

## 불포화토의 삼축압축거동에 관한 실험적 연구

### Experimental Study on the Triaxial Compressive Behaviour of Unsaturated Soil

김영석<sup>1)</sup>, Young-Seok Kim, 오카 후사오<sup>2)</sup>, Fusao Oka, 조삼덕<sup>3)</sup>, Sam-Deok Cho

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Construction Technology

<sup>2)</sup> 교토대학 공학연구과 사회기반공학전공 교수, Professor, Dept. of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University.

<sup>3)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Construction Technology

**SYNOPSIS** : It has been recognized unsaturated soil behaviour playing an important role in geomechanics. 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 (i.e. non-contactable transducer) during various triaxial compression tests, which gave a realistic estimation in the volume changes of unsaturated soil sample. The measurement of volume changes were performed with 0.5% of the maximum error under the axial strain ratio of less than 10%. The experimental results have revealed that the mechanical behaviour of unsaturated soil can be significantly affected by the matric suction. During the shearing processes, the level of maximum deviator stress under the initial suction pressure of 50kPa was higher than that under the initial suction pressure of 10kPa. On the other hand, the volume changes became smaller under the increase in the initial suction pressure.

**Key words** : Suction, Compacted silt, Triaxial compression test, Unsaturated soil, Volume change

#### 1. 서 론

일반적으로 흙은 흙입자 및 간극을 채우고 있는 물과 공기로 구성되는 3상혼합체, 즉 불포화토이다. 실제로 우리 주변을 살펴보면, 산악지대 및 경사지의 안정문제, 흙댐 및 제방의 안정문제 등, 많은 지반 공학적 문제가 이러한 불포화토 지반을 대상으로 하고 있다. 또한, 최근 새로운 에너지원으로 주목을 받고 있는 메탄가스 개발에 따른 여러 문제들을 해결하기 위해서도 불포화 지반의 역학특성을 해명하여 예측 할 필요가 있다. 본 논문에서는 이러한 배경에서 불포화토의 역학특성을 파악하기 위한 삼축압축 시험을 수행하였다. 우선 포화 삼축압축시험기를 개량하여 불포화 삼축압축시험이 가능하도록 하였다. Polyflon 필터와 세라믹 디스크를 사용함으로써 간극 공기압과 간극수압의 측정경로를 분리하여 제어/측정하였으며, 공시체의 체적변화는 공시체와 직접 접촉하지 않은 4개의 측방변위 계측시스템(Proximeter) (Kim, 2004)을 이용하여 측정하였다. 4개의 측방변위 계측시스템의 측정 위치 및 정밀도에 대해서는 사진해석을 통하여 검토를 하였다. 또한, 새롭게 개량한 삼축압축시험기를 이용하여 불포화토의 역학거동 중 압밀 및 배기/배수 전단 특성에 대하여 검토하였다. 실험에 사용된 시료는 DL-Clay(상품명)이며, 다짐을 통하여 공시체를 제작하였다. 또한, 초기 석션(suction)으로 10kPa 및 50kPa을 주어 초기 석션의 변화에 따른 불포화토의 역학특성을 검토하였다.

## 2. 불포화용 삼축압축시험기

### 2.1 특징

포화토 시험과 달리 불포화토 시험에서는 간극공기압을 간극수압과 어떻게 분리하여 측정하며, 공기를 포함하는 공시체의 체적변화를 어떻게 측정할 것 인가가 매우 중요한 포인트이다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 공시체 상단부에 Polyflon 필터(ADVANTEC(주), PF020)를, 하단부에 세라믹 디스크(A.E.V. 300kPa)를 사용함으로써 간극공기압과 간극수압을 완전히 분리하여 제어/측정하였다. 또한, 공기를 포함하는 공시체의 체적변화를 4개의 측방변위 계측시스템을 이용하여 측정하였다(그림1). 공시체에 알루미늄 호일로 만들어진 표적(target)을 붙여 계측기와 표적 사이의 거리로 공시체의 변형을 감지하는 시스템이다. 공시체의 체적변형률은 식(1)과 같이 산정하였다.

$$\epsilon_v = \epsilon_a + 2\epsilon_r, \dots\dots\dots(1)$$

여기서,  $\epsilon_v$ 는 체적변형률,  $\epsilon_a$ 는 축변형률,  $\epsilon_r$ 는 측방변형률을 나타낸다. 본 연구에서 채택한 측방변위 계측시스템은 셀 밖에서도 측정위치(수평) 조절이 가능하여 비배기 시험과 같이 급격히 체적이 변하는 경우에도 적용이 가능하며, 공시체와 직접 접촉하지 않으므로 공시체의 변형을 구속하지 않는 것이 특징이다(Kim, 2004).

