

사면기호시스템을 이용한 사면의 평가 및 분류시스템 제안

장현식¹ · 김지혜² · 장보안^{1*}

¹강원대학교 지구물리학과, ²(주)지오엔소프트

Evaluation and Classification System of Slope using the Slope Code System (SCS)

Hyun-Sic Jang¹, Ji-Hye Kim², and Bo-An Jang^{1*}

¹Department of Geophysics, Kangwon National University

²GeonSoft co., LTD.

Received 26 August 2014; received in revised form 10 September 2014; accepted 12 September 2014

사면붕괴에 따른 재해에 효과적으로 대응하기 위해서는 사면의 상태, 특성, 안정성과 사면붕괴시의 피해도에 대한 분석이 필요하다. 이 연구에서는 사면 관리에 필요한 다양한 항목을 포함하고 있는 사면기호시스템(Slope Code System, SCS)을 제안하고 있다. SCS는 사면의 상태, 지질특성, 공학적 안정성, 피해도 등을 평가하여 사면의 특성을 구체적으로 표현할 수 있으며, 평가방법도 비교적 쉽게 할 수 있다. SCS는 5가지의 평가 요소로 구성되어 있는데, '요소-1'은 사면의 구성물질을 나타내며, '요소-2'는 사면의 지질학적 특성을 성인에 따른 암종(rock type)과 지질구조로 나타낸다. '요소-3'은 사면의 공학적 안정성 평가하며, '요소-4'는 보호·보강 상태를 나타낸다. 마지막으로 '요소-5'는 사면붕괴 시 발생할 수 있는 피해의 정도를 나타낸다. SCS의 5가지 평가 요소들은 각각 평가 결과를 나타내는 고유한 분류 기호들을 가지고 있으며, 각 요소별 평가 결과로부터 부여된 5개의 기호들을 조합하여 사면의 종합적인 상태를 나타낸다. SCS는 사면의 상태, 특성, 공학적 안정성, 피해도 등을 종합적으로 평가하므로 사면의 유지관리에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 사면안정성, 피해도, 사면기호시스템

The condition, characteristics, and stability of slopes, as well as the consequences of slope failure, need to be understood for the proper stabilization of slopes and preclusion of potential disasters arising from slope failure. Here, a slope code system (SCS) that succinctly and accurately reflects the various conditions of a slope is proposed. The SCS represents the condition, characteristics, and geotechnical stability of slopes, as well as the consequences of slope failure, and the method is quickly and easily applied to a given slope. The SCS comprises five elements: 1) the slope material; 2) the genetic origin (rock type) and geological structure of the slope; 3) the geotechnical stability of the slope; 4) the probability of failure and remedial works made upon the slope; and 5) the consequences of failure. A letter code is selected from each element, and the result of the evaluation and classification of the slope is given as a five-letter code. Because the condition, characteristics, and geotechnical stability of a slope, as well as the consequences of slope failure, are provided by the SCS, this system will provide an effective mechanism for the maintenance and management of slopes, and will also allow more informed decision-making for determining which slopes should be prioritized for remedial measures.

Key words : slope stability, consequences, slope code system (SCS)

*Corresponding author: bajang@kangwon.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

국토의 70% 이상이 산지로 구성되어 있는 우리나라는 도로와 철도를 따라 수많은 절토사면이 존재한다. 또한 매년 해빙기와 여름철 집중 강우시기에 수습에서 수백건의 사면붕괴가 발생하여 막대한 인명과 재산피해가 발생하고 있다. 사면재해로 인한 인명피해는 전체 자연재해로 인한 인명 피해중에서 약 25%에 달하며(Park et al., 2005), 연 평균 18명(2001~2010년)의 인명피해를 발생시키는 것으로 알려져 사면재해에 대한 철저한 관리가 절실히 요구되고 있다(Park et al., 2011). 사면재해의 원인이 되는 사면붕괴 또는 산사태는 사면을 따라 암석이나 흙 등이 원위치에서 하부로 이동되는 현상으로 정의될 수 있으며(Crudon, 1991), 집중강우, 지진, 지하수위 변동, 해일, 급류에 의한 침식현상 등과 같은 다양한 외부자극에 의해 전단응력이 증가되거나 사면 구성물질의 전단 강도가 감소되어 발생하는 것으로 알려져 있다(Dai et al., 2002).

사면재해를 줄이기 위해서는 사면의 올바른 설계와 효율적인 관리가 필요하며, 이를 위해서는 사면의 상태를 정확하게 평가하는 것이 중요하다. 현재까지 국내외의 여러 연구자들이 다양한 방법론과 이론에 기초하여 사면 평가법들을 제시하였다. 호주에서는 빅토리아 주에 위치한 한 지역에서 자연사면 및 인공사면의 안정성을 평가하기 위한 개략적인 사면안정성 평가법을 제안한바 있으며(Joyce and Evans, 1976), 산지의 활용비율이 매우 높은 홍콩의 경우에는 홍콩 토력공정처(Civil Engineering and Development Department)에서 약 8천 개 이상의 절토사면과 옹벽사면의 보호·보강시설 설치에 대한 우선순위를 부여하기 위해 사면안정성 평가법을 개발하여 사용하고 있다(Koirala and Watkins, 1988). 미국에서는 도로 절토사면의 낙석에 따른 위험을 방지하기 위해 도로연방국(Federal Highway Administration, FHWA)에서 낙석위험 평가법(Rockfall Hazard Rating System, RHRs)을 개발하였으며(Pierson and Van Vickle, 1993), 일본에서도 일본국토교통성(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism), 일본도로공단(Japan Highway Public Corporation), 일본국유철도(Japanese National Railways) 등에서 낙석·붕괴와 산사태 및 토석류에 따른 각 관할 도로나 철도 절토사면의 위험도를 평가하기 위한 평가법들을 개발하여 사용하고 있다(Park, 2001). 그 밖에도 Romana (1985)는 Bieniawski (1979)가 제안한 암반분류기법인 RMR

(Rock Mass Rating)에 사면의 방향에 따른 불연속면의 방향과 관련된 조정계수와 굴착방법에 대한 수정계수를 적용하여 암반사면의 안정성을 평가할 수 있게 만든 SMR (Slope Mass Rating)을 제안하였다. SRM은 현재까지도 암반사면 평가법으로 가장 널리 사용되고 있다.

국내에서도 여러 기관들과 연구자들에 의해 다양한 사면 평가법들을 제안되어 왔다. Choi (1986)은 사면붕괴에 따른 피해가 비교적 큰 10개 시·군 지역에서 317개의 사면을 조사한 후, 이를 바탕으로 사면안정성 평가법을 제안하였다. Choi (1986)의 평가법은 횡단면형, 경사길이, 모암, 경사위치, 경사도, 임분 경급, 종단면형의 7개의 요인을 고려하여 각 요인에 주어진 배점의 합으로 사면의 붕괴 가능성을 평가한다. 한국건설기술연구원(Korea Institute of Construction Technology, KICT)은 일민국도변에 위치한 도로절토사면을 유지관리하기 위해 홍콩의 사면안정성 평가법(Koirala and Watkins, 1988)을 국내 사면조사에 적합하도록 수정한 평가법을 개발하여 사용하고 있다. 한국건설기술연구원의 평가법은 토사사면의 경우에는 사면의 형상이 평가에 가장 큰 비중을 차지하고 암반사면의 경우에는 RMR, 안정성해석 결과 등과 관련된 안정성항목이 가장 큰 비중을 차지한다. 또한 한국건설기술연구원의 평가법은 도로사면의 특성을 반영하여 미국 도로연방국(FHWA)의 낙석위험 평가법(RHRs)에서 사용하고 있는 도로 예상피해도 항목을 평가요소에 포함하고 있다(KICT, 1989; Song et al., 2012). 한국도로공사(Korea Expressway Corporation, EX)도 고속도로변 절토사면을 관리하기 위한 평가법을 개발하여 사용하고 있다. 한국도로공사의 평가법은 토사와 암반사면 모두 동일한 기준을 적용하고 있으며, 불연속면에 대한 평가가 가장 큰 비중을 차지하고 있다(EX, 2004; Song et al., 2012). 한국시설안전공단(Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, KISTEC)에서는 ‘시설물의 안전관리에 관한 특별법(법률 제12254호)’에 의해 관리되는 대규모 절토사면의 상태를 평가하기 위하여 ‘안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(절토사면)’을 작성하여 사용하고 있다. ‘안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(절토사면)’의 사면 평가법은 사면을 토사사면, 연약암반사면, 파쇄암반사면, 절리암반사면으로 구분하고 각 사면 유형별로 평가기준을 달리 적용하는 것이 특징이다. 또한 평가항목을 사면의 손상상태를 나타내는 항목과 파괴요인에 해당하는 항목으로 구분하고 있으며, 평가 총점을 평가 최대점수(76)으로 나누어 결합지수를 구하고 결합지수에 따라 사면을 상태

