

# 편암 및 편마암 파쇄대에 의한 사면파괴 보강 설계 사례



엄재경  
(주)대한지오이앤씨 대표이사  
(hansabalok@yahoo.co.kr)

## 1. 개요

최근 지속적인 노력으로 토목기술은 해를 거듭할수록 발전하고 있다. 좁은 국토를 효율적으로 활용하기 위한 사면 절취는 환경파괴 논란속에도 불가피하게 수행해야 되는 기본적인 과정으로 인지하고 있다. 특히 도로 및 터널, 택지조성 등 대부분 토목분야의 필수 불가결한 공정으로 시공현장에서 많은 사면절취가 이루어지고 있다. 이러한 사면절취 현장에서 발생하는 대부분의 문제는 충분한 지반조사 없이 설계되어 시공되는 현장이 주를 이루고 있다. 사면설계시 충분한 지반조사를 수행하여 사면을 구성하고 있는 지반의 특성을 파악하여 설계하는 것은 현실적 여건에 의해 매우 어려운 것이 사실이다. 그러나 최근 많이 수행되는 턴키프로젝트의 경우 기존 설계시 적용된 지반조사 비용보다 많은 조사비를 책정함으로써 많은 기술적 발전이 이루어지고 있다. 하지만 대형 국책프로젝트 및 고속도로, 국도, 신도시조성 등 국가기관이 주관하는 공사가 아닌, 민간주도사업의 경우 열악한 제정조건 및 사업자의 인식부족에 따라 최소 비용에 의한 지반조사 결과를 활용하

여 설계를 수행할 수밖에 없는 것이 작금의 현실이다.

본 설계사례는 경기도 파주시에 건립된 파주영어마을 건립공사 부지조성 중 발생한 사면파괴사례에 대한 안정 검토를 통하여 얻어진 설계사례를 소개하고자 한다.

## 2. 사면현황

본 공사는 경기도지방공사가 발주하여 (주)한진중공업



그림 1. 과업 위치도

이 시공한 공사로 사면보강설계 및 시공은 지암컨설턴트(주)와 (주)대한지오이엔씨에서 수행하였다. 사면검토 구간은 운동장 및 체육관 인접사면으로 길이 200m, 사면높이는 계획고를 기준으로 최대 30m정도이다. 본 과업의 현장 위치는 그림1과 같다.

## 2.1 검토사면 설계현황

본 설계구간은 No.C-4~No.C-14이며 파괴가 발생한 구간은 No.C-6~No.C-9구간 약 60m정도이다. 검토구간 평면도 및 대표횡단면도는 그림 2와 그림 3과 같다.

## 2.2 검토사면 파괴현황

사면 절취시 파괴가 발생한 No.C-6~No.C-9구간전경은 그림 4와 같으며 사면절취 중 소단3, 소단4에서 인장균열이에 의한 사면파괴가 발생하였다.

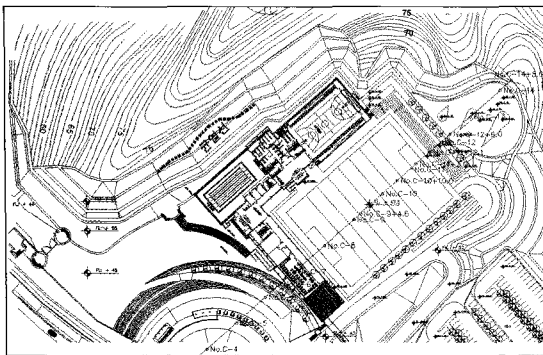


그림 2. 검토구간 평면도

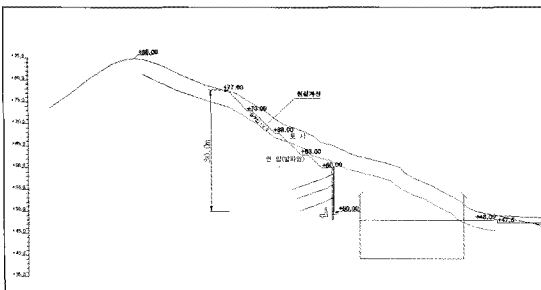


그림 3. 대표횡단면도(No.C-9)

## 3. 사면파괴 원인분석

### 3.1 지반조사

본 사면안정검토를 수행하기 위하여 사면파괴구간 현장조사 및 지반조사(NX9공)를 수행하였다. 시추조사 위치는 그림5와 같다.

