

붕괴된 사면과 굴착되지 않은 사면의 안정성 검토 Analysis of Slope Stability in Slopes of Failed and not Excavated

유병옥¹⁾, Byung-Ok You, 김정석²⁾, Kyung-Suk Kim, 이용희²⁾

- 1) 한국도로공사 도로교통기술원 사면유지관리 연구센터 센터장, 수석연구원, 공학박사
Research Director, PhD, Highway & Transportation Technology Institute, Korea Highway Corporation
- 2) 한국도로공사 도로교통기술원 사면유지관리 연구센터 연구원
Researcher, Highway & Transportation Technology Institute, Korea Highway Corporation

ABSTRACT: Generally, investigation methods of cut slope are conducted only geological surface survey to gain engineering geological data of cut slopes. These methods have many problems such as limitations of investigation for a special area. So geophysical investigations such as geotomography, seismic and electrical resistivity methods have been used to search for failure surface in potential failure slopes or failed slopes. But investigation method using the borehole camera is recently a used method and it is thought that this method is more reliable method than other investigation methods because of being able to see by the eyes. Therefore, this paper was conducted investigations of borings and BIPS(Borehole Image Processing System) to search for potential sliding surfaces and was applied to obtain information of discontinuity on failed and potential failure slope in highway. As the results of BIPS, we could decide potential sliding surface in the slope, conducted to check slope stability and decided slope stability measures.

Key words: Failure Surface, BIPS, Bedding, Slope Failure, Sandstone, Anchor

1. 서론

절취사면에서 발생하는 붕괴는 일반적으로 암반 내에 발달하는 불연속면을 따라 일어나므로 사면의 설계 단계나 시공 단계에서 붕괴 가능성이 있는 암반 내에 발달하는 활동면 또는 불연속면의 정보를 획득하는 것은 매우 중요한 부분이며, 최근에는 지반조사시 활동면 또는 불연속면에 대한 정보를 얻고자 최신 장비를 동원하는 등 많은 노력을 기울이고 있다.

국내 절취사면 설계에서는 안정성 검토를 위한 조사보다는 사면경사를 결정하기 위해 시추조사 및 지표지질조사 등을 실시하고 있으며 경우에 따라 중요도가 있는 사면에 대해서 이와 병행하여 지구물리탐사 등을 실시하고 있다. 시추조사 결과로부터 얻어지는 암반의 RQD와 TCR로부터 정성적으로 토사, 리핑암과 발파암으로 구분하고 이에 따라 사면의 경사를 설정하며, 사면 주변에 대한 지표지질조사를 실시하여 노두에서 관찰된 절리면의 방향정보로부터 사면 경사에 대한 안정성을 확인하게 된다. 그러나 이러한 지표지질조사 방법은 도로확장 공사인 경우에 노출된 사면에서 조사가 이루어 질 수 있으나 신설되는 도로인 경우에는 노출된 사면이 없어 주변 노두조사만 실시하게 되므로 조사자료에 대한 한계가 있게 되며 결국 사면안정검토에 있어 신뢰가 떨어지게 되는 문제를 가지고 있다. 시공중 붕괴가 발생한 사면이나 붕괴우려가 있는 사면은 지표면에서의 지표지질조사를 실시하여 불연속면의 정보를 획득하는 것이 보편화 된 방법이나 이것 역시 제한된 표면에서의 정보만을 획득하게 되므로 많은 한계성을 가지는 문제점을 있다.

절취사면에서 활동면을 추정하는 방법으로 토모그래피, 전기비저항탐사, 탄성과 탐사와 같은 여러 가지의 지구물리탐사 방법을 이용하고는 있으나, 최근 카메라 장치를 이용하여 시추공벽 화상을 직접적으

로 촬영 후 불연속면의 상태를 육안으로 확인하는 BIPS시험은 다른 방법들에 비해 활동가능면을 추정하는 보다 확실한 조사방법이라고 생각된다.

본 논문은 국내 고속도로 건설 현장에서 발생한 붕괴사면의 활동면 위치 파악 및 굴착이 진행되지 않아 지질정보 자료획득이 어려운 사면에 대해 BIPS시험을 통하여 지질구조 상태를 찾아내고 이로부터 사면의 안정성을 검토한 사례에 대해 소개하고자 한다.

2. 시추공벽 화상처리 시스템 (BIPS)

토목공학 분야의 지반조사에 시추공 카메라가 1997년 도입된 후 적용상의 장점과 높은 신뢰성으로 인하여 사면과 터널, 교량기초 등 암반 상태 및 불연속면의 상태확인을 위한 조사에 활발히 이용되고 있다. 시추공 카메라 장치의 주요한 용도·목적은 암반의 지질조사, 콘크리트 구조물의 보수·열화조사, 지반개량 효과의 확인하는 것이며, 특히, 암반의 지질조사에서는 시추공 내의 암반 지층 확인이나 암질 확인, 불연속면의 위치, 형상, 주향·경사, 틈새폭, 충전물질의 종류 및 두께, 활동면의 위치, 주향·경사의 판정, 시추공벽의 팽창, 붕괴 상황의 관찰, 벌어진 균열에서의 용수 상황을 파악하는데 유용하게 사용할 수 있다.

2.1 해석시스템

시추공벽 화상처리 시스템의 측정·해석 원리는 여러 기종들이 유사하지만, 사용하는 카메라, 촬영 방식, A/D 변환특성 및 광원특성 등은 장비에 따라 다소 차이가 있다.

시스템은 그림 1과 같이 크게 현장 측정시스템과 실내 해석시스템으로 구분되는데, 현장 측정시스템은 시추공벽을 360°전개화상 이미지로 촬영하는 카메라장치가 부착된 Sonde 장치, sonde케이블, 촬영조건을 제어·조정하는 컨트롤 장치, 저장 또는 기록장치 및 촬영영상을 보여주는 화면, sonde의 심도를 기록하는 Indicator 로 구성된다.

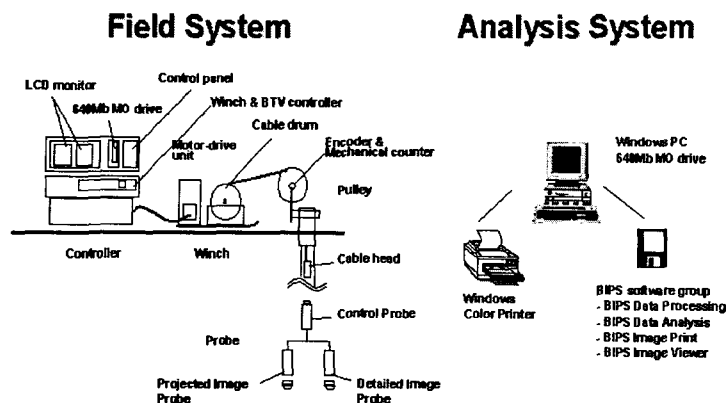
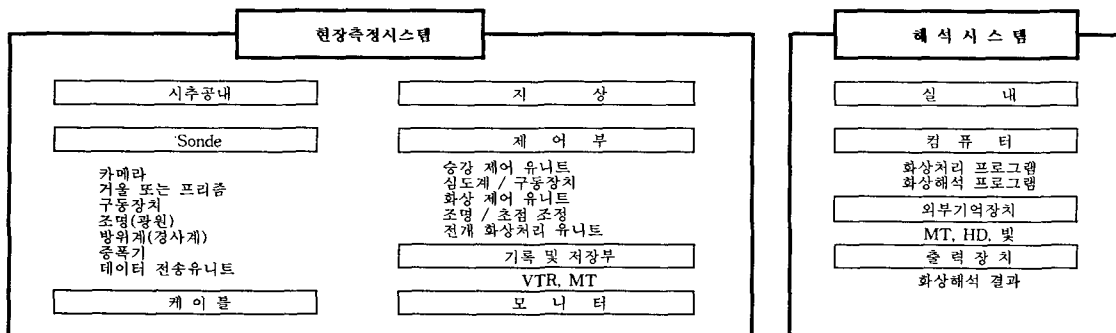


그림 1. 현장 및 실험실에서의 BIP 장치 구성

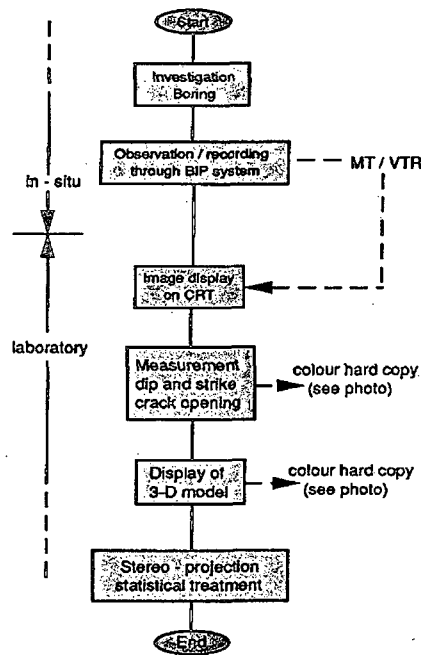


그림 2. BIPS 장치의 지질구조 분석 절차

해석시스템은 절리면의 방향분석, 절리종류, 절리틈새, 평사투영 분석, 절리충전물질, 절리누적수 등 암반의 공학적인 분류와 안정해석에 필요한 기본적인 자료를 제공하게 된다.

