

일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식에 내포된 접선점착력과 접선마찰각의 상관성

이연규*

Relationship between Tangential Cohesion and Friction Angle Implied in the Generalized Hoek-Brown Failure Criterion

Youn-Kyou Lee*

Abstract The generalized Hoek-Brown (H-B) function provides a unique failure condition for a jointed rock mass, in which the strength parameters of rock mass are deduced from the intact values by use of the *GSI* value. Since it is actually the only failure criterion which accounts for the rock mass conditions in a systematic manner, the generalized H-B criterion finds many applications to the various rock engineering projects. Its nonlinear character, however, limits more active usage of this criterion. Accordingly, many attempts have been made to understand the generalized H-B condition in the framework of the M-C function. This study presents the closed-form expression relating the tangential cohesion to the tangential friction angle, which is derived by the non-dimensional stress transformation of the generalized H-B criterion. By use of the derived equation, it is investigated how the relationship between the tangential cohesion and friction angle of the generalized H-B criterion varies with the quality of rock masses. When only the variation of *GSI* value is considered, it is found that the tangential friction angle decreases with the increase of *GSI*, while the tangential cohesion increases with *GSI* value.

Key words Generalized Hoek - Brown criterion, Mohr-Coulomb criterion, Tangential friction angle, Tangential cohesion

초 록 일반화된 Hoek-Brown (H-B) 식은 절리성 현장암반에 적용되는 암반공학 고유의 파괴조건식이다. 이 파괴조건식에서는 현장암반의 *GSI* 값을 이용하여 무결암의 강도정수를 현장암반의 값으로 변환시킨다. 현장암반의 특성을 체계적으로 고려한 거의 유일한 암반파괴조건식이라는 측면에서 일반화된 H-B 파괴조건식은 적용 범위를 넓혀가고 있지만 비선형 함수라는 단점을 가지고 있다. 이에 따라 일반화된 H-B 식을 선형 Mohr-Coulomb (M-C) 파괴조건식의 틀로 이해하려는 연구들이 시도되고 있다. 이 연구에서는 일반화된 H-B 식에 응력무차원화 변환을 적용하여 접선점착력을 접선마찰각의 함수로 표현하는 명시적 관계식을 유도하였다. 유도된 관계식을 이용하여 암반 질의 변화에 따른 일반화된 H-B 식에 내포된 접선마찰각 - 접선점착력 변화 특성을 고찰하였다. *GSI* 값의 변화만을 고려한 경우 *GSI* 값의 증가에 따라 접선마찰각은 감소하고 접선점착력은 증가하는 경향을 보였다.

핵심어 일반화된 Hoek-Brown 식, Mohr-Coulomb 식, 접선마찰각, 접선점착력

1. 서 론

암석이나 흙과 같은 입상체(granular material)의 강도는 정수압의 크기 $p(= \sigma_{ii}/3)$ 뿐만 아니라 편차응력텐서의 2차 불변량 $J_2(= s_{ij}s_{ij}/2)$ 및 3차 불변량 $J_3(= s_{ij}s_{jk}s_{ki}/3)$ 으로 표시되는 Lode 각 (Davis & Selvadurai, 2002)의 변화에 영향을 받는다. 그러므로 암석의 파괴

Received: Sep. 12, 2014

Revised: Sep. 26, 2014

Accepted: Sep. 26, 2014

*Corresponding Author: Youn-Kyou Lee

Tel) +82634691864, Fax) +82634691861

E-Mail) kyoulee@kunsan.ac.kr

Department of Coastal Construction Engineering, Kunsan National University, Daehak-ro 558, Gunsan, Jeonbuk 573-701, Korea

조건식은 일반적으로 3개의 불변량 $I_1 (= 3p)$, J_2 , J_3 를 이용하여 표시할 수 있으며, Mohr-Coulomb (M-C) 식과 Hoek-Brown (H-B) 식이 그 대표적인 예이다. M-C 식에서는 파괴 시 J_2 의 값이 I_1 의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 반면 H-B 식에서는 J_2 와 I_1 의 관계가 비선형적이다. 여러 암종을 대상으로 한 실험실 삼축압축시험 결과는 파괴 시 $J_2 - I_1$ 의 관계가 일반적으로 비선형적이라는 사실을 잘 보여 준다(Hoek & Brown, 1980).

