

응력무차원화 변환을 이용한 Hoek-Brown 파괴함수의 Mohr 파괴포락선 유도

이연규*

Derivation of Mohr Envelope of Hoek-Brown Failure Criterion Using Non-Dimensional Stress Transformation

Youn-Kyou Lee*

Abstract In the course of performing the stability analysis of rock structures, there are times when the strength of the Hoek-Brown rock mass needs to be understood in terms of the internal friction angle and cohesion. In this case, the original Hoek-Brown criterion, giving the relationship between σ_1 and σ_3 at failure, have to be transformed to the corresponding Mohr envelope. A new approach to derive the Mohr envelope of the Hoek-Brown criterion is suggested in this study. The new method is based on the Londe's transformation making the stress components dimensionless. The correctness of the derivation leading to the new τ - σ relationship is confirmed by comparing the calculation results with the Bray's solution through a verification example.

Key words Hoek-Brown failure criterion, Mohr envelope, non-dimensional stress, internal friction angle, cohesion

초 록 Hoek-Brown 파괴함수를 적용하여 암반구조물의 안정성 분석을 수행하는 경우 암반의 강도를 내부마찰각과 점착력을 이용하여 평가해야하는 경우가 있다. 이러한 경우 $\sigma_1 - \sigma_3$ 관계로 표시된 본래의 Hoek-Brown 함수는 수직응력 (σ)과 전단응력 (τ) 관계인 Mohr 파괴포락선으로 변환되어야 한다. 이 연구에서는 Hoek-Brown 파괴함수의 Mohr 파괴포락선을 구하는 새로운 방법을 제시하였다. 제시한 방법은 Londe (1988)가 제안한 응력무차원화 변환방법을 기초로 하였다. 검증 예제를 통해 새로 유도된 $\sigma - \tau$ 관계식이 Bray가 유도한 관계식과 정확히 일치한다는 것이 확인되었다.

핵심어 Hoek-Brown 파괴함수, Mohr 파괴포락선, 응력무차원화, 내부마찰각, 점착력

1. 서 론

Hoek & Brown (1980)에 의해 제안된 경험적 파괴함수인 Hoek-Brown (H-B) 파괴조건식은 Mohr-Coulomb (M-C) 식과 더불어 암석의 파괴기준식으로 널리 이용

되고 있다. H-B 파괴조건식은 제안된 이후 수차례 수정을 거쳐 다양한 조건의 암반에 적용할 수 있는 형태 (Hoek et al., 2002)로 발전하였고 수치해석에도 활발히 활용되고 있다 (Choi & Deb, 2005). H-B 파괴함수는 본래 파괴시 최소주응력 σ_3 와 최대주응력 σ_1 의 관계식으로 제안되었다. 그러나 많은 암반공학 관련 해석소프트웨어와 해석기법들이 M-C 파괴기준을 채용하고 있어 H-B 파괴함수를 M-C 파괴함수의 틀 안에서 활용해야 할 필요성이 제기되었다. 이를 위해 H-B 파괴함수를 파괴면에 작용하는 수직응력 (σ)과 전단응력 (τ)의 관계식 즉, Mohr 파괴포락선으로 전환하려는 노력들이 시도되었다. 다수의 Mohr원에 공통으로 접하는 파괴포락선을 구하는 일반적인 방법이 Balmer (1952)에 의해

Received: Jan. 24, 2014

Revised: Feb. 13, 2014

Accepted: Feb. 13, 2014

*Corresponding Author: Youn-Kyou Lee

Tel) +82634691864, Fax) +82634691861

E-Mail) kyoule@kunsan.ac.kr

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

제시되었으나 이를 H-B 함수에 적용할 경우 전단응력과 수직응력의 관계가 명시적이지 못하고 전단응력과 수직응력이 각각 σ_3 의 매개변수 함수로 표현되는 단점이 있다.

