

사면의 평면 형상을 고려한 평사투영해석법과 그 적용

윤운상 · 김정환 (서울대학교 지질과학과)

1. 서 론

암사면의 파괴를 예측하는 방법의 하나로서 평사투영법을 이용하여 불연속면에 따른 암반 활동 조건(rock sliding condition)을 분석하는 방법이 활발하게 적용되고 있다. 이 논문에서는 일반적으로 적용되어진 직선 일면 사면 외에 다양한 평면 형상을 가진 굴곡된 형태의 절취 사면에 대한 평사투영법의 적용에 대해 논의하고 그 사례를 검토하고자 한다.

2. 사면 형태에 따른 암반 활동 조건

여기서 주로 논하고자 하는 사면의 평면 형상은 사면을 형성하는 자유면의 수에 의해 정의되며, 자유면이 하나인 일면 사면(single face slope)과 자유면이 두 개 이상인 불록한 형태의 다면 사면(multi face slope)으로 구분할 수 있다.

일반적으로 적용되는 평사투영법에서 일면 사면의 활동 파괴 조건은 썩기를 형성하는 두 불연속면의 교차선이 사면의 노출 범위(daylight envelope, Markland, 1972)에 해당하고, 그 경사각(plunge)이 마찰각(friction angle)보다 클 때 발생하며, 이러한 범위를 활동 범위(sliding envelope)라 한다. 이에 더하여 Hoek and Bray(1981)는 암반의 활동 파괴를 썩기 파괴와 평면 파괴로 구분하고 평면 파괴가 발생하기 위한 일반 조건을 제시하였으며, 이 중 측면 저항을 무시할 수 있는 조건을 제기한 바 있다. 그러나, 암 사면의 경우 사면의 측면을 개방시키는 또 다른 자유면이 존재하거나, 활동 암괴의 측면을 절단하는 활동면 이외의 불연속면이 존재할 경우에 성립할 수 있으므로 사실상 일면 사면에서 단일 절리군(single joint set)에 의한 평면 파괴 조건은 성립하지 않는다. 따라서 평면 파괴 조건은 두 개 이상의 절

리군이 존재할 때와 여타의 절리군의 발달 상태가 뚜렷하지 않은 상태에서 하나의 우세한 절리군만이 분포할 경우로 구분할 필요가 있다(Table 1).

두 개 이상의 절리군이 존재할 때의 활동 파괴 조건에 대해서 Hocking(1976)은 사면의 활동 파괴 조건을 일면 활동 조건(single plane sliding)과 두 불연속면의 교선을 따르는 활동이 발생하는 양면 활동 조건(double plane sliding)으로 구분하였다(Fig. 1).

다면 사면의 경우, 노출범위(daylight envelope, D_t)는 사면을 구성하는 각 자유면들의 노출범위($D_1, D_2 \dots D_n$)의 합집합으로 정의할 수 있으며, 이 노출 범위에 대한 활동 조건은 일면 사면과 동일한 적용을 받는다.

$$D_t = D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_n$$

그러나, 여타의 절리군 발달이 미약하고 뚜렷한 하나의 우세 절리군이 발달하는 암사면의 경우 그 하나의 불연속면에 의해 발생하는 활동 파괴는 일면 사면에서는 가능하지 않다. 이러한 단일 절리군에 의한 활동 파괴(일면 활동 또는 평면 파괴)는 자유면이 2개 이상인 다면 사면에서만 가능하다 (Fig. 2). 다면 사면에서 이러한 단일절리군에 의한 평면 파괴의 발생은 다음과 같은 조건이 성립할 때 가능하다.

