

불포화토의 전단 및 함수특성곡선

The shear strength and soil water characteristic curve for Unsaturated Soils

임성윤* (충북대) · 송창섭**(충북대) · 류태진(충북대)**

Lim Seong Yoon · Song Chang Seob · Lyu Tae Jin

* 충북대학교 대학원 박사수료

** 충북대학교 농업생명환경대학 지역건설공학과

*** 충북대학교 대학원 석사과정

Abstract

Since most soils exist above the ground water table, negative pore pressure exist in unsaturated soils. Negative pore water pressure in unsaturated soil affects the soil structure and degree of saturation and it is important for accurate evaluation of unsaturate flow and behavior. This negative pore pressure is called a matric suction which causes an increased shear strength. Therefore, it is required that the effect of increase in the shear strength should be included in a geotechnical analysis.

From the test result, the influence of net confining pressure and matric suction on the shear strength was analyzed and strength parameter was increased with matric suction increase and a unliner relationship was found to relate matric suction and shear strength.

I. 서론

본 연구에서는 화강풍화토를 대상으로 함수특성곡선실험과 삼축시험을 실시한 결과를 바탕으로 기존에 제안된 특성식과 적용성을 검증하였고, 흡인력에 따른 전단강도의 변화와 강도정수의 변화를 밝히고 불포화영역에 대한 합리적인 지반강도정수의 적용을 위한 흡인력의 고려와 불포화토에서 발생하는 여러 문제들에 공학적 접근을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

II. 재료 및 실험방법

1. 재료

시험에 사용된 시료는 경기도 장흥에서 채취한 시료로 통일분류법상 SC에 해당되며 #200 통과량이 50%이하이며, 저소성의 사질토 성분이 함유된 흙이다. 시료에 대한 물리적 성질은 Table.1과 같다.

Table.1 Physical properties of soil samples

Samples	LL (%)	PI (%)	G_s	Grain size distribution(%)				γ_d (tf/m^3)	e	USCS
				4.76 m/m	2.0 m/m	0.42 m/m	0.074 m/m			
A	42.92	12.95	2.747	99.10	89.93	53.13	13.75	1.516	0.802	SC
B	32.67	10.06	2.689	93.23	80.04	48.89	19.70	1.296	1.075	SC
C	32.33	10.11	2.547	96.57	91.44	56.47	20.03	1.297	0.962	SC
D	43	8.6	2.831	99.32	88.80	54.68	23.85	1.496	0.884	SC
E	30.54	10.40	2.659	97.70	76.58	48.32	13.54	1.575	0.696	SC

2. 실험방법

(1) 공시체 제작

1) 흡-수분 특성곡선

공시체의 규격을 크게 하는 것이 다른 인자에 의한 영향을 최소화시킬 수 있지만, 공시체가 너무 크면 흡인력의 측정 및 평형상태에 도달하는데 요하는 시간이 오래 걸리게 된다. 평형도달시간이 너무 길게 되면 시험조건 및 상태가 달라질 가능성이 크다. 따라서 본 연구에서는 흡인력의 측정 및 평형도달시간을 최소화하기 위하여 불교란 시료를 직경 5cm, 높이 1cm의 황동제 몰드에 넣어 공시체를 제작하였다.

2) 전단강도

포화상태의 경우는 불교란 시료를 트리밍하여 공시체를 제작한 후, 배압을 통해 공시체의 포화 단계를 진행하였다. 그리고, 불포화상태의 경우는 흡-수분 특성곡선(SWCC)에서 구한 흡인력에 대한 값에 나타난 함수비를 바탕으로 하여 몰드(H=70mm, D=35mm)에 시료를 3층 다짐으로 공시체를 제작한 후, 축변환기법을 적용하여 공기압과 하부간극수압을 통해 요구되는 실험조건으로 전단을 실시하였다.

