

낙동강 실트질 모래의 불포화 전단강도 특성

Unsaturated Shear Strength Characteristics of Nakdong River Silty Sand

김 광 일¹ Jin, Guang-Ri

신 지 섭² Shin, Ji-Seop

박 성 식³ Park, Sung-Sik

김 기 영⁴ Kim, Ki-Young

Abstract

There are many technical problems, which can not be resolved by the concept of saturated soil mechanics. Unsaturated soils show an apparent cohesion due to negative pore pressure and relatively lower permeability due to entrapped air compared to saturated soils. The determination of engineering properties of soils with various moisture content is very important to evaluate shear strength and stability of natural and engineered soils. So various researches should be made on unsaturated soils. Especially, sandy soils are widely distributed near Nakdong river, one of the four rivers where Restoration Projects were carried out. Many structures such as dams, flood control facilities, detention facilities and reservoirs have been built in this area. In this study, unsaturated triaxial compressive tests were conducted on sands or silty sands at Nakdong river in order to provide their fundamental characteristics for design and construction of geotechnical structures. As a result of the tests, the maximum deviator stress increased as the confining stress and matric suction increased. The cohesion increased non-linearly as the matric suction increased, but the angle of internal friction was marginally changed.

요 지

포화토의 개념과 원리로는 실제 지반에서 발생하는 현상과 거동이 제대로 해석되지 않는 많은 공학적 문제들이 있다. 불포화토는 부간극수압의 영향으로 겉보기점착력을 보임과 동시에 물의 흐름에 있어서 간극 속에 공기의 함입으로 투수성이 저하하는 등 포화토와는 다른 거동특성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 따라서 흙 속의 수분 함량에 따른 공학적 특성을 규명하는 것은 지반강도의 산정, 구조물의 안정성 등을 판단하는데 있어서 중요한 자료를 제공하므로 많은 연구와 노력이 필요하다. 특히, 하천복원 프로젝트인 “4대강 살리기”중 한 곳인 낙동강유역에는 모래 지반이 넓은 지역에 걸쳐 분포하고 있으며, 중소규모의 댐, 홍수조절지, 하천변 저류지 및 저수지 재개발 등 많은 토목구조물이 건설되고 있다. 본 연구에서는 낙동강유역 내 불포화상태에 있는 지반구조물의 설계·시공 및 안정성 검토에 기초적 자료를 제공하고자 낙동강 중하류 실트질 모래를 대상으로 불포화 삼축압축시험을 실시하였다. 시험 결과 최대축차응력은 구속압과 흡인력이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 또한 점착력은 흡인력의 증가에 따라 비선형적으로 증가하였으나, 내부마찰각은 크게 변하지 않는 것으로 나타났다.

Keywords : Nak-dong River silty-sand, Unsaturated soils, shear strength characteristic, Suction

1 정회원, 한국수자원공사 연구원 (Researcher, Korea Water Resources Corporation)

2 비회원, 경북대학교 토목공학과 박사 (Doctor, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National Univ)

3 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수 (Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ, Tel. +82-53-950-7544, Fax. +82-53-950-9564, sunpark@knu.ac.kr, 교신저자)

4 정회원, 한국수자원공사 책임연구원 (Principal Researcher, Korea Water Resources Corporation)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지반을 굴착하거나 재 성형하고 다짐하는 등의 지반 관련 토목공사나 댐·제방, 사면 및 교량기초 등의 지반 구조물 시공은 대부분 불포화지반 위에서 행해 지고 있다. 하지만 최근까지 댐, 제방, 사면, 교량 기초 등 지반 구조물의 안정해석에서는 포화상태에서 얻어진 지반강도정수를 적용해 오고 있는 실정이다. 이는 포화토 측면에서 구조물을 설계하는 것이 이론적으로 접근이 용이하고 안전측 설계가 가능하며, 또한 불포화토를 연구하기 위해 소요되는 비용과 시간 등의 어려움이 많이 따르기 때문이다(Lee et al., 2009; Lee et al., 2002). 하지만 이런 접근 방법은 지반 내 모관흡수력의 영향 및 변화를 충분히 고려하지 못하고 대부분 보수적인 설계결과를 초래할 수 있다(Lee et al., 2002).

흡속의 수분의 함량에 따라 흡속의 흡인력은 달라지며 이로 인해 흙의 전단강도는 변하게 된다(Andrew, 1979; Craig and Shackelford, 2001; Leong, 1998). 그러므로 흙 속의 수분에 따른 전단강도 특성을 규명하는 것은 지반의 강도예측, 지지력 산정, 사면 및 댐·제방 등 지반구조물의 안정성을 판단하는 주요한 요소로 된다(Fredlund et al., 1978; Song, 2007).

최근 지반공학 분야에서 고전적인 포화토질역학의 개념과 원리로는 실제 지반에서 발생하는 현상과 거동이 제대로 해석되지 않는 공학적 문제들이 제기되면서 불포화토에 대한 관심이 증가하기 시작하였다. 국내에서도 불포화 영역에 대한 이해와 중요성이 점차 증가하고 있다. Moon(1993)는 불포화토내에서 발휘되는 음의 간극수압을 측정할 수 있는 장비를 개발하였고 Song(1994)은 불포화토의 거동 예측을 위한 구성식을 개발하여 실험값을 잘 추정할 수 있음을 보였다. Kim(2003)는 화강

풍화토의 일정 간극비에서 초기함수비의 변화에 따른 강도 및 변형특성을 밝히기 위해 불포화 삼축압축시험을 실시하였다. 이밖에 Lee et al.(2002)이 화강 풍화토에 대해, Jang et al.(2004)이 점토함유량에 따른 화강 풍화토의 거동에 대해, Im et al.(2007)이 사질토의 불포화 전단특성에 관한 연구를 수행하였다. 현재까지의 연구 동향을 살펴보면 불포화토는 음의 간극수압의 영향으로 겉보기점착력을 보임과 동시에 마찰각도 커지며 흐름에 있어서는 간극 속에 공기의 함입으로 투수성이 저하하는 등 완전 포화토와는 다른 거동특성을 나타내는 것으로 알려지고 있으며, 이러한 불포화토만의 거동특성은 포화토 거동특성에 비해 이해하기 어렵고 복잡하여 연구 결과 역시 미진한 상태이다.

