

깎기비탈면 안정성의 통계적 예측기법

Statistical Estimate Technique of Cut Slope Stability

이문세¹⁾, Moon-Se Lee, 신창건²⁾, Chang-Gun Shin, 전국재¹⁾, Kuk-Jae Jeon 이승우¹⁾, Seung-Woo Lee

¹⁾ 한국시설안전공단 기술개발팀 연구원, Researcher, Technical Development Team,
Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation

²⁾ 한국시설안전공단 기술개발팀 차장, Vice Director, Technical Development Team,
Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation

SYNOPSIS : The collapse of cut slope near national roads in Korea mostly occurs in every summer when typhoon or localized heavy rain comes. Such collapse brings about a loss of many lives and property and recently the damage is on rapidly increasing trend. Therefore, we may reduce the loss of many lives and property in great deals if we can predict and prepare for the collapse of cut slope. However, it is not easy to predict collapse because there are many factors causing collapse in combination and all they have different levels of contribution. Therefore, this study completed prediction formula by using a statistic technique for quantitative analysis on the interaction of those factors so as to predict the stability of slopes. Consequently, it is judged that effective slope management will be possible by selecting dangerous slopes quantitatively among cut slopes near national roads and by preparing for the collapse in advance.

Key words : cut slope, national roads, statistic technique, quantitative analysis

1. 서론

우리나라의 국도주변 깎기비탈면 붕괴는 매년 여름철의 태풍 및 집중호우가 발생하는 시기에 주로 일어난다. 이러한 붕괴는 많은 인명과 재산손실을 초래하게 되는데 최근 들어 그 피해가 더욱 급격하게 증가되는 추세에 있다. 따라서 깎기비탈면 붕괴를 사전에 예측하고 이에 대비할 수 있다면 인명과 재산손실을 크게 줄일 수 있을 것이다. 그러나 붕괴를 예측하는 것은 결코 쉽지 않은데, 그 이유는 붕괴를 일으키는 인자들이 여러 가지가 있으며 그 인자들이 붕괴를 야기하는데 복합적으로 작용할 뿐만 아니라 기여도가 서로 다르기 때문이다. 따라서 비탈면 안정성을 예측하기 위해 인자들의 상호 작용 및 기여도를 정량적으로 분석할 수 있는 통계적 기법을 이용하여 예측식을 완성하였다. 이를 통해 국도주변 깎기비탈면 중 위험사면을 정량적으로 선별하고 붕괴에 대한 사전 대비를 수행함으로써 효과적인 비탈면관리가 가능할 것으로 판단된다.

2. 연구방법

비탈면의 안정성 및 붕괴를 예측하기 위해서는 정성적인 방법 보다는 정량적이 방법이 계속해서 발전

해 왔는데 각종 이론을 통한 안전율 계산 방식이 주류를 이루었다, 그러나 최근에는 컴퓨터, 인공지능, 통계 등의 기초 및 응용 과학기술이 발전함에 따라 이를 이용한 연구 및 활용이 점점 증가 하고 있다.

그 예로 인공지능망의 경우 인간의 뇌에 거미줄처럼 얽혀 있는 신경망 구조를 모델링 하여 주어진 입력에 대해 원하는 출력결과를 학습시키는 오류 역전파 신경망(back propagation neural network)을 이용하여 산사태를 대상으로 발생요인의 가중치를 결정하는 류주형 외 (2002), 산사태의 취약성을 분석하기 위한 이사로 외 (2005), 지형, 지질 및 지반공학 특성을 고려하여 인공지능망 모델을 적용한 프로그램 개발의 홍원표 외 (2004) 등 많은 연구가 진행되고 있으며, 종속변수와 독립변수의 관계를 설명하는 통계 기법의 경우 토질물성과 지형, 지질자료를 대상으로 통계분석을 실시하여 암종, USCS, 공극률, 건조밀도, 투수계수, 해발고도, 사면경사 등 7개의 인자를 이용한 예측 모형을 제시한 조용찬 외 (2007), 지질, 사면경사, 사면방향, 해발고도, 식생, 수계와의 거리 등의 홍콩 란타우섬에 발생한 산사태를 대상으로 분석한 Dai et. al. (2001) 등 국내외에서 폭넓은 연구가 진행되고 있다.

