

응력, 하중, 변위제어 방식의 암석 절리면 전단시험기의 개발

Development of Stress, Load and Displacement Controlled Direct Shear Apparatus for Jointed Rock

김대영¹⁾, Dae-Young Kim, 천병식²⁾, Byung-Sik Chun, 서영호³⁾, Young-Ho Suh, 이영남⁴⁾, Young-Nam Lee

¹⁾ 현대건설 기술연구소 대리, Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology

²⁾ 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering . Hanyang Univ.

³⁾ 현대건설 기술연구소 과장, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology

⁴⁾ 현대건설 기술연구소 상무, Vice President, Hyundai Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : A new stress, load and displacement controlled direct shear apparatus has recently been developed at the Hyundai Institute of Construction Technology. This direct shear apparatus is capable of testing of rock joint under constant normal stiffness, constant normal stress or constant normal load boundary conditions. This paper describes this direct shear apparatus and illustrates results of shear tests at constant normal stress condition, constant normal load condition and constant normal stiffness condition with dental stones which have a same joint roughness and unconfined compressive strength.

Key words : direct shear apparatus, joint, normal stiffness condition, dental stone

1. 서론

암반 구조물의 안전성에 영향을 미치는 주요 인자는 암반의 불연속면이다. 불연속면의 변형 및 파괴 거동에 관련된 역학적 특성은 불연속체 해석에서 매우 중요한 입력요소로서 사용된다. 발전소, 터널, 지하에너지 저장시설, 대규모 댐 등의 수요 증가로 인해 이러한 현장 조건을 모사할 수 있는 암석 절리면 전단시험기의 개발이 필요하였다. 현장의 경계조건은 2가지 경우로 볼 수 있다. 첫째, 전단 변형시 수직 응력이 일정한 상태를 유지하는 경우(수직강성=0)로서 이러한 경우를 예를 들면 암괴가 사면을 따라 활동하는 경우이다(그림 1(a)). 둘째, 전단변형시 수직응력이 변하는 경우로서 이러한 경우는 터널이나, 지하공동 굴착시 측벽이나 천단부 암괴가 활동하는 경우이다(그림 1(b)). 이러한 상태를 일정 수직강성 상태(이 활동은 불연속면을 따라 점진적인 수직응력 증가를 발생시킨다. 이 수직응력의 발생은 주변암의 강성(stiffness)과 활동면에서의 팽창(dilation)이 조합된 효과에 기인한다. 같은 현상은 암반에 근입된 피어나 말뚝, 그라우팅된 암반앵커와 같은 구조적 접촉면에서도 발생한다(그림 1(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 이러한 문제점을 극복하기란 쉽지 않다. 본 논문에서는 일축압축, 직,간접인장 시험은 물론 위의 2가지 경계조건에 대한 전단시험이 가능한 절리면 전단시험기에 대한 소개를 하였다. 또한 동일한 인공 시편에 대하여 일정한 수직응력 상태, 일정한 수직하중 상태 그리고 수직변위가 제한된 상태(infinite normal stiffness) 상태에 대한 전단시험 결과를 비교, 분석하였다.