낙동강유역에는 모래 지반이 넓은 지역에 걸쳐 분포되어 있으며, 하천복원 프로젝트인 “4대강 살리기”프로젝트로 중소규모의 수리구조물 및 제방증축 등 공사가 진행되고 있다. 이러한 구조물들은 강우 및 홍수시 수위의 상승과 더불어 구조물의 포화영역과 불포화영역이 변화하게 된다. 하지만 수리구조물에 대한 설계기준은 지표면 포화조건으로 제안하고 있어 불합리하고 비경제적인 과 보강 및 설계가 이루어지고 있다. 이에 본 연구에서는 낙동강 유역 모래의 불포화 전단강도특성을 분석하여 낙동강유역 내에 시공되는 지반구조물의 보다 경제적인 설계·시공 및 안정성 검토가 이루어지도록 기초적 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 실험시료

본 연구에서는 성토재로 많이 사용되고 있는 낙동강

Table 1. Properties of silty sands and silts

Index properties	Silt contents					Silt	
	0%	5%	10%	20%	30%		
Specific gravity	2.637	2.641	2.640	2.638	2.638	Specific gravity	2.640
D10 (mm)	0.19	0.18	0.08	0.02	0.01	Liquid limit(%)	34.0
D30 (mm)	0.22	0.22	0.22	0.20	0.12	Plastic limit(%)	26.0
D60 (mm)	0.25	0.25	0.24	0.24	0.23	Plastic index(%)	8.0
Cu	1.316	1.378	3.038	10.435	23.200	Pass #4, (%)	100
Cz	1.038	1.084	2.445	7.246	6.207	Pass #200,(%)	100
USCS	SP	SP	SP	SM	SM	USCS	ML

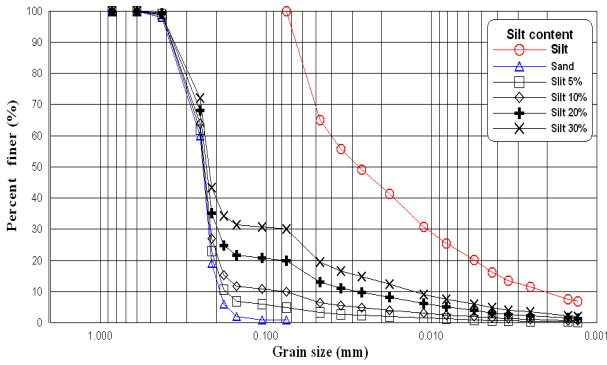


Fig. 1. Grain distribution of specimens

중류 층적 실트질 모래를 실험에 사용하였다. 낙동강 중류 지역의 실트질 모래를 채취한 후 깨끗한 모래에 대한 시험을 위하여 #20체~#200체 사이의 잔류모래를 흐르는 물에 씻어서 깨끗한 모래(clean sand)로 만들어 실험에 사용하였다.

실트의 경우도 낙동강 중류 지역에서 채취한 후 깨끗한 물에 씻어 #200체 위의 시료를 제거한 뒤 남은 시료를 자연 건조시켜 사용하였다. 시료준비 후 모래와 실트를 0%, 5%, 10%, 20%, 30% 비율로 섞어 시료를 준비하였다. 실험에 사용한 시료의 기본 물성치는 Table 1과 같으며 각각의 입도조정 시료 및 실트에 대한 입도는 Fig. 1에 나타내었다(Kim and Kim, 2008).

2.2 함수특성곡선

낙동강 실트질 모래의 함수특성곡선(SWCC : Soil Water Characteristic Curve)은 압력판 추출실험과 데시케이터 실험을 병행하여 구할 수 있다. 0~200kPa 사이의 흡수력 범위에서는 ASTM D2325-68(ASTM 1990a)에 따라 압력판 추출기(volume pressure plate extractor, 이하 VPPE)를 사용하고, 가해진 흡수력이 디스크의 공기함입 저항치를 초과하는 범위에 대해서는 데시케이터 실험을 이용하여 삼투흡입력(osmotic suction)을 적용하여 구할 수 있다. 본 논문에 적용된 함수특성곡선은 Fig. 2

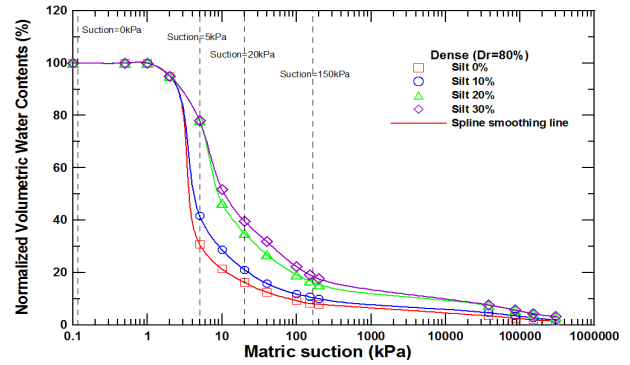


Fig. 2. Matric suction's range at unsaturated triaxial compressive tests

와 같이 공기함입치와 잔류함수비 범위를 적절하게 나누어 흡인력의 범위를 정하였다. 실험결과 실트함유율에 따른 흡인력의 변화는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

2.3 공시체 성형방법

본 연구에 적용된 모든 시료는 ASTM(D4253-00, D4254-00)에서 규정한 실험방법에 의하여 상대밀도를 산정하였으며, 공시체 성형방법은 습윤다짐법으로 성형하였다.

