

균렬성압반의 탄성억세기결정과 그것에 기초한 무동발생도의 안정성연구

김인봉, 오성만

지층은 일반적으로 여러가지 미시, 거시공극, 균렬, 절리, 층리와 같은 다양한 불연속성이 다같이 존재하는 복잡한 재료이다.

선행연구[5]에서는 불연속면분포특성을 확률적으로 주고 불연속성재료를 그것과 등가인 연속체로 근사시키는 변형성평가법을, 선행연구[2]에서는 압반의 불연속성을 모형화하기 위하여 틸결요소를 리용한 유한요소법을 제기하였다. 그러나 틸결요소를 리용한 유한요소해석방법은 균렬이 많아지면 계산량이 급속히 커지는 부족점을 가지고있다.

선행연구[6]에서는 균렬끝근방의 구역을 $n \times m$ 개의 그물로 나누고 응력결수를 도입하여 균렬의 영향을 고려하였으며 선행연구[4]에서는 내부변수들을 리용하여 균렬을 가지는 취성암석재료의 증분형태의 비탄성응력-변형관계를 결정하였다.

선행연구[7]에서는 미시균렬을 가지는 취성재료에 대하여 준미시력학적방법에 의하여 균렬성재료의 순응성행렬을 결정하였으며 선행연구[3, 8]에서는 세기, 억세기규준법에 기초하여 갱도의 안정성을 평가하였다.

본문에서는 균렬단감효과를 고려한 I, II형응력확대결수의 표시방법을 제기하고 그것에 기초하여 보충적에네르기표시를 얻었다. 그리고 그것에 따르는 억세기특성량들을 결정하였으며 갱도안정성의 세기, 억세기, 분기규준법에 의하여 안정성을 포괄적으로 결정할수 있는 알고리즘을 제기하고 수값실험을 보여주었다.

1. 균렬성압반의 탄성억세기결정방법

등방성재료의 경우 평면균렬에 의한 보충적에네르기식은 다음과 같이 표시된다.[1]

$$\Delta V_c = \sum_{s=1}^m \frac{2Ah}{V} \int_0^{a^s} (K_I^{s^2} + K_{II}^{s^2}) da^s \quad (1)$$

여기서 s 는 균렬번호, m 은 요소안의 균렬의 개수, a^s 는 균렬길이의 절반, h 는 두께, S 는 면적이며 평면변형의 경우 $A=(1-\nu^2)/E$, 평면응력의 경우 $A=1/E$, $V=Sh$ 이다.

이때 제I형응력확대결수는 다음과 같이 표시된다.

$$K_I^s = F_I^s \alpha \sigma_{22}^s \sqrt{\pi a^s} \quad (2)$$

여기서 F_I^s 는 응력 σ_{22}^s 에 대하여 물체의 유한성에 대한 보정결수로서 $0 \leq F_I^s \leq 1$ (만일 호상관계를 고려하지 않으면 $F_I^s = 1$)이며 $\alpha = H(\sigma_{22}^s)$ (H 는 헤비사이드단위계단함수)이다.

이에 따라 $\alpha = 1$ 은 열린균렬($\sigma_{22}^s \geq 0$)에, $\alpha = 0$ 은 닫힌균렬($\sigma_{22}^s < 0$)에 대응된다.

다음으로 균렬단김을 고려할 때 제II형응력확대결수표시를 구하자.

미끄럼면에서의 마찰력이 미끄럼에 반작용한다는것을 고려하면 개별적인 매개 균렬면 사이의 총체적인 접선응력 σ_{ij}^s ($ij=12, 21$)는 균렬면우의 접선응력 σ_{ij}^s ($ij=12, 21$)와 균렬면에 작용하는 법선응력 σ_{22}^s 에 의한 보충접선응력 $\zeta\psi\sigma_{22}^s$ 의 차로서 국부(균렬)자리표계 (x_1^s, x_2^s) 에서 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_{ij}^s = \sigma_{ij}^s - \zeta\psi\sigma_{22}^s \quad (ij=12, 21) \quad (3)$$

τ 를 마찰결수라고 할 때

$$\zeta = \tau H(-\sigma_{22}^s), \quad \psi = \text{sgn}(\sigma_{ij}^s) \quad (ij=12, 21). \quad (4)$$

따라서 단김균렬은 $\zeta=1$ 에 대응되며 이것을 고려하면 제II형 응력확대결수는

$$K_{II}^s = F_{II}^s \sigma_{21}^s \sqrt{\pi a^s}. \quad (5)$$

여기서 F_{II}^s 는 σ_{21}^s 에 대하여 물체의 유한성에 대한 보정결수로서 $0 \leq F_{II}^s \leq 1$ (만일 호상관계를 고려하지 않으면 $F_{II}^s=1$)이다.