이에 본 연구는 우리나라 산사태 및 국도 비탈면의 특성을 고려하여 위험요소를 정량적으로 선별하고 이를 쉽게 모델화 할 수 있는 통계적 기법을 이용하여 연구를 수행 하였다. 또한 통계적 기법 중 여러 가지 지반 특성이 비탈면 안정성에 영향을 끼치는 정도를 정량적으로 판단할 수 있는 단순회귀분석을 통해 기여도를 분석 후 유의인자를 선별하였으며, 비탈면 붕괴 발생여부를 알고 싶은 ‘종속변수’로 적용하고 이에 대해 영향을 미치는 유의인자를 ‘독립변수’로 적용하여 이 두 가지 변수 사이의 관련성을 확률로 표현하는 로지스틱회귀분석을 이용하여 비탈면 붕괴 확률을 구하는 예측모델식을 완성 하고자 한다(그림 1).

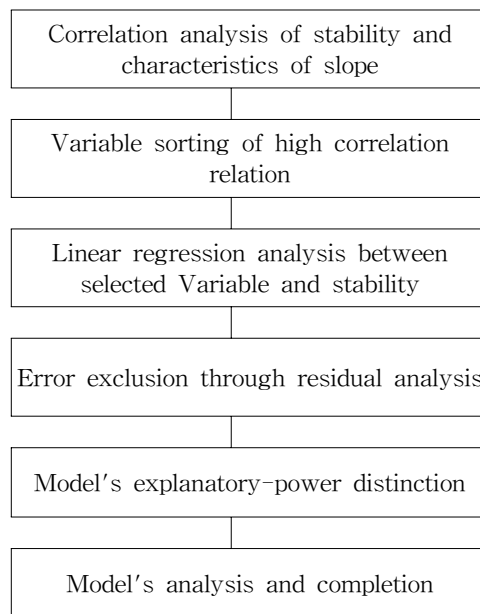


그림 1. 통계적 기법을 이용한 연구방법

따라서, 이를 위한 연구지역으로 국내 국도에 인접하여 직접적인 영향을 끼칠 수 있는 깎기비탈면 중 조사가 용이하고 동일한 비탈면 종류인 암반으로 구성되어 있으며 낙석 및 산사태가 발생되어 비탈면안정성과 관련한 지반특성을 분석할 가치가 충분한 점 등을 고려하여 선정 조사하였다.

또한 통계적인 기법을 적용하기 위해서는 붕괴가 발생한 비탈면과 발생하지 않은 비탈면의 특성을 비교하여야 하는데 이를 위해 총 89개소의 비탈면을 선정 하였으며, 54개소는 붕괴 발생 비탈면을 대상으로 조사 하였고, 35개소는 붕괴가 발생하지 않은 비탈면을 조사 하였다.

조사방법은 현장조사를 통하여 비탈면의 위치, 위경도, 차선, 조사일자 등의 일반현황과 길이, 높이, 경사, 상부경사, 이격거리, 소단분포, 종류, 주변지형, 지하수, 누수위치, 풍화도, 불연속면방향성, 측면형상, 계곡부, 붕괴이력, 뜬돌 및 낙석 분포, 암종, 토층심도, 암반형태, 불연속면 종류, 시공 등의 특이사항 및

위험도, 피해도, 붕괴유형, 위험구간 등의 조사자 소견으로 구성되며 내용의 일관성 및 객관성을 확보하였고, 슈미트해머 등을 통해 RMR, SMR 및 전단강도특성을 분석 하였다.(그림 2).

