

조도(粗度)가 전단강도에 미치는 영향

Effect of rock joint roughness on shear strength

김 영 기 (Kim, Young Ki)
천 성 환 (Chun, Seong Hwan)

경북대학교 지질학과
농어촌 개발공사

요약/Abstract

불연속면을 갖는 암체는 거의 대부분 조도를 가지고, 이 조도는 전단강도에 영향을 크게 미치므로 불연속면을 갖는 화강암류(15개), 편마암류(7개), 안산암류(1개) 등을 연구대상으로 하여 전단마찰각(ϕ_r), 조도의 한계응력(σ_r) 및 전단파괴강도(τ_0)를 도출하여 불연속면에 있어서의 전단강도(τ)를 규명한 것이다.

1. 조도는 단계전단력에 따라 마찰각은 $\phi_i=38.03^\circ$ 에서 33.21° 로 감소하고 있다. 즉 초기때가 가장 높고, 말기때가 가장 낮다.

2. 조도각(i)의 한계는 45° 이내 (시험치: 43°)에 분포하고, 절리조도계수(JRC)는 14를 넘지 않으며, $JRC = -4.63 \ln \sigma_n + 5.63$ 을 경계로한 분포 범위에 있다.

3. 조도한계응력 σ_r 는 0.1-3.65Mpa일때 전단파괴강도 τ_0 는 0.01-0.46Mpa가 되고, 이들 불연속면의 전단강도 τ 는 3.65-39.11Mpa로 되어 있어서 만일 이 이상의 하중이 가해 졌을때 그 암체는 붕괴 및 활동이 일어날 것이다.

Rock mass having discontinuous plane almost appear roughness which have a great effect on shear strength. Rocks of studied object choose granites (15 samples), gneisses (7 samples), and andesites (1 sample).

The purpose of this study was to clarify shear strength of discontinuous planes as value of shear strength angle (ϕ_r), critical stress of roughness (σ_r) and shear failure strength (τ_0).

1. Roughness decrease from $\phi_i=38.03^\circ$ to 33.21° that is, friction angle has the highest value at first stage and has the lowest value at the last stage.

2. Critical angle of roughness distribution within 45° (test max. angle= 43°), JRC(Joint Roughness Coefficient) is less than 14 and lies distribution range of boundary is following:

$$JRC = -4.63 \ln \sigma_n + 5.63.$$

3. When the roughness critical stress(σ_r) is from 0.1 to 3.56Mpa, shear failure strength of roughness (τ_0) is from 0.01 to 0.46Mpa, shear strength(τ) of discontinuous plane is from 3.65 to 39.11 Mpa. If loading is higher than these values, collapse and sliding will occur on the rock mass.

서 언

암반내에는 절리나 단층등과 같은 불연속성면들이 발달되어 있고 이들 불연속면은 기하학적인 조건과 주변조건에 따라 활동면으로 변하여 암반사면의 붕괴를

초래하게 된다. 불연속면의 파괴양상에 관한 연구는 Hoek(1970), Goodman(1973), Barton(1973), Chiu(1981)등 많은 학자들에 의해 활발히 진행되어 왔다.

불연속면의 파괴 및 활동성은 요철 정도(Roughness), 틈의 크기(Aperture), 층

진물(Filling material), 지하수의 스짐(Seepage), 불연속면의 연장성(Persistency)에 지배받고 있다. 즉 이들 지배요인들은 전단강도를 좌우하게 된다. 특히 전단마찰각은 불연속면상에 형성된 요철의 크기에 있다고 보고 이에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 조도는 암석 또는 암반이 분리될때 암석의 결구성에 따라 그 분포양상은 다양하다.

Barton(1973) 등은 조도를 정량화하여 절리조도계수(JRC: Joint Roughness Coefficient)를 제시하였다.

본 논문에서는 수원-원주간 영동고속도로 주변에 분포하고 있는 암석(화강암, 편마암)을 대상(Fig.1)으로 하여 일축 직접전단 시험을 실시하여 불연속면의 조도가 미치는 영향, 조도의 분포범위 및 전단파괴강도를 도출하고자 한다.

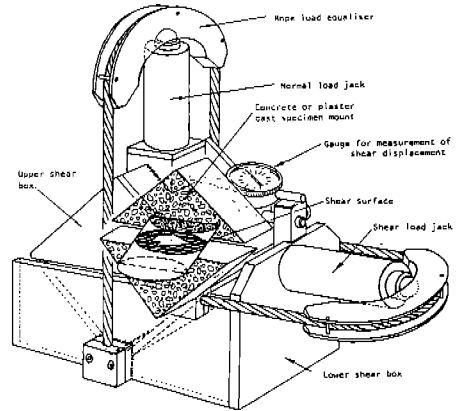


Fig. 2 Drawing of a portable shear machine showing the position of the specimen and the shear surface. Drawing adapted from one by Robertson Research Ltd. A typical machine is 51 cm long and 48 cm high and weighs 39 kg.

측정 및 시험

암석의 파괴강도시험에는 여러가지 방법이 있으나 본 연구에서는 현장채취시료(NX Core 10개)와 공시체(사각주: 7×10 cm 13개)로 하여 직접전단 시험기(영국 Robertson 사: Fig.2)를 사용하여 전단강도를 측정하였

으며 분리면에 대한 압축강도의 측정은 Schmidt hammer를 사용하였다. 시험에 이용된 시료는 23개(화강암류 15개, 편마암류 7개, 안산암류 1개)이고 시험 및 측정은 전단강도, 조도각, 마찰각, 절리조도 및 압축강도 등이다.

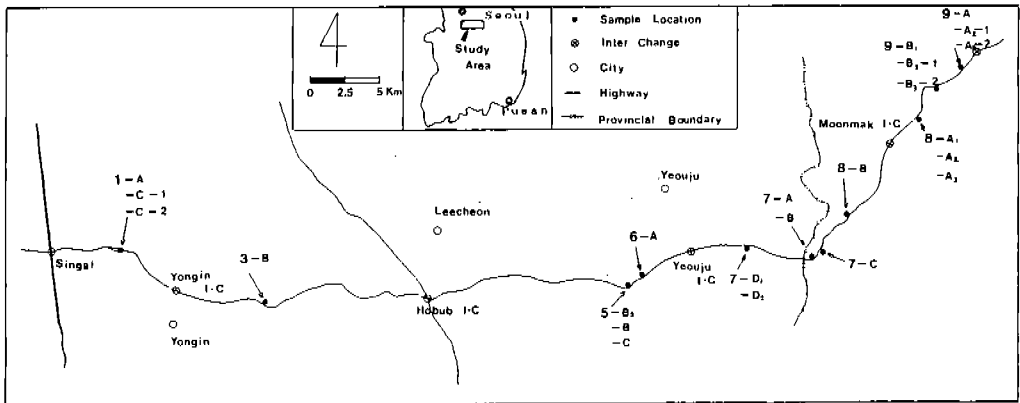


Fig.1 Sampling location map of the study area.

전단시험

전단시험에는 일축전단시험과 직접전단시험이 있으나 본 시험에서는 직접전단시험을 실시하였다. 한 시료의 시험에는 4-6단계로 하고 각 단계마다 일정한 하중(Pn)하에서 수직변이의 전단응력(σn)을 계측하게 된다.

즉, 원주상 시료의 접촉면적 A는

$$A = \pi ab - \frac{ub \times (4a^2 - u^2)^{1/2}}{2a} - 2ab \sin^{-1}(u/2a)$$

여기에서

- a: 전단방향의 반지름
- b: 전단방향과 직각인 반지름
- u: 전단된 길이(Displacement)

$$\sigma_n = \frac{P_n}{A} \quad \tau_n = \frac{P_s}{A}$$

여기에서

- σn : 수직응력(Mpa)
- τn : 전단응력(Mpa)
- Pn : 수직하중(Mpa)
- Ps : 전단하중(Mpa)
- A : 절리면적(cm²)

사각주 시료의 접촉면적 A는 A=(2a-u)×2b 로 한다.

