

다양한 경계조건에서의 불포화 실트의 삼축압축 거동 Triaxial Compressive Behaviour of Unsaturated Silt under Different Drainage Conditions

김영석¹⁾, YoungSeok KIM, 오카 후사오²⁾, Fusao OKA

¹⁾한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Disaster and Environment Research, Korea Institute of Construction Technology

²⁾교토대학 공학연구과 사회기반공학전공 교수, Professor, Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University

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. Various triaxial compression tests for unsaturated soil under different drainage conditions are carried out. The behaviour of the pore pressure, namely, the pore-air pressure and the pore-water pressure, and matric suction during the shearing tests are investigated. The experimental results have revealed that the mechanical behaviour of unsaturated soil can be significantly affected by the matric suction.

Key words : matric suction, compacted silt, triaxial compression test, unsaturated soil

1. 서론

일반적으로 흙은 흡입자 및 간극을 채우고 있는 물과 공기로 구성되는 3상혼합체, 즉 불포화토이다. 실제로 우리 주변을 살펴보면, 산악지대 및 경사지의 안정문제, 흩댐 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 역학 특성을 해명하고 예측 할 필요가 있다.

현재까지의 대부분의 불포화토 연구에서는 배기/배수 상태에서의 석션의 영향을 검토하고 있으며 (e.g., Fredlund and Rahardjo, 1993, Miller et al., 2006), 비배기 상태 등과 같이 실제의 지반내에서의 응력분담에 대해서는 명확하게 밝혀지지 않은 상태이다. 이러한 배경에서 본 논문에서는 불포화토의 역학특성을 파악하기 위하여 다양한 경계조건에서 삼축압축시험을 수행하여 검토하였다. 불포화 삼축압축시험에서는 Polyflon 필터와 세라믹 디스크를 사용하여 간극 공기압과 간극수압의 측정경로를 각각 분리하여 제어/측정하였으며, 공시체의 체적변화는 공시체와 직접 접하지 않은 4개의 측방변위 계측시스템을 이용하여 측정하였다. 등방응력 조건하에서 압밀시험을 한 후, 배기/배수, 비배기/비배수, 정체적/비배수 등과 같은 전단시험을 실시하여 경계조건에 따른 불포화토의 역학특성 및 간극공기압과 간극수압의 거동에 대하여 고찰하였다

2. 불포화 삼축압축시험

2.1 특징

포화도 시험과 달리 불포화도 시험에서는 간극공기압을 간극수압과 어떻게 분리하여 측정하며, 공기를 포함하는 공시체의 체적변화를 어떻게 측정할 것인가가 매우 중요한 포인트이다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 공시체 상단부에 Polyflon 필터(ADVANTEC(주), PF020)를, 하단부에 세라믹 디스크(A.E.V. 300 kPa)를 사용함으로써 간극공기압과 간극수압을 완전히 분리하여 제어/측정하였다. 또한, 공기를 포함하는 공시체의 체적변화를 4개의 측방변위 계측시스템을 이용하여 측정하였다(그림1). 본 연구에서 채택한 측방변위 계측시스템은 셀 밖에서도 측정위치(수평) 조절이 가능하여 비배기 시험과 같이 급격히 체적이 변하는 경우에도 적용이 가능하며, 공시체와 직접 접하지 않으므로 공시체의 변형을 구속하지 않는 것이 특징이다 (김영석과 오카후사오, 2008).

또한, 비배기 조건과 같이 간극공기압을 보다 정확하게 측정하기 위하여 사진 1과 같이 공시체 상부의 캡에 간극공기압계 및 공기작동식 밸브를 부착하여 셀내에서 계측할 수 있도록 하였다. 여기서 공기작동식 밸브란 공기압에 의하여 공기압 경로를 제어할 수 있는 장치로 비배기 시험시에 셀밖에서 밸브를 제어하여 간극공기압의 출입을 완전히 차단할 수 있다 (Kim, 2004).

2.2 시험시료 및 시험개요

시험시료는 실트분 함유량이 90 %를 차지하며 균일한 입경을 가지는 DL-Clay(상품명)를 이용하였다. 공시체는 높이 100 mm, 직경 50 mm로 동적다짐을 통해 목표 간극비가 1.1이 되도록 만들었다. 모든 실험 케이스에서 셀압력은 450 kPa, 간극공기압을 250 kPa로 일정하게 하고, 소정의 석션(10 kPa, 50 kPa)이 작용할 수 있도록 간극수압을 조절하여 24시간의 배수/흡수과정을 거친 후에 삼축압축시험을 하였다. 시험은 변형률 제어로 변형률 속도를 0.5 %/min로 일정하게 하여 축변형률이 15 %까지 수행하였다.

