

## 거동 특성에 따른 사면 파괴 지수 시스템 : SFi-system

### Slope Failure Index System Based on the Behavior Characteristics : SFi-system

윤 운 상* <sup>1</sup>	Yoon, Woon-Sang	정 의 진* <sup>2</sup>	Jeong, Ui-Jin
최 재 원* <sup>3</sup>	Choi, Jai-Won	김 정 환* <sup>4</sup>	Kim, Jeong-Hwan
김 원 영* <sup>5</sup>	Kim, Won-Young	김 춘 식* <sup>6</sup>	Kim, Chun-Sik

#### Abstract

Failure of the cut slope is triggered by combination of internal and external failure factors. Internal failure factors are related to geological and geometrical conditions of slope itself, and natural and/or artificial loadings on slope can be the external failure factors. Influences of these failure factors show different intensity according to the ground condition and are controlled by behavior characters of the slope. In this study, the soil depth ratio(SR), block size ratio(BR) and rock strength are used as the criteria to divide ground condition based on behavior characteristics. Ground condition of the slope is divided into discontinuous jointed rock mass and continuous soil-like mass, highly fractured rock mass and massive rock mass by the criteria(SR and BR). The SFi-system is a rating system to determine the slope failure index(SFi) by analyzing internal and external factors based on classification of the ground condition. The results of the SFi-system application to the real cut slopes show close relationship between the SFi value and potential or dimension of the failure. Therefore, the SFi-system can be used as a useful tool to predict and analyze the characteristic of the slope failure.

#### 요 지

절취 사면에서의 파괴는 사면의 내부 또는 외부 요인들의 결합에 의해 발생한다. 내부 요인은 사면 자체의 지질 또는 형상 조건과 관련된 파괴 요인이며, 외부 요인은 자연적 또는 인위적으로 사면에 가해지는 파괴 요인이다. 각 요인에 의한 사면 파괴에 끼치는 영향의 정도는 사면을 구성하는 지반 조건에 따라 다르며, 사면의 거동 특성에 의해 제어된다. 이 연구에서는 사면의 지반 조건을 거동 특성에 따라 구분하는 기준으로 토층심도율(SR), 블록크기비(BR) 및 암석강도를 사용하였다. 이런 기준에 의하면 사면의 지반 조건은 불연속체적 절리 암반과 연속체적 토상 지반, 파쇄 암반, 괴상 암반으로 구분된다. SFi-system은 이와 같이 구분된 지반 조건에 따라 내부 파괴 요인과 외부 파괴 요인을 평가함으로써 사면 파괴 지수(SFi)를 결정하는 평가 시스템이다. 이 평가 시스템을 실제적으로 사면에 적용한 결과, 사면 파괴 지수는 사면 파괴의 가능성 및 규모와 밀접한 관련이 있음을 보여준다. 따라서 SFi-system은 사면의 파괴 예측과 그 특성 분석을 위한 효과적인 도구로 사용될 수 있다.

**Keywords :** Behavior, Block size ratio(BR), SFi-system, Slope, Soil depth ratio(SR)

\*1 정회원, 서울대학교 자연대학 지구환경과학부 연구원, (주)넥스지오 대표이사 (Member, CEO, NEXGEO Inc., gaia@nexgeo.com)

\*2 정회원, 서울대학교 자연대학 지구환경과학부 연구원 (Member, Researcher, SEES, Seoul Nat'l Univ.)

\*3 (주)넥스지오 컨설팅사업부 과장 (Manager, NEXGEO Inc.)

\*4 서울대학교 자연대학 지구환경과학부 정교수 (Professor, SEES, Seoul Nat'l Univ.)

\*5 한국지질자원 연구원 환경지질연구부 부장 (Director, Environmental Geology Division, KIGAM)

\*6 정회원, 한국건설기술연구원, 연구관리그룹 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Construction Technology Quality Center, KICT)

# 1. 서론

절취 사면에서의 파괴는 사면 자체의 내부 파괴 요인과 사면의 외부로부터 가해지는 자연적 또는 인위적인 외부 파괴 요인의 결합에 의해 발생한다. 내부 파괴 요인은 사면을 구성하는 재료 특성과 및 불연속면을 포함하는 지질 구조 특성 등 지반의 조건과 사면의 높이 및 기울기 등 형상 조건이 포함된다. 외부 파괴 요인은 강우, 지하수 조건, 동결-융해 및 지진 등의 자연적 파괴 요인과 인위적인 하중의 증감, 절취 방법 및 보강 정도 등이 해당된다(그림 1). 이러한 사면 파괴 요인을 적절히 평가하기 위해 Romana(1985)의 SMR system을 포함하여 많은 경험적 평가 시스템이 국내외에서 제안된 바 있다(GCO, 1984; 日本道路公團, 1986; 최경, 1986; Koirala 와 Watkins, 1988; 조친환 외, 1989, Pierson과 Vickel, 1993, Gupta와 Anbalagan, 1997; 유병욱, 1997; 구호본 외, 2000).

여러 연구자들에 의해 제시된 다양한 사면 파괴 요인은 지반의 조건에 따라서 분명한 영향도의 차이를 보인다. 예를 들어, 불연속면의 방향은 절리가 발달한 암반 사면에서는 결정적 파괴 요인으로 작용하지만, 풍화가 극심하게 진행된 암반 사면에서는 그 영향이 현저히 감소된다. 즉, 사면의 지반 조건에 따라서 파괴에 미치는 개개 요인의 영향도가 제어될 수 있다.

이 논문에서는 지반의 거동 특성과 사면 파괴 요인과의 관계에 기초한 사면 파괴 지수 시스템인 SFi-system (Slope Failure index system)을 제안하고자 한다. 이 시스템의 개발과 검토를 위해 절취 사면의 지반 조건 및 파괴 특성이 조사되었으며, 373개소의 사면에 대한 데이터베이스가 구축되었다. 이 조사 자료는 거동 특성에 따라 사면의 지반 조건을 구분할 수 있는 기준을 도출하기

위해 사용되었으며, 이를 바탕으로 제안된 SFi-system과 실제 사면의 파괴 가능성 및 제반 파괴 특성과의 관련성을 분석하고, 이 평가 시스템의 활용성을 검토하는데 사용되었다.

# 2. 사면의 거동 특성과 지반 조건

사면을 구성하는 지반의 거동 특성에 대한 이해는 그 사면에서 발생할 수 있는 파괴 유형과 파괴의 직접적 요인들을 도출할 수 있는 근거가 된다. 이 논문에서는 사면 파괴 형태와 거동 특성의 관련성을 논의하고, 거동 특성을 달리하는 지반 조건으로 사면을 구분하기 위한 기준을 제안하고자 한다.

## 2.1 파괴 유형과 거동 특성

사면의 파괴 유형은 그 구성 물질과 파괴된 물질의 이동 유형에 따라 다양하게 분류되어 질 수 있다. 이 논문에서는 Varnes(1978)와 Hoek과 Bray(1981)의 분류에 기초하여 6가지의 파괴 유형으로 구분하였다. 이들은 각기, 표면 파괴(surface failure, S), 원호 파괴(circular failure, C), 쐐기 파괴(wedge failure, W), 평면 파괴(plane failure, P), 전도 파괴(toppling failure, T)와 낙석(fall, F)이다. 이 중에서 표면 파괴의 경우는 표면 침식이나 파이프링(piping) 등 비교적 얇은 파괴 심도를 갖는 흩사면의 손상 및 파괴를 통칭하는 것으로 정의하였다.

Hoek(1994)과 Palmström(1996)은 거동 특성에 따라 암반을 불연속체 및 연속체적 지반으로 구분한 바 있다. 여기서는 사면의 파괴 유형을 지반의 거동 특성에 따라 불연속적 거동(discontinuous behavior) 또는 연속적 거동(continuous behavior)으로 구분하였다. 쐐기 파괴, 평면 파괴, 전도 파괴 및 낙석은 암반의 불연속면에 의해

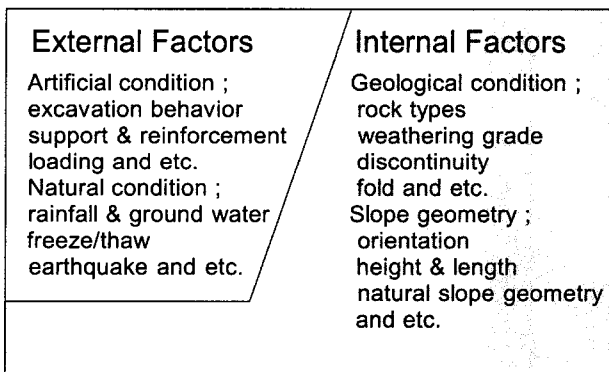


그림 1. 사면의 파괴 요인

표 1. 절취 사면의 파괴 유형

Failure modes	Behavior characteristics	Remarks
surface failure(S)	soil like behavior (continuous)	surface erosion, skin flow, piping
circular failure(C)		rotational slide flow
wedge failure(W)	discontinuity triggered behavior (discontinuous)	translational slide
plane failure(P)		topple
toppling failure(T)		fall
rock fall(F)		

표 2. 암석 종류 별 파괴 특성

Rock types	Slope No.	Unfailed slope No.	Failed slope No.			
			continuous		discontinuous	
			S	C	W&P	T&F
Sed. rocks	67	31 (46.3%)	8 (11.9%)	5 (7.5%)	20 (29.9%)	3 (4.5%)
Ign. rocks	116	48 (41.4%)	21 (18.1%)	21 (18.1%)	23 (19.8%)	3 (2.6%)
Meta. rocks	190	98 (50.0%)	17 (8.9%)	11 (5.8%)	49 (25.7%)	15 (7.9%)
Total	373	177 (47.5%)	46 (12.4%)	37 (9.9%)	92 (24.7%)	21 (5.6%)