2.3.1 공시체 성형을 위한 상대밀도 결정

ASTM방법에서 흙의 최대 단위중량을 구하기 위해서 배수를 하지 않은 상태에서 몰드에 건조한 흙을 넣어 14kPa의 연직하중을 가한 채로 연직방향으로 진동시킨다. 진동장비는 50Hz에서 10분 동안 0.48±0.08mm, 60Hz에서 8분 동안 0.338±0.08mm의 진폭에서 수직진동을 얻을 수 있어야 한다.

본 연구에서는 50Hz로 10분 동안 진동시켰다. 실트함유량 0%, 5%, 10%, 20%, 30%에 대한 상대밀도 80%시의 간극비와 단위중량을 산정하여 Table 2에 나타내었다.

2.3.2 공시체 성형

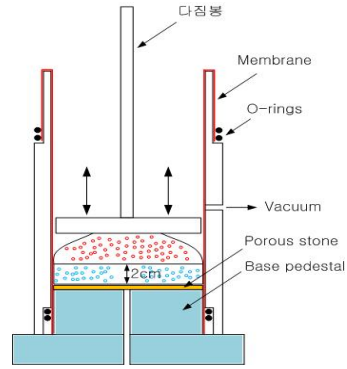
습윤다짐법은 시료에 물을 첨가하여 겔보기 점착력을 증가시켜 다지므로 시료가 자립이 되도록 성형할 수

Table 2. Void ratio and relative density of specimens

Soil state	Relative density, D_r (%)	Silt contents (%)	Dry density (g/cm^3)	Void ratio, e	Intergranular void ratio, e_s
Dense	80	0	1.377	0.915	0.915
		5	1.452	0.829	0.925
		10	1.501	0.759	0.954
		20	1.520	0.735	1.169
		30	1.513	0.744	1.491



(a) Specimens moulding photograph



(b) Wet tamping method

Fig. 3. Specimens moulding

있다. 또한, 입자 크기의 차이가 큰 경우 다지기 전 미리 물을 첨가하여 시료를 섞기 때문에 입자 분포가 균질한 시료를 만들 수 있다. 습윤다짐법은 시료를 다질 때 각 층의 높이를 일정하게 되도록 다짐한 후, 다음 층을 성형한다.

그러나 이러한 방식으로 성형할 경우, 시료의 하층부로 갈수록 밀도가 커지는 경향이 있으므로, 이를 개선하기 위해 본 연구에서는 단위중량을 목표로 5층의 과소다짐법(under compaction)을 적용하였다. 과소다짐법은 각 층에 대해 동일한 시료무게를 서로 다른 다짐높이로 성형하여 시료 전체에 균일한 건조단위중량을 확보하는 시료성형방법이다. Fig. 3에 습윤다짐법에 의하여 성형된 시료의 장면 및 모식도를 나타내었다.

2.4 실험장비 및 시험방법

2.4.1 실험장비

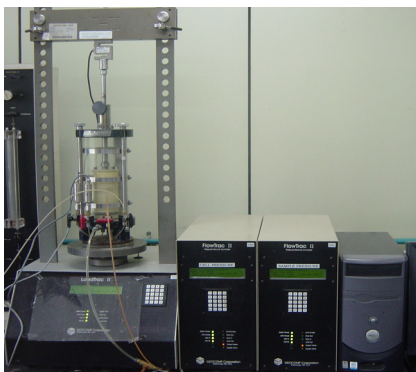
불포화토의 강도특성을 알기위해 본 연구에서는 일반 삼축시험기를 불포화토의 시험에 알맞도록 개량 제

작하였다. 이용된 삼축압축시험장비는 Fig. 4와 같으며 시스템의 구성은 삼축압축셀과 가압장치로 채하 장비, 가압장비(I), (II), 공기압축기, 측정장치 및 제어장치로 등으로 구성되어 있다.

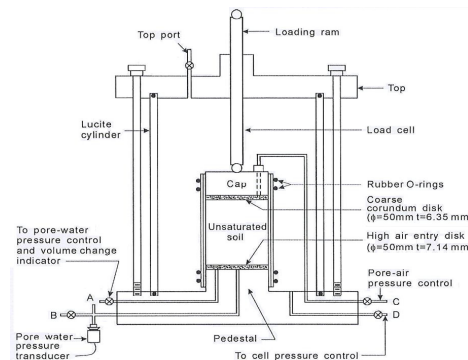
삼축압축 셀은 시료에 모관흡인력을 재현시키기 위하여 공기압과 수압을 시료의 상부 및 하부 pedestal를 통하여 가하였으며, 물을 통과시키고 공기의 이동을 제한하기 위하여 삼축압축셀의 하부 시료받침대에 500kPa의 높은 공기 유입치를 갖는 세라믹 디스크(Ceramic disk)를 설치하였다.

2.4.2 불포화전단강도특성 실험방법

불포화토의 거동특성을 규명하기 위해 수행되는 실험 중 가장 일반적인 것이 불포화 삼축압축실험이다. 불포화토의 강도특성을 나타내는 강도정수는 Fredlund et al.(1978)이 발표한 전단강도식을 통해 c' , ϕ' , ϕ^b 로 정의되며 이중 ϕ^b 를 얻기 위해서는 개량된 삼축압축시험기를 이용하여 얻을 수 있다(식 1). 이 식은 Mohr- Coulomb의 파괴규준을 불포화토에 적용할 수 있도록 확장하여



(a) Equipment photograph



(b) Cell schematic diagram

Fig. 4. Triaxial compressive test equipment

Table 3. Unsaturated triaxial compressive tests cases

Silt contents (%)	Suction (kPa)	Confine stress (kPa)
0, 5, 10, 20	0	50, 100, 200
	5	
	20	
	150	

