

## 연직배수재가 타설된 지반의 복합통수능 해석

### Composite Discharge Capacity Analysis of Vertical Drain Installed in Ground

김창영<sup>1)</sup>, Kim-Chang Young, 광노경<sup>2)</sup>, Kwak-No Kyung, 이 송<sup>3)</sup>, Song Lee

1) 한국철도시설공단 팀장, team manager of Korea rail network authority

2) 서울시립대학교 토목공학과 석사과정, Master course, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul

3) 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul

**개요(SYNOPSIS) :** Vertical drain method, which is one of the soft ground improvement methods, shortens drain path to accelerate consolidation process and is applied in many sites. At a recent, composite discharge capacity experiment that analyzes discharge amount by consolidation behavior with overburden pressure of soft ground in laboratory, simulates similarly with actuality.

Geotechnical engineering problems such as soft ground improvement are solved by numerical analysis by development of computer and numerical analysis techniques. Numerical analysis does that result is contrary by user's inexperience for choice of constitution model and application of analysis method.

Therefore, this thesis experiments on composite discharge capacity test and study discharge capacity of drain and consolidation behavior of soft ground installed prefabricated vertical drain boards. Also, This thesis studied reasonable input parameters and constitution model by compare results of composite discharge capacity test and numerical analysis using PLAXIS that is 2D finite element numerical analysis program.

**주요어(Key words) :** vertical drain board, discharge capacity, composite discharge capacity experiment, finite element numerical analysis

## 1. 서 론

근래에 들어 우리나라는 다양한 교통망의 확보와 좁은 국토의 효율적 활용 방안으로 도로, 철도, 항만시설, 공항, 공장 및 주거용지 등을 연약지반 상에 건설하고 있다. 우리나라의 연약지반은 해안 지역을 중심으로 다양한 두께를 갖는 퇴적 점성토층이 주로 형성되어 있으며, 최근 매립에 사용되고 있는 재료를 해성점토로 투기하고 있어 준설매립지 또한 대부분 이에 포함된다. 이러한 연약지반상에 구조물을 시공하는 경우 압밀침하를 촉진하거나 전단강도를 증진키기 위한 다양한 연약지반 처리공법이 개발되었다. 본 연구에서는 지반에 타설된 배수재를 현장과 유사한 조건으로 구현하는 복합 통수능 실험을 실시하여 배수재가 타설된 지반의 시간에 따른 압밀거동 및 배수재의 통수능력을 분석하였다. 또한, 이를 2차원 유한요소 수치해석 프로그램으로 모델링하고 복합 통수능 실험결과와 비교 분석함으로써 압밀거동 해석을 위한 합리적인 구성모델과 입력정수에 대해 연구하고자 한다.

## 2. 복합 통수능실험 및 분석

### 2.1 실험방법

복합 통수능 실험은 초기높이를 60cm로 형성하고, 하중을 하루에 50kPa씩 증가하여 250kPa까지 가압하여 배

수재가 타입된 조건과 타입하지 않은 조건에서 아래와 같은 과정으로 실시하였다. 통수능력 실험에서 초기 동수구배는 0.5로 설정하였다.

#### (1) 배수재 설치

배수재는 필터에 존재하는 공기를 제거하기 위해서 물속에 일정시간 담가두어 충분한 포화를 유도한다. 원통형 토조를 조립하고, 하부 바닥판에 설치되어 있는 클램프에 배수재를 고정시킨다. 실험에 사용된 배수재는 폭 96mm, 두께 3.5mm의 단면을 가지고 있으며, 하모니카형 코어와 포켓식 필터로 구성되어 있다.

#### (2) 시료 조성

실험시 점토시료를 균질하게 형성하기 위하여 함수비 150%조건으로 물을 가하여 시료를 교반한다. 교반된 시료를 원통형 강제프레임에 투입하면서 높이 30cm까지 지반을 조성한다. 간극수압 포트를 이용하여 토조내부로 연결된 간극수압계를 원하는 위치(측벽으로부터 5cm 지점에 설치)에 올려놓는다. 간극수압계가 움직이지 않도록 조심하면서 나머지 30cm의 시료를 투입하면서 총 60cm 높이로 시료를 조성한다. 시료 조성시에는 배수재가 수직으로 매입되도록 배수재를 임시로 고정시킨 상태에서 주의를 기울여 작업한다.

