

절취 사면의 파괴 특성과 관련된 영향 요인 분석 ; 경기도 남부 국도 사례 Analysis of Influence Factors Related to Failure Characteristics of Excavated Slopes ; A Case of Southern Kyounggi Area along the Nat'l Road

김정환¹⁾, Jeong Hwan Kim, 윤운상²⁾, Woon-Sang Yoon, 최재원³⁾, Jai Won Choi.

¹⁾서울대학교 지질학과 교수, Professor, Dept. of Geological Science, SEOUL Nat'l Univ.

²⁾서울대학교 지질학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Geological Science, SEOUL Nat'l Univ.

³⁾서울대학교 지질학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Geological Science, SEOUL Nat'l Univ.

SYNOPSIS : This study describes the influence factors related to slope failure pattern and dimension in the southern Kyounggi area. Intrusive and metamorphic rocks are distributed in the study area. Geological condition, rainfall property and slope geometry are influence on slope failure characteristics in the study area. Geological factors related to slope failure are rock type, geological structure and weathering condition. Because of deep soil (RS-CW) depth of granite region, circular failure type is major failure pattern in granite region. Almost granite slopes with circular or surface failure pattern are failed during heavy rainfall season. But typical wedge failure type related to geological structure factor is a main failure pattern of metamorphic rock slope. Additionally failure dimension is influenced by geological factors and several factors, i.e. natural slope condition, failure type, rainfall intensity and etc. Failure height/width ratio and thickness/length ratio of granite slope are 0.88 and 0.23. But the ratios of metamorphic rock slope are 1.36 and 0.19.

Key words : influence factor, failure pattern, failure dimension, geological condition, rainfall property

1. 서론

사면은 구성 물질에 따라 암반 사면과 토사면으로 구분되며, 사면을 구성하고 있는 지질매체에 따라서 거동이 달라지기 때문에 이들을 구분하는 기준을 확립하는 것이 필요하다. 암반 사면의 경우 구성 암석, 암석의 풍화정도, 암석 내에 발달하고 있는 층리면, 엽리면, 절리면, 단층과 같은 지질구조 요소들의 관계에 따라서 사면의 붕괴 형태가 달라지는 것으로 알려져 있다(정형식 외, 1995). 따라서 현장 조사를 통해 얻을 수 있는 사면의 불안정성에 영향을 미치는 요인들을 크게 사면 형상 요인, 지질 및 지질 구조 요인 그리고 강우 및 지형 요인으로 구분하여 사면의 파괴 유형과 규모에 미치는 영향을 분석하였다. 이외에 현장 암반 사면 평가 지침으로 자주 활용되는 각종 사면 안정성 평가법(평사투영법, SMR, SMR-net, GCO(홍콩))을 비교, 분석하여 현장 평가법으로서의 활용도를 검토하였다.

2. 지질 개요

연구 지역은 지체구조적으로 경기육괴에 속하며, 구성암상은 편마암류, 편암류 그리고 시대미상 또는

쥬라기의 화강암들이 분포한다. 연구 지역 내에서는 양지와 안성을 연결하는 남북선을 기준으로 서쪽에는 경기편마암복합체의 변성암류가 주로 분포하며, 동쪽에는 쥬라기에 관입한 화강암이 주로 분포한다. 이외에도 화강암 및 변성암을 관입하는 맥암이 분포한다.

연구 지역 내에 분포하는 암석은 크게 흑운모 호상 편마암, 반상 변정 편마암, 안구상 편마암, 규암, 대리암, 각종 편암류 등 엽리나 편리와 같은 층상구조가 발달하는 암석과 화강암질 편마암, 석영 장식질 편마암, 화강암, 맥암류와 같이 층상구조가 발달하지 않는 암석으로 구분된다. 암석 내에 발달하는 층상구조는 습곡과 단층작용에 의해 주향 방향과 경사각에 많은 변화를 보이지만, 일반적으로 편마암류에서는 주향 방향이 N10° W-35° E, 경사각은 35° -55° 의 범위를 보여주고, 편암류에서는 주향 방향이 N25° W-35° E, 경사각은 45° -80° 의 범위를 보여준다. 따라서 편마암류나 편암류들의 층상구조들은 남북방향으로 발달하고 있는 국도들의 사면에 직접적 혹은 간접적으로 영향을 준다.