#### 1) 지형 및 지질

본 조사지역의 지형 및 지질은 그림6 지질도와 같이 행정구역상 경기도 파주시 탄현면 법흥리 일원에 해당하며, 경기육괴의 최서단으로 한강과 임진강 합류부의 남동부에 위치한다. 본 지역은 풍화작용이 많은 편암 및 편마암의 변성암으로 대부분 구릉지를 이루고 있다. 조사지역 전역에 넓게 분포하는 선캠브리아기의 변성암류와 이들을 관입한 화성암류로 대별할 수 있으며, 이들을 모두 덮고 있는 충적층이 하천을 따라 분포하고 있다. 조사지역에 분포하는 선캠브리아기의 변성암류들은 과거에 연천계로 불리우던 암

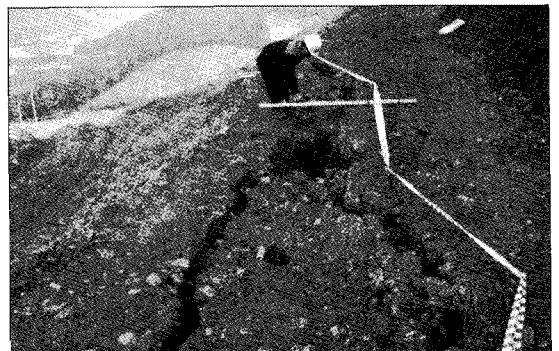
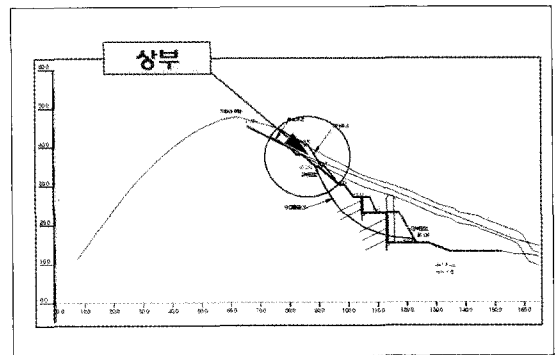


그림 4. 사면파괴단면 및 현황(상부인장균열)

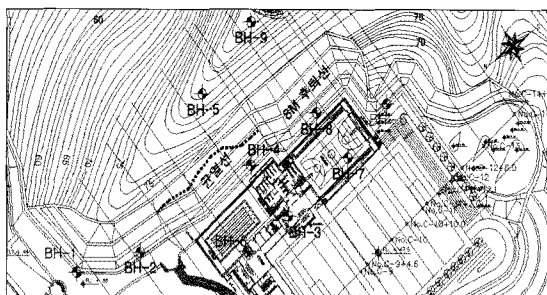


그림 5. 지반조사 위치도



그림 6. 조사지역 지질도

층으로서 지금의 경기변성암복합체로 명명되었다. 경기편마암복합체내에는 각섬암류가 분포하는데 이들은 각기 화성기원의 압과 퇴적기원암으로 분류할 수 있으며 본지역에서는 편암류인 운모편암 및 석영편암으로 나타나고 있다.

