

대규모 활동이 예측된 대절토 암반사면의 보강을 위한 지반조사 분석사례

송치용, 이증성, 심성걸, 김주화 (대림산업(주))

1. 서 론

도로공사시 대단면의 절토사면이 생기게 되는 구간의 안정성은 지속적인 도로 기능유지를 위해 중요한 사항이다. 일반적인 사면의 기본설계는 신설되는 도로 노선에 따라 수행된 보링조사 자료를 토대로 이루어지고 있어 보다 상세한 절토사면의 안정성 평가는 절취 시공중 지표지질조사 및 시험등을 통해 불연속면의 특성을 고려한 사면의 안정평가가 이루어지고 있다. 그러나, 절리면의 확인이 어려운 경우나 임의깊이에 파쇄대 구간이 존재하는 경우에는 시공중 안정성 평가가 비교적 쉽지 않을 것이다.

본 연구 대상 사면은 OO도로 확·포장공사 중 조성되는 사면으로 연장이 300m 이고, 최대 사면높이가 80m에 달하는 대절토 사면이다. 총 11개의 소단으로 이루어져 있으며, 전 사면에 걸쳐 Soil Nail공법으로 보강이 되어있다. 사면의 3단 소단부에는 2개의 지중경사계를 설치하여 주기적으로 사면의 수평방향 변위 계측을 수행하였으며, 계측 수행중 제 10 ~ 11 소단 굴착과정에서 20~60mm의 수평방향 변위가 급격히 증가되는 것과 더불어 일부 사면 배면에서 인장균열이 확인되었다. 급격한 거동원인 분석을 위해 1차지반 조사를 수행하였으며, 1차 지반조사는 보링조사 4공, 전기비저항 탐사, BIPS 등을 수행하여 대절토 사면내 활동 파쇄대를 확인할 수 있었다. 1차조사결과, 사면의 영구적인 안정성 확보를 위해 사면경사 완화공법, 락앵커, 억지말뚝 공법등의 기본적인 보강공법 적용으로 사면의 안정성이 확보될 수 있도록 기본계획을 수립하였다. 그리고 사면완화(절취) 공법을 적용하면서 보다 정확한 파쇄대 판정을 위해 보링조사를 수행하였다. 2차조사는 시공중 정확한 파쇄대의 크기와 깊이를 평가하여 적정 보강공법과 물량을 산정하는데 있어 보다 안전하고 경제적인 설계 시공이 될 수 있도록 수행되었다.

2. 대상현장 현황

2.1 현장 개요

본 사면은 그림 1과 같이 최대 높이가 약 80m인 대절토 사면으로 5m 높이마다 소단을 두어 총 11 단계에 걸쳐 사면을 굴착하였으며, 2003년 말부터 사면 굴착을 시작하여 2004년 11월 제 11 소단

굴착을 완료하였다.

사면 상부 총 2개소에 30m 깊이로 경사계를 설치하여 계측을 진행하였으며 제 4 단 굴착단계부터 계측을 시작하였다. 경사계 사이의 간격은 60m이며 계측기 설치 위치는 아래 그림 2와 그림 3과 같고, 단계별 사면 굴착 진행 상황은 그림 4와 같다.

본 현장에 대한 상세현황 및 자료는 “한국지반공학회 2006 사면안정 학술발표회”를 참조바라며, 본 논문에서 현장현황은 개략적으로만 설명하였다.

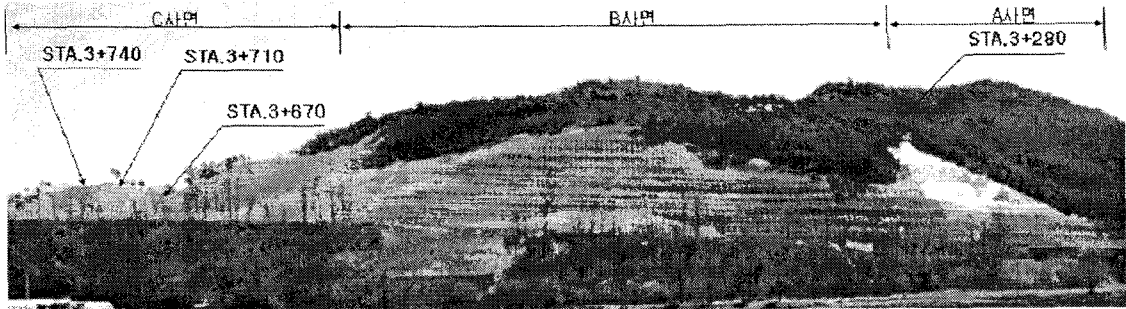


그림 1. 사면전경

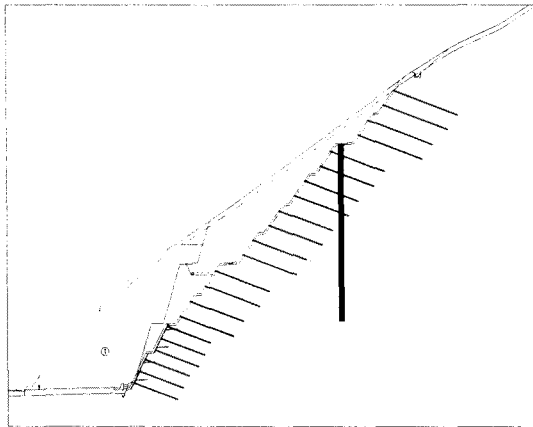


그림 2. 제 1 경사계 위치(STA.3+400)

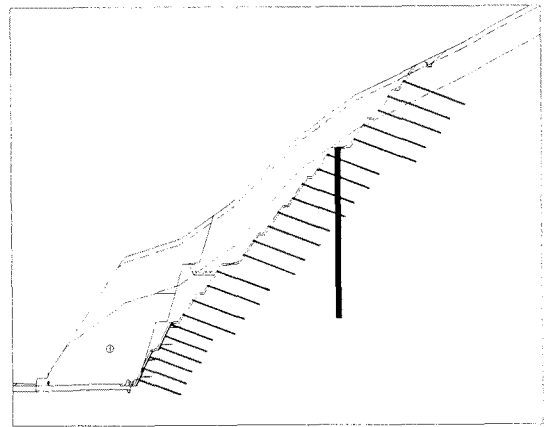


그림 3. 제 2 경사계 위치(STA.3+460)

