



붕괴나 산사태 발생에는 불확실성이 필연적으로 개입한다. 특히, 지반공학 분야 중 인공사면 및 자연사면에 대한 안정성 평가는 더욱더 조사 및 해석이 어려운 경우가 많다. 사면 안정해석은 현장의 조사결과에 의하여 지반강도정수를 도출하고 안정해석의 입력자료로 활용하여 수치해석을 실시한다. 현장 조사에서부터 설계에 이르기까지 지반강도정수의 영향은 사면 안정해석에서는 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 최근에는 결정론적인 안정해석과 확률론적인 안정해석 방법을 같이 사용하는 경우가 많이 행하여 지고 있다. 결정론적인 사면안정해석 방법시 지반강도정수의 결정에서 발생하는 문제점으로는 지반강도정수의 산정이 될 수 있다. 이는 지반강도정수 설정이 안전을 산정의 결정적인 결과를 나타내고 있으므로 지반의 불확실한 현상을 하나의 대푯값으로 표현하여야 하는 문제점이나 약점을 포함하고 있는 것 또한 사실이다. 지반 정수 설정시 발생하는 문제점으로는 지반의 불확실성은 다양한 원인에서 기인하나 그 중에서도 공간적 변동성(inherent variability, spatial variation), 조사 오차(measurement error), 통계 오차(statistical error or uncertainty) 그리고 변환 모델 불확실성(transformation model uncertainty)등 네가지가 중요한 원인이다(김진만, 2004).

지반의 강도정수에 대하여 불확실성을 고려하고자 확률론적인 해석 방법이 개발되어 사용되고 있다. 사면의 한계평형해석에서 주로 사용되는 전단강도 특성을 나타

내는 변수들은 확률변수로 고려되어야 한다. 전단강도 특성을 나타내는 내부마찰각이나 점착력 같은 경우 그 값을 획득하기 위한 실내 및 현장 시험의 수량이 한정되어 정확한 값을 획득하기 어렵기 때문에 불확실성이 포함되며 따라서 확률변수로 고려되어야 한다(박혁진, 2005).

본 논문에서는 사면의 안정해석에 영향을 미치는 인자를 통하여 안전율에 미치는 민감성에 대한 비교 검토를 실시하였다. 민감도 분석의 기초자료인 입력변수로는 일반국도변에서 수집한 1934개 현장의 자료를 통하여 지반강도정수와 사면경사의 분포현황을 이용하였다. 입력변수들은 Monte-Carlo Simulation 기법을 이용하여 변수를 산출하고 한계평형식을 사용 안전율을 도출하였다. 대상 사면 모델은 기 붕괴가 발생한 사면을 대상으로 민감성을 분석하였다. 민감성 분석 인자로는 사면경사, 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 현장 조사에서 수집된 자료를 활용하여 분석하였다(한국건설기술연구원, 2004). 수집된 사면의 자료를 분석하면 다음 표 1과 같다. 표 1에서

표 1. 조사된 절토사면 자료 분석 결과

		계	서울청	원주청	대전청	익산청	부산청
현정수		1,934	85	549	258	306	736
높이	≤ 10m	211	8	25	30	72	76
	10 ~ 20m	792	44	173	112	140	323
	21 ~ 30m	577	20	213	64	68	212
	30m <	354	13	138	52	26	125
경사	≤ 1: 1.2	22	2	5	6	3	6
	1: 1.2 ~ 1.0	97	6	22	26	16	27
	1.0 ~ 0.7	358	20	92	58	69	119
	1 : 0.7 <	1457	57	430	168	218	584
암종	화성암	625	15	157	73	131	249
	변성암	932	68	310	113	142	299
	퇴적암	377	2	82	72	33	188
연장	≤ 50m	178	12	48	36	37	45
	51 ~ 100m	756	29	222	94	131	280
	101 ~ 150m	510	19	136	60	82	213
	151 ~ 200m	268	15	78	42	32	101
	201m <	222	10	65	26	24	97

보듯이 전국에 골고루 현상이 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 분석항목으로는 사면의 기본 조사 항목인 사면의 높이, 길이, 경사각, 암질 등의 자료를 분석하였다. 본 조사 분석은 민감도 분석의 입력변수로서 사용하기 위하여 산출하였으며 일부항목은 본 연구의 민감도 분석에서 제외하였다. 입력변수로서 사용될 지반강도 정수값은 현장조사시 측정된 사면의 경사값과 RMR분류법을 이용하여 도출한 점착력과 내부마찰각을 이용하였다.

