

경상분지 퇴적암 절취사면의 붕괴특성

Failure Characteristics of Cut Slopes in Sedimentary Rock of Kyöngsang Basin

유병옥, Byung-Ok You¹⁾, 황영철, Young-Cheol Hwang¹⁾, 정형식, Hyung-Sik Chung²⁾

1) 한국도로공사 도로연구소 책임연구원, Chief Researcher, Highway Research Center, Korea Highway Corporation

2) 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Hanyang

SYNOPSIS : The stability of rock slope is considered to have a deep relation with types of rocks because types of rocks have their own typical weathering profiles, geological structures and characteristics of failures. Therefore it is essential for the evaluation of rock slope stability to analyze geological and engineering characteristics in rock mass. The data which collected from investigated slopes in sedimentary rock of Kyöngsang Basin along highways were analyzed. Primary factors affecting slope stability in rock mass are; dips and strikes of slopes and discontinuities, shear strength of discontinuities, slope geometry and geological structures etc.

Key words : sedimentary rock, cut slope, shale, sandstone, Kyöngsang basin, bedding, clay layer, plane failure

1. 서론

산악지형이 많은 우리나라는 산지를 절취하여 도로개설 및 주택단지의 개발로 인해 대규모의 절취사면이 형성되고 있는 경우가 많으나 빈번히 사면붕괴가 발생되고 있다. 일반적으로 절취사면의 안정에 영향을 미치는 요소로는 암종, 풍화, 지질구조의 특성 등의 내적인 요인과 강우, 융해, 지진, 발파 등의 외적인 요인을 들 수 있으나 이들 중 암반사면의 내적인 요인들이 사면안정에 커다란 영향을 주는 주요인으로 작용할 수 있으므로 국내에 분포하는 암반의 내적 요인들에 대한 지질학적인 구분과 공학적인 특성을 파악하는 것이 매우 중요한 일이다. 즉, 지역에 따라 분포하는 암석종류, 지질시대 및 지질구조에 따라 붕괴유형 및 발생빈도가 다른 특성을 보이고 있어 암종 및 지질구조 특성에 따른 붕괴특징을 분석함으로써 도로 및 주택단지의 개설시 예비적인 사면안정문제를 예견할 수 있을 것으로 판단된다.

그러므로 본 논문은 고속도로에서 절취사면의 비교적 많은 붕괴빈도를 보이는 경상분지 퇴적암 절취사면에 대한 현장조사를 통한 자료분석을 실시하여 퇴적암에서의 붕괴유형, 붕괴를 유발시키는 주요 지질구조, 붕괴유형 등과 같은 여러 가지 붕괴특성을 분석하여 경상분지의 퇴적암 절취사면의 지역 및 지질특성을 고려하여 설계 및 시공에 참고가 될 수 있는 자료를 제공하고자 한다.

2. 경상분지 퇴적암의 지질특성

본 논문의 조사지역은 중앙고속도로(대구-안동간), 구마고속도로, 남해고속도로, 경부고속도로(구미-부산간) 등의 고속도로를 중심으로 이루어졌으므로 이 구간의 특징을 언급하고자 한다.

2.1 암상

경상분지에 분포하는 암석으로는 중생대 백악기 경상계 신동층, 하양층군, 유천층군(Chang, 1975)으로 구성되어 있으며 세일, 사암 및 역암이 주 구성암석이고 부분적으로 화강암계통, 반암계통 및 염기성, 산성 맥암류가 관입되어 있다(그림 1). 또한 이곳은 신생대 4기 충적층이 부정합으로 피복되어 있다. 세일은 지역에 따라 다소 다른 특성을 보이는 데 중앙고속도로의 대구-안동구간에서는 암색으로 판단해 볼 때 의성 지역부근에서는 붉은 암색을 보이며 기타의 지역에서는 녹색 또는 회색의 암색을 보인다. 그리고 구마고속도로의 경우는 일반적으로 접촉변성작용을 받아 호은펠스화되어 검은 색의 암색 및 비교적 치밀한 암조직을 보이며 층리 및 절리면을 따라 점토가 충전되어 있다.