단김균렬의 경우 식 (2), (5)에서 $\alpha=0$, $\zeta=1$ 이므로 식 (1)에서 $\bar{\sigma}_{22}^s$ 에 의한 식 $\bar{K}_I^{s^2}$ 은 0과 같다. 국부균렬자리표계와 전체 자리표계에서 응력성분들사이의 관계식 $\sigma_{ij}^s = d_{ki}^s d_{lj}^s \sigma_{kl}$ 을 리용하면 식 (5)에서 σ_{21}^s 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\sigma_{21}^s = \sigma_{21}^s - \zeta\psi\sigma_{22}^s = \beta_{ij}^s \sigma_{ij} \quad (6)$$

$$\beta_{11}^s = d_{11}^s d_{12}^s - \zeta\psi d_{12}^{s^2}, \quad \beta_{12}^s = d_{12}^s d_{21}^s - \zeta\psi d_{12}^s d_{22}^s, \quad \beta_{21}^s = d_{22}^s d_{11}^s - \zeta\psi d_{22}^s d_{12}^s, \quad \beta_{22}^s = d_{22}^s d_{21}^s - \zeta\psi d_{22}^{s^2}$$

또한 전체 자리표계 (x_1, x_2) 와 국부균렬자리표계 (x_1^s, x_2^s) 의 자리표축들사이의 방향 코시누스들을 $d_{ij}^s = \cos(x_i, x_j^s)$ ($i, j=1, 2$)라고 하면 다음식이 성립된다.

$$\varepsilon_{ij}^s = d_{ki}^s d_{lj}^s \varepsilon_{kl} \quad (7)$$

균렬호상작용을 무시하고 식 (6)을 고려하면 식 (1)로부터 다음식을 얻는다.

$$\Delta V_c = \sum_{s=1}^m \frac{2\pi a h}{V} \int_0^{a^s} (\beta_{ij}^s \sigma_{ij})^2 da = \sum_{s=1}^m \frac{2\pi A h}{V} (a^s)^2 \beta_{ij}^s \beta_{pq}^s C_{ijpq} C_{klrt} \varepsilon_{kl} \varepsilon_{rt} \quad (i, j, k, l, p, q, r, t=1, 2) \quad (8)$$

식 (8)을 리용하면 전체 변형에너르기식은 다음과 같이 표시된다.

$$U = \frac{1}{2} (\lambda \varepsilon_{im} \delta_{nj} \delta_{mn} + 2\mu \varepsilon_{ij}) \varepsilon_{ij} - \sum_{s=1}^m \frac{2\pi A h}{V} (a^s)^2 \beta_{ij}^s \beta_{pq}^s C_{ijpq} C_{klrt} \varepsilon_{kl} \varepsilon_{rt} \quad (m, n, s, i, j, k, l, p, q, r, t=1, 2)$$

이제 그린의 공식

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}} = \bar{C}_{ijkl} \varepsilon_{kl} = (C_{ijkl} - \Delta C_{ijkl}) \varepsilon_{kl} \quad (i, j, k, l=1, 2) \quad (9)$$

에 따라 계산을 진행하면 탄성역세기 C_{ijkl} 과 증분역세기 ΔC_{ijkl} 은 다음과 같이 결정된다.

평면변형의 경우

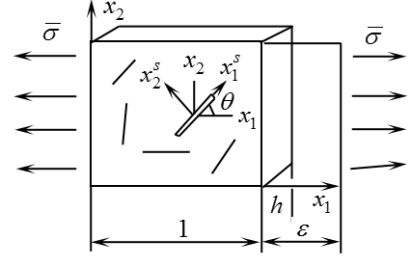


그림 1. 평면균렬모형

$$C_{1111} = C_{2222} = E(1-\nu)/[(1+\nu)(1-2\nu)], \quad C_{1122} = C_{2211} = E\nu/[(1+\nu)(1-2\nu)],$$

$$C_{1212} = C_{2121} = G, \quad C_{1112} = C_{1121} = C_{2212} = C_{2221} = 0, \quad C_{1211} = C_{2111} = C_{1222} = C_{2122} = 0$$

이고 평면응력상태인 경우

$$C_{1111} = C_{2222} = E/(1-\nu^2), \quad C_{1122} = C_{2211} = E\nu/(1-\nu^2),$$

$$C_{1212} = C_{2121} = G, \quad C_{1112} = C_{1121} = C_{2212} = C_{2221} = 0, \quad C_{1211} = C_{2111} = C_{1222} = C_{2122} = 0.$$

