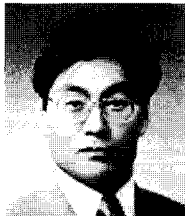


절개사면에 있어 안전율과 파괴확률에 대해



이명섭 | 삼성물산(주)건설부문 토목기술팀 부장



심성현 | 삼성물산(주)건설부문 토목기술팀 차장

1. 들어가며

토목시설의 노후화, 환경 및 설계 조건 등의 변화는 안전사고와 재해 발생 가능성을 항상 내포하고 있으며, 안전에 취약한 시설물은 이상기후로 인한 천재지변에 노출되면 예기치 못한 재해를 야기하여 상당한 인적·물적 손실을 유발하므로 이상기후에 대비하는 재해방지기술이 필연적으로 요구되어진다. 한편, 지구온난화 등으로 인한 장마철 국지성 호우와 폭설은 해마다 국가 기간교통망의 수송을 지연시킴으로써 막대한 인적·물적 손실을 가져오게 하는 바, 이와 같은 기상재해로부터 시설물, 차량 및 승객을 안전하게 보호하고 사전에 예방할 수 있는 시스템화 된 방재운영체계의 구축이 절실히 요구된다. 우리나라의 지반재해 중 대표적인 산사태 재해는 그 중 연평균 26명의 인명피해와 연평균 6,000억원의 재산피해가 발생하였고, 피해규모가 급격히 증가하는 추세이다. 더욱이 태풍 및 국지성 강우 등에 의한 자연재해는 반복성, 재발 가능성이 높기 때문에 위험개소에 대한 철저한 위험요인 및 경제성 분석을 통해 보수보강 방안과 함께 재해를 예·검지를 할 수 있는 감시시스템의 설치방안을 수립함이 절실히 요구된다. 특히, 도로

·철도와 같은 기간 교통망의 경우, 토석류 유입 또는 소규모의 사면활동으로 인하여 토사가 도로·철도로 이송된 경우 차량의 전복·매몰, 열차 탈선으로 이어질 수 있으며, 결국에는 대형사고로 발생될 가능성이 있으므로 철저한 점검 및 조사가 필요하다.

지반공학 측면에서 보면 다양한 외력 가운데 강우 침투는 모관력 저하, 간극수압 증가 등에 의한 저항력 감소와 더불어 자중증가 등에 의한 활동력 증가로 이어져 사면붕괴를 유발하게 되며, 강우에 의한 붕괴 예방을 위해 안전율에 기반을 둔 다양한 기준이 제안되어 있다. 하지만, 해석결과가 기준을 만족하더라도 실제 현장에서는 강우에 의한 파괴가 빈번하게 발생하며, 이는 기본적으로 지반물성 대표치의 분산성을 해석에서 고려할 수 없기 때문이다. 이와 같이 안전율 기반 설계는 점차 그 한계를 드러내고 있으며, 각 물성의 분포와 특성을 파악하여 보다 안전한 구조물로 설계하기 위한 신뢰성 해석이론이 도입되고 있다. 하지만, 결정론적 안전율에 대한 한계를 누구나 인식하고 있음에도 불구하고, 신뢰성 해석이론의 도입은 실무에서 현저한 진척이 없는데, 이는 확률과 통계에 기반을 두고 있어 비교적 생소한 분야에 속하고, 지금까지의 토목지식 및 경험과 비교할 때 실무에 적용

하려면 많은 개인적인 노력이 필요하기 때문이라고 판단된다.

이에 본 고에서는 불확실성을 보다 용이하게 설계에 포함시키기 위해 신뢰성해석의 산출물인 파괴확률이 안전율의 연장선상에 있음을 설명하고, 일부 지역의 절개면에 대한 파괴확률을 현장정밀조사를 통한 지반물성 산정 그리고 물성의 분포특성을 고려한 신뢰성해석을 통하여 산정하여 제시하였다. 이는 향후 국내 절개면의 신뢰성해석 기준 제안을 위해 활용될 수 있을 것이다.