저장 매체에 기록된 데이터는 그림 2의 절차에 의해 지질분석을 수행하여 절리면의 방향 및 절리틈새, 충전물질 두께 등 암반에 대한 여러 가지 자료를 해석할 수 있으며 이들 자료의 스테레오네트 분석을 통한 절리방향, 암질상태, 위경사(Apparent Dip) 평가 등의 여러 가지를 분석할 수 수행할 수 있다.

2.2 시험 장치 구성

시험 장치의 구성은 그림 3과 같이 컨트롤 패널(Controller)로 케이블 윈치(Winch), 풀리(Pulley), 프루브(Probe)의 크게 3부분으로 이루어져 있다.

컨트롤 패널(Controller)은 5인치 모니터 2개, 화상을 저장할 수 있는 저장장치, 프루브를 자동으로 승강시킬 수 있는 리모트 컨트롤 장치 및 심도표시, 승강속도 조절 등을 할 수 있으며 화질을 조절할 수 있도록 되어 있다. 5인치 모니터는 360°전개화상과 승강시의 시추벽을 볼 수 있도록 한 두 가지 화면으로 되어 있다. 장비는 -5~50°의 온도 범위에 사용할 수 있고 저장 장치는 3.5인치 640 Mb MO drive를 사용한다. 화상의 녹화속도는 0~60m 범위/시간이고 리모트 컨트롤은 카메라 조정 및 프루브의 속도를 조절할 수 있다.

프루브를 시추공 내에서 이동시키는 힘을 발생해 주는 케이블 윈치(Motor driven cable winch)는 적용 가능심도가 300~500m 정도이고 적은 용량인 경우에는 얇은 심도만 볼 수 있도록 되어 있다. 구동방법은 모터작동(Motor driven)과 핸들레버로 작동하는 수동식이 가능하며 모터를 작동하는 경우 속도조절이 가능하도록 되어 있다. 사용전원은 AC 110V~220V 겸용을 사용한다.

심도 측정 풀리 (Measuring Pulley)는 등근 원판형태로 되어 있으며 원판의 회전에 의해 심도측정이 가능하도록 되어 있다. 작동환경은 -5~50°C의 온도범위이다. 풀리는 시추공의 케이싱에 고정하여 사용하는데 케이싱 크기는 일반적으로 66mm ~ 134mm 정도이다.

시추공 내로 들어가 프루브는 BIPS Control Probe(BCP-552)와 360° Projected Image Attachment(BPR-552), Side Detailed Image Attachment(BTV-552), Front-Side Image Attachment(BFE-552)의 네 가지로 되어 있는데 컨트롤 프루브(BCP-552)에 세 가지 Attachment를 부

착하여 사용할 수 있다. BIPS Control Probe(BCP-552)는 케이블을 통하여 지상에서 보내진 전기신호를 전환하고 조절하며 Attachment에 공급하는 기능을 한다. Flux Gate Sensor, 중력방향 감지기, 2축 Inclination Meter로 구성되어 있으며 프루브의 방향 측, 프루브의 회전각 및 경사방향, 각도를 측정할 수 있어 이미지신호와 함께 지상 장치로 보낸다. 360° Projected Image Attachment(BPR-552)는 360° 공벽의 이미지를 관찰하고 기록하는데 사용되는 초기의 BIP system과 동등한 기능을 가진 Attachment이다. 원뿔형의 Cone Mirror와 작은 크기의 CCD 카메라, 링형태의 형광램프, Mirror 하부에는 방위각을 측정하는 컴퍼스 및 램프로 이루어져 있다. Side Detailed Image Attachment(BTV-552)는 공벽의 관찰을 위한 프리즘을 사용하여 공벽의 특정부를 확대하는 Attachment로서 프리즘이 회전할 수 있도록 되어 있어 어느 방향이든지 관찰이 가능하다. 지상의 컨트롤 장치에서 제어되어 이미지를 확대할 수 있다. 조명은 두 개의 할로겐 램프를 사용하여 측정지점 및 시추공벽의 전체를 조명할 수 있다. Front-Side Image Attachment(BFE-552)는 시추공의 하부 및 측면을 동시에 관찰할 수 있다. 측면 이미지는 전방 이미지 주변에 나타나며 지상 컨트롤 장치에 투영된 이미지를 전환할 수 있다.

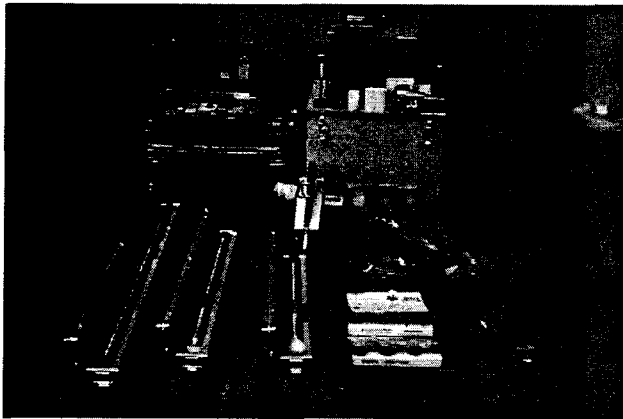


그림 3. BIPS 시험장비

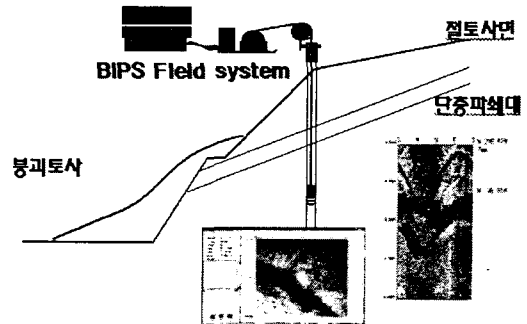


그림 4. 붕괴발생사면에서의 BIPS 적용

3. 붕괴 사면의 현장적용사례

고속도로 건설공사 중에 그림 4와 같이 굴착중에 붕괴가 발생한 퇴적암 사면과 굴착이 되지 않은 대 절토사면에 대해 시추공벽 화상처리시스템(BIPS)을 도입하여 활동면의 심도를 파악하고 불연속면의 방향 및 충전물질 등을 측정하여 사면안정검토의 사례에 대한 소개한다.

3.1 CASE 1 (붕괴가 발생한 사면의 안정검토사례)

대상사면은 ○○고속도로 확장공사에서 굴착중인 사면으로서 전반적으로 퇴적암으로 이루어져 있으며, 검은 색을 보이는 탄질 셰일, 탄층 및 사암으로 이루어진 사면 상부에 고압송전 철탑이 위치하고 있어 매우 중요한 구간이다. 사면 붕괴는 굴착도중 사면 중간부 및 좌측부의 두 구간에서 발생하였으며, 굴착이 계속 진행될 경우 추가 붕괴가능성이 매우 높고 철탑의 안정성에 영향을 끼칠 우려가 있었다. 주요 붕괴 원인인 점토층 충전구간과 파쇄대를 직접적으로 확인하고자 BIPS시험을 실시하였으며 시험 분석결과로부터 조사사면의 지층 구성상태, 점토층 충전구간 및 방향을 찾고 사면 보강 설계시 기본자료로 활용하였다. 사면 위치 및 시추현황, 사면연장, 높이에 대한 현황은 그림 5 및 표 1에 나타내었다.