총주국도	5 호선	06DC05U07500	단양군 단양읍 삼곡리		
일반현황	거리표	(영주 → 단양)방향 (2)km (800)m (상)행			
	위경도	N(36)°(57)'(16.1)" E(128)°(20)'(16.4)"			
	좌선	왕복 (2)차선 + ()			
	조사일자	2006 년 11 월 7 일			
	조사자	김진환	조사기관	KICT	
절토사면 특성	길이	150 m	최대높이	20 m	
	경사	60° (1:0.6)	상부경사	34°	
	이격거리	평균 1.5 m	소단	0 개소	
	종류	■안반 □포함 ■토사 □지면	주변지형	□산악 ■주산악 □구릉 □평지	
	지습수	□C, dry □damp □wet □dripping □flowing	누수위치	□상 □중 ■하 □와 ■중 □우	
	풍화도	□F □S □M ■1 □C □R	불연속면 방향성	■일치 □평행 □수직 □수평	
	사면형상	■직선형 □곡형 □8 형 □곡형	측면형상	□직선형 ■삼각형 □불규칙 □불규칙	
	계곡부	0 개소	붕괴이력	□유(영향) ■낙석 □유(미영향) □무	
	튼튼	□미 ■중 □소 □무	낙석	□미 ■중 □소 □무	
	발중	석회암	도층심도	0.5 m	
	암반형태	□massive □tabular □columnar □irregular □blocky □crushed	불연속면	■절리 □절리 □단층 □균열 □단층 □정단대 □암맥 □무	
	사공면류 (상대)	■갈석방지암(영호) ■남석방지암(단편)(영호) □개비() □음반(영호) □정암() □기타() □도수로()			
	조사자 소견	위험도	■상 □중 □하	피해도	■상 □중 □하
붕괴 유형		□심층 ■표층 □무	위험등급	□A □B □C □D □E	
위험구간 (붕괴유형)		■상 □중 □하 / □상 □중 □하 □상 □중 □하 / □상 □중 □하		{ 낙석 } { }	
필요 주공법			조치	□응급 □비응급	
기타					

그림 2. 깎기비탈면 특성 조사 양식

3. 연구대상 비탈면의 특성

통계적 기법을 통해 비탈면 붕괴 확률을 산정하는 예측모델식을 구하기 위해 총 89개소의 비탈면에 대한 조사를 수행 하였으며 이에 대한 일반적인 분석을 실시하였다.

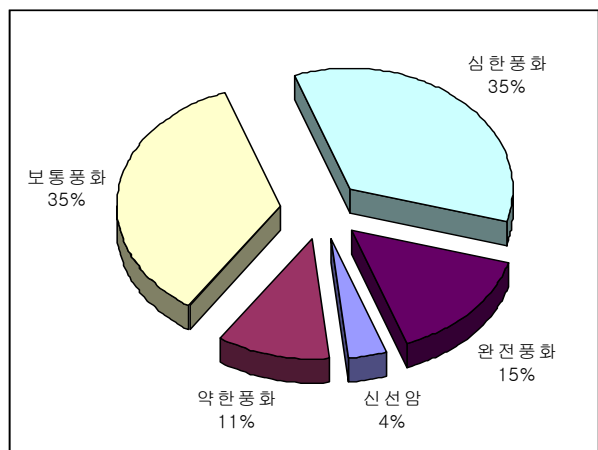


그림 3. 연구대상 깎기비탈면의 풍화정도

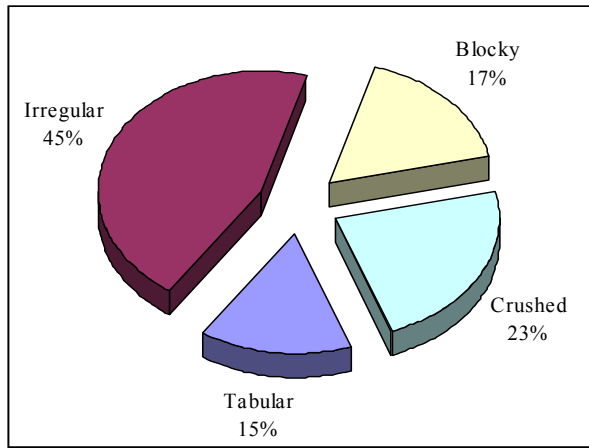


그림 4. 연구대상 깎기비탈면의 암반형태

비탈면의 풍화 정도는 그림 3에서와 같이 심한풍화~완전풍화 상태의 비탈면이 50% 이상을 나타내었고, 그림 4의 암반형태에 대해서는 불리한 절리 조합에 의한 Irregular형태의 비탈면이 45%정도로 분석되었다.

