

사면파괴 가능성 지수를 이용한 절취사면 위험도 분석

장현식¹ · 오찬성² · 장보안^{1*}

¹강원대학교 지구물리학과, ²서울대학교 지구환경과학부

Risk Analysis for Cut Slope using Probabilistic Index of Landslide

Hyun Shic Jang¹, Chan Sung Oh², and Bo An Jang^{1*}

¹Department of Geophysics, Kangwon National University, ²SEES, Seoul National University

사면붕괴는 사면에서 풍화물질, 암석, 토석류 등이 중력 방향으로 이동하는 일련의 거동으로 정의되며 여러 요인의 복합적인 작용으로 발생한다. 사면붕괴는 주요한 자연 재해 중의 하나로 매년 직접, 혹은 간접적으로 사회적, 경제적으로 많은 인명, 재산 피해를 유발시킨다. 따라서 이러한 사면재해의 위험을 효과적으로 감소시키기 위해서는 사면의 상태를 평가할 수 있는 적절한 평가 기준이 필요하며, 이를 기반으로 피해 사례를 통한 피해 금액 산출과 투자 우선순위를 결정하여 종합적인 사면에 대한 평가법과 관리체계 개발이 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서는 사면 안정성 평가를 위하여 적절한 기준을 제시하고자 위험도 분석 방법을 개발하여 새로운 사면 안정성 평가 기법을 제안하고자 한다. 본 연구에서 시행된 위험도 분석에는 비교적 안전한 사면 10개, 위험한 사면 10개, 붕괴된 사면 10개 등 총 30개의 국도변 도로 절취사면조사 자료가 사용되었다. 위험도 분석은 사면파괴위험성 분석과 피해도 분석으로 이루어져 있으며, 위험도 분석결과 위험도 점수는 안전한 사면, 위험한 사면, 붕괴사면 순으로 점수가 높았으며, 각 그룹별로 서로 점수 분포가 구별되었다. 이러한 결과를 통해 볼 때 본 연구에서 제안된 위험도 분석기법은 기존의 분석기법에 비해 사면의 상태와 안정성을 종합적으로 평가할 수 있고 사면의 위험도를 보다 정확하게 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 사면붕괴, 사면파괴위험성 분석, 피해도 분석, 위험도 분석

Landslides which is one of the major natural hazard is defined as a mass movement of weathered material, rock and debris due to gravity and can be triggered by complex mechanism. It causes enormous property damages and losses of human life directly and indirectly. In order to mitigate landslide risk effectively, a new method is required to develop for better understanding of landslide risk based on the damaged cost produce, investment priority data, etc. In this study, we suggest a new evaluation method for slope stability using risk analysis. 30 slopes including 10 stable slopes, 10 slopes of possible failure and 10 failed slopes along the national and local roads are examined. Risk analysis comprises the hazard analysis and the consequence analysis. Risk scores evaluated by risk analysis show very clear boundaries for each category and are the highest for the failed slopes and the lowest for the stable slopes. The evaluation method for slope stability suggested by this research may define the condition and stability of slope more clearly than other methods suggested by others.

Key words : landslide, hazard analysis, consequence analysis, risk analysis

서 론

사면붕괴는 암괴(또는 토괴) 이동(mass movement)으로 사면에서 풍화물질, 암석, 토석류 등이 중력 방향으로 이동하는 일련의 거동으로 정의된다(Varnes, 1984).

이는 주요한 자연 재해 중의 하나로 매년 직접, 혹은 간접적으로 사회적, 경제적으로 많은 인명, 재산 피해를 유발하고 계속적으로 증가 추세에 있으며(국립방재연구소, 2001), 이러한 경향은 산사태 위험이 있는 지역에 도시화와 개발의 증가, 지속적인 산림개간, 국지적인 강

*Corresponding author: bajang@kangwon.ac.kr

우량의 증가 등이 원인인 것으로 알려져 있다(Schuster, 1996).

이러한 사면 붕괴로 인한 피해를 줄이기 위해서는 효율적인 계획과 관리가 필요하다. 국내의 여러 연구자들은 각자 다른 다양한 방법론과 이론에 기초하여 사면안정화에 대한 새로운 상태 평가를 제시하고 있으며 최근에는 사면안정화 평가에 새로운 접근이 시도되고 있다. 윤운상(2003)은 기존의 평가법을 분석하여 사면의 지반 조건에 따라 파괴에 미치는 영향도를 파괴지수(SFI)로 결정하는 평가 시스템을 제안하였고, 홍원표 등(2004)은 결정학적 접근 방법(deterministic approach)인 ranking법이 아닌 확률론적(probability)인 접근을 위하여 비선형 문제를 해결하는데 사용되는 인공지능(AI: Artificial Intelligence)을 도입하여 전자, 제어, 토목, 사회현상 등의 여러 분야에 이용되는 신경망 이론을 산사태 발생 가능성 평가에 적용하고 있다. 또한 김상규 등(2000), 기원서 등(2001)은 전문가의 정성적인 판단과 불확실성을 고려할 수 있는 퍼지추론(Fuzzy Reasoning)을 이용하여 사면의 위험도를 평가하는 기법을 제안하고 있다. 이러한 평가 방법들은 각 세부 요인들에 상관관계를 고려하여 각각의 인자에 대해 점수를 부여하여 이들 점수들의 합으로서 사면안정을 평가하고 있으나 그 상관관계 자체가 지극히 경험적인 방법에 의해 점수 편차를 주는 것이므로 조사자에 따라 다른 결과를 야기시킬 수 있는 문제점을 내포하고 있다.

본 연구에서는 1999년부터 2003년까지 국도와 지방도를 중심으로 조사된 사면 현장 보고서를 활용하여 사면을 안전군, 위험군, 붕괴군으로 나눈 후, 각 군에 해당하는 조사 인자들을 파괴위험(hazard) 자료와 피해(consequence) 자료로 구분하여 정리하였다. 또한 구분된 자료는 일련의 파괴위험 분석(hazard analysis)과 피해도 분석(consequence analysis)을 통하여 각각의 군에 대한 사면 파괴 가능성 지수와 피해점수를 산출하고 이를 이용하여 사면의 안정성을 종합적으로 평가할 수 있는 새로운 위험도 분석(risk analysis)법을 제안하고자 한다.

위험도의 개념

국내외의 초기 사면 안정에 대한 연구는 진단용력과 진단강도의 계산에 의한 안전을 산출이 지배적이었다. 단순히 안전율의 계산에 의한 안정성 평가는 사면 자체적인 즉, 내적인 면을 고려할 수 있을지는 모르나 사면이 미치는 주변, 외적인 인자들은 고려하지 못하는 문제

점이 있다. 이에 따라 사면 안정성 평가의 새로운 방법과 대안들이 제시되어 왔으며 본 논문에서 제안하고 있는 위험도 분석(risk analysis)은 이 중에서 최근 가장 활발히 진행되고 있는 사면 안정성을 평가하는 방법 중 하나이다.

