

절리면의 거칠기에 따른 암석 절리의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구

이상돈¹⁾ · 강준호¹⁾ · 이정인²⁾

Shear Strength and Deformation Behavior of Rock Joint with Roughness

Sang-Don Lee, Jun-Ho Kang and Chung-In Lee

ABSTRACT

Direct shear tests were carried out on the rock joints and artificial discontinuities to investigate the influence of joint roughness on the shear strength and deformation behaviour. Single direct shear testing apparatus used in experiment was designed and manufactured. Its capacity is 200 tons of shear load, 20 tons of normal load and 150 cm² of maximum shear area. Test samples were cement mortar with artificial discontinuity and sandstone with natural joint. Peak shear strength was increased as joint roughness or normal stress was increased, especially, linearly increased with roughness angle in cement mortar. If joint roughness angle was constant at low normal stress, shear strength was not affected by width and height of joint roughness in cement mortar. Peak shear strengths obtained from tests were larger than the values calculated by Barton's equation, and shear stiffness was increased with joint roughness coefficient.

1. 서 론

지하철, 원유·액화가스 등의 지하비축설비, 암반사면, 터널, 지하 고속도로, 핵폐기물 처리장 등 암반을 대상으로 하는 구조물들이 점점 늘어감에 따라 암반내 지하 구조물의 안정성 문제와 관련하여 대상 암반의 역학적 거동을 이해, 파악하는 것은 매우 중요하다. 대부분의 현지 암반은 균질한 무결암반이 아니고 내부에 미시적, 거시적인 균열, 절리, 단층 등과 같은 역학적 불연속면을 갖고 있어 이들이 암반의 거동에 큰 영향을 미친다.

이와 같은 불연속면이 암반의 변형거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 절리면을 포함한 암반에 대한 원위치전단시험이 실시되고 있는데, 이 시험은 비용이 많이 들 뿐만 아니라 시험방법도 까다로우며, 여러

가지 조건을 고려한 충분한 시험을 할 수 없는 결점이 있다.

따라서 절리면을 포함하고 있는 비교적 대형의 시험편에 대하여 실험실 전단시험을 통하여 절리면의 상태나 하중 조건, 거칠기 등에 따른 암석의 전단강도 및 변형거동을 자세히 조사할 필요가 있다. 현재까지 절리면의 전단변형 거동에 대한 국내에서의 연구는 아주 미미한 실정이다. 그러나 외국에서는 이 주제에 대한 논문이 많이 발표되어 왔는데, 그중에서도 Barton^{1,3)}과 Bandis⁴⁾의 연구결과가 널리 이용되고 있다.

본 연구에서는 절리면의 거칠기 및 수직응력 조건이 암석의 전단강도 및 변형거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 절리면을 포함한 비교적 큰 비정형시료에 대해서도 시험이 가능한 일면 직접전단시험기를 설계, 제작하였다. 이 시험장치는 200톤 용량의 만능재료

* 1994년 12월 12일 접수

1) 정회원, 서울대학교 자원공학과 박사과정

2) 정회원, 서울대학교 자원공학과 교수

시험기에 설치하게 되어 있으며, 전단방향 변위속도의 제어가 가능하고, 최대 수직하중은 20톤, 최대 전단면적은 150 cm²까지의 시험이 가능하다.

이 시험기를 이용하여 수직응력 및 절리의 거칠기에 따른 전단강도, 전단강성, 팽창각 등의 전단변형 특성을 조사하였고, 절리면의 전단강도에 대한 관계식으로서 가장 널리 알려져 있는 Barton의 경험식을 이용하여 시험결과를 검토하였다. 시험에 사용한 시료는 규칙적인 톱니형 인공절리 시험편을 시멘트 모르타르로 제작하였으며, 자연절리를 가진 암석 시험편으로는 동원탄과 사북광업소의 지하갱도에서 직접 채취한 사암을 사용하였다.

2. 전단강도 경험식

절리의 전단강도를 표현하는 가장 간단한 관계식은 Patton¹³⁾이 제시한 것으로서 다음과 같다.

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_u + i) \quad (1)$$

τ : 전단강도

σ_n : 유효수직응력

ϕ_u : 재료 자체의 마찰각(ultimate friction angle)

i : 거칠각(roughness angle)

그러나 평면 절리를 제외한 일반적인 절리들에서는 수직응력-최대전단강도 관계가 직선이 아니라 곡선의 형태로 나타남이 많은 연구자들에 의해 밝혀졌으며, 여러 경험식들이 제시되었다. 그 중에서 가장 널리 이용되고 있는 경험식은 1973년에 Barton¹¹⁾이 발표한 것이다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\text{JRC} \log \frac{\text{JCS}}{\sigma_n} + \phi_b \right) \quad (2)$$

JRC : 절리거칠계수(joint roughness coefficient)

JCS : 절리면의 압축강도

(joint wall compressive strength)

ϕ_b : 기본마찰각(basic friction angle)

절리면의 압축강도는 풍화되지 않은 절리인 경우에 그 암석의 단축압축강도와 동일하지만, 절리면이 풍화되어 있는 경우에는 Schmidt 해머 등을 이용하여 간접적으로 측정하여야 한다. 기본마찰각은 톱으로 자른 매끈한 평면에 대한 전단시험으로 구하는데, 절리면이 풍화되어 있거나 충전물이 있는 경우에는

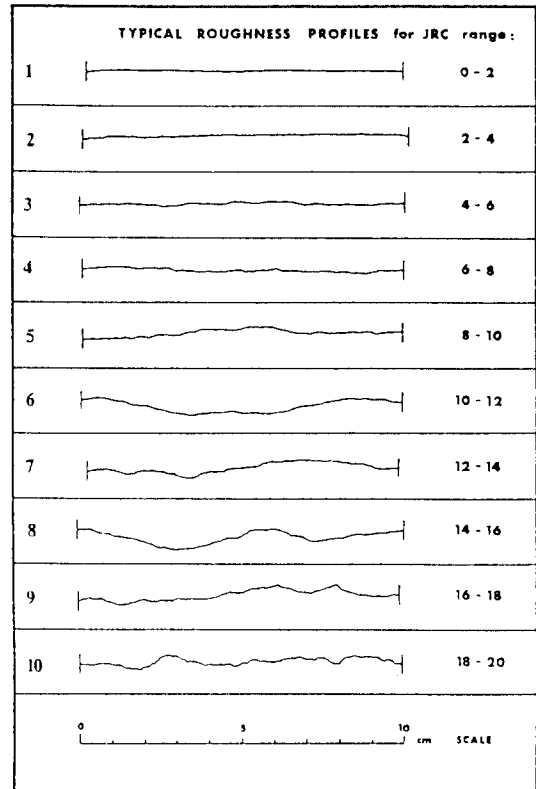


Fig. 1. Barton's roughness profiles showing the typical range of JRC values.

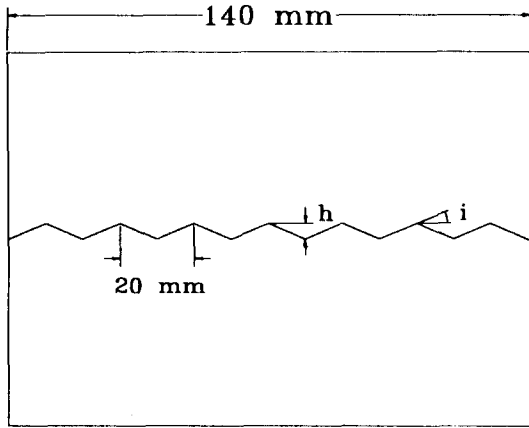
기본마찰각 대신에 잔류마찰각(ϕ_r , residual friction angle)을 사용한다. 이 잔류마찰각은 수직응력에 대하여 잔류전단강도(residual shear strength)를 그래프로 표시하여 그 기울기로부터 구한다.

