

사면 안정해석에 적용되는 지반강도정수(C, ϕ)와 사면경사 민감도 분석 Sensitivity Analysis of Shear Strength Parameters(C, ϕ) and Slope Angel in Slope Stability Analysis

백 용¹⁾, Yong Baek, 배규진²⁾, Gyu-Jin Bae, 권오일³⁾, O-Il Kwon,
장수호⁴⁾, Su-Ho Jang, 구호본⁵⁾, Ho-Bon Koo

- 1) 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology
- 2) 한국건설기술연구원 지반연구부 연구위원, Researcher Manager, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology
- 3) 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology
- 4) 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology
- 5) 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원, Researcher Fellow, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : Shear strength parameters obtained from filed survey are important factors in the analysis of slope stability. In this study, sensitivity analysis was performed to evaluate the effect of input parameters on the analysis of slope stability. The input parameters selected for sensitivity analysis were slope angle, cohesion, and friction angle. Monte-Carlo Simulation method was used for calculating input parameters and the factor of safety was computed by means of limit equilibrium method. A rock slope, which has failed in the field, was used for the sensitivity analysis in the analysis of slope stability. The result of analysis shows that the factor of safety of the rock slope was a little low. From partial correlation coefficient(PPC) of input parameters determined from the sensitivity analysis, slope stability was dependant on cohesion and slope angle. The effect of friction angle was lower than that of cohesion and slope angle on slope stability.

Key words : Shear Strength Parameters, Monte-Carlo Simulation, Limit Equilibrium Method, Factor of Safety, Sensitivity Analysis

1. 서 론

사면 안정해석은 현장의 조사결과에 의하여 지반강도정수를 도출하고 안정해석의 입력자료로 활용하여 수치해석을 실시한다. 현장 조사에서부터 설계에 이르기까지 지반강도정수의 영향은 사면 안정해석에서는 매우 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 사면의 안정성 해석에 영향을 미치는 인자를 선별하여 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석의 기초자료인 입력변수로는 일반국도변에서 수집한 1934개 현

장의 자료를 통하여 지반강도정수와 사면경사의 분포현황을 이용하였다. 입력변수들은 Monte-Carlo Simulation 기법을 이용하여 변수를 산출하고 한계평형식을 사용 안전율을 도출하였다. 대상 사면 모델은 기붕괴가 발생한 사면을 대상으로 민감성을 분석하였다. 민감성 분석 인자로는 사면 경사, 점착력, 내부마찰각을 대상으로 하였으며 출력인자로는 안전율을 선정하였다. 민감도 분석시 민감도지수는 PCC(Partial Correlation Coefficient)를 적용하였다.

2. 현장 조사 자료수집

본 연구에 활용한 현장 조사 자료는 한국건설기술연구원에서 1998년부터 실시한 전국 일반국도변에 위치한 절토사면 1934개소의 현장을 조사에서 수집된 자료를 활용하여 분석하였다. 표 1은 본 연구에 활용한 지방청별 자료 현장수를 나타낸 것이다. 표 1에서 보듯이 전국에 골고루 현장이 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 입력변수로서 사용될 지반강도 정수값은 현장조사시 측정된 사면의 경사값과 RMR분류법을 이용하여 도출한 점착력과 내부마찰각을 산출하였다.

표 1. 본 연구에 활용한 지방청별 일반국도변 절토사면 현장수

	총계	서울청	원주청	대전청	익산청	부산청
현장수	1,934	85	549	258	306	736

2.1 지반강도정수산정 방법

2.1.1 RMR 분류 및 SMR 분류

국내에서 터널 및 암반역학에 주로 암반 분류법으로 RMR분류법이 활용된다. 1973년 Bieniawski에 의하여 처음 제안된 RMR분류법은 최근에 Romana(1993)등에 의하여 사면의 안정에도 활용되게 되었다. 표 2는 지반강도정수 산출을 위하여 본 연구에서 활용된 현장조사 결과의 실례를 나타낸 것이다.

