

다중 파괴모드를 고려한 단순 사면의 최적 설계

Optimum Design of a Simple Slope considering Multi Failure Mode

김현기* · 신민호** · 최찬용***
Kim, Hyun Ki · Shin, Min Ho · Choi, Chan Yong

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. Optimum design to determine angle of a simple slope is executed for multi failure mode using linear programming. Because of complex consideration for various failure shapes and modes, it is possible to secure advanced safety by using simultaneous failure probability.

Key words : Slope Stability, System Reliability, Multi-failure Mode, Optimum Design

요 지

최저 안전을 또는 최대 파괴확률을 기반으로 하는 기존의 사면안정해석에 대하여, 지반물성과 해석모델이 갖는 고유 불확실성을 최소화하고, 사면안정해석에서 다양한 안정해석모델과 그에 따른 파괴형상을 반영할 수 있도록, 다중 파괴모드를 고려한 사면의 신뢰성해석기법을 제안하였다. 파괴확률의 산정에는 체계 신뢰성해석분야에서 최근 도입된 선형계획법에 의한 최적화를 이용하였다. 이를 통하여 여러 가지 해석모델을 신뢰성 기반으로 동시에 고려하여 해석할 수 있다. 선형계획법에 의한 다중 파괴모드를 고려한 파괴확률 산정기법을 이용하여 단순 사면의 경사도 결정을 위한 최적 설계를 검토하였다. 그 결과, 동시 파괴확률을 이용하면, 대상으로 하는 사면안정해석모델과 파괴형상 및 파괴확률을 복합적으로 고려할 수 있기 때문에 개선된 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 사면안정, 체계 신뢰성해석, 다중파괴모드, 최적 설계

1. 서 론

전통적인 사면안정해석은 허용응력 설계법의 안전을 개념을 사용하여 저항과 하중의 비로서 표현되며, 재료특성, 강도, 하중 등의 지반정수가 갖고 있는 불확실성에도 불구하고 대표 값을 부여해야 하는 단점을 가지고 있다. 이와 같은 결정론적 방법은 사면조건, 기술자의 판단, 지반정수에 적용될 보수성 등을 경험적으로 반영하여, 최소안전율을 갖는 한계 활동면과 파괴형상을 정의하게 되며, 한계 활동면과 파괴형상은 안정해석모델에 의해 지배된다. 현재 사면안정해석은 상용 프로그램에 의존하기 때문에 파괴면을 미리 지정하지 않으면 대부분 원호파괴 형상을 따르게 된다. Clarence Cannon dam의 사례는 연구자에 따라 파괴형상을 원호파괴(Hassan et al., 1999)와 비원호파괴(Wolff et al., 1995)의 2가지로 접근

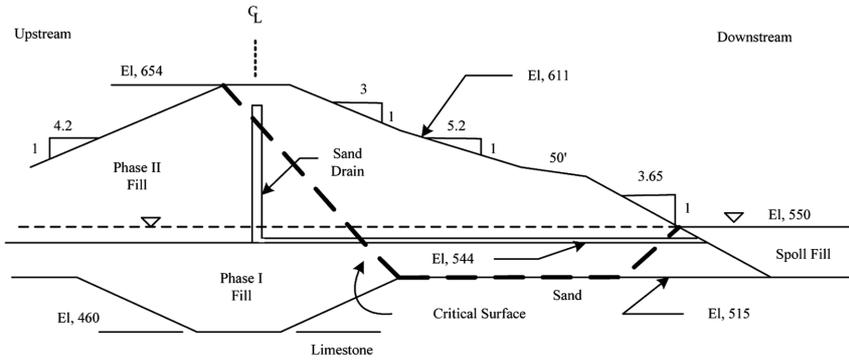
한 예이며, 해석모델을 다르게 적용함에 따라, 각기 다른 독립적인 파괴면이 산출되는 것을 확인할 수 있다.

