

파괴형태를 고려한 암반사면의 신뢰도해석

Reliability-Based Analysis for Rock Slopes Considering Failure Modes

이 인 모*¹
Lee, In-Mo

이 명 재*²
Lee, Myung-Jae

Abstract

This paper presents the results of sensitivity analysis based on an example study to verify a newly developed reliability-based model for rock slopes considering uncertainties of discontinuities and failure modes-plane, wedge, and toppling. The parameters that are needed for sensitivity analysis are the variability of discontinuity properties (orientation and strength of discontinuities), the loading conditions, and the rock slope geometry. The variability in orientation and friction angle of discontinuities, which can not be considered in the deterministic analysis, has a great influence on the rock slope stability. The stability of rock slopes including failure modes is more influenced by the selection of dip direction of cutting rock face than any other design variables. The example study shows that the developed reliability-based analysis model can reasonably assess the stability of rock slope.

요 지

본 논문은 새로 개발된 파괴형태를 고려한 암반사면의 신뢰도해석 모델의 검증을 위하여 예제를 통한 민감도해석을 수행하였고 그 결과를 수록하였다. 민감도분석에 이용된 매개변수는 암반 불연속면의 공학적 특성 (불연속면의 방향 및 강도), 하중조건 및 암반사면의 기하학적 형상 등이다. 확률론적해석에서 고려할 수 있는 불연속면의 방향 및 마찰각의 통계적특성이 파괴형태를 고려한 암반사면의 안정에 큰 영향을 보였다. 암반사면의 안정은 굴착면의 방향에 가장 민감하였다. 예제분석을 통하여 개발된 파괴형태를 고려한 암반사면의 신뢰도모델은 암반사면의 안정성 조사에 성공적으로 적용할 수 있었다.

Keywords : Reliability-based analysis, Failure modes, Rock slope, Discontinuity, Monte Carlo simulation, Sensitivity analysis

*1 정희원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

*2 정희원, (주)도담엔지니어링 대표이사

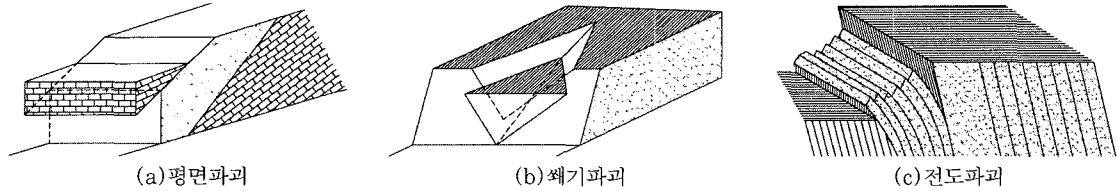


그림 1. 암반사면의 파괴형태

1. 서론

암반사면의 파괴형태는 불연속면과 굴착면의 방향에 따라 크게 평면파괴(plane failure), 썩기파괴(wedge failure) 및 전도파괴(toppling failure) 등으로 분류된다. 일반적으로 암반사면의 안정해석은 크게 기하학적해석(kinematic analysis)과 안정해석(stability analysis)으로 나뉜다. 암반사면의 기하학적 해석은 암반의 불연속면과 굴착면의 경사방향과 경사각의 상대적인 분포경향에 따라 암반사면의 안정성을 검토하는 방법으로 실제 설계에 넓게 이용되고 있다(Hoek 과 Bray, 1981; Leung와 Kheok, 1987). 하지만, 파괴형태를 고려한 암반사면의 안정해석은 직선변형(평면 및 썩기파괴)과 회전변형(전도파괴)을 결합한 극한평형 안정해석방법이 난해하여 연구 및 설계에 거의 반영되지 못하고 있다.

암반사면의 불연속면의 방향, 빈도, 투수성 및 강도 등의 공학적특성은 지질조건, 응력상태, 조사방법오차 등으로 인한 많은 불확실성을 내포하고 있다. 실제 설계시 암반사면의 정확한 해석 및 보강대책을 검토하기 위해서는 파괴 형태를 고려한 해석, 불연속면의 방향 및 강도의 통계적특성, 굴착면의 경사각과 지보력을 고려한 기하학적해석과 안정해석을 결합한 확률론적 안정해석방법이 필요하다.

본 논문에서는 암반굴착사면의 설계시 파괴 형태, 불연속면의 통계적 특성, 굴착면의 경사각과 지보력을 고려할 수 있고 자중 뿐 만 아니라 수압 및 지진하중 등을 고려할 수 있는 해석방법 및 해

석프로그램을 제안하여 예제해석에 적용하였다. 또한, 사면높이, 암반내 불연속면의 방향 및 강도의 통계적 특성, 불연속면 간격 및 암반사면 경사각 등의 매개변수에 따른 파괴형태를 고려한 암반사면의 신뢰도 해석모델의 민감도해석을 실시하였다.

2. 암반사면의 안정해석

2.1 암반사면의 파괴형태

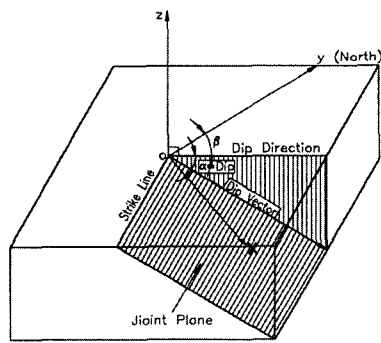
암반사면의 안정조건은 암반내 불연속면의 기하학적 형상과 강도특성에 좌우된다. 절취면에 대한 불연속면의 상대적인 발달 방향은 평면, 썩기 및 전도파괴 등의 파괴형태를 좌우하는 중요한 인자이다(그림 1).

일반적으로 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. 하지만, 기하학적 해석은 하중조건을 전혀 반영할 수 없으므로 실제 설계시 정확한 해석 및 보강대책을 검토하기 어렵다. 기하학적으로 파괴조건을 만족하는 경우에 암반사면에 작용하는 자중 및 외부하중에 대한 힘의 평형관계를 검토하는 방법이 극한평형안정해석(limit equilibrium stability analysis)이다. 이 단계에서는 굴착면의 경사각 및 지보력을 정량적으로 평가 가능하며, 자중 뿐 만 아니라 수압 및 지진하중도 반영할 수 있다.

