

## 다중파괴모드를 고려한 사면안정해석

### Slope Stability Analysis Considering Multi Failure Mode

김현기<sup>†</sup> · 김수삼<sup>1</sup>

Hyun-ki Kim · Soo-sam Kim

**Abstract** Conventional slope stability analysis is focused on calculating minimum factor of safety or maximum probability of failure. To minimize inherent uncertainty of soil properties and analytical model and to reflect various analytical models and its failure shape in slope stability analysis, slope stability analysis method considering simultaneous failure probability for multi failure mode was proposed. Linear programming recently introduced in system reliability analysis was used for calculation of simultaneous failure probability. System reliability analysis for various analytical models could be executed by this method. For application analysis for embankment, the results of this method shows that system stability of embankment calculate quantitatively.

**Keywords** : Slope Stability, System Reliability, Multi-failure Mode, Simultaneous failure probability

**초 록** 최저 안전율 또는 최대 파괴확률을 기반으로 하는 기존의 사면안정해석에 대하여, 지반물성과 해석모델이 갖는 고유 불확실성을 최소화하고, 사면안정해석에서 다양한 안정해석모델과 그에 따른 파괴형상을 반영할 수 있도록 다중 파괴모드에 대한 동시 파괴확률을 고려한 사면의 신뢰성해석기법을 제안하였다. 붕괴현장조사를 통하여 현장에서 가장 빈번하게 발생하는 파괴형식을 다중파괴모드로 정의하였다. 동시 파괴확률의 산정에는 체계 신뢰성해석분야에서 최근 도입된 선형계획법에 의한 최적화를 이용하였으며, 이를 통하여 여러 가지 해석모델을 신뢰성 기반으로 동시에 고려하여 해석할 수 있다. 이 방법의 적용성 평가를 위하여 기존 문헌에서 나타난 제방에 대한 신뢰성해석 결과와 비교하였다. 다중 파괴모드에 대한 동시 파괴확률을 고려한 사면의 신뢰성 해석을 적용한 결과, 전체 시스템에 대한 안전성을 정량적으로 산출할 수 있음을 확인하였다.

**주요어** : 사면안정, 체계신뢰성해석, 다중파괴모드, 동시파괴확률

## 1. 서 론

전통적으로 사면안정해석은 허용응력 설계법의 안전율 개념을 사용하여 저항과 하중의 비로서 표현되며, 재료특성, 강도, 하중 등의 지반정수가 갖고 있는 불확실성에도 불구하고 대표 값을 부여해야 한다. 이러한 결과로 실제 현장에서는 설계시 고려한 파괴형상을 포함하여 다양한 파괴의 발생 가능성이 있고, 해석결과가 안정 기준을 만족하는 경우라도 사면붕괴는 해마다 발생하고 있다.

또한, 집중호우, 태풍, 국지성 호우 등과 같은 외부요인에 의해 사면은 붕괴에 도달할 수 있지만, 전수조사 및 안정해석에 의하면 거의 모든 사면의 안전율은 1.0 이상으로 평가되어 실제 사면의 안정성을 명확히 반영한다고 볼 수 없다. 이런 현상의 주요 발생 원인으로는 강우 등의 외부조건 변화에 대한 반응이 어렵다는 점과 지반물성 및 사면안정해석 모델의 불확실성 존재 등이 있다.

다양한 안정해석모델과 그에 따른 파괴형상이 존재하는 사

면안정해석에서 안전율이 최소로 되거나, 파괴확률이 최대로 되는 단일 파괴형상만을 대상으로 하는 경우, 예기치 못한 불안정한 상태가 도래할 수 있음을 현장사례를 통하여 자주 접할 수 있다. 정확한 파괴형상을 예측할 수 없다면 차선책으로 여러 가지 파괴형상 즉 파괴모드를 동시에 고려할 수 있는 방안을 대안으로 검토할 수 있다. 사면의 안정성을 서로 중복되지 않고, 누락이 없는(Mutually exclusive and collectively exhaustive, MECE) 사건으로 구성하면, 안전과 파괴라는 2가지로 분류되고, 파괴영역은 다양한 사면안정해석모델별로 산출되는 파괴확률로 이루어지며, 안전영역과 파괴영역의 모든 확률의 합은 확률공리에 의해 '1'로 정의된다. 파괴영역에 해당하는 파괴확률사이의 동시 파괴확률을 정의하면, 여러 안정해석모델에 의한 파괴형상을 동시에 고려할 수 있다. 이상과 같이 다중 파괴모드에 대한 동시 파괴확률을 산정하기 위해서는 체계신뢰성해석의 도입이 필요하다. 체계 신뢰성해석에는 단일구간해법, 이중구간해법, 선형계획법에 의한 최적화 과정 등이 개발되어져 왔다.