다양한 안정해석모델과 그에 따른 파괴형상이 존재하는 사면안정해석에서 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 해

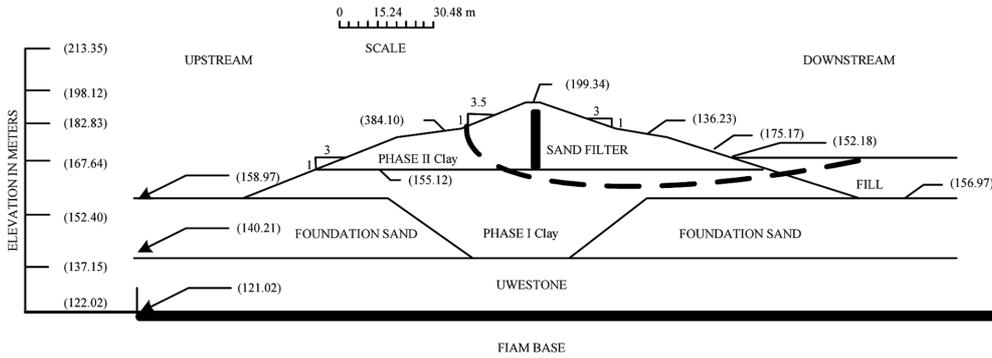
*한국철도기술연구원 구조연구실 선임연구원 (Email: hkkim@krii.re.kr, 교신저자)

**한국철도기술연구원 구조연구실 수석연구원

***한국철도기술연구원 구조연구실 선임연구원



(a) Non-circular failure surface(Wolff et al., 1995)



(b) Circular failure(Hassan et al., 1999)

Fig. 1. Cross section and failure surface of Clarence Cannon dam

당하는 파괴확률사이의 동시 파괴확률을 정의하면, 여러 안정 해석모델에 의한 파괴형상을 동시에 고려할 수 있다. 이상과 같이 다중 파괴모드에 대한 동시 파괴확률을 산정하기 위해서는 체계신뢰성해석의 도입이 필요하다.

한편, 최적설계분야와 관련하여 신뢰성해석의 적용은 사용의 용이성에 목적을 둔 모델이 상당수 개발되어 왔으며, 파괴확률과 수명주기비용(Life cycle cost, LCC)을 비교하여 최적 공법을 선정할 수 있도록 한 연구개발 사례가 있다(松尾 稔 등(1978), 鈴木 誠 등(1986), 松尾 稔 등(1992)). 하지만, 파괴확률면이 대책공법과 LCC에 미치는 영향이 지대함을 고려하면, 다양한 파괴형상을 고려하지 못해 공법의 선택이 제한될 수 있고, 경제적이지 못한 공법이 선택될 개연성이 존재한다.

따라서, 본 연구에서는 선형계획법에 의한 다중 파괴모드에 대한 동시 파괴확률 산정기법을 이용하여 단순 사면의 경사도 결정을 위한 최적 설계를 검토하였다. 동시 파괴확률을 이용하면, 대상으로 하는 사면안정해석모델과 파괴형상 및 파괴확률을 복합적으로 고려할 수 있기 때문에 개선된 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 이론적 배경

2.1 안전율과 파괴확률

전통적인 사면안정해석에서의 안정성은 지반정수의 대푯값을 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(2006), 김(2007)).

신뢰성해석기반 사면안정해석은 사면의 임계활동면에 대한 파괴확률을 산출하여 안정성을 평가하며, 안전율의 확률밀도 함수가 기준 안전율을 하회하는 한계상태함수 구간의 확률밀도 면적을 통해 결정한다. 하지만, 신뢰성해석의 확률밀도 함수를 정확히 구하는 것은 매우 어렵고 보통 사용되는 실용적인 방법은 안전율의 기대값과 표준편차를 통한 것이다. 파괴확률은 신뢰지수에 의해 간접적으로 산정할 수 있으며, 기준 안전율이 1.0인 경우 다음과 같이 산정한다(김 등(2002)).

$$\beta = \frac{E[FS] - 1.0}{\sigma_{FS}} \quad (1)$$

여기서, β 는 신뢰지수이며, $E[FS]$ 는 안전율의 기대값, σ_{FS} 는 안전율의 표준편차를 나타낸다.

