

## 인공 절리모델에 대한 전단특성 연구

### A Study on Shearing Characteristics of Joint Model

---

장 보 안(Bo-An Jang)  
조 종 수(Jong Su Cho)

강원대학교 지구물리학과  
강원대학교 지구물리학과

---

#### 요약 / ABSTRACT

시멘트 모르타르를 이용하여 제작한 압축강도 및 거칠기가 다른 25 종류의 인공절리 모델에 대하여 절리면 전단시험을 실시하였다. 절리면 전단시험은 통상적으로 시행되는 다단계 시험과 ISRM에서 제안된 시험을 사용하였으며, 두 시험간의 마찰각 차이, 다단계 시험의 유용성, 측정된 결과에 대한 경험식과의 비교 연구를 시행하였다. 다단계 시험에서 측정된 마찰각은 ISRM 시험에서 측정된 마찰각보다 약 6.4° 낮은 값을 보이며, 시험편의 압축강도와 거칠기가 변화하여도 두 시험에서 측정된 마찰각의 차이는 일정한 값을 보여 다단계 시험은 유용한 것으로 판단된다. 절리면에 가해진 수직응력에 대한 전단응력의 관계를 나타내는 여러 가지 경험식과 본 연구에서 측정된 결과를 비교한 결과, ISRM 시험에 의한 결과는 Patton의 경험식과 유사하고, 다단계 시험에 의한 결과는 Barton의 경험식과 유사한 결과를 보인다.

**주요어** : 시멘트 모르타르, 절리면, 전단시험, 마찰각, 거칠기

Direct shear tests are performed for artificial joint models made of cement mortar with 25 types of different strength and roughness. The tests consist of the multi-stage test which is a common test method for a single joint plane and the test method suggested by ISRM. Then, not only the differences of friction angles between the two test methods are compared, but is the effectiveness of the multi-stage test investigated. The average of friction angles measured from the multi-stage test is 6.4° lower than that from the ISRM test. Although the strength and roughness of samples vary, the differences of friction angles between the two test methods are constant. The relationship between the shear stress and the normal stress measured from the multi-stage test is well correlated with the Patton's equation. Whereas, the Barton's equation is best fitted with those measured from ISRM test.

**Key Words** : Cement mortar, Joint, Direct shear test, Friction angle, Roughness.

## 서 론

절리는 대표적인 불연속면으로 모든 암반 내에 분포하고 있다. 절리가 발달한 암반에서의 안정성은 암석 자체의 안정성보다 불연속면의 안정성에 의하여 좌우되므로, 절리면의 거동 특성은 암반의 안정성 분석, 특히 암반사면의 분석이나 지하 공동의 안정성 분석에 필수적 자료이다. 절리면의 특성에 관한 연구 동향을 고찰해 보면, 국외에서는 불연속면의 크기에 의한 전단 거동을 규명한 연구(Barton et. al., 1981), 절리면 형상(profile)을 이용한 절리면 전단 거동 예측(Dight and Chiu, 1981), 절리면 특성 중 거칠기 측정에 관한 연구(Tse and Cruden, 1979), 절리면의 역학적 특성 연구(Leichnitz, 1985)등의 많은 연구들이 진행되었고, 국내에서는 절리면에서의 전단 거동 특성과 역학적 파라미터들 간의 상관성(이종욱 외, 1993), 절리면의 거칠기에 따른 암석 절리의 전단 강도 및 변형 거동에 관한 연구(이상돈 외, 1994), 일차 파괴된 암반 사면의 전단강도 및 보강 설계법 고찰(조태진 외, 1995)등의 연구가 꾸준히 수행되고 있지만, 국외에 비해 국내에서의 연구는 아직 미흡한 실정이다.

최근에 이르기까지 각종 고속도로나 국도의 건설현장에 시공된 도로절취 사면은 한국도로공사에서 규정한 시방서에 의거하여 암석의 종류나 절리의 발달 정도, 절리면의 거동 특성에 대한 이해 없이 암반의 질에 따라 일률적인 사면 구배를 적용하였다. 그러나 시공이 완료되거나 시공 중인 절취 사면의 붕괴가 자주 발생하게 되어, 시공사들은 점차적으로 절리가 사면의 안정성에 매우 중요한 작용을 하고 있음을 인식하게 되었고, 절리면의 거동 특성을 이해하기 위하여 절리면 전단시험을 수행하고 있다. 절리면 전단시험은 원위치 전단시험이나 동일한 절리면을 가진 여러 개의 시험면에 대한 실험실 전단시험을 통하여 이루어져야 한다.

ISRM (International Society for Rock Mechanics)은 최소한 5개의 동일한 형태를 가진 절리면에 대하여 수직응력을 변화시키며 절리면 전단 시험을 수행하도록 규정하고 있다(Brown, 1981). 그러나 대부분의 도로사면이나 터널의 조사는 시추조사로 이루어지고 있으며, 동일한 절리면

에서 5개의 시료를 구하기는 불가능한 것이 현실이므로, 단일 시료에 대하여 수직응력을 변화시키며 반복적으로 전단을 일으키는 시험이 통상적으로 수행되고 있다. 따라서 단일 시험에 대한 다단계 시험(이하 다단계 시험)으로 규명된 절리면의 거동 특성과 ISRM에서 규정한 5개의 동일한 형태의 절리면에 대하여 시행된 시험(이하 ISRM 시험)에서 얻어진 절리면의 거동 특성을 비교하여 다단계 시험과 ISRM 시험과의 차이, 다단계 시험의 유효성을 규명하는 것이 매우 필요하다.

본 연구에서는 시멘트 모르타르를 이용한 규칙적인 틈니형 인공 절리 시험편을 제작하여 다단계 시험과 ISRM 전단시험에 의한 절리면의 거동특성의 차이 및 다단계 시험의 유용성을 규명하였다. 또한 암석의 압축강도 및 절리면의 거칠기에 따른 절리면의 거동특성 변화를 규명하기 위하여 총 25종의 시료에 대하여 압축강도의 변화 및 거칠기의 변화에 따른 절리면의 거동 특성을 연구하였다. 위의 연구를 통하여 얻어진 결과는 절리면의 전단강도를 나타내는 경험식들과 비교 연구하였다.

