

수평배수공법에 있어서 부압의 영향에 관한 실험적 연구

The Effects of Negative Pressure on Horizontal Drain Method

김정기¹⁾, Jung-Ki Kim, 김지용²⁾, Ji-Yong Kim, 정승용³⁾, Seung Yong Jung, 김수삼⁴⁾, Soo-Sam Kim

¹⁾중앙대학교 토목공학과 대학원, Dept. of Civil Eng. Chung-ang University

²⁾중앙대학교 토목공학과 대학원, Dept. of Civil Eng. Chung-ang University

³⁾지구환경전문가그룹 선임 연구원, Senior Researcher, Expert Group for Earth and Environment

⁴⁾중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environment Eng. Chung-ang University

SYNOPSIS : The horizontal drain method is one of methods improving reclamation ground. This method reduces consolidation time by using drained installed horizontally, and negative pressure is applied on end of these drains by vacuum pump. But, effective negative pressure still wasn't evaluated in applying this method to reclamation ground. To estimate optimum negative pressure, soil box test that make a model the in-situ by installing horizontal drains in the center is performed pressing different vacuum pressure in the laboratory, and the variations in settlement and volume of drained water through the drains during consolidation process were measured. Also, water content with distance from drain and with depth is measured after the test.

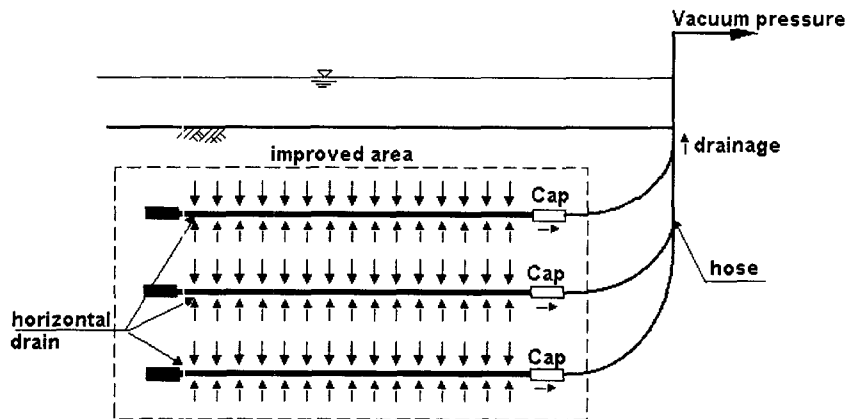
Key words : optimum negative pressure, horizontal drain, water content

1. 서론

최근의 해안매립공사에서는 주위 환경보전 및 공사비 절감 등의 목적으로 주로 점토 또는 실트로 구성된 해안의 하부에 퇴적된 층적층을 준설 제거하는 해저준설공사를 수행하는 경우가 많다. 이러한 해저에 퇴적되어 있는 점성토를 펌프준설선 등을 이용하여 준설매립지에 투입하면 자갈, 모래 등과 같은 조립토와는 달리 침강 퇴적되지 않고 시간 경과와 함께 자중압밀종료 후 지반이 안정한 상태에 이르기까지는 장시간을 필요로 하는 초연약지반이 형성된다. 또한 이러한 초연약해성점성토로 준설매립된 부지는 고풍수비이고 압축성이 큰 지반으로 압밀침하량이 큰 경우가 많으며, 자중압밀 이후에도 지반의 지지력이 거의 없는 상태이므로 시공기계의 투입은 물론 사람의 보행조차도 곤란하므로 장기간의 자중압밀 이후에도 추가적인 지반개량이 필요하다. 이러한 연약지반처리를 위한 개량공법으로 배수재를 수평으로 타설하고 배수재 단부에 진공펌프에 의한 진공압을 가하여 초연약지반을 단기간에 개량하는 수평배수공법이 소개되고 있다. 따라서 매립지에 투입된 점성토를 단기간에 압밀침하시켜 매립지내에 보다 많은 준설토 투입을 가능하게 하여 준설매립기간을 단축시키고, 또한 재투입한 준설점성토량 만큼 성토량을 저감하고 동시에 표층부 중기주행성 확보를 위한 연약지반의 강도 증가를 도모할 수 있다.

