

단층파쇄대의 사면안정성 연구

A Study on Slope Stability of Faultzone

이수곤¹⁾, Su-Gon Lee, 금동현²⁾, Dong-Heon Geum

¹⁾ 서울시립대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

²⁾ 서울시립대학교 토목공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

SYNOPSIS : There are complicated and big shear zone which is about several tens meter in the middle of the cutting slope in this study area. And slope stability analysis is very hard because many fault zones are gathered in the shear zone. This study furnish informations of scrutinized geological survey, numerical stability analysis, reinforcement work analysis and computation of ground mass properties. Then this offer rational slope stability analysis, rock mass decision and counterplan.

주요어(key word) : big shear zone, slope stability analysis, fault zone, rock mass decision,

1. 서 론

본 연구지역에 나타나는 절취사면은 지반이 매우 복잡하고 사면 중간에 수십 m의 대규모 단층파쇄대가 존재하고 있다. 또한 단층파쇄대 내부에는 수많은 단층들이 모여있어 파쇄와 풍화가 심하기 때문에 사면의 안정성 분석에 큰 어려움이 있다. 본 연구는 전라남도 부안지역의 도로공사 및 포장공사의 시공 사례에 따른 정밀지표지질조사, 지반강도정수산정, 수치안정성 해석, 보강대책연구 등을 수행함으로써 단층파쇄대 지반의 합리적인 사면안정성 분석, 압판정 및 대책사례를 제시한다.

2. 지반조사

2.1 정밀지표지질조사

본 절취사면에 관하여 정밀지표지질조사가 수행되었다. 본 연구지역은 수직으로 발달하는 수 많은 단층들로 인하여 단층파쇄대가 발달하는데 파쇄와 풍화가 심하여 풍화암이 대부분이다. 본 단층파쇄대(풍화대)이 사면의 안정성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

2.1.1 지질특성

본 연구지역의 암석은 화산기원의 퇴적암으로 구성되어 있다. 그 중에서 화산각력암(Volcanic breccia), 응회암(Tuff)이 주로 분포하며 간혹 안산암(Andesite)도 존재한다. 본 지역은 대규모 단층대(Fault Zone)으로서 무수히 많은 단층들(연장성이 10~20m)이 발달한다. 특히 본 절취사면의 중앙부에는 수직으로 5~7m 폭으로 두쌍의 단층파쇄대가 존재하는데 암석들의 분포는 단층각력암(Fault breccia)이 많고 풍화가 심하며 또한 열수변질작용에 의한 점토성 토층(Kaolinite, Chlorite)이 존재한다. 그리고 간혹 단층파쇄대에는 산성암맥(Acidic dyke)이 얇게 존재한다.

2.1.2 불연속면의 측정

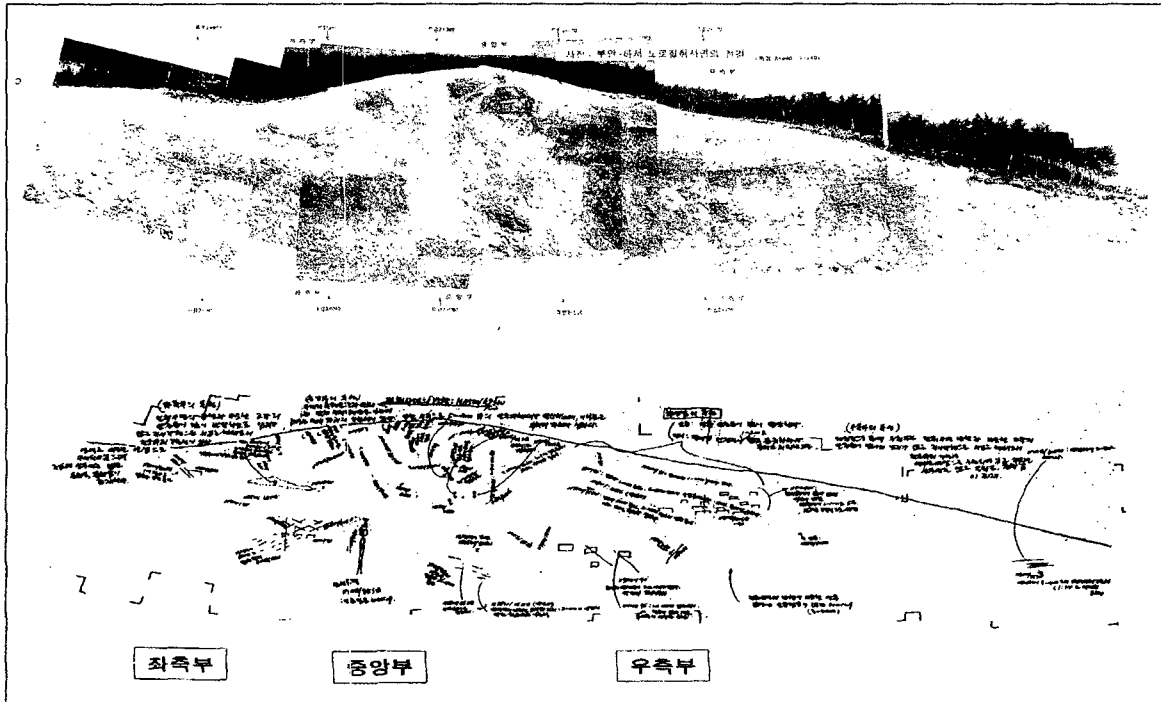
① 단층파쇄대(Fault Zone, Shear Zone)

