

일정변형률 압밀시험을 이용한 방사배수 조건하에서의 압밀해석

Consolidation at Constant Strain Rate for Radial Drainage

윤 찬 영*¹ Yune, Chan-Young
장 인 성*² Jang, In-Sung
정 충 기*³ Chung, Choong-Ki

Abstract

In this paper, the testing cell and the related theory for the interpretation of constant rate of strain (CRS) consolidation test results in case of radial drainage were developed. The proposed method makes it possible to evaluate consolidation characteristics of clayey soil rapidly and accurately. To investigate the application of the developed testing device and theory, CRS consolidation tests and incremental loading(IL) tests in radial drainage condition with remolded and undisturbed samples were performed. Comparisons of consolidation parameters from consolidation curves including coefficient of consolidation values show the applicability and the reliability of the suggested method. The experimental data were compared with additional vertical drainage CRS tests and IL tests, and then were analyzed considering the effect of the drainage direction. In addition, the effect of excess pore water pressure generated during CRS consolidation test was investigated.

요 지

본 연구에서는 방사방향의 배수조건을 갖는 점성토의 압밀특성을 짧은 시간에 정확하게 평가할 수 있는 방사배수 일정변형률 압밀시험을 위한 시험기와 해석이론을 개발하였다. 개발된 시험기 및 해석이론에 대한 적용성을 검토하기 위하여 성형시료 및 불교란 시료에 대하여 방사배수 일정변형률 압밀시험과 단계하중 압밀시험을 실시하였다. 압밀곡선으로부터 평가되는 압밀정수 및 압밀계수에 대한 비교, 분석을 통하여 제안된 시험기 및 이론의 신뢰성과 적용성을 평가하였고, 방사배수 시험과 더불어 수행된 연직배수 일정변형률 압밀시험과 단계하중 압밀시험을 통하여 배수방향에 따른 영향과 시험기 및 해석이론의 적용성을 분석하였다. 또한, 일정변형률 압밀시험시 발생하는 과잉간극수압에 대한 분석을 통하여 간극수압의 발생 양상 및 실험결과에 미치는 영향을 확인하였다.

Keywords : Clayey soil, Consolidation, Constant rate of strain, Radial drainage

1. 서 론

이방적 특성을 갖는 흙은 압밀 시에도 배수 방향에 따라 매우 다른 거동을 보인다. 연약한 점성토의 경우 상대적으로 큰 이방적 투수성 때문에 횡방향(또는 방

사방향) 배수 시에는 연직배수와 다른 압밀특성을 갖게 된다. 방사방향 배수에 따른 압밀특성은 특히 연직 배수재를 이용하여 지반개량을 실시하는 경우 그 침하 및 압밀 거동을 예측하기 위해서 매우 중요하다. 이를 위한 실내 시험으로 기존의 표준압밀시험기 또는 로우

*1 정회원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

*2 정회원, 한국해양연구원 연안항만공학연구본부 연수연구원 (Member, Post-Doctoral Researcher, Coastal & Harbor Engrg., Laboratory, Korea Ocean Research & Development Institute)

*3 정회원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., geolabs@gong.snu.ac.kr)

셀(Rowe Cell) 시험기를 방사방향으로 배수되도록 고안하여 활용하고 있다. 그러나 단계재하에 의한 압밀시험은 잘 알려진 바와 같이 1) 시험기간이 길고, 2) 연속적인 데이터를 얻을 수 없어 정확한 압밀특성의 결정이 어려울 수가 있으며, 3) 수작업을 이용한 압밀계수의 산정($\log t, \sqrt{t}$ 방법)으로 인하여 결과 값의 객관성이 떨어진다는 단점이 있다.

이에 반하여 Hamilton과 Crawford(1959)에 의하여 제안되고, Smith와 Wahls(1969), Wissa 등(1971)에 의하여 해석 방법이 제시된 일정변형률 압밀시험은, 단계재하 방식의 실험과 비교할 때 1) 짧은 시간에 실험을 마칠 수 있으며, 2) 연속적인 실험자료를 얻을 수 있어 압밀특성을 정확하게 파악할 수 있고, 3) 실험 및 자료의 해석이 간편하고, 임의성이 적을 뿐만 아니라 장비의 자동화가 쉬우며, 4) 배압을 가하여 시료를 포화시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 현재까지 일정변형률 시험은 연직배수에 국한되어 개발되고 활용되었으며, 아직까지 방사방향 시험기의 개발 및 관련 연구는 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 점성토의 방사방향 배수 압밀 거동을 분석하고, 관련 압밀특성치들을 얻을 수 있는 시험기를 관련 해석이론과 함께 개발하였다. 카올리나이트 성형시료와 부산지역에서 채취한 불교란 시료를 이용하여 실험을 실시하고, 그 결과를 동일 시료에 대하여 실시한 방사방향 단계재하 압밀시험의 결과와 비교하여 개발된 시험기와 해석이론의 적용성을 검증하였다. 또한, 연직방향 배수조건 하에서 일정변형률 및 단계재하 시험을 실시하고, 그 결과들을 방사방향 배수 시험의 결과들과 비교하여 압밀특성의 이방성과 함께 적용성을 확인, 검토하였다.

2. 일정변형률 압밀이론

2.1 연직배수 일정변형률 압밀이론

연직배수조건하에서의 일정변형률 압밀시험의 해석 방법은 Smith와 Wahls(1969), Wissa 등(1971), Umehara와 Zen(1980), Lee(1981) 등의 학자들에 의하여 연구되었다.