수평배수공법을 현장에 적용함에 있어 가장 중요한 것은 배수재의 유효경, 통수능과 진공펌프에 의해 발생하는 진공압의 크기이다. 본 연구에서는 수평배수재의 단부에 작용시킬 적정 부압을 산정하는 것을 그 목표로 하고 있다. 수평배수재의 성능과 진공 펌프에 의해 단부에 가해지는 적정 부압을 평가하기 위하여 본 연구에서는 실제현장에 수평배수재를 타설한 경우를 모형화한 시험을 실시하였다. 본 실험은 실험토조 중앙부에 실제 크기의 단일배수재를 설치하고 이 배수재에 의하여 발생하는 시료의 침하특성, 압밀속도, 그리고 시험 종료 후 깊이별, 배수재로부터의 거리별 함수비를 측정하였다.

준설패립지반에서 수평배수재의 적용은 <Fig. 2.1>에 도시한 바와 같이 배수재를 준설패립지반 내에 매설선을 이용하여 수평으로 설치하여 수평배수재의 단부에 진공펌프에 의한 부압을 가하여 준설패립지반의 간극수를 강제로 탈수시키는 공법이다.



<Fig. > Schematic diagram of Horizontal Drainage using Vacuum

2. 실험

본 시험에서 사용된 시료는 남해안 여천지역에서 채취한 해성점성토로서 시험기의 크기를 고려할 때 이에 필요한 불교란 시료를 확보하는 것은 매우 어렵기 때문에 본 시험에서는 시료를 교란된 상태로 채취하여 실내실험실에서 습윤상태의 흙을 그대로 #10번체로 체가름한 것을 사용하였다. 이 과정 중 시험 결과에 영향을 미칠 정도의 크기가 큰 자갈이나 조개껍데기 등의 불순물을 제거하면서 이와 동시에 시료채취지점과 동일한 위치에서 운반되어온 해수를 첨가하여 입자간의 포화도를 높이면서 고함수비 상태의 시료를 준비하였다. 본 시험에서 사용된 시료의 토질특성을 정리하면 <Table 2.1>에 제시되어 있는 바와 같다.

<Table 2.1> Soil properties used in this study

Classification	Properties	Classification	Properties
Soil classification	CL	Liquid limit (LL)	44±2%
Percent passing No. 200 sieve	97.8%	Plastic limit (PL)	24±2%
Specific gravity	2.68	Plastic index (PI)	20±2

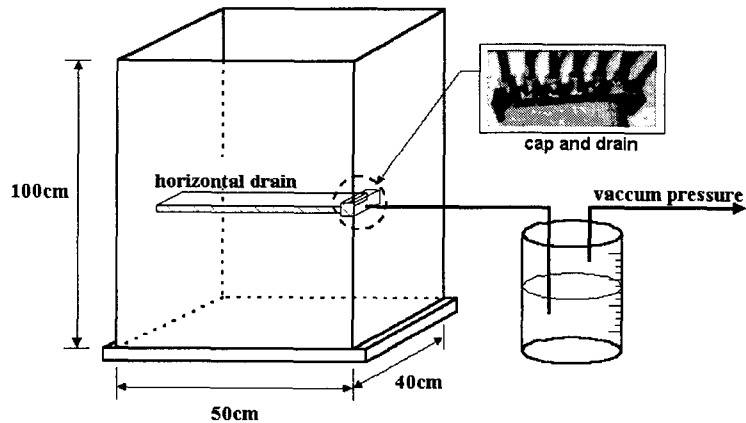
2.1 실험기기

일반적으로 사용되고 있는 방사형압밀시험(Radial consolidation test)을 응용한 중형토조 압밀시험기는 토괴에 단일의 배수재가 설치된 경우를 모형화한 실험이며 시료 중앙에 설치된 배수재의 단부에 진공압을 작용시켜 배수재로 배수가 이루어지도록 하여 발생하는 침하량과 배수량을 조사하는 시험이다.

