

포항 점토 지반의 수평배수 압밀특성 연구

A Study on Character of Consolidation for Radial Drainage of Pohang's Clay Ground

이 송¹⁾, Song Lee, 전제성²⁾, Je-Sung Jeon, 김원영³⁾, Won-Young Kim

¹⁾ 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

²⁾ 서울시립대학교 토목공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

³⁾ 서울시립대학교 토목공학과 석사, M.S, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

SYNOPSIS : Vertical drain used improvement soft clay is made of not only decreasing construction time but also increasing the ground strength during some decades. As, it is applied to improvement soft clay with vertical drain, it is designed by the result that is caused by oedemeter test ignored anisotropic of the ground related to consolidation conditions. When we are expected consolidation conditions, the most important factors is soil of compaction and water permeability. Above all, anisotropic of the ground permeability show the results which differ between vertical and radial drainage. Recently, We study for radial consolidation coefficient and permeability coefficient that utilized Rowe Cell Consolidation and permeability tester but, it dont use well because of not only a supply lack also difficulty of test.

The paper experimented with searching anisotropic of the ground so there are Rowe Cell test, standard consolidation tester and modified standard consolidation test that have pohang's soft clay ground. Therefore, we find anisotropic of the ground and a tester of easy use more than before. We made a comparison test result between the devised tester and Rowe Cell tester. Also, we learned average degree of consolidation for partial penetrating vertical drains. We were found relations as effective stress-void and effective stress-permeability coefficient through those tests.

Key Words : Oedemeter test, Vertical drain, Rowe Cell, Modified Standard Consolidation Test, anisotropic, soft clay, Partial penetrating vertical drain, Radial drainage.

1. 서 론

연직배수공법은 연약지반의 개량공법으로서 지난 수십년 동안 공사기간 단축뿐만 아니라 지반의 강도를 확보하는 면에서 많이 이용되어 왔다. 현재, 국내 연약지반에서 연직배수공법을 병행한 지반개량공법을 적용할 때, 압밀현상과 관련된 지반의 이방성을 무시한 채 표준압밀시험결과 만으로 설계가 이루어지고 있는 실정이다. 하지만, 압밀현상을 예측하는데 있어 가장 중요한 요소는 지반의 압축성 및 투수성이다. 특히 지반의 투수성에 관한 이방성은 수평방향과 수직방향의 결과가 큰 폭의 차이를 보이고 있다.

최근 들어 실제 현상에 부합하는 압밀현상의 예측을 위하여 수평방향 압밀계수 및 투수계수 등을 구

하기 위한 연구가 Rowe Cell 시험을 통해 활발히 진행되고 있다. 하지만, Rowe Cell 시험기의 보급이 아직은 미비한 수준이며, 시험방법과 결과분석의 어려움으로 기존의 표준압밀시험결과를 이용한 설계가 이루어지고 있는 것이 현 실정이다.

본 연구에서는 Rowe Cell시험 및 표준압밀시험에 의하여 압밀현상과 관련된 지반의 이방성을 살펴보았으며, 기존의 표준압밀시험기를 개량하여 손쉽게 수평배수 압밀특성을 파악할 수 있는 시험장치를 고안하였다. 고안된 시험기를 통하여 직경비를 달리한 수평배수 압밀시험을 실시하여 그 결과를 Rowe Cell 시험결과와 비교 분석하였다.