3. 국도 및 사면 분포

연구지역은 경기 남부 지역의 국도 및 그 주변의 74개소의 절취 사면으로서 수원-여주간 42번 국도 이남의 지역에 해당한다. 연구지역 내에 분포하는 국도는 3번(이천-장호원), 17번(양지-일죽), 37번(장호원-여주), 38번(안중-장호원), 39번(안산-아산), 42번(수원-여주), 45번 국도(용인-평택)이며, 각각의 국도는 동-서 방향과 남-북 방향으로 엇갈리면서, 망상구조로 발달한다. 연구 지역 동쪽에 분포하는 3번, 17번, 37번, 안성-장호원간 38번, 양지-여주간 42번 국도 주변에는 주로 화강암이 분포하며, 서쪽에 분포하는 안중-평택간 38번, 39번, 수원-양지간 42번, 45번 국도 주변에는 주로 변성암류가 분포한다(그림 1). 그러나, 변성암 지역과 화강암 지역을 관통하는 38번 및 42번 국도의 경우 대부분의 사면이 동쪽에 집중되어 있어 전반적으로 화강암으로 구성된 사면이 우세하다.

연구지역에 개설되어 있는 왕복 2차선의 국도들은 대부분이 노선의 직선화나 왕복 4차선으로의 확장 공사로 인하여 새로운 사면들이 많이 발달하고 있으며, 오래된 사면은 전체 사면의 수에 대하여 약 10% 정도이고, 새로 절개한 사면은 약 73%, 나머지 사면들은 오래된 사면과 새로운 사면의 복합 형태이다. 대부분의 사면들이 새로 절개된 사면이기 때문에 일반적으로 사면의 안정과 토사의 유출을 막기 위한 보강 공사가 완료되어 있거나, 현재 보강 공사가 진행중인 곳이 많다.

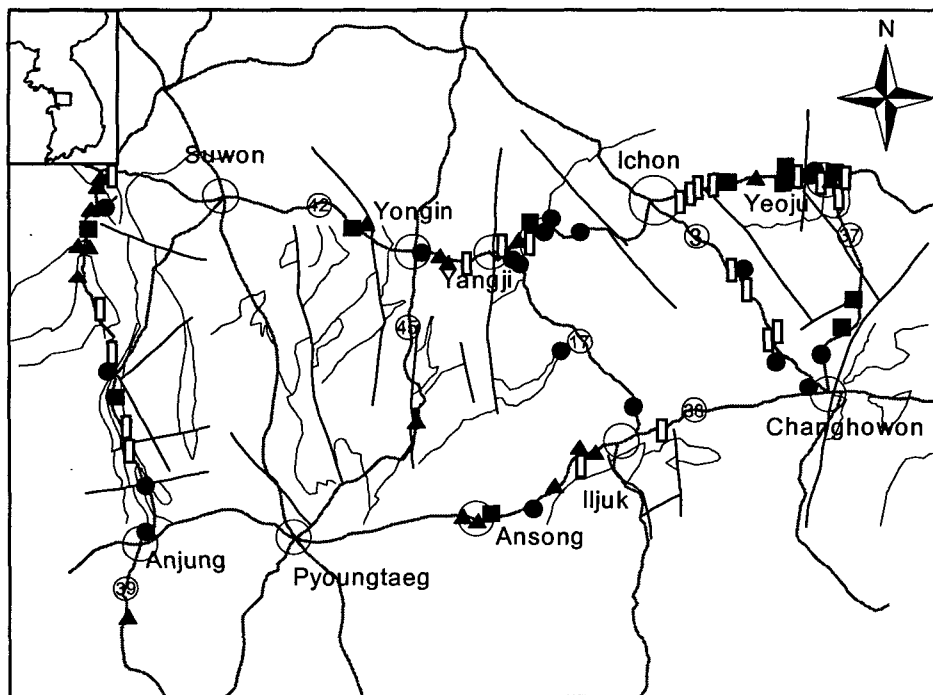


그림 1. 조사지역의 지질도 및 파괴 현황도

4. 사면 특성 분석

4.1. 사면 규모 및 암종에 따른 사면 특성 분석

총 74개의 조사사면 중에서 화성암(대부분 화강암)이 48개소, 변성암이 26개소로 화성암이 변성암의 약 2배 정도의 점유 상태를 보인다. 암종별 사면의 길이와 높이를 분석한 결과 평균높이 두 암종 모두 약 17m이나, 평균길이는 변성암이 130.4m로 화성암의 177.8m에 비해 짧으며, 사면 높이와 길이의 비도 평균 0.15로서 화성암의 평균 0.12에 비해 높은 값을 보인다.

