

PBD가 설치된 연약지반의 원심모형실험에 관한 연구

A Study on Centrifuge Model Experiments of Soft Soil Ground Installed with PBD

정길수* 박병수* 전상현** 유남재***
Jeong, Gil-Soo Park, Byung-Soo Jeon, Sang-Hyun Yoo, Nam-Jae

Abstract

This study is the results of experimental and numerical study on the consolidational behavior of multi-layered soft soil ground installed with plastic board drains (PBD).

Centrifuge model tests with a marine clay sampled from field were performed to investigate the consolidational behavior of multi-layered ground where a dredged soil was placed on the soft clay ground and PBDs were installed. Test results were compared with those of numerical analyses, using the 2-D equivalent model previously proposed.

From test results, it was found that the amount of consolidation settlement occurred in the original ground due to embankment surcharge loads was in the range of 38% of total settlement in the whole ground. From the results of cone penetration tests executed after finishing the centrifuge model tests, the cone resistance was found to increase with depth. The measured water contents inbetween PBDs were in the ranges of 38~50% and their values tended to increase with increasing the distance between PBDs.

키워드 : 연약점토, 연직배수재, 압밀

Keywords : Soft clay, Plastic board drain(PBD), Consolidation

1. 서론

연약지반위에 부지를 조성하고 구조물을 축조하는 경우에는 안정성을 도모하기 위하여 연직배수 (Vertical Drain)공법에 의한 지반개량 사례가 꾸준히 증가하고 있다. 연직배수공법은 연약지층의 심도가 깊은 경우에 연직방향으로 배수재를 설치하여 과잉간극수압의 배수거리를 단축시킴으로써 압밀을 촉진시키는 공법이다. 그러나 이 공법을 이용하여 지반개량을 할 경우 시공초기에 지반교란 또는 스

미어존 (Smear Zone)이 예상되며, 이는 시공중의 증장비 수행에 따른 지반 표층의 교란과 드레인 다설에 필요한 멘드렐(Mendrel)의 관입·인발에 기인된 드레인 주위 지반의 교란으로 대별되며 압밀촉진효과를 크게 저하시키는 요인으로 작용한다.

기존의 연직배수재가 설치된 연약지반의 압밀거동을 해석하기 위한 접근방법은 첫째, 실제 현장지반에 설치된 배수재를 하나의 단위셀(Unit Cell)로 취급하여 단위셀의 평균압밀도를 예측하는 이론적인 해에 대한 연구와 둘째, 실제 지반의 복잡한 영향요소가 포함된 압밀거동을 재현하기 위하여 3차원 또는 2차원으로 수행하는 수치해석적 연구로 크게 두가지로 구분될 수 있다.

본 연구에서는 실험적 방법을 이용하여 연직배수재(PBD)가 설치된 다층구조의 연약지반에 대한 거

* 강원대학교 토목공학과 연구원, 공학박사

** 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

동특성을 규명하기 위하여 현장조건을 고려한 원심 모형실험을 실시하였다.

좀 더 단순화된 가정에 기초하여 교란영역과 배수 저항효과를 고려한 다음 식을 제시하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F}\right) \quad (4)$$

그리고,

$$F = F_{(n)} + F_s + F_w \quad (5)$$

여기서, F 는 드레인의 간격에 의한 영향 $F_{(n)}$ 과 스미어존의 영향 F_s , Well Resistance의 영향 F_w 등의 추가적인 영향요소를 나타내는 것으로 드레인 간격비에 의한 영향요소는 일반적인 간격비인 20또는 그 이상의 경우에 대하여 다음과 같이 단순화 될 수 있다.

$$F_{(n)} = \ln\left(\frac{D_e}{d_w}\right) - \frac{3}{4} \quad (6)$$

드레인을 설치할 때에 발생하는 교란영역을 고려하기 위하여 교란영역에서는 투수계수가 감소하는 것으로 가정하여 다음과 같이 교란영역에 의한 영향요소를 나타내었다.

$$F_s = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1\right) \ln\left(\frac{d_s}{d_w}\right) \quad (7)$$

