

링 전단시험기를 이용한 암석절리의 잔류강도 특성에 관한 연구

A Study on Residual Stress Characteristics for Joint of Rock in Ring Shear Tests

권 준 육^{*1} Kwon, Joon-Uk
김 선 명^{*2} Kim, Sun-Myung
윤 지 선^{*3} Yoon, Ji-Son

Abstract

Residual stress is defined as a minimum stress with a large displacement of specimens and the residual stress after peak shear stress appears with displacement volume but there is no provision to select the residual stress.

In the previous study, residual stress was recorded when the change of shear load is small in the condition of the strain more than 15%. But, in this study, hyperbolic function ($\tau = \frac{\theta}{a + b\theta}$, a, b = experimental constant) of soil test is adapted to joint of rock and the propriety is investigated.

In a landslide and landsliding of artificial slope, wedge failure of tunnel with a large displacement, tests are simulated from peak stress to residual stress for safety analysis. But now, direct shear stress and triaxial compressive tests are usually performed to find out characteristics of shear stress about joint.

Although these tests get a small displacement, the data of peak stress and residual stress are used for safety analysis.

In this study, we tried to determine failure criteria for joints of rock using ring shear test machine. The residual stress following shear behavior was determined by the result of ring shear test and direct shear test.

In conclusion, after comparing the results of the two test, we found that cohesion(c) and internal friction angle(ϕ) of ring shear test are 30% and 22% respectively of those of the direct shear test.

요 지

“잔류강도는 큰 변위를 받는 시험편의 최소강도이다.”(鈴木素之 등, 1995)라고 정의되며 Peak 전단강도 이후의 잔류강도는 변위량의 크기에 따라서 다르게 나타나고 있으나, 이에 대한 정확한 규정이 없는 것이 현 상황이다.

기존에 사용되어온 잔류강도의 결정은 시험자의 판단 하에 변형률 15% 이상에서도 전단하중의 변화가 크지 않으면 잔류강도가 나타난 것으로 보고 시험을 중지함과 동시에 이 값을 잔류강도로 사용하였다. 그러나 본 연구에서는 보통 토질 시험에서 많이 이용되고 있는 쌍곡선함수($\tau = \frac{\theta}{a + b\theta}$, 여기서 a, b 는 실험정수) 근사법(鈴木素之 등, 1995)을 암석절리에 적용하여 적합성을 검토해 보았다.

산사태나 인공사면의 Sliding, 터널의 쌓기파괴 등을 대부분 대 변위를 받고 있다고 생각되어지므로 각종 안정성 해석 시 Peak 강도에서 잔류강도까지의 넓은 영역을 동시에 실현하는 시험을 실시하여야 한다고 판단된다(釜井俊孝, 1995). 그러나 현재 절리면의 전단특성을 알아보기 위한 실내시험으로는 직접전단시험과 삼축압축시험이 많이 실시되고 있다.

*1 정회원, 인하대학교 대학원 지구환경공학부 석사과정

*2 정회원, 인하대학교 대학원 지구환경공학부 박사과정

*3 정회원, 인하대학교 지구환경공학부 교수

이 시험들은 상당히 작은 변위를 구현하고 있음에도 불구하고 여기서 얻은 Peak 강도이외의 잔류강도 값까지 각종 안정성 해석의 입력 값으로 사용되어지고 있는 것이 현실정이다. 그러므로 본 연구에서는 매우 큰 변위를 시험편에 적용시키지 못하는 기존 시험의 결점을 보완하고 잔류강도 측정의 용이성을 위해 링 전단시험을 실시하여 직접전단시험의 결과 값과 비교 분석함으로서 잔류강도 정수를 산출하기 위한 시험으로는 링 전단시험의 유용하다는 것을 검증하고자 하였다.

본 연구는 링 전단시험기를 제작하고 제작된 시험기를 이용하여 암석절리의 파괴기준을 결정하고 Peak 강도 이후의 잔류전단강도의 거동에 대해서 링 전단시험결과와 직접전단시험의 결과 값을 비교함으로서 전단거동에 따른 잔류강도를 결정하고자 하였다.

