

암반 절리의 일정 수직 강성 조건하의 전단거동에 관한 실험적 연구

임홍래 (청석 엔지니어링)

이정인 (서울대학교)

1. 서론

지하 공간의 개발을 위해서는 지하의 주요 구성 요소인 암반의 공학적 성질을 파악하는 것이 필수적이다. 암반은 단층, 절리, 균열 등의 불연속면을 포함하고 있어, 지하 암반의 공학적 성질을 규명하기 위해서는 암반 내에 포함되어 있는 불연속면의 역학적 전단 거동을 조사하여야 한다. 암반 절리면의 전단 거동을 조사하기 위한 직접 전단 시험은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 전단 변위가 발생하는 동안 수직 하중을 일정하게 유지하는 일정 수직 하중 (constant normal load, CNL) 조건의 직접 전단 시험과 전단 변위에 의해 발생하는 수직 팽창 (dilation)에 따라 수직 하중을 일정한 비율로 증가시키는 일정 수직 강성 (constant normal stiffness, CNS) 조건의 직접 전단 시험이 그것이다.

일정 수직 하중 조건의 직접 전단 시험은 일정 수직 강성 조건에 비해 상대적으로 수직 변위에 대한 구속이 없고 상재 하중이 일정한 암반 사면의 전단 거동을 해석하는데 적합하다. 또한 일정 수직 하중 시험은 구현 요소가 적고 방법이 간단하여 암반 사면의 거동 해석 뿐만 아니라 지하 암반 절리의 거동을 해석하는 시험방법으로도 널리 사용되어 왔다. 그러나, 지하 암반 절리의 전단 거동은 심도에 따른 초기 수직 하중의 재하와 더불어, Fig. 1.1에서 보여지는 것과 같이 굴착 자유면 주위 암반의 평행 절리, 록볼트, 록피어 등 절리면과 주위 암반의 상호작용을 통한 구속으로 인하여 발생하는 암반의 수직 강성 요소를 고려하여야 한다. 따라서, 이와 같은 지하 암반 절리의 거동을 좀더 정확하게 규명하기 위해서는 일정 수직 강성 시험이 필요하다.

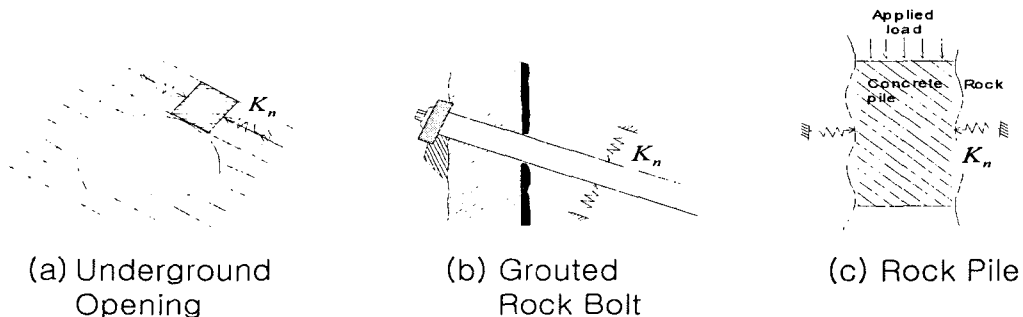


Fig. 1.1 Examples of the constant normal stiffness condition (after Mouchaorab et al., 1994).

일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험에서 일정 수직 강성은 용수철을 시료와 하중기 사이에 삽입하거나, 피드백이 가능한 서보 콘트롤 유압 시험기를 이용하여 구현이 가능하다. 일정 수직 강성을 유지하기 위하여 용수철을 사용하게 되면, 전단 시험이 진행되는 동안 발생하는 면적 변화를 고려할 수 없으므로 보다 정확한 시험을 위해서는 완벽한 서보밸브 제어가 가능한 시험기가 필요하다. 초기의 연구에는 용수철을 사용하는 경우 (Lam, 1982), (Benmokrane et al., 1989), (Indraratna et al., 1999), (Johnston et al., 1987)가 많았으나 점차 서보밸브 제어 (Jiang et al., 2003), (Mouchaorab et al., 1994), (Seidel et al., 2002)로 바뀌고 있는 추세이다.

일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험은 Lam (1982)에 의해서 그 사례가 발표된 이후에 세계적으로 연구가 진행 중에 있으며, 그 대표적 사례는 아래와 같다.

Johnston et al. (1987)은 콘크리트와 암석을 사용한 규칙적인 삼각 톱니 시료의 전단 거동을 일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험 및 수치 해석을 통하여, 전단 시험을 크게 (1) 절리의 밀착, (2) 수직 변위 발생으로 점착력 감소, (3) 절리면 요철의 미끌림 (asperity sliding), (4) 절리면 요철의 전단 (asperity shearing) 및 잔류 전단 강도 도달의 4단계로 구분 하였다.

Mouchaorab과 Benmokrane (1994)은 시멘트 모르타르를 사용한 규칙적인 삼각 및 사각 톱니 시료에 대해 일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험을 실시하여, 절리 경사각과 정점 전단 응력, 최대 수직 응력, 최대 수직 팽창 등 전단 파라미터 사이에는 다음과 같은 관계가 있음을 확인하였다. 경사각이 15° ~ 25° 범위 내에서 증가할 경우는 각각의 파라미터가 증가하는 경향을 보이다가, 경사각이 더 커지면 오히려 감소하는 경향을 보인다. 정점 전단 응력에 도달 했을 때의 전단 변위는 경사각이 증가함에 따라 역 S자 형태로 감소하다가 경사각이 40° 를 넘어서면 일정해지는 경향을 보인다.

Indraratna et al. (1999)은 석고로 만든 규칙적인 이등변 삼각 톱니 모양 단면의 인공 절리 시료에 대하여 일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험을 실시하여, 일정 수직 강성 조건의 전단 시험이 일정 수직 하중 조건의 전단 시험에 비하여 전단 강도는 더 크게, 그리고 수직 팽창과 마찰각은 더 작게 평가하는 경향이 있음을 확인하였다. 그리고 일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험은 동일한 수직 강성이 작용할 경우 초기 응력에 비교적 무관하게 마찰각이 결정되는 것으로 밝히고 있다.

국내에서는 김대영 (2001)이 치과용 석고로 만든 톱니모양의 인공절리 시료를 대상으로 수직 팽창을 완전 구속하는 무한 수직 강성 시험을 실시하여, 정점 전단 응력이 일정 수직 하중 시험에 비해서 전단 변위가 상당히 많이 진행된 이후에 도달하는 것을 확인하였다.

이 연구에서는 새로운 일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험이 가능한 서보 콘트롤 유압 시험기를 제작하였다. 그리고 인공 모의 암체로서 시멘트 모르타르를 사용한 이등변 톱니 모양의 인공 절리 시료 및 자연 절리 복제 시료를 제작하여, 거칠기를 정량적으로 측정하고 초기 수직 응력 및 일정 수직 강성을 변화시켜가며 실험을 실시하여 그 결과를 비교 분석하였다.

2. 시료 및 시험 장비

2.1 시료 준비

이 연구에 사용된 재료는 인공 모의 암체로서 시멘트 모르타르를 사용하였다. 시멘트 모르타르는 (주)유니온의 ‘고강도 그라우트 (HS)’를 사용하였으며, 시멘트 모르타르의 물-시멘트 비를 중량비 13% (물:시멘트 = 13:100)로 하여 이등변 톱니 모양의 인공 절리 시료와 자연 절리면의 복제물 (replica) 시료를 제작하였다.

