

풍화잔적토의 불포화전단강도에 미치는 순연직응력의 영향

Influence of net normal stresses on the shear strength of unsaturated residual soils

성상규¹⁾, Sang-Gyu Sung, 이인모²⁾, In-Mo Lee

¹⁾ 고려대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

²⁾ 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : The characteristics and prediction model for the shear strength of unsaturated residual soils was studied. In order to investigate the influence of the net normal stress on the shear strength, unsaturated triaxial tests and SWCC tests were carried out varying the net normal stress, and the experimental data for unsaturated shear strength tests were compared with predicted shear strength envelopes using existing prediction models. It was shown that the soil - water characteristic curve and the shear strength of the unsaturated soil varied with the change of the net normal stress. Therefore, to achieve a truly descriptive shear strength envelope for unsaturated soils, the effect of the normal stress on the contribution of matric suction to the shear strength has to be taken into consideration. In this paper, a modified prediction model for the unsaturated shear strength was proposed.

Key words : Soil-water characteristic curve, Unsaturated shear strength, Prediction model, Net normal stress

1. 서론

불포화토의 강도를 예측하는 방법은 여러 지반공학자들에 의해 제안되어 왔으며, 그 중에서 SWCC로부터 전단강도를 추정하는 Vanapalli 등(1996)의 수정모델이 matric suction에 따른 물의 보유정도의 변화와 이에 따른 임의 suction하에서의 유효응력의 발현정도를 불포화토의 기본이론에 맞추어 가장 충실하게 구현한 것이라 할 수 있다. 이 모델은 근본적으로 Fredlund 등(1977)이 제안한 이론을 확장한 것으로 순연직응력(net normal stress, $(\sigma - u_a)$)과 흡인력(matric suction, $(u_a - u_w)$)으로 불리는 두 개의 독립적인 응력상태변수를 가진다. 따라서, 이 모델에서는 두 변수가 서로간에 영향을 미칠 수 없게 되어 있지만, 실제로는 밀접한 상호관계를 가지고 있음을 지금까지의 경험을 통해서 알 수 있다. 구속압이나 공기압의 변화에 의해 순연직응력이 증가하게 되면 흙의 체적이 감소하여 보다 치밀한 구조를 형성하므로 상대적으로 간극의 크기가 줄어들게 되어, 모세관현상의 원리에 의해 물을 보유하는 능력이 커지므로 임의의 흡인력에서 상대적으로 포화도가 증가하게 된다. 따라서, 흙 입자와 물의 접촉면적(contact area)이 증가되어 흡인력에 의한 입자간의 융집정도가 보다 강하게 되므로, 전단강도의 증가를 가져오게 된다. 상기의 이유로, 보다 정확한 불포화토의 전단강도 예측을 위해서는 기존의 모델을 순연직응력(net normal stress)이 흡인력(matric suction)에 미치는 영향을 고려할 수 있게끔, 보완 또는 수정하여야 할 것으로 생각된다. 본 연구에서는 기존의 연구결과를 바탕으로 국내에 산재해 있는 화강풍화잔적토(weathered residual granite soils)에 대해 불포화전단강도 실험을 실시하고 이와 병행하여 흙-

수분 특성곡선(SWCC, Soil-Water Characteristic Curve)을 구하였다. 특히, 금번 연구에서는 기존의 실험장비들을 개량하여 임의의 순연직응력을 일정하게 유지한 상태에서 SWCC를 구함으로써 순연직응력의 변화에 따른 SWCC의 변화양상을 파악할 수 있었다. 또한, 전단강도 실험결과를 기존의 강도 예측모델에 의한 예측결과와 비교 검토하는 과정에서 순연직응력에 따른 흙-수분 특성의 변화를 고려할 수 있는 보다 개선된 불포화토 전단강도 예측모델을 제안하고자 한다.

2. 불포화토 전단강도 예측방법

2.1 개요

일반적으로 불포화토의 전단강도를 결정하는 접근법에는 두 가지가 있다. 독립상태변수(independent state variable) 접근법(Fredlund 등, 1977)과 유효응력(effective stress) 접근법(Bishop, 1959)이다. 전자에서는 응력상태변수를 순연직응력과 흡인력의 항으로 나누고 전단강도는 다음 식에 의해 평가된다.