첫째, 활동면의 주향(또는 경사방향, θ)은 양측 사면의 주향(또는 경사방향, α, β) 사이에 놓여야 한다. ($\alpha < \theta < \beta$)

둘째, 활동면의 경사각(ψ_p)은 사면의 경사각(ψ_f)보다 작아야 하며, 인장 균열이 존재하지 않을 때에는 사면의 하부 최대 돌출 길이(Y')와 높이(H)의 비에 의해 최소값이 제한된다.

$$(\psi_p < \psi_f \text{ 또는 } \tan^{-1}(H/Y') < \psi_p < \psi_f; \text{ 인장 균열이 없을 때})$$

셋째, 활동면의 경사각(ψ_p)은 그 면의 마찰각(φ)보다 커야 한다. ($\psi_p > \varphi$)

3. 다면 사면의 암반 활동 예측을 위한 평사투영망

다면 사면을 그 형태에 따라 이면(two face), 삼면(three face), 곡면 호상(curved face or arcuate) 사면에 대해 활동파괴예측을 위한 평사투영망을 제시하고, 절리군의 방향 및 평균

사면의 길이(X)와 돌출 거리(Y)에 따라 최대파괴규모에 대한 분석을 실시하였다.

평균 사면의 길이 X는 평면 상에서 양측 사면(side slope, RS, LS)의 끝점을 이은 평균 사면(mean slope, MS)의 길이로 정의하고, 돌출 거리 Y는 평면 상에서 평균 사면에서 최대 돌출부까지의 거리로 정의된다. 최대 평면 활동 면적의 산출을 위한 양측 사면의 방향과 활동면 또는 불연속면의 각관계 분석을 위해 양측 사면이 평균 사면 방향과 이루는 각을 측면 사면각 α , β 라 하고, 활동면 또는 불연속면의 주향이 평균 사면방향과 이루는 예각을 평면 활동각 θ 로 하여 분석하였다.

3.1 이면 사면(two face slope: triangular shape)

이면 사면은 두 개의 자유면에 의해 형성된 굴곡 다면 사면으로서 사면 상부의 평면과 최대 활동 면적 A는 Fig. 3a와 같다. 이면 사면의 노출 범위는 이면 사면을 이루는 두 개 사면의 노출범위를 합친 범위와 같다. Fig. 3b는 이면 사면의 활동 범위를 불연속면의 대원(girdle) 또는 극점(pole) 도시에 의해 분석할 수 있도록 한 평사 투영망이다. 그림의 예는 평균 사면(NS/60E)에 대해 각각 30° ($\alpha = \beta$)의 측면 사면각을 가지는 양측 사면으로 구성된 이면 사면으로서 불연속면의 마찰각이 30° 인 예이다. 이 때, 단일 절리군에 의해 발생하는 일면 활동 범위는 음영 처리된 부분으로서 사면 활동 범위에서 두 양측 사면의 경사 방향 사이에 해당하는 범위가 된다.

3.2 삼면 사면(three face slope: quadrangular shape)

삼면 사면은 세 개의 자유면에 의해 형성된 굴곡 다면 사면으로서 양측 사면과 중앙 사면(central slope)으로 구성되며, 사면 상부의 평면과 최대 활동 면적 A는 Fig. 4a와 같다. 삼면 사면의 노출 범위는 삼면 사면을 이루는 세 개 사면의 노출범위를 합친 범위로서 Fig. 4b는 삼면 사면의 활동 범위를 분석할 수 있도록 한 평사 투영망이다. 그림의 예는 평균 사면(NS/60E)에 대해 각각 30° 의 측면 사면각을 가지는 양측 사면과 평균 사면과 동일한 방향의 중앙 사면으로 구성된 삼면 사면으로서 불연속면의 마찰각은 30° 로 가정하였다.

3.3 곡면 사면(curved face slope: arcuate shape)

곡면 사면 중 호상 사면은 원호 형태의 평면을 가지는 사면으로서 호를 이루는 무수히 많

은 자유면의 조합으로 이루어진 형태이며, 사면 상부의 평면과 최대 활동 면적은 Fig. 5a와 같다. 곡면 호상 사면의 경우 양측 사면은 호상 사면의 양단 접선 방향이 이루는 사면이며, 측면 사면각 α , β 는 호상 사면의 이 접선과 평균사면이 이루는 각으로 정의할 수 있다. 또한, 호상 사면의 노출범위는 호를 이루는 무수한 자유면의 노출범위를 합친 범위이다. 이 때, 각 자유면의 경사각이 동일하다면, 즉 호상 사면 전 구간의 경사각이 동일하다면 노출범위는 양측 사면의 노출범위와 양측 사면의 극점 또는 대원의 최대 경사점을 연결하는 소원이 이루는 범위이다. Fig. 5b는 전 구간에서 경사각이 동일한 곡면 호상 사면의 활동 범위를 분석할 수 있도록 한 평사 투영망으로서 평균 사면(NS/60E)에 대해 각각 30° 의 접선 측면 사면각의 양측 사면을 가지는 호상 사면이며, 불연속면의 마찰각은 30° 로 가정하였다.