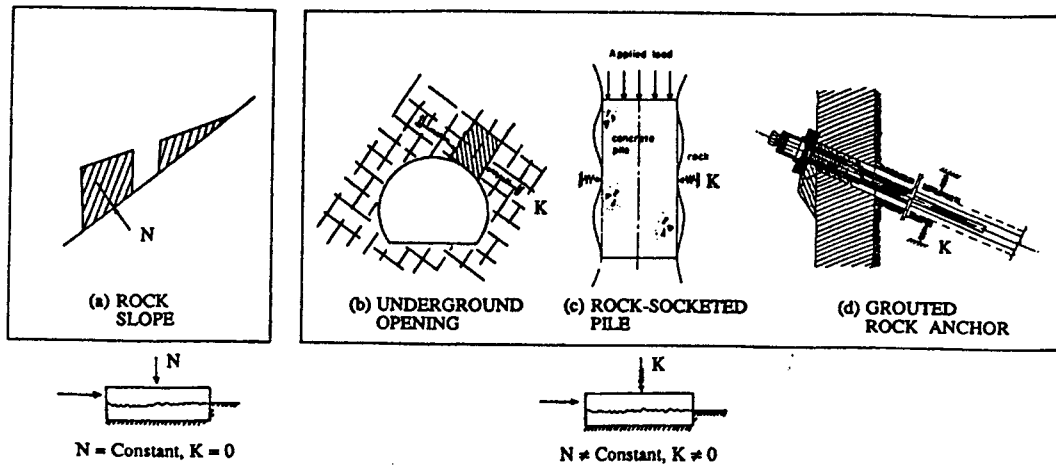


그림 1. 절리면 전단 거동의 예(Moucharab and Benmokrane, 1994)

2. 절리면 직접전단 시험기의 특징

이 절리면 직접전단시험기는 현대건설 기술연구소에서 1년 6개월에 걸쳐 설계, 제작 완료하였다. 이 시험기는 수직하중 재하 시스템, 수평하중 재하 시스템, 파워유닛, 제어장치 및 데이터 저장 장치로 구성되어있다(그림 2).

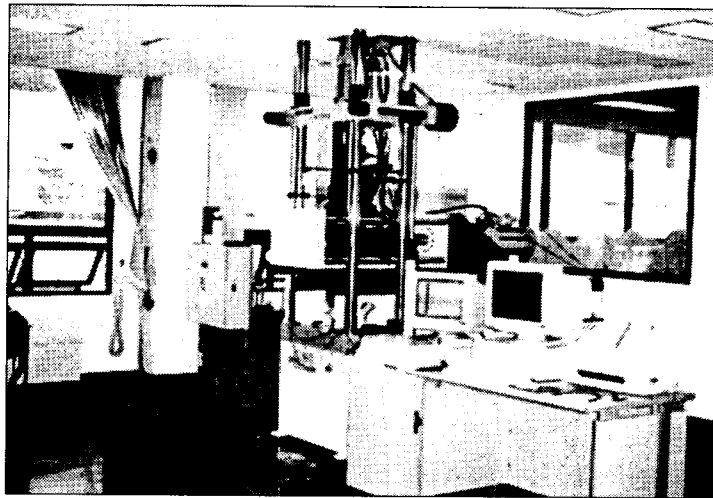


그림 2. 암석 절리면 직접전단 시스템

직접전단 시험기의 단면은 그림 3에 나타내었다. 변위계가 내장된 수직하중을 가하는 vertical actuator(1), vertical actuator를 상하로 움직이고 고정시키는 side jack(2), column을 따라 상하로 움직이며 수직하중을 지지하는 cross head(3), cross head를 column에 고정시키는 clamp(4), 수직하중을 지지하는 4개의 column(5), 수직하중을 측정하는 load cell(6), 인장시험시 샘플을 잡는 grip(7), 샘플의 편심을 보정하고 전단시 암석 샘플의 roll과 pitch를 가능하게 하는 spherical seat(8)와 swivel joint(9), 샘플을 잡는 상부 전단상자(10), 샘플의 dilation이 가능하도록 하는 roller bearing(11), dilation을 측정하는 전후 좌우 4개의 수직 LVDT(12), 변위계가 내장된 수평하중을 가하는 horizontal actuator(13), 수평하중을 측정하는 load cell(14), 하부 전단상자(15), 하부 전단상자를 미소한 마찰로 활동 가능케하는 linear

