

유사 암석 시편을 사용한 암석 절리면 돌출부 손상 연구

홍은수¹, 권태혁², 조계춘^{3*}

A study on the asperity degradation of rock joint surfaces using rock-like material specimens

Eun-Soo Hong, Tae-Hyuk Kwon, Gye-Chun Cho

Abstract Image analyses for sheared joint specimens are performed to study asperity degradation characteristics with respect to the roughness mobilization of rock joints. Four different types of joint specimens, which are made of high-strength gypsum materials, are prepared by replicating the three-dimensional roughness of rock joints. About twenty jointed rock shear tests are performed at various normal stress levels. The characteristic and scale of asperity degradation on the sheared joint specimens are analyzed using the digital image analysis technique. The results show that the asperity degradation characteristic mainly depends on the normal stress level and can be defined by asperity failure and wear. The asperity degradation develops significantly around the peak shear displacement and the average amount of degraded asperities remains constant with further displacement because of new degradation of small scale asperities. The shear strength results using high-strength gypsum materials can not fully represent physical properties of each mineral particles of asperities on the natural rock joint surface. However the results of this quantitative estimation for the relationship between the peak shear displacement and the asperity degradation suggest that the characterization of asperity degradation provides an important insight into mechanical characteristics and shear models of rock joints.

Keywords: Image analysis, joint shear test, asperity degradation, roughness mobilization

요 지 암석 절리면의 거칠기의 발현에 따른 돌출부의 손상 특성을 연구하기 위해 전단시험 한 절리면 시편에 대한 이미지 분석을 수행하였다. 동일한 절리면에 대한 반복적인 시험에는 복제 시편을 사용한 모델시험이 가장 적합하였으므로 암석 절리면으로부터 각기 다른 4종류의 3차원 거칠기를 복제하고, 고강도 석고를 사용한 시편을 제작하였다. 연직응력 수준을 변화시키며 총 20여회의 전단시험을 실시하였으며, 전단된 시편의 디지털 사진의 이미지 분석을 통하여 손상된 거칠기의 국지적 양상과 규모를 분석하였다. 분석 결과 거칠기의 손상 특성은 연직응력의 수준에 크게 의존하며, 돌출부의 파괴와 마모로 규정할 수 있는 것으로 나타났다. 돌출부 손상은 첨두 전단변위에서 가장 많이 발생하며, 변위가 증가하면 작은 돌출부들이 새롭게 손상되어 평균적인 돌출부의 손상 규모는 일정한 것으로 나타났다. 고강도 석고를 사용한 전단시험 결과에 자연 암석절리의 돌출부를 구성하는 광물입자의 물리적 특성이 완전하게 반영될 수는 없다. 그러나 첨두 전단변위와 돌출부 손상과의 상관관계에 대한 정량적 연구 결과는 돌출부 손상 특성의 파악이 암석 절리면 역학적 특성과 전단모델의 연구에 매우 중요한 수단이 될 수 있음을 보여준다.

주요어: 거칠기 발현, 돌출부 손상, 이미지 분석, 절리면 전단시험

1. 서 론

이전의 암석 절리면의 전단특성에 대한 연구는 주로 경험적 방법(Barton, 1973; Bandis 등, 1983), 거칠기 계수의 도입(Carr와 Warriner, 1989; Kulatilake 등, 1995; Maerz 등, 1990; Tse 와 Cruden, 1979), 파괴 기구(mechanism)의 규명(Gentier 등, 1999; Lam과 Johnston,

1989; Haberfield과 Johnston, 1994; Seidel과 Haberfield, 1995; Yang 등, 2001) 등을 통하여 수행되었다. 대부분의 연구결과는 첨두 전단변위(peak shear displacement)와 첨두 전단강도(peak shear strength)는 대체로 거칠기가 최대로 발현된 시점에 나타나는 것으로 단순화하고 있다. 특히 거칠기의 정량화를 위한 연구도 대부분 2차원 거칠기 프로파일의 기하학적 특성에 주목하여 거칠기 계수를 사용한 거칠기의 물리적 특성화에 중점을 두어 왔다(홍은수 등, 2006). 그러나 3차원 절리면의 경우 첨두 값에 이르는 동안의 절리면 전단과 거칠기 발현의 기구는 대단히 복잡하며, 이러한 거칠기 정량화 방법으

¹정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수

²비회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사후 연구원

³정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

*교신저자: 조계춘 (E-mail: gyechun@kaist.edu)

로는 거칠기의 복잡한 발현(mobilization)특성을 제대로 진단모델에 반영하기가 어렵다(Hong 등, 2008).

연직응력의 수준에 따라 미끄러짐(sliding)과 파괴(failure)로 대변되는 절리면의 진단모드와 그에 따라 발현된 거칠기의 크기는 침투 진단강도에서 손상(degradation)되는 돌출부(asperity)들의 규모와도 직접적인 관련이 있다. 그러므로 전체 거칠기 가운데 침투 진단강도에 직접적으로 영향을 주는 돌출부의 손상 특성을 파악하는 것이 거칠기의 정량화와 올바른 거칠기의 측정, 또는 합리적인 거칠기의 최소 측정간격 선정을 위하여 대단히 중요한 문제라고 판단된다.

거칠기 발현 과정에서 3차원 절리면 돌출부의 손상특성은 실험적 연구(Borri-Brunetto 등, 1999; Chiaia, 2002; Gentier 등, 2000; Wang과 Scholz, 1993), 수치적 연구(이승도, 2002; Misra, 2002) 등을 통하여 미시적으로 연구되었다. 그러나 절리면에서 발현된 침투 진단강도 또는 침투 진단변위와 돌출부 손상과의 상관관계에 대한 정량적 연구는 아직까지도 미흡한 수준이라고 생각된다.

이 연구는 3차원 거칠기 모델 진단시험을 통하여 손상되는 돌출부 즉, 요철의 규모와 진단변위의 관계에 대한 규명을 목적으로 하였다. 이를 위하여 화강암의 인장 절리면에 실리콘 라텍스를 도포하여 서로 다른 4종류의 3차원 암석 절리면 형상을 얻었으며, 암석과 유사한 고강도 석고(Rock II)를 사용하여 진단 시험용 시편을 복제 하였다. 진단된 시편은 디지털 사진을 촬영하여 이미지 분석을 실시하여 돌출부의 손상 양상에 대한 정성적 분석과 손상 결과에 대한 정량적 분석을 수행하였다.

자연 절리면 시편을 사용하여 진단시험을 하는 경우 첫째, 고유한 3차원 거칠기를 가지는 동일한 시편은 존재하지 않으며 둘째, 절리면 손상의 영향으로 동일한 시편을 사용한 반복시험이 어려우므로 이 연구에서 목적하는 손상특성 파악이 불가능하다. 그러나 절리면 복제 방법은 동일한 3차원 거칠기를 가지는 시편을 사용하여 다양한 시험 조건으로 진단시험을 가능하게 하므로 이 연구에 매우 유용한 방법이 될 수 있었다.

