

절리면에서의 전단거동 특성과 역학적 파라미터들 간의 상관성 Relationship between shear behavior characteristics and mechanical parameters of fractures

이종욱(Lee, Jong Uk)
이찬구(Rhee, Chan Goo)
황신일(Hwang, Shin Il)
장천중(Chang, Chun Joong)
최원학(Choi, Weon Hack)

한국원자력연구소
한국원자력연구소
한국원자력연구소
한국원자력연구소
한국원자력연구소

요약/Abstract

본 연구에서는 절리면에서의 전단거동 특성을 규명하기 위해 총 37개의 편마암종 코아 시편들을 대상으로 Portable Direct Shear Box를 이용하여 실내 직접전단시험을 수행하였다. 시편들에 가해진 최대 수직응력의 범위는 $5.60 \sim 25.67 \text{kg/cm}^2$ 이었으며, 전단하중을 점진적으로 가중시키는 다단계 전단시험법에 준하여 실험하였다. 이러한 방법에 의한 실험결과들을 분석하여 절리면의 전단강도에 관한 경험식들을 제시하였으며, 전단거동에 영향을 미치는 역학적 파라미터들을 도출하여 상호 비교 분석하였다.

절리조도계수에 따른 전단강성의 변화는 수직응력이 증가함에 따라 시편의 절리조도계수가 클수록 전단강성의 값도 급증하는 경향을 보이며, 본 실험에 적용한 최대 수직응력 하에서 구한 평균 할선 전단강성은 약 110.68kg/cm^2 였다. 또한 수직응력이 증가함에 따라 시편의 길이와 전단강성 사이에는 크기효과(size effect)에 의한 반비례 관계를 나타내어, 동일한 절리조도계수를 지닌 시편일지라도 길이가 긴 시편의 경우에 전단강성이 감소함을 알 수 있었다.

In this study, laboratory direct shear tests on 37 core specimens of gneiss were performed to examine the characteristics of shear behavior on fractures by using a portable direct shear box. The multi-stage shear testing method was used and normal stress applied

to specimens ranges from 5.60 to 25.67kg/cm². On the basis of test results, the empirical equations for the shear strength on fractures were suggested. The mechanical parameters that can influence the shear behavior were derived and compared between each parameter.

The values of shear stiffness have a trend showing rapid increase with the increase of normal stress and joint roughness coefficient, and the average value of secant shear stiffness for all specimens is about 110.68kg/cm³ under the range of normal stress applied in this test. In addition, the relationship between the length of specimen and shear stiffness is inversely correlated due to the size effect. Therefore, even the specimens with the same joint roughness coefficient show the trend of decreasing shear stiffness in case of the specimens being the longer length.

서 언

최근들어 국내외적으로 지하공동의 활용성이 증대되고 있으며 지하암반을 대상으로 한 암반구조물의 필요성과 대형화 추세에 따라 이러한 구조물들의 설계, 시공 및 유지와 관련된 안정성문제가 심각하게 대두되고 있다. 또한 지하암반은 절리, 파쇄대 및 단층 등과 같은 불연속면들의 발달로 인하여 이방성(anisotropy)을 나타내기 때문에 대상암반과 암반구조물의 역학적 거동을 일관성있게 예측하고 적절하게 평가하기가 매우 어려운 실정이다.

이러한 불연속면들이 존재하는 암반이나 암반구조물들에 있어서 대상암반의 역학적 거동은 주로 불연속면의 발달상태나 주위의 응력조건에 의해 좌우되며, 그로 인해 응력 평형상태를 잃게 되면 취약한 암반에서의 미끄럼에 의한 붕괴나 rock burst 등과 같은 대규모의 재해를 초래하게 된다. 따라서 암반을 대상으로 구조물을 건설할 경우에는 이러한 역학적 특성을 감안하여 설계 및 시공시에 반영해야 하며 그에 따른 면밀한 조

사와 검토가 요청된다(이정인외, 1991 ; IAEA-Safety series No.54, 1981 ; No.62, 1984). 더구나 방사성폐기물 영구처분장을 건설할 경우 부지특성조사의 일환으로 장기적인 안정성을 고려하여 이에 따른 지질공학적 및 암석역학적 조사가 체계적으로 수행되어야 한다(Shuri, F.S., et al., 1981 ; Feves, M.L., et al., 1981 ; USNRC NUREG-1199, 1987 ; IAEA Technical report No.215, 1982 ; No.256, 1985).

이와 관련된 불연속면의 전단거동을 규명하기 위한 연구동향을 고찰해 보면, 절리의 표면특성에 영향을 미치는 물리적인 증거를 규명한 연구(Jaeger, J.C., 1969 ; Patton, F.D., 1966), 절리조도(joint roughness)와 절리면 압축강도(joint wall compressive strength)의 정량화 연구(Barton, N., and Chouvey, V., 1977), fractal차원과의 상관관계를 이용한 절리조도계수의 결정에 관한 연구(Carr, J.R., and Warriner, J.B., 1989), 지하공동 상태의 수직 응력과 변위에 따른 조도 감쇄현상(asperity degradation)의 고찰(Hutson, R.W., and Dowding, C.H., 1990), 불연속면에서의 파괴조건과 위험각의 범위를 규명한 연구(김기주, 1986)

가 있으며, 그 외에도 현장에서의 적용을 위한 크기효과(scale effect)에 관한 연구들(Barton, N., et al., 1985; Pratt, H.R., et al., 1974; Swahn, G., 1985)이 꾸준히 수행되고 있다.

그러나 상기한 바와 같이 불연속성 암반에 대한 전단거동을 예측하기 위해 현장에 직접 적용가능한 실험적 분석과 연구결과는 매우 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 실내 전단시험을 수행하여 불연속면의 지질공학적 특성과 전단거동과의 상관관계를 규명하고 방사성 폐기물 처분장의 안정성과 관련된 암반의 물성 및 거동 해석에 필요한 역학적 파라미터들을 실험적으로 분석 검토함으로써, 궁극적으로는 현장에 적용가능한 역학적 파라미터들을 도출하여 그들의 상관관계를 정립하고 그 적용성을 고찰하는데 있다.

본 연구에서 수행된 실험내용은 다음과 같으며, 이 연구는 방사성 폐기물 관리기금에 의해 수행되었음을 밝힌다.

현장에서의 적용성을 위해 시편들의 절리면을 절리조도에 따라 분류하였고, 수직응력에 따른 전단강도의 관계, 절리조도에 따른 전단강도의 관계 및 충전물질의 유무에 따른 전단강도와의 관계를 분석하여 경험식을 제시하였다. 또한 전단응력에 따른 전단변위 거동, 전단변위에 따른 수직변위 거동, 수직응력에 따른 전단강성의 관계 및 절리조도와 크기효과(size effect)에 따른 전단강성의 변화를 고찰하였다.

시료 및 시편

암석학적 특징

본 연구대상으로 선정된 시료는 충청남도

공주군 신평면 봉갑리 일대에서 수행한 시추조사로부터 심도 50~200m에서 회수된 NX코아 시료로서 지질학적으로 선캠브리아기 편마암류에 속한다. 본 실험에서는 총 37개의 코아시료를 대상으로 하였으며 그 중 2개의 맥암류 시료를 제외한 35개의 시료는 대부분이 호상편마암이고 일부는 석영편암이었다.

또한 본 시료는 실내에서 장기간 자연건조시킨 상태로 보관한 후 실험을 수행하였으며, 가능한 한 절리면의 조도 발달상태가 다양한 시료들을 선정하였고 절리면이 충전물질로 피복된 시료들도 실험대상으로 하였다.

시편 제작

본 실험에서는 상, 하 절리면에서의 전단거동 특성을 규명해야 하기 때문에 절리면을 포함한 상, 하부 시료를 실험목적에 적합하도록 아크릴 몰드(acryl mold)를 사용하여 주형시편(molded specimen)을 제작하여야 한다. 본 실험에서 사용한 아크릴 몰드는 7개로서 상, 하부로 분리되며, 규격은 가로 18cm, 세로 14cm, 두께 1.2cm로서 상, 하부 시편을 각각 한 개씩 구조하는데 사용되었다. 또한 본 실험에서 사용한 주형재로서 대부분이 고화 완화제를 첨가한 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 일부는 미국산인 세립질 석고분말을 사용하였다.

