

낮은 거칠기를 갖는 자연절리면의 특성 연구

Research on Characteristics of Natural Joint with Low Roughness

이수곤⁽¹⁾, Su-Gon Lee, 양홍석⁽²⁾, Hong-Suk Yang, 김부성⁽³⁾, Bu-Sung Kim

⁽¹⁾ 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

⁽²⁾ 서울시립대학교 토목공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

⁽³⁾ 서울시립대학교 토목공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

개요(SYNOPSIS) : The shear strength of rock discontinuities is very important in many rock engineering project including analysis of tunnel and slope. But shear strength of rock that acquired through discontinuity shear test is different from soil shear test and more complex. Shear strength is effected by the factors which are various, but it is the best influence of filling material and joint roughness.

In this reserch, we studied shear strength characters of natural joint of phillite that was placed importance on joint roughness, JRC is less low than 8.

주요어(Key words) : shear strength, filling material, joint roughness, JRC, natural joint, phillite

1. 서론

대부분의 암반구조물에서 발생하는 파괴는 직·간접적으로 암반에 포함된 불연속면의 영향을 받는다. 암반의 파괴에 영향을 미치는 불연속면의 특성에는 여러 가지가 있으나, 그중에서도 충전물질과 절리면 형상이 가장 큰 영향을 미친다고 할 수 있는데, 충전물질에 대한 암반파괴의 영향을 규명하는 것은 단순한 암석역학적인 문제뿐만 아니라 토질역학적인 문제까지 그 연구 범위가 확대된다. 그러나 절리면 형상에 의한 암반파괴에 미치는 영향은 암석이 갖는 절리면 거칠기에 의하여 주로 결정되며 절리면의 강도를 포함한다.

절리면 형상이 암반파괴에 미치는 영향은 많은 연구자들에 의하여 연구되어온 문제로서, Barton과 Patton에 의하여 절리면 형상의 수치화와 절리면 전단강도에 미치는 영향이 연구된 후로 최근에는 절리면 형상을 정확하게 측정하기 위한 레이저 3차원 형상 측정장치까지 사용되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 프로파일 게이지를 사용하여 절리면 형상을 측정하고 JRC를 산출하여 절리면 형상을 수치화 하였으며, 절리면 전단시험기를 이용하여 절리면 전단강도를 측정하였다. 또한 압축시험을 이용하여 수직강성을 측정하여 절리면 형상과 절리면 전단강도, 변형특성 사이의 상관관계를 파악하는 것을 주 목적으로 하였다.

2. 시료 준비 및 장비

2.1 시료 준비

본 연구에서 사용한 자연 절리면은 청주-상주 지역의 천매암류로서 천매암류가 가지고 있는 이방성의 특성으로 인해 대부분의 절리면이 비교적 비슷한 형상을 갖는다. 자연 절리면 시료를 사용하는 실험에서 가장 주의 해야 할 점은 절리면이 교란을 받지 않아야 한다는 점이다. 따라서 본 연구에서는 절리면이 교란을 받지 않게 하기 위하여 테이프와 충격 흡수제 등을 이용하였다. 절리면 전단시험이 ISRM의 방법과 Multi-Stage Test 방법 두가지로 진행되었기 때문에 시험 결과 수는 14개이지만 시료의 수는

ISRM으로 실험된 5 set와 Multi-Stage Test 방법으로 실험된 6 set를 합치면 총 31개의 시료를 준비하였다. 천매암류가 갖는 물성과 역학적 성질을 측정하기 위하여 ISRM에 기준한 압축시험을 실시하였는데 그 결과는 표 1과 같다.