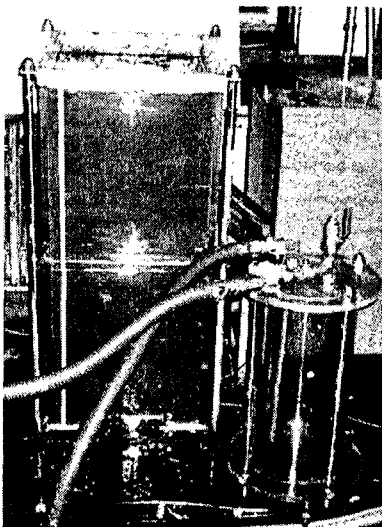
시험기기는 <Fig. 2.1>과 <Fig. 2.2>에 제시된 바와 같이, 폭40cm×길이50cm×높이100cm인 사각형 아크릴로 이루어져 있으며, 시험기의 상부와 하부가 분리되도록 설계되어 시험 준비가 용이하게 제작되어 배수재가 설치된 후에 직사각형 셀에 점성토 시료를 포설하고 진공압을 가하는 순으로 작업할 수 있도록 설계되었다.

<Fig. 2.3>은 진공펌프의 사진을 보여주고 있다. 진공펌프에 의해 발생된 진공압은 펌프의 우측에 설치되어 있는 진공탱크에 저장되며 작용압력은 연결관에 설치되어 있는 진공레귤레이터에 의해 조절되어 각 수평배수재에 진공압이 작용되도록 구성되어 있다. 배수조는 2개를 설치하여 시료에서 배수되는 간극수의 양을 측정하였으며 실험 진행 중 진공펌프의 과열을 방지하기 위하여 냉각수 공급장치를 설치하였다.

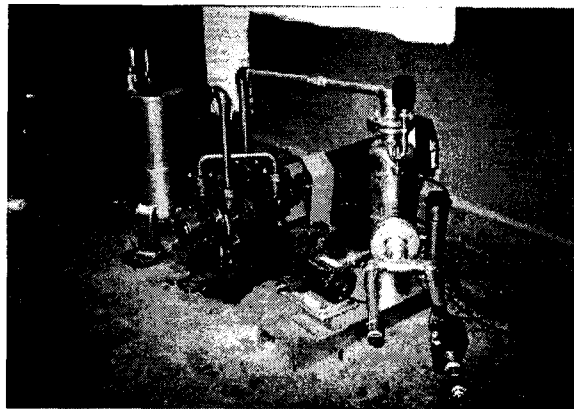
시료 내부 간극수의 배제는 현장조건과 동일하게 공기중에 노출되어 있는 시료의 상부와 중앙에 설치되어 있는 배수재로 배수되도록 하였다. 압밀 진행시 시료 표층의 침하량을 측정하였으며 배수된 간극수의 유량은 진공관과 연결된 배수량 측정셀에서 체적을 측정하였다.



<Fig 2.1> 토조시험의 개략도



<Fig. 2.2> 중형토조시험기와 배수셀



<Fig. 2.3> 진공펌프시스템의 전경

2.2 실험절차

본 시험은 단일의 배수재가 설치된 지반의 형상을 모형화하여 진공압밀에 의한 개량효과를 조사하기 위한 시험으로서 시료의 압밀은 자중과 진공펌프에 의한 부압의 작용으로 발생된다.

앞에서 언급한 바와 같이, 시료는 #10번체를 통과시켜 불순물을 제거한 슬러리 상태의 시료를 사용하였으며 시료의 중앙에 설치된 배수재에 진공압을 달리 가하여 압밀을 진행시키고, 경과시간에 따른 표층의 침하량과 배수량을 측정하였다. 적정 부압을 산정하기 위한 본 시험 조건은 <Table 2.2>와 같다.

