

절리면 전단거동의 크기효과에 관한 실험적 연구

An Experimental Study for the Scale Effects on Shear Behavior of Rock Joint

이상은*
Lee, Sang-Eun

Abstract

The scale effect of specimens on the shear behavior of joints is studied by performing direct shear tests on six different sizes in Granite. The peak and residual shear stress, shear displacement, shear stiffness, and dilation angle are measured with the different normal stress(0.29~2.65MPa) and roughness parameters. It is also shown that both the joint roughness coefficient(JRC) and the joint compression strength(JCS) reduce with increasing joint length. A series of shear tests show about 56~67% reduction in peak shear stress, and about 18~44% in residual shear stress, respectively as the contact area of joint increases from 12.25 to 361cm². Also the variation of dilation angle is 27° at normal stress of 0.29 MPa and 6° at normal stress of 2.65 MPa, respectively. The envelopes considering scale effect for JRC are made for the peak shear strength of rock joint in comparison with the Barton's equation.

Keywords : Direct shear test, Scale effect, Joint roughness coefficient, Joint compression strength

요 지

화강암 시료에서 절리면 시편의 크기효과를 연구하기 위해 6가지 크기의 인공절리 시편을 제작하여 직접전단시험을 수행하였다. 각기 다른 수직응력 0.29~2.65MPa과 절리면의 거칠기 파라미터에 대하여 최대전단응력, 잔류전단응력, 전단강성 및 팽창각이 이 연구를 위해 평가되었다. 거칠기 파라미터중 절리거칠계수(JRC)와 절리면의 압축강도(JCS)는 시편의 크기가 증가할수록 감소하였다. 시편의 절리면적이 12.25cm²에서 361cm²으로 증가할 경우 최대전단응력은 약 56~67%, 잔류전단응력은 18~44%까지 감소하였다. 또한 팽창각은 수직응력이 0.29 MPa일 때 27°, 2.65 MPa일 때 6°의 변화를 보였다. JRC 크기효과를 고려한 전단강도 관계식이 Barton의 경험식과 비교되었다.

주요어 : 직접전단시험, 크기효과, 절리거칠계수, 절리면의 압축강도

1. 서론

암반에는 다양한 불연속면이 존재하고 있으나, 그중 암반사면이나 지하공동의 안정성을 해석함에 있어서 큰 영향을 미치고 가장 많이 분포하는 것이 절리이다. 최근 절리에 관한 연구동향을 살펴보면 불연속면의 크기에 의한 전단거동 연구(Bandis 등, 1981), 암석 절리 변형의 원리(Bandis 등, 1983), 거칠기 특성(Tse와 Cruden, 1979), 접촉면적의 변화 연구(Scavia와 Zaninetti, 1997) 등 많은 연구들이 진행된 바 있다. 암석의 전단강도는 시편의 크기 및 형상에 따라 차이를 보이는데, 일반적으로 시편의 크기가 커지면 전단강도가 저하되는 것으로 알려져 있다.

절리면 전단시험에서 전단강도에 영향을 미치는 것은 단순히 전단면적만이 아니라 많은 변수들이 존재한다. 그 중 절리거칠계수(JRC), 절리면의 압축강도(JCS)는 가장 크게 영향을 미치는 요소로서 실험적으로 이미 검증된 바 있다(Bandis 등, 1981).

국내에서는 불연속면의 방향에 따른 전단강도 및 변형특성 연구(강준호, 1991), 절리면의 거칠기에 따른 전단거동(이상돈 등, 1994), 거칠기 파라미터의 비교분석 및 거동(이상돈, 1996), 주기전단하중하의 암석절리의 역학적 및 수리학적 거동(이희석, 1999), 시멘트현탁액 주입에 의한 신선한 절리암반의 역학적 특성(김태혁, 1999), 절리면 거칠기에 따른 암석의 전단거동(김대영, 2001), 암석 절리면 거칠기의 정량화에 대한 연구(천병식과 김대영, 2001), 암석 절리면 거칠기의 정량화에 따른 절리면 전단강도 모델(이인모 등, 2002), 일정수직강성 조건하의 암석절리면 전단거동(손봉기, 2005), 암석 절리면의 동적마찰거동 특성(박병기, 2005) 등의 많은 연구가 꾸준히 수행되고 있지만 크기효과에 관한 국내의 연구는 아직 부족한 실정이다.

최근에 이르기까지 각종 건설현장에 시공된 절취사면은 시공이 완료된 후나 시공중에 붕괴가 자주 발생하게 되어, 절리가 사면의 안정성에 매우 중요한 작용을 하고 있음을 인식하게 되었고, 절리면의 거동특성을 이해하기 위하여 절리면 전단시험을 수행하고 있다. 그러나 절리면 전단시험을 위한 시료의 대부분은 시추조사를 통하여 얻어진 단일코어시료에 의하여 절리면의 거동특성을 파악하여야 하는 문제점을 지니고 있다. 이러한 이유로 전단면적이 일정한 범위에 한정되기 때문에 절리

의 크기에 따른 전단거동의 영향을 조사하는 것은 대단히 어렵다.

따라서 본 연구에서는 절리의 크기에 따른 전단거동 및 전단강도의 특성을 알아보고 그 결과를 이미 발표된 경험식과 비교·검토하였다.