사면안정해석 결과의 안전율이 정규확률분포를 따른다고 가정하면 파괴확률은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$P_r(f) = \Phi(-\beta) = \int_{-\infty}^{\beta} g(z) dz \quad (2)$$

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 하중 저항설계법(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. 따라서 개별 파괴양식에 대해 얻어진 신뢰성 해석결과를 이용하여 발생 가능한 모든 파괴양식에 대한 총체적인 안전성 평가를 하기 위한 방법이 필요로 된다. 사면 붕괴에는 여러 가지 잠재적인 파괴면이 존재하게 된다. 잠재적으로 존재하는 여러 가지 파괴모드를 체계로 구성하여 해석하는 방법을 체계신뢰성해석(System reliability analysis)이라 한다. 체계신뢰성해석은 파괴모드간의 연관관계에 따라 직렬계 구조 또는 병렬계 구조 또는 이 두가지의 혼합 형태로 구분할 수 있다. 사면 안정성 평가 및 해석에 있어서는 어떤 하나의 파괴가 발생하면 시스템이 파괴되기 때문에 가외성(Redundancy)이 없는 시스템으로 직렬계 구조를 갖는다고 판단할 수 있다.

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

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

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

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

복수의 한계상태에 의한 영향을 고려하는 경우에 개의 직렬계 구조의 파괴모드에 대한 파괴사건을 정의하면, 각각의 한계상태에 대한 파괴확률은 면적분을 사용해서 구할 수 있다. 하지만, 각 파괴모드 사이에 상호 연관성이 존재한다면, 체계의 파괴확률 계산은 매우 어렵기 때문에 Cornell(1967)의 단일모드 구간해법과 Ditlevsen(1979)의 이중모드 구간해법 등이 근사적 해법으로 개발되어져 왔으며, 최근에는 선형계획법에 의한 구간해법이 개발되었다.

2.3 선형계획법(Linear programming, LP)

주어진 개개의 조건을 만족하면서 목적을 최대로 달성할 수 있는 해를 최적해(Optimal solution)라 할 때, 선형계획법(Linear programming)은 목적과 조건의 상호관계가 1차식의 형태를 갖는다고 가정하여 주어진 문제의 최적해를 구하는 방법이다. 선형계획법은 목적함수와 제약조건이 설계변수로 구성되어 선형관계를 갖는다고 가정하며, 이를 수식으로 나타내면 다음 식(4)-(7)과 같다. 주어진 제약조건에 대하여 식(4)의 목적함수의 최대화 또는 최소화를 통하여 최적해를 탐색한다.

$$\begin{aligned} &\text{maximize(minimize)} \quad c^T p & (4) \\ &\text{subject to} \quad a_1 p = b_1 & (5) \\ &\quad \quad \quad a_2 p \geq b_2 & (6) \\ &\quad \quad \quad a_3 p \leq b_3 & (7) \end{aligned}$$

부등호 제약조건은 부가변수(Surplus variable)나 완화변수(Slack variable)를 사용해서 등호식으로 변화시킬 수 있다

다중 파괴모드를 고려한 단순 사면의 최적 설계

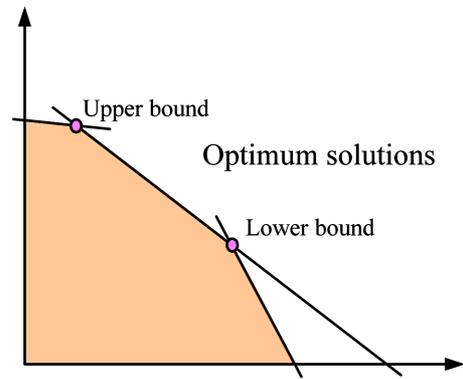


Fig. 2. Upper and lower bound by linear programming

므로 모든 제약 조건을 등호제약조건으로 만들어서 표준 선형계획문제로 변화시킬 수 있다(류연선 등(2001), Dantzig(1951)).