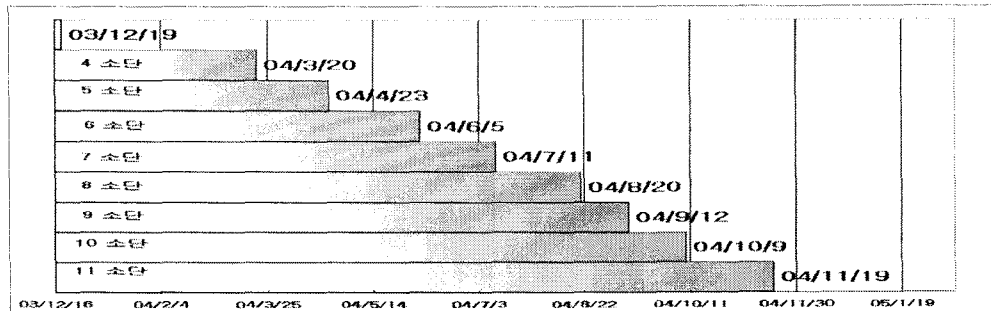


그림 4. 단계별 사면 굴착 현황

2.2 계측 및 균열발생 현황

(1) 사면의 수평거동 계측

단계별 굴착에 따른 사면 거동계측 결과는 그림 5와 같다. 우선 제 1 경사계를 살펴보면 2004-11-02 까지는 굴착단계에 따라 변위가 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 대부분의 변위는 2004-11-02 ~ 2004-11-23 (11소단 굴착) 사이에 발생하여 이 기간 동안 25 ~ 60mm의 변위가 발생하였으며, 이후 동절기를 겪는 동안 약 10mm의 변위가 추가적으로 발생하였다. 전반적인 변위형상을 살펴보면, 5 ~ 10m 깊이에서 갑작스럽게 큰 변위가 유발되었으며, 그 외 다른 위치에서는 최하단부로부터 점진적으로 변위가 증가하는 경향을 보였다. 제 2 경사계의 경우를 살펴보면, 2004년 6월까지 큰 변위가 발생하지 않았으나, 이후 2004년 10월 까지(7~10소단 굴착) 굴착단계에 따라 변위가 증가하고 있음을 알 수 있었다(그림 5). 이후 2004-11-02 ~ 2004-11-23 사이에(11소단 굴착) 45mm 내외의 변위가 발생하였으며, 이후 동절기를 겪는 동안 약 20mm의 변위가 추가적으로 발생하였다. 27m 깊이 이하에서는 변위가 거의 발생하지 않았으며, 25 ~ 27m 깊이에서 변위가 급증하였다. 15 ~ 25m 깊이까지는 점진적으로 증가하며, 그 이상 깊이에서는 거의 비슷한 변위량을 보였다.

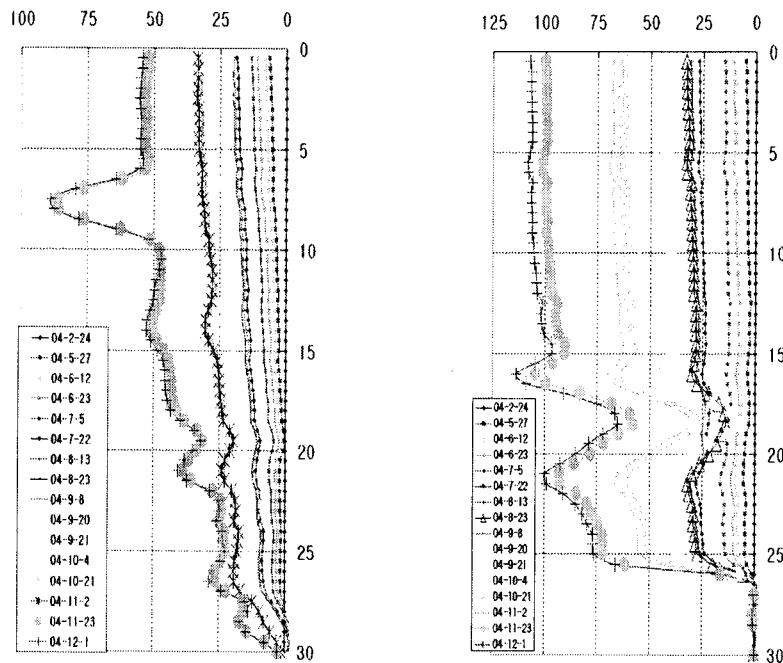


그림 5. 시간별 발생 변위 계측 결과 제 1 경사계(좌), 제 2 경사계(우)

수평 변위가 급격히 증가하기 이전 단계에서는 우기(7~8월)를 거치면서 강우의 영향으로 수평 변위가 증가하였다고 생각할 수 있다. 그러나, 11월에 급격히 발생한 변위의 경우 굴착시기가 강우의 영향이 크지 않은 때이며 변위 증가량이 상대적으로 큰 것을 고려할 때, 그 원인은 굴착으로 인한 응력해방 및 이로 인한 수평 방향 변위 발생, 절취사면 하단부 굴착으로 인한 전체 사면의 활동 발생 때문인 것으로 판단되었다.

(2) 사면부의 균열현황

사면 시점에서 120~140m 후방(절취부 상단에서 60~120m 후방)에 3~10cm 폭으로 80m 이상의

연속적인 균열이 발생된 것을 발견하였다. (2005.4.14) 사면 절취구배는 1:0.7이며, STA.3+200~STA.3+280까지는 보강이 없으며, STA.3+280 위치부터는 SOIL NAIL 로 보강되어있다.

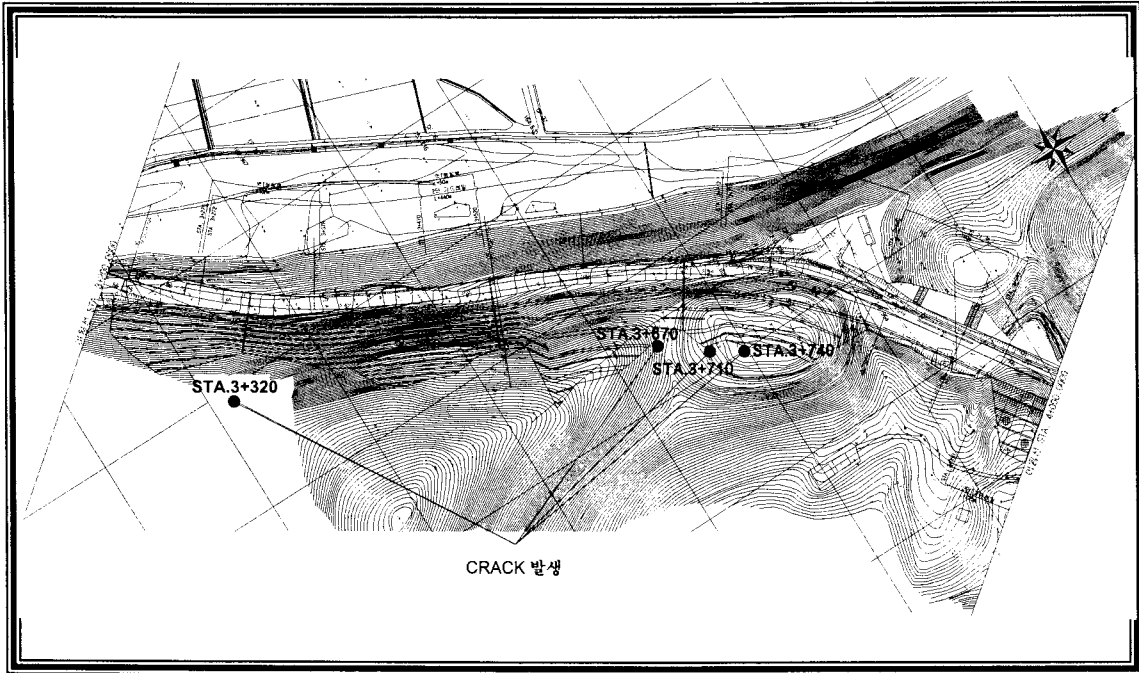


그림 6. 균열발생 위치(평면도)



