

절리면 거칠기에 의한 전단강도 이방성

Anisotropy of shear strength according to roughness in joint surface

이 창 훈(Chang Hoon Lee)

(주)경창지오컨설팅

정 교 철(Gyo Cheol Jeong)*

안동대학교 지구환경과학과

요약 / ABSTRACT

절리면에서의 이방성 및 전단거동을 정량적으로 파악하기 위한 목적으로 암석 절리면에 석고 몰드를 제작한 후 시멘트 몰타르를 이용하여 복제된 절리모델에 직접전단시험을 실시하였다. 시험 전 암석 시험편의 절리면에 대하여 기계식 단면측정기를 이용하여 절리면의 거칠기를 측정하고 이에 대한 결과를 수치화하였다. 수치화를 통하여 제시된 좌표값을 통하여 거칠기의 통계적 변수와 프랙탈 차원을 구하였다. 대부분의 절리모형에서, 낮은 수직응력 수준에서 전단변위에 따른 전단응력의 값이 지속되거나 상승하였다. 이는 자연상태의 절리면에 대하여 형성된 절리모형의 경우 단일 거칠기 특성에 의존되지 않음을 나타낸다. 거칠기에 대한 여러 통계적 변수에 의해 제시된 단면의 특성과 전단강도와의 관계는 일정하지 않으며, 대부분 낮은 상관관계를 가지고 있음이 확인되었다. JRC를 이용한 Barton의 경험식과 실제 실험에서 주어진 값을 비교한 결과 Barton의 경험식은 거칠기에 대한 이방성의 영향을 고려하기 어려우며, 절리면에 대한 특성을 파악함에 있어서 적절하지 않은 것으로 판단된다. 프랙탈 차원의 경우 동일한 단면에 대하여 이방성을 고려할 수 있었으며, 이를 이용한 경험식을 사용한 결과 시험결과와 유사한 이방성을 인지할 수 있었다.

주요어 : 절리, 거칠기, 전단강도, 이방성, 프랙탈 차원

In order to quantify the anisotropic properties of rock included joints and shear behavior in joint surface, the mold is produced for rock joint surface using gypsum plaster and performed for replicated joint models made of cement mortar. Rock sample is measured using mechanical profilometer before testing and their result is expressed quantitatively. The statistical parameters and the fractal dimension by fractal theory for roughness is investigated its coordinate value for numerical process. The shear strength to the shear displacement in low level normal stress is maintained or increased in most joint models. Their results present that this relationship is depended several roughness properties in joint model for natural rock joint. The relationship between

* Corresponding author

the shear strength and the properties for profiles estimated by some statistical parameter in roughness has the low correlation and is not constant. The result between the data for direct shear test and using Barton's equation, Barton's equation has not the effectiveness for the effect of anisotropy and has not suitable to recognizing the properties for joint surface. It means that *JRC* has not the properties of anisotropic rock surface.

The fractal dimension is well correlated with the data of direct shear test than those of *JRC*. New experimental formulae using fractal dimension is comported with the anisotropic properties for direct shear test.

Key words : Joint, Roughness, Shear strength, Anisotropy, Fractal dimension

서 언

암반불연속면 중에서 절리는 대부분 과거의 영구 전단변위가 거의 일어나지 않은 암석에서 면 방향의 관상형 불연속면을 지시하는 용어로서 대부분의 불연속면 거동의 기초가 되고 있다(Priest, 1993). 불연속성 암반의 경우에는 암반이 가지는 연속체적 역학적 특성에 의한 영향보다 암반 내에 존재하는 절리면에 의한 역학적 특성에 의존하는 경향이 크다. 따라서 이러한 암반 내의 불연속면에 대한 특성을 이해하기 위한 연구는 최근 국내외에서 매우 중요하게 다루어지고 있다. 국내에서의 연구로는 절리에서의 전단거동 특성과 역학적 파라미터들 간의 상관성(이종욱 외, 1993), 절리면의 거칠기에 따른 암석 절리의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구(이상돈 외, 1994) 등의 절리면 특성에 관한 연구가 수행되었으며, 국외에서는 불연속면의 크기에 의한 전단 거동을 규명한 연구(Barton, 1976), 직접전단시험에 의한 최대 전단강도의 이방성(Huang and Doong, 1990), 절리면 특성 중에서 거칠기(roughness) 측정에 관한 연구(Tse and Cruden, 1979) 등이 수행되었다.

절리면에 대한 전단거동 특성에서 절리면의 거칠기는 매우 중요한 역할을 한다. 수직응력에 대한 전단강도와와의 관계에 대하여 Patton(1966)은 절리면의 거칠기의 각을 파라미터로 하는 i (roughness angle)를 제안하였으며, Barton(1973)은 *JRC*(절리거칠기계수, Joint Roughness Coefficient)와 *JCS*(절리면 압축강도, Joint wall Compressive Strength)라는 파라미터를 제안하고

이러한 절리면의 거칠기가 수직응력에 대한 전단강도에 영향을 가짐을 규명하였으며, 또한 *JRC*의 10가지 기준형상(Barton's standard roughness profiles)을 제안하여 현장 및 실험실에서 절리면의 거칠기의 영향을 조사할 수 있도록 하였다. 하지만 기준형상을 통한 거칠기의 조사 및 해석은 조사자의 주관성이 개입될 수 있으며, 이로 인하여 절리면의 전단거동 특성을 파악하는데 있어서 자료의 유효성이 낮아지며 적절한 평가를 취하기 어렵게 되어있다. 이후 전단거동 특성에 영향을 미치는 절리면의 거칠기에 대하여 이를 정량화하기 위한 연구들이 수행되었으며, 이러한 거칠기의 정도를 지시하는 여러 통계적 파라미터(Z_2 , Z_3 , R_p , A_i 등) 및 프랙탈 차원(Fractal dimension) 등이 제안되었다. 최근 절리 특성 연구의 주요 관심사는 절리면의 거칠기의 영향을 정량화하는데 있다. 절리성 암반의 역학적인 특성 및 전단거동 특성을 예측하기 위하여 단일 절리에서의 정확한 분석이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 절리면의 전단거동 특성을 파악하기 위하여 일정한 역학적 특성을 가지는 시멘트 몰타르를 사용한 절리 모형을 제작하였으며, 절리면에 대한 이방성을 고려하기 위하여 3 방향으로 구분하여 거칠기의 측정 및 직접전단 시험을 실시하였다. 측정된 거칠기에 대하여 거칠기의 정도를 지시하는 *JRC* 및 통계적인 파라미터, 프랙탈 이론을 통한 프랙탈 차원을 구하였으며, 특히 동일 시험편에 대하여 각 방향에 대한 전단시험자료와 이러한 파라미터와의 관계를 지시하는 경험식과 실제 전단시험을 통한 값을 비

교합으로서 절리면의 거칠기에 따른 절리면의 거동특성을 규명하였다. 또한 직접전단시험을 통한 절리 모형에 대한 절리면 전단강도와 Barton (1973)이 제시한 경험식 및 프랙탈 이론에 근거된 거칠기-길이 측정법에 의하여 획득된 프랙탈 차원을 사용한 Kulatilake et al.(1995, 1997, 1998) Kulatilake and Um(1999)에 의하여 제시된 경험식을 비교하였으며, 이에 대한 전단거동 특성과 거칠기 파라미터와의 상관관계의 타당성을 비교 분석하였다.

