

국내 붕괴특성을 고려한 암반사면의 평면파괴 조건 연구

Consideration of the Plane-Failure Condition of Rock Slopes according to Failure Characteristics in Korea

황 영 철 (Young Cheol Hwang)

한국도로공사 도로연구소

요약 / ABSTRACT

암반사면의 붕괴형태는 원호, 평면, 쐐기 또는 전도파괴로 구분하며, 각각의 붕괴는 역학적인 안정조건을 벗어날 경우 붕괴가 발생하는 것으로 평가한다. 특히, 암반사면 평면파괴는 절리면의 방향성에 대하여 일반적으로 '활동가능성이 있는 면의 주향과 절취사면의 주향의 차이가 약 20° 이상일 경우에는 발생하지 않는 것으로 알려져 있고 설계되고 있다. 그러나, 이러한 안정조건을 만족한 경우라도 사면의 붕괴가 빈번히 발생하고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 안정된 사면조건에도 불구하고 현장 지형여건상 붕괴가 발생한 사례를 중심으로 국내 암반사면의 평면파괴조건을 제시하였다.

주요어 : 암반사면, 평면파괴, 파괴조건, 붕괴특성

The stability of rock slopes is closely related to the factors such as; type of rock, development of geological structures, weathering, characteristics of rock, and the shape of the geological features. When we design the rock slope, the slope stability is determined by the discontinuity causing the circular, plane or wedge failure. The failure happens when the slope is under the unstable geological condition. But in some cases, slope failure has occurred even though the slope is under stable geological conditions. In this respect, this paper presents the plane failure conditions for domestic rock slopes through research of sites where slope failure has occurred regardless of whether or not it satisfied the stable geological conditions.

Key words : Rock slope, plane failure, failure condition, failure characteristic

서론

절토사면의 붕괴원인은 지형조건이나 풍화도, 지질구조 등 매우 다양하며 이들이 복합적으로 작용하여 발생하게 된다. 특히 암반사면 내에 발달해 있는 불연속면의 조건이 가장 주요한 원인이 되며 주로 불연속면의 조사내용을 토대로 설계 및 안정검토를 실시하게 되며, 붕괴는 역학적으로 가정된 안정조건을 벗어날 경우 붕괴가 발생하는 것으로 평가한다(Goodman, 1980). 그러나, 일반적으로 알려진 안정조건을 만족한 경우라도 국내 암반의 붕괴특성이나, 현장 상황을 적절히 고려하지 못하여 사면의 붕괴를 자주 경험하고 있는 실정이며, 이에 대한 연구도 미진한 상태이다. 그러므로, 암반사면의 안정조건에 대한 적합성을 평가하고, 국내 암반특성에 맞는 안정조건을 설정하여 적용할 필요가 있다.

따라서, 본 논문에서는 고속도로 주변에서 발생한 262개의 평면파괴 사례를 검토하고, 최근에 붕괴가 발생한 사면을 정밀 조사하여 암반사면 평면파괴에 대한 안정조건의 적합성을 검토하고 국내 암반사면의 붕괴특성을 고려한 평면파괴 안정조건을 제시하고자 하였다(한국도로공사, 1994~2000).

암반사면의 평면파괴조건

암반사면에서 발생하는 평면파괴는 그 발생빈도가 비교적 적은 것으로 알려져 있고 일반적으로 Figure 1 및 Figure 2와 같이 다음의 조건을 만족하게 될 때 붕괴가 발생하는 것으로 알려져 있다(Hoek & Bray, 1981). 즉,

① 활동가능성이 있는 면의 주향과 절취사면의 주향의 차이가 대략 20° 이내일 경우

② 파괴 면의 경사가 마찰각보다 크고 사면의 경사보다 작을 경우

③ 활동압력의 측면에서의 저항력이 슬라이딩이 발생할 수 있도록 무시할 정도로 작은 경우

특히, 상기의 조건 중 일반적으로 시행하는 평사투영해석법에 의한 안정성판단은 ③의 경우를 고려하기 어렵다. 따라서, ①과 ②의 조건을 고려하여 판단하며, 평면파괴 검토시 daylight zone을

사면방향과 ±20° 이내일 경우에만 고려함으로써 이를 벗어나 있을 경우는 그 발생가능성을 배제하고 있다.

