

점토의 일차원 압밀과정중 작용하는 수평토압과 간극수압

Lateral Stress and Pore Pressure During One-dimensional Consolidation of Clay

김재영¹ Kim, Jae-Young

Abstract

The earth pressure coefficient at rest for clayey soils in the one-dimensional state, K_0 obtained from the triaxial test is not correct in principle because the seepage flow is radial and the displacement of soil elements is three-dimensional. Measurements of the earth pressure and the pore water pressure during one-dimension consolidation in the consolidometer ring are presented. The earth pressure and pore water pressure are measured directly by a circular part of the consolidometer ring of a floating type at its mid height. A plastic clay showed $K_0=0.5$ irrespective of pressure in the consolidometer ring.

요 지

일반적으로 일차원 압밀상태에 있는 정지토압계수 K_0 값은 삼축시험에서 구해지지만, 압밀중의 간극수의 흐름이 방사류이고, 공시체의 변형이 3차원적이므로, 얻어진 값의 신뢰성에는 의문이 있다. 여기서는, 일차원 압밀시험기를 개량하여, 압밀링 중앙높이에 배치한 압밀링 요소를 토압감지부로 하며, 감지부 중앙에서는 간극수압을 측정하였다. 내경 6cm의 압밀링은 부동(浮動)링 형식으로 높이 4cm의 공시체 중앙높이가 항상 같은 위치를 유지하는 구조이다. 직경 6cm의 공시체와 샘플링후 시료변형을 고려한 압밀링 내경보다 직경이 약간 작은 공시체에서 얻은 압밀종료시의 K_0 값은 공시체직경과 압밀압력에 상관없이 거의 0.5를 나타내었다.

Keywords : Clay, Consolidation test, Lateral stress, Pore stress, Stress release

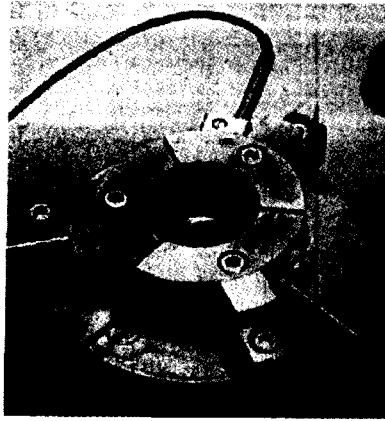
1. 머리말

점토의 일차원 압밀상태에 있어서 수평토압계수 K_0 값은 일반적으로 삼축시험에 의해 구해지지만, 공시체 전체에 있어서 수평변위가 발생하지 않게 측압을 제어하는 것이 쉽지 않고, 외주면에 감은 여과지에 방사류로 배수하는 압밀형태는 일차원 압밀이라고 할 수 없으며, 압밀후의 간극수압 분포가 공시체 반경방향으로 불균질한 것은 잘 알려져 있다. 또한 수평변위의 불균일성은 공시체의 불균질성에 강한 영향을 받으며, 외주면에 감은 여과지의 압축성 등이 원인으로, 얻어지는 K_0

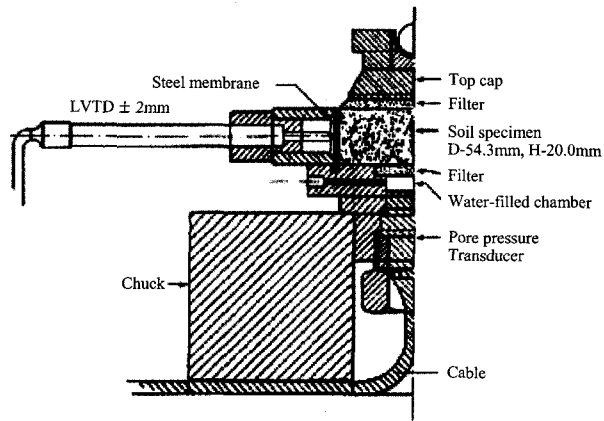
값의 신뢰성과 정확도에는 의문이 남는다.