가 가장 좋은 A 등급부터 가장 낮은 E 등급까지 5개 등급으로 분류한다(KISTEC, 2012). 국립방재연구소(National Institute for Disaster Prevention, NIDP)은 2001년에 발생한 붕괴사면에 대한 조사결과를 바탕으로 재해영향평가를 위한 사면안정성 평가법을 제시하였다(Park, 2001). 국립방재연구소의 평가법은 토사사면에서는 사면의 형상과 토질상태에 큰 비중을 두었고 암반사면의 경우에는 불연속면 특성을 가장 중요한 평가항목으로 설정하였으며, 사면붕괴의 주 원인인 강우의 평가를 위해 강우강도와 배수상태 항목을 평가항목에 포함시켰다. 또한 Song et al. (2012)은 앞서 설명한 국내의 5가지 평가법의 장단점을 분석하여 사면 관리주체 담당자들이 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 평가항목으로 이루어진 개선된 평가표를 제안하였다.

지금까지 설명된 국내외의 사면 평가법들은 사용 목적에 따라 평가방법이 조금씩 다르지만 대부분은 사면의 공학적 안정성을 평가하는데 큰 비중을 두고 있으며, 평가 결과에 따른 사면의 상태를 종합점수 또는 점수에 의한 등급으로 나타낸다. 비록 사면의 공학적 안정성이 사면재해를 관리하는데 있어 가장 중요한 요소이지만 공학적 안정성만으로 사면재해를 효과적으로 관리할 수는 없다. 이는 사면 붕괴원인이 매우 다양하고 사면붕괴에 따른 피해정도가 사면의 안정성과는 무관한 경우도 있기 때문이다. 따라서 사면재해를 보다 효과적으로 관리하기 위해서는 공학적 안정성뿐만 아니라 사면의 유형이나 피해특성 등과 같이 보다 다양한 정보들을 수집하여 종합적으로 관리해야 할 필요가 있다.

이 연구에서는 사면의 상태를 종합적으로 파악하면서도 쉽게 평가할 수 있는 개선된 사면평가체계를 제안하고자 하였다. 이를 위해 사면의 특성을 사면의 구성 물질, 지질학적 특성, 공학적인 특성, 보호·보강상태, 피해도 등 5가지 특성 요소로 구분하고, 각 요소마다의 평가 기준을 정립하였으며, 평가 결과를 평가 요소별 기호(Code)의 조합으로 표현하는 사면기호시스템(Slope Code System, SCS)을 제안하였다.

사면기호시스템(SCS)의 평가 요소

사면은 다양한 목적을 위해 만들어지며, 그 특성도 지질, 형태, 용도, 위치에 따라 매우 다양해진다. 그러므로 사면의 상태를 하나의 점수나 등급만으로 표현할 경우 사면이 가지고 있는 여러 정보를 활용할 수 없게 된다. 이 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 사면의 특성

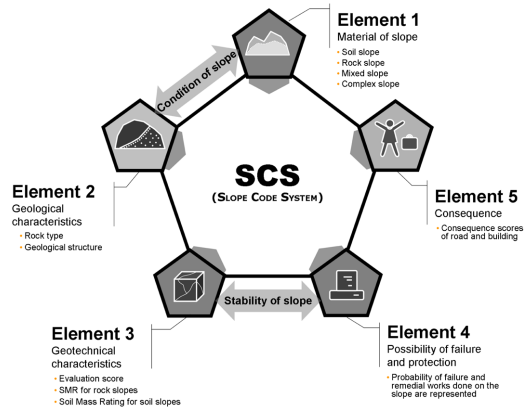


Fig. 1. Elements of the slope code system.

을 Fig. 1과 같이 사면의 구성물질, 지질특성, 공학적 안정성, 보호·보강상태, 피해도 등 5가지 요소로 나누어 각 요소별로 평가하고자 하였다. 구성물질(요소-1)과 지질특성(요소-2)은 사면의 가장 기본적인 상태를 나타내는 요소들이고 공학적 안정성(요소-3)과 사면의 보호·보강상태(요소-4)는 사면의 안정성을 나타내는 요소들이다. 마지막 요소인 피해도(요소-5)는 사면붕괴 발생 시 예상되는 인적, 물적 피해정도를 나타내는 요소로서 사면의 안정성과 더불어 사면재해 관리 시 중요한 정보로 활용될 수 있는 요소다.

요소-1 : 사면의 구성물질

자연적인 재료로 이루어진 사면은 그 구성물질에 따라 정확한 분류가 어려우나 한국시설안전공단의 ‘절토사면 유지관리 매뉴얼’에서는 유지관리상의 편의를 위해 사면을 크게 암반사면, 토사사면, 혼합사면, 복합사면으로 분류하고 있다(KISTEC, 2013). 이 연구에서도 한국시설안전공단의 ‘절토사면 유지관리 매뉴얼’에 따라 사면의 구성물질을 구분하고 Table 1과 같이 구성물질별 분류 기호를 정의하였다.

토사사면은 사면의 구성 물질이 대부분 흙으로 이루어진 사면을 지칭하며 분류기호는 ‘S’다. 토사사면의 경우 포화 시와 불포화시의 단위중량의 변화량이 크기 때문에, 강우나 지하수에 의한 영향을 크게 받는 특징을 가진다. 토사사면의 대표적인 붕괴유형으로는 세굴, 표층유실, 원호파괴 등이 있다.

암반사면은 사면의 구성 물질이 암석으로 구성된 사면을 지칭하며 분류기호는 ‘R’이다. 암반사면에서의 사면붕괴는 주로 불연속면에서 발생되므로 불연속면의 상

Table 1. Codes for slope material.

Material	Soil slope	Rock slope	Mixed slope	Complex slope
Code	S	R	M	C

태와 방향성 등에 따라 사면의 안정성이 결정되게 된다. 암반사면의 대표적인 붕괴유형으로는 낙석, 썰기파괴, 평면파괴 등이 있다.

혼합사면은 암반층과 토사지반이 상하로 구성되어 있는 사면을 지칭하며 분류기호는 ‘M’이다. 혼합사면은 강우시 지하수의 흐름은 불투수층인 암반층과 투수층인 토층의 경계인 토층심도선을 따라 흐르게 되고, 토층심도선을 따라 지하수의 이동이 활발해지면서 토사유실과 마찰저항 저하로 잠재적인 파괴면을 형성하게 되며 집중강우시 활동력증가로 붕괴되는 특징을 가지고 있다.

복합사면은 암반층과 토사지반이 좌우 방향으로 반복되는 사면을 지칭하며 분류기호는 ‘C’다. 보통 지질적인 요인에 의한 단층대나 전단대의 영향으로 차별풍화가 진행되어 암반층과 토사지반이 반복되는 경우가 있으며 이외에도 지형적인 요인이나 지하수 영향에 의해서도 관찰된다.

