

흡인력에 따른 불포화토의 전단강도 특성

송창섭¹⁾ · 최득호²⁾

¹⁾ 충북대학교 농업생명환경대학 지역건설공학과 · ²⁾ 충북대학교 대학원

Characteristics of Shear Strength for an Unsaturated Soil with the Matric Suction

Song, Chang-Seob¹⁾ and Choi, Dook-Ho²⁾

¹⁾ Dept. of Rural Engineering, Chungbuk National University,

²⁾ Dept. of Rural Engineering, Graduate School, Chungbuk National University.

ABSTRACT

In order to analyse the strength problems for an unsaturated soil, it is required to examine closely the characteristics of the parameters of shear strength which was changed with the metric suction and void ratio. To this ends, a triaxial compression test was conducted on the three samples-granular soil, cohesive soil and silty soil. The specimen was made by pressing the static pressure on the mold filled soil and was controled the void ratio with the different compaction ratio. And the test was performed by using the modified apparatus of the triaxial compression tester. The range of matric suction was 0-90 kPa.

The measured results for the deviator stress and parameters of shear strength were analysed with the void ratio and the compaction ratio, and they were examined closely the characteristics of the strength for an unsaturated soil.

Key Words : *Unsaturated soil, Matric suction, Shear strength, Void ratio, Shear stress parameter.*

I. 서 론

국지적으로 산간지에 많은 피해를 나타내고 있다. 특히 오랜 기간 동안 가꾸어온 산림이 일시에 산사태 등에 의하여 파괴되거나 비탈면 녹화지역 최근 강우형태는 게릴라성 집중호우를 동반하여 산사태 등에 의하여 파괴되거나 비탈면 녹화지역

Corresponding author : Song, Chang-Seob, Dept. of Rural Engineering, Chungbuk National University,
Tel : +82-43-261-2578, E-mail : cssong@chungbuk.ac.kr

Received : 29 December, 2006. **Accepted** : 28 February, 2007.

이 훼손되는 경우가 많이 발생하고 있는 실정이다. 이러한 피해를 줄이기 위해서는 산사태 등과 같은 비탈면 붕괴의 매커니즘을 정확하게 규명하고 지반의 특성을 정밀하게 파악하는 것이 필요하다. 특히, 노년기 지형이 대부분을 차지하는 우리나라의 경우에는 산의 토심이 얇고 풍화가 많이 진행된 지반이 주류를 이루기 때문에 함수상태에 따른 흙의 특성을 정확하게 판단하여 사면안정, 산사태 등의 해석에 적용하여야 할 것이다.

지반은 지하수의 위치에 따라 포화영역과 불포화 영역으로 나누어지는데, 포화영역은 흙 입자를 제외한 간극이 모두 물로 채워진 상태이고, 불포화 영역은 간극의 일부만 물로 채워진 상태이다. 불포화영역은 공기와 물의 접촉면을 포함하는 4상구조로 이루어져 있다(Fredlund and Rahardjo, 1993). 불포화영역의 간극 속에는 물과 공기의 압력차에 의한 표면장력과 물분자를 결합하는 표면력이 모세관 현상과 흡착현상을 일으키고(Bishop, 1963; Fredlund, 1979), 이 때 발생하는 부(-)의 간극수압은 유효응력과 흙 속의 물의 흐름을 변화시키므로, 기존의 포화토 이론을 적용하는 것은 불합리하다(송창섭, 1996). 흙 속에 함유된 수분의 양에 따라 흙 속의 흡인력은 달라지며 이로 인해 흙의 전단강도를 변화시키게 된다(Andrew, 1979; Craig, 2001; Leong, 1995). 따라서, 흙 속의 수분에 따른 전단강도 특성을 규명하는 것은 지반의 강도 예측, 지지력 측정, 사면안정 등을 판단하는데 중요한 요소가 된다(Fredlund, 1978). 특히, 우리나라에 주로 분포하

고 있는 화강토에 대한 전단특성을 규명하는 것은 최근에 집중호우 등에 의하여 발생하는 산사태 등의 자연재해의 예측이나 방지를 위해서 필요한 연구의 대상이 되고 있다(송창섭, 1995; 1996). 그러나 아직도 우리나라의 불포화토에 대한 연구는 미미하여 이에 대한 집중적인 연구와 기기의 개발이 필요한 실정이다(송창섭, 1994).

