

대규모 사면의 붕괴사례 Case Study on Large Cutting Slope Failure

박영목 (Yeong-Mog Park)

영남대학교 공과대학 토목공학과 부교수,
Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam University

SYNOPSIS : This paper described two case studies on large scale failure of cutting slope. The kind of rock in both sites predominated limestone and shale respectively. These cutting slopes located in northern area of Gyongbug Province are composed of very complicated and various rock mass. Geological characteristics, causes of failure, proceeding of security diagnose, maintenance method etc. of two sites were carried out to check the cutting slope stability and to provide reasonable maintenance method. This paper may provide the useful data for engineers related with design and construction of large cutting slope.

Key words : large cutting slope, Limestone, Shale, Slope failure, Security diagnose

1. 서론

국토의 약 70%가 산악지로 형성된 우리나라에서 인구증가 및 산업발달에 기인하여 국토의 효율적인 개발이 절실히 요구되어 도로, 철도 및 단지조성 등을 위하여 대규모의 절취사면을 형성하는 경우가 많다. 일반적으로 절취사면은 토사와 암반의 복합지반으로 구성되며, 사면의 안정성 검토를 위해서 복합지반구성물질의 정확한 특성평가를 할 필요가 있다. 과학기술의 발달과 건설안전에 대한 인식의 증진 등으로 많은 노력과 경비를 투자하여 절취사면의 안정성을 검토하고있으나 아직까지 그 한계를 실감하고 있는 실정이다. 특히 동일한 절취사면에 대해서도 수종의 암석이 혼재되어 복잡 다양한 사면특성을 나타내는 영남, 충청지역에서는 설계에 의해 일반론적인 기준치에 의해 형성된 절취사면의 붕괴발생이 상대적으로 많이 나타날 수 있다고 판단된다.

영구적으로 안정적인 절취사면의 조성을 위해서는 암석의 종류, 풍화특성, 지질구조, 충전재의 협재 여부 및 불연속면의 특성 등의 내적인 영향요인과 강우, 동결융해, 지진 및 발파 등의 외적요인이 존재한다. 내적인 요인 중에서는 무결합 암석의 강도특성에 의해서 주로 판단되는 사면구배의 결정에 문제가 있으며 외적인 요인으로는 최근에 빈번히 발생하는 국지적인 호우도 사면의 안정성에 크게 문제를 유발할 수 있다, 따라서, 설계 시 일률적인 사면구배의 설정은 바람직하지 않다고 사료되며, 향후 합리적인 절취사면구배의 설정으로 대규모 붕괴를 사전에 방지하는 노력을 할 필요가 있다고 판단된다.

이와 같은 관점에서 본 고에서는 석회암과 셰일로 대표되는 복합 암종 및 암상을 가진 경북 북부지역의 대규모 붕괴가 발생하여 필자가 안전진단을 수행한 절취사면 중 대표적인 2개소 사면의 진단결과를 기술하여 건설기술자에게 설계, 시공 및 유지관리 시에 도움이 되는 자료를 제공하고자한다.

2. 붕괴사례 1

2.1 개요

본 붕괴는 경북북부지역의 도로 확,포장공사 구간중 대규모의 토사 및 암반의 복합 절취사면구간에서 공사수행 중에 발생한 것이다. 대상사면의 위치는 경북 문경시의 잣밭산(해발 387m)이며 붕괴된 절취사면의 규모는 길이 L=340m, 최대절취고 Hmax=57m에 해당한다. 설계, 시공된 사면의 절취구배는 밭과 암에서 1:0.5, 리핑암에서 1:0.7 그리고 토사구간에서 약 1: 1.5 내외를 유지하고 있었다.

현안 절취사면의 안정성 검토를 위하여 이 지역에 분포되어 있는 사면의 지질 구조적 특징, 지반의 성층상태 및 토성을 파악하였으며, 적절한 사면보강대책공법의 수립에 필요한 제반 자료를 수집할 목적으로, 사면활동이 일어난 곳을 중심으로 총 4개소에 대한 시추조사와 원위치 시험이 실시되었으며, 필요한 지점에서 시굴조사 및 현장 들밀도시험이 실시되었다. 또한 암반 절취사면 일원에 대한 정밀 지표지질조사를 실시하였으며, 상기 현장조사 과정에서 채취된 시료에 대하여 실내시험이 실시되었다. 이러한 조사결과를 토대로 각 사면에 분포하는 지층의 강도정수를 도출하고, 붕괴사면에 대한 역해석 및 안정 해석을 실시하여 각 사면에 대한 종합적인 복구 및 보강대책을 수립하였다.

2.2 지형 및 지질 특성

2.2.1 지형

조사지역의 지형은 일반적으로 산세가 험준하고 고도가 높아서 대략 700m 이상의 기복차를 나타낸다. 본 조사지역의 산계는 연속적이나 기술의 편의상 동부 북부 서부로 3분하여 설명하였다.(점촌 도폭 참조) 동부에 있는 산릉은 남북으로 연속되며, 동서편으로 대소 지산릉이 무수히 발달되어 있다. 산의 경사는 대체로 급하며 북측사면이 더욱 가파르다. 북부는 동부 산맥중의 대미산(해발 1,116m)에서 시작하여 본 조사지역의 산계중 주봉의 하나인 주흥산(해발 1,106m)과 신선봉(해발 957m)을 거쳐 서측으로 연속되는 산령으로 되고 이 주 산령의 남북방향으로 대소 지산릉이 발달되었다. 서부는 마폐봉에서 시작하여 오령산(해발 1,017m), 이화산(해발 548m), 갈정산(해발 991m)을 거쳐 남측으로 연속되는 능선을 중심으로 동서로 대소 산릉이 발달한다. 그 외 상기 주 산릉은 백화산에서 이만봉(해발 690m), 옥너봉(해발 632m), 을 거치는 동서방향의 큰 산릉이 갈라져 성주봉(해발 690m), 옥너봉(해발 632m)에서 급경사로 되어 끝난다. 위에서 설명한 바와 같이 이들 3개의 주 능선들은 서로 연결되어 역 U자형의 주 분수령 울타리를 형성하여 문경분지를 형성하였다. 현장주위 수계의 발달은 미약하나 산계의 형태에 따라 중앙을 남류하는 신북천을 비롯하여 동단과 서단에 소 하천이 흐르고 있다. 이 하천들은 수지상 지류를 가지고 있으며 V자형 대소 계곡에 수 많은 계류가 발달한다.

2.2.2 지질

본 조사지역은 조선계 대석회암통이 발달하고 있으며 시대미상의 상내리층을 부정합으로 피복하는 옥천계 백화산층과 부곡리층(대석회암통)을 경사부정합으로 피복하는 중생대 유라기의 단산층 및 이들 모든 암층을 관입한 경상계 불국사통의 흑운모화강암과 석영반암으로 구성된다. 본 절취사면 붕괴의 주된 부분인 부곡리층(대석회암통)은 호계산 부곡리를 중심으로 비교적 광범위하게 분포하는 본층은 시대미상의 상내리층과 이를 관입한 백화산각섬암이 피복하고 있으며, 대동계의 단산층과 경사부정합의 관계이다. 주로 석회암으로 구성되나 간혹 사암 또는 세일의 협층을 갖으며, 석회암은 백색에서 회색에 걸치는 다양한 색을 가지며 형태는 괴상 또는 판상이 대부분이다. 본암은 관입 화강암 접촉부에서 규화되어 석회규산염암을 이루고 있거나 결정질로 되었다. 석회암의 박편사진을 촬영하여 관찰한 결과, 유백색 및

담회색의 큰 결정들이 방해석이며 구성광물의 95%를 차지한다. 방해석은 한방향 내지 두방향으로 쌍정면이 발달하고 결정면 사이각이 120. 로 매우 안정한 광물 상호관계를 보여준다.