요소-2 : 사면의 지질학적 특성

요소-2는 사면을 구성하는 암석의 종류(rock type)와 사면에 분포하는 지질학적 구조를 나타내는 부분이다. 일반적으로 암종 별로 불연속면의 발달 상태, 풍화속도, 붕괴유형 등이 다르므로 암종은 사면의 상태평가에 고려되어야 한다. Kim et al. (2001)의 연구결과에 따르면 암종에 따른 붕괴유형은 다음과 같은 특징이 있다. 화성암으로 이루어진 사면은 낙석 또는 평면파괴와 토층유실 및 풍화에 의한 원형파괴 등 다양한 붕괴양상을 나타낸다. 특히 화강암의 경우에는 핵석형의 풍화로 인해 토층이 유실되어 암괴가 떨어지기도 하며, 토층이 얇은 가파른 사면의 경우에는 상부 토층이 붕괴되는 경우도 많다. 퇴적암에서의 붕괴원인은 지질구조선에 의한 붕괴와 풍화로 인한 붕괴로 대별할 수 있다. 또한 붕괴양상은 평면파괴 유형이 가장 높은 빈도를 나타내며, 차별적인 풍화로 인한 낙석과 세굴문제 및 풍화에 의한 표면부에서의 원형파괴 양상이 우세하다. 변성암은 대부분 선캄브리아기에 형성된 암석으로 지질구조가 매우 복잡하게 발달하였으므로 조사할 때 세심한 주의가 필요하며, 특히 사면 내에 단층과쇄대, 단층점토 등 연약대의 존재여부를 주의 깊게 관찰하여야 한다. 변성암 중 편마암으로 이루어진 사면은 사면안정문제에 특히 취약한 사

면으로 평면파괴, 썰기파괴, 원형파괴 등 다양한 붕괴양상을 나타낸다. 이는 편마암에 주로 발달하고 있는 지질구조선인 단층과 엽리의 절리면 거칠기가 매우 작고 단층점토나 점토질이 절리면에 충전 되어 있는 경우가 많아 붕괴빈도가 높은 것이다.

KISTEC (2013)은 ‘절토사면 유지관리 매뉴얼’에서 다양한 지질학적 구조는 사면의 붕괴에 직·간접적으로 영향을 미친다고 하였으며, 지질학적 구조가 사면의 안정성에 미치는 영향을 다음과 같이 설명하였다. 단층 또는 단층에 의한 파쇄대는 지하수의 이동경로이고, 지반의 풍화가 급속히 진행되어 연약해지므로 사면의 불안정요인으로 작용한다. 특히 단층에 의해 생성된 단층점토는 물에 의한 팽창성이 있으며 강도가 약하므로, 단층의 방향이 사면의 안정에 불리한 방향일 경우 붕괴면으로 작용할 가능성이 높아서 특별한 주의가 필요하다. 지층이 심한 지중압력에 의한 변형작용으로 휘거나 접힌 습곡은 심한 전단작용과 변형작용으로 인해서 암반이 약화되므로 사면의 붕괴원인이 되기도 한다. 기반암에 관입된 암맥의 경우에는 차별풍화과정을 거쳐 주위의 암반과 풍화정도가 달라질 수 있으므로 사면의 불안정요인으로 작용될 수 있다. 퇴적작용에 의해 생성된 층리는 연속성이 매우 좋아 사면 안정성에 불리한 방향으로 발달된 경우에는 대규모의 평면파괴가 발생할 가능성이 있다. 풍화에 약한 철과 마그네슘 성분을 많이 포함한 유색광물이 많은 암석의 사면내에 존재할 경우에는 빠른 풍화속도로 인한 차별 풍화 현상과 암반의 강도 저하현상이 발생되므로 사면의 안정성에 문제가 발생되기도 한다. 또한 이암, 석회암, 편암, 세일, 천매암 등과 같이 풍화가 빨리 진행되거나 쪼개짐이 쉽게 발생하는 연약한 암석의 경우에도 암반이 불안정을 유발시키는 경우가 많다. 이외에도 거의 모든 암반에 존재하는 절리 역시 연장성이 좋고 절리의 방향이 사면의 안정에 불리한 방향으로 발달되어 있는 경우에도 사면붕괴의 주된 원인으로 작용하기도 한다.

이처럼 사면을 구성하고 있는 암석의 종류와 지질학적 구조는 사면의 안정성에 영향을 미치는 중요한 요소이지만, 이들이 사면의 안정성에 영향을 미치는 정도를 정량적으로 파악하기는 매우 어렵다. 따라서 이 연구에서는 암종과 지질학적 구조를 점수나 등급으로 평가하는 대신

Table 2. Codes for geological characteristics.

Rock type	Igneous	Sedimentary	Metamorphic	Complex
Code	I	S	M	C
Subscript	None-0 Fault-1 Fold-2 Dyke-3 Joint-4 Foliation-5 Stratification-6 Weak zone (mafic minerals)-7 Weak rock-8 Complex-9			
Example	I ₃ : slope consisting of granite with dyke (s)			

Table 3. Parameters and ratings for RMR_{basic} (Bieniawski, 1979).

Parameter		Rating					
Compressive strength of intact rock (MPa)	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	< 1
	15	12	7	4	2	1	0
Rock quality designation (RQD)	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	20	17	13	8	3		
Spacing of discontinuities	> 2 m	0.6-2 m	20-60 cm	6-20 cm	< 6 cm		
	20	15	10	8	5		
Condition of discontinuities	Very rough and unweathered, wall rock tight and discontinuous, no separation	Rough and slightly weathered, wall rock surface separation < 1 mm	Slightly rough and moderately to highly weathered, wall rock surface separation < 1 mm	Slickensided wall rock surface or 1-5 mm thick gouge or 1-5 mm wide continuous discontinuity	5 mm thick soft gouge, 5 mm wide continuous discontinuity		
	30	25	20	10	0		
Ground-water condition	General conditions	completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing	
	Inflow per 10 m tunnel length (l/min)	None	< 10	10-25	25-125	> 125	
	Joint water pressure/major principal stress	0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5	
		15	10	7	4	0	

기호를 사용하여 암종과 지질학적 구조의 상태를 표현하는 방법을 선택하였다. 암종은 성인에 따라서 화성암, 퇴적암, 변성암과 여러 암종이 혼재하는 경우를 추가하여 4가지로 구분하였고, 이에 따른 고유기호를 Table 2와 같이 부여하였다. 지질학적 구조의 경우 KISTEC (2013)의 연구결과를 바탕으로 단층, 습곡, 암맥, 절리, 엽리, 층리, 유색광물, 연약암으로 구분하며, 지질학적 구조가 나타나지 않는 경우와 여러 가지 지질구조가 혼재하는 경우를 추가하여 10가지로 구분하였고, 이에 따른 고유번호를 Table 2와 같이 부여하였다. 최종적으로 지질학적 특성을 나타내는 요소 2는 암종에 해당하는 기호에 지질학적 구조에 해당하는 번호를 아래첨자 형태로 결합하여 나타내며, Table 2의 예로 나타난 'I₃'은 암맥이 분포하는 화강암으로 구성된 사면을 표시한 것이다.

요소-3 : 사면의 지질공학적 특성

요소-3은 사면의 공학적인 안정성을 평가하는 부분으로, 암반사면과 토사사면에 각각 다른 평가법을 사용하였다. 암반사면의 경우에는 사면 평가에 가장 널리 사용되고 있는 SMR을 사용하였다(Romana, 1985). SMR은 식 (1)과 같이 대표적인 암반분류 기법인 RMR에 불연속면과 사면과의 방향성 관계에 대한 조정계수를 빼주고 굴착 방법에 따른 계수를 더하여 점수를 구한다.

$$SMR = RMR_{basic} + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4 \tag{1}$$

여기서, RMR_{basic}은 무결암의 일축압축강도(UCS), 암질지수(RQD), 불연속면의 간격, 불연속면 상태, 지하수 상태 등 총 5개 항목을 Table 3의 평가기준에 따라 평가한 후 항목별 점수를 합산하여 구한다(Bieniawski,

Table 4. Values of adjustment factors (F_1, F_2, F_3) for different joint orientations (Romana, 1985).

