

Mohr-Coulomb 및 Hoek-Brown 파괴기준을 적용한 원형공동의 소성거동 분석

이용섭¹⁾ · 문현구²⁾

1. 서론

일정한 방향성을 가진 불연속면을 내포한 암반은 불연속면의 방향에 따라 강도와 변위의 이방성 거동을 나타내므로, 특정한 방향의 불연속면이 발달한 퇴적암과 변성암 등의 암반에 안전하고 경제적인 터널을 건설하기 위해서는 이방성 거동을 고려한 변위예측 및 보강설계에 관한 연구가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 불연속면의 방향에 따른 암반의 이방성 강도에 관한 연구와 원형터널의 굴착에 의한 터널주변의 소성대 분포 및 터널변위에 관한 연구를 수행하였다. 그리고 이러한 암반에 굴착된 터널의 안정성을 확보하기 위한 합리적인 보강설계에 대한 연구를 수행하였다. 이들 일련의 과정은 불연속 암반이 선형 파괴조건식인 Mohr-Coulomb 파괴조건식(이하 M-C 파괴조건식)과 비선형 파괴조건식인 Hoek-Brown 파괴조건식(이하 H-B 파괴조건식)을 만족할 경우에 대하여 연구를 수행함으로써 상이한 파괴 거동을 적용할 경우 파괴조건식에 따른 영향을 비교하였다.

2. 파괴조건식에 따른 불연속 암반의 강도

암반에 존재하는 불연속면이 일정한 방향성을 가질 경우, 식 (1)을 이용하여 불연속면의 방향에 따른 암반의 강도를 계산할 수 있다(Jeager, 1960).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_j + \sigma_3 \tan \phi_j)}{(1 - \tan \phi_j \tan \beta) \sin 2\beta} \quad (1)$$

여기서, σ_1 과 σ_3 는 최대주응력과 최소주응력이며, β 는 최대주응력과 불연속면이 이루는 각도이다. 그리고 c_j 와 ϕ_j 는 불연속면의 점착력과 마찰각으로, M-C 파괴조건식을 적용할 경우 상수가 되며, H-B 파괴조건식을 적용할 경우 응력에 따른 변수가 된다.

본 연구에서는 Donath의 실험자료를 이용하여 불연속 암반의 이방성 거동에 관한 연구를 수행하였다(Donath, 1964). Fig. 1은 파괴조건식에 따른 암반의 이방성 강도를 도시한 그림이다. 그림에서와 같이 M-C 파괴조건식을 적용할 경우 불연속면의 점착력과 내부마찰각은 상수이므로 최저강도가 나타나는 위치는 일정하였으며, 이방성 강도곡선은 대칭으로 나타났다. 그러나 H-B 파괴조건식을 적용할 경우 불연속면의 점착력과 내부마찰각은 응력에 따른 변수이므로 최저강도가 나타나는 위치는 변화하였으며, 이방성 강도곡선은 최저점을 중심으로 비대칭으로 나타났다.

주요어: 파괴조건식, 이방성 강도와 변위, 변위의 이론해, 보강설계

1) 한양대학교 지구환경시스템공학과 공학석사(ys329@hrg.hanyang.ac.kr)