이에 본 연구에서는 불포화토의 전단강도 특성을 규명하기 위하여 비교적 세립질의 3종류 흙을 선정하여 구성성분, 간극 및 흡인력이 전단강도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 다짐도를 달리하여 공시체를 제작하고, 흡인력을 조절할 수 있도록 삼축 압축시험기를 개조하여 불포화토에 대한 삼축압축시험을 수행하였다. 이러한 일련의 시험결과를 바탕으로 흡인력과 다짐율에 따른 불포화 전단특성을 규명하고자 한다.

II. 재료 및 시험

1. 시료의 채취 및 물리적·역학적 특성

시료는 우리 나라 전역에 골고루 분포되어 있으며, 축제 또는 성토재로 주로 사용되고 있는 화강토 및 점성토를 선정하였다. 전남의 영산강 하구 부근의 점성토(시료 A), 전북 부안 근처의 풍화가 많이 진행된 화강토(시료 B) 및 충북 진천 근처의 비교적 풍화의 진행이 늦은 화강토(시료 C)를 채취하였다. Table 1은 사용된 시료의 물리적·역학적 특성을 요약한 것이며, Figure 1은 사용된 각 시료의 입도분포를 보여준다.

Table 1. The physical and mechanical properties of samples.

Sample	Specific Gravity	Atterberg Limits		Compaction test		Grain size distribution					USCS
		LL (%)	PI (%)	$\gamma_{d_{max}}$ (t/m^3)	OMC (%)	No.4	No.10	No.40	No.200	0.005	
soil A	2.679	52.0	16.9	1.56	23.0	100	100	99.9	96.0	42.8	MH
soil B	2.621	35.0	12.0	1.77	16.8	98.8	94.3	76.8	53.4	28.6	CL
soil C	2.632	47.4	1.5	1.55	23.9	99.9	95.5	78.4	52.0	20.4	ML

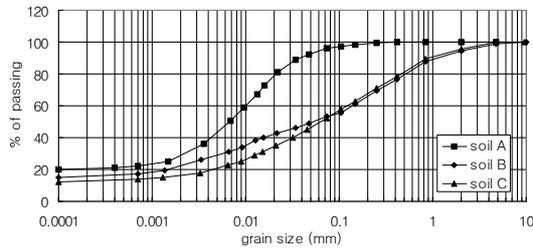


Figure 1. Grain size distribution.

2. 공시체의 제작

공시체는 시료의 함수상태와 다짐상태를 고려하여 제작하였다. 특히, 흙의 다짐상태에 따른 간극비의 대소에 의한 수분상태를 검토하기 위하여 인위적으로 간극을 조절하여 공시체를 제작하였다(송창섭, 1995). 공시체는 각 시료의 최대다짐(100%) 상태를 바탕으로 90%, 80%, 70% 등으로 다짐율을 조절하였으며, 각각의 다짐율에 대하여 흡인력을 5단계(0.1kPa, 10 kPa, 50 kPa, 400 kPa, 800 kPa)로 구분하여 공시체를 만들었다. 이는 현장의 시공과정에서 다짐율에 따라 직접 적용할 수 있도록 고안하였다. Table 2는 각 공시체의 상태(3회의 평균치)를 요약한 것이다.

Table 2. Initial condition of samples.

Samples	Compaction ratio (%)	Void ratio	γ_{dmax} (t/m ³)	Water contents(%) With matric suction				
				0.1 kPa	10 kPa	50 kPa	400 kPa	800 kPa
Soil A	100	0.720	1.558	26.79	25.45	17.76	12.38	11.47
	90	0.911	1.402	34.25	32.55	21.11	12.77	11.36
	80	1.149	1.246	43.50	41.77	25.06	13.30	11.56
	70	1.456	1.091	54.51	52.86	29.45	13.76	11.68
Soil B	100	0.485	1.765	18.68	16.07	12.22	9.49	8.93
	90	0.650	1.589	25.16	23.31	15.52	10.83	9.99
	80	0.856	1.649	30.84	30.22	17.95	10.61	10.20
	70	1.121	1.236	43.17	41.72	23.34	11.08	10.49
Soil C	100	0.698	1.550	26.74	25.26	14.53	9.62	8.81
	90	0.887	1.395	33.59	31.57	17.41	10.07	8.99
	80	1.123	1.240	42.10	40.85	20.67	10.39	9.03
	70	1.426	1.085	54.08	52.74	24.41	10.54	8.96

