터널과 지하공간, 한국암반역학회
Vol. 3, 1993, pp. 142~151

수직 및 전단하중하에서 화강암 인공절리의 변형특성

김영근[1] · 이희근[2]

Deformation Characteristics of Artificially Fractured Joints of Granite under Normal and Shear Loading

Young Geun Kim and Hi Keun Lee

ABSTRACT

In this study, the deformation characteristics of atrtificially fractured joints of granite under normal and shear loading were investigated. To obtain the characteristics of joint deformation, compression and shear tests were performed in the laboratory on three different sizes of rock specimens. The rock used in the experiments was Iksan granite. Joints were produced artificially by fracturing using the apparatus for generating extension-joint. Joint normal deformability was studied by conducting cyclic loading tests on the joints. Joint closure varied non-linearly with normal stress through cyclic loadings. As normal stress increased, the joints gradually reached a state of maximum joint closure. The relation between normal stress and joint closure for mated and unmated joints was well described by the hyperbolic and exponential function, respectively. Joint shear deformability was studied by performing direct shear tests under normal stresses on the joints. It was shown that the behaviour in the pre-peak range was non-linear and joint shear stiffness depended on the size of specimen and the normal stress.

1. 서 론

절리의 변형특성은 낮은 응력수준의 지표 근처에서 굴착이 진행될 때 현지암반의 변형을 좌우하며, 심부지하구조물에서의 높은 응력수준에서도 절리의 미끄러짐과 닫힘은 암반의 안정성에 큰 영향을 미친다 (Bandis 등[1,2,3]). 따라서 현지암반의 변형거동을 정확히 평가하고 예측하기 위해서는 암반내에 존재하는 절리의 역학적 특성을 명확히 규명하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

절리의 수직 및 전단변형 특성에 대한 연구는 많은 학자에 의해 연구되어 왔다. Goodman[4,5,6]은 절리의 수직강성과 전단강성의 개념을 도입하여 절리의 역학적 특성을 표현하였으며, Hunger와 Coates[7]는 석회암과 사암층의 맞물린 절리의 선형 수직응력-변위 관계를 구하였다. 그리고 Patton은 절리의 강도에 대하여 이중선형 파괴기준식(Bilinear failure criterion)을 제안하였으며, 또한 Barton 등[8,9,10,11,12,13,14]은 인공적으로 고안된 거친절리의 시험으로 부터 최대전단강도와 수직응력사이의 경험적인 관계식을 도출하였다. 그러나 지금까지의 여러 연구들에도 불구하고

*1993년 11월 8일 접수
1) 정회원, (주)대우 건설기술연구소 토목연구실 과장
2) 정회원, 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수

절리의 수직변형과 전단 변형의 역학적 특성의 상호 관계에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 인공적으로 제작된 절리를 이용하여 절리압축시험과 직접전단시험을 실시하여 절리의 압착특성과 전단특성과의 관계를 규명하고자 하였다. 본 연구에서 이용한 시험편은 익산화강암으로 인공절리 발생장치를 이용하여 인공절리를 제작하였다. 또한 절리 Profile 게이지를 이용하여 절리거칢계수(JRC)를 구하였다.

인공절리의 압착특성을 조사하기 위하여 절리압축시험을 실시하였다. 절리형태를 편평한 절리, 맞물린 거친절리 그리고 엇갈린 거친절리로 구분하여 반복하중에 의한 압착곡선의 특성을 조사하였으며, 절리의 크기와 형태 그리고 반복하중에 의한 절리의 최대압착량과 수직강성의 변화특성을 규명하고자 하였다. 또한 절리의 전단특성을 조사하기 위하여 직접전단시험을 실시하였다. 위의 절리압축시험에서와 마찬가지로 크기가 다른 세가지 절리에 대하여 다양한 반복하중 조건하에서 직접전단시험을 실시하여 절리의 크기와 형태 그리고 반복 하중에 의한 절리의 마찰계수와 전단강성의 변화특성을 조사하고자 하였다. 또한 인공절리의 수직변형과 전단변형 역학적특성의 상호관계를 규명하고자 하였다.

2. 절리의 변형특성

수직응력과 전단응력하에서의 절리의 변형은 다음 식으로 표현된다(Fig. 1).

$$\begin{pmatrix} d\sigma \\ d\tau \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 \\ 0 & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} dv \\ du \end{pmatrix} \tag{1}$$

여기서 $K_{nn}=(d\sigma/dv)_u$, $K_{ss}=(d\tau/du)_v$는 각각 절리의 수직 강성(Normal Stiffness)과 전단강성(Shear Stiffness)이다. 또한 Fig. 1에 나타난 바와 같이 절리틈새(Aperture, E_0)는 압축 또는 전단하에서 크게 변화하는 중요한 요소이다.

절리의 수직 변형에는 두가지 물리적인 제약이 존재한다. 첫째는 개방된 절리는 인장강도를 갖지 않는다는 것이고, 둘째는 절리의 압착량에는 한계가 있다는 것으로서 최대압착량은 절리틈새보다 작게 된다. Goodman은 수직응력하에서의 절리의 압착량(ΔV)을 쌍곡선과 유사한 다음과 같은 관계식으로 제시하였다.

$$\sigma_n = \frac{\Delta V\ \sigma_i}{V_{mc} - \Delta V} + \sigma_i \tag{2}$$

여기서 V_{mc}는 최대압착량이고 σ_i는 초기 압착응력이다.