본 연구에서는 선형계획법에 의한 최대화와 최소화를 이용함에 의해 독립 파괴모드에 대한 신뢰성해석결과를 이용하여 체계에 대한 신뢰성을 산출할 수 있음을 제안하고자 하였다 (Fig. 2).

2.4 사면의 최적설계

사면의 안전성을 확보하기 위해서는 일반적으로 소요비용이 늘어나게 되며, 제한된 예산을 고려할 때, 적정 안전확보를 위한 최적 비용에 대한 의사결정이 요구된다. 사면의 최적 설계를 위해서는 소요비용을 고려하여 다음과 같은 손실함수를 이용할 수 있다.

$$C_t = C_c + P_f C_f \quad (8)$$

여기에서 C_c 는 초기 건설비, C_f 는 파괴시 발생하는 손실비(원형복구비 또는 보상비 등), P_f 는 파괴확률, C_t 는 기대 총비용으로 정의된다. 따라서, $P_f C_f$ 는 사면이 파괴될 경우, 사전에 계산되어야 하는 기대 총비용이다.

이상의 개념을 도식화하면, 다음 Fig. 3과 같이 제시할 수 있다. 일반적으로 C_c 의 증가와 함께 P_f 는 감소하며, $P_f C_f$ 는 감소한다. 따라서, C_t 가 최소로 되는 평가기준을 설정하면, 이 값에 해당하는 대안이 최적 설계로 정의한다.

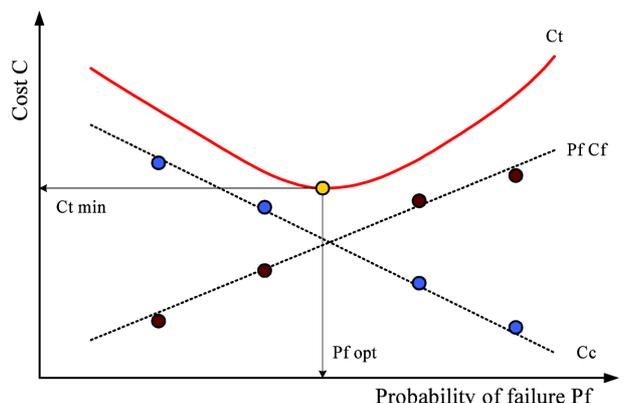


Fig. 3. Concept of optimum design

3. 선형계획법을 이용한 해석기법

3.1 대상 사면안정해석모델 선정

한국건설기술연구원(2003)과 한국철도기술연구원(2004)의 현장조사결과를 분석한 결과, 대표적인 파괴형식은 초기 강우 침투 및 토석류에 의해 발생하는 표층파괴와 암반파 토사 경계층에서 발생하는 평면파괴 그리고 통상적인 원호활동에 의한 원호파괴로 나타났으며, 체계 신뢰성해석에 기초한 다중 파괴모드에 대한 파괴확률을 산정하기 위하여 상기 3가지의 사면안정해석모델을 한계상태함수로 정의하여 연구를 수행하였다(Table 1).

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

Hailperin(1965)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 개의 구성요소를 갖는 시스템으로 정의하면, 본 논문에서는 3가지의 파괴모드 즉 표층파괴 · 평면파괴 · 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, $E_1 = E_{surface\ failure}$

$$E_2 = E_{planar\ failure}$$

$$E_3 = E_{circular\ failure}$$

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 c': Effective cohesion, γ_{sat}: Saturated unit weight, γ_w: Unit weight of water, z_w: Vertical depth of sliding surface, α: Angle of a slope, ϕ': Effective friction angle</p>
Planar failure	$g(x) = \frac{c}{c_m} = \frac{2c}{\gamma H \sin(\alpha - \theta) (\sin \theta - \cos \theta \cdot \tan \phi_m)}$ <p>where c: Cohesion, c_m: Mobilized cohesion, γ: unit weight of soils, H: Height of a slope, α: Angle of a slope, θ: Angle of failure surface, ϕ_m: Mobilized friction angle</p>
Circular failure	$g(x) = \frac{\sum \left[\frac{c' \Delta \cos \alpha + (W - u \Delta \cos \alpha) \tan \phi'}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \phi') / F} \right]}{\sum W \sin \alpha}$ <p>where c': Effective cohesion, α: Angle of failure surface, Δ: Length of a slice, ϕ': Effective friction angle, F: Safety factor</p>

adopted from Abramson et. al.(2001)

