

# 일정변형률 압밀시험을 이용한 방사 내측배수 압밀해석

## Constant Rate of Strain Consolidation Test for Radially Inward Drainage

윤찬영\* · 정충기\*\* · 양봉근\*\*\*

Yune, Chan-Young · Chung, Choong-Ki · Yang, Bong-Keun

### Abstract

In this study, a consolidometer for radially inward drainage under constant rate of strain (CRS) loading was developed. Their analytical solutions for evaluating consolidation characteristics of soils were also derived. With reconstituted kaolinite samples, comparative tests of the developed CRS loading consolidation in radially inward drainage together with incremental loading (IL) consolidation in radially inward, vertical and radially outward drainages and CRS loading consolidation in radially outward and vertical drainages were carried out. From the test results, It is confirmed that the results of the developed consolidometer were not only in good agreement with those of other consolidation tests but also they were more stable and reliable with less sample disturbance effect.

**Keywords :** Constant rate of strain (CRS) test, radially inward drainage, consolidometer, theoretical solution

### 요 지

본 연구에서는 방사내측배수 조건하에서 일정변형률 압밀시험을 실시할 수 있는 실내시험용 압밀실을 개발하였다. 또한 이를 분석하고 관련 압밀특성을 결정할 수 있는 이론해를 제안하였다. 성형 카올리나이트를 이용하여 개발된 시험기에 의한 방사내측 일정변형률 압밀시험과 더불어 비교 대상이 되는 방사내측배수, 연직배수와 방사외측배수에 대한 단계제하 압밀시험과 방사외측배수 및 연직배수 일정변형률 시험을 실시하였다. 이를 통하여 개발된 방사내측배수 일정변형률 시험기의 결과들이 타 실험방법의 결과들과 일치할 뿐만 아니라, 시료 교란 효과가 줄어든 안정적이고, 신뢰성 높은 결과를 제시하는 것을 확인하였다.

**핵심용어 :** 일정변형률 압밀시험, 방사내측배수, 압밀실, 이론해

### 1. 서 론

점성토는 강도 및 변형 특성뿐만 아니라 투수 특성에 있어서도 이방적이다. 변형 특성 및 투수성은 점성토의 침하 거동 및 압밀특성을 나타내는 지배적인 영향 요소이며 이러한 영향 요소들의 이방성으로 인하여 점성토의 압밀 거동에 있어서도 이방적 특성이 나타나게 된다. 따라서 연약지반의 개량을 위하여 연직배수재를 설치한 지반과 같이 지반내의 지배적인 간극수의 흐름이 방사방향인 경우에는 연직 방향이 아닌 방사 배수조건에서의 압밀특성을 파악하여 해석에 적용해야 한다.

방사배수 압밀 시험은 그 흐름을 중심부로 유도하는 방사 내측 시험과 외주면으로 유도하는 방사외측 시험으로 구분할 수 있다. 표준압밀시험에서 적용하는 단계제하의 경우 로우셀(Rowe cell)(Rowe와 Barden, 1966)을 이용한 방법이

많이 활용되고 있으며, 일반 압밀시험기에서도 원하는 흐름 방향을 유도할 수 있도록 압밀실의 시료 경계면에 배수재 및 불투수재를 설치하면 단계제하 방사배수 압밀시험을 수행할 수 있다. 그러나 단계제하 압밀시험은 시험 시간이 길고, 연속적인 시험 결과도 얻을 수 없는 등의 단점 때문에 일정변형률 압밀 시험(Consolidation test at constant rate of strain)이 최근에는 많이 활용되고 있다.

연직배수 일정변형률 시험은 체계적인 결과 해석 방법이 제안되어 있을 뿐만 아니라 이미 여러 국가에서 표준 시험법으로 채택되었다. 방사배수의 경우 외측 배수 즉, 중심부에서 외주면 쪽으로 배수되는 경우의 일정변형률 압밀시험에 대해서는 시험 기기 및 방법 그리고 해석 방법이 이미 제안되어 있다(윤찬영 등, 2002; Yune과 Chung, 2005). 반면에 방사내측 배수 일정변형률 시험에 관해서는 매우 제한된 조건에서의 연구만이 발표되었을 뿐이다(Seah와 Juimrongrit, 2003).

\*정희원 · 한국건설기술연구원 국토지반연구부 박사후 연구원 (E-mail : yune@kict.re.kr)

\*\*정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (E-mail : geolabs@shu.ac.kr)

\*\*\*정희원 · (주) 대우건설 토목건설 2팀 대리 (E-mail : sevens@dwconst.co.kr)

압밀 변형특성은 배수방향에 따른 영향을 받지 않겠지만, 대부분의 점성토의 경우 연직방향에 비하여 방사방향 즉, 횡방향의 투수계수가 크기 때문에 연직배수 압밀계수보다 횡방향 압밀계수가 더 크게 나타난다. 그리고 방사내측과 방사외측 배수조건에서의 압밀계수는 횡방향 흐름과 1차원 연직 변형의 동일한 조건이기 때문에 동일한 값을 가질 것으로 판단되지만, 실제적으로 두 조건의 압밀계수가 같은지는 확인된 바 없다.

본 연구에서는 일정변형을 조건하에서 방사내측배수 압밀 시험을 실시할 수 있는 시험기, 즉 압밀시험용 압밀실을 개발하였다. 또한 이를 분석하고 관련 압밀특성을 산정할 수 있는 해석방법을 제안하였다. 카올리나이트를 성형한 시료를 사용하여 방사내측배수 조건에서 배수재 직경을 변화시키면서 일정변형을 시험과 단계재하 압밀시험을 실시하였고, 이에 더하여 연직 및 방사외측배수 조건에서도 실험을 실시하였다. 이를 통하여 개발된 시험기 및 해석이론의 적용성을 검증하고, 배수재의 직경변화 및 배수방향의 영향을 살펴보았다.

## 2. 개발된 시험장치

일정변형을 압밀시험을 위하여 개발된 기존의 시험기들은 연직배수조건(Smith와 Wahls, 1969; Wissa 등, 1971)이나 방사내측배수 조건(Seah와 Juimrongrit, 2003) 혹은 연직 및 방사외측배수 조건(윤찬영 등, 2002)에서만 실험이 가능하도록 제작되었다. 본 연구에서는 연직 및 방사외측배수 조건뿐만 아니라, 간단한 경계 조건 변환을 통하여 방사내측배수 역시 가능한 그림 1과 같은 압밀시험용 압밀실을 고안, 개발하였다. 방사내측배수 일정변형을 압밀시험 수행을 위해서는 재하 시 간극수의 흐름을 방사내측방향으로 유도하면서, 시료에 재하되는 연직 하중과 연직 변형량, 그리고 외주면 경계에서의 간극수압을 정확하게 측정하여야한다. 본 연구에서 고안된 압밀실에서는 불투수성의 상부재하판, 하부판 및 외주면 압밀링과 함께 시료의 중앙부에 원통형 다공석