계측된 한 시료에 대한 각 단계의 수직응력(σn) 및 전단응력(τn)은 Table 1에 제시되었고 이들 수직변이와 전단변이 및 수직응력(σn)과 전단응력(τn)과의 관계를 도시하면 Fig.3,4와 같다.

절리조도

불연속면상의 조도(Roughness)는 파동형(Waviness) 및 들출형(Unevenness)으로

구분되는데, Waviness는 큰 규모의 파동으로 된 양상이어서 만약 두불연속면이 밀착된 곳에서는 전단하중에 너무 크기 때문에 수직변위(Dilation)를 일으키며, Unevenness는 작은 규모의 조도로서 Waviness보다 적은 규모의 수직변위가 일어나게 된다. 시험에 사용된 시료는 Unevenness에 해당된다.

Barton은 조도의 구분을 10개의 영역(0-20)으로 하여 절리조도계수(JRC)라 하고 있다. 이 분류안(Fig.5)에 따라 측정하면 Table 2와 같고, 0-16까지의 조도계수로 나타낸다. 이 조도는 전단력에 미치는 영향이 크므로 조도각 i의 산출이 요구된다. 이 조도각 i는 불연속면에 나타나는 수평에 대한 요철각을 말하고, 이의 측정에는 전단변이 시험에 의한 측정과 Profile에 의한 측정방법이 있다. 전단변이 측정은 수평이동에 대한 수직변이의 비(tan⁻¹v/u) (Table 3)로 하고, Profile의 이용은 수평면과 이룬 요철각을 측정하여 조도각(i)으로 한다. 이들 측정치 및 Profile작도는 Table 3,4 및 Fig.6과 같다.

마찰각

불연속면에 대한 마찰저항은 전단시험치의 최대전단저항 마찰각 φr와 요철각 i에대한 마찰각 φi 그리고 요철이 없는 마찰각 φb(Basic Friction Angle)와 잔류마찰각 φr 등으로 구분된다. 본 시험은 4-6 단계로 구분 실시하여 한 단계마다의 항복점에 이르면 시험을 중지하여 φr을 계측하지 못하였기에 φr이 φb와 같다고 보고 (φr=φb), φb로 대신하였다.

φb는 i+φb이고, 전단시험에서 τn-σn 관계에서 각 단계의 최정점 기울기가 된다(Fig.7).

각 시료에 대한 φr는 Table 5와 같고 화강암류의 평균 φr는 36.22° 및 편마암류의 평균 φr는 35.93°이며 편마암류를

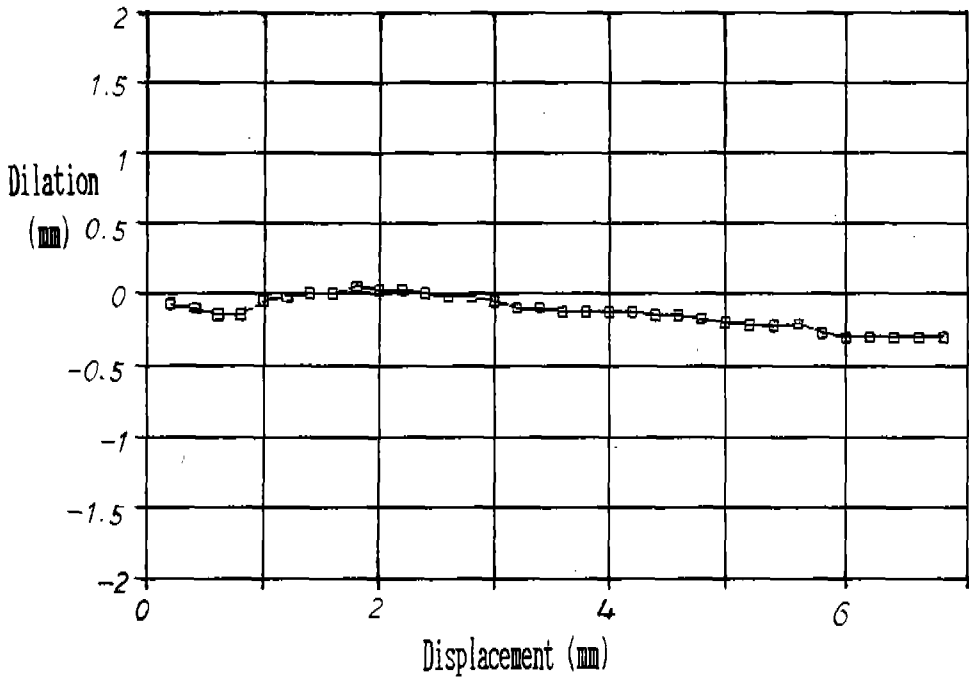


Fig.3 Relation between horizontal displacement and vertical dilation. |

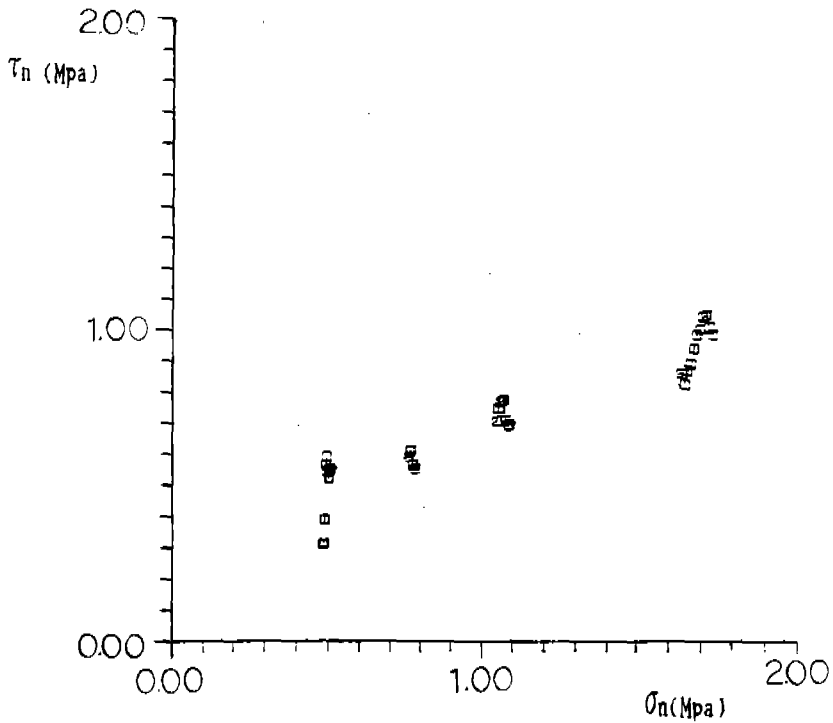


Fig.4 Relation between normal stress(σ_n) and shear stress(τ_n).

Table 1 Measured values of normal stress(σ_n), shear stress(τ_n), displacement (U), dilation(D), joint surface area(A), normal load(Pn), and shear loads(Ps) for sample No. 1-A.