본 절취사면의 기반암은 퇴적암인 석회암으로 구성되어 있으며, 석영반암 및 중성반암이 석회암을 환형으로 관입하고 있다. 또한 대표적인 절리군은 석회암에서는 층리방향의 절리군이(200~260/30~50)가 가장 우세하게 발달하며, 석영반암 등 관입암의 절리군은 경사방향 및 경사가 247/50, 177/55, 016/80, 082/66으로 나타나는 4조의 절리군으로 관찰된다.

2.3 절취사면의 붕괴 특성

그림 1.에는 본 절취사면의 지질전개도를 나타낸다. 그림 1.에서 나타내는 바와 같이 본 붕괴사면은 복잡한 암종 및 암상으로 구성되어 있으므로 정확한 진단을 위하여 9개의 대표적인 구역으로 나누었다. 본 절취사면의 파괴현황은 표 1.과 같다.

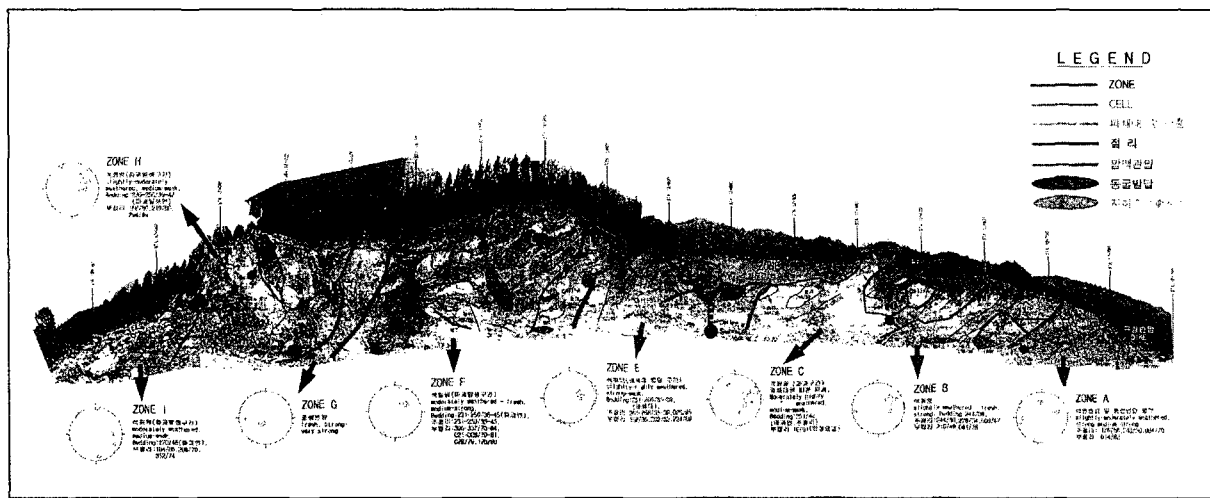


그림 1. 본 절취사면의 지질전개도

표 1. 사면파괴 현황

구분 사면	위 치	파괴발생 현황
ZoneA.	STA.12+740 ~ 790m	석영반암 및 중성반암으로 구성되며 파괴발생 없음.
ZoneB	STA.12+780 ~ 830m	석회암으로 구성되며 평면방향의 절리 발달하였으나, 파괴발생 없음.
ZoneC	STA.12+800 ~ 880m	석회암으로 구성되며 평면파괴가 발생하였고, 파괴지역 상부에는 인장균열이 관찰됨.
ZoneD	STA.12+840 ~ 900m	간류토층 및 풍화암층으로 구성되며 원호파괴 발생 지역.
ZoneE	STA.12+870 ~ 930m	석회암으로 구성되며 파괴의 발생은 관찰되지 않으나 사면의 경사는 43도 내외다.
ZoneF	STA.12+910 ~ 13+000m	석회암으로 구성되며 평면파괴 발생구간으로 현 상태에서 안정함.
ZoneG	STA.12+980 ~ 13+020m	중성반암으로 파괴 발생 없음.
ZoneH	STA.13+000 ~ 050m	석회암으로 구성되며 대소규모의 인장균열 발달한 평면파괴 발생지역.
ZoneI	STA.13+050 ~ 080m	석회암으로 구성되며 평면파괴 발생지역

2.4 사면안정성 검토

2.4.1 토사사면

현장조사 과정에서 채취된 토질시료에 대해 실시한 삼축압축시험 결과 및 직접전단시험 등을 토대로 잔류토층의 강도정수를 추정하였으며, 잔류토층 강도정수 추정에 적용된 $s' - t'$ Diagram은 그림 2.에 나타낸다. 그림 2.의 결과, 강도정수 $s' - t'$ [kg/cm²]는 30°로 추정하였다.

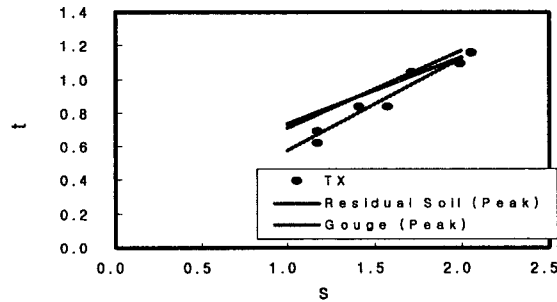


그림 2. $s' - t'$ 그래프

잔류토층 및 풍화암층으로 구성되어 있는 토사구간은 비교적 주절리면이 뚜렷한 연암 및 경암 구간과는 달리 파괴형상이 원호파괴형상으로 발생할 것으로 판단하였다. 따라서 일반 토사사면의 안정해석에 적용되는 원호활동파괴이론을 전산화한 범용 프로그램 “PC-STABL”을 사용하여 안정해석을 실시하였다. 추정된 강도정수값을 토대로 대표적인 토사사면인 ZONE D에 대해서 사면안정성을 평가하였으며 그 결과는 표 2.에 나타낸다

표 2. 사면의 예상 최소 안전율

ZONE	STA. No.	최소안전율 F_{Smin}		결과	비고
		Saturate condition	Dry Condition		
D	STA12+860	0.864	1.575	Unstable	역해석
	STA12+860	1.214	1.938	Stable	보완사면

2.4.2 암반사면

조사지역에 분포하는 기반암층의 공학적인 특성을 정량적인 방법으로 분류하기 위하여 암석 및 암반의 특성에 따라 구역화 한 후 Z. T. Bieniawski(1989)의 RMR 분류법(CSIR 분류법)을 적용하여 암반의 공학적 분류를 하였다. Bieniawski(1989)의 RMR 분류방법은 RQD 뿐만 아니라 절리면의 풍화상태 및 충전물질의 영향 등을 고려하여 암질을 분류하는 방법으로서 RMR 분류에서 고려한 기본적인 요소들은 다음과 같다. Intact rock의 일축압축강도, RQD, 절리간격, 절리상태 및 지하수 상태이다. RMR 분류는 각 Zone의 거동발생 유발 불연속면의 암반특성을 중점적으로 고려하여 실시하였다.

