

링 전단시험기를 이용한 연암의 절리에 대한 잔류강도 특성에 관한 연구 A Study on Residual Stress Characteristics for Joint of Soft Rock in Ring Shear Tests

권준욱¹⁾, Joon-Uk Kwon, 김선명²⁾, Sun-Myung Kim, 윤지선³⁾, Ji Son Yoon

¹⁾인하대학교 지구환경공학부 석사과정, Graduate Student, Division of Environmental and Geosystem Engineering, Univ of Inha.

²⁾인하대학교 지구환경공학부 박사과정, Graduate Student, Division of Environmental and Geosystem Engineering, Univ of Inha.

³⁾인하대학교 지구환경공학부 교수, Professor, Division of Environmental and Geosystem Engineering, Univ of Inha.

SYNOPSIS : In this study, we tried to determine failure criteria for joints of soft 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. Ring shear test with the specimens which cover a large deformation range was adapted to measure a residual stress, and was possible to present the peak stress to present the peak stress to the residual stress at the same time. Residual stress is defined a minimal stress of specimens with a large displacement and the result of the peak residual stress is shown by a size of displacement volume. Therefore, the residual stress in soil was decided by shear stress of maximum shear stress - shear displacement(angle) based on the test result of a hyperbolic function ($\tau = \frac{\theta}{a + b\theta}$, $a, b =$ experimental constant). In this study, it was proved that the residual stress of rock joint can be determined by using of this method.

Keywords : residual stress, ring shear test, large displacement, joint

1 서론

현지 암반은 단층이나 절리, 균열 등의 불연속면을 포함하고 있다. 이들 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 암석역학에서는 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 암반전단시험이나 블록전단시험등 직접전단시험과 암반삼축압축시험이 이용되고 실내 시험으로써 불연속면을 포함하고 있는 시험편에 대한 삼축압축시험과 직접전단시험이 이용된다.

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

링전단시험은 시험과정중에 전단면의 면적변화가 없고 연속적인 변위를 구현하는 장점을 가지고 있기 때문에 매우 큰변위에 대한 전단특성을 결정할 수가 있다.

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

2.2 수직응력

수직응력은 식 (1)에 의해 계산된다.

$$\sigma = PA_o / \pi(R_2^2 - R_1^2) \quad (1)$$

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 (2)와 같이 계산된다.

$$\tau = 3L(F_1 + F_2) / 4\pi(R_2^3 - R_1^3) \quad (2)$$

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.

2.4 잔류강도의 결정법

실내시험에 대해서 전단응력-전단변위각 관계의 실측치는 장기간의 전단에 대해서도 엄밀하게 정상상태에는 도달하지만, 실제로는 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 (1)에서 본 결정법을 모식적으로 보이고 있다. τ_{max} 를 최대전단응력, σ_n 을 수직응력, θ_{max} 를 최대전단강도시의 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 (3)으로 표현한 쌍곡선 근사가 적용 가능하다고 가정한다.

$$\tau = \frac{\theta}{a + b\theta} \quad (3)$$

여기서 a, b 는 실험에서 얻어진 정수이다.