motion bearing(16), 상부 전단상자와 하부 전단상자의 상대변위를 감지하는 수평 LVDT(17), 수평하중

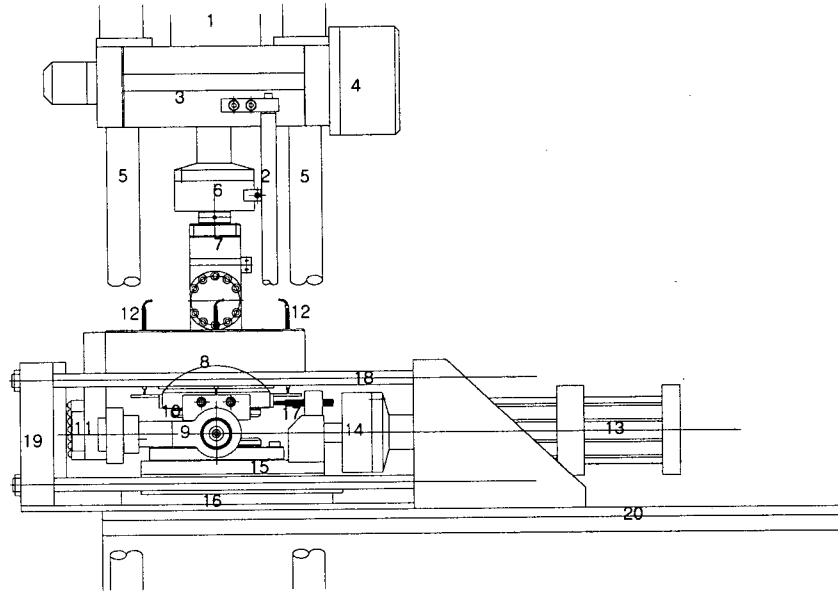


그림 3. 암석 절리면 직접전단 시험기 단면

을 지지하는 4개의 reaction bar(18)와 stiff plate(19), 수평재하 시스템의 수평이동을 가능케하는 linear motion bearing과 레일(20)로 구성되어 있다. 수직과 수평 actuator는 각각 15ton 용량이며 3, 6, 10, 15ton 단계별로 앰프를 사용하여 각 단계별 10% 이상의 하중에서는 0.1%의 정도를 유지한다. 변위를 측정하는 각각의 LVDT는 0.001mm의 정도를 갖고 있다. 각각의 센서에서 측정된 신호들은 각각의 amplifier에서 증폭되어 feed back 하고 servo valve를 제어하여 하중, 변위제어를 한다. 그러나 응력제어는 시험하는 동안 샘플이 받는 응력을 일정하게 유지시키거나, 일정패턴으로 변화시킬 수 있어야하므로 샘플의 단면적변화를 측정하여 변화된 단면적에 비례하는 하중을 가감하여야 한다. 암석코아에서 나타나는 절리면은 공축에 대하여 경사진 절리일 경우 접촉면은 타원형이며, 공축에 대하여 직각인 절리의 경우 접촉면은 원형이다. 전단시험시 변위가 발생하면 접촉면은 변하게 되는데 수직응력이 일정한 조건의 경우 이것을 시험에 반영해 주어야 한다(Ooi and Cater, 1987a). 변위에 따른 접촉면적은 다음식으로 나타낼 수 있다(Hencher and 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

본 시험기는 전단변위를 측정하는 LVDT로 시험시 상부 절리와 하부 절리의 상대변위를 측정하여 변화면적을 계산한후 감소시킬 하중을 구하여 servo valve를 제어함으로써 일정한 수직응력 상태를 유지할 수 있다.

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

$$P - \Delta P = \sigma(A - \Delta A)$$

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

3. 시편제작

일정수직응력, 일정수직하중, 일정수직강성 상태에서의 절리면의 전단거동을 비교하기 위하여 동일한 압축강도와 절리면 거칠기를 가지는 샘플을 제작하였다. 동일한 절리면을 갖는 자연암석 샘플은 없으므로 자연 암석절리면(평택 편마암)에 실리콘고무액을 사용하여 절리면의 표면형상을 뜨고 1일동안 경화시킨다. 이 경화된 실리콘 고무를 몰드에 넣은 후 다시 실리콘액을 부어 1일 경화시킨 후 상, 하부를 떼어내면 상부와 하부의 실리콘 고무 절리가 완성된다.(그림 4). 이 원형의 실리콘 고무절리를 몰드에 넣고 치재용 석고(dental stone)를 일정량의 함수비로 반죽하여 몰드에 부어 1일간 양생하였다. 치재용 석고는 초조강성을 갖는 재료로서 물과 석고의 중량비가 0.19 일 때 1시간 경과후 강도가 600kg/cm²에 달한다. 시편은 원통형이며 높이는 55mm, 직경은 100mm이다. 동일한 재료를 사용하여 직경 54mm, 높이 108mm의 원주형 공시체를 제작하여 1일 후의 일축압축강도를 측정하였다. 이 시험체의 역학적 특성은 표 1과 같다.