절리모형 제작 및 시험

절리모형 제작

본 연구에서는 복제된 절리면을 대상으로 각 절리면에 대한 전단거동 특성을 비교 및 검토하기 위하여 먼저 절리면이 포함된 3종의 암석 시험편에 대하여 시멘트 몰타르를 이용하여 절리면을 포함하는 공시체를 제작하였다. 먼저 암석 시험편에 Fig.1과 같이 폴리에틸렌(두께 0.3mm)을 이용하여 시험편 주위를 둘러 주형틀을 만든 다음 석

Table 2. Main feature of the model material joint preparation for the three samples

Samples	Rock type	Core diameter (mm)	Model mixture used plaster:sand:water by weight	Sand used #20:#30:#40 by weight	Cured conditions
A	Quartz phophylite	53-54	1 : 1.5 : 0.9	1 : 1.67 : 0.67	Temperature = 20-25°C
B					
C					

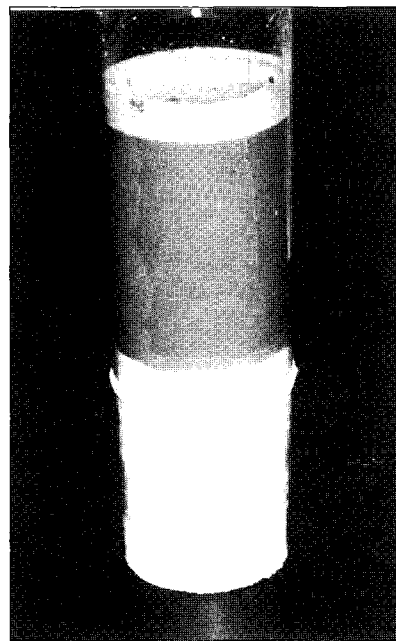
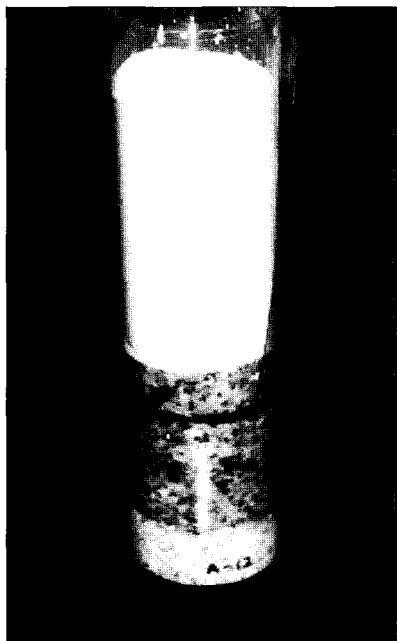
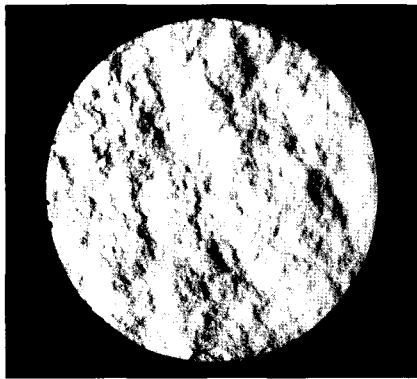
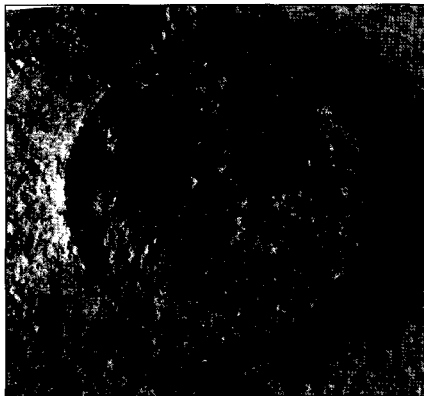


Fig. 1. A view of specimen preparation

고(gypsum plaster)를 이용하여 절리면 거칠기 주형을 제작하였다. 약 2~6 시간 경과 후 석고 주형을 암석 시험편으로부터 분리하여 앞에서와 동일한 방법으로 주형틀에 시멘트 몰타르를 주입하여 절리모형 공시체를 제작하였다. 일정한 역학적 특성을 유지하기 위하여 절리모형에 사용된 시멘트 몰타르의 비는 Table 1과 같다.



(a) gypsum mold



(b) model joint surface

Fig. 2. A view of gypsum mold and model joint surface

주입 후 약 3일이 경과한 후에 주형틀을 제거하였으며, 절리모형은 공기 중에서 10일 정도 양생하였다. 동일 절리면의 거칠기에 대한 이방성을 검토하기 위하여 각 방향에 따라 12종의 절리 모형을 제작하였으며 총 36종의 절리면을 포함한 절리 모형이 제작되었다(Fig.2). 본 연구에 사용된 시험편은 시추된 암석 코어(NX)에 준하여 제작되

었다. 이렇게 제작된 절리 모형에 직접전단시험을 수행하기 위하여 암석 코어 절단기를 이용하여 전단시험 상자에 넣을 수 있는 크기로 절단하였으며, 남은 시험편의 부분들은 재료인 시멘트 몰타르로 형성된 절리 모형에 대한 역학적인 성질을 파악하는데 사용되어졌다.

시험

시험에 사용된 시험기기는 영국 ELE사(ELE International Ltd)에서 제작한 최대하중용량 50kN의 유압식 전단시험기(Model Number EL77-1030)을 사용하였다(Fig.3).

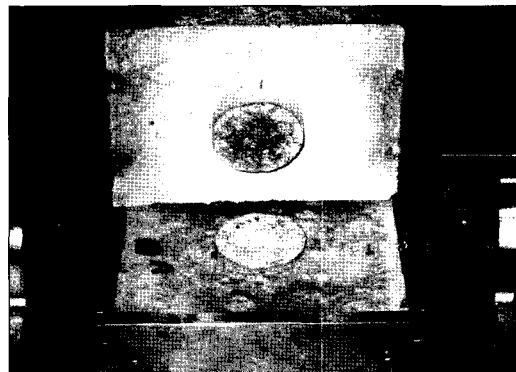


Fig. 3. A view of molded specimens in the inner shear box

시험은 다단계 시험법(multi-stage test)을 적용하였다. 시험편에 대한 수직하중은 하부 전단상자에 있는 고정압과 수직램을 이용하여 수동펌프로 가하였으며, 전단변형이 일어나는 동안 수직하중은 $\pm 2\sim 5\%$ 의 범위 내로 일정하게 유지하였다. 이는 전단변형이 발생함에 의하여 절리 표면의 거칠기에 의한 팽창과 수직변위가 발생하므로, 이로 인하여 수직응력이 증가하게 된다. 이 경우 수동펌프로 압력을 조절하였다. 계속된 전단변위의 발생에서 전단하중의 변화가 없을 경우 산류전단 강도에 이른 것으로 판단하여 가압을 중지하였다. 전단변위와 전단하중과의 관계곡선은 전단시험기의 다이얼 게이지와 각 수동펌프에 장착된 Bourdon tube gauge를 판독하여 기록하였으며, 각 시험편에 대한 전단면적을 고려하여 각 응력을 환산하였다.