Step	Pn(KN)	Ps(KN)	U(mm)	D(mm)	A(Cm ²)	σ_n (Mpa)	τ_n (Mpa)
1	1	0.65	0.2	0.075	2.06	0.4852	0.3154
	1	0.65	0.4	0.1	2.05	0.4876	0.3170
	1	0.8	0.6	0.15	2.04	0.4901	0.3921
	1	1.15	0.8	0.15	2.03	0.4925	0.5664
	1	1.2	1.0	0.05	2.01	0.4950	0.5940
	1	1.1	1.2	0.025	2.00	0.4975	0.5473
	1	1.05	1.4	0	1.99	0.5001	0.5251
	1	1.1	1.6	0	1.98	0.5026	0.5529
	1	1.1	1.8	0.05	1.97	0.5052	0.5558
2	1.5	1.17	2.0	0.025	1.96	0.7618	0.5942
	1.5	1.2	2.2	0.025	1.95	0.7658	0.6126
	1.5	1.2	2.4	0	1.94	0.7698	0.6158
	1.5	1.1	2.6	0.025	1.93	0.7738	0.5675
	1.5	1.1	2.8	0.025	1.92	0.7779	0.5705
	1.5	1.07	3.0	0.05	1.91	0.7820	0.5578
3	2	1.35	3.2	0.1	1.90	1.0483	0.7076
	2	1.42	3.4	0.1	1.89	1.0539	0.7483
	2	1.45	3.6	0.125	1.88	1.0596	0.7682
	2	1.45	3.8	0.125	1.87	1.0653	0.7724
	2	1.45	4.0	0.125	1.86	1.0712	0.7766
	2	1.32	4.2	0.125	1.85	1.0770	0.7108
	2	1.28	4.4	0.15	1.84	1.0829	0.6931
	2	1.28	4.6	0.15	1.83	1.0889	0.6969
4	3	1.57	4.8	0.175	1.82	1.6425	0.8596
	3	1.5	5.0	0.2	1.81	1.6517	0.8258
	3	1.57	5.2	0.215	1.80	1.6610	0.8692
	3	1.6	5.4	0.225	1.79	1.6704	0.8908
	3	1.68	5.6	0.21	1.78	1.6799	0.9407
	3	1.75	5.8	0.275	1.77	1.6894	0.9855
	3	1.77	6.0	0.3	1.76	1.6991	1.0025
	3	1.83	6.2	0.3	1.75	1.7089	1.0424
	3	1.83	6.4	0.3	1.74	1.7189	1.0485
	3	1.75	6.6	0.3	1.73	1.7289	1.0085
	3	1.7	6.8	0.3	1.72	1.7390	0.9854

Table 2 Measured values of JRC from profile.

Sample No.	JRC	Sample No.	JRC
1-A	8-10	7-D2	4-6
1-C-1	4-6	8-A1	6-8
1-C-2	12-14	8-A2	8-10
3-B	10-12	8-A3	4-6
5-B	6-8	8-B	8-10
5-B2	4-6	9-A1	6-8
5-C	4-6	9-A2-1	2-4
6-A	10-12	9-A2-2	2-4
7-A	0-2	9-B1	12-14
7-B	8-10	9-B3-1	4-6
7-C	14-16	9-B3-1	4-6
7-D1	4-6		

Table 3 Measured roughness angle(i) of each samples during shear test.

Sample No.	Sp.1.i	Sp.2.i	Sp.3.i	Sp.4.i	Sp.5.i	Sp.6.i	Sp.7.i
1-A	2.86	0	1.79	2.68			
1-C-1	9.5	10.4	10	8.1	5.6		
1-C-2	2.4	5.8	5.8	5	4.5	3.6	2.1
3-B	8.9	10.6	7.7	4.5	3.9	3.9	2.6
5-B	1.4	0	0	0			
5-B2	6.3	4.5	3.1	2.2	1.4	0.7	0.2
5-C	1.3	0.9	0.7	0.5	0.6	0.6	
6-A	4.8	3.7	3.7	3.9			
7-A	1.4	0.8	0.3	0.9			
7-B	16.7	12	5.9	4.6	3.8	3.5	
7-C	32	19.6	15.2	12.2	9.3	7.4	
7-D1	15.9	7.1	2.9				
7-D2	5.1	3.9	2.1				
8-A1	0.5	6.5	5.9				
8-A2	2.9	2.7	2.1	2.1	1.7		
8-A3	6.2	3.8	3	0.9			
8-B	9.8	5.1	3.9				
9-A1	10.1	2.9	1	2			
9-A2-1							
9-A2-2	4.8	2	2.3	2.7			
9-B1	9.5	0	4.4	1			
9-B3-1	1.3	0.2	0	0.6	0.9		
9-B3-2	0	3.7	2.6	1.8	1.8	1.3	

粗度가 전단강도에 미치는 영향

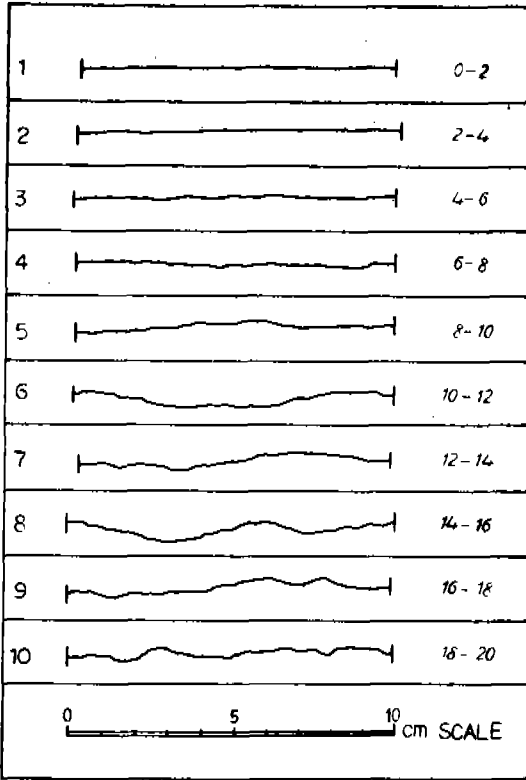


Fig.5 Roughness profiles and corresponding range of JRC value. (by Barton)

화강편마암과 호상편마암으로 구분하면 ϕ_p 는 각각 38.28° 와 30.67° 로서 상당한 차이를 보여주고 있다.

ϕ_i 는 i 에 대한 σ_i 와 τ_i 의 관계식

Sample No.	Profile	i	Ave. i
1-A		10.25	11.63
		11.66	
		13	

Fig. 6 Profiles on rough rock surface.

$$\tau_i = \tau \cos^2 i - \sigma \sin i \cdot \cos i$$

$$\sigma_i = \sigma \cos^2 i + \tau \sin i \cdot \cos i$$

으로 σ_i 및 τ_i 의 상관식에서 ϕ_i 를 구할 수 있다.

각 시료에 대한 ϕ_i 는 Table 5와 같고 화강암류의 평균 ϕ_i 는 35.25° 이고 편마암류의 평균 ϕ_i 는 35.86° 로서 거의 비슷하나 편마암류를 화강편마암과 호상편마암으로 구분하여 보면 38.55° 와 29.34° 로서 ϕ_p 에서와 마찬가지로 상당한 차이를 보여주고 있다.

ϕ_b 의 측정은 불가하므로 계산에 의해 구했다.

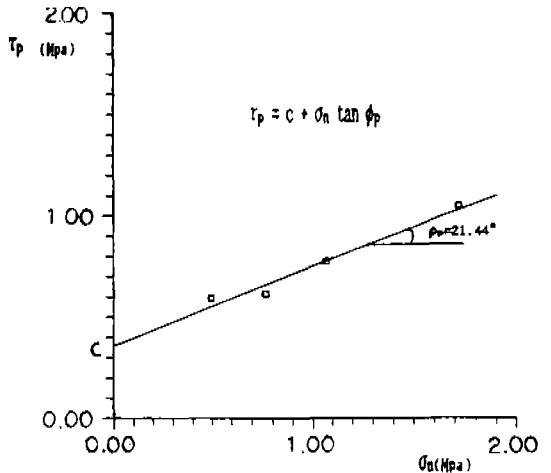


Fig. 7 Relation between normal stress and peak shear stress.

Table 4 Measured roughness angle(i) of each samples by profile.

