

모관흡수력을 고려한 불포화토의 전단강도에 대한 연구

A study on the shear strength considering matric suction for an unsaturated soil

오세봉¹⁾, Seboong Oh, 김태경²⁾, Tae-Kyung Kim

¹⁾ 영남대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Yeungnam

²⁾ 영남대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Yeungnam

SYNOPSIS : The behaviour of an unsaturated soil was analyzed by performing K_0 consolidated triaxial tests. Unsaturated triaxial tests were performed with matric suctions for weathered soils and could catch stress paths under consolidation and stress-strain relationships under shear. As a result, both isotropic and K_0 conditions had similar shear strength envelopes in the same matric suction. Especially, strength parameters could obtain by stress variables based on critical state theory reasonably which was better than those by Mohr circles at failure.

Key words : Shear strength, Unsaturated soils, Matric suction, Triaxial tests

1. 서 론

흙의 조직은 토립자와 간극으로 나누어지며 간극은 물과 공기로 채워져 있다. 불포화토의 간극속에는 물과 공기의 압력 차이가 발생하므로 표면장력과 확산이중층의 원리에 의하여 모세관 현상과 흡착현상이 발생한다. 이러한 이유로 불포화토에서는 흡수력을 가지게 되며 입자를 서로 잡아당기는 역할을 한다 (Chandler et al, 1986; Fredlund & Rahardjo, 1993). 국내에서도 불포화토의 거동에 대한 연구가 1990년대 들어서 활발하게 진행되고 있다.

이러한 연구들은 대부분 등방압축조건의 삼축시험을 토대로 이루어져 왔다. 이미 포화토의 경우에는 K_0 압밀조건에서의 거동과 등방압밀시료의 경우를 비교한 연구들이 축적되어 있다. 하지만 불포화토에 대한 K_0 압밀조건에서의 거동 특성은 그 연구 성과가 미흡한 것으로 여겨진다. 따라서 본 연구에서는 기존의 삼축압축장비를 모관흡수력조절이 가능하도록 개조하여 국내 풍화토에 대하여 K_0 조건 삼축압축시험을 수행하였다(김태경과 오세봉 2006). 이를 토대로 모관흡수력의 변화에 따른 불포화토의 강도를 중심으로 거동을 평가하였다. 특히 한계상태 이론을 적용한 불포화토의 파괴규준 및 강도정수를 산정하는데 초점을 두었다.

2. 시험조건

삼축시험기의 개요도는 그림 1과 같다. 개조된 삼축시험장비는 2중셀 구조로 외부셀과 내부셀로 구분된다. 이중 내부셀은 K_0 압밀시 시료의 체적을 측정하여 시료의 횡방향 변화량을 측정하게 하는 역할을 한다. 내부셀에는 갱센서가 설치되어있으며, 이 갱센서는 시료의 압밀과정에서 일어나는 횡방향 변위의 상대

적 변화를 측정하게 된다. 깡센서에서 측정되는 변화량은 피드백라인을 통하여 K_0 컨트롤서보로 보내어진다. K_0 컨트롤서보는 내부셀에서 측정된 횡방향 변위의 변화량을 피드백 라인을 통해 받아들여 구속압을 증가시켜 K_0 상태를 유지시킨다. 하부 좌대(base pedestal)는 불포화도를 시험하기 위하여 세라믹 디스크를 사용하였으며, 상부 캡(top cap)은 기존의 다공관을 이용하였다. 상부 배수라인은 공기압을 적용할 수 있도록 되어 있으며 공기압은 레귤레이터로 조절한다. 하부 라인인 압밀 및 전단시 시료내부에서 배수되는 물의 통로가 된다