4. 적용 사례

사례에서는 일면 사면의 사례와 다면 사면의 사례에 대해 살펴보도록 하겠다.

일면 사면의 사례는 서울 사당동 부근의 대규모 암반 절취 사면의 사례로서 일면 활동(single sliding)의 전형적인 양상을 보여 주고 있다. 평사투영해석에서도 사면의 경사 방향과 주 불연속면의 교차선 방향 사이에 한 불연속면 대원의 최대 경사점이 놓이므로 일면 활동 파괴로 분석되어진다.

다면 사면의 사례로는 경주 덕동호 부근의 굴곡이 심한 국도 주변 사면으로서 곳곳에 썩기 파괴와 평면 파괴가 발생하였다. 이 굴곡 사면을 이면 사면으로 근사하여 평사 투영해석한 결과, 두 절리군에 의한 썩기 파괴(양면 활동) 및 평면 파괴(일면 활동)뿐 아니라 단일 절리군에 의한 일면 활동 파괴의 가능성이 있는 것으로 분석할 수 있다 (Fig. 6).

5. 결 론

이 연구에서는 굴곡 사면 또는 다면 사면의 암반 활동 예측을 위한 평사 투영 해석법과 평면 상에서 단일 절리군에 의한 최대 일면 활동 면적에 대해 다루었다.

위에서 언급한 바와 같이 다면 사면의 경우 단일 사면에서의 모든 활동 조건을 포함하고

있으며, 이 때 다면 사면의 노출범위(daylight envelope, D_i)는 사면을 구성하는 자유면들의 노출범위($D_1, D_2 \dots D_n$)의 합집합으로 정의할 수 있으며, 최대 활동 면적은 측면 사면각 또는 다면 사면의 평균 사면 길이 및 돌출 거리에 의해 제한 받으며, 활동면이 평균 사면의 방향과 이루는 각이 커질수록 급격히 작아진다. 따라서 Hoek and Bray(1981)가 제시한 $\pm 20^\circ$ 의 평면 파괴 범위는 다면 사면에서의 일반적인 일면 활동 조건으로 볼 수는 없으나, 활동 가능한 암괴의 최대 활동 면적과 관련하여 재해도가 큰 암반 활동 범위 분석의 유의미한 기준으로 활용할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- Hocking, G., 1976, A method for distinguishing between single and double plane sliding of tetrahedral wedges, Int. J. Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 13. p 225-226.
- Hoek, E., and Bray, J. ,1981, Rock slope engineering, Inst. Min. Metall, London, Eng., 309p.
- Markland, J. T.,1972, A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected, Imperial College Rock Mechanics Research Report No. 19, 10 p

사 사

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

table 1. Sling failure modes of rock slope

table 1. Sling failure modes of rock slope

Hocking, 1976	Hoek & Bray, 1981	This study	
		Single-face slope	Multi-face slope
Single plane sliding	Plane failure	Single plane sliding	Single joint set sliding
			Single plane sliding
Double plane sliding	Wedge failure	Double plane sliding	Double plane sliding

