구속응력에 따른 함수특성곡선이 불포화토의 유효응력에 미치는 효과

The Effect of Soil Water Retention Curves under Confining Stress on the Effective Stress in Variably Saturated Soils

오세봉* · 이영휘** · 배임수*** · 김상민****

Oh, Seboong · Lee, Young-Hu · Bae, Im-Soo · Kim, Sang-Min

Abstract

Soil water retention characteristics are influenced by factors of the confining stress and hysteresis in the variably saturated soil. In the description of effective stress based on hydraulic characteristics, the contribution of a matric suction to effective stress then varies with depth or is different between the processes of infiltration and evaporation. Unsaturated effective stress can be described based on suction stress characteristic curve, in which a representative soil water retention curve is required to evaluate. Pressure plate extractor tests under various confining stresses were performed and the hysteresis of drying and wetting process was also acquired. In the process of drying or wetting, a unique relationship has been estimated on the effective volumetric water content and the matric suction, which defines suction stress characteristic curve. In the unsaturated shear strength from triaxial tests, the suction stress and the effective stress were evaluated by matric suctions. The failure envelope by effective stress based on soil water retention characteristics was unique and the same as the saturated one. The measured suction stress from triaxial tests was similar to that from the soil water retention curve. Therefore it is verified that a representative soil water retention curve can be defined which is independent of the confining effect under wetting or drying process of the hysteresis.

Keywords : soil water retention curves, hysteresis, confining stress, unsaturated soils, effective stress, suction stress

요 지

불포화토의 함수특성은 구속효과 및 이력현상에 따라 변화한다. 이로 인하여 불포화 지층의 유효응력을 정의할 때, 모관흡수력이 기여하는 효과가 깊이에 따라 변화하거나 침투 및 증발과정에서 상이하게 나타난다. 불포화토의 유효응력은 흡수응력 특성곡선에 근거하여 일반화 할 수 있다. 이러한 일반화를 위해서, 구속응력과 함수특성곡선의 관계를 찾는 것이 필요하다. 본 연구에서는 다양한 구속응력을 가한 상태에서 압력판 추출시험을 수행하고 건조 및 습윤과정에서 나타나는 함수특성의 이력현상을 획득하였다. 그리고 각 이력과정에 대한 유효 체적함수비와 모관흡수력 관계를 구할 수 있었다. 이로부터 모관흡수력에 따른 흡수응력 특성곡선을 정의할 수 있었다. 또한 삼축시험시 구한 불포화 전단강도로부터, 흡수응력과 유효응력을 모관흡수력으로부터 구할 수 있었다. 함수특성에 근거한 유효응력 파괴규준은 유일하게 나타났으며 포화시 파괴포락선과 일치하였다. 삼축시험으로부터 구한 흡수응력은 대표 함수특성곡선으로부터 구한 것과 유사하게 나타났다. 따라서 각 이력과정에서 구속효과에 대하여 함수특성곡선이 유일하게 정의될 수 있음을 입증하였다.

핵심용어 :

1. 서 론

이미 Bishop에 의하여, 불포화토의 유효응력은 가설이 수립되었다 (Bishop, 1954). 그러나 Bishop 유효응력의 실용적인 적용에 있어서, 모관흡수력이 유효응력에 기여하는 정도를 정량화하기는 매우 까다롭다. Lu와 연구자들(Lu and Likos 2004, 2006; Lu et al., 2009, 2010; Oh et al., 2012)

은 흡수응력에 기반한 유효응력을 제안하였고, Bishop 유효응력을 일반화하였다. 흡수응력은 불포화토 요소의 대표단면에 대한 응력변수로서, 모관흡수력이 유효응력에 기여하는 정도를 기술한다.