Mohr-coulomb의 파괴규준에 흡인력을 고려할 수 있도록 축을 추가하여 흡인력에 따른 전단강도의 증가량을 ϕ^b 의 값으로 고려할 수 있도록 하였다. 이때 ϕ^b 는 흡인력의 증가에 따라 일정한 값을 가지는 것으로 고려하였다.

$$\tau = c' + (\sigma_3 - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (1)$$

여기서, c' : 유효 점착력

u_a : 간극 공기압

u_w : 간극 수압

$(\sigma_3 - u_a)$: 순연직 응력

$(u_a - u_w)$: 모관흡인력

ϕ' : 유효마찰각

ϕ^b : 모관흡인력 증가에 따른 겉보기 점착력의 증가를 표현하는 유효마찰각

공시체 성형 및 설치 완료 후 상단에는 캡이 연결되고 캡으로는 공기압이 연결된다. Chamber Cell에 시료가 준비되면 시료의 밑판을 통하여 탈기수를 주입하여 시료를 포화시킨다. 포화도는 Skempton의 B값 측정하여 포화도가 95% 이상이 되면 완전포화가 되었다고 가정하였다. 소정의 포화도에 이르면 삼축압축 셀에 소정의 응력조건으로 압력을 가하여 주어진 구속압($\sigma_3 - u_a$)과 흡인력($u_a - u_w$)의 상태로 압밀시킨다. 압밀이 완료되면 전단실험을 수행한다.

본 연구에서는 여러 가지 실험의 종류 중 배기-비배수 상태에서 전단시험을 시행하였다. 또한 포화공시체와 불포화 공시체의 전단강도를 비교하고자 포화시료를 이용하여 삼축압축시험을 실시하였다. 배기-비배수 시험이므로 간극수압이 간극압에 영향을 받아 균일하게 유지되므로 비배수전단시험과 유사하다고 판단하여 전단속도를 0.05%/min으로 하였다. 실험조건은 Table 3에 나타내었다.

3. 불포화 실트질모래의 전단거동

낙동강 유역의 실트질 모래지반의 배기-비배수 삼축압축시험을 결과를 Table 4에 요약하였다.

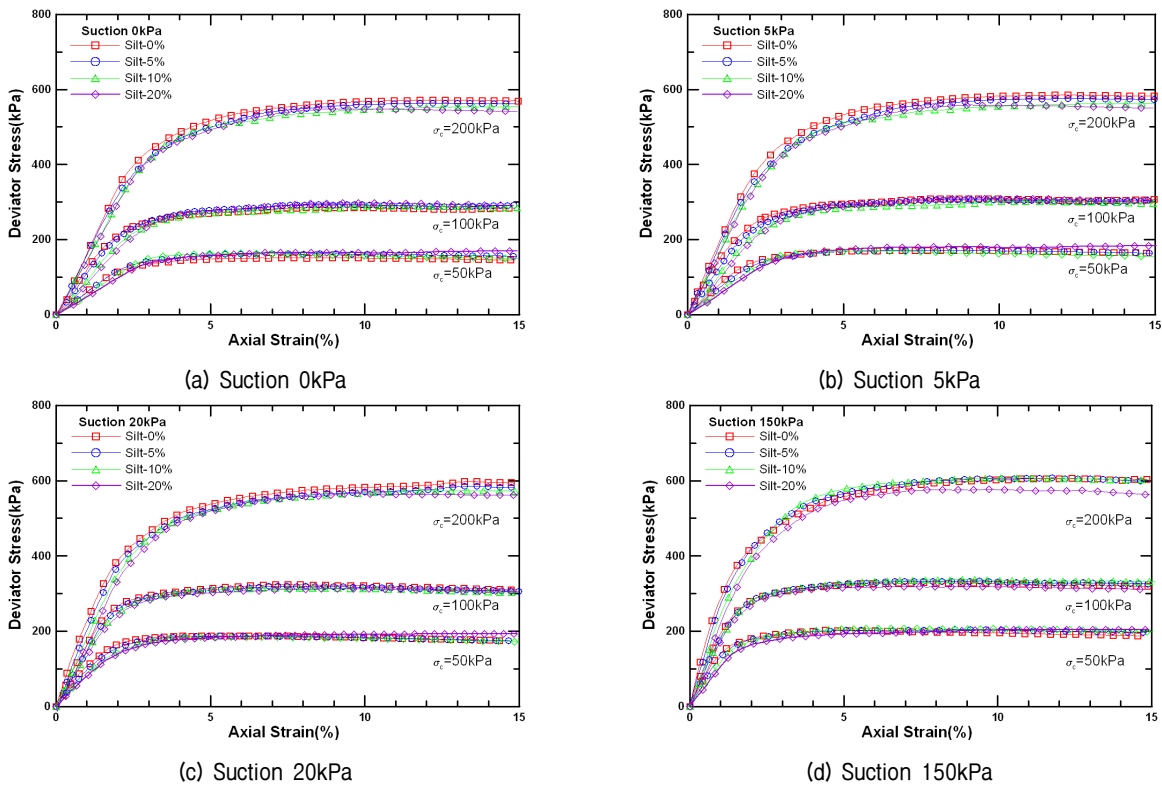


Fig. 5. The relation between axial strain and deviator stress according to suction

