

인공 삼각 돌출부의 거칠기 발현특성

Roughness Mobilization Characteristics of Artificial Triangular Asperities

홍은수¹⁾, Eun-Soo Hong, 최성웅²⁾, Sung-Oong Choi, 이인모³⁾, In-Mo Lee

¹⁾ 한국지질자원연구원 지하공간연구실 객원연구원, Postdoctoral Fellow, Geotechnical Engineering Div., KIGAM(esooohong@yahoo.co.kr)

²⁾ 한국지질자원연구원 지하공간연구실장 책임연구원, Principal Researcher, Geotechnical Engineering Div., KIGAM

³⁾ 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea University

SYNOPSIS : Underestimation of rock joint shear strength comes from an inadequate consideration of roughness mobilization behavior, which is changed by asperity size as well applied normal load. In this study, we performed rock joint shear tests, and studied the roughness mobilization characteristics related with the scale of normal stress and asperities. Test specimens with artificial triangular asperities were manufactured. The specimens consisted of 3 types, and each type represented unevenness, waviness and total roughness(superposition of unevenness and waviness). The experimental results show that the roughness mobilization characteristics are varied by the scale of normal stress and asperities. Furthermore, the investigation shows that the rate of geometrical component and mechanical component in the total roughness is also varied by the scale of normal stress and asperities. These results suggest that we should consider the roughness mobilization characteristics for the roughness quantification and the shear strength modelling.

Key words : Mobilization of roughness, Roughness components, Scale of roughness, Normal stress, Artificial triangular asperity, Shear mode, Joint shear test

1. 서 론

첨두 전단강도(τ) 또는 첨두 전단변위는 거칠기가 최대로 발현된 시점에 나타나며, 이때의 거칠기는 기하학적 성분과 기계적 성분의 합으로 규정될 수 있다. 그러나 전체 첨두 전단강도 성분에 대한 각 거칠기 성분의 발현 비율은 전단 모드에 따라 달라지며, 절리면의 전단 모드는 연직응력과 돌출부의 크기에 의하여 주로 영향을 받는다. 그러므로 전단 모드와 돌출부(asperity)의 크기, 연직응력의 관계는 거칠기의 발현 특성에 대한 이해와 정량화를 위하여 규명 되어야만 한다. 여러 연구자들(Ladanyi와 Archambault, 1970; Lam과 Johnstone, 1989; Seidel과 Haberfield, 2002)이 인공 삼각 돌출부를 가지는 시편을 사용하여 전단시험을 수행하였지만 이에 대한 연구는 아직 제대로 이루어지지 않고 있다. 이 연구의 목적은 인공 거칠기를 사용하는 절리면 전단시험을 통하여 연직응력과 돌출부의 크기에 따라 달라지는 돌출부의 전단 모드를 고찰하고, 올바른 절리면 거칠기의 정량화와 전단 모델의 개발을 위하여 거칠기의 발현 특성에 대한 새로운 이해를 제시하는 것이다. 연구를 위하여 석고 시편을 사용한 절

리면 전단시험을 실시하였다. 인공 삼각 돌출부를 사용하여 절리면의 거칠기를 모사하였으며, 전단시험은 일정 연직 하중상태에서 수행하였다.

2. 절리면 거칠기의 발현

2.1 연직응력의 영향

암석 절리면의 전단강도는 전단변위가 진행됨에 따라 발현되는 값이다(Suh와 Sin, 1981; Barton 등, 1985). 전단강도의 발현에 영향을 미치는 요소는 연직응력, 절리면의 일축 압축강도, 절리면의 거칠기, 잔류 마찰각 등으로 구분된다(Barton, 1973). 이 가운데 절리면 거칠기는 전단변위가 진행됨에 따라 그 값이 달라지므로 전단강도와 함께 발현되는 특성이다. 절리면의 전단 모드가 미끄러짐(sliding)과 돌출부 파괴(asperity failure)의 조합으로 결정되므로(Ladanyi와 Archambault, 1970; Lam과 Johnstone, 1989), 발현되는 거칠기는 기하학적 성분(geometrical component)과 기계적 성분 또는 돌출부 파괴성분(asperity failure component)의 합으로 추정할 수 있다(Bandis 등, 1981; 홍은수, 2005).