토사사면에 대하여 신뢰지수와 Ditlevsen의 상하한계를 이용한 이중구간해법에 의하여 체계 신뢰성모델을 개발하고, 파괴면 사이의 상관성을 고려한 연구(Oka 등 [19], Chowdhury 등 [15], Chowdhury 등 [16])가 진행된 바 있으며, 암반사면

<sup>†</sup>교신저자 : 한국철도기술연구원 철도구조연구실

E-mail : hkkim@krii.re.kr

<sup>1</sup>한국토지주택공사연구원

에서는 블록간의 상호작용 및 인장균열 유무 등을 고려하여 단계적 혼합구조로 체계를 구성하고, 정해진 파괴 경로 (Failure path)를 따라 체계 신뢰성을 시행하여 보다 좁은 경계를 갖는 상한계와 하한계를 산출한 연구(Rodriguez 등 [17])가 있다. Song 등 [13]은 구간해법의 산정을 위하여 선형계획법에 의한 최적화기법을 이용하였다. 선형계획법 (Linear programming, LP)에 의한 상하한 경계는 파괴모드 숫자에 독립적이며, 주어진 정보에 대하여 가장 좁은 경계를 제시할 수 있다고 제안하였다. 한편, Zevgolis 등 [12], Castillo 등 [9]의 연구자는 방과제를 대상으로 체계 신뢰성 해석기법을 적용한 바 있으며, 이 때 대상으로 한 안정해석 모델(파괴모드)은 3가지에 대하여 수행하였다.

본 연구에서는 최저 안전율 또는 최대 파괴확률을 기반으로 하는 기존의 사면안정해석에 대하여, 지반물성과 해석모델이 갖는 고유 불확실성을 최소화함과 동시에 사면안정해석에서 다양한 안정해석모델과 그에 따른 파괴형상을 반영할 수 있도록, 다중 파괴모드에 대한 동시 파괴확률을 고려한 사면의 신뢰성해석기법을 제안하고자 하였다. 동시 파괴확률의 산정에는 체계 신뢰성해석분야에서 최근 도입된 선형계획법(Linear Programming)에 의한 최적화를 이용하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 안전율과 파괴확률

전통적인 사면안정 해석에서의 안정성은 지반정수의 대표값을 적용한 안전율 개념을 사용하고 있어 지반내에 존재하는 불확실성을 반영하기 어렵지만, 신뢰성해석에서는 지반정수의 확률분포를 반영한 해석이 가능하고, 이를 이용하여 지반정수, 해석모델의 불확실성을 최소화할 수 있는 기법으로 최근 많은 연구가 수행되고 있다(김 등 [1], 김 [2], 김 등 [4]).

신뢰성해석기반 사면안정 해석은 사면의 임계활동면에 대한 파괴확률을 산출하여 안정성을 평가하며, 안전율의 확률밀도함수가 기준 안전율을 하회하는 한계상태함수 구간의 확률밀도 면적을 통해 결정한다. 하지만, 신뢰성해석의 확률밀도함수를 정확히 구하는 것은 매우 어렵고 보통 사용되는 실용적인 방법은 안전율의 기대값과 표준편차를 통한 것이다. 파괴확률은 신뢰지수에 의해 간접적으로 산정할 수 있으며, 기

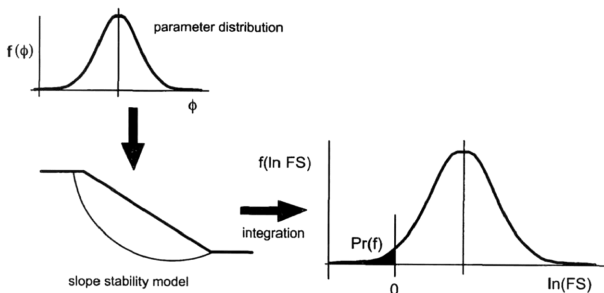


Fig. 1 Failure probability and reliability index

준안전율이 1.0인 경우 다음과 같이 산정한다(김 등 [3]).

$$\beta = \frac{E[FS]-1.0}{\sigma_{FS}} \quad (2)$$

여기서,  $\beta$ 는 신뢰지수이며,  $E[FS]$ 는 안전율의 기댓값,  $\sigma_{FS}$ 는 안전율의 표준편차를 나타낸다.

