

## 보은군 회북면 오동리 2지구 암반 절개면의 붕괴원인 고찰 Investigation on Rock Slope Failure in Odong 2 area, Boeun-Gun

구호본<sup>1)</sup>, Ho-Bon Koo, 백용<sup>1)</sup>, Yong Baek, 김규한<sup>2)</sup>, Gyu-Han Kim, 이종현<sup>2)</sup>, Jong-Hyun Rhee

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Eng. Dept., KICT

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Eng. Dept., KICT

**SYNOPSIS :** The investigated cut-slope is located in Odong-Ri, Hoebuk-Myun, Boeun-Gun and composed of quartzite and phyllitic rocks (approximately 80 meters in length and 25 meters in height). During the investigation, the groundwater which was inferred to the natural pipe of slope was continuously flowing in the upper part of slope. The investigation for discontinuity properties in this area was carried out to decide the rock mass rating and strength parameters. To analyze the stability of cut-slope, lower equal-area hemisphere projection method was used. And laboratory test was done to evaluate engineering properties of soil which was sampled in the non-failure and failure area. The inferred causes of cut-slope failure are the geometric relationship between the orientation of cut-slope and geological structures such as joints, faults which is distributed in the slope. And direct cause of failure is the increase of water content due to the heavy rainfall.

**Key words :** discontinuity properties, rock mass rating, strength parameter, engineering properties of soil

### 1. 서론

조사대상 절개면(이하 본역이라 함)은 행정구역상 충청북도 보은군 회북면 오동리에 위치하며, 규암과 천매암으로 구성된 암반 사면(길이: 80m, 높이: 25m)이다. 본역은 2000년 7월 23일 09:00~12:00 사이 300 mm의 집중강우에 의해 70~80m 구간의 절개면 상부(높이: 20~25m)에서 원호파괴, 하부(높이: 5~20m)에서 썩기파괴의 양상을 보이는 복합적인 형태의 붕괴가 발생하였다. 붕괴발생 후 30시간이 지난 2000년 7월 24일 17:00 조사시점 기준에도 절개면 지하수 유로(natural pipe)로 추정되는 상부 지점에서 지하수가 지속적으로 누수되고 있는 상태였다. 본역은 과거에 중규모 붕괴가 발생한 지역으로 이와 유사한 파괴가 주변 지역에서 발생할 가능성이 높은 것으로 판단된다. 붕괴원인과 추가 붕괴의 가능성을 분석하기 위해 붕괴지역과 절개면 상부 미붕괴 지점 각각 1개소에서 흙 시료를 채취, 절개면 전구간의 구성재료의 강도정수를 도출하고 이를 안정성 해석에 반영하였다.

### 2. 지질개요

본역의 광역지질 층서는 하부로부터 캄브리아기의 백봉리층군(미동산층, 운교리층)과 후기 오르도비스기의 옥천누층군(화전리층, 구룡산층, 이원리층, 문주리층, 황강리층) 그리고 쥬라기의 화강암체(청주화강암, 보은화강암)의 순이다. 이 중 본역을 구성하고 있는 층은 캄브리아기의 미동산층이다. 본역이 위치하고 있는 지점은 한국지질도의 미원도폭 (1:50,000)에 해당되며, 대표적인 암상은 변성퇴적암류와 이를 대

체로 후기관입한 산성 화산암류로 구분된다(자원개발연구소, 1980). 특히, 변성퇴적암류의 경우 절리의 주향은 대체로 NE방향, 경사는 NW 방향을 나타낸다.

### 3. 미봉괴구간 현황

본역의 경사도는 기존 도로 개설시에는 약 50°(1:0.8)였으나, 절취공으로 시공된 현재는 48°(1:0.9)의 경사도를 보이고 있다(그림 1). 절개면 구간 중 0~30m와 50m 구간에 관입한 맥암류들은 완전풍화(Completely Weathered)의 양상을 보이며, 2소단 상부의 맥암류들은 심하게 세굴되어 있다(그림 2, 3). 또한, 본역에 시공되어 있는 수직배수로는 수 cm의 변위를 보이고 있으며, 일부는 파손되어 배수로내의 지표수가 다시 사면내로 유입되고 있다(그림 3). 불연속면은 N60E/57NW와 N40W/83SW의 2방향이 우세하며, 절개면 전체에 걸쳐 수매의 단층이 확인되었다(그림 4). 선조사법(scanline method)을 이용하여 불연속면의 특성을 조사하였으며(그림 5, 6), 이들 자료를 근거로 암반분류 및 강도정수를 도출하였다. 안정성 해석은 하반구 등면적 평사투영법을 이용하여 절리군 조합에 의한 파괴 가능성을 분석하였다.