2. 절리에 대한 이론적 고찰

2.1 절리의 전단변형

일정한 수직응력하에서 절리의 전단변형곡선은 Goodman 등(1968)과 Jaeger(1971)에 의해 연구되어 왔다. 절리의 전단응력-전단변위 곡선은 그림 1과 같이 불룩한 형상을 보이며 거의 최대응력에 도달할 때까지 선형성을 보여준다. 일정 수직 응력하에서 전단변형곡선은 탄성, 최대응력, 소성영역으로 표현될 수 있는데, 이때 탄성영역의 경사를 전단강성(K_s)이라 한다(Goodman 등, 1968 ; Jaeger, 1971).

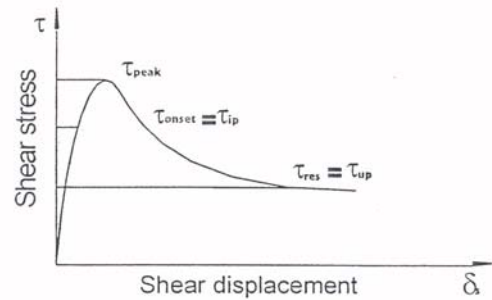


그림 1. Shear stress versus shear displacement for rock joint under constant normal stress

2.2 절리의 전단강도 경험식

Barton(1973)은 사면거동에 관한 모형연구에서 인공절리들에 대한 전단강도를 연구한 결과 식 (1)과 같이 경험식을 제시하였다.

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan(JRC \cdot \log \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_b) \quad (1)$$

JRC : 절리거칠계수(joint roughness coefficient)

JCS : 절리면의 압축강도(joint wall compressive strength)

ϕ_b : 기본마찰각, σ_n : 유효수직응력

JCS/σ_n 가 0에 가까워짐에 따라 \log 성분이 무한대로 발산하기 때문에 이 문제점을 극복하기 위하여 유효마찰각의 최대치를 70° 라고 제안하였다. 즉 $[JRC \cdot \log(JCS/\sigma_n) + \phi_b] \leq 70^\circ$ 이다.

2.3 거칠기 파라미터

거칠기를 나타내는 파라미터 중 절리의 거동을 잘 나타내는 6가지 파라미터가 있다. 즉 절리면의 평균기울기와 절리면의 평균거칠각, 절리면 기울기의 평방평균값과 거칠각의 평방평균값, 평균절리면 높이에 대한 표준편차, 절리 표면을 따라 측정된 절리면의 총길기와 절리면에 투영한 직선거리로 표현한 거칠기 형상지수, 절리면 기울기의 표준편차와 절리거칠각의 표준편차, 물체의 이상적인 위상으로부터 곡선이나 표면 및 체적 등의 변화정도를 표시하는 프랙탈 차원함수 등으로 설명될 수 있다(강준호, 1991).

2.4 절리면의 압축강도

절리면을 구성하는 암석에 대한 일축압축강도로서 정의되며, 전단강도에 영향을 주는 암석의 성질을 나타내는 지표로서 중요하다. 측정방법은 암석 벽면이 풍화되어 있거나 충전물이 있는 경우 슈미트 해머의 반발치로부터 식 (2)와 같이 절리면의 압축강도를 구한다(Pistone, 1990).

$$\log_{10}(JCS) = 0.00088\rho R + 1.01 \quad (2)$$

ρ : 건조밀도(kN/m^3),
 R : 슈미트 해머 반발치

본 연구에서는 신선한 암석에 대한 인공절리이므로 일축압축강도를 절리면의 압축강도값으로 보기로 한다.

3. 시료, 실험장치 및 방법

3.1 시편의 제작

재료 자체의 균질성과 이방성 등을 고려하여 입도상 조립질에 속하며 담회색을 띠고 있는 포천화강암을 이용하였다. 이 시편에 대한 기본적 물성치는 표 1과 같다.

시편의 제작은 크기효과를 연구하기 위해 표 2와 같이 6가지 형태로 제작하였으며, 그림 2는 그 형상을 나타낸 것이다.

인공절리를 만들기 위해 그림 3과 같이 인공절리 발생장치를 제작하였다. 이 기구는 췌기모양을 하고 있으며 열처리된 특수강이 시료의 위아래에서 가압되면서 시료 중앙선에 인장파괴를 일으켜 인공절리를 만들도록 제작된 것이다.

표 1. Physical properties of Pocheon granite

Density (kN/m^3)	Absorption (%)	Elastic wave velocity (m/sec)	Compressive strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
26.30	0.38	4300	190	60.10	0.23

표 2. The Dimension of specimens for scale effect test

Specimen	Height (cm)	Width (cm)	Length (cm)	Contact area (cm^2)
GS - 1	2.5	3.5	3.5	12.25
GS - 2	2.5	5.0	5.0	25.00
GS - 3	2.5	8.0	8.0	64.00
GS - 4	4.5	11.5	11.5	132.25
GS - 5	4.5	15.0	15.0	225.00
GS - 6	4.5	19.0	19.0	361.00

3.2 실험장치

절리면의 크기가 11.5cm 이하되는 시편은 그림 4와 같은 전단시험장치를 사용하였다. 이 시험기는 전단하중을 가압할 때는 유압램을 이용하는데 디지털게이지가 장착된 유압잭을 사용하도록 되어 있다. 절리시편을 고정시키는 전단상자는 그림 5와 같다. 그리고 이 보조기구를 수용하는 상부전단상자와 하부전단상자의 내부규격은 폭과 길이가 120mm, 높이는 50mm로 되어 있다. 전단하중을 가하는 형태는 유압램이 상부전단상자를 미는 방식으로 되어 있으며, 하부전단상자와 유압램이 부착된 가압면 사이는 직경이 20mm인 4개의 봉으로 연결하여 전단하중을 지지하도록 되어 있다. 수직하중은 최대가압하중이 20톤인 미국 United사에서 제작된 SFM Model을 이용하였다. 전단하중은 유압램을 이용하여 수동으로 가압하였고 전단변위 0.1mm 마다 유압램의 앞에 설치되어 있는 하중계를 이용하여 측정하였다. 전단시험중에 수직방향으로의 변위를 구속하지 않고 마찰저항을 줄이기 위해 롤러 베어링이 부착되어 있으며, 허용할 수 있는 총 전단변위는 25mm이다.

