

상사성을 고려한 배수제 설치 연약점토 지반의 원심모델링

Centrifuge Modeling of Soft Clay with Vertical Drains Considering the Centrifuge Similarity

유 남 재* 홍 영 길** 정 길 수*** 조 한 기****
Yoo, Nam-Jae Hong, Young-Kil Jeong, Gil-Soo Cho, Han-Ki

Abstract

This paper is results of experimental research on the effect of application of similarity related to permeability of soil on the consolidation behavior as centrifuge modeling of consolidation is performed with the centrifuge model facility.

In this research, the permeability of soil was controlled by changing the viscosity of porewater as the mixed water with glycerin was used during the centrifuge model experiments. The effect of drainage path on consolidation was investigated by installing the vertical drains. A serie of centrifuge model tests with conditions of single vertical and radial horizontal drainage were carried out. Kaolinite and Jumunjin standard sand were used as soft clay and surcharges respectively during tests.

For testing condition of single vertical drainage considering similarity of permeability, it was found that consolidation with mixed porewater with glycerin was delayed in comparisons with test results with water only. For conditions of horizontal drainage with vertical drains, a low permeability by changing the viscosity of pore water resulted in delayed degree of consolidation at an initial stage of consolidation. But, it predicted not much differences in settlement as long as the consolidation time was sufficiently long enough to finish consolidation. Consequently, it was found that similarity in permeability should be considered to be critical for the case of centrifuge model experiments related to consolidation with long drainage path.

키워드 : 원심모형시험, 투수계수, 상사법칙, 연직배수제
Keywords : Centrifuge model test, Permeability, Similarity, Vertical Drains

1. 서론

- * 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사
- ** 한림성심대학 토목과공학과 교수, 공학박사
- *** 강원대학교 토목공학과 연구원, 공학박사
- **** 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

전국토의 70%이상이 산지인 우리나라의 경우 인구증가와 산업발달 및 경제규모의 확장으로 좁은 국토를 효율적으로 활용하기 위하여 연약지반 위에 부지를 조성하고 구조물을 축조하는 사례가 꾸준히 늘고 있다. 특히 서남해안지역에 광범위하게 분포하고 있는 해성 퇴적된 연약지반과 최근 활발히 진행되고 있는 준설, 매립 공사가 점차 대규모화 되면서 연약지반의 지반 공학적 안정성을

확보하기 위하여 연직배수(Vertical Drain)공법 등과 같은 지반개량공법을 적용하고 있다.

연직배수(Vertical Drain)공법 중 플라스틱 보드 드레인(Plastic Board Drain)공법은 연직의 1차원적인 배수조건을 갖는 연약지반에 배수재를 설치하여 배수거리를 단축시켜 압밀 소요시간을 줄이는 것을 그 목적으로 하는 공법이며, Kjellman이 1937년 판상으로 된 마분지를 연약지반 개량에 적용한 것이 효시이다. 그 후 1960년경 PBD재의 유용성이 주목됨에 따라 이후 지속적인 연구개발을 통해 지금까지 전 세계적으로 약 50여종의 제품이 개발되어 사용되고 있다.

연직배수재의 제품개발과 연직배수공법이 적용된 지반의 거동 예측분석을 위해 실내시험, 현장계측, 수치해석 등 다양한 방법이 적용되고 있다. 이 중 실내에서 축소된 모형을 이용하여 현장의 응력상태를 재현하며 지반거동을 예측할 수 있는 장점을 가진 원심모형기를 이용한 PBD의 연구가 크게 주목 받고 있다. 그러나 원심모형시험시 유체의 속도에 관하여 많은 부분이 논쟁되어 왔다. 기본 개념은 Darcy의 법칙에서 출발하며 유체의 속도에 영향을 끼치는 투수계수를 인위적으로 조절하는 방법과 동수경사에 대한 개념으로 나뉜다. 전자의 경우 클리세틴이나 실리콘유와 같이 점성이 높은 재료를 사용하여 중력수준(g , G-level)에 맞게 투수계수(k)를 조절하는 것이며, 후자의 경우 압력수에 의한 접근 방법으로 투수계수(k)를 구하는 방법이다. 본 연구에서는 전자의 개념으로 시험을 수행하였으며 국외에도 소정의 중력수준의 원심모형시험시 간극수를 조절한 사례가 있다.

현재 국내에서 원심모형시험시 압밀에 결정적 영향을 끼치는 간극수의 점성을 조절한 사례가 많지 않으며, 배수재의 유효구멍크기(Apparent Opening Size, AOS)에 대하여 상사법칙을 적용한 사례는 또한 전무하다. 따라서 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 소정의 중력수준의 원심모형시험시 간극수의 점성을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 성토하중에 의한 압밀과 문제점에 관하여 그에 따른 차이와 특성을 파악하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 원심모형시험시 투수계수 적용

원심모형시험에서 중력가속도 $N\mu$ 될 때 유체의 속도는 N 배만큼 증가 한다. 이는 상사법칙에 의해 유체의 침투속도는 $v_m = Nv_p$ (v_m : 원심모형에서의 침투속도, v_p : 1g상태에서의 침투속도)의 관계로 표현할 수 있으며(Schofield, 1980), 실험적으로도 증명하였다(Arulanandan 등 1988). 상사법칙에 의한 유체의 침투속도는 이와같이 사용되어 왔으나 Darcy의 투수계수나 동수경사의 중력수준에

의한 영향에 대하여 Goodings(1979)는 문제점을 제기 하였으며, Butterfield(2000)과 Deam(2001)은 이 문제에 관하여 연구하였다.