#### (3) 실험장치 조립

배수재를 상부 클램프와 연결하고 강제재하판에 고정한다. 유·출입 수조의 높이를 조절하여 초기 동수구배에 해당하는 수위차를 맞춘다. 배수재 내부 포화와 연결상태 확인을 위하여 셀 하부의 유입밸브를 열어 상부 강제재하판으로 물이 올라오는지 확인한 후 밸브를 잠근다. 상부셀과 하중재하 장치를 설치하여 조립을 마무리한다.

#### (4) 압밀실험

초기압력 50kPa을 24시간 가압한다. 간극수압 측정을 통해 압력전달이 충분하게 이루어지고 있는지 파악한다. 하중을 하루에 50kPa씩 250kPa까지 증가면서 시간에 따른 침하량과 간극수압을 측정한다.

#### (5) 통수능 실험

압밀진행 중 일정한 시간에서 하부의 유입밸브를 개방하여 유입수조의 물이 배수재 하부로 유입되도록 하면서 유출수조로 배출되는 물의 양을 측정하여 통수능력을 파악한다.

## 2.2 배수재 타설 조건

압밀하중이 증가되는 시점에서 급격한 침하가 나타났으며, 상재하중 250kPa 이후에는 비교적 완만한 압밀침하 경향을 보였다. 100, 150, 200, 250kPa의 하중이 작용하는 시점에서는 각각 1.11, 4.20, 6.55, 8.67cm의 침하를 보였으며, 250kPa까지 5단계에 걸쳐 압밀하중을 재하하는 과정에서 총 28,500분(약 20일) 동안 총 18.34cm의 침하량을 보였다.

침하량 측정 결과로부터 시간에 따른 변형률과 시간에 따른 평균 간극비를 산정하였다. 실험 종료시점의 최종 변형률은 30.6%로 나타났으며, 간극비는 초기치 2.867에서 실험 종료시 1.685까지 감소하였다. 상재하중을 재하하면서 압밀기간 중에 통수능력 실험을 수행한 결과, 시간경과에 따른 배수재의 통수능력은 압력이 증가할수록, 또 시간이 경과함에 따라 현저하게 감소하는 경향을 보였다. 250kPa의 최종 상재하중 작용 이후에도 서서히 감소하다가 약 12일 경과시점부터는 통수능력의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 50, 100, 150, 200kPa의 상재하중을 작용한 시점에서의 통수능력은 각각 63.2, 44.5, 34.5, 28.8cm<sup>3</sup>/sec으로 분석되었다. 250kPa의 압밀하중을 작용시킨 시점에서는 27.5cm<sup>3</sup>/sec의 통수능력이 실험종료 시점에서는 4.3cm<sup>3</sup>/sec으로 분석되어 1/6이하로 감소하는 경향을 보였다.

압밀침하량 및 변형률에 따른 통수능력은 침하량 또는 변형률이 증가함에 따라 통수능력은 감소하는 경향을 보인다. 이와 같은 실험결과로 나타나는 통수능의 저하현상은 점토층의 압밀침하로 인한 배수재의 변형과 수평방향의 압력증가에 의한 유로 단면적 감소 등이 주된 원인이라 할 수 있을 것이다.

## 2.3 무처리 조건

배수재가 타설된 지반에서의 압밀거동과 비교하기 위하여 배수재를 타설되지 않은 조건으로 복합 통수능 실험 장치를 이용하여 점토의 압밀실험을 실시하였다. 시간 경과에 따라 재하된 하중과 침하량을 배수재 타설조건과 함께 보면 100, 150, 200, 250kPa의 하중이 작용하는 시점에서는 각각 0.40, 0.92, 1.37, 1.53cm의 침하를 보였으며, 250kPa까지 5단계에 걸쳐 압밀하중을 재하하는 과정에서 총 28,500분(약 20일) 동안 총 4.63cm의 침하량을 보였다.

침하량 측정 결과로부터 시간에 따른 변형률과 시간에 따른 평균 간극비를 산정하였다. 실험 종료시점의 최종 변형률은 7.72%로 나타났으며, 간극비는 초기치 2.867에서 실험 종료시 2.567까지 감소하였다.