인공모형 재료시험에 있어서 두 시험결과를 비교해 본 결과 수직응력과 잔류강도와의 관계에서 링 전단시험 결과 구해진 점착력(c)은 직접전단시험을 통해 구해진 점착력인 2.1kgf/cm^2 의 약 30%수준인 0.62kgf/cm^2 로 나타나 1.48kgf/cm^2 의 차이를 보였고 내부마찰각(ϕ)은 링 전단시험의 결과가 직접전단시험을 통해 구해진 23.02° 의 약 22% 수준인 5.16° 로 17.86° 의 차이로 링 전단시험의 결과가 낮은 값이 얻어졌다.

Keywords : Residual stress, Ring shear test, Large displacement, Joint

1. 서 론

현지 암반은 단층이나 절리, 균열 등의 불연속면을 포함하고 있다. 이를 불연속면의 변형 및 파괴거동에 관련된 역학적 특성은 암반의 해석에서 매우 중요한 요소로서 사용되고 터널, 댐, 교량, 지하 발전소, 도로 및 사면 등의 건설 시에 기초가 되는 지반이나 암반구조물의 안정성에 결정적인 영향을 끼친다. 특히 근래에는 구조물이 대형화되어 가면서 암반이나 지반이 양호하지 않은 곳에도 건설하지 않을 수 없게 되었으며 도시공간의 효율적인 이용과 국토의 균형적인 발전 측면뿐만 아니라 지하암반이 가지고 있는 여러 이점들 때문에 지하공간의 이용은 더욱 증가할 것으로 예상된다. 그러므로 앞으로 더욱 큰 안정성이나 정밀도가 요구될 것이며, 이에 따라 암반의 강도 및 변형특성에 대한 시험이 대단히 중요하게 되었다.

암반의 역학적 특성은 암반내의 분리면(절리 및 벽개), 편리, 층리, 단층, 파쇄대 등과 같은 불연속면의 영향을 받아 이방성을 띠며 불균질한 거동을 나타낸다. 따라서 암석 역학에서는 원위치 암석의 파괴만을 다루는 것보다는 불연속면의 전단거동을 더욱 중요시하게 되었다. 단층과 같은 주요 지형의 미끄러짐이나 굴착 경계 면으로부터 단일 블록이 미끄러지는 조건은 불연속면에 따라 나타나는 전단강도에 의해 지배되기 때문이다.

전단강도를 구하기 위한 원위치 시험에서는 암반전단 시험이나 블록전단시험등 직접전단시험과 암반 삼축압축 시험이 이용되고 실내 시험으로써 불연속면을 포함하고 있는 시험편에 대한 삼축압축시험과 직접전단시험의 이

용된다.

본 연구에서는 직접전단시험의 매우 큰 변위를 공시체에 적용하지 못하는 결점을 보완하고 잔류강도 측정의 용이성을 위하여 링 전단시험기를 제작하여 사용하였고, 여기에서 얻어진 링 전단시험 결과와 기존의 직접 전단시험 결과를 비교 분석하여 실제 암반의 변형특성과 파괴거동 및 파괴현상을 검토함으로써 링 전단시험의 유용성을 검증해 보고자 하였다

2. 이론적 배경

2.1 개요

대변형을 받고 있는 개소의 안정성 해석에 있어서는 peak강도에서부터 잔류강도까지의 넓은 영역을 동시에 실현하는 전단시험을 실시하여야 한다고 판단되어 본 연구에서는 시험과정 중 전단면의 면적 변화가 없고 연속적인 변위를 구현하는 것이 가능하고 매우 큰 변위에 대한 전단특성을 결정할 수 있는 장점이 있는 링 전단시험을 실시하여 직접전단시험의 결과 값을 비교하였다.

시험편은 중공원통형을 사용하며 시험편에 작용하는 수직응력과 전단응력은 일정한 수직응력이 작용한다고 가정하여 다음과 같이 유도된다.