2.3 응력변수

본 논문에서 사용하고 있는 응력변수는 평균골격응력(Average skeleton stress)이다. 평균골격응력이란, 다공질모체이론(Theory of porous media, TPM)(Ehlers, 2003, Kim et al., 2005)을 바탕으로 기체(공기)와 액체(물)를 하나의 유체로 보고, 흡골격과 그 간극을 흐르는 유체의 분응력(Partial stress)으로부터 구해지는 평균간극압(Averaged pore-pressure)에 의해 정의되는 응력이다.

$$\sigma''_{ij} = \sigma_{ij} - P^F \delta_{ij} \quad \dots (1) \quad P^F = (1 - S_r)u_a + S_r u_w \quad \dots (2)$$

여기서, σ''_{ij} 은 평균골격응력텐서, σ_{ij} 는 전응력텐서, P^F 는 평균간극압, δ_{ij} 는 Kronecker의 델타, S_r 은 포화도, u_a 는 간극공기압, u_w 는 간극수압을 나타낸다.

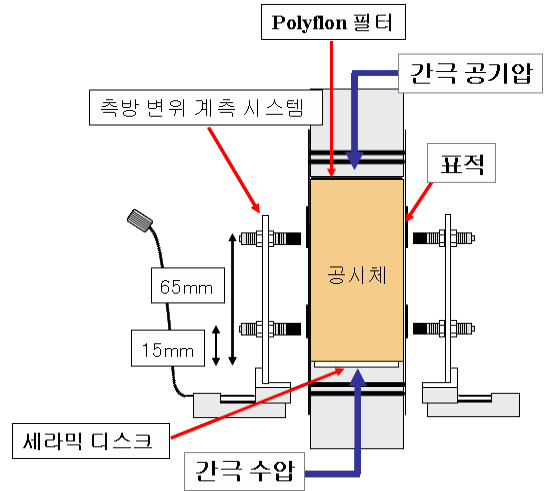


그림 1. 불포화 삼축압축시험기 개요

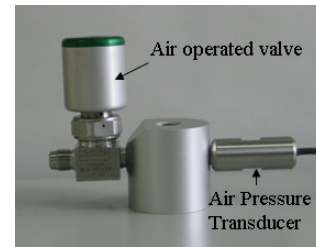


사진 1. 간극공기압 계측 및 제어 밸브

3. 불포화토의 삼축압축거동

3.1 배기/배수 시험

배수/흡수과정(압밀단계) 후, 초기석션 10 kPa과 50 kPa로 배기/배수 삼축압축시험을 실시하였다. 그림 2의 축차응력과 축변형률 관계에서 알 수 있듯이, 석션이 커질수록 동일 축변형률에 대해 축차응력이 커졌다. 그림 3은 체적변형률 및 배수량과 축변형률과의 관계를 나타내고 있다. 실선은 축방변위 계측시스템에 의해 계측한 체적변형률이며, 점선은 뷰렛으로 계측한 배수/흡수량이다. 여기서 말하는 배수/흡수량이란 전체 체적에서의 배수/흡수량의 비율을 의미한다. 모든 석션에서 체적변형률은 압축거동을 나타내고 있으며, 전단이 진행됨에 따라 체적변형률이 증가하고 있으며, 석션이 커질수록 체적변형률이 작게 나타났다. 즉, 전단중의 압축성이 작아짐을 의미한다. 다음으로 배수량과 축변형률의 관계에서 석션 10 kPa에서는 흡수거동, 석션이 50 kPa에서는 배수거동의 경향을 보이고 있다. 석션이 10 kPa의 경우, 전단과정 중에 체적이 압축함에도 불구하고 흡수거동을 보이는 것이며, 이것은 포화토의 역학거동에서는 볼 수 없는 현상이다.