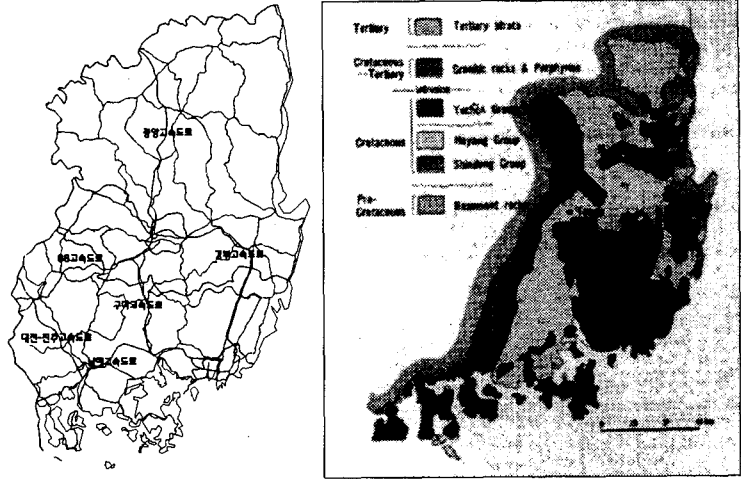


그림 1. 경상분지 지역의 고속도로 및 지질도(Lee, 1988)

2.2 불연속면 발달

경상분지는 퇴적암이 주를 이루고 있으므로 퇴적암에서의 주 지질구조인 층리면의 방향을 언급하면 다음과 같다. 지역에 따라 다소 다른 방향을 보이나 고속도로 노선을 중심으로 구마고속도로의 경우, 층리의 대표적인 주향 및 경사는 구마고속도로 달성터널을 경계로 북쪽에서는 N60~70E/15~25SE,가 우세하고 남쪽은 N10~40W/15~22NE가 대표적으로 발달한다. 그리고 중앙고속도로(대구-안동간)의 경우, N10E~N10W/10~20SE, 10~20NE 방향이 대표적이며 남해고속도로(진주-부산간)는 수평 및 10° 내외의 경사를 가진 층리가 우세하다.

3. 절취사면의 붕괴특성

3.1 경상분지 퇴적암 절취사면의 붕괴빈도

한반도 남쪽의 경상분지에서 현재 공용 중에 있는 고속도로 주변에 분포하는 절취사면은 표 1과 같다.

전국 고속도로 절취사면의 분포는 총 3,000여개로 경상분지 퇴적암 절취사면은 전체 사면개소에 대해 25% 정도를 차지하고 있는 데 이중 붕괴가 발생한 사면수는 50여개로 퇴적암 사면 중 6.7%에 해당된다.

표 1. 경상분지 퇴적암의 노선별 사면개소 및 붕괴빈도

노선명	노선연장 (km)	경상분지 퇴적암 연장(km)	경상분지 퇴적암 사면개소	붕괴개소
경부	428	81.3	95	4
구마	83.3	74.2	99	21
중앙	279.2	77.6	470	14
남해	245.6	108.2	34	10
88	174.6	26.6	45	1

3.2 경상분지 퇴적암 절취사면의 붕괴특성

절취사면의 붕괴에 영향을 주는 요인을 알아 보기 위하여 붕괴규모, 붕괴유형, 붕괴위치, 지질구조, 붕

괴시기 등에 따라 붕괴빈도를 분석하여 보았다.

3.2.1 붕괴규모에 따른 분류

본 연구에서는 퇴적암에서의 붕괴규모를 표 2와 같이 사면표면에서 활동면까지의 최대심도를 기준으로 하여 다섯개의 유형으로 붕괴빈도를 분류하였다.

56개소(77지점)의 붕괴사면에 대한 분석결과는 표 3과 같이 나타났으며 이를 연장 10km당 붕괴 지점수로 나타내면, 그림 2와 같다. 붕괴규모상으로 II-type의 붕괴가 많으며 I-type의 붕괴는 경부고속도로 대구-부산구간의 자료가 많아서 발생하는 것으로 비교적 II~III-type 정도의 분포를 보인다. 그러나 V-type의 붕괴는 대규모의 사면붕괴로 산정부에서 부터 활동이 된 사면들로 퇴적암에서 주를 이루고 것으로 활동체적이 100,000m³~300,000m³에 이른다. 이 붕괴는 단층대에 파쇄층 또는 점토층을 따라 발생된 것으로 점토층의 두께가 수십 cm 정도에 달한다.