S: 표면 파괴, C: 원호 파괴, W&P: 썩기 및 평면 파괴, T&F: 전도 파괴 및 낙석

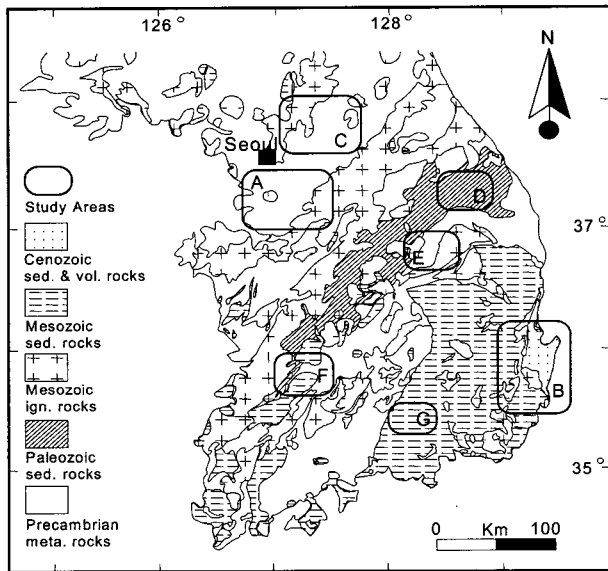


그림 2. 연구 지역의 위치

유발된 파괴 유형으로 사면 지반의 불연속적 거동 특성을 반영하고 있다. 이중 썩기 파괴와 평면 파괴는 불연속면 상의 활동에 의해 발생한 활동 파괴(sliding failure)로 구분될 수 있다. 활동 파괴를 제외한 불연속면에 의한 파괴 유형은 전도 파괴와 낙석이 이에 해당한다. 이외에 표면 파괴 및 원호 파괴는 토양 또는 그와 유사한 형태의 입자들의 거동에 의한 파괴 형태로서, 특히 원호 파괴의 경우에는 사면 지반의 연속적 거동에 의한 파괴 특성을 반영하고 있다. 이러한 파괴 유형의 구분과 그 주요 형태 및 거동 특성의 관계는 표 1과 같다.

## 2.2 암석의 종류와 거동 특성

암석의 종류는 사면의 가장 기본적인 지질 조건이다. 국내에 분포하는 암석은 선캄브리아기 변성암으로부터 신생대 퇴적암 및 화산암에 이르기까지 다양한 구성을 보이며, 변성암과 화산암의 분포가 가장 우세하다. 그림

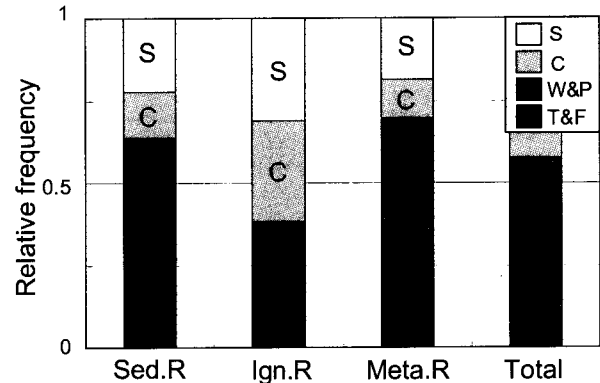


그림 3. 암석 종류에 따른 파괴 유형(Sed. R: 퇴적암, Ign. R: 화성암, Meta. R: 변성암, S: 표면 파괴, C: 원호 파괴, W&P: 썩기 및 평면 파괴, T&F: 전도 파괴 및 낙석)

2의 조사 지역은 이러한 지질 분포의 특성을 감안하여 가급적 국내에 분포하는 대표적인 암석 종류를 포함할 수 있도록 7개 지역을 선정하였다.

A 지역은 지체 구조적으로 경기 육괴에 속하며, 선캄브리아기의 편마암류, 편암류, 그리고 시대 미상 또는 중생대의 화성암들이 분포한다. B 지역은 중생대 백악기의 경상 분지와 신생대 제 3기의 양남, 포항 분지의 일부로서 각종 쇄설성 퇴적암, 화산 쇄설성 퇴적암, 화산암 그리고 백악기의 화강암류들이 분포한다. C 지역은 경기 육괴에 해당하며, 선캄브리아기의 변성암류(편마암류, 편암류, 규암)와 중생대의 화강암류가 광범위하게 분포한다. D 지역은 지체 구조상 옥천 습곡대의 북동 측부에 해당하며, 선캄브리아기의 편암-편마암 복합체를 기반암으로 고생대의 조선누층군과 평안누층군이 분포한다. E 지역은 지체 구조상 영남 육괴에 해당하며, 선캄브리아기의 편마암이 주로 분포한다. F 지역은 선캄브리아기의 변성암류를 기반암으로 시대 미상의 변성퇴적암류와 화강암류 및 이를 관입한 중생대의 화성암류와 맥암류로 구성되어 있다. G 지역은 경상분지에 속하며, 백악기 경상 누층군의 쇄설성 퇴적암으로 구성

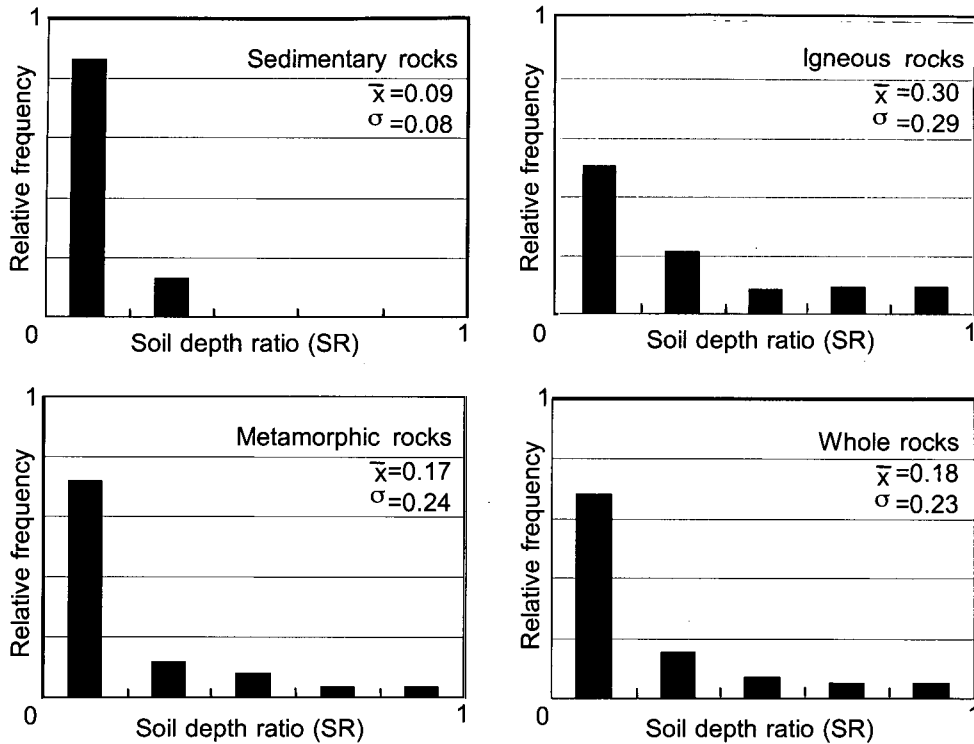


그림 4. 암석 종류별 토층심도율(SR)

되어 있다.

이들 사면의 구성 암석을 크게 퇴적암, 화성암 그리고 변성암으로 구분하였을 때, 총 373개소의 조사 사면에서 변성암(190 개소)이 가장 많은 분포를 보이며, 화성암(116 개소), 퇴적암(67 개소)의 순으로 분포한다(표 2). 지질 시대와 암상에 의해 퇴적암은 고생대 및 신생대 퇴적암, 화성암은 중생대 화강암류를 비롯해 신생대 화산암류, 변성암은 선크립브리아기의 변성퇴적암류와 편마암류로 구분된다.

사면 파괴 특성은 각 암석의 종류에 따라서 현격한 차이를 보인다(그림 3). 퇴적암과 변성암으로 구성된 사면에서는 썩기 파괴 등 불연속면에 의한 활동 파괴와 전도 및 낙석의 발생이 분포 사면의 34.3% 및 33.7%로 불연속체적 거동 특성이 우세한 반면에, 화성암(특히 중생대 화강암)의 경우에는 파괴 빈도는 22.4%에 그치고 있다. 특히 원호 파괴와 표층 파괴가 발생한 비율은, 화성암이 36.2%에 이르는 반면에, 퇴적암과 변성암의 경우에는 각각 19.4% 및 14.7%로서, 화성암이 다른 암석에 비해 원호 파괴와 표면 파괴가 두 배 이상 높은 빈도를 보인다.

암석 종류에 따른 파괴 유형의 차이를 이해하기 위하여, 각각 암석의 풍화 특성을 비교하였다. 풍화 특성의

비교는 아래 식 (1)과 같이 토층 심도와 사면 높이의 비로 정의한 토층 심도율(soil depth ratio, SR)을 이용하였다.

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

토층 심도는 충적층 또는 풍화 등급상 잔류토(residual soil)와 완전 풍화암(completely weathered rock)을 대상으로 측정하였다(Geological Society, 1977; Lee와 Freitas, 1989). 그림 4는 암석 종류별 토층심도율을 비교한 것으로서 전반적으로 토층심도율 0.2 이하의 사면이 우세하다. 그러나, 암석 종류에 따라서 평균 토층심도율과 그

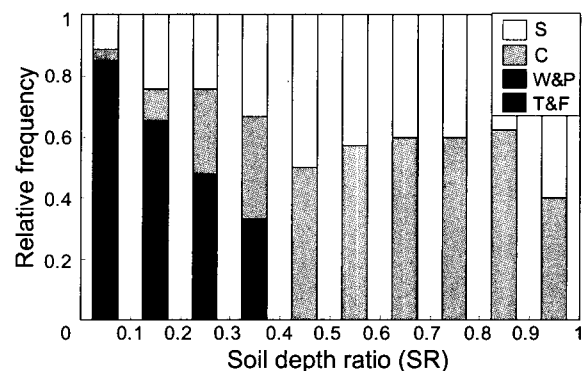


그림 5. 토층심도율(SR)과 파괴 유형의 관계(범례는 그림 3과 같음)

분포에 있어서는 상이한 특성을 보인다. 평균 토층심도율의 경우에 퇴적암이 0.09, 변성암이 0.17로서, 0.2 이하의 낮은 토층심도율을 보이지만, 화성암의 경우 0.30으로 그 평균값이 다른 암석에 비해 높을 뿐 아니라 0.4 이상의 토층심도율을 보이는 사면의 빈도수도 다른 암석에 비해 높다. 화성암의 상대적으로 높은 토층심도율은 다른 암석 종류에 비해 원호 파괴 및 표면 파괴 등 연속체적 파괴 특성이 우세한 것과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다.