한편 절리면의 크기가 15cm 이상되는 시편은 그림 5와 같은 전단상자를 이용할 수 없기 때문에 그림 6과 같이 특수 전단시험장치를 제작하여 사용하였다. 전단상자와 시료와의 간극에는 특수 고강도의 시멘트 모르타르를 이용하여 설치하였으며, 수직하중과 전단하중은 아날로그 하중계가 부착된 유압램을 이용하여 수동으로 제어하였다. 이때 전단하중은 전단변위 0.1mm마다 아날로그 하중계를 이용하여 측정하였다.

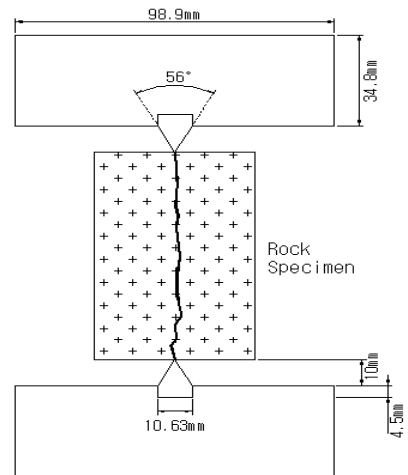


그림 3. A view of the fracturing in specimens for shear test

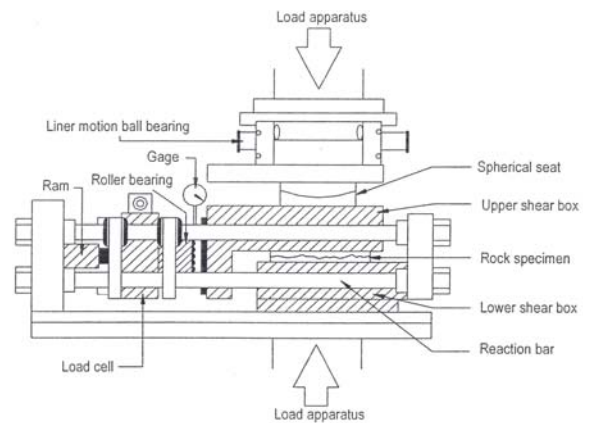


그림 4. Schematic diagram of direct shear testing apparatus (specimen size : under 11.5cm)

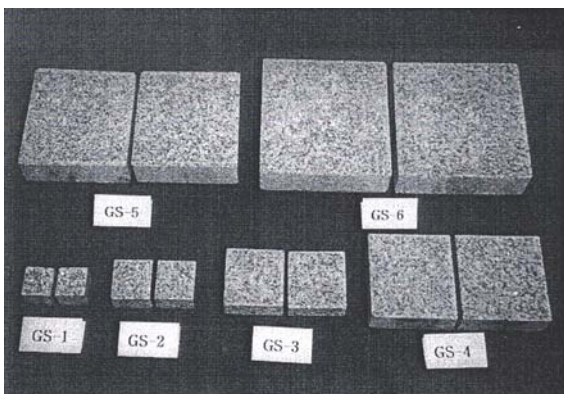


그림 2. A view of fractured specimens for scale effect test

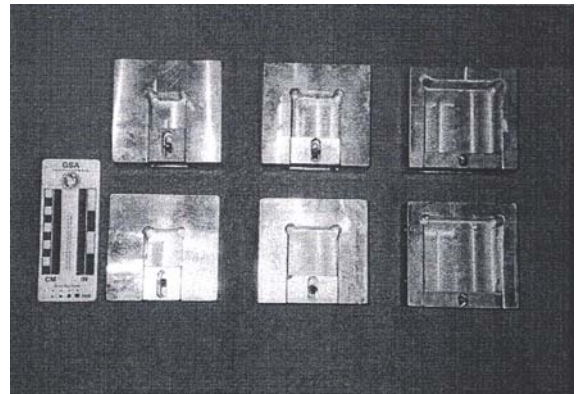


그림 5. The view of shear box

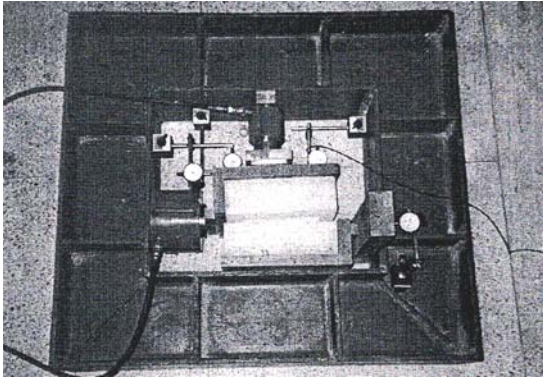


그림 6. The view of direct shear test equipment (specimen size : over 15cm)

3.3 실험방법

3.3.1 절리거칠계수의 측정

본 연구에서 JRC 측정은 KYOWA 사 제품의 DT-20D 모델의 다이얼게이지를 이용하였는데, 이것은 기복차가 20mm까지 측정이 가능하며 0.02mm 내의 오차에서 측정이 가능하다. 데이터 로거(data logger) 역시 KYOWA 제품의 UCAM-20PC 모델로서 한 채널당 80ms마다 1개의 자료를 읽을 수 있으며, 디지털 신호로 변환하여 개인용 컴퓨터로 저장된다.

