

불교란 풍화잔적토의 직접전단시험

Direct Shear Test of Undisturbed Weathered Residual Soils

오세봉¹⁾, Seboong Oh, 이영휘²⁾, Young-Huy Lee, 정종혁³⁾, Jong-Hyuk Chung

¹⁾ 영남대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Yeungnam

²⁾ 영남대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Yeungnam

³⁾ 영남대학교 토목공학과 석사, Master of Science, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Yeungnam

SYNOPSIS : A weathered residual soil is a soil-like material derived from the in situ weathering and decomposition of rock which has not been transported from its original location. Undisturbed sampling of residual soils is extremely difficult, which has an important effect on investigating the strength and compression characteristics. Thus, a special undisturbed sampling device (direct shear box with shoe) was developed and undisturbed samples were successfully obtained for direct shear tests. Direct shear testing was conducted under unsoaked and soaked condition. As a result, the shear strength of soaked samples was less than that of unsoaked samples, and it was verified that direct shearing of undisturbed samples can evaluate reasonably the shear strength and the slope stability.

Key words : weathered residual soil, undisturbed sampling, strength, soaking, slope stability

1. 서 론

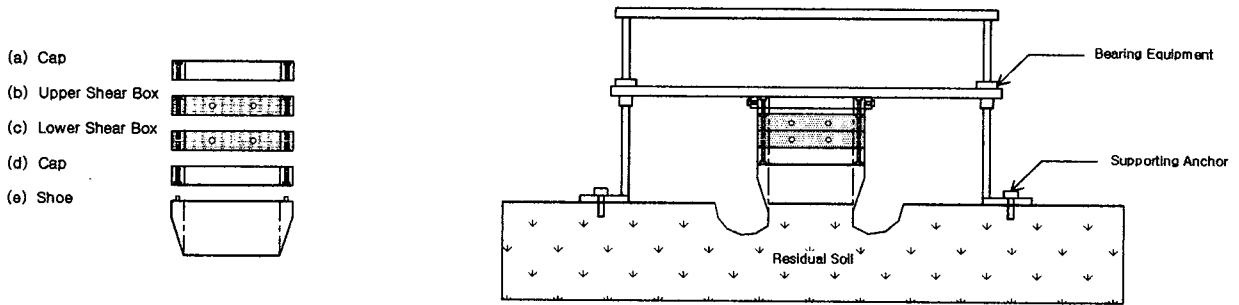
최근 들어서 자연사면이나 인공사면의 풍화잔적토층을 따라서 발생하는 사면의 붕괴가 증가하고 있으므로 전단강도의 추정이 매우 주요한 관심사로 대두되고 있다. 현재 국내에서는 풍화잔적토의 불교란 시료 채취방법으로 못 타설법, 동결법, 3중관 시료채취기 등이 많이 사용되어지고 있는데, 블록 샘플링법(Block Sampling)의 일종인 못 타설법과 3중관 시료채취기는 상대적으로 풍화가 진행되지 않아서 조립질을 많이 함유하고 있는 경우의 시료를 원하는 형상으로 성형하기가 어렵고, 동결법은 동결과정에서의 체적팽창, 결정화 작용, 수압파쇄 등으로 시료의 교란이 우려된다(이승래 등, 1997). 따라서, 본 연구에서는 현장에서 풍화잔적토의 불교란 시료를 채취하기 위해서 직접전단상자에 슈(shoe)를 장착한 불교란 시료채취기를 개발하였고, 성공적으로 직접전단시험용 불교란 시료를 채취할 수 있었다. 채취된 불교란 시료의 강도 및 변형 특성을 규명하고자 함수비 조건을 달리해가며 직접전단시험을 수행하였고, 시험결과를 이용하여 사면의 안정성을 검토하였다. 또한, 동일한 장소에서 채취된 불교란 시료에 대해서 삼축압축시험과의 결과를 비교·분석하였다.