연구에 사용한 평균 3일 기건 양생시킨 시멘트 모르타르의 단축 압축 강도는, 양생 시간이 50시간에서 74시간으로 증가하는 동안 40 MPa에서 47 MPa로 점차 증가하였고, 탄성 계수는 12.4 GPa에서 14.0 GPa로 증가하는 양상을 보였다. 간접 인장 강도는 4 MPa로 거의 일정한 모습을 보여 단축 압축 강도의 9% 정도로 나타났고, 포아송 비는 0.21로 비교적 일정하였다.

이등변 톱니 모양의 인공 절리 시료는 Fig. 2.1의 성형틀을 이용하여 제작하였으며, 성형틀의 크기는 가로 155 mm, 세로 150 mm, 높이 110 mm로서, 인공 절리 시료의 상부 반단면과 하부 반단면을 동시에 만들 수 있다. 가로는 65 mm와 90 mm로 분리되어 그 사이에 경사각을 만들 부재를 끼워 넣을 수 있다. 부재의 모습은 Fig. 2.2와 같다.

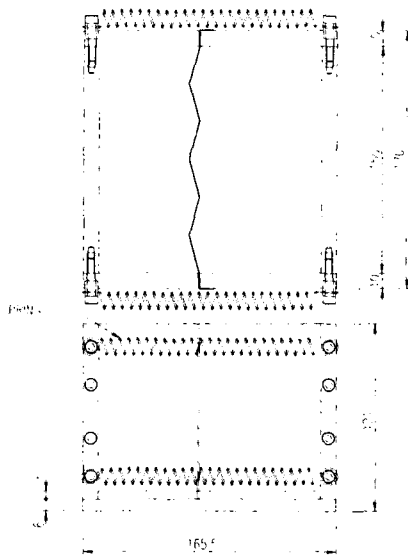


Fig. 2.1 Schematic diagram of mold frame.

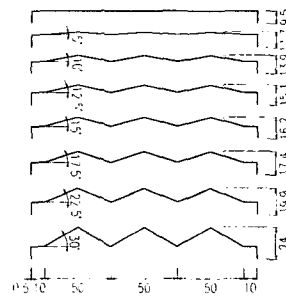


Fig. 2.2 Schematic diagram of insert in mold frame for different inclination angles.

이등변 톱니 모양의 인공 절리 시료는 경사각 0°, 5°, 10°, 12.5°, 15°, 17.5°, 22.5°, 30°의 8가지 종류를 제작하였다. 전단시험을 실시한 인공 절리 시료는 ‘AJ-경사각-초기 수직 응력-일정 수직 강성’의 형식으로 표기 하였다. 예를 들어 경사각이 12.5°이고, 초기 수직 응력이 3.5 kg/cm², 그리고 일정 수직 강성이 5 kg/cm²/mm 인 경우에는 ‘AJ-12.5-3.5-5’로 명명 하였다.

자연 절리면 복제물 시료는 25 m 심도의 터널 공사 현장에서 채취한 자연 암석 절리면을 복제하여 제작하였다. 자연 암석 절리면은 3가지 종류를 채취했으며, 표면의 거칠기는 Barton이 제안한 거칠기 프로파일과 비교하여 6~8, 10~12, 16~18 정도로 평가하였다.

자연 암석 절리면의 상대 절리면은 치과용 석고로 자연 절리면을 복제하여 만들었다. 준비한 상부와 하부의 절리면 한 쌍에 대해서, 50 mm 두께로 알루미늄 주물을 사용한 복제물을 만들어 자연 절리면 성형틀의 밀면으로 제작하였다. Fig. 2.3은 알루미늄 주물을 사용하여 제작된 복제물의 모습을 보여주고 있다. 알루미늄 주물로 만든 복제물을 가공하여 폭 110 mm, 길이 150 mm의 자연 절리면 성형틀의 밀면으로 제작하고, 10 mm 두께의 아크릴로 옆면을 제작하여, Fig. 2.4에서 보여지는 성형틀을 만들었다. 그리고 제작된 성형틀에 시멘트 모르타르를 사용하여 자연 절리면 복제물 시료를 제작하였다.

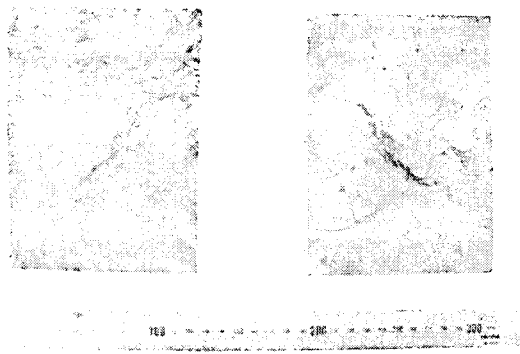


Fig. 2.3 A view of surface roughness of aluminum replica of natural joint.

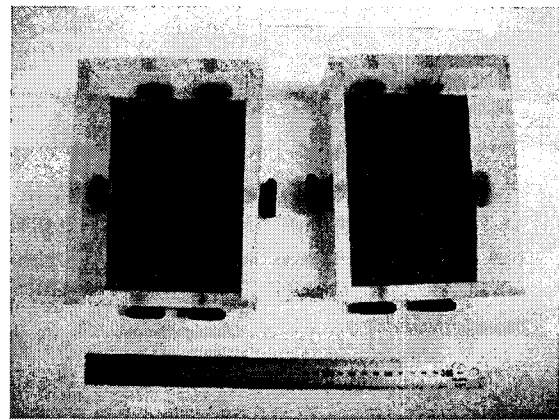


Fig. 2.4 A view of mold frame for natural jointed replica.

자연 절리면 복제물 시료는 종류 표기를 'NJ'로 하고 거칠기 16~18은 'H', 거칠기 8~10은 'M', 거칠기 6~8은 'L'로 나타내었다. 그리고 AJ시료의 명명과 비슷하게, 자연 절리면 복제물 시료를 'NJ-거칠기-초기 수직 응력-일정 수직 강성'의 형식으로 표기하였다. 예를 들어 거칠기 16~18이고, 초기 수직 응력을 1.5 kg/cm^2 , 일정 수직 강성을 $2 \text{ kg/cm}^2/\text{mm}$ 로 하였다면, 'NJ-H-1.5-2'로 시료를 명명 하였다.

AJ 시료 및 NJ 시료는 직접 전단 시험 이전에 표면의 거칠기를 측정하였다. 측정에 사용된 기기는 서울대 암반공학 연구실에서 설계 및 제작되어 배기윤과 이정인 (2002)에 의해서 성능이 검증된 3 차원 거칠기 측정기를 이용하였다. AJ 시료 및 NJ 시료의 거칠기 측정간격은 가로 1 mm, 세로 1 mm로 하였고, 시료 외곽 5 mm는 해석에서 제외하여 자료처리 범위는 폭 100 mm, 길이 140 mm로 하였다.

