확률론적 해석기법을 이용한 보은지역의 사면재해 안정성분석

정남수¹ · 유광호^{1*} · 박혁진²

¹수원대학교 토목공학과, ²세종대학교 지구정보공학과

Stability Analysis of Landslides using a Probabilistic Analysis Method in the Boeun Area

Nam-Soo Jeong¹, Kwang-ho You^{1*}, and Hyuck-Jin Park²

¹Department of Civil Engineering, University of Suwon, Korea

²Department of Geoinformation Engineering, Sejong University, Korea

본 연구는 사면재해 취약성 평가를 위해 사면모델 중 하나인 무한사면 해석모델을 적용하였다. 그러나 무한사면 해석 모델은 광역적인 연구지역에 적용하는데 있어서 데이터획득 및 처리과정에 어려움이 있고 데이터 획득과정에서 불가피 하게 불확실성이 개입되는 문제가 있다. 이러한 불확실성을 최소화하기 위해 확률론적 해석기법인 몬테카를로 시뮬레이 션을 적용하였으며, 광역적인 연구지역에 무한사면 해석모델을 적용하기 위하여 GIS를 활용한 무한사면 안정해석법으로 파괴확률을 획득하였다. 연구지역으로는 사면재해가 집중적으로 발생한 보은지역을 선정하였고 사면의 기하학적인 특성과 점착력 및 내부마찰각 등의 강도정수를 획득하였다. 또한 불확실성의 효과를 평가하기 위해 강도정수의 변동계수를 10%에서 30%로 고려하였고 이러한 과정을 통하여 확률론적 해석기법은 자료의 불확실성을 감쇠시킬 수 있다는 결과를 도출하였다.

주요어 : 몬테카를로 시뮬레이션, 확률론적 해석기법, 확률변수, 변동계수 불확실성

In this study the infinite slope model, one of the physical landslide models has been suggested to evaluate the susceptibility of the landslide. However, applying the infinite slope model in regional study area can be difficult or impossible because of the difficulties in obtaining and processing of large spatial data sets. With limited site investigation data, uncertainties were inevitably involved with. Therefore, the probabilistic analysis method such as Monte Carlo simulation and the GIS based infinite slope stability model have been used to evaluate the probability of failure. The proposed approach has been applied to practical example. The study area in Boeun area been selected since the area has been experienced tremendous amount of landslide occurrence. The geometric characteristics of the slope and the mechanical properties of soils like to friction angle and cohesion were obtained. In addition, coefficient of variation (COV) values in the uncertain parameters were varied from 10% to 30% in order to evaluate the effect of the uncertainty. The analysis results showed that the probabilistic analysis method can reduce the effect of uncertainty involved in input parameters.

Key words : Monte Carlo simulation, Probabilistic analysis, Random variable, Coefficient of variation, Uncertainty

서론

사면재해의 취약성에 대한 연구는 사면재해의 발생 가능성이 있는 지역을 예측하고 발생가능성의 정도를 분석하는 연구로 국내외적으로 다양한 연구가 진행되고 있

다. 사면재해의 취약성 연구는 크게 정성적인 평가기법과 정량적인 평가기법으로 구분할 수 있다(Aleotti and Chowdhury, 1999). 정성적인 평가기법은 위험도(risk) 평가나 취약성(susceptibility)에 대한 평가를 평가자 판단에 의존하는 방법으로 계산을 통해 획득된 값보다는

*Corresponding author: khyou@suwon.ac.kr

정성적인 판단결과나 배점으로 점수를 획득하는 방법 등을 통해 사면의 안정성을 평가한다. 반면 정량적인 평가 기법은 현장조사를 통하여 획득된 현장정보를 입력 자료로 활용하여 정량적인 해석결과를 제시하는 기법으로 통계적인 기법과 공학적 기법으로 나눌 수 있다. 통계적인 분석기법은 사면붕괴와 연관성이 있다고 판단되는 파라미터들과 사면붕괴의 공간적인 분포나 특성 등을 통계적으로 비교하여 붕괴의 발생가능성을 예측하는 기법이다(박혁진, 2007a). 반면 공학적 해석 기법은 공학적인 개념을 사용하여 소규모의 사면에 대한 안정성을 해석하는 보편적인 방법으로 사면의 물리적인 특성과 공학적인 특성을 정량화하고 사면붕괴 메커니즘을 표현할 수 있는 수학적 모델을 이용하여 사면의 안정성을 평가하는 방법이다. 공학적 해석기법의 하나인 결정론적 해석기법은 주로 안정성을 정량적으로 평가할 수 있는 지수인 안전율(factor of safety)을 이용하여 사면의 안정성을 평가한다.