표 1. 천매암류의 물성과 역학적 성질(괄호안은 평균값)

| | | |
|--|--------|-------------------|
| 건조단위중량 (t/m ³) | | 2.62 ~ 2.74(2.68) |
| 흡수율(%) | | 0.17 ~ 0.97(0.38) |
| 탄성과 속도 (km/sec) | P-WAVE | 4.24 ~ 5.29(4.62) |
| | S-WAVE | 2.74 ~ 3.89(2.96) |
| 일축압축강도(kg/cm ²) | | 200 ~ 1800(800) |
| 탄성계수(*10 ³ kg/cm ²) | | 2 ~ 12(6) |

2.2 시험 장비

본 연구에서 사용된 절리면 전단 장비는 Golder Associate 사에서 제작한 Shear Box를 사용하였다. 전단하중 측정에는 Load Cell을 사용하였고 수직, 수평 변위를 측정하기 위하여 0.001mm의 정확도를 갖는 LVDT를 제작하여 사용하였다. 수직하중은 사하중을 사용하여 일정한 하중재하가 가능하도록 하였고 면적의 감소에 따른 수직응력의 증가는 데이터 해석 프로그램을 사용하여 보정하였다. 또한 수직강성의 측정을 위하여 ELE 타입의 만능시험기를 사용하여 압축하중을 가하고 LVDT를 사용하여 수직변위를 측정하였다. 이렇게 Load Cell과 LVDT 등을 사용하여 측정된 데이터는 데이터 변환기를 통하여 저장되고 이렇게 저장된 데이터는 데이터 해석 프로그램을 사용하여 해석하였다.

3. 시험 방법

본 연구에서 사용된 절리면 전단시험 방법은 ISRM(Brown, 1981)에서 제안한 절리면 형상이 비슷한 5개의 시료를 사용하여 실험하는 방법과 하나의 시료로서 실험하는 Multi-Stage Test 방법을 사용하였다. 일반적으로 절리면 전단시험은 Multi-Stage Test를 대부분 사용하고 있는데 이는 절리면 형상이 비슷한 시료를 얻기 어려운 이유 때문이다. 그러나 앞서서도 언급했다시피 천매암의 이방성 특성상 비슷한 절리면 형상을 갖는 시료가 충분하기 때문에 5개의 시료 채취가 가능한 일부 시료들에 대하여 ISRM의 방법을 사용하였고, 나머지 시료에 대하여서는 Multi-stage Test 방법을 사용하였다. 또한 총 31개의 시료에 대하여 프로파일 게이지를 이용하여 절리면 형상을 측정하였다. JRC의 산출은 프로파일 게이지로 측정된 프로파일을 스캐너를 이용하여 그림 파일로 제작한 뒤 형상 분석기를 사용하여 거칠기형상지수(Rp, 식 (2))를 산출하였다. 이렇게 구한 거칠기형상지수는 Maerz 등이 제안한 식 (1)에 대입하여 JRC값을 산출하였다. JCS는 Schmidt Hammer를 사용하여 반발값을 읽고 이것을 Deere & Miler(1966)의 Schmidt Hammer 반발치와 일축압축강도 사이의 관계 그래프와 식 (3)에 적용하여 구하였다.

$$JRC = 411(R_p - 1) \quad (1)$$

$$R_p = \frac{\text{절리면에 투영된 직선길이}}{\text{절리면 윤곽선의 실제길이}} \quad (2)$$

$$\log_{10} \sigma_c = 0.00088 \gamma + 1.01 \quad (3)$$

σ_c : 환산 일축압축강도(MPa), γ : 건조 단위중량(g/cm^3)

절리면 수직강성은 각 시료당 총 4번의 압축, 제하를 반복하여 3 ~ 4번째의 압축시에 얻은 변형-수직 응력 곡선을 그 절리면의 폐함곡선으로 결정하였는데, 이는 풍화된 절리면이 교란되지 않은 압밀 수준으로 되돌아온 것으로 판단되는 폐함상태는 일반적으로 3 ~ 4번째의 제하후에 도달하기 때문이다 (Barton 등, 1985).

4. 시험 결과 및 고찰

4.1 JRC와 JCS 측정 결과

총 50개의 절리면 시료를 측정하여 평균한 JRC와 JCS 값은 표 2와 같다. 이러한 시험결과로 판단해 볼 때 절리면의 JRC는 비교적 낮은 값을 갖는 것으로 판단할 수 있으며 절리면 압축강도는 연암 ~ 보통암 정도의 강도값을 갖는 것으로 판단할 수 있다(그림 1 참고).

