

새로운 암석 절리면 전단강도식의 제안

Suggestion of the New Criteria on the Shear Strength of Rock Joint

김대영¹⁾, Dae-Young Kim, 이영남²⁾, Young-Nam Lee

¹⁾ 현대건설기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology

²⁾ 현대건설기술연구소 소장, Head, Hyundai Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : Shear strength of the rock joint is dependent on the roughness and the compressive strength of the joint surface, normal stress and etc. Roughness of the joint profile is described by JRC suggested by Barton and Choubey (1977). Choice of the JRC value is subjective. A number of studies have been carried out to quantify the JRC.

Predicted shear strengths by Barton's Equation using the new quantification method of JRC suggested by Chun and Kim (2001) were compared results of shear tests and new criteria of shear strength which have a better accuracy to predict shear strength was suggested.

Key words : shear strength, JRC, new criteria

1. 서론

단일 암석 절리면의 전단 특성은 절리표면의 거칠기, 압축강도, 수직응력 등에 의존한다. 절리면의 거칠기는 Barton과 Choubey(1977)가 제시한 절리 거칠기 계수(JRC)로 표현이 되나 계수의 산정이 주관적이어서 이를 정량화 하려는 많은 연구들이 발표되었다.

본 논문에서는 천과 김(2001)이 제시한 새로운 JRC 정량화 방법을 사용하여 예측한 전단강도와 실제 시험 전단강도를 비교해 보았으며, 절리면 전단강도를 정량적으로 보다 정확히 예측할 수 있는 새로운 전단강도식을 제안 하였다.

2. 연구동향

절리의 마찰 거동 및 팽창 거동을 고려한 전단강도 식들 중에 Barton(1973)의 전단강도식이 널리 사용되고 있다. Barton은 인장 절리시편에 대한 시험에서 Patton(1966) 식의 i 를 수정하여 식 (1)을 제안 하였으며 Barton과 Choubey(1977)는 JRC 값을 나타내는 도표를 발표하였다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (1)$$

여기서, JRC= 절리 거칠기 계수(joint roughness coefficient)

JCS= 절리면 압축강도(joint compressive strength)

그러나 JRC는 물리적 개념의 파라미터(parameter)가 아니라 전단시험의 결과와 Barton의 경험식을 적

용하여 역산된 계수로서 값을 산정하는데, 객관적이지 못하여 많은 오차를 포함한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 절리면 거칠기를 정량화 하고자하는 연구는 통계적 파라미터를 이용하는 방법, 프랙탈 차원(fractal dimension)을 이용하는 방법 그리고 스펙트럼(spectrum) 분석을 이용하는 방법으로 발전하여 왔다. 천과 김(2001)은 이러한 방법으로 JRC를 산정하는 데에 문제점이 있음을 제시하였으며 새로운 JRC 정량화 방법을 제안한 바 있다.

3. 새로운 JRC 정량화 방법

통계적인 파라미터로는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 주로 사용된 파라미터는 프로파일 높이의 표준편차를 나타내는 평방평균 RMS, 프로파일 기울기의 RMS인 Z_2 (Myers, 1962), 프로파일 기울기를 나타내는 거칠기 형상지수 R_p (roughness profile index) 그리고 평균거칠각 A_i (micro average i angle)이다(그림1).

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

$$A_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} I_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \tan^{-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) \quad (3)$$

$$R_p = \frac{1}{\cos(A_i)} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (\Delta x_i^2 - \Delta y_i^2)^{1/2}}{L} \quad (4)$$

여기서, $n = y$ 의 측정수, \bar{y} = 프로파일 진폭의 평균

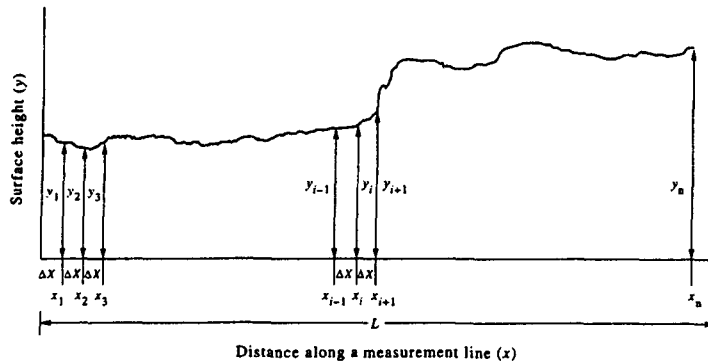


그림 1. 통계적 파라미터의 정의를 위한 절리 표면 프로파일

Tse와 Cruden(1979)은 Barton의 프로파일을 1.27mm의 측정간격으로 수치화하여 식 (5)를 제안한바 있다.