Pokrovsky와 Fyodorov(1968), Cargill과 Ko(1983), Tan과 Scott (1985), 그리고 최근에는 Singh와 Gupta(2000)에 이르기까지 많은 학자들 사이에서 투수계수는 중력에 직접 비례하며 동수경사는 중력의 영향을 받지 않는다고 하였다. 반면에 Schofield(1980)와 Goodings (1984), 그리고 Taylor(1987) 등은 투수계수는 중력수준에 독립적으로 작용하며 그리고 동수경사에 상사법칙(N)을 적용하여 구하였다.

2.2 중력수준에 의한 Darcy의 법칙 적용시

Darcy(1856)는 다공질 매체에 대한 물의 흐름에 관한 실험을 통하여 다음과 같은 관계식을 유도하였다.

$$v = ki \quad (1)$$

여기서, k = 투수계수(m/s)

i = 동수경사

Muskat(1937)은 Darcy의 투수계수와 유체의 단위중량과의 관계를 다음과 같이 정의 하였다.

$$k = K \frac{\gamma}{\mu} = K \frac{\rho g}{\mu} \quad (2)$$

여기서 K 는 토립자 특성과 관련한 절대 투수계수 이고, μ 는 유체의 동점성계수, ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력 수준이다. 이 관계에서 우리는 투수계수가 중력에 직접 비례하는 것을 알 수 있다. 그러나 여기 한 가지 문제가 있는데, 흙이 우주 공간에 있을 경우를 가정하면, 중력가속도가 0일때 흙의 침투는 일어나지 않을 것이다. 그러나 0의 중력수준에서 흙은 간극을 가지고 있기 때문에 만약 압력차이가 경계면에서 있으면 유체는 흐를 것이다. 이것은 투수계수가 0인 개념에서 모순이 된다. 이와 같은 논쟁은 Taylor(1987)에 의해 처음 제시되었다. 즉 흐름은 중력에 의한 것이 아니라, 압력차이에 의한 것이다. 이 논쟁의 명백한 이유는 Darcy의 투수계수 k 와 동수경사의 정의에 있다. 더 쉽게 이해하기 위해 Kozeny-Carman이 제시한 다음 등식을 보면 알 수 있다.

Kozeny(1927)은 다공체를 다양한 단면적을 지닌 유로의 그룹으로 간주하여 다음의 절대 투수계수(K)와 간극율(n)의 관계를 유도하였다.

$$K = \frac{cn^3}{s^2} \quad (3)$$

여기서 c 는 Kozeny의 상수로써 모세관의 모양에 따라 좌우된다(원형 모세관에서 $c=0.5$). s 는 유로의 비표면적이다.

Carmen(1937, 1956)은 Kozeny의 공식을 개선해 다음과 같은 식을 정의하였다.

$$K = \frac{d_m^2}{180} \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (4)$$

이것이 우리가 잘 알고 있는 Kozeny-Carmen 공식으로 절대투수계수(K)는 토립자의 직경(d_m)과 간극률(n)과 연계되어 있음을 알 수 있다. 절대투수계수(K)는 Dracy 투수계수(k)와 달리 중력수준에 무관함을 알 수 있다.

2.3 1g 모델과 원심모형상에 적용되는 유체의 흐름

그림 1은 Ng 의 중력상태에서 원심모형시험기 내 모델을 나타낸 것이다. B와 C의 원심모형상에서의 정수압의 차이는 $\Delta Lp(Ng)$ 이며, 두 점 사이의 상응하는 원형의 크기는 $(N\Delta L)pg$ 이다. 따라서 두 점 사이의 위치에너지 차이는 원심모형과 원형상태에서 같다. 원심모형에서 유체의 이동거리는 원형에 비하여 N 배 짧기 때문에 단위길이당 손실수두, 즉 동수구배는 N 배 크다. 따라서 $i_m = Ni_p$ 의 관계식이 성립한다. 그러나 원심모델링시험시 Δh 와 ΔL 의 경우 상사법칙을 적용하여 일정하게 측정함으로써 원형과 원심모형시험시 모형은 같다고 할 수 있다 ($i_m = i_p$). 이와같이 서로 상반되는 개념의 이해를 돕기 위하여 동수경사의 개념을 $\frac{\Delta h}{\Delta L}$ 의 개념이 아닌 에너지 수두(압력수두+위치수두)의 개념으로 이해할 필요가 있다.

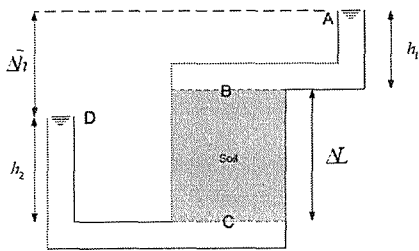


그림 1 원심모형

그림1의 모델은 흙 샘플은 Darcy의 투과성을 측정하기 위해 사용될 수 있다. 만약, B에서 C로 물이 통과할 때 A와 D의 수위가 일정하게 유지가 된다면 정수위 시험을 할 수 있다. Darcy의 투수계수는 흙 샘플에서 1g 상태에서 k_{1g} 가 되고, k_{1g} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{1g} = \frac{Q}{Ait} \quad (5)$$

여기서, Q 는 시간 t 동안 집수된 총 유체의 체적이다.

