

한반도 경상분지 퇴적암의 절취사면활동에 대한 사례연구

A Case Study on the Failure of Cut Slope in Sedimentary Rock of Kyongsang Basin in Korea

정 형식, Hyung-sik Chung*, 김 성환, Sung-hwan Kim**, 유 병옥 Byung-ok You***,

* 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Civil Engineering, Han Yang University, Seoul

** 한국도로공사 도로연구소 수석연구원, Research Director, Highway Research Center, Korea Highway Corporation

*** 한양대학교 토목공학과 박사수료, 한국도로공사 도로연구소 연구원 Completion of doctor course, Civil Engineering, Han Yang University, Researcher, Highway Research Laboratory, Korea Highway Corporation

Abstract : Many failures of rock slope along highway in Korea have occurred in the area formed with layers of gneiss and sedimentary rocks. The layer of sedimentary rock especially showed high frequencies of slope failure. In this paper, a cut slope of sedimentary rock, which is located at a new highway in the area of Kyongsang Basin of Southeast in Korean Peninsula, was considered as the case study. The section chosen was built with sedimentary rock and showed two times of slope failures in April, 1992 and July, 1994. The sliding plane occurred along the failure surface has 16° - 18° of dip angles. A layer of silty clay was inserted along the failure plane and resulted in lower shear strength.

In this paper, we study methods of stabilization and the characteristics of shear strength along the sliding plane. To achieve this objective, we conducted detailed engineering geological investigation of the slope surface, site investigation of boreholes and magnetic survey.

1. 서론

국내 고속도로 절취사면중 편마암과 사암 및 셰일을 이루는 퇴적암층의 사면에서 많은 붕괴가 발생되고 있으며, 특히 퇴적암 사면의 붕괴는 대규모의 붕괴양상을 보이는 것이 특징이다.

본 연구대상사면은 한반도 남측의 중앙고속도로 신설구간에 위치하는 사면으로 북동 40° - 50° (N40-50E)방향으로 놓여져 있다. 본 사면을 이루는 암석으로 중생대 백악기에 형성된 사암 및 셰일의 호층으로 주요 불연속면은 층리(Bedding Plane) 및 단층이 주를 이루고 있다.

STA. 7+260-480 구간의 균열발생 위치도

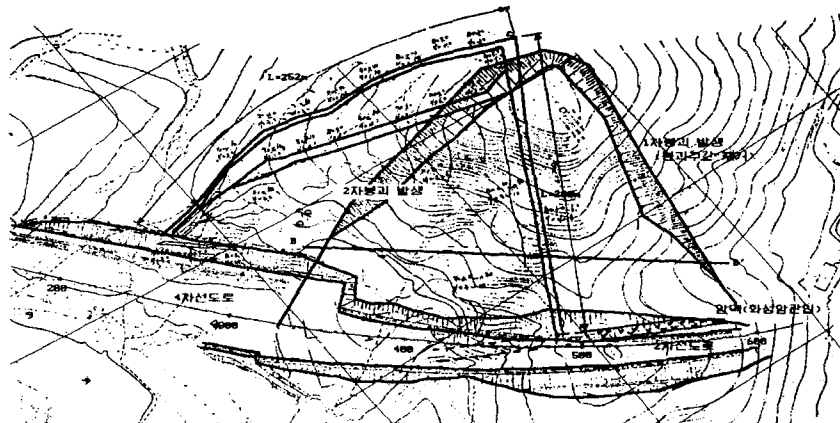


그림 1. 조사지역의 평면도

1차 붕괴는 1992년 4월 10일 14시경 90mm/3일간의 강우후에 1차 사면활동이 발생되어 활동면 상부의 붕괴된 암반을 제거하였으나 1994년 7월 27일 10시 30분경 25mm 강우 후에 2차 사면활동이 발생되었다. 그래서 사면에 대한 붕괴원인을 파악하기 위해 항공사진측량, 지표지질조사 및 시추조사, 전기비저항탐사, 활동면 점토층에 대해 직접전단시험을 실시하여 사면안정성을 분석하고 그 안정대책 방안을 검토한다.