사면안정의 안전율이 정규확률분포를 따른다고 가정하면 파괴확률은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$P_r(f) = \Phi(-\beta) = \int_{-\infty}^{-\beta} g(z) dz \quad (3)$$

여기서,  $P_r(f)$ 는 파괴확률,  $\Phi(-\beta)$ 는 표준정규분포 상의  $-\infty$ 에서  $-\beta$ 까지의 확률면적, 그리고  $g(z)$ 는 사면안정에서 안전율에 대한 한계상태함수로 정의된다.

### 2.2 다중파괴모드에 대한 체계 신뢰성해석

파괴양식이 하나로 주어진 경우에 대한 신뢰성해석은 하중저항설계법(Level I), 신뢰지수법(Level II) 및 모사법(Level III)을 이용하여 산출할 수 있다. 하지만, 대상 구조물의 안전성을 보다 합리적으로 평가하기 위해서는 여러 가지 파괴양식에 대한 종합적인 안전성 평가가 수행되어야 한다.

여러 가지 구성요소로 이루어진 체계의 신뢰성은 다중 파괴모드의 형태를 갖게 된다.  $k$ 개의 파괴모드로 구성되어 있는 시스템이 있다고 가정하면, 각 파괴모드는 식(3)과 같이 서로 다른  $k$ 개의 한계상태함수로 표현할 수 있다.

$$g_j(X) = g_j(X_1, X_2, \dots, X_i) \quad (3)$$

$$= ; i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, k$$

여기서,  $g_j(X) = j$  파괴모드에 대한 한계상태함수이며,  $X$ 는 파괴 구성요소를 나타낸다.

복수의 한계상태에 의한 영향을 고려하는 경우에  $m$ 개의 직렬계 구조의 파괴모드에 대한 파괴 사건은 식(4)와 같으므로(Ang 등 [8]), 각각의 한계상태에 대한 파괴확률( $P_j$ )은

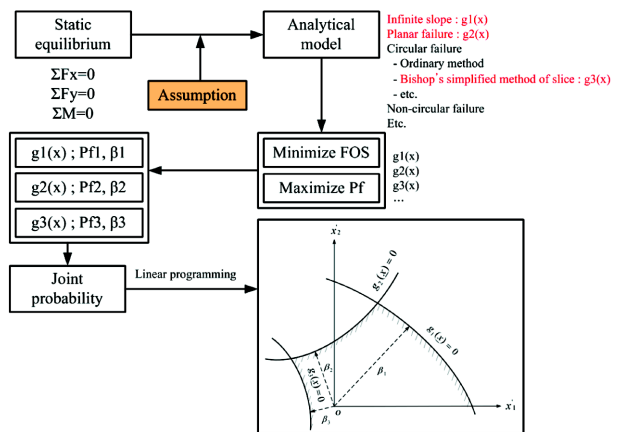


Fig. 2 Application of multi failure mode

면적분을 사용해서 구할 수 있다.

$$P_f = \int \dots \int_{(E_1 \cup \dots \cup E_m)} f_{x_1, x_2, \dots, x_n}(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (4)$$

### 2.3 선형계획법(Linear Programming, LP)

주어진 개개의 조건을 만족하면서 목적을 최대(최소)로 달성할 수 있는 해를 최적해(Optimal solution)라 할 때, 선형계획법은 주어진 문제의 최적해를 구하는 방법을 제공한다. 선형계획법은 목적함수와 제약조건이 설계변수로 구성되어 선형을 이루고 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다. 주어진 제약조건에 대하여 식(5)의 목적함수의 최대화 또는 최소화를 통하여 최적해를 탐색할 수 있다.

$$\text{maximize(minimize)} \quad c^T p \quad (5)$$

$$\text{subject to} \quad a_1 p = b_1 \quad (6)$$

$$a_2 p \geq b_2 \quad (7)$$

$$a_3 p \leq b_3 \quad (8)$$

부등호 제약조건은 부가변수(Surplus variable)나 완화변수(Slack variable)를 사용해서 등호식으로 변화시킬 수 있으므로 모든 제약 조건을 등호제약조건으로 만들어서 표준 선형계획문제로 변화시킬 수 있다.