그 중에서 Wissa 등(1971)이 제안한 방법은 현재 가장 보편적으로 사용되고 있고, 많은 실험을 통하여 검증된 방법으로서, Janbu(1965)의 변형률에 근거한 일차원

압밀해석 이론을 기초로 하여, 압밀 초기의 전이상태(transient state) 및 전이상태가 소산된 후의 정상상태(steady state)로 구분하여 연직방향 유효응력 및 압밀계수를 산정한다. 정상상태인 경우 변형률-유효응력 관계가 선형인 경우와 비선형인 경우로 나누어 해석하였다. 이 중 정상상태에서의 비선형($\epsilon - \log \sigma'$ 선형관계) 해가 ASTM에 표준 시험 해석방법으로 채택되어 현재 가장 널리 사용되고 있다. 제안된 이론에 따른 평균 연직유효응력(σ')과 연직 방향 압밀계수(c_{vw})는 각각 식 (1), (2)와 같다. 시험은 방사방향의 변형은 구속한 채 일정속도로 연직방향 변형을 발생토록 하고 연직상부로부터 배수를 유발시키면서 수행되고, 시험 중 시료가 받는 연직력(F_v), 시료 바닥에서 발생한 과잉간극수압(u_b), 연직변형률(ΔH) 등이 측정된다. 측정된 F_v 와 ΔH 를 이용, 연직 전응력(σ_v)과 연직 변형률(ϵ_v)을 산정하고, 시간에 따라(즉, 연직변형률에 따라) 측정된 σ_v 와 u_b 를 식 (1), (2)에 대입하여 시료 전체에 대한 평균 연직유효응력과 압밀계수를 산정한다.

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

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

여기서,

H : 시료의 높이

σ_{v1}, σ_{v2} : 시간 t_1, t_2 에서의 전응력

$\Delta t = t_2 - t_1$

이로부터 연직변형률과 연직유효응력의 관계, 그리고 연직유효응력 변화에 따른 압밀계수를 구할 수 있다.

2.2 방사배수 일정변형률 압밀이론

일정변형률 압밀시험에 대한 기존 해석 이론은 연직배수 조건에 국한되어 제안되었으며, 본 연구에서 개발한 방사방향 배수 압밀시험에 대한 해석 방법은 아직 제안된 바가 없다. 따라서, 본 연구에서는 개발된 시험방법의 결과 해석을 위하여 필요한 이론을 다음과 같이 유도, 제안하였다.

제안된 시험방법과 같이 방사방향으로 배수되는 경우 원통형 공시체의 압밀지배 방정식은 그림 1과 같은 원통형좌표계를 이용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

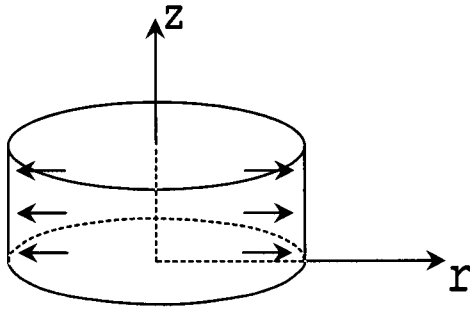


그림 1. 방사배수 조건에서의 원통형 좌표계

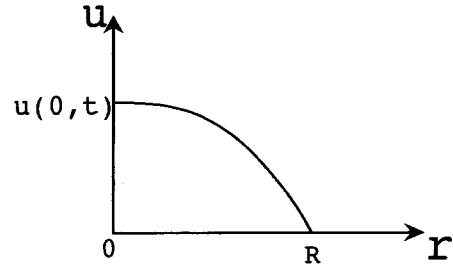


그림 2. 거리에 따른 간극수압 분포형태

$$\frac{k_h}{\gamma_w} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (3)$$

여기서, e : 간극비

u : 간극수압

t : 시간

k_h : 횡방향 투수계수

γ_w : 물의 단위중량

식 (3)의 u 와 e 는 모두 r, z, t 에 관한 함수이나, 방사 배수에 의해서만 압밀이 진행되므로 간극수압은 연직방향 즉, z 방향으로 항상 일정하게 분포하며, 시료의 두께가 얇은 경우 간극비 또한 z 방향으로 일정하다고 가정할 수 있다. 따라서, u 와 e 는 r 과 t 의 함수로 나타낼 수 있다. 그리고, 제시된 시험방법에서 시료는 상·하부의 강성 재하판 사이에서 등변형률(equal strain) 연직변형을 하므로 e 는 시간 t 만의 함수 $e(t)$ 로 나타낼 수 있다.

시료가 일정한 속도로 변형하고 그 때의 변형률 속도(strain rate)를 $\dot{\epsilon}$ 로 놓으면, 시료의 면적 및 초기 높이를 각각 A, H 라 할 때, 연직 변위량(δ)과 부피 변형량(ΔV)은 각각 다음 식들과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \dot{\epsilon} H t \quad (4)$$

$$\Delta V = \dot{\epsilon} H t A \quad (5)$$

흡에서의 부피 변형량은 간극의 변형량(ΔV_v)으로 나타나므로 시간에 따라 변화하는 간극비는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} e(t) &= e_0 - \Delta e \\ &= e_0 - \frac{\Delta V_v}{V_s} \\ &= e_0 - \frac{\dot{\epsilon} H t A}{V_s} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, e_0 는 초기 간극비이고 V_s 는 흡입자의 부피이다.

식 (3)에서 우변의 미분항은 식 (6)을 이용하여 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으므로

$$\frac{de}{dt} = - \frac{\dot{\epsilon} H A}{V_s} = const. = -C \quad (7)$$

식 (6)과 (7)을 이용하면 식 (3)은 다음 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{k_h}{\gamma_w} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) = - \frac{C}{1+e_0 - Ct} \quad (8)$$

윗 식에서 횡방향 투수계수 k_h 는 간극비 크기에 따라 변화하므로 시간에 대한 함수 $k_h(t)$ 로 표시된다.

