

# 불포화토의 $K_0$ 압밀 삼축압축시험시 모관흡수력에 따른 정지토압계수 및 전단강도에 관한 연구

## $K_0$ Values and Shear Strengths under $K_0$ Consolidated Triaxial Tests According to Matric Suction for an Unsaturated Soil

김 태 경<sup>1</sup> Kim, Tae-Kyung

오 세 봉<sup>2</sup> Oh, Se-Boong

### Abstract

In this study, 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 stress paths under consolidation and stress-strain relationships under shear were obtained. As a result, the  $K_0$  value decreased as the matric suction increased. Besides, both isotropic and  $K_0$  conditions had similar shear strength envelopes at the same matric suction. Especially, strength parameters could be obtained by stress variables used in the critical state theory more reasonably than by those of Mohr circles at failure.

### 요 지

본 연구에서는 불포화토를 대상으로  $K_0$  압밀조건에서 삼축시험을 수행하여 거동을 분석하였다. 이를 위하여 풍화토 시료를 성형하여 모관흡수력을 조절한 불포화 삼축압축시험을 수행하였으며 압밀시 응력경로 및 전단시 응력-변형을 관계를 분석하였다. 실험결과 모관흡수력이 증가할수록  $K_0$  값은 작아지는 것으로 나타났다. 또한 불포화토의 파괴포락선은 동일한 모관흡수력에 대하여 등방압밀조건과  $K_0$  압밀조건에서 유사한 결과를 가지는 것으로 나타났다. 특히, 한계상태이론에서 사용하는 응력변수를 적용할 경우 Mohr 원을 이용하여 구하는 경우에 비하여 보다 합리적으로 강도정수를 획득할 수 있었다.

**Keywords :**  $K_0$  condition, Matric suction, Shear strength, Triaxial tests, Unsaturated soils

### 1. 서 론

흙의 조직은 토립자와 간극으로 나누어지며 간극은 물과 공기로 채워져 있다. 포화토의 경우에는 간극공기압을 배제한 유효응력으로 응력변수를 정의할 수 있다 (Terzaghi, 1936). 반면 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 & Gutierrez, 1986; Fredlund & Rahardjo, 1993). 이로 인하여 불포화토에서는 포화도가 증가하는 습윤과정시 팽창과 붕괴가 일어날 수 있다 (Jennings & Burland, 1962).

Bishop(1959)은 이미 1950년대부터 유효응력을 불포화토의 간극공기압을 포함하여 정의하였다.

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

1 정회원, 영남대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ.)

2 정회원, 영남대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil and Environmental Engrg., Yeungnam Univ., sebungoh@yu.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

여기서  $\sigma'$ 는 유효응력,  $\sigma$ 는 전응력,  $u_a$ 와  $u_w$ 는 각각 간극공기압과 간극수압을 나타낸다.  $\chi$ 는 포화도에 의존하는 변수로서 완전 포화시는 1의 값을 가지고 완전 건조시는 0의 값을 가진다. 최근 들어 Bishop 응력을 적절하게 정의하면 불포화토의 전단강도를 포화토와 동일한 Mohr-Coulomb 파괴규준으로 정의할 수 있다고 보고되고 있다(Oberg & Sallfors, 1995; Bolzon et al, 1996; Khalili & Khabbaz, 1998).

한편 독립 상태변수(independent state variable) 접근법은 식 (1)에서 나타난 순연직응력  $\sigma - u_a$ 와 모관흡수력  $u_a - u_w$  향으로 독립적인 응력상태 변수를 분리하여 전단강도를 평가한다(Fredlund et al, 1978). 이러한 접근법은 많은 연구 및 실무에서 받아들여지고 있는 실정이다(Escario & Saez, 1986; Vanapalli et al, 1996). Fredlund et al(1978)에 의하면 동일한 순연직응력 조건에서 모관흡수력의 증가에 따라 전단강도가 선형적으로 증가한다. 이후 Vanapalli et al(1996)과 Rassam & Williams (1999)의 연구에서는 모관흡수력이 증가하면서 점차 비선형적인 변화를 나타내는 것으로 확인되었다.

국내에서도 불포화토의 거동에 대한 연구가 1990년대 들어서 활발하게 진행되고 있다. 송창섭(1994)은 층적 실트질 모래를 사용하여 불포화토의 거동 예측을 위한 구성식을 개발하였으며, 김찬기(1998)는 Lade모형을 이용하여 국내 풍화잔적토의 거동을 예측하였다. 또한 이성진(2002)은 화강풍화토를 이용한 실험에서 모관흡수력의 증가에 따른 겉보기 점착력의 비선형적인 증가에 대하여 쌍곡선형태로 수식화한 결과를 발표한다.

이러한 연구들은 대부분 등방압축조건의 삼축시험을 토대로 이루어져 왔다. 이미 포화토의 경우에는  $K_0$  압밀조건에서의 거동과 등방압밀시료의 경우를 비교한 연구들이 축적되어 있다 (Ladd, 1965). 하지만 불포화토에 대한  $K_0$  압밀조건에서의 거동 특성은 그 연구 성과가 미흡한 것으로 여겨진다.

지반은 비등방적인 응력상태 압축이 이루어진 상태에서 나타난 거동이 실제적이다. 이러한 지반 요소의 변형계수, 응력-변형률 관계, 강도에 대한 관찰과 자료의 축적이 이루어져야 해석이나 현장실험에 거동을 적절하게 반영할 수 있다. 본 연구자들은 불포화토의  $K_0$  압밀시 정지토압, 변형계수, 응력-변형률 관계, 강도에 관한 연구를 수행중에 있다(김태경과 오세봉 2006).

