

## 낮은 모관흡수력 수준에서 불포화토의 Bishop 응력에 관한 연구

### On the Bishop Stress of Unsaturated Soils under the Low Level of Matric Suction

오 세 봉<sup>1</sup> Oh, Se-Boong

김 태 경<sup>2</sup> Kim, Tae-Kyung

#### Abstract

In this study, the triaxial behaviour of an unsaturated soil was analyzed by Bishop stress descriptions.  $K_0$  stress paths and those final values were independent of matric suctions after describing by the Bishop stress. The failure criteria could be defined uniquely by the Bishop stress and were also independent of matric suctions. In the low level of matric suctions the failure criteria have a linear relationship and the estimated criterion fits the measured accurately. The variable  $\chi$  for describing the Bishop stress was a constant theoretically under the low level of matric suctions. The suction stress could be defined at zero deviatoric stress in the failure criteria and increased linearly with respect to matric suctions in both the theory and the experiments.

#### 요 지

본 연구에서는 불포화토의 삼축시험시 거동을 Bishop 응력으로 기술하여 분석하였다. Bishop 응력으로 기술한  $K_0$  압축시 경로 및 최종값은 모관흡수력에 무관하게 유일한 관계로 나타나고 있음을 알 수 있었다. 불포화토의 파괴포락선은 Bishop 응력으로 기술할 경우에 모관흡수력에 무관하게 유일한 관계를 나타내고 있었다. 특히 모관흡수력이 낮은 경우에는 선형적인 관계를 나타내며 실험치와 이론치가 잘 일치하고 있었다. 그리고 Bishop 응력을 기술하는 변수  $\chi$ 는 이론적으로 일정한 값을 가지고 있음을 입증하였다. 파괴규준에서 축차응력이 0인 경우 정의되는 흡수응력은 모관흡수력에 대하여 선형적으로 증가하며 실험치와 이론치가 적절하게 일치하였다.

**Keywords :** Bishop stress, Failure criteria, Matric suction, Unsaturated soils

#### 1. 서 론

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

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

여기서  $\sigma^*$ 는 Bishop의 유효응력,  $\sigma$ 는 전응력,  $u_a$ 와  $u_w$ 는 각각 간극공기압과 간극수압을 나타낸다.  $\chi$ 는 포화

도에 의존하는 변수로서 완전 포화시는 1의 값을 가지고 완전 건조시는 0의 값을 가진다. Bishop 응력은 그림 1과 같이 수직응력 성분을 식 (1)과 같이 흙 골격의 대표단면에 작용하는 응력변수로 정의하는 것이다. 따라서 Bishop 응력으로 기술할 경우에는 모관흡수력이 독립적인 응력변수로 정의될 수 없다.

Fredlund 등(1978)에 의하면 동일한 순연직응력 조건에서 모관흡수력의 증가에 따라 전단강도가 선형적으로 증가한다. 한편 Vanapalli 등(1996)과 Rassam과 Williams(1999)

1 정희원, 영남대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil and Environmental Engineering, Yeungnam Univ., sebungoh@yu.ac.kr, 교신저자)

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

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

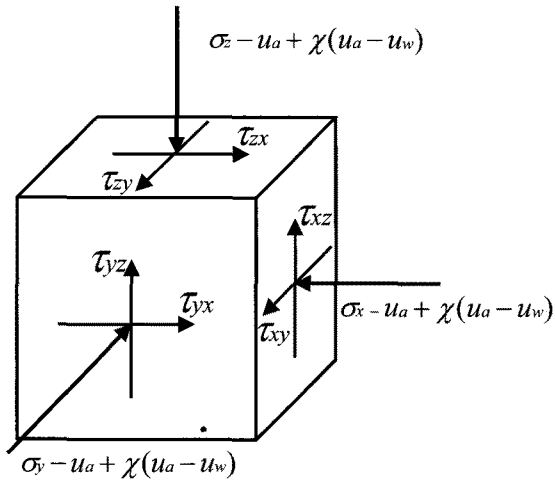


그림 1. Bishop 응력의 정의

의 연구에서는 모관흡수력이 증가하면서 점차 비선형적인 변화를 나타내는 것으로 확인되었다.

하지만 Lu와 Likos(2006)에 의하면 모관흡수력은 작용면이 흙 미시구조의 물과 공기의 접면에 작용하므로 흙 골격의 대표단면에 작용하는 독립적인 응력변수로 적용하기가 곤란하다. 더욱이 Bishop 응력을 적절하게 정의하면 불포화토의 전단강도를 포화토와 동일한 Mohr-Coulomb 파괴규준으로 정의할 수 있다고 보고되고 있다(Oberg와 Sallfors, 1995; Bolzon 등, 1996; Khalili와 Khabbaz, 1998). 또는 흡수응력(suction stress)을 정의하여 모관흡수력과 관계를 기술하고 이로부터 파괴규준을 정의하였다(Lu와 Likos, 2006). 이러한 연구를 토대로 Bishop 응력을 독립변수로 응력-변형률 관계 및 강도를 기술하는 것이 합리적이라고 판단된다. 이 때 식 (1)에 나타난  $\chi$ 의 정의가 필요하다.

