

<기술기사>

## 암반 불연속면의 정량적 기재에 관한 고찰

김영근

### 1. 머리말

각종 건설공사에서 암반(岩盤)은 피할 수 없는 대상이 되었다. 견고한 암반을 굴착하여 도로나 터널을 만들 경우 암반에 대한 정확한 평가나 이해가 이루어져야, 보다 안전하고 경제적인 공사가 될 것이다.

그러나 건설기술자에게 있어 암반은 접근하기 어려운 대상으로 생각하고 이에 대한 이해가 매우 부족한 실정이다. 또한 암반을 지질학(Geology)의 한 영역으로 생각하는 경향이 있으나, 이는 분명히 평가·분석해야 할 공학(Engineering)의 영역으로 암반의 공학적 평가에 대한 시험과 연구가 상당히 진행되어 왔다.

암반의 중요한 특징중의 하나는 수많은 불연속면을 포함하고 있다는 것이다. 불연속면은 공간위에서 임의의 방향성을 가지는 면으로 암반의 역학적 성질을 크게 지배하고 있기 때문에 불연속면을 적절히 표시하여 암반을 공학적으로 분류·평가하는 것은 무엇보다 중요하다 할 수 있다.

본고에서는 암반내에 존재하는 불연속면의 특징을 표현하기 위하여, 국제암반역학회(ISRM)에서 제안한 암반불연속면의 정량적 기재에 관한 지침(Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Mass)을 요약 정리하였다. ISRM에서는 암반불연속면의 10가지 기재사항(방향, 간격, 연속성, 거칠기, 벽면강도, 간극, 충전물, 용수, 절리군의 수, 블록 크기)에 대한 조사범위(Scope), 조사장비(Equipment), 조사방법(Procedure), 주의사항(Notes), 결과정리(Presentation of Results)에 대하여 상세하게 지침을 제시하였다. 본 지침은 실내 및 현장시험 표준화에 관한 위원회(Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests)에서 1978년 ISRM 학회지에 발표된 것이다.

암반 불연속면에 대한 정량적 평가는 암반분류(Rock Classification)시 매우 중요하게 이용될 수 있으며, 암반공학에 대한 이해를 보다 깊게 하는데 도움이 될 것

이라 생각된다.

### 2. 암반 불연속면이란?

암반에는 수많은 불연속면이 존재한다. 불연속면(Discontinuity)이라 함은 0 또는 아주 낮은 인장강도를 갖는 모든 역학적 불연속면을 말한다. 불연속면의 종류에는 절리 및 벽개와 같은 분리면, 편리와 층리 등 암석형성 과정의 초기단계에 발생한 것, 단층이나 파쇄대와 같은 대규모적인 지질구조와 연관되는 것 등이 있다.

절리(Joint)는 암석의 지질적인 연속성이 깨진 암반속에 포함되는 틈으로, 항상 서로 평행한 집합체를 형성하며, 이러한 같은 방향성에 속하는 절리를 절리군(Joint set)이라 한다. 절리의 중요한 특징은 절리면의 평행한 방향에서 전단변위를 거의 보이지 않으며, 층리, 벽개 등과 평행하게 형성되어 있는 것이다. 절리는 형태적으로는 판상절리(Platy joint), 주상절리(Columnar joint)등으로 구분되며, 성인적으로는 전단절리(Shear joint)와 인장절리(Tension joint)등으로 구분된다.

벽개(Cleavage)는 지층의 습곡이나 변형에 따라 형성된 간격이 좁은 틈을 말하는 것으로, 방향은 층리와는 상관이 없고 습곡과 같은 구조와 관계가 있으며 일반적으로 점판암이나 셰일과 같은 암석에 많이 발달되어 있다.

편리(Schistosity)는 결정편암이나 천매암과 같은 광역변성암에 발달된 수mm의 좁은 간격의 분리면이며, 표면에 특정 방향으로 늘어선 가는 주름이 있다.

층리(Bedding Plane)는 퇴적암내에 존재하며 하나의 층과 층이 경계를 이루는 면으로 한다.

시임(Seam)은 절리면의 틈에 협재된 점토질의 얇은 층으로 지하수로부터의 침전물이나 절리표면의 열수변질 등으로 점토화된 것이다.

단층(Fault)은 어느면을 경계로 양쪽 암석이 상대적(주)대우 건설기술연구소 토목연구실 선임연구원, 공학박사

인 불연속으로 변위한 부분을 말하며, 이 단층에 너비가 있을 경우 파쇄대(Fracture zone)이라 한다. 단층은 수 cm에서 수 km의 전단변위가 나타나며, 양쪽 암석이 충전물의 결과로 변성 또는 풍화되어 있다.

암반내에 존재하는 불연속면의 특징을 표현하기 위하여, 국제암반역학회는 1978년 다음과 같은 항목의 기재사항을 제안하였다.

- ① 방향(orientation): 공간상의 불연속면의 방향으로, 불연속면에서 가장 경사진 선구조의 주향과 경사로 표시한다.
- ② 간격(spacing): 이웃하는 불연속면 사이의 수직거리로써, 일반적으로 절리군의 평균간격을 말한다.
- ③ 연속성(persistence): 노두에 나타난 불연속면의 자취길이(Trace length)로써 불연속면의 침투거리 또는 범위의 개략적인 측정이 가능하며, 다른 불연속면을 만나거나 암석내에서의 종결은 연속성이 감소됨을 의미한다.
- ④ 거칠기(roughness): 불연속면 평균면과 관계된 표면거칠기 또는 굴곡으로써 전단강도에 큰 영향을 나타내며, 대규모 거칠기는 부분적인 경사로 나타난다.
- ⑤ 벽면강도(wall strength): 불연속면의 평균압축강도로써 벽면의 풍화나 변질정도에 의해 암석강도보다 작으며, 전단강도에 중요한 요소이다.
- ⑥ 틈(aperture): 불연속면 양쪽 벽면사이의 수직거리로써, 물 또는 공기로 채워져 있다.
- ⑦ 충전물(filling): 불연속면의 벽면사이의 물질로써 주변 암석보다 약하다. 대표적인 충전물로는 sand, silt, clay 등이 있다.
- ⑧ 용수(seepage): 암반 또는 불연속면에서 보이는 용출수 또는 습윤정도를 나타낸다.
- ⑨ 절리군의 수(number of sets): 같은 방향성을 가지는 절리군의 수를 말한다.
- ⑩ 블록크기(block size): 교차하는 절리군의 상호방향, 간격으로부터 구하는 암석블록의 크기를 말한다.

### 3. 암반불연속면의 정량적 기재

#### 3.1 불연속면의 방향성

(1) 범위

- ① 경사(dip): 수평면으로 부터 측정된 경사  
 경사방향(dip direction): 진북으로 부터 시계방

향으로 측정된 경사의 방위

- ② 방향성은 암반의 불안정한 상태나 과도한 변형 가능성을 좌우
  - ③ 불연속면의 방향은 암반블록의 모양 결정
  - (2) 장비
    - ① Compass & Clinometer
    - ② 자기장이 강한 암반에서 → clinometer와 50 m 테이프, 방위를 직접 읽을 수 있는 각도기
    - ③ 접근 할 수 없는 경사를 측정할 때 → 투시 장비를 가진 clinometer
  - (3) 방법
    - ① 불연속면의 최대 경사 → 2자리 숫자 예) 05°, 55° (00° ~ 90°)
    - ② 경사 방향: 진북으로 부터 측정 → 3자리 숫자 예) 010°, 105°(000°~360°)
    - ③ 경사방향/경사 → 3자리/2자리 예) 010°/05°
  - (4) 주의
    - ① 자기 편차 → 50 m짜리 테이프 사용
    - ② 안정성에 영향을 주는 불연속면의 경사측정 → 표면거칠기의 굴곡보다 큰 경사판 사용
    - ③ 절리군을 찾기 위해서는 충분한 수의 조사 → 80~300개 (이상적 150)
    - ④ Clinometer의 수직원이 90 눈금 대신 100눈금을 사용할 경우 → 90눈금으로 변환
    - ⑤ 측정의 정확도 → · 조사지역의 접근성 · 노두의 범위 · 편평도 정도 · 자기장의 변화 · 사람에 의한 오차
  - ① 주요 절리 방향의 평균 방향 → 3점 측정법(three point method)
  - ② 중요하지 않는 절리방향 → 단일 시추공에서 추정할 수 있다.
  - ③ 파쇄암반에서 절리 방향측정 → integral sampling법 사용
- (5) 결과
- ① 주향/경사 기호
    - 45° ↘ : 45°경사와 선방향의 주향을 가진 불연속면
    - : 수평 불연속면
    - ▀ : 선방향의 주향을 가진 수직 불연속면
- 불연속면의 종류
- ↘ : 절리(joint)    ↙ : 층리(bedding)    ∨ : 엽리(foliation)
  - : 주요, 연속적인 불연속면

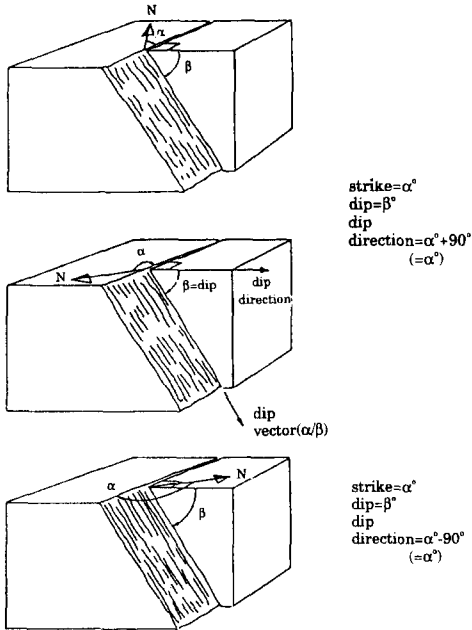


그림 1. 주향, 경사, 경사방향을 보여주는 Diagram.