따라서 본 연구에서는 기존의 삼축압축장비를 모관흡수력조절이 가능하도록 개조하여 국내 풍화토를 대상으로  $K_0$  조건 삼축압축시험을 수행하였다. 이를 토대

로 모관흡수력의 변화에 따른 불포화토의 거동을 평가하였다. 특히 한계상태 이론을 적용한 불포화토의 파괴규준 및 강도정수를 산정하는데 초점을 두었다.

## 2. 시험조건

본 연구에서는 시료를 불포화상태로 만들기 위하여 기존의 삼축시험장비(일본 Seiken사, DTC-367L)를 개조하여 사용하였다 (김태경과 오세봉, 2006). 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 갭센서가 설치되어있으며, 이 갭센서는 시료의 압밀과정에서 일어나는 횡방향 변위의 상대적 변화를 측정하게 된다. 갭센서에서 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 불포화토를 시험하기 위하여 세라믹 디스크를 사용하였으며, 상부 캡(top cap)은 기존의 다공판을 이용하였다. 상부 배수라인은 공기압을 적용할 수 있도록 되어 있으며 공기압은 레귤레이터로 조절한다. 하부 라인은 압밀 및 전단시 시료내부에서 배수되는 물의 통로가 된다.

본 연구에 사용된 시료는 지방도로 건설현장에서 채취한 시료로 실내에서 자연건조 후 10번체를 통과한 입자들을 이용하였으며 물리적 특성은 표 1과 같으며 입도

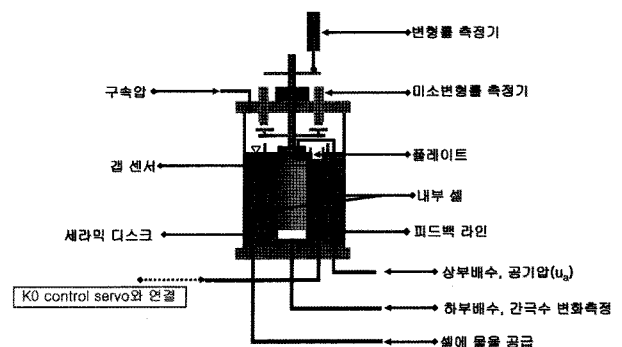


그림 1. 삼축압축시험기 개요도

표 1. 시료의 물리적 성질

시료	$\gamma_{dmax}$ ( $g/cm^3$ )	OMC (%)	소성지수 (PI, %)	#200 (%)	$G_s$	USCS
SG-4	1.74	14.8	14	33.9	2.71	SC

분포곡선은 그림 2와 같다. 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 유압잭으로 정적다짐을 하여 높이 100mm로 성형하였다. 이러한 정적다짐 과정 중에 층 분리로 인한 특이 현상은 실험과정중에 관찰되지 않았다. 다짐곡선에서 최대 건조단위중량에 상응하는 함수비는 14.8%가 되었으며 초기 간극비는 0.514였다.

삼축압축실험을 수행하기 전 시험 시료의 공기함입치 (air entry value)를 알아보기 위해 압력판 추출시험을 수행하였다. 사용된 압력판 추출시험기는 Soil & Moisture사에서 제작한 것으로 세라믹 디스크의 공기 함입치는 2기압이다. 압력판 추출시험기의 세라믹 디스크는 물과 공기를 분리하여 일정한 압력이하에서 물은 통과시키고 공기는 통과하지 못하는 역할을 한다.

압력판 추출시험은 습윤과정을 거치지 않고 시료를 충분히 포화시킨 후 건조과정을 수행하였다. 실험결과 삼축

압축실험에 사용될 시료의 공기함입치는 그림 3에서 보여 지듯이 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, 300, 400kPa로 실험을 수행하였다. 전단시 변형률 속도는 0.002%/min으로 하였다. 이때 초기조건 및 파괴시 응력은 표 2에 정리하였다.

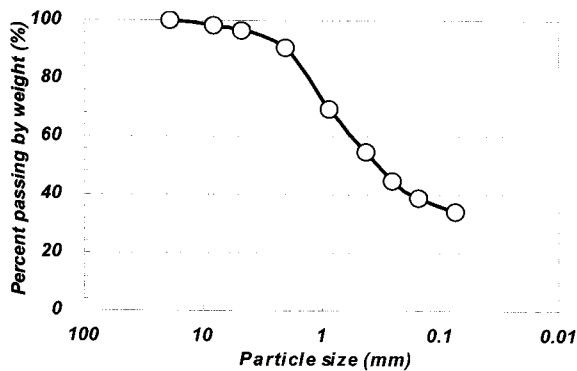


그림 2. 입도분포곡선

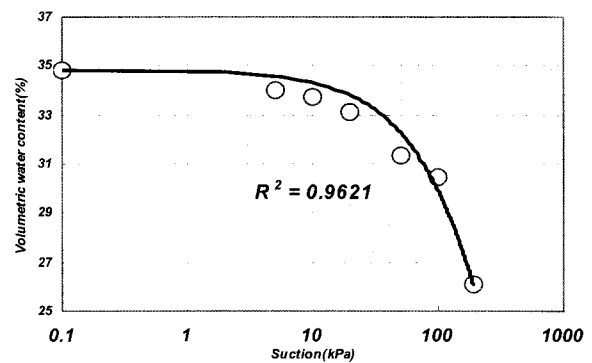


그림 3. 압력판 추출시험 결과

표 2.  $K_0$  압밀 삼축실험 초기조건 및 결과

구분	범례	$\sigma_{hc}$ (kPa)	$\sigma_{vc}$ (kPa)	$K_0$	$\epsilon_c$	$\psi$ (kPa)	$u_a$ (kPa)	$\bar{p}_c$ (kPa)	$q_c$ (kPa)	$\bar{p}_f$ (kPa)	$q_f$ (kPa)
포화토 (K/0)	K100/0	73	168	0.43	0.508	0	0	104	95	135	200
	K200/0	155	313	0.49	0.495	0	0	208	158	270	347
	K300/0	223	470	0.47	0.473	0	0	305	248	404	543
불포화토 (K/20)	K100/20	93	182	0.48	0.510	20	20	104	89	144	212
	K300/20	239	504	0.45	0.480	20	20	308	265	376	468
불포화토 (K/50)	K100/50	112	240	0.33	0.498	50	50	104	128	145	248
	K200/50	184	402	0.38	0.483	50	50	207	217	269	403
	K300/50	262	551	0.42	0.460	50	50	308	289	392	540
불포화토 (K/80)	K100/80	142	270	0.33	0.510	80	80	105	129	163	304
	K400/80	368	746	0.43	0.495	80	80	414	378	517	687