2. 신뢰성해석

2.1 안전율과 신뢰성 설계법

토목공학이 학문의 영역으로 발전되면서부터 불확실성은 존재하여 왔고, 많은 공학자와 기술자는 이러한 불확실성의 최소화 및 저감을 위해 다각적인 노력을 전개하여 왔다. 각종 물성치, 공간적 변화, 모델의 불안전성 등의 오차 발생요인은 토목구조물 특히 지반공학 구조물에 불확실성을 증가시키게 되며, 이와 같은 불확실성을 극복하고자 안전성 판단기준으로 안전율 또는 안전여유(Safety margin)이 도입되어 지금까지 광범위하게 활용되고 있다. 안전율이나 안전여유의 개념에서는 최소의 수용능력(capacity)와 최

대의 요구(demand)를 비교하여 안정성을 산정하였다. 결정론적 설계기법은 이러한 안전율을 결정하는 과정에서 주관적인 판단이 불가피하게 포함되며, 불확실성을 정량적으로 분석하여 이용하기 힘들다는 단점을 가지고 있다. 따라서 안전의 정도나 신뢰도를 정량적으로 계산할 수 있는 신뢰성 설계법의 도입이 요구되는 것이다.

신뢰성 해석을 위해서는 다음과 같은 3단계의 분석이 수행되어야 한다. 첫 번째로 구조물의 안정성에 영향을 줄 수 있는 확률변수를 결정하는 것으로 기하변수, 재료특성변수, 외력변수 등에서 확률변수 및 고정변수를 결정하게 된다. 여하히 선택하나에 따라 매우 다른 파괴함수가 정의될 가능성이 있다. 두 번째로 구조물의 안정성에 영향을 미치는 모든 변수를 포함하는 파괴함수를 결정하는 것이다. 세 번째로 저항함수와 하중함수를 구성하는 각 확률변수에 대한 확률분포특성과 통계적 변수를 획득하는 과정으로 정의된다.

이와 같은 분석을 통하여 구조물의 안정성을 평가함에 있어 하중함수와 저항함수로 구성된 신뢰함수를 설정하고, 설계변수의 확률분포를 적용하여 이에 따른 신뢰함수의 확률분포와 파괴확률을 산정할 수 있다. 예를 들면 신뢰함수는 「저항함수-하중함수」 또는 「저항함수/하중함수」의 형태로 나타나게 되며, 설계변수의 확률적 고려 수준에 따라 Level I, II, III의 3가지 형태의 해석방법이 있다(표 1 참조).

표 1. 신뢰성설계법 비교

Level	방 법
I. $S_n < R_n / FS$ 또는 $\phi R_n < \psi S_n$	- 부분안전계수 사용, 확률론적 안전성을 간접적으로 평가 - 각 하중별 안전계수를 목표 신뢰도 지수 함수형태로 표현
II. Safe : $\beta < \beta_T$	- 확률변수의 특성(평균, 분산 등)만을 이용하여 파괴확률의 상대적 지표인 신뢰도 지수를 근사적으로 산정 - 선형근사법과 비선형근사법
III. Safe : $P_f < P_T$	- 직접 파괴확률 산정 : 실제 설계 적용 어려움 - Simulation기법 활용(MCS 등)

2.2 사면안정해석에서의 이론적 배경

결정론적인 사면안정해석에서의 안정성 판단기준은 안전율 개념을 사용하고 있으며, 이러한 안전율에 의한 사면안정의 판단은 결정론적 사면안정기법에서 많이 활용되고 있지만, 안전율은 사면의 파괴확률과 신뢰성 정도를 그 자체만으로 보여줄 수 없으며, 단순히 지반의 허용전단강도와 필요 전단강도의 확률적 편차를 고려하지 않고 평균 기댓값만을 비교하는 개념이다.

$$F = S/\tau \tag{1}$$

여기에서, S는 지반의 허용 전단강도, τ 는 한계평형 상태를 이루는데 필요한 전단강도이다.