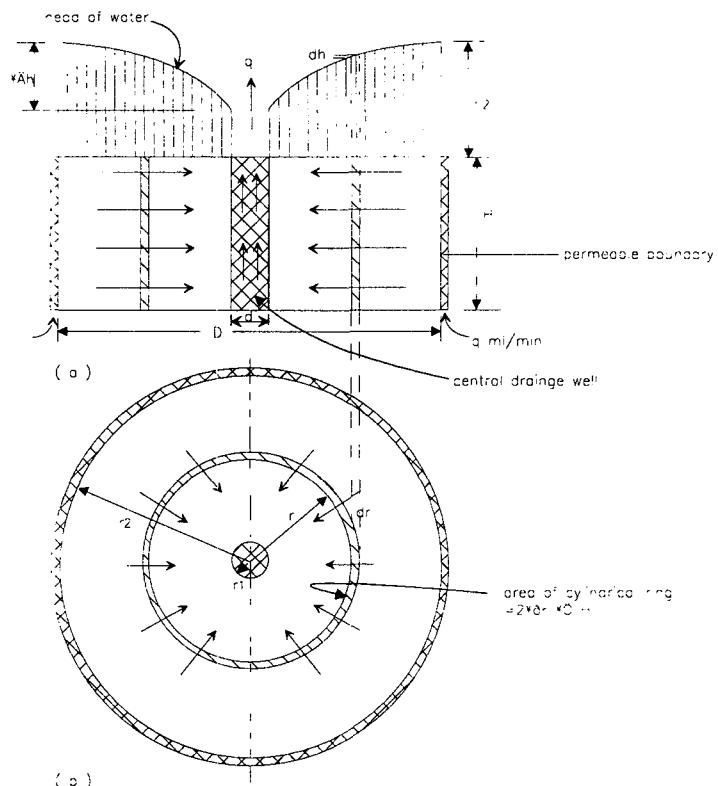
또한, 연약지반 설계시 배수채의 관입깊이에 관계없이 완전 관입되었다고 설계하고 있는 현 상황에서, 배수채의 관입깊이에 따른 압밀도의 영향성을 알아보았다.

2. 수평투수 시험

그림 1는 배수되는 경계면에 압력차를 주어 물의 흐름을 Inward 방향으로 유도한 Rowe Cell 수평투수 과정을 보여주고 있다. 이 때 물 흐름이 층류라고 가정한다면, Darcy's법칙이 유효하여 수평투수계수를 쑥 2와 3과 같이 표현할 수 있다.

$$k_r = \left(\frac{q \cdot \rho \cdot g}{2\pi H \cdot \Delta p} \right) \log_e \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2)$$

$$k_r = 0.26 \frac{q}{H \Delta p} \log_e \left(\frac{D}{d} \right) \times 10^{-2} \text{ cm/s} \quad (3)$$



(a) 시료 및 압력분배 (b) 원형형시료의 평면묘사

그림 1. 수평투수시험

3. 실내 시험

실내시험은 기본적이 토성시험 및 일축압축 강도시험을 실시하였고, 압밀시험은 표준압밀시험, 개량표준압밀시험 및 Rowe cell시험을 실시하였는데 다음과 같다.

3.1 토성 시험 및 일축 강도 시험

본 연구에 사용된 시료는 포항지역의 연약지반으로 점토 및 실트질 흙인 심도가 최소 25m에서부터 35m까지 다양하게 분포하고 있다. 이 지역의 토질 및 강도정수는 표 1과 같다.

표 1. 토질 및 강도정수

Depth (m)	Wn (%)	LL (%)	PI (%)	Qu (kg/cm ²)	Gs	USCS
6.0-6.8	80.1	78.8	45.3	0.45	2.69	CH
7.5-8.3	50.5	58.9	31.5	0.28	2.69	CH
9.5-10.3	64.0	61.0	31.9	0.52	2.70	CH
10.5-11.3	51.5	52.2	25.9	0.43	2.70	CH
18.0-18.8	50.1	64.6	37.3	0.50	2.70	CH

3.2 표준압밀시험 (SC Test)

표준압밀시험은 ELE사에서 제작한 자동화 표준압밀 시험기를 이용하여 수직방향 압밀계수 및 압축지수, 유효응력별 간극비, 유효응력별 투수계수등을 산정하였으며, 이를 Rowe cell 시험결과와 비교, 분석하였다.