그림 1. 조사대상 절개면의 원경사진



그림 2. 2소단 상부의 맥암류와 세굴현황

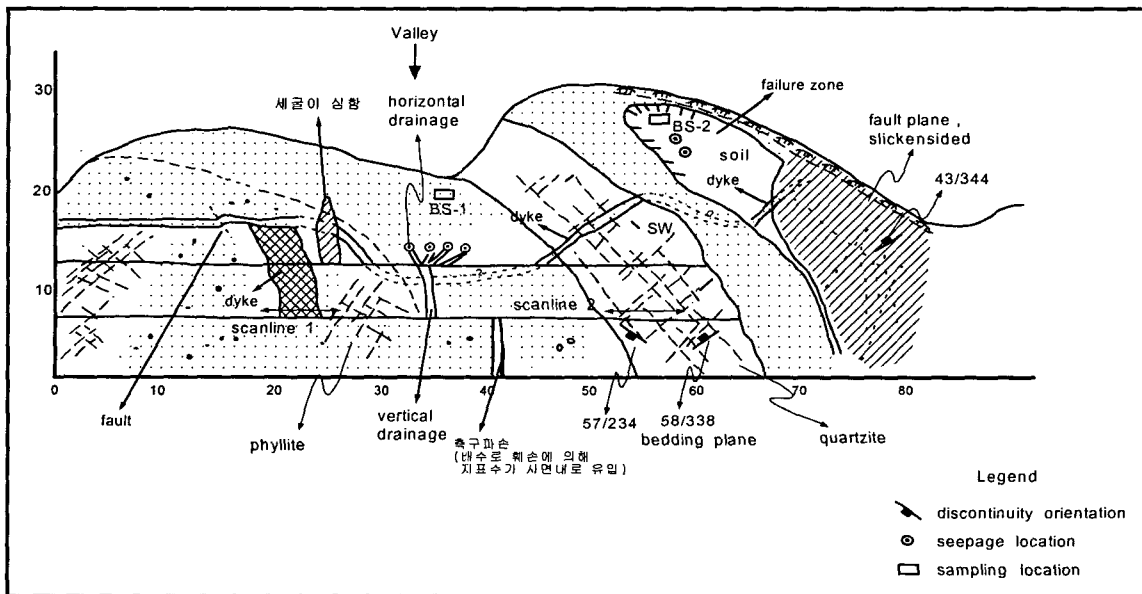


그림 3. 조사대상 절개면의 정면도



그림 4. 조사대상 절개면의 전경사진

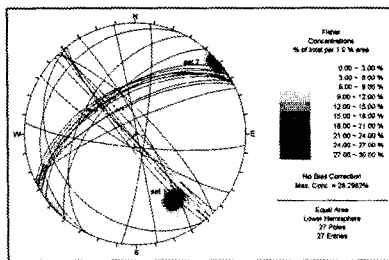


그림 5. 본역에 분포하는 불연속면의 방향성(조사선1).

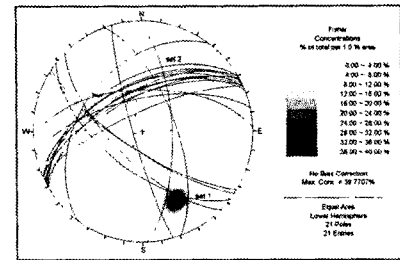


그림 6. 본역에 분포하는 불연속면의 방향성(조사선2).