<Table 2.2> 시험조건

	Initial water content(W_0)	Initial height(H_0)	Vacuum pressure
Case 1	267%	90cm	0.2kgf/cm ²
Case 2	278%	90cm	0.4kgf/cm ²
Case 3	230%	90cm	0.8kgf/cm ²

수평배수재를 설치한 후 진공압을 가하는 압밀시험을 실시하기 위한 자세한 과정을 설명하면 다음과 같다.

- ① 현장에서 채취한 교란된 상태의 시료를 불순물을 제거하기 위하여 #10번체(2mm 눈금)를 통과시키면서 해수를 적당량 첨가하여 슬러리 상태로 준비한다.
- ② 중형토조의 소정의 위치에 배수재를 고정시키고 양 단부에 클리퍼를 씌운 후 완전히 밀봉한다.
- ③ 배수재의 한쪽 단부에 진공펌프로 연결되는 배수관을 연결시킨다.
- ④ 배수재의 위치가 변화되지 않도록 조심스럽게 슬러리 상태의 시료를 소정의 높이까지 포설한다.
- ⑤ 시료의 포설이 끝나면 고정된 배수재를 풀어 자유단이 되도록 한다.
- ⑥ 시료가 어느 정도 안정화 된 후 배수관의 밸브를 열고 진공압을 가하면서 시간에 따른 표층의 침하량과 배수량을 측정한다.
- ⑦ 시험 종료 후 시료의 높이별, 배수재와의 거리별로 시료를 채취하여 함수비를 측정한 다음 배수재의 변형형상을 관측하고 기록한다.

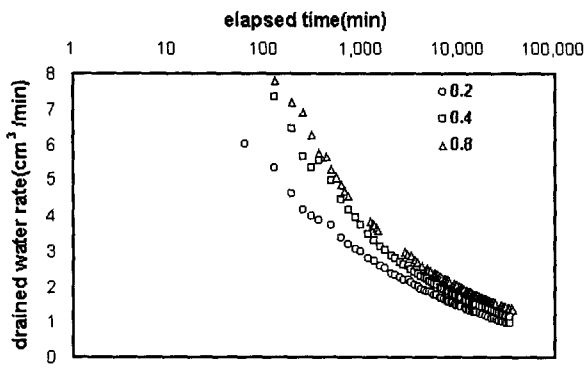
3. 실험결과

진공압 재하와 동시에 소정의 시간간격으로 표층의 침하량과 배수량을 측정함으로써 수평배수재를 이용한 연약점성토의 개량효과를 조사하였다.

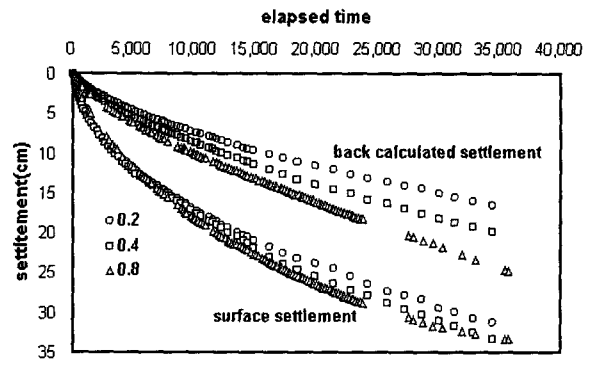
<Table 3.1>은 약 25일이 경과한 시점에서 각 조건에 대해 압밀이 진행됨에 따라서 간극수가 진공압에 의하여 시료 중앙에 설치된 수평배수재를 통하여 배출된 간극수의 누적 배수량과 진공압이 가해진 직후 표층의 초기높이(H_0)와 시험 종료 후 표층의 최종높이(H_f), 함수비 변화를 나타낸 것이며, 최종함수비는 전체 함수비를 평균한 값이다.