Sample No.	i	Sample No.	i
1-A	11.63	7-D2	7
1-C-1	9	8-A1	11.75
1-C-2	13	8-A2	14.66
3-B	10.5	8-A3	8
5-B	8.16	8-B	12.83
5-B2	9.29	9-A1	10
5-C	9.62	9-A2-1	7.25
6-A	17.16	9-A2-2	2
7-A	0	9-B1	12.83
7-B	14.79	9-B3-1	7
7-C	16.73	9-B3-2	10
7-D1	11.37		

Table 5 Friction angles(ϕ_p , ϕ_b , ϕ_i) of each sample.

Sample No.	ϕ_p	ϕ_i	ϕ_b
1-A	21.44	18.25	9.81
1-C-1	23.68	20.58	14.68
1-C-2	37.46	35.05	24.46
3-B	34.66	33.20	24.16
5-B	33.65	34.59	25.49
5-B2	39.32	40.09	30.03
5-C	32.69	32.32	23.07
6-A	45.65	42.51	28.49
7-A	36.36	35.60	36.36
7-B	33.96	34.50	19.17
7-C	29.86	32.23	13.13
7-D1	32.70	38.58	20.33
7-D2	18.40	18.67	11.40
8-A1	35.38	31.82	23.63
8-A2	40.31	39.03	25.65
8-A3	33.69	34.17	25.69
8-B	40.61	41.75	27.78
9-A1	27.96	28.34	17.96
9-A2-1	34.68		27.43
9-A2-2	39.51	37.40	37.51
9-B1	28.25	31.73	15.42
9-B3-1	30.60	29.67	23.60
9-B3-2	32.53	31.21	22.53

Barton의 식

$$JRC = \frac{\phi_p - \phi_b}{\log(JCS / \sigma_n)} = \frac{i}{\log(JCS / \sigma_n)}$$

$$\phi_b = \phi_p - i$$

에 의해 ϕ_b 를 구할수 있다. 여기에서 JCS는 절리압축강도이다. 이들 산정치는 Table 5와 같다.

Table 6 Measured JCS (Joint Compress Strength) by Schmidt hammer.

Sample No.	JCS	Sample No.	JCS
1-A	23	7-D2	100
1-C-1	22	8-A1	100
1-C-2	22	8-A2	120
3-B		8-A3	100
5-B	34	8-B	100
5-B2	34	9-A1	120
5-C	34	9-A2-1	75
6-A	53	9-A2-2	75
7-A	70	9-B1	70
7-B	40	9-B3-1	65
7-C	40	9-B3-2	65
7-D1	100		

절리면의 압축강도

절리면의 압축강도(JCS: Joint Wall Compressive Strength)는 절리면에 대한 직접압축강도를 말한다. JCS를 효과적으로 측정할 수 있는 방법에는 점하중시험(Point load test) 및 Schmidt Hammer에 의한 시험이 있으나 본 시험에서는 Schmidt Hammer를 이용 압축강도를 측정하였다.

Deer와 Miller(1966)는 Schmidt Hammer의 반발수와 σ_c 사이에 상관관계가 있다는 것을 제안, 다음과 같은 관계식과 도표

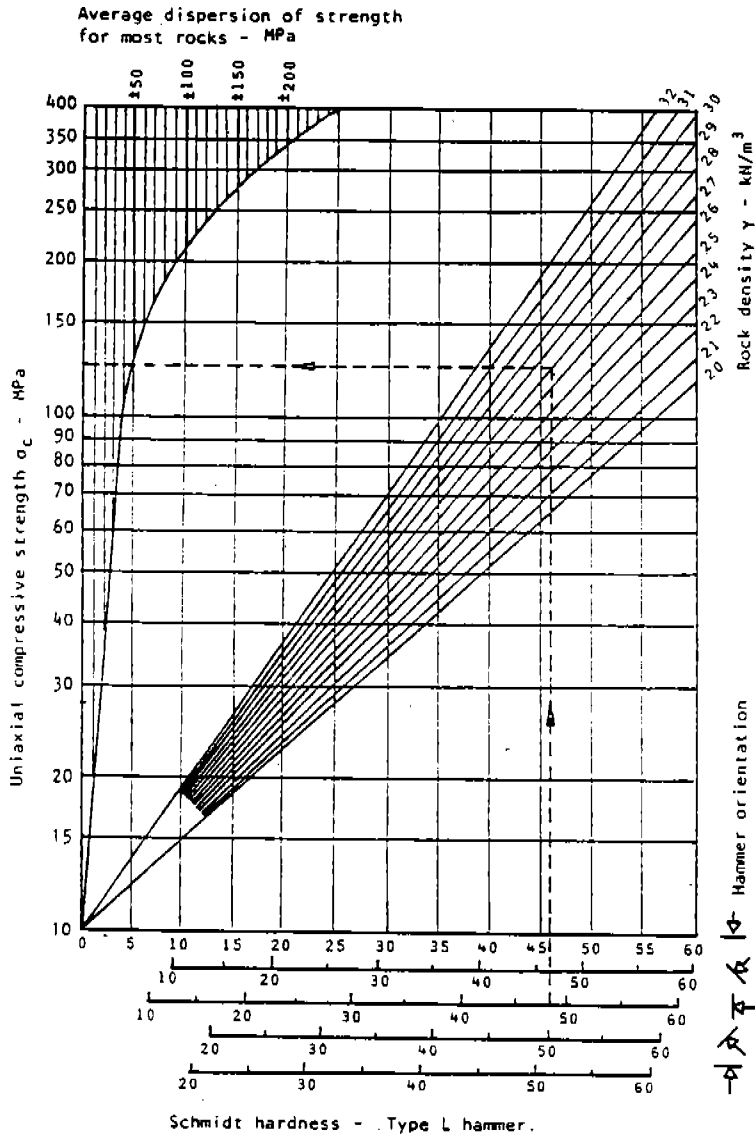


Fig. 8 Relationship between Schmidt hardness and the uniaxial compressiveness strength of rock (Deere and Miller, 1966).

(Fig.8)를 제시하고 있어서,

$$\log_{10}\sigma_c = 0.00088\gamma R + 1.01$$

σ_c : 일축압축강도(Mpa)

γ : 암석의 건조단위중량(g/cm³)

R: 반발수

본 연구에서는 도표를 활용하여 압축강도를 산출하였으며 이들 JCS값은 Table 6과 같고 이들 분포는 22Mpa-120Mpa이다.

고찰

조도의 영향

암체의 전단강도는 그 암체가 갖는 마찰저항각도각 즉 전단마찰각(ϕ)에 있다고 할 수 있다. 전단마찰각 ϕ 는 전단면상의 형상, 다시 말해서 조도가 그 암체의 전단파괴강도에 영향을 준다고 본다.

이 조도가 갖는 마찰저항각을 ϕ_i 라 하고, 요철이 없는 전단면의 마찰각을 ϕ_b 라 하면 한 불연속면을 갖는 전단면에 있어서는 항상 $\phi_i \geq \phi_b$ 의 관계가 있기때문에 i 가 그 암체의 파괴강도에 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서 종축에 $\phi_i - \phi_b$ 를 횡축에 i 를 취하여 작도하면 Fig.9와 같이 되어 i 가 크면 클수록 조도의 영향은 커지는 결과가 된다.

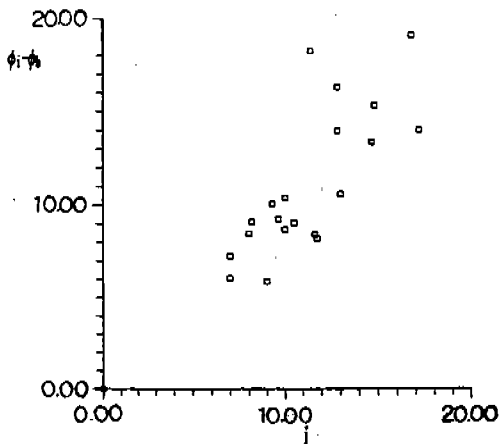


Fig.9 Relation between $\phi_i - \phi_b$ and roughness angle(i).