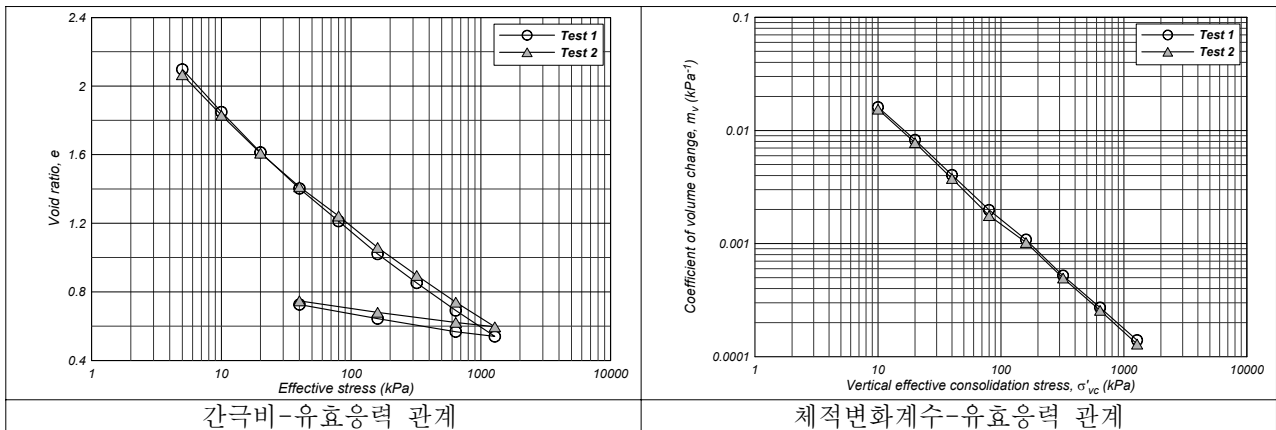
또한 시간에 따라 측정된 간극수압에서 정수압을 제거하여 과잉간극수압을 산정하였으며, 50, 100, 150, 200kPa의 상재하중 재하시점에서 각각 55.0, 89.0, 142.0, 194.1kPa의 과잉간극수압이 측정되었으며, 250kPa의 최종압력 재하시점에서는 245.1kPa의 과잉간극수압이 작용하여 최종하중 재하 후 15일 경과 of 실험종료 시점에서는 233.2kPa의 과잉간극수압이 분석되었다. 과잉간극수압으로부터 최종시점에서의 압밀도를 분석하면,  $6.7\%(U=1-u_c/u_e)$ 로 나타났다.

배수재가 타설된 실험에 비해 무처리 실험 결과는 침하가 늦게 나타나고 있으며, 과잉간극수압의 소산도 느리게 나타나며, 연직배수재 타설에 의해 지반의 압밀효과가 촉진되는 것으로 분석되었다.

## 3. 표준압밀실험 및 분석

정규압밀 영역에서의 압축지수,  $C_c$ 는 0.603, 과압밀영역에서의 팽창지수,  $C_s$ 는 0.112로 분석되었다. 체적변화계수,  $m_v$ 는 그림 3.14에서 도시한 바와 같이 로그축의 하중증가에 따라 선형적인 감소경향을 보이며,  $2.55 \times 10^{-5} \sim 0.032 \text{ m}^2/\text{kN}$ 의 범위로 분포하고 있다.

하중에 따른 연직압밀계수,  $C_v$ 를 산법으로 구하여 그림 3.15에 나타내었다.  $C_v$ 는 하중이 증가함에 따라 감소하다 다시 증가하는 경향을 보이며,  $1.33 \times 10^{-3} \sim 3.73 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{day}$  범위로 분포하고 있다.



투수계수는 실험 하중단계에서 연직압밀계수,  $C_v$ 를 산정 후 투수계수  $k_v = C_v \cdot m_v \cdot \gamma_w$ 의 관계식을 이용하여 추정 한 결과로서 계산된 투수계수 값은  $5.71 \times 10^{-6} \sim 1.10 \times 10^{-3} \text{ m/day}$  범위로 분포하고 있다.

## 4. 유한요소해석 및 분석

### 4.1 수치해석 조건

#### 4.1.1 표준압밀실험

유한요소 수치해석을 이용한 압밀거동 특성 분석을 위한 입력정수 및 구성모델에 대한 적합성을 검토하기 위하

여 먼저 표준압밀실험에 대한 모델링을 수행하였다.