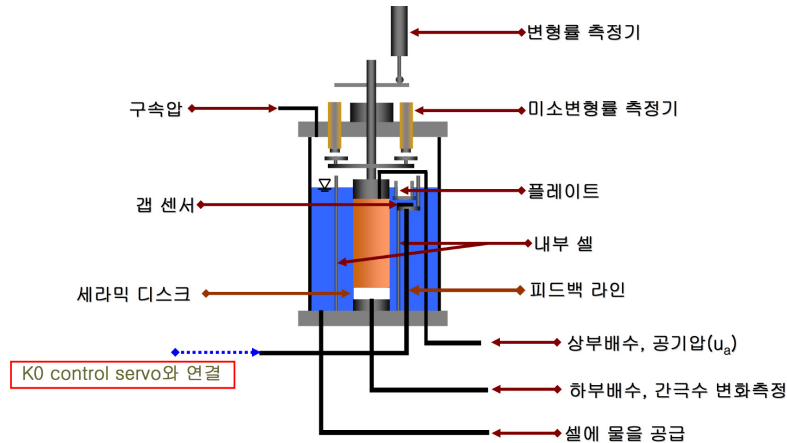


그림 1. 삼축압축시험기 개요도

본 연구에 사용된 시료는 지방도로 건설현장에서 채취한 시료로 실내에서 자연건조 후 #10번 체를 통과한 입자들을 이용하였다. 실험에 사용된 시료는 직경 50mm, 높이 100mm의 실린더 형태로 재성형하여 시험을 수행하였다. 이 때 시료를 오븐 건조시킨 후, 적당량의 물과 골고루 교반시켜 해당 함수비로 만들었다. 이렇게 교반된 흙을 직경 50mm의 실린더 형태의 스플릿 몰드에 넣고 유압적으로 정적다짐을 하여 높이 100mm로 성형하였다. 다짐곡선에서는 최대 건조단위중량에 상응하는 함수비인 14.8 %가 되었으며 초기 간극비는 0.514였다.

삼축압축실험을 수행하기 전 시험 시료의 공기함입치(air entry value)를 알아보기 위해 압력판 추출시험을 수행하였다. 압력판 추출시험은 습윤과정을 거치지 않고 시료를 충분히 포화시킨 후 건조과정을 수행하였다. 실험결과 삼축압축실험에 사용될 시료의 공기함입치는 그림 3에서 보여지듯이 20kPa 정도로 나타났다. 따라서 삼축시험에서 모관흡수력 효과가 충분히 나타나도록 모관흡수력이 공기함입치 이상인 20, 50, 80kPa를 적용하여 실험을 수행하였다.

삼축압축시험시에는 완성된 시료를 실험장치에 거치 후 포화과정을 수행하였다. 시료가 포화되면 상부 배수구를 통해 공기압을 주입하여 모관흡수력을 조절하였다. 일정한 모관흡수력을 가한 상태에서 시료내부의 함수비가 평형화가 이루어지도록 48시간이상 방치하였다. 시료내부에서 더 이상의 물이 빠져나오지 않는 것을 확인한 후 K_0 압밀과정을 수행하였다. 일정한 순체적응력까지 K_0 압밀이 완료되면 전단과정을 수행하였다.

삼축시험에서는 모관흡수력의 영향과 순체적응력의 영향을 알아보기 위해 다양한 조건에서 실험을 수행하였다. 이때 모관흡수력은 20, 50, 80kPa의 경우에 대하여 실험을 수행하였으며 순체적응력은 각 모관흡수력에 대하여 100, 200, 300kPa로 실험을 수행하였다. 전단시 변형률 속도는 0.002%/min으로 하였다.

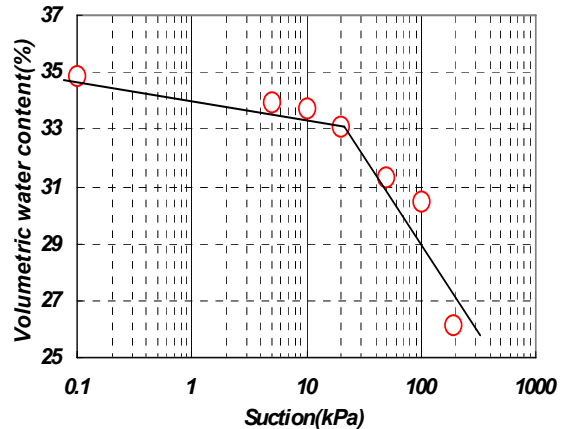


그림 2. 압력판 추출시험

3. 불포화토의 강도정수

Fredlund 등(1978)은 순응력과 모관흡수력을 독립적인 응력변수로 정의하였으며, 불포화토의 전단강도를 식 (1)와 같이 정의하였다.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (1)$$