## 2.1 지반강도정수산정 방법

### 2.1.1 RMR분류 및 SMR분류

현장에서 수집된 자료를 이용하여 지반강도정수를 산정하고, 이들 자료를 이용하여 입력변수로 활용하고자 한다. 국내에서 터널 및 암반역학에 주로 RMR분류법이 사용된다. 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.

### 2.1.2 지반강도정수 산출

지반강도정수의 산정에 대한 경험식은 많은 학자들에 의하여 제시되었다. 대표적으로 Bieniawski(1989), Trueman(1988) 등에 의하여 제시된 방법이 주로 적용되고 있다. 본 연구에서는 Trueman의 방법을 사용하였다.

표 2. 현장에서 수집한 자료를 이용한 임반분류 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 <sub>1</sub>	26	0.4	
	F <sub>2</sub>	45	1	
	F <sub>3</sub>	1	-6	
	F <sub>4</sub>	기계굴착	0.0	
	RMR+(F <sub>1</sub> ×F <sub>2</sub> ×F <sub>3</sub> )+F <sub>4</sub>	III(Fair)	53	

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. 본 연구의 해석에 사용된 입력변수들의 분포형태를 살펴본 결과, 그림 1과 그림 2와 같이 정규분포함수에 가장 잘 부합함을 알 수 있다. 그림 1은 현장에서 수집한 전체 입력변수의 분포형태를 나타낸 것이다. 그림 2는 SMR 등급중 III에 해당되는 자료를 분석한 입력 변수 분포형태이다. 또한 Hock 등(1995)은 여러 지반공학 적 문제들은 일반적으로 정규분포를 따르며 가장 널리 적용되고 있다고 보고한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 1과 그림 2와 같이 얻어진 입력변수들의 정규분포에 대해 민감도 분석을 실시하였다. 입력변수의 평균 및 분산은 전체 값들과 SMR 분류법에 의하여 총 4 단계로 분류하였다. 분석결과는 표 3과 같으며 현장의 자료를 이용하여 도출한 확률변수 결과이다. 확률변수는 식 (3)과 (4)를 이용하여 확률변수 X에 대한 N개의 측정치에 대한 평균값( $\mu_x$ )을 구하였으며 표준편차는 기대치에 대한 확률변수의 분산도를 나타내기 위해서 사용되는데 분산의 제곱근으로 나타내었다. 여기서 기댓값(E[X])는 평균값으로 모든 가능 확률변수에 그들의 발생가능성을 곱하고 더하여 구할 수가 있다. 기댓값은 다음과 같이 정의된다(윤길림, 2004).