본 지역은 대규모의 단층파쇄대 지역으로 단층의 발달이 많은데 우세한 단층들은 대부분 고각으로서

방향은 불규칙한 편이다. 단층들은 대체로 연장성이 10m 이상으로 긴 편이고 단층틈새는 단층점토가 충전된 경우도 있고, 수cm~수m 두께의 단층파쇄암이 충전하고 있다. 단층들은 대체로 고각인 경우가 대부분이고 간혹 약간 경사된 경우도 있다.

② 절리

절리의 발달은 많으나 불규칙한 편이다. 우세한 절리들은 고각인 절리도 있지만 40° 정도로 완만한 절리가 많은 편이다. 절리의 연장성이 1~3m 정도로 짧고 틈새는 비교적 치밀한 편이다. 절리에 의한 대규모 암반의 사면안정성 위험요소는 비교적 적은 편이지만 부분적으로는 평면파괴, 쉐기파괴, 전도파괴 형태의 암괴붕괴의 위험성은 존재한다.⁽¹⁾



<그림 1> 연구지역의 절취사면 및 불연속면(절리, 단층) 분포

3. 암판정 분석

3.1 슈미트 해머 측정

현장암반의 강도를 측정하기 위하여 슈미트 해머를 이용한 정량적인 방법을 사용하였다. 현장암반강도의 측정은 현장 암반의 암질구분과 RMR을 이용한 암반분류를 위하여 반드시 필요한 측정항목이다. 본 지역의 지반 특성상 절취면 전반에 걸쳐 암반이 존재하고 거의가 SHV=25~50 정도인 연암-경암이다 하지만 단층파쇄대 지역이므로 단층주변부는 SHV=10~20 정도의 풍화암도 곳곳에 나타나고 있다.

3.2 실내 일축압축강도 시험

현장에서 슈미트 해머 타격시험을 한 암석 중에서 대표적인 8개의 암석시료를 채취하여 정량적인 암판정을 위하여 실내일축압축 강도시험을 수행하였다.

3.3 실내 탄성과 속도시험

현장에서 대표적인 9개의 암석 (일축압축강도 시험에서 사용된 동일한 시료이다)을 채취하여 실내에서 암편을 탄성과 탐사 규격으로 성형한 후에 건조 상태에서 실내탄성과속도 (P-wave, S-wave)를 측정하였다. 실내 시험암석의 탄성과속도는 3.57-5.73 km/sec의 높은 수치로서 건설표준셈의 암분류 기준에 따

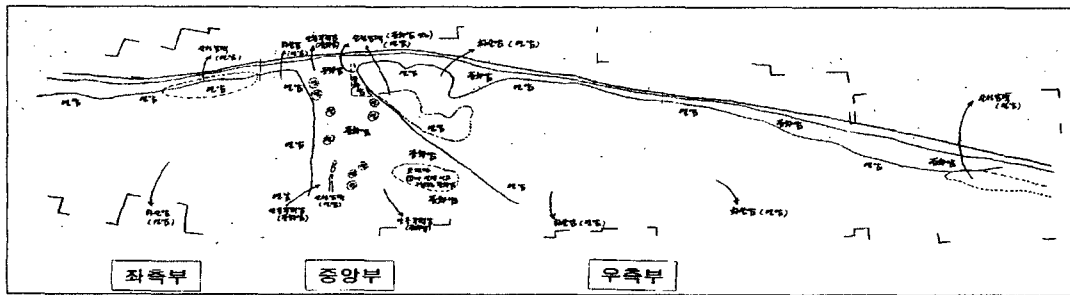
르면 연암-경암으로 분류된다. 다만 단층파쇄대 지역은 매우 낮아서 1.44km/sec 이다.