2.2 수직응력

전단시험은 수직응력의 영향이 크므로 본 연구에서는

식(1)의 관계(윤지선, 1994)에서 심부 10~60m 까지의 산사태나 인공사면의 sliding 등이 일어날 수 있는 비교적 얕은 곳의 수직하중을 구현하기 위하여 2.5 kgf/cm^2 , 5 kgf/cm^2 , 7.5 kgf/cm^2 , 10 kgf/cm^2 , 12.5 kgf/cm^2 , 15 kgf/cm^2 의 각각 6단계의 수직응력을 수직jack에 의해 가해지는 하중과 식(2)에 의해 계산하여 적용하였다(Xu S.& de Freitas. M. H., 1988).

$$\sigma = \gamma \cdot h \quad (1)$$

여기서, σ : 수직응력 (kgf/cm^2),
 γ : 단위중량 (g/cm^3), h : 심도 (m)

$$\sigma = PA_o / \pi(R_2^2 - R_1^2) \quad (2)$$

여기서, P 는 피스톤의 압력, A_o 는 피스톤 램의 유효 단면적, R_1 는 시험편 내경의 반지름, R_2 는 시험편 외경의 반지름이다.

2.3 전단응력

절리면의 전단응력은 시험기의 축과 시료의 마찰의 영향은 무시하고, 해당 시험편에 고르게 전단력이 가해진다고 가정하면 식(3)과 같이 계산된다(Xu S.& de Freitas. M. H., 1988).

$$\tau = 3L(F_1 + F_2)/4\pi(R_2^3 - R_1^3) \quad (3)$$

여기서, L 는 Arm의 중심으로부터 Load cell 중심까지의 거리, $(F_1 + F_2)$ 는 $2 \times$ Load cell에 걸리는 전단력, R_1 는 시험편 내경의 반지름, R_2 는 시험편 외경의 반지름이다.

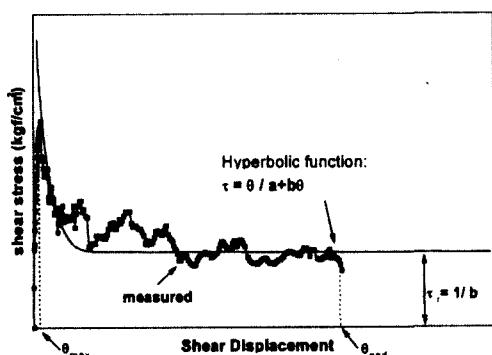


그림 1. 쌍곡선 근사에 의한 잔류강도 결정법

2.4 잔류강도의 결정법

실내시험에 대해서 전단응력-전단변위각 관계의 실측치는 장기간의 전단에 대해서도 엄밀하게 정상상태에는 도달하지만, 실제는 각각의 판단에 의해서 시험을 중지하여, 잔류강도를 결정하고 있다. 본 논문에서는 최대전단응력 후의 전단응력-전단변위각 관계의 실측 예에 대해서 쌍곡선 근사를 적용하여 그 수렴치를 잔류강도로 결정하는 방법을 사용하였다.

그림 1에서 본 결정법을 모식적으로 보이고 있다. τ_{max} 를 최대전단응력, σ_n 을 수직응력, θ_{max} 를 최대전단강도 시의 전단변위각, θ_{end} 를 시험 중지시의 전단변위각으로 하여, σ_n 이 일정할 때, 구간 $(\theta_{max}, \theta_{end})$ 에 대해서 $\tau \sim \theta$ 관계의 실측치에 대해서 식(4)로 표현한 쌍곡선 근사가 적용 가능하다고 가정한다(鈴木素之 등, 1995).

$$\tau = \frac{\theta}{a + b\theta} \quad (4)$$

여기서, a, b 는 실험에서 얻어진 정수이다.