이 샘플에 대한 실험은 원심모형시험에서 Ng 의 중력수준에서 실시하였고, 수위는 1g 시험에서처럼 A와 D의 수준으로 유지했다. A와 D의 수위가 변하지 않으면 Δh 와 ΔL 이 변하지 않아 Ng 에서도 1g에서와 마찬가지로 같은 값을 갖는다. 시험결과(Singh와 Gupta; 2000) 투수계수가 1g에서 Ng 로 N 배되는 것을 보여 주었다..

한편, 식 (6)은 Darcy의 중력의 함수이고 동수구배는 중력과 무관함을 알 수 있다.

$$v = K \frac{\rho g}{\mu} \times \frac{\Delta \left(\frac{P}{\rho g} + z \right)}{\Delta L} \quad (6)$$

위의 식 (6)을 원심모형시험 모델링에 적용하면 Darcy의 투수계수는 모델이 Ng 의 중력수준에서 N 배만큼 원형보다 커지며, Ng 상태에서 모델의 동수경사는 원형과 같다. 이것은 전수두차 $\Delta h = \Delta \left(\frac{P}{\rho g} + z \right)$ 와 유체의 흐름거리 ΔL 은 모델링에서 N 배만큼 작아진 것에 의한 것이라 할 수 있다. 압력경사는 원형과 Ng 모형에서 같은 것이나 압력수두는 원심모형시험 모델링 시 N 배 작아진 것이라 할 수 있다.

유체의 침투를 관하여 보다 일반적으로 표현할 수 있는 방법은 유체가 흐를 때 유체의 단위체적당 에너지 고려하는 것이다. 이것은 에너지 차이 때문이지 수두차이에 의해 흐르는 것은 아니다.

$$v = \frac{K}{\mu} \times \frac{[P + z\rho g]}{\Delta L} \quad (7)$$

식 (7)에 나타난 것은 흙을 통과해 흐르는 침투력에 대해 잘 정의하였으며, 이식을 1g 상태의 Darcy의 투수계수 정의를 사용하여 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$v = \frac{k_{1g}}{\gamma_{1g}} \frac{\Delta(P + z\rho g)}{\Delta L} \quad (8)$$

여기서, k_{1g} 는 1g상태의 투수계수, γ_{1g} 는 1g 상태의 물의 단위중량이다.

3. 시험 방법

3.1 기본물성시험

본 연구에서는 Kaolinite분말을 사용하여 연약지반을 모사하였다. 또한 성토제를 모사하기 위해 사용된 주문진 표준사는의 물성시험을 실시하여 다음과 같이 시험 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1 Kaolinite과 표준사의 물성시험 결과

시험	결과		
	Kaolinite	표준사	
비중 (Gs)	2.60	2.6	
연경도	액성한계(%)	59.8	NP
	소성한계(%)	35.0	NP
	소성지수(%)	24.8	NP
입도분석	균등계수	-	1.19
	곡률계수	-	1.01
	통일분류법	CH	SP

3.2 점도 시험

원심모형시험중 증력수준 증가로 인한 간극수의 투수계수에 대한 상사성을 유지하기 위하여 본 연구에서는 간극수의 점성을 조절하였다. 인위적으로 간극수의 점성을 조절하기 위하여 본 연구에서는 글리세린을 증류수와 혼합하여 점성을 조절하여 간극수로 사용하였다.

액체의 점성을 측정기 위하여 본 연구에서는 미국 Brookfield사에서 제조한 모델명, LVDV-III 회전식 디지털점도계(Programmable Viscometer)를 사용 하였다.

시험시 증력수준에 따른 상사법칙을 적용하기 위하여 증류수와 글리세린의 혼합비율을 조절해 가며 각 조건에 대한 혼합용액의 점성을 측정하여 그 결과를 표 2와 그림 2에 나타내었으며, 양대수 축으로 분석한 결과, 물과 글리세린비율(무게비) 2.25 : 1.00에서 25cP의 점성계수를 갖는 것으로 나타났다.

표 2 점도측정결과 (30℃에서 50rpm)

물:글리세린	1:1	2:1	5:1	10:1
Torque	76.7	56.8	23.2	7.3
점도(cP)	133.2	18.6	9.2	1.6

3.3 모형지반 성형 방법

원심모형시험시 연약지반을 모사하기 위하여 본 연구에서는 강제압밀 방법을 사용하였다. 먼저 시험조건에 따라 Kaolinite분말을 함수비 120%(≈2.0 LL) 조건으로 증류수 또는 증류수와 글리세린 혼합액을 혼합한 다음 균질성과 포화도를 유지하기 위하여 충분히 교반하여 시료를 준비한다. 혼합된 시료를 모형토조에 넣고 그림 3에서와 같이 에어백에 공기압을 가할 수 있는 장치를 이용하여 압

밀하중을 3단계에 걸쳐 단계적으로 재하하면서 강제압밀을 실시하였다. 이후 시료에 잔류하고 있는 과잉간극수압을 소산시키기 위하여 원심모형시험기에 토조를 장착하고 증력수준 50g 조건으로 4시간 30동안 자중압밀을 실시하였다. 이러한 시료성형과정이 종료될 때 시료의 함수비는 85~90% 분포로 나타났다.

그리고 원심모형시험시 주문진표준사를 포설하여 성토하중으로 사용하였으며, 이 때 주문진표준사의 각 하중단계별 건조 단위중량은 평균 11.28 kN/m^3 이다.

