

횡등방성 암석의 강도해석을 위한 이방성 Mohr-Coulomb 파괴조건식

이연규^{1)*}, 최병희²⁾

Anisotropic Version of Mohr-Coulomb Failure Criterion for Transversely Isotropic Rock

Youn-Kyou Lee, Byung-Hee Choi

Abstract An anisotropic version of Mohr-Coulomb failure criterion is proposed in order to provide a strength criterion for transversely isotropic rock. The concept of fabric tensor introduced by Pietruszczak & Mroz (2001) is employed to define the friction angle and cohesion as scalar functions of the fabric tensors. The anisotropy in these two strength parameters are calculated in association with the consideration of the relative rotation between the principal stress coordinate and the principal material triad. The critical plane on which the anisotropic function maximized is found by an optimization technique based on the Lagrange multiplier method. To demonstrate the performance of the anisotropic failure criterion, conventional triaxial tests on the samples having various inclinations of weakness plane are simulated and the resulting triaxial strength and dip angle of failure plane are discussed.

Key words Mohr-Coulomb failure criterion, strength anisotropy, transversely isotropic rock, critical plane approach, fabric tensor

초 록 횡등방성 암석의 강도해석에 활용할 목적으로 이방성 Mohr-Coulomb 파괴조건식을 제안하였다. 제안된 파괴조건식에서는 Pietruszczak & Mroz(2001)가 제안한 조직텐서를 도입하여 마찰각과 점착력을 조직텐서의 스칼라함수로 정의하였다. 두 강도정수의 이방성은 주응력좌표계와 재료 주좌표계의 상대적 회전을 바탕으로 계산된다. 이방성 파괴조건식을 최대로 하는 임계면을 찾는 방법이 Lagrange 승수법에 기초하여 제안되었다. 수치삼축압축 시험을 실시한 후 삼축압축강도와 파괴면 경사각 분석을 통하여 제안된 이방성 파괴함수의 성능을 검증하였다.

핵심어 Mohr-Coulomb 파괴조건식, 강도이방성, 횡등방성 암석, 임계면법, 조직텐서

1. 서 론

암석은 다양한 지질학적 요인들에 의해 강도 이방성을 나타내는 경우가 많다. 예를 들어 퇴적암의 층리 (bedding)나 변성암의 엽리(foliation)와 같이 연약면이 평행하게 발달한 횡등방성 암석의 삼축압축강도는 축 응력 방향과 연약면 사이의 각도 변화에 따라 큰 변화를 나타낸다(Jaeger, 1960, Donath, 1964, McLamore & Gray, 1967, Kwaśniewski & Mogi, 2000). 일반적

으로 연약면이 축하중 방향과 수직이거나 수평일 때 최대 강도가 얻어지며, 연약면과 축하중 방향이 이루는 각이 30~60° 범위에 있고 연약면을 따라 파괴가 발생하는 경우 최소 강도가 얻어진다. 그러므로 퇴적암이나 변성암에 건설되는 각종 암반구조물의 정밀한 안전율 분석과정에서는 암석의 이방성 강도특성을 고려할 필요가 있다.

실험적 연구와 더불어 지금까지 다양한 이방성 암석 파괴조건식들이 제안되고 있으며, 이들의 대부분은 횡 등방성 암석을 대상으로 하고 있다. Duveau et al.(1998)은 Jaeger(1960)의 연구 이래로 최근까지 발표된 다양한 이방성 암석 파괴기준식을 비교 검토하였다. 국내에서도 대학과 국책연구소를 중심으로 횡등방성 암석의 변형 및 강도 이방성에 대한 연구가 점차 활발해지고

¹⁾ 군산대학교 해양건설공학과

²⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

* 교신저자 : kyouleee@kunsan.ac.kr

접수일 : 2011년 6월 10일

심사 완료일 : 2011년 6월 22일

게재 확정일 : 2011년 6월 22일

있다(장보완 등, 2001, 이연규, 2007, 2008, 박철환 등, 2010).

