

사암과 셰일층의 교호에 의한 사면 파괴 및 보강 설계 사례 - 대구 000 현장 배후 사면 안정성 검토

최해문¹⁾, 심성현²⁾, 한병현²⁾, 김재권²⁾

¹⁾삼성건설 기술연구소, ²⁾삼성건설 토목사업본부

1. 서론

대구지역과 같이 퇴적암 지역의 대절토 사면은 절토에 의한 응력이완의 정도가 크고, 사면이 전체적으로 동일한 암종 및 균일한 강도 특성을 보이지 않으며 부분적으로 단층과 같이 활동파괴 요인으로 작용할 수 있는 지질구조를 가질 때 대규모 사면 붕괴가 일어나는 경우가 많다.

대상 부지 배후 절토 사면은 대상 지반이 셰일과 사암의 호층 구조로 이루어진 퇴적암 사면으로서 불연속 구조인 층리와 인장 절리 등에 의하여 상대적으로 취약한 셰일과 사암의 경계를 따라 평면파괴가 일어났다. 대상 사면의 높이는 약 30m이고, 길이는 현재 시공 중인 곳이 약 250m, 장래 시공 예정인 곳이 약 250m이며, 설계 구배는 영구 사면의 경우 1:0.6, 가설 사면의 경우 1:0.2 로 설계 되었다. 절토 사면은 굴착 초기에 1차 붕괴, 굴착 공사 중에 2차 붕괴, 3차 붕괴가 연속적으로 일어났다. 파괴양상은 모두 평면파괴 형태로 동일하게 나타났으며, 추가적인 굴착으로 더 광범위한 평면파괴가 예상되어 정밀지반조사와 이에 따른 보강 방안 등을 검토하였다.

사면 안정 검토는 평사투영 해석과 한계평형 해석 등을 실시하였으며, 이 결과들을 토대로 Rock Anchor 와 사면 구배를 조정한 사면 보강안 등을 확정하여 시공하였다.

2. 본론

2.1 지반조사

대구 000 시설 배후에 굴착되는 암반 사면은 사면방향과 퇴적암 층리 방향과의 기하학적 인 상관성에 의해 예상 파괴면 위에 위치해 있는 상부암반을 완전히 제거해야만 장기적인 안정성이 확보되는 지질조건을 나타내고 있다. 현장조건은 형성될 절취사면의 안정성에 매우 불리한 방향으로 층리가 분포하여 추가 공사 시 대규모 붕괴가 예상되었다.

이에 따라 사면 보강을 위한 지반조사를 실시하였는데, 1 단계로 지층분포특성에 따라 5공의 시추 조사를 실시하였으며, 또한 2차원 전기비저항 탐사와 공내 전단시험 등을 실시하였다. 실내시험으로는 절리면 전단시험, 일축압축시험, 점하중 강도시험 등을 실시하였다. 또한 2단계 정밀 지반 조사로 시험굴착과 정밀 지표지질조사를 실시하였으며, 현장조사로 거칠기(JRC)와 Schmidt 해머 강도측정, Tilt 시험 등을 실시하였다.

5개 공에 대한 시추조사에서 시추심도는 대략 20 - 26m 이었다. 시추 결과 암상은 흑색 셰일과 사암이며, 이들은 호층 구조로 구성되어 있고, 층리의 경사각은 20 - 30도의 범위를 보여주며, RQD는 대략 50 - 70%의 범위에 가장 많이 분포하고 있었다.

지층의 상태와 약선대의 분포여부를 판단하기 위하여 쌍극자 배열의 전기비저항 탐사를 실시하였다. 탐사 결과 탐사구간 내 하부 지층이 불투수성의 이질 또는 셰일이 우세한 점을 감안할 때, 저비저항 이상대는 단층, 절리 및 층리와 같은 단열구조로 해석할 수 있으며, 역산 단면 우측과 같이 측방으로 연장된 저비저항 이상대는 층리를 따라 발달한 것으로 분석되었다.

