

다짐된 고령토의 불포화 전단강도특성

Unsaturated Shear Strength Characteristics of Compacted Natural Kaolin

태두형¹⁾, Doo-Hyung Tae, 박성완²⁾, Seong-Wan Park, 권홍기¹⁾, Hong-Ki Kwon

¹⁾ 단국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Dankook University

²⁾ 단국대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Dankook University

SYNOPSIS : Unsaturated compressive tests are performed to evaluate the effect of matric suction on the strength and the deformation characteristics for statically compacted natural kaolin in Korea. Under different conditions of the initial degree of saturation in kaolin, the relationship between suction and the degree of saturation at failure can be expressed by unique soil-water characteristic curve. These results demonstrate that the newly established constant water content type unsaturated shear strength test equipment can be used for estimating the relationship between suction and the compressive strength.

Keywords : Unsaturated soil, Shear strength, Compressive test, Compacted natural kaolin

1. 서론

불포화토의 전단강도를 이용하여 설계할 경우 포화토의 전단강도를 이용하였을 때보다 경제적인 설계가 가능해진다. 제방을 건설할 경우 지반재료의 포화도에 적합한 밀도를 사용하여야 한다거나 지반을 굴착할 때 흙의 간극수압이 발생되어지는 경우 등은 불포화토개념으로 설명할 수 있다. 그러나 불포화 전단강도는 직접적인 시험결과 보다는 여러 제안식에 의해 추정되어지고 있는 실정이다.

본 연구는 직접 불포화 전단시험기를 이용하여 자연 상태 국내 고령토를 대상으로 다짐상태에서의 불포화전단강도 특성을 살펴보았다.

2. 불포화 전단강도

불포화 지반재료는 부(-)의 간극수압을 가지며, 이에 의해 유효응력이 비선형적으로 증가한다. 불포화 전단강도를 결정하는 방법은 유효응력 접근법과 독립상태변수(independent state variable)를 사용한 접근법이 있다(Fredlund and Rahardjo, 1993). Bishop & Blight(1963)는 유효응력의 비선형적 증가를 나타내기 위한 방법으로 다음 식(1)과 같이 계수 χ 를 사용하고 있다.

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

여기서, σ' : 불포화토의 유효응력 σ : 전응력
 u_a : 간극공기압 u_w : 간극수압
 χ : 유효응력계수 ($0 \leq \chi \leq 1$)

한편 Fredlund & Morgnster(1978)은 포화 시 전단강도로부터 서로 독립적인 상태변수인 순연직응력($\sigma_n - u_a$)과 모관흡수력($u_a - u_w$)을 사용하여 불포화 전단강도 식(2)를 제안하였다.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

여기서, c' : 유효점착력 ϕ' : 순연직응력에 대한 유효마찰각
 u_a : 파괴면의 간극공기압 ϕ^b : 모관흡수력에 대한 겉보기 마찰각
 u_w : 파괴면의 간극수압

이후에 여러 연구들이 직접 실험을 통한 방식이 기술적인 문제와 상당한 시간이 소요되는 관계로 보다 효율적인 적용을 위하여 Fredlund(1978)가 제안한 식을 확장형태의 예측식으로 제안하였는데 이중에 Vanapalli 등(1996)이 대표적이다.

3. 불포화 강도시험

본 연구에서 불포화 강도시험을 위한 시료는 경상북도 성주군의 자연 상태 고령토로 기본물성은 <표 1>과 같다. 자연상태인 관계로 실트질 점토로 분류되며 낮은 소성지수를 가지고 있어 일정 다짐 상태가 아니면 느슨한 상태를 유지한다.

표 1. 기본물성

구분	USCS	No.200체 통과량(%)	LL	PL	G_s	OMC (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m^3)
고령토	ML	83.48	37.7	32.6	2.534	24.8	14.7

시료는 10번체(2.0mm)에 모두 통과한 것으로, 건조단위중량을 $14.7kN/m^3$ 으로 함수비를 10~25%의 범위로 시료를 제작하였다. 시료는 직경 50mm, 높이 100mm의 몰드를 이용하여 3층의 정적다짐을 하였다. 제작한 시료는 밀봉하여 항온항습의 상태로 하루 동안 거치 후 각각 시험을 실시하였다.

