

RMC 값을 이용한 암반의 강도정수 값 추정도표 및 추정식의 제안

Suggestion of Charts and Equations Estimating the Strength Parameters of Rock Mass Using the Rock Mass Classification Value

김민권¹ Kim, Min-Kwon

이영생² Lee, Yeong-Saeng

Abstract

The strength parameters used in rock mass design are mainly estimated by equations using Hoek-Brown failure criterion because the tests to obtain the values are limited and expensive. To estimate the strength parameters, the Hoek-Brown failure criterion should be transformed to the Mohr-Coulomb failure criterion. But the processes are more or less cumbersome due to the several stages including the computation and the analyzing steps. In this study, several rock states of various conditions were modeled and then the strength parameters were estimated using the Hoek-Brown failure criterion. Thereafter by analyzing the results, some charts and equations estimating the strength parameters through only one step or easily in the field using the values of RMC, the uniaxial compressive strength and the rock constant (m_i), were suggested. And then the suggested method was compared and discussed with the existing method.

요 지

암반설계에 필요한 암반의 강도정수 값을 산정할 시에는, 암반 내 원위치시험이 극히 제한적이며 비용이 고가여서 주로 Hoek-Brown 파괴기준을 이용한 추정식을 사용하고 있다. Hoek-Brown 파괴기준식을 사용할 때에는 이 식을 Mohr-Coulomb 파괴기준식으로 변경하여야 지반의 강도정수 값을 추정할 수 있다. 그러나 파괴기준의 변경과정은 계산 및 분석단계 등 여러 단계를 거쳐야 하는 불편함이 있다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 접할 수 있는 다양한 조건의 암반상태를 모델링한 후, 일차적으로 Hoek-Brown 파괴기준을 이용하여 강도정수 값을 산정하였다. 그 결과를 분석하여 RMC, 암석의 일축압축강도(σ_c), 암석계수(m_i)의 3가지 사용요소를 이용하여 한번의 계산과정을 통해 암반의 강도정수를 추정할 수 있는 추정식 및 현장에서 손쉽게 강도정수를 산정할 수 있는 추정도표를 제안하였다. 이러한 제안 도표 및 제안식을 기존의 Hoek-Brown 및 Mohr-Coulomb 파괴기준식과 비교, 검토함으로써 본 제안의 타당성을 검증하였다.

Keywords : Strength parameter, Hoek-Brown failure criterion, Mohr-Coulomb failure criterion, Rock coefficient, Rock Mass Classification (RMC)

1 정회원, (주)지오공간 이사 (Member, Managing Director, Geo Space, Co., LTD.)

2 정회원, 경기대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyonggi Univ., Tel: +82-31-249-9709, Fax: +82-31-249-9709, yslee@kyonggi.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 급격한 산업개발 및 경제성장에 따른 국민 생활수준의 급격한 향상 등으로 산업기반시설의 확충이 요구됨에 따라 그 동안 많은 건설공사가 진행되어 왔으며, 또한 앞으로도 계속해서 진행될 것이다. 우리나라의 경우 지형의 특성상 산지가 많이 분포하고 있으며, 도심지의 경우 또한 개발이 상당 부분 완료되어 추가적인 건설공사 시 주 대상부지는 주로 지하의 암반층인 경우가 빈번히 발생하고 있다. 따라서 암반층에 대한 중요성이 크게 부각되고 있으며 이를 이해하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다.

암반의 설계 시 사용되는 설계요소로는 암반의 일축 압축강도, 점착력, 내부마찰각 등이 있으며, 각 요소 값들은 삼축압축시험, 전단시험 등 실내 및 현장 원위 치시험을 통하여 산정할 수 있으나 시험구간 선정 등에 제약사항이 많으며, 또한 시험비가 고가여서 주로 경험식을 이용하여 추정하고 있다. 경험식은 RMR(Rock Mass Rating) 분류법을 이용하는 방법과 지질강도지수(Geological Strength Index, GSI)를 이용하는 방법으로 구분할 수 있는데, RMR 암반분류법을 이용하는 방법은 Bieniawski(1978), Tsuchiya(1984), Trueman(1988)에 의하여 연구되었으며, 지질강도지수를 이용하는 방법은 Hoek and Brown(1997)에 의해 연구되었다. 이상의 경험식 중 실무에서 가장 많이 사용되고 있는 추정식은 지질강도지수를 사용하는 Hoek-Brown 파괴기준식이다. 이 식은 주응력을 중심으로한 파괴형태를 제시한 것으로 전단강도를 추정하기 위해서는 Mohr-Coulomb 파괴기준식으로 변경하여야 한다. 파괴기준의 변경과정은 먼저 Hoek-Brown 파괴기준을 선정한 후 주응력을 계산, $\sigma_3 - \sigma_{1f}$ 그래프를 작도하고 선형회귀분석을 실시하여 Mohr-Coulomb 파괴기준으로 변경하는 여러 분석 단계를 거쳐야하는 불편함이 있다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 접할 수 있는 다양한 조건의 암반 상태를 모델링한 후, 이를 Hoek-Brown 파괴기준을 적용하여 강도정수를 산정하고, 각각의 산정 단계별 선형회귀분석을 실시하는 방법으로 한번의 계산과정을 통해 암반의 강도정수를 추정할 수 있는 추정식 및 현장에서 손쉽게 강도정수를 산정할 수 있는 추정도표를 제안하였다.

Hoek-Brown 파괴기준식을 이용할 경우 지질강도지수를 사용하게 되는데, 지질강도지수의 경우 추정도표

를 이용하는 방법과 RMR₈₉, Q' 값을 이용하여 산출하는 방법이 있으나, 실무에서는 주로 RMR₈₉ 값을 이용한 방법을 사용하고 있다. 하지만 RMR₈₉의 경우 암반을 분류하는 기술자의 성향에 따라 분석값이 달라질 수 있는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 Kim and Lee(2007, 2008)는 새로운 암반분류법(Rock Mass Classification, RMC)을 제안한 바 있다. 이에 따라 본 연구에서 제안한 추정식 및 추정도표의 사용요소는 Hoek-Brown 파괴기준식에서 사용하는 요소 중 지질강도지수(GSI) 대신 새로운 RMC 값을 적용하였다. RMC 값은 암석의 일축압축강도, 암질지수, 불연속면의 간격, 풍화상태의 4가지 요소를 정량화하여 합산한 값으로, 시추주상도를 이용하여 암반분류가 가능하며, 기술자 간 평가 편차를 줄이면서 비교적 동일한 분석값을 얻을 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 RMC, 암석의 일축압축강도(σ_c), 암석계수(m_i)의 3가지 사용요소를 적용함으로써 암반의 강도정수 값을 구하는 추정식 및 추정도표를 제안하였다.

2. 암반의 강도정수 산정

2.1 Hoek and Brown 추정식

Hoek and Brown의 파괴기준은 1980년에 처음 발표된 이후 계속해서 수정되어 온 파괴기준으로 가장 실질적인 모델로 볼 수 있다. 본 파괴기준은 Fig. 1에 보듯이 암반 시험치들을 $\sigma_{1f}/\sigma_c - \sigma_3/\sigma_c$ 그래프상에 나타내었을 때 파괴시의 주응력 σ_{1f} 와 σ_3 사이에는 식 (1)과 같은 표현이 가능함을 나타내었다.

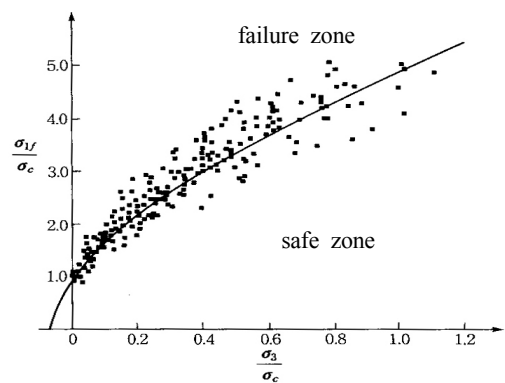


Fig. 1. Empirical failure criterion of Hoek-Brown (Hoek and Brown, 1980)

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (1)$$

여기서, m_b , s , a 는 계수로서 암반의 종류와 불연속면의 발달 정도에 따라 달라진다. σ_c 는 암석의 일축압축강도이다.