$$JRC = 32.2 + 32.471 \log Z_2 \quad (5)$$

천과 김(2001)의 JRC 정량화방법은 절리 프로파일을 일정한격으로 측정하여 얻은 수치정보를 측정간격을 변화시켜가며 측정간격 대 통계적 파라미터의 그래프를 구한 후 이 그래프를 1차식으로 회귀분석하여 기울기와 절편을 찾아내고 이 기울기와 절편과 JRC 값과의 관계를 구하여 JRC를 정량화 하였다.

$$JRC = \frac{1}{0.020137373 + (9.81436e - 4)/S^2 + 1.6637062/I^{1.5}} \quad (6)$$

여기서, $S=A_i$ -와 측정간격(dx)의 그래프에서 기울기
 $I=A_i$ -와 측정간격(dx)의 그래프에서 절편

$$\ln JRC = -3.0248601 + 64.845596 S^3 + 3.6730795 I^{1.5} \quad (7)$$

여기서, $S=\ln A_i$ 와 측정간격(dx)의 그래프에서 기울기
 $I=\ln A_i$ 와 측정간격(dx)의 그래프에서 절편

여기서 기울기는 1차 거칠기와 2차 거칠기의 정도를 나타낸다. 측정간격이 작은 구간에서는 1차 거칠기와 2차 거칠기를 동시에 표현하며, 측정간격이 큰 구간에서는 1차 거칠기만을 표현한다. Tse와 Cruden의 식과 식(6) 식(7)을 사용하여 예측한 JRC와 JRC값을 그림 2에 비교하였다. 천과 김의 식 (6)과 식(7)이 JRC를 좀더 정확히 산정하고 있는 것을 그림으로부터 알 수 있다

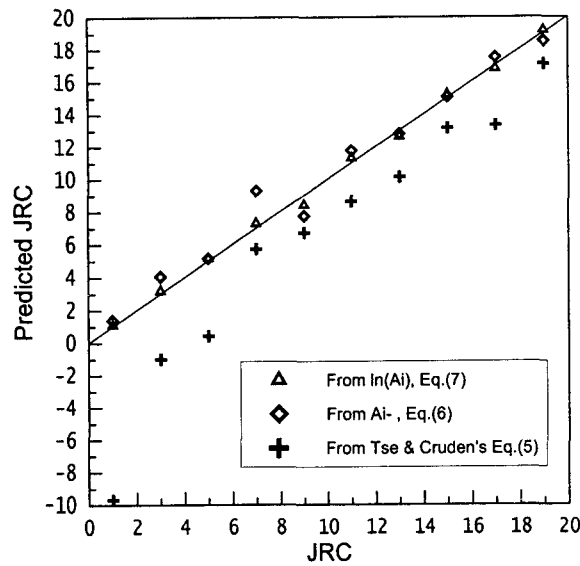


그림 2. JRC 값과 JRC 예측값의 비교

4. 전단시험

4.1 시험 시편 제작

자연 절리의 주형은 여천 화강암 절리면 1개와 용인 편마암의 절리면 3개의 자연 절리면 위에 실리콘과 경화제를 11 : 1의 부피비로 혼합한 실리콘 액체를 부어 경화시켜 고무주형을 제작하였다.(그림 3). 이 고무주형을 몰드의 바닥에 놓고 서로 다른 배합비의 석고를 부어 시편을 제작하였다.

자연절리 시편은 표 2에 나타낸 바와 같이 3가지 강도로 제작하였다.

