

## 거동 특성에 따른 사면 지반의 분류 기준

윤 운 상  
정 의 진  
최 재 원  
김 정 환

서울대학교 지구환경과학부  
서울대학교 지구환경과학부  
서울대학교 지구환경과학부  
서울대학교 지구환경과학부

### 1. 서 론

사면의 거동과 파괴 특성은 지질학적 또는 지반 공학적인 다양한 영향 인자에 의해 복잡하게 제어된다. 그 대표적인 영향요인으로는 사면의 형상 요인, 지반의 강도 특성과 불연속면의 다양한 분포 특성 및 강도 특성 그리고 지하수 조건 등이 있다. 이러한 각 요인들은 상호 연관되어 있으며, 지반 조건에 따라 사면의 안정성에 미치는 영향도의 차이를 보인다. 예를 들어 불연속면의 방향은 절리 암반 사면의 가장 중요한 파괴 영향 요인으로 작용하지만, 심하게 풍화가 진행된 암반이거나, 파쇄가 극심한 조건에서는 오히려 풍화 심도 또는 풍화도의 성질이나, 절리 밀도 등이 보다 중요한 영향 요인으로 작용할 수 있다.

이러한 사면 안정성에 대한 영향 인자의 평가를 통해 사면의 파괴를 예측하거나 그 대응 방안을 도출하기 위해 Romana(1985)의 SMR system을 포함하여 많은 연구자에 의해 사면의 파괴 예측 또는 안정성 평가를 위한 평가 시스템이 제안되었다 (Koirala and Watkins, 1988; Gupta and Anbalagan, 1997; Mazzoccola and Hudson, 1996).

이 논문에서는 사면 파괴 예측 시스템을 개발하기 위한 선행 작업으로서 사면 파괴 유형과 관련된 거동 특성을 중심으로 사면 지반의 분류를 시도하였으며, 이러한 분류의 기준이 될 수 있는 인자 및 그 기준값을 제안하고자 한다. 이를 위하여 국내 국도 주변 절취 사면 373개소를 대상으로 파괴 특성과 지반 특성을 조사 분석하였다.

### 2. 사면의 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 Hoek and Bray(1981)의 분류에 기초하여 크게 6가지의 파괴 유형으로 구분하였다. 6개의 파괴 유형은 각각 표면 파괴(surface failure), 원호 파괴(circular failure), 평면 파괴(planar failure), 썩기 파괴(wedge failure), 전도 파괴(toppling failure), 낙석(rock fall)에 해당한다.

이들 파괴 유형은 다시 그 거동 특성에 따라 두가지 범주로 묶을 수 있다. 평면 파괴, 썩기 파괴, 전도 파괴 및 낙석의 발생은 지반 또는 암반 내 발달하고 있는 불연속면이 주요한

기 파괴, 전도 파괴 및 낙석의 발생은 지반 또는 암반 내 발달하고 있는 불연속면이 주요한 파괴의 원인으로서 사면의 불연속체적 거동 특성을 반영하고 있으며, 그 외의 파괴 형태, 특히 원호 파괴의 경우 사면의 연속체적 거동 특성을 반영하고 있다. 이러한 파괴 유형의 구분과 그 주요 형태 및 거동 특성의 관계는 table 1과 같이 정리할 수 있다.

### 3. 사면의 거동 특성의 제어 요인

사면의 안정성은 우선 그 사면의 거동이 어떠한 특성을 가질 것인가에 대한 평가로부터 진행되어야 하며, 이 과정에 의해 사면 파괴의 주요 인자를 도출할 수 있다. 따라서 사면의 거동 특성을 제어하는 요인에 대한 검토와 그 분류를 수행할 수 있는 기준을 설정할 필요가 있다. 여기서는 암석 종류, 풍화 특성, 절리 밀도를 중심으로 사면의 거동 특성을 분석하고자 한다.