식 (9)에서 ΔC_{ijkl} 을 2차텐소르로 표시하면 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta C_{11} = \sum_{s=1}^m \frac{2\pi Ah}{V} (a^s)^2 M_{11}^{s^2}, \quad \Delta C_{12} = \Delta C_{21} = \sum_{s=1}^m \frac{2\pi Ah}{V} (a^s)^2 M_{11}^s M_{22}^s, \quad \Delta C_{22} = \sum_{s=1}^m \frac{2\pi Ah}{V} (a^s)^2 M_{22}^{s^2}$$

$$\Delta C_{13} = \Delta C_{31} = \sum_{s=1}^m \frac{2\pi Ah}{V} (a^s)^2 M_{11}^s M_{12}^s, \quad \Delta C_{23} = \Delta C_{32} = \sum_{s=1}^m \frac{2\pi Ah}{V} (a^s)^2 M_{22}^s M_{12}^s, \quad \Delta C_{33} = \sum_{s=1}^m \frac{2\pi Ah}{V} (a^s)^2 M_{12}^{s^2}$$

여기서 $M_{kl}^s = \beta_{ij}^s C_{ijkl}$ ($i, j, k, l = 1, 2$).

우에서 유도된 재료의 역세기특성량들이 보여주는것처럼 균렬을 포함한 취성재료의 탄성역세기는 감소한다는것을 알수 있다.

2. 세기, 역세기, 분기기준에 의한 갱도안정성평가방법

지난 시기 갱도안정성문제는 많은 경우 갱도주위암반의 최대응력이 어떤 한계값에 도달할 때 안정성이 파괴된다고 보는 세기기준과 갱도의 최대변위가 어떤 한계값에 도달할 때 안정성이 파괴된다고 보는 역세기기준을 공학적인 안정성기준으로 리용하였다.

문에서는 세기기준과 역세기기준에 분기안정성기준을 포함시켜 세가지 안정성기준을 종합적으로 평가하여 갱도안정성을 결정하는 방법을 제기한다.

알고리즘은 다음과 같다.

① 분기안정성기준에 따라 림계상태에 대응한 림계응력 $\sigma_{b림} = (\sigma_{x림}, \sigma_{y림}, \tau_{xy림})$ 을 구한다.

갱도안정성은 분기안정성기준, 역세기기준과 세기기준을 종합적으로 평가해야 정확하므로 다음의 절차들이 더 필요하다.

② (역세기기준) 미리 주어진 변위값 u_0 과 우에서 결정된 갱도웃정점에서의 변위 u_i 에 의하여 조건 $|u_i| < u_0$ 이 성립되면 안정하고 그렇지 않으면 불안정하다.

이때의 림계응력을 $\sigma_{d림}$ 이라고 한다.

③ (세기기준) 주어진 암석의 당김세기 σ_{τ} 와 모르환산응력 $\sigma_{환} = \sigma_1 - \frac{\sigma_{\tau}}{\sigma_{\tau}} \sigma_3$ 에 대하여 $|\sigma_{환}| < \sigma_{\tau}$ 가 성립되면 안정하고 그렇지 않으면 불안정하다. 여기서 σ_1 은 제1주응력, σ_{τ} 은 누름세기이다.

이때의 림계응력을 $\sigma_{s림}$ 이라고 한다.

④ 위의 세 림계응력들중에서 다음의 조건을 만족시키는 림계응력이 실제적인 림계응력이다.

$$\sigma_{림} = \min(\sigma_{b림}, \sigma_{d림}, \sigma_{s림}) \quad (10)$$

일반적으로 무른 암반인 경우 분기림계응력 $\sigma_{b림}$ 이 다른 림계응력들보다 작다.

3. 수 값 모 의

균열성암반속에 놓인 원형가로자름면을 가진 수평갱도(평면변형문제)를 보자.

수값계산에서 리용한 암석의 초기자료들은 다음과 같다.

탄성결수 $E=58\text{GPa}$, 뽕송결수 $\nu=0.23$, 당김세기 $\sigma_{\text{t}}=15\text{MPa}$, $F_{\text{I}}=F_{\text{II}}=1$

누름세기 $\sigma_{\text{c}}=150\text{MPa}$, 마찰결수 $\tau=0.65$, 갱도반경 $R=2\text{m}$, $L_x=L_y=6\text{R}$

측압결수 $\lambda=\nu/(1-\nu)$, 밀도 $\gamma=2300\text{kg/m}^3$, 균렬각도 $\alpha=30^\circ$, 수평거리 $c=0.5\text{m}$

균렬호상간 수직거리 $b=0.5\text{m}$, 균렬길이 $2a=0.5\text{m}$

갱도주위암반의 응력-변형상태에 대한 평면문제에서 주목하는 구역은 단위두께를 가지는 평면3각형요소로 분할된다.(그림 2)

갱도가 대칭성을 가지므로 $\frac{1}{4}$ 구역을 계산구역으로 취한다. 이 경우 $x=0$, $y=0$ 에서 변위 u , v 에 대하여 대칭경계조건 즉 령경계조건을 리용한다.

요소모형은 PLANE 2D로 한다.