Bishop 응력을 기술하는 변수  $\chi$ 는 포화도나 모관흡수력의 함수로 나타난다. Khalili와 Khabbaz(1998)는  $\chi$ 를 공기함입치로 표준화한 모관흡수력의 함수로 정의하였다. 한편 Vanapali와 Fredlund(2000)는 포화도의 함수로  $\chi$ 를 정의하였다. 김영석과 Oka(2008)는 횡변위를 측정 한 등방삼축시험을 수행하여 불포화토의 체적변화를 측정하였다. 이러한 실험결과에 대하여  $\chi$ 를 포화도로 정의하여 Bishop 응력을 분석한 결과, 한계상태강도가 다양한 모관흡수력에 대하여 동일한 파괴규준으로 정의되는 것을 밝혔다. Tarantino(2007)는 표준화한 포화도를  $\chi$ 로 정의하여 유사한 결과를 보고한 바 있다. 이러한 연구를 토대로  $\chi$ 를 포화도로 정의하는 것이 가장 편리할 것으로 판단된다.

불포화토에 작용하는 모관흡수력의 크기는 수리특성에 따라 다양하게 변화한다. 이인모 등(2003)은 현장사면에서 모관흡수력 및 체적함수비를 측정하였고 대상지반에 대한 투수해석을 수행하였다. 강우 전 모관흡수력이 작을수록 침투현상이 미약하게 이루어지며 흡수력의 변화가 작게 발생하였다. 반면 투수계수는 크기 때문에 깊은 깊이까지 영향을 끼치는 것을 확인하였다. 오세봉 등(2008)은 강우시 붕괴사면의 사례 연구를 통하여 사면에 작용하는 모관흡수력이 20kPa 정도의 낮은 수준임을 보여주었다. 이로 미루어 보건대 실제 사면과 같은 공학적 문제에서 발생하는 모관흡수력의 수준은 제한적인 범위에서 작용할 경우가 있다. 따라서 이러한 제한적인 조건에서 Bishop 응력을 정의하는 것이 실용적으로 필요한 실정이다.

본 연구에서는 김태경과 오세봉(2008)에 의한 실험결과를 토대로 Bishop 응력에 의거하여  $K_0$  압밀 불포화토의 거동을 분석한다. 본 연구는 낮은 모관흡수력 수준의 거동에 초점을 두고 있으며, 변수  $\chi$ 를 포화도에 의거하여 Bishop 응력을 기술한다.

먼저 Bishop 응력을 독립변수로  $K_0$  압밀 경로와 응력-변형률 관계를 기술할 수 있음을 입증하고자 한다. 또한 파괴규준을 모관흡수력에 상관없이 유일한 관계로 기술할 수 있는지에 초점을 두고 있다. 마지막으로 파괴시  $\chi$ 에 대하여 실험치와 이론치의 비교를 할 것이다.

## 2. 불포화토의 삼축실험

김태경과 오세봉(2008)은 국내 풍화토를 대상으로 모관흡수력을 조절하며  $K_0$  압밀 삼축압축시험을 수행하였다. 삼축시험장비는 2중셀 구조로 외부셀과 내부셀로 구분된다. 이중 내부셀은  $K_0$  압밀시 시료의 체적을 측정하여 시료의 횡방향 변화량을 측정하게 하는 역할을 한다. 내부셀에는 갭센서가 설치되어 있으며, 여기서 측정되는 횡방향 변위의 변화량은 피드백라인을 통하여  $K_0$  컨트롤러서보로 보내어진다.  $K_0$  컨트롤러서보는 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 라인인 압밀 및 전단시 시료내부에서 배수되는 물의 통로가 된다.

실험에 사용된 시료는 직경 50mm, 높이 100mm의 실

린더 형태로 재성형하여 시험을 수행하였다. 최대 건조 단위중량은  $1.74t/m^3$ 이고 최적함수비는 14.8%이며 초기 간극비는 0.514였다. 모관흡수력은 20, 50, 80kPa의 경우에 대하여 수행하였으며 순체적응력은 100, 200, 300, 400kPa로 실험을 수행하였다. 이때 압밀 및 파괴시 상태와 응력은 표 1에 정리하였다.

표 1에서  $\sigma_{hc}$ ,  $\sigma_{vc}$ 는 압밀완료시 수평응력과 연직응력이고  $\psi$ 는 모관흡수력이다. 그리고  $\bar{p}_c$ ,  $q_c$ 는 압밀완료시 순체적응력, 축차응력이며  $\bar{p}_f$ ,  $q_f$ 는 파괴시 응력이다. 또한  $(S_r)_c$ 는 압밀완료시 포화도이며,  $(S_r)_f$ 는 파괴시 포화도이다. 범례는 압밀완료시 순 체적응력과 모관흡수력으로 표시하였다. 예를 들어 K100/50은 순 체적응력 약 100kPa까지  $K_0$  압밀한 경우로 모관흡수력은 50kPa이다. 각 모관흡수력에 따른 구분은(K/모관흡수력의 크기)로 나타냈으며, 예를 들어 K/20은 모관흡수력이 20kPa인 시험들을 칭한다.