그림 7. 사면 배면균열(30~100mm, 평지측)

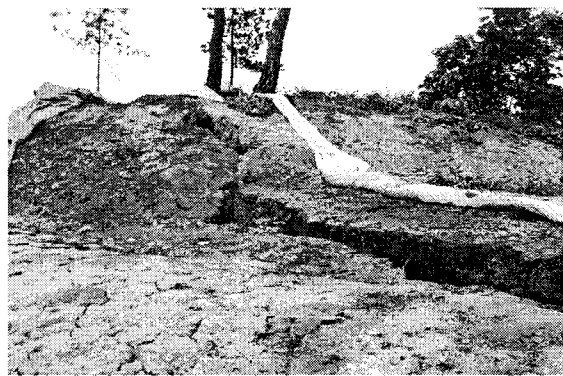


그림 8. 사면 배면균열(산측)

3. 안정성 평가를 위한 지반조사

3.1 시추조사

본 사면의 단층파쇄대에 따른 예상 파괴면과 균열 발생구간을 고려하여 지층 및 기반암의 분포상태, 풍화도, 암질등을 파악하기 위하여 1차조사에서는 4공, 상세설계를 위한 2차 조사에서는 10공의 시추조사를 실시하였다. 시추작업은 유압식 시추기를 사용하여 NX 구경으로 시추하였으며, 공 붕괴방지를 위해 공 붕괴가 없는 암반까지 casing 삽입하여 작업하였으며, 기반암층에서는 코아회수율을

높이기 위해 diamond bit 가 부착된 tripple core barrel 을 사용하여 암석시료를 채취하였으며, 채취된 암석시료에 대해서는 코아회수율(TCR:total core recovery)과 암질표시율(RQD:rock quality designation)을 측정하고, 균열상태를 기재하여 시추주상도에 작성하였다. 각 공별 1, 2차 시추조사 성과는 다음 표 1 ~ 표 2와 같다.

현장조사 및 현장시험을 위한 위치선정은 각 구간별로 파쇄대 및 예상 파괴포락선을 예측할 수 있도록 그림 9와 같이 조사위치를 선정하였다.

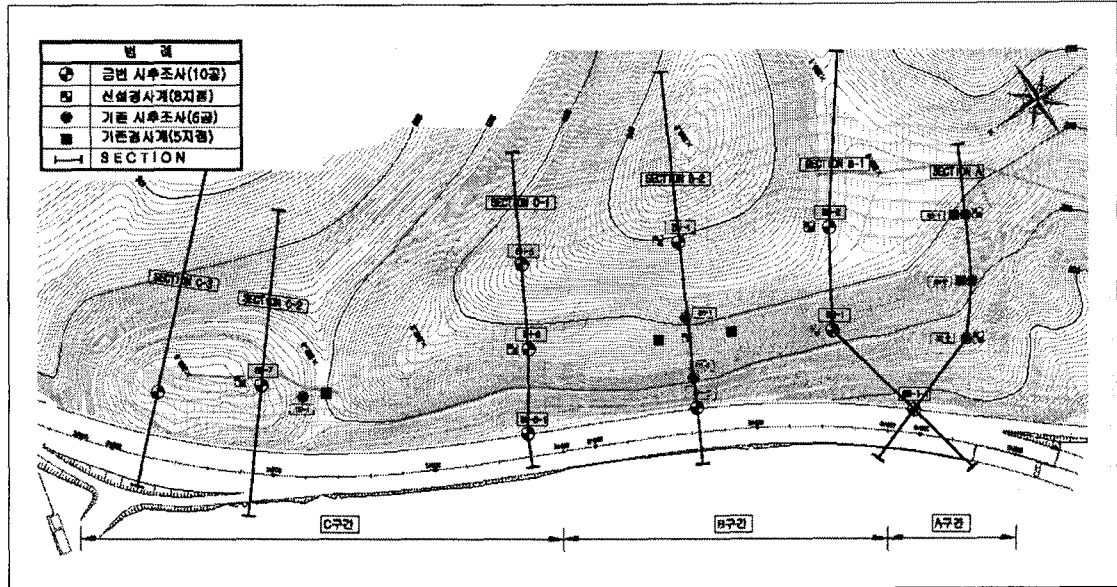


그림 9. 시추조사 위치도

표 1. 1차시추조사 성과표

(단위 : m)

공번	붕적층		풍화토층		풍화암층		연암층		보통암층		경암층		계	비고
	심도	두께	심도	두께	심도	두께	심도	두께	심도	두께	심도	두께		
AC-1	0.0~ 1.4	1.4	1.4~ 8.2	6.8	8.2~ 25.5	17.3	25.5~ 45.5	20.0	45.5~ 51.5	6.0	51.5~ 75.0	23.5	75.0	A사면
AC-2	-	-	0.0~ 9.0, 18.0~ 26.5	17.5	9.0~ 18.0, 26.5~ 33.3	15.8	33.3~ 41.4	8.1	41.4~ 60.5	19.1	-	-	60.5	
BC-1	0.0~ 1.2	1.2	1.2~ 19.5	18.3	-	-	19.5~ 38.0	18.5	38.0~ 51.5	13.5	51.5~ 62.0	10.5	62.0	B사면
CC-1	-	-	0.0~ 10.5	10.5	10.5~ 11.3	0.8	11.3~ 22.0	10.7	-	-	-	-	22.0	C사면

표 2. 2차시추조사 성과표

(단위 : m)