## 절리면의 전단강도

절리면에 수직 방향으로 수직응력이 작용할 때 절리면의 변위를 발생시키는 최대 전단응력을 절리면 전단강도라고 한다. Fig. 1과 같은 일반적인 수평의 절리면에 대하여 전단시험을 실시하면 전단변

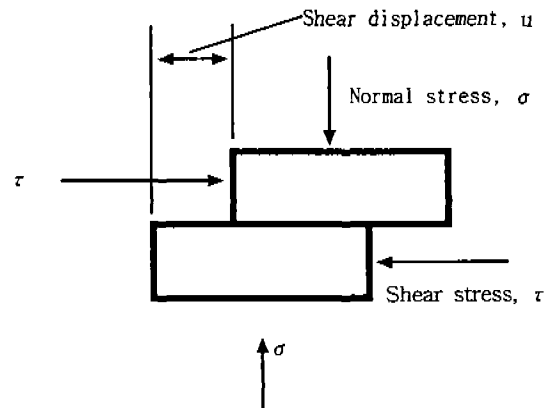


Fig. 1. Schematics of the direct shear test for joint.

위  $u$ 에 대한 전단응력  $\tau$ 는 Fig. 2와 같이 나타난다. 수직응력을 변화시키며 여러 번의 전단시험을 실시하여 수직응력  $\sigma$ 에 대한 전단응력  $\tau$ 를 도시하면 Fig. 3과 같이  $\sigma$ - $\tau$ 의 관계를 얻게된다.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (1)$$

$c$  : 점착력

$\phi$  : 절리면의 마찰각

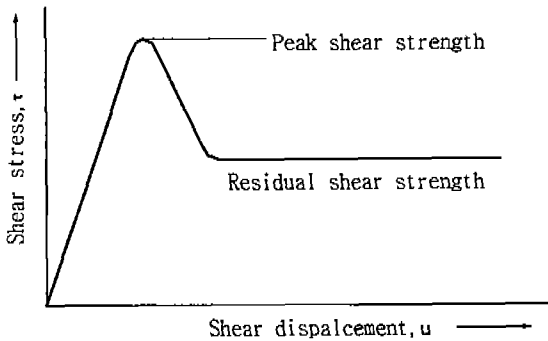


Fig. 2. Shear stress-shear displacement curve from the direct shear test for joint.

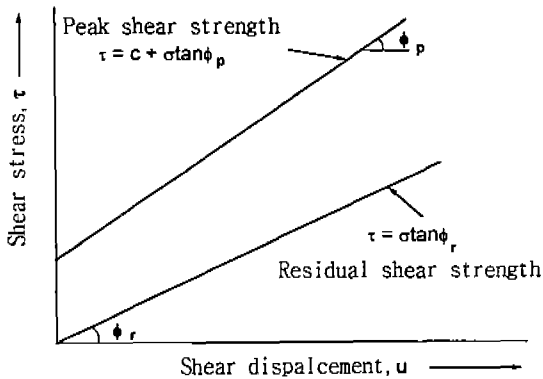


Fig. 3. Relationship between normal stress and shear stress from the direct shear test for joint.

그러나 Fig. 4와 같이 절리면이 수평이 아니거나 표면에 요철이 있으면 절리면의 마찰각은 암석 자체의 마찰각과 표면의 요철 성분의 합으로 표시될 수 있다. Patton(1966)은 표면요철을 가진 모형에 대한 일련의 시험을 통하여 전단강도를 다음의 식으로 표시하였다.

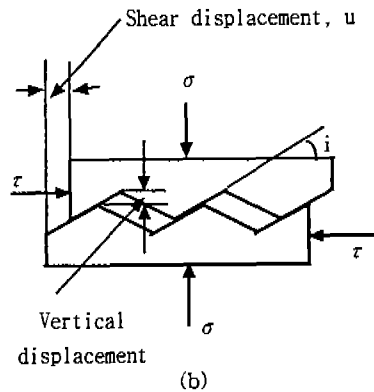
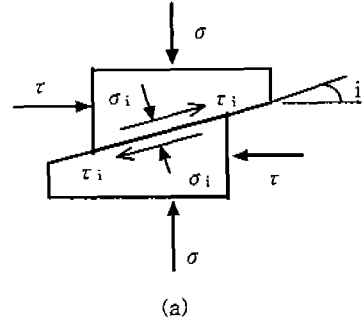


Fig. 4. Patton's model on shearing.

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \phi = \sigma_n \cdot \tan(\phi_b + i) \quad (2)$$

- $\tau$  : 전단강도
- $\sigma_n$  : 유효수직응력
- $\phi_b$  : 기본마찰각
- $i$  : 거칠기 각
- $\phi$  : 절리면의 마찰각

식 (2)는 수직응력과 전단응력이 직선의 관계를 보이고 있다. 그러나 요철을 가진 절리면은 낮은 수직응력 하에서는 돌출부의 파쇄가 거의 일어나지 않는 팽창 변형이 주로 일어나기 때문에 식 (2)의 적용이 문제가 없으나, 수직응력이 증가함에 따라 전단이 발생하는 도중 돌출부의 부분적인 파쇄가 발생하여 마찰각은 감소하게 된다. 그러므로 수직응력이 증가하면 수직응력에 대한 전단강도는 직선이 아닌 곡선의 관계를 보이게 되고 Barton(1973)은 다음과 같은 곡선의 경험식을 제시하였다.

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \phi = \sigma_n \cdot \tan \left( JRC \cdot \log \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_r \right) \quad (3)$$

JRC : 절리거칠기계수

(Joint Roughness Coefficient)

JCS : 절리면의 압축강도

(Joint Wall Compressive Strength)

$\phi_r$  : 잔류마찰각

$\sigma_n$  : 유효 수직응력

식(3)은 아주 낮은 응력 수준에서는 거의 직선에 가까운  $\sigma_n - \tau$ 의 관계를 보이게 되지만 높은 수직 응력 수준에서는 곡선의 형태로 Patton과 같은 직선의 형태를 가진 경험식보다 더 작은 전단강도를 나타내게 되어 안전측에 가까우므로, 식(3)이 전단강도의 예측에 더욱 많이 사용된다.

잔류마찰각  $\phi_r$ 은 Schmidt hammer를 이용한 반발치를 측정하여 간접적으로 구할 수 있으며, 절리면이 풍화되지 않은 암석일 경우  $\phi_r$ 은 암석의 기본마찰각  $\phi_b$ 와 같게 된다. 암석의 기본마찰각은 틈으로 자른 매끈한 절리면을 표면 연마를 한 후 tilting test나 직접전단시험에 의하여 구하게 된다.

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 \cdot \frac{R}{r} \quad (4)$$

$\phi_r$  : 잔류마찰각

$\phi_b$  : 기본마찰각

R : 절리면에서의 Schmidt hammer 반발치

r : 무결암에서의 Schmidt hammer 반발치

식 (3)에서 절리면의 압축강도는 암석의 일축압축강도를 사용한다. 그러나 절리면에 풍화가 진행 되었으면 절리면의 압축강도는 암석의 일축압축강도보다 낮으므로, 현장이나 실험실에서 Schmidt hammer를 이용하여 절리면의 압축강도를 측정하여 사용하여야 한다. JRC는 Barton이 제시한 절리면 형상을 이용하여 비교, 사용하거나 다른 연구자들의 거칠기 파라미터와 절리 거칠기 계수와와의 관계식을 이용하여 결정할 수 있다.