평사투영법(Stereographic Projection)에 의한 안정성의 평가는 절취면과 불연속면의 기하학적 형태로 부터 불연속면의 분포형태에 따른 파괴가능성을 예측할 수 있기 때문에 가능성 연구에 널리 사용된다. 평사투영법을 이용한 사면안정성 해석방법은 암반사면의 방향 및 경사, 불연속면의 방향 및 경사, 불연속면의 전단저항각 등이 고려되어 암사면의 안정성 해석에서 간단하고 신속한 방법이지만, 불연속면의 전단저항각 이외에 암반 사면의 안정에 영향을 미치는 불연속면의 틈새, 충전물의 공학적 특성, 점착력, 지하수압, 불연속면내의 결빙에 대한 이완, 사면의 높이, 암괴의 형태 등이 고려되지 않기 때문에, 평사

투영법에 의해서는 1차적으로 파괴 가능성을 예비 평가하고, 그 결과를 이용하여 한계평형해석(Limit Equilibrium)을 실시하였다. 평사투영법에 의한 해석을 실시한 결과를 표 3.에 나타내는 바와 같이 검토 대상 암반사면은 평면파괴에 대해 대체로 불안정한 것으로 판단되었으므로, 평면활동파괴에 대해 검토하였다.

표 3. 평사투영법에 의한 1차평가 요약

ZONE	CELL	암종	Major joints	판정	비고
A	-	반암	247/50, 117/55 016/80, 082/66	STABLE	
B	-	석회암	083/75, 009/67	UNSTABLE	평면파괴가능
B	A	석회암	226/50	UNSTABLE	평면파괴가능
C	-	석회암	248/36	UNSTABLE	평면파괴가능
C	B	석회암	251/42	UNSTABLE	평면파괴가능
E	A	석회암	266/39	STABLE	
E	B	석회암	261/35, 025/85 156/65, 202/35	STABLE	
F	A	석회암	337/84, 021/81	UNSTABLE	평면파괴가능
F	B	석회암	222/40, 311/84, 242/35 052/77, 177/78	UNSTABLE	평면파괴가능
F	C	석회암	224/46, 306/70 028/79, 128/80	UNSTABLE	평면파괴가능
G	-	반암	036/20, 238/71, 087/66	STABLE	
H	시점방향	석회암	242/39, 256/42 242/80, 294/89	UNSTABLE	평면파괴가능
H	중점방향	석회암	236/40, 152/80	UNSTABLE	평면파괴가능
I	-	석회암	275/44	UNSTABLE	평면파괴가능

암반의 강도정수는 RMR 방식에 따른 암반등급, 암석의 일축압축강도 또는 점하중재하시험, 시추조사자료 및 지표지질조사 결과를 토대로 예상되는 응력범위를 고려하여 Hoek & Brown이 제안한 경험식에 의하여 추정하였다.(Bell, F. G., 1992, Hoek, E., Bray, J.W., 1981). 현장 지표지질조사 성과에 의하면 조사지역의 암반은 각 사면 및 ZONE 별로 다양한 지질상태를 보이고 있다. 즉, 다양한 불연속면의 종류(절리군, 파쇄대, 단층, 전단대) 뿐 아니라 불연속면의 상태도 매우 불규칙한 변화를 가진다. 따라서 이들 특성을 최대한 반영할 수 있도록 평사투영법에 의한 1차 평가결과에서 대체로 Unstable 할 것으로 판단되는 지역과 파괴발생지역에 대한 강도정수를 세분화하였으며, 그 결과를 요약하면 표 4.와 같다.

표 4. 추정된 암반의 강도정수

ZONE	CELL	Joint	Qu	RMR	Shearing Strength	
					ϕ	c
B	Whole	248/35	782	46	41	4.5
B	B	236/43	782	42	38	5.0
C	Whole	251/42	471	23	33	1.0
C	Whole(굴착후)	251/42	471	23	35	2.5
C	B	248/36	629	25	30	2.0
C	B(굴착후)	248/36	629	25	33	2.0
E	A(굴착후)	266/39	756	32	41	3.0
E	B(굴착후)	261/35	795	37	39	3.0
F	A	250/38	604	26	31	4.5
F	B(전체)	222/40	900	26	33	6.0
F	B(상부암괴)	242/35	859	43	48	3.0
F	C	224/46	604	26	32	4.0
H	시점방향	239/41	905	27	30	7.5
H	중점방향	236/40	529	25	33	3.5
I	-	275/44	742	26	33	4.5

in above table:
 joint : major joint (dip direction / dip) * : 총리와 평행한 절리
 Qu : Unconfined Compressive Strength (kg/cm²) RMR : 암반의 등급
 ϕ : friction angle (degree) c = cohesion (ton/m²)

평사투영법에 의한 1차 평가결과에서 Unstable할 것으로 판단되는 지역과 파괴발생지역을 대상으로 한계평형이론을 적용하여 사면 안정성의 척도인 안전율을 구하고 이를 기준안전율($F_s = 1.5$)과 비교하여 안정성을 평가하였다. 표 5.에는 한계평형해석결과를 요약하여 나타낸다. 한편, 안정해석 결과 안정할 것으로 판단되는 사면에 대해서도 국부적으로는 부석이나 표면 박리 등이 쉽게 진행될 것으로 예상되는 지역에는 표면을 보호하는 대책을 강구토록 하도록 한다.

표 5. 한계평형해석 요약

ZONE	CELL	Joint set	Joint Spacing	Qu	RMR	Shearing Strength		Factor of Safety		Remarks
						ϕ	C	saturate condition	dry condition	
B	Whole	239/42	6	782	46	41	4.5	2.835	3.104	평면파괴 해석
B	B	238/38	5	782	42	38	5.0	2.342	2.555	평면파괴 해석
C	Whole	248/36	1	471	23	33	1.0	0.915	1.078	평면파괴 역해석
C	Whole	248/36	1	471	23	35	2.5	1.013	1.221	평면파괴 해석
C	B	251/42	1	629	25	30	2.0	0.811	1.114	평면파괴 역해석
C	B	251/42	1	629	25	33	2.0	1.117	1.321	평면파괴 해석
D		-	-	-	-	1.0	30	1.575	0.864	원호파괴 역해석
D		-	-	-	-	1.0	30	1.938	1.214	원호파괴 해석
E	A	266/39	1	756	32	41	3.0	1.313	1.485	평면파괴 해석
E	B	261/35	4	759	37	39	3.0	1.341	1.499	평면파괴 해석
F	A	250/38	1	604	26	31	4.5	0.858	1.010	평면파괴 역해석
F	B	222/40	1	900	26	33	6.0	0.894	1.078	평면파괴 역해석
F	B	242/35	4	589	43	48	3.0	1.646	2.011	평면파괴 해석
F	C	224/46	1	604	26	32	4.0	0.966	1.069	평면파괴역해석
H	시점부	242/39-256/42	1	905	27	30	7.5	0.788	1.007	평면파괴역해석
H	종점부	236/40	1	529	25	33	3.5	0.991	1.110	평면파괴역해석
I		275/43	1	742	26	33	4.5	0.961	1.076	평면파괴역해석

* in above table
 Joint set : 사면에 대하여 불아 정한 방향으로 발달하는 불연속면
 Qu : 암석 일축압축강도 (kg/cm^2)
 RMR : Rock Mass Rating (%)
 Shearing Strength : 불연속면의 전단강도 (ϕ : degree, c: ton/m^2)
 Factor of safety : 안전율 (현 상태는 Dry Condition)
 ①, ② : 두개의 wedge 조합에 대한 해석

2.5 대책공법 적용

절취사면에 대하여 안정성 검토를 수행하고 기준 안전율에 미달하는 사면부분에 대해 다양한 대책공법을 검토하였으며 제시된 합리적인 대책공법을 요약하면 표 6.과 같다.