2) 한양대학교 시스템응용공학부 교수

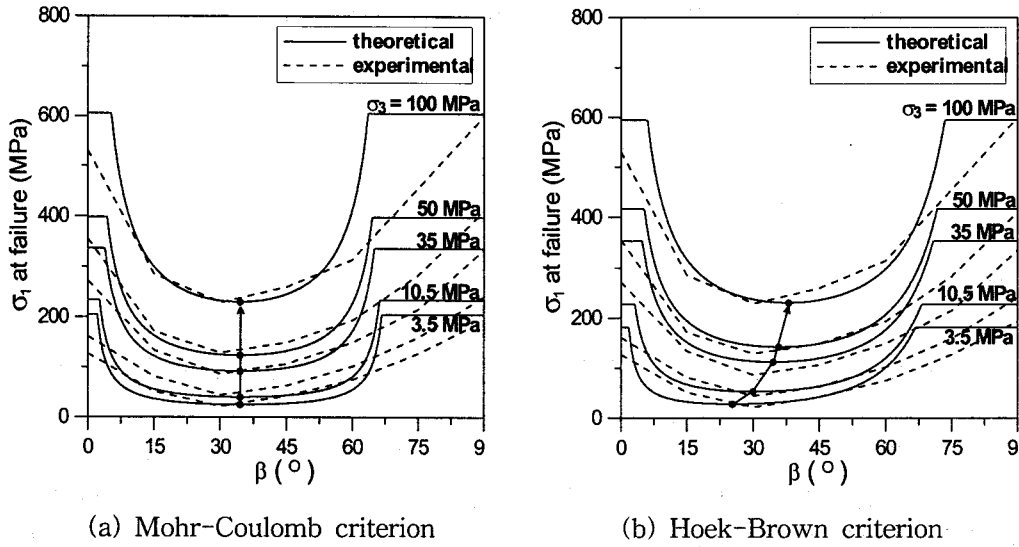


Fig. 1. Anisotropic triaxial compressive strength of discontinuous rock(slate) for different failure criteria.

3. 파괴조건식에 따른 불연속 암반의 소성대

굴착에 의해 터널주위에 파괴가 발생하는 영역을 소성대라 정의하면, 일정한 방향성을 갖는 불연속면이 존재하는 암반에 굴착된 터널주위에 발생하는 소성대는 전단대와 인장대 그리고 파쇄대를 중첩시킨 영역이 된다. 여기서, 전단대는 불연속면을 따라 전단파괴가 발생하는 영역으로, 불연속면에 작용하는 전단응력이 전단강도보다 클 경우 발생한다. 그리고 인장대는 불연속면을 따라 인장파괴가 발생하는 영역으로, 불연속면에 작용하는 수직응력이 인장응력으로 작용하고 그 값이 인장강도보다 클 경우 발생한다. 마지막으로 파쇄대는 신선암의 압축파괴가 발생하는 영역으로, 암반에 작용하는 응력이 신선암의 강도보다 클 경우 발생한다. 이러한 소성대의 발생을 방지하기 위한 최소의 보강압을 임계보강압이라 정의하면, 보강압이 임계보강압보다 클 경우 터널주변에는 소성대가 발생하지 않으며 암반은 탄성거동을 보인다. 하지만 보강압이 임계보강압보다 작을 경우 터널주변에는 소성대가 발생하게 되며, M-C 파괴조건식과 H-B 파괴조건식을 적용할 경우 소성구간에서의 변위는 다음과 같이 표현할 수 있다(이용섭, 2001; Carranza-Torres and Fairhurst, 1999).

$$\frac{u_r}{R} \frac{2G}{P - P_{cr}} = \left[\frac{K_p^* - 1}{K_p^* + 1} - \frac{(A_2 - A_3 K_{pj}) \{ \sigma_{cj} + (K_{pj} - 1) P_{cr} \}}{(P - P_{cr})(K_p^* + 1)(K_{pj} - 3)} \right] + \left[\frac{2}{K_p^* + 1} + \frac{(A_2 - A_3 K_{pj}) \{ \sigma_{cj} + (K_{pj} - 1) P_{cr} \}}{(P - P_{cr})(K_p^* + 1)(K_{pj} - 2 + K_p^*)} \right] (R_p)^{K_p^* + 1} + \left[\frac{(A_2 - A_3 K_{pj}) \{ \sigma_{cj} + (K_{pj} - 1) P_{cr} \}}{(P - P_{cr})(K_{pj} - 3)(K_{pj} - 2 + K_p^*)} \right] (R_p)^{3 - K_{pj}} \quad (2)$$

$$\frac{u_r^p}{R} \frac{2G}{P - P_{cr}} = \frac{K_p^* - 1}{K_p^* + 1} + \frac{2}{K_p^* + 1} (R_p)^{K_p^* + 1} + \frac{1 - 2\nu}{4(S_0 - S_r^*)} (\ln R_p)^2 - \left[\frac{1 - 2\nu}{K_p^* + 1} \frac{\sqrt{S_r^*}}{S_0 - S_r^*} + \frac{1 - \nu}{2} \frac{K_p^* - 1}{(K_p^* + 1)^2} \frac{1}{S_0 - S_r^*} \right] \times \left[(K_p^* + 1) \ln R_p - (R_p)^{K_p^* + 1} + 1 \right] \quad (3)$$

