

암반사면의 전도파괴에 대한 안정해석

Stability Analysis of Toppling Failure in Rock Slopes

이명재¹⁾, Myung-Jae Lee, 이인모²⁾, In-Mo Lee, 김진홍³⁾, Jin-Hong Kim

¹⁾ (주)경호기술단 연구소 소장, Manager, Technical Research Dept., Kyung-Ho Eng. Co., Ltd.

²⁾ 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

³⁾ 한석엔지니어링 토질부 이사, Manager, Geotechnical Dept., Han-Suk Eng. Co., Ltd.

개요(SYNOPSIS) : The purpose of this paper is to formulate and apply the stability analysis of toppling failure under several loading conditions. The stability analysis condition in toppling failure of rock slope is mainly influenced by the dip angle α_B and H/t ratio. For checking toppling failures in design, the stability charts composed of the dip angle α_B versus H/t ratio has been constructed in this paper.

주요어(Key Words) : Rock Slope, Toppling Failure, Stability Analysis, Stability Chart

1. 서론

암반사면의 파괴형태는 불연속면과 굴착면의 방향에 따라 크게 평면파괴(Plane Failure), 썰기 파괴(Wedge Failure) 및 전도파괴(Toppling Failure) 등으로 분류된다. 암반사면의 전도파괴는 불연속면의 주향(Strike)이 굴착면과 거의 평행하고 불연속면의 경사각(Dip Angle)이 급하고 불연속면의 발달빈도가 많은 경우에 주로 발생한다. 암반사면의 평면 및 썰기파괴에 대한 안정해석방법은 많은 적용예가 있으나, 전도파괴에 대한 안정해석방법 및 적용은 상대적으로 미약한 편이다.

본 고에서는 합리적인 암반사면의 안정해석을 위하여 수압, 지진하중 및 지보력 등을 고려할 수 있는 안정해석방법을 제안하고 예제해석을 통하여 검증하였다.

2. 전도파괴에 대한 안정해석

2.1 개요

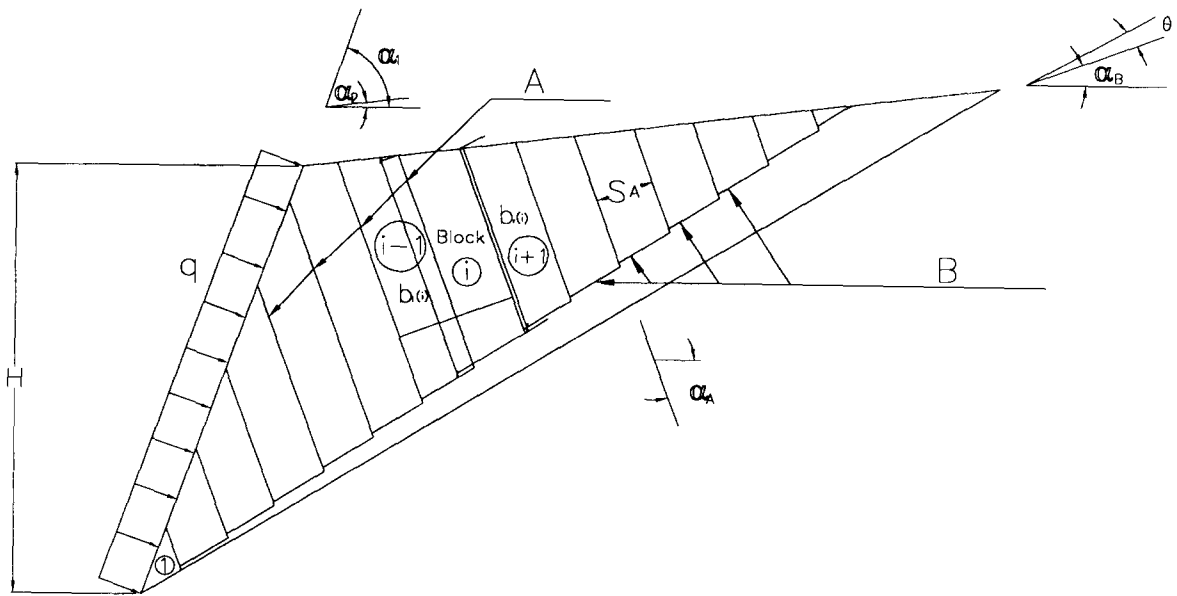
암반사면의 전도파괴에 대한 안정해석은 크게 기하학적해석(Kinematic Analysis)과 안정해석(Stability Analysis)으로 나뉜다. 기하학적해석은 불연속면과 굴착면의 경사방향과 경사각의 상대적인 분포경향에 따라 암반사면의 안정성을 검토하는 방법이다. 기하학적으로 파괴조건을 만족하는 경우에 암반사면에 작용하는 자중 및 외부하중에 대한 힘의 평형관계를 검토하는 방법이 극한 평형안정해석(Limit Equilibrium Stability Analysis)이다. 일반적으로 암반사면의 전도파괴에 대한 안정해석은 평사투영법 혹은 Goodman과 Bray(1976)의 경험식을 이용한 기하학적해석으로 검토된다. 하지만, 기하학적해석은 하중조건을 전혀 반영할 수 없으므로 실제 설계시 적용성에 제약이 따른다.