Case of Slope Failure		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very unfavourable
P T W	$ \alpha_j - \alpha_s $ $ \alpha_j - \alpha_s - 180 $ $ \alpha_j - \alpha_s $	$> 30^\circ$	$30^\circ-20^\circ$	$20^\circ-10^\circ$	$10^\circ-5^\circ$	$< 5^\circ$
F ₁ Value		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P W	$ \beta_j $ $ \beta_j $	$< 20^\circ$	$20^\circ-30^\circ$	$30^\circ-35^\circ$	$35^\circ-45^\circ$	$> 45^\circ$
F ₂ Value		P/W	0.15	0.40	0.70	1.00
		T	1.0	1.0	1.0	1.0
P W	$ \beta_j - \beta_s $ $ \beta_j - \beta_s $	$> 10^\circ$	$10^\circ-0^\circ$	0°	$0^\circ-(-10^\circ)$	$< -10^\circ$
T	$ \beta_j + \beta_s $	$< 110^\circ$	$110^\circ-120^\circ$	$> 120^\circ$		
F ₃ Value		0	-6	-25	-50	-60

NOTATIONS : P-Planar failure; T-toppling failure; W-wedge failure; α_s -slope strike; α_j -joint strike; α_p -plunge direction of line of intersection; β_s -slope dip; β_j -joint dip; β_p -plunge of line of intersection.

Table 5. Values of the F_4 adjustment factor for the excavation method (Romana, 1985).

Method of excavation	Natural slope	Pre-splitting	Smooth blasting	Regular blasting or ripping	Deficient blasting
F ₄ Value	15	10	8	0	-8

Table 6. Parameters and ratings for the geotechnical stability of soil slopes.

Parameter	Rating				
Gradient	$< 1:1$	$1:1$ to $1:1.2$	$1:1.2$ to $1:1.5$	$1:1.5$ to $1:2$	$\geq 1:2$
	0	0-8	8-16	16-24	24
Soil condition	Sandy soil				
	very loose	loose	medium	dense	very dense
	0-6	6-12	12-18	18-24	24-28
	Cohesive soil				
	very soft	soft	firm	stiff	hard
	0-6	6-12	12-18	18-24	24-28
Groundwater condition	flowing	dripping	wet	damp	dry
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-24
Vegetation condition	none	poor	medium	good	
	0-6	6-12	12-18	18-24	

1979, 1989). F_1, F_2, F_3 는 사면의 방향에 대한 불연속면의 방향과 관계된 조정계수들이고 F_4 는 굴착방법에 대한 수정계수로서 Table 4와 Table 5의 평가기준에 따라 결정된다(Romana, 1985).

토사사면의 평가는 사면의 경사, 토질 조건, 지하수 상태 및 식생상태의 4가지 항목으로 평가하도록 하였으며, 평가기준은 한국시설안전공단에서 작성한 ‘안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(절토사면)’에서 제시하고 있

는 기준에 따라 Table 6과 같이 설정하였다(KISTEC, 2012). 토사사면에 대한 최종 평가점수는 각 항목별 평가점수의 합으로 계산된다.

토사사면의 최종 평가점수의 범위는 0부터 100점까지이고 암반사면의 평가에 사용된 SMR 점수의 범위도 기본적으로는 0부터 100점까지로 설정되어 있어 두 평가법의 평가점수의 범위는 같다. 따라서 이 연구에서는 토사사면과 암반사면의 평가점수에 따른 사면의 안정성 등

Table 7. Codes for the geotechnical stability of rock and soil slopes.

Rating	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20
Condition	Very Good	Good	Fair	Poor	Very Poor
Code	A	B	C	D	E

Table 8. Probability of failure and condition of protection.

Probability of failure			Condition of protection	Rating	
Failure history	Failure indication	Rating			
No	No	4	unnecessary or good condition	4	
Yes	No	3	partially damaged	3	
No	Yes	2	needs additional work	2	
Yes	Yes	1	totally damaged	1	
			necessary but no work done	0	
Total rating = Probability of failure + condition of protection					
Rating	8	6-7	4-5	2-3	1
Condition	Very Good	Good	Fair	Poor	Very Poor
Code	A	B	C	D	E

급을 Table 7과 같이 갖은 기준에 따라 5단계로 분류하고 A부터 E까지 기호를 할당하였다.

이 연구에서는 SMR과 ‘안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(절토사면)’의 평가기준을 적용하여 사면의 공학적 안정성을 평가하도록 제안하고 있으나 기타 다른 안정성 평가법(한계평형해석, 수치해석, 확률해석 등) 등도 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

요소-4 : 파괴 가능성과 보호·보강 상태

요소-4는 사면의 파괴징후와 보호·보강 시설에 의한 사면의 안정성 증가 상태를 나타내는 부분이다. 사면의 파괴 가능성은 붕괴이력과 인장균열의 발달, 수목의 전도, 지반의 변형 및 구조물의 변형 등의 파괴를 나타내는 징후나 불연속면의 방향성을 이용한 평사투영해석을 통하여 판단할 수 있다. 그러나 비록 사면의 파괴 가능성이 있다 하더라도 적절한 보호·보강 시설이 설치되면 사면의 안정성은 현저히 증가한다. 사면의 파괴 가능성 및 보호·보강 상태를 평가하기 위한 요소는 크게 두 가지로, 첫 번째는 파괴이력과 파괴 징후의 유무를 고려한 파괴 가능성이고, 두 번째는 보호·보강시설의 상태와 능력을 고려한 보호·보강상태이다(Table 8). 이 연구에서는 파괴 가능성에 1~4점을 배점하였고, 보호·보강 상태에는 0~4점을 배점하였다. 최종적인 평가 점수는 파괴가능성과 보호·보강 상태의 합으로 나타내어 1~8점이 되며, Table 8에서와 같이 최종 평가 점수에

따라서 A~E의 5개의 기호를 부여하였다. 결과적으로 기호 A에 가까울수록 보호·보강 시설이 양호한 상태를 나타내고, 기호 E에 가까울수록 보호·보강 시설이 불량한 상태를 나타낸다.

요소-5 : 사면붕괴에 따른 피해도

요소-5는 피해도(consequence)로서 사면이 붕괴할 경우 발생할 수 있는 인명이나, 재산상의 피해 정도를 표현하기 위한 것이다. 피해도는 사면 붕괴로 인하여 발생할 수 있는 피해를 수치적이거나 묘사적으로 표현하는 것으로서 사면에 대한 위험도 분석이 완료된 후에 수행되며 사면 붕괴 위험에 노출된 피해요소(elements at risk)와 피해(vulnerability)에 대한 분석이 포함된다(Jang et al., 2007). Figure 2는 이 연구에서 적용된 피해도 분석 계통도로서 사면붕괴에 따른 피해도를 피해 규모(scale of damage)와 피해 발생 확률(probability of damage)로부터 결정되도록 설정하였다. 피해의 규모에는 붕괴규모(scale of failure, $S_{(SF)}$)와 간접손실(indirect loss, $S_{(UL)}$)을 고려하였고 피해 발생 확률은 차량이나 시설물 등과 같은 피해요소가 시공간적으로 피해에 노출될 확률(temporal spatial probability of the element at risk, $P_{(ST)}$)과 붕괴물질이 피해요소까지 도달할 확률(probability of landslide reaching the element at risk, $P_{(TL)}$)을 고려하였다.