여기서,

$$K_p^* = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}, \quad K_{pj} = \frac{1 + \sin \phi_j}{1 - \sin \phi_j} \quad (4)$$

$$A_1 = \frac{\partial G_P / \partial \sigma_r}{\partial G_P / \partial \sigma_\theta}, \quad A_2 = (1 - \nu) + \nu \frac{\partial G_P / \partial \sigma_r}{\partial G_P / \partial \sigma_\theta}, \quad A_3 = (1 - \nu) \frac{\partial G_P / \partial \sigma_r}{\partial G_P / \partial \sigma_\theta} + \nu \quad (5)$$

$$S_0 = \frac{P}{m_j \sigma_{ci}} + \frac{s_j}{m_j^2}, \quad S_r^* = \frac{\sigma_r^*}{m_j \sigma_{ci}} + \frac{s_j}{m_j^2} \quad (6)$$

이며, G 는 암반의 전단탄성계수, P 는 외부압, P_{cr} 은 소성대의 발생을 방지하기 위한 임계보강압, R_p 는 터널반경으로 정규화한 소성대 반경, ϕ 는 팽창각, G_P 는 포텐셜함수, ν 는 포아송비, σ_r 와 σ_θ 는 반경응력과 접선응력이다. 그리고 σ_r^* 와 σ_θ^* 는 탄소성 경계에서의 반경응력과 접선응력이다.

Fig. 2는 외부압이 45 MPa이고 팽창각은 30° 일 경우 파괴조건식에 따른 소성대의 양상과 변형 후 터널의 모습을 도시한 그림으로, 암반의 변위는 변형 후 터널형상을 확인하기 위하여 계산된 변위에 20배를 하였다. 여기서, 수평축과 불연속면이 이루는 각도는 60° 로, 암반의 영률은 10 GPa로, 포아송비는 0.25로 가정하였다. 그림에서와 같이 M-C 파괴조건식을 적용할 경우의 소성대 반경이 H-B 파괴조건식을 적용할 경우보다 크게 나타났다. 이는 H-B 파괴조건식을 적용할 경우 강도가 M-C 파괴조건식을 적용할 경우보다 크게 계산되었기 때문이다. 그리고 이로 인하여 M-C 파괴조건식을 적용할 경우가 H-B 파괴조건식을 적용할 경우보다 변위가 크게 발생하였으며, 두 파괴조건식 모두 소성대가 발달한 위치에서 변위가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 파괴조건식에 따른 소성대 양상에 의해 변위가 결정되었으며, 소성대 양상은 앞에서 언급했듯이 파괴조건식에 따른 강도에 의해서 결정되었다.