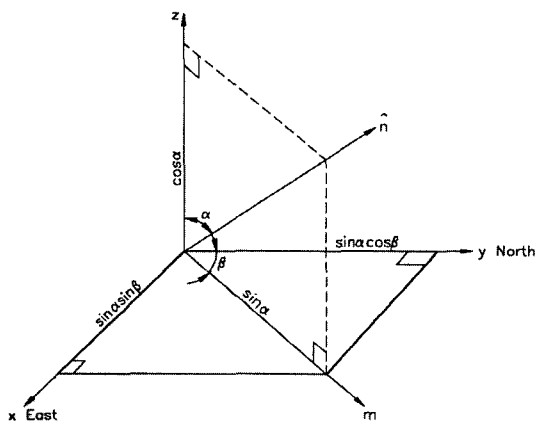
본 논문에서는 평면 및 쉐기파괴의 안정해석은 블럭이론(Goodman과 Shi, 1985)에 근거하여 산정하였으며, 전도파괴는 새로 개발된 해석모델(이명재와 이인모, 1998)을 이용하였다.

2.2 평면 및 쉐기파괴

암반사면의 평면 및 쉐기파괴에 대한 안정해석시 벡터해석방법은 각 블럭의 체적, 블럭면의 면적 및 방향, 모서리의 위치 및 방향 등을 쉽게 수식화할 수 있다. 자중, 수압, 지진력과 지보력을 고려한 키블럭의 정적 및 동적 평형 방정식은 벡터로 표현가능하다. 벡터해법에서는 불연속면의 방향을 단위법선벡터로 표현한다.



(a)절리면의 방향 및 경사



(b)기준좌표계

그림 2. 법선벡터의 기준좌표계

불연속면의 단위 법선 벡터(\hat{n})는 경사(dip, α)와 경사방향(dip direction, β)을 이용하여 아래식으로 표현되며 기준좌표계는 그림 2에 나타내었다.

$$\hat{n} = (\sin \alpha \sin \beta, \sin \alpha \cos \beta, \cos \alpha) \quad (1)$$

블럭이론에 의한 암반사면의 평면 및 쉐기파괴의 안정해석은 크게 3단계로 나눌수 있으며 아래와 같이 나타내었다(Goodman과 Shi, 1985).

- (1) 유한성해석(finiteness analysis)은 불연속면과 굴착면으로 구성되는 임의의 암블럭이 암반사면내에서 분리될 수 있는가를 분석한다.
- (2) 이동성해석(removability analysis)은 유한한 암블럭이 암반내의 다른 부분으로부터 굴착면으로 이동가능한지를 분석한다. 일반적으로 유한성해석과 이동성해석의 두단계를 합하여 기하학적 해석으로 분류한다.
- (3) 안정해석(stability analysis)은 기하학적으로 불안정한 암블럭의 활동력이 저항력을 초과하는지를 분석하는 단계이다.

2.2.1 기하학적 해석

블럭이론은 암반내에 존재하는 불연속면들로 구성된 블럭과 굴착으로 인한 굴착면과의 상호관계에 의해 암반사면의 파괴를 해석하는 이론이다. 굴착을 하면 굴착면과 불연속면의 교차에 의한 블럭의 조합으로 새로운 블럭이 형성되는데 이 블럭 중 몇 개는 그들의 형상, 크기, 방향 또는 다른 블럭에 의해 이동이 저지되기 때문에 굴착 자유공간 내부로 움직일 수 없다. 하지만 다른 몇 개의 블럭은 즉시 움직일 수 있는 위치에 있어서 이 블럭이 움직이면 구속되어있던 다른 블럭들이 움직일 수 있게 되며, 이 블럭을 키블럭(key block)이라 한다. 이 키블럭을 구하는 과정을 기하학적 해석이라 한다. 블럭이론은 평면파괴와 쉐기파괴를 고려 대상으로 하며, 해석에 사용된 기본 가정은 다음

과 같다.

- (1) 모든 불연속면은 완전 평면이다.
- (2) 불연속면은 무한히 연속된다.
- (3) 불연속면계(system of discontinuity faces)로 정의된 블록은 강체(rigid body)이다.
- (4) 불연속면과 굴착면은 입력 매개변수(input parameter)에 의해 결정된다.

그림 3에 암반사면에서의 키블럭을 나타내었다.

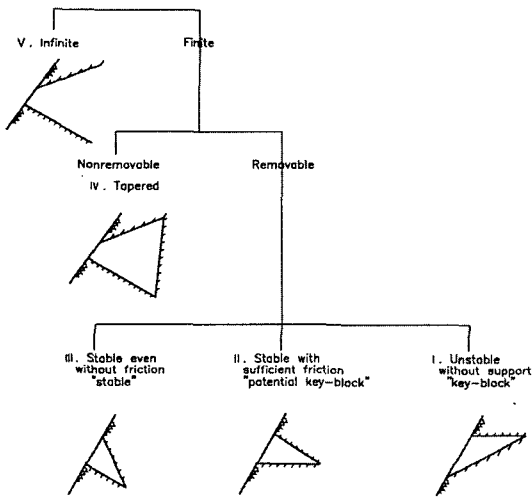


그림 3. 블록의 형태

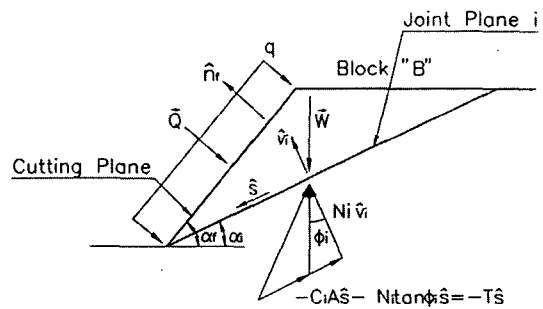
2.3.2 안정해석

암반사면의 평면 및 쉐기파괴에 대한 안정해석은 기하학적 해석에서 불안정으로 판정된 암블럭 파괴면의 마찰력과 점착력으로 이루어진 저항력과 하중(resultant force)의 비교에 의한 극한 평형해석으로 이루어진다. 블록의 안정검토시 벡터해법은 자중, 수압, 지진력, 지보력, 마찰력과 점착력을 쉽게 표현 가능하다. 그림 4에 나타난 블록 B의 평형조건에서 극한 평형방정식을 아래식에 나타내었다.

$$\vec{r} + \sum_i N_i \hat{v}_i - T\hat{s} = 0 \quad (2)$$

여기서, N_i = 불연속면 i 의 법선반력
 \hat{v}_i = 불연속면 i 의 단위법선벡터
 T = 접선력
 \hat{s} = 활동방향의 단위벡터
 \vec{r} = 전체하중

자중, 수압, 지진력 및 지보력을 포함한 전체하중(\vec{r})은 아래식으로 표현된다.