수평적인 저비저항 이상대는 지층의 경계부와 잘 일치되는데 이는 지층의 경계가 약선대를 형성하고 있음을 나타내며, 붕괴구간의 경우 사암과 셰일층의 경계부가 활동면으로 작용하였음을 알 수 있었다. 이상대의 종합적인 판단은 2단계 지표지질 조사 자료와 함께 분석하였다.



그림 1. 대상 현장 사면 사진

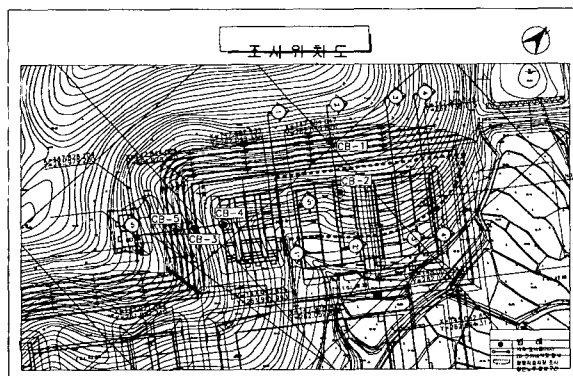


그림 2. 사면 안정 검토 구간 및 조사 위치

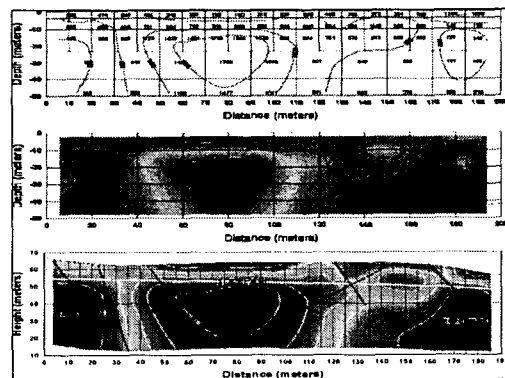


그림 3. 전기비저항 탐사 결과

조사 대상 지역의 광역지질은 경상누층군 중 신동층군과 하양층군에 속하며, 퇴적구조는 셰일과 사암의 호층구조를 이루고 있다. 퇴적구조는 셰일을 기준으로 층의 반복정도는 5m 내외이며, 조사지역 내 발달하는 단층구조는 양산단층의 파생단층으로서 60°이상의 고각도를 이루며 2성분의 방향성을 보이고 있었다. 파괴면을 형성하는 셰일층은 시기적인 퇴적환

경에 따라 암회색 세일, 사질 세일 등으로 구분되며 박층의 탄질 세일이 분포하고 있다.

사암은 중립질이 대부분이나 세립질 사암이 일부 존재하고 있으며, 사암 중 관입암인 반암류와의 접촉부는 일부 열변성된 구간이 있다. 검토사면에 분포하는 세일은 상하부에 고르게 존재하며, 각각은 개별적이다. 1차 퇴적구조 내에도 세일이 30cm정도의 층후로 반복 및 교호하며, 박층으로 존재하는 구간도 있다. 붕괴가 발생한 No. 10+00구간의 활동면은 탄질 세일층으로 굴착이 진행됨에 따라 연속적으로 평면파괴가 발생하였다.

암반 특성을 좀 더 자세하게 살펴보면, 대부분의 절취면에 있어서 암반 강도는 보통 풍화이상의 발파암을 대상으로 하며 사암의 경우 강도가 강함에서 매우 강함에 해당하고, 세일의 경우는 보통 강함 정도의 강도 특성을 보이고 있었다. Jv 측정결과로 환산된 RQD는 36 ~ 59%였으며, 절리면의 간격은 층리에 의해 영향을 받으며 규칙성을 가지는 경우 대략 80cm정도를 나타내었다. 층리는 전 사면에 걸쳐 발달하여 연장성은 20m 이상을 나타내고 있으며, 불연속면 틈새 크기는 최대 이완부에서는 10mm 이상도 관찰되나 대부분 3mm를 나타내고 있었다. 거칠기는 층리면의 경우 판상의 매끄러운 조도를 보이고 있었으며, 충전물은 대부분 구간에서 Clean한 상태이며 단층면에는 점토가 0.5mm 정도 피복되어 있었다. 풍화도는 대부분 보통풍화 내지 약간풍화상태를 나타내고 있었으며, 지하수 상태는 불연속면 중 절리면에서는 대부분 건조한 상태이고 점토 충전물을 함유한 단층면은 젖은 상태였다.