### 3.1 미봉괴구간의 암반분류 및 안정해석

본역에 대한 불연속면의 자료는 선조사법을 이용하여 구하였으며(표 1), 이를 바탕으로 RMR(Rock Mass Rating) 및 SMR(Slope Mass Rating) 값을 구하였다(표 2). 이 때 암석의 일축압축강도는 현장에서 측정한 Schmidt Hammer 값을 이용하여 결정하였으며, RQD(Rock Quality Designation)값은 식 (1) 과 같은 체적당 절리빈도( $J_v$ )와 RQD와의 상관관계식을 이용하여 구하였다(Bieniawski, 1989).

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (1)$$

표 1. 조사대상 절개면에 분포하는 불연속면의 특성

	scanline 1		scanline 2	
	set 1	set 2	set 1	set 2
orientation	N60E/57NW	N40W/83SW	N65E/58NW	N55W/72SW
spacing	0.17 m	0.38 m	0.63 m	1.17 m
aperture	1 mm	0~1 mm	1 mm	0~1 mm
persistence	1.7 m	6.6 m	7.0 m	1.8 m
roughness	planar/smooth	planar/smooth	planar/smooth	planar/rough
filling materials	soil	soil	calcite	quartz
strength	49MPa	48MPa	42MPa	55MPa
seepage	dry	dry	dry	dry
remark	joint on the dyke rock		joint on the quartzite	

표 2. 조사대상 절개면의 RMR 및 SMR 분류표

	항 목	0~70 m 영역		
		상 태	점 수	
RMR	일축압축강도 (MPa)	49 MPa	4.8	
	R.Q.D. (%)	80	16.0	
	절리면 간격 (m)	0.17	7.8	
	절리면 상태	연장길이 (m)	1.7	3.5
		분리폭 (mm)	1	4.0
		거 칠 기	smooth	1.0
		충 진 물	연약(soft)	2.0
		풍 화 도	보통 풍화	3.0
지하수 상태	damp	10.0		
합	III (Fair)	52.0		
SMR 보정값	F <sub>1</sub> : 불연속면과 절개면의 경사방향 차이	32 °	0.2	
	F <sub>2</sub> : 불연속면의 경사각	57 °	1.0	
	F <sub>3</sub> : 불연속면과 절개면의 경사각의 차이	9 °	-6.0	
	F <sub>4</sub> : 절개면 굴착 방법	기계굴착	0.0	
SMR 등급	RMR + (F <sub>1</sub> ×F <sub>2</sub> ×F <sub>3</sub> ) + F <sub>4</sub>	III (Fair)	51.0	

위의 표 2에서 알 수 있듯이 RMR 값은 52.0점으로 III등급인 '보통'(Fair)에 해당되며, SMR 값 역시 51.0점으로 III 등급의 '보통'(Fair)으로 나타난다. 통상적인 SMR의 분류값에 의하면 III 등급은 일부 불연속면에 의한 파괴나 다수의 썩기형 파괴가 예상되는 사면이다(Bieniawski, 1989). 한편, 표 2에서 얻은 RMR 값을 근거로 암반 절리면의 점착력과 마찰각을 구하면 표 3과 같다.

표 3. RMR 값으로부터 추정된 현지 암반의 강도정수

위 치	RMR 값	SMR 값	C (KPa)	Φ (°)
0 ~ 70 m	52.0 (Fair)	51.0 (Fair)	260	31

본 영역에 발달하고 있는 절리군의 안정성 해석을 위해 암반 분류에서 최소값을 가지는 조사선 1구간 내에 발달하고 있는 불연속면에 대하여 하반구등면적평사투영을 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다(그림 8, 9).

해석결과 set1(N60E/57NW)과 N85W/78SW의 방향성을 보이는 절리와의 교선이 썩기파괴 발생가능 영역에 포함되어 썩기파괴가 발생할 가능성이 매우 높은 것으로 나타난다(Norrish and Wyllie, 1996). 또한, set1과 set2(N40W/83SW)의 절리군이 교차하는 교선은 썩기파괴 발생 가능영역에 매우 근접해 있어 썩기파괴가 발생할 잠재적인 가능성이 있음을 알 수 있다(그림 7). 평면파괴 발생가능성은 희박하나, 전도파괴는 N8E/82SE의 방향을 가지는 절리군의 존재로 부분적으로 불안정한 것으로 나타났다(그림 8).