표 1. 구성지층특성

구분	지층 특성
표토층	<ul style="list-style-type: none"> <li>BH-3, 6, 6-1, 7공에서 0.1~0.5m의 두께로 분포</li> <li>구성은 양면적인 실트질 모래</li> <li>담갈색이며 습윤한 상태</li> <li>작업로 조성시 매립</li> </ul>
풍화토	<ul style="list-style-type: none"> <li>BH-2, 5, 7, 9번공을 제외한 모든공에서 나타나며 1.7~4.3m의 두께로 분포</li> <li>기반암의 완전풍화 상태이며 실트질 모래로 구성</li> <li>갈색 내지 담갈색이며, 습윤한 상태</li> <li>N치는 30/30~50/12으로 조밀~매우조밀한 상대밀도</li> </ul>
풍화암	<ul style="list-style-type: none"> <li>BH-1, 2, 7번공을 제외한 모든공에서 나타나며 0.4~2.5m의 두께로 분포</li> <li>기반암의 심한풍화 상태로 굴진시 실트질 모래로 분해</li> <li>갈색 내지 담갈색이며, 습윤한 상태</li> <li>N치는 50/9~50/2으로 매우조밀한 상대밀도</li> </ul>
연암	<ul style="list-style-type: none"> <li>BH-6-1번공을 제외한 전공에서 나타나며 지표로부터 2.6~6.8m에서 출현</li> <li>약간풍화~완전풍화의 편암, 강도는 약함~강한 상태임</li> <li>부분적 절리와 파쇄가 발달로 암편상-단주상 코어로 회수</li> <li>T.C.R은 19~100%이고, R.Q.D는 0~46%</li> </ul>
보통암	<ul style="list-style-type: none"> <li>BH-5, 9번공에서 나타나며 지표로부터 12.0~15.2m에서 출현</li> <li>보통풍화~심한풍화의 편암, 강도는 약함~강한 상태임</li> <li>편리를 따라 절리 및 파쇄 발달로 암편상-단주상 코어로 회수</li> <li>T.C.R은 34~90%이고, R.Q.D는 0~44%</li> </ul>

## 2)지층구성

지반조사결과 지표면으로부터 표토층, 풍화토층, 풍화암층, 연암, 보통암층으로 구성되어 있으며, 지층별 특성은 표 1과 같다.

검토 사면의 지반구성은 상부 표토층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층으로 구성되었으며, 표토층 및 풍화대( 풍화토 및 풍화암)의 분포는 2.3m~7.3m 두께로 조사되었으며 완전풍화 상태를 보이고 있다. 풍화대 하부 기반암인 연암의 경우 전형적인 편암의 공학적 특성이 나타나고 있으며 시추종료심도까지 완전 풍화된 풍화대가 교차하고 있다. 연암층의 상부는 다소 절리가 발달하였지만 양호한 상태를 보이나, 하부에는 편암의 편리내 파쇄 대층이 교차하며, 부분적으로 완전 풍화된 풍화대가 나타나고 있다. 연암의 분포는 풍화대 하부에서 2.3m~7.3m부터 시추종료심도까지 약 5.2m~11.6m 정도의 두께로 분포하고 있다. 연암의 T.C.R은 19~100%, R.Q.D는 0~46% 정도를 보이고 있다. 사면검토시 상부 인장균열이 발생한 구간중 대표단면 No. C-9의 횡단면도는 그림 7과 같다.

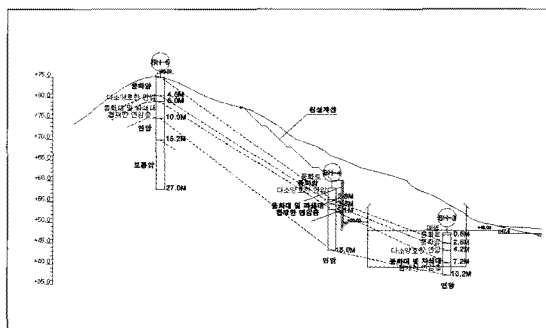


그림 7. 사면파괴구간 대표단면 (No. C-9)

### 3.2 파괴원인분석

사면파괴가 발생한 No. C-6~No. C-9검토 사면의 경우 3소단 및 4소단에서 인장균열이 발생하였으며, 인장균열의 폭은 0.3m~1.0m 이상, 인장균열깊이는 풍화대 하부까지 발생한 것으로 추정된다. 사면파괴구간과 가장 인접하여 실시한 지반조사 결과, 시추주상도 BH-4의 경우 약 3.8m까지 풍화대가 나타나며, 풍화암의 모양은 편암으로 굴진시 암편 및 모래질실트로 분해되며 차별풍화로 인해 부분적으로 연암상태의 원암이 나타나기도 한다. 본 풍화대층은 절취시 풍화가 심화되며 공학적으로 불안정 상태를 나타내고 있다. 풍화대 하부 연암의 경우 약 3.8m~15.0m까지 11.2m정도의 두께로 분포하며, 시추결과 심도 4.8m~6.8m, 심도 7.0~8.5m, 심도 8.9m~10.5m, 심도 11.8~15m에서 실트질모래, 점토질 실트가 반복적으로 협재된 풍화대가 나타나고 있다. 사면의 파괴는 상부 풍화대(풍화토 및 풍화암)와 연암사이에서 발생하였으며 이는 굴착에 따른 원지반 응력상태의 해방 및 절취후 우수유입에 의해 풍화대와 연암 경계면의 전단강도가 급속히 감소되어 파괴가 발생한 것으로 판단된다.