이 때문에, 통상적인 압밀시험과 같이 일차원 압밀상태를 재현할 수 있는 원통내에서 압밀과정중의 수평토압을 측정하는 시험법이 과거로부터 행해지고 있다. 그러나 그 대부분이 원통내부에 토압계를 설치하는 방식으로서, 필자의 견해로는 이 방법에 의한 측정으로는 신뢰성 있는 결과가 얻어지지 않고 있다. Senneset (1989)은 그림 1에 나타낸 중심각 120°로 3분할한 압밀링내에 강제 박막판(Steel Membrane)의 토압 측정부를 가지는 특수한 압밀시험기로 실트질토의 K_0 값을 구해, 거의 0.5의 값을 얻었다.

¹ 정회원, (주)삼보기술단 지반공학부 (Member, Sambo Engr. Co., LTD., geokimjy@korea.com)



(a) 분할한 압밀시험기의 모습



(b) 토압 측정부의 상세도

그림 1. Senneset이 사용한 압밀시험기(1989)

이처럼 복잡하고 특수한 압밀시험기가 아닌 측정방법으로서, 본 논문은 부동(浮動)링 형식의 압밀링을 가지며, 압밀링 중앙높이에는 원형으로 절삭한 링요소를 토압계로 설치하여, 압밀중의 수평응력을 조사하고, 또한 그 중앙에서 간극수압을 직접 측정하는 시험방법을 시도하였다. 내경 60mm의 압밀링을 사용하여, 표준압밀 시험공시체에 해당하는 직경 60mm, 직경 59.6, 59.4mm의 재압축공시체에 대한 압밀 과정에 있어서의 수평응력(전응력)과 간극수압 및 여기서 얻어지는 K_0 값을 비교하였다. 이와 같은 시험의 목적은 다음과 같다.

원지반의 일차원 압밀거동을 압밀링내에서 충실히 재현하는 압밀시험법으로서, 지반중의 유효 상재압이 재하되었을때, 수평으로 눌러 퍼져 압밀링 내벽에 밀착하는 공시체를 사용한 압밀시험법을 제안하고, 그 타당성을 서술하였다(김재영 & 高田直俊, 2001). 그러나 이 시험법은 공시체 양단면의 마찰을 없애기 위해 고무막과 그리스로 윤활시키며, 시험방법과 결과의 정리가 번거롭기 때문에 보다 간편한 방법을 제안하였다. 그 방법은, 공시체 상하단면이 단면마찰없이 수평방향으로 자유롭게 퍼지기 위한 고무막과 그리스에 의한 윤활 대신에, 공시체의 높이를 증가시켜 일반적인 다공판을 가지는 가압판과의 단면구속에 대한 영향을 상대적으로 경감시키는 방법이다. 이 시험법을 실내 재구성 점토시료를 사용한 시험결과를 토대로 여과지와 고무막을 사용한 방법과 비교하여 간편시험법의 실용성을 제시하였다(김재영 & 高田直俊, 2003). 상기와 같은 시험에서 사용한 압밀링 내경보다 직경이 작은 공시체의 경우, 압밀과정과 압밀종료시의 수평압이 초기부터 수평변위를 구속하는 통상적인 압밀시험의 경우와 다르다고 생각

되기 때문에 비교를 위한 측정을 하였다.

2. 압밀시험의 장치 및 순서

2.1 부동(浮動)링형 압밀시험장치

압밀시험기는 압밀링 내경 60mm로 그림 2와 같이 압밀링 중앙높이에 직경 16mm의 토압감지부를 설치한 높이 40mm의 공시체를 사용하였다. 감지부의 제작방법은 압밀링 요소로서 압밀링 내면과 정확히 연속한 원형면을 이룰 필요가 있기 때문에, 링 내면을 60mm보다 작게 절삭한 후, 링 외면에 용접한 내경 16mm의 원통에 2개의 나사로 감지부를 고정하고, 링과 감지부를 일체로 하여 내경 60mm로 절삭하여 완성하였다. 또한, 감지부의 중앙에는 간극수압측정을 위해 직경 5mm의 다공판을 넣고, 압밀링과는 O-ring으로 수밀성을 유지하며, 금속면과의 접촉을 피하였다. 감지부는 변위가 아주 작은 하중계에 연결하여 토압 전응력을 직접 측정하였다. 토압 감지부는 측정압에 대한 변위가 아주 작으며, 628kPa의 압력증분에 대해 0.03mm이다.