표 2. 현장에서 수집한 자료를 이용한 암반분류 실례

구분	항 목	상 태	점 수	
RMR	일축압축강도 (MPa)	150.1	11.7	
	RQD (%)	82.0	16.4	
	절리면 간격 (m)	0.2	8.2	
	절리면 상태	연장길이 (m)	5.0	1.2
		분리폭 (mm)	0.0	6.0
		거 칠 기	rough	5.0
		충 진 물	soft	2.0
	풍 화 도	심한풍화	1.0	
지하수 상태	dripping	4.0		
합	III(Fair)	56		
SMR	F ₁	26	0.4	
	F ₂	45	1	
	F ₃	1	-6	
	F ₄	기계굴착	0.0	
	RMR+(F ₁ ×F ₂ ×F ₃)+F ₄	III(Fair)	53	

2.1.2 지반강도정수 산출

지반강도정수의 산정에 대한 경험식은 많은 학자들에 의하여 제시되었다. 대표적으로 Bieniawski(1989), Trueman(1988) 등 의하여 제시된 방법이 주로 적용되고 있다. 본 방법은 회귀분석식으로부터 제안된 식으로 일반적으로 점착력은 과대한 값을 나타내고 있으며 마찰각은 과소평가되는 단점이 있다. 그러나 현장에서 취한 RMR 값을 손쉽게 계산할 수 있는 장점을 최대한 이용할 수 있어 본 연구에서 채택하였다. 식 (1)과 (2)는 본 연구에 활용된 지반강도정수 산출식이다.

$$C = 0.25 \exp(0.05 \times RMR) \quad (1)$$

$$\Phi = 0.5 \times RMR + 5 \quad (2)$$

2.2 지반강도정수 분포특성

절토사면 현장에서 수집된 자료를 활용하여 분포특성을 분석하였다. 분포특성 분석은 Monte-Carlo simulation에 활용하기 위한 확률변수를 구하기 위하여 시도되었다. 분포형태를 분석한 결과 3가지의 경우 모두 정규분포(normal distribution)를 따르는 것으로 나타났다. 입력변수의 평균 및 분산은 전체 값들과 SMR 분류법에 의하여 총 4 단계로 분류하였다. 분석결과는 표 3과 같으며 현장의 자료를 이용하여 도출한 확률변수 결과이다. 확률변수 중 식 (3)과 (4)를 이용하여 확률변수 X에 대한 N개의 측정치에 대한 평균값을 구하였으며 표준편차는 분산에 대한 제곱근으로 구하였다(윤길림, 2004). 표 3에서 SMR I 과 II의 수는 175개이며, III은 942개, IV는 549개, V는 268개소이다. 그림 1은 현장에서 수집한 전체 입력변수의 분포형태를 나타낸 것이다. 그림 2는 SMR 등급중 III에 해당하는 자료를 분석한 입력 변수 분포형태이다. 다음으로 Monte-Carlo Simulation을 이용하여 1000개의 난수를 발생시켰으며 이들 난수를 이용하여 모델 사면의 안전율을 산출하였다.

$$\mu_x = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (3)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \mu_x)^2}{N}} \quad (4)$$