방사방향으로 배수가 발생하면서 시료가 압밀될 때 시료의 반경을 R 이라고 하면, 그림 2와 같이 간극수압은 시료의 외측 경계면($r=R$)에서 0이 되고 중앙부($r=0$)에서 최대값을 나타내며, 중앙부에서의 동수경사는 0이 될 것이다. 이와 같은 경계조건을 식으로 표현하면, 다음 식 (9), (10)과 같다.

$$u(R, t) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial u(0, t)}{\partial r} = 0 \quad (10)$$

위 경계조건을 적용하면 식 (8)로부터 아래와 같은 해를 구할 수 있다.

$$u(r, t) = \frac{\gamma_w}{k_h} \frac{C}{1+e_0 - Ct} \left(-\frac{r^2}{4} + \frac{R^2}{4} \right) \quad (11)$$

이 때, 시료 중앙에서의 간극수압(u_c)은

$$u_c = u(0, t) = \frac{\gamma_w}{k_h} \frac{C}{1+e_0 - Ct} \frac{R^2}{4} \quad (12)$$

과 같다. 시료 중앙부 간극수압에 대한 시료 전체의 평

균 간극수압(\bar{u})의 비를 α_{ro} 로 정의하면 α_{ro} 값은 식 (11)과 (12)를 이용하여 다음 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다. 또한, 평균연직유효응력 $\bar{\sigma}'_v$ 은 α_{ro} 를 이용하여 식 (14)와 같이 나타나며, 시료의 크기나 재하속도에 상관없이 측정된 연직전응력과 시료 중앙부 간극수압만으로 결정할 수 있다.

$$\alpha_{ro} = \frac{\bar{u}}{u_c} = \frac{\frac{1}{A} \int_0^R u 2\pi r dr}{u_c} = \frac{1}{2} \quad (13)$$

$$\bar{\sigma}'_v = \sigma_v - \alpha_{ro} u_c \quad (14)$$

횡방향 변형이 구속된 연직 1차원 변형조건에서 방사방향의 배수만이 허용되는 경우에 대한 압밀계수(c_{vr})는 다음 식으로부터 얻어질 수 있다.

$$c_{vr} = \frac{k_h(1+e)}{a_v \gamma_w} \quad (15)$$

여기서, a_v : 연직 1차원 변형조건에 대한 압축계수 식 (12)로부터

$$1+e = 1 + e_o - Ct = \frac{\gamma_w}{k_h} \frac{C}{u_c} \frac{R^2}{4} \quad (16)$$

와 같이 나타나고, 미소변형률 조건을 가정하면 $a_v = -\frac{de}{d\sigma'} = -\frac{\Delta e}{\Delta \sigma'}$ 라 할 수 있으므로, 이들을 식 (15)에 대입하면, 아래와 같이 압밀계수를 구할 수 있다.

$$c_{vr} = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta t} \frac{R^2}{4u_c} \quad (17)$$

실험시 시간에 따라 연속적으로 측정되는 연직전응력과 시료 중앙부 간극수압, 그리고 연직변형량과 함께 식 (14)와 (17)을 이용하면 응력-변형률(또는 응력-간극비) 곡선과 함께 응력변화에 따른 압밀계수 값들을 얻을 수 있다. 이 값들은 기존의 단계재하식 방법에서 얻어지는 단속적인 값들이 아니라, 측정 간격에 따라 다르지만 매우 연속적이고 조밀하게 결과치들을 얻을 수 있다.

3. 개발된 시험장치

방사배수 일정변형률 압밀시험 수행을 위해서는 재하시 간극수의 흐름을 방사방향으로만 유도하면서, 시

료에 재하되는 하중과 연직변형량, 그리고 간극수압(방사외측 배수의 경우 시료 하부 중앙부에서 측정)을 정확하게 측정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 압밀시 배수를 방사방향으로 유도하고 간극수압을 정확하게 측정할 수 있도록 그림 3과 같은 압밀실을 고안하여, 활용하였다.

고안된 압밀실은 삼축셀과 같이 밀폐되었으며 압밀실 내에 설치된 시료를 배압을 가하여 포화시킬 수 있다. 따라서, 일정변형률로 재하되는 동안에 시료에서 발생하는 간극수압을 시료 하부 중앙부에 설치된 간극수압계(Pore Pressure Transducer)를 통하여 정확하게 측정할 수 있다. 또한, 불투수성의 상부재하판 및 하부판과 함께 원통형 시료의 외주면에 통수성 플라스틱(Porous Plastic)을 설치함으로써 과잉간극수압의 소산이 방사외측 배수로만 이루어지도록 하였다. 시료에서 배수된 간극수는 그림 3에 나타난 바와 같이 통수성 플라스틱의 외주면에 설치된 금속제 다공성 압밀링을 통하여 압밀실로 배출된다. 시료 변형의 경우, 금속제 압밀링에 의하여 방사변형(즉, 측면 변형)이 구속되므로 표준압밀시험과 같은 1차원 변형 상태를 유지하게 된다. 연직배수 시험의 경우에는 일반적인 밀폐된 금속제 압밀링을 사용하고, 다공성 상부재하판 하부에 통수성 플라스틱을 설치한 후 상부로부터 배수를 유도하도록 부분적으로 보완하여 실시한다.

시료에 가해지는 하중은 압밀실 외부로부터 가압봉을 통하여 시료에 전달되며, 그 크기는 외부에 설치된 하중계(Load Cell)를 이용하여 변위계(Dial gage 또는 LVDT)에 의한 연직변형량과 함께 측정된다. 하중계와 변위계는 압밀실 내부에 설치하는 것이 바람직하지만, 이를 위해서는 압밀실의 크기가 대형화되어야 하고, 수중과 고압에 견딜 수 있는 고가 측정기기가 필요한 문제점과 더불어 시험 절차가 번거롭기 때문에 외부에 설치하였다. 이 때 압밀시험 중에 발생할 수 있는 연직 변위의 오차는 무시할 수 있지만, 재하하중의 경우 압밀실 압력 유지를 위하여 가압봉과 상부판의 유도공 벽면 사이의 틈이 밀착되어 마찰력이 발생하기 때문에 측정오차가 크게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 압밀실 압력 유출을 최소화함과 동시에, 마찰 오차를 줄이기 위하여 그림 3에 나타난 바와 같이 상부판 유도로 외벽에 볼베어링과 O-Ring을 설치하여 가압봉을 지지하도록 하였다. 또한, 다양한 구속압 하에서 수행한 예비시험 결과를 통하여 마찰력이 매우 미소함(3N)을 확인하였으며,