미소구조(microstructure)의 이방성 분포 해석 개념을 도입하여 암석의 강도이방성을 기술하려는 연구도 최근 주목을 받고 있다. Pietruszczak & Mroz(2001)는 대각항의 합을 0으로 하는 2차 텐서의 일종인 조직텐서(second order fabric tensor) 개념을 도입하여 암석이나 흙의 이방성 강도식을 구성하는 방법을 제시하였다. 이들이 제안한 이방성 강도식은 주응력 좌표계와 재료주축(principal material triad)의 방향 차이를 이용하여 임의 방향의 강도를 계산하므로 강도이방성을 수치해석에 반영시킬 수 있는 유용한 방법으로 평가된다. 임계면법(critical plane approach)으로 알려진 Pietruszczak & Mroz의 해석법은 임의 응력조건에서 이방성 강도식을 최대화시키는 임계면을 수치해석적으로 찾고 이 면에서 이방성 강도함수의 만족 여부를 판단함으로써 암석의 강도를 계산한다. 그러므로 임계면법의 2가지 핵심 요소는 이방성강도식의 구성과 이를 활용한 파괴면의 탐색법이다. 이연규(2007)와 Lee & Pietruszczak(2008)은 조직텐서 개념을 Hoek-Brown 파괴조건식(Hoek & Brown, 1980)의 강도정수인 m 과 s 에 적용하여 이방성 Hoek & Brown 강도식을 유도하기도 하였다.

이 연구에서는 마찰각(friction angle)과 점착력(cohesion)을 Pietruszczak & Mroz(2001)가 제안한 조직텐서의 선형 스칼라함수로 정의함으로써 횡등방성 암석의 강도해석에 적용 가능한 이방성 Mohr-Coulomb 강도함수를 제안하였다. 또한 제안된 이방성 파괴함수를 활용하여 파괴면의 방향을 탐색하는 수치해석적 기법을 제시하였다. 마지막으로 임계면법을 적용한 수치 삼축압축시험을 실시하여 제안한 이방성 강도식의 강도 예측 성능을 평가하였다.

2. 이방성 Mohr-Coulomb 함수

이 연구에서는 임계면법에 활용하기 위해 이방성 Mohr-Coulomb 파괴조건이 개발되었다. 개발된 파괴함수에서는 조직텐서(fabric tensor)개념을 도입하여 강도정수의 방향에 따른 변화를 고려하였다.

2.1 등방성 Mohr-Coulomb 파괴식

임계면법에 활용 가능한 이방성 파괴함수는 기본적으로 암석의 파괴함수 F 가 파괴면에 작용하는 수직응력 σ_f 과 전단응력 τ_f 의 함수로 다음과 같이 표시될 수 있음을 전제로 한다.

$$F(\sigma_f, \tau_f) = 0 \tag{1}$$

그러므로 임계면법에서는 한 점을 지나는 모든 면에 대해 식 (1)의 만족 여부를 조사한다.

단위 법선벡터 n_i 를 갖는 잠재적 파괴면에 작용하는 수직응력 σ^n 은 응력텐서 σ_{ij} 와 n_i 를 이용하여 계산할 수 있지만 잠재적 파괴면에 작용하는 최대전단응력 τ^n 을 계산하기 위해서는 추가적으로 최대전단응력 방향의 단위벡터 s_i 를 알아야 한다. 그러나 궁극적으로 s_i 는 응력텐서 σ_{ij} 와 n_i 를 이용하여 구할 수 있으며 그 과정은 다음과 같다.

Fig. 1과 같이 수직 단위벡터가 n_i 인 임의 면에 작용하는 traction t_i 은 다음과 같이 계산된다.

$$t_i = \sigma_{ij}n_j \tag{2}$$

traction t_i 는 수평성분(t_i^s)과 연직성분(t_i^n)의 벡터 합으로 표시할 수 있다.

$$t_i = t_i^n + t_i^s \tag{3}$$

이 때 t_i 방향의 단위벡터 v_i 는 다음과 같다.

$$v_i = \frac{t_i}{\sqrt{t_j t_j}} \tag{4}$$

그러므로 t_i^s 방향의 단위벡터 s_i 는 다음과 같이 구해 질 수 있다(Pietruszczak & Mroz, 2001).

$$s_i = \frac{t_i^s}{\sqrt{t_j^s t_j^s}} = \frac{v_i - v_k n_k n_i}{\sqrt{1 - (v_j n_j)^2}} \tag{5}$$

이제 수직 단위벡터가 n_i 인 면이 파괴면이 되는지 여

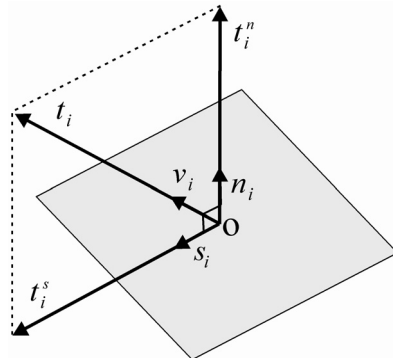


Fig. 1. Traction on a plane passing a point O

부는 다음 조건으로 판단할 수 있다.