여기서, $\sigma - u_a$ 는 순연직응력, $u_a - u_w$ 는 모관흡수력을 의미한다. 그리고 c' 는 포화토의 점착력, ϕ' 는 내부 마찰각으로 포화토의 실험결과로부터 구할 수 있다. ϕ^b 는 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력의 변화 기울기를 나타내는 흡수마찰각이다. 식 (1)에서 모관흡수력에 따른 겉보기점착력 \bar{c} 는 다음과 같이 정의한다. 겉보기 점착력은 순연직응력이 0일 때 전단강도를 의미한다.

$$\bar{c} = c' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (2)$$

불포화토의 전단강도는 순연직응력이나 모관흡수력의 증가에 따라 증가하게 된다. 이러한 관계를 $\sigma - \tau - \psi$ 축에서 나타내면 그림 3와 같다. 그림에서와 같이 모관흡수력이 증가할 때 불포화토의 파괴규준은 공간상에서 유일한 파괴면을 형성하고 있음을 알 수 있다.

Mohr-Coulomb 이론을 이용하여 불포화토의 강도정수를 산정할 경우에는 Mohr원의 접선을 이용하여야 하므로 회귀분석에 따라 그 값이 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 불포화토의 파괴규준을 파괴시의 축차응력을 이용하여 정의하였다.

불포화토의 파괴시 축차응력은 다음과 같이 나타난다.

$$q_f = d + M\bar{p}_f + N\psi_f \quad (3)$$

여기서, q_f 는 파괴시 축차응력, \bar{p}_f 는 파괴시 순 체적응력($p_f - u_a$), ψ_f 는 파괴시 모관흡수력($(u_a - u_w)_f$)이다. 그리고 M 은 한계상태 기울기, N 은 모관흡수력에 따른 순 점착력 성분의 변화 기울기, d 는 모관흡수력이 0일때의 $\bar{p}-q$ 축의 절편을 나타낸다.

식 (3)에서 순점착력 성분 \bar{d} 를 다음과 같이 정의 하면,

$$\bar{d} = d + N\psi_f \quad (4)$$

이고 불포화토의 파괴규준은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

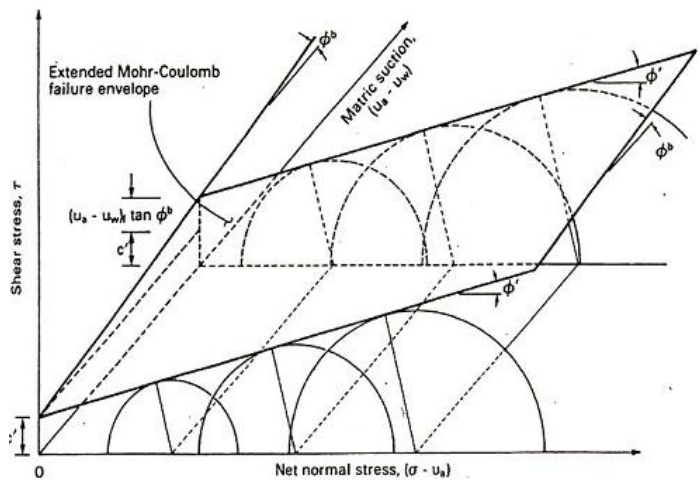


그림 3. 불포화토의 Mohr-Coulomb 파괴규준 (Fredlund and Rehardjo, 1993)