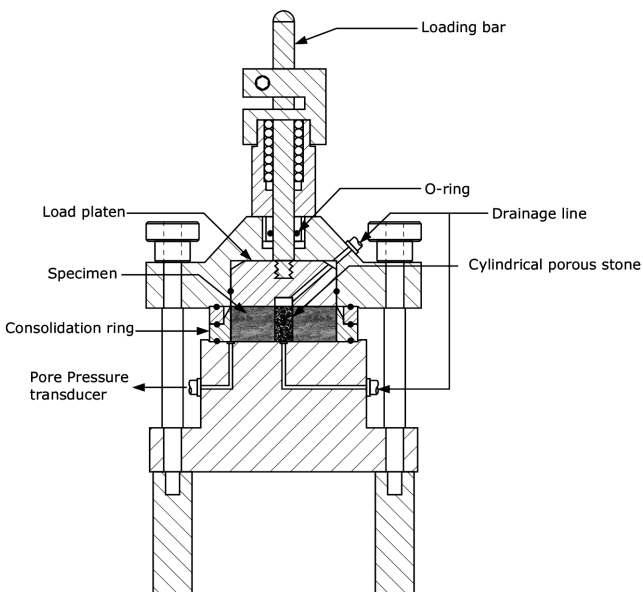


그림 1. 방사내측배수 일정변형을 압밀실

배수재가 설치됨으로써 과잉간극수압의 소산이 방사내측으로만 이루어지게 된다. 상부재하판 하부에는 재하 시 중앙부 배수재가 관입할 수 있는 정착홈이 마련되어 있으며, 금속제 압밀링 및 시료 중앙부의 원통형 다공석에 의하여 방사변형이 구속되므로 시료는 1차원 변형 상태를 유지하게 된다. 압밀실 내부는 완전히 밀폐되어 배수구를 통하여 시료에 배압을 가하여 포화시킬 수 있으며, 재하 중 시료에서 발생하는 간극수압은 시료 외주면에 연결, 부착되어 있는 간극수압계를 통하여 측정한다. 압밀이 진행됨에 따라 시료 내의 간극수는 그림 2(a)에 나타난 바와 같이 시료중앙부의 배수재를 통하여 시료상하부의 배수구로 유출된다. 이때 다양한 직경의 배수재의 사용이 가능하며, 다만 배수재 직경과 일치하는 정착홈을 갖는 상부재하판을 사용해야 한다.

방사외측배수 시험의 경우에는 그림 2(b)처럼 불투수성의 상부재하판과 함께 금속 압밀링과 시료 사이에 통수성 플라스틱을 설치하고 이를 배수구에 연결함으로써 방사외측으로만 배수를 유도하여 실험을 실시한다. 연직배수 시험의 경우에는 불투수성의 압밀링은 그대로 유지한 채 다공성 상부재하판 하부에 통수성 플라스틱을 설치한 후 상부로만 배수를 유도하도록 부분적인 보완을 하여 실험을 실시한다(그림 2(c)).

시료에 가해지는 하중은 압밀시험기 외부로부터 가압봉을 통하여 시료에 전달되고, 그 크기는 외부에 설치된 하중계(load cell)를 이용하여 측정하며, 연직변위량 역시 외부에 설치된 변위계(dial gage 또는 LVDT)에 의해 측정한다. 이때 압밀시험 중에 발생하는 가압봉, 상부재하판, 하부판 그리고 로드 프레임 등의 재하 시스템에 대한 연직 변위 보정 시험을 흙시료 대신 동일 크기의 강성 금속재를 거치하여 실시하였으며, 수행된 모든 압밀실험들은 이 결과를 이용하여 보정하였다. 가압봉과 압밀실 상부판의 유도로 사이에는 가압 중 압력 유출을 최소화함과 동시에, 마찰 오차를 줄이기 위하여 그림 1에 나타난 바와 같이 볼베어링과 O-ring을 설치하였으며, 시료 외주면의 밀폐를 위하여 상부재하판과 외벽 사이에도 O-ring을 설치하였다. 예비실험을 통해 다양한 구속압 하에서 O-ring이 설치된 유도로와 가압봉 사이와 상부재하판과 외벽 사이의 마찰력을 측정하여, 그 값이 미소함을(최대 3N) 확인하였으며, 결과 해석 시에는 이를 보정하였다.

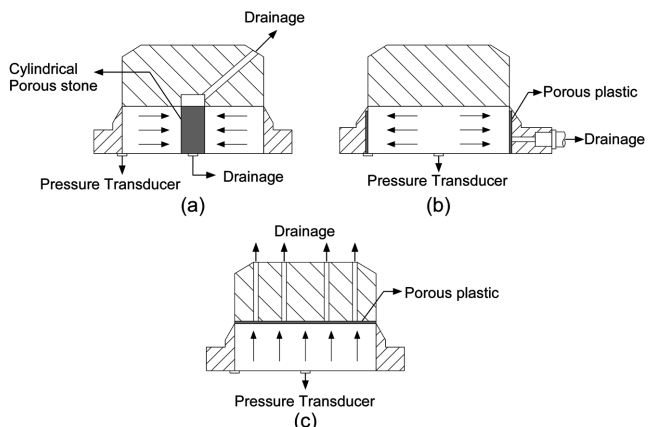


그림 2. 배수조건에 따른 가압판과 압밀링 (a) 방사내측배수 (b) 방사외측배수 (c) 연직배수

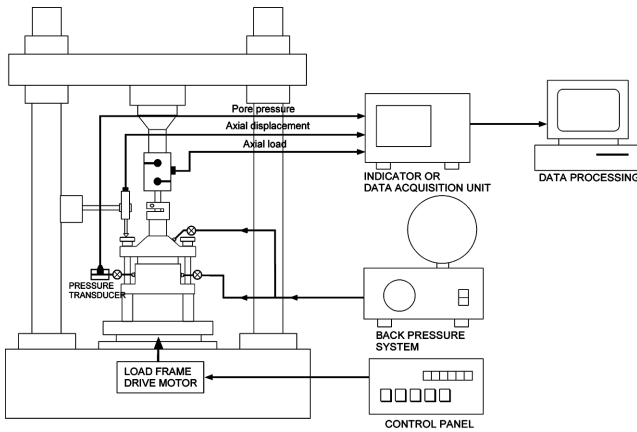


그림 3. 압밀실과 관련 시험장치 연결 개략도

압밀시험은 시료와 함께 조립된 압밀실을 그림 3과 같이 로드 프레임에 거치한 다음, 가압장치를 연결하고, 일정한 속도로 연직변형을 가함으로서 이루어진다. 재하에 앞서 배압을 가하여 시료를 포화시키면서 5 kPa 정도의 하중을 24 시간 가하여 시료를 안정화시킨다. 재하 중에는 연직 하중과 연직 변형량, 그리고 시료 외주면 간극수압을 연속적으로 측정하며, 이는 컴퓨터에 자동 저장된다. 현재 개발된 시험기에서 사용하는 시료는 직경 6 cm, 초기높이 2 cm 이다.

### 3. 이론적 배경 및 방사내측배수 일정변형을 압밀이론 개발

#### 3.1 연직배수 일정변형을 압밀이론

연직배수조건에서의 일정변형을 압밀시험 방법은 Hamilton과 Crawford(1959)에 의하여 최초로 제안되었다. 이 후 Smith와 Wahls(1969)가 정상상태(steady state)에서 일정변형을 시험결과를 해석할 수 있는 식을 개발하였고, Wissa 등(1971)은 Janbu(1965)의 변형률에 근거한 일차원 압밀해석 이론을 기초로 하여, 압밀 초기의 전이상태(transient state) 및 전이상태가 소산된 후의 정상상태에서의 선형( $\varepsilon - \sigma_v'$  선형) 및 비선형( $\varepsilon - \log \sigma_v'$  선형) 해를 제안하였다. 그 외에도 Umehara와 Zen(1980), Lee(1981) 등에 의하여 일정변형을 시험의 해석방법이 제안되었으나, Wissa 등(1971)이 제안한 정상상태에서의 비선형 해가 현재 가장 널리 사용되고 있으며, 이 때 평균 연직유효응력과 압밀계수는 다음 식 (1)과 (2)를 사용하여 계산된다.

$$\bar{\sigma}_v' = (\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_b + \sigma_v u_b^2)^{1/3} \quad (1)$$

$$c_{vo} = \frac{H^2 \log\left(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}\right)}{2\Delta t \log\left(1 - \frac{u_b}{\sigma_v}\right)} \quad (2)$$

여기서,  $\bar{\sigma}_v'$ : 평균 연직유효응력  
 $\sigma_v$ : 연직 전응력  
 $u_b$ : 시료 하부에서의 간극수압  
 $H$ : 시료의 높이  
 $\sigma_{v1}, \sigma_{v2}$ : 시간  $t_1, t_2$ 에서의 전응력  
 $\Delta t = t_1 - t_2$