사면의 안전율을 획득하기 위한 수학적 모델로는 유한사면모델이나 무한사면모델과 같은 다양한 모델이 활용되고 있으며 대개 이러한 모델들은 지반공학분야에서 소규모 단위사면의 안정성을 파악하기 위한 모델로 사용되어 왔으나 광역적인 연구지역에서는 자료 획득 및 처리의 어려움으로 인해 광역적인 지역에서 동시에 발생하는 사면재해에 대하여서는 거의 활용되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 GIS(지리정보시스템, Geographic Information System)를 활용하여 수학적 모델을 광역적인 지역에서 발생하는 사면재해의 취약성을 파악하기 위한 분석에 활용하였다(이사로, 2000; 이명진 등, 2004; 최재원 등, 2004; 이사로 등, 2005; 박병수, 2006). 수학적 모델을 통한 안전율의 산정을 위해서는 사면의 기하학적 자료, 지반의 전단강도(점착력 및 마찰각) 및 지하수위 등과 같은 입력자료들이 요구된다. 그러나 이러한 자료들은 대개 제한적인 현장조사나 실내실험을 통해 획득되며 광역적인 현장의 규모에 비해 현장조사의 수량이나 실내실험 수량들은 절대적으로 부족하게 되어 현장여건을 충분히 파악하기 힘들기 때문에 이러한 원인으로 인해 이들 자료 내에는 불확실성이 개입하게 된다(You et al., 2005). 본 연구에서는 불확실성을 정량적으로 고려하여 해석에 반영하기 위하여 확률론적 해석기법을 적용하였다. 확률론적 해석기법은 안전율을 대체하여 붕괴확률(probability of failure)을 사용하여 사면의 위험도를 평가하며 현재까지 제안된 다양한 기법 중에서 불확실성을 가장 효과적으로 정량화할 수 있는 기법으로 평가되

Fig. 1. Infinite slope model(after Haefeli, 1948).

고 있다. 특히 본 연구에서는 확률론적 해석기법 중 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 활용하여 분석을 수행하였다.

무한사면모델 및 안전율의 산정

무한사면 모델은 중력에 의한 불안정 요소와 지표면과 평행한 면에 작용하는 마찰과 점착력에 의한 안전요소의 균형을 기초로 하며 움직이는 암체 혹은 토체의 깊이가 비교적 얇은 것으로 가정하여 사면의 안정해석을 수행한다(Fig. 1). 이것은 붕괴심도가 그리 깊지 않은 국내의 사면재해 유형과도 유사하며 가장 폭 넓게 사용되는 모델중 하나이다. 무한사면 모델은 깊이에 비해 사면의 길이가 길 때 파괴면은 사면에 평행하게 형성되며 사면의 길이는 거의 무한대이므로 양 끝의 영향은 무시하고 침투 수압이 사면에 평행하게 작용한다고 가정한다. 또한 임의의 분할면 양 끝의 수직면에 작용하는 절편력의 크기가 같고 반대방향으로 작용하며 이러한 응력 상태는 어느 분할면에서나 같다고 가정하며 이러한 가정을 바탕으로 사면에 작용하는 응력의 상태를 안전율로 산정하여 사면의 안정성을 평가한다(박혁진 등, 2003).

안전율은 사면의 활동면이 가지고 있는 전단강도에 대한 한계평형상태에서의 전단응력의 비를 뜻한다. 즉 안전율은 경사면 아래로 미끄러지려는 활동력과 이에 저항하려는 저항력이 정확히 같을 때 미끄러지려는 순간이 한계평형상태에 있게 된다는 것을 가정하여 한계평형 상태에서 파괴시키려는 힘과 이에 저항하는 힘의 비로 나타낸다. 활동력에 대한 저항력의 비가 1.0보다 작을 때 사면은 불안정하고 1.0보다 클 때 안정하며 1.0과 같을 때 한계평형 상태에 놓이게 된다. 따라서 사면

의 안정성을 검토하기 위해서는 파괴면을 따라 발생하는 전단응력을 구하여 그 면에서의 흙의 전단강도와 비교해야 하며 사면의 안전율은 일반적으로 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (1)$$

여기서 F_s = 안전율, τ_f = 전단강도, τ = 전단응력
흙의 전단강도는 점착력과 마찰력으로 이루어지며 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (2)$$

여기서 c = 점착력, ϕ = 내부마찰각, σ = 파괴면에 작용하는 수직응력이다.