흡수응력특성곡선(suction stress characteristic curve, SSCC)은 함수특성곡선(soil water retention curve, SWRC)과 직접 연관되어 있다. Lu 등(2010)은 SSCC에 대한 닫힌

*정회원 · 교신저자 · 영남대학교 건설시스템공학과 교수 (E-mail : sebungoh@yu.ac.kr)

**정회원 · 영남대학교 건설시스템공학과 교수 (E-mail : younghuy@yu.ac.kr)

***한국철도공사 사원 (E-mail : limsu84@nate.com)

****영남대학교 건설시스템공학과 석사 (E-mail : west301@naver.com)

형식의 방정식(closed-form equation)을 제안하고 검증하여 불포화토의 유효응력을 정의할 수 있었다. SSCC 방정식은 van Genuchten(1980)의 함수특성곡선에서 필요한 두 개의 계수만을 사용한다. 이러한 SSCC에 기반한 유효응력을 적용하면, 불포화토의 전단강도는 유일하게 정의되며 모관흡수력을 독립적인 변수로 사용할 필요가 없다.

이러한 흡수능력 또는 유효응력을 정의할 때, 함수특성곡선이 유일하다고 가정한다. 하지만 함수특성곡선은 건조 및 습윤과정의 흡수력 이력에 따른 이력현상을 나타내고, 체적 변화에 따른 간극비 변화의 영향을 받는다(Vanapalli et al., 1996; Ng and Pang, 2000; Miller et al., 2002; Pham et al., 2003; Lu and Likos, 2004, Nuth and Laloui, 2008). 따라서 이력과 간극비 효과에 따라 상이한 함수특성곡선을 적용하면, 불포화토의 유효응력이 각 인자의 변화에 따라 영향을 받을 수 있다. 즉 깊이에 따라 구속응력이 상이한 조건에서 상이한 함수특성을 나타내고, 강우로 인한 침투시와 증발로 인한 배수시에 상이한 함수특성을 나타내게 된다. 이로부터 모관흡수력이 유효응력에 기여하는 정도가 각 상황과 인자에 의존할 수 밖에 없다.

본 연구에서는 구속응력과 흡수력 이력 효과에 독립적인 함수특성곡선에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 압력판 추출시험시 구속응력을 적용하고 건조 및 습윤 과정의 함수특성을 획득하였다. 그리고 대표 함수특성곡선을 추출하고 불포화토의 유효응력을 기술하였다. 삼축시험시 구한 불포화 전단강도와 비교하여 불포화토의 유효응력이 함수특성의 구속효과에 독립적임을 입증하였다.

2. 함수특성곡선과 유효응력

함수특성곡선(Soil water retention curve, SWRC)은 흙 조직에 존재하는 간극수의 부피와 모관흡수력의 관계로 정의된다. 이 때 간극수의 부피는 체적함수비 θ 또는 포화도를 변수로 나타내며, 체적함수비는 흙의 전체 부피에 대한 간극수의 부피의 비로 정의한다.

Fig. 1. Conceptual illustration on soil water retention curves in the process of drying and wetting

전형적인 함수특성곡선의 형태는 Fig. 1과 같이 모관흡수력을 대수축으로 나타낼 때, 역 S자 형태를 나타낸다. 모관흡수력이 증가하면, 포화된 간극은 공기함입치(u_b)보다 큰 모관흡수력에서부터 간극수가 빠져나오고 함수비가 감소한다. 현저하게 함수비가 감소하면 더 이상 간극수가 유출되지 않는 잔류함수비(θ_r)가 나타난다. 낮은 수준의 모관흡수력에서는 모세관 효과(capillarity)에 의한 영향이 지배적으로 나타나며, 모관흡수력이 증가할수록 흡착작용(adsorption)의 효과가 크게 나타난다.