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

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

$$E[X] = \mu_x = \int Xf(X)dx \approx \sum Xp(X_i) \quad (5)$$

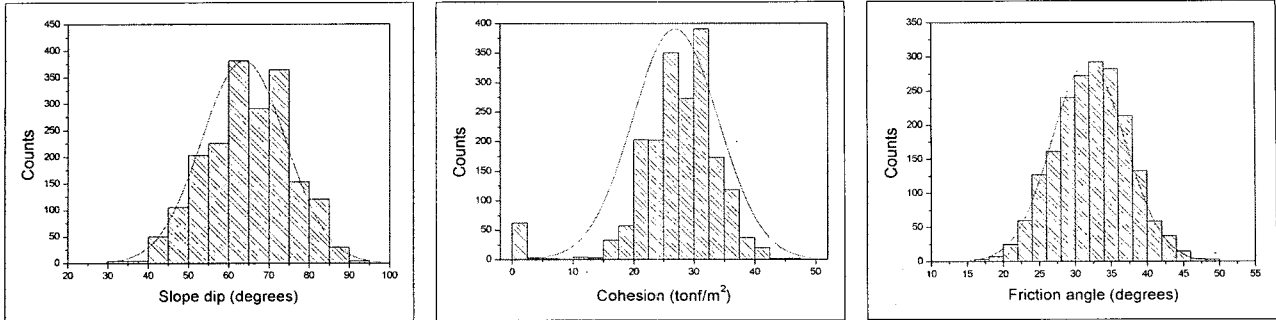


그림 1. 조사된 입력 변수전체의 확률분포

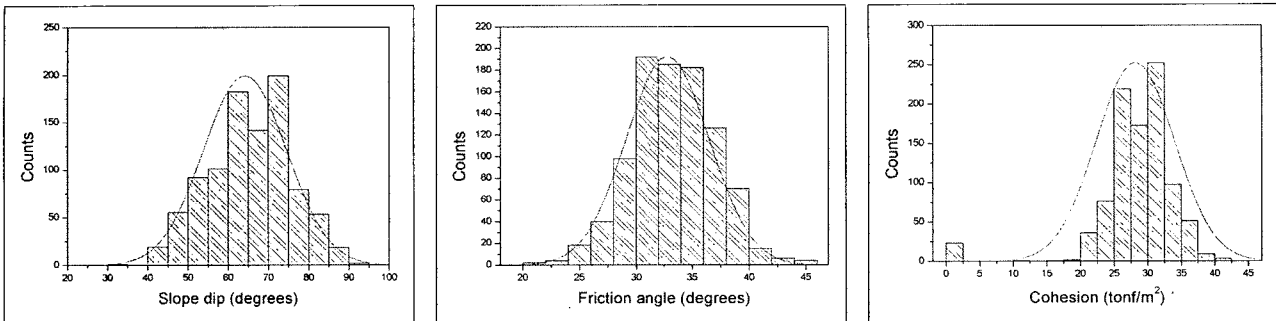


그림 2. 조사된 입력 변수중 SMR III등급의 확률분포

표 3. 현장 자료를 이용한 확률변수

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

여기서,  $f(X)$   $XX$ 의 확률밀도 함수(연속확률변수)  
 $p(X)$   $X_i$  값의 확률(이산확률분포)

표 3에서 SMR I과 II의 수는 175개이며, III는 942개, IV는 549개, V는 268개소이다. 이들자료를 이용하여 민감도 분석해석시 Monte-Carlo simulation을 통하여 1,000개의 난수를 발생시켰으며 이들 난수를 이용하여 모델 사면의 안전율을 산출하였다. 상세한 내용은 다음절에서 설명하기로 한다.

### 3. 사면 안정해석과 입력 인자 민감도 분석

#### 3.1 사면 안정해석

암반 사면의 안정성 해석은 동역학적으로 한계평형

해석을 통하여 안전율을 산출할 수 있다. 그림 3은 평면 파괴의 일반적인 모식도이다. 암반사면의 평면파괴 안전율은 다음의 식 (6)을 통하여 구할 수 있다.

$$F = \frac{cA + (W \cos \phi_p - U - V \sin \phi_p) \tan \phi}{W \sin \phi_p + V \cos \phi_p} \quad (6)$$

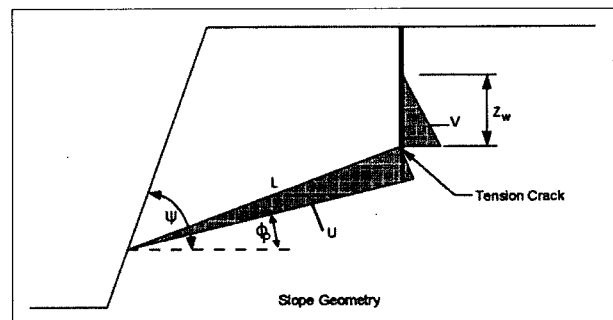


그림 3. 평면파괴 모식도

여기에서  $F$ : 안전율,  $c$ : 점착력,  $A$ : 단면적,  $W$ : 이동 블록의 무게,  $\phi_p$ : 파괴면 경사각,  $U$ : 부양력,  $V$ : 수압,  $\phi$ : 내부마찰각이다.