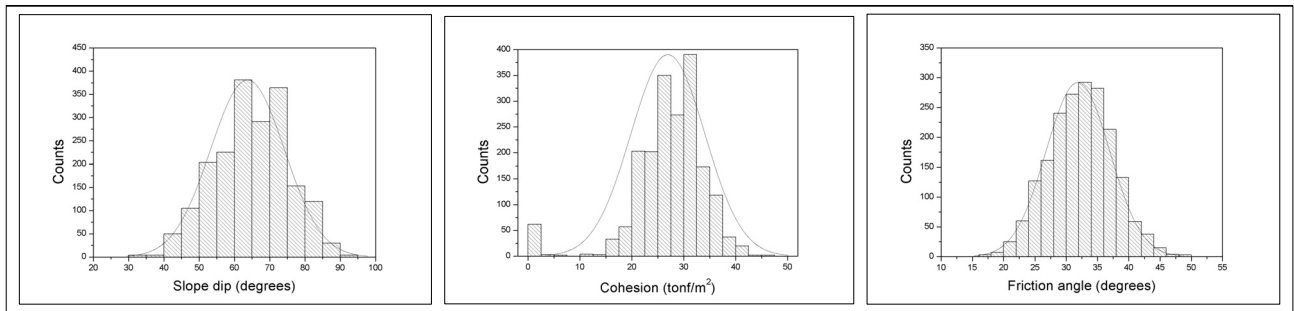


그림 1. 조사된 입력 변수전체의 확률분포

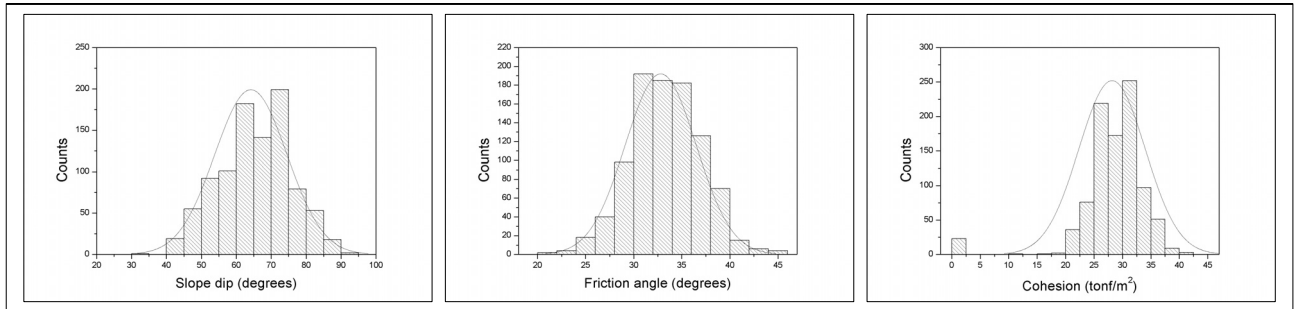


그림 2. 조사된 입력 변수중 SMR III등급의 확률분포

표 3. 현장 자료를 이용한 확률변수

구 분	사면 경사					점착력					내부마찰각				
	전체	SMR				전체	SMR				전체	SMR			
		I & II	III	IV	V		I & II	III	IV	V		I & II	III	IV	V
평균값	63.68	63.44	64.17	63.95	61.59	26.94	34.47	28.17	24.53	22.62	31.86	38.74	32.80	28.76	30.44
분산	10.48	10.87	10.35	10.02	11.39	7.14	4.68	5.84	5.3	10.19	5.09	3.73	3.69	4.93	4.98

3. 사면 안정해석과 입력 인자 민감도 분석

3.1 사면 안정 해석

암반 사면의 안정성 해석은 동역학적으로 한계평형해석을 통하여 안전율을 산출할 수 있다. 그림 3은 평면과파의 일반적인 모식도이다. 암반사면의 평면 파괴율은 다음의 식(5)를 통하여 구할 수 있다.

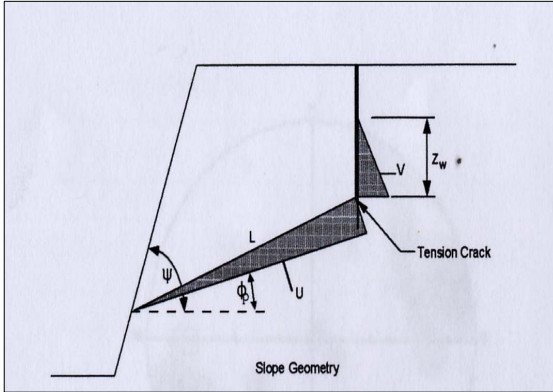


그림 3. 평면과파 모식도

$$F = \frac{cA + (W \cos \phi_p - U - V \sin \phi_p) \tan \phi}{W \sin \phi_p + V \cos \phi_p} \quad (5)$$