2. 풍화잔적토의 불교란 시료 채취방법

본 연구에서는 풍화잔적토의 불교란 시료를 손쉽게 채취하기 위한 방법을 개발하는 과정에서 다음과 같은 사항을 고려하였다. 첫째, 직접전단시험을 수행하기 위해서 정사각형의 단면형상을 가지는 불교란 시료의 채취가 가능하도록 하였다. 둘째, 블록시료를 채취하는 과정에서 발생하는 응력이완(특히, 수평응력)과 체적팽창을 최소화한다. 셋째, 시료의 운반 및 실험실에서의 성형과정에서 유발되는 교란요인을 제거한다. 따라서, 이승래 등(1997)에 의한 삼축압축시험용 불교란 시료 채취방법과 유사하게 직접전단

시험용 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 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. 또한, 그림 1 (b)와 같이 현장에서 직접 시료를 전단상자로 채취하므로 시료의 채취, 운반, 성형 과정에서 발생하는 교란요인을 대폭 감소시킬 수 있었다. 실험실로 운반된 시료는 그림 1 (a)의 전단상자 부분을 트리밍하고, 그림 2에서와 같이 전단프레임을 장착시켜 직접전단시험기 내에 전단시험 준비를 마친다.



(a) 슈 장착 직접전단상자의 구성 요소

(b) 불교란 시료 채취방법

그림 1. 슈 장착 직접전단상자의 단면도

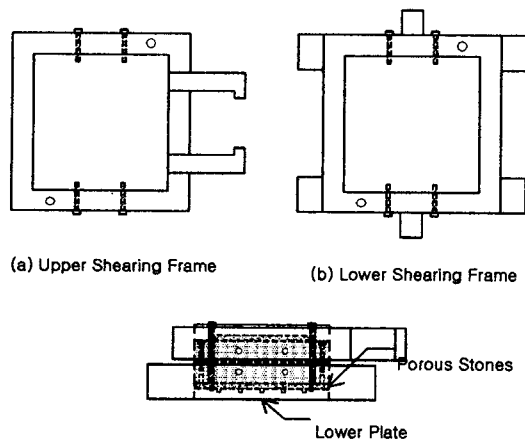


그림 2. 상·하부 전단프레임의 단면도 및 평면도

3. 불교란 풍화잔적토의 전단특성

3.1 시험 시료

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 풍화되어 생성된 것으로 보여진다. 그림 3은 대상 절취사면의 횡단면도이다. 대상 사면은 1 : 0.5의 구배로 설계되어 계획고가 약 35m 였지만 25m 정도를 절개하였을 때, 상부의 풍화

잔적토와 풍화암층을 중심으로 강우로 인한 수 차례의 사면활동이 발생하였다. 그리고 후 사면에서는 약 5~10m 정도의 인장균열이 발생하였다. 따라서, 대상 절취사면의 안정성 검토 및 풍화잔적토층에 대한 강도정수를 산정하기 위해서 불교란 시료를 채취하여 실내에서 기본적인 물성시험을 비롯한 압밀시험, 직접전단시험 그리고 삼축압축시험을 수행하였다.

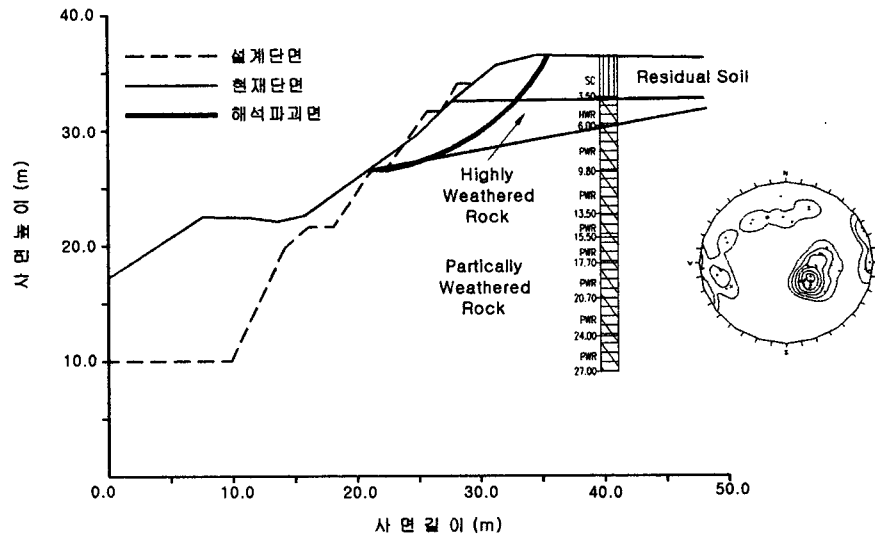


그림 3. 대상 절취사면의 횡단면도

2차례의 현장조사를 통해서 채취된 교란시료(D-1, D-2)에 대해서 기본적인 물성시험을 실시하였으며, 그 결과를 표 1에서 나타내었다.