표 2. 시료의 JRC와 JCS의 범위(괄호 안은 평균값)

| | |
|--|-------------------------|
| Rp(거칠기형상지수) | 1.0051 ~ 1.0145(1.0102) |
| JRC | 2.4 ~ 6.5(4.16) |
| Schmidt Hammer 반발치 | 32 ~ 45(40.15) |
| 환산 일축압축강도 (kg/cm^2) | 392 ~ 1350(730.08) |

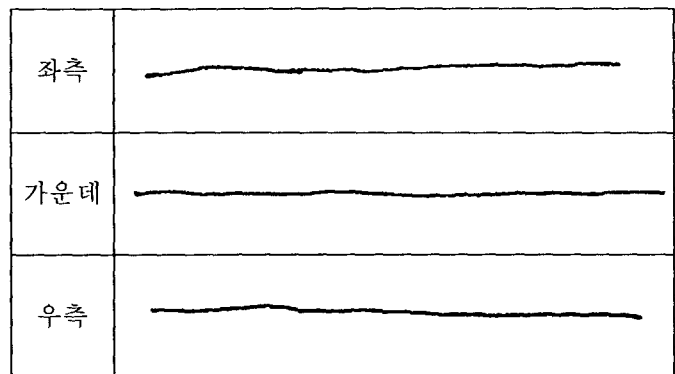
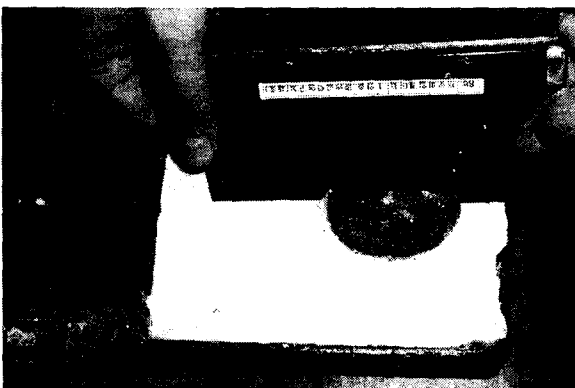


그림 1. 프로파일 게이지를 이용한 절리면 형상측정 모습과 측정 결과

4.2 절리면 전단 강도 특성

총 31개의 시편들(ISRM 방법 : 25개, Multi-Stage 방법 : 6개)에 대한 절리면 전단시험의 결과로서 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있었다.

$$\text{ISRM 방법 ; } \tau_p = 0.5492 \sigma_n + 0.1609 \quad (R = 0.8443) \quad (4)$$

$$\text{Multi-Stage 방법; } \tau_p = 0.3952 \sigma_n + 2.2784 \quad (R = 0.8613) \quad (5)$$

τ_p : 최대 전단응력(kg/cm²), σ_p : 최대 수직응력(kg/cm²), R : 상관계수

ISRM의 시험방법을 사용했을 경우에는 내부마찰각이 28.78° , Multi-Stage 시험방법을 사용했을 경우에는 내부마찰각이 21.56° 으로 산출되었다(그림 2, 3 참조). 이렇게 Multi-Stage 방법을 사용했을 경우에 내부마찰각이 현저하게 저하되는 이유는 한 시료에 대하여 수직하중을 달리하며 여러번 시험하기 때문에 상대적으로 전단 변위가 많이 발생하고 수직하중의 증가에 따라 절리면 거칠기가 파괴되면서 잔류값으로 수렴되기 때문인 것으로 판단된다.