다수의 거칠기 정량화 파라미터 중, 이 연구에 사용된 것은 절리면 기울기의 평방평균값 Z_2 , 절리면의 평균 거칠각 i_{ave} , 프랙탈 차원 D , 절리면 상대 면적비 R_s 의 4가지이다 (Belem et al., 2000). 그리고, AJ 시료와 NJ 시료의 비교 분석을 위한 매개변수는 절리면 평균 거칠각 i_{ave} 을 이용하였다. 거칠기 측정을 통한 거칠기 정량화 결과는 다음과 같다.

Table 2.1 Summary of roughness parameter about artificial saw-tooth joint sample.

Sample number	Z_2	i_{ave}	D	R_s
AJ - 0	0.0396	1.1426	1.000241	1.003695
AJ - 5	0.1194	6.4779	1.000586	1.015516
AJ - 10	0.1895	9.9309	1.001820	1.039185
AJ - 12.5	0.2232	12.3093	1.001985	1.051105
AJ - 15	0.2647	14.4829	1.002691	1.072423
AJ - 17.5	0.3153	16.6679	1.005088	1.101715
AJ - 22.5	0.4037	21.5497	1.007381	1.166115
AJ - 30	0.5674	29.1401	1.009989	1.327031
NJ - H	0.3194	13.8969	1.010615	1.187143
NJ - M	0.2590	10.0032	1.007791	1.152468
NJ - L	0.2548	9.4137	1.006812	1.141555

2.2 실험 장치

전단 시험은 서울대 암반공학 연구실에서 설계하여 제작한 일정 수직 하중 및 일정 수직 강성 전단 시험이 가능한 직접 전단 시험기를 이용하였다. 전단 시험기의 주요 부위는 시험기 본체와 시험기를 제어하는 컴퓨터, 그리고 유압 펌프 장치, 신호 증폭기, A/D 변환기 등으로 구분할 수 있다.

Fig. 2.5는 직접 전단 시험기에서 전기적 신호의 흐름을 나타내며, 변위 변환기 및 하중 변환기의 전기신호와 서보 밸브의 전기신호는 증폭기를 거쳐 컴퓨터에서 처리된다.

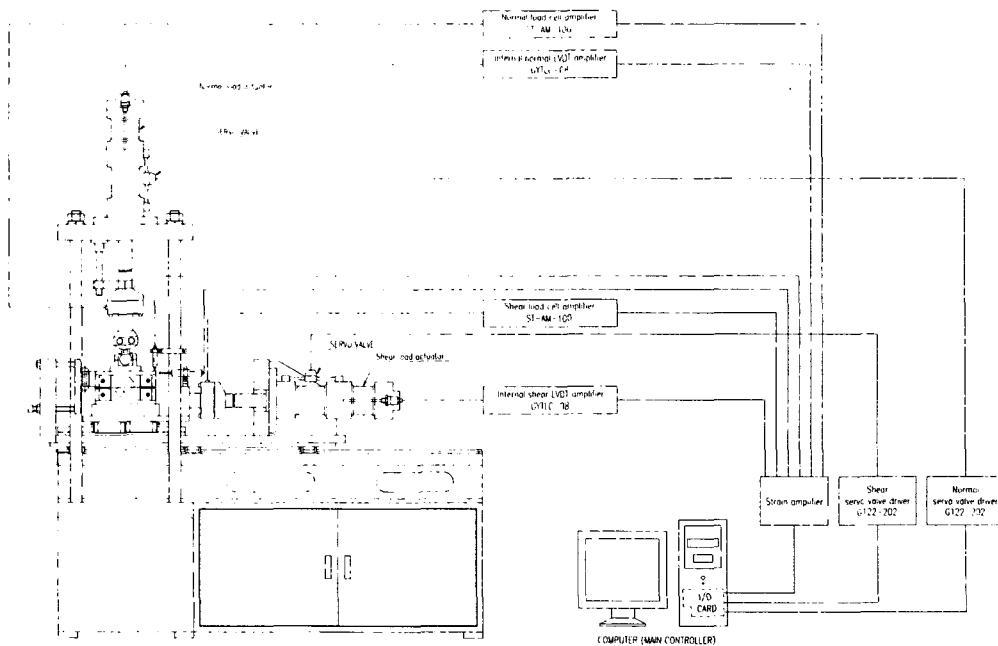
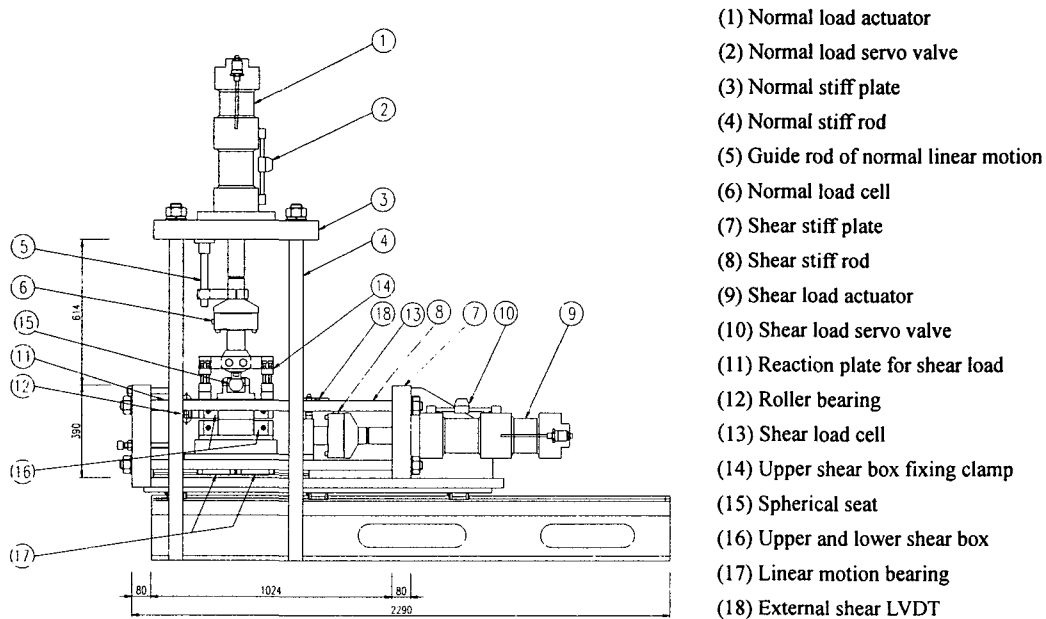


Fig. 2.5 Schematic diagram of electric signal flow of the new direct shear machine.

2.2.1 직접 전단 시험기 본체

전단 시험기 본체의 개략도 및 주요 부위의 명칭은 Fig. 2.6에 제시되어 있다. 전단 시험기 본체는 수직축 제어와 전단축 제어로 구분하여 설계하였다. 수직축 제어와 전단축 제어는 변위제어와 하중 제어가 가능하고, 그 둘은 서로 독립적인 논리 조합이 가능하다.



- (1) Normal load actuator
- (2) Normal load servo valve
- (3) Normal stiff plate
- (4) Normal stiff rod
- (5) Guide rod of normal linear motion
- (6) Normal load cell
- (7) Shear stiff plate
- (8) Shear stiff rod
- (9) Shear load actuator
- (10) Shear load servo valve
- (11) Reaction plate for shear load
- (12) Roller bearing
- (13) Shear load cell
- (14) Upper shear box fixing clamp
- (15) Spherical seat
- (16) Upper and lower shear box
- (17) Linear motion bearing
- (18) External shear LVDT

Fig. 2.6 Schematic diagram of the new direct shear machine.