<그림 1>과 같은 불포화 압축셀 장비를 이용하였다. 본 시험장비는 일정함수비 상태의 불포화 시료를 대상으로 전단시험을 할 수 있도록 제작한 시험기이다. 시험시 활용한 세라믹디스크는 500kPa의 공기압입값을 갖는 것으로 간극수압계와 연결이 되어 시료의 흡수력, Suction을 측정한다. 로딩캡은 금속으로 된 다공판으로 공기튜브와 연결이 되어 있어 시료의 간극공기를 대기와 연결시켜준다. 셀 내부는 물로 채워져 이중관 뷰렛에 연결되어 있고 부피변화를 측정한다. 물로 인한 구속압은 이중관뷰렛으로 대기와 연결해 줌으로서 최소화 시켜준다. 시험에 사용되어지는 모든 물은 탈기과정을 거친 탈기수(De-air water)를 사용한다.

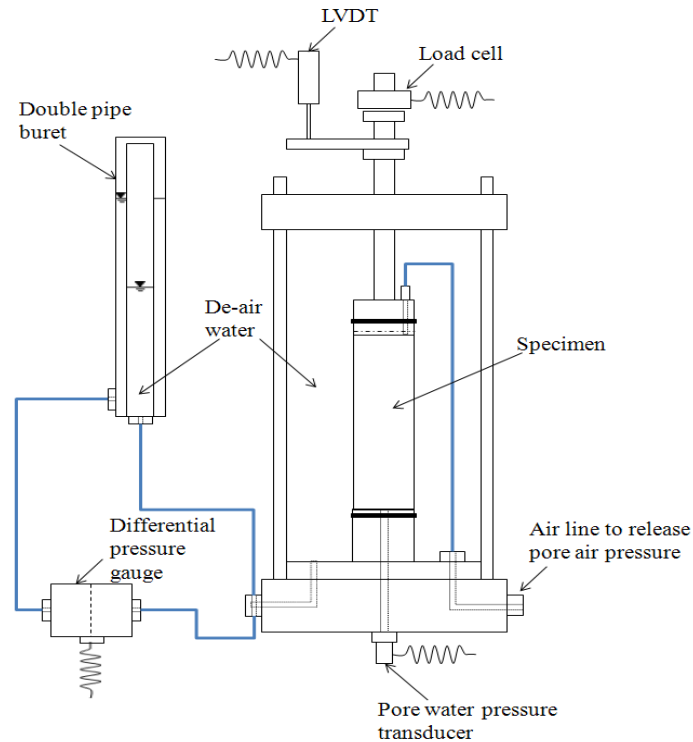


그림 1. Contant Water Content 상태 불포화 압축시험 장비 모식도

본 시험을 위하여 시료의 함수비는 일정하고 부피변화에 따라 간극공기의 출입만 있는 비배수-배기의 방식 수행되었으며 0.1mm/min의 전단속도로 수행한다. 압축시험을 수행하는 동안 하중, 간극수압, 변위, 그리고 이중관뷰렛에 연결되어있는 차압센서 등 네 개의 센서에서 각각 측정한다. 따라서 부피변화에 의한 간극비의 변화와 그에 따른 포화도의 변화를 알 수 있다.

4. 시험결과

그림 2는 초기포화도, $S_{r,i}$ 별 축 변형률, ϵ_a 에 따른 축 응력, q_u 의 변화를 나타낸 그래프이다. 각 초기 포화도의 침투응력 값을 압축강도라 하였다. 그림 3은 초기포화도, $S_{r,i}$ 에 따른 압축강도, q_u 의 변화를 나타낸 그래프이다. 초기포화도가 증가함에 따라 압축강도가 증가하다가 최고 강도를 보이고 다시 감소하는 것을 볼 수 있다. 건조 상태로 포화도 33%에서 다짐된 고령토의 경우 최대 강도를 나타내고 있다. 이는 시료가 어느 정도의 밀도 효과와 입자간 간극수에 의하여 발생하는 접촉응력을 가지고 있을 때 최고 강도를 가지게 되고, 그것보다 더 건조하거나 습윤할 때 상대적으로 작은 강도를 가진다는 것을 알 수 있다. 대부분의 경우 5% 정도의 축변형률에서 한계상태를 보이고 있다.

