

하중조건별 시험이 가능한 암석 절리면 전단시험기의 개발 및 적용시험

Development of Direct Shear Apparatus with Different Loading Conditions for Rock Joints and Its Application Tests

천 병 식*1 Chun, Byung-Sik

김 대 영*2 Kim, Dae-Young

Abstract

A direct shear apparatus controlling constant normal stress (CNS), constant normal load and infinite normal stiffness has recently been developed for natural rock joints and artificial joints. To maintain CNS condition during shear testing, a software controls the normal load which was calculated from the change of contact area. The procedure to subtract normal displacement caused by the stiffness of the normal loading system from the monitored normal displacement was programmed in the controlling software. In order to monitor the relative displacement between upper and lower shear boxes, the displacement caused from shear loading system was minimized. The relative degrees of freedom for this shear system were 4: transitional motion of the lower shear box, the upper shear box and 2 rotational motions of the upper shear box. Tests under the above mentioned 3 conditions were carried out to verify the accuracy of the control system for the same roughness joint. Tests were conducted on sawtoothed joints with asperities having inclinations of 16.7° and 26.6° . These asperity angles represented 10 and 15 JRC values respectively. The maximum dilation angle takes place at the peak shear strength. So the results were consistent with Barton's model.

요 지

자연 암석절리 및 인공 절리에 대하여 일정 수직응력제어, 일정 수직하중제어 그리고 무한 강성제어가 가능한 암석 절리면 전단시험기를 개발하였다. 이 시험기는 전단변위에 의한 접촉면적의 변화량을 계산하여 하중변화량을 조절하여 일정수직응력 상태를 유지한다. 수직하중에 따른 시험기의 강성에 의한 변위량이 제어 프로그램 내에서 제거되어 순수한 시편의 변위량을 출력하도록 하였다. 전단하중에 따른 시험기 강성에 의한 변위량은 상, 하부 전단상자의 상대변위 측정으로 최소화 하였다. 전단거동 중의 자유도는 전단방향에 대하여 수평이동, 연직이동, 피칭, 롤링이 가능하도록 하였다. 자연절리면을 모사한 석고시편에 대하여 일정 수직응력제어, 일정 수직하중제어 그리고 무한 강성제어 조건으로 시험하여 제어상태 검증 및 비교를 하였다. 또한 경사각이 16.7° 와 22.6° 인 톱니형 시편에 대하여 시험한 결과 경사각 16.7° 와 22.6° 는 JRC로 10과 15를 나타내었으며, 첨두팽창각이 첨두전단강도에서 발생되며, Barton의 모델과 잘 일치함을 보였다.

Keywords : Direct shear apparatus, Joint, Constant normal stress condition, Stiffness, Asperity

*1 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정희원, 현대건설기술연구소 선임연구원

1. 서론

암석의 절리면 전단 특성은 암반 사면, 터널, 발전소, 지하에너지 저장시설, 대규모 댐 등의 암반 구조물의 거동 이해 및 해석에 있어서 매우 중요한 사항 중의 하나이다. 전단거동이 발생하는 경계조건은 2가지로 볼 수 있는데, 전단 변형시 수직응력이 일정한 상태를 유지하는 경우(수직강성=0)와 전단변형시 수직응력이 변화하는 경우가 있다. 현장조건을 모사하기 위해서는 응력, 변위, 하중제어가 가능하도록 하여야 한다. 기존의 시험기들은 일정 수직응력 상태를 유지하기 위해서 수직하중을 일정하게 유지한 상태에서 절리면 상부 암석과 하부 암석의 크기가 다른 시편을 사용하여 시편의 크기 차이만큼 전단시킴으로써 가능하였다. 그러나 절리면 전단시험이 주로 회수된 코어를 대상으로 하기 때문에 이러한 문제점을 극복하기란 쉽지 않다. 기존 전단시험기들은 전단변위, 수직변위 그리고 전단 방향에 직각되는 축에 대한 회전변위(pitch)만을 허용하여 현장에서의 절리 전단거동에서 발생하는 자유도를 충족시키지 못하는 경우가 대부분이다. 하중을 가하는 모든 시험기에는 시험기 자체의 강성에 의해 발생하는 변위가 포함된다. 정확한 시험 결과를 획득하기 위해서는 이러한 변위가 제거되어야 하며, 변위제거의 방법으로는 시험기의 강성을 매우 크게 하는 방법과 보정식을 구하여 제거하는 방법이 있다.

본 논문에서는 위의 2가지 경계조건에 대한 전단시험이 가능하고 위의 자유도 이외에 1개의 자유도가 추가된 회전변위(roll)를 허용할 수 있으며, 적절한 시험기의 강성으로도 정확한 시험결과와 획득이 가능한 절리면 전단시험기의 개발에 대한 소개를 하였다. 또한 고강도 석고를 이용한 동일한 인공 절리시편에 대하여 일정 수직응력 상태,

일정 수직하중 상태 그리고 무한 수직강성 상태(infinite normal stiffness)에 대한 전단시험 결과를 통하여 시험기의 제어과정 검증 및 시험결과를 비교하였다. 시험결과와 정확성을 알아보기 위하여 경사각 $i=16.7^\circ, 26.7^\circ$ 인 톱니형 시편에 대한 시험 결과를 Patton과 Barton의 모델과 비교하였다.

2. 절리면 직접전단 시험기의 특징

2.1 시험기 구성

자연 암석 절리면과 인공 절리면의 전단시험을 하기 위하여 서보 제어가 가능한 직접전단 시스템을 설계, 제작하였다. 이 시험기는 그림 1에 나타난 바와 같이 수직하중 재하시스템(1), 수평하중 재하시스템(2), 파워유닛(3), 제어장치(4) 및 데이터 저장 장치(5)로 구성되어 있다.

이 장비의 재하 용량은 수직과 전단방향에 대하여 각각 15ton 이다. 전단 상자는 140 mm x 75 mm의 사각형과 직경 100mm, 54mm의 원형시편 및 단반경 54mm인 타원형 시편의 시험이 가능하며 필요에 따라 더 큰 치수의 전단상

