

수침 및 교란 효과에 따른 풍화잔적토의 전단강도 특성

The Characteristics of Shear Strength on Weathered Residual Soils for the Effect of Soaking and Disturbance

오 세 봉^{*1}
Oh, Se-Boong

정 중 혁^{*2}
Chung, Jong-Hyuk

이 영 휘^{*3}
Lee, Young-Huy

Abstract

It is difficult to evaluate the shear strength of weathered residual soils because of the difficulties of undisturbed sampling. In this study, a sampling device, direct shear box with shoe, was developed in order to get undisturbed samples easily for direct shear tests, and undisturbed samples could be successfully obtained. Through direct shear tests on undisturbed samples, the shear strength was evaluated with the variation of saturated conditions. In order to consider the effect of disturbance on the shear strength, a static compaction device was developed, and then it was found that undisturbed samples show greater shear strengths than the disturbed ones under natural water contents and similar strengths to the ones under soaked conditions. Further, the shear strength evaluated from direct shear tests was compared with the result of triaxial tests on undisturbed samples, and soaked strengths of the former were similar to the latter. As the result of stability analyses on an actual failed slope, it was found that the shear strength can be evaluated reasonably using direct shear box with shoe.

*1 정회원, 영남대학교 공과대학 토목공학과 조교수

*2 (주) 하정엔지니어링

*3 정회원, 영남대학교 공과대학 토목공학과 교수

요 지

풍화잔적토는 불교란 시료를 채취하기가 곤란하기 때문에 전단강도를 산정하는데 있어서 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 직접전단시험용 불교란 시료를 용이하게 채취하기 위해서 슈 장착 직접전단상자를 개발 하였으며, 성공적으로 불교란 시료를 채취할 수 있었다. 채취된 불교란 시료의 직접전단시험을 통해서 포화조건에 따른 전단강도의 변화를 규명하였다. 그리고 교란에 따른 풍화잔적토의 전단거동을 규명하기 위해서 정적시료 성형장치를 제작하였고, 자연함수비 상태에서는 교란에 따른 강도저하가 나타나지만, 수침시에는 강도가 유사함을 확인하였다. 불교란 시료에 대해서 직접전단시험과 삼축압축시험의 강도를 비교한 결과, 직접전단시험시 수침시료의 강도가 삼축압축시험의 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 그리고 대상 붕괴사면에 대한 역해석을 수행한 결과, 슈 장착 직접전단상자를 이용하면 풍화잔적토 사면에서의 전단강도 산정이 가능하리라고 판단되었다.

Keywords : Eathered residual soil, Undisturbed sample, Shear strength, Soaking, Slope stability

1. 서 론

흙은 생성기원에 따라서 퇴적토(sedimentary soil)와 잔적토(residual soil)로 구분되어질 수 있는데, 그 중에서 암석의 풍화산물인 풍화잔적토는 풍화도에 따라서 암석에 가까운 것에서부터 토양에 이르기까지 여러 단계로 존재하며, 모암의 특성에 따라서 그 물리적, 역학적인 속성은 다양하게 변화한다. 우리나라의 암반은 주로 화성암과 변성암으로 구성되어 있으며, 조립질의 산성화성암인 화강암과 화강암이 변성작용을 받아 생성된 편마암이나 편암이 대부분을 차지하고 있다. 그러나, 대구·경북 지역은 국내지질 분포상 특이한 지역으로 중생대 백악기 및 신생대 3기의 퇴적암이 주를 이루며 구성되어 있다(김영수 등, 1995).

풍화잔적토는 흙 입자가 변질하여 취약하게 되면 통상적인 구속응력에 의한 압축변형 중에도 입자파쇄가 발생한다(박춘식 역, 1996). 또한, 풍화잔적토는 사질토와 점성토의 양면성을 지니고 있

어 투수성은 뛰어나지만, 입자가 변질되어 세립분이 증가하게 되면 점도와 같이 함수비에 따라서 큰 강도의 변화를 나타낸다. 특히, 침수의 영향으로 강도가 저하하는 경향을 보이는데, 응력수준이 낮은 과압밀 영역이나 풍화도가 큰 시료에서 뚜렷하게 나타난다(西田一彦, 1986). 이러한 풍화잔적토는 모암의 종류, 풍화도 및 현장조건 등에 따라서 다양한 형태로 존재하므로 불교란 시료의 채취 방법도 현장조건과 실험목적에 부합되는 방법이 사용되어야 할 것이다. 불교란 시료를 채취한 후에도 실내에서 적절한 형상으로 성형하는 과정에 있어서 여러 가지 제약을 받게 되므로 시험과정도 염두에 두고 채취방법을 결정하여야 할 것이다(권오순과 정충기, 1998).

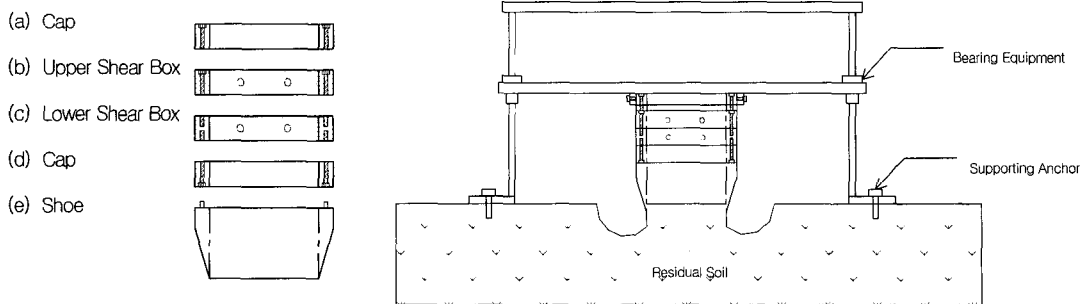
현재 국내에서는 풍화잔적토의 불교란 시료 채취방법으로 못 타설법(박병기 등, 1997), 동결법(고호성 등, 1995), 3중관 시료채취기(권오순과 정충기, 1998), 삼축시험용 불교란 시료채취기(이승래 등, 1997) 등이 사용되고 있다. 못 타설법과 3중

관 시료채취기는 상대적으로 풍화가 진행되지 않아서 조립질을 많이 함유하고 있는 경우의 시료를 원하는 형상으로 성형하기가 어렵다. 또한, 동결법은 동결과정에서의 체적팽창, 결정화 작용, 수압파쇄 등으로 시료의 교란이 우려된다(이승래 등, 1997).

본 연구는 대구·경북 지역에 널리 분포하는 퇴적암 상부의 풍화잔적토의 직접전단시험용 불교란 시료를 채취하는 기법과 직접전단시험을 통한 현장의 강도정수를 도출하는 방안에 초점을 두었다. 이를 위하여 직접전단상자에 슈(shoe)를 장착한 불교란 시료채취기를 개발하였고 성공적으로 직접전단시험용 시료를 채취할 수 있었다. 그리고 입자파쇄를 최소화하면서 교란시료를 재성형할 수 있는 정적시료 성형장치를 제작하여 포화조건에 따른 강도특성 뿐만 아니라 교란에 의한 전단강도의 변화를 고찰하였다. 또한, 동일한 장소에서 채취된 불교란 시료에 대해서 삼축압축시험과의 결과를 비교·분석하여 붕괴사면에 대한 안정 해석을 수행하였다.