## 3. 선형계획법을 이용한 해석기법 개발

### 3.1 대상 사면안정해석모델 선정

한국건설기술연구원 [5]과 한국철도기술연구원 [6]의 현장

Table 1 Limit state functions of failure mode

Failure mode	Limit state function
Surface failure	$g(x) = \frac{c' + (\gamma_{sat} - \gamma_w) z_w \cos^2 \alpha \tan \phi'}{\gamma_{sat} z_w \sin \alpha \cos \alpha}$ <p>where <math>c'</math>: Effective cohesion, <math>\gamma_{sat}</math>: Saturated unit weight, <math>\gamma_w</math>: Unit weight of water, <math>z_w</math>: Vertical depth of sliding surface, <math>\alpha</math>: Angle of a slope, <math>\phi'</math>: Effective friction angle</p>
Planar failure	$g(x) = \frac{c}{c_m} = \frac{2c}{\gamma H} \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \theta) (\sin \theta - \cos \theta \cdot \tan \phi_m)}$ <p>where <math>c</math>: Cohesion, <math>c_m</math>: Mobilized cohesion, <math>\gamma</math>: unit weight of soils, <math>H</math>: Height of a slope, <math>\alpha</math>: Angle of a slope, <math>\theta</math>: Angle of failure surface, <math>\phi_m</math>: Mobilized friction angle</p>
Circular failure	$g(x) = \frac{\sum \left[ \frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W - u \Delta l \cos \alpha) \tan \phi'}{\cos \alpha + (\sin \alpha (\tan \phi')) / F} \right]}{\sum W \sin \alpha}$ <p>where <math>c'</math>: Effective cohesion, <math>\alpha</math>: Angle of failure surface, <math>\Delta l</math>: Length of a slice, <math>\phi'</math>: Effective friction angle, <math>F</math>: Safety factor</p>

adopted from Abramson et. al [14]

조사결과를 분석한 결과, 대표적인 파괴형식은 초기 강우침투 및 토석류에 의해 발생하는 표층파괴와 암반과 토사 경계층에서 발생하는 평면파괴 그리고 통상적인 원호활동에 의한 원호파괴로 나타났으며, 체계 신뢰성해석에 기초한 다중 파괴모드에 대한 파괴확률을 산정하기 위하여 다음 3가지의 사면안정해석모델을 한계상태함수로 정의하여 연구를 수행하였다(Table 1).

### 3.2 선형계획법(Linear programming, LP)을 이용한 체계 신뢰성해석기법 개발

Hailperin [11]은 구성요소 사건의 표본공간을 구성요소 사건  $E_i$ 와 그 여사건  $\bar{E}_i, i=1, 2, \dots, n$ 의 명백한 교집합으로 각각 구성된  $2^n$ 의 중복적이지 않고 상호배타적이며, 합이 전체가 될 수 있는 요소(Mutually exclusive and collectively exhaustive, MECE)의 사건으로 나누었다.

MECE 사건이  $n$ 개의 구성요소를 갖는 시스템으로 정의하면, 본 논문에서는 3가지의 파괴모드, 즉 표층파괴평면파괴 원호파괴를 체계 신뢰성해석의 대상으로 하므로  $n=3$ 인 구성요소를 갖게 된다.

$E_{system}$ 을 전체 체계의 상태를 표현한다고 하면,

$$E_{system} = L(E_1, E_2, E_3) \quad (9)$$

와 같이 표현된다.

여기에서  $E_1 = E_{surface\ failure}$

$E_2 = E_{planar\ failure}$

$E_3 = E_{circular\ failure}$

이며,  $L(\cdot)$ 은 구성요소 사건 또는 그들의 여사건의 합집합과 교집합을 포함하는 논리함수이며, 사건과 여사건의 두 가지 상태를 고려하면, 다음과 같이 된다.

$$E_i = (E_i, \bar{E}_i) \quad (10)$$

여기에서  $\bar{E}_i$ 는 사건의 여사건을 나타낸다. 이 경우 식(10)은 다음과 같이 단순화 된다.

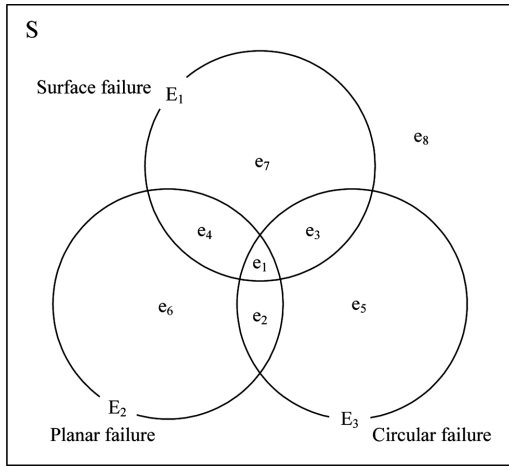
$$E_{system} = L(E_1, \bar{E}_1, E_2, \bar{E}_2, E_3, \bar{E}_3) \quad (11)$$

따라서 체계의 파괴상태를 파괴모드  $i$ 와  $E_{system}$ 의 파괴(안전)의 상태로써  $E_i(\bar{E}_i)$ 을 고려함이 유용하다.