증발이나 배수로 인하여 건조과정이 발생하면, 침투나 모세관 상승에 의한 습윤과정에 비하여 동일한 모관흡수력하에서 더 많은 양의 간극수를 저장하는 경향이 나타난다(Vanapalli et al., 1996; Ng and Pang, 2000; Lu and Likos, 2004; 유건선, 2010). 따라서 Fig. 1에서 보여지듯이 함수특성곡선은 건조 및 습윤과정에서 이력현상(hysteresis)이 발생한다. 이러한 이력현상의 기구는 아직 명확하게 밝혀지지는 않았지만, (1) 건조시 큰 간극에 영향을 받고 습윤시 작은 간극에 영향을 받는 잉크병 효과 (2) 흡입자-간극수 접면에서의 접촉각 차이 (3) 습윤시 공기의 폐색(occluded air bubbles) (4) 습윤 및 건조시 흙의 팽창과 압축의 차이로 인한 것으로 알려져 있다(Lu and Likos, 2004).

또한 포화시료를 건조하여 구한 함수특성곡선과 습윤과정의 곡선에서는 일반적으로 포화시 체적함수비가 상이하게 나타난다(Vanapalli et al., 1996; Ng and Pang, 2000; Lu and Likos, 2004). 초기에 시료 포화시 시료 표면의 흙조직보다 다소 높은 수위를 가질 수 있기 때문이다. 또는 습윤시 폐색된 공기로 인하여 모관흡수력이 0일 때 낮은 함수비를 나타낼 수 있다.

각 과정에서의 함수특성곡선은 간극비가 일정한 상태에서 모관흡수력에만 의존하는 관계를 가진다. 구속응력이나 간극비가 상이한 경우에는 함수특성곡선이 다양하게 정의될 수 있다 Fig. 1에서 보여지듯이 구속응력이 증가하면 포화시 체적함수비가 감소하며 구속응력에 따라 함수특성곡선이 변화한다(Vanapalli et al., 1996; Ng and Pang, 2000; 성상규와 이인모, 2003).

대부분의 함수특성곡선 모델은 포화도나 체적함수비를 표준화한 변수를 이용한다. 대표적인 변수가 유효 체적함수비 θ_e 로 다음과 같이 정의된다.

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1)$$

사실토와 같이 θ_r 이 0인 경우에 θ_e 는 포화도와 동일하다. van Genuchten 모델(1980)에 의한 SWRC는 유효 체적함수비와 모관흡수력간에 다음과 같은 관계를 나타낸다:

$$\theta_e = \left[\frac{1}{1 + \{ \alpha(u_a - u_w) \}^n} \right]^{1-1/n} \quad (2)$$

여기서 α 는 u_b 의 역수이며, n 은 간극크기 스펙트럼 계수이다.

Fig. 1에서 보여지듯이 함수특성곡선은 모관흡수력 외의 변수, 간극비나 이력 등의 여러 인자에 의존한다. 그리고 식 (2)의 모델은 이러한 인자들이 일정한 조건에서 하나의 관계를 맞출 수 있다.

불포화토의 유효응력가설은 Bishop(Bishop, 1954; Bishop and Blight, 1963)에 의하여 제안되었다:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (3)$$

여기서 σ' 는 유효응력, σ 는 전응력, u_a 는 간극공기압, u_w 는 간극수압, $(u_a - u_w)$ 는 모관흡수력이며 χ 는 Bishop의 유효응력 계수이다. 식 (3)의 두번째 항 $\chi(u_a - u_w)$ 는 흡수응력(suction stress)으로 표면장력에 의한 모관응력과 흡착수압 변화(반 데르 발스 힘, 이중층력, 수화작용)를 포함하는 입자간 응력을 나타낸다(Lu and Likos, 2006).

변포화토(variably-saturated soils)의 유효응력은 흡수응력을 이용하여 다음과 같이 일반화할 수 있다(Lu and Likos, 2006):

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (4)$$

열역학적 평형법칙에 의하여 흡수응력은 다음과 같이 정의된다(Lu et al., 2010):

$$\sigma^s = -(u_a - u_w)\theta_e \quad (5)$$

θ_e 는 식 (2)와 같이 모관흡수력의 함수로 정의되면 흡수응력은 모관흡수력만의 함수로 나타나며, 이를 흡수응력 특성곡선(suction stress characteristic curve, SSCC)이라고 한다(Lu and Likos, 2006).