#### 3.1 암석 종류와 풍화 특성

국내에 분포하는 암석의 종류는 선캠브리아기 변성암으로부터 신생대 퇴적암 및 화산암에 이르기 까지 다양한 구성을 보이며, 특히 변성암과 중생대 화성암의 분포가 우세하다. 이러한 지질 분포의 특성을 감안하여 절취 사면의 조사 대상 지역을 선정하였다 (Fig. 1).

총 373개소의 조사 사면을 크게 변성암, 화성암, 퇴적암으로 구분하고, 그 하위에 지질 시대를 달리하는 대표적 암석을 두었을 때, 그 점유율은 Fig. 2와 같다. Table 2는 이들 분포 암석에 대한 제반 파괴 특성을 정리한 것으로서, 각 암석 종류에 따라 상이한 파괴 특성을 보이고 있다. 파괴된 사면에 대해 불연속적 거동을 보인 파괴와 연속적 거동을 보인 파괴를 비교해 보면 변성암과 퇴적암은 썩기 파괴 등 불연속면을 따르는 활동 파괴가 단연 우세한 파괴 형태를 보여 불연속체적 거동 특성을 보이는 반면, 화성암 특히 중생대 화성암의 경우 오히려 원호 파괴와 표면 파괴에 의한 사면 파괴율이 불연속면에 의한 파괴에 비해 점유가 큰 것을 알 수 있다.

이러한 암석 종류 별 파괴 유형의 차이를 검토하기 위하여, 각 암석 종류에 따른 풍화특성을 비교하였다. 풍화 특성의 비교를 위해 토층 심도율(Soil depth Ratio: SR)을 토층 심도와 사면 높이와의 비를 이용하여 다음 식과 같이 정의하였다.

$$RS = \frac{\text{Soil depth}}{\text{Slope height}}$$

이때, 토층 심도의 측정은 총적층 외에 풍화 등급상 RS - CW에 해당하는 지반 상태를 포함하였다 (Geological society, 1977; Lee and Freitas, 1989).

Table 3은 각 암석 종류별 토층심도율을 비교한 것으로서 전반적으로 토층심도율 0.2 이

하의 풍화 상태가 우세하며, 평균 토층심도율의 경우 퇴적암이 0.09, 변성암이 0.17로 토층 심도율 0.2 이하의 낮은 풍화 심도를 보이지만, 화성암의 경우 0.30으로 그 평균이 여타의 암석에 비해 높고, 특히 0.4 이상의 토층 심도율을 보이는 사면이 폭넓게 분포하고 있다. 이러한 화성암의 상대적으로 높은 토층 심도율은 토상 지반 (soil like mass) 조건을 지시하는 것으로서 화성암의 사면 파괴 유형이 원호 파괴 및 표면 파괴가 우세한 것과 밀접한 관련이 있다.

### 3.2 토층심도율과 거동 특성

위와 같이 토층 심도율은 그 사면의 거동 특성과 매우 밀접한 관계가 있다. 여기서는 파괴된 모든 사면을 대상으로 사면의 토층심도율과 파괴 유형을 분석하고자 한다. Fig. 3은 사면의 토층심도율을 0.1 단위로 구분하여 파괴 유형의 빈도를 표시한 그래프로서, 토층 심도율 0.4 이상에서는 낙석, 켜기 및 평면 파괴 등 불연속체 거동 특성을 보이는 파괴 유형이 더 이상 나타나지 않는다. 따라서 토층 심도율 0.4는 토상 지반과 암반을 구분할 수 있는 기준으로 활용될 수 있다. 이때, 토층 심도율 0.4 이상은 토상 지반, 0.4 이하는 암반 사면으로 분류된다.

그러나, 토층 심도율이 0.4 이하인 조건에서도 0.2 이상인 경우 전체 파괴의 50% 이상을 원호 파괴 및 표면 파괴가 점유하고 있으므로, 토층 심도가 비교적 두꺼운 경우 토상 지반에 해당하는 사면 안정성 평가가 병행될 필요가 있다. 단, 토층 심도가 0.2 이하인 사면의 경우 원호 파괴 및 표면 파괴의 빈도가 격감하므로 비교적 순수한 암반 사면으로의 평가가 가능할 것이다. 따라서 필요하다면 토층 심도율을 기준으로 0.4 이상의 토상 지반, 0.2 - 0.4의 혼합 지반, 0.2 이하의 암반으로 구분할 수 있다.