이론적으로 사면의 임계활동면에 대한 파괴확률은 안전율에 대한 확률밀도함수를 구하고 한계상태 (FS=1)보다 낮은 값을 갖게 되는 확률밀도면적을 구하여 결정하게 된다. 하지만, 확률밀도함수를 정확히 구하기 위한 정밀확률해석기법이 아닌 공학적 근사확률해석 기법을 사용하여 임계활동면 안전율의 기댓값과 표준편차만을 구하게 되는 실용적인 확률적 사면

안정해석에서 파괴확률은 다음과 같은 신뢰지수라는 개념을 통해서 간접적으로 결정할 수 있다.

$$\beta = \frac{E[FS]-1}{\sigma_{FS}} \tag{2}$$

사면안정의 안전율이 정규확률분포를 따른다면 파괴확률은 다음과 같이 구해진다.

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

여기서, $P_r(f)$ 는 파괴확률, $\Phi(-\beta)$ 는 표준정규분포를 따르는 확률밀도함수에서 $-\infty$ 부터 $-\beta$ 까지의 확률면적, $g(z)$ 는 사면안정의 안전율의 상태함수로 정의된다.

2.3 몬테카를로 시뮬레이션

(Monte Carlo Simulation ; MCS)

몬테카를로 시뮬레이션은 난수(Random number)를 취급하는 기법의 총칭이며, 난수란 본래 지정된 확률분포를 갖는 수열이지만, 현재 난수라고 하면, 산술

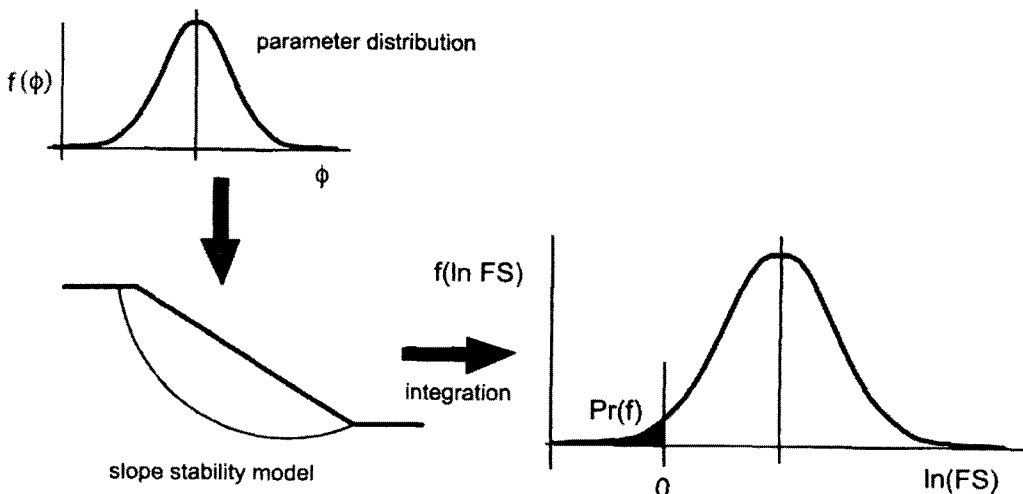


그림 1. 파괴확률 및 신뢰지수 개념도

적으로 컴퓨터에서 발생하는 의사난수(Pseudo random number)를 가리키고 있다. 컴퓨터를 통해서 발생하는 의사난수는 0~1사이의 균일형 분포이므로 이를 필요한 목표 분포함수로 변환하여야 한다. 표준정규분포로의 변환은 비상관 표준정규분포로 변환한다고 알려져 있는 Box-Muller의 함수(1958)를 이용함으로써 변환할 수 있으며, 그 함수는 다음과 같다.

$$N = \sqrt{-2 \ln R_1} \times \sin(2\pi R_2) \quad (4)$$

MCS의 각 단계에서 입력변수는 평균 μ , 표준편차 σ , 정규화 난수 N 에 의해 재설정되어진다.

$$P = \mu + N\sigma \quad (5)$$

따라서 독립적으로 정규화된 난수는 MCS 각 단계에서 각 입력변수에 대하여 얻어지게 된다.

