

암석의 파괴조건계수 평가 및 적용성에 관한 연구

A Study on the Estimation and Application of Failure Coefficients of Rock

장 명 환*¹

Jang, Myoung - Hwan

양 형 식*²

Yang, Hyung - Sik

Abstract

To estimate pure shear strength, 150 sets of triaxial test data were analyzed. The proportional coefficient of shear strength(I_c) at zero normal stress was nonlinearly decreased as failure coefficient m increases, while the internal friction angle ϕ_0 at zero normal stress was nonlinearly increased. The ratio of shear strength(c/τ_0) was inversely proportional to the ratio of the internal friction angles(ϕ/ϕ_0). The shear strength decreased as m increased, while internal friction angle increased. And uniaxial strength was proportional to c , ϕ . Regression analysis showed that shear strength strongly affects m and σ_c . The proportional coefficient of shear strength was nonlinearly increased with RMR, while the internal friction angle(ϕ_0) was linearly decreased.

요 지

순수전단강도를 추정하기 위해 150 세트의 삼축시험 결과를 분석하였다. 내부마찰각은 Hoek와 Brown의 파괴조건계수 m 이 증가하는데 따라 비선형적으로 증가하였으나 순수전단강도 비례계수 I_c 는 비선형적으로 감소하였다. 압축강도의 전단강도에 대한 비는 내부마찰각의 비에 역비례하였다. 전단강도는 m 에 반비례하였으나 내부마찰각은 비례하였다. 또 단축강도는 c , ϕ 에 비례하였다. 회귀분석의 해석에 있어서 전단강도가 m 과 단축압축강도의 주요 영향요소로 나타났다. 전단강도의 비례계수는 RMR의 증가에 따라 비선형적으로 증가하였으나 내부마찰각은 선형적으로 감소하였다.

Keywords : Failure coefficient, Rock mass, Pure shear strength, RMR, Regression analysis

*1 대한광업진흥공사 기술연구소 선임연구원

*2 정희원, 전남대학교 공과대학 자원공학과 교수

1. 서 론

암반의 파괴조건식으로 Mohr-Coulomb 조건식, Drucker-Prager 조건식, Hoek-Brown의 경험파괴식 등이 많이 적용된다.

Hoek-Brown의 식은 파괴조건계수로서 주응력 선도의 기울기와 관계되는 m , 암석의 강도 저하계수인 s 를 사용하고, Mohr-Coulomb 및 Drucker-Prager식 등은 암석의 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)을 사용한다. 이들 파괴식을 수치해석에 적용하기 위해서는 현장시험을 통하여 파괴조건계수를 결정하거나 실험실 물성을 현지 암반조건으로 변환할 필요가 있고, 또 원지반에 대한 지지력이나 사면안정해석을 위해서는 법선응력(σ)이 0일 때의 전단강도(τ_0 : 순수전단강도)와 이 때의 내부마찰각(ϕ_0)을 입력자료로 사용할 필요가 있다. Hoek와 Brown (1988)은 현장실험을 통하여 암석을 5가지 유형으로 나누고 파괴조건계수를 RMR의 식으로 제안하여 현지암반에 대한 파괴조건계수의 적용을 가능하게 하였다.

본 연구에서는 Hoek-Brown의 파괴조건계수로부터 암석의 순수전단강도와 이 때의 내부마찰각을 유도하고, 150set의 삼축압축시험자료를 분석하여 파괴조건계수 m 과 이로부터 계산한 순수전단강도 및 이 때의 내부마찰각과 Mohr-Coulomb에 의한 파괴조건계수(c, ϕ)를 비교하였다. 또 현지암반에 대한 적용을 위하여 5가지 유형의 암종별 파괴조건계수치와 RMR로부터 순수전단강도와 내부마찰각의 변환도 시도하였다.

2. 암석의 파괴조건계수

Hoek-Brown의 파괴조건식은 다음과 같다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (1)$$

여기서 σ_1 은 최대주응력, σ_3 는 최소주응력, σ_c 는 단축압축강도, m, s 는 파괴조건계수이다.

Mohr-Coulomb의 파괴조건계수는 전단파괴

응력과 법선파괴응력과의 관계를 주응력식으로 표시하면

$$\sigma_3 = a + b\sigma_1 \quad (2)$$

형태로 되고 이때 점착력과 내부마찰각은

$$\phi = \text{asin} \frac{b-1}{b+1} \quad (3)$$

$$c = \frac{a(1-\sin\phi)}{2\cos\phi} \quad (4)$$

로 된다.

3. 암석의 순수전단강도

본 연구에서는 Hoek-Brown의 경험파괴조건계수(m, s)를 이용하여 암석의 순수전단강도(τ_0)와 이 때의 내부마찰각(ϕ_0)을 유도하고 암석유형별 RMR에 따른 파괴계수를 이용하여 RMR과 순수전단강도(τ_0) 및 이 때의 내부마찰각(ϕ_0)의 관계를 유도하였다. $\mu = \tan\phi$ 일 때

$$\tau = \tau_0 + \mu\sigma \quad (5)$$

로부터 σ_1 에 의한 파단각 β 에 관하여 미분하고 정리하면

$$\frac{\partial}{\partial\beta} (|\tau| - \mu\sigma) = 0 \quad (6)$$

$\tan 2\beta = \cot\phi$ 이므로 법선응력과 전단응력은

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos\phi \quad (7)$$

$$\sigma_1 = \tau_0(\sqrt{1+\mu_0^2} + \mu_0) \quad (8)$$

과 같이 표현된다. $\sigma = 0$ 일 때, 순수전단강도를 표현하기 위하여 $\phi = \phi_0, \mu = \mu_0, \tau = \tau_0$ 라 하면 $\mu_0 = \tan\phi_0$ 가 되므로 주응력은 다음과 같다.

$$\sigma_1 = \tau_0(\sqrt{1+\mu_0^2} + \mu_0) \quad (9)$$

$$\sigma_3 = -\tau_0(\sqrt{1+\mu_0^2} - \mu_0) \quad (10)$$

Balmer(1952)의 방정식에 대입하여 정리하면

$$\left\{ \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} \right\}_{\sigma=0} = -\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = (\sqrt{1+\mu_0^2} + \mu_0)^2 \quad (11)$$

식과 같이 된다. 이 식은 Mohr-Coulomb 파괴 조건식의 기울기를 나타낸다. Hoek-Brown의 파괴조건식을 이용하여 순수전단력과 이때의 마찰각을 구하기 위해서는 (1)식을 σ_3 에 관하여 미분한 결과가 $\sigma=0$ 일 때 (11)식과 같아야 하므로 다음 식과 같이 된다.

$$\frac{m\sigma_c}{2\sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2}} = (\sqrt{1+\mu_0^2} + \mu_0)^2 - 1 \quad (12)$$

(1)식과 (12)식에 (9)식과 (10)식을 각각 대입하여 비교함으로써 τ_0 와 ϕ_0 를 얻을 수 있다.

$$\tau_0 = \frac{m(\sqrt{1+\mu_0^2} - \mu_0)}{8\mu_0\sqrt{1+\mu_0^2}} \sigma_c = I_c \sigma_c \quad (13)$$

$$\left[\frac{m^2}{s} (1 - 2\mu_0^2) - 16\mu_0^2 \right] \sqrt{1+\mu_0^2} + \frac{2m^2}{s} \mu_0^3 = 0 \quad (14)$$

(13)식에서 비례계수(I_c)를 도입하면 순수전단강도는 단축압축강도와 비례관계가 있다는 것을 알 수 있다. (14)식의 해를 구함으로써

서 순수전단력에 대한 암석의 내부마찰각은

$$\phi_0 = \sin^{-1} \left[\frac{k}{3} \cos \left\{ \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(1 - \frac{54}{k^3} \right) + \frac{4\pi}{3} \right\} + \frac{k}{6} \right] \quad (15)$$

식과 같이 된다. 여기서 $k = \frac{3m^2 + 16s}{m^2}$ 이다.

