표준압밀시험기를 사용하는 수평배수 압밀셀의 개발
Developement of Consolidation Cell of Horizontal Drainage using Standard Consolidation Tester

주재우[1], Jae-Woo Ju, 정규향[2], Gyu-Hyang Cheong, 조삼덕[3], Sam-Deok Cho 이천주[4], Chun-Ju Lee 박종범[5], Jong-Beom Park

[1] 순천대학교 토목환경공학부 교수, Prof., Facult of Civil & Environmental Engineering, Univ. of Sunchon
[2] 전남대학교 대학원 농공학과 박사수료, Ph.D. Candidate, Agricultural Eng, Univ. of Chonnam
[3] 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원 Research Fellow, Div. of Geotechnical Eng. KICT
[4] 동아시험기 대표, President, Dong-A Tester
[5] 순천대학교 대학원 토목공학과 박사수료, Ph.D.Candidate, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sunchon

SYNOPSIS : The most popular consolidation tester is a standard consolidatiion tester, which performs consolidation using the step load weight. However this apparatus is used to obtain only the vertical consolidation coefficient. Therefore the purpose of this study is to develope the horizontal consolidation cell for a horizaontal consolidation coefficient. Various size of tests have been peroformed to investigate the effect of scale effect. From the test results, it has turned out that this horizontal consolidation cell has a good function for a horizontal consolidation coefficient.

Key words : horizontal drainage, standard consolidation tester, coefficient of consolidation.

1. 서 론

점토성분이 많이 함유된 연약지반상에 토목구조물을 건설하는 경우, 장기적으로 지속되는 침하로 인해서 구조물의 안정을 위협할 수 있다. 이러한 지반은 사전에 불교란 시료를 채취하여 압밀시험을 함으로서, 그 지반이 상부하중에 따라 어느 정도 침하할 것인가 또는 원하는 압밀도를 얻으려면 어느 정도의 기간이 걸리는 지 예측할 수 있는 데이터를 얻게 된다. 가장 일반적으로 사용되는 압밀시험장치는 하중추를 이용하여 압밀응력을 증가시키는 표준압밀시험장치이다. 그러나, 현재 표준압밀시험장치는 물의 흐름을 상부방향으로만 허용하여 연직방향의 압밀특성을 얻는데 그치고 있다. 그러나 자연적으로 퇴적된 지반의 경우 지반의 이방성 때문에 수평방향의 압밀특성은 연직방향과 다르다. 수평배수에 의한 압밀시험은 주로 Rowe cell시험기에 의해 행하는데, 이 시험기는 고가의 장비이며 시험의 복잡성으로 인해 널리 보급되어 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 표준압밀시험장치를 사용하여 수평압밀시험을 할 수 있는 압밀 cell을 개발하였다. 즉 수평배수 시험법에는 중심배수와 주변배수법이 있으나 본 압밀 cell에서는 주변배수로 시험을 행하여 압밀특성을 구하는 방법을 채택하였다. 본 시험장치를 검증하기 위한 실험이 실시하였다.

2. 이론적 배경

간극수의 방사방향 흐름 조건에 대해 하중과 압축이 표준압밀시험과 동일하다면 압밀방정식은 다음과 같이 유도되어질 수 있다.

$$c_{ro}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right) = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, c_{ro} : $k_r/m_{vo}\gamma_w$

식(1)의 편미분 방정식을 해석하기 위한 초기조건 및 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &t=0 \quad , 0\le r\le R \quad u=u_i=\triangle P \\ &0\le t\le\infty, \; r=R \quad u=0 \\ &0\le t\le\infty, \; r=0 \quad \frac{\partial u}{\partial r}=0 \\ &t=\infty \quad , 0\le r\le R \quad u=0 \end{aligned}$$

위의 초기조건 및 경계조건을 이용하여 시간에 따른 평균압밀도는 다음 식과 같이 유도할 수 있다.

$$U=1-4\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{B_n^2}\exp.(-B_n^2 T_r) \quad (2)$$

여기서, B_n : 베셀방정식
T_v 시간계수

식 (2)에서 50%와 90% 평균압밀도에 해당하는 시간계수(T_{ro})는 다음과 같다.

