

암반사면의 평면파괴에 대한 신뢰성해석

Reliability Analysis of Plane Failure in Rock Slope

장 연 수*¹ Jang, Yeon-Soo
오 승 현*² Oh, Seung-Hyun
김 종 수*³ Kim, Jong-Soo

Abstract

A reliability analysis is performed to investigate the influence of the uncertainty from few in-situ samples and inherent heterogeneity of the ground on the probability of failure for a rock cut slope. The results are compared with those of deterministic slope stability analysis. The random variables used are unit weight of the rock, the angle of potential slope of failure, and cohesion and internal friction angle of joints. It was found that the rock slope in which the factor of safety satisfied the minimum safety factor in the deterministic analysis has high probability of failure in the reliability analysis when the weak geological strata are involved in the cut slope. The probability of failure of rock slope is most sensitive to the mean and standard deviation of cohesion in rock joint among the random soil parameters included in the reliability analysis. Sensitivities of the mean values are larger than those of standard deviations, which means that accurate estimation of the mean for the in-situ geotechnical properties is important.

요 지

본 논문에서는 암반사면의 절토시 현장지반 시추조사의 불충분한 자료와 비균질한 지반특성에서 오는 불확실성이 암반사면의 파괴확률에 미치는 영향을 알아보기 위하여 신뢰성해석을 실시하였고 이를 확정론적 해석결과와 비교하였다. 해석에 사용된 확률변수는 절리면의 점착력과 마찰각, 암반의 단위중량 이었으며 절리면의 경사각은 확률변수로 적용한 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 해석하였다. 해석 결과 대상 절토사면의 경우 확정론적 해석시 안정하게 나타남에도 신뢰도 해석에서는 연약 지질층의 영향에 의한 높은 불명확성으로 인하여 높은 파괴확률을 갖는 것으로 나타났다. 각 확률변수의 평균값과 분산에 대한 파괴확률의 민감도는 점착력이 가장 큰 것으로 나타났으며 평균값이 미치는 민감도가 분산의 경우보다 크게 나타나 현장 지반물성치들에 대한 평균값의 정확한 산출이 중요한 것으로 나타났다.

Keywords : Deterministic analysis, Factor of safety, Reliability analysis, Rock slope, Sensitivity

1. 서 론

지반조사로부터 얻어지는 지반정수는 많은 경우 지

반자체가 갖는 비균질성과 함께 공사비와 공사기간의 제한으로 인하여 비교적 적은 개수의 시추조사로부터 충분하지 않은 양의 자료가 얻어지고 이로 인한 불확

*1 정희원, 동국대학교 토목환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Dongguk Univ., ysjang@dgu.ac.kr)

*2 동국대학교 토목환경공학과 석사과정 (Graduate Student, School of Civil Engrg., Dongguk Univ.)

*3 (주)현대산업개발 토목설계팀 부장 (Dept. Manager, Civil Engrg., Team, Hyundai Development Company)

실성을 내포하게 된다. 전통적인 확정론적 접근방법에서는 대상지반내의 가장 보수적인 값이나 평균값을 지반정수로 선택하여 사면안정성 해석을 실시하였으므로 이러한 불확실성을 나타내는 분산의 체계적인 반영이 어려웠다.

암반사면의 경우에도 사면의 안정에 영향을 미치는 요소는 암반 블록의 크기, 형상과 활동을 일으키는 불연속면의 방향성과 전단강도 등이 있다. 특히 암반사면에 많이 내포되는 불연속면은 그 방향성과 강도에 많은 불확실성이 내포되어 있음에도 불구하고 암반사면의 절취경사를 결정하는 국내의 현행방법은 불연속면의 방향과 경사, 거칠기 등의 공학적 특성을 고려하지 않고 암석강도에 따라서 일률적으로 절취경사를 결정하는 경우가 많은데 이로부터 파생되는 불확실성으로 인하여 암반사면에서 붕괴사고를 유발시키며 막대한 손실을 초래할 수 있다. 그러므로 현지 암반의 거동을 정확히 평가하고 예측하기 위해서는 불연속면의 방향과 경사, 역학적 특성과 불연속암반 거동과의 관계를 규명하는 것이 필요하다.

확률론적 해석방법의 일종인 신뢰성해법(reliability method)은 토목분야의 구조물 안정에 대한 신뢰성 해석에 많이 사용되었으며 최근에는 지반공학 및 지반환경 분야로도 응용영역이 확대되고 있다. Meyerhof(1982)는 토공, 옹벽 그리고 기초 등 지반구조물의 종류와 하중조건에 따른 안전율과 파괴확률과의 관계에 대하여 연구하였으며, Lacasse and Nadim(1996)은 파일구조물의 안정성 해석에 지반정수의 공간적 분산성(spatial variability)을 고려하여 안전율과 파괴확률을 비교하였다. 그 결과 구조물과 지반정수의 평균값이 동일할 경우 안전율은 동일하지만 지반정수의 표준편차가 커짐에 따라 파괴확률도 커짐을 보여 주었다. Duncan(2000)은 지반공학에서의 대표적인 안정성문제로 사면파괴, 압밀침하, 기초침하 등을 들고 이들 안전율의 확률분포를 lognormal 분포로 가정하여 신뢰성과 안전율의 관계를 규명하였다. 그는 파괴확률을 안전율에 대한 대체수단이기 보다 서로에 대한 보완관계로 보아 모두 사용할 것을 권하고 있다.