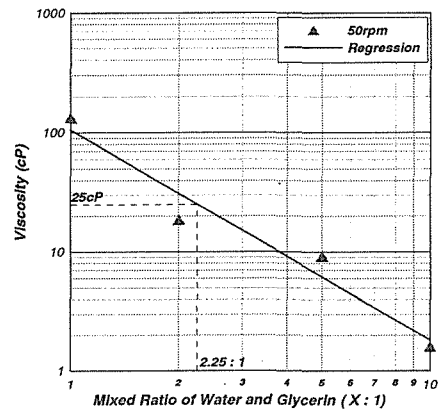


그림 2 적용 혼합비 분석

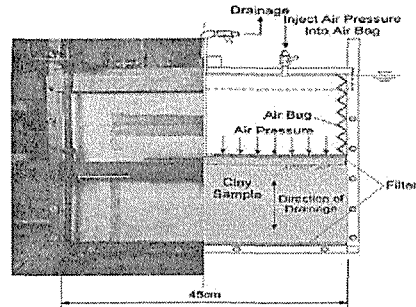


그림 3 강제압밀에 의한 모형지반 성형

3.4 배수재 모사

본 연구에서는 배수재를 모사하기 위하여 극세 섬유 중 멜트브론법(Melt-blown)법으로 제조된 부직포를 사용하였다. 극세섬유는 일반적으로 7.5 μm 이하의 섬유를 말하는데, 현장에서 보통 쓰이는 PBD의 유효구멍크기(Apparent Opening Size, AOS)는 해성점토(실트 및 점토)의 경우 $O_{90} < 80 \mu m$ 이며, 대부분 흙에서는 $O_{90} < 169 \mu m$ 이다(여기서 O_{90} 은 이미 알고있는 입경의 모래를 토

목섬유 위에 올려 놓고 진동을 주어 통과량을 측정하여, 남은 시료의 잔류 중량이 90%인 경우를 말함). 시험조건의 중력수준에 의한 상사성을 고려할 경우 그 범위에 만족하는 이와 같은 재료를 사용하였고 내부 코어를 모사하기 위해 실을 사용하였다. 그리고 그림 5는 모형지반에 일정한 간격으로 배수재를 설치한 평면상의 모습을 보여준다.

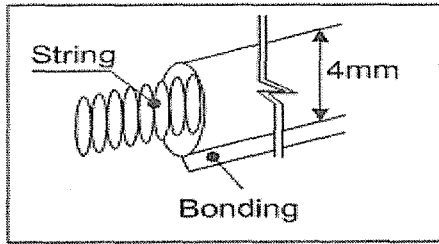


그림 4 배수재 모사

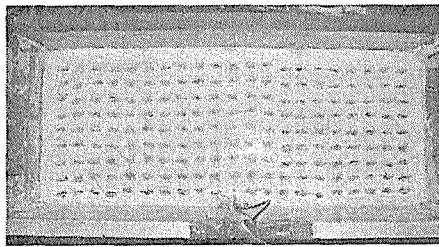


그림 5 지중 배수재 타설

3.5 시험 조건

점토 지반의 압밀거동 분석을 위한 원심모형시험시 점토의 투수계수 조건에 대한 상사법칙 적용여부에 따른 시험결과와 영향성을 분석하기 위하여 성토조건은 3단계로 나누어 균일한 두께(2cm 두께의 성토층)로 전체성토를 실시하고, 그림 6과 표 3에서와 같이 간극수의 점성계수 조건과 배수재 설치 조건을 달리하여 모형시험을 수행하였다.

표에서와 같이 Case-1과 Case-2는 간극수를 증류수로 사용하여 원심모형시험에서의 중력수준에 대한 점성계수의 상사성을 고려하지 않은 경우이고, Case-3과 Case-4의 경우는 간극수로 글리세린과 증류수의 혼합액을 사용하여 중력수준에 맞도록 점성계수를 인위적으로 증가시킨 조건이다. 또한 Case-2와 Case-4는 연직배수재를 2×2cm간격으로 타설한 조건이며, Case-1과 Case-3은 무 처리 조건이다. 지반 조성의 경우 강제 압밀 후 자중 압밀을 4시간 30분간 실시하였으며, 이때 높이는 Case-1~4 모두 20cm이었다. 성토는 주문진 표준사로 전체성토를 실시하였으며, 각 단계별 성토량은 표에서 보듯이 1단계 성토시 2.2kg 이었으며, 나머지 2단계와 3단계에서는 2kg씩 성토 하였다.

침하측정을 위한 연직변위계(LVDT)는 시료 연약 지반 상부 중앙에 위치하였고 간극수압 측정을 위하여 간극수압계(PPT)는 연약지반의 중앙부에 위치하였다.

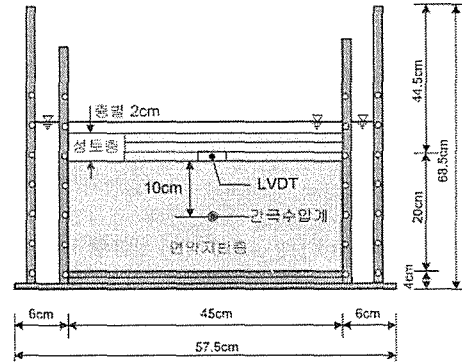


그림 6 Case-1~4 시험단면

표 3 시험 조건

(a) 배수재 타설 조건

구분	간극수	배수재 타설	
		현장조건 (m)	실험조건 (cm)
Case-1	증류수	미설치	미설치
Case-2	증류수	1×1	2×2
Case-3	증류수+글리세린	미설치	미설치
Case-4	증류수+글리세린	1×1	2×2

