

몬테카를로시뮬레이션 기법을 이용한 붕괴 암반사면의 확률론적 안정해석 및 민감도 분석

박성욱 · 박혁진*

세종대학교 지구정보공학과

Probabilistic Stability and Sensitivity Analysis for a Failed Rock Slope using a Monte Carlo Simulation

SungWook Park and HyuckJin Park*

Department of Geoinformation Engineering, Sejong University

확률론적 해석기법은 사면안정해석을 포함한 다양한 지질공학적인 문제에 내재하는 불확실성을 고려할 수 있는 효과적인 방안으로서 유용한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 확률변수에 대한 무작위 추출을 통해 상태함수인 한계평형식의 안전율을 반복하여 구하는 몬테카를로시뮬레이션 기법을 이용하여 2개의 암반사면에 대해 확률론적 안정해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 JRC와 JCS 같은 강도정수 등의 확률변수와 사면의 계원은 선행연구과정을 통해 도출된 값을 사용하였으며, 상태함수는 Barton의 경험식을 활용하였다. 본 연구에서는 각 사면별 파괴확률을 계산하고 이에 대한 민감도 및 신뢰성해석을 수행하였다. 특히 기존 결정론적 방법과의 비교와 샘플링 추출 기법에 대한 분석을 수행하였으며 분석결과 기준값보다 높은 파괴확률이 산정되어 사면의 붕괴이력과 부합되는 결과가 도출되었다. 또한 결정론적인 방법에 비해 변동성이 낮은 결과가 도출되어 해석의 신뢰성이 높은 것으로 나타났다.

주요어 : 사면안정, 확률론적 안정해석, 몬테카를로시뮬레이션

A probabilistic analysis of slope stability is an appropriate solution in dealing with uncertainty in problems related to engineering geology. In this study, a Monte Carlo simulation was performed to evaluate the performance function that is Barton's equation. A large number of randomly generated values were obtained for random variables, and the performance function was calculated repeatedly using randomly generated values. A previous study provided information of slope geometry and the random characteristics of random variables such as JRC and JCS. The present approach was adopted to analyze two failed slopes. The probabilities of failure were evaluated for each slope, and sensitivity analysis was performed to assess the influence of each random variable on the probability of failure. The analysis results were then compared with the results of a deterministic analysis, indicating that the probabilistic analysis yielded reliable results.

Key words : slope stability, probabilistic analysis, Monte Carlo simulation

서 론

자연적인 생성과정을 통해 형성된 지반을 대상으로 하는 지질공학적인 문제에는 불확실성이 필연적으로 포함되며, 이러한 불확실성은 해석과정 및 결과에 대한 신뢰도를 저하시킨다. 따라서 이러한 불확실성을 해석모

델에 고려함으로써 해석모델자체의 합리성 확보는 물론, 효율적인 설계나 경제성 분석을 도모하고자 하는 노력들이 진행 중이다(박혁진, 2007). Morgenstern et al. (2002)은 지질공학적인 문제에 있어 불확실성을 고려할 수 있는 방법으로 확률론적 해석이 적절하다고 하였으며, 많은 학자들은 해석결과의 신뢰성을 높이기 위해 기존 결정론적인 방

*Corresponding author: hjpark@sejong.ac.kr

법 대신 확률론적인 방법을 제안하였다(McMahon, 1971; Kim and Major, 1978; Kulatilake et al., 1985; Muralha, 1991; Muralha and Trunk, 1993; Low, 1997; Nilsen, 2000; Park and West, 2001; Pathak and Nilsen, 2004; Park et al., 2005).

또한 기존의 결정론적 해석에 의한 안전율은 단순히 공학적인 견지에서 사면 붕괴에 대한 여부만을 판단할 뿐, 의사결정을 위한 효율적인 판단근거를 제시하지 못하는 한계를 보이는 데, 일반적으로 의사결정 기준은 비용에 근거해야 하며 따라서 이를 고려할 수 있는 확률론적 해석기법의 적용이 더욱 요구된다고 할 수 있다. Casagrande (1965)도 역시 지질공학에 있어서의 안전성 문제를 경제성과 관련하여 설정해야 함을 주장하였다. 본 연구에서는 몬테카를로시뮬레이션(MCS)을 이용한 확률론적 안정해석을 수행하고 해석결과의 신뢰성과 반복횟수의 적정성을 분석하고자 하였다.

연구방법

본 연구에서는 선행 연구과정(박성욱, 2011)을 통해 정량적인 절리면 거칠기(JRC)를 획득하였다. 이를 위하여 지상라이다(terrestrial LiDAR)를 활용하여 활동면의 DSM (Digital Surface Model)을 확보하였으며 이로부터 절리면의 profile을 추출하고 Z2 및 Ai 통계파라미터를 이용하여 정량적인 절리면 거칠기(JRC)로 변환하였다. 또한 슈미트해머를 이용하여 절리면 압축강도를 획득하였다. 이렇게 획득된 JRC 및 JCS에 대한 평균, 표준편차, 분포함수 등의 확률특성을 획득하였으며 JRC와 JCS를 확률변수로 하는 Barton의 강도식을 상태함수로 결정하고, 구해진 DSM 으로부터 사면의 연장, 경사, 높이 등의 제원현황을 추출

함으로써 몬테카를로시뮬레이션을 위한 모델링의 자료로 활용하였다. 모델링에 따른 결정론적 상태함수와 무작위 추출된 확률변수를 이용하여 안전율을 반복 계산하였다. 이러한 과정을 거쳐 산정된 안전율의 histogram, 확률분포 함수곡선(PDF) 및 누적분포함수곡선(CDF)으로 부터 불안전 영역에 대한 최종 파괴확률을 산정하였다. 또한 각 붕괴현장별로 Z2 및 Ai 파라미터에 의해 획득된 JRC 값에 따른 파괴확률 값을 비교함으로써 각 기법간 적용성을 분석하였다. 확률변수에 대한 무작위추출과정에서 일반적인 Simple random sampling (SRS)과 Latin Hypercube sampling (LHS)과의 비교분석을 통해 LHS의 상대적인 수렴속도 및 적정 반복시행횟수를 제시하였다.

연구대상 사면 일반 현황

Slope1은 인천시 계양구 계양1동 주변 00방수로 공사 현장에 위치하며, 호상편마암으로 구성되어 있다. 사면의 높이 및 연장이 각각 19m와 50m에 이르며 경사 및 경사방향은 54/175(dip/dip direction)를 보인다. 사면방향과 유사한 대규모 단층에 의해 평면파괴가 발생되었다(Fig. 2a).