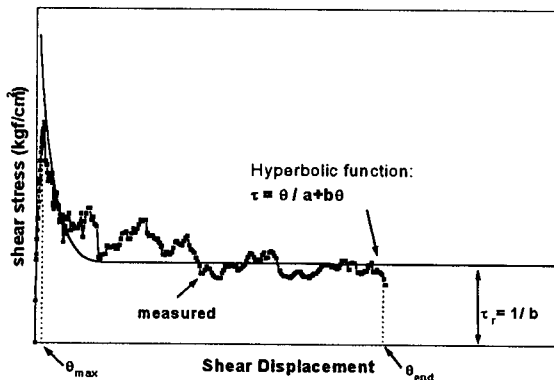


그림 1. 쌍곡선 근사에 의한 잔류강도 결정법

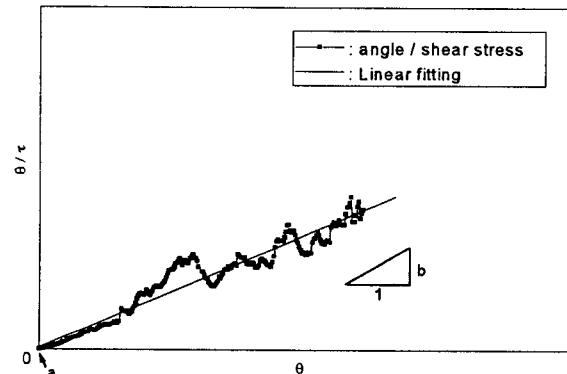


그림 2. 실험정수 a, b의 결정법

식 (3)과 실측치의 적합성이 양호하다면, 쌍곡선근사의 가정이 성립한다는 것에 대해서, 잔류강도 $\tau_r = \frac{1}{b}$ 이 때, 정수 a, b 는 그림 (2)에 보는바와 같이 $\theta/\tau \sim \theta$ 관계에 있어서 최소자승법에 의해 fitting 한 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 수직 하중을 가하기 위한 유압용 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 상단부에는 Torque Arm System과 변위 측정용 LVDT가 Arm상부에 장착되었다. 하부 회전축에는 회전각도를 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 나타나있다.

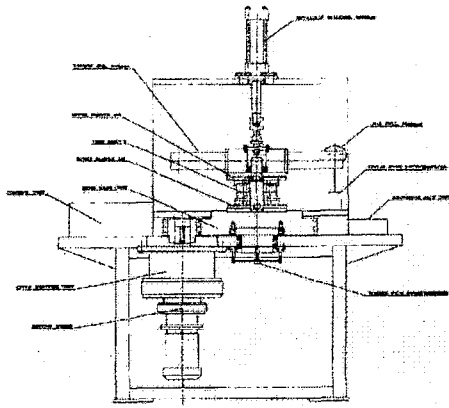


그림3-a. 링 전단시험기의 구성도

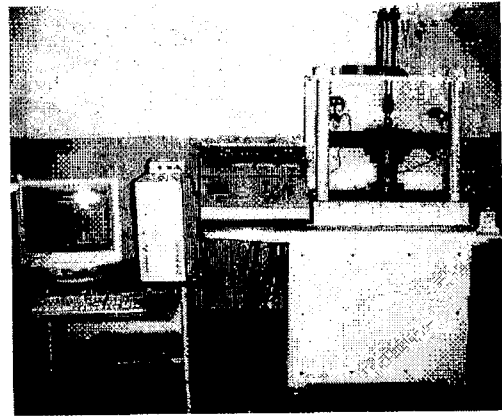


그림3-b. 링 전단시험기 세트

4 직접전단시험 장치

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

5 시료의 특성 및 시험편제작

5.1 시료의 물리·역학적 특성

본 연구에서는 균질한 시험편을 얻기 위하여 칼슘실포알루미네이트(CSA)계 시멘트를 주재료한 무수 축, 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, 압열인장강도, 정탄성계수, 탄성파속도 등을 구하였고 이 결과는 표 (1)에 나타내었다.

표 1. 몰탈 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



그림 4. 제작된 시료의 모습

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 블록중 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 (4)와 같은 내경 52.25mm, 외경 100.25mm의 절리면이 시험편의 가운데 들어있는 시멘트 몰탈 시험편을 제작하였다.

6 시험순서 및 방법

6.1 링 전단시험

링 전단시험의 전체적인 시험방법은 다음과 같다.

- (1) 에폭시 수지를 이용하여 시험편을 몰딩한다.
- (2) 시험 table에 몰딩된 시험편 및 Jig를 결합한후 Torque Arm위치를 Load cell에 살짝 접촉하도록 Torque Arm을 위치시킨다.
- (3) 시료가 정 위치에 도달하면 원하는 수직압력을 시료에 가한다.
- (4) Torque Arm의 양단 300mm 위치에 2개의 변위 측정용 LVDT를 setting한다.
- (5) 전원을 공급하고 회전속도를 조절한 후 시료에 Torque를 가한다.
- (6) 측정하고자 하는 전단변위 range를 지난 후 전단하중의 변화가 없다고 판단되면 시험을 종료한다.