표 2에서  $\sigma_{he}$ ,  $\sigma_{ve}$ 는 압밀완료 시 수평응력과 연직응력이고  $e_c$ 는 압밀완료 시 간극비이며  $\psi$ 는 모관흡수력,  $u_a$ 는 간극 공기압이다. 그리고  $\bar{p}_c$ ,  $q_c$ 는 압밀완료 시 순체적응력, 축차응력이며  $\bar{p}_f$ ,  $q_f$ 는 파괴 시 순체적응력, 축차응력이다. 범례는 압밀완료시 순체적응력과 모관흡수력으로 표시하였다. 즉 K300/50은 순체적응력 약 300kPa까지  $K_0$  압밀한 경우로 모관흡수력은 50kPa이다. 각 모관흡수력에 따른 구분은 (K/모관흡수력의 크기)로 나타냈으며, 예를 들어 K/50은 모관흡수력이 50kPa인 시험들을 칭한다.

$K_0$  압밀시험 결과와 비교를 위하여 등방압밀시험도 일부 수행하였다. 포화시료의 경우에는 100, 200, 300kPa로 압밀한 후 전단을 일으켰다. 그리고 불포화 시료의 경우에는 순 압밀응력 41kPa에 대하여 모관흡수력 20, 50, 100kPa인 경우를 시험하였다. 그 조건 및 결과는 표 3과 같으며  $\sigma_c$ 는 등방 압밀응력이다.

### 3. 삼축시험 결과 및 분석

#### 3. 1 불포화토의 $K_0$ 압밀특성

그림 3(a)에서는  $K_0$  압밀 시 수평응력과 연직응력간

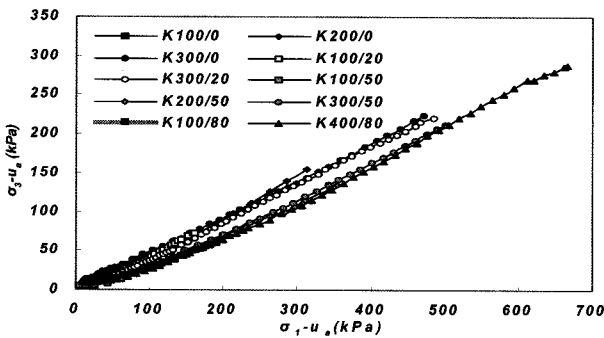
의 관계를 나타내고 있다. 압밀과정에서 응력경로는 다소 비선형적인 형태를 나타내고 있으며 응력이 증가함에 따라 선형적인 형태로 전환되고 있다. 모관흡수력이 증가할수록 동일한 순연직응력에 대한 순수평응력은 감소하는 경향을 보이며 그 경향은 압밀종료시 응력만을 나타낸 그림 3(b)에서 뚜렷하게 나타난다.

그림 4(a)에서는  $K_0$  압밀시 순체적응력에 따른 축차응력의 경로를 보여주고 있으며, 그림 3과 마찬가지로 압밀과정에서 응력경로는 초반에는 다소 비선형적인 형태를 나타내고 있다. 모관흡수력이 증가할수록 동일한 체적응력에 대한 축차응력은 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 그림 3(b)에서와 같이 모관흡수력이 증가할 경우  $K_0$  값의 감소하여 동일한 연직응력에서 더 작은 수평응력을 가지는 것으로 나타난다. 따라서 모관흡수력이 증가할 경우 최종압밀시의 축차응력도 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 모관흡수력 50kPa 이상이 되면 동일한 체적응력에 대한 축차응력은 거의 유사한 값을 가지는 것으로 나타났다. 특히 최종 압밀응력을 나타낸 그림 4(b)를 보면 이러한 경향이 뚜렷이 나타난다.

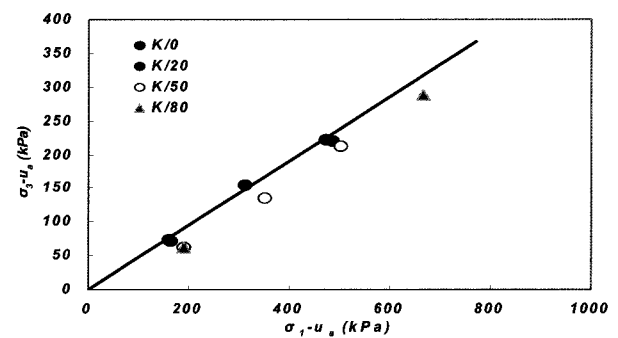
불포화토에서 정지토압계수는 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

표 3. 등방압밀 삼축시험 초기조건 및 결과

구분	범례	$\sigma_c$ (kPa)	$\psi$ (kPa)	$u_a$ (kPa)	$\bar{p}_c$ (kPa)	$\bar{p}_f$ (kPa)	$q_f$ (kPa)
포화토	1/0	100	0	0	100	181	245
		200	0	0	200	365	440
		300	0	0	300	491	572
불포화토	1/20	61	20	20	41	89	144
	1/50	91	50	50	41	105	193
	1/100	141	100	100	41	136	285