<Table 3.1> 실험결과

	Initial height(H_0)	Final height(H_f)	cumulated drainage	Initial water content(W_0)	Final water content(W_f)	Reduction effect
Case1	87.8cm	55.2cm	34,360 cm ³	267%	118%	149%
Case2	86.8cm	53.63cm	39,520 cm ³	278%	112%	166%
Case3	89.3cm	55.45cm	49,360 cm ³	230%	96%	134%



<Fig. 3.1> 시간에 따른 배수속도



<Fig. 3.2> 시간에 따른 표층침하량과 배수량으로부터 역계산된 침하량

<Fig. 3.1>은 시간의 경과에 따른 배수속도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 제시된 바와 같이 배수재에서 배출된 간극수의 초기배수속도는 각 조건에서 $10\text{cm}^3/\text{min}$ 이하임을 알 수 있다. 본 시험에 사용된 배수재의 통수능력이 $1,200\sim 1,600\text{cm}^3/\text{sec}$ 정도인 것을 감안하면 본 실내시험에서 시간당 배수되는 간극수의 양은 배수재의 통수능력에 비하여 크게 작기 때문에 배수재는 집수된 간극수를 원활히 배수하였고 따라서, well resistance 효과는 무시하여도 좋다는 것을 알 수 있다.

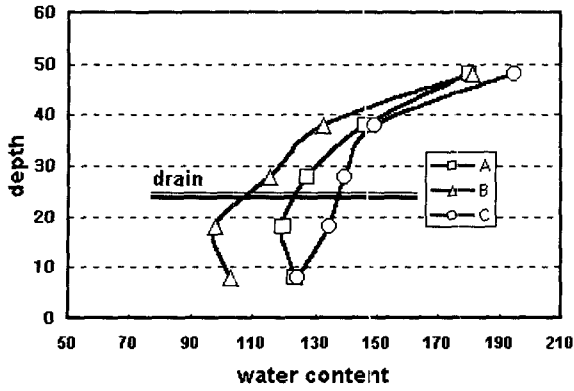
<Fig. 3.2>는 각 조건에 대하여 시간에 따른 표층의 침하량과 배수량으로 역계산(=배수량(cm^3)÷시료의 면적(cm^2))된 침하량을 비교한 것이다. 표층 침하량은 유사한 경향을 보이는 반면, 역계산된 침하량은 표층부의 침하량과 상당히 상이한 것을 볼 수 있다. 배수재로부터 배수된 배수량으로 역계산된 침하량은 최종 표층침하량의 약 74%정도밖에 미치지 못하고 있다. 이러한 차이가 발생하는 원인은 표층부 침하의 경우 진공압에 의한 압밀 이외에 시료의 전체적으로 발생하는 자중압밀에 의한 침하량이 누적되어서 나타나기 때문이며 이러한 경향은 시료의 하부로 내려갈수록 줄어들 것으로 판단된다.

4. 함수비 측정

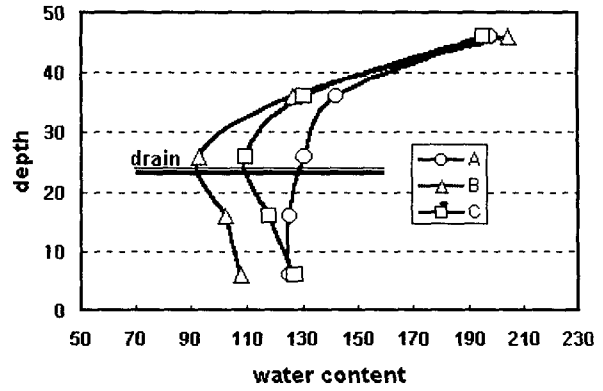
시험 종료 후 수평배수재에 의한 압밀개량효과를 조사하기 위하여 표층으로부터 깊이별, 배수재로부터 거리별 함수비를 측정하였다. 또한, 표층의 함수비 측정에 있어서 지표수의 영향을 줄이기 위하여 모든 조건에 대하여 표층 2cm를 걷어 내고 함수비를 측정하였다. 시험 종료 후 수평배수재의 변형을 조사한 결과 배수재 자체의 변형은 거의 없었지만 부압이 큰 $0.8\text{kgf}/\text{cm}^2$ 인 경우가 부압이 작은 경우보다 수평방향으로 배수재의 위치 변화가 큰 것을 알 수 있었다.