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (1)$$

여기서, ϕ^b 는 흡인력에 따른 전단강도의 증가비율을 나타내는 각이다. 후자는 불포화토의 전단강도를 결정하기 위하여 초기에 사용하였던 접근법으로 하나의 응력상태변수는 다음과 같이 나타낸다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2)$$

여기서, σ' 은 유효응력, χ 는 유효응력계수이다. 전자의 접근법은 많은 지반공학자(Gan 등, 1988; Abramamento and Carvalho, 1989; Escario and Juca, 1989; Vanapalli, 1996)와 논문에서 넓게 응호되어 오고 있으나, 토질정수를 결정하는데 방대하고 시간소모가 많은 실내실험이 불가피하며, 실험에 요구되는 전문기술의 수준이 일반적인 지반공학실험실의 능력을 능가하고 있어, 실무에서 적용하는데는 다소 어려움이 있다. 후자의 방법은 전응력, 간극수압, 공기압에 의해서 변화하는 전단강도를 하나의 응력상태변수에 의해 연관시킴으로써 실무에서 이를 적용하기가 간편하긴 하나, χ 를 결정하기 위해서는 사실상 흙의 함수특성을 실험을 통해 규명해야 하는 번거로움이 있다. 최근에 들어서는 기존 실험결과의 통계처리를 통해 나타난 일정한 연관성을 χ 와의 관계로 수식화 함으로써 보다 간편하게 불포화토의 전단강도를 예측할 수 있는 방법이 Khalili and Khabbaz (1998)등에 의해 제안되고 있다. 이 제안식은 분석을 위해 적용된 자료의 양과 흙의 종류가 매우 한정적이어서 경험식으로서의 한계성이 있으므로 추가적인 보완연구가 있어야 할 것으로 본다. Vanapalli 등(1996)은 전자의 접근법을 확장하여, ϕ^b 를 실험을 통해 따로 구하지 않아도 SWCC와 포화시의 강도정수만으로도 불포화토의 전단강도를 예측할 수 있는 실용적인 모델을 제안하였다. 이 모델은 matric suction을 유효응력의 한 형태로 보고 ϕ^b 를 이를 발현시키는 토립자와 물과의 접촉면적(A_w)의 정도 즉, 포화도의 항으로 대체함으로써, 근본적으로는 후자의 접근법과 동일한 이론적 바탕을 이루게 되었다.

2.2 예측모델

문헌조사에 의하면, 지반구조물은 같은 종류의 흙이라고 하더라도 초기함수비, 다짐에너지, 응력이력 등에 따라 그 구조와 조직이 동일할 수가 없으므로 각각의 흙-수분 특성을 고려하지 아니하고는 이론적인 방법(theoretical method)에 의해 정확히 전단강도를 예측하는 것이 어려운 것으로 나타났다. 따라서, 각각의 지반구조물의 흙-수분 특성을 가장 잘 나타내는 SWCC를 이용하는 Vanapalli 등(1996)의 제

안 모델이 기존의 불포화토 전단강도 예측모델 중에서 이론적 기반에 가장 충실한 것이라 할 수 있다. 불포화토의 전단강도는 흡인력이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 것으로 알려져 있다. (Vanapalli 등, 1996) 이는 기 언급한 바와 같이 흡인력이 증가함에 따라 습윤접촉면적(A_w)이 감소함에 기인한 것인데, Vanapalli 등(1996)의 모델에서는 다음의 식 3에서 보는 바와 같이 SWCC를 이용하여 흡인력의 변화에 따른 포화도의 변화와 이에 기인한 유효응력의 발현정도를 잘 나타내고 있다.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w)(\Theta^x) \tan \phi' \quad (3)$$

여기서, Θ 는 정규화된 체적함수비로 포화도와 유사한 값(θ / θ_s)이며, x 는 fitting parameter이다. 위의 식에서 Θ 는 실험결과를 흙-수분 특성곡선식에 의해 회귀 분석하여 구한 SWCC를 통해 구할 수 있다. 불포화토의 거동을 설명하기 위해 중요한 매개체로 사용되는 SWCC를 적절히 표현하기 위한 흙-수분 특성곡선식은 여러 지반공학자들에 의해 제안이 되었으며, Leong and Rahardjo(1997)에 의하면, 그 중에서도 다음과 같은 Fredlund and Xing(1994)의 제안식이 가장 적용성이 좋은 것으로 나타났다.