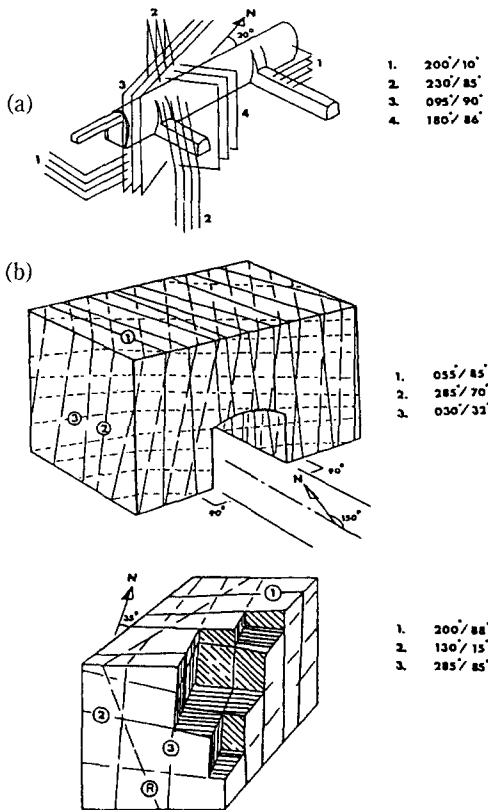


그림 2. 암반구조와 구조물과의 관계를 보여주는 블록 도해.

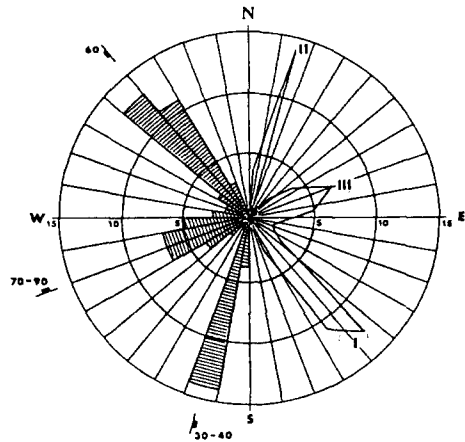


그림 3. joint rosettes 상에 방향데이터를 나타내는 두 가지 방법.

..... : 주요, 연속성이 보이지 않는 불연속면

㉑ 블록 도해(block diagram)

투영그림으로 구조물의 최적방향 선정에 도움, 암반구조의 3차원 적인 표현(그림 2)

㉒ joint rosettes

- 많은 수의 방향측정데이터를 나타내고 표시하는 일반적인 방법(그림 3)
- 단순화된 compass rose에 표현 (0° ~ 360°, 10°간격)
- 관찰데이터는 방사축을 따라 원호로 표현
- 경사는 따로 기재하며 수평 불연속면은 나타내기 어렵다.

㉓ 평사 투영법

- 등면적 투영법(Equal area projection): 데이터의 공간적인 분포가 Schmidt, Lambert net 상에 정확하게 표현된다
- 등각 투영법 (Equal angle projection): 불연속면 사이의 각도관계가 Wulff net 상에 정확하게 표현된다
- 그림 4 (a)에서 불연속면 K(주향/경사  $\alpha/\beta$ )의 극점 p는 면의 수선(normal)과의 하반구 상의 교차점이다. 극 등면적망에 극점을 나타내기 위해서는(그림 4(b)) 경사 $\beta$ 는 원점으로 부터 카운트한다. 또한 적도등면적망에 대원을 나타내기 위해서는(그림 4(c)) 주향( $\alpha+90^\circ$ )은 북점으로부터 카운트하고 경사는 원주상에서부터 주향과 직각으로 표시한다.

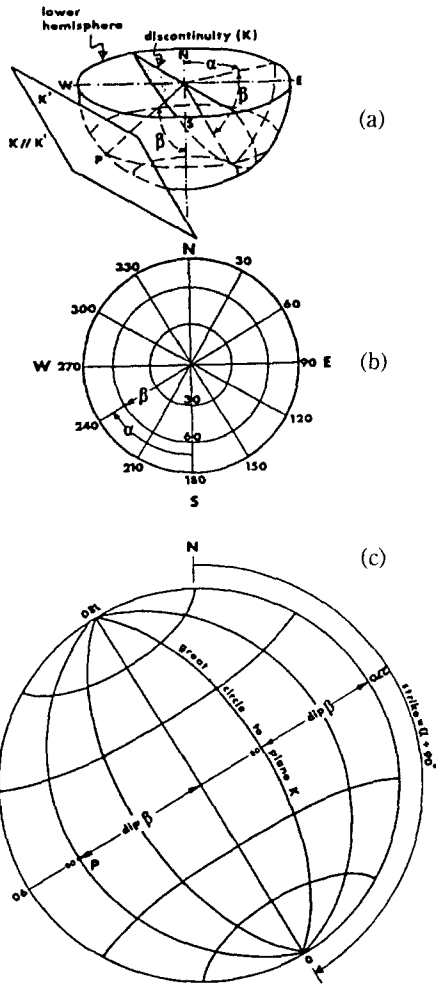


그림 4. 극등면적망(b)과 적도등면적망(c)에 극점(p)과 대원으로서 불연속면 K를 나타내는 방법.

· 극점을 나타내기 위해서는 극등면적망이 가장 편리하고, 평균방향데이터를 얻기 위해서는 극점들의 군(cluster)을 나타내고 극밀도를 표시해야 한다(그림 5).

### 3.2 불연속면의 간격

#### (1) 범위

- ㉑ 불연속면의 간격은 암반블록의 크기를 결정
  - 간격이 조밀한 경우 - low cohesion
  - 간격이 넓은 경우 - interlocking 상태
- ㉒ 간격이 조밀한 경우 암반의 파괴형태 변화(원형 파괴)
- ㉓ 낮은 전단강도나 많은 절리가 미끄러짐이 발생하

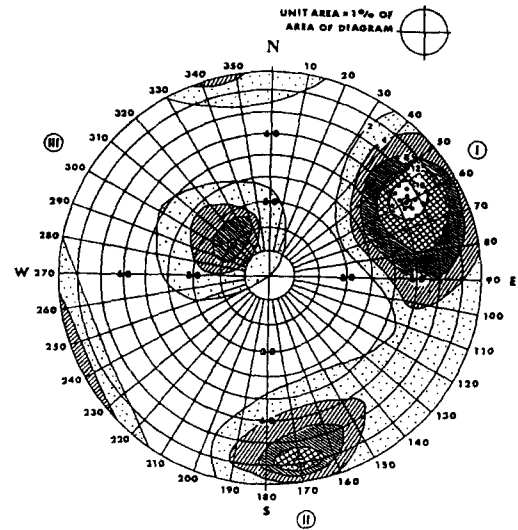


그림 5. 극 등면적망에서의 3개의 절리군의 방향을 나타내는 Schmidt contour diagram.