표 6. 각 ZONE별 구체적인 대책공법적용안

ZONE	STA. No.	Reinforcing Plan	
		제1안(구배완화공법 적용)	제2안(구배완완(1:0.8)+Rock bolt
C	12+800~12+820	암반사면구배→1:1.1 토사사면구배→1:1.5	암반부 구배 1:0.8 +rock bolt(2.5m×2.5m)
	12+840~12+875	암반사면구배→1:1.1 토사사면구배→1:1.5	암반부 구배 1:0.8 +rock bolt(2.5m×2.5m) +rock anchor(수평2.5m×수직5.0m)
C (cell B)	12+820~12+840	암반사면구배→1:1.1 토사사면구배→1:1.5	암반부 구배 1:0.8 +rock bolt(2.5m×2.5m) +rock anchor(수평2.5m×수직5.0m)
D	12+840~12+900	토사사면구배→1:1.5	-
E	12+875~12+930	암반사면구배→1:1.2 토사사면구배→1:1.5	암반부 구배 1:0.8 +rock bolt(2.5m×2.5m) +rock anchor(수평2.5m×수직6.0m)
F	12+930~12+980	암반사면구배→1:1.0 토사사면구배→1:1.5	-
H	13+000~13+050	암반사면구배→1:1.3 토사사면구배→1:1.5	암반부 구배 1:0.8 +rock bolt(3.05m×3.0m)
I	13+050~13+080	암반사면구배→1:1.3 토사사면구배→1:1.5	-

3. 붕괴사례 II

3.1 개요

본 절취사면은 경북 청송군 안덕면에 소재한 도로축조공사 현장에서 시공중 STA. No. 14+000 ~ STA. No. 18+000 구간의 붕괴가 발생한 것이다. 붕괴사면의 규모는 길이 L=80m, 최대 절취고 Hmax=30.4m에 해당한다. 붕괴된 절취사면에 대해 현장조사, 실내시험, 분석 및 고찰 등의 업무를 수행하였으며, 동일사면에 있어서도 암반의 특성과 현장조건 등이 상이하여 3개의 구간으로 나누어 대표적인 단면에 대한 다양한 해석 방법으로 안정성을 검토하고 절취사면에 적합한 대책공법을 제시하였다. 그림 3.에는 사면파괴전경을 나타내고 있다.



(— 단층, — 층리, — 절리)

그림 3. 사면파괴전경

3.2 지질특성

안덕읍 일대의 지질은 대부분 퇴적암으로서 3회 이상의 취성변형작용을 받은 경험이 있는 암석이므로 복잡한 단층구조와 여러 단계의 절리면들이 형성되어 있다. 또한, 암석 형성 시에 생성된 층리들은 수 mm의 간격이 거의 수평으로 발달하고 있다. 단지 사암과 셰일이 교호하는 양상에 따라 층리의 간격이 암상에 지배되어 간격을 달리할 뿐, 각 층리면들의 배향은 거의 평행하다. 그 후 여러 번의 변형작용으로 퇴적시 형성된 암석내의 층리면은 서로 평행하고 지표면에 경사지게 재배열되었다. 따라서 수평방향(종 방향)으로 암석의 종류가 다양하게 접하게 된다.

사면 전체의 층리면은 N80W 12SW ~ N80W 26SW로 비교적 완만하나, 파괴가 발생한 부분의 층리면의 주향 경사는 단층과 전단절리 등의 영향으로 경사각이 급해지는 경향이다. 즉, 사면파괴부의 층리면의 주향과 경사는 평균 N80W 25SW(190/25)이다. 안덕읍 일대의 지질은 전술한 바와 같이 대부분 퇴적암으로서 3회 이상의 취성변형작용을 받은 경험이 있는 암석이므로 복잡한 단층구조와 여러 단계의 절리면들이 형성되어 있고, 인장성 단층면이 발달한 부분에서 층리와 절리 등의 경사가 단층과 사교하면서 수직에 가까운 양상을 나타내게 된다

단층대의 발달특성상 No. 15 횡단면의 사면상부 및 중부와 No. 17 횡단면의 사면상부가 단층대의 발달이 현저하게 나타나며, 사면하부의 일부는 층리면과 단층면이 동시에 관찰되는 암반양상을 보이나, 사면하부는 단층대를 형성시킨 단순응력(simple shearing)작용이 미치지 못한 양상이므로 단층과 같은 취성구조의 발달이 미약하다. 다만, 또 다른 지구조 응력장의 결과 형성된 3매 이상의 전단절리들이 형성되어 있다. 사면 전체에 분포하는 단층면의 평균은 N10W 84SW(260/84)이다. 이들 단층면들은 확장도로를 횡단하는 양상으로 단층대가 발달해 있고 특히 본 사면의 상부에 위치한 두께 약 3m인 응회암이 암석의 특성상 쉽게 강한 단층대가 발달하고 그로 인해 암반이 심하게 파쇄되어 동시에 사면 상단 배후에 인장균열이 대규모로 발생한 양상이다. 암반사면 해석에 결정적인 역할을 하는 단층과 절리면들은 그 배향과 간격, 특성 등이 각 사면의 단면에서 암반파괴의 여부 및 파괴형태, 파괴방향, 파괴하중 등을 좌우하게 된다. 사면 하부의 경우는 단층으로 전이된 층리와 전단절리가 3조 발달하고 있다. 또한, 제2전단절리대를 따른 평면파괴의 발생으로 사면 배후 상단에는 사면의 주향과 거의 평행하고 경사각이 거의 수직인 인장균열대가 발달하고 있다. STA. No. 15+000의 사면 상부 및 중부의 경우와 STA. No. 17+000의 사면 상부의 단층과 층리 및 3조의 전단절리가 발달하고 있으며, 전단절리들의 평균 배향은 제1전단절리는 N10W 80NE(080/80), 제2전단절리는 N75W 75SW(195/75), 제3전단절리는 N85E 60NW(355/60)이다. 이들 전단절리와 단층 및 층리가 만나 이루는 암괴가 쇄기형상으로 본 사면에는 파괴가 발생한 것으로 판단된다. 본 구간의 암반은 비교적 풍화상태가 불량한 편이다. 즉, 본 구간의 구성 암석은 셰일이 주된 암석이고 사암과 응회암이 협재되는 양상임으로 풍화진행속도가 비교적 빠른 셰일과 응회암, 풍화진행속도가 비교적 느린 사암이 공존하는 상태를 유지하고 있다. 그러나 암반내 단층대에 발달한 단층비지의 경우와 3조 이상의 전단절리와 수 mm 간격으로 발달한 층리면의 영향으로 매우 빠른 풍화속도를 보이는 상태이다. 암반은 입자 크기가 세립질인 사암과 극세립질인 셰일 및 다공상인 응회암으로 구성되어 있으며, 엽상 및 입상조직을 나타낸다. 구성 광물은 방해석, 옥수, 석영, 장석, 암편, 기타 점토광물로 되어 있으며, 암색은 담적색 내지 적색 및 일부 담녹색을 띠고 있다.

암반을 등급별로 나누는 방법에는 Q-system 방법과 RMR 분류법이 있으나, 본 사면에서는 암반 노두의 육안관찰 결과와 시추조사 결과 및 암석의 실내물성시험 결과를 종합하여 편의상 RMR 분류법을 이용하였다. 5개의 주변수들 중 일축압축강도는 $147.2\text{kgf/cm}^2 \sim 913.2\text{kgf/cm}^2$ 로 2점 ~ 7점, 암반 노두 및 시추조사시 암심에서 측정된 평균RQD의 값은 거의 0%로 3점, 불연속면의 간격은 0.3m 이하로 10점, 불연속면의 상태는 매우 평활한 10점, 지하수 상태는 건조상태로서 10점에 해당한다. 부가적으로 주 불연속면의 배향과 사면의 배향이 거의 일치하고 암반내 3조의 절리, 단층, 무수히 많은 층리 및 인장절리 등이 형성되어 아주 작은 암체로 분리되어 있어 거의 토사와 유사함을 고려해 볼 때 불량한 -50점에 해당되어, 총점수는 -5점 ~ -10점으로서 RMR class V인 매우 불량한 암반에 해당된다. 표 7.에는 대상 사면의 구역별 암반의 RMR분류를 나타내고 있다.