2. 풍화잔적토 시료의 채취 및 성형

본 연구에서는 풍화잔적토의 불교란 시료를 보다 손쉽게 채취하기 위하여 다음과 같은 사항을 고려하였다. 첫째, 직접전단시험을 수행하기 위해서 정사각형의 단면형상을 가지는 불교란 시료의 채취가 가능하도록 한다. 둘째, 블록시료를 채취하는 과정에서 발생하는 응력이완(특히 수평응력)과 체적팽창을 최소화한다. 셋째, 시료의 운반 및 실험실에서의 성형과정에서 유발되는 교란요인을 제거한다. 따라서, 오세봉 등(1999)은 현장에서 직접전단상자로 풍화잔적토의 불교란 시료를 채취할 수 있는 불교란 시료채취기(슈 장착 직접전단상자)를 개발하였다. 그림 1 (a)에서 보여지는 바와 같이 전단상자는 상·하부에 캡(cap)을 연결한 후 최하부 선단에 슈(shoe)를 장착시켜 그림 1 (b)와 같이 지중에 관입시킬 수 있도록 설계되었다. 슈 장착 직접전단상자로 채취되는 불교란 시료의 크기는 60×60×24mm로 통상적인 직접전단시험용 시료와 동일하며, 기존의 직접전단시험기를 이용하여 시험을 수행할 수 있도록 하였다. 현장에서 직접 시료를 전단상자로 채취하므로 시료의 채취, 운반, 성형 과정에서 발생하는 교란요인을 대폭 감소시킬 수 있었다. 실험실로 운반된



(a) 슈 장착 직접전단상자의 구성 요소

(b) 불교란 시료 채취방법

그림 1. 슈 장착 직접전단상자를 이용한 불교란 시료 채취법

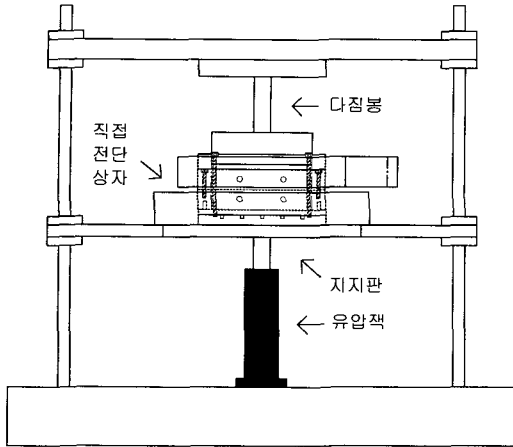


그림 2. 정적시료 성형장치

시료는 그림 1 (a)의 전단상자 부분을 트리밍하고, 따로 제작된 전단프레임을 결합시킨 후 직접전단 시험기 내에 장착한다.

교란시료를 실내에서 재성형하여 강도시험을 수행할 경우에 시료의 단위중량과 입도분포는 전단강도에 큰 영향을 끼친다. 이 때, 과도한 동적다짐을 적용하게 되는 경우에는 입자파쇄가 일어날 우려가 있다. 따라서, 본 연구에서는 입자파쇄를 최소화하며 교란시료를 재성형하기 위해서 그림 2와 같은 정적시료 성형장치를 제작·사용하였다. 정적시료 성형장치는 현장 함수비와 단위중량을 조절하여 시료를 성형한다. 정적시료 성형장치의 다짐방법은 부록에 상세히 기술하였다.

3. 시험 계획

본 연구에서 사용된 시료는 경상북도에 위치한 도로공사 현장 내에 조성중인 절취사면의 풍화잔적토층을 대상으로 하였다. 대상 절취사면은 상부로부터 풍화잔적토, 풍화암, 연암으로 이루어져 있으며, 연암층은 주로 적색 사암과 역암이 주를 이루고 있다. 따라서, 상부토층에 존재하고 있는 풍화잔적토와 풍화암은 하부의 퇴적암이 풍화되

어 생성된 것으로 보여진다. 그림 3은 대상 절취사면의 횡단면도이다. 대상사면은 1 : 0.5의 구배로 설계되어 계획고가 약 35m 였지만 25m 정도를 절개하였을 때, 상부의 풍화잔적토와 풍화암층을 중심으로 강우로 인한 수차레의 사면활동이 발생하였다. 그리고 후사면에서는 약 5~10m 정도의 인장균열이 발생하였다. 현장답사를 통해서 채취된 풍화잔적토층의 교란시료에 대해서 기본적인 물성시험을 실시하였으며, 그 결과를 표 1에서와 같이 나타내었다.

대상 절취사면의 풍화잔적토는 통일분류법 (USCS)상으로 점토질 모래인 SC로 분류되었다. 입도분포곡선은 그림 4에서 제시한 바와 같다. 풍화잔적토의 전단시 입자파쇄에 따른 입도분포의 변화양상을 알아보기 위해서 직접전단시험이 종료된 시료를 노건조시켜 입도시험을 수행하였다. 일반적으로 전단시험 전후의 입도분포곡선은 거의 유사하였으나, 입경이 0.4mm 보다 작은 경우에는 전단시의 입자파쇄로 인하여 다소 입도가 감

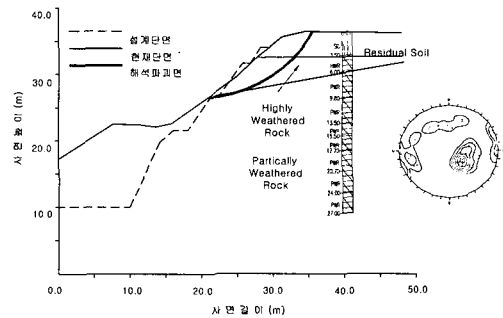


그림 3. 대상 절취사면의 횡단면도

표 1. 풍화잔적토의 기본물성

비 중 (G_s)	2.69
통일분류법 (USCS)	SC
액성한계 (LL, %)	26.6
소성한계 (PL, %)	16.1

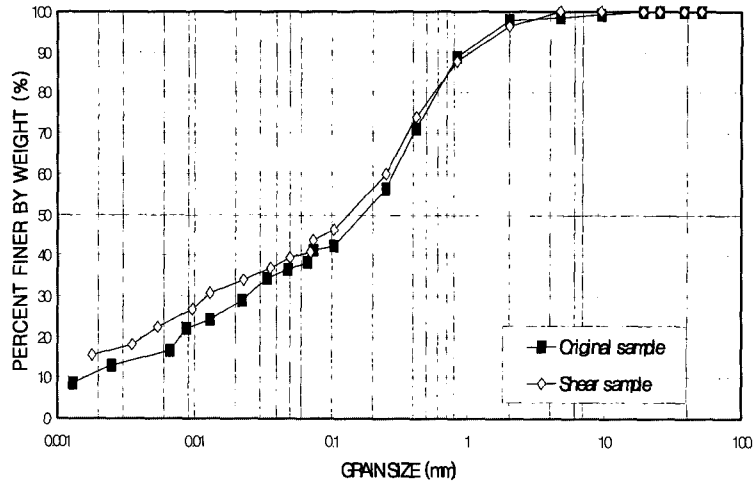


그림 4. 풍화잔적토의 입도분포곡선

소하는 것을 알 수 있다.