6.2 직접 전단시험

직접전단시험의 전체적인 시험방법은 다음과 같다.

- (1) 에폭시 수지를 이용하여 시험편을 몰딩한다.
- (2) 몰딩된 시험편을 전단상자 안에 설치하고 시험기를 조립한다.
- (3) 시험간 일정한 수직하중을 유지하도록 하기 위하여 압력유지기의 상태를 조절한다.
- (4) 수직압력을 가한후 Dial gauge를 전단상자 상단부에 설치한다.
- (5) 전단하중을 가하기 시작한다. 최대전단하중을 지나 변형률 15%이상에서도 전단하중의 변화가 크지 않다면 잔류강도가 나타난 것으로 보고 가압을 중단한다.

7 시험 결과 및 고찰

7.1 링 전단시험과 직접전단시험의 전단강도 비교

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

표 2. 링 전단시험과 직접전단시험 결과 값의 비교분석표

Ring shear test					Direct shear test				
σ_n	τ_{max}	τ_r	τ_{max}/σ_n	τ_r/σ_n	σ_n	τ_{max}	τ_r	τ_{max}/σ_n	τ_r/σ_n
(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)			(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)		
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

7.2 링 전단시험과 직접전단시험에서의 전단변위-전단응력

링 전단시험은 전단방향에 단면을 가지는, 그림 (5)와 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 Peak강도에서 잔류강도까지의 넓은 변형 영역을 동시에 실현하는 전단시험 방법으로서는 링 전단시험이 유용하다. 또한 직접전단시험의 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.

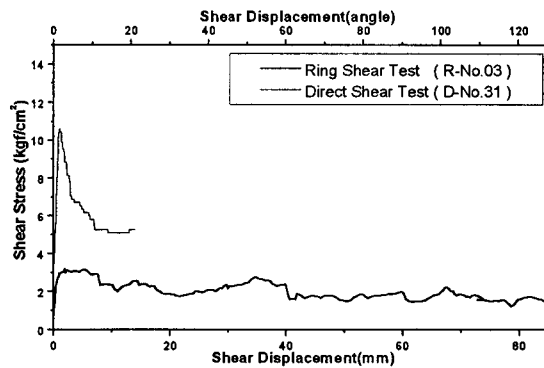


그림 5. 링 전단시험과 직접전단시험의 전단변위-전단응력 곡선의 비교

7.3 링 전단시험과 직접전단시험에서의 수직응력에 따른 전단응력의 거동

수직응력과 전단응력의 관계를 그림 (6), (7)에 나타내었다. 그림 (6)은 직접전단시험과 링 전단시험의 수직응력과 최대전단응력의 관계를 선형 근사하여 각각 점착력과 내부마찰각을 나타내었다, 여기서 점착력은 각각 3.35kgf/cm²과 1.59kgf/cm²(직접전단시험의 47%)로 1.76kgf/cm²의 차이를 보였고 내부마찰각은 각각 41.44 °와 8.33 °(직접전단시험의 약20%)로 31.11 °의 차이를 나타내었다. 그림 (7)은 직접전단시험과 링 전단시험의 수직응력과 잔류전단강도와의 관계를 선형 근사하여 각각 점착력과 내부마찰각을 나타내었다. 여기서 점착력은 각각 2.1kgf/cm²과 0.62kgf/cm²(직접전단시험의 약30%)로 1.48kgf/cm²의 차이를 보였고 내부마찰각은 23.02 °와 5.16 °(직접전단시험의 약22%)로 17.86 °의 차이를 나타내었다.

