

개별절리요소를 이용한 암반불연속면의 전단거동에 관한 수치모사

손봉기¹⁾ · 이연규²⁾ · 이정인³⁾

1. 서론

암반내에는 불연속면이 존재하고 이러한 불연속면은 지하구조물의 안정성에 영향을 미친다. 불연속면을 해석하기 위해서는 불연속면의 성질을 고려한 개별절리요소 해석이 필요하다. 본 연구에서는 새로운 구성방정식은 만들어 절리 거동을 모사해 보았다. 개별절리요소는 두께가 없는 6절점 등매개변수 요소를 이용하였다. 기본적인 가정은 고전적인 탄소성 이론에 근거를 두고 있고, 탄성거동은 전단강성과 수직강성에 의해 나타내지며, 소성거동을 나타내기 위해 비연상유동 법칙을 적용하였다. 항복함수와 소성 포텐셜함수는 최근에 Maksimovic에 의해 제시된 전단강도식과 이상돈-이정인에 의해 제시된 전단강도식을 사용하였다. 최대 전단강도 이전과 이후의 절리 거칠기 변화는 전단 방향의 소성일의 함수로 표현되는 멱함수 형태의 식으로 표현하였다. 제안된 모델을 가지고 직접 전단시험을 모사해본 결과 실제 실험에 나타나는 경화 및 연화현상 그리고 잔류전단강도와 같은 현상을 볼 수 있었다. 또한 여러 문헌에 제시된 동일조건외 절리면 직접전단 실험 결과와 비교적 잘 일치하였다.

2. 절리면 거동에 관한 구성방정식

2.1 항복함수

소성이론에 근거하여 절리면의 거동을 해석하기 위해서는 소성거동 여부를 판단하는 기준식이 필요하다. 최근에 Maksimovic가 제안한 전단 강도식을 소성함수로 사용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = |\tau| + \sigma_n \tan \left[\phi_B + \frac{\Delta\phi}{1 - \sigma_n/P_N} \right] \quad (1)$$

식(1)에서 $\Delta\phi$ 는“절리의 거칠각”으로, 불연속면의 표면 거칠기를 나타내고, P_N 은 “중간각압력(median angle pressure)”으로 변형도와 파괴에 대한 거칠기의 저항을 나타내는 항이다. 식(1)은 압축응력을 음의 부호로 사용하였다

또 이상돈-이정인은 절리의 거칠기를 객관적이고 정량적으로 측정하여 다음과 같은 전단 강도식을 제시하였다.

$$F = |\tau| + \sigma_n \tan \left(\phi_b + 1.44 i_{ave} \left(\frac{JCS}{-\sigma_n} \right)^{0.116} \right) \quad (2)$$

식(2)에서 i_{ave} 는 평균거칠각을 나타내고, 식(1)과 같이 압축응력을 음의 부호로 사용하였다.

주요어: 개별절리요소, 항복함수, 소성포텐셜 함수

- 1) 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사과정
- 2) 군산대학교 해양과학대학 해양시스템공학과 교수
- 3) 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수

2.2 소성포텐셜 함수

소성변형의 방향을 정의하기 위해 필요한 포텐셜 함수는 Lü & Brown(1988)의 연구에서와 같이 다음식의 형태로 표시할 수 있다.

$$Q = |d| + f(\sigma) = \text{const.} \quad (3)$$

탄성거동에서는 수직팽창이 발생하지 않는다고 가정할 수 있으므로 함수 Q 는 절리면의 수직팽창각(d)와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\tan(d) = \frac{dv^p}{du^p} = \frac{\partial Q / \partial \sigma}{\partial Q / \partial |d|} = \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (4)$$

식(4)에서 du^p 와 dv^p 는 각각 소성 전단변위증분과 소성 수직변위증분을 나타낸다.

2.3 소성경화 및 연화법칙

단일 절리면의 직접전단시험에서 나타나는 전단강도의 경화 및 연화특성은 소성변형에 따른 절리면 거칠기의 변화에서 기인한다고 할 수 있다. 이러한 거칠기의 변화는 하중이 가해지고 미끄러짐이 발생하면서 절리 거칠기의 손상으로 발생한다. 본 연구에서 제안한 멱함수 형태의 손상법칙은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi = \Delta\phi_0 \left(\frac{1}{1 + cW_t^p} \right)^a \quad (5)$$

여기서 W_t^p 는 전단방향의 소성일이고, $\Delta\phi_0$ 은 Maksimovic의 식에서는 초기 거칠각이고, 이상돈-이정인이 제시한 전단강도식에서는 평균 거칠각(i_{ave})로 생각할 수 있다. c 는 전단변형에 대한 절리면의 거칠기의 마모 내지는 파쇄 특성과 관련된 절리면 암석의 역학적 성질로 생각할 수 있고, 2차 거칠기의 마모에 관련된 상수로 생각할 수 있다. 상수 a 는 1차 거칠기의 파쇄에 관련된 변수로 최대전단강도 이후의 급격한 강도 저하나 높은 응력하에서의 작은 수직 팽창을 나타내는 상수로 생각할 수 있다.