<Fig. 4.1>와 <Fig. 4.2>는 단일배수재가 설치된 시료에 진공압을 재하한 중형토조시험 종료 후 측정된 함수비 자료를 이용하여 시료 전체에서 압밀 종료 후 측정위치에서의 함수비와 그 주변의 함수비의 관계를 등함수비곡선으로 나타낸 것이다. 시료의 초기함수비는 약 230~278% 정도로 시험 종료 후 시료의 평균함수비는 평균 96~118% 정도로 나타나 약 134~149% 정도의 함수비 저감효과를 나타내었다.

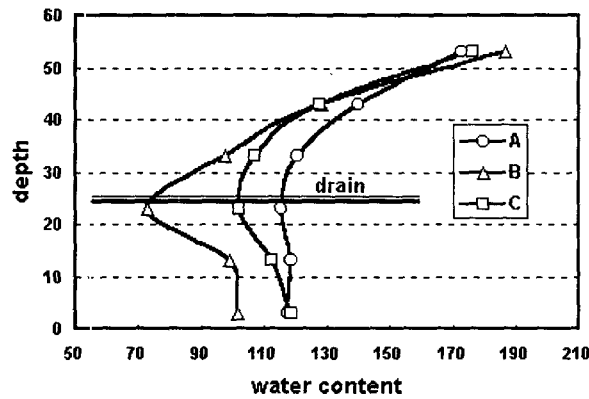
<Fig. 4.1>는 표층으로부터 깊이별 함수비 측정결과로부터 구한 함수비 분포를 보여주는 것으로 배수재로부터 거리가 먼 A와 C 지점의 함수비는 깊이에 따라 감소하다가 배수재 설치위치 이하에서는 거의 일정한 경향을 보이고 있지만, 배수재와 거리가 가까운 B지점에서는 $0.2\text{kgf}/\text{cm}^2$ 와 $0.4\text{kgf}/\text{cm}^2$ 부압이 가해진 경우보다 $0.8\text{kgf}/\text{cm}^2$ 의 부압이 가해진 경우가 배수재가 설치된 심도에서 함수비가 급격하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한, 대부분의 경우 배수재 쪽으로 기울어진 곡선분포를 보여주고 있는데, 이로부터 배수재로부터 거리가 가까울수록 그 위치의 과잉간극수압의 소산이 보다 빠르게 진행되는 것을 쉽게 추측할 수 있다.