그림 2에서는 대상 시료의 포화도로 나타낸 함수특성

곡선을 보여주고 있다. 모관흡수력이 100kPa 미만일 경우에는 포화도가 90%이상의 큰 값을 나타내고 있다. 이는 국내 풍화토에서 투수계수가 작은 경우에 나타나는 현상으로 여겨진다(오세봉 등, 2008).

식 (1)의 Bishop 응력에서 나타난 변수  $\chi$ 를 포화도  $S_r$ 로 나타내면 Bishop 체적응력은 다음과 같이 정의할 수 있다(김영석과 오카, 2008).

$$p^* = (p - u_a) + S_r(u_a - u_w) \quad (2)$$

그림 3에서는  $K_0$  압밀시 Bishop 체적응력과 축차응력 면에서의 경로를 나타내고 있다. 압밀과정에서 응력 경로는 낮은 응력수준에서는 비선형적인 형태를 나타내지만 응력이 증가함에 따라 차차 선형적인 형태로 전환되고 있다. 특히 Bishop 응력으로 기술한 결과 모관흡수력과 상관없이 응력경로가 유일한 직선으로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 압밀과정에서 평균 포화도는 0.94였다.

표 1.  $K_0$  압밀 삼축실험 초기조건 및 결과

구분	범례	$\sigma_{hc}$ (kPa)	$\sigma_{vc}$ (kPa)	$\psi$ (kPa)	$\bar{p}_c$ (kPa)	$q_c$ (kPa)	$\bar{p}_f$ (kPa)	$q_f$ (kPa)	$(S_r)_c$ (%)	$(S_r)_f$ (%)	비고
K/0	K100/0	73	168	0	104	95	135	200	100	100	K300/0는 분석에서 제외
	K200/0	155	313	0	208	158	270	347	100	100	
	K300/0	223	470	0	305	248	404	543	100	100	
K/20	K100/20	93	182	20	104	89	144	212	95.7	96.5	
	K300/20	239	504	20	308	265	376	468	100	100	
K/50	K100/50	112	240	50	104	128	145	248	NA	NA	체적변화 측정 못함
	K200/50	184	402	50	207	217	269	403	NA	NA	
	K300/50	262	551	50	308	289	392	540	NA	NA	
K/80	K100/80	142	270	80	105	129	163	304	86.3	89.9	
	K400/80	368	746	80	414	378	517	687	92.6	100	

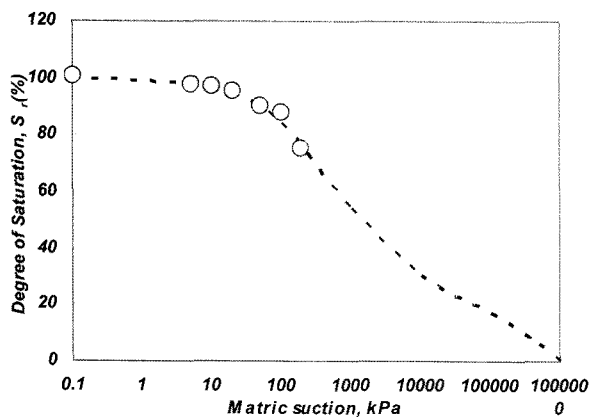


그림 2. 함수특성곡선

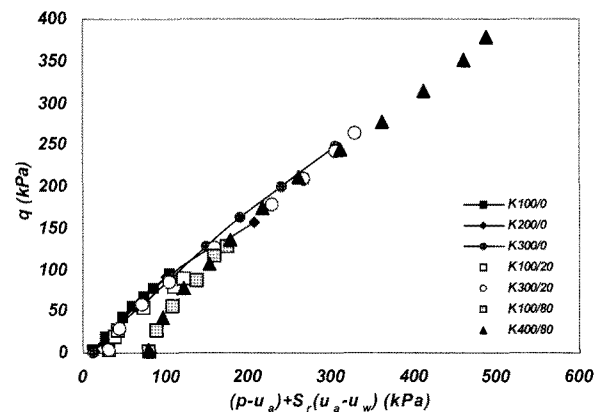


그림 3.  $K_0$  압밀시 Bishop 체적응력-축차응력 경로

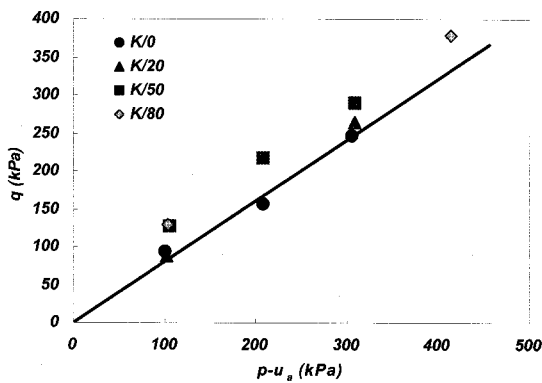
그림 4 (a)에서는  $K_0$  압밀시 순체적응력에 따른 압밀 완료시 축차응력을 보여주고 있다. 모관흡수력이 증가할수록 동일한 체적응력에 대한 축차응력은 증가하는 경향을 보이고 있다. 하지만 모관흡수력 50kPa 이상이 되면 동일한 체적응력에 대한 축차응력은 거의 유사한 값을 가지는 것으로 나타났다.