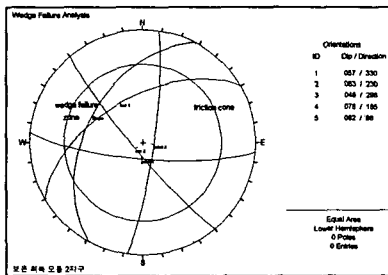


그림 7. 안정성 해석 - 썩기파괴경우

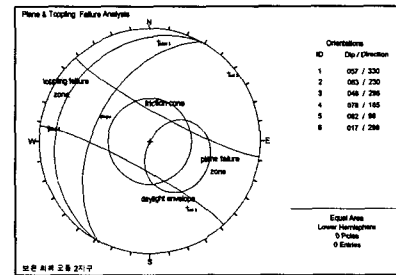


그림 8. 안정성 해석 - 평면 파괴 및 전도파괴 경우

#### 4. 붕괴구간 현황

본역은 두 차례의 붕괴가 발생하였으며, 1차 붕괴는 70~80m 구간에서 절개면 상부(높이: 20~25m)는 원호파괴, 하부(높이: 5~20m)는 썩기파괴의 양상을 보이는 복합적인 형태의 붕괴가 발생하였다. 또한, 절개면 지하수 유로로 추정되는 상부 지점에서는 지하수가 지속적으로 누수되고 있는 상태였다(그림 9). 붕괴규모는 길이가 약 20m이며 폭 5m, 그리고 깊이는 4~5m 이다. 본 절개면의 1차 붕괴시에는 붕괴구간 우측에 발달하는 천매암층 내부의 대규모 단층면을 따라 붕괴가 발생하였다. 2차 붕괴는 1차붕괴 후, 강우에 의한 함수비의 증가로 인해 상부토층 자중이 증가한 것과 절개면 하부의 지지력이 손실되어 붕괴된 것으로 판단된다(그림 10).

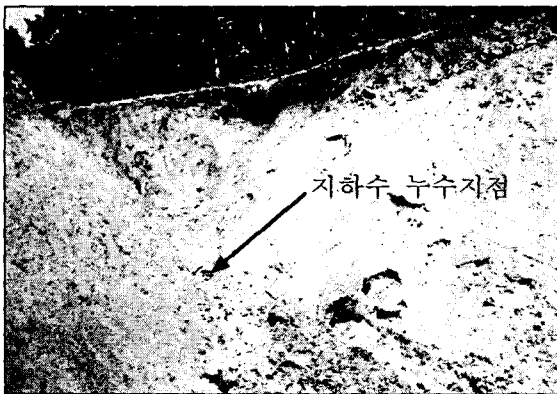


그림 9. 붕괴구간 상부지점 현황 (1차 붕괴)

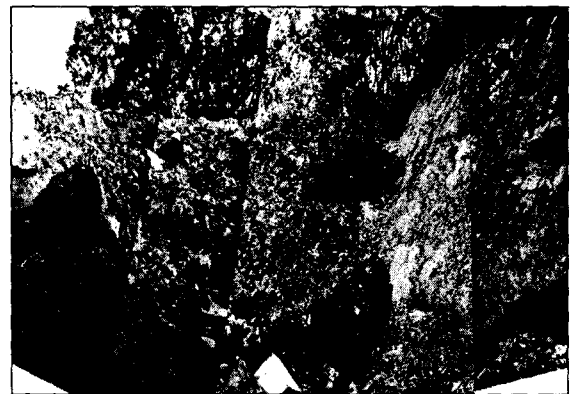


그림 10. 붕괴구간 상부지점 현황 (2차 붕괴)

#### 4.1 붕괴구간의 지반조건 및 안정해석

##### 4.1.1 붕괴 구간의 지반조건

절개면 붕괴가 발생한 구간에서 흙의 공학적 특성과 물성치를 알아보기 위해 그림 3에 표시된 지점 (BS-1, BS-2)의 지표하 약 30cm 깊이에서 시료를 채취하여 체분석 시험, 직접전단시험, 그리고 액성 및 소성한계 시험을 시행하였다. 미붕괴 지점(BS-1)과 붕괴지점(BS-2)에 대하여 실시한 체분석 시험 결과는 표 4, 5와 같다. 액성 및 소성한계 시험결과와(그림 11, 12), 시험 결과에 근거한 액성한계 및 소성한계 그리고 소성지수의 값은 표 6과 같다.