Hoek and Brown은 암반의 파괴기준을 이용하기 위하여 GSI를 새로이 도입하였는데, 이는 파괴기준식에 사용되는 계수 m_b , s , a 를 구하기 위하여 사용된다. GSI는 절리를 포함하고 있는 암반의 강도는 무결암 자체의 물성치 뿐만 아니라 무결암 시편들이 미끄러지거나 회전될 수 있는 자유도에도 영향을 받는다는 개념에서 출발하였다. 이러한 자유도는 무결암의 기하학적 형태에 의해 영향을 받는데, 예를 들어 절리면이 거칠고 신선하며, 절리 내에 충전물이 없을 경우에는 상대적으로 강도가 크게 나올 것이다. 따라서 본래의 Hoek-Brown 파괴기준식을 GSI를 이용하여 나타내면 식 (2)와 같다.

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad (2)$$

Table 1. Values of the constant m_i for intact rock, by rock group (Hoek and Brown, 1997)

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerate (22)	Sandstone (19)	Siltstone (9)	Claystone (4)
			Greywacke (18)			
	Non-Clastic	Organic	Chalk (7)			
		Coal (8-21)				
Non-Clastic	Carbonate	Breccia (20)	Sparitic Limestone (10)	Micritic Limestone (8)		
	Chemical	Gypstone (16)		Anhydrite (13)		
METAMORPHIC	Non Foliated	Marble (9)	Hornfels (19)	Quartzite (24)		
	Slightly foliated	Migmatite (30)	Amphibolite (25-31)	Mylonites (6)		
	Foliated*	Gneiss (33)	Schists (4-8)	Phyllites (10)	Slate (9)	
IGNEOUS	Light	Granite (33)		Rhyolite (16)	Obsidian (19)	
		Granodiorite (30)		Dacite (17)		
		Diorite (28)		Andesite (19)		
	Dark	Gabbro (27)	Dolerite (19)	Basalt (17)		
		Norite (22)				
	Extrusive pyroclastic type	Agglomerate (20)	Breccia (18)	Tuff (15)		

Note) 1. These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation.
2. Values in parenthesis are estimates.

여기서, m_b 는 암반의 Hoek-Brown 계수이며, m_i 는 암석의 Hoek-Brown 계수로서 암석의 삼축압축시험을 통하여 구할 수 있으며 시험자료가 없을 경우 Table 1을 이용하여 구할 수 있다. GSI를 산정하는 방법은 시추코아를 이용하는 방법이 있으며, 이는 GSI가 25이상인 비교적 양호한 암반일 경우 Bieniawski(1989)의 RMR 분류법에 의하여 시추코아를 분석하여, 그 RMR 값으로부터 GSI를 구할 수 있다. 하지만 GSI가 25이하인 불량한 암반의 경우 실제 RQD가 매우 낮기 때문에 RMR 값 자체의 신뢰도가 떨어진다. 따라서 이럴 경우에는 Barton et al.(1974)에 의한 Q' 값을 사용한다.

$$GSI = RMR_{89} - 5 ; GSI > 25 (RMR_{89} > 23) \quad (3)$$

$$GSI = 9 \cdot \ln Q' + 44 ; GSI < 25 (R_{89} < 23) \quad (4)$$

$$여기서, Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a}$$

시추코아를 사용하는 방법 이외에 실제 현장에서는 Fig. 2의 도표를 이용하여 GSI를 산출할 수 있다. 계수

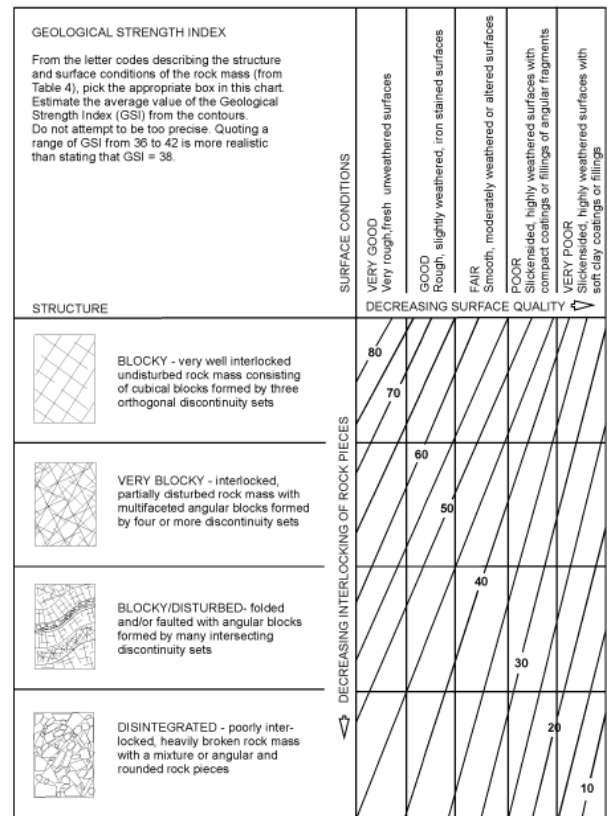


Fig. 2. Estimate of Geological Strength Index GSI based on geological descriptions (Hoek and Brown, 1980)

s, a는 식 (5), 식 (6)으로부터 구할 수 있다.

$$\bullet \text{ GSI} > 25 \text{ (보통 이상의 암반조건)} \quad (5)$$

$$s = \exp\left(\frac{\text{GSI} - 100}{9}\right), \quad a = 0.5$$

$$\bullet \text{ GSI} < 25 \text{ (매우 불량한 암반조건)} \quad (6)$$

$$s = 0, \quad a = 0.65 - \frac{\text{GSI}}{200}$$

Hoek-Brown 파괴기준식을 이용하여 암반의 강도정수를 추정하기 위해서는 식 (2)를 Mohr-Coulomb 파괴기준식으로 변환해야하는데 식 (7)과 같이 나타낼 수 있고, 식 (8), 식 (9)로부터 강도정수 값을 구할 수 있다.

$$\sigma_{1f} = \sigma_{cm} + k \cdot \sigma_3 \quad (7)$$

$$\text{여기서, } \sigma_{cm} = \frac{2 \cdot c \cdot \cos\phi}{1 - \sin\phi}, \quad k = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}$$

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{k-1}{k+1}\right) \quad (8)$$

$$c = \frac{\sigma_{cm}}{2 \cdot \sqrt{k}} \quad (9)$$

2.2 RMC 암반분류법

RMC 암반분류법은 국내 각 기관에서 사용하고 있는 요소별로 상이한 기준값을 표준화하였고 또한 주관적 판단이 개입될 소지가 많은 정성적 분류기준을 정량적 분류기준으로 구체화하여 제시한 새로운 암반분류법으로, 일축압축강도, 암질지수, 절리면 간격, 풍화도의 평가항목을 Table 2와 같이 배점화하여 각각의 평가항목에 대한 배점을 합산하여 암반을 분류한다(Kim and Lee, 2007; Kim and Lee, 2008; Kim, 2010).