반면 그림 4 (b)에서 보여지듯이 Bishop 응력으로 체적응력을 기술하면 모관흡수력에 상관없이 유일한 직선으로 나타나고 있다. 불포화토에서 정지토압계수는 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

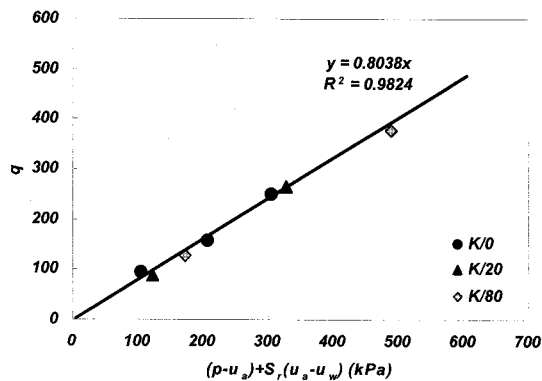
$$K_0 = \frac{\sigma_h^*}{\sigma_v^*} = \frac{3 - \eta_0}{2\eta_0 + 3} \quad (3)$$

여기서 그림 4에서 나타난 체적응력과 축차응력간의 기울기  $\eta_0$ 가 0.8038이므로 정지토압계수는 0.4766으로 일정하게 나타났다.

전단시의 응력-변형률 관계에서 Bishop 체적응력으로 표준화하여 그림 5에 나타내었다. 순체적응력이 100, 200, 300kPa인 경우에 대하여 모관흡수력에 따른 응력-변형률 관계를 비교하였으며 포화시료의 등방압축시



(a) 순체적응력

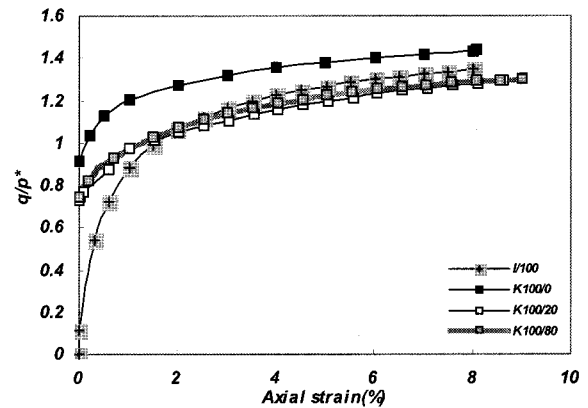


(b) Bishop 체적응력

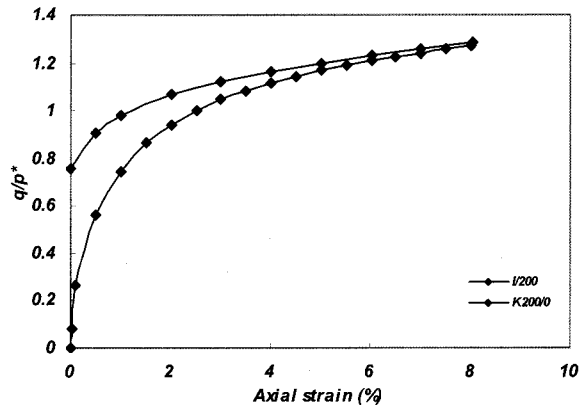
그림 4.  $K_0$  압밀시 최종 체적응력-축차응력

결과가 포함되어 있다. 그림 5 (a)에서 보여지듯이 순체적응력 100kPa이고 모관흡수력이 20, 80kPa인 경우에는 표준화한 응력-변형률 관계가 잘 일치하고 있으며 등방압축시 결과와도 수렴하는 경향을 나타내고 있다. 다만 모관흡수력이 0인 K100/0 경우(순체적응력 100kPa인 포화시료)에는 다소 불일치하는 경향을 보이고 있다.

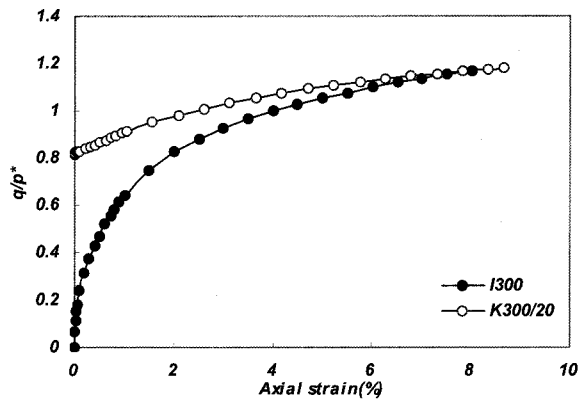
그림 5 (b)에서 보여지듯이 순체적응력 200kPa인 포화시료의  $K_0$  압축시 응력-변형률 관계가 등방압축시 결



(a) 순체적응력 100kPa인 경우



(b) 순체적응력 200kPa인 경우



(c) 순체적응력 300kPa인 경우

그림 5. Bishop 응력으로 표준화한 응력-변형률 관계

과와 수렴하는 경향을 나타내고 있다. 그림 5 (c)에서는 순체적응력이 300kPa인 경우에 모관흡수력이 20kPa에 대한 관계(K300/20)는 등방압축시 결과에 잘 수렴하고 있다.