연속면상의 조도는 일정한 수직하중하에 전단하중을 점차 증가하면 그 응력(σ_n , τ_n)은 커지고, 어느 한계 즉 항복점에 이르면 수직응력(σ_n)을 증가시킬지라도 전단응력(τ_n)은 증가되지 않고 감소하게 되어 어느 일정한 τ_n 값에 도달하면 τ_n

은 변화없이 전단면에 대한 수평변이만 일어나게 된다.

본 시험에서는 위에서 기술한 바와 같이 연속적인 시험이 아니어서 항복 이후의 변이를 정확히 알 수는 없으나 Fig.10에서 처럼 전단변이곡선은 강하하여 대략 ϕ_b 가 14.68° 및 24.46° 에서 수평변이만 일어날 것으로 추정된다. 따라서 항복 이전의 전단변이에서 i 의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

또 각 단계의 시험에서 i 의 영향을 보면 첫번째 단계에서 i 의 영향이 가장 크고, 마지막 단계에서의 i 의 영향은 줄어들고 있다.

Fig.11에서 처럼

$$\tau_i = 0.025 + \sigma_i \tan 38.03^\circ \text{ --- (1단계)}$$

$$\tau_i = 0.013 + \sigma_i \tan 36.35^\circ \text{ --- (2단계)}$$

$$\tau_i = 0.000 + \sigma_i \tan 35.93^\circ \text{ --- (3단계)}$$

$$\tau_i = 0.039 + \sigma_i \tan 33.21^\circ \text{ --- (4단계)}$$

등으로 나타나고 있어서 전단력이 진행됨에 따라 조도의 영향은 감소현상을 보여준다.

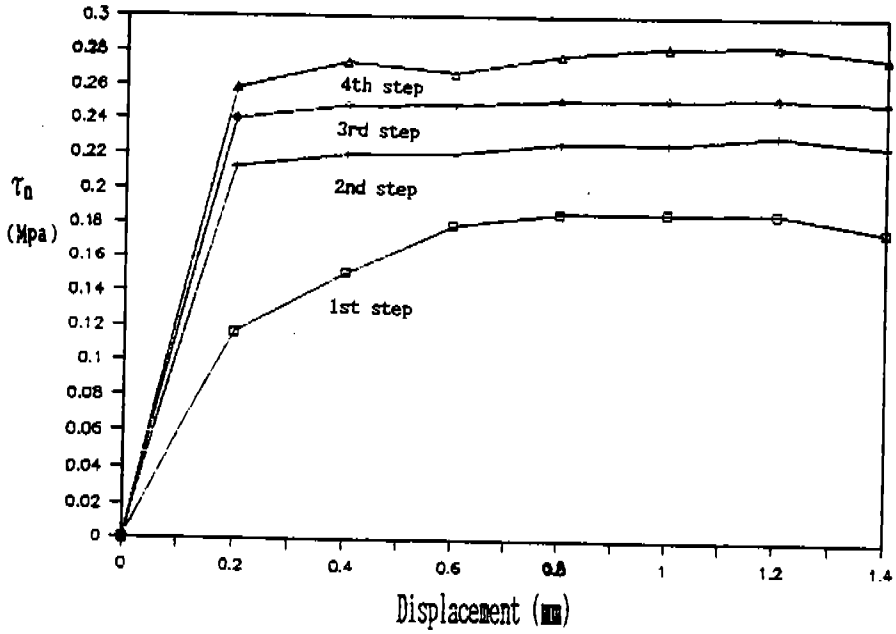
조도의 분포범위

Barton은 위에서 기술한 바와같이 조도를 10개의 영역(0-20)으로 구분하여 조도계수(JRC)라 하고 모든 조도범위가 한계에 결정하였다. 이는 전 조도에 대한 범위로 본 시험암체의 조도범위의 결정이 요구된다.

따라서 종축에 JRC, 횡축에 σ_n 을 두고 점시하면 Fig.12와 같이 된다. 여기서 σ_n 은 $i = \tan^{-1} v/u$ 일 때의 값이 되고 i 는 32° 를 넘지 않으며 음의 지수함수 관계가 되고, JRC는 14.0을 넘지 않는 범위내의 조도분포상을 보여주고 있다.

본 시험체의 분포한계는 그림의 점선에 해당되고,

1-C-1



1-C-2

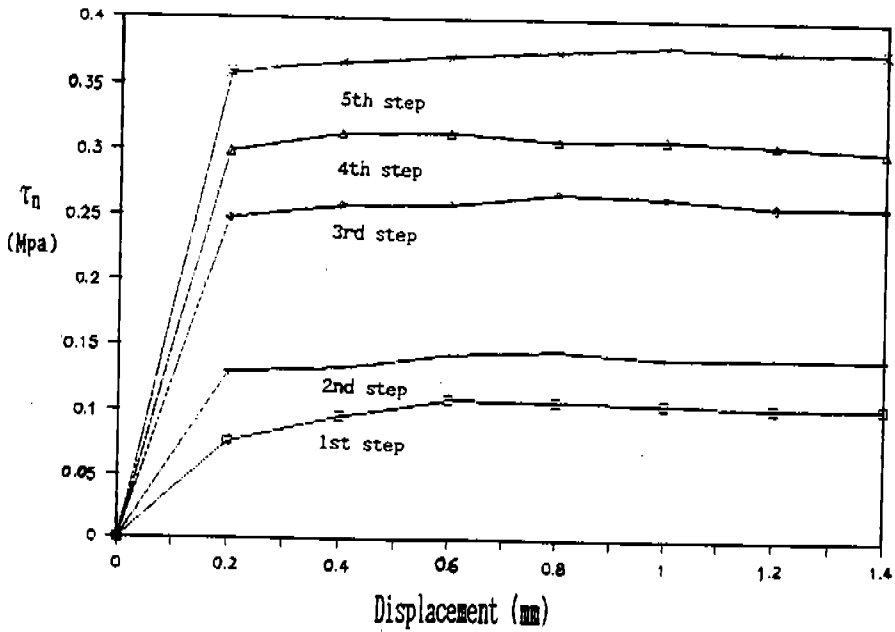


Fig.10 Relation between shear stress and displacement of each step(Sample 1-C-1,2).

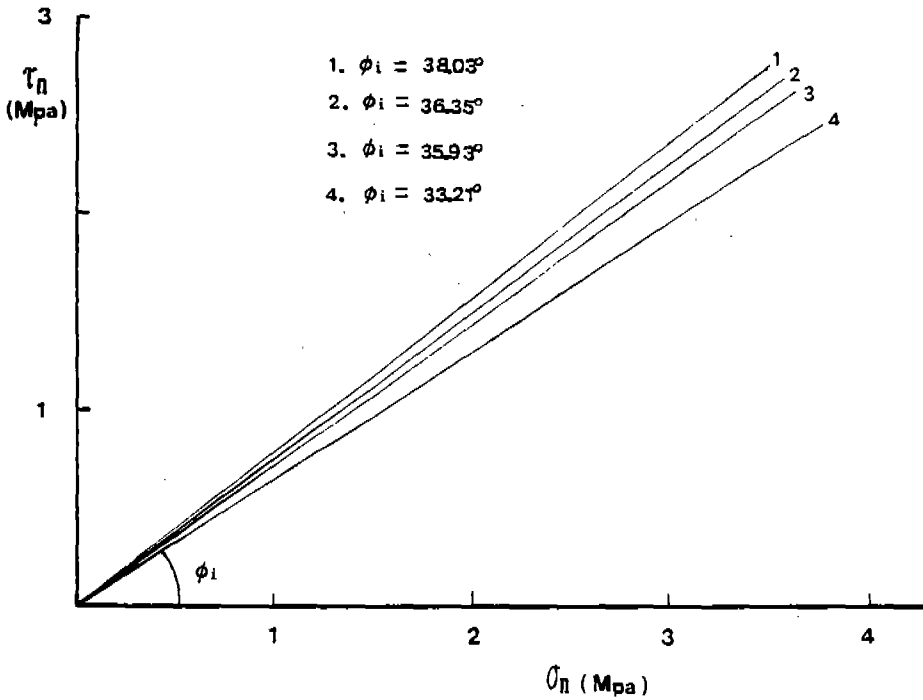


Fig.11 Relation between normal stress and shear stress at each step.

$$JRC = -4.63 \ln \sigma_n + 5.63$$

$$(0 \leq JRC \leq 20, \sigma_n > 0)$$

의 식으로 나타낼 수 있다. 한계선 (점선)에 접하는 시험체에 대한 i , JRC 및 σ_n 을 산정하면 Table 7과 같다.