압밀링은 부동링 형식으로 하부의 실린더에 의해 재하압을 가하면, 그림의 「1/2변위기구」에 의해 가압축 변위의 1/2이 압밀링에 전달되기 때문에 토압 감지부는 항상 공시체 중앙높이를 유지하게 된다. 간극수압계(共和電業 PGM-10KC)는 직경 6mm의 Diagram을 가지는 용량 980kPa이며, 사용압력범위에서 측정계의 처침은 거의 무시할 수 있다. 가압축의 변위에 대해 1/2변위를 가지는 구조는 Mochizuki & Mikasa(1988)가 3주응력제어형 시험에 사용할 목적으로 발안한 것이다.

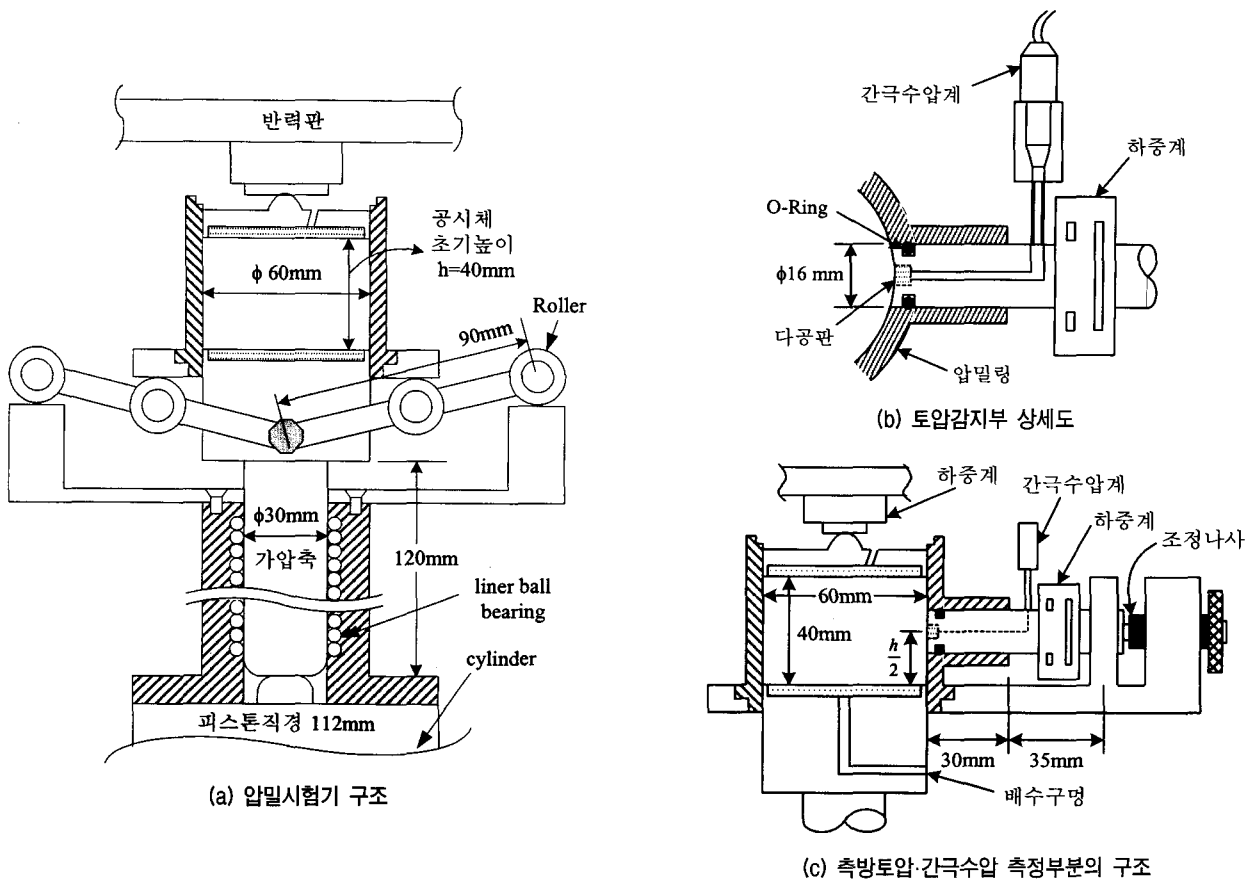


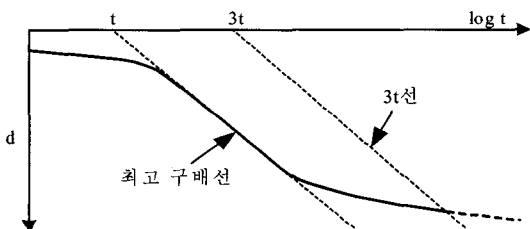
그림 2. 부동(浮動)링형 압밀시험기

2.2 점토공시체와 시험순서

시험용 시료는 일본 오사카북향점토($w_L=77\%$, $w_p=33\%$) 시료를 완전 퇴비빔 상태에서 내경 150mm 원통에 높이 160mm로 넣어 단계적으로 압력을 증가시켜, 최종압력 157kPa에서 압밀하였다. 압밀종료는 3t¹⁾법으로 종료하였다. 최종압밀압력은 일반적인 일본 층적점토의 압밀 항복응력을 대상으로 한 것으로, 본 연구에서는 문헌 2, 3에서 실시한 재압축공시체를 사용한 압밀시험방법과