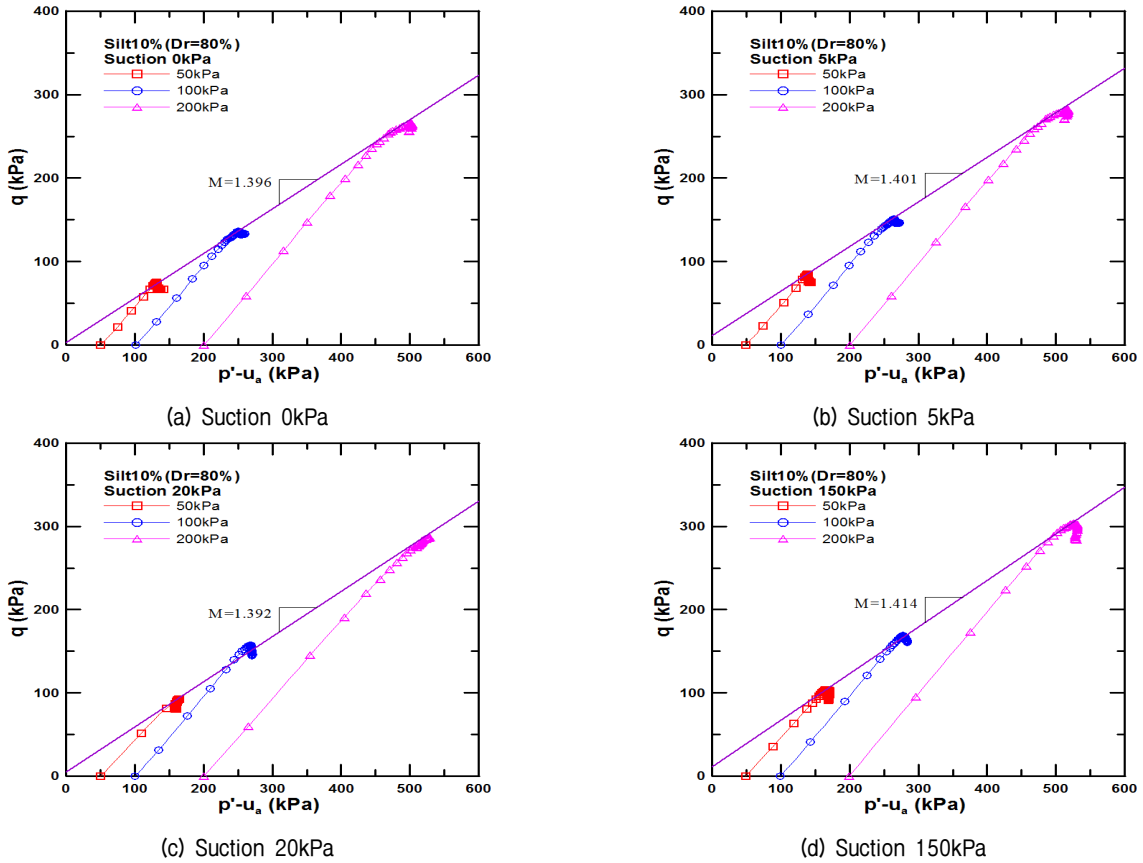


Fig. 6. The stress path at silt 10%

3.1 축차응력-축변형률

Fig. 5에는 흡인력에 따른 축차응력과 축변형률의 관계를 나타내었다. 흡인력과 실트함유율의 변화에 상관없이 모든 조건에서 최대축차응력에 도달한 후 응력이 일정하게 유지되는 전형적인 정규압밀 시료의 거동양상을 나타냈으며 모두 유효구속압이 증가할수록 최대 축차응력에 도달하는 축변형률이 증가하였다. 흡인력 0인 경우에 비하여 흡인력이 증가함에 따라 최대축차응력이 실트함량 0%에서는 2.45~34.67%, 5%에서는 2.13~25.93%, 10%에서는 1.44~26.22%, 20%에서는 1.82~20.71%로 증가하는 것으로 나타났으나, 실트함유량이 높을수록 그 증가폭은 감소하는 것으로 나타났다. 최대압축강도는 구속압뿐만 아니라 흡인력의 영향도 받는다는 것을 알 수 있다. Jubert and Colmenares(2006) 및 Song et al.(2007) 결과에서도 유사하게 나타나고 있다.

3.2 응력경로

Fig. 6에 실트함유율 10%에 대한 응력경로를 나타내

었으며 Table 4에 한계상태선의 기울기 M값을 정리하였다. 시험결과 모두 흡인력과 실트함유율에 상관없이 유일한 한계상태선에 도달하는 응력경로 거동을 보였다. 동일한 실트함유율에서 포화상태인 흡인력 0kPa의 기울기 M값과 비교하였을 때 흡인력이 증가하면 기울기 M값은 약간 감소하지만 큰 변화는 나타나지 않는다. 실트함유율 0%, 흡인력 0kPa 일 때 M값은 1.149를 가지나 흡인력이 5, 20, 150kPa로 증가하더라도 M값은 1.436, 1.431, 1.423으로 미소한 변화만 나타났다. 실트함유율이 증가 하더라도 동일한 경향이 나타났다. 이는 Fredlund et al.(1978)의 식에서 밝힌 모관흡인력의 변화에 다른 내부마찰각의 변화가 없다는 기존의 연구와 유사하다고 할 수 있다. 이와는 달리 동일한 흡인력에서 실트함유율이 증가하면 뚜렷이 기울기 M값은 감소하게 되며 M값의 감소는 내부마찰각의 감소를 나타낸다.

3.3 확장된 Mohr-coulomb의 파괴규준

Fredlund et al.(1978)은 마찰력을 전응력의 함수와 간극수압의 함수로 나누어 전단강도식을 발표하였다.