연암하부 파쇄대 및 풍화대의 경우 절리의 경사가 약 22°~45°로 발달되어 있으며, 사면경사완화(1:2.0)시 사면 절취 경사각은 26.6°로, 일부구간은 추가 슬라이딩의 가능성이 내재되어 있는 것으로 판단된다. 따라서 사면파괴의 원인으로 작용할 수 있는 편암의 절리면은 경사완화 후 노출상태와 분포상태에 따라 네일에 의한 부분 보강을 실시하여 안정성을 확보하여야 할 것으로 판단된다.

## 4. 사면보강대책검토

### 4.1 적용공법비교검토

보강대책 선정에 있어서는 사면의 불안정 원인을 파악하고 경제성, 시공성을 고려하여 그 원인에 대처하는 적극적인 대책을 수립하는데 주요점을 두어야 하며, 현장조사 및 지반조사, 사면안정 검토를 토대로 불안정구간으로 판정

된 사면에 대하여 사면의 안정성, 미관, 유지보수, 현지조건 등을 충분히 고려한 후 최적의 보강대책을 선정하여야 한다. 본 과업구간의 보강대책은 위에서 기술된 조건들을 기준으로 본 현장 적용성이 있는 다음의 3가지 공법을 표2와 같이 비교, 검토하였다.

본 사면에 대한 보강대책 비교, 검토 결과 사면내 연암내 풍화대 및 파쇄대구간을 절취하여 제거함으로써 근본적으로 안정화를 시키는 공법인 8M 이격(기존사면시점부가 체육관 건물과 약 2.0m이격되도록 설계됨)후 경사완화(풍화토, 풍화암, 연암=1:2.0)+네일 부분보강공법이 안정성 및 시공성, 경제성에서 우수한 것으로 검토되어 최종보강공법으로 결정되었다.

### 4.2 사면안정해석

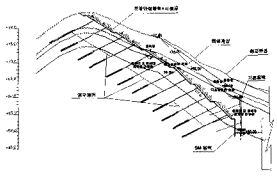
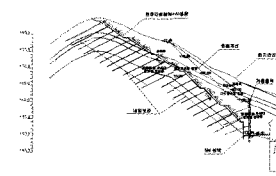
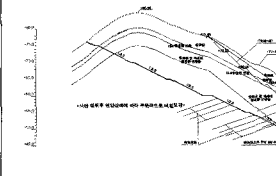
최종보강공법으로 결정된 경사완화후 네일보강공법에 대하여 사면안정해석을 실시하여 안정여부를 검토하였다. 본 사면안정해석에 사용된 프로그램은 사면안정해석 범용 프로그램인 COSTANAK(application of COmposite slip surfaces for STability ANAlysis)으로 임의형상 사면의 안정계산, 원호사면, 복합(비원형)사면, 사면앵거, 네일링보강, 사면역지막쌓, 성토사면, 연약지반개량 S.C.P 시공 사면의 안정성을 계산하는 프로그램을 사용하여 안정해석을 수행하였다.

#### 1) 해석조건

사면보강 안정성 검토에 적용된 단면은 사면파괴가 발생한 구간의 경우 사면경사 1:2.0 구간의 No. C-9 구간에 대하여 대표 단면을 선정하여 경사완화 보강후 해석을 건기와 우기로 나누어 수행하였다. 사면파괴가 발생한 구간은 1:2.0로 경사완화하였으며, 사면파괴 원인분석에서 언급하였듯이 시공중 절취연암의 상태에 따라 부분적으로 사면보강 여부를 결정하도록 하였다. 사면안정해석은 다음과 같이 수행되었다.