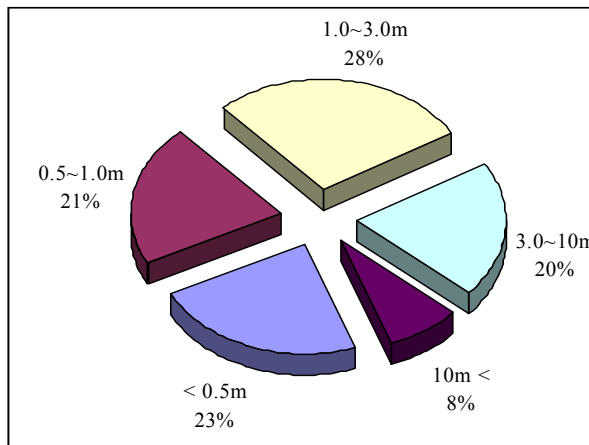


그림 5. 연구대상 깎기비탈면의 토층심도

토층심도의 경우 비탈면 표면으로 우수가 흐를 경우에 토층과 암반사이에 간극수압을 발생시켜 붕괴 요인으로 작용하는 요인인데 3.0m 이하가 72%로 대부분에 달했다(그림 5).

깎기비탈면 상부의 자연비탈면경사의 경우 아래 그림 6에서와 같이 30°이상인 비율이 24% 정도였다.

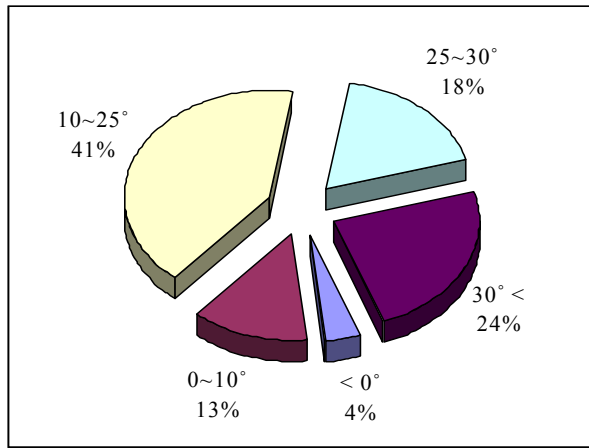


그림 6. 연구대상 깎기비탈면의 상부자연비탈면경사

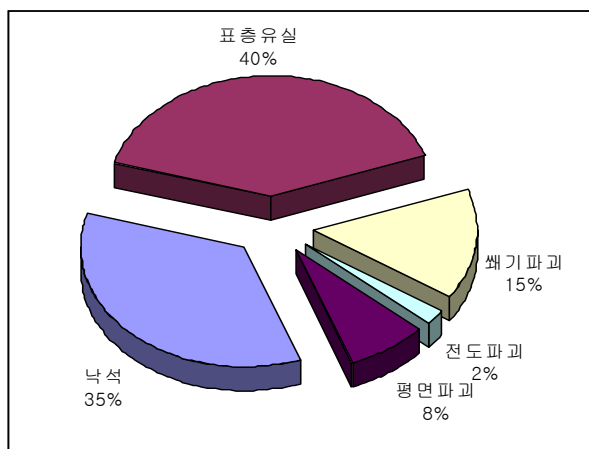


그림 7. 연구대상 깎기비탈면의 붕괴유형

붕괴 유형에 대한 자료 분석 결과, 그림 7에서와 같이 낙석, 표층유실 등의 비탈면 표면부에서 발생한 붕괴가 75%로서 대다수를 차지 했는데, 이는 연구대상 비탈면의 경우 표면 붕괴가 대부분임을 알 수 있다.