식(4)와 실측치의 적합성이 양호하다면, 쌍곡선근사의 가정이 성립한다는 것에 대해서, 잔류강도 $\tau_r = \frac{1}{b}$ 이 때, 정수 a, b 는 그림 2에 보는 바와 같이 $\theta/\tau \sim \theta$ 관계에 있어서 최소자승법에 의해 fitting한 직선의 θ/τ 축의 절편 및 경사로 주어지고 있다.

3. 링 전단시험 장치

본 연구에 사용한 링 전단시험기(Ring Shear Test Machine)는 본 연구실에서 설계하여 주문 제작하여 사용하였다. 이 시험기는 두 암석의 Crack부의 전단시험을 위한 시험장치로서 상부에는 암석에 수직하중을 가하기 위한 유

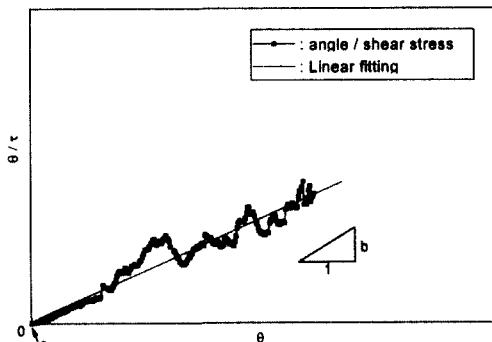
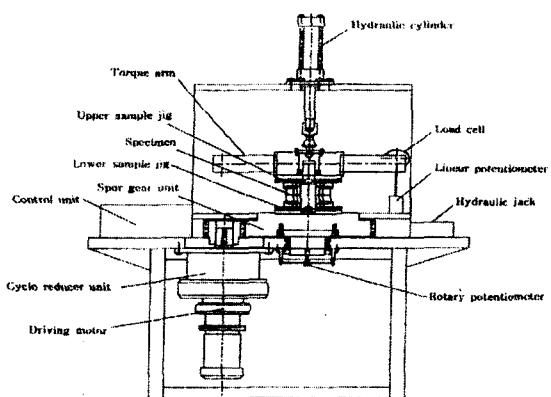
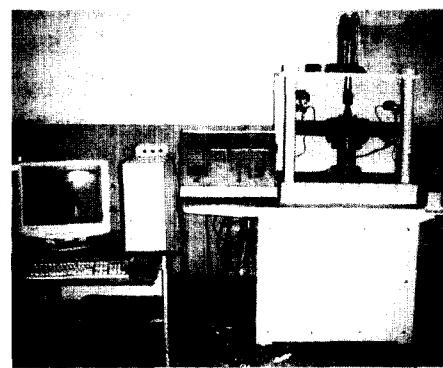


그림 2. 실험정수 a,b의 결정법



(a) 링 전단시험기의 구성도



(b) 링 전단시험기 세트

그림 3. 링 전단시험기

압용 실린더(Force: 3000 kgf)가 장착되며 Rotation Torque를 주기 위한 Driving Mortor(Capacity: 0.5HP) 와 Spur Gear Box가 장착되었다. 또한 Torque를 측정하기 위하여 시료 상단 부에는 Torque Arm System과 변위 측정용 LVDT가 Arm상부에 장착되었다. 하부 회전축에는 회전 각도를 측정하기 위한 Rotary Potentiometer(Angle 340 degree)가 장착되어 각도를 측정하도록 되어있다.

모든 센서에서 수집된 물리량은 각각의 Indicator panel에서 Display되고 Analog input되며 LABview로 짜여진 program에 의해 결과물을 출력하도록 되어있다. 시험기의 구성도와 대략적인 모습은 그림 3-(a), 3-(b)에 나타나 있다.