- 파쇄대 및 풍화대를 포함한 사면 안정성해석(건기,우기)
- 양호한 기반암(연암)사면 안정성해석(건기,우기)

표 2. 적용공법비교

구분	제 1 안 : 경사완화+사면보강	제 2 안 : 경사완화+사면보강	제 3 안 : 경사완화
공법명	8M 이격후 경사완화+영구앵커 현장타설격자블럭+식생공 (풍화도, 풍화암=1:1.5, 연암=1:1)	8M 이격후 경사완화+네일보강+ 현장타설격자블럭+식생공 (풍화도, 풍화암 =1:1.5, 연암=1:1)	8M 이격후 경사완화 (풍화도, 풍화암, 연암=1:2.0) +네일부분보강
공법 개요	 절취후 불안정 구간에 대하여 지반을 격자 보와 앵커로 보강하는 공법으로 암반사면 붕괴시 프리스트레스를 가하여 붕괴를 억 지하는 공법으로 토사사면보다는 암반사면 에 적합한 공법	 절취후 불안정 구간에 대하여 원지반을 네 일보강하는 공법으로 사면표면의 부분탈락 이 발생하는 것을 방지하기 위하여 현장타 설격자블럭과 병행하여 시공하고 현장타설 격자블럭내에 녹생토 로 주위환경과의 조 화를 고려한 공법	 사면내 불안정 구간을 절취하여 제거함으 로서 근본적으로 안정화를 시키는 공법 절취후 연암의 상태에 따라 부분적으로 네 일보강이 필요(절취후 제반사항 검토후 보 강여부 결정)
장 · 단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 프리스트레스를 가하여 붕괴역지력이 큼</li> <li>• 격자블럭이나 버트리공과 병행하여 시공 함으로써 표층역력 우수</li> <li>• 장기간 시간경과시 프리스트레스 손실로 인한 안전성 다소 감소</li> <li>• 토사사면보다 암사면에서 효과 우수</li> <li>• 미관이 다소불량</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 원지반 보강 공법으로 지반보강효과 우수</li> <li>• 격자블럭 병행시공으로 표면탈락방지</li> <li>• 경제성이 다소불리하고 공정다소 복잡</li> <li>• 미관이 다소 불량</li> <li>• 가시적인 사면경사도 급경사로 불안감조 성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 근본적인 안정 확보</li> <li>• 미관이 양호하며 불안정감 해소</li> <li>• 사면상부 부지확보</li> <li>• 도공량 증가</li> <li>• 네일보강으로 공기 다소 연장</li> </ul>
직접공사비	30.5억원(사면전체보강)	39.3억원(사면전체보강)	27.8억원 (사면전체경사완화, 부분보강)
채택안			◎

2) 지반조건

활동 발생 토층의 지반강도 정수는 파괴 단면의 역해석을 수행하여 산정하였다. 역해석시 지하수위는 무시하며 건기시 안전율 0.9~1.0에 해당하는 전단강도를 산정한다. 역해석 결과 건기시 안전율 0.9~1.0의 분포를 보이는 지반 정수는 점착력  $c=0.0 \text{ kg/cm}^2$  일 때 내부마찰각  $\phi=28^\circ$  로 해석되었다. 사면해석에 적용된 지반정수는 표3와 같이 역해석결과, 지반조사결과 및 경험값을 참조하여 결정 하였다.

표 3. 해석시 적용된 지반물성치

구분	$\gamma_c(t/m^3)$	$C(t/m^2)$	$\phi(^{\circ})$
파쇄대포함 연암사면	2.1	0	28
양호한 연암사면	2.1	10	35

3) 해석단면

사면파괴가 발생한 구간 중 지반조사를 실시한 결과 파쇄대를 포함한 단면과 파쇄대를 포함하지 않는 양호한 기반암 단면으로 구분되어 해석시 이를 구분하여 사면안정 해석을 실시하였다. 사면경사 완화구간(1:2.0) 평면도는 그