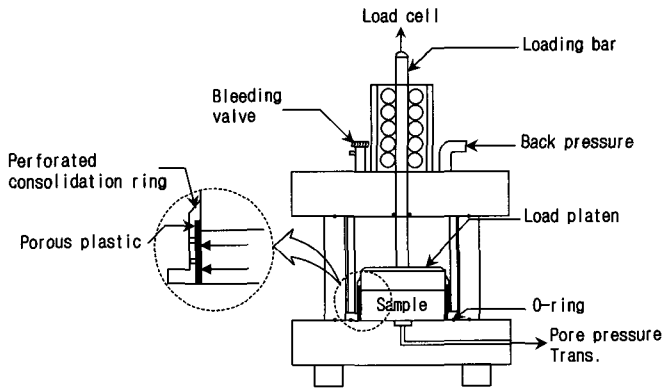


그림 3. 개발된 방사배수 일정변형률 압밀실

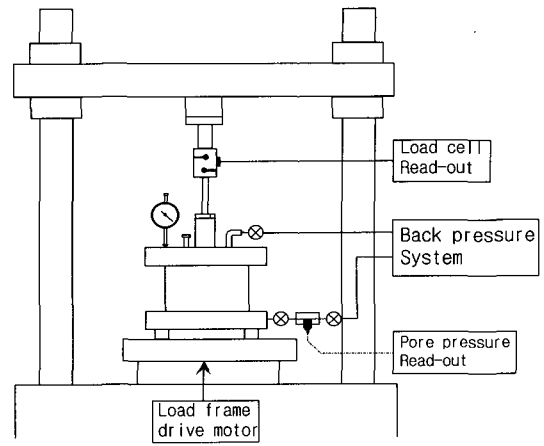


그림 4. 일정변형률 압밀시험의 계통도

결과 해석시 이 값에 대한 보정을 실시하였다.

압밀시험은 시료와 함께 조립된 압밀실을 그림 4와 같은 로드 프레임에 설치한 다음, 압력공급장치를 연결하고, 일정한 속도로 연직변형률 가함으로서 이루어진다. 재하에 앞서 배압을 압밀실에 가하여 시료를 포화시킨 후 재하와 함께 재하 하중과 연직변형률, 그리고 시료 중앙부에서의 간극수압을 연속적으로 측정한다. 현재 개발된 시험기에서 사용되는 시료는 직경 6 cm, 높이 2 cm이다. 개발된 압밀실은 배압포화 이후 포화정도를 B값 등을 이용하여 확인할 수는 없으나, 재하 직후의 하중계의 값과 간극수압계의 비교를 통하여 파악할 수 있다.

4. 실험계획 및 방법

개발된 방사배수 일정변형률 압밀시험용 압밀실과 결과 해석을 위하여 유도된 해석이론에 대한 적용성을 검증하기 위하여 성형 시료 및 불교란 시료를 이용하여 실험을 수행하였다. 일정변형률 시험과 함께 기존의 단계재하 재하방식에 따른 시험을 실시하였으며, 각 재하 방식에 대하여 연직배수 및 방사배수에 대한 시험을 실시하였다. 단계재하 방사배수 압밀시험은 일정변형률 시험에서 사용된 방식과 마찬가지로, 불투수성 상하부 재하판과 함께 시료의 외주면에 통수성 플라스틱을 다공성 압밀링 내부에 밀착되게 설치하여 실시하였다.

4.1 사용 시료

각 시험방법의 결과에 대한 명확한 비교, 분석을 위해

서는 사용된 시료의 균질성이 매우 중요하다. 이를 위하여 카올리나이트를 이용한 성형 시료를 사용하였으며, 또한 실제 현장 점성도에 대한 적용성을 확인하기 위하여 불교란 시료에 대한 시험도 병행하여 실시하였다.

성형 시료는 카올리나이트에 액성한계의 2배 이상인 100%의 함수비가 되도록 물을 넣고 슬러리 상태로 2~3일간 혼합, 교반하고 진동을 가하여 미소 공기 방울을 제거한 후 대형 시료성형기를 이용하여 제작하였다. 대형 시료성형기는 직경 35cm, 높이 60cm의 금속제 원통으로서 내부면은 마찰을 최소화하기 위하여 표면처리 되어 있으며, 연직방향으로만 압축되고, 간극수는 상하부로 배출된다. 시료성형기에 놓여진 시료는 퇴적(sedimentation)과 자중 압밀에 의하여 1~2일동안 압축이 되도록 하였으며, 이후 7~8단계로 단계적으로 하중을 증가시켜 최종적으로 약 130 kPa까지 재하, 압밀하였다. 각 단계마다 침하량을 측정하여 압밀이 완료되었음을 확인하였으며, 최종 압밀 완료까지 2주정도가 소요되었다. 제작된 시료는 램으로 싸고 파라핀으로 완전히 밀봉하여 항습조에 보관하였다.

성형 시료 및 불교란 시료에 대한 기본 물성치는 표

표 1. 시료의 기본 물성치

	성형시료	불교란 시료
액성한계 (%)	42.0	57.6
소성한계 (%)	26.6	22.3
소성지수 (%)	15.4	35.3
비중	2.60	2.59
200번체 통과율 (%)	98.0	97.3
함수비 (%)	38.3	72.2
단위중량(kN/m³)	18.04	15.40

표 5. 실시된 압밀시험 내용

시험방법	배수방향 및 변형률 속도		성형 시료		불교란 시료	
			표기	초기함수비 (%)	표기	초기함수비 (%)
단계 재하 압밀시험	연직방향 배수		RILV	38.81	UILV1	70.03
	방사방향 배수		RILR	37.32	UILR	71.31
일정변형률 압밀시험	연직방향 배수	5%/hr	RCRSV5	38.70	UCRSV5	73.40
		10%/hr	RCRSV10	38.32	UCRSV10	72.78
		15%/hr	RCRSV15	38.05	-	-
	방사방향 배수	5%/hr	RCRSR5	37.86	UCRSR5	71.83
		10%/hr	RCRSR10	39.20	-	-
		15%/hr	RCRSR15	38.30	-	-

1과 같다. 불교란 시료의 액성한계와 함수비가 약간 더 크게 나타났으며, 통일분류법에 의하면 재성형 시료는 CL, 불교란 시료는 CH로 판명되었다.

4.2 시험방법 및 내용

본 연구에서 실시한 시험은 표 2에 나타난 바와 같다. 일정변형률 시험의 경우 재하 속도의 영향을 고찰하기 위하여 성형 시료는 5, 10, 15 %/hr의 세 가지 연직변형률 속도로, 그리고 불교란 시료는 5, 10 %/hr의 두 가지 연직 변형률 속도로 연직, 방사 배수 각각에 대하여 실험을 수행하였다. 재하시에는 재하속도의 1/5로 실험하였다.