절리거칠계수(JRC)는 Fig. 1에 제시된 기준 형상과 측정된 절리면의 형상을 서로 비교하여 판단하거나 경사시험 등을 통하여 결정한다. 또한 많은 연구자들에 의해 다른 거칠기 파라미터와 절리거칠계수의 관계식이 발표되었는데, 이들을 이용하여 절리거칠계수를 결정할 수도 있다.

3. 시험편 제작 및 실험방법

3.1 시험편의 제작 및 거칠기 측정

본 연구에서 인공절리 시료는 시멘트 모르타르로 제작하였는데, 재료의 혼합비는 물 : 시멘트 : 모래 = 0.88 : 1 : 3(중량비)으로 하였다. 절리면의 형상은 톱



h(mm)	roughness angle(°)	JRC
0	0	0
1.5	8.53	5.4
2.1	11.9	10.2
3	16.7	15.2
4.2	22.8	20

Fig. 2. Cement mortar test specimen.

니모양으로서 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 시험편의 제작에는 직경 100 mm, 길이 140 mm인 원주형 틀을 사용하였는데, Fig. 2에 제시된 규격의 톱니형 알루미늄 판을 제작하여 원주형 틀의 중앙에 끼운 후 재료를 주입하였다. 시료가 균일하게 되도록 잘 다진 후 일정한 시간이 지나 딱딱하게 굳은 시험편은 원주형 틀과 알루미늄 판을 떼어 내고 실내로 운반하여 20일 이상 건조시켰으며, 시험편의 단축압축강도를 구하기 위하여 직경 56 mm의 원주형 시험편을 동시에 제작하였다.

시멘트 모르타르 시험편에 대한 거칠기 파라미터로는 거칠각(roughness angle, i)을 사용하였다. 한편 Barton의 경험식을 사용하여 시험결과를 비교해 보기 위해서는 절리거칠계수(Joint Roughness Coefficient, JRC)를 결정하여야 하는데, 이를 위해서는 Tse and Cruden⁶⁾의 연구결과를 사용하여 절리거칠계수를 계산하였다. 즉, 절리면 형상의 평균 기울기를 나타내는 파라미터인 Z_2 는 다음과 같은 적분의 형태로 표시된다.

$$Z_2 = \left[\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \right]^{1/2} \quad (3)$$

Z_2 : 절리면 형상의 평균 기울기

L : 절리면에 투영된 직선길이

dx : 수평방향의 미소증분

dy : 수직방향의 미소증분

절리의 거칠기가 규칙적이거나 절리면 형상을 수치화(digitizing)하여 측정할 경우에는 식 (3)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_2 = \left[\frac{1}{M(D_x)^2} \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

M : 측정간격의 개수

D_x : 측정간격

y_i : i번째의 높이

y_{i+1} : (i+1)번째의 높이

Tse and Cruden은 Fig. 1에 있는 10가지의 기준 형상을 사용하여 여러가지 거칠기 파라미터와 절리 거칠계수(JRC)의 상관관계를 분석하였는데, 그 결과 위의 Z_2 파라미터가 가장 깊은 상관관계를 가지고 있으며, 아래의 관계식이 가장 적절하다고 제안하였다.

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log Z_2 \quad (5)$$

따라서 시멘트 모르타르의 경우 식 (5)를 이용하여 절리거칠계수를 계산하였으며, 그 값이 거칠각 i와 함께 Fig. 2에 제시되어 있다.

자연절리를 가진 암석시료로는 사암을 선택하였는데, 시험편은 동원탄좌 사복광업소 중앙갱의 주운반갱도 및 연층갱도에서 채취하였다. 자연절리를 기준으로 절리면 양쪽의 블록을 절취하였는데, 암석의 풍화에 따른 영향을 배제하기 위하여 되도록 절리면이 풍화되지 않은 시료만을 채취하였다. 이렇게 얻은 시료는 절리면이 손상되지 않도록 양쪽 블록을 단단히 묶은 후 실험실로 운반하였다. 실험실에서 100×150×100 mm 규격의 전단상자 안에 들어갈 수 있도록 시료를 사각형 모양으로 성형한 다음 절리면 사이에 두 가닥의 실납을 넣고 압착하여 절리면의 형상을 측정하였다.

절리면의 형상을 측정할 시료는 양쪽 블록의 절리면을 일치시켜 끈으로 묶은 다음 전단상자와 같은 규격의 사각형 틀에 넣고 틀과 시료 사이의 빈 틈을 수지 혼합물로 충전하였다. 충전 깊이는 시험편 길이의 0.2배 이상이 되도록 하였으며, 절리의 측면은 충전 혼합물로부터 5 mm 이상 떨어지도록 하였다.

이와 같이 준비한 자연절리 시험편의 크기는 그 절리면의 면적이 40 cm²에서 120 cm² 정도까지 다양하다.

실납을 이용하여 얻은 절리면 형상은 영상분석기기를 이용해 수치화하여 거칠기형상지수(roughness profile index, R_p)를 계산하였다. 거칠기형상지수는 절리면에 투영된 직선길이에 대한 절리면 윤곽선의 실제길이비이다. 절리거칠계수(JRC)의 계산은 Maerz 등⁷⁾이 제시한 다음의 관계식을 이용하였다.

$$JRC = 411(R_p - 1) \quad (6)$$

3.2 직접전단시험장치 및 실험방법

시험에 사용한 일면 직접전단시험기는 200톤 용량의 만능재료시험기를 이용하여 전단하중을 수직방향으로 가하고 수직하중은 유압램을 사용하여 수평방향에서 가하도록 제작하였다. 이 전단시험기의 구조는 Fig. 3에 제시되어 있다. 프레임의 토대에는 하부전단상자를 올려 놓게 되어 있으며, 수직축에는 시험시에 전단변위가 계속되는 동안 수직하중 로프를 안내하는 부싱(bushing)장치가 설치되어 있다. 수직하중을 가하는 데 로프를 사용한 이유는 로프가 힘을 받는 방향으로 자유롭게 구부러지기 때문에 로프와 전단상자 사이에 별도로 롤러 베어링을 설치하지 않아도 전단변위의 발생에 따른 시험기 자체의 마찰저항을 아주

작게 유지해 주기 때문이다. 전단상자는 외부 전단상자와 내부 전단상자로 분리할 수 있으므로 외부 전단상자는 그대로 두고 내부 전단상자만을 교환하여 여러 가지 모양의 시험편에 대하여 시험을 수행할 수 있다. 내부 전단상자에는 시험중에 시험편의 전단방향 체적변화를 방지하는 시험편 고정장치가 부착되어 있으며, 시험할 수 있는 전단변위의 허용범위는 6 cm이다. 내부 전단상자의 규격은 원통형의 경우 직경 54 mm와 길이 110 mm, 직경 100 mm와 길이 150 mm의 두 가지이고, 사각형 전단상자는 폭 100 mm, 높이 100 mm, 길이 150 mm이다. 본 연구에서는 시멘트 모르타르 시험편의 경우 직경 100 mm의 원통형 전단상자를 사용하였으며, 사암 시험편에는 폭 100 mm, 길이 150 mm의 사각형 전단상자를 사용하였다.