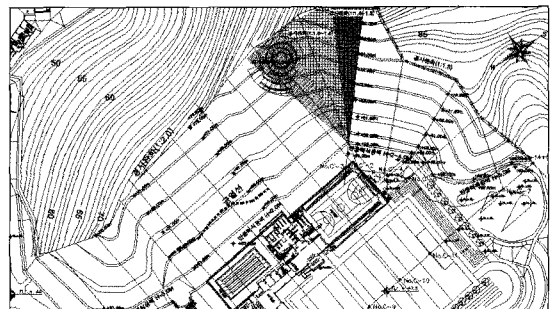


그림 8. 검토구간 평면도

## 편암 및 편암암 파쇄대에 의한 사면파괴 보강 설계 사례

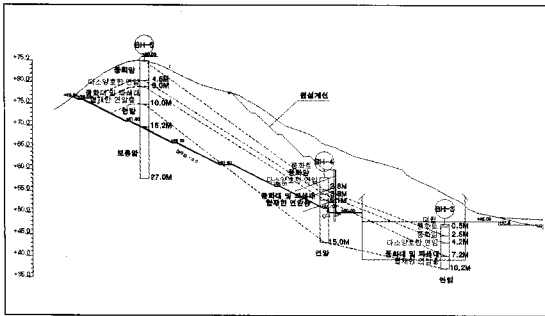


그림 9. 해석단면1(1:2.0구간/파쇄대포함/No. C-9)

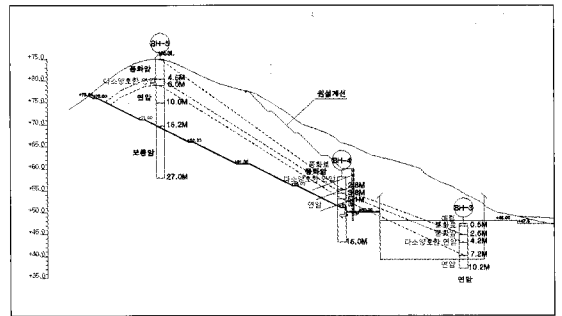


그림 10. 해석단면2(1:2.0구간/양호한연암구간/No.C-9)

### 표 4. 사면경사 완화후 사면안정해석결과

구 분	해석 안전율		검토결과
	건기	우기	
경사완화 1:2.0	파쇄대 포함 기반암 1.383	0.945	불안정
	양호한 기반암 1.932	1.528	안정

림8과 같고 대표단면은 각각 그림 9~그림 10과 같다.

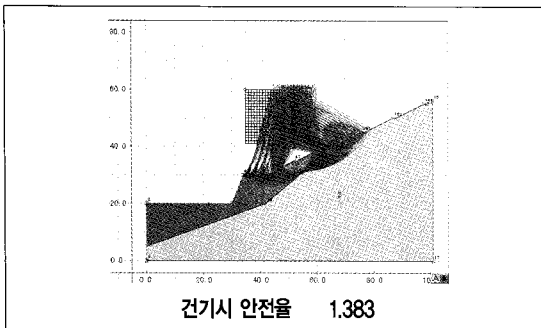
### 4) 해석결과

사면경사 1:2.0 완화구간에 대한 사면해석실시 결과는 표4와 같다. 해석결과 그림11과 그림12와 같이 기반암이

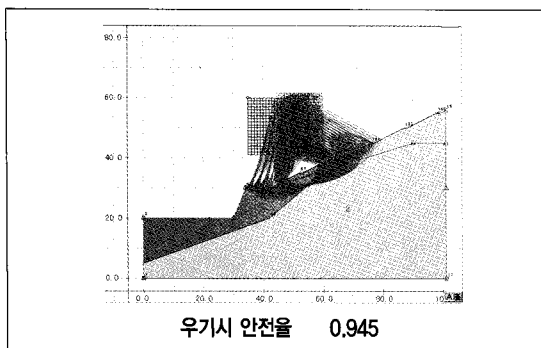
파쇄대를 포함하는 사면의 경우 해석안전율 건기시 1.383, 우기시 0.945, 기반암이 양호한 연암의 경우 건기시 1.932, 우기시 1.528 으로 파쇄대를 포함한 사면은 기준안전율에 미달하는 것으로 나타났고 양호한 연암 사면은 기준안전율을 충분히 만족하는 것으로 검토되어 파쇄대 포함 여부에 따라 사면의 안정성이 크게 좌우되는 것으로 검토되었다.