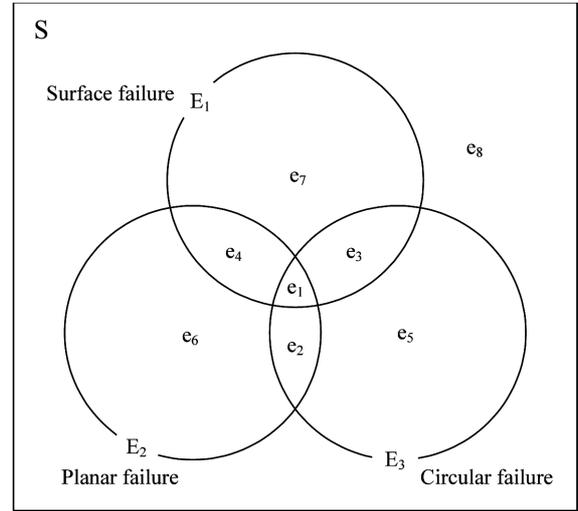


Fig. 4. Basic mutually exclusive and collectively exhaustive (MECE) events for 3-component sample space of slope stability

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 가능하다.

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.

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

따라서, Table 2와 같이 직렬계 구조를 갖는 사면 시스템의 목적함수 정의가 가능하다

요소 파괴확률과 신뢰지수를 이용하면, 2개의 구성요소 MECE 사건(Fig. 4)에 근거하여 안정해석모델을 이용하면, 각각의 사면파괴모드에서 발생한 파괴확률은 직접 산출이 가능하며, 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,

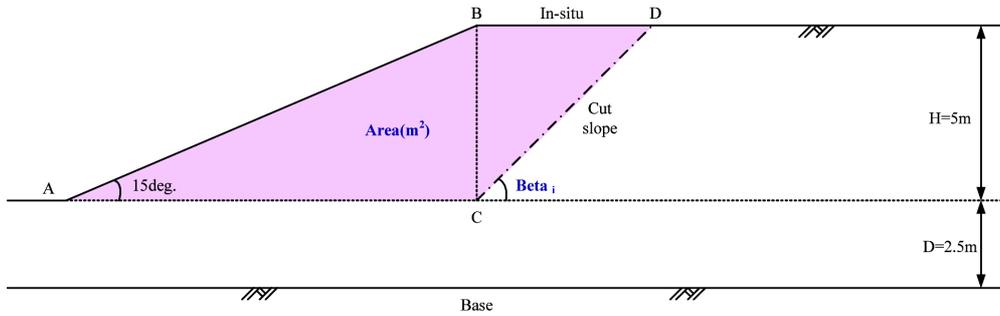


Fig. 7. Cross section of a slope

Table 3. Soil properties

Parameter	Value	Coefficient of Variance(COV)	Standard Deviation(S.D)
Cohesion	17.162 kPa	0.2	3.43
Unit weight	17.653 kN/m ³	0.2	3.53

층으로 구성된 단순 사면으로 적용된 지반물성치는 Table 3 과 같다.

4.2 최적 설계

신뢰성해석 결과를 실무에 적용할 때, 안전율 기반의 전통적 방법과 비교되어야 유리하다고 하였는데(松尾 稔 등, 1992), 이는 안전율 방법에는 오랜 역사와 경험을 바탕으로 한 많은 이점이 있기 때문이며, 신규로 도입됨에 따른 거부감을 최소화하기 위함이라고 제시하고 있다.