시험편에 대한 수직하중은 로프와 유압램을 이용하여 수동 펌프로 가하였는데, 전단변형이 계속되는 동안 수직하중은 ±2%의 범위내로 일정하게 유지하였다. 즉, 전단변형이 진행됨에 따라 절리면의 표면 거칠기에 의한 수직변위가 발생하게 되고 이로 인해 수직응력이 증가하게 되는데, 이때 펌프에 부착되어 있는 유압조정 손잡이를 조절하여 증가된 유압을 빼 줄으로써 수직응력을 일정하게 유지하였다. 전단하중이 최대치를 지난 후, 전단변위가 계속되는 동안에도 전단하중의 변화가 거의 없으면 잔류전단강도에 이른

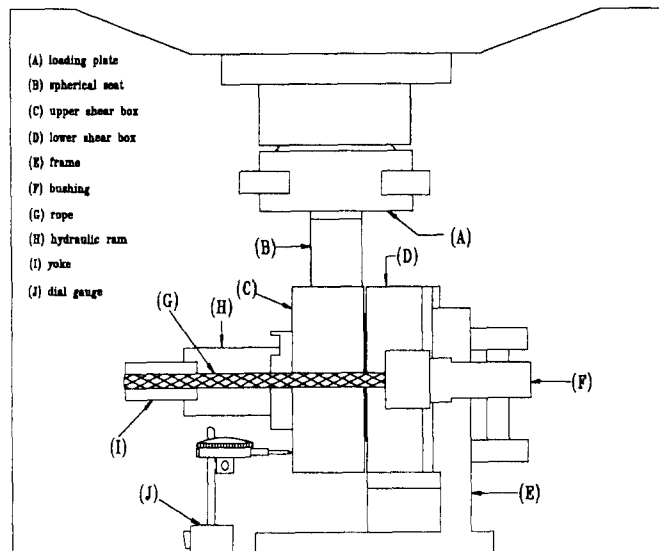


Fig. 3. Schematic diagram of the direct shear testing apparatus.

것으로 보고 가압을 중지하였다. 전단변위와 전단하중의 관계곡선은 재료시험기에 설치된 X-Y 기록계에 서 자동으로 기록하였으며, 수직변위는 다이얼게이지를 이용하여 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

직접전단시험에 사용한 시멘트 모르타르 및 사암에 대하여 각각 5회와 3회의 단축압축시험을 실시하여 그 강도값을 평균한 결과, 시멘트 모르타르의 단축압축강도는 10.1 MPa, 사암의 단축압축강도는 124.8 MPa이었다. 이 단축압축강도는 나중에 Barton의 경험식을 계산할 때 절리면의 압축강도 대신에 사용하였다. Fig. 4는 불연속면이 없는 직경 100 mm의 원주형 시멘트 모르타르 시험편에 대하여 직접전단시험을 한 결과이다. 수직응력 범위는 0.3~4.0 MPa으로서 단축압축강도에 비하여 상당히 넓은데, 그 결과 수직응력이 증가함에 따라 전단강도의 증가량이 점점 감소하는 형태를 보였다. 따라서 단축압축강도의 1/10 수준인 1.0 MPa을 기준으로 하여 시험 결과를 2중 직선으로 표시하였으며, 이렇게 얻은 점착강도는 2.0 MPa로 나타났다. 최대값을 지난 후 전단변위에 따른 강도값의 변화가 거의 없는 잔류전단강도는 직선으로 표시하였는데, 직접전단을 통해 형성된 파괴면이 상당히 거칠기 때문에 마찰각은 45.6°로 조금 크며, 0.7

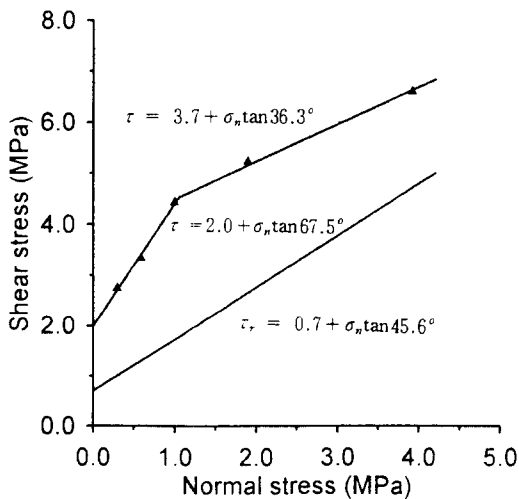


Fig. 4. Relationship between normal stress and shear strength for intact cement mortar.

MPa의 겔보기 점착력도 그래프상에 나타났다.

톱으로 자른 평면에 대한 전단시험 결과는 Fig. 5와 Fig. 6에 제시하였다. 수직응력은 0.3, 0.6, 1.0, 2.0, 4.0 MPa의 5단계로 하였는데, 시험결과는 직선에 거의 일치하였다. 이 결과로부터 구한 시멘트 모르타르와 사암 절리의 기본마찰각은 각각 35.9°, 29.7°였으며, 이 기본마찰각은 Barton의 경험식과 본 연구의 결과를 비교할 때 사용하였다.

Fig. 7은 수직응력이 0.29 MPa이고 거칠각이 11.9°

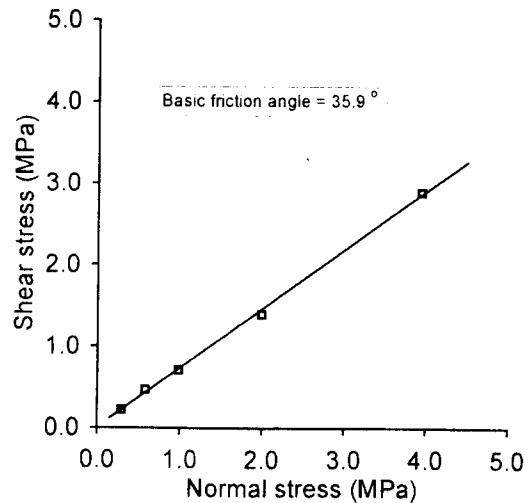


Fig. 5. Relationship between normal stress and shear strength for flat cement mortar.

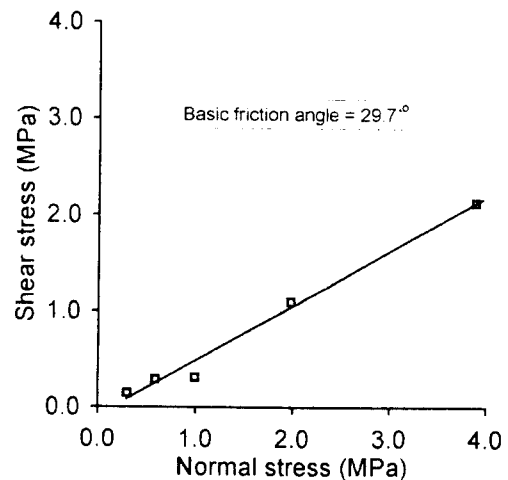


Fig. 6. Relationship between normal stress and shear strength for saw-cut sandstone joint.