본 연구에서는 Tse and Cruden(1979)의  $Z_2$  파라

미터를 이용하여 JRC를 결정하였다.  $Z_2$  파라미터는 Barton이 제시한 절리면 형상과 매우 높은 선형 관계를 보이고 있으며, 일반식은 아래와 같다.

$$Z_2 = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \quad (5)$$

$Z_2$  : 절리면 형상의 평균 기울기

L : 절리면에 투영된 직선길이

dx : 수평방향의 미소증분

dy : 수직방향의 미소증분

만약 절리의 거칠기가 규칙적인 경우나 절리면 형상을 수치화 하여 측정할 경우에는, 식(5)는 식(6)으로 변환될 수 있다.

$$Z_2 = \left[ \frac{1}{M(D_x)^2} \cdot \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

M : 측정간격의 개수

$D_x$  : 측정간격

$y_i$  : i 번째의 거칠기 높이

$y_{i+1}$  : (i+1) 번째의 거칠기 높이

Tse and Cruden은 여러 가지 거칠기 파라미터와 JRC 간의 관계를 연구한 결과  $Z_2$  파라미터가 가장 높은 상관성을 가지고 있다고 하였고 그 관계식은 다음과 같다.

$$JRC = 32.20 + 32.47 \log(Z_2) \quad (7)$$

본 연구에서는 JRC를 결정하기 위해서 식(6)과 식(7)을 이용하였고 측정결과는 Fig. 5에 나와 있다.

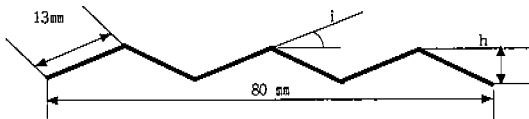
## 시험편 제작 및 실험방법

### 시험편 제작

시험편은 시멘트, 모래 및 물을 배합한 시멘트 모르타르를 이용하여 제작하였다. 시험편의 압축강도는 재료의 배합비를 조정하여 5종류로 하였으며, 절리면의 거칠기는 시멘트 모르타르의 성형틀의 형태를 조정하여 5종류로 하였다. 그 결과 하나

Table 1. Mixing types and ratios for the joint models.

Type	Mixing Ratio by Weight (water : cement : sand)	Roughness Angle ( i ' )
I	0.88 : 1 : 3	5
		10
		15
		20
		25
II	0.88 : 1 : 4	same as above
III	0.5 : 1 : 2.45	same as above
IV	0.5 : 1 : 3	same as above
V	0.4 : 1 : 2.45	same as above



Roughness Angle ( i ' )	h (mm)	JRC
5	1.13	-2.25
10	2.26	7.75
15	3.36	13.56
20	4.45	17.98
25	5.49	21.41

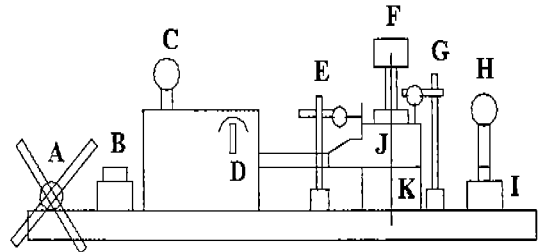
Fig. 5. Cement mortar joint model used in this study. JRC is the joint roughness coefficient.

의 압축강도에 대하여 5종류의 거칠기를 가진 시험편이 제작되어 합계 25종의 절리 모델이 제작되었다(Table 1). 거칠기의 변화는 알루미늄 판을 이용하여 절리면의 형상이 톱니 모양이 되도록 제작하였으며 (Fig. 5), 미리 제작한 알루미늄 판을 넣은 직사각형의 성형틀에 시멘트 모르타르를 충전한 후, 2일이 지나 완전하게 경화되었을 때 성형틀과 분리하여 공기 중에서 15일 동안 양생하였다. 배합

한 재료를 성형틀에 충전할 때 발생하는 기포 제거와 알루미늄 판과 재료의 밀착을 위하여 진동기 (Vibrator)를 이용하여 성형틀에 약 5분 동안 진동을 주었다. 또한 인공 절리 시험편과 동시에 일축 압축강도를 구하기 위한 시험편을 제작하였다.

실험방법

전단시험에 사용한 실험기기는 미국 SBEL사 (Structural Behavior Engineering Laboratories, Inc.)에서 제작한 Model RM-102 직접전단시험기로 최대하중은 5 ton이다(Fig. 6). 전단시험시 시험편에 가해지는 응력과 변위는 pressure transducer 및 displacement transducer를 이용하여 측정하였으며, amplifier에서 전기 신호를 증폭한 후, A/D converter에서 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 컴퓨터에 ASCII 파일로 저장을 하였다.



- A : Pressure generator for shear stress
- B : Hydraulic pump for shear stress
- C : Pressure transducer for shear stress
- D : Lever for direction of shearing
- E : Displacement transducer for shear displacement
- F : Hydraulic jack for normal stress
- G : Displacement transducer for vertical displacement
- H : Pressure transducer for normal stress
- I : Hydraulic pump for normal stress
- J : Upper shear box
- K : Lower shear box

Fig. 6. Schematic diagram of the direct shear testing apparatus (RM-102).

RM-102 직접전단시험장치는 외부의 고정된 전단상자와 내부의 교환 가능한 전단 상자로 되어 있으며, 내부 전단 상자는 원형으로 규격은 직경 126 mm, 높이 62.7mm이다. 시험편을 내부 전단 상자에 들어갈 수 있도록 절단한 후, 전단면과 전단응력의 방향이 평행이 되도록 수평계를 이용하여 수평을

맞춘다. 이 후 조강 시멘트를 이용하여 내부 전단 상자에 시편을 고정시켜 하부 전단 시험편을 만들었으며, 상부 전단 시험편은 하부 전단 시험편이 만들어진 후 중앙에 상부와 하부의 분리를 위한 아크릴로 된 패널을 설치한 후 상부 시험편을 놓아 상부 시험편을 조강 시멘트를 이용하여 고정시켰다.

다단계 시험은 먼저 가장 낮은 수직응력 하에서 전단시험을 수행한 후, 전단시험이 완료되면 전단이 발생한 시험편을 시험 전의 위치로 되돌린다. 이 시험편에 대하여 수직응력을 증가시켜서 다시 전단시험을 수행하고, 이와 같은 과정을 약 6회 반복하여 실시한다. 반면에 ISRM 시험은 6개의 동일한 절리면을 가진 시료에 대하여 각각 수직응력을 달리하여 1회의 전단시험을 실시하는 시험이다.