시료의 모델은 Modified cam-clay model을 적용하였다. 표준압밀실험에 사용된 시료의 초기함수비는 77.3%, 비중은 2.72이므로 초기간극비는 2.103이며, 포화단위중량은 15.543kN/m<sup>3</sup>이다. 압밀특성치는 압축지수, C<sub>c</sub>는 0.603, 팽창지수, C<sub>s</sub>는 0.112로 입력하였다. 투수계수는 하중작용에 따라 변하기 때문에 간극비-투수계수 결과를 반영하여 초기조건에서의 투수계수는 1.35×10<sup>-5</sup>m/day, 투수계수 변화비, C<sub>k</sub>는 0.722를 입력하였다. 여기서, 투수계수 변화비, C<sub>k</sub> = Δe / log(k<sub>2</sub>/k<sub>1</sub>)으로 정의되는 입력치이다. 이와 같이 표준압밀해석을 위한 입력정수를 아래에 정리하였다.

구성모델	r <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	k <sub>x,0</sub> =k <sub>y,0</sub> (m/day)	C <sub>k</sub>	e <sub>0</sub>	C <sub>c</sub>	C <sub>s</sub>
Modified cam-clay model (Soft soil model)	15.543	1.35 ×10 <sup>-5</sup>	0.722	2.103	0.603	0.112

표 4.1 표준압밀실험 수치해석을 위한 입력정수

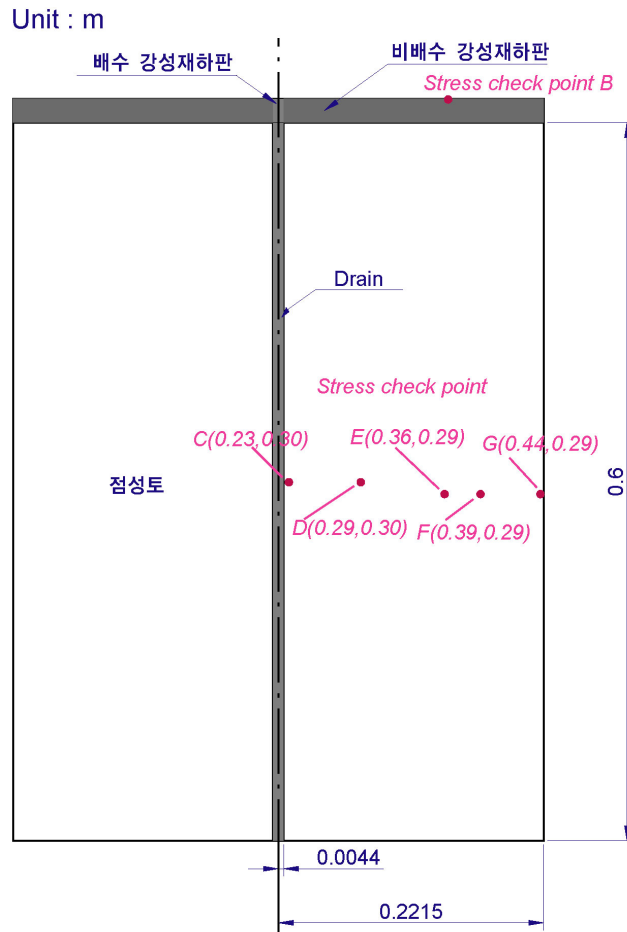


그림 4.4 복합 투수능 실험 수치해석 단면

### 4.1.2 입력조건

복합 통수능 실험의 수치해석을 위해 필요한 입력값은 아래와 같이 적용하였다.

표 4.2 수치해석 입력정수

구분	구성모델	$r_{sat}$ ( $kN/m^3$ )	$k_{x,0}=k_{y,0}$ ( $m/day$ )	$C_k$	$e_0$	$C_c$	$C_s$
점토	Modified cam-clay model (Soft soil model)	14.45	$2.33 \times 10^{-5}$	-	2.867	0.603	0.112
배수재	Modified cam-clay model (Soft soil model)	14.45	7082	0.644	2.867	0.603	0.112

(a) 점토시료 및 배수재

구분	구성모델	$r_{sat}$ ( $kN/m^3$ )	배수 조건	E ( $kPa$ )	$\nu$
강성재하판 중심 배수재 연결 관	Linear elastic	0	완전배수	$1 \times 10^{10}$	0
강성재하판 외곽	Linear elastic	0	불투수	$1 \times 10^{10}$	0

(b) 강성재하판

## 4.2 수치해석 결과

### 4.2.1 표준압밀실험 해석결과

표준압밀실험과 동일한 조건으로 유한요소 수치해석을 수행한 결과, 시간에 따른 침하량을 그림 4.7과 같이 얻었다. 각 단계별로 하중재하시점에서 급속한 침하가 발생하고, 단계별 압밀기간인 1일 동안의 침하가 수렴하는 형태로 나타났다.