Table 7 Measured values of roughness angl(i), JRC, and normal stress(σ_n), according to the distribution limit of roughness.

$i(\tan^{-1}v/u)$	JRC	$\sigma_n(\text{Mpa})$
32	13.56	0.1751
15.9	7.49	0.7348
5.1	2.89	1.7576
2.9	1.73	2.1515
2	1.20	2.6039
1.7	1.04	2.8254

이상의 검토에서 볼때 σ_n 이 증가하면 i 및 JRC는 감소하는 경향임을 알수있다. 조도각 i 와 JRC의 관계를 알아보기 위해 종축에 JRC, 횡축에 i 를 점시해 본 결과 Fig.13과 같은 상관성을 보여주고 있다. 즉, 절리조도계수(JRC)가 20에 이를 때 그때의 조도각 i 는 45° 이내에 있게된다. 이를 근거로 i 의 한계를 45° 로 설정하여 JRC와 $\log(JCS/\sigma_n)$ 의 관계는 Table 8과 같고, 이를 작도하면 Fig.14와 같이 되어 조도각 i 가 증가함에 따라 JRC가 분포할 수 있는 $\log(JCS/\sigma_n)$ 의 영역은 줄어들며 조도각 i 가 같을때 JRC는 $\log(JCS/\sigma_n)$ 가 증가함에 따라 일정하게 감소하는 규칙성을 보여 주고 있다.

위에서 여러가지의 지배요인들을 비교 점시해 본 결과 기본마찰각이 일정할때 조도각 $i(=JRC \times \log(JCS/\sigma_n))$ 의 증가

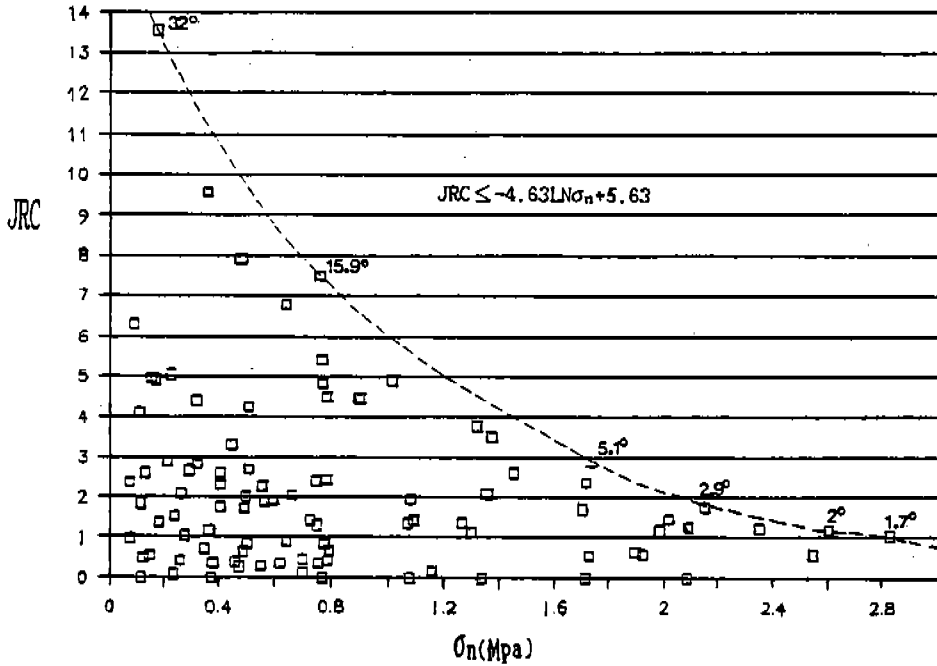


Fig.12 JRC distribution limit with normal stress.

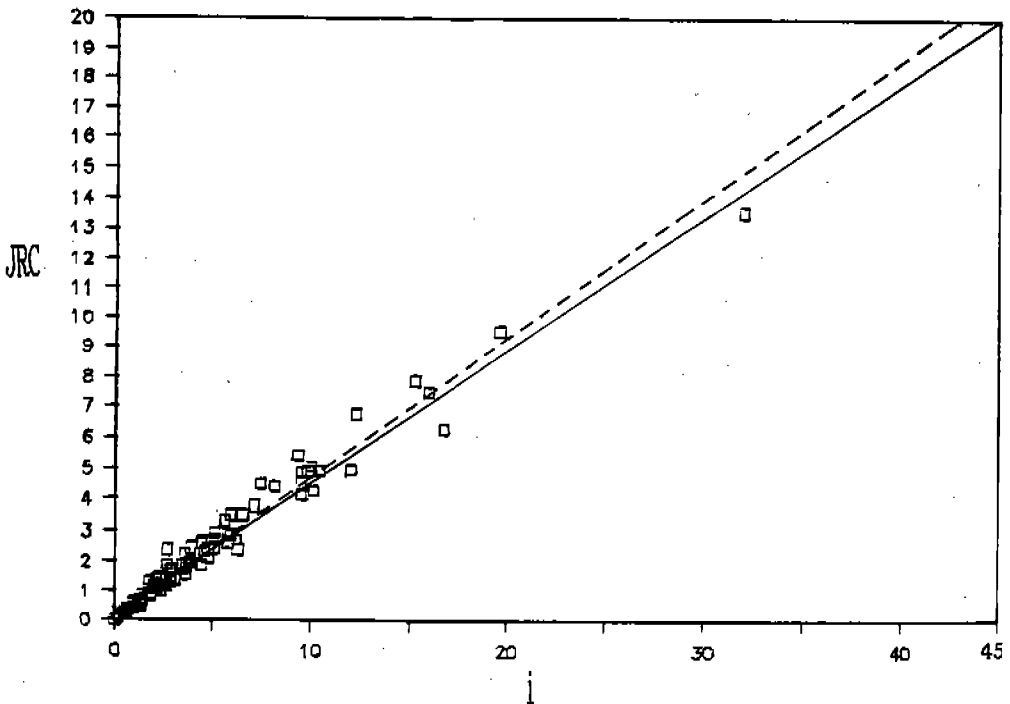


Fig.13 Relation between roughness angle(i) and JRC(Joint Roughness Coefficient).