표 1. 전단 샘플의 역학적 성질

| 재 료 | 배합비(물/석고) | 일축압축강도 |
|--------|-----------|-------------------------------|
| 치재용 석고 | 0.22/1 | 512 ± 11(kg/cm ²) |



그림 4. 절리면을 인상한 석고와 실리콘

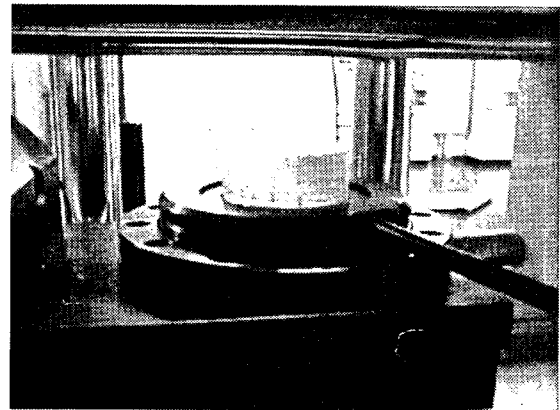


그림 5. 시편장착

이와 같이 제작된 시편을 동일한 방향으로 시험기에 장착한다. 시편은 전단상자 안의 원형몰드를 시계방향으로 회전시키면 4 개의 바이스가 시편을 조이도록 되어있다(그림5).

4. 시험결과 및 분석

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 수행하였다. 전단속도는 1mm/min 으로 15mm 까지 변위제어를 하였고, 데이터의 저장간격은 250msec 마다 1회로

하였다. 수직응력의 계산은 모두 전단변위시 변화된 단면적을 사용하도록 설정하였다. 그림 6.(a)에는 전단변위에 따른 전단응력과 수직응력, 수직하중을 나타내었다. 전단응력은 첨두전단강도에 이를 때 까지 급격히 증가하여 첨두전단강도를 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 단면적에 작용하는 수직응력은 전단변위에 관계없이 일정한 값을 나타내었다.