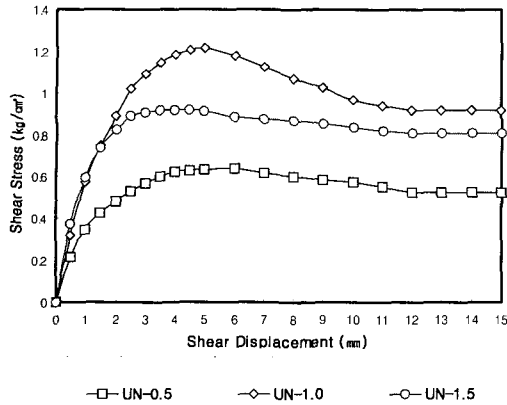
직접전단시험시 간극수압이 유발되지 않는 조건하에서 배수시험을 실시하기 위해서는 전단속도를 조절하여야 한다. Gibson과 Henkel(1954)은 배수조건에 필요한 파괴시간(t_f)을 $t_f = 12.7 t_{100}$ 으로 결정하였다. δ_f 를 침투강도시의 수평변위라 할 때, 직접전단시험시 전단속도는 δ/t_f 보다 작아야 한다. 현장에서 압밀링으로 시료를 채취하여 압밀시험을 실시한 결과, 압밀이 100%에 도달하

는데 걸리는 시간은 약 1.5분이었다. 전단시험시 파괴시간(t_f)은 약 19분이었고, 파괴시 수평변위가 2~3mm이므로 전단속도는 0.1~0.16mm/min보다 작아야 한다. 이에 본 연구에서는 전단속도를 0.065mm/min으로 결정하였다.

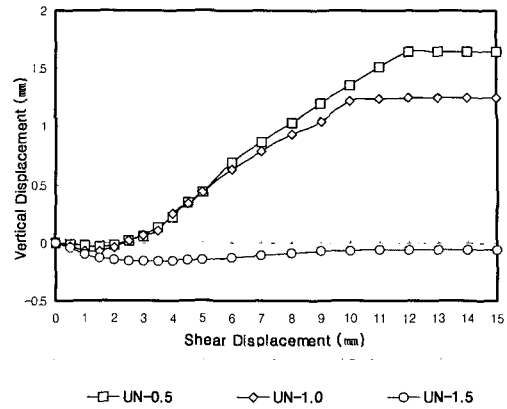
풍화잔적토의 비교란 시료에 대해서 건기 및 유기질의 전단강도를 도출하기 위하여 자연함수비 및 수침 조건으로 구분하여 시험을 수행하였다. 수침시료의 경우에는 포화, 압밀, 전단의 과정으

표 2. 비교란 시료의 직접전단시험 조건과 구속압

구 분	w_n (%)	γ_t (t/m^3)	e_0	시험 조건 및 구속압
UN-0.5	20.54	1.70	0.91	자연함수비, 0.5 kg/cm ²
UN-1.0	20.78	1.89	0.72	자연함수비, 1.0 kg/cm ²
UN-1.5	26.76	1.81	0.88	자연함수비, 1.5 kg/cm ²
US-0.5	21.93	1.62	1.02	수침, 0.5 kg/cm ²
US-0.7	12.86	1.67	0.82	수침, 0.7 kg/cm ²
US-1.0	20.0	1.79	0.81	수침, 1.0 kg/cm ²
US-1.5(a)	11.72	1.69	0.78	수침, 1.5 kg/cm ²
US-1.5(b)	10.92	1.64	0.82	수침, 1.5 kg/cm ²
평 균	18.2	1.73	0.85	-



(a) 전단응력-수평변위 관계



(b) 수직변위-수평변위 관계

그림 5. 자연함수비 상태에서 불교란 시료의 전단 및 변형 특성

로 직접전단시험을 수행하였다. 이 때 포화단계에서는 전단상자 부분을 트리밍하여 프레임에 장착한 후 직접전단시험기의 캡(0.013 kg/cm²)을 올려 놓고, 포화도가 95% 이상이 되도록 수조에서 24시간 수침시켰다(오세봉 등 1999). 시료에서 발생한 팽창량은 따로 측정하지는 않았으나 육안으로 관찰한 결과 무시할 수 있을 정도로 미미하게 발생하였다. 압밀과정은 일정한 수직하중하에서 연직변위가 더 이상 발생하지 않는 시점까지 충분히 이루어졌다.

표 2에는 풍화잔적토의 불교란 시료에 대한 직접전단시험 조건 및 구속압을 요약하였다. 현장답사를 통해서 채취된 불교란 시료는 자연함수비가 18.2%, 단위중량이 1.73t/m³, 초기간극비가 0.85의 평균치를 나타내고 있다. 특히, 불교란 시료들의 단위중량과 초기간극비는 대체로 유사한 값을 나타내고 있다.

4. 풍화잔적토의 전단특성

4.1 불교란 풍화잔적토의 직접전단시험 결과

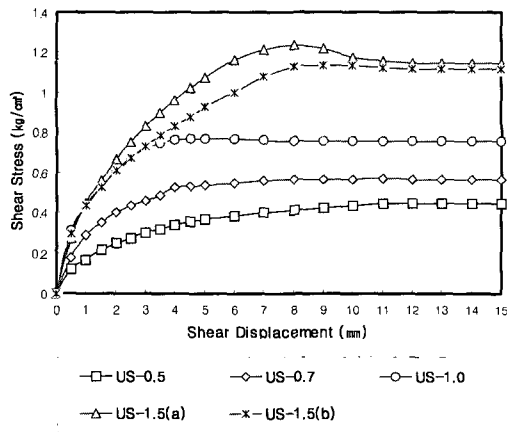
자연함수비 상태의 불교란 시료에 대해서 직접전단시험을 실시한 결과를 그림 5에 나타내었다. 일반적으로 구속응력이 증가할수록 전단강도는 증가하며, 체적은 수축하는 경향을 나타내고 있다. 그림 5(a)에서 보여지는 바와 같이, 구속압이 큰 UN-1.5가 UN-1.0보다 작은 전단응력을 나타냈다. 표 2에서 보여지듯이 UN-1.5시료는 여타 시료에 비하여 자연함수비가 크게 나타나는 데, 뚜렷한 이유는 알 수 없지만 시료의 채취 및 성형과정에서 교란이 일어난 것으로 여겨진다. 그리고 그림 5(b)에 나타난 연직변위의 양상은 구속압이 증가할수록 팽창이 감소하는 경향을 보이고 있다. 1.5 kg/cm² 인 경우에는 파괴시 수직변위가 압축변위로 나타났지만 시료의 상태가 불량하여 불교란 시료의 실제 거동을 반영한다고 보이지는 않는다.