3. 실험방법

공시체의 압축강도는 삼축압축시험에 의하여 측정하였다. 삼축압축시험은 흡인력을 조절할 수 있도록 셀의 저판을 개조하여 고압공기투과 세라믹판(high air entry ceramic disk)을 부착하여 공기압을 조절하여 흡인력을 일정하게 유지시키면서 삼축압축시험을 수행하였다. 또한 선행시험의 결과(송창섭, 1994; 1995)에 따라 평형상태에 도달하는 시간 등을 고려하였으며, 실험 전후의 함수비를 측정하여 공시체의 조건을 검토하였다. 특히, 압축강도의 측정시 요구되는 응력의 정확도를 높이기 위하여 동일한 조건으로 공시체를 제작하여 3번 반복하여 측정된 결과치를 정리하여 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 불포화토의 응력-변형률 관계

흡인력에 따른 각 공시체의 응력-변형률 관계를 도시하면 Figure 2에서 Figure 4와 같다. Figure 2의 (a), (b), (c) 및 (d)는 시료 A의 다짐율

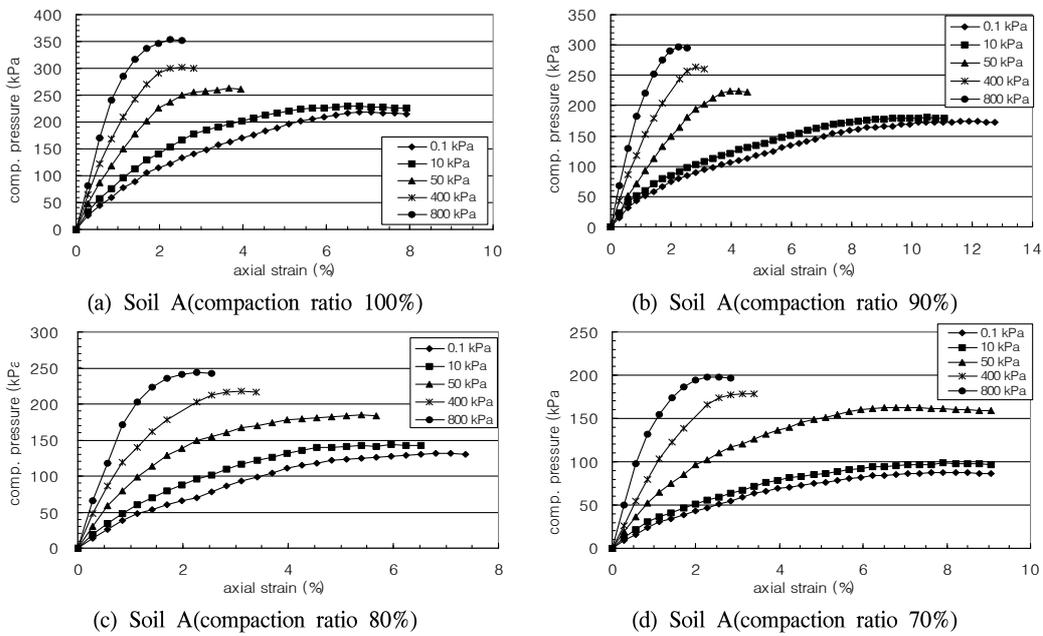


Figure 2. Stress-strain curves for soil A.

이 100%, 90%, 80% 및 70%일 때의 응력관계를 나타낸 것이다. 흡인력이 커질수록 파괴에 도달하는 압축강도가 증가하는 것을 알 수 있는데 흡인

력이 800 kPa인 경우는 0.1 kPa 때의 강도의 약 1.6배 정도로 나타났다. 또한, 흡인력이 낮은 경우에는 응력-변형을 곡선이 피크점이 없이 계속해

