

# 다양한 석션 레벨에서의 불포화실트의 삼축압축거동에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on the Triaxial Compressive Behaviour of Unsaturated Compacted Silt under Various Suction Levels

김 영 석<sup>1</sup> Kim, Young-Seok

오카 후사오<sup>2</sup> Oka, Fusao

### Abstract

It has been recognized that the behaviour of unsaturated soil plays an important role in geomechanics. However, up to now, only a few experimental data are available for the technical difficulties related to both volume changes and suction measurements. In this study, the volume changes of unsaturated compacted silty soil were monitored with proximeter during various triaxial compression tests, which gave a realistic estimation in the volume changes of unsaturated soil sample. From the test results, the behaviours of wetting-induced collapses are observed during the drainage/water absorption tests. Under exhausted-drained conditions during shearing, the shear strength increases with an increasing initial suction. On the other hand, the volume changes become small with an increase in the initial suction. And, the volumetric strain during shearing is independent of the confining pressure.

### 요 지

본 연구에서는 불포화토의 역학특성을 해명하기 위하여 4개의 횡변위 계측시스템(proximeter)을 이용하는 방법으로 포화 삼축시험기를 개량하여 불포화 삼축압축시험을 수행하였다. 등방응력조건하에서 다양한 석션을 작용시켜 압축 특성을 검토한 결과, 공시체의 초기 석션 보다 작은 석션을 작용시켰을 경우 흡수에 의한 체적압축(wetting collapse)이 발생함을 알았다. 또한 다양한 석션 레벨 및 구속압에서 삼축압축시험을 수행하여, 불포화토에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과, 초기 석션이 클수록 동일 축변형률에 대한 전단강도가 커지고 체적변형률이 작게 나타났다. 그러나, 구속압에 의한 체적변형률 및 배수량의 변화는 작게 나타났으며, 구속압 보다는 초기 석션에 더 의존하고 있다는 사실을 알았다.

**Keywords :** Exhausted-drained condition, Proximeter, Suction, Triaxial compression test, Unsaturated silt

### 1. 서 론

일반적으로 지반재료인 흙은 고체입자와 간극내 유체(물과 공기)로 구성되는 다상혼합체이며, 존재하는

환경에 따라 그 성질이 매우 복잡하게 변화한다. 또한, 지반재료는 반드시 지하수위 아래에 존재하는 포화상태 뿐만 아니라 환경에 따라 공기를 포함하는 불포화상태로도 존재한다. 실제로 많은 지반 공학적 상황은

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Disaster & Environment Research, Korea Institute of Construction Technology, kimys@kict.re.kr, 교신저자)

2 일본 교토대학 사회기반공학 전공 교수 (Prof., Dept. of Civil & Earth Resources Engrg, Kyoto Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

불포화토에서 발생한다. 사면의 붕괴, 하천제방과 같은 성토체에서의 침투변형, 필댐의 안정, 차세대 에너지 자원으로 주목을 받고 있는 메탄 하이드레이트의 공기압 특성과 같은 문제들이 그 예라고 할 수 있다. 그러나, 불포화토 실험에 있어 석션 측정 및 제어의 어려움, 체적변화 측정의 어려움 등으로 적은 실험 데이터만이 보고되어 있어, 불포화토의 역학특성을 정확히 해명하고 예측하기 위해서는 보다 많은 실험 연구를 수행하여 분석할 필요가 있다(e.g., Fredlund and Rahardjo 1993; Cui and Delage 1996). 이러한 배경에서 본 연구에서는 불포화토의 역학특성을 해명하기 위하여 다양한 석션 레벨에서 삼축압축시험을 수행하여 검토하였다. 우선, 포화 삼축시험기를 개량하여 불포화용 삼축압축시험이 가능하도록 하였다. 즉, Polyflon 필터와 세라믹 디스크를 사용함으로써 간극공기압과 간극수압의 경로를 각각 분리하여 제어/측정하였으며, 공시체의 체적변화는 4개의 횡변위 계측시스템(proximeter)을 이용하여 측정하였다(Kim, 2005). 4개의 횡변위 계측시스템의 측정 위치 및 정밀도에 대해서는 상용 디지털 카메라를 이용한 사진해석을 통하여 검토를 하였다. 시험에는 DL-clay (상품명)라고 하는 시판용 시료를 사용하였으며, 동적다짐을 통하여 공시체를 제작하였다. 등방 율력조건하에서 소정의 석션을 작용시켜 배수/흡수 과정에서의 압축 특성을 검토하였다. 또한, 다양한 석션 레벨 및 구속압에서 삼축압축시험을 실시하여, 초기 석션 및 구속압이 불포화토의 역학특성에 미치는 영향 등을 검토하였다.

## 2. 불포화용 삼축압축시험기 제작

### 2.1 시험 시료 및 공시체 제작

본 연구에서 사용한 시험시료는 불포화토의 역학실험용으로 자주 사용되고 있는 DL-clay(상품명)라고 하는 인공시료이다. 이 시료를 선정한 이유는 균일한 시료로 대량 구입이 가능하고 공시체의 제작이 용이하며, 석션 변동영역의 측정이 쉽기 때문이다(Japanese Standards for Geotechnical and Geoenvironmental Investigation Methods-Standards and Explorations, 2005). 표 1과 그림 1에는 침강분석, 물리시험 등을 통해 구한 DL-clay의 물리적 특성, 입도분포 곡선을 나타내고 있다. #200체 통과백분율이 100%에 가깝고 비교적 균일한 입경을 가지고 있음을 알 수 있다.

표 1. DL-clay의 물리적 특성

Sand (%)	0
Silt (%)	90
Clay (%)	10
Max. grain size (mm)	0.09
$W_L$ (%)	NP
$W_P$ (%)	NP
$I_P$	NP
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.65

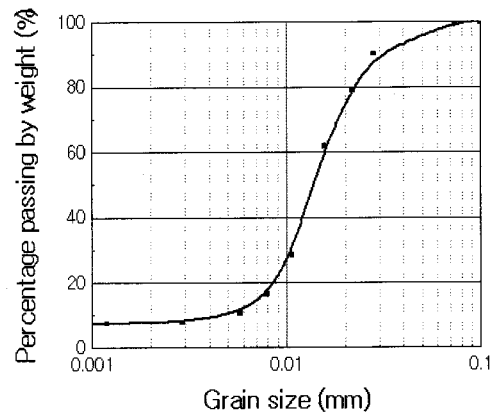


그림 1. DL-clay의 입도분포곡선

분말로 판매되는 DL-clay를 초기 함수비가 20%가 될 수 있도록 증류수와 혼합 한 후, 사진 1의 램머와 몰드를 이용하여 일정한 에너지로 동적다짐을 하여 높이 100mm, 직경 50mm의 공시체를 제작하였다. 사진 2와 같이 제작된 공시체는 초기 간극비가 약 1.1로 나타났으며, 삼축셀에 설치하여 간극수압을 측정할 결과 모든 공시체가 -18kPa에서 -20kPa로 계측되었다.