난수의 발생과 이를 목표로 하는 정규분포로의 변환과정을 정리하면 다음과 같다.

- 컴퓨터를 이용한 균등분포의 난수발생
- 발생된 난수를 함수를 이용하여 표준정규분포로 변환
- 이렇게 만들어진 표준정규분포의 난수를 목표 정규분포로 변환

지반공학으로의 적용에서 각 지반강도정수의 확률 분포에 맞춰 임의의 값을 입력하여 사면의 임계활동면에 대한 안전율을 계산하는 과정을 충분한 횟수만큼 반복하여 최종적으로 안전율의 확률밀도함수와 파괴 확률을 결정하게 된다(Tobbutt, 1982). 이러한 방식의 확률기법은 지반공학의 판단기준인 임계 안전율의 신뢰성에 대한 보다 정확한 확률정보를 제공할 수 있다.

3. 사면안정해석 및 파괴확률

3.1 개요 및 해석대상

해석 대상 사면에 대하여 지반조사 및 실내시험을 수행하였으며, 대표적인 단면에 대하여 시추조사가 실시되었다. 지반의 지층구조, 강도 및 투수 특성을 파악하기 위하여, 현장시험으로 표준관입시험, 감마선 밀도검층시험, 시추공전단시험, 현장투수시험 등을 수행하였으며, 실내 토질 시험으로 기본 물성시험, 압밀배수 삼축압축시험, 실내 투수시험 등을 수행하였다. 또한 토사층에 대하여 불포화토의 SWCC(Soil-Water Characteristic Curve)를 결정하기 위한 불포화토 함수특성 시험을 수행하였다. 표 2는 지역별 사면의 지반조사 현황을 나타낸 것이다.

표 2. 각 지역별 사면의 지반조사 현황

연번	지역	조사 및 시험 실시수량						
		시추(공)	현장시험			실내시험		
			시추공 전단	감마선 밀도검층	현장투수	삼축압축	실내투수	불포화토 함수특성
I	강원	2	3회	1공	2회	3회	3회	3회
II	강원	2	2회	1공	2회	2회	2회	2회
III	전남	1	2회	1공	1회	1회	1회	-
IV	경남	1	2회	1공	1회	1회	1회	1회
V	경기	1	2회	1공	1회	2회	2회	2회
VI	강원	1	2회	1공	1회	1회	1회	1회
VII	충청	1	2회	1공	1회	1회	1회	1회

한편 우기시, 강우에 의한 침투로 인한 사면안정성 저하를 평가하기 위해 통상적인 설계방법에서 제시하고 있는 기준을 적용하여, 지하수위를 지표 부근에 가정한 경우에 대한 사면안정해석을 수행하였다(표 3).

3.2 안정해석

강우에 의한 침투를 고려하기 위해서 현행 설계에 적용하고 있는 각 기관의 우기시 지하수위 적용기준에 따라 극한평형 해석을 수행하였다. 현행 설계 기준은 침투해석 결과와 무관하게 지하수위가 지표 부근에 존재한다고 가정하여 안정해석을 수행한다. 본 연구에서는 한국도로공사의 도로설계실무편람(1996) 및 도로설계요령(2001), 건설교통부의 국도건설공사 설계실무요령(2004) 등을 따라 지하수위가 지표에 위치한 경우와 지표 아래 3m에 위치한 두 가지 경우

에 대하여 사면안정해석을 수행하였다.