3.3 개량표준압밀시험 (MSC Test)

본 연구에서는 압밀계수 및 투수계수 등과 관련된 수평방향의 압밀특성을 파악하기 위하여 기존의 표준압밀시험기를 개량한 수평배수 표준압밀장치를 제작하였다. 이 장치는 수평배수 압밀시험을 많이 실시한 Oune가 1988년 수평배수 특성연구에 사용한 실험장치이며, 이를 더욱더 새로이 제작하였다. 그림 2에서 보듯이 중앙으로 수평배수를 유도하기 위한 모형 배수재와 압밀침하의 진행과정에서 등변형률을 유도하기 위한 상부 캡으로 구성되어 있다. 또한, 모형 배수재의 타설시 시료의 교란효과를 최소화하기 위하여 별도의 시료 커팅링을 제작하였고, 압밀시험 과정에서 모형 배수재로 유도된 간극수로 인한 압력생성을 방지하기 위하여 캡의 상향부분에 별도의 배수라인을 설치하였다. 본 연구에서 새로이 고안한 장치는 시험절차 및 결과분석에 있어 기존의 Rowe Cell 압밀시험기에 비해 매우 간편할 뿐만 아니라, 그 시험결과에 있어서도 Rowe Cell 압밀시험 및 투수시험 결과에 매우 유사한 것으로 나타났다. 한편 개량표준압밀시험기에 의한 수평배수 압밀시험시, 모형 배수재의 직경을 달리 하여 배수재 직경에 따른 수평방향 압밀계수의 변화를 연구하였고, 수직배수재의 관입깊이를 서로 다른상태에서 상부배수도 허용하여 실험한 결과에 대해서 수직배수재의 관입깊이에 대한 압밀도 변화를 알아보았다.

3.4 Rowe Cell 시험 (RC Test)

그림 3은 수평배수 압밀현상과 관련된 수평방향 압밀특성을 파악하고, 개량표준압밀시험기에 의한 수평배수 압밀시험결과의 검증을 위해서 RC 압밀시험 및 투수시험을 실시하는 과정이다. 시료의 교란을 최소화하기 위해 시료추출기에 추출속도조절기 달아 2mm/분로 추출하였고, 시료 성형시 날카로운 커팅링을 사용하여 추출시 벽면의 교란을 최소화 하였다. 시험용 시료의 직경과 높이는 각각 72.1mm와 32mm이고, 수직배수제는 주문진 표준사를 사용하였다. 표 2은 압밀시험 및 투수시험의 종류와 압밀정수 등을 나타내고 있다.

