

## 불포화 풍화토의 $K_0$ 압밀 삼축압축시험

### $K_0$ consolidated triaxial tests for unsaturated weathered soils

김태경<sup>1)</sup>, Tae-Kyung Kim 오세봉<sup>2)</sup>, Se-boong Oh,

<sup>1)</sup> 영남대학교 공과대학 건설환경공학부 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

<sup>2)</sup> 영남대학교 공과대학 건설환경공학부 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

**SYNOPSIS :** In order to predict the stability of slopes, it is important to evaluate shear strength of unsaturated soils. The triaxial tests were performed under  $K_0$  conditions for unsaturated soils and the results were compared with those for saturated soils. In unsaturated soils, the secant modul and the shear strengths are larger than those of saturated soils because of matric suctions. However the shear strengths were not affected severely by stress conditions at consolidation.

**Key words :** Unsaturated soils, Shear strengths, Matric suctions, seepage, Slope stability

## 1. 서 론

우리나라는 계절적 영향으로 인해 집중호우에 의한 사면의 파괴가 빈번하게 발생하고 있다. 그러므로 강우에 의한 사면의 안정성을 적절하게 평가하는 것이 매우 중요한 문제이다. 사면의 경우 강우가 발생하면 흙의 특성상 아랫방향으로 배수가 일어나게 되어 강우발생 후 시간경과에 따라 윗부분은 포화도가 감소하게 되므로 일반적으로 사면의 윗부분은 불포화상태로 존재하게 되어 일반적으로 사면의 안정성 해석에서 사용하고 있는 포화토 이론을 적용하는데 어려움을 야기하게 된다.

이러한 이유로 본 연구에서는 포화토와 불포화토의 강도의 차이를 비교하기 위하여  $K_0$  및 등방 삼축 압축시험을 수행하였다. 그리고 포화토와 불포화토의 강도, 응력경로, 최대 축차응력, 할선탄성계수, 전단탄성계수를 산정하여 불포화토와 포화토의 차이를 비교하였다. 이러한 연구는 강우시 불포화 사면의 안정성 해석 연구의 초기단계에 해당한다.

## 2. 실험

### 2.1 시료

본 실험에서는 교란상태에서 채취된 시료를 직경 50mm, 높이 100mm의 실린더 형태로 재성형하여 시험을 수행하였으며 시료의 재성형 과정은 다음과 같다. 먼저 시험에 사용될 시료를 오븐 건조시킨 후, 적당량의 물과 골고루 교반시켜 해당 함수비로 만들었다. 이렇게 교반된 흙을 직경 50mm의 실린더 형태의 스플릿 몰드에 넣고 유압잭을 이용하여 정적다짐을 하여 높이 100mm로 성형하였다. 표 1은 사용시료의 초기 성형 상태를 나타낸다.

표 1 교란시료의 초기성형 상태

시료의 성형상태	W (%)	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	G <sub>s</sub>	W (g)	S
포화조건						
포화 풍화토	14.8	1.74	196.35	2.65	343.6	0.95 이상
불포화 풍화토	14.8	1.74	196.35	2.65	343.6	0.5 이하

시료의 성형시 시료의 초기함수비는 다짐곡선에서의 95 % 최대건조단위중량에 상응하는 습윤측의 함수비인 14.8 %가 되도록 성형하였다. 또한 초기간극비가 0.514가 되도록 하였으며 이 시료는 삼축압축실험에 사용된다. 그림 1은 실험에 사용된 시료의 다짐곡선을 나타내었다.