표 2. 붕괴규모의 구분

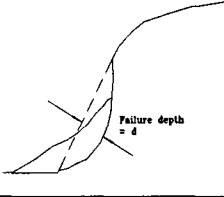
Type	I	II	III	IV	V	비 고
최 대 붕 괴 심 도	낙석, 토층유실	0~4m	4~8m	8~12m	12m 이상	

표 3. 붕괴규모에 따른 붕괴빈도

붕괴규모	암종 퇴적암(476.3km)	
	①붕괴 지점수	붕괴발생율 (%) (①/②)
I-type	10	17.9
II-type	31	55.4
III-type	10	17.9
IV-type	4	7.1
V-type	1	1.8
②합 계	77	100.0

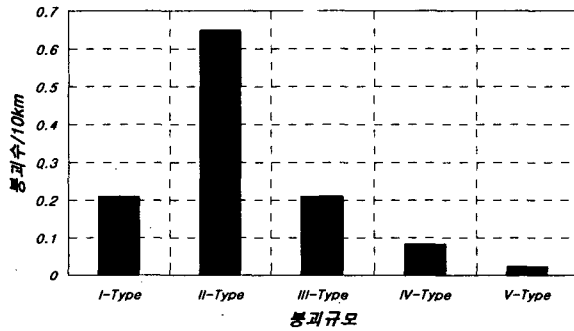


그림 2. 붕괴규모에 따른 10km당 붕괴빈도

3.2.2 붕괴유형분류

Hoek & Bray(1981)에 의하면, 암석사면은 크게 평면파괴, 쉐기파괴, 전도파괴, 원형파괴의 네 가지 붕괴유형을 갖는 데 이를 경상분지의 퇴적암에서 발달하는 불연속면의 특성에 따라 붕괴유형을 표 3과 같으며 이를 연장 10km당 붕괴 개소수로 나타내면, 그림 3과 같다.

표 4. 붕괴유형에 따른 붕괴빈도

붕괴유형	암종 퇴적암(476.3km)	
	①붕괴 개소	붕괴발생율 (%) (①/②)
평면파괴	32	57.1
쉐기파괴	3	5.4
전도파괴	0	0.0
원형파괴	3	5.4
낙 석	13	23.2
토층유실	5	8.9
②합 계	56	100.0

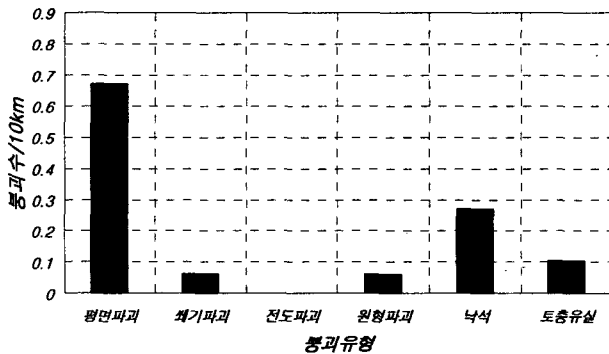


그림 3. 붕괴유형에 따른 연장 10km당 붕괴빈도

본 결과에 의하면, 평면파괴가 가장 우세하게 발생하여 전체 붕괴개소의 32% 이상을 차지하고 다음으로 낙석, 토층유실의 순으로 나타났다. 평면파괴는 주로 사면과 유사한 방향의 지질구조에 의해 발생하는 것으로 주로 층리가 주 지질구조가 된다.