표 4. 체분석 시험결과 (BS-1)

체번호	통과입경(mm)	용기+시료(g)	용기(g)	시료무게(g)	잔류율(%)	가적잔류율(%)	통과중량백분율(%)
							100.00
#4	4.76	589	510	79	6.58	6.58	93.42
#10	2.00	613	449	164	13.66	20.24	79.76
#16	1.19	531	427	104	8.66	28.89	71.11
#40	0.42	530	401	129	10.74	39.64	60.36
#140	0.105	538	342	196	16.32	55.96	44.04
#200	0.074	599	544	55	4.58	60.54	39.46
PAN		724.03	250.03	474	39.47	100.00	0.00
계				1201			

표 5. 체분석 시험결과 (BS-2)

체번호	통과입경(mm)	용기+시료(g)	용기(g)	시료무게(g)	잔유율(%)	가적잔유율(%)	통과중량백분율(%)
							100
#4	4.76	536	530	6	0.85	0.9	99.15
#10	2	468	397	71	10.01	10.9	89.14
#20	0.85	461	396	65	9.17	20.0	79.97
#40	0.42	366	333	33	4.65	24.7	75.31
#60	0.25	518	474	44	6.21	30.9	69.11
#100	0.149	378	358	20	2.82	33.7	66.29
#200	0.074	408	329	79	11.14	44.9	55.14
PAN		641.03	250.03	391	55.15	100.0	0.00
계				709			

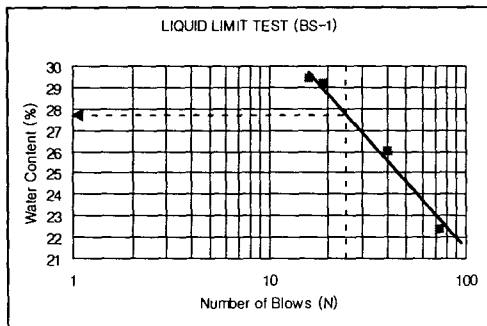


그림 11. 액성한계 시험결과 (BS-1)

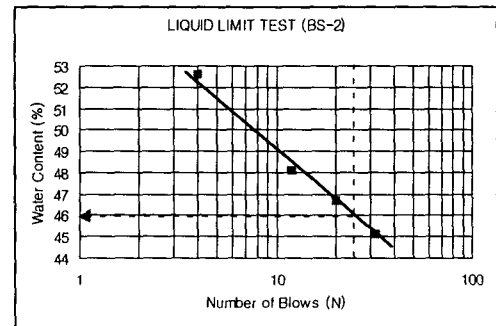


그림 12. 액성한계 시험결과 (BS-2)

표 6. 시료별 액성한계, 소성한계 및 소성지수

Location	BS-1	BS-2
Liquid Limit (LL)	27.80 %	46.00 %
Plastic Limit (PL)	17.19 %	41.53 %
Plasticity Index (PI)	10.61 %	4.47 %

두 지점에 대한 흙의 공학적 분류결과를 종합하면 BS-1 지점은 조립토 중에서도 점토질의 모래 또는 모래와 점토의 혼합토인 SC에 해당된다(표 7). 반면, BS-2 지점의 경우에는 세립토 중에서도 무기질의 실트 또는 점토질의 가는 모래 또는 점토질 실트인 ML에 해당된다(김상규, 1997; 전성기, 2000). 두 지점에서의 공학적 분류에 의한 흙의 물성치 외에도 점착력과 내부마찰각을 구하기 위해 직접전단시험을 시행하였으며 그 결과는 표 8과 같다.