\hat{n}_r : unit vector of cutting plane
 α_r : dip angle of cutting plane
 α_i : dip angle of joint plane i
 C_i : cohesion of joint plane i
 ϕ_i : friction angle of joint plane i
 q : uniformly distributed stabilizing pressure (normal to cutting plane)

그림 4. 블록B의 극한평형상태

$$\vec{r} = \vec{W} + \vec{U} + \vec{F}_d + \vec{Q} \quad (3)$$

여기서, \vec{W} = 자중, \vec{U} = 수압,
 \vec{F}_d = 지진력, \vec{Q} = 지보력

자중(\vec{W})은 암블럭의 체적에 단위중량을 곱하여 아래식으로 표현된다.

$$\vec{W} = \gamma V \hat{g} \quad (4)$$

여기서, γ = 암반의 단위중량
 V = 블록의 체적
 \hat{g} = 중력의 단위벡터 = (0, 0, -1)

표 1. Sliding Direction Vectors and Forces

| Failure Mode | Description | Sliding Direction Vectors and Forces |
|---------------|--------------------------|---|
| Plane Failure | Sliding Direction Vector | $\hat{s} = \frac{(\hat{n}_i \times \vec{r}) \times \hat{n}_i}{ \hat{n}_i \times \vec{r} }$ |
| | Resistance | $R = \hat{n}_i \times \vec{r} \tan \phi_i + C_i A_i$ |
| | Load | $L = \hat{n}_i \times \vec{r} $ |
| Wedge Failure | Sliding Direction Vector | $\hat{s} = \frac{(\hat{n}_i \times \hat{n}_j)}{ \hat{n}_i \times \hat{n}_j } \text{sign} \{ (\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \cdot \vec{r} \}$ |
| | Resistance | $R = C_i A_i + C_j A_j + \frac{1}{ \hat{n}_i \times \hat{n}_j ^2} \times \{ (\vec{r} \times \hat{n}_j) \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \tan \phi_i + (\vec{r} \times \hat{n}_i) \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \tan \phi_j \}$ |
| | Load | $L = \frac{1}{ \hat{n}_i \times \hat{n}_j } \vec{r} \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j) $ |

수압 (\vec{U})은 각 블록 표면에 작용하는 수압의 합으로 표현된다.

$$\vec{U} = \sum_{i=1}^n p_i A_i \hat{n}_i \quad (5)$$

여기서, p_i = 불연속면 i 의 중심에 작용하는 수압

A_i = 불연속면 i 의 면적

\hat{n}_i = 불연속면 i 의 블록내부 방향 단위법선벡터

지진력 (\vec{F}_d)은 굴착면 수평방향으로 작용하는 것으로 가정하여 아래식으로 나타내었다.

$$\vec{F}_d = KV \gamma \hat{a} \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서, K = 수평방향 지진계수

\hat{a} = 지진력의 단위벡터

= $(\sin \beta_f, \cos \beta_f, 0)$

β_f = 굴착면의 경사방향

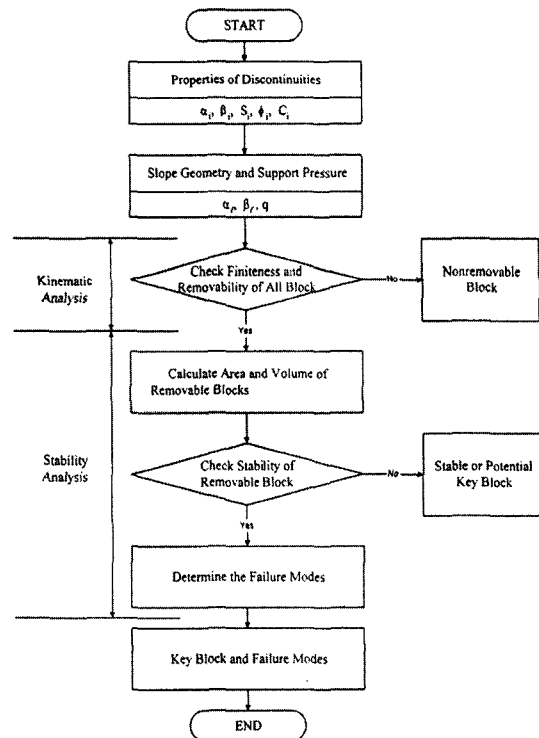


그림 5. 암반사면의 평면 및 쉐기파괴 안정해석 흐름도

락볼트나 앵커의 지보력(\vec{Q})은 아래식으로 표현된다.

$$\vec{Q} = qA_r(-\hat{n}_r) \quad (7)$$

여기서, q = 등분포 하중
 A_r = 굴착면의 면적
 \hat{n}_r = 굴착면의 단위법선벡터

평면 및 썩기파괴시 극한평형상태의 활동방향과 힘은 표 1에 나타내었다.

암반사면의 평면 및 썩기파괴에 대한 기하학적 해석과 안정해석 흐름도를 그림 5에 나타내었다.

2.3 암반사면의 전도파괴

전도파괴는 굴착면과 불연속면의 주향이 거의 평행하고 경사방향이 반대방향이고 경사각이 급한 불연속면의 발달빈도가 높은 경우에 주로 발생한다. 전도파괴의 조건은 불연속면의 반복적인 발달로 형성된 암반절편의 무게중심이 사면저점부(slope toe)보다 외부로 치우칠 때 발생한다. 전도파괴는 사면정상부(slope crest)의 수평변위가 사면저점부의 수평변위보다 상대적으로 크게 발생하는 특징을 보인다. 사면정상부와 저점부의 상대변위가 누적되어 암반절편간의 변형이 발생하며, 절편간의 전단강도 및 바닥부의 전단강도가 작용하중 보다 작은 경우에 전도파괴가 발생한다.