3.2 민감도 분석 기법

3.2.1 정의

입력변수는 측정오차(measurement error), 정보의 부재 그리고 모델의 메커니즘에 대한 부족한 이해등과 같은 다양한 불확실성의 영향을 받는다. 이로 인해 모델의 결과에 대한 확신에 한계가 발생하게 된다. 민감도분석은 입력변수들과 모델 변수들의 불확실성을 평가하는 방법이다. 또한 민감도분석은 모델의 출력이 입력변수들의 변화에 어떻게 영향을 받는지 평가하여 모델의 신뢰성과 예측 결과에 대한 신뢰성을 향상시키기 위해 사용된다. 따라서 민감도분석은 모델 입력변수의 불확실성의 결과로서 얻어지는 전체 불확실성을 정량하는 데 목적을 둔 불확실성 해석(Uncertainty Analysis)과 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다.

3.2.2 민감도 분석 종류

민감도 분석 기법은 크게 선별기법(screening), 국소적 민감도 분석(local sensitivity analysis) 그리고 대역적 민감도 분석(global sensitivity analysis)으로 구분할 수 있다(배규진, 2003). 선별기법은 한번에 하나의 변수에 대한 값을 변화시켜가며 표본을 추출하고 결과들에 대한 잔차를 비교하여 분석한다. 국소적 민감도 분석에서는 입력변수들로 출력함수를 편미분하여 분석을 하며 해석하는 방법이다. 대역적 민감도 분석은 각 입력변수의 불확실성이 출력변수의 불확실성에 미치는 영향이 평가되며 각 입력변수에 대한 분포가 해석을 위한 입력으로 사용된다. 모든 변수들을 동시에 변화시키고, 각 입력변수의 전체 범위에 대해 민감도를 측정할 경우 대역적 민감도 분석으로 고려할 수 있다(Saltelli 등, 2000).

본 연구에서는 지반강도정수와 설계인자에 대한 표본을 추출하고 출력변수 즉 안전율에 대한 민감도를 분석하기위하여 대역적 민감도 분석을 실시하였다.

3.2.3 민감도 분석 순서

일반적인 민감도 분석은 다음과 같은 순으로 결정된다. 먼저 실험 계획을 설계하고 어떠한 입력변수들을 고려할지 결정한다. 각 입력변수에 대한 확률밀도함수 또는 편차 범위를 결정한다. 다음 적절한 설계에 의해 입력 벡터 및 행렬을 발생시키고 출력결과의 분포를 조사하여 모델을 평가한다. 끝으로 출력변수에 미치는 각 입력변수의 영향 또는 상대적인 중요도를 평가하게 된다.

본 연구에서는 현장의 조사자료를 활용하여 입력변수에 대한 확률밀도함수를 설정한다. 다음으로 출력결과의 값인 안전율과 입력 변수와의 상관관계를 도출하여 민감도를 분석하게 된다. 입력변수로는 지반강도정수와 설계변수를 적용하였으며 안전율을 출력변수로 평가하였다.

3.2.4 Monte Carlo Simulation기법을 활용한 민감도 분석

Monte Carlo Simulation은 대역적 민감도 분석의 한 기법으로서, 무작위로 추출된 모델 입력변수들에 대한 결과를 평가하고 입력변수들이 모델 예측결과의 불확실성에 미치는 영향을 결정하기 위하여 적용된다. 본 연구에서는 지반강도정수의 입력변수들의 분포에 따른 결과들의 중요도와 불확실성을 분석하는데 유용한 Monte Carlo Simulation에 근거한 민감도 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 입력변수의 범위를 동일한 확률을 가진 N개의 간격으로 나누고 각 간격에서 입력변수의 값을 추출하는 표본추출 기법인 Latin hypercube 표본추출기법을 적용하였다. 이 기법은 출력결과가 입력변수들 가운데 단지 몇가지 요소들에 의해 지배 될 때 매우 우수하며 출력결과의 평균과 분포합수를 추정하는데 있어 무작위 표본추출기법보다 우수하다고 알려져 있다(Hoek 등, 1995).