불연속 구조계를 조사해 본 결과 No.7+00지점에서 대규모 평면 파괴의 가능성이 가장 큰 것으로 조사되었는데, 층리와 단층 구조대에 의한 큰 규모의 평면파괴가 예상되었다. 굴착 대상 사면의 주향과 경사방향은 59/125이며, 사면 높이는 30 m, 설계 구배는 영구사면의 경우는 1:0.6 (59°), 가설 사면의 경우는 1:0.2(79°)이었다. 이 지점의 불연속면은 34/149 계열의 층리와 53/264계열의 단층, 87/008계열의 단층 및 단층에 의해 파생된 절리로 인해 평면파괴 블록을 형성하고 있다. 53/264의 방향성을 갖는 암맥 및 단층이 평균 30mm의 점토로 충전되어 있으며, 두께 5.0m 규모의 암맥 주변부는 열화 및 점토화되어 사면 전반에 걸쳐 발달하고 있었다. 또한 66/264 계열의 단층이 평균 1.0m 간격으로 수조 발달하고 있으며, 하부 세일층 내에는 30cm 간격으로 두께 5cm의 연약층(점토 3cm 포함)이 존재하고 있어 평면파괴에 대해 매우 불안정한 상태이다. 층리면을 포함한 절리면은 대부분 건조한 상태이며 점토 충전물을 함유한 단층은 습윤한 상태를 나타내고 있었다.



그림 4. 측정점 No. 7 지점의 사면 사진

그림 5. 측정점 No. 10 지점의 붕락 사면

대상부지 배후 암반사면중에서 공사 중 세번에 걸쳐 사면 붕괴가 일어난 곳이 측정점 No.

10+00.0 지점으로 34/139 계열의 층리와 85/250계열의 단층 및 단층에 의해 파생된 절리로 인해 평면파괴 블록을 형성하고 있다. 평균 30mm의 점토가 충전되어 있는 85/250 계열의 단층이 발달하고 있으며, 68/351 계열의 단층이 평균 1.0~2.0m 간격으로 수조 발달하고 있다. 평면파괴를 유발한 하부의 흑색 셰일층에는 30cm 간격으로 두께 5cm의 연약층(점토 3cm 포함)이 존재하고 있다. 층리면을 포함한 절리면은 No.7+00과 마찬가지로 건조한 상태에 있으며 점토 충전물을 함유한 단층은 습윤한 상태를 나타내고 있다.