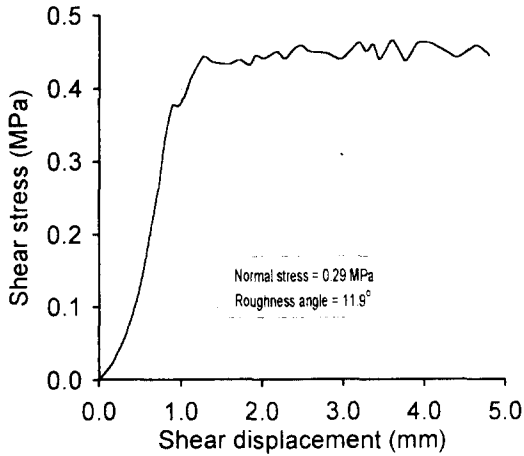


Fig. 7. Shear stress-shear displacement curve for cement mortar specimen C1-3.

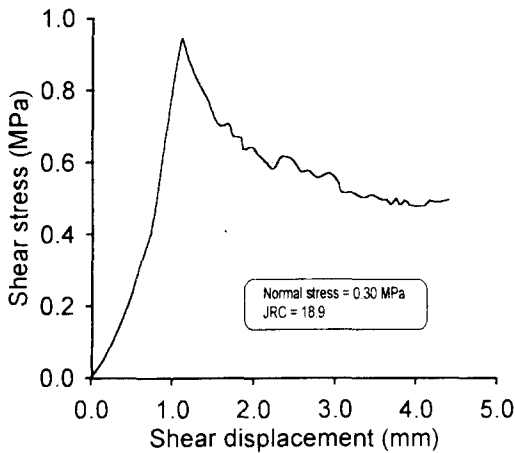


Fig. 8. Shear stress-shear displacement curve for sandstone joint specimen S-16.

인 시멘트 모르타르 시험편의 전단응력-전단변위 곡선이며, Fig. 8은 수직응력이 0.30 MPa이고 절리거칠계수가 18.9인 사암 절리의 전단응력-전단변위 곡선이다. 시멘트 모르타르의 경우에서 보면 1~2 mm의 전단변위에서 전단응력이 최고치에 이른 이후 전단변위가 계속되어도 응력이 거의 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 이는 절리면 거칠기의 파괴를 수반하지 않는 낮은 수직응력 수준에서의 전단저항은 절리면 거칠기의 크기와는 거의 관계없이 거칠각과 재료 자체의 마찰저항에 좌우됨을 나타내는 것이다. 사암에서의 최대전단강도도 1~2 mm의 전단변위에서

나타났으며, 최대전단강도 이후 전단응력은 완만한 기울기로 감소하여 전단변위가 4 mm 이상 계속된 후에 잔류전단강도 수준에 이르렀다.

수직응력이 4 MPa로 다소 큰 경우의 평면 절리에서는 전단변위가 계속됨에 따라 전단응력도 아주 조금씩 증가하는 변형강화(displacement hardening) 현상도 관측되었는데, 이 변형강화 현상은 평면의 시멘트 모르타르 시험편에서 보다 확실히 관측되었다. 시멘트 모르타르의 경우 재료 자체의 단축압축강도에 비하여 수직응력이 상당히 높은 수준이므로 이 변형강화 현상이 보다 분명하게 관측된 것으로 판단된다.

자연절리를 가진 사암시료의 경우 전단변위에 따른 팽창(dilatancy)을 측정하였는데, 전단응력이 최대치에 도달할 때 가장 많은 팽창이 발생하였다. 따라서 팽창각(dilation angle)은 최대전단강도에 도달하기 전의 수직변위가 가장 작을 때와 전단강도가 최대치에 도달했을 때의 평균 기울기로부터 계산하였다. Table 1에는 자연절리를 가진 사암의 직접전단시험 결과를 제시하였다.

4.1 전단강도에 대한 수직응력의 영향

수직응력에 따른 전단강도의 변화를 알아보기 위해 각 수직응력 단계별로 시험을 수행하였다. 즉, 시멘트 모르타르의 경우 동일한 거칠각에서 수직응력의 변화를 0.3, 0.6, 1.0, 2.0, 4.0 MPa로 하였으며, 사암의 경우에는 JRC가 6.5~9.3 사이에 있는 10개의 시료에 대해 0.28~1.99 MPa의 수직응력을 가하여 시험을 하였다.

Fig. 9는 시멘트 모르타르에 대한 시험에서 얻은 최대전단강도를 수직응력에 대하여 나타낸 것이다. 이 경우에서 보면 수직응력의 증가에 따른 전단강도의 증가량이 일정하지 않고 곡선을 그리면서 그 증가량이 아주 약간씩 감소하고 있음을 볼 수 있다. 시멘트 모르타르의 단축압축강도는 10.1 MPa인데, 수직응력이 단축압축강도의 3%에서 40%까지의 넓은 범위에 걸쳐 있는데도 이렇게 수직응력에 따른 전단강도의 감소량이 적은 것은 시험편의 형태 때문으로 판단된다. 즉, 시험편이 일정한 경사각을 가진 규칙적인 면으로 구성되어 있어 낮은 수직응력에서 전단강도에 큰 영향을 미치는 소규모의 2차적인 거칠기가 없을 뿐만 아니라 수직응력이 큰 경우의 일부분을 제외하고는 최대전단강도에 이르는 전단변형 초기에 거칠

Table 1. Results of direct shear test on natural sandstone joints.

Sample No.	Area (cm ²)	Roughness profile index R _p	Joint roughness coefficient JRC	Normal Stress (MPa)	Peak shear strength (MPa)	Residual shear strength (MPa)	Shear stiffness (MPa/m)	Dilation angle (°)
S-1	61.5	1.008848	3.6	0.59	0.74	0.48	615	15.1
S-2	57.3	1.009418	3.9	0.34	0.15	0.15	35	
S-3	54.7	1.015918	6.5	0.60	1.02	0.72	948	4.1
S-4	43.6	1.016067	6.6	0.98	1.43	0.99	1904	5.6
S-5	55.2	1.016258	6.7	0.96	2.15	1.07	1942	19.7
S-6	77.6	1.017678	7.3	1.99	5.29	1.65	4131	17.0
S-7	53.5	1.018914	7.8	0.61	2.99		1083	24.1
S-8	66.5	1.019522	8.0	0.29	0.40	0.32	176	11.3
S-9	58.4	1.020181	8.3	0.33	0.51	0.35	391	4.2
S-10	65.5	1.020970	8.6	1.99	3.95	2.04	2804	12.6
S-11	117.5	1.022566	9.3	0.28	0.77	0.35	542	13.5
S-12	84.2	1.022731	9.3	0.98	1.30	1.07	1253	5.6
S-13	70.1	1.023859	9.8	0.56	3.19		1369	31.3
S-14	60.5	1.027093	11.1	0.32	0.80	0.60	507	13.7
S-15	65.4	1.038967	16.0	0.60	1.28	0.85	1158	19.7
S-16	76.3	1.045904	18.9	0.30	0.94	0.49	1499	16.7

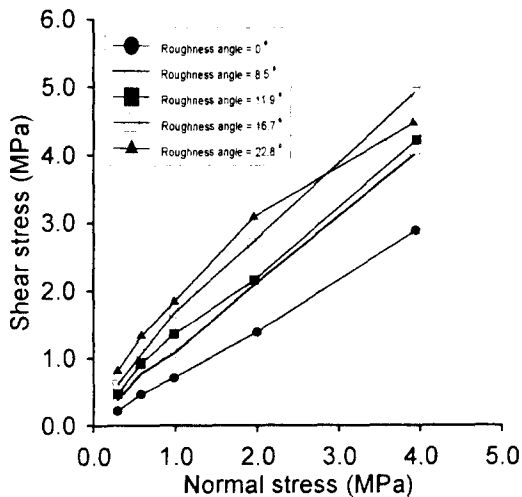


Fig. 9. Variation of the peak shear strength with normal stress in cement mortar.