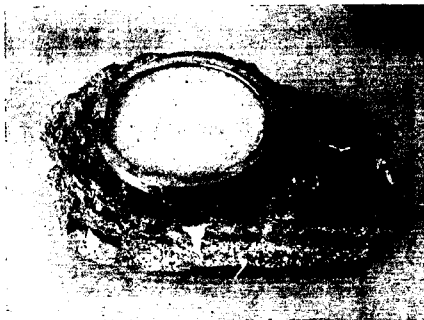


그림 3. 암석 절리면 실리콘 주형제작

표 2. 각 배합별 평탄 시편의 압축강도와 기본마찰각

Sample	q_u (kgf/cm ²) (average)	기본마찰각 ϕ_μ (°)
LF(low strength, flat surface)	208~237(226)	43.18
MF(midium strength, flat surface)	409~432(423)	41.61
HF(high strength, flat surface)	514~550(536)	39.42

4.2 절리면 거칠기 측정

X축과 Y축 방향의 구동이 가능하도록 제작한 3차원 레이저 프로파일로미터를 사용하여 절리면 시편을 X축을 0.1mm 간격으로 110mm Y축을 0.1mm 간격으로 100mm까지의 범위로 X, Y, Z의 데이터를 측정하였다.

거칠기 분석은 $Ai-$ 와 $\ln(Ai-)$ 를 측정간격을 0.1mm~10mm까지 0.1mm씩 증가시켜가면서 시편 전체의 절리면에 대하여 계산하였다. 측정 증분이 n일 때의 측정간격은 $0.1 \times n(\text{mm})$ 이며 이 측정 간격에서의 평균 $Ai-$ 는 식 (8)과 같이 계산한다.

$$(Ai-)_{\text{ave},n} = \frac{\sum_{k=0}^{\frac{1000}{n}} (Ai-)_{i=n \times k+1} \cdot l_{i=n \times k+1}}{\sum_{k=0}^{\frac{1000}{n}} l_{i=n \times k+1}} \quad (8)$$

여기서, n : 측정 증분(1~100)
 $(Ai-)_i$: i 번째 라인의 평균 $Ai-$
 l_i : i 번째 라인의 직선 길이

전단 방향에 대한 절리면의 평균 경사각 ϕ_i 는 식 (9)와 같이 계산한다.

$$\phi_{I,\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^{1001} \phi_{Ii} \cdot l_i}{\sum_{i=1}^{1001} l_i} \quad (9)$$

여기서, ϕ_{Ii} : i 번째 라인 프로파일의 선형 회귀식의 기울기
 l_i : i 번째 라인의 직선 길이

4.3 절리면 전단 시험

전단시험은 샘플명이 MJ로 표시되는 압축강도 423kg/cm^2 의 시편에 대하여는 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 의 방향으로 수행하였으며, 샘플명이 LJ인 압축강도 226kgf/cm^2 와 샘플명이 HJ인 압축강도 536kgf/cm^2 인 시편에 대하여는 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 에 대하여 수행하였다. 전단시험은 다이러턴시(dilatancy), 피치(pitch)와 롤(roll)을 허용하였으며 일정 수직응력 상태로, 수직응력 수준은 $0.01 < \sigma_n / \sigma_j < 0.3$ 의 범위에서 수행하였다.

4.4 Barton 전단강도식의 신뢰도 분석(김, 2001)

4가지의 거칠기가 다른 시편에 대하여 JRC를 육안비교한 것과 정량화 식에 의하여 산정한 JRC 값들을 Barton의 전단강도식에 대입하여 시험결과와 비교하였다. 그림 7에서 그림 9는 JRC 산정 방법별 전단강도와 시험결과를 비교한 것이다. 세 가지 방법 모두 실제의 전단강도 보다 과대하게 전단강도를 산정하는 경향이 나타난다.

육안 비교에 의한 JRC값을 사용하면 전단강도가 큰 쪽 부분에서 전단강도를 좀더 과대하게 산정하는 것으로 나타났다(그림 4).

Ai-의 기울기와 절편을 사용한 결과는 예측값의 분산이 다른 방법에 비하여 크게 나타났다(그림 5). ln(Ai)의 기울기와 절편을 사용한 결과는 다른 두 방법에 비하여 조금 더 시험 값에 접근하였으며 분산이 작은 것을 알 수 있다(그림 6).

