한국지반공학회논문집 제27권 1호 2011년 1월 pp. 41 ~ 52

다짐 풍화토의 K_0 압축 삼축시험에서 나타난 파괴이전 흡수응력 특성곡선

Suction Stress Characteristic Curve before Failure in the K_0 Consolidated Triaxial Tests for the Compacted Residual Soil

오 세 붕[1] Oh, Seboong
盧 寧[2] Lu, Ning
송 하 동[3] Song, Ha-Dong

Abstract

The hypothesis on effective stress of unsaturated soil is validated by K_0 consolidation results of triaxial tests for the compacted residual soil. The stress characteristic curve (SSCC) can describe unsaturated soil behavior on water contents, which was defined from shear strength or from soil water characteristic curves. In this study, it was found that the stress path of K_0 consolidation can also define the SSCC. The effective stress was defined by SSCC. K_0 paths for various matric suctions could be described as a unique line by effective stress. The measured values of K_0 were interpreted by effective stress as a constant with respect to matric suction. Since the SSCC from K_0 consolidation agrees with that from the shear strength, the SSCC from soil water retention curve could describe effective stress behavior consistently on both K_0 consolidation path and stress at failure. The effective stress based on SSCC can describe the entire unsaturated behavior from consolidation to failure.

요 지

풍화토의 다짐성형 시료에 대한 삼축시험의 K_0 압밀 결과를 바탕으로 불포화토에 대한 유효응력 가설을 검증하였다. 흡수응력 특성곡선은 함수특성에 관한 불포화토 거동을 기술하며, 전단강도나 함수특성곡선으로부터 구할 수 있다. 본 연구에서는 K_0 압밀 경로도 흡수응력 특성곡선을 정의할 수 있음을 밝혔다. 그리고 흡수응력에 근거하여 유효응력을 정의할 수 있었다. 다양한 모관흡수력 하에서 K_0 경로는 유효응력에 의하여 유일한 직선으로 기술될 수 있었다. 또한 측정된 K_0 값은 유효응력에 의하여 임의의 모관흡수력에 대하여 일정한 값으로 분석되었다. K_0 압밀 경로로부터 구한 흡수응력 특성곡선은 파괴규준으로부터 구한 것과 일치한다. 특히 함수특성곡선으로부터 구한 흡수응력 특성곡선이 K_0 압밀 경로 및 파괴시 응력에서 나타나는 유효응력 거동을 모두 일관되게 기술할 수 있었다. 흡수응력 특성곡선에 기반한 유효응력은 압밀에서 파괴에 이르는 불포화토의 전 거동을 기술할 수 있다.

Keywords : Consolidation, Effective stress, Suction stress, Unsaturated soils

1 정회원, 영남대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ., sebungoh@yu.ac.kr, 교신저자)
2 Prof., Division of Engrg., Colorado School of Mines, Golden, CO 80401
3 영남대학교 건설시스템공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

Bishop 유효응력은 다음과 같이 정의할 수 있다(Bishop, 1954, 1959; Bishop와 Blight, 1963).

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

여기서 $(\sigma - u_a)$는 순응력으로 전응력에서 간극공기압을 제외한 부분이다. 간극공기압이 대기압인 경우에는 전응력 또는 외부응력에 상응한다.

Bishop 응력 두 번째 항인 $\chi(u_a - u_w)$는 모관흡수력 $u_a - u_w$에 관련된 흡수응력(suction stress)을 의미한다. 이때 χ는 유효응력 계수로서 포화상태에서 모관흡수력이 0일 때 1이고 완전 건조시 0의 값을 가진다. Bishop 응력에 따라서 유효응력을 기술하려면, χ에 대한 정의가 핵심적이며 모관흡수력이나 체적함수비나 포화도의 함수로 나타난다(Khalili와 Khabbaz, 1998, Vanapali 등, 2000, 오세붕과 김태경, 2008). 그러나 χ는 모관흡력에 대한 유효응력 변화율이므로 실험적으로 구하기 까다롭고, 모관흡수력이 매우 큰 경우에는 흡수응력이 실제와 달리 항상 0이 되도록 정의하고 있다. 이로 인하여 불포화토의 유효응력에 대한 연구가 진전을 이루는 데 어려움을 겪어 왔다.

Lu와 Likos(2006)는 흡수응력 σ^s를 정의하여 이러한 단점을 개선하고 유효응력을 다음과 같이 일반화하였다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (2)$$

Bishop의 유효응력과 흡수응력에 의한 유효응력 (2)는 형태는 유사하지만 여러가지 차이를 보이고 있다. χ와 모관흡수력의 조합으로 기술하는 Bishop 응력을 포함하고 일반화할 수 있다. 흡수응력은 모관흡수력이 유효응력에 기여하는 척도를 나타낸다. Terzaghi 유효응력처럼 간극수압 대신에 흡수응력으로 표현하므로, 포화토와 유사한 방식으로 불포화토 거동에서 유효응력의 변화를 분석할 수 있어서 매우 유의미하다.

흡수응력 σ^s는 흙 골격의 대표단면에 작용하는 응력이다. 반면 모관흡수력은 흙 입자 사이의 물과 공기의 접촉면에 작용한다. 따라서 모관흡수력은 흙의 유효응력을 정의하는 변수가 될 수 없다(Lu, 2008). 그리고 흡수응력은 미시적으로는 분자간의 van der Waals 힘, 이중층에 의한 힘(double-layer force), 표면장력과 모관상승력의 조합으로 나타나는 것으로 밝혀졌다(Lu와 Likos, 2006).

흡수응력은 불포화토의 함수특성과 직접적인 관계를 가지고 있다. Lu 등(2010)은 열역학적인 관점에 흡수응력과 함수특성의 관계를 규명하고 모관흡수력에 따른 흡수응력의 관계를 흡수응력 특성곡선(suction stress characteristic curve, SSCC)으로 정의하였다. 함수특성곡선을 모관흡수력에 대한 모델로 정의하면 SSCC도 모관흡수력에 대한 유일한 함수로 나타난다. 이러한 SSCC는 모관흡수력에 따른 전단강도나 함수특성곡선으로부터 쉽게 구할 수 있다.

그리고 Oh 등(2010)은 국내 풍화토를 대상으로 SSCC를 구하고 파괴규준이 유효응력에 의거하여 포화토 규준으로 유일하게 정의됨을 확인하였다. 뿐만 아니라 전단강도로부터 구한 SSCC와 함수특성곡선으로부터 구한 SSCC가 일치함을 확인할 수 있었다. 흡수응력에 기반한 불포화토의 유효응력 가설은 불포화토의 파괴시 거동을 적절하게 기술한다. 특히 실제 거동에서 유효응력에 의한 파괴규준이 모관흡수력과 상관없이 포화토 규준과 동일하고 유일하게 정의되므로 불포화 지반문제를 포화토와 동일한 이론과 해법으로 해결하는 것이 가능하다.

Bishop 응력으로 비롯된 불포화토의 유효응력 가설에 대한 연구는 파괴시 응력, 즉 파괴규준에 국한되어 왔다. Jennings와 Burland(1962)의 Bishop 응력에 대한 신랄한 비판은 불포화토의 유효응력의 연구를 지체시켰다. 이러한 논의의 근거는 파괴이전 불포화토 체적변화를 유효응력으로 기술할 수 없다는 데 있었다. 이로 인하여 오랜 동안 불포화토의 거동을 지배하는 독립적인 변수로 모관흡수력을 사용하였다(Fredlund와 Morgenstern, 1977). 반면 Khalili 등(2004)은 포화로 인한 붕괴(collapse)를 탄소성 이론을 통하여 유효응력으로 설명하였다. 하지만 불포화토의 유효응력 가설에 대한 연구는 아직도 파괴이전의 거동에 적용할 수 있는 지를 실험적으로 입증하는 것이 필요한 실정이다.