H-B 식은 본래 많은 절리가 혼재되어 있어 절리의 방향성을 무시할 수 있는 등방성 경암에 적합한 파괴조건식으로 개발되었다. 그 후 연약 암반이나 이방성 절리 암반에 대한 적용성을 높이기 위해 여러 번의 개정과정을 거쳐 최근의 일반화된 H-B 식(G-H-B, generalized Hoek-Brown criteria, Hoek et al., 2002)의 형태로 발전하였다. H-B 식의 개발 역사는 Hoek & Marinos(2007)에 잘 요약되어 있다.

시험결과에 대한 적합도 측면에서 H-B 식이 선형 M-C 식에 비해 상대적으로 우수하지만 암반공학적 수치해석 과정에서는 M-C 파괴조건식이 여전히 많이 활용되고 있다. 이는 M-C 식의 간편성뿐만 아니라 관습적으로 연구자들과 현장 실무자들이 암석이나 암반의 강도를 점착력(c , cohesion)과 내부마찰각(ϕ , internal friction angle)으로 이해하는데 익숙하기 때문이다. 이에 따라 1990년 초반부터 H-B 식을 M-C 식의 관점에서 활용하려는 연구가 시도되었다. Hoek(1990)는 여러 조건에서 H-B 식의 순간 점선마찰각(ϕ_i)과 점선점착력(c_i)을 계산하는 방법을 제시하였다. Hoek et al.(2002)는 일반화된 H-B 곡선과 M-C 직선 사이의 면적 균형을 고려하여 해석영역 전체를 대표하는 일반화된 H-B 암반의 평균 마찰각과 점착력을 구하는 관계식을 제안하였다. 최근 국내에서도 비선형 파괴함수에 내포된 점선 M-C 강도정수의 의미를 파악하려는 연구들이 수행되고 있다(Deb & Choi, 2005, Lee & Choi, 2012, Lee & Choi, 2013). Lee & Choi(2012)에서는 일반화된 H-B 식의 점선마찰각과 점선점착력을 응력불변량의 함수로 표시하였고, Lee & Choi(2013)에서는 중간주응력을 고려하는 비선형 파괴함수의 점선마찰각과 점선점착력의 중간주응력 의존성이 연구되었다. 또한 Lee(2014)는 응력 무차원화 변환을 이용하여 H-B 식의 명시적 Mohr 파괴포락선을 유도하였다.

선형 M-C 파괴조건식 관점에서 비선형 H-B 파괴조건식의 활용도를 높이기 위해서는 H-B 식에 내포된 $c_i - \phi_i$ 의 상관성을 체계적으로 이해할 필요가 있다. 예를 들어 H-B 식의 $c_i - \phi_i$ 변환 관계식이 존재하면 극한 해석(limit analysis)의 상계해(upper bound solution)를

활용하여 H-B 암반의 대표 점착력과 마찰각을 추정하는 것이 가능하다(Yang & Lin, 2005, Yang & Lin, 2006).

H-B 암반의 파괴포락선에서 수직응력과 전단응력은 일대일 대응관계에 있으므로 주어진 H-B 강도정수에 대해 점선점착력은 점선마찰각($0 \leq \phi_i \leq 90^\circ$)을 단일 변수로 하는 함수로 표현할 수 있음을 직관적으로 알 수 있다. Balmer(1952)의 방법을 이용하면 점착력과 마찰각을 각각 최소주응력 σ_3 의 함수로 표현하는 것이 가능하다. 그러나 이 경우 $c_i - \phi_i$ 관계는 σ_3 가 매개변수이므로 점선점착력을 직접 점선마찰각의 함수로 표현하는 것이 어렵다.

이 연구에서는 매개변수의 도움을 받지 않고 일반화된 H-B 식의 점선점착력을 점선마찰각의 함수로 직접 표현하는 관계식을 유도하였다. Yang & Lin(2005)와 Yang & Lin(2006) 역시 이 관계식을 제시하였으나 결과 식 외에 유도과정은 소개하지 않았다. 이 연구에서는 파괴조건식의 응력무차원화 변환을 활용하여 일반화된 H-B 식의 점선점착력을 점선마찰각의 함수로 변환하는 관계식을 간단히 유도하는 독창적인 절차를 제시하였다. 유도된 관계식의 정확성을 검증한 후 결과식을 이용하여 GSI 지수(Hoek et al., 1995) 값의 변화에 따른 $c_i - \phi_i$ 관계의 변화특성을 고찰하였다.