H-B 파괴함수의 명시적인 τ - σ 관계식이 Bray에 의해 처음으로 유도되어 Hoek (1983)에 의해 문헌에 보고되었지만 유도과정은 소개되지 않았다. 이 후 Ucar (1986)은 복잡한 미분방정식의 풀이과정을 거쳐 Bray의 결과와 근본적으로 동일한 τ - σ 관계식을 유도하였다. 이 후 Kumar (1998)는 순간 접선 내부마찰각 ϕ_i 을 매개변수로 하는 H-B 파괴함수의 τ - σ 관계식을 제시하기도 하였다. Kumar의 방법에서는 특정 σ 에 해당하는 ϕ_i 을 수치해석적으로 계산해야하는 단점이 있으므로 Bray나 Ucar의 방법에 비해 발전된 방법이라 할 수 없다. 최근 일반화된 H-B 파괴함수 (Hoek et al., 2002)의 명시적 τ - σ 관계식을 유도하려는 시도도 있으나 아직까지 성공적인 결과는 제시되지 못하고 있으며 단지 ϕ_i 을 매개변수로 하는 결과가 보고되었다 (Yang et al., 2004).

국내에서도 Lee (2007)은 Bray의 해를 횡등방성 암석의 강도예측에 활용하였다. 또한 Lee & Choi (2012)는 Balmer(1952)의 관계식을 응력불변량으로 표현하여 일반화된 H-B 함수의 접선내부마찰각과 접선점착력을 계산하는 방법을 제안하기도 하였다.

H-B 파괴함수의 τ - σ 관계식을 유도하는 과정은 순간 접선마찰각을 계산하는 과정을 수반한다. 또 계산된 접선마찰각을 이용하여 순간 접선점착력을 계산할 수 있다. 그러므로 H-B 파괴함수를 τ - σ 관계식으로 전환하는 것은 H-B 암석의 강도 특성을 M-C 파괴함수의 강도정수인 내부마찰각과 점착력으로 이해할 수 있다는 것을 의미한다.

이 연구에서는 Londe (1988)의 응력 무차원화 변환 관계식을 이용하여 H-B 파괴함수의 명시적인 τ - σ 관계식을 유도하는 새로운 접근법을 제시하였다. 제시된 방법을 통해 H-B 파괴함수의 σ_1 - σ_3 관계식을 τ - σ 관계식으로 변환하였다. 새로운 결과식을 이용한 검증예제를 통해 제안된 방법의 정확성을 검증하였다.

2. H-B 파괴함수

H-B 파괴함수는 Hoek & Brown (1980)에 의해 제안된 이 후 지금까지 널리 이용되고 있는 대표적인 비선형 암석파괴 기준식으로서 다음과 같이 표시된다.

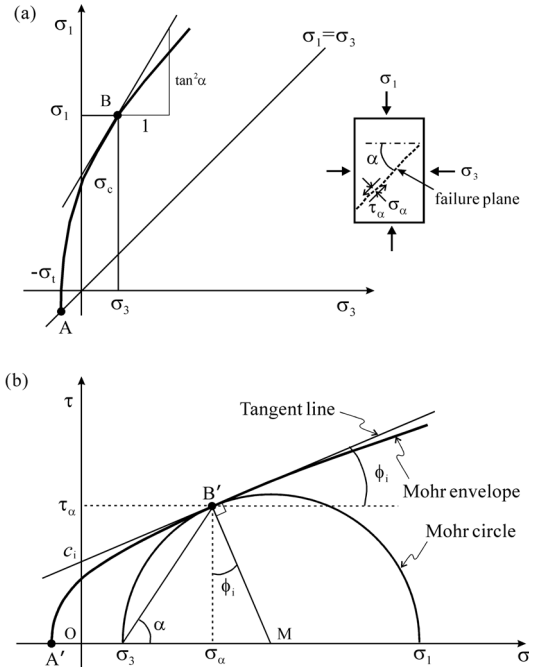


Fig. 1. Non-linear failure criterion in (a) σ_1 - σ_3 space and in (b) τ - σ space

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{0.5} \quad (1)$$

여기서 σ_1 과 σ_3 은 각각 파괴시 최대주응력과 최소주응력이고 σ_c 는 무결암의 일축압축강도이다. m 과 s 는 실험자료의 최적화를 통해 얻을 수 있는 경험적 강도정수이다.