그림 7에는 Barton 식의 정확성을 정량적으로 평가해 보기 위하여 JRC 산정에 의한 계산된 전단강도와 시험에 의한 전단강도의 비를 대수정규 확률분포곡선으로 분석하였다. JRC와 가장 상관성이 높은 것으로 나타난 ln(Ai)를 사용한 경우가 표준편차가 가장 작고 평균치도 1에 가장 가깝다. Ai-에 의한 예측이 표준편차가 큰 것은 JRC 도표에는 거칠기의 이방성이 자세히 표현되지 않았음을 알 수 있다.

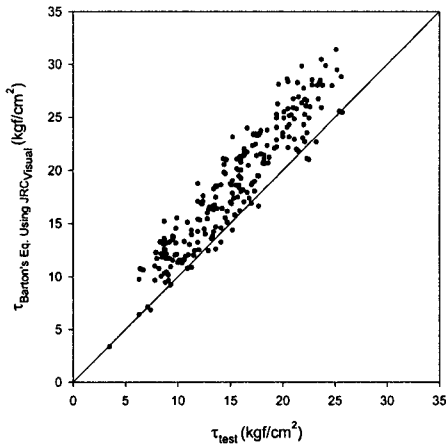


그림 4. JRC 육안에 의한 전단강도 예측값과 시험값

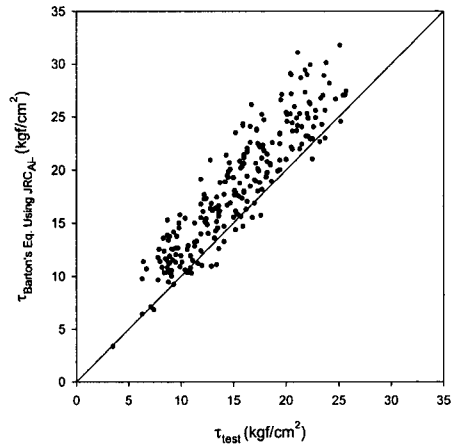


그림 5. JRC 식(6)에 의한 전단강도 예측값과 시험값

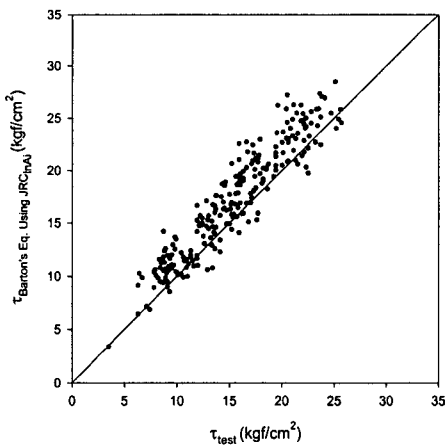


그림 6. 식(7)에 의한 전단강도 예측값과 시험값

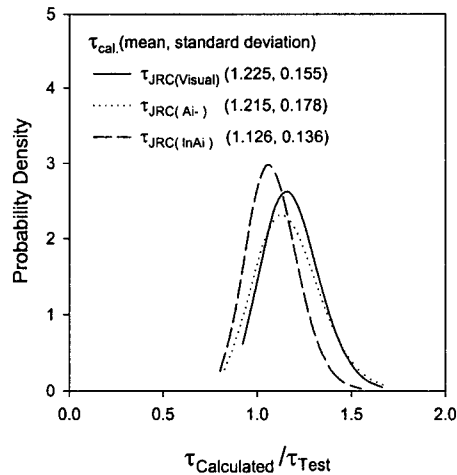


그림 7. JRC 산정법에 따른 Barton 전단강도식의 신뢰도 평가

5. 새로운 전단강도식의 제안(김, 2001)

JRC와 상관성이 우수한 것으로 나타난 ln(Ai)와 Ai-의 측정간격 곡선의 기울기(S)와 절편(I)를 기본 파라미터로 하여 절리면 침두전단강도를 예측하기 위하여 절리면 침두 전단강도를 식(10)과 같이 표현하였다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\text{NRP} \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) + \phi_\mu + \phi_I \right] \quad (10)$$