그림 5(a). 조사사면의 전경사진

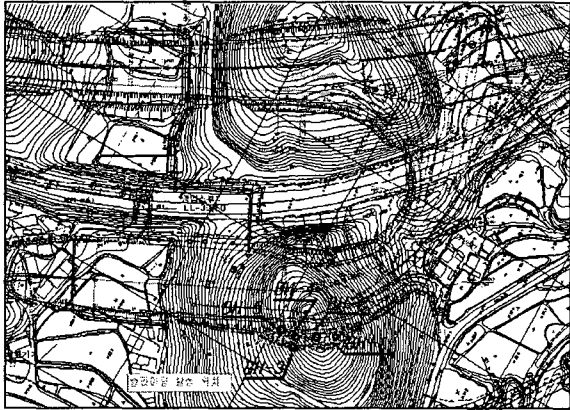


그림 5(b). 조사사면의 평면도

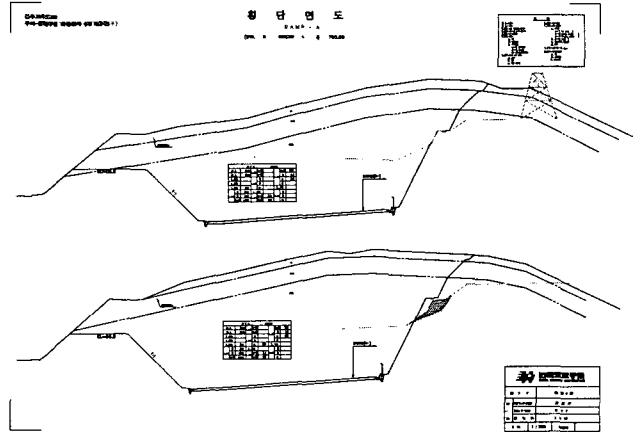


그림 5(c). 조사사면의 대표 횡단면도

표 1. 조사사면의 일반현황 및 시추현황

위 치	사면방향	설계경사	높 이	연 장	사면경사	비 고
○○고속도로	N29W	64E	24m	220m	토층 1:1.2~1:1.5 발파암 1:0.5	사면상부 철탑위치
시추현황 및 BIPS 조사	구간	시추공번	시추심도 (m)	BIPS 조사(m)	위 치	
	철탑좌측 구간	BH-1	25.3	25.0	사면활동방향으로 시추공배치	
		BH-2	25.3	25.0		
	철탑우측 구간	BH-3	25.0	24.7	사면활동방향으로 시추공배치	
		Bh-4	25.2	24.9		
Bh-5		22.1	21.8			

3.1.1 지표지질조사

(1) 암석

경상분지에 속하는 중생대 백악기의 사암 및 흑색 셰일로 이루어져 있으며 사암은 비교적 강한 암석 강도를 가지나 셰일은 지표에 노출시 작은 암편으로 쉽게 풍화되는 특성을 보인다. 주 지질구조는 층리 면으로 층리면 사이에 미고결 점토층이 충전되어 있고 탄질 셰일층이 분포한다.

(2) 풍화상태

전반적으로 풍화상태는 MW(Moderately Weathered) 정도의 풍화상태를 보이고 상부에 토층이 1m 이 내로 얇게 분포한다. 특히, 좌측구간은 뚜렷한 풍화양상을 보이는 층이 존재하며 이 경계면을 따라 상부는 풍화암-토층으로 분포하고 하부는 MW 정도의 풍화를 받은 연암으로 이루어져 있다. 그리고 암종상

탄층 또는 탄질 셰일로 이루어진 구간은 HW 정도 내지 CW 정도의 풍화양상을 보이며 점토화 된 구간이 상당히 존재한다.

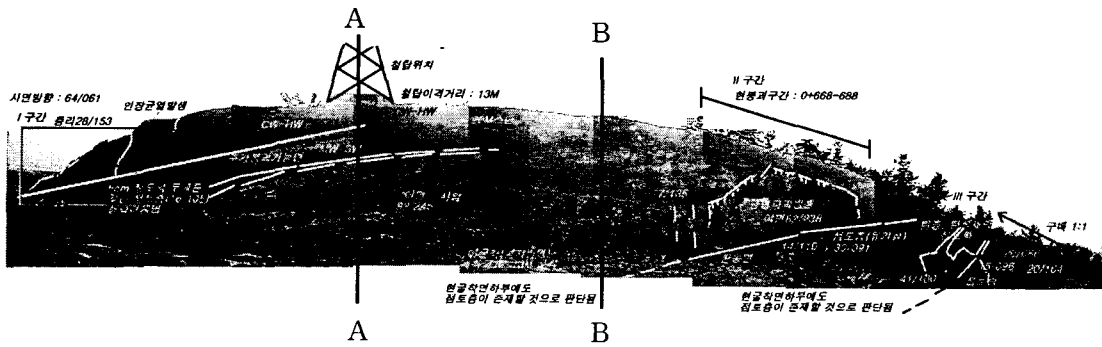


그림 6. 조사사면의 응용지질도

(3) 불연속면 상태

1set의 층리면과 2set의 수직절리가 우세하게 발달하는데 층리방향은 10~20/090~110 정도의 방향으로 분포하고 크게 3개의 구간에서 점토층을 확인할 수 있다.

(4) 사면안정검토

사면안정 해석방법은 DIPS Ver.5.0 프로그램 이용하여 평사투영법에 의한 사면안정해석을 실시하였으며, 점토가 충전된 층리면의 마찰각을 10°로 추정하는 경우 평면파괴가 가능한 것으로 분석되었다.

사면 상부에 중요 구조물이 위치하고 있으므로 점토층의 연장성과 사면내 불연속면에 대한 상세 조사를 실시한 후에 사면안정대책을 수립하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

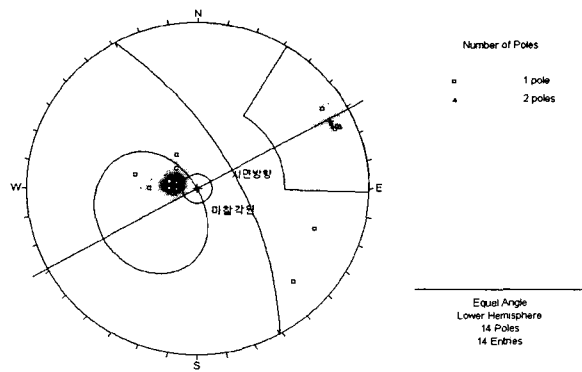


그림 7. 조사사면의 평사투영법에 의한 사면안정해석

3.1.2 BIPS 조사결과

BIPS 조사는 철탑 주변부를 중심으로 붕괴를 유발한 점토층의 연장성과 사면내에 존재가능한 또 다른 점토층의 존재 유무를 확인하는데 주안점을 두고 사면상부에서 도로계획고까지 총 5개공을 시추하여 실시하였다.

BIPS시험결과에 따른 전반적인 암반 상태는 Opening 발생된 수직절리가 많으며 심각하게 파쇄된 구간이 여러 심도에서 존재하고 있다. 점토층으로 추정되는 파쇄대는 두께가 수cm~20, 30cm 정도에 이르는 정도로 분포하고 있다. 주절리군은 퇴적암의 층리면으로서 그림 8에서와 같이 뚜렷한 방향을 갖는 1set의 절리군이 형성되며 방향은 사면 노출면에서 실시한 지표지질조사 결과와 일치하고 있다.

퇴적암으로 이루어진 사면에서 주로 점토층이 충전된 층리면을 따라 큰 규모의 붕괴가 발생하므로 사면의 평면파괴 발생가능성을 추정하기 위해서는 점토가 충전된 층리면 파악이 매우 중요하다. BIPS 조사에 의해 활동면 파악 및 사면의 암질상태를 파악하기 위해 그림 8~10과 같이 프로그램을 이용해 해석을 실시하였고, 시추공 사진 분석을 통하여 각 시추공별로 점토층이 충전된 파쇄대층을 찾았으며 표 2에 결과를 나타내었다.

조사결과, 사면내에 점토가 충전된 층은 퇴적 층리면을 따라 주로 발달하며 층리면의 경사는 15~25°사이에서 분포한다. 점토층이 충전된 층리면의 특징은 탄질 셰일층의 하부로서 지하수의 침투로 인하

여 연약화 된 것으로 보인다.