Table 8 Estimated JRC by roughness angle(i) and K(=log(JCS/σn)).

k \ i	0	2	4	6	8	10	13	16	18	20	24	28	30	33	36	39	42	45
2.25	0	0.88	1.77	2.66	3.55	4.44	5.77	7.11	8	8.88	10.6	12.4	13.3	14.6	16	17.3	18.6	20
2.2	0	0.90	1.81	2.72	3.63	4.54	5.90	7.27	8.18	9.09	10.9	12.7	13.6	15	16.3	17.7	19.0	
2.15	0	0.93	1.86	2.79	3.72	4.65	6.04	7.44	8.37	9.30	11.1	13.0	13.9	15.3	16.7	18.1	19.5	
2.1	0	0.95	1.90	2.85	3.80	4.76	6.19	7.61	8.57	9.52	11.4	13.3	14.2	15.7	17.1	18.5	20	
2.05	0	0.97	1.95	2.92	3.90	4.87	6.34	7.80	8.78	9.75	11.7	13.6	14.6	16.0	17.5	19.0		
2	0	1	2	3	4	5	6.5	8	9	10	12	14	15	16.5	18	19.5		
1.95	0	1.02	2.05	3.07	4.10	5.12	6.66	8.20	9.23	10.2	12.3	14.3	15.3	16.9	18.4	20		
1.9	0	1.05	2.10	3.15	4.21	5.26	6.84	8.42	9.47	10.5	12.6	14.7	15.7	17.3	18.9			
1.85	0	1.08	2.16	3.24	4.32	5.40	7.02	8.64	9.72	10.8	12.9	15.1	16.2	17.8	19.4			
1.8	0	1.11	2.22	3.33	4.44	5.55	7.22	8.88	10	11.1	13.3	15.5	16.6	18.3	20			
1.75	0	1.14	2.28	3.42	4.57	5.71	7.42	9.14	10.2	11.4	13.7	16	17.1	18.8				
1.7	0	1.17	2.35	3.52	4.70	5.88	7.64	9.41	10.5	11.7	14.1	16.4	17.6	19.4				
1.65	0	1.21	2.42	3.63	4.84	6.06	7.87	9.69	10.9	12.1	14.5	16.9	18.1	20				
1.6	0	1.25	2.5	3.75	5	6.25	8.12	10	11.2	12.5	15	17.5	18.7					
1.55	0	1.29	2.58	3.87	5.16	6.45	8.38	10.3	11.6	12.9	15.4	18.0	19.3					
1.5	0	1.33	2.66	4	5.33	6.66	8.66	10.6	12	13.3	16	18.6	20					
1.4	0	1.42	2.85	4.28	5.71	7.14	9.28	11.4	12.8	14.2	17.1	20						
1.3	0	1.53	3.07	4.61	6.15	7.69	10	12.3	13.8	15.3	18.4							
1.2	0	1.66	3.33	5	6.66	8.33	10.8	13.3	15	16.6	20							
1.1	0	1.81	3.63	5.45	7.27	9.09	11.8	14.5	16.3	18.1								
1	0	2	4	6	8	10	13	16	18	20								
0.9	0	2.22	4.44	6.66	8.88	11.1	14.4	17.7	20									
0.8	0	2.5	5	7.5	10	12.5	16.2	20										
0.7	0	2.85	5.71	8.57	11.4	14.2	18.5											
0.6	0	3.33	6.66	10	13.3	16.6												
0.5	0	4	8	12	16	20												
0.4	0	5	10	15	20													
0.3	0	6.66	13.3	20														
0.2	0	10	20															
0.1	0	20																

에 따라서 전단강도는 증가한다는 것을 알 수 있다.

Dilatancy의 변이나 요철의 전단강도를 고려하여 충진되지 않은 불연속면에 대한 경험적 전단강도 기준을 제시하고 있다.

조도에 따른 전단강도 특성

Barton(1974)은 수직응력에 의한

즉,

$$\tau_p = \sigma_n \tan \{JRC \times \log(JCS/\sigma_n) + \phi_b\}$$

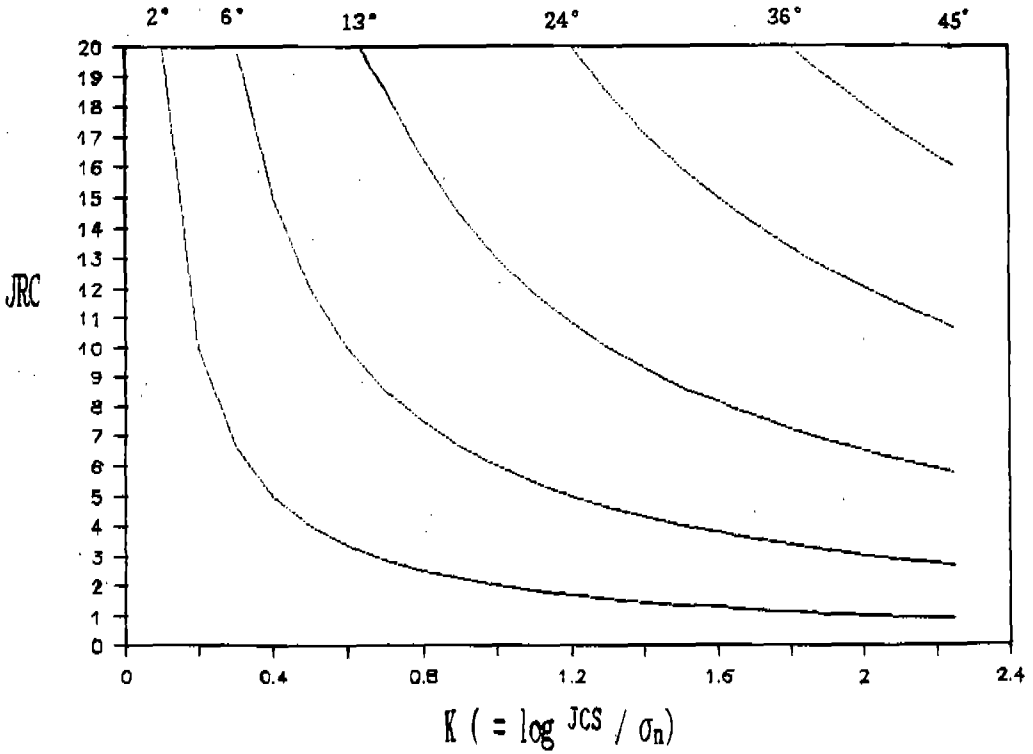


Fig.14 Relation between $K(=\log JCS/\sigma_n)$, JRC and Roughness angle(i) by $JRC=i/k$.

앞의 식을 변형하면

$$\tau_p / \sigma_n = \tan(i + \phi_b)$$

혹은 $\tan \phi_p = \tan(i + \phi_b)$

즉, $\phi_p = i + \phi_b$ 가 됨으로 Patton(1966)은 Bilinear Relation (쌍1차관계) 이 있다고 하고 조도한계응력 σ_T 를 기준으로 하여 σ_T 이하의 수직응력 (σ_n) 에서는 $\tau_p = \sigma_n \tan(\phi_b + i)$ 가 되며, σ_T 보다 클때의 수직응력에 있어서는 $\tau_p = \tau_o + \sigma_n \tan \phi_r$ 이 된다.

여기서 σ_T 는

$$\sigma_T = \frac{\tau_o}{\tan(\phi_b + i) - \tan \phi_b}$$

τ_o 는 요철에 의한 전단강도이다. 따라서 σ_T 를 기준으로 하여 이 이상의 수직응력 하에서는 조도의 영향이 미치지 않는다.

본 시료에 대한 시험결과를 제시하면 Fig.15,16과 같다. σ_T 의 분포범위는 0-3.561(Mpa)이고, τ_o 는 0-0.467(Mpa)의 범위로 나타나며 τ_p 는 3.65-39.11(Mpa)의 범위에 있다. 즉, 요철을 전단하는 힘은 요철을 넘어서는데 필요한 힘보다 적으므로 높은 수직응력에서는 $\tan \phi_p = \tan(\phi_b + i)$ 가 성립하지 않게 된다.