식 (2)와 (5)로부터, 흡수응력은 닫힌 형식 방정식(closed form equation)으로 나타난다(Lu et al., 2010):

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \left[\frac{1}{1 + \{\alpha(u_a - u_w)\}^n} \right]^{1-1/n} \quad (6)$$

흡수응력은 Fig. 2와 같이 불포화 파괴포락선에서 $(\sigma - u_a)$

Fig. 2. Conceptual procedure for quantifying SSCC from Mohr-Coulomb type strength in p - q space (Oh et al., 2012)

축에 선형적으로 투영하였을 때 나타난다. 따라서 흡수응력 특성곡선은 강도시험 결과에 맞추어 도출할 수 있다. 식 (5)와 (6)에서 보여지듯이, SWRC는 SSCC로부터 구할 수 있으며, 역으로 SWRC로부터 SSCC도 구할 수 있다. 이는 흡수응력과 유효응력이 본질적으로 SWRC와 연관된다는 것을 의미한다.

유효응력으로 나타낸 파괴규준은 다음과 같다.

$$q_f = d' + Mp_f' \quad (7a)$$

$$p_f' = (p - u_a)_f - \sigma^s \quad (7b)$$

삼축실험 조건에서 체적응력 $p \equiv (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 이고 축차응력 $q \equiv \sigma_1 - \sigma_3$ 이다. M 은 $(p - u_a) - q$ 면에서 파괴규준의 기울기를 나타내고 d' 는 포화시 절편을 나타낸다. 첨자 f 는 파괴시점을 표현한다. 흡수응력 σ^s 는 삼축실험 결과 응력으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma^s = \frac{d' + M(p - u_a)_f - q_f}{M} \quad (8)$$

유효응력 가설은 불포화토의 파괴규준을 유일하게 정의할 수 있으며, 불포화토의 파괴규준은 흡수응력에 근거하여 포화시 파괴규준으로 기술할 수 있다(Lu와 Likos, 2004; 2006; 오세봉 등, 2011).

모관흡수력 이력과 간극비 효과에 의하여 함수특성곡선이 상이하게 나타날 때, 식 (6)의 흡수응력 특성곡선에 끼치는 영향을 연구할 필요가 있다.

3. 시료조건 및 불포화 시험절차

김천지역 도로현장에서 화강풍화토 시료를 채취하여 세립분 20%가 함유하도록 입도를 조정하였다. Table 1에서 보여지듯이 통일분류상 실트질 모래(SM)로, 정적 다짐에 의하여 최대 건조밀도의 90%에서 성형하였다.

삼축시험을 통하여 불포화 전단강도를 획득하였다. 고압 공기함입치(high air-entry) 디스크를 시료의 하부에 설치하여 간극수를 배수하고 시료 상부에서는 공기압을 가하여 모관흡수력을 조절하였다. 모관흡수력은 50, 100, 200, 250, 300kPa를 가하였고 평균 순응력은 100, 150, 200, 300, 350kPa 수준을 가하였다. 압밀완료후, 축차응력은 0.005mm/min 속도로 가하여 충분히 배수가 일어나도록 하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 함수특성곡선을 획득하기 위해 사용된 압력판 추출시험기(volumetric pressure plate extractor)의 개요도이다. 압력판 추출시험기는 기존 연구(Vanapalli et al.; 1996, Ng and Pang, 2000; 성상규와 이인모, 2003)와 유사한 원리로 개조하여 연직방향의 구속응력을 가할 수 있도록 고안하였다.