식 (1)은 σ_1 - σ_3 평면에서 Fig. 1(a)와 같이 비선형곡선 형태로 도시된다. 그림에서 일축압축강도 σ_c 와 일축인장강도 σ_t 는 각각 다음과 같다.

$$\sigma_c = \sqrt{s} \sigma_{ci} \quad (2)$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{ci}}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (3)$$

점 A는 2축 인장강도를 나타내며 이 점에서 $\sigma_1 = \sigma_3 = -s\sigma_{ci}/m$ 이다. 따라서 H-B 파괴함수에서 최소주응력의 하한 값은 $-s\sigma_{ci}/m$ 이며, 취성암석의 경우 이 값은 인장강도 $-\sigma_t$ 와 거의 같다 (Hoek et al., 2002). 파괴면이 최소주응력 방향과 이루는 각을 α 라 할 때 점 B에서 접선의 기울기는 $\tan^2\alpha$ 이다.

식 (1)을 파괴면에 작용하는 수직응력 (σ)과 전단응력 (τ)의 관계로 표시하면 Fig. 1(b)와 같이 Mohr원에 공통으로 접하는 비선형 Mohr 파괴포락선이 된다. 파괴포락선 상의 임의의 점에서 접선의 기울기 각을 순간 접선마찰각 (instantaneous friction angle, ϕ_i)이라 하며 접선의 수직 절편값을 순간 접선점착력 (instantaneous cohesion, c_i)이라 한다. 그림에서 점 A'과 점 B는 각각 Fig. 1(a)의 점 A와 점 B에 대응된다.

3. H-B 파괴함수의 τ - σ 관계식

3.1 매개변수로 활용하는 τ - σ 관계식

다수의 Mohr원에 공통으로 접하는 파괴포락선을 구하는 일반적인 방법이 Balmer (1952)에 다음과 같이 제안되었다.

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \left(\frac{d\sigma_1/d\sigma_3 - 1}{d\sigma_1/d\sigma_3 + 1} \right) \quad (4)$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \frac{\sqrt{d\sigma_1/d\sigma_3}}{d\sigma_1/d\sigma_3 + 1} \quad (5)$$

H-B 파괴함수의 경우 $d\sigma_1/d\sigma_3$ 는 다음과 같다.

$$\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} = 1 + \frac{1}{2} m \frac{1}{\sqrt{m(\sigma_3/\sigma_c) + s}} \quad (6)$$

따라서 식 (4)과 식 (5)는 최소주응력 σ_3 의 함수로 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$\sigma = \frac{\sigma_c}{m} k + \frac{\sigma_c}{2} \sqrt{k} - \frac{m\sigma_c}{2} \frac{1}{4 + mk^{-1/2}} - \frac{s\sigma_c}{m} \quad (7)$$

$$\tau = \sigma_c \sqrt{k} \frac{\sqrt{4 + 2mk^{-1/2}}}{4 + mk^{-1/2}} \quad (8)$$

여기서

$$k = \frac{m\sigma_3}{\sigma_c} + s \quad (9)$$

$\sigma_3 \geq -\sigma_c s/m$ 이므로 식 (7)과 식 (8)에서 $k \geq 0$ 이다.

한편 $d\sigma_1/d\sigma_3$ 는 $\sigma_1 - \sigma_3$ 평면에서 H-B 파괴함수의 접

선기울기로서 순간마찰각 ϕ_i 혹은 파괴면의 경사각 α 를 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} = \tan^2 \alpha = \frac{1 + \sin \phi_i}{1 - \sin \phi_i} \quad (10)$$

따라서 순간 접선마찰각 ϕ_i 는

$$\phi_i = \sin^{-1} \left(\frac{mk^{-1/2}}{4 + mk^{-1/2}} \right) \quad (11)$$

이고 대응되는 순간 접선 점착력 c_i 는

$$c_i = \tau - \sigma \tan \phi_i \quad (12)$$

결과적으로 Balmer의 방법에 의해 H-B 파괴함수의 접선 M-C 강도정수 ϕ_i 와 c_i 를 구하기 위해서는 5개의 관계식 즉 식 (7)~(9)과 식 (11)~(12)이 필요하다. 여기서 5개의 관계식은 모두 최소주응력 σ_3 의 함수로 표시됨을 주목할 필요가 있다.