암종별로 사면의 경사각을 높이에 대해 도시해본 결과, 화성암의 경우 대체로 사면이 높을수록 경사각이 높은 경향을 보여주고, 범위는 32° -65° 인 것으로 분석된다. 반면 변성암의 경우, 비교적 낮은 10-20m 높이의 사면에서도 60° 이상의 높은 사면 경사각을 갖는 것으로 분석된다.

각각 조사 사면의 암종에 대해 Geological Society(1977)의 풍화등급 분류법을 기준으로 신선암에서 풍화가 완전히 진행된 풍화 잔류토까지 6등급으로 분류하였다. 이 분류 방법에서는 풍화가 되어 모암의 구조가 사라지고 완전히 토사로 변질된 RS등급 뿐만 아니라 풍화가 많이 진행되었지만 암의 구조가 남아있는 HW등급과 CW등급을 풍화토의 범주에 속한다고 하였다. Lee and Freitas(1989)는 Fresh, SW, MW를 암석, HW를 암석과 토층의 중간 물질, CW, RS를 토층으로 구분하였다.

이 연구에서는 CW 및 RS를 토층으로 보아 지표에서 CW와 HW의 경계까지를 토층심도로 정하고, 사면의 높이와 토층심도의 비를 토층심도율로 하여 분석하였다. 연구지역 내 조사사면에서는 변성암의 경우 평균 토층심도가 5.0m로서 화강암의 7.4m에 비해 얕은 심도를 보이고 있으며, 평균 토층심도율의 경우 변성암이 0.32, 화강암이 0.53으로 변성암의 토층심도율이 화강암에 비해 작다(그림 2). 또한, 암종별 토층심도와 사면 높이는 정의 상관관계를 보이는 것으로 분석된다(그림 3).

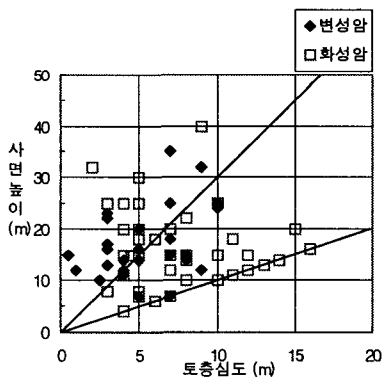


그림 2. 암종별 토층 심도와 사면 높이

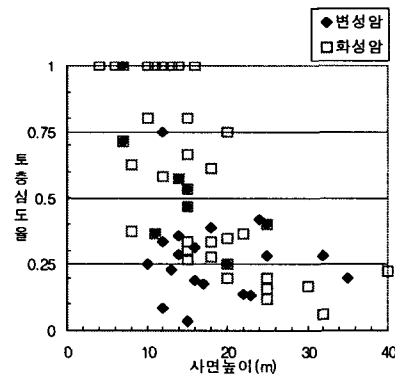


그림 3. 암종별 토층 심도율과 사면 높이

4.2 사면 파괴 현황

암반 사면의 파괴유형은 흔히 원호 파괴, 평면파괴, 썩기파괴, 전도파괴 등으로 구분되며(Hoek and Bray, 1974)되며, 이번 조사에서는 조사 지역의 파괴 현황에 따라 표층 유실, 원호 파괴, 썩기파괴로 구분하여 분류하였다. 또한 이 조사에서는 평면 파괴도 일종의 썩기 파괴로 간주하여 평면 파괴 형상의 암반 사면 파괴도 썩기 파괴로 구분하였다. 조사 사면 74개소 중 43개소의 사면이 원호 또는 썩기 파괴와 표층 유실 등으로 파괴되었거나 훼손되는 등 사면 파괴율이 68.9%, 표층유실을 제외한 파괴율도 52.7%에 달하고 있다.