(b) 단계별 성토조건 및 압밀시간

	간극수	Case-1,2	Case-3,4
		증류수	증류수+글리세린
단계별 압밀시간 (min)		60	60
성토량 (kg)	1단계 성토	2.2	2.2
	2단계 성토	2.0	2.0
	3단계 성토	2.0	2.0

4. 시험분석

4.1 시간-침하분석

가. 배수재를 설치 않은 조건

그림 7은 배수재를 타설하지 않고 지반위에 성토하중을 재하하여 시간변화에 따른 침하량을 측정 한 결과이다. Case-1의 경우 투수계수에 대한 상사성을 무시하고 간극수를 증류수로 사용한 조건이며, Case-3의 경우 증류수와 글리세린 혼합액

을 사용하여 간극수의 점성을 조절하여 상사성을 고려한 시험조건에 대한 시간-침하 곡선이다. 그림 7 에서 단계별로 성토하중이 재하된 후 시간이 경과함에 따라 연약지반의 지표 침하량도 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 연직변위계(LVDT)로 측정된 최종 총 침하량은 Case-1은 15.39mm이고 Case-3은 10.98mm이다. 이와 같이 간극수로 글리세린을 혼합하여 점성을 조절한 경우 초기에는 차이가 크지 않으나 성토하중 및 시간이 경과함에 따라 시간-침하량 곡선의 기울기가 Case-1조건에 비하여 완만하게 진행되면서 그 차이가 점점 커지는 것을 알 수 있었다. 그리고 표 4 에서 연직변위계(LVDT)로 측정한 침하량 보다는 사진판독을 통하여 산정된 침하량이 다소 작게 나타나는데, 이는 원심력의 영향이 가장 큰 시료 중앙부에 변위계가 설치된 것과, 벽면에서의 변위를 촬영한 사진을 판독하기 때문에 벽면마찰의 영향이 있을 것으로 추정됨에 따라 사진판독 결과가 상대적으로 작게 산정된 것으로 판단된다.

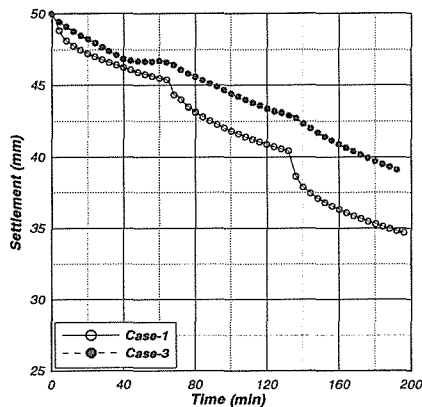


그림 7 무처리 조건의 시간-침하곡선

표 4 단계별 침하량 측정결과(배수재 미설치)

	측정방법	Case-1		Case-3	
		연직 변위계	사진 판독	연직 변위계	사진 판독
침하량 (mm)	1단계 성토	4.94	4.63	3.41	3.31
	2단계 성토	4.64	4.25	3.69	3.40
	3단계 성토	5.81	5.11	3.88	3.37
	총 침하량	15.39	13.99	10.98	10.08

나. 배수재를 설치한 조건

그림 8과 표 5는 배수재를 타설한 Case-2와 Case-4의 시간 침하 곡선 및 시험조건에 따른 침하 결과표이다. Case-2의 경우 간극수로 증류수만

을 사용한 것이고, Case-4는 간극수로 증류수준 50g 조건에 대하여 상사성을 고려한 것으로써 간극수와 글리세린을 혼합한 것을 사용한 것이다. 두 조건 모두 배수재의 유효구멍크기(AOS)를 고려한 멜트브론법으로 제작된 부직포로 모사한 배수재를 사용하였다. Case-2의 경우 연직변위계로 측정한 총 침하량은 38.51mm, Case-4는 35.74mm이었으며, 그 차이는 2mm로 이를 현장조건으로 환산시 10cm로 두 조건에 대한 침하량의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

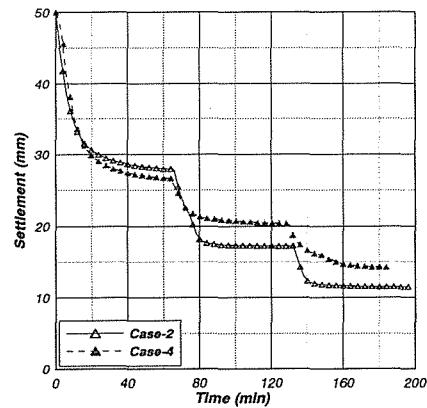


그림 8 배수재 타설 조건의 시간-침하곡선

표 5 단계별 침하량 측정결과(배수재 설치)

	측정방법	Case-2		Case-4	
		연직 변위계	사진 판독	연직 변위계	사진 판독
침하량 (mm)	1단계 성토	22.20	20.11	23.35	23.33
	2단계 성토	10.52	10.08	6.27	6.01
	3단계 성토	5.79	5.75	6.12	6.04
	총 침하량	38.51	35.94	35.74	35.38

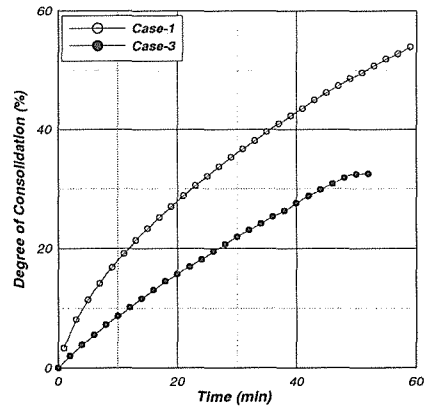
앞서 배수재를 설치하지 않은 Case-1과 Case-3에서 침하량의 차가 큰 것에 비하면, Case-2와 Case-4의 경우에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 배수거리가 증가할 수록 압밀침하량의 차가 큰 것으로 추정할 수 있으며, 압밀에 관한 원심모형시험시 배수거리가 클수록 간극수의 투수계수에 관한 상사성을 고려해야 할 것으로 판단된다.