### 2.2 불포화용 삼축압축시험기의 특징

포화토 시험과 달리 불포화토 시험에서는 공시체 내부에 간극수 외에 간극공기가 존재한다. 이 간극공기에 작용하는 압력을 간극수압과 어떻게 분리하여 측정할 것이며, 공기를 포함하는 공시체의 체적변화를 어떻게 측정할 것 인가가 매우 중요하다. 본 연구에서는 그림 2와 같이 공시체 상단부에 Polyflon 필터(ADVANTEC (주), PF020), 하단부에 세라믹 디스크(A.E.V. 300kPa)를 사용함으로써 간극공기압과 간극수압을 완전히 분리하여 제어 및 측정하였다. 또한, 공기를 포함하는 공시체의 체적변화를 4개의 횡변위 계측시스템을 이용하여 측정하였다. 횡변위 계측시스템이란, 공시체에 알루미늄 호일로 만들어진 표적(target)을 붙여 계측기와 표

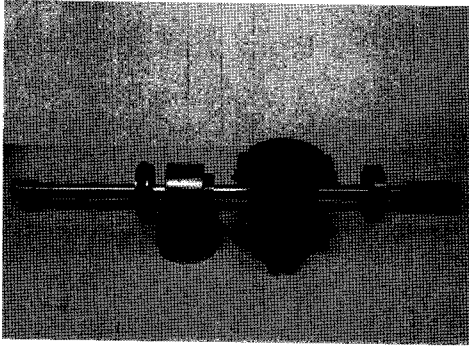


사진 1. 동적다짐에 이용한 램머와 몰드

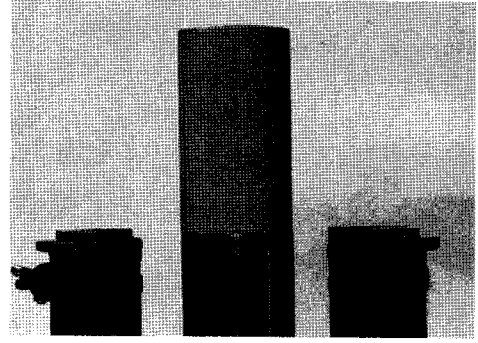


사진 2. 제작된 공시체의 모습

적 사이의 거리로 공시체의 변형을 감지하는 시스템이다(그림 2 참조). 기존의 미소변형률 연구에서 자주 사용되고 있는 장치를 응용하여 불포화토의 체적변화 측정에 사용한 것이다. 4개의 횡변위 계측시스템으로 측정한 공시체의 횡변형을 이용하여 식(1)과 같이 공시체의 체적변형률을 산정하였다.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r \quad (1)$$

여기서,  $\varepsilon_v$ 는 체적변형률,  $\varepsilon_a$ 는 축변형률,  $\varepsilon_r$ 는 횡변형률을 의미한다.

본 연구에서 개량한 횡변위 계측시스템은 삼축셀 밖에서도 측정위치(수평) 조절이 가능하며(그림 2의 controller), 비배기 시험과 같이 체적이 급격히 변하는 경우에도 적용이 가능하며, 공시체와 직접 접촉하지 않으므로 공시체의 변형을 구속하지 않는 것이 특징이다(Kim, 2005).

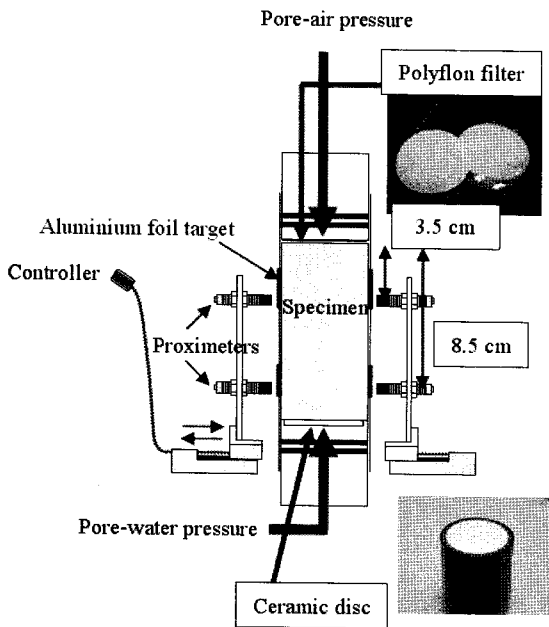


그림 2. 불포화토 삼축압축시험기 개요

### 2.3 횡변위 계측시스템의 측정위치 및 정밀도 검토

4개의 횡변위 계측시스템으로 불포화토의 체적변화를 정확하게 측정하기 위해서는 횡변위 계측시스템의 측정위치를 검토하여야 한다. 왜냐하면, 식(1)은 공시체가 균일하게 변형하는 경우 잘 일치하지만, 삼축압축시험 중 공시체가 불균일하게 변형하는 경우에는 횡변위 계측시스템의 측정위치에 따라 오차범위가 커지므로 최적의 측정위치를 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 상용 디지털 카메라를 이용한 사진해석을 통하여 횡변위 계측시스템의 측정위치를 결정하였다. 우선, 삼축압축시험 중 셀 밖에 설치한 디지털 카메라를 이용하여 축변형률 0, 5, 10, 15%의 각 단계에서 공시체 측면을 촬영하였다. 사진 3은 삼축셀을 통해 촬영한 각 변형률 단계에서의 디지털 화상을 보여주고 있다. 이렇게 구한 영상을 이용하여 그림 3과 같이 각 단계의 공시체 측면을 3차 곡선으로 표현하였다. 다음으로, 그림 4와 같이 각 단계의 3차 곡선을 적분하여 계산한 값과 횡변위 계측시스템에서 구한 값을 비교하여 측정위치를 결정하였다.

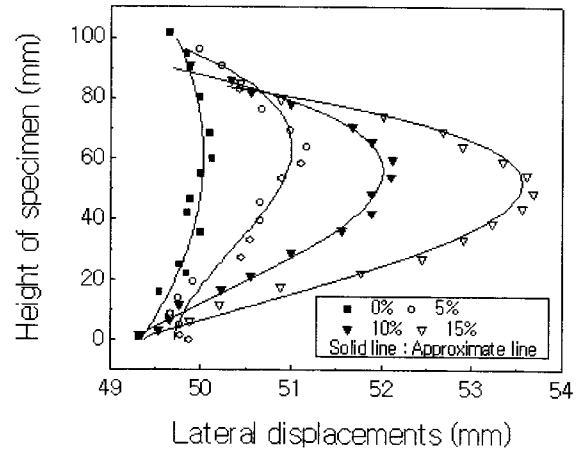


그림 3. 변형된 공시체 측면의 3차곡선

다양한 시료 및 시험조건으로 사진해석을 수행한 결과, 두 값의 차이가 최소가 되는 최적의 위치를 공시체 상단부로부터 각각 35mm, 85mm 떨어진 위치로 선정하였다(그림 2 참조). 이렇게 결정한 측정위치에서 구한 값과 사진해석을 통해 얻은 각 축변형률에서의 값을 비교한 결과(오차)를 표 2에 나타내었다. 표 2에서 알 수 있듯이 축변형률이 커질수록 오차범위는 다소 증가하지만, 최대 0.3% 이내로 나타나 횡변위 계측시스템의 측정위치는 타당한 위치라고 판단된다.

