유효응력을 발현시키는 등가 성토고는 4.0m인 것으로 나타났다.

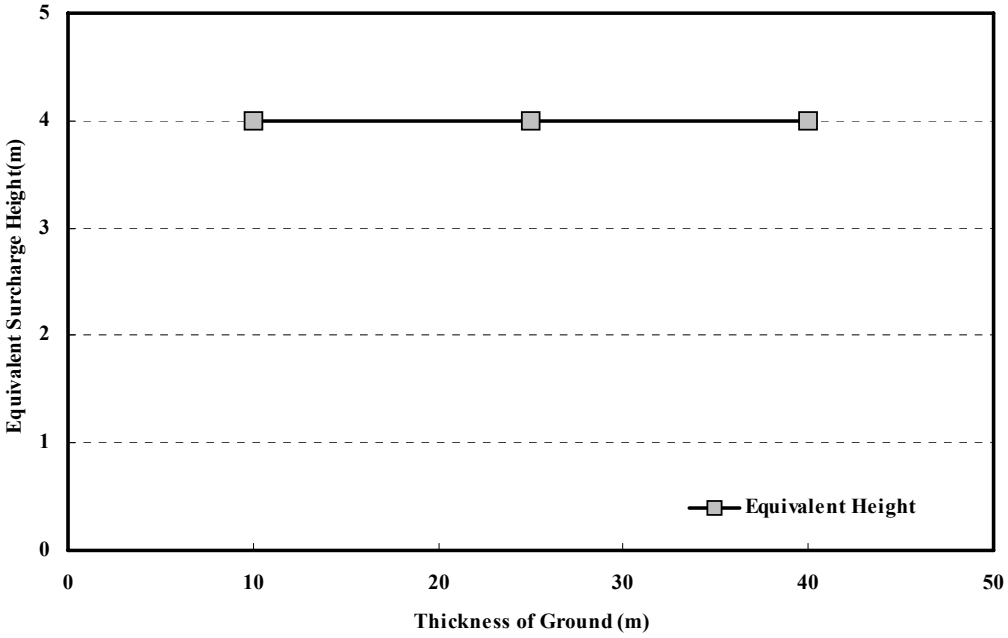


Fig. 3.9.5.9 -0.8kg/cm^{2}의 진공압을 적용시킨 석션드레인 공법과 동일한 평균유효응력을 나타내는 등가 성토고

(2) 감량화(침하량) 측면

감량화 측면에서 석션드레인 공법과 일반적인 연직배수 공법이 동일한 침하량을 나타내는 성토고를 결정하기 위하여 유한요소 수치해석을 수행하였다. Fig. 3.9.5.10는 연직배수공법의 성토고를 4.0m ~ 2.4m로 변화시킨후 수행된 해석결과를 통해 나타난 침하량 분포를 최종 진공압 -0.8kg/cm^{2}이 가해진 석션드레인 공법의 침하량과 함께 도시한 그래프이다. 최종 진공압 -0.8kg/cm^{2}이 가해진 석션드레인 공법에서 심도에 따른 효율을 고려하였을때, 동일한 침하량을 나타내는 연직배수공법의 성토고는 약 2.4m인 것으로 나타났다(Fig. 3.9.5.11).

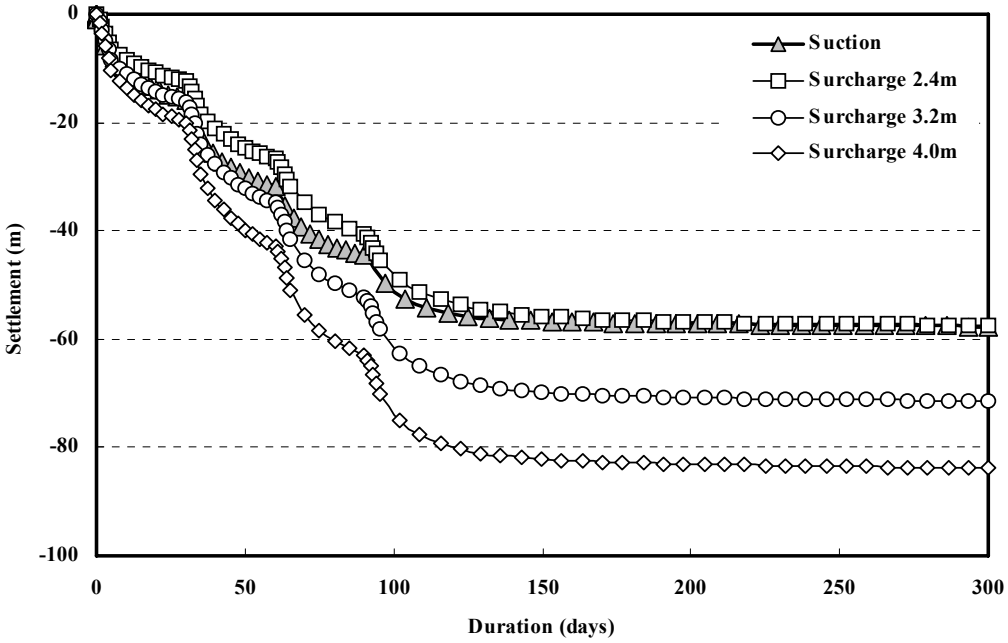


Fig. 3.9.5.10 석션드레인과 일반적인 연직배수 공법의 침하거동 비교

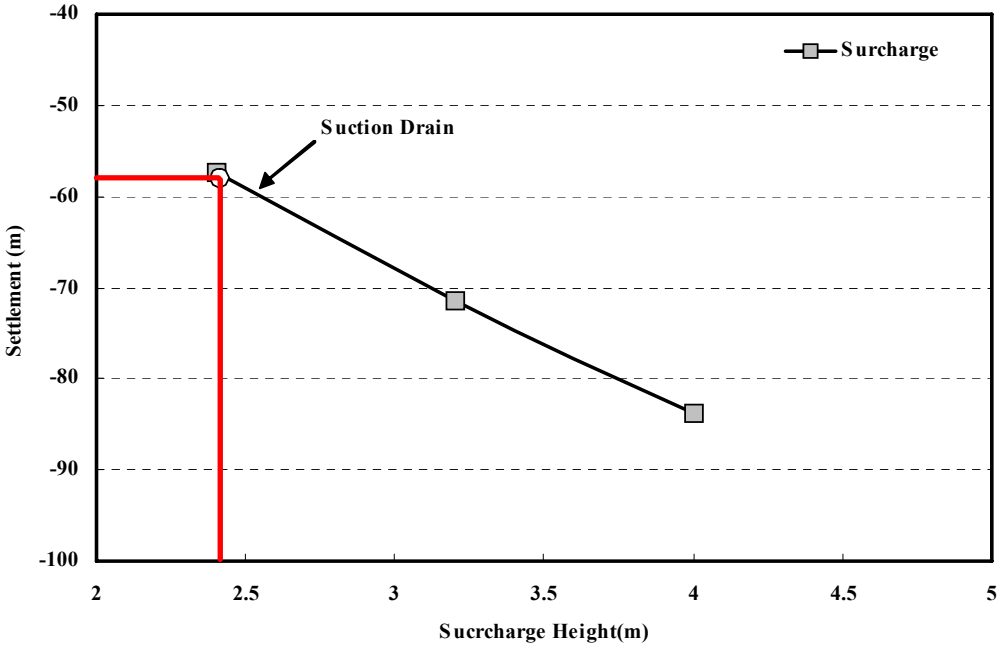


Fig. 3.9.5.11 감량화 측면에서 석션드레인 공법과 동일한
연직배수공법의 성토고 결정

연약지반의 심도가 10m, 25m, 40m인 경우에 대하여 석션드레인 공법의 진공압과 감량화 측면에서 동일한 침하량 추이를 나타내는 등가 성토고를 산정하였다. 개량도 측면 해석 결과와 마찬가지로 등가성토고는 심도에 상관없이 약 2.4m로 나타났다(Fig. 3.9.5.12).

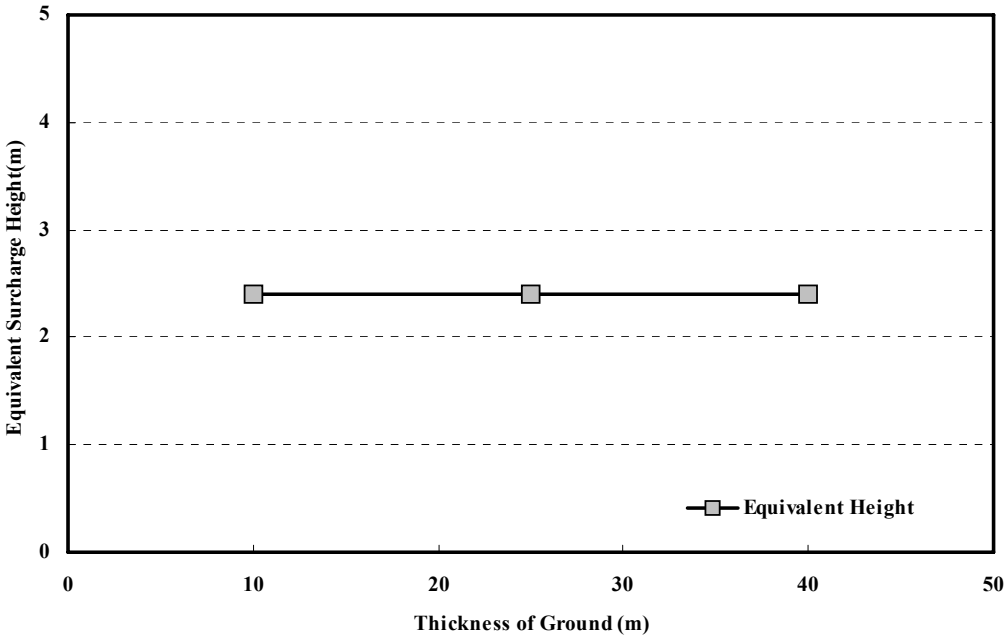
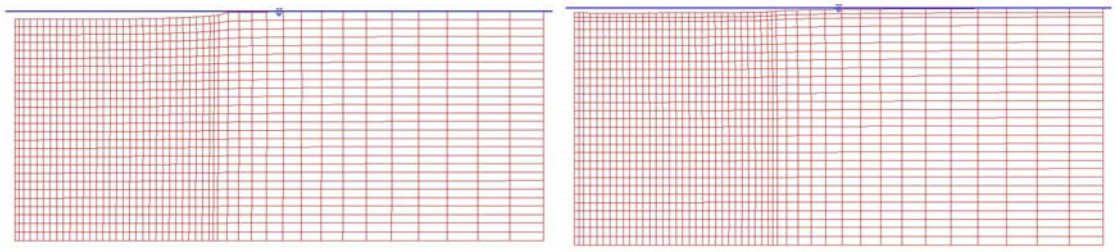


Fig. 3.9.5.12 -0.8kg/cm^{2}의 진공압을 적용시킨 석션드레인 공법과 동일한 침하량을 나타내는 등가 성토고

다. 개량도 측면 해석결과

(1) 연직변위거동

Fig. 3.9.5.13은 석션드레인 공법과 연직배수 공법의 300일 이후의 변형요소망을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 연직배수공법의 경우, 성토체 중앙부분에서 과다한 침하가 발생하고 있으며, 모서리 방향으로 갈수록 침하량이 점점 감소함을 알 수 있다. 또한 성토체 외곽에서는 약간의 융기현상이 지표 및 지중에서 발생하고 있다. Suction Drain 공법의 경우, 개량부분 전단면에서 비교적 고른 침하양상이 나타났으며, 개량부분 외곽에서도 연직방향의 침하가 발생했음을 알 수 있다.

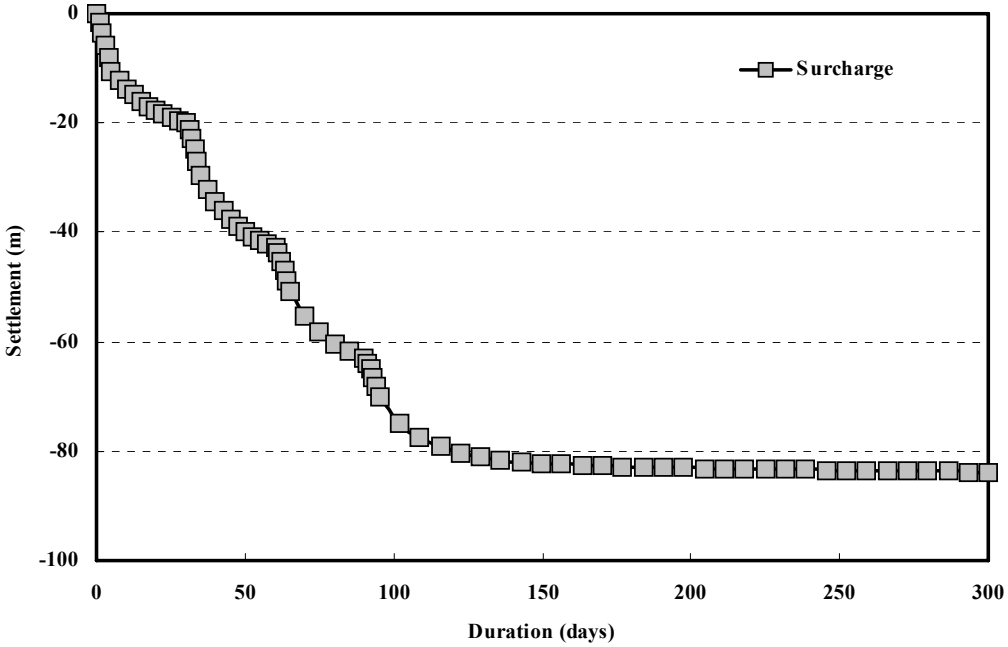


(a) 연직배수공법 (b) Suction Drain 공법

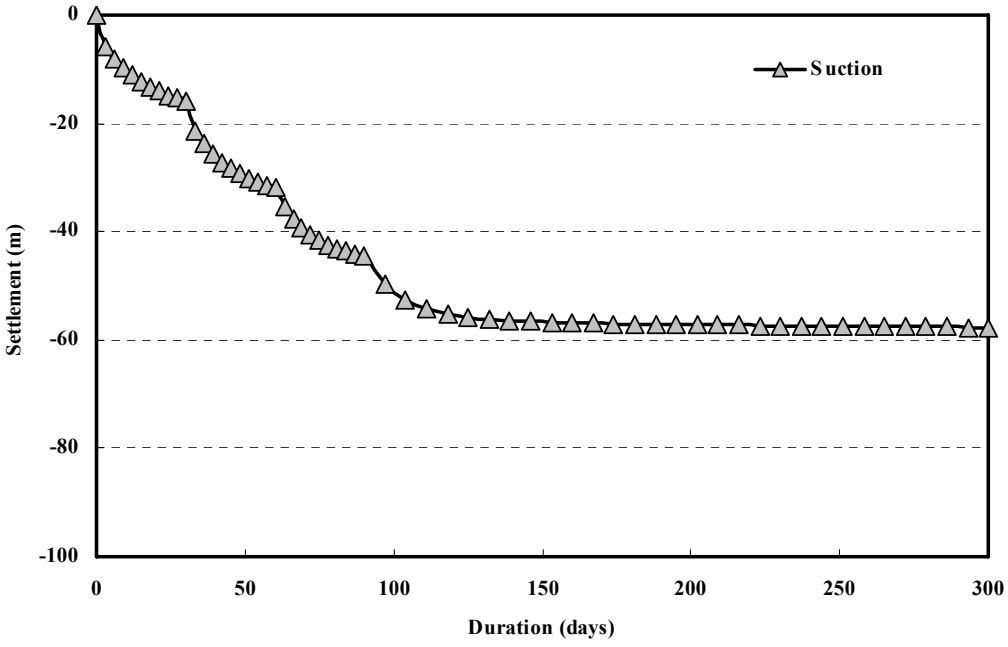
Fig. 3.9.5.13 압밀종료 후 각 공법 별 변형 요소망

Fig. 3.9.5.14(a)에는 개량영역 중앙부에서 30일 간격으로 성토고를 1.0m 씩 증가시키며 최종 4.0m가 될 때까지 단계 성토를 진행시켜 발생된 연직배수공법의 침하양상을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 성토고가 증가함에 따라 침하량은 증가하였다.

Fig. 3.9.5.14(b)에는 개량영역 중앙부에서 진공압을 -0.2kg/cm^{2}에서 -0.8kg/cm^{2}까지 -0.2kg/cm^{2}의 간격으로 변화시켜 발생된 Suction Drain 공법의 침하양상을 나타내었다. 그 결과 적용 진공압이 커질수록 침하량은 점점 크게 발생하였고 진공압 크기에 거의 비례하여 증가하는 경향이 나타났으며, 연직배수공법의 성토고 증가에 따라 발생한 침하양상과 비슷한 경향을 나타냈다.



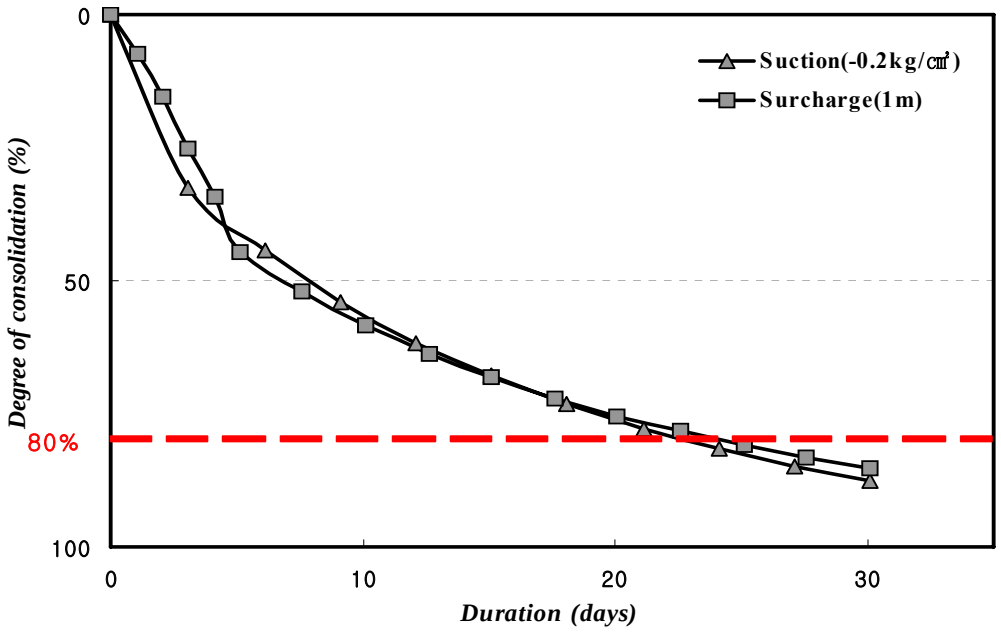
(a) 연직배수공법



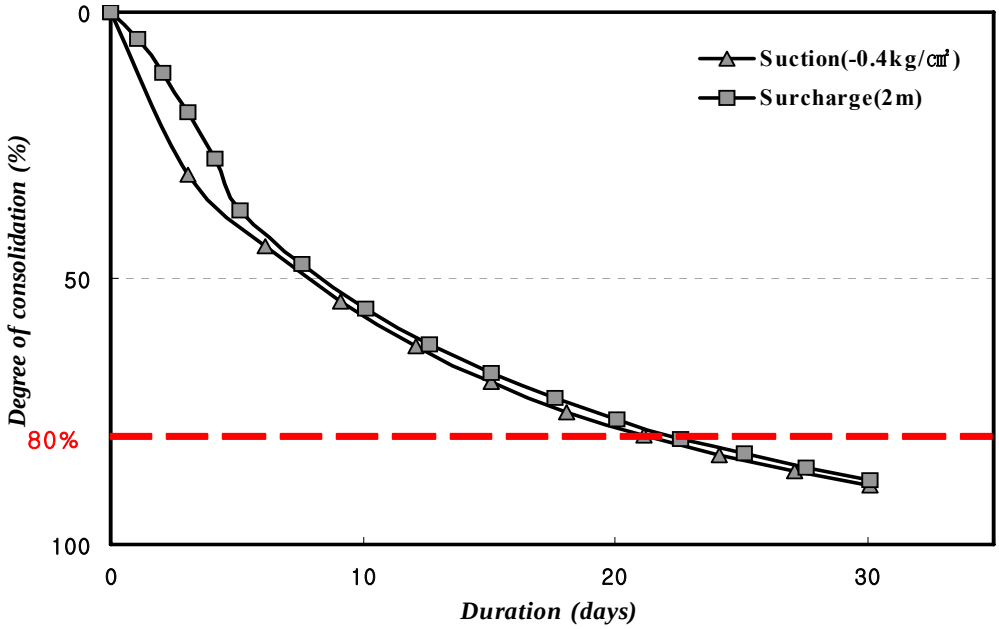
(b) Suction Drain 공법

Fig. 3.9.5.14 적용된 진공압과 단계 성토에 의해 발생된 연직변위 거동

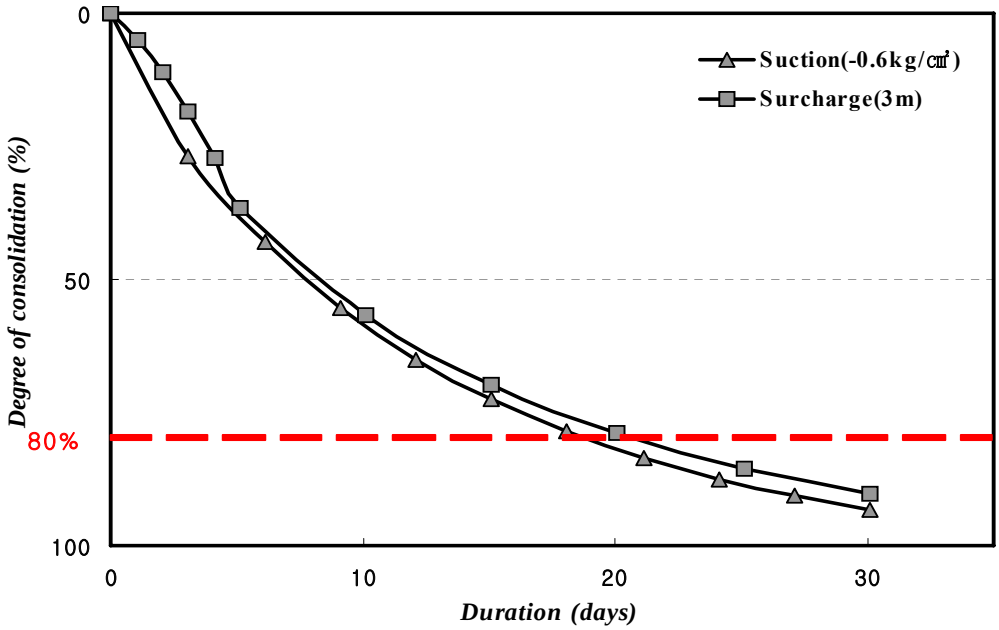
Fig. 3.9.5.15는 석션드레인공법과 연직배수공법에서 동일한 진공압 및 성토하중 단계의 시간에 따른 압밀도 분포를 나타낸 그래프이다. 석션드레인공법과 연직배수공법의 모든 재하 단계에서 압밀도는 80% 이상으로 나타났다. 진공압 -0.2kg/cm^{2}과 성토 1m 단계에서 압밀도는 석션드레인 공법과 연직배수공법이 거의 유사한 분포를 나타냈다. 그러나 하중 단계가 증가함에 따라 최종 압밀도는 석션드레인공법에서 비교적 크게 나타났으며, 동일 압밀도에 도달하는 시간 또한 짧은 것으로 나타났다. 따라서 개량도 측면에서 보았을 때, 석션드레인 공법의 압밀 속도가 연직배수공법의 압밀속도보다 비교적 크다는 결론을 도출할 수 있다.



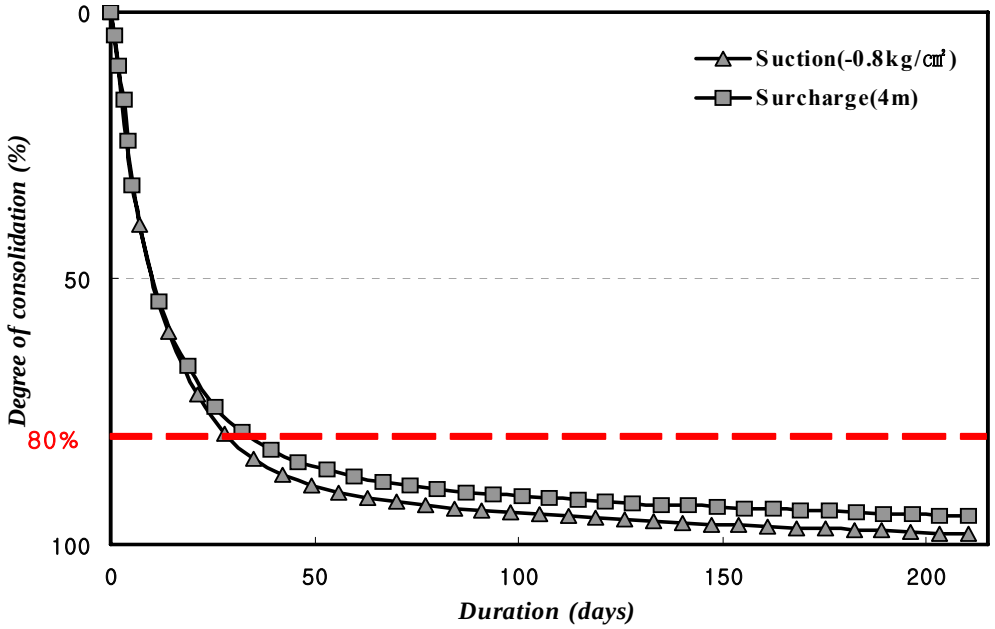
(a) 1단계 재하



(b) 2단계 재하



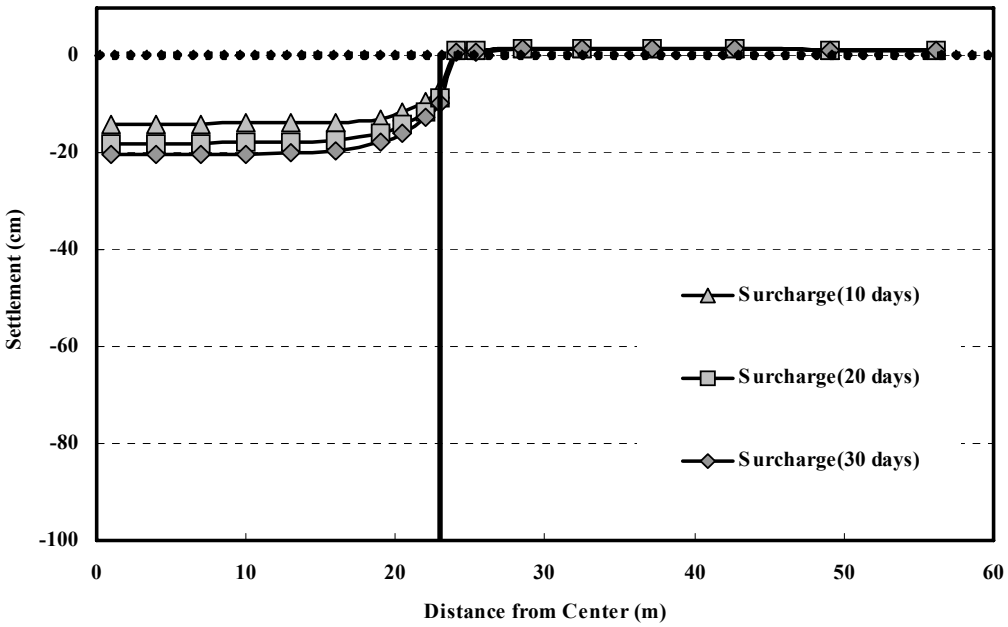
(c) 3단계 재하



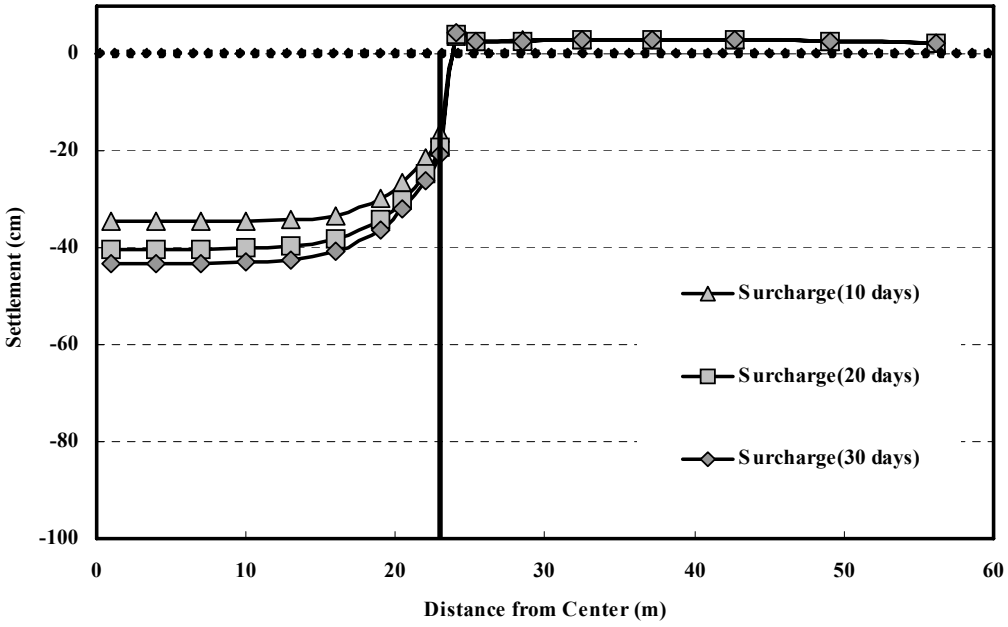
(d) 4단계 재하

Fig. 3.9.5.15 석션드레인 공법과 연직배수공법의 시간에 따른 압밀도 비교

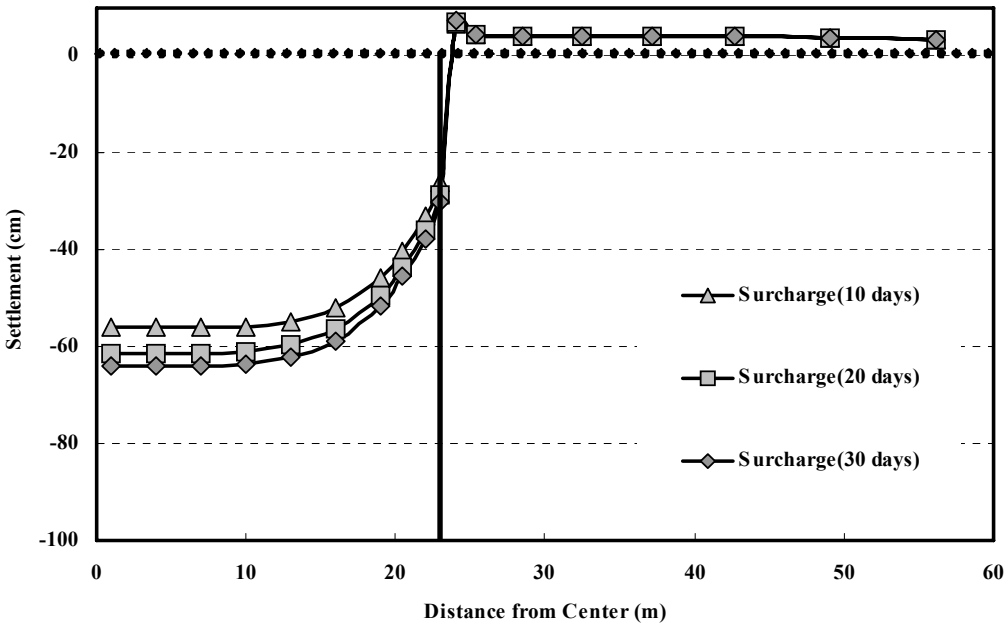
Fig. 3.9.5.16에는 성토 단계별 시간에 따라 발생된 지반의 전단면 침하양상을 나타내었다. 각 단계별로 침하량은 시간이 지남에 따라 증가하다가 수렴하는 거동이 나타났다. 성토고 4m 단계에서는 50일 이전에 대부분의 침하가 발생하여 50일 이후 침하량의 증가가 거의 없는 것으로 나타났다. 성토고가 증가함에 따라 성토층 아래에서의 압밀 침하량은 증가하고, 개량영역 외부에서의 융기량 역시 증가하는 양상을 띠었다. 이는 성토체 끝단에서 유발된 지중 내 측방변위에 기인한다.



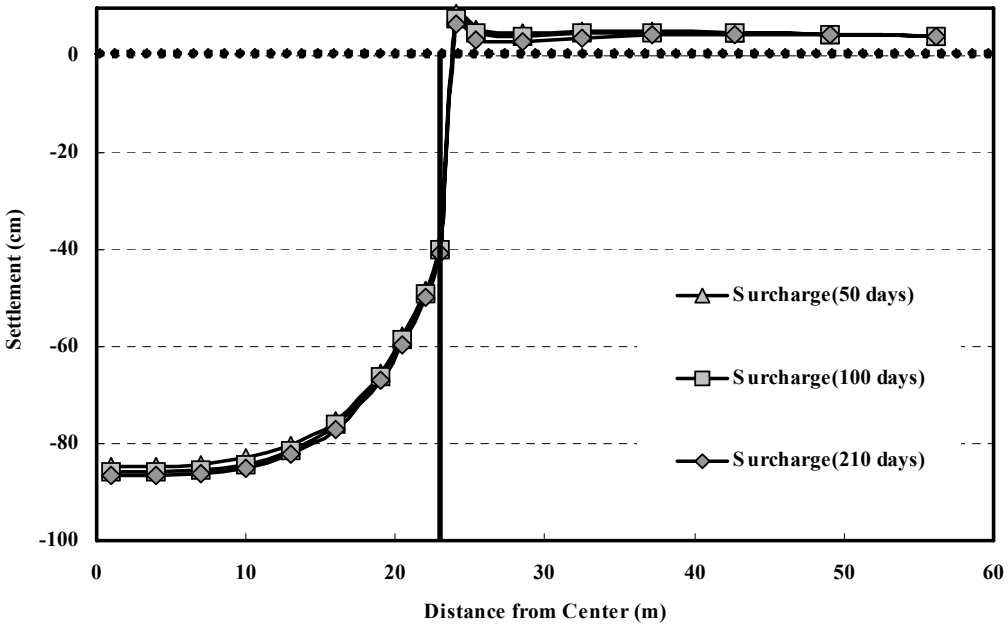
(a) 성토고 1m



(b) 성토고 2m



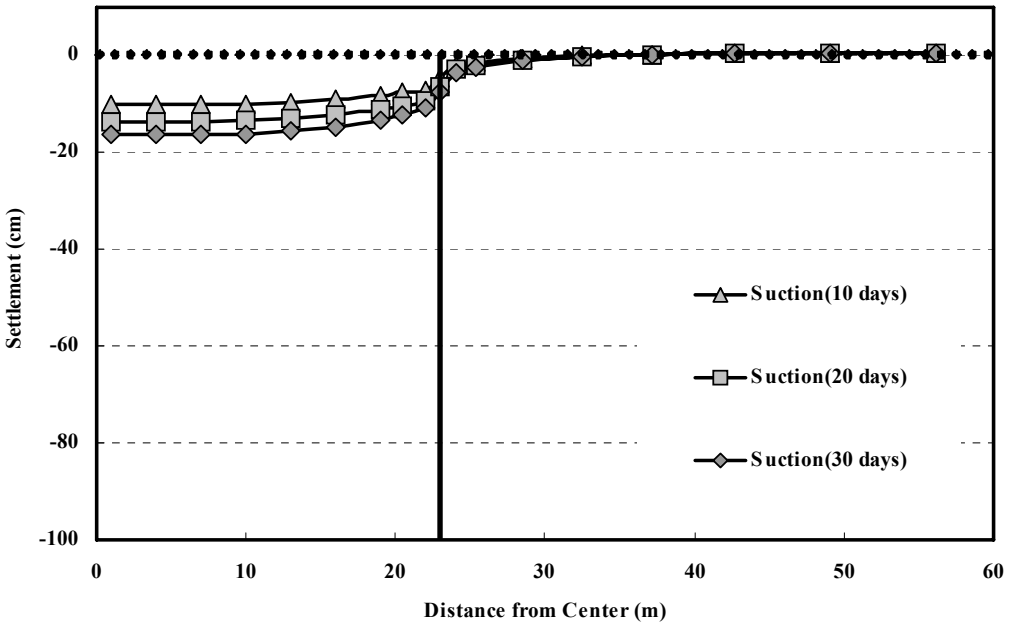
(c) 성토고 3m



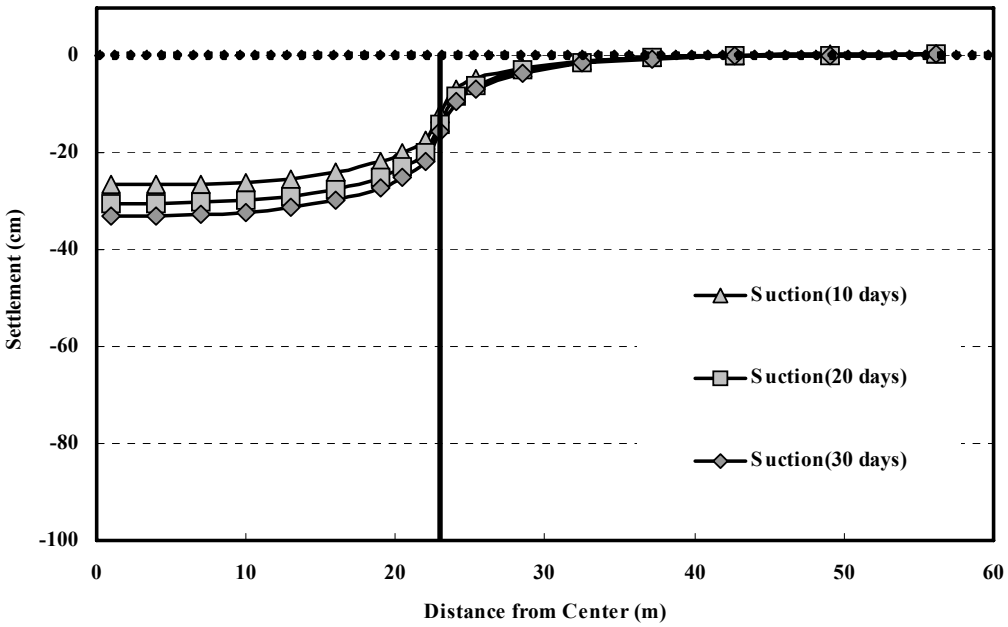
(d) 성토고 4m

Fig. 3.9.5.16 연직배수공법 적용시 시간에 따른 전단면 침하형상

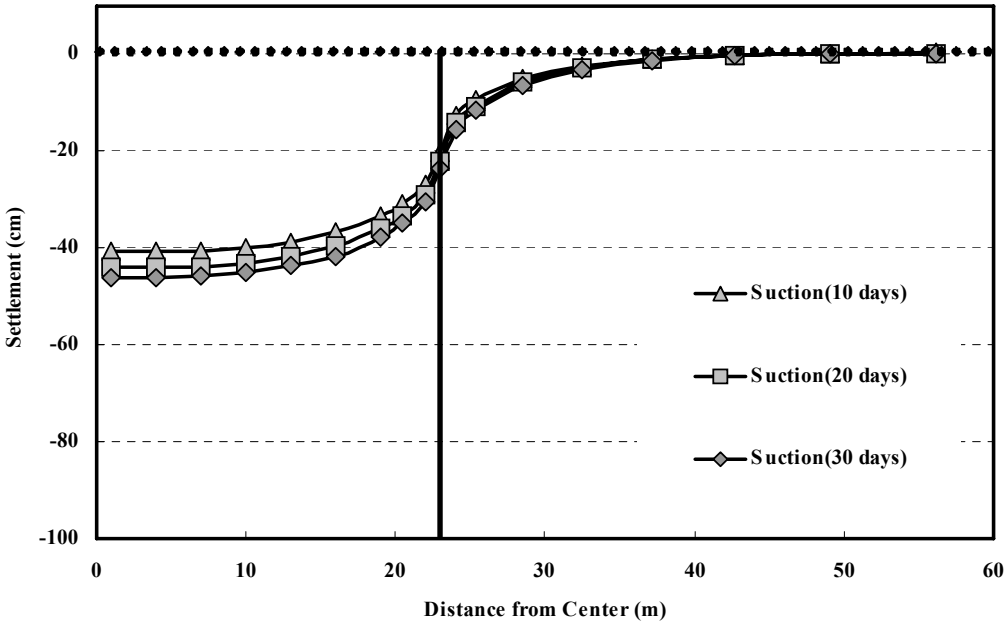
Fig. 3.9.5.17은 석션드레인 공법에서의 시간 증가에 따라 발생된 전단면 침하양상을 나타내었다. 진공압의 증가와 함께 전단면 침하량이 증가하는 경향이 나타났으며, 연직배수공법과는 달리 미개량영역에서도 침하가 발생했다. 이는 개량영역의 진공압으로 인하여 개량영역 외부의 흙이 안으로 밀려들어오면서 수평변위가 개량영역 안쪽으로 발생했기 때문이다.



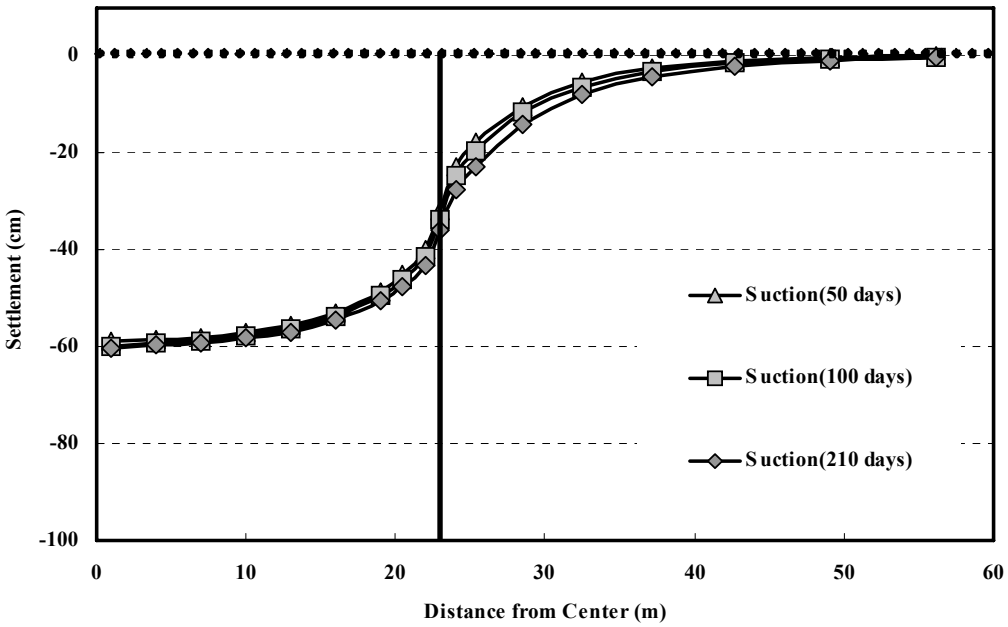
(a) 진공압 -0.2kg/cm^2



(b) 진공압 -0.4kg/cm^2



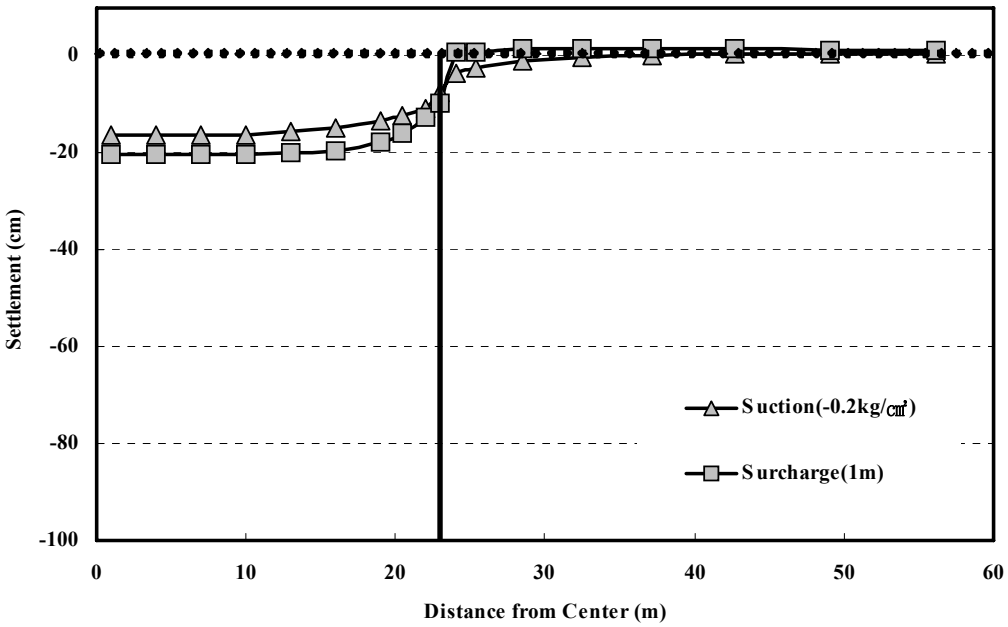
(c) 진공압 -0.6kg/cm^2



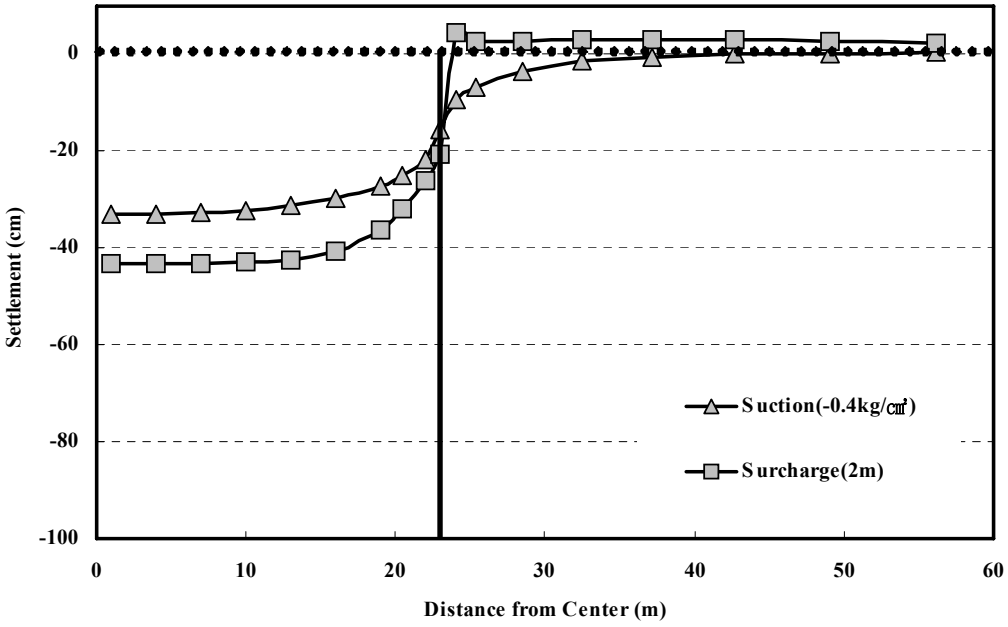
(d) 진공압 -0.8kg/cm^2

Fig. 3.9.5.17 석션드레인 공법 적용시 전단면 침하형상

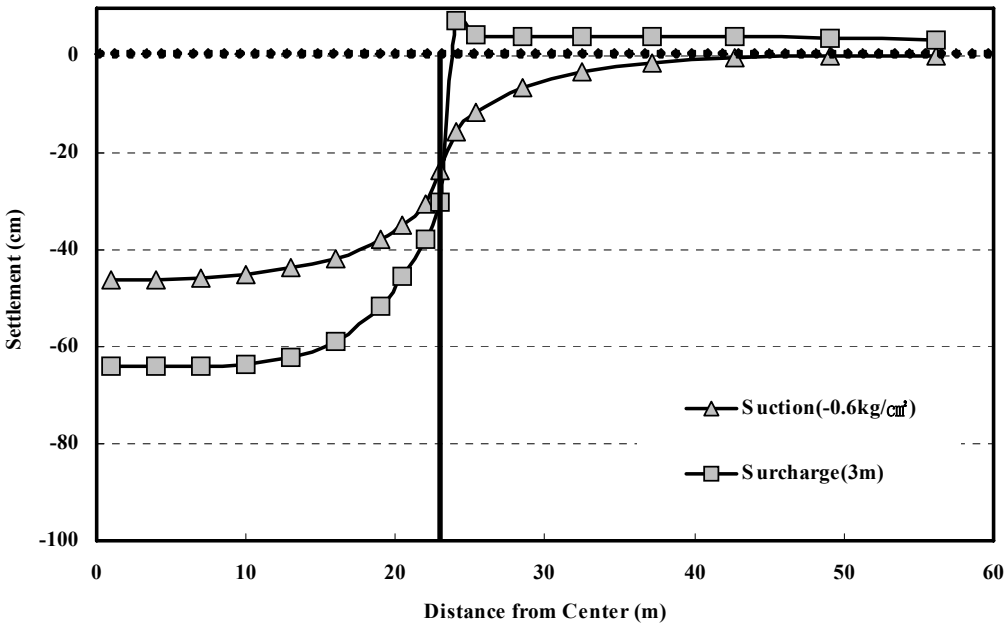
Fig. 3.9.5.18에는 연직배수공법과 Suction Drain 공법에서 성토고 1.0m, 2.0m, 3.0m, 4.0m와 진공압 -0.2, -0.4, -0.6, -0.8kg/cm^2 일 때의 전단면 침하양상을 각각 비교하여 나타내었다. 두 공법을 비교해 보면, PDB 개량영역에서 발생한 개량영역 끝단부의 융기현상은 Suction Drain 공법에서는 발생하지 않았다. 재하 단계가 증가함에 따라 석션드레인공법과 연직배수공법의 침하량 차이가 커지는 거동이 나타났는데, 이는 재하단계가 커짐에 따라 석션드레인의 경우 내부방향 수평변위가, 연직배수공법의 경우 외부방향 수평변위가 더욱 크게 나타났기 때문이다. 따라서 이러한 결과를 통해, Suction Drain 공법은 개량영역 끝단에서의 융기를 효과적으로 억제할 수 있을 것으로 판단된다.