신뢰성 해석을 암반사면에 적용하는 경우 불연속면의 기하학적 특성과 강도 특성, 지반의 단위중량, 절리면의 경사각을 확률변수(random variable)로 취급하여 가변성과 불확실성 체계적으로 고려할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 평면파괴 형상을 보여주는 암반사면에 전통적인 확정론적해석과 신뢰성해석을 모두 적용하여

그 상관관계를 분석하여 보았다. 이를 위하여 대상지반 불연속면의 점착력과 마찰각, 단위중량 등 지반정수의 평균 및 분산값을 적용하였으며 대상지반 파괴 가능 불연속면의 경사가 상수일 때와 확률변수일 때의 파괴확률에 미치는 영향을 분석하였다. 확률론적 해석으로는 1계 및 2계 신뢰성 해법(first and second order reliability method)을 적용하였다. 또한 신뢰성해석시 입력되는 지반물성 확률변수가 파괴확률에 미치는 민감도를 구하여 암반사면 안정성에 영향을 크게 미치는 인자에 대하여 고찰하였다.

2. 일계 및 이계 신뢰성 이론

토목구조물의 안정성에 대한 파괴확률을 계산하는데 가장 보편적인 방법은 Monte Carlo simulation 법이 많이 사용된다. 이 방법은 파괴확률의 값이 적어지는 경우 많은 회수의 안정성 모델에 대한 시뮬레이션이 이루어져야 한다. 파괴확률을 분석해로 구하는 방법은 사용하는 모델이 복잡하고 입력변수가 여러 개일 경우에는 그 해를 구할 수 없거나 해가 복잡하고 풀기 어려워진다. 일계 신뢰 분석법(FORM)과 이계 신뢰 분석법(SORM)은 계산과정을 간편히한 근사해법으로 비교적 적은 연산시간으로 해를 구해 줄 뿐만 아니라 입력변수나 그 분포에 대한 매개변수들이 신뢰지수(reliability index)나 파괴확률에 미치는 영향을 파악할 수 있게 하여 준다.

일계 신뢰 분석법(FORM)에서의 한계상태함수(limit state function)는 표준 공간에서 원점으로부터 가장 가까운 linearization point에서 tangent 평면으로 대체되고, 이 linearization point를 design point라 하며 파괴 영역상의 모든 점 중에서 제일 큰 확률밀도를 가지고 있다. 신뢰지수 β 는 식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$\beta = a^* \cdot y^* \quad (1)$$

여기서, a^* 는 design point에서 파괴영역으로 향하는 단위수직선이다.

파괴확률 P_f 의 근사해는 식 (2)와 같이 나타내어진다.

$$P_{f1} = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

여기서, $\Phi(\cdot)$ 는 누적 정규분포함수(cumulative normal distribution function)이다.

일계 신뢰 분석법에서 limit state surface는 가장 최소

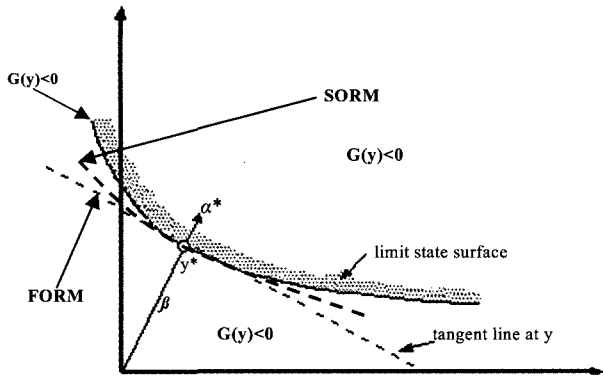


그림 1. 이차원 표준공간에서의 일계 및 이계신뢰분석과 신뢰지수의 거리를 가지는 한 점으로 표현이 되며 design point의 근처에서는 거의 평면으로 나타내어 진다(Liu and Der Kiureghian, 1989).

한계 상태 함수가 아주 큰 비선형 특성을 나타내거나 입력변수의 변화 정도가 크게 되면 limit state surface는 변곡점 곡률이 커지거나 여러 개의 곡선이 될 수 있다. 지반 문제 해석시 해석 모델의 비선형성이 크거나 변수의 분산폭이 클 경우에는 이러한 비선형 한계상태면이 형성될 수 있어 이계 신뢰 분석법(SORM)에 의한 해석도 필요하게 된다(Der Kiureghian et al., 1987).