### 4.3 보강공법 적용시 사면안정해석

상기 4.2항과 같이 사면경사완화에 따른 사면안정검토

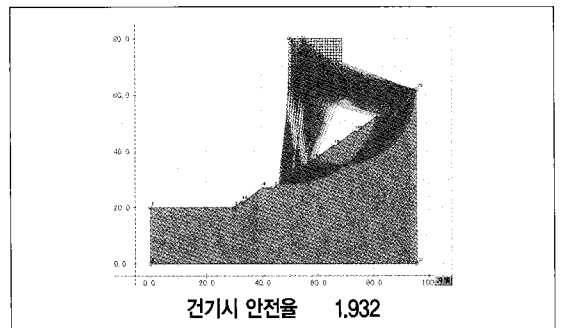


건기시 안전율 1.383

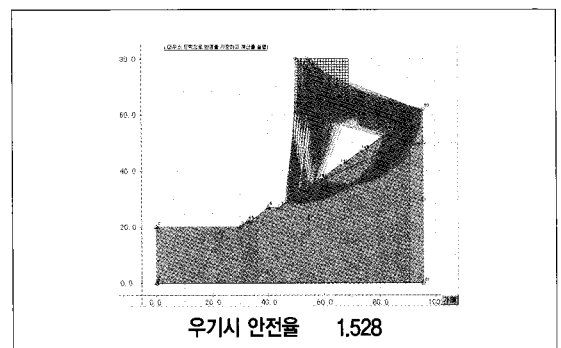


우기시 안전율 0.945

그림 11. 해석결과(1:2.0구간/파쇄대포함/No. C-9)



건기시 안전율 1.932



우기시 안전율 1.528

그림 12. 해석결과(1:2.0구간/양호한연암구간/No.C-9)

표 5. 보강후 해석단면의 보강조건

구 분	NO. C-9단면 (경사완화 1:2.0)		비 고
	소일내일 길이	소일내일 간격	
네일 재원(D29mm)	6M ~ 7M	2.0M × 2.0M	

표 6. 사면경사완화 후 네일 보강 안정성 해석결과

구 분	해석안전율		검토 결과	
	건 기	우 기		
경사완화 1:2.0	파쇄대 포함 기반암	1,786	1,276	안정

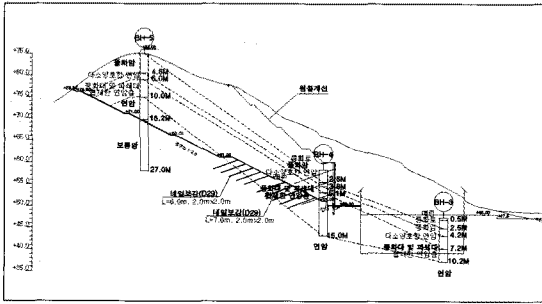


그림 13. 네일보강구간 해석단면

결과 파쇄대를 포함한 사면의 경우 기준안전율을 만족하지 못하는 것으로 검토되어 네일을 이용한 보강공법을 적용하였으며, 이에 대한 사면안전검토를 수행하였다.

### 1) 보강조건

상기해석결과 사면안전율이 기준안전율에 미달되는 파쇄대를 포함한 사면 경사완화 구간에 네일로 사면보강을 실시하여 안정성해석을 수행하였다. 네일 보강조건은 표 5와 같다.

### 2) 보강해석단면

사면 경사완화(풍화토, 풍화암, 연암 = 1:2.0)구간중 파쇄대를 포함하는 연암사면(1:2.0)의 경우 사면안전율이 기준안전율에 미달되어 네일로 사면을 보강하여 안정해석을 수행한다. 지반조사 결과 파쇄대는 사면파괴가 발생한 NO. C-6 ~ NO. C-9 사면의 사면 하부 제1소단과 제2소단에 주로 나타나고 있다

### 3) 보강해석결과

검토구간의 경사완화 (풍화토, 풍화암, 연암 = 1:2.0)후 네일보강 단면의 안정성 해석결과는 표6 과 같이 안정하게 나타났다

사면경사 완화후 네일보강후 사면안정해석결과 건기시 1.786, 우기시 1.276으로 기준안전율을 만족하는 것으로 최종 검토 되었다.