식(2)를 식(1)에 대입을 하면 안전율 F_s 는 식(3)과 같이 표현된다.

$$F_s = \frac{c + \sigma \tan \phi}{\tau} \quad (3)$$

무한 평면사면에서의 안전율은 침투가 없는 무한사면의 안전율, 식(4)와 침투가 있는 무한 평면사면의 안전율, 식(5)로 나누어지는데 본 연구에서는 연구지역이 집중강우로 인해 포화되었을 때 발생한 사면재해예측을 하기 위함하므로 식(5)를 이용하여 분석하였다.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + \gamma H \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma H \cos \beta \sin \beta} \quad (4)$$

$$F_s = \frac{c + \{[\chi(1-m) + \gamma_{sat}m]H \cos^2 \beta - \gamma_w H \cos^2 \beta\} \tan \phi}{[\chi(1-m) + \gamma_{sat}m]H \cos \beta \sin \beta} \quad (5)$$

이때 c 는 사면을 이루는 물질의 점착력(t/m^2), γ 는 흙의 단위중량(t/m^3), γ_{sat} 는 흙의 포화단위중량(t/m^3), γ_w 는 물의 단위중량(t/m^3)을 나타내고 m 은 사면의 깊이에 따른 지하수위의 비율 값이며, H 는 사면 깊이(m), β 는 사면의 기울기($^\circ$), ϕ 는 내부 마찰각($^\circ$)을 나타낸다.

몬테카를로 시뮬레이션

확률론적 해석기법에는 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation), 1계 2차 모멘트법(first order second moment method, FOSM), 점추정법(point estimate method)등의 기법이 있다. 몬테카를로 시뮬레이션은 각

입력변수들의 확률 분포곡선과 평균, 표준편차를 이용하여 분석하고자 하는 상태함수에 반복적으로 값을 입력하여 상태함수의 값들을 계산해 내고 이를 통하여 파괴확률을 구하는 방법이다. 1계2차모멘트법은 상태함수를 Taylor급수로 전개하여 초기 두 개의 term을 만든 후 확률변수의 평균과 표준편차를 이용하여 파괴확률의 근사값을 얻는 방법이다. 이 방법은 계산이 간단하고 확률변수에 대한 정보가 많이 필요하지 않는 장점이 있지만 확률변수가 많은 경우나 미분계산이 불가능한 경우 계산이 불가능하다는 단점이 있다(박혁진, 2007b). 한편 점추정법(point estimate method)은 각 확률변수에 점추정을 이용하여 상태함수에 그 수치를 대입하여 점추정으로부터 얻은 가중치를 곱하여 파괴확률의 근사값을 구하는 방법이다. 1계2차모멘트법과 점추정법은 근사적으로 파괴확률을 획득하는 방법으로 몬테카를로시뮬레이션 방법에 비하여서는 계산결과와 정확도가 낮은 편이다.

본 연구에서 활용된 몬테카를로 시뮬레이션기법(Monte Carlo simulation method)은 확률론적 해석기법의 하나로 불확실성을 고려한 상황에서 해석모델에 대한 확률론적 모의실험에 이용되는 절차를 말한다. 즉, 해석모델에서 가정한 확률분포에 따라 무작위표본추출에 의해서 우연결과를 발생시키는 모의실험이다. 이론적으로는 결정론적으로 해석 가능한 모든 모델에 적용이 가능하며 반복적인 계산을 통해 파괴확률을 계산한다. 이 기법은 Kim et al. (1978)에 의해 사면의 안정성을 해석할 수 있는 방법으로 제안되었으며 현재까지도 폭 넓게 사용되고 있다.

몬테카를로 시뮬레이션기법은 확률론적 해석기법 중 가장 완전한 방법으로 알려져 있다. 그 이유는 다른 확률론적 해석기법과는 달리 상태함수 계산을 통해 획득된 결과에 대한 정확한 정보, 즉 확률분포, 평균, 표준편차 등이 제공되기 때문이다. 그러나 이러한 결과를 획득하기 위해서는 입력 확률변수들에 대한 포괄적인 정보와 확률특성에 대한 자료가 제공되어야 한다는 제약이 있다.

몬테카를로 시뮬레이션기법을 이용한 파괴확률계산 수행과정은 다음과 같다. 먼저 해석모델의 수학적 함수 식인 상태함수를 결정한다. 본 연구에서는 안전율을 획득하기 위한 무한사면모델식이 상태함수로 고려되었다. 다음으로 모델에 사용되는 입력변수 중 확률변수로 고려되는 변수들에 대하여 확률특성을 파악하여 확률밀도 함수, 평균, 표준편차 등을 산정한다. 또한 사면 구성물질의 전단강도 특성을 의미하는 점착력과 내부마찰각이 확률변수로 고려되었으며 이들 입력변수에 대한 확률특

성이 획득되었다. 이러한 과정을 통해 얻어진 확률변수들의 난수(random value)를 생성하여 상태함수에 대입하고 계산하는 과정을 거쳐 상태함수값(안전율)을 산정한다. 이 때 반복 횟수가 부족할 경우 계산된 파괴확률이 수렴하지 않는 결과가 발생하기 때문에 충분히 많은 수의 반복계산이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 파괴확률의 수렴여부를 파악하기 위하여 반복계산을 수행하여 반복횟수를 5,000번으로 결정하였다. 그리고 확률변수의 특성에 맞는 무작위 난수를 5,000개씩 생성하여 안전율 식에 대입한 후 반복된 과정을 통해 안전율의 확률 분포를 획득하여 계산된 반복계산의 전체수와 1보다 작은 안전율이 획득된 반복계산 수의 비를 통해 파괴확률을 산정하는 순서로 분석을 수행하였다.