불포화토 실내실험시 체적변화를 측정하는 것은 쉽지 않다. 포화토의 토질역학에서는 체적변화를 간극수의 체적변화를 통하여 측정하였다. 반면 불포화토의 경우에는 간극공기의 체적을 포함한 전체 체적변화를 측정하여야 한다. 이로 인하여 불포화토의 파괴이전 체적변화를 유효응력으로 기술하는 실험에 대한 연구가 많지는 않았다. 제한적인 실험결과이지만, Gallipoli 등(2003)은 정규압밀시 체적변화를 유효응력으로 기술하였다. 모관흡수력과 포화도의 함수를 사용하여 간극비를 규준화하면 유

일한 함수로 압축곡선을 정의할 수 있음을 보고하였다.

본 연구에서는 K_0 압밀시 유효응력경로를 이용하여 불포화토의 유효응력 가설이 파괴 이전의 거동에도 합당함을 실험적으로 검증하였다. K_0 압밀 경로는 파괴 이전의 거동이면서 응력경로로 표현될 수 있다. 따라서 까다로운 체적 변화의 측정 없이도 유효응력을 기술할 수 있다. 또한 파괴시의 유효응력과 비교하여 압밀후 파괴에 이르기까지 유효응력을 추적하는 것이 가능하다.

이론적으로, 흡수응력에 근거한 유효응력은 모관흡수력 또는 포화도가 동일하면 파괴시 뿐만 아니라 파괴 이전의 전 거동에서 유효응력에 기여하는 흡수응력이 동일한 것으로 기술한다. 본 연구에서는 삼축실험시 K_0 압밀 경로를 흡수응력에 근거한 유효응력으로 기술한다. 그리고 파괴시 유효응력과 비교를 통하여 주어진 모관흡수력하에서 동일한 유효응력에 대한 기여, 즉 동일한 흡수응력을 가지고 있음을 검증하고자 한다.

2. 흡수응력 특성곡선

Lu 등(2010)은 흡수응력을 열역학적인 평형에 근거하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w)\theta_e, \tag{3a}$$

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tag{3b}$$

여기서 θ_s, θ_r은 포화 및 잔류 체적함수비이다. θ_e는 유효 체적함수비이며 체적함수비 θ를 포화시 및 잔류시 함수비로 규준화한 것이다.

함수특성곡선(soil water characteristic curve, SWCC)은 임의의 흙에 대하여 유일하게 정의되며, van Genuchten 모델(van Genuchten, 1980, van Genuchten 등, 1991)에 의하여 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\theta_e = \left[\frac{1}{1+\{\alpha(u_a - u_w)\}^n}\right]^{1-1/n} \tag{4}$$

여기서 α는 공기합입치 u_b의 역수이며 계수 n은 간극크기의 분포를 나타낸다. 즉 n이 클수록 조립질 입도분포를 나타낸다.

식 (4)를 (3)에 대입하면 흡수응력 특성곡선(suction stress characteristic curve, SSCC)은 다음과 같이 모관흡수력의 함수로 나타난다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w)\left[\frac{1}{1+\{\alpha(u_a - u_w)\}^n}\right]^{1-1/n} \tag{5}$$

SSCC는 SWCC로부터 구할 수 있으며 SWCC와 마찬가지로 유일하게 정의될 수 있다. 반대로 SSCC로부터 SWCC를 구할 수도 있다. 식 (2)에서 정의된 유효응력에서 보여지듯이, 모관흡수력이 주어지면 유효응력이 SSCC에 의하여 정의될 수 있다. 따라서 SWCC 및 SSCC는 파괴시뿐 만 아니라 파괴이전을 포함한 전반적인 거동에 대하여 각각 유일하게 정의할 수 있다.

흡수응력은 그림 1에서 보여지듯이 불포화토의 파괴규준으로부터 정의할 수 있다.

모관흡수력에 따른 불포화토의 파괴규준이 서로 평행한 것으로 알려져 있다. 이러한 가정하에서, 파괴포락선을 축차응력이 0인 상태까지 연장하면 파괴시 등방인장응력을 구한다. 이 등방인장응력을 포화시 등방인장응력 값만큼 축이동한 것이 흡수응력이다. 이러한 흡수응력은 모관흡수력에 따른 유일한 관계로 나타나는데 이로부터 흡수응력 특성곡선을 정의한다. 전단강도나 함수특성을 실험적으로 획득하면 둘 중의 하나를 이용하여 불포화토의 함수특성곡선과 SSCC(또는 유효응력)를 모두 구할 수 있다.

삼축실험에서 체적응력 불변수(volumetric stress invariant) $p \equiv (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$이고 축차응력(deviatoric stress) $q \equiv \sigma_1 - \sigma_3$이다. 유효 체적응력에 따른 파괴규준은 다음과 같이 나타난다.

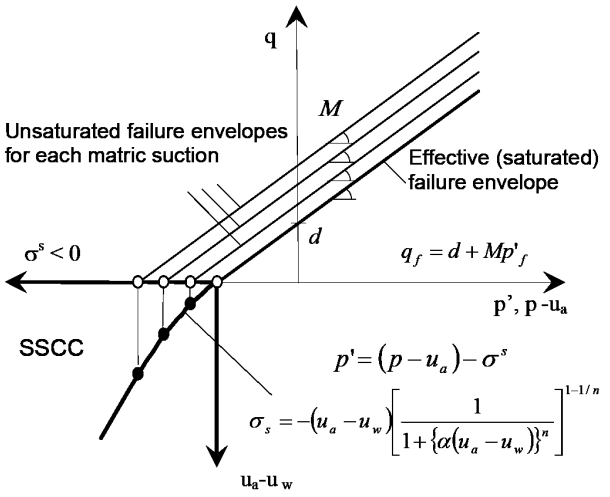


Fig. 1. Conceptual illustrations of SSCC from Mohr-Coulomb type failure criteria in p-q space

$$q_f = d + Mp'_f \tag{6a}$$

$$q_f = d + M\left(p - u_a\right)_f - M\sigma^s \tag{6b}$$

(p-u_a) - q 면에서 M은 파괴규준의 기울기를 나타내고 d는 포화시 절편을 나타낸다 첨자 f는 파괴 시점을 표현한다. 삼축시험에서 포화시 마찰각과 점착력은 M과 d로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi' = \sin^{-1}\left\{3M/\left(6+M\right)\right\} \tag{7}$$

$$c' = \frac{d}{M}\tan\phi' \tag{8}$$

식 (6b)에서, 흡수응력 σ^s는 삼축실험 결과 응력으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma^s = \frac{d + M\left(p - u_a\right)_f - q_f}{M} \tag{9}$$

유효응력 가설은 불포화토의 파괴규준을 유일하게 정의할 수 있다(Lu와 Likos, 2004, 2006, Oh 등, 2010). 즉 불포화토의 파괴규준은 흡수응력에 근거한 유효응력으로 그림 1과 같이 포화시 파괴규준으로 유일하게 기술할 수 있다. 이러한 결과는 불포화 토질역학의 문제에 포화토의 이론을 그대로 적용할 수 있음을 보여준다. 즉 Terzaghi의 유효응력에 근거한 지지력, 사면안정, 토압이론에 간극수압 대신에 흡수응력으로 유효응력을 정의하기만 하면 된다. 또한 식 (4)와 (5)는 파괴이전의 거동에 적용되므로 구성관계, 변형계수와 관련한 거동을 새로운 유효응력으로 기술할 수 있다.