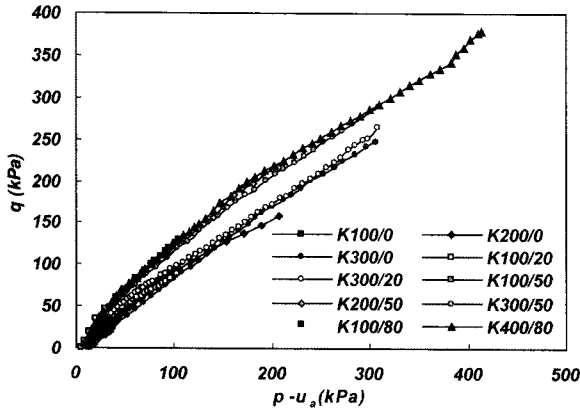


(a) 순수평응력-순연직응력 경로

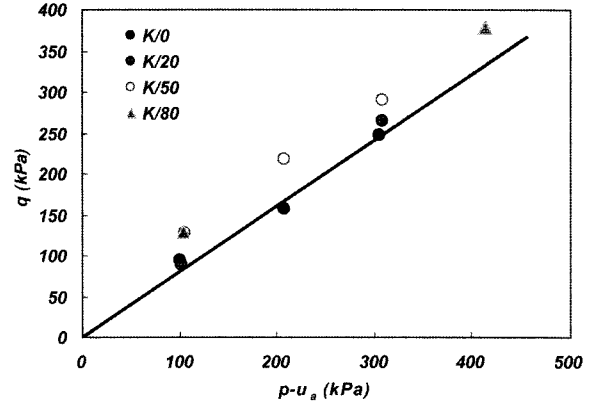


(b) 최종 순수평응력-순연직응력 관계

그림 3.  $K_0$  압밀시 순연직응력-순수평응력 경로

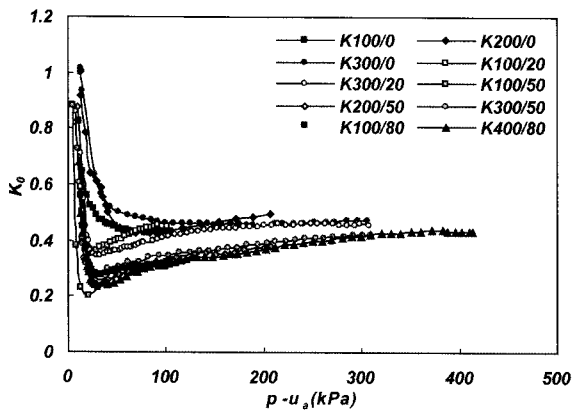


(a) 순체적응력-축차응력 경로

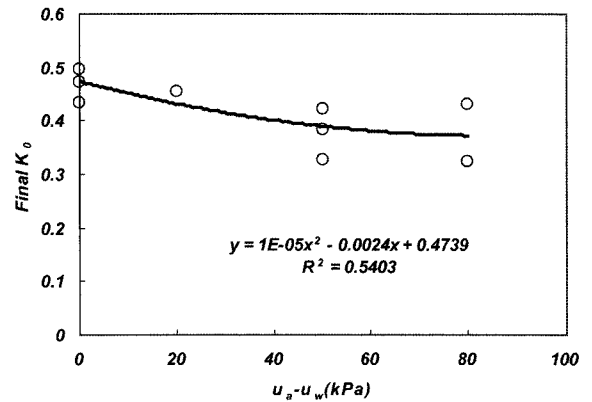


(b) 최종 순체적응력-축차응력 관계

그림 4.  $K_0$  압밀시 순체적응력-축차응력 경로



(a)  $K_0$  압밀시 순체적응력- $K_0$  관계



(b) 모관흡수력에 따른 최종  $K_0$  값

그림 5. 압밀시  $K_0$  값의 변화

$$K_0 = \frac{\sigma_h - u_a}{\sigma_v - u_a} \quad (2)$$

그림 5(a)에서는 순체적응력에 따른  $K_0$  값의 변화를 보여주고 있다.  $K_0$  값은 체적응력이 증가함에 따라 감소하다가 증가하며 한 값에 수렴하는 경향을 나타낸다. 그림 5(b)에서 보여지듯이 최종적으로 나타난  $K_0$  값은 모관흡수력이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 모관흡수력에 따른  $K_0$  값은 다음과 같은 상관관계를 보여준다.

$$K_0 = 0.00001\psi^2 - 0.0024\psi + 0.4739 \quad (3)$$

### 3.2 불포화토의 전단시 거동

모관흡수력 0, 20, 50, 80kPa에 대하여 각각 순체적응력 100, 200, 300, 400kPa일 때의 전단시 응력경로는 그림 6과 같이 나타났다. 실험결과 동일한 순 체적응력 하

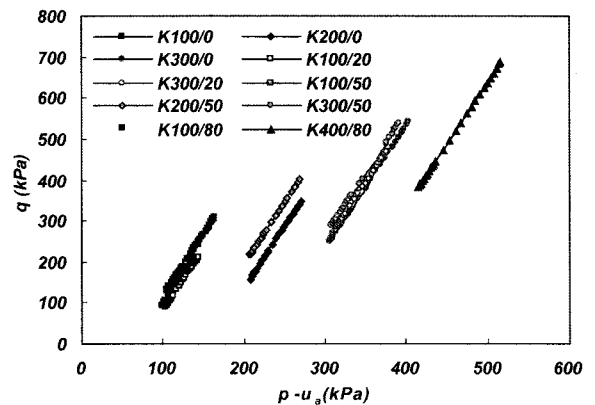
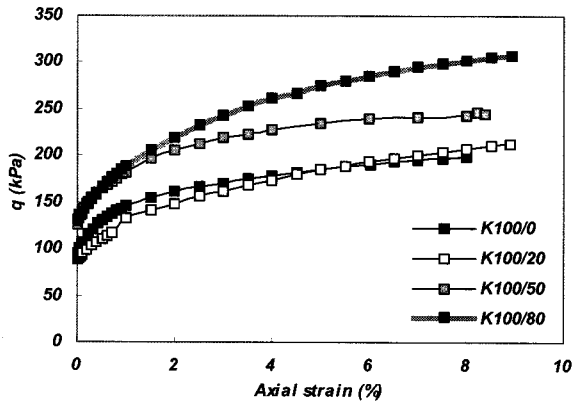


