풍화잔적토의 불포화전단강도 예측 및 특성연구

Characteristics and Prediction of Shear Strength for Unsaturated Residual Soil

이인모[1], In-Mo Lee, 성상규[2], Sang-Gyu Sung, 양일순[3], Il-Soon Yang

[1] 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea University

[2] 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea University

[3] 대본 엔지니어링(주) 지하공간 개발연구원, Daebon Engineering Co. Ltd.

SYNOPSIS : The characteristics and prediction model of the shear strength for unsaturated residual soils was studied. In order to investigate the influence of the initial water content on the shear strength, unsaturated triaxial tests were carried out varying the initial water content, and the applicability of existing prediction models for the unsaturated shear strength was testified. It was shown that the soil - water characteristic curve and the shear strength of the unsaturated soil varied with the change of the initial water content. A sample compacted in the lower initial water content needs a higher suction to get the same degree of saturation while the shear strength of a sample with the lower initial water content displays a lower value. In order to apply the existing prediction models of the unsaturated shear strength to granite residual soils, a correction coefficient, α, on the internal friction angle, ϕ' was added.

Key words : Soil-water characteristic curve, Initial water content, Unsaturated shear strength, Prediction model

1. 서론

흙이 건설재료로 사용될 경우 우리가 흔히 생각하는 포화상태가 아닌 불포화상태로 존재하게 된다. 포화토는 흙과 물, 2상으로 존재하는데 반하여 불포화토는 흙과 물뿐만 아니라 공기와 물과 공기의 경계면을 뜻하는 contractile skin이 동시에 존재하는 4상의 형태로 있게 된다. 따라서 지금까지 포화토에서와는 달리 응력상태를 나타내는 응력변수에 있어 불포화토의 경우 흡인력 $(u_a - u_w)$과 순 연직응력 $(\sigma - u_a)$ 두 개의 응력변수를 사용하며 이는 Fredlund 와 Mogenstern(1976)에 의해 소개된 바 있다. 또한, Fredlund와 Rahardjo(1993)는 제시된 응력변수의 개념을 이용하여 불포화토의 전단강도를 예측하는 이론을 제안하였으며 최근에 이르러서는 흙-수분 특성곡선을 이용한 전단강도 예측에 관한 연구가 발표된 바 있다(Vanapalli 등, 1995).

본 연구에서는 기존의 연구결과를 바탕으로 국내에 산재해 있는 화강풍화잔적토 중 신내동 시료에 대한 불포화 전단강도 시험을 실시하고 이를 기존에 제시된 전단강도 예측 모델과 비교 검토하여 전단강도 예측 모델의 국내 지반환경에 대한 적용성을 검토하고 국내의 지반환경에 맞는 전단강도 예측 모델을 제시하고자 한다. 또한 성토시, 다짐이 화강풍화토의 강도에 주는 영향을 살펴보고 다짐시 초기함수

비에 따른 포화 및 불포화 전단강도에 대한 영향을 실험을 통하여 알아보았다.

2. 불포화전단강도의 이론적 예측

불포화토의 전단강도 예측은 불포화토의 특성을 규명하는 지표인 흙 - 수분 특성곡선에서부터 출발하며, 근래에 Fredlund와 Xing(1994)은 흙 - 수분 특성곡선에 대한 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\theta = C(\Psi)\ \frac{\theta_s}{\{\ln[e+(\Psi/a)^n]\}^m} \tag{1}$$

여기서, θ는 체적함수비, θ_s는 포화시의 체적함수비이며 C(Ψ)는 보정함수로 다음의 식으로 표현된다.

$$C(\Psi) = 1 - \frac{\ln(1+\frac{\Psi}{\Psi_r})}{\ln(1+\frac{1000000}{\Psi_r})}\ ,\quad 0 \le \Psi \le 10^6\ \text{kPa} \tag{2}$$

여기서 Ψ_r는 잔류함수비를 기준으로 한 흡인력이다.