이러한 경향으로 미루어 보건대, Bishop 응력으로 기술하는 응력-변형률 관계가 모관흡수력과 무관하게 표현될 수 있는 가능성을 보여준다. 하지만 관련된 자료의 축적이 추가적으로 이루어져야 할 것으로 보인다.

그림 6에서는  $K_0$  압밀 불포화토의 체적변형률을 보여주고 있으며 순체적응력이 증가할수록 체적변형률이 증가하는 경향을 나타낸다. 순체적응력이 100kPa인 경우에는 모관흡수력이 20, 80kPa인 경우가 비교되고 있으며 두 가지 경우의 체적변형률이 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

### 3. 불포화토의 파괴규준

Fredlund 등(1978)은 순연직응력과 모관흡수력을 독립적인 응력변수로 정의하였으며, 불포화토의 수정 Mohr-Coulomb 파괴규준을 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.

본 연구는 모관흡수력의 수준이 낮은 영역에서의 거동에 국한하고 있다. 따라서 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력이 선형적으로 나타나고  $\phi^b$ 가 일정한 경우를 대

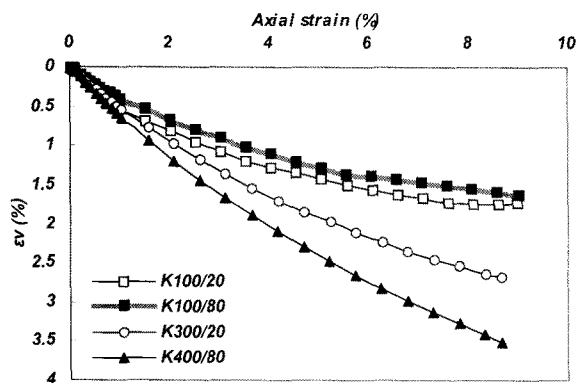


그림 6.  $K_0$  압밀 삼축시험시 체적변화

상으로 한다.

불포화토의 파괴규준을 응력 불변수(stress invariant)를 이용하여 정의할 수 있다.  $\bar{p}_f$ 는 파괴시 순 체적응력(즉  $p_f - u_a$ ),  $q_f$ 는 파괴시 축차응력,  $\psi_f$ 는 파괴시 모관흡수력(즉  $u_a - u_w$ )일 때 파괴시 축차응력은 다음과 같이 나타낸다(김태경과 오세봉 2008).

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

여기서  $M$ 은 한계상태 기울기,  $N$ 은 모관흡수력에 따른 순 점착력 성분의 변화 기울기,  $d$ 는 모관흡수력이 0 일때의  $\bar{p}-q$ 축의 절편을 나타낸다. 그림 7에서와 같이 모관흡수력이 증가할 때 불포화토의 파괴규준은 공간 상에서 유일한 파괴 평면을 형성하고 있음을 알 수 있다. 모관흡수력의 수준이 높은 영역에서  $\phi^b$ 가 일정하지 않으면  $N$ 도 모관흡수력의 함수로 나타날 것이다. 이러한 경우는 그림 7의 파괴면이 곡면으로 나타난다.

이 때 삼축압축조건시 마찰각과 관련된 파괴규준의 기울기는 다음과 같이 나타낸다.

$$\phi' = \sin^{-1}\{3M/(6+M)\} \quad (6)$$

$c'$ ,  $\phi^b$ 는 다음 식 (7)과 (8)로부터 도출할 수 있다.

$$c' = \frac{d}{M} \tan \phi' \quad (7)$$

$$\phi^b = \tan^{-1}\left(\frac{N}{M} \tan \phi'\right) \quad (8)$$

김태경과 오세봉(2008)은 식 (5)의 파괴규준을 기술

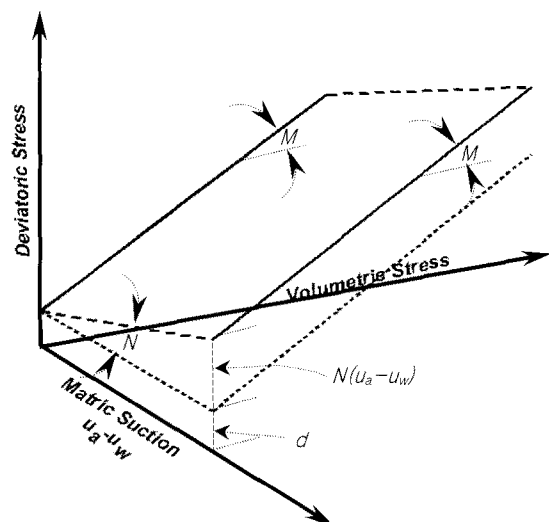


그림 7. 불포화토의 파괴규준

하는데 필요한 불포화토의 강도정수를 표 2와 같이 실험적으로 획득하였다. 이러한 결과를 그림 8의 응력공간에 나타내면 등방압축시 및  $K_0$  압축시 파괴규준이 유일한 평면으로 규정되는 것을 알 수 있다.