3.4 현장 탄성과 속도시험

본 사면의 좌측, 중앙, 우측부 세부분으로 나누어서 분석한 결과 사면의 정상에서 2~3m 정도가 풍화 토층이며 풍화토층에서 약 5-7m정도가 풍화암~약한연암으로 추정되며 사면의 하부까지는 보통암~경암으로 추정되었다.

3.5 암판정 분석결과

상기와 같이 현장에서의 육안 판정 슈미트해머 측정에 부가하여서 보다 정확한 암판정을 실내에서 일축압축강도시험과 탄성파속도를 수행한 결과를 상호 비교 검토하면 슈미트해머 결과로서 추정한 일축압축강도 값과 실제로 시험한 일축압축강도 수치는 비슷하다.



<그림 5> 암판정 분석결과

4. 사면 안정성 분석

암반사면의 안정성을 검토하기 위해서 (1) 절리가 일정한 방향으로 발달하는 경우의 절리특성에 따라서 직선적인 파괴형태로 붕괴되는 사면안정성을 평사투영망 해석법과 한계평형법으로서 검토함과 동시에 (2) 절리의 방향성이 뚜렷하지 않더라도 풍화가 심하고 파쇄가 심한 경우에 대규모로 원형파괴 형태로 붕괴될 경우를 고려한 암반의 안정성 검토를 수치해석적 방법인 SLOPE/W, FLAC 프로그램을 사용하여 수행하였다.

4.1 전단강도 특성

4.1.1 암석 절리면 전단시험

사면안정의 수치적 계산을 위한 재료의 전단강도 정수를 구하기 위하여 연암에서 경암까지의 암반에 대하여 마찰각과 점착력을 측정하기 위한 직접전단시험을 실시하였다.

<표 1> 암석 절리면 전단시험 결과

Site No.(STA.2+040-140)	Cohesion (kg/cm ²)	Friction (degree; °)
좌측(연암)	2.7	24
중앙(연암)	1.8	28
우측(경암)	0	31

4.1.2 토질/풍화암 직접전단시험

본 사면에 관하여 직접전단시험을 통한 시료의 물성치와 전단강도 정수를 구한 결과는 다음의 <표 2>와 같다. 또한 자연상태보다도 여름 폭우시에 고려될 수 있는 함수상태에서 전단강도 지수(c, φ)가 낮아지는 것을 알 수 있다. 그리고 사면붕괴 조건을 고려한 최대전단 강도보다도 사면 붕괴 후의 조건을 고려한 잔류전단강도가 적어지는 것을 알 수 있다.

<표 2> 풍화암과 풍화토의 강도정수

Site No.	Class	Moisture content (%)	$\gamma_c(t/m^3)$	$\gamma_e(t/m^3)$	Cohesion(kg/cm ²)		Friction(degree: °)	
STA. 2+040-140	(1)	26.0	1.8	1.43	peak	0.04	peak	38.4
					resid.	0.03	resid.	36.5
	(2)	23.9	2.02	1.63	peak	0.04	peak	32.2
					resid.	0.03	resid.	26.8
	(3)	30.8	1.75	1.34	peak	0.1	peak	30.6
					resid.	0.06	resid.	28.7
	(4)	31.4	1.77	1.36	peak	0.21	peak	26.9
					resid.	0.13	resid.	21.9
	(5)	31.5	1.78	1.36	peak	0.23	peak	19.8
					resid.	0.13	resid.	18.3

4.2 암반자체의 전단강도 특성

4.2.1 RMR 분류

본 지역은 단층파쇄대에 파쇄와 풍화가 심하며, 특히 지하수의 유출이 많으므로 지하수에 대해서 매우 보수적인 점수를 부여하였다. 본 지역에 측정된 RMR분류는 다음 표 3과 같다.

<표 3> RMR을 이용한 암반의 강도정수 해석결과

사면		RMR에 따른 강도 정수		
		RMR 값	C(kg/cm ²)	ϕ (°)
STA.2+040~	상부(풍화암-연암)	23	1 ~ 2	15 ~ 25
STA.2+140	하부(연암-경암)	33	1 ~ 2	15 ~ 25

4.2.2 GSI

본 연구에서는 Hoek-Brown 파괴기준을 이용한 암반의 강도정수 해석방법과 RMR 분류 방법중의 등급에 따른 강도정수 해석방법, 그리고 실내 삼축압축 강도시험을 통해서 수치해석을 통해 얻은 m_i 값과 s 값을 이용한 강도정수 해석방법을 이용하여 가장 안전측의 강도정수를 얻어내었다.