표 1. 풍화잔적토의 기본 물성시험 결과

구 분	D-1	D-2
비중 (G_s)	2.69	2.68
통일분류법 (USCS)	SC	ML
액성한계 (LL, %)	26.6	35.0
소성한계 (PL, %)	16.1	24.3
평균 자연함수비 (%)	18.2	20.0
평균 단위중량 (t/m^3)	1.73	1.90
평균 초기간극비 (e_0)	0.85	0.69

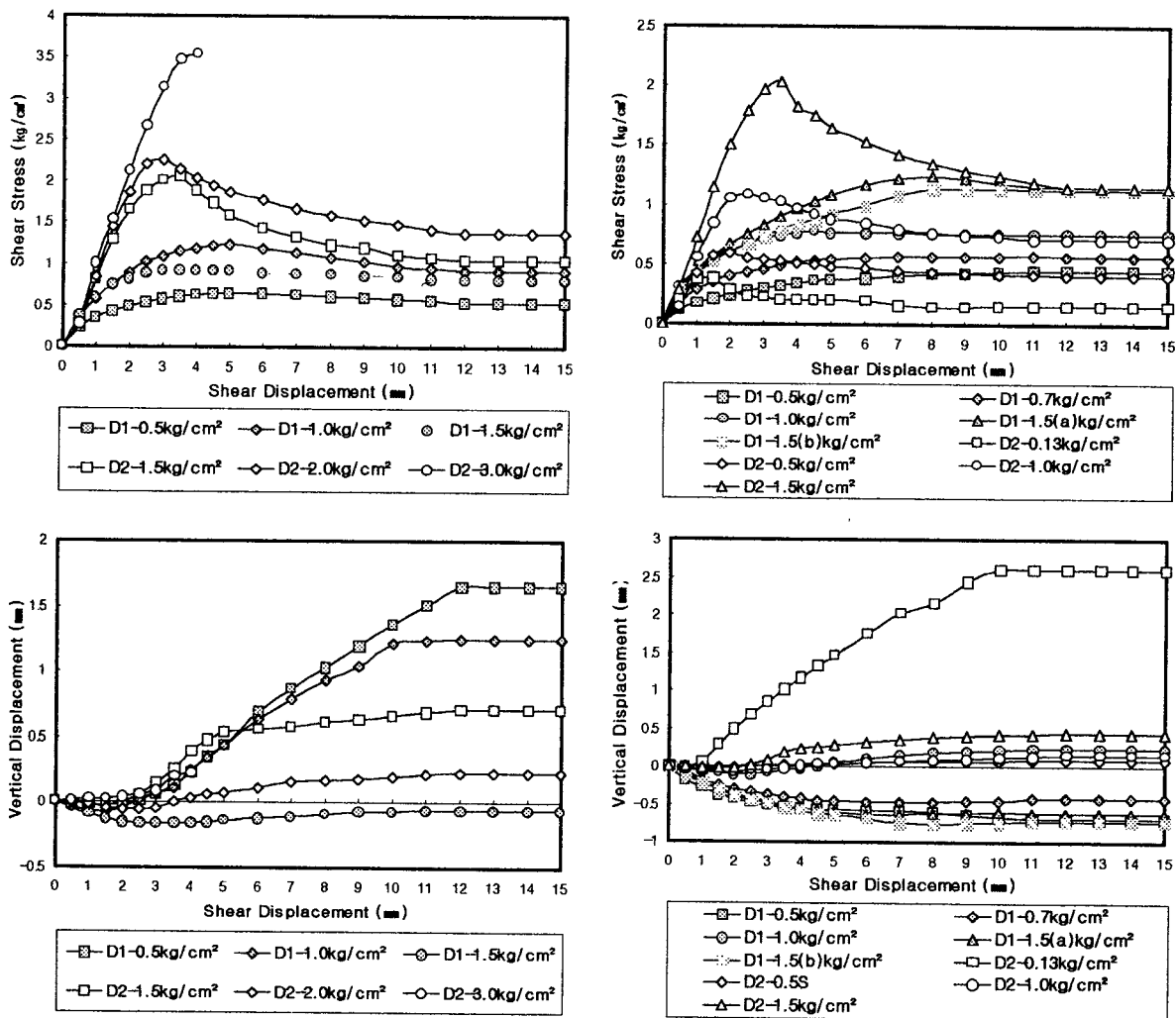
직접전단시험시 간극수압이 유발되지 않는 조건하에서 배수시험을 실시하기 위해서는 전단속도를 조절하여야 한다. Gibson과 Henkel(1954) 및 Head(1982)는 배수 직접전단시험에 대한 파괴시간(t_f)을 $t_f = 12.7 t_{100}$, ASTM D3080에서는 $t_f = 50 t_{50}$ 으로 결정하였다. 그리고 직접전단시험에서 허용되는 최대 전단속도는 δ_f/t_f 보다 작아야 한다. 단, δ_f 는 침투강도시의 수평변위이다. 압밀시험을 실시한 결과 압밀이 100%에 도달하는데 걸리는 시간은 약 1.5분으로 파괴시간(t_f)은 19분이다. 그리고 직접전단시험을 수행한 결과 극점을 나타내는 수평변위의 범위가 약 2~3mm이므로 전단시 과잉간극수압이 발생하지 않는 전단속도는 0.1~0.16mm/min 보다 작아야 한다. 따라서, 본 연구에서는 전단속도를 0.065mm/min로 결정하였다. 풍화잔적토의 불교란 시료에 대해서 포화, 압밀, 전단의 과정으로 직접전단시험을 수행하였다. 포화단계에서는 포화도가 95% 이상이 되도록 24시간 수침을 시켰다. 압밀은 일정한 수직하중에 대해서 연직변위가 더 이상 발생하지 않을 때까지 적용시켰다. 삼축압축시험용 불교란 시료는 3중관 시료채취

