

암석의 균열전파 및 결합형태에 관한 실험적 연구

박남수¹⁾, 전석원²⁾

1. 서 론

암석은 지질학적 생성과정으로 많은 역학적 결합들을 포함하고 있으며 이러한 결합 사이에 무결합 부분인 암석 브릿지(rock bridge)가 존재한다. 암반에 하중이 가해지면 균열은 암석 브릿지로 전파하여 결합(coalescence)한다. 이러한 균열결합은 균열의 방향, 연속성(persistence) 등과 함께 암반의 파괴요인 중 하나로 작용하여 암반구조물의 안정성에 큰 영향을 미치게 된다. 지금까지의 연구는 시료성형의 어려움으로 인해 대부분 암석 모사시료를 이용하여 몇 가지 제한적인 균열형상에 대해서 실험하였으며, 실험재료에 따라 암석 브릿지에서 균열거동은 다르게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 단축 압축하중 하에서 암석 브릿지 및 균열주변에서의 균열거동 특성과 재료 및 균열형상 변화가 균열거동에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 또한, 암석 내의 균열형상 변화가 암석의 강도에 미치는 영향에 대해 Ashby & Hallam 모형을 적용하여 실험결과의 타당성을 검토하였다.

2. Ashby & Hallam 모형

압축상태 하의 암석의 취성적 파괴를 모사하기 위해 균열모형을 이용한 연구가 많이 이루어졌다. Ashby and Hallam(1986)은 Fig. 1과 같은 재료의 압축시험에 활주균열모형을 적용하여 다음과 같은 균열의 상호작용을 고려한 균열의 생성 및 전파에 관한 식을 제시하였다.

$$\frac{K_I}{\sigma_c \sqrt{\pi c}} = \frac{\sin 2\psi - \mu + \mu \cos 2\psi}{(1+L)^{3/2}} \left[0.23L + \frac{1}{\sqrt{3(1+L)}} \right] + \left[\frac{2\varepsilon_0(L + \cos \psi)}{\pi} \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서, L : 정규화된 날개형 균열 길이($L=l/c$), μ : 마찰계수, $\psi = 90 - \alpha$,

ε_0 : 균열밀도($\varepsilon_0 = Nc^2/A$, N : 균열의 수, A : 시료 단면적)

본 연구에서 암석파괴강도는 암석 브릿지에서 균열이 성장하여 결합할 때의 응력이므로 최대 날개형 균열 길이는 $l_{\max} = 2b \sin \beta$ 로 나타낼 수 있다. 최대압축강도 σ_c^{\max} 는 $K_I = K_{IC}$, $L = L_{cr} = l_{\max}/c$ 일 때의 값이므로 이를 식 (1)에 대입하고 이를 $K_{IC}/\sqrt{\pi c}$ 로 나누어서 정규화된 최대강도(normalized peak strength)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\sigma_c^{\max} \sqrt{\pi c}}{K_{IC}} = \left\{ \frac{\sin 2\psi - \mu + \mu \cos 2\psi}{(1+L_{cr})^{3/2}} \left[0.23L_{cr} + \frac{1}{\sqrt{3(1+L_{cr})}} \right] + \left[\frac{2\varepsilon_0(L_{cr} + \cos \psi)}{\pi} \right]^{1/2} \right\}^{-1} \quad (2)$$

3. 시료, 실험장치 및 실험방법

강화석고의 일종인 삼우화학사의 Diastone MR-150을 물과 중량비 26 : 100으로 혼합하여 암석 모사시료를 제작하였으며 암석시료로는 여산대리석을 사용하였다. $60 \times 120 \times 25$ mm의 직육면체 시료 중앙부에 두께 0.3 mm의 인공균열 2개를 균열각도(pre-existing crack angle, α), 브릿지각도(bridge

angle, β), 균열길이(pre-existing crack length, $2c$), 브릿지길이(bridge length, $2b$)를 변화시키면서 성형하였다. 균열각도 및 브릿지각도를 변화시키고 균열길이 및 브릿지길이를 10, 15, 20 mm로 변화시켜서 균열형상의 변화에 따른 균열의 전파 및 결합양상에 대해 살펴보았다. Fig. 2와 같이 SHIMADZU UDH-200AR 하중기에 2개의 LVDT를 부착하고 0.003 kN/s의 하중속도로 하중제어를 하였다. 가압하는 동안 전면의 돋보기를 통해 균열의 전파과정을 관찰하였고, 날개형 균열 개시응력, 날개형 균열 전파각도, 균열결합 응력을 기록하였다. 실험은 균열이 결합하거나 시료가 파괴될 때까지 실시하였다.