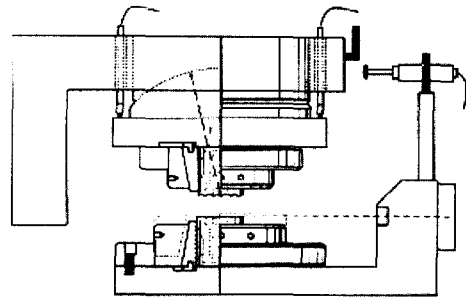


그림 2. 상, 하 전단상자와 시편구속 방법

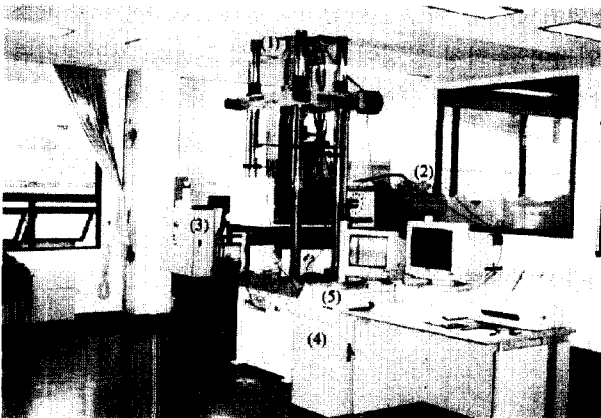


그림 1. 암석 절리면 직접전단 시스템



그림 3. 하부전단상자내 시편 구속

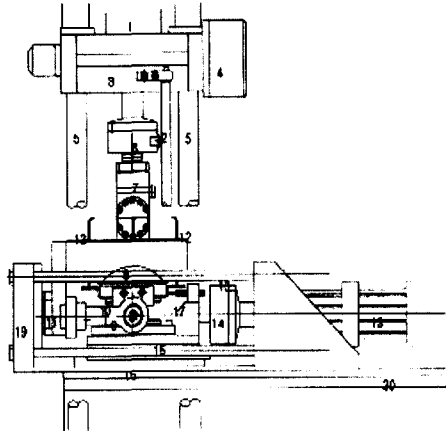


그림 4. 암석 절리면 직접전단 시험기 단면

1. 수직 유압작동기(vertical actuator),
2. 측방잭(side jack),
3. 가로 지지대(cross head),
4. 클램프(clamp),
5. 지지 기둥(column),
6. 하중변환계(load cell),
7. 인장 그립(grip),
8. 구면좌(spherical seat),
9. 회전절점(swivel joint),
10. 상부 전단상자,
11. 롤러 베어링(roller bearing),
12. 선형 변위변환기(LVDT),
13. 수평 유압작동기,
14. 하중변환계,
15. 하부 전단상자,
16. 선형 운동 베어링(linear motion bearing),
17. 변형율계,
18. 전단하중 지지봉
19. 강판(stiff plate),
20. 선형 운동 베어링

자를 장착할 수 있다. 직경 100mm, 54mm의 원형시편의 장착은 그림 2, 3과 같이 전단상자 안의 원형 모울드를 시계방향으로 회전시키면 모울드 안의 4개의 바이스가 시편을 조이도록 되어 있다. 직경 100mm의 시편의 경우 수직 응력의 범위는 0~19MPa로서 현장 조건으로 약 730m 깊이까지 모의 실험이 가능하다.

직접전단 시험기의 단면과 각부의 명칭은 그림 4에 나타내었다. 전단은 하부 시편이동 방식을 채택하였다. 수직 유압작동기(1)에는 변위계가 내장되어 있으며, 최대 15ton의 수직하중을 재하한다. 측방잭(2)은 (1)을 상하로 구동한다. 가로 지지대(3)은 (2)에 의해 상하로 움직이며 수직 하중을 지지한다. 클램프(4)는 (3)을 4개의 지지기둥(5, 직경 80mm)에 고정시키는 장치이다. 하중변환계(6)은 수직 하중을 측정용으로, 20ton 용량이며 3, 6, 10, 15ton단계별로 각각의 앰프를 사용하여 각 단계별 10% 이상의 하중에서는 0.1%의 정도를 유지한다. 인장 그립(7)은 인장시험 시편을 고정하는 장치이다. 구면좌(8)는 구심을 절리표면 중앙점에 위치하도록 하여 시편의 편심을 보정하고 전단 시 암석 시편의 좌우거동(rolling)과 전후거동(pitching)을 가능하게 하였다. 회전절점(9)은 하부 시편의 전단변위에 따른 상부 시편의 전단방향 이동을 억제하면서 상부 시편의 전후 거동을 가능하게 하며 좌우의 회전절점을 연결하는 지지대는 중앙에서 또 하나의 회전절점으로 연결되어 좌우거동이 가능하다. 롤러 베어링(11)은 매우 작은 마찰 저항으로 시편의 다이러턴시(dilatancy)를 허용한다. 선형 변위변환기(12)는 4개로 구성되어 상부 시편의 다이러턴시를 전후좌우에서 측정하며, 정도는 0.001mm, 작동범위는 10.5mm이다. 수평 유압작동기(13)는 전단하중을 재하하며 용량은 (1)과 동일하다. 하중변환계(14)는 전단하중

을 측정하며, (6)과 같은 사양이다. 하부 전단상자(15)를 선형 운동 베어링(16)이 미소한 마찰 저항으로 활동 가능케 한다. 변형율계(17)은 상부 전단상자와 하부 전단상자의 상대변위를 감지하며, 감도는 $0.5 \mu\text{m}$ 이며 작동범위는 25mm이다. 전단하중은 직경 45mm인 4개의 지지봉(18)과 강판(19)이 지지한다. 선형 운동 베어링(20)은 인장시험이나 절리면 프로파일 측정시 수평재하 시스템 전체를 후진 할 수 있도록 한다.

2.2 전단시험에서의 경계조건

전단거동 발생시의 현장의 경계조건은 2가지 경우로 볼 수 있다. 첫째, 전단 변형시 수직응력이 일정한 상태를 유지하는 경우로서 예를 들면 암괴가 사면을 따라 활동하는 경우이다(그림 5.(a)). 둘째, 전단변형시 수직응력이 변하는 경우로서 터널이나, 지하공동굴착시 측벽이나 천단부 암괴가 활동하는 경우이다(그림 5.(b)). 이 활동은 불연속면을 따라 점진적인 수직응력 증가를 발생시킨다. 이 수직응력의 발생은 주변암의 강성(stiffness)과 활동면에서의 팽창(dilatation)이 조합된 효과에 기인한다. 같은 현상은 암반에 근입된 피어나 말뚝, 그라우팅된 암반앵커와 같은

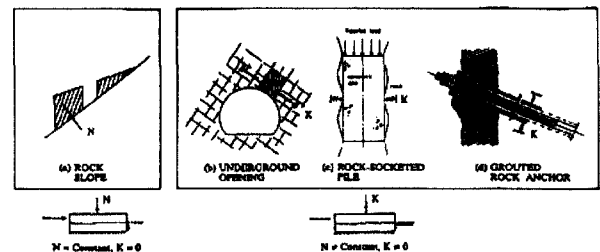


그림 5. 절리면 전단 거동의 예(Mouchaorab and Benmokrane, 1994)

구조적 접촉면에서도 발생한다(그림 5.(c), (d)). 현장조건을 모사하기 위해서는 응력, 변위, 하중제어가 가능하도록 하여야한다. 기존의 시험기들은 일정 수직응력 상태를 유지하기 위해서 수직하중을 일정하게 유지한 상태에서 절리면 상부 암석과 하부 암석의 크기가 다른 시편을 사용하여 시편의 크기 차이만큼 전단시킴으로써 가능하였다. 그러나 절리면 전단시험이 주로 회수된 코어를 대상으로 하기 때문에 전단 시험중에 이러한 문제점을 극복하기란 쉽지 않다.