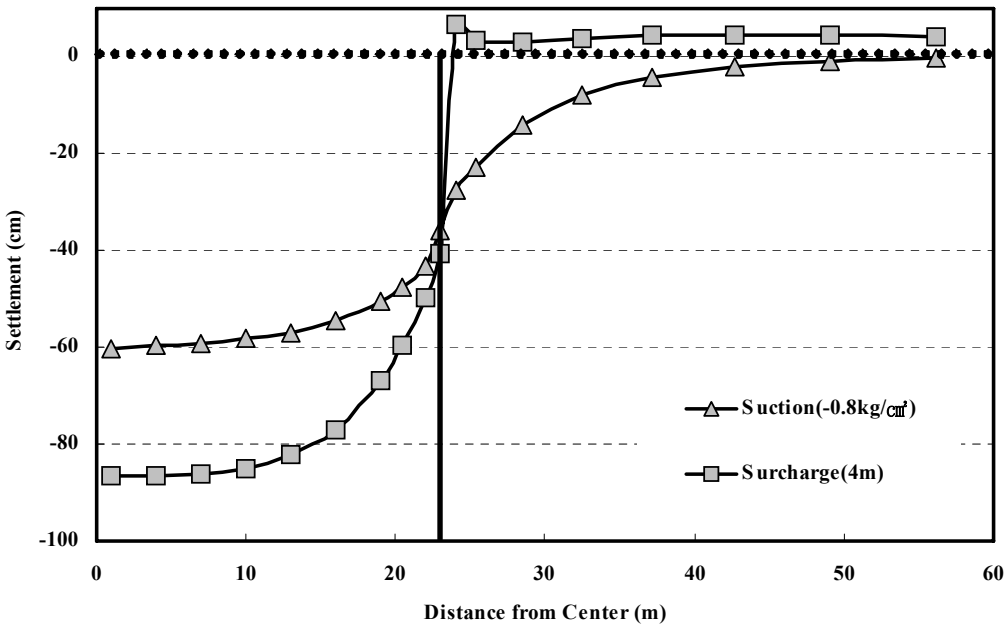
(a) 진공압 -0.2kg/cm^2, 성토고 1m



(b) 진공압 -0.4kg/cm^2, 성토고 2m



(c) 진공압 -0.6kg/cm^2, 성토고 3m



(d) 진공압 -0.8kg/cm^2, 성토고 4m

Fig. 3.9.5.18 석션드레인 공법과 연직배수공법의 각 재하단계에서 압밀 종료시 전단면 침하거동 비교

(2) 수평변위거동

Fig. 3.9.5.19은 연직배수공법에서 각 하중 단계(1.0~4.0m)별 압밀 종료시 측방변위양상과 Suction Drain 공법에서 각 진공압(-0.2~-0.8kg/cm^2)단계별 압밀 종료시 측방변위 양상을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 연직배수공법에서는 선단부 아래 지반의 경우 성토고가 높아짐에 따라 측방변위가 성토체 외곽으로 발생하였다. 그러나 Suction Drain 공법에서는 개량영역과 미개량 영역의 경계부분에서의 수평변위가 개량영역 방향으로 발생했다. 이는 Suction Drain 공법으로 인한 응력증가가 지반에 등방적으로 작용했기 때문이다. 또한 연직배수공법에서는 성토고가 높아질수록 Suction Drain 공법에서는 적용 진공압이 커질수록 변위는 서로 반대방향으로 커짐을 알 수 있다.

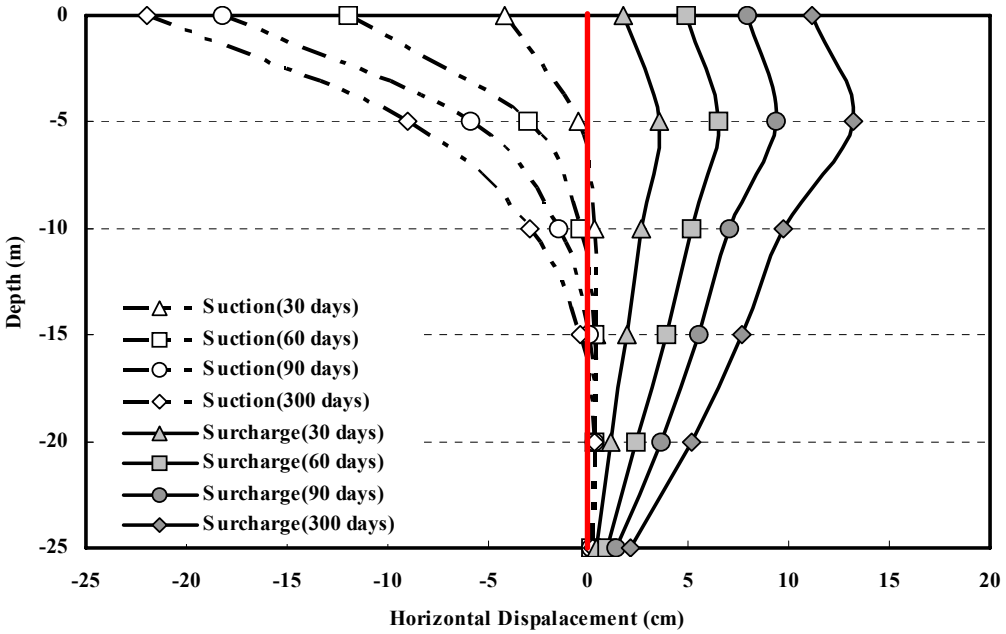
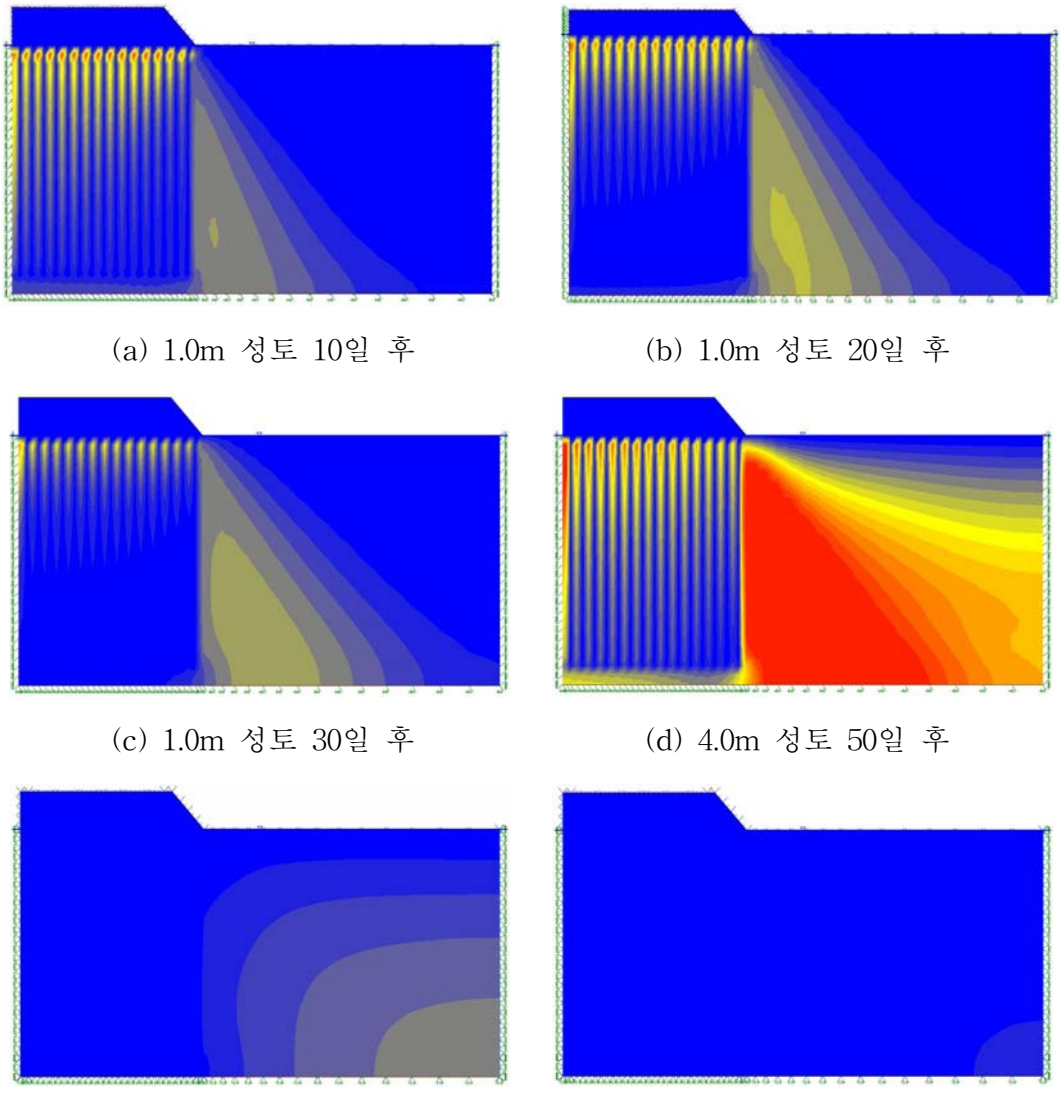


Fig. 3.9.5.19 연직배수공법과 Suction Drain 공법의 지중 내 측방변위

(3) 간극수압 거동

Fig. 3.9.5.20에는 성토재하(1.0m, 4.0m)로 인해 발생한 과잉간극 수압의 등고선 변

화를 나타내었다. Fig. 3.9.5.20 (a), (d)에 나타난 바와 같이 성토초기에 연직배수공이 관입된 부분에서는 과잉간극수압이 빠르게 소산되고 있으나, 성토체 끝단부분에서는 과잉간극수압의 소산이 지연됨을 알 수 있다. 그러나 시간의 증가(Fig. 3.9.5.20 (c), (f))와 함께 개량영역 전범위에서 과잉간극수압이 소산됨을 파악 할 수 있다.



(a) 1.0m 성토 10일 후　　(b) 1.0m 성토 20일 후

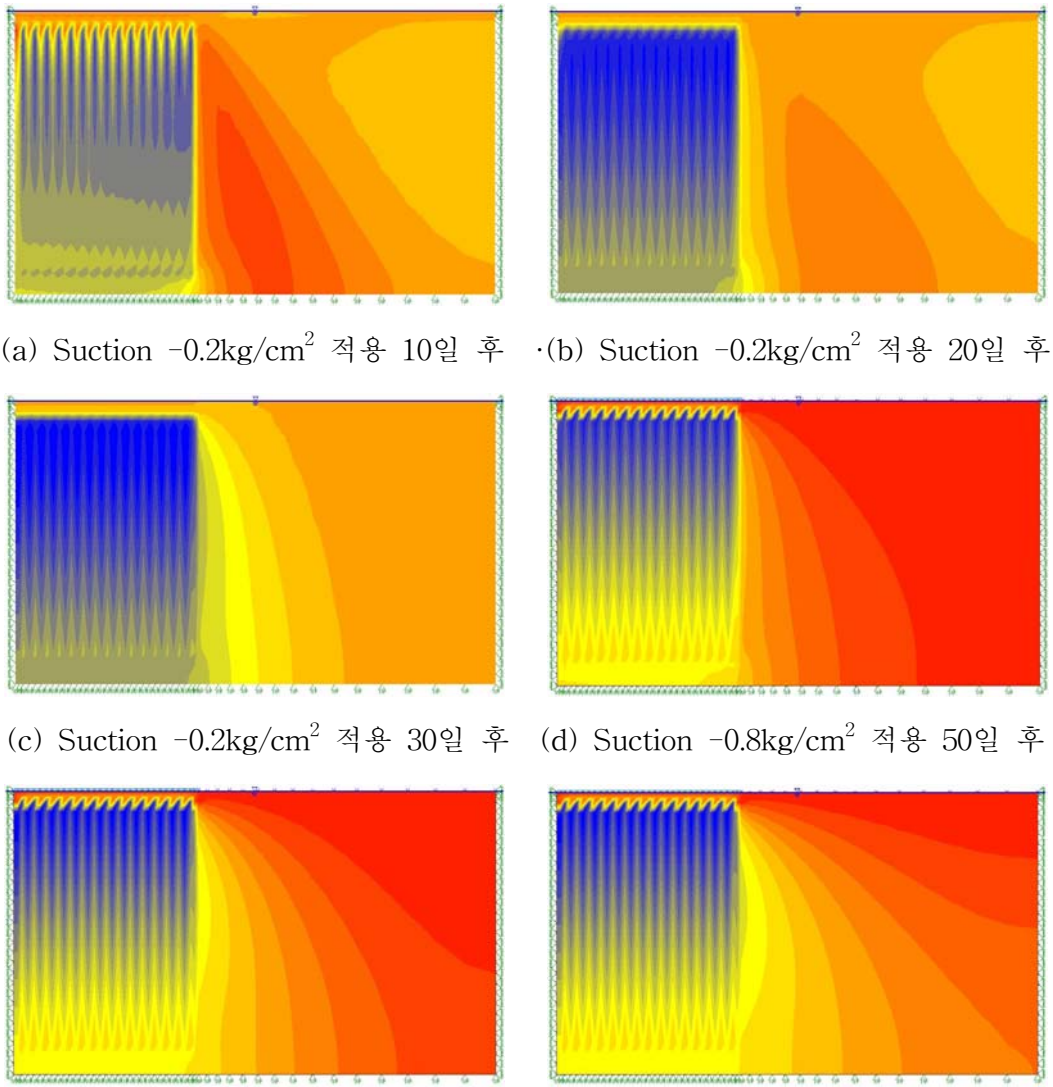
(c) 1.0m 성토 30일 후　　(d) 4.0m 성토 50일 후

(e) 4.0m 성토 100일 후　　(f) 4.0m 성토 210일 후

Fig. 3.9.5.20 성토 후 압밀기간에 따른 과잉간극수압분포 (연직배수공법)

Fig. 3.9.5.21에는 진공압을 가한 후(-0.2, -0.8kg/cm^2) 시간 경과에 따라 발생된 과잉간극수압의 변화를 나타내었다. 진공압을 가한 후 초기에는 배수재면에만 부의

간극수압이 발현되며, 시간경과에 따라 개량영역 전범위에서 부의 간극수압이 발현됨을 알 수 있다. 진공압 -0.2, -0.8kg/cm^{2}를 적용한 경우를 비교 해보면, 진공압이 커짐에 따라 부의 간극수압의 발현이 빨라짐을 알 수 있다. 그러나 적용 후 일정기간(약 50일)이 지나면, 개량영역 전범위에 걸쳐 가해진 진공압이 대부분 발현됨을 알 수 있다.



(a) Suction -0.2kg/cm^2 적용 10일 후 (b) Suction -0.2kg/cm^2 적용 20일 후

(c) Suction -0.2kg/cm^2 적용 30일 후 (d) Suction -0.8kg/cm^2 적용 50일 후

(e) Suction -0.8kg/cm^2 적용 후 100일 후 (f) Suction -0.8kg/cm^2 적용 후 210일 후

Fig. 3.9.5.21 진공압 재하 후 압밀기간에 따른 과잉간극수압분포 (Suction Drain공법)

Fig. 3.9.5.22에는 연직배수공법 적용 시 단계 성토로 인해 발생한 과잉간극수압분포를 적용기간에 따라 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 각 단계 별로 성토이

후에는 과잉 간극수압이 크게 증가하며, 방치기간 중에는 비교적 빠른 속도로 과잉 간극수압이 소산됨을 알 수 있다. 또한 상부지층과 하부지층의 간극수압은 서로 유사한 경향이 나타났다.

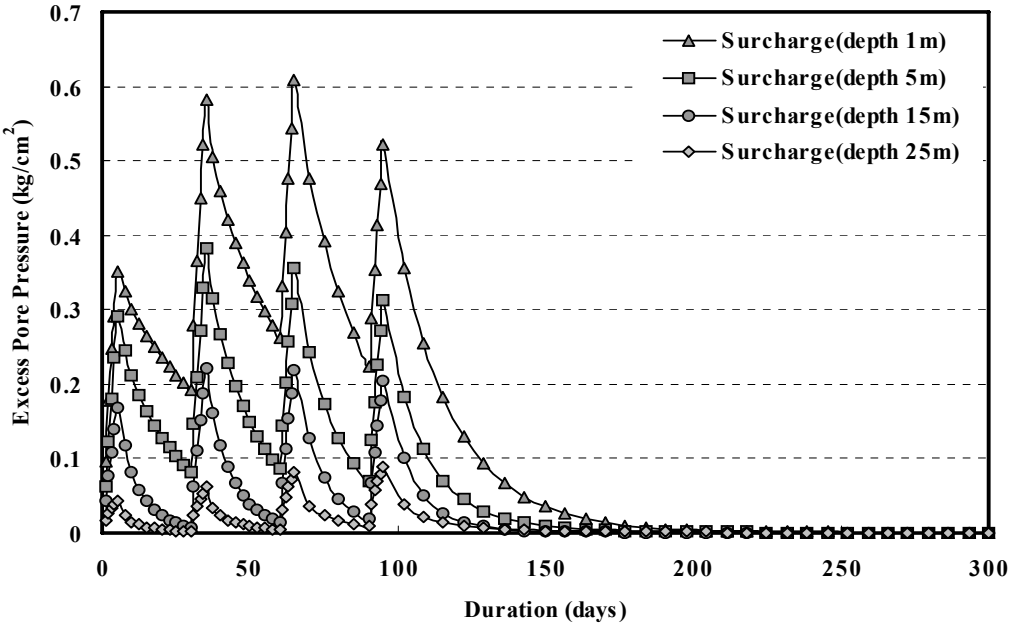


Fig. 3.9.5.22 시간-과잉간극수압분포 (연직배수공법)

Fig. 3.9.5.23에는 Suction Drain 공법에서 각 진공압에 따른 과잉간극수압 분포를 나타내었다. 적용 후 약 30일이 경과되면, 전 깊이에 걸쳐 적용된 진공압이 효율의 저감 없이 대부분 발생됨을 알 수 있다.

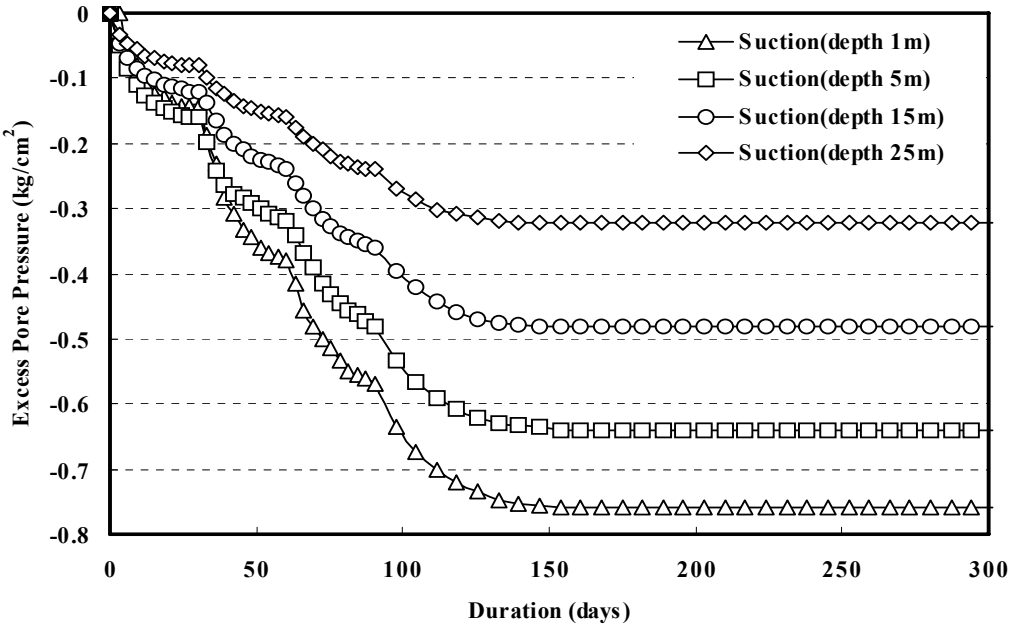
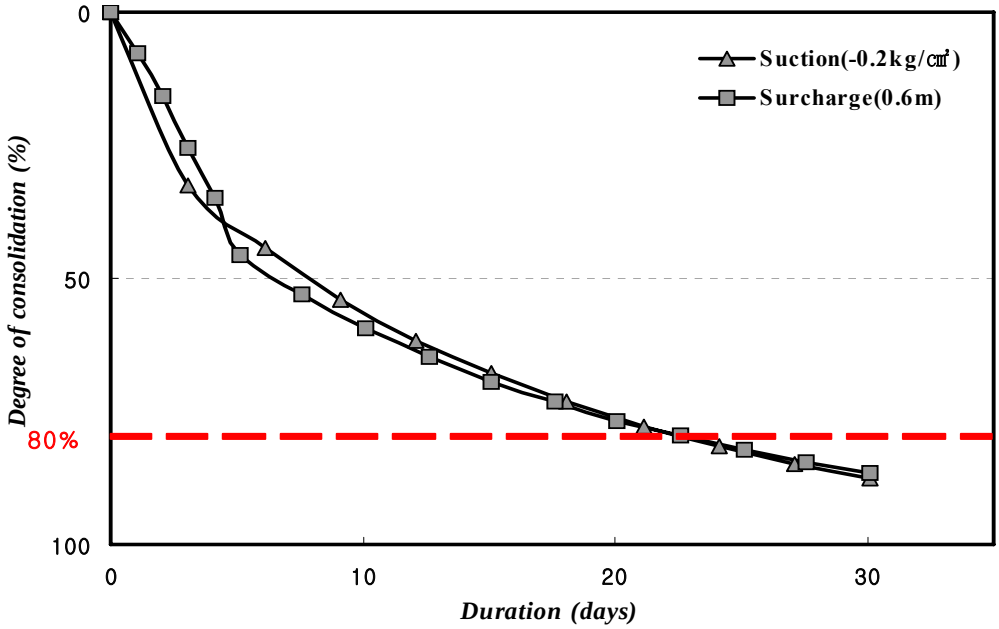


Fig. 3.9.5.23 시간-과잉간극수압분포 (Suction Drain 공법)

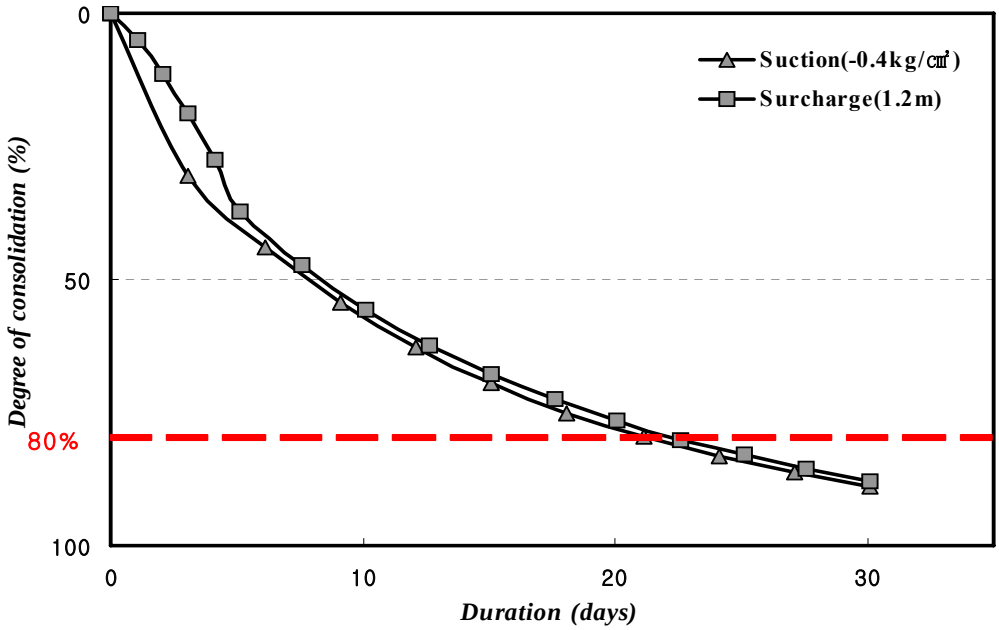
라. 감량화 측면 해석결과

(1) 연직변위 거동

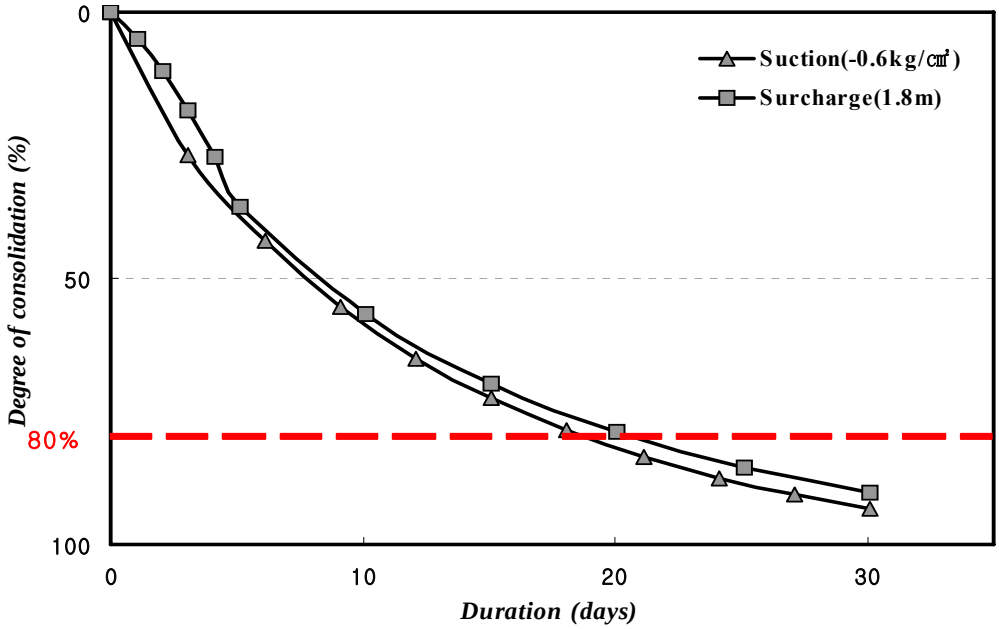
감량화 측면에서 석션드레인 공법과 동일한 연직배수공법의 성토고는 2.4m이며, 두 공법의 침하량은 Fig. 3.9.5.10에 나타내었다. Fig. 3.9.5.24는 석션드레인공법과 2.4m의 성토고를 재하한 연직배수공법에서 동일한 진공압 및 성토하중 단계의 시간에 따른 압밀도 분포를 나타낸 그래프이다. 개량도 측면 해석결과와 마찬가지로 석션드레인공법과 연직배수공법의 모든 재하 단계에서 압밀도는 80% 이상으로 나타났으며, 동일 압밀도에 도달하는 시간이 석션드레인 공법에서 더욱 짧게 나타났다.



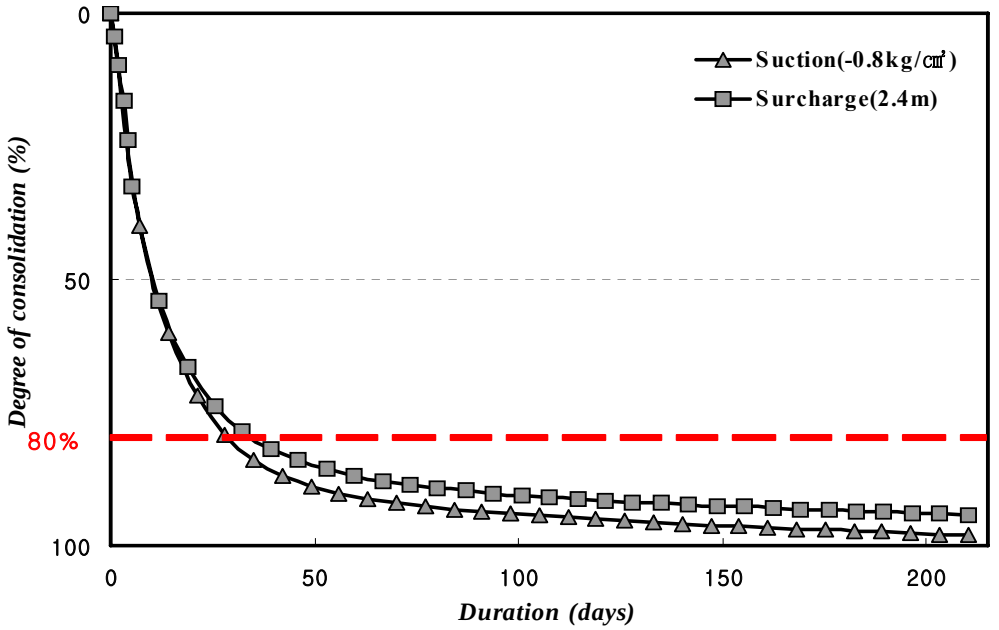
(a) 1단계 재하



(b) 2단계 재하



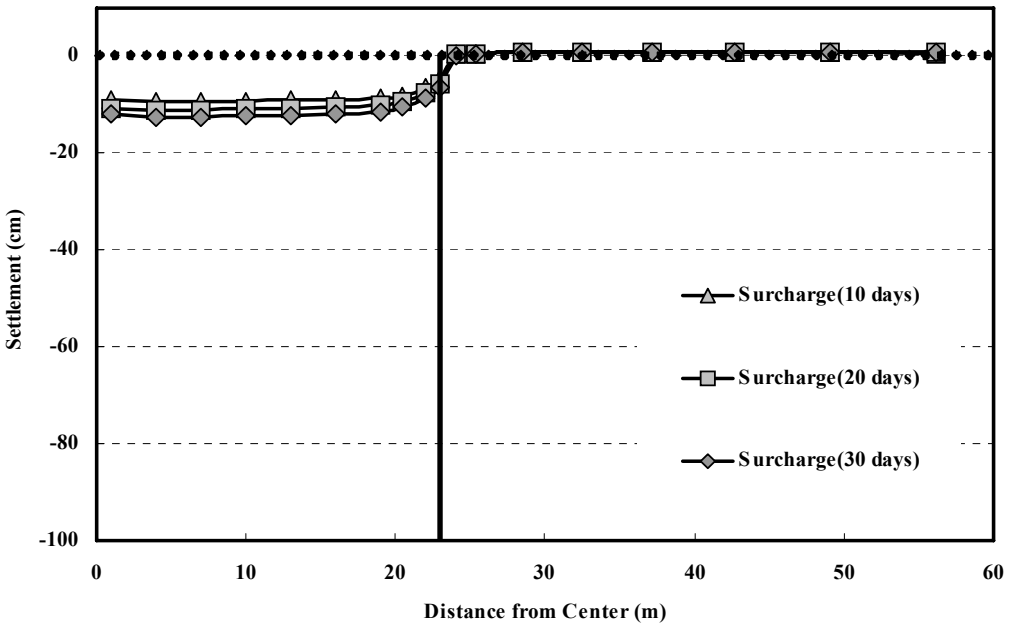
(c) 3단계 재하



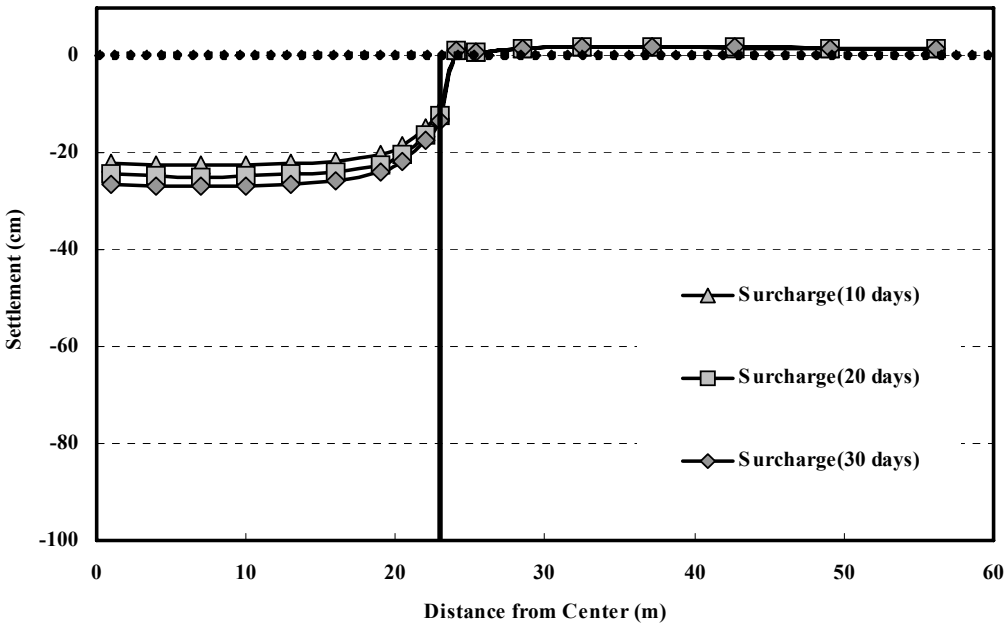
(d) 4단계 재하

Fig. 3.9.5.24 석션드레인 공법과 연직배수공법의 시간에 따른 압밀도 비교

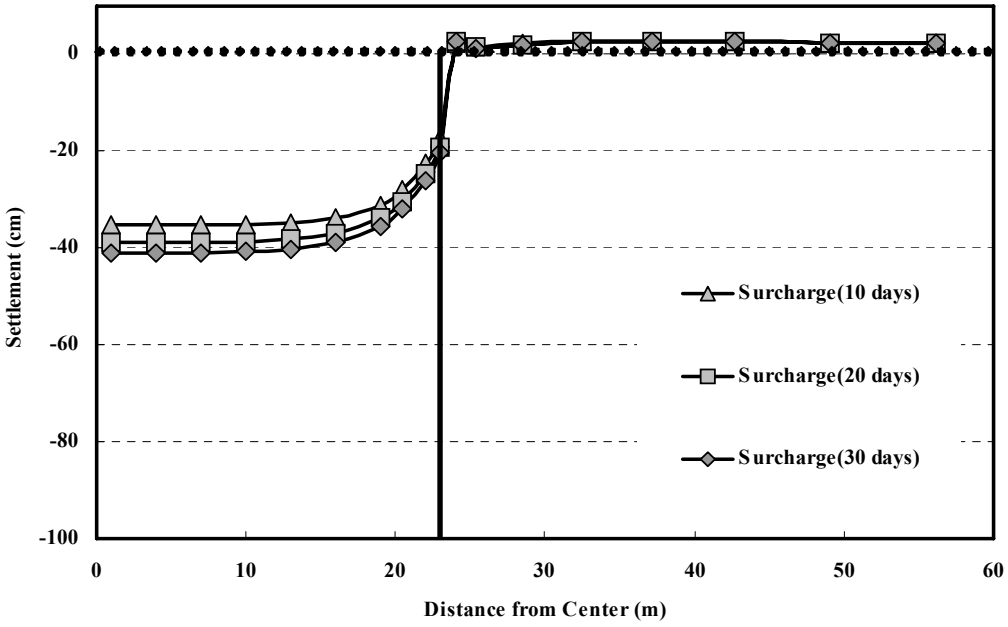
Fig. 3.9.5.25에는 성토 단계별로 시간에 따라 발생된 지반의 전단면 침하양상을 나타내었다. 전단면 침하양상 또한 개량도 측면 해석결과와 마찬가지로 각 단계별로 침하량은 시간이 지남에 따라 증가하다가 수렴하는 거동을 나타냈다. 성토체 끝단에서 유발된 지중 내 측방변위로 인하여 성토고가 증가함에 따라 성토층 아래에서의 압밀 침하량은 증가하고, 개량영역 외부에서의 융기량 역시 증가하는 거동을 나타냈다.



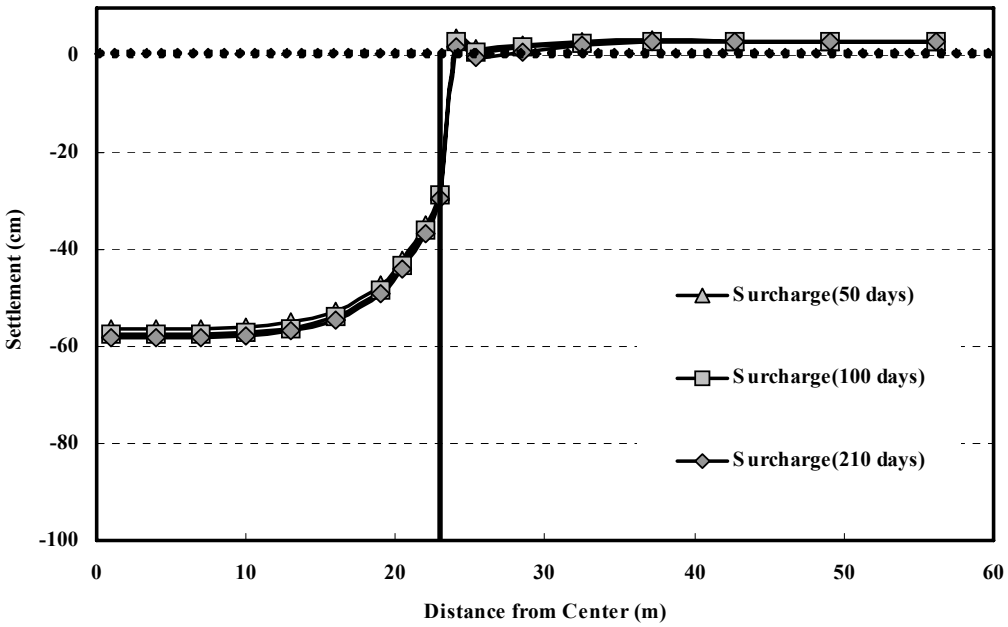
(a) 성토고 0.6m



(b) 성토고 1.2m



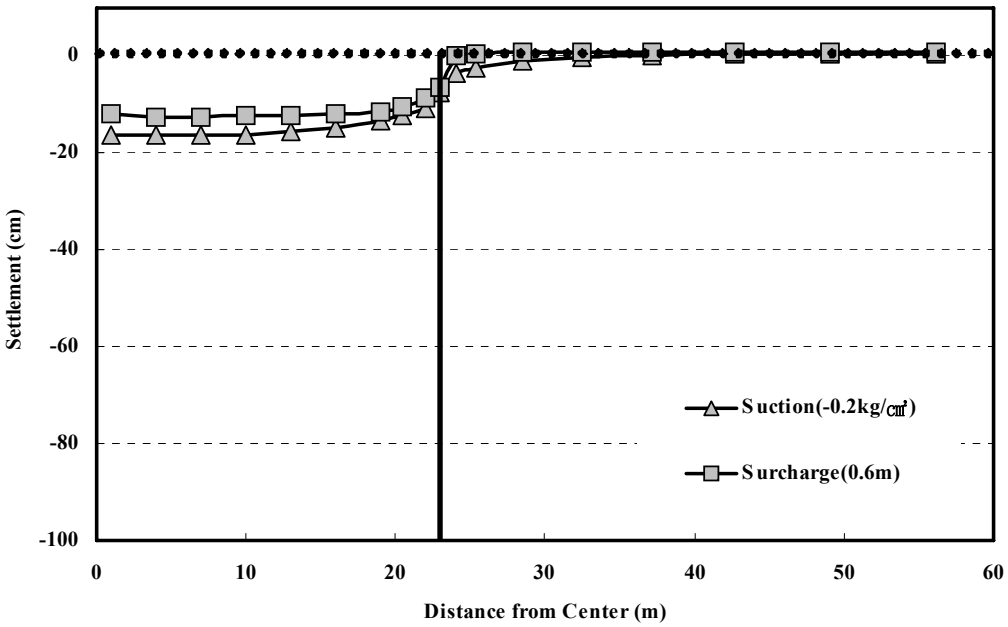
(c) 성토고 1.8m



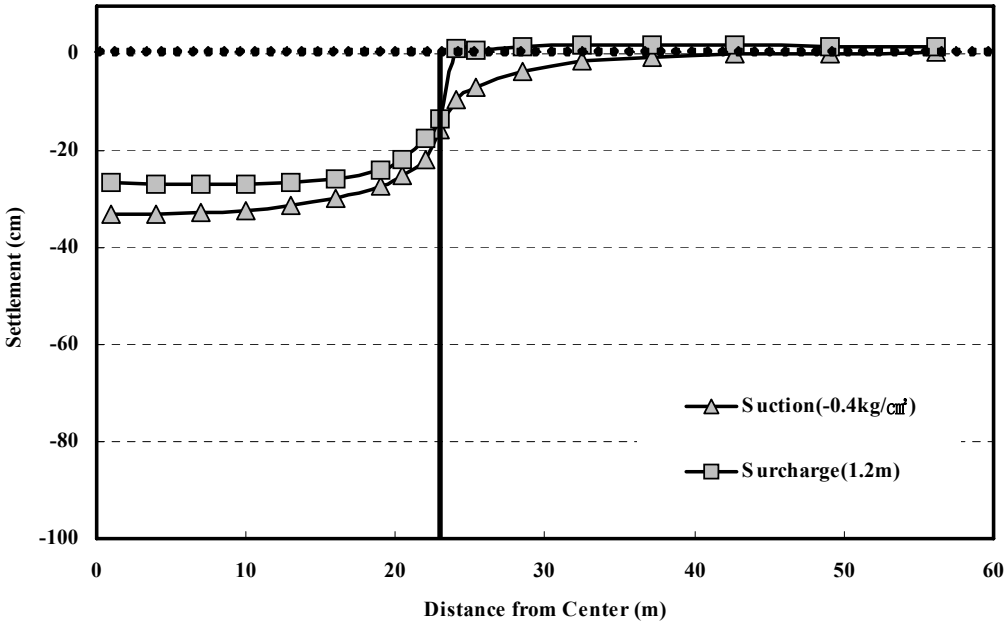
(d) 성토고 2.4m

Fig. 3.9.5.25 연직배수공법 적용시 시간에 따른 전단면 침하형상

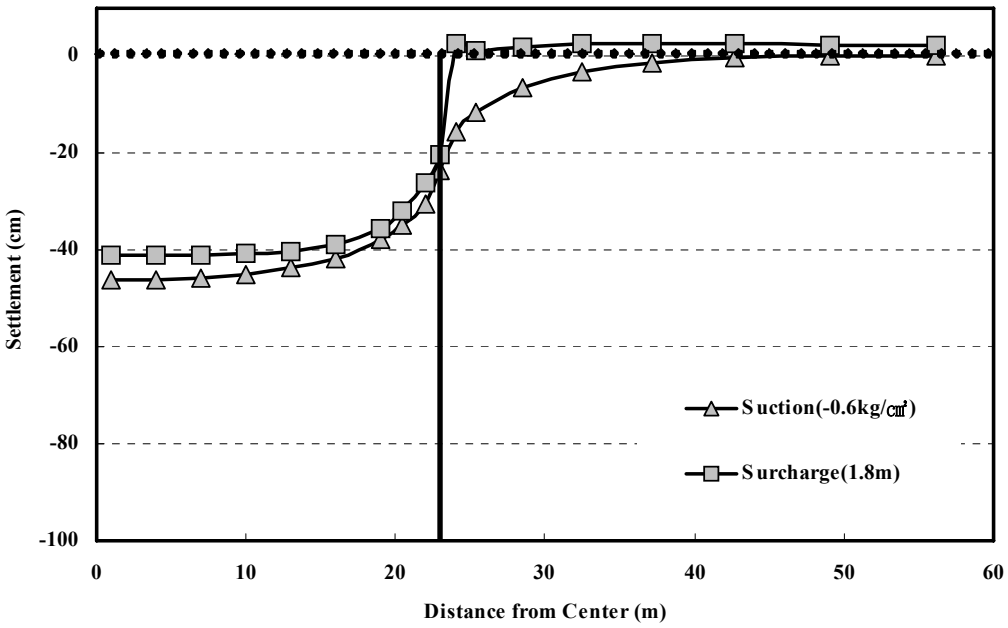
Fig. 3.9.5.26에는 연직배수공법과 Suction Drain 공법에서 성토고 0.6m, 1.2m, 1.8m, 2.4m와 진공압 -0.2, -0.4, -0.6, -0.8kg/cm^2 일 때의 전단면 침하양상을 각각 비교하여 나타내었다. 감량화 측면에서 동일한 침하량을 갖는 성토고에 대하여 연직배수공법에 대한 해석을 수행하였기 때문에 각 재하단계 별로 두 공법의 침하량 차이는 거의 나타나지 않았으며, 최종 재하단계에서는 침하량이 거의 일치하는 것으로 나타났다.



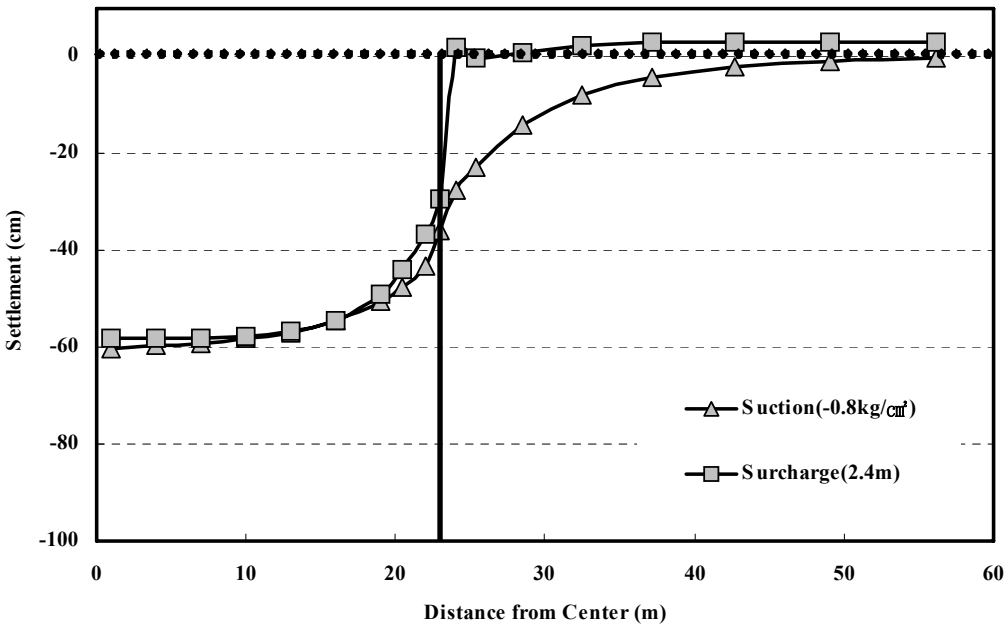
(a) 진공압 -0.2kg/cm^2, 성토고 0.6m



(b) 진공압 -0.4kg/cm^2, 성토고 1.2m



(c) 진공압 -0.6kg/cm^2, 성토고 1.8m



(d) 진공압 -0.8kg/cm^2, 성토고 2.4m

Fig. 3.9.5.26 석션드레인 공법과 연직배수공법의 각 재하단계에서 압밀 종료시 전단면 침하거동 비교

(2) 수평변위 거동

Fig. 3.9.5.27에는 연직배수공법에서 각 하중 단계(0.6~2.4m)별 압밀 종료시 측방변위양상과 Suction Drain 공법에서 각 진공압(-0.2~0.8kg/cm^2)단계별 압밀 종료시 측방변위 양상을 나타내었다. 연직배수공법에서는 성토고가 높아짐에 따라 측방변위가 성토체 외곽으로 발생하며 석션드레인 공법에서는 개량영역 내부로 발생하는 거동을 나타냈다.