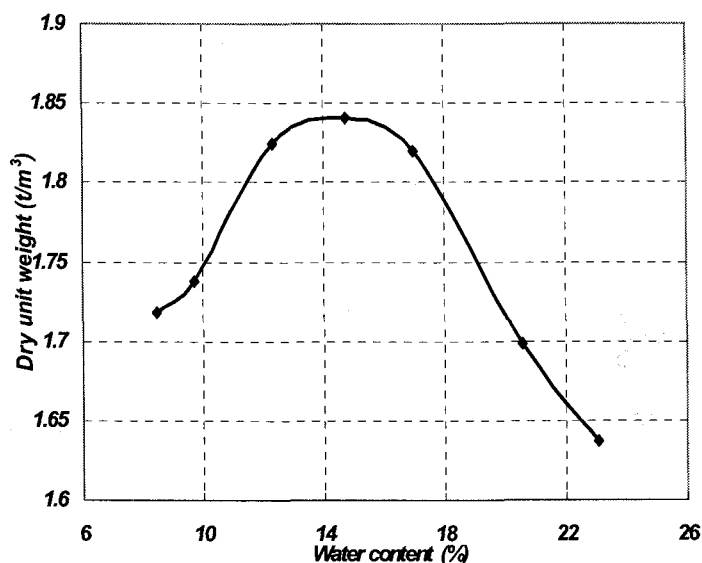


그림 1. 시료의 다짐곡선

## 2.2 실험장비

본 연구에서는 일본 세이켄사의 자동화 삼축시험장비(DTC-367L)(그림 2)를 사용하였으며, 이 장비는 삼축셀, 가압장치, 측정장치 등 3부분으로 구성되어 있다. 그리고 자동으로 Ko압밀을 재현할 수 있는 장점이 있다. 진단과정에서는 시험장비 하부에 있는 모터를 이용한 변형률제어방식이 사용된다. 삼축 시험과정에서 측정되는 아날로그 데이터는 제어소프트웨어에 의해 자동으로 디지털화 되어 2회/sec로 자동적으로 저장된다.

삼축실험에 사용되는 압력은 수압이며 이는 공기압축기(air compressor)를 사용하여 얻은 공기를 이용하였다. 이 공기는 공기압조절장치(regulator)를 거쳐 물탱크로 이동하여 수압으로 작용하게 된다. 실험에 사용되는 측정장치는 응력측정장치, 변형률측정장치, 간극수압측정장치, 내부체적변화측정장치, Ko측정장치등으로 구성되어 있다.

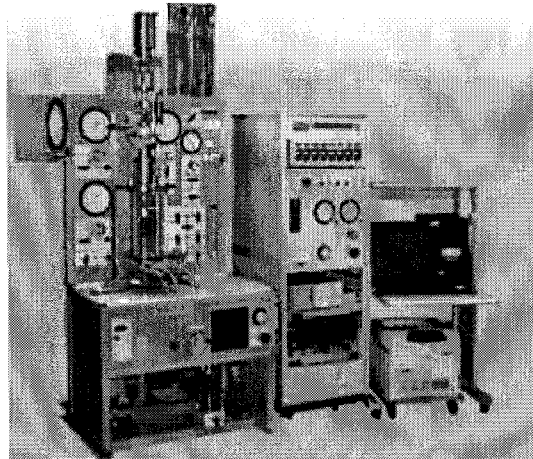


그림 2 자동화 삼축시험장비(DTC-367L)

## 2.3 실험방법

본 연구에서는 풍화토 시료의  $K_0$ 압밀 배수실험과 등방압밀 배수실험을 수행하였다. 등방압밀의 경우 삼축셀에 시료가 준비되면 먼저 시료를 포화시키는 과정을 거친 후 일정 구속압 100, 200, 300kPa를 시료에 가하여 압밀을 수행하였다. 일정 구속압을 가한 후 더 이상의 간극수의 유출이 없으면 시료의 축방향으로 축차응력을 가하여 전단을 수행하였다. 이때 전단과정 중 시료 상하부에 연결된 배수구멍을 열어 시료에서 나온 물의 양을 이용하여 체적변화를 측정하였다. 전단 속도는 시료 내에서 간극수압의 발생이 일어나지 않는 0.05mm/min의 속도로 전단을 수행하였다. 불포화토의 경우 위의 과정에서 포화 단계를 생략하였다.  $K_0$ 압밀의 경우 삼축셀에 시료가 준비되면 시료의 포화단계를 거친 후 자동화 삼축장비를 이용하여 축방향의 하중을 가하면 피드백에 의해 횡방향의 응력이 증가하는 방법을 이용하여 일정한  $K_0$ 값을 유지하면서 체적응력이 100, 200, 300kPa가 될 때 까지 압밀을 수행하였다. 압밀과정이 끝나면 등방압밀과 동일하게 배수밸브를 열어 전단 시 간극수압의 발생을 억제함과 동시에 체적의 변화를 측정하였다. 전단속도 역시 등방조건과 같이 0.05mm/min로 전단을 수행하였다.