여기서, NRP(new roughness parameter) : S와 I의 함수

NRP는 식(11)과 식(12)와 같이 시험 전단강도와의 역산과 침두 팽창각(dn)의 관계로부터 구할 수 있다.

$$\text{NRP} = \frac{\tan^{-1} \left(\frac{\tau}{\sigma_n} \right) - \phi_\mu - \phi_I}{\log_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right)} = f(S, I) \quad (11)$$

$$\text{NRP} = \frac{d_n}{\log_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right)} = f(S, I) \quad (12)$$

앞에서 구한 NRP를 식(10)에 입하여 전단강도를 계산한 결과를 시험 결과와 비교한 그래프를 그림 8과 그림9에 나타내었다. 식 (11)의 전단강도와의 역산에 의하여 구한 NRP로 예측한 전단강도와 시험 전단강도와 잘 부합됨을 알 수 있다. 식(12)의 침두 팽창각과의 역산은 침두 팽창각이 측정간격에 종속적이기 때문에 일반적으로 적용되지 못한다.

그림 10에는MJ1과 MJ2 시편에 대하여 NRP_{Ai} -를 사용하여 예측한 전단강도, JRC를 사용한 전단강도 그리고 시험결과를 전단방향 0°, 30°, 60°, 90°, 180° 그리고 270°방향으로 도시한 것이다. NRP를 이용한 방법이 전단 방향에 따라 이방성을 나타내고 있는 시험 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

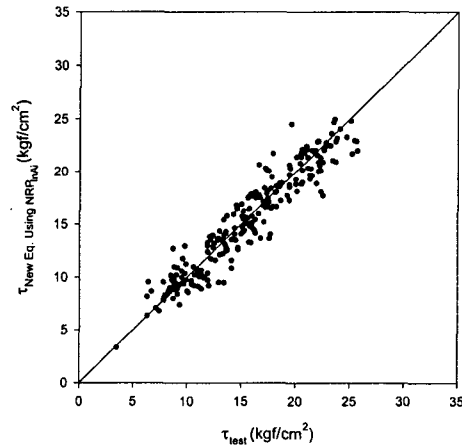
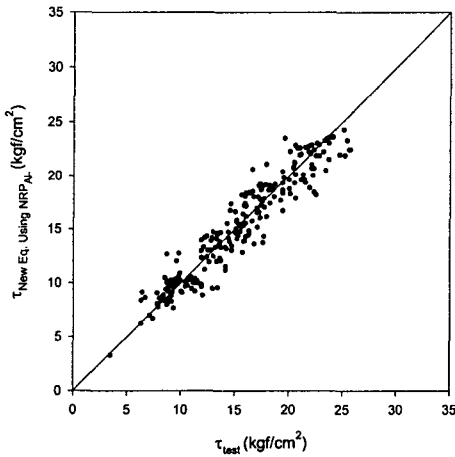


그림 8. 전단강도의 비교($\tau_{\text{NRP}_{\text{Ai}}} - \tau_{\text{test}}$) 그림 9. 전단강도의 비교($\tau_{\text{NRP}_{\text{lnAi}}} - \tau_{\text{test}}$)

그림 11에는 여러 시험결과 중에서 MJ4 0° 방향의 전단시험 결과와 Batron 식과 제안식의 파괴포락선을 비교한 것이다. 제안식이 수직응력별 전단강도에 잘 일치하고 있음을 보여준다.