3. 삼축압축시험시 K_0 압밀 경로

영남대 연구진은 국내 풍화토를 대상으로 모관흡수력을 조절하며 K_0 압밀 삼축압축시험을 수행하였다(오세붕과 김태경, 2008). 삼축시험장비는 그림 2에서 보여

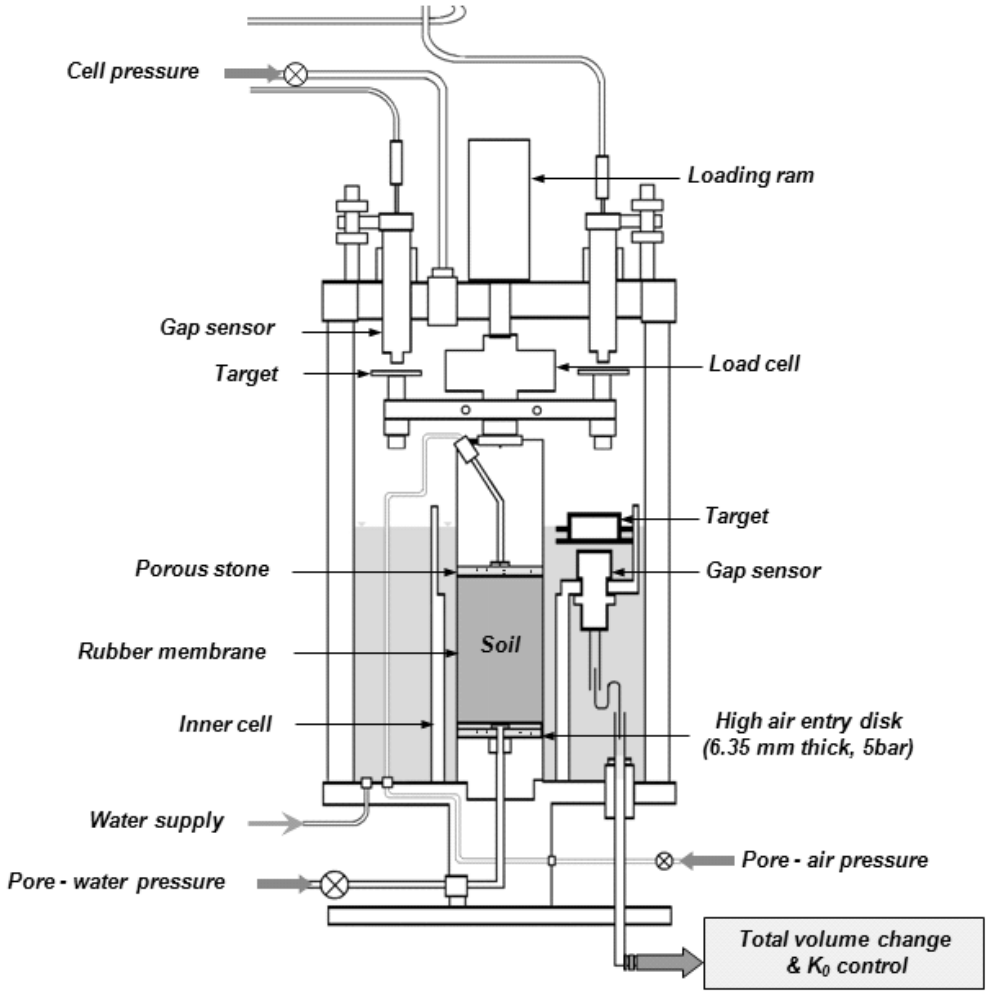


Fig. 2. Apparatus for K_0 consolidated triaxial tests

지듯이 2중셀 구조로 외부셀과 내부셀로 구분된다. 이 중 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 컨트롤서보로 보내어진다. K_0 컨트롤서보는 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 공기압을 조절한다. 하부 라인은 압밀 및 전단시 시료내부에서 배수되는 물의 통로가 된다.

본 연구에 사용된 시료는 지방도로 건설현장에서 채취한 시료로 실내에서 자연건조 후 #10번 체를 통과한 입자들을 이용하였으며 통일분류상 SC에 해당한다. 소성지수는 14%이고 #200체 통과량은 34%이다. 실험에 사용된 시료는 직경 50mm, 높이 100mm의 실린더 형태로 재성형하여 시험을 수행하였다. 이 때 시료를 오븐건조시킨 후, 적당량의 물과 골고루 교반시켜 해당 함수비로 만들었다. 이렇게 교반된 흙을 직경 50mm의 실린더 형태의 스플릿 몰드에 넣고 유압잭으로 정적다짐을 하여 높이 100mm로 성형하였다. 다짐곡선에서는 최대건조단위중량에 상응하는 함수비인 14.8 %가 되었으며 초기 간극비는 0.514였다. 시료의 성형조건과 구해진 물성치들은 표 1에 정리하였다. 모관흡수력은 20, 50, 80kPa의 경우에 대하여 수행하였으며 순체적응력은 100, 200, 300, 400kPa로 실험을 수행하였다. 상세한 내용은 표 2에 정리하였다.

그림 3에서는 대상 시료의 함수특성곡선을 보여주고 있다. 모관흡수력이 100kPa 미만일 경우에는 유효 포화도가 0.8이상의 큰 값을 나타내고 있다. 이는 국내 풍화토에서 투수계수가 낮은 경우에 나타나는 현상으로 여겨진다. 이와 같이 SWCC를 획득하면 SSCC를 식 (1)에

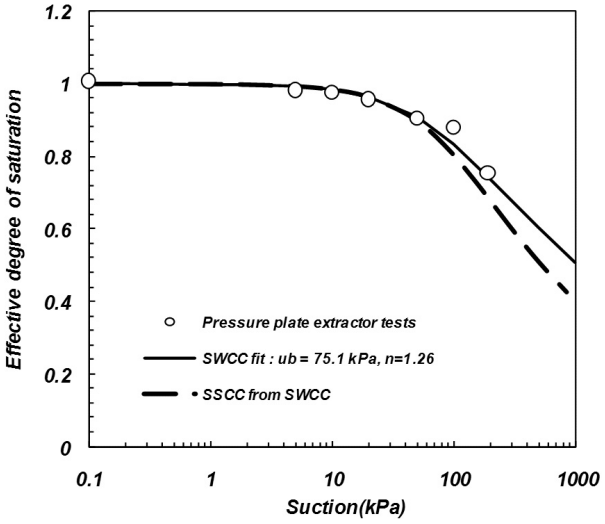


Fig. 3. Apparatus for K_0 consolidated triaxial tests

Table 1. Initial conditions of compacted residual soils and parameters evaluated from experiments on the saturated strength, the suction stress characteristic curve, and the soil water characteristic curve