절리거칠계수 측정에 대한 여러 가지 거칠기 파라미터와 JRC와의 상관관계를 분석하였는데, 그 중 Z_2 파라미터가 가장 깊은 상관관계가 있는 것으로 알려져 있으므로 본 연구에서도 식 (3)과 같이 Z_2 파라미터를 적용하였다(Tse와 Cruden, 1979).

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

- Z_2 : 절리면 기울기의 평방평균값
- L : 절리면에 투영된 직선길이
- dx : 수평방향의 미소증분
- dy : 수직방향의 미소증분

다음 Z_2 값을 식 (4)에 대입하여 절리거칠계수를 산출하였는데, 이때 절리표면의 측정간격은 1.27mm로 하였다. 그 이유는 Tse와 Cruden이 식 (4)를 적용하는데 있어 가장 적합한 간격이라고 제의했기 때문이다.

$$JRC = 32.20 + 32.47 \log(Z_2) \quad (4)$$

본 연구에는 가능한 동일한 절리거칠계수값이 필요하므로 130개의 시료를 제작하여 인공절리를 발생시킨 후 전단방향으로 3등분하여 3회 측정하고 산술평균한 후 절리거칠계수를 결정하였다. 이때 JRC 값은 12.0~14.0 범위의 절리거칠계수를 갖는 72개의 시편을 선택하여 절리면 시험을 실시하였다.

3.3.2 절리면 전단시험

인공절리 시편에 대한 직접전단시험은 다음 순서에 의해 실시하였다. 첫째, 시편의 가로 및 세로 길이를 측정하여 전단면적을 구하고 필요한 수직하중을 구한다. 이때 수직하중은 일축압축강도의 0.15~1.4% 수준에 해당하는 0.29, 0.49, 0.88, 1.37, 1.96, 2.65MPa을 적용한다. 둘째, 절리시편을 하부 전단상자에 넣고 가압면을 정확히 일치시킨 다음 상부전단상자를 시편위에 올려놓는다. 셋째, 전단하중을 가하는 동안 수직하중을 주어진 값의 범위로 일정하게 유지시킨다. 넷째, 전단시험시 전단변위가 시간에 따라 일정하게 증가하도록 하중속도는 0.5kgf/min 정도로 일정하게 유지시킨다. 다섯째, 전단하중 가압은 최대전단응력이 발생한 후 전단응력이 5% 이내의 범위에서 일정하게 발생하면 잔류전단응력에 이른 것으로 판단하여 시험을 중지한다.

4. 실험결과 및 고찰

시편의 크기에 따른 직접전단시험의 결과는 표 3과 같으며, 전단강도, 전단강성, 팽창각, 그리고 JCS와 팽창각의 관계로부터 식 (1)로부터 역산하여 JRC의 변화를 비교, 검토하였다.

4.1 전단응력

본 실험은 국제암반역학회(ISRM)의 시험법에 의하여 최대전단강도는 전단변위-전단응력곡선에서 최대전단응력으로 구하며, 잔류전단강도는 전단응력이 최대값을 지난 이후에 전단변위가 계속되는 동안 5% 이내의 범위에서 일정하게 나타나는 잔류전단응력값을 구하였다.

표 3. Results of direct shear test on rock joint

Specimen No.	Joint roughness coefficient	Normal stress (MPa)	Peak shear stress (MPa)	Residual shear stress (MPa)	Shear stiffness (GPa/m)	Dilation angle (°)	
GS-1	1	12.4	0.29	0.75	0.21	6.4	35.4
	2	12.7	0.49	1.56	0.57	12.7	34.4
	3	12.8	0.88	1.89	0.96	20.0	22.3
	4	12.6	1.37	3.01	1.48	37.2	20.6
	5	12.1	1.96	5.00	2.03	61.8	14.9
	6	12.8	2.65	6.03	2.61	118.2	8.9
	7	12.6	0.29	0.83	0.25	6.3	38.1
	8	12.9	0.49	1.74	0.55	13.7	39.8
	9	12.2	0.88	2.04	0.94	15.7	33.3
	10	12.8	1.37	3.46	1.53	26.3	31.5
	11	12.5	1.96	5.12	2.21	108.3	21.5
	12	12.1	2.65	6.34	2.57	122.4	18.1
GS-2	1	12.0	0.29	0.63	0.22	5.5	32.3
	2	12.3	0.49	0.97	0.41	10.4	27.0
	3	12.1	0.88	2.10	0.62	25.6	20.2
	4	12.4	1.37	2.53	0.98	32.6	21.9
	5	12.8	1.96	3.64	1.65	55.0	14.9
	6	12.2	2.65	4.87	2.12	74.0	8.2
	7	12.4	0.29	0.57	0.21	4.2	21.3
	8	12.8	0.49	0.84	0.39	11.0	21.9
	9	12.3	0.88	1.71	0.61	13.9	20.1
	10	12.1	1.37	2.23	0.83	23.9	15.5
	11	12.4	1.96	3.41	1.24	45.6	13.3
	12	12.5	2.65	4.36	2.13	81.0	7.9
GS-3	1	12.3	0.29	0.43	0.18	3.6	23.5
	2	12.6	0.49	0.85	0.21	8.5	25.7
	3	12.7	0.88	1.32	0.57	16.7	18.8
	4	13.1	1.37	2.40	1.10	23.9	16.1
	5	13.8	1.96	2.89	1.25	44.1	10.1
	6	12.1	2.65	3.51	1.82	55.3	9.5
	7	12.1	0.29	0.40	0.20	2.9	20.1
	8	12.6	0.49	0.65	0.27	7.5	20.6
	9	12.9	0.88	1.62	0.63	18.5	14.3
	10	12.0	1.37	2.11	1.21	35.4	12.4
	11	12.3	1.96	2.67	1.47	39.3	9.9
	12	12.2	2.65	3.51	1.82	66.4	7.9