동일한 조건을 설정하기 위해 최종압밀압력을 157kPa로 설정하였다. 이 시료를 압밀원통에서 빼내어 중심각 120°로 3분할하여 직경 높이를 표준압밀공시체에 해당하는 60×40, 재압축공시체로써 59.6×40.54, 59.4×40.81mm를 커터링으로 성형하였다. 3개 공시체의 체적은 모두 동일하다. 또한, 직경이 작은 재압축공시체는 정확하게 압밀링 중앙에 두었다. 양단면을 고무막과 그리스로 윤활시킨 공시체의 일축압축시험에 의하면, 직경 59.6mm의 공시체는 약 49kPa에서, 59.4mm 공시체는 약 69kPa에서 내경 60mm의 압밀링 내면에 밀착하게 된다. 압밀압력은 하중 증분비 1($\Delta p/p$)로 단계적으로 증가시켰다. 표준압밀공시체에 해당하는 직경 60mm 공시체는 재하단계 9.8, 19.6, 39, 79kPa에서 24시간, 이후 157, 314, 628, 1255kPa까지 각 단계 48시간 압밀을 하였다. 직경 59.6mm와 59.4mm 공시체는 157kPa에서 재하하여, 314, 628, 1255kPa까지 각 단계 48시간 압밀을 하였다.

1) 3t법은 압밀시간을 단축시키기 위해, 압밀시험에서 얻어지는 침하량-시간곡선($d-\log t$)에서, 최고 구배선의 연장선과 만나는 시간 t 에 대해 3배의 시간(3t)점에서 최고 구배선과 평행하게 긋고(이것을 3t선이라고 한다). $d-\log t$ 가 3t선에 도달했을 때를 압밀종료시간으로 결정하는 방법이다.