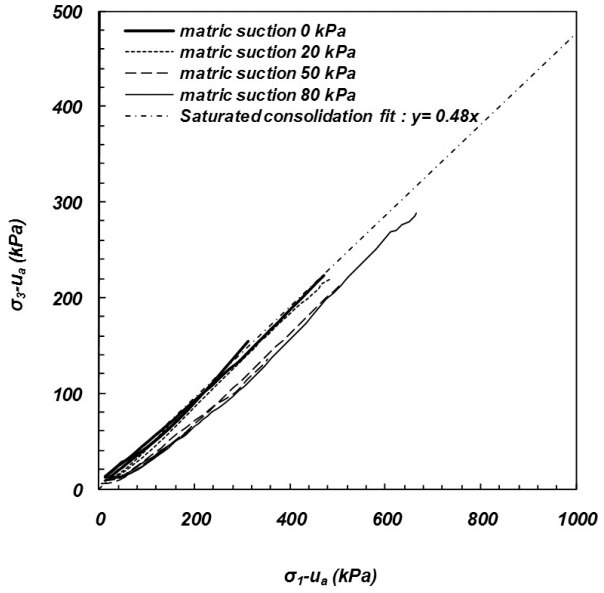
USCS	OMC (%)	Gs	#200 (%)	Void ratio	ρ_d (g/cm^3)	PI (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)	M	d (kPa)	u_b (kPa)	S_r	n
SC	14.8	2.71	33.9	0.514	1.74	26.44	5.97	26.52	1.05	57.94	75.08	0	1.26

Table 2. Stress results of K_0 consolidated triaxial tests for consolidation and failure states

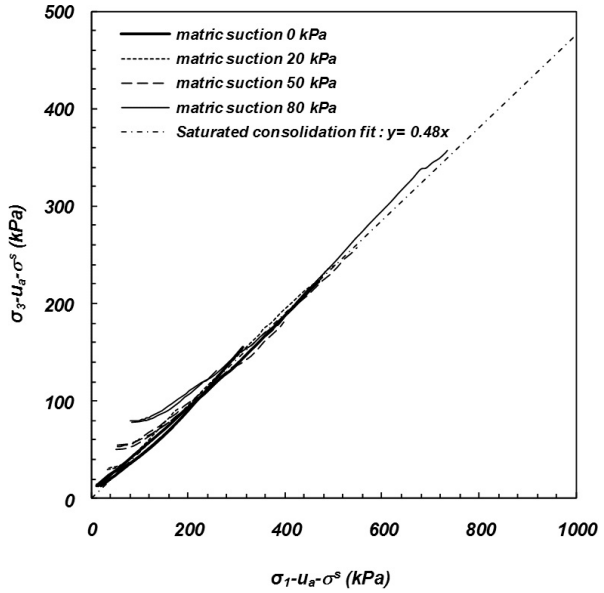
Matric suction (kPa)	Suction stress (kPa)	Net stress level (kPa)	Horizontal stress after consolidation (kPa)	Vertical stress after consolidation (kPa)	Isotropic net stress after consolidation (kPa)	Deviatoric net stress after consolidation (kPa)	Isotropic net stress at failure (kPa)	Deviatoric net stress at failure (kPa)
0	0	100	73	168	104	95	135	200
		200	155	313	208	158	270	347
		300	223	470	305	248	404	543
20	−19.3	100	93	182	104	89	144	212
		300	239	504	308	265	376	468
50	−45.4	100	112	240	104	128	145	248
		200	184	402	207	217	269	403
		300	262	551	308	289	392	540
80	−68.8	100	142	270	105	129	163	304
		400	368	746	414	378	517	687

근거하여 쉽게 구할 수 있다.

식 (4)에 나타난 van Genuchten 모델에 대하여 공기 합입치 u_b는 75.1 kPa, 계수 n은 1.26으로 나타났다(van Genuchten 등, 1991). 이와 같이 함수특성곡선으로부터 두 계수를 결정하면 식 (5)에 나타난 SSCC를 완전히 구할 수 있다(그림 3 참조). 표 2에서도 보여지듯이, 식 (5)에 의하여 모관흡수력에 따른 흡수응력을 계산할 수 있었다. 이러한 흡수응력 값들을 이용하여 실험치를 분석하며 SSCC를 이용하여 유효응력을 결정한다.



(a)



(b)

Fig. 4. Stress path during K_0 consolidation in major and minor principal stress plane (a) Total stress paths (b) Effective stress paths

그림 4(a)에서는 K_0 압밀시 순응력에 따른 응력경로를 보여주고 있다. 삼축시험에서는 수평응력 및 연직응력이 각각 최소 및 최대 주응력으로 나타난다. 표 2에서 보여지듯이 각 모관흡수력에 대하여 다양한 순응력 수준으로 실험을 수행하였다. 동일한 모관흡수력인 경우에 순응력 수준이 상이한 시료들은 대체로 일치하는 경로를 보인다.

압밀과정에서 응력경로는 초반에 순응력 수준이 낮은 경우에는 다소 비선형적인 형태를 나타내고 있다. 하지만 순응력이 증가할수록 선형적인 관계를 뚜렷이 보인다. 동일한 수직응력에 대하여, 수평응력은 모관흡수력이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 하지만 모관흡수력 50kPa이상이 되면 거의 유사한 경로를 가지는 것으로 나타났다. 모관흡수력이 0인 포화토의 압밀경로들을 이용하여 회귀분석한 결과 그림 4(a)에서 보여지듯이 0.48의 기울기를 가진 원점을 지나는 직선으로 나타났다.

그림 4(b)에서는 K_0 압밀시 유효응력에 의한 경로를 나타내고 있다. 압밀과정에서 응력경로는 낮은 유효응력 수준에서는 비선형적인 형태를 나타내지만 응력이 증가함에 따라 차차 선형적인 형태로 전환되고 있다. 유효응력으로 기술한 결과 모관흡수력과 상관없이 응력경로가 유일한 직선으로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 특히 불포화토의 수렴된 경로들이 포화토의 압밀경로와 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 유효응력에 대한 수평응력과 연직응력의 비율은 0.48로 나타났다.

그림 5에서는 K_0 압밀 완료시 수직응력에 따른 수평응력을 보여주고 있다. 그림 4(a)와 마찬가지로 그림 5(a)에서는 모관흡수력이 증가할수록 수평응력은 감소하는 경향을 보이고 있다. 하지만 모관흡수력 50kPa이상이 되면 거의 유사한 값을 가지는 것으로 나타났다. 반면 그림 5(b)에서 보여지듯이 유효응력으로 기술한 결과, 모관흡수력과 상관없이 압밀응력이 포화토의 거동과 동일한 유일한 직선으로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 또한 포화토의 압밀시 경로에 일치하는 것을 확인할 수 있다.

유효응력에 의거하여 정지 토압계수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}, \quad \sigma'_h = K_0 \sigma'_v \tag{10}$$

그림 5(b)에서 보여지듯이 대상 시료의 K_0는 일정한 값을 보이는 것으로 발혀졌다. 본 실험결과에서는 평균값이 Jacky 공식에 의한 값(0.55)보다는 다소 낮은 0.48로 나타났다.

이 때 식 (10)을 식 (2)의 유효응력에 대입하면 다음과 같이 나타난다.

$$\sigma_h - u_a = K_0(\sigma_v - u_a) + (1 - K_0)\sigma^s \qquad (11)$$

식 (11)의 흡수응력에 식 (5)를 대입하면 SSCC를 포함한 모관흡수력의 함수를 구할 수 있다.

$$\sigma_h - u_a = K_0(\sigma_v - u_a) - (1 - K_0)(u_a - u_w)\left[\frac{1}{1 + \{\alpha(u_a - u_w)\}^n}\right]^{1-1/n} \qquad (12a)$$

$$K_{0t} \equiv \frac{\sigma_h - u_a}{\sigma_v - u_a},$$

$$K_{0t} = K_0 - (1 - K_0)\frac{u_a - u_w}{\sigma_v - u_a}\left[\frac{1}{1 + \{\alpha(u_a - u_w)\}^n}\right]^{1-1/n} \qquad (12b)$$

식 (12b)에 나타난 수평 및 연직방향 순응력의 비 K_{0t}는 모관흡수력이 증가할수록 감소하고 순수직응력이 증가할수록 증가하는 경향을 나타낸다. 포화시에는 식 (10)과 같이 유효응력에 의하여 정의된 정지 토압계수 K_0와 동일한 값을 가진다.