시편의 제작순서는 제작된 시편을 용이하게 회수하기 위하여 먼저 상부몰드 내부의 표면에 윤활유를 얇게 바른 후, 주형재(casting material)를 몰드의 내부에 부어 넣고 그 다음 Rock cutter로 적절하게 절단한 시편의 절리면을 시험시의 전단면과 일치시켰으며, 주형



Plate 1. Specimen molded with casting material.

재료부터 약 0.5~0.7cm의 간격을 유지시킨 후 서늘한 곳에서 약 24시간 자연 건조시켰다. 그 후 다른 쪽 절리면을 주형이 완성된 절리면에 맞추고 윤활유를 바른 하부몰드를 올려놓은 다음, 주형재를 부어 넣고 아크릴 몰드의 볼트로 고정시킨다. 이 상태로 24시간 상온건조시킨 후, 상, 하부 몰드를 분리하면 전단시험용 시편이 완성된다. 이와 같은 과정을 통하여 완성된 시편은 Plate 1과 같으며 상온에서 일주일 정도 건조시킨 후 전단시험에 사용하였다.

실험장치 및 방법

실험장치

본 실험에서 사용한 시험기는 미국 SBEL사 (Structural Behavior Engineering Laboratories,

Inc.)에서 제작한 최대하중용량 5ton의 유압식 전단시험기(Portable Direct Shear Box : Model SB-432, Plate 2. 참조)로서 Shear box assembly, 수직하중용 Ram과 전단하중용 Ram 및 압력게이지가 부착된 수동식 유압펌프로 구성된다.

시편에 대한 수직하중과 전단하중은 수동식 유압펌프로 가하여 적용한 하중을 압력게이지로 판독하였으며 전단변위를 측정하기 위하여 정밀도가 0.01mm인 Dial gauge를 Magnetic base에 고정하여 사용하였고, 수직변위는 동일한 2개의 Dial gauge로써 측정하였다. 실험시에 적용된 전단변위의 속도는 약 0.1 mm/min를 유지하였다.

본 시험기는 충전물질로 피복된 절리면을 대상으로 시험하는데 적합하며(Witke, W., 1990), 시편에 적용되는 수직하중과 전단하

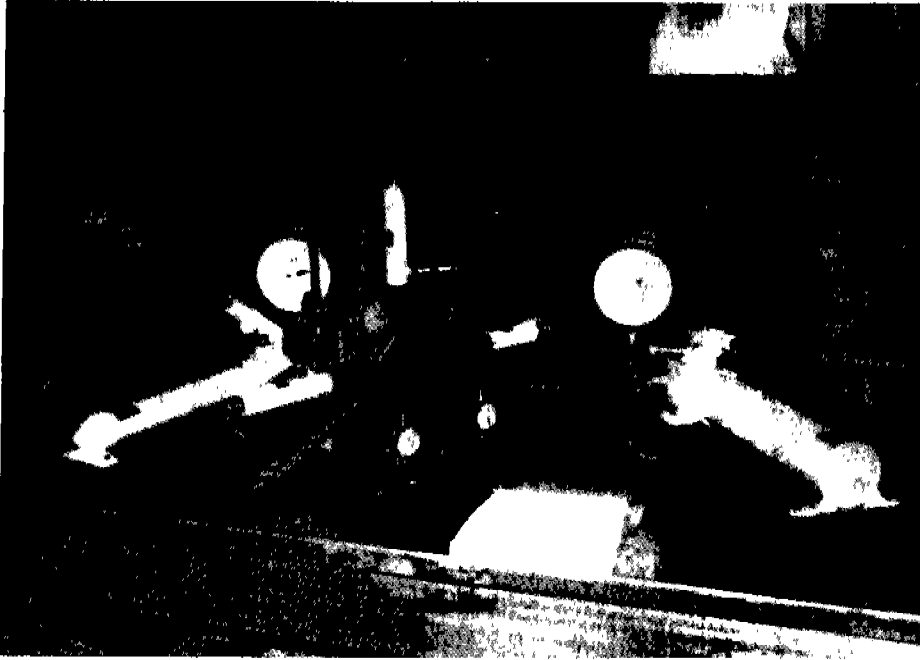


Plate 2. Portable direct shear box.

중은 가축성 와이어 로우프를 통하여 가해지는 데 이 로우프의 장점은 전단시험중 발생하는 전단면에서의 수직변위를 허용하기 때문에 시편의 국부적인 회전성(rotation)이나 측면이동(lateral movement)을 전혀 허용하지 않는 강성 시험장치에 비해 실제의 현장조건에 접근된 시험을 수행가능하게 한다는 점이다(Ross-Brown, D.M., and Walton, G., 1975). 따라서 본 실험에서는 이러한 장점을 고려하여 이 시험기를 실험목적에 적합한 시험기로 선정하였다.

실험방법

본 실험에서는 절리면에서의 전단강도 및 전단거동 특성을 파악하기 위해서 I.S.R.M. (International Society for Rock Mechanics)의 제안방법(Brown, E.T., 1981)에 의거하여 실험을 수행하였다.

실험방법은 주형제로 완성한 상, 하 시편을 시험기의 전단상자내에 고정시키고 최대전단강도를 측정하기 위해서 전단면에 소정의 수직하중을 가한 후 전단면에 따라 전단하중을 증가시켜 적용하였고, 잔류전단강도를 측정하기 위해서는 약간의 전단변위의 반전(reversal)을 허용한 후 수직하중을 증가시키는 다단계 시험법(multi-stage test) (Ross-Brown, D.M., and Walton, G., 1975 ; Franklin, J.A., 1985)을 적용하였다. 본 실험에서의 최대 수직응력은 방사성폐기물 처분장의 최소 예상 지하심도인 약 100m에서의 수직응력에 준하여 국내 암반에 대한 현장응력의 경험식(임한욱, 1988)에서 구한 수직응력치인 24.66kg/cm^2 와 거의 상응하는 25.67kg/cm^2 를 적용하였다. 이러한 조건하에서 발생하는 전단변위 및 수직변위를 측정하였



Plate 3. Molded specimens after direct shear test.

고, 최대전단강도는 전단응력이 증가되면서 전단면에서의 파괴가 발생한 후 전단응력이 급격히 감소하기 직전의 지점으로 결정하였으며, 잔류전단강도는 파괴이후 전단응력이 일정해지면서 전단변위의 증가가 종결되는 지점으로 결정하였다.

시편에 가해진 전단응력(τ)과 수직응력(σ_n)은 다음 식에 의하여 구하였으며, 본 실험을 완료한 후의 시편들은 Plate 3과 같다.

$$\tau = \frac{P_s}{A} \quad (1)$$

$$\sigma_n = \frac{P_n + P_w}{A} \quad (2)$$

여기서, P_s : 전단하중(kg)

P_n : 수직하중(kg)

P_w : 상부 전단상자(shear box)의 무게 : 18.29kg

A : 시편의 전단면적(cm^2)

실험결과 및 고찰

현장 적용성을 고려한 시편들의 분류기준

본 연구에서는 각 시편들의 절리조도상태가 실제로 현장에서의 전단거동에 미치는 영향을 분석 고찰하고 현장에서의 적용성을 최대한 반영시키기 위해 Lilly 등(1982)이 제안한 절리조도의 분류기준을 토대로 검토하였다. 이들은 분류기준을 각 시편들의 절리조도상태에 따라 육안적 분류에 의한 5가지, 즉 1) slicken-sided and polished, 2) very flat, smooth, 3) small ridges, 4) well defined ridges, 5) very rough로서 대별하여 분석한 결과, 1), 2) 및 3)항에 해당하는 절리조도가 시추코아 및 현장절리면들의 조도상태를 80% 이상 점유하

Table 1 Classification of jointed specimens with JRC groups

| JRC : 4~6 | * Value | JRC : 6~10 | * Value | JRC : 10~18 | * Value |
|-----------|---------|------------|---------|-------------|---------|
| S5 | 2.38 | S3C | 9.71 | S1 | 11.71 |
| S7C | 5.92 | S6C | 8.42 | S2C | 17.67 |
| S8 | 4.76 | S11C | 9.43 | S4C | 11.25 |
| S9 | 5.73 | S12 | 6.95 | S13 | 10.60 |
| S10 | 5.56 | S14 | 5.14 | S16C | 10.49 |
| S15C | 5.01 | S18 | 6.18 | S17 | 10.88 |
| S28C | 5.35 | S20 | 7.30 | S19C | 10.15 |
| S29C | 5.78 | S21C | 7.28 | S24C | 13.46 |
| M6C | 5.15 | S22 | 6.79 | S27C | 13.46 |
| | | S23 | 8.87 | M1C | 11.67 |
| | | S25C | 7.66 | M2C | 10.85 |
| | | S26C | 8.64 | M3 | 14.06 |
| | | S30C | 8.65 | M4 | 10.38 |
| | | M7 | 9.56 | M5C | 10.86 |

* Value : Joint roughness coefficient value on each specimen.

