

파괴조건식의 변환과 적용연구

양 형 식¹⁾

Transformation and Application of Failure Criteria

Hyung-Sik Yang

ABSTRACT

To improve the applicability of the Hoek-Brown's empirical failure theory to field problems, transformation of failure coefficients was suggested in this study. This method was tested on the published data and good results were obtained. It seemed that this method be more reasonable than traditional method of modifying the coefficients by RMR or Q values.

요 약

본 연구에서는 현장에 대한 Hoek-Brown 경험파괴조건식의 적용 타당성을 높이기 위하여 파괴조건식 변환법을 제안하고 제안된 파괴조건 변환식을 기발표 실험 데이터에 적용하고 검토하였다. 그 결과 타당한 결과를 얻을 수 있었다. 특히 현지 진단시험 결과를 이용하여 파괴조건 변환을 실시할 경우 RMR이나 Q 값을 이용한 종래 방식보다 우수한 변환이 가능할 것으로 생각된다.

1. 서 론

Hoek-Brown의 경험파괴 조건식은 암반의 봉압특성과 파괴거동을 잘 나타내는 식으로 서방세계에 널리 적용되고 있다. 우리 나라 암석에 대한 적용성도 우수하며 필자는 문헌과 실험 자료를 이용하여 중요 암석에 대한 파괴조건계수를 발표한 바 있다.¹⁾ 이 방법은 암석의 파괴조건 계수를 결정하는데 봉압 실험 결과를 이용한다. 그러나, 현장에 이 식을 적용할 때에는 현장 봉압실험이 사실상 불가능하므로 신선암의 암석 파괴조건 계수를 적당히 수정하거나 RMR이나

Q 값을 이용하여 파괴조건계수를 조정하는 편법을 써 왔다. 본 연구에서는 현장에서 실제 실험이 가능한 진단시험 자료를 이용하여 파괴조건계수를 구하는 방법을 제안하였다. 이를 위하여 파괴조건식을 변환하는 이론적 배경을 마련하였고 실제 실험결과에 적용하여 타당성을 검토하였다.

2. 파괴조건식의 변환

2.1 주응력형에서 법선-전단응력형으로

경험파괴조건식과 관련하여 전단강도 및 법선응력

*1993년 11월 17일 접수

1) 정회원, 전남대학교 공과대학 부교수

과 주응력의 관계는 Mohr 응력원식

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 \quad (1)$$

과 경험파괴조건식

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

을 이용하여 유도한다. 여기서 σ_1 과 σ_3 는 최대 및 최소주응력, m , s 는 파괴조건계수, σ_c 는 단축압축강도이다. Mohr 응력원식을 σ_3 에 관하여 편미분하여 정리하면

$$\sigma = \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} + 1} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} + 1} \sqrt{\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3}} \quad (4)$$

가 된다. 식 (2)를 σ_3 에 관하여 미분하면

$$\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} = 1 + \frac{m\sigma_c}{2(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (5)$$

이 되며, 식 (5)를 식 (3), (4)에 대입하여 정리하면

$$\sigma = \sigma_3 + \frac{\tau_m^2}{\tau_m + \frac{m\sigma_c}{8}} \quad (6)$$

$$\tau = (\sigma - \sigma_3) \sqrt{1 + \frac{m\sigma_c}{4\tau_m}} \quad (7)$$

이 된다. 이때 최대전단응력 $\tau_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ 이다.

이 식들로부터 내부마찰각과 전단강도는 각각

$$\phi_i = \tan^{-1} \left[AB \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} - \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \right)^B \right] \quad (8)$$

$$c_i = \tau - \sigma \tan \phi_i \quad (9)$$

로 구할 수 있고 여기서 A, B는 회귀분석에서 얻어지는 상수들이고 σ_1 는 인장강도이다. 경험파괴조건식은 자체로서 응력해석의 이완대 판정이나 안전율 산정에 이용될 수 있지만 상기의 (8), (9)식으로부터 임의 응력에서의 전단강도와 내부마찰각을 구하여 기존의 파괴조건식에 대입, 사용할 수도 있다.