포화시료에 대하여 통상적인 1차원 압밀시험을 수행하여 구속응력이 가해졌을 때의 연직변위를 측정하고, 시료를 압

Table 1. Geotechnical properties on decomposed granitic soils compacted at 90% $\rho_{d,max}$ of wet of OMC

USCS	G_s	#200 (%)	Void ratio	$\rho_{d,max}$ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	OMC (%)	w (%)	PI (%)	d' (kPa)	M
SM	2.75	20.1	0.627	1.88	1.69	13.0	22.8	-	73.5	1.11

Fig. 3. Pressure plate extractor test apparatus under confining stress

력판 추출기에 옮긴다. 동일한 구속응력을 압력판 추출기에서 일정하게 유지하며, Fig. 1과 같은 절차로 건조과정 및 흡윤과정에 대한 함수특성곡선을 획득한다. 한 개의 시료에 대하여 보통 한달 반 정도의 기간이 소요되었다. 또한 데시케이터 시험을 통하여 고압의 포환흡수력에 대한 함수특성을 구할 수 있었다.

상세한 삼축시험과 통상적인 압력판 추출시험 및 데시케이터 시험의 절차는 참고문헌(오세봉 등 2011; Oh et al., 2012)에 상세히 기술되었다.

4. 함수특성곡선의 응력이력 및 구속응력 효과

구속응력에 따른 압력판 추출시험을 통하여 함수특성곡선을 획득하였고, RETC 프로그램을 이용하여 van Genuchten 모델로 각 곡선에 대한 회귀분석을 수행하였다(van Genuchten et al., 1991). Table 2에서 보여지듯이 건조과정에서 공기함입치 u_b 는 9~23kPa이고 간극크기 스펙트럼 계수 n 은 1.25~1.38이다. 포화 체적함수비는 구속응력이 감소함에 따라 0.32~0.39이고 잔류함수비는 모두 0이다. 흡윤시에는 u_b 는 1.1~2.1kPa, n 은 1.2정도로 모두 유사하게 나타났다. 포화 체적함수비는 구속응력이 증가함에 따라 0.37에서 0.32로 감소하고 잔류함수비는 0이다.

Fig. 4(a)에서 보여지듯이, 건조시 SWRC는 구속응력에 따라 상이한 형태를 나타내고 있다. 구속응력이 증가할수록 포화시 체적함수비는 감소하고, 탈포화과정에서 기울기는 다소 상이하게 나타난다. 구속응력이 0인 경우를 제외하고는 포환

흡수력이 증가할수록 점차 수렴하는 경향을 나타낸다. 반면 Fig. 4(b)의 흡윤시 SWRC는 상이한 구속응력에 대하여 유사한 형태를 나타내고 있다. 또한 van Genuchten 모델로 맞춘 곡선들과 잘 일치하고 있다.

여러 연구자에 의하면, 구속응력이 증가하거나 간극비가 감소할수록 건조시 함수특성곡선에서는 공기함입치 u_b 가 증가하는 경향을 보인다(Miller et al., 2002; Pham et al., 2003; Nuth and Laloui, 2008). Table 2에서 보면, 건조기 함수특성곡선은 구속응력이 증가할수록 전반적으로 증가하는 경향이 나타난다. 하지만 구속응력이 50 kPa인 경우에는 다소 감소하였다. 이는 Fig. 1에서 보여지듯이, 포화완료 후 시험 초기에 시료 표면보다 다소 높은 수위를 가질 수 있기 때문으로 판단된다. 한편 흡윤시에는 공기함입치의 변화가 거의 없거나 구속압에 따라 다소 증가한다.

Fig. 5에서는 식 (1)의 유효 체적함수비에 따른 함수특성곡선을 보여준다. Fig. 5(a)에 나타난 건조시 SWRC는 구속응력이 0인 경우 형태가 다소 상이하지만, 나머지 경우에는 구속응력이 증가할수록 동일한 포환흡수력에 대하여 함수용량이 증가하고 있다. Vanapalli 등(1996)과 성상규와 이인모(2003)에 의하면, 건조시 SWRC는 구속응력이 증가할수록 동일한 포환흡수력에 대하여 유효 체적함수비가 증가하는 것으로 나타났으며, 이러한 연구 결과와 경향이 유사하게 나타난다.