(2) 실험방법

1) 흡-수분 특성곡선

본 연구는 Pressure Plate Apparatus를 개량하여 사용하였다. 이 기구는 상부에서 가해지는 공기압을 변화시켜 흡인력을 조절하도록 고안되었으며, 한 단계의 실험이 끝나면 Plate를 열어 시료의 무게를 측정하여 함수비와 흡인력의 관계를 도출하도록 되었다. 그러나, 감압하여 상부의 Plate를 제거하는 동안 ceramic disk의 수분이 흡 속으로 유입되는 단점을 가지고 있다. 때문에 많은 연구자들이 그 결과를 그대로 수용하여 흡-수분 특성곡선을 유도하였기 그 결과를 보완하는 과정에 상당한 오차를 보이는 경우가 있었다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 단점과 오차를 보완하기 위하여 Tempe pressure cell을 개조하여 황동제 프레임에 세라믹 디스크를 부착하고 하부로 유출되는 수량을 측정할 수 있도록 뷰렛을 연결하여 시험기구를 제작하여 사용하였다. 본 기구의 가장 큰 장점은 Plate 상부를 열지 않고도 연속적으로 흡인력의 변화에 따른 수분의 이동량을 측정할 수 있는 것이며, 감압에 따른 디스크의 수분이 흡 속으로 유입되는 단점을 보완한 것이다. 또한, 고압하에서도 아주 미소한 흡인력의 변화에도 쉽게 수분의 이동과 유출량을 측정할 수 있도록 고안된 것이다. 본 시험에서는 사용된 간극 공기압의 범위는 0.1kPa ~ 1,000kPa이며, 약 10단계로 공기압을 달리하여 시험하였다.

2) 전단강도

불포화도의 전단강도 실험을 위해 일반 삼축시험에 사용되는 삼축셀을 개량하였다. 시료에 흡인력을 재현시키기 위하여 공기압과 하부 간극수압을 시료의 상단, 하단으로 가하였으며, 물을 이동시키고 공기의 이동을 제한하기 위하여 시료의 하단에 1500kpa의 공기함입저항치를 가지는 세라믹 디스크를 사용하였다. 불포화도에 대한 삼축시험은 내부에서 발생하는 간극수압의 완전한 소산을 위해 매우 느린 변형률 속도를 수행되어야 하고, 각 흡인력에서 평형을 이루는데 필요한 시간이 매우 길어 시간소모가 크다. 본 연구에서는 대상시료에 대한 적절한 변형률 속도를 Ho와 Fredlund(1982) 등이 제안한 변형률을 기준으로 0.004mm/min의 변형률 속도를 채택하여 실험을 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 흡-수분 특성곡선

선정된 5종류의 시료에 대하여 개조된 Pressure Plate Apparatus를 사용하여 약10단계의 공기

압을 달리하여 측정된 수분의 이동량을 바탕으로 각 시료의 함수비, 포화도 및 체적 함수비를 분석하여 흡-수분 특성곡선을 도출하고 이들의 특성을 고찰하였다.

(1) 흡인력에 따른 함수비의 변화

선정된 5가지 시료의 흡인력에 따른 함수비를 도시하면 Fig.1과 같다. 초기의 포화상태의 함수비는 흙의 종류에 따라 많은 차이를 보이거나 건조과정을 통하여 흙 속의 수분이 감소됨에 따라 잔류 함수비는 흙의 종류에 관계없이 거의 같은 값을 보이는 것을 알 수 있다.

(2) 흡인력에 따른 포화도의 변화

함수비는 흙의 수분상태를 무게를 중심으로 표시하기 때문에 흙의 수분증량을 나타낸다. 그러나 흙 속에 함유되는 수분은 흙의 간극에도 관계가 있으므로 이러한 영향을 나타내기 위하여 흙의 수분상태를 부피와 관련시켜 포화도의 변화를 도시하면 다음과 같다.