민감도분석에는 많은 민감도 지수가 사용되고 있다. 일반적으로 PEAR(Pearson product moment correlation coefficient), SPEA(Spearman coefficient), SRC(Standard Regression Coefficient), PCC(partial correlation coefficient), SRRC(standardized rank regression coefficient), 그리고 PRCC(partial rank correlation coefficient)등의 지수가 널리 이용된다. 본 연구에서는 상관(correlation)과 부분상관(partial correlation)의 개념에 근거한 PCC지수를 사용하였다. 출력결과 \hat{Y} 와 입력변수 \hat{X}_j 사이의 부분상관계수는 일련의 회귀모델들로부터 얻어진다. 우선 다음과 같은 두 개의 모델을 구성한다. x_h 는 입력변수이며 b_h 와 c_h 는 회귀분석에서 얻어지는 계수들이다(식 6).

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{h \neq j} b_h x_h, \quad \hat{X}_j = c_0 + \sum_{h \neq j} c_h x_h \quad (6)$$

그런 다음 새로운 변수 $Y - \hat{Y}$ 와 $X_j - \hat{X}_j$ 를 정의하기 위해 위의 두 회귀식들의 결과들을 사용한다. Y 와 X_j 사이의 부분상관계수는 $Y - \hat{Y}$ 와 $X_j - \hat{X}_j$ 간의 상관계수로서 정의된다(Helton, 1993). 따라서 PCC는 위의 두 변수들 사이의 선형관계에 대한 척도를 제시한다. 다르게 표현하면 PCC는 X_j 와 $X_i(i \neq j)$ 들 사이의 상관관계로 인한 영향을 보정한 뒤 Y 와 주어진 입력변수 X_j 사이의 상관관계의 정도를 반영한다.

4. 분석 결과

4.1 해석 대상 사면

사면 안정 해석을 실시하기 위하여 다음 그림 4와 같은 모델을 선정하여 해석을 실시하였다. 본 사면은 20°경사를 가지는 연약대층을 따라 평면파괴가 발생하였으며 전체 사면높이는 48.2m이며, 인장균열의 깊이가 19.8m에 해당된다. 사면 경사는 58°이며, SMR에 의한 암반 등급은 III등급에 해당되는 것으로 가정하였다.

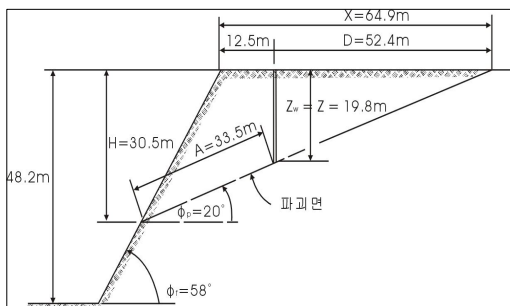


그림 4. 해석 모델 사면 모식도

4.2 해석 결과

대상모델 사면을 대상으로 안정성 해석을 실시한 결과는 다음 그림 5와 같다. 출력변수의 분포를 살펴보면 정규분포를 나타내는 것을 알 수 있다. 안전율 Fs(Factor of Safety)이 1.0이하인 경우는 72.9%에 해당되며 1.2이하는 92%에 해당되어 본 사면은 불안정한 상태임을 알 수 있다. PCC 민감도 지수를 분석한 결과는 그림 6과 같다. 민감도 분석 결과 사면의 점착력과 사면 경사가 매우 민감한 것으로 나타났으며 내부마찰각은 다소 민감성이 낮은 것으로 나타났다. 그러나,

입력변수 및 출력변수의 요소수가 적은 점을 감안할 때 민감도 지수의 정량적인 의미는 없을 것이다.