실험자료에 기초하여 Bandis 등은 초기의 맞물린 절리와 유사한 형태의 다음의 식을 제안하였다.

$$\sigma_n = \frac{\Delta V}{a - b\ \Delta V} \tag{3}$$

여기서 상수 a, b는 식 (2)에서 높은 수직하중과 낮은 수직하중에서의 절리의 한계값을 고려하면 구할 수 있다. 큰 수직하중에서 ΔV는 최대압착량 V_{mc}에 수렴한다. 따라서 수직하중이 무한대로 되면 $a/b=V_{mc}$이 되고 낮은 응력하에서는 ΔV가 0이 됨을 의미한다. 이러한 경우에 $1/\Delta V$가 a/b보다 상당히 커지므로 a/b 항은 무시할 수 있다. 이때 $1/a=\sigma_n/\Delta V=K_{ni}$이 되고 K_{ni}는 초기수직강성이다. 따라서 식 (2)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\Delta V = \frac{\sigma_n V_{mc}}{K_{ni} V_{mc} + \sigma_n} \tag{4}$$

또한 K_n은 단일한 값으로 정의될 수 없는데, σ_n의 증가에 대한 K_n은 식 (4)의 미분으로부터 구할 수 있다.

$$K_n = K_{ni} \cdot \left[1 - \frac{\sigma_n}{V_{mc} \cdot K_{ni} + \sigma_n}\right] \tag{5}$$

절리의 강도는 절리에 작용하는 전단응력과 절리에 수직하게 작용하는 수직응력에 기초하며, 흔히 가장 높은 전단강도에 해당하는 것으로 편평한 절리의 전단강도는 다음과 같다.

$$\tau = \sigma_n \tan\phi_b \tag{6}$$

여기서 ϕ_b는 기본마찰각이다.

전단파괴는 두가지 형태로 일어나는데(Fig. 2), 일정한 톱날형 절리면에서 절리면과 평행한 전단하중하에서 미끄러짐을 통해 전단변위가 발생하며 다음과 같은 파괴기준을 얻을 수 있다.

$$\tau_p = \sigma_n \cdot \tan(\phi_b + i) \qquad \sigma_n < \sigma_T \tag{7}$$

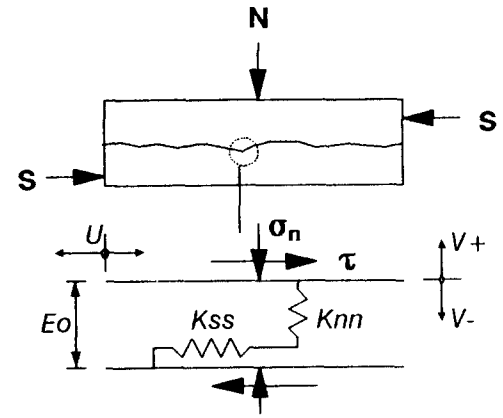

Fig. 1. Fundamental components of rock joint behaviour

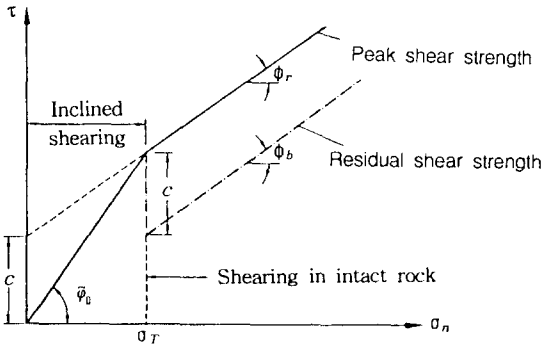

Fig. 2. Differing forms of shear failure illustrated by the example of a regular sawtoothed joint

이때 마찰각은 기본마찰각에 최고 팽창각을 더한 값이 된다. 이후에 전단을 유발하기 위해서는 신선암의 마찰력과 점착력 모두를 극복해야 하는데, 이때의 파괴기준은 다음과 같다.

$$\tau_p = \sigma_n \cdot \tan\phi_r + c \qquad \sigma_n > \sigma_T \tag{8}$$

여기서 ϕ_r는 잔류마찰각이고 c는 전단응력 절편이다.

위의 두 식을 중첩하면 Patton이 제안한 이중선형 파괴조건식이 얻어진다. 그러나 실제자료에서 초기경사 $\phi_b + i$로부터 최종경사 ϕ_r까지의 부드러운 전이를 보여주고 있다. Barton은 인공적으로 고안된 거친절리의 시험으로부터 최대전단강도와 수직응력 사이의 경험적인 관계를 다음의 형태로 도출하였다.

$$\tau_p = \sigma_n \cdot \tan[JRC \cdot \log(JCS/\sigma_n) + \phi_r] \tag{9}$$

여기서

JRC = 절리 거칠 계수(Joint Roughness Coefficient)
JCS = 절리 압축강도(Joint Compression Strength)
ϕ_r = 잔류 마찰각(Basic or Residual friction angle)

이 식에서 σ_n/JCS가 0에 가까워짐에 따라, 로그성분이 무한대로 발산한다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 Barton은 유효 마찰각의 최대치를 70°라고 제안하였다.

3. 시료, 실험장치 및 실험방법

3.1 시료의 특성과 시험편 제작

본 연구에서 사용한 시료는 익산 화강암이다. 익산 화강암은 중립 내지 조립질의 흑운모 화강암으로서 석영, 장석, 흑운모를 주조암광물로 하는 회색 화강암이다. 대상시료의 기본적인 물리적 특성을 파악하기 위하여 각종 실내 물성시험을 통해 체적비중, 겉보기공극율, 단축압축강도, 인장강도, 영률, 포아송비 등을 구하였으며 이 결과는 Table 1에 나타나 있다.