4. 통계적기법에 의한 깎기비탈면의 안정성 예측

이 연구의 주 목적은 조사 및 시험을 통해 깎기비탈면의 특성을 구하고 이를 통계적인 비탈면 안정성 예측 모델식에 대입하여 간단하게 붕괴 가능성을 예측할 수 있도록 함이다. 모델의 과정은 일차적으로 통계 프로그램인 SPSS를 이용하여 조사 및 시험에서 구한 비탈면 특성치와 붕괴여부에 대한 상관성을 분석한 후 상관성이 높은 인자를 선정하게 된다. 그리고 선정된 유의인자와 붕괴여부 사이의 관계를 로지스틱회귀분석을 통해 가중치 즉, 계수 및 상수를 구함으로써 확률론적인 비탈면 안정성 예측 모델을 완성한다.

4.1 단순회귀분석에 의한 상관성분석

조사 및 시험을 통해 얻은 각종 데이터 중 비탈면 특성 인자들과 붕괴여부와 상관성을 분석하여 붕괴 가능성에 유의한 인자를 선별하기 위해 Pearson 상관계수를 이용하여 서로간의 상관관계를 분석하고 그림 8과 같은 상관행렬그래프(matrix plot)를 얻었다. 상관행렬그래프는 각각의 인자 간 상관성을 점으

로 표시한 선점도의 행렬형태 집합체로서 대각선을 중심으로 위아래의 그래프는 동일하다. 그리고 선형성이 높은 것이 상관성 또한 높음을 의미하는데, 몇몇 인자들의 선점도 모양이 직선의 형태를 보이는데, 이는 통계적 기본 원리에 의해 본 연구 대상의 비탈면 인자들이 붕괴여부에 상관성이 있으며 단순 회귀분석에 의한 유의인자의 선별이 가능함을 의미한다.

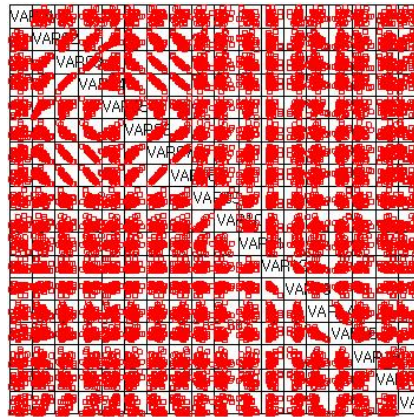


그림 8. 상관성분석을 통한 상관행렬그래프

이에 따라, 붕괴여부에 상관성이 높은 유의인자를 선별하기 위한 단순회귀분석결과, 표 1 및 2의 결과를 얻었다. 표 1은 인자들을 통계프로그램에 적용 시 범위를 갖는 범주형 변수들에 대한 결과로서 정성적인 문자변수가 단계적 의미를 같은 경우에 이용되는 방법으로서 본 연구에서는 수리조건과 풍화정도에 적용하여 분석하였다.

표 1. 범주형 인자의 기초통계량

Variable		Frequency
수리조건	Wet	120, (63.16)
	Dry	66, (34.74)
	Damp	180 (74.11)
풍화도	완전풍화	12 (0.79)
	심한풍화	74 (8.73)
	보통풍화	89 (9.17)
	약한풍화	102 (11.76)
	신선암	6 (0.76)

표 2. 연속형 인자의 기초통계량

Variable	Frequency (N)	Mean	Standard deviation	Min. Value	Max. Value
상부경사	186	325.091	121.919	70.00	655.00
방향	157	186.636	105.970	1.00	350.00
깎기비탈면경사	185	30.621	8.561	7.59	48.00
연장	92	2.665	0.044	2.56	2.76
높이	92	18.313	4.895	8.72	33.47
계곡선형	89	1.073	0.311	0.71	3.21
RMR	123	77.178	7.465	53.10	94.98
SMR	89	47.891	13.685	21.15	89.88
전단저항각	89	1.557	0.151	1.29	1.87
점착력	89	1.827	0.091	1.64	2.09
절리방향	123	1.333	0.117	1.03	1.58

표 2는 인자들이 숫자 형태로서 일반적으로 연속형 변수들에 대한 결과로 정량적인 분석이 용이하다. 본 연구에서 조사된 여러 인자들 중에 붕괴여부와 직·간접적 관련성이 높고 통계프로그램에 적용이 쉬운 11개 인자에 한하여 연속형 변수로 적용 분석하였다.