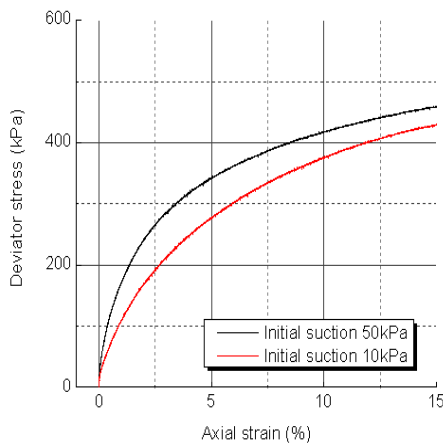


그림 2. 응력-변형률 관계(배기/배수)

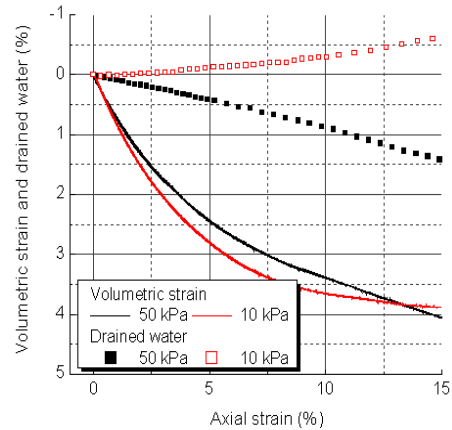


그림 3. 체적 및 배수/흡수량 변화 (배기/배수)

3.2 비배기/비배수 시험

비배기/비배수 삼축압축시험이란 전단과정 중 간극유체와 흙골격과의 상호작용 등의 역학거동을 파악하기 위하여 전단과정중 공기의 흐름과 물의 흐름을 완전히 차단하여 실시하는 시험이다. 포화토의 비배수시험과 다른점은 간극공기압의 압축을 허용함으로 시험 중에 공시체의 체적이 변한다는 것이다. 그림 4~그림 8은 초기석션 10, 50 kPa의 공시체를 가지고 실시한 비배기/비배수 삼축압축시험의 결과를 나타내고 있다. 그림 4의 응력-변형률 관계를 보면, 초기석션이 클수록 초기강성 및 최대축차응력이 커짐을 알 수 있다. 그림 5의 응력경로에서는 석션이 클수록 동일 축차응력에 대한 평균골격응력의 감소량이 적었다. 또한, 각각의 석션에서 최종 응력점을 연결한 한계 상태선은 동일직선이 되었으며, 그 기울기(파괴응력비)는 약 1.23이었다. 그림 6의 간극공기압 거동을 보면, 석션이 작을수록, 동일 축변형률에 대한 간극공기압은 커졌다. 반면, 그림 7의 간극수압 거동에서는 전단초기에는 급격하게 간극수압이 상승하였으나, 그 이후 일시적으로 감소한 다음 증가하는 경향을 나타내었다. 공시체가 비교적 느슨한 구조이므로 전단시험 개시와 함께 흙골격이 급격하게 압축되어 간극수압이 증가하였고, 간극공기의 존재로 인해 그 경향이 완화되어 감소한 것으로 생각된다. 그림 8의 석션의 변화를 보면, 전단시험과 함께 석션이 급격히 감소한 후 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 최종적으로는 석션 10 kPa에서는 완화한 증가경향, 석션 50 kPa에서는 서서히 감소하는 경향을 나타내었다. 초기에 석션이 감소한 이유로는 간극공기압이 천천히 증가하는 것에 비해 간극수압이 급격히 증가하였기 때문이라고 생각된다.

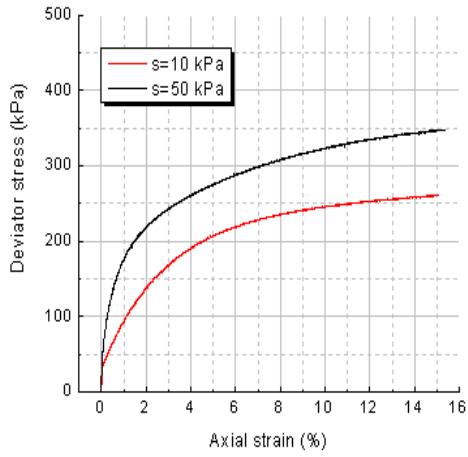


그림 4. 응력-변형률 관계 (비배기/비배수)

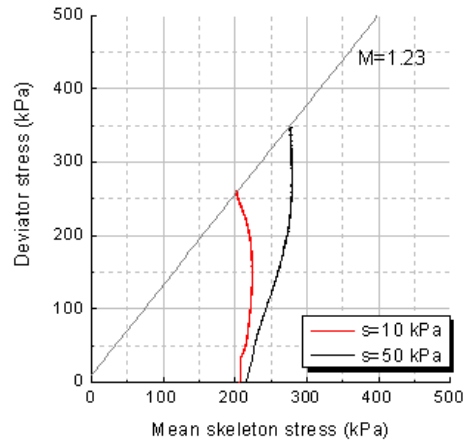


그림 5. 응력경로 (비배기/비배수)