본 연구에서는 IUGS(1997)에서 제안한 'risk assessment basic terms for landslides'의 정의를 바탕으로 상태 평가를 하고자 하였다. 일반적으로 위험도 분석은 크게 파괴위험도 분석(hazard analysis)과 피해도 분석(consequence analysis)으로 구분된다. 파괴위험도 분석은 단일사면이라든지 여러 사면의 형성 과정과 지형, 지질, 수리, 파괴 메커니즘, 그리고 기후, 식생에 대한 조사로 파괴면의 전단강도, 간극수압 등의 물리적인 특성을 파악하고 산사태 발생 시 사태물질의 이동 거리, 이동경로, 이동 속도 등을 예상하여 사면 파괴 모델 분류(Varnes, 1984; Cruden and Varnes, 1996)와 가능한 초기 파괴 시작 지점 및 사면 특성을 파악하는 것이다. 피해도 분석은 산사태 발생 시 위험 범위, 즉 영향 반경 내에 노출된 인명, 재산 피해를 나타내는 것으로 정성적인 분석과 정량적인 분석이 있다. 정성적 분석은 피해 정도를 점수 시스템, 흐름 차트, 수치적 분류, 위험도 매트릭스 등의 방법을 통하여 등급을 나누는 방식이며, 정량적 분석은 평가항목의 배점을 합산하는 것과 같이 오직 수치인 값으로 위험도를 평가하는 방식으로 비용(cost)획득이 중심이 된다(Fell et al., 2005). 두 방식은 약간의 차이는 있으나 정성적인 분석이 대다수의 사면에서 가장 일반적인 형태로 적용되고 있다(Wong, 2005). 피해도 분석을 위해서 수행되는 중요한 평가 요소로서 손실 정도(vulnerability)가 있다. 이는 산사태 위험 지역에 노출된 인명, 재산 피해를 0(손실 없음)과 1(최대 손실) 사이의 값으로 나타내는 것으로 일반적으로 붕괴물질특성(runout distance), 산사태의 규모와 이동속도, 위험에 노출된 인자(element at risk)의 성격과 위험 사면 근접 정도에 영향을 받는다(Finlay, 1996). 손실정도에 대한 평가는 상세한 과거 이력에 대한 통계가 필요하므로 Finlay(1996)가 제안한 평가보다 유동적이고 항목별 평가 범위를 더욱 세분화한 Leone et al.(1996)의 통계적 붕괴 이력을 활용한 손실정도 분석법(vulnerability matrix method)이 활용도가 높다(Dai et al. 2002).

파괴위험도 분석

사면 위험도 분석의 첫 번째 단계는 파괴위험도 분석

이며 분석과정은 Fig. 1과 같다. 파괴위험도 분석에서는 먼저 사면을 기원에 따라 자연사면과 인공사면으로 분류하고 토층심도율을 이용하여 토사사면, 혼합사면, 인공사면으로 분류하였다. 이때 자연사면의 경우는 3가지의 사면으로 세분한 후 붕괴유발 요인(트리거 요소)인 강수량과 지진요소로만 파괴위험도 평가를 수행하였다. 반면 인공사면의 경우는 사면 분류 후, 붕괴유발 요인, 사면특성, 지질특성, 붕괴물질 특성 등 다양한 요소를 이용해 평가를 수행하였다. 사면 특성 분석은 사면 경사와 지반 강도 항목과 총 위험점수에 추가적인 배점으로 적용한 붕괴 징후와 보수, 보강상태를 통하여 종합적인 평가를 가능하게 하였다. 지질 특성은 구성물질, 지질구조, 식생에 따른 평가이며, 붕괴물질 특성은 붕괴물질의 이동거리와 속도를 평가하여 전체적인 위험 분석을 수행하였다. 본 연구에서 적용된 각 평가 요소별 평가 항목

및 배점들은 제안한 평가 기법을 통해 계산된 점수가 각 군별(안전군, 위험군, 붕괴군) 구분이 가장 명확하게 구분될 때까지 반복적인 작업을 수행하여 산출된 것이며 반복, 재 반복의 방법을 선택하여 최종적으로 선택된 점수이다.

사면의 분류

사면은 일반적으로 구성물질의 종류에 따라 흙으로 이루어진 토사사면, 암반으로 이루어진 암반사면, 흙과 암반이 함께 혼재되어 있는 혼합사면으로 분류할 수 있다. 윤운상(2003)은 식(1)과 같이 토층 심도와 사면 높이의 비로 정의되는 토층심도율(SR)을 활용하여 사면분류 방법을 제안하였으며, 토층심도율(SR)을 기준으로 SR > 0.4인 경우 토상지반, 0.2 < SR ≤ 0.4인 경우 혼합지반, SR ≤ 0.2인 경우 암반으로 구분하였다. 본 연구에서도 토층심도율을 이용하여 사면을 분류하였다.

$$SR = \frac{\text{soil depth}}{\text{Slope height}} \quad (1)$$

붕괴유발 요인

사면붕괴의 원인으로 작용하는 붕괴유발 요인(trigger factor)으로는 대표적으로 강우와 지진을 들 수 있다. 강우 시 사면 내에는 함수비의 증가로 인한 단위중량 증가와 침투수에 의한 간극수압의 상승, 표면유수에 의한 침식, 지하수위면의 상승 등이 발생된다(김홍택 외, 2001). 현재 강우가 사면 붕괴에 끼치는 영향에 대해 크게 역학적 해석(조성은과 이승래, 2000; 김준모, 2002; 신희순 외, 2003)과 통계적 분석을 통한 강우의 크기 및 영향정도를 정립(Dai et al., 2002; 김영목과 정석완, 2000; 김재홍 외, 2002; 구호본 외, 2003; 이수근 외, 2003)하는 2가지 방향으로 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 강우 강도와 사면 붕괴의 상관관계를 정립하기 위하여 통계적 방법을 활용하고, 지금까지 수행되어 왔던 논문들을 분석하여 종합적인 산사태와 강우량의 상

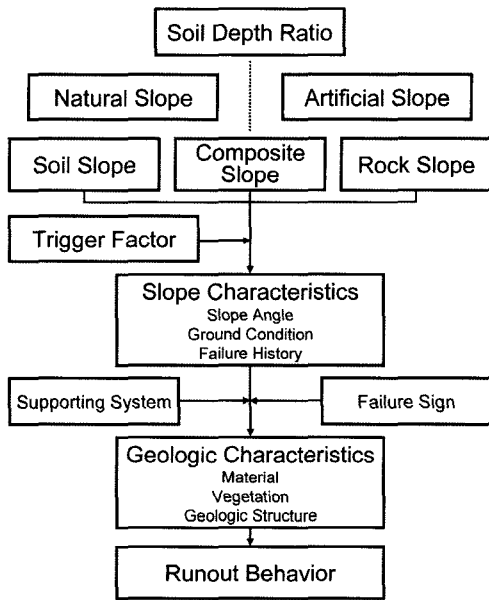


Fig. 1. Flow chart for hazard analysis.

Table 1. A new standard for the relationship between landslide and rainfall.

Classification	Hazard	VL* (0.1)	L* (0.2)	M* (0.3)	H* (0.4)	VH* (0.6)
Max. hourly rainfall (mm)		0~5	5~10	10~15	15~30	> 30
Daily rainfall (mm/day)		0~20	21~40	41~80	81~150	> 150
Cumulative rainfall (mm/2day)		0~25	26~50	51~100	101~200	> 200

*, VL(score): Very Low(); L: Low(); M: Medium(); H: High(); VH: Very High()

관관계 기준을 Table 1과 같이 정리하여 파괴위험도 분석의 전체적인 가중치로서 활용하였다. 강수량은 그 위험 정도에 따라 다섯 등급으로 나누고, 등급에 따라 0.1~0.6의 점수를 배점하였다.