4. 실험결과

4.1 날개형 균열

시료를 계속 가압할 경우 균열의 내부 및 외부첨단에서 날개형 균열(wing crack)이 곡선형으로 개시하여 이후 가압방향에 평행하게 전파한다. 본 연구에서는 날개형 균열 개시응력과 날개형 균열 개시각도를 측정하였다. 날개형 균열 개시응력은 균열각도가 증가할수록 증가하였으며 이는 Reyes(1991), Vasarhelyi and Bobet(2000)와 일치하는 결과이다. 날개형 균열 전파각도 θ 는 이론상 균열각도에 관계없이 약 70.5° 로 일정하나, 본 연구에서는 $\alpha + \theta \approx 90^\circ$ 의 형태로 변화하였다. 브릿지길이를 증가시킨 경우 날개형 균열 개시응력은 증가한 반면, 균열길이를 증가시킨 경우에는 감소하였다.

4.2 균열결합 형태

본 연구에서는 Table 1과 같이 브릿지 각도에 따라 크게 전단, 인장, 혼합형의 3가지 균열결합이 관찰되었으며, 인장 유형에서는 5가지 세부 유형이 나타났다. Diastone 시료에서는 유형 II-5가 나타나지 않았으며, 대리석 시료에서는 유형 II-2와 III이 발생하지 않았다. 또한, 브릿지길이가 균열길이의 1.5배와 2배 사이인 범위에서 균열결합이 발생하지 않았다. Diastone 시료는 모든 경우에서 균열결합이 나타나지 않았으며 대리석 시료는 중첩하지 않는 균열에서만 균열결합이 발생하지 않았다.

4.3 균열결합 응력

균열형상 및 실험재료에 따른 영향을 정규화하기 위해 균열결합 응력에 $\sqrt{\pi c}/K_{IC}$ 를 곱하여 정규화된 최대강도를 구하였으며 이를 식 (2)의 Ashby & Hallam 모형의 이론해와 비교하여 실험결과를 검증하였다. 실험결과와 이론해는 비교적 일치하였으며 Diastone 시료가 대리석 시료에 비해 이론해와의 편차가 작았다. 이는 시료 내에 포함된 미세균열의 발달 정도가 다르기 때문으로 추정된다. 정규화된 최대강도는 균열각도가 45° 일 때 최소값을 갖는 이차곡선의 형태로 나타났다(Fig. 3). 브릿지길이를 증가시킨 경우 정규화된 최대강도는 증가한 반면, 균열길이를 증가시킨 경우에는 감소하였다.

5. 결론

- 1) 날개형 균열 개시응력은 균열각도가 증가할수록 증가하였다. 날개형 균열 전파각도 θ 는 이론적으로 약 70.5° 이지만, 본 연구에서는 균열각도가 증가할수록 날개형 균열 전파각도가 $\alpha + \theta \approx 90^\circ$ 의 형태로 감소하였다.
- 2) 압축하중이 증가하면 기존 균열에서 새로운 균열이 전파하여 암석 브릿지에서 결합하였으며, 균열결합 유형은 주로 브릿지각도의 영향을 받았다. 본 연구에서는 전단, 인장, 혼합(전단+인장)의 3가지 균열결합 유형이 관찰되었다.

3) 브릿지길이와 균열길이의 1.5배와 2배 사이인 범위에서 균열결합이 발생하지 않았다. Diastone 시료는 모든 경우에서 균열결합이 나타나지 않았으며 대리석 시료는 중첩하지 않는 균열에서만 균열결합이 발생하지 않았다.

4) 균열형상 및 실험재료에 따른 영향을 정규화하기 위해 정규화된 최대강도를 구하여 Ashby & Hallam 모형의 이론해와 비교하였으며 실험결과와 이론해는 비교적 일치하였다. Diastone 시료가 대리석 시료에 비해 이론해와의 편차가 작았으며 이는 시료 내에 포함된 미세균열의 발달 정도가 다르기 때문으로 추정된다. 정규화된 최대강도는 균열각도가 45° 일 때 최소값을 갖는 이차곡선의 형태로 나타났다.

5) 브릿지길이를 증가시킨 경우 날개형 균열 개시응력과 정규화된 최대강도는 증가한 반면, 균열길이를 증가시킨 경우는 날개형 균열 개시응력과 정규화된 최대강도는 감소하였다.