그림 6은 불교란 시료를 24시간 수침시켜 압밀한 후 직접전단시험을 수행한 결과이다. 예비시료에 대해서 24시간 수침한 후의 포화도를 측정해 본 결과 95% 이상으로 포화상태임이 확인되었고, 72시간 수침 후의 포화도와 비교해 본 결과 수침상의 큰 차이는 없었다. 전단응력은 최대응력과 잔류응력이 유사하거나 일치하였으며, 전단에 따

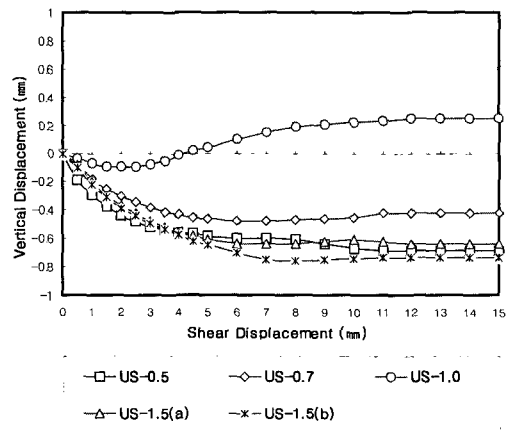
른 체적은 대체적으로 압축이 일어났다. 그림 5의 자연함수비 상태의 거동과 비교하여 볼 때, 수침 시료는 취성이 저하되고 연성적인 거동을 나타내었다. 그림 6 (b)의 US-1.0 시료의 경우에서만 체적팽창이 발생하였으며, 전단시험결과의 전반적인 경향과 어긋나는 것으로 미루어보아 시료가 교란된 상태로 판단된다.

또한, 동일한 장소에서 채취된 불교란 시료에

대해서 동일조건으로 직접전단시험을 수행하였을 때, 그 거동이 일치하여야 개발된 수장착 직접전단상자의 성능이 검증될 수 있다. 본 연구에서는 24시간 수침된 각각의 불교란 시료에 대해서 동일한 수직하중(1.5 kg/cm^2)으로 압밀한 후 직접전단시험을 수행하였다. 그림 6 (b)에서 보여지듯이 두 시료의 거동이 거의 일치하였으며, 다만 US-1.5(a) 시료의 경우에 최대 전단응력이 다소

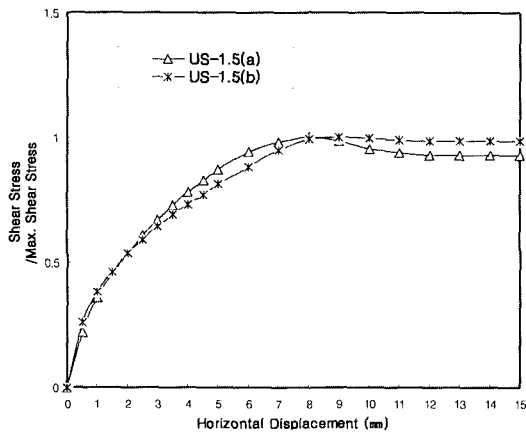


(a) 전단응력-수평변위 관계

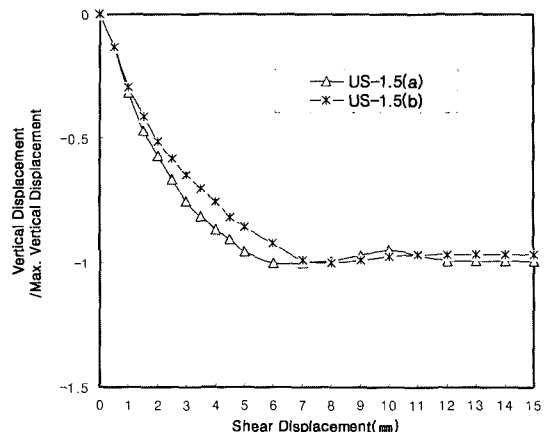


(b) 수직변위-수평변위 관계

그림 6. 수침상태에서 불교란 시료의 전단 및 변형 특성



(a) 표준화한 전단응력-수평변위 관계



(b) 표준화한 수직변위-수평변위 관계

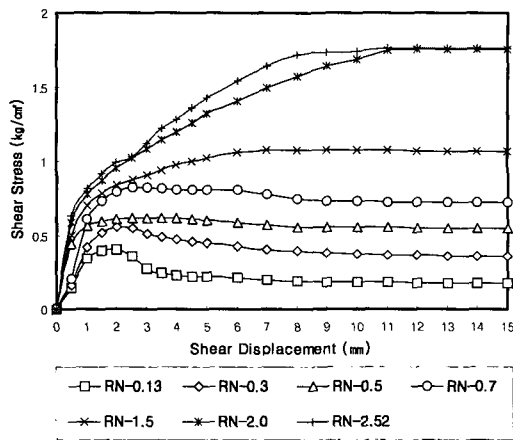
그림 7. 불교란 시료의 반복성 시험

크고 최대 수직변위가 작게 나타났다. 이는 표 2에서 나타나듯이 초기간극비가 다소 작기 때문에 나타나는 미소한 차이로 여겨진다. 보다 자세한 분석을 위해서 그림 7 (a) 및 (b)에서 최대 전단응력과 최대 수직변위로 y축을 표준화하여 나타내었으며, 각각 발생하는 수평변위가 거의 일치함을 알 수 있다. 이로부터 슈 장착 직접전단상자를 이

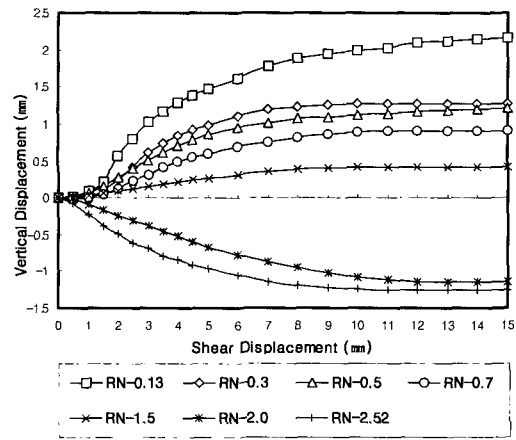
용하여 불교란 시료를 성공적으로 채취할 수 있었고, 직접전단시험의 반복성(repeatability)을 확보할 수 있었다고 판단하였다.

4.2 교란 풍화잔적토의 직접전단시험 결과

시료의 동일성을 기하기 위해서 슈 장착 직접전

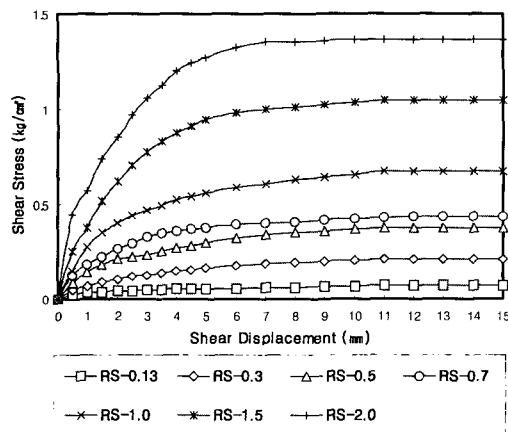


(a) 전단응력-수평변위 관계

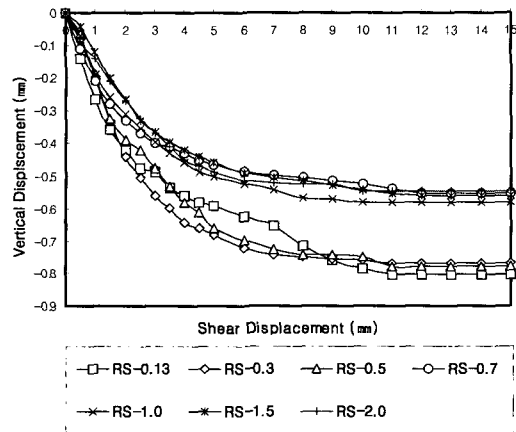


(b) 수직변위-수평변위 관계

그림 8. 자연함수비 상태에서 교란시료의 전단 및 변형 특성
(단, RN은 교란시료의 자연함수비 상태 전단을 의미하며 각 시료의 숫자는 연직응력을 의미함)