다음으로, 횡변위 계측시스템으로 구한 체적변형률의 측정 정밀도를 검토하였다. 포화토 시험의 경우 뷰렛으로 체적변화량을 직접 구할 수 있으므로, 포화토 시험의 결과와 횡변위 계측시스템의 체적 변화량을 비교하였다. 그림 5는 DL-clay와 Fukakusa clay의 압밀시험 결과를 나타내고 있다. 압밀과정 중 횡변위 계측시스템은 뷰렛으로부터 얻은 체적변형률 값과 큰 차이 없이 잘 일치하였으며, 오차범위는 최대 0.2%였다. 그림 6은 배수와 비배수 전단과정 중의 결과를 나타내고 있다. 전단

초기에서는 측정방법에 따른 오차가 거의 발생하지 않지만, 축변형률 10%이상에서 측정방법에 따라 체적변화량의 차이가 증가하고 있음을 알 수 있다. 압밀과정 중의 공시체의 변형은 비교적 균일한데 비해 전단과정 중에는 변형모드가 불규칙하며, 변형 또한 비균일하게 진행되므로 측정방법에 따른 오차가 크게 발생한 것으로 생각된다. 그러나, 축변형률 10%이하에서는 최대 0.5%의 측정 정밀도로 체적변화량의 측정이 가능하였다. 따라서, 본 연구에서 축변형률 10%를 적용범위로 설정하여 실험결과에 대하여 고찰하였다.

#### 2.4 응력변수

본 연구에서 사용하고 있는 응력변수는 평균골격응력(average skeleton stress)이다. 불포화토의 경우, 공기의 압축으로 인해 포화토의 유효응력을 사용할 수 없으므로 본 연구에서는 새로운 응력을 정의하여 도입하였다. 평균골격응력이란, 다공질모체이론을 바탕으로 기체(공기)와 액체(물)를 하나의 유체로 보고, 흙골격과 그 간극을 흐르는 유체의 분응력(partial stress)으로부터 구해지는 평균간극압(averaged pore-pressure)에 의해 정의되는 응력이다(theory of porous media, TPM)(Houlsby, 1997; Jommi, 2000; Ehlers, 2003, Kim et al. 2005). 즉,

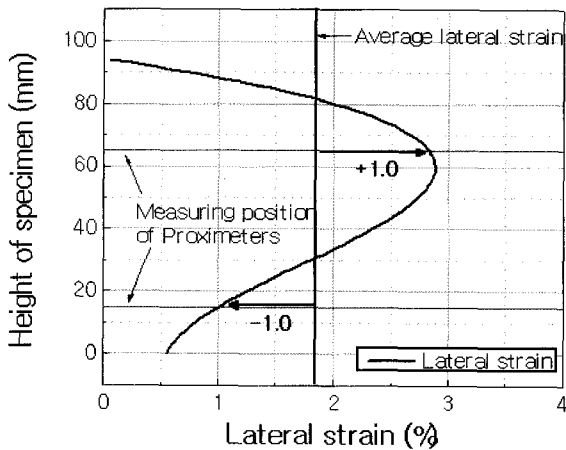


그림 4. 횡변위 계측시스템의 측정위치 결정방법

표 2. 사진해석 결과 (측정 오차)

Axial strain	5 %	10 %	15 %
Drained tests on DL-clay-1	-0.079	-0.066	0.281
Drained tests on DL-clay-2	-0.057	-0.077	0.255
Drained tests on Fukakusa clay	0.001	-0.024	0.102
Undrained tests on DL-clay	-0.144	-0.165	0.125
Unsaturated tests on DL-clay	0.047	0.010	0.159