며 만약 더 거칠고 강한 절리면이 존재할지라도 현장에서의 적용시에 파괴는 인접한 매끄러운 절리면을 따라서 우선적으로 발생함을 입증하였다(Lilly, P.A., 1982).

따라서, 본 연구에서는 이 점을 고려하여 시료선정에 있어서 절리면이 아주 거칠은 시료는 가능한 한 포함시키지 않았다. 먼저 시편의 절리조도는 pattern marker로 절리면 상에서 등간격으로 세 개의 profile을 작성하였고, fractal차원 개념(이찬구의, 1991)을 적용하여 컴퓨터 프로그램으로 각 시편들의 절리조도계수값들을 구한 후 아래와 같이 3가지로 분류하였다(Table 1).

- 1) slickensided and polished형 : JRC 4~6 그룹
- 2) very flat, smooth형 : JRC 6~10그룹
- 3) small ridges형 : JRC 10~18그룹

수직응력과 전단강도

본 실험에서는 2개의 맥암과 35개의 편마암종 시편들의 절리면에 대해 일면전단시험을 수행하였으며 측정된 실험결과를 각 시편별로 Table 2에 표기하였다. Table 2에서와 같이 시편들의 절리면에 대해 최대 수직응력을 5.60~25.67kg/cm²의 범위로 적용하고 전단하중을 점차 가중시켰을 때 최대전단강도는 5.81~38.94kg/cm², 잔류전단강도는 2.34~29.68kg/cm²의 범위로 측정되었으며, 이 때 최대전단강도에 이르는 전단변위는 대체로 0.43~4.75mm 범위였다.

수직응력의 증가에 따른 최대전단강도(τ_p) 및 잔류전단강도(τ_r)와의 관계를 파악하기 위해 실험결과를 Fig. 1에 도시하였다. 이러한 결과는 현재도 일반적으로 암반을 대상으로 한 지하구조물 및 사면의 안정성 등과 관련된

Table 2 Results of direct shear test on joint surfaces

| speci. No. | JRC Group | Normal Stress (kg/cm ²) | Peak Strength (kg/cm ²) | Residual Strength (kg/cm ²) | $\frac{\tau_r}{\tau_p}$ | $\delta_s - \delta_p$ (10 ⁻² mm) | $\delta_n - \delta_p$ (10 ⁻² mm) |
|------------|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------|---|---|
| S5 | 4~6 | 17.51 | 8.38 | 6.28 | 0.75 | 110.0 | 40.0 |
| S8 | | 13.09 | 6.58 | 6.58 | 1.00 | 770.0 | 121.0 |
| S9 | | 23.14 | 21.22 | 17.87 | 0.84 | 272.0 | 59.0 |
| S10 | | 16.36 | 12.49 | 9.86 | 0.79 | 763.0 | 41.5 |
| S7C | | 8.79 | 5.89 | 5.89 | 1.00 | 707.0 | 10.0 |
| S15C* | | 20.92 | 16.16 | 8.08 | 0.50 | 650.0 | 20.5 |
| S28C | | 14.31 | 12.66 | 9.24 | 0.73 | 988.0 | 344.0 |
| S29C | | 18.12 | 16.72 | 16.72 | 1.00 | 926.0 | 20.0 |
| M6C* | | 12.86 | 12.14 | 9.10 | 0.75 | 155.0 | 56.5 |
| S6C | | 6~10 | 10.04 | 9.61 | 4.80 | 0.50 | 740.0 |
| S12 | 16.44 | | 29.50 | 16.91 | 0.57 | 66.0 | 28.0 |
| S14 | 19.42 | | 26.24 | 16.12 | 0.61 | 43.0 | 16.5 |
| S18 | 5.60 | | 5.81 | 5.81 | 1.00 | 942.0 | 54.0 |
| S20* | 7.03 | | 8.74 | 5.90 | 0.68 | 853.0 | 61.5 |
| S22 | 5.55 | | 6.11 | 4.76 | 0.78 | 620.0 | 419.0 |
| S23* | 15.71 | | 26.31 | 26.31 | 1.00 | 475.0 | 280.5 |
| M7* | 18.62 | | 33.41 | 16.03 | 0.48 | 318.0 | 3.5 |
| S3C | 18.48 | | 15.13 | 15.13 | 1.00 | 1015.0 | 6.5 |
| S11C | 25.67 | | 21.73 | 21.73 | 1.00 | 994.0 | 123.0 |
| S21C | 16.21 | | 21.34 | 11.64 | 0.55 | 52.0 | 50.5 |
| S25C | 11.34 | | 12.70 | 12.70 | 1.00 | 460.0 | 29.0 |
| S26C | 15.35 | | 20.20 | 16.53 | 0.82 | 382.0 | 149.5 |
| S30 | 13.31 | | 18.62 | 15.52 | 0.83 | 52.0 | 55.0 |
| S1* | 10~18 | 14.36 | 11.71 | 2.34 | 0.20 | 123.0 | 5.5 |
| S13 | | 17.69 | 19.05 | 12.70 | 0.67 | 130.0 | 5.5 |
| S17 | | 18.64 | 19.70 | 19.70 | 1.00 | 325.0 | 42.0 |
| M3 | | 19.62 | 38.94 | 24.96 | 0.64 | 104.0 | 17.0 |
| M4 | | 14.71 | 16.99 | 13.99 | 0.82 | 623.0 | 10.0 |
| S2C | | 22.05 | 32.11 | 14.27 | 0.44 | 360.0 | 442.5 |
| S4C | | 9.78 | 12.30 | 11.69 | 0.95 | 263.0 | 24.0 |
| S16C | | 12.18 | 13.12 | 11.66 | 0.89 | 376.0 | 83.5 |
| S19C* | | 13.38 | 10.91 | 7.28 | 0.67 | 1042.0 | 206.5 |
| S24C | | 10.73 | 13.50 | 11.81 | 0.87 | 352.0 | 94.0 |
| S27C | | 20.93 | 26.01 | 17.55 | 0.67 | 366.0 | 255.0 |
| M1C* | | 13.26 | 18.77 | 13.32 | 0.71 | 90.0 | 28.0 |
| M2C* | | 17.66 | 29.68 | 29.68 | 1.00 | 53.0 | 28.5 |
| M5C* | | 17.33 | 20.73 | 14.10 | 0.68 | 9.10 | 11.0 |

* : Shear failed specimens

τ_r / τ_p : Ratio of residual shear strength to peak shear strength

$\delta_s - \tau_p$: Shear displacement at peak shear strength

$\delta_n - \tau_p$: Normal displacement at peak shear strength

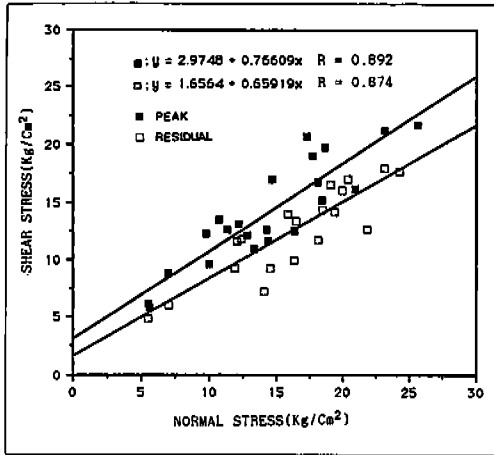


Fig. 1. Relationship between peak shear strength, residual strength and normal stress.