암반 불연속면 또는 사면 활동면의 미끄러짐 분석은 전통적으로 τ - σ 관계식으로 표시된 M-C 파괴함수를 적용하는 경우가 많다. 이 경우 미끄러짐 면에 작용하는 수직응력 σ 에 대응되는 전단강도 τ 의 계산이 필요하다. 그러나 식 (7)과 식 (8)로 제시된 τ - σ 관계는 σ_3 를 매개변수로 하는 함수이다. 또한 식 (4)에서 σ_3 를 σ 의 명시적 함수로 표시하는 것도 어렵다. 따라서 Balmer의 방법을 적용하여 H-B 암반의 전단강도를 계산하는 경우 주어진 σ 에 대응되는 τ 를 얻기 위해서는 수치해적 방법을 이용하여 식 (7)로부터 σ_3 를 근사적으로 계산해야 하는 불편함이 따른다.

3.2 τ - σ 의 명시적 관계식

영국 Imperial 대학의 John Bray는 τ 와 σ 의 명시적 함수 관계를 유도하였으며 그 결과식이 Hoek (1983)에 의해 다음과 같이 보고되었다.

$$\tau = (\cot \phi_i - \cos \phi_i) \frac{m\sigma_{ci}}{8} \quad (13a)$$

$$\phi_i = \tan^{-1} \left(4h \cos^2 \left(\frac{\pi}{6} + \frac{1}{3} \sin^{-1} h^{-3/2} \right) - 1 \right)^{-1/2} \quad (13b)$$

$$h = 1 + \frac{16(m\sigma + s\sigma_{ci})}{3m^2\sigma_{ci}} \quad (13c)$$

특정 σ 값이 주어지면 이에 대응되는 τ 값은 식 (13c), 식 (13b), 식 (13a)을 순차적으로 적용하여 구할 수 있다. 한편 순간 접선점착력 c_i 는 식 (12)을 이용하여 계산할 수 있다.

Bray의 결과식 (13)의 자세한 유도과정은 알려지지 않았으나 이 후 Ucar (1986)는 복잡한 미분방정식 풀이 과정을 거쳐 식 (13)과 근본적으로 동일한 결과식을 얻었다.

4. H-B 파괴함수의 $\tau-\sigma$ 관계식 유도를 위한 새로운 접근법

4.1 무차원 H-B 파괴함수

이 연구에서는 Londe (1988)가 제안한 응력 무차원화 변환을 이용하여 H-B 파괴함수의 $\tau-\sigma$ 관계식을 유도하는 새로운 방법을 제시하였다. Londe는 다음 관계식을 이용하여 σ_1 과 σ_3 를 무차원화 하였다.

$$P_1 = \frac{\sigma_1}{m\sigma_{ci}} + \frac{s}{m^2}, P_3 = \frac{\sigma_3}{m\sigma_{ci}} + \frac{s}{m^2} \tag{14}$$

한편 수직응력 σ 와 전단응력 τ 의 무차원화 관계식은 다음과 같다.

$$P = \frac{\sigma}{m\sigma_{ci}} + \frac{s}{m^2} \tag{15}$$

$$Q = \frac{\tau}{m\sigma_{ci}} \tag{16}$$

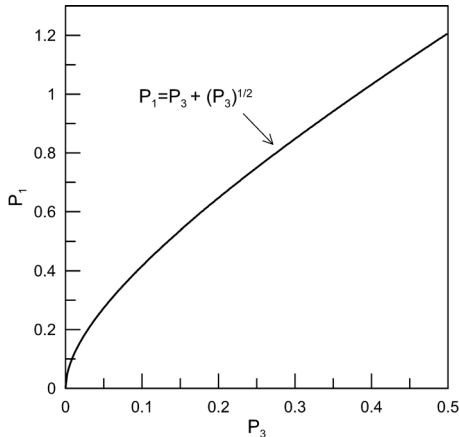


Fig. 2. H-B criterion in the transformed P_1-P_3 space

변환식 (14)을 적용하면 H-B 파괴함수식 (1)은 다음과 같이 변환된다.

$$P_1 = P_3 + \sqrt{P_3} \tag{17}$$

무차원화된 H-B 파괴함수식 (17)식은 강도정수 σ_{ci} , m , s 가 곱으로 드러나지 않는다. 그러므로 모든 암석의 H-B 파괴기준식은 유일한 파괴기준식 (17)로 변환시킬 수 있다. 식 (14)로부터 P_3 의 영역은 $P_3 \geq 0$ 이므로 무차원 H-B 파괴함수는 P_1-P_3 평면에서 Fig. 2와 같이 원점을 지나는 비선형 곡선으로 도시된다. Carranza-Torres & Fairhurst (1999)는 H-B 파괴함수의 이러한 무차원화가 암반구조물의 응력 및 변형해석을 매우 간편하게 해줄 수 있음을 보였다.