Slope2는 강원도 정선군 남면 무룡리에 국도 38호선 공사현장에 위치하며 기반암이 변성퇴적암류로 구성된 암반 사면이다. 사면의 높이 및 연장이 각각 46m와 100m에 이르며 경사 및 경사방향은 60/223(dip/dip direction)을 이룬다(Figure 3-20). 일부구간에서 대규모 단층 및 엽리 구조에 의해 평면파괴가 발생되었다(Fig. 2b).

사면의 입력자료 및 모델링

Slope1 입력자료

Slope1에 대한 모델링과정에서 사용된 사면높이는

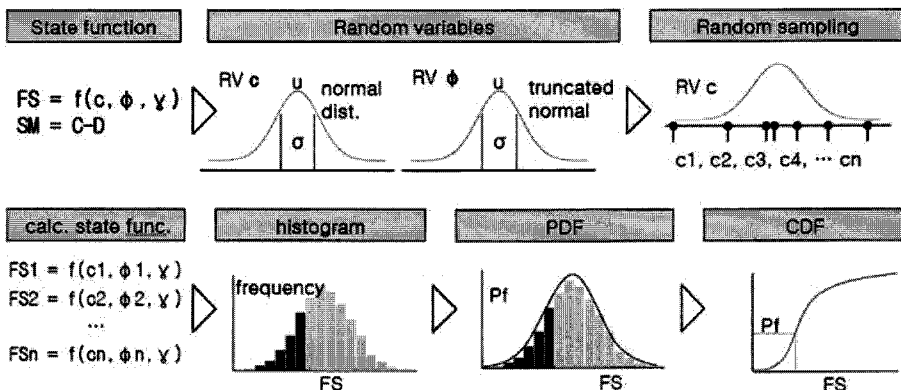


Fig. 1. Procedure followed in the Monte Carlo simulation.

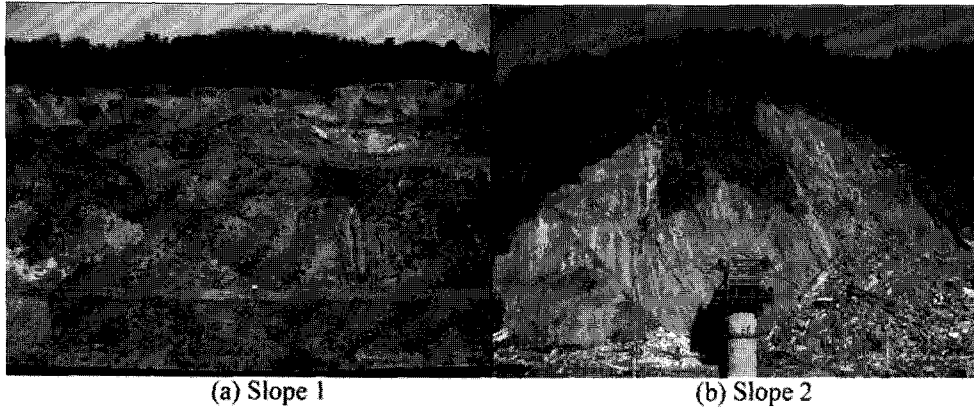


Fig. 2. Photograph of the investigated slopes.

19.5 m, 경사는 54°이며 이들은 DSM으로부터 분석되었다. 강도정수는 현장 및 실내실험 결과를 이용하였으며, 암석의 단위중량은 26 kN/m³, 절리면 기본마찰각은 28°를 사용하였다. 활동면상의 점착력은 절리면 양쪽 블록이 절리에 의해 완전 단절된 상태인 것을 감안하여 0 kN/m²을 사용하였다. 확률변수인 JRC(Z2)의 경우 평균값 5.4, 표준편차 1.45로 입력하였으며, JRC(Ai)의 경우 평균값 6.3, 표준편차 1.93, 정규분포를 따르는 것으로 입력하였다. JCS의 경우 평균 49.3 MPa, 표준편차 9.2 MPa, 표준정규분포를 따르는 것으로 고려하였다(Table 1, Fig. 3).

Slope2 입력자료

Slope2에 대한 모델링과정에서 사용된 사면높이는 39 m, 경사는 59°이며 앞서 언급한 slope1에 비해 사면규모가 크며, 경사도 급한 상태이다. 강도정수는 현장 및 실내실험 결과를 이용하였으며, 암석의 단위중량은 25 kN/m³, 절리면 기본마찰각은 25°를 이용하였다. 활동면상의 점착력은

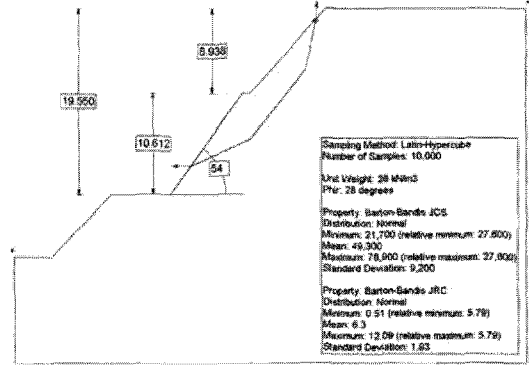


Fig. 3. Slope 1 modeling.

0 kN/m²으로, 확률변수인 JRC(Z2)의 경우 평균값 7.2, 표준편차 1.51로, JRC(Ai)의 경우 평균값 7.9, 표준편차 1.99, 정규분포를 따르는 것으로 입력하였다. JCS의 경우 평균 74.7 MPa, 표준편차 10.5 MPa, 표준정규분포를 따르는 것으로 고려하였다(Table 2, Fig. 4).