$$F(\sigma^n, \tau^n) = 0 \quad (6)$$

여기서 σ^n 과 τ^n 은 응력텐서 σ_{ij} 로부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\sigma^n = \sigma_{ij} n_i n_j; \quad \tau^n = \sigma_{ij} n_i s_j \quad (7)$$

등방성 암석에서 Mohr-Coulomb 함수를 이용하여 파괴면 형성 여부를 판단하는 경우 식 (6)은 마찰각(ϕ)와 점착력(c)을 이용하여 다음과 같이 표시된다.

$$F^{MC} = \tau^n - \sigma^n \tan(\phi) - c = 0 \quad (8)$$

2.2 이방성 Mohr-Coulomb 파괴식

식 (8)에서 강도정수 ϕ 와 c 를 조직텐서의 스칼라 함수인 공간분포함수로 가정함으로써 이방성 Mohr-Coulomb 강도함수를 정의할 수 있다. Pietruszczak & Mroz(2001)의 연구결과를 활용할 경우 ϕ 와 c 는 조직텐서 Ω_{ij} 의 n_i 방향 투영인 $\Omega_{ij} n_i n_j$ 의 다항함수로 표시된 다음과 같은 공간분포함수로 가정할 수 있다.

$$c = c_0 (1 + \Omega_{ij}^c n_i n_j) + \sum_{p=2}^n c_i (\Omega_{ij}^c n_i n_j)^p; \quad (9)$$

$$\phi = \phi_0 (1 + \Omega_{ij}^\phi n_i n_j) + \sum_{p=2}^n \phi_i (\Omega_{ij}^\phi n_i n_j)^p$$

여기서 c_0 , c_i , ϕ_0 , ϕ_i 는 공간분포함수의 계수로써 일종의 재료 상수다. $\Omega_{ij} n_i n_j$ 의 차수를 증가시키면 더욱 정밀하게 강도 이방성을 표현할 수 있으나 이에 따른 강도분포함수의 계수도 증가하므로 적절한 차수의 선택이 필요하다. Ushaksaraei & Pietruszczak(2002)의 연구에서는 $\Omega_{ij} n_i n_j$ 의 차수가 1~2인 경우를 고려하였다. 조직텐서 Ω_{ij} 는 대각항의 합(Ω_{ii})이 0인 대칭 2차 텐서로서 강도정수의 공간적 편향성을 표현하기 위해

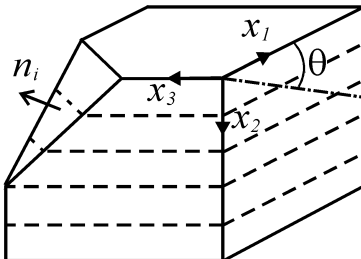


Fig. 2. Principal material triad x_i

도입되었다. 등방성 암석의 경우는 $\Omega_{ij} = 0$ 이다. 이제 식 (9)를 식 (8)에 대입함으로써 이방성 파괴함수를 정의할 수 있다.

횡등방성 암석의 경우 Fig. 2와 같은 국부좌표계(local coordinate) x_i 에서 조직텐서 $\overline{\Omega}_{ij}$ 는 다음과 같이 1개의 상수 Ω_0 로 표현된다. 여기서 Ω_0 는 이방성의 세기를 표현하는 상수이다.

$$\overline{\Omega}_{ij} = \begin{bmatrix} \Omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & -2\Omega_0 & 0 \\ 0 & 0 & \Omega_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

그러면 Fig. 2의 수직단위벡터 n_i 를 갖는 면에 대한 $\overline{\Omega}_{ij}$ 의 투영(projection)은 $\overline{\Omega}_{ij} n_i n_j$ 이다. 예를 들어 $\overline{\Omega}_{ij} n_i n_j$ 의 1차 항까지만 고려하여 강도이방성을 표현할 경우 국부좌표계 x_i 과 θ 의 각을 이루는 면(Fig. 2에서 일점 쇄선으로 표시한 면)의 점착력과 마찰각은 다음과 같이 표시된다.

$$c = c_0 \{1 + \Omega_0^c (1 - 3\cos^2\theta)\} \quad (11)$$

$$\phi = \phi_0 \{1 + \Omega_0^\phi (1 - 3\cos^2\theta)\} \quad (12)$$

여기서 c_0 와 ϕ_0 는 점착력과 마찰각의 공간평균 값으로 각각 c 와 ϕ 의 등방성분 값으로 이해할 수 있다. Fig. 3은 $c_0 = 20$ MPa 일 때 Ω_0^c 의 변화에 따른 c 의 분포특성을 식 (11)을 이용하여 도시한 것이다. Ω_0^c 가 커짐에 따