(a) 전단응력-수평변위 관계



(b) 수직변위-수평변위 관계

그림 9. 수침상태에서 교란시료의 전단 및 변형 특성
(단, RS는 교란시료의 수침상태 전단을 의미하며 각 시료의 숫자는 연직응력을 의미함)

단상자의 슈 부분 내에 있는 시료를 노건조하여 재성형시료로 사용하였다. 노건조된 시료에 대해서 가수하여 현장 함수비(18.2%) 조건으로 맞추고, 정적시료 성형장치를 사용하여 입자파쇄를 최소화하면서 현장 단위중량($1.73t/m^3$)으로 재성형하였다. 시험방법 및 전단속도는 불교란 시료의 시험조건과 동일하다. 자연함수비 상태에서의 교란시료에 대해서 직접전단시험을 실시한 결과를 그림 8에서 나타내었다. 응력수준이 낮은 경우에는 변형을 연화거동을 보이며, 체적은 팽창하는 경향을 나타내었다.

그림 9에서는 교란시료에 대해서 24시간 수침시켜 압밀한 후 직접전단시험을 실시한 결과를 보여준다. 대체로 불교란 시료의 수침상태와 비슷한 연성거동을 보인다. 그리고 그림 8에 나타난 자연함수비 상태의 교란시료에 비하여 낮은 응력수준에서도 전단응력과 체적변화가 연성거동을 뚜렷하게 나타내고 있다.

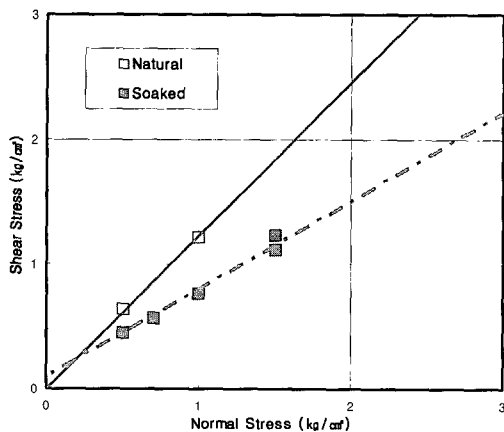
4.3 포화 조건에 따른 변화

불교란 풍화산적토의 자연함수비 상태에서의

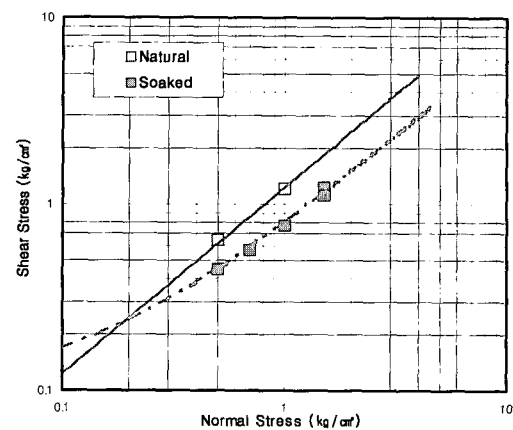
침투강도와 수침시 침투강도를 그림 10에서 비교하여 나타내었다. 자연함수비 상태에서의 조건과 비교해 볼 때, 수침시의 내부마찰각이 약 30% 정도 감소하였고, 이러한 강도에 대한 $\tau-\sigma$ 관계도를 대수축으로 치환함으로써 수침에 의한 강도의 저하현상을 보다 확연히 나타낼 수 있다. 불교란 시료의 양이 부족하여 자연함수비 상태에서는 많은 시험을 할 수 없었고, 앞절에서 논의하였듯이 구속응력이 $1.5kg/cm^2$ 인 경우에는 시험결과가 전체적인 경향과 어긋나게 나타나서 2점만으로 파괴규준을 정의할 수밖에 없었다. 그러나, 추가답사를 통하여 부근의 시료를 채취하여 직접전단시험을 한 결과, 그림 10에 나타난 자연함수비 상태의 파괴규준이 적합함을 확인할 수 있었다(오세봉 등 1999).

한편, 그림 11에서는 자연함수비 상태 및 수침시 잔류강도를 비교하여 나타내었는데, 수침에 의한 강도의 저하현상이 침투강도에 비하여 뚜렷하게 나타나지는 않았다. 대체적으로 침투 및 잔류강도의 파괴규준은 Mohr-Coulomb의 직선적인 파괴규준을 잘 따르고 있음을 알 수 있다.