2.1 불포화 전단강도의 예측모델

불포화토의 전단강도는 흡인력이 증가함에 따라 증가하며 그 증가량은 직선이 아닌 흡인력이 증가함에 따라 그 증가량이 감소하는 비선형적인 것으로 알려져 있다 (Vanapalli 등, 1995). 이는 흡인력이 증가함에 따라 습윤 표면적(a_w)이 감소함에 기인한다. 불포화토의 전단강도를 앞서 나타낸 흙 - 수분 특성곡선으로부터 예측하는 모델이 Vanapalli 등(1995, 1996)에 의해 다음의 식으로 제안된 바가 있다.

$$\tau(u_a-u_w) = c' + (\sigma-u_a)\tan\phi' + \tan\phi' \int_0^{(u_a-u_w)} \left[(\Theta^x) + x(u_a-u_w)(\Theta^{x-1})d\Theta\right]\ d(u_a-u_w) \tag{3}$$

$$\tan\phi^b = \frac{d\tau}{d(u_a-u_w)} = \tan\phi' \left[(\Theta^x) + (u_a-u_w)\frac{d(\Theta^x)}{d(u_a-u_w)}\right] \tag{4}$$

위의 식에서 정규화된 함수비($\Theta = \frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}$)는 흙 - 수분 특성곡선식을 이용하여 흡인력으로 표현이 가능하다. 이는 식 1에서와 같이 흡인력에 대한 함수로 표현할 수 있고, 따라서 전단강도의 예측은 잔류함수비 이후의 흡인력범위에서도 가능하여 이론상으로는 1000000kPa의 흡인력까지 전단강도 예측이 할 수 있다. 즉, 흙 - 수분 특성곡선과 식 3으로부터 불포화토의 전단강도를 예측할 수 있으며, 식 4에 의해서 흡인력에 따른 ϕ^b값을 구할 수 있다. 식 3은 다음과 같이 간단한 형태로도 표현할 수 있다.

$$\tau = c' + (\sigma-u_a)\tan\phi' + (u_a-u_w)(\Theta^x)\tan\phi' \tag{5}$$

또한 위 식은 다음의 식 (6)과 같이 잔류포화도(S_r)를 이용한 함수로의 표현이 가능하다.

$$\tau = c' + (\sigma-u_a)\tan\phi' + (u_a-u_w)\left[\left(\frac{S-S_r}{1-S_r}\right)\tan\phi'\right] \tag{6}$$

위의 식에서 전단강도의 변화는 잔류포화도(S_r)에 의해 좌우되게 된다. 위에서 제안된 식에서 전단강도에 영향을 미치는 인자로는 식 5에서의 매개 변수, κ 와 식 6에서의 S_r이며 이들 매개 변수들의 결정은 실제 전단강도 실험결과로부터 유추하게 된다(Vanapalli 등, 1996).

2.2 초기함수비가 전단강도에 미치는 영향

포화토 상태의 흙, 특히 점토의 경우에 다짐시 초기 함수비가 전단강도에 주는 영향에 대해 많은 연구가 있었다. 이를 종합하여 보면, 초기 함수비에 따라 다짐 후 흙의 구조가 변화하게 되는데 일반적으로 초기 함수비가 클 경우에는 흙입자의 배열이 이산구조를 가지게 되고 반면에 초기 함수비가 작으면 면모구조를 형성하게 된다. 따라서 발현되는 전단강도도 달라지게 되는데 이산구조에 비해 면모구조의 흙이 강도가 크므로 같은 단위 중량으로 다진 경우 초기 함수비가 더 작은 경우가 전단강도가 더 크게 나타나는 것으로 알려져 있다. 화강풍화토도 점성토와 사질토의 중간적 성격을 띠고 있으므로 점성토 성분의 영향으로 초기함수비에 따라 전단강도가 변화하게 된다.