2. 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식

일반화된 H-B 파괴조건식(Hoek et al., 2002)에서는 파괴 시 암반에 작용하는 최소주응력 σ_3 와 최대주응력 σ_1 의 관계를 다음과 같은 비선형 함수로 가정한다.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{ci}} = \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

여기서 σ_{ci} 는 무결암의 일축압축강도이고 암반의 강도정수 m_b , s , a 는 GSI 지수를 이용하여 다음의 경험식으로부터 결정된다.

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (2a)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (2b)$$

$$a = 0.5 + (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})/6 \quad (2c)$$

여기서 m_i 는 무결암의 m 값이며 D 은 암반교란 지수이다. D 는 발파손상과 응력이완에 의한 암반의 교란정도를 지시하는 상수로서 교란을 받지 않은 신선한 암반의 경우 값이 0이며 심하게 교란된 암반의 경우 값이 1이다.

$a = 0.5$ 인 경우 즉, $GSI = 100$ 인 경우 식 (1)은 본래의 H-B 식 (Hoek & Brown, 1980)과 동일하다. GSI 값의 범위는 10 ~ 100 으로서 10은 지극히 불량한 암반을 의미하며 100은 무결암을 나타낸다. 그러므로 이전의 개정 식들(Hoek & Brown, 1988, Hoek et al., 1995)은 양호한 암반과 불량한 암반을 구분하여 적용조건을 설정한 것과 달리 일반화된 H-B 식은 연약암반을 포함한 전체 암질 범위에 적용할 수 있는 암반 파괴조건식이다.

3. 일반화된 H-B 식의 접선마찰력 - 접선점착력 관계식

3.1 일반화된 H-B 식의 응력무차원화 변환

Londe(1988)는 $a = 0.5$ 인 H-B 식이 응력무차원화 변환을 통해 모든 암종에 적용할 수 있는 단일 파괴조건식으로 변환될 수 있음을 보였다. 이 연구에서는 Londe의 응력무차원화 변환과 유사한 변환과정을 거쳐 일반화된 H-B 식을 무차원화 시켰다. 여기에서 적용한 최대 및 최소 주응력 σ_1 과 σ_3 , 전단응력 τ 의 무차원화 관계식은 다음과 같다.

$$P_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b}; \quad P_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b}; \quad Q = \frac{\tau}{\sigma_{ci}} \quad (3)$$

무차원 응력성분 P_1 와 P_3 를 이용하면 일반화된 H-B 식 (1)은 다음과 같이 변환된다.

$$\xi = (m_b P_3)^a \quad \text{또는} \quad P_3 = \frac{1}{m_b} \xi^{1/a} \quad (4)$$

여기서

$$\xi = P_1 - P_3 \quad (5)$$

$a = 0.5$ 인 H-B 식의 경우 무차원화 변환을 통해 강도정수들이 겹으로 드러나지 않는 단일 파괴조건식을 유도하는 것이 가능하다(Londe, 1988, Lee, 2014). 그러나 일반화된 H-B 식의 무차원 변환 결과식 (4)은 강도정수 m_b 와 s 를 포함하므로 암질에 따라 무차원 파괴함수의 형태가 달라진다는 것을 예상할 수 있다.

3.2 무차원 Mohr 포락선과 접선 강도정수 관계

Fig. 1은 앞 절에서 정의한 응력무차원화 변환에 따라 $P-Q$ 평면에 도시한 일반화된 H-B 암반의 Mohr 원을 보여준다. 일반화된 H-B 식을 만족하는 임의의 ξ 값을 선택하면 이 값에 대응되는 무차원 Mohr 원의 지름과 원점으로부터의 위치가 식 (4)에 의해 결정된다. ξ 의 변화에 따른 일련의 Mohr 원에 공통으로 접하는 곡선이 일반화된 H-B 식의 무차원 $P-Q$ 관계식 즉, 무차원 Mohr 파괴포락선이 된다. 이때 무차원 파괴포락선은 원점을 지나는 포물선 형태이다.