본 고에서는 굴착사면의 전도파괴에 대한 설계시 굴착각과 지보력을 고려할 수 있고 자중 뿐만 아니라 수압 및 지진하중 등을 고려할 수 있는 해석방법을 제안하였다. 또한, 개발된 Program을 이용한 적용사례 및 설계에 이용가능한 안정도표(Stability Chart)를 제시하였다.

2.2 안정해석방법

전도파괴의 조건은 불연속면의 반복적인 발달로 형성된 암반절편의 무게중심이 암반사면의 바닥보다 외부로 치우칠 때 발생한다. 전도파괴는 사면정상부(Slope Crest)의 큰 수평변위와 상대적으로 작은 사면저점부(Slope Toe)의 변위발생으로 특징지을 수 있다. 사면정상부와 저점부의 상대변위가 누적되어 암반절편간의 변형이 발생하며, 절편간의 전단강도 및 바닥부와와의 전단강도가 작용하중보다 작은 경우에 전도파괴가 발생한다.

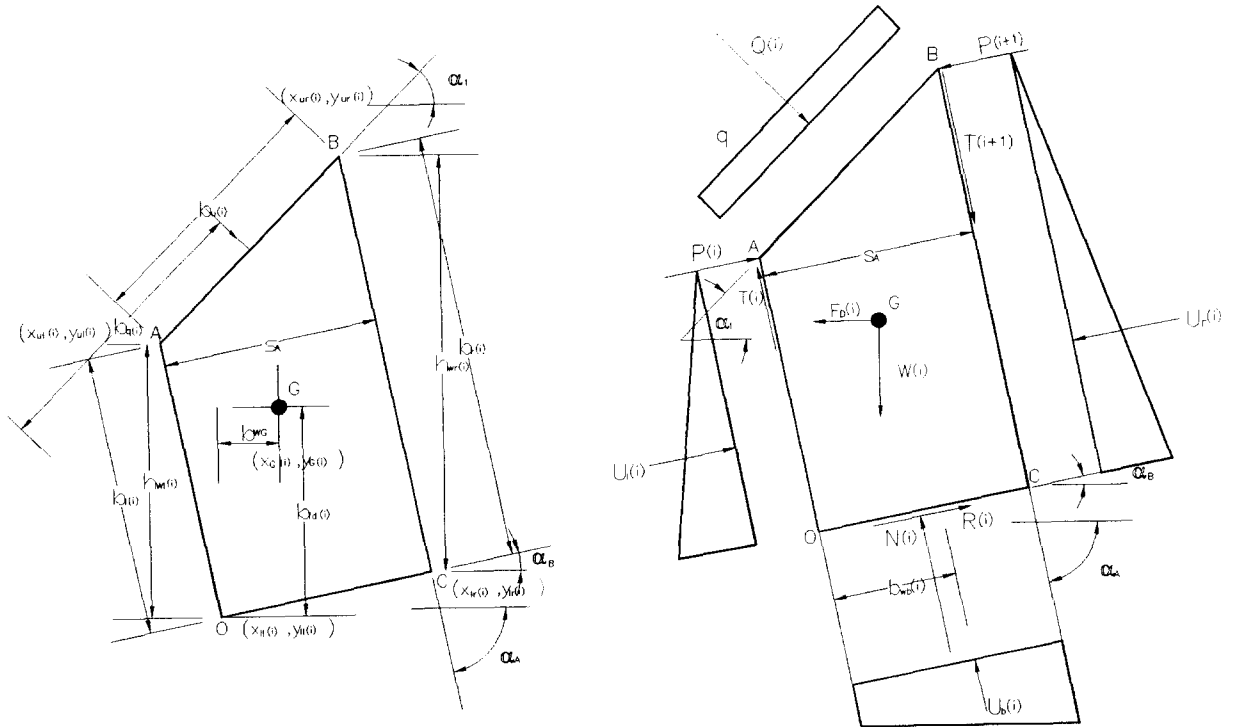
전도파괴는 굴착면과 불연속면의 주향이 거의 평행하고 경사방향(Dip Direction)이 굴착면과 반대방향이고 경사각이 급한 불연속면(Discontinuity 'A', 그림 1.)이 사면높이에 비해 상대적으로 작은 간격(S_A , 그림 1.)으로 발달한 경우에 발생한다. 또한, 전도파괴가 발생하기 위해서는 굴착면의 주향과 평행하고 사면 굴착각보다 경사각이 작은 다른 불연속면(Discontinuity 'B', 그림 1.)이 존재해야 한다. 그림 1.에 나타낸 바와 같이 사면 저점부의 절편부터 차례로 '1, ..., i-1, i, i+1, ..., n' 절편으로 정의하면 불안정한 (i+1)번째 절편에 작용하는 하중과 전단강도와의 차이로 정의되는 전달하중이 (i)번째 절편으로 전달된다. 이 누적된 전달하중이 사면저점부의 첫번째 절편까지 전달되면 파괴로 정의한다(Goodman and Bray, 1976). 이 전달하중($P(i)$)은 전도저항력($P_t(i)$, Toppling Resistance of the ith Slice)과 전단저항력($P_s(i)$, Shear Resistance of the ith Slice) 중 큰 값으로 정의되며 이 전달하중이 (i-1)절편으로 전달된다. 암반사면의 전도파괴는 저점부 첫번째 절편의 전달하중(P_1)이 '0' 보다 큰 경우에 발생한다.