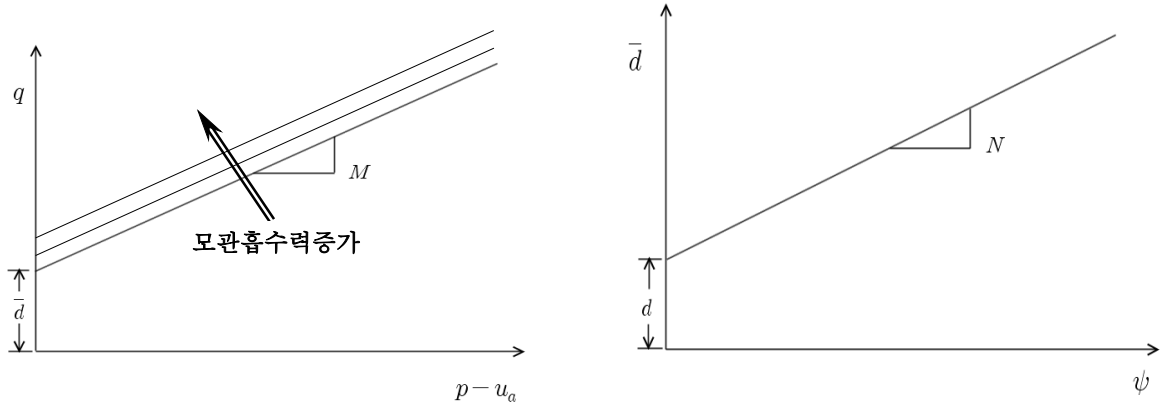


그림 4. 불포화토의 파괴규준

식 (4)를 식 (5)에 대입하면 파괴시 축차응력은 다음과 같다.

$$q_f = \bar{d} + M\bar{p}_f \quad (5)$$

이 때 마찰각과 파괴규준의 기울기는 다음과 같은 관계를 나타낸다.

$$\sin\phi' = 3M/(6 + M) \quad (6)$$

그리고 순점착력 성분은 다음과 같이 나타낸다.

$$\bar{d} = M\bar{c} \cot\phi' \quad (7)$$

식 (17)을 식 (4)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(c' + \psi_f \tan\phi^b) \cot\phi' = d + N\psi_f \quad (8)$$

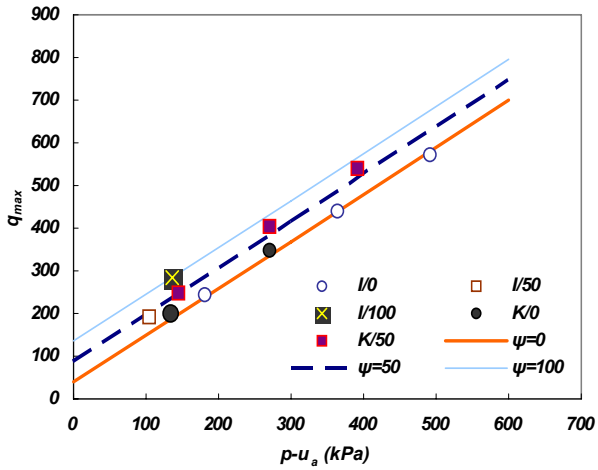
이로부터 식 (4)의 d 와 N 은 c' , ϕ' , ϕ^b 로 나타낼 수 있다.

$$c' = \frac{d}{M} \tan\phi' \quad (9)$$

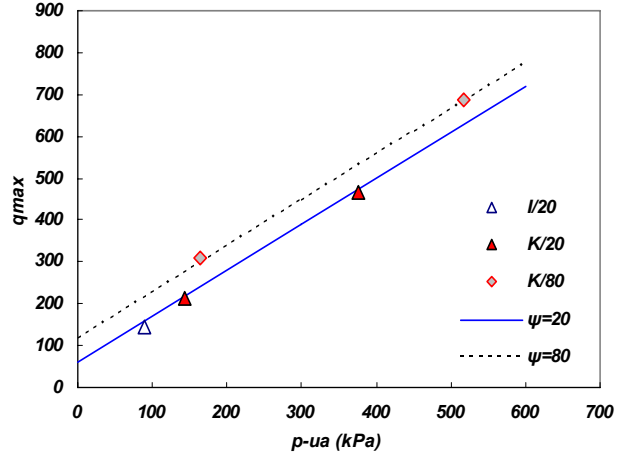
$$\tan\phi^b = \frac{N}{M} \tan\phi' \quad (10)$$

따라서 그림 4의 관계를 실험적으로 획득한 후, ϕ' 은 식 (6)으로부터 도출할 수 있고 c' , ϕ^b 는 식 (9)와 (10)으로 부터 도출할 수 있다.