## 3. 실험결과

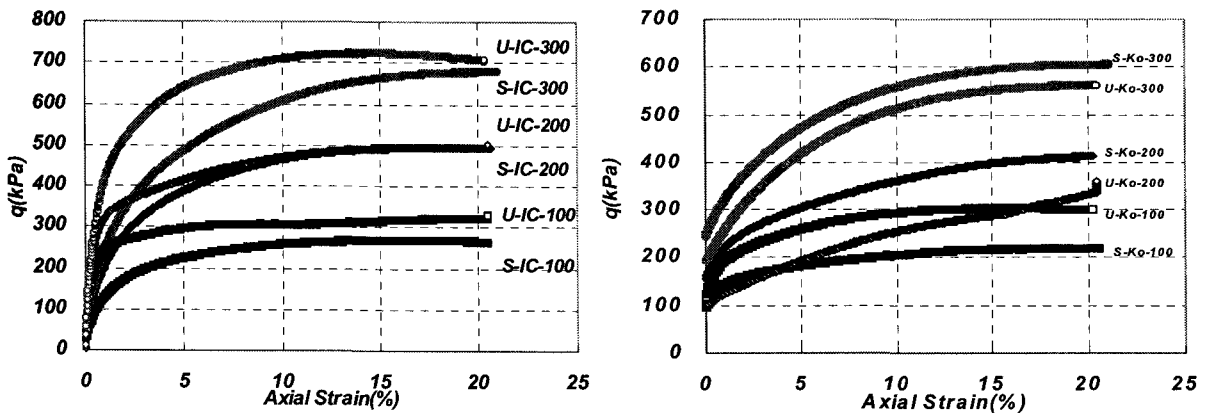
일반적으로 포화토와 불포화토는 다른 강도특성을 보이며, 불포화상태일 때의 전단강도가 증가하는 것으로 알려져 있다. 아래 표 2는 배수삼축실험의 결과 값을 나타내었다.

표 2 삼축실험 결과

구분	범례	$\sigma_{vc}$ (kPa)	$\sigma_{hc}$ (kPa)	$K_0$	$e_c$	$p_c$ (kPa)	$q_c$ (kPa)	$p_f$ (kPa)	$q_f$ (kPa)
포화토	S-Ko-100	73	167	0.43	0.51	104	95	146	219
	S-Ko-200	155	312	0.45	0.5	207	158	292	413
	S-Ko-300	222	470	0.43	0.47	305	248	425	606
불포화토	U-Ko-100	99	214	0.45	0.51	137	115	199	300
	U-Ko-200	171	267	0.6	0.5	203	96	291	359
	U-Ko-300	217	407	0.48	0.48	280	189	405	563

여기서  $\sigma_{vc}$ 는 압밀후 연직응력,  $\sigma_{hc}$ 는 압밀후 수평응력,  $K_0$ 는 정지토압계수,  $e_c$ 는 압밀후 간극비,  $p_c$ 는 압밀후 체적응력,  $q_c$ 는 압밀 후 축차응력,  $p_f$ 는 파괴시 체적응력,  $q_f$ 는 파괴시 축차응력이다.

그림3은 체적응력 100, 200, 300kPa에서의  $K_0$ 압밀조건 및 등방압밀조건에서의 포화토와 불포화토의 응력-변형률곡선을 보인다. 포화조건과 불포화조건 모두 연성적인 거동을 보인다는 것을 알 수 있다. 그림 2의 (a) 그래프로 보면 축차응력이 포화조건이 큰 것으로 보이나, 두 조건의 구속압이 다르므로 실질적으로는 불포화토의 축차응력이 포화토의 축차응력보다 큰 것을 확인할 수 있었다. 그리고 그림 2의 (b)의 그래프에서는 불포화조건이 포화조건보다 축차응력이 더 큰 것을 확인할 수 있다.