T_{50} = 0.0866
T_{90} = 0.288

3. 시험 및 방법

3.1 시료조제

본 연구에 사용된 시료는 준설투기지역에서 직접 채취한 해성점토로서 체가름시험 결과 #200통과량이 98% 이상이었다. 시료조제는 액성한계 2배 이상의 함수비 상태에서 원통형 압밀셀에 투기하여 선행하중 40kPa로 재성형 하였다. 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 Table 1에 나타낸 바와 같이 비중 2.69, 액성한계 50%, 소성지수 30, pH 6.83, 유기물 함량 2.35%로서 흙의 종류는 통일분류법상 고압축성 점토인 *CH*로 분류되었다.

3.2 압밀셀 제작

주변배수 압밀시험을 위한 압밀링은 높이 2cm, 3cm, 4cm와 각각의 높이에 따른 직경 4cm, 6cm, 8cm로 전체 9개를 제작하였다(Fig1 참조). 압밀링 내부에는 압밀하중 재하시 방사방향으로 배수가 이루어지도록 주변배수재를 압밀링 내부면에 부착하였으며, 이때 주변배수재는 plastic Porous을 사용하였다. 배수재의 두께는 1.4mm이고 투수시험결과 투수계수는 모두 $10^{-4}cm/s$ 이상이었다. 본 배수재는 시료정치시 시료와 배수재와의 벽마찰을 줄이기 위해 내면을 매끈하게 처리하였다.

Table 1 Physical properties of dredged soil

w_w (%)	95
G_s	2.69
LL (%)	50
PI	30
$USCS$	CH
$P200$ (%)	99.8
Organic content (%)	2.35
pH	6.83