2. 지질이력(Geological history)

본 지역은 그림 2에서 보는 바와 같이 모래질과 점토질의 퇴적물이 교대로 쌓여 압축작용을 받아 사암 및 셰일층이 형성되었고 수평으로 놓인 퇴적암층에 지각변동이 발생하여 도로방향으로 15~20° 정도 경사로 놓이게 되었다. 그 후 대규모 산사태가 두차례 정도 발생하여 산사태 활동면을 따라 단층점토가 생성되었다. 이 점토층은 과거 퇴적층이 쌓인 후, 사암층 사이에서 대규모 산사태 발생으로 사암층 사이에서 암반이 밀리면서 단층점토화된 것으로 추정된다. 그리고 암맥의 생성은 그림 1의 도로방향과 평행한 방향으로 단층작용에 의해 움직임이 발생하여 이 약화된 부분을 따라 암맥이 생성되었다.

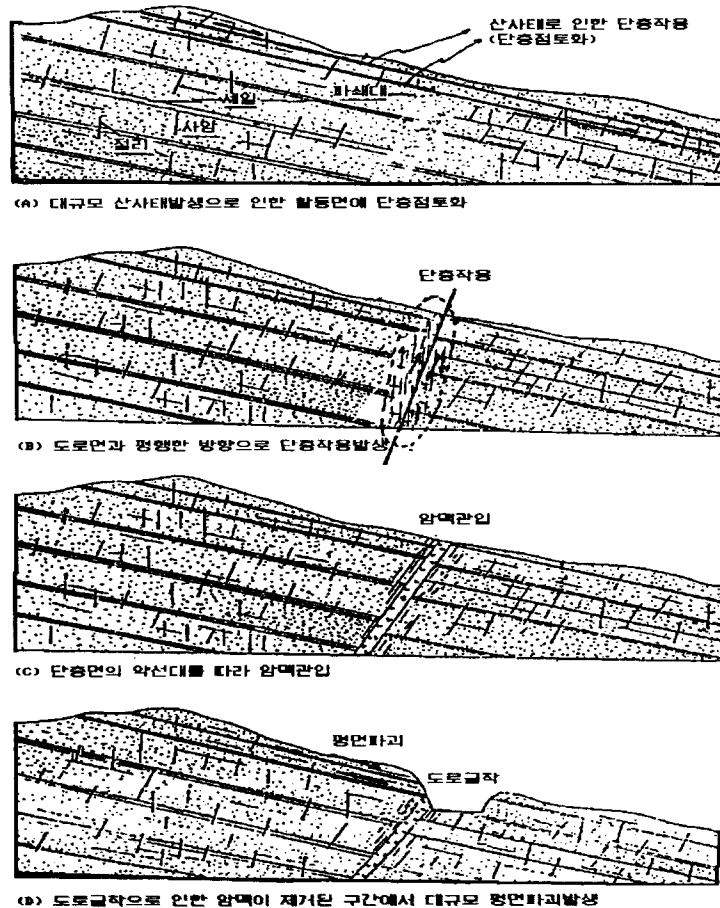


그림 2. 지질이력 추정도

3. 암반공학적 조사 및 실험

본 연구는 활동면의 위치 및 공학적인 특성을 파악하기 위하여 현장 지질조사를 실시하였으며 현장에서 5개소의 시추조사 및 전기비저항탐사를 실시하였다. 그리고 활동면의 점토에 대한 전단시험을 실시하여 점토층에 대한 전단강도를 구하였다.

3.1 불연속면 및 관입암맥

본 지역의 주요 불연속면은 N50-60E/16-18SE 방향의 층리가 우세하고 N20-25E/80-85SE 및 N60-70W/90 방향의 수직절리가 발달하는데 이는 사면활동으로 사면내에 발생된 균열방향과 일치한다. 그리고 N25E/90 방향으로 SW정도의 경암암맥이 발달하나 균열이 비교적 심한 상태로 노출시 풍화되기 쉬운 특성을 보이고 있다. 이 암맥의 역할은 그림 3에서 보는 바와 같이 암맥이 굴착 노출된 구간에서는 사면활동 발생하였으므로 본 암맥은 상부의 활동압괴를 잡아 주는 구실을 하는 것으로 판단된다.