면의 파괴가 없이 면을 따른 미끄러짐만을 수반하기 때문이다.

Fig. 10은 자연절리를 가진 사암에서의 최대전단강도를 수직응력에 대하여 표시한 것이다. 사암시료의 경우 절리면이 풍화되지 않았으므로 단축압축강도와 절리면의 강도가 거의 같다고 볼 수 있다. 따라서 수직응력 수준은 절리면 강도의 0.22%에서 1.6% 정도로 아주 작다. 이러한 낮은 수직응력 수준에서는 절리면의 조그만 돌출부들이 전단강도에 큰 영향을 미치게 되는데, 시험결과도 수직응력에 비하여 상당히 큰 전단강도값을 나타내었다. 수직응력의 범위가 넓지 않기 때문에 최대전단강도는 대체로 수직응력에 대한 선형관계로 나타났다.

수직응력에 따른 잔류전단강도는 Fig. 11과 Fig. 12에 제시되어 있다. 시멘트 모르타르의 경우 평면에

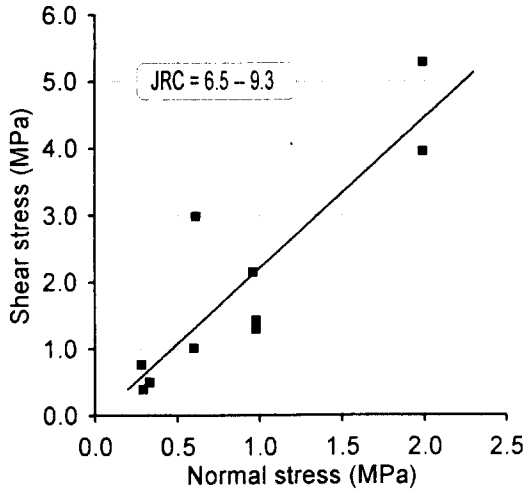


Fig. 10. Variation of the peak shear strength with normal stress in sandstone joints.

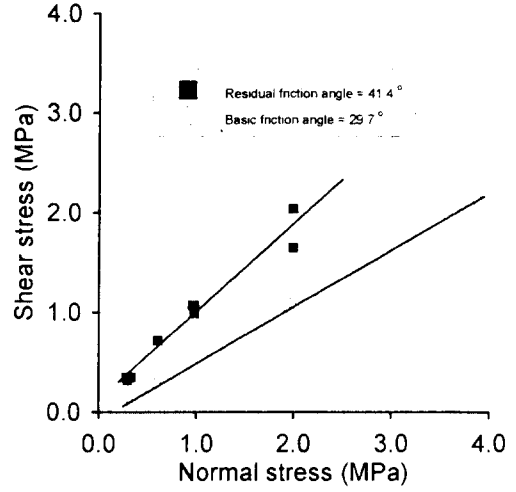


Fig. 12. Relationship between normal stress and residual shear strength for sandstone joints.

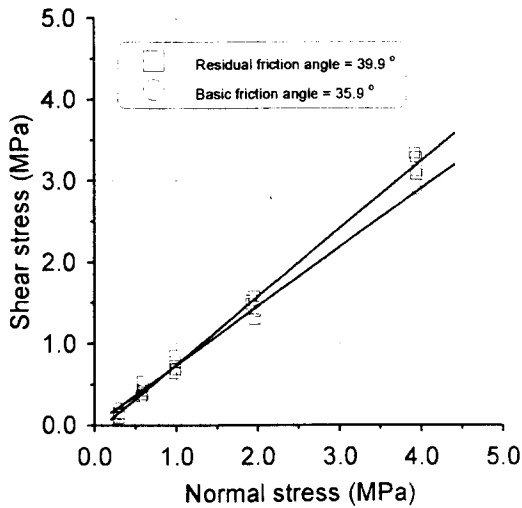


Fig. 11. Relationship between normal stress and residual shear strength for cement mortar.

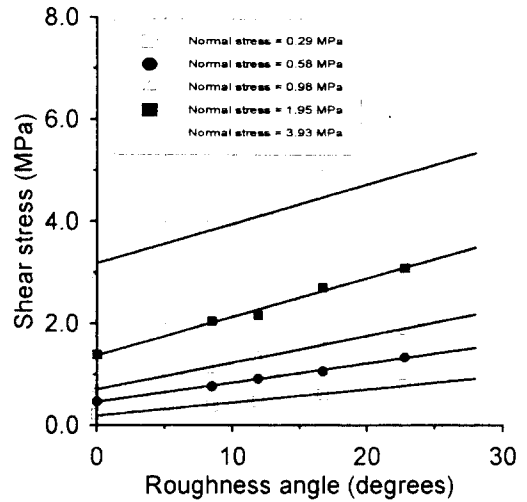


Fig. 13. Variation of the peak shear strength with roughness angle in cement mortar.

대한 시험결과보다 잔류강도가 약간 크게 나타났는데, 이는 전단변형의 진행에 따른 거칠면의 파괴 정도에 기인하는 것으로 보인다. 수직응력이 낮은 경우에는 전단변형이 거칠면의 정점을 지나 계속됨에 따라 평면에 대한 경우보다 오히려 전단응력이 더 떨어지는 반면에, 수직응력이 커지면 일부 거칠면의 파괴가 수반되면서 마찰저항이 커지게 되어 잔류전단강도도 더 증가하는 것이라 할 수 있다. 자연절리인 사암시료의 경우에는 잔류마찰각이 41.4° 로서 기본마찰각보

다 훨씬 크다. 자연절리의 경우 절리면의 형상이 불규칙적이므로 최대강도를 지난 이후에도 거칠면간의 맞물림(interlocking)이 일부 발생하여 전단강도가 더 커진다고 할 수 있다.

4.2 전단강도에 대한 거칠기의 영향

시멘트 모르타르 시험편에서 불연속면의 거칠각에 따른 최대전단강도의 변화가 Fig. 13에 나타나 있다.

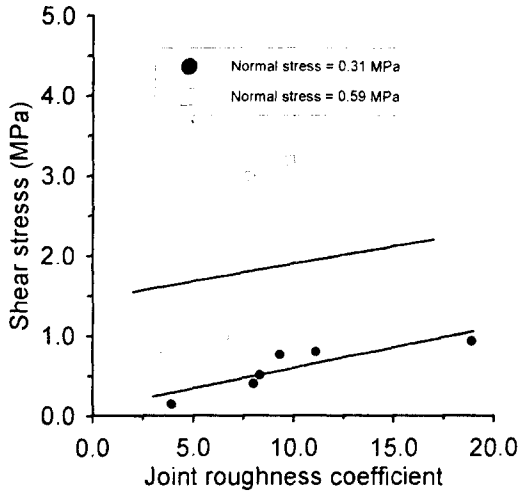


Fig. 14. Variation of the peak shear strength with joint roughness coefficient in sandstone joints.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 거칠각(roughness angle)이 커질수록 최대전단강도는 거의 선형적으로 증가한다. 하지만 수직응력이 아주 크고 거칠각도 클 때에는 이러한 선형성에서 약간 벗어나는 경우도 있는데, 이는 높은 수직응력이 수직방향의 팽창을 억제하여 일부 거칠면의 파괴를 유발하였기 때문으로 풀이된다.