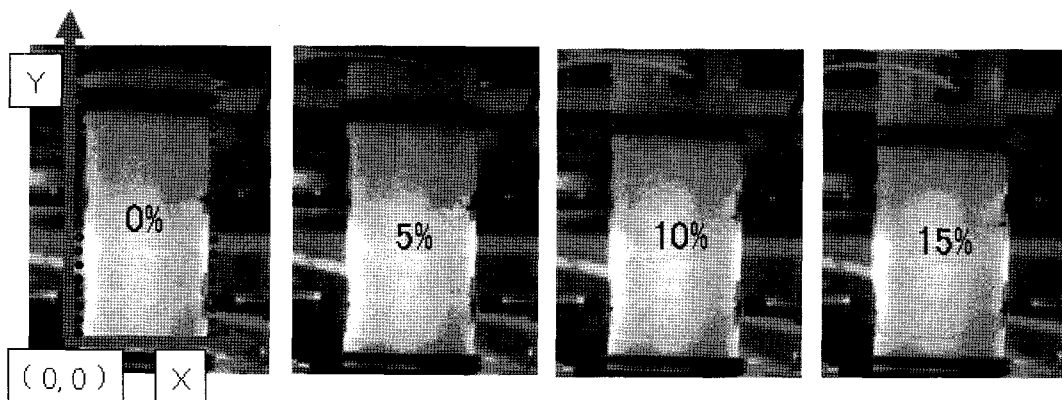


사진 3. 각 단계별 축변형률에서의 공시체 모습

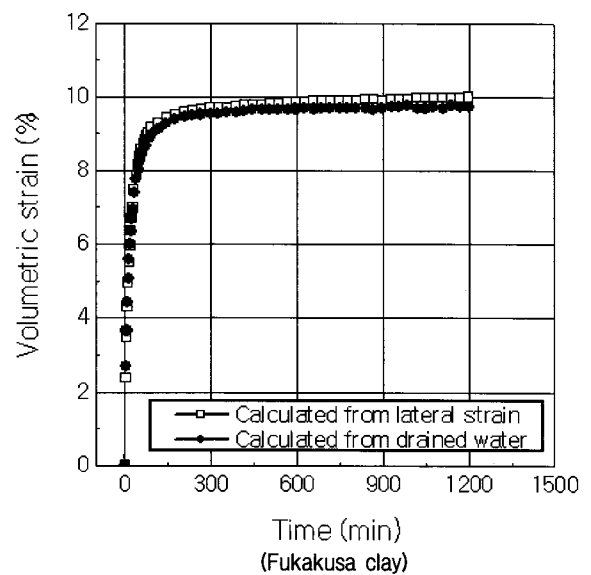
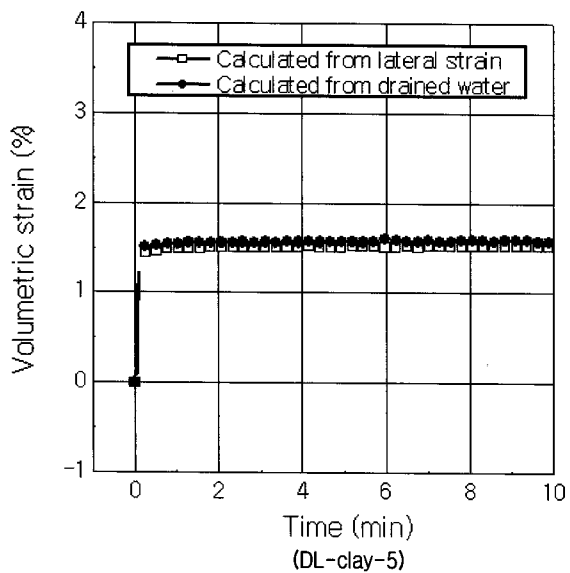
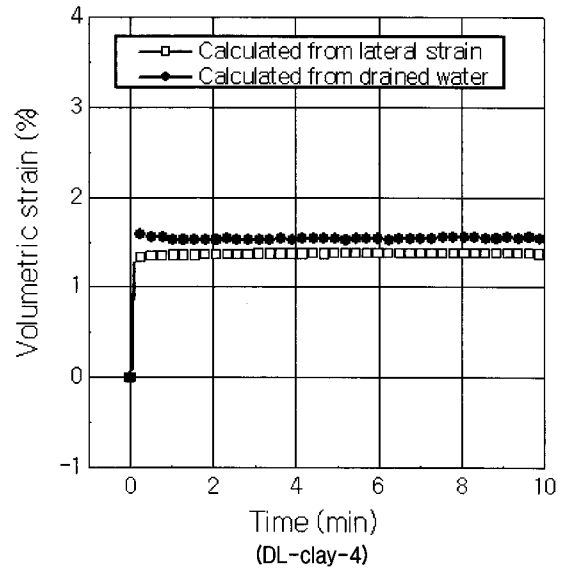
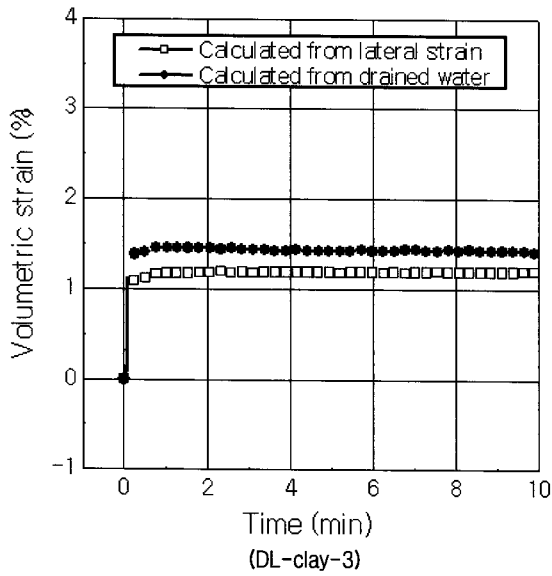
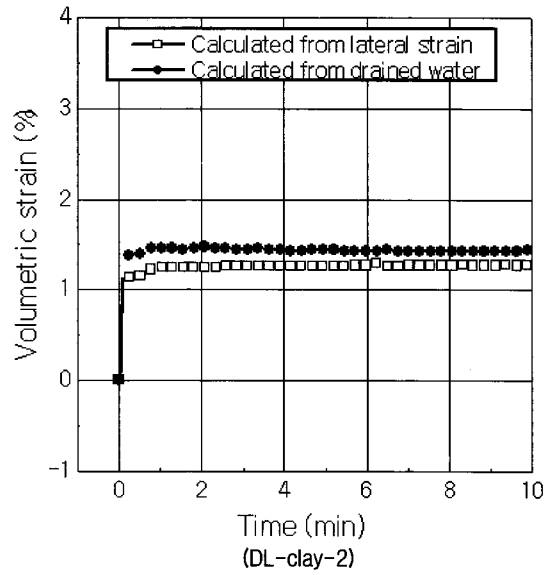
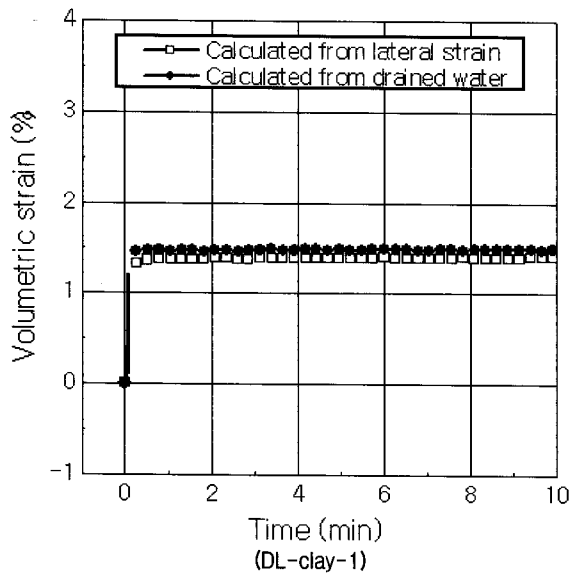