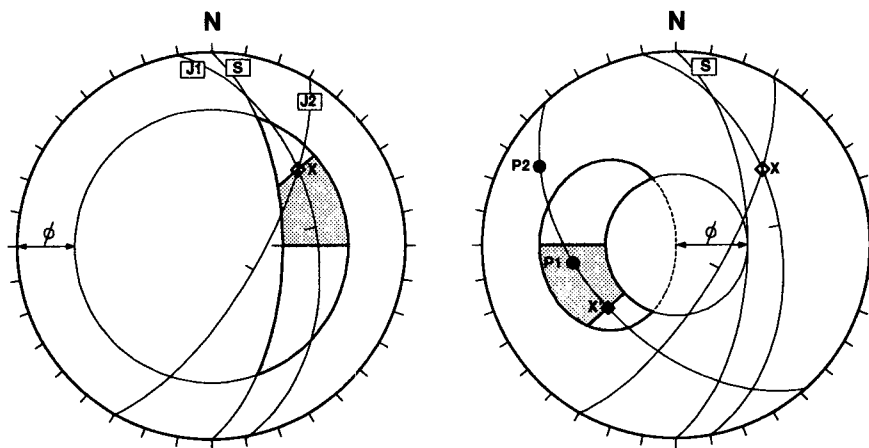


Fig. 1 Hocking's method

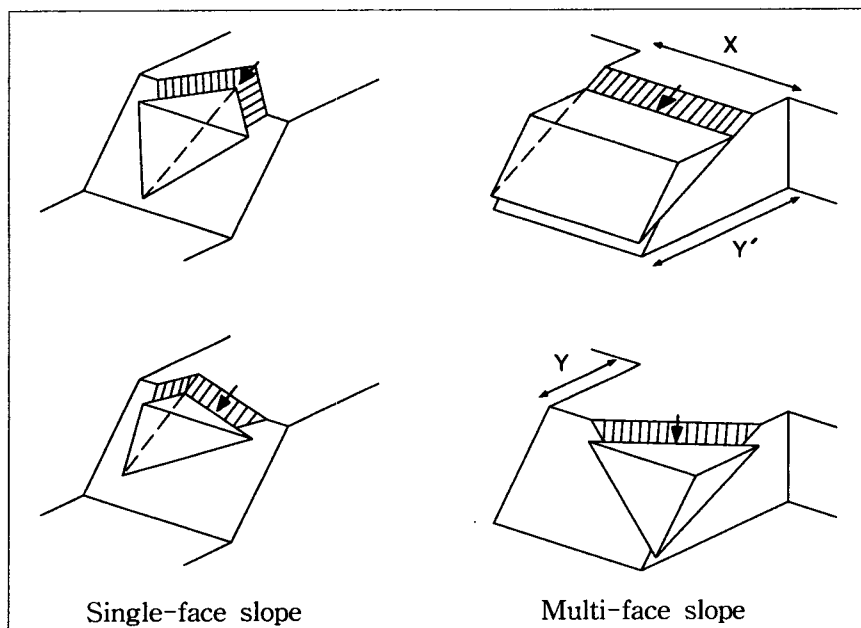


Fig. 2 Sliding failures of single- or multi-face slope

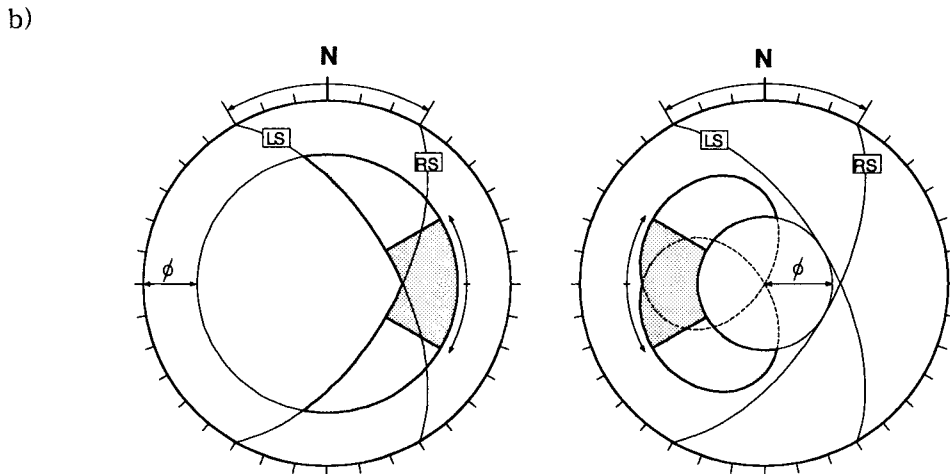
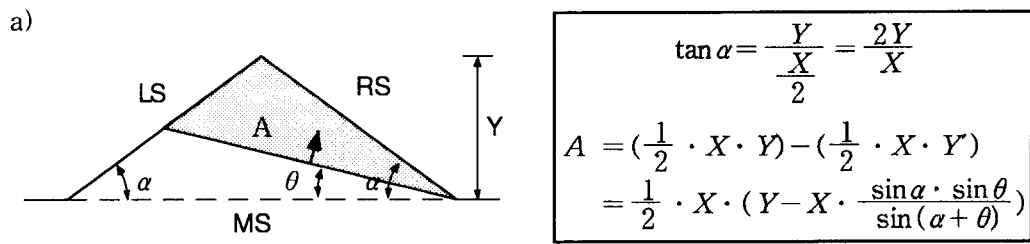