### 2.3 토층심도율과 거동 특성

앞에서 언급한 바와 같이 토층심도율은 사면의 파괴 거동과 매우 밀접한 관계가 있다. 여기서는 사면의 지반 조건을 구분할 수 있는 기준으로서의 토층심도율의 활용성을 검토하기 위하여 토층심도율과 파괴 특성과의 관계를 분석하였다. 그림 5는 파괴가 발생한 사면에 대하여 토층심도율과 파괴 유형의 빈도를 도시한 그래프로, 토층심도율이 0.4보다 큰 사면에서는 낙석, 썩기 및 평면 파괴 등 불연속면에 의해 직접적으로 유발된 파괴 유형이 더 이상 관찰되지 않으며, 대부분의 파괴는 원호 파괴와 표면 파괴에 국한된다. 이러한 양상은 토층심도율이 0.4보다 큰 사면의 경우에 흙사면과 같은 연속적 거동이 지배적인 것을 지시한다. 따라서 토층심도율은 불연속면 특성이 파괴의 직접적인 원인이 되는 암반 (rock mass)과 그렇지 않은 토상 지반(soil-like mass)으로 구분할 수 있는 기준으로서 활용될 수 있다. 따라서 이 논문에서는 토층심도율이 0.4보다 큰 지반 상태를 토상 지반, 0.4 이하의 지반 상태를 암반으로 분류하였다. 그러나, 토층심도율이 0.2보다 크며, 0.4 이하인 인 경

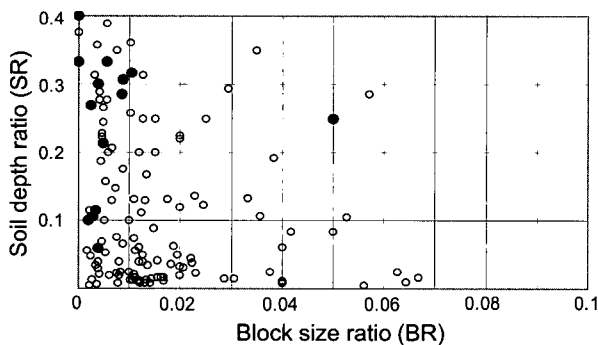


그림 6. 블록크기비(BR)과 토층심도율(SR)에 따른 지반 거동의 특성 (●: 원호 파괴, ○: 그 외 파괴 유형)

우에 전체 파괴의 50% 이상을 원호 파괴 및 표면 파괴가 점유하고 있으므로, 연속체적 지반 거동에 대한 고려가 여전히 유효하다. 따라서 필요하다면 토층 심도율을 기준으로 0.4 초과와 토상 지반, 0.2 초과 0.4 이하의 혼합 지반, 0.2 이하의 암반으로 구분할 수 있다.

### 2.4 블록크기비와 거동 특성

토층심도율 0.4 이하의 암반 사면에서도 암석 유동 (rock flow) 등 연속적인 거동을 보여주는 사례가 흔하다. 이러한 현상은 사면의 연속체적 거동 특성이 토층심도율에 국한되지 않은 것은 아니라는 것을 지시한다. Hoek와 Bray(1981)는 암반 사면의 파괴 유형을 구분하며, 파쇄가 심한 사면에서 원호 파괴가 발생할 수 있음을 지적한 바 있다. 또한 Hoek(1994)는 사면 또는 터널 등 암반 구조물의 크기와 개개 블록의 크기와의 관계에 의한 크기 효과(scale effect)로서 거동 특성의 변화를 언급한 바 있다. 즉, 사면 규모에 비하여 개개 암반 블록의 크기가 현저히 작거나 절리 간격이 매우 작다면, 토층 심도율이 0.4 이하의 암반 사면이라 할지라도 연속체적 거동을 보일 수 있음을 암시한다. 암반 블록의 형성을 위한 최소 절리군의 수는 3개이며, 암반 내에 3개 절리군이 발달할 때, 개개 암반 블록의 크기는 블록 크기 지수(block size index)인  $I_b$ 에 의해 아래 식 (2)와 같이 각 절리군의 평균 간격( $S_i$ )의 산술 평균으로 정의할 수 있다(ISRM, 1978).

$$I_b = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i}{3} \quad (2)$$

블록 크기 지수  $I_b$ 에 대한 크기 효과를 검토하기 위해 블록크기지수( $I_b$ )와 사면 높이( $H$ )의 비를 블록크기비 (block size ratio, BR)로 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$BR = \frac{\text{Block size index } (I_b)}{\text{Slope height } (H)} \quad (3)$$

토층심도율이 0.4 이하인 암반 사면에 대하여 블록크기비의 영향을 분석하였다. 그림 6은 사면의 파괴 유형을 원호 파괴와 비원호 파괴로 구분하여 토층심도율과 블록크기비에 대해 도시한 결과이다. 암반 사면의 원호 파괴는 블록크기비가 0.01 이하인 경우에 집중적으로 발생하고 있음을 알 수 있다. 원호 파괴가 연속체적 거동을 지시하는 중요한 근거라고 한다면, 이 결과는 블록

크기비가 0.01 이하인 암반 사면의 경우에 연속체적 거동을 보일 수 있음을 암시하는 것이다. 따라서 블록크기비는 0.01 이하의 연속체적 파쇄 암반(highly fractured rock mass)과 0.01 보다 큰 불연속체적 절리 암반(jointed rock mass)을 구분하는 기준으로 활용될 수 있다.

Palmstrøm(1996)은 터널에서 터널 직경/블록크기 지수로 정의되는 연속성 지수(continuity factor, CF)를 이용하여 이 지수가 100 이상일 때를 파쇄 암반(highly jointed rocks)으로 정의하고, 이때 터널 암반은 연속체적 거동을 보인다고 제안한 바 있다. 이 연속성 지수(CF)에서 터널 직경을 사면 높이로 대체하였을 때, 앞서 정의한 블록크기비(BR)의 역수가 된다. 따라서 사면에서 블록크기비가 0.01 이하에서 연속체적 거동을 보이는 분석 결과는, 터널에 있어서의 블록 크기와 지반 연속성에 대한 Palmstrøm(1996)의 연구 결과와 대단히 유사하다.

이와 반대로 구조물의 크기에 비해 절리의 간격이 현저히 넓은 괴상 지반(massive mass)일 경우에도 역시 연속체적 거동을 보일 수 있다. Palmstrøm(1996)은 터널 암반의 연속성 지수(CF)가 5 이하일 때를 괴상 암반(massive rocks)으로 정의하고, 앞에서의 연속성 지수가 100 이상인 파쇄 암반과 더불어 연속적 지반(continuous ground)으로 구분한 바 있다. 터널에서는 일축압축강도 25 MPa 이상의 견고한 암반이라 하더라도, 높은 응력 조건 하에서 파괴가 발생할 가능성이 존재한다. 그러나 사면의 경우에는 대부분이 낮은 응력 조건하에 있다고 할 때, 괴상 암반의 파괴는 신생대 퇴적암 또는 풍화암 등 연약한 암반(일축압축강도 < 25 MPa)에서 주로 고려되어야 할 것이다. 따라서 사면의 주요 대상이 되는 괴상

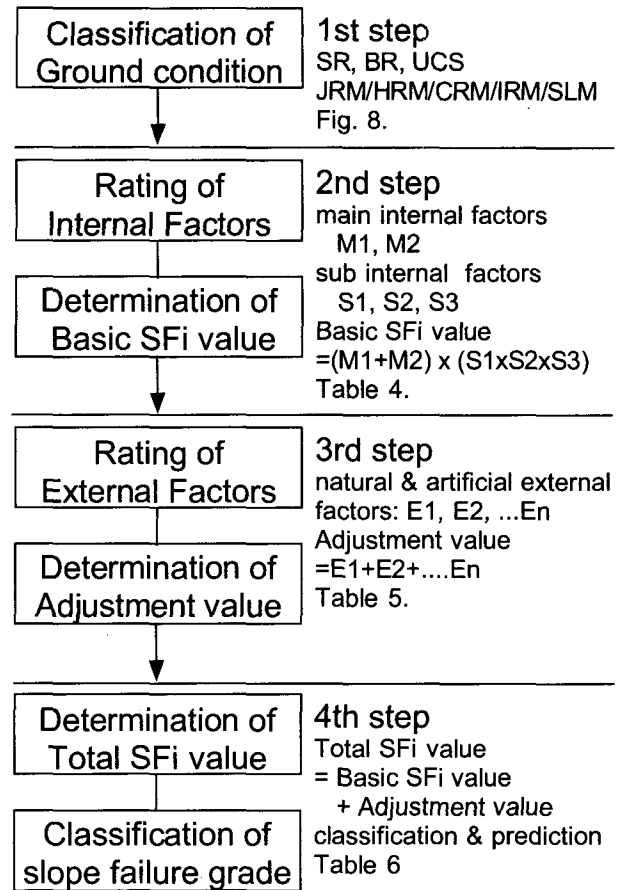


그림 7. SFi system의 평가 단계

암반은 연약한 괴상 암반(incompetent rock mass)이다. 연속체적 거동 특성을 보이는 지반 조건을 제외한다면, 불연속체적 거동 특성을 가지는 절리 암반은 토층심도율 0.4 이하이며, 블록크기비가 0.01보다 크고 2.0 이하에 해당하는 지반 조건이 될 것이다. 이러한 절리 암

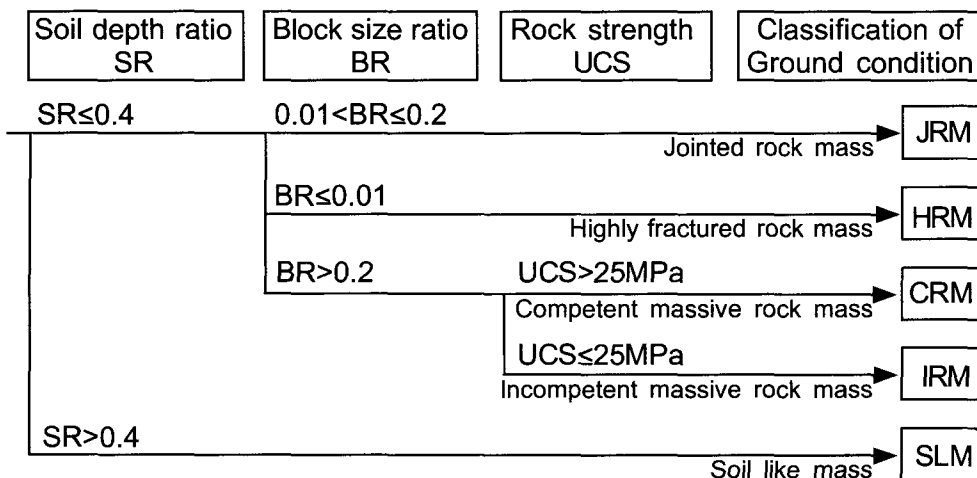


그림 8. 사면 지반 조건의 분류 기준

반은 불연속면의 방향 등 암반의 기하학적 특성이 사면 파괴의 가장 중요한 요인으로 작용하는 대표적 지반 조건이다.