확률론적 안정해석

Slope1 파괴확률 산정

slope1에 대해 Z2 파라미터 방법에 의해 도출된 JRC인 JRC(Z2)의 평균, 표준편차, 분포함수의 확률특성을 추출하여 몬테카를로시뮬레이션을 수행하였다. 무작위로 추출된 확률변수를 이용하여 JRC와 JCS의 확률특성을 고려하여 10,000회 반복 계산을 실시함으로써 최소값 0.68에서 최대값 1.79까지 10,000개의 안전율이 도출되었으며, 평균 1.09, 표준편차 0.17의 분포를 가지는 것으로 나타났다. 각 구간별 안전율의 빈도(frequency)를 막대그래프 형태로

Table 1. Input parameters for the Monte Carlo simulation (slope 1).

project setting	site	method	sampling	state function	
	slope1	MCS	SRS/LHS	Barton's eq.	
geometry	height(m)	angle(°)	input parameter	γ_s (kN/m ³)	ϕ_b (°)
	19.5	54		26	28
statistics	JRC	Z2	dist. function	mean	STD
			normal	5.4	1.45
		Ai	normal	6.3	1.93
		JCS	normal	49.3(MPa)	9.2(MPa)
				COV	

Table 2. Input parameters for the Monte Carlo simulation (slope 2).

project setting	site	method	sampling	state function		
	slope2	MCS	SRS/LHS	Barton's eq.		
geometry	height(m)	angle(°)	input parameter	$\gamma_r(\text{kN/m}^3)$	$\phi_b(°)$	
	39	59	25	25	25	
statistics	JRC	Z2	normal	7.2	1.51	0.21
	JRC	Ai	normal	7.9	1.99	0.25
	JCS	normal	74.7(MPa)	10.5(MPa)	0.14	

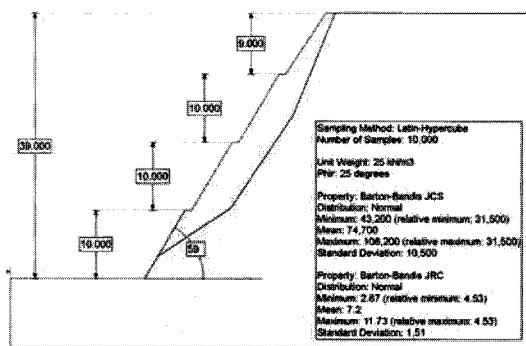


Fig. 4. Slope 2 modeling.

표시한 histogram상의 분포형태는 정규분포를 따르는 것으로 파악된다(Fig. 5).

Fig. 4에서 그래프의 좌측 어두운 색깔로 표현된 안전율 1이하 부분이 전체 반복횟수에서 차지하는 비율인 파괴 확률은 0.292로서 29.2%이다. 또한 다른 안정성 평가지수인 신뢰지수(RI)는 0.55로 분석되었다. slope1의 사면 높이 19.5m에 해당하는 신뢰지수 기준은 1.5~2.0이며 파괴확률 기준은 5~1.0% 범위를 감안할 때(Chowdhury, 2010), 산출된 slope1의 신뢰지수는 기준에 미달하고 파괴확률이 기준값을 상회하는 결과를 보이고 있다. 따라서 본 사면은 붕괴가능성이 높은 위험사면을 의미하고 실제 현장의 붕괴이력과도 부합되는 결과를 보이고 있다.

또한 Z2를 통해 획득된 JRC(Z2)값과 비교를 위해 slope1에 대해 Ai 파라미터 방법에 의해 도출된 JRC인 JRC(Ai)의 평균, 표준편차, 분포함수의 확률특성을 추출하여 몬테카를로시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위하여 10,000회 반복 계산을 실시하였고 최소값 0.64에서 최대값 2.35까지 10,000개의 안전율이 도출되었다. 각 구간별 안전율의 빈도를 막대그래프 형태로 표시한 histogram에서의 분포형태는 정규분포양상을 가지는 것으로 파악되었으며

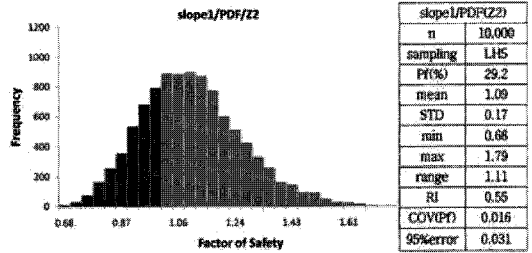


Fig. 5. Slope 1 FS (Z2) histogram.

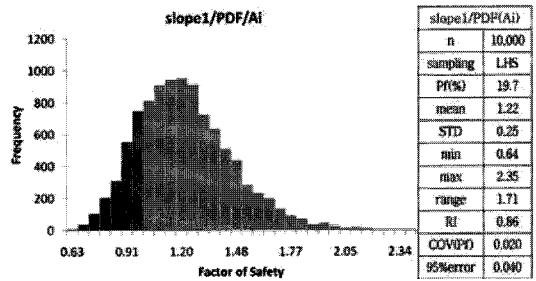


Fig. 6. Slope 1 FS (Ai) histogram.

평균 1.09, 표준편차 0.17의 분포를 가지는 것으로 나타났다(Fig. 6). 한편 Fig 6으로부터 획득한 파괴확률은 19.7%로써 앞서 실행한 Z2 파라미터를 이용한 결과인 29.2%보다 낮은 결과가 도출되었다. 이는 JRC(Ai)가 JRC(Z2)에 비해 높은 평균값이 사용된 결과로 판단된다. 프로그램의 해석결과에서 그래프의 분포형태는 평균 1.22, 표준편차 0.25의 대수정규분포 양상을 가지는 것으로 나타났다. 또한 다른 안정성 평가지수인 신뢰지수는 0.86으로 분석되었다. 따라서 Z2 방법에 의한 해석결과에 비해서는 안정한 결과가 도출되었으나, Table 3에서 제시하고 있는 기준과 산출된 파괴확률 및 신뢰지수를 비교하였을 때는 불안정한 사면으로 판단된다.

Slope2 파괴확률의 산정

slope2에 대하여서도 JRC(Z2)의 평균, 표준편차, 분포함수의 확률특성을 추출하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행

Table 3. Probability of failure and reliability index (Chowdhury, 2010).

slope height(m)	reliability index	short term	long term
		Pf(%)	annual Pf(%) @(50yr expected)
< 10	1.0~1.5	15~5	0.3~0.01
10~20	1.5~2.0	5~1.0	0.1~0.02
20~30	2.0~2.5	1.0~0.5	0.02~0.01
> 30	2.5~3.0	0.5~0.1	0.01~0.002

하여 최소값 0.54에서 최대값 1.49까지 10,000개의 안전율이 획득되었다. 각 구간별 안전율의 빈도를 막대그래프 형태로 표시한 histogram상의 분포형태는 평균 0.89, 표준편차 0.15의 정규분포를 따르는 것으로 파악되었으며(Fig. 7) 파괴확률은 78.3%로 나타났다. 프로그램의 해석결과에서 그래프의 분포형태는 평균 0.89, 표준편차 0.15의 대수정규분포 양상을 가지는 것으로 나타났다. 또 다른 안정성 평가지수인 신뢰지수는 0.78로 분석되었다. 이는 앞서 slope1에 대한 분석결과 보다 파괴확률은 높고, 신뢰지수는 낮은 결과로서 본 사면의 위험성이 slope1에 비해서도 높음을 의미한다. 또한 Table 3에서 제시하고 있는 기준과 산출된 파괴확률 및 신뢰지수를 비교하였을 때 불안정한 사면으로 판단할 수 있다.