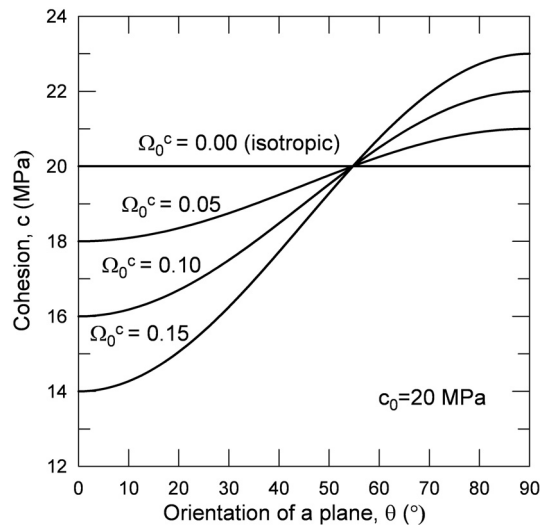


Fig. 3. Spatial variation of cohesion in a transversely isotropic rock

라 점착력의 공간적 분포 이방성이 커지고 있음을 잘 보여준다. 마찰각 ϕ 의 이방성도 유사한 형태로 나타나는 것을 예상할 수 있다.

2차 텐서의 좌표변환 성질을 이용하면 $\overline{\Omega_{ij}}$ 는 전체 좌표계(global)로 다음과 같이 변환될 수 있다.

$$\Omega_{ij} = l_{ki} \overline{\Omega_{kr}} l_{rj} \quad (13)$$

여기서 l_{ij} 는 전체 좌표계 X_i 에서 표현된 벡터를 국부 좌표계 x_i 에서 표현된 벡터로 변환시키는 3×3 변환행렬이다.

이제 $\Omega_{ij} n_i n_j$ 의 1차 항까지만 고려할 경우 Mohr-Coulomb 함수를 바탕으로 한 이방성 암석파괴함수는 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$F^{MC} = \sigma_{ij} n_i s_j - (\sigma_{ij} n_i n_j) \tan(\phi_0 (1 + \Omega_{ij}^{\phi} n_i n_j)) - c_0 (1 + \Omega_{ij}^c n_i n_j) \quad (14)$$

식 (14)는 방향 n_i 의 함수이므로 주어진 응력텐서 σ_{ij} 에 대해 적절한 최적화법을 적용하면 이 식의 값이 최대가 되는 임계면의 방향 n_i 을 찾을 수 있다. 임계면에서 $F^{MC} \geq 0$ 일 경우 잠재 파괴면은 실제 파괴면으로 간주된다.

3. 파괴면 방향의 탐색법

식 (14)의 균열개시 함수 F^{MC} 를 n_i 과 s_i 에 대해 최대화시키면 임계면의 방향 n_i 를 결정할 수 있다. 최적화 과정에서는 다음의 구속조건이 부여된다.

$$n_i n_i = 1; \quad s_i s_i = 1; \quad n_i s_i = 0 \quad (15)$$

이 연구에서는 Lagrange 승수 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 을 도입하여 3개의 구속조건을 갖는 스칼라 함수를 최적화 시키는 방법을 제시하였다. 이방성 Mohr-Coulomb 함수 F^{MC} 에 대응되는 Lagrange 함수 G^{MC} 는 다음과 같이 정의된다.

$$G^{MC} = \sigma_{ij} n_i s_j - (\sigma_{ij} n_i n_j) \tan(\phi_0 (1 + \Omega_{ij}^{\phi} n_i n_j)) - c_0 (1 + \Omega_{ij}^c n_i n_j) - \lambda_1 (n_i n_i - 1) - \lambda_2 (s_i s_i - 1) - \lambda_3 n_i s_i \quad (16)$$

n_i, s_i, λ_i 에 대한 Lagrange 함수 G^{MC} 의 안정조건 $\partial G^{MC} / \partial n_i = 0, \partial G^{MC} / \partial s_i = 0, \partial G^{MC} / \partial \lambda_i = 0$ 을 적용하면 n_i, s_i, λ_i 에 대한 대수연립방정식이 얻어지며 이것을 풀면 임계면의 방향 n_i 과 임계면에 평행한 traction

성분의 방향 s_i 를 결정할 수 있다. 이제 구해진 n_i 과 s_i 를 이용하여 σ^n 과 τ^n 를 구한 후 이방성 파괴함수인 식 (14)에 대입하여 파괴면의 형성 여부를 판정할 수 있다.