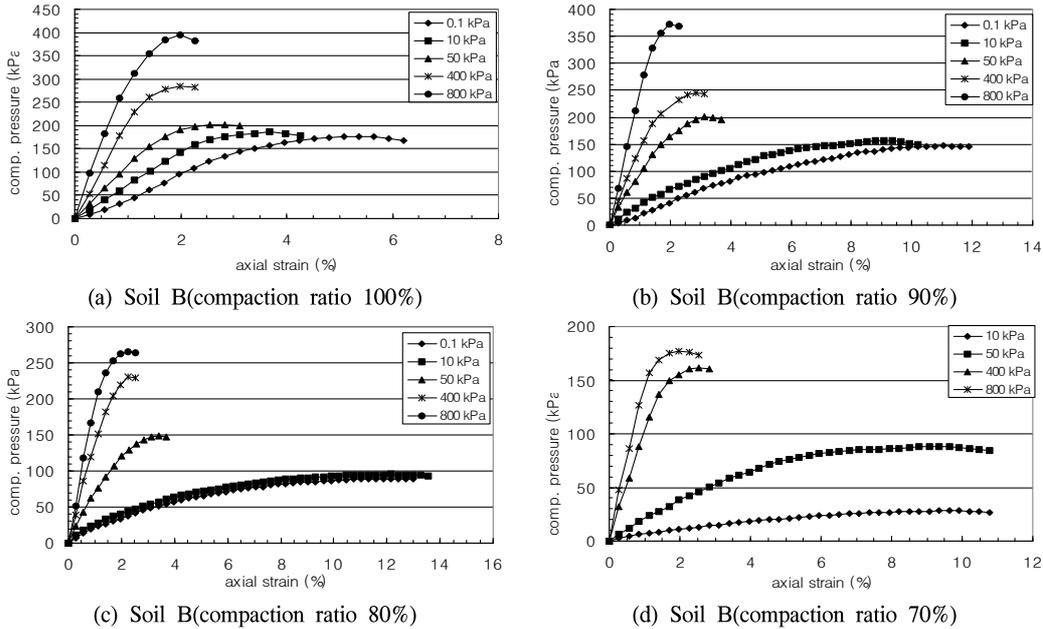


Figure 3. Stress-strain curves for soil B.

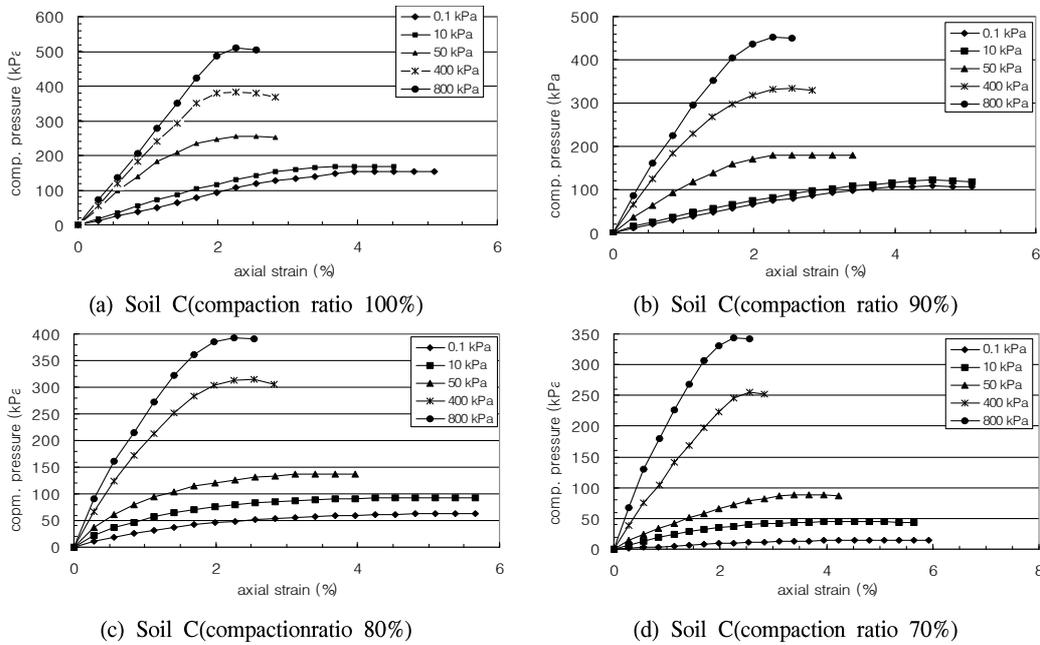


Figure 4. Stress-strain curves for soil C.