2.3.1 기하학적 안정해석

암반사면의 전도파괴에 대한 기하학적 필요조건은 크게 두가지로 대별된다. 첫째 조건은 굴착면과 불연속면의 경사방향의 상관성에 관한 것으로, 굴착면과 불연속면의 주향은 거의 평행이고 경사방향은 반대일 때 기하학적 첫째조건이 만족되는데 이들 방향의 차이는 $15^\circ \sim 30^\circ$ 정도 이내이어

야 한다 (Goodman and Bray, 1976). 본 해석에서는 굴착면과 불연속면의 경사방향이 $180^\circ \pm 30^\circ$ 사이인 경우를 첫 번째 기하학적 파괴조건으로 하였다. 둘째 조건은 굴착면의 경사각, 불연속면의 경사각과 마찰각에 관한 것으로 불연속면의 법선은 굴착면의 경사각과 불연속면의 마찰각과의 차이보다 작은 plunge인 경우에 기하학적 파괴조건을 만족한다. 본 고에서는 Choquet와 Tanon (1985)가 제안한 아래식을 두 번째 기하학적 파괴조건으로 적용하였다.

$$(90^\circ - \alpha_A) \leq (\alpha_f - \phi_A + k) \quad (8)$$

여기서, $k = 0$: $\phi_A < 20^\circ$,

$$k = \frac{3}{5}(\phi_A - 20^\circ) ; \phi_A \geq 20^\circ$$

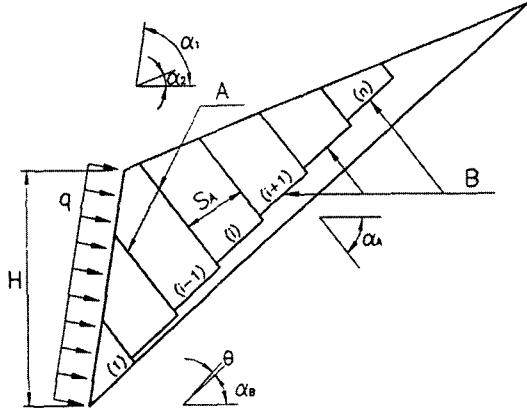
α_A = 불연속면 A의 경사각

ϕ_A = 불연속면 A의 마찰각

α_f = 암반사면의 경사각

2.3.2 안정해석

전도파괴는 굴착면과 불연속면의 주향이 거의 평행하고 경사방향(dip direction)이 굴착면과 반대방향이고 경사각이 급한 불연속면(discontinuity 'A', 그림 6)이 사면높이에 비해 상대적으로 작은 간격(S_A , 그림 6)으로 발달한 경우에 발생한다. 또한, 전도파괴가 발생하기 위해서는 굴착면의 주향과 평행하고 사면 굴착면의 경사각보다 경사각이 작은 다른 불연속면(discontinuity 'B', 그림 6)이 존재해야 한다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 사면저점부의 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



H : slope height
 q : uniformly distributed stabilizing pressure
 α_1, α_2 : cutting angle of slope and upper slope surface
 α_A, α_B : dip angles of discontinuities A and B
 S_A : spacing of discontinuity system A
 θ : step angle

그림 6. 가상파괴면에서의 전도파괴 안정해석

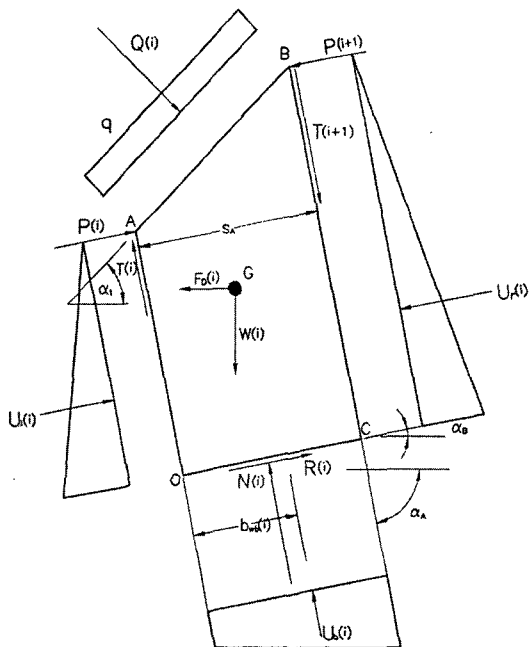


그림 7. (i)번째 절편의 작용하중

($P_t(i)$, toppling resistance of the i th slice)과 전단저항력($P_s(i)$, shear resistance of the i th slice) 중 큰 값으로 정의되며 이 전달하중이 ($i-1$) 절편으로 전달된다. 암반사면의 전도파괴는 저점부 첫번째 절편의 전달하중(P_1)이 '0(제로)' 보다 큰 경우에 발생한다.

전도저항력 및 전단저항력은 그림 7에 나타낸 바와같이 (i)번째 절편의 'O(오)'점에서 모멘트평형조건식과 불연속면 'A' 의 직각방향 힘의 평형조건식으로부터 산출된다. 그림 7에 나타낸 바와같이 (i)번째 절편에 작용하는 힘은 중력($W(i)$), 지보력($Q(i)$), 수압($U_l(i)$, $U_r(i)$ 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. (i)번째 절편에 작용하는 하중은 아래와 같다.

- 자중 : $W(i)$
- 수압 : $U_l(i)$, $U_r(i)$ 및 $U_b(i)$
- 수평지진력 : $F_D(i) = K \times W(i)$,
 K 는 수평지진계수(horizontal seismic coefficient)
- 지보력 : $Q(i)$
- 절편에 전달되는 법선력 : $P(i)$, $P(i+1)$ 및 $N(i)$
- 절편에 전달되는 전단력 : $T(i)$, $T(i+1)$ 및 $R(i)$

(i)번째 절편에 직각으로 작용하는 $P(i)$ 는 전도저항력($P_t(i)$)과 전단저항력($P_s(i)$)중 큰 값으로 정의된다(이명재와 이인모, 1998).

3. 신뢰도해석

3.1 개요

암반내 불연속면의 방향, 강도, 간격 등의 공학적 특성은 측정과 평가시 오차와 편차가 존재하며

하중조건 및 불완전한 모델링으로 인해 항상 불확실성을 포함한다. 합리적인 암반사면의 안정해석은 불확실성을 통계처리할 수 있는 신뢰도에 근거한 위험도분석을 포함하는 것이 타당한 방법이다. 본 논문에서는 암반사면의 전도파괴에 대한 신뢰도해석을 위하여 Monte Carlo 분석을 적용하였다. 기본적인 특징과 가정은 아래와 같다.

- * 암반사면의 평면파괴 및 썩기파괴에 대한 안정해석은 전장에 소개한 블럭이론에 의해 수행한다.
- * 암반사면의 전도파괴에 대한 기하학적해석과 안정해석은 전장에 소개한 새로 개발된 2차원 수치해석에 의해 수행한다(이명재와 이인모, 1998).
- * 불연속면의 방향은 clustering 기법을 이용하여 Fisher 분포를 가지는 무작위변수로 가정하였다.
- * 불연속면의 마찰각은 정규분포로 가정된 무작위변수이다.
- * 불연속면의 점착력과 간격, 암반의 기본적인 물리적인 특성은 상수로 가정되었다.
- * 본 논문에서는 creep 혹은 weathering 등의 시간관련 항목은 고려하지 않았다.
- * 매개변수의 상관관계(correlation)는 무시되었다.