사면파괴의 규모는 파괴의 폭, 높이, 길이, 두께로 조사되었으며, 파괴의 폭(W)은 정면에서 보았을 때의 최대 폭, 높이(H)는 최대 수직고, 길이(L)는 파괴 사면의 표면길이로서 높이와 사면 경사각과의 관계를 통해 계산하였고, 파괴 두께(T)는 사면 표면에서 파괴면까지 내린 법선의 최대 두께로 정의하였다.

5. 사면 파괴에 영향을 미치는 요인

사면파괴에 영향을 미치는 요인들은 크게 지질 및 지질구조 요인, 강우 및 지형 조건 요인으로 구분하여 분석하였다.

5.1 지질 및 지질 구조와 파괴 특성

5.1.1 암종별 파괴 특성

화성암과 변성암에서 발생한 각 파괴 유형의 빈도를 분석하여 보면, 화성암에서는 39.6%로 원호 파괴가 우세하게 발생하였으며, 변성암에서는 56.7%로 썩기 파괴가 우세하게 발생하였다. 또한 표층 유실도 화성암이 25%의 빈도를 보여, 변성암의 16.7%에 비해 높은 값을 보인다. 이는 변성암보다 화성암이 토층심도가 더 깊게 나타나는데 기인하는 것으로 판단된다.

암종별 파괴 규모를 파괴 폭과 파괴 높이, 파괴 길이와 파괴 두께를 비교하면, 암종에 관계없이 파괴 폭과 파괴 높이가 10m 이내에서 집중되는 경향을 보이며, 높이 5m 내외에서 집중되는 경향성을 보인다. 전반적으로 파괴 높이/폭의 비는 1.04의 비율을 보이지만 변성암의 경우 1.36으로 화강암의 0.88에 비해 폭에 비해 높이가 큰 것으로 분석되었으며, 파괴 두께/길이의 비의 경우 화강암이 0.23, 변성암이 0.19의 평균 비율을 보인다.

5.1.2 풍화 상태에 따른 파괴 특성

풍화 상태에 따라 파괴특성을 분석한 결과, 표층유실은 전체 16개소 중, 13개소가 CW와 RS등급에서 발생하며, 원호파괴는 전체 29개소 중, 20개소가 CW등급에서 발생하였다. 그러나 썩기 파괴의 경우 RS나 CW등급에서는 전혀 발생하지 않고, 주로 MW등급에서 발생하였다. 풍화 상태가 HW인 경우 원호 파괴와 썩기 파괴 유형이 혼재하여 발생한다. 이는 토층심도와 토층심도율이 파괴의 특성을 좌우하는 주요한 요인임을 지시한다. 토층심도는 약 7m, 토층심도율은 0.4를 기준으로 원호파괴와 썩기파괴가 우세한 구간이 구분되어 토층심도율이 0.4보다 낮은 사면은 썩기 파괴가 우세하고, 0.4보다 높은 사면은 원호 파괴나 표층 유실이 발생하는 토사면적인 거동을 보이고 있다(그림 4).

5.1.3 지질 구조에 따른 파괴 특성

조사 대상 사면에 발생한 썩기 파괴에 대하여, 주 절리의 경사 방향과 경사각, 그리고 사면의 경사방향과 경사각을 비교하여 사면에 썩기 파괴를 유발시키는 주절리의 방향을 분석하였다.

사면의 경사 방향과 주절리의 경사 방향을 썩기 파괴가 발생한 19개소에 대하여 빈도를 분석한 결과, 그 사이각이 30° -40° 구간과 60° -70° 구간이 각각 22.2%로 빈도가 가장 높았으며, 전체적으로 30° -70° 구간이 77.8%로 압도적인 빈도를 보인다(그림 5). 이는, 사면의 경사방향과 주절리의 경사방향의 0° -20° 사이를 가지는 평면 파괴보다는 전형적인 썩기 파괴가 조사 지역의 일반적인 파괴 양상임을 지시한다.

조사 지역에 발생한 썩기 파괴의 가능성을 불연속면의 교차선 방향을 중심으로 분석하면, 썩기 파괴의 발생은 사면의 경사 방향과 교차선의 방향각과의 사이각이 최대 60° 이내의 각을 가지는 범위에 집중되어 나타나며, 이 범위의 외곽에서는 발생하지 않는다. 또한 불연속면의 교차선의 경사각을 중심으로 분석하면, 교차선의 경사각이 사면의 경사각보다 큰 경우에는 썩기 파괴가 발생하지 않고, 주로 0° -30° 가량 사면의 경사각이 교차선의 경사각보다 큰 경우에 썩기 파괴가 발생한다(그림 6).