연구지역

연구지역은 상대적으로 작은 면적에 사면재해가 집중적으로 발생하여 사면재해 취약성 분석이 용이한 보은지역을 선정하였으며, 행정구역상 충청북도 보은군 보은읍 일대로 지리 좌표 상으로 위도 $36^{\circ}25'21''$ N- $36^{\circ}30'00''$ N, 경도 $127^{\circ}39'36''$ E- $127^{\circ}45'00''$ E 사이에 위치하며 면적은 약 68.39 km^2 이다(Fig. 2). 보은군은 충청북도 남부 내륙에 위치하고 지형적으로는 소백산맥과 노령산맥으로 둘러싸여 침식분지의 형태를 띠고 있다. 서북부와 동남부지역은 비교적 낮고 평탄한 장년기 말에서 노년기 초의 산계를 이루며, 서부지역은 동남부에 비해서 연속성의 산지 발달이 빈약한 장년기 말의 산계

를 보여준다. 반면 서쪽은 대표적인 노년기의 양상을 띠며 넓은 충적평야를 형성하고 있다. 보은지역은 지체구조상 옥천대의 중앙부에 위치하며 하부로부터 고생대의 옥천누층군, 조선누층군, 평안누층군, 쥐라기의 화강암류, 백악기의 영동층군, 화강암, 화강반암, 산성암맥이 분포하며 이들 지층을 부정합으로 덮는 제4기 충적층이 발달한다. 또한 대표적인 지질구조로 남-북 방향의 단층과 드러스트 단층이 뚜렷하며 중앙부 화성암체에 남-북에서 북북서 방향의 산성암맥이 관입되어 있고 화성암체를 제외한 지역에는 북동에서 동북동 주향의 층리 및 엽리가 발달되어 있다. 보은지역의 1998년 8월 강우량은 894 mm 로 연평균 강우량의 약 65%에 해당하며, 특히 11일~12일 양일간의 강수량은 515.5 mm 로 엄청난 양의 폭우가 쏟아졌다. 이러한 집중호우의 영향으로 보은지역에 483개소의 사면재해가 발생하였고, 사망 2명 등의 인명피해가 발생하였다.

입력자료의 획득 및 공간 데이터베이스 구축

본 연구의 진행 과정은 연구지역 선정 및 사전조사, 현장조사 및 현장데이터 획득, 공간데이터베이스 구축, GIS와 연계된 확률론적 해석기법 모듈개발, 사면재해 취약성도 분석, 결과검증으로 구분된다. 본 연구에서는 GIS기법을 이용한 광역적인 사면재해 취약성을 분석하기 위해서 1998년 8월 집중호우에 의해 많은 사면재해가 발생한 충청북도 보은군 보은읍 일대를 연구지역으

Fig. 2. Location of the study area.

Table 1. Physical and engineering characteristics of soils in the Boeun area.