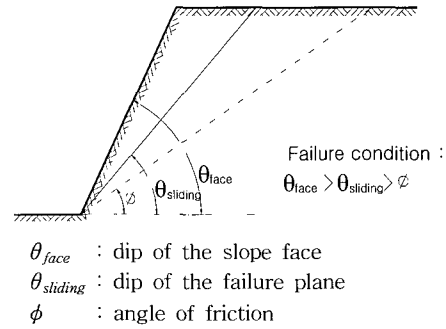


Fig. 1. Geometrical condition of Plane failure.

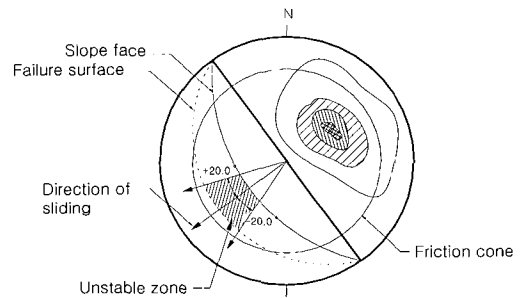


Fig. 2. Geometrical condition of Plane failure.

고속도로 사면의 붕괴 형태

암반사면에서 발생한 평면파괴 사례로부터, 평면파괴조건의 적합성을 확인하기 위하여 고속도로 주변 절토사면의 붕괴형태를 분석하였다. 고속도로 절토사면의 붕괴특성을 분석하기 위해 조사한 사면수는 전체 620개소이며, 조사대상 사면의 선정은 붕괴가 발생하였거나, 전반적으로 불안정하여 붕괴가능성이 있는 사면을 대상으로 한 것이다. 조사대상 사면을 붕괴형태별로 나누어 각각 낙석, 유실, 세굴에 의한 붕괴형태와 원호파괴, 평면파괴, 썩기파괴 및 전도파괴로 구분한 결과는 table 1과 같이 조사되었다(Figure 3).

Table 1. Failure frequency classified by failure shapes according to the rock type.

failure type \ rock type	total		metamorphic rocks		sedimentary rocks		igneous rocks	
	No. of failure	rate (%)	No. of failure	rate (%)	No. of failure	rate (%)	No. of failure	rate (%)
plane	262	42.3	141	44.4	95	43.4	26	31.0
wedge	77	12.4	50	15.8	17	7.8	10	11.9
toppling	42	6.8	13	4.1	22	10.0	7	8.3
circular	76	12.2	49	15.5	17	7.8	10	11.9
rockfall, erosion	163	26.3	64	20.2	68	31.0	31	36.9
total	620	100.0	317	100.0	219	100.0	84	100.0

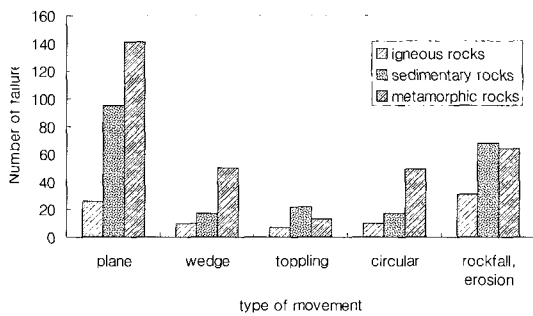


Fig 3. Failure frequency by rock type and failure modes.

본 연구에서 고속도로 절토사면에 대한 붕괴유형에 따른 붕괴빈도 분석결과 전체 사면 중 평면파괴는 262개소에서 조사되어 전체의 약 42.3%에 이르러 가장 많은 붕괴형태로 나타났다(한국도로공사, 2001).