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln [e + (\psi/a)^n]\}^m} \quad (4)$$

여기서, θ 는 체적함수비, θ_s 는 포화시의 체적함수비, a , n , m 은 fitting parameter이며, $C(\psi)$ 는 보정함수로 다음의 식으로 표현된다.

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{\psi_r})}{\ln(1 + \frac{1000000}{\psi_r})}, \quad 0 \leq \psi \leq 10^6 \text{ kPa} \quad (5)$$

여기서, ψ_r 은 잔류함수비에 상응하는 흡인력이다.

2.3 기존 예측모델의 수정방향

지금까지는 일반적으로 불포화토의 전단강도를 평가하기 위해서는 순연직응력(net normal stress)이 0인 상태에서 구한 건조(drying)시의 SWCC만을 사용하여 왔다. 하지만 연직응력이 증가하면, 시료내의 유효응력이 증가할 뿐만 아니라 체적의 감소로 구조가 달라지게 되고, 이에 기인하여, 흙-수분 특성 또한 달라지게 된다. 여러 지반공학자들에 의해 기 수행된 실험결과에 의하면, 동일한 시료라 하더라도 순연직응력이 클수록 SWCC 상의 공기유입값(air-entry value)이 증가하고, 곡선의 기울기가 완만해져 동일한 흡인력에서의 함수비(포화도)가 증가하는 것으로 나타났다.(Vanapalli 등, 1998, 1999; Ng and Pang, 2000) 따라서, 흙 입자와 물의 접촉면적이 늘어나므로 흡인력에 의한 입자간의 결속이 강화되어 전단강도가 증가하게 된다. Vanapalli 등(1996)과 Rassam and Williams(1999)의 전단실험결과에서도 순연직응력이 증가함에 따라 공기유입값이 증가하고 강도포락선의 기울기가 다소 완만해지는 것을 볼 수 있었다. 따라서, 불포화토의 흙-수분 특성이 순연직응력에 매우 의존적이라는 관점에서 볼 때, 보다 정확한 전단강도예측을 위해서는 기존의 모델에서와 같이 순연직응력이 0인 상태에서 구한 단일의 SWCC를 순연직응력의 전 범위에 걸쳐 사용할 것이 아니라 임의의 순연직응력하에서 구한 각각의 SWCC를 사용하여야 할 것이다. 하지만, 이렇게 할 경우, 임의의 순연직응력하에서 각각의 SWCC를 얻기 위해서 과다한 시간과 난해한 실험이 요구되므로 불포화토 전단강도를 비교적 구하기 쉬운 포화토의 강도정수와 SWCC 만을 이용하여 간단히 구해보고자 하는 예측모델의 기본 취지에 근본적으로 위배된다. 그러므로, 본 연구에서는 Vanapalli 등.(1996)의 제안식에 임의의 흡인력에서의 체적함수비가 순

연직응력의 변화에 종속될 수 있도록 관계식을 추가하여 연직응력의 변화에 따라 각각의 SWCC를 적용하지 않아도 순연직응력이 흙-수분 특성에 미치는 영향을 고려할 수 있도록 수정하였다.

3. 실내 실험

3.1 실험 장비

본 연구에서는 삼축압축실험과 SWCC를 구하기 위한 3가지 실험을 합해 모두 4가지의 실험을 수행하였다. 그 중에서 Pressure controlled extractot test는 기존의 Pressure plate extractor test 나 Tempe cell test와는 달리 임의의 구속압을 가한 상태에서 SWCC를 구할 수 있게끔 개량된 실험이다. 이 실험의 장비조합은 그림 1과 같으며 Pressure controlled extractor의 모식도는 그림 2와 같다.