특히, STA.7+480-580 구간에서는 그림 3과 같이 현재 암맥이 사면활동을 방지하여 주는 것으로 사료되나 4차선 확장시 암맥이 제거될 경우 활동가능성이 클 것으로 판단된다.

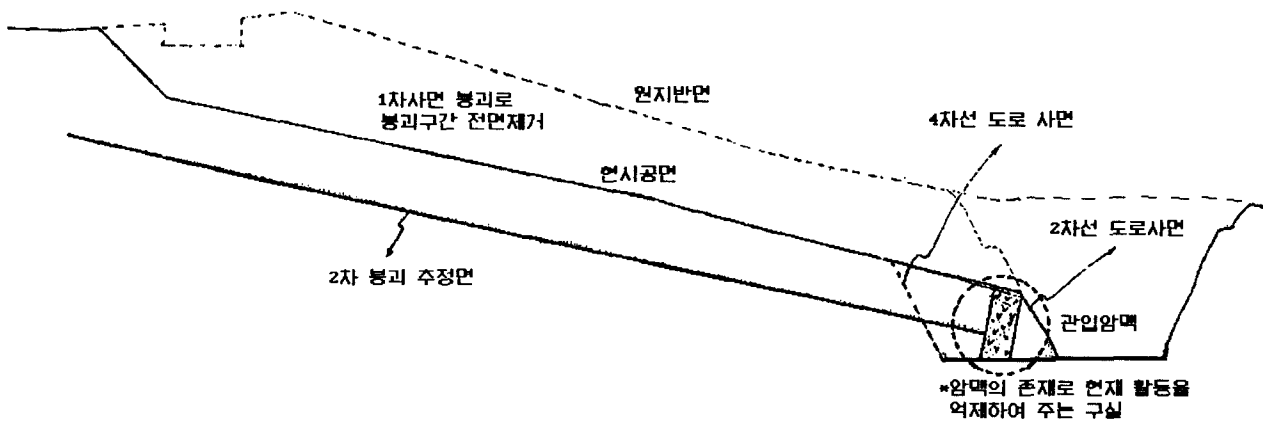


그림 3. STA.7+500 단면의 활동예상면 추정도

3.2 시추조사

본 사면붕괴 지역에서 붕괴원인을 파악하기 위해 절토사면 및 능선부위에서의 지표지질조사 결과를 기초로 그림 4의 시추 조사위치를 선정하였으며, 기반암 종류 및 심도, 단층점토의 심도, 두께 및 경사각, 퇴적암의 층리의 경사면과 파쇄대, 절리의 주향과 경사 등에 주안점을 두었으며 그 결과는 다음 표 1과 같다.