그림 6.  $K_0$  압밀삼축시험시 응력경로

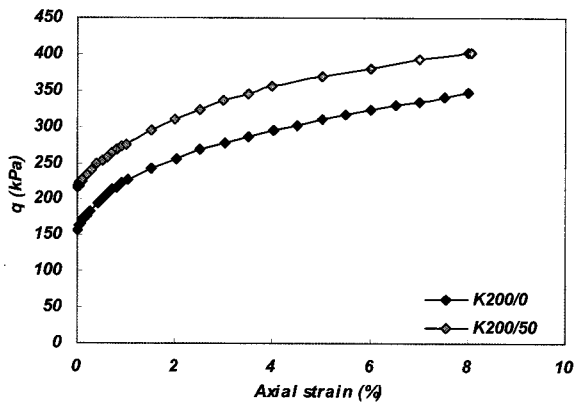
에서 모관흡수력이 0kPa인 경우(포화상태)와 모관흡수력이 20kPa인 경우 응력경로가 비슷한 것으로 나타났다. 실험시료의 공기함입치가 20kPa이므로 아직 시료내부에서 모관흡수력의 영향이 적어 포화토의 응력경로와 유사한 경로를 가진 것으로 판단된다. 하지만 모관흡수력이 50, 80kPa일 경우는 공기함입치 이상의 모관흡

수력을 가지므로 포화토의 응력경로보다 높은 응력경로를 가지는 것으로 나타났다. 그리고 동일한 모관흡수력의 경우 순 체적응력이 증가할수록 큰 축차응력을 가지는 것으로 나타났다.

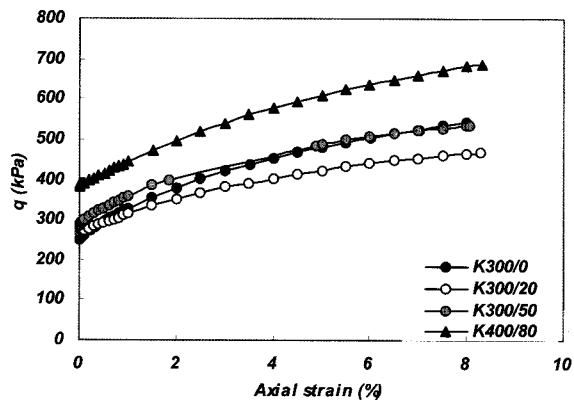
그림 7에서는 구속압에 따라 세분화한 응력-변형률 관계를 보여주고 있다. 포화토의 경우 보다 불포화토의 축차응력이 더 크게 나타나고 있다. 불포화토의 경우 모관흡수력의 증가로 인해 더 큰 축차응력을 가지는 것으로



(a)  $K_0$  압밀응력 100kPa인 경우



(b)  $K_0$  압밀응력 200kPa인 경우



(c)  $K_0$  압밀응력 300kPa이상인 경우

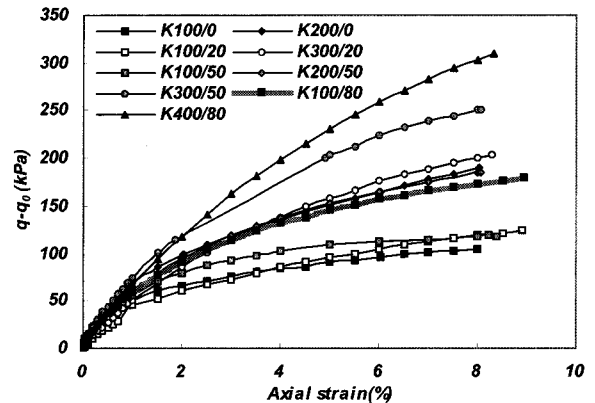
그림 7.  $K_0$  압밀 삼축시험시 구속압에 따른 응력-변형률 관계

로 판단된다. 하지만 그림 7의 (c)에서 보여 지듯이 포화토의 체적응력 300kPa일 때 축차응력이 모관흡수력이 20kPa인 경우보다 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 다른 결과들과는 일관되지 않으며 실험상의 오류로 판단된다.

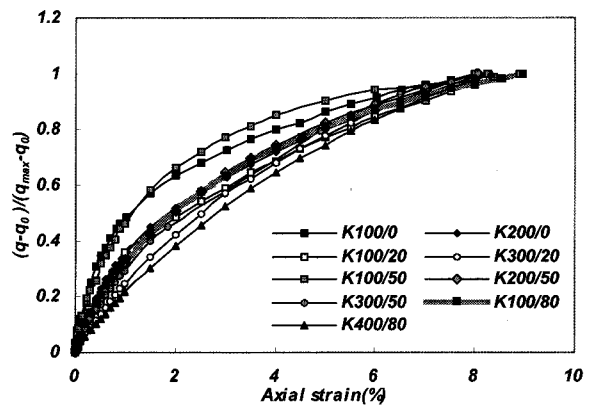
전단시의 응력-변형률 관계에서 초기 축차응력을 이동하여 그림 8(a)에 나타내었다. 포화토에 비해 불포화토에서 더 큰 축차응력의 변화를 가지는 것으로 나타났으며, 모관흡수력이 클수록 축차응력의 변화량이 증가하는 경향을 가지고 있다. 그림 8(b)에서는 축차응력을 최대축차응력으로 규준화하여 도시하였다. 그림에서 보이는 것과 같이 구속응력이 증가하거나 모관흡수력이 증가할수록 규준화된 관계에서 강성이 작게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