단계 재하시험은 KS F 2316에 제시된 표준압밀시험 방법 및 절차에 따라서 실시하였으며, 방사배수의 경우, 앞서 설명한 바와 같이 방사방향으로 배수가 유도되도록 고안된 압밀링을 활용하였다. 일정변형률 시험은 ASTM D4186-89의 방법과 절차에 따라 실시되었으며, 재하 이전에 200 kPa의 배압을 24시간 가하여 시료를 포화시켰으며, 재하와 함께 연직 하중과 연직 변위, 그리고 시료 하부 중앙부에서 간극수압을 연속적으로 측정하였다.

5. 시험결과 및 분석

일정변형률 시험에서 측정된 연직 전응력과 과잉간극수압을 이용하여 식 (1)과 식 (14)에 의하여 연직배수와 방사배수 각각에 대한 연직유효응력을 산정하였으며, 식 (2)와 식 (17)에 의하여 압밀계수를 각 연직유효응력에 대하여 산정하였다. 이를 토대로 일정변형률과 단계하중 재하에 따른 압밀시험 결과를 다음과 같이 비교, 분석하였다. 또한, 일정변형률 재하시 재하속도가

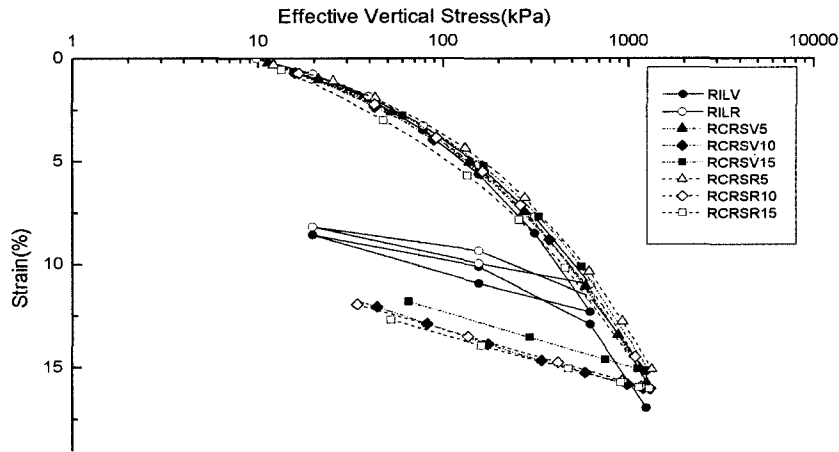
시험결과에 미치는 영향을 발생 과잉간극수압을 토대로 검토하였다.

5.1 압밀변형 특성

성형시료와 불교란 시료에 대한 압밀곡선(유효응력 - 연직변형률)을 그림 5와 그림 6에 각각 나타내었다. 그리고, 이로부터 평가된 각각의 경우에 대한 압축지수 (C_c), 재압축지수 (C_r)와 선형압밀압 (σ_p) 값들을 함께 제시하였다.

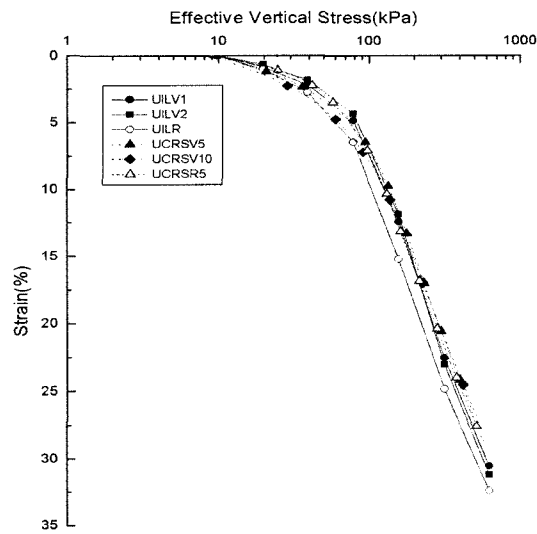
성형시료, 불교란 시료 모두 재하 방법, 배수 방향에 상관없이 압밀곡선은 거의 일치하여 뚜렷한 차이점을 확인할 수 없었다. 또한, 채택된 범위에서 변형률 속도가 압밀변형 특성에 미치는 영향 역시 뚜렷하게 확인할 수가 없었다. 압밀곡선으로부터 압밀정수 값, 즉 C_c , C_r , σ_p 값들을 평가하여 이들을 정량적으로 비교하여 볼 때, 불교란 시료는 각각의 조건에 대하여 매우 잘 일치하지만, 성형시료의 경우 압축지수의 편차가 다소 크게 나타나거나 선형압밀압을 성형시 압밀압(130kPa)보다 크게 평가하면서 실험조건마다 약간의 차이가 나타나고 있다. 성형시료의 경우 이러한 차이가 나타나는 것은 짧은 성형 시간 때문에 흙의 구조가 충분히 안정화되지 못하여 압밀곡선의 형상으로부터 선형압밀압을 명확하게 구분하기 어렵기 때문이다. 그리고, 성형시료의 경우 15%/hr의 빠른 변형률 속도 하에서는 압축지수가 다소 작게 평가되고 있지만, 이것이 반드시 빠른 재하속도의 영향인지는 분명하지 않다.

따라서, 채택된 변형률 속도의 범위에서는 연직배수 뿐만 아니라 방사배수 일정변형률 시험에서도 단계재하에 의한 표준압밀시험의 결과와 일치하여 신뢰성 있



	RILV	RILR	RCRSV5	RCRSV10	RCRSV15	RCRSR5	RCRSR10	RCRSR15
C_c	0.293	0.283	0.305	0.303	0.26	0.29	0.299	0.258
C_r	0.048	0.036	-	0.055	0.050	-	0.049	0.052
σ_p' (kPa)	190	160	205	170	190	160	225	210

그림 5. 성형 시료에 대한 유효응력-변형률 곡선



	UILV1	UILV2	UILR	UCRSV5	UCRSV10	UCRSR5
C_c	0.95	1.09	0.96	0.93	0.88	0.89
σ_p' (kPa)	90	96	80	98	97	83

그림 6. 불교란 시료에 대한 유효응력-변형률 곡선

는 점성토의 압밀변형 특성값들을 얻을 수 있으며, 이를 통하여 방사방향 일정변형률 시험을 위하여 개발된 시험기와 해석방법이 압밀변형 특성을 적절하게 평가함을 확인할 수 있다.

