

삼축시험과 직접전단시험에 의한 불포화토의 전단특성 비교

Comparison of Shear Strength Characteristics of Unsaturated Soil From Triaxial Compression Tests with Direct Shear Tests

황희석¹, 최영남², 박병수³, 유남재^{4*}

Hui-Seok Hwang¹, Young-Nam Choi², Byung-Soo Park³, Nam-Jae Yoo^{4*}

¹Member, Doctor Completion, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University, 1, kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do, Republic of Korea

²Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University, 1, kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do, Republic of Korea

³Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Gangwon State University, 270, Yeonju-ro, Gyohang-ri, Jumunjin-eup, Gangneung-si, Gangwon-do, Republic of Korea

⁴Professor(Corresponding Author), Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University, 1, kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do, Republic of Korea

ABSTRACT

In this paper, shear strength characteristics of an unsaturated soil were compared using triaxial compression tests(CD) and modified direct shear tests and thus feasibility of the newly modified direct shear testing apparatus was confirmed. The shear strength tests of unsaturated state with a soil sample, obtained from a slope where debris flow occurred at Yangpyeong in Kyeunggi province during 2010, were performed. Both tests showed a linear relationship of matric suction with the shear strength under low level of matric suction. The apparent cohesion of the unsaturated soil was also increased linearly with increase of matric suction. As results of comparing two different testing apparatus, estimated values of shear strength parameters of unsaturated soil(c' , ϕ^b) were slightly larger in the modified direct shear tests due to constraint effect of shear box.

요 지

본 논문은 삼축압축시험(CD)과 개선된 직접전단시험 결과 얻어진 불포화토의 전단특성을 비교분석하여 새로이 개선된 직접전단 시험장비의 실용성을 검증하였다. 2010년 경기도 양평군 토석류 발생사면에서 채취한 시료를 대상으로 불포화토 상태의 전단강도 실험을 수행하였다. 다른 두 종류의 실험방법에서 낮은 모관흡수력이 작용하는 경우는 전단강도와 선형적인 관계를 나타내며, 모관흡수력의 증가함에 따라 불포화토의 겉보기 점착력 역시 선형적으로 증가하였다. 다른 두 실험방법에 의한 결과를 비교한 결과, 산정된 불포화토의 강도정수(c' , ϕ^b)는 전단 상자의 구속효과가 있는 개선된 직접전단시험에서 다소 크게 나타났다.

Keywords : Shear strength characteristics of unsaturated soil, Triaxial compression tests, Modified direct shear tests, Shear strength parameters of unsaturated soil

1. 서 론

일반적으로 지하수면 위에 있는 자연상태의 흙은 불포화 상태로 존재하며 모세관 현상이나 삼투압 등으로 인해 물을

흡수하려고 하는 부(-)의 간극수압을 갖게 된다. 이러한 부(-)의 간극수압의 지반흡수력을 갖는 불포화토 상태는 포화토 상태에 비하여 사면 안정성에 유리하기 때문에, 불포화토 지반의 거동을 기존의 포화토 원리를 이용해 평가하는 것은 적합하지 않다. 불포화토의 모관흡수력에 따른 전단강도 특성을 규명하기 위한 실험방법은 크게 삼축압축실험과 직접전단실험이 있으며 이를 이용하여 불포화토의 전단특성을 규명하려는 연구가 많이 진행되어왔다. Fredlund et al.(1978)은 삼축

Received 5 Oct. 2016, Revised 9 Dec. 2016, Accepted 12 Dec. 2016

*Corresponding author

Tel: +82-33-255-6237; Fax: +82-33-250-7237

E-mail address: njyoo@kangwon.ac.kr (N.-J. Yoo)