표 3. Continued

Specimen No.	Joint roughness coefficient	Normal stress (MPa)	Peak shear stress (MPa)	Residual shear stress (MPa)	Shear stiffness (GPa/m)	Dilation angle (°)	
GS-4	1	12.3	0.29	0.37	0.18	2.6	23.8
	2	12.8	0.49	0.61	0.25	4.7	17.0
	3	12.4	0.88	1.10	0.60	9.9	12.2
	4	12.9	1.37	1.58	1.00	16.0	10.8
GS-5	5	12.5	1.96	2.32	1.27	27.6	9.4
	6	12.2	2.65	3.00	1.75	48.9	6.5
	7	12.3	0.29	0.35	0.17	4.6	21.8
	8	12.2	0.49	0.51	0.27	5.5	19.2
	9	12.1	0.88	1.20	0.56	11.9	14.0
	10	12.1	1.37	1.68	1.12	17.6	17.7
	11	12.7	1.96	2.33	1.28	26.9	8.7
	12	12.9	2.65	2.90	1.18	43.9	6.5
GS-5	1	12.4	0.29	0.30	0.18	2.0	15.0
	2	12.4	0.49	0.41	0.25	2.7	14.4
	3	12.4	0.88	1.00	0.49	7.5	13.3
	4	12.9	1.37	1.43	1.10	13.0	6.2
	5	12.5	1.96	2.21	1.23	19.0	10.0
GS-5	6	12.5	2.65	2.50	1.64	25.0	6.9
	7	12.0	0.29	0.33	0.16	2.7	17.0
	8	12.7	0.49	0.52	0.32	3.1	15.0
	9	12.7	0.88	0.73	0.52	4.5	13.5
	10	12.1	1.37	1.30	0.97	8.2	10.7
	11	12.2	1.96	2.10	1.32	16.2	9.4
	12	12.9	2.65	2.50	1.68	29.0	5.6
GS-6	1	12.2	0.29	0.35	0.17	2.4	11.0
	2	12.5	0.49	0.58	0.33	4.7	10.4
	3	12.4	0.88	1.10	0.51	8.8	8.0
	4	11.6	1.37	1.60	0.99	12.2	6.7
	5	11.9	1.96	2.00	1.25	17.9	6.6
	6	12.3	2.65	2.56	1.64	26.5	4.7
	7	12.0	0.29	0.31	0.16	1.8	11.2
	8	12.1	0.49	0.50	0.32	3.1	10.4
	9	12.2	0.88	0.90	0.71	6.5	10.2
	10	12.2	1.37	1.30	1.02	9.6	8.0
	11	12.3	1.96	1.71	1.26	16.0	7.6
	12	12.2	2.65	2.60	1.69	23.2	3.1

표 3의 결과중 절리면적이 25cm²인 GS-2 시편의 전단응력과 전단변위와의 관계를 나타내면 그림 7

과 같다. 수직하중이 작을수록 최대전단응력에 도달하는 전단변위가 비교적 크게 나타나는 것을

관찰할 수 있다. 이것은 수직응력이 작으면 절리면 돌출부의 파괴가 얇은 깊이로 일어나기 때문인 것으로 여겨진다.

각각의 수직응력에 따른 절리면의 크기변화에 대한 최대전단응력의 변화를 나타내면 그림 8과 같다. 0.29~2.65 MPa의 수직응력에서 제일 작은 시편(GS-1)을 기준으로 할 때 최대전단응력의 감소율은 56~67%이다. 이 결과는 Bandis 등(1981)의 거친 입자를 갖는 사암의 층리면 결과와 유사한 감소율을 나타내는데, 이것은 절리 돌출부의 손상과 파괴에 있어서 시편의 크기가 증가할수록 미세한 거칠면의 영향을 덜 받기 때문인 것으로 여겨진다.

한편, 각 수직응력에 따라 절리 크기의 변화에 대한 잔류전단강도의 변화를 나타내면 그림 9와 같다. GS-1 시편을 기준으로 할 때 잔류전단응력의 감소율은 18~44%이다. 이와 같은 현상은 전단 변형이 발생함에 따라 절리면 파쇄물들의 영향이 절리면 크기가 작은 시편에 더 큰 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.

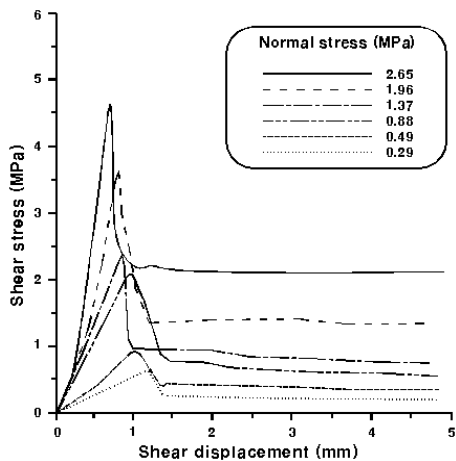


그림 7. Shear stress-shear displacement behavior of rock joint in GS-2 specimen

4.2 전단강성

전단강성은 단위 전단변형을 일으키는데 필요한 전단응력이므로 전단응력-전단변위 곡선에서 탄성영역의 기울기로 표시된다. 본 실험에서는 전단응력이 최대값에 도달하기 전의 40~60% 응력에서 비교적 선형인 구간의 전단응력/전단변위의 비로써 결정하였다.