마지막으로 상관분석 및 단순회귀분석 등을 통해 얻은 기초통계량을 이용하여 붕괴여부에 주요한 변수인 유의인자를 선별하기 위해 T-검정을 실시하였으며, 범주형 및 연속형 변수 13개 중에 유의수준 5%이하의 변수로 깎기비탈면경사, 계곡선형, RMR, SMR, 점착력의 5가지가 유의인자로 선별되었고, 그 결과는 표 3과 같다.

표 3. T-검정 결과(유의수준 5%)

유의인자	Effective variables
깎기비탈면경사	<.0001
계곡선형	0.0029
RMR	0.0089
SMR	0.0152
점착력	0.0145

따라서, 깎기비탈면경사, 계곡선형, RMR, SMR, 점착력이 붕괴여부에 가장 유의한 인자임을 알 수 있으며, 이를 토대로 로지스틱회귀분석 방법을 적용하면 붕괴여부를 확률론적으로 계산하는 예측 모델을 만들 수 있을 것이다.

4.2 로지스틱회귀분석에 의한 예측 모델

4.1의 상관분석, 회귀분석, T-검정으로부터 상위 상관관계의 유의한 변수로 독립변수인 깎기비탈면경사, 계곡선형, RMR, SMR, 점착력과 종속변수인 붕괴여부와와의 관계식을 얻기 위해 로지스틱회귀분석을 적용하였으며 그 결과는 다음과 같다(표 4).

표 4. 로지스틱회귀분석 결과

Parameter	DF	Estimate	Standard Error	Wald Chi-square	Pr > Chi-square
깎기비탈면경사	1	0.929	0.0455	21.87	<.0001
계곡선형	1	0.7890	3.0486	0.06	0.8009
점착력	1	-1.271	0.0360	2.08	0.1491
SMR	1	-0.1779	0.4170	0.18	0.6699
RMR	1	-0.0555	0.0517	1.15	0.2832

표 4의 결과 중 각 인자들의 Estimate값이 독립변수(각 인자)와 종속변수(붕괴여부)와의 상관계수로서 붕괴를 예측하는 1차원 모델식의 기울기 즉, 계수를 의미한다. 따라서 이를 이용하여 식을 구성하면 다음의 식 (1)과 같다.

$$\text{로지스틱회귀모형(Q)} = [0.929 \times \text{깎기비탈면경사}] + [0.789 \times \text{계곡선형}] + [-1.271 \times \text{점착력}] + [-0.1779 \times \text{SMR}] + [-0.0555 \times \text{SMR}] \quad (1)$$

그러나 식 (1)은 로지스틱회귀분석에 의해 얻어진 1차적인 결과물로서 붕괴여부를 확률론적으로 표현하기 위해서는 변환식이 필요한데 통계의 로지스틱회귀모형의 기본 이론에 의해 expodist를 적용한 식을 이용하면 쉽게 확률형태로 변환이 가능하며 그 식은 다음과 같다.

$$\text{깎기비탈면 붕괴가능성 예측모델(P)} = [\text{EXP(Q)}] / [1+\text{EXP(Q)}] \quad (2)$$

따라서 식 (1)에 조사 및 시험을 통해 얻은 비탈면 특성 중 깎기비탈면경사, 계곡선형, RMR, SMR, 점착력 값을 대입하면 로지스틱회귀모형값(Q)을 구할 수 있고 이를 다시 식 (2)에 대입하면 붕괴가능성이 정략적인 확률로 표시된다.

5. 깎기비탈면 붕괴가능성 예측 모델식 검증

통계적 기법에 의해 깎기비탈면의 붕괴가능성을 확률론적으로 예측 할 수 있는 모델식을 완성 하였다. 그러나 이 식에 대한 검증이 필요한데, 통계이론에서 일반적으로 이용하는 정오분류에 따른 검증 방식을 적용하여 검증하고자 한다(표 5).