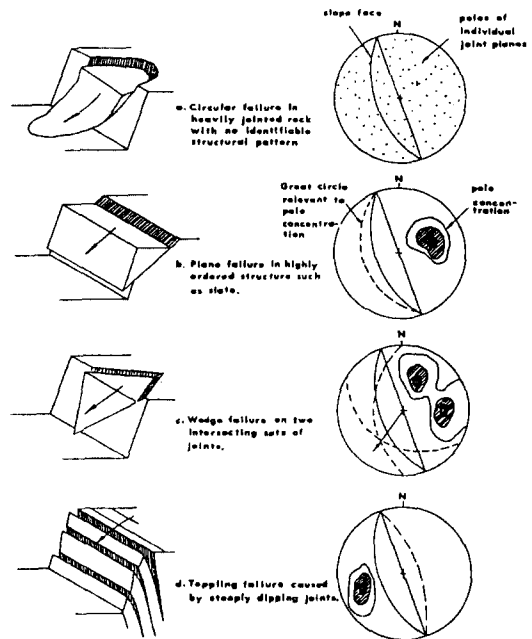


그림 6. 적도 등면적망에서의 4개의 사면파괴형태를 나타내는 데이터.

는 경우 → 간격의 중요성 증가

- ㉔ 간격은 암반의 투수성이나 용수특성에 영향, 일반적으로 수리전도도는 간격에 반비례

#### (2) 장비

- ㉑ 측정 테이프(최소 3 m, 단위 mm)

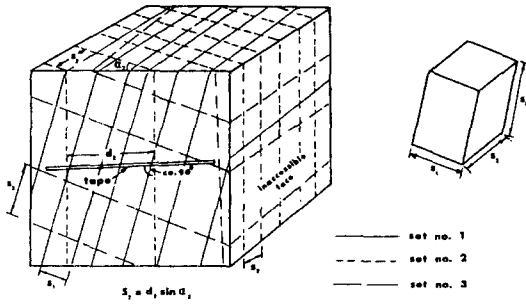


그림 7. 암반노두로부터 절리간격 측정.



그림 8. 절리의 최소, 평균, 최대 간격  $S_{min}$ ,  $S$ ,  $S_{max}$ 을 보여주는 histogram.

- ① compass & clinometer
- (3) 방법
  - ① 측정자는 절리군의 표면자취가 테이프에 수직하게 될수 있는 노두에서 사용(그림 7)
  - ② 옆의 절리와의 간격(d)은 모두 측정 기록, 조사길이는 3 m 이상 → 평균절리의 10배 이상 되어야 한다
  - ③ 측정자와 절리군사이의 최소각( $\alpha$ )은 compass로 측정
  - ④ 평균 간격은 다음식으로 부터 계산된다.

$$S = d_m \sin \alpha$$

여기서  $d_m$ 은 측정된 평균간격이다.

측정된 데이터는 그림 8에서 보는 바와 같은 histogram에서 나타내는 것이 좋다.

- (4) 주의
  - ① 측정테이프와 compass 추천 → 불연속면은 절리군내에서도 평행하지 않다.
  - ② 개개의 평균간격의 평균치는 암반블록의 평균크기를 나타낸다.

표 1. 절리간격의 표현

	표 현	간 격
극도로 좁다	extremely close	<20 mm
매우 좁다	very close	20~60 mm
좁다	close	60~200 mm
보통	moderate	200~600 mm
넓다	wide	600~2000 mm
매우 넓다	very wide	2000~6000 mm
극도로 넓다	extremely wide	mm

- ③ 주어진 절리군에서 비슷한 간격을 가진 영역은 더 큰 괴상 암반에 의해 구분된다.
- ④ 일반적으로 발파영향에 의한 균열은 제외
- ⑤ 암반노두가 제한된 경우 탄성과 반사법을 이용 → 절리빈도와 속도사이의 관계식
- ⑥ 절리의 간격이나 빈도는 시추코아 또는 공내조사법으로 부터 얻을 수 있다.
- (5) 결과
  - ③ 최소, 평균, 최대 간격  $S_{min}$ ,  $S$ ,  $S_{max}$ 는 각각의 절리군에 대해서 기록.
  - 분포형태는 histogram으로 표현, 절리간격의 표현은 다음 표와 같다(표 1).
  - ④ 많은 수의 절리간격 자료를 통계처리하는 방법 → histogram 사용 각각의 절리군에 대한 빈도곡선이 같은 histogram에 그려진다.
  - ⑤ 절리간격은 절리빈도(절리수/m)의 역수

### 3.3 불연속면의 연속성

- (1) 범위
  - ① 연속성은 임의의 면에서 불연속면의 크기 또는 넓이로, 노두에서의 불연속면의 자취 길이(trace length)의 조사에 의해 개략적으로 구할 수 있다. 가장 중요한 요소중의 하나지만 정량적 측정은 가장 어렵다.
  - ② 다른 절리보다 더 연속적인 절리가 나타나고, 또 어떤 절리는 다른 절리나 암체내에서 끝난다.
  - ③ 사면에서 안정성에 불리한 방향의 불연속면의 연속성 정도는 매우 중요
  - ④ 터널에서 5-10 m의 평편한 절리는 안정성에 중요
- (2) 장비
  - ① 측정 테이프(길이 10 m, 단위 mm)
- (3) 방법
  - ① 절리군은 다음과 같이 구분된다(그림 9)
    - persistent, sub-persistent, non-persistent

- ⑥ 주향과 경사방향에서 측정. 평면인 노두에서는 측정 불가능  
절리군에 대해 측정된 평균 자취길이는 다음과 같이 표현된다(표 2).
- ⑦ 불연속면 길이에 대한 mapping은 다음과 같이 기록한다.
  - Exposure(x): 절리가 노두면 바깥으로 연속하고 있는 것
  - Rock(r): 노두면내의 암석내에 절리 말단이 있는 것
  - Discontinuity(d): 다른 불연속면에 부딪혀 끝나는 것
  - Systematic: (x)에서 High

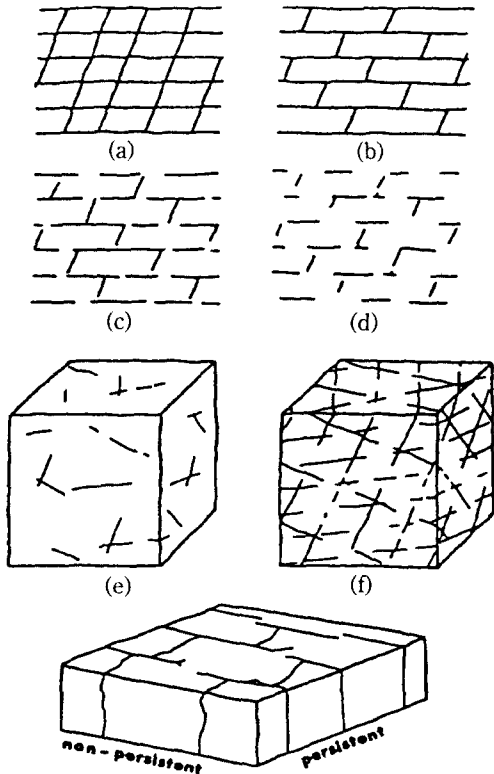


그림 9. 절리군의 연속성을 보여주는 그림.

표 2. 절리 연속성의 표현

	표 현	간 격
매우 낮다	very low	<1 m
낮다	low	1~3 m
보통	medium	3~10 m
높다	high	10~20 m
매우 높다	very high	>20 m

- Sub-systematic: (r)에서 High
- ⑧ 말단자료(termination data, x, r, d)는 절리의 양 끝에 기록  
예) 8(dx)는 절리길이 8m 이고 한쪽은 d, 다른 한쪽은 x
- (4) 주의
  - ⑨ 양끝점이 보이는 절리가 하나의 끝점 또는 끝점이 없는 절리보다 작게 보일 수 있다.
  - ⑩ 불연속면 → isometric dimension  
r → circular, d → rectilinear인 경향을 보인다.
  - ⑪ 평균자취길이는 평균반경보다 약간 작거나 약간 큰 범위를 갖는다.
  - ⑫ 절리의 최대 길이 분석 가능
  - ⑬ 연속성-암반내의 임의의 면의 전체 면적에 대한 %
  - ⑭ stepped 파괴 가능성을 조사하는 것이 중요(그림 10)
  - ⑮ rock bridge에 의한 전단강도(점착력)는 다음식으로부터 구할 수 있다

$$c = \frac{1}{2}(\sigma_c \sigma_t)^{\frac{1}{2}}$$

여기서  $\sigma_c$ 는 단축압축강도,  $\sigma_t$ 는 인장강도

(5) 결과

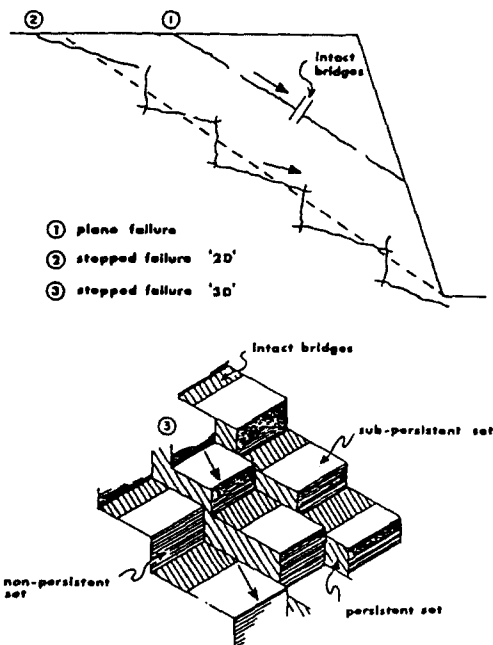


그림 10. 위험한 파괴면의 예.