3.2 Monte Carlo 분석

Monte Carlo 분석은 많은 공학적인 문제의 확률론적 분석을 위한 수단을 제공한다. 불연속면의 방향과 마찰각의 무작위성을 고려하기 위해 무작위변수를 독립적으로 발생시키는 Monte Carlo 분석에 의해 수행되었다. 해석에서 불연속면 방향의 통계적 특성은 평균과 분산정도를 나타내는 Fisher 상수 K로 표현하였다. α_x 와 β_x 는 불연속

면 cluster 법선의 평균 trend와 plunge이다. 균등분포의 무작위변수 두개를 발생시키기 위해 p는 0에서 1까지, λ 는 0에서 2π 까지 그리고 발생된 불연속면 법선의 trend α_y 와 plunge β_y 은 아래 식으로 표현된다(Leung와 Quek, 1995).

$$\sin \beta_y = \frac{\sin(\beta_x - \theta) \sin \theta + 8 \sin^{-2} \frac{\theta}{2} \sin^2 \frac{\lambda}{2} \cos \beta_x}{\sin \theta} \quad (9)$$

$$\cos(\alpha_x - \alpha_y) = \frac{\cos \theta - \sin \beta_x \sin \beta_y}{\cos \beta_x \cos \beta_y} \quad (10)$$

$$\text{여기서, } \theta = \cos^{-1} \left[1 + \frac{\ln(1-p)}{K} \right]$$

각 불연속면의 마찰각의 평균과 표준편차는 정규분포를 갖는 무작위변수로 가정하여 산정하였다.

3.3 파괴확률

본 논문에서 파괴의 정의는 safety margin (SM)으로 표현되었다. 이 방법은 문제와 결과의 엄격한 수학적 표현을 제공하는 이점이 있고, 파괴확률의 정의를 확실하고 쉽게 이해할 수 있다 (Ang and Tang, 1975). 암반사면의 평면 및 썩기파괴에 대한 파괴확률은 표 1에 나타난 저항력(resistance)과 하중(load)과의 차에 의해 아래 식으로 정의한다.

$$P_f = P[SM = R - L \leq 0] \quad (11)$$

여기서, P_f = 파괴확률

암반사면의 전도파괴는 전달하중이 누적되어 사면 저점부의 첫 번째 절편의 전달하중(P_1)이 '0(제로)'보다 클 때 발생한다. 전도파괴에 대한 파괴확률은 아래 식으로 정의하였다(이명재와 이인모, 1998).

$$P_f = P[SM = P_1 \geq 0] \quad (12)$$

식(12)는 그림 6에 나타난 첫 번째 절편에 작용하는 힘이 남아 있으면 전도파괴가 발생한다는 것을 의미한다. Monte Carlo 분석에 의해 반복적인 안정해석을 실시하여 아래 식으로 파괴확률을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{fp} &= \frac{N_p}{N} \\ P_{fw} &= \frac{N_w}{N} \\ P_{ft} &= \frac{N_t}{N} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

P_{fp} , P_{fw} , P_{ft} = 평면, 썩기 및 전도파괴확률
 N_p , N_w , N_t = 평면, 썩기 및 전도파괴 빈도
 N = Monte Carlo 분석횟수

전체파괴확률(overall failure probability)은 각 반복단계에서의 합집합으로 나타내며(Leung와 Quek, 1995), 다음식으로 정의한다.

$$P_{fo} = P_{fp} \cup P_{fw} \cup P_{ft} \quad (14)$$

여기서, P_{fo} = 전체파괴확률

3.4 암반사면의 신뢰도해석 모델

본 논문에서는 파괴형태를 고려한 암반사면의 신뢰도해석을 위하여 해석프로그램(RA-RSSA)을 개발하였다. 이 프로그램의 신뢰도해석 과정은 불연속면의 방향 및 마찰각을 무작위변수로 고려한 Monte Carlo 분석에 의해 수행되었다. 각 해석단계는 원하는 횟수에 도달할 때까지 반복적으로 기하학적해석과 안정해석으로 이루어진 파괴

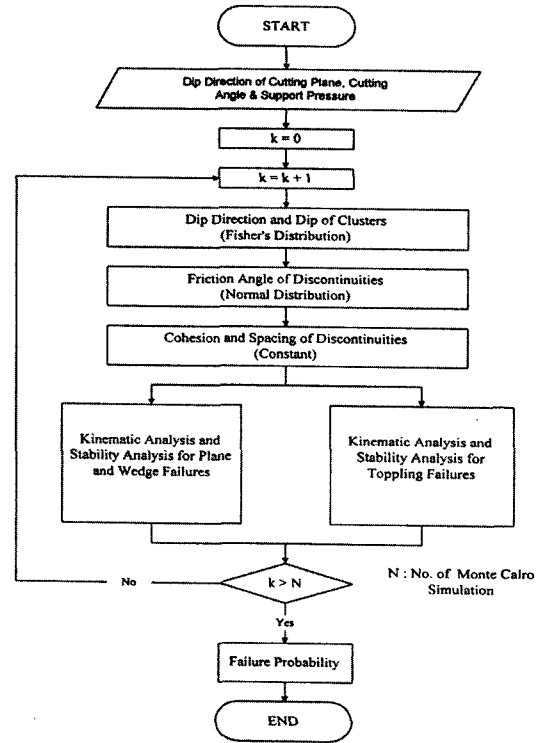


그림 8. 파괴형태를 고려한 암반사면의 신뢰도해석 흐름도

형태를 고려한 암반사면의 안정해석(Lee, 1996)으로 구성되었다. 마지막으로 그 결과를 누적 계산하여 암반사면의 파괴유형별 파괴확률을 산정한다. 이 프로그램은 암반사면의 경사방향, 굴착면의 경사각, 사면높이, 수압 및 지진하중과 지보력 등의 설계변수의 모든 가능한 조합을 계산할 수 있다. RA-RSSA의 흐름도는 그림 8에 나타내었다.