여기서, d_s : 드레인 주위의 교란영역의 직경

k_s : 스미어존에서의 수평투수계수

배수저항에 의한 영향요소는 드레인재의 연직방향으로의 배수흐름에 Darcy의 법칙이 유효하다는 가정 하에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_w = \pi z(L - z) \frac{k_h}{q_w} \quad (8)$$

여기서, L : 드레인 전체길이

z : 상부 경계면으로부터의 거리

$$q_w : \frac{k_w \pi d_w^2}{4} (\text{배수재의 통수능})$$

2. 이론적 배경

Barron은 1948년 Terzaghi의 1차원 압밀방정식의 가정에 근거하여 방사형 배수를 고려하는 이론을 제안하였으며 현재까지도 Sand Drain의 설계에도 널리 활용되고 있다. 그의 제안식은 점토의 투수계수 및 체적압축계수가 압밀 중에 변화하지 않는다는 조건하에서 다음의 2차원 압밀지배 방정식을 유도하였다.

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

여기서, u : 임의의 위치와 시간의 과잉간극수압

t : 전 연직응력의 증가이후의 시간

r : 중심원상의 중심으로부터 고려하고자 하는 지점의 거리

C_h, C_v : 수평 및 연직방향 압밀계수

위 식은 Sand Drain 내부에서 연직배수 효과를 무시한 부등침하가 발생하지 않는 등변형률 조건에서 다음 식과 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = C_h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right) \quad (2)$$

식 (2)로부터 Barron은 교란영역(Smear Zone)과 배수저항(Well Resistance)이 없는 경우 이상적인 조건하에서 약식화로 수평방향에 대한 평균압밀도 ($U_{h(ave)}$)를 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$U_{h(ave)} = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n)}\right) \quad (3)$$

여기서, $U_{h(ave)}$: $\frac{C_h T}{D_e^2}$

$$T_h : \frac{C_h T}{D_e^2}$$

$$F_w : \frac{(n^2)}{(1-n)} \left(\ln(n) - \frac{3}{4} + \frac{1}{n^2} \right)$$

D_e : 원통시료의 등가경(현장의 경우 배수재 설치간격)

d_w : 배수재의 환산직경

n : D_e/d_w

그러나 위 식은 교란영역과 배수저항효과를 고려하지 않아 압밀도를 과대평가하는 경향이 있다.

Hansbo(1979)는 PBD재의 배수재를 사용하는 경우에 적용하기 위하여 위의 Barron이 제안한 식을 변형하고, PBD재의 단면과 배수의 특성을 고려한

3. 실험방법

3.1 사용시료 및 물리적 특성

원지반과 준설토 지반을 모사하기 위하여 본 연구에서는 현장에서 직접 채취한 점토시료를 이용하였으며, 현장의 압성에 의한 성토하중을 모사하기 위하여 주문진 표준사를 이용하였다. 먼저 점토시료는 현장에서 채취한 해수를 혼합하여 교반한 다음 40번체(0.42mm)를 통과시켜 불순물과 입경이 큰 입자를 제거함으로써 시료의 균질성을 확보하였으며, 주문진 표준사의 경우 별도의 가공 공정을 거친 상용제품을 사용하였다.

점토시료와 주문진 표준사에 대한 기본물성시험을 실시하여 그 결과를 정리하여 표 1에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 시험에 사용된 점토의

경우 비중 2.71, 액성한계 49.3%, 소성지수 25.4%의 물리적 특성을 나타내고 있다. 주문진 표준사의 경우 비중 2.6, 유효경(D_{10}) 0.2mm인 전형적인 사질토의 특징을 보이고 있다. 또한 통일분류법(USCS)에 의해 입도를 분류한 결과 점토와 주문진 표준사는 각각 CL, SP로 각각 분류되었다.