### 3.3 블록 크기비와 거동 특성

토층 심도율 0.4 이하의 암반 사면에서도 사면 전반에 발생하는 원호 파괴 형태의 연속적 거동을 보여주는 예가 발견된다. 즉, 사면의 거동이 연속체적인 거동을 보이는 조건은 비단 사면에 있어서 토층이 접하는 비율에 국한되지 않는다. 원호 파괴의 발생이 사면의 연속체적 거동을 지시하는 중요한 근거라고 할 때, 비록 토층심도율이 작다 하더라도, 사면에 발달한 절리의 빈도가 대단히 조밀할 경우 개개 암반 블록은 불연속체적 거동을 하겠지만 사면 전반을 고려한다면 오히려 연속체적 거동으로 인한 원호 파괴가 발생할 수 있다. Hoek and Bray(1981)는 암반 사면의 파괴 유형을 구분하며, 원호 파괴가 파쇄가 심한 사면에서 발생할 수 있음을 지적한 바 있다. 이러한 구조물과 암반 블록의 크기로 정의될 수 있는 파쇄 정도의 관계는 크기 효과(scale effect)의 개념으로 여러 부문에서 제기되고, 활용되고 있다 (Hoek and Brown, 1980; Hoek, 1994). 사면에 있어서도 사면의 규모에 대한 개개 암반 블록의 크기가 현저히 작다면, 또는 절리의 간격이 현저히 작다면, 그 사면은 암반사면이라 할

지라도 연속체적 거동을 하는 것으로 안정성 평가를 수행할 수 있을 것이다. 사면에 형성된 암반 블록의 크기는 블록 크기지수인  $I_b$ 에 의해 다음식과 같이 블록 크기 지수  $I_b$ 는 블록을 형성하는 3개 절리군의 평균 간격으로 정의할 수 있다.

$$I_b = \frac{S1+S2+S3}{3} \quad ; S1, S2, S3: \text{ 각 절리군의 개개 절리 사이의 간격}$$

블록크기 지수  $I_b$ 와 사면 높이  $H$ 의 비를 블록크기비(Block size Ratio, BR)로 정의하면 다음과 같다.

$$BR = I_b / H$$

Fig. 4는 사면의 파괴 유형을 원호 파괴와 비원호 파괴로 이분하여 토층심도를 0.4이하인 암반 사면을 대상으로 토층심도율 SR과 블록크기비 BR에 대해 도시한 결과이다. 그 결과, 토층심도비가 0.4이하인 암반 사면에 있어서도 블록크기비가 0.01 이하인 경우, 원호 파괴가 집중적으로 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 블록크기비가 0.01 이하인 경우 개개 블록의 불연속체적 거동에 의한 사면 안정성 해석도 가능하지만, 암반 전체를 연속체로 가정하여 개개 블록의 특성 보다는 암반 전체의 물성값에 의한 사면 안정성 해석이 보다 효과적일 수 있음을 지시하는 것이다.

이상의 결과는 토층 심도율 0.4 이하의 암반 사면을 다시 연속체적 지반과 불연속체적 거동 특성을 보이는 지반으로 구분할 수 있는 유력한 지표가 블록 크기비이며, 이 블록 크기비가 0.01이하일 때, 그 암반은 연속체적 파괴가 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

반대로 불연속면의 연장성이 제한적인 조건에서 절리의 간격이 상대적으로 넓은 사면의 경우, 역시 연속체적 거동을 보일 수 있다. Palmström(1996)은 터널에서 터널의 직경에 비해 암반 블록의 크기 지수가 0.2 이상일 때, 괴상 암반(massive rockmass)로 구분하고, 연속체적 거동 특성을 보이는 것으로 제안한 바 있다. 특히 이 괴상 암반을 다시 암석의 강도 기준에 의해 괴상 경암반(competent rockmass)과 괴상 연약암반(incompetent rockmass)로 구분하였다. 터널의 경우 견고한 암반이라 할 지라도 높은 응력 조건속에서 파괴가 발생할 가능성이 존재한다.