Sample No.	MC	Density	Atterberg		Direct shear		Grain Size analysis % finer than					USCS
		ps	LL	PI	C	Φ	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200	2 μ	
No.	%	g/cm ³	%		kN/m ²	deg.	4.75	2.00	0.425	0.075	0.002	
S-1	2.8	2.671	NP	-	1.00	31.2	80.1	57.9	20.1	4.0		SW
S-2	3.3	2.667	NP	-	1.00	31.1	81.0	60.6	23.2	4.5		SW
S-3	3.8	2.673	NP	-	1.00	34.1	85.0	75.7	24.8	7.3		SW-SM
S-4	4.2	2.669	NP	-	0.00	34.4	88.2	69.7	28.4	9.0		SW-SM
S-5	5.0	2.670	NP	-	1.00	34.0	91.7	79.1	26.3	7.9		SW-SM
S-6	3.6	2.663	NP	-	3.00	30.6	70.3	58.5	32.2	19.3		SM
S-7	5.1	2.665	NP	-	3.00	30.2	80.8	60.5	41.6	19.9		SM
S-8	4.3	2.658	NP	-	4.50	27.2	97.7	91.7	53.2	28.2		SM
S-9	4.6	2.660	NP	-	4.00	28.0	95.0	75.9	43.5	21.8		SM
S-10	4.4	2.665	NP	-	5.00	25.7	97.2	83.3	46.0	29.0		SM
S-11	6.9	2.657	NP	-	5.00	35.5	100	93.0	55.1	25.9		SM
S-12	6.6	2.661	NP	-	8.00	35.1	100	90.4	57.6	21.5		SM
S-13	4.7	2.658	34.5	11.3	8.00	24.6	100	93.7	72.6	47.4	9.5	SC
S-14	16.6	2.664	30.1	5.4	4.00	34.5	100	90.1	55.1	35.8	6.0	SM
S-15	16.1	2.659	32.2	6.7	5.00	33.7	100	92.8	62.0	38.8	8.0	SM
S-16	15.8	2.666	33.0	8.4	6.00	32.1	100	94.1	59.6	41.3	9.0	SM
S-17	17.5	2.663	29.6	4.8	4.00	33.3	100	88.0	61.2	36.1	5.5	SM
S-18	17.8	2.660	31.7	6.2	5.00	34.0	100	90.2	56.8	39.6	7.0	SM
S-19	19.0	2.647	30.6	4.5	4.00	33.1	100	90.5	65.9	41.7	6.0	SM
S-20	17.7	2.652	30.3	4.2	4.00	33.0	100	89.0	62.3	38.8	6.0	SM
S-21	14.8	2.653	NP	-	6.00	35.2	100	92.4	51.5	23.5		SM
S-22	14.5	2.657	NP	-	5.00	35.7	100	93.9	46.8	20.9		SM
S-23	15.2	2.668	29.0	3.9	4.00	32.3	100	93.6	56.2	31.0	5.0	SM
S-24	15.6	2.675	32.1	7.4	6.00	29.1	100	96.1	68.4	49.1	7.0	SM
S-25	16.3	2.670	31.8	7.2	5.00	29.5	100	93.4	63.4	42.7	7.0	SM
S-26	12.0	2.674	32.5	7.7	7.00	31.3	100	93.8	54.3	32.7	7.5	SM
S-27	12.2	2.676	32.7	8.1	6.00	31.4	100	94.2	63.7	37.1	8.0	SM
S-28	12.5	2.649	29.6	4.1	7.50	31.1	100	93.2	55.3	35.1	5.5	SM
S-29	10.8	2.682	30.5	4.3	5.00	23.6	90.2	81.2	57.4	39.5	6.0	SM
S-30	10.2	2.678	30.0	4.1	4.50	24.6	93.2	76.3	55.6	35.2	5.0	SM
S-31	6.9	2.679	30.1	4.1	5.00	30.9	93.9	85.2	51.2	32.4	5.0	SM
S-32	7.7	2.674	30.7	4.5	3.00	30.8	95.7	82.6	62.2	34.1	6.0	SM
S-33	8.5	2.685	29.8	3.8	2.50	30.4	97.1	88.9	55.4	33.6	4.0	SM
S-34	10.2	2.662	NP	-	3.00	31.5	91.6	75.8	37.6	18.9		SM
S-35	13.7	2.672	NP	-	2.00	32.0	100	89.0	51.5	25.9		SM
S-36	14.2	2.664	NP	-	4.00	31.2	100	85.2	36.9	18.9		SM
S-37	10.9	2.671	NP	-	3.00	31.7	92.3	72.3	37.3	16.2		SM
S-38	11.0	2.661	NP	-	6.00	35.3	95.5	87.4	42.5	18.6		SM

로 선정하였고 대상연구지역의 사면재해 분석에 필요한 관련 자료를 획득하였다. 이를 위하여 국토지리정보원으로부터 1:5,000축척의 정밀 수치지형도, 국립산림과학원으로부터 1:25,000축척의 정밀 토양도, 한국지질자원연구원으로부터 1:50,000축척의 지질도를 수집하였다. 또한 사면재해가 발생한 위치와 지질도를 통한 암석분포

현황을 분석한 후, 실내실험을 위한 시료채취 위치를 선정하여 2010년 11월 36개의 불교란 토질시료를 채취하였고 채취된 시료를 대상으로 건설공사 품질시험기준(KS F 2343)에 준하여 전단강도 실험을 실시하였다. 실내실험을 통해 점착력과 내부마찰각과 같은 전단강도특성 자료를 획득하였으며(Table 1) 이렇게 수집된 자료들

Fig. 3. Map of the Boeun area showing (a) landslides locations and (b) geology.