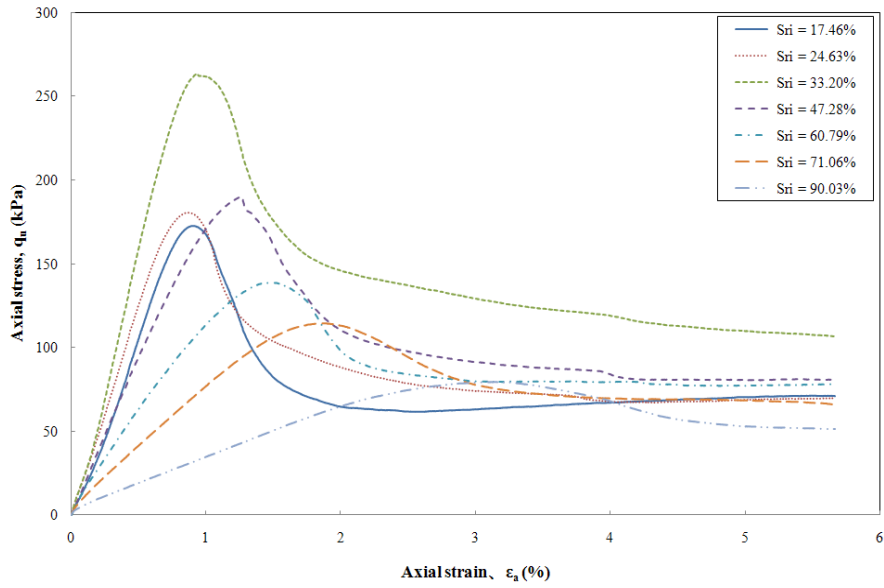


그림 2. 축 변형률에 따른 축 응력 곡선

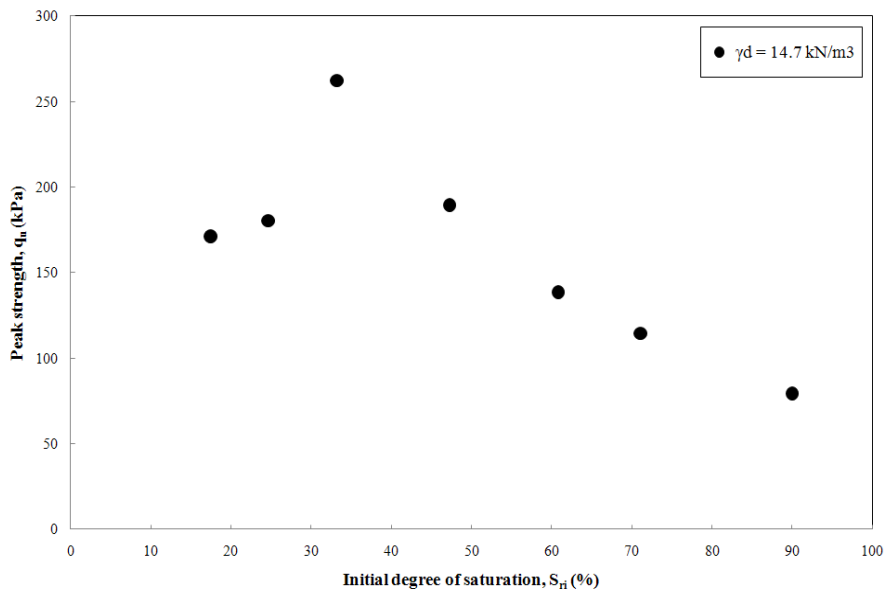


그림 3. 초기포화도에 따른 압축강도

그림 4는 초기포화도, S_{ri} 에 따른 변형계수, E_{50} 의 변화를 나타낸 그래프이다. 변형계수의 경향은 압축강도의 경향과 동일하여 불포화 강도와 강성도의 변화가 비슷함을 알 수 있다.