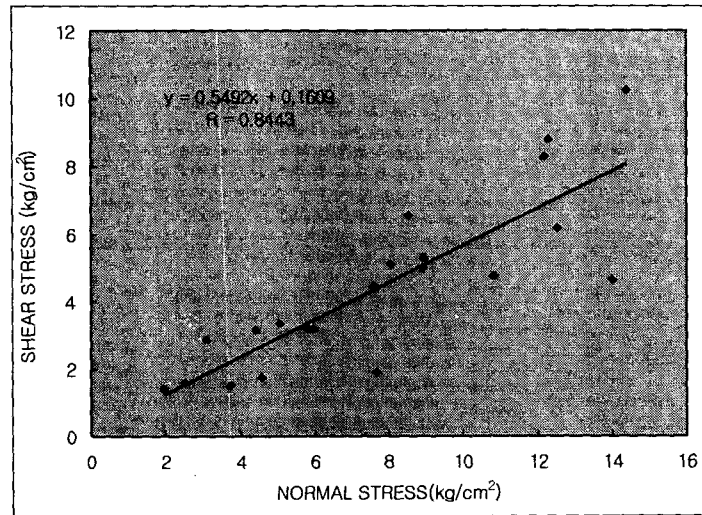


그림 2. ISRM 방법을 이용한 절리면 전단시험 결과

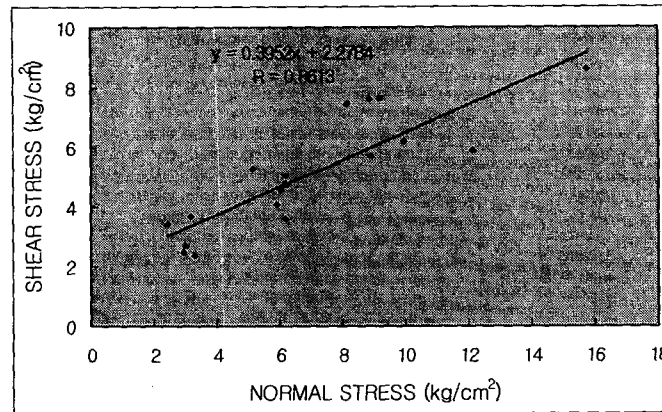


그림 3. Multi-Stage 방법을 이용한 절리면 전단시험 결과

4.3 수직 강성(Kn)과 전단강성(Ks)

총 31개의 시료에 대하여 실시한 수직강성 값의 범위는 5.56 ~ 10.5MPa/mm이고 평균값은 8.24MPa/mm이다. 또한 평평한 절리에서 최대압착량은 반복하중이 증가함에 따라 미세 거칠기에 파괴되어 증가하는 것으로 알려져 있으나(김영근, 이희근, 1993), 본 실험에서 사용된 천매암류의 경우에는 이러한 미세 거칠기가 거의 없기 때문에 반복하중에 증가함에 따라 최대압착량은 감소하는 것으로 나타났으며, 수직강성값의 경우에는 미세 거칠기가 없는 평평한 시료의 경우가 미세 거칠기가 있는 경우에 비하여 최대압착량이 적기 때문에 비교적 큰 값을 갖을 것으로 예상된다(그림 4 참조).

전단강성 값의 범위는 0.18 ~ 0.69MPa/mm이고 평균값은 0.44MPa/mm이다. 이러한 결과는 일반적인

전단강성 값에 비하여 약 10배 정도 작은 값으로 이는 절리면이 평평하고 미세 거칠기가 거의 없는 천매암류의 절리표면 특성상 상대적으로 최대 전단응력값까지 도달할 동안 변위량의 많기 때문으로 판단된다. 또한 잘 알려진 바와 같이 전단강성은 수직응력의 증가에 따라 증가하는 결과를 보인다(그림 5).