Fig. 2.6의 맨 위에 위치해 있는 수직 액츄에이터는 내부에 내장 변위변환기를 포함하고 있으며, 서보밸브로 제어가 된다. 수직 액츄에이터는 전단 액츄에이터의 모습과 동일하며, 전단 액츄에이터의 기능 또한 수직 액츄에이터와 동일하다. 수직 액츄에이터와 전단 액츄에이터에 부착되어 있는 2개의 서보밸브는 미국 MOOG사의 G761-3003을 사용하였으며, 서보앰프 G122-202를 이용하여 제어한다. 내장 변위변환기는 자기유도 방식을 이용하는 일본 SANTEST의 GYRP-100을 사용하였고, 제어는 GYTLC-08 제어를 사용하였다.

수직 강판은 수직 액츄에이터를 지지하는 역할 및 4개의 수직 강봉과 수직운동 안내봉을 지지하는 역할을 한다. 그리고 전단 강판은 전단 액츄에이터를 지지하는 역할 및 4개의 전단 강봉과 전단 반력판을 지지하는 역할을 한다. 하중 변환기는 국내 '봉신 로드셀'사의 DSCK를 사용하였다.

롤러 베어링은 상부 전단 상자에 2개가 고정되어, 전단 하중을 전단 반력판에 전달해주며 수직 팽창이 발생할 때에 전단 하중에 의한 마찰력을 극소화 한다. 직선운동 베어링은 일본 THK사 제품으로 하부 전단 상자 밑에 2개가 위치하여, 전단시험 시 하부 시료가 직선 운동을 할 수 있게 지지하는 역할 및 수직 하중으로 인한 마찰력을 감소시키는 역할을 한다

2.2.2 제어 프로그램

제어 프로그램은 Visual Basic Ver. 6.0 과 NI (National Instrument)의 라이브러리를 이용하여 작성하였고, Fig. 2.7은 제어 프로그램의 초기 화면이다.

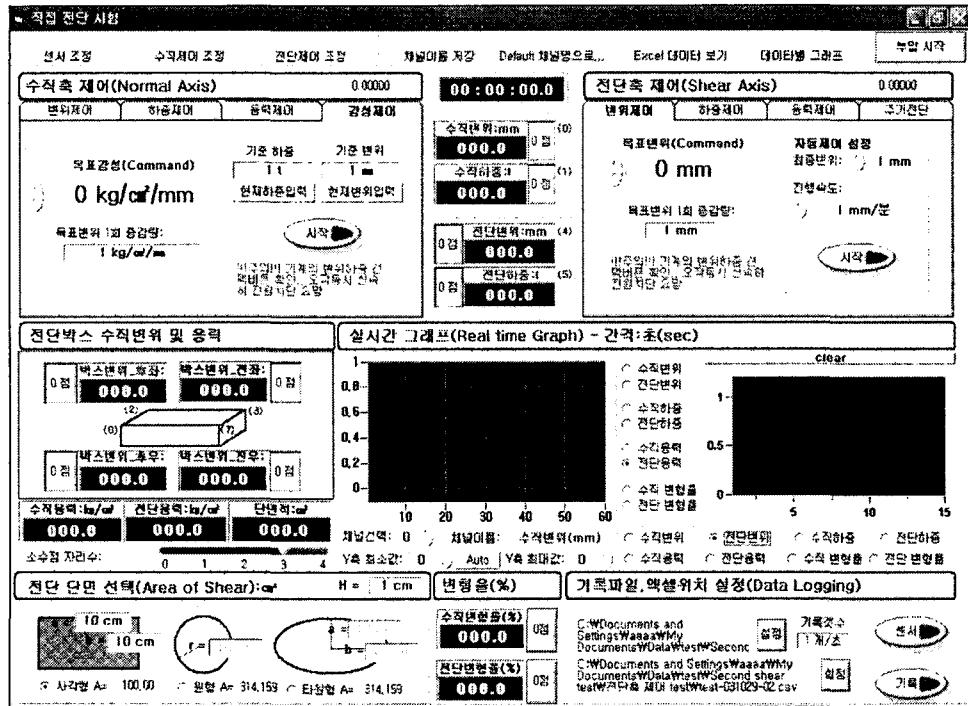


Fig. 2.7 A general view of controlling program.

응력제어를 이용하여 시험 초기에 재하한 초기 수직 응력을 시험간 일정하게 유지할 수 있다. 일정 수직 하중 조건의 직접 전단 시험은 시험간 시료 접촉면의 변화를 고려한 아래의 식에 의해 계산된 하중을 재하함으로써 구현된다.

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A_i} = \sigma_o \quad \therefore P_i = \sigma_o \cdot A_i \quad (2.1)$$

여기서, σ_o 는 초기 수직응력, σ_i 는 임의 전단 변위 지점에서 수직응력, A_i 는 임의 전단 변위 지점에서의 시료 접촉면적, P_i 는 임의 전단 변위 지점에서 재하하는 수직 하중을 의미한다.

또한 강성제어를 이용하여 일정 수직 강성 시험을 할 수 있으며, 일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험에서 임의 지점에서의 수직 하중은 아래의 식을 이용하여 계산된 값을 재하한다.

$$\sigma_{n(CNS)} = \sigma_o + K\delta_v = \frac{P_i}{A_i} \quad \therefore P_i = \sigma_o \cdot A_i + K \cdot A_i \cdot \delta_v \quad (2.2)$$

여기서, $\sigma_{n(CNS)}$ 는 일정 수직 강성 조건 하의 임의 전단 변위 지점에서 수직응력, K 는 제어하고자 하는 수직 강성, δ_v 는 임의 전단 변위 지점에서 발생하는 수직 팽창을 의미한다.

전단 변위에 따른 시료 접촉면의 변화는 이상적인 형태를 가정하여 계산된 값을 사용 하였다.

사각형 시료의 경우 Fig. 2.8의 (A)에서 제시된 것과 같이, 임의 지점에서 측정된 전단변위 δ 에 따라 시료 접촉면이 선형적으로 변화하므로 다음의 식으로 면적을 계산하였다.

$$A_i = b(a - \delta) \quad (2.3)$$

여기서, A_i 는 임의 지점에서의 시료 접촉면적, a 는 시료 길이, b 는 시료의 폭을 나타낸다.

타원에서 장축의 길이와 단축의 길이가 같은 특수한 경우가 원이므로, 원형 시료와 타원형 시료의 경우에는 모두 이상적 타원으로 가정하였다. 타원 시료에 대해 Fig. 2.8의 (B)에서 보여지는 것과 같이, 임의 전단 변위 δ 에서 시료의 접촉면적은 아래의 식을 이용하였다 (Hencher et al., 1989).

$$A_i = \pi ab - \frac{\delta b \sqrt{4a^2 - \delta^2}}{2a} - 2ab \sin^{-1} \left(\frac{\delta}{2a} \right) \quad (2.4)$$

여기서, A_i 는 임의 지점에서의 시료 접촉면적, a 는 타원 장축의 반지름, b 는 타원 단축의 반지름을 나타낸다.