4. 직접전단시험 장치

시험에 이용한 일면 직접전단시험기는 미국 ROCTEST 사에서 제작한 Portable shear box(모델 PHI-10)이다. 주요 구성부분으로는 수직램 1개, 수평램 2개, 전단상자와 roller carriage 등이다. 또한 암석 시험편을 전단 상자에 설치하기 위한 몰드세트를 포함하고 있다. 수직하중을 가하는 램의 용량은 15톤이며, 전단하중을 가하는 수평램의 용량은 1톤이다. 특히 수직하중시스템의 압력유지기(pressure maintainer)는 시험수행간 일정한 수직하중이 가지도록 하는 작용을 한다. 전단상자내에 시험편을 고정하기 위하여 에포마이카수지, 활석 및 경화제를 혼합한 에폭시수지를 이용하였다(윤현익, 1998).

5. 시료의 특성 및 시험편제작

5.1 시료의 물리 · 역학적 특성

본 연구에서는 균질한 시험편을 얻기 위하여 칼슘설포알루미네이트(CSA)계 시멘트를 주재로한 무수축, 고강도, 내투수성, 내식성 특성의 시멘트 몰탈을 사용법에 맞게 물과 충분히 혼합하여 자연상태에서 28일 이상씩 같은 조건으로 건조시켰다. 대상시료의 기본적인 물리 · 역학적 특성을 파악하기 위하여 각종 실내 물성시험을 통해 일축압축강도, 압밀인장강도, 정탄성계수, 탄성파속도 등을 구하였고 이 결과는 표 1에 나타내었다.

5.2 시험편 제작

일정 수직응력 상태에서의 절리면의 거동상태를 비교하기 위하여 동일한 거칠기를 가지는 시험편의 샘플을 제작하였다. 자연암석에 있어서 동일한 절리면의 재현이 어려우므로 서울화강암중의 흑운모 화강암(Biotite Granite) 지역인 인왕산 근처에서 암석 블록을 채취하여 이 암석 블



그림 4. 제작된 시료의 모습

표 1. 물탈 시험편의 물리·역학적특성

Sample Properties	Average
Uniaxial compressive strength [kgf/cm ²]	615
Brazilian tensile strength [kgf/cm ²]	45
Static Elastic modulus [$\times 10^4$ kgf/cm ²]	9.26
P-wave velocity [m/sec]	3826
S-wave velocity [m/sec]	1643
Dynamic Poisson's ratio	0.38
Specific gravity	2.04
Unit Weight [g/cm ³]	2.14

표 2. 링 전단시험과 직접전단시험 결과 값의 비교분석표

Ring shear test					Direct shear test				
σ_n (kgf/cm ²)	τ_{\max} (kgf/cm ²)	τ_r (kgf/cm ²)	τ_{\max}/σ_n	τ_r/σ_n	σ_n (kgf/cm ²)	τ_{\max} (kgf/cm ²)	τ_r (kgf/cm ²)	τ_{\max}/σ_n	τ_r/σ_n
2.5	1.98	0.94	0.79	0.38	2.5	5.19	3.39	2.02	1.36
5	2.19	0.79	0.44	0.16	5	7.72	4.32	1.54	0.86
7.5	2.77	1.19	0.37	0.16	7.5	10.33	4.74	1.38	0.63
10	3.04	1.84	0.30	0.18	10	12.87	6.42	1.29	0.64
12.5	3.60	2.09	0.29	0.17	12.5	13.66	7.74	1.09	0.62
15	3.64	1.6	0.24	0.11	15	16.58	8.42	1.11	0.56

* σ_n : Normal stress, τ_{\max} : Peak shear stress, τ_r : Residual shear stress

특중 가장 신선한 절리면에 실리콘 고무를 이용해 시험기에 필요한 단면의 가운데 절리면을 포함하는 상부와 하부의 절리 샘플을 얻었다. 이렇게 얻어진 샘플을 몰드에 넣고 시멘트 몰탈을 부어서 그림 4와 같은 내경 52.25mm, 외경 100.25mm의 절리면이 시험편의 가운데 들어있는 시멘트 몰탈 시험편을 제작하였다.