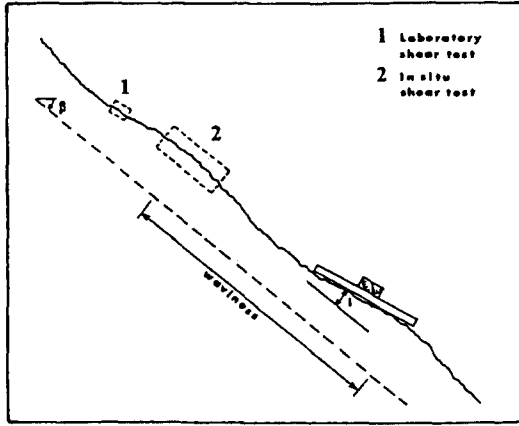


그림 11. 불연속면 거칠기의 크기.

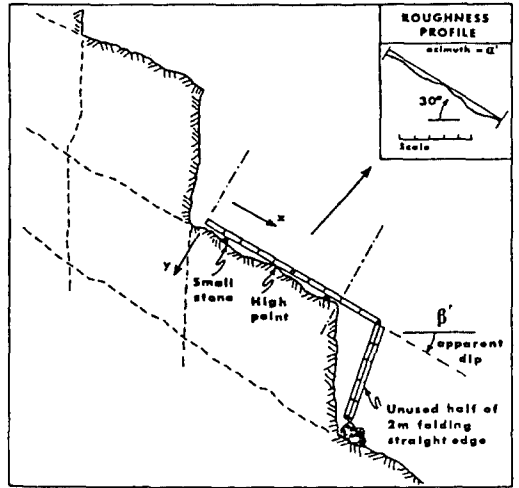


그림 12. 불연속면 거칠기를 측정하는 방법(2-D).

- ㉠ 절리군은 상대적인 연속성에 따라 systematic, sub-systematic 또는 non-systematic 으로 표현
- ㉡ 관찰된 자취길이의 size-frequency histogram 이 주어져야 한다.
- ㉢ 절리 말단 지수( $Tr$ , termination index) 은 절리 끝점의 총수( $\Sigma r + \Sigma d + \Sigma x$ )에 대한 암체에서 끝점이 만나는 절리의 %로 정의 된다. 즉

$$Tr = \frac{\Sigma r}{2 \times (\text{관찰된 불연속면의 수})} \times 100\%$$

- ㉣ 중요 파괴면의 연속성은 평가되어야 한다.

### 3.4 불연속면의 거칠기

#### (1) 범위

- ㉠ 불연속면의 거칠기는 전단강도에 중요한 요소
- ㉡ 일반적으로 거칠기는 큰 규모의 굴곡(waviness) 과 작은 규모의 굴곡(unevenness)으로 특징 지워진다.
- ㉢ waviness → 평균 절리면에 관련된 전단변위의 초기방향에 영향  
unevenness → 시험실이나 중규모의 현장시험에서의 전단강도에 영향(그림 11)
- ㉣ 중요 미끄럼 방향을 안다면 거칠기에 대한 선형 profile
- ㉤ 중요 미끄럼 방향을 모른다면 3방향에서 거칠기 측정 (compass & disc-clinometer)
- ㉥ 거칠기를 측정하는 목적은 전단강도나 팽창도를 계산하는데 있다.

#### (2) 장비

- ㉠ linear profiling
  - i) 접자(길이 최소 2 m, 단위 mm)
  - ii) compass & clinometer
  - iii) 10 m 끈(1 m 간격, 10 cm 간격으로 표시한 것)
- ㉡ compass & disc-clinometer
  - i) Clar 지질 컴퍼스
  - ii) 4개의 얇은 원형 판(지름 5, 10, 20, 40 cm)

#### (3) 방법

- ㉠ linear profiling
  - 접근가능하고 전단파괴가 일어날 가능성이 있는 불연속면 선정
  - 평균방향에 평행하게 자를 놓는다. → 가능한 직선 (그림 12)
- ㉡ compass & disc-clinometer
  - 접근가능하고 전단파괴가 일어날 가능성이 있는 불연속면 선정
  - 작은 거칠기는 가장 큰 평판을 놓는다(그림 13).

#### (4) 주의

- ㉠ linear profiling
  - i) 자동 기록 profilograph가 사용
  - ii) 불연속면이 몇개의 평행면으로 나누어지는 경우 주의
  - iii) 거칠기를 기록하는 방법-굴곡의 길이와 높이 기록
- ㉡ compass & disc-clinometer

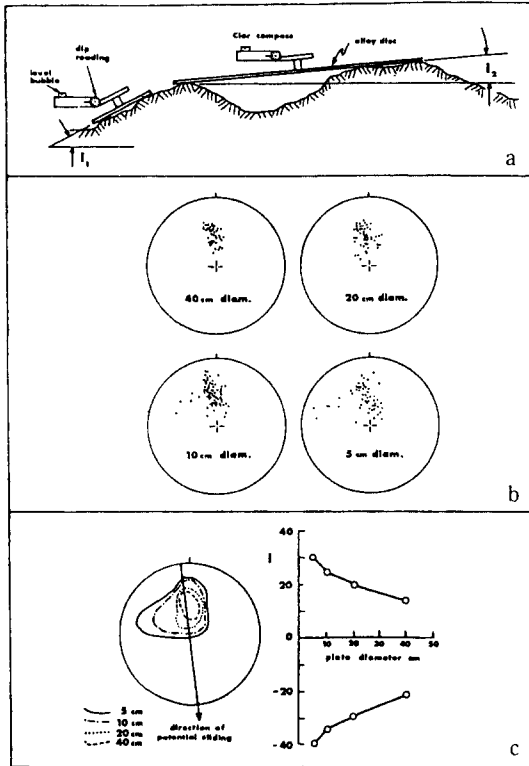


그림 13. 불연속면 거칠기를 측정하는 방법(3-D).

- i) 가장 작은 평판은 분산이 크고, 가장 큰 거칠기  
가장 큰 평판은 분산이 작고, 가장 작은 거칠기
- ii) 평판 크기에 대한 최대 거칠기를 그린다(그림 13).

(5) 결과

① linear profiling

- i) (x) 와 (y) 값을 그린다.
- ii) Profile은 최대, 최소 평균 거칠기를 같은 페이지에 그린다.
- iii) 측정방향과 경사 표기

② compass & disc-clinometer

- i) 여러 평판에서 얻어진 경사방향과 경사를 stereo-net 상에 그린다.
- ii) 주어진 절리군에서의 저리에 대한 측정치를 같은 stereo-net 상에 그린다.

③ 표현

- 두개의 스케일에 기초 : small scale(수 cm)과 large scale(수 m)
- slickenside(경면)는 이전의 전단변위가 분명한

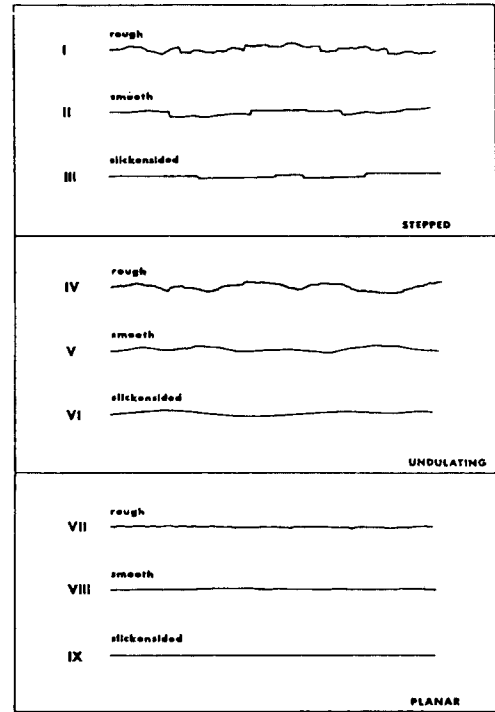


그림 14. 대표적인 거칠기 profile.

때만 사용한다.