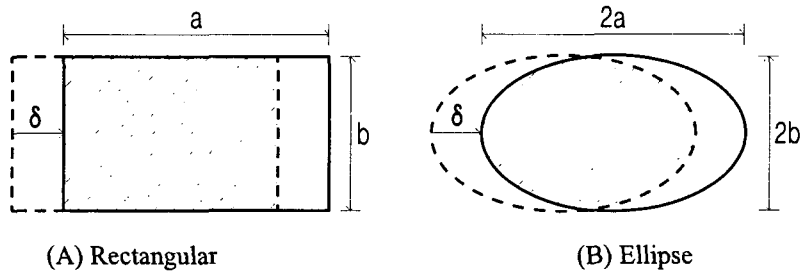


Fig. 2.8 Schematic diagram of surface contact area change.

3. 일정 수직 강성 (CNS) 조건 하의 직접 전단 시험

일정 수직 강성 조건 하의 직접 전단 시험은 AJ 시료와 NJ 시료의 2가지 종류에 대해서 실시하였다. 각각의 시료에 대해서 초기 수직 응력을 0.15, 0.35, 1.00 MPa의 세가지 조건 및 일정 수직 강성을 0.2, 0.5, 1.0 MPa/mm의 세가지 조건으로 실험을 하여, 모두 9가지 경계 조건의 일정 수직 강성 조건 하의 직접 전단 시험을 하였다. 또한, 이 연구의 모든 실험은 전단속도를 2 mm/min으로 하였다.

측정된 데이터의 자료 해석을 위한 전단 파라미터는 다음과 같이 정의를 하였다. 첫 번째 정점 전단 응력 (the first peak shear stress, τ_{p1})은 수직 팽창의 발생으로 절리면의 전단 강도에 작용하는 점착력 성분의 영향이 감소하기 시작하는 지점으로, 전단 변위-전단 응력 곡선에서 전단 변위 3 mm 이하에서 전단 응력이 급변하는 지점으로 평가하였다. 두 번째 정점 전단 응력 (the second peak shear stress, τ_{p2})은 전단 응력이 가장 높게 측정된 지점으로 정하였으며, 선형 팽창각 (linear dilation angle, d_n)은 수직 변위의 30~80% 범위에서 나타나는 선형구간의 기울기로 정하였다.

3.1 이등변 톱니 모양의 인공절리 (AJ) 시료에 대한 일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험

전형적인 일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험에 대한 그래프는 Fig. 3.1과 Fig. 3.2에 제시하였다. 제시된 그래프는 AJ-22.5를 대상으로 일정 수직 강성을 0.5 MPa/mm로 설정한 경우이다. 이때 초기 수직 응력을 0.15, 0.35, 1.00 MPa로 변화시키며 전단 거동을 측정하였다.

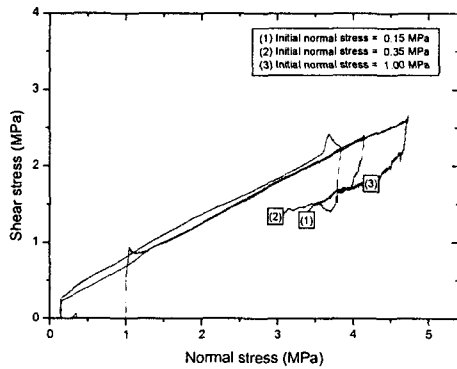


Fig. 3.1 Normal stress versus shear stress curve (AJ-22.5, stiffness = 0.5 MPa/mm).

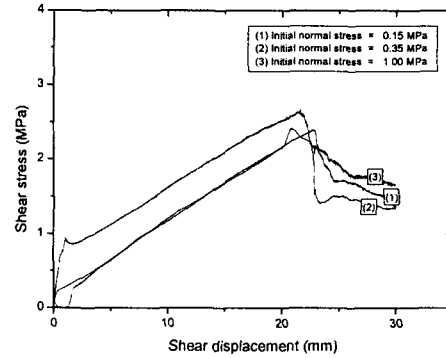
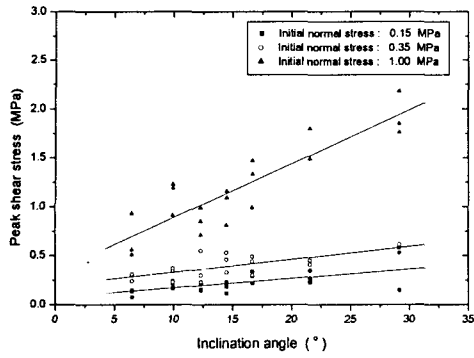


Fig. 4.2 Shear displacement versus shear stress curve (AJ - 22.5, stiffness = 0.5 MPa/mm).

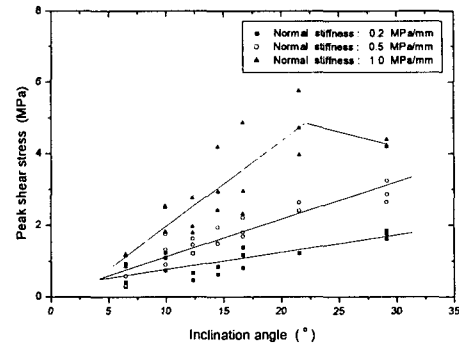
Fig. 3.1에서, 수직 강성이 동일할 경우 마찰각은 초기 수직 응력과 상관관계가 적은 경향을 보임을 알 수 있으며, 결보기 점착력도 비슷한 경향성을 보이고 있다. Fig. 3.2에서, 초기 수직 응력 1.00 MPa의 경우, 전단 응력이 첫 번째 정점 전단 강도 이후 다소 감소하고 다시 일정하게 증가하여 두 번째 정점 전단 강도를 보이는 일반적인 일정 수직 강성 조건의 전단 거동 양상을 보여주고 있다.

일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험 데이터를 분석한 결과, 전단 파라미터가 초기 수직 응력과 상관 관계가 높은 것과 일정 수직 강성과 상관 관계가 높은 것의 두 종류로 구분할 수 있음을 확인 하였다. 첫 번째 정점 전단 응력 (τ_{p1})의 경우 초기 수직 응력과 상관 관계가 높게 나타났으며, 두 번째 정점 전단 응력 (τ_{p2})과 최대 수직 응력 (σ_u), 최대 수직 응력에서의 전단 변위, 최대 팽창량, 그리고 선형 팽창각 (d_n)은 수직 강성과 상관 관계가 높게 나타났다. 그리고 마찰각과 결보기 점착력 및 두 번째 정점 전단 변위는 상관도가 낮지만, 수직 강성에 더 높은 상관 관계를 가지는 것으로 보여진다.

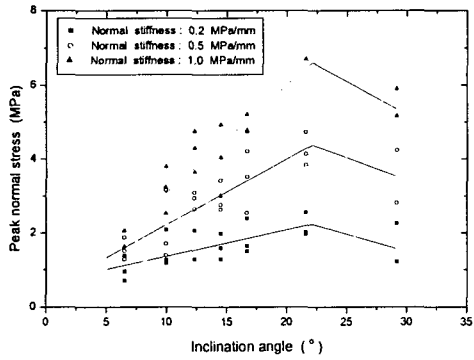
그리고 이들 전단 파라미터 중에서 상관성이 확연히 나타나는 첫 번째 정점 전단 응력, 두 번째 정점 전단 응력, 최대 수직 응력, 선형 팽창각에 대해서 분석을 하였다.