거칠기의 발현에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 전단강도에서와 마찬가지로 연직응력이다. 미시적인 관점에서 볼 때 물체 표면에 작용하는 연직응력이 증가하면 표면의 실제 접촉면적도 증가되는 것으로 생각된다(Archard, 1957; Xie 등, 1997). 이것이 마찰에 대단히 큰 영향을 미치므로 연직응력의 크기와 전단강도의 크기는 대체로 비례한다. 이 경우 표면에서는 소수의 접촉점만 매우 큰 압력을 받게 되며(Brown과 Scholz, 1986), 연직응력이 증가되면 이러한 미세 돌출부가 부분적으로 파괴되어 전체적인 돌출부의 접촉면적과 맞물림 정도가 커지게 된다(Xie 등, 1997). 이것은 결국 실제 전단 면적을 증가시키는 효과를 가져와 거칠기의 기계적 성분을 증가시키는 직접적인 원인이 되는 것으로 추정된다. 이러한 현상은 이후 만곡의 전단시험에서 주로 나타나는 마모(wear)의 주요 원인인 것으로 생각할 수 있다.

거시적인 관점에서 볼 때 연직응력의 크기는 절리면의 미끄럼 또는 팽창과 전단 파괴의 상호작용을 결정짓는 주요 요소가 된다(Barton, 1973). 연직응력이 낮은 경우 두 거칠기 성분 가운데 거칠기를 구성하는 주요 성분은 기하학적 성분이지만, 연직응력이 증가할수록 기계적 성분의 비중이 더 증가하고 기하학적 성분의 비중은 상대적으로 감소하는 경향을 보인다. 결국 연직응력이 어느 단계에 이르면 거칠기의 기하학적 성분은 무시되고 기계적 성분이 거칠기의 대부분을 구성하는 것으로 추정된다(홍은수, 2005).

2.2 거칠기 규모의 영향

ISRM(1981)은 만곡(waviness: large scale undulation)을 전단변형 도중에 전단되지 않고 팽창을 일으키는 거칠기로, 요철(unevenness: small scale roughness)을 전단변형 도중에 손상되는 거칠기로 구분하였다. 연구 결과(Seidel과 Haberfield, 2002; 홍은수, 2005)에 의하면 손상되는 돌출부의 크기는 응력 조건과, 강도특성, 전단변위의 크기, 요철의 크기 및 경사 조건의 함수이다. 그러므로 돌출부의 규모에 따라서도 전단 모드와 거칠기의 발현 양상도 다를 것으로 추정된다.

전단 모드를 고려할 때 만곡은 주로 거칠기의 기하학적 성분과, 요철은 주로 기계적 성분과 관련되어 있는 것으로 볼 수 있다. 그러나 만곡은 규모가 큰 돌출부를 나타내며 요철은 규모가 작은 돌출부를 나타내는 것으로 볼 수도 있으며, 돌출부의 규모에 따라 전단과정에서 거칠기의 발현 양상이 다른 것으로 생각된다.

3. 인공 삼각 돌출부의 거칠기 발현

3.1 시험 방법

절리면 전단시험을 위한 시편(10cm × 10cm × 3cm)은 인공 삼각 프로파일을 사용한 금속 주형으로부터 복제하여 제작하였다. 사용된 시편은 각각 만곡의 프로파일, 요철의 프로파일 그리고 전체(만곡과

요철의 합) 프로파일을 대표한다. 시편의 제작에 사용된 재료는 석고(gypsum)이다. 사용된 재료의 특성은 표 1과 같다.