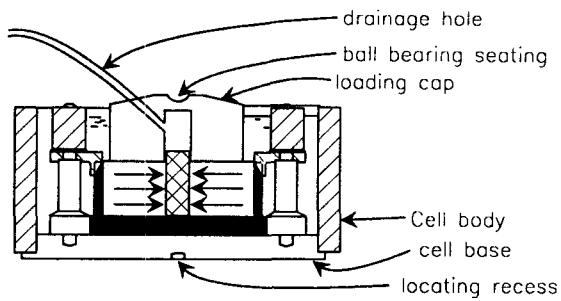


그림 2. 개량표준암밀 시험기의 모식도

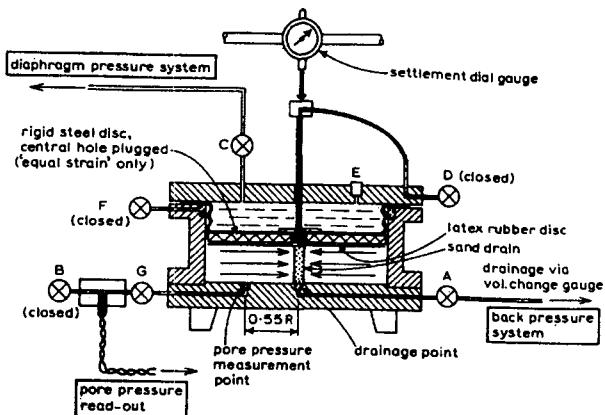


그림3. Rowe-Cell 수평배수 암밀 및 투수시험의 세부적인 압력시스템

표 2. 암밀시험 및 투수시험의 종류와 암밀정수

Test details	Test initial condition and Consolidation parameters					Demanded Values			Test Frequency				
	d_w (mm)	W (%)	r_d (t/m ³)	E_0	C_c								
RC_H	14.2	51.7	1.11	1.48	0.50	$e - k_h$			2				
MSC_H	14.2	52.5	1.07	1.52	0.55	e-log P	$e - k_h$	$e - C_v$	1				
	11.6	52.0	1.10	1.49	0.50				1				
	7.3	53.3	1.07	1.52	0.52				1				
MSC_P _{1.0}	11.6	65.9	0.93	1.92	0.74				2				
MSC_P _{0.75}	11.6	66.3	0.92	1.90	0.75	e-log P	$e - C_{vh}$		2				
MSC_P _{0.5}	11.6	66.2	0.93	1.91	0.71				2				
SC_V	0.2 (Kg/cm ²)								1				
	0.4 (Kg/cm ²)								1				
	0.8 (Kg/cm ²)								2				
	1.6 (Kg/cm ²)								2				
비 고	표준암밀직경=63.5mm Rowe Cell직경=72.1mm $d_w =$ 드레인 직경 $d_e =$ Cell직경					e-log P	$e - k_v$	$e - C_v$					
	RC : Rowe Cell MSC : 개량표준암밀 SC : 표준암밀 H : horizontal V : vertical												
	P ₀ : 배수재의 부분관입깊이 비												
	※ MSC 및 RC 시험 - inward drainage, equal starain												

4. 결과 분석 및 고찰

4.1 시험방법에 따른 유효응력-간극비 관계

그림 4는 각기 다른위치와 심도에서 채취한 시료를 이용하여, 선행압밀하중을 달리하여 표준압밀시험을 실시한 결과로서, 25~35m정도의 심도로 분포하고 있는 포항지역 연약지반은 위치와 심도별로 거의 유사한 간극비와 유효응력 관계를 나타내고 있다. 그림 5는 SC시험과 RC수평배수시험, 모델 배수재의 직경을 변화시켜가며 수평배수에 의한 MSC시험을 통해 간극비와 유효응력관계를 나타낸 것이다. 본 실험에서 보듯이, 압밀 시험의 배수방향 및 시험기, 수직배수재의 직경비에 관계없이 간극비와 유효응력관계가 거의 유사함을 알 수 있다.

4.2 시험종류별 투수계수의 변화 및 이방성

그림 6는 개량형 표준압밀시험에서 구한 수평방향 투수계수(K_h)와 표준압밀시험에서 구한 수직방향 투수계수(K_v)를 나타낸 것으로서, 각 시험별 투수계수를 다양한 유효응력 즉 간극비의 함수로 나타내었다. 결과에서 보듯이 K_v 는 대략 $6.55E-09 \sim 1.22E-07$ cm/sec, K_h 는 대략 $1.93E-08 \sim 3.18E-07$ cm/sec의 범위로 나타났다. 또한 수평방향 및 수직방향 투수계수는 모두 간극비의 지수함수형태로 표현되며, K_h 는 K_v 에 비해 대략 2.5~4.3배 정도 큰 것으로 나타났다. 그림 7는 RC수평투수시험 및 MSC에서 구한 K_h 를 비교하였다. 그림에서도 보듯이 두 시험결과가 거의 유사함을 알 수 있는데, MSC시험이 시험방법 및 결과분석 절차에 있어 기존의 RC시험보다 매우 간편하면서도 소정의 정확도를 확보할 수 있는 시험임을 알 수 있었다.