사면안정의 경우, 안정해석법으로 정의되는 한계상태함수의 파괴모드는 어느 하나에서도 파괴가 발생하면 사면 전체가 파괴되었다고 가정하게 되므로 직렬계 구조를 따른다고 가정할 수 있고, 수학적으로 직렬계 구조는 단지 합집합 기호를 포함하는  $L(\cdot)$ 로 정의된다.

$$E_{series\ system} = \bigcup_i E_i \quad (12)$$

요소 파괴확률과 신뢰지수를 이용하면, 2개의 구성요소 MECE 사건(Fig. 3)에 근거하여 안정해석모델을 이용하면, 각각의 사면파괴모드에서 발생한 파괴확률은 직접 산출이 가



**Fig. 3** Basic mutually exclusive and collectively exhaustive (MECE) events for 3-component sample space of slope stability

능하며, 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P(E_1) &= P_1 = p_1 + p_3 + p_4 + p_7 \\ P(E_2) &= P_2 = p_1 + p_2 + p_4 + p_6 \\ P(E_3) &= P_3 = p_1 + p_2 + p_3 + p_5 \end{aligned} \quad (13)$$

요소 파괴확률과 신뢰지수를 이용하면, 2개의 구성요소에 대한 파괴모드 사이의 결합확률을 정의할 수 있으며,

$$\begin{aligned} P(E_1E_2) &= P_{12} = p_1 + p_4 \\ P(E_1E_3) &= P_{13} = p_1 + p_3 \\ P(E_2E_3) &= P_{23} = p_1 + p_2 \end{aligned} \quad (14)$$

다음 식(15)에 의해 산정된다.

$$P[E_i \cap E_j] = \Phi(-\beta_i) \Phi\left(\frac{\beta_j - \rho_{ij}\beta_i}{\sqrt{1-\rho_{ij}^2}}\right) + \Phi(-\beta_j) \Phi\left(\frac{\beta_i - \rho_{ij}\beta_j}{\sqrt{1-\rho_{ij}^2}}\right) \quad (15)$$

한편, 3가지 구성요소에 대한 결합확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(E_1E_2E_3) = P_{123} = p_1 \quad (16)$$

$\rho_{ij} = r_i r_j (i \neq j)$ ,  $\rho_{ij} = 1 (i = j)$ 로 정의된 Dunnet 등 [10]에 의한 계급 상관행렬을 도입하면,  $m$ 개의 구성요소에 대한 결합

파괴확률은 일차원 적분에 의해 산출된다.

$$\begin{aligned} P_{12\dots m} &= P\left(\bigcap_{i=1}^m E_i\right) = \Phi_m(u_1, u_2, \dots, u_m; R) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \prod_{i=1}^m \Phi\left(\frac{u_i - r_i t}{\sqrt{1-r_i^2}}\right) dt \end{aligned} \quad (17)$$

여기에서,  $\Phi_m(u_1, u_2, \dots, u_m; R)$ 은  $u_i$ 좌표에서  $R = [\rho_{ij}]$ 의 상관행렬을 갖는 개의 변수를 갖는 표준정규누적분포함수이며,  $\phi(\cdot)$ 는 일차원 표준 정규분포의 확률밀도함수이다.

이상과 같이 계산되는 확률은 선형계획법에서 제한조건 (Constraint condition)으로 적용되며, Table 2에 제시된 목적함수를 Fig. 4의 제한조건에 의해 최대화 또는 최소화하는 해를 탐색하면,  $p_1, p_2, \dots, p_8$ 의 값이 각각 결정되어 이들의 합으로 사면 안정성에 대한 상한계와 하한계를 산출하게 된다.

$$\text{Maximize } p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7 \text{ (상한계)} \quad (18)$$

$$\text{Minimize } p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7 \text{ (하한계)} \quad (19)$$

$$\begin{matrix} & a_i & & p & = & b_i \\ P(E_1) & : & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \\ p_8 \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \\ b_8 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

※  $b_8=1$

**Fig. 4** Constraint condition of linear programming in this study

### 3 해석 프로그램 개발

파괴모드에 대한 안정해석모델을 이용하여 신뢰성해석프로그램 SRES(System Reliability Program of Earth Slopes)를 개발하였다. Visual Basic을 이용하여 프로그램을 구성하였으며, 안전율의 확률특성(표준편차, 분산계수) 및 파괴확률의 산출이 가능하다(Fig. 5). 단위 신뢰성해석 결과에 기

