

불연속면 분포 특성과 암반 사면의 안정성

윤운상 (서울대학교 지질학과 박사과정)

김정환 (서울대학교 지질학과 교수)

1. 서 론

불연속면의 방향, 길이, 간격 등 분포 특성(Fig. 1)은 암반 사면의 파괴에 가장 직접적인 요인이다. 일반적으로 사면의 안정성을 논의할 때, 하나의 활동면을 상정하여 이에 대한 안전을 해석을 실시하는 경우가 많다. 그러나, 많은 경우 암반의 파괴는 하나의 불연속면으로 정의된 활동면 보다는 수 개의 불연속면과 관련되어 형성된 활동면에 의해 발생한다. Fig. 2는 이 경우 고려할 수 있는 활동면의 형태로서 첫째, 두 개 이상의 절리군의 상호 교차에 의한 활동면(joint-joint system)과 둘째, 개개의 절리군 사이에 암교(rock bridge)가 존재하는 활동면(joint-rock bridge system)이 형성된 경우이다. 후자의 경우 작은 규모의 암교가 존재한다 하더라도 암반의 강도를 상당량 증가시키므로 사면의 안정성에 결정적인 요인이 될 수 있다. 이 논문에서는 후자의 경우를 중심으로 불연속면의 방향과 함께 암교(rock bridge)의 규모를 결정하는 불연속면의 분포 특성과 사면의 안정성과의 관계를 비교 분석하고자 한다.

2. 암반 활동 파괴와 불연속면의 분포 특성

Jennings(1970)는 동일 평면 상에 존재하는 불연속면과 그 사이의 암교를 고려하여 다음과 같이 절리의 연장성(persistence, K)를 정의하고, 이에 의해 전체 활동면의 전단강도(c_a , ϕ_a)와 전단 저항력(R)를 아래와 같이 제안하였다.

$$K = \frac{\sum JL}{\sum JL + \sum RBR} \quad : JL: \text{절리부의 길이, RBR: 암교의 길이}$$

$$c_a = (1 - K)c_r + Kc_j \quad : c_r, c_j : \text{암교 및 절리의 점착력}$$

$$\tan \phi_a = (1 - K) \tan \phi_r + K \tan \phi_j \quad : \phi_r, \phi_j : \text{암교 및 절리의 마찰각}$$

$$R = (\sigma_a \tan \phi_a + c_a)A \quad : \sigma_a : \text{활동면에 작용하는 평균 수직응력}$$

그러나, Jennings(1970)의 경우 불연속면이 동일 평면에 있다는 가정 하에 발생하는 파괴(in-plane failure)를 고려한 것으로서, 실제 암석의 경우 전단 강도에 비해 인장강도가 현저

히 작으므로 오히려 이러한 동일 평면상의 활동보다는 불연속면간 인장 균열의 발달에 의한 파괴(en-echelon failure)가 보다 일반적인 경우가 될 수 있다(Einstein, 1983).

여기서는 전형적인 두가지 예(Case 1, Case 2)를 설정하여, 불연속면의 분포 특성에 따른 두 경우의 파괴 특성을 분석해 보고자 한다(Fig. 3). 두 예의 안정성 분석에 사용된 안전율 공식은 아래와 같으며, 경사 90° 의 법면과 2,500kg/m³의 단위 중량 및 45° 의 불연속면 경사각을 가정하였다.

1) Case 1: rock bridge is normal to sliding plane

$$FS(\text{safety factor}) = \frac{R_{rt} + R_j}{\text{driving force}} = \frac{T_r \cdot S + (c_j + \sigma_n \cdot \tan \phi_j) \cdot l}{W \cdot \sin \theta}$$

2) Case 2: rock bridge is parallel to sliding plane

$$FS(\text{safety factor}) = \frac{R_{rs} + R_j}{\text{driving force}} = \frac{(c_r + \sigma_n \cdot \tan \phi_r) \cdot G + (c_j + \sigma_n \cdot \tan \phi_j) \cdot l}{W \cdot \sin \theta}$$