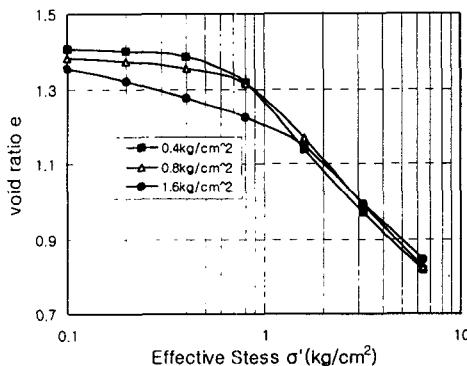


그림 4. 선행압밀하중에 따른 유효응력-간극비관계

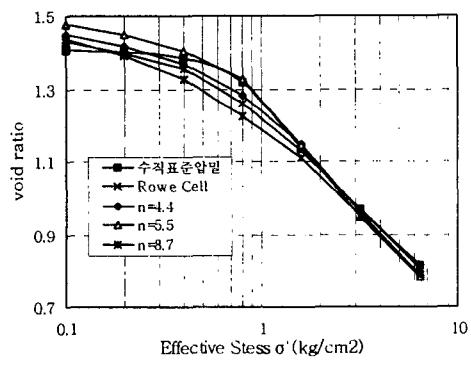


그림 5. 시험 방법에 따른 유효응력-간극비관계

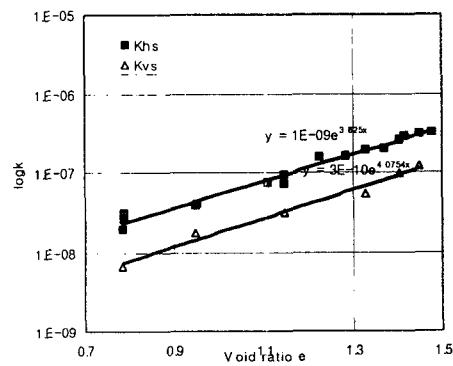


그림 6. 표준압밀시험에 의한 배수조건별 간극비-투수계수 관계

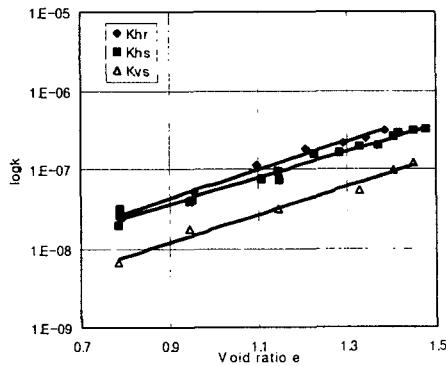


그림 7. 시험 방법에 따른 간극비-투수계수 관계

4.3 시험종류별 압밀계수의 변화 및 이방성

그림 8은 배수조건에 따른 간극비별 압밀계수를 나타낸 것으로 배수되는 방향에 따라서 값들이 상이하게 나타났다. 실험결과에서 보듯이 수직압밀계수(C_v) 0.83 ~ 3.98 $m^2/year$, 수평압밀계수(C_h)은 1.9~7.8 $m^2/year$ 의 범위에 있었으며, C_h 은 C_v 보다 2~3배 정도 큰 것으로 나타났다. 그림 9는 개량형 표준 압밀시험으로 수직배수재의 직경비를 다르게 하여 실험한 결과 간극비에 따른 압밀계수값을 나타내었다. 직경비가 작을수록 C_h 가 조금씩 큰 경향을 띠었는데, 이는 배수되는 단면적이 클수록 압밀계수가 조금씩 크게 나타났다.

4.4 직경비별 개량형 표준압밀 시험결과

그림 10는 압밀하중이 0.8~1.6kg/cm²에서 직경비를 달리하여 수평배수실험한 결과로서 압밀도를 직경비별 시간에 따라 도시하였다. 여기서, 실내실험과 Barron이 제시된 수평배수이론식을 비교하였을 때, 직경비가 작을수록 압밀속도가 빠르게 나타나는데, 이러한 결과는 압밀도가 직경비의 함수임을 알 수 있게 한다.