표 5. 추정된 회귀모형의 정오분류표(붕괴 발생분류 기준값 70% 이상의 경우)

Inference result Observed value	Occured (Target=1)	Not occurred (Target=0)	Total
Occured (Target=1)	47	5	52
Not occurred (Target=0)	7	30	37
Total	54	35	89

※정분류율 = (제대로 분류한 경우) / (전체경우) = (47+30) / 89 = 0.865

위의 모형의 성능은 86.5%에 해당 (오분류율은 13.5%)

※민감도(sensitivity) : Target=1인 경우를 분류한 확률 = 47/52 = 0.90

※특이도(specificity) : Target=0인 경우를 분류한 확률 = 30/37 = 0.81

정분류율, 민감도, 특이도 등은 실제 붕괴가 일어난 비탈면과 모델식에 의해서도 붕괴가 일어날 것으로 예상되는 비탈면을 비교하여 올바르게 분석된 경우의 수를 확률로 표시하는 방법으로 세 가지 모두 80~90% 정도의 우수한 성능을 보였다. 이러한 결과로 볼 때, 이 연구에서 제안된 예측모델은 연구지역과 같은 조건일 경우 붕괴가능성을 예측하기 위한 모델로서 적합한 것으로 평가된다.

6. 결 론

본 연구는 비탈면의 붕괴 여부를 몇 가지 비탈면 특성만으로 쉽게 예측할 수 있도록 로지스틱회귀분석을 이용하여 깎기비탈면 붕괴가능성 예측모델을 개발하였다. 그리고 개발된 모델과 실제 결과를 비교 분석하여 모델의 적합성을 검증하였다. 모델의 개발을 위해 총 89개소의 비탈면에서 조사 및 분석을 실시하였으며, 그 결과 연구지역과 유사한 조건인 경우 이 연구에서 개발된 모델을 이용하여 깎기비탈면의 붕괴가능성을 예측할 수 있는 것으로 평가되었고, 연구결과는 다음과 같이 요약된다.

- 1) 연구대상 비탈면의 풍화 정도는 심한풍화~완전풍화 상태의 비탈면이 50% 이상, 암반형태에 대해

서는 Irregular형태의 비탈면이 45%정도, 토층심도의 3.0m 이하가 72%로 대부분에 달했다, 깎기비탈면 상부의 자연비탈면경사의 경우 30°이상인 비율이 24% 정도, 붕괴 유형은 낙석, 표층유실 등의 비탈면 표면부에서 발생한 붕괴가 75%로서 대다수를 차지한다.

2) 상관성분석을 통해 여러 인자들과 비탈면붕괴여부의 상관관계를 분석한 결과 깎기비탈면경사, 계곡선형, RMR, SMR, 점착력이 붕괴여부에 유의한 영향인자인 것으로 평가됨으로써 이들 인자는 비탈면 붕괴 분석 시 고려되어야 할 요소임을 알 수 있다.

3) 실제 붕괴가 일어난 비탈면이 모델식에 의해서도 붕괴확률이 높게 분석되었으며 정분류율, 민감도, 특이도 등이 모두 80~90% 정도로서 제안된 모델식이 우수한 성능을 보였다.

4) 이 연구에서 개발된 깎기비탈면 붕괴가능성 예측모델에 의한 붕괴확률이 실제 붕괴여부와 매우 유사한 결과를 보임으로써 그 적합성이 검증되었다. 따라서 이 모델은 연구지역과 같은 조건에서 간접적인 방법으로 붕괴여부를 예측할 경우 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 류주형, 이사로, 원중선(2002), “인공신경 망을 이용한 산사태 발생요인의 가중치 결정”, 대한자원환경지질학회.
2. 이사로, 류주형, 민경덕, 원중선(2005), “인공신경망을 이용한 산사태 취약성 분석”, 대한자원환경지질학회, pp.333-340.
3. 조용찬, 채병곤, 김원영(2007), “화강암지역 산사태 예측모델을 이용한 강릉지역의 산사태 예측도 작성”, 대한자원환경지질학회.
4. 홍원표, 김원영, 송영석, 임석규(2004), “인공신경망모델을 이용한 산사태 예측”, 한국지반공학회.
5. Dai F C, Lee C F, Li J and Xu Z W(2001), “Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island Hong Kong” Environmental Geology, 40, 381 - 391.