3. RMC를 이용한 암반의 강도정수 추정도표 및 추정식의 제안 과정

암반의 강도정수 산정은 일반적으로 Hoek-Brown 파괴기준식을 사용한다. 이 식은 1980년에 처음으로 발표된 이후 계속 수정되었는데, 기본적으로 암석뿐만 아니라 암반에도 적용할 수 있는 유일한 기준이다. 하지만, 이 파괴기준식을 사용하기 위해서는 Mohr-Coulomb 파괴기준으로 변경하여야 한다. 그러나 Mohr-Coulomb 파괴기준으로의 변경과정은 여러 분석단계를 거쳐야 하는 불편함이 있고, 또한 Hoek-Brown 파괴기준 적용시 GSI 값을 사용하게 되는데, 이러한 GSI 값 산출시 기술자의 성향에 따라 각각 다른 결과치가 산정될 수

Table 2. Rock mass classification system (Kim and Lee, 2007; Kim and Lee, 2008; Kim, 2010)

Parameters		Ratings of values					
1	Uniaxial compressive strength	Class no.	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5
		Strength of intact rock material (MPa)	> 120	80~120	50~80	30~50	< 30
	Rating	20	15	12	6	3	
2	RQD	Class no.	I	II	III	IV	V
		RQD (%)	> 90	60~90	30~60	10~30	< 10
	Rating	20	15	10	8	2	
3	Spacing of discontinuities	Class no.	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5
		Spacing (cm)	> 130	80~130	40~80	10~40	< 10
	Rating	30	20	12	6	2	
4	Weathering	Class no.	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5
		condition	fresh	slightly weathered	moderately weathered	highly weathered	completely weathered
	Rating	30	20	16	10	3	
RMC		RMC = ① + ② + ③ + ④					
Ratings		100~81	80~61	60~41	40~21	20~0	
Description		very hard rock	hard rock	medium rock	soft rock	weathered rock	
					Blasting	Ripping	

있는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하고자하였다. 우선 현장에서 접할 수 있는 여러 상황의 암반 모델링을 수행한 후, 시추조사 결과에서 구한 RMC 값과 RMR분류법을 이용하여 구한 GSI 값과의 상관성 분석을 실시함으로써 GSI 값을 RMC 값으로 변환하는 과정을 수행하였다. 암반의 모델링 분석은 먼저 암석계수(m_i)에 따른 암반의 강도정수 상관관계를 구하기 위하여 선형회귀분석을 통하여 직선식을 구한다. 직선식의 기울기와 절편값은 암석의 일축압축강도(σ_c), RMC 값에 따라 변하는 상수이다. 따라서 암석의 일축압축강도(σ_c), RMC 값을 변경하여 각각의 값에 대하여 앞에서의 선형회귀분석을 반복하여 실시한

다. 각각의 값에 따른 직선의 기울기와 절편값을 적용하여 다시 회귀분석함으로써 상관식을 구한다.

3.1 지반조사

지반조사는 RMC 암반분류법을 이용하여 강도정수 값을 산정하는 연구를 수행하기 위하여 실시하였으며, 조사지역은 중생대 쥐라기 대보화강암에 해당하는 흑운모화강암이 분포하고 있는 경기도 ○○시 ○○동 일원에서 수행하였다. 시추조사는 총 10개소에서 1,236m 구간에 대하여, 총 시추구간을 136개의 구간으로 세분하여 조사하고 이를 이용하여 암반분류를 실시하였는

Table 3. Results of boring test

Hole No.	Section	Classification				Hole No.	Section	Classification			
		RMC	RMR	Q	GSI			RMC	RMR	Q	GSI
TB-1	1.00-3.50	53	58	4.000	61	TB-1	91.00-94.00	100	97	711.111	92
	3.50-6.50	56	65	10.950	65		94.00-97.00	100	99	711.111	94
	6.50-9.50	72	77	13.800	77		97.00-100.00	100	97	711.111	92
	9.50-12.50	51	55	7.333	58		100.00-103.00	100	96	711.111	91
	12.50-15.50	71	73	65.600	73		100.00-103.00	100	96	711.111	91
	15.50-18.50	71	77	72.000	77		106.00-109.00	100	98	711.111	93
	18.50-21.50	61	70	4.100	70		109.00-112.00	100	99	711.111	94
	21.50-24.50	61	66	2.433	66		112.00-115.00	100	99	711.111	94
	24.50-27.50	71	71	11.733	71		115.00-118.00	100	99	711.111	94
	27.50-30.50	82	80	36.800	80		118.00-121.00	100	99	711.111	94
	30.50-33.50	100	93	106.667	88		121.00-124.00	100	99	711.111	94
	33.50-36.50	77	78	39.200	78		124.00-127.00	100	96	711.111	91
	36.50-39.50	82	85	53.333	85		127.00-130.00	100	97	711.111	92
	39.50-42.50	71	68	9.100	68		130.00-133.00	100	99	711.111	94
	42.50-44.00	82	79	30.000	79		133.00-136.00	100	98	711.111	93
	44.00-46.00	100	96	426.667	91		136.00-139.00	100	97	711.111	92
	46.00-49.00	82	84	52.800	84		139.00-142.00	100	97	711.111	92
	49.00-52.00	100	96	426.667	91		142.00-145.00	100	97	711.111	92
	52.00-55.00	76	72	13.950	72		145.00-148.00	100	98	711.111	93
	55.00-58.00	57	57	5.700	60		148.00-151.00	100	98	711.111	93
58.00-61.00	76	75	80.889	75	151.00-154.00	95	95	711.111	90		
61.00-64.00	76	76	30.667	76	154.00-157.00	71	70	11.850	70		
64.00-67.00	82	83	170.667	83	157.00-160.00	71	72	27.667	72		
67.00-70.00	82	83	133.333	83	160.00-163.00	100	96	711.111	91		
70.00-73.00	100	99	711.111	94	163.00-166.00	100	93	177.778	88		
73.00-76.00	100	98	711.111	93	166.00-169.00	100	98	711.111	93		
76.00-79.00	90	92	177.778	87	169.00-172.00	100	98	711.111	93		
79.00-82.00	100	98	711.111	93	172.00-175.00	100	97	711.111	92		
82.00-85.00	100	98	711.111	93	175.00-178.00	71	69	14.000	69		
85.00-88.00	100	98	711.111	93	178.00-181.00	82	79	33.333	79		
88.00-91.00	100	97	711.111	92	181.00-184.00	71	74	58.000	74		

데 그 결과 중의 일부를 Table 3에 나타내었다. 여기서 암반분류는 RMC, RMR₈₉, Q-system 분류법을 이용하였으며, 암반분류 결과를 이용하여 각 분류법 간의 상관성을 분석하였다. 각각의 암반분류법과의 상관성 분석 결과를 Fig. 3에 나타내었는데, RMC 값과 RMR₈₉ 값은 단순 선형함수의 관계를 보이며, RMC 값과 Q-system 값은 로그함수 관계를, 그리고 RMC 값과 GSI 값은 기울기가 약 1에 가까운 정비례의 단순 선형함수 관계를 보인다. 이들의 관계식을 나타내면 다음 식 (10)~식 (12)와 같다.

$$RMC = RMR_{89} - 7 ; R^2 = 0.89 \quad (10)$$

$$RMC = 7.69 \cdot \ln Q + 43.799 ; R^2 = 0.82 \quad (11)$$

$$RMC = 0.98 \times GSI ; R^2 = 0.88 \quad (12)$$

3.2 암반 모델링

Hoek-Brown 파괴기준식은 식 (1)과 같이 일축압축강도(σ_c), 최소주응력(σ_3), 암반의 종류와 불연속면의 발달 정도에 따라 달라지는 계수(m_b, m_i, s, a)로 구성된다. 따라서 본 연구에서는 암석의 일축압축강도, GSI 그리고 암석계수에 따른 암반 강도정수의 변화 양상을 분석하기 위하여 다양한 암반 상태를 모델링하였는데, Table 4에 나타낸 RMC, 일축압축강도, m_i 값을 여러 가지로 가정하고 이들을 조합함으로써 총 440개의 암반 상태를 모델링하였다.