#### 3.2 방사외측배수 일정변형을 압밀이론

방사외측배수 조건에서의 일정변형을 시험방법 및 해는 윤찬영 등(2002)에 의하여 제안되었다. 윤찬영 등(2002)은 미소변형을 조건에서 간극비-연직유효응력의 선형관계를 가정하여 정상상태의 압밀해를 구하였으며, 다음 식 (3), (4)와 같이 평균 연직유효응력 및 압밀계수를 산정할 수 있는 식을 제안하였다.

$$\bar{\sigma}_v' = \sigma_v - \alpha_{ro} u_c \quad (3)$$

$$c_{ro} = \frac{\Delta \sigma' R^2}{\Delta t 4 u_c} \quad (4)$$

여기서,  $c_{ro}$ : 방사외측배수 압밀계수

$\alpha_{ro}$ : 시료 중앙부 간극수압에 대한 평균간극수압 비  
 $(=u/u_c=1/2)$

$R$ : 시료의 반지름

$\bar{u}$ : 평균 간극수압

$u_c$ : 시료중앙부에서의 간극수압

또한 이를 비선형 관계( $\varepsilon - \log \sigma_v'$  선형)로 확장한 식을 추가 제안하였다(Yune과 Chung, 2005). 이 때 평균 연직유효응력은 위의 식 (3)과 동일하며, 압밀계수는 다음 식 (5)와 같이 계산된다.

$$c_{ro} = \frac{R^2 \sigma_v' \log(\sigma_{v2}' / \sigma_{v1}')} {1.736 u_c \Delta t} \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_v'$ : 시간  $t_1, t_2$ 사이에서의 평균 유효응력

$\sigma_{v1}', \sigma_{v2}'$ : 시간  $t_1, t_2$ 에서의 유효응력

#### 3.3 방사내측배수 일정변형을 압밀이론의 개발

앞에서 언급한 바와 같이 일정변형을 시험방법 및 해석이론은 주로 연직 및 방사외측 배수조건에서만 제안되어있다. 본 연구에서 개발된 바와 같은 방사내측배수 조건에서의 일정변형을 시험의 해석방법에 대해서는 아직까지 그 연구를 찾아보기 어려운 실정이며 다만 Seah와 Juirnarongrit(2003)에 의하여 간극비-연직유효응력의 선형관계를 가정하고 제한된 조건에서 제안된 이론해가 유일하다. 따라서 본 연구에서는 방사내측배수 조건에서의 일정변형을 압밀 해석이론을 다

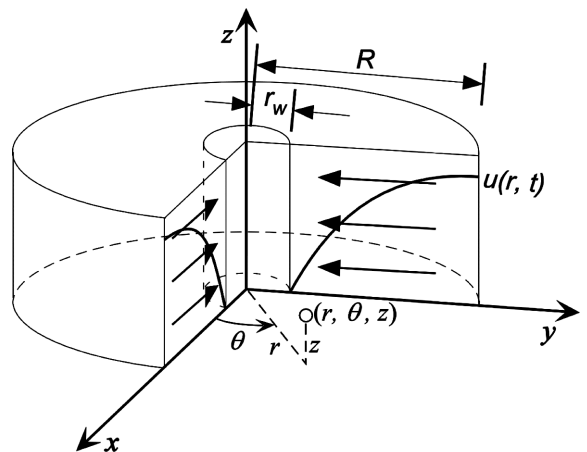


그림 4. 원통형 좌표계에서의 방사내측배수 조건 및 과잉간극수압 분포

음과 같이 개발, 제안하였다.

그림 4와 같은 방사내측배수 조건에서 원통형 좌표계를 도입하면 압밀 지배방정식은 식 (6)과 같이 나타난다.

$$\frac{k_h}{\gamma_w} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (6)$$

여기서  $e$  : 간극비  
 $u$  : 간극수압  
 $t$  : 시간  
 $k_h$  : 횡방향 투수계수  
 $\gamma_w$  : 물의 단위중량

이 때 식 (6)에서  $u$ 와  $e$ 는 축대칭 조건에서  $r, z, t$ 의 함수로 나타나지만 간극수의 흐름이 방사내측으로만 발생한다고 가정하면, 과잉간극수압의 소산은 방사방향으로만 발생하므로 과잉간극수압은 연직방향으로 일정한 값을 갖는다. 그러므로 일정한 전응력 하에서 전응력과 과잉간극수압의 차이로 계산되는 유효응력 역시 연직방향으로 일정하며, 연직유효응력의 함수로 표현되는 간극비도 연직방향으로 동일하게 나타난다. 따라서  $u$ 와  $e$ 는  $r$ 과  $z$ 의 함수로 나타난다. 한편 개발된 압밀실은 횡방향이 구속된 1차원 변형 상태에서 상부의 강성 재하판에 의한 등변형률 상태에 놓여있으므로 간극비  $e$ 는  $r$ 과는 무관하고 시간  $t$ 만의 함수  $e(t)$ 로 표현된다.

시료에 일정한 속도의 연직변형이 발생할 때, 변형률 속도 (strain rate)를  $\dot{\epsilon}$ 으로 놓으면, 시료의 연직변형량,  $\delta$ 와 부피 변형량,  $\Delta V$ 는 다음 식 (7), (8)로 나타난다.

$$\delta = \dot{\epsilon} t H_0 \quad (7)$$

$$\Delta V = \dot{\epsilon} H_0 A \quad (8)$$

여기서  $A$ 는 시료의 면적이고,  $H_0$ 는 시료의 초기 높이이다. 흙에서의 부피 변형량은 간극의 변형량( $\Delta V_v$ )이므로 시간에 따라 변화하는 간극비는 다음 식 (9)와 같다.

$$e(t) = e_0 - \Delta e = e_0 - \frac{\Delta V_v}{V_s} = e_0 - \frac{\dot{\epsilon} t H_0 A}{V_s} \quad (9)$$

여기서  $e_0$ 는 초기 간극비  $V_s$ 는 흙입자의 부피이다. 따라서, 시간에 따른 간극비의 변화율은 식 (9)를 미분하여 다음의 식 (10)과 같이 상수로 표현된다.

$$\frac{de}{dt} = -\frac{\dot{\epsilon} H_0 A}{V_s} = \text{const.} = -C \quad (10)$$

따라서 식 (6)은 식 (9)와 (10)을 이용하면 다음 식 (11)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 지배방정식에서 시간에 따른 간극비의 변화율이 상수로 나타나므로 미소변형률 조건을 가정하였을 때, 지배방정식 (6)의 해는 정상상태에서의 해가 된다.

$$\frac{k_h}{\gamma_w} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) = \frac{C}{1+e_0 - Ct} \quad (11)$$

위 식 (11)에서 횡방향 투수계수  $k_h$ 는 간극비의 크기에 따라 변화하므로 시간에 대한 함수  $k_h(t)$ 로 표시된다. 그림 4

와 같이 방사내측으로 배수가 발생하면서 시료가 압밀되는 경우 간극수압은 중심부 배수재의 경계( $r=r_w$ )에서 0이 되고, 시료의 외측경계면( $r=R$ )에서는 최대값과 함께 동수경사는 0이 될 것이다. 이와 같은 경계조건을 식으로 표현하면 다음 식 (12), (13)과 같다.

$$u(r_w, t) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial u(R, t)}{\partial r} = 0 \quad (13)$$

따라서, 식 (11)에 경계조건 식 (12), (13)을 적용하면 일정변형률을 재하 중 과잉간극수압은 다음 식 (14)와 같이 얻어진다.

$$u(r, t) = \frac{\gamma_w}{k_h} \frac{CR^2}{4(1+e_0 - Ct)} \left( -\frac{r^2}{R^2} + N^2 - 2 \ln \frac{r_w}{r} \right) \quad (14)$$

여기서  $N$ 은 배수재 직경비( $=r_w/R$ )이다. 이로부터 시료 외주면에서의 간극수압( $u_i$ ), 즉 실험 중 측정하게 되는 값은

$$u_i = u(R, t) = \frac{\gamma_w}{k_h} \frac{CR^2}{4(1+e_0 - Ct)} (-1 + N^2 - 2 \ln N) \quad (15)$$