Fig. 3 Sliding condition of two face slope. a) sliding area, b) stereonet

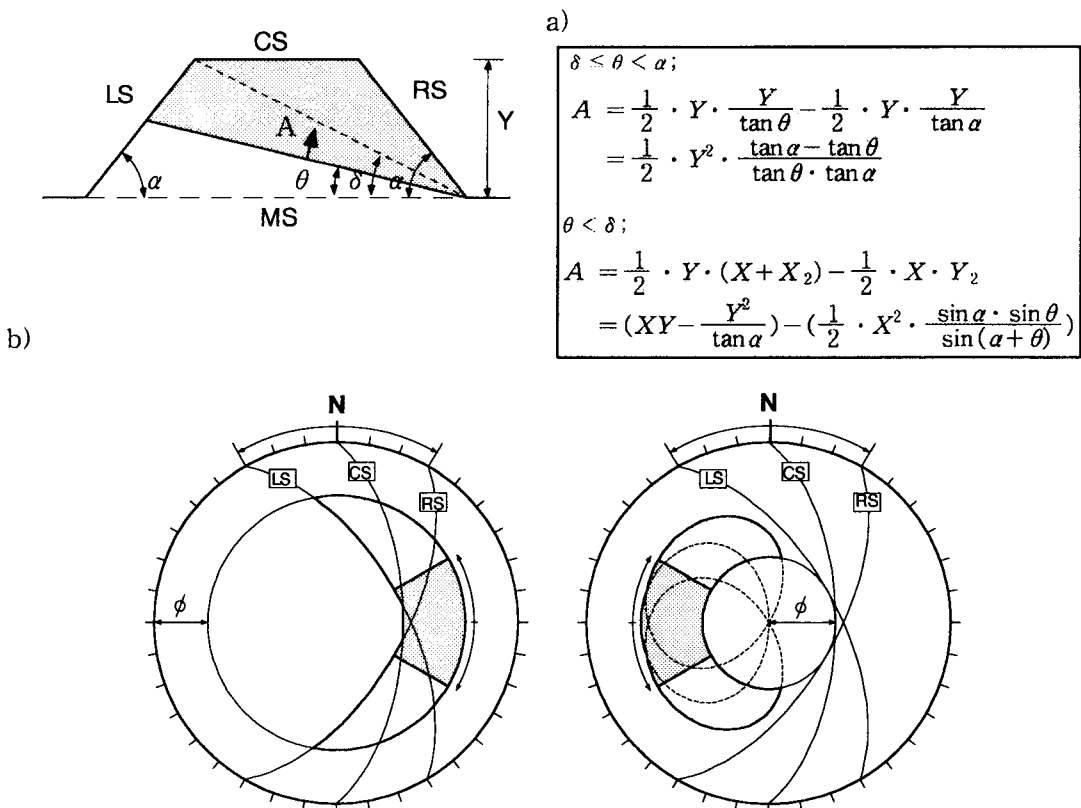


Fig. 4 Sliding condition of three face slope. a) sliding area, b) stereonet