안정조건을 만족한 사면 붕괴 사례

본 연구에서는 암반사면의 안정성 평가시 일반적으로 적용되고 있는 평면파괴 조건에 대하여 국내 암반사면에서의 적용성을 평가하기 위하여 경부고속도로 구미-동대구간 4공구 확장공사구간(연장 10.46km) 중 평면파괴형태로 붕괴가 발생한 3개사면을 분석하였다(Figure 4). 대상 사면들은 1999년 8월 이후 99년 11월까지 사면별로 1~2차례 붕괴가 발생하였으며 주 붕괴원인은 주 지질구조인 층리면을 따라 점토질 충전물이 존재하거나 심하게 파쇄된 면에 의한 것으로 나타났다.

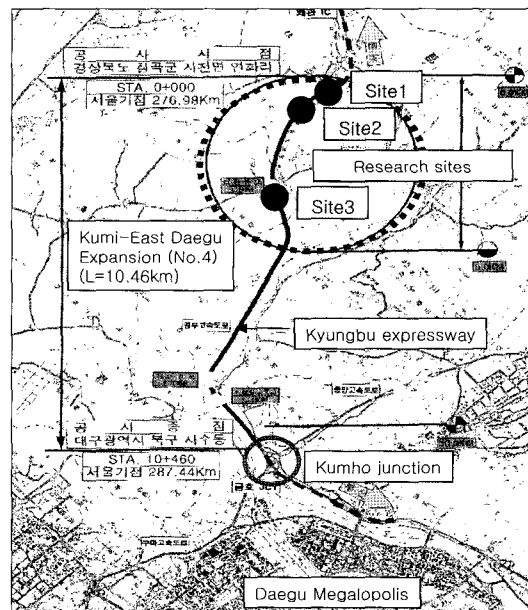


Fig 4. Location of the site.

대상 사면은 층리가 발달해 있고 층리면을 따라 지하수가 유출되는 곳이 많으며 또한 gouge가 충전되어 있는 부분이 있으나 층리면의 방향과 사면방향이 많이 틀어져 있어, 평면파괴에 대한 불안요소는 당초 배제되어 있었다. 그러나 암질 불량에 의한 사면의 부분적 붕락 등의 이유로 구배를 완화하게 되고 공사도중 혹은 공사완료 후 강우에 의해 절리면이 포화되면서 수압에 의한 영향과 절리면 gouge의 전단강도 저하로 대규모 평면파괴가 발생하였다(Giani, 1988).

연구대상 지역의 지질은 우리나라 남동부 경상

분지 퇴적암지대로서 중생대 백악기 경상계 신동층, 하양층군, 유천층군(Chang, 1975)으로 구성되어 있으며 주 구성암석은 세일, 사암 및 역암계통이며 부분적으로 화강암계통, 반암계통 및 염기성, 산성 맥암류가 관입되어 있다(Lee, 1988).

본 연구대상 지역은 지질학적으로 중생대 백악기 하양층군으로 구성되어 있다. 하양층군은 후기 화산활동에 의한 퇴적분지로 대부분이 역암, 사암, 이암, 혈암등과 같은 쇄설성 퇴적암이 서로 교호하며 존재한다. 대상사면은 사암과 세일로 구성되어 있고 사면의 절토고는 36m~75m이고 사면 연장도 200~420m로 대절토 사면이다.

본 사면의 주 지질구조는 층리이고 주된 붕괴형태는 평면파괴이며 1999년 8월 이후 붕괴가 발생하였다. table 2는 대상사면 현황을 나타낸 것이다. Figure 5~7은 각 사면의 붕괴시 혹은 일부 정리작업이 진행된 후의 사면현황을 나타낸 것이다.