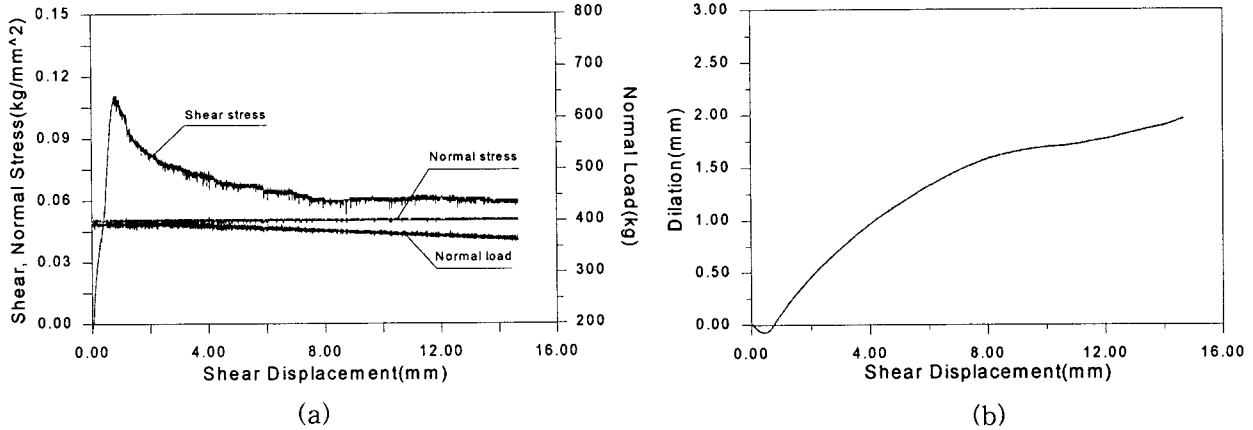


그림 6. 일정 수직응력 상태의 절리면 전단시험 결과

그림 6(b)에는 전단변위에 따른 수직변위를 나타내었다. 초기 전단변위시에 미소하게 수축이 발생하다가 팽창이 발생하는데 이는 절리면사이의 접촉이 완전하지 않아 전단이 시작되면서 수축이 발생하고 절리면이 완전히 맞물리고난 후 팽창이 발생되는 것으로 판단된다. 전단변위 10mm 부근에서 팽창율이 둔화되었다가 다시 증가하는 것으로 나타나는 데 이것은 그 시점에서 절리면의 일부가 갈린 것으로 판단된다.

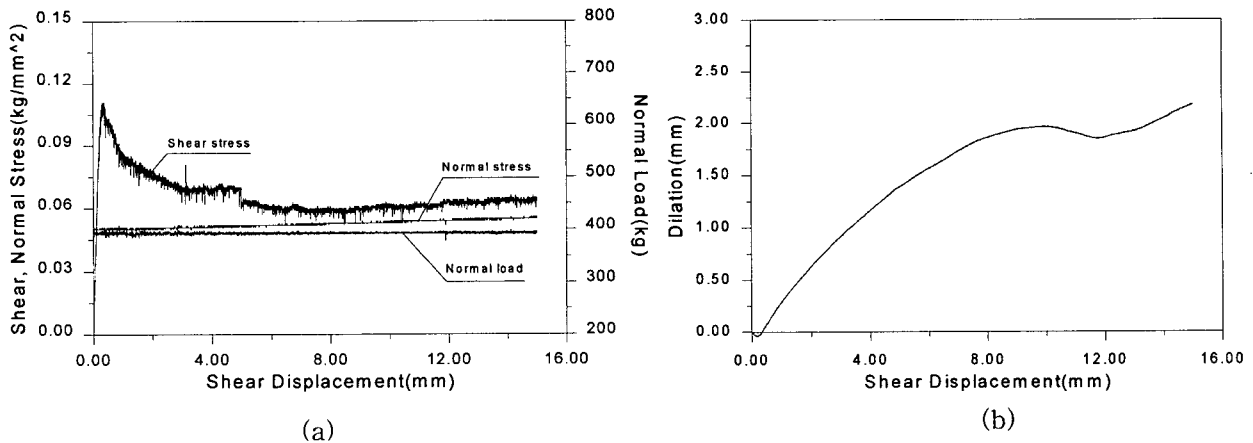


그림 7. 일정 수직하중 상태의 절리면 전단시험 결과

그림 7(a)는 일정 수직하중 상태에서의 전단변위와 전단하중, 수직응력, 그리고 수직하중을 도시한 것이다. 수직하중이 일정하게 유지되고 전단 변위에 따라 유효 전단면적이 감소하므로 수직응력이 서서히 증가하고 있음을 보여준다. 전단응력은 그림 6(a)의 경우보다 작은 변위에서 첨두상태에 도달하였고 잔류 전단강도는 전단변위에 따라 수직응력이 증가하는 비율과 비슷하게 증가함을 보여주고 있다. 그림 7(b)는 전단변위에 따른 수직변위를 나타낸 것으로 그림 6(b)와 비교할 때 전단변위 10mm 이후에 수축이 발생하고 전단변위 12mm 이후의 팽창율이 그림 6(b)의 경우보다 큼을 볼 수 있다. 이것은 수직하중