- 거칠기의 중간 치수는 3개로 구분 : stepped, undulating, planar
- 거칠기의 작은 치수는 3개로 구분 : rough, smooth, slickenside
- 거칠기의 대표적인 예가 그림 14에 나타나 있다.
- 전단강도의 크기는

$$I > II > III, IV > V > VI, VII > VIII > IX$$

$$I > IV > VII, II > V > VIII, III > IX, VI > IX$$

(6) 전단강도의 추정

거칠기를 표현하는 주요 목적은 전단강도를 추정하는 것이다. 전단강도는 최대 및 최소 마찰각 또는 중간각에 굴곡에 의한 것을 합한 것으로 구한다. 즉

$$\tau = \sigma'_n \tan(\phi + i)$$

여기서  $\tau$ 는 전단강도,  $\phi$ 는 마찰각  $\sigma'_n$ 는 유효 수직응력,  $i$ 는 굴곡

또는 다음식으로 부터  $\phi_{peak}$ 를 구할 수 있다.

$$\phi_{peak} = JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma'_n} \right) + \phi_r$$

여기서 JRC는 절리거칠기계수 JCS는 절리면의 압축



강도이다. 이 방법의 적용례는 그림 15에 설명되어 있다.

먼저 JRC를 구하기 위해서는 그림 16에 주어진 거칠기 profile를 이용한다. 그 다음으로 JCS값과  $\phi_r$ 을 구하기 위해서 Schmidt 햄머 시험을 실시한다.

3.5 불연속면의 강도

(1) 범위

- ㉔ 절리면을 포함하고 있는 암석의 압축강도는 전단 강도 및 변형성에 매우 중요

표 3. 불연속면의 거칠기

구분	표 현	현
I	Rough, stepped	거침, 계단면
II	Smooth, steeped	부드러움, 계단면
III	Slickensided, stepped	경면, 계단면
IV	Rough, undulating	거침, 파상면
V	Smooth, undulating	부드러움, 파상면
VI	Slickensided, undulating	경면, 파상면
VII	Rough, planar	거침, 평면
VIII	Smooth planar	부드러움, 평면
IX	Slickensided, planar	경면, 평면

㉕ 풍화 및 변질 정도 반드시 기재

㉖ 풍화의 결과

역학적인 분해 - 절리의 개구, 절리의 생성, 광물 경계의 개구

화학적인 분해 → 탈색, 실리카 광물의 점토 광물로 분해

㉗ 간이 시험법 → Schmidt 햄머 시험, 지질햄머 시험

㉘ 광물 코팅은 전단강도에 영향

㉙ manual index 시험과 Schmidt 햄머 시험 추천

(2) 장비

㉚ 햄머

㉛ 강한 pen knife

㉜ Schmidt 햄머

㉝ 건조 밀도 측정 장비

(3) 방법

㉞ 암반의 풍화 등급(표 4)

㉟ 광물의 풍화 등급(표 5)

㊱ manual index 시험

• 불연속면의 벽면이나 대표적인 암석에서 실시한다.

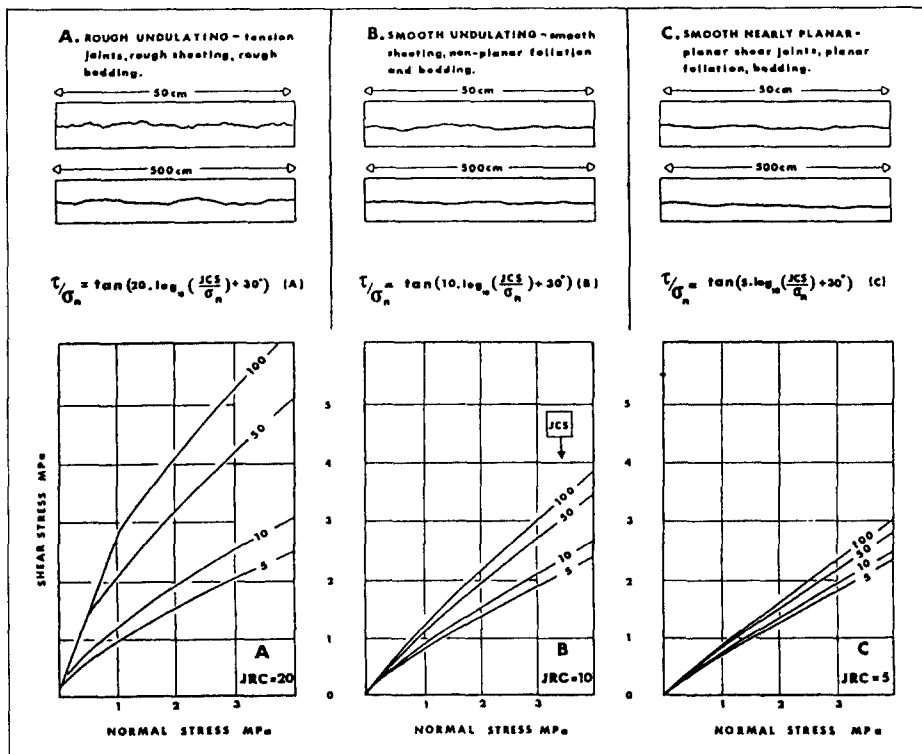


그림 15. 거칠기 profile로 부터 최대 전단강도를 구하는 방법

- 신선한 암편조각에서 실시될 수도 있다. → 점하중시험(point load test)

④ Schmidt 햄머 시험

- 불연속면에 수직하게
- 암석면은 포화된 상태에서 시험 → 가장 안전한 값
- 암편조각이나 광물입자 부스러기 제거
- 시험횟수 → 10회/불연속면 또는 단위면적당 10회

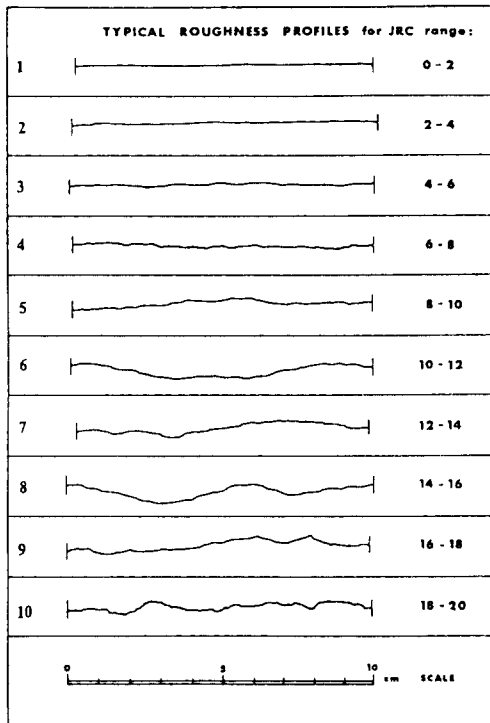


그림 16. 전형적인 JRC 값을 보여주는 거칠기 profile.

- Schmidt 반발계수(r)와 암석비중( $\gamma$ ) → JCS 추정 (그림 17)
- 암석강도를 추정하기 위해 점하중 시험이 실시되기도 한다.

(4) 주의

④ 암석의 풍화 등급

- 풍화분포 → 노두의 mapping에 의해 결정 →

표 5.

용어	표현
Fresh	광물의 풍화 흔적 없음
Discolored	광물의 원래 색이 변화, 변화 정도 표시
Decomposed	암석은 흩으로 풍화
Disintegrated	원래의 조직은 남아 있지만 광물은 분해 암석은 흩으로 풍화, 원래의 조직은 남아 있다. 암석은 부스러지고 광물 입자는 분해되지 않음

표 6. 암석 분류

등급	표현	특징	단축압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )
R0	Extremely weak	손톱에 의해 파임	2.5-10
R1	Very weak	햄머 타격에 의해 부스러짐	10-50
R2	Weak	햄머 타격에 의해 움푹파임	50-250
R3	Medium strong	햄머 1회 타격으로 깨짐	250-500
R4	Strong	햄머 1회 이상의 타격에 의해 깨짐	500-1000
R5	Very strong	햄머의 다수타격에 의해 깨짐	1000-2500
R6	Extremely strong	햄머타격에 의해 약간 깨짐	>2500

표 4.