Figure 5의 사면은 사면의 좌측 계곡부에서 층리면을 따라 붕괴가 발생한 것이고, Figure 6의 사

면은 대규모 붕괴는 발생하지 않았으나 층리가 발달한 사면에서 도로 계획고로부터 20m 높이 소단에 폭 5~10cm, 길이 약 80m 정도의 균열이 발생한 것을 나타낸다. 또한 Figure 7의 사면은 그림의 우측부분이 붕괴된 것으로 해당사면에서는 사면 좌측의 계곡부에서 대규모 붕괴가 발생한 것으로 대상 사면 모두 층리면을 따라 사면 계곡부에서 붕괴가 발생하였다.

붕괴원인 분석

붕괴원인 분석 및 대책안 수립을 위한 조사는 현장 지표지질조사와 병행하여 Borehole Image Processing System(BIPS) 조사를 실시하였다(Raax Co. Ltd., 1988). BIPS의 적용목적은 주 활동면으로 예상된 층리면 방향 및 심도와 절리면 사이의 충전물질을 파악하고 이로부터 적절한 대책수립을 위함이며 따라서, 조사위치로부터 도로 계획고면 깊이까지를 조사하였다(竹田 均, 1993).

Table 2. The failure state of the slope.

site	length	height	rock type	direction of slope face	geological structure	history of failure	failure type
Site 1	200m	36m	sandstone/s hale	N5W/64NE	bedding	1st(99.9.11) : 5m ³ 2nd(99.9.24) : 13,000m ³	plane
Site 2	420m	75m	sandstone/s hale	N5W/64NE	bedding	1st(99.9.24) : 5~10cm crack	plane
Site 3	380m	50m	sandstone/s hale	N50W/64NE	bedding	1st(99.8.22) : 10m ³ 2nd(99.9.20) : 20,000m ³	plane



Fig. 5. The failure state of Site 1 (From left of slope to the top of mountain).

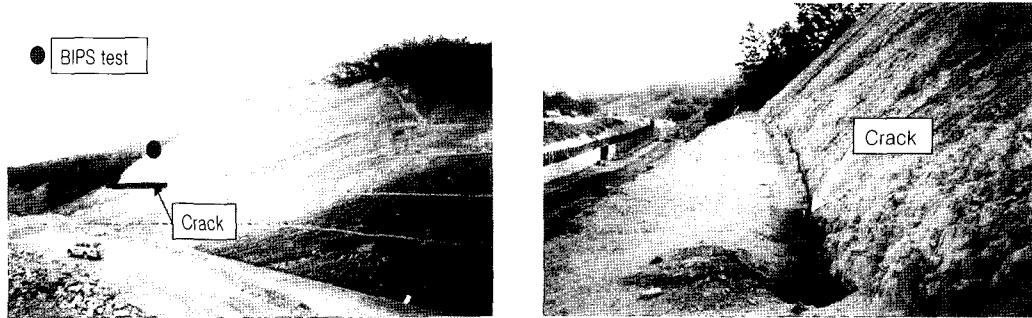


Fig. 6. The failure state of Site 2(Crack on the left of slope - Width 5~10cm, Length 80m).

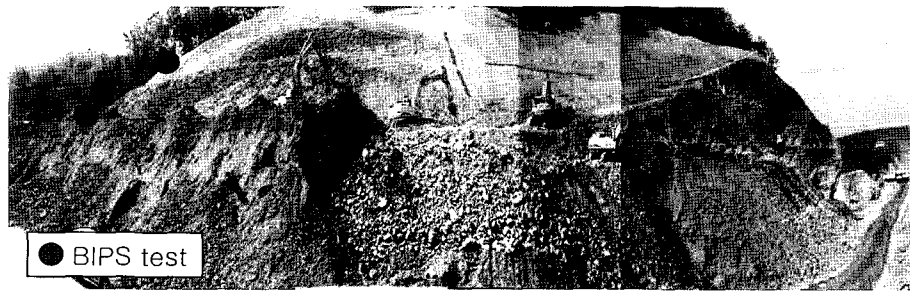


Fig. 7. The failure state of Site 3 (From the valley to the top of mountain).