현장의 지반조건은 그림 1에서와 같이 하부 원지반 상부에 준설매립이 실시되어 압밀이 진행됨에 따라 현재 각 지층의 평균높이는 각각 5.8m와 4.8m를 유지하고 있다. 또한 다층구조의 연약지반을 개량하기 위하여 연직배수재의 설치간격, 성토하중 등에 대한 최적의 시공조건을 분석하기 위하여, PBD설치간격은 조건에 따라 0.8~1.5m로 모두 4가지 조건이며 이후 각각 1m의 Sand Mat와 산토에 의한 성토를 실시한다. 또한 상부에는 PBD설치간격에 따라 4.2~5.2m의 성토를 실시하고 3.4~10.0개월간 방치기간을 두어 예상압밀도 90~95%에 도달하도록 압밀을 실시하는 조건에 준하여 실험조건을 결정하였다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 지반조건에 대하여 중력수준 50g 조건의 원심모형시험을 수행하고자 상사법칙을 적용하여 표 2와 같은 실험조건을 결정하였다. 표에서 보는바와 같이 중력수준과 상사법칙을 고려하여 산정된 원지반층과 준설토층의 지반높이는 각각 11.6cm와 8.6cm이며, 배수재 설치간격은 조건에 따라 1.6~3.0cm이다. 또한 준설토층의 경우 현장이력을 감안하여 원지반층 상부에 고탍수비 조건으로 준설투기한 다음 압밀을 통하여 준설토층(8.6cm 높이)를 조성하는 방법을 사용하였으며, 이후 성토과정은 Sand Mat, 산토, 성토 순으로 조성의 높이까지 일시성토후 압밀을 실시하였다.

표 1 시료의 물리적 특성

구분	점토	주문진 표준사
비중 (Gs)	2.71	2.60
액성한계	LL, %	49.3
	PL, %	23.9
	PI, %	25.4
입도 분포	>0.074, %	90.1
	Cu	-
	Cc	-
	USCS	CL

3.2 실험조건

기존의 연약지반 위에 준설매립을 실시하여 다층구조의 지반조건이 형성된 지역의 압밀거동을 연구하고자, 본 연구에서는 현장의 지반조건과 시공조건을 설정한 후 상사법칙을 적용하여 모형지반의 높이를 결정하고 시료를 성형하여 원심모형시험을 실시하였다.

3.3 원지반 성형

강제압밀과 원심모형시험기를 이용한 자중압밀을 통하여 모형지반을 성형한 다음 원형토조에 옮겨서 모형시험을 실시하였다. 모형지반 성형의 세부적인 절차와 지반특성은 다음과 같다.

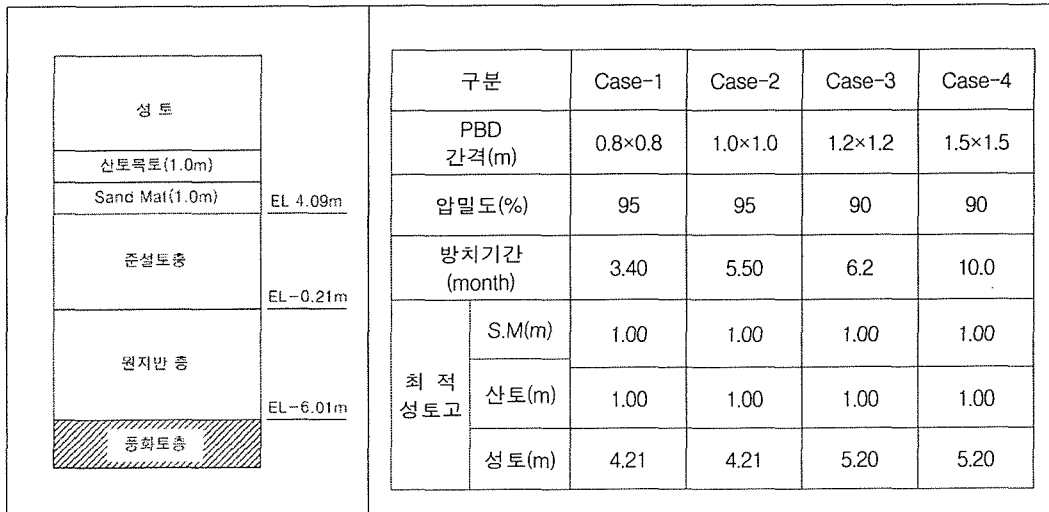


그림 1 지층 및 시공조건에 따른 실험종류

표 2 실험조건

구분	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
PBD 간격(cm)	3.2×3.2	4.0×4.0	4.8×4.8	6.0×6.0
압밀도 (%)	95	95	90	90
방치기간(Hr.)	3.0	3.0	3.0	3.0
원지반층(cm)	11.6	11.6	11.6	11.6
준설토층(cm)	8.6	8.6	8.6	8.6
성 토 고	S.M(cm)	2.0	2.0	2.0
	산토(cm)	2.0	2.0	2.0
	성토(cm)	8.4	8.4	10.4