### 2.2 측방변위 계측시스템

우선, 측방변위계측 시스템의 측정위치에 대하여 검토를 하였다. 식(1)은 공시체가 균일하게 변형하는 경우 잘 일치하지만, 전단과정 중 공시체가 불균일하게 변형하는 경우에는 측방변위계측 시스템의 측정

위치에 따라 오차범위가 커지므로 최적의 측정위치를 사진해석을 통하여 결정하였다. 전단과정 중 셀 밖에 설치한 디지털 카메라를 이용하여 축변형률 0%, 5%, 10%, 15%의 각 단계에서 공시체 측면의 사진을 촬영하여, 3차곡선으로 표현하였다(사진1, 그림2). 그림3과 같이 각 단계의 3차곡선을 적분하여 계산한 값과 측방변위계측 시스템에서 구한 값을 비교하여 측정위치를 결정하였다. 그 결과 두 값의 차이가 최소가 되는 위치인 공시체 하단부로부터 각각 65mm, 15mm 떨어진 위치를 선정하였다( 1 참조). 또한 측방변위계측 시스템의 정밀도를 검토하였다. 포화토 시험의 경우 뷰렛으로 체적변화량

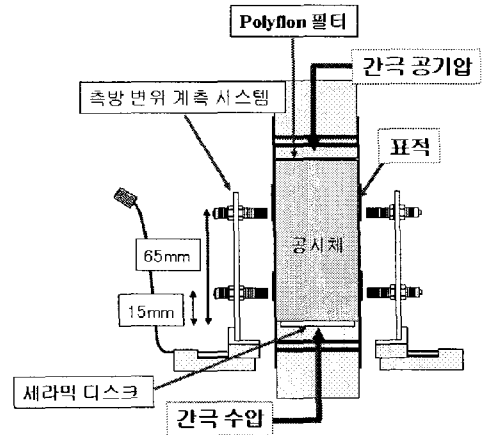


그림 1. 불포화용 삼축압축시험기 개요

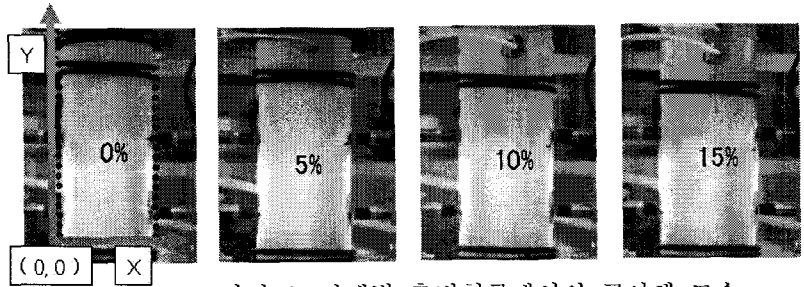


사진 1. 단계별 축변형률에서의 공시체 모습

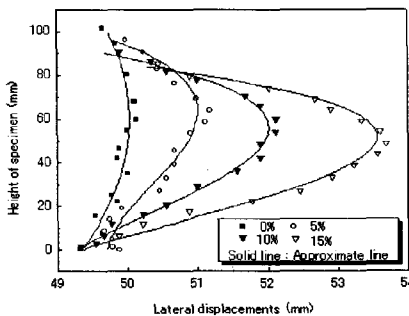


그림 2. 변형된 공시체측면의 3차곡선

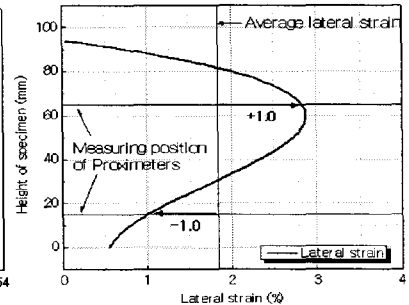


그림 3. 측정위치의 결정

을 직접 구할 수 있으므로, 포화토 시험의 결과와 측방변위계측 시스템의 체적 변화량을 비교하였다. 그림4는 포화 DL-Clay(상품명)의 압밀시험 결과를 나타내고 있다. 압밀과정 중 측방변위계측 시스템은 뷰렛으로부터 얻은 체적변형률과 큰 차이 없이 잘 일치하였으며, 오차범위 또한 최대 0.3%였다. 반면, 그림5의 전단과정 중의 결과를 보면 측변형률 10%이상에서 측정방법에 따라 체적변화량의 차이가 급격하게 나타남을 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, 측변형률 10%이하에서는 최대 0.5%의 측정 정밀도로 체적변화량 측정이 가능하였다.