그림 5. 압밀과정 중의 체적변형을 비교

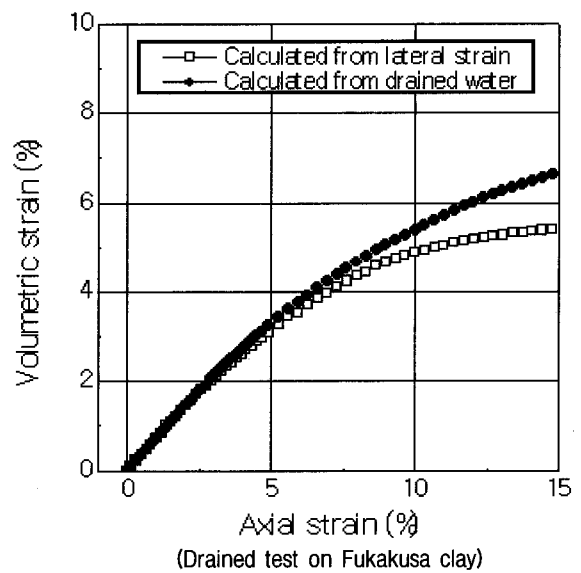
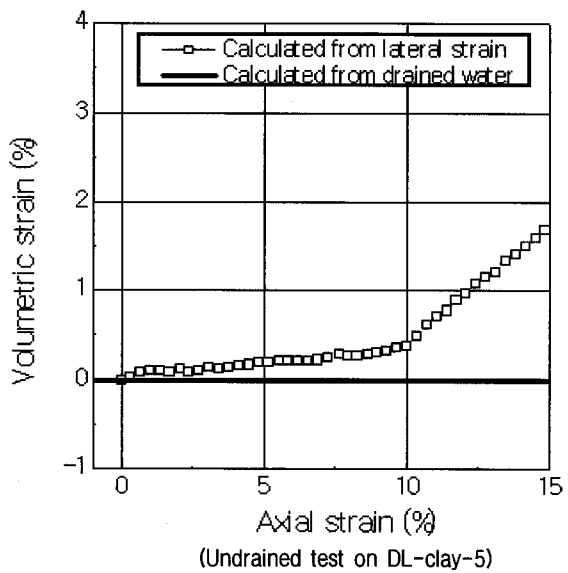
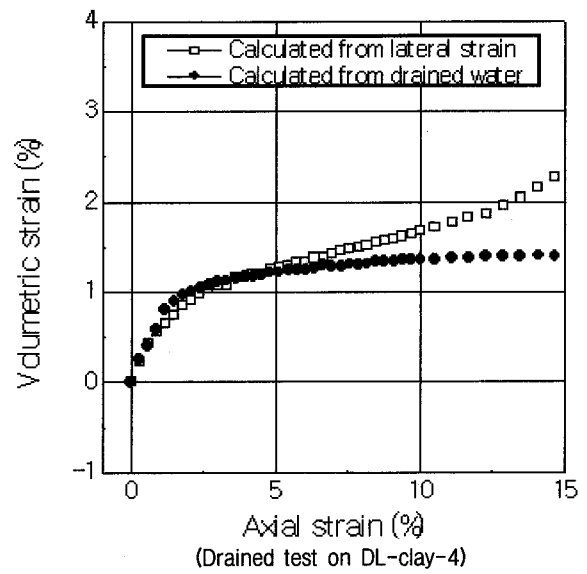
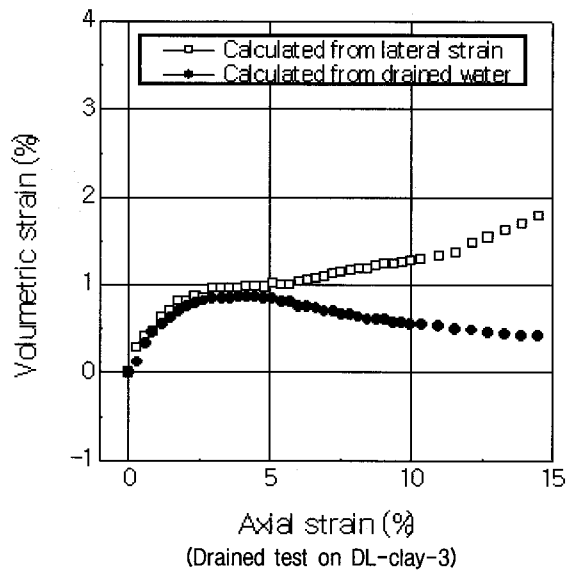
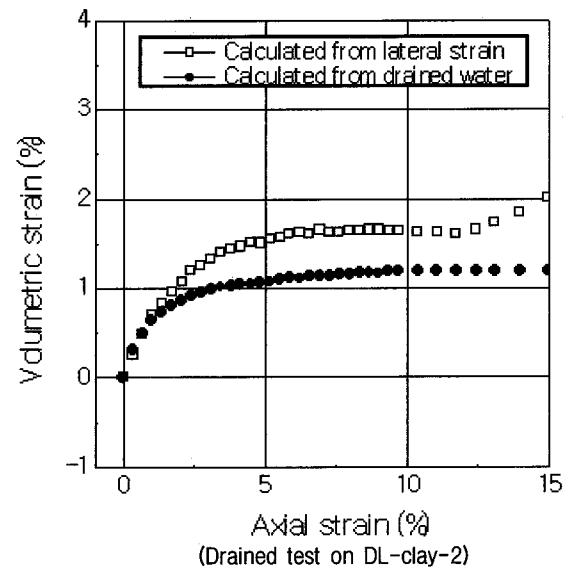
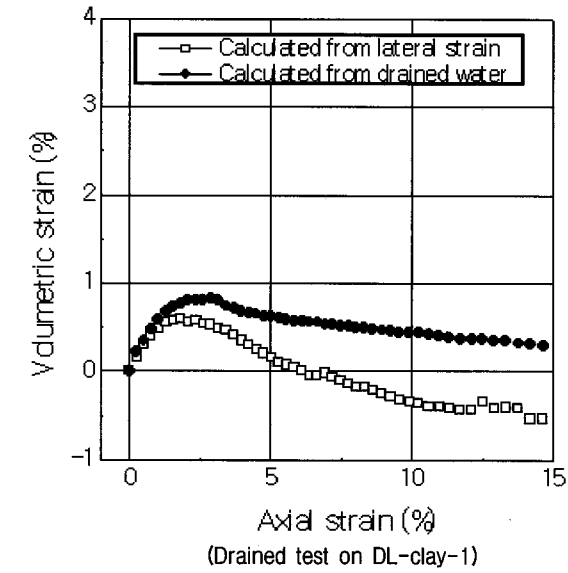


그림 6. 전단과정 중의 체적변형을 비교

$$\sigma''_{ij} = \sigma_{ij} - P^F \delta_{ij} \quad (2)$$

$$P^F = (1 - S_r)u_a + S_r u_w \quad (3)$$

여기서,  $\sigma''_{ij}$ 은 평균골격응력텐서,  $\sigma_{ij}$ 는 전응력 텐서,  $P^F$ 는 평균간극압,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker의 델타,  $S_r$ 은 포화도,  $u_a$ 는 간극공기압,  $u_w$ 는 간극수압을 나타낸다.

포화도가 100%일 때 평균간극압은 간극수압과 동일한 값이 되어, 평균골격응력은 Terzaghi의 유효응력과 동일한 값이 된다. 즉, 평균골격응력은 포화, 불포화에 모두 적용 가능한 응력이다. 또한, 평균골격응력의 도입으로 비배기 조건과 같이 공기압이 발생할 경우에도 불포화토의 역학특성을 명확히 나타낼 수 있다.

### 3. 다양한 석션 레벨에서의 불포화토의 삼축압축거동

#### 3.1 시험개요

간극수압의 측정 정밀도를 향상시키고 계측경로에 잔류하고 있는 기포를 제거하기 위해서는 삼축압축시험을 수행하기 전에 반드시 세라믹 디스크와 간극수압의 측정 경로를 포화시켜야 한다. 공시체를 삼축셀에 설치한 후, 소정의 구속압과 석션을 작용시켜 불포화토의 삼축압축시험을 수행하였다. 그림 7에 구속압 및 석션의 재하순서를 도식화하였다. 우선, 초기 구속압으로서 셀압력을 20kPa 작용시켰다. 공시체를 설치하고 초기 구속압을 작용시킨 단계(A점)에서는 간극공기압은 대기압으로 하였다. 공시체 제작 부분에서 언급한대로 이

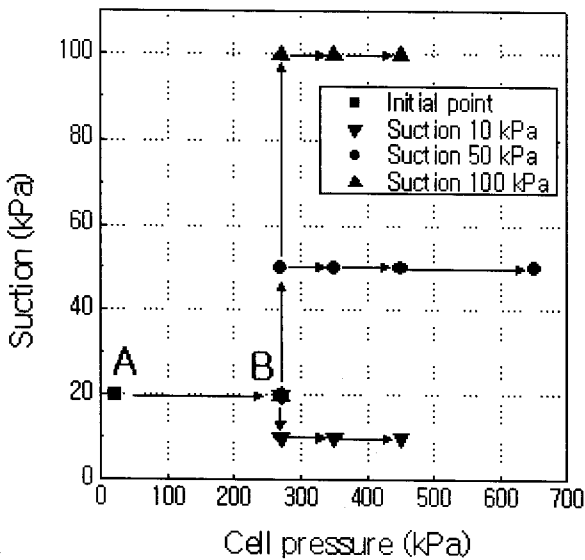


그림 7. 구속압 및 석션 재하순서

시점에서 공시체의 간극수압은 약 -20kPa로 측정되었다. 다음으로, 등방 응력상태를 유지하면서 셀압력과 간극공기압을 동시에 각각 270kPa, 250kPa까지 상승시켰다(B점). 이 상태에서 일정 시간 방치한 뒤 간극수압을 측정한 결과 약 230kPa로 나타나, 공시체가 가지는 초기 석션은 약 20kPa임을 알 수 있다. 이 상태가 배수/흡수과정의 초기 상태이며, 소정의 구속압과 석션을 작용시켜 본 실험을 수행하였다. 이상과 같이 간극공기압을 상승시켜 간극수압을 부압에서 정압으로 바꾼 이유는 보다 큰 석션을 부하하기 위함이다.

