표면 거칠기 계수 Rs를 이용한 암석 절리면 전단강도 모델

Modelling of Rock Joint Shear Strength Using Surface Roughness Parameter, Rs

이석원[1] Seok-Won Lee, 배석일[2] Seok-Il Bae, 이인모[3] In-Mo Lee,

[1]한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Eng. Div., KICT
[2]고려대학교 토목환경공학과 석사과정, Grad. Student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.
[3]고려대학교 토목환경공학과 교수, Prof., Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : The shear strength of jointed rock is influenced by effective normal stress, joint wall compressive strength, joint roughness and so on. Since joint roughness makes considerable influences on shear strength of jointed rock, many studies tried to get quantitative joint roughness parameter. Until now, Joint Roughness Coefficient, JRC proposed by Barton has been prevalently used as a rock joint roughness parameter in spite of its disadvantages. In this study, a quantification of rock joint roughness is performed using surface roughness parameter, Rs. Proposed method is applied to rock core specimens, field joint surfaces, and JRC profiles. The scale of fluctuation is introduced to extend the suggested method to the large scale field joint surface roughness. Based on the quantification of joint surface roughness, joint shear tests are performed with the portable shear box. The relationship between joint surface roughness and joint shear strength is investigated and finally, a rock joint shear strength equation is derived from these results. The equation has considerable credibility and originality in that it is obtained from laboratory tests and expressed with quantified parameter.

Key Words : Joint surface roughness, Rs, Joint roughness coefficient, JRC, Joint shear test, Shear strength of jointed rock

1. 서론

암반의 절리면 전단강도에 영향을 미치는 인자들은 절리면에 작용하는 수직응력, 절리면 근처에서의 암반의 일축압축강도, 암반의 기본 마찰각, 절리면의 풍화정도, 절리면의 거칠기 등을 들 수 있다. 이중, 절리면의 표면 거칠기에 대한 정성·정량화 작업은 많은 연구자에 의하여 제안되고 또한 각각의 연구목적에 맞게 사용되어 왔다. 그러나 현재까지 측정자 오차를 완전히 배제할 수 있는 정량화 된 측정방법 및 표면 거칠기 계수가 제시되지 못하고, 일반적으로 많은 문제점이 제시됨에도 불구하고 Barton(1977)이 제안한 Joint Roughness Coefficient, JRC를 사용하여 표면 거칠기 정도를 표현하고 이를 절리면 전단강도의 산정에 사용하여 왔다.

본 연구에서는 우선적으로 지오멤브레인에 적용하여 거칠기 계수로 적용성을 검증 받은(이 석원, 1998), 표면 거칠기 계수(Surface Roughness Parameter), Rs를 이용하여 절리면 거칠기를 간편하고 측정자 오차를 최소화 할 수 있는 측정방법을 제시하였다. 제시된 거칠기 측정방법을 이용하여 다수의 암코아, 실제 현장 절리면 및 Barton이 제시한 10개의 프로파일의 절리면 거칠기 값을 측정함으로써 제시된 표면 거칠기 계수 및 측정방법의 타당성을 검토하고, 이를 확장하여 실제 현장에서 큰 규모의 절리면 거칠기 측정에 직접 적용할 수 있는 대안을 제시하였다. 이러한 거칠기 측정의 정량화를 바탕으로

하여 암석 절리면 전단시험을 수행하여 표면 거칠기와 절리면 전단강도와의 관계를 분석하였다. 또한 Barton이 제시한 암석의 절리면 전단강도 식에 JRC 값 대신 Rs 값을 적용한 새로운 절리면 전단강도 모델을 제시하였다.

2. 암석의 표면 거칠기 정도의 정량화

2.1 암석 절리면 거칠기 측정 방법

본 연구에서는 암석 절리면 거칠기 정도를 측정하기 위하여 그림 1에서 보인 바와 같이 직경 54 mm의 암코아의 경우 120 ° 간격을 이루는 3개의 프로파일을 가지고 거칠기 값을 산정 하였다. 우선적으로 제시된 3개의 프로파일 위치에서 프로파일 게이지를 사용하여 형상을 측정한 후 얻어진 절리면 프로파일을 300 dpi resolution의 스캐너로 scanning하여 PCX 이미지 파일로 전환하여 컴퓨터에 저장하였다. 저장된 이미지 파일을 UN-SCAN-IT version 5.0 프로그램을 사용하여 (x,y) ASCII 데이터로 digitizing 한 후 이 좌표 값을 가지고 절리면 거칠기 값의 산정에 사용하였다.