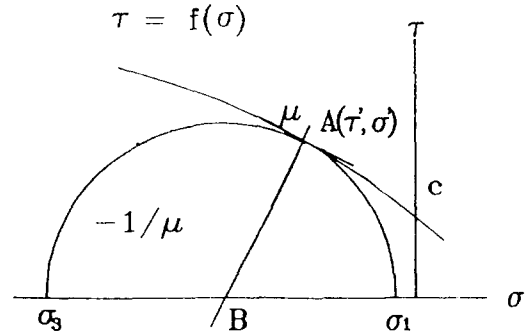


Fig. 1. Generation of Mohr circle from shearing test results.

2.2 법선-전단응력형에서 주응력형으로

지하공동의 설계에는 기존의 Mohr-Coulomb이나 Drucker-Prager조건식에 적용하기 위해 봉압압축시험을 하는 대신 현장암반에 대한 전단강도 시험을 실시한 경우가 많다. 이들 시험은 상당히 경비가 드는 것인데 직선적 파괴이론의 c , ϕ 결정에만 사용되고 있다. 한편 현장암반에 대한 삼축시험은 사실상 불가능하므로 이러한 전단시험을 활용할 수 있다면 대단히 유익할 것이다.

본 연구에서는 간단한 변환에 의해 경험적 파괴이론으로의 전환을 모색하였다.

전단시험의 결과를

$$\frac{\tau}{\sigma_c} = A \left[\frac{\sigma}{\sigma_c} + \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \right] \quad (10)$$

또는

$$\tau = \gamma\sigma^B + \tau_0 \quad (11)$$

등으로 표시하였을 때 모든 Mohr 응력원이 이 포락선에 접하는 것으로 가정한다. 이 경우 접점을 지나는 지름과 포락선은 직교하므로 이 지름의 식으로부터 응력원의 중점과 두 주응력을 계산할 수 있다.

Fig. 1에서 임의점 A(τ' , σ')에서의 순간 기울기를 μ 라 하면 접선을 지나는 식은

$$\tau = -\frac{1}{\mu}(\sigma - \sigma') + \tau' \quad (12)$$

이다. 응력원의 중점 B는 ($\sigma' + \mu\tau'$, 0)이고 반경은

$$r = \tau' \sqrt{1 + \mu^2} \quad (13)$$

Table 1. Results of shearing test for Hukusima Mudstone.

σ_m	τ_m , avg	τ_m		
		67.5	90.	112.5
10.	15.47	13.80	16.60	16.00
20.	18.94	17.80	19.00	20.03
30.	21.30	19.40	21.60	23.00
40.	22.47	21.40	22.00	24.00

Unit : kgf/cm²

Table 2. Results of confined compression test.

Confined pressure	1	Confined strength	3	avg.
0.	45.3	35.9	40.2	40.5
5.	54.5	56.3	55.2	55.3
10.	59.5	60.8	59.9	60.1

으로 된다. 따라서 이 임의점에 상응하는 주응력들은 각각

$$\sigma_1 = \sigma' + (\mu + \sqrt{1 + \mu^2})\tau' \quad (14)$$

$$\sigma_3 = \sigma' + (\mu - \sqrt{1 + \mu^2})\tau' \quad (15)$$

로 된다. 그러므로 $3.4 \sigma_3 < \sigma_1 < \sigma_1$ 인 응력원²⁾들을 구하여 이로부터 다른 파괴조건식을 구할 수 있다.

2.3 전환례

현실적으로는 법선전단응력형의 자료를 주응력형 자료로 변환하는 것이 의미가 있을 것이다. 여기서는 김 등³⁾의 자료를 이용, 변환하였다. Table 1, 2는 적용 원래 자료이다. 이 암반은 일본 福島産 泥岩(Hukusima Mudstone)으로 이방성이 있는 암석이며 본 연구에서는 원저자의 실험 데이터를 그대로 사용하여 전단시험 결과로부터 전단형 파괴조건계수와 타 파괴조건계수를 구하였다. 같은 문헌에 동일한 암석에 대한 봉압압축시험자료도 있으므로 이를 이용하여 그 타당성을 검토하였다.

Fig. 2와 Fig. 3에 그 결과를 보였다. 전단시험자료로부터 구한 파괴조건계수는 c 가 15.3, ϕ 가 13.5였으며 이를 전환하여 구해진 경험파괴조건계수 m 은 2.1이다. 반면 봉압시험결과로부터 구한 경험파괴조건계수 m

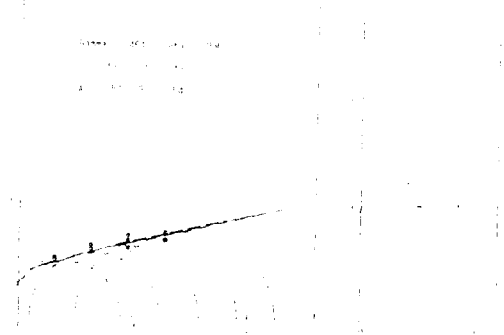


Fig. 2. Conversion of failure criteria.