배수/흡수과정에서는 닫혀 있던 배수경로의 밸브를 열어 소정의 석션이 작용할 수 있도록 간극수압을 조절하였다. 즉, 간극공기압을 250kPa로 일정하게 하고, 간극수압을 조절하는 방법으로 공시체에 소정의 석션을 작용시켰다. 예를 들어 초기 석션이 10kPa일 경우, 간극수압을 240kPa로, 초기 석션이 50kPa일 경우, 간극수압을 200kPa로 조절하였다. 다음으로, 소정의 구속압이 작용할 수 있도록 셀압력을 조절하였다. 본 연구에서는 기준 셀압력을 450kPa로 하였고, 구속압의 영향을 알아보기 위하여 셀압력을 350kPa, 650kPa로 하여 실험을 수행하였다. 배수/흡수 과정 후, 배기·배수 조건에서 삼축압축시험을 수행하였다. 석션의 영향, 구속압의 영향을 파악하기 위하여, 다양한 석션 레벨 및 구속압을 변화시켜 배기·배수 삼축압축시험을 수행하였다.

#### 3.2 배수/흡수 과정에서의 역학거동

석션의 영향을 검토하기 위하여 구속압을 200kPa로 일정하게 하고, 초기 석션을 0, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150kPa로 다양하게 설정하여 실험을 수행하였다.

그림 8은 배수/흡수 과정에서 뷰렛으로 얻은 배수/흡수량을 나타내고 있다. 동일 석션에서의 배수/흡수량은 거의 동일하며, 공시체의 초기 석션인 약 20kPa보다 큰 석션을 작용시킨 경우는 배수거동을 보이며, 그 보다 작은 석션을 작용시킨 경우에는 흡수거동을 보임을 알 수 있다. 즉, 초기 간극수압 약 230kPa보다 작은 간극수압을 작용시킨 경우는 배수거동, 큰 간극수압을 작용시킨 경우는 흡수거동을 보였다. 또한, 배수량은 석션이 클수록, 흡수량은 석션이 작을수록 많았다.

그림 9는 체적변형률의 경시변화를 나타내고 있다. 초기 단계에서는 구속압의 상승에 의해 급격한 체적변형률이 발생하고 있다. 배수거동을 보이는 석션 20kPa

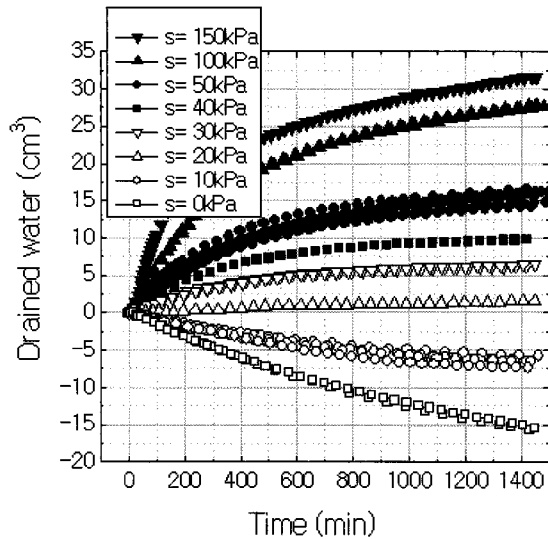


그림 8. 배수/흡수량

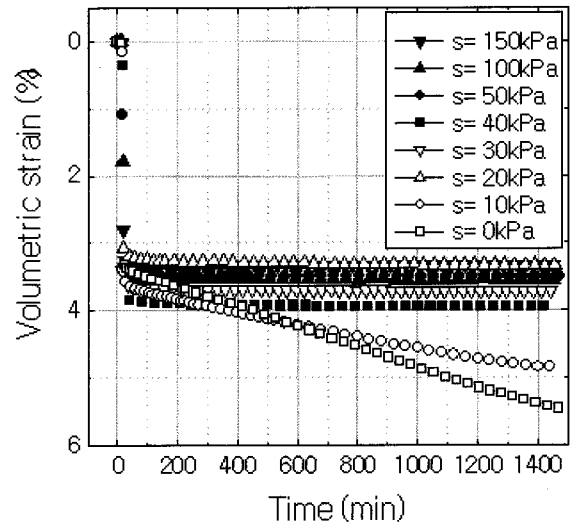


그림 9. 체적변형을 경시변화

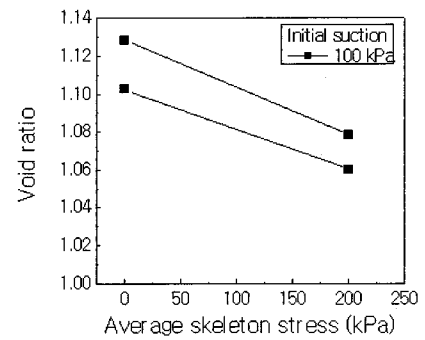
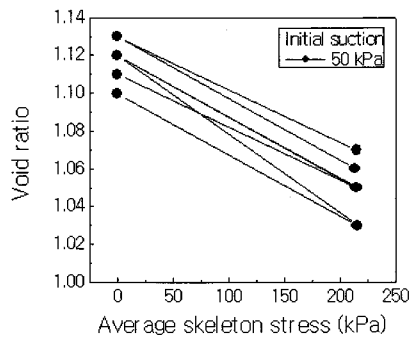
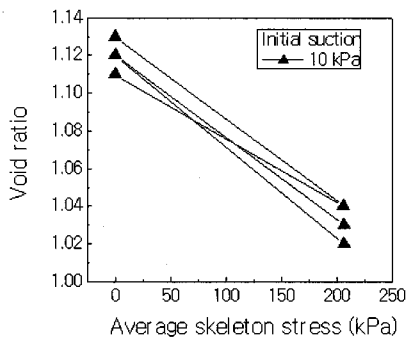


그림 10. 석선에 따른 간극비 변화

이상의 경우에는 체적변화가 거의 발생하지 않았으며, 흡수거동을 보이는 석선 0, 10kPa에서는 천천히 체적변형률이 증가하는 거동을 보였다. 이것은 초기 석선 약 20kPa부터 흡수에 의해 10kPa 또는 0kPa까지 석선이 해방되어, 체적압축(wetting collapse)이 발생하였다고 판단된다. 또한, 석선 0kPa로 24시간 방치한 후 포화도를 계측한 결과 70%로, 석선 0kPa도 불포화 상태이다.

그림 10은 배수/흡수 과정중의 석선 0, 50, 100kPa의 간극비와 평균골격응력과 관계의 관계를 나타내고 있다. 석선이 증가할수록 그 기울기는 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 석선의 증가와 함께 흙의 압축성이 감소함을 시사하고 있다.

### 3.3 전단과정에서의 역학거동

배수/흡수과정 후, 초기 석선 및 구속압을 다르게 하여 배기·배수 삼축압축시험을 수행하였다. 우선, 구속압을 200kPa, 변형률 속도를 0.05%/min로 일정하게 하

여 초기 석선을 0, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150kPa로 배기·배수 삼축압축 시험을 하여 초기 석선이 불포화토의 역학거동에 미치는 영향을 검토하였다.