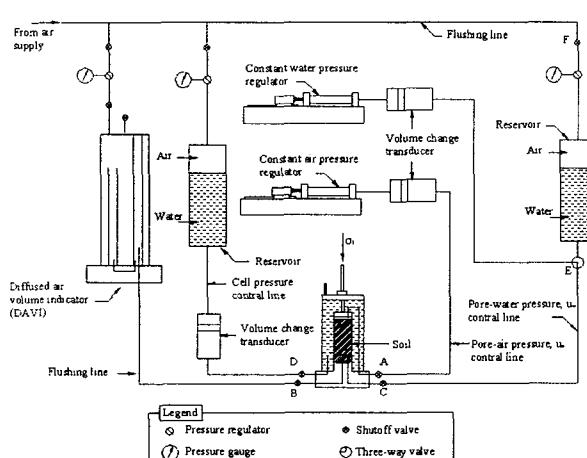


그림 1. 삼축실험장비 모식도

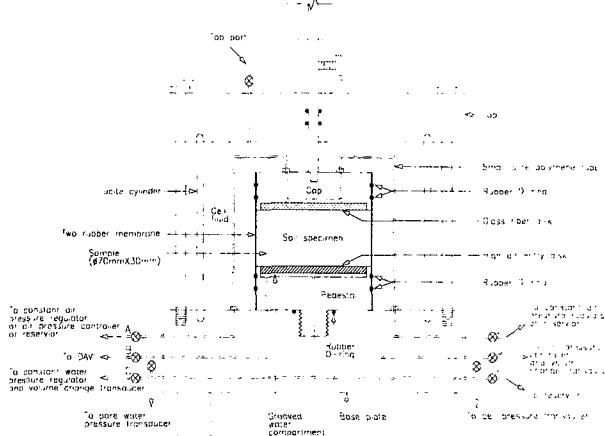


그림 2. pressure controlled extractor 모식도

3.2 시료

실험에 사용된 시료는 국내에서 쉽게 접할 수 있는 화강풍화잔적토(residual granite soil)로서 서울의 신내동에서 채취하였다. 본 연구에 사용된 시료는 현장에서 채취된 자연시료를 48시간 노건조(oven dried) 시킨 후 고무망치로 잘게 부순 것을 10번 체를 통과시킨 것으로서 조립토의 성질이 매우 강하다. 시료의 기본 성질은 다음의 표 1과 같으며, 시료의 다짐곡선 및 입도분포는 각각 그림 3과 4에 나타나 있다. 본 실험에 사용된 다짐시료는 상대다짐도(relative compaction, R)가 90%가 되게 준비하였다.

표 1. 시료의 기본 물성

Soil	Porosity	O.M.C (%)	$\gamma_d(\text{max})$ (kN/m^3)	Percent passing #200 sieve (%)	Plasticity (%)			G_s	USCS
					LI	PL	PI		
Shinnae-dong	0.358	10	18.64	3.72		NP		2.65	SW

다지기 전에 우선, 무게를 잰 일정량의 시료를 팬에 담아 초기함수비가 10%가 되도록 증류수를 스프레이로 분사한 후 잘 섞은 다음 시료가 서로 뭉치지 않게 10번 체로 다시 한번 통과시킨다. 그 다음 습도를 일정하게 유지할 수 있는 항습용기(desiccator)에 넣어 적어도 24시간 동안 함수비를 균등화 시켰다. 항습용기에서 끄집어 낸 시료는 시료성형용 모울드에 넣어 정다짐(static compaction)을 한다.