두 번째 붕괴유발 요인인 지진은 현재까지도 전 세계적으로 많은 피해를 입히고 있으며 기상청(2001~2004)에 따르면 국내에서도 규모는 3~4.0 정도의 크기의 지진이 매년 23회 이상 발생하고 있다. 특히 여름철, 7~9월에 집중호우가 발생하는 시점에 지진이 발생한다면 산사면의 안정성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 지진으로 인한 사면 붕괴에 대한 연구는 계속적으로 진행되고 있으며(Rodriguez et al., 1999; Luzi et al.,

2000; Keefer, 2000; Bommer and Rodriguez, 2002), 본 연구에서는 지진의 규모에 따라 다섯 등급을 설정하고 각 등급마다 0~0.4점까지 배점을 부여하였다(Table 2).

이렇게 구하여진 강우와 지진요소 점수는 합산 후 기타 위험요소 점수들의 합산 점수와 곱하여 최종 위험도 점수를 구하게 되므로 붕괴유발 요인들은 전체적인 위험도의 가중치로서 작용하게 된다.

사면 특성

사면 특성의 항목으로 Table 3과 같이 사면 경사, 지반 강도 특성, 붕괴이력이 있다. 사면의 경사는 한국시설안전기술공단(2003)의 ‘절토사면 안전점검 및 정밀안

Table 2. Relationship between magnitude of earthquake and landslide.

hazard(score)	VL(0)	L(0.1)	M(0.2)	H(0.3)	VH(0.4)
Magnitude	1~3.5	3.6~5.4	5.5~6.0	6.1~7.9	8 or greater

VL(score): Very Low(); L: Low(); M: Medium(); H: High(); VH: Very High()

Table 3. The hazard score of slope characteristics.

Hazard score of slope angle							
Classification	SR > 0.4		0.2 < SR ≤ 0.4		SR ≤ 0.2		
	angle(°)	score	angle(°)	score	angle(°)	score	
Hazard Index	< 26.6	2	< 39.8	4	< 45.0	2	
	≤ 33.7	7	≤ 45.0	15	≤ 55.0	5	
	≤ 39.8	15	≤ 55.0	20	≤ 63.4	10	
	≤ 45.0	30	≤ 63.4	23	≤ 73.3	18	
	> 45.0	40	> 63.4	25	> 73.3	20	
Hazard score of ground condition.							
Classification		Soil slope					
Hazard Index	Sandy soil	very dense	dense	moderate	loose	very loose	
	Cohesive soil	very hard	hard	moderate	weak	very weak	
	Score	1~2	3~6	7~12	13	15	
Classification		Rock slope					
Hazard Index	SMR	I	II	III	IV	V	
	Score	5~9	10~14	15~29	30	35	
Classification		Composite slope					
Hazard Index	Soil	sandy soil	very dense	dense	moderate	loose	very loose
		Cohesive soil	very hard	hard	moderate	weak	very weak
		Score	1	2~4	5~8	9	10
	Rock Mass	SMR	I	II	III	IV	V
		Score	2~4	5~13	14~17	18	20
Hazard score of failure history							
Hazard Index	Failure history	NO		Rockfall		YES	
	Score	0		6		10	

전진단 세부지침' 을 참고하여 토층 심도율에 따른 사면 분류 특성에 맞게 항목별 점수를 주었다. 지반 강도 특성도 마찬가지로 분류된 사면 특성에 따라서 배점을 다르게 주었으며 토사사면의 경우는 사질토와 점성토(한국시설안전기술공단, 2003)로 크게 나누어 사질토의 경우는 매우 조밀, 조밀, 보통, 느슨, 매우 느슨으로, 점성토의 경우는 매우 단단, 단단, 보통, 약함, 매우 약함으로 구분하여 평가하였다. 암반 사면의 경우는 SMR (Slope Mass Rating)의 5단계로 구분하였고 혼합사면의 경우는 흙과 암의 특성을 동시에 고려하였다. 한번 붕괴된 사면은 붕괴 이후에도 계속적인 변위가 발생하게 되고, 다시 붕괴 되는 시점도 빠르므로 붕괴이력은 사면의 안정성 평가에 고려되어야 하는 중요한 요소가 된다. 본 연구에서는 한국건설기술연구원(2002)의 사면 붕괴이력에 대한 분류를 참고하여 붕괴이력에 대한 항목과 배점을 결정하였다.

붕괴징후와 배수 및 보강 시스템 평가

붕괴 징후에 대한 평가 요소는 인장균열과 지반변형 등으로 한국시설안전기술공단(2003)의 평가 항목을 참조하였다. 인장균열의 경우는 균열의 존재 유무뿐만 아니라 진행성 여부가 명확한 경우에 대하여 적용하였으며, 지반변형 상태는 사면의 배부름 현상이나 압괴의 이완 등에 해당하는 것으로 변형징후의 증거가 발생하였을 시 정도에 따른 평가가 아니라 '없음', '있음' 에 따라 위험 점수를 부여하였다(Table 4). 배수 및 보강상태는 조사자나 전문가의 의견에 따라 판단되며 상태가 양호하고 보강공법이 효율적일수록 총 위험 점수의 마이너스 요인으로 작용한다(Table 4).

지질 특성

지질 특성은 Table 5와 같이 암종과 지질구조, 식생으로 구분하여 각각 배점하였으며, 암종의 경우는 어느 특정한 암석, 혹은 대표적인 암석으로 사면의 안정성을

Table 4. Hazard score of failure sign composed of tension crack and ground transformation for slope characteristics.

Failure sign	Hazard score	Drainage, Support system	Hazard score
Tension crack	10	Efficient, Good	-10
		Efficient, Damage	-6
Ground transformation	5	Inefficient, Good	-4
		Inefficient, Damage	0

Table 5. Hazard score of geological characteristics.

Hazard score according to Rock type									
Igneous rock									
Detailed factor	Particle Size			Shape of a Particle			Color		
	Fine	Medium	Coarse	Irregular	Mode-rate	Equigr-anuar	Light	a Little light	Black
score	0	1	2	0	1	1	0	1	1
Sedimentary rock									
Detailed factor	Particle Size			Shape of Bedding			Grade of Chemical weathering		
	Fine	Medium	Coarse	Massive not.	Lamina, ≤ 1 cm	Strata, > 1 cm	Strong	Moderate	Weak
score	0	0	1	0	1	2	1	2	2
Metamorphic rock.									
Detailed factor	Structure				Metamorphic grade				
	Cleavage	Foliation	Schistosity	Gneissosity	Low	Medium	High		
score	1	2	3	3	0	1	2		
Hazard score according to geologic structure type									
factor	Simple		Bedding		Joint		Fault		Fracture zone
score	1		2		5		7		8
Hazard score according to vegetation type									
factor	Small Pole			Medium and Large Pole			Mixed forest		
score	2			1			0		

평가한다는 것은 문제점이 있다고 판단하여 안정성에 대한 암석의 기존 연구 분석 결과와 자료들을 종합하여 새로운 방식의 암중에 따른 위험 지수를 개발하였다. 암중에 따른 위험지수는 암종을 화성암, 퇴적암, 변성암으로 나누고 각 암종별로 서로 다른 세부 평가항목으로 결정하게 된다. 화성암의 세부 평가항목은 입자크기, 입자형태, 암석의 색이며, 퇴적암의 세부 평가항목은 입자크기, 층리형태, 화학적 풍화도이고 변성암의 세부 평가항목은 구조와 변성도이다. 최종적으로 암중에 따른 위험지수는 각 세부 평가항목별 점수의 합으로 산출된다.