각 수직응력별 크기변화에 따른 전단강성을 나타내면 그림 10과 같다. 제일 작은 시편 GS-1을 기준으로 할 때 전단강성의 감소율은 65~79%이

며, 수직응력이 증가할수록 그 변화율은 비교적 크게 변화하였다.

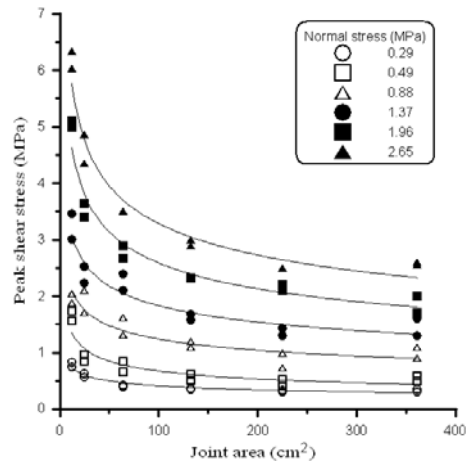


그림 8. Variation of peak shear stress with joint contact area

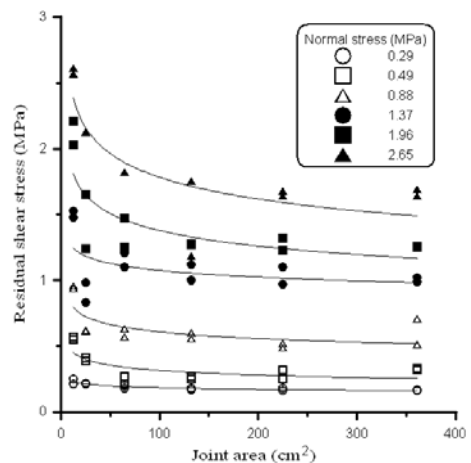


그림 9. Variation of residual shear stress with joint contact area

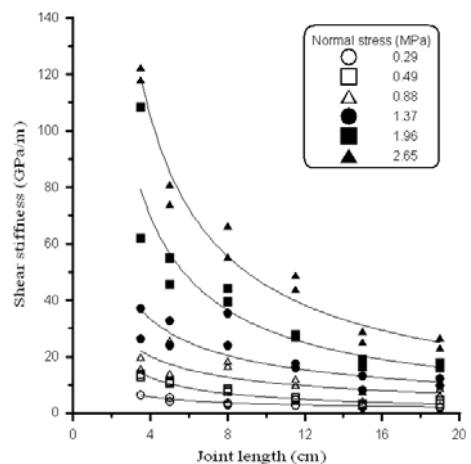


그림 10. Variation of shear stiffness with joint length

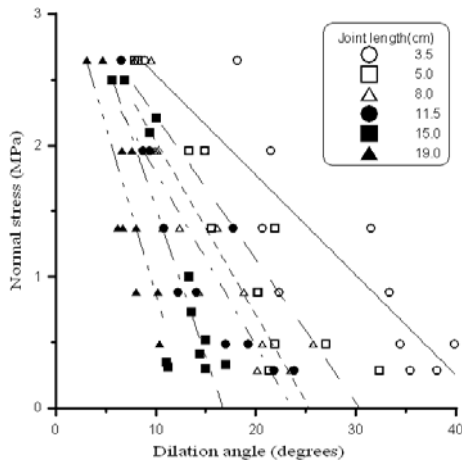


그림 11. Variation of dilation angle with normal stress

4.3 팽창각

팽창각은 팽창이 발생하기 시작한 전단변위 이후부터 최대전단강도에 도달하기까지의 전단변위구간에서 전단변위-수직변위 곡선에 그은 접선의 기울기로써 구하였다. 각 수직응력에 따라 절리크기의 변화에 대한 팽창각의 변화를 그래프로 나타내면 그림 11과 같다. 회귀분석 결과 수직응력이 크면 시편의 크기에 따른 팽창각의 변화는 6° 정도로 작으며, 수직응력이 작으면 팽창각의 변화는 27° 정도로 크게 나타나는데, 이것은 최대 전단강도에 도달시 절리크기가 큰 시편일수록 작고 가파른 돌출부들이 균질화된 성분으로 간주되어 전단 거동을 하기 때문으로 판단된다.