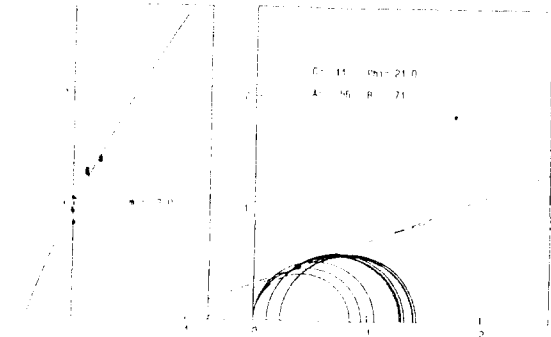


Fig. 3. Checkup the validity of criteria conversion.

은 2.0이었으며 이를 전환한 전단형 파괴조건계수 c 는 14, ϕ 는 21이다. 실험의 정확도와 범위에 따라 다르겠지만 이 자료는 이방성 암반에 대한 자료임에도 불구하고 계산된 파괴조건계수들이 비교적 잘 일치하고 있다.

이로써 본 연구에서 제안된 파괴조건계수의 전환 방식이 타당함을 알 수 있다.

3. 현지암반(in-situ rocks)에의 적용성

Priest와 Brown⁴⁾은 신선암과 이의 파쇄 암편에 대한 대형 봉압압축실험을 수행하고 이로부터 현지 암반의 파괴조건계수를 RMR로 보정하는 방식을 제안하였다.

$$m = m_0 \exp\left[\frac{RMR - 95}{13.4}\right] \quad (16)$$

$$s = \exp\left[\frac{RMR - 100}{6.3}\right] \quad (17)$$

여기서 m_1 는 신선암의 파괴조건계수이다. 이 식들은 파쇄된 암석으로 토질역학적인 봉압실험을 실시한 결과로부터 유도한 것이기 때문에 실제 현장암반과의 연결이 쉽지 않다. 또 자료도 극히 적기 때문에 식의 신빙성도 문제가 있을 것으로 생각된다.

그러나 필자에 의해 제안된 2.2절의 변환 방식을 이용한다면 현장암반에 대한 적용이 무리없이 이루어질 수 있을 것으로 생각한다. 실제 암반에 대한 전단강도 시험 결과를 입수하지 못하여 직접 이 변환을 시도하지는 못하였지만 2.3절의 실례에서 본 바와 같이 그 적용가능성은 충분히 예견된다고 본다.

4. 결 론

본 연구에서는 파괴조건식계수의 합리적인 결정방법을 모색하고 실험 및 문헌자료를 통하여 Hoek-Brown 경험파괴조건식을 적용, 해석하였다. 제안된 파괴조건 변환식을 기발표 실험 데이터에 적용한 결과 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 특히 현지 전단시험 결과를 이용하여 파괴조건 변환을 실시할 경우 RMR을 이용한 종래 방식보다 양호한 변환이 가능할

것으로 생각된다.

5. 감사의 말씀

이 연구는 한국과학재단의 연구지원(KOCEF 893-0510-011-2)으로 수행된 "경험적 파괴이론의 국내 주요암반 연구"의 일부이며 연구비를 지원해준 재단에 감사드린다.

참고문헌

- 1) 양형식, 1992, 국내 주요암석의 파괴조건계수, 한국 자원공학회지, Vol. 29, pp. 91-102
- 2) Brown, E.T., J.W. Bray, B. Ladanyi & E. Hoek, 1983, Ground response curves for rock tunnel, J. Geotech. Eng. Div., ASCE Vol. 109, pp. 15-39
- 3) 金沂柱, 李正仁, 金載極, 1983, 軟弱面을 갖는 岩石의 剪斷強度 및 變形舉動에 關한 研究(第2報), 대한광산학회지 Vol. 20, pp. 119-125
- 4) Priest, S.D. & E.T. Brown, 1983, Probabilistic stability analysis of variable rock slopes, Trans. Inst. Min. Metall, Vol. 92A, pp. 1-12