사암시료의 경우에는 절리거칠계수에 따른 최대전단강도를 Fig. 14에 표시하였는데, 시멘트 모르타르의 경우와 달리 아주 분산된 형태를 보이고 있다. 수직응력이 0.31 MPa인 경우의 최대전단강도는 JRC가 증가함에 따라 비교적 일정하게 증가하고 있으나, 수직응력이 0.59 MPa인 경우에는 두 시료에서 아주 큰 전단강도값을 나타냈다. 이 두 시료에서의 큰 강도값은 절리면내의 일부분에 경사가 급한 소규모의 2차 거칠기가 있어 전단변형시에 이를 극복하지 못하고 그 일부분이 떨어져 나갔기 때문이다. 따라서 이 두 시료에서는 잔류전단강도를 측정하지 못하였으며, 팽창각도 각각 24.1°와 31.3°로서 원래의 JRC 값인 7.8과 9.8에 비해 상당히 크다. 절리거칠계수에 따른 잔류전단강도의 변화는 Fig. 15에 있다. 잔류전단강도도 JRC 값이 커짐에 따라 약간씩 증가하는데, 이는 절리면의 거칠기가 클수록 잔류강도 수준에서도 거칠면간의 맞물림이 많이 형성되어 전단저항을 증가시키는 것으로 판단할 수 있다. 또한 수직응력 수

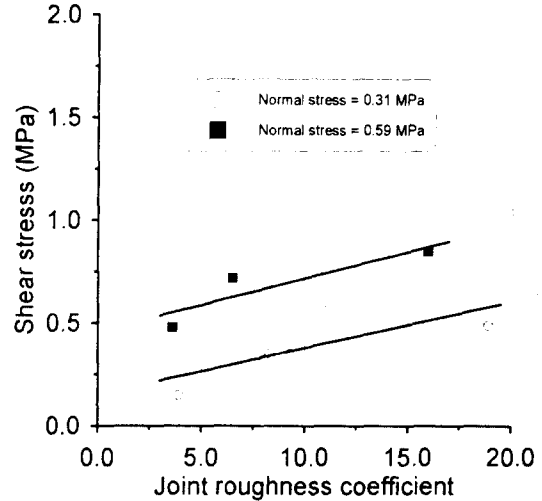


Fig. 15. Variation of the residual shear strength with joint roughness coefficient in sandstone joints.

준이 낮기 때문에 강도가 최대치를 지난 이후에도 거칠면이 파괴되지 않고 거의 그대로 남아 있음의 의미하는 것이다.

4.3 전단감성

수직응력에 따른 전단감성의 변화는 Fig. 16과 Fig. 17에 표시하였다. 전단감성은 단위 전단변형을 일으키는 데에 필요한 전단응력이므로 전단응력-전단변위 곡선에서 곡선의 기울기로써 표시된다. 본 연구에서 전단감성은 최대전단강도의 1/2인 지점에서 전단변형 곡선에 대한 접선의 기울기로써 결정하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 수직응력이 증가할수록 전단감성도 크게 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 수직응력이 증가할수록 전단변위를 구속하여 최대전단강도에 이르기까지의 변위를 감소시킴으로써 결국 전단감성이 증가하게 되며, 또한 수직응력이 수직방향 변위를 억제하여 전단변형보다는 전단파괴의 가능성을 높여 전단감성을 증가시키는 한 요인이 된다고 할 수 있다.

거칠기에 따른 전단감성의 변화는 Fig. 18과 Fig. 19에 제시되어 있다. 시멘트 모르타르 시험편에서의 전단감성은 그 변화가 다소 불규칙적인데, 이와 같은 심한 변화는 시험편 각각에서 불연속면의 표면상태에 차이가 있기 때문으로 생각된다. 즉, 시험편 제작시에

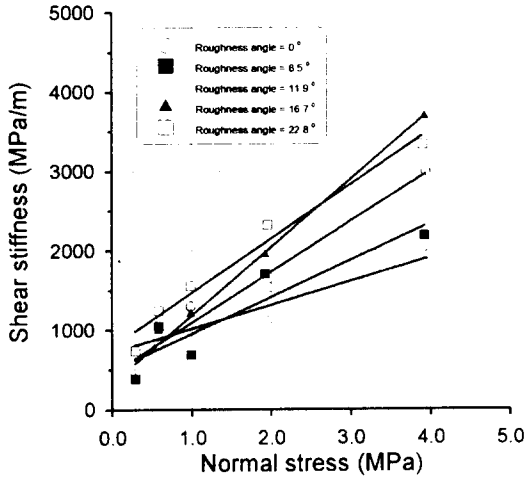


Fig. 16. Variation of the shear stiffness with normal stress in cement mortar.

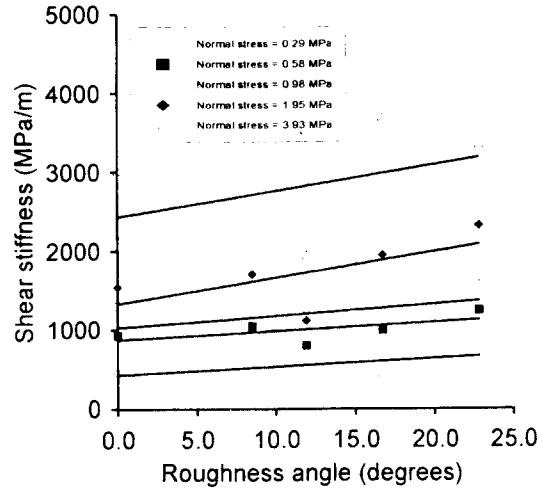


Fig. 18. Variation of the shear stiffness with roughness angle in cement mortar.

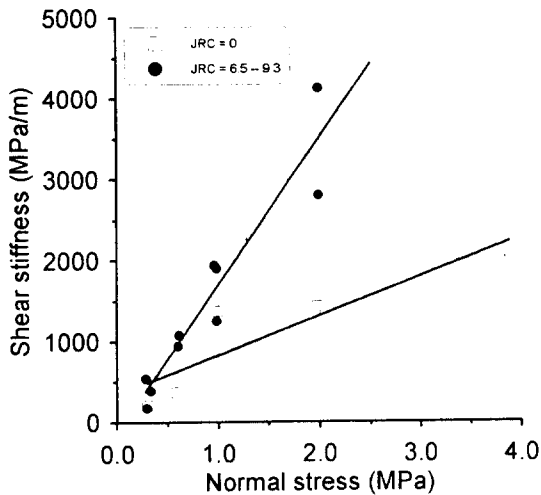


Fig. 17. Variation of the shear stiffness with normal stress in sandstone joints.