(a) 0.2kgf/cm²



(b) 0.4kgf/cm²

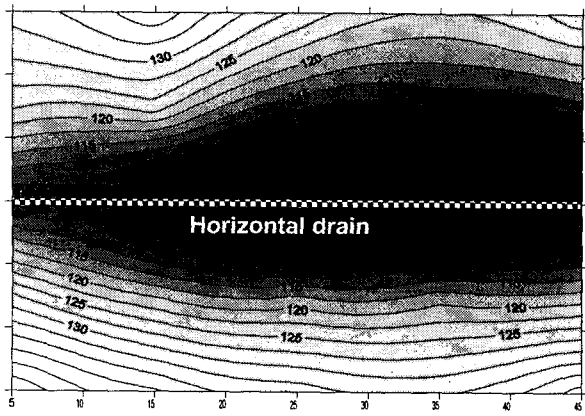


(c) 0.8kgf/cm²

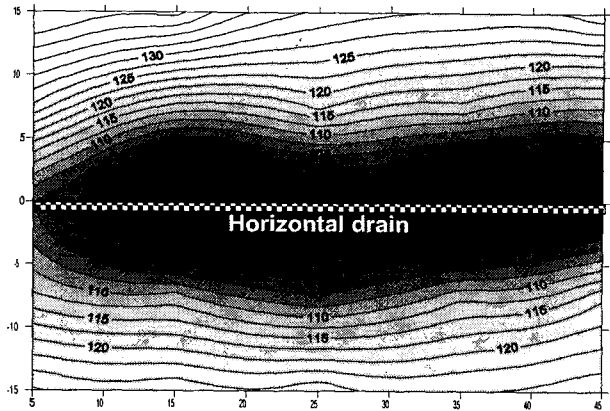
<Fig. 4. 1> 깊이에 따른 함수비 분포

<Fig. 4.2>는 배수재로부터 수평방향으로의 거리별 함수비 측정결과를 이용하여 구한 등함수비곡선으로서 모든 조건에서 배수재에 근접하면서 함수비가 감소하는 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. <Fig. 4.3>은 시험종료 후 중앙에 위치한 수평배수재로부터 수평방향 거리별 함수비를 측정된 결과를 이용하여 배수재 중심에서의 거리와 초기함수비($W_{initial}$)와 최종함수비(W_{final})의 비($W_{initial} / W_{final}$)로 나타내었다. 그림에서 각 거리별 함수비는 배수재로부터 거리가 동일한 지점을 평균하여 구한 것이다.

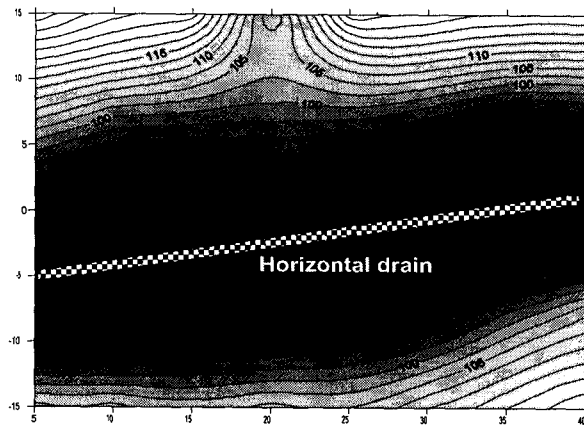
이 그림으로부터 부압이 클수록 배수재로부터 수평방향에 따라 기울기가 커진다는 것을 알 수 있다. 이는 함수비의 변화 폭이 크다는 것을 의미한다. 함수비의 변화 폭이 크다는 것은 개량효과가 부압이 클수록 균등하지 않다는 것을 말하는 것이다. 즉, 거리별 함수비 저감효과가 균등하지 않다는 것이다. 이러한 현상이 발생하는 원인으로 배수재의 필터에서 흙 입자, 유기물질, 염분, 미생물의 침전 및 성장으로 필터내 공극이 막히고 간히는 과정인 막힘현상(Blocking, Blinding, Clogging)을 들 수 있다. 즉, 부압이 클수록 필터쪽으로의 물의 흐름과 흙 입자의 이동이 빨라 부압이 작은 경우보다 배수재의 필터근처에 Blocking, Blinding, Clogging등의 빠른 변화과정을 거쳐 최종적으로 낮은 투수성을 갖는 층, 즉 고체필터구조를 형성하여 필터 내로의 간극수 유입을 감소시키기 때문으로 사료된다.