3. 실내 실험

3.1 시료

본 연구에서는 서울의 신내동지역에서 채취한 시료를 이용하였다. 사용된 시료의 물리적 특성을 파악하기 위하여 액·소성 실험, 비중실험, 다짐 실험 및 입도 분석실험을 행하였다. 시료의 물리적 성질은 다음의 표 1과 같으며, 시료의 입도분포 및 다짐 곡선은 각각 그림 1과 2에 나타나 있다.

표 1 신내동 시료의 물성치

Soil	Porosity	O.M.C (%)	$\gamma_{d(max)}$ (kN/m^3)	Percentpassing #200 sieve (%)	Plasticity(%)			G_s	USCS
					LI	PL	PI		
Shinnae-dong	0.358	10	18.64	14.23	NP			2.65	SC

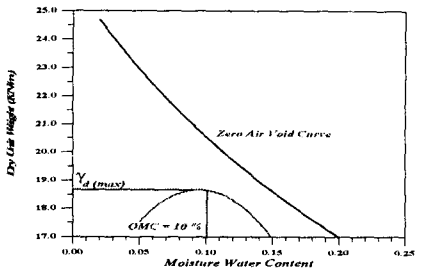


그림 1 신내동 시료의 다짐곡선

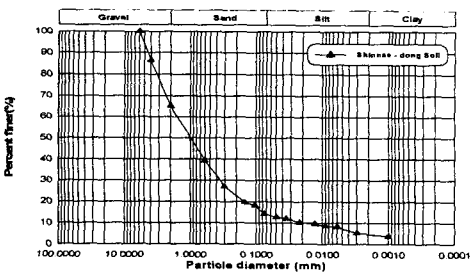


그림 2 신내동 시료의 입도분포

3.2 실험 장비 및 방법

3.2.1 흙 - 수분 특성곡선 실험 장비 및 방법

불포화토에 대한 실내 실험에 있어 불포화토 내부에 발생하는 부(-)의 간극 수압을 모사하기 위해 axis - translation tech.이 적용되었으며 이는 Hilf(1956)에 의해 검증된 바 있다. 우선 불포화토 특성의 지표라고 할 수 있는 흙 - 수분 특성곡선에 대한 실험이 수행되었으며 흡인력의 범위에 따라 pressure plate extractor와 tempe - cell이 사용되었다. 각각의 실험장비는 다음의 그림 3과 4에 나타나 있다.

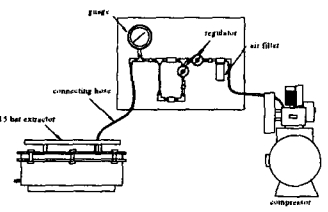


그림 3 Pressure plate extractor

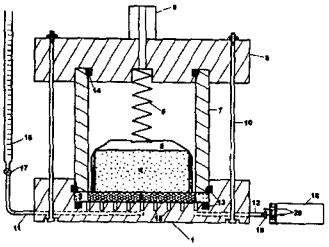


그림 4 Tempe cell test

3.2.2 불포화 삼축실험장비 및 실험 방법

불포화 전단강도 실험에 사용된 장비는 다음의 그림 5, 6, 7에 나타나 있다. 실험 장비를 살펴보면 우선 삼축쎌은 상부에는 공기압을 가하도록 하였고 하부에는 수압을 가하며 셀 내부의 일정한 흡인력 유지를 위해 높은 air entry값을 가지는 high air entry disk를 설치하였다. 또한 시료의 상부와 하부에는 실험중에 각각 일정한 공기압과 수압을 유지하기 위하여 압력조절기를 연결하였다.