표 7. 통일분류법에 의한 분류

지 점	BS-1	BS-2
분 류	SC	ML
포화단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	1.9 ~ 2.1	2.0 ~ 2.1
전체단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	1.7 ~ 2.1	1.7 ~ 2.1

표 8. 흙 시료의 강도정수(strength parameter)

	BS-1 (SC)	BS-2 (ML)
점 착 력 (t/m <sup>2</sup> )	0.9	0.7
내 부 마 찰 각 (°)	23.4	21.8

상기의 시험 결과를 보면 강도정수의 값은 큰 차이를 보이지 않으며 함수비는 큰 차이를 보이고 있다.

#### 4.1.2 실내시험 결과를 이용한 절개면 안정성 해석

단위중량은 1.7~ 2.1(t/m<sup>3</sup>)의 값을(표 7), 점착력은 0.7, 0.9(t/m<sup>2</sup>), 내부 마찰각은 21.8 °와 23.4 °의 값을 사용하여 해석을 실시하였다(표 8). STABL5M을 이용하여 해석하였으며, 해석법은 Janbu의 방법을 적용하였다. 절개면의 안정성 검토에 있어서는 절개면 활동시의 강도정수  $c$ ,  $\phi$  값을 파악하는 것이 중요하다. 절개면 붕괴가 발생하지 않은 지점과 발생한 지점에 대하여 절개면 활동시의 강도정수  $c$ ,  $\phi$  값을 직접전단시험을 시행하여 구하였다. 실내시험에 의한 강도정수 값을 바탕으로 미붕괴구간 및 붕괴구간이 건조할 때와 포화되었을 때인 각각의 경우에 대하여 안정성 해석을 실시하였다(그림 13~16).

표 9. 조사대상 절개면의 안전율(Factor of Safety)