기(TS)와 이승래 등(1997)에 의해서 개발된 불교란 시료채취기(UTX)로 채취하여 삼축압축시험을 실시하였다. 전단은 각각의 압밀압에 대해서 축차응력을 증가시켜 0.1%/min의 변형률 제어방식으로 압밀배수(CU) 삼축압축시험을 실시하였다.

3.2 풍화잔적토의 전단특성

3.2.1 불교란 풍화잔적토의 직접전단시험 결과

그림 4는 자연함수비 및 수침 상태의 불교란 시료에 대해서 직접전단시험을 실시한 결과이다. 그림 4 (a)에서 보여지듯이 D1 시료에 비하여 D2 시료가 변형률 연화거동을 나타내어 다소 과압밀된 시료라고 보여진다. 그림 4 (b)는 포화되지 않은 불교란 시료를 24시간 수침시켜 압밀한 후 직접전단시험을 수행한 결과이다. 예비시료에 대해서 24시간 수침 후의 포화도를 측정해 본 결과 95% 이상으로 포화상태임이 확인되었고, 72시간 수침 후의 포화도와 비교해 본 결과 수치상의 큰 차이는 없었다. 구속 수직응력이 증가할수록 전단응력은 증가하며, 연직변위는 수축하는 체적변화를 보인다. 또한, 과압밀된 D2 시료는 24시간 수침 후에도 명확한 침두강도를 나타내었다. 그림 5는 동일한 장소에서 채취된 불교란 시료에 대해서 동일 조건으로 직접전단시험을 수행한 바 파괴시의 전단응력과 전단변형이 거의 일치하여 제작된 불교란 시료채취기의 성능이 우수하며 시험결과의 반복성을 확보할 수 있음을 확인할 수 있다.