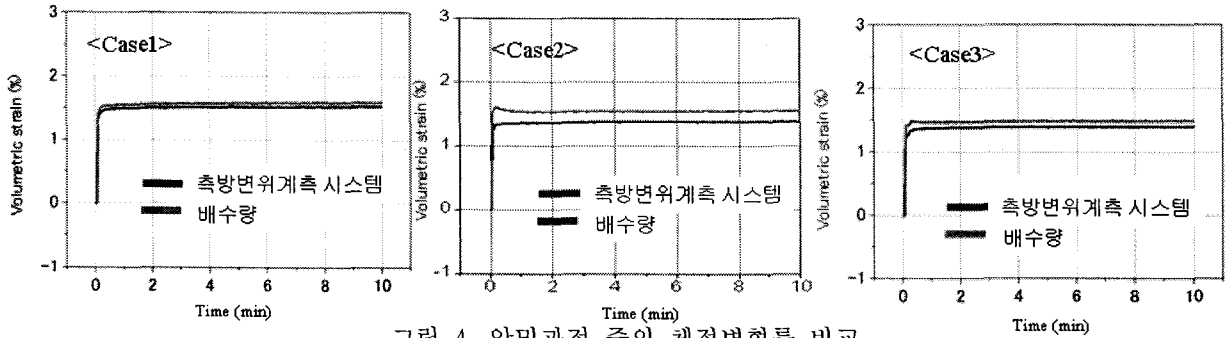


그림 4. 압밀과정 중의 체적변형률 비교

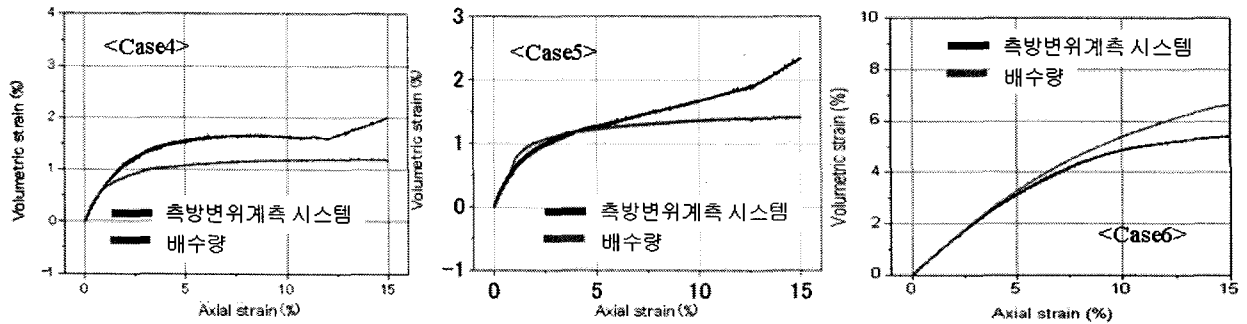


그림5. 전단과정 중의 체적변형률 비교

### 3. 불포화토의 삼축압축거동

#### 3.1 압밀시험

시험시료로는 실트분 함유량이 90%를 차지하며 균일한 입경을 가지는 DL-Clay(상품명)를 이용하였다. 공시체는 높이 100mm, 직경 50mm로 동적다짐을 통해 목표 간극비가 1.1이 되도록 만들었다. 표 1은 압밀시험 전의 공시체의 상태(평균) 및 시험조건을 나타내고 있다. 모든 실험 케이스에서 셀압력은 450kPa, 간극공기압을 250kPa로 일정하게 하고, 소정의 석션의 작용할 수 있도록 간극수압을 조절하여 압밀시험을 하였다. 그림6은 압밀과정 중의 간극비와 평균골격응력(Average skeleton stress)

과의 관계를 나타내고 있다. 여기서, 평균골격응력이란 흙골격과 그 간극을 흐르는 유체의 분응력으로부터 구해지는 평균 간극압에 의해 정의되는 응력이다(Ehlers 2004, Kim et al. 2005). 석션이 증가할수록 그 기울기는 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 석션의 증가와 함께 흙의 압축성이 감소함을 알 수 있다.