(15)식이 해로서 성립하려면 (1)식으로부터 유도한 압축강도식과 (17)식의 압축강도가 서로 일치하여야 한다.

$$\sigma_{cm} = \sqrt{s} \sigma_c \quad (16)$$

$$\sigma_c = \frac{8\mu_0\sqrt{1+\mu_0^2}}{m(\sqrt{1+\mu_0^2} - \mu_0)} \tau_s = \frac{\tau_s}{I_c} \quad (17)$$

Fig. 1은 150 set의 삼축시험자료를 이용하여 계산한 것으로 x축은 (16)식에 의한 압축강도, y축은 (17)식에 의한 압축강도이다. 두가지 계산에 의한 결과가 일치하여 방법의 정당성을 나타내준다.

삼축실험 자료로부터 파괴조건계수 m , s 를 계산하면 신선암인 경우 $s=1$ 이므로 τ_0 와 ϕ_0 는 파괴조건계수 m 값에 따라 변한다. Fig. 2는 삼축실험에서 구한 m 값의 변화에 따라 (15) 식으로 계산한 ϕ_0 의 변화도를 나타낸 것이다.

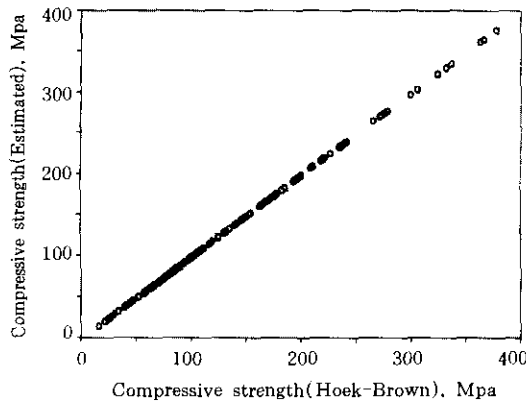


Fig.1 Compressive strengths calculated by two methods.

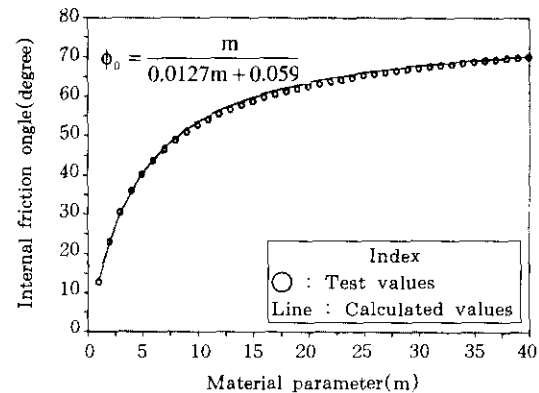


Fig. 2 Relationship between internal friction angle(ϕ_0) and material parameter(m)

그림에서 암석의 순수내부마찰각은 m 값에 따라 비선형적으로 증가하였다.

$$\phi_0 = \frac{m}{0.0127m + 0.0598} \quad (18)$$

Fig. 3은 (13)식에서 I_c 와 m 의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 순수전단강도의 비례계수는 파괴정수 m 값의 증가에 따라 다음 식과 같이 비선형적으로 감소하였다.

$$I_c = 0.352 - 0.072 \ln(m - 0.543) \quad (19)$$

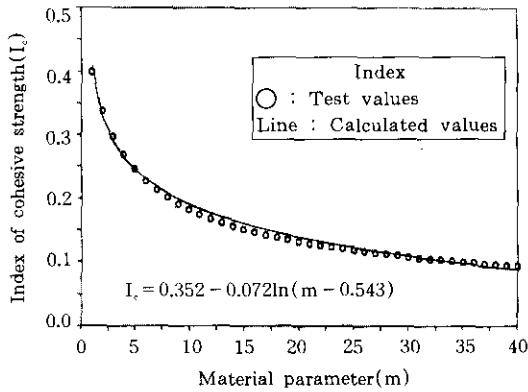


Fig. 3 Relationship between Index of cohesive strength(I_c) and material parameter(m)

4. 파괴조건계수 및 단축강도

Table. 1은 5가지 유형별 신선암의 파괴조건계수 m_i 와 본 연구에서 150 set의 국내의 삼축실험자료를 수집·분석한 파괴조건계수의 분석결과를 나타낸 것이다.

Table. 1에서 ()안의 숫자와 m_i 는 본 연구에서 이용한 삼축시험 자료 수와 이를 분석한 파괴조건계수의 값을 나타낸 것이다. A그룹은 평균 9.08로 Hoek-Brown이 제시한 값 보다 다소 높았으나 나머지 그룹의 평균치는 다소 낮은 값으로 분석되었다. 최대치와 최소치의 차이는 최소 6배에서 50배까지 그 변화가 심하였다. 이런 현상은 국내암석의 파괴조건계수 연구에서도 보고된 바 있다.(양, 1992)

Table. 2~Table. 6은 각 그룹별 삼축압축시험자료의 분석결과를 나타낸 것이다. 표에서 σ_c 는 삼축압축자료로부터 회귀분석에 의하여 평가한 압축강도를 나타낸 것이다. N은 삼축시험자료의 한 set당 자료 수이고, Ref.의 번호는 Sheorey(1997)가 제공한 삼축시험자료 set의 순서이며, []는 국내자료의 인용문헌을 나타낸 것이다.

암석의 내부마찰각(ϕ)은 암석의 순수전단강도에서 구한 내부마찰각(ϕ_0)보다 그룹별로

Table.1 Rock type and material constants(m , s)

Groups	A	B	C	D	E	
Rock type	Dolomite(4) Limestone(10) Marble(8)	Mudstone Siltstone(1) Shale(17) Slate(7)	Sandstone(59) Quartzite(4)	Andesite(2) Dolerite Diabase(2) Rhyolite(1)	Amphibolite Gabbro(2) Gneiss(10) Granite(12) Norite Quartz-Diorite(11)	
m_i	7	10	15	17	25	
Analyzed material parameter(m) in this study						
Number	22	25	63	5	35	
m_i	Avg.	9.08	8.43	13.74	15.85	17.98
	Max.	17.49	15.83	43.31	24.24	38.01
	Min.	2.80	1.93	0.86	4.82	2.50