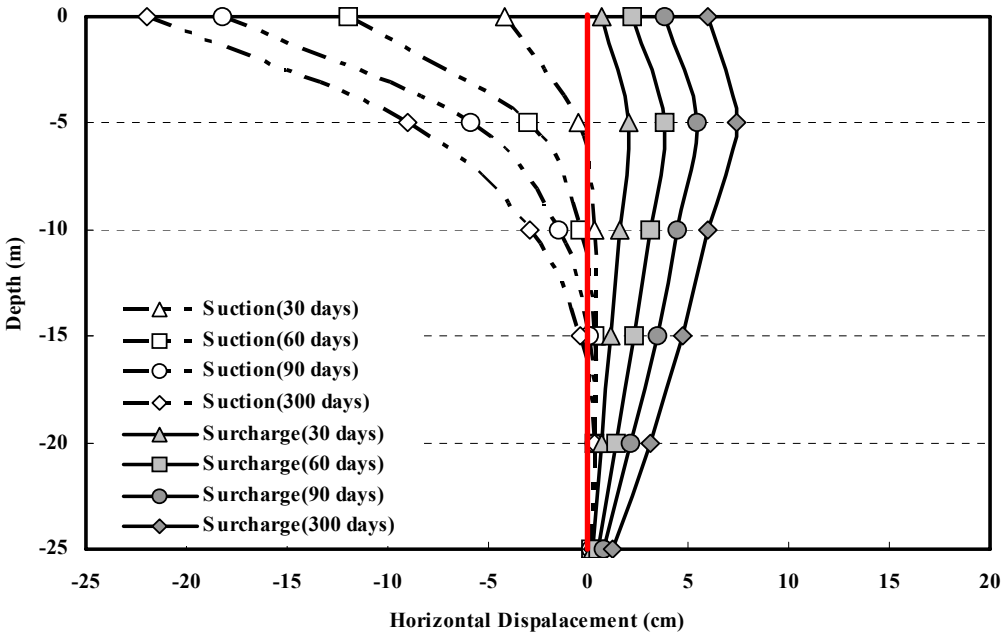
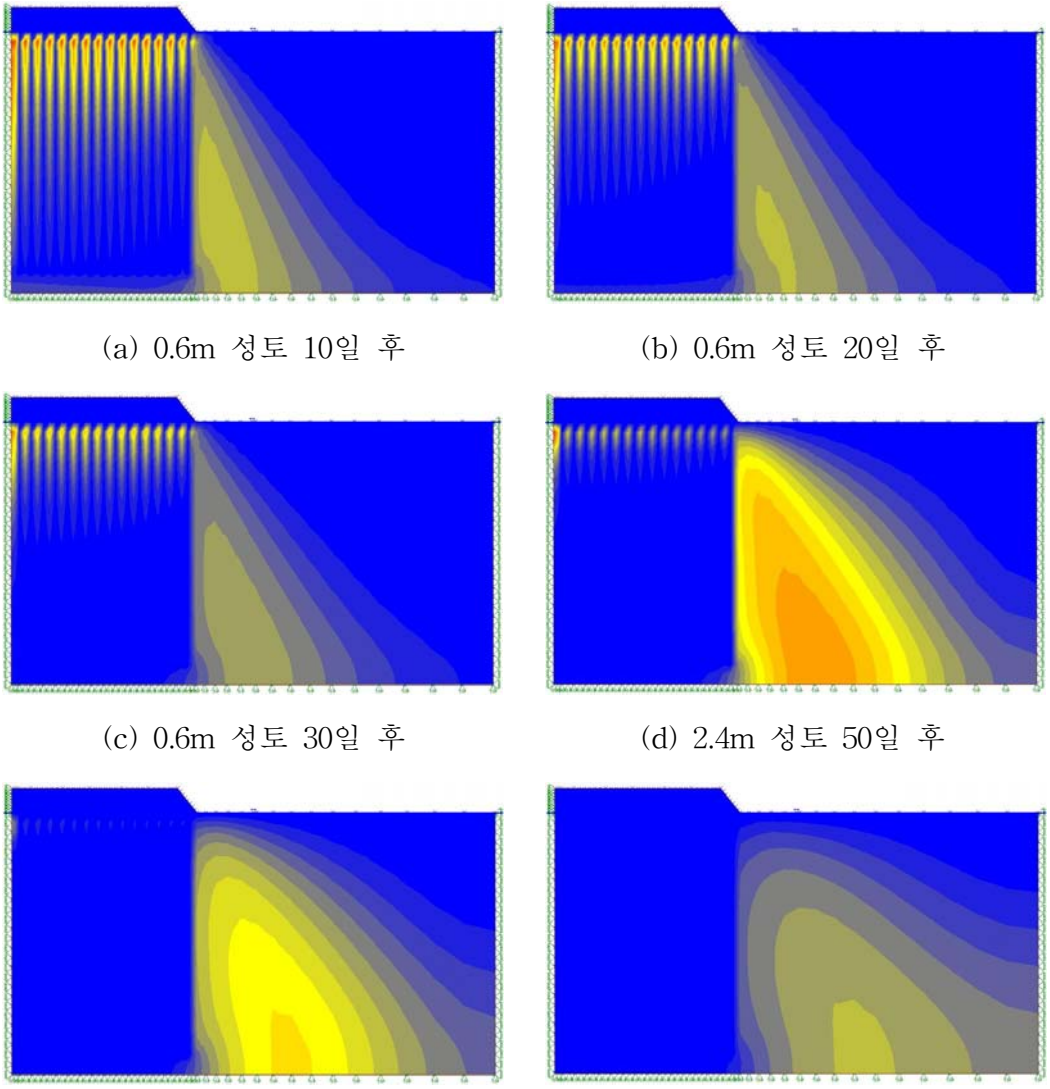


Fig. 3.9.5.27 연직배수공법과 Suction Drain 공법의 지중 내 측방변위

(3) 간극수압 거동

Fig. 3.9.5.28에는 성토재하(0.6m, 2.4m)로 인해 발생한 과잉간극 수압의 등고선 변화를 나타내었다. 2.4m 성토시 50일 이후에 과잉간극수압의 변화가 거의 없는 것으로 보아 50일 이전에 과잉간극수압이 대부분 소산된 것으로 판단된다.



(a) 0.6m 성토 10일 후　　(b) 0.6m 성토 20일 후

(c) 0.6m 성토 30일 후　　(d) 2.4m 성토 50일 후

(e) 2.4m 성토 100일 후　　(f) 2.4m 성토 210일 후

Fig. 3.9.5.28 성토 후 압밀기간에 따른 과잉간극수압분포 (연직배수공법)

Fig. 3.9.5.29에는 연직배수공법 적용 시 단계 성토로 인해 발생한 과잉간극수압분포를 적용기간에 따라 나타내었다. 성토 직후 과잉 간극수압이 급격히 증가하였으며, 압밀이 진행됨에 따라 비교적 빠른 속도로 과잉간극수압이 소산되었다.

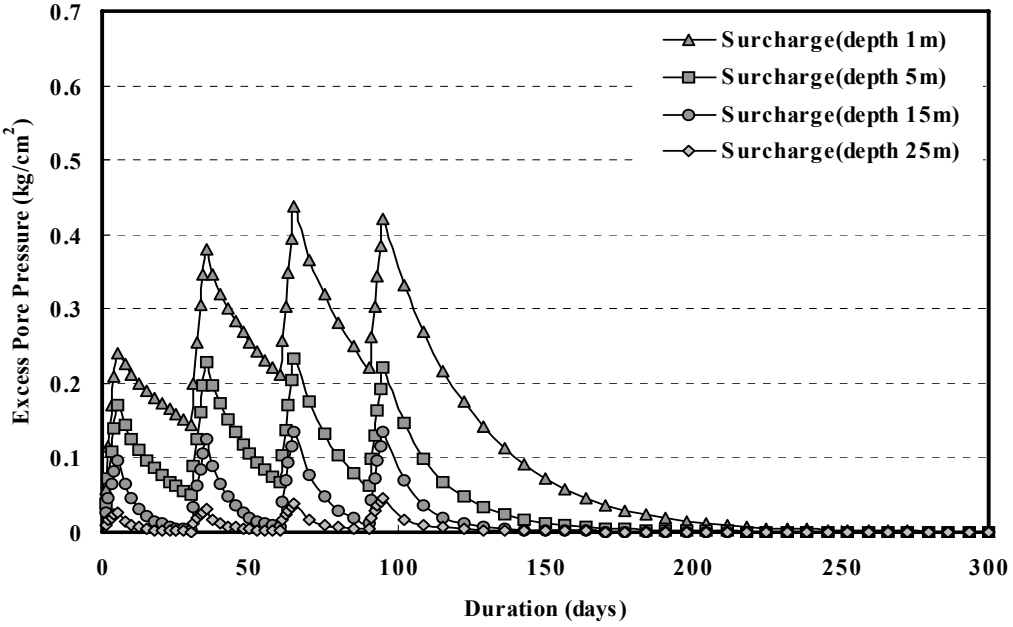


Fig. 3.9.5.29 시간-과잉간극수압분포 (연직배수공법)

6. Suction-CAIN 프로그램을 이용한 대심도 연약지반 해석

민감도 분석과 현장 및 상용프로그램 결과를 통해 적용성 검토가 완료된 Suction-CAIN 프로그램을 이용하여 가상의 대심도 지반(심도 40m)에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석에 사용된 파라미터는 Table 3.9.6.1과 같으며 2차년도 현장시험시공에서 도출된 입력 파라미터를 이용하였다. 해석 단면의 Sealing층은 1m 설정하였으며, 개량층의 두께는 39m, 폭은 42m로 설정하였다. 배수재의 배치간격은 1.5m로 현장시험시공과 동일하게 배치하였으며, 배수재의 배치형상은 사각형 배치로 하였다. 대심도 지반의 해석을 위해 구성한 유한요소망을 Fig. 3.9.6.1에 나타내었다. 각 단계 별 해석 기간은 $-0.2kg/cm^2$, $-0.4kg/cm^2$, $-0.6kg/cm^2$ 각각 60일로 설정하였으며, $-0.8kg/cm^2$은 120일간 재하하여 총 300일 간의 해석을 수행되었다. 배수재에 가해진 진공압은 현장시험시공의 결과를 통해 예측된 심도별 효율의 추세를 이용하여 입력하였다(Fig. 3.9.6.2).

Table 3.9.6.1 Clay 지반에 적용한 수정 Cam-Clay 매개 변수

κ	λ	e_{cs}	M	ν′	$\gamma_{bulk}(tonf/m^3)$	$\gamma_w(tonf/m^3)$	$k(cm/sec)$
0.0234	0.117	2.09	1.042	0.3	1.75	1	5.73×10^{-8}

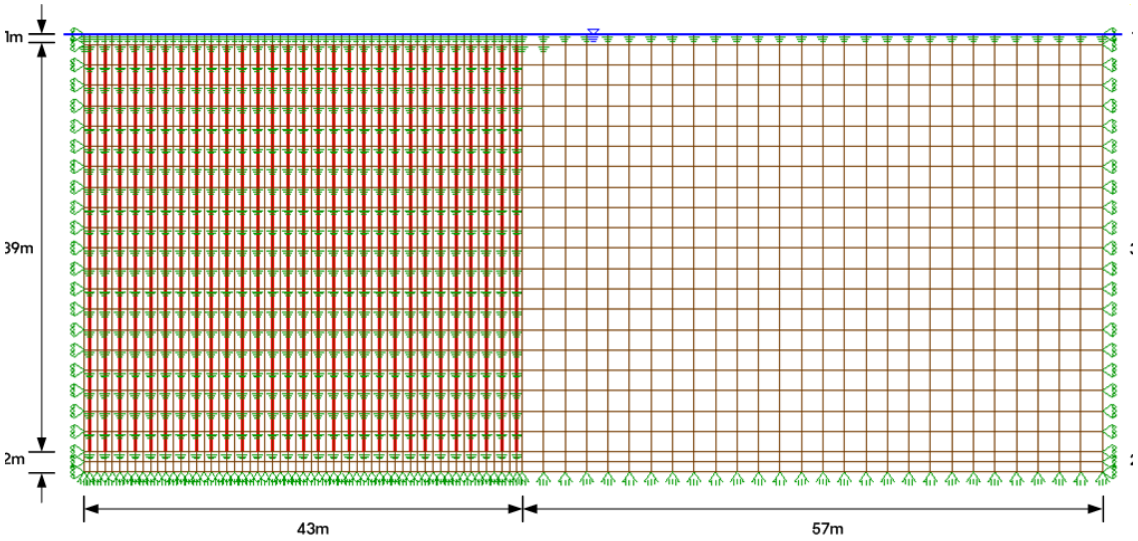


Fig. 3.9.6.1 대심도 지반 해석 단면

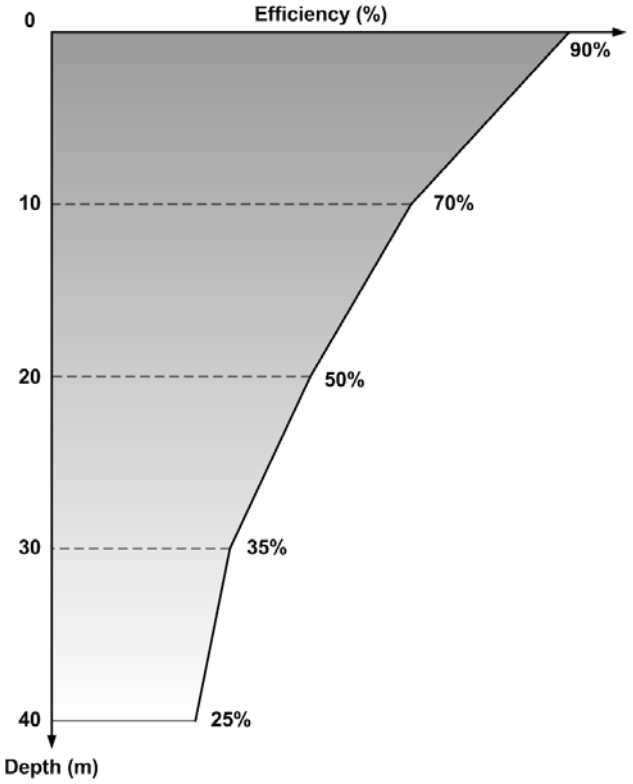


Fig. 3.9.6.2 심도에 따른 적용 진공압 효율

가. 변위거동

Fig. 3.9.6.3 ~ Fig. 3.9.6.6에는 각 진공압 단계별 전단면 변형 형상을 나타내었다. 침하는 대부분 개량영역에서 발생하였으며 개량지역 외부 약 10~12m 까지도 진공압의 영향으로 침하가 발생하였다. 수평변위는 개량영역의 진공압으로 인하여 외부에서 개량영역 방향으로 발생하였다.

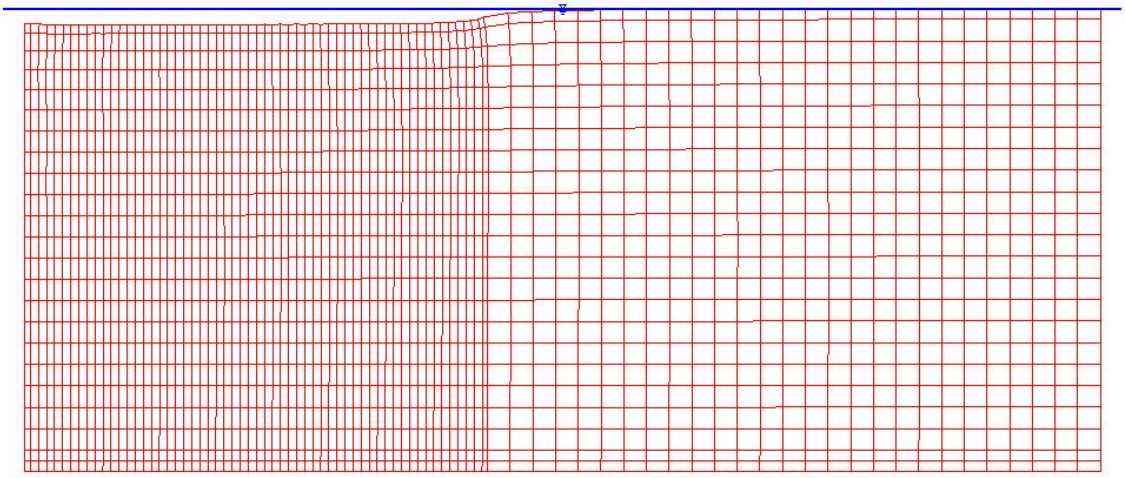


Fig. 3.9.6.3 진공압 -0.2kg/cm^2 적용후 단면의 변형

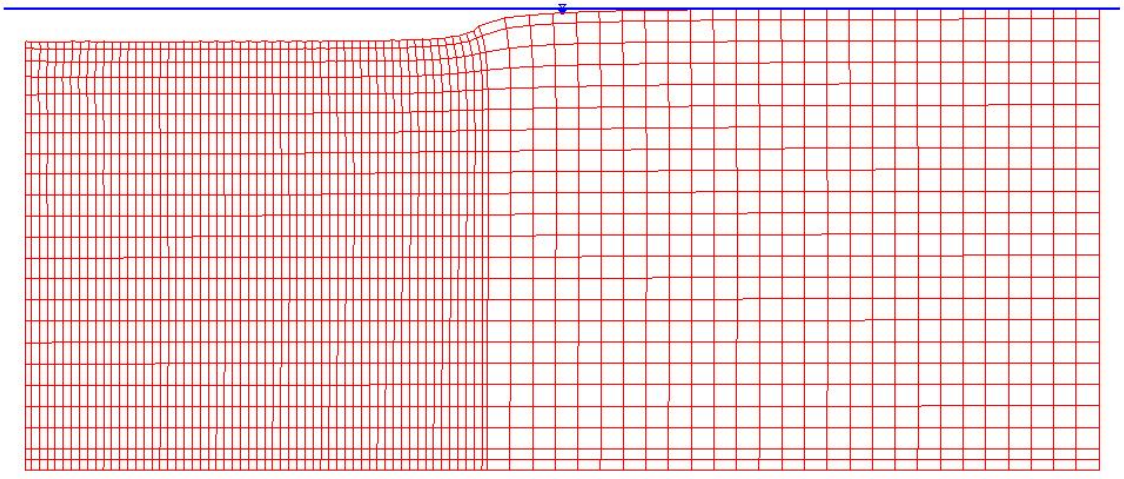


Fig. 3.9.6.4 진공압 -0.4kg/cm^2 적용후 단면의 변형

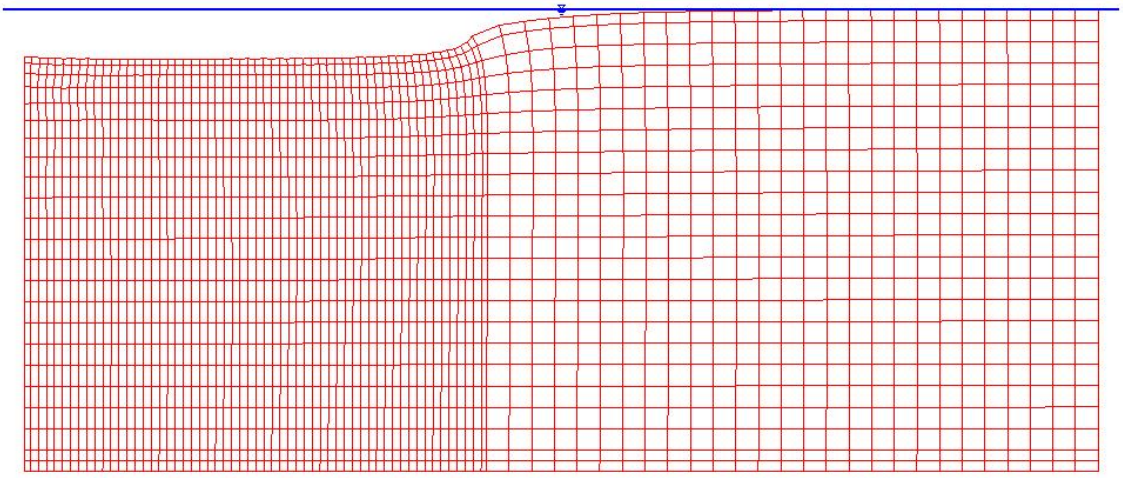


Fig. 3.9.6.5 진공압 -0.6kg/cm^2 적용후 단면의 변형

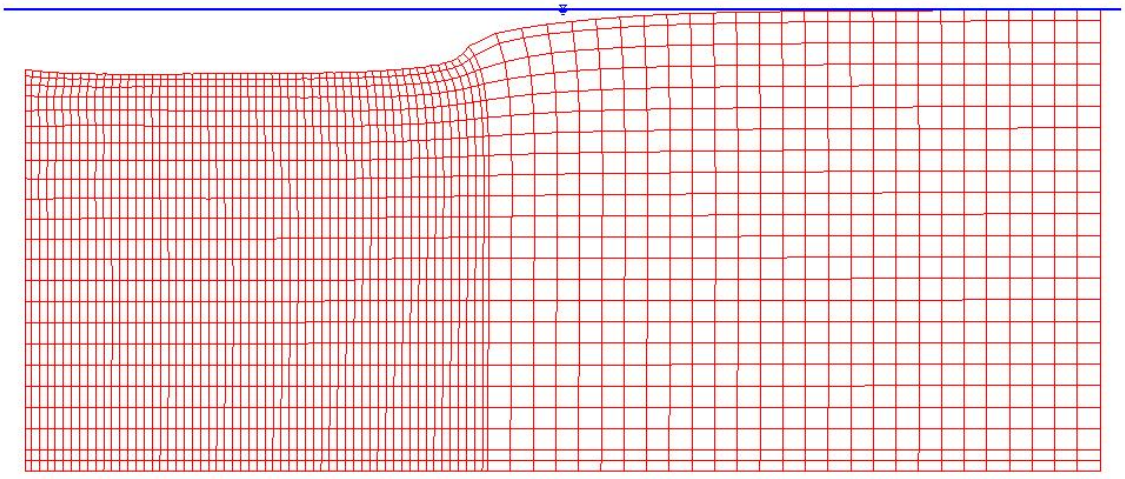


Fig. 3.9.6.6 진공압 -0.8kg/cm^2 적용후 단면의 변형

(1) 침하량

Fig. 3.9.6.7에는 진공압 적용 기간에 따른 지반의 침하량 분포를 나타내었다. 총 최종 침하량은 약 1.1m가량 발생하였다. 진공압 단계가 증가할수록 각 단계별 누적 침하량이 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 낮은 진공압 단계에서 지속적으로 압밀이 발생하여 지반의 간극비가 감소하였기 때문이다. Fig. 3.9.6.8에는 개량지역 외부 6m, 10m 지점에서 발생한 침하량을 내부 1m 심도에서 측정된 결과와 비교하여 나타내었다. 또한 심도가 깊어질수록 침하량의 발생 추이는 크게 감소하였는데, 이는 심도의 증가와 함께 진공압 전달률이 작아졌기 때문에 발생된 결과이다. 개량영역 내부 진공압의 영향으로 개량영역 외부에서도 침하량이 발생하였으나, 거리가 증가함에 따라 그 값은 감소하였다.

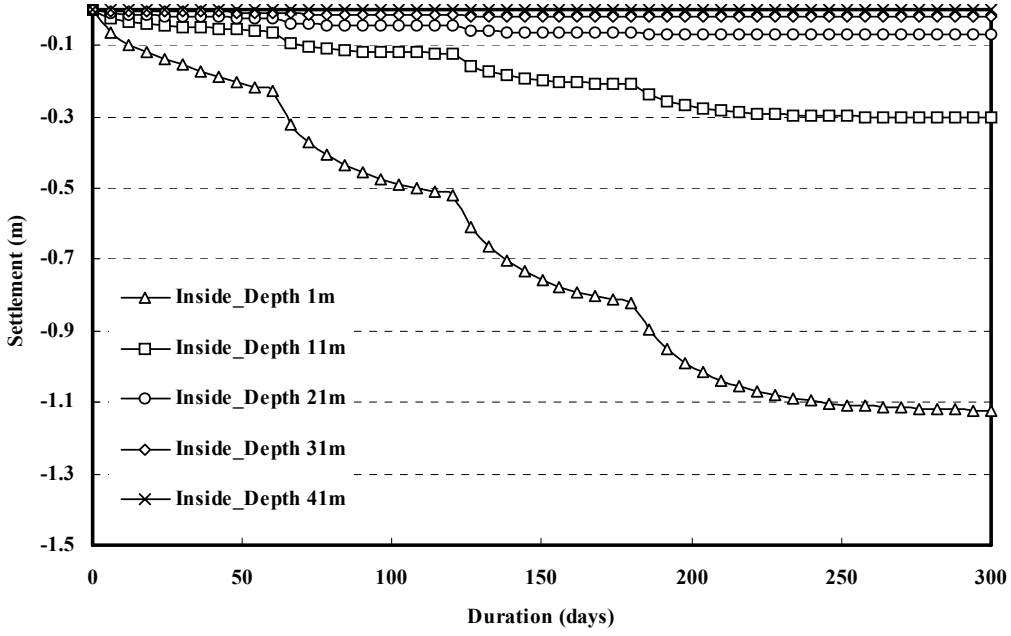


Fig. 3.9.6.7 심도별 시간에 따른 침하량 분포

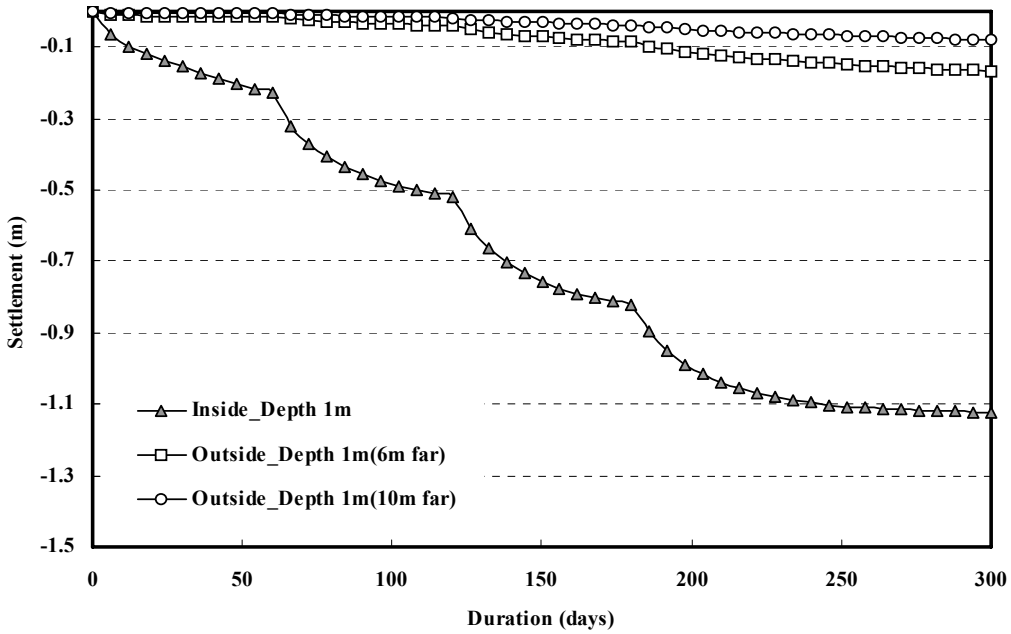
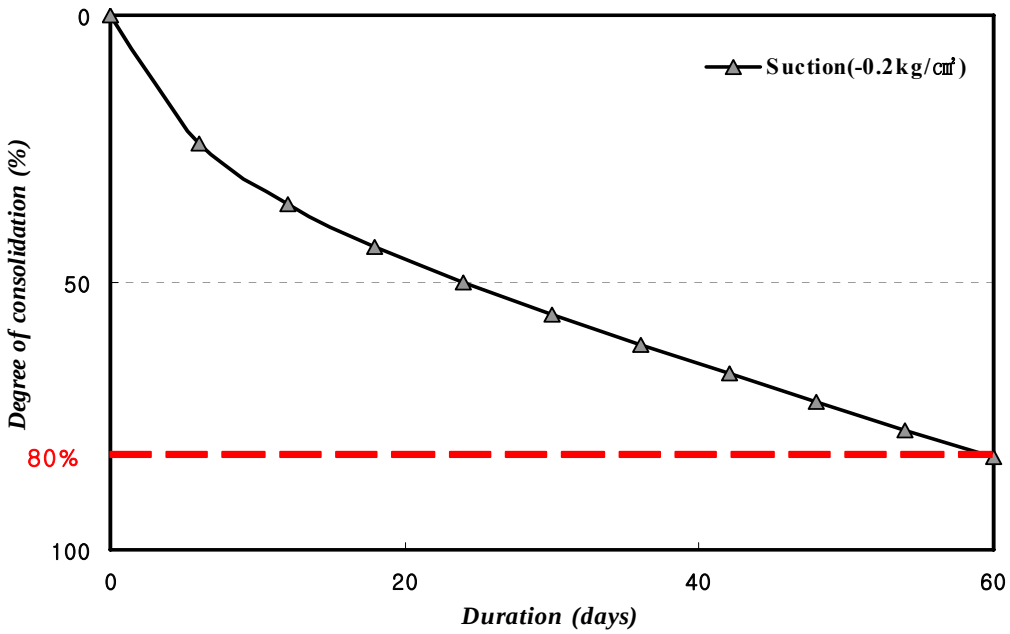
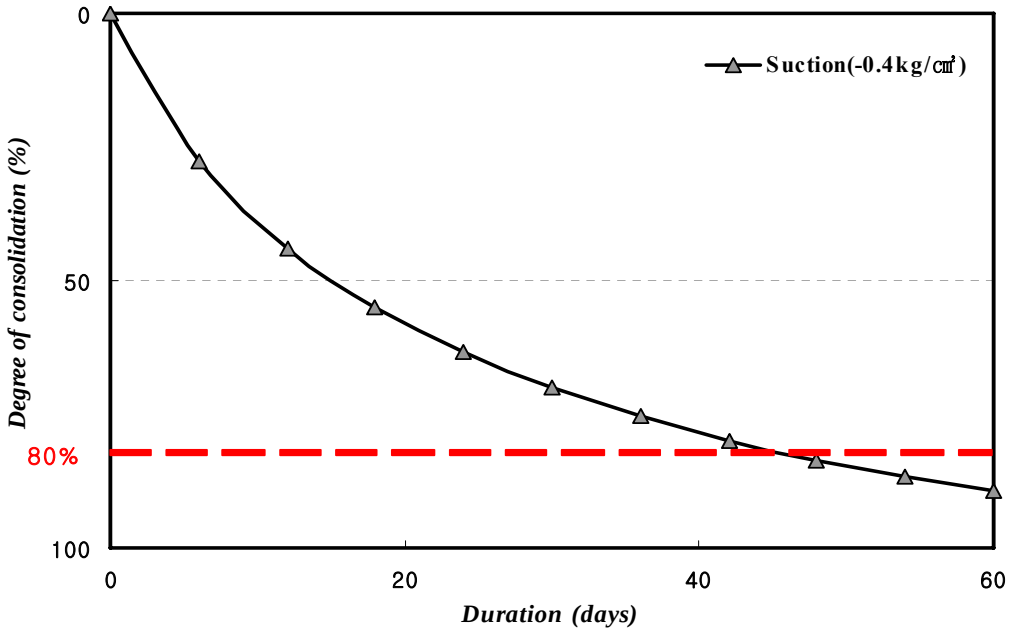


Fig. 3.9.6.8 개량영역의 침하량과 외부 6m, 10m 지점의 침하량 분포 비교

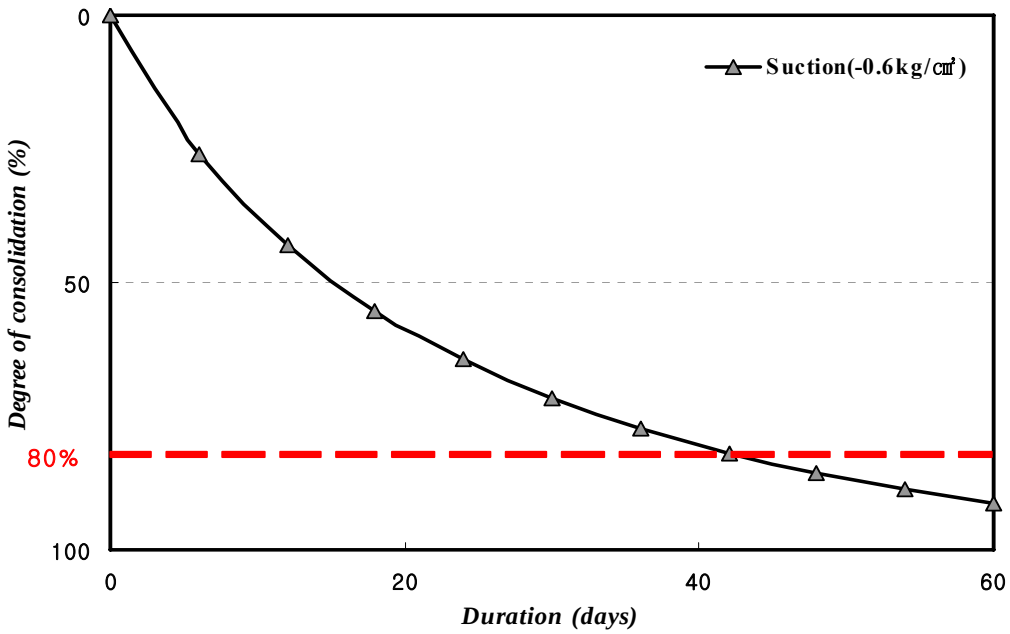
Fig. 3.9.6.9는 각 진공압 단계별 시간에 따른 압밀도 분포를 나타낸 그림이다. 모든 진공압 단계에서 압밀도는 80%를 넘어서는 것으로 나타났다. 저진공압 단계에서 고진공압 단계로 재하 단계가 증가할수록 압밀도는 증가하며, 동일 압밀도(80%)에 도달하는 기간 또한 짧아지는 거동을 나타냈다. 이는, 전 진공압 단계에서 과잉간극수압이 완전히 소산되지 않은 상태에서 다음 단계의 진공압이 재하되었기 때문에 각 단계별 진공압의 증분은 동일하더라도 과잉간극수압의 증분은 증가하기 때문인 것으로 판단된다.



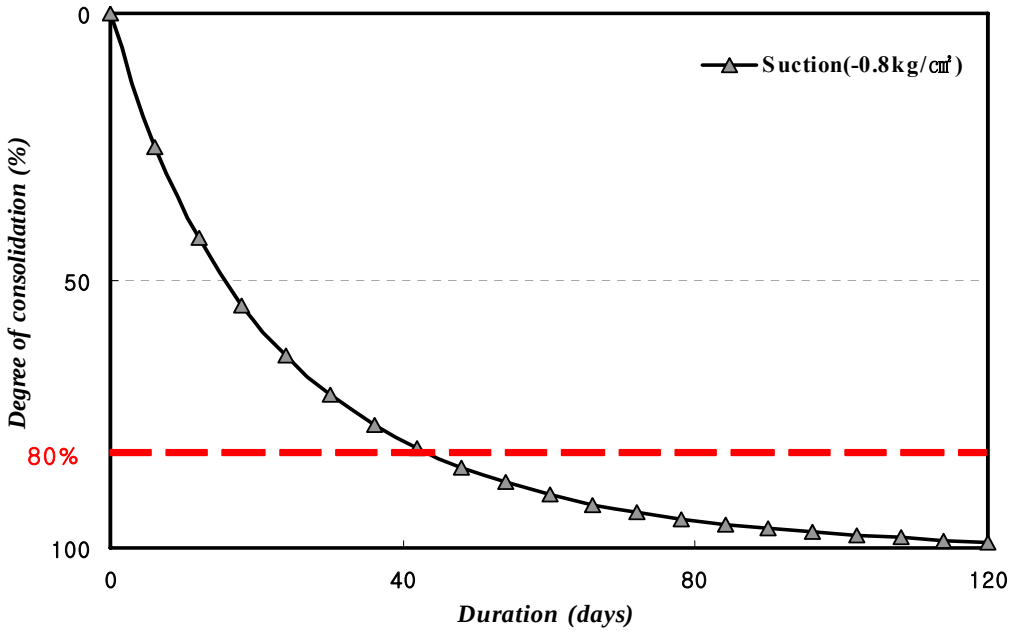
(a) 진공압 -0.2kg/cm^2



(b) 진공압 -0.4kg/cm^2



(c) 진공압 -0.6kg/cm^2



(d) 진공압 -0.8kg/cm^2

Fig. 3.9.6.9 개량영역의 침하량과 외부 6m, 10m 지점의 침하량 분포 비교

Fig. 3.9.6.10은 각 진공압 단계별 최종 침하량 분포를 나타낸 그래프이다. 최대 침하량은 개량영역 중심에서 발생하며, 개량영역에서 미개량 영역으로 갈수록 진공압의 크기가 감소하여 침하량이 감소하였다.

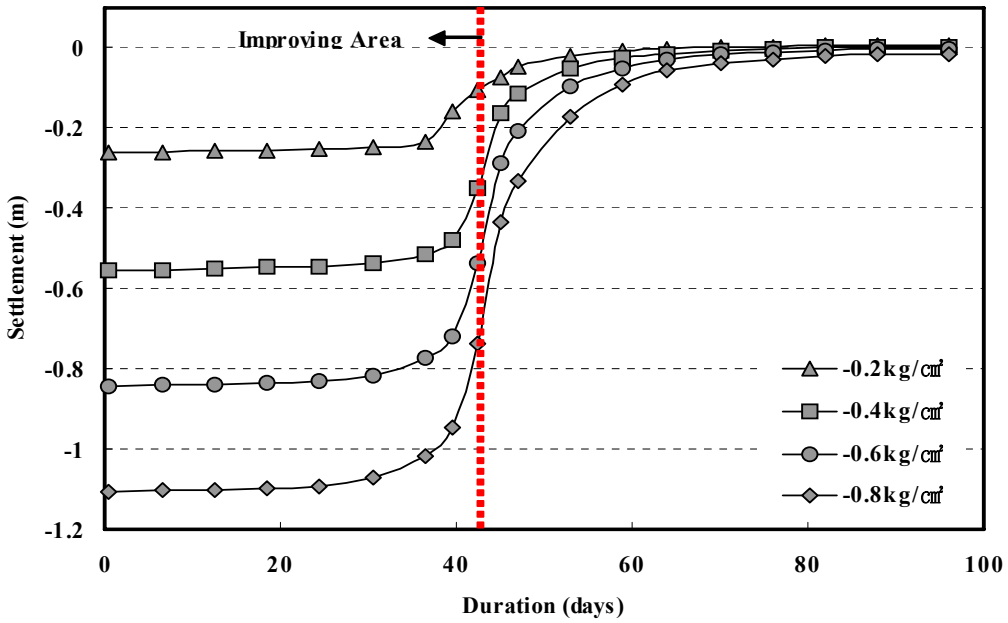


Fig. 3.9.6.10 진공압 단계별 침하량의 수평분포

(2) 수평변위

Fig. 3.9.6.11은 심도에 따른 각 하중 단계별 수평변위 분포를 나타낸 그래프이다. 일반적인 성토재하 공법의 경우 수평변위는 양(+)의 과잉간극수압으로 인하여 개량영역에서 외부로 발생하지만, 석션드레인 공법의 경우 개량지역 내부에 부(-)의 간극수압이 발생하기 때문에 수평변위가 외부에서 개량영역 방향으로 발생한다. 수평변위는 진공압이 커짐에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 상부의 높은 진공압 효율에 의해서 상부에서 최대 30cm로 크게 발생하였다. 수평변위는 심도가 깊어질수록 급격히 감소하여 약 10m 이하에서는 양(+)의 값을 나타냈는데, 이는 심도가 깊어짐에 따라 진공압 효율은 감소하고 자중에 의한 영향이 커지기 때문인 것으로 판단된다.

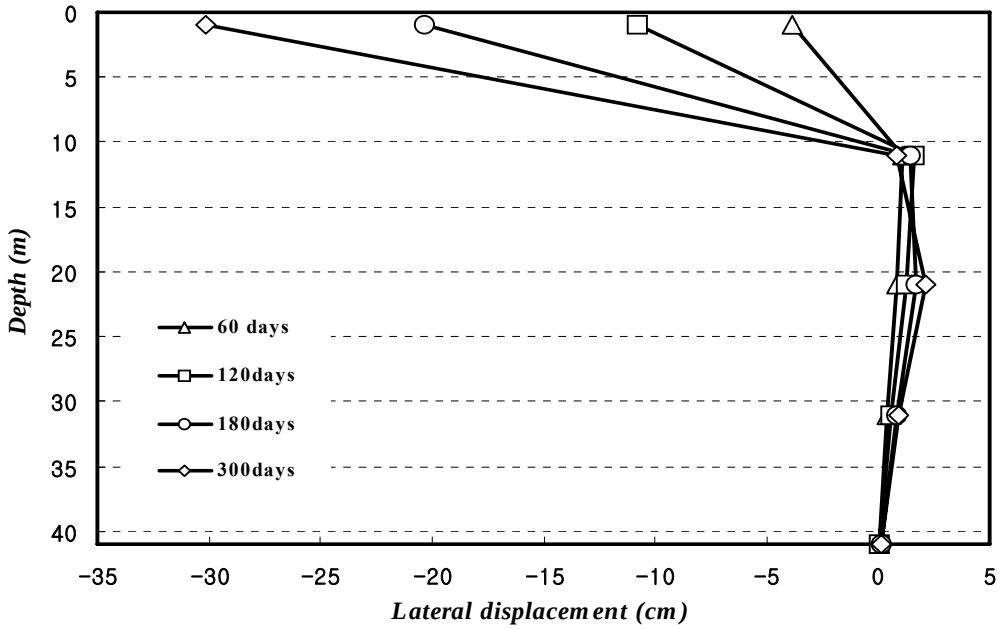


Fig. 3.9.6.11 심도에 따른 각 하중단계별 수평변위 분포

나. 진공압 분포

Fig. 3.9.612는 배수재에 가해진 진공압 효율을 나타낸 그래프이다. 해석에 입력된 진공압은 현장시험시공시 배수재에 심도별로 측정된 진공압의 효율의 추세를 통해 심도별로 예측하였다. 진공압의 효율은 상부에서 약 90%로 나타났으며, 심도에 따라 지수적으로 감소하여 40m에서는 약 25%의 효율이 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 3.9.6.13은 현장시험시공 결과로부터 얻어진 심도별 효율을 고려하여 수치해석시 각 하중 단계별 입력된 배수재 내부의 진공압을 나타낸 그래프이며, Fig. 3.9.6.14는 입력된 실제 진공압 분포를 심도별로 나타낸 그래프이다.

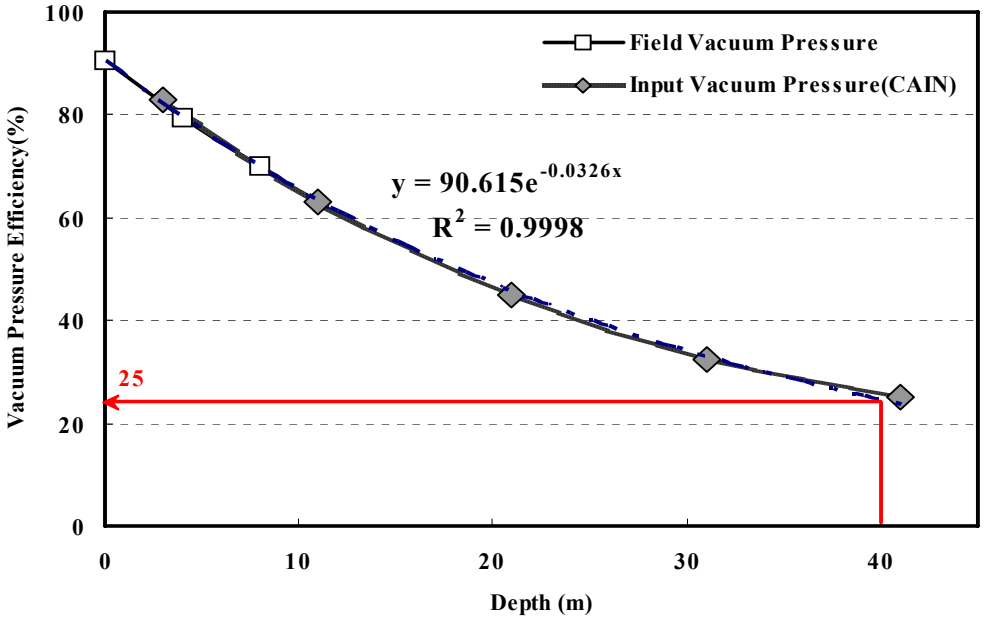


Fig. 3.9.6.12 배수재에 실제로 가해진 진공압 효율

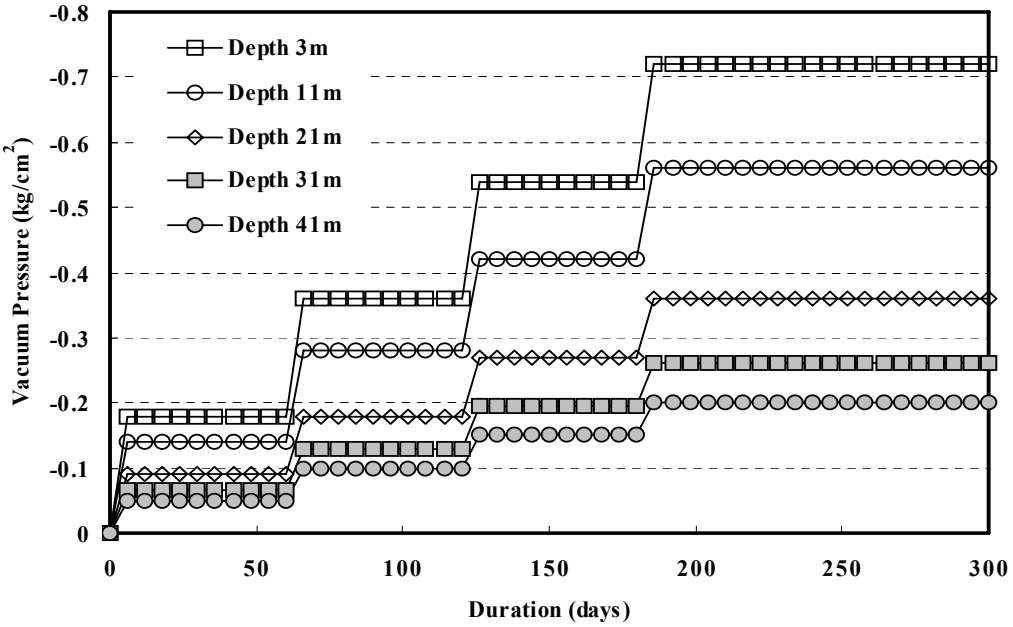


Fig. 3.9.6.13 시간에 따른 배수재의 진공압 분포

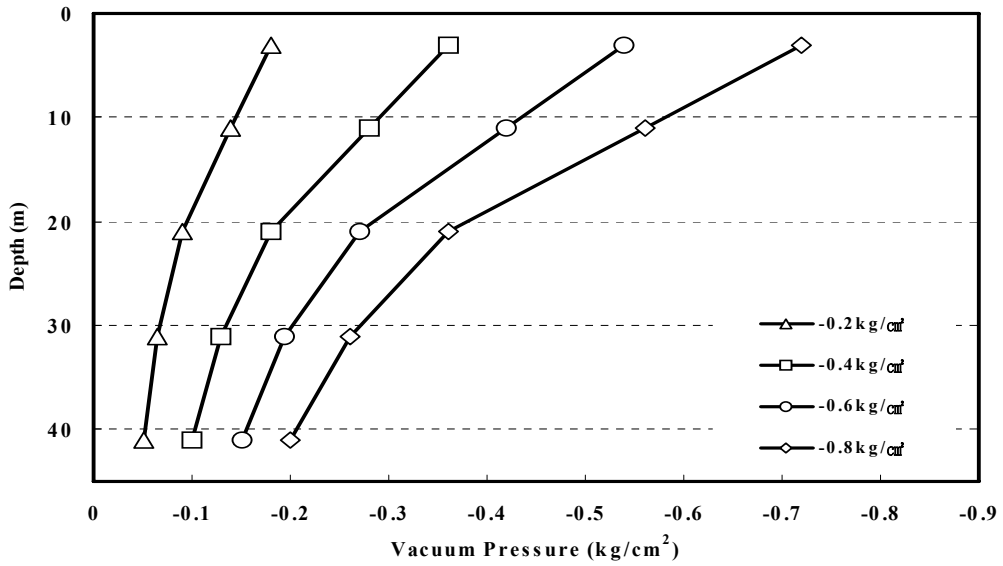


Fig. 3.9.6.14 심도에 따른 배수재의 진공압 분포

Fig. 3.9.6.15는 시간에 따른 지반내 과잉간극수압 분포를 심도별로 나타낸 그래프이다. 시간에 따른 지반내 과잉간극수압은 배수재에서 가해진 진공압의 크기와 거의 동일한 값으로 수렴하였다. 각 하중 단계별 최대 과잉간극수압은 진공압 재하 직후로부터 약 10~20일 이후에 발생하였다.

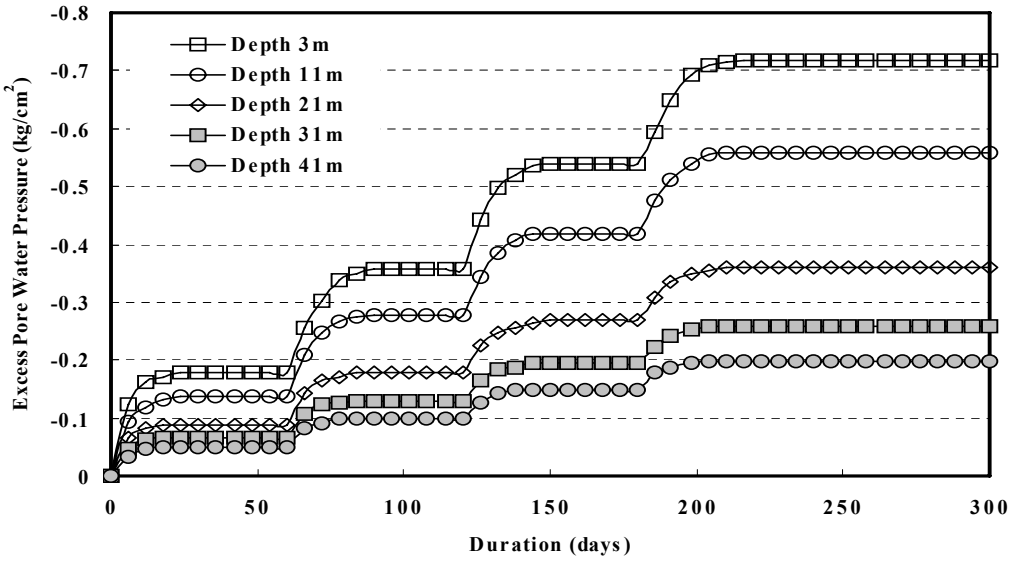
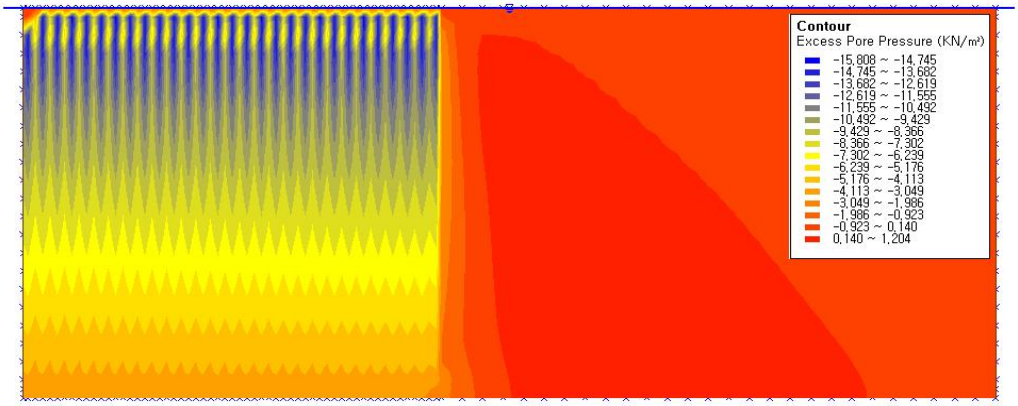
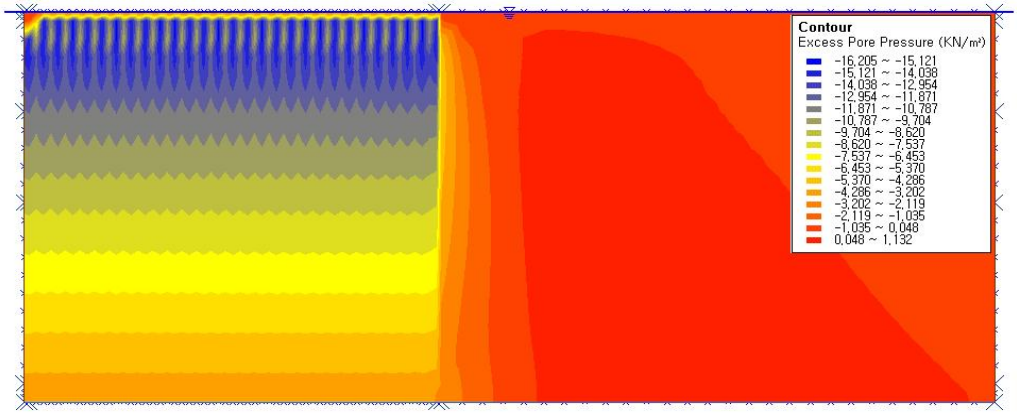


Fig. 3.9.6.15 시간에 따른 지반내 과잉간극수압 분포

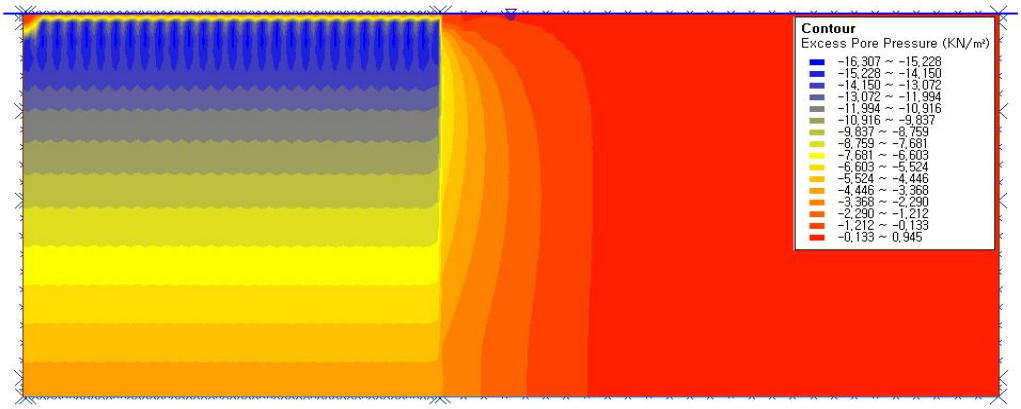
Fig. 3.9.6.16~Fig. 3.9.6.19는 각 하중 단계별 시간에 따른 지반내 과잉간극수압 분포를 등고선으로 나타낸 그림이다. 과잉간극수압은 배수재 주변에서부터 바깥쪽으로 시간이 지남에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 압밀종료시점에는 개량지역 전반에 걸쳐 동일 심도에서 거의 일정한 과잉간극수압이 유지되는 것으로 나타났다.