교란시료에 대해서 현장 함수비(18.2%)와 단위

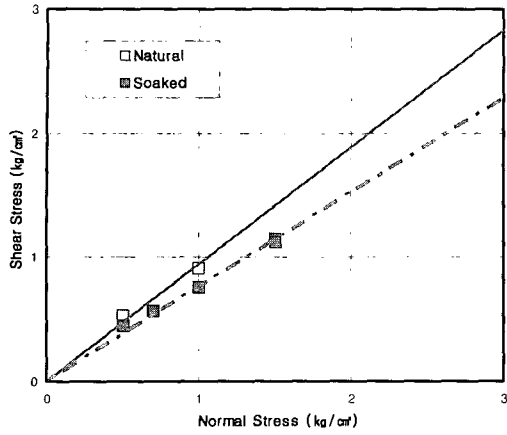


(a) 실응력축

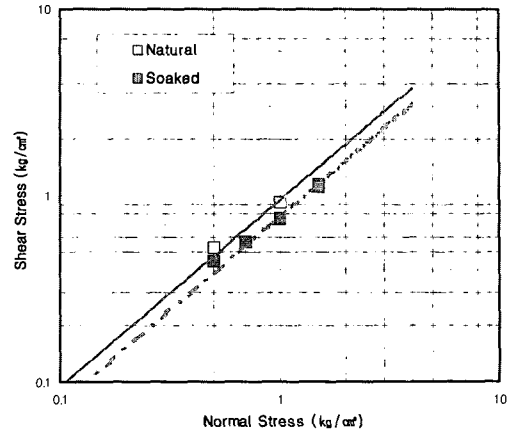


(b) 대수응력축

그림 10. 포화 조건에 따른 불교란 시료의 침투강도의 변화

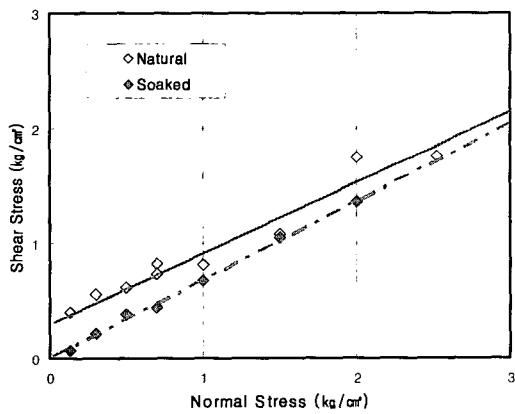


(a) 실응력축

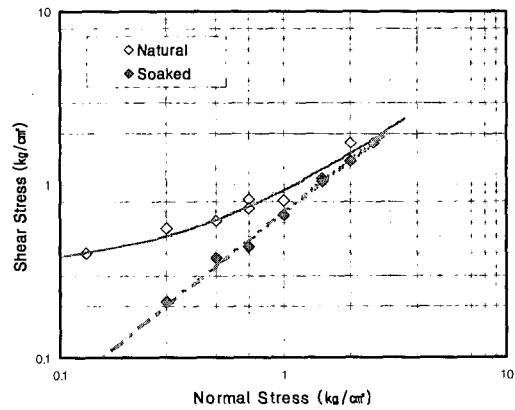


(b) 대수응력축

그림 11. 포화 조건에 따른 불교란 시료의 잔류강도의 변화



(a) 실응력축



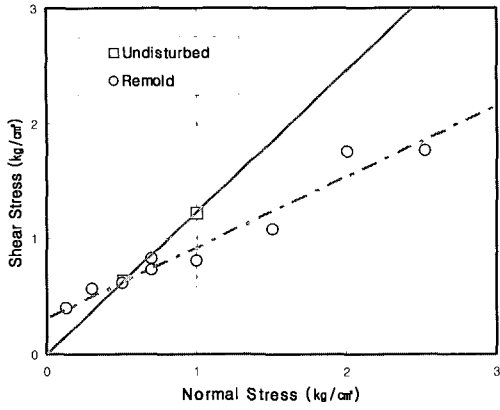
(b) 대수응력축

그림 12. 포화 조건에 따른 교란시료의 침투강도의 변화

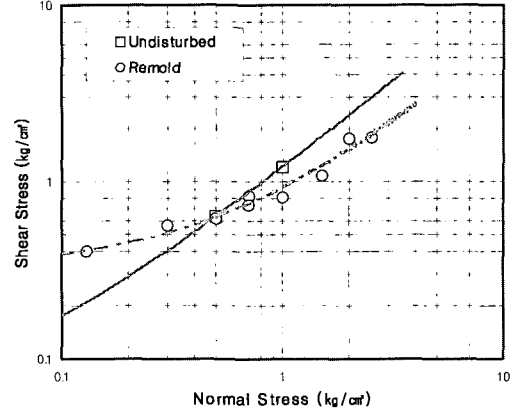
중량(1.73t/m³)의 조건으로 재성형된 시료에 대한 포화 조건에 따른 침투강도의 변화를 그림 12에 나타내었다. 응력수준이 낮은 경우(연직응력 약 1kg/cm² 이하)에는 수침으로 인하여 강도가 뚜렷이 저하하였으나 응력수준이 높은 경우에는 뚜렷하지 않았다.

4.4 교란효과에 따른 변화

그림 13에서는 자연함수비 상태에서 교란에 따른 침투강도의 변화양상을 보여주고 있다. 불교란 시료의 자료 양이 부족하여 응력수준이 낮은 영역에 대한 비교는 불가능한 상태이지만, 그림 13(b)에서 보여지듯이 연직하중이 약 0.7kg/cm² 이상

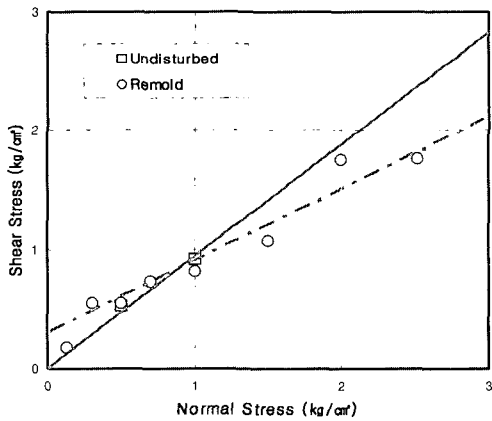


(a) 실응력축

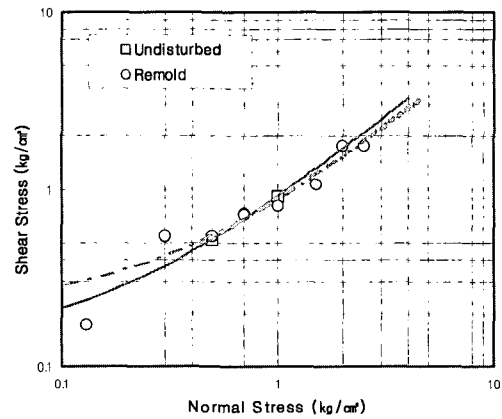


(b) 대수응력축

그림 13. 교란효과에 따른 침투강도의 변화(자연함수비 상태)



(a) 실응력축



(b) 대수응력축

그림 14. 교란효과에 따른 잔류강도의 변화(자연함수비 상태)

인 경우에 대하여 강도의 저하현상이 뚜렷이 나타나고 있다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 응력수준이 낮은 경우에 불교란 시료의 전단강도는 그림 13 (a)에서 정의된 파괴규준보다 클 것으로 판단된다.

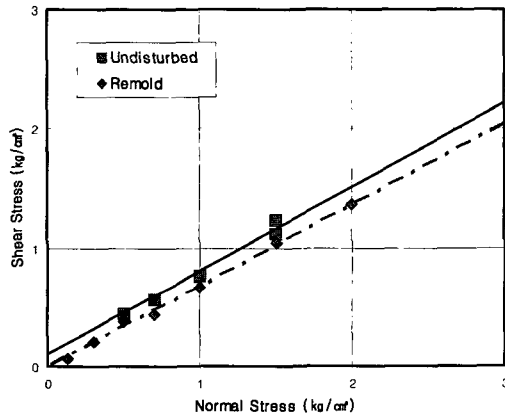
또한, 그림 14 (a)에는 불교란 시료와 교란시료의 잔류강도를 비교하였다. 그림 14 (b)에서 보여지듯이 침투강도의 경우와는 달리 대상시료의 경

우에는 교란에 따른 잔류강도의 변화는 크게 일어나지 않았다.

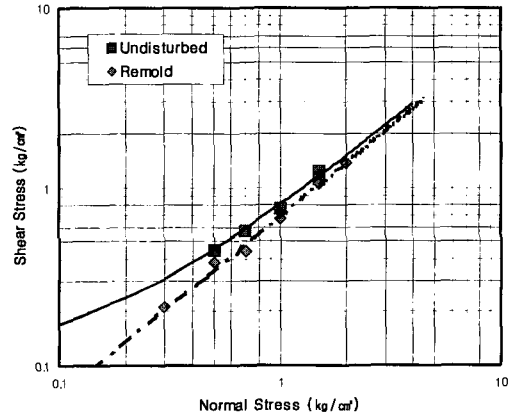
수침상태에서 교란에 따른 침투강도의 변화양상을 그림 15 (a) 및 (b)에서 나타내었는데, 강도의 저하현상이 다소 나타났으나 뚜렷하지는 않음을 알 수 있다. 이로부터 수침시의 거동에 대해서는 불교란 및 교란 시료의 전단강도가 대상시료에 대해서는 매우 유사함을 알 수 있다. 수침시 거동은

표 3. 직접전단시험 결과에 의한 강도정수

구 분		점착력 (c, kg/cm ²)	내부마찰각 (ϕ , °)	결정계수 (R ²)	
불교란 시료	침두 강도	자연함수비 상태	0.0	50.8	0.99
		수침상태	0.1	35.2	0.98
	잔류 강도	자연함수비 상태	0.0	43.3	0.95
		수침상태	0.0	37.4	0.99
교란 시료	침두 강도	자연함수비 상태	0.3	32.7	0.93
		수침상태	0.0	34.5	0.99
	잔류 강도	자연함수비 상태	0.3	31.9	0.91
		수침상태	0.0	34.5	0.99