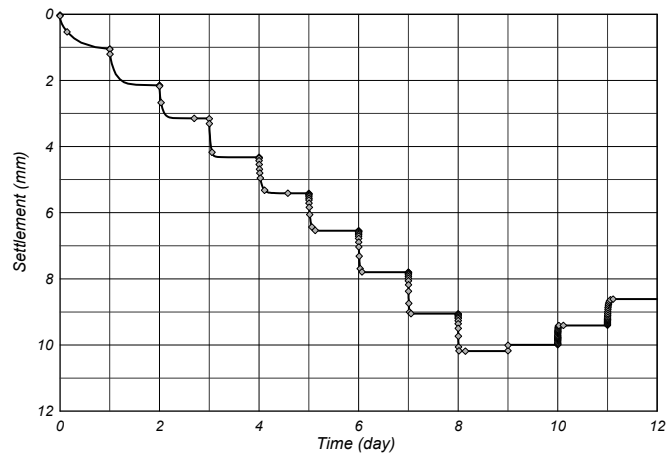


그림 4.7 표준압밀실험 수치해석의 시간에 따른 침하량

표준압밀실험에 대한 수치해석 결과로부터 간극비와 유효응력과의 관계를 산정하여, 그림 4.10에 실험결과와 함께 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 실험결과와 수치해석에서의 유효응력에 따른 간극비 관계가 유사한 경향으로 나타나고 있다. 그러므로 수치해석에 적용된 구성모델 및 입력정수가 압밀거동을 비교적 잘 분석하는 것으로 판단된다.

수치해석에서의 압밀속도를 분석하기 위하여 하중재하 단계 40kPa과 160kPa, 640kPa의 각각 하중단계에서 시간-압밀도(=현재침하/최종침하)관계를 실험결과와 함께 그림 4.9~그림 4.11에 각각 나타내었다. 그림에서 보

는 바와 같이 실험결과 수치해석결과가 유사한 경향으로 분석되고 있는 것으로 나타났다. 그러므로 표준압밀실험을 분석한 유한요소 수치해석에서 압밀거동과 관계된 입력정수가 적합하게 적용된 것으로 판단된다.