암석 코어를 회수하여 얻은 절리면은 공축에 대하여 경사진 절리일 경우 접촉면은 타원형이며, 공축에 대하여 직각인 절리의 경우 접촉면은 원형이 된다. 이러한 시편을 대상으로 전단시험을 실시할 경우 전단시험시 전단변위에 따라 접촉면적이 변화하게 된다. 수직응력이 일정한 조건의 경우 이것을 시험에 반영해 주어야한다(Ooi와 Cáter, 1987). 일정 수직응력제어는 시험하는 동안 시편이 받는 응력을 일정하게 유지시키거나, 일정패턴으로 변화시킬 수 있어야하므로 시편의 단면적변화를 측정하여 변화된 단면적에 비례하는 하중을 가감하여야한다. 원형이나 타원형의 접촉면적의 변화(그림 6)는 변위에 따라 일정하지 않기 때문에 이를 시험에 적용하기에는 어려운 점이 많다. 절리면이 타원형이나 원형인 경우 변위에 따른 접촉면적은 식(1)로 나타낼 수 있다(Hencher와 Richard, 1989).

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

여기서, A_i : i 시점에서의 전체 접촉면적

a : 타원의 장반경

b : 타원의 단반경

δ_i : i 시점에서의 절리면의 상대변위

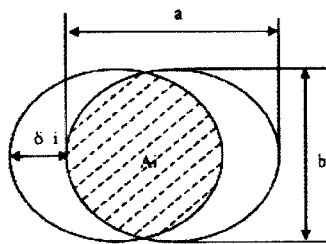


그림 6. 타원형 시편의 임의의 전단변위에서의 접촉면적

타원형 암석 시편에 대하여 일정 수직응력 상태에서의 전단시험을 수행하기 위해서는 초기 수직하중에서 전단시에 전단변위에 의해 감소되는 면적에 해당하는 하중이 감소되어야 일정한 수직응력 상태를 유지 할 수 있다. 본 시험기는 전단변위를 측정하는 LVDT로 시험시 상부 절리와 하부 절리의 상대변위를 측정하여 변화면적을 계산한후 감소시킬 하중을 구하여 수직 actuator의 servo valve를 제어함으로써 일정한 수직응력 상태를 유지할 수 있도록 하였다. 시험시 하중제어량, ΔP 는 다음식과 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_{const} = \frac{P_o}{A_o} = \frac{P_i}{A_i} = \frac{P - \Delta P}{A - \Delta A} \quad (2)$$

$$\Delta P = P - \sigma_{const} (A - \Delta A) = P \frac{\Delta A}{A} \quad (3)$$

여기서, P_o : 초기 수직하중

P_i : i 시점에서의 수직하중

A_o : 초기 접촉면적

A_i : i 시점에서의 전체 접촉면적

2.3 자유도(degrees of freedom)

현장에서의 자연절리의 거동은 일반적으로 3차원적인 문제이다(Huang, 1990). 그림 7에 나타낸 바와 같이 전단면에 대하여 6개의 상대 자유도가 있으며, 이는 각 축을 따르는 이동과 각 축에 대한 회전이다. 두 암석 사이의 절리면에 대한 실내 전단 시험에서 자유도가 많을수록 실제 자연 현상을 잘 모사할 수 있다. 그림 7에서 전단방향을 x축으로 하면 일반적인 전단시험기는 대개의 경우 x축으로의 전단변위, z축으로의 다이러턴시, y축에 대한 회전 θ_y (pitch)만을 허용한다. 현장에서의 전단거동에서도 전단 방향이 x축인 경우 y축 방향에 대한 변위는 z축에 대한 회

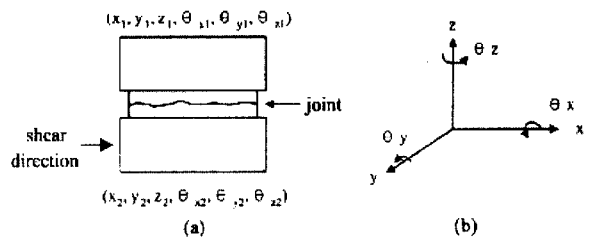


그림 7. 3차원에서의 자유도

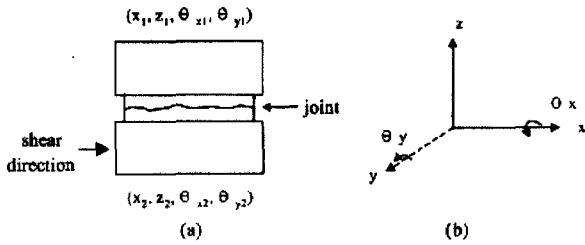


그림 8. 제작된 전단시험기에서의 자유도

전 θ_x (yaw)과 함께 발생할 것으로 판단되며 이를 실내시험에 적용할 수는 있으나 해석이 곤란하다. 이동식 전단상자(potable shear box)의 경우 케이블로 수직하중을 지지하여 z축 방향의 변위에 대하여 완전히 자유롭지 못하고, 시편의 거칠기 및 이방성에 따라 z축에 대한 회전 θ_z 가 발생할 수 있으며 이러한 경우에 대부분 실험결과를 사용할 수 없다. 새로이 제작된 전단시험기는 그림 8에 나타낸 바와 같이 z축으로의 다이러턴시, y축에 대한 회전 θ_y 외에 x축에 대한 회전 θ_x (roll)를 추가하여 좀 더 실제의 전단거동에 가깝게 하였다.

2.4 시험기의 강성에 의한 변위보정

수직변위를 측정하는 외부 4개의 LVDT는 그림 4에서와 같이 절리간의 상대변위를 직접 측정하지 못하므로 인해 측정값에는 3가지의 변위가 포함된다. 이들은 1) 절리의 폐쇄, 2) 시편의 압축, 3) 하부 전단상자압축과 전단상자 하부 선형운동 베어링부의 압축이다. 한편 수직 유압작동기에 내장된 변위계에는 위의 3가지 변위 외에 구면좌, 상부 전단상자, 하중변환계, 인장그립의 압축과 4개의 기둥의 인장변위가 동시에 측정된다. 전단상자 내에 강성이 큰 100mm 직경의 강제 실린더를 장착하고 압축시험을 실시하여 수직 유압작동기 내의 LVDT와 4개의 외부 LVDT로 측정된 시스템의 수직변위는 그림 9와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 수직유압 작동기에 내장되어 있는 변위계에서 측정된 수직변위는 외부 4개의 LVDT에서 측정된 수직변위 보다 2배 이상 크게 발생하여 앞의 내용을 입증하고 있다. 전단시험이나 수직강성 시험시 순수한 시편의 팽창이나 압축, 절리의 폐쇄를 측정하기 위해서는 셋째 항목인 전단시스템에서 발생하는 변위를 제거하여야 한다. 시험 결과에 사용하는 수직변위는 외부 LVDT 4개의 평균치를 사용하므로 전단시험시 수직하중 및 수직하중 증감에 따른 절리면의 폐쇄(joint closure) 및 다이러턴시 계산에는 이 변위량이 제거되어야 한다. 절리면 폐쇄량의 계산에 대