**Table 2** Coefficients  $c_i$  of the object function  $c^T p$  for 3-component systems

		Basic MECE Events							
		$e_1 = E_1E_2E_3$	$e_2 = \bar{E}_1E_2E_3$	$e_3 = E_1\bar{E}_2E_3$	$e_4 = E_1E_2\bar{E}_3$	$e_5 = \bar{E}_1E_2\bar{E}_3$	$e_6 = \bar{E}_1\bar{E}_2E_3$	$e_7 = E_1\bar{E}_2\bar{E}_3$	$e_8 = \bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3$
		Design Variables							
System event		$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_1$	$p_7$	$p_8$
$E_1 \cup E_2 \cup E_3$		1	1	1	1	1	1	1	0
Objective Function ; Maximize(Minimize) $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7$									

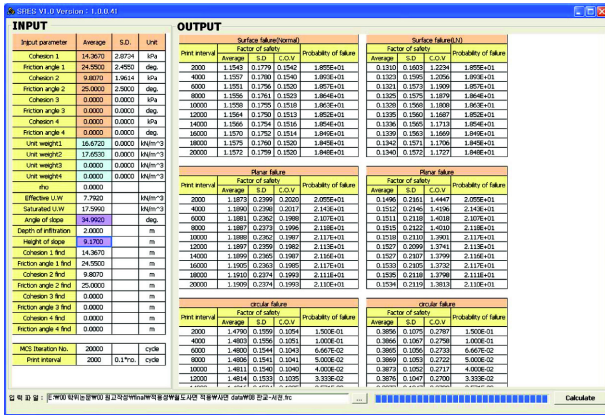
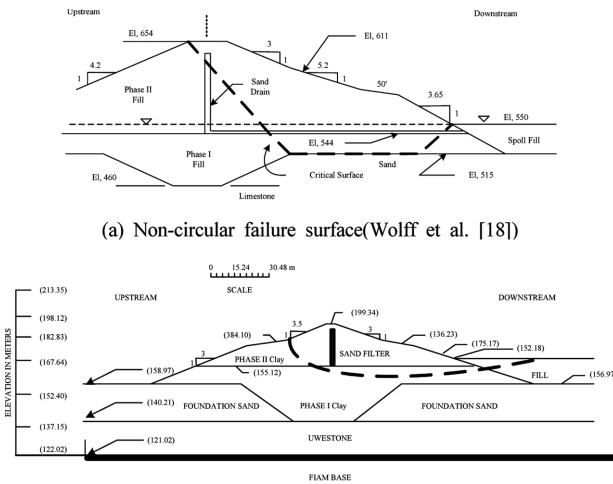


Fig. 5 Operating screen of SRES program



(b) Circular failure(Hassan et al. [7])

Fig. 6 Cross section and failure surface of Clarence Cannon dam

초하여 선형계획법에 의한 최적화 과정은 상용 프로그램인 Matlab에서 제공하는 함수인 'linprog'를 이용하여 수행하였다.

### 4. 적용성 분석

#### 4.1 대상 사면

미국 Missouri주 Clarence Cannon dam의 확률론적 해석은 기존의 연구로 Wolff 등 [18], Hassan 등 [7]에 의해 보고된 바 있다. 사면에 대한 단면은 Fig. 6과 같으며, 지중구조는 다짐 점토의 2개 지역으로 구분되는데, 모래와 석회암의 기반층 위에 Phase I과 Phase II로 구분되어 시공되어있다.

확률변수로는 2개의 점토층에 대한 지반의 강도정수를 선정하였으며, 제방으로부터 채취한 시료의 비배수 전단강도에 기초하여 적용되었다. 한계활동면은 Phase I의 저부를 통과하는 비원호활동면과 Phase I과 II를 통과하는 원호활동으로 구분하고 연구를 수행한 바 있다. 지반의 분산계수가 다

Table 3 Input parameters for Clarence Cannon dam

Material	Parameter	Mean (kPa)	S.D (kPa)	COV	Correlation coefficient	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )
Phase I fill	c <sub>1</sub>	117.79	58.89	0.50	+0.10	22
	φ <sub>1</sub>	8.5	8.5	1.00		
Phase II fill	c <sub>2</sub>	143.64	79	0.55	-0.55	22
	φ <sub>2</sub>	15	9	0.60		

S.D : Standard deviation

COV : Coefficient of variance

Table 4 Comparison of the results

Case	Failure mode	FOS	Reliability index	Probability of failure
Hassan et. Al	Non-circular	2.16	2.69	3.59E-1%
Wolff et. Al	Non-circular	2.36	1.69	4.55E+0%
Hassan et. Al	Circular	2.35	3.99	3.30E-3%

소 크게 산출되어 적용되었으며, 지반정수간의 상관성을 고려한 사례이다. 한편, 지반 물성치를 Table 3에 보였다.