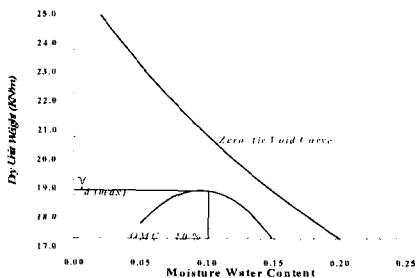


그림3. 시료의 다짐곡선

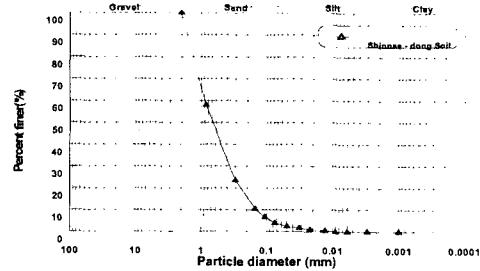


그림 4. 시료의 입도분포

4. 실험결과 및 분석

4.1 순구속압이 흙-수분 특성에 미치는 영향

여러 지반공학자들에 의해 기 수행된 연구결과에 의하면 대체적으로 구속압의 증감에 따라 거시간극(macro-pore)은 상당히 민감하게 그 크기가 변화하는 반면에 미세간극(micro-pore)은 그렇지 않은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 거시간극의 경우에는 주로 열려있고(open) 간극간에 서로 연결이 되어 있어 구속압에 의한 간극 줄음이 용이한 반면에 미세간극의 경우에는 간극이 대부분 흙덩어리 안에 갇혀있는 상태에 놓여 있어 간극공기나 간극수가 잘 빠져 나올 수 없으므로 잘 줄어들지 않기 때문에 나타난다. 특히, 본 연구의 실험에서 사용한 시료와 같이 사질토인 경우에는 미세구조의 형성비율이 상대적으로 낮아 이러한 경향이 더욱 뚜렷하게 나타날 것으로 예상할 수 있다.

그림 5와 6은 다짐시료에 대해 SWCC를 구하는 3가지 실험을 수행한 결과와 이를 Fredlund and Xing(1994)이 제안한 SWCC 식(식3)에 의해 fitting한 곡선을 동시에 나타낸 것이다. 실험결과와 program "SOIL VISION"을 사용하여 구한 fitting curve가 상당히 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이들 그림을 보면 순구속압이 증가할수록 동일한 흡인력에서의 함수비와 포화도가 증가하는 것과 공기유입값 이후의 곡선의 기울기가 상대적으로 완만해지는 것을 알 수 있다. 또한, 기 언급한 바와 같이 해당시료가 사질토의 특성이 강하므로 거시간극에 지배되는 낮은 흡인력 범위에서는 구속압의 크기에 따라 흙-수분 특성곡선이 상당히 달라지나 높은 흡인력의 범위에서는 거의 변화하지 않는 것을 볼 수 있다.

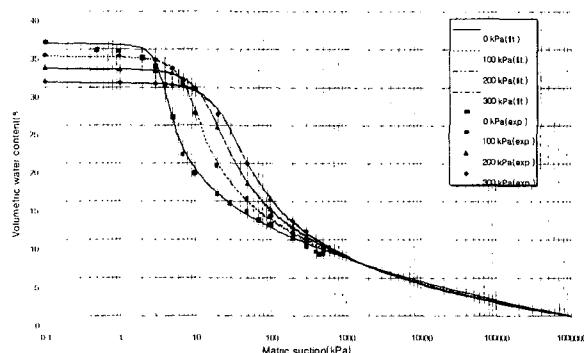


그림 5. 순구속압에 따른 SWCC(체적함수비)

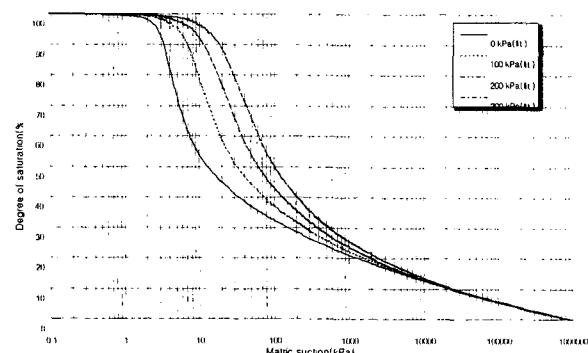


그림 6. 순연직응력에 따른 SWCC(포화도)

4.2 순구속압이 불포화토의 전단강도에 미치는 영향

앞의 절에서 기 언급한 바와 같이 순구속압이 증가하면 동일한 흡인력에서의 포화도가 증가하므로 물과 흙의 접촉면적이 증가하여 전단강도가 증가하게 된다. 그림 7은 불포화 삼축압축실험 결과를 나타낸 것인데, 흡인력이 커질수록 파괴포락선의 기울기가 조금씩이나마 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 순연직응력이 증가할수록 흡인력에 의한 전단강도의 증가정도가 선형적임을 알 수 있다. 하지만