을 이용하여 공간데이터 베이스를 구축하였다. 사면재해의 취약성 분석을 위해 필요한 가장 중요한 자료중의 하나는 실제 사면재해 발생위치로 이는 취약성분석을 통해 획득한 결과를 실제 사면재해 발생 여부와 비교함으로써 제안된 해석기법을 검증하기 위해 필요하다. 사면재해 발생위치 파악을 위해서는 사면재해 발생지역을 현지 답사하여 그 결과를 지도에 표시하는 방법이 가장 정확한 방법이나 많은 시간과 비용 등의 현실적인 제약이 있어 사면재해 발생 전 항공사진과 사면재해 발생 후 항공사진을 비교하여 사면재해 발생위치를 일차적으로 파악한 후, 현지답사를 통한 GPS측량을 수행하여 사면재해발생 직후 작성된 사면재해 위치도를 활용하였다(Fig. 3). 또한 연구지역 내에 사면재해가 발생할 수 있는 지역의 경사분포를 파악하기 위해 수치화된 지형정보가 요구되며 이를 위해 1:5,000축척의 수치지형도를 이용하여 자료변환 후 내삽과정을 거쳐 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 작성하였다. 이를 기초로 사면의 경사 분포를 공간데이터베이스로 작성하여 각 사면의 경사를 획득하였다(Fig. 4). 또한 분석에 사용되는 사면의 깊이를 획득하기 위해 1:25,000축척의 정밀도양도를 분석하여 연구지역의 유효토심 자료를 획득하였다(Fig. 5). 지질특성자료 파악을 위해 1:50,000축척의 지질도로부터 암상분포를 ARC/INFO의 커버리지 형태의 데이터베이스로 구축하였다(Fig. 3). 또한 현장에서 채취한 불교란 시료를 통해 얻은 강도정수와 문헌자료를 이용하여 연구지역의 지반 물성치를 데이터베이스화 하였다. 이렇게 구축된 데이터베이스는 우선 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 간격의 격자(ARC/INFO GRID 형태)로 변

Fig. 4. Distribution of slope angles.

Fig. 5. Distribution of effective soil thickness.

환하였고, 이를 MATLAB(Ver. 7)에 적용하기 위해 ASCII 파일로 변환하였으며 MATLAB기반의 확률론적 해석기법 모듈을 이용하여 각 격자에서의 사면재해 발생확률을 산정하였다. 이렇게 분석된 사면재해 발생확률은 다시 Arc/GIS 프로그램을 이용하여 데이터베이스화하여 사면재해 취약성도로 작성하였다.

결과 및 분석

결정론적 해석 결과

확률론적 해석기법과의 비교를 위하여 본 연구에서는 먼저 결정론적 해석기법을 적용하여 취약성 분석을 수행하였다. 이를 위하여 앞 서 획득된 공간데이터베이스의 값을 활용하였으며 특히 확률변수로 고려된 점착력과 내부마찰각에 대하여서는 실내실험을 통해 획득된 각 암종의 평균값을 대표값으로 고려하여 분석을 수행하였다. 또한 사면의 두께는 토양도에서 제공하는 유효토심의 평균값을 이용하였으며 지형도로부터 획득한 DEM으로부터

터 각 사면의 경사를 획득하여 안전율을 계산하였다. 특히 대상연구지역에 사면재해가 발생했을 당시의 강수량을 보면 사면들이 거의 포화된 상태에서 사면재해가 발생했다는 것을 유추할 수 있으므로 사면이 완전 포화되었다고 가정하여 분석을 수행하였다. 또한 비교를 위하여 사면이 건조한 경우, 즉 지하수위가 전혀 존재하지 않은 경우에 대하여서도 분석을 수행하였다. 먼저 사면이 건조한 상태에서는 불안정한 것으로 평가된 지역(즉 안전율이 1.0보다 작은 것으로 계산된 지역)이 실제로 사면재해가 발생한 지역 중 3.9%만 일치하는 것으로 분석되어 취약성 분석 결과의 정확도가 매우 낮은 것으로 분석되었다. 또한 지하수의 수위를 사면 높이와 동일하다고 고려한 경우 불안정한 지역으로 분석된 지역 중 48.4%에서만 실제 사면재해가 발생한 것으로 분석되었다(Fig. 7). 해석된 결과로부터 사면이 포화된 정도가 높을수록 사면재해 발생위치와의 일치 정도가 높게 나타나는 것을 알 수 있으며 이와 같은 결과는 연구지역이 집중호우의 영향으로 사면재해가 발생했다는 점을 감안할

Fig. 6. Probability density functions for cohesion and friction angle.

Table 2. Geotechnical parameter of the study area.

Classification		Mean	Standard Deviation	COV
Cohesion (t/m^2)	Yuseong granite	0.439	0.215	0.490
	Cheongsan granite	0.380	0.130	0.342
Angle of internal friction ($^{\circ}$)	Yuseong granite	31.812	2.936	0.092
	Cheongsan granite	30.200	3.496	0.116

때 지하수위가 높게 상승했을 가능성이 크고 이에 따라 사면재해가 집중적으로 발생한 것으로 보이는 현장상황과 일치하는 점을 보이고 있다.

확률론적 해석 결과

본 연구에서는 사면재해의 안정성 분석에 사용되는 인자들 중 불확실성이 내포하고 있는 것으로 보이는 점착력과 내부마찰각을 확률변수로 고려하여 확률론적 해석기법인 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하여 분석을 수행하였다. 이를 위하여 현장으로부터 획득된 자료의 실내시험 결과로부터 점착력과 내부마찰각에 대한 통계적 및 확률적 특성을 분석하였으며 이러한 결과를 확률론적 해석에 활용하였다. 실내시험을 통해 획득된 각 사면 구성물질의 평균, 표준편차, 변동계수는 Table 2와 같다. 확률론적 해석에 있어 점착력과 내부마찰각은 현장으로부터 획득된 자료를 기초로 분석을 수행하였으며 PASW Statistics(Ver. 18)을 이용한 정규성 검증($P\text{-Value} > 0.05$)을 통해 두 확률변수의 확률밀도함수로 정규분포곡선을 선정하였다(Fig. 6).