## 3.2 민감도 분석 기법

### 3.2.1 정의

민감도 분석이란 입력변수들과 설정된 모델 출력변수간의 불확실성을 평가하는 일종의 확률론적인 방법이다. 또한 민감도 분석은 모델의 입력변수들의 변화에 어떻게 영향을 받는지 평가하여 모델의 신뢰성과 예측 결과에 대한 신뢰성을 향상시키기 위해 사용된다. 따라서, 민감도 분석은 모델 입력변수의 불확실성의 결과로서 얻어지는 전체 불확실성을 정량화 하는데 목적을 둔 불확실성 해석(uncertainly analysis)과 밀접한 관계가 있다(Saltelli 등, 2000). 입력변수는 측정오차(measurement error), 정보의 부재 그리고 모델의 메커니즘에 대한 부족한 이해 등과 같은 다양한 불확실성의 영향을 받는다. 이로 인해 모델의 결과에 대한 확신에 한계가 발생하게 된다.

### 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. 그러나 입력변수들의 상호작용을 고려하지 못하며 해석에 많은 표본이 필요하다는 단점을 가지고 있다. 국소적 민감도 분석은 입력변수들로 출력함수를 편미분하여 분석을 하며 해석하는 방법이다. 그러나 출력을 함수식으로 결정해야 하는 문제가 있으며 모델이 선형적이지 않고 상당한 불확실성이 입력변수들에 존재 할 때 결과의 불확실성을 신뢰적으로 추정할 수 없는 단점이 있다. 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 설계 인자에 대한 표본을 추출하고 출력변수 즉 안전율에 대

한 민감도를 분석하기 위하여 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 출력결과들의 분포를 조사하여 모델을 평가한다. 끝으로 출력 변수에 미치는 각 입력 변수의 영향 또는 상대적인 중요도를 평가하게 된다.

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

### 3.2.4 Monte-Carlo Simulation 기법을 활용한 민감도 분석

Monte-Carlo Simulation(이하 MCS)은 대역적 민감도 분석의 한 기법으로서, 무작위로 추출된 모델 입력변수들에 대한 결과를 평가하고 입력변수들이 모델 예측 결과의 불확실성에 미치는 영향을 결정하기 위하여 적용된다. 일반적인 MCS는 랜덤하게 선택된 모델 입력변수들에 대한 결과를 평가하고 모델 예측 결과의 불확실성과 입력변수들이 결과의 불확실성에 미치는 영향을 결정하기 위하여 적용된다. 해석방법은 먼저, 각 입력변수에 대한 범위와 분포를 선택하고 1단계에서 규정된 범위와 분포로부터 샘플을 발생시킨다. 다음 샘플의 각 요소에 대해 모델을 평가하고 불확실성 분석 및 민감도 분석을 실시한다.

본 연구에서는 지반강도정수의 입력변수들의 분포에 따른 결과들의 중요도와 불확실성을 분석하는데 유용한 MCS에 근거한 민감도 분석을 수행하였다. MCS기법에서 샘플링은 크게 2가지로 구분할 수 있다. Random sampling 기법과 Latin hypercube sampling 기법으로 나눌 수 있다. Random sampling은 표본조사에 있어서 표본들이 모집단 전체의 경향을 정확하게 나타낼 수 있도록 완전히 무작위로 추출하는 방법을 말한다. Random sampling을 이용하여 조사대상 전체를 조사하는 대신, 일부분을 조사함으로써 전체를 추량(推量)하는 것이다. 따라서 샘플