Fig. 1에 도시한 무차원 Mohr 원의 방정식 다음과 같다.

$$P^2 - \left(\frac{2}{m_b} \xi^{\frac{1}{a}} + \xi \right) P + \frac{1}{m_b^2} \xi^{\frac{2}{a}} + \frac{1}{m_b} \xi^{\frac{a+1}{a}} + Q^2 = 0 \quad (6)$$

식 (6)을 ξ 로 미분하면 무차원 Mohr 파괴포락선과 무차원 Mohr원의 접점 A에서 P 값 즉, P_A 가 다음과 같이 ξ 의 함수로 표시됨을 알 수 있다.

$$P_A = \frac{2\xi^{(2-a)/a} + m_b(a+1)\xi^{1/a}}{2m_b\xi^{(1-a)/a} + m_b^2 a} \quad (7)$$

한편 접선마찰각 ϕ_i 와 ξ 의 관계식은

$$\sin\phi_i = \frac{\overline{MP_A}}{\overline{MA}} = \frac{m_b a}{2\xi^{(1-a)/a} + m_b a} \quad (8)$$

또는

$$\xi = \left[\frac{m_b a (1 - \sin\phi_i)}{2 \sin\phi_i} \right]^{a/(1-a)} \quad (9)$$

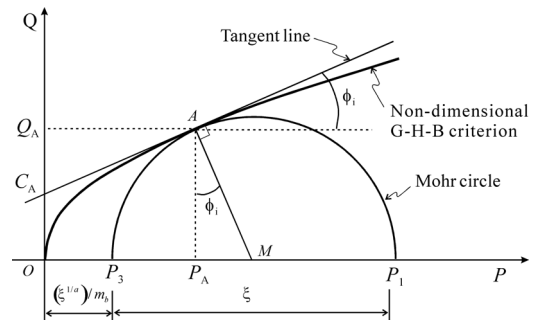


Fig. 1. Generalized H-B criterion in the non-dimensional stress space

으로 표시할 수 있다.

그러므로 무차원 Mohr 파괴포락선과 무차원 Mohr 원의 접점 A의 좌표값 P_A 와 Q_A 는 각각 다음과 같이 ϕ_i 의 함수로 표시하는 것이 가능하다.

$$P_A = \frac{1}{m_b} \left[\frac{m_b a(1 - \sin \phi_i)}{2 \sin \phi_i} \right]^{1/(1-a)} \left[1 + \frac{\sin \phi_i}{a} \right] \quad (10)$$

$$Q_A = \frac{\cos \phi_i}{2} \left[\frac{m a(1 - \sin \phi_i)}{2 \sin \phi_i} \right]^{a/(1-a)} \quad (11)$$

이때

$$\frac{\sigma}{\sigma_{ci}} = P_A - \frac{s}{m}; \quad \frac{\tau}{\sigma_{ci}} = Q_A \quad (12)$$

이므로 접선 M-C 식 $c_i = \tau - \sigma \tan \phi_i$ 을 고려하면 접선 점착력 c_i 와 접선마찰각 ϕ_i 사이의 직접 변환 관계식이 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{c_i}{\sigma_c} = \frac{\cos \phi_i}{2s^a} \left[\frac{m_b a(1 - \sin \phi_i)}{2 \sin \phi_i} \right]^{a/(1-a)} + \frac{s^{(1-a)} \tan \phi_i}{m_b} - \frac{\tan \phi_i}{m_b s^a} \left[\frac{m_b a(1 - \sin \phi_i)}{2 \sin \phi_i} \right]^{1/(1-a)} \left[1 + \frac{\sin \phi_i}{a} \right] \quad (13)$$

여기서 σ_c 는 일반화된 H-B 암반의 일축압축강도로서 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_c = \sigma_{ci} s^a \quad (14)$$

$a=0.5$ 인 경우 식 (13)은 다음과 같이 단순화 된다.

$$\frac{c_i}{\sigma_c} = \frac{m_b(1 - \sin \phi_i)^2}{8\sqrt{s} \sin(2\phi_i)} + \frac{\sqrt{s} \tan \phi_i}{m_b} \quad (15)$$

일반화된 H-B 식의 경우 $c_i/\sigma_c - \phi_i$ 의 관계가 암반의 양호도를 반영하고 있음을 식 (13)와 (15)은 잘 보여준다. 반면에 M-C 파괴조건식의 경우 $c/\sigma_c - \phi$ 관계식은

$$\frac{c}{\sigma_c} = \frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi} \quad (16)$$

이므로 암반의 상태에 영향을 받지 않고 일정한 형태를 갖는다.