표 5. 붕괴유형 및 지질특징

붕괴유형	특 징 그 림	지 질 특 징	붕괴유형	특 징 그 림	지 질 특 징
평면파괴 (미고결 점토층)		사면방향으로 경사진 층리면에 미고결 점토가 충전된 평면형 파괴가 발생하는 유형으로 세일내에 충전된 예들이 많았다. 수직절리의 영향은 미미하다.	원형파괴 (5.4%)		세일이 절토에 의해 지표면에 노출되면 풍화속도가 급속히 진전되어 작은 압편은 상호간의 접촉력이 없어 강우에 의해 쉽게 토층과 같은 원형파괴유형을 보인다.
(사암과 세일사이)		사암과 세일이 교호되는 층에서 세일이 빗물이나 강우에 의해 풍화되어 붕괴되기도 한다. 석회암 및 고생대 퇴적암에서는 경사가 급한 층리면을 따라 평면파괴가 발생한다.	낙석 (차별적 풍 화)		세일과 사암의 호층으로 이루어진 사면에서 세일이 풍화에 약한 특성에 의해 차별적인 풍화를 받아 상부의 사암이 붕락하는 하는 유형이다. 사암에는 수직절리의 발달이 심하여 이 수직절리가 블록화 시켜주는 구실을 한다.
(단층 파쇄대)		사암과 세일로 이루어진 층의 층리면 사이에 대규모의 단층점토층이 충전되어 이 면을 따라 활동된다. 이 붕괴유형은 매우 대규모적인 붕괴규모를 갖는다.	(23.2%)		세일이나 사암, 역암에서 지표 노출로 물리적인 풍화를 받게 된다. 이때 암괴는 매우 작은 압편으로 세분화되어 표면에 붙어 있는 암괴가 낙석하게 된다.
쐐기파괴 (5.4%)		경상분지의 중생대 퇴적암은 층리면의 경사가 완만하여 이와 같은 붕괴가 드물지만 고생대 퇴적암지대에서 층리가 경사가 급하거나 심하게 왜곡되어 이 유형의 붕괴를 보이기도 한다.	세 굴		세일이나 사암에서 단층파쇄대를 빗물에 의해 세굴이 발생되어 점진적으로 침수가 되어 세굴 길이 및 폭이 넓어진다. 그리고 주변 암괴가 붕괴되는 이어지는 연속적인 붕괴형태를 보인다.

붕괴유형별 지질구조의 특징은 표 5와 같으며 붕괴유형은 구마고속도로의 경우, 층리경사방향이 도로 쪽으로 향한 하행측 사면에서 사면안정의 문제가 발생되고 있으며, 특히 층리면에 점토질이 충전되어 있는 경우가 빈번하여 대규모적인 사면 상부로부터의 평면파괴가 주를 이룬다. 그러나 남해고속도로의 경우는 세일층과 사암이 교호되어 세일이 차별적인 풍화를 받아 사암이 붕락되는 유형의 붕괴양상을 보인다. 중앙고속도로 대규모의 경우는 단층파쇄대에 의한 대규모적인 평면파괴의 예가 있었으며 풍화에 약한 적색세일이 발달하여 세일층이 풍화를 받아 원형파괴를 보인다. 그리고 단층파쇄대가 지나는 구간에서 세일 및 사암이 세굴에서 심하게 발생하는 양상을 보인다.

3.2.3 풍화정도에 따른 붕괴유형분류

암석 풍화정도의 구분은 일반적인 6단계(F, SW, MW, HW, CW, RS)로 구분하는 데 풍화정도에 따라 붕괴유형에 차이를 보인다. 본 논문은 붕괴가 발생한 사면을 대상으로 풍화정도를 파악하여 붕괴유형의

상관관계를 파악하였다(표 6). 풍화정도에 따른 붕괴유형은 그림 4와 같이 SW~MW에서 평면파괴가 약 60%를 차지하고 다른 붕괴유형은 비교적 낮은 분포를 보인다.