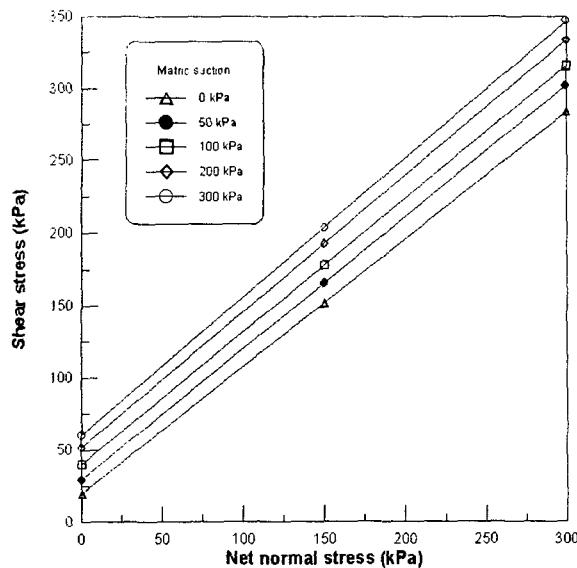


그림 7. 순연직응력에 따른 파괴포락선

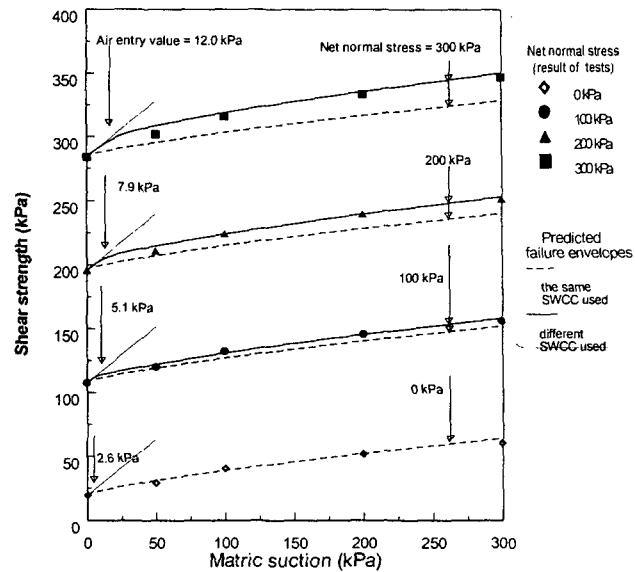


그림 8. 흡인력에 따른 전단강도의 변화

Vanapalli 등(1996)의 모델에서는 파괴포락선의 기울기를 동일하게 적용하였다. 그림 8은 불포화토 삼축압축실험으로 구한 흡인력에 따른 전단강도를 전단응력-흡인력 평면에 투영하여 나타낸 것이다. 이 그림에서는 Vanapalli 등(1996)의 전단강도 예측모델에 의해서 구한 파괴포락선과 순구속압을 달리해서 구한 3개의 SWCC를 각각의 순연직응력에 따라 동일 모델에 각기 적용하여 구한 파괴포락선을 함께 나타내어 실험치와 두 예측치를 비교해 보았다. 순연직응력이 0일 때의 흡인력에 따른 전단강도(접착력) 실험결과를 식3에 의해 curve fitting 한 결과, fitting parameter(κ)는 1.34 가 가장 적절한 값으로 나타났다.(program "SOIL VISION" 사용) 따라서, 이후에는 객관적인 비교를 위해 fitting parameter, κ 는 모두 1.34를 적용하였다. 그림 8을 보면, 순연직응력이 0인 상태에서 구한 SWCC를 일률적으로 모델에 적용하는 구한 파괴포락선 보다는 순연직응력의 변화에 맞추어 각각의 응력상태에서 구한 SWCC를 구별 적용하여 구한 파괴포락선이 전단강도 실험결과와 근사하게 잘 맞는 것으로 나타났다. 따라서, 보다 정확한 불포화토의 전단강도를 예측하기 위해서는 기존의 모델을 흡인력에 미치는 순연직응력의 영향을 고려할 수 있게끔 수정하여 할 것으로 판단된다. 한편, 그림 8을 보면, Rassam and Williams(1999)가 최근의 자료조사를 통해 주장한 바와 같이 본 연구의 실험결과에서도 공기유입값과 연직응력(normal stress)간에는 거의 선형적인 관계가 나타남을 알 수 있다.