서 완만하게 증가하다가 일정한 최대응력에 도달하게 된다. 그러나 흡인력이 높은 경우에는 응력의 피크 후에 감소되는 경향을 보여준다. 이러한 현상은 흡인력이 커질수록 더 명확하게 됨을 알 수 있다. 그런데, 흙 속에 포함된 함수비의 감소에 따른 흡인력의 증가는 바로 강도의 증가로 이어지는 것은 아니고 흙의 상태와 간극, 함수상태 등이 복합적으로 나타나는 현상이므로 이에 대한 세밀한 연구는 추후에 이루어져야 할 것이다.

Figure 3의 (a), (b), (c) 및 (d)는 시료 B의 다짐율에 따른 응력-변형관계를 도시한 것이다. 시료 A와 마찬가지로 흡인력이 커짐에 따라 압축강도 역시 증가하는 것으로 볼 수 있다. 그런데, 시료에 포함된 세립분이 적을수록 강도가 증가하는데 건조에 따른 효과 즉, 흡인력에 따른 강도의 증가가 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 경향은 시료 C에서도 마찬가지로 나타나는 것으로 보아 흡인력의 영향에 따른 강도의 증가는 세립분이 적을수록 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 100% 다짐에 대하여 흡인력이 800 kPa인 경우, 시료 B는 시

료 A에 비하여 약 14% 정도 크게 나타나고 있다.

2. 흡인력에 따른 압축강도의 변화

흡인력에 따른 압축강도의 변화를 규명하기 위하여 파괴 시의 압축강도를 흡인력에 따라 도시하면 Figure 5에서 Figure 7과 같다. Figure 5는 시료 A의 흡인력에 따른 압축강도의 변화를 다짐율에 따라 도시한 것이다. 마찬가지로 Figure 6은 시료 B, Figure 7은 시료 C에 대한 압축강도를 흡인력에 따라 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 흡인력에 따라 압축강도는 증가하게 되는데, 압축강도의 변화가 어떤 흡인력을 기준으로 증가하는 기울기가 급격하게 변화하는 것을 볼 수 있다. 이는 압축강도 증가의 변화에 영향을 미치는 함수상태가 존재한다는 것을 의미한다. 그림에 나타난 변곡점을 흙-수분특성곡선(soil-water characteristic curve, SWCC)과 비교하면 거의 공기함입저항치(air entry value)에 해당하는 것으로 나타났다. 또한 그림에서 볼 수 있듯이 압축강도는 축압뿐만 아니라 흡인력에도 영향을 받게 되

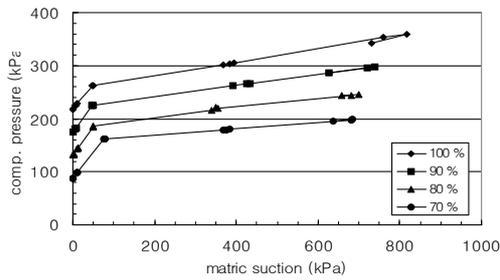


Figure 5. Compressive stress for soil A.

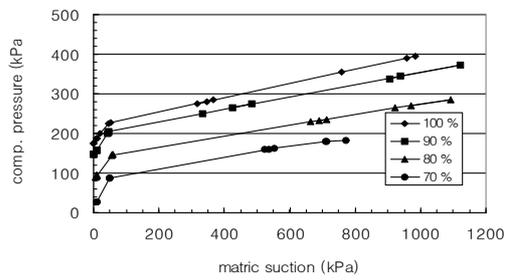


Figure 6. Compressive stress for soil B.

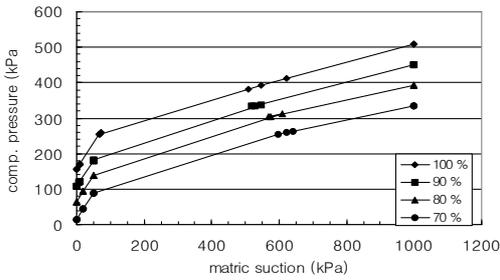


Figure 7. Compressive stress for soil C.

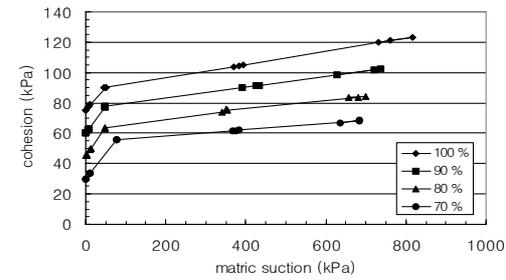


Figure 8. Cohesion for soil A.