안정성의 림계상태에 대응된 계산결과값들은 표와 같다.

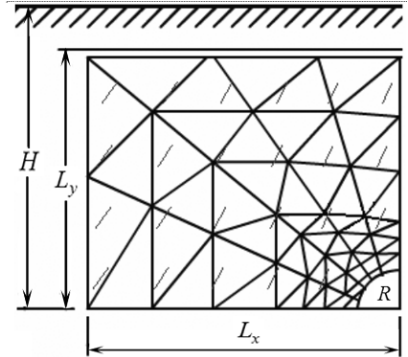


그림 2. 유한요소모형화

표. 안정성의 림계상태에 대응한 계산결과

측정형태	역세기기준 $\sigma_{d\text{림}}/\text{MPa}$	세기기준 $\sigma_{s\text{림}}/\text{MPa}$	분기기준 $\sigma_{b\text{림}}/\text{MPa}$	림계응력 $\sigma_{\text{림}}/\text{MPa}$
계산값	2.3	2.5	2.17	2.17

세기기준의 림계응력 2.5MPa 은 암반의 당김세기에 해당하는 값이고 역세기기준에 대응한 응력 2.3MPa 은 림계변위 $6.5 \times 10^{-2}\text{m}$ 에 대응한 값이다.

표에서 보는바와 같이 분기기준에 의한 림계응력은 2.17MPa 이다.

식 (10)에 따라 총적인 림계응력은 분기안정성기준에 의한 림계응력으로서 2.17MPa 이다.

림계응력은 균렬각도가 증가함에 따라 감소하고(그림 3) 균렬길이의 증가에 따라 천천히 증가한다.(그림 4)

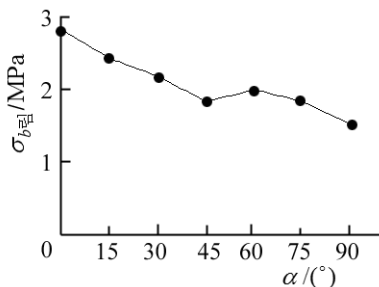


그림 3. 균렬각도에 따르는 분기림계응력변화

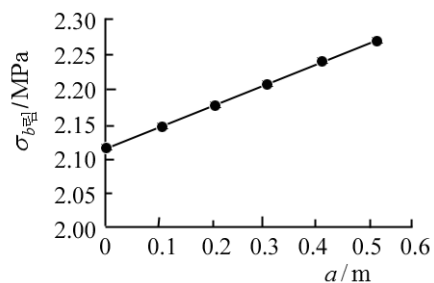


그림 4. 균렬길이에 따르는 분기림계응력변화

맺는 말

론문에서는 런속체력학의 테두리안에서 균렬을 가지는 암반재료의 새로운 력학적모형을 물체의 전체 탄성변형에너지를 변형에너지와 균렬에 의한 보충적에너지의 차로 취한데 기초하여 진행하였다.

평면균렬의 경우에 균렬단김효과를 고려한 I, II형응력확대결수식을 얻고 그것에 기초하여 보충적에너지를 표시하였으며 그린의 정리를 리용하여 재료의 역세기특성량들을 결정하였다. 얻어진 특성량들을 리용하여 COSMOS/M에서 응력, 변위, 변형해석과 안정성해석을 진행하였으며 강도안정성의 세가지 규준법에 의하여 안정성을 포괄적으로 결정할수 있는 알고리즘을 제기하고 수값실험을 보여주었다.

참고 문헌

- [1] Journal of **Kim Il Sung** University (Natural science), 3, 3, 5, Juche103(2014).
- [2] R. E. Goodman et al.; ASCE, 94, 637, 1968.
- [3] V. V. Nazimko; International J. of Lock Mechanics and Mining Science, 34, 5, 657, 1997.
- [4] H. Skrzypek et al.; Engineering Fracture Mechanics, 71, 681, 2004.
- [5] M. Oda; Soils and Foundations, 22, 96, 1982.
- [6] V. Vadim; Computational Materials Science, 26, 159, 2003.
- [7] Xi Qiao Feng et al.; Mechanics of Materials, 36, 261, 2004.
- [8] Li Xiang et al.; Journal of Science and Technology, 36, 22, 48, 2012.

주체104(2015)년 11월 5일 원고접수

On the Determination of the Elastic Stiffness of Crack Rock and the Stability of the Unprop Tunnel based on It

Kim In Bong, O Song Man

This paper represented the expression methods of the I, II type stress intensity factors regarded the crack closure effect in the bedrock with the cracks, and based on it, obtained the expressions of complementary energy.

And the stiffness properties is determined according to them and is suggested the algorithm by which the stability can be determined inclusively by the 3 criterions of the stability of the tunnel-strength, stiffness, bifurcation and are shown the numerical simulations.

Key words: crack rock, crack closure effect, stress intensity factor