이 연구에서는 돌출부를 절리 표면에서 주변보다 상대적으로 날카로운 국소점(Jager, 1971)으로, 거칠기를 절리면 돌출부들의 전체 합으로 정의하였다. 또한 만곡(waviness)을 진단변형 도중에 진단되지 않고 팽창을 일으키는 거칠기로, 요철(unevenness)을 진단변형 도중에

손상되는 거칠기(ISRM, 1981)로 정의하였다.

2. 거칠기의 발현과 돌출부의 손상

마찰계수의 성분은 돌출부의 변형 성분과 단단한 돌출부와 마멸된 입자에 의한 소성변형 성분, 그리고 미끄러짐 면에서 편평한 부분의 응착력으로 이루어진다(Suh와 Sin, 1981). 이것은 각각 돌출부의 파괴, 마모(wear)와 연마(abrasion), 접촉면의 응착(adhesion)과 관련이 있다. 돌출부의 파괴는 전단 또는 압축에 의한 파괴이다. 마모는 마찰에 의해 표면의 물질이 떨어져 나가는 것으로, 전단이 진행될수록 규모가 커지는 특성을 나타낸다. 마모는 비교적 편평한 면에서 주로 나타나는 응착에 의한 것과 매끈하고 연약한 물질이 거칠고 단단한 물질사이에서 발생하는 연마에 의한 것으로 나눌 수 있다(Bhushan, 2002).

이상의 연구 결과가 비록 금속 재료를 바탕으로 한 것이며, 암석 절리면 같이 거친 표면에서는 응착은 별로 중요하지 않은 것으로 보이지만(Poon과 Sayles, 1992) 마찰의 본질은 암석 절리면에서도 동일하다.

마찰에 의한 돌출부 파괴, 마모와 같이 외력에 의한 절리면 거칠기의 물리적인 변질을 모두 암석 절리의 손상으로 정의 할 수 있다. 절리면의 손상은 절리면 전단 이전 연직하중 재하에 의한 미소 거칠기의 손상과 전단 하중에 의한 거칠기의 손상으로 구분할 수 있다. 그러나 연직하중에 의한 미소 거칠기 손상은 규모가 작고(Brown과 Scholz, 1986) 진단강도에 미치는 영향도 미미하므로 여기에서는 논외로 하였다.

미시적인 측면에서 마찰은 국지적 소수의 접촉점에서 나타나는 현상이다(Brown과 Scholz, 1986; Chiaia, 2002). 따라서 절리면의 진단특성은 절리 표면에서의 접촉점의 수, 접촉점의 크기, 접촉 압력, 돌출부 강도(즉 절리면의 기하학적 거칠기, 연직응력, 강도특성, 전단거리)에 의존한다(Archard, 1957; Barton과 Choubey, 1977; Reeves, 1985).

이중 연직하중은 침투 진단강도의 발현에 지배적인 인자로 알려져 있다. 이것은 연직하중이 전단되는 혹은 전단력에 영향을 주는 미세 돌출부의 수와 면적에 가장 큰 영향을 미치기 때문으로 보인다. 침투 진단강도는 침투 진단변위에서 발현되며 그 결과는 손상으로 나타난다. 전단 도중에 파괴되는 거칠기인 요철의 규모는 연직

응력의 수준에 대하여 의존하는 것으로 생각할 수 있다.

절리면의 전단 모드는 낮은 연직응력 수준에서는 만곡을 따르는 미끄러짐이 주요하며, 높은 연직응력 수준에서는 돌출부의 파괴가 주요한 것으로 생각된다(Hsu 등, 1988). 따라서 거칠기의 손상은 주로 낮은 연직응력 수준에서 요철의 파괴, 높은 연직응력 수준에서의 요철의 파괴와 이로 인한 만곡의 마모가 지배적인 것으로 보인다.

3. 전단시험 개요 및 이미지 분석 방법

3.1 전단시험 방법

인공인장 절리 제작을 위한 석재는 전북 익산시 함열면에서 채취한 화강암(함열석)을 사용하였다. 이 지역의 화강암은 남한 기반암의 25%를 차지하는 대보 화강암의 일종으로 재질이 치밀하고 흡수율이 낮으며 강도가 큰 특성을 가지고 있다. 편광현미경 분석 결과 대체로 중립질 또는 조립질의 정장석, 사장석, 석영, 흑운모 등이 주류를 이루고 있으며, 입자의 평균 직경은 각각 1.0, 3.4, 0.5, 1.7 mm 이며 전체 평균은 0.9 mm 이다.

이전의 연구(Hong 등, 2006)에서는 인공적으로 분리

된 1 m × 2 m 크기의 함열석 인장 절리 표면에 실리콘 고무를 도포하여 100 mm × 100 mm × 40 mm 크기의 4개의 거칠기 복제물(No.1, No.2, No.3, No.4)을 제작하였다. 복제물의 형상은 Fig. 1과 같으며, 표면 거칠기 계수(surface roughness parameter), R_s 는 각각 1.0869, 1.0876, 1.0889, 1.0879이다.

표면 거칠기 계수, R_s 는 Eq. 1과 같이 실제 절리면의 면적(A)과 수평면에 투영된 절리면의 면적(A_0)의 비로서 정의된다.

$$R_s = A/A_0 \quad (1)$$

이 연구에서는 3차원 거칠기를 가진 시편을 제작하기 위해 실리콘 복제물을 몰드로 사용하여 절리면 전단시험을 위한 시편(100 mm × 100 mm × 40 mm)을 추가로 제작하였다. 먼저 실리콘 복제물로부터 상부 시편을 복제하고 다시 복제된 상부 시편으로부터 맞은편의 시편을 복제하였으므로 제작된 시편은 상·하면이 완전히 맞물린 것으로 생각된다. 시편의 제작에 사용된 재료는 이전의 연구에서 사용된 고강도 석고(Rock-II)이다. 사용된 재료의 특성은 Table 1에서와 같다.