이상과 같이 여러 요소 값 들을 조합한 총 440개의

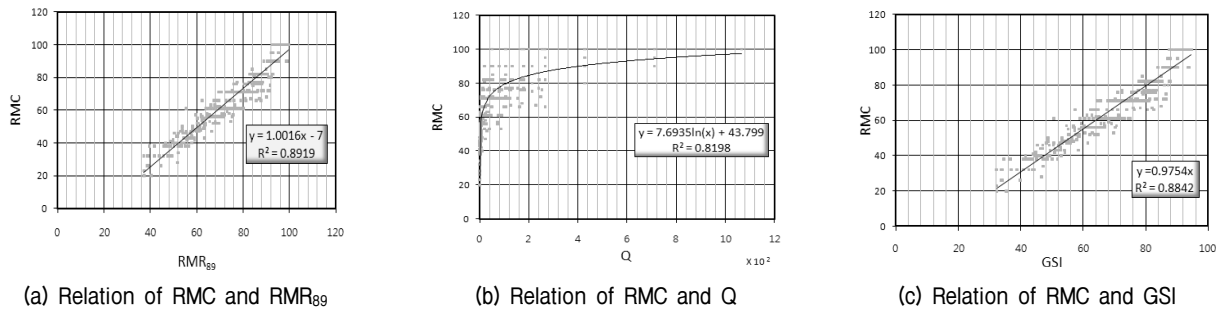


Fig. 3. Results of correlation analysis

Table 4. Assumed values of some parameters for rock mass modelling

	Parameters	Values
1	RMC	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80
2	uniaxial compressive strength (MPa)	10, 30, 50, 80, 120
3	m_i	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33

Table 5. Analyzed values for the uniaxial compressive strength and strength parameters of rock masses in the case of RMC=10

RMC	10	σ_c (MPa)														
		10			30			50			80			120		
No	m_i	σ_{cm}	c	ϕ	σ_{cm}	c	ϕ	σ_{cm}	c	ϕ	σ_{cm}	c	ϕ	σ_{cm}	c	ϕ
1	3	0.32	0.14	9	0.95	0.41	9	1.58	0.68	9	2.53	1.08	9	3.80	1.62	9
2	6	0.48	0.19	13	1.44	0.58	13	2.40	0.96	13	3.84	1.53	13	5.76	2.30	13
3	9	0.61	0.23	15	1.84	0.70	15	3.06	1.17	15	4.89	1.87	15	7.34	2.80	15
4	12	0.73	0.27	17	2.18	0.80	17	3.64	1.33	17	5.82	2.13	17	8.72	3.20	17
5	15	0.83	0.30	19	2.49	0.89	19	4.16	1.48	19	6.65	2.36	19	9.97	3.54	19
6	18	0.93	0.32	21	2.78	0.96	21	4.64	1.60	21	7.42	2.56	21	11.13	3.85	21
7	21	1.02	0.34	22	3.05	1.03	22	5.09	1.71	22	8.14	2.74	22	12.21	4.12	22
8	24	1.10	0.36	23	3.31	1.09	23	5.51	1.82	23	8.82	2.91	23	13.22	4.36	23
9	27	1.18	0.38	24	3.55	1.15	24	5.91	1.91	24	9.46	3.06	24	14.19	4.59	24
10	30	1.26	0.40	25	3.78	1.20	25	6.30	2.00	25	10.08	3.20	25	15.12	4.79	25
11	33	1.33	0.42	26	4.00	1.25	26	6.67	2.08	26	10.67	3.33	26	16.01	4.99	26

암반 모델링에 대하여 Hoek-Brown 파괴기준식을 이용하여 암반의 강도정수 값을 구할 수 있는데, 그 결과 중 RMC=10에 대한 결과를 Table 5에 나타내었다. 그 중의 한 예로 $\sigma_c = 10\text{MPa}$ 에 대하여 m_i 값에 따른 일축 압축강도, 점착력, 내부마찰각의 상관관계를 나타내면 Fig. 4와 같다.

3.3 암반의 일축압축강도(σ_{cm})

모델링한 440개의 암반조건에 대하여 Hoek-Brown 파괴기준식을 이용하여 암반의 일축압축강도를 구하였는데 그 결과 중 RMC=10에 대한 결과는 Table 5에 나타나 있다. m_i 값 변화에 따른 암반의 일축압축강도 (σ_{cm}) 값을 플로팅하면 Fig. 4(a)와 같은 직선식의 형태로 나타나고 이는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다. 각각의 RMC 값에 따라 Fig. 4(a)와 같은 과정을 수행하면 Table 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 즉 기울기($a_{\sigma_{cm}}$)와

절편값($b_{\sigma_{cm}}$)은 RMC 값에 따라 변하는 변수이다. Table 6에서 암석의 일축압축강도(σ_c)=10MPa일 때 RMC 값에 따른 기울기 값($a_{\sigma_{cm}}$)과 절편값($b_{\sigma_{cm}}$)을 각각 플로팅하면 Fig. 5(a), Fig. 5(b)와 같이 나타낼 수 있다. Table 6의 결과에서 기울기 값($a_{\sigma_{cm}}$)과 절편값($b_{\sigma_{cm}}$)은 각각의 암석의 일축압축강도(σ_c) 값에 선형적 비례관계임을 알 수 있다. 이로부터 식 (13a), 식 (13b)와 같은 추정식이 구해지게 된다. 현장에서는 이상의 결과로부터 종합하여 제안한 Fig. 6을 이용하게 되면 보다 쉽고 빠르게 암반의 일축압축강도(σ_{cm}) 값을 추정할 수 있다.

$$\sigma_{cm} = a_{\sigma_{cm}} \cdot m_i + b_{\sigma_{cm}} \quad (\text{MPa}) \quad (13)$$

여기서,

$$a_{\sigma_{cm}} = \sigma_c \times (-2 \times 10^{-7} \cdot \text{RMC}^2 + 0.0002 \cdot \text{RMC} + 0.0017) \quad (13a)$$

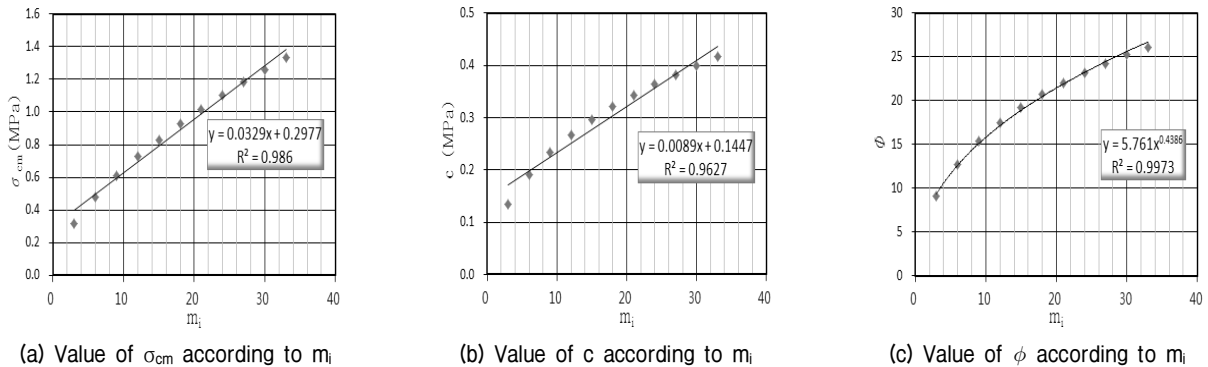


Fig. 4. Changes of the uniaxial compressive strength and strength parameters according to m_i (RMC=10, $\sigma_c = 10\text{ MPa}$)

Table 6. Regression analysis for the uniaxial compressive strength of various rock mass models