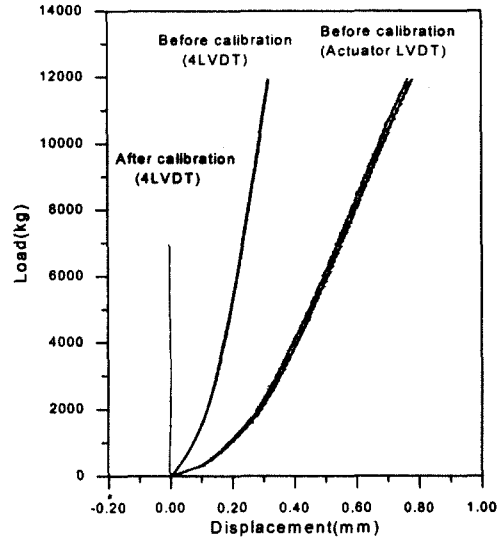


그림 9. 시스템의 강성 보정 곡선

표 1. 하중-변위 곡선 회귀분석 결과

	값	표준오차	R ²
a	1.650e-1	1.812e-4	0.9999327
b	1.827e3	3.634	
c	1.347e-5	1.189e-8	

하여 이와 유사한 과정이 Goodman(1976)과 Huston과 Dowding(1987) 그리고 Mouchaorab과 Benmokrane(1994)에 의해 전단시험 및 수직강성 시험 후에 데이터를 처리하는 과정에 적용되었다. 본 장비에서는 시험 및 데이터 처리의 편의성을 도모하기 위하여 전단이나 수직강성 시험시에 수직 하중 증감에 따른 전단 시스템에서 발생하는 수직 변위량을 외부의 4개의 LVDT에서 측정된 평균값에서 자동적으로 감하여 실제 시편만의 압축 및 팽창 변위를 실시간으로 표시하고 저장할 수 있도록 하였다. 이것은 그림 9의 4개의 LVDT 평균값의 하중-변위곡선에 대하여 수직하중을 x 축으로 하고 수직변위를 y 축으로 변환하여 식 (4)의 쌍곡선함수를 적용하였다. 하중-변위곡선을 회귀분석한 결과는 표 1과 같다.

$$y = \frac{ax}{b+x} + cx \quad (4)$$

여기서, y : 시스템의 수직변위

x : 수직하중

a, b, c : 상수

위의 회귀분석 결과에 따라 시험기 강성에 대한 변위보정을 시험과정에 적용한 압축시험결과는 위의 그림 9에 나타내었다. 수직하중의 증가에 관계없이 수직변위는 거의 0을 나타내고 있다.

전단 변위의 측정에서도 수평 유압작동기에 내장된 변위계에서는 유압램, 하중변환계, 하부 전단상자 그리고 4개의 하중 지지봉의 강성에 의한 변위가 측정된다. 전단변위는 상부 전단상자와 하부 전단상자의 상대변위를 측정하도록 설계하여 전단하중의 증가에 따라 수평재하 시스템의 변위가 측정되는 것을 제거함으로써 시험기의 변위량이 측정되는 것을 최소화 하였다.

2.5 제어 프로그램

시험기는 제어프로그램에 의하여 실행되며 주 메뉴는 그림 10과 같다. 유압펌프의 가동, 수직, 수평 유압작동기의 가동, 상부와 하부 전단상자의 이동과 이동속도, 초기 하중 설정 기능 및 여러개의 부 메뉴를 포함하고 있다. 부 메뉴를 살펴보면, 원형 및 타원형, 사각형의 시편을 선택할 수 있는 시편 형상선택, 시편 치수입력 그리고 일정 수직응력 및 일정 수직하중제어 메뉴가 있다.

시험과정 제어에 대한 부 메뉴에서는 사용자가 원하는 시험을 프로그래밍할 수 있다. 채널 1은 수직 유압작동기에 대한 제어로서 변위제어, 하중제어, 응력제어를 포함하며, 변위계 및 하중계의 데이터 저장 및 시험 반복회수에 대한 것이다. 채널 2는 전단 유압작동기에 대한 것으로 변

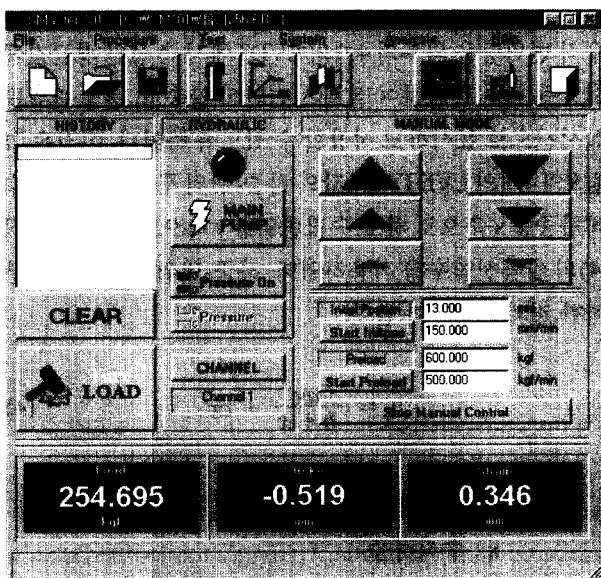


그림 10. 제어프로그램의 주메뉴 화면



그림 11. 실리콘 절리주형과 석고 시편

위제어, 하중제어, 응력제어 및 반복회수를 포함한다. 이 두 채널에 대한 적절한 제어프로그램에 의하여 시편과 LVDT 장착이후 시작에서부터 시험을 끝내고 데이터 저장 및 원상복귀까지 일련의 과정으로 실행할 수 있다. 그래프 설정 메뉴는 실험 실시중에 모니터에 출력할 그래프를 설정한다. 그래프는 총 4개의 그래프를 도시할 수 있으며 축에 대한 설정 및 출력 간격을 설정한다. 실험 메뉴에서는 앞에서 설정한 그래프와 데이터를 실시간으로 출력하며 실험을 실시하며 실험 정지기능이 있다. 이외에도 시험기의 응답속도를 제어하는 PID(proportional integral differential) 제어 및 각 하중 단계별 앰프를 설정하는 메뉴 그리고 binary file을 text file로 변환하고 결과출력 및 보고서 작성을 할 수 있는 메뉴가 있다.

3. 시편제작

전단시험기의 제어상태 검증 및 실험 결과의 정확성 여부를 판단하기 위하여 거칠기를 갖는 자연절리 모사 시편과 거칠각(asperity angle)과 강도를 달리 제작한 톱니형 시편을 제작하였다.

동일한 거칠기의 절리면을 갖는 시편을 제작하기 위하여 자연 암석절리면(평택 편마암)에 내경 100mm의 원형 링을 놓고 암석과 링 사이의 공간은 수분을 적절히 가한 벤토나이트로 채우고 마감하였다. 실리콘과 경화제(ShinEtsu 사)를 혼합한 액체를 링 속에 적정량을 붓고 1일 동안 경화시킨다. 이 경화된 실리콘 고무를 몰드에 넣은 후 다시 실리콘액을 부어 1일 경화시킨 후 상, 하부를 떼어내 상부와 하부의 실리콘 고무 절리 주형을 완성하였다(그림 11).