4. 암질 변화에 따른 접선마찰각 - 접선점착력의 상관성 변화특성 고찰

4.1 접선마찰각 - 접선점착력 관계식의 검증

일반화된 H-B 식은 파괴 시 최소주응력 σ_3 과 최대주응력 σ_1 의 관계식으로 제시되었지만 대응되는 명시적 Mohr 파괴포락선 즉, $\tau - \sigma$ 관계식을 구하려는 노력도 시도되고 있다. 그러나 아직까지 일반적인 경우에 적용되는 일반화된 H-B 식의 명시적 Mohr 파괴포락선은 보고되지 않고 있으며 $GSI=100$ 와 $D=0$ 인 경우 즉, $a=0.5$ 인 경우에 대한 명시적 Mohr 파괴포락선만이 문헌에 보고되고 있다(Hoek, 1983, Ucar, 1986, Lee, 2014).

이 연구에서는 Lee(2014)가 제시한 절차에 따라 $\sigma_{ci} = 90$ MPa, $m_i = 10$, $GSI=100$, $D=0.0$ 인 암반의 Mohr 파괴포락선을 구하고 그 과정에서 계산된 접선점착력을 식 (13)을 이용한 결과와 비교하였다. Table 1의 가장 오른쪽 열에 제시한 접선점착력 값들은 3번째 열의 접선마찰각을 입력자료로 이용하여 식 (13)으로 계산한 결과이다. 계산된 접선점착력은 명시적 Mohr 파괴포락

Table 1. Verification of $\phi_i - c_i$ relationship for a generalized H-B rock with $\sigma_{ci} = 90$ MPa, $m_i = 10$, $GSI = 100$ and $D = 0.0$

σ (MPa)	Shear strength and tangential M-C strength parameters (Lee, 2014)			cohesion by Eq. (13)
	τ (MPa)	ϕ_i (°)	c_i (MPa)	c_i (MPa)
-8.0	3.334	67.948	23.083	23.083
32.0	48.974	39.693	22.413	22.413
72.0	78.135	33.136	31.135	31.135
112.0	102.267	29.314	39.381	39.381
152.0	123.469	26.667	47.131	47.131
192.0	142.661	24.674	54.458	54.458
232.0	160.350	23.094	61.425	61.425

Table 2. Values of tangential M-C parameters giving the identical uniaxial compression strength for both the M-C and generalized H-B criterion ($D=0.0$)

GSI	$m_i = 10.0$		$m_i = 20.0$		$m_i = 30.0$	
	$\phi_i (^\circ)$	c_i/σ_c	$\phi_i (^\circ)$	c_i/σ_c	$\phi_i (^\circ)$	c_i/σ_c
20	64.177	0.115	71.342	0.082	74.653	0.067
40	62.412	0.123	70.005	0.088	73.534	0.072
60	57.771	0.144	66.424	0.104	70.521	0.086
80	52.000	0.172	61.816	0.126	66.593	0.104
100	45.585	0.204	56.443	0.151	61.928	0.125

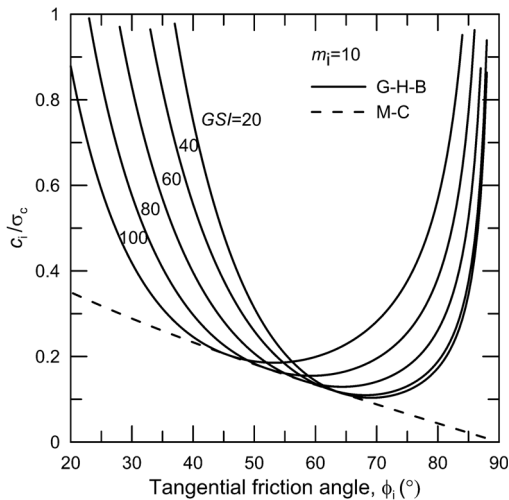


Fig. 2. Tangential cohesion - friction angle relationships for different rock conditions ($m_i = 10.0$)