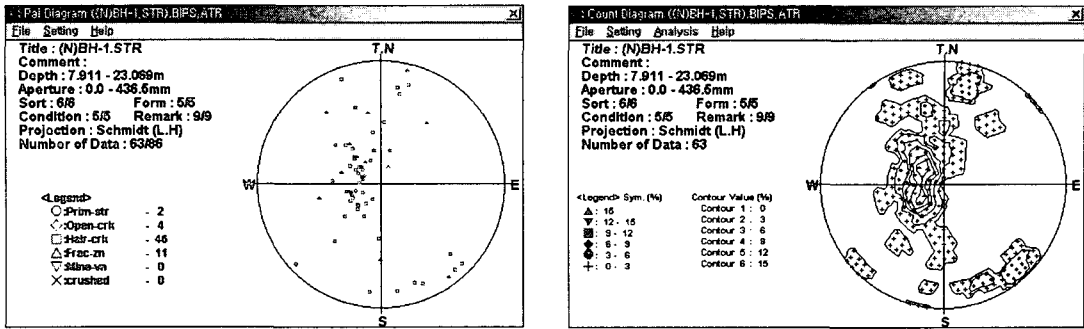


그림 8. BIPS 조사에 의한 절리방향 분석 예(BH-1)

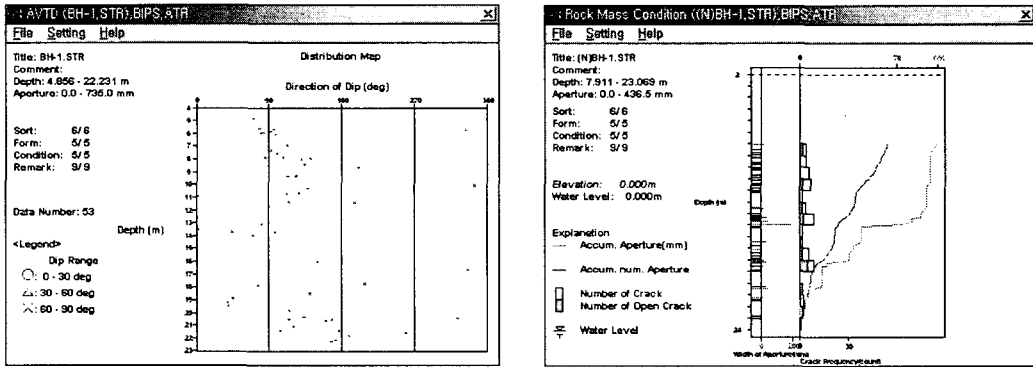


그림 9. 깊이별 불연속면 방향분포 분석예(BH-1) 그림 10. 깊이에 따른 암질상태 분석예(BH-1)

표 2. BIPS 조사결과 요약

공번	심도(m)	불연속면 방향	불연속면 상태	공번	심도(m)	불연속면 방향	불연속면 상태
BH-1	7.9-8.1	16/116, 18/145	부분적으로 점토 충전된 파쇄대	BH-2	2.2-2.4	21/118, 18/133	점토 충전된 파쇄대
	9.3-9.4	13/064	점토 충전된 파쇄대		6.2-6.8	40/076, 37/180	점토 충전된 파쇄대
	14.8-15.1	42/077, 20/064	점토 충전된 파쇄대		9.3-10.6	43/262, 43/163, 48/215	부분적으로 점토 충전된 파쇄대
	19.2-19.3	18/047	점토 충전된 파쇄대		13.9-14.5	30/058, 29/137	부분적으로 점토 충전된 파쇄대
	19.6-19.9	22/047	점토 충전된 파쇄대		15.0-16.7	29/140, 61/198, 69/132	부분적으로 점토 충전된 파쇄대
	20.2-20.7	24/139, 25/190	부분적으로 점토 충전된 파쇄대		17.8-18.5	53/091, 50/099	부분적으로 점토 충전된 파쇄대
	21.7-22.6	32/113	부분적으로 점토 충전된 파쇄대		20.7-20.9	26/121	점토 충전된 파쇄대
BH-3	2.2-2.4	21/118, 18/133	점토 충전된 파쇄대	BH-4	15.5-15.7	29/151	점토 충전된 파쇄대
	6.2-6.8	40/076, 37/180	점토 충전된 파쇄대		16.1-16.4	72/176	점토 충전된 파쇄대
	20.7-20.9	26/121	점토 충전된 파쇄대		18.2-18.5	24/060, 18/096	점토 충전된 파쇄대
	21.8-22.0	31/097	점토 충전된 파쇄대				
	22.5-22.6	19/137	점토 충전된 파쇄대				
BH-5	5.0-5.5	14/079	부분적으로 점토 충전된 파쇄대	BH-6	3.9-4.6	25/113, 22/117	부분적으로 점토 충전된 파쇄대
	8.6-8.8	23/087	부분적으로 점토 충전된 파쇄대		5.1-5.3	28/104	부분적으로 점토 충전된 파쇄대
	10.2-10.9	29/095, 40/075, 60/109	부분적으로 점토 충전된 파쇄대		5.6-5.7	21/312	파쇄대
	11.6-12.1	48/292, 42/299	부분적으로 점토 충전된 파쇄대		7.6-7.7	21/312	파쇄대
	20.3-20.4	16/104	점토 충전된 파쇄대		11.2-11.8	44/037, 29/051	부분적으로 점토 충전된 파쇄대
			12.5-13.0		25/088	파쇄대	
			19.8-20.1		11/131, 48/339	부분적으로 점토 충전된 파쇄대	

그림 11에는 표 2에 나타난 점토층 충전면을 평사투영망에 모두 나타난 것으로서 점토층이 충전된 불

연속면의 경사는 15~25°, 방향은 102~110°방향에 집중된다.

3.1.3 활동면 추정

BIPS 조사결과와 시추조사결과를 바탕으로 대표적인 두 개의 단면에 대해 활동가능면을 추정하였다. 활동가능면은 그림 12와 같이 사면상부에 이미 붕괴가 발생한 면과, 점토층과 탄질 셰일층의 두 구간이 추가로 존재하며 사면방향으로 깊어지는 양상을 보인다.

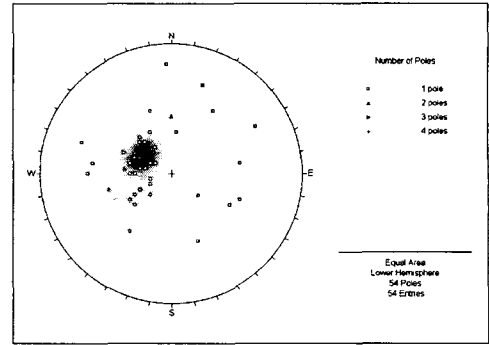


그림 11. 점토가 충전된 면에 대한 방향분석

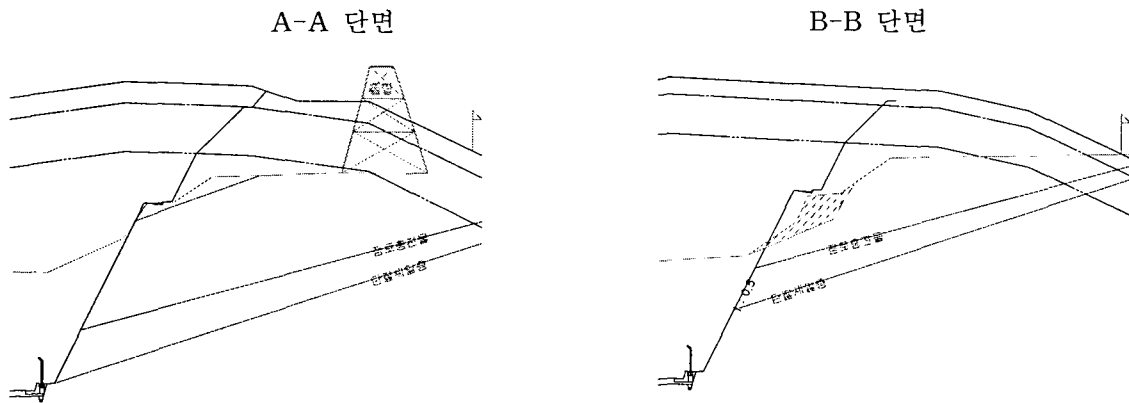


그림 12. BIPS 조사에 의한 활동면 추정

3.1.4 사면안정검토

평사투영법에 의한 사면안정에 의하면, 그림 13과 같이 Dip/Dip direction이 15~25/102~110 정도의 절리와 경사를 가지고 있는 지역에 대해서 평면파괴의 가능성이 있는 것으로 해석되었다. 그리고 평면파괴에 대한 안전율을 계산결과는 A-A 단면구간에서 건기시 및 우기시 안전율 (FS = 0.765 < 1.5, FS = 0.495 < 1.1~1.2)이 모두 불안정한 상태로 해석되었고, B-B 단면에서도 역시 건기시 및 우기시 안전율 (FS = 0.850 < 1.5, FS = 0.564 < 1.1~1.2)이 불안정한 상태로 해석되었다.

평면파괴는 사면의 안정성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되므로 사면 대책공법 적용시 미연에 파괴발생 가능한 암괴 등을 미리 제거시킬 수 있는 방안이나 보강재를 이용한 공법 등을 적용하는 것이 필요하리라 판단되었다.