자연절리 시편은 원형의 실리콘 고무절리를 몰드에 넣고 고강도 석고(Mitsubishi chemical Co., Rhombrock) :

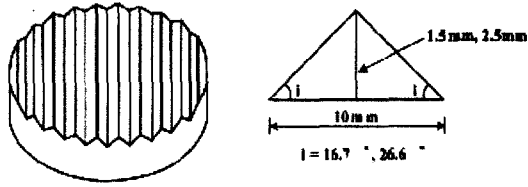


그림 12. 톱니형 시편

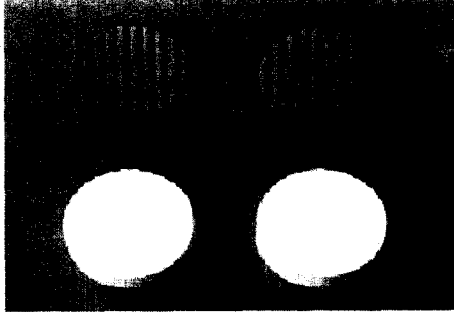


그림 13. 톱니주형, 시편

물의 중량비를 1 : 0.22로 반죽하여 몰드에 부어 1 일간 양생하였다. 압축강도는 51.2MPa이다.

톱니형 절리의 주형은 공업용 플라스틱을 재료로 하여 직경 99.9mm의 원판위에 경사가 16.7° 와 26.6° 인 삼각톱니(그림 12)를 10 열로 제작하고 상하가 서로 일치되도록 한쌍의 톱니 주형(그림 13)을 가공하였다.

내경 100mm, 외경 120mm 높이 75mm의 몰드에 20mm 높이의 스페이서를 바닥에 놓고 그위에 톱니 주형 상, 하면을 각각 놓고 몰드를 길이 조절이 가능한 철재 밴드(호스 클램프)로 조인다. 톱니형 절리시편은 고강도 석고:소석고:표준사:물을 1.85:1:0.625:1로 중량배합하여 재료혼합용 믹서에서 약 3분간 혼합한후 몰드에 부은후 진동기로 기포를 제거하고 어느정도 경화되면 표면을 매끈하게 정리한다. 약 30분이 경과한후 몰드에서 석고샘플을 탈형하고 절리면에서 톱니형 주형을 탈형하면 톱니가 서로 완전히 맞물리는 한쌍의 톱니형 절리 샘플이 완성된다. 각 절리 시편의 바닥에서부터 톱니의 중심까지의 높이는 35mm 이다. 이들 샘플을 온도 22~25℃의 샘플 저장실에 45일간 양생하였다. 양생이 완료된 시편(그림 13)의 강도는 45~47MPa이며, 평탄면 전단시험에서 구한 기본마찰각은 41.6° 이다.

4. 전단강도 모델과 시험결과의 비교

4.1 절리면 전단강도 모델

Patton(1966, a, b)은 일정한 톱니형 돌출부를 갖는 인공 절리에 대하여 직접전단시험 결과에 기초하여 침투전단강도에 대한 이중선형모델을 제안하였다. 수직응력이 낮을 때 절리거동은 점착력이 없이 돌출부를 따라서 미끄러지며 높은 수직응력하에서는 암석 절리의 변위가 돌출부의 전단파쇄에 의해 발생됨을 발견하였다.

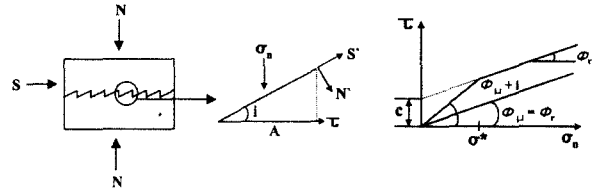


그림 14. Patton의 이중선형 모델

그림 14에서 전단강도는

$$\begin{aligned} \tau &= \sigma_n \tan(\phi_\mu + i) \quad \sigma_n < \sigma^* \\ \tau &= c + \sigma_n \tan \phi_r \quad \sigma_n > \sigma^* \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\sigma^* = \frac{c}{\tan(\phi_\mu + i) - \tan \phi_r}$ (식 (5)의 경계를 나타내는 전이 응력)

$\phi_\mu =$ 암석의 기본 마찰각으로 그 값은 평탄면의 직접전단시험에서 결정

$\phi_r =$ 암석절리의 잔류마찰각이며 큰 전단 변위 후의 평탄면의 직접전단시험에서 결정

절리의 거칠기는 점착력을 증가시키기 보다는 총 마찰각 ϕ_t 를 순간거칠각도(instantaneous asperity angle) i_p 에 해당하는 량만큼 증가시킴으로써 즉, $\phi_t = \phi_\mu + i_p$ 로 전단저항에 기여한다. 순간거칠각도 i_p 는 초기 거칠각 i_0 와 관련이 있으며, 거칠부 표면 재료의 손상에 영향을 주는 접촉 조건에 따라 변화한다. Patton(1966a, b)은 그의 모델에서 낮은 수직응력하에서 초기거칠각도 i_0 는 침투 전단강도에서의 순간거칠각도 i_p 와 같다고($i_p = i_0$) 제안하였다. 이것은 Patton의 모델(식(5))는 돌출부 각도가 일정하므로 전단강도 포락선이 직선이 된다.

Barton(1973)은 암석에 인장균열을 발생시켜 만든 절리 시편에 대하여 200여회 이상의 전단시험을 실시하여 경험

식(6)을 발표하고 그후 절리 거칠계수 JRC를 그림 15와 같이 제안하였다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_{\mu} \right] \quad (6)$$

여기서, JRC = 절리면 거칠계수

JCS = 절리면 압축강도

그림 16은 Barton의 전형적인 인장절리에 대한 직접전단시험의 전단응력-변위 곡선이다. 전단응력의 증가에 따라 수직변위 δ_v 는 압축을 나타내기 시작하여 침투전단강도에서 최대팽창율로 팽창된다. 침투전단강도 이전까지는 탄성변형을 보이며 이후에 전단변위 δ_h 의 증가에 따라 감소하여 잔류전단강도에 이른다. 그는 최대 팽창각, $d_n = \tan^{-1}(d\delta_v/d\delta_h)_{\max}$ 가 침투전단강도에 일관되게 일치함을 발견하였다. Barton의 모델에서 침투전단응력에 대한 순간 거칠각은 식(7)과 같다.

$$i_p = JRC \log_{10}(JCS/\sigma_n) \quad (7)$$

4.2 시험결과 및 비교

동일한 압축강도와 절리형상을 갖는 3가지 시편에 대하여 초기 수직하중 392.7kg을 가하고 일정 수직응력 상태, 일정 수직하중 상태, 일정 수직강성(stiffness) 상태에 대하여 절리면 전단시험을 수행하여 시험기의 제어상태를 확인하고 각 실험 결과를 비교하였다. 전단속도는 1mm/min. 으로 15mm 까지 변위제어를 하였고, 데이터의 저장간격은 250msec 마다 1회로 하였다. 수직응력의 계산은 모두 전단변위시 변화된 단면적을 사용하도록 설정하였다. 그림 17(a)에는 전단변위에 따른 전단응력과 수직응력, 수직하중을 나타내었다. 전단응력은 침투전단강도에 이를 때 까지 급격히 증가하여 침투전단강도를 지나면서 전단변위가 8mm 정도 지날 때 까지 감소하고 그 이후에는 일정한 상태를 나타내고 있다. 수직응력이 일정한 상태를 유지하기 위하여 전단 변위가 증가할수록 초기의 수직하중이 서서히 감소하고 있음을 나타내고 전단변위에 따라 변화된 단면적이 작용하는 수직응력은 전단변위에 관계 없이 일정한 값을 나타내었다.