표 7. 안전진단 사면의 구역별 암반의 RMR 분류.

zone	암석명	압축강도 (kgf/cm ²)	RQD(%)	불연속면 간격(cm)	불연속면 상태	지하수 상태	사면 배향 ^ 주불연속면 배향	점수	등급	비고
상부	응회암	147.2	0	1~20	매우 평활	건조	평행	-5	V	
중·하부	세일 사암	913.2	0	20~50	평활	건조	거의 평행	-10	V	
평균	세일	530.2	0	20	평활	건조	거의 평행	-7.5	V	

3.3 안정성 검토

암반사면은 주로 암석의 종류와 암석 내에 형성된 불연속면의 배향(주향과 경사) 및 암반 내 불연속면에 유동하는 지하수의 유무에 따라 사면의 안정성이 좌우되며, 사면을 구성하고 있는 암석의 종류에 따라 그 구성광물이 달라지고 각각의 광물에 대해서는 고유의 강도 및 풍화도의 상이 등에 의해 사면의 풍화정도가 결정된다. 따라서, 암반사면의 풍화상태 및 지질구조를 서술하기 위해서는 암반사면 전체를 대표적인 단면별로 나누어서 기술해야만 한다. 따라서, 본 사면의 대표단면으로 STA. No. 15+000 단면과 STA. No. 17+000 단면을 취하였으며(지질전개도 참조), 암석의 특성 및 지질구조 등을 표시하여 대표단면별 지질횡단면도를 작성하였다. 그림 4.에는 대표적인 STA. No. 15+000 단면의 지질횡단면도를 나타낸다.

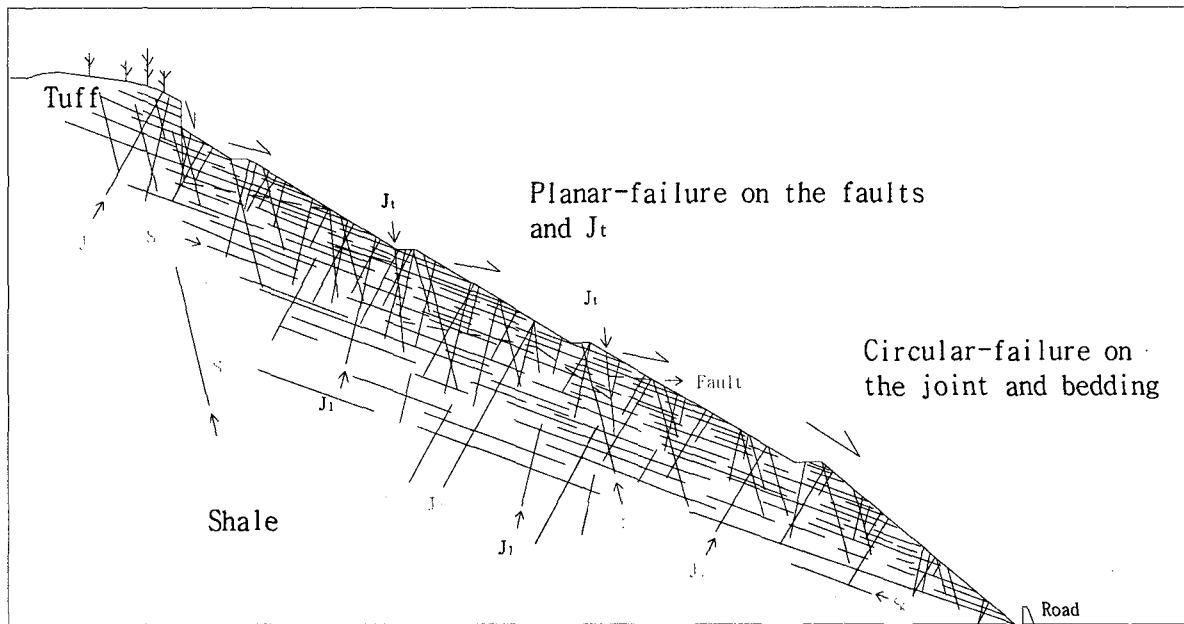


그림 4. 대표적인 STA. No. 15+000 단면의 지질횡단면도

사면의 안정성 검토를 위하여 암반자체와 전체사면으로 구분하여 암반사면에서는 주 불연속면에 대하여 검토하고, 파괴 암체의 크기 및 파괴형태를 예측하였다. 또한, 불연속면의 입체 투영망 분석을 실시하여(StereoNett), 사면의 예상 파괴방향을 결정하였다. 전체사면에 대해서는 시공사면과 붕괴사면에 대하여 PC STABL 5M 프로그램을 이용하여 사면활동파괴해석을 실시하였다.

3.3.1 평사투영해석

본 과업에서는 미국의 Toronto 대학에서 개발된 Dips 프로그램을 이용하여 등면적 하반구 투영법으로 해석을 수행하였다. 주 불연속면(미끄러짐면)의 상태를 검토한 결과, 종류는 층리이며, 배향은 : 190/12 ~ 26(N80W 12 ~ 26SE), 간격 : 1cm ~ 50cm. 연속성은 무한하며, 거칠기 : 매우 평활(단층화한 층리), 지하수 상태는 건조한 상태이며, 충전물은 약간의 점토 광물(단층비지), 틈은 0.1mm 정도이다. 파괴압체의 크기는 평균적으로 $0.001\text{m}^3 \sim 0.0125\text{m}^3$ 정도이나 STA. No. 15+000 ~ No. 17+000 단면의 경우에(단층대가 분포하는 경우) 0.75m^3 정도로서, 파괴압체의 하중은 약 $1.725\text{ton} \cdot \text{m}$ 를 나타낸다.

현 사면의 STA. No. 15+000 단면에서 상부는 전단절리면을 따른 전도파괴 및 단층면을 따른 평면파괴가 발생하였고, 중부는 단층면과 전단절리면을 따른 평면파괴가 발생하였고, 하부는 절리면과 층리면을 따른 원호파괴가 발생하였다. STA. No. 17+000 단면에서 사면 전체가 절리면과 층리면을 따른 원호파괴가 발생하였고, 상부는 단층면과 전단절리면을 따른 평면파괴 및 전도파괴가 발생하였다. 파괴압체의 미끄러짐 방향을 살펴보면 STA. No. 15+000 단면과 STA. No. 17+000 단면의 중·상부의 경우는 제1 및 제2 전단절리, 제2 및 제3 전단절리, 제2 전단절리 및 인장절리, 제2 전단절리 및 단층면을 따른 썩기파괴가 남서 방향으로 45° 의 침강각을 나타내며, 사면 상부의 단면은 제2 전단절리면을 따른 평면파괴가 남서 방향의 45° 의 경사각을 나타낸다(그림 5. 참조). 그림 5.에 각 불연속면에 따른 파괴양상 및 파괴방향을 평사투영도에 작성하여 불연속면에 따른 예상 파괴양상 및 방향을 나타내었다.