Estimating equation for the uniaxial compressive strength of rock mass				$\sigma_{cm} = a_{\sigma_{cm}} \cdot m_i + b_{\sigma_{cm}} \quad (\text{MPa})$							
RMC	10 MPa		30 MPa		50 MPa		80 MPa		120 MPa		
	$a_{\sigma_{cm}}$	$b_{\sigma_{cm}}$	$a_{\sigma_{cm}}$	$b_{\sigma_{cm}}$	$a_{\sigma_{cm}}$	$b_{\sigma_{cm}}$	$a_{\sigma_{cm}}$	$b_{\sigma_{cm}}$	$a_{\sigma_{cm}}$	$b_{\sigma_{cm}}$	
80	0.1268	3.5262	0.3804	10.579	0.6339	17.631	1.0143	28.209	1.5214	42.314	
70	0.1172	2.3707	0.3517	7.1121	0.5862	11.853	0.9379	18.966	1.4068	28.448	
60	0.1034	1.7291	0.3101	5.1873	0.5169	8.6455	0.8270	13.833	1.2405	20.749	
50	0.0888	1.3401	0.2664	4.0202	0.4440	6.7003	0.7103	10.721	1.0655	16.081	
40	0.0752	1.0777	0.2257	3.2332	0.3762	5.3886	0.6019	8.6218	0.9028	12.933	
30	0.0633	0.8842	0.1900	2.6526	0.3166	4.4210	0.5066	7.0736	0.7598	10.610	
20	0.0471	0.5239	0.1412	1.5716	0.2353	2.6193	0.3764	4.1909	0.5646	6.2864	
10	0.0329	0.2977	0.0987	0.8932	0.1645	1.4886	0.2632	2.3818	0.3948	3.5726	
Results of regression analysis		$a_{\sigma_{cm}}$	$a_{\sigma_{cm}} = \sigma_c \times (-2 \times 10^{-7} \cdot \text{RMC}^2 + 0.0002 \cdot \text{RMC} + 0.0017)$								
		$b_{\sigma_{cm}}$	$b_{\sigma_{cm}} = \sigma_c \times 0.0268 \cdot e^{0.0322 \cdot \text{RMC}}$								

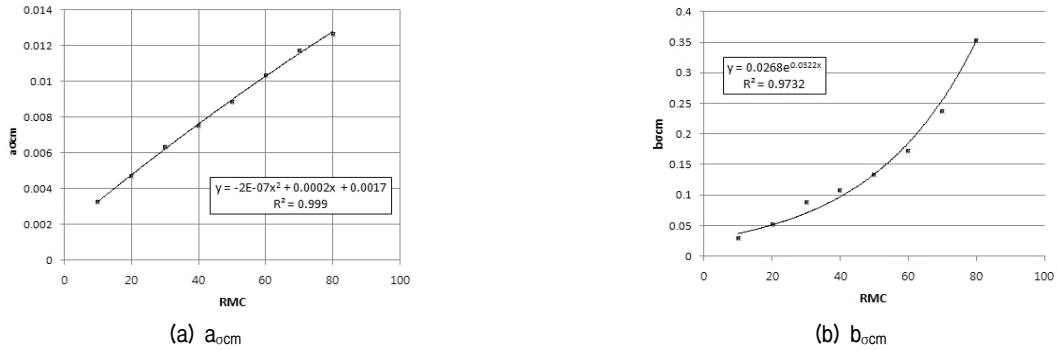


Fig. 5. Regression curve for the slope values and the intercept values of the equation for the uniaxial compressive strength

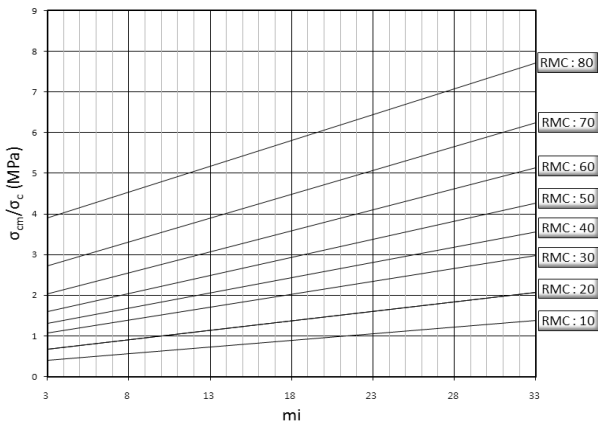


Fig. 6. Estimating chart for the uniaxial compressive strength of rock masses

$$b_{\sigma_{cm}} = \sigma_c \times 0.0268 \cdot e^{0.0322 \cdot RMC} \quad (13b)$$

3.4 암반의 점착력(c)

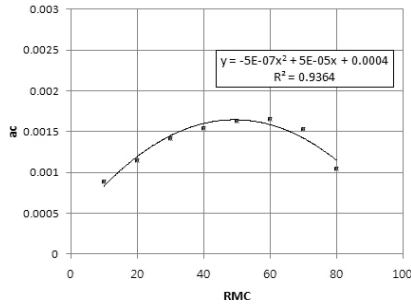
모델링한 440개의 암반조건에 대하여 Hoek-Brown 파괴기준식을 이용하여 암반의 점착력(c)을 구하였는

데 그 결과 중 RMC=10에 대한 결과는 Table 5에 나타나 있다. m_i 값 변화에 따른 암반의 점착력(c) 값을 플로팅하면 Fig. 4(b)와 같은 직선식의 형태로 나타나고 이는 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다. 각각의 RMC 값에 따라 Fig. 4(b)와 같은 과정을 수행하면 Table 7과 같은 결과를 얻을 수 있다. 즉 기울기 값(a_c)과 절편값(b_c)은 RMC 값에 따라 변하는 변수이다. Table 7에서 암석의 일축압축강도(σ_c)=10MPa일 때 RMC 값에 따른 기울기 값(a_c)과 절편값(b_c)을 각각 플로팅하면 Fig. 7(a), Fig. 7(b)와 같이 나타낼 수 있다. Table 7의 결과에서 기울기 값(a_c)과 절편값(b_c)은 각각 암석의 일축압축강도(σ_c) 값에 선형적 비례관계임을 알 수 있다. 이로부터 식 (14a), 식 (14b)와 같은 추정식이 구해지게 된다. 현장에서는 이상의 결과로부터 종합하여 제안한 Fig. 8을 이용하게 되면 보다 쉽고 빠르게 암반의 점착력(c)을 추정할 수 있다.

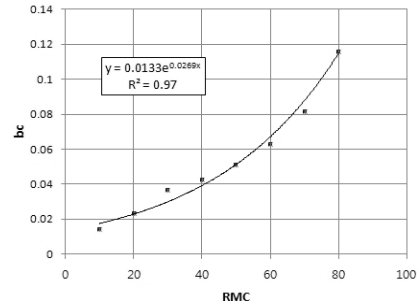
$$c = a_c \cdot m_i + b_c \quad (\text{MPa}) \quad (14)$$

Table 7. Regression analysis for cohesion of various rock mass models

Estimating equation for the cohesion of rock mass					$c = a_c \cdot m_i + b_c \quad (\text{MPa})$						
RMC	σ_c	10 MPa		30 MPa		50 MPa		80 MPa		120 MPa	
		a_c	b_c	a_c	b_c	a_c	b_c	a_c	b_c	a_c	b_c
80		0.0105	1.1589	0.0315	3.4767	0.0524	5.7944	0.0839	9.2711	0.1259	13.907
70		0.0153	0.8177	0.0458	2.4531	0.0764	4.0885	0.1222	6.5416	0.1833	9.8124
60		0.0166	0.6276	0.0498	1.8829	0.0829	3.1382	0.1327	5.0211	0.1991	7.5316
50		0.0163	0.5104	0.0489	1.5313	0.0815	2.5522	0.1304	4.0835	0.1957	6.1253
40		0.0154	0.4287	0.0461	1.2862	0.0768	2.1437	0.1228	3.4299	0.1843	5.1448
30		0.0142	0.3655	0.0425	1.0966	0.0708	1.8277	0.1133	2.9242	0.1700	4.3864
20		0.0115	0.2347	0.0345	0.7042	0.0576	1.1737	0.0921	1.8779	0.1381	2.8168
10		0.0089	0.1447	0.0266	0.4342	0.0443	0.7237	0.0709	1.158	0.1063	1.7370
Results of regression analysis		a_c		$a_c = \sigma_c \times (-5 \times 10^{-7} \cdot RMC^2 + 0.00005 \cdot RMC + 0.0004)$							
		b_c		$b_c = \sigma_c \times 0.0133 \cdot e^{0.0269 \cdot RMC}$							