한편 안전율의 값이 1.0보다 작을 때 불안정한 것으로 판단하는 결정론적 해석과 달리 확률론적 해석의 결과는 불안정한 것으로 판단하는 기준(파괴확률 값)이 아

Fig. 7. Distribution of factors of safety when $m = 1$. **Fig. 8.** Distribution of failure probability when COV of field data and $m = 1$.

직까지 정립되지 않았다. 따라서 본 연구에서 기존의 연구결과를 바탕으로 파괴확률이 5%이상인 지역을 불안정한 것으로 판단하였다(Chowdhury, 2010). 이러한 자료를 기초로 산정한 확률론적 해석기법의 정확성은 지반이 포화된 것으로 가정하였을 경우 약 79.1%를 보이고 있어 결정론적 해석결과인 48.4%의 정확도에 비해 상당히 높은 것을 확인할 수 있다(Fig. 8, Table 3). 한편 현장으로부터 획득한 점착력과 내부마찰각의 경우 넓게 분포한 연구지역 중 가장 대표적인 특성을 보이는 지점에서 획득한 소규모의 시료로 실내시험을 수행한 결과이므로 시험을 통해 파악한 불확실성(즉, 표준편차나 분산)보다 더 많은 불확실성을 고려하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 불확실성의 영향을 고려하기 위하여 점착력과 내부마찰각의 변동계수를 변화시켜가며 분석을 수행하였다. Harr (1987)에 따르면 점착력과 마찰각의 변동계수는 20%로 제한되고 있다. 본 연구에서는 변동계수가 파괴확률에 미치는 영향을 알아보기 위하여 변동계수를 10%(COV = 0.1), 20%(COV = 0.2), 30%(COV = 0.3)로 변화를 주어 수행하였으며, 사면이 강우로 포화된 경우($m = 1.0$)와 건조한 경우($m = 0.0$)인 경우에 대해 분석을 수행하여 파괴 확률을 획득하였다

Table 3. Results of probabilistic analysis.

COV	Groundwater level ratio	m = 0	m = 1
0.1	Landslide occurrence rate at 5% PF	11.2	62.1
	Ratio of unstable area to total area at 5% PF	3.0	20.7
0.2	Landslide occurrence rate at 5% PF	25.5	73.5
	Ratio of unstable area to total area at 5% PF	7.4	28.0
0.3	Landslide occurrence rate at 5% PF	49.5	81.0
	Ratio of unstable area to total area at 5% PF	15.2	36.2
C = 0.41, $\Phi = 0.10$ (field data)	Landslide occurrence rate at 5% PF	24.4	79.1
	Ratio of unstable area to total area at 5% PF	7.4	34.3

Fig. 9. Distribution of failure probability distribution when COV = 0.1 and m = 1.

Fig. 11. Distribution of failure probability distribution when COV = 0.3 and m = 1.

Fig. 10. Distribution of failure probability distribution when COV = 0.2 and m = 1.

(Table 3). Fig. 9, 10, 11은 사면이 강우로 인해 포화된 경우 변동계수를 변화시켜가며 분석을 수행한 결과이다. 변동계수를 10%로 고려했을 경우 예측의 정확도는 62.1%로 분석되었으며 변동계수를 20%와 30%로

변동하였을 경우 예측의 정확도는 각각 73.5%와 81.0%로 상승한 것을 확인할 수 있었다. 즉 변동계수를 증가시킬수록(불확실성을 많이 고려할수록) 예측의 정확도가 상승함을 보여주고 있다. 또한 확률론적 해석의 결과는 결정론적 해석 결과에 비해 예측의 정확도가 상당히 높은 것으로 분석되어 사면재해 취약성 분석에는 결정론적인 방법보다 확률론적인 방법이 더 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

결론

본 연구의 목적은 광역적인 사면재해 발생 예상지역에 대하여 불확실성을 고려한 사면재해 취약성도 작성법을 제시하는 것이다. 대상연구지역인 보은군 보은읍 일대의 데이터베이스를 구축하여 대상연구지역의 사면재해 발생특성과 가장 유사한 무한사면 해석 모델에 적용하여 분석하였다. 또한 광역적인 지역에 대한 연구를 위하여 GIS를 접목하였으며 불확실성을 고려한 사면재

해 취약성도를 작성하기 위하여 확률론적인 해석기법인 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 이용하여 분석하였다.