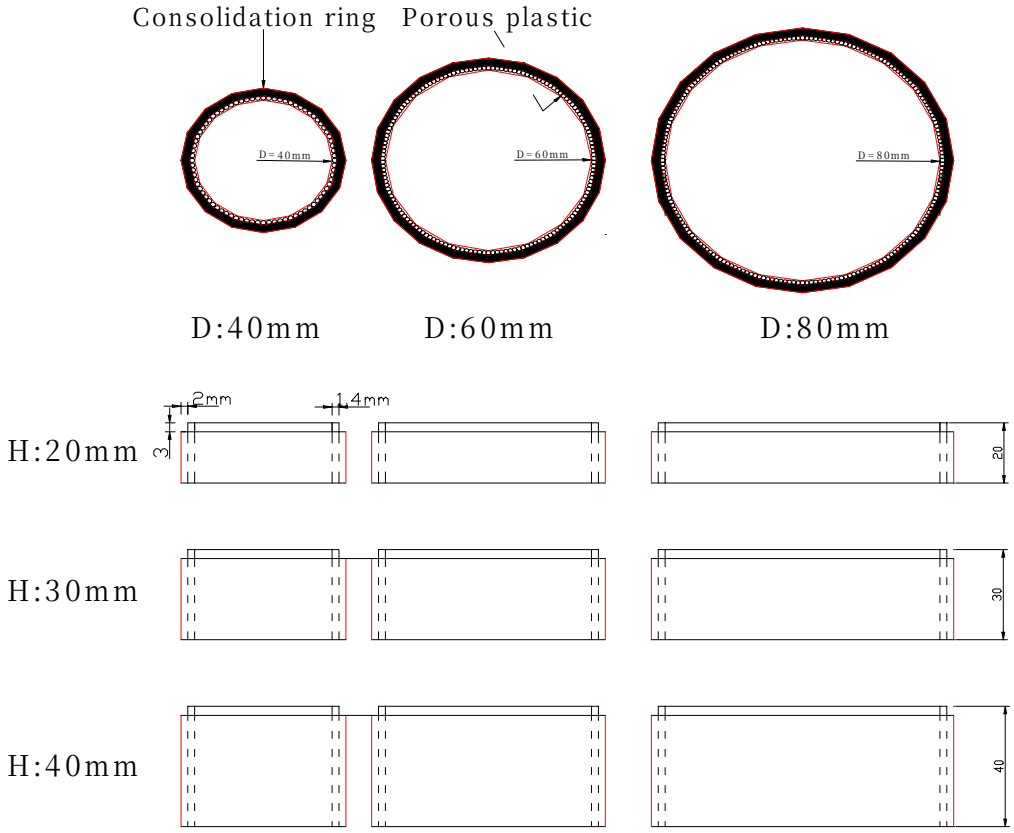


Fig. 1 Schematic diagram for peripheral drainage consolidation ring

3.3 시험방법

주변배수 압밀시험을 위해 Fig. 2에서와 같이 압밀링 내면에 배수재를 부착하였고, 상하부 방향의 배수를 제어하기 위해, 시료의 상부면과 하부면에 불투수성 재료를 설치하여 상하부면으로의 배수를 억제하였다. 하중재하는 표준압밀시험에서 사용하는 추를 이용하였으며, 초기하중 10kPa에서부터 압밀을 시작하여 640kPa까지 하중증가율 ($\triangle P/P$)은 표준압밀시험과 동일하게 1로 하였다. 각 하중단계에서 배수거리가 길기 때문에, 하중재하시간은 48시간으로 하였으며 최대 640kPa까지의 하중단계가 재하 된 후 48시간 팽창시켜 압밀시험을 완료하였다.

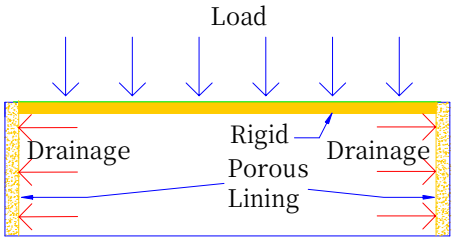
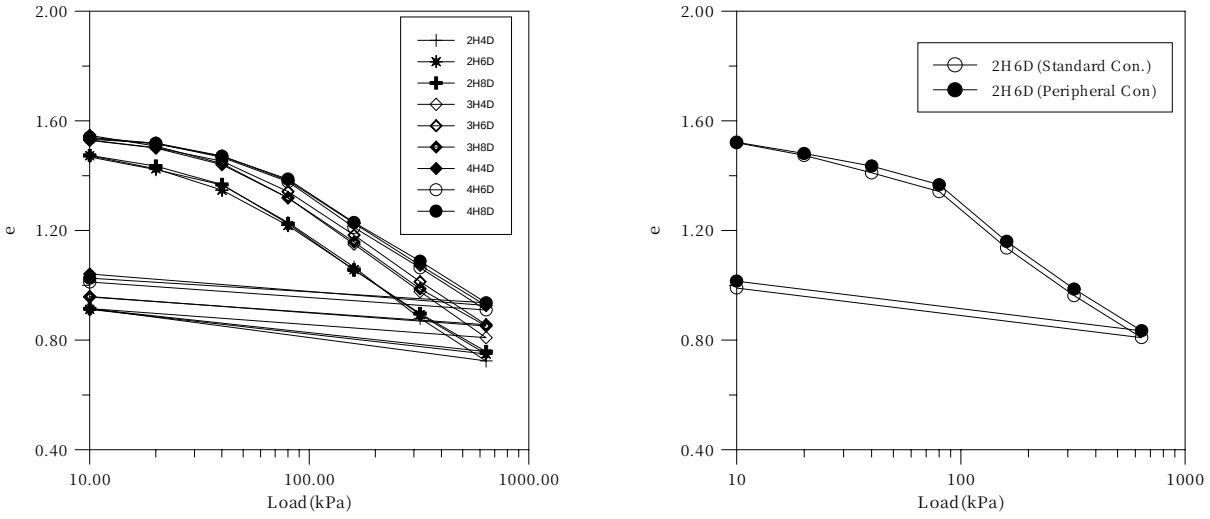


Fig. 2 Equal strain, horizontal outward drainage

4. 결과 및 고찰

4.1 e-log P 곡선

직경과 높이에 따른 9종의 주변배수 압밀시험과 직경 6cm에 대한 연직 및 주변배수 압밀시험 결과 Fig. 3과 같이 나타났다. Fig. 3의 (a)는 시료의 높이에 대한 직경별 하중증가에 대한 간극비의 변화를 나타낸 것으로, 초기 간극비의 영향이 고려된다면 거의 비슷한 형상을 보이는 것으로 판단되며, 따라서 시료의 높이나 직경의 크기변화가 e-log P 곡선에 미치는 영향은 그다지 크지 않은 것으로 판단되었다. Fig. 3의 b)의 경우는 재성형된 똑같은 점토에 대해 연직배수 압밀시험과 수평배수 압밀시험결과로부터 e-logP 곡선을 얻어 나타낸 것으로, 거의 유사한 곡선을 보여준다. 이는 재성형점토에 대한 주변배수 압밀시험이 성공적으로 수행되어졌음을 증명하는 것으로 판단되었다.