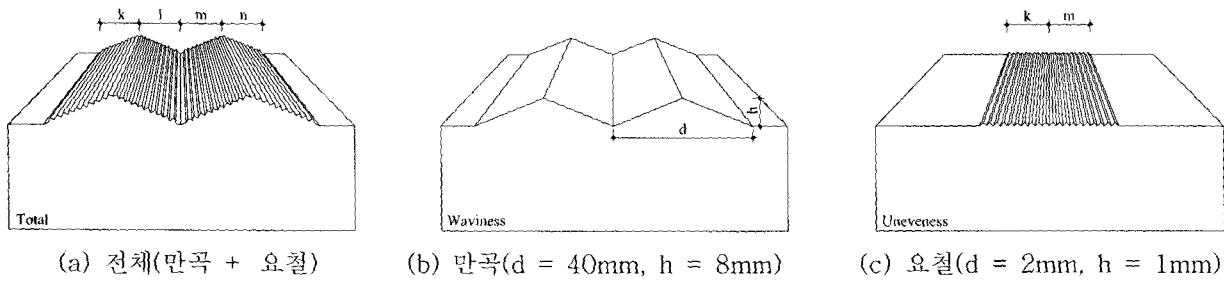


그림 1. 인공 프로파일을 사용한 석고 시편

표 1. 사용된 재료의 특성

압축강도, σ_c (mN/m^2)	인장강도, σ_t (kN/m^2)	활선탄성계수, E_{sec} (kN/m^2)	기본마찰각, Φ_b ($^\circ$)
10.0	2.2	183.7	39.5

전단시험기는 낮은 연직응력과 높은 연직응력 상태에서의 거칠기 발현특성을 각각 규명하기 위하여 2kN 까지 재하가 가능한 전동식 절리면 전단시험기(motored shear apparatus)와 500kN 까지 재하가 가능한 유압식 절리면 전단 시험기(hydraulic shear apparatus)를 각각 사용하였다. 재하응력을 각각 10단계로 적용하였으며, 2~361.9kN/ m^2 의 범위를 적용하였다. 전단속도는 0.5mm/min을 적용하였다.

3.2 응력 수준에 따른 요철과 만곡의 전단강도 발현

그림 2는 연직응력(σ)과 첨두 전단강도(τ)를 절리면 압축강도(JCS)로 정규화 하여 나타낸 그림이다. 여기서 일반 석고 시편의 시험 결과는 total, waviness, unevenness이며 각각 전체 거칠기, 만곡, 요철의 프로파일을 사용한 것이다. unevenness*는 전체 거칠기의 전단강도에서 만곡의 전단강도를 뺀 것(total-waviness)이다. 이것은 요철에 해당하는 시편의 전단강도 시험 결과와 이론상 같아야 하지만 실제로는 unevenness가 인위적으로 만곡의 경사가 0인 평면위에 배치한 프로파일의 시험 결과 이므로 만곡 이 경사를 가질 때 보다는 실제 거칠기가 약간 과소평가 되었을 가능성이 있다. 그림 2에서는 매우 낮은 연직응력 수준에서 이러한 현상을 나타내고 있으며, 여기에서는 unevenness*를 요철의 전단강도로 간주하였다.

만곡과 요철의 프로파일에 의한 전단강도는 응력 수준에 따라 다른 결과를 보여주고 있다(그림 2). 요철에서의 전단강도는 σ/JCS 가 0.02 부근까지 만곡에서 보다 크게 나타나며 그 이후에 비로소 만곡의 전단강도가 상대적으로 큰 값을 나타내게 된다. 그러나 연직응력 수준이 일정 규모 이상 커지면 반대로 만곡의 전단강도가 더 크게 나타나는 현상을 보여주고 있다. 또한 σ/JCS 가 0.05 이후에 요철의 전단강도 파괴 포락선이 사실상 기본 마찰각의 파괴 포락선과 기울기가 같게 되지만, 만곡의 경우는 대체로 σ/JCS 가 0.15 이후 일 때에서야 이러한 현상이 나타난다. 이러한 현상은 모두 돌출부의 규모가 작을수록 거칠기 발현이 낮은 연직응력 수준에서 주로 이루어지며, 돌출부의 규모가 큰 경우 거칠기의 발현이 높은 연직응력 수준에서 이루어지기 때문으로 추정된다.