은 조사하고자 하는 대상 전체, 즉 모집단의 측도가 되도록, 추첨처럼 우연에 맡겨 결정되도록 선택하여야만 한다. 이같이 추출한 표본을 무작위표본 또는 임의표본이라 한다. Random sampling 기법은 샘플이 충분히 많은 경우에 쉽게 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 모델을 평가하는데 있어 많은 시간과 비용이 소요되는 경우나 샘플 개수가 한정되어 있는 경우에 Random sampling 기법을 적용하는 것은 문제가 있다(Saltelli 등, 2000).

따라서 본 연구에서는 보다 적은 표본을 사용하고서도 좋은 결과를 산출하는 것으로 알려진 Latin hypercube 표본추출기법을 적용하였다. 예를 들어 Latin hypercube 기법에 의해 얻어진 1,000개의 표본을 적용한 해석결과 Random sampling에서 얻어진 5,000개의 표본을 적용한 해석결과에 상응한다고 보고되었다(Hoek 등, 1995). Latin hypercube 기법은 확률변수(random variable)가 동등한 확률간격으로 나뉘지며 각 간격에서 무작위 추출을 하는 층화 추출기법(stratified sampling)이다. Latin hypercube 표본추출기법에서는 입력변수 개수의 1.5배 이상 표본을 추출할 것을 추천하고 있다(Saltelli 등, 2000). 본 연구에서는 3개의 입력변수에 대해서 Latin hypercube 기법에 의해 총 1,000개의 표본을 추출하였다.

Random sampling과 Latin hypercube sampling으로 Random sampling은 입력변수들의 분포로부터 원하는 N차원 샘플(x1, x2, ..., xN)을 발생시키는 것으로 통계적인 관점에서 출력결과와 평균과 편차에 대해 불평형 추정값(unbiased estimate)을 제시하므로 유리한 점이 있다.

Latin hypercube sampling은 입력변수의 범위를 동일한 확률을 가진 N개의 간격으로 나누고 각 간격에서 입력변수의 값을 추출하는 것으로 출력결과가 입력변수들 가운데 단지 몇가지 요소들에 의해 지배될 때 매우 우수한 결과를 나타낸다. 또한 출력결과와 평균과 분포 함수를 추정하는데 있어 Random sampling보다 우수하고 편차가 더욱 작은 추정값을 얻을 수 있다(Hoek 등, 1995). 특히 출력함수가 입력변수들의 영향을 크게 받을수록 편차감소 폭이 더 커진다.

### 3.2.5 민감도 분석 지수

민감도 분석에는 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. PEAR지수는 입력변수  $x_{ij}$ , 출력변수  $y_i$ , 점  $(x_{ij}, y_i)$ 에서 계산된 Linear correlation coefficient라 할 수 있으며 입력변수  $x_j$ 와 출력변수  $y$ 사이의 상관관계  $\gamma_{x,y}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_j)(y_i - \bar{y})}{\left[ \sum_{i=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \right]^{1/2} \left[ \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (7)$$

$$\text{여기서 } \bar{y} = \sum_i \frac{y_i}{N}, \quad \bar{x}_j = \sum_i \frac{x_{ij}}{N}$$

$\gamma_{x,y}$ 는  $x_j$ 와  $y$ 사이의 선형적인 상관관계에 대한 척도이다. SPEA지수는 비선형적인 모델에 대해서는 상관관계에 대한 척도로서 선호된다. SPEA는 원래값 대신에  $y$ 와  $x_j$ 의 순위(rank)를 사용하여 계산된다(Conover, 1980). 그리고 기본적인 가정은  $x_{ij}$ 와  $y_i$ 는 각각의 분포로부터 랜덤하게 얻어진 sample이며 두 변수들에 대한 측정스케일은 적어도 서수(ordinal)이다. Regression analysis에 근거한 민감도 지수로 SRC가 있다. 선형 회귀모델에서 출력결과  $y$ 의 불확실성에 대한 각 입력변수  $x_j$ 의 중요도를 평가하기 위하여  $b_j$ 를 평가하며  $b_j$ 를 계산하는 가장 일반적인 방법은 최소자승법이다(Draper & Smith, 1981). 이 회귀 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{y - \bar{y}}{\hat{s}} = \sum_j \frac{b_j \hat{s}_j}{\hat{s}} \frac{x_j - \bar{x}_j}{\hat{s}_j} \quad (8)$$