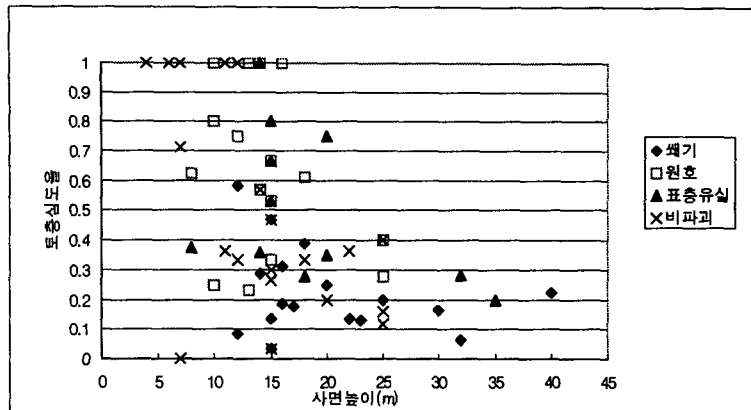


그림 4. 토층 심도율과 사면 높이에 대한 파괴 유형

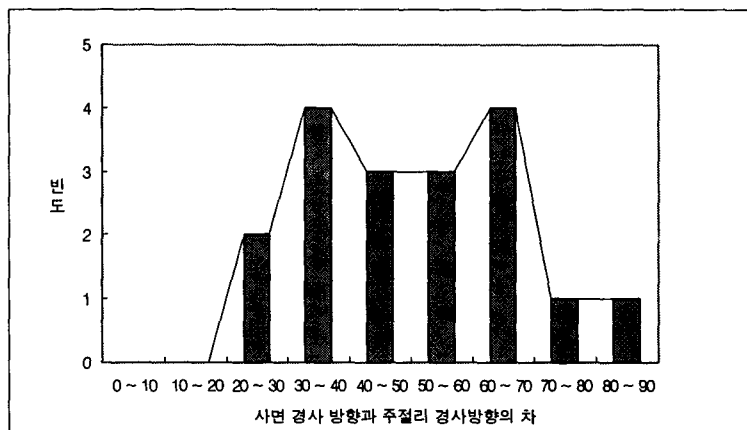


그림 5. 사면의 경사 방향 및 주절리의 경사 방향과 썩기 파괴의 빈도

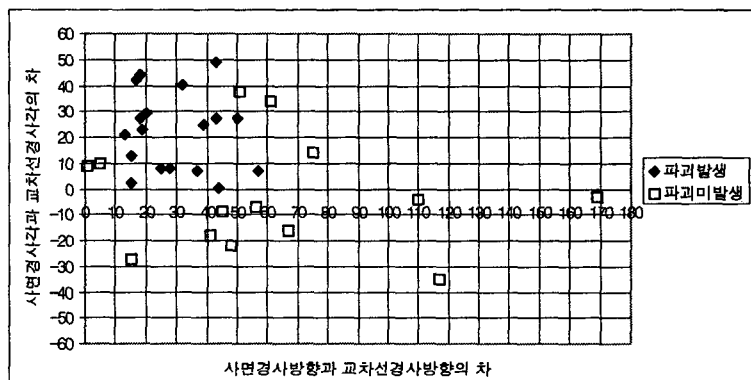


그림 6. 사면 및 불연속면 교차선의 방향과 경사각에 대한 썩기 파괴의 발생

5.2 강우 및 지형과 파괴 특성

총 82개 파괴 개소 중 1998년 7-8월의 집중호우 중 또는 직후에 발생한 파괴는 총 45개소로 54.9%이다. 특히, 썩기 파괴를 제외한 원호 파괴와 표층 유실의 경우, 3개소를 제외하고는 대부분 집중호우와 관련되었다. 따라서 표층유실 및 원호 파괴와 같이 토층에서 발생하는 파괴의 경우에 집중 강우에 의한 함수비 증가와 밀접한 관계가 있다. 집중 호우에 의한 함수비 증가를 제어하는 요인은 절취사면 상부의

자연사면의 지형특성이다. 상부 자연사면의 지형을 크게 산지, 평지, 계곡부로 구분하여 분석한 결과, 상부 자연 사면이 평지인 경우 상대적으로 파괴 높이에 비해 파괴 폭이 넓은 양상을 보이며, 계곡부 또는 배수로 주변에서는 평지에 비해 파괴 폭과 파괴 높이가 비례하는 양상을 보인다(그림 7).