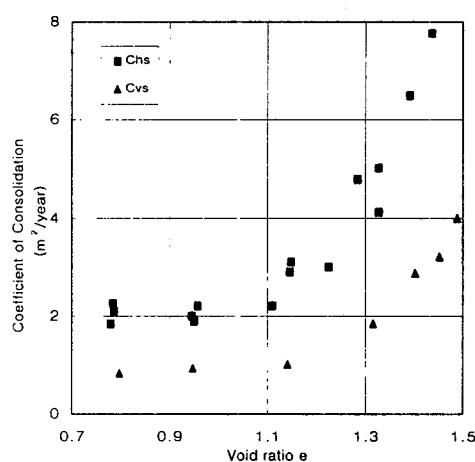


그림 8. 배수조건에 따른 간극비압밀계수관계

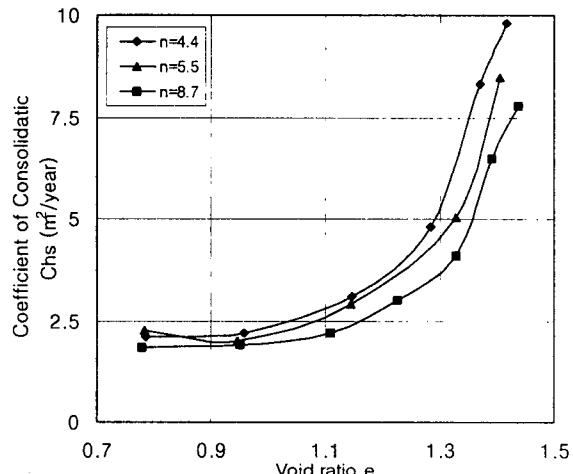


그림 9. 직경비에 따른 간극비수평압밀계수관계

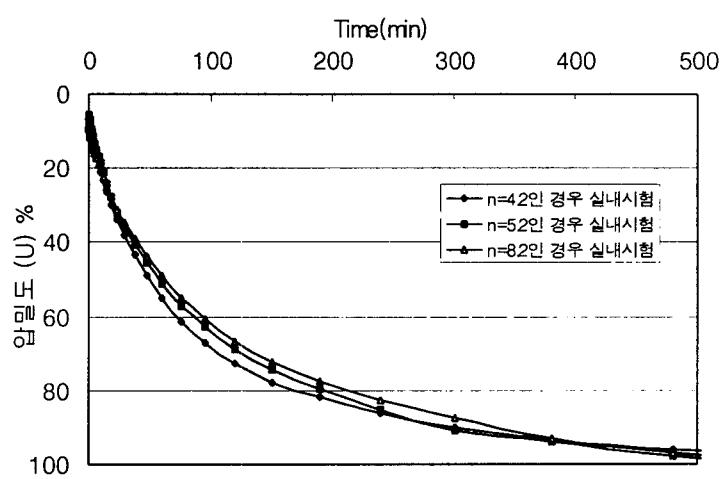


그림 10. 직경비별 시간에 따른 압밀도

그림 11은 압밀하중이 $0.8\sim1.6\text{kg/cm}^2$ 에서 시료의 교란의 정도를 알아보기 위해 직경비별 실험과 Barron의 이론식을 비교한 결과이다. 여기서 시료의 교란정도는 S로 투수계수비는 K'로 표현하였다. 압밀 초기부분에서는 거의 linear effect가 보이지 않다가 압밀이 60% 이상 되었을 때, 압밀도가 현저히 저하되는 현상이 발생하였다. 이는 smear effect이외에도 다른 영향으로 인해 압밀도가 지연된다고 판단된다. 그림 12는 직경비가 5.5일 때 MSC시험결과와 Barron 및 Yoshikuni의 이론식을 비교한 결과이다. 여기서 교란정도 S와 통수능의 저항계수는 L로 표현하였다. 압밀속도에 대한 저항능력은 압밀초기부분에는 발생하지 않다가 압밀이 60%정도 진행된 시점에서 발생되었고, 실험결과에서 알 수 있듯이 압밀이 60%까지는 Barron의 이론식과 실험결과가 일치해 보이나, 압밀이 80%에 도달할 때에는 Yoshikuni의 이론식과 비슷함을 알 수 있었다. 실험을 통해 Well Resistance의 저항능력을 알아본 결과, 압밀 초기부분에서는 발생하지 않다가 압밀이 진행되면서 Well Resistance가 발생하는데, 이는 배수재의 필터에 미세한 점토입자가 막힘으로 인해 발생되었다고 판단된다.