5.2 압밀계수

성형시료 및 불교란 시료 각각에 대하여 평가된 압밀계수 값들을 유효응력에 대하여 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 여기서 단계재하 표준압밀시험의 경우 압밀계수는 \sqrt{t} 법을 사용하여 산정하였다.

유효응력에 따른 압밀계수의 변화를 살펴보면 재하방법 및 배수방향에 상관없이 기존의 연구 결과(Wang & Wei, 1996)와 유사한 경향성을 나타내고 있다. 즉, 성형시료의 경우 압밀계수의 값들이 유효응력이 커짐에 따라서 증가하며, 정규압밀 상태에 도달한 선행압밀압 이후에 더 급격하게 증가한다. 그리고 불교란 시료의 경우 선행압밀 이전의 과압밀상태에서는 유효응력이 증가하면서 압밀계수 값들이 감소하다가 선행압밀압 도달 이후에는 거의 일정한 값을 갖는다.

두 가지 시료 각각에 대하여 실험방법에 따른 압밀계수 값들을 비교하여 보면, 배수 방향을 포함한 모든 실험결과에 대하여 최대 편차가 5배 이내의 값을 가진다. 배수방향에 따라 구분하여 보면 그 차이는 더 작게 나타나며, 제안된 방사방향 일정변형률 시험에 의한 압밀계수와 단계재하 방사방향 압밀계수의 차이는 3배 이내이다. 이러한 편차의 크기는 시료의 불균질성, 각 실험 방법 적용시 발생가능한 편차, 그리고 압밀계수 평가방법의 한계 등을 감안할 때 받아들일 수 있는 범위라고 판

단된다. 참고로 Sheahan과 Watters(1997)가 일정변형률과 단계재하에 의한 연직방향 압밀계수만을 비교 평가하여 제시한 연구결과에 따르면 압밀계수의 최대 편차가 10~100배에 이른다.

배수방향에 따른 압밀계수를 비교해 볼 때, 선행압밀압보다 작은 과압밀 영역에서는 뚜렷한 경향을 보이지 않지만, 정규압밀 영역의 경우 방사방향 압밀계수가 연직방향 압밀계수보다 크게 나타남을 알 수 있다. 일정변형률 시험의 결과만으로 비교하여 볼 때 성형시료, 불교란 시료 각각에 대하여 방사방향 압밀계수가 연직방향 압밀계수보다 평균 30%, 70% 정도 크게 나타났다. 이는 점성토가 갖는 투수계수의 이방성에서 비롯된 것이며, 정규압밀의 경우 방사방향 투수계수가 연직방향 투수계수에 비해 큰 값을 가지기 때문이다(AI-Tabbaa 등, 1987; Mesri 등, 1994). 그리고, 과압밀 영역에서 압밀계수의 이방성이 뚜렷하지 않는 것 또한 과압밀 점성토에서 나타나는 투수계수의 이방성 저하 때문이라고 할 수 있다. 또한, 불교란 시료가 정규압밀영역에서 성형시료보다 압밀계수 이방성이 크게 나타난 현상은 불교란 시료의 경우 현장의 장기간 재하로 인해 흙의 이방적 구조가 심화되었기 때문으로 판단된다.

일정변형률 시험과 단계재하 시험의 결과를 비교하여 볼 때 정규압밀 영역에서 일정변형률 시험이 두 가지 배수 방향 모두에 대하여 압밀계수를 다소 크게 평가(성형시료 최대 : 43%, 불교란 시료 최대 : 33%)하는 것으로 나타났으며, 과압밀영역의 경우 재하방법에 따른 차이를 뚜렷하게 판별할 수가 없었다. 한편, 변형률 속도의 경우 배수방향 및 시료의 과압밀 여부에 상관없이 채택된 범위에서 뚜렷한 차이를 구분할 수가 없었다.

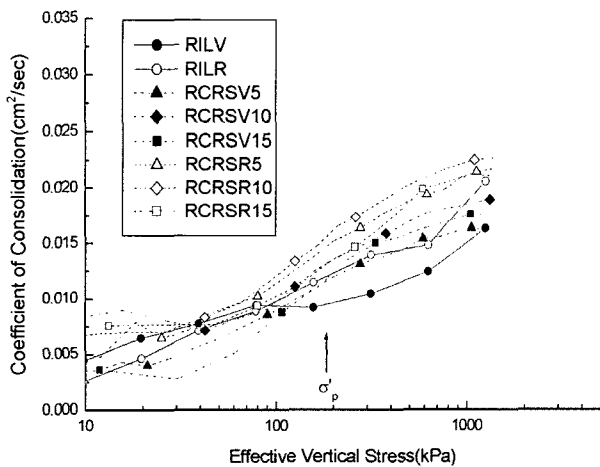


그림 7. 성형 시료에 대한 유효응력-압밀계수 관계

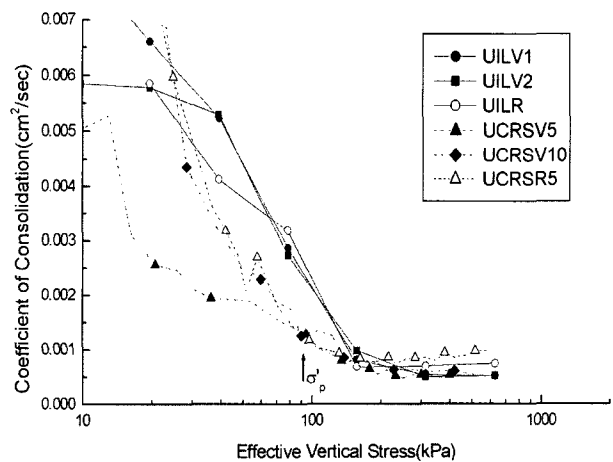


그림 8. 불교란 시료에 대한 유효응력-압밀계수 관계

따라서, 개발된 방사방향 압밀시험기와 해석방법은 위에서 설명한 바와 같이 단계재하 압밀시험 결과와 비교해 볼 때, 편차의 범위가 작을 뿐만 아니라, 배수 방향, 응력 이력, 시료 조건에 따라 합리적 결과를 도출한다는 점을 감안하면 충분한 신뢰성과 활용성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