본 논문에 사용된 확률변수 θ 에 대한 일계파괴확률 P_f 의 민감도는 식 (3)과 같은 관계로 표현된다.

$$\nabla_{\theta} P_f = -\Phi(\beta) \nabla_{\theta} \beta \quad (3)$$

여기서, $\Phi(\beta)$: 표준 정규 확률분포 밀도 함수이며, $\nabla_{\theta} \beta$ 는 확률변수 θ 에 대한 신뢰지수 β 의 민감도이다.

3. 대상 현장조건 및 평사투영해

대상지역은 경기도 00-000간 도로개설 구간으로 구간내의 지층현황을 파악하기 위하여 터널시추(TB) 10공과 암사면 시추(CB) 16공을 실시하였다(그림 2). 본 해석에 사용된 절토 B구간은 터널 종점부로 Sta. 4+275~Sta. 4+360 지역에 위치한다. 시추공 TB-11~TB-13의 조사결과 암상이 주로 화강암질 편마암으로 구성되어 있으며 편마암의 엽리면을 따라 절리가 발달되었고 절리면의 풍화가 심하였다. 일부 구간에서는 파쇄대가 발달되어 암질이 매우 불량한 것으로 나타났다.

해석구간의 단면을 그림 3에 나타내었는데 설계 절토 사면고는 27m로 비교적 높고 경사는 1:0.3으로 설계되었다. 지층의 구성 상태는 상부로 부터 붕적토층, 풍화암층, 연암층, 경암층의 순서로 구성되었는데 붕적토층은 0.0~0.3m의 층후로 분포하며 암갈색의 자갈섞인 실트질 모래로 구성되고 느슨한 상대밀도를 보인다. 풍화암층은 0.3~2.3m의 층후로 분포하고 황갈색의 실트질 또는 조립질 모래로 구성되었고 매우 조밀한 상대밀도를 보인다. 연암층은 2.3~12.8m의 층후로 분포하며 담갈색 또는 갈회색의 화강암질 편마암으로 구성되었으며 절리면에 소량의 실트성분이 충전되어 있다. 또한 풍화가 심하고 절리면을 따라 파쇄대가 발달되어 있다. 경암층은 12.8~31.0m의 층후로 분포하고 있는데 암종은 담회색의 화강암질 편마암으로 구성되고 미약하지만 엽리구조가 발달되어 있다.

공사구간내의 시추주상도와 실내암석시험을 통해 구한 암반 및 암반절리면의 점착력과 내부마찰각 등을 표 1에 나타내었다. 절리면 경사각의 평균과 표준 편차는

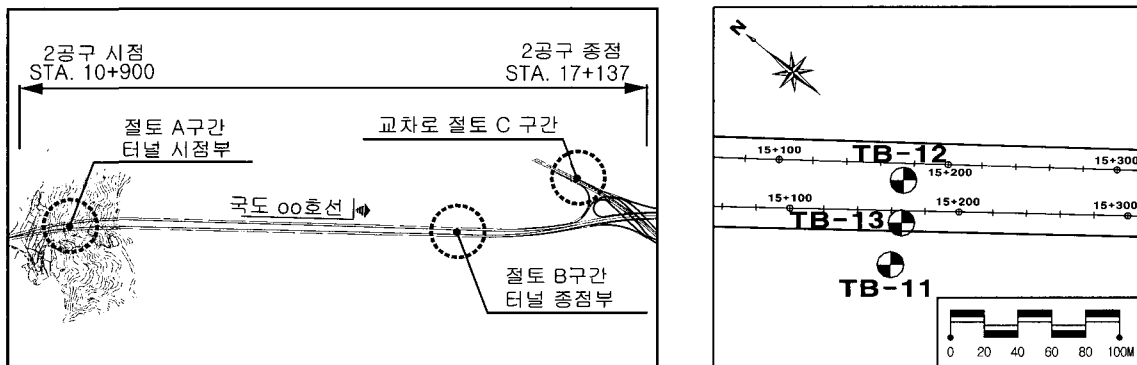


그림 2. 해석구간의 평면도와 시추 위치도

표 1. 암반사면의 지반 물성치

구 분	평 균	표준편차	분산계수
점착력, c (t/m^2)	12.67	15.53	1.22
내부 마찰각, ϕ ($^\circ$)	45.70	2.88	0.06
단위중량, γ (t/m^3)	2.70	0.10	0.04
절리면의 경사각, ϕ_p ($^\circ$)	61.00	8.60	0.15

평사투영해에 의하여 평면파괴의 가능성이 있는 제 1절리군에 해당하는 dip값들 중 내부마찰각 보다는 크고 사면의 경사보다 적은 값들을 대상으로 평균 및 표준편차를 산출하였다.