절리면 거칠기에 의한 전단강도 이방성

제작된 절리모형에서 각 방향에 대한 거칠기를 측정하였다. 먼저 절리면에 대하여 기준 단면을 설정하고 이에 대하여 120° 간격(총 3방향)으로 단면을 설정하였다(Fig.4). 거칠기의 측정장치로는 레이저를 이용한 광학적 단면측정기(optical profilometer)와 기계적 단면측정기(mechanical profilometer)가 있으며, 광학적 단면측정기의 경우에는 미세한 측정간격을 가지며 정확하다는 장점이 있으나, 많은 노이즈를 포함한다는 단점과 실제 야외에서의 측정 상 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 실제 실내 및 야외에서 측정 가능한

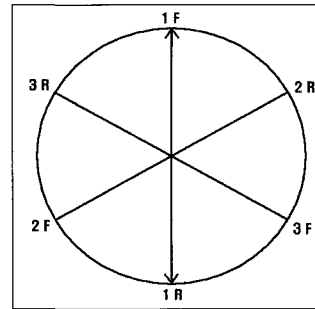


Fig. 4. A view of direction of shear test in the specimen

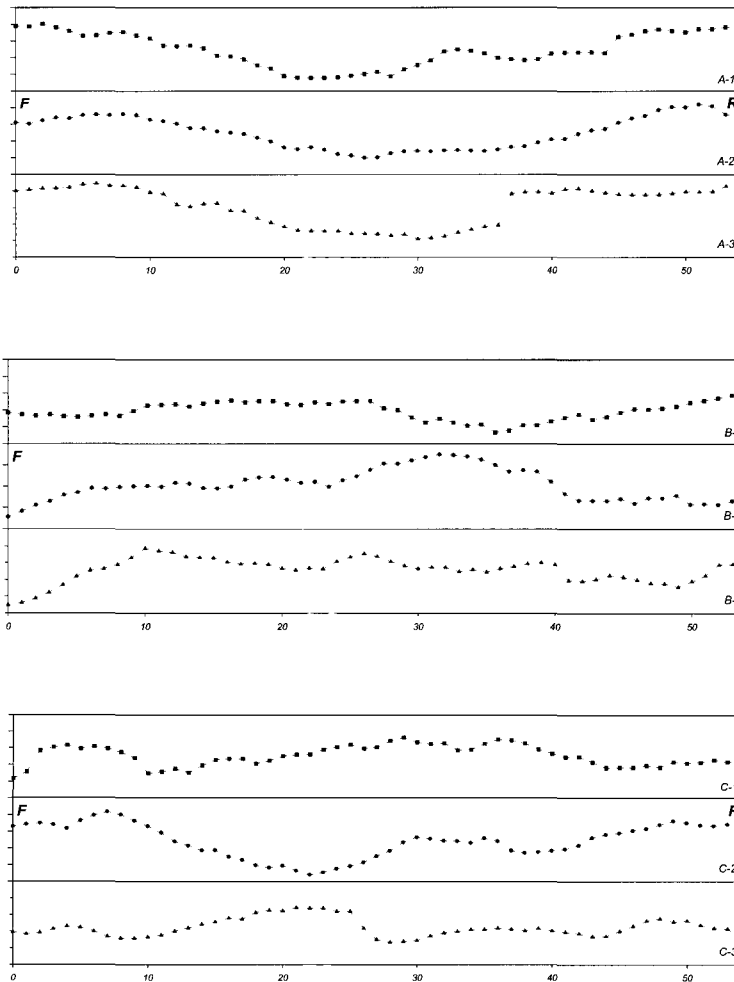


Fig. 5. Numerical roughness profiles for each roughness profiles

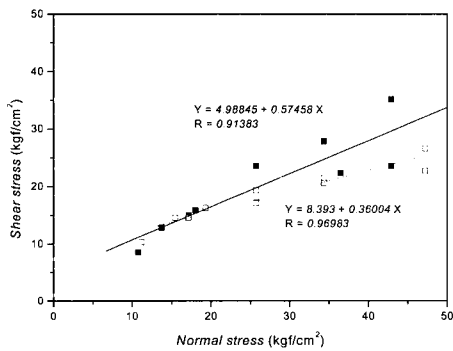
기계적 단면측정기를 사용하였으며, 이는 실제 측정방법이 용이하다는 장점에 의하여 선택되었다. 사용된 기계적 단면측정기는 일본의 Fuji Tool사의 Contour Gage 150-6"이 사용되었으며, 이의 횡적측정폭은 1 mm이며, 거칠기에 대한 최대측정 거리는 150 mm이다.

절리면의 거칠기 측정 시 측정방향은 코아 형태의 시험편의 축에 수직으로 측정하였으며, 측정된 단면은 스캐닝을 통한 작업으로 이미지화 하였다. 거칠기 단면의 이미지에 대하여 Dig X-Y를 사용하여 x와 y에 대한 좌표값으로 수치화하였다. 수치화된 자료에 대하여 단면측정기가 가지는 횡적 측정간격의 제한성(1mm)에 의해 횡좌표는 고정된

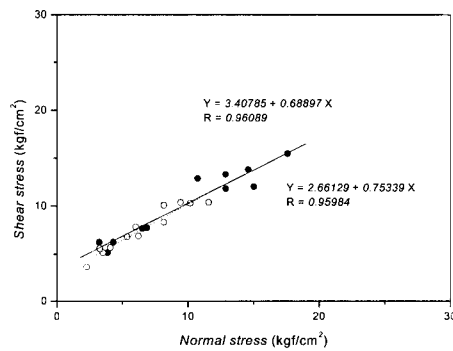
값으로 보정하였으며 종적 측정치는 기계적 단면측정기가 가지는 아날로그식 측정에 의해 측정 제한이 없으므로 0.001 mm까지 분석하였다. 측정된 단면에 대하여 단면이 가지는 경사를 제거하기 위하여 초기의 단계에서, 절리면의 양 혹은 음의 기울기를 가지는 선형 함수에 의해 표현이 가능함으로 거칠기 단면의 수치 자료를 통한 회귀 분석을 실시하였으며, 거칠기 단면의 수치자료에 회귀분석에서 얻어진 경사값을 제거한 좌표값을 최종적으로 구하였다.

전단시험 결과

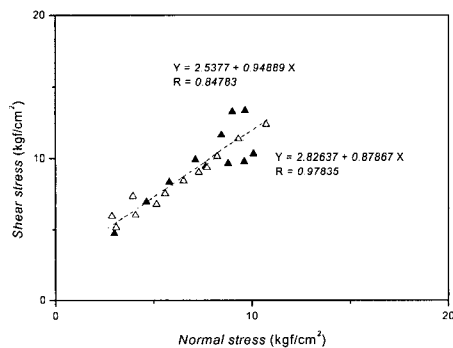
직접전단시험에 사용한 절리 모형에 사용된 시



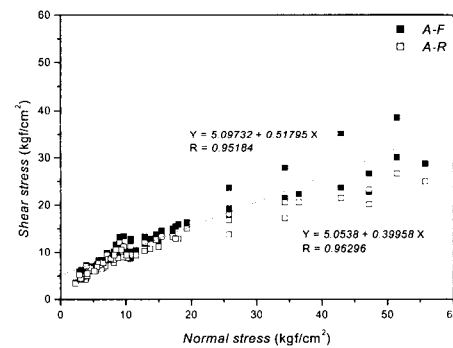
(a) A-1



(b) A-2



(c) A-3



(d) A

Fig. 6. The relationship between the peak shear strength and normal stress measured from the different directions in each roughness profile of the A-type cement mortar joint model.