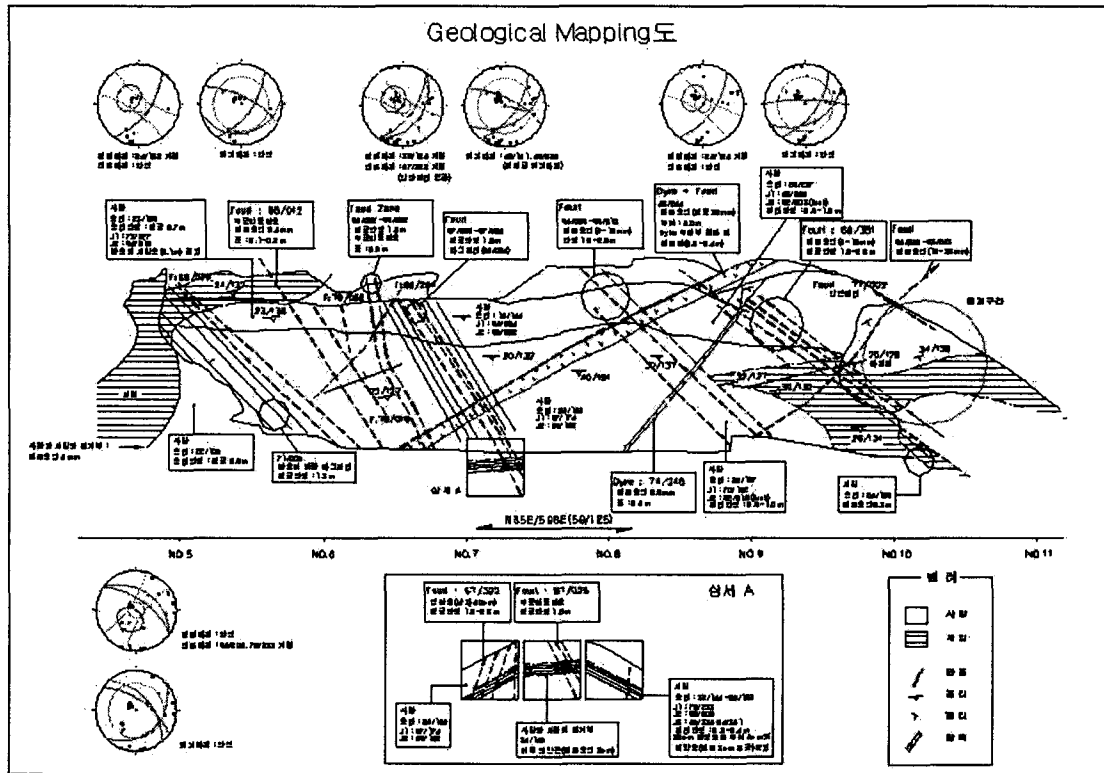


그림 6. 현장 지질 Mapping 도

2.2 사면 안정 검토

2.2.1 강도 정수 산정

대상 지반 중에서 발파암을 대상으로 하여 강도정수 산정했는데, 현장조사 결과를 토대로 한 전단강도 산정은 현장 지표지질 조사시 J_v , JRC , Waveness의 측정 및 TILT TEST 결과와 반발도(R)를 토대로 Barton의 경험식을 이용하여 검토사면의 지반정수를 선정하였다. 또한 파괴 블록에 대해 자체 작성한 Excel 프로그램으로 역해석을 실시하여 물성치를 산정하였고, 절리면 전단시험에서는 전단면이 암석의 연약면과 일치하도록 시료의 방향을 선택하여 전단응력과 잔류전단강도를 4~5회에 걸쳐 구한 후 이 결과를 회귀분석하여 물성치를 구하였다. (표 1)

현장에서 시추작업으로 불교란 시료의 채취가 어려운 풍화토층 및 풍화암층에 대하여 해당층의 지반정수를 파악하기 위해 시추조사와 병행하여 직접 공내전단시험(BST)을 실시하여 점착력 및 내부마찰각을 산정하였으며 그 결과는 표2와 같다.

기존문헌의 제안 값을 참고로 하여 RMR에 의한 추정치와 함께 Hoek & Brown 제안식 등으로 사면 안정 시 사용될 지반의 물성치와 강도정수를 구하였으며, 안전측 설계를 위한 설계정수가 되도록 필요에 따라 감쇠기법을 사용하였다.

표 3은 산정된 강도 정수에 대한 요약으로서, 현장암반의 경우 대규모 단층구조대의 영향과 지하수에 의해 풍화 및 이완영역이 확대된 지역으로 특정 불연속면에 의해 파괴가 진행되는 경우에는 점착력이 없는 것으로 간주하였고, 불규칙적인 파괴면을 갖는 암반의 해석 시에는 점착력을 고려하는 방식으로 해석에 필요한 강도정수를 산출하였다.

표 1. 자연 절리면 전단 시험 성과표 (코어시료)

공 변	시험구간(m)		내부마찰각 $\phi(^{\circ})$	점착력 C (kg/cm ²)
CB-1 (사암)	3.7~4.0	최대	29.93	0.37
		잔류	27.11	0.14
CB-1 (세일)	20.4~20.6	최대	25.50	0.48
		잔류	24.93	0.16

표 2. 시추공 공내 전단 시험 결과

공 변	시험구간 (m)	지하수위 (GL-m)	점착력 (t/m ²)	내부마찰각 (Degree)	비 고
CB-4	0.7	3.4	1.68	27.38	풍화토층
	1.3	3.4	2.61	30.63	풍화암층