Bishop 응력에 의하여 수직응력을 정의하면 Mohr-Coulomb 파괴규준은 다음과 같이 정의할 수 있다(Lu와 Likos, 2004).

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a)_f \tan \phi' + \chi_f (u_a - u_w)_f \tan \phi' \quad (9)$$

이를 식 (4)에서 흡수마찰각  $\phi^b$ 와 비교하면 다음과 같다.

$$\tan \phi^b = \chi_f \tan \phi' = f(u_a - u_w) \quad (10)$$

이 때  $\phi^b$ 는 모관흡수력의 함수로 정의되며 포화도나 체적함수비를 변수로 기술할 수 있다.

식 (1)에 나타난 Bishop 응력으로 체적응력을 정의하면 다음과 같다.

$$p^* = (p - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (11)$$

그리고 Bishop 응력에 대한 파괴규준은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$q_f = d + Mp_f^* \quad (12a)$$

즉

$$q_f = d + M\{(p - u_a)_f + \chi_f(u_a - u_w)_f\} \quad (12b)$$

표 2. 불포화토의 강도정수

M	N	d	c' (kPa)	$\phi$ (°)	$\phi^b$ (°)
1.1	1.0	45	21.5	27.7	25.5

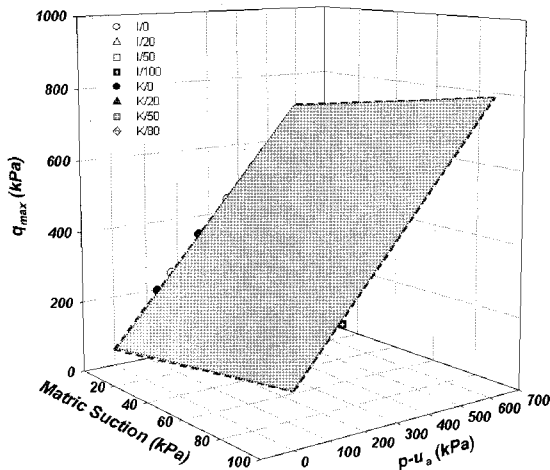


그림 8. 대상 불포화토의 파괴규준

이다. 여기서  $\chi_f$ 는 다음과 같이 유도된다.

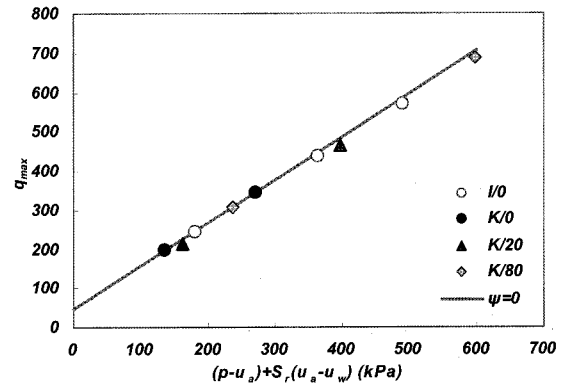
$$\chi_f = \frac{q_f - d - M(p - u_a)_f}{M(u_a - u_w)_f} \quad (13)$$

식 (13)에 식 (5)을 대입하면  $\chi_f$ 는 다음과 같다.

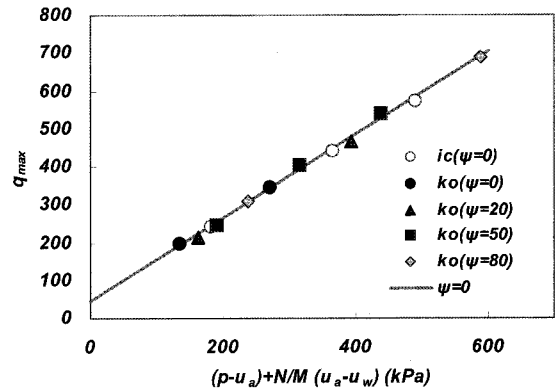
$$\chi_f = N/M \quad (14)$$

결국 모관흡수력의 수준이 낮은 경우, N이 일정한 영역의 거동에서는  $\chi_f$ 가 일정하게 나타난다. 따라서 표 2에 나타난 결과를 대입하면  $\chi_f$ 는 0.9091이 된다.