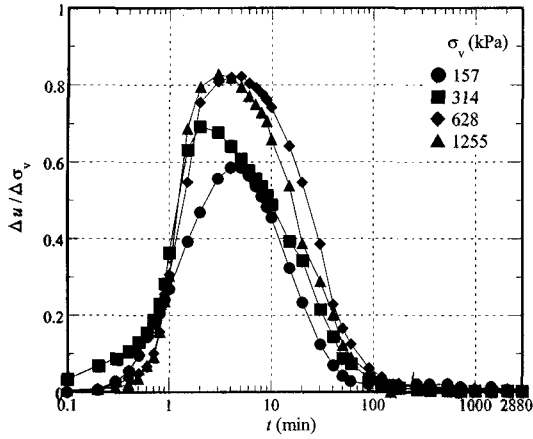


3. 압밀과정에 있어서 수평토압과 간극수압의 변화

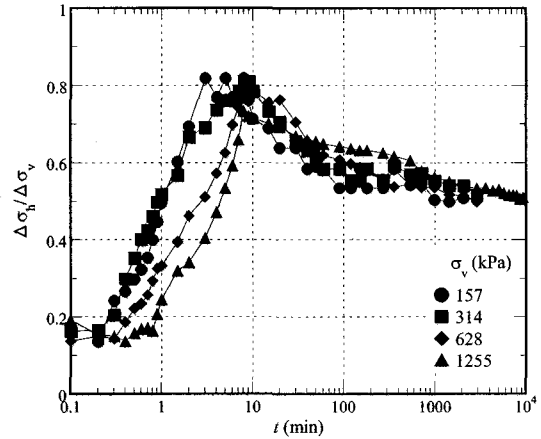
3.1 수평토압과 간극수압 측정결과

그림 3~5에 재하압 증분으로 정규화한 압밀중의 수

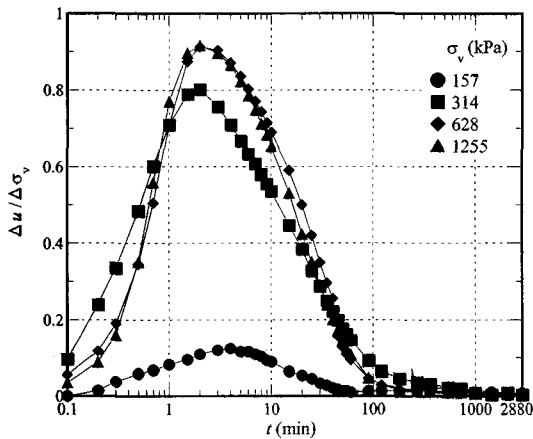
평토압(전응력) 증분과 간극수압 증분, 그리고 정지토압 계수의 변화를 공시체 직경별로 나타내었다. 그림의 시간축에는 실린더의 공기압이 소정의 값에 도달하는데 필요한 시간이 포함되어 있다. 수평토압과 간극수압이 peak에 이르기까지 상당한 시간이 필요하며, 실린더의



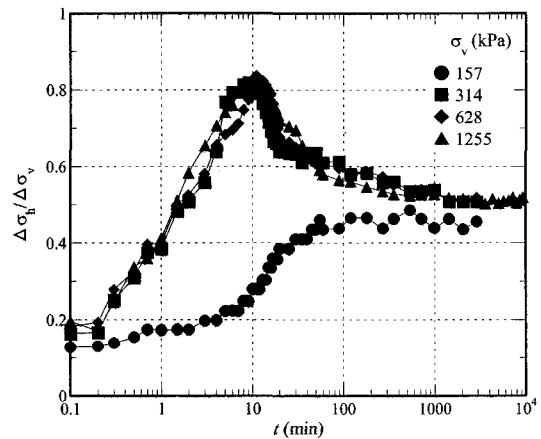
(a) 직경 60mm공시체(표준압밀공시체 해당)



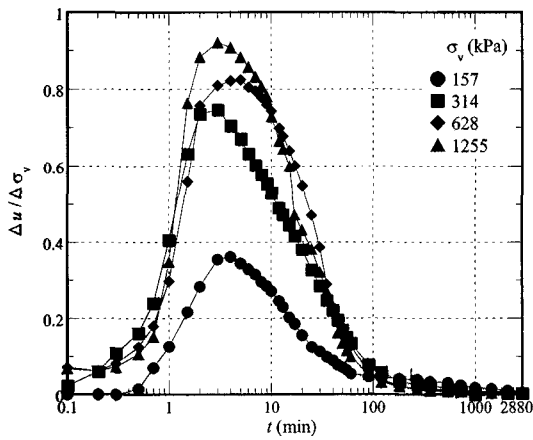
(a) 직경 60mm공시체(표준압밀공시체 해당)