6. 시험 결과 및 고찰

6.1 링 전단시험과 직접전단시험의 전단강도 비교

링 전단시험과 직접전단시험을 각각 2.5kgf/cm², 5kgf/cm², 7.5kgf/cm², 10kgf/cm², 12.5kgf/cm², 15kgf/cm²의 수직응력 하에서 비교를 위하여 같은 절리면을 포함하고 있는 시멘트 몰탈 시료에 실시한 결과는 표 2와 같다. 여기서 링 전단시험의 최대전단응력은 직접전단시험결과에 대해 약 26%의 값을 보이고 있으며 잔류전단응력은 19%의 값을 보이고 있다.

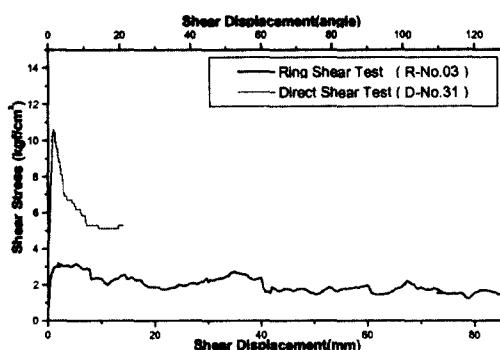


그림 5. 링 전단시험과 직접전단시험의 전단변위-전단응력 곡선의 비교

6.2 링 전단시험과 직접전단시험에서의 전단변위-전단응력

링 전단시험은 전단방향에 단면을 가지는 그림 5와 같이 매우 큰 변위를 공시체에 적용하는 것이 가능하기 때문에 잔류강도 측정에 적당한 직접형 전단시험으로 이용되고 외국의 경우 산사태 등의 안정 평가를 주요한 대상으로 하여 행해지고 있다. 실제 원위치 암반 및 지반의 미끄러짐은 대부분 대변형을 받고 있다고 생각되어지므로 Peak 강도에서 잔류강도까지의 넓은 변형 영역을 동시에 실현하는 전단시험법으로서 링 전단시험이 유용하다. 또한 직접 전단시험의 경우 최대전단하중을 지나 변형률 15%이상에서도 전단하중의 변화가 크지 않다면 잔류강도가 나타난 것으로 보고 시험을 마치고 있는데 링 전단시험은 이것보다 큰 50%이상의 변형률(본 시험기는 340degree(226mm)) 까지 측정할 수 있다.

6.3 링 전단시험과 직접전단시험에서의 수직응력에 따른 전단응력의 거동

수직응력과 전단응력의 관계를 그림 6,7에 나타내었다. 그림 6은 직접전단시험과 링 전단시험의 수직응력과 최대전단응력의 관계를 선형 근사하여 각각 점착력과 내부마찰각을 나타내었다. 링 전단시험결과 구해진 점착력은 직접전단시험을 통해 구해진 점착력인 3.35kgf/cm^2 의 약 47%수준인 1.59kgf/cm^2 로 나타나 1.76kgf/cm^2 의 차이를 보이고 있다. 내부마찰각은 링 전단시험의 결과가 직접전단시험을 통해 구해진 41.44° 의 약 20%수준인 8.33° 로 31.11° 의 차이를 나타내었다.

본 링 전단시험은 Peak강도를 구하기 위한 시험은 아니지만 이러한 결과는 전단응력의 분포를 시료 내측과 외측에 균일하게 분포한다고 가정하였고 전단면적도 과대평가되었기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 보여진다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 매우 큰 시료로 시험을 실시하거나 내외경의 비가 작은 시료로 시험을 실시하게 되면 해소할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 7은 직접전단시험과 링 전단시험의 수직응력과 잔류전단강도와의 관계를 선형 근사하여 각각 점착력과 내부마찰각을 나타내었다. 링전단시험 결과 구해진 점착력은 직접전단시험을 통해 구해진 점착력인 2.1kgf/cm^2 의 약 30수준인 0.62kgf/cm^2 1.48kgf/cm^2 의 차이를 보였고 내부

마찰각은 링 전단시험의 결과가 직접전단시험을 통해 구해진 23.02° 의 약 22%수준인 5.16° 로 17.86° 의 차이를 나타내었다. 이러한 현상은 링 전단시험에서 매우 큰 변위를 구현했기 때문에 낮게 나타난 것으로 생각되며 직접전단시험의 결과가 과대평가된 것으로 보여진다. 그러므로 링 전단시험의 잔류강도 결과 값을 안정해석의 입력 값으로 사용하는 것이 바람직하다고 판단되어진다.