(a) 하중재하 직후

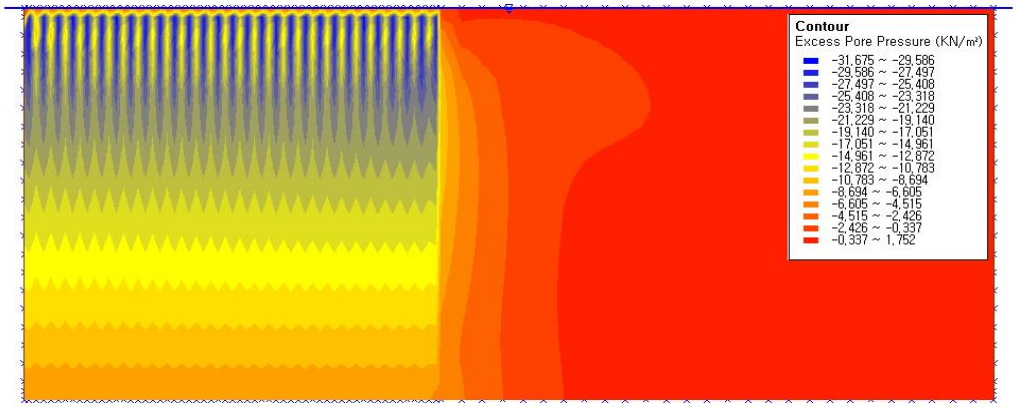


(b) 압밀중

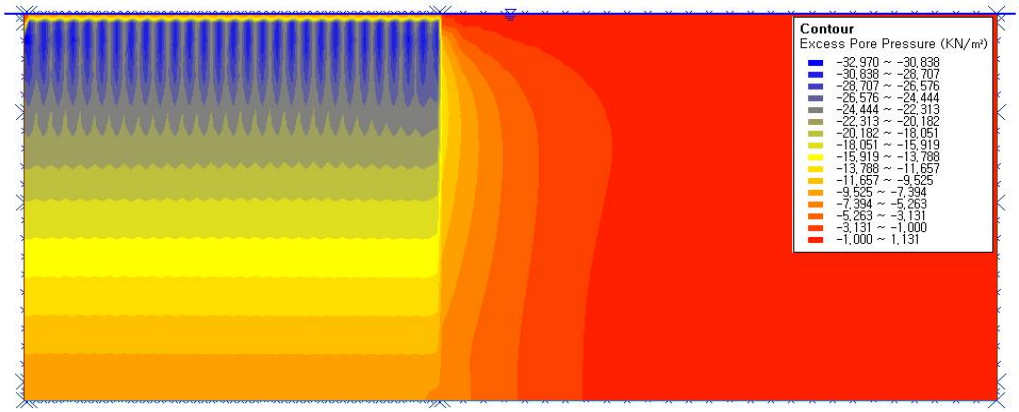


(c) 압밀종료시

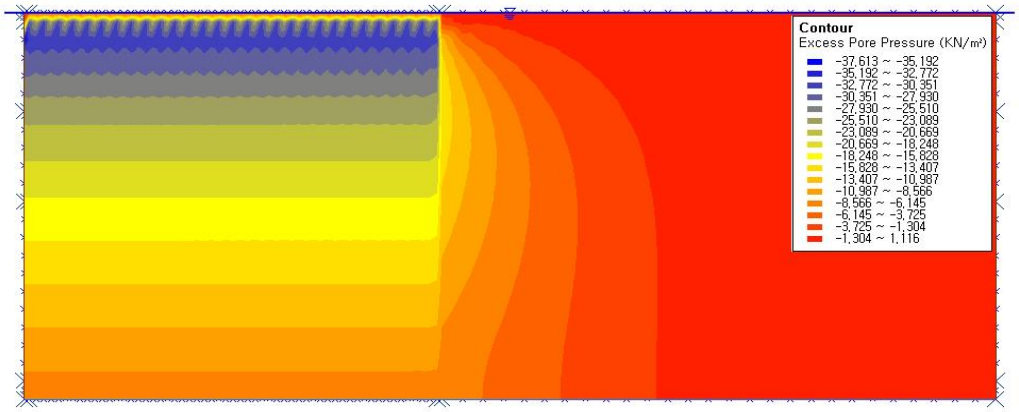
Fig. 3.9.6.16 시간에 따른 지반내 과잉간극수압 분포(-0.2kg/cm^2)



(a) 하중재하 직후

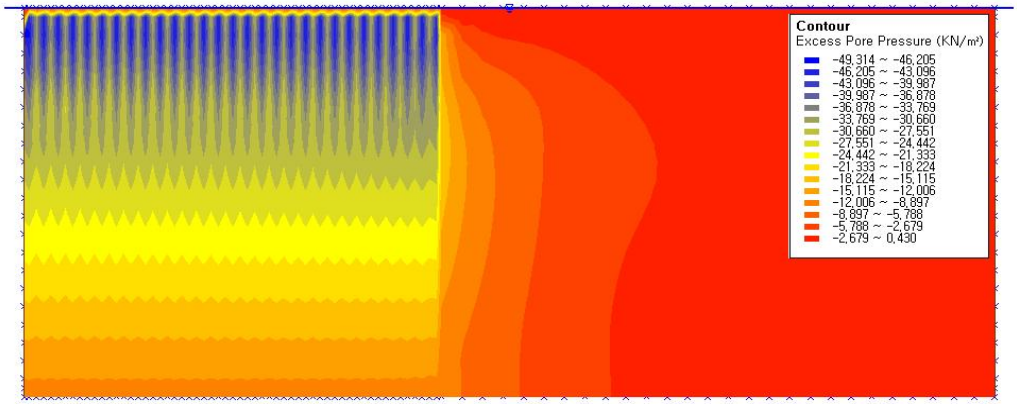


(b) 압밀중

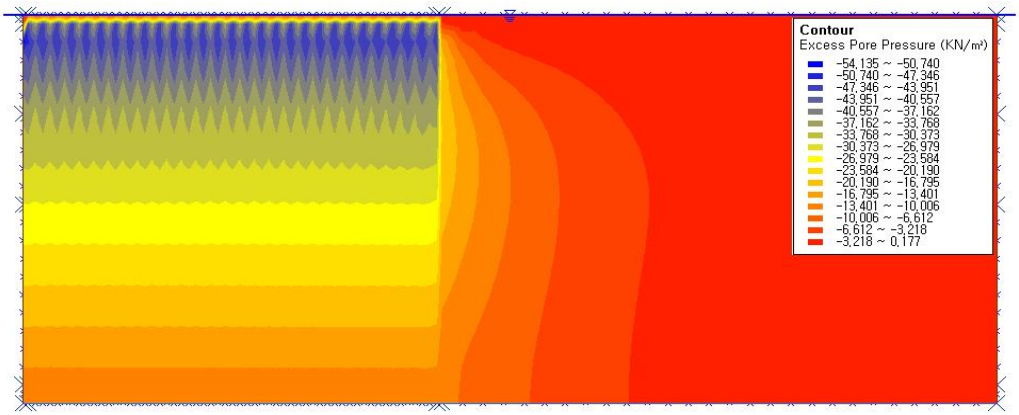


(c) 압밀종료시

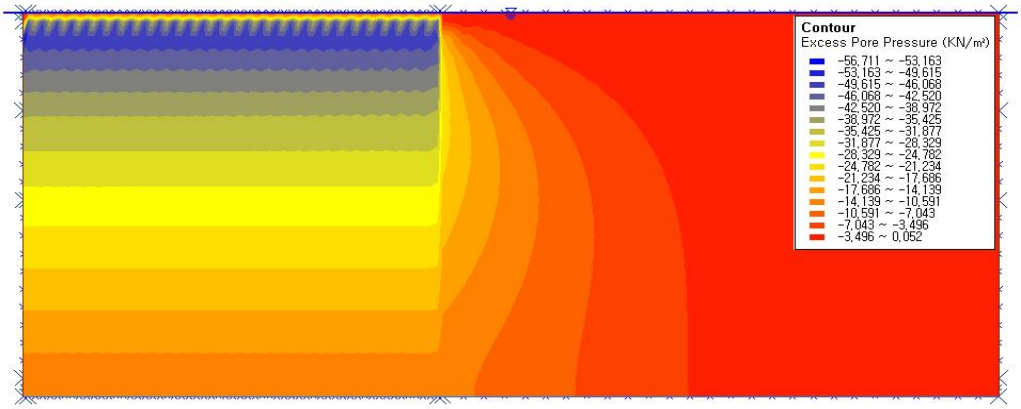
Fig. 3.9.6.17 시간에 따른 지반내 과잉간극수압 분포(-0.4kg/cm^2)



(a) 하중재하 직후

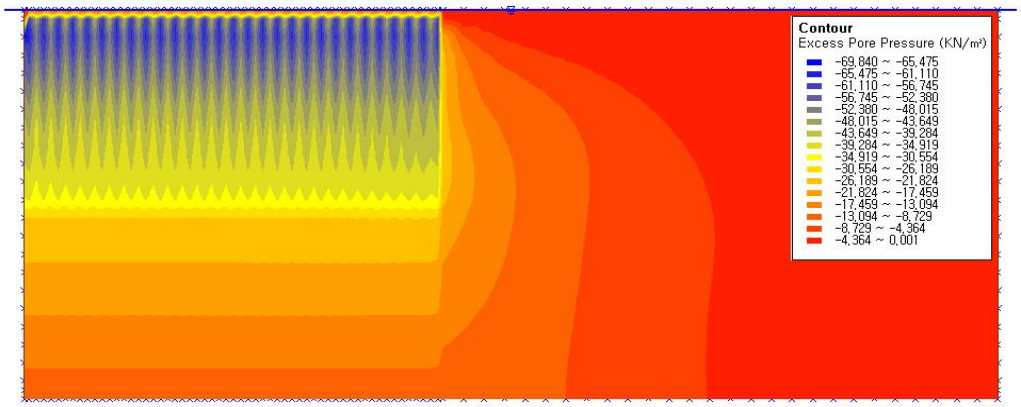


(b) 압밀중

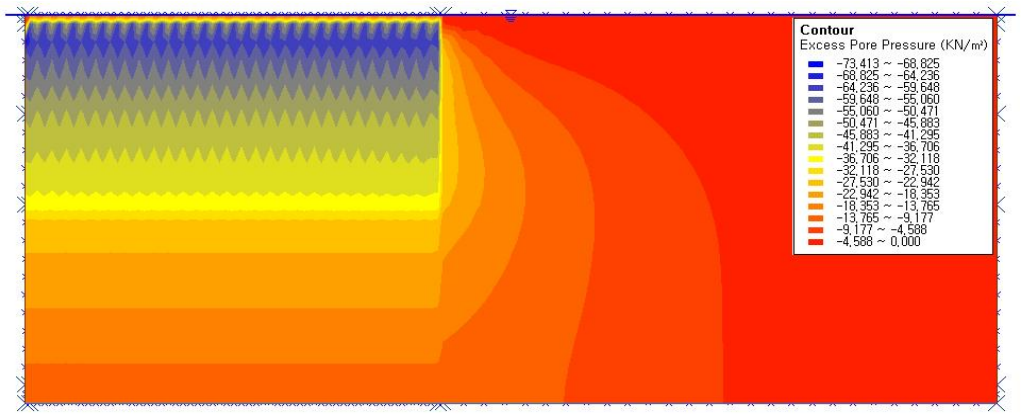


(c) 압밀종료시

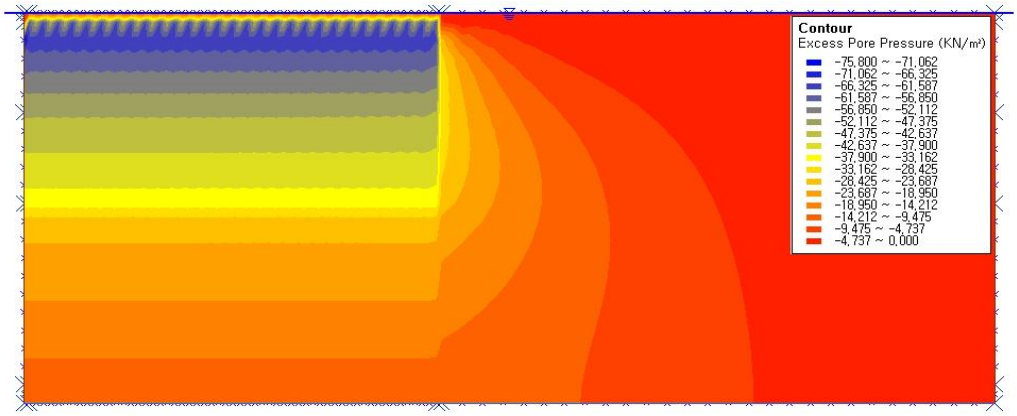
Fig. 3.9.6.18 시간에 따른 지반내 과잉간극수압 분포(-0.6kg/cm^2)



(a) 하중재하 직후



(b) 압밀중



(c) 압밀종료시

Fig. 3.9.6.19 시간에 따른 지반내 과잉간극수압 분포(-0.8kg/cm^2)

7. 결론

본 장에서는 Suction Drain 공법이 적용된 지반의 거동을 예측하기 위하여, 진공압을 이용한 개량공법에 최적화된 Suction-CAIN 프로그램의 적용성을 검토하였다. 이를 위해 개발된 프로그램의 민감도 분석을 수행하였고, 상용프로그램(Sage CRISP)과 개발된 수치해석프로그램(Suction-CAIN)을 이용하여 2차년도 현장시험시공 단면을 모사하여 비교/분석하고 그 적용성을 검토하였다. 또한 Suction-CAIN 프로그램을 통해 대심도 지반을 모사하고 그 결과를 검토하였다.

1) Suction-CAIN 프로그램의 민감도 분석결과, 유한요소의 형상 및 수치해석 단면상 배수재의 타설개수는 프로그램 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나 해석상 타설개수가 동일하더라도 Hird 산정식 입력시 실제 배수재의 간격을 변화시키는 경우에는 해석 결과가 민감하게 변화하였다.

2) 상용프로그램을 통한 현장시험시공부지 모사 결과, 심도에 따른 진공압의 효율저하 요인과 교란의 영향으로 인해 발생된 투수계수 저하효과를 고려할 수 없었기 때문에 지반 내 발생된 변위거동과 진공압 분포가 실제보다 측정된 값보다 매우 크게 발생하였다.

3) Suction-CAIN 프로그램을 통한 현장시험시공부지 모사결과, 실제 현장에서 측정된 결과와 침하, 진공압, 간극수압 거동에서 거의 유사하게 나타났다. 교란영역의 효과를 Hird의 이론을 통해 비교적 현장조건과 유사하게 모사할 수 있었고, 배수재 길이에 따른 진공압 감소율을 고려할 수 있었기 때문에 나타난 결과이다.

4) Suction-CAIN 프로그램을 이용하여 성토재하공법과 석션드레인 공법을 비교한 결과, 감량화 측면에서 진공압 -0.8kg/cm^{2}의 석션드레인 공법과 동일한 침하량 결과를 나타내는 등가 성토고는 2.4m로 나타났으며, 개량도 측면에서 동일한 유효응력(p')을 나타내는 등가 성토고는 4.0m인 것으로 나타났다. 또한 압밀도 비

교 결과 석션드레인 공법이 연직배수공법에 비하여 압밀속도가 빠르게 나타났다.

5) Suction-CAIN 프로그램을 통한 대심도 모사결과, 심도에 따라 발생된 진공압 효율의 감소로 인해 개량영역 하부에서 발생된 침하량과 상부층에서의 침하량의 차이가 비교적 크게 나타났다. 그러나 시간경과에 따라 배수재 인접지반에 발생된 진공압이 심도에 따라 배수재에 가해진 크기와 거의 유사하게 발생됨을 파악할 수 있었으며, 이를 통해 대심도 지반에 본 공법의 적용 가능성을 파악할 수 있었다.

제 10 절 석션드레인 공법의 경제성 분석

본 연구에서 개발된 석션 드레인공법은 기존의 압밀 촉진 공법과 같이 연약지반에 연직 배수재를 타설하여 투수계수가 큰 연직 배수재를 통해 간극수의 배출을 통해 압밀을 촉진하는 공법이다. 그러나 기존의 연직배수재를 사용한 압밀 촉진공법은 모래의 다짐을 통해 상재하중을 증가시켜 준 반면, 석션드레인 공법은 진공펌프와 배수재 간 직접적인 연결을 통해 배수를 촉진시키는 공법으로서 시공방법의 차이가 있으므로 기존의 압밀 촉진 공법과 본 연구에서 수행된 석션드레인 공법의 현장시험 시공비를 시험시공 자료를 통하여 비교하여 경제성을 파악하고자 하였다.

현장 시험에서 사용된 부지의 면적은 1섹션당 20m×30m의 총 2섹션으로서, 1200m^2을 개량 면적으로 하였다. 본 연구에서 사용된 석션드레인 공법의 총 공사비용을 Table 3.10.1.1～Table 3.10.1.6에 나타내었다.

Table 3.10.1.1 배수재와 진공호스 구입 및 가공비용

항목	기본단위	단가(원)	요구수량	소계
이중코어 배수재	1m	650	2600m	1,600,000
나선원형 배수재	1m	550	2600m	1,400,000
석션 호스 배관 및 부속품				12,663,000
석션 커넥터				3,000,000
현장 배수재 접속 장치				12,000,000
배수재 커넥터 제작 비용	EA	10,000	500	5,000,000
합계	35,663,000			

Table 3.10.1.2 배수재 및 장비 설치 비용

항목	기본단위	단가	요구수량	소계
접지압 확보 성토비	1m^3	5,000원	300m^3	1,485,000
배수재 타설비	1일	9,500,000	2일	19,000,000
백호 및 장비 사용료		275,000		275,000
합계	20,760,000			

Table 3.10.1.3 진공펌프 작동 및 유지비용

항목	기본단위	단가	요구수량	소계
대형 진공 펌프	1EA	5,000,000	2EA	10,000,000
현장 추출 기기	1EA	3,000,000	2EA	6,000,000
현장 석션 가압 및 부속장치		11,500,000		11,500,000
유지비(유류비)		1,500,000		1,500,000
합계	29,000,000			

Table 3.10.1.4 전원 장치(고정비용)

항목	기본단위	단가	요구수량	소계
현장 전원 제어기		10,000,000		10,000,000
전기 인입선 및 케이블 장치		12,841,000		12,841,000
합계	22,841,000			

Table 3.10.1.5 지반조사 및 현장 계측 비용

항목	기본단위	단가	요구수량	항목소계
현장 데어터 로거	1EA	3,300,000	2EA	6,600,000
현장 데이터 계측 컴퓨터	1EA	3,000,000	1EA	3,000,000
현장 메인 서버		5,000,000		5,000,000
계측 기기 시스템		8,000,000		8,000,000
피조콘 조사 비용		1,100,000		1,100,000
합계	23,700,000			

Table 3.10.1.6 부대비용

항목	기본단위	단가	요구수량	소계
골재비용				600,000
현장 시공용 부직포				500,000
합계	1,100,000			

본 연구에서는 기존에 사용되어온 압밀촉진공법과 석션드레인 공법의 경제성을 비교하기 위해, Fig. 3.10.1.1과 같이 기존 압밀 촉진 공법의 개략적인 공사비용을

제시하였다. 이때, 기존의 압밀촉진공법과 석션드레인 공법을 정량적인 비교를 위해 원/m^2의 단위로 정규화 시켜 공사비를 산정하였으며, 각 공법의 세부 내역은 Table 3.10.1.7에 나타내었다. Table 3.10.1.7에 제시한 석션드레인 공법을 제외한 공법의 공사비는 2006 한국 물가정보를 토대로 산정한 금액이다.

공사비를 비교한 결과 석션드레인 공법은 기존에 사용되어온 진공압밀공법보다 약 3,000원/m^2 이상의 공사비 절감 효과를 가져 온 것으로 예상된다(10m 개량심도 가정 시). 또한 현재 가장 많이 사용되는 PBD 공법과 비교한 경우 역시 약 5,000원/m^2의 시공 단가의 차이가 나타남을 알 수 있었고, 갈수록 성토재의 수급과 토취장의 확보가 어려워질 것으로 예상되기 때문에 PBD 공법과의 시공 단가의 차이는 더욱 커질 것으로 예상된다. 또한 고정비용인 전원장치의 경우, 개량 부지가 넓어질수록 m^2 당 총 공사비를 감소시키는 요인으로 작용하기 때문에, 본 공법이 범용적으로 사용될수록 공사비는 낮아질 것으로 예상된다. PBD공법과 석션드레인공법의 20m×10m 지반에서 개략적인 공사 총액을 산출해보면, PBD공법 24,630,000원, 석션드레인공법 23,250,000원으로 나타났다.

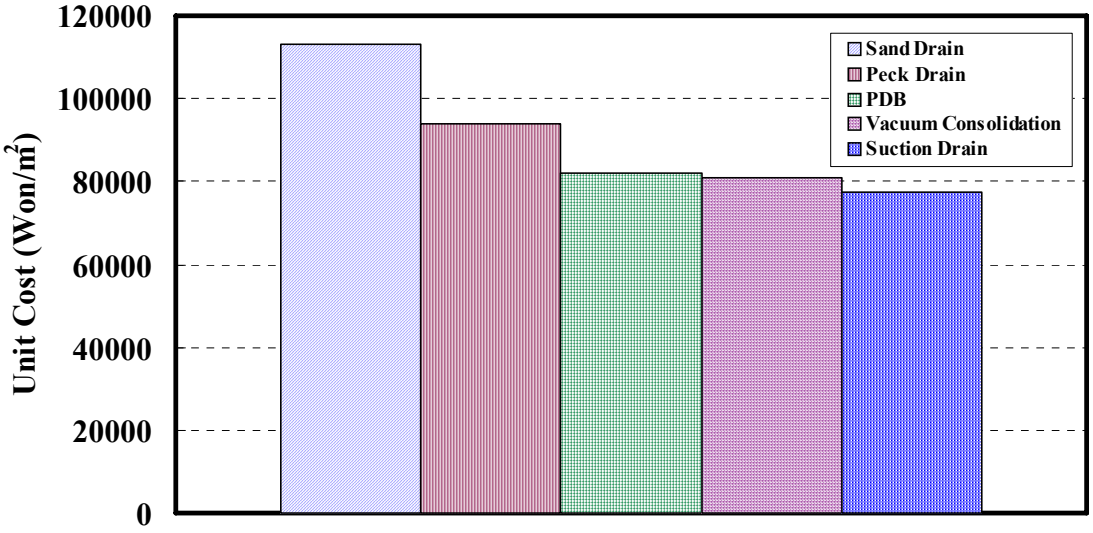


Fig. 3.10.1.1 기존공법과 석션드레인 공법의 개략공사비 비교

Table 3.10.1.7 기존공법과 석션드레인 공법의 개략공사비 비교(개량심도 10m 가정 시, 2006년 일위대가 기준 산정 공사비(OO사), 2006 한국물가정보)

공 법	개략 공사비 (원/m^2)	산출근거
샌드드레인	113,200	① (1.3×1.3)m^2당 1공 가정, 심도 1m당 총 7,001.2원/m^2 (케이싱 항타 및 인발 2,147.9원, 모래(구입,운반,투입) 2,340원, 콤퓨레샤 579.4원, 발전기 1,375.6원, 에어호스 1.6원, Leader 63.1원, Hopper 100.5월, Casing 132.1원, Skip Bucket 5.3원, 추가인건비 255.9원) ② 수평배수층 : 11,000원/m^2(양질의 모래 성토 1m) ③ 압밀성토 : 53,900원/m^2(성토재 마사토 가격은 모래가격의 70%, 7m(변동가능)성토) ①×10×0.69+②+③=113,200원/m^2
팩드레인	93,850	① (1.1×1.1)m^2당 1공 가정, 심도 1m당 총 3,488원/m^2 (케이싱 항타 및 인발 945.6원, 모래(구입,운반,투입) 573.9원, 공기압축기 288.1원, 발전기 699.8원, 에어호스 0.3원, Leader 19.7원, Hopper 38.6원, Pack 망사 357.0원, 추가인건비 504.7원) ② 수평배수층 : 11,000원/m^2(양질의 모래 성토 1m) ③ 압밀성토 : 53,900원/m^2(성토재 마사토 가격은 모래가격의 70%, 7m(변동가능)성토) ①×10×0.83+②+③=93,850원/m^2
PBD	82,100	① (1.0×1.0)m^2당 1공 가정, 심도 1m당 총 1,720원/m^2 (P.B.D 압입기 1,000원, P.B.D 자재 600원, 슈(앵커) 자재 60원, 추가인건비 57.5원) ② 수평배수층 : 11,000원/m^2(양질의 모래 성토 1m) ③ 압밀성토 : 53,900원/m^2(성토재 마사토 가격은 모래가격의 70%, 7m(변동가능)성토) ①×10+②+③=82,100원/m^2
진공압밀	80,966	① OO하수처리장 연약지반 개량공사(10m) - 진공압밀과 Dynamic Compaction 공법 동시사용 (부지 107,406m^2, 공사비 102억), 94,966원/m^2 ② 일반적인 Dynamic Compaction 공법의 개략공사비 : 14,000원/m^2 ①-②=80,966원/m^2
석션드레인	77,500	① 배수재와 진공호스 구입 및 가공 비용 : 16,000원/m^2 ② 배수재 및 장비 설치 비용 : 17,300원/m^2 ③ 진공펌프 작동 및 유지 비용 : 24,200원/m^2 ④ 부대비용 : 1,000원/m^2 ①+②+③+④=58,500원/m^2(고정비용 제외) - ⑤ ⑥ 전원 장치(고정비용) : 22,841,000원(본 연구의 경우, 20m×10m부지 19,000원/m^2 ⑤+⑥ = 77,500원/m^2(적용 부지 증가에 따라 m^2 당 단가는 감소됨)

Table 3.10.1.8은 기존의 연직배수공법과 석션드레인 공법을 VE(Value Engineering) 기법으로 비교하기 위하여 경제성, 시공성, 환경성, 유지관리, 내구성의 5가지 항목별로 등수에 따라 점수를 부여한 표이다. 각 항목은 20점 만점으로 총점 100점에 대한 부여점수로 각 공법을 비교하였다. 경제성의 경우, Table 3.10.1.7을 바탕으로 비율적으로 산정하였으며(샌드드레인의 경제성을 10(50%)으로 가정하고, 비율적으로 산정), 환경성은 인공 배수재의 사용으로 PBD공법, 진공압밀 공법, 석션드레인 공법을 낮게 부여하였다(14점부여). 그러나 유지관리 측면에서는 전단파괴 방지를 위한 성토속도의 조절 및 기밀시트의 품질 유지가 필요 없으며, 진공펌프의 관리만으로 비교적 유지관리가 간편한 석션드레인 공법을 비교적 높게(17점) 부여하였다. 또한 안정성 측면에서도 석션드레인 공법의 경우 주변지반의 융기를 발생시키지 않으며, 개량영역 외곽 지반에도 비교적 균등한 침하를 발생시키기 때문에 다른 공법보다 비교적 높은 점수를 부여하였다(20점).

Table 3.10.1.8 압밀촉진공법의 항목별 부여점수

구분	샌드드레인	팩드레인	PBD	진공압밀	석션드레인
경제성(20)	10	15	18	19	20
시공성(20)	14	13	20	16	17
환경성(20)	20	17	14	14	14
유지관리(20)	14	14	16	14	17
안정성(20)	17	17	18	17	20
총점(100)	75	76	86	80	88

Fig. 3.10.1.2는 각 항목에 대한 부여점수와 총점을 압밀촉진공법별로 나타낸 그래프이다. VE 기법을 이용하여 각 압밀촉진공법을 비교 분석한 결과 석션드레인공법이 총점 88점으로 가장 우수한 공법으로 나타났다.

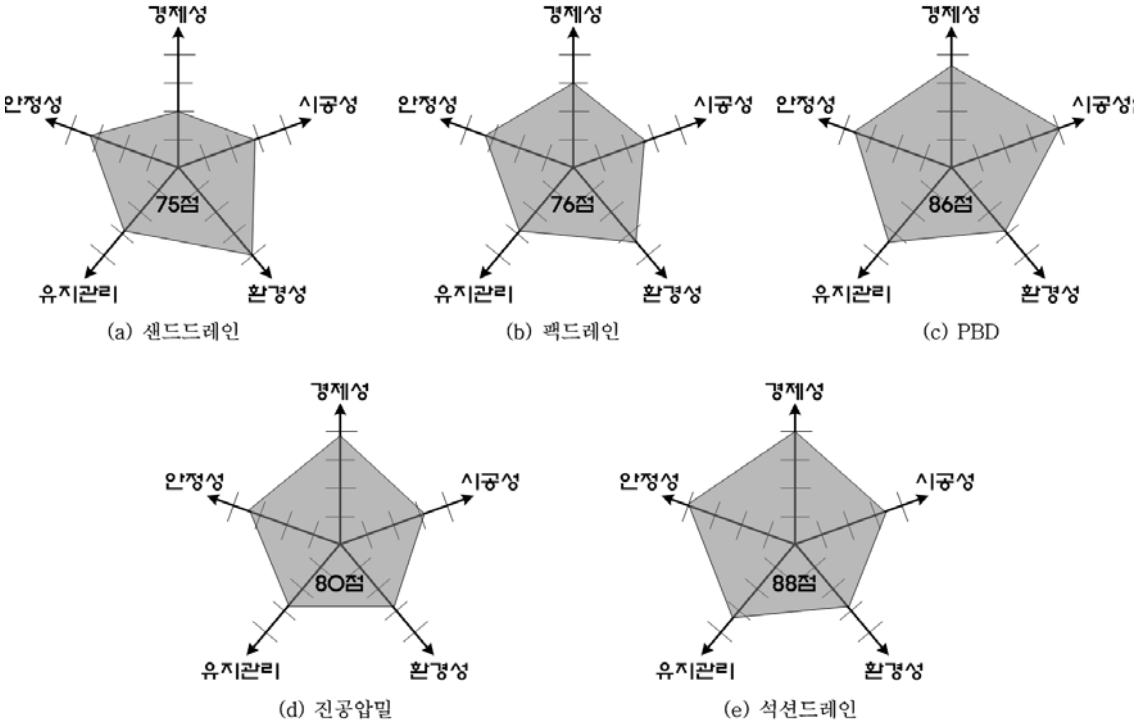


Fig. 3.10.1.2 VE 기법을 이용한 압밀촉진공법의 비교

제 11 절 석션드레인 공법의 설계 프로세스 개발

1. 일반사항

가. 목적

본 매뉴얼은 석션드레인공법에 관련된 일반적인 조사·설계·시공·품질관리·시공관리에 관한 사항을 규정함으로써 공법의 보급 및 발전을 도모하는 것을 목적으로 한다.

본 공법은 기존 압밀촉진 공법의 기술적 과제를 해결하고자 개발된 석션드레인공법(Suction Drain)의 시공 매뉴얼로서, 실제 지반에의 시공결과를 바탕으로 실적과 노하우를 정리하여 석션드레인공법의 설계나 시공에 종사하는 기술자에게 표준적인 지침을 제공하여 현장 지반 조건에 적합하게 시공되는 것을 도모하는 목적으로 작성되었다. 본 공법은 특허기술(등록번호 : 10-0679603, “연약지반내의 간극수를 추출하기 위한 석션드레인 배수재의 연결구조”, 등록번호 : 10-0679601, “초 연약지반내의 간극수를 배수하기 위한 석션드레인 공법”출원번호 : 10-2007-66708, “간척지에서의 석션드레인 제염장치 및 시공방법”, 출원번호 : 10-2007-66711, “석션드레인 공법의 공기와 간극수의 분리배출을 위한 집수탱크”, 출원번호 : 10-2007-66712, “석션드레인 공법용 원통형 배수재 및 제작방법”)인 석션드레인 공법에 있어서의, 특수한 재료·장치, 진공설비의 조립과 기밀성의 확보, 동태 관측, 개량지반의 품질평가, 품질관리 기준의 책정, 품질관리 목표, 성토의 안정 관리, 특이 지반의 특성 등에 관련된 사항을 포함한다.

나. 적용범위

본 매뉴얼의 적용에 있어 공법의 특징인 시스템화된 조사·설계·시공의 흐름을 충분히 이해하는 것이 중요하다.

자연 지반은 불균질하며 연약지반층에 존재하는 물리적 특성을 완전히 파악할 수 없는 경우가 대부분이다. 따라서 본 매뉴얼의 조사편은 설계에 필요한 지반조사를 수행하여 공법의 적용성을 평가하는 것에 중점을 두고 있다.

설계편에서는 국내 시험시공 데이터 및 국외(일본) 데이터를 근거로 설계 진공압 등의 표준치을 나타냈다. 일반적으로 본 공법의 정확한 수행을 위해서는 시공에 앞서 사전에 시험시공을 실시하는 것이 바람직하다. 그러나 공사 규모나 공기의 제약 등에 의해 시험시공을 하기 곤란한 경우가 많기 때문에 시공 중에 충분한 계측관리를 수행하여 현장 상황에 맞게 적절하게 대응해 가는 것이 중요하다

다. 적용지반

(1) 기존의 연약지반 대책공법에서는 그 공법의 지반에 대한 적용성에 대한 판단 잘못으로 인하여 충분한 개량 효과를 얻지 못하는 경우가 있었다. 석션드레인공법은 연약 지반 대책공법으로 그 적용성이 좋기 때문에 대부분의 지반에 적용이 가능하다. 그러나 지반이나 지하수의 상태에 따라서 일부에서 적용이 어려운 경우도 있기 때문에 공법의 적용시 경제성도 고려하면서 목적한 개량 효과를 얻을 수 있는 지반인지 여부에 대한 판단이 필요하다.

(2) 석션드레인 공법의 적용 시 지반이나 지하수 및 지반의 상태에 따라서 적용이 어려운 지역이 발생할 수 있다. 따라서 사전 조사나 시공시의 조사를 충분히 수행하여 그 적용성을 검토하는 것이 중요하다.

(1) 적용 가능한 지반

연약지반은 다양하고 지형 조건에 따라 그 특성이 다르기 때문에 석션드레인 공법은 모든 지반에 적용이 가능하지 않으며 지반의 분포 상태나 그 특징 혹은 지하수의 상태에 의해 적용이 어려운 경우도 있다. Table 3.11.1.1은 지형·지질 조건에 따라 구분한 연약지반의 침하와 안전성의 특징을 정리한 것이다. 석션드레인 공법은 고함수비, 고압축성의 지반에 특히 유효하며 균질한 해성점토 등에도 유효하다. 즉, 퇴적 연약층에 효과가 있다. 연약 지반의 일반적인 구분은 다음과 같다(한국도로공사, 1999).

- 고유기질토 : N치 ≦ 4, q_u ≦ 0.6kg/cm^2
- 점성토 : N 치 ≦6, q_u ≦ 1kg/cm^2

Table 3.11.1.1 연약지반 대책의 기술실적과 지형지질(일본실용연약지반대책기술총람편집위원회, 1993)

지반 지질			준설지반	자연지반					
				내륙형			임해형		
침하 패턴				천층형	이탄형(천층형)		심층형		
일반적 연약지반 대책공법의 경우	구조물 피해의 정도 (연약 지반·의 층두께 등)			신중하게 대응하면 없음(층후 10m 이하)	재하기간(방치기간)이 충분하면 기능면에서 문제가 되는 경우가 적다(층두께는 일반적으로 10m 이하)		10년 이상 장기간에 걸쳐서 기능 장애를 야기(하부 해성점토층에 의한 침하가 크다. 층두께 15~20m 이상)		
	침하특성		침하량이 크고, 압밀기간이 길다	성토후 6개월에 대략 수렴	성토 후 6개월로 침하는 수렴되는 경향		기능 확보의 난이도를 검토해, 유지관리로 대응가능		
	안정성		문제많음	비교적양호	신중한 완속단계시공 및 압성토, 지오그리드공법		양호	이탄형과 동일 (양호한 경우도 많다)	
	모식주상도	상부층 육성층 층두께 10m(이탄·유기질토·점토) 해발-5m전후			이탄단독	이탄+점토	이탄협재	상부모래층	모래층협재	연속
		중간사층								
		하부층 해성층(해성점토층) 장기침하가 큼 대책:유지관리 설계로 대응								
	지형과 침하 안정	델타성 후배습지						◎△	●△	●▼
		내륙성 후배습지		○△	●▼	◎▼	◎▼		●△	
		석호성습지			●▼	◎▼		◎△	●▼	●▼
		곡간습지			●▼	◎▼				●▼
		충적곡		○▼	●▼	◎▼				
		붕적곡		○△						
		준설지반	●▼							

주) ●◎○ : 침하 패턴·모식주상도 등과의 대응을 나타낸다.

● 침하량이 크다 ◎침하량이 약간 크다 ○침하량이 적다

▼ 안정에 문제가 있다 △ 안정에 문제가 적다

(2) 적용에 유의해야 하는 지반

석션드레인 공법은 고함수비, 고압축성의 지반에 특히 유용하며 균질한 해성점토에서 효과가 좋다. 그러나 Table 3.11.1.2에 나타낸바와 같이 감압에 의해 실링층 기밀 유지가 곤란하게 되는 폐기물·쓰레기·이물질 등이 혼입되어 있거나, 암거 및 배수 도랑 등이 존재하는 특이지반, 통기성이 현저하게 높은 모래질 지반에서는 기밀성 확보가 어려워지는 경우도 있다. 또한 경질, 중간층(N치 8~13 이상)이나 콘크리트 등이 있으면 연직 Drain의 타설이 곤란하게 된다. 그 때문에 사전조사나 시공시의 조사단계에서는 토층구성이나 매설물의 유무를 파악하고 협재한 모래층이나 하부 모래층의 투수성·피압상황, 중간층의 분포 등을 확인할 필요가 있다.

Table 3.11.1.2 석션드레인공법을 적용이 곤란한 지반

적용이 곤란한 지반	어려운 이유	대처법	지반구성
표층 부근의 특이지반	기밀성의 확보가 곤란	시공 결과에 따라 적절하게 대처	표층 부근에 폐기물·쓰레기·이물질이 혼입되어 있거나, 암거 배수 도랑이 있는 지반
투수성 지반	진공압의 유지가 곤란 (주변에의 지반 침하도 염려사항)	지수대책을 검토	층이 2~3m를 넘는 모래층, 자갈층 등의 투수성·통기성이 높은 지반
경질층	프라스틱 Drain 타설시 케이싱의 관입이 곤란	프리보링이나 워터제트 등의 보조공법의 병용	N치 8~13의 지층이나 폐기물, 매립물 등

2. 조사

가. 조사 일반

(1) 현장지반의 조사를 통해 계획단계, 시공시 및 시공 후에 적절한 조사를 실시하여 공법 적용성의 판정, 설계·시공에 필요한 기초자료의 수집, 개량지반의 평가 등을 행한다.
(2) “품질확인”은 원지반의 토성과 상태에 대응하여 실시하되 각 단계에서의 조사는 본 공법이 갖는 고품질·저가격·짧은 공기와 같은 특징을 살릴 수 있도록 수행한다.

(1) 개요

각 단계에서 조사의 기본적인 고려 사항이나 계획 입안은 발주자가 정하는 지침이나 기준을 따른다.

석션드레인공법을 설계할 때, 조사는 사전 조사, 시공시의 조사, 품질확인 조사로 구분하여 각 단계에서 적절하게 실시하는 것이 중요하다. 각 조사의 기본 방침과 조사·검토 항목을 Table 3.11.2.1, 그 흐름을 Fig. 3.11.2.1의 흐름도에 각각 나타냈다.

Table 3.11.2.1 각 단계별 기본방침 및 조사・시험항목

항목	사전조사	시공중 조사	품질확인조사
기본방침	석션드레인공법으로 특화한 설계·시공에 불가결한 지반정보를 구하고 공법의 적용성을 검토하는 것	시공에 불가결한 보완조사나 주변 환경대책에 요구되는 조사를 실시하는 것	지반 개량의 결과를 분명히 하고 아울러 공사목적 (시설이 요구하는 기능과 비교해 효과의 정도를 평가하는 것
조사 검토 사항	1) 지형, 구조물 등의 주변조건, 토층구성, 투수층 등 수리지질적 조건 2) 압밀침하량과 침하시간(연약층의 압밀 특성) 3) 설계·시공의 기초자료(연직 Drain 길이, 기밀층의 두께 등)	1) 배수종료 시점 2) 특이지반이나 지하수위의 확인 3) 중간 모래층이 존재하거나 투수성지반이 존재하는 경우 수위관측공을 설치	1) 개량지반의 물리·역학 특성 2) 장기 안정의 검토 3) 개량지반의 평가



Fig. 3.11.2.1 조사를 포함한 공법 전체의 진행 흐름도

(2) 사전 조사

사전 조사는 석션드레인공법의 적용시 설계·시공에 필수적으로 갖추어야 할 지반 정보를 얻는 것을 기본으로 한다. 석션드레인공법의 용도 및 그 목적에 따라 그 조사내용과 수량은 크게 달라질 수 있다. 또한 사전조사, 시공중 조사 및 시공후 조사에서 조사빈도는 달라질 수 있다.

석션드레인공법은 연약지반 해석 실시 후, 지반개량에 의한 대책공법의 2차 선정의 단계에서 선정되는 경우가 많지만, 실제로 조사과정에서는 초기의 1차 조사와 연약 지반 설계시의 2차 조사를 포함해 사전 조사를 위주로 하고, 일반적으로 2차 조사의 경우는 1차 조사를 보충하는 경우가 많다. 따라서 1차조사 회수를 늘려서 공법의 적용성을 명확히 파악해야 한다.

또한, 실링유지가 어려운 조건인 표층 부근에 폐기물·쓰레기·이물질이 혼입되어 있거나 암거, 배수층 등이 존재하는 특이지반이나 통기성이 현저하게 높은 모래지반, 경질 또는 중간층(N치 8~13 이상), 콘크리트 폐기물 등을 포함한 지반에서는 공법의 적용이 어려운 경우도 있기 때문에 이를 감안하여 그 적용성을 검토하여야 한다.

(3) 시공시의 조사

개량지반의 품질을 확인하기 위해서 시공시의 조사, 사전 조사 및 설계내용을 검토하여 연직 Drain의 타설심도, 특이지반이나 용수압의 확인, 정밀검토 등 시공에 불가결한 보충 조사를 필요에 맞게 실시한다. 또한 중간 모래층이 존재하거나 투수성지반에서는 환경 영향을 고려하여 수위관측공을 설치하는 것도 중요하다.

(4) 품질확인 조사

석션드레인공법은 연약지반의 압밀침하를 비교적 단기간에 종료시키는 것이 가능하고 개량 효과를 조기에 확인할 수 있는 특징을 가지고 있다. 본 공법에서의 사후조사는 품질확인조사라고 부른다. 품질확인조사는 석션드레인공법에 의한 지반개량의 결과를 파악하여 공사목적(구조물에 요구되는 기능)과 비교하고 효과의 정도를 평가하는 것을 그 목적으로 하고 있다. 또한, 재하기간중의 계측관리 등에 의해 소정의 개량품질을 만족하고 있는 것이 분명할 경우에는 품질확인 조사를 행하지 않아도 좋다. 단, 개량품질의 평가에 따라 각각의 구조물의 기능에 적합한 개량 효과를 얻을 수 없을 경우는 그 후의 시공이나 유지관리로 대처하는 방안을 수립하여야 한다.

나. 각종 조사 항목과 수량

각종 조사는 그 목적에 따라 방법이나 수량을 선정하여 계획에서 시공의 각 단계의 적절한 시기에 실시한다. 각 단계에서의 조사는 지형·지질이나 현지 상황 등에 대응해 적당하게 변경할 수 있다.

각 단계에서의 조사 항목과 조사 방법을 Table 3.11.2.2에 조사 방법과 그 목적 및 수량을 Table 3.11.2.3에 나타내었다.

(1) 기본 개념

조사에 지형도, 토지 이용도, 항공사진 등을 이용하여 시공 현장 및 주변의 지형을 판독하고 현지답사를 실시하여 하천 현황이나 토지의 이력, 근접 구조물의 상황을 상세하게 파악한다. 조사방법이나 조사지점의 선정 및 설계·시공 계획에서는 이 결과를 충분히 고려하여야 한다.

(2) 조사 수량

각 단계에서의 조사는 ① 개량 목적과 시공 조건 ② 기존 조사 자료의 신뢰성 ③ 층 구성의 복잡도 ④ 시험시공과 그 후의 시공 ⑤ 유사 지반에서의 시공 실적 등에 의해 달라질 수 있다. 품질 확인 조사의 수량은 기존 데이터 및 사전 조사 수량과 내용을 고려하여야 한다.

(3) 사전조사 결과에 의한 적용성 판정과 결과의 통계

사전 조사의 결과에 근거하여 석션드레인공법 채택 여부에 대한 검토를 실시한다. 사전 조사에 의한 토층 구성이 폐기물·쓰레기·지하 배수 도랑 등이 존재하는 특이 지반이나 투기성 지반, 경질인 중간층을 가지는 지반으로 구분되는 경우에는 기밀성을 확보기 어렵거나 연직 Drain의 타설이 곤란하게 된다. 그 때문에 보조공법 등의 대체 공법을 추가로 검토하여 사전조사 결과를 보고한다. 사전조사 결과의 정리

는 다음과 같은 항목에 대해 실시한다.

① 사전 조사 결과

·토층 구성(토질 단면도)

·지하수의 성질과 상태(피압수의 유무나 수질 시험의 결과 등), 지반의 공학적 성질

·토질 시험의 결과

② 사전 조사 결과에 의한 적용 지반의 판정 결과(경우에 따라 보조 공법 등 대책 공법의 검토 결과를 추가한다)

(4) 품질확인조사의 시기

품질확인조사의 실시 시기는 진공 구동장치를 정지한 후 진공압의 영향이 없어진 후(진공압에 의한 지반내의 간극수압이 회복된 후 : 대략 2주간~1개월 정도)에 실시하되, 침하나 간극수압의 경시변화를 기준으로서 설정한다.

Table 3.11.2.2 각 단계에서의 구체적인 조사 항목과 조사 방법

조사단계	조사 항목 \ 조사 방법		사운딩	시추조사	원위치시험			불교란시료채취	토질 시험										수질시험
									물리					역학					
					표준관입시험	수압측정	현장투수시험		밀도	함수비	입도	액소성한계	습윤밀도	일축압축	삼축압축CU	삼축압축UU	압밀		
사전조사	토질	토층 구성·분포의 파악	◎	◎	◎														
		사질토층의 확인, (특히 수평 방향)	◎	◎	◎														
		연약층 하부의 경사	◎	◎	◎														
		연약층의 물리·역학 특성 파악	◎	◎				◎	○	◎	○	○	○	◎	△	○	◎		
	지하수	지하수위		◎		△	△												
		사질토층 및 대수층 등의 투수성, 피압상황의 확인		◎	○	△	◎												
		수질		△			△												△
시공중조사	토질	토층 구성·분포의 상세한 파악	○	○	○														
		사질토층의 확인,	◎	◎	◎														
		연약층 하부의 경사	◎	◎	◎														
	사질토층 및 기저대수층 등의 투수성, 피압상황의 확인			○	○	△	○												
	주변에의 환경 영향(지하수위 관측공 설치)			○	○														
품질확인조사	침하층후·분포의 파악		◎	△	△														
	개량 후의 기본 물성치의 확인			△				△	△	◎	△	△	△	△					
	개량 후의 강도특성		◎	◎				△	△	◎	△	△	△	◎		△	△		
	개량 후의 압밀특성			○				△	△	○	△	△	△	△					
	개량 후의 변형특성		◎	○				△	△	○	△	△	△	○		△			
	연약층의 연속적인 강도 특성		◎	△				△		△			△	△		△			

주) ◎ 우선적으로 실시, ○ : 통상의 경우에 실시, △ 무·필요에 따라서 실시

Table 3.11.2.3 각 단계에서의 조사 방법과 그 목적

항목	사전 조사	시공 조사	품질 확인 조사
사운딩(CPT*1등)	개량 범위내의 토층의 초기강도를 파악	개량 범위내의 토층의 분포 상황과 개량 후의 강도 증가를 파악	개량 범위내의 토층의 분포 상황과 개량 후의 강도 증가를 파악
시추조사	토층 구성 및 지반내 모래의 확인 및 불교란 시료를 채취	토층 구성 및 모래층의 확인. 필요시 지하수위 관측공을 설치	지반의 토층 구성의 확인 및 불교란 시료를 채취하여 개량 후의 품질 평가·해석
표준 관입시험	원지반의 상세한 지질 확인 및 상대적 강도를 파악	원지반의 상세한 지질 확인 및 상대적인 강도를 파악	사전과 사후의 상대적인 강도를 확인하여 품질 평가·해석
불교란 시료채취	연약층의 역학적 특징을 파악	필요에 따라 실시	개량 후의 품질 평가·해석
수압시험, 현장 투수시험	대수층의 피압상황의 파악	필요에 따라 실시	필요에 따라 실시
공내수평재하시험	필요에 따라 실시	필요에 따라 실시	개량 후의 지반의 변형 특성을 확인
실내 토질 시험	원지반의 물리적·역학적 특성을 파악 진공재하시의 안정을 검토하는 경우에는 유효 응력 해석 평가를 하여야 하기 때문에 3축압축 시험은 압밀비배수 조건으로 실시	필요에 따라 실시	개량 후의 지반 물성치를 확인해, 품질 평가·해석의 기초 자료로 사용 개량한 점성토이 강도가 증가하여 단단해지므로 Sampling 시의 응력해방의 영향을 고려하여 강도 평가는 3축압축 시험의 비압밀비배수 조건 실시

*1) CPT는 전기식 정적 콘관입시험으로 실시한다.