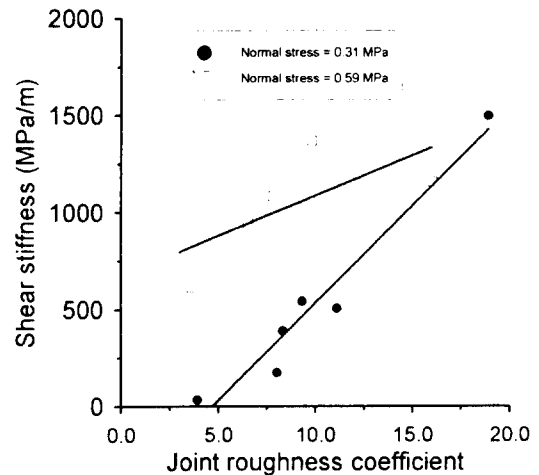


Fig. 19. Variation of the shear stiffness with joint roughness coefficient in sandstone joints.

시료를 다져 넣었는데, 이 과정에서 재료의 혼합이 시험편마다 일정하지 않고 톱니형 거칠기를 형성시키는 관과의 접촉상태가 양호하지 않아 불연속면이 깨끗하게 만들어지지 못했던 것으로 생각된다. 사암 절리의 경우에는 JRC 값이 커짐에 따라 전단강성의 증가 경향을 비교적 뚜렷하게 확인할 수 있다.

4.4 Barton 경험식과의 비교

시험을 통하여 얻은 전단강도와 Barton의 경험식을

사용하여 계산한 결과를 비교해 보기 위해 전단강도를 가한 수직응력으로 나눈 값, 즉 마찰각 성분을 비교하였다. Fig. 20과 Fig. 21은 시멘트 모르타르 시료에 대한 Barton 식에서의 예상 마찰각과 시험에서 측정된 마찰각을 그래프로 표시한 것이다. 시멘트 모르타르 시험편은 규칙적인 톱니형 불연속면으로 되어 있기 때문에 측정치의 분산이 아주 작다. Barton 식의 계산에 기본마찰각을 사용한 경우는 단지 예상치보다 약 15% 정도 큰 값을 나타냈으나, 잔류마찰각을 사

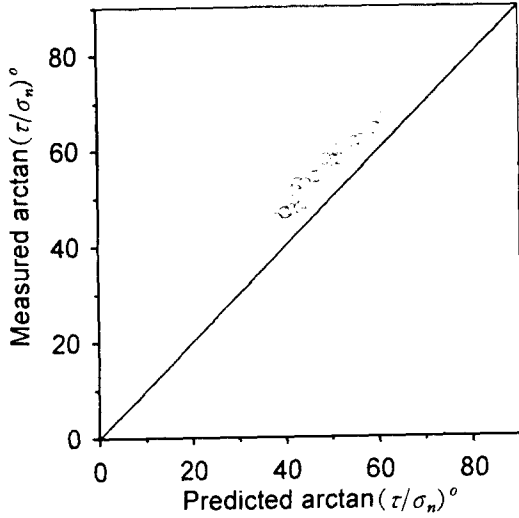


Fig. 20. Peak arctan (τ/σ_n) predicted from Barton's equation compared with the measured values obtained from direct shear test on the same cement mortar samples (using basic friction angle).

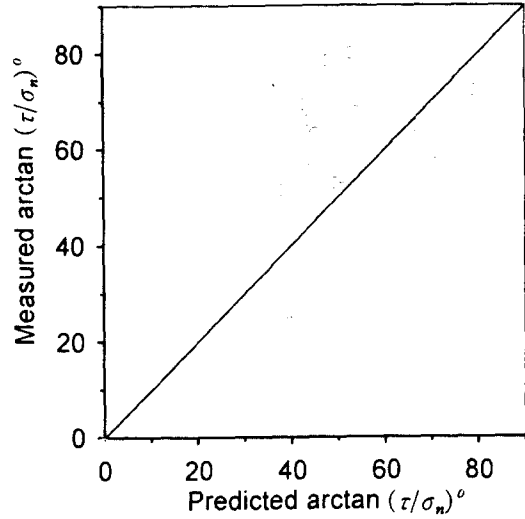


Fig. 22. Peak arctan (τ/σ_n) predicted from Barton's equation compared with the measured values obtained from direct shear test on the same sandstone joint samples (using basic friction angle).

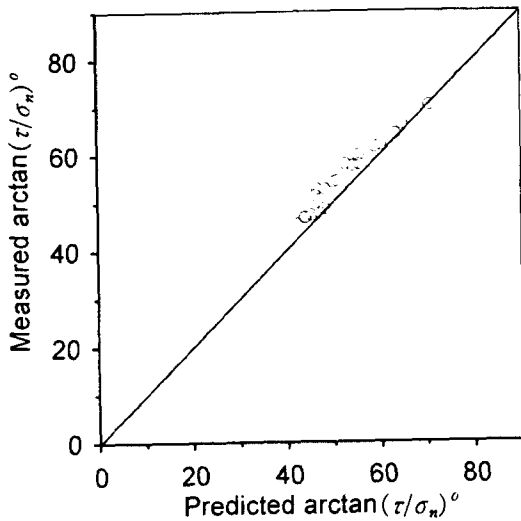


Fig. 21. Peak arctan (τ/σ_n) predicted from Barton's equation compared with the measured values obtained from direct shear test on the same cement mortar samples (using residual friction angle).

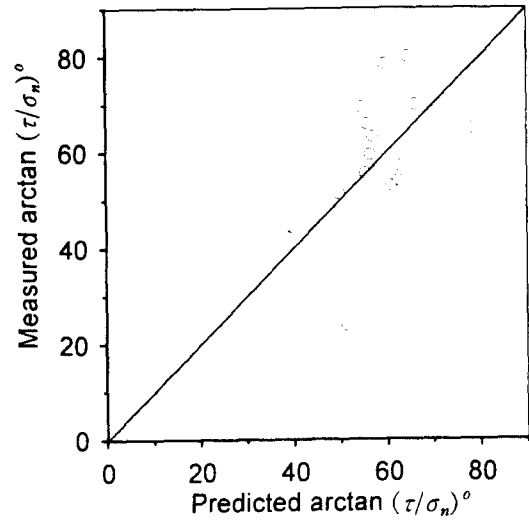


Fig. 23. Peak arctan (τ/σ_n) predicted from Barton's equation compared with the measured values obtained from direct shear test on the same sandstone joint samples (using residual friction angle).

용한 경우는 예상치에 거의 근접하였다. 사암에서의 결과는 기본마찰각을 사용한 경우 예상치보다 약 25% 정도 크게 나타났으나, 잔류마찰각을 사용한 경우는

대체로 예상치와 비슷하였다.

Barton은 그의 경험식을 이용할 때 톱으로 자른 면에 대한 전단시험으로 구한 기본마찰각을 사용할

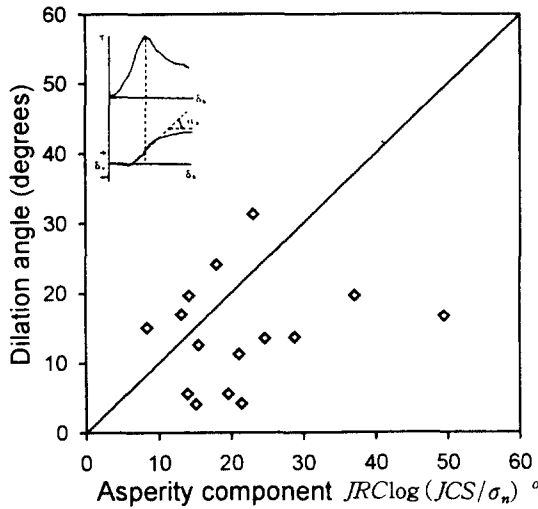


Fig. 24. Distribution of peak dilation angles versus the asperity component of Barton's equation.