이 일정하게 유지된상태, 즉 수직응력이 증가한 상태이므로 전단 변위 10mm 부근에서 시편의 파쇄가 그림 6(b)의 경우보다 크게 발생하여 수축이 발생하고 파쇄된 부스러기에 의한 영향 때문에 팽창율이 큰 것으로 볼 수 있다. 초기 전단변위시 미소한 수축 이후 팽창이 일찍 시작되는 점과 침두전단강도에 빨리 도달한 점을 볼 때 시편 장착시 절리면의 접촉이 잘 되었던 것으로 판단된다. 그림 8은 시험기의 수직 변위를 고정시킨 상태 즉, 상태에서의 전단변위에 따른 전단응력, 수직응력, 그리고 수직하중을 도시한 것이다. 일정 수직강성 상태는 초기 수직하중을 가한 상태에서 전단상자의 수직변위를 제한 하도록 함으로서 가능하다. 수직변위가 구속되므로 전단 변위시 발생하는 수직변위는 절리면과 상부와 하부의 시편내에서 발생하는 변위이다. 그림 8(a)를 보면 수직하중이 초기 전단변위가 증가함에 따라 급격히 증가하고 5mm의 전단변위 이후에도 계속 증가함을 볼 수 있다. 전단응력은 앞의 두 시험에 비하여 상

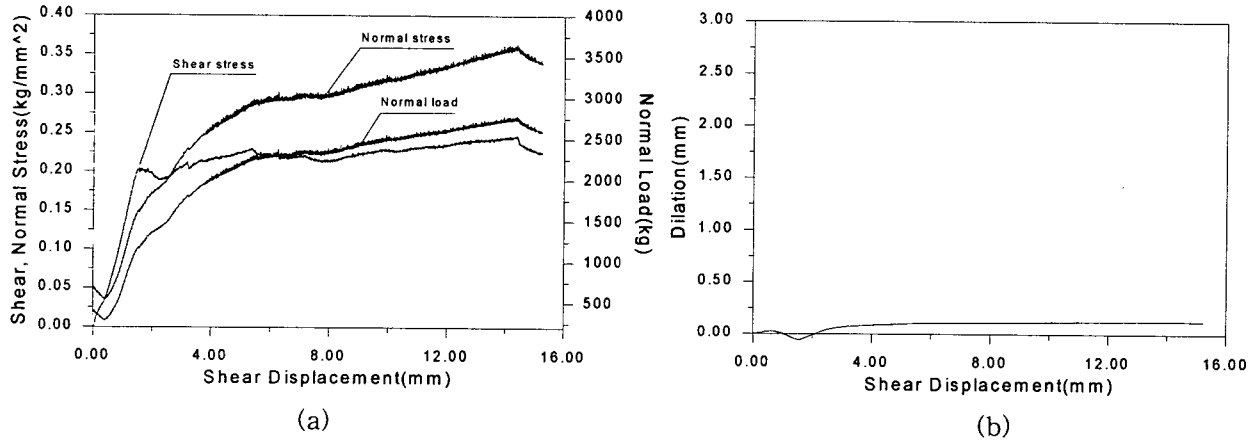


그림 8. 일정 수직강성 상태에서의 절리면 전단시험 결과

당히 큰 전단변위시에 침두전단강도가 나타나며, 잔류전단강도가 침두 전단강도보다 더 커지고 있음을 보여준다. 이는 dilatancy 역제로 전단이 절리를 따라 발생하면서 전단 중심선에서 벗어난 절리부분을 파괴시키기 때문에 나타나는 영향이다. 그림 8(b)에는 전단 변위에 따른 수직변위를 나타낸 것으로 전단 변위 초반에 수축하다가 팽창하여 일정한 상태를 유지하고 있다. 수직변위가 구속되므로 전단변위는 시편을 파괴시키면서 발생되었다.