4.4 JRC 및 JCS에 대한 크기효과

JCS가 190 MPa일 때 절리면의 JRC에 대한 크기효과를 식 (1)로부터 역산하여 회귀분석 결과 그림 12와 같이 JRC는 시편의 길이에 따라 최대 11까지 변하는데, Bandis 등(1981)에 의한 거친 입자를 갖는 사암의 층리면 결과와 유사한 특성을 보이고 있다. Bandis(1990) 제안식의 형태를 이용하여 그 결과를 나타내면 식 (5)와 같다.

$$JRC_n = JRC_0 \left[\frac{L_n}{L_0} \right]^{-0.032JRC_0} \quad (5)$$

JRC_n : 시편의 크기효과를 고려한 JRC 값

JRC_0 : 시편의 길이가 3.5cm일 때 수정 JRC 값 (17.25)

L_n : 시편의 길이 (cm)

L_0 : 기준이 되는 가장 작은 시편의 길이 (3.5cm)

위 식은 시편의 길이에 따라 회귀분석하여 구한 JRC의 크기효과를 표현한 것으로서 그림 12의 실선은 실험값이고 점선은 Bandis(1990) 실험값을 나타낸 것이다. Bandis 식보다 화강암 시편의 실험값에 의한 식이 큰 감소지수를 나타내는데, 이것은 Bandis의 실험값이 JRC 값을 동일하게 중정석, 알루미늄, 모래로 혼합하여 제작한 모형시편의 절리면 전단시험 결과인 반면 이 연구는 실내에서 화강암 시료에 인공적으로 인장절리를 발생시켜 제작한 시편을 이용하였기 때문으로 여겨진다. 즉 재료자체의 균질성, 실험조건 및 Asperity의 파괴 정도에 따른 크기효과가 반영된 것으로 추정된다.

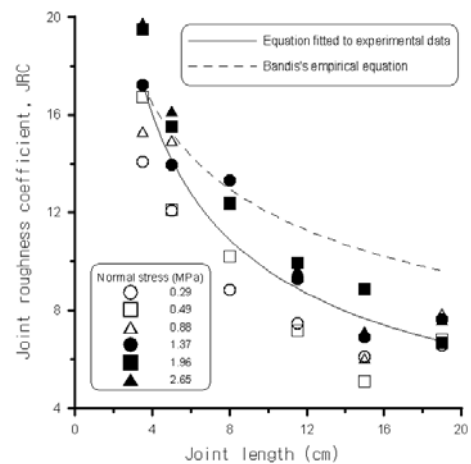


그림 12. Variation of joint roughness coefficient with joint length at constant JCS of 190 MPa

평균 JRC 값이 12.4일 때 식 (1)로부터 역산하여 구한 JCS 값의 도해는 그림 13과 같다. 절리 길이 8.0cm 이하에서는 그 값의 범위가 넓으며, 절리 길이가 크게 될 수록 JCS 값이 점차 상실되는데, 이 결과는 Lama와 Gonano(1976)에 의한 연구결과와 잘 일치하였다.

한편 절리 길이에 따라 JCS 값의 범위가 넓기 때문에 본 연구에서는 JCS 값이 일정할 때 JRC 값의 변화로만 크기효과를 검토하였다.

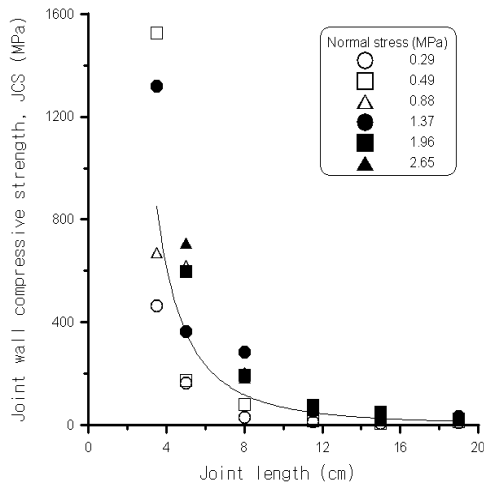


그림 13. Variation of joint wall compressive strength with joint length at constant JRC of 12.4

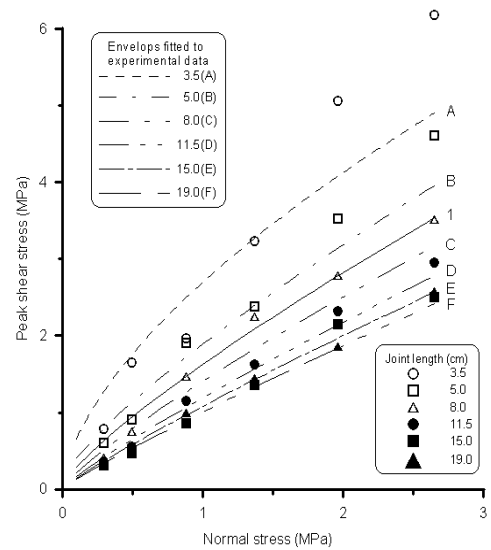
4.5 실험결과와 고찰

본 연구에서는 인공적으로 제작한 화강암 절리 시편에 대하여 6단계의 수직응력에 따른 전단특성을 검토하였다. 그 결과 시편의 크기가 증가할수록 전단응력, 전단강성, 팽창각, JRC 및 JCS 값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

절리면 전단시험에 관한 경험식은 식 (1)에서 언급한 Barton(1973)의 경험식을 토대로 실험결과를 고찰하기로 한다. 전단시험 결과와 JRC 크기효과를 대입한 Barton의 파괴포락선과 본 연구에서 고려한 JRC 12.4와 JCS 190 MPa를 대입한 Barton의 경험식을 표현하면 그림 14와 같다.

Barton 식에 190 MPa의 JCS 값과 30.1° 의 기본 마찰각 ϕ_0 를 대입하여 구한 값과 실제 실험값을 비교하면 절리면의 크기가 8cm 이하일 때 Barton의 경험식보다 큰 값을 보이고 있다. 또한 시편의 크기가 작을수록 실험값과 JRC 크기효과가 반영된 Barton 식과는 큰 차이를 보이지만 시편의 크기가 클수록 그 차이는 작아지는 것이 관찰되었다. 이것은 시편의 크기가 작으면 그림 13과 같이 평균 JRC값이 12.4일 때 JCS 값이 넓은 분포를 보이기 때문인 것으로 생각된다.