Table.2 The analysis results of triaxial test data for the group A

Rock	Site	Author	σ_c	m	ϕ_0	τ_0	γ^*	ϕ	c	γ^*	$\frac{\phi}{\phi_0}$	$\frac{c}{\tau_0}$	N	Ref
Dolomite	Webatuck	Brace	171	6.00	44.4	39.58	0.97	29.7	51.02	0.97	0.67	1.29	5	34
Dolomite	Blair	Brace	65	5.12	41.4	16.02	0.89	32.3	16.87	0.91	0.78	1.05	7	35
Dolomite	Cungju*	Lee	235	11.17	55.0	41.50	1.00	45.1	48.72	1.00	0.82	1.17	4	[6]
Dolomite	Dunham	Mogi	219	17.49	61.5	31.39	0.99	49.2	41.66	0.97	0.80	1.33	6	173
Limestone	Canada Potash	Betourn	130	12.70	57.0	21.65	0.97	43.4	28.62	0.99	0.76	1.32	6	19
Limestone	Canada Potash	Betourn	63	15.60	60.0	9.57	0.99	42.8	14.46	0.99	0.71	1.51	6	16
Limestone	Portland	Frankli	54	6.69	46.3	11.83	0.58	35.0	12.03	0.78	0.76	1.02	33	62
Limestone	Portland	Frankli	95	7.08	47.3	20.45	0.70	36.4	21.32	0.85	0.77	1.04	29	61
Limestone	Solenhofen	Gnrirk	277	2.80	29.8	85.08	0.38	34.3	52.25	0.68	1.15	0.61	4	69
Limestone	-	Horino	58	5.91	44.1	13.49	0.96	30.1	17.21	0.98	0.68	1.28	6	108
Limestone	-	Hoskins	236	3.98	36.5	64.09	0.95	26.9	71.92	0.96	0.74	1.12	6	124
Limestone	Namil*	Jang	77	10.29	53.7	14.10	0.97	37.3	20.31	0.98	0.69	1.44	5	[8]
Limestone	Namil*	Jang	86	13.68	58.1	13.81	1.00	41.1	21.24	0.99	0.71	1.54	5	[8]
Limestone	-	Stowe	103	9.92	53.1	19.15	0.77	45.5	17.77	0.79	0.86	0.93	4	196
Marble	Carrara	Frankli	94	7.65	48.7	19.66	0.99	32.6	27.67	0.99	0.67	1.41	12	66
Marble	Danby	Gnrirk	53	25.27	66.1	6.40	0.99	39.1	20.41	0.99	0.59	3.19	4	70
Marble	Tennessee	Hoek	132	6.07	44.6	30.33	0.99	31.5	38.12	0.99	0.71	1.26	8	104
Marble	Carrara	Kovary	105	6.25	45.1	23.74	1.00	32.1	29.57	1.00	0.71	1.25	7	132
Marble	Japan	Lee	72	4.90	40.5	17.97	1.00	28.9	21.48	0.99	0.71	1.20	4	[5]
Marble	Carthage	Marble	99	7.53	48.5	20.86	1.00	28.8	33.58	0.99	0.59	1.61	5	71
Marble	Daye	Ouyang	109	7.14	47.5	23.44	0.96	30.7	32.92	0.97	0.65	1.40	10	176
Marble	Georgia	Schwart	53	6.56	46.0	11.78	0.99	28.0	16.27	0.96	0.61	1.38	11	182
Average			115	9.08	48.9	25.27	0.9	35.5	29.79	0.94	0.73	1.33	21	
Maximum values			277	25.27	66.1	85.08	1.0	49.2	71.92	1.00	1.15	3.19		
Minimum values			53	2.80	29.8	6.40	0.4	26.9	12.03	0.68	0.59	0.61		

Table.3 The analysis results of triaxial test data for the group B

Rock	Site	Author	σ_c	m	ϕ_0	τ_0	γ^*	ϕ	c	γ^*	$\frac{\phi}{\phi_0}$	$\frac{c}{\tau_0}$	N	Ref
Shale	-	Sheorey	58	7.04	47.3	12.53	0.93	30.8	16.68	0.95	0.65	1.33	6	187
Shale	-	Sheorey	80	5.67	43.3	18.99	0.88	29.8	23.15	0.94	0.69	1.22	6	188
Shale	-	Singh S	26	11.51	55.5	4.51	0.95	36.3	7.57	0.98	0.65	1.68	5	194
Shale	-	Singh S	29	7.57	48.5	6.00	0.98	32.6	8.35	0.99	0.67	1.39	5	195
Shale	-	Singh S	67	15.83	60.2	10.07	0.99	46.4	13.76	0.97	0.77	1.37	5	193
Shale	Dongwoun mine	Lee	73	1.93	23.1	25.06	0.97	17.0	27.04	0.99	0.74	1.08	7	[5]
Shale	Dongwoun mine	Lee	81	6.21	45.0	18.41	0.96	30.7	24.11	0.99	0.68	1.31	7	51
Shale	Dongwoun mine	Lee	117	3.55	34.4	32.98	0.98	25.6	36.79	0.99	0.75	1.12	6	[5]
Shale	Dongwoun mine	Lee	125	8.89	51.3	24.38	0.99	37.6	31.89	1.00	0.73	1.31	6	[5]
Shale	Green river	McLamor	99	4.32	38.1	26.08	0.99	19.8	42.07	1.00	0.52	1.61	5	161
Shale	Green river	McLamor	112	4.55	39.2	28.88	0.99	20.8	46.20	1.00	0.53	1.60	5	155
Shale	Green river	McLamor	194	7.08	47.4	41.78	1.00	28.4	66.80	1.00	0.60	1.60	5	154
Shale	Green river	McLamor	221	6.36	45.4	49.70	1.00	27.9	74.45	1.00	0.61	1.50	5	147
Shale	Samcheog*	Choi	83	5.79	43.7	19.50	0.87	31.4	23.29	0.93	0.72	1.19	7	[9]
Shale	Samcheog*	Choi	131	7.26	47.8	27.99	0.84	37.2	32.11	0.93	0.78	1.15	6	[9]
Shale	Samcheog*	Kim	17	4.21	37.6	4.43	0.98	27.3	5.04	0.98	0.72	1.14	3	[1]
Shale	Samcheog*	Kim	27	7.07	47.3	5.92	0.99	25.7	9.91	0.99	0.54	1.68	4	[1]
Siltstone	Ormonde	Hobbs	65	9.58	52.6	12.31	0.95	39.8	14.93	0.94	0.76	1.21	5	103
Slate	-	Fayed	168	13.63	58.0	27.04	0.93	47.8	31.31	0.90	0.82	1.16	5	59
Slate	Austin	McLamor	220	4.80	40.1	55.65	0.99	22.5	85.46	0.99	0.56	1.54	5	146
Slate	Austin	McLamor	242	5.99	44.3	55.93	0.98	25.4	89.73	0.99	0.57	1.60	5	138
Slate	Martensburg	Donath	58	30.96	68.3	6.33	0.99	38.1	29.40	0.99	0.56	4.65	5	50
Slate	Martensburg	Donath	155	14.22	58.6	24.52	0.99	37.8	46.64	1.00	0.64	1.90	5	56
Slate	Penrhyn	Attewel	149	7.84	49.2	30.64	0.89	33.5	42.51	0.96	0.68	1.39	6	4
Slate	Penrhyn	Attewel	178	8.82	51.2	34.95	0.89	35.5	49.15	0.97	0.69	1.41	6	10
Average			111	8.43	47.1	24.18	0.96	31.4	35.13	0.97	0.67	1.53	25	
Maximum values			242	30.96	68.3	55.93	1.00	47.8	89.73	1.00	0.82	4.65		
Minimum values			17	1.93	23.1	4.43	0.84	17.0	5.04	0.90	0.52	1.08		