사면안정해석은 극한평형해석 방법 중 모멘트 평형조건에 의한 안전율 산정방법인 Bishop의 방법을 적용하였으며, 상용프로그램인 GEO-SLOPE사의 SLOPE/W를 사용하여 수행하였다. 표 3과 같이 지하수위를 지표면 부근에 가정한 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

3.3 신뢰성해석

사면의 신뢰성해석을 위해 사면안정해석에 필요한 입력변수에 대하여 분산계수(Coefficient of Variance)를 조사하였다. 변수별로 실험을 통해 분산계수를 결정하기에는 비용적, 시간적 소모가 상당하여 과거 문헌을 근거로 분산계수를 결정토록 하였다. 다음의 표 4는 Lumb(1966), Schultze(1972),

표 3. 강우에 의한 침투 고려에 따른 해석 종류

건기	우 기 (강우에 의한 침투 고려)	
강우에 의한 침투 미고려	지하수위가 GL-3m에 위치	지하수위가 지표에 위치

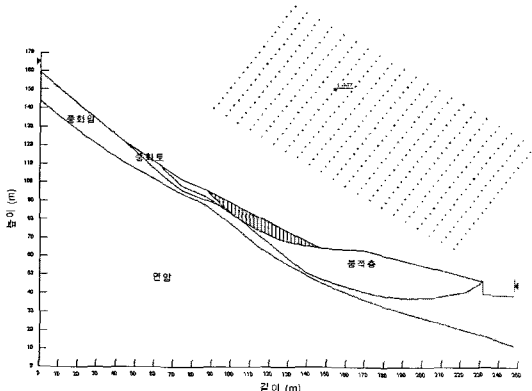
표 4. 지반정수의 분산계수

Parameter		C.O.V	Source
Porosity		0.10	Schultze(1972)
Specific gravity		0.02	Padilla & Vanmarcke(1974)
Water content	Silty clay Clay	0.20	Padilla & Vanmarcke(1974)
		0.13	Fredlund & Dahlman(1972)
Degree of saturation		0.10	Fredlund & Dahlman(1972)
Unit weight		0.03	Hammitt(1966)
Coefficient of permeability	S=80% S=100%	2.40	Nielsen et al.(1973)
		0.90	
Compressibility factor		0.16	Padilla & Vanmarcke(1974)
Preconsolidation pressure		0.19	Padilla & Vanmarcke(1974)
Compression index	Sandy clay Clay	0.26	Lumb(1966)
		0.30	Fredlund & Dahlman(1972)
Standard penetration test		0.26	Schultze(1975)
Standard cone test		0.37	Schultze(1975)
Friction angle(ϕ)	Gravel Sand	0.07	Schultze(1972)
		0.12	Schultze(1972)
Cohesion(c)		0.40	Fredlund & Dahlman(1972)

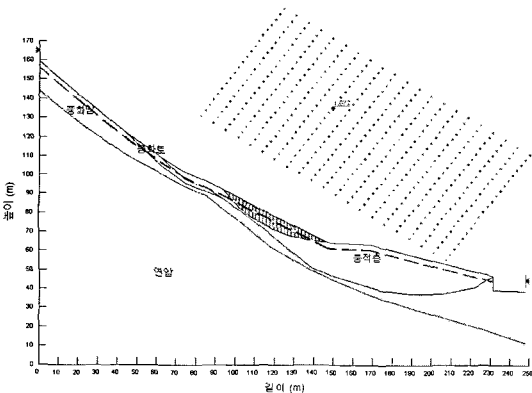
Padilla & Vanmarcke(1974) 등에 의해 제안된 각 지반정수의 분산계수를 나타낸 것이며, 이를 수치해

석 프로그램인 SLOPE/W에서 제공하는 신뢰성해석 도구의 입력변수로 지정하여 해석을 진행하였다.

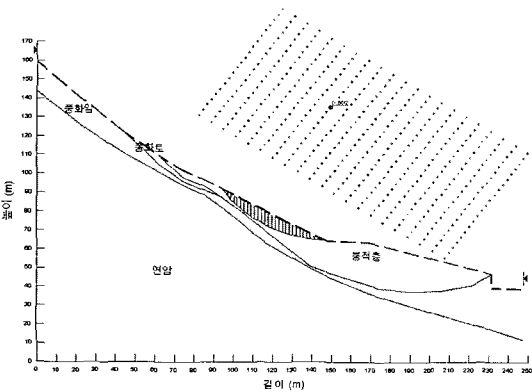
몬테카를로 시뮬레이션의 경우, 반복횟수는 변화하는 입력변수의 수와 예상되는 파괴확률에 따라 결정되며 일반적으로 수천번 정도의 반복으로 Monte-Carlo probabilistic slope analysis에서 타당한 신뢰성을 확보할 수 있다고 제시(Mostyn and Li, 1993)하고 있으므로 이를 기반으로 약 9,000회의 반복횟수를 적용하였다.