수직응력은 여러 번의 예비 실험에 근거하여 6 단계를 사용하였다. 전단응력을 가할 때 초기 변위 발생시까지는 유압식 수동 펌프를 이용하여 초기 변위 발생을 유도한 후, 일정한 전단 변위를 가하기 위해서 정압기(pressure generator)를 이용하여 일정한 속도로 전단변위를 주었다. 전단응력은 최대 전단 강도가 발생한 후 전단 강도가 일정해지면 잔류 전단 강도에 이른 것으로 판단하여 가압을 중지하였다. 시험편의 기본마찰각은 톱으로 자른 매끈한 절리면을 가진 시험편에 대해 tilting test를 수행하여 구하였고 그 결과는 Table 2에 제시되어 있다.

Table 2. Uniaxial compressive strengths and basic friction angles for each types of model.

Type	Uniaxial Compressive Strength(kgf/cm <sup>2</sup> )	Basic Friction Angle ( $\phi_b$ )°
I	104	32
II	115	30
III	218	33
IV	297	31
V	348	33

압축강도 시험편은 전단 시험편과 같이 양생한 시험편을 실내 시추기를 사용하여 54mm 규격으로 시추한 코어를 사용하였다. 시험편은 길이가 직경의 2배가 되도록 절단하고 편평도가 0.02mm 이내가 되도록 연마하여 건조기에서 24시간동안 건조한 후 실험하였다. 일축압축강도는 각 시멘트 모르타르 배합비에 대하여 4번씩의 일축 압축 시험을 하여 평균값을 구하여 사용하였고, 그 결과는 Table 2에 제시되어 있다.

### 실험결과 및 고찰

#### 전단응력에 따른 전단변위의 거동

절리면에 전단시험을 실시하면 이론적으로는 Fig. 2와 같이 일정한 전단변위에 이르기까지 전단 응력은 증가하여 최대 전단강도를 보인 후 전단응력은 감소하여 일정한 값을 보이게 된다. Fig. 7은 본 연구에서 측정된 전단응력과 전단변위의 관계를 보여주는 곡선으로, 최대전단강도에 도달한 후 거의 같은 크기의 잔류전단강도를 보이는 형태, 최대 전단강도에 도달한 후 전단강도가 점차 증가하는 형태 및 최대전단강도를 보인 후 감소하여 잔류전단강도를 보이는 형태의 세 가지 형태로 관찰되었다.

최대전단강도 이후 거의 같은 크기의 잔류전단 강도를 보이거나 전단강도가 조금씩 증가하는 형태는 수직응력 수준이 낮을 경우에 주로 관찰되었고, 최대전단강도를 지나 점차 감소한 잔류전단강도의 그래프 형태는 높은 수직응력에서 주로 관찰되었다. 또한 최대전단강도 이후 비슷하거나 점차 낮아지는 잔류전단강도의 형태는 낮은 거칠기 각을 갖는 시험편에서 주로 관찰된 반면, 전단강도가 최대 전단강도 이후 감소하여 낮은 잔류전단강도를 보이는 형태는 거칠기 각이 큰 시험편에서 주로 관찰되었다. 이는 거칠기 각이 낮을 경우 시험편의 거칠기가 파괴되는 변형보다는 미끄럼 변형이 주로 발생하여 뚜렷한 최대전단강도를 나타내지 않지만 거칠기 각이 커짐에 따라 미끄럼 변형보다는 시험편의 거칠기가 파괴되는 전단파괴가 발생하기 때문에 뚜렷한 최대전단강도가 관찰된 것으로 생각된다.

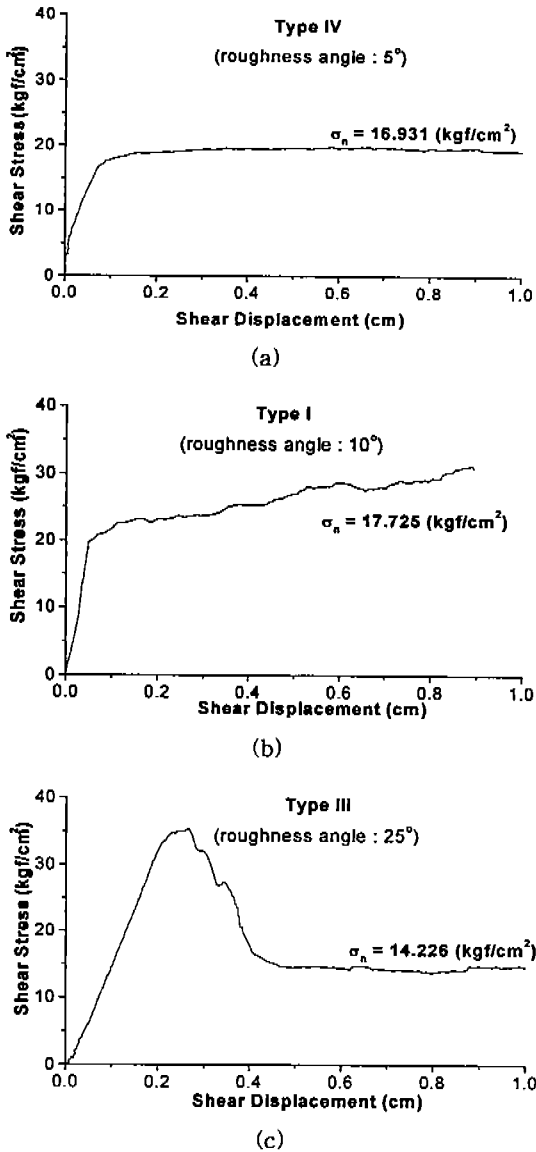


Fig. 7. Three types of shear strength-shear displacement curve. (a) the residual shear strength is almost the same as the peak strength. (b) the residual shear strength is increasing after peak shear strength. (c) the residual shear strength is lower than the peak shear strength.