W: 하중, θ : 활동면 경사각, σ_n : 활동면에 대한 평균 수직 응력

R_j : 불연속면의 전단 저항, c_j, ϕ_j : 불연속면의 점착력 및 마찰각

R_{rt}, R_{rs} : 암석의 인장 및 전단 저항, T_r, c_r, ϕ_r : 암석의 인장강도, 점착력 및 마찰각

S, G: 불연속면의 법선 및 평행 간격(암교의 길이), A: 불연속면의 길이, l: 불연속면 활동 길이의 합

두 예에 대해 불연속면의 간격/길이 비에 따른 안전율을 비교해 보았다. Fig. 4는 암석의 인장강도를 1MPa로 가정하였을 때의 건조시기 안전율을 도시한 것으로서 Case 2에서는 암석의 점착력이 인장강도의 2배인 경우를 고려하였다. 동일한 간격/길이비에서 Case 1이 Case 2에 비해 2배 이상 불안정한 안전율을 보이고 있으며, Case 1의 경우 길이/간격 비가 약 0.05, Case 2에서는 약 0.02일 때, 안전율이 1인 한계 상태에 도달하는 것으로 분석되었다. 따라서 Case 1과 같이 불연속면의 사이에서 인장균열의 발달로 인한 파괴가 보다 암반 활동 파괴에 취약한 것으로 판단되며, 이 경우 건조 시 및 완전 포화 시의 간격/길이 비에 따른 암석의 임계 인장 강도를 비교해 본 결과 (Fig. 5), 건조 시의 간격/길이 비에 대한 임계 인장강도는 길이 간격 비가 0.05 이하인 경우 1MPa 이상으로 급격히 증가하고 있어 사면의 안정성에 대한 주의가 필요하며, 개별요소법 수치해석 프로그램인 UDEC(ITASCA, 1993)을 이용하여 비교한 결과와 잘 일치하고 있다. 불연속면과 암교가 완전히 포화된 상태를 가정하였을 경우, 임계 인장강도는 보다 증가하여 길이 간격 비가 0.1이하일 때, 1MPa 이상으로 급격히 증가하여 보다 그 위험성이 증대됨을 알 수 있다.

3. 사례 연구

연구 대상 사면은 경주-감포간 4번 국도 변의 덕동호 인근에 위치하는 암반 사면으로서 도로의 굴곡에 의해 사면 역시 굴곡되어 방향의 변화를 보이고 있다 (Fig. 6). 사면의 암석은 백악기 경상누층군의 암석으로서 사암과 셰일의 호층을 보이는 퇴적암이며, 이를 관입한 화강암맥이 분포하고 있다. 사면을 방향 변화에 따라 총 5개의 구간(A-B, B-C, C-D, D-E, E-F)으로 구분하였을 때, B-C와 C-D 두 구간에서 비교적 큰 규모의 파괴가 발생하였다. B-C 구간에서는 높이 30m 이상의 썩기 파괴가 약 35m의 거리를 두고 2개소에서 발생하였으며, C-D 구간에서는 비교적 얇은 평면 파괴가 역시 두 개소에서 발생하였다. 그 외 구간에서도 소규모의 원호 및 썩기 파괴가 발생하고 있다.

우선 사면의 파괴 형태를 분석하기 위해 불연속면의 길이를 고려한 평사 투영해석을 실시하였다 (Fig. 7). 불연속면의 길이를 고려하지 않은 평사 투영 해석 결과, 두 구간 모두 파괴 영역에 해당하지 않고 있다. 즉 Zone B-C에서는 두 개의 큰 규모의 썩기 파괴가 발생하였음에도 불구하고, 썩기 암괴의 미끄러짐 방향은 사면에 대해 안정한 썩기를 지시하고 있다. 그러나, 동일한 방향 자료에 대해 각 불연속면의 자취 길이를 가중 요소로 채택하여 평사 투영 해석을 실시한 결과, Zone B-C와 C-D에서 실제 발생한 썩기 파괴 형태를 비교적 정확히 예측할 수 있는 분석 결과를 도출할 수 있었다. 이러한 결과는 암반 사면의 파괴 가능성이 불연속면의 방향, 길이, 간격 등 분포 특성과 밀접한 관련이 있음을 지시하고 있다.