4. 수치 삼축압축시험

제한된 이방성 Mohr-Coulomb 강도식의 성능을 검증하기 위해 Fig. 4의 모델을 대상으로 수치 삼축압축시험을 실시하였다. 여기서 x_i 는 재료의 주축(principal material coordinate)이며 X_i 는 전체 좌표계이다. 축응력 σ_1 은 X_2 축에 평행하게 작용하며 구속압 $\sigma_3 (= \sigma_2)$ 가 X_1 축과 X_3 축 방향으로 작용한다. β 는 X_1 축에 대한 연약면의 경사각이며 α 는 X_1 축에 대한 파괴면의 경사각이다. 연약면 경사각 β 의 변화에 따른 파괴강도 σ_1 의 크기 변화와 파괴면의 경사각 α 를 수치해석적으로 계산하였다.

강도정수 c 와 ϕ 의 이방성 정도가 축강도 및 균열면 경사각에 미치는 영향을 고찰하기 위해 Ω_0^c 와 Ω_0^{ϕ} 에 변화를 주어 해석을 실시하였다. c 와 ϕ 의 공간분포 함수에 적용한 Ω_0 의 값은 0.05, 0.10, 0.15이다. 공간평균 강도정수 값으로 $c_0 = 30\text{MPa}$ 와 $\phi_0 = 40^\circ$ 을 가정하였다.

Fig. 5는 $\Omega_{ij}^c = \Omega_{ij}^{\phi}$ 인 경우로서 c 와 ϕ 의 이방성 정도가 동일하다고 가정한 해석 결과이다. 연약면이 수평할 때 즉 $\beta = 0^\circ$ 일 때 강도가 가장 크게 나타나며 $\beta = 60^\circ$ 부근일 때 축강도가 최소로 나타난다. 이러한 경향성은 Donath(1964)의 실험결과와 일치한다. 파괴면의 경사는 $55^\circ \sim 65^\circ$ 범위에 있으며 $\beta = 30^\circ$ 근방에서 파괴면 경사각이 최소로 나타나고 있음을 보여준다. 암석시료의 삼축압축강도 및 균열면의 경사는 시료에 분포하는 연약면의 경사뿐만 아니라 강도정수의 이방성 정도에 영향을 받는다는 것을 이 그림은 잘 보여준다. 또한 강

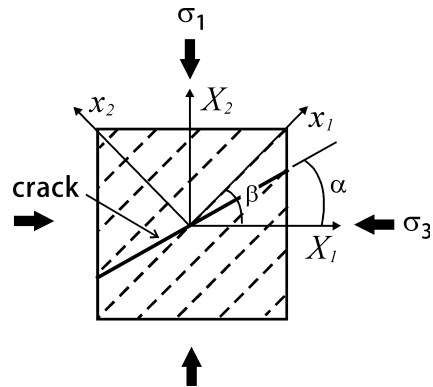


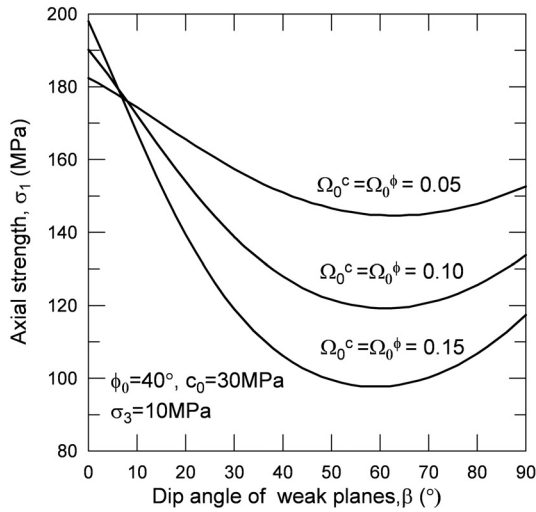
Fig. 4. Geometry of the sample for the simulation of triaxial compression

도정수의 이방성이 증가하면 최소 축강도와 파괴면의 경사각이 작아지는 경향을 뚜렷이 보여준다.