4.2 H-B 파괴함수의 파괴포락선 유도

무차원 최대주응력 P_1 과 최소주응력 P_3 으로 도시한 Mohr 원 M 에 접하는 무차원 파괴포락선 $f(P, Q) = 0$ 을 Fig. 3에 도시하였다. $f(P, Q) = 0$ 역시 모든 암석에 적용되는 유일한 파괴포락선이다. Mohr 원의 지름을 $P_1 - P_3 = \xi$ 이라 하면 식 (17)로부터 $P_3 = \xi^2$ 임을 알 수 있다. $dQ/dP = d\tau/d\sigma$ 이므로 접점 $C(P, Q)$ 에서 접선의 기울기각 ϕ_i 는 변환 전 $\tau-\sigma$ 평면에서의 접선 기울기각과 동일하다.

Mohr 원의 방정식은 다음과 같다.

$$\left[P - \left(\xi^2 + \frac{\xi}{2} \right) \right]^2 + Q^2 = \left(\frac{\xi}{2} \right)^2 \tag{18}$$

식 (18)을 ξ 에 대해 미분하면

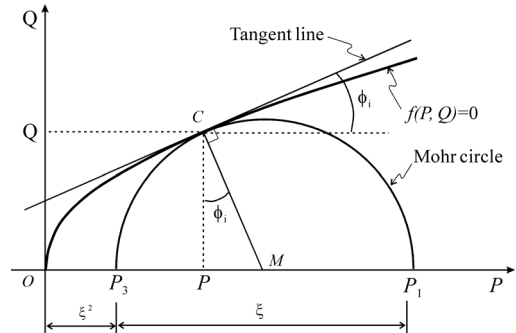


Fig. 3. Non-dimensional H-B failure envelope and Mohr circle

$$P = \frac{3\xi^2 + 4\xi^3}{1 + 4\xi} \quad (19)$$

이므로 접점 C에서 P값과 ξ의 관계를 다음 식으로 얻을 수 있다.

$$4\xi^3 + 3\xi^2 - 4P\xi - P = 0 \quad (20)$$

$P \geq 0$ 이므로 식 (20)은 3개의 실근을 가지며 그 중 ξ가 양수인 조건을 만족하는 근은 다음과 같다.

$$\xi = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\theta}{3}\right) \sqrt{\frac{16}{3}P + 1} - \frac{1}{4} \quad (21)$$

여기서

$$\theta = \cos^{-1} \left[-\left(\frac{16}{3}P + 1\right)^{-3/2} \right] \quad (22)$$

한편 Fig. 3에서 $\sin\phi_i = \overline{PM}/\overline{CM}$ 이므로 식 (19)를 이용하여 순간 접선마찰각에 대한 다음 관계식을 유도할 수 있다.

$$\sin\phi_i = \frac{(\xi^2 + d/2) - (3\xi^2 + 4\xi^3)/(1 + 4\xi)}{\xi/2} \quad (23)$$

$$\sin\phi_i = \frac{1}{4\xi + 1} \quad \text{또는} \quad \phi_i = \sin^{-1} \left(\frac{1}{4\xi + 1} \right) \quad (24)$$

또한 Fig. 3으로부터 무차원 전단강도 Q는 \overline{CP} 이므로 다음 식으로 표시된다.

$$Q = \frac{\xi}{2} \cos\phi_i \quad (25)$$

최종적으로 수직응력 σ에 대한 전단강도는 다음과 같다.

$$\tau = Q(m\sigma_{ci}) \quad (26)$$

요약하면 주어진 σ에 대한 전단강도 τ는 식 (15), 식 (21), 식 (22), 식 (24) ~ 식 (26)을 순차적으로 적용하여 구할 수 있다.

이상에서 설명한 관계식을 이용하여 계산한 H-B 파괴함수의 τ-σ 관계는 Bray 및 Ucar의 결과식을 이용한 것과 정확히 일치하는 것으로 확인되었다. 그러나 이 연구에서 발견한 τ-σ 관계의 유도과정은 Ucar의 경우에 비해 훨씬 간편하다는 장점이 있다.