선정된 5가지 시료의 흡인력에 따른 포화도를 도시하면 Fig.2와 같다. 그림에서 보듯이 시료가 포화상태에서 건조상태로 수분이 감소함에 따라 포화도가 급격하게 달라지는 것을 볼 수 있다. 특히, 흡인력이 증가함에 따라 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

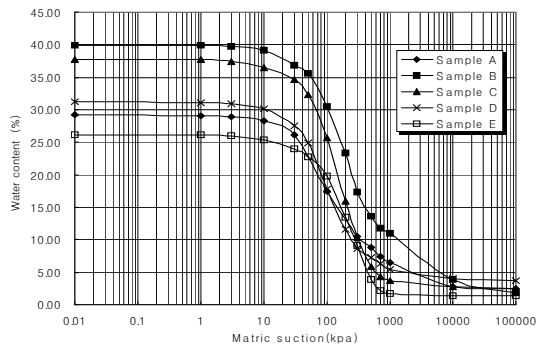


Fig.1 Water content versus suction

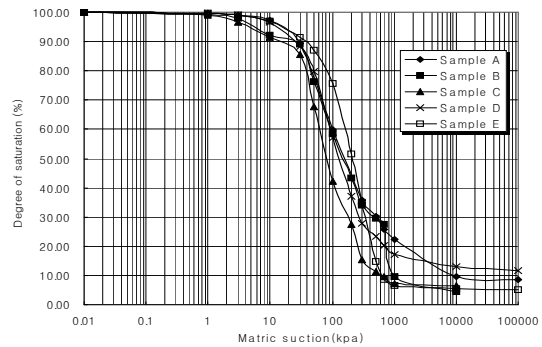


Fig.2 Degree of saturation versus suction

(3) 흡인력에 따른 체적함수비의 변화

함수비는 흙의 수분상태를 무게를 중심으로 표시하고, 포화도는 부피개념으로 나타내기 때문에 흙 속에 함유되는 수분상태를 정확하게 나타내기 위해서는 이러한 양자의 관계를 전부 포함하여야 할 것이다. 따라서, 흙의 수분상태를 무게와 부피의 개념을 동시에 고려하여 나타내기 위하여 체적함수비로 도시하면 다음과 같다. 선정된 5가지 시료의 흡인력에 따른 체적함수비를 도시하면 Fig.3과 같다. 함수비로 나타내면 흡인력이 큰 경우에는 구분이 명확하지 못하고, 포화도로 표시하면 초반부의 차이를 구분하기 어려운 단점을 가지고 있다. 그러나, 체적함수비로 나타내면 이러한 단점을 보완하여 흡인력의 변화에 따른 수분상태를 보다 명확하게 구분할 수 있는 장점이 있다.

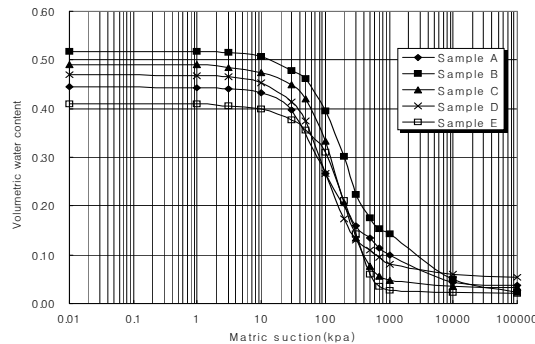


Fig.3 Volumetric water content versus suction

(4) 제안된 흡-수분 특성곡선식과의 비교

1) Brooks and Corey(1964)의 계수 비교

새로운 특성 방정식을 유도하기 위하여 시험결과를 바탕으로 제안된 특성 방정식을 검토하여 문제점과 장단점을 분석하였다. Table 1은 Brooka and Corey의 방정식에 사용되는 각 상수를 도출하여 정리한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 간극비의 변화에 따라 각 상수는 서로 다른 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서, Brooks 등의 방법에 의하면 한 종류의 시료에서는 한 종류의 특성곡선이 나타나기 때문에 이러한 다짐의 영향을 반영할 수 없음을 쉽게 알 수 있다. 결과에 의하면 간극비가 증가할수록 잔류포화도는 감소하는 경향을 보이는 반면, 잔류함수비에 관계되는 계수(λ)와 공기함입저항치($(U_a-U_w)b$)는 는 감소하는 경향을 보이고 있다.