지질구조는 한국건설기술연구원(2002)의 연구결과를 바탕으로 단순, 층리, 절리, 단층, 파쇄대로 분류하였으며, 사면에서 관찰된 대표적인 지질구조를 판단하여 평가하게 된다.

식생의 경우는 국립산림과학원(2005)의 분류 지침을 참고하여 소경목, 중경 대경목, 혼효림으로 분류하여 평가하였다. 식생에 대한 평가는 토층이 사면안정성에 큰 영향을 미치는 혼합사면과 토사사면에서만 적용하여 평가하였고 암반사면의 경우 토층의 분포가 미약하므로 평가에서 제외하였다.

붕괴물질 특성

붕괴물질 특성(runout behavior)은 산사태 발생 시 사태물질의 이동거리, 이동경로, 이동속도 등을 예상하여 사면 파괴 모델 분류(Varnes, 1984; Cruden and Varnes, 1996)와 가능한 초기 파괴 시작 지점 및 사면 특성을 파악하는 것이다. 본 연구에서는 Table 6과 같이 붕괴물질 특성을 파악하기 위한 평가 요소로 진행방해도, 규모지수를 통한 부피, 가능한 붕괴물질 이동거리와 속도를 적용하였다. 붕괴물질의 이동거리를 측정하기 위하여 현재까지 연구되어 왔던 논문들을 종합하여 평가하고자 하였다(Scheidegger, 1973; Li, 1983; Nicoletti and

Sorriso-Valvo, 1991; Corominas, 1996; Hunter and Fell, 2003). 연구된 논문들은 모두 가능한 사면의 부피를 안다고 가정하였을 때 붕괴물질 이동 거리(Travel Distance)를 식(2)와 식(3)을 통하여 계산하였으며 그 회귀정도를 분석하였다.

$$L = \frac{H}{\tan\alpha} \tag{2}$$

$$\log \tan\alpha = A + B \log V \tag{3}$$

식(2)에서 L은 붕괴 물질 이동거리이며 H는 붕괴 물질의 발생 가능 높이로 사면을 굴착하거나 절개하였을 때의 높이를 나타내며 α 는 L과 H의 사이각을 의미한다. 식(3)의 V는 붕괴물질의 체적이고 A와 B는 상수로 여러 연구 결과에서 회귀 분석을 통하여 제안되어 왔지만 Hunter and Fell(2003)의 연구 결과가 회귀 분석 상의 오차가 가장 적었으며 적용 신뢰도가 높다고 보고하고 있으므로(Hungr et al., 2005), 본 연구에서도 Hunter and Fell(2003)이 제안한 A, B의 상수를 적용하였다(Table 6).

Table 6에 표시된 Unconfined(방해 없음), Partly confined(부분 방해), Confined(방해)는 붕괴 물질이 사면을 타고 이동할 때 그 진행 방해도를 나타낸 것이다. 채병근 외(2005)는 상부와 하부의 경사 차이가 없을 때 이동속도가 빨라지고 하부 경사가 완만할수록 붕괴 물질의 이동이 방해된다고 판단하였으며 사면 방향 변화 정도에 따라 이동 속도가 급격히 줄어 들 수 있다고 하였다. 따라서 본 연구에서도 하부와 상부 경사의 비와 사면 경사 방향 변화정도로 진행 방해도를 Table 7과 같이 평가하였다. Table 7에서 사면 방향 변화정도는 각도가 40° 초과이면 High, 40° 이하이면 Low로 구분하였는데, 이는 사면의 경사가 40° 이상일 경우 전형적인 슬라이드(translational slide)가 발생되고 그 이하일 경우

Table 6. Regression equation of H/L versus landslide volume(Hunter and Fell, 2003).

Path type	A	B	R ²	Std. Dev.
Unconfined	0.77	0.087	0.71	0.095
Partly confined	0.69	0.110	0.52	0.110
Confined	0.54	0.27	0.85	0.027

Table 7. Results of evaluated movement of debris flow to landslide surface.

Ratio of Upper/Low angle	≤ 0.2		≤ 0.4	≤ 0.6	> 0.6
	The degree change of dip direction	High	Confined	Partly confined	Partly confined
	Low	Confined	Partly confined	Unconfined	Unconfined

에는 사태물질이 넓게 퍼져 하부로 이동하는 양이 상대적으로 적기 때문이다(채병곤 외, 2005). 또한 이동거리 항목은 피해 측정에 직접적으로 연관되어 있으므로 피해분석의 규모(scale)를 평가할 때 참고자료로 활용된다.

붕괴 물질의 이동 속도는 Table 8과 같이 평가하여 배점하였다. 이동 속도를 실제로 측정한다는 것은 거의 불가능하므로 이동 거리와 마찬가지로 진행방해도로 평가하였다. 붕괴물질의 이동속도가 매우 느림과 느림은

confined, 보통은 partly confined, 빠름과 매우 빠름은 unconfined로 평하여 점수를 각각 2, 4, 8점으로 부여하였다.

피해도 분석

피해도는 사면 붕괴로 인하여 발생하거나 발생할 수 있는 결과, 즉 인명이나 재산상의 피해를 수치적이거나

Table 8. Travel velocity assessment and scoring.

Velocity Class	Description	Score
Extremely slow	Confined	2
Slow	Confined	2
Moderate	Partly confined	4
Rapid	Unconfined	8
Extremely rapid	Unconfined	8

Table 9. Consequence sheet for roads.

Component	Description	Score
a) Type	a one-lane	0.2
	a two-lane : lane on the inside : lane on the outside	0.2
	a four-lane : lane on the inside : lane on the outside	0.1
	(Inside means inner-way, in case a two-lane, where is a side of slope)	0.1
		0.05
b) Scale	S : No matter what landslide volume is small or large, it has no influence on facilities (5 m or greater between slope and road).	0.05~0.1
	M : Landslide volume is small (soil depth : 0.1~1 m), there is a little probability that landslide debris has influence on facilities (3 m or greater between slope and road).	0.1~0.25
	L : Landslide volume is large (soil depth : over 1 m), there is very strong probability that landslide debris has influence on facilities (1 m or less between slope and road).	0.3
c) Characteristics	Vulnerability Score = $(Nv/24) \times (Lv/1000) \times (1/Sr) \times (Nvp)$ Nv : Average number of vehicle per day Nvp : Average number of persons in vehicle per day Sr : Speed regulations Lv : Average length of vehicle	
d) Indirect loss	Proximity · easy access to slide : it takes about 30 minutes to landslide area.	0.1~0.15
	Low traffic density(< 3000/day)/A four-lane and more · difficult access to slide : it takes over 1 hour to landslide area.	0.16~0.3
	High traffic density(> 3000/day)/A two-lane and less Connection	
	· easy contact with someone : surely recognize landslide within a range of view.	0.01~0.03
	· difficult contact with someone : hardly anyone recognize landslide within a range of view.	0.04~0.1
	Economic Loss · Time Loss : Delay time to the vehicle movement/expected time to the reopening a road · Bypass is or not (0.03 or 0.08)	
e) Subjective assessment	Stable	0.01~0.02
	Possible	0.03~0.07
	Failure	0.08~0.1

묘사적으로 표현하는 것이다. 이것은 사면에 대한 위험도 분석이 완료된 후에 수행되며 사면 붕괴 위험에 노출된 인자와 피해에 대한 분석이 포함된다. 노출된 인자는 사면 붕괴로 인하여 피해를 받을 수 있는 지역의 사람, 건물, 공사현장, 산업기반시설, 차량 등이 해당된다. 사면 파괴가 발생하였을 때 혹은 사면 파괴가 발생할 수 있는 위험 지역을 이동, 거주하거나 혹은 그 지역에서 경제적 활동을 하는 모든 것을 지칭한다. 피해는 위에서 분석한 사면 붕괴로 인하여 피해를 받을 수 있는 노출된 인자의 손실 정도를 나타내는 것으로 0(피해없음)에서 1(총 피해)까지의 값으로 표현하는 것이다.