그림 11의 축차응력과 축변형률 관계에서 알 수 있듯이, 초기 석선 0kPa과 10kPa에서는 차이가 나타나지 않았으나, 석선이 커질수록 동일 축변형률에 대해 축차응력이 커졌다. 또한, 축변형률 5%까지는 석선에 대한 영향이 매우 커서, 역학거동에 큰 차이를 나타내고 있었으나, 축변형률 10% 이상의 대변형률 영역에서는 석선에 따른 축차응력의 차이는 크게 나타나지 않았다. 그림 12는 미소변형률 영역에서의 축차응력과 축변형률 관계를 나타내고 있으며, 초기 강성은 석선에 매우 많이 의존하고 있음을 알 수 있다. 축변형률 0.05%에서 초기 강성을 비교해 보면, 석선 150kPa에서의 축차응력은 석선 0kPa의 축차응력 보다 약 2배정도 큰 값을 나타냈다.

그림 13은 체적변형률 및 배수량과 축변형률과의 관계를 나타내고 있다. 실선은 횡변위 계측시스템에 의해 계측한 체적변형률이며, 점선은 뷰렛으로 계측한 배수/



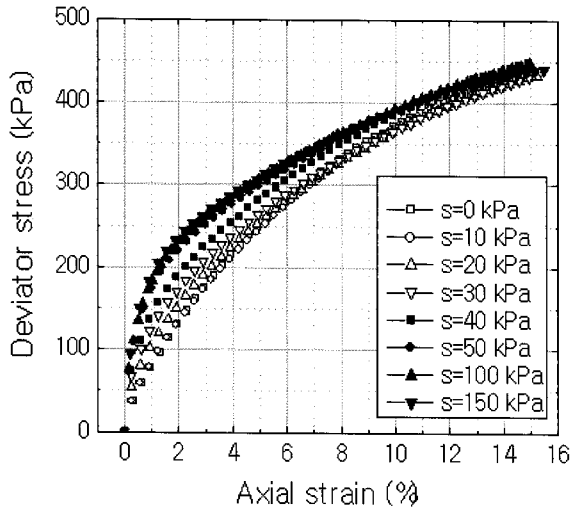


그림 11. 석선에 따른 응력-변형률 관계

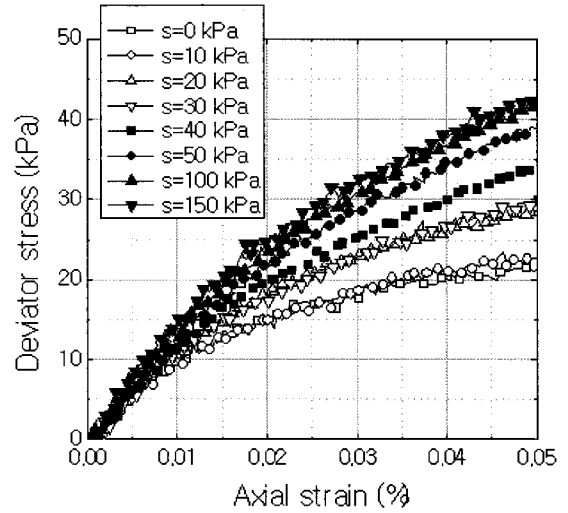


그림 12. 미소변형률 영역에서의 응력-변형률 관계

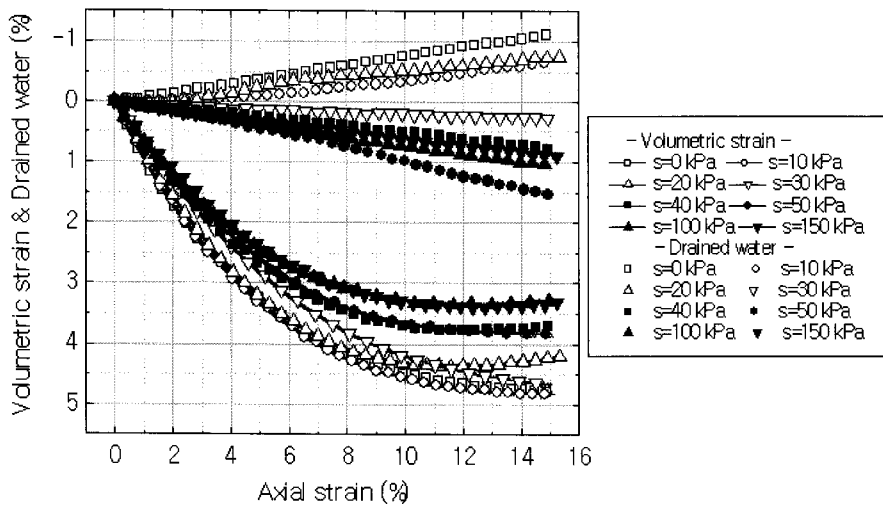


그림 13. 석선에 따른 체적변형률 및 배수량 거동

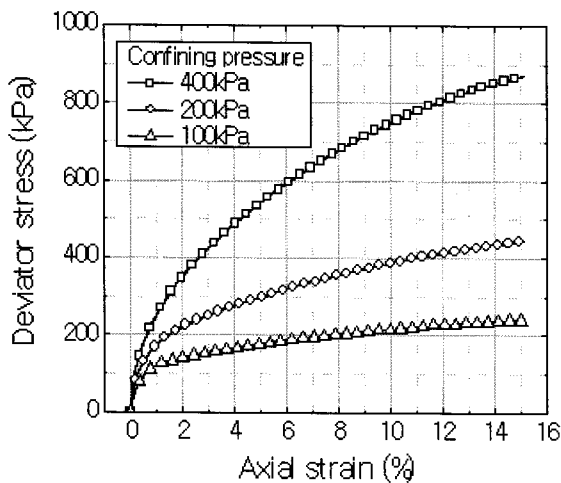


그림 14. 구속압에 따른 응력-변형률 관계

흡수량이다. 여기서 말하는 배수/흡수량이란 전체 체적에서의 배수/흡수량의 비율을 의미한다. 모든 석선에서

체적변형률은 압축거동을 나타내고 있으며, 전단이 진행됨에 따라 체적변형률이 증가하고 있다. 석선 0, 10, 20kPa에서는 축변형률 7% 부근까지 체적변형률이 거의 동일하나, 석선이 커질수록 체적변형률이 작게 나타났다. 즉, 전단중의 압축성이 작아짐을 의미한다. 다음으로 배수량과 축변형률의 관계에서 석선 0, 10, 20kPa에서는 흡수거동, 석선 30kPa 이상에서는 배수거동의 경향을 보이나, 석선과의 명확한 연관성은 보이지 않는다. 특이한 사실은 석선 0, 10, 20kPa의 경우, 전단 중에 체적이 압축함에도 불구하고 흡수거동을 보이는 것이며, 이것은 포화토의 역학거동에서는 볼 수 없는 현상이다. 이 거동이 생기는 원인으로 전단이 진행됨에 따라 흡입자 골격과 간극이 변화하여, 미시적인 관점에서 보면 공시체 내부의 수분특성이 변화하였기 때문이라고 판단된다.