4.3 수정예측모델

앞 절에서의 비교 분석에 의하면, 흡인력에 따른 전단강도 실험결과가 순연직응력이 0일 때의 SWCC를 일률적으로 사용하는 Vanapalli 등(1996)의 모델에 의한 예측치 보다는 순연직응력의 증가에 따라 각기 다른 SWCC를 동일 모델에 적용하여 구한 예측치와 근사하게 잘 맞는 것을 볼 수 있었다. 이는 예측에 사용된 Vanapalli 등(1996)의 제안 모델이 순연직응력의 변화에 따라 변화하는 유효접촉면적의 변화를 추가적으로 고려할 수만 있다면 상당히 정확하게 불포화토의 전단강도를 예측할 수 있음을 반증하는 것이다. 본 연구에서는 식 3의 마지막 부분에 순연직응력을 독립변수로 하는 수치식(numerical formula)을 추가하여 순연직응력 0 일때의 SWCC 만을 적용하면 순연직응력의 변화에 따른 흙-수분 특성의 변화와 이에 기인한 전단강도의 변화를 적절히 표현할 수 있는 방법을 모색하였다. 이를 위해, 기존의 모델식에 여러 가지 수치식을 바꾸어 대입하고, numerical fitting parameter를 변환하는 반복적인 curve fitting 작업을 통해 실험결과를 가장 적절히 표현할 수 있는 수치식을 구하였다. 그림 6에서, 공기유입값 이후의 SWCC에서 볼 수 있듯이 순구속압에 따른 포화도의 변화정도가 거의 선형적이므로 선형 수치식이 가장 적절할 것임을 미루어 짐작할 수 있다. Fredlund and Rahardjo(1993)나 Rassam and

Williams(1999)는 그들의 제안 모델에서 매우 낮은 흡인력 범위 즉, 공기유입값(AEV)까지의 흡인력 범위에서는 φ^b 를 φ' 과 동일하게 적용하였다. 이는, 공기유입값 이전의 흡인력 범위에서는 시료에서 물이 거의 빠져나가지 않아 포화 상태로 간주할 수 있으므로 흙 입자간의 접촉을 유발하는 흡인력이 전량 유효응력으로 발휘될 수 있다는 사실에 근거한 것인데, 본 연구에서 제안한 수정모델에서도 공기유입값까지의 흡인력 범위에서는 φ^b 를 φ' 과 동일하게 적용하였다. 이때, 순연직응력과 AEV의 관계는 선형적으로 고려하여 Rassam and Williams(1999)의 제안한 식(식 6)을 그대로 적용하였다.

$$AEV = AEV_I + AEV_S(\sigma_3 - u_a) \quad (6)$$

여기서, AEV_I 은 직선의 절편, AEV_S 는 직선의 기울기이며, 각각의 상수는 전단강도 실험결과나 SWCC 실험결과로부터 구한 각각의 연직응력에 따른 AEV를 회귀 분석하여 구할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 수정 모델식은 다음과 같다.

$$\text{if } (u_a - u_w) \leq AEV, \text{ then} \quad (7)$$

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + (u_a - u_w)]\tan\phi'$$

$$\text{if } (u_a - u_w) > AEV, \text{ then} \quad (8)$$

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + AEV]\tan\phi'$$

$$+ \{[(u_a - u_w) - AEV](\theta')\tan\phi')[\gamma + \lambda(\sigma - u_a)]\}$$

여기서, κ , γ , λ 는 fitting parameter이다. 단, 위의 제안식은 전체 흡인력의 범위에서 유효한 것은 아니며, 그림 6에서 보는 바와 같이 순연직응력에 의해 시료내의 포화도가 변화하는 낮은 흡인력의 범위에서만 적용이 가능하다. 그러므로 높은 흡인력의 범위에서는 Vanapalli 등(1996)의 모델을 적용하여야 한다. 이 제안식을 본 연구의 실험에서 사용한 화강풍화잔적토의 다짐시료에 대해 적용해 본 결과, 그림 9와 같이 전단강도 실험결과와 매우 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 결정계수, R^2 은 약 0.995이다. 이때, 적용한 fitting parameter는 표 2와 같다.