본 연구는 실제 암석인 화강암 시편에 인공절리를 형성하여 전단시험을 수행하였기 때문에, 중정석, 알루미나, 모래, 물 등을 혼합하여 인공절리로 제작한 Bandis(1990)의 실험 데이터와는 큰 차이를 보이고 있다. 다만 유사한 JRC를 갖는 암석시편



1 : Barton's empirical equation having average JRC of 12.4 at JCS of 190 MPa

그림 14. Theoretical envelopes fitted to experimental data, using scale-reduced values of JRC at constant JCS of 190 MPa

을 선별하여 절리 크기별 전단특성의 변화를 규명하는데 초점을 두었다.

향후 다양한 암종과 JRC 값에 따른 크기효과에 대하여 보다 많은 실험적 고찰이 요구된다.

5. 결론

본 연구에서는 포천화강암을 대상으로 절리면의 역학적 특성인 전단강도, 전단강성, 마찰각, 팽창각 및 JRC에 대한 크기효과를 알아보기 위해 6가지 크기의 시편을 제작하고 직접전단시험을 실시하였다. 시험 후 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 절리면의 크기에 따른 최대전단응력의 감소율은 절리면의 길이를 3.5cm로 기준하였을 때 56~67%이고, 잔류전단응력은 18~44%이다. 이때 전단강성의 변화율은 65~79%이며 수직응력이 증가할수록 그 변화는 뚜렷하였다.
- (2) 팽창각의 변화는 수직응력이 0.29 MPa일 때 27° , 수직응력이 2.65 MPa일 때는 6° 정도로 그 변화가 작았다. 또한 시편의 크기가 작을수록 큰 변화율을 보였다.

- (3) JCS 값이 190 MPa일 때 Barton 식으로부터 역산하여 구한 JRC 값의 변화는 시편의 크기에 따라 JRC 값이 11정도 감소하였다. 비교하였을 때 시편의 크기가 증가할수록 그 차이는 작게 나타났다.
- (4) 실험값을 JRC 크기효과가 반영된 Barton 식과 (접수일 : 2005. 10. 14. 심사완료일 : 2006. 5. 11.)

참고문헌

1. 강준호(1991), 불연속면의 방향에 따른 암석의 전단강도 및 변형특성에 관한 연구. 석사학위논문, 서울대학교.
2. 김대영(2001), 절리면 거칠기에 따른 암석의 전단거동. 박사학위논문, 한양대학교.
3. 김태혁(1999), 시멘트현탁액 주입에 의한 신선한 절리암반의 역학적 특성 변화에 관한 연구. 박사학위논문, 서울대학교.
4. 박병기(2005), 암석 절리면의 동적마찰거동 특성. 박사학위논문, 서울대학교.
5. 손봉기(2005), 일정수직강성 조건에서의 암석절리면 전단거동에 관한 연구. 박사학위논문, 서울대학교.
6. 이상돈 등(1994), 절리면의 거칠기에 따른 암석 절리의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구. 터널과 지하공간, 한국암반역학회, Vol. 4, pp. 261~273.
7. 이상돈(1996), 절리형상의 정량적 측정을 통한 각종 거칠기 피라미터의 비교분석 및 전단거동해석. 박사학위논문, 서울대학교. pp. 6~14.
8. 이인모 등(2002), 암석 절리면 거칠기의 정량화에 따른 절리면 전단강도 모델. 한국지반공학회논문집, 제18권, 제4호, pp. 1~10.
9. 이희석(1999), 주기전단 하중하의 암석절리의 역학적 및 수리학적 거동 연구. 박사학위논문, 서울대학교.
10. 천병식, 김대영(2001), 암석 절리면 거칠기의 정량화에 대한 연구. 한국지반공학회논문집, 제17권, 제1호, pp. 85~97.
11. Bandis, S. C., Lumsden, A. C. & Barton, N. R.(1981), Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp. 1~21.
12. Bandis, S. C., Lumsden, A. C. & Barton, N. R.(1983), Fundamentals of rock joint deformation. Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 20, No. 6, pp. 249~263.
13. Bandis S. C.(1990), Scale effects in the strength and deformability of rocks and rock joints. Proc., 1st International Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 6191 126 5, pp. 59~76.
14. Barton, N.(1973), Review of a new shear-strength criterion for rock joints. Engng. Geol. 7, pp. 287~332.
15. Goodman, R. E., Taylor, R. L. & Brekke, T. L.(1968), A model for the mechanics of joint rock. J. of Soil Mech & Foundations Division, ASCE, pp. 637~659.
16. Jaeger, J. C.(1971), Friction of rock and stability of rock slopes. Geotechnique 21, NO. 2, pp. 97~134.
17. Lama R. D. & Conano L. P.(1976), Size-effect considerations in the assesment of mechanical properties of rock masses. Proc. 2nd Symp. on Rock Mechanics, Dhanbad.
18. Pistone, R. S.(1990), Scale effect in the shear strength of rock joints. Proc., 1st International Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Balkema, Rotterdam. ISBN 90 6191 126 5, pp. 201~206.
19. Scavia, F. Re, C. & Zaninetti, A.(1997), Variation in contact areas of rock joint surfaces as a function of scale. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 34:3-4, pp. 254.
20. Tse, R. & Cruden, D. M.(1979), Estimating joint roughness coefficients. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 16, pp. 303~307.