그림 17(b)에는 전단변위에 따른 수직변위를 나타내었다. 침투전단강도에 해당하는 전단변위 이전에 압축이 발

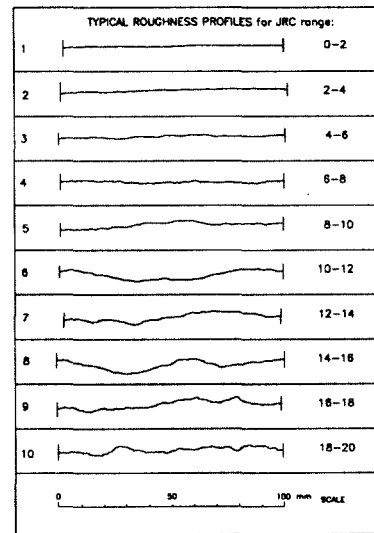


그림 15. 거칠기에 따른 절리 샘플의 JRC 값 (Barton과 Choubey, 1977)

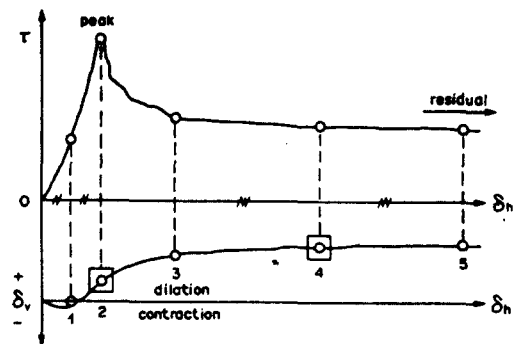
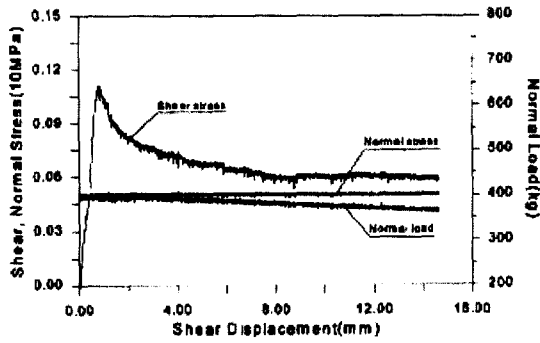


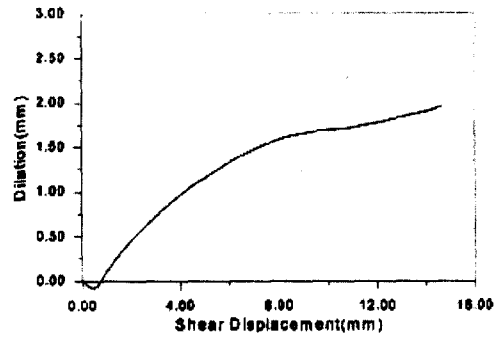
그림 16. 전형적인 전단응력-전단변위 곡선 (Barton, 1976)

생후 팽창이 시작되어 침투전단강도에서 최대 팽창율을 나타내었다. 전단변위 10mm 부근에서 팽창율이 둔화되었다가 다시 증가하는 것으로 나타나는 데 이것은 그 시점에서 절리면의 일부가 전단파쇄되는 것으로 판단된다.

그림 18(a)는 일정 수직하중 상태에서의 전단변위와 전단하중, 수직응력, 그리고 수직하중을 도시한 것이다. 수직하중이 일정하게 유지되고 전단변위에 따라 유효 전단면적이 감소하므로 수직응력이 서서히 증가하고 있음을 보여준다. 전단응력은 그림 17(a)의 경우보다 작은 변위에서 침투상태에 도달하였고 잔류 전단강도는 전단변위에 따라 수직응력이 증가하는 비율과 비슷하게 증가함을 보여주고 있다. 그림 18(b)는 전단변위에 따른 수직변위를 나타낸 것으로 압축 및 팽창이 전형적인 전단변위-팽창곡

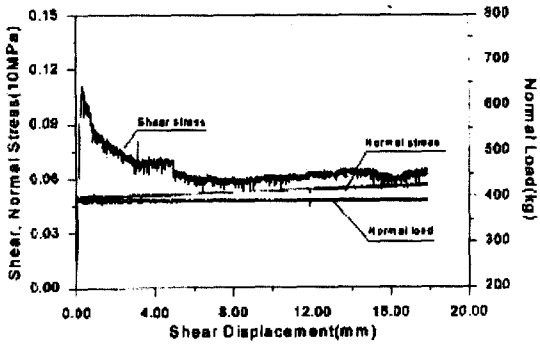


(a)

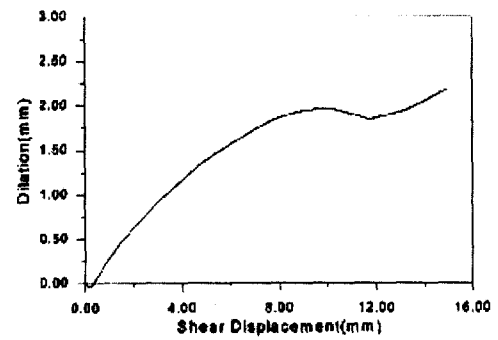


(b)

그림 17. 일정 수직응력 상태의 절리면 전단시험 결과

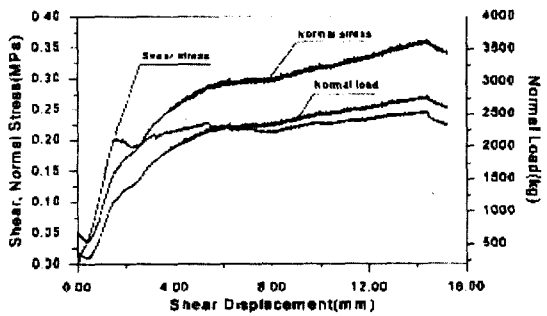


(a)

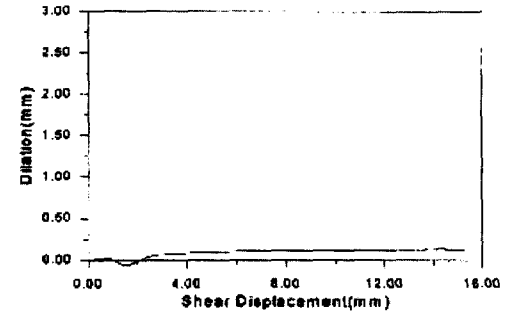


(b)

그림 18. 일정 수직하중 상태의 절리면 전단시험 결과



(a)



(b)

그림 19. 일정 수직강성 상태에서의 절리면 전단시험 결과

선에 부합된다. 그림 17(b)와 비교할 때 전단변위 10mm 이후에 수축이 발생하고 전단변위 12mm 이후의 팽창율이 그림 17(b)의 경우보다 큼을 볼 수 있다. 이것은 수직하중이 일정하게 유지된 상태, 즉 수직응력이 증가한 상태이므로 전단 변위 10mm 부근에서 시편의 파쇄가 그림 17(b)의 경우보다 크게 발생하여 수축이 발생하고 파쇄된 부스러기에 의한 영향 때문에 팽창율이 큰 것으로 판단된다. 초기 전단 변위시 미소한 수축 이후 팽창이 일찍 시작되는 점과

첨두전단강도에 빨리 도달한 점을 볼 때 시편 장착시 절리면의 접촉이 잘 되었던 것으로 판단된다.