(a) a_c



(b) b_c

Fig. 7. Regression curve for the slope values and the intercept values of the equation for cohesion

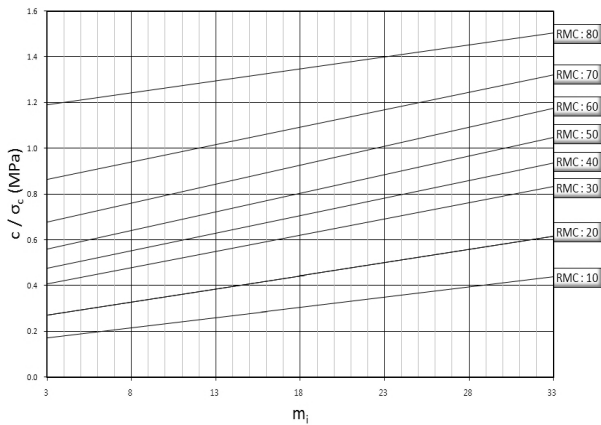


Fig. 8. Estimating chart for cohesion of rock masses

여기서,

$$a_c = \sigma_c \times (-5 \times 10^{-7} \cdot \text{RMC}^2 + 0.00005 \cdot \text{RMC} + 0.0004) \quad (14a)$$

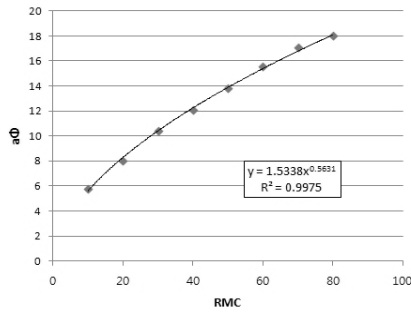
$$b_c = \sigma_c \times 0.0133 \cdot e^{0.0269 \cdot \text{RMC}} \quad (14b)$$

3.5 암반의 내부마찰각(ϕ)

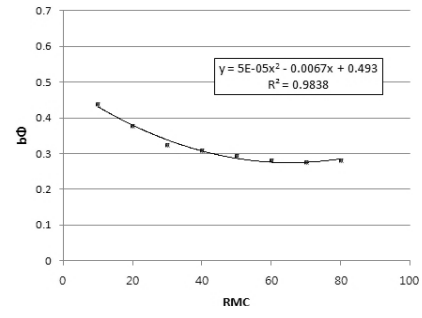
모델링한 440개의 암반조건에 대하여 Hoek-Brown 파괴기준식을 이용하여 암반의 내부마찰각(ϕ)을 구하였는데 그 결과 중 RMC=10에 대한 결과는 Table 5에 나타나 있다. Table 5에서 볼 수 있듯이 암반의 내부마찰각(ϕ)은 암석의 일축압축강도(σ_c) 값과는 무관함을 알 수 있다. m_i 값 변화에 따른 암반의 내부마찰각 값을 플로팅하면 Fig. 4(c)와 같은 형태로 나타나고 이는 지수함수 형태의 식 (15)로 나타낼 수 있다. 각각의 RMC 값에 따라 Fig. 4(c)와 같은 과정을 수행하면 Table 8과 같은 결과를 얻을 수 있다. 즉 계수 값(a_ϕ)과 계수 값(b_ϕ)은 RMC 값에 따라 변하는 변수이다. Table 8에서 암석의 일축압축강도(σ_c)=10MPa일 때 RMC 값에 따른 계수 값(a_ϕ)과 계수 값(b_ϕ)을 각각 플로팅하면 Fig. 9(a), Fig. 9(b)와 같이 나타낼 수 있다. Table 8의 결과에서 계수 값(a_ϕ)과 계수 값(b_ϕ)은 각각의 암석의 일축압축강도(σ_c) 값과는 무관함을 알 수 있다. 이로부터 식 (15a),

Table 8. Regression analysis for internal friction angle of various rock mass models

Estimating equation for the internal friction angle of rock mass		$\phi = a_\phi \cdot m_i^{b_\phi}$											
RMC	σ_c	10 MPa		30 MPa		50 MPa		80 MPa		120 MPa			
		a_ϕ	b_ϕ	a_ϕ	b_ϕ	a_ϕ	b_ϕ	a_ϕ	b_ϕ	a_ϕ	b_ϕ		
80		18.021	0.2802	18.021	0.2802	18.021	0.2802	18.021	0.2802	18.021	0.2802		
70		17.085	0.2764	17.085	0.2764	17.085	0.2764	17.085	0.2764	17.085	0.2764		
60		15.584	0.2819	15.584	0.2819	15.584	0.2819	15.584	0.2819	15.584	0.2819		
50		13.840	0.2934	13.840	0.2934	13.840	0.2934	13.840	0.2934	13.840	0.2934		
40		12.075	0.3082	12.075	0.3082	12.075	0.3082	12.075	0.3082	12.075	0.3082		
30		10.412	0.3243	10.412	0.3243	10.412	0.3243	10.412	0.3243	10.412	0.3243		
20		7.9928	0.3769	7.9928	0.3769	7.9928	0.3769	7.9928	0.3769	7.9928	0.3769		
10		5.7610	0.4386	5.7610	0.4386	5.7610	0.4386	5.7610	0.4386	5.7610	0.4386		
Results of regression analysis		a_ϕ		$a_\phi = 1.5338 \cdot \text{RMC}^{0.5631}$									
		b_ϕ		$b_\phi = 5 \times 10^{-5} \cdot \text{RMC}^2 - 0.0067 \cdot \text{RMC} + 0.493$									



(a) a_ϕ



(b) b_ϕ

Fig. 9. Regression curve for the coefficients of the equation for the internal friction angle

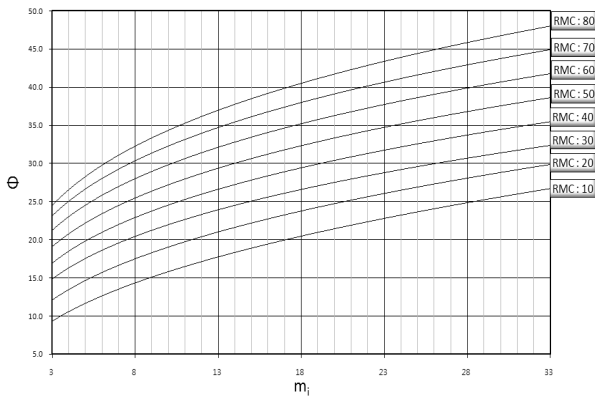


Fig. 10. Estimating chart for internal friction angle of rock masses

식 (15b)와 같은 추정식이 구해지게 된다. 현장에서는 이상의 결과로부터 종합하여 제안한 Fig. 10을 이용하게 되면 보다 쉽고 빠르게 암반의 내부마찰각(ϕ)을 추정할 수 있다.

$$\phi = a_\phi \cdot m_i^{b_\phi} \quad (15)$$

여기서, $a_\phi = 1.5338 \cdot RMC^{0.5631}$ (15a)

$$b_\phi = 5 \times 10^{-5} \cdot RMC^2 - 0.0067 \cdot RMC + 0.493 \quad (15b)$$

4. 암반의 강도정수 값 산정 예

현재 실무에서 이용하고 있는 암반의 강도정수 추정 방법(Hoek-Brown 파괴기준식)과 본 연구에서 제시한 암반의 강도정수 추정방법으로 암반의 강도정수를 산출함으로써 기존 추정방법과 본 연구제안 추정방법의 차이를 비교, 검토하였다. 이를 위하여 다음의 5가지 사례를 선정하였다.