그림 12에는 JRC 값을 사용한 Barton의 전단강도식과 본 연구에서 제안한 전단강도식의 신뢰도 분석을 위하여 계산된 전단강도와 시험에 의한 전단강도의 비를 대수정규 확률분포곡선으로 분석하여 나타내었다. JRC로 전단강도를 산정하는 것보다 NRP로서 전단강도를 산정하는 것이 좀 더 정확함을 알 수 있다. JRC의 예측에서는 Ai -가 $\ln \text{Ai}$ 보다 표준편차가 커서 신뢰도가 떨어지나 NRP에서는 Ai -가 $\ln \text{Ai}$ 보다 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 이는 전단저항에 기여하는 거칠기만을 사용하여 전단강도를 예측하는 것이 타당하며, Ai -를 사용하는 NRP가 JRC에서는 잘 표현하지 못하는 절리면 거칠기의 이방성

을 좀 더 잘 표현한다고 할 수 있다. 이상에서 검토한 내용을 종합하여 새로운 침두 전단강도식을 식 (13)과 같이 제안하였다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\text{NRP} \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) + \phi_\mu + \phi_I \right] \quad (13)$$

여기서, NRP = $-0.4322 + 21.8900 \cdot S + 2.1925 \cdot I$
 S : 측정간격별 Ai- 곡선에서 선형 회귀식의 기울기
 I : 측정간격별 Ai- 곡선에서 선형 회귀식의 절편