수직응력과 수평응력의 비율에 대한 실험결과를 모관흡수력에 따라 나타내면 그림 6과 같다. 식 (12b)의 K_{0t}의 경우에는 실험적으로 구속응력이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내며 모관흡수력이 증가할수록 감소하고 있다. 이러한 경향은 실험치에서도 전반적으로 유사하게 나타나고 있다. 토압계수나 응력의 비는 실험결과의 비율이나 기울기를 나타내므로 그림 6의 실험치들은 분포가 다소 산만하게 나타날 수 밖에 없었다. 따라서 식 (12b)에 의한 예측치와 오차를 보이고 있다.

그림에서 보여지듯이 식 (10)과 같이 유효응력으로 정의한 정지 토압계수는 모관흡수력에 상관없이 평균 0.48

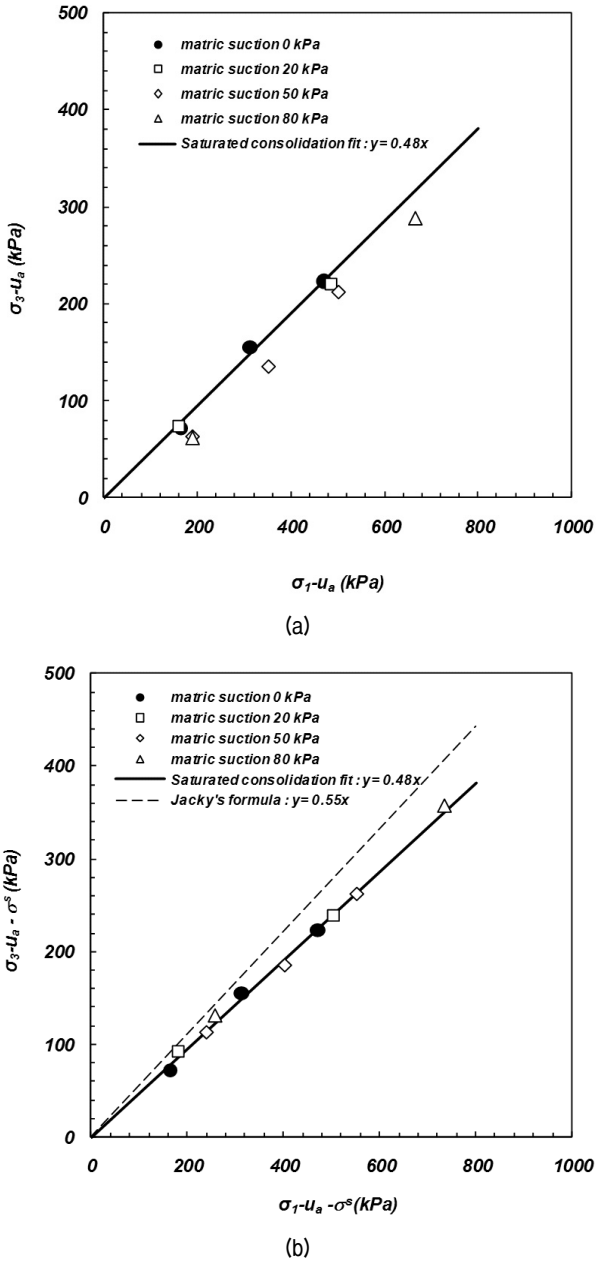


Fig. 5. Stress state after K_0 consolidation in major and minor principal stress plane (a) Total stress (b) Effective stress

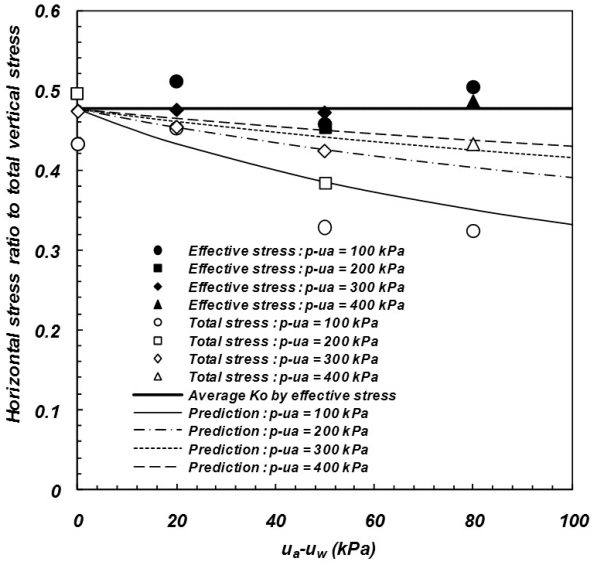


Fig. 6. Horizontal stress ratio to vertical stress with respect to matric suction

의 비율을 나타내고 있다. 이러한 결과들로 미루어 볼 때, 정지 토압계수는 식 (10)과 같이 유효응력으로 정의하는 것이 순응력에 의한 것이 비하여 합리적임을 알 수 있다.

유효응력이 정지 토압계수를 포함하여 K_0 압밀시 경로를 적절하게 기술할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 이러한 유효응력은 SWCC로부터 구한 흡수응력에 의하여 정의하였다. SWCC는 응력 거동이 아닌 함수특성으로부터 구한 실험치이다. 즉 함수특성으로부터 압밀과 관련한 유효응력 거동을 기술할 수 있음을 입증하였다.

4. 삼축시험시 압밀과 파괴에서 나타난 SSCC

이론적으로, 흡수응력은 파괴시와 무관한 SWCC에 의하여 정의할 수 있으므로 모관흡수력에 따라 유일하게 정의되고 파괴이전의 거동에도 정의하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 SWCC로부터 모관흡수력에 따른 흡수응력, 즉 SSCC를 구하고 이를 이용하여 삼축시험시 압밀 및 파괴에 대한 유효응력 거동을 분석한다. 이때 삼축실험 결과들과 SWCC에 의한 SSCC가 일치함을 입증하여 압밀과 파괴시의 SSCC가 일치함을 입증할 것이다.

삼축시험 조건에서 정지토압 조건(또는 K_0 압밀응력조건)에서 축차응력과 체적응력의 비율은 유효응력에 의하여 정의하면 다음과 같다.

$$\eta_0 \equiv \frac{q}{p'} = \frac{3(1-K_0)}{1+2K_0} \tag{13}$$

앞 절에서 논하였듯이 유효응력으로 정의한 K_0값이 일정하므로 식 (13)에 나타난 η_0역시 일정한 값을 가진다. 따라서 축차응력과 체적응력 축에서 K_0 응력경로는 원점을 지나는 직선으로 나타난다.

이 때 식 (2)의 유효응력을 식 (13)에 대입하면 다음과 같이 나타난다.

$$q = \eta_0(p-u_a) - \eta_0\sigma^s \tag{14}$$

식 (14)의 관계는 그림 7에서 보여지듯이 모관흡수력에 따라 상이한 평행한 직선으로 나타난다. 이 때 순체적응력 축에서 만나는 등방인장응력이 흡수응력을 나타낸다. 각 직선은 모관흡수력이 상이하고 일정한 값을 가지므로 모관흡수력에 따른 흡수응력을 구하고 이를 흡수응력 특성곡선으로 나타낼 수 있다.