Ai 파라미터로부터 추출된 JRC 확률특성을 이용하여 도출된 해석 결과는 최소값 0.54에서 최대값 1.49까지의 안전율 분포를 보이며(Fig. 8) 파괴확률은 59.6%로써 앞서 실행한 Z2 파라미터를 이용한 결과인 78.3%보다 낮은 결과가 도출되었다. 이는 JRC(Ai)가 JRC(Z2)에 비해 높은 평균값이 사용된 결과로 판단된다. 각 구간별 안전율의 빈도를 막대그래프 형태로 표시한 histogram상의 분포형태는 평균은 0.98, 표준편차 0.22의 정규분포를 따르는 것으로 파악된다. 따라서 Z2 방법에 의한 해석결과에 비해서는 안정한 결과가 도출되었으나, Table 3에서 제시하고 있는 기준과 산출된 파괴확률 및 신뢰지수를 비교하였을 때는 불안정한 사면으로 판단된다.

slope1 및 slope2에 대한 확률론적 안정해석결과 Ai에

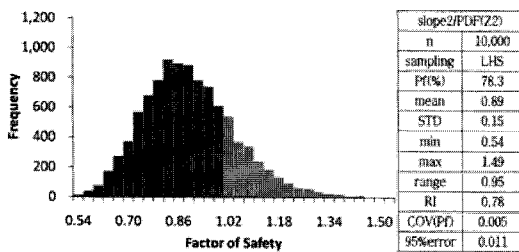


Fig. 7. Slope 2 FS (Z2) histogram.

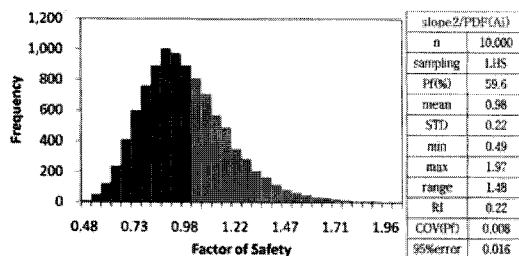


Fig. 8. Slope 2 FS (Ai) histogram.

의한 방법보다 Z2에 의한 파괴확률이 높게 나타났다. 이는 전반적인 JRC(Z2)의 값이 JRC(Ai)의 값보다 낮는데 기인하며, 결국 Z2에 의한 방법이 Ai에 의한 방법보다 사면의 안정성을 저평가함으로써 보수적인(conservative) 해석 결과를 도출하고 있음을 지시하는 결과로 판단된다. 따라서 Ai 파라미터에 의한 안정해석시 Z2에 의한 방법보다 안전한 해석결과가 도출될 수 있음을 의미한다.

확률변수가 해석결과에 미치는 민감도 분석

확률변수인 Z2 및 Ai 파라미터를 활용하여 획득된 절리면거칠기(JRC) 및 절리면압축강도(JCS)가 해석결과에 미치는 영향을 살펴보기 위해 slope1에 대해 민감도(sensitivity) 분석을 실시하였다. 무작위 추출에 따른 JRC(Z2)의 변화가 안전율에 미치는 영향을 살펴보았으며, JRC가 0.51~12.9까지 변화함에 따라 안전율도 0.68~1.97까지 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다(Fig. 9). 분포 그래프가 선형적인 비례관계를 보이고 있으며, 이는 JRC의 변화가 분석 결과인 안전율에 미치는 민감도가 높음을 의미한다.

반면, 절리면압축강도(JCS)가 안전율에 미치는 영향을 살펴보기 위한 민감도 분석에서는 JCS의 변화가 안전율에 미치는 영향은 매우 낮거나 거의 없는 것으로 나타났다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 JCS의 변화에 따른 안전율의

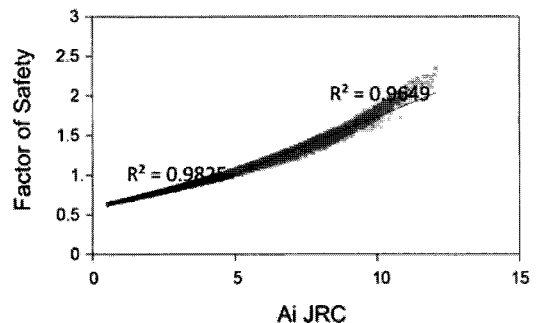
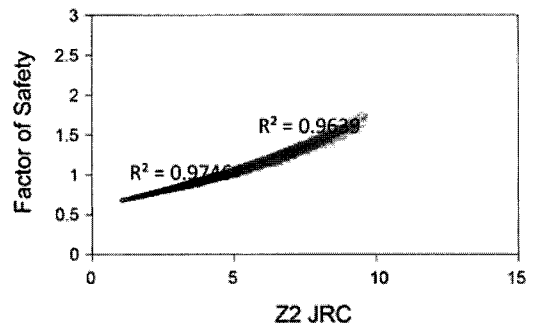


Fig. 9. Sensitivity of (a) JRC (Z2) and (b) JRC (Ai) vs FS.

분포가 선형이 아닌 원형에 가까운 형태를 보이고 있으며, 이는 두 인자간의 상관성이 매우 낮음을 의미한다. 이러한 이유는, 식 1에서 보논바와 같이, 상태함수인 Barton의 경험식에서 JCS는 활동면상에 작용하는 수직응력값에 따라 JRC값에 영향을 미치게 되는데, 일반적으로 활동면에서의 수직응력의 작용범위가 JCS값에 비해 1/300~1/100 수준으로 현저히 작으며, 로그함수의 특성상 입력값의 산술적인 증감에 대해 결과값이 소수점 이하값으로 미미하게 반응하는 결과로 판단된다. 두 개의 확률변수에 대한 변화 range를 %로 표시하여 안전율에 미치는 민감도를 동시에 분석하면 Fig. 11과 같다. JRC(Z2)나 JRC(Ai) 모두 절리면압축강도(JCS)에 비해 JRC가 안전율에 미치는 영향이 큰 것으로 분석되고 있다.