로 표현되므로, 외측변면 간극수압에 대한 시료 전체의 평균 간극수압( $\bar{u}$ ) 비를  $\alpha_{ri}$ 로 정의하면  $\alpha_{ri}$ 는 식 (18)과 같이 배수재 직경비,  $N$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{ri} = \frac{\bar{u}}{u_i} = \frac{\frac{1}{\pi(R^2 - r_w^2)} \int_{r_w}^R u 2\pi r dr}{u_i} = \frac{-N^4 + 4N^2 - 3 - 4 \ln N}{(1 - N^2)(-2 + 2N^2 - 4 \ln N)} \quad (18)$$

그러므로 시료 내의 평균 연직유효응력은 사용된 배수재 직경비에 따라 식 (18)로부터 결정된  $\alpha_{ri}$ 값과 시험 중 측정된 연직 전응력과 시료 외주면 간극수압을 이용하여 다음 식 (19)와 같이 계산된다.

$$\bar{\sigma}_v' = \sigma_v - \alpha_{ri} u_i \quad (19)$$

한편, 미소변형률 조건을 가정하면 흙의 압축성, 즉 압축계수  $a_v$ 는 아래의 식과 같이 선형관계로 표현될 수 있으므로,

$$a_v = -\frac{de}{d\sigma_v'} = \frac{C \Delta t}{\Delta \sigma_v'} \quad (20)$$

방사내측배수 조건에서의 압밀계수는 다음 식 (21)로 정의되고

$$c_{ri} = \frac{1+e k_h}{a_v \gamma_w} \quad (21)$$

식 (15)를  $1+e$ 에 대하여 표시하면

$$1+e = \frac{\gamma_w CR^2}{k_h 4 u_i} (-1 + N^2 - 2 \ln N) \quad (22)$$

이므로, 식 (20)과 (22)를 식 (21)에 대입하면 일정변형률 시험에서 방사내측배수 조건에서의 압밀계수는 식 (23)과 같이 나타난다.

$$c_{ri} = \frac{\Delta\sigma_v' R^2}{\Delta t 4u_l} (N^2 - 1 - 2\ln N) \quad (23)$$

한편 위의 식은 미소변형을 가정에 의한 흙의 선형적 변형관계에 따라 결정된 것이므로, 흙의 비선형 특성을 고려할 때, 특히 압밀 중 큰 변형이 발생할 경우 오차가 발생할 수 있다. 실제 흙의 변형에서 발생하는 비선형관계, 즉 압밀시험 시 나타나는 변형 특성을 고려하면 간극비-유효응력 관계는 다음 식 (24)와 같이 표시할 수 있다.

$$e = a \log \sigma_v' + b \quad (24)$$

여기서,  $a$ 는 유효응력을 대수좌표로 나타낸 반대수좌표계상의 압축곡선의 기울기,  $b$ 는 단위 유효응력에서의 간극비이다.  $a$ 의 절대값은 정규압밀영역에서 압축지수  $C_c$ , 과압밀영역에서는 재압축지수  $C_r$ 로 나타난다. 식 (24)를 연직유효응력에 대하여 미분하여 정리하면

$$\begin{aligned} \frac{de}{d\sigma_v'} (= -a_v) &= \frac{0.434a}{\sigma_v'} = \frac{0.434}{\sigma_v'} \frac{\Delta e}{\log(\sigma_{v2}'/\sigma_{v1}')} \\ &= \frac{0.434}{\sigma_v'} \frac{C\Delta t}{\log(\sigma_{v2}'/\sigma_{v1}')} \end{aligned} \quad (25)$$

과 같고, 식 (22)와 (25)를 식 (21)에 대입하면 방사내측배수 조건에서 시료의 비선형성을 고려한 압밀계수는 식 (26)과 같이 구할 수 있다.

$$c_{ri} = \frac{R^2 \sigma_v' \log(\sigma_{v2}'/\sigma_{v1}')}{1.736u_l \Delta t} (N^2 - 1 - 2\ln N) \quad (26)$$

간극비-유효응력의 선형관계 및 비선형관계에서 구한 압밀계수의 비는 Yune과 Chung(2005)이 방사외측배수 조건에서 계산한 것과 동일하게 다음 식 (27)로 표현된다.

$$\frac{c_{ri-linear}}{c_{ri-nonlinear}} = \frac{c_{ro-linear}}{c_{ro-nonlinear}} = 0.434 \frac{\Delta\sigma_v'}{\sigma_v' \log(\sigma_{v2}'/\sigma_{v1}')} \quad (27)$$

위 식에서 계산된 압밀계수의 비를 재하 시 측정된 잇따른 두 개의 연직유효응력의 비( $\sigma_{v2}'/\sigma_{v1}'$ )로 그림 5에 도시하였다.  $\sigma_{v2}'/\sigma_{v1}'$ 이 증가함에 따라, 1에서부터 점차로 감소하는 경향을 보인다. 그러나  $\sigma_{v2}'/\sigma_{v1}'$  값이 표준압밀시험에서의 하중재하 비인 2가 되어도 압밀계수 비는 0.96 이상으로 나타나, 표준압밀시험에 비하여 하중재하비, 즉 측정되는 연직유

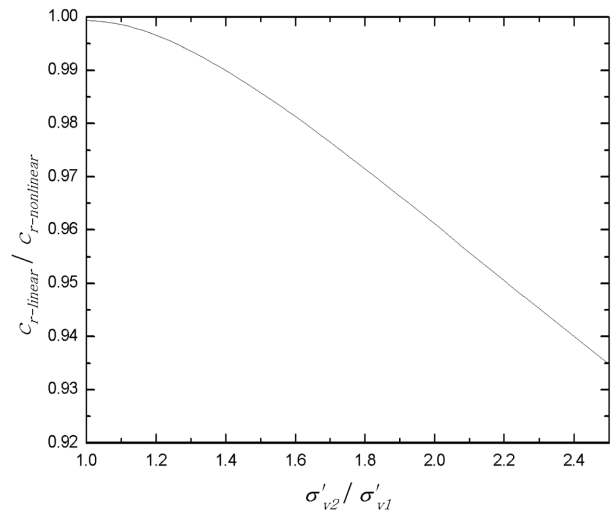


그림 5. 하중재하비에 따른 선형 및 비선형 압밀계수의 비

효응력의 비가 훨씬 작은 일정변형을 시험에서는 두 해의 차이가 무시할 수 있을 정도로 작을 것으로 판단된다.

#### 4. 시험계획 및 방법과 사용시료

개발된 방사내측배수 일정변형을 압밀시험용 압밀실과 결과 해석을 위하여 제안된 해석이론에 대한 적용성을 검증하기 위하여 카올리나이트 성형 시료를 이용하여 실험을 수행하였다. 일정변형을 시험과 함께 단계하중 재하방식에 의한 시험을 실시하였으며, 각 재하 방식에 대하여 연직배수, 방사외측배수 및 방사내측배수에 대한 시험을 실시하였다. 본 연구에서 실시한 실험들은 표 1에 나타난 바와 같다. 일정변형을 방사내측배수 시험의 경우 배수재 직경의 영향을 파악하기 위하여 60 mm인 시료 직경에 대하여 5, 10, 20 mm로 배수재 직경을 변화시켜가며 실험을 실시하였다. 변형률 속도는 방사외측배수 일정변형을 압밀시험에 대한 기존의 연구(윤찬영 등, 2002)에서 동일한 시료에 대하여 검증된 속도인 3.5%/hr를 사용하였고, 추가로 변형률 속도의 영향을 파악하기 위하여 배수재 직경 10 mm 시료에 대하여 10%/hr의 실험을 실시하였다. 단계재하 압밀시험 역시 일정변형을 시험과 동일하게 연직, 방사외측, 직경 5, 10, 20 mm의 배수재를 이용한 방사내측배수 시험을 실시하였다.