- ① 혼합점토시료를 초기함수비 100%(≒2.0LL)내외 조건으로 균질하게 교반한 다음 강제압밀 토조에 넣고 압밀하중 0.05~0.2 kgf/cm²까지 단계적으로 강제압밀을 실시한다. 강제압밀종료후 토조 분리과정에서 실측한 시료의 평균함수비는 75%내외이다.
- ② 강제압밀토조에 금속제질의 튜브를 관입한 다음 강제압밀토조의 전·후면판을 분리하여 주변의 시료를 제거하고, 내경 19cm의 원형토조에 시료를 넣고 토조를 조립한다. 이 때 시료의 초기높이는 14cm이다.
- ③ 원심모형 토조에 원심모형시험기 Swing Basket에 부착한 다음 증력수준 50g조건에서 자중압밀을 실시하여 강제압밀과정에서 잔류한 과잉간극수압을 완전히 소산시킨다. 이 때 압밀소요시간은 평균 4시간이 소요되며 압밀종료후의 시료의 평균높이는 13.5cm 내외로 나타났다.

실험순서에서와 같이 자중압밀이 종료된 원지반의 최종높이를 13.5cm로 결정한 것은 이후 준설텍과정에서 발생하는 원지반의 침하량을 고려한 것으로서 실제 실험과정에서 준설텍에 의해 원지반의 압밀침하가 발생되어 결과적으로 원지반의 높이 11.6cm에 근접한 12~12.5cm내외의 시료높이를 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

3.4 준설토 성형

원심모형시험 조건의 제약으로 현장에서와 같이 연속투기에 대한 모사가 어려운 관계로 본 연구에서는 예비실험을 통하여 표 3과 같은 단계별로 일시투기를 실시하였으며 세부적인 실험순서는 아래와 같다.

- ① 자중압밀이 완료된 원지반층 상부에 준설텍층과의 경계를 구분하기 위하여 초기함수비 150%조건인 카올리나이트(백색)를 4~5mm높이로 투기한다.
- ② 준설텍층 모사에 사용될 시료를 초기함수비 150% 조건으로 균질하게 교반한 다음, 자중압밀이 완료된 원지반층 위에 3.8cm 높이(카올리나이트 높이포함)만큼 투기한 다음 증력수준 50g 조건에서 2시간 30분동안 압밀을 실시하며 주기적으로 준설텍층의 계면고와 원지반 높이를 육안으로 관측한다.
- ③ 3단계에 걸쳐 ②번 과정을 반복한 다음 15시간 동안 압밀을 실시하면서 원지반층과 준설텍층의 높이를 육안으로 관측하며, 토조하부에 간극수압계를 연결하여 일면배수조건 지반의 준설텍토 투기에 따른 원지반층 하부의 간극수압변화를 측정한다.

표 3 준설텍층 투기조건

시험 단계	시간		투기고	
	실험, Hr.	현장, Yr.	실험, cm	현장, m
1단계 투기	0	0.00	3.8	1.9
2단계 투기	2.5	0.71	7.6	3.8
3단계 투기	5	1.43	11.4	5.7
방치	22.5	6.42	11.4	5.7