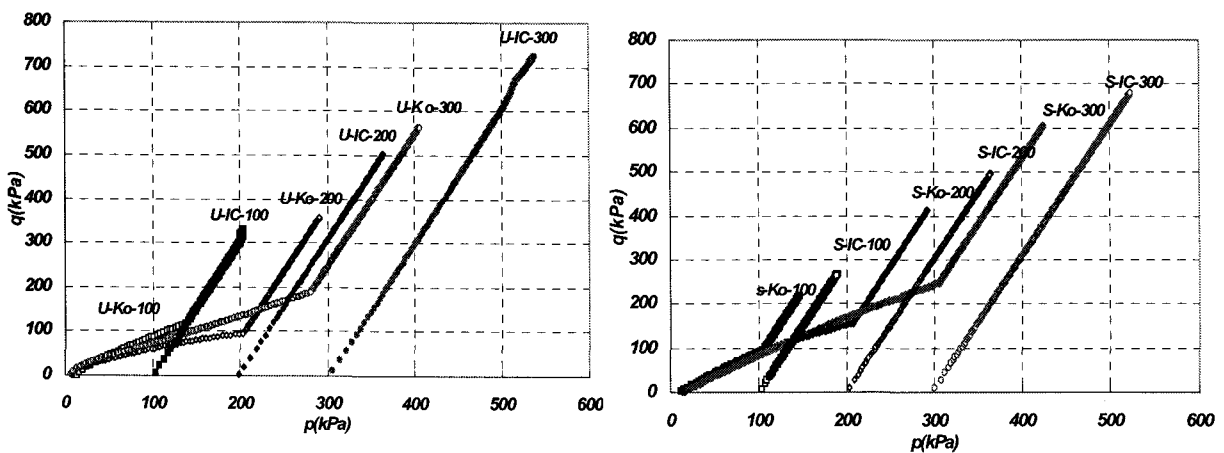


(a)  $K_0$  압밀 조건

(b) 등방 압밀 조건

그림 3 압밀 조건에 따른 응력 - 변형률 곡선

그림 4는 포화토 및 불포화토의 응력경로를 나타내었다. 이 실험결과에서 포화토와 불포화토의  $K$  값은 유사하게 나타난다는 것을 확인할 수 있었으나 불포화토의 경우 약간의 오차가 있음을 확인할 수 있다. 그리고 불포화토에 비해 포화토의 축차응력의 값이 큰 것으로 보이나 동일한 체적응력 하에서 불포화토의 축차응력( $q$ )이 더 큰 것을 확인할 수 있다.



(a) 불포화토의 응력경로

(b) 포화토의 응력경로

그림 4 포화 조건에 따른 응력경로

그림 5는 Ko압밀조건에서의 포화토와 불포화토의 간극비의 변화를 보여주고 있다. 동일한 체적 응력 하에서 불포화토의 간극비의 변화가 적게 일어난다는 것을 확인 할 수 있다.