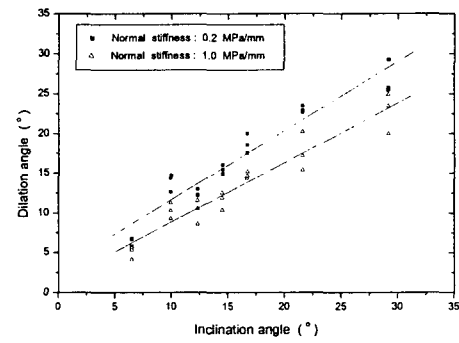
(A) The first peak shear stress



(B) The second peak shear stress



(C) Peak normal stress



(D) Dilation angle

Fig. 3.3 Scatter plot of AJ-sample under CNS condition.

Table 3.1 A result of the first peak shear stress about AJ-sample according to the linear regression.

Initial normal stress (MPa)	Slope (MPa/°)	Intercept (MPa)	Standard deviation (MPa)	Correlation coefficient
0.15	0.009	0.08	0.081	0.6257
0.35	0.013	0.20	0.086	0.7202
1.00	0.055	0.34	0.217	0.8843

Table 3.2 A result of the second peak shear stress about AJ-sample according to the linear regression.

Constant normal stiffness (MPa/mm)	Slope (MPa/°)	Intercept (MPa)	Standard deviation (MPa)	Correlation coefficient
0.2	0.048	0.29	0.272	0.8027
0.5	0.104	0.07	0.305	0.9303
1.0	0.238	-0.42	0.736	0.8559

Table 3.3 A result of peak normal stress about AJ-sample according to the linear regression.

Constant normal stiffness (MPa/mm)	Slope (MPa/°)	Intercept (MPa)	Standard deviation (MPa)	Correlation coefficient
0.2	0.071	0.65	0.369	0.7036
0.5	0.178	0.45	0.531	0.8634
1.0	0.290	0.19	0.614	0.8953

Table 3.4 A result of dilation angle about AJ-sample according to the linear regression.

Constant normal stiffness (MPa/mm)	Slope	Intercept (°)	Standard deviation (°)	Correlation coefficient
0.2	0.869	3.00	1.890	0.9594
0.5	0.831	1.57	1.656	0.9656
1.0	0.749	1.37	1.632	0.9593

Fig. 3.3의 (A)에서, 첫 번째 정점 전단 응력의 경우 경사각이 증가함에 따라 측정값이 증가하는 것으로 나타났다. 초기 수직 응력이 0.15 MPa에서 1.00 MPa로 증가 함에 따라서 경사각과 첫 번째 정점 전단 응력의 선형 회귀식의 기울기가 0.009에서 0.055로 증가했다. 초기 수직 응력에 따라 선형 회귀시킨 3개의 직선에 대해, 기울기는 상관계수 0.9890, 절편은 상관계수 0.9829를 갖는 선형 증가의 경향성을 보이고 있다. 따라서, 경사각이 5°에서 30°사이의 값을 가질 경우, 초기 수직 응력이 0.15MPa과 1.00MPa 사이에서 첫 번째 정점 전단 응력은 초기 수직 응력과 경사각에 대해 아래의 식으로 표현 할 수 있다.

$$\tau_{p1} = (0.06 + 0.28\sigma_{n0}) + (-0.003 + 0.057\sigma_{n0})i \quad (4.1)$$

여기서, τ_{p1} 은 첫 번째 정점 전단 응력을 의미하고, σ_{n0} 는 초기 수직 응력, i 는 경사각을 의미한다.

두 번째 정점 전단 응력의 경우 일정 수직 강성에 큰 영향을 받는 것으로 확인하였다. Fig 3.3의 (B)에서, 경사각이 증가함에 따라 두 번째 정점 전단 응력도 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 수직 강성이 1.0 MPa/mm인 경우 경사각 22°부근에서 감소하는 형태를 보여, Mouchaorab과 Benmokrane (1994)의 실험 결과를 확인 할 수 있었다. 두 번째 정점 전단 응력의 수직 강성에 따른 3개의 선형 회귀직선 또한 기울기와 절편이 상관계수 0.9960과 -0.9974를 갖는 것으로 분석되었다. 따라서, 경사각이 5°에서 22°사이의 값을 가질 경우, 일정 수직 강성이 0.2 MPa/mm와 1.0 MPa/mm사이에서 두 번째 정점 전단 응력은 일정 수직 강성과 경사각에 대해 아래의 식으로 표현 할 수 있다.

$$\tau_{p2} = (0.48 - 0.90K_n) + (-0.006 + 0.241K_n)i \quad (4.2)$$

여기서, τ_{p2} 는 두 번째 정점 전단 응력을 의미하고, K_n 은 수직 강성을 의미한다.

Fig. 3.3의 (C)에서, 최대 수직 응력 또한 경사각이 증가함에 따라 측정치가 증가하는 경향을 보이지만, 경사각이 22° 부근에서부터는 값이 감소하는 경향을 보인다. 세 개의 회귀직선에서 증가하는 구간에 대한 절편의 상관계수가 -0.9977이고, 기울기의 상관계수가 0.9915이다. 따라서, 수직 강성에 따른 경사각과 최대 수직 응력의 세 직선은 경사각이 5°에서 22°사이의 값을 가질 경우, 일정 수직 강성이 0.2 MPa/mm와 1.0 MPa/mm사이에서 아래의 식으로 표현 할 수 있다.

$$\sigma_u = (0.75 - 0.57K_n) + (0.027 + 0.269K_n)i \quad (4.3)$$

여기서, σ_u 는 최대 수직 응력을 의미한다.

선형 팽창각에 대한 회귀 분석값은 Table 4.5에 제시하였다. 그리고 Fig. 4.3의 (D)에서, 선형 팽창각은 경사각이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고, 수직 강성이 증가함에 따라서는 선형 팽창각이 감소하는 경향이 있다. 세 개의 회귀 직선에 대한 절편과 기울기의 상관계수는 -0.8503과 -0.9979이다. 따라서, 경사각이 5°에서 30°사이의 값을 가질 경우, 일정 수직 강성이 0.2 MPa/mm와 1.0 MPa/mm사이에서 3개의 선형 회귀 직선을 일반화시켜 아래의 식으로 표현 할 수 있다.

$$d_n = (3.04 - 1.87K_n) + (0.902 - 0.151K_n)i \quad (4.4)$$

여기서, d_n 은 선형 팽창각을 의미한다.

3.2 자연 절리 복제 (NJ) 시료에 대한 일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험

NJ 시료를 대상으로 실시한 일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험의 일반적인 결과 그래프는 Fig. 3.4와 Fig. 3.5에 보이는 것과 같다. 제시된 그래프는 NJ-L에 대해서, 시험 조건은 수직 강성을 0.5 MPa/mm로 고정시키고 초기 수직 응력을 0.15, 0.35, 1.00 MPa로 변화시킨 것이다.

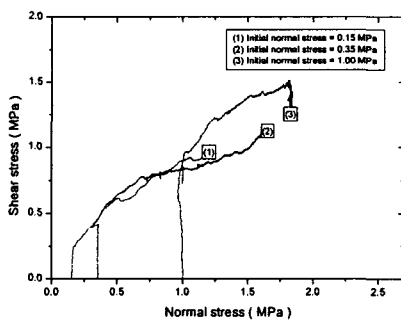


Fig. 3.4 Normal stress versus shear stress curve (NJ-L, stiffness = 0.5 MPa/mm).