공번	붕적층		풍화토층		풍화암층		연 암 층		보통암층		경 암 층		계	비고
	심도	두께	심도	두께	심도	두께	심도	두께	심도	두께	심도	두께		
BH-1-1	-	-	-	-	-	-	0.0~ 13.0	13.0	13.0~ 18.0	5.0	18.0~ 24.0	6.0	24.0	A사면
BH-1	-	-	0.0~ 14.8	14.8	-	-	14.8~ 38.0	23.2	38.0~ 41.5	3.5	41.5~ 60.0	18.5	60.0	B사면
BH-2	-	-	-	-	-	-	20.0~ 39.0	19.0	39.0~ 46.5	7.5	46.5~ 90.0	43.5	90.0	사 면 절취부 20.0m 굴 진 (B사면)
BH-3	-	-	-	-	-	-	0.0~ 11.5	11.5	11.5~ 19.5	8.0	19.5~ 24.0	4.5	24.0	B사면
BH-4	-	-	-	-	-	-	-	-	35.0~ 42.5	7.5	42.5~ 110.0	67.5	110.0	사 면 절취부 35.0m 굴 진 (B사면)
BH-5	-	-	-	-	-	-	23.0~ 40.5	17.5	40.5~ 49.5	9.0	49.5~ 93.0	43.5	93.0	사 면 절취부 23.0m 굴 진 (C사면)
BH-6	-	-	0.0~ 11.7	11.7	-	-	11.7~ 32.5	20.8	32.5~ 40.0	7.5	40.0~ 60.0	20.0	60.0	C사면
BH-6-1	-	-	-	-	-	-	0.0~ 12.5	12.5	12.5~ 13.6	1.1	13.6~ 22.0	8.4	22.0	C사면
BH-7	0.0~ 1.0	1.0	1.0~ 15.5	14.5	-	-	15.5~ 45.0	29.5	-	-	45.0~ 50.0	5.0	50.0	C사면
BH-8	0.0~ 0.5	0.5	0.5~ 4.2	3.7	-	-	4.2~ 21.0	16.8	21.0~ 29.0	8.0	29.0~ 50.0	21.0	50.0	C사면

3.2 시추공 영상촬영(BIPS)

시추공영상촬영은 공내영상 촬영장치(BIPS; Borehole image processing system)를 이용하여 1, 2차에 걸쳐 지하 암반의 균열상태를 직접 영상(image)으로 촬영하여 확인하므로써 암반내에 발달되어 있는 불연속면이나 균열의 상태(방향, 틈새간격, 충전물유무등) 및 암질특성을 명확하게 규명하여 설계에 반영할 수 있도록 현장조사자료에 대한 다양한 지질정보를 부가할 수 있다. 공내영상촬영에 사용된 장비는 일본 RaaX사에서 제작한 장비로서, 크게 본체(IPRU : Control unit), Cable winch, Probe, Encoder 및 전원공급장치 등의 현장장비 부분과 촬영된 영상을 실내에서 전산 처리하여 해석할 수 있는 Software program으로 구성되어 있으며, 측정 가능한 구경은 $\phi 50\sim 230\text{mm}$ 이고, 심도는 220m까지 측정할 수 있다.

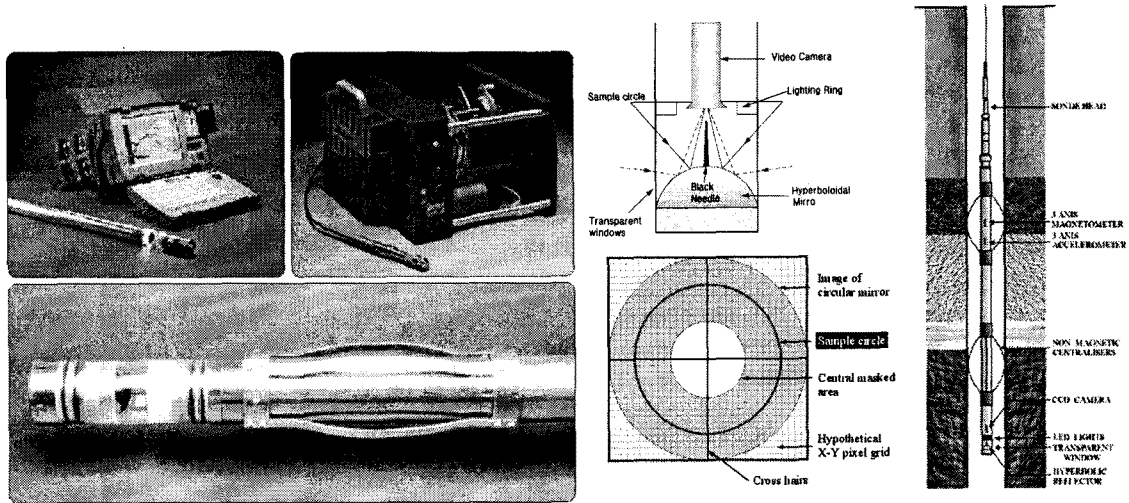


그림 10. BIPS 장비

본 조사지역에서 실시된 시추공에 대하여 시추공영상촬영을 시행하였으며, 각 시추공별 불연속면의 방향성은 다음 표 3과 표 4와 같다.

표 3. BIPS 1차 촬영결과표(Dip direction/Dip)

공 번	전체 불연속면 (All discontinuity)		전체 절리군 (Joint)		파쇄대 (Fracture zone)		광물맥 (Mineral vein)	
	주방향	부방향	주방향	부방향	주방향	부방향	주방향	부방향
AC-1	015/17	022/43	018/19	019/39	-	-	338/46	-
AC-2	356/23	212/43	351/32	212/43	319/47	280/51	161/33	360/28
BC-1	077/59	295/27	331/28	077/58	283/44	018/17	226/30	-
CC-1	307/33	-	317/26	-	302/36	-	-	-

표 4. 2차 BIPS 촬영결과표(Dip direction/Dip)

공 번	전체 불연속면 (All discontinuity)		전체 절리군 (Joint)		파쇄대 (Fracture zone)	
	주방향	부방향	주방향	부방향	주방향	부방향
BH-1-1	300/28	-	298/28	-	311/31	198/51
BH - 2	324/18	272/35	317/19	268/34	335/12	-
BH - 3	273/32	337/50	333/53	058/44	276/32	335/35
BH - 4	273/17	041/13	045/12	269/18	356/25	315/60
BH - 5	192/39	357/25	192/39	064/57	327/28	209/31
BH - 7	291/23	-	293/19	196/27	290/25	-

4. 상세 지반조사 결과 분석

4.1 A사면의 지반특성 분석

1차조사는 기존시추조사(SB-2)와 확인시추조사(AC-1, AC-2) 구간이며, 공내영상촬영은 AC-1, AC-2 지점에서 수행되었다. 시추조사에 의해서는 지층의 구성상태 및 암반의 TCR과 RQD를 평가하였으며, 공내영상촬영(BIPS)에 의해서는 불연속면의 방향성, 불연속면의 간격, 분포양상등을 분석하였다.

AC-1, AC-2 지점의 확인시추조사 결과와 BIPS 결과 비교분석자료는 표 5와 같다.