BIPS 조사는 총 6개지점에서 활동붕괴면 방향으로 실시되었으며 각 대상사면별 조사현황은 table 3과 같다.

조사결과 층리방향에 gouge가 충전되어 있거나 파쇄되어 있으며, 주 활동면으로 예상되는 부분에 대한 BIPS 결과는 다음 Figure 8과 같다. Figure 8의 영상은 시추공의 내부에서 시추공 벽면을 촬영한 것을 펼친 화상으로, 화상의 중앙이 북쪽(N)을 가리키고 좌·우측 끝단은 남쪽(S)을 가리킨다. 그리고 좌측의 수치는 시험위치 지표면으로부터의 깊이이고, 우측의 수치는 분석결과 절리면의

주향과 경사를 표시한 것이다. BIPS에 의한 대상사면들의 불연속면들은 경사가 비교적 완만한 상태이나, 부분적으로 토사가 끼여 있거나 파쇄된 구간을 확인할 수 있다.

현장조사결과 본 지역에 대한 주 지질구조는 층리면인 것으로 관찰되었으며 BIPS에 의한 조사결과 시추공 내의 절리방향은 N40~60° E의 주향에 약 15~25° SE정도로 경사져 있는 것으로 분석된다. Figure 9는 대상으로 한 3개 사면의 절리분석 결과를 종합하여 나타낸 것이다.

Table 3. BIPS of the site.

구 분	Site 1	Site 2	Site 3
no. of BIPS test	2 holes	2 holes	2 holes
depth of BIPS test	BH-1(20.9m) BH-2(30.94m)	BH-3(21.809m) BH-4(11.547m)	BH-5(49.242m) BH-6(43.189m)

우에 의해 사면 표면으로 지하수가 많이 유출되고, 풍화의 진전으로 풍화에 약한 세일층과 단층대에서 일부 부분적 붕락이 지속적으로 발생하였으며, 또한 지형특성상 집수면적이 상당히 큰 관계로, 우기시 계곡부를 따라 토사유실이 발생하는 곳이 많았다(정형식 등, 1996, 유병욱 등, 1999).

현장에서의 지표지질조사를 통해 얻은 자료로부터 평사투영해석을 실시하였으며, 평사투영해석시 절취면의 방향은 원 사면의 방향과 계곡부 사면방향에 대해 모두 실시하였다(Figure 11). 평사투영해석시 절리면의 마찰각은 gouge 전단시험 결과로부터 15° 정도로 추정하여 적용하였다. 해석결과 조사된 주 층리면들은 절리면의 마찰각이 15° 일 경우 daylight envelope 내에는 포함되나, 일반적인 평면파괴 조건인 사면방향과의 ±20°를 크게 벗어나 있어 안전에는 별 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다.

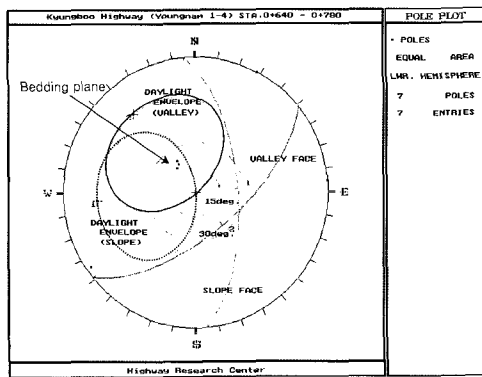


Fig. 11. Slope stability analysis on Site 1.

그러나, 본 경우 사면 계곡부 쪽으로 대규모 평면파괴가 발생하였으며 층리면의 방향과 계곡부 사면의 경사방향이 거의 일치하여 강우등에 의한 절리면 포화시 점토질 gouge가 있는 층리면을 따라 파괴가 발생한 원인이 된 것으로 분석된다. 따라서, 일반적으로 적용되고 있는 암반사면의 평면파괴 조건에 대한 적절한 적용성 평가가 뒤따라야 할 것으로 판단된다. 특히 불연속면이 계곡부 쪽으로 연장될 경우에는 평사투영을 이용한 파괴

가능성의 추정시, 현장상황에 따라 계곡부 사면의 경사방향도 고려하여야 한다.