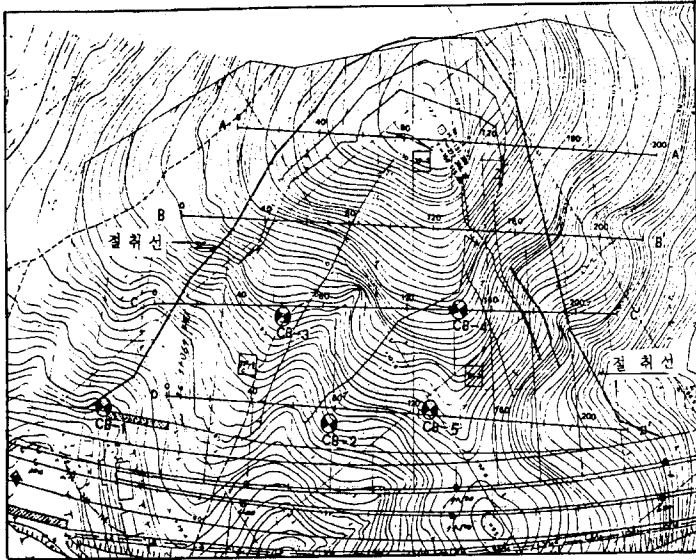


그림 4. 시추 위치도

표 1. 시추조사결과

구분	위 치 (STA Km+m)	표고 (m)	굴진 도 (m)	주 파 쇄 대		단 층 점 도	
				심도(m)	경사각 (°)	심도(m)	경사각 (°)
CB-1	7+327	73.5	19.0	6.2-7.6 18.9-19.0	15-18	13.2-13.3 15.0-15.3 16.4-16.5 18.9	60-70
CB-2	7+438	89.0	25.0	3.2-5.6 11.3-12.2 20.3-22.5 24.8	15-18	3.0-4.0 7.0 15.0-15.5 16.6-17.0 17.8-18.0 18.5-18.7	60-70
CB-3	7+410	97.5	20.0	5.0-5.3 8.3-9.5 19.1-21.0	15-18	3.0-3.7 4.7-5.6 9.8-10.5 11.3 17.8 19.2-20.0	60-70
CB-4	7+502	109.3	25.0	0.5-2.9 6.1-11.7 15.2-16.0	15-18	4.8-5.0 11.0-11.1 14.5-14.7 19.5-20.0	50-70
CB-5	7+488	95.5	25.0	7.5-8.7 13.3-14.5 22.3-25.0	18-20	1.7-2.5 3.0-3.3 3.7-4.0 14.0-14.1 20.2-20.5	60-70

3.3 전기비저항탐사

전기비저항탐사의 목적은 사면붕괴지역의 사면활동심도를 결정하여 붕괴원인 및 사면안정해석의 기초자료로 이용하는 데 있다. 조사방법은 지형적인 조건 및 하부 파쇄대 심도 등을 결정하는데 적합한 Half Schlumberger 전극법을 이용하였다. 조사결과는 그림 5와 같으며 파괴면은 층리면과 능선방향에 대체로 평행하게 발달하는 것으로 나타났다. 이러한 요인들은 파괴면들이 지층의 층리와 대체로 평행하게 발달하며 국부적으로 수직단층작용에 의한 것으로 분석된다.

측선 B - B'에 대한 전기비저항탐사 결과도 (등위선 비저항도)