압축실험을 수행하여 순연직응력($\sigma - u_a$)과 모관흡수력($u_a - u_w$)을 두 개의 독립된 응력상태변수를 사용하여 불포화토의 전단강도를 정의하였고, Taha et al.(2000)은 불포화 풍화잔적토에 대하여 삼축압축실험을 수행하여 흡수력에 기인하여 전단강도가 증가함을 나타내었다. 또한, 불포화토에 대한 직접전단시험을 통하여 모관흡수력에 따른 전단강도의 변화를 규명하기도 하였으며(Escario & Saez, 1986; Gan et al., 1988), 국내에서도 삼축압축시험기 또는 개선된 삼축압축시험기를 통하여 불포화토의 전단특성을 규명하고자 하는 연구들이 진행되어 왔다(Lee et al., 2002; Kim, 2003; Kim et al., 2005; Lim, 2007; Oh et al., 2009). 이와 같이 기존 연구는 주로 삼축압축시험으로 불포화토의 전단특성을 조사해왔으며 일반적인 직접전단시험기는 간단히 전단강도 정수를 구할 수 있음에도 불구하고 시료에 공기압을 적용하거나 유지하는데 한계가 있어 불포화토 전단시험을 수행하는데 한계가 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 일반 직접전단시험기를 불포화 상태를 유지하여 전단강도 시험이 가능하도록 개선하고, 개선된 직접전단시험기와 삼축압축시험기를 이용하여 불포화토의 전단시험을 실시하였다. 다른 두 종류의 시험방법으로 얻어진 불포화토의 겉보기마찰각(ϕ^b), 겉보기점착력(c') 및 포화토의 강도정수(c', ϕ')를 비교 분석하고, 개선된 직접전단 시험의 실용성을 검증하였다.

2. 불포화토의 전단강도

불포화토의 경우, 순 연직응력($\sigma - u_a$)과 모관흡수력($u_a - u_w$)을 두 개의 독립된 응력상태변수로 사용하여 연속적인 거동을 분석할 수 있었으며, Fredlund et al.(1978)은 위의 독립적인 응력변수로 정의하여 식 1과 같이 불포화토의 전단강도를 정의하였으며, 이와 같은 독립 상태변수(independent state variable)접근법은 많은 연구 및 실무에서 사용되어지고 있다(Escario & Saez, 1986; Vanapalli et al., 1996).

$$\tau_f = c' + (\sigma_{nf} - u_{af})\tan\phi' + (u_{af} - u_{wf})\tan\phi^b \quad (1)$$

여기서,

$\sigma_{nf} - u_{af}$: 파괴 시 순연직응력

$u_{af} - u_{wf}$: 파괴 시 모관흡수력

ϕ^b : 모관흡수력에 따른 전단강도의 증가비율을 나타내는 마찰각

낮은 모관흡수력의 경우에서 불포화토의 전단강도의 증가

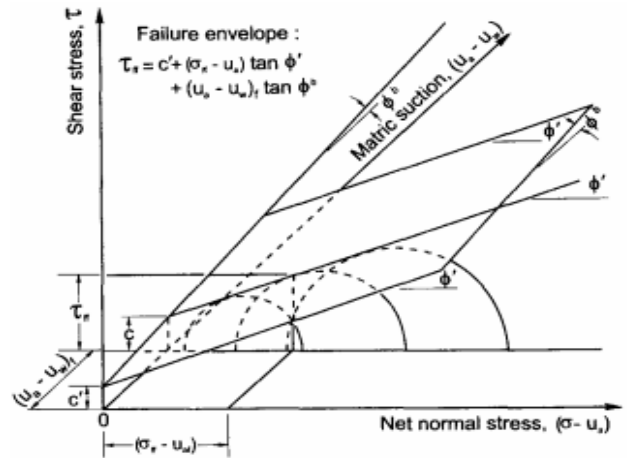


Fig. 1. Extended Mohr-Coulomb failure envelope for unsaturated soils (Fredlund and Rahardjo, 1993)

를 나타내는 겉보기마찰각 ϕ^b 가 선형적 관계를 갖는다고 가정하였으며, 이후 Vanapalli et al.(1996)과 Rassam & Williams (1999)의 연구에서 모관흡수력이 증가하면서 전단강도가 비선형적으로 증가한다는 것으로 확인되었다.

공기함입치(air-entry value)를 초과하게 되면, 겉보기마찰각 ϕ^b 는 모관흡수력이 증가하는 반면에 감소하는 경향을 보인다. 이는 입자간의 응력에 모관흡수력의 영향으로 전단강도가 증가하고, 공기, 물, 토립자 상호간의 경계면에서 공기함입치 범위 안에서 모관흡수력이 증가한다. 결과적으로 모관흡수력과 불포화토의 전단강도는 비선형성을 가지게 되며, 모관흡수력의 증가는 겉보기마찰각(ϕ^b)의 감소를 의미한다. Fig. 1은 Mohr-Coulomb의 파괴기준에 모관흡수력을 고려할 수 있는 축을 추가하여 모관흡수력의 증가에 따른 전단강도의 증가량을 겉보기 마찰각(ϕ^b)값으로 고려하였다.