3. 설계

가. 설계 일반

(1) 토질, 품질, 공사기간, 공사비 및 주변 환경 등의 제반 조건을 검토하여 채택 여부를 결정한다.
(2) 본 공법의 설계는 지반 조건이나 부지 등의 시공 조건을 고려하고 상부 구조물의 기능이 충분히 발휘되도록 계획한다.
(3) 본 공법의 설계에서는 진공을 이용한 지반개량공법과 관련하여 이론적으로 충분히 밝혀지지 있지 않은 부분도 있기 때문에 현 단계에서는 경험적인 설계 방법을 채용해, 계측관리에 의한 시공관리를 실시하는 것을 기본으로 한다.
(4) 압밀도(U)를 80% 이상으로 하는 것을 목표로 하여 진공재하 기간 및 단계진공압 조건을 설정하는 것을 기본으로 한다.
(5) 지형, 지질이나 주변 환경을 감안한 상태에서 주변 지반이나 구조물에 기능장해가 발생할 가능성이 있는지를 검토하여 장해가 미친다고 판단되는 경우에는 진공재하속도의 조절 등의 변위 경감 공법을 병용 한다.

(1) 토질, 품질, 공사기간, 공사비 및 주변 환경

석션드레인공법의 적용성을 검토하는 경우에는, 적용지반의 토질이나 요구되는 품질(강도, 잔류침하량 등), 진공재하정지 전후에 있어서의 설비의 설치 기간, 진공재하기간을 맞춘 공사기간, 공사비 등을 충분히 검토할 필요가 있다.

(2) 성토병용 설계

석션드레인공법만으로는 목표 침하량에 도달될 수 없을 경우, 성토재하공법과 석션드레인 공법을 병용하여 설계 한다.

(3) 상부 구조물의 기능

본 공법의 설계에서는 향후 시공될 상부 구조물의 기능을 감안하여 설계 하중, 잔류 침하량, 지반 강도, 안전율 및 성토속도 등의 설계 조건에 대해 검토해 각각의 구조물의 요구 기능에 맞는 설계 목표치나 관리 기준치를 설정할 필요가 있다.

(4) 경험적 설계

석션드레인공법은 현 시점에 있어 충분히 해명되어 있지 않은 부분도 있기 때문에 본 매뉴얼에서는 지금까지의 시험시공실적을 기반으로 한 경험적 방법을 바탕으로 설계를 실시하고 계측관리를 실시하는 것으로 품질을 확보하는 방법을 채택하고 있다.

(5) 주변 환경의 고려

주변에 구조물이 있는 경우에는, 구조물의 기능, 지반 조건이나 부지 등의 시공조건을 고려하여 대책공의 가부를 검토하는 것이 중요하다.

나. 시설 요구 성능의 설정

본 공법의 설계에서 대상으로 하는 구조물의 기능에 적합한 지반 강도, 잔류 침하량 및 안전율 등의 설계 목표치나 관리 기준치를 설정하고 이들을 만족하도록 설계 조건을 설정한다. 또 시공시에 설계 목표치나 관리 기준치를 만족하는지 여부를 확인할 수 있도록 계측관리 및 품질관리의 항목을 적절히 검토한다.

본 공법은 구조물의 요구 성능에 의해 진공재하기간, 단계진공압조건, 추가성토 등의 설계 조건을 바꿀 필요가 있지를 검토해 구조물의 요구 성능을 명확하게 하는 것이 중요하다. 따라서 구조물의 요구 성능에 맞는 관리 기준치를 설정하고 계측관리에 의한 시공관리를 적절히 실시하는 것이 중요하다.

Table 3.11.3.1 시설의 기능과 침하장해의 참고예

구조물		침하 장해와 유지관리의 가부			비고
		잔류 침하	부동 침하	유지관리	
철도		A	A	×	유지관리가 필요없도록 하여야 함
도로	유지 보수하기 쉽다(일반도로로)	D	C	○	보수 빈도를 고려
	유지 보수 곤란(고규격 도로)	C	B	△	
건축물의 기초		B	A	×	
택지용의 조성지		B	A	×	습지, 후배습지, 매적곡 등에서 주의
제방·호안		C	C	○	
수로·컬버트		B	A	△	
매립지		D	D	○	
가설 구조물		D	D	○	
그 외의 공공성의 높은 중요 구조물		A	A	×	

주) A : 허용 할 수 없는 것, B : 1회 정도의 보수 대응이 경제적인 것.
C : 수회 정도의 보수 대응이 경제적으로, 있는 것, D : 보수 빈도를 고려해, 어느 범위내에서 침하를 허용 할 수 있는 것, ○ : 실시 가능한 것, △ : 유지관리가가 가능하나 보수가 어려운 경우
× : 유지관리가 지극히 어렵고, 무익한 경우

다. 설계조건의 설정

(1) 설계지반정수의 설정

필요에 따라 구역마다 지반정수를 설정하여야 하며 설계에 필요한 토질 정수를 결정한다.

지반 모델, 토질 정수의 설정예를 Fig. 3.11.3.1에 나타내었다. 덧붙여 개량 범위내에 모래층이 있는 경우에는 그 층의 투수성을 파악하고 필요시에 대책을 검토하여야 한다.

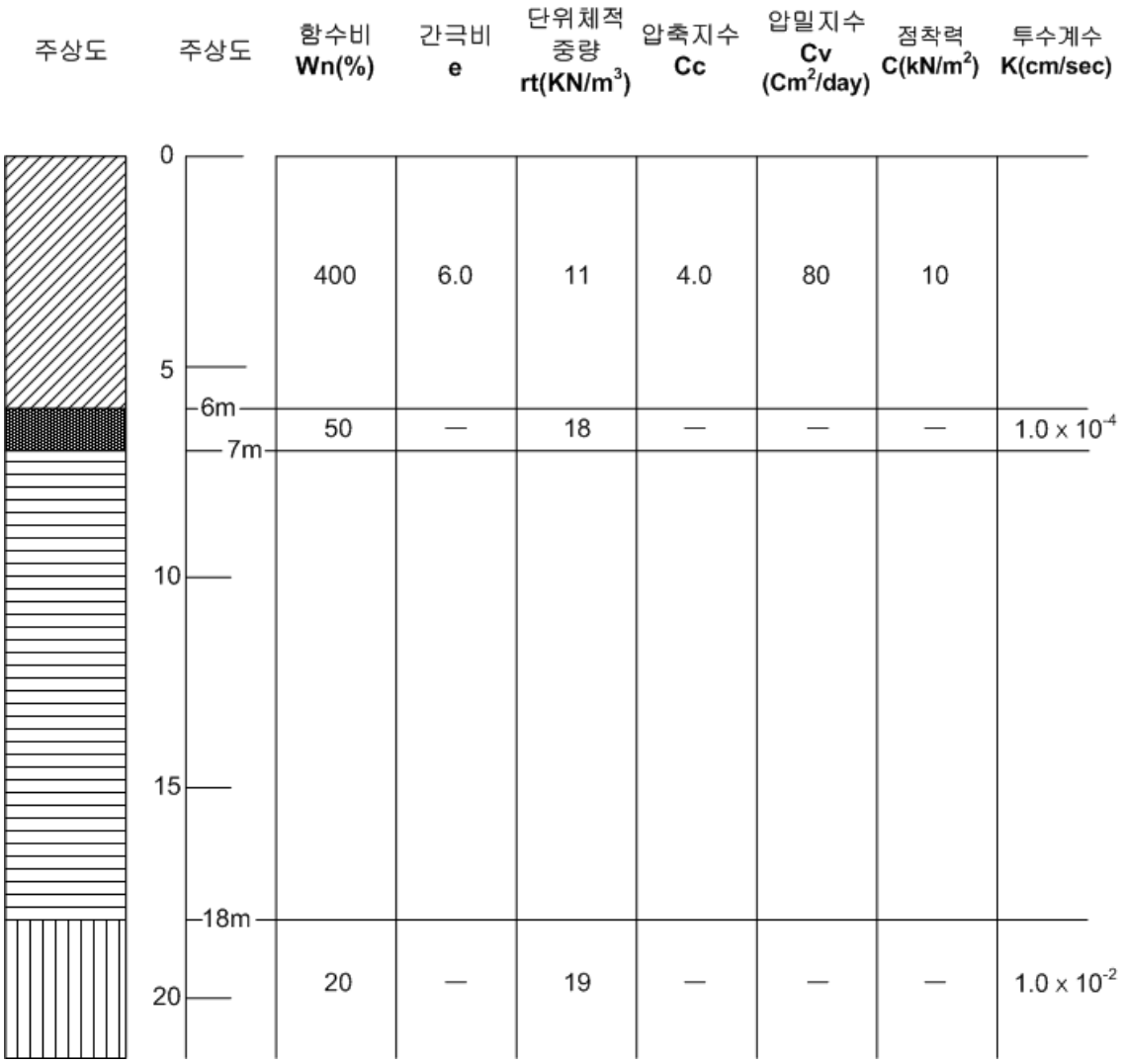


Fig. 3.11.3.1 지반 모델의 설정예

(2) 개량 면적의 설정

개량면적은 시공 조건(구조물의 기능과 형상, 시공 방법 및 근접 구조물의 유무) 등을 고려하여 설정한다. 진공 구동장치 1대 당 개량 가능한 면적을 진공펌프의 효율을 감안하여 계산하여 결정한다.

개량면적의 설정은 시설의 기능과 형상에 따라 결정된다. 개량구역의 단부는 강도 증가가 적기 때문에, 개량 단부까지 필요 강도가 규정되는 경우는 1~2m 정도의 여유를 가진 개량 면적을 설정하는 것이 중요하다.

개량면적의 결정 시, 작업에 사용될 진공펌프의 대수 및 용량의 결정후, 아래의 진공펌프 용량계산식을 이용하여 결정한다. 이때 배수재의 타설개수 및 진공호스의 적용길이 등을 정확히 파악하여 개량면적을 결정해야 한다.

$$S = Fs \times 2.303 \times (V/T) \times Log(P_1/P_2)$$

여기서, S : 진공펌프의 용량(m^3/min)

V : 드레인재, 배수재, 집수펌프 내 공기의 총량(m^3)

T : 진공도달시간(min)

P_1 : 초기진공도(일반적으로 대기압 1.0kgf/cm^2)

P_2 : 연약지반에 작용되는 진공압(본 연구의 경우, -0.8kgf/cm^2)

Fs : 안전율, 통상적으로 5를 사용함.

(3) 설계 진공재하압

진공재하시의 설계 하중은 특이 지반을 제외하고, -0.2kg/cm^2의 진공압에서 -0.8kg/cm^2의 진공압까지 각 단계 별 80%이상의 압밀도에 도달할때까지 단계적으로 재하한다. 특이 지반이란 실링유지가 어려운 폐기물, 쓰레기, 지하 배수 도랑 등이 존재하는 지반이나, 투기성이 현저하게 높은 사질지반, 용수량의 현저하게 많은 피압성 지반, 기밀성의 확보가 극히 곤란한 지반을 말한다.

설계 진공압의 설정은 목표 침하량에 따라 결정된다. 목표침하량 조건에 따라 진공압 단계를 변화 시키고, 석션드레인 전용 프로그램을 통해 단계 진공압 조건에 따른 개량도를 예측한다. 또한 각 단계 진공압 조건에서의 침하추이를 시공중 관측하여 압밀도를 판별한 후, 다음 단계의 진공압 재하시기를 결정한다.

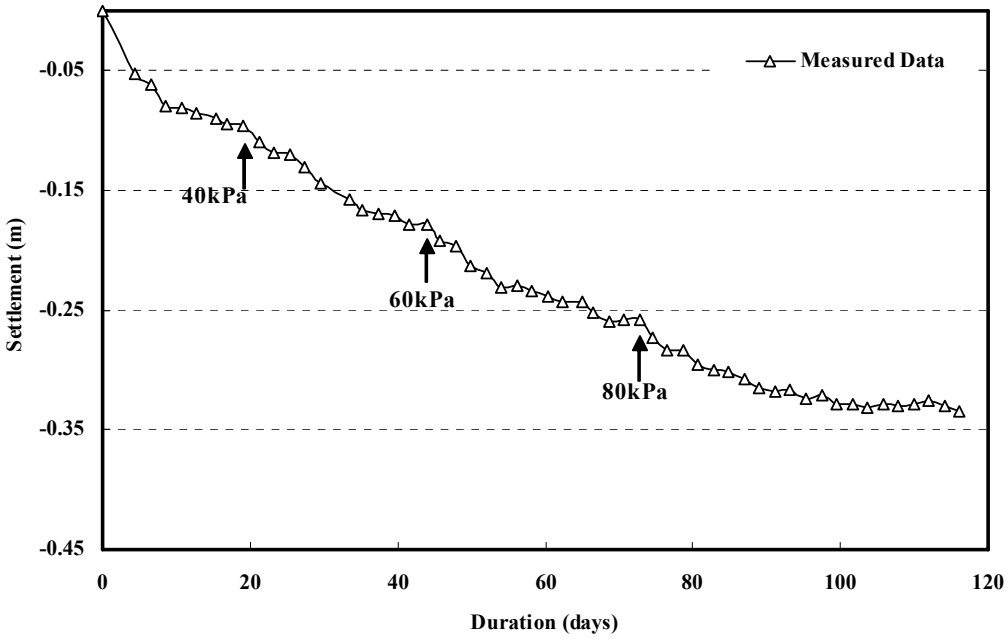


Fig. 3.11.3.2 단계 진공압 적용예

라. 연직 Drain의 설계

(1) 연직 Drain의 타설심도의 설정

연직 Drain의 타설심도는 대수층의 유무나 지반 조건을 고려하여 설계 대상 구조물의 기능이 요구하는 사양을 만족할 수 있도록 설정한다. 석션드레인 전용 해석 프로그램을 이용하여 타설심도에 따른 대상층의 총 침하량을 검토하여 최적의 경제적인 타설심도를 결정한다.

개량 심도는 개량 목적 및 지반 조건(연약 지반의 층두께, 투수층, 대수층의 경사, 경제성)등을 고려해 설정한다. 또한 Drain 하부에 압밀대상층이 존재하는 경우에는 잔류 침하가 소정의 값을 만족하는지 여부를 검토할 필요가 있다(Fig. 3.11.3.3). 또한 진공압의 심도에 따른 적용효율을 고려하여 심도에 따른 개량도를 평가한다(Fig. 3.11.3.4).

연약층의 하부에 모래층 등의 투수층이 분포하는 경우, 케이싱의 끝을 투수층에 정착되지 않게 하기 위하여 연직 Drain의 하단은 지반경사를 고려하여 모래층 위

로 1m정도에 정착시킨다.

습지형 또는 개량 대상 지반내에 얇은 층간 모래층이 존재하는 경우에는 Drain 하단에 존재하는 홍적 모래층이나 층간 모래층으로부터 지하수가 배수되어 주변지반에 침하가 발생할 우려가 있으므로 특히 주의가 필요하다.

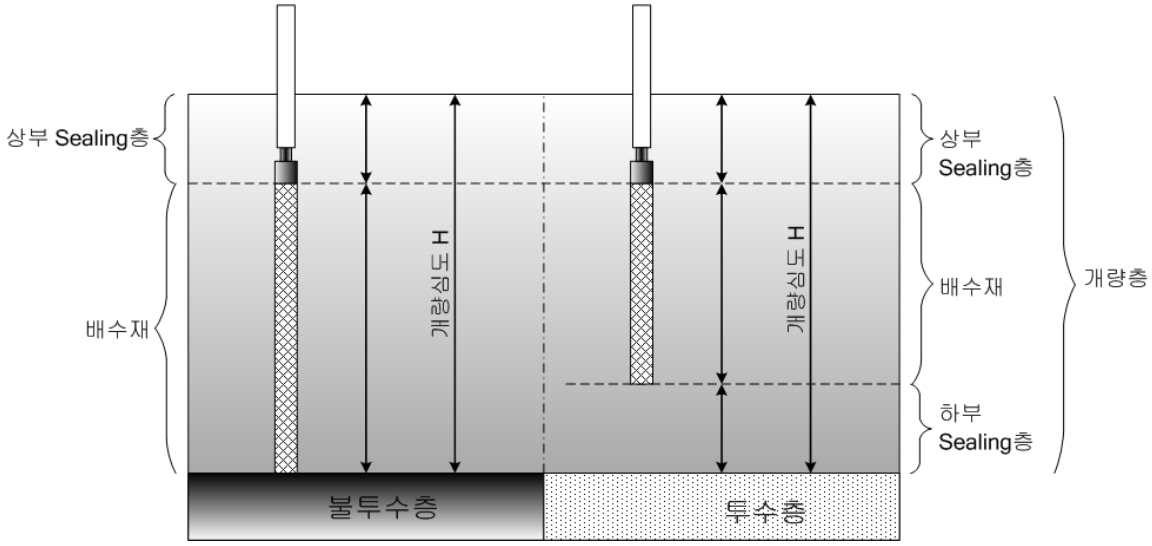


Fig. 3.11.3.3 지층 조건에 따른 연직 Drain 타설심도결정

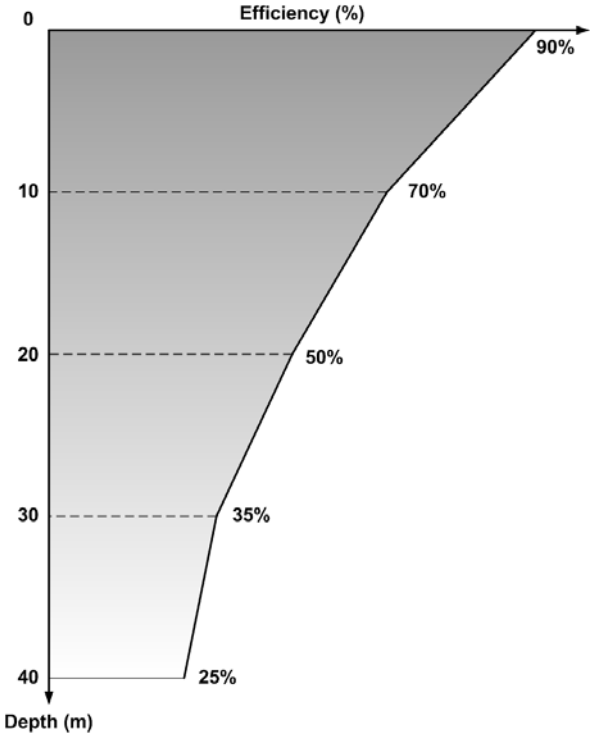


Fig. 3.11.3.4 심도에 따른 진공압 효율 분포

대심도 연약지반에 석션드레인 공법 적용시 석션드레인 전용 해석 프로그램을 이용한 수치해석을 수행하여 경제적인 드레인 타설심도를 결정한다. 대심도 연약지반의 경우 하부 지반은 자중에 의한 압밀의 영향을 크게 받으며, 배수재에 가해지는 진공압 또한 감소하기 때문에 타설심도가 깊어짐에 따라 개량도가 점차 감소하게 되므로 전체 심도에 걸쳐 배수재를 타설하는 것은 비경제적이다. 따라서 동일한 단면에 대해서 타설심도를 달리한 해석을 수행하여 최종침하량이 수렴하는 타설심도를 결정한다.

(2) Sealing 층 두께의 설정

석션드레인 공법에서 진공압을 유지시킬 수 있는 Sealing 두께는 약 1~2m가 일반적이다. 그러나, 토질조건이나 시공조건에 따라 Seal 층 두께를 산정할 필요가 있다고 판단될 경우, 다음 식을 이용한다. 또한 Sealing 층의 시간계수(T_v)는 진공압 개량기간 내의 Seal층에 대해서도 개량범위와 동일한 압밀도가 되도록 해야 한다.

$$H_2 = \sqrt{\frac{t_u \cdot C_v}{T_v}}$$

여기서, H_2 : Sealing 층 두께　　t_u : 진공압개량기간(day)

C_v : 압밀계수(= c_v)(m^2/day)　　T_v : 시간계수

(3) 배수재 층 두께의 산정

배수재 층의 두께는 개량 층의 두께에서 Sealing 층 두께를 빼서 구한다.

$H_1 = H - H_2$　　하부가 불투수층일 경우

$H_1 = H - 2H_2$　　하부가 투수층일 경우

여기서 H : 개량 층의 두께　　H_1 : 배수재 층의 두께

H_2 : Sealing 층 두께

(4) 연직 Drain의 타설간격의 설정

연직 Drain의 타설간격은 시공성 및 작업성을 고려하여 선정한다.

심도 10m의 연약지반 단면에 대한 수치해석을 수행한 결과 Fig. 3.11.3.5와 같이 드레인의 타설간격이 1.5m 이하가 될 경우 동일한 압밀도에 도달하는 시간이 점차 수렴하는 것을 알 수 있다. 따라서 시공성 및 작업성을 고려하여 간격을 결정한다.

Fig. 3.11.3.5 드레인 타설간격에 따른 동일한 압밀도(40%) 도달 시간

다만, 아래와 같은 조건의 경우에는 침하 검토를 하여 Drain 타설간격을 짧게 한다.

① 해성점토가 두껍게 퇴적하고 있는 경우, 중간 모래층이 존재하는 경우

마. 석션드레인 시스템의 설계

(1) 설계 순서

본 공법의 설계에서는 구조물의 요구 성능인 침하량, 소요 강도, 안전율 등의 설계 목표치나 기준치를 설정한 후 설계 조건의 정리를 실시해 연직 Drain의 검토, 압밀침하 검토등을 실시한다.

석션드레인 공법을 이용하여 개량목적에 맞는 설계를 위한 순서를 나타내면 다음과 같다.

1) 감량화(침하의 측면)

개량목적이 대상지반의 감량화인 경우, 조건에 부합되어야 할 주요인자로는 목표 감량화량(m^3) 및 시공기간이 있으며, 실제 설계 시에는 이러한 인자들과 사전조사를 통해 목표 감량화량(V) 및 목표 개량일 수(T_p)조건을 만족하는 진공압 개량기간(t_u) 및 배수재의 타설간격(d) 등을 결정한다.

감량화를 목적으로 하는 경우의 설계순서를 Fig. 3.11.3.6에 나타내었다. 지반조건 등 사전조사를 통해 목표 감량화량(목표 침하량)에 도달할 수 없다고 판단되어진 경우에는 별도의 대책(예, 성토재하를 병행)을 검토해야 한다.

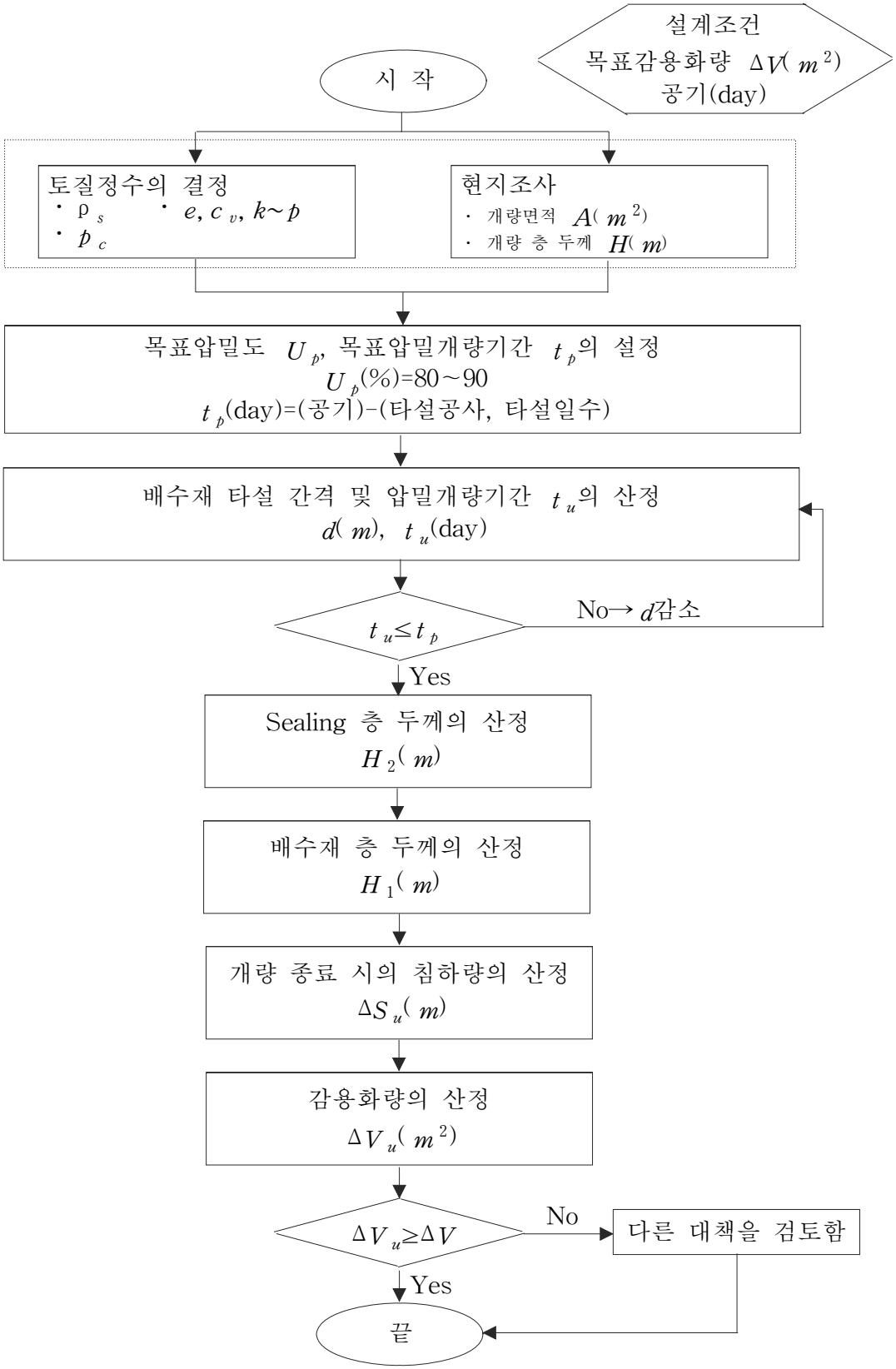


Fig. 3.11.3.6 석션드레인 공법을 이용한 감량화를 위한 설계 순서

2) 강도증가

지반의 지지력 증가가 개량 목적인 경우, 원호활동 등의 검토로부터 목표증가강도(C_u) 및 공기(t_u)가 확보될 수 있도록 배수재의 타설간격(d) 및 진공압을 이용한 개량기간(t_u) 등을 설정해야 한다. 강도증가를 목적으로 하는 경우의 설계순서를 Fig. 3.11.3.7에 나타내었다.

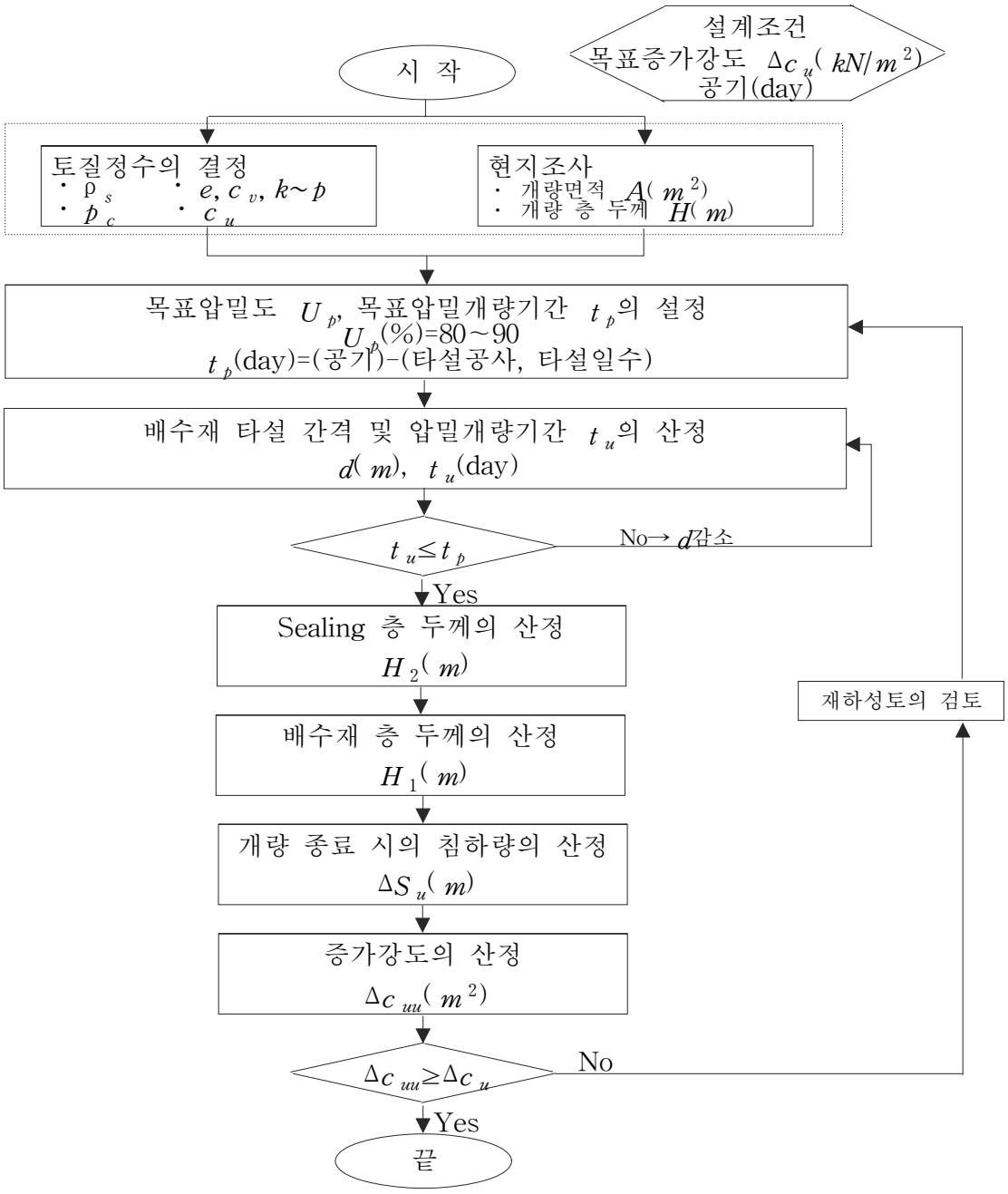


Fig. 3.11.3.7 석션드레인 공법을 이용한 강도증가를 위한 설계 순서

(2) 개량기간의 산정

개량구간의 침하속도는 Barron의 근사해로 구할 수 있으며, 배수재 타설간격(d)을 가정하고 아래제시하는 방법에 따라 산정될 수 있다. 배수재를 이용한 압밀개량의 경우 목표압밀도(U_p)는 일반적으로 80%로 설정한다.

1) 배수재의 환산직경(d_w)

일반적으로 배수재는 장방형단면을 갖기 때문에, 압밀계산 시에는 등가의 원형단면으로 환산하여 계산한다.

2)배수재의 유효직경(d_e)

일반적으로 배수재의 표준배치는 집수관과 배수호수 접합시의 작업성을 고려해 정방형 배치를 많이 사용한다. 정방형 배치라고 가정할 때, 배수구간을 동일면적의 등가유효원으로 환산하면 유효직경과 배수재의 평균간격과의 관계에는 다음과 같은 관계가 있다.

$d_e = 1.13\, d(m)$: 정방형 배치조건인 경우

여기서, d_e : 배수재의 유효직경(m)

d : 배수재의 타설간격(m)

3) 개량기간(t_{suc})의 산정

Barron의 압밀도 근사해를 이용하여 개량영역이 목표압밀도에 도달할 수 있는 시간을 계산할 수 있는데, 사전조사에서의 각층의 c_v가 두드러지게 다를 경우에는 개량목적에 따라 개량기간(t_{suc})의 산정 결정방법이 다르기 때문에 주의해야 한다. 진공압에 따른 개량기간을 산정하는 방법을 제시하면 다음과 같다.

$$t_u = \frac{d_e^2}{c_h} T_h$$

여기서, $T_h = -\frac{F(n)\ln(1-U_p/100)}{8}$, $F(n) = \frac{n^2}{n^2-1}\ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2}$,

$n = \frac{d_e}{d_w}$, t_u : 진공압개량기간(day), d_e : 배수재의 유효직경(m)

c_h : 압밀계수(= c_v)(m^2/day), T_h : 시간계수

U_p : 목표압밀도(%) d_w : 배수재의 환산직경(m)

(3) 침하량의 산정

1) 배수재 층의 최종 침하량

배수재 층의 최종침하량은 이하에서 나타낸 압축지수(C_c)를 이용한 방법에 의해 산정하며, 개량대상층이 두꺼운 경우에는 몇 개의 층으로 분할하여 침하량을 산정한다. 또한, 가해지는 각 단계별 진공압으로 인해 발생되는 침하량을 각각 산정하여 합산한다. 만약, 개량층의 토질특성이 크게 다르게 나타난 경우에는 여러층으로 나누어서 각각의 층에 대한 침하량을 산정하여 합산한다.

$$\Delta S_1 = \sum_i \Delta S_{1i} = \sum_i \frac{Cc}{1+e_{0i}} \cdot H_{1i} \cdot \log \frac{P_{0i} + \Delta P_{1i}}{P_{0i}} \quad (\mathrm{m})$$

$$\Delta S_2 = \sum_i \Delta S_{2i} = \sum_i \frac{Cc}{1+e_{1i}} \cdot H_{2i} \cdot \log \frac{P_{1i} + \Delta P_{2i}}{P_{1i}} \quad (\mathrm{m})$$

$$\vdots$$

$$\Delta S_n = \sum_i \Delta S_{ni} = \sum_i \frac{Cc}{1+e_{(n-1)i}} \cdot H_{ni} \cdot \log \frac{P_{(n-1)i} + \Delta P_{ni}}{P_{(n-1)i}} \quad (\mathrm{m})$$

Total $S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \cdots + \Delta S_n$ 정규압밀지반 (3.11.3.1)

$$\Delta S_1 = \sum_i \Delta S_{1i} = \sum_i \frac{Cc}{1+e_{0i}} \cdot H_{1i} \cdot \log \frac{P_{0i} + \Delta P_{1i}}{P_{ci}}$$

$$\Delta S_2 = \sum_i \Delta S_{2i} = \sum_i \frac{Cc}{1+e_{1i}} \cdot H_{2i} \cdot \log \frac{P_{1i} + \Delta P_{2i}}{P_{ci}} \quad (\mathrm{m})$$

$$\vdots$$

$$\Delta S_n = \sum_i \Delta S_{ni} = \sum_i \frac{Cc}{1+e_{(n-1)i}} \cdot H_{ni} \cdot \log \frac{P_{(n-1)i} + \Delta P_{ni}}{P_{ci}} \quad (\mathrm{m})$$

Total $S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \cdots + \Delta S_n$ 과압밀지반 (3.11.3.2)

여기서, ΔS_1, ΔS_2, ΔS_n : 각 진공압 단계에서의 배수재층 최종 침하량 (m)

C_C : 압축지수, P_{ci} : 압밀항복응력(kN/m^2)

e_{0i}, e_{1i} $e_{(n-1)i}$: 각 부납단계에서의 초기간극비

H_{1i}, H_{2i}, H_{ni} : 각 진공압단계에서의 배수재 층의 초기두께 (m)

P_{0i}, P_{1i}, $P_{(n-1)i}$: 각 진공압단계에서의 초기토피압 (kN/m^2)

ΔP_{1i}, ΔP_{2i}, ΔP_{ni} : 각 단계별 작용진공압 (kN/m^2)

2) Sealing 층의 최종침하량

상부 Sealing 층과 하부 Sealing 층의 최종침하량 모두 배수재 층의 최종 침하량과 동일한 C_C값으로 산정한다. 그러나 작용하는 진공압을 삼각형 분포로 가정하여 산출해야한다.

3) 목표 압밀도에 대한 최종 침하량

개량 종료시의 압밀도는 다음의 식 (3.11.3.3)과 같은 방법으로 산정한다.

$$\Delta S_u = \sum_i \Delta S_{1i} \cdot U_{pi}/100 + \sum_j \Delta S_{2j} \cdot U_{pj}/100 \quad (\mathrm{m}) \qquad (3.11.3.3)$$

여기서, ΔS_u : 개량 종료시의 침하량 (m)

ΔS_{1i} : 배수재층의 최종침하량 (m)

ΔS_{2j} : Sealing 층의 침하량 (m)

$U_{pi} \cdot U_{pj}$: 각 층의 압밀도 (%)

(4) 감량화량의 산정

개량에 따른 감량화량($\triangle V_u$)은 식(3.11.3.4)을 통해 구할 수 있다.

$$\triangle V_u = A \cdot \triangle S_u (m) \qquad (3.11.3.4)$$

여기서, A : 개량대상면적(m^3)

$\triangle S_u$: 개량종료시의 침하량(m)

(5) 개량층의 강도증가량 산정

개량후의 지반강도 산정방법은 원지반에 존재하는 강도와 개량을 통한 강도증가치를 더하여 산정할 수 있다. 개량에 따른 증가강도는 작용진공압과 강도증가율(C_u/p)을 이용하여 식 (3.11.3.5)에 따라 산정할 수 있다.

$$\triangle C_{uu} = C_u/p \cdot \triangle p \cdot U_p/100 \, (kN/m^2) \qquad (3.11.3.5)$$

여기서, $\triangle C_{uu}$: 증가된 강도 (kN/m^2),

C_u/p : 강도증가율 (=0.25~0.35)

$\triangle p$: 작용진공압 (kN/m^2), U_p : 목표압밀도

이때, 상부Sealing 층 부분의 증가강도에 대해서는 표층을 $C_u = 0$으로 하부부분은 직선분포로 가정한다(Fig. 3.11.3.8). 단 표층의 안정 등의 사항을 고려할 때, 이 부분이 큰 영향을 미칠 경우에는 별도의 검토를 한다.

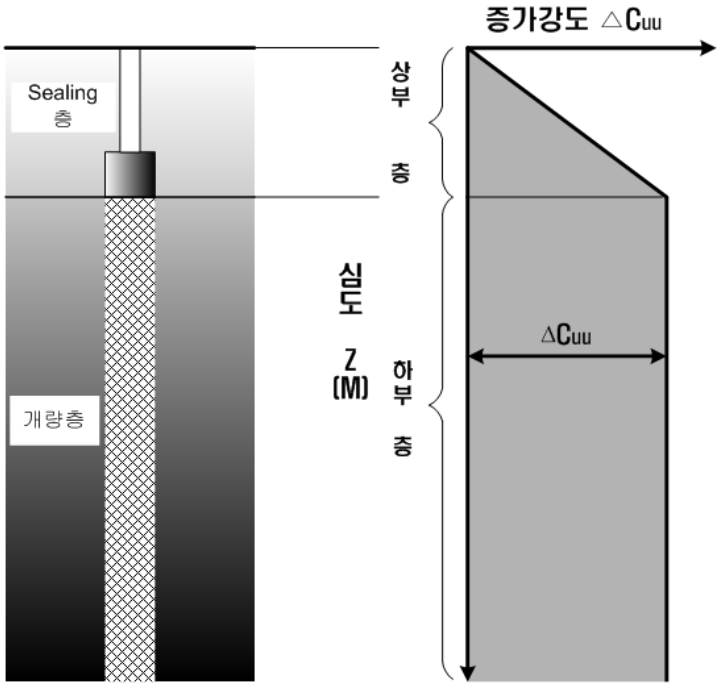


Fig. 3.11.3.8 개량에 따른 증가하중

바. 주변 지반에의 영향 검토

(1) 검토 순서

본 공법을 설계할 때에는 주변 지반이나 주변 구조물 등에 기능 장해가 발생할 수 있는 가능성을 검토하여 장해를 끼친다고 판단되었을 경우에는 보조공법등의 대책을 수립하여야 한다.

본 공법은 진공압을 이용한 탈수에 의해 연약 지반의 압밀침하를 촉진시키는 공법이기 때문에 통상 주변 지반에는 수축 침하 등의 영향이 발생한다. 중간 모래층이 협재하는 경우에는 중간 모래층을 통해서 주변 지반의 수위가 저하되어 변형이 비교적 넓은 범위에 이를 가능성도 있으므로 주의가 필요하다. 또한, 시공 조건 등에 따라서는 주변 지반에 횡방향 변형의 경향이 발생하는 경우도 있다. 따라서 본 공법의 설계에서는 종래 공법과 같이 근접 시공에 관한 검토를 실시하여 주변 지반 등에 영향이 문제가 되는 경우에는 변형 경감공 등의 대책공법에 대해 검토한다.

(2) 주변 지반에의 영향 예측

본 공법에 따른 주변 지반에의 영향에 대해서는 현재까지의 계측 사례나 수치해석 결과 등을 통해 그 범위나 크기를 예측하고 변형경감공의 필요성 등에 대해서 판단한다.

주변 지반에의 영향의 예측은 현재까지의 계측사례 등을 통해 그 영향 범위나 크기를 종합적으로 판단한다. 주변 지반의 변형예측에는 FEM 등의 수치 해석 수법의 적용도 시도되고 있지만, 해석에 필요한 지반정수 등이 사전에 충분히 파악되지 못하는 경우가 많아 수치 해석으로는 변형을 정확하게 예측하는 것이 어려운 경우도 많다. 따라서 시공간 발생된 계측데이터와 수치해석결과를 병행하여 대책을 수립한다.

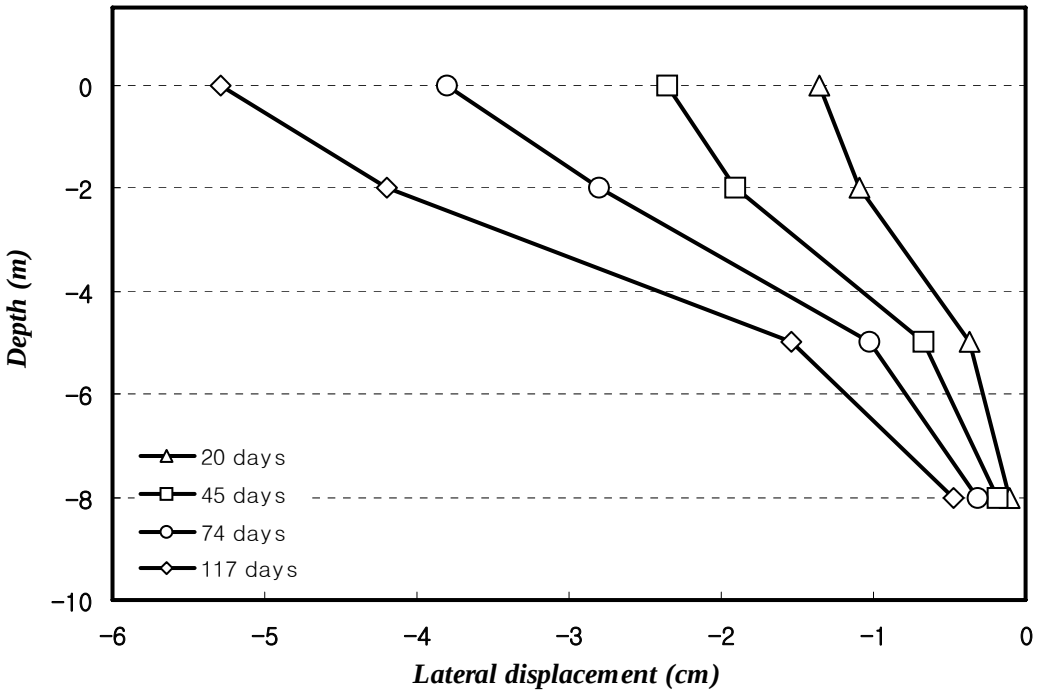


Fig. 3.11.3.9 실측예

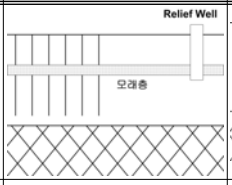
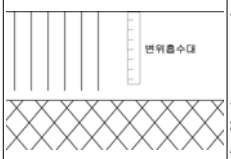
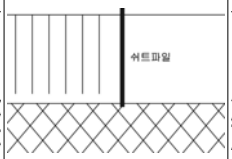
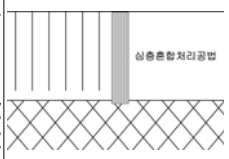
(3) 변형경감공의 설계

사전 검토로 주변 지반의 변형이나 지하수위의 저하 등에 의해 근접 구조물 등에 기능 장해가 발생할 수 있다고 판단되는 경우에는 보조 공법(변형경감공)을 병용하여 변형을 억제하는 대책을 강구하여야 한다. 변형경감공은 지반조건, 시공조건, 주변에 미치는 영향 등을 충분히 고려한 후 가장 목적에 적합하고 경제적인 공법을 선택한다. 변형경감공의 선정에서는 고려해야 할 여러 조건을 적절히 고려하여 FEM 해석 등을 실시해 지반 거동을 파악하는 것도 효과적이다.

시험시공 계측되고, FEM해석을 통해 예측된 수평변위거동은 일반적으로 연직변위량에 비해 매우 작다. 그러나 연약층이 두껍게 퇴적한 경사지반 등에서는 측방변위가 커지는 경우가 있다. 또, 중간 모래층 등 투수성이 높은 층이 분포하는 경우에는 개량 영역내에 진공압을 작용시킴으로서 모래층 내의 수두가 광범위하게 저하하여 광역적인 침하를 유발시킬 가능성이 우려된다.

이러한 주변 지반 변위에 의해 주변 구조물 등에 기능 장해를 일으킬 위험성이 있는 경우에는 보조공법을 병용하여 변형대책을 강구하여야 한다. 보조공법은 지반조건이나 시공조건, 주변에 미치는 영향 등을 충분히 고려한 후, 가장 효과적이며 경제적인 공법을 선택하여야 한다. Table 3.11.3.2는 주변 지반의 변형이나 지하수위의 저하를 억제하는 보조 공법의 예를 나타낸다.

Table 3.11.3.2 보조 공법(변형경감)의 예

변장 경감공	Relief 웰 공법	변위 흡수대	쉬트파일 공법	심층혼합처리 공법
공법 개요도				
비고	우물로 물을 공급하여 진공압에 의한 지하수위 저하의 영향의 확장을 억제한다.	오가 굴착 등에 의해 미리 지반을 느슨하게 하여 변위를 흡수한다.	연약층의 두께가 두꺼우면 지반과 함께 쉬트파일이 변형하기 쉽다.	심층 혼합 처리 공법의 시공시에는 지반의 변형에 주의한다. 고화재에 의한 지하수 오염 등에도 주의한다.

사. 환경 영향 검토

(1) 수질

본 공법을 계획할 때에는 연약 지반으로부터 배출된 간극수의 방류구를 확보하여야 하며 배출수가 배수 기준에 적합한지 여부를 사전에 확인해 둘 필요가 있다.

석션드레인공법은 감압에 의해 연약 지반으로부터 간극수를 강제로 배출하는 공법이며, 중간 모래층 및 협재 모래층이 존재하지 않으면 침하 체적만큼의 물이 배출된다. 따라서 배출된 물의 방류구를 확보하여야 하며 또한 배출수의 수질이 관련 기준에 적합한지 여부를 사전에 확인해 둘 필요가 있다. 시공중에는 배수된 물의 탁도, 부유물질(SS) 관리를 실시하여야 한다. 시공 조건에 따라 탁수 처리의 필요성이 있는 경우에는 적절한 탁수 처리를 강구할 필요가 있다.

(2) 소음

본 공법은 소음이 비교적 적은 공법이지만, 주변 환경조건을 감안하여 소음에 대한 대책이 필요한 경우에는 적절한 대책을 강구여야 한다.

시공 구역에 민가가 근접하고 있는 경우에는 민가로부터 가능한 한 멀어진 위치에 진공 구동장치를 설치하는 것이 좋다.

(3) 주변 지하수

본 공법을 계획할 때에는 주변 지하수의 이용 상황을 파악하여야 하며 영향이 염려되는 경우에는 대책을 검토하여 시행하여야 한다.

석션드레인 공법을 계획할 때에는 개량 구역에 근접해 가옥이 있으며 시추 주상도로부터 대수층을 명확하게 확인할 수 있는 경우에는 주변 지하수의 이용 상황을 파악하여야 하며 영향이 염려되는 경우에는 차수대의 축조, Relief 웰, Recharging 등의 대책을 실시하여야 한다.

4. 품질관리의 계획

가. 품질관리의 내용

품질관리의 내용에는, 현지 계측에 근거하는 시공중의 품질관리와 원위치 시험, 실내 시험 등에 기초를 두는 시공 후의 품질관리가 있다.