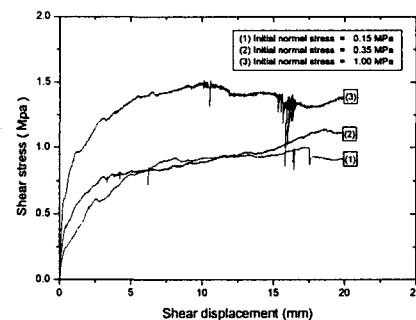
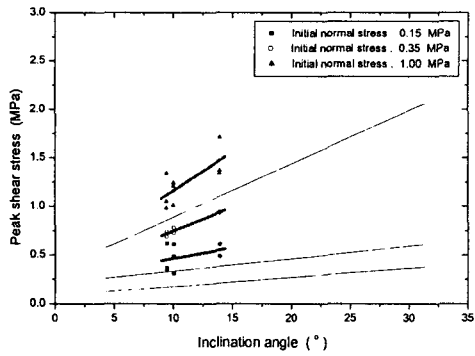
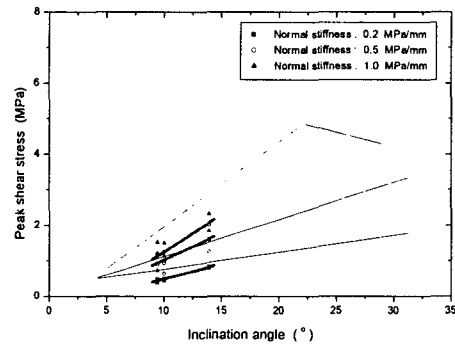


Fig. 3.5 Shear displacement versus shear stress curve (NJ-L, stiffness = 0.5 MPa/mm).

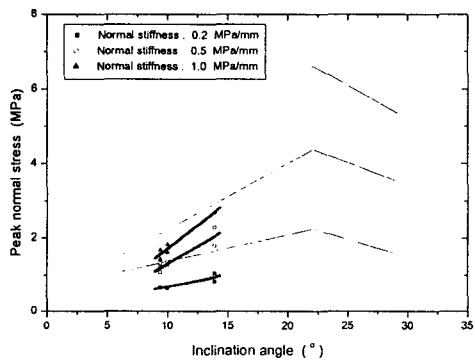
실제 암반 절리를 모사한 NJ 시료에 대한 시험 결과는, 거칠기를 일정한 경사각으로 만든 AJ 시료의 결과와 비교하여 일정한 증감의 형태로 표현되는 선형성이 부족하지만, 시험결과의 경향성은 비슷한 형태를 보이고 있다.



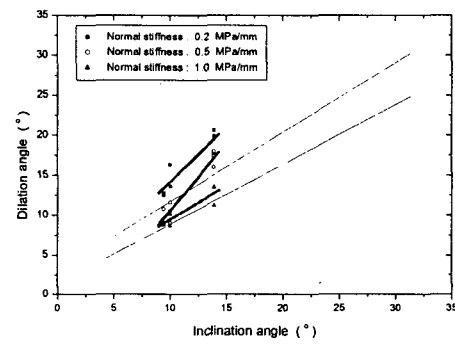
(A) The first peak shear stress



(B) The second peak shear stress



(C) Peak normal stress



(D) Dilation angle

Fig. 3.6 Scatter plot of NJ-sample under CNS condition.

Table 3.5 A result of the first peak shear stress about NJ-sample according to the linear regression.

Initial normal stress (MPa)	Slope (MPa/°)	Intercept (MPa)	Standard deviation (MPa)	Correlation coefficient
0.15	0.022	0.24	0.128	0.3449
0.35	0.048	0.27	0.026	0.9763
1.00	0.080	0.37	0.164	0.7375

Table 3.6 A result of the second peak shear stress about NJ-sample according to the linear regression.

Constant normal stiffness (MPa/mm)	Slope (MPa/°)	Intercept (Mpa)	Standard deviation (MPa)	Correlation coefficient
0.2	0.087	-0.38	0.043	0.9799
0.5	0.153	-0.50	0.283	0.7704
1.0	0.211	-0.86	0.312	0.8196

Table 3.7 A result of peak normal stress about NJ-sample according to the linear regression.

Constant normal stiffness (MPa/mm)	Slope (MPa/°)	Intercept (MPa)	Standard deviation (MPa)	Correlation coefficient
0.2	0.069	-0.01	0.083	0.8975
0.5	0.190	-0.59	0.180	0.9240
1.0	0.252	-0.81	0.137	0.9705

Table 3.8 A result of dilation angle about NJ-sample according to the linear regression.

Constant normal stiffness (MPa/mm)	Slope	Intercept (°)	Standard deviation (°)	Correlation coefficient
0.2	1.357	0.61	1.457	0.9169
0.5	1.681	-6.25	1.119	0.9613
1.0	0.852	0.94	0.961	0.9094

Fig. 3.6의 그래프에서 가는 실선은 AJ 시료를 대상으로 시험한 결과의 회귀분석 직선을 나타낸다. AJ 시료와 NJ 시료를 비교 분석하기 위해서, AJ 시료에 대한 시험을 통해서 추정된 직선을 추가적인 설명 없이 NJ 시료에 대한 시험 결과의 비교 분석에 사용하였다.

NJ 시료를 대상으로 측정한 첫 번째 정점 전단 응력은 Fig. 3.6의 (A)에 나타내었으며, 회귀 분석값은 Table 3.5에 제시하였다. NJ 시료를 대상으로 측정된 첫 번째 정점 전단 응력은 AJ 시료를 대상으로 예측한 값에 비해서 0.3 MPa정도 더 높게 측정되었다. 그리고 첫 번째 정점 전단 응력에 이르는 전단 변위 또한 AJ 시료의 경우 1 mm 미만에서 나타났으나, NJ 시료에서는 2 mm 근방에서 나타났다. 이는 NJ 시료의 경우 상부 반단면과 하부 반단면의 거칠기 차이로 인하여 엇물린 절리면의 1차 거칠기가 완전히 밀착되는 동안 전단 응력이 계속 증가하여, NJ 시료의 첫 번째 정점 전단 응력이 AJ 시료의 경우에 비해 0.3 MPa정도 더 크게 측정된 것으로 보인다.