공학적 설계에 광범위하게 적용되고 있는 아래와 같은 Mohr-Coulomb의 식으로 표기할 수 있다.

$$\tau = C + \sigma_n \tan\phi \dots\dots\dots (4)$$

- 여기서, τ : 전단강도(kg/cm²)
- C : 점착력(kg/cm²)
- σ_n : 수직응력(kg/cm²)
- ϕ : 내부마찰각(°)
- $\tan\phi$: 마찰계수

총 37개의 시편들에 대한 본 실험결과를 분석한 결과, 수직응력과 최대전단강도 및 잔류전단강도의 관계식은 각각 다음과 같이 표시되었다.

$$\tau_p = 2.9748 + 0.7661 \sigma_n (R=0.892) \dots\dots (5)$$

$$\tau_r = 1.6564 + 0.6592 \sigma_n (R=0.874) \dots\dots (6)$$

이 관계식은 상관계수(R)가 각각 0.892,

0.874로서 매우 높으며, 내부마찰각과 잔류마찰각은 각각 37.5°, 33.4°로서 내부마찰각값은 기존의 연구결과들(신희순 외, 1989; Deere, D.V., and Patton, F.D., 1984; Miller, R.P., 1978)에서 제시된 값들의 범위인 35~60°에 속하므로 현장조건을 분석하는데 활용가능하다고 생각된다.

조도 그룹과 전단강도

실험대상으로 한 총 37개의 시편들을 상기한 바와 같이 절리조도계수에 따라 4~6, 6~10, 10~18의 세 그룹으로 각각 구분하여 각 그룹별로 수직응력에 따른 최대전단강도와 잔류전단강도의 측정치를 Table 2에 기재하였고 그들의 관계를 Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4에 각각 도시하였다.

상기한 세 그룹에 의한 시편들에 있어서 수직응력에 따른 최대전단강도 및 잔류전단강도와의 관계식은 다음과 같이 모두 Mohr-Coulomb의 식으로 표기되었다.

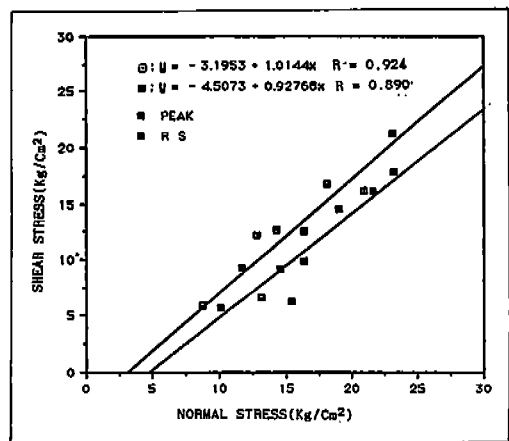


Fig. 2 Relationship between peak shear strength, residual strength and normal stress for the specimens with JRC 4~6 range.

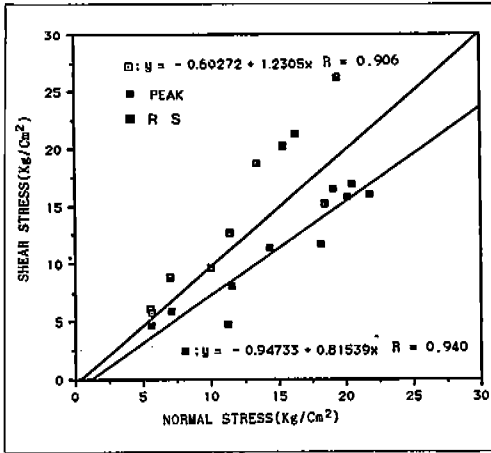


Fig. 3 Relationship between peak shear strength, residual strength and normal stress for the specimens with JRC 6~10 range.

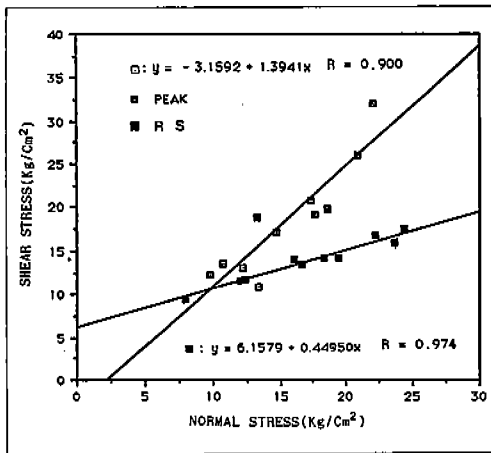


Fig. 4 Relationship between peak shear strength, residual strength and normal stress for the specimens with JRC 10~18 range.

1) JRC 4~6 그룹인 경우 :

$$\tau_p = -3.1953 + 1.0144 \sigma_n \dots\dots\dots(7)$$

(R=0.924, $\phi=45.4$)

$$\tau_r = -4.5073 + 0.9277 \sigma_n \dots\dots\dots(8)$$

(R=0.890, $\phi=42.9$)

2) JRC 6~10 그룹인 경우 :

$$\tau_p = -0.6027 + 1.2305 \sigma_n \dots\dots\dots(9)$$

(R=0.906, $\phi=50.9$)

$$\tau_r = -0.9473 + 0.8154 \sigma_n \dots\dots\dots(10)$$

(R=0.940, $\phi=39.2$)

3) JRC 10~18 그룹인 경우 :

$$\tau_p = -3.1592 + 1.3941 \sigma_n \dots\dots\dots(11)$$

(R=0.900, $\phi=54.3$)

$$\tau_r = -6.1579 + 0.4495 \sigma_n \dots\dots\dots(12)$$

(R=0.974, $\phi=24.2$)

Fig. 2~4 및 식(7)~(12)에서와 같이 절리 조도 그룹에 따른 시편들은 모두 높은 상관 계수를 나타내고 있다. 또한 각 그룹에 해당하는 내부마찰각은 절리조도계수가 증가함에 따라 큰 값을 나타내나, 잔류마찰각은 그와 반대로 현저히 감소하는 영향을 보인다. 이러한 현상은 시편의 절리면에 적용한 수직 응력의 영향도 작용하나 절리조도계수가 클수록 상, 하 시편의 맞물림 정도가 증가하게 되어 이에 따른 내부마찰력의 증가로 인해 내부마찰각이 증가하는 경향을 보이고, 잔류마찰각의 감소현상은 이와는 반대로 절리면의 요철이 심한 시편일수록 최대전단강도 부근에서 상, 하 전단면의 요철부가 미끄럼과파 또는 전단과파에 의해 심하게 마모되기 때문이며, 이러한 현상은 전단시험후의 전단면을 나타내는 Plate 4의 파쇄물질로도 확인할 수 있다.

충전물질과 전단강도

지하암반에 발달되어 있는 절리면을 포함한 불연속면들은 항상 신선한 상태로 유지되는 경우는 거의 드물며, 시간이 경과함에 따라

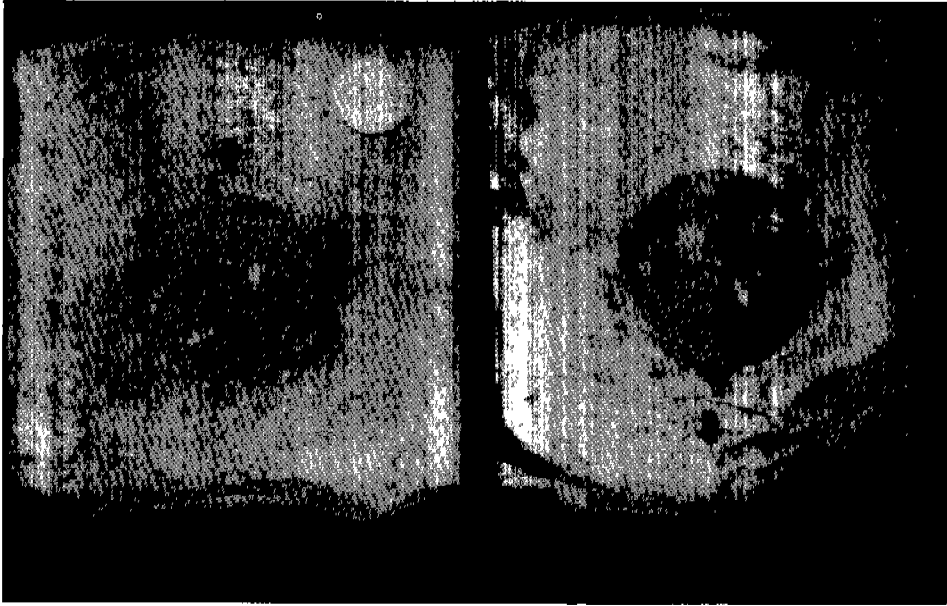


Plate 4. Typical feature of shear failed specimen by direct shear test(↔ : shear direction).