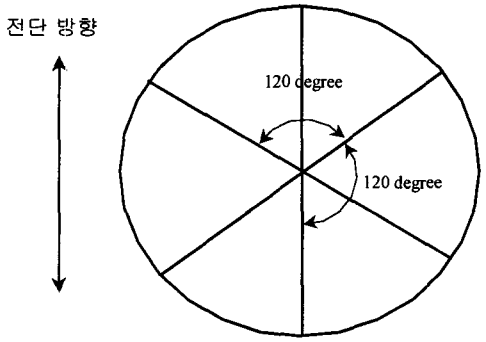


그림 1. 절리면 거칠기 측정 프로파일

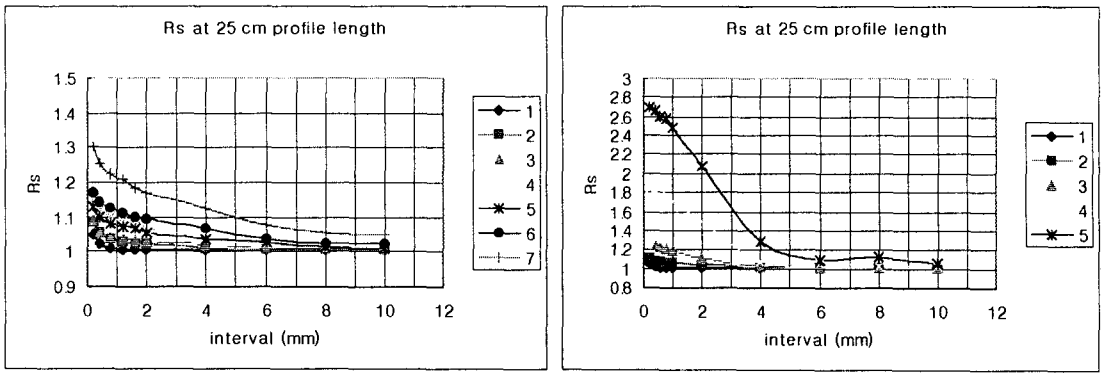
이렇게 측정된 표면형상을 정량화 할 수 있는 계수들은 현재까지 상당히 많이 제안되었으나, 본 연구에서는 Gokhale and Underwood(1990)와 Gokhale and Drury(1990)에 의해서 처음으로 소개된 표면 거칠기 계수(Surface Roughness Parameter), Rs를 사용하였다. Rs는 3차원적인 거칠기 계수로써 식 1에서 보인바와 같이 실제 면적과 투영된 면적사이의 비율로 정의된다.

$$R_S = \frac{A_S}{A_0} \tag{1}$$

여기에서, A_S = 실제 표면의 면적
A_0 = 실제 표면이 투영되었을 때의 면적

Rs를 암반의 절리면의 거칠기에 적용하기 위해서는 암반의 절리면이 가질 수 있는 최대와 최소의 거칠기의 범위 내에서 각각의 거칠기를 정량적으로 잘 나타낼 수 있는 Rs 측정간격과 암반이 가지는 waviness를 고려한 Rs 측정길이를 먼저 규명하여야 한다. 여러 가지 문헌들을 참조하여, 자연 암반 절리면의 형상과 범위를 고려해서 규칙적인 작은 거칠기만을 가진 프로파일들과 약간의 불규칙적인 waviness를 가진 프로파일들을 가상으로 제작한 뒤 이를 바탕으로 Rs 측정간격과 Rs 측정길이를 구해보았다. 두 가지 프로파일 모두 Rs 측정간격은 0~10 mm에 대해서, Rs 측정길이는 5~25 cm에 대해서 각각 검토해 보았다. 그림 2(a)는 프로파일 측정길이 25 cm 에서 다양한 Rs 측정간격에 따른 Rs의 변화를 규칙적인 거칠기 프로파일에 대해서 구해본 결과이고, 그림 2(b)는 같은 조건에서 불규칙적인 거칠