결언

암석의 분리면에는 거의 대부분 조

粗度が 전단강도에 미치는 영향

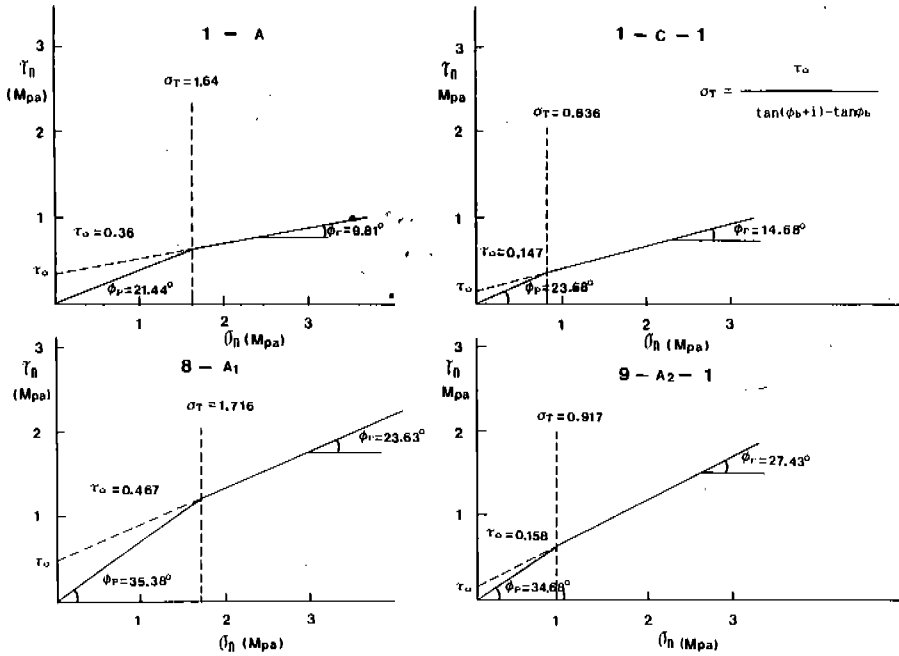


Fig.15 Failure envelope and roughness critical stress (by Patton's).

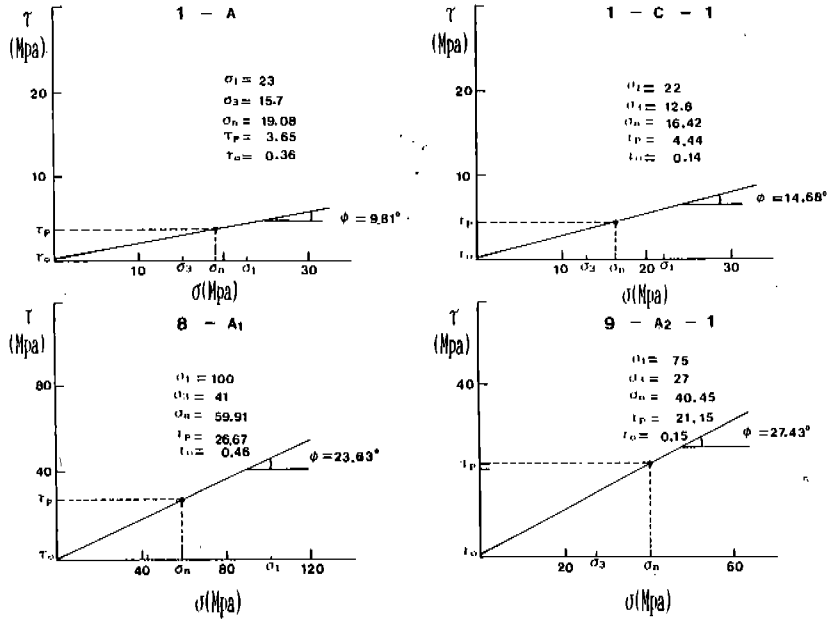


Fig.16 Relation between normal stress(σ_n) and maximum shear stress(τ_p).

도를 형성하고 있고 이 조도가 그 암석의 전단강도에 영향을 미치므로 조도의 영향, 조도의 분포범위와 불연속면의 전단강도등이 검토 연구되었다.

시험연구대상암체는 4종으로 시료의 갯수는 화강암류 15개, 편마암류 7개, 안산암류 1개 등이다.

1. 조도에 응력을 가하면 초기때의 전단마찰각(ϕ)은 크지만 응력의 말기에 가면 ϕ 값은 감소하게 되어 그 영향은 초기때보다 줄어들게 된다. ϕ 는 38.03° 에서 33.21° 로 감소현상이 있다.

2. 시험암석의 조도의 i 는 대부분 20° 이내 분포하나 최대 32° , $JRC=14$ 이내의 범위에 있고, $JRC=-4.63\ln\sigma_n+5.63$ 을 경계로 한 분포범위에 있게 된다. 또 JRC 와 i 의 관계를 보면 $i=43^\circ$ 로서 조도각 i 는 45° 를 넘지 않고 있다.

3. 전단파괴강도($\tau=\tau_0+\mu\sigma$ 에서 $\tau-\mu\sigma=\tau_0$)는 조도의 파괴강도각(ϕ)에 있다. τ_0 를 이용하여 조도가 견딜 수 있는 각 시료에 대한 한계응력치 σ_T 는 0.1-3.56Mpa 이고 이때의 τ_0 는 0.01-0.46Mpa가 되고 있다. 이에따라 각 불연속면의 전단강도는 3.65- 39.11Mpa이어서 만일 이 이상의 하중이 가해졌을때, 이들 불연속암체는 붕괴 및 활동이 일어날 것이다.

참고문헌

강병무외 8인, 1988, 구조거동 및 지질 수 문특성연구(암반 불연속면의 기재방법과 적용), KAERI/RR-723/88 /GE, 한국에너지 연구소.
김영기, 지질공학, 1986, 대학교재 출판사, pp.110-119.

이찬구의 10인, 1990, 구조거동 및 지질 수 문특성연구(절리면의 조도특성과 전단강도), KAERI II/RR-1/90, 한국원자력 연구소 부설 원자력 제2연구소.
최병렬, 이찬구, 1990, 암반불연속면의 전단강도 측정기기 개발, 지질학회지, 제 26권, 제 4호, pp.324-328.
최병렬, 이찬구, 1991, 절리면의 전단강도에 관한 연구, 지질학회지, 제 27권, 제 2호, pp.117-122.
B.Nilson, 1985, Shear strength of rock joints at low normal stresses a key parameter for evaluating rock slope stability, Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints, 15-20, pp.487-494.
B. Stimpson, 1982, A Rapid Field Method for Recording Joint Roughness Profiles, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.19, pp.345-346.
Deere D.U. & R.P.Miller, 1966, Engineering classification and index properties of intact rock, Tech, Report. No.AFWLTR-65-116.
Evert Hoek, John Bray, Rock Slop Engineering, 3rd ed., The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp.83-126.
G. Barla, F. Forlati, A. Zaninetti, 1985, Shear behavior of filled discontinuity, Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints, 15-20 pp.163-171.
G. Venkatachalam, 1985 Modeling of rock joints, Proceedings of the International Symposium of Fundamentals of Rock Joints, 15-20, pp.453-459.
N. Barton, 1973 Review of a New Shear-Strength Criterion for Rock Joints, Engineering Geology, Vol.7, pp.287-332.
N. Barton, 1976, The shear strength of Rock and Rock Joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.13, pp.255-279.
N. Barton, V. Choubey, 1977, The shear strength of Rock Joints in Theory and Practice, Rock Mechanics, Vol.10, pp.1-54.

- N. Turk, W.R.Dearman, Investigation of some rock joint properties: Roughness angle determination and joint closure, Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints, 15-20 pp.197-203.
- Patton F.D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock and related materials,. PH.D.Thesis, Univ of Illinois, 282p.
- P. M. Diget, H.K.Chiu, 1981, Prediction of shear Behaviour of Joints Using Profiles, Int. J.Rock Mech. Min Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 18, pp.369-386.
- Richard E. Goodman, 1976, Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, West Publishing Company.