#### 4.2 체계 신뢰성해석 결과

Cannon dam에 대하여 본 연구에서 제안한 신뢰성해석기법을 이용한 동시 파괴확률의 적용성을 검토하였다. 연구자에 따라 원호파괴 또는 비원호파괴로 정의했던 기존 연구의 해석결과를 이용하여, 각 연구에서 제안한 원호파괴와 비원호파괴가 동시에 발생할 파괴확률을 산정하였다.

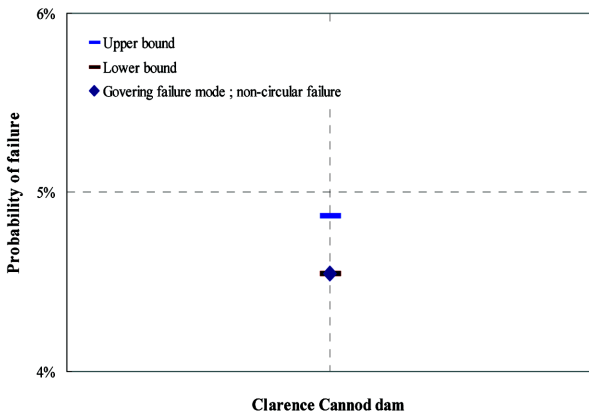
Hassan 등 [7] 및 Wolff 등 [18]에 의한 기존 연구결과에 따르면 각기 원호파괴 또는 비원호파괴가 지배 파괴모드로 되며, 이에 따른 신뢰지수를 산정한 바 있다. 신뢰지수를 파괴확률로 변환할 경우, 지배 파괴모드에 대한 최대 파괴확률은 Wolff 등 [18]에 의한 비원호파괴 해석 결과인 4.550%이며, 최소 파괴확률은 Hassan 등 [7]에 의한 원호파괴 해석결과인 0.0033%이다. 한편, 비원호파괴를 대상으로 한 Hassan 등 [7]에 의한 연구에서는 0.359%의 파괴확률이 산정되기도 했다. 따라서, 독립 파괴모드를 고려한 경우에는 최대 파괴확률이 산출되는 Wolff 등 [18]에 의한 비원호파괴형상이 지배적인 파괴모드로 고려된다(Table 4).

연구자별로 각기 다르게 산정된 파괴형상과 파괴확률 및 신뢰지수를 이용하여, 각 파괴모드에 의해 발생할 수 있는 동시 파괴확률을 본 연구에서 개발한 선형계획법에 의한 체계 신뢰성해석을 이용하여 산출하였다. 2가지 파괴모드에 대한 제방의 동시 파괴확률은 상한계 4.870%, 하한계 4.550%로 나타났다. 이는 기존 연구결과와 비교할 때, 상한계가 독립 파괴모드에 대한 최대 파괴확률보다 크기 때문에 독립 파괴모드만을 고려한 경우, 2가지 파괴모드를 대상으로 할 때, 제방 시스템의 불안정성을 과소평가할 가능성이 있다는 것을 파악할 수 있다(Table 5, Fig. 7).

또한, 해석모델에 따라 잠재 활동면의 형상과 사면안정해석결과는 상이하게 나타나지만, 본 연구에서 제안된 동시 파

**Table 5** Results of system reliability analysis

Bounds	Upper bound	Lower bound	Band
LP bounds	4.87%	4.55%	0.32%



**Fig. 7** Simultaneous Probability of failure of Cannon dam

파괴확률을 이용하면 어떠한 해석모델이라도 결합하여 대상 사면의 종합적인 체계 신뢰도를 평가할 수 있음을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 사면안정해석모델은 표층파괴와 평면파괴, 원호파괴의 3가지를 검토 대상으로 하고, 신뢰지수법과 모사법을 이용하여 해석모델에 따른 독립 파괴확률과 파괴형상을 결정하였으며, 선형계획법에 의한 최적화를 이용하여 다중파괴모드에 대한 사면 시스템의 동시 파괴확률을 산정하였다. 본 연구에서 제안된 기법을 이용하면, 대상으로 하는 사면안정해석모델과 파괴형상 및 파괴확률을 복합적으로 고려할 수 있기 때문에 기존에 제안된 안전율 및 파괴확률에 의한 해석결과와 비교할 때, 개선된 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단되며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 선형계획법에 의한 최적화를 이용하여 다중파괴모드에 대한 동시 파괴확률을 산출할 수 있는 기법을 개발하였다. 이를 이용하면 여러 가지 해석모델을 신뢰성 기반으로 동시에 고려하여 해석할 수 있다.