	미붕괴지점(BS-1)의 안전율	붕괴지점(BS-2)의 안전율
건조시	0.784	0.715
포화시	0.310	0.300

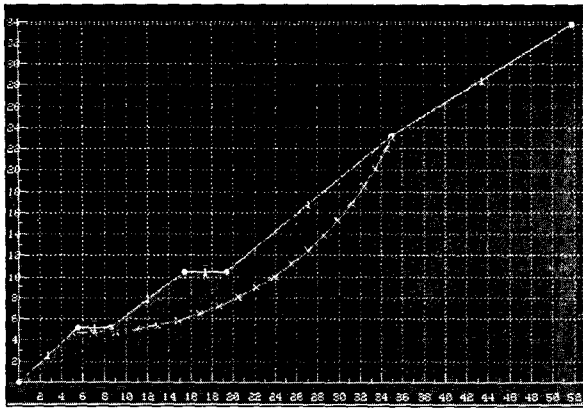


그림 13. 미붕괴구간(BS-1)의 건조상태 안정해석

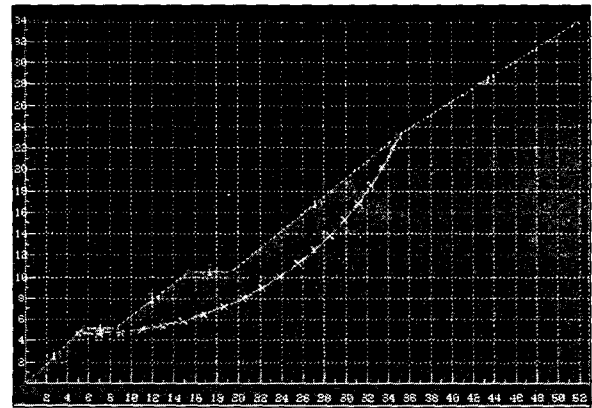


그림 14. 미붕괴구간(BS-1)의 포화상태 안정해석

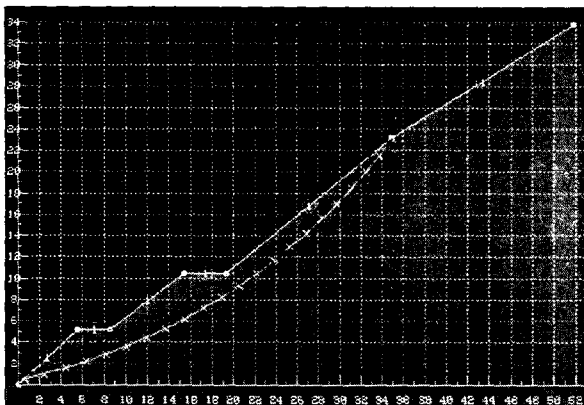


그림 15. 붕괴구간(BS-2)의 건조상태 안정해석

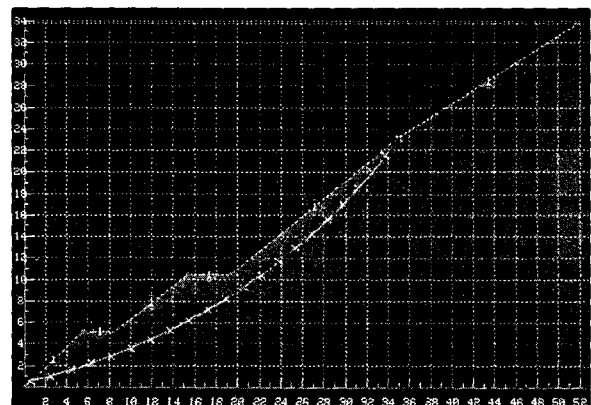


그림 16. 붕괴구간(BS-2)의 포화상태 안정해석

안정성 해석 결과 안전율은 1.0 이하의 값을 가지며, 건조상태와 포화상태에서 모두 불안정한 것으로 나타나 추가붕괴의 가능성이 매우 높은 것을 알 수 있다. 또한, 두 지점의 안전율은 거의 유사한 값을 보이는 데 이는 두 지점의 강도정수 값이 유사한 것에도 상응한다. 상기의 결과로부터 알 수 있는 것은 두 지점은 강도 정수 및 안전율은 유사한 값을 가지는 것으로 나타났지만, 함수비의 차이로 인하여 붕괴발생 여부가 결정되었다는 것이다. 즉, 붕괴 지점의 BS-2 시료(ML)는 미 붕괴지점인 BS-1 시료(SC)보다 함수비가 크며, 또한 투수성이 불량하여 자체 중량이 증가, 천매암층 내에 발달하고 있는 단층면을 따라 상부 토층이 붕괴된 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본역은 과거에 중규모 붕괴가 발생한 지역으로 현재 절취공으로 시공되었으며 집중강우로 인해 일부 구간이 붕괴되었다. 현장조사와 안정해석 결과 0~70m 구간은 세굴현상이 심하여 매우 불안정한 상태를 보이고 있으며, 썩기파괴와 전도파괴의 가능성이 높게 나타났다. 또한, 70~80m 구간은 붕괴현상이 진행 중이며 실내 시험을 통한 안정성 해석 결과 추가 붕괴의 가능성이 매우 높은 것으로 나타났다.

예상되는 붕괴원인으로는 절개면의 방향과 절리, 단층 등의 지질구조와의 기하학적 관계를 들 수 있으며, 직접적으로는 집중강우로 인한 함수비의 증가를 생각할 수 있다. 이 중 강우에 의한 함수비 증가는 흙 자체의 단위중량이 증가하여 절개면이 불안정한 상태가 되며, 이로 인한 간극수압의 증가는 유효 응력을 감소시켜 결과적으로는 전단강도가 감소하게 된다. 이러한 상태에서 지질 구조적으로 불안정한 대규모 단층면과 같은 불연속면이 존재할 경우에는 붕괴발생 가능성이 매우 높은 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 김상규(1997), 토질역학(이론과 응용), 청문각, pp. 15~31.
2. 이종혁 외(1980), 지질도폭 설명서(미원), 자원개발연구소, pp. 1~8.
3. 전성기(2000), 실무자를 위한 사면안정화 설계실무편람, 도서출판 과학기술, 서울, pp. 13~15.
4. Norrish, N.I. and Wyllie, D.C.(1996), Rock slope stability analysis in Landslides: investigation and mitigation, Special report/National Research Council, pp. 405~410.
5. Bieniawski, Z.T.(1989), Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley & Sons Inc., pp. 38~40.