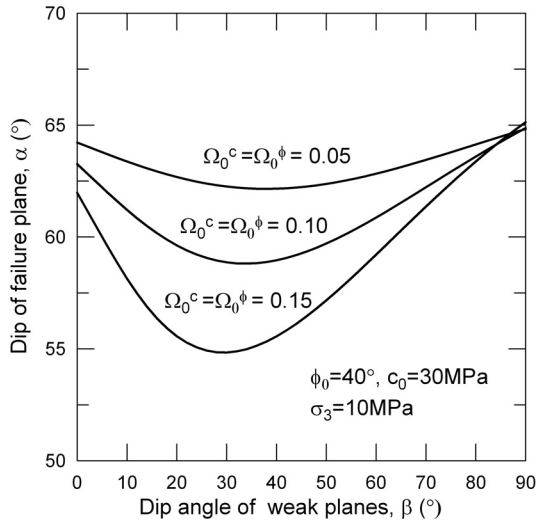
Fig. 6은 ϕ 가 등방성이지만 c 가 이방성을 나타내는 경우다. Fig. 7은 c 가 등방성이지만 ϕ 가 이방성을 나타내는 상황을 가정한 해석 결과이다. β 의 변화에 따른 축강도 및 균열 경사각의 변화는 두 경우 모두 전체적으로 Fig. 5와 유사한 경향을 보여준다. 점착력의 이방성이 파괴면의 경사각에 미치는 영향은 크지 않다는 것

을 Fig. 6은 잘 보여준다. 그러나 Fig. 6과 Fig. 7을 비교하면 마찰각 ϕ 의 이방성이 축강도와 균열방향에 미치는 영향이 점착력 c 의 이방성이 미치는 영향에 비해 상대적으로 더 크다는 점을 알 수 있다.

구속압 σ_3 의 크기가 횡등방성 암석의 삼축압축강도 및 파괴면 경사에 미치는 영향을 분석하였다. 점착력은 등방성이며 마찰각은 이방성($\Omega_0^\phi = 0.15$)을 나타내는 시료를 가정하고 $\sigma_3 = 5, 10, 20$ MPa인 경우에 대해 β 를

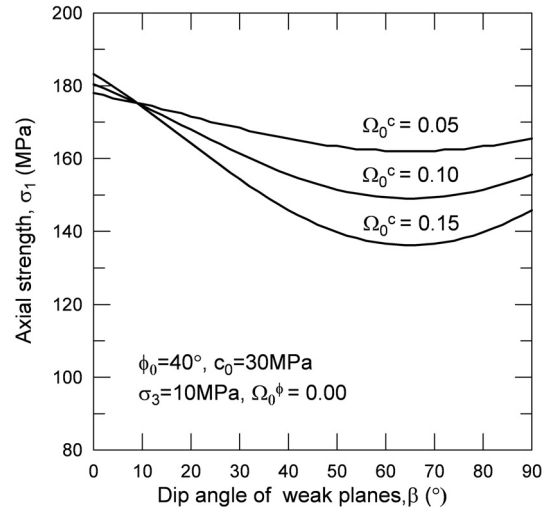


(a)

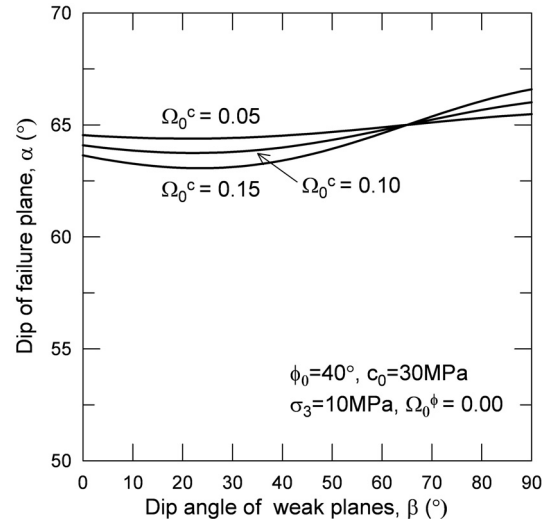


(b)

Fig. 5. Variation of (a) axial strength (σ_1) and (b) dip of failure plane (α) with sample orientation (β); Both c and ϕ are anisotropic



(a)



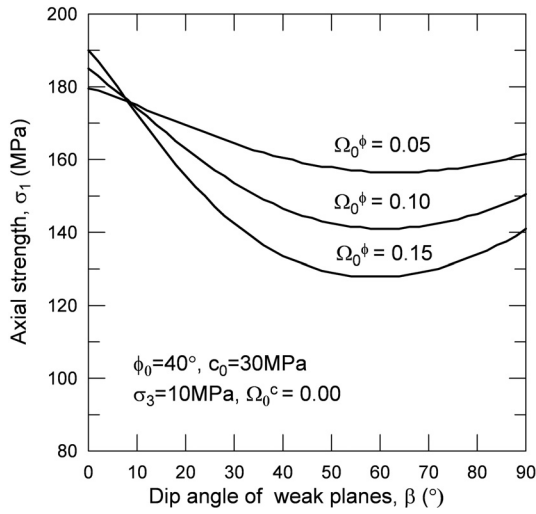
(b)