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left(JRC \cdot \log \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_b \right) \quad (1)$$

결정론적 사면안정해석

확률론적 안정해석에 이어 전통적인 해석법인 결정론적 방법을 적용하여 안전율을 산정함으로써 확률론적 안정해석결과와 비교하고자 하였다. 사면의 제원, 암석의 단위중

량, 기본마찰각 값은 앞서 언급한 몬테카를로시뮬레이션 모델링과정에서의 입력값과 동일한 값을 활용하였다. 또한 JCS의 경우에도, 특별히 현장에서 암석시료를 채취하여 실내에서 일축압축실험을 하지 않는 한, 일반적으로 간편하게 얻을 수 있는 슈미트해머값(SHV)의 평균값을 이용하므로 확률론적 안정해석 모델링 과정에서의 각 사면별 평균값을 활용하였다.

JRC의 경우, 일반적으로 조사자가 현장에서 관찰되는 활동면중 대표적인 것으로 판단되는 지점에서, 프로파일게이지를 이용하여 수차례(10~20회) 반복 측정하고 이를 실내에서 표준프로파일과 비교하여 각각의 JRC값을 산정하고 이를 평균하여 사용한다. 본 절의 결정론적 안정해석에 사용된 JRC값은, 전통적인 방법에 따라, 현장에서 프로파일게이지를 이용하여 조사자가 측정한 프로파일(각 현장별로 10개)을 실내에서 Barton and Choubey (1977)의 표준프로파일과 비교하여 JRC값을 도출한 후 이를 평균하여 활용하였다(Table 4).

각 사면에 대한 결정론적 안정해석결과, slope1의 경우 안전율 0.96으로 불안정한 해석결과가, slope2의 경우 안전율 1.21로 안정한 해석결과가 도출되었다(Fig. 12). 이는 앞서 수행된 확률론적 안정해석 결과인, slope1의 평균 안전율

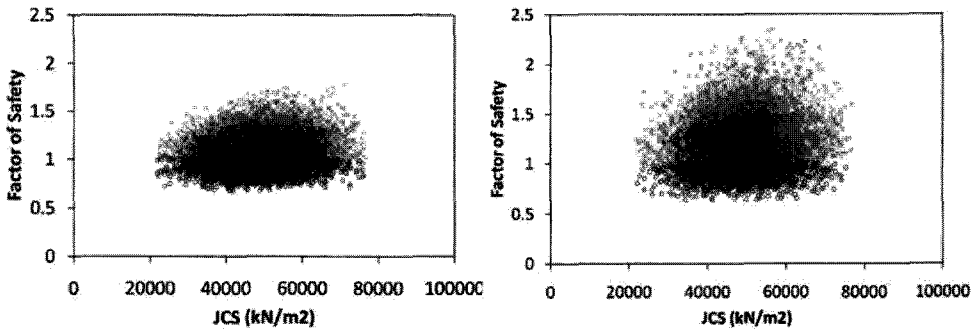


Fig. 10. Sensitivity of JCS vs FS.

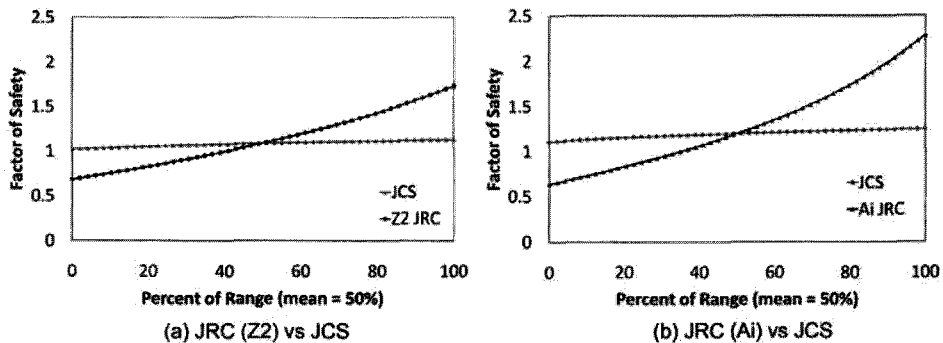


Fig. 11. Sensitivity of JRC vs JCS.

1.09, slope2의 평균 안전율이 0.89로써 slope2의 평균 안전율과 안정성이 낮은 결과와 상반된 양상을 보이고 있다. 또한 slope2의 경우 확률론적인 안정해석에서 파괴확률 78.3%로 높게 나왔음에도 불구하고, 결정론적인 안정해석에서는 일반적인 사면의 허용안전율인 1.2를 상회하는 안정한 결과가 도출되었다.

이러한 분석결과는 결정론적인 안정해석과정에서 입력되는 강도정수 중에 JRC의 값 차이에 기인한 결과로 판단된다. slope1의 경우 결정론적인 안정해석에 사용된 JRC 값은 4.2로써 확률론적 해석결과에서 사용된 평균값인 5.4(Z2)에 비해 1.45 정도 낮은 값이 사용되었다. 반면, slope2의 경우 결정론적인 안정해석에 사용된 JRC값은 10.1로써 확률론적 해석결과에서 사용된 평균값인 7.2(Z2)에 비해 1.51 정도 높은 값이 사용되었다. 결정론적 안정해석시 사용되는 강도정수는 제한된 샘플에 의한 특정값을 사용하는 만큼 샘플링과정에서의 대표성 문제가 야기된다. 따라서 보다 많은 자료를 사용하는 확률론적 안정해석이 결정론적 방법 보다 변동성이 적은 결과가 도출될 가능성이 높음을 시사한다고 판단된다.

확률론적 해석결과의 정밀도 분석

몬테카를로 시뮬레이션에 있어서 결과의 신뢰성은 반복

Table 4. Input parameters and FS for deterministic stability analysis.

	height (m)	angle (°)	γ_t (kN/m ³)	ϕ_b (°)	JCS (MPa)	JRC
slope1	19.5	54	26	28	49.3	4.2
FS : 0.96						
slope2	39	59	25	25	74.7	10.1
FS : 1.21						

시행횟수에 지배된다. 따라서 확률론적 해석결과의 정밀도를 향상시키기 위해서는 충분히 많은 반복계산이 필요하나 시간이 많이 소요되는 한계를 가지므로 해석조건별로 적절한 반복횟수에 대한 분석을 실시하여 해석을 수행한다. 일반적으로 파괴확률이 매우 작거나, 반복수행 횟수가 부족할 경우에는 상당량의 오차가 포함될 수 있기 때문에, 파괴확률에 대한 변동계수(COV)나 일정 신뢰구간에서의 오차분석을 통해 요구 정밀도와 반복횟수가 서로 적절히 결정되도록 하고 있다(Ayyub and Haldar, 1985).