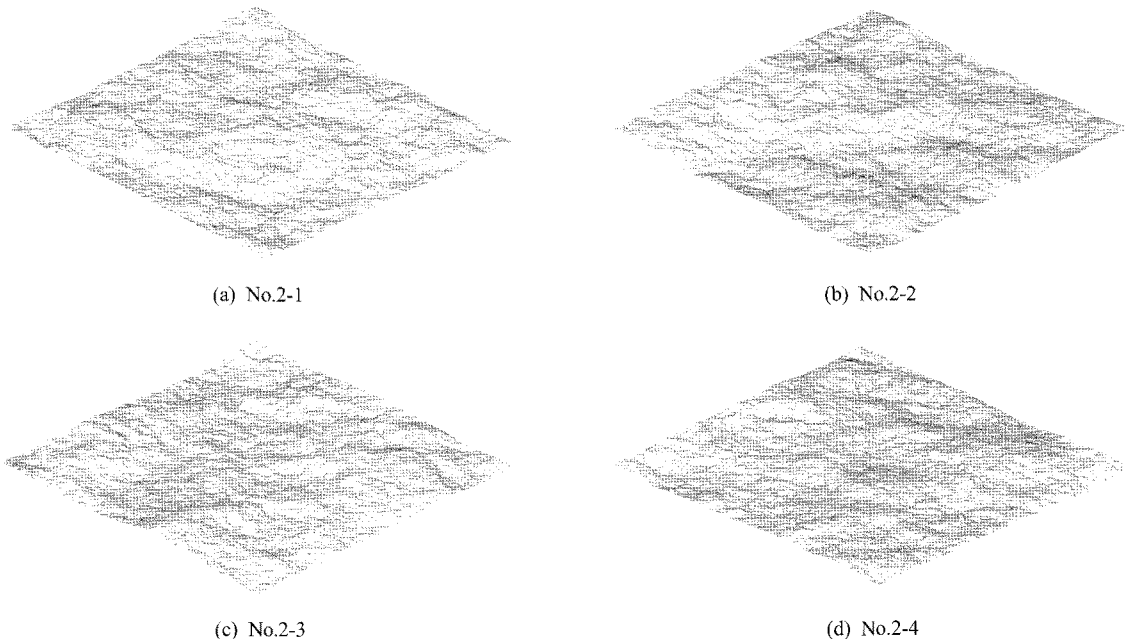


Fig. 1. Used rock joint surfaces

유압식 절리면 전단 시험기를 사용하였으며(홍은수 등(2005) 참조), 연직변위와 수평변위는 유효값이 0.1 mm 인 2개의 LVDT를 사용하여 측정하였다. 연직 재하응력을 5 단계(2.4, 6.0, 10.7, 19.1, 54.9 kN/m²)로 적용하였고, 전단시험 조건을 일정 연직하중 조건으로 하였다. 전단속도는 0.5 mm/min을 적용하였다. 일부시편의 경우 침투 전단강도 발현 직후 전단시험을 중단하였으며, 다른 시편의 경우는 침투 전단강도 발현 후에도 일정기간 동안 전단을 지속하였다.

3.2 전단시험 결과

절리면 전단 시험 결과는 Table 2와 같다. 표면거칠기 계수, Rs의 크기는 No.3 > No.4 > No.2 > No.1 순이지만 전단응력 크기의 결과는 No.3 > No.4 > No.1 > No.2로 나타나 일부의 경우 Rs와 전단응력 크기와의 상관성이 떨어졌다. 이것은 Rs가 평균 절리면 거칠기 이므로 전단거동에 매우 큰 영향을 미치는 국부적인 거칠기를 잘 반영하지 못하였기 때문으로 생각된다.

3.3 이미지 분석 방법

시편의 색조는 전단 시험전 분홍색을 띠고 있으나 전단 시험후 돌출부가 손상된 경우에는 Fig. 2에서와 같이 손상 부위의 색조가 흰색으로 바뀌었다. 따라서 손상 부위를 육안으로도 손상 부위를 쉽게 구분 하는 것이 가능하였다. 그러나 전단 직후 절리면 시편의 표면에는 돌출

부가 전단되어 탈락된 입자가 발생 하였으며, 손상부위의 색조와 같아 혼돈의 여지가 충분하였다. 따라서 촬영을 할 때에는 정확한 손상 부위를 파악하기 위해 솔을 사용하여 탈락된 입자를 제거하였다.

디지털 사진의 촬영은 고해상도의 디지털 카메라를 사용하고, 이미지의 왜곡을 막기 위해 시편과 일정 거리를 유지하며 시편 중앙의 직상부에서 수행하였다. 이미지 분석과정에서 분석 대상의 크기 확인을 쉽게 하기 위하여 절리면 측면에 버니어 캘리퍼스를 놓아 사진에 참조자료가 포함되도록 하였다.

촬영한 비트맵 파일 포맷의 이미지는 컴퓨터에서 오토캐드(AutoCAD 14[®])를 사용하여 분석하였다. 오토캐드에서는 시편 이미지의 스케일을 스케일에 맞추어 정확히 조정된 후 손상된 부분의 외곽선을 폴리라인으로 표시하여 손상부위의 크기(너비, 길이, 면적)를 쉽게 구할 수 있도록 하였다. 이미지 분석에 사용한 디지털 사

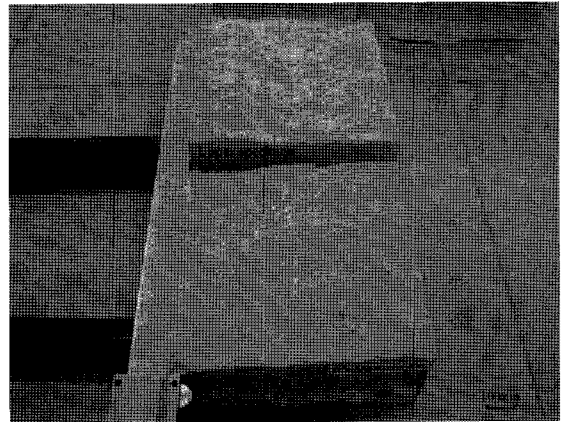


Fig. 2. Typical degradation of Joint surface after shear test

Table 1. Material property of the used specimen

comp. strength (σ_c , MN/m ²)	secant modulus (E_{sec} , kN/m ²)	basic friction angle (Φ_b , °)
40.3	8,386.5	36.4

Table 2. Shear test results: shear stress change, τ with normal stress, σ level

σ (kN/m ²)	τ (kN/m ²)			
	No.1	No.2	No.3	No.4
2.4	4.5	3.1	5.7	5.0
6.0	10.0	7.6	15.3	13.4
10.7	16.7	13.6	23.6	21.0
19.1	27.7	24.6	35.8	33.4
54.9	70.4	66.8	80.7	78.8

Table 3. Specification of used digital camera and computer graphic devices

Item	Description
Digital camera	Nikon E3500, image resolution 2048 × 1536 DPI
Monitor	Samsung Syncmaster 197T, 17 inch, 1280 × 1024 DPI, 32 bits
Graphic card	GeCube RADEON X1600 series, 256 Megabites video RAM
File Format	bitmap (Raster graphic) format

진기와 컴퓨터의 사양은 Table 3과 같다.

4. 이미지 분석에 의한 거칠기 손상 분석

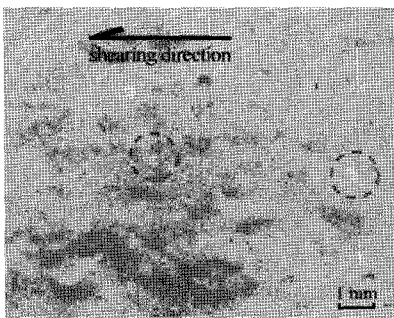
4.1 국소 영역의 돌출부 손상 양상

먼저 돌출부 손상 양상을 확인하기 위해 이미지를 확대 하여 Fig. 3에서와 같이 국소 영역을 분석하였다. 여기서 Fig. 3의 (a)는 No.2의 하부 시편으로 연직응력이 10.7 kN/m² 일 때, (b)는 No.1의 상부 시편으로 연직응력이 6 kN/m² 일 때, (c)는 No.2의 하부 시편으로 연직응력이 10.7 kN/m² 일 때, (d)는 No.3의 하부 시편으로 연직응력이 54.9 kN/m² 일 때 전단으로 인한 돌출부 손상 결과이다.