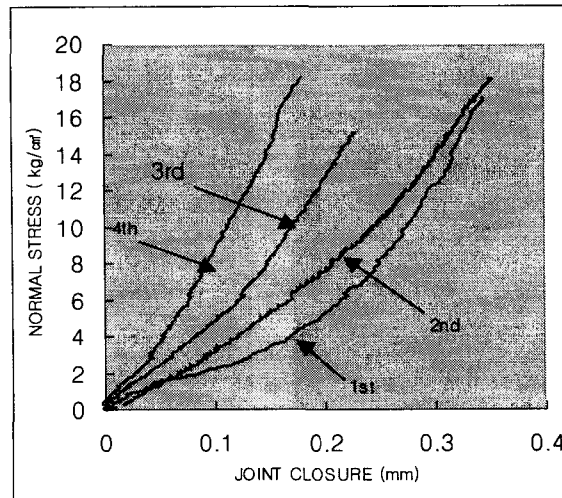


그림 4. 수직응력-폐합량 그래프

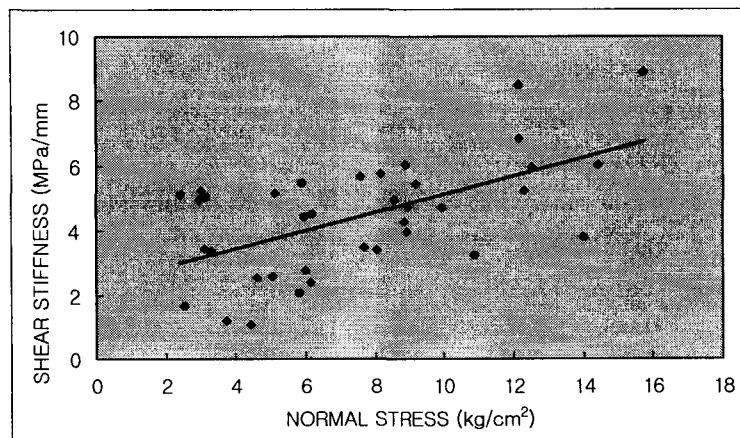


그림 5. 전단강성 - 수직응력 그래프

5. 결론

본 연구에서는 비교적 파괴 가능성이 많은 평평한 절리에 대하여 ISRM과 Multi-Stage 시험방법을 사용하여 전단특성 값을 산출하였으며, 각 시험방법에 따른 절리면 전단특성 차이에 대하여 연구하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 평평한 절리면을 갖는 천매암류에 대한 절리면 전단시험 결과, 내부마찰각은 ISRM의 경우에 약 28.78° , Multi-Stage의 경우에는 21.56° 로 각각 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 일반적으로 알려져 있는 내부마찰각 $30^\circ \sim 40^\circ$ 의 수치는 낮은 JRC에서는 적당하지 않는 것으로 판단된다. 따라서 절리면 전단강도를 산출하는데 있어서 일반적으로 알려진 수치를 사용하기 보다는 정밀한 실험을 거친후에 정확한 수치를 구하는 것이 바람직하다고 판단된다.

(2) 낮은 JRC값(2 ~ 6)을 갖는 절리면 전단실험에서도 ISRM의 방법이 더 높은 내부마찰각값을 나타내는 것으로 판단된다.

(3) 미세 거칠기가 거의 없는 평평한 절리의 경우에 수직강성은 반복하중이 증가함에 따라 최대압착량은 감소되어 증가하는 것으로 판단되며, 전단강성은 최대전단강도까지의 전단변위량이 많기 때문에 비교적 작은 값을 보이는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이상돈, 강준호, 이정인, “절리면의 거칠기에 따른 암석 절리의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구”, 터널과 지하공간, 한국 암반역학회, vol.4, 1994, pp. 261~273
2. 김영근, 이희근, “수직 및 전단하중하에서 화강암 인공절리의 변형특성”, 터널과 지하공간, 한국 암반역학회, vol.3, 1993, pp. 142~151
3. 최병렬 외 1인, “암석역학적으로 고찰한 서울화강암의 절리에 관한 연구”, 지질학회지, 제11권, 제 4호, 1975, p. 233~239
4. 이종욱, 이찬구, 황신일, 장천중, 최원학 “절리면에서의 전단거동 특성과 역학적 파라미터들 간의 상관성”, The Journal of Engineering Geology, vol.3, No.1, April, 1993, pp. 1~20
5. BARTON, N.R., SC. BANDIS, K. Bakhtar, “Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joint”, 1985,
6. BARTON, N.R., SC. BANDIS 외 1인, “Fundamentals of Rock Deformation”
7. Brwon, E.T., 1981, Rock Charaterization testing and monitoring, Pergamon Press, 211p.
7. S.R. Hencher & LR. Rchards, “Laboratory direct shear testing of rock discontinuities”, GROUND ENGINEERING, MARCH, 1989, pp. 24~31
8. S.R. Hencher, “Interpretation of direct shear tests on rock joint”, Proceeding of International Symposium on Rock Mechanics, pp. 99~106
9. C.A.Jermy 외 1인, “The shear strength of discontinuities in Karoo dolerite, South Africa”, Mechanics of Jointed and Faulted Rock, 1995
10. S.C.Bandis, “Mechanical properties of rock joint”, Rock Joint, 1990
11. N.Barton & S.Bandis, “Review of capabilities of JRC-JCS model in engineering practice”, Rock Joint, 1990