4. 예제해석

4.1 개요

예제해석은 본 논문에서 제안한 파괴형태를 고려한 암반사면의 신뢰도해석 방법의 검증을 위하여 사면높이, 암반내 불연속면의 방향 및 강도의 통계적 특성, 불연속면의 간격, 수압, 지진하중

표 2. 암반 불연속면의 방향 및 마찰각

| | Orientation | | | Friction Angle | | Spacing (m) |
|---|---------------|--------------|-----|----------------|---------------------|-------------|
| | E(α) | E(β) | K | E(ϕ) | σ (ϕ) | |
| 1 | 35° | 20° | 100 | 30° | 3° | 3 |
| 2 | 15° | 125° | 100 | 30° | 3° | 3 |
| 3 | 60° | 220° | 100 | 30° | 3° | 3 |
| 4 | 70° | 300° | 100 | 30° | 3° | 3 |

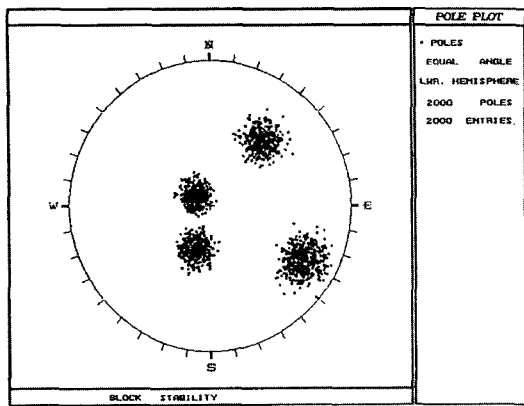


그림 9. 불연속면 방향의 분포양상

및 지보력 등의 하중조건과 암반사면의 굴착면의 경사방향 및 경사각 등의 매개변수에 따른 민감도 해석(sensitivity analysis)을 실시하였다. 예제해석은 그림 9와 표 2에 나타난 바와 같이 대표적인 4개의 불연속면이 존재하는 암반사면을 대상으로 수행하였다. 각 불연속면의 경사방향과 경사각은 Monte Carlo 해석 단계마다 식(9)과 (10)을 이용하여 표 2에 나타난 각 불연속면의 평균치와 분산정도를 나타내는 Fisher상수로 부터 산정된다. 불연속면의 마찰각은 정규확률분포를 갖는 무작위변수의 발생에 의해 Monte Carlo 해석 단계마다 표 2에 나타난 평균치(30°)와 표준편차(3°)로부터 산정된다. 파괴확률을 산정하기 위한 설계변수는 다음과 같이 가정하였다.

* 암반사면의 경사방향 : $\beta_f = 0^\circ \sim 360^\circ$

* 암반사면의 경사각 : $\alpha_f = 30^\circ \sim 90^\circ$

* 지보력 : $q = 0 \sim 10 \text{ t/m}^2$

그 외 영향인자 중 상수는 아래의 값으로 가정하였다.

* 암반사면의 높이 : $H = 30 \text{ m}$

* 암반의 단위중량 : $\gamma = 2.5 \text{ t/m}^3$

* 암반사면의 상부경사각 : $\alpha_2 = 0^\circ$

4.2 결과분석

암반사면의 경사방향 및 경사각에 따른 평면, 쉼기, 전도 및 전체파괴확률 분포는 그림 10에서부터 그림 13에 나타내었다. 굴착면의 경사각이 70°이고 지보력이 없을 때, 굴착면의 경사방향에 따른 파괴확률은 그림 14에 나타내었는데, 암반사면의 평면 및 쉼기파괴는 굴착면의 경사방향이 0°~90°, 190°~250° 및 300°~360°에서 발생한다. 암반사면의 전도파괴는 굴착면의 경사방향 이 0°~160°일 때 발생하며 굴착방향에 따른 파괴 확률의 변화가 크다. 굴착면의 경사방향이 20°이고 지보력이 없을 때 굴착면의 경사각에 따른 파괴확률을 그림 15에 나타내었으며, 그림에 나타난 바와 같이 평면 및 쉼기파괴는 굴착면의 경사각이 35°에서 90°로 증가함에 따라 서서히 증가한다. 전도파괴 확률은 굴착면의 경사각이 40°에서 65°로 증가함에 따라 급격히 변화하는 양상을 보인다. 이것과는 전도파괴가 다른 파괴형태보다 굴착면의 경사각에 좀더 민감한 변화를 보이는 것을 나타낸다. 굴착면의 경사방향이 20°이고 경사각이 70°일 때 지보력에 따른 파괴확률을 그림 16에 나타내었다. 평면 및 쉼기파괴는 지보력의 증가에 따라 파괴확률이 급격히 감소하며 지보력의 변화에 따른 전도파괴의 확률은 0.45에서 0.9 정도의 범위에 분포하며 이는 평면 및 쉼기파괴시 지보력에 대한 보강효과가 전도파괴보다 훨씬 효