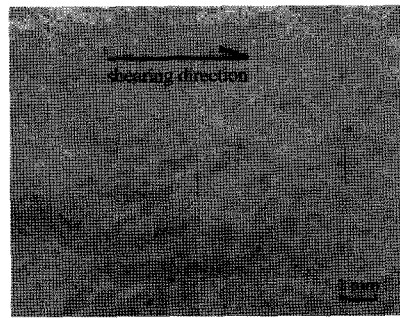
전형적인 돌출부의 파괴 양상은 Fig. 3의 (a)와 같다. (a)와 같은 개별 돌출부의 파괴가 주로 발생할 경우 비교적 작은 손상 면적을 나타낸다. 그러나 Fig. 3의 (b)에서와 같이 연마나 마모의 경우 손상면적이 상대적으로 더 커지는 것으로 생각된다. (b)에서는 돌출부의 연마와 마모를 잘 보여준다. 돌출부가 연마되어 떨어져 나간 부분

은 Rock-II의 분홍색 색조가 잘 나타나며, 연마된 부분의 주면에는 돌출부가 마모되어 흰색의 색조를 띠고 있다. 비교적 낮은 연직응력 상태에서의 전단이므로 돌출부 규모가 클 때 비교적 큰 규모 돌출부의 저부까지 파괴가 이루어지지 않고 돌출부 표면을 따라 손상이 이루어진 것으로 보인다.

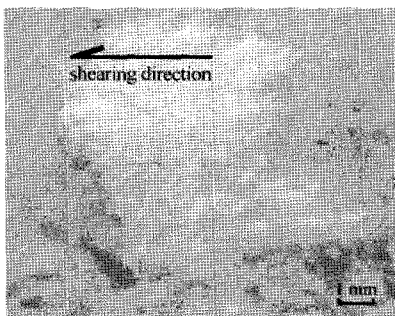
돌출부에 미치는 연직응력이 커지는 경우 Fig. 3의 (c)에서와 같이 돌출부의 파괴 규모, 손상 범위가 낮은 연직응력일 때보다 상대적으로 커지고 마모가 증가하는 것으로 생각된다. 그러나 이미지 분석을 할 때 손상 영역과 손상되지 않은 영역을 구별하는 것은 비교적 쉬우나, 정밀한 분석을 하지 않은 경우 Fig. 3의 (d)에서와 같이 주변보다 상대적으로 들어간 부분(凹부)의 손상과 돌출된 부분(凸부, Fig. 3(c))의 손상을 구분하는 것은 매우 어려웠다. 또한 아주 미세한 크기의 돌출부 손상은 확인하지 못하였을 가능성이 있지만, 대체로 0.2 mm 이상 규모의 돌출부 손상은 충분히 구별할 수 있었다.



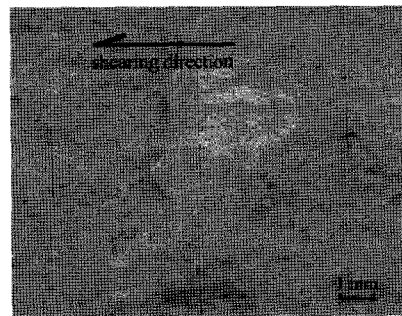
(a) asperity failure ($\sigma=10.7 \text{ kN/m}^2$)



(b) abrasion & wear ($\sigma=6.0 \text{ kN/m}^2$)



(c) wear in convexed area ($\sigma=10.7 \text{ kN/m}^2$)



(d) wear in concaved area ($\sigma=54.9 \text{ kN/m}^2$)

Fig. 3. Typical roughness degradation cases

4.2 돌출부 손상영역 분석

4종류의 거칠기를 나타내는 20개 하부 시편의 전단에 의한 손상 영역을 연직응력별로 Fig. 4와 같이 표시하였다. 총 6,128개로 표시한 손상 영역은 요부와 곡부의 손상을 모두 반영한 것이다. Fig. 4를 바탕으로 손상 영역의 개수(N), 전단과 평행한 방향의 손상영역의 평균 너비(x), 평균 손상 영역의 면적(A_f), 전체 손상 면적(ΣA_f), 평균 손상영역의 면적으로부터 구한 평균 등가 손상 직경(D_{eq}), 전체 손상 면적과 시편 면적(A)의 비($\Sigma A_f/A$)를 측정하여 Table 4에 정리하였다.

돌출부 손상영역 분석 결과 연직응력이 증가할수록 손상영역의 발생 빈도(N)와 면적(ΣA_f , $\Sigma A_f/A$)이 증가

하는 것으로 나타났다(Fig. 4, Table 4). Fig. 5는 $\Sigma A_f/A$ 를 전단변위로 정규화 한 것으로 연직응력의 증가에 따른 $\Sigma A_f/A$ 의 증가를 잘 나타낸다. 이러한 경향은 거칠기의 손상 특성과 발현과의 밀접한 상호 연관성을 나타내는 것으로 생각된다.

그러나 D_{eq} 와 x는 적용 연직응력의 범위 내에서 연직응력의 증가에 대한 뚜렷한 상관성을 보이지 않았으며, 평균적인 D_{eq} 와 x는 각각 1.5 mm, 1.3 mm로 나타났다(Fig. 6). 이러한 양상은 $\Sigma A_f/N$ 역시 비슷하다(Table 4).

Fig. 7은 시편에서 손상영역 각각의 너비(x_i)를 계급구간 0.2 mm로 나타낸 돛수분포이다. 돛수분포는 모두 치

Table 4. Degradation and shear displacements.

σ (kN/m ²)	N (ea)	x (mm)	ΣA_f (mm ²)	$\Sigma A_f/N$ (mm ²)	D_{eq} (mm)	$\Sigma A_f/A$ (%)	d_h (mm)	$(d_h)_{peak}$ (mm)
No.1								
2.4	75	1.4	161.2	2.1	1.5	1.3	0.8	0.3
6.0	171	1.1	218.1	1.3	1.1	2.2	1.7	1.2
10.7	97	1.6	275.5	2.8	1.6	2.8	1.7	1.0
19.1	149	1.9	503.9	3.4	1.8	5.0	1.6	1.2
54.9	1,167	0.8	1,194.5	1.0	0.9	13.1	1.9	1.6
No.2								
2.4	27	1.4	46.8	1.7	1.4	0.5	1.1	0.6
6.0	99	1.0	166.1	1.1	1.0	1.7	1.4	0.9
10.7	101	2.1	397.3	3.9	1.8	4.0	3.2	1.3
19.1	221	1.3	460.7	2.1	1.4	4.6	2.3	2.1
54.9	833	1.3	1,899.9	2.3	1.4	19.0	2.8	2.7
No.3								
2.4	48	1.3	81.3	1.7	1.3	0.8	1.4	1.1
6.0	272	0.7	178.7	0.7	0.8	1.8	1.5	1.4
10.7	127	1.3	359.3	1.4	1.2	3.6	1.1	1.0
19.1	127	1.9	661.8	5.2	2.0	6.6	2.0	1.8
54.9	1,215	0.8	1,090.3	0.9	0.9	10.9	1.8	1.6
No.4								
2.4	90	1.1	139.8	1.6	1.2	1.4	1.3	0.5
6.0	109	1.4	239.1	2.2	1.5	2.4	0.9	0.6
10.7	219	1.3	429.4	2.0	1.3	4.3	1.1	0.9
19.1	233	1.4	558.9	2.4	1.4	5.6	0.7	0.6
54.9	564	1.1	1,063.6	1.9	3.8	11.8	1.1	1.0
Avg.	306	1.3	506.3	2.1	1.5	5.2	1.6	1.2