표 3. 강도 정수 요약 및 산정 결과

구 분		단위중량 $\gamma_t(\text{ton/m}^3)$	내부마찰각 $\phi(^{\circ})$	점착력 C(ton/m ²)
1) Tilt Test결과	Sandstone	-	28~32	-
	Shale	-	23~25	-
2) Barton경험식	JRC(1),JCS(25), $\sigma_n(0.735)$	-	20.1	0.65
3) RMR분류결과	현재 공사 부지	-	21~29	15.8~24.5
	장래 대상 부지	-	26~28	19.8~25.4
4) 역해석 결과	굴착 도중 슬라이딩	2.5	$\phi=22$ $\phi=19$	c=0.54 c=1.06
5) 절리면전단결과	Sandstone	-	27.11	0.14
	Shale	-	24.93	0.16
6) 참고문헌	점토질세일, 성층면	-	19~25	0
7) 산정 결과 (해석 적용)	발파 암반	2.5	25	5.0
	사암층의 수직 절리면	-	22	0
	세일층의 층리면	-	19	0

2.2.2 붕괴 구간의 안정성 검토

사면의 안정성 검토는 암반사면에 대하여 실시하였으며, 불연속 구조의 특성에 의해 특

정적인 불연속구조를 갖는 경우에 대하여 해석하였다. 그림 7은 사면 붕괴에 대한 모식도로써 사암층 내 주요 불연속 구조인 층리와 인장절리(또는 단층)에 의한 기하학적인 파괴모형을 나타내며, 사암과 셰일의 호층 구조를 보이는 퇴적 구조면상에서 전단강도가 상대적으로 취약한 셰일과 사암의 경계부를 따라 평면파괴가 발생한 것으로 판단되는 검토사면이 파괴 메커니즘을 잘 표현하고 있다.

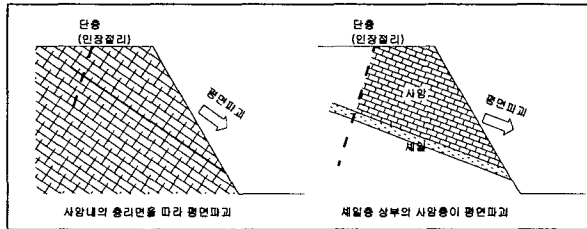


그림 7. 층리에 의한 평면파괴 모식도

내용		비고
평사투영 해석	- 평면파괴 - 썩기파괴 - 전도파괴	Dips 5.0
한계평형 검토	- 평면파괴 - 원호파괴	Excel 프로그램 Slope/win

표 4. 암반사면 해석 내용 및 프로그램

대상 부지 배후 암반사면의 안정성 검토는 암반 절취 중인 영구사면을 대상으로 이루어질 상세 조사를 기본으로 하였으므로, 사면의 굴착방향에 따라 사면안정성에 영향을 미치는 불안정 요인을 규명하고 검토구간에 대한 보강대책을 검토하기 위하여 경사각에 따른 불연속면의 방향성과 경사각에 대한 안정성 평가를 실시하였다.

사면의 안정성 해석시 필요한 지반 물성치와 강도정수는 현장조사를 통하여 공사 중 안정성 확보 측면에서 최적 설계 및 시공이 이루어질 수 있도록 산정 하였으며, 주요 특정 불연속구조에 의해 파괴모형을 형성하는지를 현장 Mapping 및 지질구조 평면도로 정리하였다.

조사한 결과를 토대로 먼저 평사투영 해석을 실시하여 암반내 파괴의 형태를 규명하고 예측되는 파괴모형은 수치적인 방법으로 계산하는 방식으로 실시하였다. 안정성 해석의 순서는 다음과 같다.

Geological Mapping -> Stereo-Net분석 -> S.M.R 사면평가
-> 한계평형식 -> 필요역제력(보강력) -> 산출보강공법 선정

평사투영 해석을 실시한 사면의 경사각 및 경사 방향은 59/125였고, 해석에 적용된 지반의 내부 마찰각은 22° 이었다. 해석 결과 6개 지점에서 모두 평면 파괴가 가능한 것으로 해석되었다.