(b) 직경 59.6mm공시체

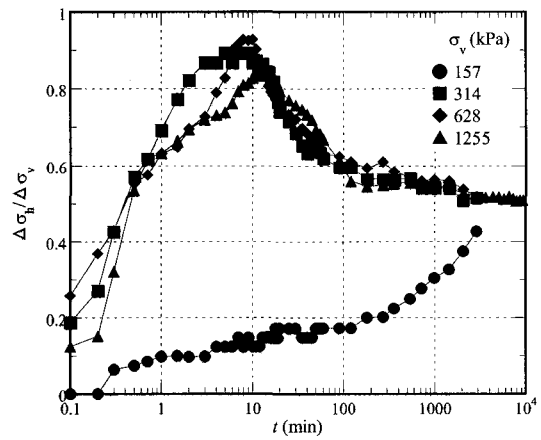


(b) 직경 59.6mm공시체



(c) 직경 59.4mm공시체

그림 3. $\Delta u/\Delta \sigma_v$ 의 시간에 따른 변화



(c) 직경 59.4mm공시체

그림 4. $\Delta \sigma_h/\Delta \sigma_v$ 의 시간에 따른 변화

공기압이 소정 값에 도달하는데 약 1분이 걸리는 점과, 점토의 변형이 응력증분에 대해 즉각 따르지 못하기 때문으로 생각된다.

그림 3(a)에 나타난 공시체직경 60mm의 경우, 수평토압이 피크에 도달하는데 3~10분이 필요하다. 피크 값은 재하압 증분의 80%정도로, 압밀압력의 증가와 함께 피크에 달하는데 필요한 시간이 조금씩 증가하고 있다.

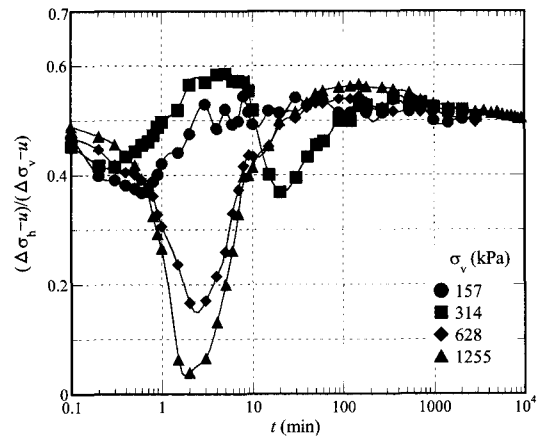
그림 3(b), (c)에 나타난 재압축공시체의 경우, 초기 재하단계 157kPa는 공시체가 눌러 퍼지는데 저항하기 때문에 수평토압은 작지만, 이 값은 시간과 함께 소성변형을 동반해 증가하여, 0.5부근에 근접하고 있다. 이후 단계에서는, 모든 응력단계에 있어서 비슷한 변화를 나타내며, 피크에 도달하는 시간은 약 10분이다. 압밀종료시의 수평토압은 3종류의 공시체 모두가 거의 0.5에 수렴하고 있다.

그림 4에 나타난 간극수압의 변화에 있어서는, 재하단계 157kPa에 있어서 재압축공시체의 간극수압이 공시체직경 60mm와 비교해 작은 것은 공시체가 압밀링 내장에 눌러 퍼진 후의 수평토압이 작기 때문이다. 이후의 단계는 직경을 달리한 공시체와 함께 재하압에 관계없이 거의 비슷한 경로를 나타내고 있다.

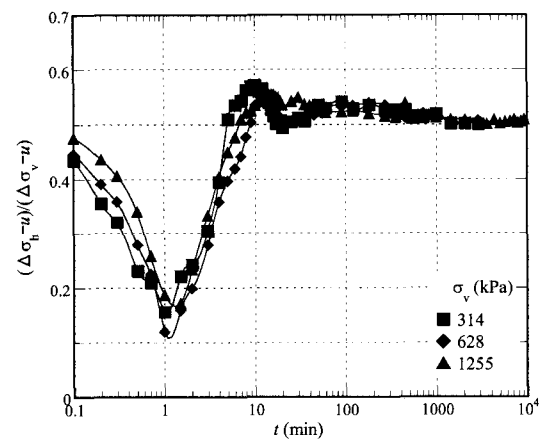
그림 5에 수평응력증분에서 간극수압을 제외한 유효 응력으로 정리한 수평토압증분과 상재압증분의 비, 즉 K_0 값의 변화를 3종류의 공시체별로 나타내었다. 직경 60mm공시체의 재하단계 157, 314kPa에서는 간극수압과 수평토압의 피크가 거의 동시에 발생하기 때문에 K_0 값은 거의 일정한 값을 나타내고 있지만, 이후의 재하단계에서는 재압축공시체를 포함해 간극수압의 피크가 수평토압의 피크보다 빠르기 때문에 K_0 값은 일단 감소하고 있다. 그 이유는, 실린더의 공기압이 소정의 압력에 도달하기까지의 시간조절에 의한 오차와 점토의 변형이 응력증분에 대해 즉각 반응하지 못하기 때문으로 사료된다. 아울러 수평토압의 피크이후 K_0 값이 시간에 대해 약간 감소경향을 보이고 있지만, 압밀종료시에는 공시체직경과 압밀압력에 있어서 K_0 값은 거의 0.5를 나타내고 있다.