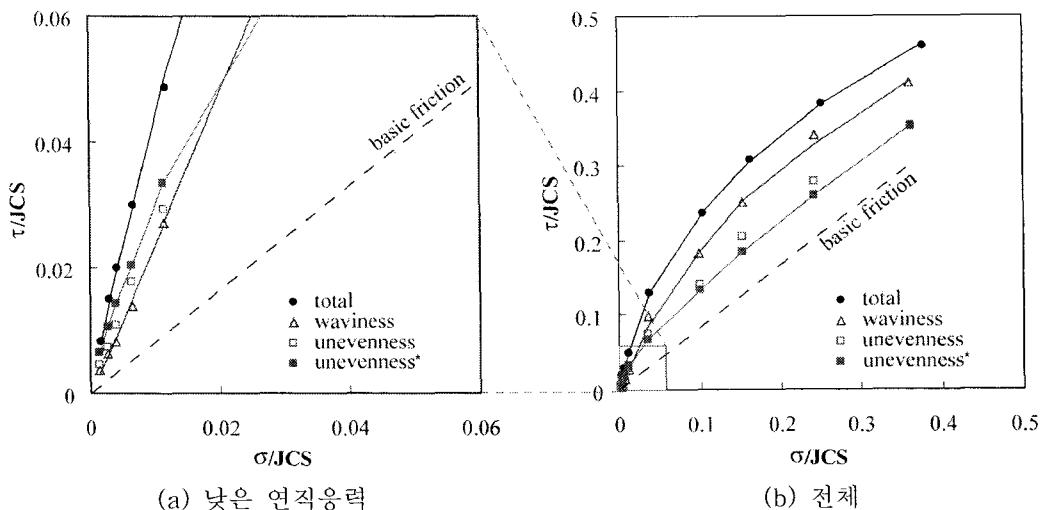


그림 2. 일반 석고의 인공 거칠기 시편 전단시험 결과

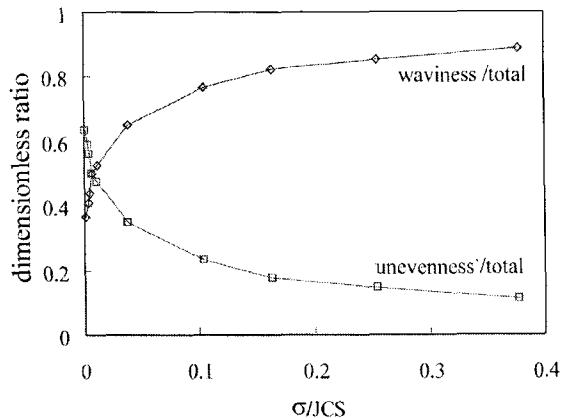


그림 3. 연직응력에 따른 전단강도의 발현

그림 3은 연직응력에 따라 만곡과 요철에서의 전단강도의 발현 양상을 잘 보여주고 있다. 전체 전단 강도 중 만곡의 전단강도(waviness/total)는 σ/JCS 에 따라 점차 증가하여 σ/JCS 가 0.1 이상인 경우 전단 강도의 약 80%에 근접하며, 최종적으로 전체 전단강도의 약 90%에 달하였다. 반면 전체 전단강도 중 요철의 전단강도(unevenness*/total)는 만곡과는 반대 경향을 띠며 연직응력이 커짐에 따라 점차 작아져 σ/JCS 가 0.1 이상인 경우 전단강도의 약 20%에 근접하고, 최종적으로 전체 전단강도에 대하여 약 10%에 달하였다. 만약 σ/JCS 가 1에 근접하면 전체 전단강도 중 만곡의 전단강도가 100%에 달하며, 전체 전단강도 중 요철의 전단강도 비율은 0%에 근접할 것으로 추측된다.