고속도로 주변 평면파괴 사면 분석

평면파괴시 활동가능성은 붕괴면의 주향이 사면의 주향과 평행할 때 가장 높게 된다. 이러한 발생조건으로부터 Hoek & Bray(1981)은 평면파괴 발생조건을 절리주향과 사면주향과의 차이가 ±20° 이내일 경우라고 제시하고 있다.

본 연구에서는 상기의 붕괴조건을 평가하기 위해 지난 수년동안 현장조사를 통해 수집된 사면 자료 중 평면파괴형태로 붕괴된 사면을 조사하고, 조사된 평면파괴사면 중 61개 사면에 대하여 사면주향과 활동면의 주향과의 차이를 분석하였다(Figure 12).

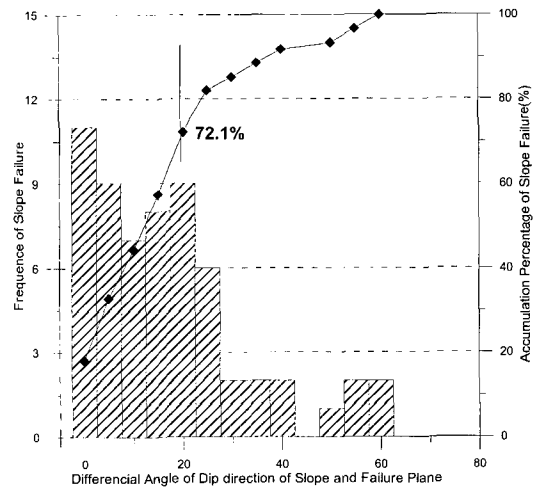


Fig. 12. The difference of slope face strike and failure surface strike(At plane failure).

분석된 평면파괴사면 중에 72.1%는 일반적으로 적용되는 평면파괴조건인 절리주향과 사면주향과의 차이가 ±20° 이내에서 발생한 것으로 나타났고, 나머지 27.9%는 이 조건을 벗어난 경우에 붕괴가 발생한 것으로 나타났다. 붕괴사태를 분석한 Figure 12의 그래프에서 실선으로 표시한 주향각

차이에 따른 붕괴 누적백분율 그래프는 주향각의 차이가 약 25° 정도까지는 급격한 경사를 이루며 일률적으로 증가하나 그 이후에서는 완만한 경사의 그래프를 나타낸다. 주향각의 차이를 25° 로 확대한다면 붕괴빈도는 82%에 도달하게 되며 이 각도를 벗어난 사례는 총 18%정도로서 61개소중에 11개소에서 발생한 것으로 조사되었다.

따라서, 지금까지 일반적으로 암반사면 평면파괴 안정조건에 이용하고 있는 $\pm 20^\circ$ 라는 수치는 그래프로부터 비교적 합리적인 것으로 판단되나, 약 28%에 달하는 붕괴조건은 절토사면수가 많은 우리나라 실정으로 보면 결코 간과할 수 없는 수치이다.

그러므로 산발적으로 발생한 주향각의 차이를 제외하고 비교적 빈도수가 많은 주향각 차이의 경계는 본 조사사례에서는 25° 로 평가되며, 평사 투영해석에 의한 안정성 판단시 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

결론 및 제안

본 연구에서는 암반사면 평면파괴조건에 대해 ①평면파괴는 활동가능성이 있는 면의 주향과 절취사면의 주향의 차이가 20° 이내일 경우에 발생한다는 조건에 대한 것과, ②대표단면에 대한 안정성검토 후 현장에서의 rounding처리 등에 의한 부분적 안정처리지 간과할 수 있는 문제를 현장 붕괴사례를 통하여 고찰해 보았으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 고속도로 절토사면에서 붕괴가 발생한 620개의 사면을 대상으로 붕괴형태를 분석한 결과 평면파괴는 약 43%인 262개소에서 발생하여 가장 높은 붕괴빈도를 나타내었으며, 이는 국내의 지질학적 특성뿐만 아니라, 평면파괴 가능성을 평가하는 안정성평가기준 상의 문제점도 있는 것으로 추정된다.