이 사면에서 발생한 대규모의 썩기 파괴에 대한 불연속면 분포의 직접적인 영향을 분석하기 위해 썩기를 형성하는 주 절리군인 Set 1을 대상으로 두 썩기 발생 지점을 연결하는 수평 조사선을 상정하여 특성 조사를 실시하였다. Set 1 불연속면의 길이 및 간격의 확률밀도분포는 여러 저자에 의해 논의된 것(Priest and Hudson, 1976, 1981; Wallis and King, 1988)과 같이 음의 지수 분포 또는 power-law 분포의 형태를 보이고 있으며, 특히 길이에 대한 누적 빈도 분석 결과에서는 비교적 뚜렷한 power-law 분포의 특성을 보이고 있다 (Fig. 8). 이러한 불연속면 길이의 누적 빈도 분포는 일정 길이 이상의 불연속면에 대한 누적 빈도 및 간격을 분석 또는 추정할 수 있어 이를 이용한 암반 분류 또는 사면에 직접적인 영향을 줄 수 있는 큰 규모의 불연속면의 발달 간격을 추정하므로써 사면 안정성 해석에 대한 보다 객관적인 정보를 제공할 수 있다. 특히 조사선상의 불연속면 분포에 대한 분석을 실시한 결과 (Fig. 9), 조사선의 양끝인 파괴 지점에서 불연속면의 빈도와 밀도가 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 특히 썩기 파괴 발생 지점에서 간격/길이 비가 0.05 이하로 감소하는 것을 알 수 있다. 이상의 결과는 실제 사면에서 파괴 가능성과 파괴 발생 위치가 불연속면의 분포 특성과 밀접한 관련이 있으며, 특히 분포 특성의 상호 관계에 대한 분석과 공간적 분포에 대한 이해는 사면 파괴를 이해하는 중요한 근거로 활용할 수 있다.

4. 결 론

이 상에서 불연속면의 분포 특성이 사면의 안정성에 미치는 영향에 대한 안전율 차원의 분석과 이에 대한 사례 분석을 수행하였다. 그 결과 사면의 활동면으로 작용하는 불연속면의 길이와 간격/길이 비에 의해 암교의 길이 등 활동면의 상태와 활동 암괴의 증량이 변화하며, 이에 의해 사면의 안정성에 심각한 영향을 주는 것으로 확인되었다. 분석된 사례에서도 불연속면의 특성 특히, 방향, 길이, 간격 등 분포 특성의 상태와 상호 관계가 사면 파괴에 직접적인 영향을 주는 것으로 분석되었다.

참고 문헌

- Einstein, H. H., Veneziano, D, Baecher, G. B. and O'Reilly, K. J., 1983, The effect of discontinuity persistence on rock slope stability, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 20, 227-236.
- ITASCA, 1993, User's manual UDEC.
- Jennings, J. E., 1970, A mathematical theory for the calculation of the stability of open cast mine. *Proc. Symp. on the Teoretical Background to the Planning of Open Pit Mines*, Johannesburg, 87-102.
- Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1976, Discontinuity spacing in rock, *Int. J. Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 13, 138-148
- Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline survey, *Int. J. Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 18, 183-197.
- Wallis, P. F. and King, M. S., 1980, Discontinuity spacing in a crystalline rock. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 17, 63-66

사 사

이 논문은 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방지기술개발사업으로 수행한 내용이다. 연구에 많은 조언을 해주신 한국자원연구소 김원영 부장님께 감사드린다.