그림 6은 각 재하단계의 압밀종료시에 있어서 재하압에 대한 수평토압의 관계를 공시체별로 나타냈다. 재압축공시체는 재하단계 157kPa에서 눌러 퍼져 압밀링 내벽에 밀착하므로, 이 단계를 제외한 압밀종료시의 수평토압을 나타내었다. 표준압밀에 해당하는 공시체는 압밀항복응력인 157kPa에 있어서 K_0 가 0.5보다 작지만,

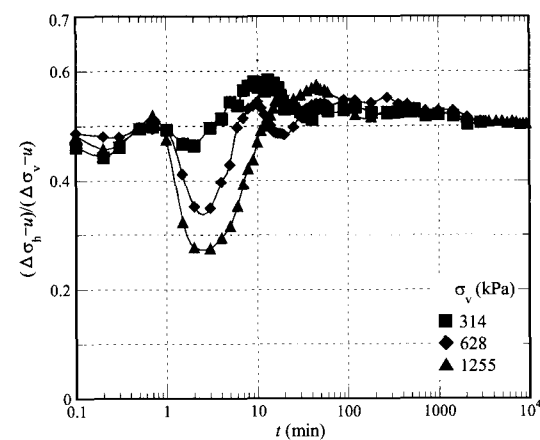
재하압의 증가와 함께 3종류 공시체 모두의 K_0 는 거의 0.5부근에 위치하고 있으며, 재하압 증분뿐만 아니라 재하압에 대해서도 K_0 값은 거의 0.5에 나타나고 있다. 그림에 나타난 재하압은 각 단계의 압밀이 종료한 48시간에 있어서의 실측값으로 나타난 것이다.



(a) 직경 60mm공시체(표준압밀공시체 해당)