(2) 평면파괴 조건 중의 하나인 사면 주향과 활동면 주향과의 차이각에 대해서 고속도로 주변에서 평면파괴가 발생한 사면 중, 61개의 사면 자료를 분석한 결과, 사면과 활동면 주향과의 차이각은 일반적으로 적용되는 $\pm 20^\circ$ 범위에서 총 61개

의 평면파괴 붕괴사례 중 72%가 발생한 것으로 조사되었으며, 주향각 차이가 $\pm 20^\circ$ 를 벗어난 경사에서도 총 붕괴 중 약 28%에 해당하는 사면에서 붕괴가 발생하였다.

(3) 붕괴사례로부터 조사된 자료의 분석결과, 파괴영역에 대한 주향각의 차이를, 사면의 붕괴가 집중되어 있는 $\pm 25^\circ$ 까지로 확대한다면 붕괴빈도는 총 붕괴수의 약 82%에 해당하며, $\pm 30^\circ$ 이상을 벗어난 경우는 붕괴가 산발적으로 발생하고 있어 국내에서의 암반사면에 대한 평면파괴 평가시 파괴영역에 대한 조건을 확대 적용할 필요가 있다고 판단된다.

(4) 본 연구는 평면파괴가 발생한 61개의 사면을 대상으로 한 것이며, 잠정적으로 제안된 25° 의 기준이 보다 합리적인 안정성 판단기준으로 수립되기 위해서 보다 다양한 조건에서의 검토가 진행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- 정형식, 유병욱, 1996, 지질특성에 따른 암반사면 붕괴유형연구, 한국지반공학회지, 12권, 6호, 37-49.
- 유병욱, 황영철, 정형식, 1999, 경상분지 퇴적암 절취사면의 붕괴특성, 한국지반공학회 '99 봄 학술발표회 논문집, 339-346 p.
- 한국도로공사 도로연구소, 1994~2000, 현장기술자 문검토서(사면분야), 한국도로공사.
- 한국도로공사, 2001, 고속도로 절토사면 유지관리 시스템 개발 연구(II), 한국도로공사, 35-79 p
- Giani, G.P., 1988, Rock Slope Stability Analysis, A. A. Balkema, 47-98 p.
- Hoek, E. & Bray, J., 1981, Rock Slope Engineering, Revised Third Edition. Institute of Mining and Metallurgy, London, v. 88, n. 114, 150-59, 171.
- Lee, D.-S., 1988, Geology of Korea (2nd Edition), Kyohak-Sa Publishing Co., 7-10 p.
- Raax Co. Ltd., 1988, Borehole Image Processing System Operation Manual, Richard E.

국내 붕괴특성을 고려한 암반사면의 평면파괴 조건 연구

Goodman (1980, 1989 (2nd edition)),
Introduction to Rock Mechanics, 294-16 p.
竹田 均, 川越 健, 岩井孝宰, 御手洗良夫, 1993, 畫
像解析による岩盤評価システムの研究 : 第
25回 岩盤力學に關するシンポジウム講演論
文集, 1-5 p.

투 고 일	2002년 7월 1일
심 사 일	2002년 7월 2일
심사완료일	2002년 8월 14일

황영철

한국도로공사 도로연구소 지반연구그룹
(461-703) 경기도 성남시 수정구 금토동 293-1
Tel : 02-2230-4658
Fax : 02-2230-4183
E-mail : ychwang@freeway.co.kr