극점 및 대원으로 표현한 해석구간의 평사투영해석 결과(그림 4) 암반사면의 주향은 N22°E이고 높이는 27m이었다. 불연속 절리면의 극점을 평사투영한 결과 3개의 주절리군이 형성되었으며 제 1절리군(J_1)의 주향은 N66°E, 경사 61°SE로 friction cone 외부와 daylight envelope 내부에 속하게되어 평면파괴를 발생시키는 불리한 절리군이다. 제 2절리군(J_2)의 주향 N17°E, 경사

55°NW와 제3절리군(J_3)의 주향 N60°W, 경사 67°NE를 극점으로 표시하였는데 이 두 절리에서는 평면파괴의 가능성이 제 1절리군보다는 안정한 것으로 나타났다.

대원으로 표시된 평사투영해석 결과 역시 제 1절리군은 내부마찰각<절리면의 경사<사면의 경사의 관계를 나타내어 제 1절리군에 대한 평면파괴의 가능성이 높게 나타남을 보여준다. 또한, 대원으로 표시한 평사투영방법에서는 제 1절리군과 3절리군에 의한 교차점이 내부마찰각과 유사한 지점에서 발생하여 썩기파괴의 발생 가능성이 내재하고 있음을 알 수가 있다. 평면파괴와 썩기파괴 두가지 경우에 대한 확정론적 해석과 신뢰성해석이 모두 가능하나 본 논문에서는 평면파괴에 경우에 파괴사면인 불연속면의 경사각이 확률변수인 경우와 상수인 경우의 차이를 알아보기 위하여 불연속면의 경사각과 파괴사면의 기하학적구조와의 관계를 식 (8a-i)를 이용하여 구하였으며 본 논문에는 이관계를 이용한 평면파괴의 경우에 대한 신뢰성안정해석을 하는 것에 목적으로 하였다.

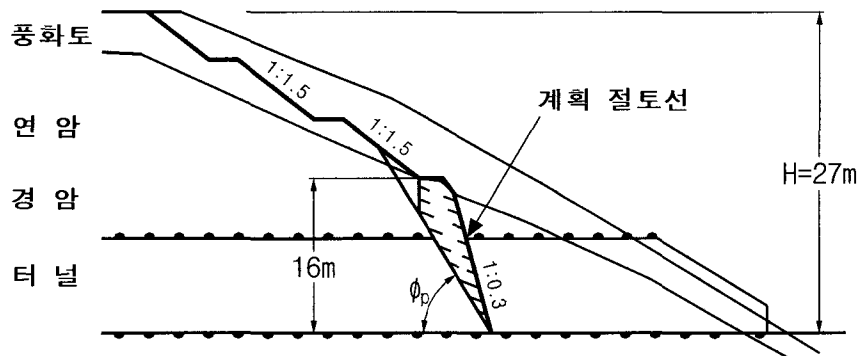
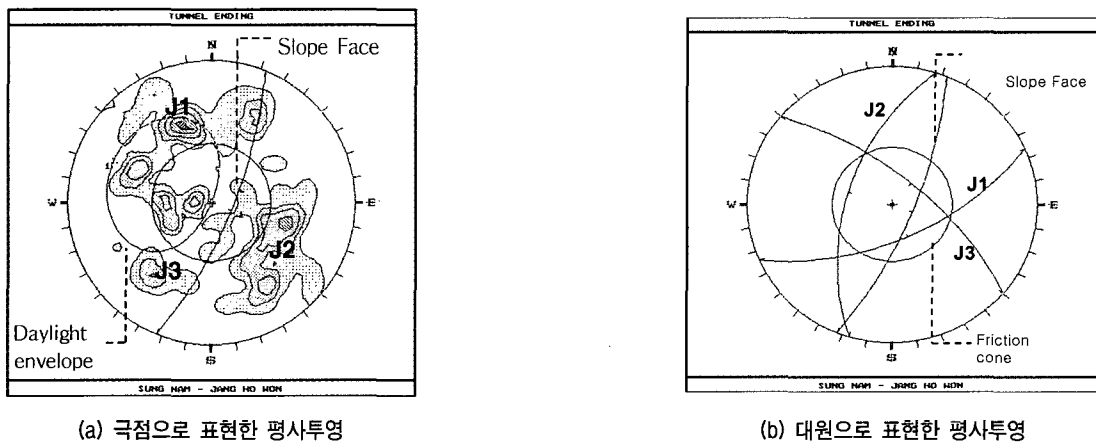


그림 3. 해석구간의 단면도



(a) 극점으로 표현한 평사투영

(b) 대원으로 표현한 평사투영

그림 4. 해석 종단사면의 평사투영 해석 결과

4. 평면파괴에 대한 확정론적 안정해석

ϕ : 슬라이딩면의 마찰각이다.