그 면들은 풍화되거나 산화되기 쉽고 또한 지하수 유입의 통로가 되어 지하수내의 광물성분이 충전물질로써 침전하여 고화되는 경우가 많다. 따라서 이러한 충전물질들이 지하암반의 역학적 거동에 영향을 미치게 되는데(Brown, E.T., 1981), 본 실험에서는 이 점을 고려하여 실험대상 시편들을 충전물질의 유무에 따라 충전된 시편과 비충전된 시편으로 구분하여 분석하였다.

Table 2에서와 같이 “C”로 표기한 충전된 시편은 총21개로서 그 중 6개 시편들은 slightly weathered 혹은 moderately weathered 상태의 풍화정도를 나타내었고 풍화된 S6 시편은 충전되지 않았으나 이에 포함시켰다. 또한 비충전된 시편은 16개로서 풍화되지 않은 신선한 상태였다.

식(13)~(16)과 Fig. 5 및 Fig. 6은 충전물질의 유무에 따른 시편들에 있어서 각각 수

직응력에 대한 최대전단강도 및 잔류전단강도와의 관계를 나타낸 것이다.

1) 비충전된 경우 :

$$\tau_p = 12159 + 0.8960 \sigma_n \dots\dots\dots(13)$$

$$(R=0.942, \varphi=41.9)$$

$$\tau_r = -0.8630 + 0.7545 \sigma_n \dots\dots\dots(14)$$

$$(R=0.876, \varphi=37)$$

2) 충전된 경우 :

$$\tau_p = 1.1523 + 0.9692 \sigma_n \dots\dots\dots(15)$$

$$(R=0.849, \varphi=44.1)$$

$$\tau_r = 3.3124 + 0.5739 \sigma_n \dots\dots\dots(16)$$

$$(R=0.741, \varphi=29.9)$$

상기한 식과 Fig. 5 및 Fig. 6에서와 같이 이들 관계식도 높은 상관계수를 나타낸다. 내부마찰각은 비충전된 시편들의 경우보다

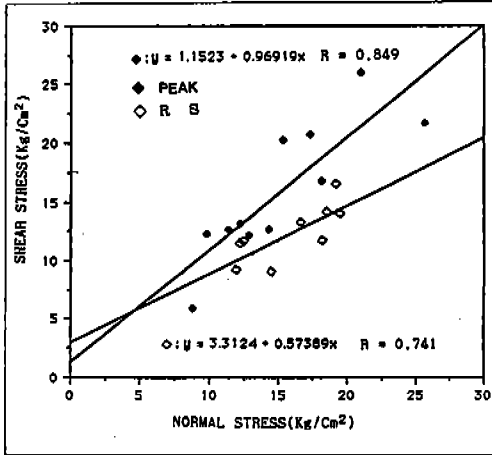


Fig. 5 Relationship between peak shear strength, residual strength and normal stress for the specimens with filling materials.

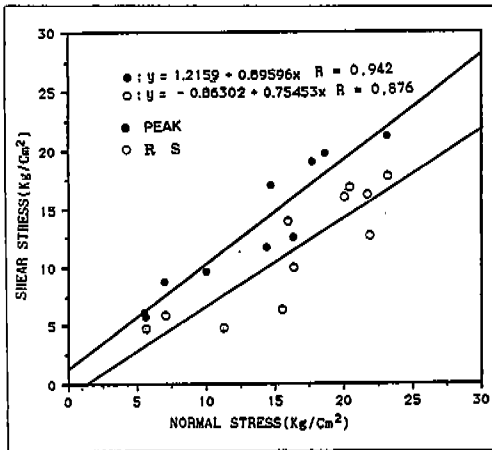


Fig. 6 Relationship between peak shear strength, residual strength and normal stress for the specimens without filling materials.

충전된 시편의 경우에 큰 값을 나타내는데, 이는 마찰력이 높은 방해석이나 석영류의 충전물질이 절리면의 요철부에 헐채하여 내부마찰력을 증가시킴으로써 전단강도를 증가시키는 요인으로 작용하였기 때문으로 볼 수 있다. 또한 충전된 시편의 경우에 내부마찰

각과 잔류마찰각의 차이가 무려 14.2°나 되는데, 이 현상은 최대전단강도 부근에서 충전물질로 인해 증가되었던 내부마찰력이 파쇄된 충전물질을 압착시킴으로써 점착력을 현저히 증가시킨 후 잔류변형 구간에서는 완화되면서 곧 내부마찰력의 감소로 인한 미끄럼변형(slip deformation)을 초래하기 때문으로 볼 수 있다.

전단응력과 전단변위 거동

본 실험에서는 암석시편들에 대해 전단응력에 따른 전단변위의 거동을 파악하기 위하여 절리조도계수에 따른 세 그룹들, 즉 JRC 4~6, 6~10 및 10~18의 범위로 구분하여 측정된 결과를 대표적인 경우만 Fig. 7에 전단응력-전단변위 곡선으로 도시하였다.

Fig. 7에서와 같이 JRC 4~6 그룹인 시편들은 대체로 완만한 곡선을 보이며 전단응

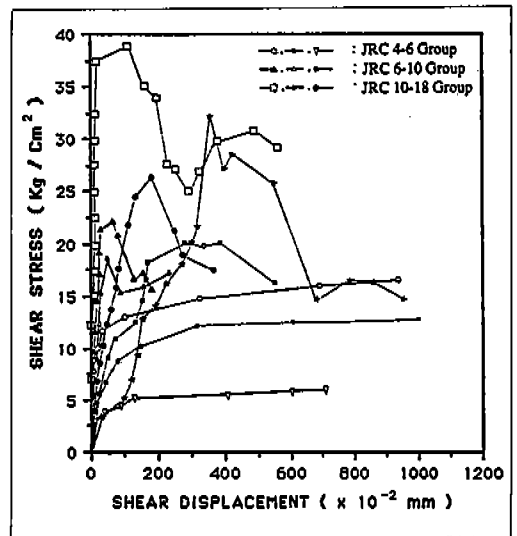


Fig. 7 Relationship between shear stress and shear displacement for the specimens with three JRC groups.

력의 증가에 따른 최대전단강도와 잔류전단강도의 차이가 작게 나타나는데, 이는 시편의 절리면이 비교적 평탄하여 쉽게 미끄럼 변형을 일으키기 때문으로 생각된다. 그러나, JRC 6~10 및 10~18 그룹인 경우는 절리조도계수가 증가함에 따라 최대전단강도와 잔류전단강도의 차이가 커지며, 전단응력-전단변위 곡선의 형태도 JRC 4~6그룹의 굴곡이 더 심한 양상을 보인다. 이 점은 전 항에서 설명한 바와 같은 원인으로 절리조도계수의 증가에 따른 전단면에서의 전단저항이 불규칙적으로 더 심하게 작용되기 때문인 것으로 생각된다.

전단변위와 수직변위 거동

전단변위와 수직변위의 관계

일반적으로 수직변위를 측정하는 실내시험에 있어서 전단변위는 수직변위에 수반되며, 최대수직변위는 보통 낮은 수직응력 하에서는 최대전단응력 이후에 대체로 발생하나 높은 수직응력 하에서는 최대전단응력 상태에서 바로 발생하게 된다(Goodman, R.E., 1970). 본 실험에서는 시편의 전단면에 대해 5.60~25.67 kg/cm² 범위인 비교적 낮은 최대수직응력을 적용하였고 이로 인하여 최대수직변위는 대부분 최대전단강도점 이후 잔류강도점 부근에서 측정되었으며, 최대전단강도점에서 측정된 경우는 매우 드물었다.