표 6. 암종별 풍화정도에 따른 붕괴유형 빈도

붕괴 유형	풍 화 정 도							
	SW		MW		HW		CW	
	①붕 괴지 점수	붕괴발 생율(%) (①/②)	①붕 괴지 점수	붕괴발 생율(%) (①/②)	①붕 괴지 점수	붕괴발생 율(%) (①/②)	①붕 괴지 점수	붕괴발생 율(%) (①/②)
평면파괴	16	28.57	12	21.43	4	7.14	0	0.00
꺾기파괴	0	0.00	2	3.57	1	1.79	0	0.00
전도파괴	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
원형파괴	0	0.00	1	1.79	2	3.57	0	0.00
유 실	0	0.00	1	1.79	2	3.57	2	3.57
낙 석	9	16.07	4	7.14	0	0.00	0	0.00
②합계	25	44.64	20	35.71	9	16.07	2	3.57

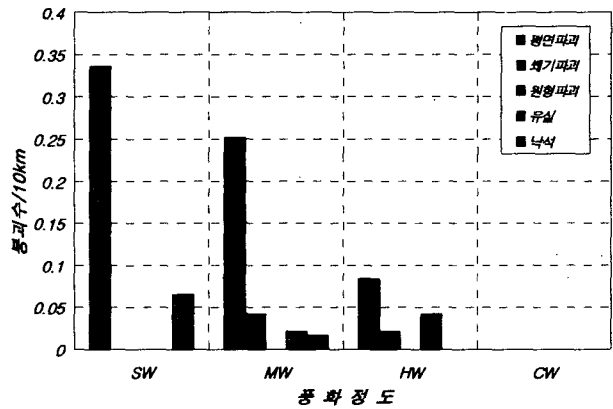


그림 4. 풍화정도에 따른 붕괴형태별 10km당 붕괴빈도

3.2.4 붕괴위치에 따른 분류

사면붕괴는 풍화특성 및 지형형상, 단층과 같은 지질구조 유무에 따라 사면내 붕괴위치에 다양한 차이를 보인다(日本土質工學會, 1977).

본 논문은 표 7과 같이 붕괴위치를 구분하여 사면내 어느 지점에서 붕괴가 많이 발생하는지를 알아보았다. 붕괴 I-type은 깊은 활동면의 심도를 갖는 붕괴로 대규모적인 붕괴가 발생하는 것으로 이 붕괴 유형은 암반내에서는 단층파쇄대나 점토층에 의해 발생하는 경우가 많다. 붕괴 II-type은 사면내의 전면적에서 발생하는 유형으로 매우 불량한 암질상태를 갖는 사면, 전면에서 사면방향과 유사한 방향으로 파쇄대층이 깊게 존재하는 사면, 암반 상부에 토층이 덮고 있는 사면 등에서 붕괴가 발생된다. 붕괴 III-type은 상부의 토층구간에서 붕괴가 발생하는 예로서 일반적으로 풍화대가 깊은 사면에서 우세하다. 붕괴 IV-type은 사면하단부에서 붕괴가 발생하는 유형으로 일반적으로 절리, 단층 등의 지질구조선에 의해 발생된다. 붕괴 V-type은 소규모적으로 사면 여러 개소에서 발생하는 예로 사면내에 국부적으로 암질이 불량한 개소나 단층파쇄대 등이 있는 경우에 발생된다. 그리고 붕괴 VI-type은 낙석 및 매우 소규모적인 상부에서의 유실을 말한다.

표 7. 붕괴발생위치 분류

분류	평 면 도	횡 단 도	분류	평 면 도	횡 단 도
I			IV		
II			V		
III			VI		

표 8 및 그림 5에서 보는 바와 같이 암중연장 10km당 붕괴수를 알아본 결과, I-type, III-type의 붕괴가 주를 이룬다. 특히, I-type의 붕괴는 세일 및 사암으로 이루어진 암층에 주로 발달하는 유형으로 구마고속도로의 경우는 미고결 점토층을 따라 붕괴가 발생되었다.