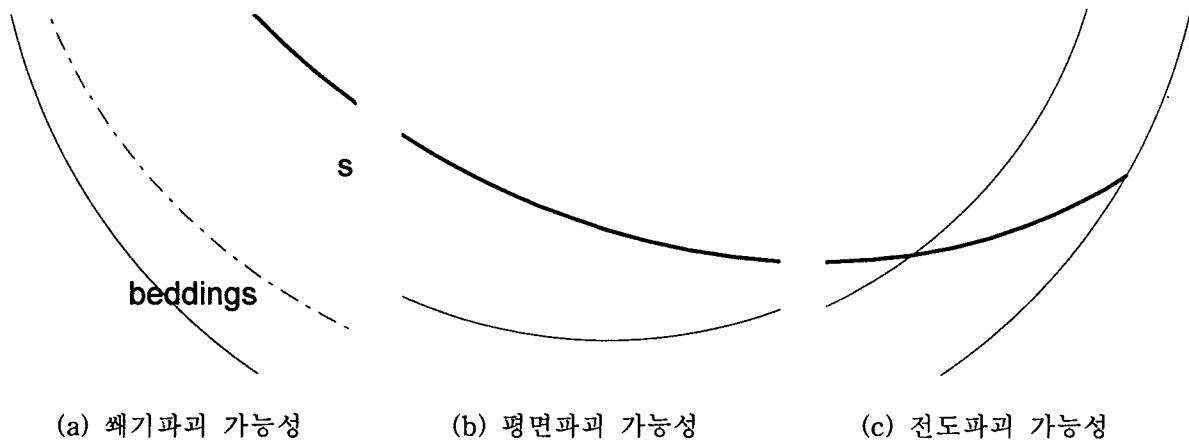


그림 5. 불연속면에 대한 파괴 가능성

3.3.2 전체사면의 안정성

본 사면에서 취약부위인 대표적인 단면 3개소(STA. No. 14+000, STA. No. 16+000, STA. No. 17+000)의 안정해석에 일반적으로 많이 이용되는 한계평형이론 및 암반의 평면파괴해석에 근거한 사면 안정해석을 실시하였다. RMR 분류법으로 평가된 본 과업지역의 암반상태는 RMR class V인 매우 불량한 암반에 해당되고, 총점수가 20점 미만인 경우 암반의 마찰각은 15° 이하, 점착력은 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하이다(현대산업개발, 2001). 또한, 본 과업 설계사면은 대체로 구배로만 볼 때는 안전측에 속하는 사면이지만 붕괴가 발생한 상태이므로 물성치는 시험에서 얻은 값을 이용하되 본 사면의 전반적인 강도정수는 붕괴 사면의 평면파괴 역해석을 이용하여 붕괴시의 강도정수를 도출하였다. 절토사면의 파괴가 발생한 풍화암층을 대상으로 우기시의 최소안전율(한국도로공사)인 1.2에 미달하는 값과 시험결과치 반영 등을 참고하여 평면파괴 역해석을 통하여 얻은 합리적인 강도정수로 점착력은 $0.2\text{kg}/\text{cm}^2$, 내부마찰각은 26° 로 결정하여 PC STABL 5M 프로그램에 적용하였다. 표 8.에는 해석에 사용된 물성치를 나타내고, 표 9.에는 평면파괴에 대한 해석결과를 나타낸다. 해석결과, 표 9.에서 나타낸바와 같이 대표적인 3사면 모두 안전율 F_s 가 1.2에 근접하는 값을 나타내므로 적용된 c, ϕ 값이 합리적인 것으로 판단된다.

표 8. 평면파괴해석에 사용된 물성치

STA. No.	사면높이 H(m)	사면구배	단위중량 $\gamma_t(t/m^3)$	내부마찰각 $\phi(^{\circ})$	점착력 (t/m^2)
14+000	30.4	1 : 1.6 (32°)	2.50	26	2.0
16+000	30.4	1 : 1.6 (32°)	2.50	26	2.0
17+000	24.7	1 : 1.6 (32°)	2.50	26	2.0

표 9. 평면파괴에 대한 해석결과

STA. No.	파괴양상	A(m^2/m)	W(t/m)	U(t/m)	V(t/m)	F _s
14+000	전체파괴 (H=30.4m)	59.16	608.79	159.72	14.58	1.13
16+000	전체파괴 (H=30.4m)	60.93	613.92	141.66	10.81	1.196
17+000	전체파괴 (H=24.7m)	47.23	399.71	111.93	11.23	1.196

평면파괴 역해석을 통하여 산출한 강도정수($c=0.2kg/cm^2$, $\phi=26^{\circ}$)를 사용하여 파괴부 사면의 층리면의 평균경사인 25°내외에서 파괴가 발생할 때의 안전율을 범용 사면안정해석 프로그램인 PC STABL 5M을 사용하여 안정해석을 실시하였다. 해석에 사용된 시공사면의 지반 물성치는 표 10.에 나타낸다.

표 10. 시공사면의 지반 물성치

구 분	$\gamma_t(g/cm^3)$	$c(kg/cm^2)$	$\phi(^{\circ})$	비 고
토 사	1.72	0.35	30	시험결과치
풍화암층	2.50	0.2	26	역해석결과치
연 암 층	2.70	2.5	25	시험결과치

STA. No. 14+000, STA. No. 16+000, STA. No. 17+000의 시공단면에 대하여 건기 및 우기시 사면의 안정성을 검토하여 그 결과를 표 11.에 나타냈다.

표 11. 시공사면 해석결과

단면	안전율(F _s)		비고
	건기시	우기시	
STA. No. 14+000	1.460	1.073	기준안전율 건기시 : 1.5 우기시 : 1.2 (한국도로공사)
STA. No. 16+000	1.508	1.142	
STA. No. 17+000	1.614	1.251	

표 11.에서 알 수 있는 바와 같이 평면파괴 역해석에서 우기시 최소안전율 일 때의 강도정수를 사용하여 사면안정해석을 실시한 결과 STA. No. 14+000와 STA. No. 16+000 단면에서 우기시에 한국도로공사의 사면안전율(F_s) 기준치인 F_s = 1.2에 미달하므로 사면붕괴가 발생한 현장의 특성에 본 해석의 적용 강도정수가 적합한 것으로 판단된다. 표 12.에는 해석에 사용된 붕괴사면의 지반 물성치를 나타낸다.

표 12. 붕괴사면의 지반 물성치

구 분	$v_t(\text{g/cm}^3)$	$c(\text{kg/cm}^2)$	$\phi(^{\circ})$	비 고
토 사	1.61	0.14	20	
풍화암층	2.00	0.2	25	
연 암 층	2.70	2.5	25	

현재 붕괴가 발생된 현사면에 대하여 풍화암층의 $v_t=2\text{g/cm}^3$ 으로, $\phi=25^{\circ}$ 로 하향 조정하여 안정해석을 실시한 결과를 표 13.에 나타냈다.

표 13. 붕괴사면 해석결과

단면	안전율(F_s)		비고
	건기시	우기시	
STA. No. 14+000	1.488	1.112	기준안전율 건기시 : 1.5 우기시 : 1.2 (한국도로공사)
STA. No. 16+000	1.558	1.188	
STA. No. 17+000	1.875	1.493	

표 13.에서 알 수 있듯이 평면파괴 해석수행에 있어서 우기 시 최소안전율 1.2일 때의 강도정수로 사면안정을 해석한 결과 현재의 붕괴사면도 기준치에 근접하므로 붕괴 후 방치된 현 사면에 대한 보강이 필요하다고 사료된다. 또한, 이 결과는 수회 답사한 현장의 절취사면에서 사면이 붕괴 후 도로측으로 변위거동을 하고 있는 것을 육안관찰한 결과와도 일치된다. 따라서, 본 사면의 보강대책이 요망된다.