식 (8)에서  $b_j \hat{s}_j / \hat{s}$ 를 SRC(Standard regression coefficient)라 한다.  $x_j$ 가 독립인 경우에 SRC는 각 입력변수의 변화로 인한 영향을 정량화하기 때문에 민감도분석의 지표로서 사용된다. 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 (9)).

$$\hat{Y} = b_o + \sum_{h \neq j} b_h x_h, \quad \hat{X}_j = c_o + \sum_{h \neq j} c_h x_h \quad (9)$$

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 상관계수로 정의된다(Helton, 1993). 따라서 PCC는 위의 두 변수들 사이의 선형관계에 대한 척도를 제시한다. 다르게 표현하면 PCC는  $x_j$ 와  $x_j(i \neq j)$ 들 사이의 상관관계로 인한 영향을 보정한 뒤  $Y$ 와 주어진 입력변수  $x_j$ 사이의 상관관계의 정도를 반영한다. SRC는 규정된 표준편차 범위에서 얻어진 입력변수들이 출력변수에 대한 영향에 대한 척도를 제시하기 때문에 PCC와 SRC는 서로 관련이 있지만 어느 변수의 중요도에 대한 동일한 척도는 아니다. 특히 SRC는 모든 입력변수들에 대해 민감하므로 입력변수들에 따른 output의 변동을 의미한다. 반면 PCC는 다른 변수들의 영향을 배제한 어느 변수의 중요도에 대한 척도이다.

#### 4. 분석 결과

##### 4.1 해석 대상 사면

사면 안정 해석은 그림 4와 같은 모델을 선정하여 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. 이는 수집된 현장조사 자료 중 III등급의 현상수가 가장 많으며 전체자료 분석 결과 가장 유사한 정규분포의 확률분포를 가지기 때문이다.

##### 4.2 해석 결과

본 연구에서는 총 2개의 지반물성과 사면경사가 사면 안정성에 미치는 중요도와 민감도를 정량적으로 분석

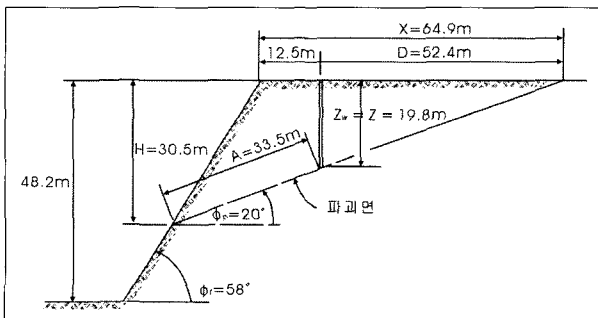


그림 4. 해석 모델 사면 모식도

하기 위하여 식 (6)의 안전율 식에서 얻어진 총 1,000가지 경우의 해석결과들(그림 5)에 대해 앞의 3.2절에서 설명한 PEAR, SPEA, PCC, PRCC, SRC 및 SRRC의 6가지 민감도지수를 계산하여 분석하였다. 이때 유의수준은 0.95로 하였다.

선형회귀모델에 근거한 SRC, PRCC 및 SRCC는 모든 경우에 가설이 기각되어 적용할 수 없는 것으로 나타났다. 역시 선형적인 상관관계에 근거한 PEAR과 SPEA도 몇 개의 변수를 제외하고는 대부분 가설이 기각되었다. 따라서 본 연구에서는 가설이 기각되지 않은 PCC를 척도로 분석하였다.