Table 4. The results of unsaturated triaxial compressive tests

Silt contents (%)	Suction (kPa)	Confine stress (kPa)	qmax (kPa)	e _f (%)	E (MPa)	M	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	ϕ^b (°)
0	0	50	151	7.5	6.08	1.449	2.1	35.7	1.31
		100	285	8.9	12.02				
		200	571	12.3	16.73				
	5	50	171	7.7	7.67	1.436	8.6	35.4	
		100	309	9.6	15.36				
		200	585	12	18.84				
	20	50	188	6.6	11.99	1.431	13.2	35.3	
		100	323	7.3	16.43				
		200	598	13.2	23.08				
	150	50	202	4.4	14.14	1.423	16.5	35.1	
		100	329	7.6	19.66				
		200	606	12.4	29.86				
5	0	50	162	6.3	6.03	1.414	6.9	34.9	1.26
		100	293	8.7	10.98				
		200	563	12.4	16.3				
	5	50	171	7.1	6.83	1.418	9.5	35	
		100	306	9.6	12.42				
		200	575	11.7	17.67				
	20	50	187	5.8	10.12	1.41	14.1	34.8	
		100	319	9.3	14.83				
		200	586	12.2	20.51				
	150	50	204	6.5	13.02	1.418	17.4	35	
		100	333	9.1	18.3				
		200	607	12.3	27.22				
10	0	50	164	6	5.37	1.396	7.9	34.5	1.28
		100	289	10.9	9.2				
		200	557	12.8	14.69				
	5	50	171	5.9	5.96	1.401	10.3	34.6	
		100	302	10.1	10.46				
		200	565	12.2	16.61				
	20	50	185	4.9	7.99	1.392	14.7	34.4	
		100	314	7.7	14.43				
		200	574	13.2	18.01				
	150	50	207	5.6	11.76	1.414	18.7	34.9	
		100	337	8.8	18.41				
		200	608	10.6	21.43				
20	0	50	169	7.5	4.84	1.370	11.6	33.9	1.15
		100	297	9.9	8.69				
		200	548	11.1	14.45				
	5	50	183	7.1	5.44	1.366	15.6	33.8	
		100	309	7.8	9.80				
		200	558	12.3	16.27				
	20	50	193	6.3	8.33	1.361	17.8	33.7	
		100	313	9.5	13.45				
		200	566	10.5	17.00				
	150	50	204	7.7	10.61	1.366	20.0	33.8	
		100	319	9.2	16.96				
		200	577	10.6	19.74				

Mohr-Coulomb의 파괴규준을 불포화토에 적용할 수 있도록 확장하여 전단강도를 표현하기 위하여 모관흡인력 항을 도입하였다. 이를 적용하기 위하여 실험결과로부터 겉보기 점착력과 내부마찰각을 구하여 Table 4에 나타내었다. 겉보기 점착력은 실트함유율이 0%에서 흡인력 150kPa일 경우 16.5kPa로 나타나 흡인력 0kPa의 2.1kPa 보다 7.8배 증가하였다. 실트함유량이 증가하더라도 값에 차이는 있지만 겉보기 점착력은 흡인력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 Wheeler(1988)의 해상점토, Krahn et al.(1989)의 Notch Holl 실트, Im(2007)의 사질토에 대한 연구결과에서도 나타났다. 이는 흡인력이 증가함에 따라 흙이 건조되면서 점착력을 가지게 되어 강도가 증가한다는 것을 의미한다(Im, 2007).

흡인력에 따른 겉보기 점착력의 변화를 보다 자세히 확인하고자 기존의 연구에서 Fredlund(1978)이 제시한 식인 쌍곡선식을 이용하였다. Fredlund et al.(1978)이 제시한 식 (2)는 모관 흡수력에 대한 강도의 증가량을 선형으로 고려하고 있어 겉보기 마찰각(ϕ^b)으로 강도정수

를 표현하고 있다.

$$C_A = c' + \psi \tan \phi^b \quad (2)$$

쌍곡선식은 초기 기울기와 최대 점근값으로 표현되는 것을 이용해 모관흡인력에 대한 겉보기 점착력값을 초기기울기와 최대 점근값으로 수식화 하였다. 이를 이용해 흡인력에 따른 겉보기 점착력의 비선형적인 변화를 설명할 수 있다. 이전 연구에서 Lee et al.(2002)이 화강 풍화토의 겉보기 점착력을 쌍곡선식을 이용하여 비선형 수식화 하였으며, 흡인력에 대한 겉보기 점착력의 수식은 다음과 같다.

$$C_A = c' + \frac{\psi}{a + b\psi} \quad (3)$$

$$C_{A, \max} = C_{\max} + c'$$

여기서, C_A : 흡인력의 증가로 인한 겉보기 점착력
 c' : 포화상태의 겉보기 점착력(흡인력 0)