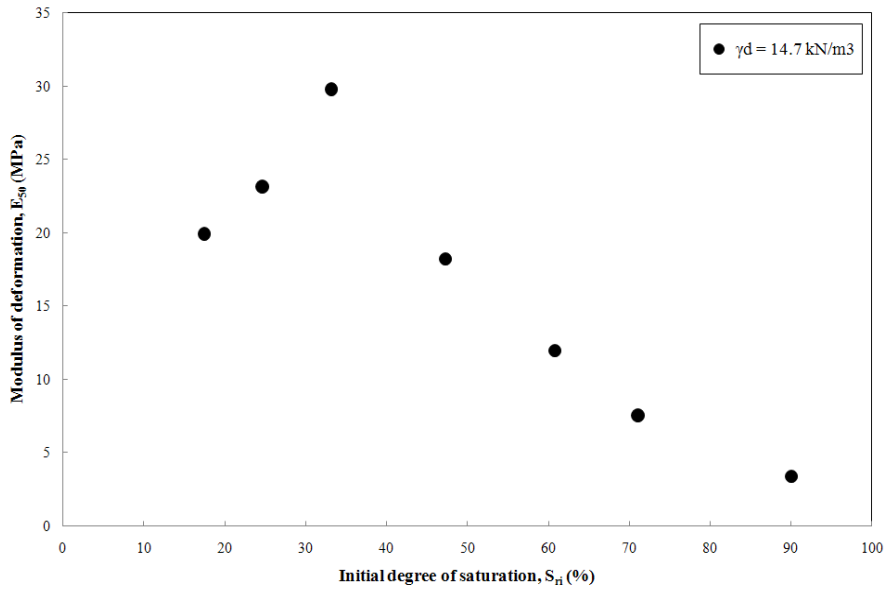


그림 4. 초기포화도에 따른 변형계수, E_{50}

그림 5는 축 변형률, ϵ_a 에 따른 부피 변형률, ϵ_v 의 관계를 나타낸 그래프이다. 부피 변형률을 통하여 시료의 간극비의 변화와 그에 따른 시료의 포화도의 변화를 알 수 있다. 금번 시험의 경우 매우 낮은 범위의 구속압 조건(3kPa) 에서 시험이 실시된 관계로 추후 다양한 구속압조건에서의 시험결과를 통하여 밀도와 구속압의 효과, 그리고 포화도와의 관계를 규명할 수 있을 것이다.

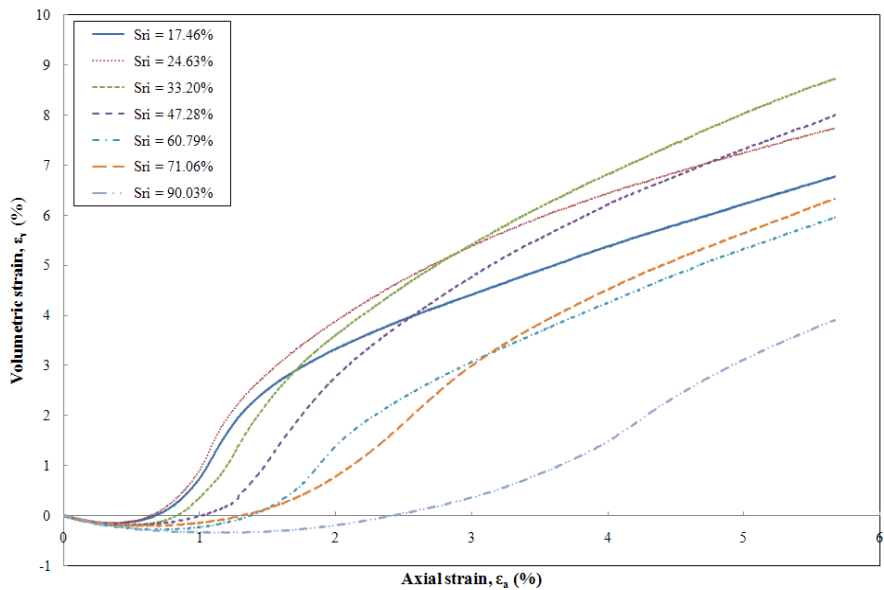


그림 5. 축 변형률에 따른 부피 변형률

그림 6은 초기포화도, S_{ri} 에 따른 초기흡수력, S_i 와 파괴시의 흡수력, S_f 의 관계를 나타낸 그래프이다. 초기 흡수력은 포화도가 증가함에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다. 파괴시의 흡수력은 초기에 비해 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 파괴시 시료의 부피가 증가함으로써 간극비가 커지고 그에 따른 포화도가 감소함에 기인 한다는 것을 알 수 있다. 시험을 통하여 비배수-배기 조건의 시험이 양호한 상태에서 이루어지고 있어 향후 실용적인 시험이 가능하리라 판단된다.