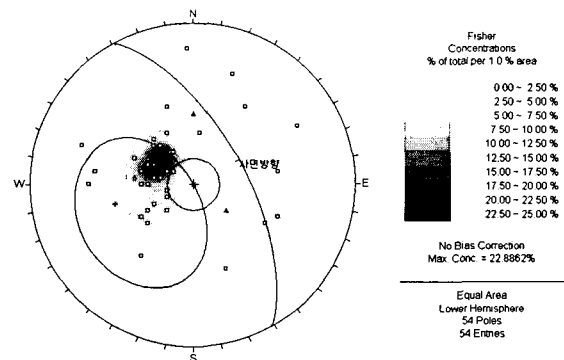


그림 13. 평사투영법에 의한 사면안정해석결과

3.1.5 사면안정대책

평사투영해석 및 한계평형해석 결과와 현장상황을 종합적으로 검토한 결과, 현재 사면의 절취상태로는 장기간 시간 경과시 사면이 불안정한 상태로 될 가능성이 있으므로 사면을 안정화 시키는 방안을 수

립하는 것이 바람직한 것으로 판단되었다. 그러나 사면 상부에 위치한 고압 송전 첩탑으로 인하여 사면 경사 완화방안과 같은 추가절취시공은 제약이 있었으므로 사면을 보강하는 방안으로 결정하였으며 안전율이 확보되도록 다음과 같이 제안하였다.

송전첩탑을 중심으로 사면 우측(B-B단면)은 사면경사를 1:1.8로 완화시키고, 점토층전층이 발견된 구간(A-A단면)에 대해서는 Rock Anchor를 설치하여 저심부까지 안정화시키도록 하며, 이외의 부분에 대해서는 FRP 가압그라우팅으로 원지반 전단강도를 증가시켜 안정화를 유지하는 방안을 제안하였다.

사면경사를 1:1.8로 완화시킨 후에 안정해석을 수행한 결과, 건기시는 안전율이 1.53, 우기시는 1.32로서 안정한 것으로 나타났다.

Rock Anchor + FRP 가압그라우팅으로 보강구간은 활동면 주변에 60ton용량의 Rock anchor를 1.5m 간격으로 6단을 설치하고 정착장 길이는 7.6m로 둘 경우, 점토 층진 층리면의 활동에 대해 안정되는 것으로 해석되었다.

표 3. 구조계산에 의한 앵커 설치제원

구 분	자유장(m)	정착장(m)	앵커전장(m)	정착하중(ton)
적 용	13.80	7.60	21.40	60.00

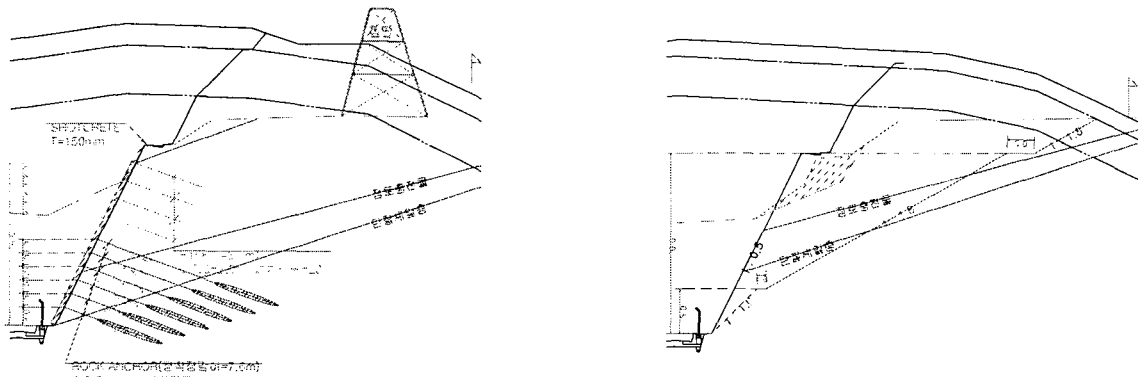
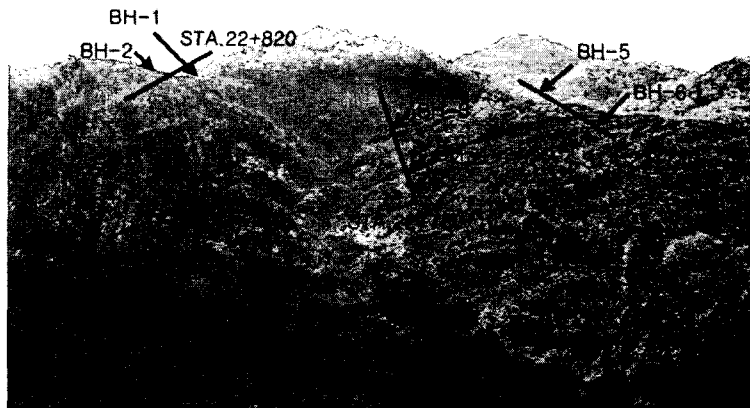


그림 14. A-A, B-B 단면구간의 사면안정대책방안

3.2 CASE II (굴착되지 않은 대절토 사면의 안정검토사례)

대상사면은 ○○고속도로 신설공사 구간에서 현재 굴착이 되지 않은 사면으로 절토높이가 80m에 이르는 대절토 사면이 형성되어 이에 대한 상세 조사를 실시하여 사면안정성 검토 및 대책을 수립하고자 BIPS 조사를 실시하였다.

본 사면의 위치 및 시추현황, 사면연장, 높이에 대한 현황은 그림 15 및 표 4와 같다.



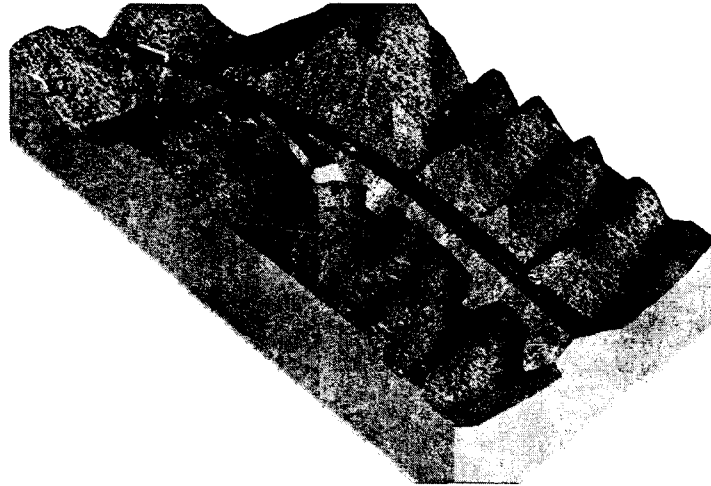


그림 15(a). 조사사면의 전경사진 및 도로굴착시의 3차원 입체도

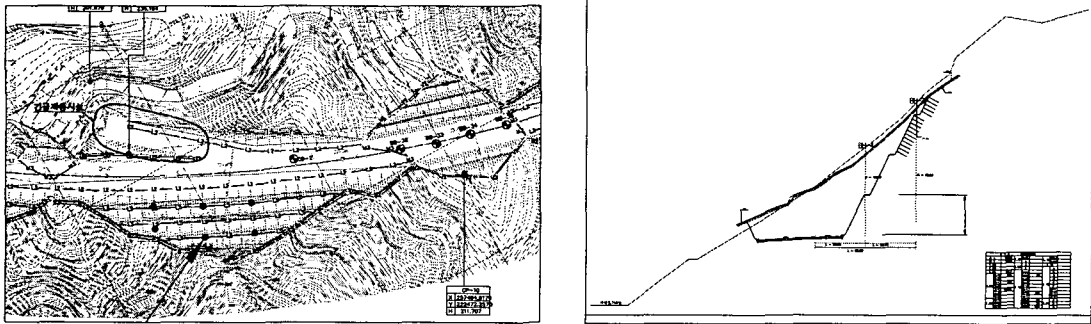


그림 15(b). 조사사면의 평면도 및 대표횡단면도

표 4. 조사사면의 일반현황 및 시추현황

위 치	사면방향	설계경사	높 이	연 장	사면경사	비 고
○○고속도로	N39E	64SE	80m	300m	토층 1:1.2~1:1.5 발파암 1:0.5	지형이 급경사형성
시추현황 및 BIPS 조사	구간	시추공번	시추심도 (m)	BIPS 조사(m)	위 치	
	22+820단면	BH-1	62.0	62.0	도로횡단방향으로 시추공분포	
		BH-2	63.0	63.0		
	22+780단면	BH-3	60.1	60.1		
		BH-4	46.5	46.5		
	22+740단면	BH-5	48.0	48.0		
BH-6		56.0	56.0			

3.2.1 지표지질조사

(1) 지질조사결과

아직 사면굴착이 시작되지 않은 상태로서 장비진입을 위한 작업로 측면과 대상사면에 인접한 지방도의 절개구간에 대한 지표지질조사를 실시하였다.