이러한 절차는 그림 1에 나타난 강도로부터 흡수응력 특성곡선을 구하는 절차와 유사하다. 반면 파괴 이전의 거동인 압밀 경로로부터 흡수응력을 구하는 데 특징이 있다. 파괴규준에 의한 흡수응력은 모관흡수력이 0일 때 값으로 축을 이동하지만, 압밀경로에 의한 것은 그럴 필요가 없다. 본 연구에서는 이러한 SSCC가 서로 일치함을 보이는 데 초점을 두고 있다.

그림 8에서는 압밀 완료시 실험결과를 이용하여 상이한 모관흡수력에 대한 순 체적응력과 축차응력의 관계를 나타내고 있다. 그림 8(a)의 포화토의 경로로부터 η_0는 0.80으로 나타났다. 식 (5)와 표 1에 나타난 SWCC 계수 α와 n을 적용하면 SSCC를 구할 수 있다. 표 2에서는 각 모관흡수력 20, 50, 80kPa에 대하여 흡수응력을 계산하였다. 식 (14)에 의하여 순응력에 의한 압밀응력은 모관흡수력에 따라 상이하게 평행한 직선으로 계산하였다. 그리고 SSCC로부터 구한 예측선들은 실험치와 전반적으로 잘 일치하는 것으로 보인다. 다만 모관흡수력이 80kPa인 경우에는 실험치가 예측치에 비하여 압밀시 축차응력이 다소 작게 나타났다.

그림 8(a)는 파괴이전 압밀 거동으로부터 흡수응력을 직접 구할 수 있음을 보여준다. 모관흡수력에 따른 흡수응력을 구하면 SSCC를 구할 수 있다. 이로부터 계수 α와 n을 구하면 역으로 SWCC를 구할 수 있다. 이러한 절차는 그림 1과 같이 파괴시 전단강도로부터 구하던 방식과 유사하다. 즉 파괴시 뿐 아니라 파괴이전의 응력과 관련한 거동에서 SSCC와 SWCC를 구할 수 있음을

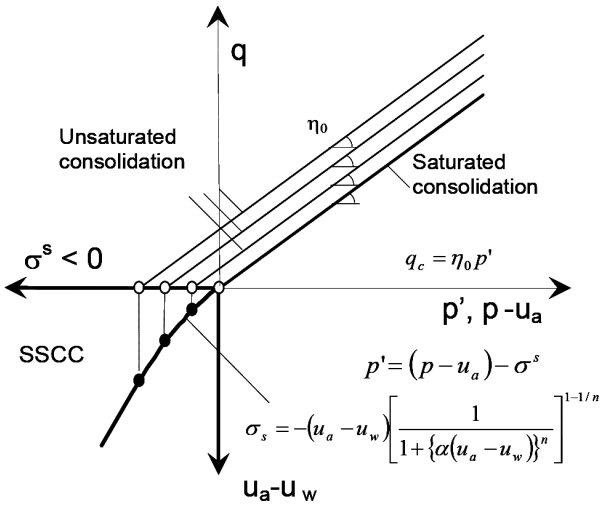
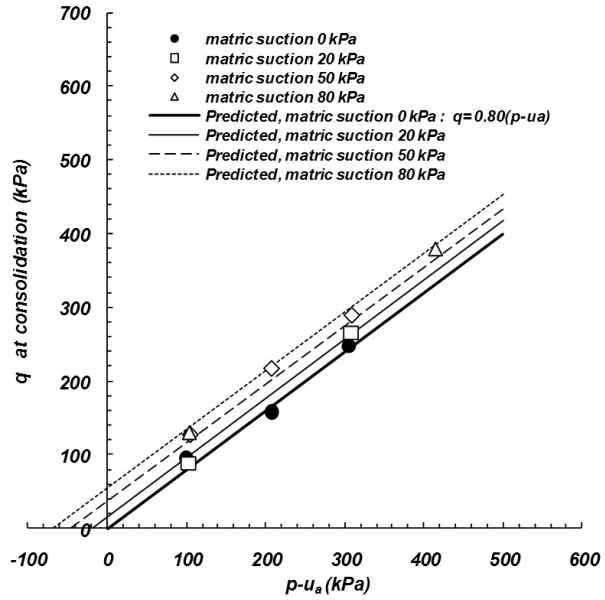


Fig. 7. Conceptual illustrations of SSCC from K_0 consolidation test results

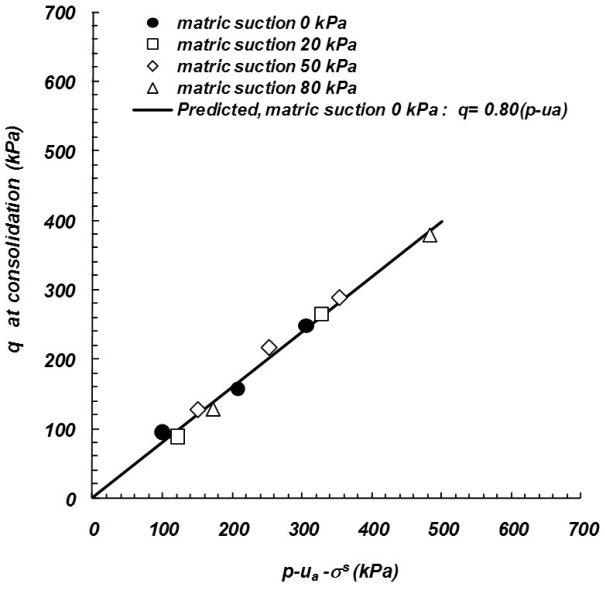
보여준다.

그림 8(b)에서는 유효 체적응력에 의하여 압밀응력을 나타내고 있다. 유효응력으로 기술하는 경우에는 상이한 모관흡수력에 따른 압밀응력이 포화토의 압밀선과 거의 일치하는 것으로 보인다. 이로부터 불포화토의 압밀시 나타나는 응력을 유효응력으로 기술할 경우에 포화토의 거동과 동일하게 표현할 수 있음을 알 수 있다. 특히 파괴 이전의 압밀 거동을 SSCC에 기반한 유효응력으로 설명할 수 있었다. 이 때 흡수응력은 삼축시험이 아닌 불포화토의 함수특성을 나타내는 SWCC로부터 구하였다. 그리고 함수특성시험(압력판 추출시험)과 삼축시험이 시료의 제원이나 응력조건 등이 상이함을 고려할 때, 실험치가 유일한 직선으로 뚜렷하게 일치하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 9에서는 파괴시 체적응력과 축차응력을 보여주고 있다. 불포화토의 파괴포락선은 SWCC로부터 구한 흡수응력을 적용한 것이다. 순응력으로 기술한 파괴포락선은 그림 9(a)에서 보여지듯이 모관흡수력이 증가함

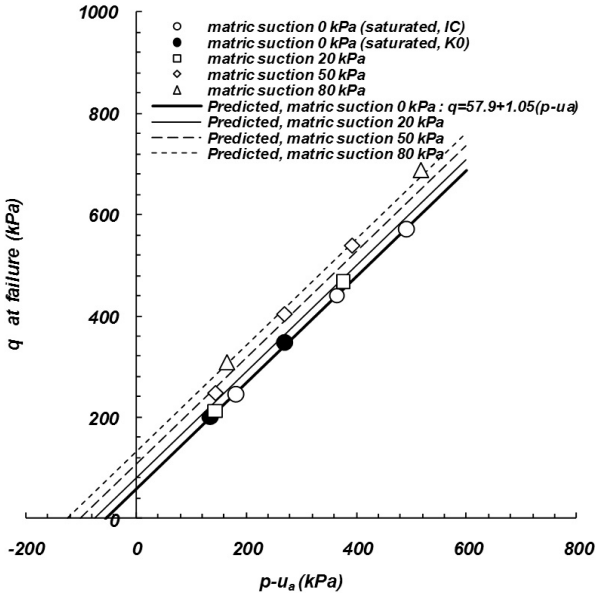


(a)