한편 구속응력이 150, 200kPa인 경우 공기함입치 부근 실험치에서 배수가 일어나지 않고 함수비가 일정하여 van Genuchten 모델 위에 실험치들이 나타나고 있다. 건조곡선은

Table 2. Parameters of van Genuchten model for each SWRC

Confining stress	Drying					Wetting				
	0 kPa	50 kPa	150 kPa	200 kPa	Total	0 kPa	50 kPa	150 kPa	200 kPa	Total
θ_s	0.387	0.362	0.357	0.317	-	0.369	0.368	0.337	0.321	-
u_b	11.20	8.90	19.63	23.03	8.04	1.13	1.70	1.43	2.08	1.72
θ_r	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-
n	1.25	1.31	1.37	1.38	1.23	1.16	1.20	1.18	1.19	1.19

(a) Drying process

(b) Wetting process

Fig. 4. SWRCs for volumetric water contents

(a) Drying process

(b) Wetting process

Fig. 5. SWRCs for effective volumetric water contents

초기 포화시에 시료 표면부 위에 약간의 수위가 존재할 수 있어서 낮은 모관흡수력 수준에서 오차가 발생할 수 있다. 또한 실제 지층이 오랜 침투와 배수가 반복적으로 발생하는 것을 고려할 때, 실험실에서 성형후 첫 과정에서 발생하는 함수특성은 모관작용과 흡착작용이 실제적이지 않을 수 있다. 이로 인하여 동일한 시료에 대하여 반복적인 실험결과를 획득하기 어렵다.

반면 Fig. 5(b)에 나타난 습윤곡선은 실험치가 거의 일치하는 경향을 나타내고 있다. 포화 체적함수비로 표준화한 유효 체적함수비는 유일한 곡선으로 나타난다. 따라서 습윤시 SWRC는 구속응력에 따라 포화시 체적함수비에는 영향을 끼치지만, 유효 체적함수비에는 영향을 별로 끼치지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서는 건조 및 습윤과정에서 나타나는 이력현상을 보여주며, 실험치는 압력판 추출시험과 데시케이터 시험 결과를 나타내고 있다. van Genuchten 모델은 각 과정에 대한 실험치를 통합적으로 회귀분석한 대표곡선을 보여주며, Table 2에서 보여지듯이, 건조과정에서 u_b 는 8.04kPa이고 n 은 1.23 이고 습윤과정에서는 u_b 는 1.72kPa이고 n 은 1.19이다.

건조곡선에서는 모관흡수력이 낮은 경우에 모델은 실험치

의 함수비를 다소 과소평가하고 모관흡수력이 높은 경우에는 반대의 경향을 보인다. 반면 습윤곡선은 모델의 대표곡선이 실험치를 매우 잘 맞추고 있다.

동일한 모관흡수력 하에서 SWRC 이력현상의 함수비 차는 건조 및 습윤과정에서 나타나는 함수 용량의 차이를 나

Fig. 6. Hysteresis on drying and wetting SWRCs

타낸다. Fig. 6에서의 함수 용량 차이는 포화 시료에 대한 1차 건조곡선을 기준으로 하고 있다. 하지만 실제 지반에서는 반복적인 건조 및 습윤과정의 이력현상에서 함수 용량의 차이는 감소할 것으로 예상된다. 이인모 등(2003)과 김윤기(2009)에 의하면, 현장에서 측정된 모관흡수력과 체적함수비에서는 실내 함수특성곡선에 대하여 습윤과정측에 수렴된 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 실제 현장에 적합한 함수특성곡선은 1차 건조과정 이후의 SWRC에서 획득하는 것이 합리적이다.