3. 개별절리의 유한요소 해석 결과 및 검증

개발된 프로그램을 검증하기 위하여 일정 수직응력 조건하에서 수직응력을 0.5, 1, 2(MPa)로 변화시키면서 절리면의 전단거동을 수치적으로 모사하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 실험실 직접전단시험에서 나타나는 경화 및 연화 현상 그리고 최대 전단 강도 이후의 잔류강도 등 대표적인 현상을 비교적 정확히 모사 될 수 있음을 확인하였다.

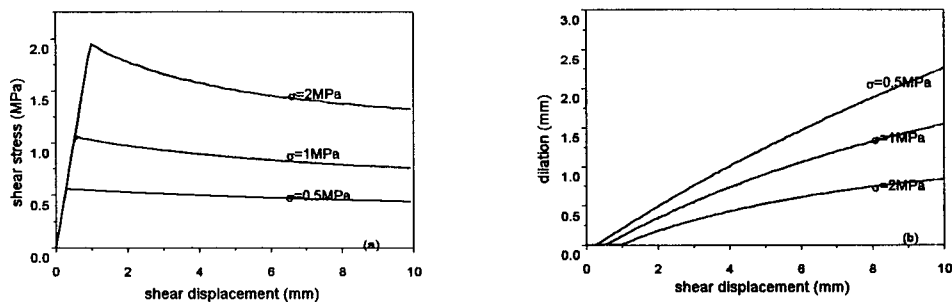


Fig.1 Shear behavior for different normal stresses under normal stress condition.

Fig.1은 Maksimovic가 제안한 전단강도식을 항복함수와 소성 포텐셜함수로 이용하여 나타낸 결과이다. Fig.1의 입력변수는 Table 1과 같다.

Table 1. Input Parameters for constant normal stress condition.
(unit of K_s, K_n : MPa/m, unit of c : m/MN)

K_s	K_n	ϕ_B	$\Delta\phi$	P_N	c	a
2000	4000	30°	20°	5MPa	100	1

Fig.1(a)은 수직응력이 증가할수록 최대 전단 강도와 최대 강도가 발생하는 변위가 증가함을 알 수 있다. Fig.1(b)는 거친 절리면에서 특징적으로 나타나는 전단변위에 대한 수직변위의 관계를 보여주는 것으로 수직응력이 클수록 팽창량이 적고, 절리면의 빠른 손상에 따라 수직팽창각이 빠르게 작아지고 있음을 보여준다.

4. 결 론

암반절리의 전단거동을 모사하기 위해 탄소성이론에 근거하여 상대변위를 허용할 수 있는 개별절리요소를 사용하였다. 항복함수와 소성 포텐셜함수로는 Maksimovic가 제안한 전단강도식과 이상돈,이정인이 실험에 의해 제시한 전단강도식을 이용하였다. 또한 최대 전단 강도 이전과 이후의 경화 및 연화현상을 나타내기 위해 멱함수 형태의 거칠기 손상법칙을 제시하였다. 비교적 단순한 입력자료로 직접전단시험을 수치해석적으로 모사 할 수 있었다.

참고문헌

1. 이연규, 이정인, 1998, 거친 절리면의 전단거동 해석을 위한 탄소성 구성법칙, 터널과 지하공간, Vol.8, p.234-248
2. 이상돈, 1996, 절리형상의 정량적 측정을 통한 각종 거칠기 파라미터의 비교분석 및 전단 거동 해석, 서울대학교 공학박사 학위논문.
3. 이희석, 1999, 주기전단 하중하의 암석 절리의 역학적 및 수리학적 거동 연구, 서울대학교 공학박사 학위논문
4. M. Maksimovic 1997, The shear strength components of a Rough rock joint. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 33, pp. 769-783
5. M. Maksimovic 1992, New description of the shear strength for rock joints. Rock Mech. Rock Engng., Vol. 25(4), pp. 275-284
6. Plesha M.E., (1985), Constitutive modeling of rock joints with dilation, Proc. of the 26th US Symp. on Rock Mech., pp.387-394