Excel 매크로로 작성한 프로그램(Limit 2000)을 이용하여 검토 사면별 대표 횡단면을 선정하여 한계 평형 해석을 실시하였는데, 해석 결과 사면 구배 1:0.6에서는 건기시와 우기시 모두 안전율이 1이하로 불안정한 사면 상태를 나타내었다.

또한 Goodman 등에 의한 전도파괴 가능성에 대한 검토에서는 국부적으로 사암과 셰일층내 발달한 수직성 절리에 의해 전도 또는 낙석이 우려되었는데, 최대 안정절취 경사를 기하학적인 평가로 해석한 결과 1 : 1.0-1.2 구배시 안정화 시킬 수 있으며, 이는 결착식 낙석방지망으로 억지가 가능한 수준으로 판단되었다.

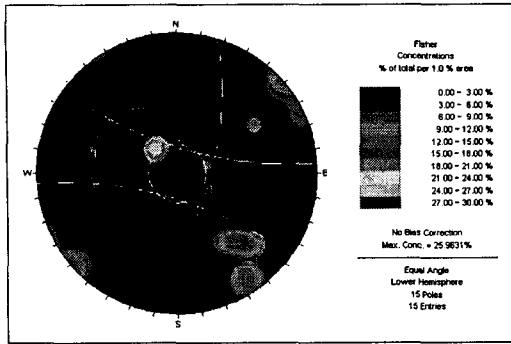


그림 8. 평사투영 해석

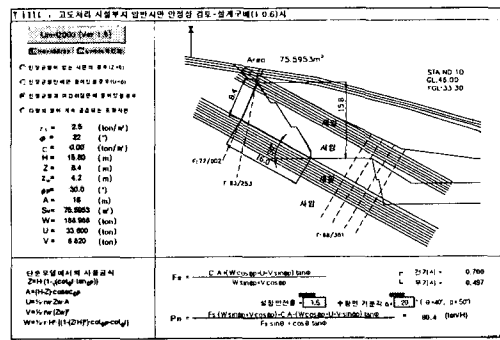


그림 9. 한계평형 검토 예

표 5. 전도파괴에 대한 검토

		Toppling이 발생할 조건		안정성이 확보되는 조정구배	
① 조건		±30°이내의 주향방향		Fix	
② 조건	Goodman & Bray(1976)	$(90 - \delta) + \psi_i < \alpha$		$90 - \frac{(\delta + \phi)}{2} \geq \alpha$	
		α : 사면의 경사각	59°	α : 사면의 경사각	44°
		δ : 절리의 경사각	70°	δ : 절리의 경사각	Fix
		ϕ : 내부마찰각	22°	ϕ : 내부마찰각	Fix
		ψ_i : $(90 - \alpha - \phi)$	9°	사면 완화구배	1 : 1.0
	Choquet & Tanon(1985)	$(90 - \delta) \leq (\alpha - \phi + k)$		$(90 - \delta) + (\phi - k) < \alpha$	
		α : 사면의 경사각	59°	α : 사면의 경사각	41°
		δ : 절리의 경사각	70°	δ : 절리의 경사각	Fix
		ϕ : 내부마찰각	22°	ϕ : 내부마찰각	Fix
		$k = 3/5(\phi - 20), (k \geq 0)$	1°	사면 완화구배	1 : 1.15

2.3 사면 안정 대책공

대구 000 시설 배후 암반사면은 1 : 0.6 구배로 설계된 절취고 30m이상의 대절토 사면에서 중규모 이상의 평면파괴가 발생 하였거나 향후 추가 공사시에 발생할 것으로 예상되었다. 사면 안정성 검토를 수행한 결과에서도 설계구배 1: 0.6 일 때의 사면 안전율은 영구 사면에 대한 최소안전율인 1.5에 미치지 못하는 것으로 분석되었다.