파괴확률의 변동계수 산정

몬테카를로 시뮬레이션에 있어서 파괴확률에 대한 변동계수는 식 2를 통해 획득할 수 있다(Haldar, 2000). 각 현상별 변동계수 산정결과는 Table 5와 같으며, 최소 0.5%에서 최대 2%이하의 작은 값을 가지는 것으로 파악되었다. 이는 일반적으로 확률변수로 사용되는 지반정수가 갖는 10% 내외의 변동계수 범위보다도 작은 값으로, 산정된 파괴확률이 실용적인 공학적 견지에서 충분한 신뢰성을 확보하였다고 판단된다.

$$COV \approx \frac{\sqrt{(1-P_f)P_f}}{P_f} \frac{N}{P_f} \quad (2)$$

COV : 변동계수, P_f : 파괴확률, N: 반복시행 횟수

신뢰구간에 대한 파괴확률 오차 분석

몬테카를로 시뮬레이션에 있어서 반복횟수에 따른 오차

Table 5. COV of failure probability.

	slope1(Z2)	slope1(Ai)	slope2(Z2)	slope2(Ai)
COV of P_f	0.016	0.02	0.005	0.008

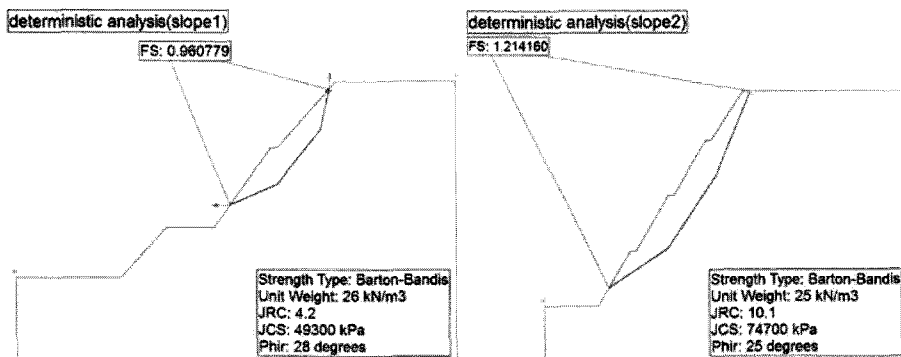


Fig. 12. Results of deterministic analysis.

를 분석하기 위해, 표준정규분포상의 약 2σ범위인 95%를 신뢰구간으로 설정하였을 때, 파괴확률의 오차 계산에 식 3을 이용하였다(Haldar, 2000). 따라서 산정된 95%의 신뢰구간에서의 오차를 바탕으로 10,000회 반복횟수에 따른 시면별 파괴확률의 오차범위는 Table 6과 같이 정리된다.

$$\varepsilon\% = \sqrt{\frac{(1-P_f)}{N \times P_f}} \times 200\% \quad (3)$$

ε% : 파괴확률 오차, P_f: 파괴확률, N: 반복시행 횟수
 분석결과 각 케이스별 오차범위는 0.79~0.95%로써 모두 1% 미만의 수준인 것으로 분석되었다. 이는 slope1의 경우, 10,000번의 반복시행에서 29.2%±0.91의 파괴확률을 가질 가능성이 95% 이상임을 의미한다. 이러한 결과를 살펴볼 때, 본 몬테카를로 시뮬레이션 과정에서 도출된 파

괴확률의 정밀도가 공학적인 판단을 하는데 있어 충분한 신뢰성을 가지는 것으로 판단된다.

SRS와 LHS 기법 비교 분석

몬테카를로 시뮬레이션 수행과정에서의 확률변수에 대한 표본추출방법은 일반적인 무작위추출법으로 SRS (simple random sampling)와 LHS(Latin Hypercube sampling) 방법이 있으며(황현식과 박정수, 2001) SRS에 비해 LHS는 작은 반복횟수로도 전분포 영역에 걸쳐 효율적인 추출이 가능한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 각 기법별 확률변수에 대한 표본추출 특성을 살펴보기 위한 분석을 실시하였다. Fig 13에서 보는 바와 같이 확률변수 JRC값에 대해, 100회의 비교적 작은 추출횟수에서도, SRS에 비해 LHS가 통계파라미터에서 정의한 정규분포 특성을 충실히 반영하여 추출하고 있음을 알 수 있다.

또한 다음 Fig. 14에서 보는 바와 같이 JCS에 대한 100회의 표본추출시 두 기법간의 비교에서도 역시 SRS에 비해 LHS가 통계파라미터에서 정의한 정규분포 특성을 고르게 반영하고 있음을 알 수 있다. 각 표본추출기법별로 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해 필요한 반복 시행횟수를 알아보기 위한 실험을 수행하였다.

Table 6. P_f error for the 95% confidence interval.

	slope1 (Z2)	slope1 (Ai)	slope2 (Z2)	slope2 (Ai)
P _f	0.292	0.197	0.783	0.596
error of 95% confidence interval	0.031	0.040	0.011	0.016
range(P _f ε%) of P _f	29.2%±0.91	19.7%±0.79	78.3%±0.86	59.6%±0.95

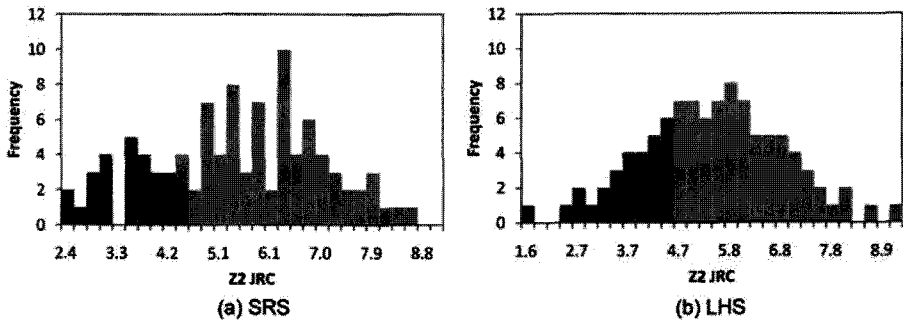


Fig. 13. Sampling comparison between JRC (SRS) and JRC (LHS) (n = 100).