암종은 중생대 백악기 경상계에 속하는 암층으로 사암, 세일, 역암 등이 저변성작용을 받아 있는 퇴적 변성암에 해당하는 암석이 주로 분포하고 단층 및 습곡 등의 지각변동으로 인해 심한 지질구조선이 심

하게 교란되어 있다. 풍화상태를 판단하기 위해 인근 지역의 사면에 대한 노두조사결과 전반적으로 MW (Moderately Weathered) 정도의 풍화상태이며 토층은 매우 얇은 심도로 분포하고 있다. 불연속면 상태는 그림 16과 같이 35~45/135~145 방향으로 발달하는 1set의 편리가 우세하고 60°이상의 고각의 절리면이 Random한 분포양상을 보인다. 단층면의 발달은 지방도 사면에서 관찰할 수 있다.

(2) 사면안정검토

사면안정해석은 DIPS Ver.5.0 프로그램 이용하여 평사투영법에 의한 안정해석을 실시하였다. 절리면의 전단강도는 시추코아 시험에서 얻어진 절리면 잔류마찰각 31°를 적용하였으며 해석결과 주절리면에 의해 평면파괴가 가능한 것으로 분석되었다.

기존 설계에는 사면을 1:0.5경사로 80m까지 절취하고 사면 상부에 Rock Bolt를 설치하여 암괴를 안정화 시키는 것으로 되어 있으나 현재 평면파괴 발생가능 경사가 35~45°이므로 Rock Bolt만으로는 안정화가 어려울 것으로 판단된다.

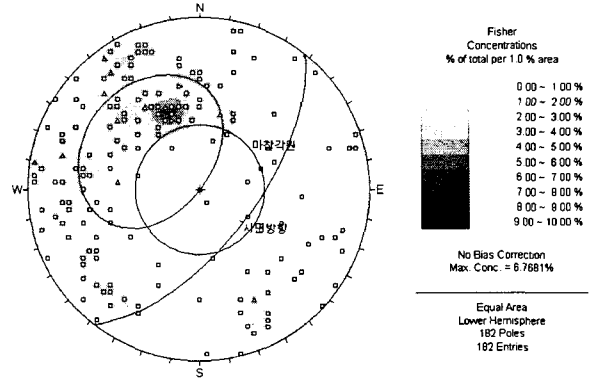


그림 16. 인접구간 사면의 절리조사를 이용한 평사투영법에 의한 사면안정해석

3.2.2 BIPS 조사

BIPS시험을 위하여 총 6공을 시추하였으며 여기에는 No.1공에 대해 해석한 결과만을 소개한다.

BH-1 시추위치는 STA.22+820 단면상에 위치하며 도로 계획고에서 사면높이 약 77m 지점으로 시추 심도는 도로계획고 상단 15m까지 실시하였다. BIPS 조사결과 전반적인 절리발달양상은 그림 17에서와 같이 사면방향으로 발달하는 편리구조가 우세하게 발달하고 있으며, 지표면에서부터 약 13m까지는 PVC 관에 의해 관찰이 불가능한 상태이나 시추조사를 참조할 경우, 6m까지는 풍화암 정도이고 10.2m 까지 파쇄가 심한 암질불량한 상태를 보인다. 심도에 따라 암질이 불량한 파쇄가 구간에 여러 깊이에 존재하고 있으며 점토층이 충전되는 것으로 추정되는 구간이 여러 심도에 존재한다.

- 13.5m : 점토층이 존재하는 것으로 판단됨(134/26)
- 16.2~16.3m : 심도에 점토층으로 판단되는 층이 존재(135/31)
- 20.7m : 152/17 : 방향으로 연약층이 존재
- 25.9m : 편리방향을 따라 점토층이 존재함(165/31)
- 30.2~30.4m : 매우 불량, 점토층이 존재하는 것으로 판단됨(156/28, 122/55)
- 41.1m : 099/63 방향의 점토층으로 추정되는 면이 존재함.

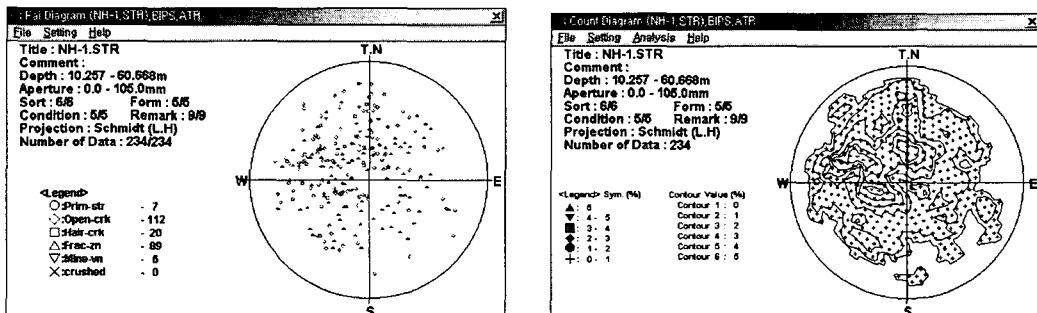


그림 17. BH-1 시추공의 BIPS 조사결과 절리 분포 현황

위에 언급한 불연속면은 거의 대부분 사면방향으로 30°내외로 경사져 있다. 심도별 전반적인 불연속면의 분포를 도로면을 중심으로 도시한 경우와 심도별 불연속면 방향 분포상황을 나타내면 그림 18, 19와 같다. 그림 20에서 판단해 보면, 시추 지표면에서 32m까지는 절리가 심하게 발달하고 32m 이후에서는 암질상태가 양호하게 나타나고 있다.

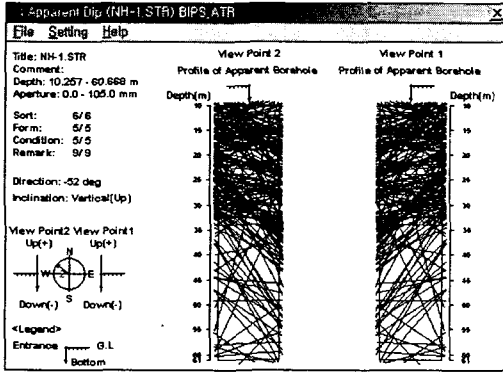


그림 18. 절리면 발달방향(BH-1)

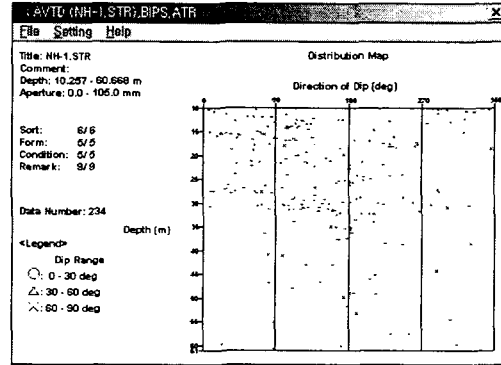


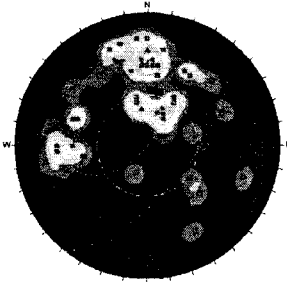
그림 19. 심도별 불연속면 방향분포(BH-1)

표 5 및 그림 21은 붕괴가능 심도 파악을 위한 심도별 암반상태를 나타낸 것이다.

표 5. 심도별 암반상태(BH-1)

심도	상 태	비 고
2~10.2m	<ul style="list-style-type: none"> · PVC관에 의해 관찰이 어려운 상태 · 6m까지는 토층 및 풍화암으로 코아시료가 거의 없는 상태임. · 6.0~6.2m, 7.4~7.5m, 8.2m 파쇄대형성 · 암질이 불량한 상태 	
10.2~19.0m	<ul style="list-style-type: none"> · 파쇄대형성(특히, 10.2~10.8m까지 매우 불량한 상태) · 13.5m 점토층이 존재하는 것으로 판단됨(134/26) · 16.2~16.3m 심도에 점토층으로 판단되는 층이 존재(135/31) 	
19.0~32m	<ul style="list-style-type: none"> · 부분적으로 양호한 구간과 파쇄가 심한 구간이 존재함. · 20.7m : 152/17 방향으로 연약층이 존재 · 21.3~22.3m : 파쇄가 심한 상태임. · 22.3~24.0m : 양호한 상태 · 24.2~24.4m : 큰 구조선 존재(사면안정에는 큰 영향이 없음) · 25.3~25.6m : 파쇄대 형성 · 25.9m : 편리방향을 따라 점토층이 존재함(165/31) · 26.8~28.0m : 파쇄대 형성, 뚜렷한 편리구조선이 존재함. · 29.0~29.4m : 파쇄대 형성 · 30.2~30.4m : 매우 불량한 구간으로 점토층이 존재하는 것으로 판단됨(156/28, 122/55) 	

표 5. 심도별 암반상태(BH-1)(계속)

심도	상태	비고
32.0~62.0m	<ul style="list-style-type: none"> 전반적으로 양호한 암반상태를 보이나 일부 심도에서 파쇄대층이 존재함. 32.2~32.6m : 편리가 우세하게 발달, 파쇄대 형성 35.0~35.6m : 사면방향으로 40~60°로 경사진 구조선이 존재함. 36.2m : 184/53의 구조선 존재 41.1m : 099/63 방향의 점토층으로 추정되는 면이 존재함. 43.0m : 160/59방향으로 큰 구조선이 존재함. 	