4.2 압밀도 분석결과

가. 배수재를 설치하지 않은 조건

그림 7의 시간-침하량 관계곡선을 이용하여 각 성토단계별로 시간에 따른 압밀도 변화를 분석하였으며, 이 때 분석방법은 쌍곡선법과 Asaoka법을

이용하였다. 그림 9는 배수재를 설치하지 않은 조건에 대한 성토하중 단계별로 시간경과에 따른 압밀도 분석결과를 나타낸 것으로 앞서 언급한 바와 같이 쌍곡선법과 Asaoka법을 이용하여 압밀도를 산정하고 두 결과에 대하여 평균값의 변화를 나타낸다. 각 성토하중 단계에서 시간이 경과함에 따라 압밀도도 점진적으로 증가하는 것으로 나타나며, 지반 투수계수의 상사성을 고려한 Case-3의 경우 상사성을 무시한 Case-1에 비하여 상대적으로 압밀도가 작게 진행됨을 알 수 있다. 각 단계별 시험 종료시 최종적인 압밀도는 표 6에서와 같이 Case-1의 경우 49~53%의 범위를 나타냈으며, Case-3은 32~36%로 Case-1보다 15~20% 작게 나타났다. 이러한 결과에 의하면 배수거리가 긴 조건에 대한 압밀 시험시 지반 투수계수에 대한 상사법칙을 고려해야 할 것으로 판단된다.

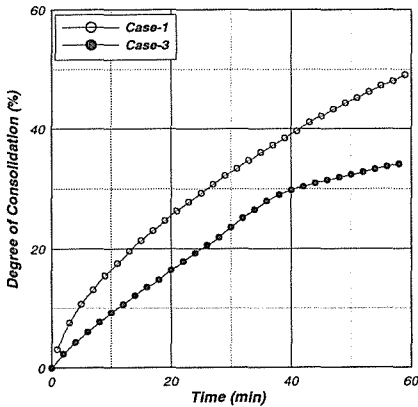


(c) 3차 성토

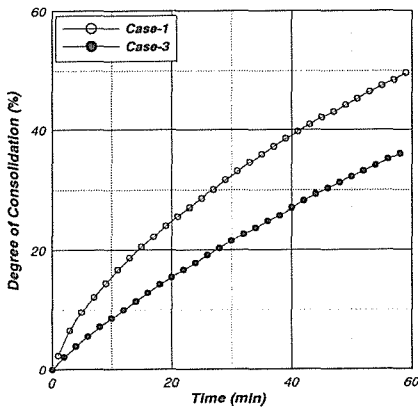
그림 9 시간에 따른 압밀도 변화(Case-1, 3)

표 6 시험 조건에 따른 단계별 압밀도 산정결과 (배수재 미설치)

		Case-1	Case-3
		증류수	증류수 +글리세린
단계별	압밀시간(min)	60	60
압밀도 (%)	1단계 성토	49.5	34.5
	2단계 성토	50.0	36.0
	3단계 성토	53.0	32.5



(a) 1차 성토

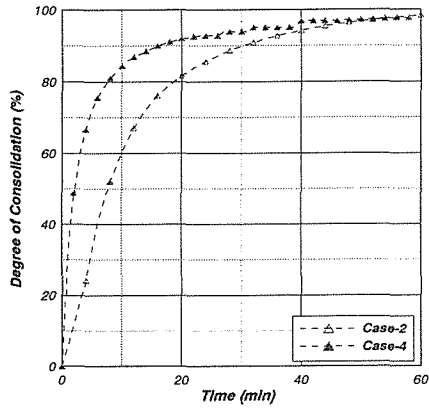


(b) 2차 성토

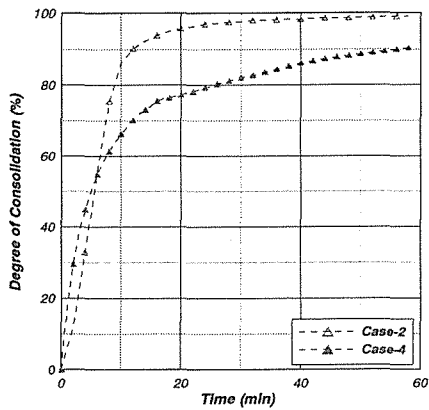
나. 배수재를 설치한 조건

그림 10은 배수재를 설치한 조건에 대한 성토 단계별로 시간경과에 따른 압밀도 변화를 나타낸다. 그림에서와 같이 배수재를 설치하지 않은 조건에 비하여 배수거리 단축으로 인해 압밀도가 빠르게 진행됨을 확인할 수 있으며, 성토단계별로 60분의 압밀시간이 경과한 후의 압밀도는 92.5~99%로 배수재를 설치하지 않은 조건에 비해 45~63% 크기 만큼 압밀도가 증가한 것으로 나타났다.