본 연구에서는 절리에 대한 압축시험과 전단시험을 실시하기 위해서 익산 화강암에 대하여 가로×세로×높이가 150×100×110 mm, 75×100×110 mm, 75×50×110 mm의 3가지 형태의 직육면체로 절단한 후, 압이 가해지는 양단면을 시편자동 연마기를 사용하여 압이 가해지는 양단면을 ±0.001의 정밀도로 자동 연마하여 시료별로 32개씩 총 96개를 성형하였다. 제작된 압축 및 전단시험용 시험편의 제원이 Table 2에 나타나 있다. 성형된 시료에 인공적으로 절리를 만들기 위해서 인공절리 발생장치를 제작하였다. 이 기구는 쐐기모양의 날카로운 열처리된 특수강이 시편의 위아래에서 가압되면서 시료 중앙선에 인장파괴를 일으켜 시료에 인공절리를 만들도록 제작된 것이다. Fig. 3은 압축 및 전단시험용 시료에 인공절리를 만드는 장면이다.

제작된 인공절리의 거친정도 및 그 특성을 알기 위하여 거칠기 Profile 게이지를 이용하여 각각의 절리면에 대한 거칠기를 측정하였다. Fig. 4는 대표적인 절리면의 거칠기의 측정 결과를 나타낸 것으로 절리 거칠계수를 구하기 위한 전형적인 거칠기 Profile과 비교해 보면 본 연구에서 만들어진 인공절리의 JRC는 약 16~18로 비교적 거친 절리면임을 알 수 있었다.

또한 제작된 절리는 풍화되지 않은 신선한 상태이므로 절리 압축강도(JCS)는 신선암의 압축강도와 같음을 알 수 있다.

3.2 실험장치 및 실험방법

절리압축시험은 미국 MTS사의 재료시험기를 이용하였다. 이 시험기는 명령-시행-결과비교-재명령의 과정을 반복하는 밀폐형 자동조정장치로서, 중앙통제부는 재료시험기의 작동명령과 작동상태를 제어하는 부분으로 교류조절기, 직류조절기, 기능출력기, Microprofiler로 구성되어 있다. 실험방법은 시험편을 하부 플레이트에 올려놓고 AC 조절기를 이용하여 적정위치까지 이동시킨후 컴퓨터에서 시험을 제어하고 실시하는 프로그램을 실행하여 시험방법을 지정하고 센서의 종류와 시험편의 크기 등을 입력한다. 그리고 하중속도, 하중한계, 변위한계 등을 입력한 후 압축시험을 실시하였다. 본 실험에서는 하중속도는 0.4 mm/min, 하중한계는 10톤, 변위한계는 10 mm로 하였다. Fig. 5는 시험편이 설치된 모습이다.

본 실험에서는 절리의 압착특성을 규명하기 위하여 크기가 다른 세가지 시험편(NA,NB,NC)에 대하여 각각 16개씩 총 240회의 실험을 실시하였다. 절리형태에 따른 압착특성을 규명하기 위하여 절리형태를 편평한 절리, 맞물린 거친절리 그리고 엇갈린 거친절리로 구분하여 실험을 실시하였다. 또한 반복하중에 의한 압착곡선의 특성을 조사하기 위하여 5회의 반복하중에 의한 절리 압축시험을 수행하였다.

직접전단시험은 일본 Shimadzu사의 만능시험기를 이용할 수 있도록 제작된 일면전단시험기를 사용하였다. 시험편에 대한 전단하중은 위의 200톤 용량의 압축기로 가하여 하중이 정확히 전달되도록 압축기의 가압판과 전단상자 사이에 구좌(Spherical seat)를 설치한다. 하중과 전단변위의 관계 곡선은 압축기에 부속되어 있는 X-Y 기록계에 의해 자동으로 기록된다. 수직하중은 20톤 용량의 유압램에 의해 yoke와 로우프를 통해 수평으로 가해지는데 유압램은 유압식 수동펌프로써 작동시킨다. 수직변위의 측정은 다이알게이지에 의해 이루어졌다. 본 실험에서는 절리형태 및 수직응력조건에 따른 인공절리의 전단특성을 규명하기 위하여 크기가 다른 세가지 시험편(SA, SB,

Table 1. Physical properties of Iksan granite

Properties	Unit Weight (KN/m^3)	Apparent Porosity (%)	Compressive Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
Value	27.1	0.63	158	8	19.6	0.21

Table 2. Specimens for joint compression and direct sheartest

Joint Type	Specimen		Height(cm)	Width(cm)	Length(cm)	Contact Area (cm^2)
	Compression	Shear				
Flat	NA－F	SA－F	11.0	10.0	15.0	150.0
	NB－F	SB－F	11.0	10.0	7.50	75.00
	NC－F	SC－F	11.0	5.0	7.50	37.50
Mated Rough	NA－M	SA－M	11.0	10.0	15.0	150.00
	NB－M	SB－M	11.0	10.0	7.50	75.00
	NC－M	SC－M	11.0	5.0	7.50	37.50
Unmated Rough	NA－UM	SA－UM	11.0	10.0	15.0	150.00
	NB－UM	SB－UM	11.0	10.0	7.50	75.00
	NC－UM	SC－UM	11.0	5.0	7.50	37.50

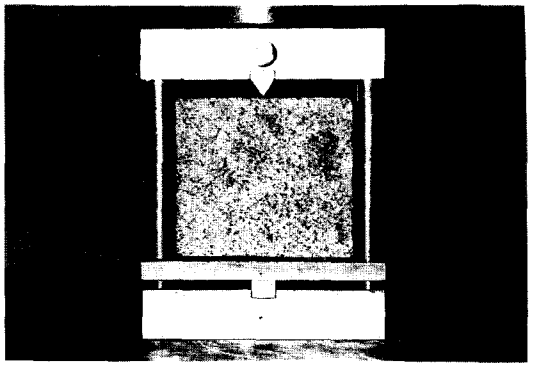

Fig. 3. A view of fracturing in a specimen for joint compression and direct shear test