피해규모에서 고려된 사면의 붕괴규모($S_{(SF)}$)는 Song

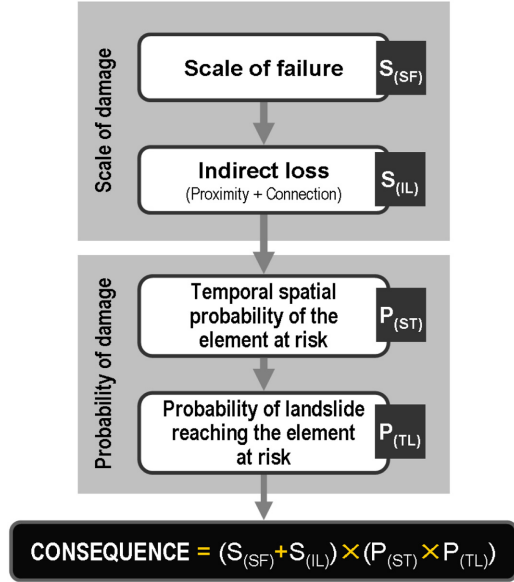


Fig. 2. Framework for consequence analysis.

and Hong (2008)의 사면붕괴규모기준을 활용하였다. Song and Hong (2008)은 기존의 사면활동체적에 따른 기준들(JNR, 1974; Okada et al., 1992; Sugiyama et al, 1995; Asian Technical Committee on Geotechnology for Natural Hazards in ISSMFE, 1997)을 토대로 붕괴 규모가 150 m^3 이하는 소규모로, $150 \text{ m}^3 \sim 900 \text{ m}^3$ 는 중규모로, 900 m^3 이상은 대규모로 분류하였다. 즉, 사면붕괴 이후 활동토괴의 제거작업 기간이 1일 이하인 경우 소규모파괴, 2일에서 7일인 경우 중규모 파괴, 7일 이상인 경우 대규모 파괴로 간주하였다. 이 연구에서는 붕괴규모에 따라 점수를 0 부터 0.7점까지 부여하였다 (Table 9).

간접손실(S_{IL})은 접근성(proximity)과 연락성(connection)을 고려한 Jang et al. (2007)의 간접손실 결정법을 활용하였다. Jang et al. (2007)은 접근시간과 우회도로의 여부에 따라 접근성을 평가하였는데 사면붕괴가 발생할 경우, 이를 처리하기 위해 접근하는 시간이 30분 이내이고 우회도로가 있어 통행이 원활하다면 접근하기 '쉬움(easy)'으로 구분하였고, 접근시간이 30분 이내이지만 우회도로가 없어 통행에 불편을 가져올 수 있거나 또는 접근시간이 30분 이상이고 우회도로가 있는 경우는 '보통(normal)'으로 구분하였다. 또한 접근시간이 30분 이상이고 우회도로가 없어 사면 붕괴 시 통행이 불편하거나, 접근시간이 60분 이상일 경우에는 '어려움(difficult)'

으로 구분하였다(Table 9). 연락성은 사면 붕괴가 발생할 경우, 그에 대한 인지여부를 평가하는 것이다. 사람의 시야 거리에서 사면 붕괴를 판단 할 수 있는 경우 연락성이 쉽다고 구분하였고, 판단할 수 없는 경우 연락성이 어렵다고 구분하였다. 접근성은 '쉬움', '보통', '어려움'에 따라가 0, 0.1, 0.2 점을 부여하며, 연락성은 쉬울 때는 0, 어려울 때는 0.1 점을 부여하게 된다(Table 9). 간접손실 점수는 접근성과 연락성 점수의 합으로 계산되고 0 부터 0.3점의 범위를 갖는다. 종합적으로 피해 규모 점수는 붕괴규모와 간접손실 점수를 합하여 계산되며 피해규모가 전혀 없는 0점부터 최대 피해규모인 1 점까지의 범위를 갖는다.

피해발생 확률은 사면붕괴 시 시간과 공간적으로 차량이나 주거시설 등과 같은 피해요소들이 피해에 노출될 확률(P_{ST})과 붕괴물질의 피해요소까지 도달할 확률(P_{TL})을 함께 고려하였다. 먼저 피해요소가 피해에 노출될 확률의 경우에는 Fell et al. (2005)가 제안한 방법을 적용하였다. Fell et al. (2005)은 산사태 위험도 평가와 관리를 위한 체계개발 연구에서 사면붕괴 시 차량과 주거시설이 시간적, 공간적으로 피해에 노출될 확률(P_{ST})을 식 (2)와 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$P_{(ST)_{road}} = \frac{N_V}{24} \cdot \frac{L}{1000} \cdot \frac{1}{V_V} \quad (2)$$

$$P_{(ST)_{building}} = \frac{T_B}{24} \cdot \frac{D_B}{7} \quad (3)$$

여기서, N_V 는 일일 평균 차량통과 대수, L 는 차량의 평균 길이(m), V_V 는 차량의 평균 속도(km/h), T_B 는 1일 당 거주 시간 그리고 D_B 는 1주일 당 거주 일이다. 피해에 노출될 확률, $P_{(S:T)}$ 는 0부터 1까지의 범위를 가지며, 피해에 노출될 가능성이 전혀 없을 경우에는 0이 되고 가능성이 100%일 때는 1이 된다.

붕괴물질이 피해요소에 도달될 확률(P_{TL})은 붕괴물질의 이동거리(travel distance of slope failure)와 붕괴물질의 이동을 저지시키는 도랑(ditch)의 효과를 함께 고려하였다. 붕괴물질의 이동거리는 Heim (1932)이 제안한 식 (4)와 Straub (1997)의 연구에 따른 식 (5)을 활용하여 구할 수 있다.

$$L_{max} = \frac{H_{max}}{\mu_{app}} \quad (4)$$

$$\text{Log } \mu_{app} = -0.18 \text{Log}(V) - 0.89 \quad (5)$$

Table 9. Parameters and ratings for the consequence of failure.

Parameter		Description			Rating	
Scale of damage	Scale of failure [$S_{(SF)}$]	Working time for removal		Scale of failure		
		S	1 day	$\leq 150 \text{ m}^3$	0-0.2	
		M	2-7 days	150-900 m^3	0.2-0.7	
	L	≥ 7 days	$\geq 900 \text{ m}^3$	0.7		
	Indirect loss [$S_{(IL)}$]	• Proximity				
		easy access to failure				0
average access to failure				0.1		
difficult access to failure				0.2		
Probability of damage	Temporal spatial probability of the element at risk [$P_{(ST)}$]	• Road				
		$P_{(ST)_{road}} = \frac{N_V}{24} \cdot \frac{L}{1000} \cdot \frac{1}{V_V}$				0-1
		• Building				
	$P_{(ST)_{building}} = \frac{T_B}{24} \cdot \frac{D_B}{7}$					
	Probability of landslide reaching the element at risk [$P_{(TL)}$]	• Travel distance of slope failure				
		out of the element at risk				0.3
neighboring the element at risk				0.3-0.7		
on the element at risk				0.7-1		
• Effectiveness of ditch						
efficient				0.25		
medium				0.25-0.5		
inefficient				0.5-0.75		
none				1		
Total consequence		Consequence = [$S_{(SF)} + S_{(IL)}$] \times [$P_{(ST)} \times P_{(TL)}$]				
Code		A	B	C	D	E
Rating		0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1

식 (4)에서 L_{max} 은 붕괴물질의 최대 수평이동거리(m), H_{max} 는 붕괴물질의 발생이 가능한 최대 높이(m), μ_{app} 는 붕괴물질이 수평 이동하여 도달하는 끝 지점과 붕괴물질의 발생이 가능한 최대 높이와의 비를 의미한다. μ_{app} 는 Straub (1997)이 제안한 식 (5)을 이용하여 계산할 수 있다. 식 (5)에서 V 는 붕괴물질의 체적(km^3)이다.

식 (4)와 (5)로 부터 계산된 붕괴물질의 최대 수평이동거리(L_{max})로부터 붕괴물질과 피해요소와의 간격을 추정할 수 있는데, 이 연구에서는 이동된 붕괴물질이 피해요소와 수 미터(m) 이상의 충분한 간격이 있을 경우 붕괴물질이 ‘피해요소에 도달하지 않음(out of the element at risk)’으로, 붕괴물질이 피해요소에 1m 이내로 근접하는 것으로 분석되었을 경우에는 ‘피해요소에 근접

(neighboring the element at risk)’로, 붕괴물질의 이동거리 내에 피해요소가 위치할 경우에는 ‘피해요소에 도달(on the element at risk)’로 분류하고 전혀 도달하지 않는 0 부터 붕괴물질이 완전히 피해요소에 도달하는 1 까지 점수를 배점하였다(Table 9). 도랑의 효능은 붕괴물질의 이동을 제어할 수 있는 능력에 따라 ‘충분(efficient)’, ‘보통(mediaum)’, ‘불충분(inefficient)’, ‘없음(none)’으로 구분하고 완전히 붕괴물질을 제어할 수 있는 충분한 능력이 있을 경우 0부터 전혀 제어할 수 없는 경우인 1까지 점수를 배점하였다(Table 9). 종합적으로 붕괴물질이 피해요소에 도달될 확률($P_{(TL)}$)은 붕괴물질의 이동거리에 따른 배점과 도랑(ditch)의 효능에 따른 배점의 곱으로 나타낸다.