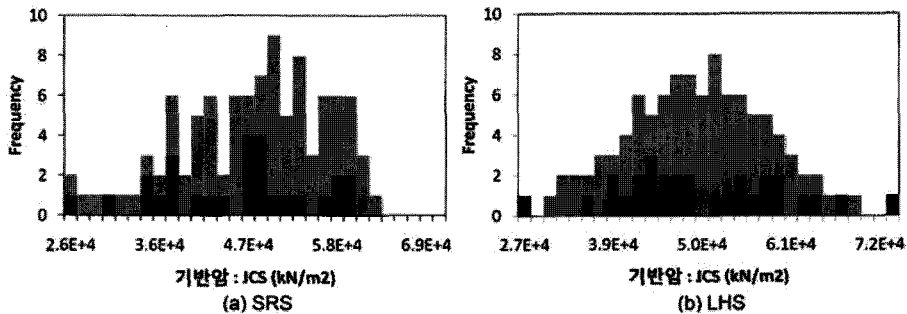


Fig. 14. Sampling comparison between JCS (SRS) and JCS (LHS).

이를 위하여 SRS와 LHS 각 기법별 100,000번의 반복 수행을 실시하였으며, 분석결과의 신뢰성을 높이기 위해 slope1과 slope2를 하나의 그래프에 같이 도시하여 비교분석하였다(Fig. 15). 실험결과, 반복수행 10,000회 이하에서의 최종값(@100,000회)에 대한 초기수렴속도는 LHS가 SRS에 비해 우수한 경향을 보이고 있다. 10,000회에서의 LHS와 같은 정도의 결과를 얻기 위해서 SRS는 최소 30,000~40,000회의 반복수행이 필요한 것으로 분석된다. 또한 50,000회 이상의 반복수행에서는, 두 기법간 최종파괴확률에 대한 정밀도에 있어서의 차이는 없는 것으로 파악된

다. 따라서 50,000회 이상의 반복수행에서는 원래 SRS가 가지고 있는 고른 추출에 있어서의 한계가 극복되는 것으로 판단된다.

일반적으로 최종해석결과인 파괴확률은 소수점 1자리의 %값으로 표현한다. 따라서 충분한 반복시행횟수에서의 최종 파괴확률값에 비해 0.5%의 허용오차를 공차(tolerance)로 설정하였을 때, LHS는 10,000회, SRS는 30,000회가 필요한 것으로 판단된다. 이는 본 논문의 몬테카를로시뮬레이션 기법을 이용한 확률론적 안정해석에 있어서의 실용적인 최소 반복횟수로 판단된다.

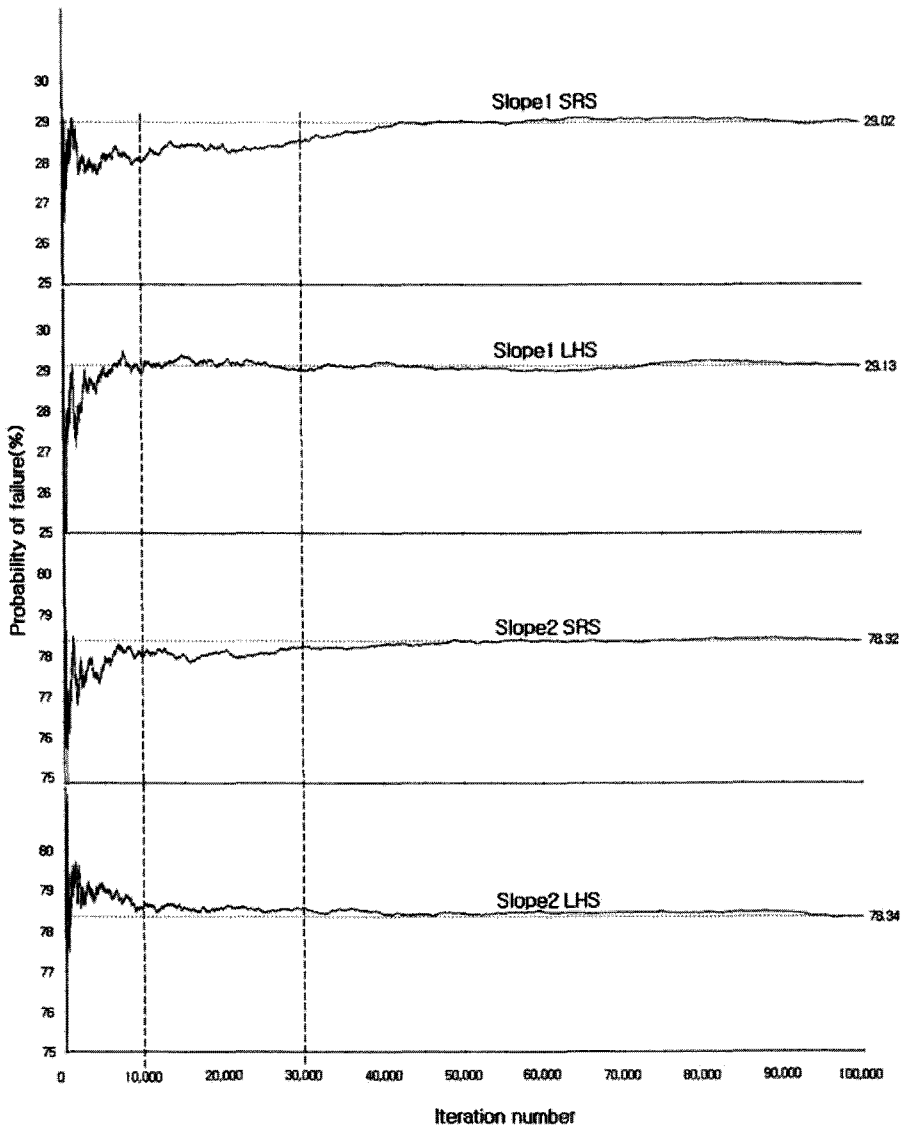


Fig. 15. Simple random sampling (SRS) vs. Latin Hypercube sampling (LHS).