(a) 건기 시



(b) 지하수위 GL-3m



(c) 지하수위 지표

그림 2. 사면안정해석 결과(I 사면-강원)

4. 해석결과

4.1 사면안정해석결과

그림 2는 전형적인 사면안정해석 결과로 I 사면(강원)에 대한 것이다. 그림 2의 (a), (b), (c), (d)는 각각 강우에 의한 침투를 고려하지 않은 경우, 24시간 동안 200mm 강우가 내린 후 12시간이 경과한 경우, 지하수위가 지표에 있다고 가정할 경우, 지하수위가 GL-3m에 있다고 가정한 경우에 대하여 극한평형해석법으로 결정된 최소안전율이 발생하는 활동면이다. 예상 활동면은 강우에 대한 고려 조건에 상관없이 유사한 형태로 발생하는 것으로 나타났으나, 최소안전율의 경우는 강우 고려 조건에 따라 변화하였다.

4.2 신뢰성해석결과

지하수위를 지표로 가정한 경우에는 안전율이 평균 0.716 정도로 크게 감소하여 모든 사면에 대해서 매우 불안정한 결과가 산정되었다. 그러나 역시 예상 활동면이 비교적 심도가 깊은 원호파괴 형태로 결정되어 표층유실 형태의 실제 파괴 상황을 전혀 반영하고 있지 못하고 있다. 따라서 지하수위를 지표로 가정하는 것은 비교적 표고가 높고 경사가 급한 토사

표 5. 사면의 안전율과 파괴확률 분포

연번	지역	건기		GL -3m		GL 0m	
		안전율	파괴확률(%)	안전율	파괴확률(%)	안전율	파괴확률(%)
I	강원	1.447	0.172	1.069	27.064	0.582	100
II	강원	1.487	0.216	1.223	6.686	0.811	92.054
III	전남	1.466	2.411	1.292	6.69	0.79	100
IV	경남	1.371	2.419	1.363	1.478	0.627	99.751
V	경기	1.334	4.829	1.316	5.467	0.632	99.001
VI	강원	1.088	31.548	1.02	43.15	0.456	99.998
VII	충청	1.512	0.376	1.367	2.064	0.803	89.245

절개사면에 대해서는 지나치게 보수적인 가정이며, 과도한 보강 등의 불합리한 결과를 초래할 우려가 있는 것으로 판단된다. 송평헌 등(2004)은 수치해석 결과의 분석을 통해 강우의 침투에 의한 지하수의 상승이 지표면에 이른다는 가정은 불합리하다고 주장하였으며, 지하수위가 지표면에 있다는 적용기준을 준용할 경우, 표준구배에 따라 설계가 이루어진 사면도 우기 시 대부분 불안정하게 평가되어 과도한 보강이 이루어지게 되며 표준구배에 대한 사실상의 의미도 상실된다고 지적하였다. 한편, 신뢰성 해석결과에 의하면 해당 절개면의 파괴확률은 다양하게 분포되고 있으며, 건기시 조건과 사면의 완전포화조건을 기준으로 할 때 평균 81.4%의 파괴확률 증가가 나타나고 있어 현재의 기준이 과도하게 적용된 것임을 보다 명확하게 파악할 수 있었다. 건기시의 파괴확률에서는 최소 0.172%부터 최고 31.548%까지 분포하고 있고 특히, 유사한 안전율이 나타남에도 불구하고 파괴확률은 상당한 차이를 보이고 있음을 볼 수 있다. 이는 평균치로 대표되는 지반정수를 근거로 한 전통적인 사면안정해석에 대비하여 신뢰성해석이 갖는 장점을 보여주는 결과이며, 안전율을 근거로 제정한 기준에 비해 현재 code화하고 세계적인 추세인 파괴확률을 제한하여 설계에 반영함이 바람직하다는 결과를 도출할 수 있는 근거가 된다.