표 8. 붕괴위치에 따른 붕괴빈도

붕괴위치 \ 암중	퇴적암(476.3km)	
	①붕괴 지점수	붕괴발생율(%) (①/②)
I-type	25	44.7
II-type	4	7.1
III-type	13	23.2
IV-type	5	8.9
V-type	5	8.9
VI-type	4	7.1
②합계	56	100.0

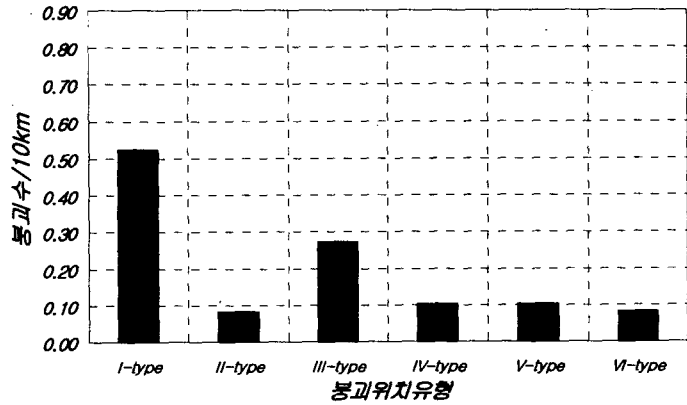


그림 5. 붕괴위치에 따른 붕괴빈도

3.2.5 암중별 지질구조에 따른 분류

암반사면의 붕괴는 암반에 발달하는 불연속면에 의해 좌우되며 사면붕괴의 주원인이 될 수 있는 불연속면으로는 절리, 엽리, 단층, 층리 등이 있다. 절리는 모든 암석 내에 분포하나 층리는 퇴적암, 엽리, 편리는 변성암중 편마암, 편암에서 발달하는 지질구조이고 단층과쇄대는 주로 변성암에서 우세하게 발달하는 지질구조이다.

조사된 사면 중 특히, 암반 내에 발달하는 지질구조 중 표 9 및 그림 6에서 보는 바와 같이 절리는 모든 암석에 발달하는 지질구조이고 층리는 퇴적암의 지질구조로 층리면에 의해 평면파괴가 주로 발생되었으나 세일층의 풍화로 인해 사암이 낙석되기도 한다.

표 9. 지질구조에 따른 붕괴빈도

지질구조 \ 암중	퇴적암(476.3km)	
	①붕괴 지점수	붕괴발생율(%) (①/②)
절리	6	10.7
층리	25	44.6
단층	3	5.1
풍화	13	23.2
암질불량	9	16.1
②합계	56	100.0

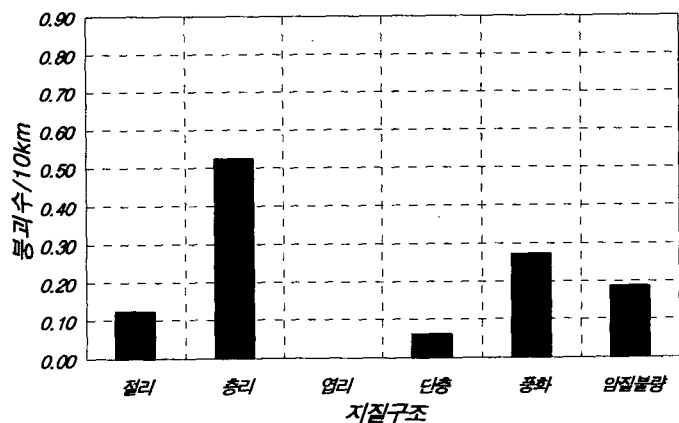


그림 6. 지질구조에 따른 10km당 붕괴빈도

3.2.6 붕괴시기에 따른 분류

일반적으로 사면활동은 내적 또는 외적요인에 의해 지반의 평형상태가 깨어지면서 발생하는 것이므로

사면의 붕괴시기를 절토중, 절토완료 2년이내, 공용중의 세 가지로 구분하여 암종에 따라 붕괴빈도를 구분하였다.

그 결과, 표 10 및 그림 7과 같이 주로 퇴적암의 많은 사면붕괴가 토공완료 2년 이내에 발생하는 것이 많은 것으로 분석되었는데 이는 사면 절토 후에 암반이 풍화작용이 촉진되어 굴착전의 안정한 상태에서 불안정한 상태로 전환되면서 발생되거나 강우에 의해 암반의 단위중량이 증가하고 활동면의 전단강도가 저하되면서 발생하는 것으로 사료된다. 그리고 개통 후에도 많은 붕괴빈도를 보이는 것으로 나타났다.