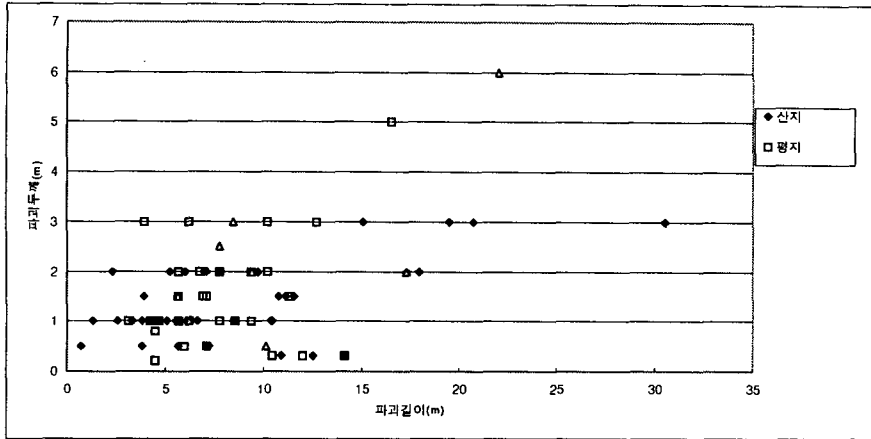


그림 7. 강우기 파괴된 사면의 상부 지형 특성과 파괴 길이 및 두께

6. 사면 안정성 평가법의 비교, 분석 ; 39번 국도 사면의 사례연구

사면의 안정성 평가는 일반적으로 경험적 평가법, 평사투영해석, 한계평형해석 및 수치해석 등을 통하여 이루어진다. 이 연구에서는 경험적 방법으로서 홍콩 GCO 사면 안전도 평가 기준(건설기술연구원, 1989)과 SMR 평가법에 대해 논의하고, 평사투영해석으로서 일반적으로 사용되는 Markland(1972)의 평사투영해석법과 윤운상 외(1997)에 의해 제안된 SMR-net에 대해 상호 비교하고자 한다. 홍콩 GCO 사면 안전도 평가 기준에 의거해서 조사 지역의 사면에 대해 평가 한 결과, 원호 파괴의 경우 파괴 현황과 유사한 지역적 평가내용을 보이고 있으나, 풍화상태가 양호한 암반사면의 전형적인 파괴 유형인 썩기 파괴가 발생한 사면에 대해서는 모두 안정한 사면으로 평가하는 등 그 결과가 일치하고 있지 않다. 이 사면 평가기준이 주로 주절리의 방향이 사면과 평행한 평면 파괴만을 안정성 평가 요소로 고려하고 있는 영향으로 판단된다. 각 평가법에 의한 결과를 비교하기 위하여 홍콩 GCO 사면 안전도 평가와 SMR 및 SMR-net평가, 평사 투영 해석을 부분적으로 소규모 썩기파괴가 발생한 암반사면에 대해 수행하였다(그림 8, 9, 표 1, 2). 홍콩 GCO 사면 안전도 평가 기준에 의하면 부분적으로 안정한 사면으로 평가되었으며, SMR 평가에 의하면 기본 평가의 경우 46점으로 양호한 암반에 속하여 소량의 또는 다량의 썩기 파괴가 발생할 수 있는 부분적 안정 사면으로 평가되었으며, 불연속면 방향에 대해 SMR 보정 기준과 동일한 결과를 나타내는 마찰각 30° 기준의 SMR-net를 이용하여 보정한 결과 0이하의 썩기 파괴의 위험이 매우 큰 것으로 분석되었다.