3.5 PBD 제작 및 설치

일반적으로 현장에서 폭 10cm 내외의 배수재를 타설하기 위하여 맨드렐(Mandrel)과 슈(Shoe)를 사용하고 있다. 실험과정에서 이러한 시공과정을 모사하기 위하여 맨드렐을 이용하여 모형배수재를 설치하고자 하였으나, 모형 맨드렐을 제작하는데 필요한 재료의 두께와 실험가능 재원을 고려하는 경우, 실험과정에서 맨드렐을 인발하고 난 이후 배수재와 지반사이의 틈이 크게 벌어지고 맨드렐에 의한 주변지반의 교란을 가중시킬 것으로 판단되었다. 맨드렐에 의한 지반 교란효과는 현장상황을 모사할수 있는 장점이 있으나 맨드렐을 인발후에 예상되는 맨드렐과 모형지반의 이격은 압밀침하량 및 간극수압의 소산에 영향을 크게 줄 수 있다고 판단하였다. 따라서 그 대안으로 본 실험에서는 맨드렐을 사용하지 않고 배수재를 직접 관입시키는 방법을 사용하였다. 그림 2와 같이 모형배수재는 실제 PBD에서 부직포를 분리하여 두 겹으로 접착하였고 증공식의 0.4cm 폭의 모형 배수재를 제작하였다. 그리고 배수재 내부에는 굵은 실을 삽입하여 Plastic Board

와 같이 배수면적 확보를 위한 역할을 모사하여 소정의 투수능을 확보 할 수 있도록 하였다.

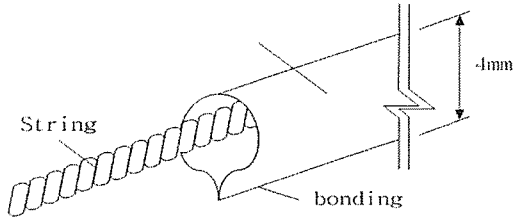


그림 2 모형배수재 개요

3.6 Sand Mat 및 성토하중

PBD타설이후에 실시되는 성토과정은 표 2에 나타난 바와 같이 Sand Mat, 산토, 성토층 등 모두 3개층으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 원심모형시험의 제약사항 등을 고려하여 표 4에서와 같이 3단계로 구분하여 성토하중을 재하하였다. 표에서와 같이 Sand Mat와 산토의 경우 주문진표준사를 이용하여 재하하였으며, 시험시간이 짧아 두 지층을 동시에 재하하여 30분간 압밀을 실시하였으며, 이후 성토의 경우 2단계로 나누어 단계성토를 실시하였으며 성토후 각각 30분과 3시간(180분)에 걸쳐 압밀을 실시하였다.

표 4 성토하중 조건

시험 단계	지층	사용시료		압밀시간, min.
		시료종류	$\gamma_d, \text{gf/cm}^3$	
1단계	Sand Mat	주문진 표준사		30
	산토	주문진 표준사		
2-1단계	성토	Slag	1.85	30
2-2단계	성토	Slag	1.85	180

4. 결과분석

다층구조의 연약지반의 PBD 설치간격에 따른 압밀 침하특성을 분석하기 위하여 원심모형시험을 실시하고 결과를 분석하였다.

4.1 준설투기 단계

자중압밀이 완료된 원지반에 2시간 30분 간격으로 3회에 걸쳐 준설매립을 실시하고 15시간 동안 압밀을 실시하여 현재의 지반상태와 유사한 지층상태를 모사하였다. 실험과정 동안 측정된 원지반과

준설매립층의 높이를 측정결과를 이용하여 그림 3~그림 6에서와 같이 시간-높이 관계곡선을 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 원지반의 경우 상부에 준설매립층이 상재하중으로 작용하여 완만하게 압밀이 진행되고 있음을 확인할 수 있으며, 상부 준설매립층의 경우 투기직후 압밀침하가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 준설매립과정에서 실시된 시료의 총 투기고는 표 5에서와 같이 12.14~12.5cm이며 준설투기 과정 종료후 발생된 준설매립층의 총 침하량은 4.0~4.45cm(현장기준, 2.0~2.225m)로 나타났으며, 이로 인해 원지반에서는 0.74~1.25cm(현장기준 0.37~0.625m)의 압밀침하량이 발생되었다.