(a) 0.2kgf/cm²

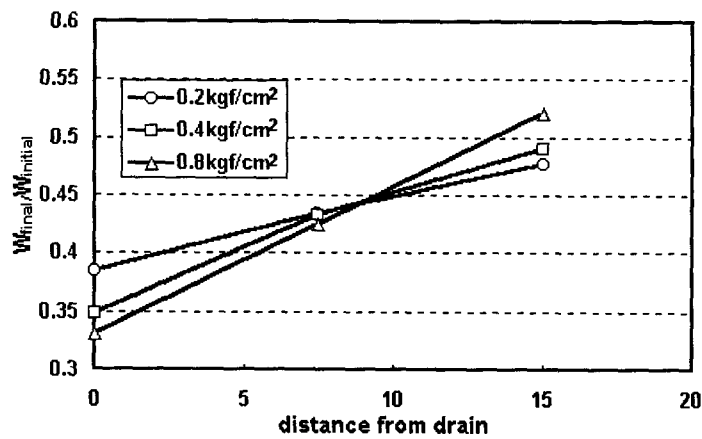


(b) 0.4kgf/cm²



(c) 0.8kgf/cm²

<Fig. 4.2 > 수평배수재로부터 거리에 따른 함수비 분포



<Fig. 4.3 > 시간에 따른 배수재로부터 $W_{\text{final}}/W_{\text{initial}}$

5. 결론

수평배수공법에 있어서 수평으로 설치된 배수재의 단부에 진공펌프에 의해 작용하는 적정 부압을 산정하기 위하여 단일 배수재를 설치하고, 0.2kgf/cm^2 , 0.4kgf/cm^2 과 0.8kgf/cm^2 의 부압을 가하는 모형 토조 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 약 25일이 경과한 시점에서 각 조건에서 압밀이 진행됨에 따라서 진공압에 의하여 시료 중앙에 설치된 수평배수재를 통하여 약 $34,360\text{cm}^3$, $39,520\text{cm}^3$, $49,360\text{cm}^3$ 의 간극수가 배출되었으며 시료 표층은 약 33cm가 침하 하였다. 이로부터 수평배수재가 지반의 압밀촉진에 큰 효과를 발생시킬 수 있다는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다.
2. 시료의 초기함수비는 약 230~278% 정도로 시험 종료 후 시료의 평균함수비는 평균 96~118 % 정도로 나타나 약 134~149%정도의 함수비 저감효과를 나타내었다. 0.8kgf/cm^2 의 부압을 가하는 경우는 배수재 근처에서 최고 70%까지 함수비가 감소하였다.
3. 표층으로부터 깊이별 함수비와 배수재로부터 수평방향의 함수비 측정결과에 의하면 낮은 부압에서는 배수재로부터 거리별로 함수비의 저감효과가 균등하고 시험 종료 후 배수재의 위치변화가 없는 반면 높은 부압에서는 배수재 근처에서 상당한 함수비 저감 효과가 있었지만 함수비의 저감효과가 균등하지 않고 시험 종료 후에도 배수재의 위치 변화가 다른 저부압에서 보다 큰 것을 알 수 있었다.
4. 수평배수재에 의해서 배출되는 간극수의 배수속도는 모든 조건에서 초기 배수속도가 거의 $10\text{cm}^3/\text{min}$ 이하로 본 시험에 사용된 배수재의 통수능력은 $1,200\sim 1,600\text{cm}^3/\text{sec}$ 정도인 것을 감안하면 시간당 배수되는 간극수의 양은 배수재의 통수능력에 비하여 크게 작기 때문에 배수재는 집수된 간극수를 원활히 배수하였고 따라서, 본 실험에서는 well resistance효과는 무시하여도 좋다는 것을 알 수 있다. 그러나, 시험에서 사용된 배수재의 길이는 50cm로 현장조건(100~200m)에 비하여 매우 짧기 때문에 well resistance의 효과를 조사할 수 없으므로, 현장시공과 이론식을 이용한 세심한 연구를 통하여 배수재의 타설길이에 따른 최소요구통수능력을 산정하는 것이 요구된다고 사료된다.

참고문헌

1. 강민수, “영향인자를 고려한 연직배수기술의 개발에 관한 연구”, 중앙대학교 64회 박사학위논문, 1998
2. 渡義治, 新舎博, 林健太郎, “水平ドレーン材を利用した真空壓密工法に関する基礎實驗”, 五洋建設(株), Vol.14, pp. 137-142, 1985
3. 渡義治, 樋口洋平, 新舎博, “水平ドレーン工法による超軟弱地盤の改良“, 第8回ジオテクスタイルシンポジウム, pp. 102-110, 1993