Table 1. Soil parameters for Brooks's equation.

Samples	Void ratio	Sr	λ	$(u_a - u_w)_b$
A	0.802	7.31	1.42	20.50
B	1.075	4.48	1.20	30.08
C	0.962	5.14	1.28	26.32
D	0.884	6.70	1.34	21.74
E	0.696	8.25	1.48	15.80

2) Fredlund and Xing(1994)의 계수 비교

체적함수비를 추정하기 위해서는 Fredlund 등이 제안한 방정식을 바탕으로 실험치와 비교하여 각 계수를 도출하여 요약하였다. Table 2는 각 시료의 실험 결과를 바탕으로 도출된 각 계수를 정리한 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 간극비의 변화에 따라서 각 계수가 변화는 것을 알 수 있다. 즉, 계수 a, b 및 c는 간극비에 따라 증가하는 반면, hr은 감소하는 알 수 있다. 이러한 결과는 Fredlund 등의 제안식도 Brooks의 제안식과 같은 결과를 나타내게 된다.

Table 2. Soil parameters for Fredlund and Xing equation.

Samples	Void ratio	a	b	c	hr
A	0.802	20.50	1.42	1.79	1800
B	1.075	30.08	1.20	3.64	1100
C	0.962	26.32	1.28	2.53	1300
D	0.884	21.74	1.34	2.51	1500
E	0.696	15.80	1.48	1.35	2100

2. 진단강도

불포화토의 진단거동을 밝히기 위해 구속압력을 50kpa, 150kpa, 300kpa으로 각각 달리하고 각각의 구속압력에 따라 흡인력을 0kpa, 10kpa, 50kpa, 100kpa로 달리하여 삼축시험을 수행하였다.

(1) 축차응력

1) 흡인력에 따른 축차응력의 변화

흡인력이 증가할수록 피크시 강도는 더 높은 변형률에서 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 동일한 흡인력을 가해도 순구속압이 증가하면 흡인력의 영향이 감소하는 것을 나타내며, 시료에 흡인력을 가하면 축차응력-변형률 관계에서 파괴는 점차 작은 변형에서 발생한다고 판단된다.

2) 순구속압에 따른 축차응력의 변화

순구속압이 50kpa인 경우 흡인력이 10kpa에서 100kpa로 증가할때의 축차응력 증가량이 순구속압이 150kpa인 경우보다 더 큼을 알 수 있다. 따라서, 흡인력에 따른 축차응력의 변화는 순구속압이 증가하면서 축차응력도 증가됨을 알 수 있었으며, 축차응력의 증가량은 순구속압보다 흡인력

의 변화에 더 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. Fredlund등(1979)에 의하면 흡인력에 따른 축차응력의 변화는 순구속압이 증가하면서 축차응력도 함께 증가된다고 발표하였고, 축차응력 증가량은 순구속압보다 흡인력의 변화에 더 많은 영향을 받는다고 하였다.

(2) 불포화토의 파괴포락선 및 강도정수의 도출

Fig.4은 A시료에 대하여 흡인력이 0kpa, 100kpa일 때의 파괴포락선을 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 A시료의 경우 흡인력이 0kpa인 경우 점착력이 8.126kpa, 내부마찰각이 5.15°, 100kpa인 경우에는 점착력이 65.557kpa, 내부마찰각이 26.27°, 로 나타났다.