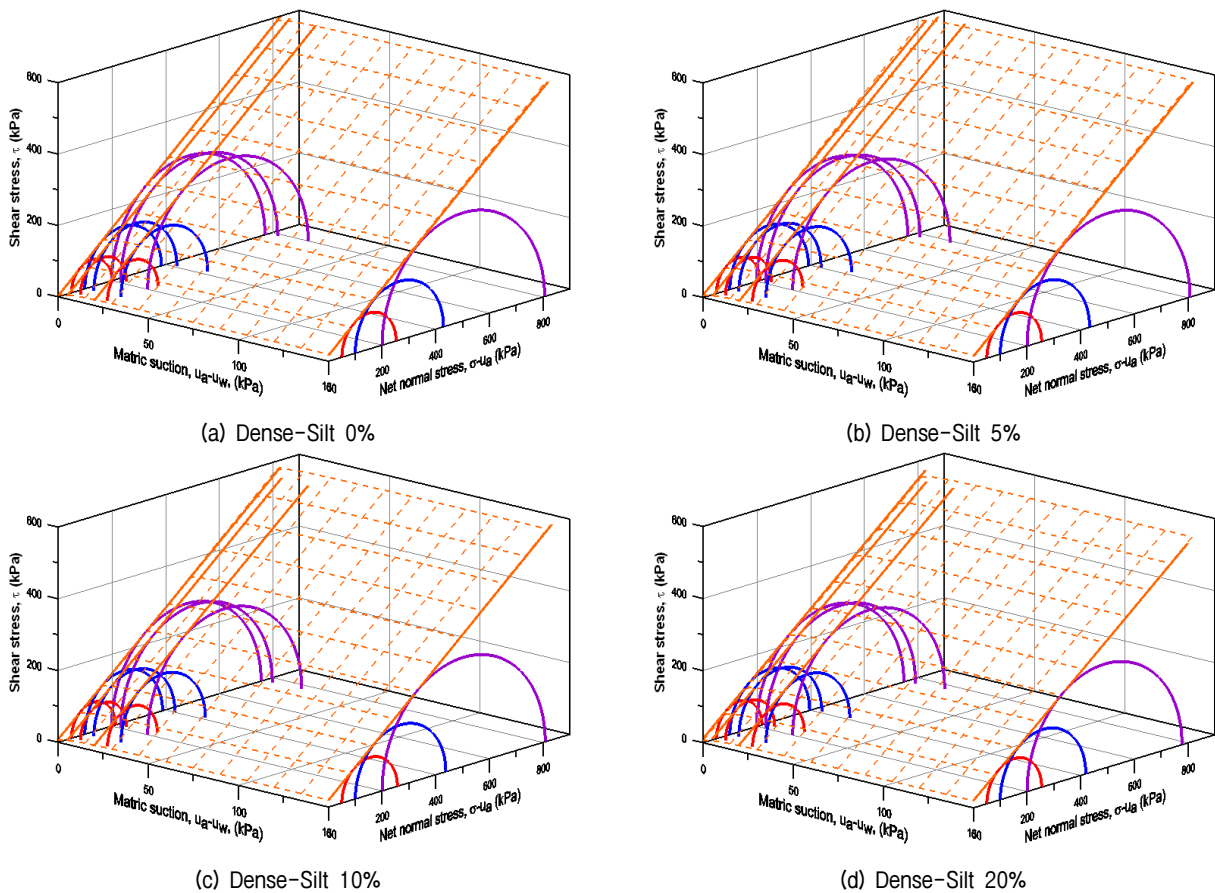


Fig. 7. Extended Mohr-Coulomb failure envelope

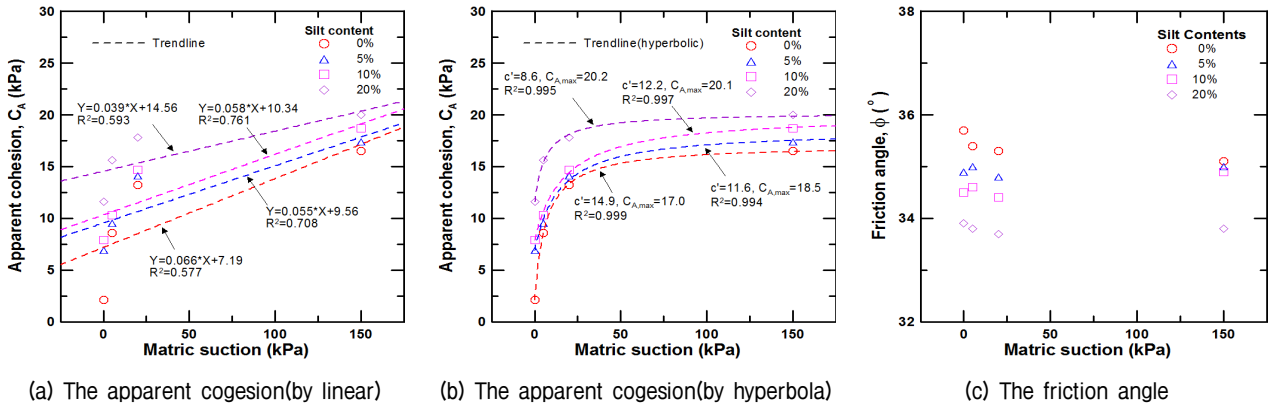


Fig. 8. The apparent cohesion and friction angle according to suction

$$a : \text{초기기울기의 역수} (= \frac{1}{\tan \phi'})$$

$$b : \text{최대점근값의 역수} (= \frac{1}{C_{\max}})$$

C_{\max} : 흡인력 증가로 인한 최대 겉보기 점착력증분

식 (2)와 (3)을 이용하여 정리한 실험결과를 Table 4에 나타내었으며, Fig. 8에 흡인력에 따른 겉보기 점착력 및 내부마찰각의 변화를 나타내었다. Fig. 8(a)와 같이 선형식의 경우 상관계수가 0.577~0.761로 나타나 실험결과를 정확히 묘사하지 못하였다. 이는 조립질 시료의 경우 작은 흡인력에서도 체적함수비의 변화가 커 전단강도의 변화가 심하기 때문이다. 선형으로 도시한 결과는 1.15°~1.31°로 흡인력의 증가에 따른 겉보기 점착력증분은 작게 나타났다. 또한 실트함유율이 증가함에 따라 겉보기 마찰각은 1.31°에서 1.15°로 미소한 폭으로 작아졌다.

쌍곡선식의 경우 Fig. 8(b)에서 확인되듯이 선형식에 비하여 상관계수가 0.994~0.999로 실험결과를 잘 묘사하였다. 쌍곡선식의 경우 초기기울기와 최대 점근값으로 작은 흡인력에서 전단강도의 큰 변화를 잘 설명하였다. 삼축시험시 적용된 흡인력이 함수특성곡선 실험결과를 바탕으로 공기함입치와 잔류함수비 범위를 적용한 결과 모든 경우에서 흡인력 150kPa일때 겉보기 점착력이 쌍곡선식의 최대 점근값으로 구한 최대 겉보기 점착력과는 큰 차이가 나지 않아 본 연구에서 적용한 흡인력의 범위가 유효함도 알 수 있다.