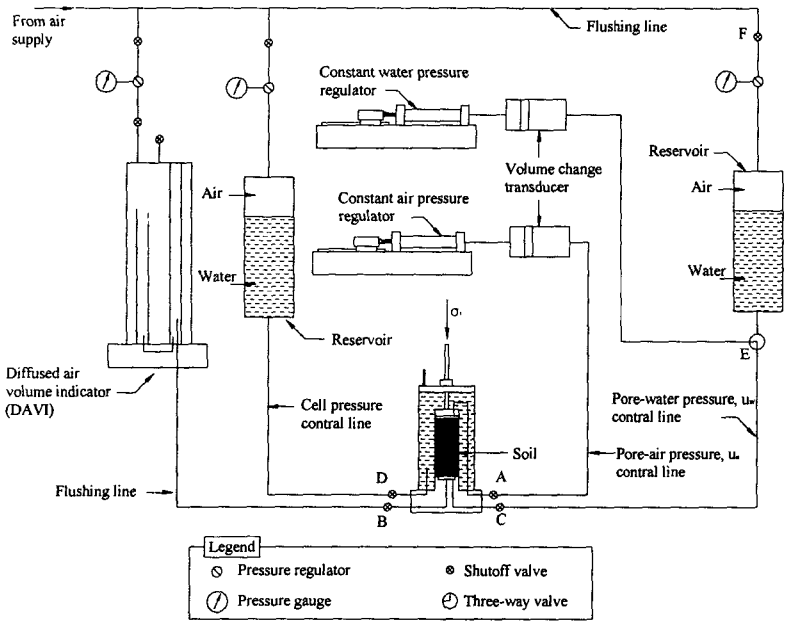


그림 5 삼축 실험장비의 모식도

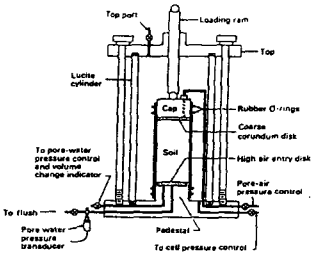


그림 6 삼축쎌의 상세도

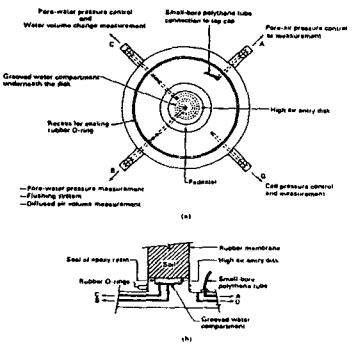


그림 7 삼축쎌의 하부 상세도

본 연구에서는 Fredlund (1975)가 제안한 실험 방법 중 압밀배수(CD) 실험을 실시하였다. 우선 각각의 초기 함수비(12%, 7%)로 정다짐 시료를 성형하는데 시료 전체가 균일한 다짐도를 가지게 하기 위하여 먼저 층다짐을 약하게 해준 뒤 정다짐으로 시료 전체를 다짐하여 동일한 부피와 건조단위중량을 가진 시료를 형성한다. 그 뒤 삼축 셀에 시료를 놓은 뒤 back pressure를 가해 시료를 포화시킨다. 시료가 포화된 뒤 실험에서 필요로 하는 흡인력을 시료내부에 형성시키게 되는데 이 과정에서 시료는 각기 다른 함수비(포화도)를 가지게되며 평형상태에 도달하는데 상당한 시간을 요하게 된다. 그 후 일정 변형율로 전단실험을 수행하며, 이때 일반 삼축실험과 달리 high air entry disk의 투수율이 적으므로 시료 내부에 axis translation technique에 의한 공기압과 수압이 일정하게 유지될 수 있도록 충분한 시간을 두고 하중을 가한다. 본 실험에서는 변형율을 0.0001 /sec로 하였으며, 순 연직응력과 흡인력을 각각 0~300 kPa로 변화시키며 불포화 삼축실험을 실시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 초기함수비의 영향

4.1.1 신내동시료의 초기함수비에 따른 흙 - 수분 특성곡선의 변화

본 연구에서는 전단강도 실험에 앞서 흙-수분 특성곡선을 구하는 실험이 수행되었으며 각각 12%와 7%, 두개의 초기함수비로 다진 시료에 대하여 수행하였다. 우선 초기함수비가 흙 - 수분 특성곡선에 미치는 영향을 분석하기 위해 각각의 초기함수비에 의한 흙 - 수분특성곡선을 비교하면 그림 8과 같다. 이때 흙 - 수분 특성곡선은 Fredlund와 Xing(1994)이 제시한 식 1을 기본으로 하였다. 식에 필요한 각각의 매개 변수들은 앞의 실험결과로부터 도출되어 표 2에 나타나 있다.