Table 9는 피해도 평가를 위한 평가기준과 배점, 그리고 최종 평가 점수에 따른 기호를 나타낸다. 평가 기준에 따라 붕괴규모(S_{SF}), 간접손실(S_{IL}), 시공간적으로 피해에 노출될 확률(P_{ST}), 붕괴물질이 피해요소에 도달할 확률(P_{TL})이 결정되면 최종적인 피해도 점수는 식 (6)으로 부터 구할 수 있다.

$$Consequence = [S_{SF} + S_{IL}] \times [P_{ST} \times P_{TL}] \quad (6)$$

피해도의 평가 결과로 얻어지는 점수는 0~1의 값을 가지며, 점수에 따라 A~E의 기호를 부여하였다(Table 9). 기호 A에 가까울수록 사면이 붕괴할 시에 발생하는 피해가 작다는 것을 의미하고, E에 가까울수록 피해가 크다는 것을 의미한다.

사면기호시스템(Slope code system, SCS)

사면기호시스템(SCS)은 5가지의 평가요소들에 대한 평가와 분류 결과로부터 결정된 요소별로 기호(code)를 조합하여 사면의 특성을 나타내게 된다. Fig. 3은 SCS의 전반적인 기호체계를 모식도로 나타낸 것으로서 ‘code 1’은 구성 물질에 따라서 사면을 토사사면(S), 암반사면(R), 혼합사면(M), 복합사면(C)의 4종류로 분류한다. ‘code 2’는 사면을 구성하는 암종(rock type)과 내포된 대표 지질학적 구조를 표현하기 위한 것으로 성인에 따른 암종 기호와 지질구조 특성 기호를 결합하여 나타낸다. ‘code 3’은 사면의 공학적인 안정성을 표현하고 있으며, ‘code 4’는 사면의 파괴 가능성에 따른 보호·보강상태를 나타낸다. ‘code 3’과 ‘code 4’는 사면의 전반적인 안정성을 나타내며 평가에 점수에 따라 A부터 E까지 5개의 상태 등급으로 표현된다. ‘code 5’는 사면붕괴 시 발생할 수 있는 피해도를 나타내며, ‘code 3’과 ‘code 4’처럼 평가 점수에 따라 A부터 E까지 5개의 등급으로 표현된다. 만약 Fig. 3의 예처럼 SCS 평가로부터 사면의 기호가 RI₄DDB로 부여되었다면, 이 사면은 절리가 발달된 화성암으로 이루어진(code 2 ‘I₄’) 암반사면(code 1 ‘R’)이고 SMR 평가결과 공학적 안정성이 불량한(code 3 ‘D’) 상태라는 것을 알 수 있다. 또한 이 사면은 과거 붕괴이력과 인장균열과 같은 붕괴 징후가 관찰되며 보호·보강상태가 거의 효과를 발휘하지 못하는 상태(code 4 ‘D’)이므로 사면의 안정성 확보를 위한 빠른 조치가 필요하다는 것을 알 수 있다. 그러나 사면붕괴규모가 작고 피해발생 확률이 작아 실질적인 인명이나 재산상의 피해가 발생할 가능성이 크지 않다(code 5 ‘B’)는 것을 알 수 있다.

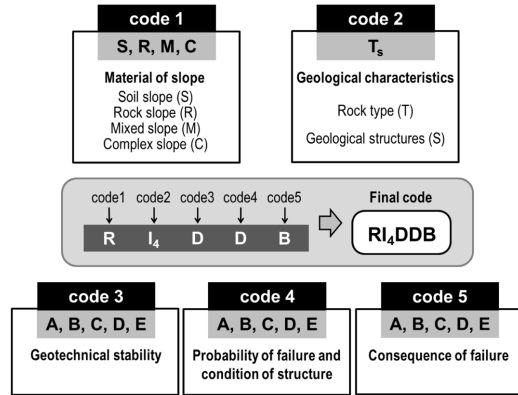


Fig. 3. Diagram showing the slope code system.



Fig. 4. Photograph of slope-1.

SCS 현장 적용 사례

SCS의 실효성을 검토하기 위하여 실제 절토사면을 대상으로 SCS 평가법을 적용하였다. 평가 적용된 사면은 경상남도 울주군에 위치한 사면-1과 강원도 화천군에 위치한 사면-2로서 일반적인 규모의 도로 절토사면이다.

사면-1

사면-1은 경상남도 밀양과 언양을 잇는 국도 24호선 상에 위치하고 있으며 행정구역상으로 경상남도 울주군 상북면 덕현리에 속한다. 사면은 길이 87m, 높이 약 30m 규모이며 평균 약 60° 정도의 경사를 보이는 암반 사면이다(Fig. 4). 사면을 구성하고 있는 암석은 불국사 화성암류에 해당되는 화강암이며, 풍화정도는 약간풍화에서 보통풍화의 양상을 보인다. 사면 내에는 80/120, 15/323, 60/337의 방향성을 갖는 3조의 절리군이 발달해 있으며, 3개 이상의 단층이 관찰되었다.

Table 10은 사면-1에 대한 SCS 평가 결과를 종합적으로 나타낸 것이며, 요소별 평가내역은 다음과 같다. 사면-1의 주된 구성물질은 암반이므로 요소-1의 기호는 암반사면에 해당하는 ‘R’을 부여하였다. 또한 사면-1의 구성암성은 화강암으로서 화성암에 해당하고 지질구조 특성에는 3개 이상의 단층이 존재하는 것을 고려하여 요

Table 10. Result of SCS evaluation of slope-1.

Element of SCS	Summary of assessment	Rating	Code
Element 1 Slope material	Rock slope		R
Element 2 Geological characteristics	Rock type : Igneous rock (granite) Geological structure : Fault		I ₁
Element 3 Slope material	UCS : 85 MPa RQD : 55% Joint spacing : about 0.1 m Condition of discontinuities Persistence : about 8.0 m Aperture : about 5 mm Roughness : slightly rough weathering : Moderately weathered Ground water condition : wet F1×F2×F3 = -0.15 F4 = 0 (mechanical excavation)	52	C
Element 4 Slope material	Failure history : Yes Failure indication : Yes Condition of protection : Partially damaged	4	C
Element 5 Slope material	Scale of failure : about 900 m ³ Indirect loss Proximity : average access to failure Connection : easy contact with someone Temporal spatial probability, $P_{(ST)}$: 0.026 Probability of landslide reaching, $P_{(TL)}$: 0.75 Travel distance : on the road Effectiveness of ditch : inefficient	0.007	A
Final Code			RI ₁ CCA

소-2의 기호는 'I₁'를 부여하였다.

암반사면인 사면-1의 공학적 안정성 평가에는 SMR이 사용되었고 사면-1의 SMR 점수는 52로 보통정도의 공학적 안정성을 갖는 것으로 분석되어 요소-3의 기호는 'C'를 부여하였다.

사면-1에서는 소규모의 썩기파괴 이력이 관찰되었고, 추가적인 썩기파괴나 낙석이 발생할 수 있는 다수의 이완 암블력이 관찰되었다. 또한 사면-1에는 낙석방지울타리와 낙석방지망이 설치되어 있으나 사면의 규모나 암반상태를 고려할 때 현재의 낙석방지 시설로는 도로의 안정성을 충분히 확보하기 어려운 상태로 판단되며, 낙석방지울타리의 경우 기존에 발생되었던 낙석으로 인해 일부 구간이 파손되어 있는 상태다. 이러한 조사결과를 바탕으로 분석된 요소-4의 평가점수는 4점이며, 이에 따른 요소-4의 기호는 'C'가 부여되었다.