Fig. 6의 건조곡선과 습윤곡선을 보면, 이력현상은 뚜렷하게 존재하지만 구속효과에 의한 차이는 두드러지지 않음을 알 수 있다. 즉 체적함수비를 표준화한 유효 체적함수비는 구속응력에 상관없이 각 이력에 대하여 유일하게 수렴함을 알 수 있다.

5. 유효응력에 근거한 전단강도

삼축시험에서는 모관흡수력이 일정한 상태에서 등방압밀

Fig. 7. Failure criteria from triaxial test results and predictions by SSCC

배수시험을 수행하였다. 건조 및 습윤시 SWRC를 이용하여 식 (6)으로부터 흡수응력을 계산할 수 있다. Fig. 7에서는 습윤시 SWRC를 이용하여 흡수응력을 계산하였다. 그리고 식 (7b)로부터 파괴시 유효 체적응력은 구하였다. Fig. 7(a)에서는 순 체적응력 $p - u_a$ 와 파괴시 축차응력의 관계를 나타낸다. 불포화 시료에서는 동일한 구속응력에 대하여 모관흡수력이 증가할수록 전단강도는 증가하므로 포화시 파괴포락선의 상부에 구분되어 나타난다. 포화시 파괴규준은 식 (7a)에 대하여 $M=1.11$, $d=73.5\text{kPa}$ 로 나타났다.

Fig. 7(b)에서는 삼축시험결과 나타난 실험치들을 유효응력으로 기술한 파괴규준을 보여주고 있다. 다양한 모관흡수력에 대하여 유효응력으로 기술한 전단강도는 유일한 파괴포락선위에 존재한다. 특히 포화시 파괴규준과 동일한 파괴규준으로 정의할 수 있음을 알 수 있다.

이로부터 Fig. 6에 나타난 SWRC가 전단강도에서 나타난 유효응력을 적절하게 기술할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 습윤시 SWRC가 구속응력이 상이한 경우에 대하여 유일하게 정의될 수 있음을 입증한다.

Fig. 8에서는 삼축시험시 구한 SSCC를 SWRC로부터 평가한 것과 비교하였다. Fig. 8에서 보여지듯이 식 (8)과 같이 삼축시험시 강도와 식 (6)과 같이 습윤시 SWRC로부터 구한 SSCC가 모관흡수력에 따라 대체로 일치하고 있음을 알 수 있다. 모관흡수력이 100kPa에서는 실험치의 흡수응력을 다소 과대평가하고 300kPa에서는 과소평가한다. 강도에 대한 실험치는 파괴시 응력을 Fig. 2와 같이 연장하여 낮은 수준의 흡수응력을 구하므로 통상적으로 오차가 발생한다. 건조시 SWRC는 삼축시험으로부터 구한 SSCC를 전반적으로 과대평가하였다.

본 연구에서는 구속응력에 따라 상이하게 나타나는 SWRC를 유효체적함수비로 표준화하여 건조 및 습윤곡선을 추출하여 SSCC를 설정하였다. 이러한 SSCC는 강도시험으로부터 구한 흡수응력을 잘 예측하였다. 따라서 유효응력을 기술하는 데 필요한 SWRC가 구속효과에 상관없이 나타나고 있음을 입증하였다. 또한 식 (5)에 나타난 흡수응력에 의하여 유효응력을 기술할 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8. SSCC from triaxial tests and SWRC

6. 결 론

본 연구에서는 구속응력과 이력현상에 따른 함수특성곡선의 변화를 실험적으로 획득하였다. 그리고 유효 체적함수비에 대한 함수특성곡선을 비교한 결과 건조 및 습윤과정에서 나타난 함수특성곡선들이 구속응력과 무관하게 존재하는 것을 알 수 있었 있었다.