등급	용어	표현
I	Fresh	광물의 풍화 흔적 없음 약간의 탈색이 주요 절리면에 있음
II	Slightly weathered	탈색이 광물과 불연속면의 풍화를 나타냄
III	Modeartely weathered	모든 광물이 풍화에 의해 탈색 광물의 1/2 이하가 흩으로 분해
IV	Highly weathered	신선 또는 탈색된 암이 연속적인 구조로 작용 광물의 1/2 이상이 흩으로 분해
V	Completely weathered	신선 또는 탈색된 암이 불연속적인 구조로 작용 모든 광물이 흩으로 분해
VI	Residual soil	원래의 구조는 그대로 남아 있다. 모든 광물이 흩으로 전환 암석구조는 파괴, 부피 변화

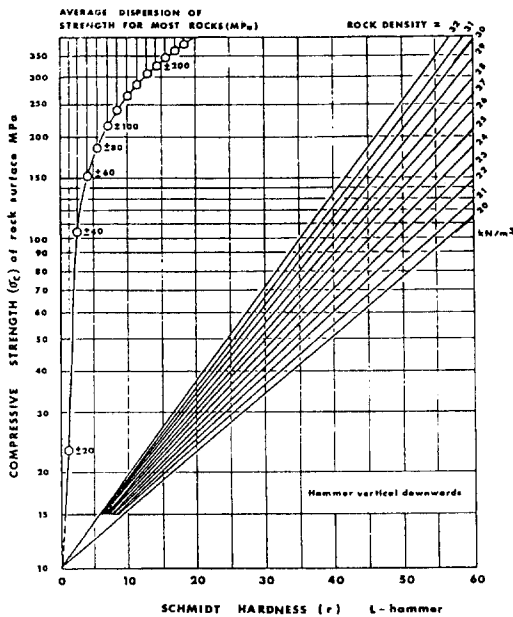


그림 17. Schmidt 햄머에 대한 보정 차트.

개구성 절리의 존재여부와 암석의 공극률에 관계된다

- 풍화와 변질은 구분이 어렵다.
- 점도가 많은 암석은 풍화받기 쉽다.

㉑ manual index 시험

- 시험편을 이용한 시험보다 선호 → 많은 불연속면에 대해 시험 가능
- 절리벽면의 상태를 보다 정확히 나타낼 수 있다.

㉒ Schmidt 햄머 시험

- 반발계수의 범위 10~60
- 가장 작은 값 → weak rock ( $\sigma_c < 200 \text{ kg/cm}^2$ )
- 가장 높은 값 → very strong & extremely strong rock ( $\sigma_c > 1500 \text{ kg/cm}^2$ )
- 타격방향에 따른 보정 필요

Rebound r	Downwards		Upwards		Horizontal a=0
	a=-90	a=-45	a=+90	a=+45	
10	0	-0.8		-	-3.2
20	0	-0.9	-8.8	-6.9	-3.4
30	0	-0.8	-7.8	-6.2	-3.1
40	0	-0.7	-6.6	-5.3	-2.7
50	0	-0.6	-5.3	-4.3	-2.2
60	0	-0.4	-4.0	-3.3	-1.7

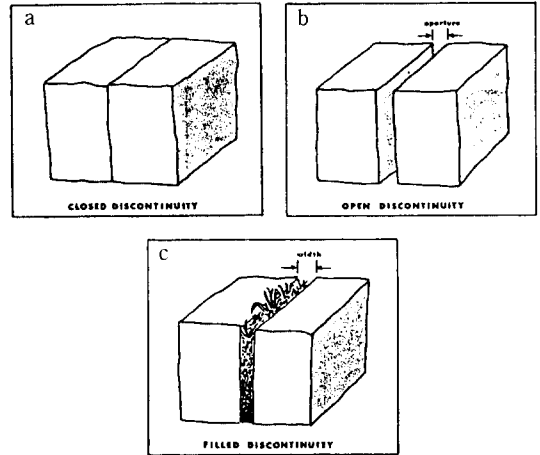


그림 18. 충전된 불연속면의 폭(width)과 열린 불연속면의 간극(aperture)의 정의.

(5) 결과

㉑ 암석의 풍화 등급

- 뚜렷한 풍화대 → 간단한 스케치와 함께 등급 표시(I, II, III 등)
- 개별절리의 풍화등급 → 절리군no. 1 대부분 moderately discolored, 약 20% fresh

㉒ manual index 시험

- 암석강도 → 절리군 no.1 대부분 medium strong(R3), 약 20% strong(R4)
- 절리벽면의 강도는 신선암의 강도와 구별

㉓ Schmidt 햄머 시험

- 절리면에 대한 반발계수(r)와 암석비중( $\gamma$ ), 추정된 JCS 함께 명기
- 10개 이상의 결과로부터 대표값 산정, 신선암과 구별

3.6 불연속면의 간극

(1) 범위

㉑ 간극 → 개구성 절리의 두 벽면사이의 수직거리  
충전된 절리의 폭(width)과는 구별(그림 18)

㉒ 큰 간극은 전단변위로 부터 발생

㉓ 그 값은 매우 작다 → mm의 1/2 정도

㉔ 간극의 영향 → 투수시험에 의해 평가

㉕ 간극은 절리내의 수압, 유입량, 배출량에 영향

(2) 장비

㉑ 3 m 길이의 측정 테이프(단위 mm)

㉒ Feeler 게이지

- ㉔ 하얀색 스프레이 페인트
- ㉕ 노두를 씻어내는 장비
- (3) 방법
  - ㉖ 절리면을 깨끗하게 한다 → 조사선을 따라 하얀색 페인트 칠 밝은 조명 필요
  - ㉗ 미세한 간극 → feeler 게이지  
큰 간극 → mm 자
- (4) 주의
  - ㉘ 노두에서 보이는 간극은 본질적으로 교란된 것으로 측정된 것은 암반내에 존재하는 것 보다 크다.
  - ㉙ 시추공 periscopes 추천 → 표피가 30 m 이하 일 때
- ㉚ integral sampling method → 시추코아의 회수
- ㉛ 현지 투수계수 측정 시험 → 간극의 영향
- ㉜ 측정된 간극은 각 지점 마다 다르다.
- (5) 결과
  - ㉝ 간극은 다음표에 의해서 기술된다(표 7).
  - ㉞ 평균 절리는 각 절리군에서 기록한다
  - ㉟ 평균값보다 큰 값을 갖는 불연속면의 방향, 위치도 함께 기록한다
  - ㊱ Extremely wide 또는 Cavernous인 경우 사진 첨부

**3.7 충전물**

- (1) 범위
  - ㉒ 충전물은 불연속면에서 이웃하는 벽면을 구분하는 물질  
예) calcite, chlorite, clay, silt, fault gouge, breccia 등
  - ㉓ 충전된 절리 다양한 역학적 특성(전단강도, 투수성, 변형성 등)
  - ㉔ 다음과 같은 요소에 의해 결정된다.

**표 7. 절리 간극에 대한 분류**

간	극	표	현
<0.1 mm	Very tight	Closed	
0.1-0.25 mm	Tight	(닫힘)	
0.25-0.5 mm	Partly open		
0.5-2.5 mm	Open	Gapped	
2.5-10 mm	moderately	(벌어짐)	
>10 mm	wide		
1-10 cm	Very wide	Open	
10-100 cm	Extremely	(열림)	
>1 m	wide		

- 충전물의 광물(Mineralogy of filling material)
- 등급 또는 입자크기(Grading or particle size)
- 과압밀비(Over-consolidation ratio)
- 함수비와 투수율(Water content and permeability)
- 선행 전단변위(Previous shear displacement)
- 벽면 거칠기(Wall roughness)
- 폭(Width)
- 벽면의 파쇄(Fracturing or crushing of wall rock)
- ㉕ 정량적인 기록
- (2) 장비
  - ㉖ 3 m 길이 측정 테이프 (단위 mm)
  - ㉗ 2 m 길이 접자
- ㉘ plastic 가방(충전물 채취)
- ㉙ 강한 pen knife
- (3) 방법
  - ㉚ 폭(Width)
    - 최대, 최소 및 평균 폭 측정
    - 최소, 최대 폭의 차이는 전단변위의 발생 가능성
    - 얇은 충전물 → 거칠기의 평균높이 측정용이, 이것은 폭과 비교(그림 19)
    - 복잡하게 충전된 주요절리(그림 20)는 10% 오차내에 측정
  - ㉛ 풍화 등급
    - 풍화의 결과로 충전된 절리는 decomposed 암석과 disintegrated 암석으로 구성된 충전물을 갖는다.
    - Decomposed : 암석은 휴과 같은 상태로 풍화되고, 조직은 여전히 남아 있지만 모든 광물은 분해
    - Disintegrated : 암석은 휴과 같은 상태로 풍화되고, 조직은 여전히 남아 있지만 암석은 부서지고, 광물은 분해되지 않음
- ㉜ 광물조직
  - 충전물의 미세파편은 장기적인 전단강도에 영향을 주므로 중요
  - swelling clay 의 경우 주의
- ㉕ 입자크기
  - 충전물의 등급을 매기는 방법 → clay, silt,

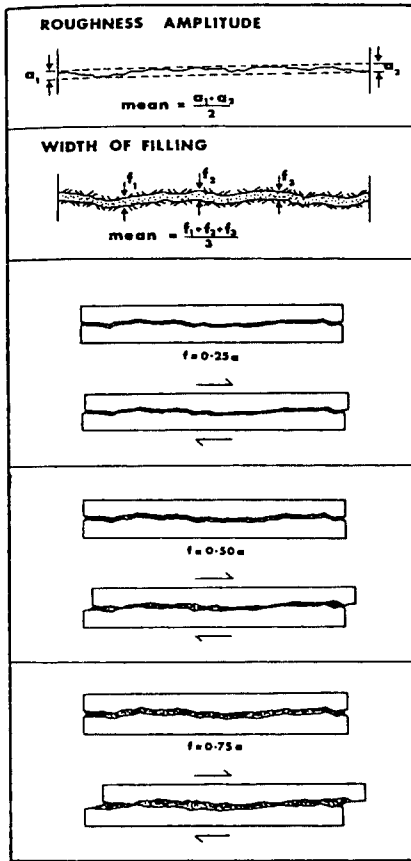


그림 19. 충전된 불연속면의 예(벽면 거칠기의 크기와 충전물의 폭).