(1) 확률론적 해석에 있어 점착력과 내부마찰각은 현장으로부터 획득된 자료를 기초로 분석을 수행하였으며 정규성 검정을 통해 두 확률변수의 확률밀도함수로 정규분포곡선을 선정하였다. 안전율의 값이 1.0보다 작을 때 불안정한 것으로 판단하는 결정론적 해석과 달리 확률론적 해석의 결과는 불안정한 것으로 판단하는 기준(파괴확률 값)이 아직까지 정립되지 않았다. 따라서 본 연구에서 기존의 연구결과를 바탕으로 파괴확률이 5%이상인 지역을 불안정한 것으로 판단하였다.

(2) 실제 사면재해 발생 위치좌표와의 일치 비율을 이용하여 결정론적 해석기법과 확률론적 해석기법을 비교해본 결과 확률론적 해석기법이 결정론적 해석기법 보다 13.7%~32.6%의 정확도가 상승하였다. 이러한 결과를 통해 확률론적 해석기법의 경우 강도정수의 변동성을 고려한 분석이 가능하므로 강도정수 내에 내재되어 있는 불확실성을 고려하여 정확성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 본 연구에서는 변동계수가 파괴확률에 미치는 영향을 알아보기 위하여 변동계수를 10% (COV = 0.1), 20%(COV = 0.2), 30%(COV = 0.3)로 변화를 주어 파괴확률을 획득하였다. 변동계수를 10%로 고려했을 경우 예측의 정확도는 62.1%로 분석되었으며 변동계수를 20%와 30%로 변동하였을 경우 예측의 정확도는 각각 73.5%와 81.0%로 상승한 것을 확인할 수 있었다. 즉 변동계수를 증가시킬수록 예측의 정확도가 상승함을 보여주고 있다.

(4) GIS를 결합하여 넓은 지역의 사면재해 취약성을 분석할 수 있었으며 무한사면 해석모델을 사용하고 확률론적 기법을 이용하여 분석함으로써 정량적인 지표인 파괴확률로서 사면재해 취약성을 평가할 수 있었다.

참고문헌

- 박병수, 2006, 지형공간 정보를 활용한 사면재해 안정평가의 확률론적 해석, 한국지형공간정보학회지, 14(3), 55-62.
 박혁진, 2007a, 사면분야에서의 risk management의 필요성, 지반공학의 현기술과 개선 방향, 구미서관, 279-296.
 박혁진, 2007b, 10장 확률론적 해석기법, 사면공학, 한국암반공학회, 261-285.

박혁진, 이사로, 김정우, 2003, 무한사면해석기법과 GIS를 이용한 사면 재해 위험성 분석 및 검증, 대한자원환경지질학회지, 36(4), 313-320.

이사로, 2000, 지리정보시스템(GIS)을 이용한 사면재해 취약성 분석 기법 개발 및 적용연구, 연세대학교 박사학위논문, 163p.

이사로, 이명진, 원중선, 2005, 인공신경망 및 GIS를 이용한 강릉지역 사면재해 발생 요인의 가중치 분석, 대한지질학회지, 41(1), 101-111.

최재원, 이사로, 민경덕, 우익, 2004, 지리정보시스템(GIS) 및 베이지안 확률 기법을 이용한 보은지역의 사면재해 취약성도 작성 및 검증, 대한자원 환경지질학회지, 37(2), 207-223.

Aleotti, P. and Chowdhury, R. 1999, Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58(1), 21-44.

Chowdhury, R., 2010, Geotechnical Slope Analysis, CRC press, 541p.

Haefeli, R., 1948, The stability of slopes acted upon by parallel seepage, Proc. 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1, 57-62.

Harr, M.E., 1987, Reliability Based Design in Civil Engineering, Dover, Mineola, NY, 291

Kim, H. S., Major, G., and Ross-Brown, D. 1978, Application of Monte Carlo Techniques to slope stability analyses, Proc. 19th US Symposium on Rock Mechanics, 2, 28-39.

You, K.H., Park, Y.J., and Lee, S.J., 2005, Risk analysis for determination of a tunnel support pattern, Tunnelling and Underground Space Technology, 20(5), 479-486.

2011년 8월 16일 원고접수, 2011년 9월 16일 게재 승인

정남수

수원대학교 토목공학과

445-743 경기도 화성시 봉담읍 와우리 산 2-2

Tel: 031-220-2566

Fax: 031-220-2522

E-mail: dol21c@hotmail.com

유광호

수원대학교 토목공학과

445-743 경기도 화성시 봉담읍 와우리 산 2-2

Tel: 031-220-2566

Fax: 031-220-2522

E-mail: khyou@suwon.ac.kr

박혁진

세종대학교 지구정보공학과

143-747 서울 광진구 군자동 98번지

Tel: 02-3408-3965

Fax: 02-3408-4341

E-mail: hjpark@sejong.ac.kr