이로부터, 각 이력(건조 및 습윤과정)에 대하여, 흡수응력을 모관흡수력에 대한 유일한 함수로 정의할 수 있었고, 불포화토의 유효응력을 구속응력에 대하여 독립적으로 기술할 수 있었다. 삼축시험시 나타난 전단강도로부터, 유효응력에 대한 파괴규준은 유일하게 존재하는 것을 알 수 있었다. 이때 실험치의 유효응력은 함수특성곡선으로부터 구할 수 있었다. 또한 함수특성곡선으로부터 구한 흡수응력 특성곡선은 삼축시험으로 구한 실험치와 유사하게 나타남을 알 수 있다.

본 연구에서는 불포화토의 유효응력이 모관흡수력만의 함수로 나타나며, 구속응력에 따른 체적변화에 영향이 받지 않는 것을 입증할 수 있었다. 하지만 다양한 흙에 대한 함수 특성이나 전단강도에 대한 자료의 축적이 필요하며, 반복적인 이력에 대한 실험이 수행 중에 있다.

감사의 글

이 연구는 부분적으로 한국에너지기술평가원(과제번호: 211-C-000-676)과 한국건설교통기술평가원(과제번호: 211-C-000-612)의 연구비 지원에 의한 성과임.

참고문헌

- 김윤기(2009) **지반투수특성과 강우특성을 고려한 토사사면 설계 및 안정해석기법**, 박사학위 논문, KAIST.
- 오세봉, Ning Lu, 송하동(2011) 다짐 풍화토의 K_0 압축 삼축시험에서 나타난 파괴이전 흡수응력 특성곡선, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, 제27권 제1호, pp. 41-52.
- 유건선(2010) “체적압력판추출기의 측정법 개선에 관한 연구”, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제30권 제4호, pp. 185-191.
- 성상규, 이인모(2003) 화강풍화 잔적토의 불포화 전단강도에 미치는 순연직응력의 영향, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, 제19권 제1호, pp. 27-38.
- 이인모, 조우성, 김영옥, 성상규(2003) 풍화토 사면에서 강우로 인한 간극수압변화에 대한 실험 연구, **한국지반공학회 논문집**,

- 한국지반공학회, 제19권 제1호, pp. 41-49.
- Bishop, A. W. (1954) The use of pore water coefficients in practice. *Geotechnique*, Vol. 4, No. 4, pp. 148-152.
- Bishop, A. W. and Blight, G. E. (1963) Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils. *Geotechnique*, Vol. pp. 13, 177-197.
- Lu, N. and Likos, W. J. (2004) *Unsaturated Soil Mechanics*, Wiley, New York.
- Lu, N. and Likos, W. J. (2006) Suction stress characteristic curve for unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No. 2, pp. 131-142.
- Lu, N., Kim, T.-H., Sture, S., and Likos, W. J. (2009) Tensile strength of unsaturated sand. *Journal Engineering Mechanics*, Vol. 135, No. 12, pp. 1410-1419.
- Lu, N., Godt, J. and Wu, D. T. (2010) A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. *Water Resources Research*, Vol. 46, doi:10.1029/2009WR008646, pp. 1-14.
- Miller, C. J., Yesiller, A. M., Yaldo, K., and Merayyan, S. (2002) Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No. 9, pp. 733-742.
- Ng, W. W. and Pang, Y. W. (2000) Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 2, pp. 157-166.
- Nuth, M. and Laloui, L. (2008) Advances in modelling hysteretic water retention curve in deformable soils. *Computers and Geotechnics*, Vol. 35, pp. 835-844.
- Oh, S., Lu, N., Kim, Y. K., Lee, S. J., and Lee, S. R. (2012) 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*, Vol. 38, No. 1, 47-57.
- Pham, H. Q., Fredlund, D. G., and Barbour, S. L. (2003) A practical hysteresis model for the soil-water characteristic curve for soils with negligible volume change. *Geotechnique*, Vol. 53, pp. 293-298.
- 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.
- van Genuchten, M. T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp. 892-898.
- 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.

(접수일: 2012.2.22/심사일: 2012.3.16/심사완료일: 2012.4.24)