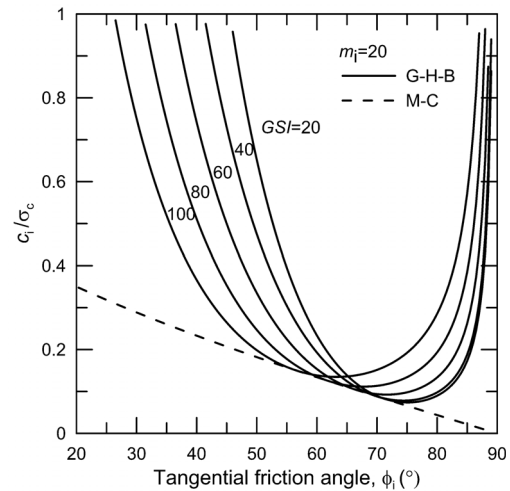


Fig. 3. Tangential cohesion - friction angle relationships for different rock conditions ($m_i = 20.0$)

선 계산과정에서 얻는 4번째 열의 값들과 정확히 일치하고 있음을 잘 보여준다.

4.2 GSI 값에 따른 접선점착력 - 접선마찰각 관계의 변화 특성

Hoek et al.(1995)에 의해 제안된 GSI 지수는 일반화된 H-B 파괴기준을 따르는 암반의 강도정수를 결정하는 기본 입력자료로서 실험실 강도시험 결과와 현장 암반의 강도정수를 연결하는 매개 역할을 한다. GSI 값의 범위는 10~100이며 낮은 값일수록 암반의 상태가 나빠짐을 의미한다. 지하수 조건과 지압조건을 배제할 경우, 즉 가장 유리한 지하수 상태와 지압조건을 가정할 경우 기존의 대표적 암반분류 체계인 RMR 및 Q 지수와 GSI 지수는 양호한 상관관계를 나타내는 것으로 알려져 있다(Hoek et al, 1995).

이 연구에서는 GSI 지수로 암반의 양호성을 표현하

는 것이 가능하다는 가정 하에 식 (13)을 이용하여 GSI 지수의 변화에 따른 일반화된 H-B 암반의 접선마찰각 - 접선점착력 상관관계 변화특성을 고찰하였다. 편암, 사암, 화강암을 각각 대표하는 3개의 m_i 값 10.0, 20.0, 30.0을 가정하였고, 비교란 상태의 암반 즉, $D=0.0$ 을 가정하였다.

Fig. 2 ~ Fig. 4는 3가지 m_i 값에 대해 각각 5가지 GSI 값 즉, 20, 40, 60, 80, 100 을 가정한 후 관계식 (13)을 도시한 것이다. 그림에 세로축은 암반의 일축압축강도 σ_c 로 정규화한 접선점착력이며 가로축은 접선마찰각이다. 비교를 위해 일반화된 H-B 암반과 동일한 일축압축강도를 가정한 M-C 파괴함수의 점착력 - 마찰각 관계식 (16)도 함께 도시하였다. 일반화된 H-B 암반의 접선점착력이 ϕ_i 의 증가에 따라 감소하다 다시 증가하는 현상은 비선형 Mohr 파괴포락선 상의 점접 위치에 따라 접선의 수직축 절편값이 달라지는 특성이 반영된 것이다.