(2) 개발된 기법에 대하여 기존 연구결과를 대상으로 적용성을 분석하였다. 동일한 제방에 대하여 수행한 안정해석이라 할지라도, 해석모델 차이에 따라서 결과와 파괴형상이 달라지게 된다. 기존 연구자에 의해 각기 다르게 산출된 신뢰도 및 안정해석결과를 이용하여, 본 연구에서 제안한 다중 파괴모드에 대한 동시 파괴확률을 고려한 사면의 신뢰성 해석을 적용한 결과, 제방 시스템에 대한 안정성을 정량적으로 산출할 수 있었다.

(3) 안정해석모델을 동시 파괴확률로 복합적으로 고려할 때, 작지만 '0'이 아닌 파괴확률을 안정해석에 반영함으로써, 개별 파괴모드만을 대상으로 했을 경우 예상하지 못했던 불

안정성을 반영할 수 있다.

(4) 사면안정해석모델 또는 잠재 활동면의 형상에 따라 사면의 신뢰성해석결과는 상이하지만, 본 연구에서 제안된 동시 파괴확률을 이용하면 어떠한 해석모델이라도 결합하여 대상 사면의 종합적인 체계 신뢰도를 평가할 수 있고, 최대 파괴확률만을 고려했을 때와 비교하여 안정성을 개선할 수 있다고 판단된다.

## 참고문헌

- [1] K.Y. Kim, S.E. Cho (2006) A study on the probabilistic stability analysis of slopes, *Journal of KGS*, Vol. 22, No. 11, pp. 101-112.
- [2] J.M. Kim (2007) Reliability analysis of slope stability with sampling related uncertainty, *Journal of the KGS*, Vol. 23, No. 3, pp. 51-59.
- [3] H.B. Kim, S.H. Lee (2002) A study to develop a practical probabilistic slope stability analysis method, *Journal of KGS*, Vol. 18, No. 5, pp. 271-280.
- [4] H.K. Kim, S.S. Kim (2008) Risk assessment of slopes using failure probability in Korean railways, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 11, No. 2, pp. 158-164.
- [5] KICT (2003) 2002 Development & operation of cut slopes management system.
- [6] KRRI (2004) A study on the evaluation and countermeasure of stability of railway slopes.
- [7] Ahmed M. Hassan, Thomas F. Wolff (1999) Search algorithm for minimum reliability index of earth slopes, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental eng.*, Vol. 125, No. 4, pp. 301-308.
- [8] Ang, T. H-S., W.H. Tang (1984) Probability concepts in engineering planning and design. Volume II: decision, risk and reliability, John Wiley & Sons, New York
- [9] C. Castillo, R. Minguez, E. Castillo, M.A. Losada (2004) An optimal engineering design method with failure rate constraints and sensitivity analysis. Application to composite breakwaters, *Coastal Eng.*, Vol. 53, pp. 1-25.
- [10] W. Charles, A. Dunnett (1955) Multiple comparison procedure for comparing several treatments with a control, *Journal of the American Statistical Association*, 50(272):1096-1121.
- [11] T. Hailperin (1965) Best possible inequalities for the probability of a logical function of events, *Am. Math. Monthly*, Vol. 72, No. 3 pp. 343-359.
- [12] Ioannis E. Zevgolios and Philippe L. Bourdeau (2006) System reliability of cantilever retaining walls with correlated failure modes, *Geo-congress 2006*.
- [13] J.H. Song, Armen Der Kiureghian (2003) Bounds on system reliability by linear programming, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 129, No. 6, pp. 627-636.
- [14] Lee W. Abramson, Thomas. S. Lee, Sunil Sharma (2001) Glenn M. Boyce, Slope stability and stabilization methods, 2nd edition, John Wiley & Sons, INC.
- [15] R.N. Chowdhury, D.W. Xu (1994) System reliability with general slip surfaces, *Soil and Foundations*, Japanese Society of

- SMFE, Vol. 34, No. 3, pp. 99-105.
- [16] R.N. Chowdhury, D.W. Xu (1995) Geotechnical system reliability of slopes, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 47, pp. 141-151.
- [17] R. Jimenez-Rodriguez, N. Sitar, J. Chacon (2006) System reliability approach to rock slope stability, *Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 43, pp. 847-859.
- [18] T.F. Wolff, A. Hassan, R. Khan, I. Ur-Rasul, M. Miller (1995) Geotechnical reliability of dam and levee embankments, Technical report prepared for U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station-Geotechnical Laboratory, Vicksburg, Miss.
- [19] Yoneo Oka, Tien H. Wu (1990) System reliability of slope stability, *Journal of Geotechnical Eng.*, Vol. 116, No. 8, pp. 1185-1189.
- 접수일(2010년 9월 6일), 게재확정일(2010년 12월 20일)