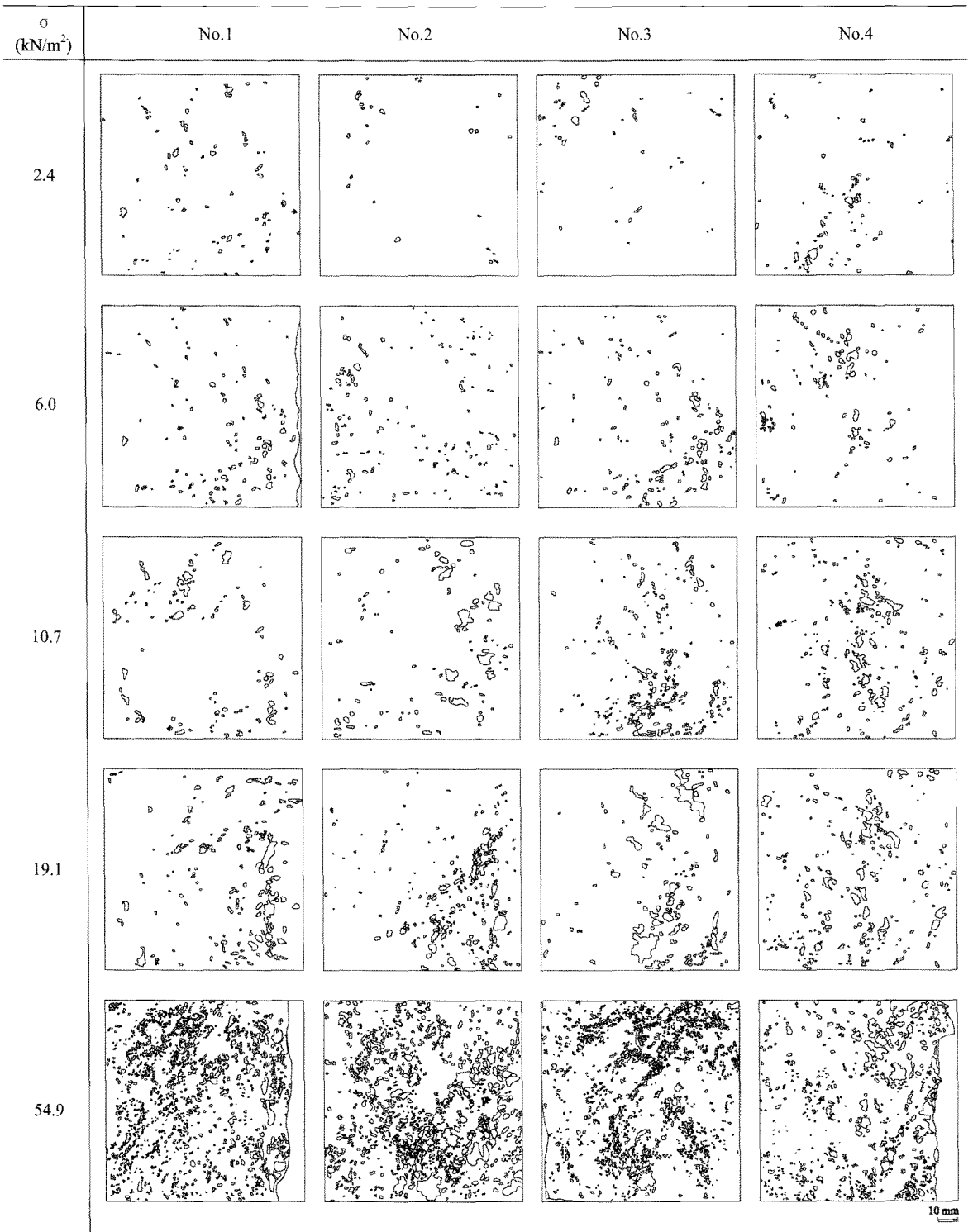


Fig. 4. Degradation of joint surface (lower specimens).

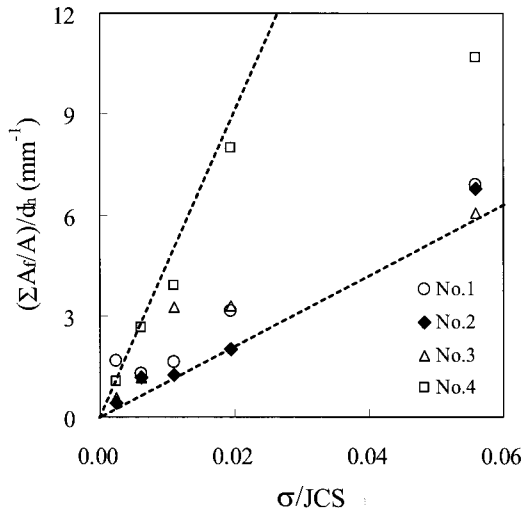


Fig. 5. Normalized degradation area $(\Sigma A_d/A)/d_h$ Vs. normalized normal stress σ/JCS .

우친 분포를 나타냈다. 뚫수는 손상되는 돌출부의 너비가 0보다 커지며 급격하게 증가하였으며, 1 mm 부근에서 정점을 이루다가 아래로 볼록한 포물선을 그리듯 감소하여 3 mm~4 mm 이내까지 서서히 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 8은 각 뚫수분포에서의 정점(x_d)의 크기와 전체 손상 면적과 시편 면적의 비($\Sigma A_d/A$)를 전단 거리(d_h)로 정규화 한 것과의 관계를 나타낸 그림이다. 각 시편의 x_d 는 그 시편에서 가장 지배적인 돌출부 손상 폭을 의미하며, 손상비율이 증가함에 따라 x_d 는 1 mm 근처에서부터 서서히 감소하는 추세를 나타냈다.

3차원 절리면을 전단하는 경우 전단이 진행되면서 절리면을 따른 팽창이 발생하며, 맞물림 정도와 맞물린 형태가 표면의 기하학적 형태 때문에 국지적으로 달라진다(Karpenko와 Akay, 2001). 따라서 지금까지 전단되지 않고 있던 작은 크기의 돌출부가 각 전단 단계마다 새롭게 맞물려져 전단되는 것으로 생각된다. 또한 연직 응력이 증가하면 거칠기에 따라 절리면의 미세 접촉 면적이 증가하므로(Xie 등, 1997), 작은 크기의 손상 영역의 수도 증가한다.