Table.4 The analysis results of triaxial test data for the group C

Rock	Site	Author	σ_c	m	ϕ_0	τ_0	γ	ϕ	c	γ^0	$\frac{\phi}{\phi_0}$	$\frac{c}{\tau_0}$	N	Ref
Quartzite	Cheshire	Borecki	48	43.31	71.5	4.45	0.99	51.0	10.66	0.96	0.71	2.39	4	38
Quartzite	Galena Mine	Chan	201	19.42	62.9	27.48	0.94	50.1	38.06	0.96	0.80	1.38	4	47
Quartzite	Lupin Mine	Betourn	166	4.28	38.0	43.91	1.00	28.5	49.76	1.00	0.75	1.13	4	27
Quartzite	Mirzapur	Singh M	99	19.61	63.0	13.42	0.98	51.3	17.79	0.99	0.81	1.33	5	192
Sandstone	Berea	Aldritic	85	8.52	50.6	16.97	0.98	34.7	22.25	0.96	0.69	1.31	5	2
Sandstone	Berea	Aldritic	76	8.54	50.6	15.01	0.97	34.5	19.42	0.95	0.68	1.29	5	3
Sandstone	Nepean	Betourn	147	23.78	65.4	18.23	1.00	51.1	27.30	0.99	0.78	1.50	4	14
Sandstone	Pniowek	Borecki	140	6.00	44.4	32.32	0.87	32.3	38.06	0.94	0.73	1.18	11	32
Sandstone	Anna	Borecki	118	6.90	46.9	25.81	0.97	32.1	34.28	0.98	0.69	1.33	8	33
Sandstone	-	Derbysh	74	12.33	56.5	12.52	0.89	38.9	18.34	0.93	0.69	1.46	21	63
Sandstone	Lublin	Dlugosz	119	11.84	55.9	20.53	0.99	38.2	29.54	0.97	0.68	1.44	4	49
Sandstone	DKK	Dunikow	23	22.92	64.9	2.93	1.00	39.1	7.87	0.99	0.60	2.69	4	57
Sandstone	-	Everlin	175	7.45	48.3	36.90	0.90	34.6	41.87	0.92	0.72	1.13	5	58
Sandstone	Pennant	Frankli	212	11.62	55.6	36.69	0.97	42.3	47.93	0.97	0.76	1.31	29	67
Sandstone	Darley Dale	Frankli	75	17.38	61.4	10.75	0.97	40.5	21.65	0.97	0.66	2.01	23	65
Sandstone	Zapadni Donba	Glushko	41	15.13	59.5	6.23	0.83	49.7	7.28	0.90	0.84	1.17	4	68
Sandstone	S.W.Germany	Gowd	65	11.21	55.1	11.53	1.00	33.1	21.51	0.99	0.60	1.87	9	72
Sandstone	Rudna	Gustkie	74	31.54	68.5	8.08	0.99	37.6	34.02	0.97	0.55	4.21	5	73
Sandstone	Victoria	Gustkie	43	35.01	69.5	4.40	0.99	38.1	22.20	0.98	0.55	5.05	5	74
Sandstone	-	Harelan	93	9.47	52.4	17.72	0.96	35.2	26.26	0.98	0.67	1.48	5	77
Sandstone	-	Harelan	151	10.08	53.4	27.83	0.94	41.4	32.01	0.91	0.78	1.15	5	75
Sandstone	-	Harelan	75	14.29	58.7	11.90	0.96	37.5	23.34	0.99	0.64	1.96	5	76
Sandstone	Furukawa	Hoshino	163	15.60	60.0	24.69	0.99	36.1	52.53	0.98	0.60	2.13	5	123
Sandstone	GasfordSummer	Hossain	53	7.13	47.5	11.35	1.00	31.2	15.53	0.99	0.66	1.37	7	125
Sandstone	Vorkuta	Initsk	177	11.21	55.1	31.18	0.88	41.4	38.54	0.91	0.75	1.24	6	126
Sandstone	Samchoeg*	Kim	81	1.11	14.8	31.78	0.74	12.9	31.63	0.96	0.87	1.00	4	[1]
Sandstone	Samchoeg*	Kim	53	2.26	25.8	17.34	0.97	18.5	19.04	0.99	0.71	1.10	4	[1]
Sandstone	Samchoeg*	Kim	64	2.88	30.3	19.47	0.86	22.6	20.86	0.96	0.74	1.07	4	[1]
Sandstone	Samchoeg*	Kim	83	3.41	33.6	23.91	0.90	25.0	25.68	0.95	0.75	1.07	5	[1]
Sandstone	Samchoeg*	Kim	68	3.49	34.0	19.22	0.81	26.7	19.22	0.92	0.78	1.00	3	[1]
Sandstone	Samchoeg*	Kim	59	4.06	36.9	15.89	0.91	24.8	18.60	0.96	0.67	1.17	7	[1]
Sandstone	Samchoeg*	Kim	63	5.30	42.0	15.26	0.97	28.6	18.79	0.97	0.68	1.23	5	[1]
Sandstone	Samchoeg*	Kim	35	5.76	43.6	8.21	0.97	29.8	10.29	1.00	0.68	1.25	3	[1]
Sandstone	Samchoeg*	Kim	84	6.27	45.2	19.08	0.96	32.0	23.56	0.97	0.71	1.23	6	[1]
Sandstone	Samchoeg*	Kim	88	6.90	46.9	19.24	0.94	36.8	21.70	0.96	0.78	1.13	3	[1]
Sandstone	Samchoeg*	Kim	85	18.57	62.3	11.83	0.98	50.4	14.98	0.98	0.81	1.27	3	[1]
Sandstone	Buchberg	Kovary	77	12.19	56.4	13.04	0.99	36.7	21.64	0.97	0.65	1.66	6	130
Sandstone	Buchberg	Kovary	72	13.08	57.4	11.84	0.91	38.2	19.56	0.94	0.66	1.65	12	131
Sandstone	Kuzbass	Kuntysh	103	16.57	60.8	15.18	0.99	37.8	33.14	0.99	0.62	2.18	6	134
Sandstone	Jastrzebie	Kwasnie	110	6.97	47.1	23.84	0.93	33.5	28.95	0.94	0.71	1.21	10	137
Sandstone	Pniowek	Kwasnie	111	8.60	50.7	22.06	0.80	37.7	24.60	0.88	0.74	1.12	8	136
Sandstone	Pniowek	Kwasnie	102	11.54	55.5	17.80	0.94	38.8	24.69	0.94	0.70	1.39	8	135
Sandstone	Japan	Lee	42	0.86	11.7	17.36	0.39	13.3	15.74	0.89	1.13	0.91	4	[4]
Sandstone	Dongwoun mine	Lee	183	22.99	65.0	23.14	0.99	52.1	33.09	1.00	0.80	1.43	4	[5]
Sandstone	Dongwoun mine	Lee	199	30.25	68.0	22.03	0.98	55.3	33.23	1.00	0.81	1.51	4	[5]
Sandstone	Blue	Misra	179	7.37	48.1	37.87	0.99	36.4	45.70	0.99	0.76	1.21	6	166
Sandstone	St. Bees	Misra	67	9.14	51.8	13.00	0.98	34.6	18.33	0.96	0.67	1.41	7	163
Sandstone	Darley Dale	Misra	46	12.41	56.6	7.71	1.00	34.0	15.36	0.98	0.60	1.99	11	162
Sandstone	Elland Edge	Misra	103	12.75	57.1	17.08	0.99	40.2	25.02	0.97	0.71	1.47	6	165
Sandstone	Horsforth	Misra	48	16.74	60.9	7.07	1.00	39.7	13.15	0.97	0.65	1.86	5	164
Sandstone	Ramsbottom Wi	Misra	104	17.06	61.2	15.11	1.00	43.1	24.83	0.98	0.70	1.64	5	167
Sandstone	Buckton	Misra	109	17.69	61.7	15.54	0.99	43.3	24.93	0.96	0.70	1.60	5	168
Sandstone	Elland Edge	Misra	87	19.73	63.1	11.76	0.98	45.4	20.69	0.99	0.72	1.76	7	169
Sandstone	Darley Dale	Murrel	78	17.58	61.6	11.11	0.99	35.0	29.57	0.98	0.57	2.66	12	175
Sandstone	Singhrauli	Ramamur	31	6.41	45.6	6.87	0.93	34.4	7.65	0.93	0.75	1.11	6	177
Sandstone	Darley Dale	Ramez	112	7.75	49.0	23.21	0.96	31.8	30.39	0.95	0.65	1.31	8	178
Sandstone	Vindhyan	Rao	95	28.28	67.3	10.87	0.95	57.6	12.66	0.89	0.86	1.17	6	181
Sandstone	Vindhyan	Rao	82	39.49	70.7	7.98	0.94	57.9	12.72	0.95	0.82	1.59	6	179
Sandstone	Pottsville	Schwartz	45	43.01	71.5	4.22	1.00	43.0	21.43	0.98	0.60	5.08	11	183
Sandstone	Kusunda	Sheorey	71	9.11	51.7	13.68	0.96	34.1	20.00	0.97	0.66	1.46	6	186
Sandstone	Mirzapur	Singh M	66	12.05	56.2	11.31	0.99	43.9	14.42	0.99	0.78	1.27	5	191
Sandstone	GasfordSummer	Vutukur	63	6.37	45.5	14.16	0.98	31.1	17.79	0.96	0.68	1.26	9	197
Sandstone	Bandera	Wilhelm	45	14.74	59.2	7.00	0.99	38.6	13.03	1.00	0.65	1.86	5	199
Average			93	13.74	53.1	17.08	0.94	37.4	24.20	0.96	0.71	1.62	63	
Maximum values			212	43.31	71.5	43.91	1.00	57.9	52.53	1.00	1.13	5.08		
Minimum values			23	0.86	11.7	2.93	0.39	12.9	7.28	0.88	0.55	0.91		