- H : slope height
- q : uniformly distributed stabilizing pressure
- α_1, α_2 : cutting angle of slope and of upper slope surface
- α_A, α_B : dip angle of discontinuity planes A and B
- S_A : spacing of discontinuity system A
- θ : step angle
- $b_l(i), b_r(i)$: left and right height of block

그림 1. 가상파괴면에서의 전도파괴 안정해석

전도저항력 및 전단저항력은 그림 2.에 나타난 바와같이 (i)번째 절편의 'O'점에서 모멘트평형조건식과 불연속면 'A'의 직각방향 힘의 평형조건식으로부터 산출된다. 그림 2.(a)에 (i)번째 절편의 기하학적 크기를 나타내었다. 그림 2.(b)에 나타난 바와같이 (i)번째 절편에 작용하는 힘은 중력(W(i)), 지보력(Q(i)), 수압(U_r(i)와 U_b(i)) 및 지진하중(F_D(i))이며 불연속면 'A'에 법선력(P(i)와 P(i+1))과 접선력(T(i)와 T(i+1))이 작용하고 불연속면 'B'에는 법선저항력(N(i))과 전단저항력(R(i))이 작용한다. 전도저항력과 전단저항력은 아래식으로 정의된다.



(a) 기하학적 형상

(b) 작용하중

그림 2. (i)번째 절편의 기하학적 형상과 작용하중

$$\begin{aligned}
 P_{s1} &= F_D(i) \times \cos(\alpha_B) + W(i) \times \sin(\alpha_B) \\
 &+ \left\{ P(i+1) + (u_r(i) - u_l(i)) \right\} \times \cos(\alpha_A + \alpha_B - 90^\circ) \\
 &+ T(i+1) \times \sin(\alpha_A + \alpha_B - 90^\circ) - Q(i) \times \cos(90^\circ - \alpha_1 + \alpha_B) \\
 P_{s2} &= \left\{ w(i) \times \cos(\alpha_B) - F_D(i) \sin(\alpha_B) + T(i+1) \times \cos(\alpha_A + \alpha_B - 90^\circ) \right. \\
 &\quad \left. - (P(i+1) + u_r(i) - u_l(i)) \times \sin(\alpha_A + \alpha_B - 90^\circ) \right. \\
 &\quad \left. + Q(i) \times \sin(90^\circ - \alpha_1 + \alpha_B) \right\} \times \tan \phi_B \\
 P_{s3} &= \cos(\alpha_A + \alpha_B - 90^\circ) + (\tan \phi_A + \tan \phi_B) \times \sin(\alpha_A + \alpha_B - 90^\circ) \\
 &\quad - \tan \phi_A \cdot \tan \phi_B \times \cos(\alpha_A + \alpha_B - 90^\circ) \\
 P_s(i) &= (P_{s1} - P_{s2}) / P_{s3} \tag{1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_r(i) = & \left[P(i+1) \times \left[b_r(i) + \sqrt{(x_{ll}(i) - x_{lr}(i))^2 + (y_{ll}(i) - y_{lr}(i))^2} \right. \right. \\
& \times \sin(\alpha_A + \alpha_B - 90^\circ) \left. \left. \right] + u_r(i) \times b_{wr}(i) - u_l(i) \times b_{wl}(i) \right. \\
& + U_b(i) \times b_{wb}(i) + F_D(i) \times b_{fd}(i) - W(i) \times b_w(i) \\
& \left. - T(i+1) \times S_A - Q(i) \times b_q(i) \right] / b_l(i) \tag{2}
\end{aligned}$$