5. 검증 예제

H-B 파괴함수의 강도정수 $\sigma_{ci} = 90\text{MPa}$, $m = 10$, $s = 1$ 을 가정한 후 이 연구에서 유도한 식 (15), 식 (21), 식 (22), 식 (24) ~ 식 (26)을 이용하여 σ의 변화에 따른 전단강도 τ를 계산하고 그 결과를 Bray의 식 (13)으로 계산한 결과와 비교하였다. 순간 접선점찰력 c_i 는 식 (12)을 이용하여 계산하였다. 비교 결과를 Table 1에 제시하였다. 두 방법에 의한 결과는 정확히 일치함을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 강도지수 m의 값이 각각 2, 6, 10, 14 일 때 H-B 파괴함수를 $\sigma_1 - \sigma_3$ 평면에 도시한 것이다. 각 곡선은 $\sigma_3 = -s\sigma_{ci}/m$ 일 때 2축인장 조건을 표시하는 직선 $\sigma_1 = \sigma_3$ 과 만난다. 즉, H-B 파괴함수가 정의되는 영역은 $\sigma_3 \geq -s\sigma_{ci}/m$ 이다. Hoek & Brown (1980)에 의하면 $m \gg 1$ 인 무결암 ($s = 1$)의 경우 m은 암석의 취성도 ($\sigma_c/|\sigma_t|$)를 대변하는 지수이다. Fig. 4에서 m의 값이 6 이상인 취성이 큰 암석의 경우 2축 인장강도 $\sigma_3 = -s\sigma_{ci}/m$ 와 일축인장강도 (곡선의 수평축 절편)는

Table 1. Variation of shear strength in H-B rock with $\sigma_{ci} = 90\text{MPa}$, $m = 10$ and $s = 1$

σ (MPa)	Solution by new procedure			Bray's solution		
	τ (MPa)	φ _i (°)	c _i (MPa)	τ	φ _i (°)	c _i (MPa)
-8.0	3.334	67.948	23.083	3.334	67.948	23.083
32.0	48.974	39.693	22.413	48.974	39.693	22.413
72.0	78.135	33.136	31.135	78.135	33.136	31.135
112.0	102.267	29.314	39.381	102.267	29.314	39.381
152.0	123.469	26.667	47.131	123.469	26.667	47.131
192.0	142.661	24.674	54.458	142.661	24.674	54.458
232.0	160.350	23.094	61.425	160.350	23.094	61.425