그러나 사면의 경우 이러한 괴상 암반에서의 파괴는 주로 절리의 발달이 적은 연약한 암반 사면에서 발생하는 예로서 사면의 파괴가 불연속면에 의해 제어되기 보다는 낮은 암반 강도에 의해 제어된다. 따라서 사면의 경우 사면 높이에 비해 절리 간격이 현저히 넓다면 암반의 강도가 낮은 연약한 괴상 암반 조건을 우선적으로 점검할 필요가 있다. 만약 절리 간격이 현저히 넓고 암반의 강도도 높은 암반 사면이 존재한다면 사면의 높이가 아주 높거

나, 이방성이 존재하는 등 특수한 영역에서 안정성 평가의 고려 대상이 될 수 있다. 그러나, 이러한 사면 조건은 국내 지질 조건에서 사실상 관찰하기 어렵다.

이러한 암반의 연속체적 조건을 제한 부분이 즉 블록크기비가 0.01에서 0.2사이에 해당할 때, 가장 일반적으로 암반 사면의 안정성 해석의 대상이 되는 절리 암반이 될 것이다. 절리 암반은 주지하다시피 암반내 발달하는 불연속면의 방향 등 기하학적 특성이 사면의 안정성에 가장 중요한 요인으로 작용하는 사면으로서 불연속체 거동의 대표적 지반 조건이다.

#### 4. 사면 지반의 분류와 파괴 유형 분석

앞서 기술한 사면 거동 특성의 제어 요인에 따라 사면을 분류하기 위해서는 3단계 과정을 진행하여야 하며, 이 과정을 통하여 총 5 개의 지반 조건으로 분류할 수 있다 (Fig. 5).

토상 지반(soil like mass, SLM), 절리 암반(jointed rockmass, JRM), 파쇄 암반(highly fractured rockmass, HRM), 괴상 연암반(massive incompetent rockmass, IRM), 괴상 경암반(massive competent rockmass, CRM) 등 6개의 지반 조건 중 국내에서 가장 일반적인 지반 조건은 토상 지반, 절리 암반, 파쇄 암반이며, 괴상 연암반은 일부 국한된 지역에서 관찰되고, 괴상 경암반 조건은 조사 지역 내에서는 관찰되지 않았다.

괴상 경암반을 제외한 각 지반 조건에 따른 파괴 유형 분석 결과, 불연속체적 거동에 의한 사면 파괴는 절리 암반에서 가장 뚜렷하며, 토상 지반에서는 연속체적 거동으로 인한 사면 파괴가 발생하고 있다 (Fig. 6). 이러한 절취 사면의 연속체적 거동 특성은 절리 암반, 파쇄 암반, 괴상 연암반, 토상 지반의 순으로 강화되어간다.

#### 5. 결 론

거동 특성에 대한 이해는 사면의 파괴 유형 및 주요 파괴 요인의 결정 등 사면 파괴 예측의 중요한 과정이다. 여기서는 거동 특성에 따른 사면의 지반 분류에서 그 기준으로 활용할 목적으로 몇가지 지반 특성을 분석하였다. 그 결과, 사면의 토층심도율(SR)과 블록크기비(BR)를 이용하여 연속체적 또는 불연속체적 거동 특성을 예측할 수 있는 것으로 평가되었다. 이 기준을 이용하여 사면의 지반 조건을 토상 지반( $SR > 0.4$ ), 절리 암반( $SR < 0.4, 0.01 < BR < 0.2$ ), 파쇄 암반( $SR < 0.4, BR < 0.01$ ), 괴상 암반( $SR < 0.4, BR > 0.2$ )으로 분류할 수 있다. 이 때, 각 지반 조건별 주요 파괴 요인으로서 절리 암반에서는 절리의 기하학적 형태, 파쇄 암반에서는 절리 밀도, 괴상 암반에서는 암반 강도, 토상 지반에서는 토질 조건을 고려될 수 있다.