6.4 링 전단시험의 전단변위와 전단응력의 관계

링 전단시험을 5kgf/cm^2 , 10kgf/cm^2 , 15kgf/cm^2 의 일정 수직응력을 유지하면서 측정한 결과 전단변위에 따른 전단응력의 변화를 그림 8에 나타내었다. 여기서 수직응력이 증가함에 따라 전단응력 증가하는 현상이 뚜렷이 보였고 같은 일정한 수직응력을 가해주었을 때는 거의 같은 양상을 보였다(그림 8은 각 수직응력하의 전형적인 그래프를 하나씩 plotting 한 것임). 전단변위가 증가함에 따라 잔류응력으로 점차 수렴해 가는 양상을 보였다.

6.5 링 전단시험의 전단변위에 따른 수직변위의 거동

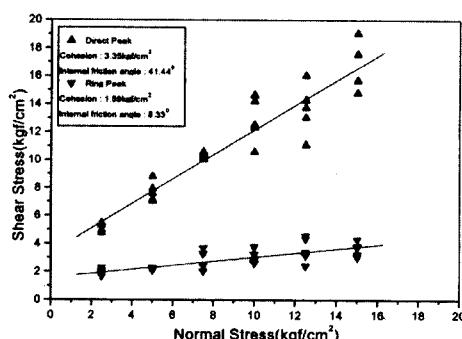


그림 6. 수직응력과 최대 전단응력과의 관계

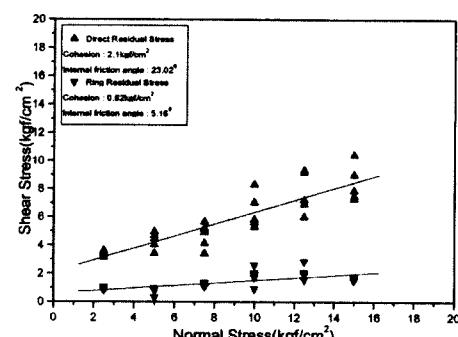


그림 7. 수직응력과 잔류전단강도와의 관계

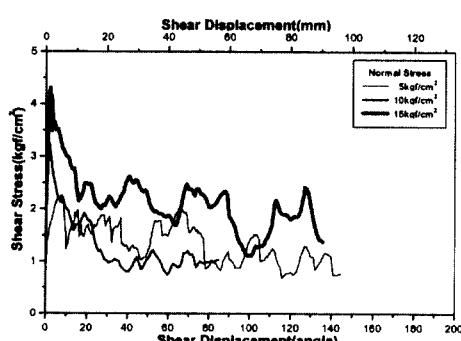


그림 8. 3가지 수직응력하에서의 전형적인 전단응력-전단변위곡선

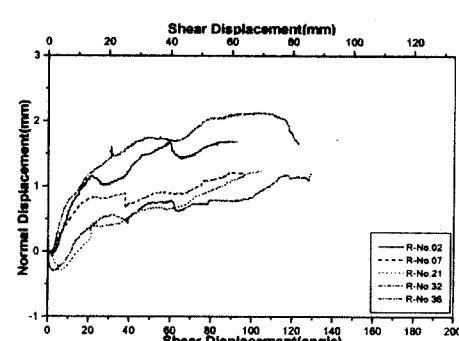


그림 9. 대표적인 수직변위-전단변위 곡선

링 전단시험을 실시한 결과 전단변위에 따른 수직변위의 대표적인 거동을 그림 9에 나타냈다. 이 그림은 수직압 12.5kgf/cm²하에서의 측정치이며 거의 같은 양상으로 변화함을 보여주고 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 암석절리에 대한 전단강도 및 잔류강도 특성을 알아보기 위하여 시험편에 대변위를 적용하는 것이 가능한 링 전단시험기를 설계, 제작하여 사용하였고 일정 수직응력 하에서 절리면의 거동상태를 알아보기 위하여 동일한 거칠기를 가지는 시멘트 몰탈 시험편을 만들어 암석절리를 대신한 시험을 실시하였다.