4.1 해석식

암반사면의 평면파괴에 대한 안정해석을 위하여 Hoek and Bray(1981)의 한계평형해석식을 이용하였으며 해석식에 대한 암반사면의 개요는 그림 5에 나타내었다.

사면의 안전율은 슬라이딩을 유발시키는 힘의 총합에 대한 슬라이딩에 저항하는 힘의 총합으로 식 (4)와 같이 계산된다.

$$F_s = \frac{cA + (W \cos \phi_p - U - V \sin \phi_p) \tan \phi}{W \sin \phi_p + V \cos \phi_p} \quad (4)$$

여기서, c: 절리면의 점착력,

A: 슬라이딩면의 면적 = $(H - z) \operatorname{cosec} \phi_p$,

V: 인장균열에 작용하는 수압,

U: 파괴면에 작용하는 수압,

W: 암괴의 자중, ϕ_p : 슬라이딩면의 경사각,

수압에 작용하는 U와 V는 다음과 같이 계산된다.

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w z_w (H - z) \operatorname{cosec} \phi_p \quad (5)$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w z_w^2 \quad (6)$$

대상 사면은 상부면에 인장균열이 있는 경우로 암괴의 자중은 식 (7)을 이용하여 해석하였다.

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\left(1 - \left(\frac{z}{H}\right)^2\right) \cot \phi_p - \cot \phi_f \right] \quad (7)$$

신뢰성 해석시 파괴경사면 ϕ_p 를 확률변수로 보았을 경우에는 사면의 기하학적 형상에 따른 요소들을 아래와 같이 정의하였으며 식 (8.a-i)을 이용하여 사면의 안정성을 해석하였다.

$$b = a - H \cdot \cot \phi_f \quad (8.a)$$

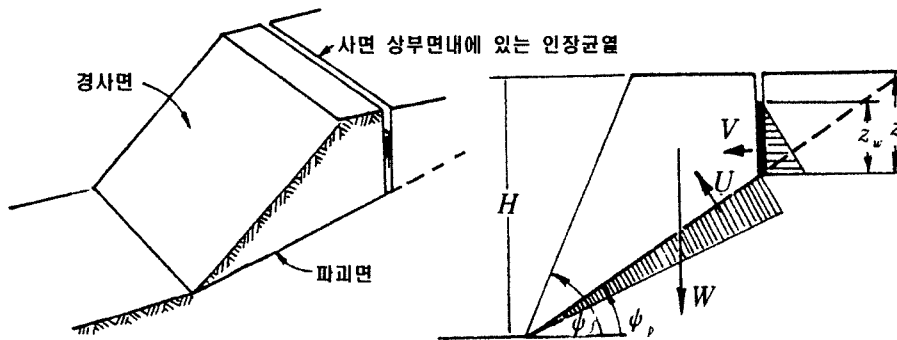


그림 5. 인장균열을 가진 사면의 기하학적 조건 (Hoek & Bray, 1981)

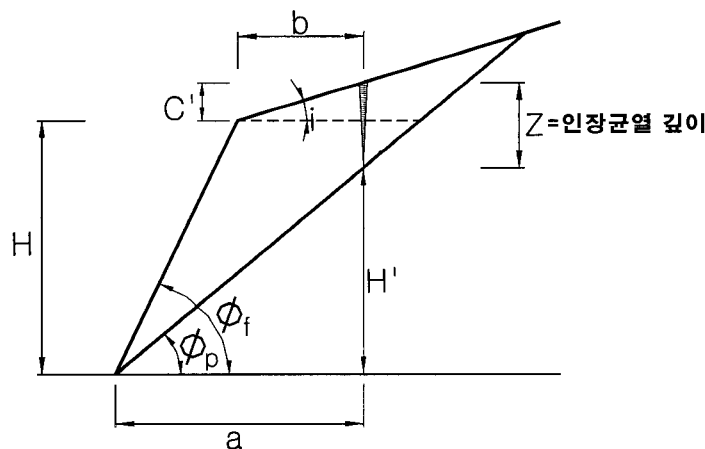


그림 6. 신뢰성 해석시 파괴경사면을 확률변수로 보기위한 가정 단면

$$c' = b \cdot \tan i \quad (8.b)$$

$$H' = a \cdot \tan \phi_p \quad (8.c)$$

$$Z = \text{인장균열깊이} = H - a \cdot \tan \phi_p + a \cdot \tan i - H \cdot \cot \phi_f \cdot \tan i \quad (8.d)$$

$$A' = \text{인장균열 깊이까지의 토괴 단면적} = (a + b) \cdot 0.5 \cdot H - 0.5 \cdot a \cdot H' + 0.5 \cdot b \cdot c' \quad (8.e)$$

$$A = \text{슬라이딩면의 면적} = (H + c' - Z) \cdot \text{cosec } \phi_p \quad (8.f)$$

$$U = \text{파괴면에 작용하는 수압} = 0.5 \cdot \gamma_w \cdot Z_w \cdot (H + c' - Z) \cdot \text{cosec } \phi_p \quad (8.g)$$

$$V = \text{인장균열에 작용하는 수압} = 0.5 \cdot \gamma_w \cdot Z_w^2 \quad (8.h)$$

$$W = \text{암괴의 자중} = \gamma \cdot A' \quad (8.i)$$

이다.