최적 절토구배를 결정하는 문제를 대상으로 절취 토량

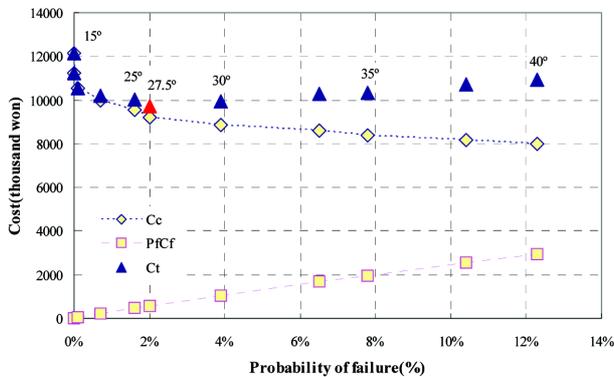


Fig. 8. Optimum design of slope angle(27.5°) in the previous study

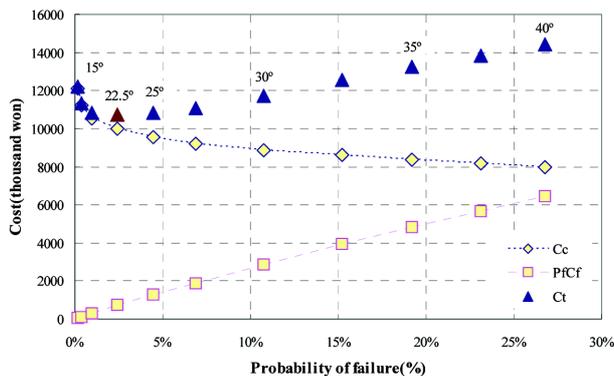


Fig. 9. Optimum design of slope angle(22.5°) in this study

1 m³당 소요비용은 13,000원으로 하고, C_f 는 C_c 의 3배를 상정하였다. 설계 대체안이 절토사면의 구배이므로 다음의 Fig. 8 및 Table 4의 결과와 같이 27.5°가 최적 구배로 결정되어, 사면의 최적 설계가 완료되었다.

松尾 稔 등(1992)이 최적설계를 검토한 바 있는 상기 사면에 대한 지반조건을 이용하여, 본 연구에서 제한한 다중파괴 모드에 대한 동시 파괴확률을 산정하였다. 원호파괴에 대한 파괴확률은 비교를 위해 기존 연구결과를 사용하였으며, 표층파괴와 평면파괴를 추가적으로 고려하였다.

각 파괴모드에 대한 단위 신뢰성해석을 본 연구에서 개발

Table 4. Probability of failure for each failure mode

Angle	Surface failure P_{f1}	Planar failure P_{f2}	Circular failure P_{f3}
15	0.148%	0.002%	0.010%
17.5	0.352%	0.002%	0.010%
20	0.856%	0.005%	0.100%
22.5	1.740%	0.010%	0.700%
25	2.903%	0.017%	1.600%
27.5	4.931%	0.032%	2.000%
30	7.052%	0.055%	3.900%
32.5	9.217%	0.079%	6.500%
35	12.254%	0.152%	7.800%
37.5	14.015%	0.231%	10.400%
40	16.189%	0.402%	12.300%

Table 5. Comparison of failure probability for variation of slope angle

Angle	Previous study	Lower bound	Upper bound
15	0.010%	0.148%	0.159%
17.5	0.010%	0.352%	0.365%
20	0.100%	0.856%	0.961%
22.5	0.700%	1.740%	2.438%
25	1.600%	2.903%	4.472%
27.5	2.000%	4.931%	6.862%
30	3.900%	7.052%	10.730%
32.5	6.500%	9.217%	15.190%
35	7.800%	12.254%	19.220%
37.5	10.400%	14.015%	23.140%
40	12.300%	16.189%	26.790%