4.5 수직배수재의 부분관입

그림 13은 배수재의 관입깊이 별 시간에 대한 압밀도를 나타낸 것이다. 하중단계는 $3.2\sim6.4\text{kg/cm}^2$ 이고, 직경비는 5.5일 때 실험을 실시하였고, 평균압밀도는 시간에 대한 침하량을 압밀종료시간이 24시간 제어시 최종압밀량으로 나누어서 얻어내었다. 실험결과에 보듯이 압밀속도면에서 배수재의 관입깊이가 깊을수록 압밀도는 더 빠르게 발생하였다. 그림 14는 수직배수재의 관입깊이와 압밀도의 상관관계를 알아보기 위해서 시간을 Root T로 나타낸 것이다. 결과에서 보듯이 거의 60%까지는 선형적인 경향을 가지고 있었고, 직선부분을 1차원 함수식으로 나타낸 결과 관입깊이 0.5cm당 기울기의 차이가 2.4~2.6정도로 나타났다. 압밀도와 Root 시간의 일정한 관계가 있음을 알 수 있었다.

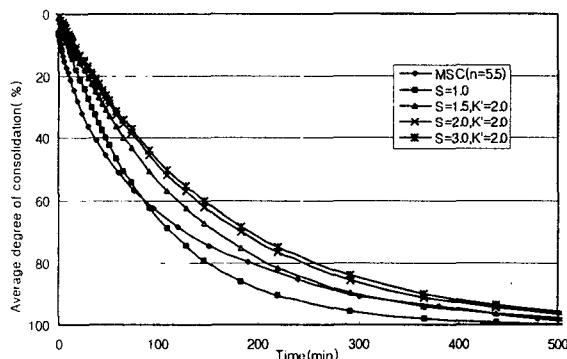


그림 11. n=5.5인 경우 시험과 Barron이론의 압밀도

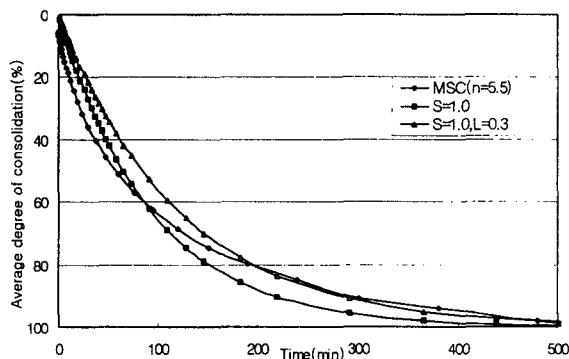


그림 12. n=5.5인 경우 시험과 Well Resistance와의 관계

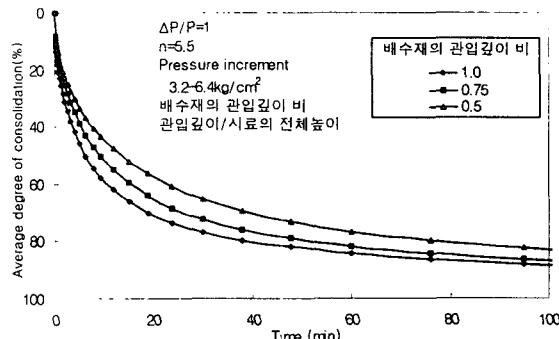


그림 13. Drain의 관입깊이별 시간에 대한 압밀도

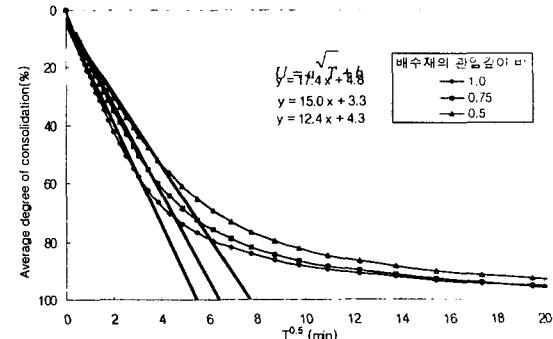


그림 14. Drain의 관입깊이별 $T^{0.5}$ 에 대한 압밀도

5. 결론

본 연구에서는 SC시험 및 Rowe Cell을 이용한 수평배수시험, 직경비를 달리한 MSC시험한 결과는 다음과 같다.