기 프로파일에 대한 결과이다. 그림 2(a)와 그림 2(b)를 살펴보면 Rs 측정간격 2 mm가 각각의 프로파일을 확연히 구분 시켜주는 최대한의 측정간격으로 볼 수 있다. 물론 2 mm 이하의 측정간격에서 더 좋은 결과를 보여줄 수 있으나, 일반적으로 암석의 절리면 프로파일을 얻을 경우 프로파일 게이지를 이용하게 되는데, 프로파일 게이지의 정밀도가 약 1 mm 정도이므로 이를 고려하여 2 mm를 암반의 절리면 거칠기에 적용하는 Rs 측정간격으로 정하였다. 이외에도 5~20 cm의 프로파일 측정길이에 대해서도 각각의 측정간격을 적용시켜 보았고 결과는 그림 2와 비슷한 경향을 보여주었다. 다음으로 규명해야 하는 것이 Rs 측정길이이다. 그림 3은 불규칙한 프로파일을 Rs 측정간격 2.0 mm로 5~25 cm의 프로파일 측정길이에 대해서 Rs를 구한 결과이다. 주어진 범위의 프로파일 측정길이에서는 Rs 값의 변화가 거의 없는 것을 볼 수 있고, 따라서 최소 Rs 측정길이를 5 cm로 결정하였다.



(a) 규칙적인 거칠기를 가진 경우 (b) 불규칙적인 거칠기를 가진 경우

그림 2. 프로파일 측정길이 25 cm에서 고려해 본 다양한 측정간격에 따른 Rs 값의 관계

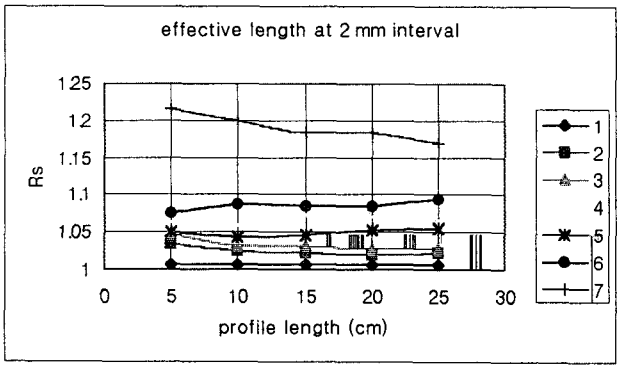


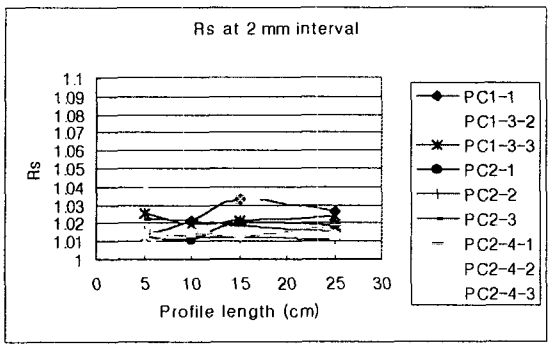
그림 3. 측정간격 2 mm로 평가한 다양한 프로파일 측정길이에서의 Rs 값의 관계