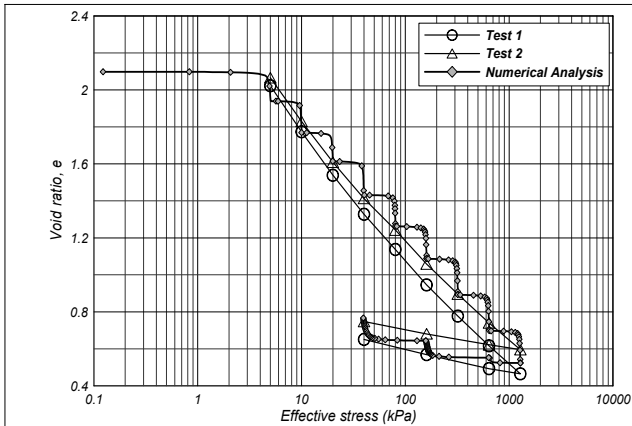


그림 4.8 표준압밀실험 수치해석의 간극비-유효응력

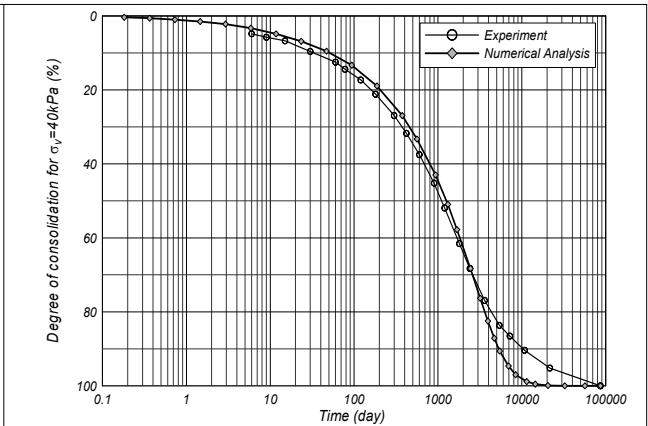


그림 4.9 40kPa 하중단계에서의 시간-압밀도

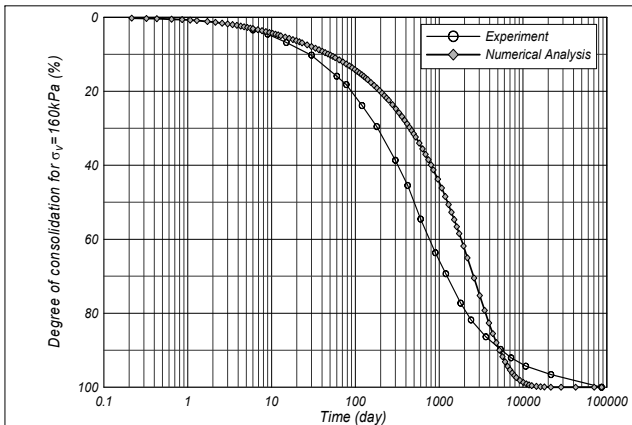


그림 4.10 160kPa 하중단계에서의 시간-압밀도

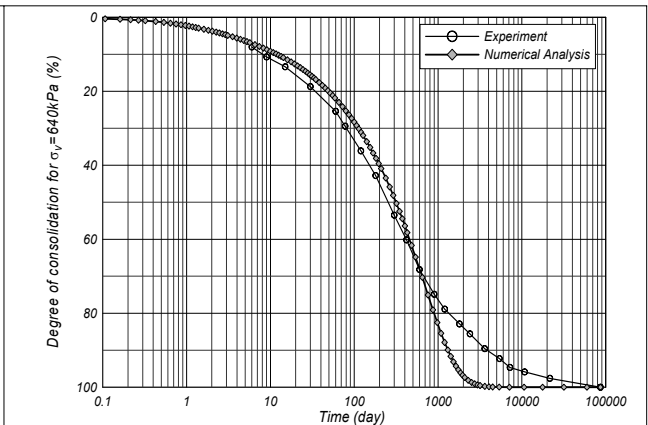


그림 4.11 640kPa 하중단계에서의 시간-압밀도

#### 4.2.2 배수재 타설 조건 해석결과

##### (1) 시간에 따른 침하량

배수재가 타설된 복합통수능 실험에 대한 시간-침하량 수치해석 결과를 실험결과와 함께 그림 4.12에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 하중이 증가함에 따라 압밀침하가 변곡점을 보이면서 나타나고 있다. 실험결과에 비해 다소 작은 침하량을 나타내나 전반적으로 유사한 결과를 보이고 있다고 판단된다.