2.3 해석 Program 개발

암반사면의 전도파괴에 대한 안정해석은 그림 1.의 (n)번째 절편에서부터 앞절에서 제안한 식 (1)과 (2)를 이용하여 $P_i(i)$ 와 $P_s(i)$ 를 산정하고 그중에 큰 값을 $P(i)$ 으로하여 순차적으로 첫 번째 절편까지 계산한다. 첫 번째 절편의 P_1 를 산정하여 ' $P_1 > 0$ ' 이면 전도파괴, ' $P_1 \leq 0$ ' 이면 안정으로 정의한다. 해석과정을 그림 3.에 나타내었다.

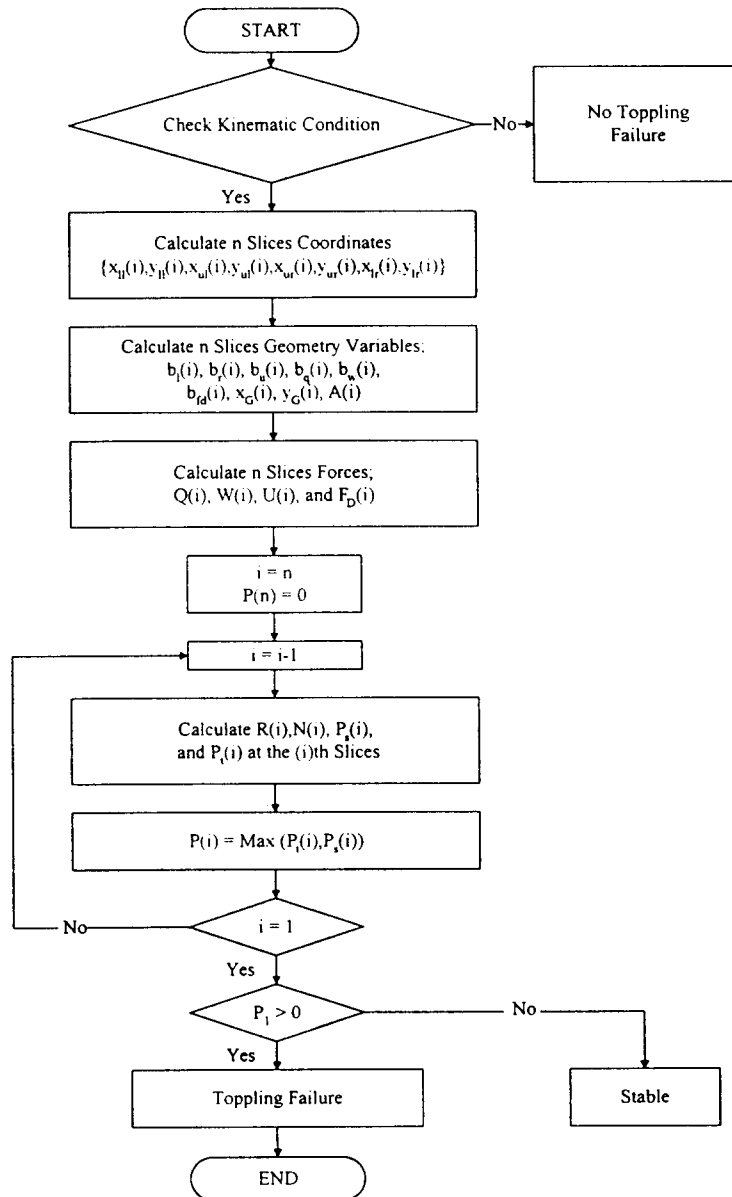


그림 3. 암반사면의 전도파괴에 대한 안정해석 흐름도

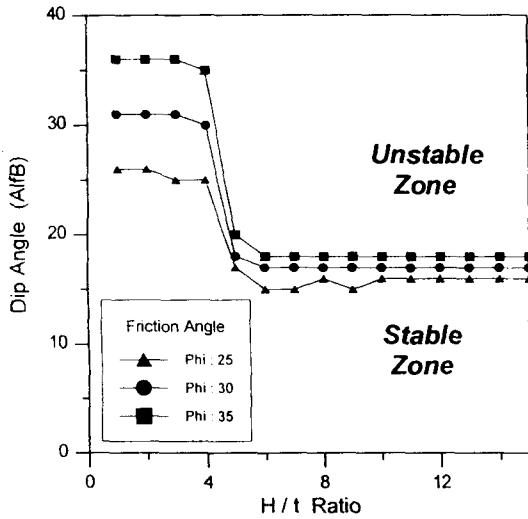


그림 6. 내부마찰각에 따른 안정도표

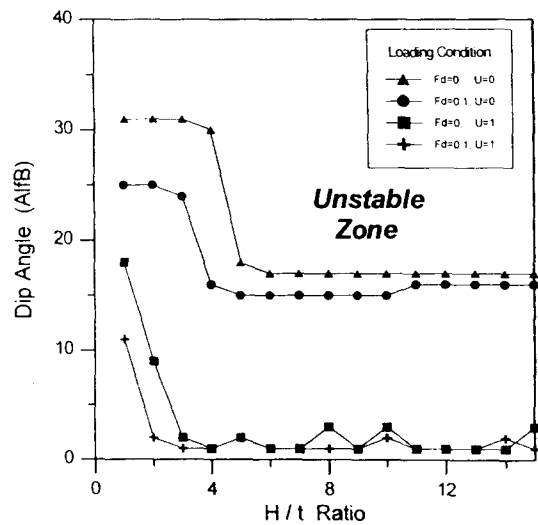


그림 7. 수압과 지진하중에 따른 안정도표

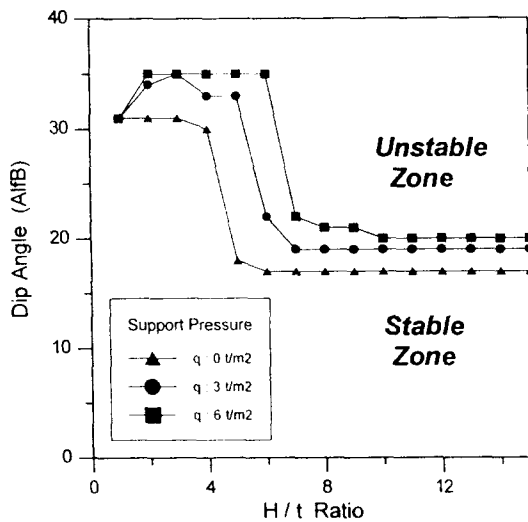


그림 8. 지보력에 따른 안정도표

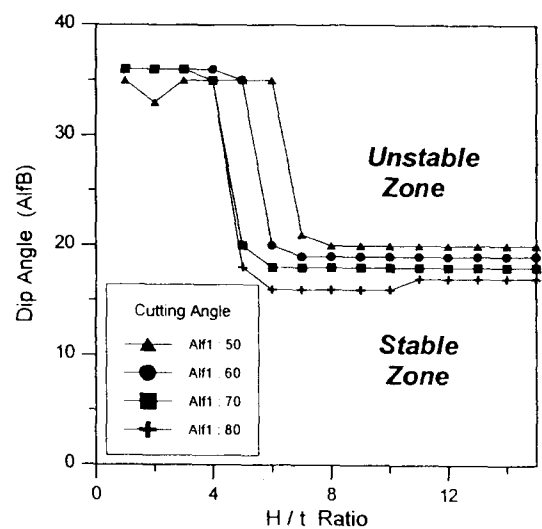


그림 9. 굴착각에 따른 안정도표

4. 결론

본 고에서는 제안한 암반사면의 전도파괴에 대한 안정해석방법은 불연속면의 기하학적 특성 뿐만 아니라 수압, 지진하중 및 지보력 등을 해석에 합리적으로 반영할 수 있어 암반사면 보강대책 검토시 하중조건에 따른 적정구배의 굴착방법과 Rock Bolt 등의 필요지보력을 산정할 수 있다. 암반사면의 전도파괴에 대한 안정해석시 가장 중요한 영향인자는 H/t비와 α_B 이다. 또한, 그림 6. ~ 9.에 제안한 안정도표는 암반사면의 전도파괴에 대한 안정성을 하중조건 및 매개변수의 분포특성에 따라 정량적으로 평가가능하므로 쉽게 설계에 적용가능하다.

참고문헌

1. Goodman, R. E. and Bray, J. W. (1976), "Toppling of Rock Slope", ASCE Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes, Vol.2, pp.201-234.
2. Scavia, C., Barla, G. and Bernaudo, V. (1990), "Probabilistic Stability Analysis of Block Toppling Failure in Rock Slopes", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 27, No. 6, pp. 465-478.
3. Zambak, C. (1983), "Design Charts for Rock Slopes Susceptible Toppling", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, No. 8, pp. 1039-1062.