2.2 암석 절리면 거칠기 측정 결과

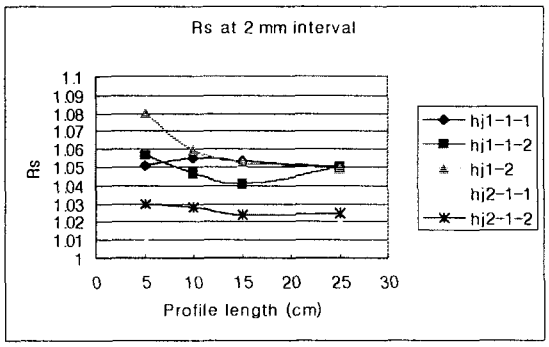
앞에서 규명한 Rs 측정간격과 Rs 측정길이를 본 연구에서는 우선적으로 암코아 절리면의 거칠기 측정에 적용시켜서 거칠기 값을 산정하여 보았다. 암코아의 직경은 54 mm이므로 Rs 측정길이를 만족시켰다. 모두 29개의 암코아에 대해서 결과를 얻었는데, 그 결과 Rs는 약 1.01~1.08 사이의 값을 나타내었으며, 따라서 거칠기를 구분하기 위해서는 최소 소수점 이하 둘째 자리까지가 요구된다.

또한 실제 현장에서의 절리면에 대해서 같은 측정간격으로 Rs 적용을 검토해 보았다. 현장 절리는 평창동, 홍제동 그리고 안암동의 암반으로부터 얻었으며 Rs는 2 mm의 Rs 측정간격으로 10, 15 그리고 25

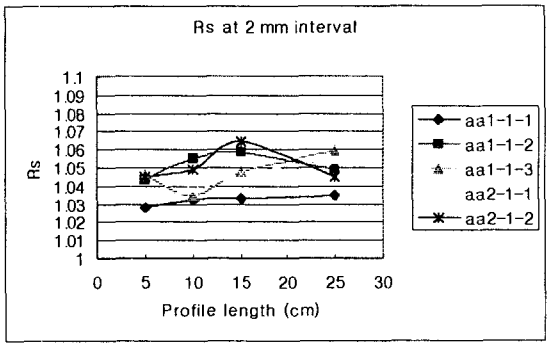
cm의 프로파일 측정길이에 대해서 구해보았다. 그림 4에서 알 수 있듯이 Rs 측정간격 2 mm로 각각의 실제 절리의 거칠기가 잘 표현되며 그 측정결과도 암코아의 정량화에서 얻어진 Rs 값의 범위 안에 들어 있음을 알려준다. 또한 프로파일의 측정길이도 Rs 값에는 크게 영향을 주지 않는 것으로 보여져 주어진 프로파일 측정길이에서의 Rs 값의 변화는 거의 없는 것으로 볼 수 있다.



(a) 평창동 절리의 결과



(b) 홍제동 절리의 결과



(c) 안암동 절리의 결과

그림 4. Rs 측정간격 2 mm로 평가해 본 현장절리 3곳의 프로파일 측정길이와 Rs 값의 관계

2.3 Barton의 JRC 프로파일에 대한 R_S의 적용

전술한 바와 같이 Barton(1977)은 암석 절리면의 거칠기를 JRC라는 계수로 제시하였다. 하지만 JRC는 2차원적인 프로파일만을 표현할 수 있고 정성적이므로 시각적으로 그 값을 판단할 수밖에 없는데, 그것을 판단하는 사람의 기술적 숙련도 및 경험에 따라서 값의 차이가 클 수 있다. 또한, waviness와 작은 roughness와의 차이를 구분하지 못하는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 3차원의 프로파일을 설명할 수 있으며 측정간격만 정해지면 항상 일정한 값을 나타내는 정량적인 계수인 Rs를 이용하여 Barton(1977)이 제시한 10개의 JRC 프로파일을 정량화 해 보았다. 그림 5는 이 결과를 보여준다. Rs 측정간격은 1 mm 와 2 mm, 두 가지로 평가했으며 10개의 JRC 프로파일 각각의 JRC값은 Barton이 제시한 값의 범위에서 가운데 값을 읽었다. 그림 5에서 알 수 있듯이 Rs 측정간격 2 mm로 JRC를 평가했을 경우 Barton이 제시한 8번째와 9번째 프로파일의 경우는 Rs 값이 거의 같음을 알 수 있다. 두 프로파일을 잘 살펴보면 8번째 프로파일은 waviness가 큰 반면 9번째는 작은 roughness가 8번째 프로파일 보다는 큰 것을 알 수 있으므로 제시된 10개의 프로파일은 큰 거칠기를 의미하는 waviness와 작은 거칠기를 의미하는 roughness를 구별하지 않았음을 알 수 있다.