표 5. 확인시추조사와 공내영상촬영 결과비교(1차조사)

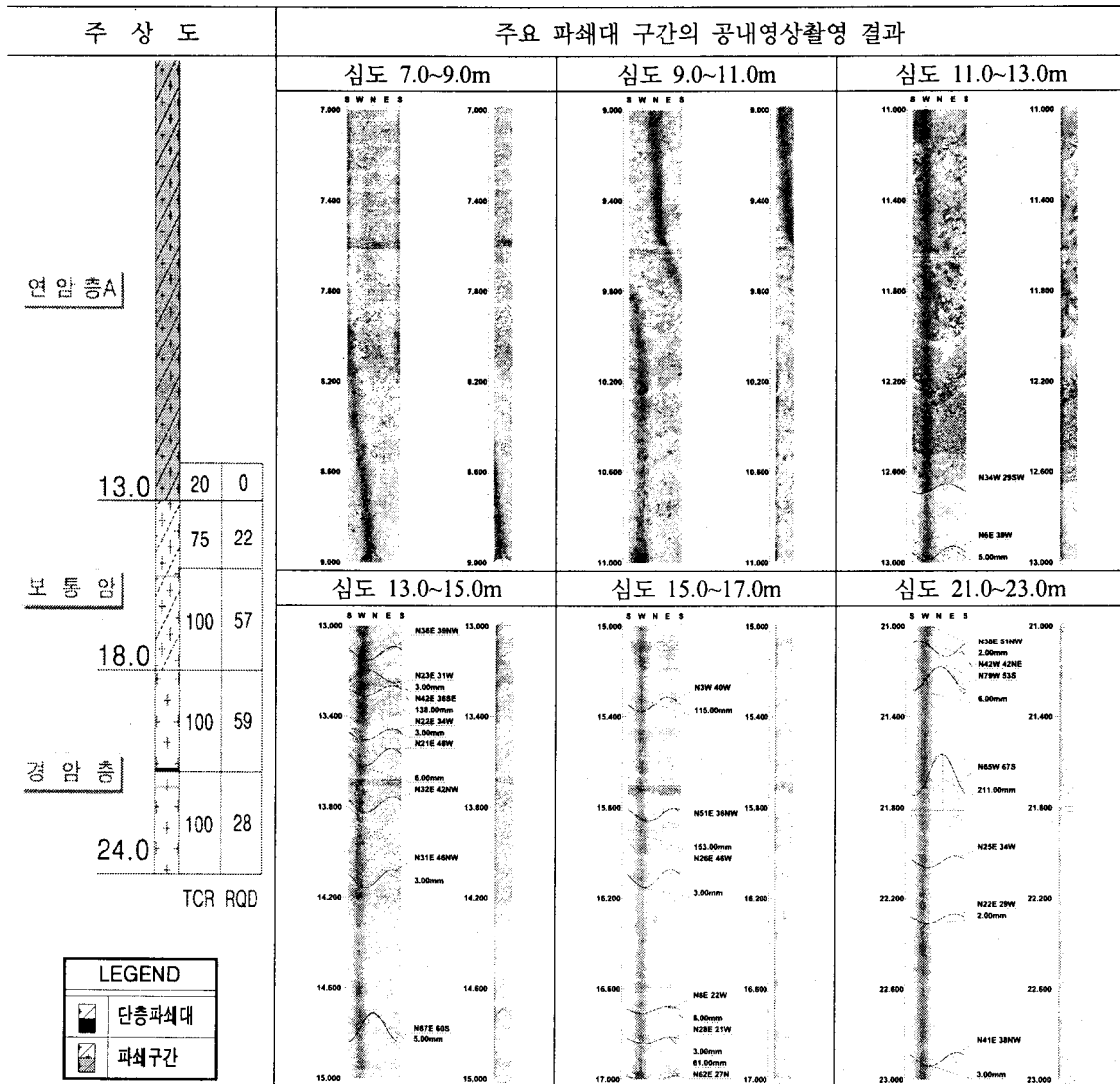
위 치	심 도(m)	확인시추조사	심 도(m)	공내영상촬영
AC-1	25.5~45.5	- 절리, 균열이 심한 파쇄구간 ; TCR=3~60%, RQD=0% - 단층점토 충전구간 ; 25.5~26.0m, 39.4~39.8m 43.6~44.4m	25.5~45.0	- 절리균열이 심한 파쇄대 - 불연속면의 간격 ; 60~600mm - 15/17(Dip direction/Dip)
AC-2	33.3~41.4	- 절리, 균열이 심한 파쇄구간 ; TCR=11.14%, RQD=0% - 단층점토 충전구간 ; 33.3~36.0m, 36.0~41.4m	33.6~37.9 38.9~39.2 41.1	- 단층파쇄대 분포 - 불연속면의 간격 ; 60~600mm - 356/23(Dip direction/Dip)
분석 결과	AC-1 25.5~45.5m 절리, 균열이 심한 파쇄대구간 존재(단층점토 충전) AC-2 33.3~41.4m 절리, 균열이 심한 파쇄대구간 존재(단층점토 충전)			

2차조사는 BH-1-1의 시추조사를 실시하였으며, 공내지하수위는 GL(-) 8.5m 지점인 연암층 내에 분포하는 것으로 측정되었다. 시추조사에 의해서는 지층의 구성상태 및 암반의 TCR과 RQD를 평가하였으며, 공내영상촬영(BIPS)에 의해서는 불연속면의 방향성, 불연속면의 간격, 분포양상등을 분석하였다. BH-1-1 지점의 확인시추조사 결과와 BIPS 결과 비교분석자료는 표 6과 같다.

표 6. 확인시추조사(BH-1-1)와 공내영상촬영 결과비교(2차조사 결과)

파쇄대의 규모 및 방향성 분석(BH-1-1)	
전체 불연속면의 방향성	파쇄대의 방향성

파쇄대의 규모 및 방향성 분석(BH-1-1)



분 석 내 용

- BH-1-1 지점에서 실시한 공내영상촬영 결과, 주요 파쇄대는 심도 0.0~12.7m 지점에 분포하고 있는 것으로 관찰됨
- 단층에 의한 파쇄대는 심도 20.5~20.7m 지점에 분포함
- 시추조사와 공내영상촬영으로 파악된 파쇄대의 분포 심도를 비교한 결과, 매우 일치하는 것으로 나타남

이상과 같이 확인시추조사와 공내영상촬영 1, 2차 조사를 통해 그림 11과 같이 활동 가능성이 큰 사면내 파괴 예상면을 평가할 수 있었다. 1차(당초) 조사시 파쇄대구간은 사면천단부 25.5~45.5m 에 분포하고 중간부에는 33~41m 에 분포되는 것으로 조사되었으나, 금번 2차조사시 1차조사때 비해 지표에서 얇은 부분에 파쇄대 구간이 확인되었다. 이와같이 파쇄대구간이 1차조사때 보다 얇은 부분에 위치한 이유는 사면안정화공법중 사면완화공법(사면절취)을 적용한 후 응력이완으로 인해 기존에 확인되지 못했던 파쇄대구간이 2차 조사시 평가할 수 있었던 것으로 판단된다.