3.3 응력 수준에 따른 요철과 만곡의 거칠기 발현

3.3.1 거칠기의 발현

그림 4는 거칠기와 연직응력의 관계를 명백히 보여주고 있다. 여기서 연구된 거칠기(JRC*)는 Barton(1973)의 상관관계식을 사용하여 시험 결과로부터 역산하여 구한 것이다. 그러나 이 거칠기는 전체 거칠기와, 만곡, 요철의 응력 수준에 따른 변화 특성을 세밀히 파악하고자 기본 마찰각 성분을 제외하고 구한 값이다.

그림 4에서 보면 거칠기는 상수가 아니며, 연직응력에 따라 변화함을 알 수 있다. 대체로 σ/JCS 최대 값이 나타나는 위치와 JRC*의 최대값이 나타나는 위치는 같으며, 거칠기의 발현 특성과 관련하여 σ/JCS 의 범위를 명백하게 3구간으로 구분할 수 있다. 전체 거칠기와 만곡에서는 σ/JCS 가 약 0.01 이하인 초기에는 거칠기가 거의 선형적으로 증가형태를 보이며(1st stage), σ/JCS 가 0.15 정도 까지 완만한 증가를 보이다가(2nd stage) 이후에는 포물선 형태로 완만하게 감소한다(3rd stage). 요철의 경우(unevenness*)도 만곡의 그래프 형태와 유사하다. 요철의 경우 거칠기는 σ/JCS 가 약 0.005 까지는 선형적으로 증가하고 완만하게 증가하는 구간은 약 0.01까지로 매우 짧으며, 그 이후 감소하는 경향을 보인다. 전체 거칠기나 만곡의 경우 그래프의 감소추이는 위로 볼록한(concave) 형태이나 요철의 경우는 감소세가 훨씬 커서 아래로 볼록한(convex) 형태를 보인다. 또한 σ/JCS 가 1에 근접한다면 그림 5에서와 같이 거칠기 값은 '0'에 가까울 것으로 추정된다. 그러므로 Barton(1973)이 제시한 상관식의 추정 결과가 잘 맞는 경우는 거칠기가 비교적 일정한 σ/JCS 가 0.1 ~ 0.3의 범위일 가능성이 있다.