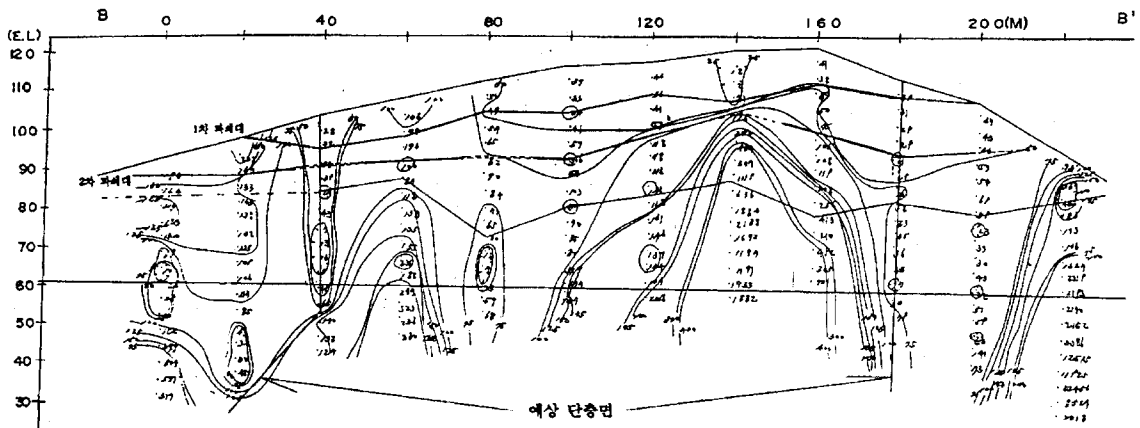


그림 5. 측선 B-B'에 대한 전기비저항 탐사결과도

3.4 실내실험

토사층은 주로 기반암인 사암과 셰일층의 풍화잔류토로 구성되어 있으며 200번체 통과량은 25/3-55.8%, 소성한계는 NP로서 통일분류법상 SM 및 ML로 분류되며, 습윤단위중량(γ_t)은 1.623-1.777t/m³ 정도이다. 그리고 활동면에 협재되어 있는 단층점토는 200번체 통과량이 100%로 매우 세립이며 액성한계는 51.0%, 소성지수 27.3으로 통일분류법상 CH로 분류되며, 불교란 시료에 대한 직접전단 시험결과는 표 2와 같다.

표 2. 단층점토 직접전단시험 결과

구 분	함 수 비 (%)	Peak Strength		Residual Strength	
		C (kg/cm ²)	ϕ	C(kg/cm ²)	ϕ
자 연 함 수 비	47.9	0.14	2.0	0.048	3.5
포 화 상 태	91.2	0.112	3.8	0.035	3.7

3.5 붕괴원인

본 사면활동은 2차선 도로굴착으로 그림 6과 같이 전면부에서 상부를 지지해 주는 역할을 한 암맥이 제거되어 단층점토층을 따라 암반활동이 발생되었으며 상부에서 약 20m 정도의 인장균열이 발생되었다. 그리고 2차 붕괴면 1차 붕괴면에서 10m 아래 쪽으로 점토층 3-7cm 정도로 존재하였고 전면부의 암맥이 제거되어 사면활동이 발생되었다.

수직절리면을 따라 빗물이 침투하여 점토층에 윤활제 역할 및 수압발생으로 절리면의 전단강도 급격히 저하로 사면붕괴가 발생하였다. 이에 덧붙여 절리면을 따라 사면활동을 저지시켜온 경암질의 암맥이 제거됨에 따라 이 예상활동면의 경사는 16-18° 정도의 완만한 경사를 가지고 있다.

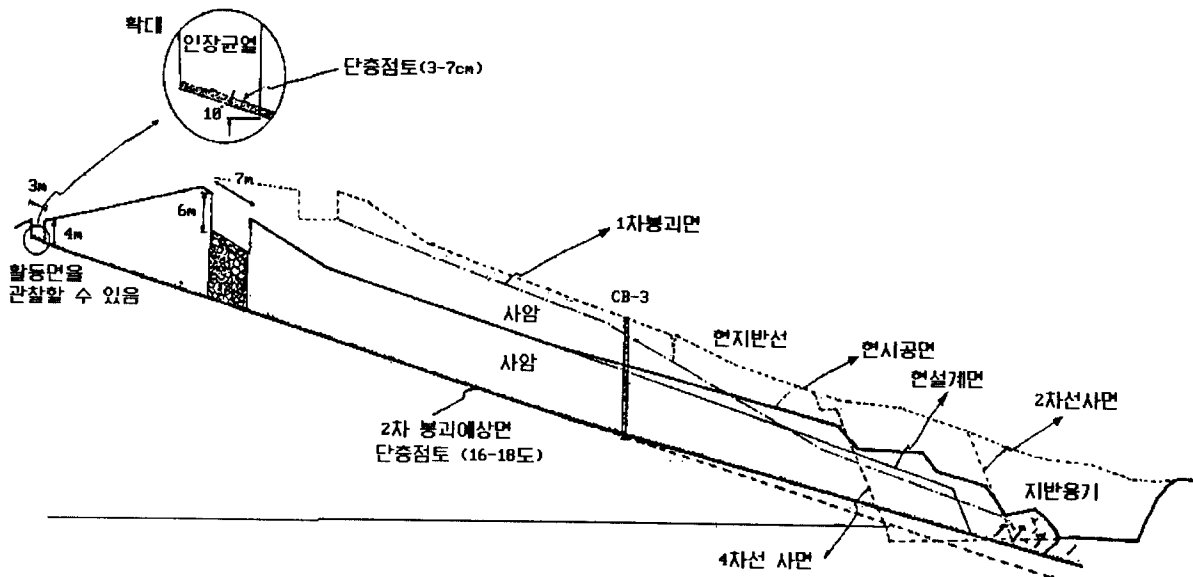


그림 6. STA.7+420 단면의 활동예상면 추정도

4. 사면안정검토

4.1 붕괴규모

2차 붕괴시 그림 7과 같이 활동암반물량은 278,606m³ 정도로 암반의 단위중량 2.5t/m³을 적용하였을 경우, 활동암반 총중량은 약 700,000ton에 이르는 것으로 추정된다.