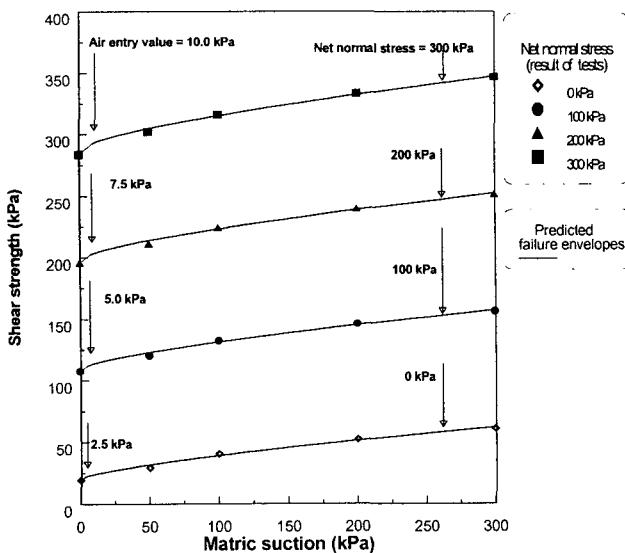


그림 9. 수정모델에 의한 전단강도 예측결과

표 2. fitting parameter

AEV _I (kPa)	AEV _S (kPa)	κ	γ	λ
2.5	0.025	1.34	0.91	1.2×10^{-3}

5. 결론

본 연구에서는 서울의 신내동 지역에 분포하는 화강풍화잔적토를 대상으로 하여 SWCC 실험과 불포화 삼축압축실험을 실시하여 순연직응력이 시료의 흙-수분 특성과 전단강도에 미치는 영향을 알아보았다. 본 연구의 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 순구속압이 증가할수록 공기유입값이 거의 선형적으로 증가하였으며 동일한 흡인력에서의 포화도가 증가하고 공기유입값 이후의 곡선의 기울기가 완만해지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 순연직응력의 증가에 따라 흙의 구조가 보다 치밀해짐으로 인해, 동일한 흡인력에서 상대적으로 물을 보유할 수 있는 능력이 커짐을 의미하는 것으로 이에 기인한 전단강도의 증가가 타당함을 보여준다.
- 2) 실험에 사용된 화강풍화토는 사질토의 성질이 강하므로 미세간극의 형성비율이 매우 낮아 구속압에 대해 민감하게 간극의 크기가 변화하는 것으로 나타났다. 따라서, SWCC를 보면 거시간극에 지배되는 낮은 흡인력 범위에서는 구속압의 크기에 따라 흙-수분 특성곡선이 상당히 달라지나 높은 흡인력의 범위(1500kPa 이상)에서는 거의 변화하지 않는 것을 볼 수 있다.
- 3) 전단강도 실험결과와 Vanapalii 등(1996)의 제안 모델에 의한 예측결과를 비교 분석한 결과, 기존 모델이 순연직응력의 변화에 따라 변화하는 유효접촉면적의 변화를 추가적으로 고려할 수만 있다면 상당히 정확하게 불포화토의 전단강도를 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 순연직응력에 따른 유효접촉면적의 변화를 선형적을 고려하는 수치식을 추가하여 식 7, 8과 같은 수정된 모델식을 제안하였다.

6. 감사의 글

본 연구는 교육부의 BK21 사업에 의해 이루어진 결과로써 당 기관에 감사를 드린다.

7. 참고 문헌

1. Charles, W.W.Ng, 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 , 157~166.
2. Fredlund, D.G., and Morgenstern, N.R. (1977), "Stress state variables for unsaturated soils" , *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 103(GT5): 447~466.
3. Fredlund D.G. and Xing, A. (1994), "Equations for the soil - water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 31, pp. 521~532.
4. Khalili, N., & Khabbaz, M. H. (1998), "A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils", *Geotechnique*, Vol. 48, No. 5, 681~687.
5. Leong, E.C., and Rahardjo, H. (1997), "Review of soil - water characteristic curve equation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.123, 1106~1117
6. Rassam, D.W., and Williams, D.J. (1999), "A relationship describing the shear strength of unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, 363~368.
7. Vanapalli 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, 379~392.
8. Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., and Pufahl, D.E. (1999), "The influence of soil structure and stress history on the soil - water characteristic of a compacted till", *Geotechnique*, Vol. 49, No. 2, 143~159.