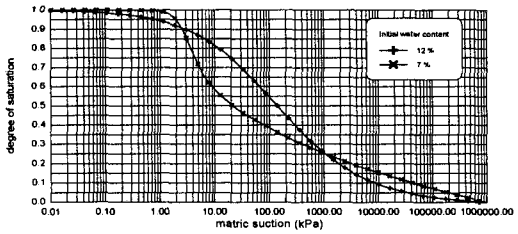


그림 8 초기함수비에 따른 신내동 시료의 흙 - 수분 특성곡선

표 2 신내동 시료의 흙 - 수분 특성곡선에 사용된 각 초기함수비에 따른 매개변수

Initial water content (%)	a	m	n
12	4.2437	11.5014	0.2109
7	2.4227	3.8424	0.2642

비교 결과를 보면 초기함수비에 따라 흙 - 수분 특성곡선은 판이하게 다르게 나타나고 있다. 두 경우에 있어 air - entry value는 3kPa 정도로 비슷한 값을 보이나 초기 함수비가 작은 경우 air - entry value를 지나면 흡인력이 증가함에 따라 함수비가 급격하게 줄어들고 있으며, air - entry value와 잔류 흡인력 사이에서는 초기함수비가 작은 경우 같은 흡인력하에서 함수비가 더 작게 된다. 이는 흙입자의 구조에서 그 원인을 찾을 수 있다. 초기 함수비가 작은 경우 큰 경우에 비해 다짐시 보다 큰 macropore 가 형성되기 때문에 흙입자의 배열 특성상 큰 macropore의 물이 쉽게 소산되기 때문인 것으로 판단된다.

4.1.2 초기함수비에 따른 신내동시료의 전단강도의 변화

우선 불포화토의 ϕ^b를 구하기에 앞서 ϕ'을 먼저 구해야 한다. 이 실험은 건조단위중량이 동일하고 초기 함수비가 다른 두 종류의 시료에 대하여 실시되었다. 실험결과를 보면 순 연직응력이 작은 경우는 OC-sand의 거동을, 반대로 순 연직응력이 큰 경우는 NC-sand의 거동을 보였다. 이 실험의 조건과 실험결과들을 정리하면 표 3과 같으며 각 초기 다짐함수비에 대한 강도의 변화를 정확히 비교하기 위하여 두 가지 전단강도변화를 하나의 그림으로 나타내면 그림 9와 같다. 결과를 살펴보면 초기 함수비가 작은 경우 강도가 약간 증가하며 이러한 강도증가는 내부마찰각보다는 겉보기점착력이 증가하여 나타남을 볼 수 있다. 이는 초기함수비가 작은 경우 macropore 가 보다 작게 형성되는 것에 기인한 결과로 보여진다.

표 3 각각의 초기함수비에서의 전단강도 정수

초기 함수비	단위 중량 (kg/cm^3)	구속 압력 (kPa)	파괴시 전단강도 (kPa)	내부 마찰각 (°)	점착력 (kPa)
12 %	1.75	10	24	44.2	0.888
	1.75	100	234		
	1.75	180	415		
7 %	1.75	10	52	43.4	12.069
	1.75	100	243		
	1.75	180	425		

불포화 전단특성파악과 화강풍화토에 대한 ϕ^b를 구하기 위해 신내동시료에 대한 불포화토 전단강도 실험을 실시하였다. 본 실험의 과정은 앞서 서술한 바와 같이 이루어졌으며 실험결과에서 특기할 사항은 순 연직응력이 낮은 경우 peak stress가 불분명하게 나타나는데 반하여, 순 연직응력이 큰 경우 OC - soil의 경향을 보이며 peak stress가 분명하게 나타나는 것이다.