Table.5 The analysis results of triaxial test data for the group D

Rock	Site	Author	σ_c	m	ϕ_0	τ_0	γ^*	ϕ	c	γ^*	$\frac{\phi}{\phi_0}$	$\frac{c}{\tau_0}$	N	Ref
Andesite	Kidd Creek Mi	Betourn	241	4.22	37.7	63.86	0.98	26.9	74.44	0.98	0.71	1.17	9	28
Andesite	Japan	Lee	103	14.61	59.0	16.08	1.00	44.7	22.31	0.98	0.76	1.39	4	[4]
Diabase	Frederick	Brace	364	24.24	65.6	44.84	0.98	41.3	118.52	1.00	0.63	2.64	4	36
Diabase	Lac St. Jean	Betourn	326	19.74	63.1	44.18	0.98	52.3	57.23	0.99	0.83	1.30	6	15
Rhyolite	Kidd Creek Mi	Betourn	118	4.82	40.2	29.68	0.96	29.2	33.81	0.98	0.72	1.14	4	31
	Average		228	15.85	57.0	33.70	0.98	41.9	57.97	0.99	0.74	1.62	5	
	Maximum values		364	24.24	65.6	44.84	1.00	52.3	118.52	1.00	0.83	2.64		
	Minimum values		103	4.82	40.2	16.08	0.96	29.2	22.31	0.98	0.63	1.14		

Table.6 The analysis results of triaxial test data for the group E

Rock	Site	Author	σ_c	m	ϕ_0	τ_0	γ^*	ϕ	c	γ^*	$\frac{\phi}{\phi_0}$	$\frac{c}{\tau_0}$	N	Ref
Diorite	Beliveau Mine	Betourn	146	2.50	27.7	46.41	0.98	21.7	49.34	0.99	0.78	1.06	4	29
Diorite	PierreBeauche	Betourn	60	8.17	49.9	12.22	0.97	35.9	15.85	0.98	0.72	1.30	5	23
Diorite	PierreBeauche	Betourn	170	12.65	56.9	28.40	0.94	45.3	35.61	0.97	0.80	1.25	5	20
Diorite	Belmoral Mine	Betourn	101	14.58	59.0	15.72	0.95	47.7	18.54	0.92	0.81	1.18	5	18
Diorite	PierreBeauche	Betourn	80	19.93	63.2	10.75	1.00	48.4	15.95	0.98	0.77	1.48	5	25
Diorite	Copper Cliff	Betourn	142	38.01	70.3	14.07	0.99	59.7	19.85	0.99	0.85	1.41	4	12
Diorite	-	Broch	274	17.37	61.4	39.45	0.97	49.4	50.31	0.94	0.80	1.28	5	43
Diorite	-	Broch	210	20.96	63.8	27.66	0.97	50.9	36.46	0.92	0.80	1.32	5	44
Diorite	Aridah	Dayre	238	20.69	63.7	31.53	1.00	46.5	52.32	0.98	0.73	1.66	5	48
Diorite	Northumberland	Frankli	300	12.72	57.0	49.90	0.92	46.2	59.75	0.93	0.81	1.20	24	64
Diorite	Orikabe	Moki	280	11.00	54.8	49.69	0.98	33.5	91.76	0.98	0.61	1.85	6	171
Gabbro	-	Broch	379	15.03	59.4	58.40	0.91	50.1	66.03	0.89	0.84	1.13	5	45
Gabbro	-	Broch	227	20.74	63.7	30.08	0.97	50.7	40.46	0.93	0.80	1.35	5	46
Gneiss	Montauban Min	Betourn	64	8.47	50.5	12.69	0.87	41.3	12.38	0.87	0.82	0.98	5	22
Gneiss	Strathcona Mi	Betourn	333	13.92	58.3	53.21	0.94	49.5	61.04	0.95	0.85	1.15	5	17
Gneiss	-	Broch	195	6.39	45.5	43.95	0.65	43.9	31.93	0.71	0.96	0.73	5	40
Gneiss	-	Broch	198	8.76	51.1	38.87	0.87	40.3	44.12	0.91	0.79	1.14	5	41
Gneiss	-	Broch	106	9.42	52.3	20.26	0.94	38.1	25.33	0.93	0.73	1.25	5	42
Gneiss	-	Broch	222	16.23	60.5	32.96	0.96	48.1	41.67	0.93	0.79	1.26	5	39
Gneiss	Idaho Springs	Horino	273	24.06	65.5	33.70	0.96	54.8	43.36	0.95	0.84	1.29	6	112
Gneiss	Idaho Springs	Horino	267	29.70	67.8	29.81	0.99	56.9	40.27	0.96	0.84	1.35	6	121
Gneiss	Gyounggyi*	Lee	136	2.80	29.8	41.66	0.98	22.9	44.98	1.00	0.77	1.08	3	[7]
Gneiss	Gyounggyi*	Lee	125	9.74	52.8	23.50	0.97	40.4	29.38	0.99	0.77	1.25	3	[7]
Granite	Strathcona Mi	Betourn	367	9.16	51.8	70.84	0.98	42.8	80.26	0.98	0.83	1.13	5	21
Granite	Blue Beach N.	Betourn	222	25.15	66.0	26.84	1.00	53.3	38.39	0.99	0.81	1.43	4	13
Granite	Blackingstone	Frankli	228	18.10	62.0	32.15	0.88	49.2	42.74	0.90	0.79	1.33	39	60
Granite	Westerly	Heard	221	26.59	66.6	25.97	1.00	40.1	60.95	0.97	0.60	2.35	8	79
Granite	Iksan*	Yang	154	33.13	69.0	16.32	0.99	57.8	22.99	0.98	0.84	1.41	4	[3]
Granite	Whangdeung*	Yang	186	36.94	70.1	18.70	0.99	59.3	26.64	0.99	0.85	1.42	4	[3]
Granite	Gotherd	Kovary	163	14.90	59.3	25.29	0.99	42.2	40.61	0.98	0.71	1.61	6	133
Granite	Whangdeung*	Lee	173	26.38	66.5	20.43	0.95	52.3	32.25	0.99	0.79	1.58	4	[7]
Granite	Whangdeung*	Lee	165	27.50	67.0	19.14	0.99	53.3	28.93	0.98	0.80	1.51	4	[7]
Granite	Iksan*	Lee	149	32.77	68.9	15.85	1.00	57.5	22.43	0.99	0.84	1.42	4	[4]
Granite	Mannari	Mogi	306	13.12	57.5	50.28	0.98	36.9	91.94	0.98	0.64	1.83	6	172
Granite	Westerly	Mogi	338	21.81	64.3	43.71	1.00	40.5	98.74	0.96	0.63	2.26	10	174
	Average		206	17.98	58.7	31.73	0.96	45.9	43.24	0.95	0.78	1.38	35	
	Maximum values		379	38.01	70.3	70.84	1.00	59.7	98.74	1.00	0.96	2.35		
	Minimum values		60	2.50	27.7	10.75	0.65	21.7	12.38	0.71	0.60	0.73		