전단응력과 전단변위에 따른 수직변위의 거동은 수직변위-전단변위 곡선으로 도시하여 파악할 수 있으며 두가지 유형으로 구분할 수 있다(Barton, N., 1973; Ladanyi, B. and Archambault, G., 1969). 즉, (1) 수직변위가 전단하중의 증가에 따라 일단 침하한 후, 서

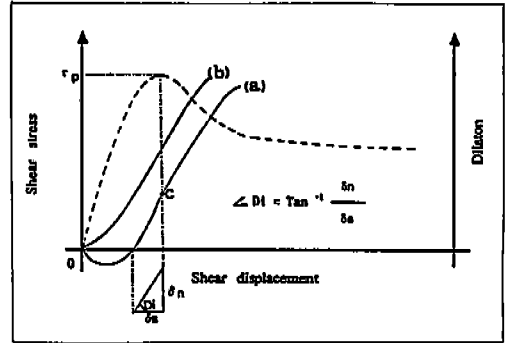


Fig. 8 Schematic diagram of dilation-shear displacement curve.

서히 부상단계로 전환하여 전단파괴에 이르는 경우(Fig. 8(a))와, (2) 침하는 발생하지 않고 처음부터 전단하중의 증가에 따라 급격히 부상하는 경우(Fig. 8(b))의 유형으로 구분이 가능하다. 또한 Fig. 8(a)의 경우에는 최저점, D에서 수직변위의 증가와 더불어 전단변위도 증가되며 최대전단강도에 상응하는 변곡점, C에 이르는 일반적인 경향을 나타내게 된다.

본 실험의 결과에서도 대부분의 시편들이 수직변위-전단변위 곡선상에서 최대전단강도점과 Fig. 8(a)의 경우의 변곡점이 거의 상응함을 보였으며, 그 외의 시편들은 Fig. 8(b)의 경향을 나타냈다.

할선 Dilation비와 Dilation각

실험대상 절리면들에서의 전단변위에 따른 수직변위의 거동을 구체적으로 비교 분석하기 위하여 각각의 시편에 대해 최저수직변위값(δ_n, min)과 최대전단강도점에 해당하는 변곡점의 수직변위값(δ_n, peak) 및 그 때의 값들에 해당하는 각각의 전단변위들을 구하여 최대전단강도점에서의 할선 dilation비(secant dilation ratio)를 산정한 후, 각각의 시편에

Table 3 Results of direct shear test of Secant dilation ratio and dilation angle on each specimen.

| speci. No. | JRC Cr. | $\delta n/\delta s$ | Di (°) | speci. No. | JRC Cr. | $\delta n/\delta s$ | Di (°) |
|----------------------|-----------|---------------------|----------------------|----------------------|---------|---------------------|--------|
| S5 | 4~6 | 40.0/ 51 | 38.1 | S21C | 6~10 | 50.5/ 47 | 47.0 |
| S8 | | 121.0/785 | 8.8 | S25C | | 29.0/ 41 | 35.3 |
| S9 | | 59.0/266 | 12.5 | S26C | | 149.5/280 | 28.1 |
| S10 | | 41.5/759 | 28.7 | S30C | | 55.0/ 38 | 55.4 |
| S7C | | 10.0/ 44 | 12.8 | Aver. dilation angle | | | 22.9 |
| S15C | | 20.5/559 | 2.1 | S1 | 10~18 | 5.5/123 | 2.6 |
| S28C | | 344.0/973 | 19.5 | S13 | | 5.5/ 28 | 11.1 |
| S29C | | 20.0/602 | 1.9 | S17 | | 42.0/316 | 7.6 |
| M6C | | 56.5/525 | 6.2 | M3 | | 17.0/ 97 | 9.9 |
| Aver. dilation angle | | | 14.5 | M4 | | 10.0/217 | 2.6 |
| S6C | 47.5/704 | 3.8 | S2C | 442.5/166 | | 69.4 | |
| S12 | 28.0/ 66 | 23.0 | S4C | 24.0/152 | | 9.0 | |
| S14 | 16.5/ 21 | 38.2 | S16C | 83.5/ 78 | | 47.0 | |
| S18 | 54.0/872 | 3.5 | S19C | 206.5/1042 | | 11.2 | |
| S20 | 61.5/805 | 4.3 | S24C | 94.0/236 | | 21.7 | |
| S22 | 419.0/620 | 34.1 | S27C | 255.0/ 31 | 83.1 | | |
| S23 | 280.5/467 | 31.0 | M1C | 28.0/ 84 | 18.4 | | |
| M7 | 3.5/255 | 0.8 | M2C | 28.5/ 50 | 29.7 | | |
| S3C | 6.5/ 96 | 3.9 | M5C | 11.0/ 91 | 6.9 | | |
| S11C | 123.0/200 | 31.6 | Aver. dilation angle | | | 23.6 | |

* $\delta n/\delta s$: Secant dilation ratio(unit of δn and δs : 10^{-2} mm)

대한 Dilation각(Di)을 도출한 결과를 JRC의 크기에 따른 세가지 그룹별로 Table 3에 표기하였다.

Table 3에서와 같이 JRC 그룹에 따른 시편들의 평균 Dilation 각은 JRC 4~6, 6~10 및 10~18 그룹인 경우에 각각 14.5°, 22.9°, 23.6°로 나타났다. 이러한 결과를 분석해 볼 때 시편들의 절리조도가 증가할수록 절리면에서의 수직변위 거동에 Dilation각이 크게 반영됨을 파악할 수 있으며, 이와 같은 절리 조도에 따른 Dilation각의 상관성은 암반 불

연속면에서의 지하수 유동성을 분석하는데에도 유용할 것으로 생각된다.

수직응력과 전단강성

전단강성은 절리면에 대한 전단시험중 발생하는 전단응력과 전단변위 간의 변화특성에 의해 나타나며, 전단응력-전단변위 곡선상에서 최대 전단응력에 이르기까지의 곡선의 기울기로서 표시된다(Goodman, R.E., 1970 ; 김기주, 1986).

본 실험에서는 Fig. 9와 같이 각 시편들에

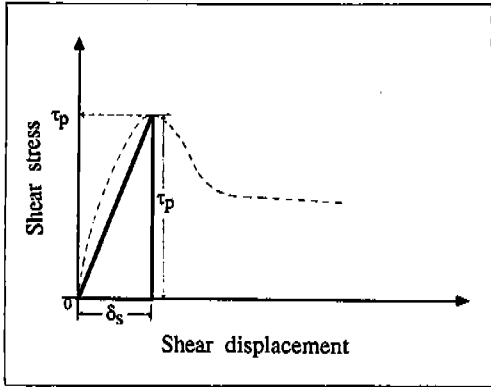


Fig. 9 Schematic diagram of shear stress-shear displacement curve.