피해도 분석을 위하여 계통도 분석을 수행하였다(Fig. 2). 피해도 측정을 위한 대상을 크게 도로와 건물로 구분하였으며 관련 인자들의 각각의 특성에 따라 Table 9와 10과 같이 인자별 피해점수를 설정하여 평가하였다. Table 9, 10을 보면 피해도 측정을 위한 인자로 피해대상의 형태, 붕괴물질 규모 및 특성, 간접손실, 그리고 주관적인 평가 등이 있다. 피해도 점수의 총점은 최대 1이며 각각 인자별 점수의 경우 형태가 0.2, 붕괴물질 규모가 0.3, 특성은 확률적인 접근으로 점수에 대한 배점이 없이 Table 9, 10에 있는 관계식으로 구하고 간접손실은 0.4, 주관적인 평가는 0.1로 하였다. 주관적인 평가는 본 평가 기법의 객관성 유지에는 다소 어긋나지만 사면 현장의 보고서를 작성한 전문가의 의견을 고려하고자 하였으며 객관성 확보를 위해 피해도 분석의 총점

에 10%에 해당하는 0.1의 점수만 배점하였다.

도로에 대한 평가

도로에 대한 피해도 산정 방식은 Table 9에 요약 정리하였다. 도로의 경우 형태를 1차선, 2차선, 4차선 이상으로 나누었으며 2차선과 4차선 이상의 경우는 사면 방향으로 안쪽 차선과 바깥 차선으로 구분하여 배점의 가중치를 주고자 하였다. 규모는 S(Small), M(Medium), L(Large)로 분류하여 S는 붕괴물질의 규모와는 상관없이 사면 붕괴 시 붕괴물질이 도로에 영향을 주지 않는 것으로 이는 붕괴규모가 크다 하더라도 도로에 피해가 발생하지 않기 때문이다. M은 붕괴물질의 규모는 작으나 사면 붕괴 시 도로 안쪽 차선까지 영향을 주는 것이며, L은 붕괴물질의 규모도 크고 사면 붕괴 시 도로의 모든 차선에 영향을 주는 것으로 나타내었다. 특성은 사면도로를 이용하는 도로의 제한 속도(Sr, km)와 하루 평균 차량에 타고 사람수(Nvp), 하루 평균 이동 차량수(Nv), 평균 차량의 길이(Lv, meter)를 이용하여 식(4)와 같이 특성치를 산출하였다(Hung et al., 2005).

$$VS(\text{VulnerabilityscoreofRoads}) = \frac{Nv}{24} \times \frac{Lv}{1000} \times \frac{1}{Sr} \times Nvp \quad (4)$$

간접손실은 근접성(Proximity), 연락성(Connection), 경제적인 손실(Economic Loss)로 구분하였다. 근접성은 병원, 도로관리기관과 같은 주요 시설에서 붕괴 사면까지의 거리와 차량 통행량에 따른 혼잡성과 가장 밀접한 관련이 있다. 일본 건설성의 사면안정성 평가방법에서는 일일 교통량 3000대를 기준으로 그 이상일 경우 교통량이 많은 중요 도로로, 그 이하일 경우 상대적으로 교통량이 적은 도로 규정하고 있어 본 연구에서도 일일 교통량 3000대를 기준으로 도로의 혼잡성을 판단하였다. 또한 응급환자의 최대 이송시간이 30분에서 1시간 이하여야 한다는 점을 고려하여 사면 붕괴 시 사면으로의 접근 가능 시간이 30분 이내이고 하루 평균 교통량이 3000대 이하, 그리고 4차선 이상의 경우에는 접근하기 쉬우므로, 접근 가능 시간이 1시간 이상이고 교통량은 3000대 이상, 그리고 2차선 이하일 경우는 접근 어려움으로 나누었다. 연락성은 사면 붕괴 시 주변에서의 인지 여부에 대한 평가로 사람의 시야 거리에서 사면 붕괴의 판단 가능 여부에 따라 2가지로 구분하여 배점하였다. 경제적인 손실은 도로 복구 예상시간에 대한 차량운행 지연시간을 우회도로의 유무에 따른 점수를 곱하여 나타내었으며 주관적인 평가는 안정, 위험, 붕괴군에 따른 점수를 부여하였다.

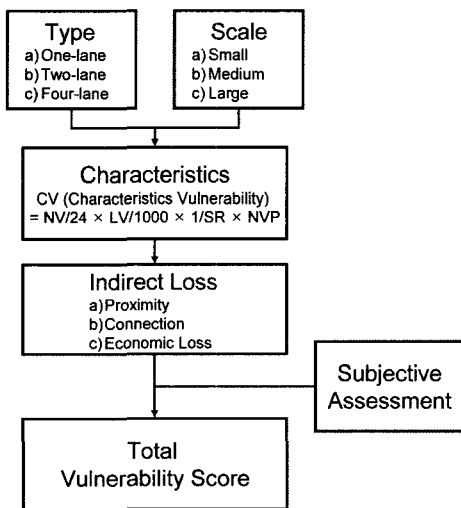


Fig. 2. Event tree chart for consequence analysis using road and building vulnerability score. (T.V: Total vulnerability score)

건물에 대한 평가

건물에 대한 피해도 산정 방식은 Table 10에 요약 정리하였다. 건물의 경우도 마찬가지로 형태는 가건물, 낮은 층수의 건물, 낮은 층수의 건물들의 모임, 높은 층수의 건물의 4가지 형태로 구분하였다. 가건물과 낮은 층수의 건물은 조립식과 벽돌집으로 그 구성 물질에 따라 세분하였다. 규모는 사면 붕괴가 건물에 영향을 주는 정도에 따라 S(Small), M(Medium), L(Large)로 구분하였다. 특성은 건물 내에 거주하고 있는 사람수(L)와 평균 거주 시간(Hours; Sh, Days; Sd)을 평가한 뒤 식(5)을 이용하여 점수를 배점하였다(Hungr et al., 2005).

$$VS(\text{Vulnerability Score of Building}) = \frac{Sh}{24} \times \frac{Sd}{7} \times L \quad (5)$$

간접손실의 경우는 도로의 간접손실 배점 형태와 동일하지만 경제적인 손실 부분에서는 건물 복구 예상시

간에 대한 경제적 활동 지연시간을 평가하여 점수를 배점하였다. 주관적인 평가 항목에서는 도로의 경우와 마찬가지로 안정, 위험, 붕괴일 경우 각각 배점에 더해하였다. 피해분석의 총 배점 산출은 식(6)과 같다.

$$\text{총 피해점수} = \text{특성확률} \times \{(\text{형태} + \text{규모}) + \text{간접손실} + \text{주관적인평가}\} \quad (6)$$

안전군일 경우는 피해가 없을 것으로 판단하였기 때문에 간접손실의 항목에서 경제적 손실 점수를 고려하지 않지만 위험군과 붕괴군의 경우는 손실이 우려되거나 발생하므로 경제적 손실을 고려하였다. 즉, 안전군일 경우 근접성과 연락성 점수를 합하여 간접손실 점수를 산출하지만 위험군과 붕괴군일 경우는 근접성과 연락성의 합한 점수에서 경제적 손실을 곱하여 간접손실 점수를 산출하였다.