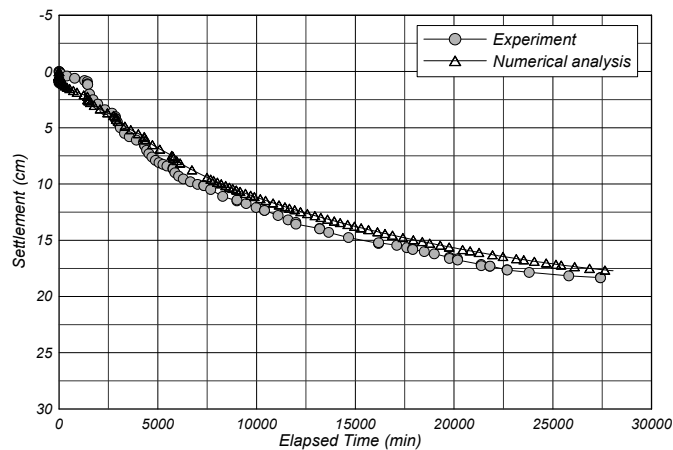


그림 4.12 배수재 타설조건 수치해석의 시간에 따른 침하량

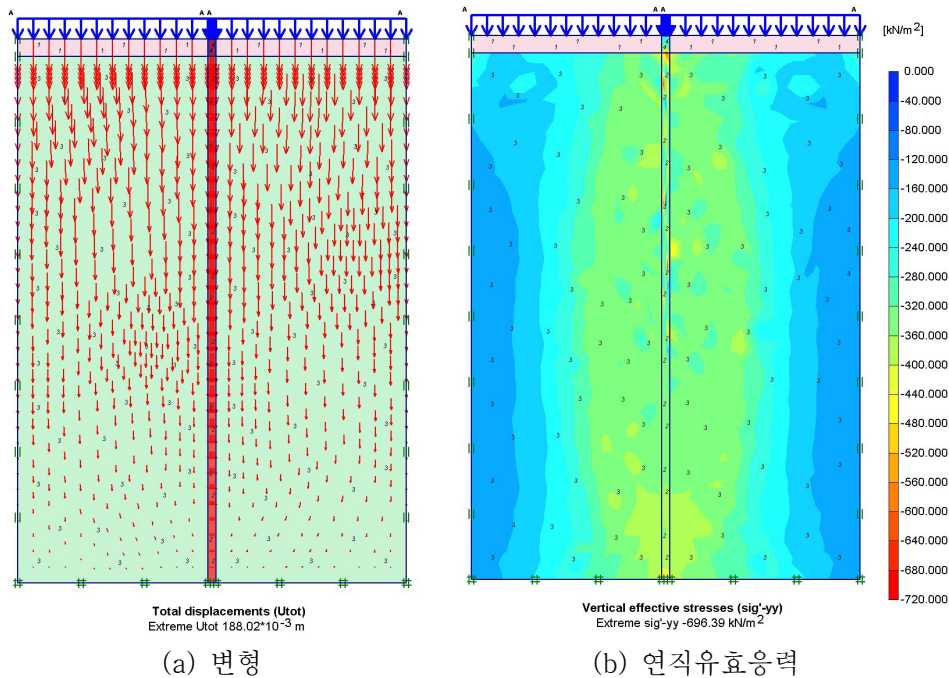
(2) 시간에 따른 과잉간극수압

배수재와 가장 가까운 C점(배수재와의 이격거리 1cm)에서는 하중재하에 따라 과잉간극수압이 즉시 발생하나 빠른 시간에 소산되는 형태를 보여주고 있다. 배수재와 약 7cm 떨어져 있는 D점에서는 C점에 비해 과잉간극수압의 소산 속도가 느리게 나타나고 있다. 또한, 하중재하 후의 과잉간극수압의 소산 속도가 점차 증가하고 있는 경향을 보이고 있다. 배수재와 14cm 이격되어 있는 E점에서는 250kPa의 최종하중 재하시험까지 F점(배수재와 이격거리 17cm) 및 G점(배수재와 이격거리 22cm)과 유사하게 과잉간극수압의 소산이 매우 작게 나타나고 있으나 최종하중이 재하된 이후부터는 배수재와의 거리가 가까울수록 과잉간극수압의 소산이 빠르게 진행되는 경향을 나타내고 있다.

(3) 단계별 지반 변형 및 응력

위와 같이 복합통수능 실험과 동일하게 배수재가 타입되어 있는 조건에서 수치해석을 실시한 결과 침하량과 과잉간극수압이 유사한 경향으로 분석되었다. 실험에서 분석하기 어려운 지반의 변형형태 및 응력에 대하여 수치해석 결과로 나타내고자 한다. 하중단계별로 하중을 작용한 시점에서의 변형 및 응력을 단계별로 나타내었다.

50kPa 하중 작용시점에서의 최대변형량은 2.27mm, 하중작용 후 1일간의 압밀진행시 최대변형량은 22.10mm로 나타났다. 100kPa 하중 작용시점에서의 최대변형량은 24.09mm, 하중작용 후 1일간의 압밀진행시 최대변형량은 40.11mm로 나타났다. 150kPa 하중 작용시점에서의 최대변형량은 41.90mm, 하중작용 후 1일간의 압밀진행시 최대변형량은 57.82mm로 나타났다. 200kPa 하중 작용시점에서의 최대변형량은 59.28mm, 하중작용 후 1일간의 압밀진행시 최대변형량은 74.99mm로 나타났다. 250kPa 하중 작용시점에서의 최대변형량은 76.19mm, 하중작용 후 1일간의 압밀진행시 최대변형량은 175.92mm로 나타났다. 200일 경과시점에서는 188.02mm의 침하량으로 나타났다.



200일 경과시점 수치해석 결과

### 4.2.3 무처리 조건 해석결과

(1) 시간에 따른 침하량

하중이 증가함에 따라 압밀침하가 변곡점을 보이면서 나타나고 있으며, 실험결과에 비해 다소 작은 침하량을 나타내나 전반적으로 유사한 결과를 보이고 있다고 판단된다.