그림 9에서는 Bishop 응력에 따른 파괴규준을 나타내고 있으며 실선은 식 (12)의 파괴포락선이다. 식 (12)의 파괴규준은 포화시 모관흡수력이 0일 경우에 식 (5)에서 기술하는 파괴규준과 일치한다. 그림 9 (a)는 실험치는  $\chi = S_r$ 인 경우에 Bishop 응력을 정의하여 나타낸 것으로 실험치의 평균 포화도는 0.966이었다. 그림 9 (b)에서는  $\chi_f = N/M$ 일 경우에 해당하며 포화도를 측정하지 못한 모관흡수력 50kPa인 경우를 포함한다. 실험치는 모관흡수력에 상관없이 전반적으로 유일한 직선상에 나



(a)



(b)

그림 9. Bishop 체적응력에 따른 파괴시 축차응력

타나며, 식 (12)의 파괴포락선과 잘 일치하고 있다. 특히 낮은 모관흡수력 수준에서  $\chi = S_f$ 인 경우와  $\chi_f = N/M$ 인 경우의 분석결과가 별 차이를 나타내지 않고 있다.

따라서 Bishop 응력으로 정의된 파괴규준은 모관흡수력에 상관없이 유일하게 정의될 수 있으며 모관흡수력의 수준이 낮은 경우에는  $\chi_f = N/M$ 로 정의할 수 있음을 알 수 있다.

그림 10에서는  $K_0$  압밀 삼축실험 결과 나타난 순체적응력에 따른 최대축차응력을 보여준다. 최대축차응력은 순체적응력이 증가할수록 평행한 기울기를 가지며 증가하고 있다. 이러한 파괴규준을 축차응력이 0인 경우까지 연장하면 흡수응력(suction stress)을 다음과 같이 정의할 수 있다(Lu와 Likos, 2006).

$$p_s = \frac{q_f}{M} - \frac{p_f}{M} = \frac{d + N\psi_f}{M} \quad (15)$$

Lu와 Likos(2006)는 그림 9에 나타난 흡수응력을 적용한 파괴규준을 다음과 같이 기술하였다.

$$q = M(p - u_a)_f + Mp_s \quad (16)$$

이 때 흡수응력은 다음과 같이 정의된다.

$$p_s = X(u_a - u_w)_f \quad (17)$$

여기서  $X$ 는 흡수응력 계수이다. 이러한 흡수응력은 모관흡수력에 대하여 유일한 관계를 나타내며 이를 흡수응력 특성곡선으로 기술할 수 있다. 따라서 식 (9)에 의하여 흡수응력은 다음과 같이 유도된다.

$$p_s = d/M + N(u_a - u_w)/M \quad (18)$$

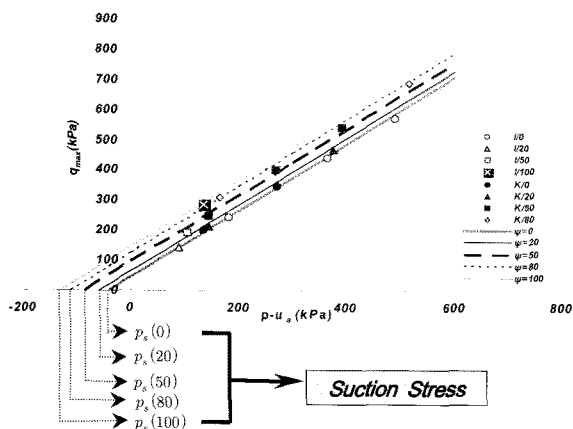


그림 10. 파괴시 순체적응력에 따른 축차응력

그림 11에서는 낮은 응력수준의 모관흡수력에 따른 흡수응력을 보여주고 있다. 실험에서 구한 흡수응력은 파괴시 응력을 축차응력이 0인 경우까지 연장하여 구한 것이다. 즉

$$p_s = \frac{q_m}{M} - \overline{p_m} \quad (19)$$

여기서,  $q_m$ 은 측정된 축차응력이며,  $\overline{p_m}$ 는 측정된 순체적응력이다. 식 (18)에서 나타난 바와 같이 모관흡수력이 증가함에 따라 흡수응력은 선형적으로 증가하고 있으며 실험치로부터 구한 흡수응력과 잘 일치하는 것으로 보여진다.

흡수응력 계수  $X$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$X = d/M(u_a - u_w) + N/M \quad (20)$$

한편 측정된 응력으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X = \frac{q_m/M - \overline{p_m}}{u_a - u_w} \quad (21)$$