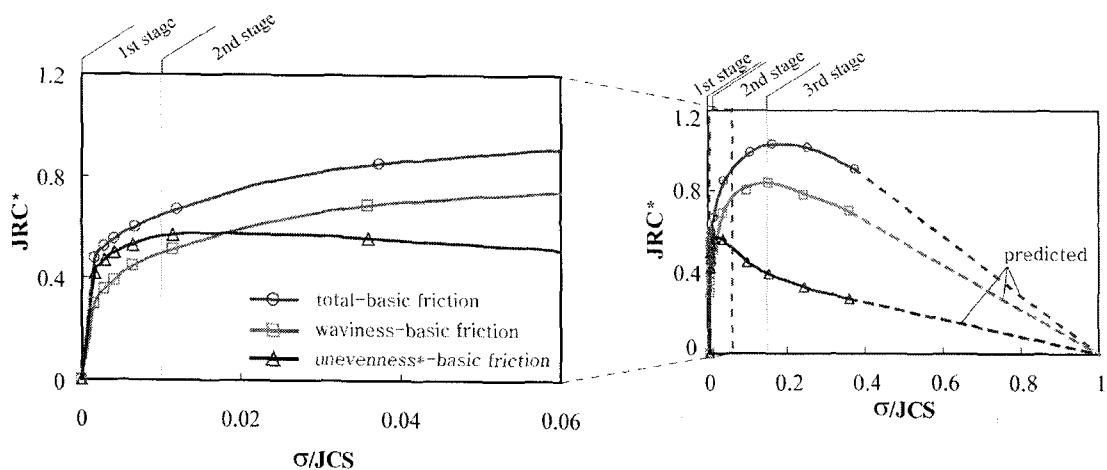


그림 4. 인공 삼각 프로파일 시편의 연직응력에 따른 JRC의 변화

3.3.2 거칠기 구성 성분의 변화

이러한 만곡과 요철에서의 연직응력에 대한 JRC*의 변화는 전단모드의 변화와 일치한다. 그림 5는 σ/JCS 에 대한 전단모드, τ/JCS 의 변화, JRC*의 변화를 개념화한 것이다. 연직응력의 변화에 따라 전단모드가 미끄럼 단계와 돌출부 파괴 단계로 명확히 구분됨을 알 수 있다. 그러나 만곡에서는 미끄럼 단계와 돌출부 파괴 단계가 상대적으로 떨어져 있으며, 그 사이에 돌출부가 마모되는 단계가 나타난다. 만곡과 요철의 $(\tau_w/JCS)_{max}$, $(\tau_u/JCS)_{max}$ 의 위치는 각각 $(JRC^*_w)_{max}$, $(JRC^*_u)_{max}$ 의 위치와 거의 같으며, $(JRC^*_u)_{max}$ 가 발생한 위치 이후에서의 전단강도 증가는 대단히 작아 최대값의 크기와 별 차이가 없다.

그림 6은 그림 5를 참조하여 σ/JCS 와 전단 모드에 따른 거칠기 구성 성분의 변화를 개념화 시킨 것이다. 먼저 σ/JCS 가 '0'에 가까운 경우는 돌출부 파괴가 없으므로 기계적 거칠기가 '0'이며, σ/JCS 가 1인 경우는 돌출부의 기하학적 특성이 무시되는 경우로 미끄럼이 '0'으로 간주할 수 있으므로 기하학적 거칠기가 '0'이다. 연직응력이 증가하면 기계적 거칠기 성분이 점차 증가하며 기하학적 거칠기 성분은 점차 감소한다. 이러한 현상은 주로 작은 돌출부의 파괴와 큰 돌출부의 마모 때문으로 추정된다. 거칠기 성분비의 변화 현상은 앞의 강도-변형 특성의 변화 양상을 참조할 때 요철에서는 낮은 연직응력에서 급격히 나타나고 만곡에서는 비교적 높은 연직응력에서 나타나며, 그 변곡점은 최대 첨두 전단강도의 발현 위치 또는 최대 거칠기의 발현 위치와 같다고 볼 수 있다. 돌출부 저부파괴 이후는 전체 거칠기 성분 가운데 기하학적 성분의 비율은 상당히 감소하여 이후 σ/JCS 가 1이 될 때 까지 완만한 감소세를 이어갈 것으로 추측된다.