Table 10. Consequence sheet for buildings.

Component	Description	Score
a) Type	Squatter	0.2
	prefabricate concrete	0.15
	Low-rise building	
	prefabricate concrete	0.15
	Multi-story building	0.1
	High-rise building	0.02
b) Scale	S : Very little serious damage to properties within a few flats or individual houses.	0.05~0.1
	M : Some damage to squatter or low-rise buildings within a few flats or individual houses.	0.1~0.25
	L : Severe structural damage to multi-story buildings including a large number of houses	0.3
c) Characteristics	Vulnerability Score = (Sh/24) × (Sd/7) × L How long stay in the building : Sh(hours), Sd(days) How many live in the building : L	
	Proximity < > · easy access to slide; it takes about 30 minutes to landslide area. Low traffic density(< 1500/day)/A four-lane and more.	0.1~0.15
d) Indirect loss	· difficult access to slide; it takes over 1 hour to landslide area. High traffic density(> 1500/day)/A two-lane and less.	0.16~0.3
	Connection · easy contact with someone : surely recognize landslide within a range of view.	0.01~0.3
	· difficult contact with someone : hardly recognize landslide within a range of view.	0.04~0.1
	Delay time to the economic activity/expected time to the building restoration from the effects of the landslide	
e) subjective assessment	Stable	0.01~0.02
	Possible	0.03~0.07
	Failure	0.08~0.1

평가 기법의 검증

파괴위험도 분석 결과

파괴위험도 분석은 붕괴유발 요인, 사면 특성, 지질 특성, 붕괴 물질 특성 점수를 적용하였다. 점수를 산출하는 방식은 식(7)과 같으며 2002년, 2003년 동안 조사된 사면 현장 보고서 234개를 활용하여 구분한 안전군, 위험군, 붕괴군 중에서 객관적으로도 가장 군 편별이 확연하고 대표적인 사면 10개씩을 선택하여 그 내용 중 파괴위험도 분석에 필요한 항목을 추출하여 총 파괴위험 점수를 산출하였다.

$$\text{Total hazard score} = (\text{Rainfall} + \text{Earthquake score}) (\text{Slope} + \text{Geology} + \text{Runout behavior score}) \quad (7)$$

파괴위험도 분석 시 강수량과 지진 요소는 안전군, 위험군, 붕괴군 모두 동일한 조건으로 적용하였으며, 강우량의 경우 2일 누적강우량에 해당하는 200 mm를 적용하였고 지진 요소는 기상청의 지진연보를 참조하여 우리나라에 발생하는 평균 규모 3.5를 적용하였다. 분석결

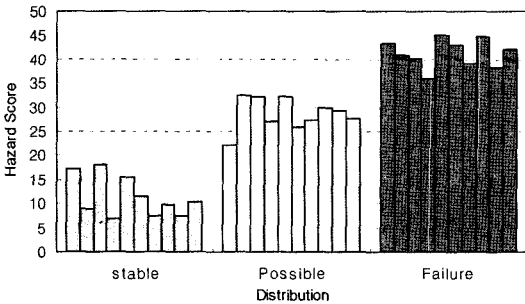


Fig. 3. Distribution of hazard score for stable, possible and failed slopes.

과 각 군별 파괴위험 점수는 안전군의 경우 6.8~18.2점(평균 11.3점)의 분포를 보였으며, 위험군의 경우 22.2~32.6점(평균 28.6점), 붕괴군의 경우 35.8~45.0점(평균 41.3점)의 분포를 보였다(Table 11). 각 군별 파괴위험 점수 분포는 Fig. 3과 같이 서로 중첩되지 않고 구분 경계가 뚜렷이 나타났으며 이는 본 연구에서 제안한 평가요소의 가중치와 배점이 효과적이었다고 판단할 수 있다. 군별 최대 점수와 최소 점수의 중간점수를 각 군별 경계점수로 가정한 결과 안전군과 위험군의 경계점수는 20.2점, 위험군과 붕괴군의 경계점수는 34.2점이었다.

사면재해에 대한 최종 위험도는 사면의 파괴확률을 산정한 후 사면붕괴에 따른 피해점수 또는 피해액과 파괴확률을 곱하여 산출하는 것이 일반적이다. 그러나 사면의 파괴확률은 한계평형해석과 같은 동역학적인(한계평형) 해석을 통해서만 계산할 수 있기 때문에 본 연구에서는 파괴위험 분석결과를 이용하여 파괴확률을 모사하는 사면의 파괴가능성지수(probabilistic index)를 제안하여 사용하였다. 사면 파괴가능성지수는 파괴확률은 아니지만 확률적 개념을 그대로 도입하여 범위를 0에서 100까지로 설정하였고 파괴확률과 마찬가지로 10 이하의 값을 갖는 경우를 안정측으로, 10이상의 값을 갖는 경우는 불안정측으로 가정하였으며, 50이상의 경우는 파괴가 발생한 것으로 간주하였다. 따라서 파괴위험도 분석에서 안전군의 파괴가능성지수는 0~10, 위험군의 파괴가능성지수는 10~50, 붕괴군의 파괴가능성지수는 50~100로 가정하였다. Fig. 4는 각 군별 파괴위험도 점수분포와 파괴가능성지수 분포를 영역으로 나타낸 것이며, 지수형태의 곡선은 군별 경계지점을 대상으로한 파괴가능성지수와 파괴위험 점수간의 회기분석 곡선이다. 회기분석 곡선은 식(8)과 같은 함수로 표현되며 안전군의 경우는 그래프의 형태가 완만하게 증가하지만 붕괴군으로

Table 11. Hazard score for stable, possible and failed slopes.

Hazard score for stable slope	Hazard score for slope of possible failure	Hazard score for failed slope
17.20	22.20	43.40
8.80	32.60	41.00
18.20	32.20	40.20
6.80	27.00	35.80
15.40	32.30	45.00
11.40	25.80	43.10
7.50	27.30	39.20
9.80	30.00	44.90
7.40	29.30	38.20
10.30	27.60	42.20

점수가 증가할수록 그래프가 급격하게 증가하는 지수 형태이며 상관도(R^2)는 0.999 내외로 높은 상관성이 있는 것으로 분석되었다.

$$P_f = 0.0043 \times S_H^{2.6442} \quad (0 \leq S_H \leq 45) \quad (8)$$

(P_f : Probabilistic index of landslide; S_H : Hazard score)

식(8)을 이용하여 연구대상 사면에 대한 파괴가능성 지수를 계산한 결과 안전군의 파괴가능성지수는 0.68~9.17, 위험군은 16.50~42.82, 붕괴군은 54.85~100로 파괴위험 점수와 마찬가지로 각 군별 파괴가능성지수가 명확히 구분되었다(Table 12).