Table 6 Comparison of the results

Angle(°)	松尾 稔 et. Al(1992)				In this study			
	$P_f(\%)$	C_c	$P_f \times C_f$	C_t	$P_f(\%)$	C_c	$P_f \times C_f$	C_t
15	0.01%	12,129	3.64	12,133	0.16%	12,129	57.99	12,187
17.5	0.01%	11,219	3.37	11,222	0.36%	11,219	122.75	11,342
20	0.10%	10,530	31.59	10,562	0.96%	10,530	303.42	10,833
22.5	0.70%	9,984	209.76	10,194	2.44%	9,984	730.55	10,715
25	1.60%	9,555	458.43	10,013	4.47%	9,555	1,281.32	10,836
27.5	2%	9,191	551.20	9,742	6.86%	9,191	1,891.17	11,082
30	3.90%	8,879	1,038.84	9,918	10.73%	8,879	2,858.15	11,737
32.5	6.50%	8,619	1,679.86	10,299	15.19%	8,619	3,925.70	12,545
35	7.80%	8,385	1,962.09	10,347	19.22%	8,385	4,834.79	13,220
37.5	10.40%	8,177	2,552.58	10,730	23.14%	8,177	5,679.48	13,856
40	12.30%	7,995	2,951.75	10,947	26.79%	7,995	6,429.06	14,424

P_f : Probability of failure, C_c (thousand won/m) : Construction cost
 C_f (thousand won/m) : Loss cost by failure, C_t (thousand won/m) : Total Cost

Table 7 Total cost

Previous study		Lower bound		Upper bound	
pf(%)	Ct	pf(%)	Ct	pf(%)	Ct
0.01%	12,133	0.15%	12,183	0.16%	12,187
0.01%	11,222	0.35%	11,338	0.36%	11,342
0.10%	10,562	0.86%	10,800	0.96%	10,833
0.70%	10,194	1.74%	10,506	2.44%	10,715
1.60%	10,013	2.90%	10,387	4.47%	10,836
2.00%	9,742	4.93%	10,550	6.86%	11,082
3.90%	9,918	7.05%	10,757	10.73%	11,737
6.50%	10,299	9.22%	11,001	15.19%	12,545
7.80%	10,347	12.25%	11,467	19.22%	13,220
10.40%	10,730	14.02%	11,617	23.14%	13,856
12.30%	10,947	16.19%	11,880	26.79%	14,424

한 SRES를 이용하여 수행하였다. SRES 해석결과를 사용하여 표준파괴 · 평면파괴 · 원호파괴에 대한 각각의 독립적인 파괴확률을 산출할 수 있고, 모드별 파괴확률을 이용하여 Table 2의 목적함수를 구성하고, Fig. 5의 제한조건을 만족하도록 Matlab의 'linProg' 함수를 이용하여 상한계와 하한계를 계산하였다. 다음의 Table 4는 각 파괴모드에 대한 파괴확률을 보인 것이며, Table 5는 사면경사 변화에 따라 산출된 파괴확률을 기존 연구와 상한계 및 하한계를 비교하여 나타낸 것이다.

상한계를 사면 경사도 결정을 위한 최적 설계에 적용한 경우, 예측한 바와 같이 원호파괴만을 파괴모드로 고려해서 해석한 파괴확률에 비교할 때, 전체 사면 시스템의 안정성을 대표할 수 있는 동시 파괴확률은 근소하게 증가되고 있으며, 이에 따라 소요비용도 증가함을 알 수 있다. 최종 결과는 Fig. 9에서 확인할 수 있으며, Table 4와 같이 사면의 최적 절토구배는 22.5°인 것으로 계산된다.

총 기대비용은 9,742천원/m에서 10,715천원/m으로 증가하

고 있으며, 최적 파괴확률은 약 2%와 2.44% 정도로 유사한 것을 확인할 수 있다. 기존 연구결과와 상한계 · 하한계의 총 기대비용 변화를 Table 6에 나타내었다. 하한계의 경우에도 원호파괴만을 고려했던 기존 연구결과와 비교할 때, 근소한 증가를 보이고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 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, 동시 파괴확률을 고려한 사면의 신뢰성해석기법을 제안하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 국내에서 빈번하게 발생하는 사면붕괴는 표준파괴 · 평면파괴 · 원호파괴의 3가지로 나타났다. 안정해석시 하나의 파괴면을 대상으로 하면 다른 파괴형태에 대하여 고