이와같이 활동가능한 파쇄대구간의 정확한 판정은 수치해석시 안정성 판단과 보강방안 변경등이 가능하여 보다 안정적인이고 경제적인 시공이 확보될 수 있도록 할 것이다.

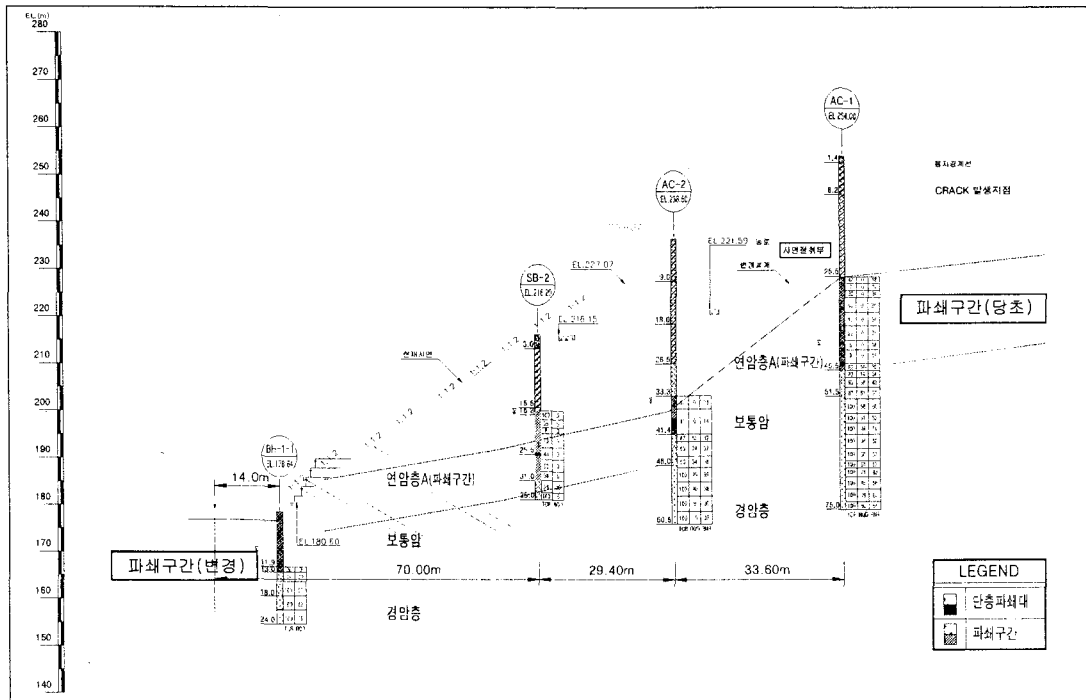


그림 11. A 사면부 보강을 위한 파쇄대 평가

4.2 B 사면의 지반특성 분석

1차조사는 기존시추조사(DB-4)와 확인시추조사(BC-1) 구간이며, 공내영상촬영은 BC-1 지점에서 수행되었다. 시추조사에 의해서는 지층의 구성상태 및 암반의 TCR과 RQD를 평가하였으며, 공내영상촬영(BIPS)에 의해서는 불연속면의 방향성, 불연속면의 간격, 분포양상등을 분석하였다.

BC-1 지점의 확인시추조사 결과와 BIPS 결과 비교 분석자료는 표 7과 같다.

표 7. 확인시추조사와 공내 영상촬영 결과비교(1차)

위치	심 도(m)	확인시추조사	심 도(m)	공내영상촬영
BC-1	19.5~39.0	- 절리, 균열이 심한 파쇄구간 ; TCR=9~67%, RQD=0% - 단층점토 충전구간	19.5~38.0	- 구간파쇄대
	36.4~36.5		45.4m,	- 파쇄대
			47.2~48.2	
			49.8~49.9	
			60.2, 61.4	
	39.9, 50.9,		- 단층파쇄대(점토충진)	
52.5, 53.3,	- 불연속면의 간격; 60~600mm			
57.5	- 77/59(Dip direction/Dip)			
분석 결과	BC-1 36.4~36.5 절리, 균열이 심한 파쇄대구간 존재(단층점토 충전)			

2차조사는 총 4공(BH-1~4)의 시추 조사를 실시하였으며, 결과중 대표적으로 BH-2 지점을 살펴보면 다음과 같다. 본 지점의 지층구성 상태는 현 지표에서부터 기반암이 분포하고 있으며, 공내 지하수위는 GL(-) 30.0m 지점인 연암층 내에 분포하는 것으로 측정되었다. 시추조사에 의해서는 지층의 구성상태 및 암반의 TCR과 RQD를 평가하였으며, 공내영상촬영(BIPS)에 의해서는 불연속면의 방향성, 불연속면의 간격, 분포양상등을 분석하였다. BH-2 지점의 확인시추조사 결과와 BIPS 결과 비교 분석자료는 표 8과 같다.

표 8. 확인시추조사(BH-2)와 공내영상촬영 결과비교(2차)