## (2) 시간에 따른 과잉간극수압

실험결과에 비하여 과잉간극수압의 소산이 작게 나타났다. 이는 무처리 실험의 경우 간극수압의 모니터링 위치가 측벽에서 약 5cm 이격된 곳으로 간극수압이 측벽면을 통해 일부 배수되기 때문에 수치해석에 비하여 과잉간극수압이 상대적으로 빠르게 소산되기 때문으로 판단된다. 이러한 문제는 실험적인 오차로 볼 수 있으며 이를 제외하면 수치해석이 비교적 실험을 잘 모델링하는 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 연직배수재가 타설된 연약지반의 압밀거동 연구를 위해 실내실험을 수행하고, PLAXIS 프로그램을 이용하여 유한요소 수치해석을 실시하였다.

실내실험은 전라남도 광양시 지반개량공사 현장에서 채취한 현장시료를 이용하였으며, 복합통수능 실험장치를 이용하여 연직배수재 타설 조건과 타설하지 않은 조건으로 실험을 실시하였다. 연직배수재를 타설한 복합통수능 실험에서는 250kPa의 최대 압력까지 하루에 50kPa씩 단계별로 증가하였으며, 압밀과정 중에 외부 수조에서 배수재 내부로 물을 흘려보내면서 배수되는 양을 측정함으로써 통수능력을 측정하였다.

유한요소 수치해석을 이용한 압밀거동 특성 분석을 위해 먼저 표준압밀실험에 대한 모델링을 수행하여 입력정수 및 구성모델에 대한 적합성을 검토하였다. 통수능력 실험결과에 대한 수치해석은 실험의 초기조건이나 시간, 압밀하중 등을 동일하게 모델링하여 배수재 타설조건과 배수재가 타설되지 않은 조건에 대하여 해석을 수행하였다. 이러한 연구로부터 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

1. PBD 연직배수재에 대한 복합통수능 실험결과, 250kPa 하중재하 초기에는  $27.5\text{cm}^3/\text{sec}$ 의 통수능력을 보였으며, 이후 15일간 압밀을 진행한 시점에서는  $4.3\text{cm}^3/\text{sec}$ 의 통수능력을 나타내어 약 15.6%로 감소하는 경향을 확인하였다.
2. 표준압밀실험을 수행하고 이를 유한요소법에 의해 Modified cam-clay 구성모델과 Biot 압밀모델로 적용하여 수치해석을 실시한 결과, 유사한 침하 및 간극수압 소산 경향을 확인할 수 있었다. 여기에 입력된 정수를 복합통수능 실험에 대한 수치해석에 적용하였다.
3. 배수재가 타설된 복합통수능 실험에 대한 수치해석을 수행한 결과, 시간에 따른 침하량과 시간에 따른 과잉간극수압 소산 등을 유사하게 분석할 수 있었다. 그러므로 연직배수재가 타설된 지반에 대하여 입력정수를 적절하게 적용할 경우 수치해석으로 지반의 거동 분석을 파악할 수 있을 것으로 분석되었다.
4. 배수재가 타설된 조건에 대한 수치해석과 동일한 입력정수를 이용하여 배수재가 타설되지 않은 조건에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 이를 무처리 조건에서의 실험결과와 비교할 때 시간에 따른 침하 및 과잉간극수압의 소산이 비교적 유사하게 분석되는 것으로 나타나 유한요소 수치해석의 압밀지반에서의 적용성을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

1. 강민수(1998), "영향인자를 고려한 연직배수기술의 개발에 관한 연구", 박사학위논문, 중앙대학교.
2. 박영목(1994), "현장조건을 고려한 플라스틱 보드 드레인의 성능평가", Geosynthetics Conference, pp.91~100.
3. 박병기, 정진섭, 강병선, 이진수(1985), "연약지반개량공법에 이용될 범용프로그램의 Sand Drain 법에의 적용", 지반(한국지반공학회지), 한국지반공학회.
4. Barron, R.A.(1948), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", Trans, ASCE, Vol.113, No.2346, pp.718-742.
5. Bergado, D.T, Asakami, H., Alfaro, M.C., Balasubramaniam, A.S.(1991), "Smear effects of vertical drains on soft Bangkok clay.", J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol.117, No.10, pp.1509-1530.
6. Budhu, M(2007), Soil Mechanics and Foundations 2nd Edition, John Wiley & Sons.