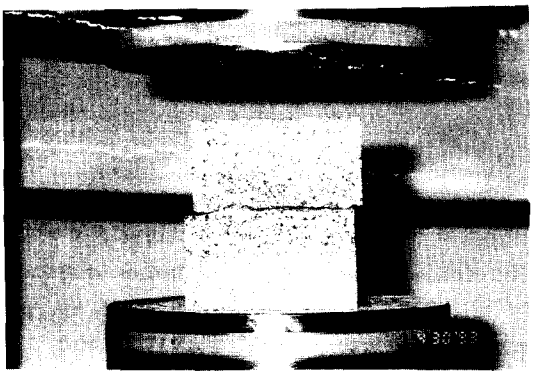

Fig. 5. A view of a specimen setting in MTS for joint compression test

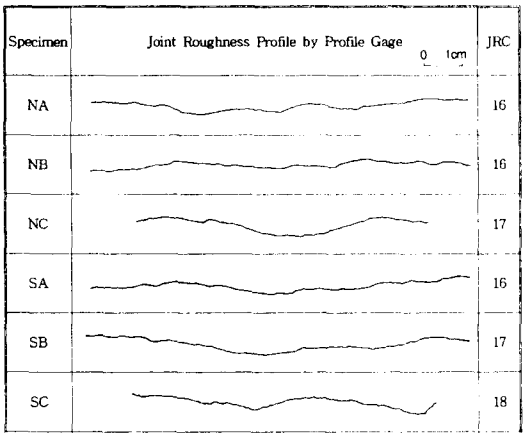

Fig. 4. Typical joint roughness profiles for artificially fractured joints

SC)에 대하여 각각 16개씩 총 192회의 실험을 실시하였다. 절리형태에 따른 전단 변형특성을 규명하기 위하여 절리압착시험과 같이 세가지 절리형태로 구분하였으며, 또한 반복하중에 의한 전단특성을 조사하기 위하여 다양한 반복하중 조건하에서 전단시험을 수행하였다. 본 실험에서는 전단시험기의 하중용량을 고려하여 수직하중은 0.9~7 MPa 범위로 하였으며, 이 범위에서 4개의 수직하중을 선택하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절리 압축시험 결과

절리에 대한 압착곡선을 구하기 위해서는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 신선암에 대한 압축시험을 실시하여 하중증가에 따른 변형곡선(A)을 구하고 이를 다시 절리를 만들어 절리를 포함한 시험편에 대한 변형곡선(B)을 구한다. 이 두 변형곡선의 차(B-A)가 절리의 순수한 압착곡선으로 Fig. 7에 나타나 있다. 이 곡선의 점근선이 절리의 최대압착량(V_m)이며, 접선의 기울기가 절리의 수직강성(K_n)이 된다. 또한 압착초기의 수직강성이 초기수직강성(K_{ni})이다.

4.1.1 편평한 절리에 대한 결과

편평한 절리인 시험편 NA-F에 대한 절리압착곡선이 Fig. 8에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 하중에는 압착량이 증가하다가 수직응력이 증가할 수록 점차적으로 압착량 증가율이 감소하는 비선형거동을 보여주고 있다. 이는 무하중시 닫혀 있지 않는 절리가 초기 하중에 의해 닫히고, 하중이 증가함에 따라 절리가 완전히 밀착되어 절리에 의하여 만들어진 변형이 없어지게 되어 신선암과 같은 거동을 보이기 때문이다. 또한 1차 하중시의 변형곡선과 2차하중 이후의 변형곡선과 차이가 나타나지 않아 반복하중에 의한 영향은 매우 작게 나타났다. Fig. 9는 1차 하중시의 실험결과와 이를 쌍곡선 함수와 이의 도함수 그리고 지수함수로 근사시킨 결과를 비교 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지수함수 근사식이 시험결과와 비교적 좋은 일치를 보여주고 있으며 1차 하중시의 초기수직강성은 약 96 MPa/mm로 나타났다.

편평한 절리에서의 반복하중과 시험편의 크기에 따른 최대압착량과 수직강성의 변화를 살펴보면, 동

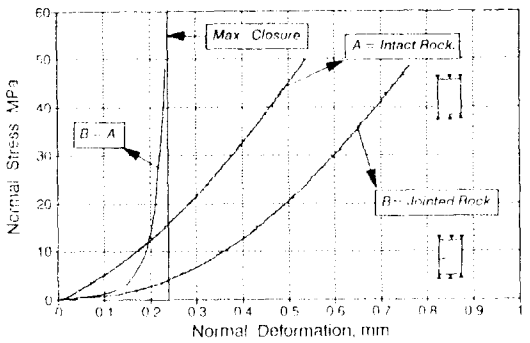

Fig. 6. Typical normal stress-normal deformation curve for an artificially fractured joint of Iksan granite

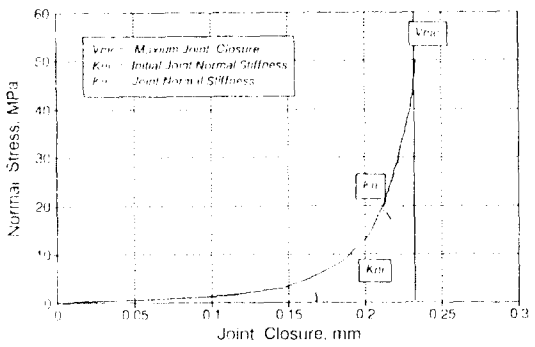

Fig. 7. Typical normal stress-joint closure curve for an artificially fractured joint of Iksan granite