실트 0%에서 포화상태에서 겉보기 점착력은 2.1kPa가 나타났으며 쌍곡선식으로 구한 최대점근값으로 구

한 불포화상태에서의 최대 겉보기 점착력은 17.0kPa로 나타났다. 실트함유율이 5, 10, 20%로 증가함에 따라서는 최대 겉보기 점착력의 증가율이 168.5%, 154.4%, 74.3%로 감소함을 확인할 수 있다. 또한 절대값으로 본 최대 겉보기 점착력값도 구속압이 증가함에 따라 14.9, 11.6, 12.2, 8.6kPa로 대체적으로 실트함유율이 증가함에 따라 감소함을 확인할 수 있다. 내부마찰각의 경우는 흡인력의 변화에 따른 큰 변화는 나타나지 않았다.

4. 결론

본 연구는 낙동강 지역에 넓게 분포하고 있는 실트질 모래의 전단강도특성을 규명하고자 낙동강 중류지역의 모래와 실트를 채취하여 배기-비배수 조건에서의 불포화 삼축압축시험을 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 응력-변형률곡선에서 흡인력에 상관없이 모든 조건에서 최대축차응력에 도달한 후 응력이 일정하게 유지되는 전형적인 정규압밀 시료의 거동양상을 나타냄을 확인하였다. 또한 흡인력, 구속압이 일정한 상태에서 축차응력은 구속압, 흡인력의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 분석결과 유일한 한계상태선에 도달하는 응력경로 거동을 보였다. 동일 실트함유율에서 흡인력이 증가에 따라 기울기 M값은 대체적으로 감소하거나 비슷한 값을 가지는 것으로 나타났으며, 동일 흡인력에서는 실트함유율이 증가함에 따라 기울기 M값은 감소하는 것으로 나타났다.

- (3) Mohr-Coulomb의 파괴규준을 통해 흡인력에 따른 겉보기 점착력과 내부마찰각을 구한 결과 겉보기 점착력은 선형적으로 나타나지 않고 비선형적으로 나타났으며 특히 쌍곡선식을 통해 표현함이 더 타당한 것으로 나타났다.
- (4) 실트함유율이 5, 10, 20%로 증가함에 따라서는 최대 겉보기 점착력의 증가율이 168.5%, 154.4%, 74.3%로 감소하는 것으로 나타났으며, 절대값으로 본 최대 겉보기 점착력 값도 구속압이 증가함에 따라 14.9, 11.6, 12.2, 8.6kPa로 나타나 실트함유율이 증가함에 따라 감소함을 확인할 수 있다. 본 연구위 경우 내부마찰각의 경우는 흡인력의 변화에 따른 큰 변화는 나타나지 않았다.

참 고 문 헌

- 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: pp.178-180.
- ASTM D2325-68 (1994) e1, "Standard Test Method for Capillary-Moisture Relationships for Coarse- and Medium-Textured Soils by Porous-Plate Apparatus".
- ASTM D4253-00, "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table".
- ASTM D4254-00, "Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density".
- Bishop, A. W. and Donald, I. B. (1961), "The Experimental Study of partly Saturated Soil in the Triaxial Apparatus", *Proceedings 5th ICSMFE*, pp.13-21.
- 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): pp.790-800.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. (1978), "Shear strength of unsaturated soil", *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3): pp.313-321.
- Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977), "Stress State Variables for Unsaturated Soils", *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.103, No.GT5, pp.447-466.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", *John Wiley & Sons Inc.*, pp.64-123.
- Jeong, S. S., Yu, N. D., and Kim, J. H. (2004), "Characteristics of unsaturated weathered soils with varying clay contents", Korea Society of Civil Engineers Conference, pp.2487-2492.
- Jubert, A. P. and Colmenares, J. E. (2006), "Stress-strain-suction behaviour of two clayey materials under unconfined conditions". Unsaturated Soils. Geotechnical special publication. No.147, ASCE, pp.109-1120.
- Kim, Y. S. and Kim, D. M. (2008), "Characteristics of Undrained Cyclic Shear Behavior of Nak-Dong River Sand by Silt Contents", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.11, pp.79-89.
- Kim, C. K. (2003), "Characteristics of Stress-strain Behaviour for Unsaturated Weathered Granite Soil", *Journal of Korea Society of Civil Engineers-C*, Vol.23, No.3, pp.177-184.
- Krahn, J., Fredlund, D. G., and Klassen, M. J. (1989), "Effect of Soil Suction on Slope Stability at Notch Hill", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.26, No2, pp.269-278.
- Lee, H. K. and Lee, I. (2009), "A Study for Unsaturated-Character of Weathered Granite Soil in Korea", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.10, No.3, pp.13-20.
- Lee, S. J., Lee, S. R., and Jang, B. S. (2002), "Unsaturated Shear Strength Characteristics of Weathered Granite Soils", *Journal of Korea Society of Civil Engineers-C*, Vol.22, No.1, pp.81-88.
- Leong E. C. and Rahardjo, H. (1995), "Characteristic Curves for two Residual Soils from Granitic and Sedimentary Formations", *Preceeding of the International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT'95*, Paris. France, pp.519-524.
- Lim, S. Y. (2007), "The Shear Characteristics of Unsaturated Sandy Soils", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.10, pp.57-64.
- Moon, J. B., Kim, S. K., and Jang, Y. S. (1993), "Development and Verification of Negative Pore Pressure Tip for unsaturated Flow Analysis", Korea Society of Civil Engineers Conference, Vol.1993, No.1, pp.385-388.
- Song, C. S. and Chang, P. W. (1994), "Development of Constitutive Model for the Prediction of Behaviour of Unsaturated Soil(I) -Study of Characteristics of Unsaturated Soil", *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 36(4), pp.87-94.
- Song, C. S. and Choi, D. H. (2007), "Characteristics of Shear Strength for an Unsaturated Soil with the Matric Suction", *Journal of Korean Env. Res. Tech.*, Vol.10, No.1, pp.82-83.
- Wheeler, S. J. (1988), "A Conceptual Model for Soils Containing Large gas Bubbles", *Geotechnique*, 38(3), pp.389-397.

(접수일자 2012. 10. 22, 심사완료일 2013. 2. 18)