잔류강도는 쌍곡선 함수에 근사하는 방법으로 결정하여 직접전단시험 결과 값과 비교함으로서 링 전단시험기의 유용성을 검증하였다.

본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 전단강도 특성을 파악하기 위해 시험편에 대변위를 적용하기 위한 직접형 전단시험은 직접전단시험보다 링 전단시험이 유용한 것을 알 수 있었다.
- (2) 흙의 잔류강도 결정에 적용되었던 쌍곡선함수 ($\tau = \frac{\theta}{a + b\theta}$) 모형을 암석절리면에 적용시켜 회귀분석을 해 본 결과 결정계수 평균 0.9이상으로 높은 상관관계를 보였다.
- (3) 인공모형 재료시험에 있어서 직접전단시험과 링 전단시험의 시험결과를 비교하면 다음과 같다.
ⓐ 수직응력 - 최대전단응력 관계에서 점착력은 각각 3.35 kgf/cm²과 1.59 kgf/cm²(직접전단시험의 약 47%)의 값으로 나타났고 내부마찰각은 각각 41.44°와 8.33°(직접전단시험의 약20%)로 나타났다.

ⓑ 수직응력 - 잔류전단강도와의 관계에서는 점착력이 각각 2.1 kgf/cm²과 0.62 kgf/cm²(직접전단시험의 약 30%), 내부마찰각은 23.02°와 5.16°(직접전단시험의 약22%)의 값으로 링 전단시험의 결과가 낮은 값이 얻어졌다.

- (4) 산사태, 인공사면, 터널의 채기 파괴 등 대변위가 예상되는 곳의 안정성해석의 입력 값으로서는 (3)의 직접 전단시험 결과와 같은 잔류강도 값을 사용하면 위험 측의 설계가 될 가능성이 있으므로 실제 상황을 보다 잘 표현하는 링 전단시험에서 얻은 잔류강도 결과값을 활용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 윤지선, 1991, 암석·암반의 조사와 시험, 구미서관, pp.413~431, pp.555~578
2. 윤지선, 1994, 암반역학, 구미서관, pp.59~70, pp.112~162.
3. 윤지선, 1995, 암의 역학, 구미서관, pp.80~144.
4. 윤현익, 1998, 다단계직접전단시험을 통한 서울화강암의 전단강도 측정에 관한 연구 : 인하대학교 공학석사학위논문.
5. 鈴木素之, 岐梅建夫, 川上浩. 1995, "リングせん断試験による粘土の残留強度特性", 直接形せん断試験の方法と適用に關するシソポジウム發表論文集, 社團法人日本土質工學會 土の一面せん断試験の方 法検討委員會, pp.269~274.
6. 釜井俊孝 1995, "リングせん断試験による破壊の傳播過程", 直接形せん断試験の方法と適用に關するシソポジウム發表論文集, 社團法人日本土質工學會 土の一面せん断試験の方法検討委員會, pp.255~262.
7. Bishop, A. W., Green, G. E., Garga, V. K., Andresen, A. and Brown, J. D. (1971) "New ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength", Geotechnique 21, No.4, 273~328.
8. E. Heak and Brown, 1980, Underground Excavation in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp.131~177.
9. Richard E. Goodman, 1989, Introduction to Rock Mechanics, John Wiley & Sons, pp.141~177
10. Xu L. S. & de Freitas. M. H. (1988) "Use of a rotary shear box for testing the shear strength of rock joints". Geotechnique 37, No. 2, 301~309.

(접수일자 2000. 5. 19)