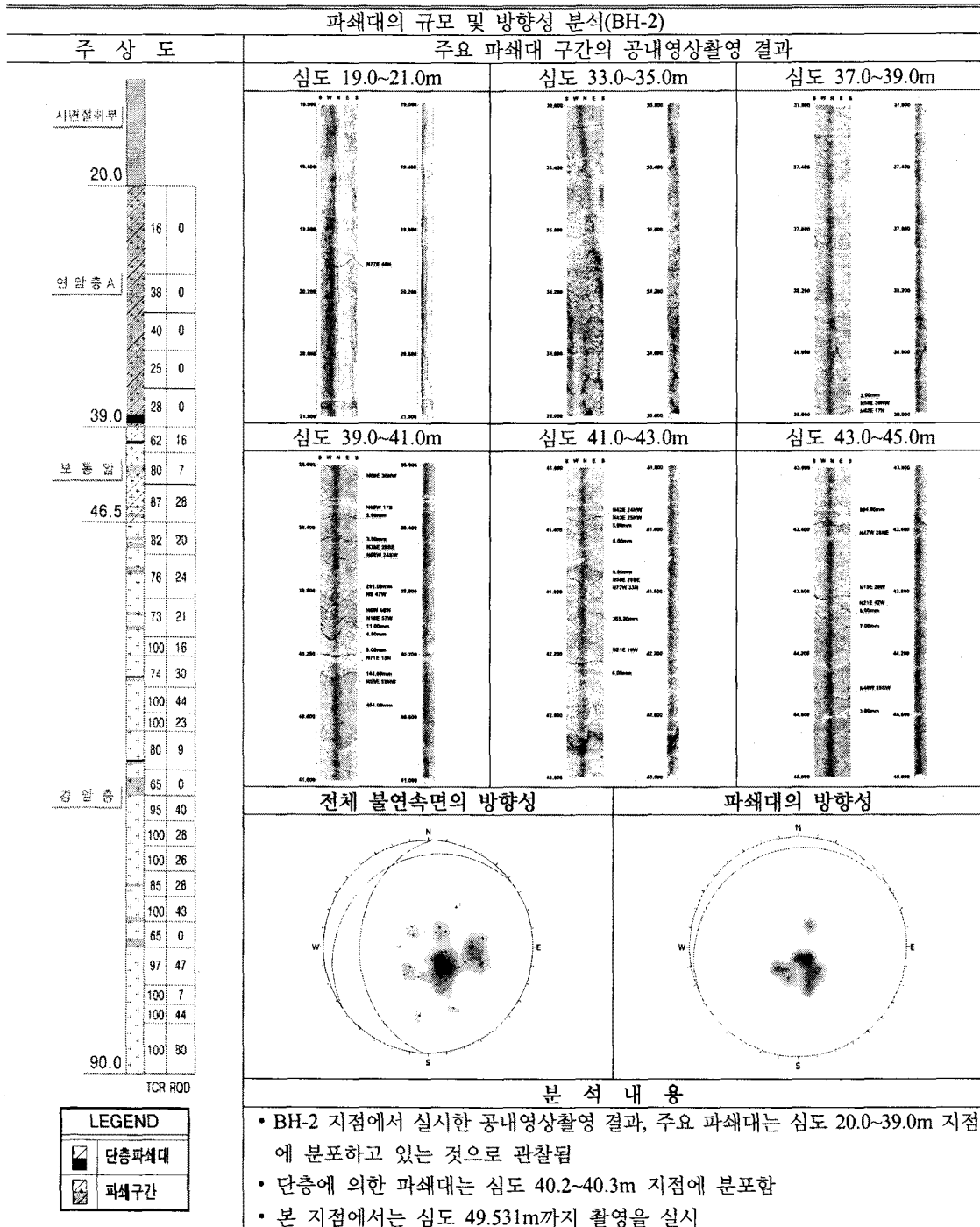
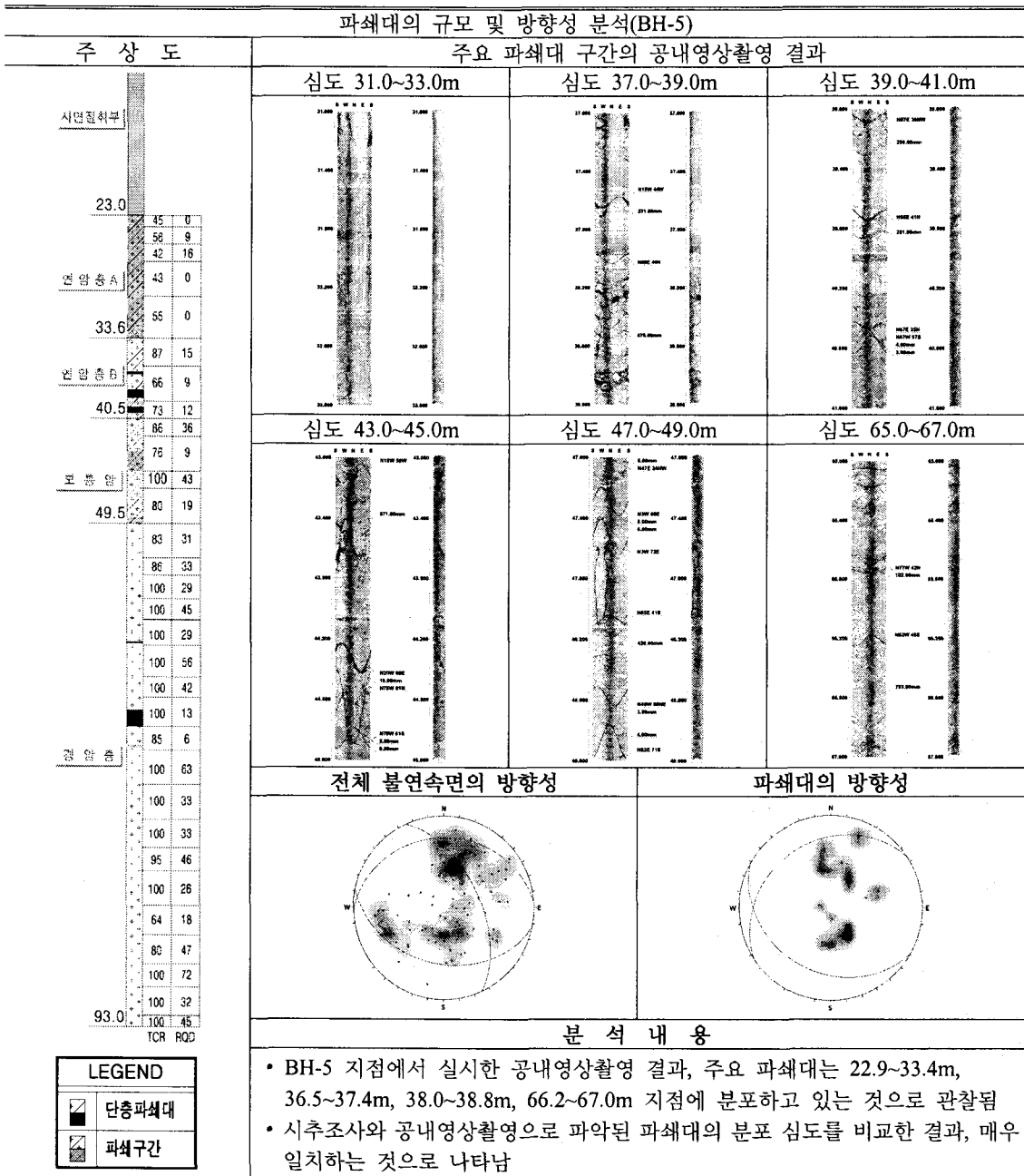


표 9. 확인시추조사와 공내 영상촬영 결과비교(1차)

위 치	심 도(m)	확인시추조사	심 도(m)	공내영상촬영
CC-1	11.3~22.0	- 절리, 균열이 심한 파쇄구간 ; TCR=59~82%, RQD=0% - 단층점토 충전구간	11.2,13.8,	- 파쇄대 분포 - 불연속면의 간격; 60~600mm - 307/33(Dip direction/Dip)
	12.8~13.4		15.4,16.6,	
	14.3~14.8		19.0,19.7,	
	16.6~16.9		21.3m 지점	
분석 결과	CC-1 11.3m 절리, 균열이 심한 파쇄대구간 존재(단층점토 충전)			

표 10. 확인시추조사(BH-5)와 공내영상촬영 결과비교(2차)



이상과 같이 확인시추조사와 공내영상촬영 1, 2차 조사를 통해 그림 13과 같이 활동 가능성이 큰 사면내 파괴 예상면을 평가할 수 있었다. 1차(당초) 조사시 파쇄대구간은 사면천단부 23~30m 에 분포하고 중간부에는 13~20m 에 분포되는 것으로 조사되었으며, 금번 2차조사는 1차조사때와 유사한 심도에서 파쇄대 구간이 확인되었으나, 파쇄대 두께는 약 2배 이상 결과를 나타내고 있다. 이와같이 파쇄대구간이 1차조사때 보다 얇은 부분에 위치한 이유는 사면안정화공법중 사면완화공법(사면절취)을 적용한 후 응력이완으로 인해 기존에 확인되지 못했던 파쇄대구간이 2차 조사시 평가할 수 있었던 것으로 판단된다.