것을 추천한 바 있다. 일반적인 절리에 대한 직접전단시험으로 얻은 잔류마찰각은 거칠기의 영향을 배제할 수 없으므로 절리면이 풍화되어 있거나 충전물이 존재하는 경우 등에만 잔류마찰각을 사용할 것을 추천하였다. 따라서 본 연구에서의 시험결과는 Barton 경험식에 의한 결과보다 약간 큰 강도값을 산출하였다고 할 수 있다.

전단강도가 최대치에 도달할 때의 팽창각과 Barton 식의 거칠기 성분과의 관계는 Fig. 24에 표시하였다. 그림에서 보는 것처럼 시험에서 얻은 팽창각은 Barton 식에서의 거칠기 성분값과 비슷하거나 아주 낮은 값을 나타내고 있다. 또한 팽창각의 분산도 심한데, 이는 시험기의 제약에 의해 수직변위를 전단상자의 중앙에서 측정하거나 4군데의 모퉁이에서 측정하지 못했기 때문으로 풀이된다.

5. 결 론

본 연구에서는 절리면의 거칠기가 암석의 전단강도 및 변형거동에 미치는 영향을 조사하였다. 시험에 사용한 일면 직접전단시험기는 직접 설계, 제작하였으며, 인공 불연속면을 가진 시멘트 모르타르 시험편 및 자연절리면을 갖는 사암 시료에 대하여 절리의 거칠기 및 수직응력에 따른 직접전단시험을 실시하

였다. 시멘트 모르타르의 경우 불연속면의 거칠기 및 수직응력을 각각 5가지로 하여 시험하였으며, 사암 절리의 경우는 수직응력을 4가지로 하고 총 16개의 자연절리에 대하여 시험을 하였다.

이와 같은 연구에서 얻어진 주요한 결과는 다음과 같다.

1) 절리면의 거칠기가 클수록 최대전단강도도 증가하는데, 특히 시멘트 모르타르의 경우 불연속면의 거칠각(roughness angle)이 0° 에서 22.8° 까지의 범위에서 증가함에 따라 최대전단강도는 이에 비례하여 증가하였다. 자연절리를 가진 사암 시료의 경우에는 잔류전단강도도 절리면의 거칠기에 따라 증가하였다.

2) 수직응력의 증가에 따른 최대전단강도는 시멘트 모르타르의 경우 거칠각이 0° 에서부터 22.8° 까지 커짐에 따라 증가하나 그 증가율은 약간씩 감소하였다. 또 수직응력이 아주 작고 불연속면의 거칠각이 일정한 경우 전단강도는 거칠기의 폭이나 높이에 따른 크기에는 거의 영향을 받지 않았다.

3) 톱으로 자른 평면에 대해 직접전단시험을 실시하여 얻은 기본마찰각보다는 잔류마찰각이 더 크게 나타났는데, 특히 자연절리 시료인 사암의 경우에는 잔류마찰각이 10° 이상 크게 산출되었다. 따라서 Barton의 경험식을 이용하고자 할 때 절리면이 풍화되어 있거나 충전물이 존재하는 경우를 제외하고는 기본마찰각을 사용하는 것이 타당하다고 판단된다.

4) Barton이 제시한 암석 절리면의 거칠기 및 절리표면의 압축강도를 고려한 전단강도 경험식과 본 연구의 시험결과를 비교한 결과, 시멘트 모르타르와 사암 시료의 최대전단강도는 Barton의 식에 의해 계산한 값보다는 크게 나타났다. 또 Barton의 경험식에 나타난 절리면의 거칠기 성분에 대하여 본 시험에서 얻은 팽창각(dilation angle)을 그래프로 표시한 결과 정확한 비례관계를 보이지는 않았다. 하지만 측정자료의 축적이 보다 많이 이루어진다면 그 상관관계를 보다 명확하게 파악할 수 있을 것이다.

5) 전단강성은 수직응력에 따라 크게 증가하는 경향을 보였으며, 자연절리의 경우에는 절리거칠계수가 커짐에 따라라도 증가하였다. 이 연구에서 수행한 여러 가지 경우를 종합해 볼 때 전단강성은 수직응력, 절리면 거칠기 및 절리면의 풍화상태에 좌우된다고 할 수 있다.

본 연구에서는 인공절리 및 자연절리의 거칠기에

따른 일면 직접전단시험을 실시하여 위와 같은 연구 결과를 얻었으나 충분한 시험을 하였다고 볼 수는 없다. 특히, 자연절리를 가진 암석에 대한 더욱 많은 연구가 필요하며, 큰 수직하중을 받는 암석에서의 전단파괴에 대한 분야도 더욱 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단 1990년 목적기초연구 “지하암반내 에너지 비축기지 건설을 위한 지반공학적인 연구”의 일부이다. 연구비를 지원해 준 한국과학재단에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 1) Barton N.R., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, Vol. 7, pp. 287-332.
- 2) Barton N.R., 1976, The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 13, pp. 255-279.
- 3) Barton N.R. and Choubey V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech.*, Vol. 10, pp. 1-54.
- 4) Bandis S.C., Lumsden A.C. and Barton N.R., 1983, Fundamentals of rock joint deformation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 20, No. 6, pp. 249-268.
- 5) Hoek E. and Bray J., 1981, *Rock slope engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 83-126.
- 6) Tse R. and Cruden D.M., 1979, Estimating joint roughness coefficients. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 16, pp. 303-307.
- 7) Maerz N.H., Franklin J.A. and Bennett C.P., 1990, Joint roughness measurement using shadow profilometry. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 27, No. 5, pp. 329-343.
- 8) Ladanyi B. and Archambault G., 1970, Simulation of shear behavior of a jointed rock mass. *Proc. 11th Symp. on Rock Mechanics, AIME, New York*, pp. 105-125.
- 9) Venkatachalam G., 1985, Modelling of rock joints. *Proc. Int. Symp. on Fundamentals of Rock Joints, Björkliden, Sweden*, pp. 453-459.
- 10) Herdacia A., 1985, Direct shear tests of artificial joints. *Proc. Int. Symp. on Fundamentals of Rock Joints, Björkliden, Sweden*, pp. 123-132.
- 11) Ross-Brown D.M. and Walton G., 1975, A portable shear box for testing rock joints. *Rock Mech.* 7, pp. 129-153.
- 12) Stimpson B., 1982, A rapid field method for recording joint roughness profiles. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 19, pp. 345-346.
- 13) Patton F.D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock and related materials. Ph. D. Thesis, Geology Department, University of Illinois, Urbana, p. 282.
- 14) 김기주, 이희근, 이정인, 김재극, 1982, 불연속면을 갖는 암석의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구(제1보) - 인공적 불연속면의 방향 및 매수에 의한 영향 -, *대한광산학회지*, Vol. 19, pp. 252-259.
- 15) 김기주, 이정인, 김재극, 1983, 연약면을 갖는 암석의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구(제2보) - 자연 절리면을 갖는 이암 시료에 대하여 -, *대한광산학회지*, Vol. 20, pp. 119-125.