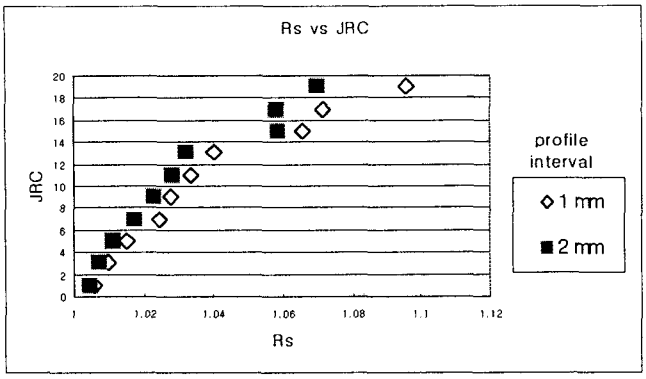


그림 5. Rs로 평가해 본 JRC

2.4 Scale of Fluctuation

실제 암석 절리면 전단강도의 판단 대상은 본 연구에서 수행된 5~25 cm 정도 범위가 아니라 훨씬 더 큰 범위에서 존재한다. 그러한 경우, Rs 측정간격도 본 연구에서 사용된 2 mm로 표현되는 거칠기들은 전단강도에 지배적인 영향을 주지 못할 수도 있다. 또한 큰 범위의 거칠기에서는 Rs 측정길이를 산정하는 것은 많은 무리가 있다. 이러한 문제점들은 통계학에서 이용되는 'Scale of Fluctuation, δ'라는 개념을 도입하면 해결될 수 있다. δ는 어떠한 fluctuation을 나타내는 데이터들이 있을 때 이들이 평균값을 통과하는 정도를 나타낸 계수이다. 암반의 거칠기에 있어서 그 범위가 커지게 되면 δ의 값도 커지게 될 것이며 전단 강도에 영향을 미치게 되는 roughness의 범위도 δ값이 증가하는 정도에 영향을 받게 될 것이다. 따라서 δ를 전단 강도에 영향을 미치는 하나의 roughness 척도로 삼아서 Rs 측정간격을 설정하는 것은 큰 범위에서 Rs의 적용을 가능하게 할 수 있다.

본 연구에서 실험된 암코아들의 δ값들을 모두 얻은 결과, 평균 6.5 mm의 δ값을 얻을 수 있었다. 이것은 암코아의 범위에서의 거칠기는 약 6.5 mm 측정간격으로 waviness가 형성되었음을 의미한다. 암코아에 대한 Rs 측정간격은 2 mm로 적용되었으므로 δ값이 Rs 측정간격보다 약 3배정도 크게 존재했음을 알 수 있고 또한, 이러한 관계 및 범위 속에서 거칠기들이 잘 구분이 되었으므로 범위가 훨씬 큰 암반의 절리에 대한 Rs 평가도 식 2의 관계를 고려하여 이루어질 수 있음을 제안한다.

$$\delta = 3 \times R_S \text{ 측정간격} \qquad (2)$$

3. 암석 절리면 전단 시험

3.1 실험장치 및 방법

여러 가지 절리면 거칠기들에 대한 Rs의 적용성이 검토되었으므로 Rs로 표현된 거칠기와 절리면 전단강도와 어떠한 관계가 있는지 절리면 전단시험을 통하여 알아보았다. 실험 시료는 암코아 (5.4 cm, NX) 가 사용되었다. 암석의 종류는 150 MPa 정도의 일축압축강도를 가지는 보통암이 선택되었다. 그림 6에서 보이는 바와 같이, Portable shear box (Hoek and Bray, 1977)가 절리면 전단시험 장치로 사용되었고 시험된 수직응력의 범위는 0~4 MPa 이었다. 암코아를 고정시키기 위해서 shear box에 맞는 몰드를 그림 7에서 보인 바와 같이 제작하였고 무수축 모르타르를 이용하여 암코아를 몰드에 고정시켰다.