(1) 시공중 품질관리

현장 계측에 근거하는 시공 중의 품질관리의 주요 항목은 설계 진공재하압 이상의 압력이 소정의 기간에 걸쳐 재하되고 있는지를 확인하는 것이다. 예를 들면, 특이 지반에서 설계 진공재하압을 확보하지 못하거나 설계 목표치를 만족할 수 없을 가능성이 있는 경우에는 성토의 추가, 진공재하기간의 연장등의 대책을 강구하여야 한다. 게다가 해당지역에서의 시험 공사나 파일럿 시공 등의 유사 공사에 근거한 관리 기준이 분명한 경우를 제외하고는 침하 관리 및 주변에의 영향 관리 등을 실시하여야 한다.

(2) 시공 후의 품질관리

시방서 등에 명기되어 있는 경우에는, 진공재하정지 후에 품질 확인 조사를 실시하여 구조물이 요구하는 성능의 가능여부를 확인하여야 한다.

석션드레인공법은 진공재하의 개시·정지를 즉시에 실시할 수 있기 때문에 설계 목표치에 이르지 않은 것이 품질 확인 조사 시에 판명되었을 경우에도 진공압의 재재하로 신속하게 개량을 계속할 수 있다.

또한, 조사시에 진공재하압이 소산하고 있지 않는 경우에는 정확한 조사 결과를 얻을 수 없는 경우가 있으므로, 조사는 진공재하정지 후의 수압의 회복이나 리바운드의 수렴을 확인하고 나서 실시한다. 조사 시기는 진공재하정지 후부터 대체로 2주간부터 1개월 사이에 실시하는 것이 타당하다.

나. 계측 관리 계획

본 공법에서는 정상적으로 실시되는 운전 관리 외에, 해당지역에서의 시험 시공이나 파일럿 시공 등 유사 공사에 근거하는 관리 기준이 분명한 경우를 제외하고 침하 관리 및 주변에의 영향 관리등을 위해, 적절한 계측 관리를 계획해야 한다.

(1) 기본 사항

본 공법에서는 시설의 요구 품질이나 공사의 목적을 감안하여 Table 3.11.4.1에 나타낸 바와 같은 계측 관리 계획을 적절히 수행하여야 한다. 덧붙여 시공시의 거동을 파악하기 위해서 행해지는 시험 공사나 파일럿 공사에서는 개량 면적을 고려하여 계측 관리의 계획을 수립해야 한다.

석션드레인 공법의 계측관리는 크게 나누어 운전 관리와 동태 관측으로 나눌 수 있다. 운전 관리는, 본 공법의 특징인 진공재하압, 진공 설비의 가동 상황 등 정상적인 점검 관리를 실시하는 것이다. 동태 관측은 주변에의 영향관리, 침하 관리(진공재하 정지의 판단) 등 구조물의 요구 품질이나 공사의 목적에 따라 적절히 실시한다. 각종 계기와 이용 목적을 Table 3.11.4.2 계측 관리 항목과 계측 빈도를 Table 3.11.4.3에 나타내었다.

Table 3.11.4.1 석션드레인공법의 계측 관리 항목

석션드레인 공법의 계측 관리	운전 관리(정상 관리)	
	동태 관측	침하 관리(진공재하의 정지 판단)
		주변에의 영향 관리

(2) 계측기기 배치의 유의점

간극수압계는 이하의 토질 특성에 유의하여야 하며 가급적 각층의 중앙부에 설치하는 것이 좋다.

①과잉간극수압의 소산이 느려 강도 증가가 늦고, 잔류 침하가 생기기 쉬운 연약층(압밀계수 Cv가 작은 유기질 점토나 두꺼운 점토층 등)
②소성 유동이 크고 높은 과잉간극수압이 발생하기 쉬운 고유기질토층(피트층)
③침하량이 많은 연약층

간극 수압계는 전기식으로 하고 감압에 의한 유리 가스의 영향을 피하기 위해 공기 침수치 2kg/cm^2 정도의 세라믹 필터를 갖춘 것을 이용하여야 하며 수압부는 탈기수로 채워야 한다.

층별침하계는 잔류 침하량이 주요한 품질관리 목표가 되는 경우에는 침하 특성에 의해 고유기질토층(피트층)·유기질점토층·상부 점토층·하부 점토층 등과 같이 연약층을 구분한 위에 침하량의 큰 주된 연약층의 표면에 있어서의 침하를 측정할 수 있도록 설치하는 것이 좋다. 아울러 간극수압계, 층별 침하계의 설치는 단일층이 10m 이상이 되는 경우에는 5m 마다 1 개소 이상 설치하는 것이 바람직하다.

Table 3.11.4.2 각종 계기와 이용 목적

계기의 명칭	이용 목적			비고
	운전 관리	침하 관리	주변에의 영향 관리	
압력계	◎	-	-	정상 관리 계측으로서 전블록으로 적용
진공압계	◎	-	-	
지표면침하계	◎	◎	-	
유량계	◎	-	-	
온도계	◎	-	-	
침하판	-	◎	-	
층별 침하계	-	◎	-	시험 공사, 파일럿 시공으로 다용
지표면변위말뚝	-	-	◎	
지중 변위계	-	-	◎	지중내 변위가 탁월한 경우에 사용
간극수압계	-	◎	-	시험 공사, 파일럿 시공으로 다용
지하수위 관측공	-	-	○	지하수위 저하의 영향이 큰 경우에 사용
@:빈도가 높다				

Table 3.11.4.3 계측 관리 항목 및 계측 빈도

계측 관리 항목		계측 기기	계측 단위	관측 빈도
운전 관리 용 계측	진공압(진공 구동장치)	진공압계	1개/구동장치	1회/1일
	진공압(배수재내)	진공압계	2개/개량면적	자동 관리(연속)
	지표면침하	수성식 침하계	2개/개량면적	
	배수량	유량계	1개/구동장치	
	배수 온도	온도계	1개/구동장치	
동태 관측	지표면침하	침하판	3~4개소/개량면적	1회/1일
	층별 침하	층별 침하계	1 개소/개량면적	1회/1~3 일
	간극 수압	간극 수압계	수개소/개량면적	자동 관리(연속)
	지중 변위	지중 변위계	2개소/개량면적	1회/1~3일
	지표면의 수평·연직 변위	지표면변위말뚝	필요수/측선	1회/1~3일
	주변의 지하수위	수위관측공	수개소/개량면적	1회/1일

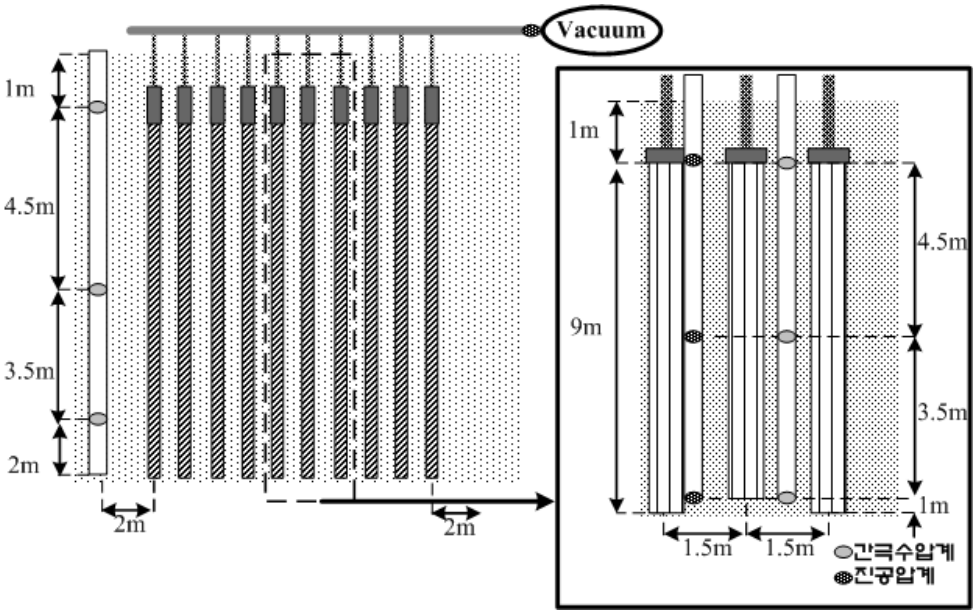
(3) 침하 관리를 위한 계측 계획

설계 목표치에 잔류 침하량이 규정되고 있는 경우에는, 부의 과잉 간극 수압의 소산 상황 및 침하 상황을 압밀대상층 마다 계측 하는 것을 기본으로 한다.

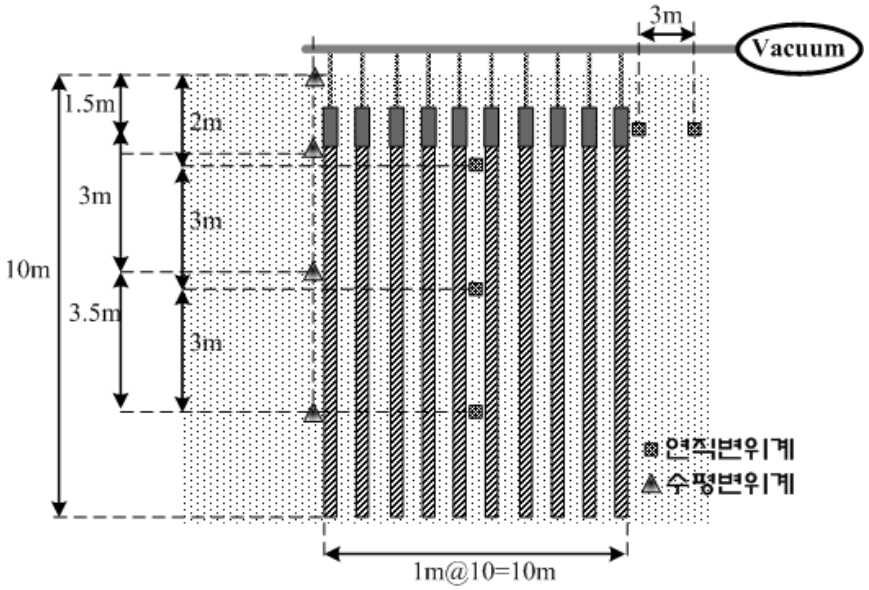
주변에의 영향이 염려되는 경우에는 주변에의 영향 관리를 실시해, 장해가 미친다고 판단되었을 경우에는 변형 경감공을 실시한다.

석션드레인공법은, 수개월의 단기간에, 목표 침하량에 도달될 수 있는 특징이 있다. 잔류 침하량을 경감시키기 위해서는, 압밀대상층 마다 간극 수압이 개량전의 간극수압에 비해 저하해 있는 것을 확인하는 것이 중요하고, 층별 침하 상황과 과잉 간극 수압의 소산 상황을 파악하면서 진공재하의 정지시기를 판단하는 것을 기본으로 하고 있다. 특히 압축 특성이 큰 압밀대상층(유기질점토나 예민비의 높은 점토)이 존재하는 경우에는 각층의 침하 상황을 파악하는 것이 중요하다.

주변지반의 영향을 검토하기 위한 동태 관측 항목으로서는 지표면의 수평·연직 변위, 지중 변위 및 주변 지하수위 등이 있으며, 주변구조물의 기능을 고려하여 동태 관측 항목을 결정한다.



(a) 간극수압계, 진공압계



(b) 변위계(연직, 수평)

Fig. 3.11.4.1 계측 기기 배치예

다. 운전 관리

설계 진공재하압을 유지·관리하기 위해서 자동 계측 장치에 의해 운전 관리(정상 관리)를 실시한다.

운전 관리(정상 관리)는 본 공법의 특징인 진공압의 경시적인 재하상황을 파악하기 위해서 자동 계측 장치에 의해 정상적으로 행해지는 것이다. 계측 항목은, 진공 구동장치 및 적용 배수재 내의 진공압, 지표면침하, 배수량, 배수 온도등이 된다.
각 계측 항목의 개요와 관리상의 취급 방법은 이하와 같다.

진공압 : 진공 구동장치 및 적용배수재내에 진공압을 계측하여 설계 진공재하압의 유지·관리에 노력한다. 설계 진공압을 유지할 수 없는 경우, 그 원인이 진공구동장치에 있는지 아니면 기밀층의 누기와 같은 시공상의 요인에 의한 것인지 등을 판단하는 데이터가 된다.

지표면침하 : 지표면침하는 진공압의 변화를 반영하고 있어, 수압식 침하계를 이용해 개량체의 침하 상황을 실시간으로 확인하는 것으로써 설계 진공재하압의 유지·관리가 적절히 행해지고 있는 것을 검증하는 데이터이다.

배수량 : 개량 면적으로부터의 배수량에 대해 매 분 유량과 누가 유량의 자동 계측을 실시한다. 일반적으로 배수량은 진공 구동장치의 가동 직후에 많으며 그 후, 지반의 압밀의 진행에 따라 감소하지만 배수량에 경시적인 감소 경향이 안정되지 않는 경우에는 주변으로부터의 누수의 유무를 판단하는 데이터가 된다.

배수 온도 : 개량 면적으로부터 배출되는 물의 온도를 자동으로 계측한다. 일반적으로 배수된 물은 지하수의 온도를 나타내지만, 기온에 따라 변화하는 경우 등에는, 배수량의 데이터와 아울러 주변으로부터의 표면수(연못이나 하천)의 유입 유무를 판단하는 데이터가 된다.

라. 침하 관리

석션드레인공법의 침하 관리는, 침하의 진행 상황 및 단계진공압에 의해 발생한 과잉 간극수압의 소산 상황에 근거한 해석을 실시해, 진공재하의 정지시기 및, 잔류 침하의 수습 시기의 검토를 파악하기 위해 실시한다. 또한 검토 결과에 의해, 당초 예측보다 시공 기간이 늘어난다고 판단되었을 경우에는, 필요한 대응책의 검토를 실시한다.

본 공법은 경험적인 기법을 기본으로 침하에 관한 검토를 실시해, 동태 관측에 의해 품질을 확보한다.

침하의 수렴은, 관측 데이터를 기초로 쌍곡선법에 따라 예측한다. 또한, 쌍곡선법의 기준일은, 각 진공압단계 별 첫 시작을 기준으로 한다.

과잉간극수압의 소산은, 진공재하전의 정수압을 기준으로 한 간극수압의 경시 변화로부터 판단한다. 이 때, 간극수압계와 연직 Drain와의 위치 관계나 계기의 침하 등이 복합적으로 측정치에 영향을 준다고 예상되는 것에 대하여 현시점에서는 고려하고 있지 않다.

사전에 예측한 방치 기간에 대해서, 침하의 수습 지연이나 과잉간극수압이 잔류하고 있는 경우에는, 진공재하기간의 연장이나 서차지(surcharge)성토의 추가 등의 책을 검토한다.

마. 주변에의 영향 관리

석션드레인공법 시공시 주변 지반의 변형을 계측 하여 주변 지반(구조물)에 유해한 영향이 발생되지 않게 관리하는 것을 목적으로 한다

석션드레인 공법 시공시 주변 지반의 영향 관리는, 다음의 항목에 중점을 두는 것으로 한다.

·진공압 재하로 인한 주변 지반의 끌어당김

·방치 기간중의 끌어당김에 의한 침하 사이에 존재하는 모래층의 수위 저하

주변 지반에의 영향은, 지표면변위말뚝과 지중 변위계를 기본으로 해, 경시 변화도등을 작성해 관리를 실시한다.

수위 저하는 진공재하개시 후부터 비교적 단기간으로 발생하는 것으로부터, 진공압을 서서히 상승시키면서 수위 관측우물의 거동에 주시해 수위 저하가 발생했을 경우에는 진공재하를 중지하고 대책을 협의한다.

동태 관측 결과로부터 주변 구조물의 허용치를 넘는 것 같은 변형이 예측되는 경우에는, 변형 경감공의 검토를 실시한다.

바. 진공재하의 정지

진공재하의 정지는, 동태 관측 결과나 품질 확인 조사 결과를 근거로 해 설계 목표치의 달성도나 시설 요구 성능을 감안한 다음 판단한다.

진공재하의 정지는 설계 목표치의 달성도나 시설 요구 성능을 감안한 다음 판단할 필요가 있으며, 대책 목적에 의해서도 정지 판단 기준이 다르다. 또, 진공재하정지시에 있어서의 과잉간극수압의 거동이나 리바운드 상황으로부터도, 개량 효과를 판정할 수 있는 것으로부터 진공재하를 일시적으로 정지시켜, 정지 후의 거동도 관측을 하고, 최종적으로 진공재하를 정지시킬지 어떨지의 판단을 실시하는 것이 중요하다.

사. 변형 거동 예측

연약층이 두껍고, 장기 침하나 부등 침하가 시설 기능에 큰 영향을 줄 가능성이 있는 경우에는, 지반 조사를 충분히 한 다음 석션드레인 전용 해석 프로그램에 의한 변형 거동 예측을 실시하는 것이 유효하다.

장기 침하나 부등 침하등이 시설 기능에 큰 영향을 줄 경우에는, 진공압재하속도의 설정, 진공재하의 정지시기 등 중요한 기술적 판단이 필요하다.

또한 시공시의 관리치를 어느 정도로 설정하는지, 관리치를 넘는 것 같은 경우의 대책 수법의 선정 등, 신중한 검토가 필요하게 된다. 이러한 경우, 충분한 지반 조

사에 근거한 적절한 지반 정수의 설정을 실시한 다음, 석션드레인 전용 해석 프로그램을 이용한 해석에 의해 거동 예측을 검증하여, 시공시의 관리치를 설정해 두는 것이 유효하다. 해석 결과의 타당성등을 확인하면서 적절한 시공을 실시하기 위해서도, 동태 관측을 충분히 실시할 필요가 있다.

5. 설계 세목

가. 연직 Drain

모래는 연직 Drain타설기의 Trafficability의 확보를 주된 목적으로 하며, 층두께는 50cm를 표준으로 한다. 연직 Drain재는 석션드레인공법에 적절한 재료를 사용해야 한다. 또한 연직 Drain재의 배치는 설계 계산에 근거해, 개량 대상 지역에 적절히 배치한다.

(1) 모래

모래는 연직 Drain타설 등, Trafficability의 확보를 목적으로 사용된다. 모래에는, 석션호스의 부설, 석션커넥터의 접합, 진공재하시의 기밀성 보관 유지 등에 장해가 되지 않는 재료를 사용한다.

표층부가 연약한 지반에서는, 모래의 두께가 균일하게 유지되도록, 시트를 병용한다. 시트를 이용하는 경우의 모래층은 50 cm를 표준으로 한다. 모래가 두꺼우면, 단부 처리의 시공성이 저하된다.

(2) 연직 Drain

연직 Drain재의 선정에 대해서는, 고진공에 대해도 충분한 통수성이 확보되는 원형 및 판형 플라스틱 보드 Drain재를 선택한다.

연직 Drain의 배치는 시공성을 고려해, 정방형의 등간격 배치를 표준으로 한다.

나. 진공 설비공

지표의 진공 설비공은 집수탱크, 진공펌프, 석션호스의 설치 부설등이 있다. 이러한 설비는, 지반내에 고진공압을 작용시키기 위해서 특히 중요한 설비이기 때문에, 현장시험시공실적을 참고로 적절한 설계를 실시한다.

(1) 석션호스의 부설

높은 진공압아래에서 안정된 배수를 실시하기 위해, 석션호스는 지반의 침하나 변형에 잘 저항하도록 충분한 강도를 가진 재료를 선택한다. 일반적으로는 석션호스는 진공압으로 인한 변형에 잘 견질 수 있도록 철심이 내제되어 있는 호스를 사용한다.

(2) 집수탱크의 설치

집수탱크는, 예상되는 침하 형상을 고려한 다음 효율적으로 배수로 위치에서 개량지반내에 매설한다. 집수탱크는 원칙적으로 탱크내에 수중 펌프를 내장한다. 배치의 상세한 것에 대하여는 지반 조건·시공 조건·개량 심도·구동장치 운전 기간등을 고려한 경험적 판단을 필요로 하므로 시공 단계에서도 연직 Drain 타설 결과 등을 고려해 재검토하는 것이 바람직하다.

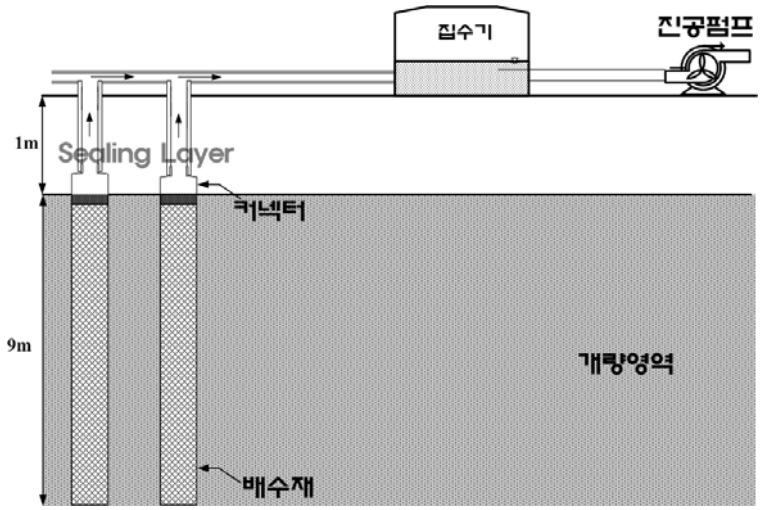


Fig. 3.11.5.1 집수탱크시스템의 구조

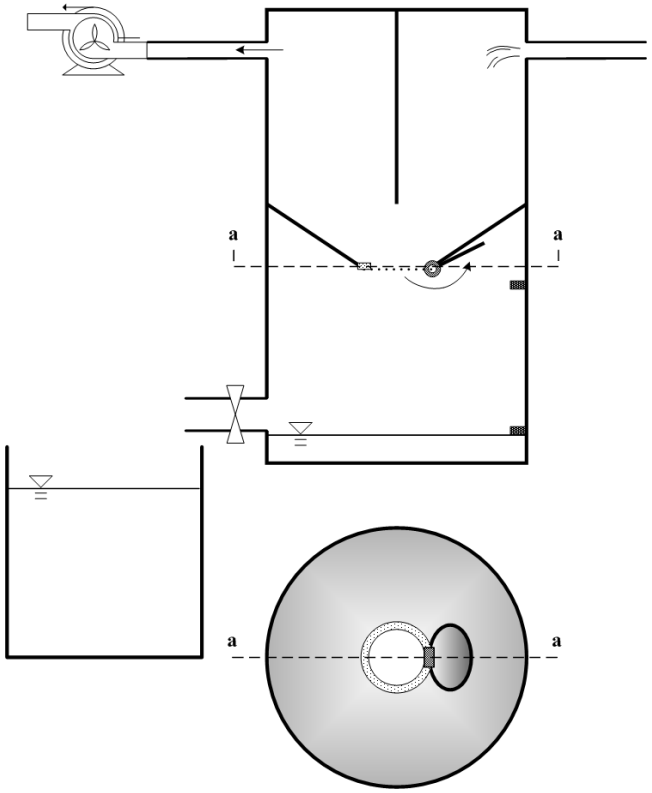


Fig. 3.11.5.2 집수탱크의 구조

(3) 석션커넥터의 설계

석션커넥터는 크게 판형 배수재용과 원형배수재용으로 나뉠 수 있다.

판형 배수재의 커넥터는 배수재의 관입 이후 지반의 불확실성에 의한 탈착이나 휨 변형의 방지를 위해서 우레탄 소재의 연성 재질로 제작한다. 커넥터의 상부에는 석션호스의 연결을 위해 호스의 내경과 동일한 유출구를 제작하고, 하부는 판형 배수재가 삽입될 수 있도록 속이 빈 직사각형 형태로 제작한다.

나선코어 원형 배수재를 사용하여 시공하는 경우 실내 제작과정에서 타설 깊이에 따라 Sealing Connector의 효과를 낼 수 있도록, 배수재 상부에는 배수구멍을 뚫리지 않은 무공 상태로 제작한다. 또한 무공배수재와 유공배수재, 그리고 배수호스를 열융착 방법으로 공장에서 롤 형식으로 제작하여 판형배수재와 같이 현장에서 직접 절단하여 배수재의 타입이 손쉽고 빠르게 진행될 수 있도록 한다.

다. 진공재하공

진공 구동장치는 각 개량 목표지반의 크기를 고려하여 설정한다. 진공 구동장치를 본가동시키기 전의 점검·준비로서 조정 운전을 3일정도 시운전한다. 진공재하기간은, 각 진공압 단계 별 압밀도 80%이상에 도달되었을 때까지로 설정한다.

(1) 진공구동장치의 결정

요구되는 펌프의 용량의 계산을 통해 실제 시공 시 소요되는 펌프의 대수를 산정한다. 이때 배수재 및 석션호스의 길이 및 내부 면적으로 고려하여 진공구동장치의 용량을 결정한다.

Table 3.11.5.1 진공펌프 용량 계산 예

(1개의 Section의 경우 = 10m ×20m×30m, 직경 3cm 원형배수재의 경우)

배수재의 면적(cm^2) - 직경 3cm	배수재의 총 예상 소요 길이(cm) 260본 × 10m	배수재의 총 용량(cm^3)-①
7.1	260,000	1,837,831
배수호스 내경 면적(cm^2, 내경 ϕ20)	내경 ϕ20배수호스의 총 예상 소요 길이(cm)	내경 ϕ20 배수호스의 총 용량(cm^3)-②
3.14	13,000	40,840
배수호스 내경 면적(cm^2, 내경 ϕ30)	내경 ϕ30배수호스의 총 예상 소요 길이(cm)	내경 ϕ30 배수호스의 총 용량(cm^3)-③
7.1	260,000	1,837,831
진공압이 걸리기 위해 소요되는 시간(min) - T - ⑤	안전율 - Fs - ⑥	집수통의 용량(cm^3), 500L-④
1	5	500,000
초기진공도 - P1(kgf/cm^2) - ⑦	적용진공도 - P1(kgf/cm^2) - ⑧	드레인재, 배수재, 집수펌프 내 공기의 총량(m^3)-①+②+③=④
1.0	0.8	4,216,504
요구되는 총 진공펌프의 용량(⑥×2.303×(④/⑤)×log(⑦/⑧)		**4.70m^3/min**

(2) 진공재하기간의 설정

진공재하기간의 설정은, 개량지반내에 계속적으로 진공압을 작용시키기 위한 진공 구동장치의 운전 기간을 결정하는 것이다. 진공재하기간은 설계에 의한 계산치(시간-침하 관계) 및 경험치를 참고에 결정할 수 있다. 그러나, 지반의 불균형등의 영향에 의해, 당초 상정한 진공재하기간내에 설계의 목표치를 만족할 수 없는 경우에는, 동태 관측 결과에 의한 판단에 근거해, 진공재하기간의 연장을 하는 일도 있다.

라. 품질관리의 계획

품질관리의 내용에는, 현지 계측에 근거하는 시공중의 품질관리와 원위치 시험, 실내 시험 등에 기초를 두는 시공 후의 품질관리가 있다. 품질관리의 계획은 시설의 요구 품질이나 공사의 목적을 감안해 적절히 계획해야 한다. 시공중의 품질관리의 하나인 운전 관리는, 진공재하압의 경시적인 재하상황을 파악하기 위해서 행해지는 것이다. 설계 단계에서의 품질관리의 계획은, 시공시에 품질관리 하는 항목(설계 관리치)을 정해 그 계측의 내용을 결정하고, 완성시의 품질 확인 조사의 내용에 대해 적절히 계획 한다.

현지 계측에 근거하는 시공중의 품질관리의 계획은 동태 관측 계획을 포함해, 요구 품질이나 공사의 목적을 감안해 적절히 계획한다. 또, 시공 후의 품질관리의 계획은 각종 조사의 항목, 수량과 그 내용의 항을 참고에 상세를 계획한다.

마. 설계도·사양

설계한 내용을 설계도 및 설계 사양으로서 명확하게 제시해야 한다. 또, 지반 개량의 품질관리에 관한 방침을 명시해야 한다.

(1) 표준적인 설계도면

설계도면은 지반 개량 범위를 나타내는 평면도, 횡단도, 배수 설비의 표준적인 구조 배치를 나타내는 표준 구조도를 작성한다. 평면 계획에서는, 주변 지반의 지표수의 배수로, 지하 배수 시설, 지반의 경사, 토층의 분포 등, 진공 설비의 계획에 영향을 주는 주변 상황을 고려해 설계 계획을 실시한다. 또, 주변 변형에 대한 변장 경감공에 대해서도, 필요에 따라서 평면도에 명기한다.

(2) 상세도

지반 개량의 설계에 대해서는, 설계시에 지반 상황이 충분히 파악되는 것을 적는다. 이로 인해 설계 단계에서는 개량 목적을 명확하게 해, 그 달성 기법을 제안해, 예산을 확정한다.

연직 Drain 배치도 : 연직 Drain 배치를 나타내는 도면에서, 타설위치, 타설갯수·타설심도가 명기된 도면, 타설심도가 변화하는 경우는 지역설정계획 평면을 나타낸다.

바. 설계 수량 정리

설계도에 근거해 수량을 일람표에 정리한다. 수량 단위는, 적산 자료를 참고에 적절한 내용의 것으로 한다. 또, 동태 관측 및 품질관리에 관한 조사·해석 계획에 대해서도 수량을 정리한다.

(1) 본체 공사의 수량 항목

a) 준비공

시공 면적을 확보하기 위한 정지면적, 샌드, 매트, 토목 시트등의 수량을 계상

b) 연직 Drain타설공

Drain 타설기의 선정, 타설갯수, 타설심도, 연직 Drain재 수량을 계상

c) 진공 설비공

지표의 배수 설비에 대해 수량을 계상한다. 구체적으로는 석션호스 부설, 집수탱크 설치, 석션 커넥터 부설을 계상한다.

d) 진공재하공

진공 구동장치 및 사용료 적산 품목의 진공재하기간(운전 가동 날짜)을 계상한다. 진공재하기간은, 조정 운전 기간을 포함하는 것으로 해, 각 블록의 진공재하기간(날짜)을 산출한다.

e) 운전 관리공

정상 계측 관리 기기의 설치에 관련되는 계측기기(센서)의 수량 및 사용 기간 날짜를 계상한다. 덧붙여 진공재하정지 후의 정상 계측 관리 기기의 사용에 대해서는 별도 동력원을 확보한다. Table 3.11.5.2에 수량일람표를 나타내었다.

Table 3.11.5.2 수량 일람표(예)

공종	항목	규격	단위
1. 사전조사	토질조사시험	- 압밀특성 조사 - 지반 내 초기 강도 조사	식
2. 타설준비	부지정리		m3
	타설기 적재를 위한 Sand 포설	두께(m) D(50cm 이하로 설정)	m3
3. 연직드레인 타설	Drain 타설기	타설깊이/주행방식	기
	타설개수 (심도별)	타설깊이(m), L	
	연직드레인	원형배수재, 판형배수재	m
	선단앵커	앵커 플레이트 등	EA
4. 진공시스템	배수재 Core 형상에 따른 커넥터	원형, 판형 커넥터	EA
	배수재 Core 형상에 따른 석션호스	Φ30mm, Φ20mm	m
	진공펌프	통상형/방음형(개량면적에 따른 대수 결정)	대
	집수탱크	500L	EA
	계측관리장치	센서 설치 포함	EA
	진공압 조절장치	단계진공압 조절용	EA
5. 진공재하공	진공구동기기운전기간	4.5m^3/min	일
	배수펌프(집수탱크 배수용)		대
	동력가동기간	상온 380V	대
6. 운전관리계측시스템	계측관리장치	데이터로거, 컴퓨터	대
	진공압계	배수재 내, 지반 내 심도 별 부설 (계측범위 : -1~3.5kg/cm^2)	EA
	간극수압계	지반 내 심도 별 부설 (계측범위 : 0~3.5kg/cm^2)	EA
	침하계	지반 내 심도 별 부설 (계측범위 : 0~10m)	EA
	수평변위계	지반 내 심도 별 부설 (계측범위 : 0~10°)	EA
	유량계	배수량 체크	EA

사. 대조표(설계)

Table 3.11.5.3 설계 체크표(예)

No	항목	주요내용	제시 자료	체크		비고
				해당 대상	조사	
1	기본 조건	1) 토질 정수의 설정은 적정인가.				
		2) 지하수 상황의 파악을 했는가				
		3) 공법의 적응을 검토했는가				
2	설계 계산	1) 연직 Drain의 심도, 간격은 적정인가.				
		2) 압밀침하등을 검토했는가				
		3) 공구분할(블럭구분)은 적정인가.				
		4) 진공재하기간, 성토재하기간을 검토했는가				
		5) 주변지역에의 영향을 검토했는가				
3	표준도	구조도, 단면도등을 작성했는가				
4	연직 Drain공	타설배치도(심도 명기)를 작성했는가				
5	집수탱크·석션호스	1) 석션호스의 배치는적정인가				
		2) 집수탱크의 배치는 적정인가				
		3) 배출수의 배수 계통, 배수끝단 위치는 적정인가.				
		4) 배치도를 작성했는가				
6	진공재하공	1) 진공 구동장치의 배치, 진공재하기간을 계획하였나.				
		2) 전력 공급 계획을 했는가				
7	운전 관리공	각 기기의 배치를 계획했는지. 계측 기간을 계획하였나.				
8	동태 관측공	1) 관측 방법을 계획 검토했는가				
		2) 관측 계획 배치도등을 작성했는가.				
		3) 안정 관리·해석을 계획했는가				
9	품질 확인 조사	1) 품질 확인 목표가 결정되고 있나				
		2) 확인 조사 방법을 계획했는가				
		3) 조사 계획 배치도등을 작성했는가				
		4) 품질 확인평가, 해석 업무를 계획했는가				
10	수량 계산	1) 수량 계산에 이용한 치수, 기호는 도면과 일치한가				
		2) 공종마다, 재료마다 수량이 정리되어 있는가				

6. 시공

가. 시공 일반

석션드레인 공법의 표준적인 시공은 크게 나누어, 준비공, 연직 Drain타설공, 진공 설비공, 진공재하공으로 구성한다. 석션드레인공법의 시공은, 시설의 요구 성능에 응한 개량 효과를 얻기 위해서 정해진 순서에 따라 시공하는 것으로 한다.

(1) 재하방식과 시공 순서

본공법의 재하방식은 진공재하방식을 표준으로 한다. 다만, 개량 목적등에 의해, 성토고가 필요할 경우도 있다. 본공법의 표준적인 시공 순서를 Fig. 3.11.6.1에 나타내었다.

(2) 시공 개요

① 연직 Drain의 시공은, 일반적인 연직 Drain 공법과 같이, 현장의 시공 조건에 대응한 적절한 시공 기계를 이용하는 것으로 한다.
② 석션커넥터는 배수재의 종류에 따라 적절한 방식의 것을 취한다.
③ 진공재하기간에는, 각종 계기를 이용한 계측 관리를 실시하는 것으로, 현장 상황에 따른 적절한 시공 관리를 실시하는 것으로 한다.

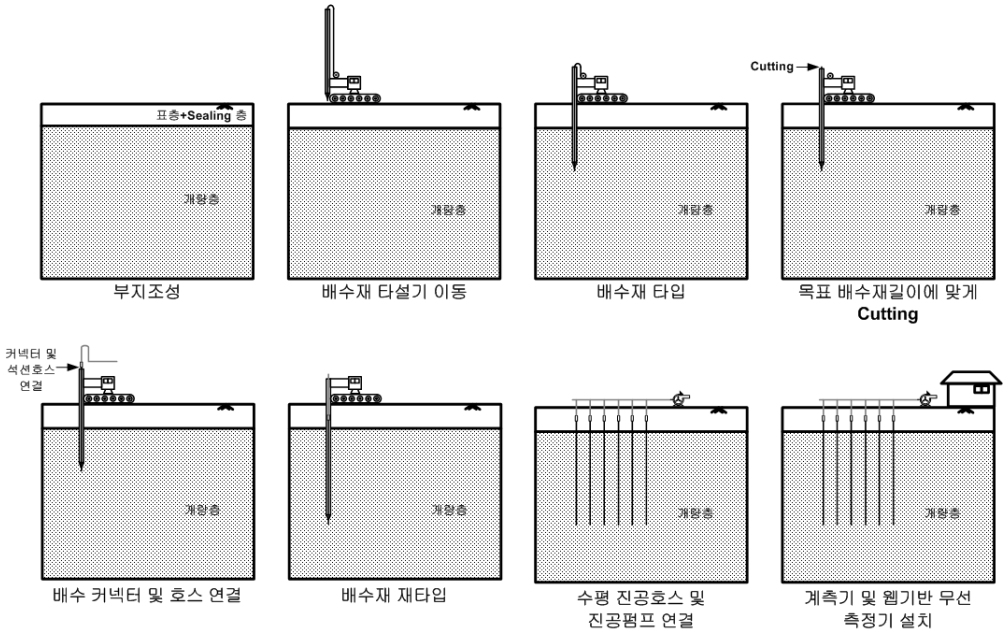


Fig. 3.11.6.1 석션드레인공법의 시공 순서

나. 시공 계획

시공 계획의 입안해서는 설계도 및 각종 적용 기준에 따라, 토질 조건, 현장 작업 조건, 주변 환경조건등을 충분히 고려해야 한다

또한, 석션드레인 공법의 시공을 원활히 할 수 있도록, 설계도에 나타난 내용에 따라, 필요한 사항에 대해 충분한 사전 확인을 실시해 시공 계획에 반영시키는 것으로 한다. 더불어 설계 상 기대 되는 개량 효과를 확보함과 함께 주변에의 영향을 최소한으로 억제하도록, 근처에서의 공사 실적이나 유사 공사의 시공 기록 등을 참고로 하는 등, 적절한 시공 계획을 입안할 수 있도록 노력하는 것이 필요하다.

(1) 시공 계획의 입안

공사 발주전의 설계 단계에, 주변 환경에의 영향, 시공 기계의 선정, 작업 순서, 공정 등, 시공 계획과 관계되는 조사·검토를 행한다. 그러나 안전하고 적절한 시공을 실시하기 위해서는, 설계 단계에서 행해진 각종 조사·시공 계획 결과를 대조 조

사하고 필요한 조사 항목이 있으면 추가로 실시할 필요가 있다. 특히, 본공법의 시공에 대해서는, 토층 구성이나 토질 성질과 상태등의 적절한 파악이 지반 개량 효과를 충분히 발휘시키기 위해서 중요한 요소이다. 석션드레인 공법의 시공은 대상으로 하는 토질 조건이나 현장에서의 작업 조건에 의해 시공의 가부가 결정되므로 반드시 시공에 앞서 시공 계획서를 입안해야 한다.

(2) 사전 확인 항목

시공 계획 입안전사전에 확인해야 할 항목을 Table 3.11.6.1에 나타내었다. 일반적으로, 지반 개량은 복잡한 지반을 대상으로 하고 있음에도 부분적인 조사 자료에 근거해 전체를 판단하는 경우가 많기 때문에, 과거의 유사한 조건에서의 시공 기록이나 시공 실적이 참고가 되는 경우가 많다. 지형·지질 조건이나 과거의 시공 사례 등에서 본공법의 시공중에 예상되는 현상에 대해 검토를 실시해, 필요가 있으면 대책공을 입안해 협의해 두는 등, 만전의 배려를 실시하는 것이 바람직하다. 또한 개량 대상층의 변화가 심한 경우, 연직 Drain의 타설전에 시험시공을 실시해, 타설심도를 재검토하는 하는 방안도 추천한다. 특이 지반에서는, 시공 효율이 현저하게 저하하거나 보조 공법의 적용이 필요해 경우에 따라서는 시공 불가능하게 되므로 주의가 필요하다.

이와 같이, 설계 단계에서 행해진 각종 조사·시공 계획 결과를 대조 조사해, 필요시 시공전 조사를 추가해, 설계 내용을 재검토하는 일도 시공 단계에서의 중요한 업무이다.

Table 3.11.6.1 사전에 확인해야 할 항목

분류	확인항목	확인내용
토질조건	토질	-지층 구성, 지층의 연속성의 파악 -표층 지반의 땅의 성질, 투수성, 통기성의 파악 -표층의콘크리트덩어리, 지중 장애물의 유무 -협재된 모래층 유무 -과거에 지반이 받은 하중 이력의 파악
	지하수	-지하수정도, 수질의 파악 -피압수 및 복류수의 유무
현장 작업 조건	작업 범위	-넓이, 형상등의 확인 -경계선의 확인
	시공지반	-표층 지반의 안정성의 확인 -공사용통로의 확인 -지표 부근의 각초·무늬·패각편·키네등의 유무
	가설설비	-공사용전력, 배수로의 유무
	자연조건	-기온, 강우, 적설, 바람등의 자연 조건의 파악
	매서물및 지장물	-전선, 전주, 수목등의 지상 장애물의 유무 -매설물, 콘크리트덩어리, 전석등의 지중 장애물의 유무 -과거의 조사 보링구멍등의 유무
주변 환경조건	주변 도로 상황	-도로 상황, 교통 사정의 파악 -규제의 유무
	인접지역상황	-가옥, 도로, 철도, 립 갱등의 인접 구조물등의 파악 -주변에의 영향도 맞아, 관측 수법, 관리치, 대응 수단 -근린의 생활 시간대의 파악 -근접하는 하천, 호수, 늪등의 파악
	건설공사의 법적규제	-소음, 진동, 작업시간대등의 확인 -배수 기준의 확인 -병원, 경찰등, 사고 발생시 대처를 위한 연락기관의 확인

다. Drain 타설기

연직 Drain의 타설에는, 지반 조건, 개량 심도등에 대해, 적절한 Drain타설기를 사용한다.

Drain타설기는, 타설기록계등의 관리 장치를 구비하여, Drain의 타설장이 적절히

관리·기록할 수 있는 기종을 이용하는 것으로 한다. 덧붙여 타설기록계등의 관리 장치는, 공사 개시전에 적절히 시험테스트를 실시하는 것으로 한다.

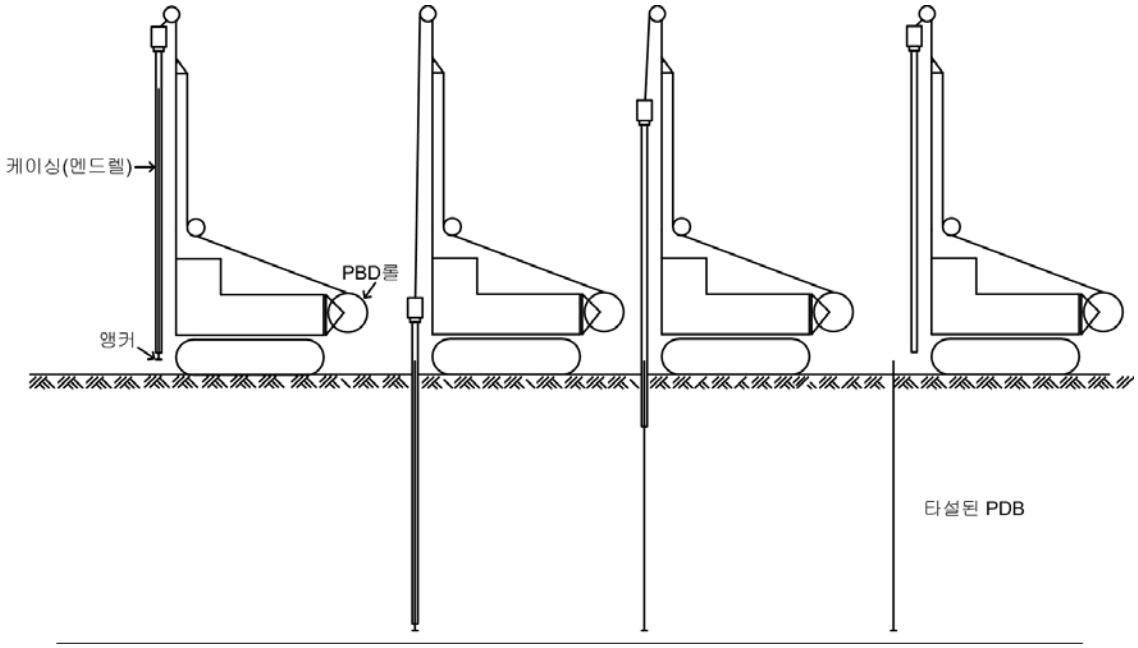


Fig. 3.11.6.2 석션드레인 배수재 타설전경

라. 계측 관리 장치

석션드레인공법에서는, 진공압, 침하량, 배수량, 배수 온도등을 계측 관리 장치로, 자동 계측 해 진공압재하상황(운전 관리)과 침하 상황을 리얼타임으로 파악·평가해, 효율적인 지반 개량을 행한다.

시공중, 시공후 석션드레인공법으로 발생되는 거동양상 및 주변지반에의 영향을 파악하기 위해 실시간 계측을 실시한다.

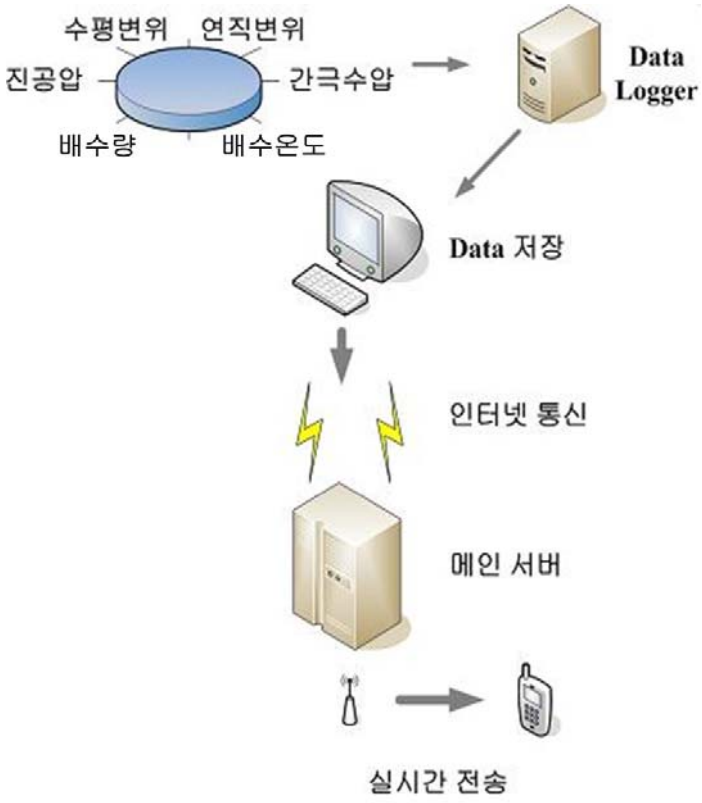


Fig. 3.11.6.3 실시간 계측관리 시스템

마. 배수 설비

배수 설비로서 배출되는 지하수를 배수 처리하기 위한 배수로가 필요하다. 배수의 수질이, 배수 기준에 대해서 문제가 있는 경우에는 별도의 물처리 대책이 필요하다.

진공 구동 후, 초기의 단계에서는 꽤 많은 지하수가 배출되므로, 예상되는 배수량을 적절히 처리할 수 있는 배수로를 확보해야 한다.

또한, 지하수의 수질이나 탁도에 문제가 있는 경우에는, 물처리 시설을 설치할 필요가 있다. 배수의 기준은 규정에 맞게 사전에 확인 한다.

바. 작업 면적

시공에 필요한 작업 야드의 넓이는, Drain타설기의 조립·해체, Drain타설에 수반하는 이동·선회, 진공 구동장치나 계측 관리 장치의 설치, 재료의 보관 장소등을 고려한 넓이가 필요하다.

작업 면적은 일련의 시공을 원활히 진행하기 위해서 충분한 넓이가 필요하고, Drain타설기의 조립·해체나 Drain타설에 필요로 하는 면적, 진공 구동장치나 계측 관리 장치의 설치 장소등도 고려해야 한다.

사. 진공재하공

진공압은 진공 구동장치의 운전에 의해 발생된다. 이 기간은, 진공압등의 데이터를 항상 체크하면서, 배수재에 가해진 진공압의 100% 발휘될 수 있도록 운전을 실시한다. 또한, 진공재하에 의해 유발되는 배수량 및 배수기준등을 고려하여 적절히 처리한다. 계측 관리 데이터나 그 외의 동태 관측 결과를 항상 정리해, 개량의 진척도를 파악해 두는 것이 중요하다. 또, 주변 변위 등 근접 구조물에의 영향에 유의해 두는 것이 중요하다.

진공재하기간은, 최종 단계 평균 진공재하압 -0.8kg/cm^2 이상을 유지하기 위한 운전 관리와 안정, 침하 및 주변에의 영향 관리등을 실시하면서, 진공 설비를 계속 본격적으로 가동하는 기간이다.

7. 시공 관리

가. 시공 관리 일반

본공법의 시공 관리는 시설의 요구 성능에 있던 설계 목표치나 관리 기준치를 달성하여 안전하고 확실한 지반 개량이 시공 성과로 도달될 수 있도록 실시한다. 본공법의 시공 관리는 시공 계획서에 따라 경험과 지식을 충분히 가지는 감리 기술자가 실시한다.

(1) 관리 일반

시공 관리는 시공 공정에 의해 그 내용이 다르다. 또, 시방서·설계도서에 나타난 재료·시공 기기·장치등으로 실시한다. 아래와 같이, 본공법의 시공 관리는, 재료 관리, 형태 관리, 품질관리, 환경·유지 관리로부터 구성된다.

시공 관리	형태 관리	재료·구조물의 형상과 위치 관리
	품질관리	진공 구동장치의 운전 관리
		성토의 안정 관리
		침하 관리
		주변에의 영향 관리
		품질 확인 조사
	경계·유지 관리	소음·진동·수질 관리

(2) 관리의 개요

① 재료 관리 : 품질 규격을 만족하는 재료가 수급되어 사용되고 있는지를 관리한다.

② 형태 관리 : 본공법이 시공 오차내에서 시공되도록 관리한다.

③ 품질관리 : 설계 진공압을 유지하기 위한 진공 구동장치의 운전 관리를 실시한다. 또한, 각종 동태 관측 데이터를 기초로 시공중의 품질 및 주변에의 영향도

를 확인한다. 시공 후의 품질을 확인하기 위한 조사를 실시한다. 덧붙여 동태 관측에 의해 당초의 예측과 다른 거동이 인정되었을 경우는, 진공재하기간이나 추가성토등 당초 설계의 변경 및 변장 경감공의 채용을 검토한다.