### 3. SFi-system과 사면 파괴 예측

SFi-system은 앞에서 기술한 거동 특성에 의한 지반 조건의 분류에 기초하여 사면의 파괴를 예측하고자 개발된 평가 시스템으로서 Yoon 외. (2001)에 의해 제안된 RSFi-system을 부분적으로 보완, 수정한 것이다. 여기서는 SFi system의 평가 과정을 소개하고, SFi 값과 사면 파괴 특성과의 연관성을 규명하고자 한다.

SFi system을 이용한 사면의 파괴 예측은 다음의 4 단계에 의해 수행된다(그림 7).

- 1단계: 거동 특성에 의한 지반 조건 분류
- 2단계: 내부 파괴 요인(internal failure factor)의 평가와 기본 SFi 값의 결정
- 3단계: 외부 파괴 요인(external failure factor)의 평가와 SFi 보정값의 결정
- 4단계: 최종 SFi 지수의 결정 및 사면 평가

#### 3.1 거동 특성에 의한 지반 조건 분류: 1단계

거동 특성에 의한 사면의 지반 분류는 토층심도율, 블록크기비, 일축압축강도 등 3개 기준에 의해 수행된다(그림 8). 이 과정은 첫째로 토층심도율이 0.4보다 큰 토상 지반을 분류하고, 둘째로 토층심도율이 0.4 이하의 암반에 대해 블록크기비를 이용하여 절리 암반, 파쇄 암반, 괴상 암반을 분류한다. 절리 암반, 파쇄 암반, 괴상

암반의 블록크기비는 각각 0.01 이하, 0.01 초과 0.2 이하, 0.2 초과이다. 마지막으로 괴상 암반은 일축압축강도 25 MPa을 기준으로 하여 괴상 경암반과 괴상 연암반으로 세분한다.

이 과정을 통하여 사면의 지반 조건은 최종적으로 절리 암반(jointed rock mass, JRM), 파쇄 암반 (highly fractured rock mass, HRM), 괴상 경암반(competent massive rock mass, CRM), 괴상 연암반(incompetent massive rock mass)과 토상 지반(soil like mass, SLM)으로 구분된다. 이 5개의 지반 조건 중 절취 사면에서 가장 일반적인 지반 조건은 절리 암반으로, 조사 사면 중 50.7%가 이에 해당하며, 파쇄 암반(30.6%), 토상 지반 (15.0%), 괴상 연암반(3.8%)의 순으로 분포한다. 괴상 경암반 조건은 조사 사면에서는 관찰되지 않으며, 지표와 인접한 절취 사면의 경우에 이 조건의 사면이 분포할 확률은 매우 미약하다. 괴상 연암반 역시 일부 신생대 퇴적암과 절리 발달 상태가 미약한 일부 풍화암을 제외

표 3. 지반 조건과 파괴 유형의 관계

	JRM	HRM	IRM	SLM	Sum
S	10	15	5	16	46 (12.3%)
C	2	14	1	20	37 (9.9%)
W&P	62	29	1	0	92 (24.7%)
T&F	15	6	0	0	21 (5.6%)
Unfailed	100	50	7	20	177 (47.5%)
Sum	189 (50.7%)	114 (30.6%)	14 (3.8%)	56 (15.0%)	373

JRM: 절리암반, HRM: 파쇄 암반, IRM: 연약 암반, SLM: 토상 지반, 이외 표 2와 같음

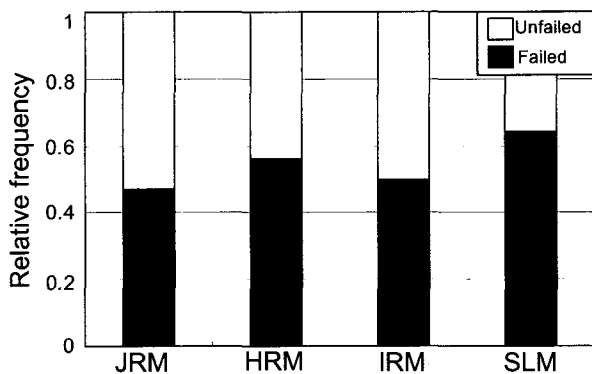


그림 9. 지반 조건 별 파괴 빈도 (JRM: 절리 암반, HRM: 파쇄 암반, IRM: 연약 암반, SLM: 토상 지반)

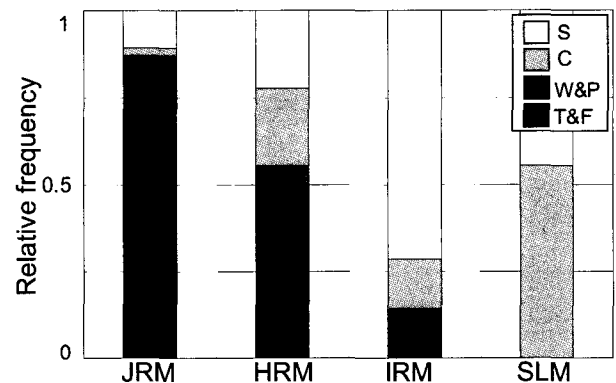


그림 10. 사면 지반 조건과 파괴 유형의 관계. 범례는 그림 3과 같음

하고는 큰 빈도 분포를 보이지 않는다. 따라서 대부분의 절취사면은 절리 암반, 파쇄 암반, 토상 지반에 해당한다. 그림 9는 각 지반의 조건에 따른 사면 파괴율을 도시한 결과이다. 사면의 파괴율은 절리 암반(47.1%), 괴상 연암반(50.0%), 파쇄 암반(56.1%), 토상 지반(64.3%)의 순으로 증가한다(표 3). 특히 토상 지반은 사면 파괴율이 60% 이상으로 다른 지반 조건에 비해 파괴율이 높다. 관찰되지 않은 괴상 경암반은 분포한다하더라도 그 파괴율은 다른 지반 조건에 비해 낮을 것으로 판단된다.

그림 10은 괴상 경암반을 제외한 4개 지반 조건에 대해 파괴 유형을 분석한 결과로, 지반의 연속성에 대한 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 평면 파괴, 썩기 파괴 등 활동 파괴와 낙석 및 전도 파괴를 불연속체적 거동의 대표적 파괴 유형이라 할 때, 절리 암반은 전체 파괴 유형 중 75% 이상이 이에 해당하며, 파쇄 암반은 약 50%, 괴상 연암반은 25% 이내의 파괴가 불연속체적 거동(discontinuous behavior) 특성을 보이는 것으로 나타났다(표 3). 반면에, 토상 지반은 불연속체적 거동을 보이지 않고 있다. 이 결과는 사면의 연속체적 거동 특성(continuous behavior)이 절리 암반, 파쇄 암반, 괴상 연암반, 토상 지반의 순으로 강화됨을 지시한다. 이렇게 서로 다른 거동 특성을 보이는 각 지반 조건의 구분은 사면에서 발생할 수 있는 파괴 유형을 지반 조건에 따라 예측할 수 있다는 측면에서 매우 중요한 정보를 제공한다.

### 3.2 내부 파괴 요인의 평가와 기본 SFi 값 결정: 2단계

사면 파괴의 내부 요인은 사면 자체의 지질 조건과 사면 형상 조건에 관련된 요인이다. SFi-system에서 내부 요인은 5개의 지반 조건에 따라 2개의 주요 요인(main factors, M1 and M2)과 3개의 보조 요인(sub factors, S1, S2 and S3)으로 구분된다. 각 지반 조건의 주요 요인 및 보조 요인의 선정과 평가 기준의 작성은 사면 조사 자료를 이용한 통계적 분석과 각 요인들에 대한 해석적 접근에 의해 수행되었다(김정환 외, 2000; 윤운상, 김정환; 2000; 윤운상 외, 2000). 이 외에도 사면 파괴에 대해 연구된 다양한 기존 연구 성과를 참고하였다(Hoek과 Bray, 1981; Einstein 외., 1983; Bieniackski, 1984; Barton 외., 1985; Cundall과 Hart, 1993; Mazzoccola와 Hudson, 1996; 정형식과 유병옥, 1996). 표 4는 이러한 분석 결과를 바탕으로 제안된 각 지반 조건의 주요 요인 및 보조 요인의 항목과 평가 기준이다.

절리 암반(JRM)은 대부분이 평면 파괴, 썩기 파괴, 전도 파괴 및 낙석 등 불연속면에 의해 유발된 파괴 유형을 보여준다. 이러한 파괴 유형을 제어하는 요인은 불연속면의 방향 및 분포 특성과 암반의 강도 특성이다(Hoek과 Bray, 1981). 절리 암반에서 선정된 주요 파괴 요인은 사면의 방향과 관련된 불연속면(또는 교차선)의 경사각(M1)과 경사방향(M2)이며, 보조 파괴 요인은 불연속면의 전단 강도(S1), 간격/깊이 비(S2), 암석 강도(S3)이다.