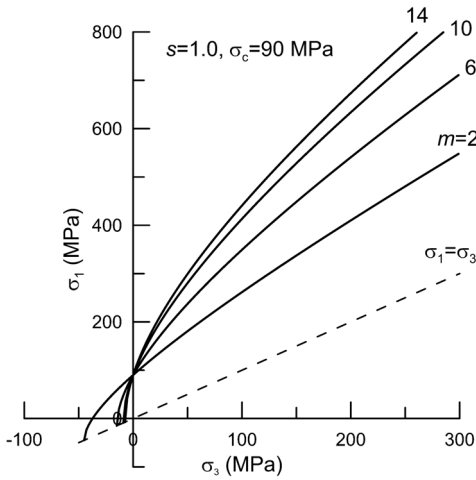


Fig. 4. H-B failure criterion depicted in $\sigma_1 - \sigma_3$ plane

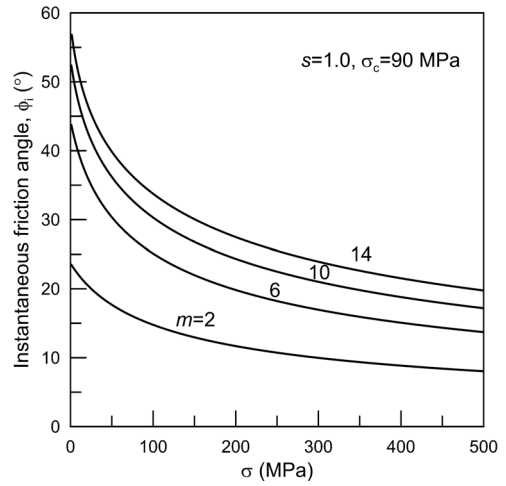


Fig. 6. Instantaneous friction angle of H-B criterion varying with normal stress

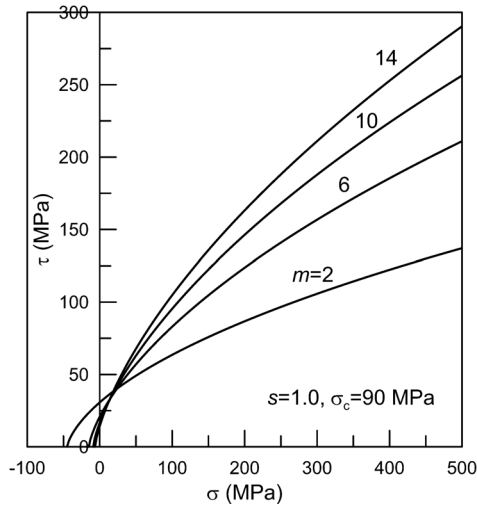


Fig. 5. H-B failure criterion depicted in $\tau - \sigma$ plane

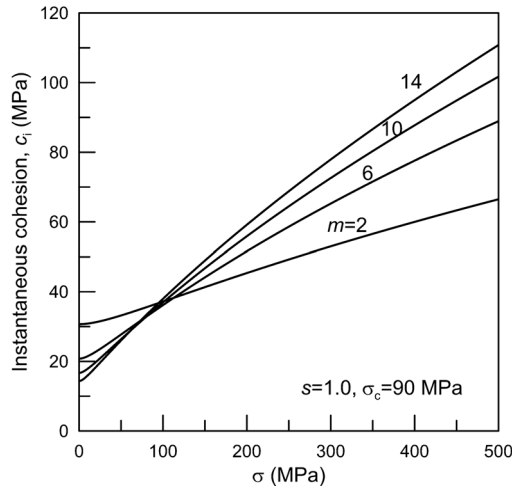


Fig. 7. Instantaneous cohesion of H-B failure criterion varying with normal stress

거의 동일하나 $m=2$ 경우와 같이 취성이 낮은 암석의 경우 두 인장강도의 차이가 커짐을 보여준다.

4절에서 제안한 방법을 적용하여 앞 단락에서 설명한 4개의 H-B 곡선에 대응되는 $\tau - \sigma$ 곡선을 계산하였고 이를 Fig. 5에 나타내었다. 또한 $\sigma \geq 0$ 구간에서 순간 접선마찰각 ϕ_i 의 변화곡선과 순간 접선점착력 c_i 의 변화곡선을 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 제시하였다. ϕ_i 는 식 (24)을 이용하여 계산되었으며 c_i 는 식 (12)로부터 계산되었다. m 의 값이 큰 암석일수록 ϕ_i 이 커지는 경향을 잘 보여준다. Fig. 5에서 관찰할 수 있듯이 파괴면에 작용하는 수직응력 (σ)의 증가에 따른 전단강도증가의 비

선형성은 m 값의 증가와 함께 커지므로 $\sigma=0$ 부근에서 c_i 값은 m 값이 작을수록 커지는 경향을 볼 수 있고 이 후 σ 가 증가하면 이러한 경향은 역전되는 특징을 관찰할 수 있다. 구간 $\sigma \geq 0$ 에서 ϕ_i 는 σ 의 증가와 함께 지수함수적으로 감소하는 특징을 나타내며 c_i 는 증가하는 특징을 보여준다. m 의 값이 클수록 σ 의 증가에 대한 ϕ_i 의 감소율은 커지며 c_i 의 증가율 역시 커지는 경향을 보여준다.