그림 19는 시험기의 수직 변위를 고정시킨 상태 즉, 무한 수직강성 상태에서의 전단변위에 따른 전단응력, 수직응력, 그리고 수직하중을 도시한 것이다. 일정 수직강성 상태는 초기 수직하중을 가한 상태에서 전단상자의 수직 변위를 제한 하도록 함으로서 가능하다. 수직변위가 구속되므로 전단 변위시 발생하는 수직변위는 절리면과 상부

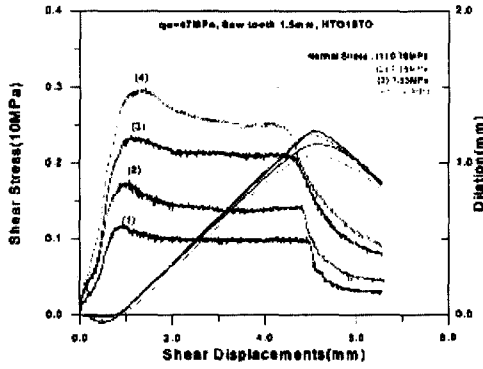


그림 20. 수직응력별 전단과 팽창곡선($i=16.7^\circ$)

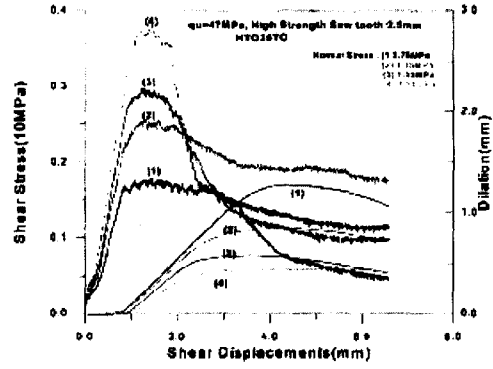


그림 21. 수직응력별 전단과 팽창곡선($i=26.6^\circ$)

와 하부의 시편내에서 발생하는 변위이다. 그림 19(a)를 보면 수직하중이 초기 전단변위가 증가함에 따라 급격히 증가하고 5mm의 전단변위 이후에도 계속 증가함을 볼 수 있다. 전단응력은 앞의 두 시험에 비하여 상당히 큰 전단 변위시에 첨두전단강도가 나타나며, 잔류전단강도가 첨두 전단강도보다 더 커지고 있음을 보여준다. 이는 다이러턴시 억제로 전단이 절리를 따라 발생하면서 전단 중심선에서 벗어난 절리부분을 파괴시키기 때문에 나타나는 영향이다. 그림 19(b)에는 전단 변위에 따른 수직변위를 나타낸 것으로 전단변위 초반에 수축하다가 팽창하여 일정한 상태를 유지하고 있다. 수직변위가 구속되므로 전단변위는 시편을 파괴시키면서 발생되었다. 이상의 실험 결과에서 알 수 있듯이 하중조건에의 제어는 잘 구현되었다.

전단실험 결과의 정확성을 판단하기 위하여 톱니 경사각이 각각 $i=16.7^\circ$ 과 $i=26.6^\circ$ 이며 압축강도가 47MPa인 시편에 대하여 수직응력을 0.76, 1.15, 1.53, 1.91MPa로 하여

실시하여 Patton과 Barton의 전단강도 모델과 비교하였다. 이 실험에서의 전단 속도는 0.5mm/min.이며 총 전단변위는 6.7mm이다. 그림 20은 톱니경사각 $i=16.7^\circ$ 인 시편의 수직응력별 전단응력곡선과 팽창곡선을 나타낸 것이다. 수직응력의 증가에 따라 전단응력과 전단강성이 증가하였다. 다이러턴시는 수직응력의 증가에 따라 감소하였으나 그 차이는 크지 않고 최대팽창량은 전단변위 5mm 부근에서 발생한다. 각각의 수직응력에서 첨두전단응력 이전에 전단응력의 증가에 따라 팽창곡선은 압축을 나타내며 첨두전단강도 부근에서 최대팽창각을 나타내어 그림 16에 나타낸 Barton의 인장절리에 대한 전형적인 전단응력-변위 곡선과 경향이 일치함을 알 수 있다. 그림 21은 톱니경사각 $i=26.6^\circ$ 인 시편의 수직응력별 전단응력곡선과 팽창곡선을 나타낸 것이다. 수직응력의 증가에 따라 전단응력이 그림 20의 경우보다 크게 증가하였다. 다이러턴시 (dilatancy)는 수직응력의 증가에 따라 크게 감소하였으며

표 2. 전단실험결과와 역산된 JRC

시 편	JCS (MPa)	i_o ($^\circ$)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	Ks (GPa/m)	dn ($^\circ$)	JRC= $\frac{d_n}{\log(JCS/\sigma_n)}$	JRC= $\frac{\tan^{-1}(\tau/\sigma_n) - \phi_b}{\log(JCS/\sigma_n)}$	JRC= $1.6 + 0.47 i_o$ (Huang's Eq.)
Hto156	47	16.7	0.77	1.19	2.0928	17.86	9.45	8.68	9.45
Hto159	47	16.7	1.16	1.78	3.1910	17.94	11.16	9.50	9.45
Hto1512	47	16.7	1.53	2.37	4.2030	15.00	10.08	10.45	9.45
Hto1515	47	16.7	1.92	3.03	4.1452	14.04	10.11	11.55	9.45
Hto256	47	26.6	0.78	1.79	2.8670	27.24	15.30	13.96	14.10
Hto259	47	26.6	1.16	2.57	3.0779	25.34	15.76	15.00	14.10
Hto2512	47	26.6	1.53	2.98	3.6233	23.72	15.95	14.27	14.10
Hto2515	47	26.6	1.91	3.82	3.8476	20.91	15.03	15.70	14.10

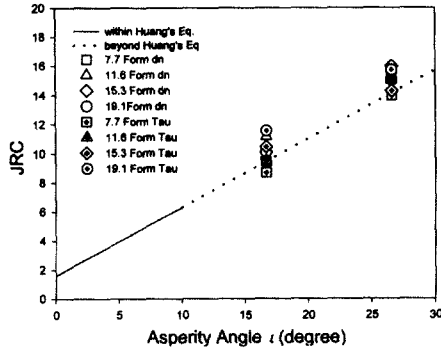


그림 22. 톱니 경사각 i_0 와 JRC의 관계비교

전단변형에 의한 전단파쇄(shearing off)가 그림 20에 비하여 크게 발생하여 최대팽창량이 전단변위 4mm 이하에서 나타남을 알 수 있다. 침투전단응력 이전에 전단응력의 증가에 따른 압축량은 그림 20에 비하여 감소되었다. 침투전단강도 부근에서 최대팽창각을 나타내었다.