#### 4. 불포화토의 강도정수

Fredlund et al(1978)은 순응력과 모관흡수력을 독립적인 응력변수로 정의하였으며, 불포화토의 전단강도를



(a) 응력-변형률 관계



(b)  $K_0$  압밀시험시 규준응력-변형률관계

그림 8.  $K_0$  압밀 삼축시험시 규준화된 응력-변형률관계

식 (4)와 같이 정의하였다.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (4)$$

여기서,  $\sigma - u_a$ 는 순연직응력,  $u_a - u_w$ 는 모관흡수력을 의미한다. 그리고  $c'$ 는 포화토의 점착력,  $\phi'$ 는 내부 마찰각으로 포화토의 실험결과로부터 구할 수 있다.  $\phi^b$ 는 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력의 변화 기울기를 나타내는 흡수마찰각이다. 식 (4)에서 모관흡수력에 따른 겉보기점착력  $\bar{c}$ 는 다음과 같이 정의한다. 겉보기 점착력은 순연직응력이 0일 때 전단강도를 의미한다.

$$\bar{c} = c' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (5)$$

불포화토의 전단강도는 순연직응력이나 모관흡수력의 증가에 따라 증가하게 된다. 이러한 관계를  $\sigma - \tau - \psi$  축에서 나타내면 그림 9와 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 나타낸다.

$$q_f = d + M\bar{p}_f + N\psi_f \quad (6)$$

여기서,  $q_f$ 는 파괴시 축차응력,  $\bar{p}_f$ 는 파괴시 순 체적응력( $p_f - u_a$ ),  $\psi_f$ 는 파괴시 모관흡수력( $(u_a - u_w)_f$ )이다.

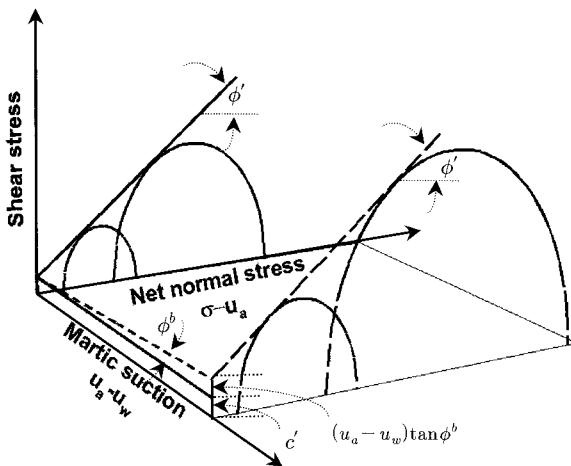


그림 9. 불포화토의 Mohr-Coulomb 파괴규준

그리고  $M$ 은 한계상태 기울기,  $N$ 은 모관흡수력에 따른 순 점착력 성분의 변화 기울기,  $d$ 는 모관흡수력이 0일 때의  $\bar{p}-q$ 축의 절편을 나타낸다.

식 (6)에서 순점착력 성분  $\bar{d}$ 를 다음과 같이 정의 하면,

$$\bar{d} = d + N\psi_f \quad (7)$$

이고 불포화토의 파괴규준은 그림 10과 같이 나타낼 수 있다.

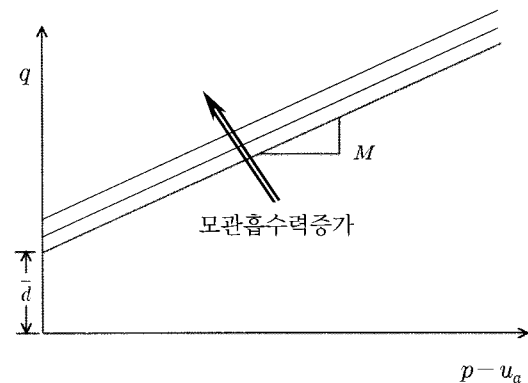
식 (7)을 식 (6)에 대입하면 파괴시 축차응력은 다음과 같다.

$$q_f = \bar{d} + M\bar{p}_f \quad (8)$$

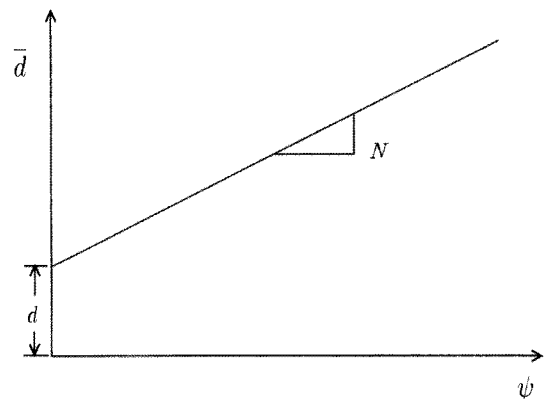
이 때 삼축압축조건/시 마찰각과 관련된 파괴규준의 기울기는 다음과 같이 나타낸다.

$$M = 6\sin\phi' / (3 - \sin\phi'), \quad (9a)$$

$$\sin\phi' = 3M / (6 + M) \quad (9b)$$



(a)  $p-q$  관계



(b)  $\psi - \bar{d}$  관계

그림 10. 불포화토의 파괴규준

그리고 순점착력 성분은 다음과 같이 나타난다.

$$\bar{c} = c' + \psi_f \tan \phi^b, \quad (10a)$$

$$\bar{d} = M \bar{c} \cot \phi' \quad (10b)$$

식 (10)을 식 (7)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(c' + \psi_f \tan \phi^b) \cot \phi' = d + N \psi_f \quad (11)$$

이로부터 식 (7)의  $d$ 와  $N$ 은  $c'$ ,  $\phi'$ ,  $\phi^b$ 로 나타낼 수 있다.

$$d = M c' \cot \phi', \quad (12a)$$

$$N = M \tan \phi^b \cot \phi' \quad (12b)$$

따라서 그림 10의 관계를 실험적으로 획득한 후,  $\phi'$ 은 식 (9b)로부터 도출할 수 있고  $c'$ ,  $\phi^b$ 는 다음 식 (13)과 (14)로부터 도출할 수 있다.