사면-1에서 관찰된 썩기파괴 위험 암반구간을 바탕으로 추정된 최대 붕괴규모는 약 900 m³ 정도이며, 붕괴 발생시 접근성은 '보통'으로 연락성은 '쉬움'으로 가정하였다. 식 (2)로 계산된 차량의 시공간적 피해 노출될 확

률($P_{(ST)}$)은 약 0.022이다. 이때, 평균 차량길이는 5 m, 평균 주행속도는 60 km/h로 가정하였고 일일 평균 차량통행량(N_V)는 국토교통부의 교통량정보제공시스템(www.road.re.kr)에서 2013년 통계자료를 조회하여 6476대로 적용하였다. 붕괴물질이 도로에 침범할 확률($P_{(TL)}$)을 분석하기 위해 필요한 붕괴물질의 최대 이동거리는 약 19 m로 계산되었고 붕괴물질 최대 이동거리와 보호·보강상태를 조합하여 계산된 사면-1의 $P_{(TL)}$ 은 0.75이다. 이때, 최대 붕괴높이는 30 m, 붕괴물질의 체적은 900 m³로 가정되었다. 최종적으로 식 (6)으로 부터 계산된 사면-1의 피해도는 약 0.007 이고 요소-5의 기호는 'A'가 부여하였다.

사면-1에 대한 SCS 평가 결과를 종합하면 사면-1의 사면기호는 'RI₁CCA'이다. 이 사면기호는 사면-1이 암반사면이고 화성암으로 이루어져 있으며, 단층이 발달되어 있다는 것을 알려준다. 또한 사면의 공학적 안정성과 보수보강상태는 보통정도 수준이며, 사면붕괴 시 예상되는 피해도는 미미하다는 것을 알려 준다.

사면-2

사면-2는 강원도 춘천과 화천을 잇는 407번 지방도 상에 위치하고 있으며 행정구역상으로 강원도 춘천시 사북면에 속한다. 사면은 길이 50 m, 높이 약 14 m 규모이며 약 52°~62° 정도의 경사를 보이는 토사, 암반 혼합사면이다(Fig. 5). 사면을 구성하고 있는 암석은 중생대 주라기에 생성된 복운모 화강암이며, 사면의 중앙을 기준으로 좌측 하단부분은 약간풍화에서 보통풍화의 정도이고 그 외의 부분들은 보통풍화에서 심한풍화 양상을 보인다. 사면 내에는 51/070, 82/090, 61/347의 방향성을 갖는 3조의 절리군이 발달해 있으며, 3개의 뚜렷한 단층이 존재하고 단층 주변으로 절리가 매우 조밀하게 발달되어 있다.

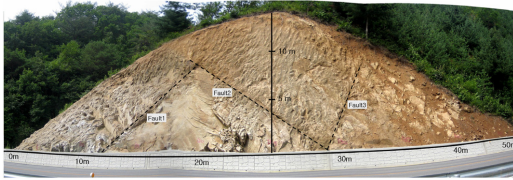


Fig. 5. Photograph of slope-2.

게 발달되어 있다.

Table 11은 사면-2에 대한 SCS 평가 결과를 종합적으로 나타낸 것이며, 요소별 평가내역은 다음과 같다. 사면-2의 주된 구성물질은 암석이나 사면의 1/3 정도는 심한풍화상태이고 사면의 상부를 중심으로 토층이 발달되어 있는 것을 고려하여 요소-1의 기호는 혼합사면에 해당하는 ‘M’을 부여하였다. 사면-2의 구성암성은 화강암으로서 화성암에 해당하고 지질구조 특성에는 3개의 뚜렷한 단층이 존재하는 것과 절리밀도가 높다는 것을 고려하여 요소-2의 기호를 ‘I₉’으로 부여하였다.

사면-2의 공학적 안정성 평가에는 SMR이 사용되었고 사면-2의 SMR 점수는 38로 공학적 안정성이 불량한 것으로 분석되어 요소-3의 기호는 ‘D’를 부여하였다.

사면-2에서는 사면 우측과 상부의 토사부분에서 표층 유실이 발생하는 것으로 관찰되었고 단층 주변의 암반 구간에서는 낙석이 발생할 수 있는 다수의 이완 암블럭이 관찰되었다. 사면-2에는 1 m 높이의 L형 측구 외는 특별한 보호·보강시설이 없어 사면붕괴 발생시 도로의 안정성을 확보하기 어려운 상태로 판단된다. 따라서 요

Table 11. Result of SCS evaluation of slope-2.

Element of SCS	Summary of assessment	Rating	Code
Element 1 Slope material	Mixed slope (soil and rock)		M
Element 2 Geological characteristics	Rock type : Igneous rock (granite) Geological structure : Fault and heavy joint		I ₉
Element 3 Slope material	UCS : 61 MPa RQD : 47% Joint spacing : about 0.1 m Condition of discontinuities Persistence : about 6.0 m Aperture : about 5 mm Roughness : smooth weathering : MW~HW Ground water condition : damp F1×F2×F3 = -4.2 F4 = 0 (mechanical excavation)	38	D
Element 4 Slope material	Failure history : Yes Failure indication : Yes Condition of protection : Needs additional work	3	D
Element 5 Slope material	Scale of failure : about 200 m ³ Indirect loss Proximity : average access to failure Connection : easy contact with someone Temporal spatial probability, P _(ST) : 0.016 Probability of landslide reaching, P _(TL) : 0.75 Travel distance : on the road Effectiveness of ditch : inefficient	0.004	A
Final Code			MI ₉ DDA

소-4의 평가점수는 3점이며, 이에 따른 요소-4의 기호는 'D'가 부여되었다.

사면-2에서 추정된 최대 붕괴규모는 약 200 m³ 정도이며, 붕괴발생시 접근성은 '보통'으로 연락성은 '쉬움'으로 가정하였다. 식 (2)로 계산된 차량의 시공간적 피해 노출될 확률($P_{(ST)}$)은 약 0.016이다. 이때, 평균 차량 길이는 5 m, 평균 주행속도는 60 km/h로 가정하였고 일일 평균 차량통행량(N_V)는 국토교통부의 교통량정보제공시스템(www.road.re.kr)에서 2013년 통계자료를 조회하여 4558대로 적용하였다. 붕괴물질이 도로에 침범할 확률($P_{(TL)}$)을 분석하기 위해 필요한 붕괴물질의 최대 이동거리는 약 6.8 m로 계산되었고 붕괴물질 최대 이동거리와 보호·보강상태를 조합하여 계산된 사면-2의 $P_{(TL)}$ 은 0.75이다. 이때, 최대 붕괴높이는 14 m, 붕괴물질의 체적은 200 m³로 가정되었다. 최종적으로 계산된 사면-2의 피해도는 약 0.004이고 요소-5의 기호는 'A'가 부여하였다.

사면-2에 대한 SCS 평가 결과를 종합하면 사면-2의 사면기호는 'MI₆DDA'이다. 이 사면기호는 사면-2가 토사와 암반이 혼합된 사면이고 화성암으로 이루어져 있으며, 절리 외에 단층과 같은 지질구조들이 복합적으로 발달되어 있다는 것을 알려준다. 또한 사면의 공학적 안정성과 보수보강상태는 불량한 수준이지만 사면붕괴 시 예상되는 피해도는 미미하다는 것을 알려 준다.