4.2 한계평형해석 결과

평면파괴에 대한 가능성을 내재하고 있는 주향 N66° E, 경사 61°SE인 제 1절리군 (J_1)에 대하여 표 1에 나타난 절리면 토질정수의 평균값을 사용하였으며 대상지역의 절리면 내부 마찰각의 평균은 45.0°, 점착력 13t/m², 암석의 단위중량 2.7t/m³, 활동면의 경사각 ϕ_p 는 61°이었다. 평면파괴 해석을 위한 가정단면은 빗금친 부분의 암괴로 표시하였다(그림 3).

안전율은 우기시 수압에 대한 안전율과 건기시 수압이 작용하지 않을 때의 안전율을 산출하여 안정성을 판단하였으며 우기시 안전율은 인장균열부에 물이 50%가 채워져 있는 경우로 가정하였다. 확정론적 해석에 의한 안전율 산출결과를 표 2에 나타내었는데 산출결과 건기시 안전율은 3.25이고 우기시 안전율은 2.94로서 모두 허용안전율 1.50보다 더 크게 나타나 확정론적 해석에서 평면파괴에 대해 안정한 것으로 파악되었다.

5. 신뢰성 해법을 이용한 인정해석

해석 구간내의 사면에 대한 확정론적 안정성해석 수행결과를 토대로 평면파괴가 나타난 암반사면에 대하여 단위중량, 점착력, 내부마찰각을 확률변수로 적용하고 절리면의 경사각 ϕ_p 를 확정론적 상수와 확률변수로 보는 두 경우로 나누어 신뢰성해석을 수행하였다.

Hooper and Butler(1966), Schultze(1971)은 흙의 점착력, 내부마찰각 등의 불확실성에 대한 통계적 분포가 일반적으로 정규분포를 따르는 것으로 제안하였고 Lumb(1966), Meyerhof(1970), Turnbull et al.(1966)에 의하면 단위중량, 전단저항각등 여러 물성치들이 정규분포의

표 2. 평면파괴에 대한 안전율 산출

구 분	위 치	절토 구간사면
사면경사 ($\phi_i, ^\circ$)		73
활동면 길이 (A, m)		13.26
암괴자중 (W, t/m)		73
부 양 력 (U, t/m)		14.58
간극수압 (V, t/m)		2.42
사면안전율	건기시	3.25
	우기시	2.94

양상을 나타낸다고 주장하였다. 이에 본 구간에서는 각 확률변수를 정규분포로 가정하고 신뢰성 해석으로부터 일계와 이계 파괴확률 및 신뢰지수, 확률변수의 토질정수들에 대한 민감도를 분석하였다.

5.1 한계상태함수

본해석에서의 한계상태함수(limit state function)는 대상지역의 c, ϕ, γ 를 확률변수로 보고 절리면의 경사각 ϕ_p 를 확정론적 상수로 본 경우[식 (9)]와 절리면의 경사각 ϕ_p 를 확률변수로 본 경우[식 (10)]의 두가지에 대하여 구성하였다.

$$g_1(x) = FS(c, \phi, \gamma) - 1.0 \quad (9)$$

$$g_2(x) = FS(c, \phi, \gamma, \phi_p) - 1.0 \quad (10)$$

여기서 $g(x)=0$ 일 때는 한계상태면을 나타내며 사면파괴가 발생하는 안전율 1.0의 상태를 나타낸다. 이 면을 기준으로 $g(x)>0$ 일 때의 안전율은 사면파괴가 발생하지 않는 안전한 상태가 되고 $g(x)<0$ 이면 사면파괴가 발생하는 파괴 상태가 된다.

5.2 해석결과

해석 구간에 대하여 점착력, 내부마찰각, 단위중량 그리고 절리면의 경사각을 확률변수로 보고 신뢰성 해석을 실시한 결과를 표 3에 나타내었다. 한계평형 해석결과에서의 안전율은 우기시 2.94로 안전율만에 의하면 사면이 안정하다고 나타나는 반면 파괴확률은 절리면의 경사각을 확정론적 상수로 본 경우에는 FORM 방법에 의한 경우 34.4%, 확률변수로 본 경우에는 29.4%로 비교적 높은 파괴확률을 갖는 것으로 나타났다. 이는 대상구간 내에 파쇄대가 존재하여 이 구간 강도정수의 높은 불명확성이

파괴확률에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

FORM과 SORM 해석에 의한 파괴확률을 비교한 결과 파괴면의 절리 경사를 확정론적 상수로 계산한 경우에는 상호간에 큰 차이가 없었으나 확률변수로 본 경우에는 FORM의 경우 29.4%, SORM의 경우가 26~28%로 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 절리면의 경사를 확률변수로 보는 경우 경사의 변화가 대상 파괴 블록의 형상에 변화를 주게되며 이는 안정성 해석 모델의 비선형성을 증가시키는 것으로 나타났다.