<표 4> GSI를 이용한 암반의 강도정수 해석결과

사면 (STA.2+040-2+140)		해석결과				
		일축압축강도(Mpa)	m_i	GSI 값	C(kg/cm ²)	ϕ (°)
1	상 부(풍화암-연암)	60	16(화산암)	30(Blocky/seamy & poor)	7.26	47
	하 부(연암-경암)	90	16(화산암)	40(Blocky/seamy & fair)	9.23	55

4.3 지반강도정수 산정

본 연구의 지반강도정수 산정은 암석절리면 전단시험과 토질절리면 전단시험으로 얻어진 점착력과 마찰각과 RMR분류를 이용한 수치계산방법과 GSI를 이용한 방법으로 얻어낸 점착력, 마찰각을 비교하여 안전측의 설계를 하기 위한 값을 선택하였다. 다음 <표 5>는 RMR, GSI 암석 및 토질 절리면 전단시험을 이용하여 가장 대표성이 있다고 판단되는 강도정수들을 사용한 것이다.

<표 5> 본 프로그램 해석시 사용한 강도 정수

사면(STA.2+040~2+140)		강도 정수		
		C(t/m ²)	ϕ (°)	$\tau(t/m^2)$
좌측부 (STA.2+040~STA.2+070)	상 부(풍화토)	4	36.5	1.8
	중간부(풍화암-연암)	5	28	2.3
	하 부(연암-경암)	8	30	2.6
중간부 (STA.2+070~STA.2+110)	상 부(풍화토)	2.3	19.8	1.8
	중간부(풍화암-연암)	5	28	2.3
	하 부(연암-경암)	8	30	2.6
단층파쇄대 (STA. 2+080부근)	상 부(풍화토)	0.3	26.8	2.0
	중간부(풍화암-연암)	1.3	21.9	1.8
	하 부(연암-경암)	1.3	18.3	1.8
우측부 (STA.2+110~STA.2+140)	상 부(풍화토)	3	28.7	1.8
	중간부(풍화암-연암)	5	28	2.3
	하 부(연암-경암)	8	30	2.6

4.4 절리면에 의한 직선적인 파괴가능성 검토

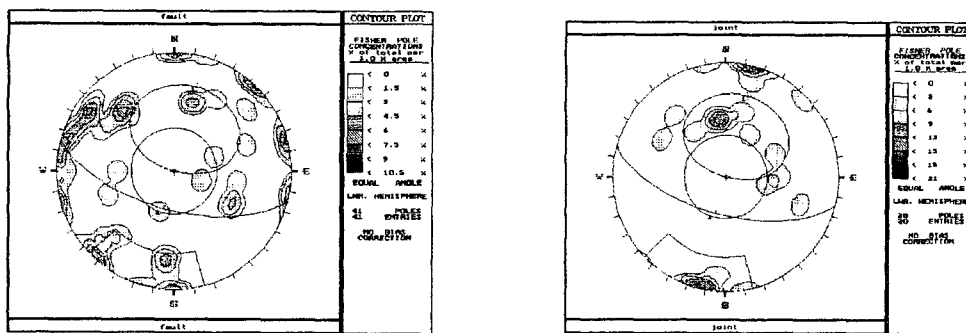
암반사면내에 절리면에 의한 직선적인 파괴가능성을 검토하기 위하여 평사투영망 해석법과 한계평형 해석법을 사용하였다.

4.4.1 평사투영망 해석

본 사면의 불연속면은 N20W/80SW, N80E/80NE 등이 많이 분포하고 있으나 전체적으로 보아 불규칙한 불연속면이 많이 존재한다. 불연속면에 의한 암괴의 붕괴가능성을 검토하기 위하여 본 지역은 붕괴 규모 특성상 크게 2부분으로 나누었다.

TYPE 1 : 비교적 규모가 작은 국부적인 암괴의 붕괴 가능성(평면, 썩기, 전도파괴형태)이 있는 부분들로 본 절취사면의 여러 곳에 산재한다. (ZONE-A, B, C, D, E, G, H, I, J, L 지역)

TYPE 2 : 본 절취사면의 중앙부에 존재하는데 이 지역에는 두 개의 수평단층과 아울러서 고각의 많은 단층들이 존재한다. 여기서 두 개의 수평단층과 고각의 많은 단층들로 인하여 대규모 썩기파괴 형태의 위험성이 있다.(ZONE-F,K,M,O,P,Q,R)