Fig. 6. Variation of (a) axial strength (σ_1) and (b) dip of failure plane (α) with sample orientation (β); c is anisotropic while ϕ is constant (isotropic)

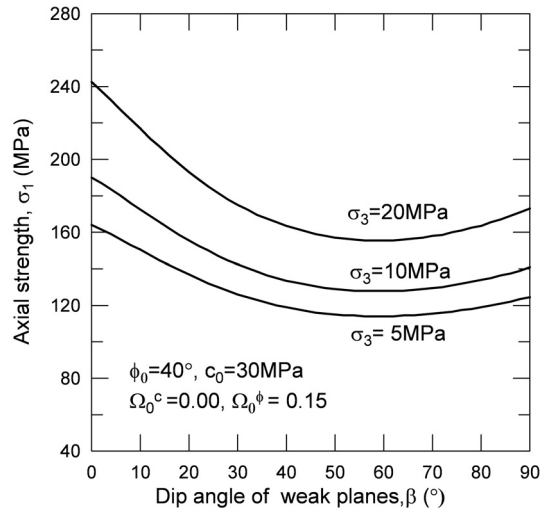
변화시키며 수치 삼축압축시험을 실시한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. σ_3 의 증가에 따라 축강도가 증가되고 있음을 볼 수 있고 β 의 변화에 따른 축강도 변화 경향은 3가지 구속압 σ_3 에 대해 동일하게 나타난다. β 가 $0^\circ \sim 60^\circ$ 범위에 있으면 구속압의 증가에 따라 파괴면의 경사가 약간씩 낮아지나 $60^\circ \sim 90^\circ$ 범위에 있으면 약간씩 높아지는 특성을 보여준다. 이는 균열의 경사각이 구속압의 크기에 영향을 받지 않는 등방 Mohr-Coulomb

강도식의 결과와 대비되는 것이다. 이러한 해석결과는 실제 실험실 시험에서 관찰되는 파괴면 방향의 분산현상이 암석시료의 이방성과 어느 정도 관련성이 있을 수 있다는 것을 암시해준다.

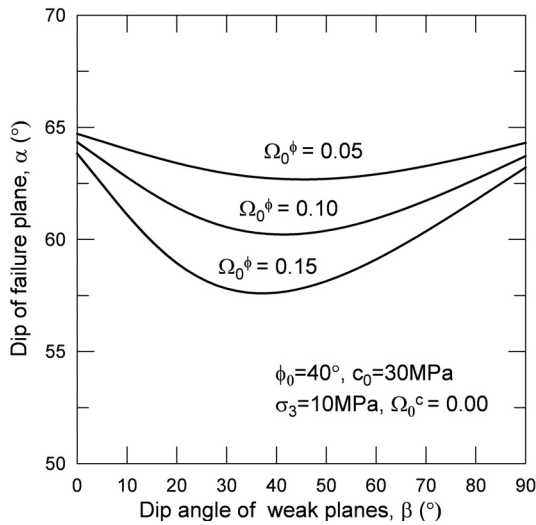
이상의 수치 삼축압축시험 결과를 종합해 볼 때 제안된 이방성 Mohr-Coulomb 강도함수와 파괴면 탐색법이 실제 암석의 이방성 강도 및 파괴 특성을 평가하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.



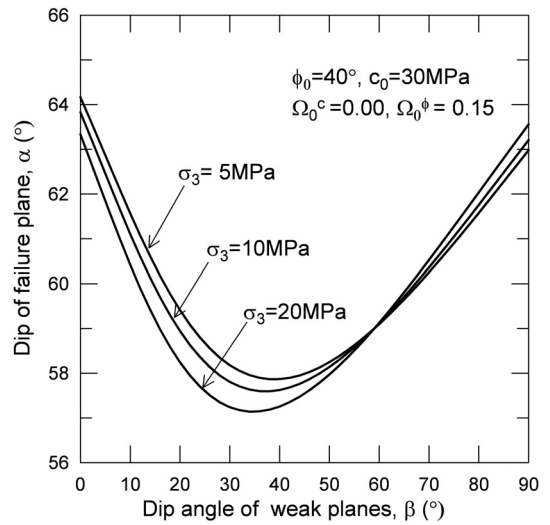
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 7. Variation of (a) axial strength (σ_1) and (b) dip of failure plane (α) with sample orientation (β); ϕ is anisotropic while c is constant (isotropic)