절리면 거칠기에 의한 전단강도 이방성

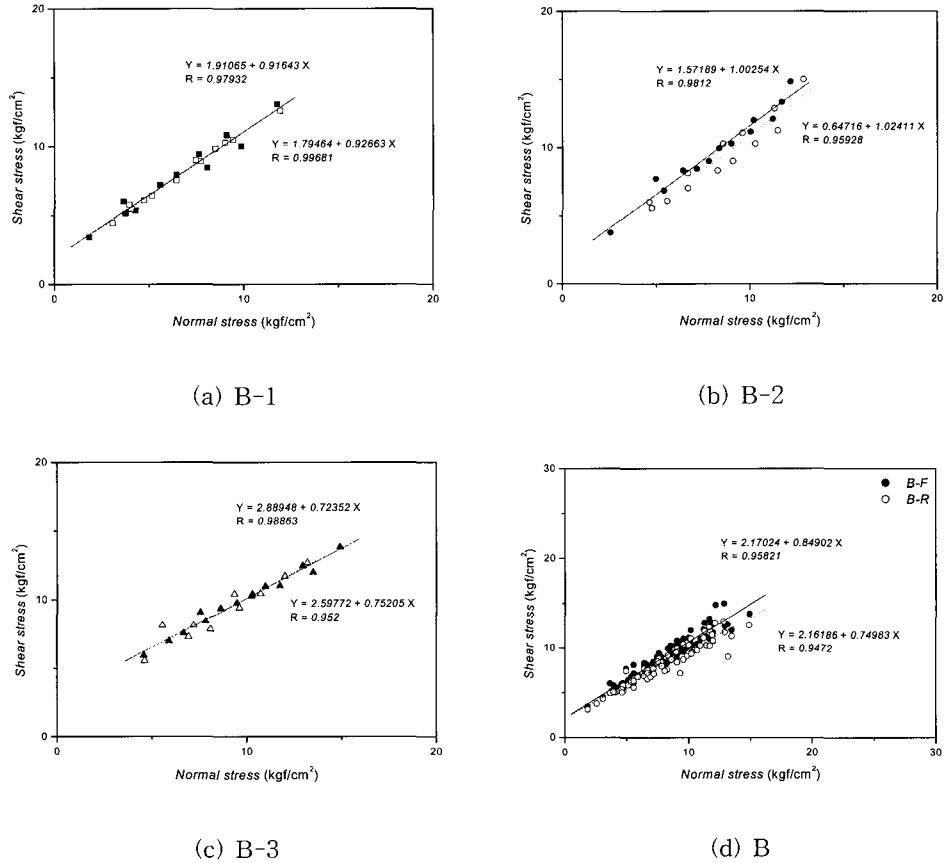
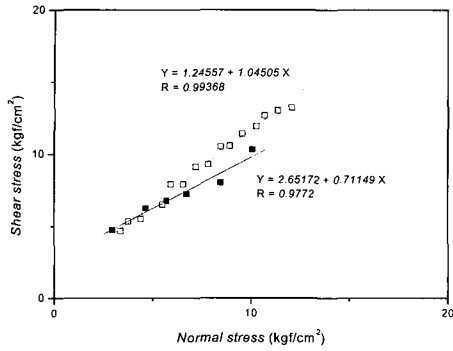


Fig. 7. The relationship between the peak shear strength and normal stress measured from the different directions in each roughness profile of the B-type cement mortar joint model.

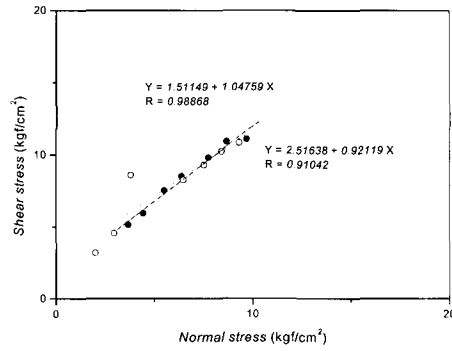
멘트 몰타르에 대하여 일축압축강도시험을 실시하였다. 총 6개의 시험 결과에 대한 강도값을 평균한 결과 시멘트 몰타르의 일축압축강도는 254.825 kgf/cm²이었다. Barton(1973)의 경험식을 계산하는 경우에서, 절리면 압축강도(JCS, joint wall compressive strength)는 암석의 일축압축강도를 사용하나, 절리면의 풍화의 진행여부에 따라 암석의 일축강도에 비하여 현저하게 낮아지므로, 이에 대하여 슈미트햄머를 이용하여 절리면의 압축강도를 계산하여야 한다. 본 시험에서는 시멘트 몰타르를 이용한 절리 모형이며, 이는 풍화되지 않은 암석의 절리면에 준하므로 위에서 제시된 시멘트 몰타르의 일축압축강도를 절리면 압축 강도로

사용하였다.

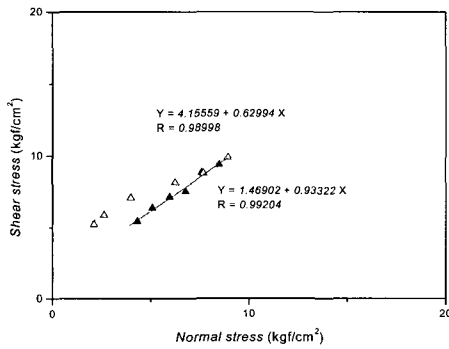
시멘트 몰타르를 이용한 절리모형에 대한 이방성의 정도와 이에 해당하는 전단강도와와의 관계를 파악하기 위하여 각 절리면에 대하여 3방향, 즉 120° 간격에 해당하는 방향으로 구분하였다. 동일한 거칠기에서도 이방성을 가지므로, 이에 대한 전단강도 변화를 측정하기 위하여 각 방향에 대하여 양방향으로 구분하였으며, 총 6방향(60° 간격)에 대하여 전단시험을 실시하였다. Fig. 6, 7, 8는 A, B, C 공시체의 절리 모형에 대하여 직접전단시험을 한 결과이다. 다단계 시험으로 실시한 경우에 수직응력의 범위는 3.0~50.0 kgf/cm²으로 측정되었으며, 마찰각은 36°~47°로 측정되었다.



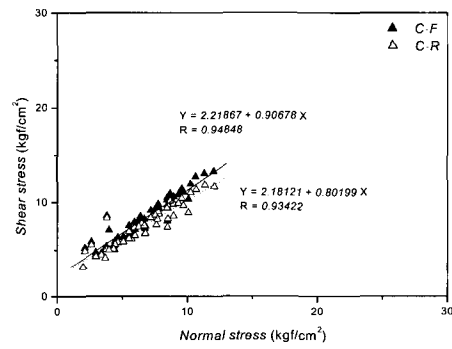
(a) C-1



(b) C-2



(c) C-3



(d) C

Fig. 8. The relationship between the peak shear strength and normal stress measured from the different directions in each roughness profile of the C-type cement mortar joint model.

동일한 절리를 가지는 시험편 각 방향에서 거칠기에 대한 전, 후 방향의 전단시험에 대한 마찰각의 편차는 공시체 A의 경우 $1.5^{\circ} \sim 1.7^{\circ}$ 이며, B는 $0.2^{\circ} \sim 0.7^{\circ}$, C는 $2.6^{\circ} \sim 7.6^{\circ}$ 로 계산된다. 이는 각 절리면의 *JRC*의 값에 대한 범위와 비교에서 상관성을 가지지 않으며, 동일 거칠기에 대하여 이방성을 가지지 않는 *JRC*에 기인한 것으로 여겨진다.

Fig.9는 공시체 A의 제 1 방향($0^{\circ} \sim 180^{\circ}$)에 대하여 수직응력에 대한 전단강도를 제시한 그래프이다. 실험결과에 의하면 전 및 후 방향에서 전체적인 경향은 수직응력의 증가에 따라 전단강도의

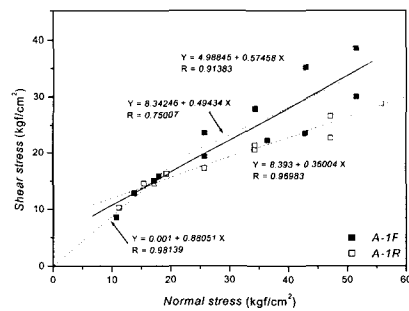


Fig. 9. Relationship between the peak shear strength and normal stress for wide range of normal stresses.

증가량이 감소하는 형태로 나타나고 있다. 일축압축강도의 1/10인 15~20 kgf/cm²을 경계로 하여 낮은 수직응력에서는 회귀분석에 의한 마찰각보다 높은 마찰각을 나타내며, 높은 수직응력에서는 낮은 마찰각을 나타내고 있다. 이러한 경향은 전방향 및 후방향에 있어서 수직응력에 대한 전단강도의 그래프에서와 비슷한 양상을 나타내고 있다. 이는 전단시험에서, 수직응력의 범위를 일축압축강도에 비하여 상당히 넓은 범위를 사용하므로 인하여 낮은 수직응력 상태에서는 거칠기의 영향이 상당히 크게 작용하여 전단강도의 값이 급속하게 증가하게 되며, 수직응력의 증가에 따라 이러한 거칠기의 국부적인 파괴에 의하여 이후 수직응력에 대한 전단강도가 낮아지는 것으로 생각된다.