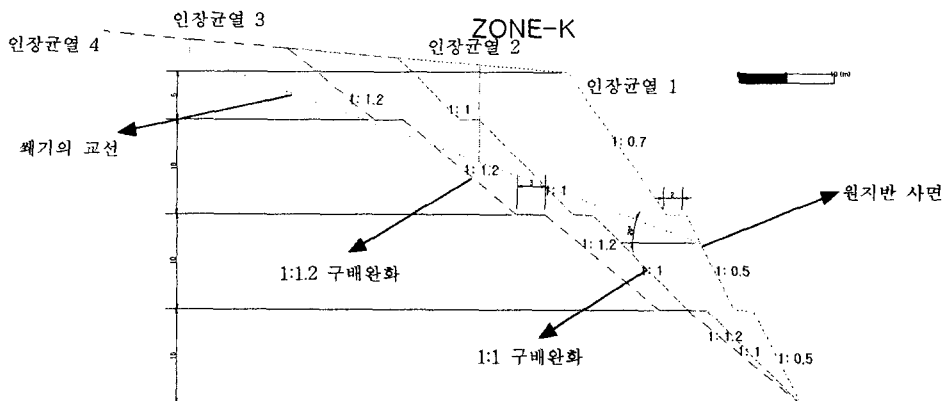
(a) 단층의 발달방향

(b) 절리의 발달방향

<그림 2> 평사투영망 해석결과(DIPS)

4.4.2 한계평형에 의한 해석

본 조사에서는 위험암괴가 있는 지역에 대하여 ZONE-A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, O, P, Q, R, 로 세분하여 구분하고 다시 록볼트 보강의 가능성이 있는 지역 ZONE-D, F, J, K, L, O로 나누어서 한계평형 해석을 실시하였다. 그리고 본 한계평형 해석에서는 평면파괴 지역과 썩기파괴 지역을 나누어서 인장균열이 존재하는 사면과 활동면 전체에 수압이 작용하는 사면으로 나누어 한 단면당 4개의 경우에 대하여 안전율을 검토하였다. 여기서 인장균열은 본 절취면상에서 수행한 정밀지표지질조사의 결과에 따라서 결정된다.⁽²⁾



<그림 6> 한계평형 해석에서의 직선적인 파괴가능성 검토(ZONE-K)

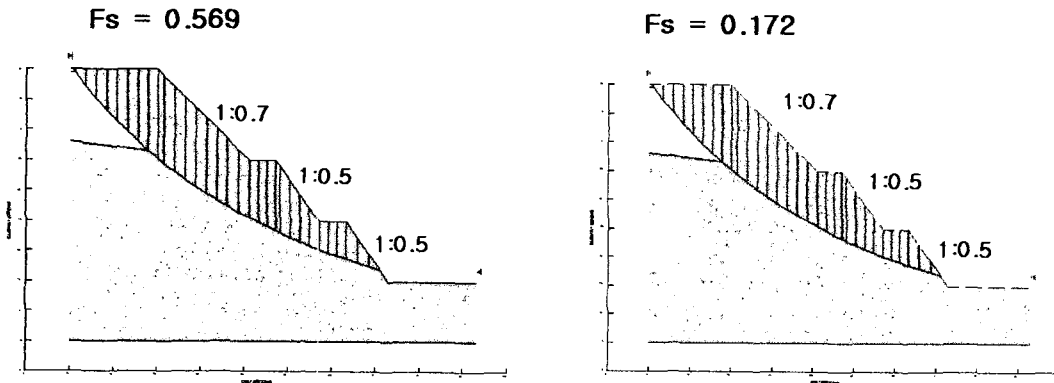
4.5 파쇄와 풍화가 많은 암반사면의 원형파괴 가능성 검토

4.5.1 SLOPE/W 에 의한 안정성 검토

본 조사사면을 좌측부(대부분 연암으로 구성된 부분), 중앙부A(주로 연암으로 구성된 부분), 중앙부B(단층파쇄대로서 주로 풍화암과 풍화토로 구성된 부분), 우측부(대부분 연암으로 구성된 부분)의 4부분으로 나누어 해석을 하였으며 또한 각 사면을 풍화토, 풍화암-연암, 연암-경암의 3부분으로 나누어 지반물성치를 부여하였다. 본 사면은 구배완화 전에 안전율이 건기시 $F_s=1.3-1.6$, 우기시 $F_s=0.2-1.1$ 인 것으로 해석되어 파괴 가능성이 매우 큰 것으로 나타났다