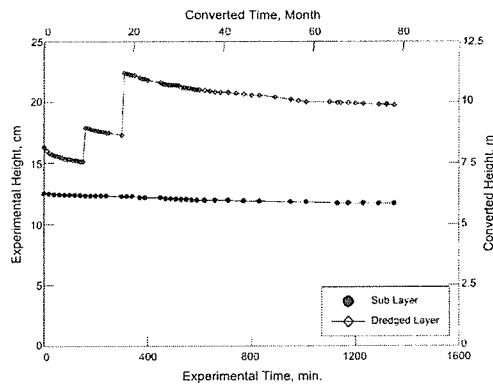


그림 3 준설매립에 의한 시간-높이 관계곡선(Case-1)

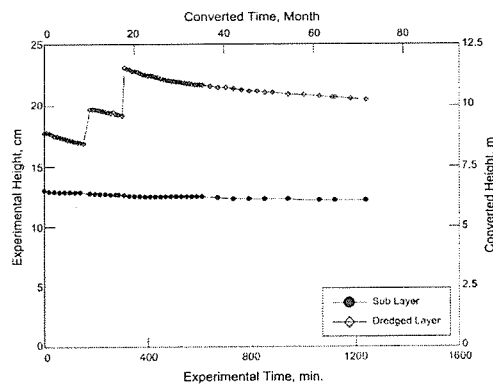


그림 4 준설매립에 의한 시간-높이 관계곡선(Case-2)

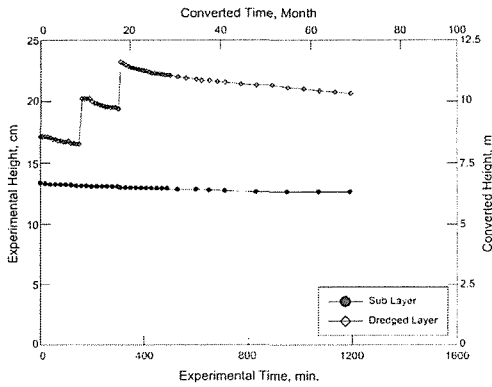


그림 5 준설매립에 의한 시간-높이 관계곡선(Case-3)

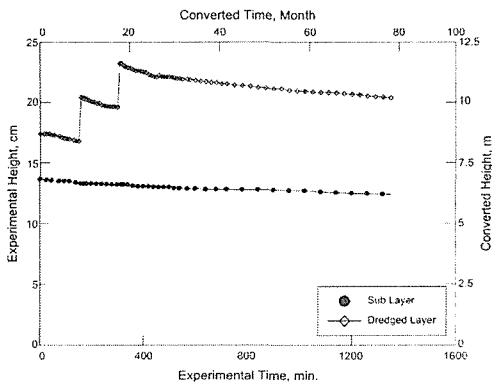


그림 6 준설매립에 의한 시간-높이 관계곡선(Case-4)

표 5 지층별 압밀침하량(준설매립 단계)

시험조건		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
원지반	초기높이 (cm)	12.5	13.0	13.39	13.65
	압밀침하량 (cm)	0.8	0.8	0.74	1.25
준설매립층	총투기고 (cm)	12.5	12.45	12.14	12.15
	압밀침하량 (cm)	4.45	4.0	4.14	4.25

4.2 PBD타설 및 성토단계

그림 7~그림 10은 PBD타설 이후 성토하중 재하 과정에서 측정된 원지반층과 준설매립층의 시간-압밀침하량 관계곡선을 나타내며, 각 조건별로 최종침하량과 소요시간을 정리하여 표 6에 나타내었다. 그

림에서 보는 바와 같이 Sand Mat와 산토, 1, 2차성토가 진행되는 초기 60~80분 내외 구간에서 대부분의 침하량이 발생되는 것으로 나타났으며, Sand Mat 재하이후 발생된 총 침하량은 시험조건에 따라 4.3~5.20cm로 나타났으며, 이중 원지반의 침하량은 1.55~2.25cm로서 전체 침하량의 38% 수준인 것으로 나타났다. 시험조건에 따라 압밀이 종료된 시점을 분석하여 그 결과를 그림 11에 나타내었다. 그림에서와 같이 배수재 간격이 증가할수록 압밀종료시간도 증가하는 경향성을 지니지만, 전반적으로 테이더의 분산이 크게 나타난다. 이는 시험조건에 따른 배수재 간격은 1.6~3.0cm 범위내에서 실험이 진행되기 때문에 PBD타설 과정에서 발생하는 지반교란, PBD 수직도 문제 등에 의한 영향이 상대적으로 크게 작용하기 때문인 것으로 추정된다.