이와같이 활동가능한 파쇄대구간의 정확한 판정은 수치해석시 안정성 판단과 보강방안 변경등이 가능하여 보다 안정적이고 경제적인 시공이 확보될 수 있도록 할 것이다.

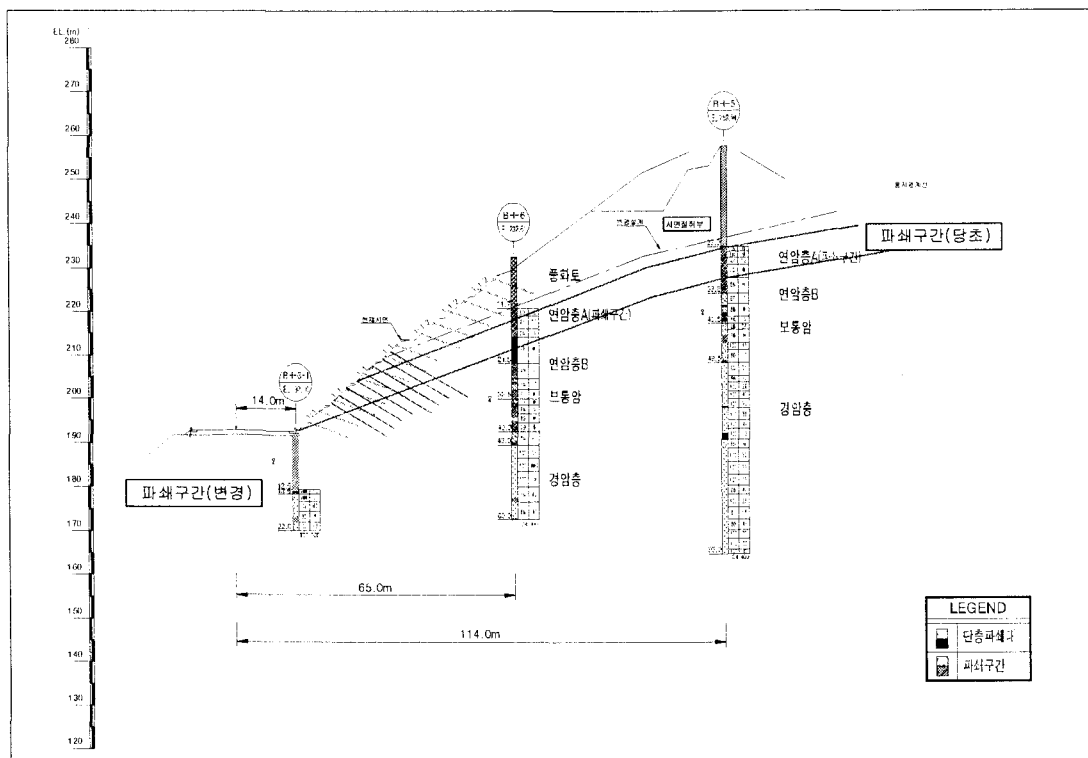


그림 13. C 사면부 보강을 위한 파쇄대 평가

5. 결 론

본 연구에서는 대절토 사면내에 파쇄대구간이 존재하여 지표지질 조사에서도 뚜렷한 구조적인 특징이 나타나지 않는 대절토 사면에 대하여, 안정성에 문제가 되었던 원인을 판단하기 위한 1차 지반 조사와 상세설계 및 시공중 안정성 평가를 위한 2차지반 조사에 대한 사례분석이 수행되었으며, 분석한 결과는 아래와 같다.

- (1) 대절토 사면의 과대한 수평변위 원인을 평가하기 위해 1차지반 조사는 보링조사, 전기비저항탐사, BIPS등이 수행되었으며, 조사결과 절취사면내 활동 가능성이 있는 파쇄대를 확인할 수 있

었다. 1차지반 조사에 의한 활동면을 수치해석시 가정 파괴면으로 적용하여 적절한 보강공법을 선정할 수 있었다.

- (2) 1차조사를 통해 사면의 영구적인 안정성 확보를 위해 사면경사 완화공법, 락앵커, 역지말뚝 공법이 선정되었으며, 시공시 락앵커의 정확한 정착장 길이 산정과 역지말뚝의 근입장등의 보강물량을 안전하고 경제적으로 산정하기 위해 보다 정확한 파쇄대의 크기와 깊이 평가가 필요하였으며, 이를 위한 2차상세 지반조사를 수행하였다.
- (3) 2차지반 조사결과, 1차조사와는 다른 파쇄대가 평가되었으며, 이는 사면완화 공법 적용시 굴착에 따른 지반응력 이완등의 원인으로 파쇄대의 형상과 깊이가 다르게 나타났으며, 이와같은 정확한 파쇄대 규모 확인이 시공중 안정성 확보와 경제적인 설계 시공을 위해 효과적인 조사사례임을 알 수 있었다.

■ 참고문헌 ■

1. 황의석, 송치용, 이종성(2006), 지반조사 분석을 통한 대절토사면의 임계활동면 평가사례, (사)한국지반공학회 사면안정 학술발표회 논문집.
2. (사)한국지반공학회(1997), 지반공학시리즈 5 사면안정, 구미서관.
3. (사)한국지반공학회(2000), 지반공학시리즈 11 토목기술자를 위한 암반공학, 구미서관.
4. (사)한국지반공학회(2002), OO도로 확장 및 포장공사중 사면안정대책 연구보고서.
5. (사)대한토목학회(2005), OO도로 확포장공사 구간 대절토부 사면안정성 검토 보고서.
6. (주)브니엘컨설팅(2003), OO도로 확장 및 포장공사중 사면안정대책 연구보고서.
7. (주)라운이엔지(2005), OO도로 확장공사중 대절토부 지반조사보고서.
8. (주)라운이엔지(2006), OO도로 확장공사중 대절토부 지반조사보고서.