단층파쇄대 구배완화 전(1:0.5)-건기

단층파쇄대 구배완화 전(1:0.5)-우기



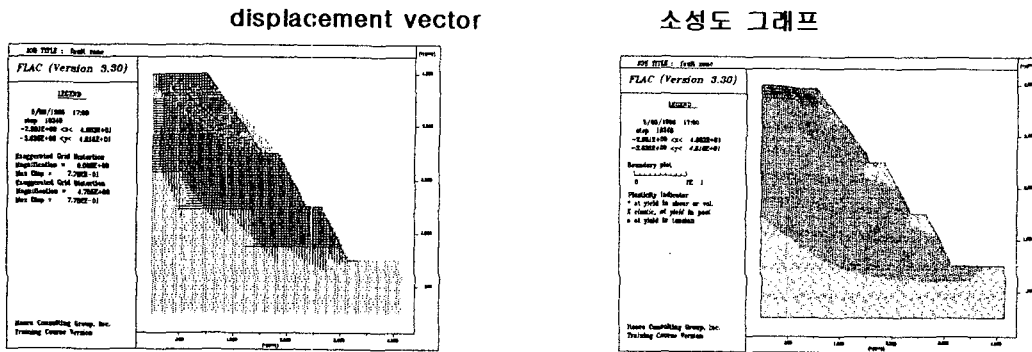
<그림 7> SLOPE/W 에 의한 해석결과(단층파쇄대 지역)

4.5.2 FLAC 에 의한 수치안정성 검토

본 조사사면은 유한 차분법을 사용하는 FLAC을 이용하여 암사면을 연속체로 보고 사면의 형상과 지질조건에 따른 안정성을 검토하였다. 본 사면의 해석결과 좌측부, 중앙부A, 우측부는 1:0.5 설계구배시에 소단부분에서 파괴영역과 소성영역이 발생한 것으로 나타났다.

단층파쇄대 구배완화 전(1:0.5)

단층파쇄대 구배완화 전(1:0.5)



<그림 8> FLAC 에 의한 해석결과(단층파쇄대 지역)

5. 절취사면의 안정화 대책

본 지역은 대규모 단층파쇄대로서 연장성이 수십m 되는 긴 단층들이 매우 많아서 지반이 복잡할 뿐만 아니라, 또한 풍화도 불규칙하게 발달하고 있으므로 현재 기존에 설계된 1:0.5 구배로는 불안하므로 장기적인 안정성 측면에서 최소한 1:1 또는 1:1.2로 구배를 완화해야 한다.

A. 불연속면(절리, 단층)을 고려해 볼 때 절취사면이 불안하다.

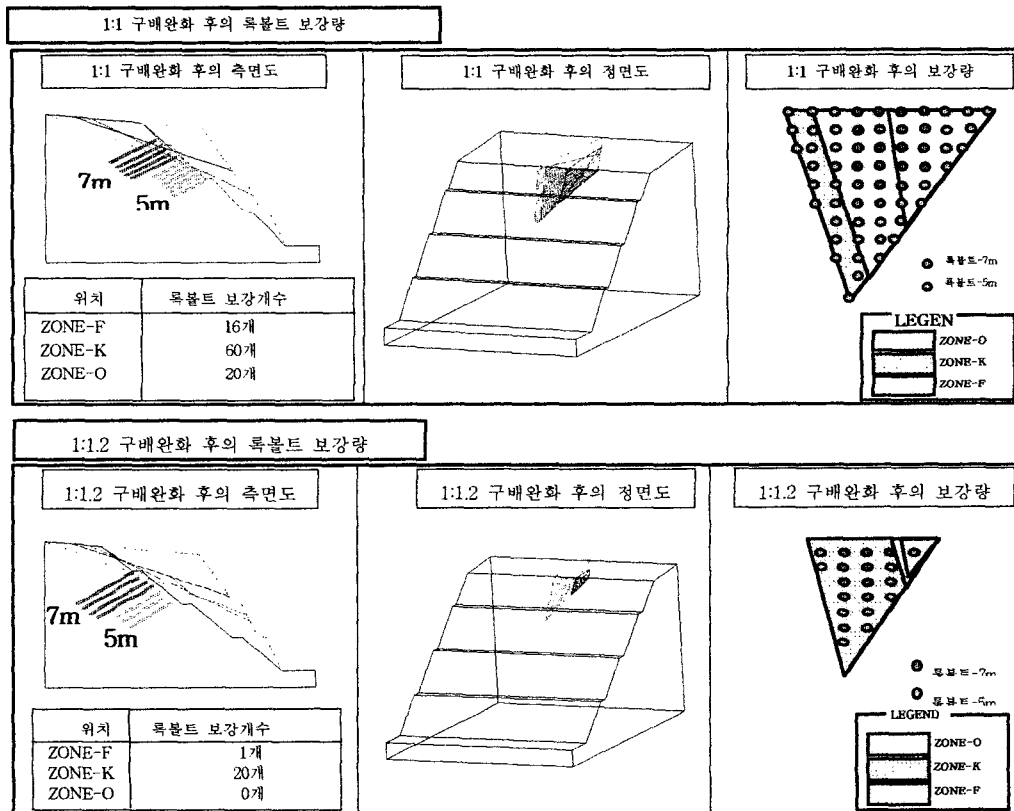
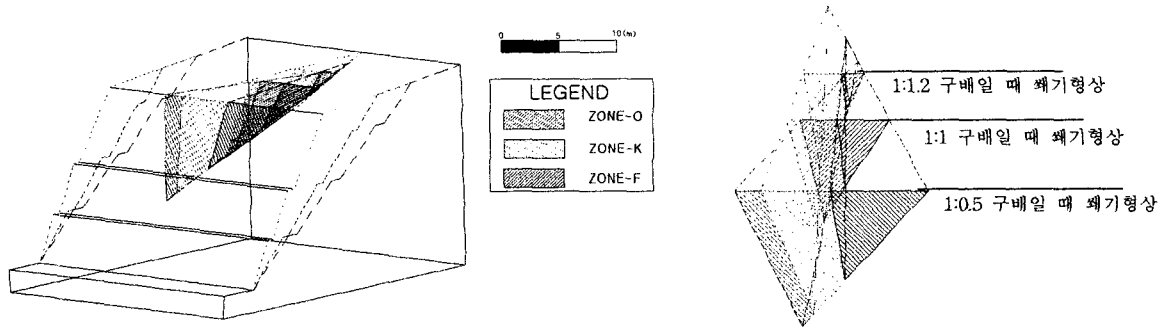
1) 대규모 단층에 의한 직선적인 전도파괴의 위험성이 있다.