Fig. 8. Variation of (a) axial strength (σ_1) and (b) dip of failure plane (α) with sample orientation (β) for different confining pressure (σ_3)

5. 결 론

사용의 간편성과 지금까지 축적된 방대한 실험자료를 활용할 수 있다는 장점 때문에 Mohr-Coulomb식은 오늘날까지도 암석의 파괴조건식으로 널리 활용되고 있다. Mohr-Coulomb식의 두 강도정수인 마찰각과 점착력은 상수 값으로 가정하므로 이 파괴식은 엄밀히 말해 등방성 암석에 적용할 때에만 유효성을 갖는다. 그러나 암석은 다양한 지질학적 성인과 후천적 변형에 의해 강도 이방성을 나타내는 경우가 많다. 따라서 Mohr-Coulomb식을 이방성 암석의 강도해석에 적용하기 위해서는 강도정수를 이방성 방향에 따른 함수로 수정할 필요가 있다.

이 연구에서는 대각항의 합이 0이며 2차 대칭텐서인 조직텐서를 도입하여 마찰각과 점착력을 조직텐서의 스칼라 함수로 표현하는 이방성 Mohr-Coulomb 파괴조건식을 제시하고 이를 임계면법에 적용하였다. 제시된 파괴함수는 횡등방성 암석을 활용 대상으로 한다. 제시된 파괴조건식에서 두 강도정수의 이방성 정도는 주응력축과 재료주축(principal material triad)의 상대적 회전을 바탕으로 계산된다. 제시된 이방성 파괴함수를 최대 하는 임계면을 찾기위해 Lagrange 승수법에 기초한 최적화 기법을 제안하였다.

수치삼축압축시험을 실시하여 제안된 이방성 Mohr-Coulomb 파괴조건식의 유효성이 검증되었다. 수치해석적으로 계산한 삼축압축강도는 실험적 경향과 잘 일치하였다. 또한 점착력의 이방성에 비해 마찰각의 이방성이 삼축강도의 크기와 파괴면의 방향에 더 큰 영향을 미친다는 사실을 해석결과는 보여주었다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 임(No.2009-0075527).

참고문헌

1. 장보완, 나광희, 장명환, 2001, 단일 시편을 이용한 평면 이방성 암석의 탄성계수 결정, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 11, 72-78.
2. 박철환, 박찬, 신중호, 정용복, 2010, 다중시험편 시험에 의한 평면이방성 암석의 탄성정수 분석연구 제1보 - 자료해석을 중심으로, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 20, 455-464.
3. 이연규, 2007, 임계면법을 이용한 횡등방성 암석의 강도예측, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 17, 119-127.
4. 이연규, 2008, 임계면법을 이용한 횡등방성 암석의 이방성 인장강도 해석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 11, 194-201.
5. Donath, F.A., 1964, Strength variation and deformation behavior in anisotropic rock, In: "State of stress in the Earth's crust", W.R. Judd(Ed.), 281-298.
6. Duveau, G., J.F. Shao, and J.P. Henry, 1998, Assesment of some failure criteria for strongly anisotropic geomaterials, Mech. Cohes.-Frict. Mater. 3, 1-26.
7. Hoek, E. and E.T. Brown, 1980, Underground excavation in rock, London: Institute of Mining and Metallurgy.
8. Jaeger, J.C., 1960, Shear failure of anisotropic rocks, Geologic Magazine 97, 65-72.
9. Kwaśniewski, M.A. and K. Mogi, 2000, Faulting in an anisotropic, schistose rock under general triaxial compression, In: Pacific Rocks, J. Girard, M. Liebman, C. Breeds and T. Doe(Ed.), 737-746.
10. Lee, Y.K. and S. Pietruszczak, 2008, Application of critical plane approach to the prediction of strength anisotropy in transversely isotropic rock masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 45, 513-523.
11. McLamore, R. and K.E. Gray, 1967, The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks, Trans. Am. Soc. Mech. Engrs Series B, 62-76.
12. Pietruszczak, S. and Z. Mroz, 2001, On failure criteria for anisotropic cohesive-frictional materials, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 25, 509-524.
13. Ushaksaraei, R. and S. Pietruszczak, 2002, Failure criterion for structural masonry based on critical plane approach. J. Eng. Mech. 128(7), 769-778.

이 연구



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

최병희



1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2002년 전남대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2005년 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 공학박사

Tel: 042-868-3237

E-mail: bhchoi@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원