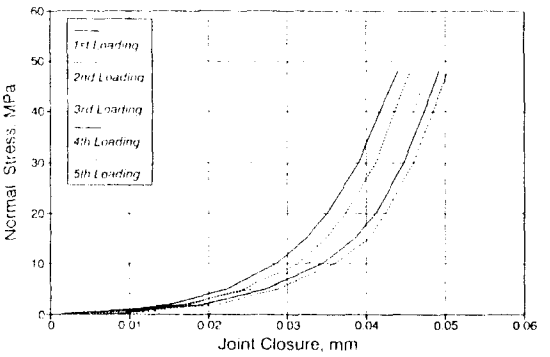

Fig. 8. Normal stress joint closure curve for flat joint NA-F under repeated loadings

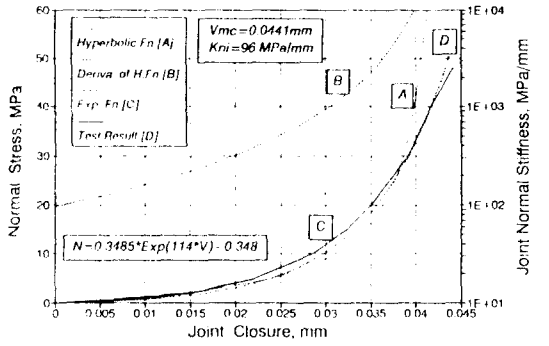

Fig. 9. Comparison between approximate functions for joint closure curve and the result of test under 1st loading for flat joint NA-F

일한 시험편에서 절리에 대한 압착실험이 계속 될수록 즉, 반복하중이 증가함에 따라 절리의 최대압착량은 증가하는 경향을 보였다. 또한 시험편의 크기가 작을수록 즉 하중을 받는 절리의 접촉면적이 작을 수록 최대압착량은 감소하고 있음을 알 수 있다. 그리고 동일한 시험편에서 반복하중에 의한 압축시험이 계속됨에 따라 초기수직강성은 증가하였고 절리의 접촉면적이 작을수록 마찬가지로 증가하였다.

4.1.2. 맞물린 거친절리에 대한 결과

맞물린 거친절리의 시험편 NA-M에 대한 절리압착곡선이 Fig. 10에 나타나 있다. 이 곡선은 비선형 변형곡선으로 그림에서 나타난 바와 같이 1차 하중시 상대적으로 많은 영구변형이 발생하고, 2차하중 이후에는 약간의 영구변형이 나타나 1차 변형곡선과는 달리 2차 하중 이후의 변형곡선들은 비슷한 형태를 보여주고 있다. 1차 하중시의 최대압착량은 0.0495 mm로 나타났다. Fig. 11에는 1차 하중시의 실험결과와 이의 근사식을 비교 도시하였다. 쌍곡선함수의 근사식과 지수함수 근사식은 하중 초기에서 일치하지 않았으나, 쌍곡선함수가 비교적 잘 일치하였다.

맞물린 거친절리에서의 반복하중과 시험편의 크기에 따른 최대압착량과 수직강성의 변화를 살펴보면, 시험편 NB, NC에서는 반복하중에 따른 수직강성의 변화는 2차 하중에서 증가 후 반복하중이 계속됨에 따라 다시 감소하는 경향을 보였다. 이는 1차 하중에 의해 절리의 압착이 이루어진 후 계속적인 반복하중에 의해 돌출부의 미소 파괴로 인한 추가적인 압착이 진행되기 때문이라 생각된다. 이러한 경향은 최대압착량이 1차 하중시에 가장 크게 나타난 후 2차 하중 이후에도 계속적으로 나타나는 경향과 잘 일치한다. 시험편 NA의 초기수직강성이 가장 크게 나타났으며 최대압착량은 가장 작게 나타났다. 또한 절리의 접

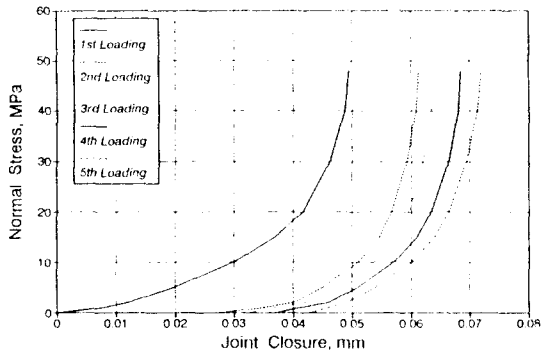

Fig. 10. Normal stress-joint closure curve for mated rough joint NA-M under repeated loadings

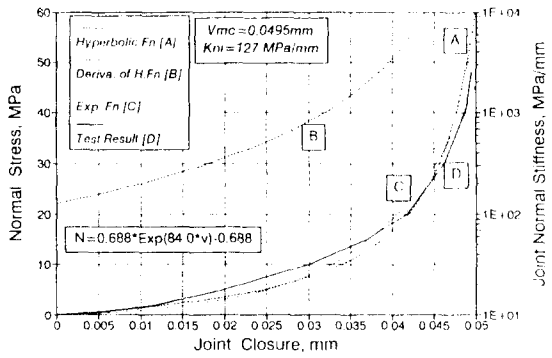

Fig. 11. Comparison between approximate functions for joint closure curve and the result of test under 1st loading for mated rough joint NA-M1

촉면적이 작을 수록 초기수직강성은 감소하였고 최대압착량은 증가하였다.