일축압축강도의 측정을 위해서 Point load test가 실시되었으며 Tilt test로 기본 마찰각을 측정하였다. 실험된 암코아의 절리는 모두 point load test를 통하여 얻었다. 따라서, 일축압축강도는 Broach and Franklin(1972)에 의해서 제시된 식에 의해 얻을 수 있었고, 절리의 풍화정도는 일정하게 유지할 수 있었다. 이렇게 얻어진 하나의 절리를 가진 한 쌍의 암코아는 그림 7에 보이는 두 개의 몰드에 각각 무수

축 모르타르로 고정이 된 뒤 그림 6의 장치에 삽입된 후 전단된다. 총 29개의 암코아가 전단되었고 그 결과는 다음과 같다.

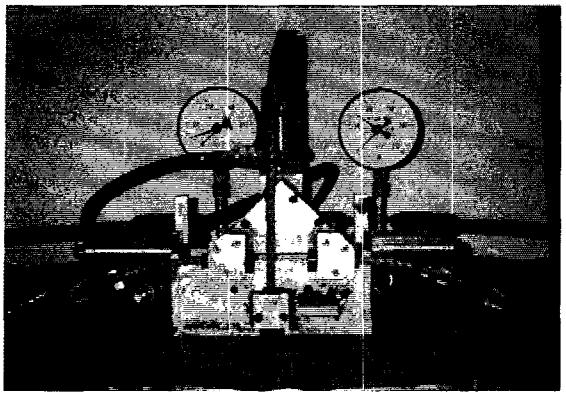


그림 6. Portable Shear Box

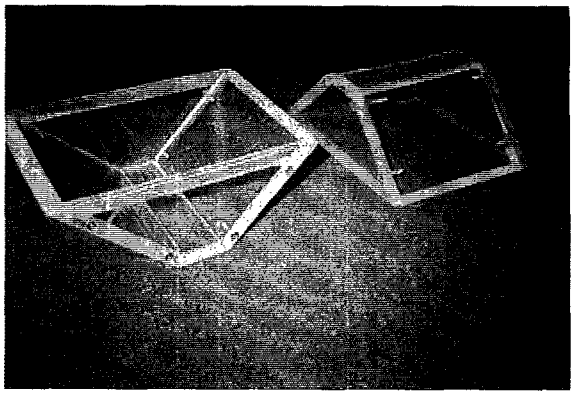


그림 7. 암코아 고정을 위한 몰드

3.2 실험 결과

그림 8은 거칠기를 정량화된 값으로 보여주는 계수, Rs와 전단강도의 관계를 보여준다. 수직응력이 0~2 MPa의 범위에서는 선형적인 관계를 보여주다가, 수직응력이 4 MPa 정도로 커지게 되면 약 1.04~1.05의 Rs 값에서부터 비선형적인 관계를 나타냄을 실험을 통하여 알 수 있었다. 실험된 보통암의 강도를 고려해 볼 때, 비선형관계가 시작되는 지점에서는 Teeth Breaking 현상이 일어났음을 알 수 있었다.