려할 수 없기 때문에, 예기치 못한 피해에 직면할 수 있다. 이 때문에 여러 파괴형태를 고려하여 동시에 안정성을 평가할 수 있는 기법이 필요하며, 독립 파괴모드의 최대 파괴확률만을 이용하여 시행되었던 사면의 최적 설계 예제에 대하여 동시 파괴확률의 적용을 검토한 결과, 3가지 파괴모드를 고려함에 의해 사면경사에 대한 최적 설계가 변경되었으며, 기대 총비용은 근소하게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

- 2) 사면의 경사 또는 대책공법 결정 등의 최적 설계분야에서 동시 파괴확률의 적용은 기대 총비용의 증가를 수반하지만, 다양한 파괴모드에 대한 사면 시스템의 안정성 파악 및 확보에 기여할 수 있다. 안정해석모델을 동시 파괴확률로 복합적으로 고려할 때, 작지만 '0'이 아닌 파괴확률을 안정해석에 반영함으로써, 개별 파괴모드만을 대상으로 했을 경우 예상하지 못했던 불안정성을 반영할 수 있다.

참고문헌

김기영, 조성은 (2006) 확률론적 사면안정 해석기법에 관한 연구, **한국지반공학회는논문집**, 제22권, 11호, pp.101-112.
 김진만 (2007) 통계오차를 고려한 사면안정 신뢰성해석, *Jour. of the KGS*, Vol. 23, No. 3, pp.51-59
 김형배, 이승호 (2002) 실용적인 확률론적 사면안정해석기법 개발, **한국지반공학회는논문집**, 제18권, 5호, pp.271-280.
 류연선, 임오강, 박경진 (2001) **최적설계입문**, 인터비전.
 한국건설기술연구원 (2003) 2002년 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용.
 한국철도기술연구원 (2004) 철도절개면 안정성 평가 및 대책방안 연구.
 Ahmed, M. Hassan, Thomas F. Wolff (1999) Search algorithm for minimum reliability index of earth slopes, *Journal of Geotech-*

nical and Geoenvironmental eng., Vol. 125, No. 4, pp.301-308.
 Cornell, C.A. (1967) Bounds on the reliability of structural systems, *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 93, No. 1, pp.171-200.
 Dantzig, G.B. (1951) Application of the simplex method to a transportation problem, *Activity analysis of production and aloocation*, T. C. Koopmans, ed., Wiley, New York
 Ditlevsen, O. (1979) Narrow reliability bounds for structural systems, *Journal of Structural Mechanics*, Vol. 7, No. 4, pp.453-472.
 Dunnett, C.W. (1955) A multiple comparison procedure for comparing several treatments with a control. *J. Amer. Statist. Assoc.* 50, pp.1096-1121.
 Hailperin, T. (1965) Best possible inequalities for the probability of a logical function of events, *Am. Math. Monthly*, Vol. 72, No. 3 pp.343-359.
 Junho Song, and Armen Der Kiureghian (2003) Bounds on system reliability by linear programming, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 129, No. 6, pp.627-636.
 Lee, W. Abramson, Thomas. S. Lee, Sunil Sharma, Glenn M. Boyce (2001) *Slope stability and stabilization methods*, 2nd edition, John Wiley & Sons, INC.
 Wolff, T.F., Hassan, A., Khan, R., Ur-Rasul, I., and Miller, M. (1995) Geotechnical reliability of dam and levee embankments, Technical report prepared for U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station-Geotechnical Laboratory, Vicksburg, Miss.
 松尾稔, 上野誠 (1978) 斜面崩壊防止のための信頼性設計に関する研究, *土木學會論文報告集*, 第276号, pp.77-87.
 鈴木誠, 石井清 (1986) 斜面安定對策工としての水平排水管設置の最適設計, *土木學會論文集* No. 370/III-5, pp.209-216.
 松尾稔, 鈴木壽 (1992) 粘着力のみからなる土の單純斜面の信頼性設計, *土と基礎*, Vol. 30, No. 12, pp.61-66.

◎ 논문접수일 : 10년 09월 06일
 ◎ 심사의뢰일 : 10년 09월 09일
 ◎ 심사완료일 : 10년 12월 02일