파쇄 암반(HRM)은 불연속체적 파괴 유형과 함께 연속체적 파괴 유형을 동시에 보인다. 이러한 파괴 유형을 제어하는 주요 요인은 블록 크기를 중심으로 한 불연속면의 분포 특성과 전단강도 특성이다(Hoek, 1994). 파쇄 암반에서 선정된 주요 파괴 요인은 파쇄 정도와 관련된 절리 간격(M1)과 절리군 수(M2)이며, 보조 파괴 요인은 불연속면의 전단 강도(S1), 사면 경사와 관련된 블록의 밀면 경사각(S2), 암석 강도(S3)이다.

괴상 경암반(CRM)의 지반 조건과 파괴는 국내에서 확인하기 어려운 상태이다. 이러한 지반 조건에서의 파괴는 주로 급경사의 대규모 사면 조건에서 강한 이방성이나, 인지하기 어려운 지질 조건의 불확실성에 의한 것일 가능성이 크다. 따라서 괴상 경암반에서의 주요 파괴 요인은 이방성 유무를 포함한 암석의 종류(M1), 사면의 높이(M2), 보조 파괴 요인은 이방성 암석의 면구조 방향(S1), 사면 경사각(S2), 암석 강도(S3)로 선정하였다.

괴상 연암반(IRM)은 연약한 암반의 강도로 유발되는 연속체적 파괴 유형이 우세한 지반 조건이다. 이에 해당하는 암반은 신생대 퇴적층 또는 각종 암석의 풍화암이 해당할 수 있다. 따라서 괴상 연암반의 주요 파괴 요인은 암석 강도(M1)와 사면 경사각(M2)으로 설정하였으며, 보조 파괴 요인은 층리 등 면구조 방향(S1), 사면 높이(S2)와 팽창성 광물의 유무 및 슬레이킹 내구성과 관련된 항목(S3)으로 선정되었다.

토상 지반(SLM)은 깊은 풍화 심도에 의한 원호 파괴 등 연속체적 거동 특성이 지배적인 지반 조건이다. 토상 지반의 주요 파괴 요인은 토질 조건(S1), 사면 경사(S2)이며, 보조 파괴 요인은 토층 심도(S1), 사면 높이(S2), 상부 자연 사면의 경사(S3)로 설정하였다.

이상의 각 지반 조건별 내부 파괴 요인의 주요 요인과 보조 요인의 평가에 의해 기본 SFi 값이 결정된다. 기본 SFi 값은 아래 식 (4)와 같이 두 주요 요인 평점의 합에 세 보조요인을 곱하여 결정된다.



표 4. 기본 SFi 값의 결정을 위한 내부 파괴 요인의 평가 기준

Jointed rock mass : JRM				Competent massive rock mass : CRM			
Main internal factors				Main internal factors			
$\psi_j$ for sliding	$30^\circ < \psi_j \leq \psi_s$	$\psi_j \leq 30^\circ$	$\psi_j > \psi_s$	rock type	strongly anisotropic	moderately anisotropic	isotropic
$\psi_j$ for toppling	$90^\circ < \psi_j \leq -80^\circ$	$-80^\circ < \psi_j \leq -60^\circ$	$\psi_j > -60^\circ$				
<b>M1</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>20</b>	<b>M1</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>20</b>
$\theta$ for sliding	$\theta \leq 20^\circ$	$20^\circ < \theta \leq 40^\circ$	$\theta > 40^\circ$	slope height	>60m	60-40m	<40m
$\theta$ for toppling	$160^\circ < \theta \leq 200^\circ$	$140^\circ < \theta \leq 160^\circ$ $200^\circ < \theta \leq 220^\circ$	$\theta \leq 140^\circ$ $\theta > 220^\circ$	<b>M2</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>20</b>
<b>M2</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	Sub internal factors			
Sub internal factors				planar structure	$\theta < 20^\circ$ $\phi < \psi_j \leq \psi_s$	$20^\circ < \theta \leq 40^\circ$ $\phi < \psi_j \leq \psi_s$	etc.
friction angle	$\phi \leq 30^\circ$	$30^\circ < \phi \leq 40^\circ$	$\phi > 40^\circ$	<b>S1</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>
roughness	slickensided	smooth-S.R.	rough	slope	>1:0.35	1:0.35-1:0.5	<1:0.5
<b>S1</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	<b>S2</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>
JS/JL	JS/JL ≤ 0.05	0.05 < JS/JL ≤ 0.1	JS/JL > 0.1	UCS (MPa)	<100	100-200	>200
<b>S2</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	<b>S3</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>
UCS (MPa)	UCS ≤ 25	25 < UCS ≤ 100	UCS > 100	<b>Incompetent massive rock mass : IRM</b>			
weathering	HW	MW	SW-Fresh	Main internal factors			
<b>S3</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	UCS (MPa)	5	5-15	>15
<b>Highly fractured rock mass : HRM</b>				<b>M1</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>20</b>
Main internal factors				slope	>1:1	1:1.5-1:1	<1:1.5
JS (cm)	JS < 6	6 < JS ≤ 20	JS > 20	<b>M2</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>20</b>
RQD	0	0 < RQD ≤ 50	RQD > 50	Sub internal factors			
<b>M1</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>20</b>	planar structure	$\theta \leq 20^\circ$ $\phi < \psi_j \leq \psi_s$	$20^\circ < \theta \leq 40^\circ$ $\phi < \psi_j \leq \psi_s$	etc.
Jn	Jn > 3	3	Jn < 3	<b>S1</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>
<b>M2</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	slope height	>20m	10-20m	<10m
Sub internal factors				<b>S2</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>
friction angle	<30°	30°-40°	>40°	SM	>50%	10-50%	<10%
roughness	slickensided	smooth-S.R.	rough	Ps	>2MPa	0.1-2MPa	<0.1MPa
<b>S1</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	slaking durability	ld <sub>1</sub> < 85 ld <sub>2</sub> < 60	85-95 60-85	ld <sub>1</sub> > 95 ld <sub>2</sub> > 85
$\beta$	$30^\circ - \psi_s$	0-30°	-45°-0	<b>S3</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>
UCS (MPa)	<25MPa	25-100MPa	>100MPa	<b>Soil like mass : SLM</b>			
weathering	HW	MW	SW-Fresh	Main internal factors			
Jo (mm)	Jo ≥ 2.5	2.5 < Jo ≤ 0.5	Jo < 0.5	soil condition	loose sand soft clay	Med. sand Med. clay	dense sand stiff clay
<b>S3</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	<b>M1</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>20</b>
$\psi_s$ : dip angle of slope $\psi_j$ : dip angle of joint(or intersection). if $\theta > 180^\circ$ , $\psi_j$ has (-) sign. $\theta$ : angle between dip direction of joint (or inter-section) and dip direction of slope $\phi$ : friction angle of joint UCS: uniaxial compressive strength of rock JS/JL = joint spacing/joint trace length Jn: number of joint sets, Jo: aperture of joint $\beta$ : base plane angle of rock block SM: swelling minerals Ps: swelling pressure ld: slaking durability index				slope	>1:1	1:1.5-1:1	<1:1.5
				<b>M2</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>20</b>
				Sub internal factors			
				soil depth	>10m	5-10m	<5m
				<b>S1</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>
				slope height	>20m	10-20m	<10m
				<b>S2</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>
				natural slope	$\psi_s > 30^\circ$	10-30°	$\psi_s < 10^\circ$
				<b>S3</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>

basic SFi value = (M1+M2) × (S1×S2×S3)

$$\text{Basic SFi value} = (M1 + M2) \times (S1 \times S2 \times S3) \quad (4)$$

기본 SFi 값은 내부 요인에 의한 사면 파괴의 가능성을 지시하며, 그 값이 클수록 사면 파괴 가능성이 높아진다. 주요 요인의 합은 40~100의 범위를 가진다. 주요 요인의 합이 결정된 이후에 곱해지는 보조 요인이 0.5~1의 범위를 가지므로 기본 SFi 값은 20~100의 범위를 보인다.

### 3.3 외부 파괴 요인의 평가와 SFi 보정값의 결정: 3단계

사면 파괴의 외부 요인은 사면의 외부로부터 가해지는 자연적 또는 인위적 파괴 요인이다. 이에 해당하는 요인으로서 강우, 동결/융해 등 기후 조건과 지진 등의 자연적 요인과 상재 하중, 진동, 절취 방법 및 보강 등 인위적 요인이 있다(Crawford와 Curran, 1982; Anderson과 Howes, 1985; Swindells, 1985; Romana, 1993). 각 사면이 처한 환경은 지역에 따라 다르므로 고려하여야 할 외부 요인의 선정 역시 다를 수 있다. 그러나, 기본 SFi 값을 반영하기 위해서는 가급적 평가의 개개 외부 요인의 평점은 최소 -20, 최대 20으로 제한되는 것이 바람직하다.

표 5는 강우 및 지하수 조건, 절취 방법, 보강, 배수 시설 등 일반적으로 고려할 수 있는 외부 요인에 대해 평가 기준 및 평점을 제시한 예이다. 사면의 지반 조건

에 따라서 발생할 수 있는 영향도의 차이를 반영할 필요가 있다면, 지반 조건 별로 외부 평가 요인의 평점을 다르게 줄 수도 있다. 예를 들어 강우 조건을 외부 요인으로 선정하였을 때, 그 영향도는 절리 암반에 비해 토상 지반에서 보다 크게 작용할 것이다(김정환 외, 2000). 이 경우에 강우 조건에 대한 외부 요인의 평점을 토상 지반에서 보다 크게 적용할 수 있다. 따라서 표 5에서 제시한 예와 별도로, 조사자 또는 평가자는 조사 지역 또는 사면의 조건에 따라 외부 요인의 선정 및 평점을 결정할 수 있다.