5.3 일정변형률 압밀시험시 발생 과잉간극수압의 영향

일정변형률 압밀시험시 시료 내에서 발생하는 과잉간극수압은 변형률 속도와 밀접한 관련이 있으며, 과도하게 발생할 경우 실험결과의 신뢰성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 연직배수 일정변형률 시험에서는 발생하는 과잉간극수압을 고려하여 변형률 속도를 제한하는 기준을 설정하고 있다. ASTM(1996)에 따르면 간극수압비(재하된 전응력에 대한 과잉간극수압의 비)가 30% 이내가 되도록 변형률 속도를 제한하고 있다.

시료의 평균유효응력에 대한 시료 하부 중앙에서 측정된 과잉간극수압과 간극수압비의 대표적 결과를 그림 9와 10에 나타내었다. 측정 간극수압은 초기에 점진적으로 증가하다가 선행압밀하중 이후에 급격히 증가하고 있다. 그러나 간극수압비는 실험 초기에는 큰 값을 보인 후 점차 감소하여 일정한 값으로 수렴한다. 즉, 과잉간극수압이 커짐에 따라서 증가된 동수구배 때문에 과잉간극수압의 소산이 가속화되어 간극수압비는 전응력 및 유효응력의 증가와 함께 감소한다. 이러한 경향성은 배수방향에 상관없이 동일하게 나타났으며, 다만 배수길이가 긴 방사배수의 경우 간극수압과 간극수압비가 약간 크다. 한편, 그림 7과 8의 비교에서 알 수

있듯이, 불교란 시료의 경우 성형시료보다 더 작은 압밀계수(즉, 더 작은 투수계수)를 갖기 때문에 더 큰 간극수압 및 간극수압비를 갖는 것으로 나타났다.

일정변형률 시험시 간극수압의 변화를 시험 조건에 따라 자세히 살펴보기 위하여 각 시험에 대한 최대 간극수압비와 수렴 간극수압비, 그리고 ASTM의 기준인 간극수압비 30%에서의 유효응력 값들을 표 3에 나타내었다. 간극수압비, 특히 안정화 상태의 수렴 간극수압비의 경우 변형률 속도에 따라 증가하고, 배수길이가 긴 방사방향 배수에서 더 큰 값을 가지며, 압밀계수가 작은 불교란 시료에서 더 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 각 시험 조건으로부터 예상되는 결과와 정확하게 일치하는 것이다. 재하 초기에 나타나는 최대 간극수압비는 모든 시험에서 30% 이상이지만, 재하와 함께 감소하여 선행압밀압에 도달하기 이전에 대부분 30% 이하의 값을 가진다. 간극수압비 30% 도달시 유효응력의 크기도 수렴 간극수압비의 경우와 마찬가지로 변형률 속도가 클수록, 방사방향 배수에서, 그리고 불교란 시료에서 더 큰 값을 갖는다.

각 일정변형률 시험의 초기 영역에서 ASTM의 기준인 30% 이상의 간극수압비가 발생하였지만, 앞서 설명한 바와 같이 실험 결과 평가된 압밀변형 특성과 압밀계수 값들은 모든 응력 단계에서 충분한 신뢰성을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 간극수압비가 지나치게 크면, 이에 따른 높은 동수구배의 영향으로 압밀 거동에 영향을 줄 수 있으므로 이에 대해서는 추후 심도있는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 배수길이가 길어서 동일 간극수압에서 동수구배가 작게 나타나는 방사배수의 경우, 간극수압 크기의 영향이 연직배수에 비해 감소하

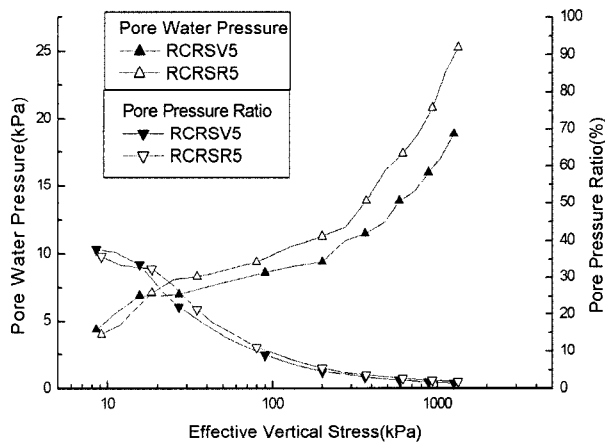


그림 9. 성형 시료에 대한 간극수압 및 간극수압비의 관계

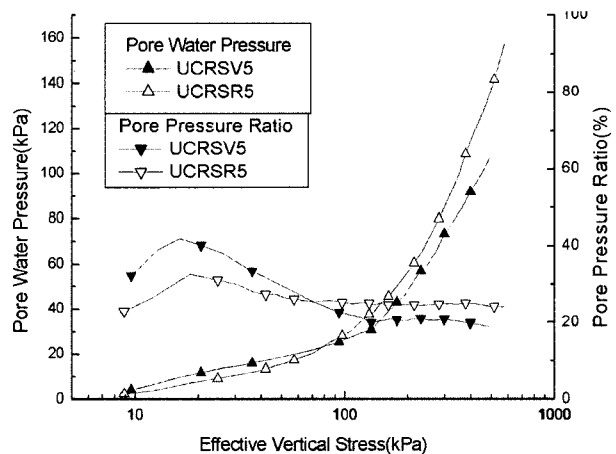


그림 10. 불교란 시료에 대한 간극수압 및 간극수압비의 관계

표 3. 최대 간극수압비, 간극수압비 30%에서의 유효응력 및 수렴값

성형 시료	최대 간극수압비 (%)	간극수압비 30%에서의 유효응력 (kPa)	간극수압비 수렴값 (%)	비교란 시료	최대 간극수압비 (%)	간극수압비 30%에서의 유효응력 (kPa)	간극수압비 수렴값 (%)
RCRSV5	36.7	18.4	1.5	UCRSV5	41.8	49.2	18.9
RCRSV10	34.9	30.2	2.5	UCRSV10	41.9	-	32.1
RCRSV15	76.9	73.3	4.1		-	-	-
RCRSR5	33.2	21.8	1.9	UCRSR5	32.5	30.0	24.1
RCRSR10	48.0	48.7	3.4		-	-	-
RCRSR15	55.4	80.3	5.6		-	-	-

므로 기준 간극수압비를 연직배수와는 다르게 설정할 필요가 있다.