그림 12는 실험종료후 실시한 Cone관입시험 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 심도가 깊어질수록 콘저항치는 증가하는 경향을 보이며, 그 크기는 준설매립층의 경우 0.3~0.8 kgf/cm², 원지반층의 경우 0.8~1.2 kgf/cm²의 콘저항치를 보이는 것으로 나타났다.

표 6 지층별 압밀침하량(준설매립 단계)

시험조건		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
원지반	소요시간 (min)	120	220	240	225
	최종침하량 (cm)	1.55	1.82	2.25	1.60
전체	소요시간 (min.)	175	220	240	240
	최종침하량 (cm)	4.75	5.20	4.60	4.30

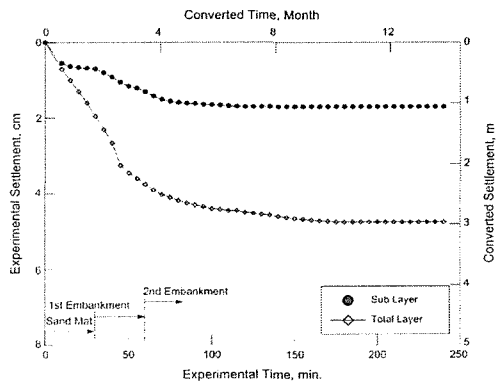


그림 7 성토하중에 의한 압밀침하량 변화(Case-1)

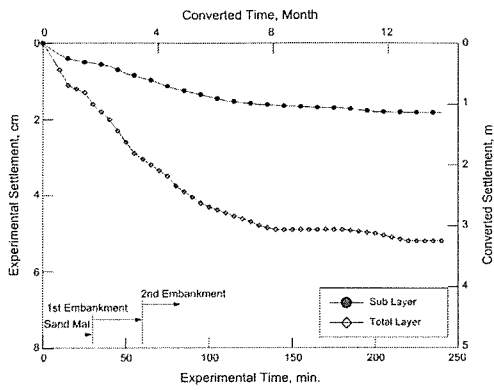


그림 8 성토하중에 의한 압밀침하량 변화(Case-2)

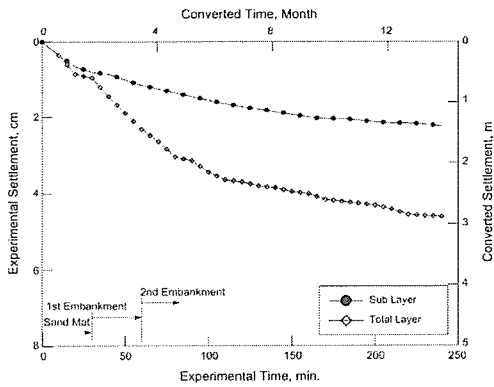


그림 9 성토하중에 의한 압밀침하량 변화(Case-3)

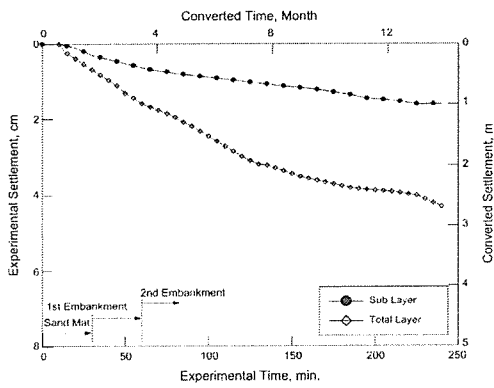


그림 10 성토하중에 의한 압밀침하량 변화(Case-4)

그림 13은 시험종료후 배수재 사이에서 측정된 함수비 측정결과를 나타낸다. 그림에서 보는바와 같

이 실험종료후 함수비는 38~50% 범위에 위치하며, Case-1~Case-4의 평균함수비는 각각 44.0, 44.2, 48.0, 49.4%로 나타나 배수재 설치간격이 증가할수록 배수거리가 증가하여 시료의 함수비도 증가하는 것으로 나타났다.