거칠기 파라미터

절리 거칠기 상수(JRC)

절리 단면에 대한 거칠기를 정량화하는 파라미터로서 JRC와 통계적 파라미터, 프랙탈 차원(D) 등이 제안되었다. Barton(1973)은 1차원적인 개념에서 거칠기를 정량화하는 JRC를 제안하였으며, JRC에 대한 근사값을 구하기 위하여 두 가지의 방법을 제안하였다. 첫번째 방법은, 자연상태의 절리에 대한 거칠기 단면을 Barton(1973)에 의해 제안된 10가지 기준형상에 시각적인 비교를 함으로써 구하는 것이다. 이들 기준형상은 JRC의 값이 가장 부드러운 거칠기로부터 가장 거친 거칠기까지의 단계를 0에서 20 사이의 값으로 제안하였다. 이러한 시각적인 비교 방법은 조사자들에 의한 주관성이 나타나며, 이로 인하여 결과 치에 있어서 신뢰도가 떨어지게 된다. 다른 방법은, Barton에 의하여 제안된 최대전단강도에 대한 경험식을 사용한 것과 절리면에서의 기본마찰각, 수직응력, 절리면 강도에 대한 역해석을 통하여 JRC를 계산하기 위한 목적으로 경사시험을 실시하는 것이다. Hsiung et al.(1994)은 응회암의 절리에 대한 직접전단시험의 결과와 경사시험을 통하여 JRC를 추정하기 위하여 위의 역해석 과정을 사용하였다. 응회암 절리에서 직접전단시험에 대한 경사시험의 파라미터($JRC_{\text{tilt test}}/JRC_{\text{direct shear test}}$)에 있

어서 0.5의 평균값을 가지며, 0.36~0.76 사이의 범위를 가진다고 제시하였다.

통계적 파라미터

거칠기를 정량화하기 위하여 평균 절리면 높이에 대한 평균값(centerline average value)과 평균 자승값(mean square value), 거칠기 단면 제곱의 평방평균값(root mean square value, RMS value), 거칠기 단면의 일차 미분값 제곱의 평균값(mean square of the first derivative, Z_1), 일차 미분값 제곱의 평방평균값(RMS of the first derivative, Z_2), 이차 미분값 제곱의 평방평균값(RMS of the second derivative, Z_3), 거칠기의 방향성을 나타낼 수 있는 거리의 초과분의 백분율(percentage excess of distance, Z_4), 자기상관함수(auto-correlation function), 스펙트럼밀도함수(spectral density function), 구조함수(structure function, SF), 거칠기형상지수(roughness profile index, R_p), 절리면의 평균 거칠기값(micro average i angle, A_i) 등과 같은 통계적 파라미터들이 다수의 연구에서 시도되었다. 이 중에서 Myers(1962)에 의한 파라미터에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\tan A_i = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dy}{dx} \right) dx = \frac{1}{L} \sum y_{i+1} - y_i \quad (1)$$

$$Z_2 = \left[\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} \\ = \left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

이들 중에서 절리면의 평균 거칠기값과 거칠기 단면의 일차 미분값 제곱의 평방평균값, 이차미분값 제곱의 평방평균값은 절리면 기율기와 관련된 변수들이다. 이들 변수들의 일부는 개념적으로 동일하며 종속 성분이다. 평균 절리면 높이에 대한 평균값과 평균 자승값, 거칠기 단면 제곱의 평방평균값은 종속성 파라미터로서 단일 변수로서 고려되며, 거칠기 단면의 일차 미분값 제곱의 평균

값과 일차 미분값 제곱의 평방평균값, 거칠기형상 지수, 절리면의 평균 거칠기값 등은 위와는 다른 변수로 정의된다. 자기상관함수와 스펙트럼밀도함수는 또 다른 종속성 변수로 고려된다. 다른 종속적 변수들 간에는 개념적인 차이가 존재한다. 평균 절리면 높이에 대한 평균과 평균 자승값, 거칠기형상지수는 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} &\text{centerline average value} \\ &= \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} |y| dx = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i| \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &\text{mean square value} \\ &= \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} y^2 dx = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$R_p = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2)^{\frac{1}{2}}}{L} \quad (5)$$

Barton(1973)의 기준형상의 해석에 의하여, Tse and Cruden(1979)은 구조함수(SF)와 JRC 및 Z_2 와 JRC 사이의 상호관계를 제안하였으며, 특히 Z_2 는 무차원이므로, 단위를 가지는 구조함수보다 더 유용하다는 언급을 하였다. Maerz et al.(1990)는 JRC와 거칠기단면지수 사이의 상관관계를 분석하였다. Tse and Cruden(1979)은 여러 가지 거칠기 변수와 JRC와의 상관관계를 연구한 결과 Z_2 와 가장 상관성이 높음을 제시하였으며 이의 관계식은 다음과 같다.

$$JRC = 32.20 + 32.47 \log Z_2 \quad (6)$$

이들 통계적인 변수들 중에서 거칠기를 정량화 하는데 어떤 것이 유용한가를 평가하는 문헌은 많지 않다. 현재로는 Z_2 가 통계적 변수들 중에서 가장 유용한 것으로 알려져 있으며, 이는 단일의 통계적 변수로서 암석 절리의 거칠기를 정량화 하는데 매우 중요하다. 다만 Z_2 가 정류성 거칠기를 획득하는데 유용한 변수라고 할지라도, 이는 비정류성 거칠기의 획득에서의 유용성은 가지지 않는다.

프랙탈 차원

본 연구에서는 프랙탈 차원을 구하는 방법(roughness-length method, line-scaling method, variogram method, spectral method) 중에서 거칠기-길이 측정법(Roughness-Length method)을 사용하여 구하였다. 자기상사성 프랙탈 단면에 대하여, 관계식은 다음과 같다(Kulatilake and Um, 1999)

$$\begin{aligned} s(w) &= Aw^H \\ \log s(w) &= \log A + H \log w \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서, $s(w)$ 는 단면 높이의 표준편차, w 는 단면의 간격 길이, H 는 Hurst exponent ($0 < H < 1$), A 는 비례상수이다. 변수 H 와 A 는 각각 $\log w$ 에 대한 $\log s(w)$ 의 자료들의 선형회귀에 의한 기울기와 y 절편으로 계산되었다. 위 식에서 $w=1$ 이면 $s(w)=A$ 이다. A 와 H 에 대하여 정확한 측정치를 얻기 위한 목적으로 고려된 거칠기 단면의 자료에 대하여 식에서 주어진 선형회귀의 적용성을 확인하는 것이 필요하다. $s(w)$ 와 w 사이의 상관관계에서, $s(w)$ 는 길이 w 의 창에서 조사점에 일치된 선형에서 단면 높이의 잔차에 대한 RMS(root mean square) 값과 같이 계산되었다. RMS 값은 RMS방법(Malinverno, 1990)에 의하여 구할 수 있다. 이 방법에서, 수준값의 표준편차는 단면을 따라서 일련의 폭(창의 폭)에 대하여 계산한다. 각 창에 있어서, 창 내의 점들에 대하여 이들이 가지는 경사도를 제거하는데 회귀를 사용한다. 이러한 선에 대한 점들의 고도에 대한 차이가 계산되면, 다음의 식에 따라서 특정한 길이의 모든 창에 대하여 RMS 값을 평가게 된다.

$$\begin{aligned} \Delta_i &= \frac{1}{m_i - 2} \sum_{j \in w} (z_j - z)^2 \\ RMS(w) &= \frac{1}{n_w} \sum_{i=1}^{n_w} \sqrt{\Delta_i} \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서, m_i 는 길이 w 인 i 번째 창에서의 점의 수, z_j 는 회귀선으로부터의 잔차, z 는 i 번째