## 사 사

이 논문은 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방지기술개발사업으로 수행한 내용이다. 연구에 많은 조언을 해주신 한국자원연구소 김원영 부장님과 건설기술연구원의 구호본 팀장님께 감사드린다.

## 참 고 문 헌

- 김정환, 윤운상, 최재원, 권혁신, 김세현, 2000, 암반사면의 파괴 예측을 위한 단열 구조 특성화 및 평가시스템 개발 연구, 서울대학교.
- Geological Society, 1977, The description of rock masses for engineering purposes, Geol. Soc.(London) Eng. Group Working Party, Q. J. Eng. Geol. 25, 355-388
- Gupta, P and Anbalagan, R, 1997, Slope stability of Tehri Dam Reservoir Area, India, using landslide hazard zonation (LHZ) mapping, Q. J. Eng. Geol. 30, 27-36
- Hoek, E, 1994, Strength of rock and rock masses, ISRM News Journal, 2, 416
- Hoek, E. and Bray, J., 1981, Rock Slope Engineering 3rd eds, Inst. Min. and Metall, London.
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1980, Underground Excavation in rock, Inst. Min. and Metall, London.
- Koirala, N.P. and Wakins, A.T., 1988, Bulk appraisal of slopes in Hong Kong In Proc. 5th Symp. On Landslides, 1181-1186
- 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. 22, 31-48
- Mazzoccola, D.F. and Hudson, J.A., 1996, A comprehensive method of rock mass characterization for indication natural slope instability, Q. J. Eng. Geol., 29, 37-56
- Palmström, A., 1996, Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering, Tunnelling and Underground space tech, Part I, 11, 175-188
- Romana, M., 1985, New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes, Proc. Int. Symp. On the Role of Rock Mech., 49-53.
- 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., 11-33

Table 1. Failure modes of cut slope

Failure modes	Behavior characteristics	Remarks
surface failure	continuous behavior (soil like behavior)	surface erosion, skin flow, piping
circular failure		rotational slide
rock fall	discontinuous behavior (discontinuity triggered behavior)	fall
planar failure		translational slide
wedge failure		
toppling failure		topple

Table 2. Failure characteristics of various rock types.

SR: sedimentary, IR: igneous and MR: metamorphic rocks

Rock types	Failure modes	No.	Non-Failure	soil like behavior		discontinuity triggered behavior				Failure ratio
				Surface Failure	Circular Failure	Rock Fall	Planar Failure	Wedge Failure	Toppling Failure	
SR	Cenozoic	11	5	2	2	0	0	2	0	54.5%
	Mesozoic	22	9	3	0	2	1	7	0	59.1%
	Paleozoic	34	17	3	3	1	4	6	0	35.3%
	sum	67	31	8	5	3	5	15	0	53.7%
IR	Cenozoic	12	9	0	1	0	0	2	0	25.0%
	Mezozoic	104	39	19	20	4	1	21	0	59.1%
	sum	116	48	19	21	4	1	23	0	58.8%
MR	Meta-Sed.	108	59	6	3	12	7	21	0	45.4%
	Gneiss	82	39	11	10	3	1	17	1	52.4%
	sum	196	98	17	13	15	8	38	1	48.4%
Total		373	177 47.5%	44 11.8%	39 10.5%	22 5.9%	14 3.8%	76 20.4%	3 0.3%	52.5%