④ 환경·유지 관리 : 필요시 시공에 따른 소음·진동, 배수의 수질등의 관리를 실시한다.

(3) 감리 기술자의 역할

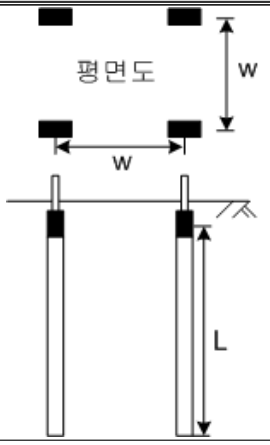
본공법에서는 시험시공을 통한 운전 관리 데이터를 기초로 진공압의 관리를 실시해 필요한 개량 효과를 얻는 것이 기본적인 요건이다. 감리 기술자는 항상 운전 관리 데이터에 유의함과 동시에, 당초 설계와 다른 사태가 발생했을 때는, 신속하게 대처해야 한다. 덧붙여 공사 계약의 시방서로 규정하고 있는 관리 요령이 있는 경우에는 시방서를 따른다.

나. 형태 관리

본공법은, 개량 범위나 연직·Drain 간격등의 형상·치수를 명시한 설계도서에 따라 시공된다. 시공한 형태가 규격치를 만족하는 형상·치수가 되어 있는지, 형태 관리 기준에 근거해 확인·기록한다.

형태 관리의 예를 다음에 있는 Table 3.11.7.1에 나타내었다.

Table 3.11.7.1 형태 관리의 예

공종	측정 항목	규격치	측정 기준	측정 개소
연직 Drain	위치·간격 W	±150mm	1개소/타설장 1800m·대·일 혹은 1개소/대·날	
	타설길이 L		모든 개수	
석션호스	연장 L	≧설계치	1 시공 면적마다	

다. 기본적인 품질관리

석션드레인 공법의 기본적인 품질관리, 설계진공압이 소정의 기간에 걸쳐 계속적으로 재하 되는 것이 중요하다. 감리 기술자는, 계측 관리 계획에 근거해 진공압의 유지·관리에 특히 유의함과 함께 시공 기간중에 실시되는 각종 계측 데이터를 정리해 설계시 요구되는 품질을 확보할 수 있는지를 관리한다.

(1) 운전 관리(정상 관리)

석션드레인 공법에서는 운전 관리용의 계측기기를 이용해 정상 관리를 실시하여 자동 기록된다.

(2) 진공재하압의 유지·관리

본공법에서는 진공압이 소정의 기간에 걸쳐 계속해 재하 되는 것이 중요하다. 이 때문에 진공 구동장치의 정상적인 가동과 기밀성의 유지에 노력하는 것과 동시에, 계측 관리 장치로부터 얻을 수 있는 데이터를 소정의 양식을 참고에 정리해, 이상 유무를 실시간으로 판단한다.

① 진공 설비공의 최종 단계에서는 조정 운전을 실시해 계측 관리 데이터를 기초로 진공 구동장치의 점검·정비를 실시하는 것과 동시에, 기밀성이 보관 유지되고 있는 것을 확인한다.

② 본운전시에는 진공압등의 데이터를 항상 체크하면서, 진공압을 유지할 수 있도록 석션 호스의 누수여부를 파악한다.

Table 3.11.7.2 소정의 진공압을 유지할 수 없는 원인과 대책예

	원인	대책
①	진공 구동장치의 부진	구동장치의 정비 또는 교체
②	석션커넥터 접착부 및 손상부로부터의 공기누출	석션커넥터 손상부의 보수
③	석션호스의 누수	석션호스의 교체 및 누수지점 실링
④	중간 모래층으로부터의 지하수의 유입	불투수대의 구축

제 12 절 결론 및 요약

본 과업에서는 대심도 연약지반에 적용 가능한 Suction Drain 기법을 1차년도 실내 실험(Column Test, Pilot Scale Test)결과를 통해 설계 인자를 도출하여 2차년도 현장시험시공을 수행하고, Suction Drain 공법의 현장 시공성과 적용성을 파악하고자 하였다. 또한 Suction Drain 공법에 최적화된 수치해석 프로그램(Suction-CAIN)을 개발하여 현장시험시공 결과와의 비교/분석을 통해 적용성을 검증하고, 기존 상용프로그램으로 수행된 결과와 검증하였다. 최종적으로는 수행된 모든 영향인자를 통해 Suction Drain 공법의 설계 Process를 제안하였다. 본 과업을 통해 도출된 결과를 각 Process 별로 정리하여 제시하면 다음과 같다.

▶ 실내실험결과

1) 실내실험을 통해 석션드레인에 최적화된 배수재(더블코어 판형배수재, 나선코어 원형배수재)를 선정할 수 있었으며, Sealing 층의 두께 및 개량기간에 따른 배수효과를 정량적으로 파악할 수 있었다.

2) 진공압의 재하시 단일 진공압을 일시에 가해주는 조건보다 낮은 진공압에서 높은 진공압으로 재하 단계를 조절(-0.2kg/cm^2→-0.4kg/cm^2→-0.6kg/cm^2→0.8kg/cm^2)하여 가하는 조건의 배수효율이 크게 나타났다. 이는 단계 진공압으로 인해 지반 내 발생된 Hardening Zone의 범위가 감소하였기 때문이다.

3) 개량 기간에 따라 발생된 함수비결과를 통해 투수계수감소비를 역산하여 Hardening Zone의 범위를 유추해보면, 배수재로부터 약 4~11cm 내에서 발생됨을 확인할 수 있었다.

4) 실내실험 결과를 통해 현장시공시 고려해야할 영향인자(배수재 종류, 처리기간, 배치간격, 진공압 범위. 배수재와 진공호스의 결속방법)를 도출하였고, 이를 2차년도 현장시험시공의 설계인자로 적용하였다.

▶ 현장시험시공결과

1) 나선코어 원형배수재의 개량효과가 이중코어 판형배수재 보다 크게 나타났는데, 이는 원형의 Core 형태로 인해 진공을 적용시킬 수 있는 실제 공기의 통로가 판형 Core 형태 보다 더 컸기 때문에 나타난 결과이며, 이로 인해 지반 내 진공압을 더 효율적으로 적용 시킬 수 있었다.

2) 측방변위의 경우, 연직배수공법은 개량영역에서 비개량영역 방향으로 나타난 반면 Suction Drain 공법에서는 개량영역 안쪽으로 나타났다. 이는 Suction Drain 공법을 적용함에 따라 발현된 응력증가가 지반에 등방적으로 작용하기 때문이다.

3) 진공압 분포의 경우, 판형배수재 및 원형배수재가 타설된 지반의 심도 1.5m지점에서 각각 평균 94%, 85%의 효율을 보였으며, 9.5m지점에서는 평균 70%, 47%로 진공압 효율이 감소하였는데, 이는 Core 형태에 기인한다. 지반 내부에서 산정된 진공압은 배수재에 가해지는 진공압의 약 50~58%로 나타났다. 따라서 이러한 결과를 통해 심도에 따라 발생된 지반 내 진공압 분포를 유추할 수 있었다.

4) 현장시험시공 결과를 통해 기존에 제시된 압밀촉진 공법과 본 연구에서 제안된 석션드레인 공법의 경제성 분석결과 기존 공법에 비해 약 5,000원/m^2~36,000원/m^2 정도의 공사비 절감효과가 나타남을 파악할 수 있었다.

▶ 수치해석프로그램 개발 결과

1) Suction-CAIN 프로그램과 상용프로그램인 Sage CRISP을 통한 현장시험시공부지 모사결과, Suction-CAIN 프로그램의 해석결과가 현장조건에 부합되는 결과가 나타났다. 이는 Suction-CAIN 프로그램의 경우, 배수재 타설로 인한 Smear Zone의 효과를 Hird의 이론을 통해 비교적 현장조건과 유사하게 모사할 수 있었고, 배수재 길이에 따른 진공압 감소율을 고려할 수 있었기 때문에 나타난 결

과이다.

2) Suction-CAIN 프로그램을 통해 성토재하공법과 석션드레인 공법을 비교한 결과 최종 진공압 0.8kg/cm^{2}을 가해준 석션드레인 공법과 감량화 측면에서 등가인 성토고는 연약지반의 심도에 상관없이 약 2.4m, 개량도 측면에서는 약 4m로 나타났다. 개량도 측면 해석 결과, 석션드레인 공법의 침하량이 성토재하공법의 침하량보다 작게 나타났는데, 이는 석션드레인 공법의 경우 성토재하공법과 달리 수평변위가 개량지역 내부 방향으로 발생하였기 때문이다.

3) Suction-CAIN 프로그램을 통한 대심도 모사결과, 심도에 따라 발생된 진공압 효율의 감소로 인해 개량영역 하부에서 발생된 침하량과 상부층에서의 침하량의 차이가 비교적 크게 나타났다. 그러나 시간경과에 따라 배수재 인접지반에 발생된 진공압이 심도에 따라 배수재에 가해진 크기와 거의 유사하게 발생됨을 파악할 수 있었으며, 이를 통해 대심도 지반에 본 공법의 적용 가능성을 파악할 수 있었다.

▶ 추후 제안사항

- 현장 시험시공 완료후 현장 콘관입 시험이 수행되지 않으므로 인해서 석션드레인 공법 적용으로 인한 강도증가 효과를 파악할 수 없었다. 향후 현장 콘 관입 시험의 수행으로 강도증가비를 구하고 추가적인 데이터의 분석이 수행되어야 할 것이다.
- 본 연구에서는 현장시험시공 결과를 수치해석 결과와 비교/검토 하였으나 향후 정밀 이론해석과의 비교가 이루어져야 할 것이다.
- 석션드레인 공법 적용시 인접부지의 침하 및 수평변위를 파악함으로써 영향범위를 구하고, Crack 발생 양상 등에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 연약지반개량시 대부분의 경우 진공압과 선행하중 공법이 병행 적용될 것으로 예상되므로 이에 따른 문제점 및 설계기법과 시공기술에 대한 추가적인 연구개발이 필요할 것이다.
- Hardening Zone과 압밀에에 따른 영향 측면에 대한 추가적인 연구를 통해 정확한 거동 양상에 대한 분석이 필요할 것으로 보인다.

- 샌드심이 있는 지반 등 불균질한 지반에 적용시키기 위한 구체적인 방안 및 설계기법 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

이상의 결과를 통해 Suction Drain 공법의 현장적용성과 효율성을 검증할 수 있었으며, 제시된 해석 Process를 통해 현장 시공자의 시공 Tool을 제공하였다. 또한 개발된 수치해석 프로그램을 통해 현장지반의 거동을 모사하여 시공기간 및 효율성을 검토할 수 있다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구개발 수행 진도율

1. 1차년도 진도율

····· 당초계획
——— 실　　적

구분 / 개발내용	연구개발기간 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	진도(%)
▪ 기초문헌조사 - 국내/외 연구동향 - 기술정보수집	····												100
▪ 기존기술의 한계점 파악 - 기존기술의 문제점 파악		····											100
▪ 최적배수재의 기준선정 - 배수재의 선정 - 연결방법 개발			·····	·····	·····								100
▪ 실내실험계획 및 실험 - 실험기 제작 - 지반강도증진효과 파악 - 개량범위 및 속도 파악						·····	·····	·····	·····				100
▪ 실험결과분석 및 고찰 - 실험결과의 고찰										·····			100
▪ 최적의 시스템 결정 - 이론적 배경 고찰 - 실험결과의 고찰/분석											·····		100
▪ 중간보고서 작성												·····	100
총 진도율	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	100

2. 2차년도 진도율

구 분 / 개발내용	연 구 개 발 기 간												진도(%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
▪ 현장시험시공 계획 - 부지선정 및 배수재 선정 - 장비활용계획													100
▪ 현장시험시공 - 결과수집(자동계측)													100
▪ 현장시험시공 결과분석 - 침하량, 수평변위 분석 - 진공압, 간극수압 분석													100
▪ 실용화 기술개발 - 현장설계 및 해석 프로세스 개발 - 석션드레인 전용 배수재 개발 - 수치해석 프로그램 개발 ▪ 설계메뉴얼 작성													100
▪ 종합보고서 작성													100
총 진도율													100

제 2 절 연구개발 목표의 달성도

목 표	달 성 도 (%)	내 용
대심도 연약지반개량을 위한 석션드레인 기법의 최적 시스템 결정	100	▪ 배수재와 석션호스와의 결속부 제안 ▪ 처리기간 및 적정진공압 산정 ▪ 단계진공압에 따른 배수효율 산정 ▪ 타설간격, 배치형상 결정
석션드레인 기법에 최적화된 배수재의 선정	100	▪ 실내실험을 통한 적정 배수재의 선정
지반개량효과 파악	100	▪ 콘관입시험을 통한 지반개량효과 파악 ▪ 함수비 저감효과를 통한 지반개량효과 파악
해석 및 설계 프로세스 개발	100	▪ 기존에 제안되었던, 이론과 새로운 이론의 접목을 통한 설계 프로세스 제안
현장시험시공을 통한 기법의 실용화 기술개발	100	▪ 실제 지반에서의 석션드레인 공법의 적용
처리지반 해석 Tool 개발	100	▪ 프로그램의 개발을 통한 해석 Tool 검증
시공 매뉴얼 작성 및 시스템의 적용성 평가	100	▪ 현장데이터 및 시공성 검토를 통한 시공 매뉴얼 작성
경제성 분석	100	▪ 기존의 전통적인 지반개량 기법과의 비교를 통한 경제성 분석
타 공법에의 적용성 파악	100	▪ 타공법에의 적용성을 이론적으로 파악

제 3 절 관련분야의 기술발전에의 기여도

본 연구를 통해 획득한 연구 성과를 국내외적으로 발표함으로써 관련 공법 및 기술의 질적 향상에 공헌하였다. 그 결과를 제시하면 다음과 같다.

1. 특허

▶ 특허등록

2007. 1. 25, 특허등록 (10-0679603), “연약지반내의 간극수를 추출하기 위한 석션드레인 배수재의 연결구조”

2007. 1. 25, 특허등록 (10-0679601), “초 연약지반내의 간극수를 배수하기 위한 석션드레인 공법”

▶특허 출원

2007. 7. 3, 특허출원 (10-2007-66708), “간척지에서의 석션드레인 제염장치 및 시공방법”

2007. 7. 3, 특허출원 (10-2007-66711), “석션드레인 공법의 공기와 간극수의 분리배출을 위한 집수탱크”

2007. 7. 3, 특허출원 (10-2007-66712), “석션드레인 공법용 원통형 배수재 및 제작방법”

2. 국외학술지

Soo Sam Kim, Sang Jae Han, Seung Yong jung, Hyun Young Shin (2007. 6), "Drained Triaxial Behavior of SCP-reinforced Composite Ground with Low Area Replacement Ratio", International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 17, No. 2, June 2007, pp. 152-158

Sang Jae Han, Soo sam Kim, Han Kyu Ryu, Hyun Young Shin (2007. 9), "Behavior of Composite Ground Reinforced by Sand Compaction Pile", The International Society of Offshore and Polar Engineers, vol. 17, No. 3, pp. 233-239

3. 국내학술지

신현영, 한상재, 정승용, 김수삼 (2005. 9), "저치환율 SCP 복합지반의 하중전이특성 해석을 위한 초기응력-할선계수(ISSM) 모델의 적용성", 대한토목학회논문집, 제25권, 제5C호, pp. 333-342

정승용, 한상재, 신현영, 김수삼 (2005. 9), "현장조건을 고려한 연직배수재의 통수능 시험", 대한토목학회논문집, 제25권, 제5C호, pp. 313-321

사공명, 김민석, 김수삼, 이인용 (2006. 5), "강우로 인한 철도 연변사면의 활동분석 : 실내모형실험", 한국지반공학회 논문집, 제22권, 제5호, pp. 83-91

김민석, 사공명, 김수삼 (2007. 4), "다중 파괴면을 이용한 강우시 사면의 안정성 해석" 한국지반공학회 논문집, 제 8권, 제 2호, pp. 1~8

한상재, 김기년, 김수삼, 정승용 (2007. 7), "배수재 종류 및 단계진공압 조건에 따른 석션드레인 공법의 효율", 대한토목학회, (심사중)

한상재, 김기년, 정승용, 김수삼 (2007. 7), "석션드레인 공법에서 기간 및 진공압에 따른 hardening zone의 특성", 대한토목학회, (심사중)

4. 국외학술발표

Soo Sam Kim, Young Nam Lee, Sang Jae Han, Ki Nyun Kim, Seong Hyun Shim (2006. 5), "Finite Element Analysis of the Difference in Displacement Behavior Developed from a Suction Drain Method and a Vertical Drain Method", The Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition, pp. 416-421

Ju Hyong Kim, Sam Deok Cho, Soo Sam Kim (2006. 5), "Evaluation of the

Environmentally Friendly Drains for Soft Ground Improvements", The Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition, pp. 546-551

Soo Sam Kim, Hyun Young Shin, Sang Jae Han, Jae Kwon Kim, Myung Ho Lee (2006. 5), "Estimation of Stress Concentration Characteristics in Composite Ground Reinforced by Sand Compaction Piles with Low Replacement Ratio", The Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition, pp. 596-603

Soo Sam Kim, Dong Wook An, Sang Jae Han, Hyun Young Shin, Seung Yong Jung, Ju Hyong Kim (2006. 6. 29), "Two Dimensional Plain Strain Analyses on the Behavior of Soft Clay with Vertical Drain Using Equivalent Permeability Model", The 3rd KICT-HU Joint Workshop, pp. 31-47

Ju Huong Kim, Sam Deok Cho, Yeon-Soo Jang, Soo-Sam Kim, (2007. 1. 14) "Soft Ground Improvements Using Natural Fiber", Materials Science Forum, vols 544-545, pp. 629-632

Soo Sam Kim, Sang Jae Han, Ki Nyun Kim, Dong Wook An (2007. 7. 1), "The Characteristic of Consolidation by Suction Drain Method and Influence of Hardening Zone", The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition

Min Soo Kang, Young Jae Song, Soo Sam Kim, Sang Il Lee (2007. 7. 1), “The Analysis of efficiency of suction drain method by step vacuum pressure”, The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition

5. 국내학술발표

장연수, 장진영, 김수삼, 조삼덕 (2005. 10. 20), “천연마섬유배수재의 내구성 시험”, 대한토목학회 정기 학술대회, pp. 4233-4236

신현영, 심성현, 김재권, 김수삼 (2005. 10. 20), “저치환율 SCP 복합지반의 응력분

담비 산정", 대한토목학회 정기 학술대회, pp. 4348-4351
김기년, 안동욱, 한상재, 정승용, 김수삼 (2006. 3. 24), "Suction 연직배수 공법과 PDB 공법의 변위거동 차이에 대한 유한 요소 해석", 한국지반공학회 봄 학술대회, pp. 1165-1172
김민석, 사공명, 김수삼 (2006. 3. 24), "강우침투를 고려한 철도 연변사면의 안정성 해석", 한국지반공학회 봄 학술대회, pp. 687-696
김병일, 사상호, 김방식, 김수삼 (2006. 3. 24), "연약지반의 불확실성을 고려한 연직배수공법의 신뢰성 설계", 한국지반공학회 봄 학술대회, pp. 1148-1154
신현영, 한상재, 김수삼, 김재권, 심성현 (2006. 3. 24), "저치환율 SCP 복합지반의 2차원 유한요소 해석기 개발과 적용", 한국지반공학회 봄 학술대회, pp. 394-401
김기년, 정승용, 한상재, 김수삼 (2006. 6. 16), "Suction Drain 공법에서의 배수재 종류에 따른 개량 특성", 한국지반공학회 창립 22주년 기념 기술위원회 공동 학술세미나, pp. 171-176
신현영, 한상재, 정승용, 김수삼 (2006. 10. 12), "연직배수 지반의 2차원 등가 평면변형율 수치해석 프로그램 개발", 대한토목학회 학술발표회, pp. 636-639
김기년, 이상일, 김대호, 정승용, 김수삼 (2006. 10. 27), "Suction Drain 공법의 압밀특성과 Hardening Zone의 영향", 한국지반공학회 학술발표회, pp. 1178-1183
김종윤, 안동욱, 윤명석, 한상재, 김수삼 (2006. 10. 27), "단계진공압에 따른 Suction Drain 공법의 효율 평가", 한국지반공학회 학술발표회, pp. 1184-1189
신현영, 정승용, 한상재, 김수삼, 김주형, 조삼덕 (2006. 10. 27), "등가평면변형률 2D 유한요소기법을 이용한 연직배수공법 적용지반의 거동 예측", 한국지반공학회 학술발표회, pp. 1190-1193
안동욱, 김기년, 김대라, 정승용, 김수삼 (2007.3), "Suction Drain Method에서 진공압 효율 평가에 관한 연구", 한국지반공학회 봄 학술발표회, pp. 348-355

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서 개발하고자 하는 대심도 연약지반의 개량을 위한 석션드레인 공법은 국내에는 아직까지 실용화 되지 않은 기술이며, 성토하중 및 Sealing 재료를 사용하지 않기 때문에 경제적으로 연약지반 개량에 적용가능하다. 또한 준설매립지반을 비롯해 하천 하구의 초연약지반 및 배수상태가 불량한 저습답 등 다양한 지반에 적용가능하며, 개량지반에 오염원이 존재할 경우, 기존의 토양증기추출공법(SVE)과 지반정화 기법을 연계하여 진공을 이용한 오염물 추출에도 매우 경제적으로 이용가능 할 것으로 판단된다.

따라서, 이렇게 개발된 기술의 시공 매뉴얼을 작성하고, 관련 업체들에 기술 보급을 꾀하여 관련 산업의 활성화에 선도적인 역할을 수행할 수 있으며, 건설교통부에서 지정하는 신기술 및 해외 특허를 취득하여 관련 기술의 해외 수출 및 세계시장에서의 우위를 확보할 수 있다. 석션드레인 공법을 이용한 응용분야를 나열해 보면 다음과 같다.

1) 지반공학분야

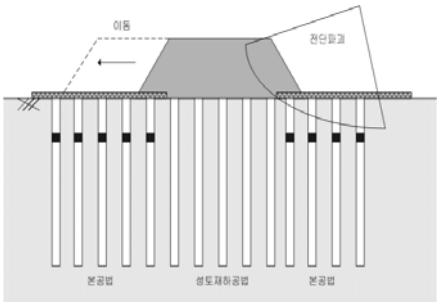
- 진공배수에 의한 성토사면 안정화
- 국부적인 연약지반 개량
- 도심지 굴착 시 차수효과
- 대심도 연약지반 개량
- 도심지 소규모 지반 개량
- 저습답의 농지 개량
- 상부구조물이 존재하는 연약지반 개량
- 진공압을 이용한 효율적인 지하수위저하
- 제방 아래 연약지반의 안정화

2) 지반환경분야

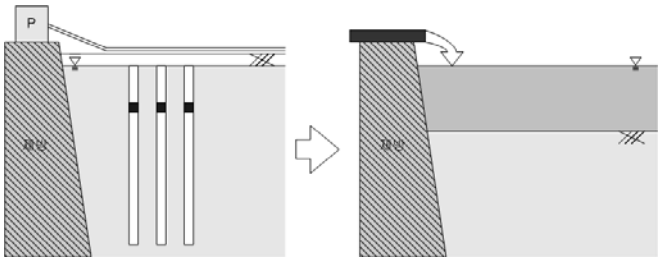
- Soil Flushing 공법과 석션드레인 공법을 접목한 오염 지반 정화
- 폐기물 매립지의 배수

- 대심도 지역에 오염원이 존재할 경우 SVE공법과의 연계를 통한 오염 지반 정화
- 지반 내 가스 매설관의 파손으로 인한 가스 누출 시 긴급 가스포집

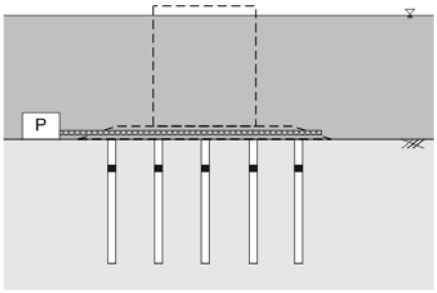
다음에 제시하는 그림은 석션드레인 공법을 활용한 응용분야의 적용 예이다.



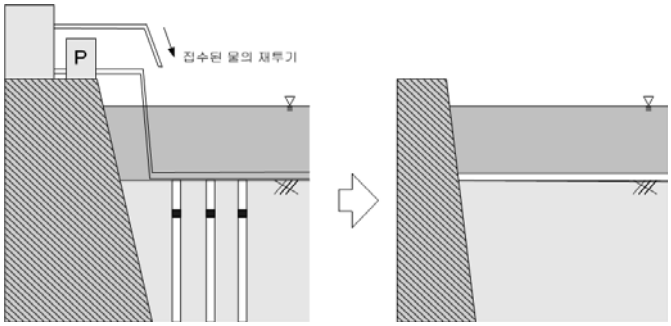
(a) 성토로 인한 전단파괴 및 Sliding 방지



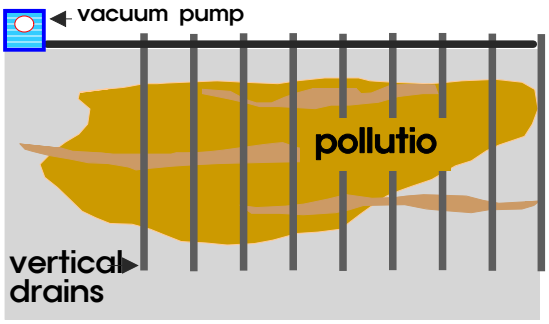
(b) 준설매립토의 개량에 활용



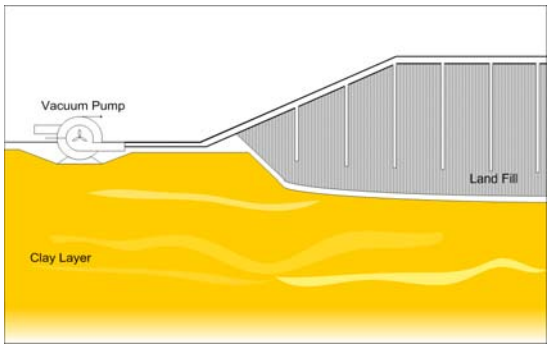
(c) 구조물 기초보강에 활용



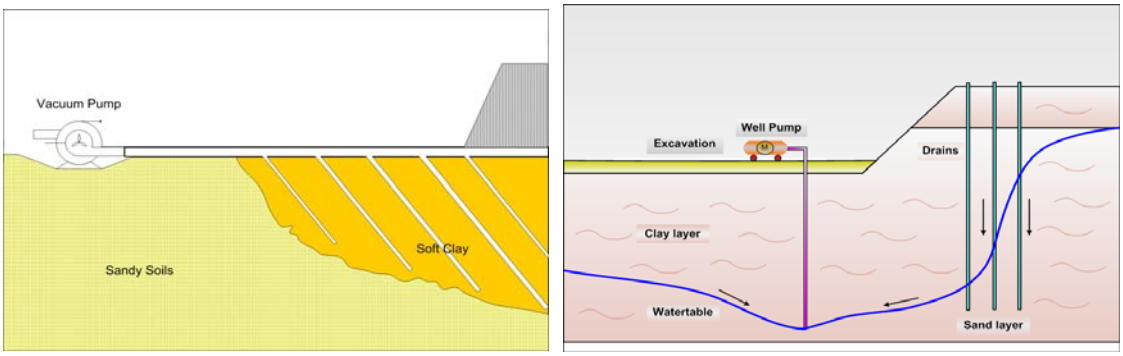
(d) 준설매립토의 개량에 활용



(e) 오염원의 제거에 활용



(f) 폐기물 매립지의 배수에 활용



(g) 구조물 존재 시 공법의 적용　　(h) 진공을 이용한 지하수위 저하

Fig. 5.1.1.1 석션드레인 공법을 이용한 응용예

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

샌드 드레인(Sand Drain), 팩 드레인(Pack Drain), 페이퍼 드레인(Paper Drain) 공법과 선행재하공법(Preloading Method) 등 기존에 주로 사용되던 연약지반개량 공법들은 배수재의 통수능력 저하와 성토하중에 의한 지반의 전단파괴, 성토재 수급 등의 많은 문제점이 노출되어 새로운 배수공법의 필요성이 절실히 요구고 있다. 신공법의 필요성의 증대되면서 기존의 성토재하공법 및 연직배수공법의 단점을 보완하고자 1952년 Kjellman에 의해 진공압밀(대기압재하)공법이 개발되었으나, 진공유지를 위한 멤브레인의 시공 상의 어려움 및 장비의 효율저하로 인해 그 적용성에 한계를 드러냈다. 1990년대 이후에는 통수능력을 향상시킨 다양한 배수재의 개발, 강력한 진공펌프의 개발, 타설 장비의 개발 등 관련 장비의 첨단화에 힘입어 다시금 진공압밀(대기압재하)공법에 대한 새로운 연구가 진행되었다. 그러나 이러한 주변여건의 변화에도 불구하고 멤브레인의 파손과 배수재의 Clogging 현상에 따른 배수효율의 감소로 인한 처리심도의 감소, 시공 상의 막대한 비용으로 인해 그 활용에는 큰 제약이 있었다. 최근에는 이러한 문제점을 극복하기 위한 새로운 진공압밀공법을 개발하여 실제 지반의 적용성 및 효율성을 높이고 있다. 이러한 신공법들의 대표적인 예가 일본에서 제안된 캡(Cap)형 진공압밀공법과 네덜란드에서 개발된 굴착형 진공압밀공법이다. 이러한 공법들은 실내 실험 및 현장시공을 통해 그 효과가 이미 검증되었으며, 유럽을 비롯해 동남아, 일본 등지에서 이미 시공되었거나 또는 시공 중에 있다.

최근의 2년간 국외 연구동향을 살펴보면 Indraratna, Bamunawita and Hadi khabbaz(2004)에 의해 수정 Cam-Caly 모델을 이용한 2차원 평면변형 유한요소 모델을 기초로 하여 진공압의 영향을 받는 단일 연직 배수재의 불포화 배수 경계 조건의 영향을 파악하려는 연구가 진행되었다. 또한 Chai, Carter and Hayashi(2004)는 수치모델로 현장에 진공압을 적용하는 경우에 관한 모사를 위해, 흙의 요소에 작용하는 구속응력을 어떤 식으로 고려해야 하는지에 관한 연구를 진행했으며, 실제 현장에서 측정된 데이터 결과와 잘 부합됨을 제시한 바 있다. Indraratna(2005)

는 축대칭과 평면변형상태에서 진공압을 적용시킨 연직배수 분석 모델을 제시하여 배수재 길이에 따른 진공압의 유효성을 고려하고자 하였다. 이러한 최근의 연구에서는 실제 지반을 수치해석을 이용하여 모사한 후, 실제 지반에서의 거동과 비교/분석하는 추세에 있다.

국내의 경우, 세계적인 연구 추세에도 불구하고, 2007년 현재까지도 기존 진공압밀(대기압재하)공법의 수치해석과 실내 검증실험을 통한 유효성 검증 수준에 머물고 있는 실정이다. 2000년대 이후에는 현장적용성에 대한 검토를 통해 실제 현장에 적용을 꾀하고자 하였으나, 개량효과의 미미, 효율성 문제 등의 여러 가지 문제점이 발생하였다. 따라서 국내에서도 기존에 제시된 진공압밀(대기압재하)공법의 문제점들을 효과적으로 개선할 수 있는 공법의 필요성이 대두되고 있다.

또한 기존에 제시된 공법 및 현재 세계적으로 개발된 신공법들 역시 심도에 큰 제약을 받기 때문에, 대심도 연약지반을 개량할 수 있으면서, 기존 압밀촉진공법의 문제점을 효과적으로 해결할 수 있는 새로운 공법의 개발이 필요하다.

본 연구진이 제시하는 대심도 연약지반의 개량을 위한 Suction Drain 공법의 경우 배수재와 진공펌프를 직접으로 연결하고 성토하중과 맴브레인 재료를 전혀 사용하지 않기 때문에, 기존에 제시되었던 성토 또는 대기압 재하하중 및 단순연직드레인 압밀촉진공법과는 전혀 다른 신기술이다. 이 또한 국내 적용 사례는 없다. 따라서 Suction Drain 공법이 개발되면, 기존 압밀침하공법의 문제점(성토재하에 따른 환경부담, 부등침하, 전단파괴, 멤브레인 파손과 진공배수 효율 감소, 막대한 비용 소요 및 깊이에 따른 비균질한 개량효과)을 해결하여 대심도 연약지반에 효과적으로 적용할 수 있을 것이다.

제 7 장 참고문헌

A.H.Nooy Van der Kolff, S.E.J. Spierenburg and F.A.J.M. Mathijssen(2004), Royal Boskalis Westminster nv, Papendrecht, Netherlands

ARUTIUNIAN. RN.(1983), Vacuum-accelerated stabilization of liquefied soils in landslide, Proceedings of the Eighth European Conference on Soil, Improvement of Ground, vol.2, pp. 575~576

Barron, R. A.(1948), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", Trans, ASCE, 2346, pp. 221~228.

CHOA. V.(1989), Drains and vacuum preloading pilot test, Proceeding of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.2, pp. 1347~1350

Cortlever. NG(2002), "Design manual ; Mebradrain prefab vertical drains"

Elgamal. AW., Adalier. K.(1996), "soil stabilization by ambient pore pressure and geomembrane containment geosynthetics", international, vol.3, No.1, pp. 463~491

H. Yoneya, T. Shiina & Shinsha(2003), Improvement of soft ground applying vacuum consolidation method by expecting upper clay layer as sealing-up material

Hansbo, S.(1981) "Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains", Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Stockholm, Sweden Vol. 3, paper 12/22, pp. 677~682.

IHM .CW., Masse. F.(2001) Successful application of Menard Vacuum Consolidation method to Nakdong River soft clay in Kimhae.

Kjellman, M.(1948), "Accelerating consolidation of fine grained soils by means of cardboard wicks", Proc. 11th Conf. Soil Mech., Rotterdam, No.2, pp.302~305.

Lorenzo GA., Bergado DT., Bunthai. W., Hormdee. D., and Phothiraksanon. P.(2003), Innovations and performances of PVD and dual function geosynthetic applications, Geotextiles and Geomembrains, pp. 75~79

Masse F., Charles A., Ihm Chol Wong and Varaksin S.(2001), Vacuum consolidation, GEO-ODYSSEY - ASCE/VIRGINIA TECH - BLACKSBURG

Onoue, a.(1988), "Consolidation by vertical drains taking well resistamce and smear into consideration", Soils and Foundations, Vol. 28, No. 4, pp. 165-174.

Quaranta. JD., Gabr. MA(2000) PREFABRICATED VERTICAL DRAINS FLOW RESISTANCE UNDER VACUUM CONDITIONS, JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING, pp. 81～84

Rick woods & Amir Rahim(2001), "Sage CRISP technical reference manual for use with Sage-CRISP version 4.0", The CRISP consortium., LTD

Shinsha. H., Watari. Y. and Kurumada. Y.(1991), Improvement of very soft ground by vacuum consolidation using horizontal drains, Proceeding of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.1, pp. 387～392

SHINSHA. H., WATARI. Y. and KURUMADA. Y.(1991), Improvement of very soft ground by vacuum consolidation using horizontal drains, Proceeding of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.1, pp. 387～392

Spaulding C., Porbaha A.(2004), Embankment construction on marshland using vacuum consolidation technology, Geotechnical Engineering for Transportation Projects(Geotechnical special publication No.126), pp. 1943～p1950

TANG. Y., GAO. Z.(2002), Experimental study and application of vacuum preloading for consolidating soft soil foundation, Proceeding of the twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.2, pp. 1423～1426

Toy. MS.(1997), "Methodology for analyzing soil vacuum data at voc -contaminated sites", journal of environmental engineering, pp. 683～690

Xiaofeng Liu, Chenggang Bao(1996), The characteristics of mucky soil under vacuum preloading, Second International Conference on Soft Engineering, pp. 948～952

YE. BR., SHANG. SZ. and DING GQ.(1991), Consolidation of soft soil by means

of combined vacuum surcharge preloading, Proceeding of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.2, pp. 277～280

Yong-Suk Song, Tae-Hyung Kim(2004), Improvement of estuarin marine clays for coastal reclamation using vacuum-applied consolidation method, Ocean Engineering 31, pp. 1999～2010

Yoshikuni, H.(1979), "Design and Construction Control of Vertical Drain Methods", Gihodo, Tokyo, Foundation Engineering Series.

Yoshikuni, H., Nakanodo, H.(1974), "Consolidation of Fine-grained Soils by Drain Wells with Finite Permeability", Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering 14, No. 2.

Young-In Chung(1993), Vacuum consolidation of highly compressible soil with vertical wick drain, Doctor of philosophy in material, South dakota

Zeng, G. X., Xie, K. H.(1989), "New Development of the Vertical Drain Theories", Proceedings of the 12th ICSMFE, Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 2.

강민수(1998), "영향인자를 고려한 연직배수기술의 개발에 관한 연구", 중앙대 박사 학위논문.

김성준, 김성운, 박중배, 은희범(2000), 표층개량을 위한 수평진공배수공법의 적용성 분석, 대한토목학회 학술발표회 논문집

박영목(1997), "국내 PBD재의 배수성능과 진공효과에 의한 통수능력 향상에 관한 연구", 한국지반공학회, 제 13권 2호. pp. 39～53.

박중배, 김유석, 김성준(2002), 초연약지반의 표층처리를 위한 수평진공배수공법 시공, ISSMGE ATC-7 Simposium, 부산, pp. 439～500

박중배, 김홍석, 김성준, 강명찬, 이송(2002), 표층처리를 위한 수평진공배수공법의 현장 적용성에 관한 연구, 대한토목학회논문집 제22권 제5-6호, pp. 545～555

박중배, 이승우, 김유석(1996), 수직배수를 병행한 진공압밀(대기압재하)공법 적용시의 연약지반의 거동 예측 연구, 대한지반공학회지, 제12권 제5호, pp. 79～87

은성민(1999), 밴드드레인이 부분관입된 대심도 연약점토 지반을 위한 PDSS 해석, 동아대, 석사학위논문

이규환, 전제성, 이송(1996), 원형통 드레인 보오드를 이용한 진공압밀공법에 관한 연구, Geosynthetics Conference(Korea) 96년 국제 토목 섬유학회 한국지부 학술

발표회 논문집, pp. 103～115
이기남(2001), 진공압밀공법에 의한 연약지반의 변형거동특성, 석사학위논문, 중앙대학교 대학원.
이송, 강명찬, 김홍석(2001), 수평진공배수공법이 적용된 준설매립지반의 압밀 해석에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 제17권 4호, pp. 209～220
이송, 양태선, 박종찬, 백영식(1993), 진공하중에 의한 Drain Board 타입 점토지반의 거동 특성, 한국지반공학회지
이송, 이규환, 전제성(1997), 원통형 드레인을 사용한 진공압밀공법의 효과분석, 대한토목학회논문집, 제17권 제3-2호, pp. 209～216
이송, 정연인, 이규환, 전제성(1996), 진공압밀공법이 적용된 해성 점토지반의 거동분석, 대한토목학회 학술발표회 논문집
이승래, 김윤태(1996), “성토재 아래의 연약지반에 설치된 연직배수재의 수치모델링”, 한국지반공학회지, 제12권, 6호, pp.127～138
이주동(2002), “탄소성이론을 이용한 복합지반의 등가특성치 예측”, 명지대학교 석사학위논문, pp.33～36
이주형, 이상익, 김영욱, 김병일(2003), “탄소성 이론을 이용한 복합지반의 등가특성치예측”, 한국지반공학회지, 제 19권 2호 pp.179～187
안동욱(2007), “연약지반에 Suction Drain Method 적용시 진공압의 크기에 따른 개량 효율 평가”, 한양대학교 석사학위논문
이상일(2007), “Suction Drain Method에서 진공압 적용기간에 따른 개량효과에 관한 기초적 연구”, 한양대학교 석사학위논문
日 오양건설(2004.10), 진공압밀배수공업(Cap Drain을 이용한 배수공법의 설계,시공)
정수철, 박종찬, 정연인, 이송(1995), 진공하중에 의한 드레인 보드가 타입된 점토지반의 침하해석, 대한토목학회 학술발표회 논문집
정연인, 김희중, 장준호(2004), 진공압밀 배수공법에 의한 Hardening Zone에 대한 연구 ,한국구조물진단학회 제8권 제3호
정연인, 이태문(1999), 진공압에 의해 탈수 처리된 정수장 슬러지의 이용에 관한 연구(탈수방안에 관하여), Journal of Korea Technological Society of Water and Waste Treatment, 제7권 제1호, pp. 23～31

정하익(2001), 연약지반개량기술 과제에 관한 PM개발, 한국건설진흥연구원

제호경(1999), “연직배수재가 부분 관입된 대심도 연약지반에서의 압밀거동”, 동아대학교 석사학위논문, pp.11～17

조삼덕, 김주형(2005), “새로운 진공압밀공법”, 한국지반공학회 기술기사, Vol. 21, No. 11

조준산, 황규호, 이규환, 이송(1995), 진공하중에 의한 점토의 배수촉진 관한 실험적 연구, 1995년 산업기술연구소 논문집 제3집

차정일(2003), 진공압밀배수공법에 의한 Hardening Zone의 개선방안에 대한 연구, 계명대학교 대학원 석사학위논문

한국토지공사(1999), 압밀지반의 압밀특성에 관한 연구, pp.761～764

부록 1. Suction-CAIN Program 간편 매뉴얼

1. 적용예제 설명

본 예제를 위한 단면은 기반암 상부에 점토층이 12m 높이로 존재하고 있으며 점토층의 중앙 28.0m 구간에 PBD를 시공한 후 -0.8kg/cm^{2}의 진공압을 가해주게 된다. 점토층의 전체 너비는 66m이며 수위는 원지반 높이에 존재하고 있다. 아래의 Fig. 1.1은 해석의 편의를 위해 대상지반을 제체중앙을 기준으로 양분한 해석단면이다.

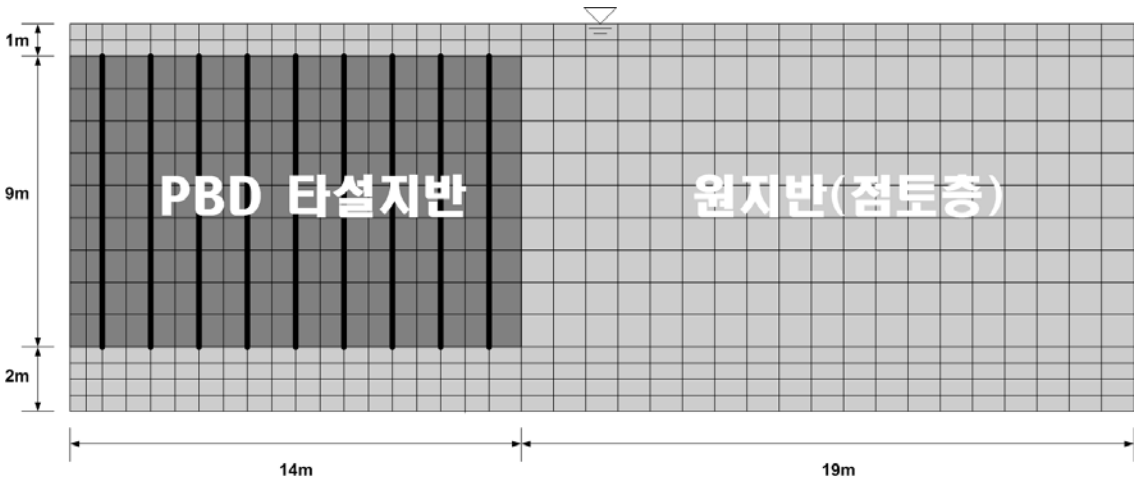


Fig. 2.1.1 적용예제 해석단면

2. 전처리(Pre Processing)프로그램의 구동

다음의 각 입력절차를 거쳐 해석단면의 형상과 특성을 입력한다.

(1) Starting The Project

▶ STEP. 1 Suction-CAIN을 실행한 후 File 메뉴에서 New File을 선택하여 새 프로젝트를 불러온다.

▶ STEP. 2 프로그램 하단 단위설정 메뉴에서 단위를 Meters, kN, Day로 설

정한다. 이때 설정한 단위는 프로그램 내 모든 입력절차에서 변환이 가능하다.

▶ STEP. 3 좌측의 Properties 메뉴의 Title창과 Description창에 해석단면에 대한 제목과 설명을 입력한다.

▶ STEP. 4 File 메뉴에서 Save를 선택하여 해당 데이터를 저장한다.

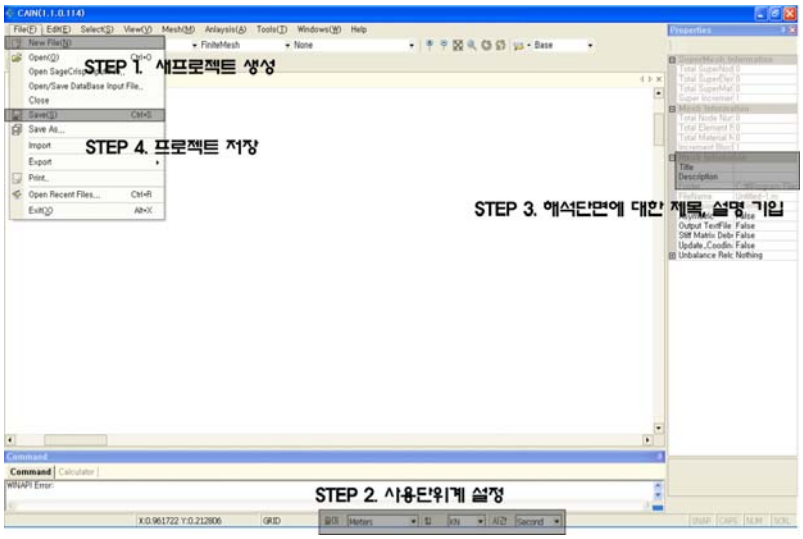


Fig. 2.2.1 새 프로젝트 생성

(2) Creating The Super Mesh & Defining Material Zone

프로젝트 단면 생성의 편의와 PBD 타설구간 형상을 결정하기 위해 Finite Element 생성에 앞서 Super Element를 생성한다.

▶ STEP. 1 프로그램 상단의 View 메뉴에서 Super Finite Element Mesh를 선택한다.

▶ STEP. 2 프로그램 상단의 Mesh 메뉴에서 Add Super Nodes를 선택한다.

▶ STEP. 3 프로그램 하단의 Command 창에 “슈퍼절점 Coordinate를 입력하세요.”라는 명령 뒤에 해당좌표를 입력한 후 “엔터키”를 누른다.

▶ STEP. 4 STEP. 3을 반복하여 각각의 Super Nodes를 모두 입력한다.

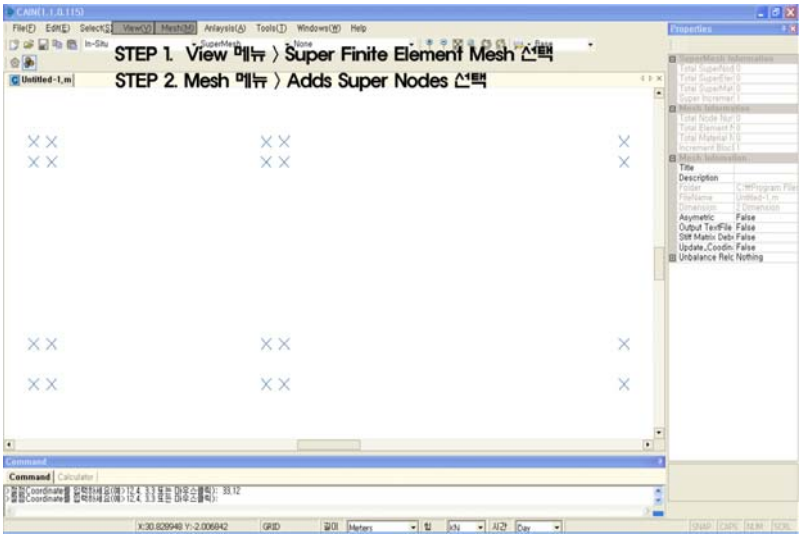


Fig. 2.2.2 Super Node 생성

▶ STEP. 5 프로그램 상단의 Mesh 메뉴에서 Add Super Elements를 선택한다.

▶ STEP. 6 각 Super Node를 시계반대 방향으로 선택하여 폐합시켜 Super Elements를 생성한다.

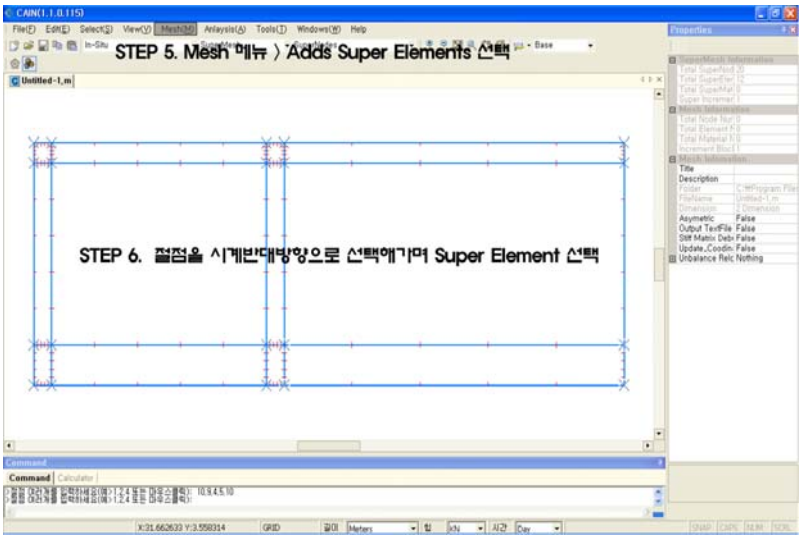


Fig. 2.2.3 Super Element 생성

▶ STEP. 7 프로그램 상단의 Mesh 메뉴에서 Mesh Information을 선택한 후, Mesh Information 창을 활성화 시켜 Material 탭에 다음 표의 물성치를 각각 입력한다.