(a) 실응력축



(b) 대수응력축

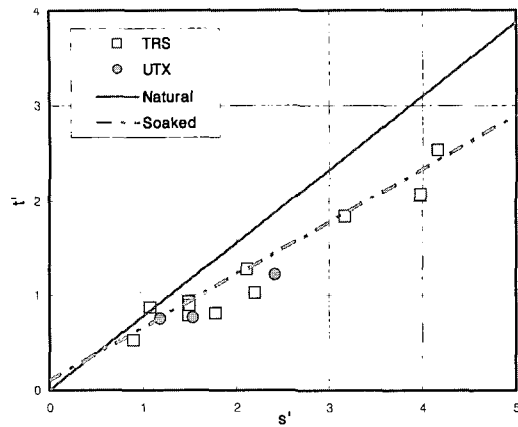
그림 15. 교란효과에 따른 침두강도 변화(수침상태)

대체로 연성을 나타내고 있어서 잔류강도도 그림 16과 거의 유사한 결과를 나타냈다. 불교란 및 교란 시료의 강도정수를 표 3에 정리하였다.

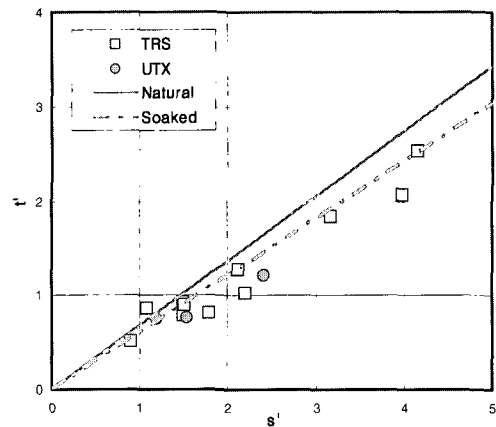
5. 삼축압축시험과의 결과 비교 및 대 상 붕괴사면의 안정해석

직접전단시험용 불교란 시료를 채취한 동일한 장소에서 3중관 시료채취기(TRS)와 이승래 등(1997)에 의하여 개발된 삼축압축시험용 불교란 시료채취

기(UTX)로 불교란 시료를 채취하여 삼축압축시험을 실시하였다. 직접전단시험과 삼축압축시험의 결과를 비교·분석하기 위하여 그림 16에서 s' - t' 관계상에 직접전단시험의 결과치를 나타내었으며 $s' = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$, $t' = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ 이다. 직접전단시험 결과는 s' - t' 관계상에 직접 나타낼 수 없으므로 회귀분석결과 나타난 점착력과 마찰각으로부터 절편과 기울기를 환산하여 그림 16에 자연함수비조건 결과(natural)와 수침조건 결과(soaked)를 직선식으로 나타냈다.



(a) 침투강도



(b) 잔류강도

그림 16. 직접전단시험 및 삼축압축시험 결과 비교

그림 16에서 보여지는 바와 같이 TRS 시료에 대한 삼축압축시험결과 나타난 풍화잔적토층의 전단강도는 동일한 시추공에서 채취하였음에도 불구하고 채취한 시료의 초기상태에 따라 자료의 분산이 심하게 일어나고 있다. 그리고 UTX 시료는 본 연구의 시료채취법과 유사하게 지표부근에서 삼축시험용 시료를 채취한 것으로 여타 시험결과에 비하여 다소 낮은 강도를 나타내고 있다. 이러한 시험결과는 잔적토층 시료가 채취 및 성형과정에서 교란이 발생하거나 채취지점에 따라 균질하지 못하여 발생한 것으로 여겨지며, 대상 지층의 전단강도는 하나의 값이라기 보다는 주어진 범위 내에서 규정될 수 있는 양으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림에도 불구하고 삼축시험결과를 기준으로 하여 본 연구의 직접전단시험결과를 비교할 목적으로 평균적인 강도정수를 도출한 결과 삼중관 시료채취기로 채취한 시료(TRS)는 점착력과 마찰각이 0.05 kg/cm^2 , 33.4° 이었으며 UTX 시료는 0.23 kg/cm^2 , 24° 이었다.

직접전단시험 결과, 자연함수비상태에서는 강도가 과대평가되었고 수침상태에서의 침투 및 잔류 강도가 삼축압축시험 결과와 유사한 경향을 나

타내고 있음을 알 수 있다. 다만, 이러한 직접전단 시험 결과는 대체로 삼축시험결과 중 다소 크게 나타난 전단강도를 따르고 있는데, 이는 직접전단 시험이 평면변형을 조건, 배수상태에서 강제된 파괴면에서 전단강도를 구하기 때문으로 판단된다. 이러한 결과를 미루어 볼 때 수 장착 직접전단상자를 이용하여 풍화잔적토의 불교란 시료를 채취한 후 수침상태에서의 직접전단시험을 수행하면 강도정수를 합리적으로 산정할 수 있음을 알 수 있다.

대상 절취사면에 대해서 평사투영해석을 실시한 결과, 그림 3에서 보여지는 바와 같이 하부의 연암층에서는 파괴의 징후가 나타나지 않았다. 한편, 상부의 풍화잔적토층과 풍화암층을 중심으로 원호활동 파괴가 발생하여 대상 절취사면에 대한 한계평형해석을 실시하였다. 풍화잔적토층과 풍화암층의 현장 단위중량은 각각 1.73 t/m^3 , 1.90 t/m^3 이고, 전단강도는 동일하다고 가정하였다.

붕괴사면의 안전율(F_s)이 1.0일 때의 강도정수를 역해석하여 그림 17에 나타내었다. 풍화잔적토 사면의 수압조건은 구하기가 어려워서 간극수압비(r_u)가 각각 0.2, 0.3, 0.4인 경우에 대하여 마찰각

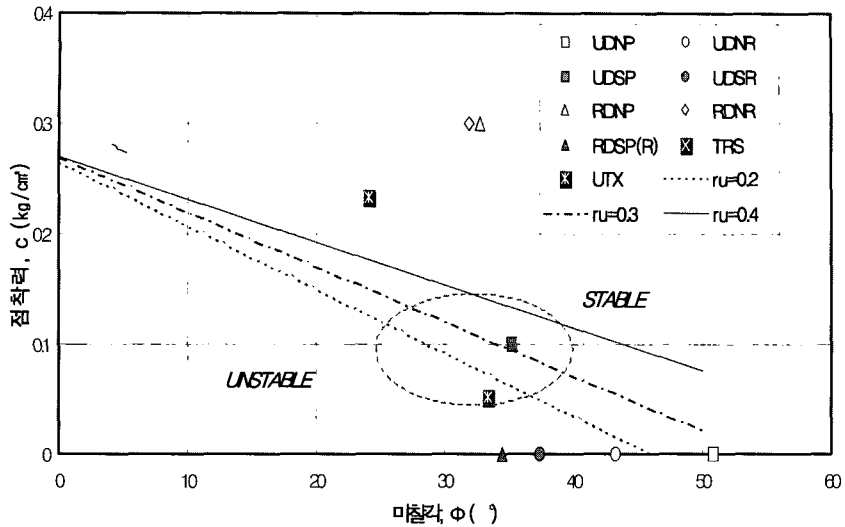


그림 17. 안전율이 1.0 일 때 마찰각에 따른 점착력
 (단, 첫문자 U는 불교란 시료, R은 교란시료를 가리키며 D는 직접전단시험 결과를 의미함, N은 자연함수비 상태, S는 수침상태 전단시험 결과이며, P는 침투강도, R은 잔류강도를 의미함)