시험방법에 따른 마찰각의 변화

다단계 시험의 경우 수직응력은 2.0~23.0kgf

/cm<sup>2</sup>의 (참고 : 1 kgf/cm<sup>2</sup> = 0.1 MPa) 범위로 적용하여 최대전단강도는 3.0~35.0 kgf/cm<sup>2</sup>의 범위로

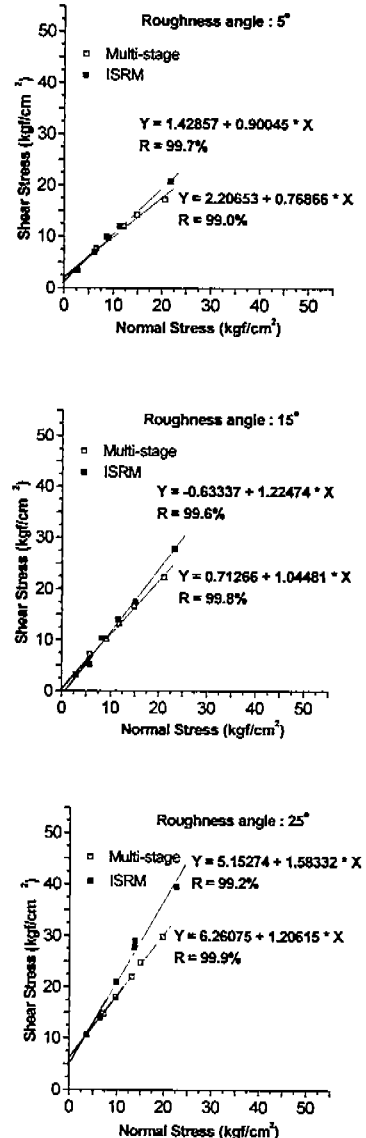


Fig. 8. The relationship between the peak shear strengths and normal stress measured from the type I of the cement mortar joint model. The slopes of lines are friction angles. Not only friction angles increase as roughness angle increases, but do the differences of friction angle between the two methods increase.

측정되었으며, 마찰각은 38°~59°로 측정되었다. ISRM 시험의 경우 수직응력은 2.0~35.0kgf/cm<sup>2</sup>로 적용하여 최대전단강도는 3.0~53.0kgf/cm<sup>2</sup>로 측정되었고, 마찰각은 43°~65°로 측정되었다. Fig. 8은 type I에서 측정된 수직응력-전단응력 그래프로, 시험편의 거칠기 각이 커짐에 따라 마찰각이 증가하고, 다단계 시험과 ISRM 시험의 마찰각의 차이가

점차 커짐을 보여준다. 이는 다단계 시험의 경우 단일 시험편을 이용하여 반복적으로 전단시험을 수행하기 때문에 시험편 거칠기의 계속적인 파괴가 일어난 반면에, ISRM 시험의 경우는 거칠기가 파괴되지 않은 여러 개의 시험편을 이용하기 때문에 시험편에 적용된 수직응력 수준이 커짐에 따라 전단강도의 차이가 현저하게 발생하는 것으로 판단된다.

시험 방법에 따른 결과를 종합적으로 분석하기 위해 각 시험을 통해 얻은 모든 결과를 하나의 그래프로 모은 후 Mohr-Coulomb의 식으로 표시한 결과, 상관계수는 90% 이상으로 높게 나타났으며 마찰각은 다단계 시험의 경우 47.5°, ISRM 시험의 마찰각은 53.9°로 측정되어 약 6.4°의 마찰각 차이를 보이고 있다(Fig. 9). 각 실험방법에 따른 수직응력과 최대전단강도의 관계식은 다음과 같다.

$$\tau = 1.79497 + 1.09105 \cdot \sigma_n (R = 90.0\%)$$

- Multi-stage test

$$\tau = 0.0168 + 1.36905 \cdot \sigma_n (R = 90.0\%)$$

- Test suggested by ISRM

R : correlation coefficient

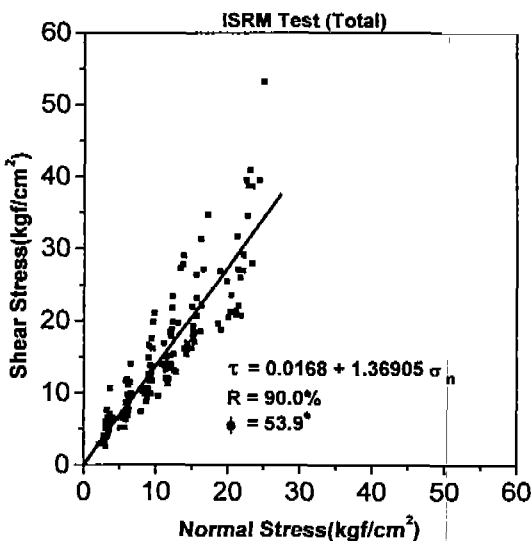
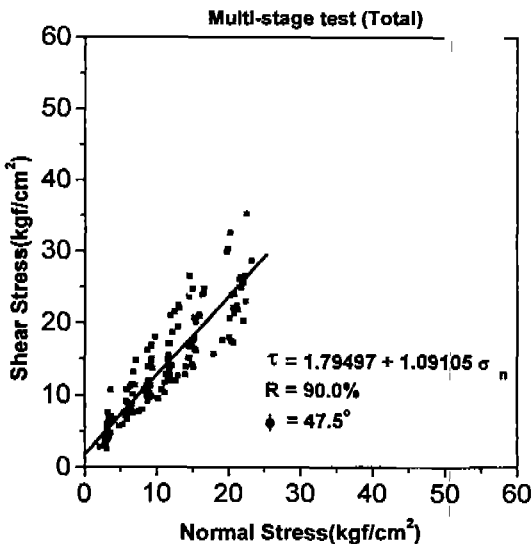


Fig. 9. Relationship between peak shear strength and normal stress for the multi-stage test and the ISRM test.

#### 압축강도에 따른 마찰각의 변화

동일한 거칠기를 가지고 있으나 압축강도가 다른 시료를 제작하여 압축강도의 변화에 따른 마찰각의 변화를 추적하였고, Fig. 10은 압축강도와 마찰각의 관계를 보여준다. 대부분의 시료에서 압축강도가 증가하여도 마찰각은 거의 일정한 값을 보여, 암석의 압축강도는 마찰각에 거의 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

동일한 거칠기를 가지고 있으나 압축강도가 변화할 때, 다단계 시험과 ISRM 시험간의 마찰각의 변화는 Table 3에서 보여진다. 다단계 시험의 경우 마찰각은 44.8°~49.0°의 범위로 측정되었으며, ISRM 시험의 경우에는 50.0°~53.6°로 ISRM 시험의 마찰각이 평균 4.48° 크게 측정되었다. 그러나 type IV 시료를 제외한 모든 시료에서 두 시험 방법에 따른 마찰각 차이는 5.0°~6.0°로 거의 일정한 값을 보여, 암석의 압축강도의 변화에 따른 시험 방법간의 마찰각 차이는 거의 영향이 없는 것으로 판단된다.



Table 3. Friction angles measured from the multi-stage tests and the ISRM tests. Each type is composed of 5 samples of different roughness angles and the same uniaxial compressive strength. Values written with bold type represent averages.