선정된 외부 요인 평점의 합은 기본 SFi 값에 대한 보정값(adjustment value)으로 결정된다. n개의 외부 요인(E1, E2, E3,.....En)이 존재할 때, 아래 식 (5)와 같이 산정된다.

$$\text{Adjustment Value} = E1 + E2 + \dots + En \quad (5)$$

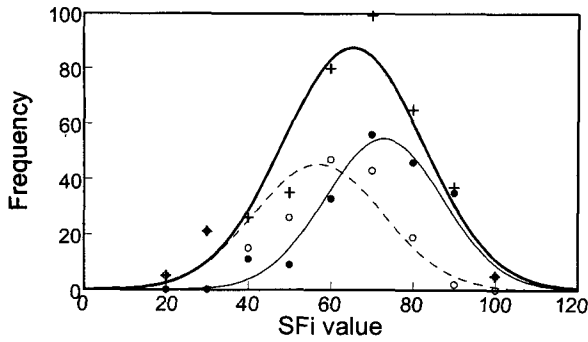
보정값은 외부 요인에 의한 사면 파괴의 위험도를 지시하며, 보정값이 클수록 사면 파괴의 가능성 역시 증가한다. 표 5의 평점 기준에 의하면 토상 지반을 제외하고, 보정값은 -40~40의 범위를 가진다.

### 3.4 최종 SFi 값의 결정과 사면 평가: 4단계

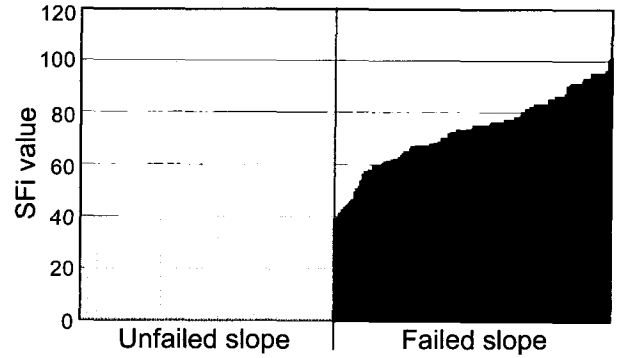
최종적인 SFi 값(total SFi value)은 아래 식 (6)과 같이

표 5. 보정값 결정을 위한 외부 파괴 요인의 평가 기준

E1	rainfall or ground water condition				
mm/hour	0	1~10	11~20	21~30	>30
mm/day	0	1~50	51~100	101~150	>150
mm/2day	0~50	51~100	101~150	151~200	>200
water table	dry	1/3 of H	1/2 of H	2/3 of H	saturated
rating	-5	0	5	10	15
SLM rating	0	-5	10	15	20
E2	method of excavation				
method	no cutting	presplitting	smooth blasting	blasting or mechanical	deficient blasting
rating	-10	-5	0	5	10
E3	support and reinforcement				
method	heavy	medium	light	protection	no support
rating	-15	-10	-5	0	5
E4	drainage system				
description	very good	good	medium	poor	very poor
rating	-10	-5	0	5	10
Adjustment value = E1 +E2 +E3 +E4 + ..... +En					



(a) SFi 값의 확률밀도분포



(b) 파괴 및 비파괴 사면의 SFi 값 분포

그림 11. SFi 값과 사면 파괴 특성(+: 전체 사면, ●: 파괴 사면, ○: 비파괴 사면)

2단계의 기본 SFi 값과 3단계의 보정값의 합산으로 결정된다.

$$\text{total SFi value} = \text{basic SFi value} + \text{adjustment value} \quad (6)$$

결정된 SFi 값은 내부 요인 및 외부 요인의 결합에 의한 사면 파괴 지수로 SFi 값의 증가는 사면의 전체적인 파괴 가능성의 증가를 지시한다. 최종 SFi 값의 범위는 외부 요인의 수에 따라 그 최소값과 최대값이 결정되어진다. 외부 요인에 대해 표 5의 평가 항목 및 평가 기준을 사용하였다면 총 SFi 값은 -20~140의 범위를 가지게 된다.

SFi 값과 사면의 파괴 가능성 또는 사면 파괴의 규모와의 관계를 분석하기 위하여 조사 지역의 373개 사면에 대해 SFi-system을 직접 적용하였다. 외부 요인은 표 5의 항목과 기준을 사용하였다.

그림 11은 이들 사면의 총 SFi 값과 파괴 가능성과의 관계를 보여준다. 전체 조사 사면의 총 SFi 값은 일반적으로 20에서 100사이의 값을 보이며, 평균 SFi는 65.40, 표준 편차는 17.02이다. 그림 11a는 전체 SFi 값의 확률 밀도분포로 평균 및 표준편차에 의한 정규분포곡선과 비교적 잘 일치하고 있다.

조사 사면 중 파괴가 발생한 사면은 196개소이다. 파괴가 발생한 사면의 경우에 SFi 값은 40~100의 범위를 가지고 있으며, 평균 72.95, 표준 편차 14.24를 보인다, 파괴가 발생한 사면의 SFi 값의 확률밀도 분포는 그림 11a와 같이 정규 분포 곡선과 거의 일치하고 있다. 파괴 사면의 대부분은 60 이상의 SFi 값을 가지고 있으며, 60 이하의 SFi 값에서는 파괴 빈도의 급격한 감소를 보이고 있다(그림 11b). 또한 60 이하의 SFi 값을 가지는 일부 사면에서 발생한 파괴는 대부분 표면 침식 등의 표면

파괴에 국한되고 있다. 이러한 결과는, 총 SFi 값이 60 이상일 때, 사면 파괴 가능성이 매우 높음을 지시한다.

이러한 반면에 파괴가 발생하지 않은 177개소의 사면의 경우에도 20~80의 SFi 값 범위를 보인다. 파괴가 발생하지 않은 사면 역시 SFi 값의 확률 밀도 분포는 평균 57.12, 표준 편차 14.24의 정규 분포 형태를 보이고 있다(그림 11a). 파괴가 발생하지 않은 사면의 경우에 절반 이상이 60이하의 SFi 값을 보이지만, 60 이상 값을 보이는 사면 역시 상당한 점유율을 보이고 있다(그림 11b). 이렇게 60 이상의 SFi 값을 가지고 있음에도 불구하고, 파괴되지 않은 사면은 잠재된 파괴 가능성이 높은 사면으로 특별한 주의와 관리가 필요한 사면으로 생각된다. 이와 같은 SFi의 적용 결과는 SFi 값과 사면의 파괴 가능성이 강력한 연관 관계가 있다는 것을 지시한다.

이 외에 SFi 값과 사면 파괴의 규모와의 관계를 분석하기 위하여 파괴가 발생한 사면의 파괴 규모와 SFi 값을 비교하였다. IAEG 산사태 위원회(1990)는 사태 규모에 대한 몇 개의 측정 기준을 정의하였다. 이에 의하면 파괴의 규모는 파괴면(surface of rupture)의 깊이(Dr), 너비(Wr), 길이(Lr)로 정의할 수 있다(그림 12). 원호 파괴와 같이 파괴면이 세 개의 축(a, b, c)을 가진 반 타원체(half an ellipse)라면 그 부피(V)는 다음 식 (7)과 같이 구할 수 있다(Beyer, 1987).

$$V = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi a \cdot b \cdot c = \frac{1}{6} \pi Dr \cdot Wr \cdot Lr \quad (7)$$

여기서는 아래 식과 같이 하나의 사면에 발생한 n개의 파괴에 대해 파괴면의 깊이(Dr), 너비(Wr), 길이(Lr)를 곱한 것의 합으로 파괴 규모 지수(failure dimension factor, Fd)를 아래 식 (8)과 같이 정의하여 사용하였다.

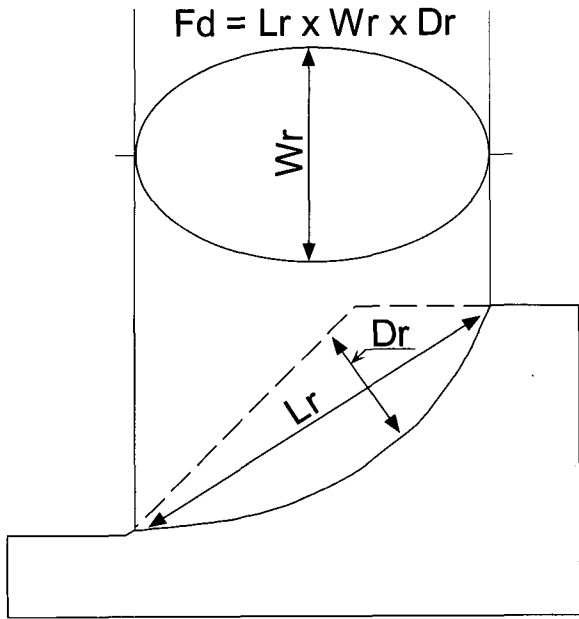


그림 12. 파괴 규모 지수(Fd)의 정의  
(Lr: 파괴 길이, Wr: 파괴 너비, Dr: 파괴 깊이(IAEG, 1990))

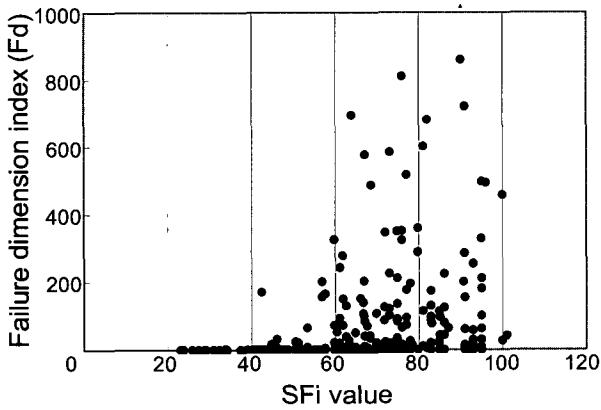


그림 13. SFi 값과 파괴 규모 지수(Fd)

$$\text{Failure dimension factor}(Fd) = \sum_{i=1}^n (Lr_i \cdot Wr_i \cdot Dr_i) \quad (8)$$

그림 13은 조사 사면의 파괴 규모 지수(Fd)와 SFi value를 비교한 것이다. SFi 값이 증가할수록 사면의 파괴 규모 지수가 증가하며, 특히 SFi 값 60 이상에서 급증하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 SFi가 사면의 파괴 규모와 밀접한 관계가 있음을 지시한다.