사면 안정 대책공의 선정은 지형, 지질이나 기후 조건 등을 충분히 파악함과 동시에 경제성, 시공성을 고려한 공법을 선정해야 한다. 대상 시설 배후 암반사면은 Tension Crack(인장균열)으로 작용하는 단층의 연속성이 매우 높고 반복적이며, Sliding을 유발하는 불연속 구조들의 연속성이 높은 것과 낮은 것이 혼재하고 있다. 이런 특성으로 인해 대규모 평면파괴 블록내에 소규모 평면파괴 암체가 존재하고 있으며, 전도파괴는 소규모로 예상된다.

주보강 공법에서는 대규모 평면파괴에 대한 안정 대책방안을 수립하고, 보조공에서는 낙

석으로 전이되는 소규모 평면파괴 및 전도파괴 암체의 안정대책을 강구하는 방향으로 사면 안정화 공법을 선정하였다.

고려한 주 보강공법의 1안으로 원 설계구배(1:0.6) + 록앵커 보강안, 2안으로는 구배완화 + 록앵커 또는 록볼트 보강안으로 구배완화 정도에 따라 2-1안은 구배완화(1:1.5) + 록볼트로 보강, 2-2안은 구배완화(1:1.0-1.2) + (록볼트+록앵커)로 보강, 2-3안은 구조물 재배치 후(1:0.7-1.0) + 록앵커로 보강하는 방안이며, 3안으로는 불안정한 상부 암체를 완전 제거시켜 사면 경사를 1:2로 완화하는 방안이다. 이중 3안과 같이 완화 구배를 적용할 때는 무한사면에 가깝게 절취가 이루어져야 하므로 비현실적이어서 고려 대상에서 제외하였다. 다양한 공법 중에서 1안과 2-2안에 대하여 최종적으로 검토하여 그 중 안정성과 경제성에서 우월한 2-2안으로 결정하여 시공하였다. 이때 부지내의 대상 구조물을 종방향으로 71m 이동시켜서 사면과 구조물 사이에 9m의 여유 폭을 확보할 수 있었지만, 이에 따른 평면 재설계를 실시해야 하는 단점이 있었다.

표 6. 사면 안정 대책공법 비교

	설계구배(1:0.6) + 앵커보강	구배완화(1:0.6⇒1:1.0) + 구조물 이동 + 앵커보강
공법 개요	<ul style="list-style-type: none"> 구조물 이동 : 원 설계위치 주보강공법 : R/A : 40 ton(영구앵커) <ul style="list-style-type: none"> - CTC 1.5m(수직×수평 설치간격) - 시공장 14.5~31.5m 수량 1800공. 보조공법 : Net + Wire rope + R/B <ul style="list-style-type: none"> - 표면보호공 : 녹생토 	<ul style="list-style-type: none"> 구조물 이동 : 종방향71m, 횡방향9m이동 주보강공법 : R/A : 40 ton(영구앵커) <ul style="list-style-type: none"> - CTC 2.0m(수직×수평 설치간격) - 시공장 13.5~26.5m 수량 617공. 보조공법 : Net + Wire rope + R/B <ul style="list-style-type: none"> - 표면보호공 : 녹생토
모식도		
장단점	<ul style="list-style-type: none"> 낙석방지공을 연계시공 5m마다 굴착직후 R/A시공완료, 다음 소단까지 굴착하는 시공 cycle의 반복공정으로 전체적인 공기가 증가 필요한 보강력 과다로 보강공사비 큼 	<ul style="list-style-type: none"> 낙석방지공을 연계시공 구조물 위치를 이동으로 활동하중의 격감 및 보강력이 크게 감소함. 구조물로 평면 재설계가 필요함. 시공중 안정성, 시공성이 매우 양호함.
추정 공사비	₩ 3,360 백만원	₩ 2,965 백만원 (추천안)

보조공법으로는 소규모 평면 및 전도파괴에 의해 낙석이 발생할 것으로 예상되는 바, 낙석에 의한 위험을 방지하기 위한 대책으로 결착식 낙석방지망을 설치하고, 세일과 사암의

특성상 굴착면의 이완영역이 시간 경과에 따라 다소 클 것으로 판단되므로, 굴착 표면의 풍화·침식에 대한 표면 보호공으로 녹생토공을 고려하였다.