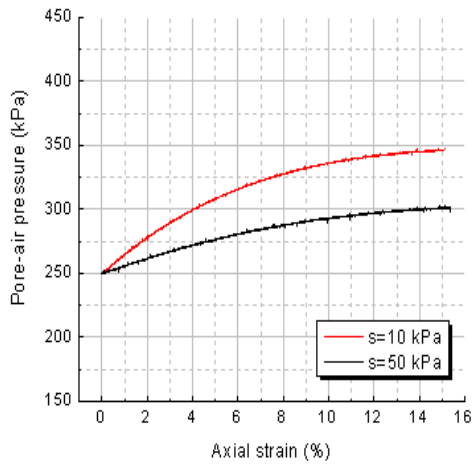


그림 6. 간극공기압 변화 (비배기/비배수)

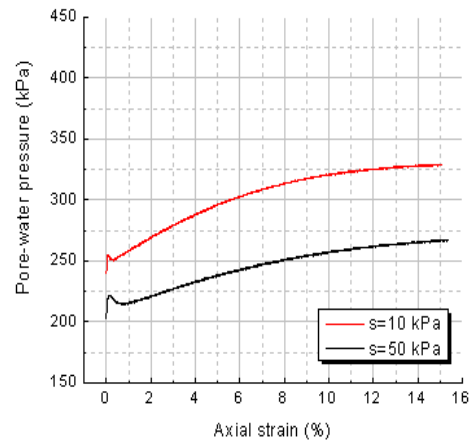


그림 7. 간극수압 변화 (비배기/비배수)

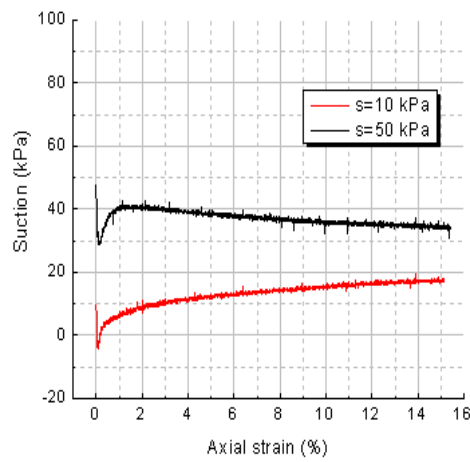


그림 8. 석션 변화 (비배기/비배수)

3.3 정체적/비배수 시험

정체적/비배수 삼축압축시험이란 공시체 상부로부터 공기압을 공급하여 전단과정 중 체적변화가 발생하지 않도록 제어하는 시험이다. 포화토의 비배수 시험과 같이 시험 중에 공시체의 체적이 변하지 않는 것이 특징이다 (그림 9 참조). 그림 10과 11은 응력-변형률 관계 및 응력경로를 나타내고 있다. 석션의 증가함에 따라 축차응력이 커지고 있으며, 동일 축차응력에 대한 평균골격응력의 감소량이 적게 나타났다. 그러나, 다른 시험결과와 비교해 최대 축차응력이 매우 작게 나타남을 알 수 있다. 그림 12와 13은 전단과정 중 간극유체의 거동을 나타내고 있다. 간극공기압은 축변형률 1% 단계에서 급상승하고 있으며, 간극수압은 간극공기압의 상승과 함께 상승하고 있음을 알 수 있다.

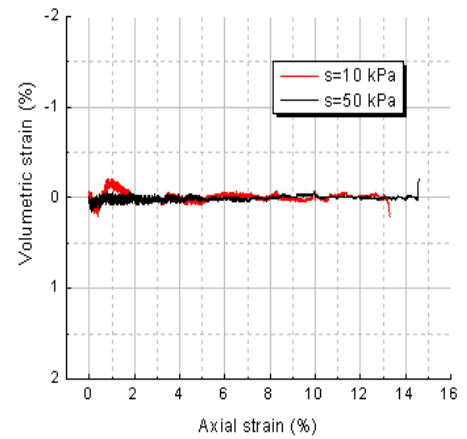


그림 9. 체적변화 (정체적/비배수)

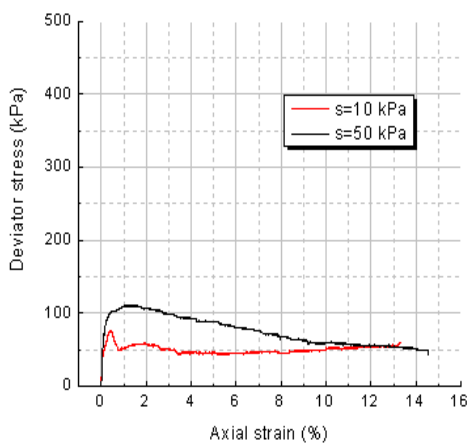


그림 10. 응력-변형률 관계 (정체적/비배수)