Table 3. Soil depth ratio of various rock types

SR: sedimentary, IR: igneous and MR: metamorphic rocks

Rock types		Soil depth Ratio						Ave.	STD.
		0 - 0.2	0.2 - 0.4	0.4 - 0.6	0.6 - 0.8	0.8 - 1			
SR	Cenozoic	9	2	0	0	0	0.098	0.090	
	Mesozoic	17	5	0	0	0	0.105	0.108	
	Paleozoic	32	2	0	0	0	0.066	0.060	
	sum	58	9	0	0	0	0.086	0.085	
IR	Cenozoic	10	0	2	0	0	0.129	0.171	
	Mezozoic	49	25	8	11	11	0.315	0.298	
	sum	59	25	10	11	11	0.296	0.293	
MR	Meta-Sed.	81	12	6	3	6	0.161	0.248	
	Gneiss	56	11	10	4	1	0.178	0.233	
	sum	137	23	16	7	7	0.168	0.240	
Total		254	57	26	18	18	0.178	0.233	

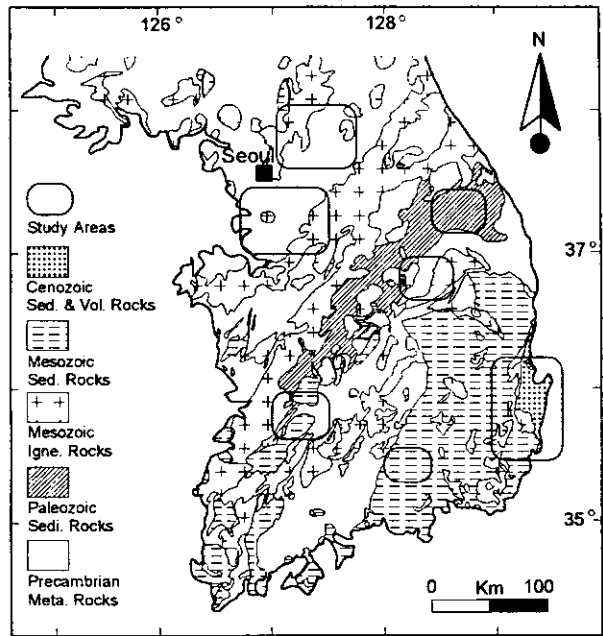


Fig. 1. Locality map of study areas

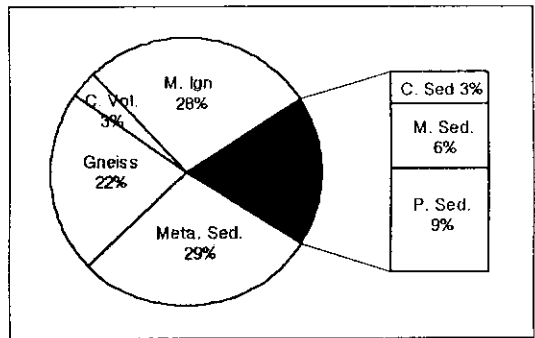


Fig. 2. Rock type of analyzed slopes.