창인 w_i 에서의 평균 잔차, n_w 는 길이 w 인 창 의 전체 수이다. m_i 의 값은 경사를 제거한 선의 기울기와 절편을 생성하기 위하여 사용된 자유도 2 에 대하여 수정하기 위하여 2를 감한다. z 의 값은 선형회귀에서 0이나, 만약 w_i 에서 경사를 제거한 선을 형성하는데 있어서 단순종점회귀(simple endpoint regression)을 사용하는 경우에는 고려되어야 한다. 본 연구에서, 선형회귀는 어떤 창의 폭도 0이 되는 평균잔차를 의미하는 경사도를 제거한 선의 기울기와 절편을 계산하기 위하여 사용하였다. w_{i+1} 창에서 단면의 $i+1$ 에서 시작하였으므로, 각 창 크기에 대하여 다수의 창들이 생성되었다. 프랙탈 차원은 다수의 창 크기에 대한 log 창의 크기에 대하여 위의 식으로부터 얻어진 log RMS 값을 표기하는 RMS방법으로 계산되었다. 또한 선형회귀의 결과에 대한 기울기 β 는 다음의 식으로부터 프랙탈 차원과 관련된다.

$$D = 2 - \beta \tag{9}$$

여기에서, D 는 프랙탈 차원이다.

거칠기 파라미터의 측정

본 연구에서는 절리면의 파라미터 중 Z_2 와 A_i , R_p 의 3가지 파라미터를 구하였으며, Tse and Cruden(1979)이 제안한 방법에 의해 Z_2 와 JRC 의 상관관계를 이용하여 JRC 를 구하였다. 프랙탈 차원의 경우 절리-길이 측정법을 사용하여 구하였다. 거칠기의 파라미터를 구하기 위하여 위에서 제시된 바와 같이 절리면의 각 방향에서의 거칠기에 대한 수치화된 자료를 얻었다.

거칠기 파라미터의 경우 측정간격에 따라 의존성을 나타내므로 해석에 사용된 측정범위는 기계식 단면측정기의 최소측정범위인 1mm 간격을 사용하였다. 실제 절리면과 비교하여 기계식 단면측정기에 의하여 측정된 단면을 비교한 결과 측정 간격보다 작은 미세한 거칠기 요소는 실제 진단

Table 2. Calculated roughness parameters, fractal dimension and other parameter for each roughness profile

Parameter Sample No	R_p	Z_2	$A_i(^{\circ})$	JRC	Fractal dimension			
					D	Regression line		
						H	K_d	
A-1	F	1.027	0.243867	9.852066	12.301	1.372	0.637	0.046
	R					1.483	0.517	0.069
A-2	F	1.015	0.18071	8.278875	8.056	1.244	0.765	0.028
	R					1.471	0.529	0.046
A-3	F	1.036	0.314415	8.8673	15.884	1.177	0.823	0.034
	R					1.375	0.625	0.058
B-1	F	1.017	0.188143	8.590518	8.643	1.638	0.362	0.067
	R					1.834	0.166	0.108
B-2	F	1.020	0.206239	9.15067	9.924	1.372	0.628	0.045
	R					1.380	0.620	0.044
B-3	F	1.035	0.276742	12.19614	14.084	1.214	0.786	0.043
	R					1.420	0.580	0.066
C-1	F	1.041	0.304862	12.42391	15.449	1.473	0.563	0.075
	R					1.659	0.341	0.140
C-2	F	1.031	0.256177	12.26648	12.995	1.230	0.770	0.044
	R					1.123	0.877	0.036
C-3	F	1.042	0.314598	11.49772	15.892	1.264	0.736	0.051
	R					1.378	0.613	0.064

강도에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. Table 2는 전체 공시체에 대한 거칠기 변수들의 계산치를 보여주고 있다. Fig. 10은 y축을 각 변수로 하여 JRC와의 관계를 나타낸 그래프이다.

각 변수의 경우, Z_2 를 포함하여 A_i , R_p 중에서 전 및 후방향에 대하여 양방향 동일한 값을 보여주고 있다. 이에 비해 프랙탈 차원의 경우 양방향에 대하여 다른 값으로 보여주고 있으므로 절리면의 거칠기에 대하여 정량적으로 이방성을 검토할 수 있다고 생각된다. 하지만 측정방법에 있어서 크로스오버 길이를 적용하지 않으므로 인하여 이에 대한 정확성에 대한 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 측정기기의 한계에 의해 이러한 크로스오버 길이를 적용할 수 없으므로, 이에 대한 개념은 제외한 프랙탈 차원에 대하여 고려했다.

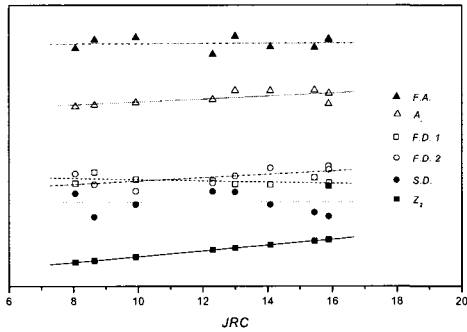


Fig. 10. Comparison between roughness parameter and JRC. Where, FA is friction angle from direct shear test; FD1 is the fractal dimension using line-scaling method; FD2 is the fractal dimension using roughness-length method; SD is standard deviation of roughness profiles; Z_2 is RMS of the first derivative on joint profile.

절리면의 전단강도

Patton(1966)의 이단 선형모델은 낮은 수직응력에서 슬라이딩에 따른 마찰과 높은 수직응력에서 돌출부의 전단파괴 등 두 가지 형태로 완전 분리된다는 가정에 근거하고 있다. 그러나 평면 절리를 제외한 대부분의 절리에서 수직응력과 최대 전단강도에 대한 관계는 직선이 아니라 곡선의

형태로 제시된다는 것이 여러 경험식들에 의해 제시되었다.

Barton의 경험식

Barton(1973)은 암석 시료에 대하여 인장균열을 유도하여 얻은 다수의 모형절리들에 대한 전단시험을 실시하여 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (10)$$

여기에서, JRC는 절리 거칠기 계수(joint roughness coefficient), JCS는 절리면 압축 강도(joint wall compressive strength), σ_n 은 유효수직응력(effective normal stress), ϕ_r 은 잔류마찰각(residual friction angle)이다. 절리면이 풍화되지 않은 경우에는 절리면 압축강도는 암석의 일축압축강도와 일치하지만, 절리면이 풍화되어 있는 경우에는 슈미트해머(Schmidt hammer)를 이용하여 간접적으로 측정해야 하며, 절리면이 풍화되거나 충전물이 있는 경우에 기본마찰각 대신 잔류마찰각을 사용해야 한다. 잔류 마찰각을 구하는 관계식은 다음과 같다.

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 \cdot \frac{R}{r} \quad (11)$$

여기에서, ϕ_r 은 잔류 마찰각, ϕ_b 는 기본 마찰각, R 은 절리면에서 슈미트해머의 반발치, r 은 무결암에서 슈미트해머의 반발치이다. 이는 수직응력에 대한 잔류전단강도를 그래프로 나타내어 수직응력과 전단강도의 선형관계로부터 기울기에 의해 얻을 수 있다. 위의 식은 Patton(1966)의 경험식에 있는 i 에 대하여 이를 수직응력의 함수로 변화한 것이며, 절리면의 거칠기 및 재료에 대하여 자체의 마찰각, 수직응력, 절리면의 압축강도를 모두 고려하고 있다.