- sand, rock particle 의 % 평가
- ㉔ 충전물 강도
  - 충전물의 다음표에 의해 분류(표 8)
  - S1~S6의 전단강도는 압축강도의 1/2
- ㉕ 선행 변위
  - 개략적인 과압밀비(OCR) 의 평가
- ㉖ 함수량 및 투수성
  - 다음표에 의해 구분(표 9)

(4) 주의

- ㉑ S1-S6 등급은 토질역학기준을 사용해서 보다 정확히 기재 가능
- ㉒ 충전물의 열수변질은 충전물의 광물조직의 특성을 복잡하게 한다.
- ㉓ 선행 변위가 일어났다면 OCR은 중요하지 않다. 선행 변위가 일어났지 않았다면 OCR은 중요하다.

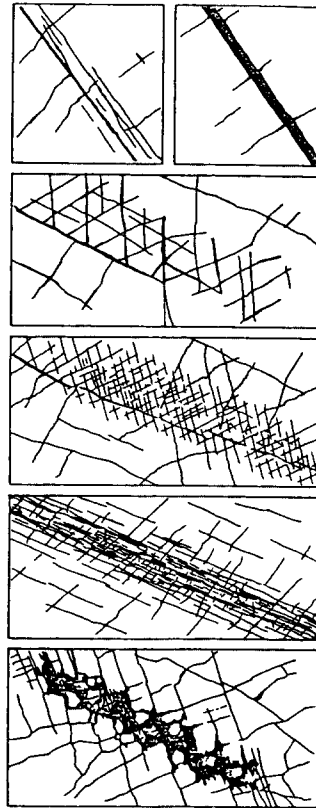


그림 20. 복잡한 충전질리의 예.

표 8. cohesive soil에 대한 분류

등급	표현	특징	단축압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )
S1	Very soft clay	주먹으로 쉽게 수 in 들어감	<0.25
S2	Soft clay	손가락으로 쉽게 수 in 들어감	0.25-0.5
S3	Firm clay	적당한 힘을 써서 손가락으로 쉽게 수 in 들어감	0.5-1.0
S4	Stiff clay	많은 힘을 써서 손가락으로 들어감	1.0-2.5
S5	Very stiff clay	손톱에 의해 쉽게 파임	2.5-5.0
S6	Hard clay	손톱에 의해 어렵게 파임	>5.0

- ㉑ 단층은 투수성이 높은 충전물 포함하고 근처에는 불투수성 clay 포함
- (5) 결과
  - ㉒ 형태 : 폭(Width), 벽면 거칠기(wall roughness), 현장스케치(field sketch)
  - ㉓ 충전물 종류 : 광물조직, 입자크기, 풍화 등급

- ㉓ 충전물 강도 : manual index (S1-S6), 전단강도, 과압밀비, 선행변위의 유무
- ㉔ 용수 : 함수비(W1-W5), 투수성

**3.8 용수**

- (1) 범위
  - ㉑ 암반 내에서의 용수는 절리를 통과하는 flow로 부터 발생
  - ㉒ 지하수의 예측은 안정성과 공사의 어려움에 대한 판단에 도움
  - ㉓ 불규칙한 지하수위는 연속적인 불투수층에서 발생
  - ㉔ 굴착에 의한 용수 → 지하수위 감소로 구조물 침하
  - ㉕ 수리지질학 → 절리에 대한 자세한 평가
  - ① ice 형성여부 중요
- (2) 장비
  - ㉑ 육안 관찰
  - ㉒ 공중사진, 강우 및 기온 기록
- (3) 방법
  - ㉑ 부분적인 배수 패턴, 지하수위, 강우, 기온 기록
  - ㉒ piezometer 시험 → 지하수위 예측

- ㉑ 용수의 효과 → 사전설계에서 고려
- ㉒ 비충전 절리와 충전 절리에서의 용수
- ㉓ 터널에서 용수에 대한 평가는 중요
  - 표 11과 같이 구분
  - ① 암반사면에서의 평가는 불연속면의 방향, 간격, 간극에 의해 결정
  - ② 용수에 대한 얼음의 영향은 평가되어야 한다
- (4) 주의
  - ㉑ 용수관찰 → 강우량 기록
  - ㉒ 시추공 이용 → piezometer 설치, pumping 시험
  - ㉓ 시추공에서 수행된 시험 → 암반의 투수성 평가
  - ㉔ 퇴적암의 층리 → 높은 투수성
  - ㉕ 단층 → 높은 투수성의 breccia와 불투수성 clay 포함, 이방성
  - ① 암반사면에서 용수되는 절리의 가장 높은 위치 파악 중요
- (5) 결과
  - ㉑ 공중사진, 지질도에 지하수 흐름 패턴 표시, 가능하면 강우량, 기온도 기록
  - ㉒ 불투수층을 지하수위와 같이 지질도와 단면도에 표시
  - ㉓ 터널과 지하수위와의 상호작용 설명
  - ㉔ 절리, 절리군, 암반에 대한 용수 등급을 표시

**표 9. 함수량에 의한 분류**

등급	표 현
W1	과압밀, 낮은 투수성에 의해 물의 유입 없다
W2	damp, 자유수는 없다
W3	wet, 경우에 따라 물이 떨어짐
W4	outwash의 표시, 계속적인 물의 유입
W5	부분적으로 outwash, 심각한 물의 유입

**표 10. 용수에 의한 분류**

불연속면 등급	표 현
Unfilled (비충전)	I tight, dry 용수의 가능성 없음
	II dry, 용수의 증거 없음
	III dry, 용수의 증거 있음(녹)
	IV damp, 자유수는 보이지 않음
	V seepage, 때때로 물이 떨어짐, 계속적인 용수는 아님
	VI 계속적인 용수(1/min, 수압 측정)
Filled (충전)	I 충전물 과압밀, 낮은 투수성으로 뚜렷한 flow보이지 않음
	II 충전물 damp, 자유수는 보이지 않음
	III 충전물 wed, 때때로 물이 떨어짐
	IV 충전물 씻겨져 나간 흔적, 계속적인 용수(1/min)
	V 부분적으로 씻겨져 나감, 상당한 양의 용수(1/min)
	VI 완전히 씻겨져 나감, 높은 수압(1/min, 수압)

**3.9 절리군의 수**

- (1) 범위
  - ㉑ 절리군의 수 → 암반의 역학적 거동과 모양 결정
  - ㉒ 절리군의 수 → 사면 안정성에 매우 중요
  - ㉓ 터널 안정성에서 3차원 블록구조 형성, over break양 결정
- (2) 장비
  - ㉑ compass & clinometer
  - ㉒ 육안 관찰과 사진

**표 11. 터널벽면에서 용수에 의한 분류**

등급	표 현
I	벽면과 천정, dry, 용수는 관찰되지 않음
II	약간의 용수, 불연속면에서 물이 떨어짐
III	중정도의 용수, 불연속면에서 계속적인 용수(1/min/10m, 터널길이)
IV	높은 용수, 불연속면에서 강한 용수(1/min/10m, 터널길이)
V	매우 높은 용수(1/min/10m, 터널길이)

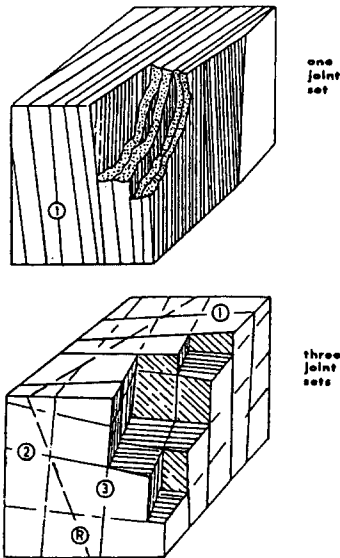


그림 21. 암반의 역학적 거동에 대한 절리군 수의 영향을 보여주는 예.