표 10. 붕괴시기에 따른 붕괴빈도

붕괴시기	암종	
	퇴적암(476.3km)	
	①붕괴지점수	붕괴발생율(%) (①/②)
절 취 중	5	8.9
절취후-2년	30	53.6
개 통 후	21	37.5
②합 계	56	100.0

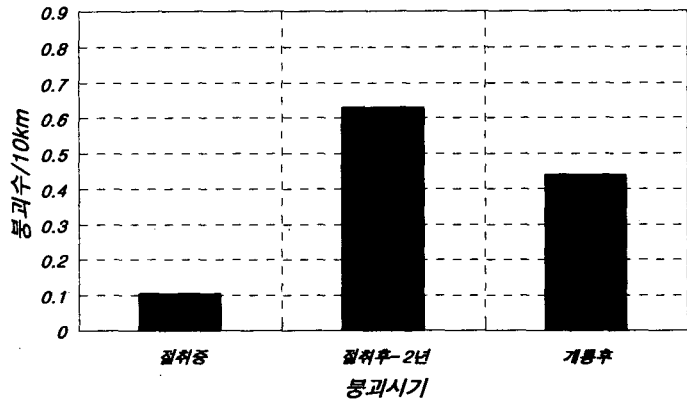


그림 7. 붕괴시기에 따른 10km당 붕괴빈도

3.3 평면파괴시 사면주향과 붕괴면 주향과의 각도차

일반적으로 평면파괴의 발생은 붕괴면 주향이 사면주향과 일치할 때 붕괴가능성이 가장 크게 발생된다. 이러한 발생조건으로 Hoek & Bray(1981)는 절리주향이 사면주향과 비슷하여야 한다(최소한 $\pm 20^\circ$ 내외)라고 제시하고 있다. 그러나 실제 절취사면의 붕괴예에서 사면주향과 절리주향과의 차이를 살펴보면, 그림 8과 같이 평면파괴의 약 65%는 $\pm 20^\circ$ 이내에서 발생하고 약 85%는 $\pm 30^\circ$ 이내에서 발생하는 것으로 분석되었다. 그리고 15% 정도는 $\pm 30^\circ$ 이상의 범위에서 발생하는 것으로 나타났다.

그러므로 평면파괴는 사면주향과 절리주향과의 차이가 $\pm 20^\circ$ 이상에서도 발생할 수 있으므로 평면파괴의 가정조건을 $\pm 30^\circ$ 범위까지 넓혀 적용하여 평사투영법에 의한 사면안정해석시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

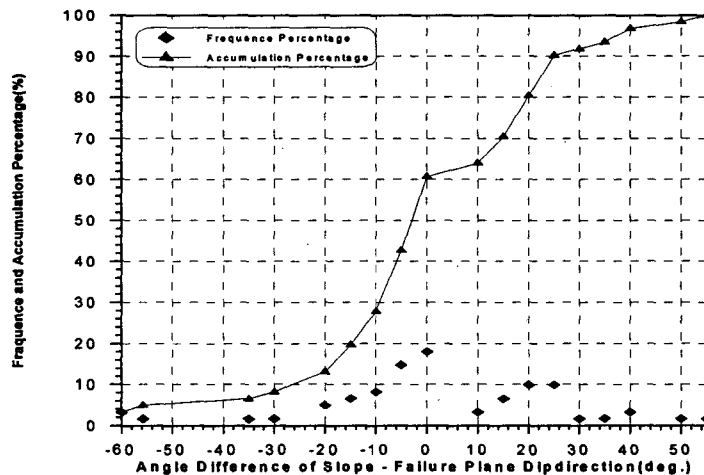


그림 8. 평면파괴시 사면주향과 붕괴면 주향의 차이 빈도율 및 누가백분율

3.4 활동면의 전단강도

활동면의 전단강도는 붕괴가 발생된 사면에 대해 역산법에 의해 추정하였다(Mihail, 1994). 활동면의 전단강도는 그림 9에서와 같이 주로 마찰각이 층리면에 충전된 점토층에 의해 좌우되어 매우 작은 전단강도의 값을 갖는다. 마찰각은 $10^{\circ} \sim 17^{\circ}$, 점착력은 $0 \sim 2.5t/m^2$ 의 범위에서 많이 분포한다.