표 1. 실시된 시험내용 및 표기법

시험방법	배수방향 및 배수재 직경	변형률 속도 및 표기		
단계재하 압밀시험	연직배수	IL-V		
	방사외측배수	IL-RO		
	방사내측배수	5 mm	IL-RI-5	
		10 mm	IL-RI-10	
20 mm		IL-RI-20		
일정변형률 압밀시험	연직배수	3.5 %/hr	CRS-V	
	방사외측배수	3.5 %/hr	CRS-RO	
	방사내측배수	5 mm	3.5 %/hr	CRS-RI-5
		10 mm	3.5 %/hr	CRS-RI-10
			10 %/hr	CRS-RI-10-10%
20 mm	3.5 %/hr	CRS-RI-20		

표 2. 카올리나이트 시료의 기본 물성치

	액성한계	소성한계	소성지수	비중	200번체 통과율	통일분류법상 분류
카올리나이트	42.0%	26.6%	15.4%	2.60	98.0%	CL

단계제하 방식외측 및 방사내측배수 압밀시험은 일정변형을 시험에서 사용된 방식과 마찬가지로, 간극수의 흐름을 각각에 해당하는 방향으로 유도할 수 있도록 일반 표준압밀시험용 압밀실을 불투수성 상하부 재하판과 함께 외주면에 통수성 플라스틱을 다공성 압밀링 내부에 밀착되게 설치하거나(방사외측), 내부에 원통형의 다공석을 삽입하여(방사내측) 실시하였다.

시험을 위하여 저소성 점성토인 카올리나이트를 성형하여 사용하였다. 기본 물성치는 표 2와 같다. 각 시험방법의 결과에 대한 명확한 비교, 분석을 위해서는 사용되는 각 시료들이 균질해야 한다. 이를 위하여 그림 6과 같은 시료 성형기를 제작하여 시료를 성형하였다. 제작된 시료 성형기는 상부의 교반실과 하부의 압밀실로 구성되어 있으며, 이들은 완전히 밀폐되어 있어 시료의 교반 중에 진공을 가하여 시료 내부의 공기를 제거할 수 있다. 압밀실은 직경 34 cm, 높이 60 cm의 금속제 원통으로서 강성이 큰 주철로 제작되었으며, 내부면은 마찰을 최소화하기 위하여 크롬도금이 되어 있다.

시료는 교반, 압밀 과정을 통해 성형되며, 성형된 대형 시료는 실험에 알맞은 크기로 잘라서 랩 및 파라핀으로 밀봉하여 항습조에 보관하였다. 교반과정에서는 상부 교반실에 카올리나이트 시료와 액성한계의 2배 이상인 100%의 함수비가 되도록 물을 넣어 슬러리 상태로 혼합한 후, 그림 6에 나타난 바와 같은 교반날(blade)을 상부 모터로 계속 회전시키면서 교반하여 시료를 균질화시킨다. 이 때 물 1 리터당 약 16g의 소금(NaCl)을 첨가하여 시료가 면모화되도록 하였고, 0.01%의 아지화 나트륨(NaN<sub>3</sub>)을 첨가하여 시료성형 중

에 곰팡이 발생 및 미생물의 번식을 방지할 수 있도록 하였다. 또한 교반 중에 교반실 상부로부터 진공압을 가하여 시료내의 공기를 제거함으로써 시료가 완전히 포화되도록 하였다. 시료 내의 공기가 제거되고 물과 완전히 혼합된 카올리나이트 슬러리는 하부의 압밀실로 내려지며 자중압밀에 의하여 1~2 일 동안 압축이 되도록 방지하였다. 압밀실 내부 크롬 도금면에는 약 1 mm 두께로 실리콘 그리스를 도포하여 시료 성형 중에 발생할 수 있는 마찰을 감소시켰다. 이후 7~8단계로 단계적으로 하중을 증가시켜 최종적으로 약 160 kPa까지 재하, 압밀하였다. 각 단계마다 침하량 및 간극수 배출량을 측정하여 압밀이 완료되었음을 확인하였으며, 최종 압밀 완료까지 2주 정도가 소요되었다.

일정변형률 압밀시험 시에는 시료의 포화를 위하여 재하 이전에 200 kPa의 배압을 시료 상하부의 배수구 및 간극수압 측정부를 통하여 24시간 가하였으며, 재하시에는 배수구만을 통하여 배압을 일정하게 유지시키면서 실험을 실시하였다.

## 5. 시험결과 및 분석

### 5.1 과잉간극수압 거동

일정변형률 압밀시험은 빠르고 정확하며 객관적으로 압밀 특성을 산정할 수 있어 단계제하 압밀시험을 대체하여 널리 이용되고 있으나, 그 결과 값이 변형률 속도에 따라 영향을 받을 수 있으므로 정확한 압밀특성을 산정하기 위해서는 적절한 변형률 속도를 결정해야한다. 점성토를 대상으로 수행한 실험에서는 변형률 속도가 빨라질수록 선행압밀하중 및 압밀계수가 증가한다는 연구결과가 발표된 바가 있다 (Silvestri 등, 1986). 일정변형률 압밀시험의 재하 속도 기준은 일반적으로 재하 시 발생하는 과잉간극수압비(=측정 과잉간극수압/전응력)를 이용하고 있다. 연직배수 일정변형률 시험의 경우, Smith와 Walhs(1969)는 50% 이하, ASTM(1996)에서는 3~30%의 범위로 과잉간극수압비 기준을 제안하고 있다. Yune과 Chung(2005)은 성형 카올리나이트 시료와 부산에서 채취한 불교란 시료를 이용한 방사외측배수 일정변형률 시험 결과로부터 12.9%/hr의 변형률에 이를 때까지 단계제하시험의 결과와 잘 부합하는 만족스런 압밀 특성을 평가할 수 있다는 연구를 제시한 바가 있다. 이 연구 결과에 따르면 연직 압밀압이 40 kPa에 도달하기 전에 50% 이상의 과잉간극수압비가 나타나다가 이후, 감소하는 경향을 보이고 있다. 기준 이상의 높은 과잉간극수압비가 실험초기에 나타났음에도 결과에 영향을 주지 않은 것은 절대 과잉간극수압의 크기가 작으므로 압밀 이론의 기본 조건인 간극수의 steady state 흐름을 만족하기 때문으로 분석되었다.

본 연구에서는 동일 카올리나이트 시료에 대하여 기존의 연구(윤찬영 등, 2002)에서 방사외측배수로 검증된 변형률 속도 범위인 3.5%/hr와 10.0%/hr를 적용하였다. 실시된 실험에서 유효응력에 따른 과잉간극수압비를 그림 7에 나타내었다. 각 시험에서의 과잉간극수압비는 기존의 연구와 같이

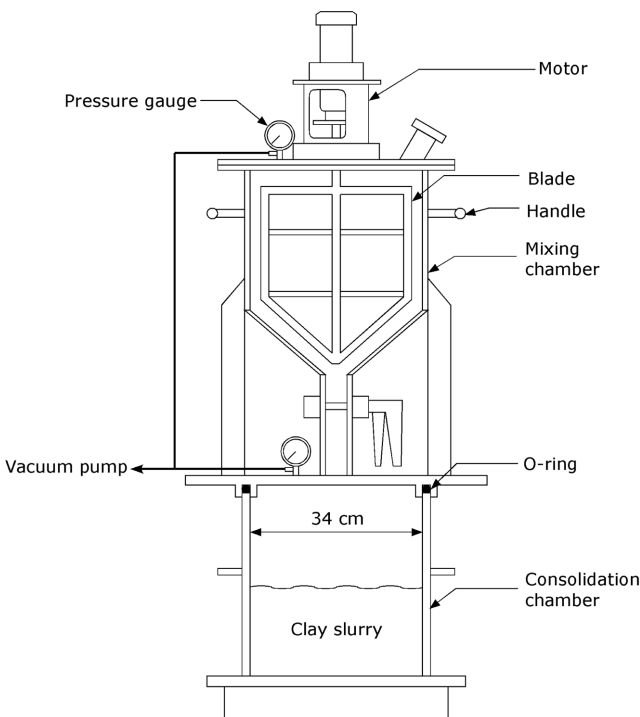


그림 6. 시료 성형기

초기에 최대값을 나타내고 이후 급속히 감소하여 연직압밀 압 40 kPa에서는 모든 경우에 45% 이내에 도달하고, 이후에도 계속 감소하여 일정한 값으로 수렴한다. 수렴값은 모든 실험에서 12% 이내로 나타났다. 초기 재하단계에서 나타나는 과잉간극수압비의 최대값도 가장 작은 배수재 직경 5 mm를 적용한 실험(CRS-RI-5)과 변형률 속도의 영향을 알아보기 위하여 10%/hr의 빠른 속도로 실시한 실험(CRS-RI-10-10%)을 제외하고는 모든 실험에서 40%이하로 나타났다. 따라서 기존의 방사외측배수 실험을 기준으로 판단할 때, 배수재 직경 5 mm와 10%/hr의 변형률 속도를 적용한 실험의 40 kPa 이하 응력 범위를 제외한 모든 경우에 적합한 결과를 도출할 수 있을 것으로 추정된다.