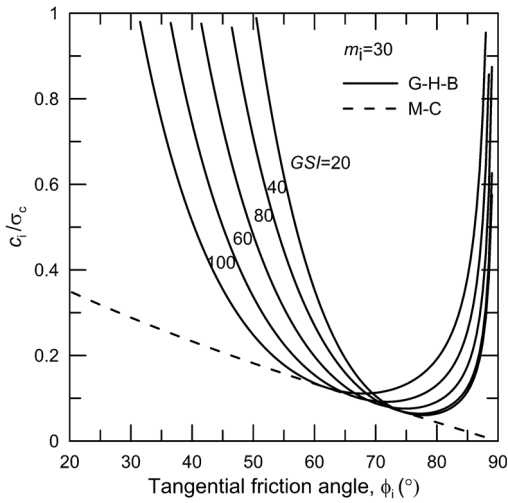


Fig. 4. Tangential cohesion - friction angle relationships for different rock conditions ($m_i = 30.0$)

동일한 GSI 값을 갖는 암반에서는 m_i 가 증가할수록 특정 ϕ_i 에 해당하는 c_i/σ_c 값은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 m_i 가 증가할수록 U자 형태를 보이는 접선마찰각 - 접선점착력 곡선의 폭이 좁아지는 것으로 나타났다. 이는 파괴포락선의 경사가 급해짐을 의미한다. 이러한 접선마찰각 - 접선점착력 곡선의 변화 특성은 일반적으로 m_i 가 마찰각과 상관성이 크다는 사실을 잘 보여준다. 한편 동일한 m_i 값을 갖는 암반을 가정할 경우 GSI 값이 증가할수록 접선마찰각은 감소하고 접선점착력은 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 2 ~ Fig. 4는 또한 일반화된 H-B 식의 접선마찰각 - 접선점착력 곡선이 M-C 파괴조건식의 마찰각 - 점착력 곡선과 접하면서 M-C 식의 마찰각 - 점착력 곡선 위쪽에 위치한다는 것을 보여준다. 각 경우 접점의 ϕ_i 값과 c_i/σ_c 을 Table 2에 제시하였다. M-C 암반과 일반화된 H-B 암반이 동일한 일축압축강도 $\sigma_c = \sigma_{ci} s^a$ 를 갖는다고 가정했을 때 접점에 해당하는 마찰각과 점착력은 일반화된 H-B 암반의 접선 등가마찰각과 등가점착력을 의미한다. GSI 값의 증가에 따라 이 등가마찰각은 감소하고 등가점착력은 증가하는 경향을 보여준다.

5. 요약 및 결론

무결암의 강도는 절리, 균열, 층리 등과 같은 역학적 결함을 포함하는 현장 암반의 강도와 일반적으로 큰 차

이를 보인다. 그러므로 무결암을 대상으로 한 실험실 시험을 통해 결정된 파괴조건식의 강도정수는 반드시 현장조건을 반영하는 값으로 변환되어야 한다. 암반강도 평가를 목적으로 개발된 경험적 파괴조건식인 일반화된 H-B 파괴조건식에서는 암반분류 체계의 일종인 GSI 지수 값을 활용하여 현장암반의 강도정수를 결정한다. 1980년에 제안된 H-B 파괴조건식의 가장 최근 개정식인 일반화된 H-B 식은 현장 암반조건을 잘 반영시킬 수 있는 실용적 파괴조건식으로서 최근 적용범위를 넓혀가고 있지만 비선형 파괴함수라는 단점도 무시할 수 없다.

반면에 M-C 파괴조건식은 사용이 간편한 선형 파괴조건식이지만 강도정수인 점착력과 마찰각을 현장 암반의 조건으로 환산하는 체계적인 방법이 존재하지 않으며 과도한 인장강도를 예측하는 단점이 있다. 그러나 여전히 많은 암반공학 실무자들은 암반의 강도를 점착력과 마찰각으로 평가하려는 경향이 있고 많은 암반공학 소프트웨어들도 M-C 식을 채택하고 있다. 이러한 경향은 사면해석의 경우에 특히 두드러진다. 따라서 현장암반 조건의 반영에 유리한 일반화된 H-B 식의 활용성을 높이기 위해서는 이 파괴조건식을 M-C식의 틀로 이해할 필요가 있다.

이러한 목적의 하나로 이 연구에서는 일반화된 H-B 식의 접선마찰각 - 접선점착력 변환 관계식을 독창적인 응력무차원화 변환방식을 통해 유도하고 정확성을 검증하였다. 유도된 관계식을 이용하면 주어진 강도정수 m_i , σ_{ci} , D 와 GSI 지수를 이용하여 매개변수 없이 접선점착력을 접선마찰각의 함수로 표현하는 것이 가능하다. m_i 와 GSI 지수 값의 변화에 따른 변환 관계식의 변화특성을 분석하였다. m_i 의 변화만을 고려한 경우 m_i 의 증가에 따라 ϕ_i 는 증가하며 c_i/σ_c 는 감소하는 경향을 보였다. GSI 지수의 변화만을 고려한 경우 GSI 의 증가에 따라 ϕ_i 는 감소하며 c_i/σ_c 는 증가하는 경향을 보였다.