요약 및 결론

사람들이 일상에서 접하는 사면을 안전하게 관리하는 것은 매우 중요한 과제이다. 이는 사면붕괴로 인해 인명과 막대한 재산피해가 발생할 가능성이 크기 때문이다. 사면을 안전하게 관리하고 사면재해에 효과적으로 대응하기 위해서는 사면의 공학적 안정성, 지질특성, 붕괴에 의해 유발될 수 있는 피해특성 등과 같이 다양한 정보가 필요하다. 이러한 필요성을 충족시키고자 이 연구에서는 기존에 제안되었던 사면 평가법들보다 더 많은 평가요소들을 갖고 있고 사면의 상태를 구체적으로 표현할 수 있는 사면기호시스템(SCS)을 제안하였다.

SCS의 주된 목적은 관리(또는 평가) 대상 사면의 종합적인 상태를 쉽고 빠르게 이해할 수 있도록 다양한 평가를 실시하고 그 결과를 종합적이고 단순한 형태로 표현하는 것이다. 이를 위해 SCS는 5가지의 평가 요소로 구성되어 있다. '요소 1'은 사면의 구성물질을 나타내고 있으며, '요소 2'는 사면의 지질학적 특성을 성

에 따른 암종(rock type)과 지질구조 특성의 조합으로 나타내고 있다. '요소 3'은 사면의 공학적 안정성 평가하여 사면의 안정성을 등급으로 나타내며, '요소 4'는 사면의 안정성을 증대시킬 수 있는 보호·보강 상태를 나타내고 있다. 마지막으로 '요소 5'는 사면붕괴 시 발생할 수 있는 피해의 정도를 나타낸다. SCS의 5가지 평가 요소들은 각각 평가 결과를 나타내는 고유한 분류 기호들을 가지고 있으며, 평가의 최종 단계는 각 요소별 평가 결과로부터 부여된 기호들을 조합하여 사면의 종합적인 상태를 나타내는 최종 기호를 만들어 내는 것이다.

SCS는 사면의 공학적인 안정성 점수 도출에 치중되어 있던 기존의 평가법들과 달리 공학적 안정성뿐만 아니라 사면 관리에 유용한 여러 가지 정보를 간략한 기호의 조합으로 종합적으로 표현할 수 있어 사면재해 관리에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 더욱 효율적인 관리를 위해서는 인터페이스를 결합한 체계적이고 향상된 데이터베이스 프로그램을 개발할 필요성이 있으며, 여러 연구자들과 사면관리 실무자들의 의견을 수집하여 평가 결과가 객관적이고 정확할 수 있도록 각 평가요소별 평가기준에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 (주)지질유산환경연구소의 지원으로 수행하였습니다.

References

- Asian Technical Committee on Geotechnolgy for Natural Hazards in ISSMFE, 1997, Manual for zonation on areas susceptible to rain-induced slope failure, Japanese Geotechnical Society, Tokyo, 81p.
- Bieniawski, Z. T., 1979, The geomechanics classification in rock engineering applications, In : Proc. of the 4th Congress of the International Society for Rock Mechanics, Montreux, 2, 41-48.
- Bieniawski, Z. T., 1989, Engineering rock mass classifications, New York, Wiley, 365p.
- Choi, K., 1986, Landslides occurrence and its prediction in Korea, Ph.D. Thesis, Kangwon National University, Korea, 45p (in Korean with English abstract).
- Cruden, D. M., 1991, A simple definition of a landslide, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 43, 27-29.
- Dai, F. C., Lee, C. F., and Ngai, Y. Y., 2002, Landslide risk assessment and management: an overview, Engineering Geology, 64, 65-87.
- EX (Korea Expressway Corporation), 2004, A study on

- development of highway slope management system, Korea Expressway Corporation, RT 04-05, 212p (in Korean with English abstract).
- Fell, R., Ho, K. K. S., Lacasse, S., and Leroi, E., 2005, State of the Art Paper 1-A framework for landslide risk assessment and management. In : Proc. of the International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada, 31p.
- Heim, A., 1932, Bergsturz und menschenleben, Verlag Fretzund Wasmuth, Zurich, 128p.
- Jang, H. S., Oh, C. S., and Jang, B. A., 2007, Risk analysis for cut slope using probabilistic index of landslide, The J. of Eng. Geol., 17, 163-176 (in Korean with English abstract).
- JNR (Japanese National Railways), 1974, Modern inspection and maintenance procedure for railway structures, Japan Railway Civil Engineering Association, 691-739 (in Japanese).
- Joyce, E. B. and Evans, R. S., 1976, Some areas of landslide activity in Victoria, Australia, In : Proc. of the Royal Society of Victoria, Victoria, 88: 95-108.
- Kim H. T., Ryu, J. S., Kang, I. K., and Kim, Y. J., 2001, A study on simplified stability check list for stability estimation of rock slope, In : Proc. of Korean Geoenvironmental Society '01 conference, Taejeon, 123-128 (in Korean with English abstract).
- KISTEC (Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation), 2012, Manual for detail guideline of safety inspection and Precision safety diagnosis (Cut slope), Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, RD-12-E6-021, 163p (in Korean).
- KISTEC (Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation), 2013, Cut slope management manual. Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, RD-12-E6-059, 89p (in Korean).
- KICT (Korea Institute of Construction Technology), 1989, Appraisal and construction method of slopes, KICT 89-GE 111, 331p (in Korean).
- Koirala, N. P. and Watkins, A. T., 1988, Bulk appraisal of slope in Hong Kong, In : Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, 1181-1186.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2013, Traffic monitoring system, Retrieved from <http://www.road.re.kr>.
- Okada, K., Sugiyama, T., Muraishi, H., and Noguchi, T., 1992, Statistical estimating method of railway embankment damage due to rainfall, Doboku Gakkai Ronbunshu, Japan Society of Civil Engineers, 448, 25-34.
- Park, D., 2001, Risk analysis of slopes for the disaster impact assessment, National Institute of Disaster Prevention, NIDP-2001-09, 133p (in Korean with English abstract).
- Park, D., Kim, T. H., Oh, J. R., and Park, J. H., 2005, A study on the monitoring and detection of slope failure (II) - Focusing on the application of rainfall data, National Institute of Disaster Prevention, NIDP-ER-2005-02, 234p (in Korean with English abstract).
- Park, D., Kim, T. H., Oh, J. R., Devkota, K., Jung, S. J., Song, Y. K., Son, Y. G., and Cha, A. R., 2011, Establishment of collapse warning and evacuation criteria for steep slopes, National Disaster Management Institute, NDMI-PR-2011-14-01, 156p. (in Korean with English abstract).
- Pierson, L. A. and Van Vickle, R., 1993, Rockfall hazard rating system: participant's manual, Federal Highway Administration publication, FHWA SA-93-057.
- Romana, M., 1985, New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes, Int. Symp. on the Role of Rock Mechanics ISRM, Zacatecas: 49-53.
- Song, Y. S. and Hong, W. P., 2008, Proposal of a design method of slope reinforced by the earth retention system, The J. of Eng. Geol., 18, 17-26 (in Korean with English abstract).
- Song, Y. S., Park, D., Son, Y. J., and Kim, T. H., 2012, A study on the improvement of stability checklist by analyzing the evaluation element for steep slopes, J. of Korean Society of Hazard Mitigation, 12, 77-84 (in Korean with English abstract).
- Straub, S., 1997, Predictability of long runout landslide motion: implications from granular flow mechanics, Geol. Rundsch, 86, 415-425.
- Sugiyama, T., Okada, K., Muraishi, H. Noguchi, T., and Samizo, M., 1995, Statistical rainfall risk estimating method on deep collapse of cut slope, Soils and Foundations, 35(4), 37-48.

장현식

강원대학교 지구물리학과
200-701 강원도 춘천시 강원대학길 1
Tel: 070) 7843-3329
Fax: 033) 244-9276
Email: whitennull@kangwon.ac.kr

김지혜

(주)지오엔소프트
200-701 강원도 춘천시 서면 박사로 882 강원창작
개발센터 B106호
Tel: 033) 243-5303
Fax: 033) 243-5305
Email: luminous11@hotmail.com

장보안

강원대학교 지구물리학과
200-701 강원도 춘천시 강원대학길 1
Tel: 033) 250-8583
Fax: 033) 244-9276
E-mail: bajang@kangwon.ac.kr