실험 결과에 근거한 ϕ^b를 구하기 위하여 흡인력에 따른 전단강도의 변화를 나타내었으며 각각의 초기함수비에 대한 결과는 그림 10과 같다. 결과를 보면 12%로 다진 경우에 전단강도가 큰 경향을 보이고 있다. 각각의 초기함수비에 대한 결과가 표 4에 나타나 있다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 초기 다짐함수비가 적은 경우 흡인력의 증가에 따른 불포화 전단강도의 증가가 상대적으로 작게 나타나고 있다. 이는 다짐함수비가 큰 경우 이산구조를 지니게 되어 입자와 입자 사이가 더욱 밀착되어 흡인력에 대한 영향을 더 크게 받기 때문인 것으로 판단된다.

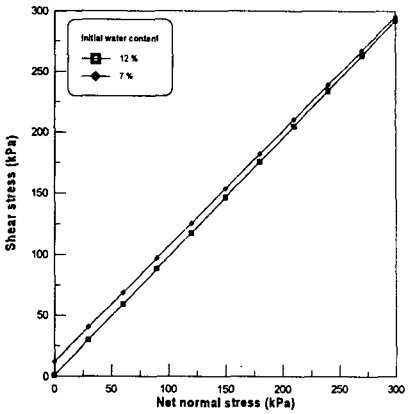


그림 9 초기함수비에 따른 전단강도의 비교

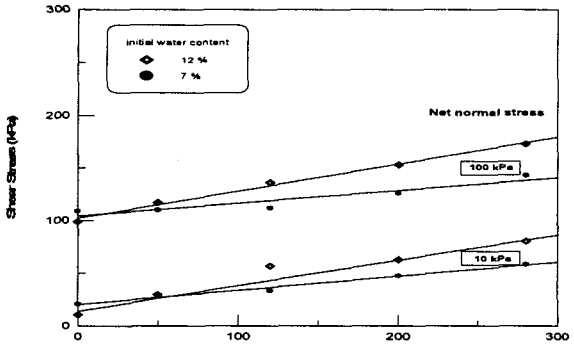


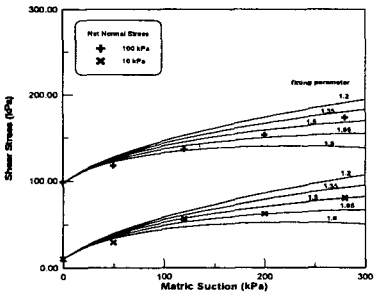
그림 10 흡인력에 따른 전단강도의 변화

표 4 각각의 조건에 따른 ϕ^b

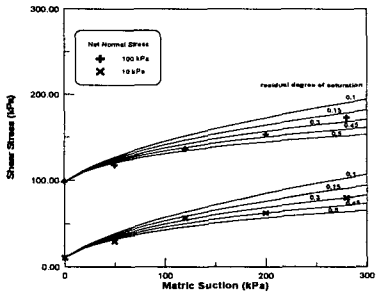
Initial water content (%)	Net normal stress (kPa)	
	100	10
12	14.5 °	13.6 °
7	6.9 °	7.6 °

4.2 불포화 전단강도의 예측

본 절에서는 불포화 전단강도의 예측에 대한 이론, 즉 매개 변수를 이용하는 모델과 잔류 함수비를 이용하는 두 가지의 예측 모델에 대하여 국내 화강풍화토에 대한 적용성에 평가를 하였다. 본 연구에서는 우선 Vanapalli등이 행한 방법과 마찬가지의 방법으로 각각의 초기 다짐함수비가 각각 12%, 7%인 경우에 흙 - 수분 특성곡선으로부터 불포화 전단강도를 예측하였다. 우선 실제 실험결과로부터 식 5와 6에서 필요로 하는 매개 변수와 잔류함수비를 구하기 위해 두 값을 변화시켜 가며 그림 11과 12와 같이 나타내었다.