## 5. 결론

본 사면설계 보강사례의 경우 일반적인 사면보강설계시 지반조사를 충분히 수행하지 않을 경우 매우 안정측 설계를 실시하게 되는 경우가 대부분이다. 본 설계사례의 경우 지반조사가 수행된 관계로 하부에 존재하는 파쇄대로 인한 사면불안정 요인을 충분히 고려하여 설계를 수행할 수 있었던 경우로 이로 인하여 경제적 및 구조적 안정성을 확보 할 수 있었다. 본 설계사례를 통하여 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 사면검토의 경우 지반조사가 수행되어 사면내 발달되어 있는 파쇄대를 확인함으로써 이에 대한 근본적인 대책을 수립할 수 있었다.
- 2) 본 검토에서도 지반조사는 수행하였으나 사면안전검토에서 가장 중요한 지반정수인 강도정수(점착력 및 내부마찰각) 도출을 위한 역학시험은 수행되지 못하였다. 따라서 역해석 및 경험값을 적용하여 사면안정해석을 수행하는 한계를 극복하지 못하였다.
- 3) 당 현장의 경우 인장균열이 발생한 사면상부에서의 지반조사가 수행되지 않았을 경우, 지표하 10.0m에 위치하고 있는 풍화대(파쇄대)를 고려하지 못하는 결정적인 실수를 범하게 될 수 있는 현장에 해당된다. 즉 사면보강시 파쇄대의 깊이나 규모를 파악하지 못하여 파쇄대내에 네일이나 앵커를 보강하는 경우 장기적인 사면안정성을 확보하지 못하게 되는 결정적인 요인이 될 수 있다.
- 4) 사면안전검토 수행시 최소한의 지반조사를 수행해야

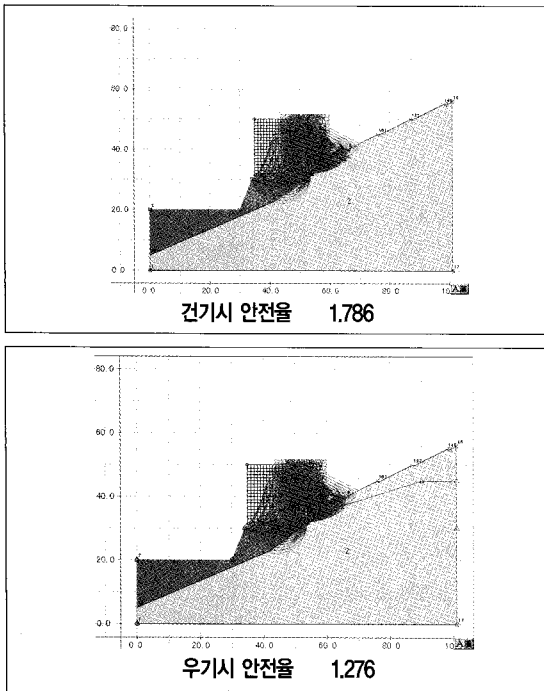


그림 14. 사면경사완화네일 보강후 안정성 해석

함에도 불구하고 현장여건이 허락하지 못한다는 이유로 대부분의 현장에서 지층 및 지반조건 확인 없이 지

층 및 강도정수를 추정하여 설계를 수행하게 된다. 일반적으로 상부로부터 하부로 지반조건을 양호하다고 판단하여 사면안정검토를 실시하는 것이 현실이며, 이는 대부분의 사면관련 지반공학자들이 상세 지반조사 없이 사면안정검토를 수행하는 방법임을 부인할 수 없을 것이다. 따라서 이에 대한 충분한 사전검토를 실시하여 최대한의 대안을 찾아야 하며, 이를 극복하기 위하여 다각적인 노력이 지속적으로 필요하다고 판단된다.

### 참고 문헌

1. 전성기(2002), "실무자를 위한 사면안정화 설계실무편람", 과학기술, pp13~20
2. 유병욱, 황영철, 김성환(2001), "단층파쇄대 사면의 보강대책 연구", 한국지반공학회, 2001년 사면안정학술발표회 논문집, pp59~71
3. 천병식, 임해식(1998), "쏘일네일링", 유림출판사, pp221~272