따라서 홍콩 GCO 사면 안전도 평가 기준은 암반 사면의 파괴 유형을 예측하지 못하는 한계 뿐 아니라, 썩기 파괴 등 불연속면 특성에 의해 지배되는 암반사면의 일반적인 파괴 유형에 대해 그 불안정성을 평가하기 어려운 한계를 가지는 것으로 분석되었으며, SMR의 경우 불연속면 특성에 의한 안정성 평가에 중점을 두고 있으나, 역시 자체 기준에는 평면 파괴 및 전도 파괴만이 고려되어 사용자에 의해 썩기 파괴 유형에 대한 별도의 고려를 수행해야 할 필요성이 있다. 특히 절리 방향 보정에 의해 SMR 점수가 급격히 감소하는 결과를 이에 대한 세심한 주의가 필요할 것으로 생각된다. 이런 측면에서 SMR-net의 활용은 SMR 평가의 한계를 보완하여 줄 수 있는 방법으로서 평사 투영으로 얻을 수 있는 정보 뿐 아니라 각 파괴 유형에 대한 불연속면의 전단강도를 보정값을 산출하는데 효과적으로 활용될 수 있다. 인 방법으로 틀 수행자체 및 SMR-net와 평사투영해석은 암반사면의 파괴 유형을 해명할 수 있는 반면 썩기의 규모에 관계없이 사면의 안정성을 비교적 낮게 평가하는 경향이 있다.

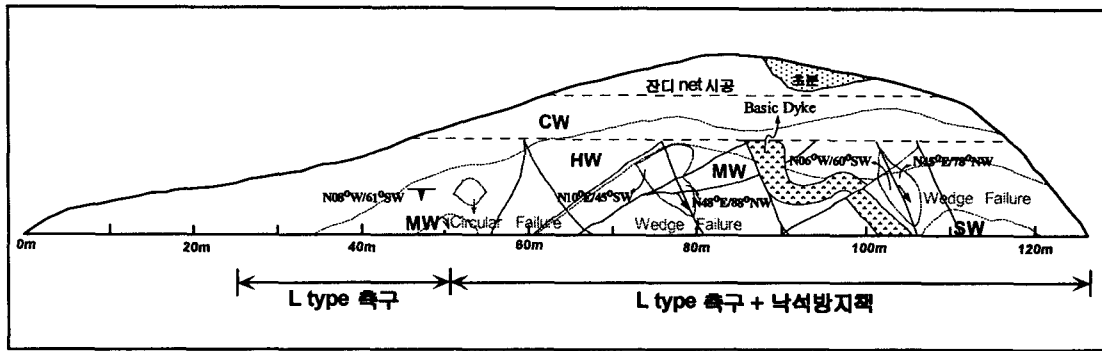


그림 8. 도로 절개 사면의 sketch (39번 국도 사면의 예)

표 1. 39번 국도 사면의 절리군 자료

	절리군1	절리군2	절리군3	점수
방향(주향/경사)	N70E/46NW	N2W/42SW	N48E/88NW	
간격	0.1m	0.25m	0.5m	8.2
틈새	5mm	0.5mm	0.5mm	0.6
연장성	10 m 이상	5-10m	5-10m	1.0
거칠기	smooth	rough	rough	1.0
충진물	clay	무	무	2.0
벽면풍화도	MW	MW	MW	3.0

표 2. 39번 국도 사면의 SMR 해석

	항 목	상 태	점 수
RMR	일축압축강도 (MPa)	보 통 압	8.3
	R.Q.D. (%)	62.2	12.4
	절리면 간격 (cm)	0.2	8.2
	절리면 상태	불 량	7.6
	지하수 상태	건 조	10.0
	합	III (fair)	46.5
SMR 보정	$(F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$	썩기과괴	-48.0

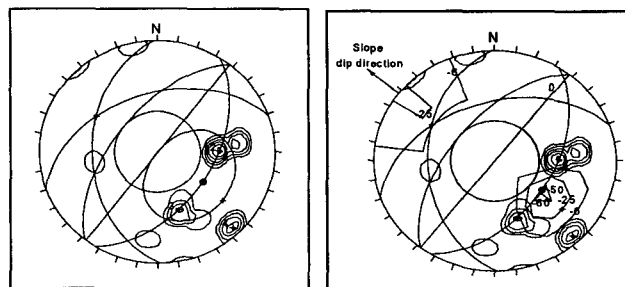


그림 9. 39번 국도 사면의 평사 투영 해석 및 SMR-net 해석

7. 결론

경기 남부 지역의 국도 주변 절취 사면에 대해 지질 요인과 강우 및 지형 요인을 중심으로 파괴 유형 및 규모 등 파괴 특성에 대한 영향을 분석하고, 사면에 대한 각종 현장 평가법을 사면 파괴 현황과 비교하여 분석하였다.