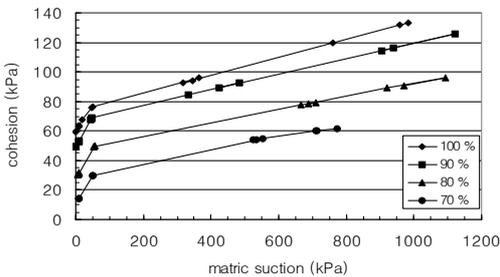


Figure 9. Cohesion for soil B.

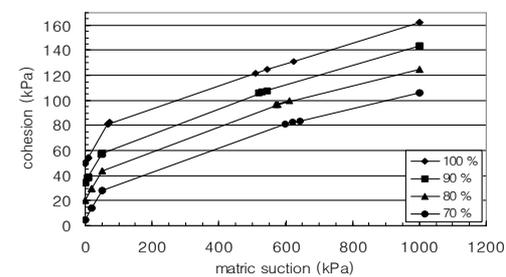


Figure 10. Cohesion for soil C.

는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Jubert and Colmenares(2006)의 결과에서도 유사하게 나타나고 있다. 따라서 불포화토의 전단강도는 축압과 흡인력을 동시에 고려하여 강도를 예측해야 할 것이다.

3. 흡인력에 따른 점착력의 변화

흡인력에 따른 점착력의 변화를 검토하기 위하여 각 시료의 점착력을 다짐율에 따라 도시하면 Figure 8에서 Figure 10과 같다. Figure 8은 시료 A의 점착력을 흡인력에 따라 도시한 것이다. 마찬가지로 Figure 9는 시료 B, Figure 10은 시료

C에 대한 점착력을 흡인력에 따라 도시한 것이다. 다짐율 100%인 경우, 시료 A의 점착력이 시료 C보다 약 50% 크게 나타나고 있다. 또한, 그림에서 볼 수 있듯이 점착력 성분도 압축강도와 비슷하게 흡인력의 증가에 따라 급격하게 증가하다가 어떤 흡인력을 경계로 증가율이 둔화되는 경향을 보이고 있다. 이는 압축강도뿐만 아니라 불포화토의 점착력도 축압뿐만 아니라 흡인력에도 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서 불포화토의 전단강도를 나타내기 위해서는 축압뿐만 아니라 흡인력도 고려하여야 한다.

Table 3. Shear strength parameters for samples used.

Shear strength parameters	Soil A				Soil B				Soil C			
	100%	90%	80%	70%	100%	90%	80%	70%	100%	90%	80%	70%
ψ' (deg)	21	21	21	21	22	22	22	22	25	25	25	25
ψ^b (deg)	2.5	2.0	1.5	1.2	3.5	3.0	2.5	2.0	5.0	4.5	4.0	3.5
c' (kPa)	75.0	60.0	45.0	30.0	59.5	45.6	27.2	10.0	49.7	34.4	20.0	5.0

4. 불포화토의 전단상수

불포화토의 전단강도는 측압뿐만 아니라 흡인력도 고려하여야 하기 때문에 포화토에 적용되는 기준을 사용할 수 없다. 따라서 불포화토에 적용되는 기준을 정립하기 위하여 앞에서 언급한 결과를 바탕으로 불포화토의 전단상수를 다짐율에 따라 정리하면 Table 3과 같다. 각 시료의 포화상태의 마찰각(ψ')은 측압에 따라 달라지는 상수로 흡인력이 공기함입저항치에 이르는 동안 적용되며, 점착력(c')은 측압이 "0"일 때의 전단강도식의 절편에 해당하며 흡인력이 증가할수록 커지는 경향을 가지고 있음이 앞 절에서 증명되었다. 또한, 흡인력의 증가에 따른 마찰각(ψ^b)는 불포화토의 전단특성을 규정짓는 상수로 흡인력의 증가에 따른 전단강도의 증가비율을 의미한다.

표에서 알 수 있듯이 포화상태의 마찰각 및 점착력은 시료에 포함된 세립분이 작을수록 크게 나타나고 있다. 또한 흡인력에 따른 마찰각의 증가를 나타내는 흡인력에 따른 마찰각(ψ^b)도 세립분이 적을수록 크게 나타나고 있다. 또한 간극의 영향을 나타내는 다짐에 따른 각 전단상수의 변화는 포화상태의 마찰각은 동일하나 다짐율이 높을수록 점착력 및 흡인력에 따른 마찰각은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 흡인력의 증가에 따른 강도의 증가 효과가 세립분이 적을수록 크게 나타나는 데 기인한 것으로 판단된다.