이러한 두 가지 요인 때문에 평균적인 손상 영역의 평균 너비(D_{eq} , x)와 크기($\Sigma A_d/A$)는 연직 응력의 증가에 따라 급격하게 증가하지 않는 것으로 보인다. 지배적인 돌출부 손상 폭(x_d)과 전체 손상 면적과 시편 면적의 비($\Sigma A_d/A$)

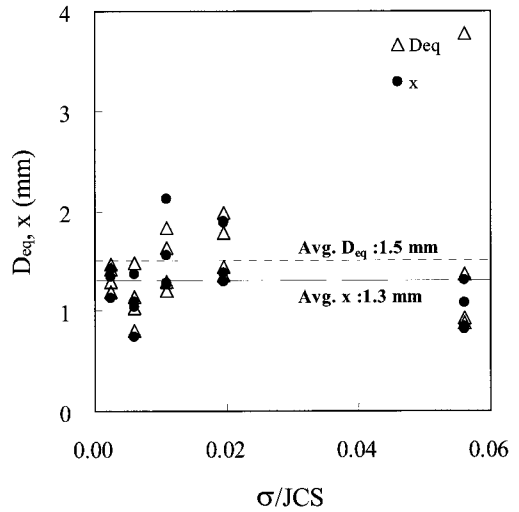


Fig. 6. Avg. equivalent diameter D_{eq} , Avg. width x Vs. normalized normal stress σ/JCS .

와의 관계는 손상 면적이 커질수록 작은 돌출부의 손상 증가가 비교적 큰 면적의 손상보다 크다는 것을 나타낸다. 이미지 관찰 결과에서도 손상 면적이 큰 경우 대부분 규모가 큰 돌출부 저부의 전단 또는 압축파괴보다는 비교적 완만하고 큰 굴곡의 위에 존재하는 작은 돌출부가 차례로 손상된 것으로 보였으며, 그 기구가 마모 현상에 가깝다. 연직 응력이 증가하면 파괴되는 돌출부의 크기가 급격히 증가하는 것으로 생각할 수 있으나, 실제로는 전단 경로 상에서 파괴되는 큰 규모 돌출부는 그 수나 전체 손상 영역에서의 비율이 비교적 적은 것으로 보인다.

4.3 전단변위와 돌출부 손상

전단변위, 침투 전단 변위와 돌출부 손상과의 관계를 알아보기 위해 시험이 종료된 순간의 전단변위(d_h)와 침투 전단변위($(d_h)_{peak}$)를 측정하였다(Table 4). Table 4에서 $d_h/d_{h(peak)}$ 의 차이가 0.2이내로 거의 유사한 경우 굵은 글씨체로 표시하였다.

Fig. 9는 전체 손상 면적과 시편 면적의 비($\Sigma A_d/A$)를 전단거리(d_h)로 정규화한 값과 전단변위와 침투 전단변위의 비, $d_h/d_{h(peak)}$ 의 관계를 나타낸 그림이다. 전단변위가 침투 전단변위보다 커질때 전단변위의 크기에 대한 손상 영역의 크기는 상관성을 잘 보이지 않으며 $(\Sigma A_d/A)/d_h$ 의

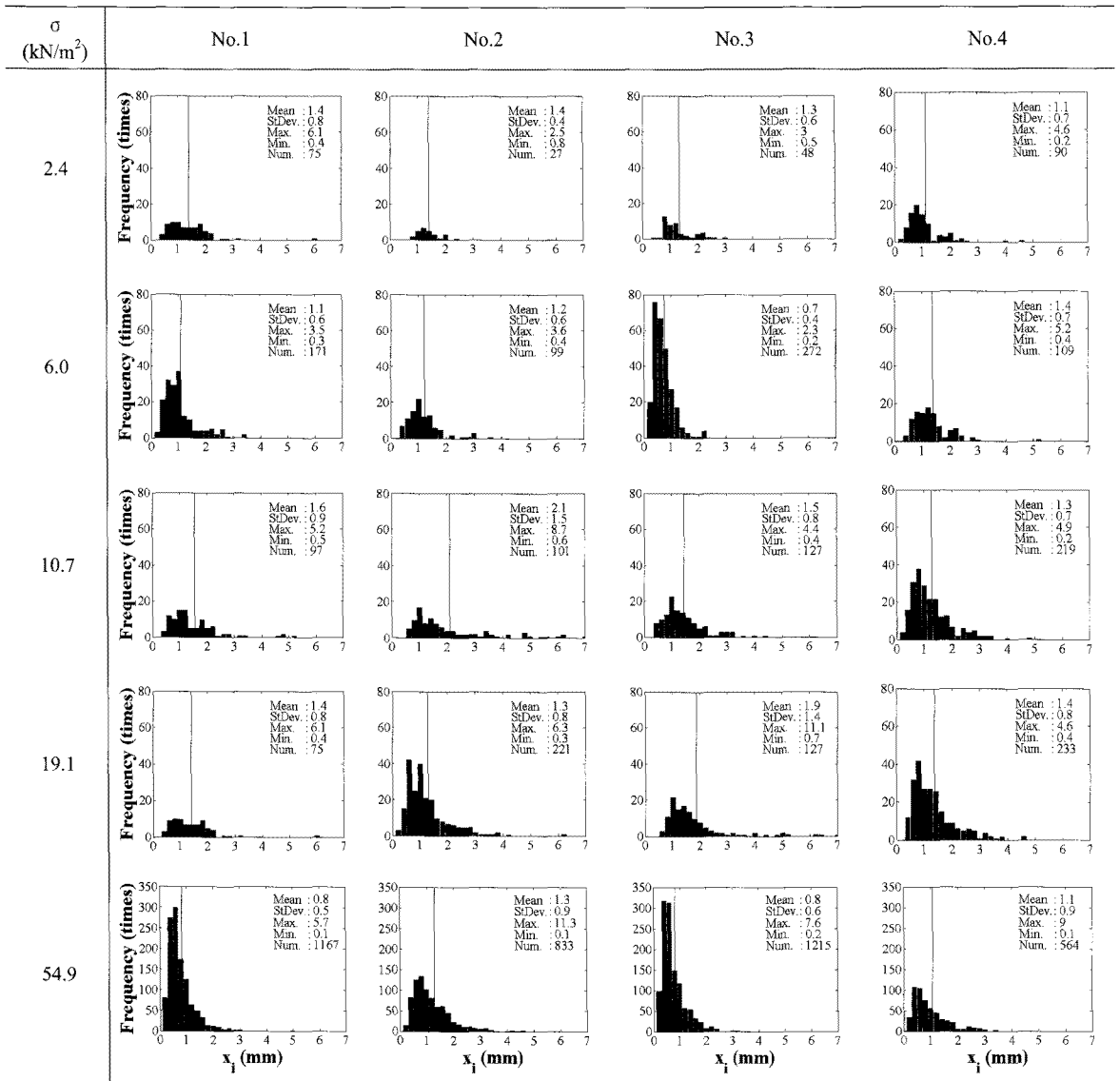


Fig. 7. Histogram of horizontal degradation length (lower specimens).

크기는 1부근을 나타낸다. 그러나 전단변위가 침투 전단 변위와 같을 때 $(\Sigma A_i/A)/d_h$ 의 크기는 크게 증가하는 부분이 존재한다. 이러한 결과는 침투 전단변위에서 발생하는 손상의 크기가 전체 전단과정 중 발생하는 손상의 대부분을 차지할 가능성이 크다는 것을 나타낸다.