3. 불포화토의 전단강도 실험

3.1 시험시료

본 연구에 사용된 시료는 2010년 경기도 양평군의 토석류 발생사면에서 교란시료를 채취하여 실내에서 자연건조 후 #10번체를 통과한 시료를 대상으로 하였다. 불포화토의 전단 시험에 사용된 시료는 직경 50mm, 높이 100mm의 삼축압축 시험용과 직경 53.5mm, 높이 20mm의 직접전단시험용으로 재성형하여 시험을 수행하였다. 각각 실험에서 대상시료의 성형은 토석류 현장조사에서 실시한 현장단위중량실험을 통해 획득한 현장단위중량과 현장함수비에 맞게 3층 다짐방법에 의해 성형하였다. 대상 시료의 물리적 성질은 No. 200체 통

Table 1. Physical properties of the soil sample

Items	No.200 passing (%)	Liquid limit (LL)	Plastic limit (PL)	Plasticity index (PI)	Classification (USCS)	Specific gravity (Gs)	Field water content (%)	Total unit weight (kN/m^3)	Dry unit weight (kN/m^3)	Optimum water content (%)
value	12,9	23,5	15,6	7,91	SM-SC	2,65	14,7	16,7	18,2	11,2

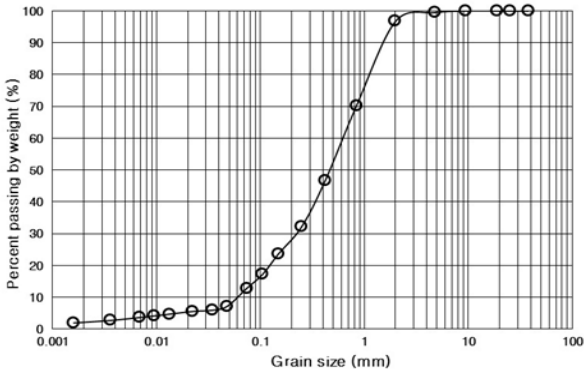


Fig. 2. Particle size distribution

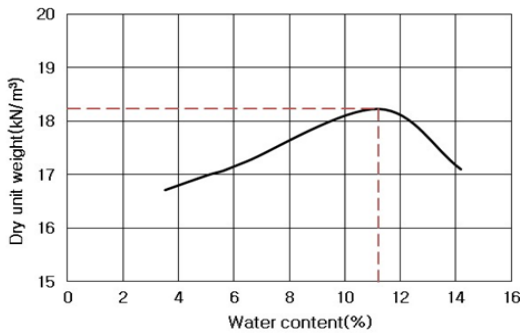


Fig. 3. Compaction curve

과율은 12.9%, 통일분류법(USCS)상 SC-SM에 해당하였다. 시료 성형시 함수비는 14.7%였으며, 포화도 44.3%, 간극비는 0.88이었다. 다짐시험과 기본물성시험 결과를 Table 1에 나타내었으며, Fig. 2와 3은 각각 입도분포와 다짐곡선을 나타내었다.

3.2 삼축압축시험

본 연구에서는 불포화토의 삼축압축시험을 수행하기 위하여 영국 GDS사에서 제작한 시험기를 사용하였다. Fig. 4와 같이 간극수를 통과시키고 공기의 이동을 제한하기 위하여 세라믹 디스크(high air entry disk)를 부착한 하부 좌대(base pedestal)를 제작하여 사용하였으며 상부 캡(top cap)은 다공관을 이용하여 연결되는 배기라인으로 간극공기압을 가하여 모관흡수력($u_a - u_w$)을 재현하였다. 또한, 하부 배수라인은 압밀과정과 전단과정에서 시험시료내부에서 배출되는 간극