각 확률변수의 평균값에 대한 파괴 확률의 민감도 순서를 보면 절리경사를 확률변수로 본 경우 점착력 > 단위중량 > 절리경사 > 내부마찰각의 순으로 나타났으며 점착력의 경우는 절리경사를 확정론적 상수로 본 경우와 비교하여 민감도에 차이가 없었으나 단위중량과 내부마찰각의 민감도는 다소 감소한 것으로 나타났다. 단위중량의 평균값은 파괴확률에 대하여 정의 상관관계를 그리고 점착력과 내부마찰각, 절리경사각은 부의 상관관계를 갖는 것으로 나타났다.

분산의 파괴확률에 대한 민감도 역시 절리경사를 확

률변수로 보았을 경우가 확정론적 상수로 본 경우에 비교하여 점착력은 증가한 반면 단위중량과 내부마찰각은 감소하였다. 4가지 확률변수 모두 파괴확률과 정의 상관관계를 갖고 있어 확률변수의 분산도가 증가할수록 파괴확률은 증가하였으며 그 영향은 점착력이 가장 큰 것으로 나타났다. 확률 변수의 평균과 분산의 파괴확률에 미치는 민감도를 검토한 결과 평균값이 미치는 민감도가 분산의 경우보다 크게 나타나 현장 평균값의 정확한 산출이 매우 중요한 것으로 나타났다.

표 4에서는 신뢰성 해석한 결과 나온 지반정수의 최확치와 확정론적 사면안정해석으로부터 얻어진 안전율을 구할 때 사용한 평균값을 함께 나타내었다. 위에 적용된 두 경우 모두 파괴가 발생하는 수치에 있어서 점착력의 최확치(most likely value)는 절리면의 경사를 확정론적 상수로 본 경우 6.43, 확률변수로 본 경우 4.31로 평균값인 12.67에 비교하여 매우 낮은 것으로 나타나고 있어 사면의 안정성을 증가시키기 위하여 현장 절리면 점착력의 정확한 파악과 이를 증가시킬 수 있는 사면 안정공법의 적용이 필요한 것으로 나타나고 있다.

표 3. 해석구간 사면의 신뢰성 해석결과

(a) 신뢰지수와 파괴확률

절리면 경사각의 조건	FORM		SORM				안전율(FS)
			point fitting		curvature fitting		
	신뢰지수 β	파괴확률 P_f	신뢰지수 β	파괴확률 P_f	신뢰지수 β	파괴확률 P_f	
확정론적 상수로 본 경우	0.4018	0.3439	0.4061	0.3423	0.4036	0.3433	2.94
확률변수로 본 경우	0.5405	0.2944	0.6358	0.2624	0.5953	0.2758	

(b) 절리면의 경사각을 확정론적 상수로 본 경우에 대한 신뢰지수와 파괴확률의 민감도

확률변수	민감도	신뢰지수에 대한 민감도		파괴확률에 대한 민감도	
		$\frac{\partial \beta}{\partial \mu}$	$\frac{\partial \beta}{\partial \sigma}$	$\frac{\partial P_f}{\partial \mu}$	$\frac{\partial P_f}{\partial \sigma}$
단위중량, γ		-1.2×10^{-1}	-5.9×10^{-4}	4.4×10^{-2}	2.2×10^{-4}
절리면의 점착력, c		6.4×10^{-2}	-2.6×10^{-2}	-2.4×10^{-2}	9.5×10^{-3}
절리면의 내부마찰각, ϕ		1.2×10^{-2}	-1.7×10^{-4}	-4.4×10^{-3}	6.1×10^{-5}

(c) 절리면의 경사각을 확률변수로 본 경우에 대한 신뢰지수와 파괴확률의 민감도

확률변수	민감도	신뢰지수에 대한 민감도		파괴확률에 대한 민감도	
		$\frac{\partial \beta}{\partial \mu}$	$\frac{\partial \beta}{\partial \sigma}$	$\frac{\partial P_f}{\partial \mu}$	$\frac{\partial P_f}{\partial \sigma}$
단위중량, γ		-4.9×10^{-2}	-1.3×10^{-4}	1.7×10^{-2}	4.4×10^{-5}
절리면의 점착력, c		6.4×10^{-2}	-3.5×10^{-2}	-2.2×10^{-2}	1.2×10^{-2}
절리면의 내부마찰각, ϕ		4.0×10^{-3}	-2.5×10^{-5}	-1.4×10^{-3}	8.6×10^{-6}
절리면의 경사각, ϕ_p		1.0×10^{-2}	-5.0×10^{-4}	-3.6×10^{-3}	1.7×10^{-4}