대해 전단하중을 가하는 초기단계부터 최대 전단응력점까지의 전단변위(δs)에 대한 최대 전단응력(τp)의 변화율로서 활선 전단강성

(secant shear stiffness : Ks)을 식(17)에 의하여 각각 구하였고 그 결과를 Table 4에 기재하였다.

$$K_s = \frac{\tau_p}{\delta_s} \dots \dots \dots (17)$$

수직응력에 따른 전단강성의 변화는 시편에 적용한 최대수직응력이 클수록 최대전단강도가 증가하고 이에 따르는 전단변위는 감소하여 결국 전단강성이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 수직응력이 증가하면 시편의 상, 하 전단면에서의 미끄럼마찰력(frictional sliding)이 구속되어 최대 전단강도에 이르는 전단변위가 감소된 점에 기인한다고 볼 수 있다. 본 실험에서는 각

Table 4 .Secant shear stiffness of each specimen.

| speci. No. | JRC Group | τ_p/δ_s | K_s (kg/cm ²) | speci. No. | JRC Group | τ_p/δ_s | K_s (kg/cm ²) |
|------------|------------|-------------------|-----------------------------|------------|-----------|-------------------|-----------------------------|
| S5 | 4~6 | 8.38/ 110 | 76.18 | S21C | 6~10 | 22.11/ 52 | 425.19 |
| S8 | | 6.58/ 770 | 8.55 | S25C | | 12.70/ 460 | 27.61 |
| S9 | | 21.22/ 272 | 75.01 | S26C | | 20.20/ 382 | 52.88 |
| S10 | | 12.49/ 763 | 16.37 | S30C | | 18.62/ 52 | 358.08 |
| S7C | | 5.89/ 707 | 8.33 | S1 | 10~18 | 11.71/ 123 | 95.20 |
| S15C | | 16.16/ 650 | 24.86 | S13 | | 19.05/ 130 | 146.54 |
| S28C | | 12.66/ 988 | 12.81 | S17 | | 19.70/ 325 | 60.62 |
| S29C | | 16.72/ 926 | 18.06 | M3 | | 38.94/ 104 | 374.42 |
| M6C | | 12.14/ 155 | 78.32 | M4 | | 16.99/ 623 | 27.27 |
| S6C | | 9.61/ 740 | 12.99 | S2C | | 32.11/ 360 | 89.19 |
| S12 | 29.50/ 66 | 446.97 | S4C | 12.30/ 263 | | 46.77 | |
| S14 | 26.24/ 43 | 610.23 | S16C | 13.12/ 376 | | 34.89 | |
| S18 | 5.81/ 942 | 6.17 | S19C | 10.91/1042 | | 10.47 | |
| S20 | 8.74/ 853 | 10.25 | S24C | 13.50/ 352 | | 38.35 | |
| S22 | 6.11/ 620 | 9.85 | S27C | 26.01/ 366 | 71.07 | | |
| S23 | 26.31/ 475 | 55.39 | M1C | 18.77/ 90 | 208.56 | | |
| M7 | 33.41/ 318 | 105.06 | M2C | 29.68/ 53 | 560.00 | | |
| S3C | 15.13/1015 | 14.91 | M5C | 20.73/ 91 | 227.80 | | |
| S11C | 21.73/ 994 | 21.86 | | | | | |

* τ_p/δ_s : Secant shear stiffness(unit of δ_s : 10⁻²mm)

시편들에 대해 최대 수직응력을 5.60~25.67 kg/cm²의 범위로 적용한 결과, 실험대상 시편들의 평균 활선 전단강성은 약 110.68kg/cm³였다.

절리조도와 크기효과에 따른 전단강성의 변화

절리조도와 전단강성의 관계

전단강성에 영향을 미치는 역학적 파라미터들로는 절리조도와 절리면 압축강도를 고려할 수 있는데 본 실험에서 이들을 측정할 결과는 Table 5와 같으며, 뚜렷한 상관관계를 보이는 절리조도와 전단강성과의 관계를 도시하면 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서와 같이 수직응력이 증가함에 따라 절리조도계수가 큰 시편들일수록 전단강성의 값도 급증하는 경향을 보인다. 이는 수직응력이 증가함에 따라 시편의 절리조도계수가 클수록 미끄럼

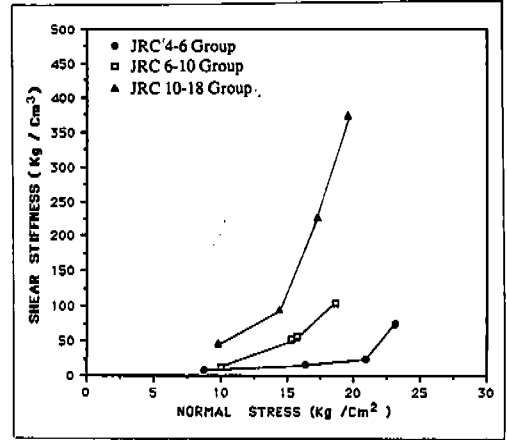


Fig. 10 Relationship between JRC, normal stress and shear stiffness.

마찰력이 감소하고 짧은 변위구간에서 전단 파괴를 일으키므로 결국 전단강성이 커지게 된 점에 기인한다고 볼 수 있다.

크기효과와 전단강성의 관계

Fig. 11에는 수직응력이 증가함에 따른 전

Table 5 Parameters affected on shear stiffness.

| speci. No. | JRC Group | Normal Stress (kg/cm ²) | Ks (kg/cm ³) | JCS (kg/cm ²) | Specimen Length (cm) |
|------------|-----------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|
| S7C | 4~6 | 8.79 | 8.33 | 1131.88 | 14.0 |
| S10 | | 16.36 | 16.37 | 1142.08 | 7.6 |
| S15C | | 20.92 | 24.86 | 1223.65 | 5.9 |
| S9 | | 23.14 | 75.01 | 1325.62 | 5.0 |
| S6C | 6~10 | 10.04 | 12.99 | 1040.10 | 10.5 |
| S26C | | 15.35 | 52.88 | 1111.48 | 6.8 |
| S23 | | 15.71 | 55.39 | 1182.86 | 6.4 |
| M7 | | 18.62 | 105.06 | 1101.29 | 5.4 |
| S4C | 10~18 | 9.78 | - | - | - |
| S1 | | 14.36 | 95.20 | 591.43 | 6.4 |
| M5C | | 17.33 | 227.80 | 917.74 | 5.8 |
| M3 | | 19.62 | 374.42 | 1080.89 | 5.1 |

* Ks : Shear stiffness,

JCS : Joint wall compressive strength(Schmidt hammer rebound test : ISRM method)

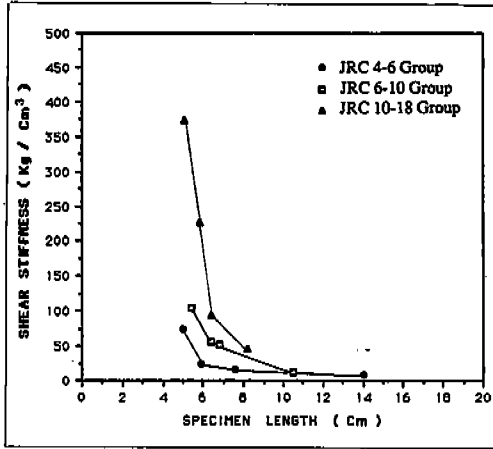


Fig. 11 Relationship between JRC, specimen length, and shear stiffness.

단강성과 시편의 길이와의 관계를 절리조도계수와 함께 비교하여 도시하였다. Fig. 11과 Table 5에서와 같이 절리조도계수가 같은 그룹에 속할 경우 시편의 길이가 클수록 전단강성이 작아지고, 시편의 길이가 작을수록 전단강성은 급격히 커진다. 또한 절리조도계수가 큰 시편일수록 시편길이의 범위가 작은 구간에서 전단강성이 급증하는 경향을 보인다.

이와 같이 전단강성이 수직응력의 증가에 따라 크기효과의 영향을 받으므로 동일한 절리조도계수를 지닌 시편일지라도 길이가 긴 시편일수록 전단강성이 작아질 수 있음에 유의할 필요가 있다.

그러나 본 실험에서 분석한 전단강성에 대한 크기효과의 영향은 실험대상의 모든 시편들에 대해서 규명되지 않았으므로, 향후 보다 많은 시편들의 확보와 더불어 지속적인 실내시험과 현장시험을 병행하여 보다 면밀하게 분석할 필요성이 있다고 생각된다.

결론

본 연구에서는 절리면에서의 전단거동 특성을 규명하기 위해 총 37개의 편마암종 코아시편들을 대상으로 Portable Direct Shear Box를 이용하여 실내 직접전단시험을 수행하였다. 시편들에 가해진 최대수직응력의 범위는 5.60~25.67kg/cm²로 적용하였고 전단하중을 점진적으로 가중시키는 다단계 전단시험법에 준하여 실험하였다. 이러한 방법에 의한 실험결과들을 분석하여 절리면에서의 전단강도에 관한 경험식들을 제시하였으며, 전단거동에 영향을 미치는 역학적 파라미터들을 도출하여 상호 비교 분석하였다.