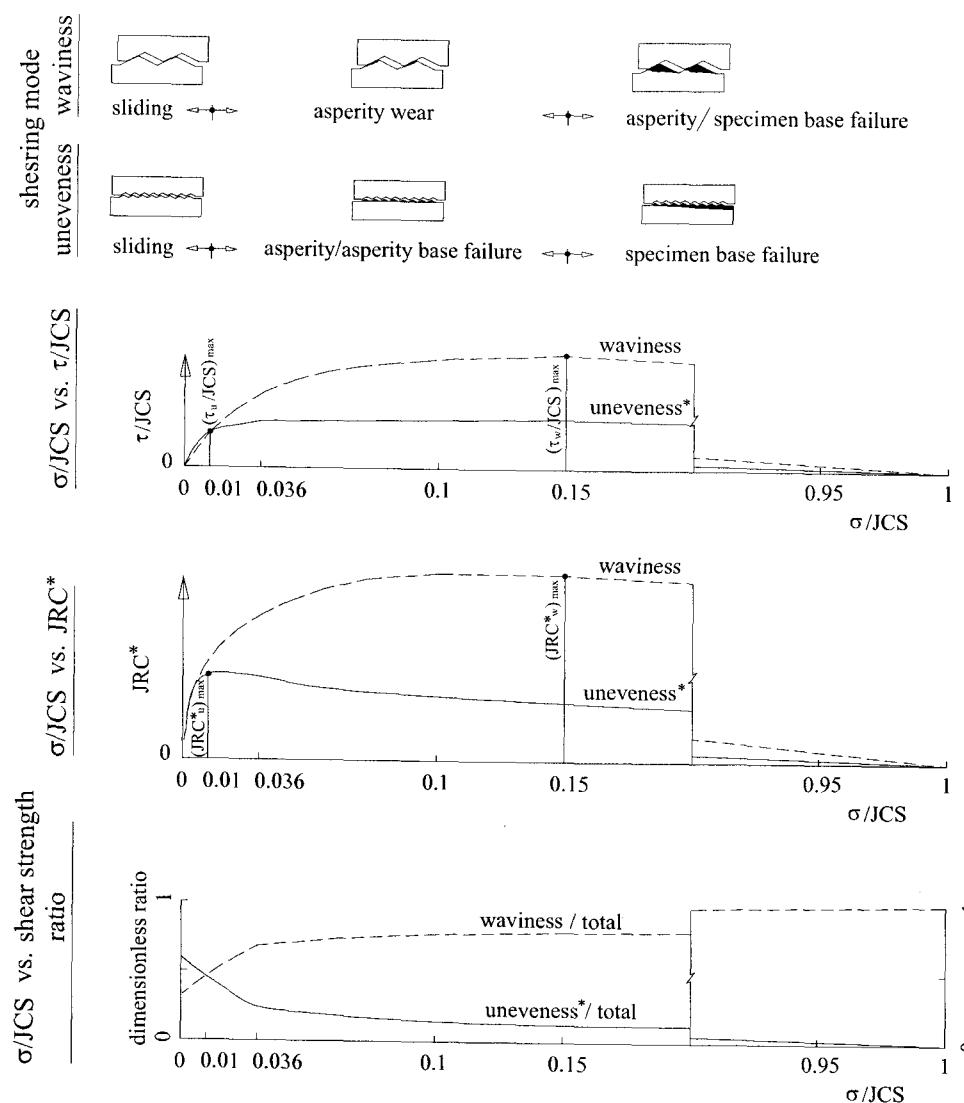


그림 5. 전단 모드에 따른 τ/JCS , JRC^* , 전단강도 비율의 변화

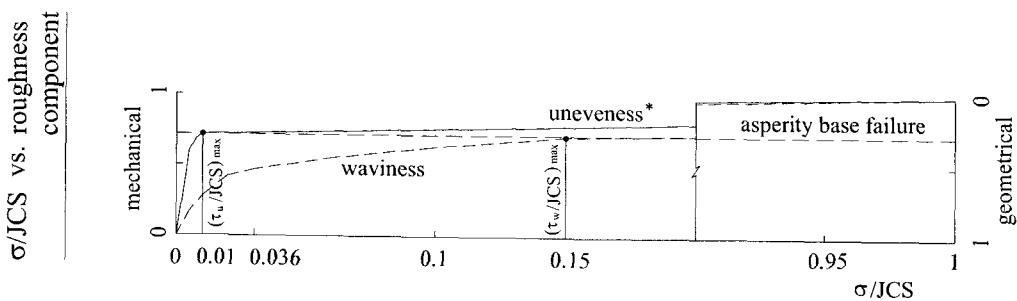


그림 6. 전단 모드에 따른 거칠기 성분 비율의 변화

그림 6에 의하면 거칠기의 규모가 다르면 거칠기의 구성 성분의 비율 역시 달라진다. 거칠기의 기하학적 특성과 기계적 특성은 전단이 진행되는 동안 매우 복잡한 상호작용을 하며(Siedel과 Haberfield, 1995) 발현되는 것으로 알려져 있지만 실제로는 크기가 다른 돌출부들에서 발현되는 거칠기의 크기가 연직응력의 수준에 따라 다르고, 거칠기 성분의 발현 비율도 달라지기 때문이다. 지금까지 이와 같은

연구를 한 사례는 없었으며, 전단강도 모델의 개발을 위한 거칠기의 정량화에는 이와 같은 거칠기 발현 특성을 반드시 고려하여야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