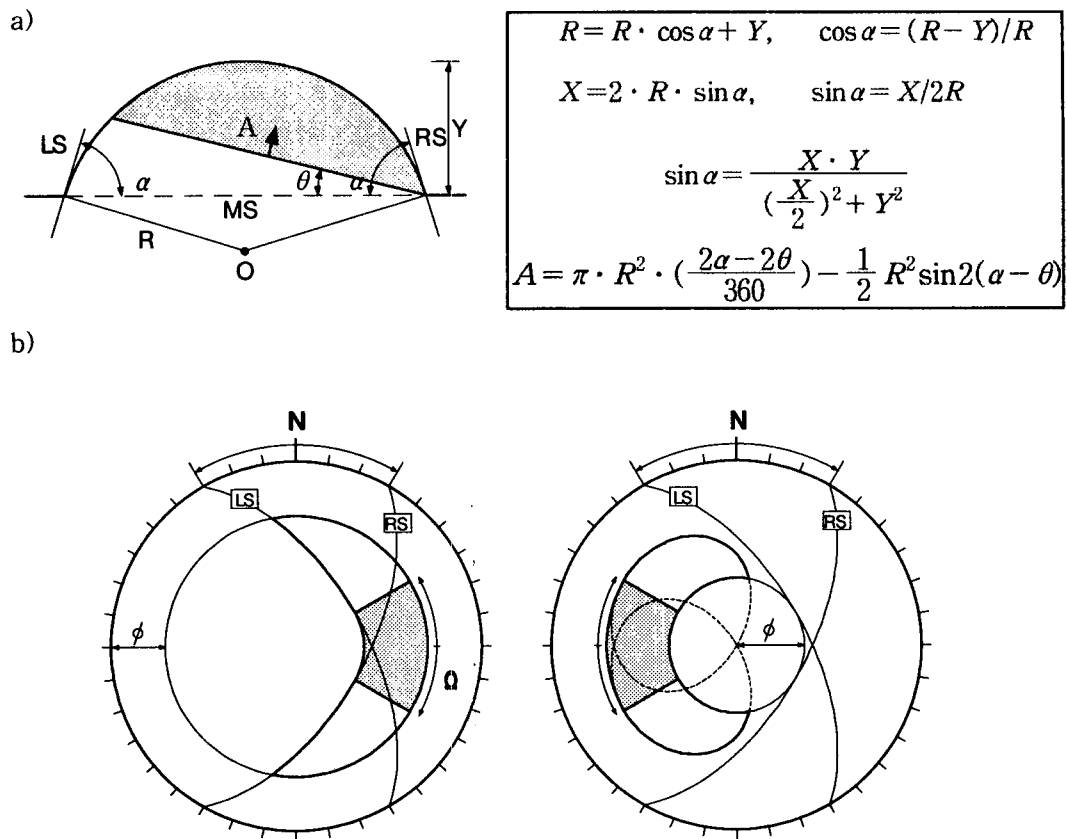


Fig. 5 Sliding condition of curved slope. a) sliding area, b) stereonet

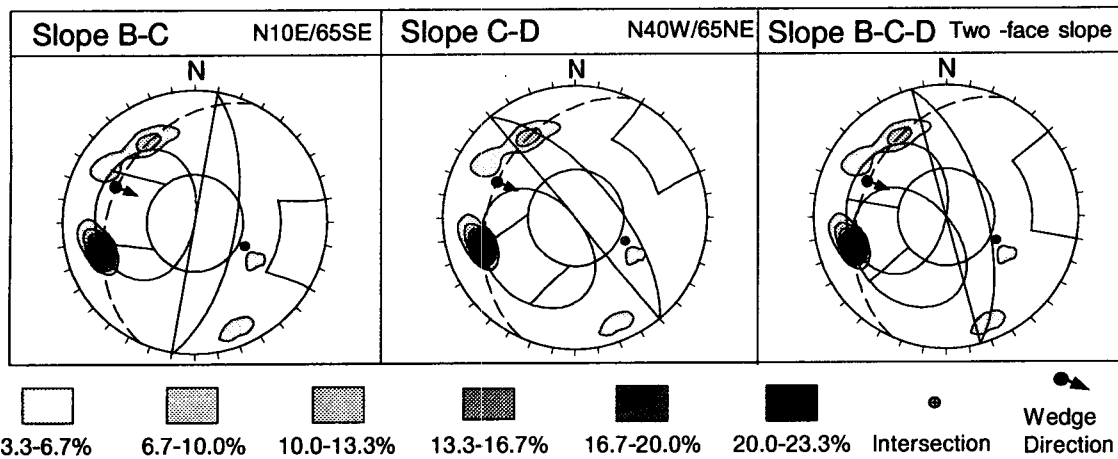


Fig. 6 Cases of stereographic analysis for rock sliding