Kulatilake et al.의 경험식

Kulatilake et al.(1995)는 낮은 수직응력 하에서 암석의 최대전단강도(τ) 이론에 의한 경험식을

제안하였으며, 이는 다음과 같다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi + a(SRP) \left[\log_{10} \left(\frac{\sigma_I}{\sigma} \right) \right]^d + I \right) \quad (12)$$

여기에서, a, c, d 는 실험 자료에 대한 회귀해석을 통하여 얻어지는 계수, SRP 는 정류성 거칠기 계수(stationary roughness parameter)이며, σ_n 은 수직응력, ϕ 는 마찰각, I 는 전체적인 방향각(global trend angle), σ_I/σ 는 Kulatilake *et al.*(1995)에 의해 정의되는 변수이다.

위에서 언급한 바와 같이 프랙탈 차원만으로 거칠기를 정량화할 수 없으므로, 다른 변수와의 조

합에 의하여 거칠기를 평가하였다. 그는 Barton(1973)의 기준형상을 대상으로 하여 $\log L - \log r$ 에 의해 결정되는 a 와 D 를 조합한 변수와 JRC 와의 상관관계를 분석하였다. 그 결과 SRP 변수의 경우 JRC 와의 높은 상관성이 있음을 제안하였다. 이러한 파라미터는 정류성 거칠기에서 계산된 a 와 D 를 사용하므로 정류성 거칠기에서만 적용 가능하다. JRC 를 사용하는 Barton(1973)의 경험식과 비교하기 위하여 Kulatilake *et al.*(1995)의 경험식을 사용하여 보았다. 이는 JRC 의 거칠기에 대한 이방성을 고려하기 어려우므로, 프랙탈 차원을 통하여 이러한 이방성을 포함하는 정량적인 거칠기 평가를 하기 위함이다. 본 연구에서는 Kulatilake *et al.*(1995)에 의해 제시된 SRP 중에서 $K_d^b D$ 를 사용하였으며, 각 계수들은

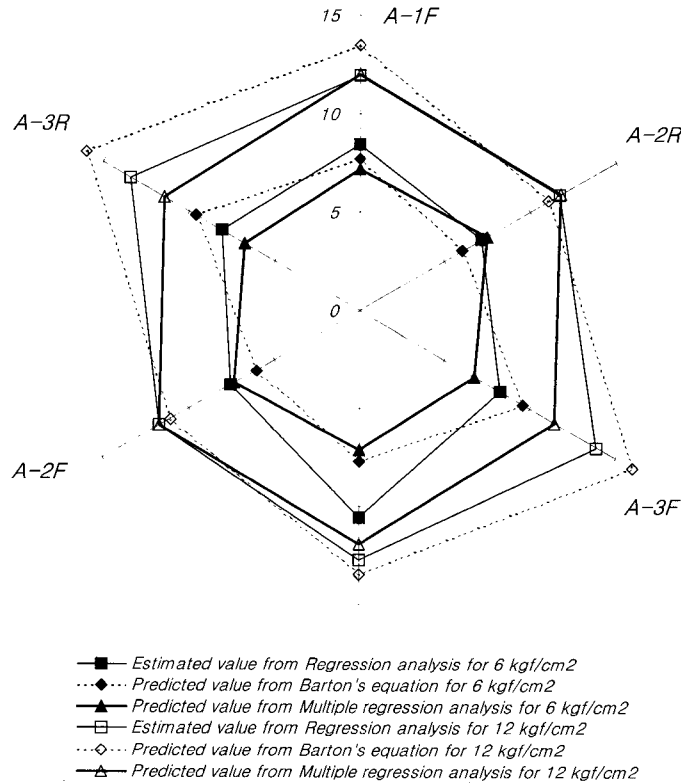


Fig. 11. Peak shear strength predicted by Barton's equation, those using regression for the data of direct shear test and those calculated by Kulatilake's equation in specimen A joint model.

직접전단시험을 통하여 얻어진 자료들에 대한 다중선형회귀를 통하여 구하였다. A, B, C 공시체의 각 형태에 대하여 구해진 계수 a, b, c, d 의 다중회귀 결과에 대한 R^2 은 각각 0.76, 0.57, 0.63로서 비교적 양호한 값으로 나타났다. 위 식으로부터 구한 전단강도 경험식은 다음과 같다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi + 0.027 K_d^{-0.845} D^{2.770} \left[\log_{10} \left(\frac{\sigma_I}{\sigma} \right) \right]^{4.772} + I \right) \quad (13)$$

결과 및 토의

직접 전단시험을 실시하여 얻어진 결과와 Barton(1973)의 경험식, Kulatilake et al.(1995)의

경험식을 가지고 거칠기의 이방성 영향을 비교하기 위하여 방사형 그래프를 이용하여 검토하였다(Fig. 11, 12, 13). 6과 12 kgf/cm²의 수직응력에 대한 최대전단강도로 비교하였다. 대체로 Barton의 경험식의 경우 실험 결과에 대한 근접한 값을 보여주지만, 각 방향에 대하여 실험 결과와는 다른 이방성을 나타내고 있으며, 각 절리면에 대한 실험결과와의 상관계수를 비교한 결과 0.83~0.90 정도의 상관성을 보여주고 있다. 이에 반하여 Kulatilake에 의한 경험식의 경우, 0.88~0.95로서 절리면에 대하여 Barton의 경험식에 대한 상관계수보다 높은 상관계수 값을 보여주고 있다. 전단 시험에 대한 결과에서 회귀분석을 통하여 얻어진 마찰각의 경우, 기본마찰각보다 낮게 나타났다. 이는 상관계수의 비교에서 다른 절리모형에 비해

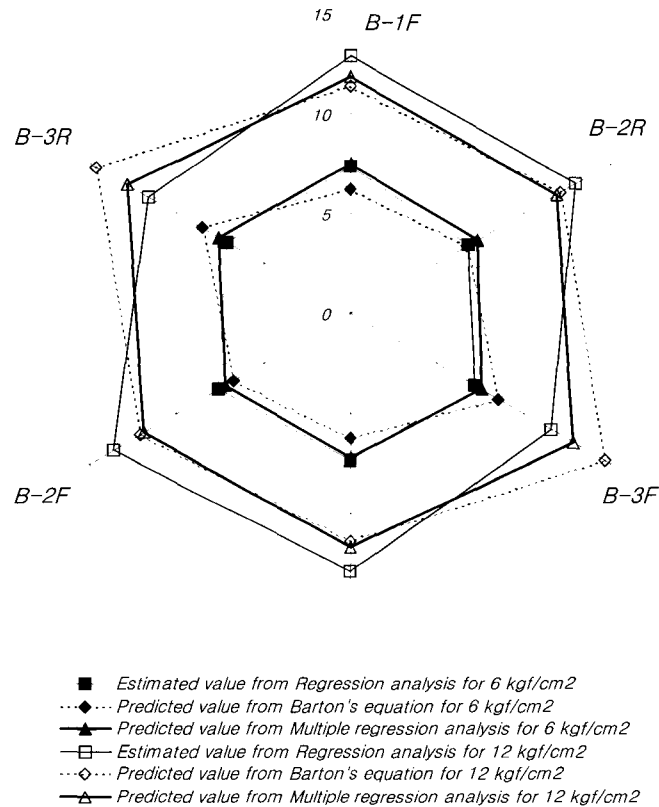


Fig. 12. Peak shear strength predicted by Barton's equation, those using regression for the data of direct shear test and those calculated by Kulatilake's equation in specimen B joint model.