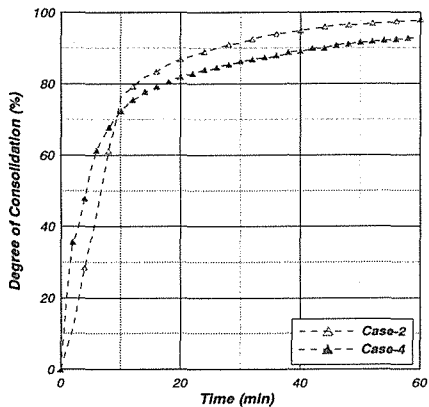
그리고 Case-2와 Case-4의 시험조건에서 압밀도가 90%에 도달하는 시간을 분석한 결과 Case-2의 경우 24~28분 사이였으며 Case-4는 38~53분으로 10분 이상의 차이가 발생되었다. 그러나 배수재를 설치한 조건에서의 침하량 분석결과에 의하면 두 조건에 대한 침하량 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 배수거리가 짧은 조건에 대한 압밀시험시 지반 투수계수에 대하여 상사법칙 고려하는 경우 시험초기 압밀이 다소 지연됨을 알 수 있으나, 압밀도 90%에 도달하는 시간차는 10여 분으로 나타나, 정확한 침하량 예측을 위해서는 시험조건별로 압밀시간에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.



(a) 1차 성토



(b) 2차 성토



(c) 3차 성토

그림 10 시간에 따른 압밀도 변화(Case-2, 4)

표 7 시험 조건에 따른 단계별 압밀도 산정결과 (배수재 설치)

시험조건	Case-2	Case-4	
간극수	중류수	중류수 +글리세린	
단계별 압밀시간(min)	60	60	
압밀도 (%)	1단계 성토	98.0	97.5
	2단계 성토	99.0	90.5
	3단계 성토	98.0	92.5

4.3 지반변위 분석결과

원심모형시험의 경우 시험과정을 상시 모니터링 할 수 있는 시스템을 갖추고 있다. 특히 본 연구과 같이 압밀시험을 실시할 경우 각 단계별로 시험시작 및 종료시점에서 촬영한 사진 자료를 판독함으로써 구조물 또는 성토하중 조건에 대한 지반전체에 대한 변위거동을 분석할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 성토하중이 재하되기 직전에 촬영된 사진과 시험이 종료된 이후 최종적으로 촬영된 사진을 판독하여 성토하중에 의한 지반변위를 분석하였다.

그림 11은 배수재를 설치하지 않은 조건에 대한 사진판독 결과를 나타낸다. 그림에서와 같이 동일 높이에 위치한 수평방향의 격자의 경우 중앙으로 갈수록 변위가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 회전에 의한 원심력이 동일하게 작용하기 때문이다. 사진판독 결과 시험종료 후 성토하중에 의해 발생된 지표면의 변위는 각각 10.08~13.99mm로 글리세린을 혼합하여 투수계수에 대한 상사법칙을 고려한 조건이 압밀침하량이 작은 것으로 나타났다. 또한 그림 12는 배수재를 설치한 조건에 대한 성토하중 재하전후의 지반변위 분석결과를 나타낸다. 시험종료후 발생된 지표면에서 변위는 35.38~35.94mm로 나타나 배수거리가 짧은 경우 성토 단계별로 각각 60분동안 압밀이 진행된 경우 최종적으로 지반변위의 차는 크지 않은 것으로 나타났다.

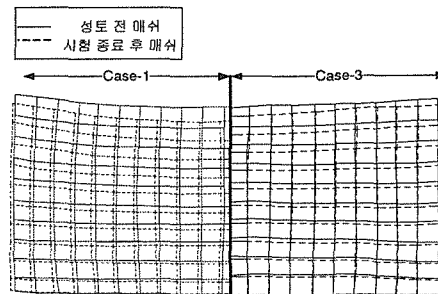


그림 11 원심모형시험 전후의 변위(Case-1, 3)

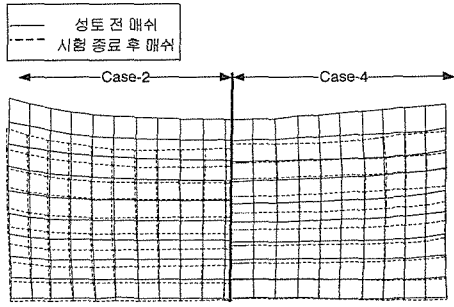


그림 12 원심모형시험 전후의 변위(Case-2, 4)

4.4 함수비 측정결과

그림 13은 시험 종료후 함수비를 측정하기 위하여 단면을 절개한 전경이며, 구간별로 측정된 함수비를 심도에 따라 정리하여 그림 14에 나타냈다. Case-1와 Case-3의 경우 중앙부분에서 심도별로 등간격으로 시료를 채취하여 함수비를 측정하였으며, Case-2와 Case-4의 경우 중앙부분에서 위치한 배수재와 배수재 사이에서 심도별로 등간격으로 채취한 시료에 대한 함수비 측정하였다.

배수재를 설치하지 않은 경우 심도별 함수비는 0.5~0.8H 위치에서 상대적으로 크게 나타나 일차원 조건의 압밀이 진행되는 전형적인 경향성을 반영하고 있다. 또한 배수재를 타설한 조건의 경우 심도에 따라 함수비는 비교적 일정하게 분포하는 경향을 보인다. 분석결과, Case-1~4의 조건별 평균함수비는 각각 59.0%, 64.3%, 73.2%, 59.7%로 나타나 배수재를 타설한 조건이 상대적으로 낮은 함수비를 보이고 있다.