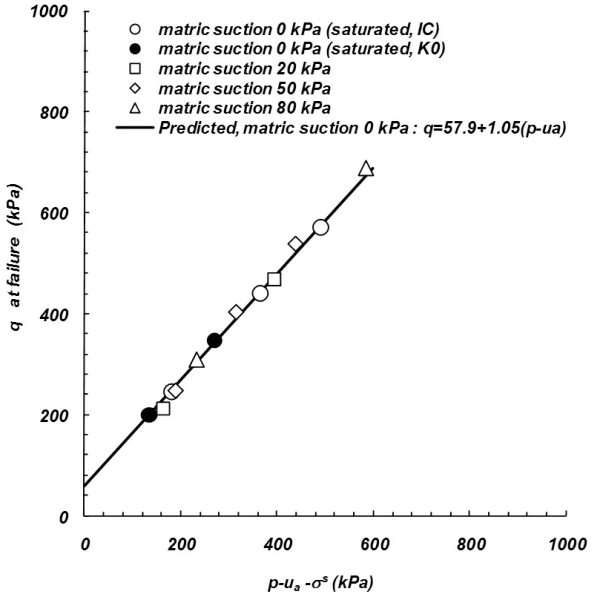


(b)

Fig. 8. Consolidation stress in p'-q axis (a) Total stress (b) Effective stress



(a)



(b)

Fig. 9. Stress at failure in p'-q axis (a) Total stress (b) Effective stress

에 따라 파괴시 축차응력이 증가하는 양상을 보인다. 실험치에 나타난 파괴시 응력은 모관흡수력에 따른 파괴포락선에 잘 따르고 있다. 포화토의 경우에는 등방압밀 후 전단시험 결과를 포함하고 있다.

그러나 그림 9(b)의 유효응력으로 구한 파괴규준은 포화시 파괴규준으로 수렴하여 일치한다. 그리고 실험치들은 유일한 유효응력 파괴포락선에 거의 정확하게 일치하고 있다. 이 때 유효응력은 SSCC로부터 흡수응력을 구하여 분석하였으며 압밀시 거동과 동일한 SSCC를 적용하였다.

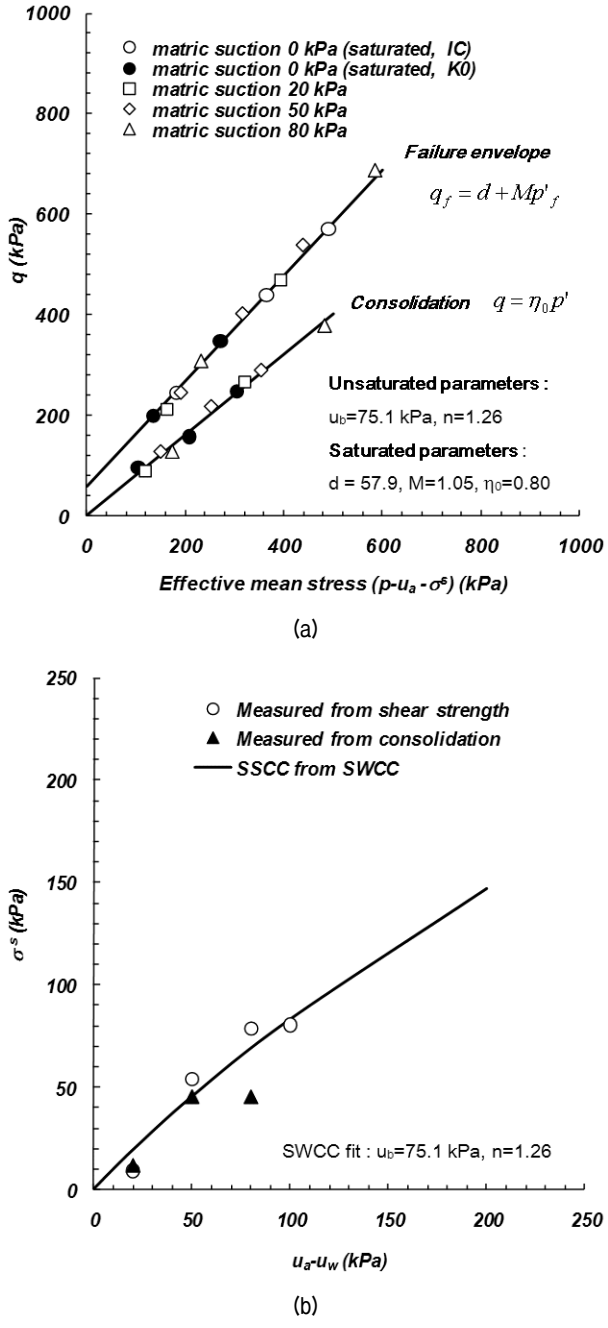


Fig. 10. Effective stress description from consolidation to failure (a) Effective stress after consolidation and at failure in p'-q axis (b) SSCC from SWCC fit and the results on consolidation and strength

그림 10(a)에서는 압밀 및 파괴시 유효응력을 모두 보여주고 있다. 두 경우 모두 동일한 SSCC를 적용하였으며, 포화시 거동으로 일치하는 특성을 보여주고 있다. 즉 응력이나 강도를 구하는 삼축시험이 아니라 불포화토의 함수능력과 관련한 SWCC로부터 흡수응력을 구하고 유효응력을 계산한 것이다. 그리고 그 기울기는 압밀시에는 포화시 정지토압계수와 관련이 있고 파괴시에는 포화 파괴규준의 기울기에 해당한다.

SSCC에 기반한 유효응력은 압밀로부터 파괴에 이르기까지의 전체 거동을 기술할 수 있었다. 특히 응력 거동과 관련하여 모관흡수력에 상관없이 포화토의 거동과 동일하게 나타나고 있음을 보여준다. 그림 10(b)에서는 SSCC 즉 모관흡수력에 따른 흡수응력을 보여준다. 압밀 및 파괴시 흡수응력의 실험치는 다소 오차를 포함하고 있지만 SWCC로부터 구한 동일한 SSCC로 표현될 수 있었다.

본 연구에서는 그림 8(a)와 9(a)와 같이 동일한 모관흡수력 수준에 대하여 구속압이 상이한 결과를 얻고자 하였다. 삼축실험과 같은 응력과 관련된 시험에서 구한 SSCC는 그림 1과 7에서 보여지듯이 실험치를 연장하여 응력수준이 낮은 등방 인장응력을 구해야 한다. 이러한 방식으로 SSCC를 정확하게 구하기 위해서는 구속압이 상이한 결과보다는 모관흡수력이 다른 결과의 양이 충분이 많아야 한다.

본 연구는 실험시 수행한 모관흡수력 수준이 낮아서 전반적인 거동을 포괄하기엔 한계가 있었다. 따라서 모관흡수력이 높은 수준에 대한 보완적인 연구가 요구된다. 또한 대상 풍화토 시료는 모래나 점토의 사이에 있는 입도분포를 가지고 있으며, 다양한 입도분포에 따른 실험적인 접근을 수행할 필요가 있다.