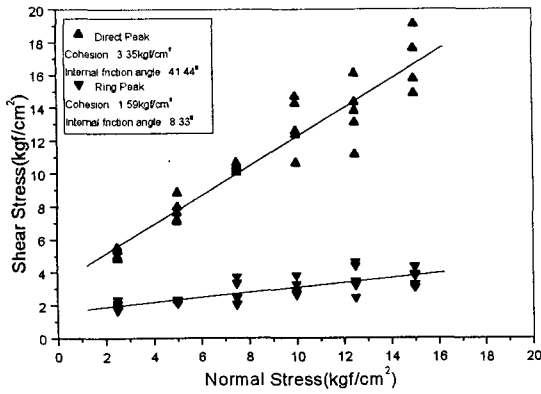


그림 6. 수직응력과 최대 전단응력과의 관계

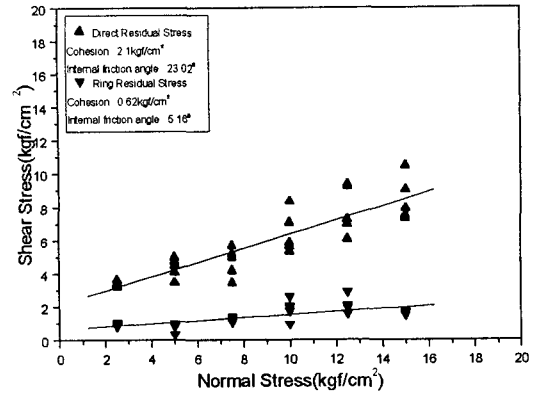


그림 7. 수직응력과 잔류전단강도와의 관계

7.4 링전단시험의 전단변위와 전단응력의 관계

링전단시험을 5kgf/cm², 10kgf/cm², 15kgf/cm²의 일정 수직응력을 유지하면서 측정된 결과 전단변위에 따른 전단응력의 변화를 그림 (8)에 나타내었다. 여기서 수직응력이 증가함에 따라 전단응력 증가하는 현상이 뚜렷이 보였고 같은 일정한 수직응력을 가해주었을 때는 거의 같은 양상을 보였다. 전단변위가 증가함에 따라 잔류응력으로 점차 수렴해 가는 양상을 보였다.

7.5 링 전단시험의 전단변위에 따른 수직변위의 거동

링전단시험을 실시한 결과 전단변위에 따른 수직변위의 대표적인 거동을 그림 (9)에 나타냈다. 이 그림은 수직압 12.5kgf/cm²하에서의 측정치이다.

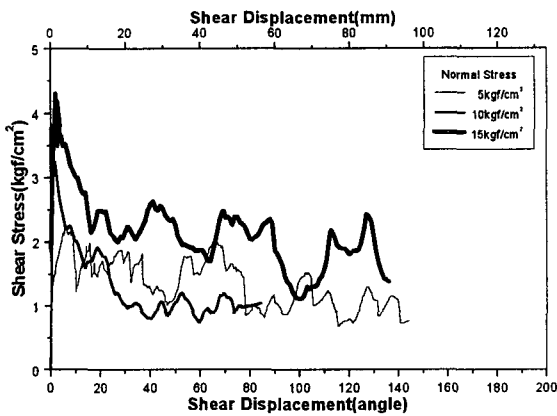


그림 8. 3가지 수직응력하에서의 전단응력-전단변위곡선

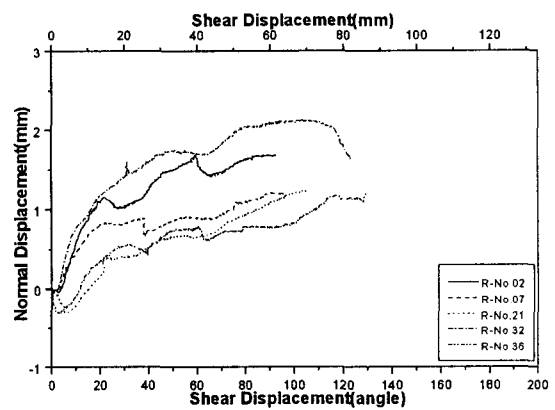


그림 9. 대표적인 수직변위 - 전단변위 곡선

8 결론

본 연구에서는 연암 절리에 대한 전단강도 및 잔류강도특성을 알아보기 위하여 시험편에 대변위를 적용하는 것이 가능한 링 전단시험기를 설계 제작하여 사용하였다.