(a) 자연함수비 상태

(b) 수침상태

그림 4. 자연함수비 및 수침 상태에서 불교란 시료의 전단 및 변형 특성

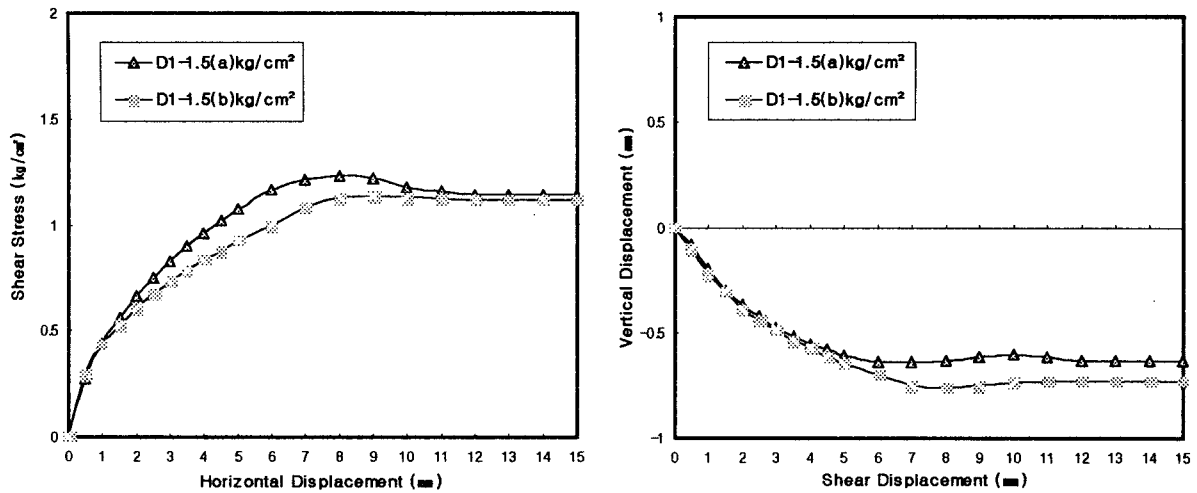


그림 5. 불교란 시료의 반복성 시험

3.2.2 함수비 조건에 따른 변화

1, 2차 현장조사를 통해서 채취한 풍화잔적토의 불교란 시료에 대해서 함수비 조건을 달리해가며 직접전단시험을 수행하였다. 그림 6은 침투 및 잔류 강도의 규준이 Mohr-Coulomb의 직선적인 파괴규준을 잘 따르고 있음을 보여준다. 그림 6 (a)는 자연함수비 상태에서의 침투강도와 24시간 수침 후의 침투강도를 비교한 것이다. 자연함수비 상태에서의 조건과 비교해 볼 때 수침시의 내부마찰각이 약 30% 정도 감소하였고, 기존의 $\tau - \sigma$ 관계도(Diagram)를 log축으로 치환함으로써 수침에 의한 강도의 저하현상을 보다 확연히 나타낼 수 있다. 그림 6 (b)는 자연함수비 상태에서의 잔류강도와 24시간 수침 후의 잔류강도를 비교한 것인데, 수침에 의한 강도의 저하현상이 뚜렷하게는 나타나 보이지 않는다. 표 2는 불교란 시료의 직접전단시험 결과를 나타낸 것이다.

표 2. 불교란 시료의 직접전단시험 결과

구 분		점착력 (c, kg/cm ²)	내부마찰각 (ϕ , °)	결정계수 (R ²)
침투강도	자연함수비 상태	0	50.8	0.99
	수침상태	0.1	35.2	0.98
잔류강도	자연함수비 상태	0	43.3	0.95
	수침상태	0	37.4	0.99