과잉간극수압의 크기는 같은 변형률 속도(3.5%/hr)를 적용한 연직배수, 방사외측배수 그리고 배수재 직경 20 mm의 경우는 거의 유사한 간극수압 발생 양상을 보여주고 있으며, 변형률 속도를 10%/hr로 3배 가까이 증가시키게 되면 재하에 따른 전응력에 대한 과잉간극수압 발생율이 3.5%/hr의 변형률 속도를 적용한 경우에 비해 크므로 그림 7과 같이 과잉간극수압비가 크게 나타난다. 한편 동일한 3.5%/hr를 적용하더라도 배수재의 직경이 20 mm에서 10 mm, 5 mm로 작아질수록 과잉간극수압비가 크게 나타나는데, 이는 배수재 직경이 작을수록, 평균배수길이가 길어질 뿐만 아니라 간극수가 유입되는 배수재의 표면적(즉 주변 면적)이 작아져서 배수 효율이 떨어지기 때문이다.

## 5.2 압밀변형 특성

일정변형률 압밀시험에서 시료의 평균 유효응력은 연직, 방사외측, 방사내측 배수조건에 대하여 각각 식 (1), (3), (19)를 이용하여 계산하였다. 그림 8에 일정변형률 시험과 단계재하 압밀시험의 유효응력-변형률 관계를 연직유효응력 10 kPa에서 초기화하여 도시하였다. 전체적인 압축특성에 있어서는 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 일정변형률 시험과 단계재하 시험이 상당히 잘 일치하여 나타나고 있다. 다만 일정변형률 시험에 비하여 단계재하 시험의 압축성이 시험 초기의 과압밀 영역에서 조금 더 크게 나타나고 있지만, 이 후 정규압밀 영역으로 가면서 두 시험 간에 유사한 압축특성을 보인다. 이는 표 3에 나타난 단계재하와 일정변형률 각 시험들의 평균적 압축지수의 값들로부터 확인할 수 있다. 재압축지수의 경

우에도 두 재하방법의 차이가 미소함을 확인할 수 있다. 일정변형률 방사내측배수에서 나타난 압축지수를 단계재하 및 방사외측배수 시험의 결과들과 비교하였을 때 그 차이는 각각 2.7%와 5.9%로 매우 작게 나타났으며, 재압축지수의 경우에도 각각 6.8%와 4.3%로 작게 나타났다. 방사 내측배수 시험에서 적용된 변형률 속도와 배수재 직경의 변화에 대한 효과 역시 매우 미소하였다(최대 편차(방사 내측 시험 전체) : 압축지수 3.8%, 재압축 지수 12.8%). 선행압밀하중은 표 3에 나타난 바와 같이 방사내측배수 일정변형률 시험에서 평균값 204kPa을 기준으로 여타 일정변형률 시험의 평균 185kPa, 단계재하 시 평균값 176kPa 보다 약간 크게 평가되었으며, 변형률 속도와 배수재 직경에 대한 경향성은 나타나지 않는다. 대부분의 시험결과에서 평가된 선행압밀압은 성형 시 재하압 160 kPa 보다 큰 값을 나타내고 있다.

일정변형률 시험과 단계재하 시험 간의 선행압밀압 이전 초기 과압밀영역에서 나타나는 차이는 기존의 연직배수를 이용한 연구결과(Sheahan과 Watters, 1996)에서도 제시된 바가 있으며, 그 원인으로는 단계재하 시험 시 불포화에 따른 시료 내 공기의 압축의 영향으로 판단된다. 즉, 일정변형률 압밀시험의 재하 전 배압포화 과정을 통하여 공기를 제거함으로써 시료의 교란을 감소시키고, 이에 따라서 그림 8에 나타난 바와 같이 과압밀 영역과 정규압밀 영역이 일정변형률 시험에서 더 분명히 구분되는 효과를 얻을 수 있으며, 따라서 Casagrande 방법을 토대로 선행압밀압을 정확하게 평가할 수 있다.

이러한 결과로부터, 개발된 일정변형률 방사내측배수 시험의 압밀변형 특성은 기존의 연직배수 및 방사외측배수 조건에서 수행된 일정변형률 시험 결과와 잘 일치하고 있으며, 단계재하 시험 보다 교란효과가 줄어든 개선된 결과를 제시하고 있음을 알 수 있다. 또한 카올리나이트 성형 시료를 대상으로 한 배수재 직경(5 mm-20 mm)과 변형률 속도(3.5%/hr-10%/hr)의 범위에서 매우 일관된, 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다는 사실로부터 개발된 시험기 및 해석이론이 합리적이고 신뢰성 있는 실험결과를 도출하고 있으며 그 적용성이 매우 큰 것으로 판단된다.

## 5.3 압밀계수

그림 9에 전체 실험에 대한 유효응력-압밀계수 관계를 나

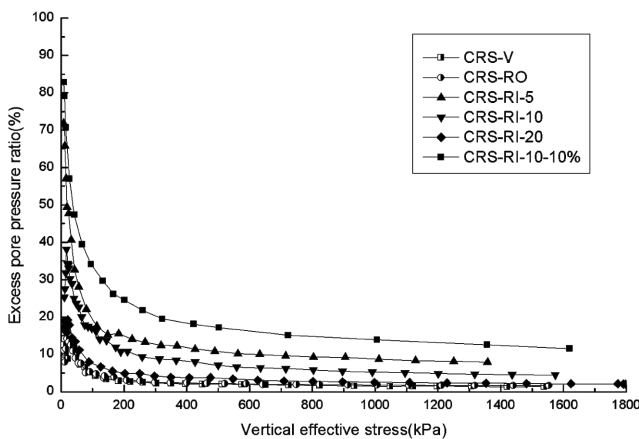


그림 7. 일정변형률 시험에서 유효응력-과잉간극수압비 곡선

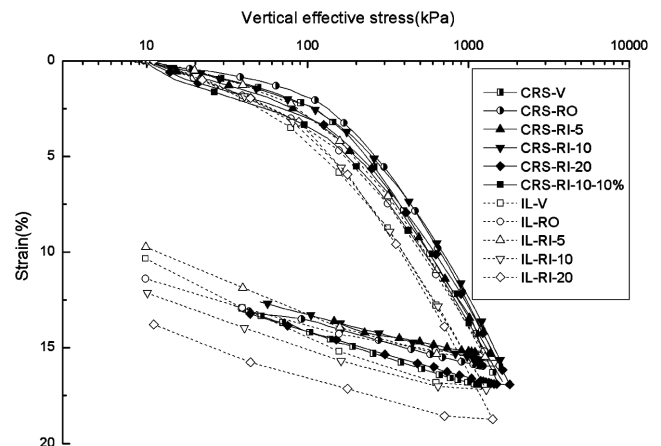


그림 8. 전체 시료에 대한 유효응력-변형률 곡선

표 3. 압축지수 및 선행압밀하중

	압축지수( $C_c$ )		재압축지수( $C_r$ )		선행압밀하중( $\sigma_p'$ )	
	산정값	평균	산정값	평균	산정값	평균
IL-V	0.288	0.296	0.056	0.041	165	176
IL-RO	0.278		0.028			
IL-RI-5	0.299		0.039			
IL-RI-10	0.284		0.041			
IL-RI-20	0.330		0.039			
CRS-V	0.310	0.306	0.052	0.046	180	185
CRS-RO	0.302		0.040			
CRS-RI-5	0.288	0.288	0.041	0.044	190	204
CRS-RI-10	0.287		0.043			
CRS-RI-10-10%	0.282		-			
CRS-RI-20	0.293		0.047			

타내었다. 단계제하 압밀시험의 경우에는 방법을 사용하여 압밀계수를 산정하였으며, 일정변형을 시험에서의 압밀계수는 배수방향에 따라서 시료의 비선형적 압축특성을 고려한 식 (2), (5), (26)을 사용하여 계산하였다.