Fig. 10은 평균 등가 손상 직경(D_{eq}), 손상영역의 평균 너비(x), 돛수분포에서의 정점을 나타내는 x_d 와 전단변위와 침투 전단변위의 비, $d_h/d_{h(peak)}$ 와의 관계를 나타낸

그림이다. 그림에서 손상영역의 크기(D_{eq} , x)는 변위의 크기와의 상관성을 잘 보이지 않는다. x_d 역시 마찬가지로이며, 대체로 1 mm 정도의 값을 보인다. 그러나 침투 전단 변위가 전단변위와 같을 때에는 1 mm보다 작은 경우가 다수 나타나는 특징을 보인다.

이것은 평균적인 손상 돌출부 폭은 연직응력에 대한 관계와 마찬가지로 변위가 커지더라도 손상 돌출부 수의 증가로 인해 비교적 일정하며, 지배적인 손상 돌출부

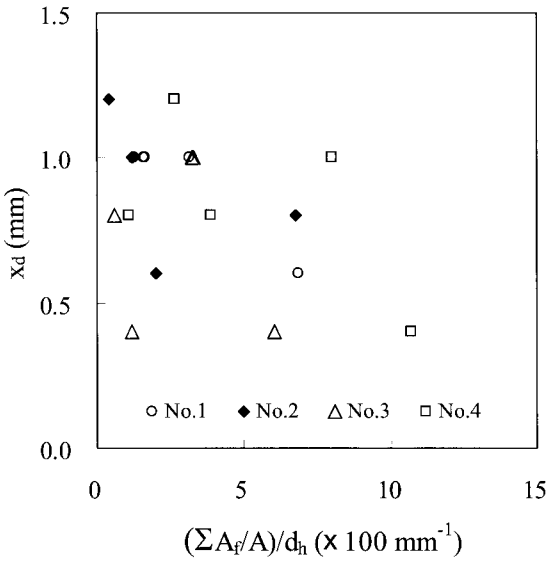


Fig. 8. Dominant degradation width x_d & normalized degradation area $(\Sigma A_f/A)/d_h$ variation

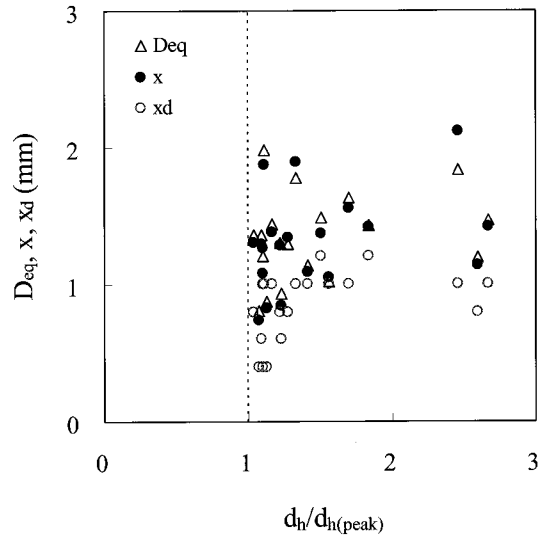


Fig. 10. Avg. equivalent diameter D_{eq} , Avg. width x , dominant degradation width x_d Vs. normalized shear displacement $d_h/d_{h(peak)}$

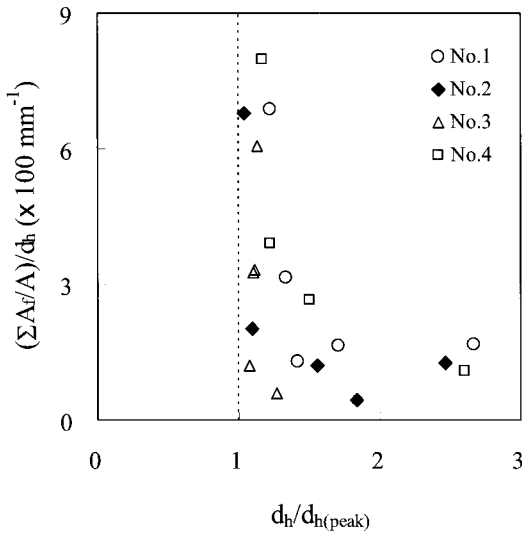


Fig. 9. Normalized degradation area $(\Sigma A_f/A)/d_h$ Vs. normalized shear displacement $d_h/d_{h(peak)}$

폭은 침두 전단변위 일 때 값이 작을 수 있으나 침두 전단변위 이후에는 전단변위와 함께 증가하여 차츰 변위와 무관하게 일정한 크기에 다다르는 것을 나타낸다.

Fig. 9와 Fig. 10에서와 같이 침두 전단변위 이후에는 손상면적의 증가 비율이 일정하고 지배적인 손상 폭도

거의 일정한 값(1 mm)을 나타냈다. 이러한 결과와 이 연구에서 거칠기의 복제에 사용한 화강암의 광물 크기 (평균직경: 0.9 mm)를 고려할 때 자연 절리면의 경우 침두 전단변위에서 손상된 돌출부의 대부분은 절리 표면에 존재하는 광물입자의 파괴일 가능성이 큰 것으로 보인다. 또한 침두 전단변위에서 전단 저항력의 대부분은 광물입자 크기의 돌출부 파괴와 연관되며, 마모의 영향은 전체 전단 저항력의 일부일 가능성이 크다는 것을 나타낸다.

5. 결론 및 토의

이미지 분석을 통하여 거칠기의 손상 양상을 정성적으로 고찰하고 손상되는 돌출부의 규모와 전단변위의 관계에 대한 정량적인 분석을 수행 하였다. 비록 이 연구를 위해 수행된 전단시험 결과가 모델시험에 의한 것이며, 이미지 분석의 정밀도에도 한계가 있었지만 이 연구에서 수행된 연구의 결과는 암석 절리면의 전단에서 나타나는 거동을 잘 반영하고 있다고 생각된다. 이상의 연구 결과는 다음과 같다.

1. 돌출부 손상은 크게 작은 돌출부의 압축, 전단으로

발생하는 파괴와 비교적 완만하고 큰 굴곡의 위에 존재하는 작은 돌출부가 차례로 손상되는 마모로 구분할 수 있다. 손상 면적은 마모에서 돌출부 파괴일 때보다 상대적으로 더 크다.