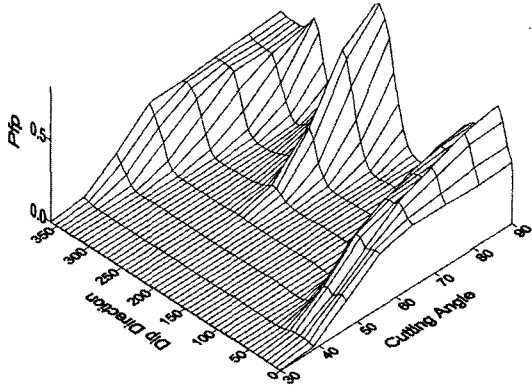


그림 10. 굴착면의 경사방향 및 경사각에 따른 평면파괴확률

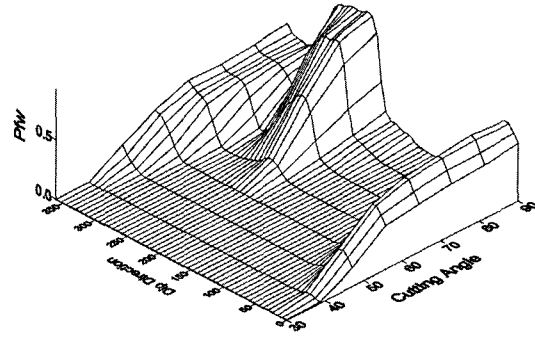


그림 11. 굴착면의 경사방향 및 경사각에 따른 쐐기파괴확률

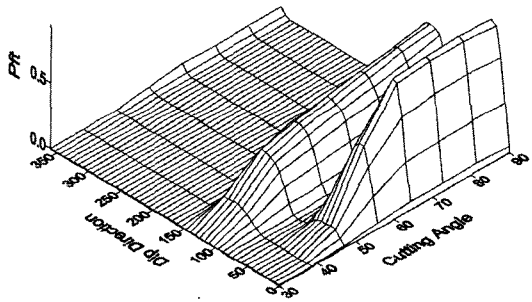


그림 12. 굴착면의 경사방향 및 경사각에 따른 전도파괴확률

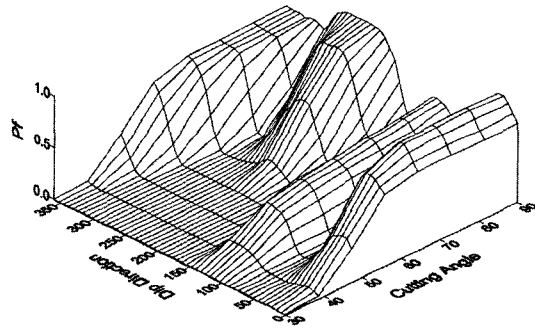


그림 13. 굴착면의 경사방향 및 경사각에 따른 전체파괴확률

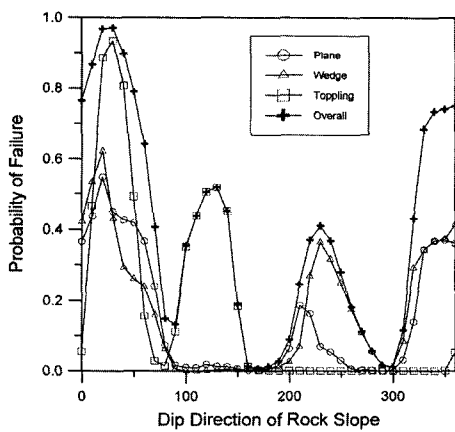


그림 14. 굴착면의 경사방향에 따른 파괴확률
($\alpha_f = 70^\circ$, $q = 0 \text{ t/m}^2$)

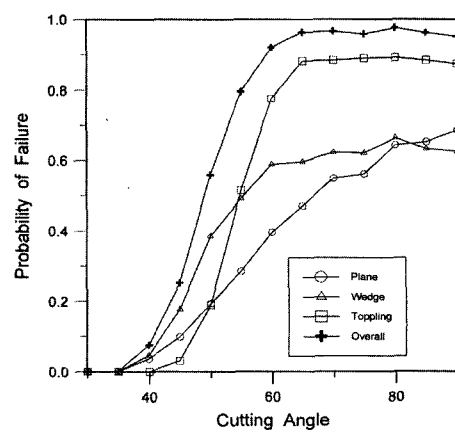


그림 15. 굴착면의 경사각에 따른 파괴확률
($\beta_f = 20^\circ$, $q = 0 \text{ t/m}^2$)

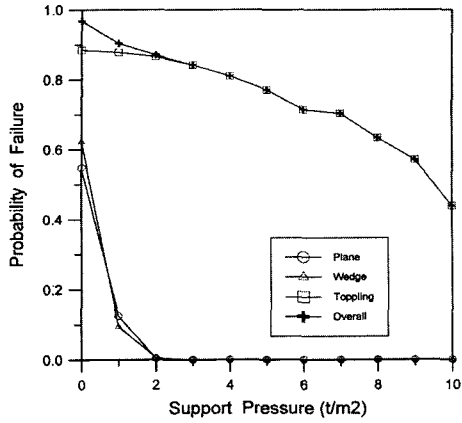


그림 16. 지보력에 따른 파괴확률 ($\beta_f = 20^\circ, \alpha_f = 70^\circ$)