방사내측배수 압밀시험에 의한 압밀계수는 시험된 전체 압밀응력 범위에서 단계제하시험에서 평가된 압밀계수 값의 범위 내에 속하는 것으로 나타났으며, 특히 단계제하 시험의 방사배수 시험 결과 보다 훨씬 작은 편차만이 나타나고 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 일정변형을 압밀시험의 경우 배압포화를 통하여 시료의 교란을 감소시킨 결과에 기인한 것으로 판단된다. 특히 본 연구에서 개발한 방사 내측배수 압밀시험의 경우 압밀계수의 편차가 매우 작아서, 수행된 전체 유효응력 범위에서 최대 88.4%, 그리고 압밀응력에 따른 변화가 작은 정규압밀 영역에서 최대 23.0%로 나타났다. 즉, 단계제하 압밀시험 보다 훨씬 작은 편차의 일관된 결과를 제시함으로써, 그 신뢰성이 높음을 확인할 수 있다.

압밀계수에 대한 시험 조건에 따른 영향을 단계제하 압밀 시험에 대하여 평가하여 보면, 그림 9에 나타난 바와 같이 연직배수 압밀계수가 가장 작고, 방사외측배수 압밀시험이 이보다 약간 크며, 방사내측배수의 경우 배수재의 직경에 따른 뚜렷한 경향성 없이 이들 보다 훨씬 크게 압밀계수를 평가하는 것으로 나타났다. 즉, 비록 재성형 시료이지만, 성형

중에 발생한 이방성의 영향으로 기존의 많은 연구(Rowe와 Shields, 1965; Mesri 등, 1994; Sridharan 등, 1996)에서 제시된 바와 같이 연직방향 보다 방사방향으로 더 큰 압밀계수를 갖지만, 이보다도 방사 내측이나, 외측이나에 따라 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

일정변형을 시험의 경우 시험 조건에 따른 영향, 즉 시험 조건에 따른 압밀계수의 변화가 단계제하시험 보다 작지만, 시험 조건별 경향성은 분명하게 확인할 수 있다. 그림 9의 결과를 확대한 그림 10에 나타난 바와 같이 특히 정규압밀 영역의 경우 연직배수에 비하여 방사배수에서 압밀계수가 평균 21.9% 크게 나타나며, 방사외측배수가 방사내측배수의 평균 보다 17%정도 크게, 그리고 배수재 직경이 5 mm, 10 mm, 20 mm로 증가할수록 압밀계수 역시 4%, 11% 정도로 약간씩 크게 나타났다. 또한 변형률 속도의 영향을 비교할 때, 3.5%/hr에 비하여 10.0%/hr의 압밀계수가 평균 5% 크게 평가하고 있다. 표 4에 각 실험에서 정규압밀영역에서의 압밀계수 평균값을 정리하였다. 그러나 이러한 결과는 매우 제한된 수의 특정 흙의 실험에 대한 결과이기 때문에 여기서 나타난 결과를 일반화하여 단정하기는 어렵다. 다만, Prawono(1981)도 실내시험을 통한 연구에서 배수재 직경이 증가할수록 압밀계수가 증가한다는 실험결과를 제시한 바가 있으며, Silvestri 등(1986)은 연직배수 조건에서 변형

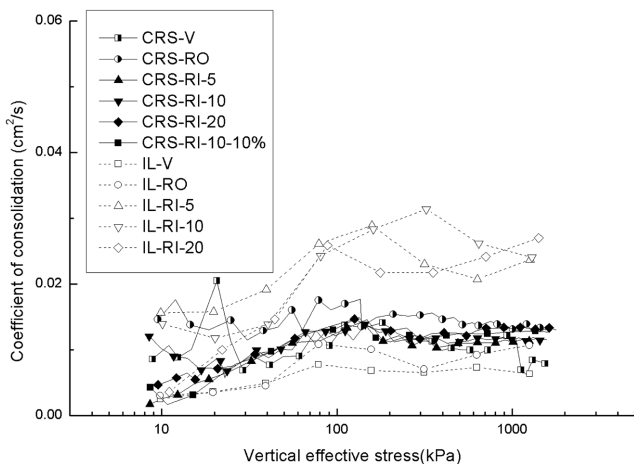


그림 9. 전체 실험에 대한 유효응력-압밀계수 관계

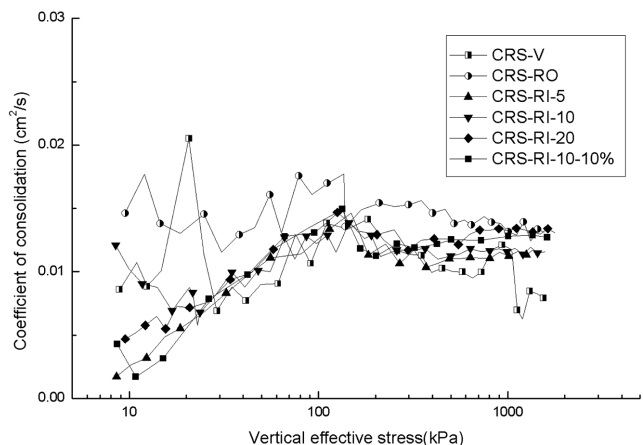


그림 10. 일정변형을 압밀시험에 대한 유효응력-압밀계수 관계



표 4. 정규압밀영역에서의 압밀계수 평균값

	정규압밀영역에서의 평균 압밀계수(cm <sup>2</sup> /s)	배수방향별 평균
IL-V	0.00679	0.00679
IL-RO	0.00928	0.00928
IL-RI-5	0.02413	0.02511
IL-RI-10	0.02752	
IL-RI-20	0.02369	
CRS-V	0.01022	0.01022
CRS-RO	0.01413	0.01413
CRS-RI-5	0.01123	0.01205
CRS-RI-10	0.01170	
CRS-RI-10-10%	0.01228	
CRS-RI-20	0.01297	

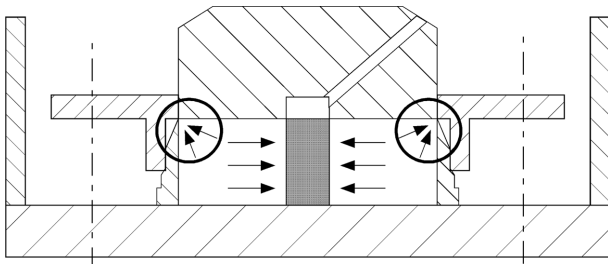


그림 11. 표준압밀시험기를 개량한 단계재하 방사내측배수 시험에서 배수방향

를 속도가 빨라짐에 따라 압밀계수도 증가한다는 본 연구와 유사한 결과들을 제시한 바가 있다. 그러나, 여기서 제시된 결과들도 명확한 분석을 토대로 그 원인을 제시하고 있지는 못하며, 특히 방사배수의 배수방향의 영향에 대해서는 아직 명확히 밝혀진 바가 없다. 따라서, 이러한 압밀계수에 대한 실험 조건에 따른 영향에 대해서는 보다 심층적인 연구가 향후 필요할 것으로 판단된다. 다만, 단계재하시험에서 방사외측보다 방사내측배수의 압밀계수가 크게 평가됨에 따라 일정변형률 시험의 방사배수 방향에 대한 결과와 상반되게 나타난 것은 실험적 오차일 가능성이 있다. 그림 11에 나타난 바와 같이 일반 표준압밀시험기를 보완하여 사용할 경우 가압판이 상하로 자유롭게 움직이면서 시료 압밀량과 가압판 사이가 완전히 밀폐되기 어렵기 때문이다. 따라서 단계재하 시험의 방사내측배수의 경우 미소한 간극수압이 이 사이로 소산되면서 압밀 시간을 단축시켜 압밀계수를 과대평가하는 결과가 초래되었을 가능성이 있다.