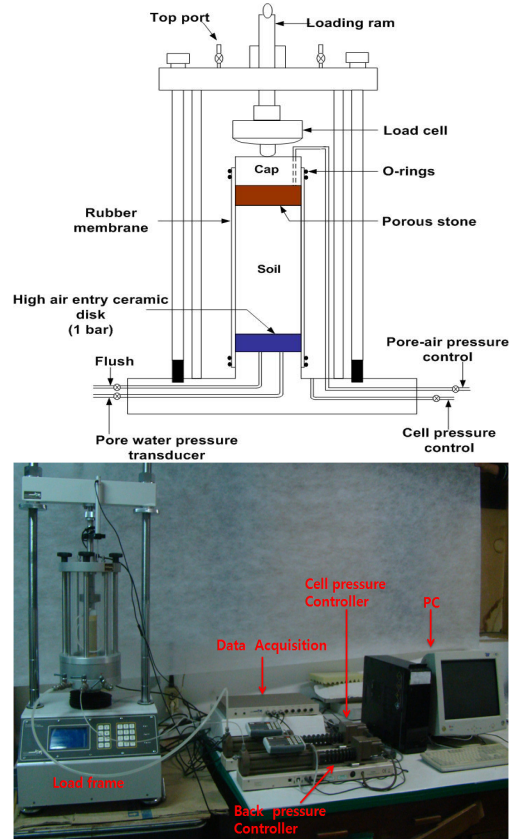


Fig. 4. Triaxial testing apparatus for unsaturated soil

수의 통로가 된다. 상부 캡을 통해 공기압을 적용할 때 배수라인으로 일정 시간동안 배출되는 물의 양을 측정하여 일정하게 수렴되는 경향을 보이면 시료의 평형화 과정이 완료된 것으로 간주하였다. 시료에 모관흡수력을 유발시키기 위해서는 부(-)의 간극수압을 유지시켜야 하는데 부압이 1기압 이상 걸리게 되면 물속의 공기로 인해서 공동이 발생 할 수 있어 실험에 축 변환기법(axis-translation technique)을 적용하였다.

하부 좌대에 1 bar의 공기 함입치를 갖는 세라믹 디스크를 설치함으로써 간극수압을 양의 값으로 작용시키고 상부 캡을 통하여 간극공기압을 간극수압이 증가된 만큼 작용시켜 실제 시료에 발생하는 모관흡수력을 일정하게 유지시킬 수 있도록 공기압과 수압을 각각 독립적으로 조절하였다.

양평의 토석류 발생사면에서 채취한 시료를 현장단위중량과 함수비를 고려하여 3층 정적다짐으로 재 성형한 후 기존의 포화삼축시험과 불포화 등방압밀배수시험(CD)으로 수행하

Table 2. Summary of stress conditions during triaxial tests

sample	σ_c (kPa)	$u_a - u_w$ (kPa)	u_a (kPa)	σ'_c (kPa)	$(\frac{\sigma_1 - u_a}{2} + \frac{\sigma_3 - u_a}{2})'_f$ (kPa)
Saturated Soil	100	0	0	100	162
	200	0	0	200	321
	300	0	0	300	480
Unsaturated Soil	120	20	20	100	167
	150	50	50	100	174
	200	100	100	100	184

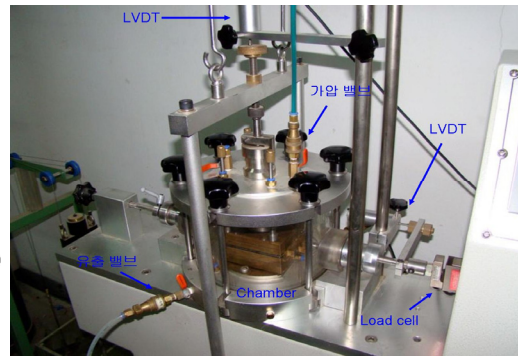
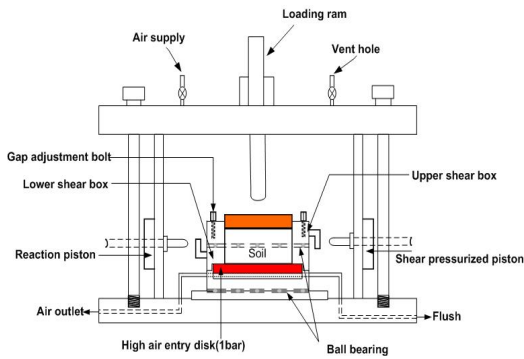


Fig. 5. Modified direct shear testing apparatus for unsaturated soils

었다. Fredlund & Rahardjo(1993)등의 연구결과에서 모관 흡수력이 증가함에 따라 내부마찰각이 미세하게 증가하는 경향을 보이지만 거의 같은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 불포화토의 삼축압축시험은 동일한 순체적응력에서 간극공기압을 20, 50, 100kPa로 변화시켜 모관흡수력의 전단강도에 대한 기여도를 측정하였다. 전단시험 시 준비된 시료를 포화시키는 과정 후 시료 내에 해당하는 모관흡수력을 재현시켜 하부 배수라인을 통해 배출되는 물의 양이 수렴할 때까지 평형화 과정을 수행한다. 전단과정 중 시료에 연결된 배수구멍을 모두 열어서 시료 내 간극수압과 간극공기압의 증가를 차단하였다. 또한, 내부에서 발생하는 간극수압의 완전한 소산을 위해 전단속도는 0.005%/min으로 매우 느리게 실험을 수행하였다. 그리고 기존의 포화삼축압축 시험은 구속응력을 100, 200, 300kPa로 수행하였다. 삼축압축 시험의 초기조건 및 파괴 시 응력을 Table 2에 정리하였다. 여기서 σ_c 는 압밀완료시 등방응력, u_a 는 간극공기압, σ'_c 는 압밀완료시 순 체적응력이다.