5. 불포화토의 전단특성

흡인력 또는 다짐율에 따른 변화를 검토하여

불포화토의 전단특성을 분석하기 위하여 앞에서 도출된 각 시료의 전단상수를 분석하였다.

포화상태의 마찰각을 각 시료에 포함된 세립분(0.005 mm 체를 통과한 입도를 가지는 흙)의 양에 따라 도시하면 Figure 11과 같다. 포화상태의 마찰각은 세립분의 많을수록 마찰각은 작아지는 것을 알 수 있으며, 시료 C의 경우 시료 A에 비해서 약 4°정도 크게 나타났다.

Figure 12는 흡인력에 따른 마찰각의 변화를 다짐율에 따라 도시한 것이다. 함수비가 감소하면 흡인력이 증가하게 되고, 이에 따라 전단강도는 증가하게 되는데 이러한 증가비율을 나타내는 마찰각이 흡인력에 의한 마찰각이 된다. 이러한 마찰각의 변화는 그림에서 볼 수 있듯이 다짐율에 거의 선형적인 관계를 가지는 것으로 나타났다. 이러한 경향을 각 시료에서 공통적으로 나타나고 있다. 다만 시료 A의 경우 다짐률이 극히 적을 때 약간 벗어나는 것을 볼 수 있는데, 이는 이러한 다짐상태에서는 공시체의 제작이 아주 어려워 실험 과정에 오차가 포함된 것으로 판단된다.

Figure 13은 점착력 성분을 다짐율에 따라 도시한 것이다. 시료의 종류에 관계없이 일반적으로 다짐하여 밀도가 증가하게 되면 점착력 성분이 증가하여 강도가 커지게 된다. 이러한 경향을 그림을 통하여 입증할 수 있다. 또한 이러한 경향을 간극비에 따라 도시하면 Figure 14와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 점착력 성분은 다짐율에 따라서는 거의 선형적으로 변화하지만 간극비에 대해서는 약간 비선형의 관계를 나타내고 있다.

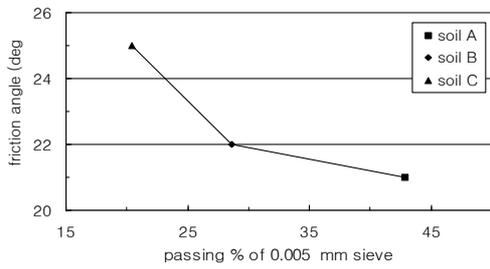


Figure 11. Friction angle of saturated soil.

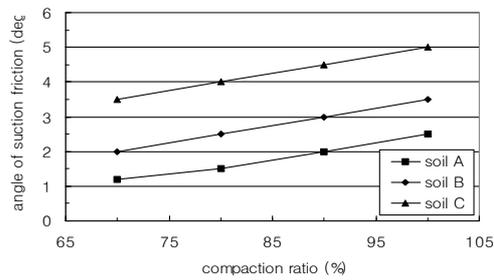


Figure 12. Suction angle with compaction.

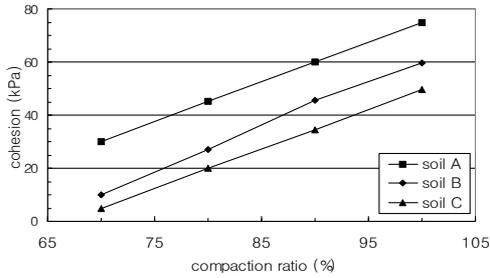


Figure 13. Cohesion with compaction ratio.

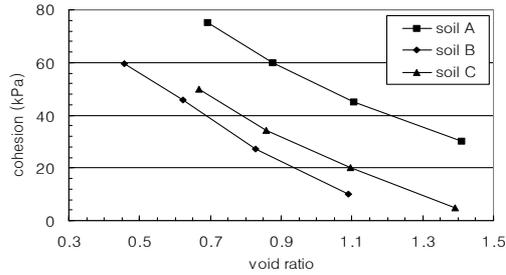


Figure 14. Cohesion with void ratio.