평균 0.73, 0.67, 0.71, 0.74, 0.78배 정도 과소평가되었으나, 전단강도(c)는 순수전단강도(τ_0)에 대해서 1.33, 1.53, 1.62, 1.62, 1.38 배정도 높게 평가되는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 Mohr-Coulomb의 파괴조건계수(c, ϕ)는 그 파괴포락선이 직선이기 때문에 법선응력(σ)의 크기에 관계없이 일정한 값을 갖지만, 순수전단강도 및 이 때의 내부마찰각(τ_0, ϕ_0)은 법선응력(σ)의 증가에 따라 파괴포락선이 비선형적으로 변하는 Hoek-Brown의 파괴조건계수(m, s)로부터 계산하게 되어 이들 값도 응력수준에 따라 변화하기 때문인 것으로 사료된다.

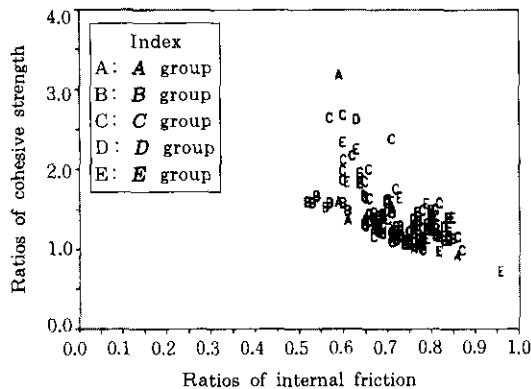


Fig.4 The relationship of between ratios of cohesive strength(c/τ_0) and ratios of internal friction(ϕ/ϕ_0)

Fig. 4는 150개의 삼축압축자료를 분석한 것으로 x축을 암석의 내부마찰각의 비율(ϕ/ϕ_0)로 하고 y축을 점착력의 비율(c/τ_0)로 무차원화하여 두 변수간의 변화도를 나타낸 것이다.

그림에서 내부마찰각의 비율이 증가함에 따라 점착력의 비율은 감소하는 경향을 보여주고 있다. 즉 Mohr-Coulomb의 파괴포락선은 c, ϕ 값의 조합에 의하여 결정되어지지만 두 변수사이의 관계는 반비례의 경향이 있는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 삼축자료를 회귀 분석하여 평가한 압축강도와 실험치에 대한 단축압축강도를 나타낸 것이다. 회귀분석에 의한 단축압축강도는 응력조건에 따른 파괴강도 값이 단축압축강도에 반영되고 이는 순수전단강도를 계산하는데 반영되는 것으로서 회귀분석 결과 $\gamma^2=0.92$ 로서 실험치와 비교적 잘 일치하였다. 또 RMR분류에서 압축강도의 최고치인 250 MPa 범위 안에 92% 정도가 속하였으나 E 그룹에서는 약 30% 정도가 이 범주를 초과하였다.

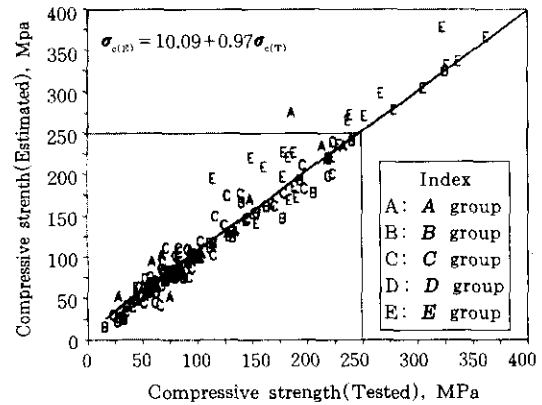


Fig.5 The relationship of between tested and estimated values of compressive strength.

신선암에 대한 삼축압축자료(150 set)로부터 파괴조건계수 m 과 c, ϕ 및 τ_0, ϕ_0 의 관계를 다중 회귀분석한 결과 다음 식이 얻어졌다.

$$m = -13.674 - 0.023c + 0.722 \phi \quad (\gamma^2 = 0.61) \quad (20)$$

$$m = -21.749 - 0.028\tau_0 + 0.674 \phi_0 \quad (\gamma^2 = 0.61) \quad (21)$$

파괴조건계수 m 은 암석의 전단강도와 음(-)의 비례관계를, 내부마찰각과 양(+)의 비례관계를 나타내었다.

경험파괴식으로부터 유도한 단축압축강도(σ_c)와 전단강도(τ_0, c) 및 내부마찰각(ϕ_0, ϕ)을 독립변수로 한 다중회귀분석 결과, 다음 식들이 얻어졌다.

$$\sigma_c = -102.69 + 3.487c + 3.215\phi \quad (r^2 = 0.78) \quad (22)$$

$$\sigma_c = -163.13 + 5.254\tau_0 + 3.215\phi \quad (r^2 = 0.91) \quad (23)$$

단축압축강도는 전단강도 및 내부마찰각과 양의 상관관계가 있는 것으로 분석되었고 상관

계수는 0.78, 0.91로 비교적 높은 수치를 보여주었다. 특히 단축압축강도와 순수전단강도(τ_0) 및 내부마찰각(ϕ_0)은 매우 높은 상관관계를 보여주었는데 이는 순수전단강도가 암석의 단축압축강도를 반영하기 때문으로 판단된다.

Table.7 Influence diagnostics with coefficients of regression

	Failure criteria(m)						Estimated compressive strength					
	Eq.(21)			Eq.(20)			Eq.(23)			Eq.(22)		
	β_i	SE	t	β_i	SE	t	β_i	SE	t	β_i	SE	t
γ_0	-21.749	4.588	-4.74	-13.674	5.699	-2.40	-163.133	24.35	6.70	-102.693	37.880	-2.71
τ_0	-0.029	0.026	-1.11				5.253	0.139	37.79			
ϕ_0	0.675	0.034	19.85				3.213	0.179	17.75			
c				-0.023	0.025	-0.92				3.487	0.164	21.26
ϕ				0.722	0.047	15.36				3.215	0.316	10.17

Table. 7은 다중회귀분석에서 추정된 회귀계수들을 분석한 것이다. 표에서 회귀계수 β_i ($i=0.1.2 \dots$)를 각각의 표준오차(SE)로 나눈 t-점정의 통계치에 대한 절대값이 클수록 회귀함수에서 중요한 영향변수가 된다. 신선암에 대한 삼축압축실험의 분석결과 파괴조건계수 m 은 암석의 전단강도보다는 암석의 내부마찰각이 더 중요한 영향변수가 되는 것으로 분석되었다. 그러나 암석의 압축강도는 내부마찰각보다는 점착력의 영향이 더 큰 것으로 분석되었다. 이것은 (14)식에서 암석의 전단강도가 압축강도에 대한 비례하는 것과 일치한다.

5. RMR과 파괴조건계수

Hoek-Brown은 현장실험과 조사를 통하여 각 그룹별 RMR에 따른 경험파괴조건계수의 값을 제시하였다. 본 연구에서는 그 값을 각 그룹의 신선암의 파괴조건계수로 나누어 일반화하여 RMR에 따른 파괴조건계수들의 변화도를 나타내었다.