3.3 직접전단시험

Gan et al.(1988)이 제시한 일반 직접전단시험기를 이용하여 불포화토 전단시험을 수행하기 위하여 직접전단시험기 챔버 내의 불포화상태를 유지시키며 하부전단상자를 움직임으

로서 전단강도시험이 가능하도록 기존의 직접전단시험기를 개선하였다. 본 연구에 사용된 개선된 직접전단시험기는 공기압에 따른 시료 내 간극수의 유출을 측정하여 흙의 함수특성 곡선을 구하는 실험과 동일한 조건과 방법으로 시료를 조성할 수 있도록 챔버(chamber)의 상부 배기 홀을 통해 공기압을 가하여 전단시험을 수행할 수 있도록 설계되었다(Kwak et al., 2011). 그리고 시료의 받침에는 1bar의 공기압까지 공기를 통과시키지 않고 간극수의 연속성을 유지시킬 수 있는 세라믹 디스크를 설치하여 시료 내에 모관흡수력이 유지될 수 있도록 하였다. 가장 큰 특징은 직접전단시험 과정에서 다일러턴시(dilatancy)의 영향을 최소화할 수 있도록 하부와 상부 전단 상자 사이에 0.5mm의 이격을 두었다.

시험시작 전 세라믹 디스크를 포화시키기 위하여 전단시험기의 챔버 안에 증류수를 채우고 1bar의 공기압을 가하여 하부의 세라믹 디스크를 통해 증류수가 배출되는 것을 확인하였다. 이후 현장 함수비와 입도 및 단위중량을 고려하여 현장과 동일한 조건으로 3층 정적다짐으로 성형한다. 챔버 안에 증류수를 채워 수침을 통해 시료의 포화과정을 거친다. 챔버 안에 공기압을 가하여 하부 배수라인을 통해 시료 내의 간극수의 유출량 측정하여 함수특성곡선에서 유출된 양 만큼 간극수가 배출되면 평형화 과정이 끝난 것으로 간주한다. 불포화토의 직접전단시험은 시료 내부에서 발생하는 간극수압의 완전한 소산을 위하여 0.01mm/min의 속도로 매우 느리게 하여,

Table 3. Summary of stress conditions during direct shear tests

sample	$\sigma - u_a$ (kPa)	$u_a - u_w$ (kPa)	u_a (kPa)	τ'_f (kPa)
Saturated Soil	50	0	0	20
	100	0	0	67
	150	0	0	87
Unsaturated Soil	100	8	8	64
	100	32	32	69
	100	64	64	82

100kPa의 동일한 수직하중에서 모관흡수력을 8, 32, 64kPa으로 적용하여 수행하였다. 기존의 포화토 직접전단시험은 50, 100, 150kPa으로 수직하중을 변화시켜 실험을 수행하였다. 여기서 $\sigma - u_a$ 는 순 연직응력, $u_a - u_w$ 는 모관흡수력, u_a 는 간극공기압, τ'_f 는 파괴 시 전단응력이다.

4. 실험결과 분석

4.1 삼축압축시험결과

Fig. 6은 삼축압축시험에서 순 체적응력 100kPa일 때 모관흡수력($u_a - u_w$) 변화에 따른 축차응력-축 변형률 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 뚜렷한 최대값을 보이지 않고 변형률 경화 특성을 보이고 있으며, 모관흡수력이 증가함에 따라 최대축차응력은 계속적으로 증가하고 초기 축차응력기울기도 커지는 것을 알 수 있다. 여기서 흙의 응력-변형률 관계는 뚜렷한 파괴점을 보이지 않고 연성파괴 형태를 나타내고 있어서 본 연구에서는 파괴 시 축차응력을 축변형률의 20%에서의 축차응력으로 일관되게 정의하였다.