절리면 거칠기에 의한 전단강도 이방성

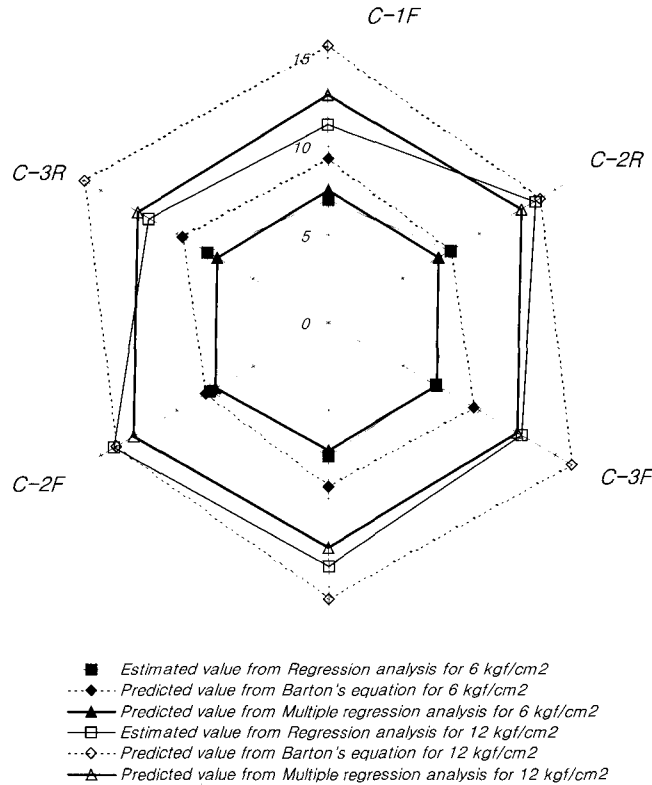


Fig. 13. Peak shear strength predicted by Barton's equation, those using regression for the data of direct shear test and those calculated by Kulatilake's equation in specimen C joint model.

상반된 결과를 제시하는 것으로 판단된다. Kulatilake의 경험식의 경우, 실제 전단시험의 자료에 근접하는 결과를 보여줌과 동시에 전단강도에 대한 이방성에서 근접한 경향을 나타내고 있다.

Barton의 경험식 및 Kulatilake의 경험식에서 사용되는 전단강도에 대한 해석에서는 재료 자체의 고유성분인 마찰계수($\tan \phi$)에 근거한 식으로 구성되어 있으므로, 내부 마찰각에 대하여 Kulatilake의 경험식에서 사용된 $K_d^b D^c$ 와 JRC 의 비교를 실시한 결과, $K_d^b D^c$ 의 경우 $-0.594 \sim 0.817$ 의 상관계수를 가지며, 이는 $-0.860 \sim 0.301$ 인 JRC 보다 높은 상관성을 가진다는 것을 알 수 있다. 이는 절리 모형에 대한 직접전단시험의 결과에 Kulatilake의 경험식이 보다 근접한 관계를 보여주고 있다는 것을 의미하며, 또한 SRP 인 $K_d^b D^c$

의 경우 JRC 보다 절리면의 거칠기에 대한 영향을 보다 잘 표현하고 있다는 것을 나타내고 있다.

결 언

1. 절리면을 포함하는 암석 공시체에서 절리면의 거칠기 특성을 정량적으로 평가하고, 이 거칠기 특성이 전단강도에 미치는 영향을 규명하기 위하여 시멘트 몰타르를 이용하여 절리 모형을 제작하였으며 이에 대하여 3종의 절리 모형과 각 6방향에 대한 직접전단시험을 실시한 결과, 동일한 절리면에 대하여 방향에 따라 각각 다른 역학적 이방성을 보여주고 있다.

2. 직접전단시험의 결과와 비교하여 Barton에 의하여 제시된 경험식은 Kulatilake *et al.*에 의하여 제시된 경험식과 비교하여 절리면의 이방성, 즉 방향에 따른 거칠기의 영향을 해석하기가 어

럽다. 이는 JRC 의 경우 동일한 절리 단면의 거칠기에 대하여 양방향 같은 값으로 제시되기 때문이다. 프랙탈 차원의 경우 및 $K_{\alpha}^b D^c$ 의 경우, 실제 시험값과의 비교에서 JRC 의 상관관계(0.83~0.89)에 비하여 높은 상관관계(0.94~0.96)를 나타낸다.

3. SRP 인 $K_{\alpha}^b D^c$ 를 이용한 Kulatilake의 최대전단강도 관계식은 Barton이 제시한 관계식보다 실제의 시험자료에 근접하고 있으며, 시험 결과에 의한 역학적 이방성파도 잘 일치한다. 따라서 Kulatilake *et al.*에 의하여 제시된 경험식이 절리면 전단강도를 예측하는데 유용하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 이종욱, 이찬구, 홍신일, 장천중, 최원학, 1993, 절리면에서의 전단거동 특성과 역학적 파라미터들 간의 상관성, 지질공학회지, 3, 1-20.
- 이상돈, 강준호, 이정인, 1994, 절리면의 거칠기에 따른 암석 절리의 전단강도 및 변형 거동에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반역학회, 4, 261-273.
- Barton N., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joint, *Engrg. Geology*, v.7, p.287-332.
- Barton N., 1976, Rock mechanics review : The shear strength of rock and rock joint, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* v.13, p.255-279.
- Hsiung T. H., Kana D. D., Ahola M. P., and Chowdhury A. H., 1994, Laboratory characterization of rock joint, *Nuclear Waste Regulatory Analyses*, San Antonio, Tex., Tech. Prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission
- Huang T. H. & Doong Y. S., 1990, Measurement of rock joint roughness and its directional shear strength, *Mech. Jointed and Faulted Rock*, Rossmanith (ed.), 337-343.
- Kulatilake P. H. S. W., Reno Fiedler, Bibhuti B. Panda, 1997, Box fractal dimension as a measure of statistical homogeneity of jointed rock masses, *Engineering geology*, 48, 218-223.
- Kulatilake P. H. S. W., Um J., 1999, Requirements form accurate quantification of self-affine roughness using the roughness-length method, *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.*, 36, 5-18.
- Kulatilake P. H. S. W., Fellow, ASCE, Um J., Panda B. B., and Nghiem N., 1999, Development of new peak shear-strength criterion for anisotropic rock joints, *J. Eng. Mech.*, 1010-1017.
- Kulatilake P. H. S. W., Shou G., Huang T. H., Morgan R. M., 1995, New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol 32, No. 6, 673-697.
- Kulatilake P. H. S. W., Um J., and Pan G., 1997, Requirements for accurate estimation of fractal parameters for self-affine roughness profiles using the line scaling method, *Rock Mech. Rock Engng.*, 30(4), 181-206.
- Kulatilake P. H. S. W., Um J., and Pan G., 1998, Requirements for accurate quantification of self-affine roughness using the variogram method, *Int. J. Solids Structures*, v. 35 n. 31-32, p.4167-4189.
- Maerz N. H., Franklin J. A. and Bennet C. P., 1990, Joint roughness measurement using Shadow Profilometry, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* v.27, p.329-343.
- Malinverno A., 1990, A simple method to estimate the fractal dimension of a self affine series. *Geophys. Res. Lett.*, V.17, p.1953-1956.
- Myer M. O., 1962, Characterization of surface roughness, *Wear*, v.5, p.182-189.
- Patton F. D., 1966, Multiple modes of shear failure in rocks, *Proc. 1st Cong. ISRM*,

절리면 거칠기에 의한 전단강도 이방성

Lisbon v.1, p.509-513.

Priest S. D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, London.

Tse R. and Cruden D. M., 1979, Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. v.16, p.303-307.

투 고 일	2002년 10월 21일
심 사 일	2002년 10월 22일
심사완료일	2002년 11월 21일

이창훈

(주)경창지오콘설탄트

대구광역시 동구 신천4동 366-6(경창빌딩 2F)

전화 : 053-745-6557

팩스 : 053-745-6559

e-mail : wolf-tiger@orgio.net

정교철

안동대학교 지구환경과학과

경북 안동시 송천동 388

전화 : 054-820-5753

팩스 : 054-823-1627

e-mail : jeong@andong.ac.kr

이창훈, 정교철