5. 결론

원심모형시험시 지반의 투수계수에 대한 상사법칙의 고려여부가 연약지반의 압밀거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 투수계수를 매개변수로 하는 원심모형시험을 수행하여 그에 따른 상관관계를 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 지반의 투수계수에 대한 상사법칙을 적용하기 위하여 간극수의 점성계수를 조절하였으며, 중력수준에 따라 요구되는 점성계수는 글리세린과 증류수를 혼합하여 획득할 수 있었다. 또한, PBD 배수재 필터의 유효구멍크기에 대한 상사성은 펠트블론 재료로 모사할 수 있었다.

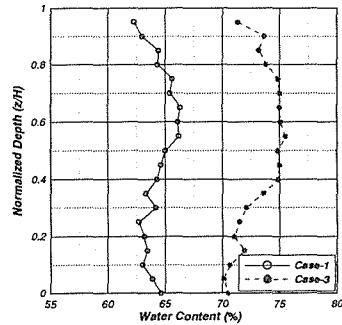
(2) 연직방향의 1차원 배수조건에 대한 압밀시험 결과, 투수계수에 대한 상사법칙을 고려하는 경우 침하량과 압밀도 분석을 통하여 상대적으로 압밀이 지연되는 경향을 확인할 수 있었다.

(3) 배수재가 타입된 수평배수 조건에 대한 압밀시험 결과, 투수계수에 대한 상사법칙을 고려하는 경우 초기에 압밀이 다소 지연되었으며, 시간이 경과하여 압밀이 충분히 진행된 조건에서는 침하량의 차이가 없는 것으로 나타났다.

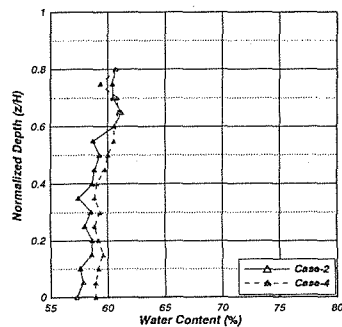
(4) 따라서 원심모형시험기를 이용하여 배수거리가 긴 경우에 대한 압밀시험시 지반의 투수성에 대한 상사법칙의 고려여부는 시험결과에 결정적 영향을 미치는 것으로 분석되었다.



그림 13 시험 종료 후 단면



(a) 배수재 타설하지 않은 조건(Case-1, 3)



(b) 배수재 타설한 조건(Case-2, 4)

그림 14. 깊이별 함수비 분포

참 고 문 헌

- [1] Andrew, D. Gibson, "Physical Scale Modelling of Geotechnical Structures at 1G", *California Institute of Technology*, 1997.
- [2] Arulanandan, K., Thompson, P. Y., Kutter, B. L., Meegoda, N. J., Muraleetharan, K. K. and Yogachandran, C, "Centrifuge modelling of transport processes for pollutants in soils", *J. Geotechn. Eng. ASCE* 114(2), pp. 185~205, 1988.
- [3] Butterfield, R, "Scale-modeling of Fluid Flow in Geotechnical Centrifuge". *Soils and Foundation*, 40 (No.6), pp. 39~45, 2000.
- [4] Cargill, K. W. and Ko, H. Y, "Centrifuge Modeling of Transient Water Flow", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 120(2), pp. 366~387, 1983.
- [5] Dean, E. T. R, Discussion on "Scale-modeling of Fluid Flow in Geotechnical Centrifuge", *Soils and Foundation*, Vol. 41, No. 4, pp. 108~110, 2001.
- [6] Devendra, N. Singh. and Ashok, K. Gupta, "Modelling Hydraulic Conductivity in a Small Centrifuge", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No.5, pp. 1150~1155, 2000.
- [7] Goodings, D. J, "Relationship for Modelling Water Effects in Geotechnical Models", *Proceedings. Application of Centrifuge Modelling to Geotechnical Design*. University of Manchester, 1~23, .1984.
- [8] Jansen, H. L. and Den Hoedt G, "Vertical Drains: In-situ and Laboratory Performance and Design Considerations", *Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1983.
- [9] Kjellman, W, "Accelerating Consolidation of Fine Grained Soils by Means of Cardbord Wicks", *Proc., 2th ICSMFE, Rotterdam*, Vol. 2, pp. 302~305, 1948a.
- [10] Pokrovsky, G. I. and Fyodorov, I. S, "Centrifuge Modelling in the Construction Industry", *Vol. 1, in Translation Building Research Establish, U. K*, 1968.
- [11] Robert, H., Perry, D. W. and Green, "Perry's Chemical Engineer's Handbook", *The McGraw-Hill Companies*, 1999.
- [12] Schofield, A. N, "Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations", *Geotechnique*, Vol. 30, No. 3, pp. 227~268, 1980.
- [13] Tan, T. S. and Scott, R. F, "Centrifuge Scaling Considerations for Fluid-Particle Systems". *Geotechnique*, Vol. 35, No. 4, pp. 461~470, 1985.
- [14] Taylor, R. N, "Discussion on Tan & Scott(1985)", *Geotechnique*, Vol. 37, No. 1, pp.131~133, 1987.
- [15] Technical Committe TC2, "Catalogue of Scaling Laws and Similitude Questions in Centrifuge Modeling", *Technical Committee Swiss Federal Institute of Technology, Zürich*, 2006.