조사 지역에 분포하는 변성암 사면의 경우 화성암 사면에 비해 토층심도가 비교적 낮은 것으로 분석되었다. 파괴 유형 역시 화강암 구간에서는 평면 파괴 및 표층 유실에 의한 파괴가 우세한 반면, 변성암 구간에서는 썩기 파괴 유형이 지배적인 파괴 유형으로 분석되었다. 또한 변성암의 경우 화강암에 비해 폭에 비해 높이가 큰 것으로 분석되었으며, 파괴 두께/길이의 비의 경우 화강암이 변성암에 비해 보다 깊은 파괴 형태를 보이는 것으로 분석되었다. 특히 풍화 상태에 따라 토층심도율이 0.4보다 낮은 사면은 썩기 파괴가 우세하고, 0.4보다 높은 사면은 원호 파괴나 표층 유실이 발생하는 토사면적인 거동을 보이는 것으로 분석되었다. 암석 종류 및 풍화 상태 외에 중요한 지질 요인의 하나인 지질구조 특히 불연속면의 방향에 대해 분석한 결과 경사 방향이 사면 경사 방향각과 30° - 70° 사이의 차이를 보이는 주절리에 의해 발생한 파괴가 압도적인 빈도를 보여 평면 파괴 유형보다는 전형적인 썩기 파괴가 조사 지역의 일반적인 파괴 양상으로 분석되었다.

이러한 지질 요인 이외에 사면의 파괴 특성을 가장 크게 지배하는 요소로서 강우 및 지형 특성을 분석하였으며, 조사 지역에서 1998년 7,8중 집중호우 중 또는 직후에 발생한 파괴는 54.9%로서 썩기 파괴를 제외한 원호파괴와 표층유실의 경우는 대부분 집중호우와 관련되어 있음을 확인하였으며, 그 규모 및 형태에 있어 상부 자연사면의 지형요인(평지, 계곡부, 산지)과 밀접한 연관을 가질 것으로 생각된다.

이상의 파괴 요인 분석에 입각해 각종 암반사면 평가법을 비교 분석한 결과, 홍콩 GCO 사면 안전도 평가는 원호 파괴에 대해서는 파괴 현황과 유사한 평가를 도출하고 있으나, 썩기 파괴에 대해서는 대부분 현황과 일치하지 않는 평가를 내리고 있으며, SMR 평가의 경우 불연속면에 의한 암반 사면의 평가에 주목하고는 있으나, 역시 썩기 파괴에 대해서는 그 평가 기준이 모호하여, SMR-net 등의 평가 투영 방법이 적절하게 보완되어야 할 것으로 판단된다.

8. 참고문헌

1. 건설기술연구원, 1989, 사면의 안전진단 및 보호공법, 331pp.
2. 윤운상, 김학수, 김정환, 1997. RMR-net를 이용한 암반 분류의 적용, 지질학회지 33(4), pp.202-209
3. 정형식, 김성환, 유병옥, 최영철, 1995, 지질특성에 따른 사면 붕괴 유형에 대한 연구, 한국지반공학회 사면안전대책, 조사 및 설계방법, 시공사례 학술발표집, pp. 157-175
4. Geological society, 1977, The discription of rock masses for engineering porposes, Q.J. Engineering Geol. 25(4), 313-312.
5. Hoek, E.T. and Bray, J.W., 1974, Rock slope engineering, Inst. Min. Metall., London, Eng., pp.57-61
6. Lee, S. G. and Freitas, M. H., 1989, A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granite in Korea.
7. Markland, J. T., 1972, A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected". Imperial College Rock Mechanics Research Report No. 19, pp 10.
8. Romana, M. R., 1993, A geomechanical classification for slopes: slope Mass Rating, Comprehensive Rock Engineering. Hudson, J.A. eds., Pergamon Press, U.K., Vol 3, pp. 575-601.