- 1) 전체 거칠기에 의한 첨두 전단강도는 만곡과 요철에 의한 전단강도의 합과 같다. 또한 낮은 연직응력 수준에서는 작은 규모를 가지는 돌출부의 첨두 전단강도가 대부분을 이루며, 연직응력이 증가함에 따라 큰 규모를 가지는 돌출부의 첨두 전단강도가 증가하여 전체 전단강도의 대부분을 차지하게 된다.
- 2) 전단 모드는 돌출부의 크기와 연직응력의 크기에 따라 달라진다. 연직응력이 증가하면 돌출부의 전단 모드는 미끄럼에서 돌출부 저부파괴로 변화하며, 돌출부의 크기가 작을수록 작은 연직응력 수준에서 전단모드의 전이가 일어난다.
- 3) 거칠기의 발현 특성 역시 전단 모드에 따라 달라지며, 낮은 연직응력 구간에서는 거칠기 계수가 급격히 증가하다가 점차 완만히 증가하여 최대값에 다다르고, 이후 포물선 형태를 그리며 완만히 감소한다. 그러므로 첨두 전단강도에서 거칠기 계수는 연직응력 수준에 따라 다르며, 연직응력에 대하여 비선형적으로 변화한다.
- 4) 전체 거칠기 성분 가운데 기하학적 거칠기와 기계적 거칠기 성분의 비율은 연직응력의 수준에 따라 달라진다. 연직응력의 수준이 낮은 경우 기하학적 거칠기가 대부분을 이루지만 연직응력이 증가 할 수록 거칠기의 기계적 성분이 증가하며, σ/JCS 가 1이 되는 경우 기계적 거칠기가 대부분이 되는 것으로 추정된다.
- 5) 연직응력에 따른 거칠기 성분 비율의 전이형태도 돌출부의 규모에 따라 달라진다. 작은 규모의 돌출부에서는 거칠기의 주요 성분이 기하학적 성분에서 기계적 성분으로 전이되는 시점이 큰 규모의 돌출부 보다 상대적으로 빠르며 급격한 반면, 큰 규모의 돌출부에서는 이러한 경향이 느리고 완만하다.
- 6) 이상을 종합할 때 거칠기의 정량화를 위하여 단일한 거칠기 계수를 사용한다면 전단모델이 잘 맞지 않을 수 있으므로 돌출부의 규모와 발현 특성을 고려하여 거칠기 계수를 적용하는 것이 합리적이라 판단된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술 연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

1. 홍은수(2005), 거칠기의 발현 특성에 의한 암석 절리 거칠기의 특성화, 박사학위논문, 고려대학교.
2. Archard, J. F.(1957), "Elastic deformation and the laws of friction", Proc. R. Soc. London, Ser. A, 295, pp. 190~205.
3. Bandis, S. C., Lumsden, A. C., and 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, No. 1, pp. 1~21.
4. Barton, N. R.(1973), "Review of a new shear-strength criterion for rock joints", Engrg. Geol., Vol. 7, pp. 287~332.
5. Barton, N. R., Bandis, S. C., and Bakhtar, K.(1985), "Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 22, pp. 121~140.

6. Brown, S. R., and Scholz C. H.(1986), "Closure of rock joints", *J. Geophys. Res.*, Vol. 91, No. B5, pp. 4,939~4,948.
7. ISRM(1981), "Suggested method for the quantitative description of discontinuities in rock masses", *Rock Characterization Testing and Monitoring*, Pergamon press, Oxford, pp. 3~52.
8. Ladanyi, B., and Archambault, G.(1970), "Simulation of shear behavior of a jointed rock mass", *Proc. 11th Symp. Rock Mech.*, Urbana, Illinois, pp. 105~125.
9. Lam, T. S. K., and Johnstone, I, W.(1989), "Shear behavior of regular triangular concrete/rock joints evaluation", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 728~740.
10. Seidel, J. P., and Haberfield, C. M.(2002), "A theoretical model for rock joints subjected to constant normal stiffness direct shear", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 39, pp. 539~553.
11. Suh, N. P., and Sin, H. C.(1981), "The genesis of friction", *Wear*, Vol. 69, pp. 91~114.
12. Xie, H., Wang, J., and Xie, W.(1997), "Fractal effects of surface roughness on the mechanical behavior of rock joints", *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 8, No. 2, pp. 221~252.