표 4. 일계 신뢰성 해석으로부터 나타난 평면파괴시의 최확치 및 평균값의 지반 정수

		점착력, c (t/m ²)	내부마찰각, ϕ (°)	단위중량, γ (t/m ³)	절리면경사각, ϕ_p (°)
최확치	ϕ_p 를 확정론적 상수로 본 경우	6.43	45.60	2.70	-
	ϕ_p 를 확률변수로 본 경우	4.31	45.70	2.70	57.6
평균값		12.67	45.70	2.70	61.0

6. 결론

본 연구에서는 암반사면의 평면파괴에 대한 확정론적 안정해석을 실시한 후 지반정수 c , ϕ , γ 를 확률변수로 본 경우와 여기에 절리면의 경사각 ϕ_p 을 확률변수로 추가한 경우에 대하여 신뢰성해석을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 암반사면의 평면파괴에 대한 확정론적 해석식을 이용하여 구한 안전율은 우기시 2.94로 나타났으나 파괴확률은 절리면의 경사를 확정론적 상수로 본 경우 34.4%, 절리면의 경사를 확률변수로서 본 경우 29.4%로 불안정하게 나타났다. 그리고 절리면의 경사를 확률변수로 본 경우의 파괴확률은 절리면의 경사를 상수로 보는 경우 보다 약간 적게 나타났다.
- (2) 이러한 현상은 대상 구간내에 파쇄대가 존재하여 이 구간의 강도정수의 표준편차가 크기때문에 신뢰성해석은 이의 영향을 반영하여 파괴확률이 크게 나타나고 있다. 따라서 절토사면의 시공시 대상지역의 파쇄대등 취약지역을 사전 조사하여 쏘일네일링 및 록앵커 등의 보강 작업을 선 수행할 것이 요구된다.
- (3) FORM과 SORM 해석에 의한 파괴확률을 비교한 결과 파괴면의 절리 경사를 확정론적 상수로 계산한 경우에는 상호간에 큰 차이가 없었으나 확률변수로 본 경우에는 FORM의 경우는 29.4%, SORM의 경우는 26-28%로 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 절리면의 경사를 확률변수로 보는 경우 경사의 변화가 대상 파괴블록의 형상에 변화를 주게되며 이는 안정성 해석 모델의 비선형성을 증가시키기 때문으로 판단된다.
- (4) 각 확률변수의 평균값과 분산에 대한 파괴확률의 민감도는 점착력이 가장 민감한 것으로 나타났다. 확

률 변수의 파괴확률에 미치는 민감도를 검토한 결과 평균값이 미치는 민감도가 분산의 경우보다 크게 나타나 현장 지반물성치들에 대한 평균값의 정확한 산출이 중요한 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. Der Kiureghian A., Lin, H.Z. and Hwang, S.J.(1987), "Second Order Reliability Approximations", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.113, No.8, pp.1208-1225.
2. Duncan, J.M.(2000), "Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division*, ASCE, Vol.126, No.4, pp.307-316.
3. Hoek, E. and Bray, J.(1981), *Rock Slope Engineering*, Revised Third Edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
4. Hooper, J.A. and Butler, F.G.(1966), "Some Numerical Results Concerning the Shear Strength of London Clay," *Geotechnique*, Vol.16, No.3, pp.282-304.
5. Lacasse, S. and Nadim, F.(1996), "Uncertainties in Characterising Soil Properties," *Uncertainty in the Geologic Environment, Proceedings of Uncertainty 96*, Madison, Wisconsin, pp.49-75.
6. Liu, P.L. and Der Kiureghian.(1989), *Finite-Element Reliability Methods for Geometrically Nonlinear Stochastic Structures*, Report No. UCB/SEMM-89/05, Dept. of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
7. Lumb, P.(1966), "The Variability of Natural Soils," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.3, No.2, pp.74-97.
8. Meyerhof, G.G.(1970), "Safety Factors in Soil Mechanics," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.5, No.2, pp.140-148.
9. Meyerhof, G.G.(1982), "Limit States Design in Geotechnical Engineering," *Proceedings of the Conference on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*, Vol.1, pp.67-71.
10. Schultze, E.(1971), "Frequency Distributions and Correlations of Soil Properties," *Proceedings of the First International Conference on Application of Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering*, Vol.1, pp.371-387.
11. Turnbull, W.J., Compton, J.R. and Ahlvin, R.G.(1966), "Quality Control of Compacted Earthwork," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.92, No.SM5, pp.142-145.

(접수일자 2002. 2. 8, 심사완료일 2002. 7. 10)