4.1.3. 엇갈린 거친절리에 대한 결과

엇갈린 거친절리인 시험편 NA-UM에 대한 절리압축곡선이 Fig. 12에 나타나 있다. 이 곡선은 가압초기에 변형량이 증가하다가 수직응력이 증가함에 따라 선형적인 증가를 보였으며, 수직응력 6 MPa 에서 절리 돌출부의 부분적인 파괴가 관찰되었다. 이는 엇갈림으로 절리면의 돌출부가 마찰되면서 부분적인 소성영역이 발생하기 때문이다. Fig. 13은 1차 하중시의 실험결과와 이의 근사식을 비교 도시한 것으로 지수함수 근사식이 실험결과와 비교적 일치하였다.

엇갈린 거친절리에서의 반복하중과 시험편의 크기에 따른 최대압착량과 수직강성의 변화를 살펴보면, 1차 하중에 의한 절리의 최대압착량이 가장 크게 나

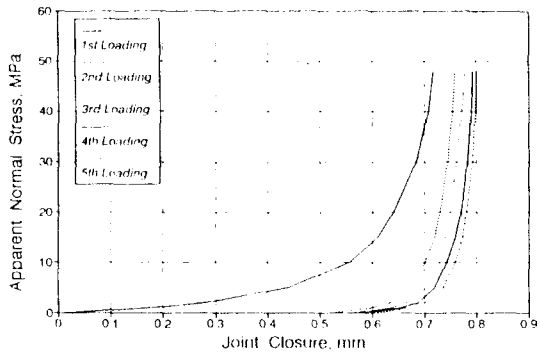

Fig. 12. Normal stress-joint closure curve for unmated rough joint NA-UM under repeated loadings

타났으며 이후 절리의 계속적인 압착에 의해 최대압착량은 거의 변화가 없었다. 또한 절리의 엇갈림 정도가 클수록 최대압착량은 증가하였으며, 절리 돌출부의 굴곡을 넘어서면 파괴가 발생하였다. 수직강성은 1차 하중시 돌출부의 미끄러짐으로 인하여 매우 작게 나타났고 이후 절리가 닫히게 되면 약간의 증가를 보였다. 또한 절리의 크기에 따른 최대압착량과 초기수직강성의 변화는 나타나지 않았다.

4.2 직접전단시험 결과

4.2.1 편평한 절리에 대한 결과

편평한 절리에 대한 직접전단시험의 대표적인 결과를 수직-전단응력면에 대해 나타내면 Fig. 14와 같다. 이 그림은 시험편 SA-F의 경우로써 수직응력이 증가할 수록 최대전단강도는 선형적으로 증가하였다. 이를 회귀분석하면 마찰각을 구할 수 있으며, 그림에서는 35.6°로 나타났다.

이와 같은 과정으로부터, 시험편 SA-F의 경우 초기마찰계수는 0.56~0.68, 최대마찰계수는 0.68~0.79의 범위로 나타났으며 수직응력이 증가함에 따라 마찰계수는 소폭 감소하였다. 마찰각은 초기전단응력에서는 31.7°, 최대전단응력에서는 35.6°로 나타났으며 초기전단응력에서 보다 최대전단응력에서 좋은 상관관계를 보였다. 시험편 SB-F의 경우, 초기마찰계수는 0.60~0.70, 최대마찰계수는 0.68~0.88의 범위로 나타났다. 또한 마찰각은 초기전단응력에서 34.2°, 최대전단응력에서는 36.1°로 시험편 SA보다 약간 크게 나타났으며, 약간의 분산을 보일 뿐 매우 좋은 상관도를 보였다. 그리고 시험편 SC의 경우, 초기마찰계

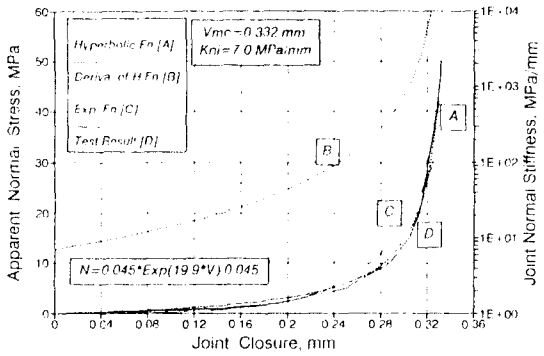

Fig. 13. Comparison between approximate functions for joint closure curve and the result of test under 1st loading for unmated rough joint NA-UM

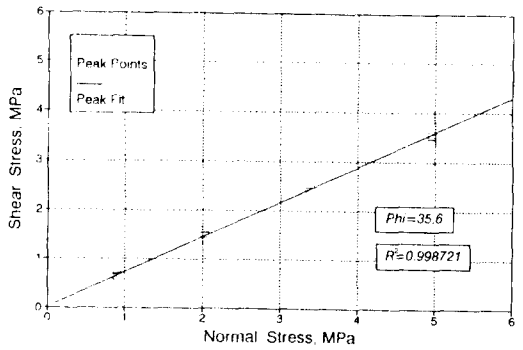

Fig. 14. σ-τ relation showing peak shear stress for flat joint SA-F

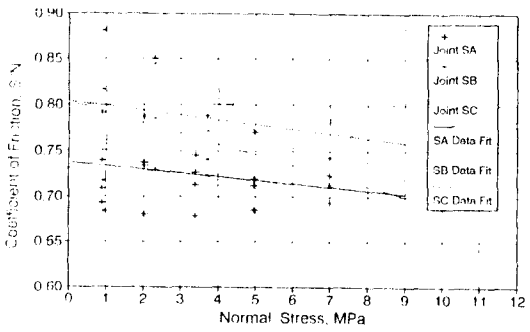

Fig. 15. Size effect on coefficient of friction for flat joint

수는 0.57~0.78, 최대마찰계수는 0.60~0.87의 범위로 나타났으며, 마찰각은 초기전단응력에서 33.8°, 최대전단응력에서는 36.6°로 세가지 시험편 중에서 가장 크게 나타났는데, 이는 절리의 크기가 작을수록 마찰각은 증가하였음을 의미한다.