IV. 결 론

불포화토의 전단강도 특성을 분석하기 위하여 입도가 서로 다르게 분류되는 3종류의 흙에 대하여 시료의 다짐상태 및 흡인력을 달리하여 삼축 압축시험을 수행하였다. 시험결과를 바탕으로 응력-변형을 관계, 압축강도 및 점착력을 흡인력 및 다짐율에 따라 분석하여 불포화토의 전단강도를 기술하고, 도출된 전단상수를 바탕으로 분석된 불포화토의 전단강도 특성을 요약하면 다음과 같다.

1. 불포화토의 응력-변형을 곡선은 흡인력이 낮은 경우에는 정점이 없이 계속 증가하는 반면 흡인력이 높은 경우에는 응력의 정점을 보인 후 급격하게 감소하는 경향을 보이는데 이는 시료의 종류에 관계없이 비슷한 경향을 나타내었다. 또한, 시료 A의 경우, 흡인력이 800 kPa인 경우는 0.1 kPa 때의 강도의 약 1.6배 정도로 높게 나타났다.

2. 불포화토의 압축강도는 흡인력의 커질수록

거의 선형적으로 증가하게 되는데, 공기함입저항치를 전후로 증가비율이 급격하게 변화하는 것으로 나타났다. 시료 A의 경우, 흡인력이 800 kPa인 경우는 0.1 kPa 때의 강도의 약 1.6배 정도로 크게 나타났다

3. 불포화토의 마찰각은 세립분의 함량에 따라 달라지는데, 시료 C가 시료 A보다 약 4° 크게 나타났다. 또한, 점착성분 및 흡인력에 따른 마찰각 (ψ^b)은 시료의 종류에 따라 증가비율은 다르지만 다짐율에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.

4. 불포화토의 점착력은 다짐율에 따라 선형적으로 증가하지만 간극비에 따라서는 비선형적으로 감소하는 것으로 나타났으며, 100% 다짐율인 경우 시료 A가 시료 C보다 약 50% 정도 크게 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원

사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by Chungbuk National University Grant in 2005).

인 용 문 헌

- 송창섭 · 장병욱. 1994. 불포화토의 거동예측을 위한 구성식 개발(I)-불포화토의 거동특성 연구. 한국농공학회지 36(4) : 87-94.
- 송창섭 · 장병욱. 1995. 불포화토의 거동예측을 위한 구성식 개발(II)-구성식 개발 및 적용. 한국농공학회지 37(1) : 81-98.
- 송창섭 · 장병욱. 1995. 불포화 사질토의 거동예측을 위한 구성식 개발. 지반공학회지 11(3) : 43-54.
- 송창섭 · 장병욱. 1996. 불포화 점성토의 거동예측을 위한 구성식 개발. 한국농공학회지 38(3) : 101-110.
- Andrew M. R., and J. B. Burland. 1999. Use of the Tensile Strength of Water for the Direct Measurement of High Soil Suction. Can. Geotech. J., 36 : 178-180.
- Bishop A. W., and G. E. Blight. 1963. Some aspects of effective stresses in saturated and unsaturated soils. Geotechnique, 13(3) : 177-197.
- Craig. A. B., and C. D. Shackelford. 2001. Soil-Water Characteristic Curves and Dual Porosity of Sand-Diatomaceous Earth Mixtures. J. of Geotech. and Geoenviron. Engrg. ASCE, 127(9) : 790-800.
- Fredlund, D. G. 1979. Second Canadian Geotechnical Colloquium : Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated Soils. Can. Geotech. J. 16(1) : 121-139.
- Fredlund, D. G., and H. Rahardjo. 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons Inc.
- Fredlund, D. G., and A. Xing. 1994. Equation for the Soil-Water Characteristic Curve. Can. Geotech. J., 31 : 521-531.
- Fredlund, D. G., N. R. Morgenstern and R. A. Widger. 1978. Shear strength of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, 15(3) : 313-321.
- Jubert A. P., and J. E. Colmenares. 2006. Stress-strain-suction behaviour of two clayey materials under unconfined conditions. Unsaturated Soils. Geotechnical special publication, No. 147. ASCE, 109-1120.
- Leong E. C., and H. Rahardjo. 1995. Typical Soil-Water Characteristic Curves for two Residual Soils from Granitic and Sedimentary Formations. Preceeding of the International Conference on Unsaturated Soils. UNSAT'95. Paris, France, 519-524.