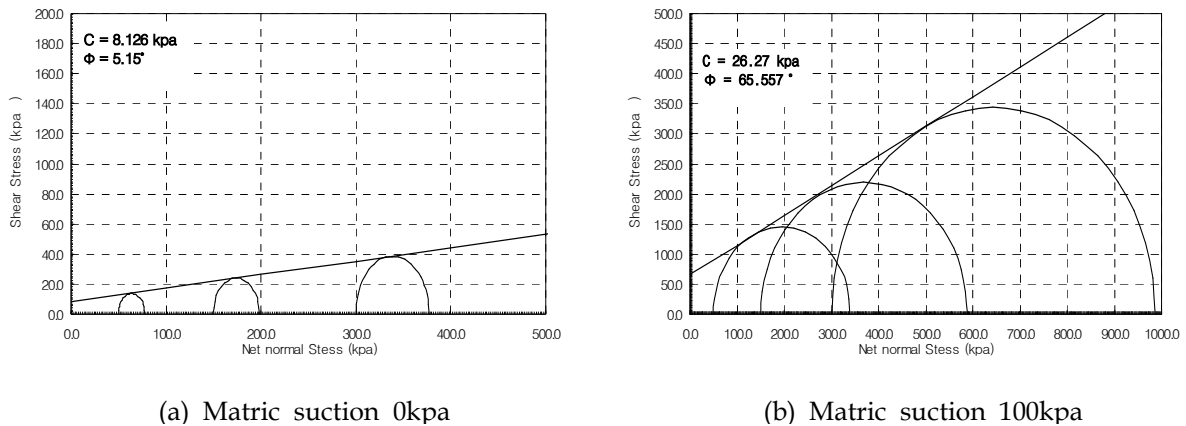


Fig.4 Failure envelope for the shear stress versus net normal stress plane for Sample A

(3) 강도정수의 분석

Fig.11은 선정된 시료 5가지의 흡인력에 따른 점착력과 내부 마찰각의 변화를 도시한 것이다. 흡인력이 증가할수록 점착력과 내부마찰각이 증가함을 볼 수 있다.

1) 불포화토 점착력의 변화

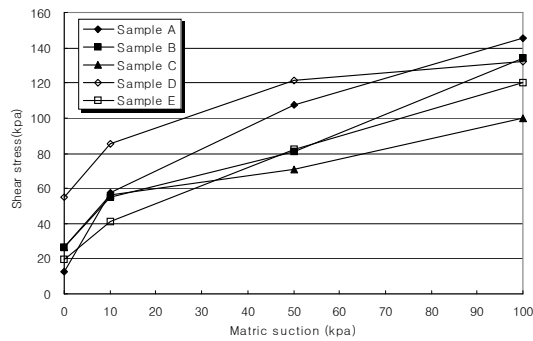
점착력의 경우 모든 시료에서 흡인력이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하였다. 흡인력이 증가함에 따라 강도정수가 증가하는 이유는 흙이 건조과정에 의하여 흡인력이 달라지면 점착력을 가지게 되어 강도가 증가한다는 것을 의미한다.

2) 불포화토의 내부마찰각의 변화

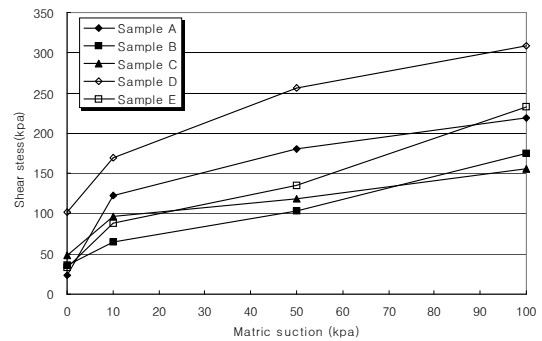
내부마찰각의 경우는 흡인력이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하였다. 이는 흡인력이 증가하면 물을 중심으로 토립자가 결합하여 조립토처럼 거동하게 되어 내부마찰각도 증가되는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Wheeler (1989)의 해성점토에 대한 연구결과와 Krahn등(1989)의 Notch Hill 실트에 대한 연구결과에서도 비슷하게 나타났다.