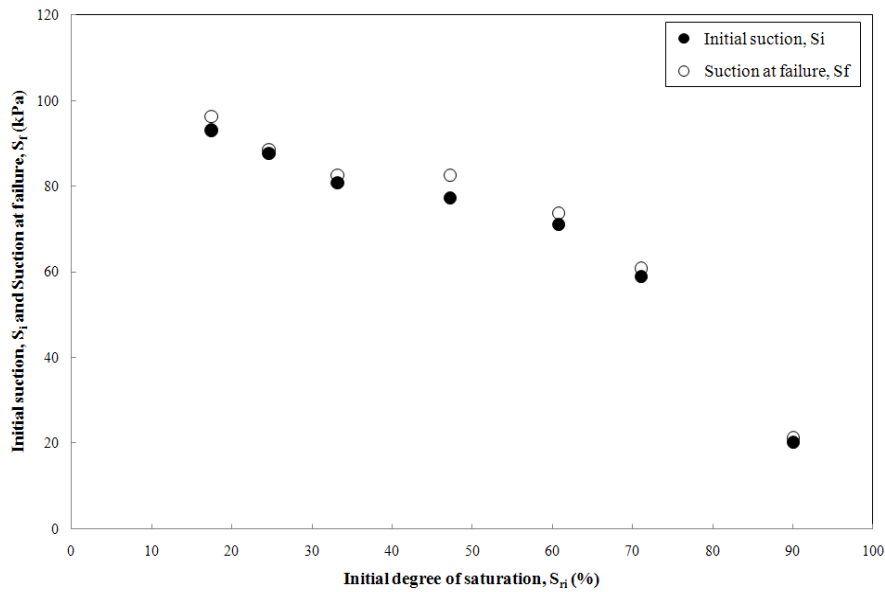


그림 6. 초기포화도에 따른 초기흡수력과 파괴시 흡수력

5. 종합

본 연구는 새로이 구축된 불포화 전단시험기를 이용하여 다짐된 국내산 고령토를 적용하여 불포화 전단강도 특성을 평가하였다. 제한적인 시험결과를 토대로 종합하면 다음과 같다.

(1) 불포화 시료의 간극수에 따라 전단강도의 차이를 볼 수 있다. 다만 일정 포화도를 기준으로 강도의 증감이 나타나 밀도와 구속압, 그리고 재료 내부에서 발생하는 응력의 차이로 인하여 최대 강도가 발현되는 것으로 판단된다. 강성도, 즉 변형계수 역시 이에 기인하는 것을 볼 수 있다.

(2) 압축시험시 부피가 증가하는 구간에서 파괴가 일어나고 이에 따라 간극비는 증가하고 포화도는 감소함으로써 흡수력이 증가하는 것을 알 수 있었다.

향후 다양한 조건의 밀도와 함수비, 그리고 구속압에 대한 시험을 통하여 보다 정량화된 불포화 전단강도특성을 평가할 수 있을 것이다. 또한 이를 통하여 불포화상태에서 발생하는 유효응력을 추정하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 2009년도 “일반연구자지원사업”의 지원으로 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bishop, A. W. and Blight G. E. (1963), "Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partially Saturated Soils", *Geotechnique*, vol 13, 177-197.
2. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977), "Stress State Variables for Unsaturated Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 103, pp 447-466.

3. Fredlund, D. G., and Rahardjo, H.(1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & sons, NewYork.
4. Karube, D., Kawai, K.(2001), "The role of pore water in the mechanical behavior of unsaturated soils", *Geotechnical and Geological Engineering* 19, pp. 211~241.
5. Kato, S., Yoshimura, Y. and Sunden, W.(2002), "Effects of suction on unconfined compression strength and undrained shear strength of compacted silty clay", *Proc. of the Third International Conference on Unsaturated Soils*, ISSMFE, Recife, 2, 513~519.
6. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W. (1996), "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, pp.379-392.