이러한 결과를 토대로 볼 때, 현행 기준이 불완전

한 것을 볼 수 있으며, 보다 명확한 해석을 위해 사면 내에서 발생한 파괴면에 대한 보다 정밀한 조사를 통하여, 사면의 제원, 강우 특성, 유역 면적을 고려한 표면 유출량 등에 따른 파괴 패턴을 명확히 구분하고, 파괴 패턴에 따라 서로 다른 적절한 해석기법을 적용하기 위한 시도가 필요하다는 사실과 함께 사면 안정분야로의 신뢰성해석의 체계적인 도입으로 보다 안전한 구조물 설계기준 또는 기법의 개발이 필요로 됨을 알 수 있다. 다음의 표 5는 7개 사면에 대한 안전율과 파괴확률을 제시한 것이다.

5. 맺으며

불확실성을 보다 용이하게 설계에 포함시키기 위해 신뢰성해석의 산출물인 파괴확률이 안전율의 연장 선상에 있음을 설명함과 동시에 현재 활용되고 있는 신뢰성 설계에 대하여 개략적으로 설명하였다. 또한 일부 지역의 절개면에 대한 파괴확률을 현장정밀조사를 통한 지반물성 산정 그리고 물성의 분포특성을 고려한 신뢰성해석을 통하여 산정하여 제시하였다. 현재 각종 설계기준에서 제시하고 있는 건기시 및 우기시 사면안정해석 기준에 맞춰 해석을 실시한 결과, 지표면까지 포화된 조건을 적용한 경우 과다설계의 개연성이 나타나고 있음을 확인할 수 있었으며, 이에

대한 보다 명확한 근거로 평균 81.4%의 파괴확률 증가량을 들 수 있었다. 더욱이 유사한 안전율이 산출 되었어도 파괴확률의 경우 많은 차이를 보이고 있어, 지반정수의 확률적 분포를 고려한 신뢰성해석기법의 도입이 시급하다는 사실도 알 수 있었다. 강우에 의한 자연현상으로 발생하는 절개면 재해를 보다 명확하게 예측하기 위해 사면 내에서 발생한 파괴면에 대

한 보다 정밀한 조사를 통하여, 사면의 제원, 강우 특성, 유역 면적을 고려한 표면 유출량 등에 따른 파괴 패턴을 명확히 구분하고, 파괴 패턴에 따라 서로 다른 적절한 해석기법을 적용하기 위한 시도가 필요하고, 사면안정분야로의 신뢰성해석의 체계적인 도입으로 보다 안전한 구조물 설계기준 또는 기법의 개발이 필요로 됨을 알 수 있다.

참고문헌

1. 박용원, 김갑래, 여운관(1993). "1991년 용인-안성 지역 산사태 연구" 한국지반공학회지, 제9권, 제4호, pp.103-116
2. 사공명(2004). "강우로 인한 사면의 안정성 평가", 한국철도학회 추계학술발표회 논문집 CD.
3. 최경(1986). "한국의 산사태 발생요인과 예지에 관한 연구", 강원대학교 농학박사 학위논문
4. 김형배, 이승호, "실용적인 확률론적 사면안정해석기법 개발", 한국지반공학회논문집 제18권, 5호, 2002, pp. 271-280
5. 조래청, "확률론적 유한요소법을 이용한 사면의 신뢰성 해석모델(RESFEM) 개발", 건국대 박사학위논문, 1996.
6. 동국대, '시화호 제체 신뢰성 설계에 관한 연구', 2002. 11
7. 윤길림 외, '확률 및 신뢰성 개념을 도입한 지반설계 사례연구', 2004. 8
8. 김진만, '지반성질 결정시 공간적 변동성과 조사오차의 중요성', 2004. 8
9. K. K. Phoon, 'Towards Reliability-Based Design for Geotechnical Engineering', 2004. 8