(4) 불포화토의 강도특성

Fig.5는 순구속압이 50kpa, 150kpa인 상태에서 흡인력에 대한 전단응력을 도시한 것이다. A시료의 경우 순구속압이 50kpa일때의 ϕ^b 가 8.05°, 150kpa일때의 ϕ^b 가 18.91°로 나타났다. 이러한 흡인력에 따른 전단강도의 증가경향으로 불포화 영역에 대한 강도정수 적용시 흡인력의 고려가 필요할 것으로 판단된다. 전단강도는 흡인력이 증가함에 따라 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 흡인력에 따른 전단강도가 증가하는 변곡점의 흡인력은 흙-수분 특성곡선에서의 공기함입저항치 (Air entry value)의 근처에서 나타났다. 한편 Fredlund(1978)등은 직접전단시험의 결과로부터 선형적인 전단강도식을 주장한 바 있지만, 위의 실험결과를 보면 전단강도는 흡인력에 따라 선형적으로 증가하는 것이 아니라 비선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 비선형적인 증가를 보이는 경향은 Escario와 Saez(1986)의 직접전단시험의 결과에서도 나타났다.



(a) net confining pressure 50kpa



(b) net confining pressure 150kpa

Fig.5 Variation of shear strength versus matric suction

IV. 결론

선정된 시료 5가지에 대하여 개조된 Pressure Plate Apparatus에 적용하여 약 10단계의 공기압을 공급하여 수분의 이동량을 측정하였다. 측정된 결과를 바탕으로 각 시료의 함수비, 포화도 및 체적 함수비를 분석하여 흡-수분 특성곡선을 도출하고 이들의 특성을 요약하면 다음과 같다.

1. 흡인력에 따른 특성곡선을 체적 함수비로 나타내면 초기 포화부분뿐만 아니라 건조과정이 진행된 후에도 구분이 명확하게 나타났다.
2. 잔류포화도(S_r)는 간극비에 따라 감소하는 경향을 보이는데 세립분의 함량에 따라 크기가 달라진다. 계수 λ 와 h_r 은 간극비에 따라 증가하게 되는데, λ 는 극격한 변화를 보이는 반면 h_r 은 비교적 완만하게 변하는 것으로 나타났다.
3. Fredlund 등의 제안식에 나타나는 계수 a , b 및 c 는 간극비에 따라 증가하는 반면, h_r 은 감소하는 경향을 보였다.
4. Brooks and Corey 및 Fredlund et al 등이 제안한 특성곡선식은 흡의 다짐상태나 간극비의 변화에 따른 함수특성을 잘 나타내지 못하는 것을 실험을 통하여 규명하였다.
5. 실험결과를 바탕으로 간극비나 다짐상태에 따른 함수특성을 나타낼 수 있는 특성곡선식을 제안하였으며, 실험결과치와 비교하여 적용성을 검증하였다.

불포화토의 전단거동을 밝히기 위해 구속압력을 50kpa, 150kpa, 300kpa로 각각 달리하고 각각의 구속압력에 따라 흡인력을 10, 50, 100kpa로 달리하여 삼축시험을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 순구속압과 흡인력이 일정할 경우에는 다짐률이 감소함에 따라 피크시 강도는 더 높은 변형률에서 나타났고, 이것은 동일한 흡인력을 가해도 다짐률이 감소하면 흡인력의 영향이 증가하는 것을 나타내며, 시료의 간극비가 증가함에 따라 축차응력-변형률 관계에서 파괴는 점차 큰 변형률에서 발생한다고 판단된다.
2. 불포화토의 전단강도는 흡인력에 따라 증가하며, 전단강도는 흡인력의 증가에 따라 비선형 관계에 있음을 알 수 있었고, 불포화상태에서 전단강도정수는 흡인력에 따라 내부마찰각과 점착력이 증가하는 경향을 보였고 흡인력이 불포화토의 강도특성이 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Song, C. S. 1994. Development of constitutive model for the prediction of behaviour of an unsaturated soil. Ph.D Thesis. Seoul National University.(in Korean)
2. Fredlund D.G. and H. Rahardjo. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons Inc.