4.2 전단강도 추정

STA.7+420 단면에서 활동면의 전단강도추정을 위하여 (1)식을 이용하여 역해석을 실시하였다. 암반의 단위중량은 2.5t/m³, 활동암괴중량 6000ton/m, 활동면 길이(A) 200m, 활동면 경사(ϕ_p) 16.5°, 인장균열 깊이(z) 4m, 적용안전율은 사면이 건조한 경우 1.00, 활동면에 수압이 작용하는 경우는 0.97을 적용하였다.

$$F = \frac{CA + (W \cos \phi_p - U - V \sin \phi_p) \tan \phi}{W \sin \phi_p + V \cos \phi_p} \quad \text{----- (1)}$$

여기서 A : 활동면길이
C : 점착력
U : 활동면에서 수압에 의해 위로 작용하는 힘
V : 인장균열에서의수압
 ϕ_p : 활동면의마찰각

전단강도 추정결과는 활동면의 마찰각 15°, 활동면의 점착력은 0.8 t/m²으로 추정되었다.

4.3 검토결과

건조시 안정상태로 존재하다 강우시에 사면내의 수직절리를 통해 빗물이 침투되어 전단강도를 감소시켜 붕괴가 발생되었다. 붕괴되었던 활동면이 현재 활동이 정지된 상태이나 활동단부의 굴착시 추가적인 활동가능성이 클 것으로 보인다. STA.7+480-580 구간은 그림 7과 같이 현재 암맥이 사면활동을 억제하여 주나 4차선 확장으로 암맥제거시 활동가능성이 있으므로 안정대책수립이 필요하다.

5. 사면안정대책

본 사면에 대한 안정대책방안으로 그림 8과 같이 붕괴 암반상부의 절반을 제거하여 안전율을 높여 주고 잔여암반에 강관말뚝으로 활동면에서 전단저항력을 증가시켜 준다. 그리고 도로면의 사면 전면부는 Gabion 옹벽을 설치하여 4단 억지말뚝 하단부의 활동력을 지지하여 주는 복합구조물을 설치하여 준다.