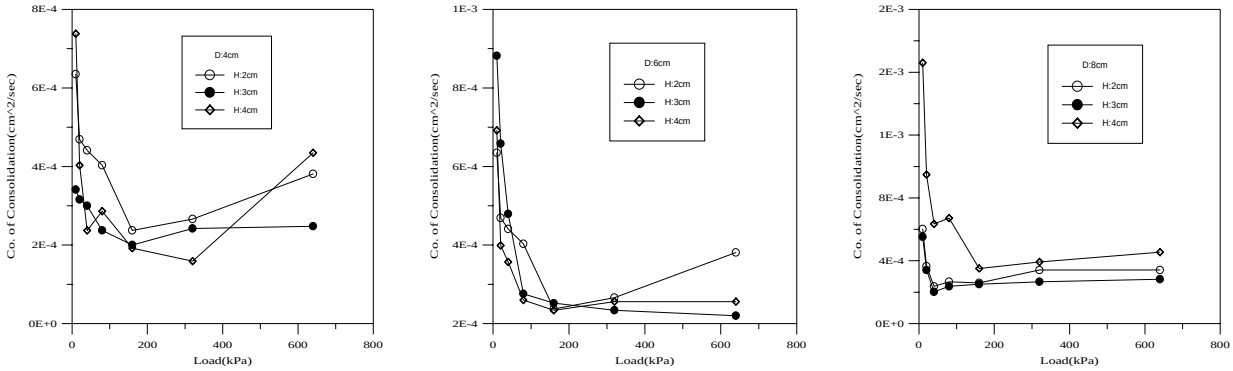
(a) e-log P curve with height & diameter at peripheral consolidation test

(b) e-log P curve for vertical & horizontal consolidation test

Fig. 3 e-log P curves

4.2 높이의 변화에 따른 압밀계수

주변배수 압밀시험시 높이에 따른 압밀계수의 변화를 알아보기 위해 각 직경별로 높이를 2cm, 3cm, 4cm로 변화시켜 가며 압밀시험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 4에서와 같이 주변배수 압밀시험에서 수평압밀계수는 높이와는 무관하게 거의 비슷한 값을 나타내고 있어 주변배수 압밀시험에서 높이의 영향은 수평압밀계수에 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있었다.

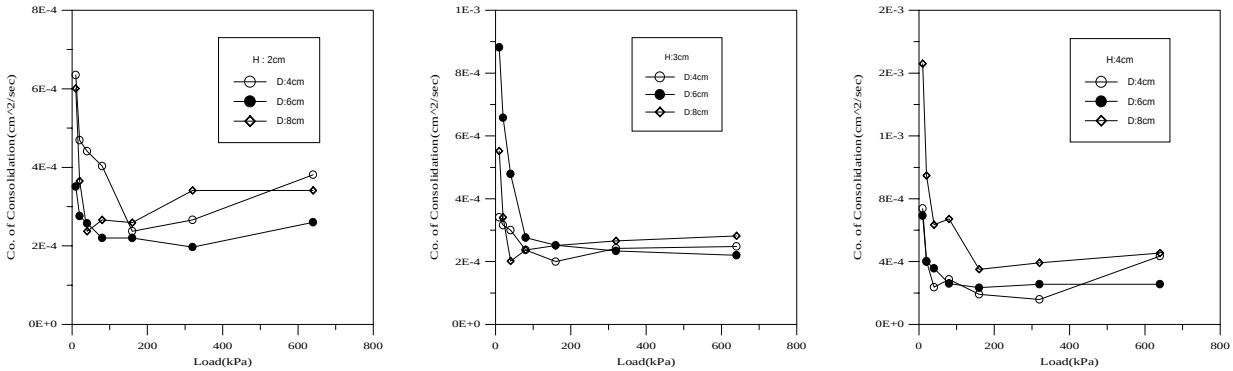


(a) Diameter 4cm (b) Diameter 6cm (c) Diameter 8cm

Fig. 4 Coefficient of consolidation with variation of height

4.3 직경의 변화에 따른 압밀계수

Fig. 5는 주변배수 압밀시험에서 직경의 변화 즉, 배수거리의 변화가 수평압밀계수에 미치는 영향을 알아보기 위해 각 높이별 배수거리를 2cm, 3cm, 4cm로 변화시켜 가며 압밀시험을 수행하였다. 그 결과 수평압밀계수는 배수거리에 관계없이 역시 유사한 값을 나타내고 있어 주변배수 압밀시험에서 배수거리가 수평압밀계수에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있다.