2. 연직응력이 커지면 돌출부의 파괴 규모, 손상 면적이 커지고 마모가 점차 증가한다. 이러한 경향은 거칠기의 손상 특성과 발현과의 밀접한 상호 연관성을 나타내는 것으로 생각된다.
3. 연직응력이 증가하여도 파괴되는 큰 규모 돌출부의 수와 전체 손상 영역에서의 비율은 비교적 적다. 오히려 작은 돌출부의 손상 폭과 면적이 크게 증가하며, 평균적인 돌출부 손상 폭과 면적은 큰 변화가 없다.
4. 손상은 대부분 침투 전단변위에서 발생한다. 평균적인 손상 돌출부 폭은 전단 변위가 커지더라도 작은 돌출부 손상의 증가로 인해 비교적 일정하다. 지배적인 손상 돌출부의 폭은 침투 전단변위 일 때 일정치 않은 작은 값을 나타내나 전단변위와 함께 증가하여 점차 일정한 크기에 이른다.
5. 이 연구에서는 평균적인 돌출부 손상 폭은 1.3~1.5 mm 정도이며, 지배적인 평균 돌출부 손상 폭은 0.9 mm로 나타났다. 의미 있는 최대 돌출부 손상 폭은 약 3~4 mm인 것으로 나타났다.
6. 자연 절리면의 경우 침투 전단변위에서 손상된 돌출부는 대부분 절리 표면의 광물입자크기 돌출부가 파괴되었을 가능성이 크다. 따라서 침투 전단변위에서 나타나는 전단 저항력의 대부분은 광물입자 크기의 돌출부 파괴와 연관되며, 마모의 영향은 상대적으로 적을 가능성이 크다. 이 연구 결과에 의하면 요철의 파괴가 만곡의 마모에 비하여 전체 전단강도에 미치는 영향이 더 클 수 있다는 것을 나타낸다.
7. 석고의 재질은 대체로 무결합(이승우와 송재준, 2006)에 가까워 일정한 것으로 생각되지만 자연 절리면의 경우 돌출부를 이루는 각 광물성분의 강도특성과 변형특성 등이 차이가 나므로 두 재료를 사용한 절리면 전단의 경우 미시적인 돌출부 파괴 특성이 다를 수 있다. 그러나 석고시편의 경우 거시적인 면에서 전단 기구와 거동은 자연 절리면과 유사한 것으로 생각되며 따라서 손상 기구와 양상도 자연 절리면과 유사하리라 생각된다. 또한 동일한 3차원 거칠기를 가지는 복제 시편을 사용한 전단시험은 다양한 시험 조건에

대하여 거칠기 영향이 배제된 연직응력, 전단변위 등의 변화에 대하여 일관적인 시험결과를 얻을 수 있어 이 연구에서 매우 유용한 방법이 될 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 주관하고 한국건설교통기술 평가원이 시행하는 07첨단도시개발사업(과제번호: 07 도시재생B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 이승도 (2002), “거칠기가 절리의 전단거동 및 투수성에 미치는 영향에 관한 연구”, 터널과 지하공간, 한국암반 공학회, 제12권, 제4호, pp. 312-320.
2. 이승우, 송재준 (2006), “무결합 재료의 크기에 따른 강도와 탄성계수의 변화에 대한 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제8권, 제3호, pp. 205-217.
3. 홍은수, 남석우, 이인모 (2005), “암석 절리면 거칠기의 정량화에 대한 연구 (I) - 문제점의 규명 -”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제7권, 제4호, pp. 269-283.
4. 홍은수, 조계춘, 권태혁, 이인모 (2006), “암석 절리면 거칠기의 정량화에 대한 연구 (II) - 거칠기의 구분과 강도식의 제안 -”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제8권, 제2호, pp. 183-196.
5. Archard, J.F. (1957), “Elastic deformation and the laws of friction”, Proc. R. Soc. London, Ser. A, pp. 190-205.
6. Barton, N.R. (1973), “Review of a new shear-strength criterion for rock joints”, Engrg. Geol., Vol. 7, pp. 287-332.
7. 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.
8. Barton, N.R. and Choubey, V. (1977), “The shear strength of rock joints in theory and practice”, Rock Mechanics, Vol. 10, pp. 1-54.
9. Bhushan, B. (2002), Introduction to tribology, John Wiley & Sons Inc., New York.
10. Borri-Brunetto, M., Carpinteri, A. and Chiaia, B. (1999), “Scaling phenomena due to fractal contact in concrete and rock fractures”, International Journal of Fracture, Vol. 95, pp. 221-238.
11. Brown, S.R. and Scholz, C.H. (1986), “Closure of rock joints”, Journal of Geophysical Research, Vol. 91, pp.

- 4939-4948.
12. Carr, J. R. and Warriner, J. B. (1989), "Relationship between the fractal dimension and joint roughness coefficient", *Bull. Assoc. Engrg. Geol.*, Vol. 26, pp. 253-264.
 13. Chiaia, B. (2002), "On the sliding instabilities at rough surfaces", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 50, pp. 895-924.
 14. Gentier, S., Riss, J., Archambault, G., Flamand, R. and Hopkins, D. (1999), "Influence of fracture geometry on shear behavior", *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* Vol. 37, pp. 161-174.
 15. Haberfield, C.M. and Johnston, I.W. (1994), "A Mechanically-based model for rough rock joints", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 31, No. 4, pp. 279-292.
 16. Hong, E.S., Lee, I.M. and Lee, J.S. (2006), "Measurement of rock joint roughness by 3D scanner", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 29, No. 6, pp. 482-489.
 17. Hong, E.S., Lee, J.S. and Lee, I.M. (2008), "Underestimation of the roughness in rough rock joint", *International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics*, Vol. 32, pp. 1385-1403.
 18. Hsu, S.M, Klaus, E.E. and Chang, H.S. (1988), "A mechano-chemical destructive model for wear under mixed lubrication conditions", *Wear*, Vol. 128, pp. 307-323.
 19. ISRM (1981), "Suggested method for the quantitative description of discontinuities in rock masse", *Rock Characterization Testing and Monitoring*, Pergamon press, Oxford, pp. 3-52.
 20. Jaeger, J.C. (1971), "Friction of rocks and stability of rock slopes", *Geotechnique*, Vol. 21 No. 2, pp. 97-134.
 21. Karpenko, Y.A. and Akay, A. (2001), "A numerical model of friction between rough surfaces", *Tribology Int.* Vol. 34, pp. 531-545.
 22. Kulatilake, P.H.S.W., Shou, G. and Huang, T.H. (1995), "Spectral-based peak-shear-strength criterion for rock joints", *J. Geotech. Engrg.*, pp. 789-796.
 23. 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.
 24. Maerz, N.H., Franklin, J.A., and Bennett, C.P. (1990), "Joint roughness measurement using shadow profilometry", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 27, pp. 329-343.
 25. Misra, A. (2002), "Effect of asperity damage on shear behavior of single fracture", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, pp. 1997-2014.
 26. Poon, C.Y. and Sayles, R.S. (1992), "The classification of rough surface contacts in relation to tribology", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 25, pp. A249-A256.
 27. Reeves, M.J. (1985), "Rock surface roughness and frictional strength", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 22, No. 6, pp. 429-442.
 28. 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.
 29. Suh, N.P. and Sin, H.C. (1981), "The genesis of friction", *Wear*, Vol. 69, pp. 91-114.
 30. Tse, R. and Cruden, D.M. (1979), "Estimating joint roughness coefficients", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 16, pp. 303-307.
 31. Wang, W. and Scholz, C.H. (1993), "Scaling of constitutive parameters of friction for fractal surfaces", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 30, No. 7, pp. 1359-1365.
 32. Yang, Z.Y., Di, C.C. and Yen, K.C. (2001), "The effect of asperity order on the roughness of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*", Vol. 38, pp. 745-752.
 33. 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.

접수일(2009.7.3), 수정일(2009.7.20), 게재확정일(2009.7.24)