Mixing Types	I (°)	II (°)	III (°)	IV (°)	V (°)	Average
Multi-stage test	38-50 <b>45.4</b>	40-55 <b>46.6</b>	39-57 <b>44.8</b>	38-55 <b>49.0</b>	41-59 <b>48.6</b>	
ISRM test	42-58 <b>50.8</b>	46-58 <b>51.6</b>	43-60 <b>50.8</b>	43-59 <b>50.0</b>	47-65 <b>53.6</b>	
Difference	4-8 5.4	3-7 5.0	3-11 6.0	4-5 1.0	2-7 5.0	4.48

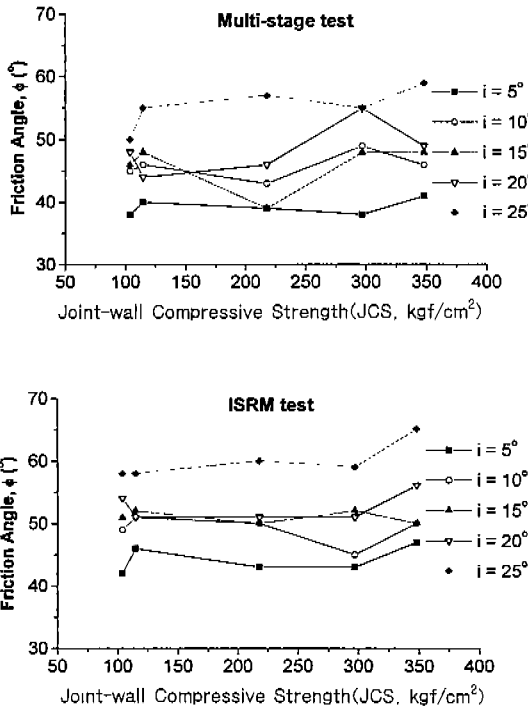


Fig. 10. Relationship between the joint wall compressive strength(JCS) of specimens and the friction angles of joints. *i* represents the roughness angle.

거칠기에 따른 마찰각의 변화

동일한 압축강도를 가지고 있으나 시료의 거칠기가 변화할 때 절리면의 마찰각의 변화는 Fig. 11

에서 보여진다. 모든 시료에서 거칠기 각이 증가함에 따라 마찰각도 증가하는 경향을 보여, 절리면의 마찰각은 시료의 거칠기와 직접적인 상관 관계를 보이는 것으로 판단된다. 거칠기 각의 증가에 따른

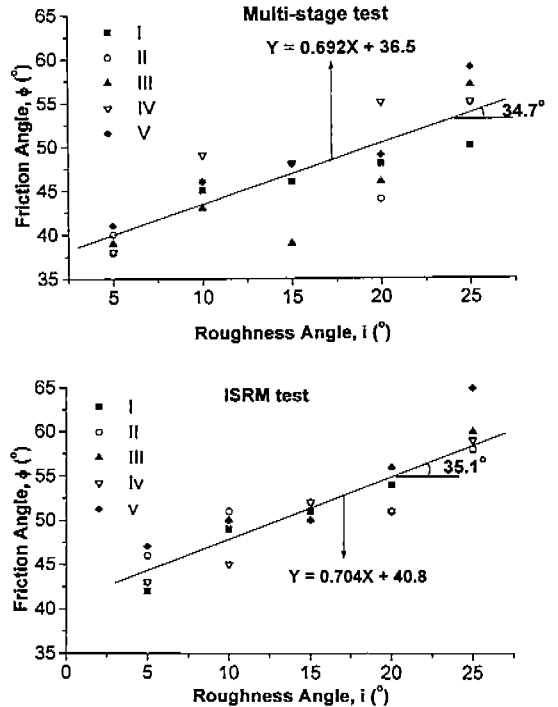


Fig. 11. Relationship between the roughness angles of specimens and the friction angles of joints. Greek numbers represent types of cement mortar and are explained in table 1.

마찰각의 증가 비율은 다단계 시험과 ISRM 시험에서 거의 동일한 값을 보여, 거칠기의 증가에 따른 마찰각의 증가는 시험 방법에 따라 차이가 없음을 보여준다.

거칠기가 변화할 때 시험 방법간의 마찰각 차이는 Table 4에서 보여진다. 다단계 시험의 경우 절

리면의 마찰각은 39.2°~55.2°의 범위로 측정되었으며 ISRM 시험의 마찰각은 44.2°~60.0°의 범위이다. 다단계 시험보다 ISRM 시험의 마찰각이 약 4.48° 정도 크게 측정되었으며, 시험 방법간의 마찰각의 차이는 거칠기가 증가하여도 거의 일정한 것으로 판단된다.

Table 4. Friction angles measured from the multi-stage tests and the ISRM tests. Each type is composed of 5 samples of the same roughness angle and different uniaxial compressive strengths. Values written with bold type represent averages.

Roughness angle	5 (°)	10 (°)	15 (°)	20 (°)	25 (°)	Average
Multi-stage test	38-41 <b>39.2</b>	43-49 <b>45.8</b>	39-48 <b>45.8</b>	44-55 <b>48.4</b>	50-59 <b>55.2</b>	
ISRM test	42-47 <b>44.2</b>	45-51 <b>49.0</b>	50-52 <b>51.0</b>	51-56 <b>52.6</b>	58-65 <b>60.0</b>	
Difference	4-6 <b>5.0</b>	4-7 <b>3.2</b>	2-11 <b>5.2</b>	5-7 <b>4.2</b>	3-8 <b>4.8</b>	<b>4.48</b>

전단시험결과와 Patton의 경험식과의 비교

본 연구의 결과와 Patton의 경험식을 이용하여 수직응력-전단응력 관계를 비교한 결과, ISRM 시험의 결과는 대체로 경험식과 같은 직선의 선형관계를 보이며 경험식에서 예측한 전단강도와 거의 같거나 다소 높은 전단강도가 측정되었다(Fig. 12). 반면에 다단계 시험의 결과는 시험편의 거칠기 각과 수직응력이 높아지면서 선형관계에서 다소 벗어난 곡선 형태의 그래프 관계를 보이며 전단강도가 측정되었다. 다단계 시험의 경우 동일 시험편을 이용하여 반복적으로 전단시험을 수행하기 때문에 낮은 수직응력 하에서는 시험편 거칠기의 파괴가 없이 서로 미끄러지는 팽창 변형만이 일어나다가, 점차 수직응력이 높아지면서 시험편 거칠기 파괴가 발생하여 전단강도의 증가폭이 낮아지기 때문으로 사료된다. Patton의 경험식과 실험결과를 비교한 결과, 대체로 유사한 선형관계를 보이고 있음이 관찰되었으나 일부분에서는 곡선의 관계를 보인다. 이러한 결과는 전단시험 수행시 적용된 수직응력의 범위가 너무 작았기 때문으로, 보다 넓은 범위의 수직응력을 적용한다면 보다 뚜렷한 경험식과의 관계를 알 수 있을 것으로 판단된다.