Fig. 6, Fig. 7은 각 그룹별 파괴조건계수의 변화도를 나타낸 것이다. 식에서 m_1 는 신선암

에 대한 파괴조건계수이고, I_m , I_s 는 암반굴착 방법으로서 기계굴착 또는 조절발파인 경우 1, 절리 등으로 교란된 암반에서는 2를 적용한다. 그림에서 파괴조건계수 m , s 는 RMR이 증가함에 따라 비선형적으로 증가한다.

5가지 유형의 암석 그룹에 대한 파괴조건계수와 RMR사이의 관계를 이용하여 암석의 순수전단강도에 대한 비례계수와 이때의 내부마

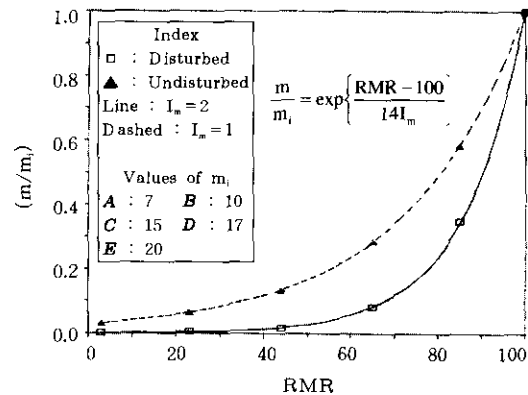


Fig.6 The relationship between RMR and the ratio of material parameter (m/m_1)

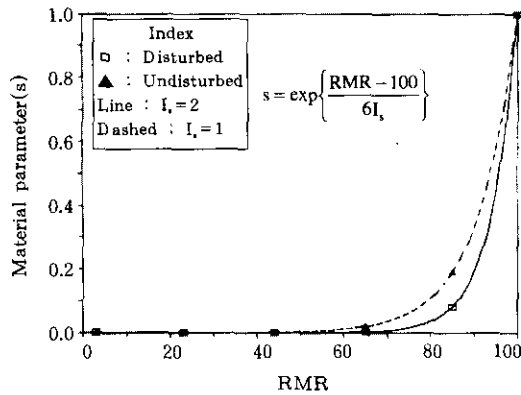


Fig. 7 The relationship between RMR and the ratio of material parameter (s)

찰각을 RMR에 따라 현지암반의 값으로 변환하였다. Fig. 8은 파괴조건계수 m , s 로부터 변환한 순수전단강도의 비례계수를 RMR에 따라 각 그룹별로 최대값으로 일반화시켜 하나의 식으로 나타낸 것이다. 그림에서 순수전단강도의 비례계수도 RMR에 따라 비선형적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. RMR에 따른 암석의 순수전단강도는

$$\tau_0 = I_i I_c \sigma_c = I_i \exp\left\{\frac{\text{RMR} - 100}{I_j}\right\} \sigma_c \quad (24)$$

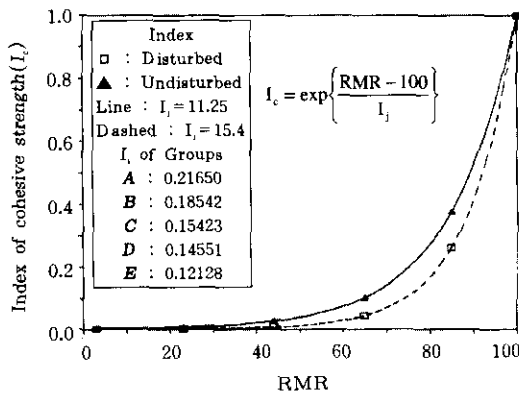


Fig. 8 The relationship between RMR and index of cohesive strength(I_c)

와 같이 구할 수 있다. (24)식에서 I_i 는 각 그룹별로 A:0.22, B:0.19, C:0.15, D:0.15, E:0.12 이고, 기계굴착 또는 조절발파인 경우 $I_j = 11.25$, 절리 등으로 교란된 암반에서 $I_j = 15.4$ 이다.

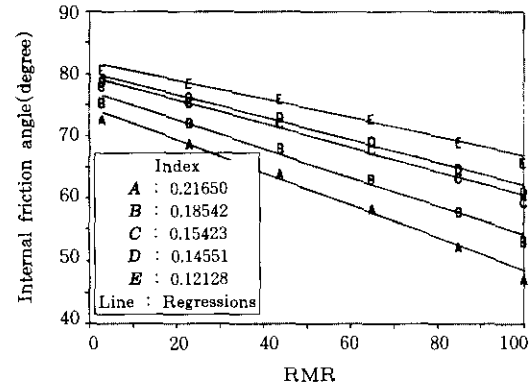


Fig. 9 The relationship between RMR and internal friction angle(ϕ_0) at undisturbed rock

Fig. 9, 10은 $\sigma = 0$ 에서 기계굴착 또는 조절발파인 경우와 절리 등으로 교란된 암반 등에서 내부마찰각을 RMR로 계산한 것과 회귀분석한 결과이며, (25)식은 이때의 회귀방정식이다.

$$\phi_0 = a - b \cdot \text{RMR} \quad (25)$$

그림에서 내부마찰각은 RMR의 증가에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 Fig. 4에서와 같이 전단강도비(c/τ_0)와 내부마찰각(ϕ/ϕ_0)은 반비례 관계에 있고, 순수전단강도는 RMR의 증가에 따라 비선형적으로 증가하기 때문에 이때의 내부마찰각은 RMR에 따라 감소하는 것으로 분석된다.

Table. 8은 그룹별 회귀방정식의 회귀계수를 나타낸 것이다. 표에서 회귀방정식의 기울기는 암석유형별로 그룹화 시킨 m_i 값의 크기에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, 상관계수는 $r^2 = 0.99$ 로 매우 높게 나타났다.

삼축실험자료에 대한 다중회귀분석에서는 파괴조건계수 m 과 내부마찰각(ϕ , ϕ_0)은 매

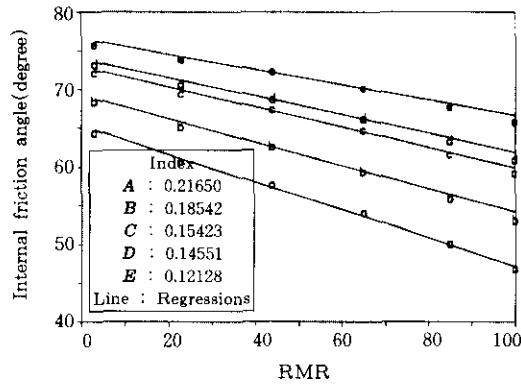


Fig.10 The relationship between RMR and internal friction angle(ϕ_0) at disturbed rock

우 높은 상관관계를 보여주었으나, 본 분석에서는 RMR의 증가에 따라 m , s 가 증가함에도 불구하고 내부마찰각은 RMR에 따라서 감소하는 경향을 보여 주었다. 이는 신선암에서 암석의 연약계수(s)가 1 이었으나 Hoek-Brown의 파괴조건계수에서는 RMR에 따라서 연약

계수의 차가 최고 10^{-7} 배까지 나기 때문인 것으로 분석된다. (26)-(27)식은 Hoek-Brown이 RMR에 따라 제안한 암종별 파괴조건계수치 (m , s)에 대하여 기계굴착 또는 조절발파인 경우의 m , s 와 절리 등으로 교란된 암반 등에 대한 순수전단강도의 비례계수 (I_c) 및 내부마찰각에 대한 다중회귀분석결과를 나타낸 것이고, Table. 9는 추정된 회귀계수들에 대한 회귀진단결과이다.

$$\phi_0 = 65.22 + 0.59m - 17.15s \quad (\text{Disturbed}, \gamma^2 = 0.27) \quad (26)$$

$$I_c = 0.0099 - 0.0024m + 0.1929s \quad (\text{Disturbed}, \gamma^2 = 0.93) \quad (27)$$

$$\phi_0 = 70.07 + 0.30m - 18.73s \quad (\text{Undisturbed}, \gamma^2 = 0.42) \quad (28)$$

$$I_c = 0.0134 - 0.0015m + 0.1794s \quad (\text{Undisturbed}, \gamma^2 = 0.92) \quad (29)$$

여기서 내부마찰각의 추정보다는 비례계수의 추정이 더 적합하게 이루어짐을 알 수 있다.