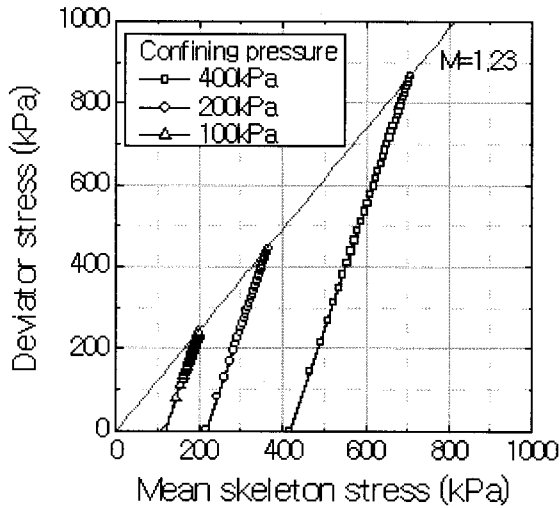


그림 15. 구속압에 따른 응력경로

다음으로, 구속압이 불포화토의 역학특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 초기 석선을 50kPa로 일정하게 하고, 구속압을 100, 200, 400kPa의 3종류로 변경하여 배기·배수 삼축압축시험을 수행하였다. 변형률 속도는 0.05%/min로 모든 시험에서 동일하다. 그림 14는 축차 응력과 축변형률의 관계를 나타내고 있으며, 구속압이 커질수록 동일 축변형률에 대한 축차응력이 커지는 경향을 보였다.

그림 15에는 구속압에 따른 응력경로를 나타내고 있다. 각각의 구속압에 있어서의 최종 응력점을 연결하면 동일 직선으로 원점을 통과하고 있으며 그 응력비(한계 상태)는 1.23이었다. 이러한 결과는 향후 불포화토의 역학거동을 예측 할 때(이론적 연구), 응력변수로서 평균 골격응력을 도입하면 보다 통일적인 표현이 가능함을 시사하고 있는 것이다.

그림 16에는 체적변형률 및 배수량과 축변형률과의 관계를 나타내고 있으며, 체적변형률, 배수량 어느쪽도 구속압 200kPa, 400kPa 에서는 동일한 값으로 구속압 100kPa과 비교하여 약간 큰 값을 보이고 있다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 체적변형률과 배수량은 구속압에 크게 의존하지 않으며, 초기 석선에 보다 많이 의존하고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 불포화토의 역학특성을 해명하기 위하여 우선, 포화용 삼축압축시험기를 개량하여 불포화 삼축압축시험이 가능하도록 하였다. 공시체의 체적변화

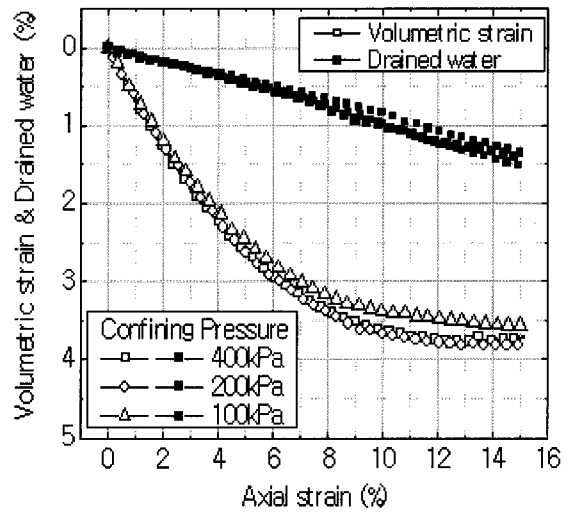


그림 16. 구속압에 따른 체적변형률 및 배수량 거동

는 4개의 횡변위 계측시스템을 이용하였으며, 그 정밀도는 사진해석을 통하여 검토하였다. 또한, 불포화실트의 역학거동 중 배수/흡수과정에서의 압축특성, 배기·배수 전단특성에 대하여 검토하였다.

본 연구를 통해 얻은 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 불포화용 삼축시험을 할 경우, 공기를 포함하는 공시체의 체적변화는 4개의 횡변위 계측시스템을 이용하여 측정 가능하며, 사진해석을 통해 그 정밀도를 검토한 결과, 축변형률이 10% 이하일 때 최대 0.5%의 측정 정밀도로 체적 변화량의 측정이 가능하였다.
- (2) 소정의 석선 및 구속압을 작용시키는 배수/흡수과정에서는 공시체의 초기 석선 보다 적은 석선을 작용시킬 경우, 흡수에 의한 체적압축(wetting collapse) 현상을 관찰 할 수 있었다. 또한, 평균골격응력으로 정리한 간극비 변화에서 석선이 증가와 함께 흡의 압축성이 감소하였다.
- (3) 배기·배수 삼축압축시험 결과 중 초기 석선이 다른 경우, 석선이 클수록 동일 축변형률에 대한 전단강도가 커지고, 체적변형률이 작아졌다. 또한, 전단에 따른 공시체 내부의 수분특성의 변화에 의해 초기 석선이 적은 경우에는 체적이 압축함에도 불구하고 흡수거동이 나타났다.
- (4) 평균골격응력(average skeleton stress)을 도입하여 응력경로를 정리 한 결과, 최종 응력점을 연결한 한계 상태선은 원점을 통과하는 동일 직선이었다. 즉, 불포화토의 역학거동을 모델링 할 경우, 평균골격응력을

활용하면 통일적인 표현이 가능할 것으로 판단된다.

(5) 배기·배수 삼축압축시험에서 구속압에 따른 체적변형을 및 배수량의 변화는 작고, 초기 석선에 보다 많이 의존하고 있었다.

본 논문에서는 초기 석선 및 구속압이 불포화토의 역학특성에 미치는 영향을 배기·배수 삼축압축시험 결과를 중심으로 검토하였다. 향후, 비배기 조건 등 다양한 경계조건하에서 불포화토의 역학특성을 해명 할 필요가 있으며, 불포화토의 이론적인 연구 및 불포화토의 전단강도 정수에 대한 연구도 함께 이루어져야 할 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구논문이 완성될 수 있도록 많은 협조와 의견교환을 해 주신, Meizou University의 KODAKA 교수, Kyoto University의 KIMOTO 교수에게 감사를 드립니다. 또한 실내실험을 함께 수행 해 준 Osaka City의 NISHIMATSU씨, Osaka Gas의 SUZUKI씨에게 진심으로 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Cui, Y. J. and Delage, P. (1996), "Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt", *Geotechnique*, 46(2), pp.291 -311.
2. Ehlers, W. (2003), "Continuum and numerical simulation of porous materials in science and technology", *Modeling and mechanics of granular and porous materials*, Chapter 9, pp.245-291.
3. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), "*Soil Mechanics for unsaturated soils*", A Wiley-Interscience Publication, pp.217-259.
4. Houlby, G. T. (1997), "The work input to an unsaturated granular material", *Geotechnique*, 47(1), pp.193-196.
5. Japanese Standards for Geotechnical and Geoenvironmental Investigation Methods-Standards and Explorations(2005), "Site investigation", Japanese Geotechnical Society. (in Japanese)
6. Jommi, C. (2000), "Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils", *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils*, Tarantio, A. and Mancuso, C eds., Balkema, pp.139-153.
7. Kim, YoungSeok(2005), "Elasto-viscoplastic Modeling and Analysis for Cohesive Soil Considering Suction and Temperature Effects", Doctoral Thesis, Kyoto University, Japan.
8. Kim, Y. S., Kimoto, S., Oka, F. and Kodaka, T.(2005), "Numerical simulation of triaxial compression behaviour of the unsaturated silt using an elasto-viscoplastic model", *Proceeding of the 11th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Torino, Italy, Giovanni Barla and Marco Barla eds., Bokokna, Vol.1, pp.361-368.

(접수일자 2007. 5. 8, 심사완료일 2007. 11. 10)