일정 수직응력하에서 절리면의 거동상태를 보기 위하여 동일한 거칠기를 가지는 시멘트 몰탈 시험편을 만들어 시험하였고 잔류강도는 쌍곡선함수에 근사하는 방법으로 결정하여 직접전단시험 결과 값과 비교함으로써 링 전단시험기의 유용성을 검증하였다.

본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 전단강도 특성을 파악하기 위해 시험편에 대변위를 적용하기 위한 직접형 전단시험으로는 직접전단 시험보다 링 전단시험이 유용하다.
2. 흙의 잔류강도 결정에 적용되었던 쌍곡선함수($\tau = \frac{\theta}{a + b\theta}$)모형을 연암 절리면에 적용시켜 회귀분석을 해본 결과 유의수준 0.01에서 유의하였고 결정계수는 평균 0.9이상으로 높은 상관관계를 나타냈다.
3. 직접전단, 링 전단시험의 시험결과를 비교하면 인공모형 재료시험에 있어서 수직응력-최대전단응력 관계에서 점착력은 각각 3.35kgf/cm²과 1.59kgf/cm²(직접전단시험의 약47%)의 값으로 나타났고 내부마찰각은 각각 41.44 °와 8.33 °(직접전단시험의 약20%)로 나타났다. 수직응력-잔류전단강도와의 관계에서는 점착력이 각각 2.1kgf/cm²과 0.62kgf/cm²(직접전단시험의 약30%), 내부마찰각은 23.02 °와 5.16 °(직접전단시험의 약22%)의 값으로 링 전단시험의 결과가 낮은 값이 얻어졌다.
4. 산사태등 대변위가 예상되는 안정성해석에 입력 값으로서는 링 전단시험에서 얻은 잔류강도 결과 값을 활용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

9 참고문헌

1. 김영근, 1993, 절리특성이 인공절리를 포함한 불연속암반의 변형거동에 미치는 영향에 관한 연구 : 서울대학교 공학박사학위논문.
2. 윤지선, 1991, 암석·암반의 조사와 시험, 구미서관, pp.413~431, pp.555~578
3. 윤지선, 1994, 암반역학, 구미서관, pp.59~70, pp.112~162.
4. 윤지선, 1995, 암의 역학, 구미서관, pp.80~144.
5. 윤현익, 1998, 다단계직접전단시험을 통한 서울화강암의 전단강도 측정에 관한 연구 : 인하대학교 공학석사학위논문.
6. 이상돈, 1996, 절리형상의 정량적 측정을 통한 각종 거칠기 파라미터의 비교분석 및 전단거동 해석: 서울대학교 공학박사학위논문.
7. 이정인, 1995, 암반사면공학, 엔지니어즈, pp.111~161.
8. 鈴木素之, 崎梅建夫, 川上 浩. 1995, "링겐센斷試驗による粘土の残留強度特性", 直接形せん斷試験の方法と適用に関するシンポジウム發表演文集, 社團法人日本土質工學會 土の一面せん斷試験の方法検討委員會, pp.269~274.
9. 釜井俊孝 1995, "링겐센斷試驗による破壊の傳播過程", 直接形せん斷試験の方法と適用に関するシンポジウム發表演文集, 社團法人日本土質工學會 土の一面せん斷試験の方法検討委員會, pp.255~262.
10. 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.
11. E. Heak and Brown, 1980, Underground Excavation in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp.131~177.
12. Richard E. Gooman, 1989, Introduction to Rock Mechanics, John Wiley & Sons, pp.141~177
13. Xu .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.