이에 따른 연구결과와 그 활용성을 고찰한 내용은 다음과 같다.

1. 본 실험대상 편마암 시편들에 대해 최대수직응력을 5.60~25.67kg/cm²의 범위로 적용했을 때 최대전단강도 및 잔류전단강도는 각각 5.81~38.94kg/cm², 2.34~24.96kg/cm²의 범위로 측정되었다. 또한 최대전단강도에 이르는 전단변위는 대체로 0.43~4.75mm내에서 나타났으며 내부마찰각과 잔류마찰각은 각각 37.5°와 33.4°였다.

2. 편마암 시편들의 수직응력에 따른 전단강도의 관계는 현재에도 암반구조물 및 사면 안정성과 관련된 공학적 설계에 광범위하게 적용되는 Mohr-Coulomb 식으로 표기되며, 최대전단강도(τ_p) 및 잔류전단강도(τ_r)에 대한 관계식은 아래와 같고 각각의 상관계수도 0.892, 0.874로서 높게 나타났다.

$$\tau_p = 2.9748 + 0.7661 \sigma_n \quad (R=0.892)$$

$$\tau_r = 1.6564 + 0.6592 \sigma_n \quad (R=0.874)$$

참고문헌

3. 수직응력에 따른 전단강도의 관계에 있어서 절리조도와 충전물질이 미치는 영향을 규명하기 위해 시편들을 절리조도계수에 따라 4~6, 6~10 및 10~18의 세 그룹으로 구분, 분석하여 각 그룹별로 최대전단강도 및 잔류전단강도의 관계식을 구했으며, 그들의 상관계수는 0.89이상의 높은 값을 보였다. 또한 내부마찰각의 경우는 절리조도계수가 높은 시편들과 충전된 시편들의 경우에 증가경향을 보였으며, 잔류마찰각은 절리조도계수가 낮은 시편들과 비충전된 시편들의 경우에 증가경향을 나타냈다.

4. 전단응력에 따른 전단변위의 거동을 분석한 결과, 시편의 절리조도계수가 커질수록 최대전단강도와 잔류전단강도의 차이가 증가하는 경향을 보였다. 또한 전단변위에 따른 수직변위의 거동에서의 최대수직변위는 대부분 최대전단 강도점 이후 잔류전단강도점 부근에서 측정되었으며, 평균 Dilation각은 절리조도계수에 따른 4~6, 6~10 및 10~18 그룹에 대해 각각 14.5°, 22.9°, 23.6°로서 증가경향을 보였다.

5. 절리조도계수에 따른 전단강성의 변화는 수직응력이 증가함에 따라 시편의 절리조도계수가 클수록 전단강성의 값도 급증하는 경향을 보이며, 5.60~25.67kg/cm²의 수직응력 하에서 구한 시편들의 평균 활선 전단강성은 약 110.68kg/cm²였다.

6. 시편의 길이와 전단강성은 수직응력이 증가함에 따라 크기효과에 의한 반비례 관계를 나타내어, 동일한 절리조도계수를 지닌 시편 일지라도 길이가 긴 시편의 경우에 전단강성이 감소함을 알 수 있었다.

김기주, 1986, 불연속면을 갖는 암석의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구, 박사학위논문, 213p.

신희순 외, 1989, Portable Shear Box를 이용한 석탄의 직접 전단시험, 대한광산학회지, 제26권, pp. 129-136.

이정인 외, 1991, 무약재 암반사면의 안전진단 및 보강대책에 관하여, 한국암반역학회; 터널과 지하공간, 제1권, pp.147-157.

이찬구 외, 1991, 절리면의 조도특성과 전단강도, 대한지질학회지, 제27권, 제4호, pp. 371-382.

임한욱, 이주영, 1988, 삼척 탄전지대 석탄광에서의 암반 응력측정에 관한 연구, 대한광산학회지, 제25권, pp.301-308.

Barton, N., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints, Eng. Geol., Vol.7, pp.287-332.

Barton, N., Bandis, S., and Bakhtar, K., 1985, Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints, Int. Jour. of Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 22, No.3, pp.121-140.

Barton, N., and Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mech. and Rock Eng., Vol.10, pp.1-54.

Brown, E.T., 1981, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, in Rock Characterization Testing and Monitoring, ISRM suggested methods, Pergamon Press, Oxford, pp. 1-52., pp.129-140.

- Carr, J.R., and Warriner, J.B., 1989, Relationship between the fractal dimension and joint roughness coefficient, *Bull. Assoc. Eng. Geologist*, Vol. 26, pp.253-263.
- Feves, M.L., Shuri, F.S., et al., 1981, Field and in-situ rock mechanics testing manual, ONWI-310, pp. 1-13.
- Franklin, J.A., 1985, A direct shear machine for testing rock joints, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 8, No. 1, pp.25-29.
- Goodman, R.E., 1970, The deformability of joints-Determination of the in-situ modulus of deformation of rock, *Symp. American Society for Testing and Materials*, STP 477, Denver, Colorado, 1969, pp. 174-196.
- Hunt, R.E., 1984, *Geotechnical engineering investigation manual-Test results*; Deere, D.V., and Patton, F.D., McGraw-Hill Book Company, pp.196-197.
- Hutson, R.W., and Dowding, C.H., 1990, Joint asperity degradation during cyclic shear, *Int. Jour. of Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, Vol.27, No.2, pp.109-119.
- Jaeger, J.C., 1969, Shear failure of anisotropic rocks, *Geol. Mag.* Vol. XCVII, No.1, pp.65-72.
- Ladanyi, B. and Archambault, G., 1969, Simulation of shear behavior of a jointed rock mass, *Proc. 11th U.S. Rock Mech. Symp.*, Berkeley, pp.105-125.
- Lama, R.D. and Vutukuri, V.S., 1978, *Handbook on the mechanical properties of rocks*, Vol. II-Testing techniques and results; Miller, R.P., *Trans Tech. Publ.*, pp.315-455.
- Lilly, P.A., 1982, The shear behavior of bedding planes in Mt. McRae shale with implication for rock slope design, *Int. Jour. of Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, Vol. 19, No.4, pp.205-209.
- Patton, F.D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock, *Proc. 1st. Congr. Int. Soci. Rock Mech.*, Vol.1, pp.509-513.
- Pratt, H.R., Black, A.D., and Brace, W.F., 1974, Friction and deformation of jointed Quartz Diorite, *Proc. 3rd. Int. Congr. on Rock Mechanics*, Denver, Colorado, Vol.26, pp.306-310.
- Ross-Brown, D.M., and Walton, G., 1975, A portable shear box for testing rock joints, *Rock Mech. and Rock Eng.*, Vol.7, pp.129-153.
- Safety series No.54, 1981, *Underground disposal of radioactive wastes: Basic guidance*, IAEA, Vienna, pp.1-56.
- Safety series No.62, 1984, *Site investigations, design, construction, operation, shutdown and surveillance of repositories for low- and intermediate-level radioactive wastes in rock cavities*, IAEA, Vienna, pp.1-92.
- Shuri, F.S., Cooper, J.D., and Hamill, M.L., 1981, *Laboratory rock mechanics testing manual*, ONWI-311, pp.1-15.
- Swahn, G., 1985, Methods of roughness analysis for predicting rock joint behavior, *Proc. Int. Symp. on Fundamentals of rock joints*, Bjorkliden, 15-20 Sept., pp.153-161.
- Technical reports series No.215, 1982, *Site in-*

vestigations for repositories for solid radioactive wastes in deep continental geological formations, IAEA, Vienna, pp.1-106.

Technical reports series No.256, 1985, Techniques for site investigations for underground disposal of radioactive wastes, IAEA, Vienna, pp.1-62.

U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1987, Standard format and content of a license application for a low-level radioactive waste disposal facility Safety analysis report, NUREG-1199.

Wittke, W., 1990, Rock mechanics : Theory and application with case histories, Springer-Verlag Publ., pp.704-728.

이종욱, 이찬구, 황신일, 장천중, 최원학 :
한국원자력연구소 부설원자력환경관리
센터 지질공학실
대전시 유성구 덕진동 150
305-353
TEL : (042) 868-2059
FAX : (042) 861-4824