Fig. 7는 불포화 삼축압축시험을 통해 얻어진 구속응력과 간극수압, 간극공기압의 값으로 전단강도와 순 체적응력의 관계를 2차원 파괴포락선으로 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 포화토(모관 흡수력 0kPa)의 삼축압축시험결과에서 내부마찰각이 28.1°, 점착력(c')은 2.12 kPa로 나타났다. 불

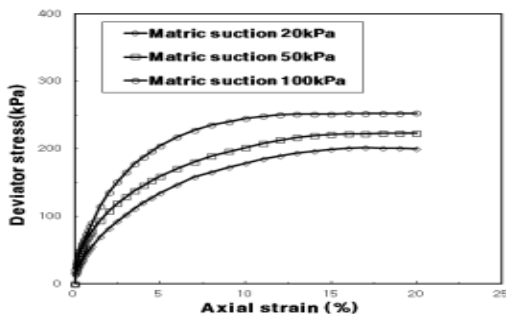


Fig. 6. Deviator stress vs. strain curves for triaxial tests

포화토 상태의 경우, 모관흡수력이 20, 50, 100kPa로 증가함에 따라 점착력이 각각 7.20, 14.1, 23.1kPa로 나타나 시료의 겉보기 점착력은 모관흡수력의 증가함에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 모관흡수력의 변화에 따른 겉보기 점착력의 변화를 나타낸다. 그림에서 보듯이 낮은 모관흡수력범위에서 모관

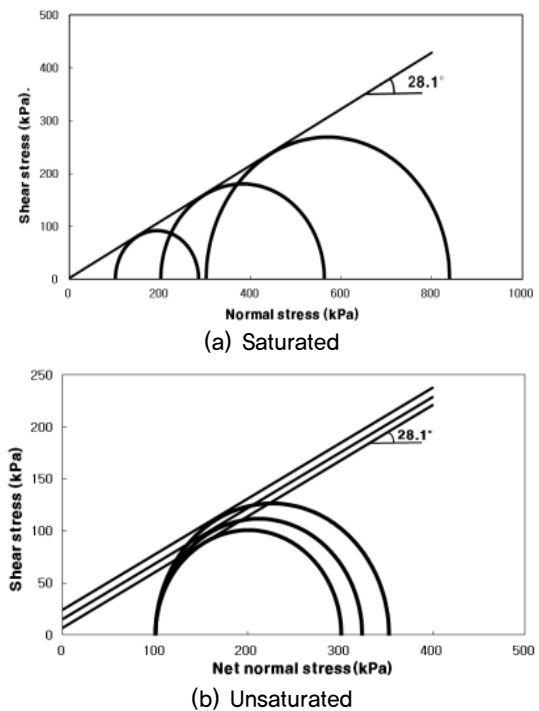


Fig. 7. Failure envelope projected on the τ vs $(\sigma - u_a)$

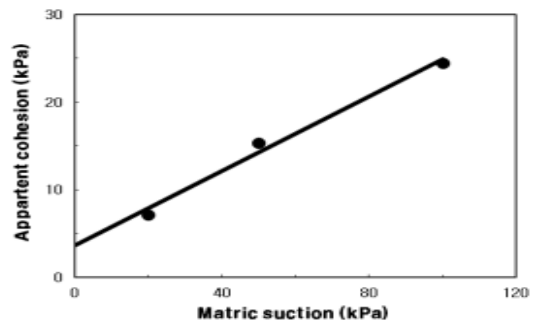


Fig. 8. Intersection line between the failure envelope and C_A vs $(u_a - u_w)$ plane

흡수력과 겔보기점착력의 선형적인 관계를 보여주고 있다. 겔 보기 마찰각(ϕ')은 모관흡수력에 따른 겔보기 점착력의 변화 기울기를 나타내는 흡수마찰각이므로 Fredlund et al.(1978)의 독립응력변수에 따른 불포화토의 전단강도 정의를 이용하여 불포화토의 강도정수인 ϕ' 을 구하였으며, 그 값은 11.1°로 나타났다.