표 6. 총 SFi 값을 이용한 사면 파괴 등급의 분류

SFi value	SFi ≤ 20	20 < SFi ≤ 40	40 < SFi ≤ 60	60 < SFi ≤ 80	SFi ≥ 80
Failure class	I	II	III	IV	V
Stability	completely stable	stable	partially unstable	unstable	completely unstable
Failures	no failure	occasionally failure	small failure	medium failure	large failure

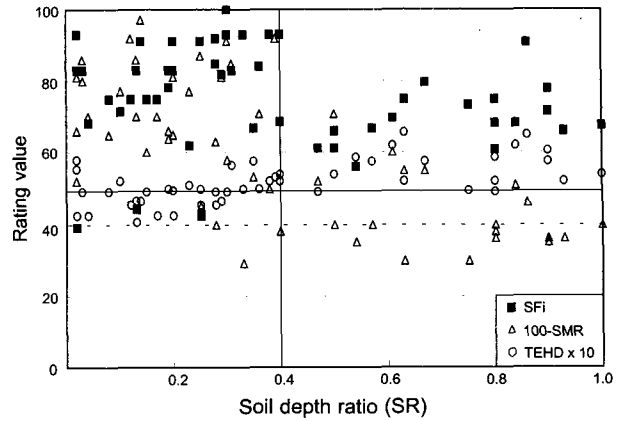


그림 14. 파괴 발생 사면에 대한 SFi-system, SMR(Romana, 1985), LHEF 평가(Gupta와 Anbalagan, 1997) 값의 비교

따라서 제안된 과정에 의해 결정한 SFi 값은 사면의 파괴 가능성은 물론이고, 그 파괴 규모에 대한 예측에 효과적으로 활용될 수 있다. 파괴 가능성 및 파괴 규모와 SFi 값과의 관계를 이용하여 사면의 안정성 및 파괴 조건을 표 6과 같이 구분하였다. SFi 값 20 이하는 파괴 등급 I로서 파괴 가능성이 매우 낮은 아주 안전한 영역에 해당한다. SFi 값 20 초과, 40 이하는 파괴 등급 II로서 파괴 가능성이 낮은 안전한 영역에 해당하며, 상황에 따라 다소의 파괴가 발생할 수는 있다. SFi 값 40 초과, 60 이하는 파괴 등급 III로서 파괴 가능성이 다소 존재하는 부분적인 불안정 영역에 해당하며, 소규모의 파괴가 발생할 수 있다. SFi 값 60 초과, 80 이하는 파괴 등급 IV로서 파괴 가능성이 높은 불안정한 영역에 해당하며, 중규모의 파괴가 발생할 수 있다. SFi 값 80 초과는 파괴 등급 V로서 파괴 가능성이 매우 높은 아주 불안정한 영역에 해당하며, 대규모의 파괴가 발생할 수 있다.

조사자 및 평가자는 이 기준에 따라 사면의 안정성 등급을 결정하고, 파괴 가능성 및 위험도를 예측할 수 있다. 특히 SFi system의 과정을 통해 분류된 지반 조건은 거동과 관련된 파괴 유형 등 보다 구체적인 사면의 파괴 특성에 대한 정보를 제공할 수 있으므로 효과적인 대응 방안을 모색할 수 있다. 또한 SFi-system의 적용 단계에서 분석된 사면 파괴의 내부 요인 및 외부 요인에

표 7. SFi system, SMR 평가(Romana, 1985), LHEF 평가(Gupta와 Anbalagan, 1997)의 파괴 위험성 평가 기준 비교

Class	I	II	III	IV	V
SF <sub>i</sub> system	completely stable	stable	partially unstable	unstable	completely unstable
	SF <sub>i</sub> ≤ 20	20 < SF <sub>i</sub> ≤ 40	40 < SF <sub>i</sub> ≤ 60	60 < SF <sub>i</sub> ≤ 80	80 < SF <sub>i</sub>
SMR system	completely stable	stable	partially unstable	unstable	completely unstable
	80 < SMR	60 < SMR ≤ 80	40 < SMR ≤ 60	20 < SMR ≤ 40	SMR ≤ 20
LHEF system	very low hazard	low hazard	moderate hazard	high hazard	very high hazard
	TEHD ≤ 3.5	3.5 < TEHD ≤ 5.0	5.0 < TEHD ≤ 6.0	6.0 < TEHD ≤ 7.5	7.5 < TEHD

대한 평가 내용은 사면의 파괴가 예측되었을 때, 1차적으로 해결하여야 할 문제가 무엇인지를 조사자 또는 설계자에게 제공할 수 있을 것이다.

#### 4. 다른 평가법과의 비교

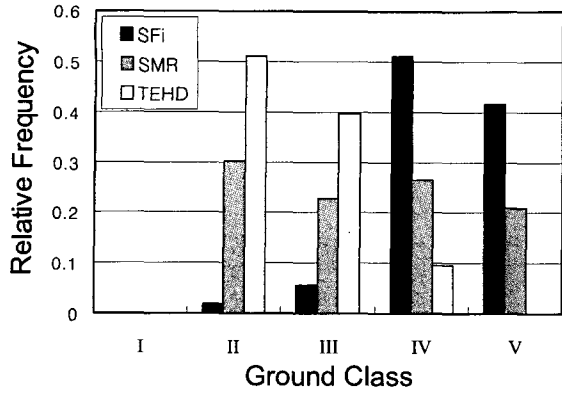
SFi system의 평가 결과를 다른 사면 평가법과 비교함으로써, 그 적용성에 대해 검토하였다. 비교하고자 하는 평가법은 암반 사면에서 널리 활용되고 있는 SMR(Slope Mass Rating) 평가법(Romana, 1985)과 자연 사면을 대상으로 산사태 재해 등급을 평가하는 LHEF(Landslide Hazard Evaluation Factor) 평가법(Gupta와 Anbalagan, 1997)이다. 표 7은 SF<sub>i</sub> system, SMR 및 LHEF 평가의 값에 의한 사면 파괴 등급 및 암반 평가 기준이다.

그림 14는 조사 지역 중 A 지역을 대상으로 파괴가 발생한 사면 53개소만을 추출하여 토층심도율에 따른 각 평가법의 결과 값을 비교한 것이다. SF<sub>i</sub> system과 LHEF의 경우, 평가값인 SF<sub>i</sub> 값과 TEHD 값이 높을수록 사면이 위험한 조건으로 평가되는 반면, SMR은 그 SMR 값이 높을수록 사면 지반이 양호한 상태로 평가되므로 비교의 용이함을 위하여 100-SMR을 비교 대상으로 하였다. 또한 LHEF 평가법에서는 TEHD의 평점 범위가 0~10이므로 역시 비교의 용이함을 위하여 10×TEHD를 비교 대상으로 하였다. 파괴가 발생한 사면에 대해 SMR 평가는 토층 심도율 0.4이하의 암반 사면에 대해서는 대부분 100-SMR 값이 50 이상의 불량한 지반으로 평가되어 높은 적중율을 보이고 있으나, 토층 심도율이 0.4 보다 큰 토상 지반에서는 많은 경우, 100-SMR 값이 50 이하인 평점을 보이는 등 적합하지 않은 평가 결과를 보이고 있다. LHEF 평가의 경우, 대부분의 10×TEHD 값이 40~60 에 놓이고 있다. 단, 토층심도율 0.4를 기준으로 할 때, 0.4보다 큰 지반 조건에서는 50 이상

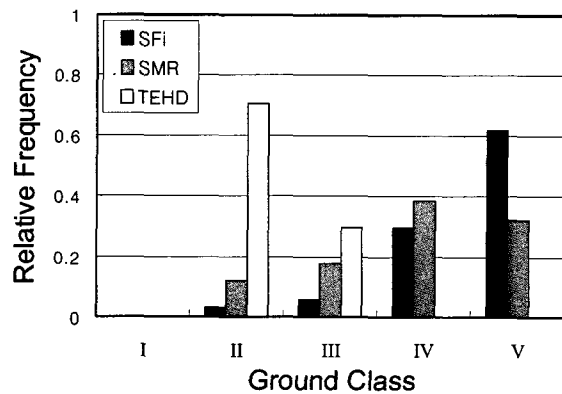
의 값이 우세하고, 0.4 이하에서는 50 이하의 값이 우세한 경향을 보이고 있으므로 오히려 토층 심도가 0.4보다 큰 토상 지반에 적용성이 있는 것으로 판단된다. 반면, SF<sub>i</sub> system의 평가값은 토층심도율에 관계없이 대부분의 값이 60 이상의 값을 모여 사면의 지반 조건에 관계없이 사면 파괴 예측에 활용될 수 있음을 보여주고 있다.

그림 15는 각 평가 시스템이 제시하고 있는 파괴 등급 평가 결과를 비교한 것이다. SF<sub>i</sub> system과 SMR 평가법은 점수 20 간격의 등간격 구분을 채택하는 반면, LHEF 평가법은 표 7과 같이 각 등급의 범위가 서로 다르게 설정되어 있다. 그림 15a는 파괴된 모든 사면에 대해 세 평가법에 의한 파괴 등급의 빈도를 비교한 것이다. SF<sub>i</sub> system은 대부분의 사면이 불안정(IV)에서 불안정(V) 영역으로 평가되었으나, SMR 평가에서는 안정(II)에서 매우 불안정(V)에 이르는 제 등급에 넓게 분포하고 있으며, LHEF 평가에서는 오히려 안정한 영역(II)에 상당한 분포를 보이고 있다. 이를 토층심도율 0.4를 기준으로 토상 지반과 암반으로 구분하여 다시 도시하였다. 그림 15b는 토층 심도율 0.4 이하의 암반 사면만을 대상으로 파괴 위험 등급 분포를 도시한 것으로서, SF<sub>i</sub> system과 SMR 평가는 탁월한 적용성을 보이는 반면, LHEF 평가는 암반 절취 사면에 적용하기에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 그림 15c는 토층 심도율이 0.4보다 큰 토상 지반 사면만을 대상으로 한 것으로서, SF<sub>i</sub> system은 여전히 높은 적용성을 보이는 반면, SMR 평가는 사면 파괴 예측에 활용될 수 없는 양상을 보인다. LHEF 평가의 경우, 암반 사면에 비해 토상 지반 사면에서 보다 효과적인 것으로 판단된다.