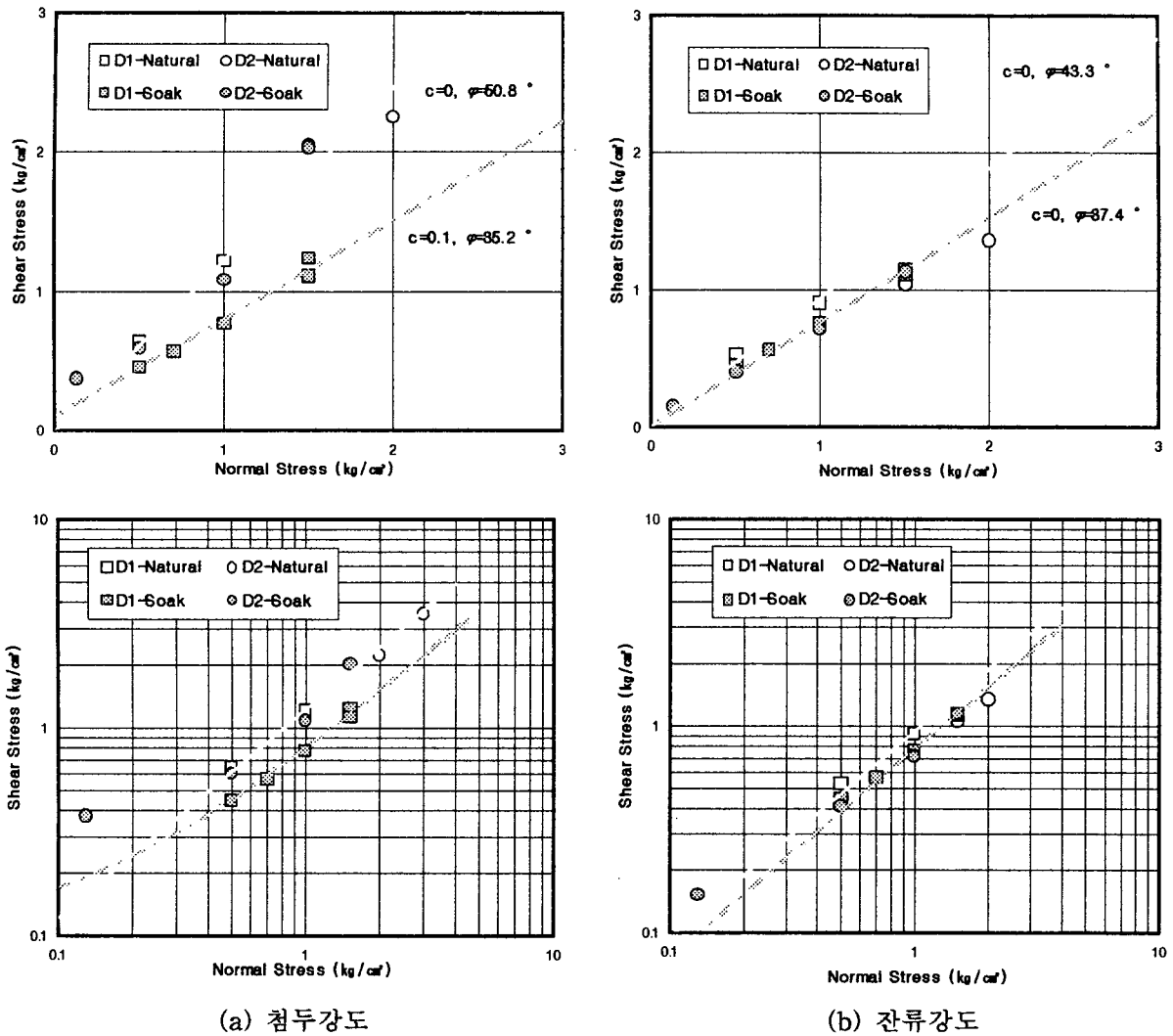
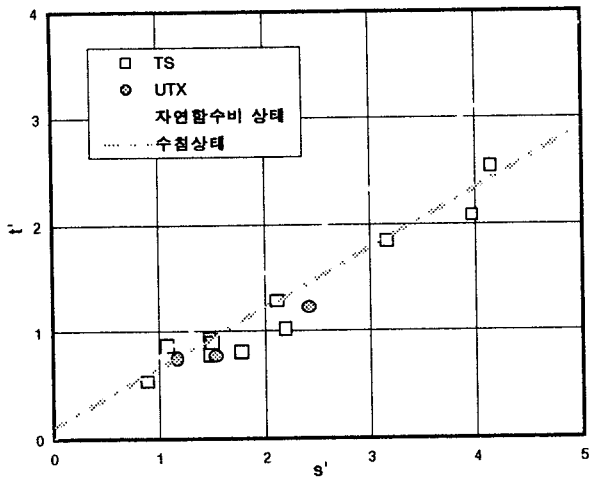