Fig. 8은 식 (21), 식 (22), 식 (24), 식 (25)을 이용하여 계산한 H-B 파괴함수의 무차원 Mohr 포락선을 도

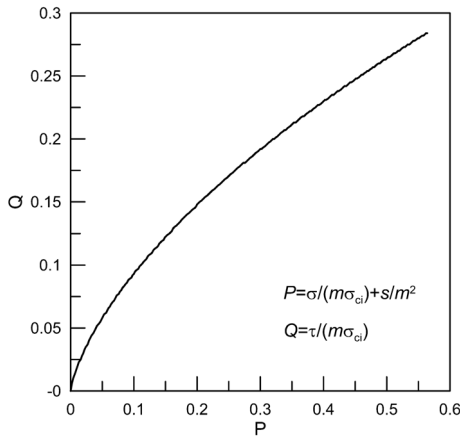


Fig. 8. Non-dimensional Mohr envelope of H-B failure criterion

시한 것이다. Fig. 2의 $P_1 - P_3$ 관계 곡선과 마찬가지로 무차원 파괴포락선도 강도정수 σ_{ci} , m , s 의 크기에 관계없이 유일하게 결정된다. 따라서 특정 암석에 대한 σ_{ci} , m , s 값이 주어지면 이 무차원 Mohr 포락선으로부터 H-B 파괴함수의 Mohr 파괴포락선을 결정할 수 있다.

6. 결론

H-B 암반을 대상으로 사면안정성 해석을 수행하거나 암반기초의 지지력을 산정하는 경우 H-B 암석의 강도는 종종 내부마찰각과 점착력 개념으로 이해하는 것이 필요할 때가 있다. 이 경우 암석의 파괴조건식은 전단 응력 (τ)과 수직응력 (σ)의 관계로 표시되어야 한다. 이 연구에서는 $\sigma_1 - \sigma_3$ 관계로 표시된 본래의 H-B 파괴함수를 $\tau - \sigma$ 의 명시적 관계식 즉 Mohr 파괴포락선으로 전환하는 새로운 방법을 제시하고 그 결과를 Bray가 제안한 기존의 결과식과 비교하였다. 제안된 방법은 Londe (1988)가 제안한 응력무차원화 변환을 바탕으로 하고 있으며 Ucar (1986)의 방법에 비해 유도과정이 매우 간단하다는 특징을 갖는다.

검증 예제를 통해 새로운 방법으로 유도한 $\tau - \sigma$ 관계식을 이용해 계산한 암석의 전단강도는 Bray의 결과식을 이용한 결과와 정확히 일치함을 확인하였다. 또한 이 연구에서는 모든 암석 상태에 적용되는 유일한 H-B 파괴포락선인 무차원 전단응력 (Q)과 무차원 수직응력 (P) 관계 곡선을 제시하였다. 암석의 σ_{ci} , m , s 값이 주어지면 무차원 파괴포락선으로부터 $\tau - \sigma$ 관계를 신속히 계산할 수 있다.

이 연구에서 제안한 방법은 일반화 H-B 파괴함수의

강도정수 a 가 0.5인 경우에 한정하여 적용할 수 있다. 그러나 이 연구에서 제시한 방법론은 $a = 0.5 \sim 0.6$ 인 일반적인 경우의 H-B 파괴포락선을 유도하는 과정에도 응용 가능할 것으로 예상된다.

사 사

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

References

- Balmer, G., 1952, A general analytical solution for Mohr's envelope, Proc. ASTM, Vol. 52, pp. 1260-1271.
- Carraza-Torres, C. and Fairhurst, C., 1999, The elastoplastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 36, pp. 777-809.
- Choi, S.O. and Deb, D., 2005, Supplementation of generalized Hoek-Brown yield surface through the singularity adjustment in elastic-plastic analysis, Geosystem Engineering, Vol. 8(2), pp. 43-50.
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1980, Empirical strength criterion for rock masses, J. Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 106 (GT9), pp. 1013-1035.
- Hoek, E., 1983, Strength of jointed rock masses, Geotechnique, Vol. 33(3), pp. 187-223.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B., 2002, Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition, Proc. NARMS-TAC Conf., Toronto, Vol. 1, pp. 267-273.
- Kumar, P., 1998, Shear failure envelope of Hoek-Brown criterion for rock masses, Tunnell. and Underg. Space Tech., Vol. 13(4), pp. 453-458.
- Lee, Y.-K., 2007, Prediction of strength for transversely isotropic rock based on critical plane approach, Tunnel & Underground Space (J. Korean Soc. Rock Mech.), Vol. 17(2), pp. 119-127.
- 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, Tunnel & Underground Space (J. Korean Soc. Rock Mech.), Vol. 22(6), pp. 462-470.
- 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. 112(3), pp. 303-315.
- Yang, X.-L., Li, L. and Yin, J.-H., 2004, Stability analysis of rock slopes with a modified Hoek-Brown failure criterion, Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., Vol. 28, pp. 181-190.

**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 해양건
설공학과 교수