Table 2.2.1 Material Properties

Clay-Hird		Clay-Origin		PBD	
Modified Camclay		Modified Camclay		Bar	
E_0 (kN/m^2)	4000	E_0 (kN/m^2)	4000	E_0 (kN/m^2)	0.001
ν	0.33	ν	0.33	ν	0.30
γ_{bulk} (kN/m^2)	18.11	γ_{bulk} (kN/m^2)	18.11	γ_{bulk} (kN/m^2)	0.0001
γ_w (kN/m^2)	9.81	γ_w (kN/m^2)	9.81	γ_w (kN/m^2)	9.81
κ	0.02	κ	0.02	κ	-
λ	0.22	λ	0.22	λ	-
e_{cs}	2.10	e_{cs}	2.10	e_{cs}	-
M	0.90	M	0.90	M	-
k_x (m/s)	-	k_x (m/s)	1.94E-9	k_x (m/s)	-
k_y (m/s)	-	k_y (m/s)	0.97E-10	k_y (m/s)	-
배수조건	압밀	배수조건	압밀	배수조건	압밀

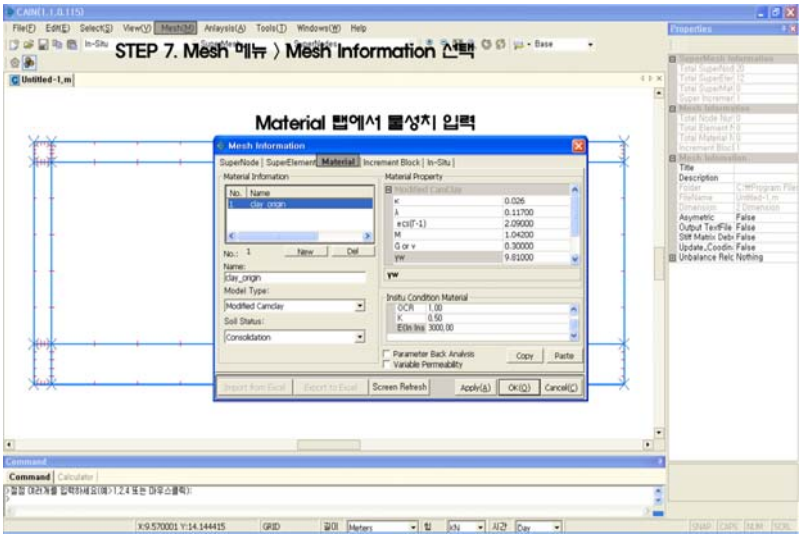


Fig. 2.2.4 Material Properties 입력

▶ STEP. 8 프로그램 상단의 Select 메뉴에서 Super Element를 선택한 후 마우스를 이용하여 각각의 Super Element를 선택한다.

▶ STEP. 9 Super Element가 선택되면 좌측 Properties창의 Material Info의 하위메뉴를 클릭하여 물성치 이름을 "Clay-Origin"으로 할당한다.

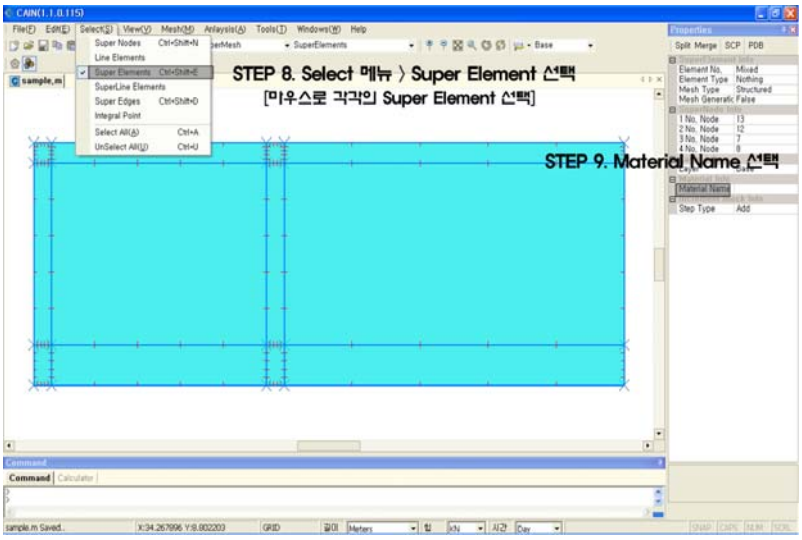


Fig. 2.2.5 Super Element 물성치 적용

▶ STEP. 10 프로그램 상단의 Select 메뉴에서 UnSelect All을 선택(또는 Esc)하여 선택된 Super Element의 선택을 취소한다.

▶ STEP. 11 전체 Super Element의 선택이 취소되면 다시 PBD가 타입될 Super Element를 마우스로 선택한다.

▶ STEP. 12 Super Element가 선택되면 좌측의 Properties창 윗부분의 PBD 메뉴를 클릭하여 PBD Super Element Manager를 불러온다.

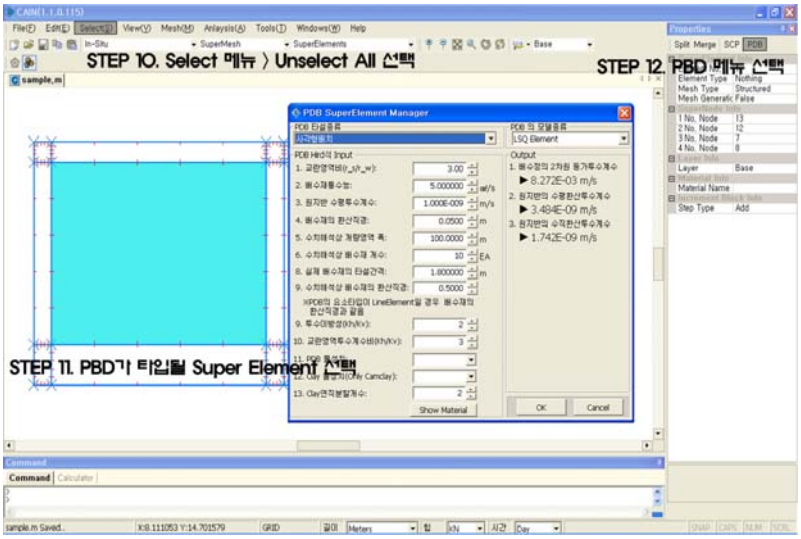


Fig. 2.2.6 PBD 타설구간(Super Mesh) 설정

▶ STEP. 13 PBD Super Element Manager창에 아래의 Fig. 2.2.7과 같이 입력한다.

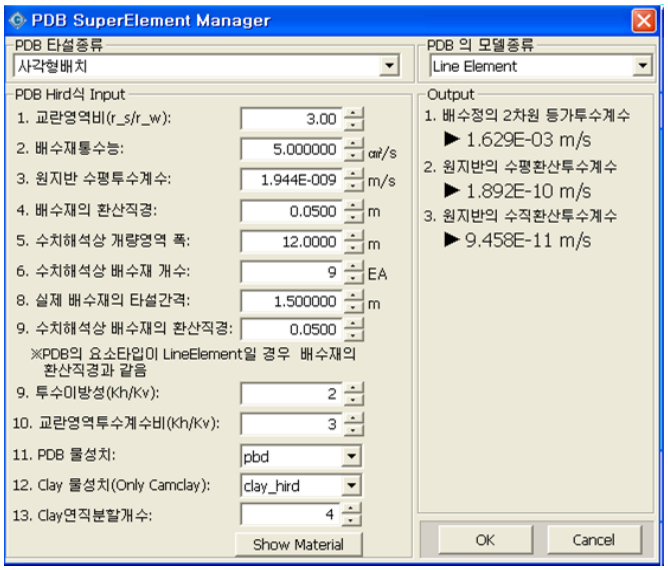


Fig. 2.2.7 PBD Super Element Manager

▶ STEP. 14 확인(OK)을 클릭하여 SCP 단면을 생성한다.

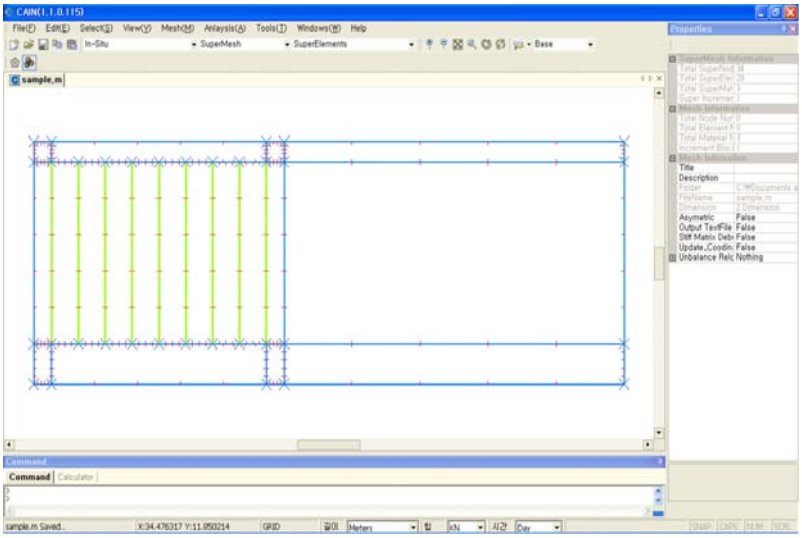


Fig. 2.2.8 PBD 단면(Super Mesh) 생성

(3) Defining Edge Grading

▶ STEP. 1 프로그램 상단 Select 메뉴의 Select Super Edges를 선택한 후 Fig. 2.2.9와 같이 마우스로 Super Edge를 선택하여 좌측 Properties창에서 Division을 9로 설정한다.

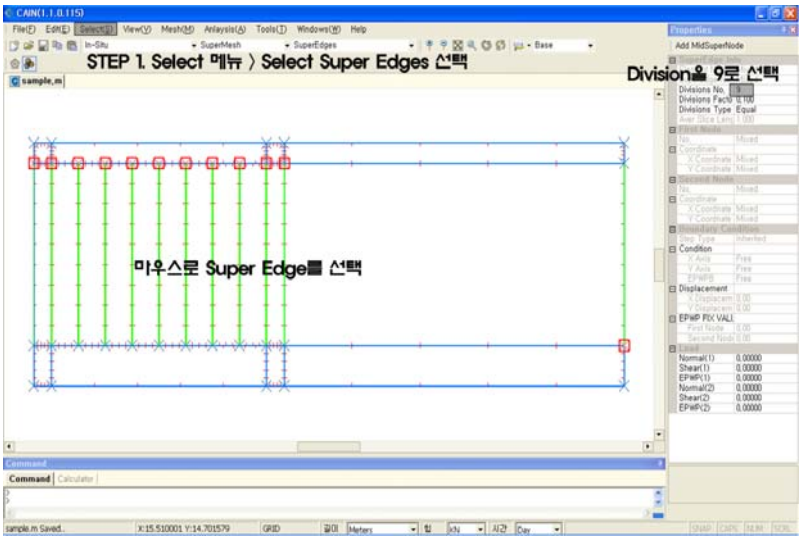


Fig. 2.2.9 Super Edge Grading 설정

▶ STEP. 2 Step 1의 방법으로 나머지 Super Edge들에 대한 Edge Grading을 설정한다.

(4) Defining Water Level & Boundary Condition

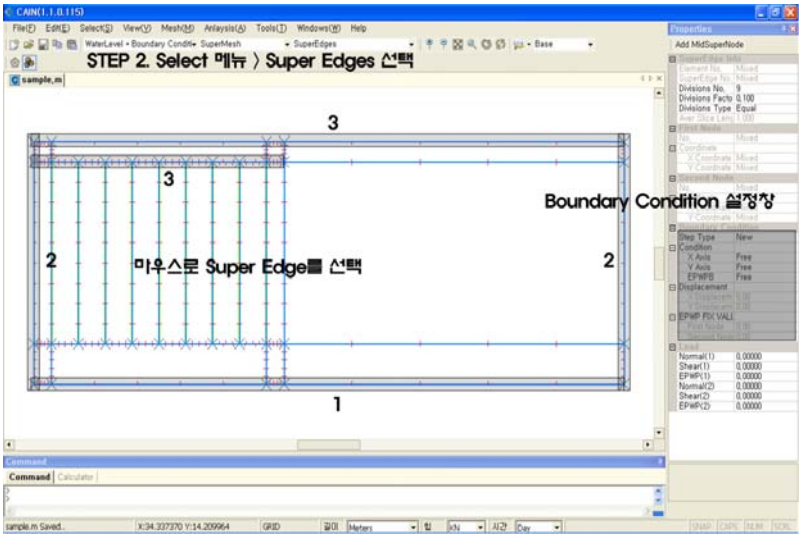
▶ STEP. 1 프로그램 상단 메뉴의 Increment 선택창에서 Water Level & Boundary Condition을 선택한다.

▶ STEP. 2 프로그램 상단 Select 메뉴의 Select Super Edges를 선택한 후 다음 그림과 같이 마우스로 Super Edge를 선택하여 좌측 Properties 창에서 X축과 Y축의 Condition을 다음과 같이 설정한다.

① X Axis=Fixed, Y Axis=Fixed, EPWPB=Free

② X Axis=Fixed, Y Axis=Free, EPWPB=Free

③ X Axis=Free, Y Axis=Free, EPWPB=Fixed



<그림 869> Boundary Condition 설정

▶ STEP. 3 프로그램 상단 Mesh 메뉴의 Initial Water Table을 선택한다. 이 때 Initial Water Table의 X축 좌표는 해석단면의 횡축방향 길이보다 같거나 커야한다. Water Table 메뉴에 다음과 같이 좌표 (-1,12), (34,12)를 입력한다.

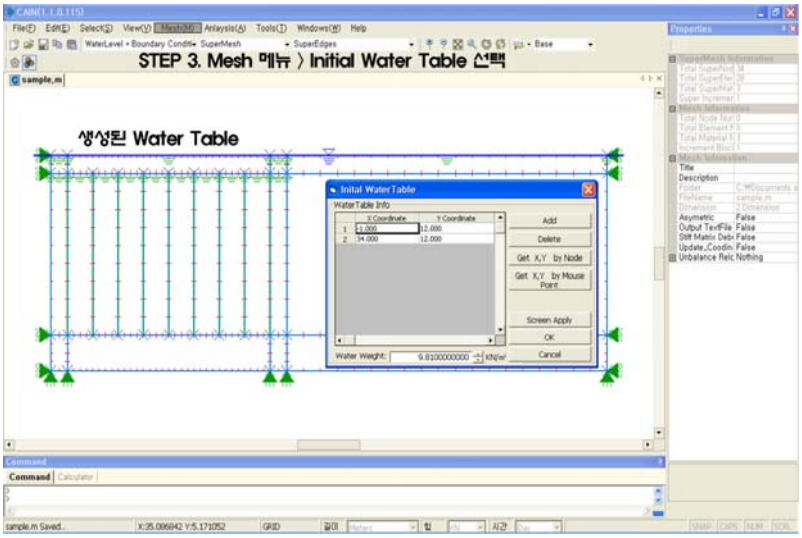


Fig. 2.2.11 Initial Water Table 설정

(5) Creating Finite Mesh

▶ STEP. 1 프로그램 상단 Select 메뉴의 Select Super Mesh를 선택한 후 원지반과 PDB 개량구간에 해당하는 전체 Super Mesh를 마우스로 드레그하여 선택한다.

▶ STEP. 2 좌측 Properties창 Super Element Info 메뉴의 Element type을 LSQ Consolidating, Mesh Type을 Structured로 각각 선택한 후 Mesh Generation을 True로 선택하여 Finite Mesh를 생성한다.

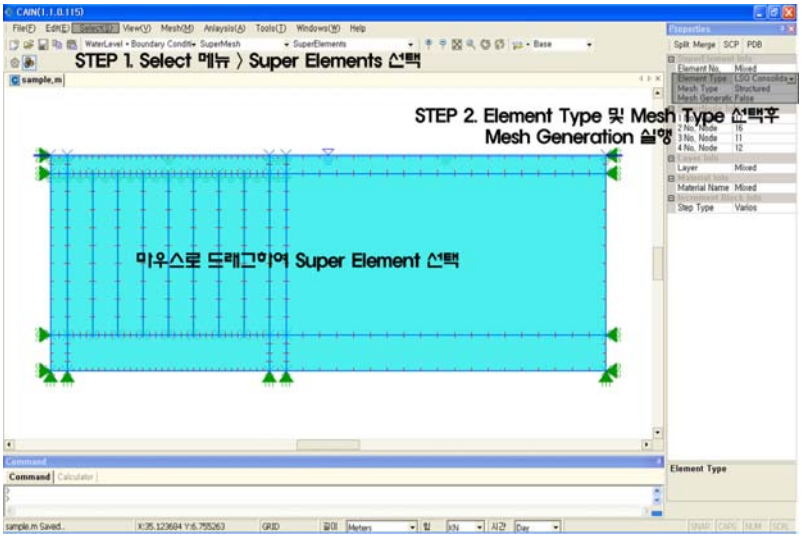


Fig. 2.2.12 Finite Mesh 생성을 위한 입력

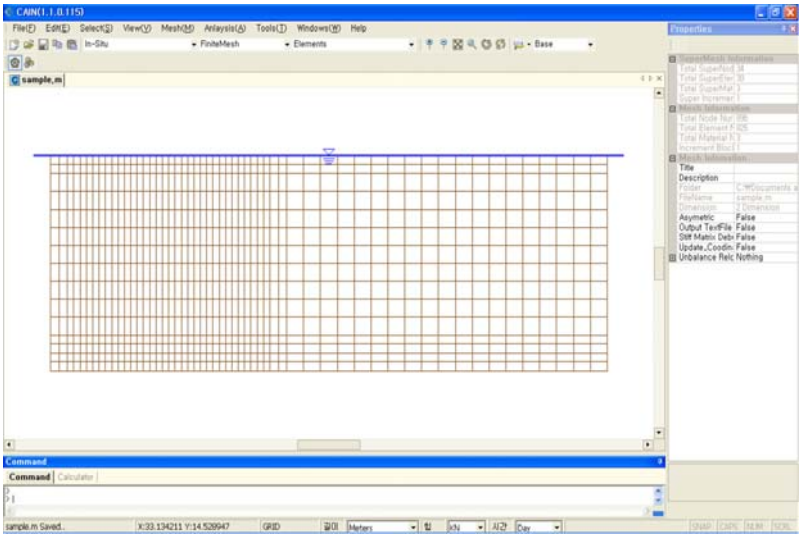


Fig. 2.2.13 Finite Mesh 생성

(6) Defining Increment Blocks & Setting Up The Construction Sequence

▶ STEP. 1 프로그램 상단 Mesh 메뉴의 Mesh Information을 선택하여 Mesh Information 창을 연다. Increment Block 탭을 선택하고 다음과 같이 각각의 Block을 추가한다.

① Loading(9kPa): Load No.=5, Total Times=0.3days, Factor Style=Equal

② Suction(100days): Load No.=20, Total Times=100days, Factor Style=Equal

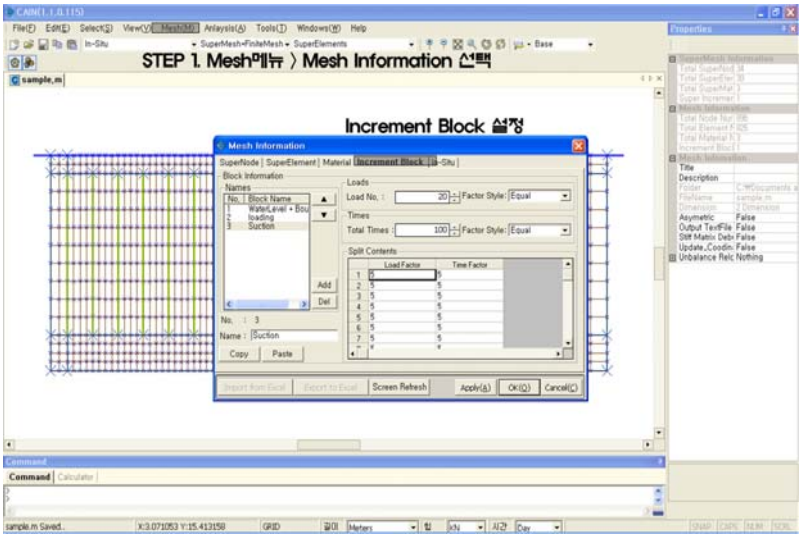


Fig. 2.2.14 Increment Block 생성

▶ STEP. 2 프로그램 상단의 Increment 선택창에서 Trafficability를 위한 성토(0.5m)를 모사하기 위하여 Loading 단계를 불러온다.

▶ STEP. 3 Mesh 선택창에서 Finite Edges를 선택한 후 성토가 이루어지는 지반의 Edge를 선택하고 오른쪽 하단의 Normal Stress(1)과 Normal Stress(2)에 “9”를 입력한다.

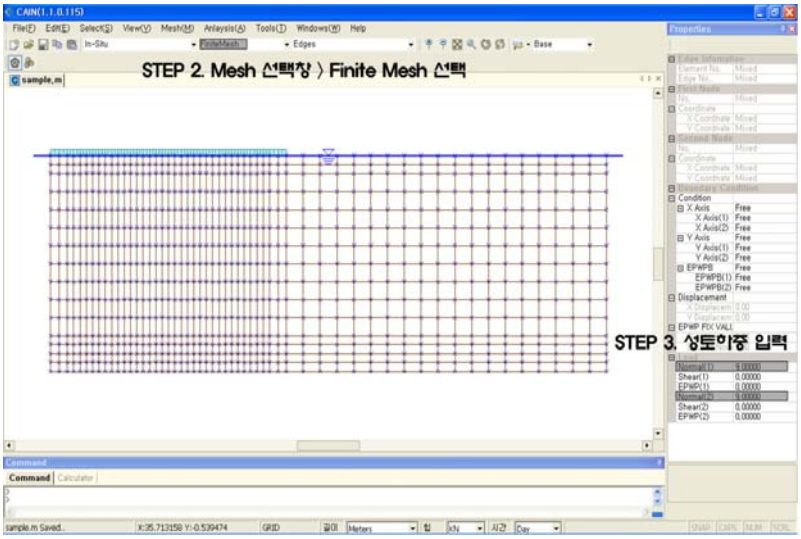


Fig. 2.2.15 성토체 Increment Block의 Step type 설정

▶ STEP. 4 프로그램 상단의 Increment 선택창에서 진공압 기간 모사를 위한 Suction 단계를 불러온다.

▶ STEP. 5 프로그램 상단 Select 메뉴의 Super Line Elements를 선택한 후 배수재 선요소를 선택하여 오른쪽 화명 중간에 Step Type을 Add로 선택하여 배수재 선요소가 Suction 단계 이후에만 나타나도록 한다.

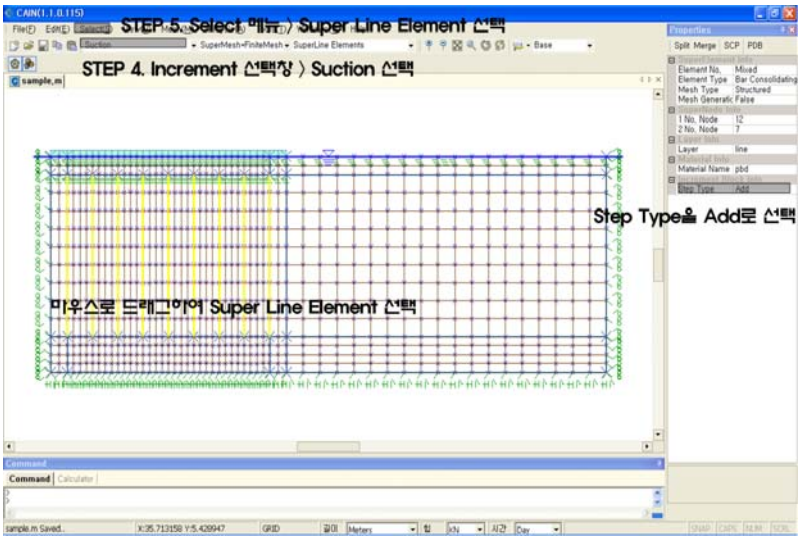


Fig. 2.2.16 배수재 선요소의 Step Type 설정

▶ STEP. 6 배수재 선요소를 Super Edge로 선택하여 화면 오른쪽 중간 부분에서 배수 경계조건을 입력한 후 EPWP에 적용 진공압을 입력한다.

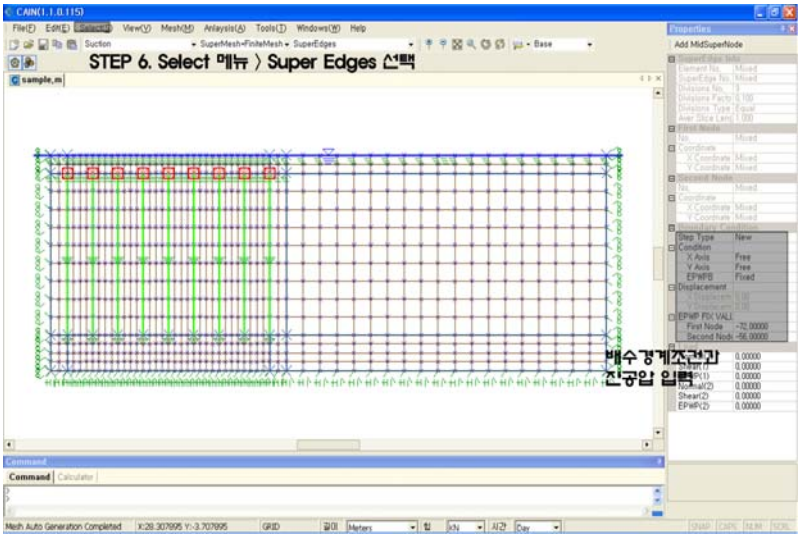


Fig. 2.2.17 배수재 선요소에 진공압 입력

▶ STEP. 7 프로그램 상단 Select 메뉴의 Super Line Elements를 선택한 후 화면 오른쪽 상단의 Mesh Generation을 수행하여 배수재 선요소를 유한요소로 생성시킨다.

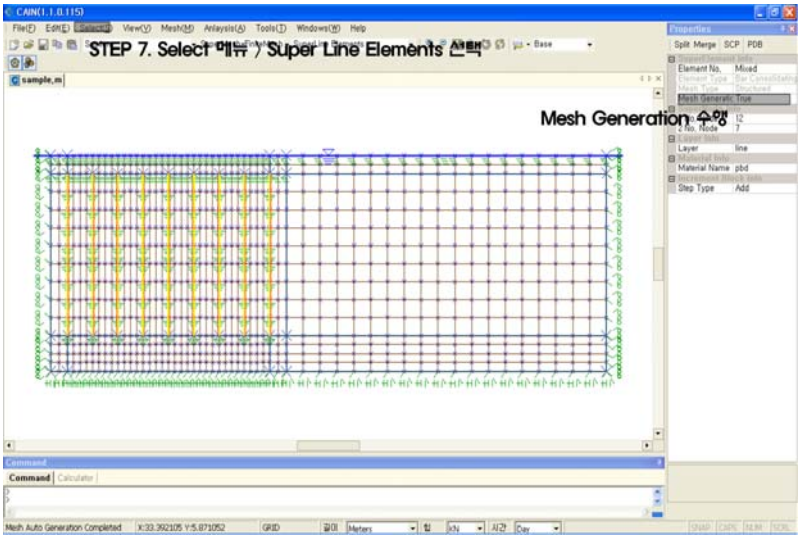


Fig. 2.2.17 배수재 Finite Mesh 생성

(7) Running The Analysis

▶ STEP. 1 프로그램 상단 Analysis 메뉴의 Solve를 선택한다.

▶ STEP. 2 FEM Analyzer의 Mesh Renumbering과 Validate Mesh를 차례로 실행시켜 해석절차에 오류가 있는지 확인한다.

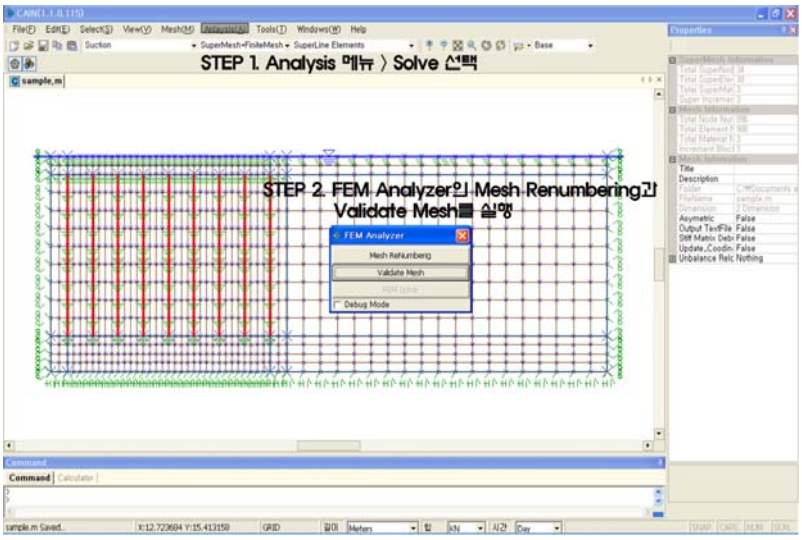


Fig. 2.2.19 FEM Analyzer 실행

▶ STEP. 3 FEM Solve를 실행하여 해석을 시작한다.

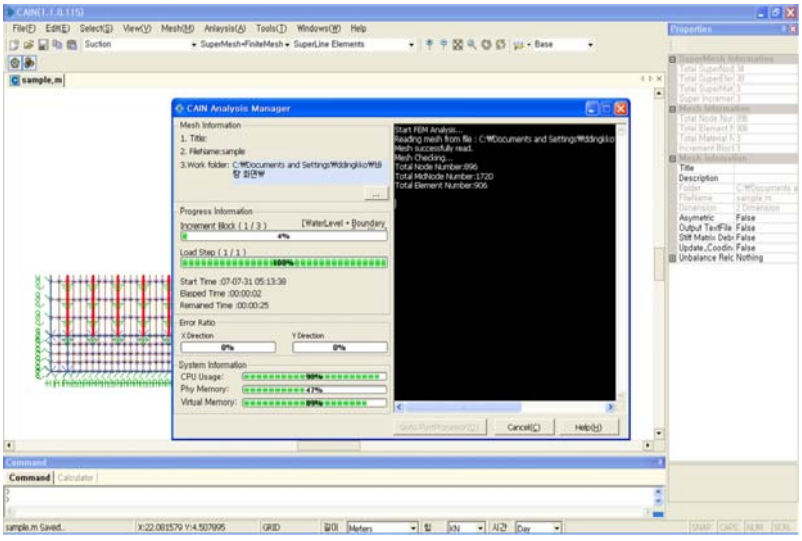


Fig. 2.2.20 Analysis manager 실행

3. 후처리(Post Processing) 프로그램의 구동

(1) Starting The Post Processor

▶ STEP. 1 해석종료 후 Analysis manager의 Go to Post Processor를 선택하여 Post Processor를 불러온다. Project 이름 뒤에 해석 시간이 표시됨.

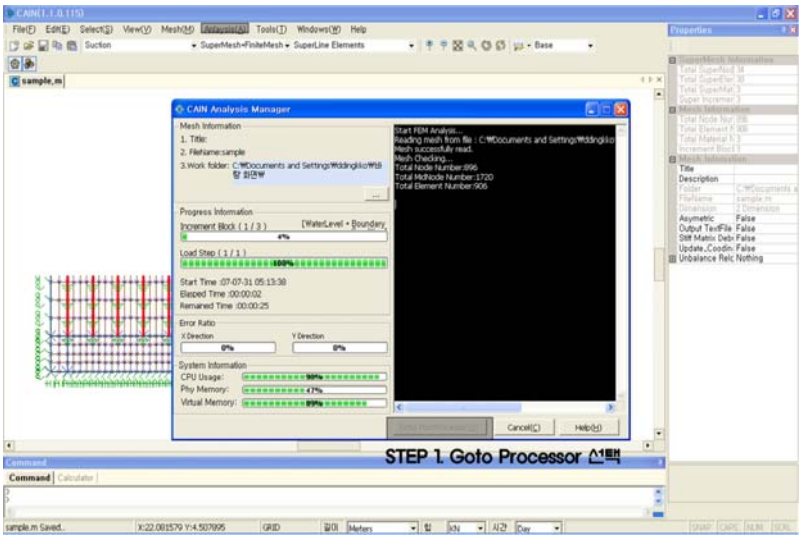
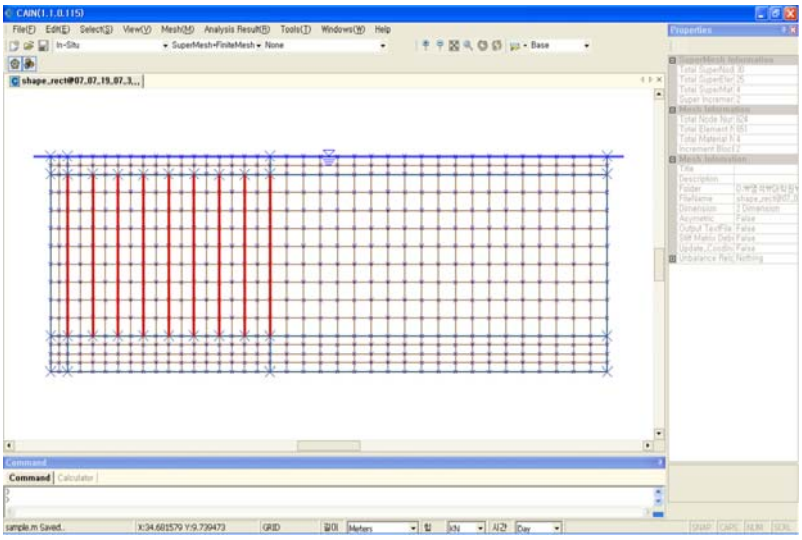


Fig. 2.3.1 Analysis manager의 Post Processor 선택



2.3.2 Post Processor 실행

(2) Plotting Deform Mesh

▶ STEP. 1 프로그램 상단의 Analysis Result 메뉴의 Deform을 선택하여 Deform Controller를 불러온다.

▶ STEP. 2 Deform Controller의 Add를 클릭하여 객체를 만들고 Inerement Block Range에서 보고자하는 단계를 선택한 후 Screen Apply를 선택하여 화면에 출력한다.

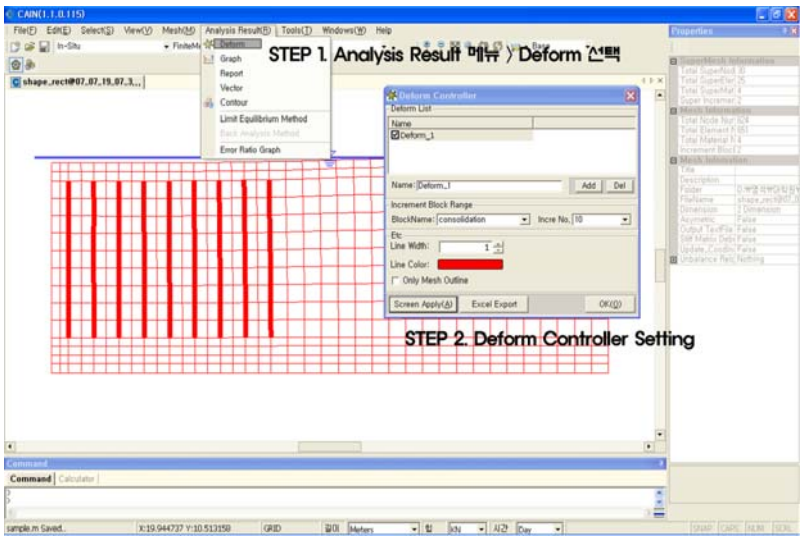


Fig. 2.3.3 Deform Mesh 설정

(3) Plotting Graph

▶ STEP. 1 프로그램 상단의 Analysis Result 메뉴의 Graph을 선택하여 Graph Tool을 불러온다.

▶ STEP. 2 Graph Tool의 Add를 클릭하여 객체를 만들고 Type에서 보고자하는 Node나 Integral Point를 선택하고 Construction Step Scope에서 보고자하는 단계를 선택한 후 그래프 데이터 설정에서 X축과 Y축에 시현될 데이터를 결정하고 Plot이나 Export Excel을 선택하여 화면에 출력한다.

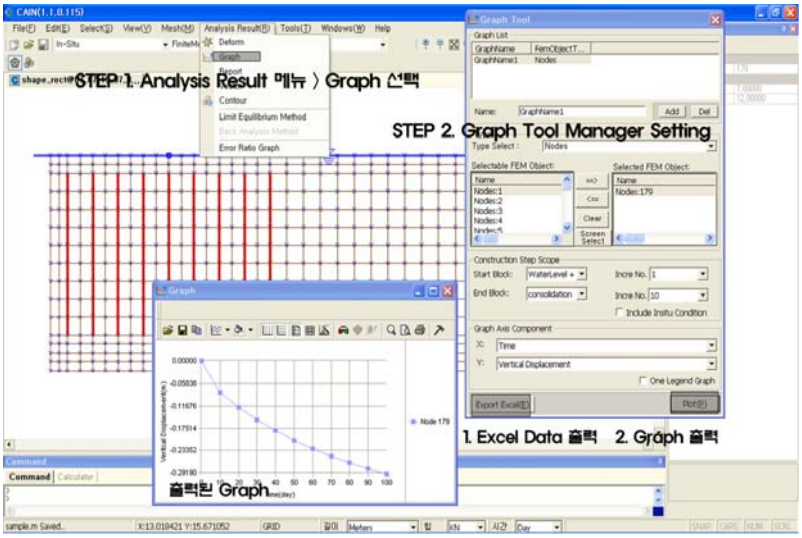


Fig. 2.3.4 Graph 설정 및 출력

(4) Plotting Contour

▶ STEP. 1 프로그램 상단의 Analysis Result 메뉴의 Contour을 선택하여 Contour Setting을 불러온다.

▶ STEP. 2 Contour Setting의 Add를 클릭하여 객체를 만들고 Type에서 보고자하는 해석결과를 선택하고 Inerement Block Range에서 보고자하는 단계를 선택한 후 Screen Apply를 선택하여 화면에 출력한다.

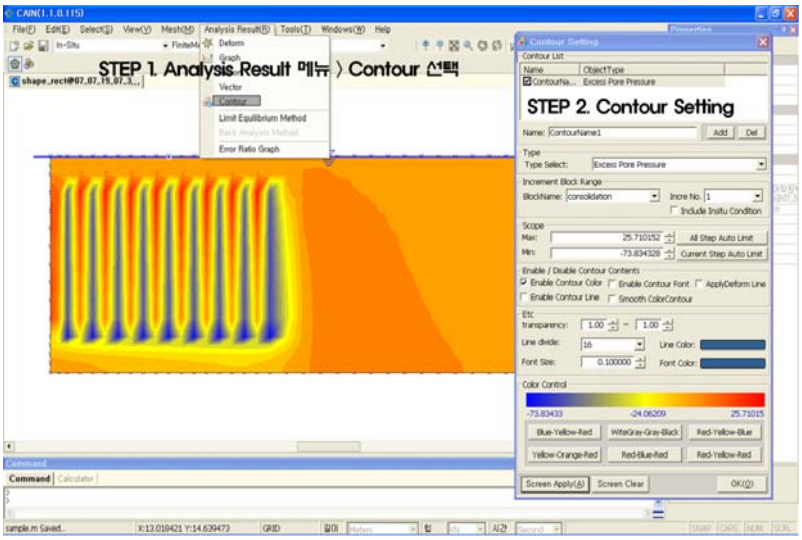


Fig. 2.3.5 Contour 설정・출력

(5) Plotting Report

▶ STEP. 1 프로그램 상단의 Analysis Result 메뉴의 Report를 선택하여 Report Analyzer를 불러온다.

▶ STEP. 2 Report Analyzer에서 보고자하는 FEM Object Type을 선택한 후 각각의 범위와 기타 옵션을 선택하고 하단 Query를 실행하여 사용자의 기호대로 좌측 Result 창에 해당데이터를 불러온다.

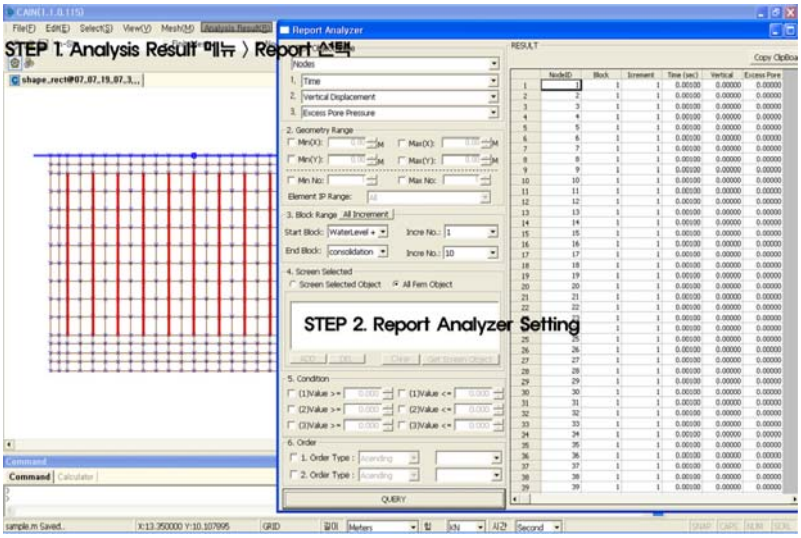


Fig. 2.3.6 Report Analyzer 실행

부록 2. 현장시험시공 관련 사진

1. 부지정리

<table>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>부지 전경</td><td>진입로</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>발전기 부지 부직포 포설</td><td>발전기 부지 사석포설</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>매트흙 운반</td><td>흙, 매트 포설</td></tr>
</table>

2. 석션드레인 시스템 설치

<table>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>집수탱크</td><td>순환탱크</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>분전반</td><td>예비 발전기</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>발전기</td><td>유류탱크</td></tr>
</table>

	
저수조	진공펌프
	
진공펌프 계통 설치 전경	최종 설치 후 전경

3. 배수재 준비과정



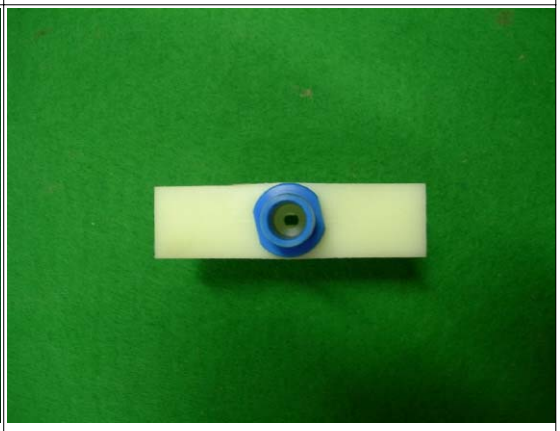
판형 배수재



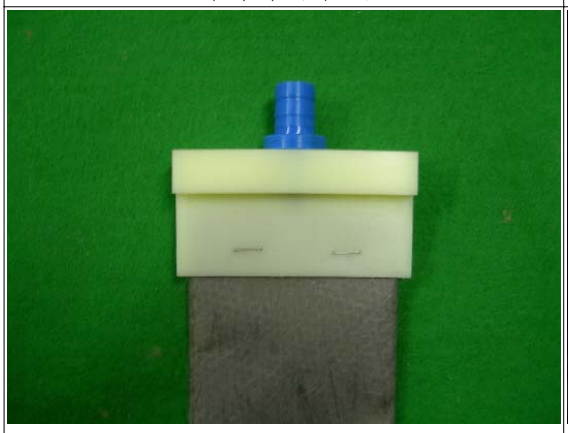
판형 배수재 컷팅



커넥터 (측면)



커넥터 (정면)



커넥터와 배수재의 연결



방수 처리

<table>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>커넥터 연결이 완료된 판형 배수재</td><td>원형 배수재</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>원형 배수재 단면</td><td>무공배수재와 유공배수재의 연결부</td></tr>
</table>

4. 배수재 타설



배수재 타설 장비



배수재 타설 맨드럴 가이드



맨드럴 연결



연결된 맨드럴



판형 배수재 슈



원형 배수재 슈

<table>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>판형 배수재 맨드럴 관입</td><td>원형 배수재 맨드럴 관입</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>배수재 타설 준비</td><td>배수재 타설 준비</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>배수제 타설</td><td>배수재 타설이 완료된 부지 전경</td></tr>
</table>

5. 계측기 설치



천공기



천공 과정



간극수압계 포화



간극수압계 설치



액상침하계 설치(지중)



액상침하계 설치(지표)

	
수평변위계	수평변위계 설치
	
진공압계 연결(원형 배수재)	진공압계 연결(판형 배수재)
	
진공압계 타입(원형 배수재)	진공압계 설치(판형 배수재)

6. 진공호스와 배수재의 연결



배수재와 호스 연결 전



판형 배수재 연결



판형 배수재 연결



원형 배수재 연결



원형 배수재 연결



진공호스와 펌프의 연결부

	
진공호스와 펌프의 연결	시공 완료

첨 부

자체평가의견서

1. 과제 현황

접수 번호	C105A1000020-05A03002020		사업 성격	실용화
연구 분야	E0302			
연구 과제	과 제 명	대심도 연약지반개량을 위한 석션드레인 (Suction Drain)공법과 설계기법의 개발		
	주관연구기관	(주) 지구환경전문가그룹	총괄책임자	정승용
연구 기간	2005. 7. 29 ~ 2007. 7. 28			
협동연구기관	기 관 명		연 구 책 임 자	
	(외)			
위탁연구기관	기 관 명		위탁연구책임자	
	한양대학교 산학협력단(외)		김 수 삼	
참여기업	기업체명		대 표 자	
	(주) 지구환경전문가그룹(외)		정 승 용	

연 구 비 (천원)	연차	정부	민간	계
	1차년도	135,000	45,000	180,000
	2차년도	247,500	82,500	330,000
	3차년도			
	계	382,500	127,500	510,000

2. 평가일 : 2007. 7. 27.

3. 평가자(연구책임자) 확인

본인은 평가대상 연구과제의 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약합니다.

소 속	직 위	성 명	확약(서명, 인)
(주)지구환경전문가그룹	대표이사	정승용	

Ⅰ. 연구개발 실적

평 가 항 목	가중치 (A)	평가척도(B) 수 5	우 4	미 3	양 2	가 1	득점 (A×B)	평 기 의 견
연구수행								
① 연구개발 결과의 우수성 및 창의성	2	5					10	Suction Drain 기법의 영향인자를 효율적으로 산정하여 실제 현장시료에 성공적으로 적용
② 연구개발 수행노력의 성실도	2	5					10	연구계획서 상의 Process에 부합되는 연구를 성실히 수행함
③ 연구개발 결과에 대한 활용가능성	2	5					10	본 연구의 결과를 토대로 실제 현장 지반에 적용이 가능할 것으로 판단됨
④ 연구개발 결과의 파급효과	2	5					10	본 연구개발 결과를 통해 시공비를 크게 단축시킬 수 있음
⑤ 공개 발표된 연구개발 성과 (논문 게제 또는 산업재산권 출원 및 심사 가능성, 발표회개최 등)	2	5					10	국내외 학술지 및 학술발표회, 특허등록 등 다수의 연구 성과를 발표하였음
연구목표 달성도(연구개발계획서상에 기술된 연구목표)								
⑥ Suction Drain 공법의 영향인자 규명	2	5					10	실내 및 현장 실험을 통해 관련 영향인자를 명확히 도출
⑦ 진공압 효율극대화를 위한 결속방법 및 연결시스템 개발	2	5					10	2가지 형태의 결속시스템의 개발 및 적용성 검증
⑧ 현장시험시공을 통한 실용화기술 개발	2	5					10	2차년도 현장시험시공의 수행을 통한 실용화 기술 개발
⑨ 설계 Process 및 체크리스트 작성	2	5					10	설계 Program 및 매뉴얼 제시
⑩ 처리지반 해석 Tool의 개발	2	5					10	Suction-CAIN 프로그램의 개발을 통한 지반 해석 Tool 구축
소계 전문가 평가점수 (100점 만점)							100	

II. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

1차년도 실내 모형실험을 통해 Suction Drain 기법의 영향인자를 도출하고, 1차년도 결과와 2차년도 현장시험시공의 결과를 통해 공법의 적용성 및 개량효율을 파악할 수 있었다. 또한, Suction Drain 공법의 적용을 위한 설계 매뉴얼을 제시하였고, 본 공법에 최적화된 해석 프로그램을 개발하여 범용적인 사용이 가능한 해석기법을 제안하였다. 따라서 적용성 검토가 완료된 Suction Drain 공법을 이용하여, 설계기법을 적용하면 기존의 공법으로는 개량이 불가능했던 대심도 연약지반의 효과적인 개량이 가능할 것이다.

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

본 기법은 진공압 펌프와 배수재 상호 간의 직접적인 연결을 통해 진공효율의 감소인자를 최소화 시킬 수 있으며, 이를 통해 기존에 제시된 압밀촉진공법보다 개량효율을 높일 수 있다. 또한 본 공법의 적용을 통해 주변지반의 변형을 최소화 시키면서, 목표지반을 효과적으로 개량할 수 있다. 따라서 본 공법의 평가시에는 도출된 영향인자 및 설계인자가 타당한가? 본 공법의 현장적용성의 검토 방법이 타당한가? 실제 대심도 지반의 개량에 본 공법의 적용이 가능한가? 배수재와 진공압 펌프 간의 결속방법이 실제 지반에서도 효율에 감소 없이 적용이 가능한가?, 제시된 시공메뉴얼이 타당한가?, 개발된 수치해석기법의 해석결과가 적절한가? 등의 사항을 중점적으로 파악해야 할 것이다.

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

기존에 사용되는 지반개량공법은 재료수급의 어려움, 대심도 연약지반에 적용 불가 등의 여러 가지 문제점을 내포하고 있다. 따라서 이러한 문제점은 본 기법의 개발을 통해 효과적으로 개선될 수 있다. 본 연구를 통해 개발된 석션드레인 기법은 광범위한 지반조건에 범용적으로 적용이 가능하고, 대심도 연약지반에도 적용할 수 있기 때문에, 그 활용도가 매우 높다.

따라서, 1, 2차년도 연구에서 규명된 배수재의 종류, 처리기간, 진공압 크기, 타설간격 및 배치형상 등 많은 설계인자를 통해 도출된 설계 매뉴얼 및 해석프로그램을 이용하여 기존 지반개량공법을 대체할 수 있도록 사업화/실용화를 통한 기술 보급을 꾀한다.