전단시험결과와 Barton의 경험식과의 비교

Barton의 경험식을 이용하기 위해서 시험편의 JRC를 계산하는 과정에서 거칠기 각 5°의 경우 JRC 계산 값이 음의 값이 나왔기 때문에 거칠기 각 5°의 실험결과는 Barton의 경험식과 비교할 수 없었다. 이는 절리면의 JRC를 계산하는 식의 오차로 시험편의 거칠기 각이 낮을수록 Z2 파라미터와 JRC 간의 상관관계가 낮아지기 때문에 거칠기 각 5°의 경우 JRC 값이 음의 값으로 측정된 것으로 판단된다.

거칠기 각 5°의 경우만을 제외하고 경험식의 예측값과 측정결과를 비교한 결과(Fig. 13), 다단계 시험의 경우 수직응력이 증가함에 따라 점차 전단강도의 증가폭이 감소되는 경향을 보여 경험식의 전단강도 변화와 유사한 그래프가 관찰되었으며 경험식의 값보다 유사하거나 약간 높은 전단강도가 측정되었다. ISRM 시험의 경우는 다단계 시험의 결과와는 달리 수직응력이 증가함에 따라 전단강도의 증가가 선형관계를 이루는 것으로 나타났으며, 이는 여러 개의 시험편을 이용하여 절리면 전단시험을 수행하기 때문에 거칠기의 파괴가 수반되지 않은 상태여서 전단강도가 수직응력의 변화에 따라

인공 절리모델에 대한 전단특성 연구

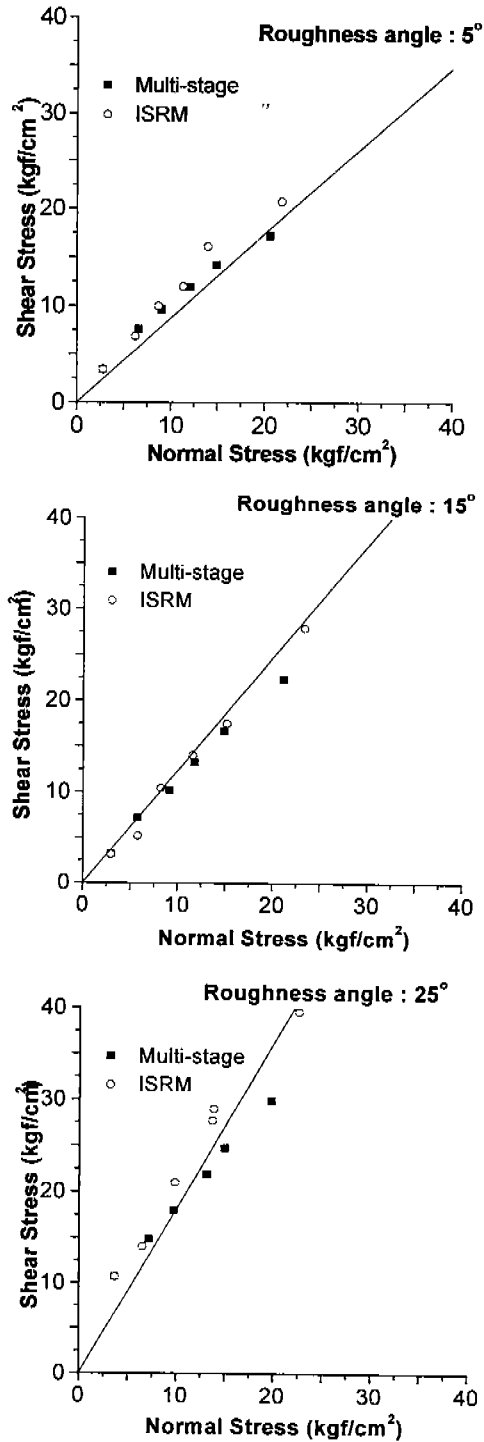


Fig. 12. Peak shear strengths predicted from Patton's equation(solid line) and those measured from the type I of the cement mortar joint model.