(a) Height 2cm (b) Height 3cm (c) Height 4cm

Fig. 5 Coefficient of consolidation with variation of Diameter

4.4 연직 및 주변배수압밀시험에 의한 압밀계수 비교

본 논문에서 수평압밀셀에 대한 유효성을 검증하기 위해서 보통 사용하는 직경 6cm, 높이 2cm인 압밀셀을 사용하여 수평배수 및 연직배수 압밀시험을 실시하였다. 이방성이 존재하지 않으므로 실험결과로부터 구해지는 압밀계수는 수평 및 연직에서 거의 같은 값이 나와야 한다. Fig. 6은 실험결과로부터 압밀하중에 따른 압밀계수를 나타낸 것으로 수평배수압밀계수와 연직배수 압밀계수가 유사한 값을 보였다. 따라서, 본 연구에서 개발한 압밀계수가 실용적으로 사용될 수 있는 것으로 판단되었다.

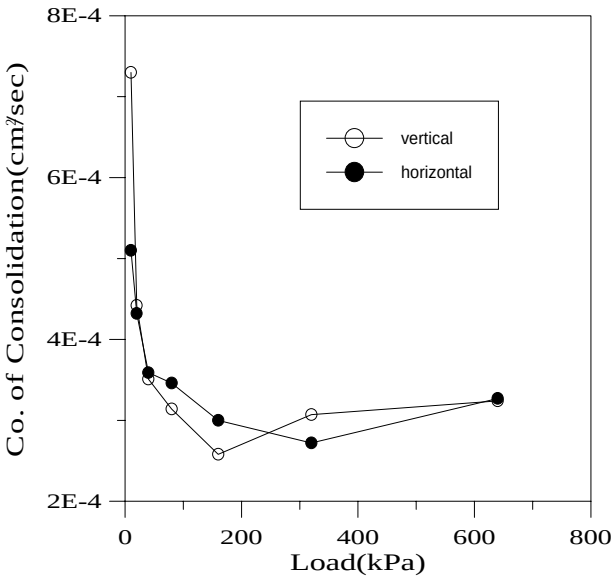


Fig. 6 Coefficient of consolidation for vertical and horizontal drainage

5. 요약 및 결론

표준압밀 시험기를 이용한 수평배수압밀시험을 실시하기 위해, 수평압밀셀을 제작하였으며, 수평배수 압밀시험에서 시료의 두께 및 배수거리가 압밀계수에 미치는 영향을 분석하기 위해 3종의 직경과 각 직경에 대한 3종의 높이에 대해 주변배수 압밀셀을 제작하여 수평배수압밀시험을 수행하였다. 또한 본 논문에서 제작한 수평배수압밀셀에 대한 유효성을 검증하기 위해 이방성이 없는 재성형된 점토에 대해 연직 및 수평배수 압밀시험을 실시하였다. 실험결과로부터 수평압밀계수는 시료의 두께 및 수평배수거리의 영향이 그다지 크지 않았다. 이방성이 없는 재성형시료에 대한 시험 결과에서는, 수평압밀계수와 연직압밀계수가 비슷한 값을 보여 본 연구에서 개발한 수평압밀셀이 실용적으로 이용이 가능한 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 동아시험기(주)의 협조로 진행된 것으로 본 연구를 가능케한 동아시험기(주) 관계자님께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

1. Hardin, B. O.,(1989), “1-D Strain in Normally Consolidation Cohesive Soils”, *Journal of the Geotechnical Engineering*, Vol. 115, No,5, pp.689-710
2. Head, K. H.,(1986), “Manual of Soil Laboratory Testing”, *ELE*, Vol. 3, pp.1129～1196
3. Mckinlay, D. G.(1961), "A laboratory study of rates of consolidation in clays with particular reference to conditions of radial porewater drainage", *Proc. 5th Int. Conference on Soil Mechanics & Foundation Eng.*, Vol. 1, Paper 1～38, Dunod, Paris.