그림 12에서는 모관흡수력에 따른 흡수응력계수를

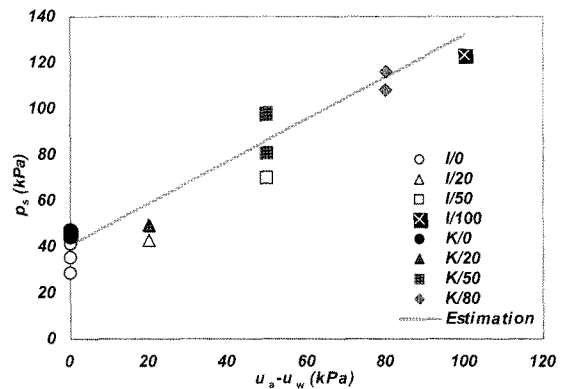


그림 11. 모관흡수력에 따른 흡수응력

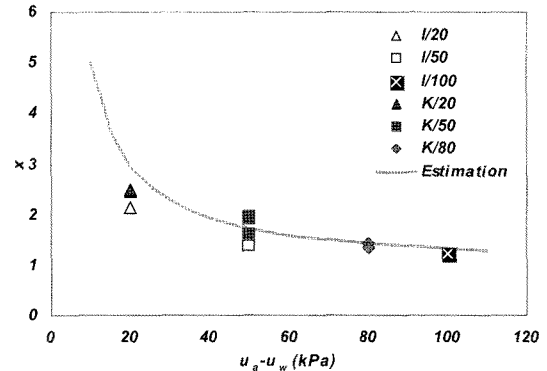


그림 12. 모관흡수력에 따른 흡수응력계수

보여주고 있으며 식 (20)에서 나타난 결과가 실험치로부터 구한 흡수력 계수와 잘 일치하고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 김태경과 오세봉(2008)에 의한 실험결과를 토대로 불포화토의 Bishop 응력을 기술하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 낮은 수준의 모관흡수력에서는 Bishop 응력을 포화도를 이용하여 기술할 수 있었다. 이러한 Bishop 응력을 이용한 경우에  $K_0$  압축시 경로가 모관흡수력에 무관하게 유일한 직선으로 수렴하였다. 또한 압밀완료시 응력이 유일한 직선으로 나타나며  $K_0$  값이 0.48로 나타났다.
- (2) Bishop 응력으로 규준화한 응력-변형률 관계를 통하여 모관흡수력에 따른 차이가 크게 나타나지 않고 수렴하는 경향을 확인하였다. 하지만 일부 실험결과에서는 차이가 발생하였으며, Bishop 응력으로 실제 응력-변형률 관계를 기술하는 추가적인 자료의 축적이 필요하다.
- (3) Bishop 응력으로 기술한 Mohr-Coulomb 파괴규준은 유일한 직선으로 정의할 수 있었다. 그리고 실험에서 구한 파괴시 응력과 잘 일치하였다. 특히 낮은 모관흡수력 수준에서는 파괴시  $\chi$ 가 일정한 값으로 나타남을 이론적으로 입증하였다.
- (4) 흡수응력은 모관흡수력에 대하여 선형적인 관계를 가지고 있으며 실험치와 이론치가 적절하게 일치하고 있었다. 그리고 흡수응력 계수는 모관흡수력이 증가함에 따라 비선형적으로 감소하는 특성을 실험치와 이론치로부터 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

이 연구는 2008학년도 영남대학교 학술연구조성비에 의한 것으로 연구비의 지원에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. 김영석, 오카 후사오 (2008), “다양한 석션 레벨에서의 불포화실트의 삼축압축거동에 관한 실험적 연구”, 한국지반공학회논문집 제24권 1호, pp.25-35.
2. 김태경, 오세봉 (2008), “불포화토의  $K_0$  압밀 삼축압축실험시 모관흡수력에 따른 정치토압계수 및 전단강도에 관한 연구”, 한국지반공학회논문집, 제24권 5호, 인쇄중.
3. 오세봉, 문종호, 김태경, 김윤기 (2008), “불포화 지반특성 영향에 대한 강우시 사면붕괴의 사례연구”, 대한토목학회논문집, 제28권 3C호, 인쇄중.
4. 이인모, 조우성, 김영욱, 정상규 (2003), “풍화토 사면에서 강우로 인한 간극수압 변화에 대한 실험연구”, 한국지반공학회논문집, 19권, 1호, pp.41-49.
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”, *Geotechnique*, Vol.48, No.2, pp.279-289.
7. Fredlund, D. G., Mogensten, N. R. and Widger, R. A. (1978), “The shear strength of unsaturated soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, 15, pp.313-321
8. Khalili, N. and Khabbaz, M. H. (1998), “A unique relationship for  $\chi$  for the determination of the shear strength of unsaturated soils”, *Geotechnique*, Vol.48, No.5, pp.681-687.
9. Lu, N., and Likos, W. J. (2004). *Unsaturated soil mechanics*, Wiley, New York.
10. Lu, N., and Likos, W. J. (2006), “Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.2, pp.132-142
11. Oberg, A. L. and Salfors, 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.
12. Tarantino, A. (2007), “A Possible critical state framework for unsaturated compacted soils”, *Geotechnique*, Vol.57, No. 4, 385-389
13. 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.
14. 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.
15. Vanapalli, S. K., and Fredlund, D. G., 2000, “Comparison of empirical procedures to predict the shear strength of unsaturated soils using the soil-water characteristic curve,” in *Advances in Unsaturated Geotechnics*, Shackelford, C. D, Houston, S. L., and Chang, N. Y., eds., GSP No.99, ASCE, Reston, VA, pp.195-209.

(접수일자 2008. 6. 5, 심사완료일 2008. 7. 14)