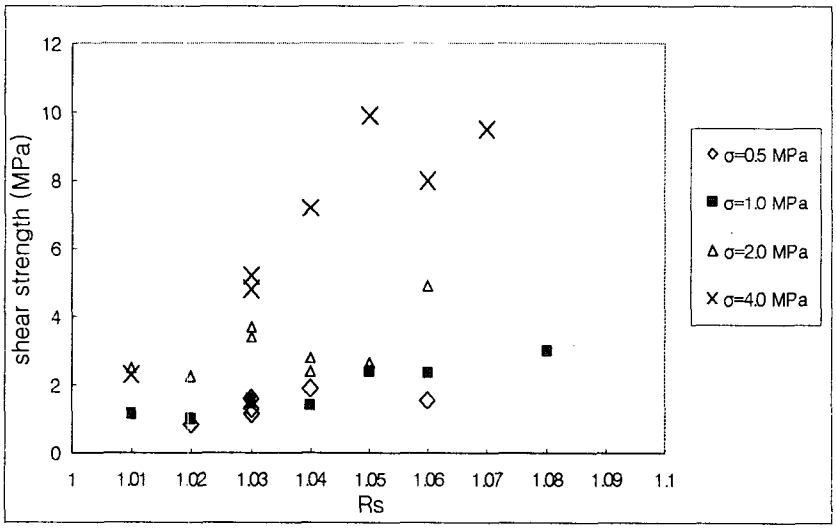


그림 8. 표면 거칠기와 전단강도와의 관계

그림 9는 암코아에서 구한 Rs에 대하여 수직응력과 최대전단응력과의 관계를 비교해 본 결과이다. 파괴선이 곡선을 이루고 있지만 편의상 선형적으로 관계를 나타내었다. 각각의 거칠기 계수의 증가분에 따라서 전단강도가 눈에 띄게 증가하는 것을 알 수 있었고, 이것은 표면 거칠기 계수, Rs가 절리면의 거칠기를 구분한 정량적인 값이 절리면의 전단강도를 표현하는데 가능했다는 것을 의미한다.

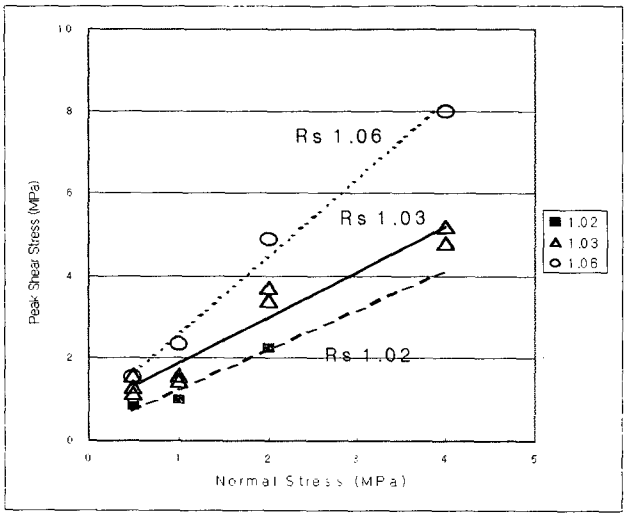


그림 9. 거칠기 계수 Rs에 따른 수직응력과 최대전단응력의 관계

3.3 암석의 절리면 전단강도 모델

앞에서 Barton의 JRC 프로파일을 Rs로 표현을 해 본 결과 Rs와 JRC의 관계가 자연로그(Ln)와 다항식(polynomial)으로 표현될 경우 좋은 상관관계를 나타내었다. 이러한 관계를 Barton(1977)이 제시한 암석의 절리면 전단강도식에 바탕하여 새로운 정량화된 전단강도식을 제시하였다. 식 3과 식 4는 이러한 Rs와 JRC의 관계를 바탕으로 Barton이 제시한 전단강도식에 JRC 대신 정량화 된 값인 Rs를 대체하여 도출된 식이다.

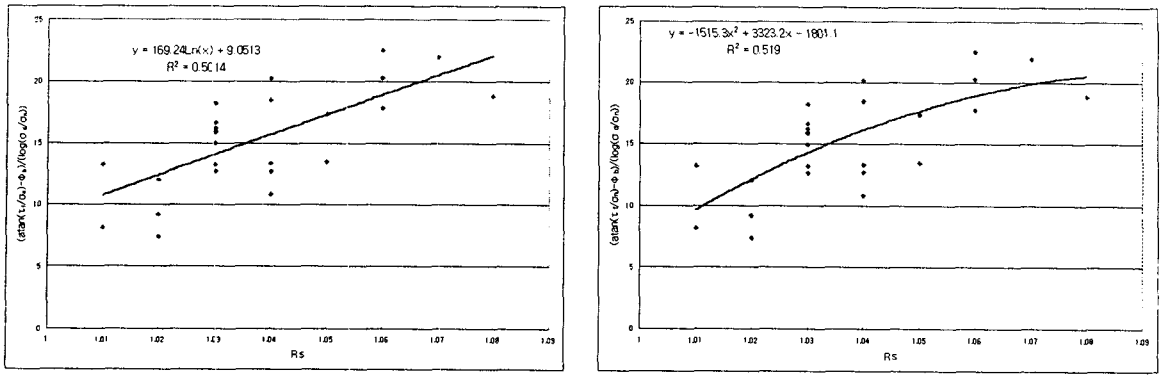
$$\tau_f = \sigma_n \times \tan\left(\phi_b + (a \times \ln(Rs) + b)\log\left(\frac{\sigma_d}{\sigma_n}\right)\right) \tag{3}$$

$$\tau_f = \sigma_n \times \tan\left(\phi_b + (a \times Rs^2 + b \times Rs + c)\log\left(\frac{\sigma_d}{\sigma_n}\right)\right) \tag{4}$$