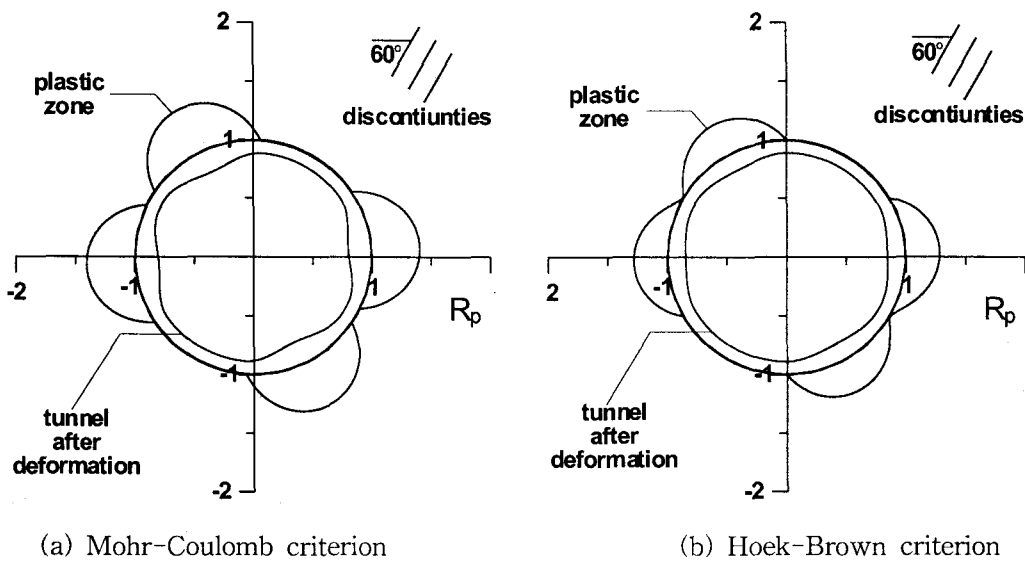


Fig. 2. Plastic zone radius and deformed shape of tunnel according to failure criterion.

4. 보강설계에의 적용

불연속면의 방향이 일정한 암반에 굴착된 터널의 보강설계에 있어서 록볼트 설치간격 및 수에 따른 보강효과에 관한 연구를 수행하기 위하여 Fig. 3에 도시된 7개의 보강계획 비교하였다. 여기서, A-1과 B-1은 최대 소성대 반경이 나타나는 위치에만 1개의 록볼트를 설치할 경우이며, A-2, A-3, A-4는 15° 간격으로, 그리고 B-2, B-3는 30° 간격으로 추가적으로 록볼트를 설치할 경우이다.

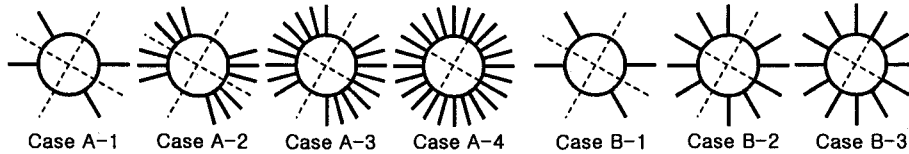
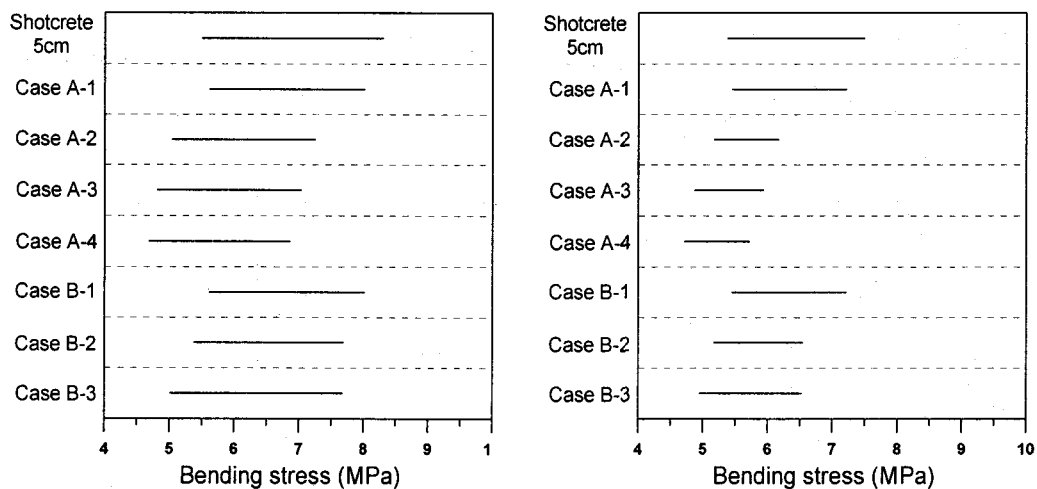


Fig. 3. Configuration of support plan.