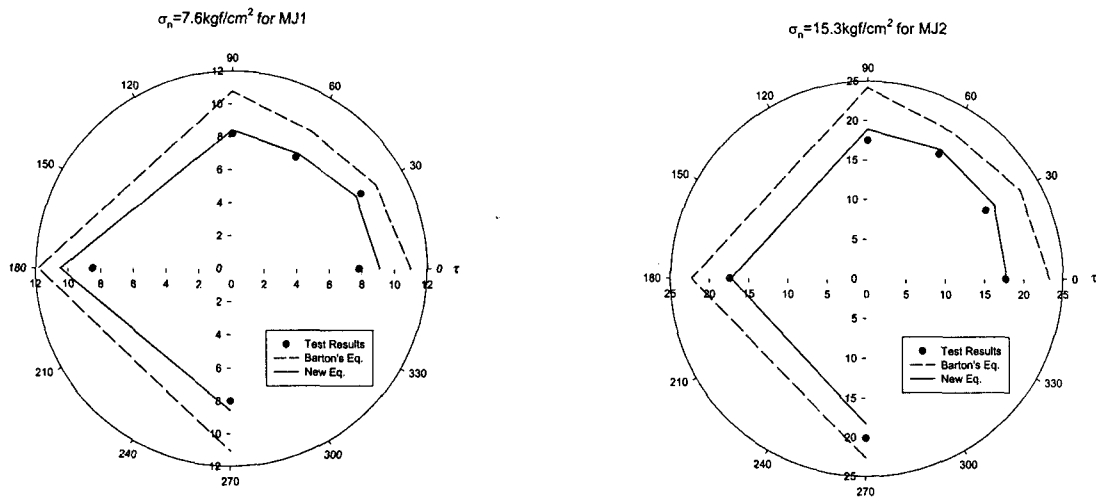


그림 10 전단강도 예측식과 시험결과(MJ1과 MJ2)의 전단 방향별 비교

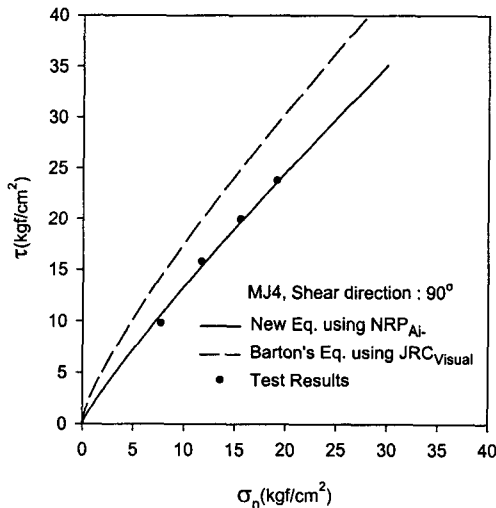


그림 11. 제안식과 Barton 식의 파괴 포락선 비교

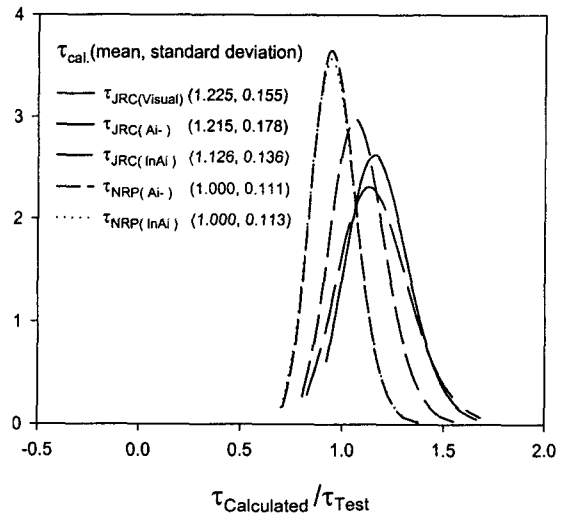


그림 12. Barton 식과 제안식의 신뢰도 평가

새로이 제안된 NRP는 절리면의 1차 거칠기와 2차 거칠기를 동시에 고려하고 있어 침두 전단강도를 보다 잘 예측할 수 있으며 거칠기의 이방성 또한 잘 표현하고 있는 것으로 나타났다. NRP는 기울기가 클수록 1차 거칠기 내에 2차 거칠기가 존재하고, 기울기가 같은 경우 절편이 클수록 절리 굴곡의 각도가 커져서 큰 전단저항을 발휘한다는 물리적 개념을 잘 만족 시킨다. 본 연구에서 제안된 전단강도식은 이러한 물리적 개념을 반영하여 전단강도를 보다 정확히 예측한다.

6. 결 론

새로운 정량화 방법에 의하여 JRC의 신뢰도를 평가함과 동시에 새로운 거칠기 파라미터를 사용하는 전단강도식을 제시하여 일정 수직응력 조건에서의 거칠기를 이용한 전단강도 예측의 신뢰성을 한 차원 끌어 올렸으며 그 내용은 다음과 같다.

- 1) 새로운 JRC 정량화 방법은 프로파일 기울기와 관련된 통계적 파라미터와 측정간격과의 그래프에서 선형 회귀분석을 하여 구한 기울기와 절편을 JRC 정량화의 변수로 사용함으로써 JRC와의 상관관계가 기존의 정량화 방법 보다 우수한 것으로 나타났다.
- 2) 거칠기 측정 및 전단시험을 통하여 JRC의 신뢰도를 분석한 결과 Barton의 경험식은 전단강도를 과대평가하는 것으로 나타났다.
- 3) 전단시험 결과와 A_i -의 기울기와 절편에 대한 역산으로부터 NRP를 제시하여 신뢰도 높은 새로운 전단강도 모델을 제시하였다.

참 고 문 헌

1. 김대영(2001), "절리면 거칠기에 따른 암석의 전단거동", 한양대학교 박사학위논문
2. 김대영, 천병식, 서영호, 이영남,(1999), "응력, 하중, 변위제어 방식의 절리면 전단시험기의 개발", 한국지반공학회 봄 학술발표회, pp.471-477
3. 천병식, 김대영(2001), "암석 절리면 거칠기의 정량화에 대한 수치적 연구", 한국지반공학회논문집 제 17권 1호 pp. 85-97
4. 천병식, 김대영(2000), "하중조건별 시험이 가능한 암석 절리면 전단시험기의 개발 및 적용시험", 한국지반공학회논문집 제 16권 6호 pp. 161-172
5. Bandis, S. C., Lumsden, A. C. and Barton, N. R.(1981), "Experimental studies of scale effects on the shear behavior of rock joints", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp. 1~21.
6. Barton, N. R.(1973), "Review of a new shear-strength criterion for rock joints", Engineering Geology, 7. pp.287~332.
7. Barton, N. and Choubey, V.(1977), "The shear strength of rock joints in theory and practice", Rock Mech. Vol. 10, pp.1~54.
8. Patton, F. D.(1966, a), "Multiple modes of shear failure in rock", *Proc. 1st Congr. ISRM*, Lisbon, 1, pp.509~513.
9. Patton, F. D.(1966, b), "Multiple modes of shear failure in rock and related materials", Ph.D thesis, Univ. of Illinois
10. Tse, R. and Cruden, D. M.(1979), "Estimating joint roughness coefficients", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 16, pp.303~307.