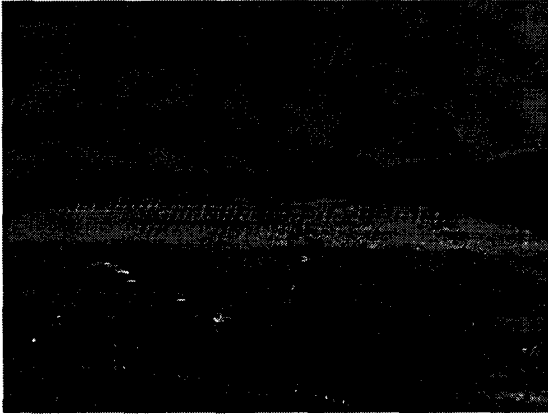


그림 10. 사면 보강 공사 전경

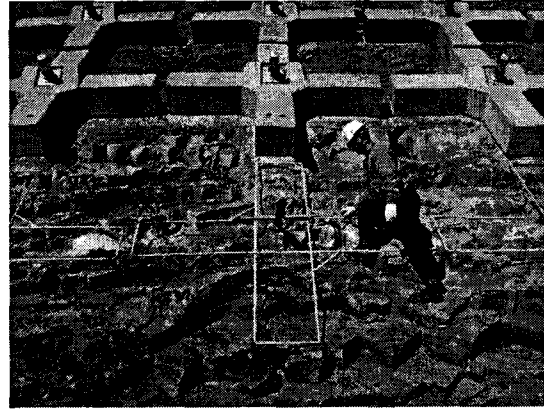


그림 11. 앵커 격자 틀 시공 장면

3. 결론

본 연구 지역은 대구지역의 전형적인 퇴적암 사면으로, 보강을 하지 않을 때는 사암과 셰일의 경계부에서 지속적인 사면 붕괴가 발생하였는데, 상부 암체를 모두 제거하지 않는 한 지속적인 붕괴가 발생할 수 있는 지질 구조를 가지고 있었다. 이에 따라 수차례의 현장 지질 조사와 전기 비저항 탐사 등을 실시하고, 각종 암석 실내 시험, 전단 시험 등을 통하여 전단 강도를 결정하고 사면 안정성 검토를 실시하였다.

사면 해석 결과 당초 설계 구배인 1:0.6의 사면 구배로 시공할 경우 검토 단면 6개 모두에서 평면 파괴가 발생하였으며, 한계평형해석에서도 기준 안전율을 만족하지 못했다. 따라서 소요 안전율을 만족시키기 위한 보강력을 산출하고, 보강력을 만족시킬 수 있는 사면 보강 대책 공법을 선정하였다. 사면 보강법은 원설계 구배인 1:0.6을 유지한 채 록앵커 보강하는 방안과 구배를 1:1.0으로 완화하고, 록볼트+록앵커로 보강하는 방법 중에서 경제성과 시공성을 고려하여 최종적으로 후자의 방법을 선정하여 시공하고 있다. 또한 소규모 낙석을 예방하기 위하여 결착식 낙석방지망 + 녹생토 공을 보조공법으로 선택하였다.

시공시 하부 굴착에 의한 Key Block의 제거에 의해 중규모 이상의 활동 파괴가 발생할 수 있으므로, 영구사면에 대한 충분한 보강이 이루어지기 전까지는 하단부 가설사면부에 대한 굴착을 유보하였고, 직각으로 굴착하도록 설계된 “ㄱ”형 모서리부 사면은 다른 곳에 비해 부분적인 안정성이 크게 저하될 소지가 크므로 곡면으로 굴착하도록 하여 사면 붕괴의 가능성을 미연에 방지하도록 하였다.

참고문헌

1. (주)지오이엔지, 2002.3, “대구시 000 시설 부지 암반 사면 안정성 검토 보고서”
2. 한국지반공학회, 1997, “지반공학 시리즈5 사면안정”
3. 이정인, 1997, “불연속 암반의 역학적 성질과 암반 구조물의 안정성 평가”, 한국지반공학회 97년 봄 학술 발표회 논문집, pp.17-31