5. 불포화토의 유효응력이론의 적용성

SWCC를 실험적으로 획득하면 SSCC를 구할 수 있다. 또는 모관흡수력을 조절한 불포화토의 강도실험을 통하여 SSCC를 구하면 역으로 SWCC마저 구할 수 있다. 이러한 절차를 거치면 식 (2)에 의하여 불포화토의 유효응력을 정의할 수 있다. 본 연구에서는 K_0 압밀실험을 통해서도 SSCC를 결정할 수 있음을 보여주었다. 또한 이

로부터 SWCC를 구하는 것이 가능하다고 판단한다.

SSCC를 적용한 유효응력은 압밀부터 파괴에 이르는 전반적인 거동을 지배한다. 흡수응력에 근거한 유효응력은 모관흡수력 또는 포화도가 동일하면 전 거동에서 유효응력이 동일한 것으로 기술한다. 특히 유일한 SSCC로 압밀에서 전단에 이르는 전체 거동을 지배하는 유효응력을 기술할 수 있다. 본 연구에서는 압밀 및 파괴시 유효응력이 유일한 SSCC에 의하여 정의될 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

그리고 유효응력으로 기술할 경우에는 압밀 및 파괴시 응력에 대한 불포화토의 거동이 포화토의 거동과 일치하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 불포화토의 파괴시 뿐 아니라 파괴이전의 거동(예를 들어, 구성관계)도 포화토와 일관되게 기술하는 것이 가능하다.

우선 파괴규준과 관련한 한계해석 문제들이 포화토 이론과 유사하게 해결될 수 있다. 예를 들어 사면안정해석, 지지력 문제, 토압이론 등이 Terzaghi 유효응력에서 필요한 간극수압 대신에 흡수응력을 대입하면 포화토 이론을 거의 그대로 적용할 수 있다. 그리고 이러한 흡수응력은 주어진 모관흡수력에 대하여 SSCC를 이용하여 구할 수 있다.

응력해석의 경우에는 SSCC에 기반한 유효응력을 적용한 정식화를 한다. 수리전도해석으로 간극수압 또는 모관흡수력 분포를 구한 후 흡수응력을 계산할 수 있다. 이로부터 유효응력을 구할 수 있다. 유효응력 해석 절차는 포화토 경우와 유사하다. 구성관계는 SSCC에 기반한 유효응력 관계로 기술해야 한다. 하지만 포화토의 구성관계와 유사하므로 정식화는 단순하고 실험적으로 필요한 계수를 구하는 것이 필요하다.

6. 결 론

본 연구에서는 K_0 압밀 삼축시험을 통하여 압밀경로에서 나타나는 흡수응력을 구할 수 있음을 입증하였다. 함수특성곡선은 van Genuchten 모델을 적용하였다. 이로부터 흡수응력 특성곡선(SSCC)을 구할 수 있었고 SSCC에 근거한 유효응력을 계산하였다.

(1) 유효응력으로 기술한 압밀 경로는 파괴규준과 마찬가지로 유일한 직선으로 나타났다. SSCC에 근거한 유효응력은 압밀에서 파괴까지의 거동을 기술할 수 있으며, 포화토의 거동과 동일하게 기술함을 보여준다.

(2) 유효응력으로 기술한 정지토압계수는 일정한 값을 보였다. 불포화토의 정지토압계수는 모관흡수력과 상관없이 포화토와 동일한 것으로 나타났다. 순응력으로 기술한 수평응력은 수직응력에 대하여 모관흡수력과 구속응력에 따라 변화한다.

(3) K_0 압밀시 응력경로는 파괴규준과 마찬가지로 모관흡수력에 따른 흡수응력을 구할 수 있었다. 따라서 파괴시뿐 아니라 파괴 이전의 거동에서 흡수응력 및 SSCC를 구할 수 있음을 알 수 있다.

(4) SWCC로부터 구한 SSCC로 유효응력을 정의하였다. 함수특성실험으로부터 구한 흡수응력은 시료제원 및 시험조건이 상이한 삼축시험시에서도 압밀 및 파괴시 유효응력을 정의할 수 있었다. 모관흡수력 수준이 다양한 자료를 확보하면, 압밀 또는 강도 결과로부터 SSCC를 구하고 SWCC를 역으로 구할 수 있음을 알 수 있다.

유효응력 가설은 흙의 거동을 지배한다. 불포화토의 유효응력은 모관흡수력에 따라 정의할 수 있다. 특히 압밀에서 파괴에 이르는 전 과정에 모관흡수력이 유효응력에 기여하는 부분이 유일하게 정의된다. 이로부터 불포화토의 유효응력 가설이 실제 지반 문제에 적용될 수 있는 주요한 토대를 구축하였다고 판단한다.

본 연구는 하나의 시료에 대하여 제한적인 모관흡수력 수준에서 수행한 실험을 근거로 하고 있다. 따라서 본 결론이 재현성을 확보하기 위해서, 이러한 한계를 극복할 수 있는 추가적인 실험을 수행하고 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술평가원 2009년도 건설기술혁신사업 ‘수치해석기법을 이용한 도로 동상 저감기법의 성능평가’ 및 한국연구재단 2009년도 일반연구자지원사업(기본연구) ‘불포화토의 비등방압축시 거동에 대한 구성모델 개발’의 성과로서 연구비 지원에 감사드린다.

참 고 문 헌

1. 오세붕, 김태경 (2008), “낮은 모관흡수력 수준에서 불포화토의 Bishop 응력에 관한 연구”, *한국지반공학회논문집*, 제24권 5호.
2. Bishop, A. W. (1954), “The use of pore water coefficients in practice”, *Géotechnique*, 4(4), 148-152.

3. Bishop, A. W. (1959), "The principle of effective stress", *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknikk*, Oslo, Norway, 106(39), 859-863.
4. Bishop, A. W., and Blight, G. E. (1963), "Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils", *Géotechnique*, 13, 177-197.
5. Fredlund, D. G., and Morgenstern, N. R. (1977), "Stress state variables for unsaturated soils", *J. Envir. Engrg. Div*., 103(5), 447-466.
6. Gallipoli, D., Gens, A., Sharma, A. and Vaunat, J. (2003), "An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behavior", *Géotechnique*, 53(1), 123-135.
7. Jennings, J. E. B., and Burland, J. B. (1962), "Limitation to the use of effective stresses in unsaturated soils", *Géotechnique*, 12, 125-144.
8. Khalili, N., and Khabbaz, M. H. (1998), "A unique relationship for χ for the determination of shear strength of unsaturated soils", *Géotechnique*, 48(5), 681-688.
9. Khalili, N., Geiser, F., and Blight, G. E. (2004), "Effective stress in unsaturated soils: Review with new evidence", *Int. J. Geomech.*, 4(2), 115-126.
10. Lu, N. (2008), "Is matric suction stress variable?" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(7), 899-905.
11. Lu, N., and Godt, J., and Wu, D. T. (2010), "A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil", *Water Resources Research*, doi:10.1029/2009WR008646, in press
12. Lu, N., and Likos, W. J. (2004), *Unsaturated Soil Mechanics*, Wiley, New York.
13. Lu, N., and Likos, W. J. (2006), "Suction stress characteristic curve for unsaturated soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2), 131-142.
14. Oh, S., Lu, N., Y. K. Kim, S. J. Lee, and S. R. Lee (2010), "Relation between the Soil Water Characteristic Curve and the Suction Stress Characteristic Curve: Experimental Evidence from Tests on Residual Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, submitted.
15. 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.
16. van Genuchten, M. T. (1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
17. van Genuchten, M. T., Leij, F. J., and Yates, S. R. (1991), *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*, EPA 600/2-91/065.

(접수일자 2010. 7. 7, 심사완료일 2010. 11. 4)