사례 1. 암반의 상태 - RMC=30, $\sigma_c=30\text{MPa}$, $m_i=30$

Table 9. Analyzed results of Hoek-Brown failure criterion for case 1

no.	GSI	m_b	s	a	σ_3	σ_{1f}
1	30	2.4626	0.0004	0.5	1.8	13.348
2					3.6	19.920
3					5.4	25.383
4					7.2	30.271

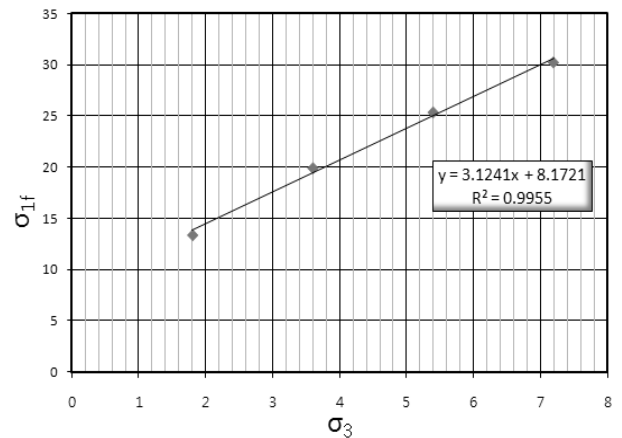


Fig. 11. Mohr-Coulomb failure criterion for case 1

사례 2. 암반의 상태 - RMC=40, $\sigma_c=30\text{MPa}$, $m_i=30$

사례 3. 암반의 상태 - RMC=50, $\sigma_c=50\text{MPa}$, $m_i=30$

사례 4. 암반의 상태 - RMC=60, $\sigma_c=50\text{MPa}$, $m_i=30$

사례 5. 암반의 상태 - RMC=70, $\sigma_c=80\text{MPa}$, $m_i=30$

4.1 Hoek-Brown 파괴기준식 이용방법

사례 1(RMC=30, $\sigma_c=30\text{MPa}$, $m_i=30$) 암반에 대한 강도정수 값을 산정하는 과정은 다음과 같다(GSI값은 RMC 값을 이용하는 식 (12)로부터 구함).

- ① $0 < \sigma_3 < 0.25\sigma_c$ 범위안의 임의의 σ_3 에 대하여 Hoek-Brown 파괴기준식을 이용하여 σ_{1f} 값을 구함.

- ② Mohr-Coulomb 파괴기준으로 변환하기 위하여 1)의 과정을 통해 구한 값을 이용하여 $\sigma_3 - \sigma_{1f}$ 대항 그래프 작성 및 회귀분석 실시.
- ③ 회귀분석 결과 절편값이 암반의 일축압축강도(σ_{cm})로 8.1721과 기울기(k) 3.1241을 구함.
- ④ $c = \frac{\sigma_{cm}}{2\sqrt{k}}$, $\phi = \arcsin\left(\frac{k-1}{k+1}\right)$ 식을 이용하여 점착력 및 내부마찰각을 구함.
- ⑤ 점착력(c) = 2.31MPa, 내부마찰각 = 31°

4.2 제안 추정식 이용방법

사례 1(RMC=30, $\alpha_c=30$ MPa, $m_i=30$) 암반에 대한 강도정수 값을 본 연구에서 제안한 추정식을 적용하여 산정하는 과정은 다음과 같다.

- ① RMC와 α_c 를 이용하여 a_c , b_c , a_ϕ , b_ϕ 를 구함.
- ② 식 (14), 식 (15)를 이용하여 점착력 및 내부마찰각을 구함.
- ③ 점착력(c)=2.17MPa, 내부마찰각=33°

4.3 강도정수 산정결과

이상과 같이 Hoek-Brown 파괴기준식 및 본 연구제안 추정식을 이용하여 5가지 사례에 대한 암반 강도정수 값을 산정한 결과는 Table 10과 같다.

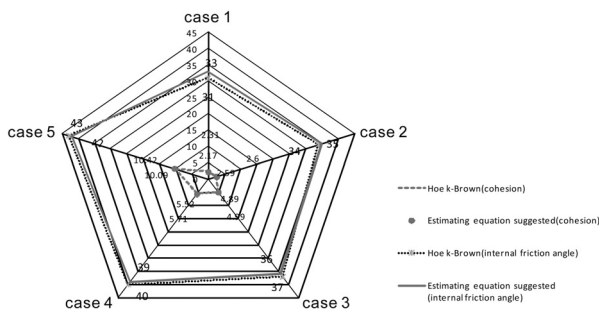


Fig. 12. Comparison of shear strength parameters for various case

Table 10. Analyzed results of shear strength parameters for various case

case	Use of Hoek-Brown equation		Use of estimating equation	
	cohesion (MPa)	internal friction angle (°)	cohesion (MPa)	internal friction angle (°)
1	2.31	31	2.17	33
2	2.60	34	2.59	35
3	4.89	37	4.99	36
4	5.52	40	5.71	39
5	10.09	43	10.42	42

시추주상도상에서 얻을 수 있는 일축압축강도, 암질 지수, 불연속면의 간격, 풍화상태의 4가지 요소를 정량화하여 합산한 결과를 사용함으로써 현장에서 손쉽게 강도정수를 추정할 수 있는 추정도표 및 추정식을 제안하였다. 이와 같은 일련의 일축압축강도 및 강도정수 값 산정과정을 정리하여 Fig. 13에 나타내었다.

4.4 검토 및 토의

암반 강도정수 값 산정사례에서 보는 바와 같이 Hoek-Brown 파괴기준식을 이용하여 강도정수 값을 산정할 경우 파괴기준 값의 산정, $\sigma_3 - \sigma_{1f}$ 관계 그래프 작성 및 회귀분석 실시, 절편값 및 기울기 산정 후 Mohr-Coulomb 파괴기준식에 대입 등 여러 단계를 거쳐야하

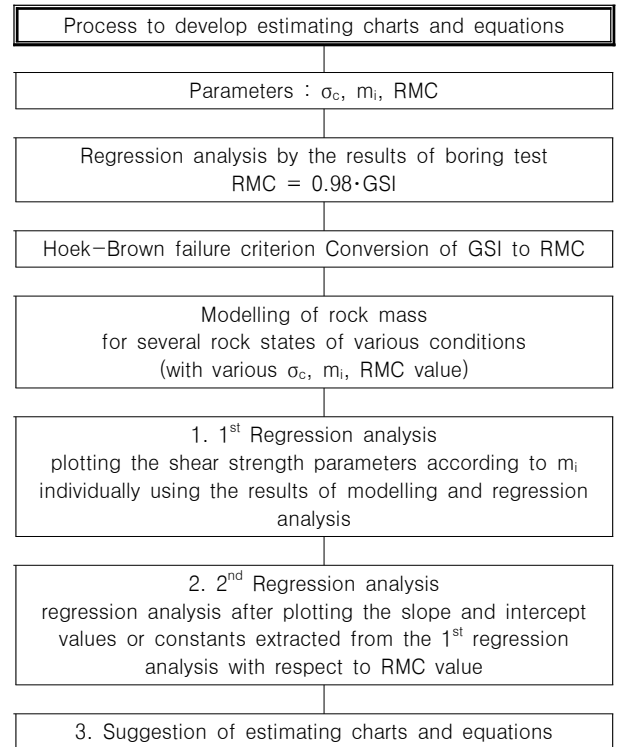


Fig. 13. Process to develop estimating charts and equations for strength parameters of rock masses