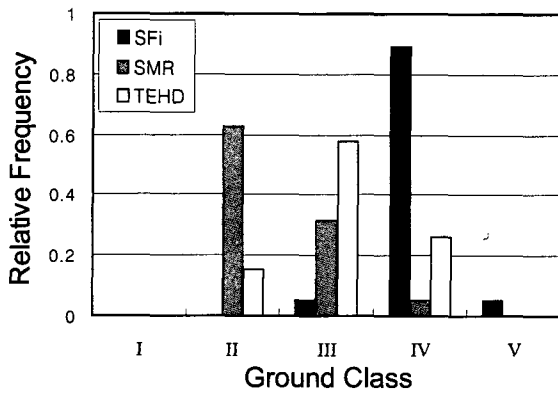
이상의 비교 결과는 SF<sub>i</sub> system은 여타 평가 시스템이 적용되는 특정 영역에서 유사한 결과를 도출할 뿐 아니라, 사면 지반 조건을 구분하고, 이에 적합한 평가 항목을 설정함으로써 토층심도율과 관계된 사면의 지



(a) 전체 사면



(b) 토층심도 0.4 이하 사면



(c) 토층심도 0.4 이상 사면

그림 15. 파괴 발생 사면에 대한 SFi, SMR(Romana, 1985), LHEF 평가(Gupta와 Anbalagan, 1997)의 파괴 등급 평가 결과 비교

반 특성에 관계없이 전반적인 파괴 예측에 효과적으로 적용될 수 있음을 지시하고 있다.

## 5. 결론

거동 특성에 대한 이해는 사면의 파괴 유형 및 주요 파괴 요인의 결정 등 사면 파괴 예측의 중요한 과정이

다. 사면의 토층심도율(SR)과 블록크기율(BR) 및 아머 강도(UCS)은 사면을 구성하는 지반 조건을 연속체적 또는 불연속체적 거동 특성을 가지는 지반으로 구분할 수 있게 하는 중요한 기준임이 확인되었다. 이 두 기준을 이용하여 사면의 지반 조건은 토층 심도율이 0.4 이하의 압반과 0.4 보다 큰 토상 지반으로 구분될 수 있으며, 압반 사면은 다시 블록 크기율이 0.01 이하인 파쇄 압반, 2보다 큰 괴상 압반, 0.01 초과 2 이상의 절리 압반으로 구분될 수 있다. 대부분의 절취사면에서는 절리 압반이 우세하며, 그 외 파쇄 압반과 토상 지반이 분포한다.

SFi system은 이러한 거동 특성에 의한 지반 조건의 분류에 근거하여 사면 파괴에 관여하는 내부 또는 외부 요인을 평가함으로써 사면 파괴 예측을 위한 보다 합리적인 체계를 제공하고 있다. 조사 사면 373 개소에 대해 SFi-system을 적용한 결과, 4단계의 과정을 통하여 결정된 SFi 값은 실제 사면의 파괴 발생 및 그 규모와 관련하여 밀접한 관련이 있는 것으로 확인되었으며, 이에 근거하여 SFi 값을 기준으로 사면의 파괴 등급을 매우 안정(I, SFi value  $\leq 20$ ), 안정(II,  $20 < \text{SFi value} \leq 40$ ), 부분적 불안정(III,  $40 < \text{SFi value} \leq 60$ ), 불안정(IV,  $60 < \text{SFi value} \leq 80$ ), 매우 불안정(V,  $80 < \text{SFi value}$ ) 등 5개 등급으로 구분하였다. 이 SFi system의 결과를 SMR(Romana, 1985) 및 LHEF 평가(Gupta와 Anbalagan, 1997) 등 여타 평가법과 비교한 결과, SMR 평가가 토층심도율이 0.4 보다 큰 토상 지반에 대해, LHEF 평가가 상대적으로 토층심도율 0.4 이하의 압반에 대해 평가의 취약함을 보이는 반면, SFi system은 전반적인 사면 지반에 대해 그 파괴 예측을 효과적으로 수행할 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 지반의 거동 특성에 대한 이해를 기초로 한 SFi-system은 사면 파괴 및 그 특성에 대한 예측과 대응에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다. 또한 향후 사면 진반의 풍화 진행에 인한 내구성 저하 문제에 대한 접근이 이루어진다면 시간 경과에 대한 SFi 평가값의 보정에 의한 사면 파괴 예측이 가능할 것으로 생각한다.

## 감사의 글

이 논문은 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방지기술훈발사업의 일환으로 수행한 내용이다. 연구에 많은 조언을 해주신 건설기술연구원원의 구호본, 박혁진 박사께 감사드린다.

## 참고 문헌

1. 구호본, 박혁진, 민기복, 정의진, 김춘식, 박성욱(2000), "도로절개면 투자우선순위 결정기법 개발", 한국지반공학회 2000 봄 학술발표회 논문집, 서울, 대한민국, pp.411~418.
2. 김정환, 윤운상, 최재원, 권혁신, 김세현(2000), 암반 사면의 파괴 예측을 위한 단열 구조 특성화 및 평가시스템 개발 연구 보고서, 서울대학교, 한국자원연구소, p188.
3. 유병옥(1997), "암반 사면의 안정성 평가 및 대책에 관한 연구", 박사 학위 논문, 한양대학교, p335.
4. 윤운상, 김정환(2000), "굴곡 사면의 암반 활동 파괴 예측을 위한 평가 투영 해석", 한국지반공학회 2000 봄 학술발표회 논문집, 서울, 대한민국, pp.457-464.
5. 윤운상, 권혁신, 김정환(2000), "절리 간격이 암반사면의 안정성에 미치는 영향", 한국지반공학회 2000 가을 학술발표회 논문집, 성남, 대한민국, pp.511~518.
6. 정형식, 유병옥 (1996), "지질 특성에 따른 암반 사면의 붕괴 유형 연구", 한국지반공학회지, 제12권, 제6호, pp.37~49.
7. 최경(1986), "한국의 산사태 발생 요인과 예지에 관한 연구", 박사 학위 논문, 강원대학교, p45.
8. 조천환, 나경원, 구호본(1989), 사면의 안전 진단 및 보호 공법, 한국건설기술연구원, p331.
9. 日本道路公團 (1986), 道路土工 のり面工 斜面安定工 指針, 社団法人 日本 道路 協會, pp.6~32, 423~434.
10. Anderson, M. G. and Hows, S.(1985), "Development and application of a combined soil water-slope stability model", Q. J. Eng. Geol., Vol.18, pp.225~236.
11. Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K.(1985), "Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst, Vol.22, pp.121~140.
12. Beyer, W. H.(1987), Handbook of Mathematical Sciences, 6th ed. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 860pp.
13. Bieniawski, Z. T.(1984), Rock mechanics design in mining and tunneling, Balkema, Rotterdam, p272.
14. Cundall, P. A. and Hart, R. D.(1993), "Numerical modelling of discontinua", Comp. Rock Eng. eds Hudson, Vol.2, pp.227~236.
15. Crawford, A. M. and Curran, J. H.(1982), "The influence of rate- and displacement-dependent shear resistance on the response of rock slopes to seismic loads", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst. Vol.19, pp.1~8.
14. Einstein, H., H. Veneziano, D. Baecher, G. B. and O'Reilly, K.J. (1983), "The effect of discontinuity persistence on rock slope stability", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst. Vol.20, pp.227~236.
15. Geological Society(1977), "The description of rock masses for engineering purposes", Geol. Soc.(London) Eng. Group Working Party, Q. J. Eng. Geol. Vol.25, pp.355~388.
16. Geotechnical Control Office(GCO)(1984), Geotechnical manual for slope, 2nd ed. Public works department, Hong Kong, p295.
17. Gupta, P and Anbalagan, R(1997), "Slope stability of Tehri Dam Reservoir Area, India, using landslide hazard zonation(LHZ) mapping", Q. J. Eng. Geol. Vol.30, pp.27~36.
18. Hoek, E(1994), "Strength of rock and rock masses", ISRM News Journal, Vol.2, pp.4~16.
19. Hoek, E. and Bray, J.(1981), Rock Slope Engineering 3rd eds, Inst. Min. and Metall, London.
20. ISRM(1978), "Suggested method of quantitative description of discontinuities in rock masses", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst. Vol.15, pp.319~368.
21. Koirala, N.P. and Wakins, A.T.(1988), "Bulk appraisal of slopes in Hong Kong", In Proc. 5th Symp. On Landslides, pp. 1181-1186.
22. IAEG Commission on Landslides(1990), "Suggested Nomenclature for Landslides", Bull. Int. Asso. Eng. Geol., No.41, pp.13~16.
23. Lee, S.G. and De Freitas, M.H.(1989), "A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granite in Korea", Q. J. Eng. Geol. Vol.22, pp.31~48.
24. Mazzoccola, D.F. and Hudson, J.A.(1996), "A comprehensive method of rock mass characterization for indication natural slope instability", Q. J. Eng. Geol., Vol.29, pp.37~56.
25. Palmström, A.(1996), "Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering", Tunnelling and Underground Space Tech, Vol.11, pp.175~188.
26. Pierson, L. A. and Vickel, R. V.(1993), Rock fall Hazard Rating System-Participants' Manual, FHWA SA-93-057, National Highway Institute.
27. Romana, M.(1985), "New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes", Proc. Int. Symp. On the Role of Rock Mech., pp.49~53.
28. Romana, M.(1993), "A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating", Comp. Rock Eng. eds Hudson, Vol.3, pp.575~599.
29. Swindells, C. F.(1985), "The detection of blast induced fracturing to rock slopes", Int. Symp. on the role of Rock Mech., pp.81~86.
30. Varnes, D.J.(1978), "Slope movement types and processes". In Special Report 176: Landslide: Analysis and Control(R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11~33.

(접수일자 2001. 9. 3, 심사완료일 2002. 3. 8)