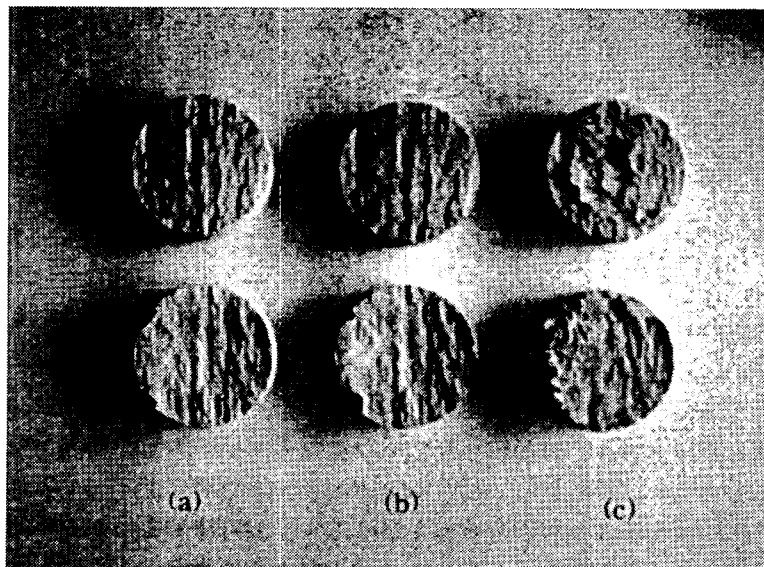


그림 9. 절리면 전단시험후 각 시편의 상태

그림 9에는 3가지 조건에 대한 절리면 전단시험후 시편의 상태를 나타낸 것이다. (a)는 일정 수직응력 상태, (b)는 일정 수직하중 상태, (c)는 수직변위가 제한된 상태의 시험후 모습이다. (a)는 절리면 일부에서 접촉면이 갈렸고 (b)는 (a)의 경우 보다 조금 많이 갈렸으며 (c)는 절리면이 파쇄된 상태를 나타내었다.

5. 결론

현장의 경계조건과 하중조건을 구현할 수 있는 절리면 전단시험기를 개발하였다. 일반적으로 절리면 전단강도를 결정하는데에는 Nx 크기의 코아를 회수하여 전단시험을 수행한다. 기존의 전단시험은 일정 수직하중 상태로 시험하여 전단변위가 커지게 되면 수직응력 상태가 커지게 되어 잔류전단강도를 과대평가할 수 있다. 이 시험기는 정형화된 시편의 경우 전단변위시 발생하는 전단변위를 이용하여 접촉면적을 계산하고 하중을 가감함으로써 수직응력을 일정하게 유지하여 이러한 결점을 보완 하였다. 실시간으로 전단거동을 컴퓨터 모니터링하므로써 시험 및 자료처리의 편의성과 결과 판단을 빠르게 할 수 있도록 하였다. 이 시험기를 이용하여 동일한 절리형상과 압축강도를 갖는 치재용 석고 시편에 대하여 일정 수직응력조건, 일정 수직하중 조건, 일정 수직강성조건에 대한 시험결과는 다음과 같다.

(1) 일정 수직응력 조건과 일정 수직하중 조건의 침투전단강도는 거의 비슷한 값이 나오나 잔류 전단강도는 변위가 증가할수록 일정 수직하중의 조건으로 시험할 경우 커지게된다.

(2) 수직변위를 제한한 조건의 경우 전단강도는 시편의 압축강도와 절리면 거칠기에 주로 영향을 받아 일정 수직응력이나 일정 수직하중의 조건과는 매우 다른 전단거동을 나타내었다.

(3) 터널이나 지하공동 등을 대상으로 하는 절리면 전단강도에 대한 설계 입력변수를 구하기 위해서는 주변암반의 강성과 응력상태를 고려한 조건으로 시험을 하여야한다.

(4) 이 절리면 전단시험기는 암 사면이나, 댐 기초, 터널, 지하공간 등의 설계시 입력변수를 구하는데 있어서 매우 유용하게 사용될 것이다.

참고문헌

1. 이상돈(1996), " 절리형상의 정량적 측정을 통한 각종 거칠기 파라미터의 비교분석 및 전단거동 해석 ", 서울대학교 박사학위논문
2. SR Hencher and LR Richard(1989), "Laboratory direct shear testing of rock discontinuities", Ground Engineering, pp.24~31.
3. Khaled S. Mouchaorab and Brahim Benmokrane(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.
4. Ooi, L. H. and Carter, J. P.,(1987a), "A constant normal stiffness direct shear device for static and cyclic loading", Geotechnical Testing Journal, Vol. 10, No. 1, pp.3~12.
5. 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