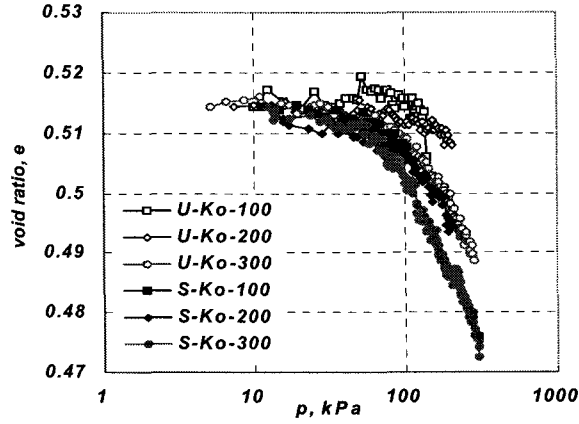
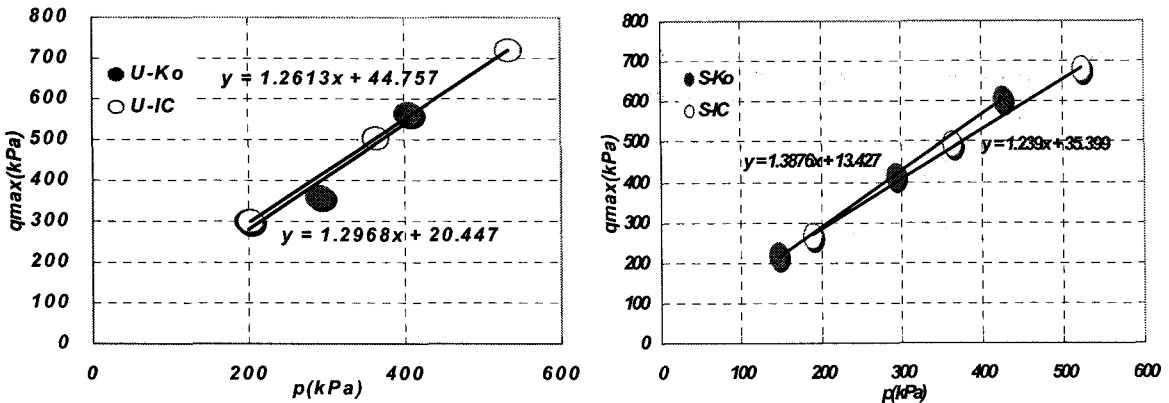


그림 5 Ko 압밀조건에서의 p-e 곡선

그림 6은 불포화조건과 포화조건에서의 최대축차응력을 비교하여 나타내었다. Ko조건과 등방조건 모두 포화토와 불포화토의 최대축차응력이 비슷한 값을 보였다.



(a) 불포화조건

(b) 포화조건

그림 6 포화조건에 따른 최대축차응력

표 3은 Ko실험과 등방실험에서 구한 값을 이용하여 포화토와 불포화토의 강도 정수를 비교한 것이다.

표 3 포화토와 불포화토 강도정수 비교

구속조건	포화조건	$c$ ( $t/m^2$ )	$\phi$ ( $^\circ$ )	$K_0$
$K_0$ 조건	포화토	1.63	34.29	0.45
	불포화토	5.24	31.41	0.45
등방조건	포화토	4.12	30.86	1
	불포화토	4.84	35.42	1
대표값		2.73	32.3	0.45

## 4. 결론

포화토와 불포화토의 강도특성을 비교하기 위하여 삼축압축실험을 수행하였다. 실험에 사용한 시료는 함수비 14.8%를 가진 시료로, 포화도 95%이상과 포화도 50%이하로 나누어 실험을 수행하여 아래와 같은 실험 결과를 얻었다.

- (1) 포화토와 불포화토를 실험한 결과 모두 응력-변형률 곡선에서 연성적인 거동을 나타내었으며, 불포화토의 축차응력이 포화토의 축차응력보다 큰값을 가진다는 것을 확인 할 수 있었다.
- (2) p-e 곡선에서는 포화토와 불포화토에서 등방압밀조건보다  $K_0$ 압밀조건에서의 간극비 변화가 작게 나타나는것을 확인 할 수 있었다.
- (3) 포화토와 불포화토의 강도 정수를 실험을 통해 비교한 결과 불포화토의 강도정수가 포화토의 강도 정수보다 조금 큰 것으로 확인 되었다.

## 참 고 문 헌

1. 김상규, 류지협, "불포화토의 투수 및 강도특성 측정", 대한토목학회 1996년도 학술발표회 논문집(III), 375-378
2. 김 욱 (2003),  $K_0$  압밀조건서 포화풍화토의 구성관계, 석사학위논문, 영남대학교
3. 오세봉, 박현일 (2004), "사질토의  $K_0$  조건하 거동에 대한 구성모델 및 유전자 알고리즘을 적용한 계수의 최적화 산정기법", 한국지반공학학회논문집, 제20권, 제5호, pp. 37~48 /특별논문집 제1호/ 4. 오세봉, 신동훈, 권오균, 박현일, 김 욱 (2004), "사질토의 체적팽창을 고려한 비등방경화 구성 모델: II. 검증", 한국지반공학학회논문집, 제20권, 제6호, pp. 85~94