Fig. 15에서 보는 바와 같이 편평한 절리에서의 마찰계수는 수직응력이 증가함에 따라 약간 감소하였고 절리의 크기가 작을수록 즉 절리의 전단접촉면적이 작을수록 마찰계수는 크게 나타났다. 또한 Fig. 16에서 보는 바와 같이 수직응력이 증가함에 따라 전단강성은 증가하였는데, 또한 낮은 수직응력하에서 절리의 크기에 따른 전단강성의 변화가 나타나지 않았으나 수직응력이 증가할 수록 절리의 크기에 따른 전단강성의 차이가 잘 나타났다. 즉 동일한 절리에서 절리의 크기가 작아질수록 절리의 전단강성은 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 수직응력이 클 수록 절리의 전단강성의 분산정도가 크게 나타났다.

4.2.2 맞물린 거친절리에 대한 결과

맞물린 거친절리에 대한 직접전단시험의 대표적인 결과를 수직-전단응력면에 대해 나타내면 Fig. 17과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 수직응력이 증가함에 따라 전단응력은 증가하였으나, 2차 하중 이후에서 최대전단강도는 잔류전단강도에 접근하였다. 이는 1차 전단시에 절리의 돌출부가 대부분 파괴되었기 때문으로 생각된다.

맞물린 거칠절리인 시험편 SA-M의 전단시험 결과를 Barton의 경험식에 적합시키면 Fig. 18에 나타난 바와 같다. 여기서 JCS는 Table 1에 나타난 시험편의 단축압축강도 158 MPa를, 마찰각 ϕ_b는 편평한 절리의 마찰각 35.5°를 이용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 비교적 좋은 일치를 보였다.

맞물린 거칠절리에서 마찰계수는 낮은 수직응력에서 급격히 감소하다가 이후 점차적으로 감소하였다. 절리의 크기에 따른 마찰계수의 변화는 뚜렷하게 나타나지 않았지만 높은 수직응력하에서는 절리의 크기가 커질수록 마찰계수는 작아졌다. 또한 전단강성은 수직응력이 증가함에 따라 비선형적인 변화를 보였는데, 수직응력이 높아짐에 따라 전단강성의 증가폭이 저하되는 로그함수와 유사한 거동이 나타났다. 그리고 높은 수직응력에서 절리의 크기에 따른 전단강성의 차이가 관찰되었다.

4.2.3 엇갈린 거친절리에 대한 결과

엇갈린 거친절리에 대한 직접전단시험의 대표적인 결과(시험편 : SA-UM)를 수직-전단응력면에 대해 나

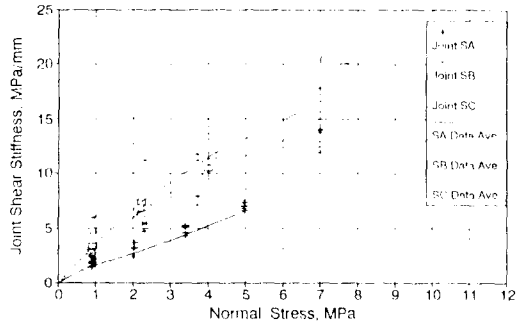

Fig. 16. Size effect on joint shear stiffness for flat joint

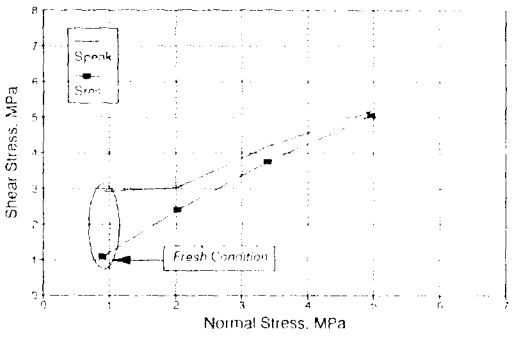

Fig. 17. σ-τ relation showing gradual weakening of peak shear stress due to incremental normal loads for mated rough joint SA-M

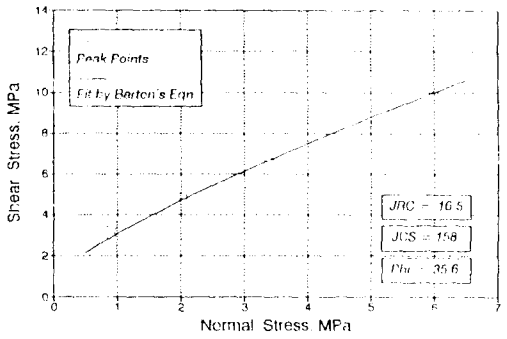

Fig. 18. Data fit to Barton's empirical equation for mated rough joint SA-M

타내면 Fig. 19와 같다. 그림에서 보면 수직응력이 증가할 수록 초기 및 최종최대전단강도 모두 이중선형적으로 증가하였으며, 초기최대전단강도와 최종최대전단강도는 거의 일치하였다. 또한 직선식의 기울기인 마찰계수는 0.801~1.007의 범위로서 편평한 절