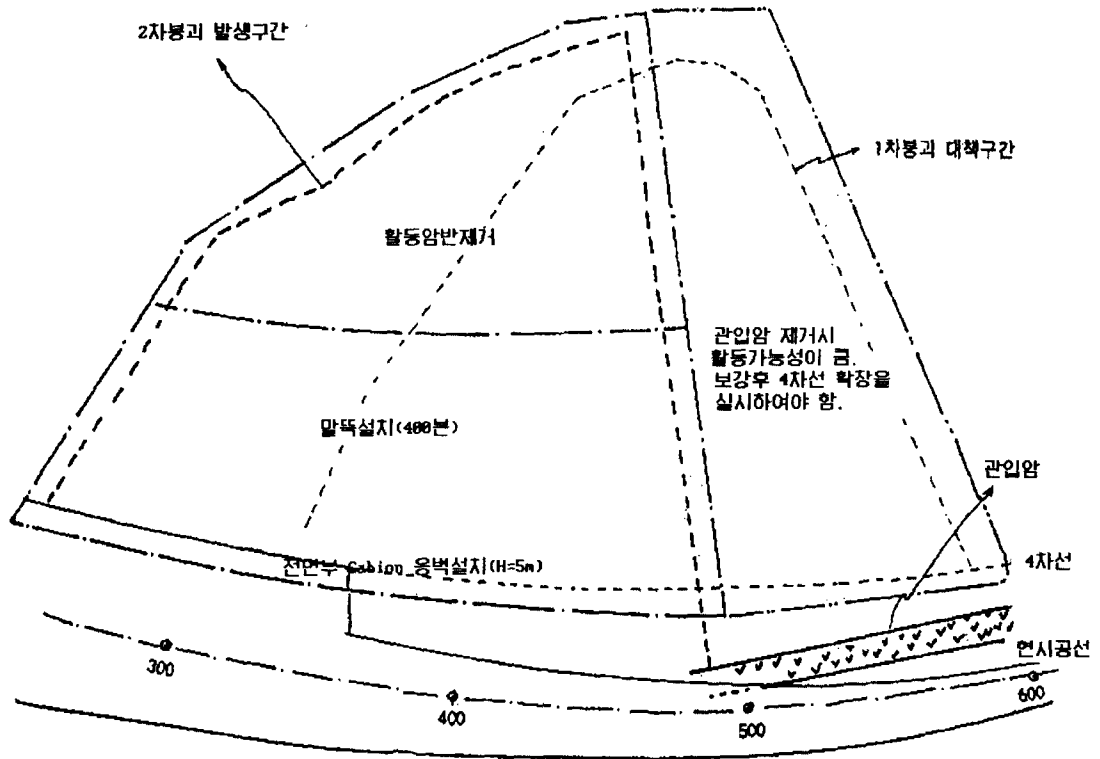


그림 7. 사면안정대책 평면도

5.1 복합구조물 설치

가. 사면붕괴암반의 상부 절반을 제거시

잔여암반 중량 : 350,000 ton

활동암반 1/2 제거시 활동면면적 \approx 17,000 m (활동면 면적의 3/5 정도)

나. 토공작업후 안전율(활동면이 포화된 경우)

전체물량에 대한 안전율 계산

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{CA + (W \cos \phi - U - V \sin \phi) \tan \phi}{W \sin \phi + V \cos \phi} \\
 &= \frac{0.8 \times 17,000 + (350,000 \times \cos 16.5 - 8,500) \tan 15}{350,000 \times \sin 16.5} \\
 &= 1.02
 \end{aligned}$$

여기서 A : 활동면의 길이(17,000 m)

C : 잔류점착력(0.8 ton/m²)

ϕ : 잔류내부마찰각 (15°)

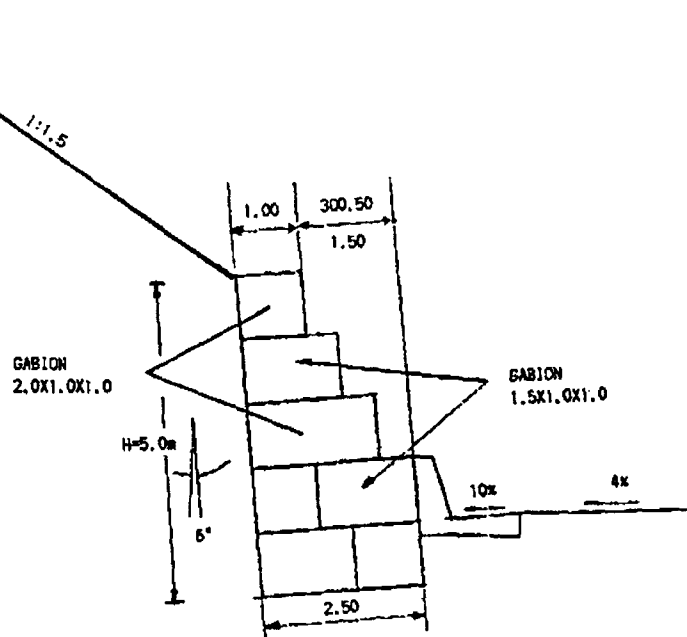
U : 활동면에서 수압에 의해 위로 작용하는 힘(8,500ton/m)