6. 결론 및 요약

본 연구에서는 방사배수 일정변형률 압밀시험을 위한 시험기를 해석이론과 함께 개발하고, 성형시료 및 비교란 시료에 대하여 실험을 수행하여 단계하중 압밀시험의 결과와 비교, 분석함으로써 그 적용성을 검토하였다. 또한, 연직배수 일정변형률과 단계하중 압밀시험을 병행하여, 배수 방향에 따른 영향 및 이에 따른 제안 시험기 및 해석이론의 적용성을 분석하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 방사방향 일정변형률 압밀시험 결과 나타난 압밀변형 특성, 즉 압밀곡선의 형상과 이로부터 결정되는 압축지수, 재압축지수 및 선행압밀압은 다른 시험 결과들과 매우 잘 일치한다. 또한, 제안된 시험기 및 해석이론을 통하여 결정된 방사방향 압밀계수 역시 단계재하 시험의 결과와 비교할 때 그 차이가 받아들일 수 있을 만큼 작은 범위로 나타났으며, 시료의 교란 여부, 배수방향, 응력 이력 등에서 나타날 수 있는 압밀계수의 경향성과 잘 부합하는 결과를 보여 주고 있다. 따라서, 개발된 방사방향 압밀시험기와 해석 이론은 충분한 신뢰성과 활용성을 갖고 있는 것으로 판단된다.
- (2) 일정변형률 시험에 의해 결정된 방사방향 압밀계수는 정규압밀 영역에서 단계재하시험보다 압밀계수를 다소 크게 평가하며(성형시료 최대 : 43%, 비교란 시료 최대 : 33%), 과압밀 영역에서는 재하방법에 따른 뚜렷한 차이가 나타나지 않는다. 이는 연직방향 압밀계수의 경우에도 마찬가지이다. 한편, 정규압밀 상태에서는 재하 방법에 상관없이 방사방향

압밀계수가 연직방향 압밀계수보다 크다는 사실을 확인할 수 있었다.

- (3) 적용된 변형률 속도에서 ASTM의 기준인 30%보다 큰 간극수압비가 모든 일정변형률 시험에서 특히, 재하초기에 발생하였지만 압밀거동에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한, 배수길이가 긴 방사배수의 경우, 시료 내에 간극수압의 영향이 연직배수보다 작을 수 있으므로 일정변형률 시험에 필요한 변형률 속도에 대한 기준 설정을 위해서는 추후 심도있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

기 호

- α : 측정된 간극수압에 대한 평균간극수압의 비
- α_m : 시료 중앙부 간극수압에 대한 평균간극수압의 비
- δ : 연직 변위량
- ϵ_v : 연직 변형률
- $\dot{\epsilon}$: 변형률 속도(strain rate)
- γ_w : 물의 단위중량
- σ'_v : 평균 연직유효응력
- σ_v : 연직 전응력
- σ_{v1}, σ_{v2} : 시간 t_1, t_2 에서의 전응력
- σ'_v : 연직 유효응력
- A : 시료의 면적
- C : 상수($= \frac{eHA}{V_s}$)
- c_{vr} : 방사방향 압밀계수
- c_{vw} : 연직방향 압밀계수
- e : 간극비
- e_0 : 초기 간극비

참 고 문 헌

F_v : 연직력

H : 시료의 높이

ΔH : 연직 변형량

k_h : 횡방향 투수계수

R : 시료의 반지름

r : 반경방향 좌표계

t : 시간

$\Delta t = t_2 - t_1$

u : 간극수압

\bar{u} : 평균 간극수압

u_b : 시료 하부에서의 간극수압

u_c : 시료 중앙부에서의 간극수압

V_s : 흡입자의 부피

ΔV : 부피변화량(= ϵHtA)

ΔV_v : 간극의 변형량

z : 연직방향 좌표계

1. Al-Tabbaa, A. & Wood, D. M.(1987), "Some measurements of the permeability of kaolin", *Geotechnique*, Vol.37, No.4, pp.499-503.
2. ASTM(1996), "Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using controlled-strain loading", *ASTM D4186-89*, pp.515-519.
3. Crawford, C. B.(1964), "Interpretation of the consolidation test", *J. Soil Mech. Fdns Div.*, ASCE, SM5, pp.87-102.
4. Hamilton, J. J. and Crawford, C. V.(1959), "Improved determination of pre-consolidation pressure of a sensitive clay", *ASTM STP 254*, pp.254-271, Philadelphia.
5. Janbu, N.(1965), "Consolidation of clay layers based on non-linear stress-strain", *Proc. 6th ICSMFE*, Vol.2, pp.83-87, Montreal.
6. Lee, K.(1981), "Consolidation with constant rate of deformation", *Geotechnique*, Vol.31, No.2, pp.215-229.
7. 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.
8. Sheahan, T. C. and Watters, P. J.(1996), "Using an Automated Rowe Cell for Constant Rate of Strain Consolidation Testing", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.19, No.4, pp.354-363.
9. Smith, R. E. and Wahls, H. E.(1969), "Consolidation under constant rates of strain", *J. Soil Mech. Fdns Div.*, ASCE, SM2, pp.519-539.
10. 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.
11. Wang, N. and Wei, R.(1996), "Evaluation of sample quality of soft clay", *Proc. 2nd Int. Conf. on Soft Soil Engineering*, pp.120-125, Nanjing.
12. 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.

(접수일자 2002. 3. 2, 심사완료일 2002. 8. 13)