따라서 AJ 시료를 대상으로 추정된 회귀식 (3.1)을 다음의 식으로 수정하면, 식 (3.5)가 자연 절리 복제 시료에 대해서 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다. 이때, 식 (3.5)에 의한 추정값과 NJ 시료를 대상으로 측정한 실험값의 편차에 대한 평방평균은 0.146 MPa로 계산되었다.

$$\tau_{p1} = (0.36 + 0.28\sigma_{n0}) + (-0.003 + 0.057\sigma_{n0})i \quad (3.5)$$

Table 3.6에는 두 번째 정점 전단 응력에 대한 회귀 분석값을 제시하였다. Fig. 3.6의 (B)에서, 두 번째 정점 전단 응력에 대해서는 AJ 시료와 NJ 시료가 수직 강성이 0.2 MPa/mm와 0.5 MPa/mm일 경우 서로 비슷한 경향을 보였다. 하지만, 수직 강성이 1.0 MPa/mm인 경우에는 AJ 시료에 비해서 NJ 시료의 경우가 0.6 MPa정도 작게 평가되는 것으로 나타났다. 따라서, 0.5 MPa/mm 이하의 낮은 수직 강성에 대해서는 식 (3.2)를 자연 절리 복제 시료에 대해서도 적용할 수 있음을 확인하였다. 이때, 식 (3.6)에 의한 추정값과 NJ 시료를 대상으로 측정한 실험값의 편차에 대한 평방평균은 0.257 MPa로 계산되었다.

$$\tau_{p2} = (0.48 - 0.90K_n) + (-0.006 + 0.241K_n)i \quad (3.6)$$

최대 수직응력은 Fig. 3.6의 (C)와 Table 3.7에 제시하였다. 각각의 수직 강성에 대해서 경사각에 따른 최대 수직 응력의 증가 경향은 AJ 시료와 NJ 시료가 서로 비슷한 모습을 보여, 기울기가 비슷한 값으로 나타났다. 그리고, 서로 같은 경사각에 대한 AJ 시료와 NJ 시료의 절리 높이는 거칠기 진폭의 크기로 인해 서로 큰 차이를 보인다. 이러한 차이로 인하여, AJ 시료와 NJ 시료의 최종 팽창량이 2.5 ~ 1.5 mm 정도의 차이를 보였고, 최대 수직응력은 대략 1 MPa 정도의 차이를 보였다.

따라서 식 (3.3)의 절편에 AJ 시료를 통한 추정값과 NJ 시료를 통한 측정값의 차이에 해당하는 1.0 MPa 정도를 감하여 아래의 식으로 표현 하면, NJ 시료에 대해서도 경사각과 최대 수직 응력의 관계를 설명할 수 있었다. 이때, 식 (3.7)에 의한 추정값과 NJ 시료를 대상으로 측정한 실험값의 편차에 대한 평방평균은 0.339 MPa로 계산되었다.

$$\sigma_u = (-0.25 - 0.57K_n) + (0.027 + 0.269K_n)i \quad (3.7)$$

경사각과 선형 팽창각의 관계는 Fig. 3.6의 (D)와 Table 3.8에 보여지듯이, AJ 시료와 NJ 시료에 대해서 비교적 잘 일치하고 있다. 따라서 식 (3.4)를 NJ 시료에 대해서 경사각과 선형 팽창각의 관계를 설명하는 실험식으로 사용해도 될 것으로 사료된다. 이때, 식 (3.8)에 의한 추정값과 NJ 시료를 대상으로 측정한 실험값의 편차에 대한 평방평균은 2.701°로 계산되었다.

$$d_n = (3.04 - 1.87K_n) + (0.902 - 0.151K_n)i \quad (3.8)$$

4. 결론

이 연구에서는 지하 암반 절리면의 전단거동을 보다 정확히 규명하기 위하여 일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험을 실시하였다. 시료로는 인공 모의 암체로서 시멘트 모르타르를 이용하여 제작한 이등변 톱니 모양의 인공 절리 (AJ) 시료와 자연 절리 복제 (NJ) 시료

의 두 종류를 사용하였다.

일정 수직 강성 조건의 직접 전단 시험을 실시하여 경사각, 초기 수직 응력 및 수직 강성과 전단 파라미터의 상관관계를 조사하였다. 분석결과 전단 파라미터는 초기 수직 응력과 상관 관계가 높은 것과 수직 강성과 상관 관계가 높은 것으로 구분 할 수 있었다. 첫 번째 정점 전단 응력 τ_{p1} 은 초기 수직 응력과 높은 상관 관계를 보였으며, 두 번째 정점 전단 응력 τ_{p2} 과 최대 수직 응력 σ_u , 선형 팽창각 d_n 은 수직 강성과 높은 상관 관계를 보였다. AJ 시료에 대해서 경사각, 초기 수직 응력 및 일정 수직 강성과 상관 관계가 높은 전단 파라미터들은 아래의 수식으로 표현 할 수 있었다.

$$\begin{aligned}\tau_{p1} &= (0.06 + 0.28\sigma_{n0}) + (-0.003 + 0.057\sigma_{n0})i \\ \tau_{p2} &= (0.48 - 0.90K_n) + (-0.006 + 0.241K_n)i \\ \sigma_u &= (0.75 - 0.57K_n) + (0.027 + 0.269K_n)i \\ d_n &= (3.04 - 1.87K_n) + (0.902 - 0.151K_n)i\end{aligned}$$

또한, AJ 시료와 NJ 시료의 경사각에 따른 상관성을 분석하기 위하여 절리면의 거칠기 정량화를 실시한 이후 절리면 평균 거칠각을 매개로 하여 서로를 비교 분석 하였다. NJ 시료에 대해서 위의 식은 절편을 변경하면 비교적 합당하게 사용 할 수 있음을 확인하였다. NJ 시료를 대상으로 수정한 식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\tau_{p1} &= (0.36 + 0.28\sigma_{n0}) + (-0.003 + 0.057\sigma_{n0})i \\ \tau_{p2} &= (0.48 - 0.90K_n) + (-0.006 + 0.241K_n)i \\ \sigma_u &= (-0.25 - 0.57K_n) + (0.027 + 0.269K_n)i \\ d_n &= (3.04 - 1.87K_n) + (0.902 - 0.151K_n)i\end{aligned}$$

참고문헌

1. 김대영, 절리면 거칠기에 따른 암석의 전단거동, 공학박사학위논문, 한양대학교 대학원, 2001, p. 230.
2. 배기윤, 이정인, 레이저 변위계를 이용한 암석절리면의 3차원 거칠기 측정기 개발, 터널과 지하공간, 2002. 12(4): p. 268-276.
3. Belem, T., F. Homand-Etienne, and M. Souley, *Quantitative Parameters for Rock Joint Surface Roughness*, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2000. 33(4), p. 217-242.
4. Benmokrane, B., K.S. Mouchaorab, and G. Ballivy, *Laboratory investigation of shaft resistance of*

- rock-socketed piers using the constant normal stiffness direct shear test*, Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(3), p. 407-419.
5. Hencher, S.R. and L.R. Richard, *Laboratory direct shear testing of rock discontinuities*, Ground Engineering, 1989, **22**, p. 24-31.
 6. Indraratna, B., A. Haque, and N. Aziz, *Shear behavior of idealized in filled joints under constant normal stiffness*, Geotechnique, 1999, **49**(3), p. 331-355.
 7. Jiang, Y., Y. Tanabashi, J. Xiao, and N. Sakuma, *Mechanical and hydraulic behavior of rock joints under constant normal stiffness conditions*, in *Proceedings of the First Kyoto International Symposium on Underground Environment*, 2003, Kyoto, Japan.
 8. Johnston, I.W., T.S.K. Lam, and A.F. Williams, *Constant normal stiffness direct shear testing for socketed pile design in weak rock*, Geotechnique, 1987, **37**(1), p. 83-89.
 9. Mouchaorab, K.S. and B. Benmokrane, *A New Combined Servo-Controlled Loading Frame/Direct-shear Apparatus for the Study of Concrete of Rock Joint Behavior Under Different Boundary and Loading Conditions*, Geotechnical Testing Journal, 1994, **17**(2), p. 3-12.
 10. Seidel, J.P. and C.M. Haberfield, *Laboratory Testing of Concrete-Rock Joint in Constant Normal Stiffness Direct Shear*, Geotechnical Testing Journal, 2002, **25**(4), p. 391-404.