식(8)은 파괴가능성지수 산출에 복잡한 계산을 요하지 않는 간단한 식이며, 분석에 사용된 자료가 30개로 비교적 제한적이지만 높은 상관도를 보이므로 파괴가능성지수를 산정하는데 유용할 것으로 판단된다. 또한 차후로 더 많은 사면에 대상으로 분석이 이루어진다면 더욱 신뢰성 있는 관계식이 산출될 것이라고 판단된다.

피해도 및 위험도 분석 결과

피해도 분석은 앞서 언급하였던 Table 9와 Table 10에 기술되어있는 피해도 분석 기준을 바탕으로 실시되었으며 분석결과는 Table 13과 같다. 피해도 분석결과는 안전군의 피해도 점수는 0.0067~0.0279 (평균 0.0181), 위험군은 0.0029~0.0204 (평균 0.0115), 붕괴군은 0.0104~0.0811 (평균 0.03168) 정도로 파괴위험도 분석결과와 달리 군별로 피해도 점수가 명확히 구별되지 않았으며 특별한 연관성도 보이지 않았다.

총 위험도 점수는 식(9)와 같이 파괴가능성지수와 피해도 점수의 곱으로 계산된다.

$$\text{Total risk score} = \text{Probabilistic index of landslide} / 100 \times \text{Consequence score} \quad (9)$$

식(9)를 통해 계산된 연구대상 사면들의 총 위험도 점수는 Table 14와 Fig. 5와 같다. 안전군의 위험도 점수는 0.01~0.1 정도 계산되었으며, 위험군은 0.1~0.8, 붕괴군은 0.8~8.1 정도의 분포를 보여 안전군과 위험군에 비해 붕괴군의 위험도 점수가 월등히 높은 것으로 분석되었다. 이는 붕괴군이 안전군이나 위험군에 비해 파괴가능성지수가 월등히 높고 분석 대상 사면의 규모도 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 위험도 분석결과는 분석대상 사면의 실제 안정성 검토자료와 잘 부합된다고 할 수 있다.

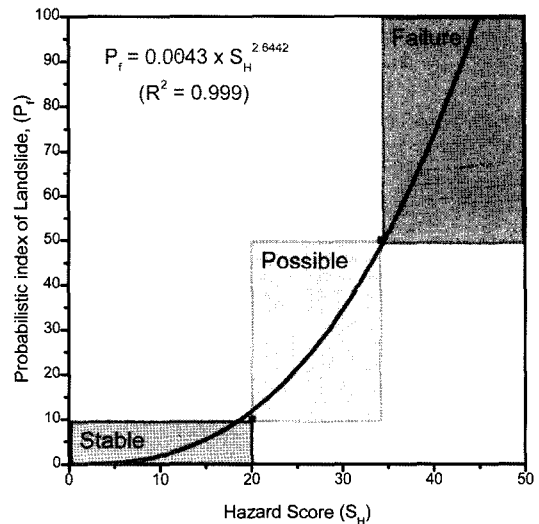


Fig. 4. The correlation between probabilistic index of landslide and hazard score using regression analysis.

Table 12. Probabilistic index of landslide for a district of stable, possible and failure using equation-8.

Probabilistic index of landslide for a district of stable	Probabilistic index of landslide for a district of possible	Probabilistic index of landslide for a district of failure
7.90	16.50	91.26
1.34	42.82	78.51
9.17	41.45	74.53
0.68	26.02	54.85
5.89	41.79	100.42
2.66	23.07	89.60
0.88	26.79	69.72
1.78	34.37	99.83
0.85	32.29	65.12
2.03	27.57	84.73

또한 위험도 분석결과와 파괴위험도 분석결과를 종합적으로 비교해 볼 때 각 군별 점수 분포가 서로 많은 차이를 보이는데 이는 한계평형해석이나 사면붕괴 위험 분석만으로는 종합적인 사면재해 평가를 수행하기 어렵다는 것을 암시해 준다고 할 수 있다. 본 연구 결과를 종합해 볼 때 분석대상 사면의 위험도 점수가 0.08 이하일 경우에는 사면의 위험을 예측할 수 있으며, 위험도

점수가 0.1 이상일 경우 붕괴위험이 뚜렷한 극한 위험을 나타내는 것으로 판단할 수 있다.

결론

사면의 파괴위험도 분석은 대상 조사 사면의 사면 특성, 지질 특성, 붕괴 물질 특성을 분석한 후 사면 붕괴 유발 요인인 붕괴유발 요인으로 강수량과 지진 벡터를 적용하여 본 결과, 각 군의 유형별 구분 경계가 뚜렷이 나타나며 제안한 평가 기법이 평가요소의 가중치 수정 및 보완이 적절하다고 판단된다. 피해도 분석은 대상 조사 사면의 파괴위험도 분석 후에 실시하며, 사면 인접 시설 및 인명 피해를 수치적인 접근으로 수행하였다. 이를 위해 형태(Type), 붕괴 물질 규모, 특성 확률, 간접 손실, 그리고 주관적인 평가의 각각에 따른 배점을 수행한 결과 각 군들 간의 피해 점수는 최소 0.002에서 최대 0.08의 값을 보이며 전반적으로 안전군, 위험군, 붕괴군의 순으로 높아지는 것으로 판단된다.

위험도 분석을 위하여 파괴위험도 점수를 이용한 사

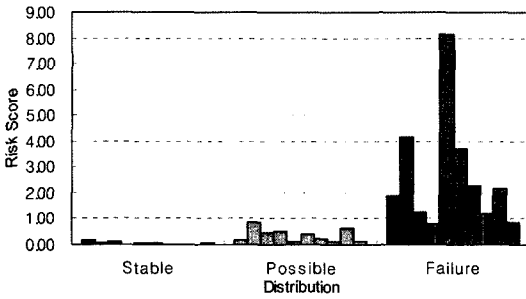


Fig. 5. Distribution of risk score for stable, possible and failed slopes.

Table 13. Consequence score for a district of stable, possible and failure using the consequence sheet.

Risk score for a district of stable	Risk score for a district of possible	Risk score for a district of failure
0.197	0.164	1.898
0.037	0.876	4.185
0.139	0.464	1.259
0.090	0.497	0.817
0.039	0.121	8.144
0.064	0.424	3.709
0.015	0.201	2.280
0.017	0.120	1.208
0.013	0.601	2.162
0.053	0.119	0.881

Table 14. Total risk score.

Consequence score for a district of stable	Consequence score for a district of possible	Consequence score for a district of failure
0.0250	0.0094	0.0208
0.0279	0.0204	0.0533
0.0152	0.0112	0.0169
0.0136	0.0191	0.0149
0.0067	0.0029	0.0811
0.0241	0.0184	0.0414
0.0174	0.0075	0.0327
0.0098	0.0035	0.0121
0.0154	0.0186	0.0332
0.0258	0.0043	0.0104

면 파괴가능성지수를 결정할 수 있는 관계식을 제안하였다. 제안된 식은 본 논문의 평가 기법을 위한 식이며 앞으로 많은 사면에 대한 자료를 획득 분석하면 더욱 신뢰할 수 있는 산출 방법이 될 것이라 기대된다. 또한 산출된 파괴가능성지수를 피해도 점수와 함께 적용시켜 본 결과 안전군, 위험군, 붕괴군의 분포가 뚜렷이 구분되는 것으로 보아 제안한 평가 기법이 사면재해 평가에 효과적인 것으로 판단된다.