4.2 직접전단시험결과

불포화의 직접전단시험으로 순 수직응력 100kPa일 때 모관흡수력 변화에 따른 전단응력-수평변위의 변화를 도시하면 Fig. 9와 같다. 결과에서 볼 수 있듯이 삼축압축시험의 결과와 마찬가지로 모관흡수력이 증가함에 따라 전단응력과 변형량이 증가하였다. 전단응력은 초기 변위 발생 시 급격하게 증가하는 형태를 가지며, 뚜렷한 최대값을 나타내지 않는 경화

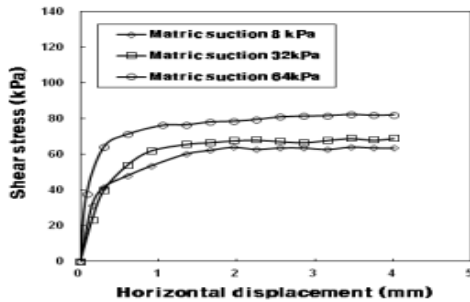


Fig. 9. Shear stress vs. horizontal displacement curves for direct shear tests

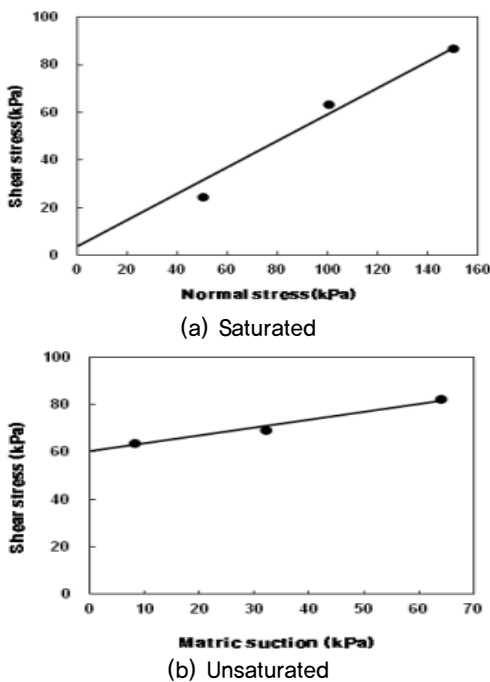


Fig. 10. Failure envelope from direct shear tests

현상에 따른 연성 파괴 형태를 보이기 때문에, 전단면적 10%의 변형률일 때 전단응력을 파괴 시 전단응력으로 일관되게 정의하였다.

Fig. 10(b)는 모관흡수력의 변화에 따른 전단응력의 변화를 나타낸 것으로 모관흡수력이 증가함에 따라 전단응력이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 이러한 결과는 흙이 건조 과정에 의하여 모관흡수력이 달라지면 점착력을 가지게 되어 전단강도가 증가한다는 것을 의미한다. 삼축시험결과와 마찬가지로 낮은 모관흡수력 범위에서 모관흡수력과 전단강도의 선형적인 관계를 보여주고 있다. 또한 모관흡수력-전단응력 관계에서 산정된 ϕ' 의 값은 15.1°이고, 포화토의 점착력(c'), 내부마찰각(ϕ')은 각각 3.64kPa, 29.1°로 나타났다.

4.3 전단강도 비교

동일한 현장조건의 시료를 대상으로 한 각각의 실험방법으로 산정된 불포화 전단강도를 비교분석하였다. 전단강도 비교 결과 전체적으로 개선된 직접전단시험을 통해 산정된 마찰각(ϕ')과 점착력(c') 및 겔보기 마찰각(ϕ')의 크기가 삼축압축시험을 통해 산정된 값보다 크게 나타났다.

Fig. 11(a)은 개선된 직접전단시험과 삼축압축시험을 통한 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 도시한 것으로 전체적으로 개선된 직접전단시험을 통해 산정된 전단강도가 삼축압축시험을 통한 전단강도보다 다소 큰 것을 알 수 있다. 또한, Fredlund