그림 5에서는 K_0 압밀 삼축실험 결과 나타난 순체적응력에 따른 최대축차응력을 보여준다. 그림에서와 같이 모관흡수력에 따른 파괴포락선은 실험결과와 거의 일치한다. 그림 5 (a)에서 모관흡수력이 0인 포화시료에서 등방압밀조건과 K_0 압밀조건에서의 파괴포락선이 거의 동일한 위치에 있다는 것을 확인 할 수 있다. 다양한 모관흡수력 하에서 실험치의 최대 축차응력이 계산된 포락선의 파괴포락선과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 또한 약간의 분산은 있었지만 등방압밀조건과 K_0 압밀조건에서 거의 동일한 파괴포락선을 가지는 것으로 나타났다.



(a) 모관흡수력 0, 50, 100kPa



(b) 모관흡수력 20, 80kPa

그림 5. 파괴시 순체적응력에 따른 축차응력

그림 6에서는 그림 5에서 구한 모관흡수력에 따른 겉보기점착력을 실험치와 비교하였다. 실험치는 식 (5)를 이용하여 겉보기점착력 $q_f - Mp_f$ 를 구하였다. 설정된 실선은 실험치를 회귀분석한 결과로서 그 함수 값은 그림 5에 나타난 축차응력축의 절편에 해당한다. 그리고 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력은 전반적으로 실험치와 분석치가 일치하는 결과를 보이지만, 실험치가 다소 산만한 분포를 보이며 최대 20%정도 분석치와 차이를 보인다. 불포화토의 강도정수를 표 1에 정리하였다.

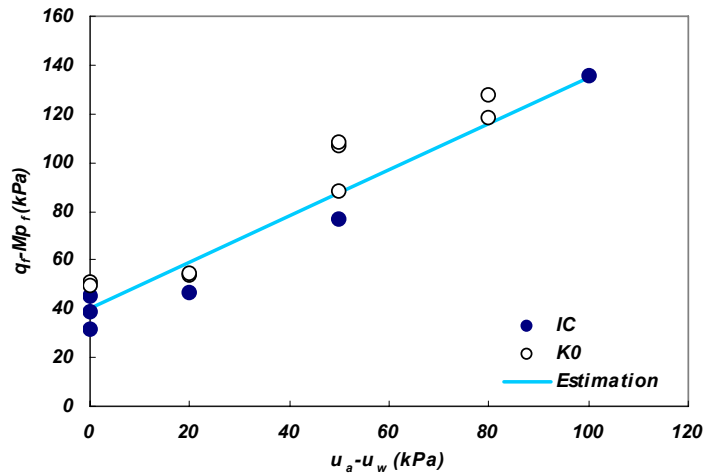
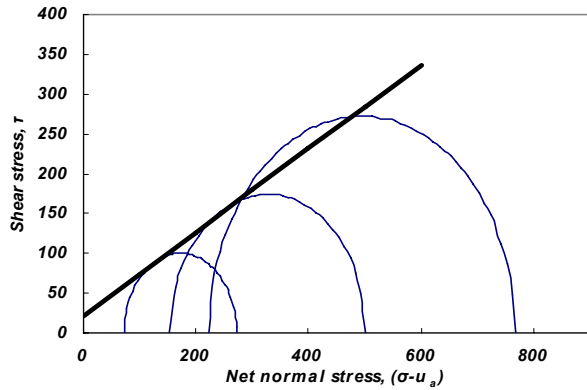