현재 국내에서는 사면 상태 평가나 사면 안정성 평가에 파괴위험 분석만이 주로 적용되고 있고 위험도의 개념은 보편화 되지 못한 실정이다. 따라서 본 논문을 계기로 위험도의 의미를 새롭게 적용하고 평가에 활용된다면 지금까지의 사면재해 평가 시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구의 적용성 검토에 이용된 사면이 대부분 도로 절취사면에 대한 자료이므로 아직까지는 다양한 사면 유형에 대한 적용성이 부족하다 할 수 있으며, 차후로 여러 종류의 인공사면과 자연사면 등을 대상으로 적용성 검토를 수행하여 평가 시스템을 보완할 필요성이 있다.

사 사

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(사면 붕괴 예측 및 대응 기술 개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

구호본, 백용, 권오일, 2003, 태풍에 의한 절개면 붕괴특성 연구 및 경사도 설계기준 검토, 한국지반공학회 2003 봄 학술발표회 논문집, 117-122.
 국립방재연구소, 2001, 재해영향평가서 사면안정성 평가법 개발, 행정자치부.
 국립산림과학원, 2005, 산사태 위험지 판정표, <http://www.kfri.go.kr>
 기상청, 2001~2004, 지진현황, http://www.kma.go.kr/neis/neis_01_02_01.jsp
 기완서, 김상석, 주승환, 2001, 퍼지근사추론법에 의한 암반사면의 안정해석, 지질공학, 11, 153-161.
 김상규, 류지협, 윤수호, 2000, 퍼지 집합을 이용한 사면의 위험도 평가, 대한토목학논문집, 20, 179-193.
 김영목, 정석완, 2000, 대전-충남 지역의 강우특성에 의한 산사태에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 20, 341-355.
 김준모, 2002, 사면 내의 지하수 유동과 사면의 안정성에 대한 강수 영향의 원전 연동된 수리지질역학적 수치 해석, 한국지반공학회논문집, 18, 5-16.
 김재홍, 박성완, 정상섭, 유지형, 2002, 강우시 습윤에 의한 불포화 풍화토의 사면 안정 해석 연구, 한국지반

공학회논문집, 18, 123-136.
 김홍택, 유한규, 강인규, 이혁진, 2001, 실내모형실험을 통한 강우시 사면내 간극수압의 변화 탐구, 한국지반공학회 2001 봄 학술발표회 논문집, 199-206.
 신희순, 배규진, 이승호, 정용진, 심정훈, 2003, 집중호우로 붕괴된 절토부 사면의 사면안정 처리에 관한 연구, 한국지반공학회 2003 봄 학술발표회 논문집, 137-144.
 이수곤, 박지호, 선건규, 2003, 강우시 산사태 특성에 관한 연구(암중에 따른 특성 연구), 한국지반공학회 2003 봄 학술발표회 논문집, 131-136.
 윤운상, 2003, 단열 구조 분포 특성화와 사면 안정성 해석 연구, 박사학위논문, 서울 대학교, 265p.
 조성은, 이승래, 2000, 강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성 평가, 한국지반공학회논문집, 16, 107-116.
 채병근, 김원영, 이춘오, 김경수, 조용찬, 송영석, 2005, 지질조건에 따른 사태물질 이동특성 고찰, 지질공학, 15, 185-199.
 한국건설기술연구원, 2002, 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용 IV, 건설교통부.
 한국시설안전기술공단, 2003, 안전 점검 및 정밀안전진단 세부지침, 건설교통부.
 홍원표, 김원영, 송영석, 임석규, 2004, 인공경망 모델을 이용한 산사태 예측, 한국지반공학회논문집, 20, 67-75.
 Bommer, J.J. and Rodriguez, C.E., 2002, Earthquake-induced landslide in Central America, Engineering Geology, 63, 189-220.
 Corominas, J., 1996, The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. Canadian Geotechnical Journal, 33, 260-271.
 Cruden, D.M. and Varnes, D.J., 1996, Landslide types and process(in Landslides; Investigation and Mitigation), Special Report-Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 36-75.
 Dai, F.C., Lee, C.F. and Ngai, Y.Y., 2002, Landslide risk assessment and management: an overview, Engineering Geology, 64, 65-87.
 Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S. and Leroi, E. 2005, A framework for landslide risk assessment and management, "Landslide Risk Management" In Hungr, Fell, Couture & Eberhardt (eds), Taylor & Francis Group, London, 3-25.
 Finlay, P.J., 1996, The risk assessment of slopes. School of Civil Engineering, University of New South Wales, Australia, Ph. D. Thesis.
 Hungr, O., Fell, R., Couture, R. and Eberhardt, E., 2005. Landslide risk management, Proceedings of International Conference on Landslide Risk management, Vancouver, Canada, 764p.
 Hunter, G. and Fell, R., 2003, Travel distance angle for rapid-landslide in constructed and natural soil slopes. Canadian Geotechnical Journal, 40, 1123-1141.
 IUGS, 1997, Quantitative risk assessment for slopes and landslides - the State of the Art, IUGS Working Group on Landslides, Committee on Risk Assessment, in "Landslide risk assessment", Cruden & Fell (eds), Balkema, Rotterdam, 3~12.

- Keefe, D.K., 2000, Statistical analysis of an earthquake induced landslide distribution - the 1989 Loma Prieta, California event, *Engineering Geology*, 58, 231-249.
- Leone, F, Aste, J.P and Leroi, E., 1996, Vulnerability assessment of elements exposed to mass-moving: working toward a better risk perception, in Senneset, K.(Ed), *Landslides*, Balkema, Rotterdam, 263-269.
- Li, T., 1983, A mathematical model for prediction the extent of a major rockfall, *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 24, 473-482.
- Luzi, L., Pergalani, F and Terlien, M.T.J., 2000, Slope vulnerability to earthquakes at subregional scale using probabilistic techniques and geographic information systems, *Engineering Geology*, 58, 313-336.
- Nicoletti, P.G., and Sorriso-Valvo, M., 1991, Geomorphic controls of the shape and mobility of rock avalanches, *Geological Society of America Bulletin*, 103, 1365-1373.
- Rodriguez, C.E., Bommer, J.J. and Chandler, R.J., 1999, Earthquake induced landslides:1980-1997, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18, 325-346.
- Scheidegger, A., 1973 On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mechanics*, 5, 231-236.
- Schuster, R.L., 1996, Socioeconomic significance of landslides (in *Landslides; investigation and mitigation*), Special Report - Transportation Research Board, National Research Council, 12-35
- Varnes, D.J., 1984, The International Association of Engineering Geology Commission on Landslides and Other Mass Movements Landslide hazard zonation: A review of principles and practice. *Natural Hazards*, 3: 63. Paris, France. UNESCO.
- Wong, H.N., 2005, Development and application of landslide risk assessment. Special Project Report. Geotechnical Engineering Office, Hong Kong.

2007년 3월 17일 원고접수, 2007년 6월 13일 게재승인

장현식

강원대학교 자연과학대학 지구물리학과
200-701 강원도 춘천시 효자2동 192번지
Tel: 033-244-9275
Fax: 033-244-9275
E-mail: whitnull@kangwon.ac.kr

오찬성

서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부
151-742 서울시 관악구 신림9동 산 56-1번지
Tel: 02-880-5828
E-mail: oray78@empal.com

장보안

강원대학교 자연과학대학 지구물리학과
200-701 강원도 춘천시 효자2동 192번지
Tel: 033-250-8583
Fax: 033-244-9275
E-mail: bajang@kangwon.ac.kr