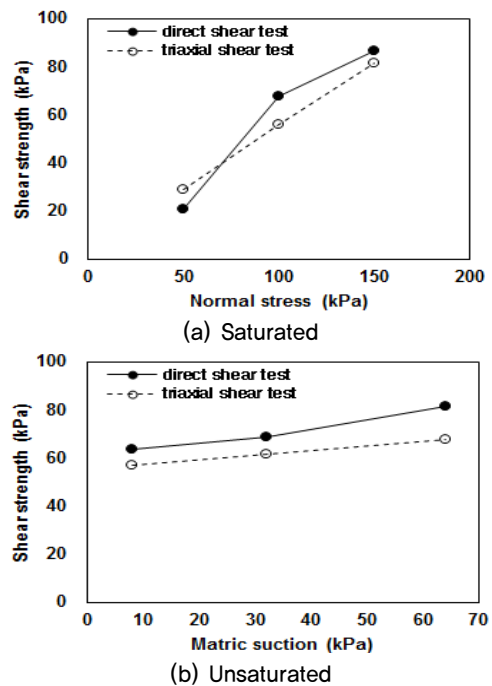


Fig. 11. Comparison of Shear strength

et al.(1978)가 정의한 불포화토의 전단강도를 산정한 결과를 Fig. 11(b)에 나타내었다. 동일한 모관흡수력에서 개선된 직접전단시험을 통해 산정된 전단강도가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 일반 직접전단시험기를 불포화 상태를 유지하며 전단시험이 가능하도록 Gan et al.(1988)이 제안한 방법으로 직접전단시험기를 개선하고, 개선된 직접전단시험기와 삼축 압축 시험기를 이용하여 포화토와 불포화토 전단시험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 불포화토 상태의 실험결과, 삼축압축시험의 겉보기마찰각 (ϕ^b)은 11.1° , 점착력(c')은 2.12kPa , 개선된 직접전단시험의 겉보기마찰각 (ϕ^b)은 15.1° , 점착력(c')은 3.64kPa 으로 분석되어, 전단상자의 구속효과가 있는 직접전단시험 전단강도 값이 삼축압축시험 보다 다소 크게 나타났다.
- (2) 동일한 현장의 시료에 대하여 두 종류의 실험방법에서 모관흡수력이 증가함에 따라 축차응력 및 전단응력이 증가하는 것은 겉보기 점착력의 증가로 인한 전단강도의 증가로 판단된다.
- (3) 두 종류의 실험결과, 모관흡수력이 낮은 경우에서 모관흡수력과 불포화토의 강도정수는 선형적인 관계를 나타내었다.
- (4) 실제 토석류 발생현장의 교란시료를 대상으로 개선된 직접전단시험기를 사용하여 불포화토의 전단강도 정수를 효과적으로 획득하므로써 개발된 시험장비의 실용성을 검증하였다.

References

1. Escario, V. and Saez, J. (1986), The Shear Strength of Partly Saturated Soils. *Geotechnique*, Vol.36, No.3, pp.453-456.
2. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978), The Shear Strength of Unsaturated Soils, *Can. Geotech. Journal*, Vol.15, No.3, pp.313-321.
3. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley and Sons, Inc., pp.228-235.
4. Gan, J. K. M., Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1988), Determination of The Shear Strength Parameters of On Unsaturated Soil using The Direct Shear Test, *Can. Geotech. Journal*, Vol.25, No.3, pp.500-510.
5. Kim, C. K. (2003), Characteristics of Stress-Strain Behaviour for Unsaturated Weathered Granite Soil, *KSCE*, Vol.23, No.3C, pp.177-184 (in Korean).
6. Kim, S. N., Park, C. W., Mok, Y. J. and Kim, S. M. (2005), Determination of Soil Water Characteristic Curve and Permeability Equation of Unsaturated Soils using Modified Triaxial Apparatus, *Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.5, pp.59-64 (in Korean).
7. Kwak, C. S., Yoo, K. S., Park, B. S. and Yoo, N. J. (2011), Development of Unsaturated Direct Shear Testing Apparatus, *Proceeding of Korean Geotechnical Society(KGS) Fall National Conference*, KGS, pp.266-274 (in Korean).
8. Lee, S. J., Lee, S. R. and Jang, B. S. (2002), Unsaturated Shear Strength Characteristics of Weathered Granite Soils, *KSCE*, Vol.22, No.1-C, pp.81-88 (in Korean).
9. Lim, S. Y. (2007), The Shear Characteristics of Unsaturated Sandy Soils, *Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.10, pp.57-64 (in Korean).
10. Oh, S. B., Lee, J. P., Kim, T. K. and Kwon, O. K. (2009), An Analysis of Stress-Strain Relationships of Unsaturated Soils Based on Bishop Stress, *KSCE*, Vol.29, No.4C, pp.175-182 (in Korean).
11. Rassam, D. W. and Williams, D. J. (1999), A Relationship Describing the Shear Strength of Unsaturated Soils, *Can. Geotech. Journal*, Vol.36, No.2, pp.363-368.
12. Taha, M. R., Hossain, M. K. and Mofiz, S. A. (2000), Shear Strength Behaviour of Unsaturated Granite Residual Soil, *Unsaturated soils for Asia. Proceedings of the Asian Conference on Unsaturated Soils, UNSAT-ASIA 2000, Singapore*, pp.575-580.
13. 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, *Can. Geotech. Journal*, Vol.33, No.3, pp.379-392.