4. 결론

본 논문에서 경상분지 퇴적암 절취사면의 붕괴특성을 파악한 결과는 다음과 같다.

- 1) 한반도의 남동측 경상남북도에서 나타나는 중생대 백악기, 유라기의 퇴적암층은 비교적 많은 붕괴빈도를 보인다.
- 2) 붕괴유형은 평면파괴가 우세하게 나타났으며 세일층의 차별적인 풍화에 의해 봉락형의 붕괴유형을 보이기도 한다.
- 3) 퇴적암의 붕괴위치는 사면상부에서 부터의 붕괴가 많았으며 붕괴규모는 주로 중간정도에 해당되며 단층파쇄대나 미고결 점토층이 충전된 층리를 따라 발생하는 대규모의 붕괴양상을 보인다.
- 4) 지질구조에 따른 붕괴는 퇴적암에서는 주로 사면방향으로 경사진 20° 내외의 미고결 점토층에 의해 붕괴가 발생하는 것으로 나타났다.
- 5) 붕괴가 발생된 사면에서 역산법에 의해 전단강도의 추정에 의하면 활동면의 전단강도는 점토층에 의해 좌우되어 마찰각이 $10^{\circ} \sim 17^{\circ}$, 점착력이 $0 \sim 2.5t/m^2$ 의 범위에서 많이 분포한다.

참고 문헌

1. 유재일, 유병옥(1993), "사면안정처리에 관한 연구(III)", 한국도로공사.
2. 정형식, 유병옥(1996), "지질특성에 따른 암반사면 붕괴유형연구", 한국지반공학회지, 제 12권, 제 6호, pp.37~49.
3. 지반연구소(1994-1996), "현장기술자문검토서(사면분야)", 한국도로공사 도로연구소.
4. 近森 藤夫(1987), "地すべり防止および急傾斜地崩壊対策事業の現状と課題", 地すべり防止・斜面安定, 総合土木研究所, pp.7~18.
5. 土質工學會(1977), 切土のり面, pp.3~4, pp.106~123.
6. Chang, K. H.(1975), Cretaceous stratigraphy of south-east Korea, J. Geol. Soc. Korea v.11, pp.1~13(E)
7. Hoek, E. & Bray, J.(1981). "Rock Slope Engineering". Revised Third Edition. Institute of Mining and Metallurgy, London, p.88, 114, pp.150~159 171.
8. International Society for Rock Mechanics(1981), "Basic Geotechnical Description of Rock Masses", ISRM Commission on Classification of Rock Masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts., 18, pp.85~110.
9. Lee, Dai-Sung(1988), "Geology of Korea(Second Edition)", Kyohak-Sa Publishing Co., pp.7~10.
10. Mihail E. Popescu, Takuo Yamagami(1994), "Back Anlysis of Slope Failure - A Possibility or A Challenge", 7th International IAEG Congress, Balkama, Rotterdam, pp.4737~4744.

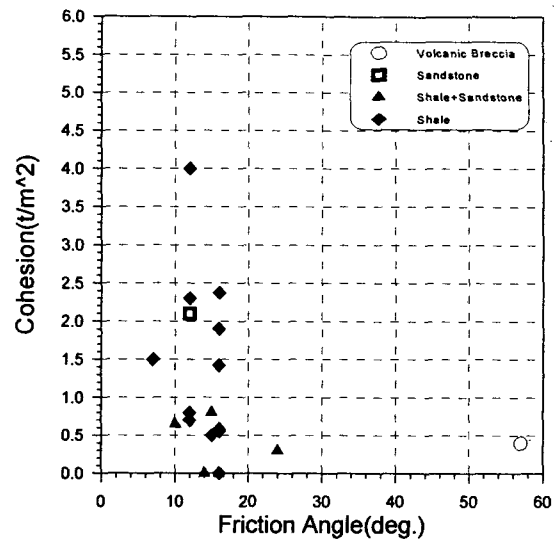


그림 9. 활동면의 점착력과 마찰각