(b) 직경 59.6mm공시체



(c) 직경 59.4mm공시체

그림 5. $(\Delta\sigma_h - u)/(\Delta\sigma_v - u)$ 의 시간에 따른 변화

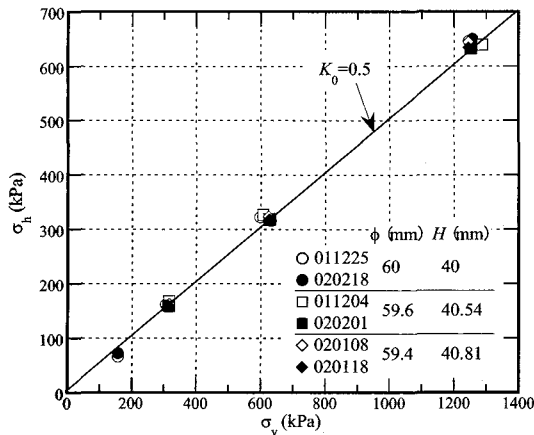


그림 6. 각 재하단계의 압밀종료시에 있어서 재하압에 대한 수평토압의 관계

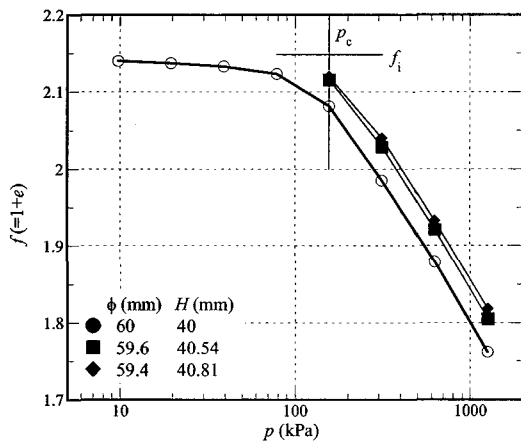


그림 7. 각 공시체의 f - $\log p$ 관계

3.2 f - $\log p$ 관계

그림 7에 $f(=1+e)$ - $\log p$ 를 나타내었다. 3종류의 공시체에서 구한 f - $\log p$ 관계에서는, 직경 59.4mm의 재압축공시체가 59.6mm공시체보다 약간 위에 위치하고 있다. 한편 표준압밀에 해당하는 60mm공시체의 f - $\log p$ 관계는 압밀항복응력에 해당하는 압밀하중이 가해졌을때의 응력상태는 수평응력이 크고, 따라서 평균주응력이 커져 압축량은 증가하게 된다. 그러므로 샘플링에 의한 응력해방에 의한 시료변형을 고려한 재압축공시체의 f - $\log p$ 관계에 대해 표준압밀공시체에 의한 f - $\log p$ 관계는 과거의 경향과 같이 아래에 위치하고 있다(김재영 & 高田直俊, 2001).

4. 결론

부동(浮動)링 형식의 압밀링을 사용하여, 압밀링 중앙높이에 압밀링 요소를 토압계로 하며, 그 중앙에서 간극수압도 동시에 측정하는 시험으로, 압밀링 내경과 같

은 표준압밀에 해당하는 공시체 및 직경이 약간 작은 공시체인 재압축 공시체의 압밀과정에 있어서 수평토압과 간극수압을 측정하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 표준압밀에 해당하는 직경 60mm공시체는, 모든 재하단계에서 비슷한 수평토압의 변화를 나타내었다. 직경이 약간 작은 재압축 공시체의 재하 첫 단계 수평토압은, 공시체가 눌러 펴지는 과정에 발생하는 저항에 의해 작게 나타나고 있지만, 재하압 증분으로 정리한 값은 0.5부근에 위치하고 있다.
- (2) 재하압 증분으로 무차원화한 정규압밀영역의 수평토압은 압밀종료시에 있어서 공시체직경과 응력레벨에 상관없이 거의 0.5에 수렴하고 있다.
- (3) 재압축 공시체는 재하 첫 단계의 간극수압이 낮은 값을 나타내고 있지만, 이후 단계부터는 공시체직경과 응력레벨에 상관없이 거의 비슷한 변화를 나타내고 있다.
- (4) 수평토압의 피크는 모든 공시체가 재하압 증분의 80%정도로, 피크에 도달하기까지는 몇 분~10분 정도가 필요하다. 또한, 간극수압의 피크도 재하압 증분의 80%정도이며 발생시각은 2~3분으로 수평토압보다 빠르게 나타나고 있다.
- (5) 재하압 증분 및 재하압으로 정리한 유효수평압 증분과 유효수평압, 즉 응력조건에 대한 정지토압계수는 모든 공시체가 응력레벨에 상관없이 거의 0.5를 나타내고 있다.
- (6) 일차원 압밀과정중의 공시체에 작용하는 수평토압과 간극수압의 계측에 관해, 이 압밀시험기는 만족할 만한 성능을 나타내고 있다.

참고 문헌

1. Senneset, K. (1989), "A New Oedometer with Splitted Ring for the Measurement of Lateral Stress", *Proceedings of International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.115-118.
2. 金 宰永, 高田直俊 (2001), "サンプリングによる応力解放を考慮した圧密試験", *土木學會論文集*, No.680/III-55, pp.263-268.
3. 金 宰永, 高田直俊 (2003), "応力解放によるサンプル変形を考慮した圧密試験の簡易法", *土と基礎, 地盤工學會*, Vol.51, No.4, pp.5-7.
4. Mochizuki, A., Mikasa, M. and Takahashi, S. (1988), "A New Independent Principal Stress Control Apparatus", *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, STP977, ASTM, pp.844-858.
5. 金 宰永, 高田直俊 (2002), "浮動リング型圧密試験装置を用いた圧密中の土壓測定", *第57回土木學會年次學術講演會講演概要集*, III-A355, pp.709-710.

(접수일자 2003. 6. 10, 심사완료일 2004. 8. 16)