위의 식은 다음 식 5와 식 6으로 변형될 수 있고 실험 결과로부터 얻은 그림 10(a)와 그림 10(b)를 통하여 a, b 그리고 c 값을 얻을 수 있다.

$$\frac{\left(\tan^{-1}\left(\frac{\tau_f}{\sigma_n}\right) - \phi_b\right)}{\log\left(\frac{\sigma_d}{\sigma_n}\right)} = JRC = a \times \ln(Rs) + b \tag{5}$$

$$\frac{\left(\tan^{-1}\left(\frac{\tau_f}{\sigma_n}\right) - \phi_b\right)}{\log\left(\frac{\sigma_d}{\sigma_n}\right)} = JRC = a \times Rs^2 + b \times Rs + c \tag{6}$$



(a) Ln 관계 (b) Polynomial 관계

그림 10. 실험을 통한 Rs와 JRC의 Ln 및 Polynomial 관계

위의 결과들을 통하여 다음 전단강도식을 제안한다.

$$\tau_f = \sigma_n \times \tan\left(\Phi_b + (169.2 \times \ln(Rs) + 9.1)\log\left(\frac{\sigma_d}{\sigma_n}\right)\right) \quad (7)$$

$$\tau_f = \sigma_n \times \tan\left(\Phi_b + (-1515.3 \times Rs^2 + 3323.2 \times Rs - 1801.1)\log\left(\frac{\sigma_d}{\sigma_n}\right)\right) \quad (8)$$

4. 결론

본 연구를 통하여, 표면 거칠기 계수인 Rs는 암반의 절리면 거칠기를 정량적으로 표현할 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구가 선택한 약 5~25 cm범위의 암반 절리들에 대해서는 최대 Rs 측정간격을 2 mm, 최소 Rs 측정길이를 5 cm로 하여 각각의 절리들을 구분할 경우 Rs가 암반의 절리면을 효과적으로 정량화 할 수 있다는 사실을 알 수 있었다. 표면 거칠기 계수, Rs로 다양한 암코아를 정량화 해 본 결과 대략 1.01~1.08 정도의 값을 나타내었고, JRC의 프로파일을 Rs로 정량화 해 본 결과도 일치하는 결과를 나타내었다. 각각의 계수들은 최소 소수점이하 둘째 자리까지 값의 구분을 했을 경우 각각의 거칠기를 잘 표현하였고 실험을 통하여 증명이 되었다. 앞에서 언급한 범위 5~25 cm를 넘어가는 큰 waviness를 가진 절리들에 대해서는 Scale of Fluctuation의 약 3분의 1정도의 Rs 측정간격을 사용한다면 그러한 범위에서의 각각의 거칠기를 정량화 할 수 있다는 것을 제시하였다. 또한 Rs를 사용하여 구분한 정량화 된 값에 따라서 암석의 절리면 전단강도의 구분이 확실하게 이루어지는 것을 암석 절리면 전단강도 시험을 통하여 알 수 있었으며 실험 결과를 통하여 정량화 된 계수인 Rs를 사용한 암석 절리면 전단강도식을 제안하였다.

참고문헌

1. Barton, N. and Choubey, V. (1977), "The Shear Strength of Rock Joint in Theory and Practice", *Rock Mechanics*, Vol. 10, pp 1-54.
2. Broach, E. and Franklin, J. A. (1972), "The Point Load Strength Test", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 9, pp 669-697.
3. Lee, Seok-Won (1998), "Influence of Surface Topography on Interface Strength and Counterface Soil Structure", *PhD Thesis*, Georgia Institute of Technology.