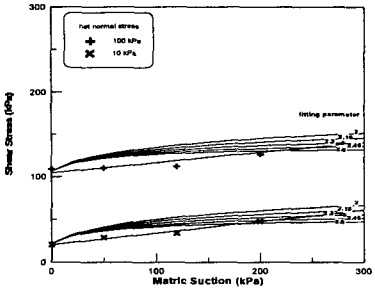
(a) 매개변수를 사용하는 경우



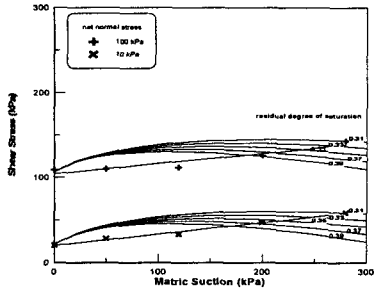
(b) 잔류함수비를 사용하는 경우

그림 11 초기함수비가 12%인 경우 전단강도의 예측

결과를 보면 두 가지 경우 모두 전단강도의 예측이 실제의 결과에 비해 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 위의 결과를 종합하여 볼 때, 기존에 제시된 불포화 전단강도 예측 모델은 흙 - 수분 특성곡선과 불포화전단 강도사이의 관계를 이론적으로 나타내고 있으나, 국내 화강풍화토의 불포화 전단강



(a) 매개변수를 사용하는 경우



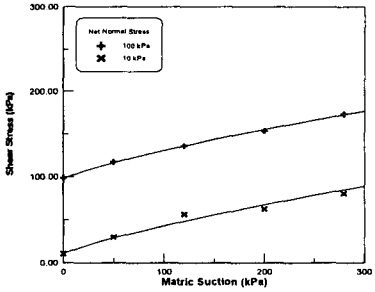
(b) 잔류함수비를 사용하는 경우

그림 12 초기함수비가 7%인 경우 전단강도의 예측

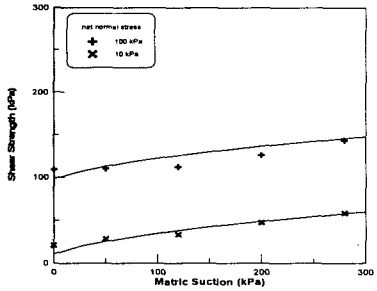
도를 예측함에 있어서는 다소 적용상에 문제가 있음을 알 수 있다. 이는 기존의 Vanapalli등에 의해 제안된 불포화 전단강도 예측모델에서 air - entry value이하의 흡인력에서 ϕ^b값을 그 흙의 내부마찰각과 같다고 가정하고 그 값이 흡인력이 증가함에 따라 감소한다고 하였다. 그러나 본 연구에 사용된 시료와 같이 air - entry value가 매우 작은 경우 초기의 ϕ^b값을 내부마찰각과 동일시 한다면 위의 결과에서처럼 흡인력이 작은 경우의 ϕ^b값이 크게 예측되어 실제의 실험결과와 맞지 않는 결과를 보이게 된다. 따라서 화강풍화토에 대하여 정확한 불포화 전단강도를 예측하기 위해서는 풍화도 및 입도분포에 따라서 기존의 예측 모델에서 ϕ^b값을 결정하는 ϕ값에 대하여 보정을 해주어야 한다. 기존에 제시된 모델식 5의 내부마찰각 항에 보정계수(α)를 첨가하여 식 7과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)(\Theta^x)\tan\alpha\phi' \tag{7}$$

앞의 경우와 마찬가지로 식 7의 예측모델을 이용하여 구한 전단강도값과 각각의 초기함수비에 대한 실험 결과를 비교해보면 그림 13과 같으며 이때 사용된 매개 변수는 각각 초기 함수비에 따라 12%인 경우는 κ = 0.7와 α = 0.6을 적용하였으며 7 %의 경우는 κ = 0.7와 α = 1.2를 적용하였다. 그림을 보면 실제의 실험결과와 만족할 만한 비교 결과를 보여주고 있다.