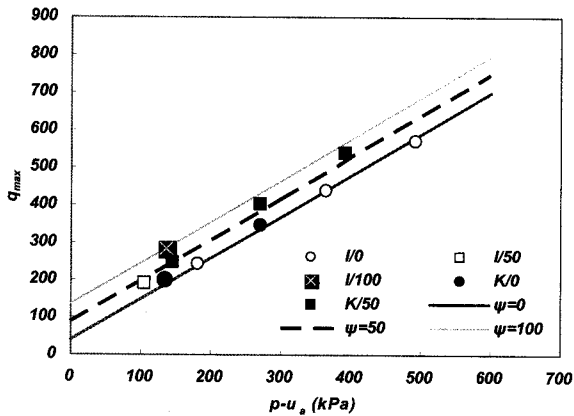
$$c' = \frac{d}{M \cot \phi'} = \frac{d}{M} \tan \phi' \quad (13)$$

$$\tan \phi^b = \frac{N}{M} \tan \phi' \quad (14)$$

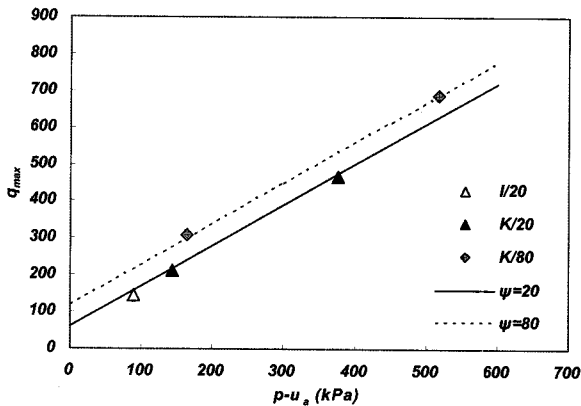
그림 11에서는  $K_0$  압밀 삼축실험 결과 나타난 순체적응력에 따른 최대축차응력을 보여준다. 최대축차응력은 순체적응력이 증가할수록 평행한 기울기를 가지며 증가하고 있다. 그리고 모관흡수력에 따라 겉보기 점착력 성분  $\bar{d}$ 는 그림 11에서 순체적응력이 0일 때 절편에 해당한다. 따라서 파괴포락선의 기울기와 관련된  $M$  또는  $\phi'$ 는 일정한 값으로 획득할 수 있으며, 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력을 도출할 수 있다.

그림 11에서와 같이 모관흡수력에 따른 파괴포락선은 실험결과와 거의 일치한다. 그림 11(a)에서 모관흡수력이 0인 포화시료에서 등방압밀조건과  $K_0$  압밀조건에서의 파괴포락선이 거의 동일한 위치에 있다는 것을 확인할 수 있다. 모관흡수력이 50인 경우에도 실험치의 최대 축차응력이 계산된 포락선의 파괴시 축차응력보다 다소 크게 나타났지만 거의 파괴포락선과 일치하는 것으로 나타났다. 모관흡수력이 100인 경우 비록 실험결과가 한 점밖에 없지만 계산된 포락선과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그림 11(b)에서도 모관흡수력 20, 80인 경우를 비교해본 결과 약간의 분산은 있었지만 등방압밀조건과  $K_0$  압밀조건에서 거의 동일한 파괴포락선을 가지는 것으로 나타났다.

그림 12에서는 그림 11에서 구한 모관흡수력에 따른 겉보기점착력을 실험치와 비교하였다. 실험치는 식 (8)을 이용하여 겉보기점착력  $q_f - M \bar{p}_f$ 를 구하였다. 설정된 실선은 실험치를 회귀분석한 결과로서 그 함수값은 그림 11에 나타난 축차응력축의 절편에 해당한다.



(a) 모관흡수력 0, 50, 100kPa일 경우



(b) 모관흡수력 20, 80kPa일 경우

그림 11. 파괴시 순체적응력에 따른 축차응력

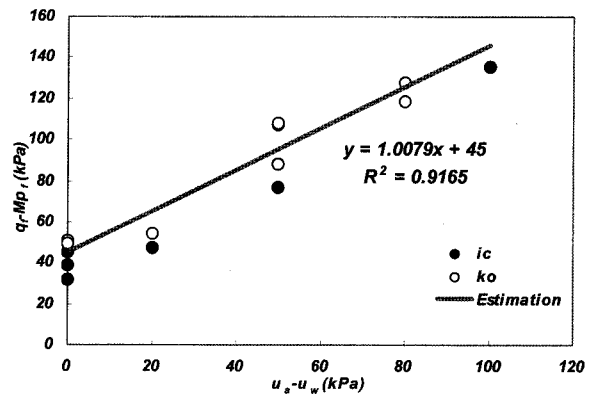


그림 12. 파괴시 모관흡수력에 따른 겉보기점착력 성분



그리고 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력은 전반적으로 실험치와 분석치가 일치하는 결과를 보이지만, 실험치가 다소 산만한 분포를 보이며 최대 20%정도 분석치와 차이를 보인다. 전반적으로 등방압밀시험결과는 회귀분석 결과보다 다소 작거나 유사한 겉보기 점착력을 나타내며  $K_0$  압밀 시험결과는 다소 크거나 유사한 결과를 나타내고 있다.

이러한 겉보기 점착력의 분산적인 분포는 그림 11에 나타난 포락선의 절편을 함수값으로 정의하기 때문에 일어난다. 그러나 절편은 150kPa 미만의 작은 범위로 규정되어 700kPa정도의 범위를 갖는 그림 11의 결과에 큰 영향을 끼치지 않는다.