표 1. 공시체 초기상태 및 시험조건

초기석션 $s$ (kPa)	10	50	100
초기간극비 $e$	1.12	1.12	1.11
초기포화도 $S_r$ (%)	46.04	45.98	46.42
셀압력 $\sigma_3$ (kPa)	450		
간극공기압 $u_a$ (kPa)	250		
간극수압 $u_w$ (kPa)	240	200	150

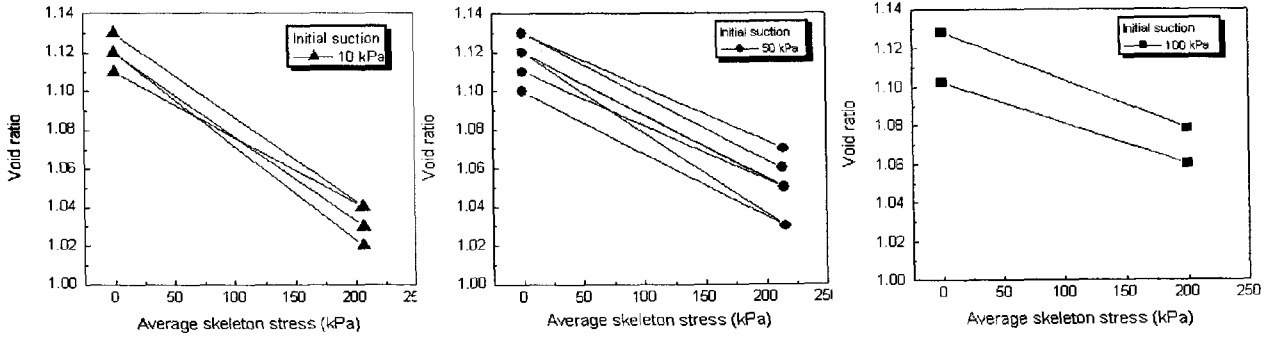


그림 6. 압밀과정 중 간극비 변화(초기석션 10, 50, 100kPa)

### 3.2 배기/배수 시험

압밀과정 후 배기/배수 조건으로 초기석션 10kPa과 50kPa에 대하여 삼축압축시험을 하였다. 시험은 변형률 제어로 변형률속도가 0.05%/min로 일정하게 하여 축변형률이 15%까지 실험을 하였다. 전단시험 전의 포화도는 약 60%(석션 10kPa) 및 약 30%(석션 50kPa)이었다. 그림 7은 응력-변형률 관계를 나타내고 있으며, 석션이 커질수록 최대축차응력이 커짐을 알 수 있다. 반면 그림 8의 체적변화에서는 석션이 커질수록 적은 체적변형률이 발생하였다.

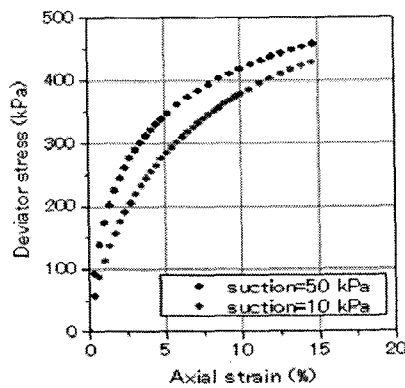


그림 7. 응력-변형률 관계

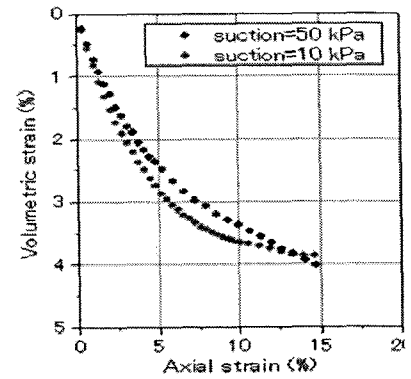


그림 8. 체적변화

### 4. 결론

본 논문에서는 포화용 삼축압축시험기를 개량하여 불포화 삼축압축시험이 가능하도록 하였다. 공시체의 체적변화에 대해서는 4개의 측방변위계측 시스템을 이용하였으며, 사진해석을 통해 검토한 결과, 축변형률이 10%이하일 때 최대 0.5%의 측정 정밀도로 체적 변화량 측정이 가능하다는 결과를 얻었다. 또한, 불포화토의 역하거동 중 압밀 및 배수전단 특성에 대하여 검토하였다. 압밀과정 중에는, 석션의 증가와 함께 흙의 압축성이 감소하였으며, 전단과정 중에는 석션이 클수록 최대축차응력이 커졌으며, 체적 변형률은 작게 나타났다.

### 참 고 문 헌

1. 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.
2. Kim, Y. S. (2004), "Elasto-viscoplastic modeling and Analysis for Cohesive Soil Considering Suction and Temperature Effects", Doctoral thesis, Kyoto University.
3. 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", Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Torino, Italy, Giovanni Barla and Marco Barla eds., Bolocna, Vol. 1, pp.361-368.