절취사면의 좌측부와 우측부에는 대규모 단층(연장성이 15-25m 이상)들이 존재한다. 본 단층들은 절취

사면의 주향과 비슷하면서 거의 수직인 단층들로서 대규모 전도파괴의 가능성이 있다.

- ① 1:1로 구배를 완화하면 전도파괴의 위험성이 남아 있으나 위험압괴의 규모가 작아진다.
 - ② 1:1.2로 구배를 완화하면 1:1 구배완화에 비해 위험압괴의 규모가 작아져 1:1구배보다는 더 안전하다.
- 2) 대규모 단층에 의한 직선적인 썩기파괴의 위험성이 있다.

절취사면의 중앙부에는 두 종류의 수평단층 (실제로는 절취사면을 가로지르면서 발달한다)들이 존재한다. 수평단층은 20-35m로서 긴 편이고 단층틈새에는 5-10cm 정도의 단층파쇄암과 풍화가 심하며, 특히 3-5cm 두께의 단층점토가 충전되어 있다. 본 수평단층을 교차하여서 많은 수직단층들이 발달하므로 수평단층과 수직단층에 의한 썩기파괴의 위험성이 존재한다.⁽³⁾⁽⁴⁾

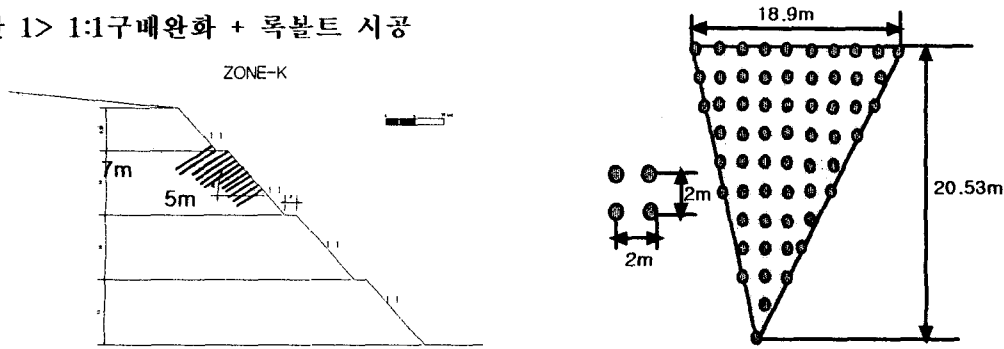


<그림 9> 본 지역에 나타나는 썩기파괴 형상(ZONE-F,K,O)