## 6. 결론 및 요약

본 연구에서는 방사내측배수 조건에서 일정변형률 압밀시험을 수행할 수 있는 실내시험용 압밀실을 개발하고 여기서 측정되는 값들로부터 압밀 특성값들을 결정할 수 있는 해를 관련 지배방정식으로부터 유도하였다. 개발된 압밀실은 간단한 경계 조건 변환을 통하여 연직배수 및 방사외측배수 일정변형률 압밀시험도 가능하며, 제시된 해는 흙의 선형 및 비선형 변형 특성을 고려하였다.

개발된 시험기와 결과 해석 해의 적용성을 검증하기 위하여 성형 카올리나이트 시료를 이용하여 압밀시험을 실시하였다. 다양한 배수재 직경과 두 가지 변형률 속도를 적용하여 방사내측배수 일정변형률 압밀시험을 수행함과 더불어, 비교 검증 시험으로 연직, 방사내측, 방사외측 배수 단계재하 압밀시험과 연직 및 방사외측 배수 일정변형률 압밀시험을 실시하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 방사내측배수 일정변형률 시험에 따른 압밀 변형 특성은 이미 검증된 연직배수 및 방사외측배수 압밀시험과 일치하는 것으로 나타났으며, 단계재하 시험의 결과 보다 시료 교란 효과가 줄어든 개선된 결과를 제시하는 것으로 평가되었다. 또한 압밀계수도 단계재하 시험의 결과와 일치하면서도, 시험에 따른 편차가 적은 훨씬 안정적이고 신뢰성 높은 값을 평가할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 개발된 시험기는 기존의 표준압밀시험에 따른 단계재하 압밀 시험보다, 우월한 성능을 가지는 것으로 판단된다.
2. 일정변형률 시험으로부터 평가된 압밀계수는 배수방향에 따라 방사외측, 방사내측, 연직배수의 순으로 약간씩 크게 나타났으며, 방사내측배수의 경우에는 배수재 직경이 클수록 압밀계수가 미소하지만 증가하는 것으로 나타났다. 연직배수 시험에 비하여 방사배수 시험에서 압밀계수가 크게 나타나는 현상은 횡방향으로 더 큰 투수계수를 갖는 점성토의 이방적 특성 때문이며 실제로 많은 실험적 연구를 통하여 밝혀진 사실이다. 그러나 배수재 직경과 압밀계수와의 상관관계에 대해서는 다양한 시료를 대상으로 더욱 심도 있는 연구가 필요한 것으로 판단된다.

## 기 호

- $A$  : 시료의 면적
- $a_v$  : 압축계수
- $c_{ro}$  : 방사외측배수 압밀계수
- $e$  : 간극비
- $e_0$  : 초기 간극비
- $H$  : 시료의 높이
- $H_0$  : 시료의 초기 높이
- $k_h$  : 횡방향 투수계수
- $N$  : 배수재 직경비( $=k_w/R$ )
- $R$  : 시료의 반지름
- $r_w$  : 연직배수재 반지름
- $t$  : 시간
- $u$  : 간극수압
- $\bar{u}$  : 평균 간극수압
- $u_b$  : 시료 하부에서의 간극수압
- $u_c$  : 시료중앙부에서의 간극수압
- $u_l$  : 시료의 외주면에서의 간극수압
- $V_s$  : 흡입지의 부피
- $\Delta V$  : 부피변형량
- $\alpha_{ri}$  : 외측벽면 간극수압에 대한 시료 전체의 평균간극수압 비
- $\alpha_{ro}$  : 시료 중앙부 간극수압에 대한 시료 전체의 평균간극수압 비

- $\delta$  : 시료의 연직변형량
- $\dot{\epsilon}$  : 변형률 속도(strain rate)
- $\gamma_w$  : 물의 단위중량
- $\bar{\sigma}_v'$  : 평균 연직유효응력
- $\sigma_v$  : 연직 전응력
- $\sigma_{v1}, \sigma_{v2}$  : 시간  $t_1, t_2$ 에서의 전응력
- $\sigma_{v1}', \sigma_{v2}'$  : 시간  $t_1, t_2$ 에서의 유효응력
- $\sigma_v'$  : 시간  $t_1, t_2$  사이의 평균 유효응력

### 감사의 글

본 연구는 서울대학교 공학연구소의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

윤찬영, 장인성, 정충기(2002) 일정변형률 압밀시험을 이용한 방사배수 조건하에서의 압밀해석, **한국지반공학회논문집**, 한국지반공학회, 제18권 제4호, pp. 147-157.

ASTM (1996) Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using controlled-strain loading, *ASTM D4186-89*, pp. 515-519.

Hamilton, J. J. and Crawford, C. V. (1959) Improved determination of pre-consolidation pressure of a sensitive clay, *ASTM STP 254*, Philadelphia, pp. 254-271.

Janbu, N. (1965) Consolidation of clay layers based on non-linear stress-strain, *Proc. 6th ICSMFE*, Vol. 2, pp. 83-87.

Lee, K. (1981) Consolidation with constant rate of deformation, *Geotechnique*, Vol. 31, No. 2, pp. 215-229.

Mesri, G, Feng, T. W., Ali, S., and Hayat, T.M. (1994) Permeability characteristics of soft clays, *Proc. 8th ICSMFE*, Vol. 1, pp. 187-192.

Prawono, S. (1981) Sand drain model by central drain oedometer, *10th ICSMFE*, Vol. 1, pp. 745-750.

Rowe, P. W. and Barden, L. (1966) A new consolidation cell, *Geotechnique*, Vol. 16, No. 2, pp. 162-169

Rowe, P. W. and Shields, D. H. (1965) The measured horizontal coefficient of consolidation of laminate, layered or varved clays, *6th ICSMFE*, Vol. 1, pp. 342-344.

Seah, T. H. and Juirnarongrit, T. (2003) Constant rate of strain consolidation with radial drainage, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 26, No. 4, pp. 432-443.

Sheahan, T. C. and Watters, P. J. (1996) Using an automated Rowe cell for constant rate of strain consolidation testing, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 19, No. 4, pp. 354-363.

Silvestri, V., Yong, R. N., Soulie, M., and Gabriel, F. (1986) Controlled-strain, controlled-gradient, and standard consolidation testing of sensitive clays, *Consolidation of Soils: Testing and evaluation, ASTM STP 892*, Philadelphia, pp. 433-450.

Sridharan, A., Prakash, K. and Asha, R. (1996) Consolidation behavior of clayey soils under radial drainage, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 19, No. 4, pp. 421-431.

Umehara, Y. and Zen, K. (1980) Constant rate of strain consolidation for very soft clayey soils, *Soils and Foundations*, Vol. 20, No. 2, June, pp. 79-95.

Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H., and Heiberg, S. (1971) Consolidation at constant rate of strain, *J. Soil Mech. Fdns Div.*, ASCE, SM10, pp. 1393-1413.

Yune, C. Y. and Chung, C. K. (2005) Consolidation test at constant rate of strain for radial drainage, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 28, No. 1, pp. 71-78.

(접수일: 2006.6.1/심사일: 2006.7.11/심사완료일: 2006.8.4)