black: sedimentary rocks, white: igneous rocks, grey: metamorphic rocks

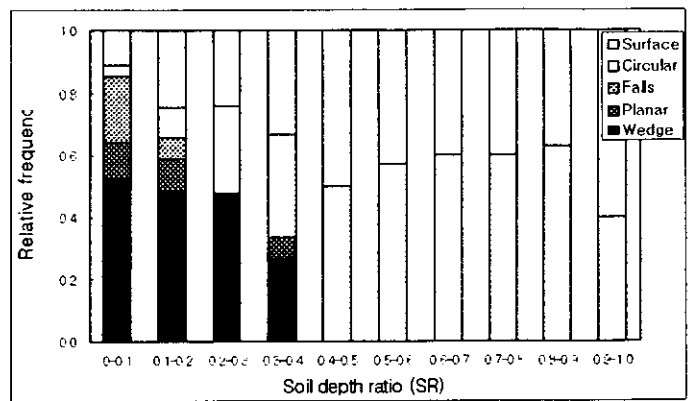


Fig. 3. Failure modes and soil depth ratio of slope



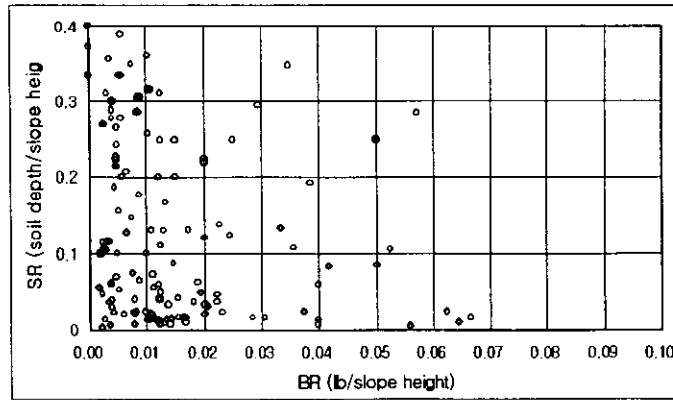


Fig. 4. Ground behavior characteristics and block size ratio of rock slope  
 filled circle: circular failures, open circle: the other failures

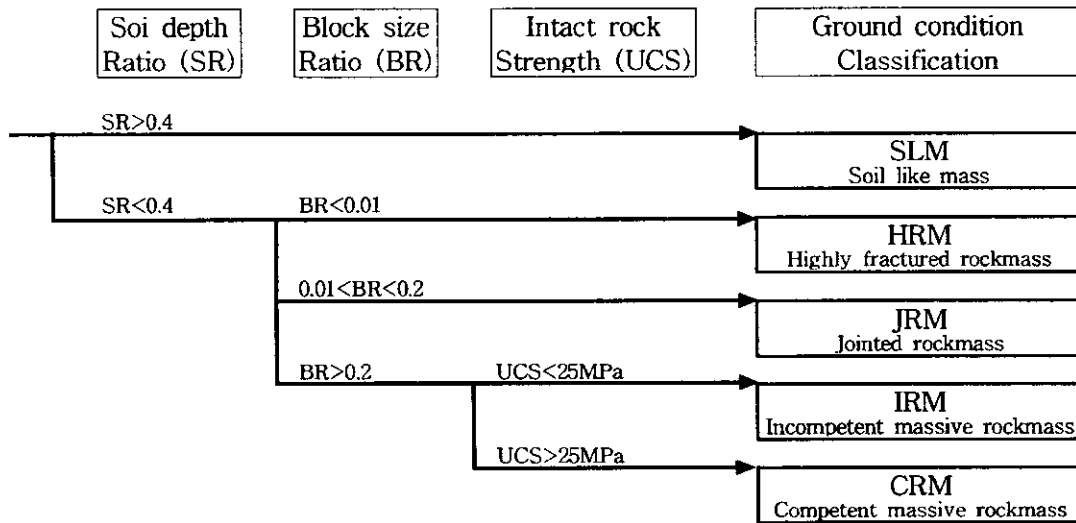


Fig. 5. Classification flow of slope ground condition

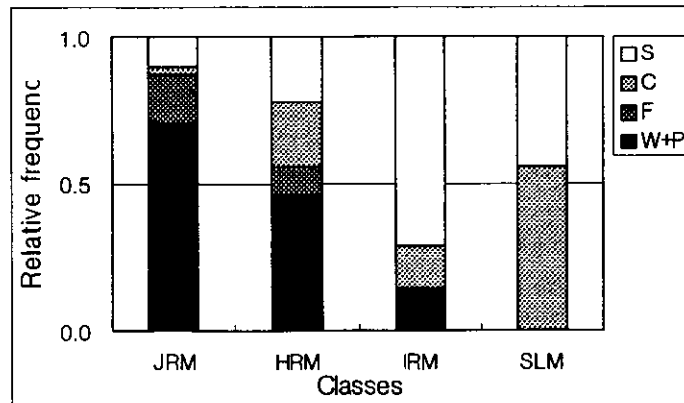


Fig. 6. Failure modes with ground condition