대상모델 사면을 대상으로 안정성 해석을 실시한 결과는 그림 5와 같다. 안전율을 대상으로 한 출력변수의 분포가 정규분포를 나타내는 것을 알 수 있다. 안전율 Fs(Safety factor)가 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. 특히 사면경사는 사면의 안전율과 음(-)의 관계를 가지며 PCC의 절대값이 1에 가깝게 나타나 사면경사는 사면의 안전율을 저해할 수 있는 매우 주요한 설계인자임을 알 수 있다. 반면 점착력은 사면의 안전율과 양(+)의 관계를 가지며 역시 PCC의 절대값에 1에 가깝게 나타났다. 이는 점착력이 사면의 안전율을 향상시킬 수 있는 주된 인자임을 보여준다. 반면 마찰각은 점착력과 마찬가지로 사면의 안전율과 양의 관계를 보이지만 PCC가 0.4이하로서 사면의 안전율에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

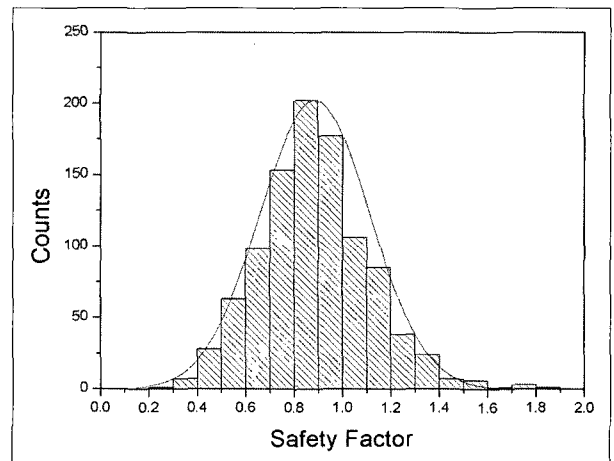


그림 5. 안전율에 관한 출력변수 분포도

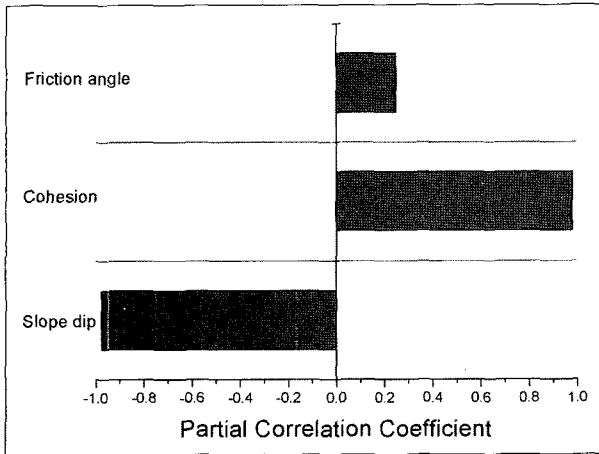


그림 6. 민감도 분석을 통한 PCC지수 분포

따라서 이와 같은 민감도 분석결과로부터, 지반물성인 점착력과 사면 설계변수인 사면경사가 사면의 안전율의 변화에 중요한 요인으로 작용한다는 것이 밝혀졌다.

이상의 결과는 사면의 안정성을 향상시키기 위한 주된 설계인자를 규명하고 민감도기법의 적용성 평가를 위한 기초 연구로서 얻어진 것이다. 특히 사면 안전율을 계산하는데 있어 식 (6)과 같은 일반적인 이론해를 적용하였으며, 민감도 해석대상도 지반물성 2가지와 사면설계변수 1개에 국한되어 있다. 따라서 보다 신뢰적인 사면 안전율 산정기법과 다양한 지반의 입력변수 및 사면 설계변수들에 대한 포괄적이고 체계적인 후속 연구가 필요할 것이다.