Fig. 4는 록볼트 보강설계에 따른 슛크리트에 작용하는 휨응력의 변화폭을 도시한 그림이다. 그림에서와 같이 M-C 파괴조건식을 적용할 경우의 변위가 H-B 파괴조건식을 적용할 경우보다 크게 발생하므로 최대휨응력 역시 크게 발생하였다. 그리고 록볼트 설치간격 및 수에 따른 보강효과에 있어서 최대 소성대 반경이 나타나는 위치에만 록볼트를 설치한 A-1의 경우 그 보강효과가 미비하였으나, 록볼트를 추가적으로 설치한 A-2와 A-3 그리고 A-4의 경우 보강효과가 크게 나타났다. 이는 록볼트가 보강효과를 발휘하기 위해서는 록볼트 보강효과와의 결합에 의한 상호작용이 필요하기 때문이다. 그리고 불연속면이 일정한 방향성을 갖는 암반에 굴착된 터널에서 위치에 따른 휨응력의 차이는 전단대와 인장대에 의한 것이므로, 이들이 발달한 위치에 집중적인 보강을 실시한 A-2와 A-3 그리고 A-4의 보강효과가 B-2와 B-3에 비해 상대적으로 크게 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 안전하고 경제적인 터널을 건설하기 위해서는 소성대가 발달한 부분에 대하여 2개 이상의 록볼트를 집중적으로 설치하는 것이 합리적이라 판단된다.



(a) Mohr-Coulomb criterion

(b) Hoek-Brown criterion

Fig. 4. Range of bending stress for different support plans.

5. 결 론

본 연구에서는 Donath의 실험자료를 이용하여 일정한 방향성을 갖는 불연속면이 존재하는 암반에 터널을 굴착할 경우 파괴조건식에 따른 강도와 변위의 이방성 거동에 대한 연구를 수행하였으며, 이러한 이방성 암반에 안전하고 경제적인 터널을 건설하기 위한 보강설계에 대하여 알아보았다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 일정한 방향성을 갖는 불연속면이 존재하는 암반은 불연속면의 방향에 따라 강도가 변화하였다. 최저강도가 나타나는 위치는 M-C 파괴조건식을 적용할 경우 일정하였으나, H-B 파괴조건식을 적용할 경우 불연속면의 점착력과 마찰각이 응력에 따른 변수로 표현되므로 최저강도가 나타나는 위치가 응력에 따라 변화하였다.

(2) 이러한 암반에 터널을 굴착할 경우 터널주변에 발생하는 소성대는 전단대와 인장대 및 파쇄대에 의해서 결정되었으며, 소성대 반경은 파괴조건식에 따른 강도와 동일한 양상으로 나타났다. 이로 인하여 암반의 변위는 터널에서 위치에 따라 다르게 발생하였으며, 그 양상은 파괴조건식에 따른 강도와 동일하게 나타났다.

(3) 안전하고 경제적인 터널을 굴착하기 위해서는 소성대가 발달한 위치에 록볼트를 집중적으로 설치하여 슛크리트에 작용하는 휨응력을 저하시키는 것이 합리적이라 판단된다. 그리고 M-C 파괴조건식을 적용한 경우가 H-B 파괴조건식을 적용한 경우보다 슛크리트에 작용하는 휨응력이 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

이상에서와 같이 불연속면이 일정한 방향으로 존재하는 암반은 강도와 변위의 이방성 거동을 나타내므로, 이러한 암반에 터널을 굴착할 경우 이방성 거동을 고려한 보강설계를 실시하는 것이 타당하리라 판단된다.

6. 참고 문헌

이용섭, 2001, 상이한 파괴기준을 가진 불연속 암반의 이방성 거동에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교, 서울, pp. 30-49.

Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C., 1999, "The Elasto-plastic Response of Underground Excavation in Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 36, No. 6, pp. 777-809.

Donath, F. A., 1964, "A Strength Variation and Deformation Behavior of Anisotropic Rocks", *State of Stress in the Earth's Crust*, Elsevier, New York, pp. 281-297.

Hoek, E., Brown, E. T., 1980, *Underground Excavation in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, p. 527.