이들 실험 데이터에 대하여 침투전단강도, 수직응력, 전단강성 침투전단변위, 최대팽창각 등을 계산하는 프로그램을 작성하여 표 2에 그 전단시험결과와 시험결과에서 역산된 JRC 값을 나타내었다.

수직응력의 증가에 따라 전단강성은 증가하였으며 톱니의 경사각 i_0 에 따라서는 경사각이 큰 경우에 낮은 수직응력에서는 전단강성이 크나 수직응력이 커지면 오히려 작아졌다. 최대팽창각(d_n)은 수직응력의 증가에 따라 감소하였으며 감소량은 톱니의 경사각 i_0 가 큰 쪽이 크게 나타났다. 그림 22에서 JRC 값은 전단변위-수직변위 곡선에서 구한 최대팽창각을 식 (7)에 대입하여 구한 것과 전단시험 결과를 Barton의 전단강도식(6)에 대입하여 구한 것, 그리고 Huang(1990)의 실험식에 대입하여 구한 것을 나타내었다. Huang은 압축강도가 45MPa이며 경사각 i_0 가 3°, 6°, 10°인 톱니형 절리를 고강도 석고(hydrostone)와 물을 혼합하여 제작한 시편에 대하여 수직응력이 1~10MPa인 수준으로 전단시험을 실시하였다. 그의 실험에서는 Barton의 전단강도식에서 역산한 JRC 값이 $i_0=3^\circ$ 일 경우 평균 값이 $2.11 \pm 0.78 \sim 3.35 \pm 1.45$ 의 범위를 나타내었으며, $i_0=6^\circ$ 인 경우 $3.49 \pm 0.93 \sim 7.10 \pm 0.00$, $i_0=10^\circ$ 인 경우 $4.32 \pm 2.35 \sim 6.70 \pm 0.80$ 의 범위를 나타내었다. 그는 이 결과를 톱니의 경사각과 JRC의 관계인 $JRC=1.6+0.47 \cdot i_0$ 로 나타내었다. 실험결과를 비교해 보면 최대팽창각으로 구한 JRC와 전단응력으로 구한 JRC가 거의 일치함을 알 수 있으며, Huang의 식보다는 조금 큰 값을 나타내고 있

다. 본 실험 결과의 편차가 Huang의 결과보다 매우 작으며, Huang의 실험이 톱니의 경사각 $i_0=10^\circ$ 가 최대인점을 고려하면 본 실험 결과가 더 신뢰할 수 있다고 판단된다. Patton의 식 (5)는 낮은 수직응력과 높은 수직응력의 사이의 전이영역에서의 전단강도를 잘 표현할 수 없어 낮은 수직응력 상태에서는 초기 거침각 i_0 와 최대팽창각이 잘 일치하나, 수직응력이 커지면 그 차이가 커지게 된다. 본 실험의 수직응력 15.3kg/cm², 19.1kg/cm²은 이 전이영역에 해당되는 응력이다.

5. 결론

현장의 경계조건과 일정 수직응력, 일정 수직하중, 무한수직강성 조건을 구현할 수 있도록 고안된 절리면 전단시험기의 특징과 적용시험을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 정형화된 시편의 경우 전단변위시 발생하는 전단변위를 이용하여 접촉면적을 계산하여 제어함으로써 수직응력이나 수직하중을 일정하게 유지할 수 있다.
- (2) 사용자가 원하는 실험과정을 프로그래밍할 수 있으며, 플라스터(plaster)를 사용하던 기존의 시편 고정 방법을 기계적으로 개선하였다.
- (3) 시험기의 강성 부족으로 인하여 발생하는 수직변위는 제어프로그램 내에서 쌍곡선 함수를 사용하여 제거하였으며, 전단 시스템에서는 상, 하 전단상자 간의 상대변위를 측정하여 이를 제거하였다.
- (4) 절리면 전단거동의 자유도를 증가시키는 장치를 고안하여 전단방향의 이동, 수직 방향의 이동, 전후회전, 좌우회전 운동이 가능하게 하므로써 현장의 절리거동을 잘 모사할 수 있다.
- (5) 하중 조건에 대한 검증 시험 결과 일정 수직응력조건, 일정 수직하중 조건, 일정 수직강성조건이 잘 구현되었으며 각 조건에 따른 실험 결과는 상이하였다.
- (6) 톱니형 시편에 대한 시험기의 정확성 시험 결과는 Huang의 시험결과에 비하여 편차가 매우 작아 신뢰성이 높음이 확인되었다. 또한 각 수직 하중 단계에서 최대 팽창각에 대하여 역산한 JRC 값과 전단강도에서 역산한 JRC 값, 그리고 Huang의 실험식에 의한 JRC 값이 잘 일치되어 Barton의 모델과 잘 부합됨을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 김대영, 천병식, 서영호, 이영남(1999), "응력, 하중, 변위제어 방식의 암석 절리면 전단시험기의 개발", '99 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.471~477.
2. 이상돈(1996), "절리형상의 정량적 측정을 통한 각종 거칠기 파라미터의 비교분석 및 전단거동 해석", 서울대학교 박사학위논문, pp.37~52.
3. ASTM(1997), "Standard test method for performing laboratory direct shear test of rock specimens under constant normal force", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04. 09, D5607.
4. Barton, N. R.(1972), "A model study of rock-joint deformation", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 9, pp.579~602.5.
Barton, N. R.(1973), "Review of a new shear-strength criterion for rock joints", Engineering Geology, 7. pp.287~332.
6. Barton, N. and Choubey, V.(1977), "The shear strength of rock joints in theory and practice", Rock Mech. Vol. 10, pp.1~54.
7. Goodman, R. E.(1976), "Methods of geological engineering in discontinuous rocks", West Publishing, New York.
8. Hencher, S. R. and Richard, L. R.(1989), "Laboratory direct shear testing of rock discontinuities", Ground Engineering, pp.24~31.
9. Huang, X.(1990), "A laboratory study of the mechanical behavior of rock joints, with particular interest to dilatancy and asperity surface damage mechanism", Ph.D thesis, University of Wisconsin-Madison, pp.36~131.
10. Hutson, R. W. and Dowding, C. H.(1987), "Micro computer control of direct-shear tests", Proc., 28th U.S. Symp. on Rock Mechanics, Tucson, AZ, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 125~132.
11. Mouchaorab, Khaled S. and Benmokrane, Brahim(1994), "A new combined servocontrolled loading frame/direct-shear apparatus for the study of concrete or rock joint behavior under different Boundary and loading conditions", Geotechnical Testion Journal Vol.17, No.2 pp.233~242.
12. Ooi, L. H. and Carter, J. P.(1987), "A constant normal stiffness direct shear device for static and cyclic loading", Geotechnical Testing Journal, Vol. 10, No. 1, pp.3~12.
13. Patton, F. D.(1966, a), "Multiple modes of shear failure in rock", Proc. 1st Congr. SRM, Lisbon, 1, pp.509~513.
14. Patton, F. D.(1966, b), "Multiple modes of shear failure in rock and related materials", Ph.D thesis, Univ. of Illinois

(접수일자 2000. 10. 7)