그림 6. 파괴시 모관흡수력에 따른 겉보기점착력 성분

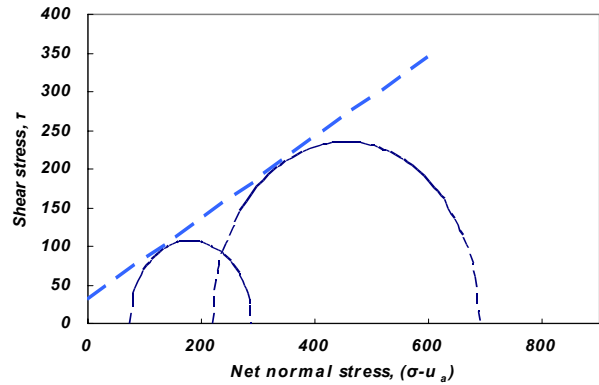
표 1. 불포화토의 강도정수

M	N	d	$c' (kPa)$	$\phi (^{\circ})$	$\phi^b (^{\circ})$
1.1	1	45	21.5	27.7	25.5

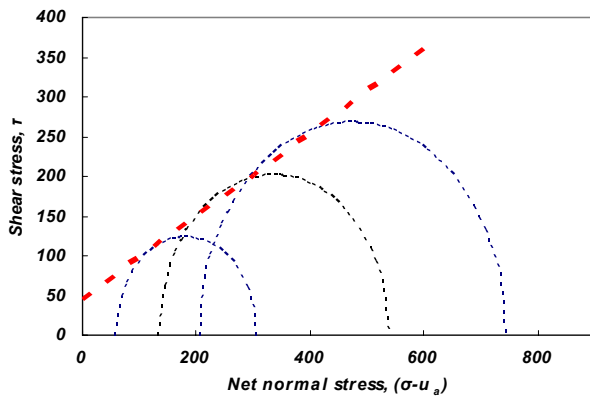
그림 7에서 보여지듯이 불포화토의 파괴규준을 나타낸 결과 실험적으로 구한 파괴시 Mohr 원의 접선을 잘 나타내는 것으로 나타났다. 실제로 접선을 따라서 파괴규준을 도출하는 것은 여러 모관흡수력에 대한 결과를 일관되게 회귀분석하는 것이 곤란한 경우가 많다. 따라서 불포화토의 파괴시 축차응력을 이용하여 불포화토의 강도 및 파괴규준을 정의하는 것이 합리적이라고 판단된다.



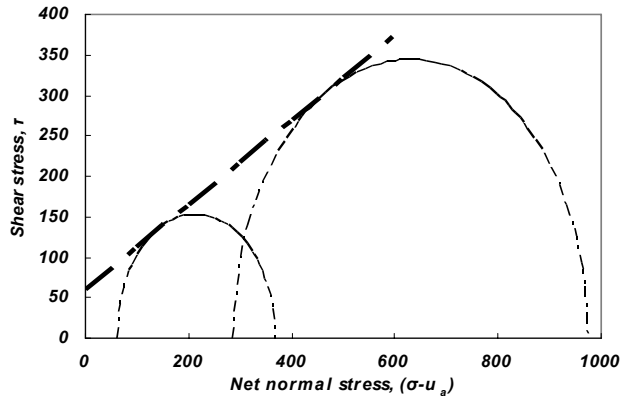
(a) 모관흡수력 0kPa



(b) 모관흡수력 20kPa



(c) 모관흡수력 50kPa



(d) 모관흡수력 80kPa

그림 7. Mohr-Coulomb 파괴포락선

4. 결 론

본 연구에서는 불포화토의 K_0 압밀 삼축압축실험을 수행하여 불포화토의 강도정수를 파괴시의 축차응력을 이용하여 도출하였다. 모관흡수력이 동일한 경우 등방조건과 K_0 조건에서 거의 동일한 파괴포락선을 가지는 것으로 나타났다. 그리고 모관흡수력이 증가함에 따라서 겉보기 점착력은 유사하게 증가하는 것으로 나타났다. 불포화토의 강도정수를 한계상태이론의 응력변수를 적용하여 구한 결과 기존의 Mohr-Coulomb 이론을 이용하여 구한 결과보다 용이하고 합리적인 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 이러한 기법을 적용하면 다양한 모관흡수력에 따른 파괴시 Mohr 원의 접선을 이용하여 불포화토의 강도정수를 획득하는 데 겪는 불편함을 해소할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김태경, 오세봉 (2006), “불포화 풍화토의 K_0 압밀삼축실험”, 2006 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp.860-865.
2. Chandler, R. J. and C. I. Gutierrez. (1986), “The filter-paper method of soil suction measurement”, *Geotechnique*, Vol.36, pp.265-268.
3. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, JOHN WILEY & SONS, INC. pp.217-296