(3) 방법

- ㉠ 절리군의 수는 mapping된 면적에 대한 함수 절리방향을 측정하고 평사투영해석을 통하여 구한다.
- ㉡ 절리방향이 일정하면 측정절리의 수를 줄일 수 있다.
- ㉢ 국부적으로 존재하는 절리군 기록
- ㉣ 절리군의 인식을 위하여 숫자를 붙인다(그림 21).

(4) 주의

- ㉠ systematic 절리군 → persistent, parallel, sub-parallel, non-systematic 절리 → 불규칙적
- ㉡ 층리나 엽리에 평행한 절리는 절리군의 국부적인 평가에 포함
- ㉢ 각각의 절리군의 간격은 매우 중요

(5) 결과

- ㉠ 절리군의 수는 방향데이터의 일부로써 나타난다.
- ㉡ 절리군의 수에 의한 암반구분은 다음과 같다(표 12).

3.10 블록 크기

(1) 범위

- ㉠ 블록크기는 암반거동의 매우 중요한 지표이다. 블록크기는 절리군의 수, 절리의 간격, 연속성에 의해서 결정된다.

표 12. 절리군의 수에 의한 암반구분

구분	표현
I	괴상(massive), 가끔 불규칙한 절리
II	1개의 절리군
III	1개의 절리군에 불규칙한 절리
IV	2개의 절리군
V	2개의 절리군에 불규칙한 절리
VI	3개의 절리군
VII	3개의 절리군에 불규칙한 절리
VIII	3개의 이상의 절리군
IX	파쇄암, 토사상태

- ㉠ 절리군의 수와 방향은 최종적인 블록의 모양을 결정한다. 그러나 모양은 불규칙적이다.
- ㉡ 큰 블록으로 구성된 암반 → 변형이 적고 arching과 interlocking 형성  
작은 블록으로 구성된 암반 → 사면에서 원형이나 회전 파괴양상
- ㉢ 암반발파의 효율은 → 블록크기의 함수
- ㉣ 블록크기는 대표적인 블록의 평균크기(block size index,  $I_b$ ) 또는 암반의 단위부피당 교차하는 절리의 총수(volumetric joint count,  $J_v$ )로 표시
- (2) 장비
- ㉠ 3 m 길이 측정 테이프 (단위 mm)
- (3) 방법
- ㉠ 블록 크기지수 (Block size index,  $I_b$ )
  - 블록 크기지수는 대표적인 블록크기와 이의 평균으로부터 추정  
수mm-수m, 측정오차는 10%
  - 평균값으로 나타낸 지역은 최대 및 최소치 기록
  - 절리군의 수도 기록
- ㉡ 체적 절리계수 (Volumetric joint count,  $J_v$ )
  - 각각의 절리군에서 단위 길이(m) 당 절리의 총수
  - 불규칙한 절리도 포함되지만 결과에 미치는 영향은 작다.
  - 절리군마다 기준선을 설정하는데, 기준선 길이는 5-10 m이다.  
예) 3개의 절리군과 불규칙한 절리가 있는 경우  
 $J_v = 6/10 + 24/10 + 5/5 + 1/10 = 4.1 m^3$
- ㉢ 암반 분류  
블록의 크기와 모양에 의해 암반분류는 다음과 같

표 13. 체적 절리계수(Volumetric joint count,  $J_v$ )

표 현	체적 절리계수( $J_v$ , 절리갯수/ $m^3$ )
Very large blocks	<1.0
large blocks	1-3
Medium sized blocks	3-10
Small blocks	10-30
Very small blocks	>30

다(그림 22)

- i) massive: 절리가 거의 없고, 매우 넓은 간격
- ii) blocky: 거의 등면적
- iii) tabular : 한쪽방향이 다른 방향보다 상당히 작다
- iv) columnar: 한쪽방향이 다른 방향보다 상당히 크다
- v) irregular: 블록의 크기와 모양에 다양한 변화
- vi) crushed: 심하게 절리가 발달

(4) 주의

㉑ 블록 크기지수 (Block size index,  $I_b$ )

- 블록 크기지수의 목적은 대표적인 암반블록의 평균 크기를 나타내는 것
- 절리군이 3개 이상이면 절리군의 평균간격이  $I_b$ 의 이상치를 제공하지 못한다.
- 퇴적암에서 두개의 수직절리군과 층리가 있는 경우

$$I_b = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3}$$

㉒ 체적 절리계수 (Volumetric joint count,  $J_v$ )

- 각각의 절리군에 대한 주향방향에서, 주향에 수직하게 계산
- $J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n}$
- $J_v$ 의 계산은 평균간격에 기초
- random한 절리는  $J_v$ 에 뚜렷한 영향을 주지 못한다.
- RQD와의 관계  
 $RQD = 115 - 3.3 J_v$   
 (RQD = 100 for  $J_v < 4.5$ )
- 시추코아 자료가 없을 때 RQD 평가

㉓ 방향 데이터

블록에 대한 정확한 평가 및 설명

(5) 결과

㉑ 블록 크기지수 ( $I_b$ )

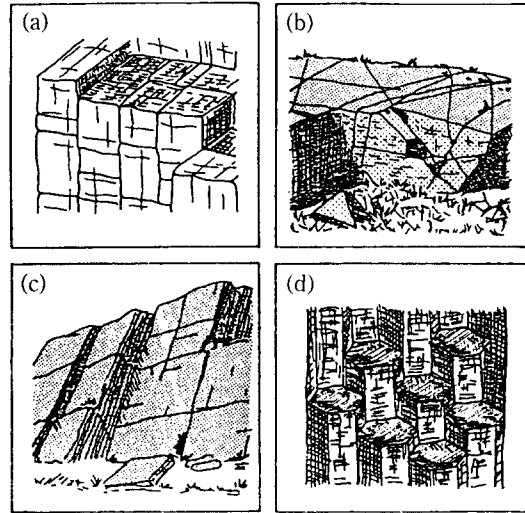


그림 22. 암반의 종류 (a) blocky (b) irregular (c) tabular (d) columnar.

관심지역의 가장 크고 가장 작은 블록크기에 대한  $I_b$  값

㉒ 체적 절리계수 ( $J_v$ )

절리군의 수와 연속성 표기

- ㉓ 암반의 종류를 표시: massive, blocky, tabular, columnar, irregular, crushed 가능한한 블록의 크기나 모양은 사진 또는 스케치한다

4. 고 찰

본고에서는 국제암반공학회에서 제안한 암반 불연속면의 정량적 기재에 대한 지침을 살펴보았다. 이러한 정량적 기재는 암반분류의 기본항목으로 활용되고 있어, 암반분류나 평가시 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 판단된다.

현재 국내에서는 RMR, Q 시스템과 같은 분류법이 일반적으로 적용되고 있다. 그러나 이러한 분류법의 현장적용시 많은 엔지니어들이 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이는 아무리 좋은 지침서가 있다 하더라도 실제로 현장에서의 경험이 부족하기 때문으로 생각된다. 따라서 실제 적용을 통하여 암반분류나 평가에 대한 방법을 익혀야 한다고 생각된다.

또한 이러한 분류법이 과연 국내 암반조건에 적합한지 한 번쯤 생각해 보아야 할 것이다. 지금까지 수행되어 온 많은 조사자료들을 정리하고 분석하여 국내에서



광범위하게 적용될 수 있고 보다 손쉽게 분류·평가할 수 있는 분류시스템이 있었으면 한다. 이를 위해서는 엔지니어뿐만 아니라 학교나 연구소에서의 체계적인 노력과 연구가 이루어져야 한다고 생각한다.

암반분류나 평가시 가장 중요한 것은 얼마나 주관적인 요소를 최소화할 수 있는냐하는 것이다. 이는 각각의 평가항목에 대한 정량적인 기재로서 가능하지만 너무 복잡하거나 상세한 경우는 실제 현장적용시 어려움이 많다는 사실 또한 유념해야 한다. 따라서 암반의 정량적 평가도 중요하지만 암반의 거동을 지배하는 중요인자에 대한 평가도 중요하다 할 수 있다. 이를 위해서

는 암반의 불연속면을 모델링하고 분석하는 해석기술에 의한 암반 불연속면의 정량적 평가가 이루어져야만 한다.

## 참 고 문 헌

- 'Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Mass' Rock Characterization Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods, the Commission on Testing Methods, Pergamon Press, pp.3~52, 1981