결 론

몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 두개의 붕괴암반 사면에 대한 확률론적 안정해석을 실시하였으며, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. Z2 파라미터에 의한 JRC를 이용하여 분석한 slope1의 파괴확률은 29.2%로 나타났으며, Ai 파라미터를 이용한 파괴확률은 19.7%로 Z2 파라미터에 의한 방법보다 약간 높게 산정되었다. 이러한 결과는 안전율 산정에 직접적인 영향을 미치는 확률변수 JRC(Ai)가 JRC(Z2)에 비해 비교적 높게 분포되어 입력된 결과로 판단된다.

2. slope2에 대한 분석에서도, Z2 파라미터를 이용한 파괴확률은 78.3%, Ai 파라미터를 이용한 파괴확률은 59.6%로서 JRC(Ai)가 JRC(Z2) 보다 높은 경향의 안전율을 도출시키는 것으로 나타났다. 이러한 slope1과 slope2의 해석결과를 살펴볼 때, Ai 파라미터에 의한 방법이 Z2 방법보다 거칠기를 과대평가하며, 해석결과에서는 Ai에 비해 Z2의 파괴확률이 높게 산정되어 보수적인 해석 경향을 보이고 있다. 따라서 Ai 파라미터에 의한 안정해석시 Z2에 의한 방법보다 안전측 안정해석결과가 도출되는 경향이 있으므로 해석자의 주의가 요망된다.

3. JRC와 JCS가 해석결과에 미치는 영향을 살펴보기 위해 실시한 민감도 분석에서, JRC가 해석결과인 파괴확률에 미치는 영향이 JCS에 비해 큰 것으로 분석되었다. 이는 Barton의 경험식의 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

4. 결정론적 안정해석과의 비교에서는 slope1의 경우 안전율 0.96으로 불안정한 해석결과가, slope2의 경우 안전율 1.21로 안정한 해석결과가 도출되었다. 이러한 해석결과는 확률론적 안정해석결과에서 slope1에 비해 slope2의 위험성이 큰 것으로 분석된 결과와 대치된다. 이러한 결과는 보다 많은 자료를 사용하는 확률론적 안정해석이 결정론적 방법 보다 변동성이 적은 결과가 도출될 가능성이 높음을 시사하는 것으로 판단된다.

5. 해석결과인 파괴확률에 대한 정밀도를 분석하기 위해 파괴확률에 대한 변동계수 및 신뢰구간에서의 오차를 분석한 결과 변동계수의 경우 최소 0.5%에서 최대 2%로 나타났다. 신뢰구간에서의 오차는 0.79~0.95%로써 모두 1% 미만의 값이 도출되어 공학적인 판단에 충분한 정밀도를 확보하였다고 판단된다.

6. 100회의 무작위추출 결과 LHS가 SRS에 비해 확률 변수에 대한 고른 추출에 효과적인 것으로 분석되었다. 파괴확률의 신뢰성 확보를 위한 반복횟수 비교검토에서는

10,000회 이하에서의 최종값에 대한 초기수렴속도는 LHS가 SRS에 비해 우수한 것으로 분석된다. 또한 최종값에 대한 0.5%의 허용오차를 공차로 설정하였을 때, LHS는 10,000회, SRS는 30,000회가 필요한 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2010-0028025).

참고문헌

- 박성욱, 2011, 지상라이다 자료를 이용한 확률론적 암반 사면 안정해석, 세종대학교 박사학위논문, 46-87.
- 한국암반공학회, 2007, 사면공학, 261-285.
- 황현식, 박정수, 2001, 격자기반 라틴 하이퍼큐브의 계획의 제안, Proceedings of the Autumn conference, Korean Statistical Society, 115-120.
- Ayyub, B.M. and Haldar, A., 1985, Decision in construction operation, Journal of Construction Engineering and Management Division, ASCE, 111(4), 343-357.
- Barton, N.R. and V. Choubey, 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, J. of Rock Mech., 10, 1-54.
- Casagrande, A., 1965, Role of the calculated risk in earthwork and foundation engineering, J. of the Soil Mech. Div., ASCE, 34(2), 169-188.
- Chowdhury, R., 2010, Geotechnical Slope Analysis, CRC press, 541p.
- Haldar, A. and Mahadevan, S., 2000, Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design, John Wiley and Sons, 258-259.
- Kim, H. and Major, G., 1978, Application of Monte Carlo technique to slope stability analyses. Proceedings of 19th U.S. Symposium on Rock Mech. 42-50.
- Kulatilake, P.H.S.W., Finley, R.E. and Ghosh, A., 1985, Effect of variability of joint orientation and strength on factor of safety of wedge failure, Proceedings of International Symposium on Fundamentals of Rock Joints, 25-33.
- Low, B.K., 1997, Reliability analysis of rock wedges, J of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(6), 498-505.
- McMahon, B.K., 1971, Statistical methods for the design of rock slopes, 1st Australian-New Zealand Conference on Geomechanics, 314-321.
- Morgenstern, N.R., El-Ramly, H. and Cruden, D.M., 2002, Probabilistic slope stability analysis for practice, Canadian Geotech. J., 665-683.
- Muralha, J., 1991, A probabilistic approach to the stability of rock slope, 7th Congress of the ISRM, Germany, A.A.Balkema, 921-927.
- Muralha, J. and Trunk, U., 1993, Stability of rock blocks-Evaluation of failure probabilities by Monte Carlo and

- first order reliability methods, International Symposium on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Turkey, 759-765.
- Nilsen, B., 2000, New trends in rock slope stability analyses. Bull. Eng. Geol. Env. 58, 173-178.
- Park, H. J. and West, T. R., 2001, Development of a probabilistic approach for rock wedge failure, Engineering Geology. 59, 233-251.
- Park, H.J., West, T.R. and Woo, I., 2005, Probabilistic analysis of rock slope stability and random properties of discontinuity parameters, Interstate Highway 40, Western North Carolina, USA Engineering Geology, 79, 230-250.
- Pathak, S. and Nilsen, B., 2004, Probabilistic rock slope stability analysis for Himalayan condition. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 63, 25-30.

박성욱

세종대학교 지구정보공학과
 143-747 서울 광진구 군자동 98번지 세종대학교
 Tel: 070-7094-4614
 Fax: 042-828-6966
 E-mail: wook@nexgeo.com

박혁진

세종대학교 지구정보공학과
 143-747 서울 광진구 군자동 98번지 세종대학교
 Tel: 02-3408-3965
 Fax: 042-828-6966
 E-mail: hjpark@sejong.ac.kr

2010년 11월 17일 원고접수, 2010년 12월 14일 게재승인