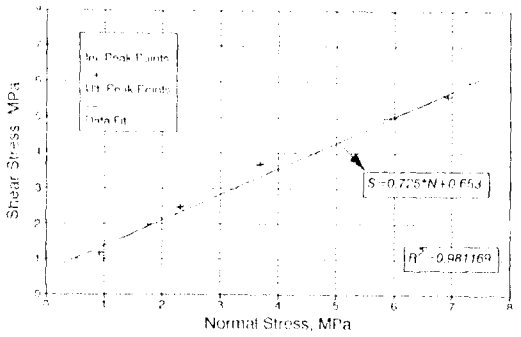

Fig. 19. σ-τ relation showing initial and ultimate peak shear stress for unmated rough joint SA-UM

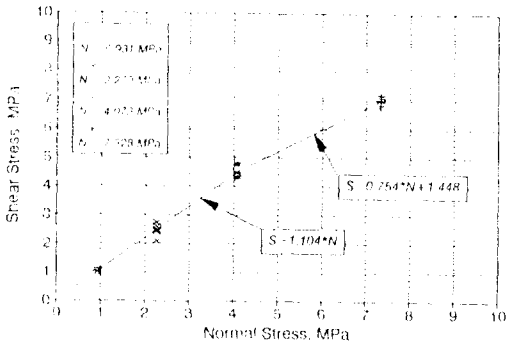

Fig. 20. Data fit to bilinear function for unmated rough joint SC-UM

리보다 크고 맞물린 거칠절리보다 작게 나타났다. 시험편 SC-UM의 경우도 마찬가지로 Fig. 20에서 보는 바와 같이 수직응력이 높을수록 최대전단강도의 증가폭이 둔화되는 이중선형관계를 보였다.

또한 엇갈린 거칠절리에서도 수직응력이 증가함에 따라 마찰계수는 감소하였으며 동일한 절리에서 절리의 크기가 작아질 수록 마찰계수는 약간 증가하였다. 그리고 절리의 크기에 따른 전단강성의 변화는 절리가 작은 경우의 전단강성이 수직응력의 증가에 따라 크게 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 절리 크기와 절리 형태에 따른 절리의 압착특성과 전단특성을 규명하기 위하여 절리 압축시험과 직접전단시험을 실시하였다. 본 연구에서

얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 절리의 압착특성은 비선형 변형거동으로, 1차 하중시 상대적으로 많은 영구변형이 발생하였으며, 이를 근사시킨 결과 편평한 절리와 엇갈린 거친절리에서는 지수함수식이, 맞물린 거친절리에서는 쌍곡선함수식이 비교적 잘 일치하였다.

(2) 초기수직강성은 반복하중이 계속됨에 따라 증가하였고, 절리의 접촉면적이 작을수록 증가하였다. 또한 편평한 절리에서 가장 크고, 엇갈린 거친 절리에서 가장 작게 나타났다.

(3) 절리의 마찰계수는 수직응력이 증가함에 따라 감소하였고 절리의 크기가 작을수록 증가하였으며, 맞물린 절리에서 가장 크게 나타났다.

(4) 절리 전단강성은 수직응력이 증가함에 따라 그리고 절리의 크기가 작아질수록 증가하였으며, 맞물린 절리에서 가장 크게 나타났다.

(5) 거친절리에서 전단하중이 반복됨에 따라 돌출부의 부분적인 손상으로 최대전단강도는 감소하였다. 또한 엇갈린 거친절리에서 수직응력이 증가함에 따라 최대전단강도는 이중선형적으로 증가하였다.

참고문헌

1) Bandis, S., Lumsden, A.C. and Barton, N., 1983, Fundamentals of Rock Joint Deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 20, No.6, p. 249-268.
2) Bandis, S., Lumsden A.C. and Barton, N., 1981, Experimental Studies of Scale Effects on the Shear Behaviour of Rock Joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.18, p. 1-21
3) Bandis, S., 1990, Mechanical Properties of Rock Joints, Proc. of Int. on Rock Joints, p. 125-140.
4) Goodman, R.E., Taylor, R.L. and Brekke, T.L. 1968, A Model for the Mechanics of Jointed Rock, J. of Soil Mech. & Foundations Division. ASCE, p. 637-659.
5) Goodman, R.E., 1974, The Mechanical properties of Joints, Proc. 3rd Congrs. Int. Soc. Rock Mech., Denver, Vol.I.A, p. 127-140.
6) Goodman, R.E., 1976, Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rock, West Publishing Company, St Paul, Ch.5, p. 158-208.
7) Hungr, O. and Coates, D.F. 1978, Deformability of Joints and Its Relation to Rock Foundation Settlements, Can. Geotech., Vol. 15, p. 239-249.
8) Barton, N., 1976, The Shear Strength of Rock and Rock Joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 17, p. 255-279.
9) Barton, N. and Choubey, V., 1977, The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, Rock mechanics and Rock Eng., 10, p. 11-54.
10) Barton, N. and Bandis, S., 1980, Some Effect of Scale on the Shear Strength of Joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 27, p. 69-73.
11) Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K., 1985, Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.22, No.3, p. 121-140.
12) Barton, N., 1986, Deformation Phenomena in Jointed Rock, Geotechnique 36, No.2, p. 147-167.
13) Saeb, S. and Amadei B., 1992, Modelling Rock Joints under Shear and Normal Loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.29, No.29, p. 267-278.
14) Swan, G. 1983, Determination of Stiffness and Other Joint Properties from Roughness Measurements, Rock Mechanics and Rock Eng., Vol. 16, p. 19-38.