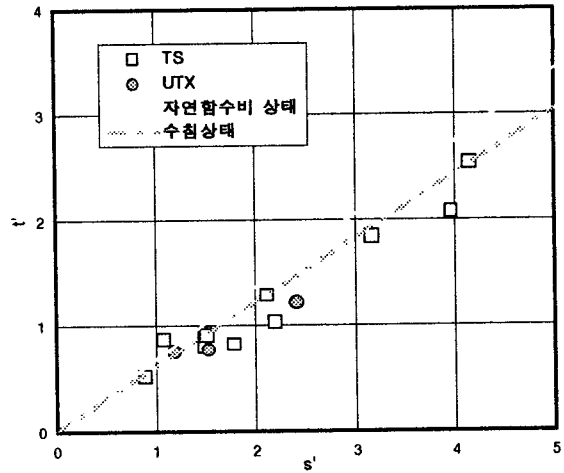
그림 6. 함수비 조건에 따른 불교란 시료의 첨두 및 잔류 강도의 변화

3.2.3 삼축압축시험과의 결과 비교

직접전단시험용 불교란 시료를 채취한 동일한 장소에서 3중관 시료채취기(TS)와 삼축압축시험용 불교란 시료채취기(UTX)로 불교란 시료를 채취하여 삼축압축시험을 실시하였다. 그림 7과 그림 8은 직접전단시험과 삼축압축시험의 결과를 비교하기 위해서 각각의 $s'-t'$ Diagram과 Mohr's Circle 상에 직접전단시험의 결과치를 나타낸 것이다. 단, $s'-t'$ Diagram에서 $s' = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2}$, $t' = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2}$ 이다. 그 결과 자연함수비 상태에서의 잔류강도와 수침상태에서의 첨두 및 잔류 강도가 삼축압축시험의 결과와 아주 유사한 경향을 나타내었다. 따라서, 본 연구의 수 장착 직접전단상자를 이용한 풍화잔적토의 불교란 시료채취 및 수침상태에서의 직접전단시험을 통한 강도의 산정방법이 합리적임을 알 수 있다.