이 연구에서 유도한 변환 관계식은 다양한 암반공학 적 문제 해결에 응용될 수 있을 것으로 예상된다. 예를 들어 H-B 암반사면의 한계해석에서 상계해(upper bound solution)의 최소화를 통해 H-B 암반의 등가마찰각을 결정하는 것이 가능해진다. 일반적으로 상계해는 점착력과 마찰각의 함수로 표시되므로 이 연구에서 제시한 관계식을 이용하면 상계해를 마찰각만의 함수로 변환시킬 수 있고, 이 함수를 최소화하는 마찰각을 탐색하여 암반의 등가마찰각을 구할 수 있다. 제시된 변환 관계식의 암반공학 적 응용 사례는 추후 연구를 통해 발표할 예정이다.

사 사

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A1A2013261).

Reference

- Balmer, G., 1952, A general analytical solution for Mohr's envelope, Proc. ASTM, Vol. 52, pp. 1260-1271.
- Davis, R.O. and Sevadurai, A.P.S., 2002, Plasticity and Geomechanics, Cambridge University Press.
- Deb, D. and Choi, S.O., 2005, Comparison between direct and indirect implementation of generalized Hoek and Brown failure criterion in numerical analysis procedure, J. Korean Soc. Rock Mech. (Tunnel and Undergr. Space), Vol. 15(3), pp. 228-235.
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1980, Underground Excavations in Rock, London: Insti. Min. Metall.
- Hoek, E., 1983, Strength of jointed rock masses, Geotechnique, Vol. 33(3), pp. 187-223.
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1988, The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update, Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp., Univ. of Toronto, pp. 31-38.
- Hoek, E., 1990, Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 27(3), pp. 227-229.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F., 1995, Support of underground excavation in hard rock, A.A. Balkema.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B., 2002, Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition, Proc. NARM-TAC Conf., Toronto, Vol. 1, pp. 267-273.
- Hoek, E. and Marinos, P., 2007, A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion, Soils and Rocks, No. 2.
- Lee, Y.-K. and Choi, B.-H., 2012, Equivalent friction angle and cohesion of the generalized Hoek-Brown failure criterion in terms of stress invariants, J. Korean Soc. Rock Mech. (Tunnel & Undergr. Space), Vol. 22(6), pp. 462-470.
- Lee, Y.-K. and Choi, B.-H., 2013, Dependency of tangential friction angle and cohesion of non-linear failure criterion on the intermediate principal stress, J. Korean Soc. Rock Mech. (Tunnel & Undergr. Space), Vol. 23(3), pp. 219-227.
- Lee, Y.-K., 2014, Derivation of Mohr envelope of Hoek-Brown failure criterion using non-dimensional stress transformation, J. Korean Soc. Rock Mech. (Tunnel & Undergr. Space), Vol. 24(1), pp. 81-88.
- Londe, P., 1988, Discussion on the determination of the shear stress failure in rock masses, ASCE J. Geotech. Eng. Div., Vol. 14(3), pp. 374-376.
- Ucar, R., 1986, Determination of shear failure envelope in rock masses, J. Geotech. Eng. Div. ASCE, Vol. 122(3), pp. 303-315.
- Yang, X.-L. and Yin, J.-H., 2005, Upper bound solution for ultimate bearing capacity with a modified Hoek-Brown failure criterion, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 42, pp. 550-560.
- Yang, X.-L. and Yin, J.-H., 2006, Linear Mohr-Coulomb strength parameters from the non-linear Hoek-Brown rock masses, Int. J. Non-Linear Mech., Vol. 41, pp. 1000-1005.

이 연 규

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 063-469-1864
 E-mail: kyoulee@kunsan.ac.kr
 현재 군산대학교 해양과학대학 해양건설공학과 교수