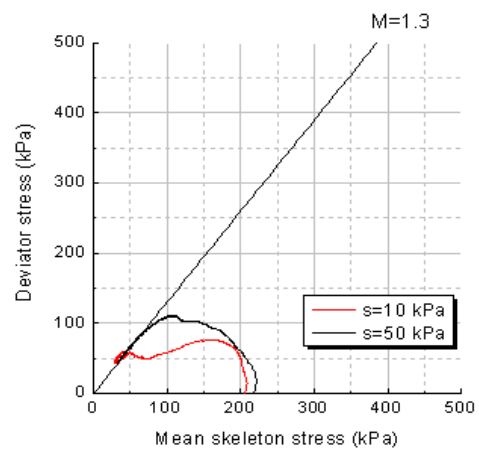


그림 11. 응력경로 (정체적/비배수)

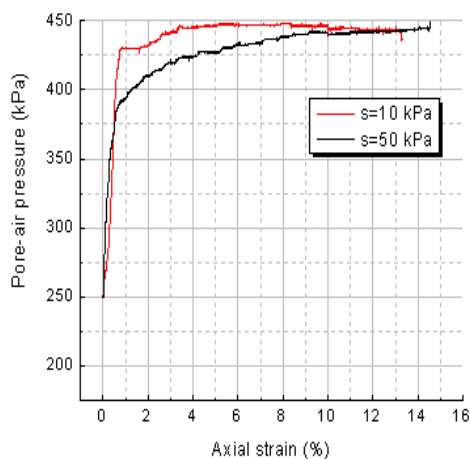


그림 12. 간극공기압 변화 (정체적/비배수)

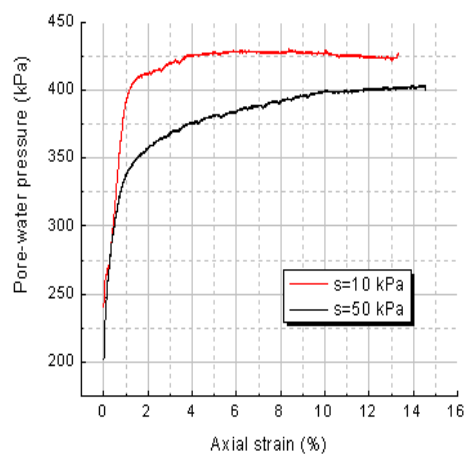


그림 13. 간극수압 변화 (정체적/비배수)

4. 결론

본 논문에서는 배기/배수, 비배기/비배수, 정체적/비배수 시험을 실시하여 경계조건에 따른 불포화토의 역학특성 및 간극공기압과 간극수압의 거동에 대하여 검토하였다.

본 연구에서 통해 얻은 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 경계조건에 상관없이 모든 시험에서 초기 석션이 클수록 최대축차응력이 크게 나타났다.
- (2) 비배기/비배수 시험 및 정체적/비배수 시험에서는 전단과정 중 간극유체(간극공기압, 간극수압)의 거동을 검토 할 수 있었다.
- (3) 비배기/비배수 시험의 간극수압 거동에서 전단초기에 급격하게 간극수압이 상승하였으나, 그 이후 일시적으로 감소한 다음 증가하는 불포화 특유의 거동을 나타내었다. 이는 공시체가 비교적 느슨한 구조이므로 전단시험 개시와 함께 흙골격이 급격하게 압축되어 간극수압이 증가하였고, 간극공기의 존재로 인해 그 경향이 완화되어 감소한 것으로 생각된다.
- (4) 정체적/비배수 시험에서 얻은 응력-변형률 관계는 다른 시험결과와 비교해 최대 축차응력이 매우 작게 나타났다.

참고문헌

1. 김영석, 오사후사오 (2008), “ 다양한 석션 레벨에서의 불포화토의 삼축압축거동에 관한 실험적 연구, 한국지반공학회 논문집, 제24권 1호, pp.1-11.
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.
4. Kim, Y. S. (2004), "*Elasto-viscoplastic modeling and Analysis for Cohesive Soil Considering Suction and Temperature Effects*", Doctoral Thesis, Kyoto University.
5. 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 11th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Torino, Italy, Giovanni Barla and Marco Barla eds., Bolocna, Vol. 1, pp.361-368.
6. Miller, G. A., Zapata, C. E., Houston, S. L., and Fredlund, D. G. (2006), "*Unsaturated Soils*", Geotechnical Special Publication No. 147, ASCE.