## 5. 결론

사면 안정해석시 사용되는 지반설계정수에 대하여 민감도 분석을 실시하였다. 사면의 설계에 사용되는 입력인자들을 선정하고 상호인자의 민감성에 대하여 검토하였다. 기초자료로는 일반국도변에 분포하는 사면을 대상으로 자료를 수집하였다. 이들 자료를 근거로 하여 확률분포를 설정하였으며 기 붕괴된 모델 사면을 대상으로 안정성 해석을 실시하였다. 기붕괴 사면을 대상으로 입력변수에 대한 민감도를 분석한 결과 안전율은 다소 낮은 것으로 나타났다. 안전율에 대한 검토시 현재 결정론적인 안전율을 사용하여 설계에 반영하고 있으나 확률론을 이용한 허용안전율의 평가도 검토하는 방안도 마련하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

민감도 분석에서 PCC 민감도 지수를 이용하여 분석한 결과 점착력, 사면경사, 내부마찰각순으로 민감성이 있는 것으로 해석되었다. 본 논문에서는 민감도 해석대상이 3가지로 국한되어 사용하였으나 향후 보다 신뢰적인 사면 안전율 산정기법과 다양한 지반의 입력변수 및 사면 설계변수들에 대한 포괄적이고 체계적인 후속 연구가 필요할 것으로 생각된다.

또한 경제성을 고려한 보강공법의 적정성에 대하여 추가적으로 연구가 수행되어야 할 것으로 본다. 제한된 입력 변수와 출력 변수에 대한 민감도 분석뿐 아니라 사면의 붕괴는 다양한 인자의 복합적인 활동으로 발생되기에 많은 인자의 선택을 통하여 출력변수와의 상관관계를 규명하는 것이 이후의 연구 방향이라 사료된다.

## 참고 문헌

1. 김진만 (2004), 지반성질 결정시 공간적 변동성과 조사오차의 중요성, *한국지반공학회*, Vol.1. No.1, pp.111-128.
2. 박혁진 (2005), "Q & A", *한국지반공학회*, Vol.21, No.4, pp.54-58.
3. 배규진 외 3인 (2003), "쑤크리트 라이닝의 거동해석에 영향을 미치는 입력변수들에 대한 민감도 분석", *대한토목학회*, 제 23권, 제 5C호, pp.345-356.
4. 윤길림 (2004), "확률 및 신뢰성 개념을 도입한 지반설계 사례연구", *한국지반공학회, 2004년 지반조사위원회 학술논문집*, 제 1권, 제 1호, pp.73-107.
5. 한국건설기술연구원 (2004), *2004 도로절토사면 유지관리시스템 개발 및 운용*, Vol.1, No.1, p.358.
6. Bieniawski (1973), Engineering classification of jointed rock mass, *Trans. South Afr. Ins. of Civil Eng.*, Vol.15, N12, pp.335-344.
7. Bieniawski, Z. T. (1989), *Engineering Rock Mass Classification*, John Willy & Sons.
8. Conover, W. J. (1980), *Practical Nonparametric Statistics*, 2nd ed., Wiley, New York.
9. Draper, N.R. and Smith, H. (1981), *Applied Regression Analysis*, 2nd edn. Wiley, New York.
10. Helton, J.C. (1993), *Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance assessment for radioactive waste disposal*. Reliab. Engng. Syst. Safety., Vol.42, pp.327-367.
11. 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.
12. Romana, R.M. (1993), "A Geomechanical classification for slopes: Slope mass rating", *Comprehensive rock engineering*, ed. Hudson, Pergamon Press, pp.575-600.
13. Saltelli, A., Cahn, K. and Scott, E. M. (2000), *Sensitivity analysis*, John Wiley and Sons Ltd., England.
14. Trueman, R. (1988), *An evaluation of strata support techniques in dual life gateroad*, Ph.D, Thesis, Univ. of Wales.

(접수일자 2005. 5. 31, 심사완료일 2005. 7. 5)