Table.8 Coefficients of regression with RMR and internal friction angle(ϕ_0)

Group	$\phi_0 = a - b \cdot \text{RMR}$					
	Undisturbed			Disturbed		
	a	b	γ^2	a	b	γ^2
A	74.54	0.26	0.99	65.23	0.18	0.99
B	77.16	0.23	0.99	69.15	0.15	0.99
C	79.57	0.19	0.99	72.89	0.13	0.99
D	80.22	0.18	0.99	73.91	0.12	0.99
E	81.96	0.15	0.99	76.57	0.10	0.99

Table.9 influence diagnostics with coefficients of regression

	Disturbed						Undisturbed					
	Eq.(26)			Eq.(27)			Eq.(28)			Eq.(29)		
	β_i	SE	t	β_i	SE	t	β_i	SE	t	β_i	SE	t
y_0	65.22	6.40	10.19	0.0099	0.0169	0.59	70.07	6.73	10.41	0.0134	0.0184	0.728
m	0.59	0.39	1.52	-0.0024	0.0010	-2.40	0.30	0.34	0.88	-0.0015	0.0009	-1.60
s	-17.15	6.30	-2.72	0.1929	0.0166	5.60	-18.73	5.53	-3.38	0.1794	0.0152	11.80

표에서와 같이 현지암반에 대한 적용시 암석의 순수전단강도와 내부마찰각에 대한 영향 인자는 s 값이 m 값 보다 더 큰 것으로 분석되었다. 특히 s 값의 영향은 I_c 값의 크기에 더 영향이 큰 것으로 나타났고, 이때의 상관계수도 0.93, 0.92로 매우 높았다. 이것은 삼축압축자료에 대한 분석결과와도 일치한다.

이상의 결과로부터 암반에서 Mohr-Coulomb의 파괴조건식을 적용할 경우 입력자료로서 암반의 순수전단강도와 내부마찰각을 고려할 필요가 있는데 순수전단강도는 RMR에 따라 비선형적으로 증가하나 내부마찰각은 RMR에 따라 직선적으로 반비례한다는 것에 유의할 필요가 있다. 이는 Mohr-Coulomb의 파괴포락선이 직선이기 때문에 파괴조건계수는 법선응력 σ 의 크기에 관계없이 일정한 값을 갖지만, τ_0 , ϕ_0 는 σ 의 크기에 따라 파괴포락선이 비선형적으로 변하는 Hoek-Brown의 파괴조건계수로부터 변환한 값이기 때문인 것으로 판단된다. 이 차이는 원지반의 지지력이나 사면안정해석에서 암반의 순수전단강도를 고려해야 할 경우에 이완영역이나 안전율에 변화를 줄 수 있다고 생각된다.

6. 결 론

150개 삼축압축 시험자료로부터 파괴조건을 구하고 상관관계를 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 신선암에 대한 암석의 내부마찰각은 파괴조건계수 m 의 증가에 따라 비선형적으로 증가하였으나, 순수전단강도의 비례계수(I_c)는 비선형적으로 감소하였다.
- 2) 분석 결과, A그룹 신선암의 m 값은 평균 9.08로 Hoek-Brown이 제시한 값보다 다소 높았으나 나머지 그룹은 다소 낮은 값이었고, 최대치와 최소치의 차이는 최소 6배에서 50배까지 그 변화가 심하였다.
- 3) 암석의 내부마찰각(ϕ)은 $\sigma=0$ 일 때의

내부마찰각(ϕ_0)보다 평균 0.67~0.78배 정도로 과소평가되었으나 전단강도(c)는 순수전단강도(τ_0)에 대해서 1.33~1.62배 정도 높게 평가되었다. 내부마찰각의 비율이 증가함에 따라 전단강도의 비율은 감소하는 것으로 나타났으며 두 변수 사이는 반비례관계로 분석되었다.

- 4) 신선암의 삼축자료에 대한 다중회귀분석에서 파괴조건계수 m 은 전단강도와 반비례관계를, 내부마찰각과 정비례관계를 나타내었고, 단축압축강도는 Mohr-Coulomb의 파괴조건계수와 양의 상관관계를 나타내었다. 추정된 회귀계수의 분석에서 파괴조건계수 m 은 내부마찰각이, 단축압축강도는 전단강도가 주요 영향변수로 분석되었다.
- 5) Hoek-Brown의 파괴조건 계수를 이용하여 계산한 순수전단강도의 비례계수(I_c)는 RMR에 따라 비선형적으로 증가하는 것으로 분석되었으나 내부마찰각(ϕ_0)은 선형적으로 감소하는 경향이었고, 다중회귀분석 결과의 추정회귀계수에 대한 분석에서 암석의 순수 전단강도(τ_0)와 내부마찰각은 m 보다 s 가 더 큰 영향변수인 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김재극(1973), "탄광지대 암석의 물리적성질에 관한 연구", *대한광산학회지*, 제10권, 제1호, pp. 10~20.
2. 양형식(1992), "국내 주요암석의 파괴조건계수 연구", *한국자원공학회지*, 제29권, 제2호, pp. 91~102.
3. 양형식, 장명환(1996), "방사성폐기물 지층처분장설계를 위한 화강암의 열역학적 거동에 관한 연구", *한국암반공학회지*, 제6권 제1호, pp. 69~74.
4. 이정인(1975), "삼축압축하에서 암석의 초음파 전파속도의 변화와 파괴특성에 관하여", *대한광산학회지*, 제12권, 제1호, pp. 15~28.

5. 이정인(1976), "우리나라 무연탄의 심부채탄을 위한 삼축압축하의 협탄층 암석의 역학적 성질에 관한 기초 연구", *대한광산학회지*, 제13권, 제2호, pp. 75~83.
6. 이형원(1993), "암석의 열파괴와 강도 및 변형 거동의 온도의존성에 관한 연구", 박사학위논문, 서울대학교, 196p.
7. 이희석(1995), "온도변화에 따른 화강암, 편마암의 역학적 수리적특성에 관한 연구", 석사학위논문, 서울대학교, 136p.
8. 장명환, 양형식(1989), "Hoek-Brown의 경험파괴식을 이용한 불연속 암반의 파괴거동에 관한 연구", *한국자원공학회지*, 제26권 제?호, pp. 414~422.
9. 최익권, 이정인, 김재극(1976), "삼척지구 퇴적암의 파괴특성에 관한 연구", *대한광산학회지*, 제13권, 제1호, pp. 48~53.
10. Balmer, G.(1952), "A General Analytical Solution for Mohr's envelope", *Proc. Am. Soc. for Testing Materials*, Vol. 52, pp. 1260~1271.
11. Hoek, E., and Brown, E. T.(1988), "The Hoek-Brown failure criterion-a 1988 update", *Proc. 15th Can. Rock Mech. Symp.*, University of Toronto, pp. 31~38.
12. Sheorey, P.R.(1997), *Empirical Rock Failure Criteria*, Balkema, Netherlands, 175p.

(접수일자 1998. 3. 16)