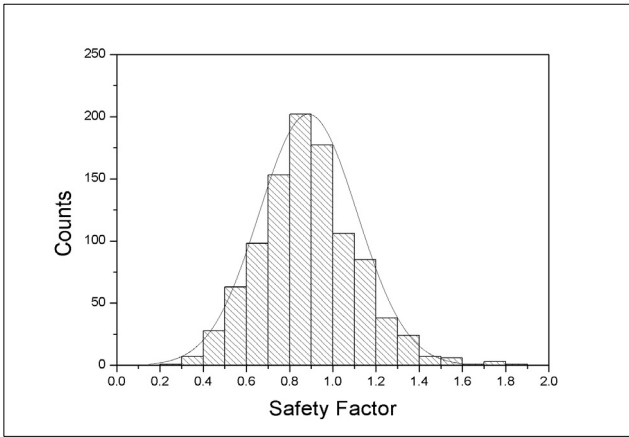


그림 5. 안전율에 관한 출력변수 분포도

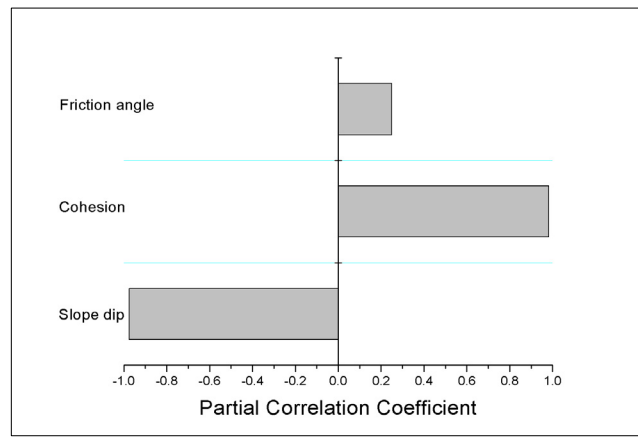


그림 6. 민감도 분석을 통한 PCC지수 분포

5. 결론

사면 안정해석시 사용되는 지반설계정수에 대하여 민감도 분석을 실시하였다. 기 붕괴된 모델 사면을 대상으로 안정성 해석을 실시하고 입력변수에 대한 민감도를 분석한 결과 안전율이 다소 낮은 것으로 판단할 수 있다. 민감도 분석에서 PCC 민감도 지수를 이용하여 분석한 결과 점착력, 경사, 내부마찰각 순으로 민감성이 있는 것으로 해석되었다. 그러나, 입력변수 및 출력변수의 요소수가 적은 점을 감안할 때 민감도 지수의 정량적인 의미는 없을 것이다.

향후 연구 방향으로는 경제성을 고려한 보강공법의 적정성에 대하여 추가적으로 연구가 수행되어야 할 것으로 본다. 또한 본 연구에서는 제한된 입력 변수와 출력 변수에 대한 민감도 분석을 수행하였으나 사면의 붕괴는 다양한 인자의 복합적인 활동으로 발생되기에 많은 인자의 선택을 통하여 출력변수와 의 상관관계를 규명하여야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 배규진 외 3인(2003), “숏크리트 라이닝의 거동해석에 영향을 미치는 입력변수들에 대한 민감도 분석”, **대한토목학회**, 제 23권, 제 5C호, pp. 345~356.
2. 윤길림(2004), “확률 및 신뢰성 개념을 도입한 지반설계 사례연구”, **한국지반공학회**, 2004년 지반 조사위원회 학술논문집, 제 1권, 제 1호, pp.73~107.
3. Bieniawski(1973), Engineering classification of jointed rock mass, *Trans. South Afr. Ins. of Civil Eng.*, Vol. 15, N12, pp.335~344.
4. Bieniawski, Z. T., (1989), **Engineering Rock Mass Classification**, John Willy & Sons.
5. Conover, W. J., (1980), **Practical Nonparametric Statistics**, 2nd ed., Wiley, New York.
6. Hoek, E., Kaiser, P. K. and Bawden, W. F. (1995), "Horizontal vibration-New lumped parameter model", *Proc of 9th Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Tokyo. Vol. 2, pp.365~368.
7. Romana, R.M.,(1993), **"A Geomechanical classification for slopes: Slope mass rating"**, Comprehensive rock engineering, ed. Hudson, Pergamon Press, pp. 575~600.
8. Saltelli, A., Cahn, K. and Scott, E. M.(2000), **Sensitivity analysis**, John Wiley and Sons Ltd., England.
9. Trueman, R.(1988), **An evaluation of strata support techniques is dual life gateroad**, Ph.D, Thesis, Univ. of Wales.