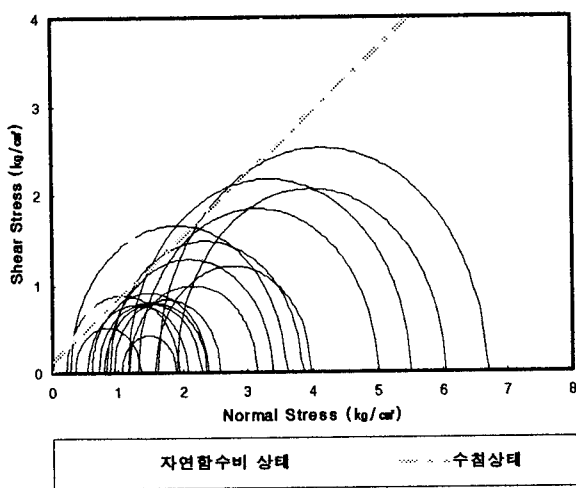


(a) 침두강도의 변화

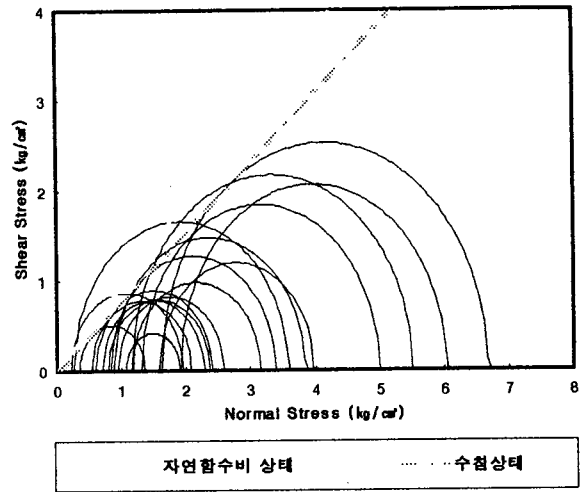


(b) 잔류강도의 변화

그림 7. $s'-t'$ Diagram 상에서 직접전단시험 결과 비교



(a) 침두강도의 변화



(b) 잔류강도의 변화

그림 8. Mohr's Circle 상에서 직접전단시험 결과 비교

3.2.4 대상 절취사면의 안정해석

대상 절취사면에 대한 안정해석은 한계평형해석을 실시하였다. 대상 절취사면에 대해서 평사투영해석을 실시한 결과 그림 3에서 보여지는 바와 같이 하부의 연암층(PWR)을 중심으로는 파괴가 일어나지 않았고, 상부의 풍화잔적토층과 풍화암층을 중심으로 원호활동 파괴가 발생하였음을 알 수 있었다. 풍화잔적토층과 풍화암층의 현장단위중량을 각각 1.73t/m^3 , 1.90t/m^3 으로 하고, 비교란 시료의 수침시 직접전단 시험 결과($c=0.1\text{kg/cm}^2$, $\phi=35.2^\circ$)를 이용하여 사면의 안정해석을 수행하면 건조상태($r_u=0$)에서는 $F_s=1.52$, 습윤상태에서는 $r_u=0.3$ 일 때 $F_s=1.03$ 이고, $r_u=0.4$ 일 때 $F_s=0.88$ 이었다. 이는 건기시에 사면의 이론적인 안전율이 1.0 이상이므로 파괴가 일어나지 않고, 우기시에는 안전율이 1.0 이하로 감소하여 파괴가 발생하는 것으로 해석된다. 따라서, 본 연구의 수 장착 직접전단상자로 채취한 현장의 비교란 시료로부터 실제지반의 강도정수를 합리적으로 산정할 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

- (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. 그리고 실내시험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 대상 절취사면의 풍화잔적토는 모암을 퇴적암으로 하는 점토질 모래인 SC와 실트질의 세립모래인 ML로 분류되었다. 채취된 풍화잔적토의 불교란 시료의 직접전단시험을 통해서 함수비 조건에 따른 전단강도의 변화를 규명할 수 있었는데, 자연함수비 상태와 수침상태를 비교한 바 잔류강도는 유사하나 수침시의 침투강도가 약 30% 정도 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 불교란 시료의 직접전단시험 및 삼축압축시험(CU)의 결과를 비교하였다. 그 결과 직접전단시험시 자연함수비 상태에서의 잔류강도와 수침상태에서의 침투 및 잔류 강도가 삼축압축시험의 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 따라서, 슈 장착 직접전단상자를 이용하여 불교란 시료를 채취하고, 수침상태에서 직접전단시험을 수행하면 합리적인 전단강도를 도출해 낼 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 대상 절취사면에 대한 안정성을 검토하기 위해서 불교란 시료의 수침시 직접전단시험 결과를 이용하여 사면안정 해석을 실시하였다. 그 결과 건기시에 사면은 이론적으로 안전율이 1.0 이상으로 시공시 파괴가 일어나지 않았으나, 우기시에는 안전율이 1.0 이하로 감소하여 파괴가 발생하였다. 따라서, 슈 장착 직접전단상자로 채취한 불교란 시료로 풍화잔적토 사면의 전단강도 산정이 가능하리라고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 건설교통부 건설기술연구개발사업(과제번호 97007-1)에 의하여 연구비를 지원받았으며 이에 깊은 감사를 드립니다. 또한 시료채취 장비의 개발과 삼축압축용 불교란시료의 채취에 많은 도움을 준 한국과학기술원 토목공학과 정순용 박사과정, 이승래 교수님과 김동수 교수님께 깊은 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. 권오순, 정충기 (1998), “ 풍화에 따른 풍화토의 특성변화, ” 한국지반공학회지, 第 14 卷, 第 5 號, pp. 53~66
2. 김영수, 이상복, 정성관 (1995), “ 퇴적암 풍화토의 공학적 특성, ” 한국지반공학회지, 第 11 卷 第 4 號, pp. 63~74
3. 이승래, 김동수, 정순용, 권기철 (1997), “ 화강풍화토의 거동특성 규명을 위한 불교란 시료채취기 개발, ” 한국지반공학회지, 第 13 卷, 第 6 號, pp. 13~23
5. 西田一彦 (1986), 風化殘積土の 工學的 性質 박춘식 譯 (1996), 풍화토의 특성, 도서출판 엔지니어스
6. 西田一彦, 青山千彰 (1981), “ 亂さない不飽和まさ土のせん斷強度特性, ” 土の基礎, No. 1243, pp. 35~40
7. 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
8. 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
9. Head, K.H. (1982), Manual of soils laboratory testing, Vol. 2 : Permeability, Shear Strength and Compressibility tests, Pentech Press, pp. 747