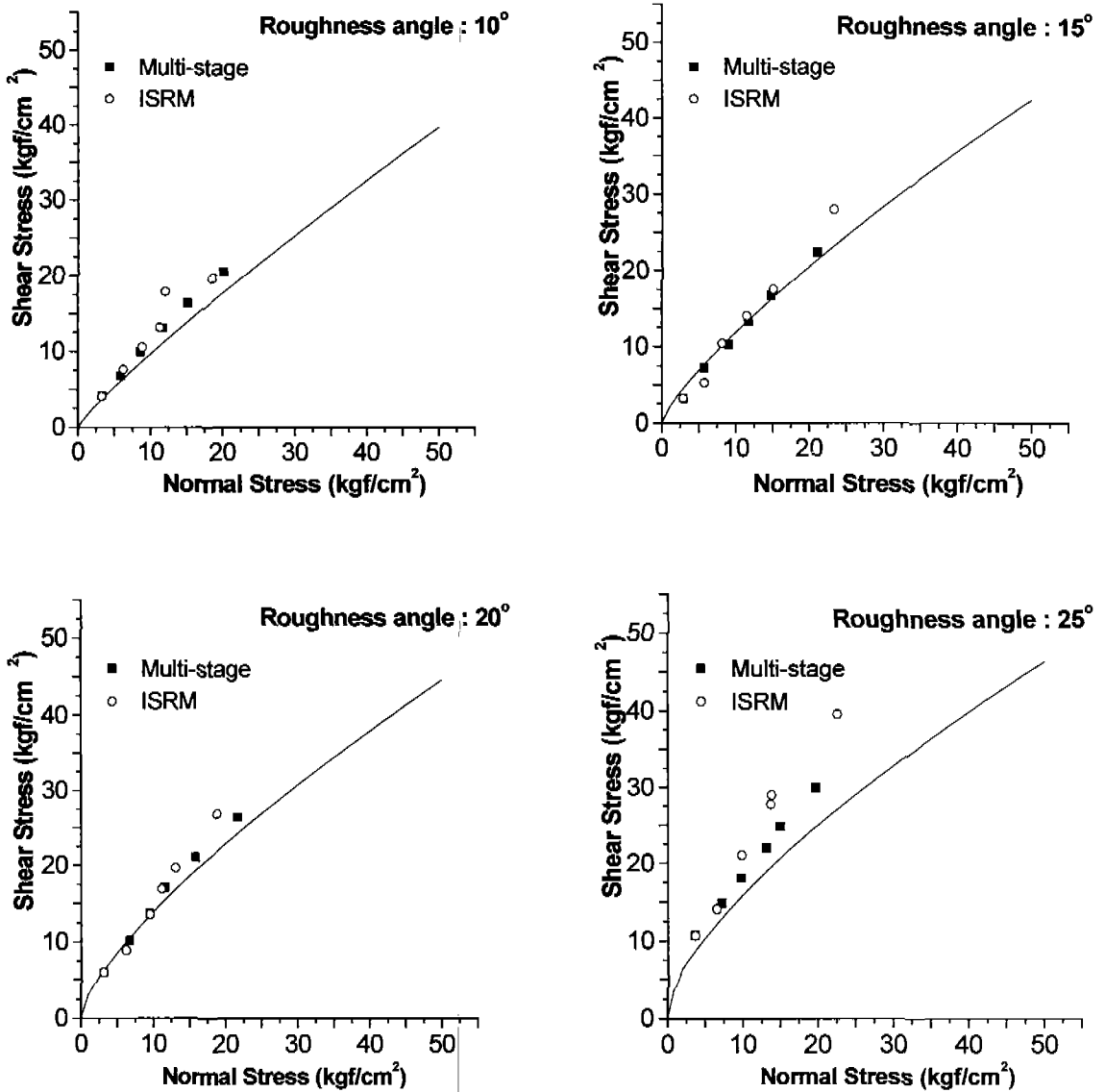


Fig. 13. Peak shear strength predicted from Barton's equation(solid line) and those measured from the type I of the cement mortar joint model.

거의 직선에 가까운 선형관계를 보이는 것으로 판단된다. Barton의 경험식에서 계산된 전단강도보다 본 연구의 결과가 더 크게 측정된 것은 Barton의 경험식은 절리면이 풍화되었을 경우에만 잔류전단강도를 사용하고 일반적인 경우 기본마찰각을 사용하기를 추천하고 있으나, 본 연구에 사용된 시험편은 절리면이 매우 신선한 상태여서 기본마찰각을

사용했기 때문에 경험식의 값보다 더 크게 나온 것으로 판단된다.

현재 일반적으로 자연 시료를 이용하여 전단시험을 행할 때 시료 채취의 어려움으로 ISRM 시험보다는 단일 시료를 이용하여 전단시험을 반복하는 다단계 시험을 행하고 있기 때문에 현장에서 전단강도를 예측하기 위해서는 Barton의 경험식을 사용

하는 것이 안전측면에서 더 타당하다고 판단된다. 하지만 본 연구에서 시험편에 적용된 수직응력은 시험편의 일축압축강도에 비하여 낮은 수준이었으므로 수직응력의 범위를 넓게 하여 전단시험을 한다면 경험식과 실험결과 간의 보다 명확한 관계를 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

## 결 론

1. 시멘트 모르타르를 이용한 인공절리 모델에서 다단계 시험의 경우 마찰각은  $38^{\circ} \sim 57^{\circ}$ 로 측정되었으며, ISRM 시험의 경우 마찰각은  $43^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 로 측정되어, 두 시험간에는  $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 의 마찰각 차이를 보인다. 모든 시험을 종합하여 Mohr-Coulomb의 식으로 표시한 결과 다단계 시험의 마찰각은  $47.5^{\circ}$ , ISRM 시험의 마찰각은  $53.9^{\circ}$ 로 측정되어, 통상적으로 시행되는 다단계 시험은 ISRM에서 제안한 시험에 비하여 약  $6.4^{\circ}$  낮은 값을 나타낸다.

2. 동일한 거칠기를 가진 절리면에서는 압축강도가 변화하여도 마찰각은 거의 일정하여, 절리면의 압축강도와 마찰각은 상관관계가 없는 것으로 사료된다. 또한 다단계 시험과 ISRM 시험간의 마찰각 차이 또한 압축강도와는 상관없이 일정하다.

3. 동일한 압축강도를 가지고 있으나 절리면의 거칠기가 변화하면, 마찰각은 거칠기의 변화와 직접적인 상관관계를 보인다. 거칠기의 증가에 따른 마찰각의 증가는 다단계 시험과 ISRM 시험 모두에서 일정하다.

4. 위의 결과를 종합하면 시멘트 모르타르 절리 모델의 경우 다단계 시험은 ISRM에서 제안한 전단 시험에 비하여 약  $6.4^{\circ}$  낮은 안전측의 마찰각을 나타내고 있으며, 절리면의 압축강도와 거칠기에 의한 영향은 다단계 시험에서도 ISRM 시험과 동일하다.

5. 실험결과를 Patton의 경험식과 비교한 결과, 다단계 시험과 ISRM 시험 모두 경험식을 이용한 예측 전단강도와 유사하게 거의 직선에 가까운 선형으로 증가하였고, 실험결과는 대체로 Patton의 경험식보다는 다소 높게 측정되었다. 또한 ISRM 시험의 경우는 Barton의 경험식보다는 Patton의 경험식과 유사한 직선에 가까운 선형의 관계를 보이

며 관찰되었다.

6. Barton의 경험식과 본 연구의 실험 결과를 비교한 결과, 수직응력이 낮을 때에는 다단계 시험과 ISRM 시험 모두 같거나 낮게 측정되었으나 수직응력이 높아지면서 점차 Barton의 경험식보다 높게 나타났다. 다단계 시험은 Barton의 경험식과 유사하게 수직응력이 커질수록 점차 전단강도가 감소하는 형태였으나 ISRM 시험은 선형관계를 보였으며 이는 거칠기의 파괴 수준에 의한 전단강도의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 강원대학교 부설 자원개발연구소의 지원으로 수행되었다.

## 참 고 문 헌

- 이종욱, 이찬구, 홍신일, 장천중, 최원학, 1993, 절리면에서의 전단거동 특성과 역학적 파라미터들 간의 상관성, 지질공학회지, 3, 1-20.
- 이상돈, 강준호, 이정인, 1994, 절리면의 거칠기에 따른 암석 절리의 전단강도 및 변형 거동에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반역학회, 4, 261-273.
- 조태진, 김영호, 1995, 일차파괴된 암반사면의 전단강도 및 보강설계법 고찰, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 5, 104-113.
- Barton, N. R., 1973, The shear strength of rock and rock joints, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 13, 255-279.
- Barton, N. R., Bandis, S. C. and Lumsden, A. C., 1981, Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 18, 1-21.
- Brown, E. T., 1981, Rock characterization testing and monitoring, Pergamon Press, 211 p.
- Dight, P. M. and Chiu, H. K., 1981, Prediction of shear behaviour of joints using profiles, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 18, 369-386.

- Leichnetz, W., 1985, Mechanical properties of rock joints, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 22, No. 5, 313-321.
- Patton, F. D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock, Proc. 1st Congr. Int. Sci. Rock Mech., 1, 509-513.
- Tse, R. and Cruden, D. M., 1979, Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 16, 303-307.

---

장 보안, 조 종수  
강원도 춘천시 효자동 192  
강원대학교 지구물리학과  
TEL : 0361) 250-8583  
FAX : 0361) 244-8580  
bajang@cc.kangwon.ac.kr