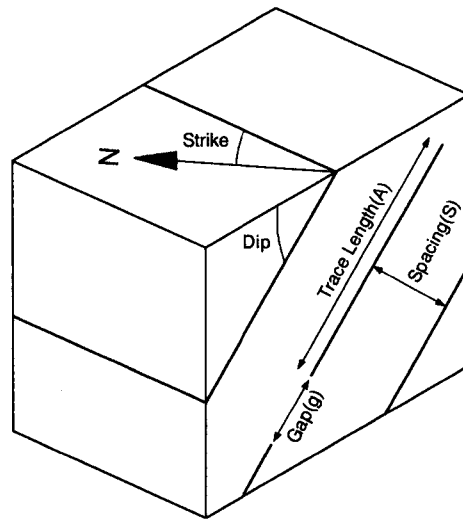


Fig. 1 Distribution

properties of discontinuity

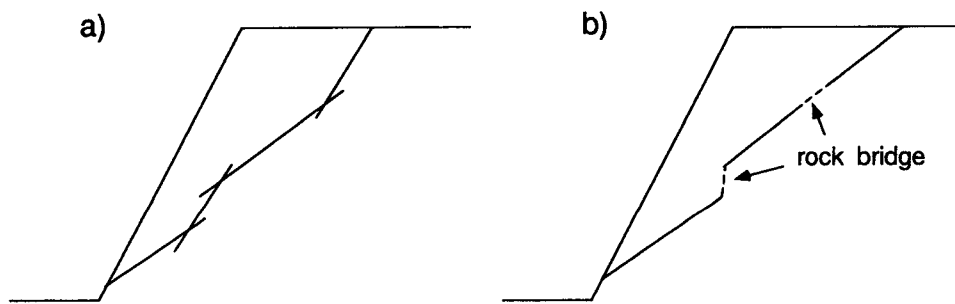


Fig. 2 Multi-plane sliding of rock slope. a) Joint-Joint, b) Joint-Rock bridge system

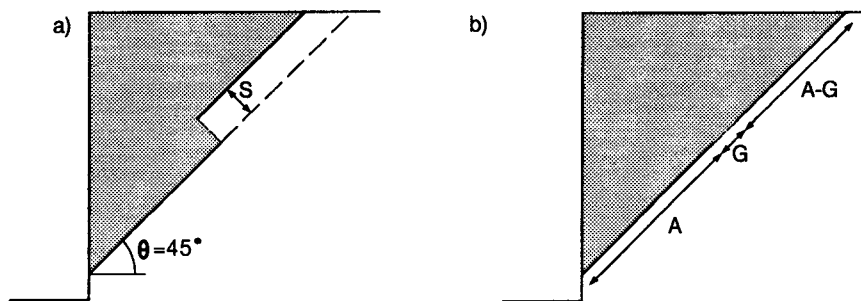


Fig. 3 Sliding cases of rock bridge(normal(a) or parallel(b) to sliding plane) system