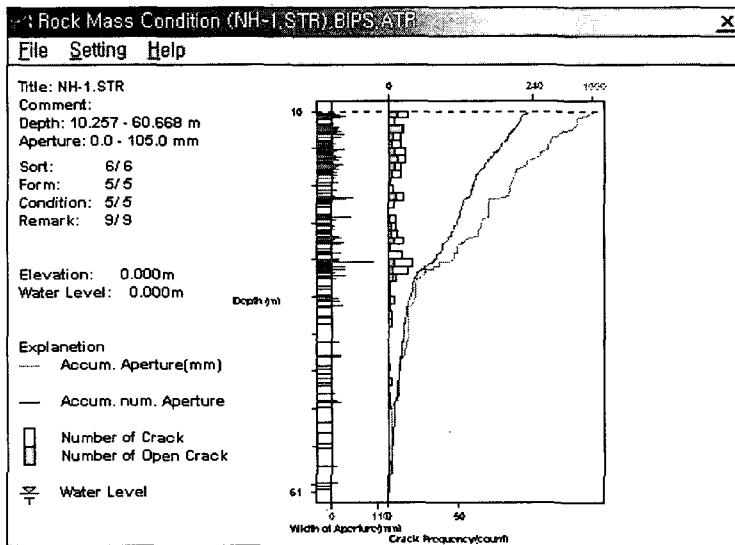


그림 20. 심도별 절리분포 및 균열현황도(BH-1)

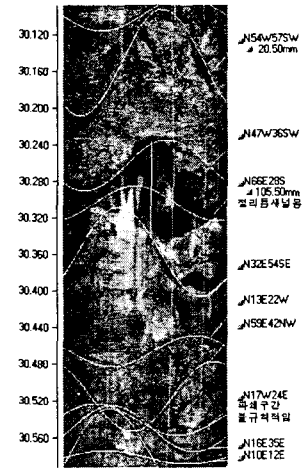


그림 21. 파쇄대 발달 구간의 BIPS 조사결과 예(BH-1)

3.2.3 사면안정검토

회수된 시추코아 시료에 대하여 절리면 전단시험을 실시하였으며 그림 22와 같이 절리면의 점착력 2.0ton/m², 마찰각 31°를 구하였고, 평사투영법에 의한 사면안정해석시 마찰콘의 각도에 적용하였다.

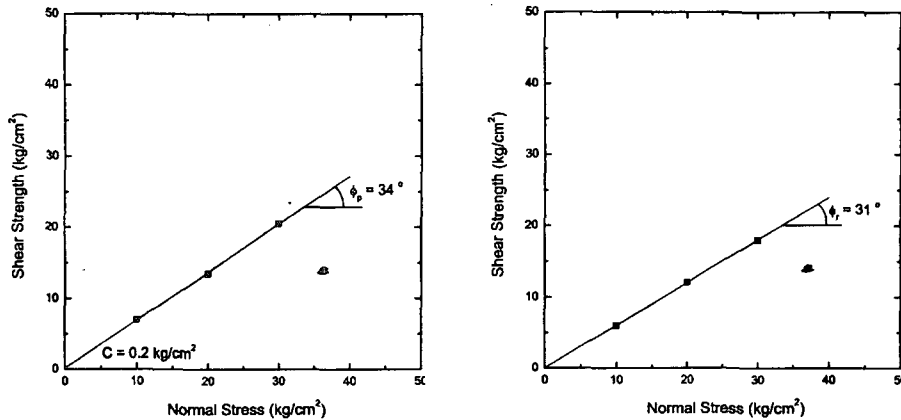


그림 22. 절리면 전단시험결과(잔류강도)

그림 23과 같이 주절리군의 Dip/Dip direction이 40~45/155~175, 35~45/105~120 정도의 절리와 경사를 가지는 검토 대상 사면에서는 평면파괴의 가능성이 매우 클 것으로 해석되었다. 이는 인접도로의 절토사면 및 노두조사 결과에서도 동일한 결과를 나타낸다.

대표적인 사면단면(그림 24)에 대하여 앞의 조사결과를 바탕으로 평면파괴 가능영역을 설정한 후 이에 대한 안전율을 계산한 결과, 건기시는 0.87, 우기시는 0.32~0.62로 모두 불안정한 상태로 해석되었다. 평면파괴는 사면의 대형 붕괴를 유발한다는 점에서 안정성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되어 사면 대책공법 적용시 붕괴발생 가능한 암괴 등을 미리 제거시킬 수 있는 방안이나 보강재를 이용한 공법 등을 적용하는 방안이 필요할 것으로 판단되었다.

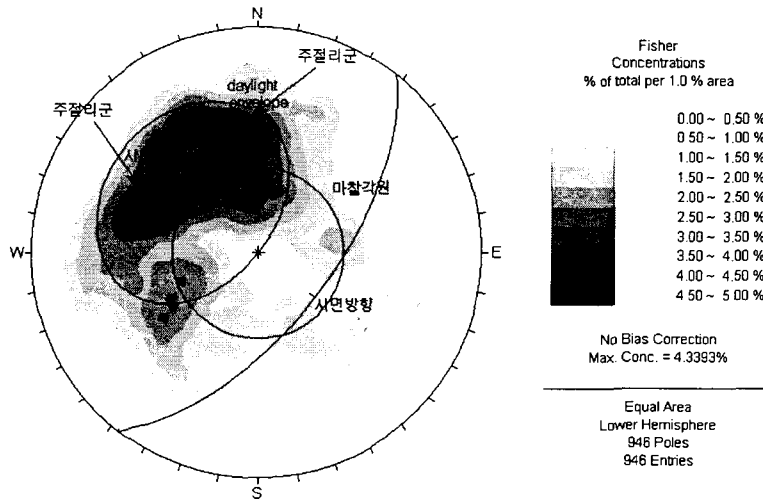


그림 23. BIPS 조사결과에 의한 평사투영법에 의한 사면안정해석결과

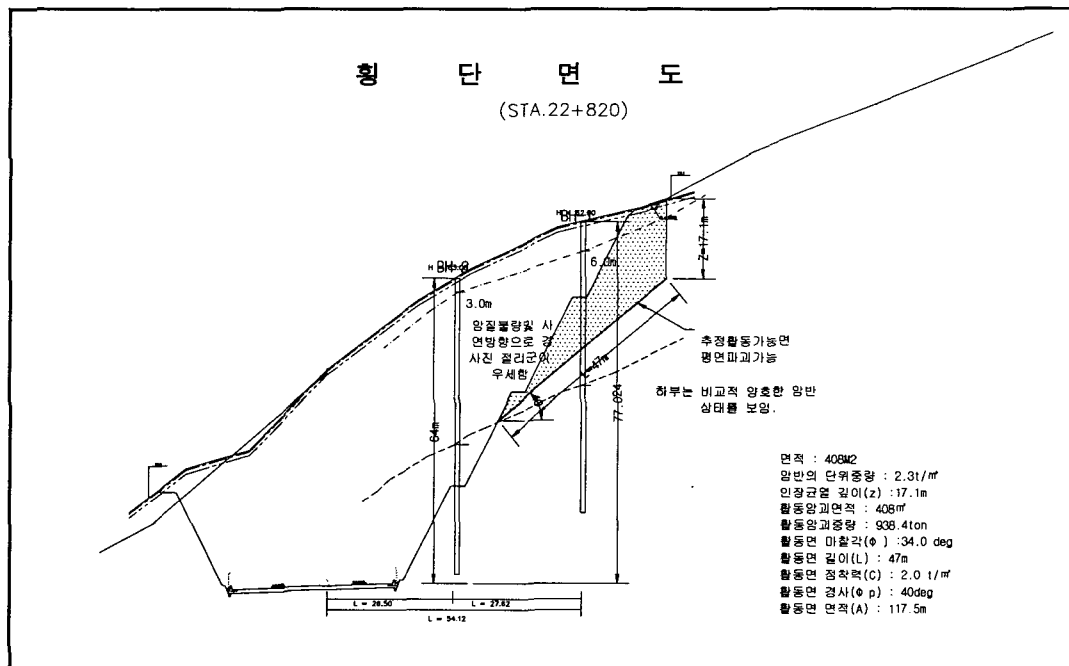


그림 24. 검토사면의 안전율 계산을 위한 해석단면

3.2.4 사면안정대책

사면안정대책으로는 경사완화 방안, 보강방안 및 도로노선 변경방안 등을 검토할 수 있다. 사면의 경사를 완화시켜 안정화시키는 방안은 주절리면의 경사각도 40°(1:1.2)에 맞게 그림 25와 같이 사면을 절취하게 되는데, 이럴 경우 절토사면의 높이가 120m 정도의 장대사면이 형성되고 완화 후에도 40°미만의 절리면에 국부적인 붕괴가능성이 있어 장기적으로 유지관리 및 환경친화적인 측면에서 문제점을 가지고 있다.