그림 11과 12로부터 그림 10의 관계를 실험적으로 획득하였다. 그리고 식 9, 13, 14로부터 구한 불포화토의 강도정수를 표 4에 정리하였다.

그림 13에서는 모관흡수력의 변화에 따른 파괴시 최대주응력과 최소주응력을 나타내고 있다. 각 모관흡수력단계에 대하여 표 4에서 구한 강도정수를 이용하여 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 정

의하는 것이 합리적이라고 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 불포화 조건에서의  $K_0$  압밀 삼축압축실험을 수행하여 압밀 및 전단시 거동을 분석하였다. 시료는 점토질모래(SC)로 분류되는 풍화토를 정적으로 다짐하여 재성형하였다. 불포화토의 강도정수를 파괴시의 축차응력을 이용하여 도출하였다. 실험결과를 정리하면 아래와 같다.

- (1) 동일한 시료에 대하여  $K_0$  값은 모관흡수력이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있으며 그 상관관계를 찾을 수 있었다. 압밀과정에서 순수평응력은 모관흡수력이 증가하면 감소하고 동일한 체적응력에 대한 축차응력은 증가하는 경향을 보였다.
- (2)  $K_0$  압밀후 응력-변형률 관계에서는 모관흡수력이 클수록 동일한 변형률에 대한 축차응력이 크게 나타났다. 동일한 모관흡수력에서 순체적응력이 증가함에 따라 축차응력도 증가하는 것으로 나타났다.
- (3) 모관흡수력이 동일한 경우 등방조건과  $K_0$  조건에서의 동일한 파괴포락선을 가지는 것으로 나타났다. 그리고 모관흡수력이 증가함에 따라서 겉보기 점착력은 유사하게 증가하는 것으로 나타났다.
- (4) 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 것보다 더 합리적일 것으로 판단된다.

표 4. 불포화토의 강도정수

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

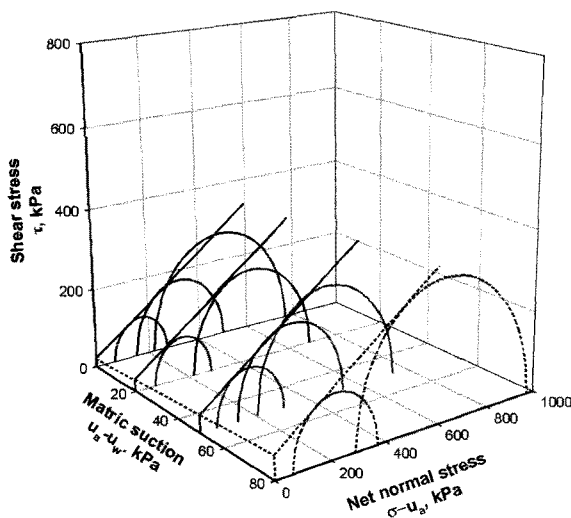


그림 13. 파괴시 주응력에 따른 파괴포락선

## 감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원에서 주관한 건설핵심기술연구개발사업의 수탁과제인 “불포화 사면 및 다짐 지반 최적화 표준설계를 위한 지반정수 산정 기술(04핵심기술A01-08)”의 연구비지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 김태경, 오세봉 (2006), “불포화 풍화토의  $K_0$  압밀삼축실험”, 2006

한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp.860-865.

2. 김찬기 (1998), “풍화잔적토의 응력-변형률 거동 특성”, *대한토목학회논문집*, 제18권, 제III-6호, pp.899-909.
3. 송창섭 (1994), “불포화토의 거동예측을 위한 구성식 개발”, 서울대학교, 박사학위 논문.
4. 이성진 (2002), “화강풍화토의 불포화 전단강도 특성에 관한 연구”, *대한토목학회논문집*, 제22권, 제1-C호, pp.81-88.
5. Bishop, A. W. (1959), “The Principle of Effective Stress”, *Technisk Ukeblad*, 106(99), pp.859-863.
6. Bolzon, G., Schrefler, A. and Zienkiewicz, O. C. (1996), “Elasto-plastic soil constitutive laws generalized to partially saturated state”, *Géotechnique*, Vol.48, No.2, pp.279-289.
7. Chandler, R. J. and C. I. Gutierrez. (1986), “The filter-paprer method of soil suction measurement”, *Géotechnique*, Vol.36, pp.265-268.
8. Escario, V. and Saez, J. (1986), “The shear Strength of partly saturated soils”, *Géotechnique*, Vol.36, No.3, pp.453-456.
9. Fredlund, D. G., Mogensten, N. R. and Widger, R. A. (1978), “The shear strength of unsaturated soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, 15, pp.313-321.
10. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, JOHN WILEY & SONS, INC. pp.217-296.
11. Jennings, J. E. and Burland, J. B. (1962), “Limitation to the use of effective stress in partly saturated soils”, *Géotechnique*, 12(2), pp.125-144.
12. Khalili, N. and Khabbaz, M. H. (1998), “A unique relationship for  $\chi$  for the determination of the shear strength of unsaturated soils”, *Géotechnique*, Vol.48, No.5, pp.681-687.
13. Ladd, C. C. (1965), “Stress-strain Behavior of Anisotropically Consolidated Clays during Undrained Shear”, *Proc., 6th ICSMFE, Montreal*, Vol.1, pp.282-286.
14. Oberg, A. L. and Sallfors, G. (1995), “A rational approach to the determine of the shear strength parameters fo unsaturated soils”, *Proc. 1st Int. Conf. Unsaturated Soils*, Paris, pp.151-158.
15. Terzaghi, K. (1936), “The shear resistance of saturated soils”, 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Vol.1, pp.54-56.
16. Rassam, D. W. and Williams, D. J. (1999), “A relationship describing the shear strength of unsaturated soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, pp.363-368.
17. Vanapilli 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.

(접수일자 2008. 1. 7, 심사완료일 2008. 4. 30)