3.4 대책공법

3.4.1 개요

본 현장의 STA. No. 14+000 ~ STA. No. 18+000(L=80m) 사면은 층리와 절리, 단층면을 따라 기 파괴가 발생한 상태이며, 붕괴사면을 대상으로 평사투영해석과 한계평형이론에 의한 사면안정해석을 수행한 결과, 불안정한 상태로 나타났으며 향후 추가적인 파괴의 발생가능성이 충분히 존재하여 적절한 대책공법이 요망되는 상황이다. 따라서, 본 장에서는 현장에서 합리적으로 적용될 수 있는 대표적인 5종(FRP 보강 그라우팅 공법, Rock Anchor공법, Rock Bolt공법, Gabion공법 및 사면구배완화공법 등)의 대책공법들에 대하여 검토를 수행하고 적절한 대책공법을 제시하고자 한다.

3.4.2 FRP보강 grouting 공법

붕괴된 사면에 대하여 TALREN97을 사용하여 FRP보강 grouting공법 적용에 의한 안정해석을 실시하였다. 표 14.와 표 15.는 각각 안정해석시 사용된 FRP의 제원과 안정해석후 예상되는 최소안전율을 나타낸다.

표 14. 적용된 FRP 제원

내경	ø37mm
두께	5t
인장강도	10.5t
설치 길이	8m, 10m
설치 각도	20°
수평설치 간격	2.5m
연직방향거리 간격	2.5m

표 15. FRP 공법 적용시 해석결과

구분	안 전 율		기준 안전율	지하수위 조건	비고
	건 기 시	우 기 시			
보강전	1.42	1.14	건기시 : 1.5이상	건기시 : 간극수압계수 0.3 적용	
보강후	1.64	1.34	우기시 : 1.2이상	우기시 : 지표면	

그림 6.에는 대표적인 단면에서 FRP 공법을 적용한 단면도를 나타낸다.

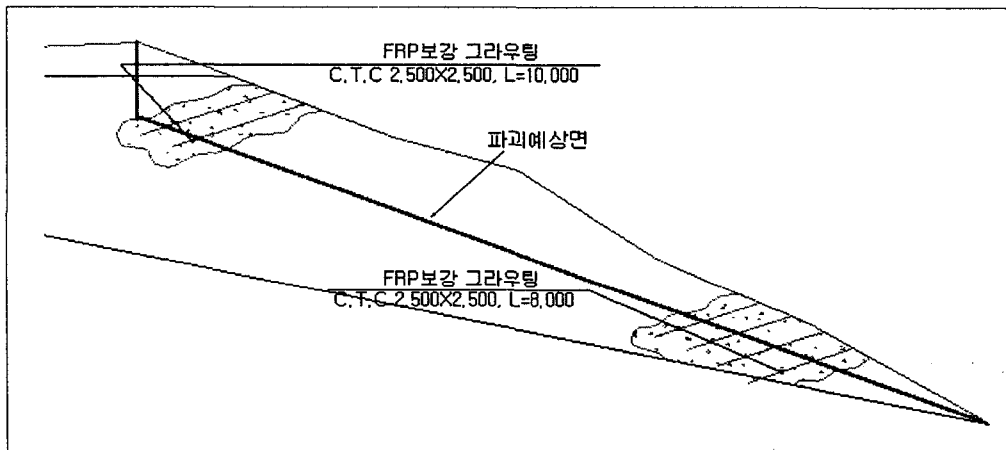


그림 6. FRP보강 그라우팅 단면도

3.4.3 Rock Anchor 공법

붕괴된 사면에 대하여 Rock Anchor 보강후 범용 사면안정해석 프로그램인 PC STABL 5M을 사용하여 Rock Anchor 보강에 의한 안정해석을 실시하였다. 표 16.과 표 17.은 각각 안정해석시 사용된 앵커의 제원과 안정해석후 예상되는 최소안전율을 나타낸다.

표 16. 적용된 Rock Anchor 제원

자유장 길이	$L_f = 10 \sim 15m$
정착장 길이	$L_b = 9m$
천공 직경	100mm
수평설치 간격	3m
연직설치 간격	2m
설치 각도	$\theta = 15^\circ$

표 17. Rock Anchor 공법 적용시 해석결과

단면	안전율(F_s)	
	건기시	우기시
STA. No. 14+000	1.873	1.471
STA. No. 16+000	2.241	1.741
STA. No. 17+000	2.446	1.922

그림 7.에는 대표단면(STA. No.14+000)에 대한 Rock Anchor 설치위치 및 간격을 나타낸다.

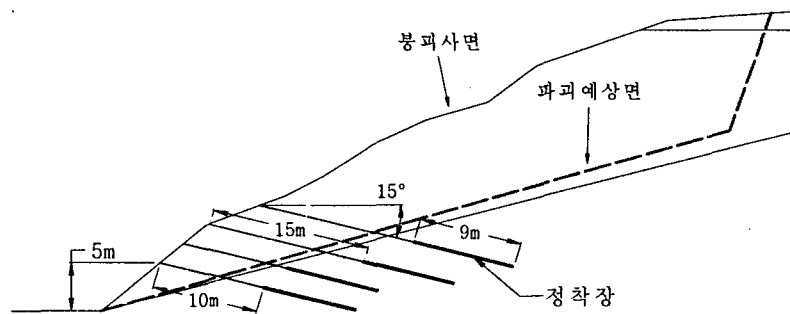


그림 7. STA. No. 14+000 사면의 Rock Anchor 설치 단면도

3.4.4 Rock Bolt 공법

붕괴된 사면에 대하여 Rock Bolt 보강전, 후의 안정해석을 실시하였다. 그림 8.에는 안정을 유지할 수 있는 시공단면도를 나타낸다.

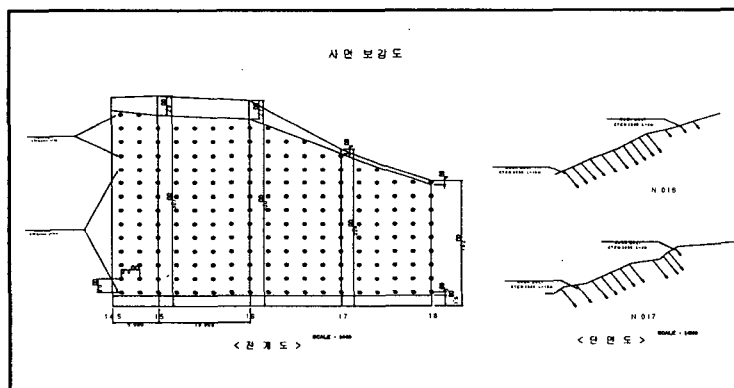


그림 8. Rock Bolt 시공 단면도

3.4.5 사면구배 완화공법

본 공법은 절취사면 파괴요인을 제거하는 가장 손쉬운 공법으로서 현장사면의 안정성에 문제가 발생할 경우 용지매수 및 사토처리 등의 여건이 허락하는 한 많이 적용되는 공법이다. 본 사면에 대해서는 상, 하단에 걸쳐 평면파괴가 기 발생한 상태이므로 역해석을 수행하여 실험치 및 기존 문헌자료 등을 토대로 강도정수를 산정하고 그 값을 적용한 상태에서 합리적인 경사로 사면구배를 완화시켜 사면의 안정을 피하고자 한다. 시행착오법에 의거하여 다양한 구배로 해석을 수행한 후 파괴암체를 제거하는 범위에서 가장 경제적이고 효율적인 대책사면구배를 형성하였으며 대표적인 단면에 따라 다소간의 차이는 있으나 그림 9.과 같이 사면구배를 설정하였다. 기존의 동일 사면부의 시공결과와 통일을 기하기 위하여 직고 5m 간격으로 1m 폭의 소단을 설치하는 형상으로 하며, 붕괴사면의 파괴암체를 대부분 제거하기 위해 초기에 직고 5m까지는 1 : 3.0, 그 상단부는 전체를 1 : 2.0의 구배를 유지하는 것으로 하여 해석을 실시하였다.