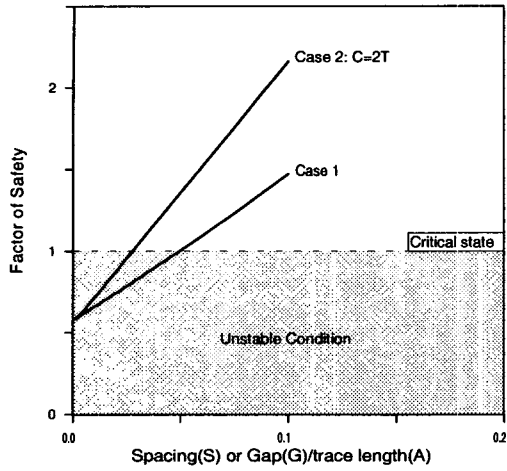


Fig. 4 Safety factor analysis

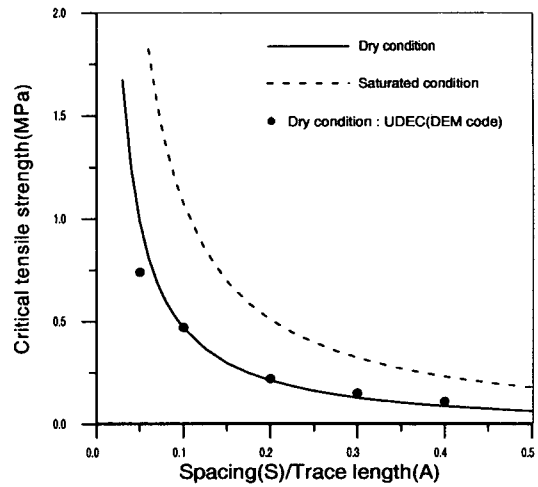


Fig. 5 Critical tensile strength of rock bridge

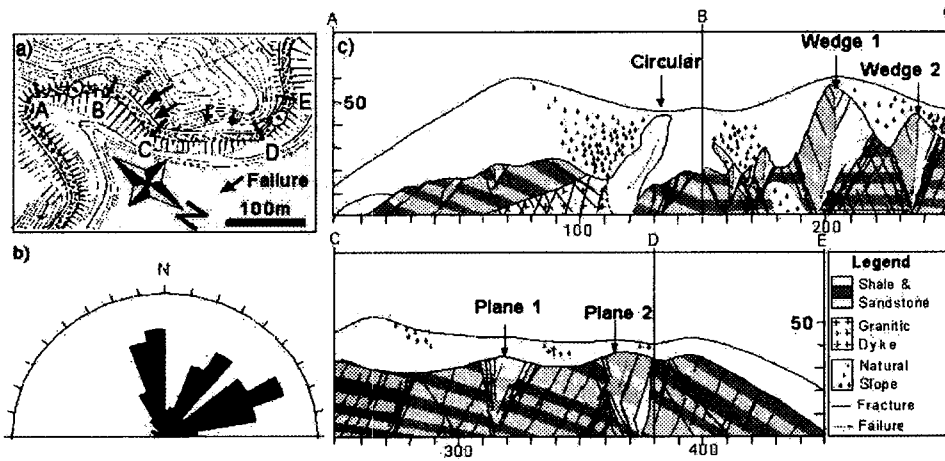


Fig. 6 Failure patterns of case slope

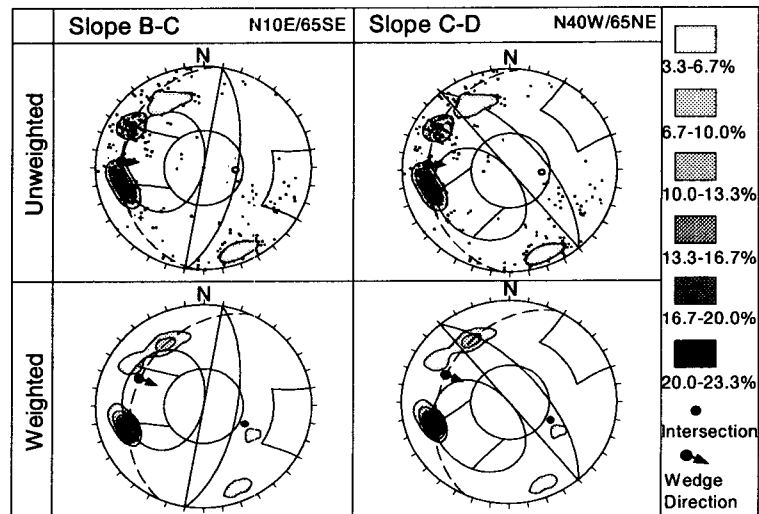


Fig. 7 Stereographic analysis to be considered discontinuity distribution properties