(a) 초기함수비 : 12 %



(b) 초기함수비 : 7%

그림 13 각각의 초기함수비에 따른 보정식을 이용한 전단강도의 예측

5. 결 론

본 연구에서는 Vanapalli 등(1996)이 제안한 불포화토 전단강도 예측 모델을 이용하여 서울의 신내동 지역에 분포하는 화강풍화토에 대한 불포화 전단강도를 예측하고 이 예측 결과를 실제의 불포화 삼축실험 결과와 비교하였다. 또한 국내의 화강풍화토의 예측이 가능하도록 기존에 제시된 예측모델에 대한 수정을 행하였다. 또한 초기 다짐함수비를 다르게 하여 다짐함수비가 불포화토의 흙 - 수분 특성곡선 및 전단강도에 미치는 영향을 알아보았으며, 이로부터 도출된 결론은 다음과 같다

(1) 초기 다짐함수비를 다르게 할 경우 불포화 상태에서의 흙 - 수분 특성곡선 및 불포화 전단강도가 변

화하게 된다. 흙 - 수분 특성곡선의 경우 초기 다짐함수비가 작은 경우 동일 흡인력하에서 더 작은 함수비를 보이게 된다. 그리고 불포화 전단강도는 초기 다짐함수비가 작은 경우 흡인력의 증가에 따른 강도의 증가가 더 작게 나타났다.

(2) 화강풍화토의 불포화 전단강도를 예측하는 경우 화강풍화토 자체의 큰 내부마찰각으로 인해 기존의 전단강도 예측모델을 국내의 화강풍화토에 적용할 경우 식 7과 같이 화강풍화토의 내부마찰각에 보정계수를 도입하여 적용하여야 한다.

(3) 불포화토의 전단강도를 예측하기 위해 현재까지 제시된 모델로써는 흙 - 수분 특성곡선로부터의 정확한 직접적 예측은 불가능하며 불포화 전단강도 예측을 위해서는 해당 시료에 대하여 각각의 전단강도 예측 모델에서 필요로 하는 매개 변수들을 구하기 위해 최소한의 전단강도 실험을 필요로 하게 된다.

6. 감사의 글

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

7. 참고 문헌

1. Fredlund, D.G. (1975), "A diffused air volume indicator for unsaturated soils", Canadian Geotechnical Journal, vol. 12, pp. 533～539.
2. Fredlund, D.G. and Morgenstern, N. R. (1976), "Constitutive relations for volume change in unsaturated soils", Canadian Geotechnical Journal, vol. 13, pp. 261～276.
3. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993), "Soil mechanics for unsaturated soil", John Wiley & Sons, Inc., New York.
4. Fredlund D.G. and Xing, A. (1994), "Equations for the soil - water characteristic curve", Canadian Geotechnical Journal, vol. 31, pp. 521～532.
5. Fredlund D.G., Xing, A., Fredlund M.D. and Barbour, S.L. (1995), "The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil - water characteristic curve", Canadian Geotechnical Journal, vol. 32, pp. 440～448.
6. Hilf, J. W. (1956), "An investigation of pore-water pressure in compacted cohesion soils", Ph.D. thesis Tech. Memo. No.654, U.S. Dept. of the interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Div., Denver, Colo.
7. Kim K.S. (1999), "Soil - water characteristic curves of residual soils and deformable soils", Ma. S. Thesis. Univ. of Korea, Seoul, Korea.
8. Lee C.K. (1999), "The characteristics of decomposed granite soils in Korea", Sang - Kyu Kim Symposium on Geotechnical Engineering, Seoul, 116～132
9. Vanapalli S.K., Fredlund D.G., Pufahl D.E. and Clifton A.W. (1995), "Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil - water characteristic curve", Proceeding of the First International Conference on Unsaturated Soil, Paris, France, 63～69.
10. 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.
11. Vanapalli S.K., Fredlund D.G. and Pufahl D.E. (1998), "Effect of compaction on the unsaturated shear strength of a compacted till", Proceeding of the Second International Conference on Unsaturated Soil, Beijing, China, vol. 2.
12. 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.