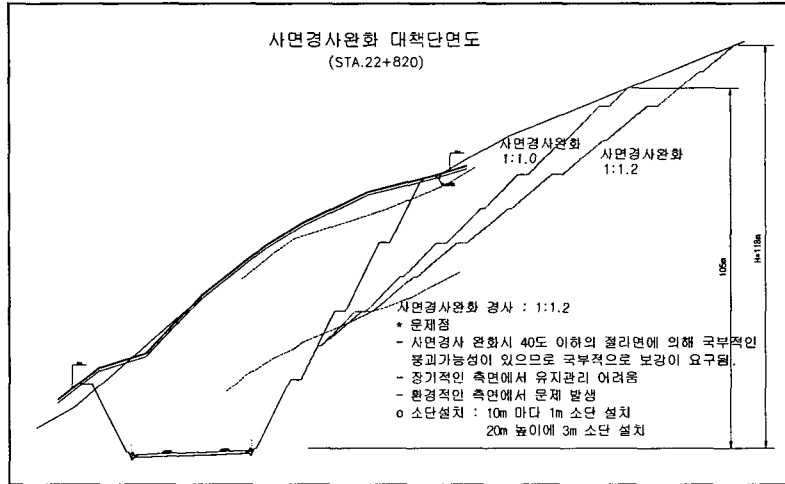


그림 25. 사면경사 완화방안 (1:1.0 ~ 1:1.2)

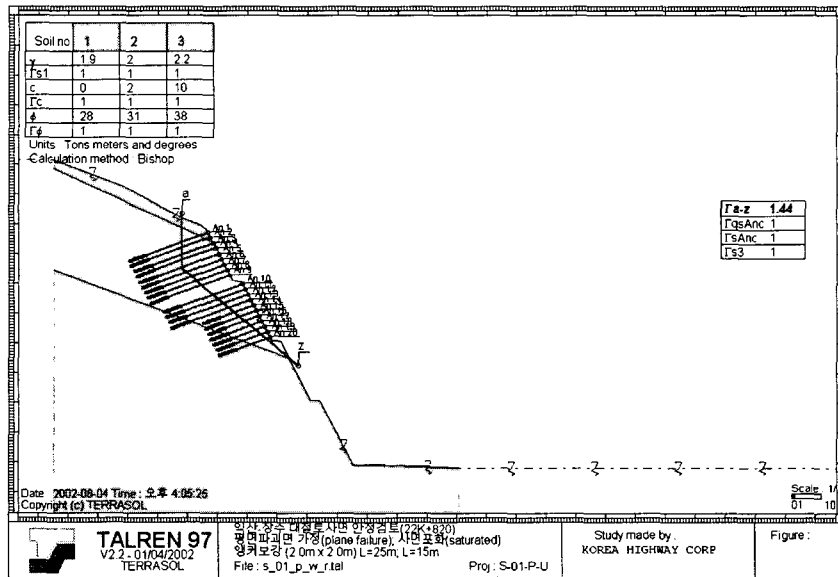


그림 26. 앵커보강후의 안정성 검토 (STA 22+820, 사면포화시, FS=1.44)

사면보강방안으로 적용 가능한 방안으로는 Rock anchor공, nailing공 등이 있으나 현재 추정된 가상파괴면 적용시 활동 토괴 중량이 매우 크고 심도도 깊으므로 적절한 보강방안으로서 심도에 구애받지 않고 보강력도 큰 락앵커를 이용하여 보강하는 방안을 고려할 수 있다. 쏘일네일이나 락볼트는 대규모 평면파괴 가능영역을 보강하기에는 보강가능 심도가 깊지 않고 1분당 보강할 수 있는 크기도 한계가 있으므로 추정한 파괴면의 보강을 위해서 적절한 보강공법으로 고려하기는 어려울 것으로 판단된다.

대표단면에 대한 설계안전을 확보를 위한 앵커의 보강간격을 2.0m×2.0m로 두고, 사면의 최악조건인

포화시에 대하여 앵커길이를 상부에는 30m, 하부에는 18m로 두고 해석을 수행한 결과, 그림 26과 같이 확보되는 안전율은 1.44로서 안정한 것으로 나타났다. 이에 대한 앵커설계제원은 앵커용량 60ton을 적용하는 경우, 앵커길이 상부 30m 13단, 하부 18m 7단, 앵커간격 2.0m×2.0m, 보강위치 : 2소단 상부사면로 검토되었다.

하지만, 현재 설계높이가 80m로 매우 높은 장대사면 구간이므로 장기적인 유지관리측면을 고려하였을 때, 사면안정성 확보를 위해 개착터널 또는 선형을 변경하여 차선분리로 터널을 설치하는 방안도 고려해 보는 것이 적절할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문은 굴착중에 붕괴가 발생한 절토사면과 굴착되지 않은 절토사면에 대하여 BIPS 조사를 실시하여 위험구간을 찾아내고 사면안정해석을 실시하여 대책방안을 제시한 사례를 소개하였으며 결과를 요약하면 같다.

- 1) BIPS 조사는 굴착이 되지 않은 절토사면과 사암, 세일의 퇴적암으로 이루어진 사면에서 층리구조에 의해 뚜렷한 방향성을 보이는 불연속면의 방향을 판단하고 하부에 파쇄대 및 점토층을 가진 구간을 확인하는데 매우 중요한 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 두 사례의 절토사면에서 BIPS 장비의 사용목적으로 CASE I에서는 평면파괴의 가능성을 가지는 점토층을 찾는 데 주안점을 두었으며 CASE II에서는 지표지질조사 자료의 부족을 보완하고 절토사면 내에 분포하는 주 불연속면의 방향을 찾아 사면에서의 주 붕괴가능성을 찾는 데 주안점을 두고 조사하였다.
- 3) 대상 절토사면에서의 BIPS 조사결과에 의하면, CASE I의 붕괴가 발생된 사면에서는 하부의 여러 심도에서 활동면으로 작용할 수 있는 15~20°정도의 경사를 가지는 점토층이 충전된 층리면이 관찰되었으며 CASE II의 굴착이 되지 않은 사면에서는 뚜렷한 방향성을 가진 불연속면이 우세하게 발달하여 전반적으로 굴착이 진행되면 불안정한 사면이 될 것으로 보인다.
- 4) 대상사면에서 CASE I의 경우, 평면파괴의 가능성이 크고 상부에 철타이 위치하고 있어 사면의 경사완화방안을 어려운 상태이므로 철타이의 영향이 없는 구간에서는 경사를 완화하는 방안과 철타이 위치하는 구간에서는 Rock Anchor로 사면을 보강하는 방안을 제안하였다. 그리고 CASE II의 사면은 절토고 80m, 1:0.5 구배 및 40m 상부구간에 4m 길이의 Rock Bolt 로 설계되어 있으나 BIPS 조사결과에 의하면, 사면방향으로 경사진 뚜렷한 주절리면을 가지고 있으므로 사면에 대한 안정대책이 요구되었다.

참고문헌

1. 유병옥, 황영철, 김성환(1998), 시추공 화상처리장치에 의한 사면의 안정성 평가 : '98 사면안정학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp63-79.
2. 大橋敏行, 草深守人(1987), 畫像處理により 岩盤節理情報調査・評価システム開發 : 第19回 岩盤力學に關するシンポジウム講演論文集, pp396-400.
3. 大西有三, 堀田政國, 大谷可郎(1989), 畫像處理システム用いた岩盤割れ目のフラクタル幾何學的特性評價について、土木學會論文集, 第412号/III-12, pp61-68.
4. 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, pp1-5.
5. 龜和田俊一, 遠藤 努, 國分英彦, 西垣好彦(1989), BIPS システムの 装置とその能力について : 第21回 岩盤力學に關するシンポジウム講演論文集, pp196-200.
6. S. Kamewada & H. S. Gi, Taniguchi, H. Yoneda(1990), Application of borehole image processing system to survey of tunnel : Proceedings of the international symposium on rock joints, pp51-57.