- 1) 압밀 시험에서 배수방향 및 각 시험기별, 개량형 표준압밀시험시 수직배수재의 직경비에 관계없이 동일한 유효용력범위에서는 간극비가 거의 유사하게 나왔다.
- 2) 개량형 표준압밀시험에 의한 K_h 는 표준압밀 시험의 K_v 보다 대략 2.5~4.5배 정도 크게 나타났고, 개량형 표준압밀시험으로 구한 K_h 는 Rowe-Cell시험으로 구한 K_h 와 매우 유사한 값을 나타났다. 그러므로, 수직배수재를 사용한 연약지반 개량시 시험방법 및 결과분석 절차에 있어 개량형 표준압밀시험은 기존의 Rowe-Cell시험보다 매우 간편하게 K_h 구할 수 있으며 소정의 정확도를 확보할 수 있다는 것을 알았다.
- 3) 배수방향에 따른 압밀계수에 비교한 결과 C_h 는 C_v 보다 2~3배 정도 크게 나왔으며, 개량형 표준압밀시험에서 직경비에 따른 C_h 는 배수재의 직경이 클수록 조금씩 크게 산정되었다.
- 4) 유효용력에 대한 투수계수 및 압밀계수는 일정한 상수 값이 아닌 간극비에 대한 함수로 표현할 수 있으므로, 연약지반 설계시 흙의 압밀되는 과정을 비선형적으로 적용하는 것이 더욱 타당함을 알게 되었다.
- 5) 직경비별 개량표준압밀 시험결과와 기존의 이론식과 비교한 결과 Smear Effect는 거의 발생하지 않았으며, Well Resistance는 압밀초기부분에는 거의 발생하지 않다가 압밀 60%되는 시점에서 발생됨을 알았다. 이는 실험상 배수재면에 점토입자의 막힘현상에 의해서 Well Resistance가 발생함을 알 수 있었다.
- 6) 실제 연약지반 설계시 고려하지 않고 있는 배수재의 관입깊이의 영향을 MSC시험을 통해 알아보았다. 배수재 관입깊이별 압밀속도를 알아보기 위하여 압밀도- $T^{0.5}$ 으로 도시한 결과, 압밀도의 초기 60%까지는 관입깊이 비가 0.25씩 증가할수록 기울기가 2.4~2.6정도 증가함을 보였다. 현 연약지반 설계시 배수재의 부분관입에 대해서 고려하지 않고 있지만 본 실험을 통해 알아본 결과, 연약지반 설계에 있어서 부분관입의 고려한 설계가 필요하리라고 판단된다.

참고문헌

1. 이송, 김성택, 전제성, (1998), Rowe Cell시험을 이용한 고함수비 지반의 비선형 압밀변수 산정에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 제 18권 제 2-2호, pp 109~112.
2. Braja M.Das (1983) Advanced Soil Mechanics. McGrawHill, International Edition.
3. Berry. P.L., and W.B. Wilkinson (1969) The Radial Consolidation of Clay Soils. Geotechnique, vol 19, pp253~284.
4. Mahbubul A.Khan and Vinod K.Garga (1994) A simple Design for Hydraulic Consolidometer and Volume Gauge. Can.Geotechnique, vol 27, pp 769~772.
5. Murti.V. (1990) Determination of Time factor in a Combined Vertical and Radial Consolidation. Can.Geotechnique, vol 27, pp245~248
6. Onoue,A., (1988) Consolidation by Vertical Drains taking Well Resistance and Smear into Consolidation. Soil & Foundation, vol 28, No.4, pp165~174.
7. Rowe.P.W. and Laing Barden (1966) A New Consolidation Cell. Geotechnique, vol 16, pp 162~170.
8. Yoshikuni, H and Nakando, H., (1977) Consolidation of Clay Cylinder with External Radial Drainge. ASCE, vol 17, pp 61~64.