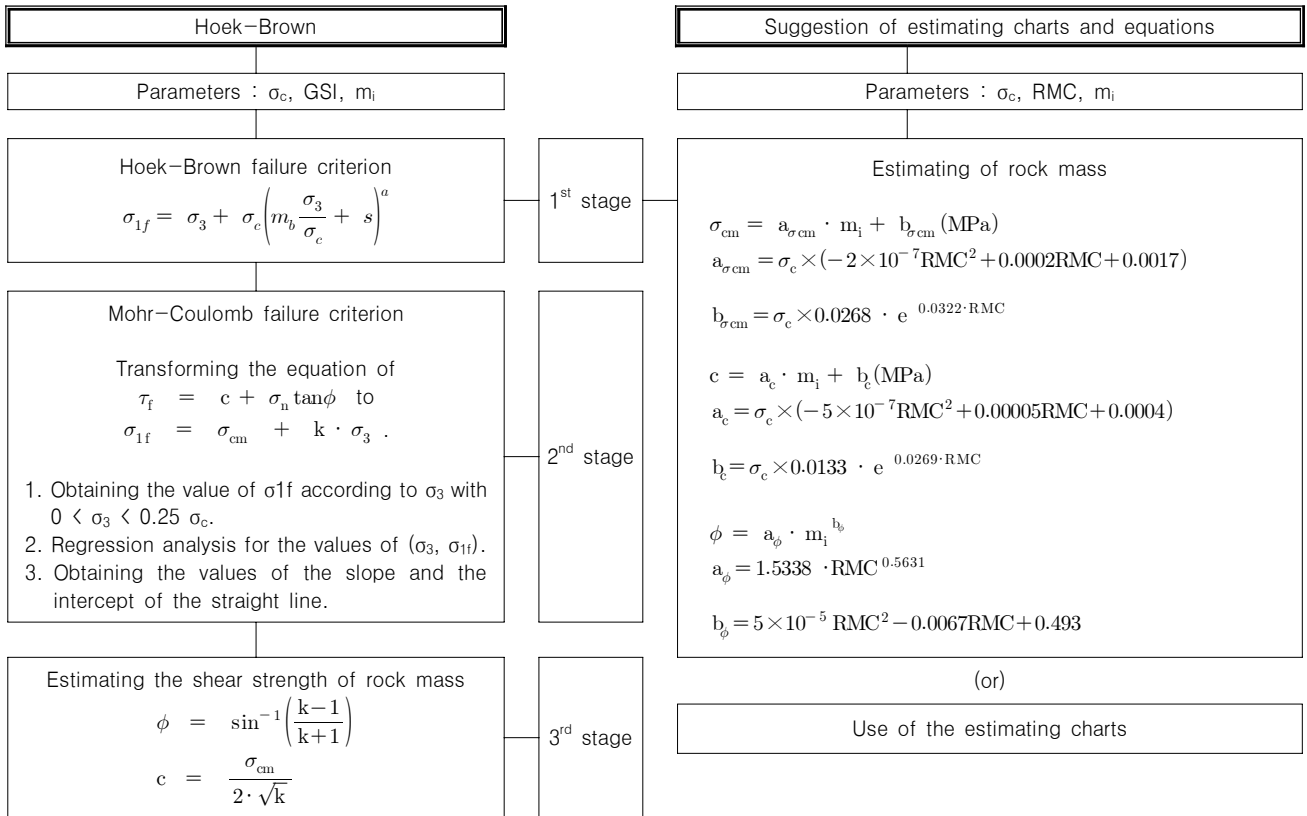


Fig. 14. Comparison between two methods to obtain the uniaxial compressive strength and shear strength parameters

는 불편함이 있고, 또한 파괴기준 값의 산정과정에서 기술자의 성향에 따른 산출 편차가 심한 지질강도지수 (GSI)를 이용하여, 암석계수(m_b , s , a)를 산출하여야 하는 단점이 있는 반면, 제안된 추정식의 경우에는 보다 객관화된 정량적 방법을 사용한 암반분류 값(RMC), 일축압축강도(σ_c), 암석계수(m_i)의 3가지 요소를 사용하여, 한번의 계산과정으로 강도정수를 추정할 수 있는 장점이 있다. 또한 추정도표를 사용하면 계산과정을 거치지 않고서도 빠른 시간에 암반의 강도정수를 추정할 수 있다. 두가지의 방법으로 계산된 강도정수 값을 비교해 보면 전단강도정수 값에서는 큰 차이가 발생하지 않음을 알 수 있으나, 본 연구에서 모사하지 못한 여러 가지 현장 조건이 있을 수 있으므로, 추후 역해석등을 통한 보완 연구가 필요할 것으로 판단된다. Hoek-Brown의 파괴기준과 제안 추정식 및 추정도표를 이용한 강도정수 산정방법을 비교하여 다음 Fig. 14에 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 암반 강도정수 산정방법의 불편함과 단점을 보완하기 위하여, 시추주상도상에서 간

편하게 구할 수 있는 암석의 일축압축강도(σ_c), RMC 값과 기존 표로부터 바로 구할 수 있는 암석계수(m_i)만을 이용하여 간편하게 암반의 강도정수 값을 추정할 수 있는 추정도표 및 추정식을 제안하였는데 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 암반의 일축압축강도(σ_{cm})는 암석계수(m_i), RMC 값, 암석의 일축압축강도(σ_c)에 따라 선형 직선식으로 나타낼 수 있으며 이를 구할 수 있는 도표 및 추정식을 제안하였다.
- (2) 암반의 점착력(c)은 암반의 일축압축강도(σ_{cm})와 같이 암석계수(m_i), RMC 값, 암석의 일축압축강도(σ_c)에 따라 선형 직선식으로 나타낼 수 있으며 이를 구할 수 있는 도표 및 추정식을 제안하였다.
- (3) 암반의 내부마찰각(ϕ)은 암석계수(m_i)의 지수식으로 나타낼 수 있으며 이를 구할 수 있는 도표 및 추정식을 제안하였다.

본 연구에서 제안한 강도정수 추정도표 및 추정식은 RMC, 암석의 일축압축강도, 암석계수의 3가지 요소를 이용하여 기존 방식보다 신속하고 간편하게 강도정

수 값을 추정할 수 있으므로, 설계 및 시공 시 참고자료로 사용할 수 있을 것으로 기대되며, RMC 값의 사용으로 기술자간의 평가치 편차를 상당부분 상쇄할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 기술자간의 효율적인 의사소통에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌 (References)

1. Barton, N., R Lien and J Lunde (1974), Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mech.*, Vol. 6, pp.183-236.
2. Bieniawski, Z. T. (1978), Determination of rock mass deformability : Experience from case histories, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 15, pp.237-247.
3. Bieniawski, Z. T. (1989), *Engineering Rock Mass Classification*, John Wiley & Sons, New York. pp.251.
4. Hoek, E. and E. T. Brown (1980), *Underground Excavation in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp.527
5. Hoek, E. and E. T. Brown (1997), Practical estimates of rock mass strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.34, No.8, pp.1165-1186.
6. Kim, M.K. (2010), *New Rock Mass Classification System and the Formular for Shear Strength Parameters based on Quantitative Value*, Ph.D. Thesis, Kyonggi University, pp.47-111
7. Kim, M.K. and Lee, Y.S. (2007), “A Study on the Rock Mass Classification of Korea”, *Proc., 33rd Conf. of Korean Society of Civil Engineers*, Kwangju, pp.888-891. (in Korean)
8. Kim, M.K. and Lee, Y.S. (2008), “A Suggestion of a New Rock Mass Classification System”, *Journal of the Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.24, No.11, pp.43-53. (in Korean)
9. Tsuchiya and Takashi (1984), *NA TM의設計プログラムの開発*, Japan Society of Civil Engineers, Doboku Gakkai Ronbunshu, pp.117-123.
10. Trueman, R. (1988), *An evaluation of strata support techniques in dual life gateroads*, Ph.D Thesis, Univ. of Wales, pp.15-58.

Received : February 10th, 2014

Revised : March 7th, 2014

Accepted : March 13th, 2014