에 상응하는 점착력을 구할 수 있었다. 이러한 안전율 곡선을 경계로 상부영역은 안정상태를 나타내며, 하부영역은 불안정한 상태이다. 대상사면이 붕괴시에 이론적 안전율 1.0을 나타낸다고 고려하면, 강도정수는 대략적으로 그림 17에 나타낸 타원부 내에 포함될 것이다. 대상사면에서 구한 전단강도 정수들을 그래프에 함께 나타낸 결과, 불교란 수침시료에 대한 직접전단시험시 침투 강도 정수 및 3중관 시료채취기로 채취한 불교란 시료의 삼축압축시험의 강도정수가 실제지반의 강도정수를 합리적으로 산정할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구는 퇴적암을 모암으로 하는 풍화잔적토 현장에서 불교란 및 교란 시료를 채취한 후 포화 조건에 따라서 직접전단시험과 삼축압축시험을 실시하여 다음과 같은 성과 및 결론을 얻었다.

1) 풍화잔적토의 직접전단시험용 불교란 시료를

채취하기 위해서 직접전단상자에 슈(shoe)를 장착한 불교란 시료채취기(슈 장착 직접전단상자)를 개발·제작하였다. 이를 이용하여 직접전단시험용 불교란 시료를 성공적으로 채취할 수 있었다. 대상 절취사면의 풍화잔적토는 모암을 퇴적암으로 하는 점토질 모래인 SC로 분류되었다.

2) 직접전단시험용 불교란 시료채취기의 성능평가를 위해서 동일한 장소에서 채취된 불교란 시료를 동일 조건하에서 직접전단시험을 수행하여 시험결과의 반복성을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 채취된 풍화잔적토의 불교란 시료의 직접전단시험을 통해서 포화조건에 따른 전단강도의 변화를 규명할 수 있었는데, 자연함수비와 수침 상태를 비교한 바 잔류강도는 유사하나 수침시의 침투강도가 약 30% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

3) 교란에 따른 풍화잔적토의 전단거동을 규명하기 위해서 입자파쇄를 최소화하면서 교란시료

의 성형이 가능한 정적시료 성형장치를 제작하였다. 대상시료의 전단강도는 자연함수비 상태에서는 교란에 따른 강도저하가 나타나지만, 수침시에는 강도가 유사함을 확인하였다.

4) 불교란 시료의 직접전단시험과 삼축압축시험(CU)과의 결과를 비교하였다. 그 결과 수침상태에서 직접전단시험시 침투 및 잔류 강도가 삼축압축시험 결과(TRS시료)와 유사한 경향을 나타내었다. 그리고 대상 붕괴사면에 대한 역해석을 수행한 결과 슈 장착 직접전단상자로 채취한 불교란 시료로 직접전단시험을 수행하면, 풍화잔적토 사면에서의 전단강도 산정이 가능하리라고 판단되었다.

추후 풍화잔적토의 불교란 시료에 대해서 압밀시험과 직접전단시험을 연속적으로 수행하여 압축성과 전단강도와의 관계를 규명하고, 다양한 국내 풍화잔적토층을 대상으로 지속적인 자료의 축적이 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 건설교통부 건설기술연구개발사업(과제번호 97007-1)에 의하여 연구비를 지원받았으며, 이에 깊은 감사를 드립니다. 또한, 시료채취장비의 개발과 삼축압축시험용 불교란 시료의 채취에 많은 도움을 준 한국과학기술원 토목공학과 정순용 박사과정께 깊은 사의를 표합니다.

참고 문헌

1. 고희성, 임종철, 박성재(1995), "잔적토의 실내시험법 개발과 역학적 특성에 관한 연구", 대한토목학회 학술 발표회 논문집(Ⅲ), pp. 155~158.
2. 권오순, 정충기(1998), "풍화에 따른 풍화토의 특성변화", 한국지반공학회지, 第 14 卷, 第 5 號, pp. 53~66.
3. 김영수, 이상복, 정성관(1995), "퇴적암 풍화토의 공학적 특성", 한국지반공학회지, 第 11 卷, 第 4 號, pp. 63~74.

4. 박병기, 강병선, 이강일, 이광찬, 임은상(1997), "화강토의 전단강도 및 변형특성", 한국지반공학회지 第 13 卷, 第 4 號, pp. 177~198.
5. 박춘식 譯(1996), 풍화토의 특성, 도서출판 엔지니어스.
6. 이승래, 김동수, 정순용, 권기철(1997), "화강풍화토의 거동특성 규명을 위한 비교란 시료채취기 개발", 한국지반공학회지, 第 13 卷, 第 6 號, pp. 13~23.
7. 오세봉, 이영휘, 정종혁(1999), "불교란 풍화잔적토의 직접전단시험", 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 423~430.
8. 西田一彦, 青山千彰(1981), "亂さない不飽和まさ土のせん断強度特性", 土の基礎, No. 1243, pp. 35~40.
9. 西田一彦, 青山千彰(1984), "物理強度特性からみた亂さないまさ土の分類", 土木學會論文集, 第 352 號, III-2, pp. 159~168.
10. 西田一彦, 青山千彰(1991), "風化殘積土の特性と工學的問題", 土の基礎, 小特集: 風化土, Vol. 39, No. 6, No. 401, pp. 1~8.
11. Blight, G.E. (1997), Mechanics of Residual soils : A guide to the formation, classification and geotechnical properties of residual soils, with advice for geotechnical design, A.A. Balkema.
12. Gibson, R.E. & Henkel, D.J. (1954), "Influence of duration of tests at constant rate of strain on measured 'drained' strength," Geotechnique 4(1), pp.6~15.

부 록

노건조된 시료에 대하여 가수를 하여 현장 함수비 및 현장단위중량의 조건으로 시료를 성형한다. 3층으로 나누어 다지고자 할 경우에 한 층의 시료는 무게비로 계산하여 전체의 1/3로 한다. 본 연구에서는 현장에서의 단위중량이 낮아 정적인 단층 습윤다짐법으로 시료를 성형하였다.

1. 정적시료 성형장치의 지지판 위에 조립된 직접전단상자를 놓고, 한 층분의 시료를 전단상자 안에 넣는다.
2. 다짐봉이 직접전단상자 안으로 위치하도록 한다.
3. 다짐봉에 표시된 일정한 높이까지 유압잭을 밀어올린다. 성형 후의 부피는 다짐봉의 위치와 유압잭의 밀어올려진 길이에 의해서 결정되는데, 이러한 관계는 유압잭이 완전히 내려진 위치를 기준으로 하여 각 층에서의 다짐 후의 부피를 미리 계산하여 다짐봉에 표시해둔다.
4. 응력이 균등하게 분배되도록 일정한 시간을 기다린 후, 유압잭을 서서히 내린다.
5. 위의 2. ~ 4.의 과정을 반복하여 최종적인 성형시료의 부피를 맞춘다.

(접수일자 1999. 4. 21)