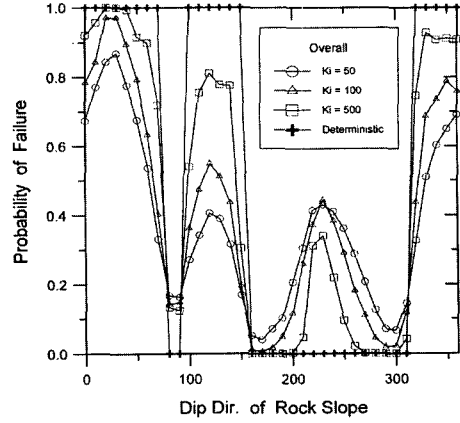


그림 17. 불연속면 방향의 Fisher상수 변화에 따른 파괴확률

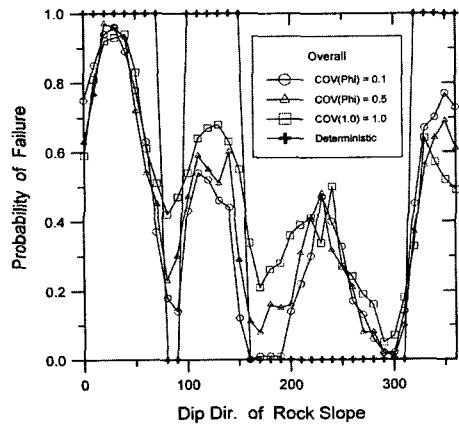


그림 18. 불연속면 마찰각의 표준편차 변화에 따른 파괴확률

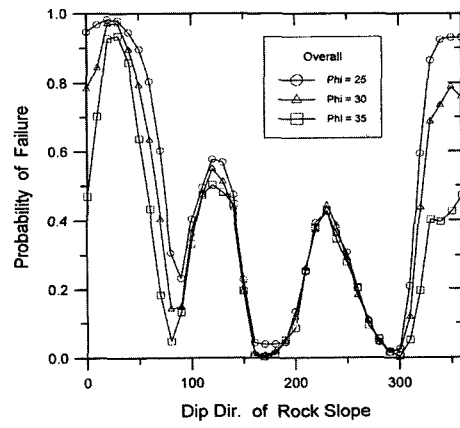


그림 19. 불연속면 마찰각의 평균치 변화에 따른 파괴확률

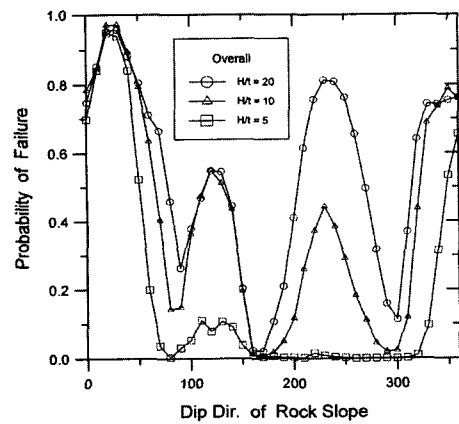


그림 20. H/t비 변화에 따른 파괴확률

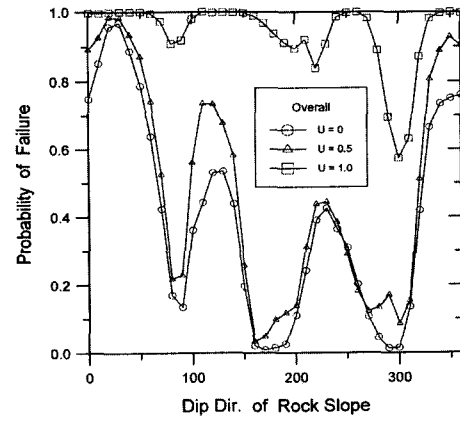


그림 21. 간극수압 변화에 따른 파괴확률

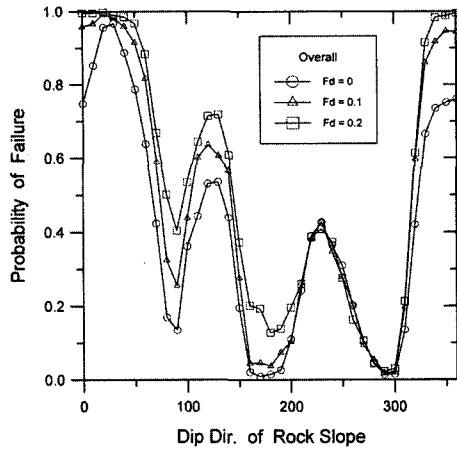


그림 22. 지진하중 변화에 따른 파괴확률

과적임을 나타낸다. 그림 17과 그림 18에 불연속면 방향의 분산상태를 나타내는 Fisher상수와 마찰각의 분산정도에 따른 평면, 썩기 및 전도파괴 확률의 분포양상을 보였다. 불연속면의 방향 및 마찰각의 분산상태가 커짐에 따라 통계적특성을 고려하지 않은 결정론적해석(deterministic analysis) 결과와는 상당한 차이를 보이며, 이는 불연속면의 확률론적 특성이 해석결과에 큰 영향을 끼침을 나타낸다. 그림 19에서부터 그림 22는 불연속면의 마찰각 평균치, 암반사면의 높이 대 불연속면 간격의 비(H/t), 수압 및 지진하중 변화에 따른 전체 파괴확률의 변화양상을 보여준다. 그림 21에 나타난 바와 같이 수압은 암반사면의 안정에 큰 영향을 보였다. 암반사면의 전도파괴확률은 굴착면의 경사방향 및 경사각의 기하학적 조건에 가장 민감한 변화를 보였으며, 불연속면의 통계적 특성에도 큰 영향을 보였다.

5. 결론

본 논문에서 제안한 파괴형태를 고려한 암반사면의 신뢰도해석은 불연속면의 방향 및 마찰각을 무작위 변수로 고려한 Monte Carlo분석을 적용

하였고 불연속면의 기하학적 특성 뿐만 아니라 수압, 지진하중 및 지보력 등을 해석에 합리적으로 반영할 수 있어 암반사면 보강대책 검토시 평면, 썩기 및 전도파괴에 대한 안정해석, 하중조건에 따른 적정구배의 굴착방법과 Rock Bolt 등의 필요 지보력을 합리적으로 산정할 수 있다.

파괴형태를 고려한 암반사면의 신뢰도해석 방법의 검증을 위하여 사면높이, 암반내 불연속면의 방향 및 강도의 통계적 특성, 불연속면의 간격, 수압, 지진하중 및 지보력 등의 하중조건과 암반사면의 경사방향 및 경사각 등의 매개변수에 따른 민감도해석(sensitivity analysis)을 실시하였다. 민감도해석을 위한 예제해석 결과를 평가해 볼 때, 암반사면의 평면, 썩기 및 전도파괴 확률분포는 굴착면의 경사방향에 가장 민감한 영향을 보였다. 암반사면의 평면 및 썩기파괴확률 변화를 고려하면 굴착면의 경사각의 변화에 의한 구배완화 방법보다 상대적으로 Rock Bolt 등의 지보방법이 효과적이었고, 전도파괴에 대한 파괴확률의 변화를 고려하면 Rock Bolt 등의 지보방법보다는 굴착면의 경사각의 변화에 의한 구배완화방법이 더 효과적이었다. 불연속면의 방향 및 마찰각의 분산상태가 커짐에 따라 통계적특성을 고려하지 않은 결정론적해석(deterministic analysis) 결과와는 상당한 차이를 보이며, 이는 암반내 불연속면의 확률론적 특성이 해석결과에 큰 영향을 끼침을 나타낸다. 암반사면의 평면, 썩기 및 전도파괴확률은 경사방향 및 굴착면의 경사각의 기하학적 조건에 가장 민감한 변화를 보였으며, 불연속면의 통계적 특성에도 큰 영향을 보였다.

감사의 글

본 논문은 고려대학교의 특별연구비(1998년도)에 의하여 이루어진 연구의 일부로서 지원에 감사드린다.

참 고 문 헌

1. 이명재, 이인모(1998), "암반사면의 전도파괴에 대한 안정해석", 한국지반공학회지, 제 14권, 제 2호, pp. 55-66.
2. 이명재, 이인모(1998), "암반사면의 전도파괴에 대한 신뢰도해석", 대한토목학회논문집, 제 18권, 제 III-5호, pp. 679-688.
3. Ang, Alfredo H. S. and Tang, W. (1975), Probability Concepts in Engineering Planning and Design, John Wiley & Sons, Inc.
4. Choquet, P and Tanon, D. B. (1985), "Nomograms for the Assessment of Toppling Failure in Rock Slopes", In Proc., 26th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 19-30.
5. 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.
6. Goodman, R. E. and Shi, Gen-Hua (1985), Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Prentice-Hall, Inc.
7. Hoek, E. and Bray, J. W. (198), Rock Slope Engineering, The Institution of Mining and Metallurgy.
8. Lee, Myung-Jae (1996), "Reliability-based Optimization for Rock Slopes", Ph. D Thesis, Korea University, pp. 106-127.
9. Leung, C. F. and Kheok, S. C. (1987), "Computer Aided Design of Rock Slope Stability", Rock Mechanics and Rock Engineering 20, pp.111-122.
10. Leung, C. F. and Quek, S. T. (1995), "Probabilistic Stability Analysis of Excavations in Jointed Rock", Can. Geotech. J. 32, pp.397-407.
11. 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.
12. Zanbak, C. (1983), "Design Charts for Rock Slopes Susceptible Toppling", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, No. 8, pp. 1039-1062.

(접수일자 1998. 11. 6)