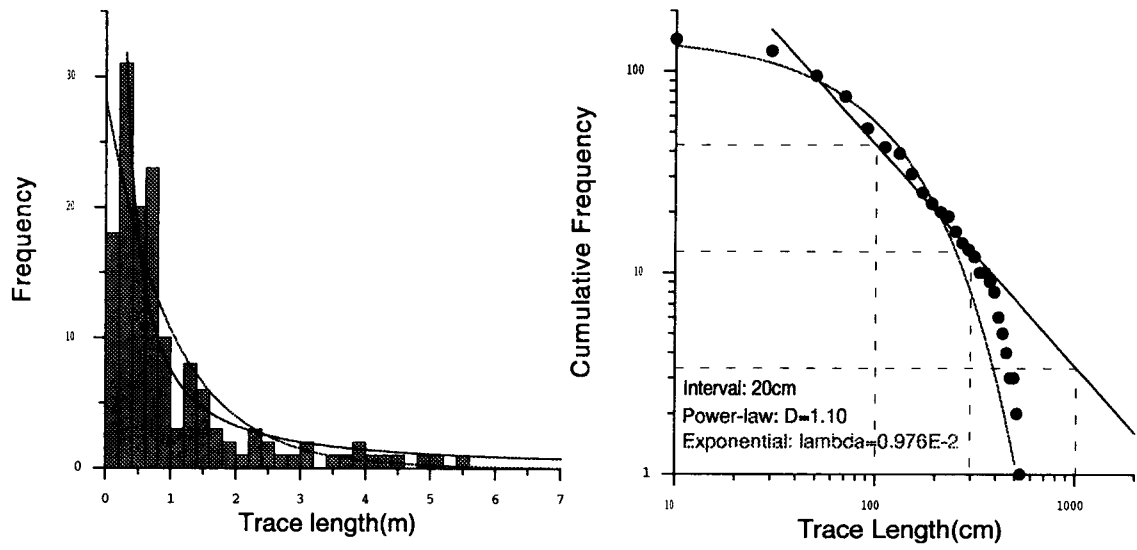


Fig. 8 Statistical characteristics of Set 1 discontinuity trace length distribution properties

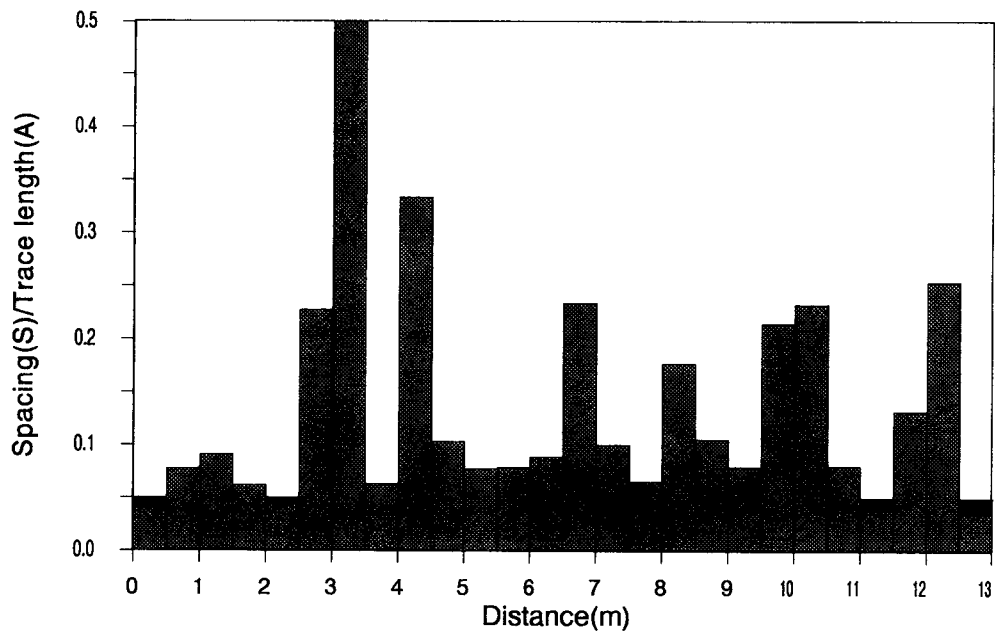


Fig. 9 Spatial distribution of Set 1 discontinuity distribution properties