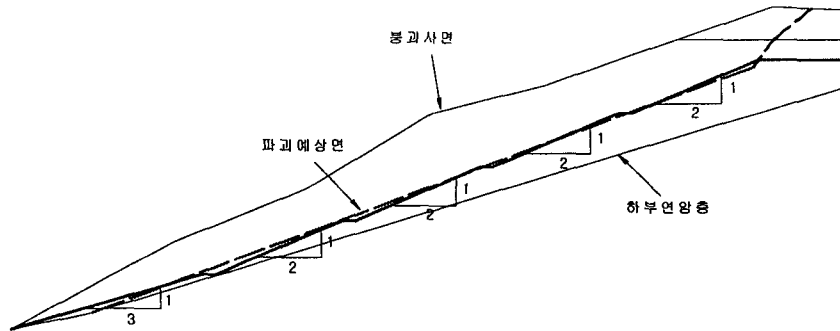


그림 9. 사면구배 완화공법 모형도

해석은 범용 사면안정해석 프로그램인 PC STABL 5M을 사용하여 안정해석을 실시하였다.

STA. No. 14+000, STA. No. 16+000, STA. No. 17+000의 3개 단면에 구배를 완화하여 건기 및 우기 시 사면의 안정성을 검토하였다. 표 18.에는 사면구배 완화공법 적용시 사면안정 해석결과를 나타낸다.

표 18. 사면구배 완화공법 적용시 해석결과

단면	안전율(F_s)		비고
	건기시	우기시	
STA. No. 14+000	3.632	3.225	기준안전율 건기시 : 1.5 우기시 : 1.2 (한국도로공사)
STA. No. 16+000	2.423	2.022	
STA. No. 17+000	2.676	2.250	

표 18.에서 알 수 있는 바와 같이 대표적인 3개 단면 모두 1 : 2의 구배를 유지할 경우 건기시와 우기시에 한국도로공사의 사면안전율(F_s) 기준치인 $F_s = 1.5$ 와 1.2 를 크게 상회하는 값을 나타내나 본 붕괴사면의 주 파괴요인의 일종인 층리면의 경사각이 $16 \sim 25^\circ$ 를 나타내고 있으므로 원호활동파괴해석으로

파악이 불가능한 암반특성에 기인한 요인의 제거를 위하여 사면구배를 1 : 2가 되게 사면구배 완화공법을 적용하게 되면 사면의 안정성이 충분히 확보될 것으로 판단된다. 단, 사면구배 완화공법의 적용시 본 사면의 표층암반은 풍화진행속도가 빠르므로 표면보호공법을 적용하여 암반풍화의 촉진을 방지할 필요가 있으며 사면 정상부에 우수 등의 침투를 방지할 수 있는 산마루 측구 설치 등의 조치가 요망된다.

3.4.6 GABION 공법

본 사면에 적용된 높이 6m의 GABION 옹벽 치수는 그림 10.에 나타내었다.

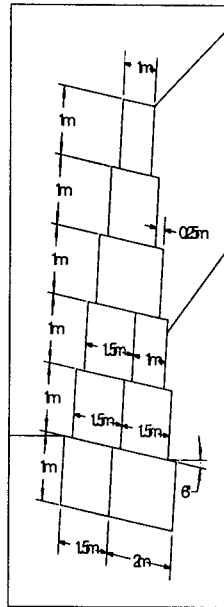


그림 10. GABION 옹벽 치수

붕괴된 사면에 대하여 GABION 옹벽 설치후 범용 사면안정해석 프로그램인 PC STABL 5M을 사용하여 안정해석을 실시한 결과를 표 19.에 나타내었다.

표 19. GABION 공법 적용시 해석결과

단면	안전율(F_s)	
	건기시	우기시
STA. No. 14+000	2.010	1.594
STA. No. 16+000	1.770	1.364
STA. No. 17+000	1.881	1.476

그림 11.은 계비온(GABION) 설치 단면도를 나타낸다.

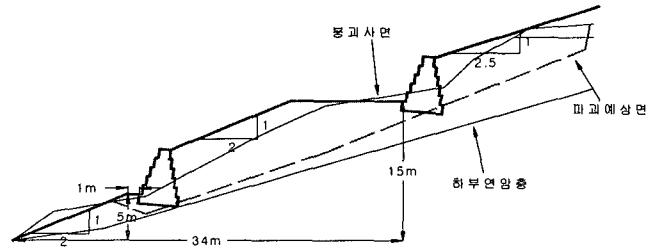


그림 11. STA. No. 17+000 사면의 GABION 설치 단면도

3.5 결과

본 사면에 대한 대책공법으로 사면구배완화공법, Rock Anchor보강, Rock Bolt+Grouting 보강, FRP 보강 및 GABION 옹벽 설치 등에 대한 검토를 수행하였으나 현장 여건상 FRP 보강공법의 적용이 가장 합리적인 것으로 판단되어 보강을 실시하고 약 2년이 경과된 현재까지 문제발생이 없이 안정된 상태를 유지하고 있다.

4. 결론

전술한바와 같이 본 고에서 수행한 두 종류의 대규모 붕괴 절취사면은 암종 및 암상이 복잡 다양하게 형성되어 있으며 암석이 괴상으로 존재하기도 하고 암반사이에 두꺼운 토층이 출현하는 등 상식적으로는 이해하기 힘든 자연이 만든 불균질성 지층이 대상이다. 따라서, 불확정요인이 많이 존재할 수 있는 상황이다. 일반적으로 절취사면의 설계 시에는 암반의 역학적 특성을 기준으로 일률적인 사면구배를 적용하는 것이 통례이나 사면의 내적인 불안정요소와 외적인 기상이변 등을 고려할 때 안이한 구배의 적용은 문제가 있는 것으로 판단된다.

향후 건설기술자는 설계 시 적용하는 절취사면의 물리 역학적 특성을 정확하게 얻을 수 있도록 현장 조사시에 많은 노력과 경비를 소요할 필요가 있으며, 설계시 기 형성되어있는 인근의 절취사면구배를 고려하여 사면의 구배를 조정할 필요가 있는 것으로 판단된다. 대책공법의 적용에서도 알 수 있듯이 사면구배완화공법 적용시 풍화특성이 큰 암반사면에서도 일반적인 토사의 자연안식각인 약 54도의 구배로 사면구배를 조정할 경우 붕괴 문제발생을 미연에 방지할 수 있을 것으로 사료되는데 영구적인 대규모 절취사면을 조성하는 경우 합리적인 시공법과 경제성도 충분히 고려할 필요가 있으나 안전제일의 공사가 되어 국민이 안심하고 국가기간시설물을 이용할 수 있도록 하는 것이 가장 중요할 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

1. 현대산업개발(2001), "지반조사보고서", p.298, p.395.
2. Bieniawski(1989), "Engineering rock mass classifications", John Wiley & Sons, Inc., N.Y.
3. Bell, F. G.(1992), "Engineering in Rock masses", pp.65~66.
4. Hoek, E., Bray, J.W.(1981), "Rock Slope Engineering", pp.104~112. Appendix 1.