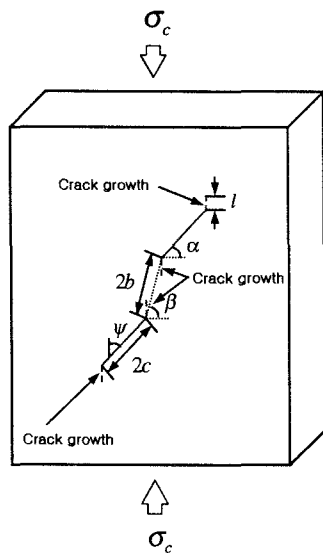


Fig. 1. Model containing two neighboring pre-existing cracks of length 2c

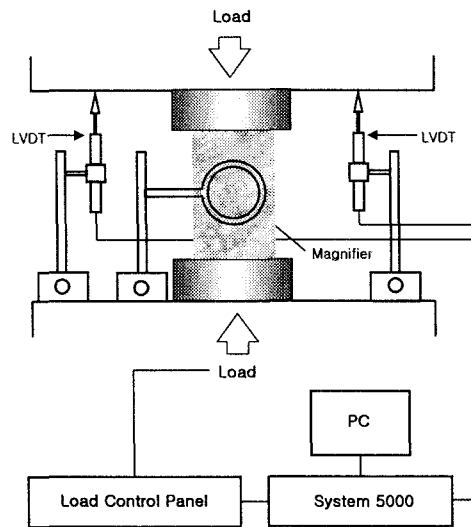
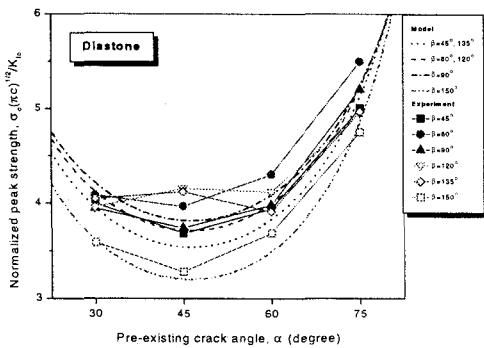
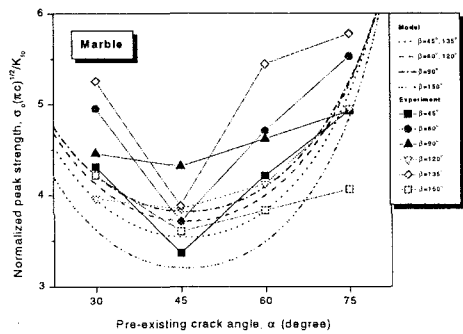


Fig. 2. Schematic diagram of test setup






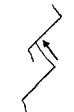



(a) Diastone



(b) Marble

Fig. 3. Pre-existing crack angle vs. normalized peak strength

Table 1. Classification for three types of crack coalescence

Type	Schematic path of coalescence	Description	Bridge angle	Mode of coalescence
I		Crack coalescence occurred by shear crack	$\beta < 90^\circ$	Shear
II-1		Wing crack initiated from the inner tips of pre-existing crack and coalescence occurred by its propagation	$\beta = 90^\circ$	Tension
II-2		Crack coalescence occurred by tension crack which initiated in the middle of rock bridge during the wing crack propagated	$\beta = 90^\circ$	Tension
II-3		Wing crack initiated from the inner tips of pre-existing crack and coalescence occurred by wing crack in the middle of pre-existing crack	$\beta > 90^\circ$	Tension
II-4		Wing crack initiated from the inner tips of pre-existing crack and coalescence occurred by wing crack in the outer tips of pre-existing crack	$\beta > 90^\circ$	Tension
II-5		Crack coalescence occurred by tension crack which initiated in the middle of rock bridge during the wing crack propagated	$\beta > 90^\circ$	Tension
III		Wing crack initiated from the inner tips of pre-existing crack and coalescence occurred by shear crack which propagated from the wing crack	-	Shear + Tension

6. 참고문헌

- Ashby, M.F. and Hallam, S.D., The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states, *Acta Metall.*, Vol. 34, No. 3, pp. 497-510, 1986.
- Reyes, O., Experimental study and analytical modeling of compressive fracture in brittle materials, *Ph.D. thesis, Mass. Inst. of Technol.*, Cambridge, 1991.
- Vasarhelyi, B. and Bobet, A., Modeling of crack initiation, propagation and coalescence in uniaxial compression, *Rock Mech and Rock Eng.*, Vol. 33, No. 2, pp. 119-139, 2000.
- Wong, R.H.C. and Chau, K.T., The coalescence of frictional cracks and the shear zone formation in brittle solids under compressive stress, *Int. J. Rock Mech Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 34, No. 3-4, Paper No. 335, 1997.

주요어: 암석 브릿지, 균열 결합 유형, 정규화된 최대강도, Ashby & Hallam 모형

- 1) 서울대학교 지구환경시스템공학부
- 2) 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수