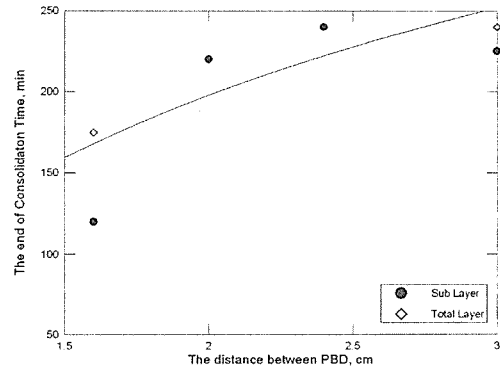


그림 11 배수재 간격에 따른 최종압밀시간 변화

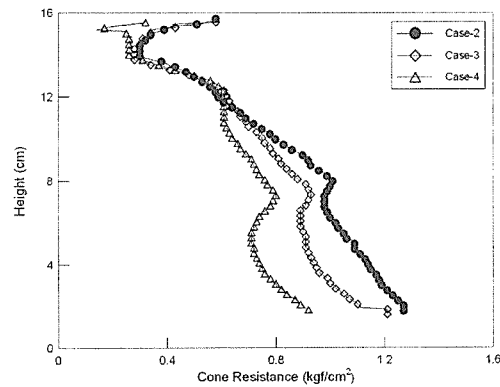


그림 12 Cone 관입시험 결과

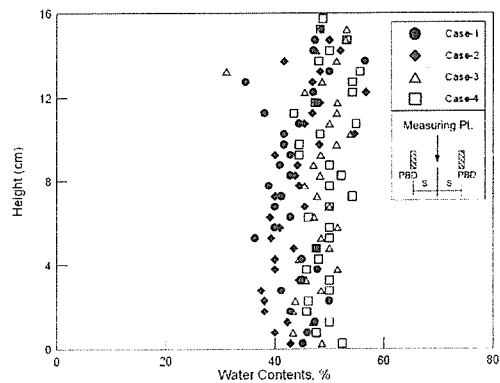


그림 13 최종함수비 측정 결과

5. 결론

다층구조의 연약지반의 PBD 설치간격에 따른 압밀 침하특성을 분석하기 위하여 원심모형시험을 실시하고 결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 원지반과 준설매립층으로 구성된 현장지반조건과 PBD타설후 성토하중을 재하하는 복잡한 시공조건을 원심모형시험 기법으로 실험실에서 재현하여 그에 따른 압밀침하거동을 예측할 수 있었다.
- 2) PBD타설후 실시된 성토하중에 의해 발생된 점토층의 압밀침하량은 4.3~5.2cm(현장기준, 2.15~2.6m)이며, 원지반의 압밀침하량은 1.55~2.55cm(현장기준, 0.78~1.28m)로 전체침하량의 38%수준으로 나타났다
- 3) 실험종료후 실시한 Cone관입시험 결과 심도가 깊어질수록 콘저항치는 증가하는 경향을 보이며, 평균적으로 준설매립층의 경우 0.3~0.8 kgf/cm², 원지반층의 경우 0.8~1.2 kgf/cm²의 콘저항치를 보이는 것으로 나타났다.
- 4) 시험종료후 배수제 사이에서 측정된 함수비 측정결과 배수제 설치간격이 증가할수록 배수거리가 증가하여 시료의 함수비도 증가하는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- [1] Barron, R. A., "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", *Trans. ASCE*, Vol. 113, No. 2346, pp. 718~742(1948).
- [2] Bergado, D. T., Alfaro, M. C. and Balasubramaniam, A. S., "Improvement of Soft Bangkok Clay Using Vertical Drains" *Geotextiles and Geomembranes*, pp.615~663(1993).
- [3] Hansbo, S., "Consolidation of Fine Grained Soils by Prefabricated Drains", *Proc. 10th ICSMFE*, pp.677~682(1981).
- [4] Hansbo, S., "Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains", *Ground Engineering*, 12, 5, pp.16~25(1979).
- [5] Yoshikuni, H. and Nakanoda, H., "Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability", *Soils and Foundations*, Vol.14, No.2, pp.35~46(1974).