B. 전체적인 암반의 풍화특성을 고려해 볼 때도 절취사면이 불안하다.

본 지역은 대규모 단층파쇄대지역으로서 풍화도 불규칙하다. 특히 절취사면의 중앙부에는 5-7m 폭의 대규모 단층파쇄대가 수직적인 형태로서 존재하는데 본 단층파쇄대내에는 파쇄도 심하고 거의 풍화암과 풍화토로 구성될 정도로 풍화도 심하므로 사면의 원형파괴 형태로 대규모로 붕괴될 우려가 있다. 수직적인 사면의 안정성을 검토를 해보면 현재 설계된 1:0.5구배에서는 우기시에 불안(안전율이 낮게 나오며, 또한 소성변위가 많이 발생함)하므로 최소한 1:1~1:1.2로 재 절취가 필요하다.

<방안 1> 1:1구배완화 + 록볼트 시공

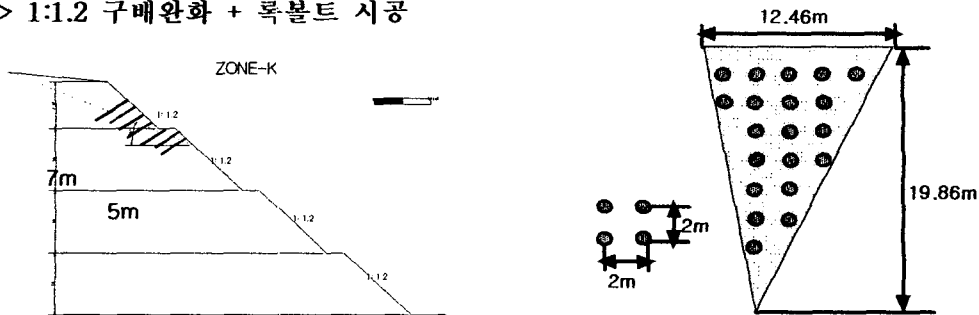


활동파괴면이 20° 경사일 때, 사면의 안전율을 $F_s=1.3$ 으로 유지하기 위하여 요구되는 록볼트 개수

지역	건기안전율 (F_s)	우기안전율 (F_s)	총보강량(ton) (1본당 록볼트의 하중)	록볼트			
				썩기암괴에 대한 보강개수	각도	길이	직경
②	2.09	0.42	17.0(10ton)	2개	30°	5m	25mm
③	1.84	1.03	57.9(10ton)	6개	30°	5-7m	25mm
④	1.83	1.05	601.44(10ton)	60개	30°	5-7m	25mm

<그림 10> 1:1로 구배완화 했을 때의 록볼트 시공 모식도(ZONE-K)

<방안 2> 1:1.2 구배완화 + 록볼트 시공



활동파괴면이 20° 경사일 때, 사면의 안전율을 $F_s=1.3$ 으로 유지하기 위하여 요구되는 록볼트 개수

지역	건기안전율 (F_s)	우기안전율 (F_s)	총보강량(ton) (1본당 받는 록볼트의 하중)	록볼트			
				썩기암괴에 대한 보강개수	각도	길이	직경
③	4.53	1.43	46.57(10ton)	5개	30°	5m	25mm
④	4.58	1.05	192.66(10ton)	20개	30°	5-7m	25mm

<그림 11> 1:1.2로 구배완화 했을 때의 록볼트 시공 모식도(ZONE-K)

6. 결론

본 연구지역의 절취사면은 대규모 단층파쇄대로서 연장성이 수십 m되는 긴 단층들이 매우 많아서 지반이 복잡할 뿐만 아니라 또한 풍화도 불규칙하게 발달하고 있으며 단층틈새로 5-10cm 정도의 단층점토가 충전되어 있다. 또한 단층파쇄대 내부에 존재하는 수평단층을 교차하여서 많은 수직단층이 발달하므로 수평단층과 수직단층에 의한 썩기파괴와 전도파괴의 위험성이 존재한다. 그러므로 본 연구에서는 파쇄와 풍화가 심한 단층파쇄대 지역에서 일어날 수 있는 직선파괴 가능성과 원형파괴 가능성을 모두 고려하여 사면안정성 검토를 수행한 후에 절취구배를 결정하여야 한다.

참고문헌

1. 이수근, "암석과 불연속면의 분류 및 공학적 특성" 토목시공 고등기술강좌(seriesIII), 대한토목학회, 1994, pp.253-338
2. E. Hoek & J. W. Bray "Rock slope Engineering", The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1981
3. Olliver, " Weathering ", Longman, London 1984, pp.270
4. S.R.Hencher " The implication of joints and studies for slope stability", John wiley & sons Ltd, New York, 1987, pp.145-186