다. 말뚝설계

- 강관말뚝 보강
 - 강관말뚝 허용전단응력 (도로교 표준시방서) SPC50 : 1100 kg/cm^2
 - 강관말뚝 유효단면적 ($\phi 406\text{mm}$) : 91.8cm^2
 - 강관말뚝 본당 억지력(SPC50) : 101ton
- 보강재 (속채움 콘크리트)
 - 2종 콘크리트 : $\sigma_{ck} = 240\text{kg/cm}^2$
 - 허용전단응력(도로교 표준시방서) $\sigma_{ca} = 1.15\text{kg/cm}^2$
 - 본당억지력 : 21ton/1본
- 본당 전체 억지력
 - $101\text{ton} + 21\text{ton} = 122 \text{ ton}$
- 소요안전율 $F_s = 1.5$ 로 고려할 경우
 - 전체 필요저항력 : $99,405 \times 1.5 = 149,108 \text{ ton}$
 - 전체 소요말뚝 억지력 : $149,108 - 101,242 = 47,866 \text{ ton}$
 - 총 소요말뚝 본수 : $47,866 / 122 = 392.3 \approx 400\text{본}$

라. Gabion 설계

- 설계단면



○ 설계조건

- Gabion Fill 단위중량 : $2.4t/m^3$, Mesh의 인장강도 : $4.3t/m^2$
- 뒷채움부 토질정수 : 마찰각 35° , 단위중량 $1.8t/m^3$, 사면경사 33.7° (1:1.5)
- 기초 깊이 : 1m

○ 안정성 검토결과

활동에 대한 안정검토	전도에 대한 안정검토
활동력 : 9.26 t/m 저항력 : 28.78 t/m	전도모멘트 : $-0.73t \cdot m$ 복원모멘트 : $32.20t \cdot m$
안전율 : 3.12	안전율 : 안정

Gabion 옹벽설치로 하부면에서의 전단저항을 증가시켜 뒷채움부 및 압반활동에 충분한 사면안정성을 취할 수 있을 것으로 사료되며, 일반 콘크리트 옹벽에 비해 배수의 잇점과 미관을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

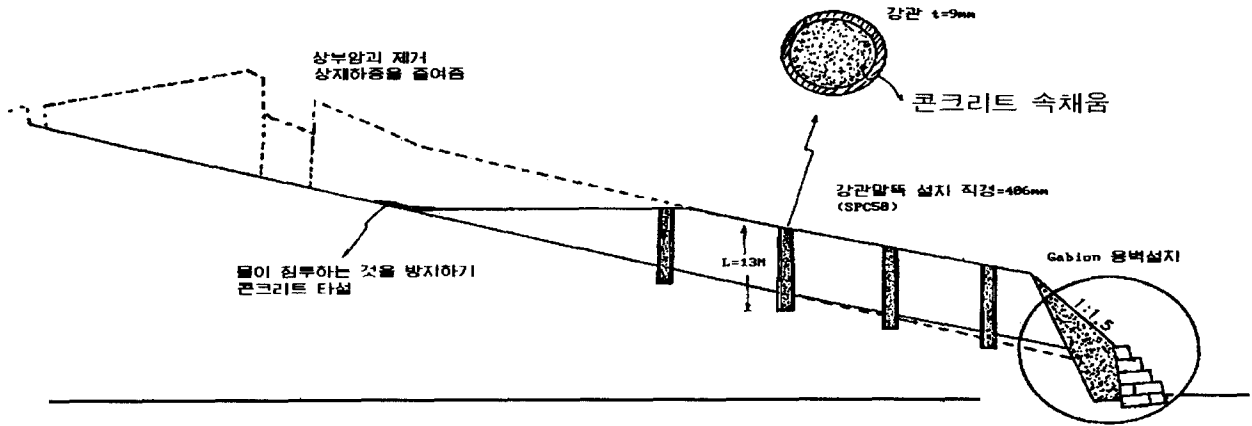


그림 8. 사면안정대책단면도

6. 결론

- 1) 조사지역의 암석은 사암과 셰일층이 교호하여 형성되어 있으며 도로선과 평행한 암맥을 형성하며 층리면과 평행한 단층이 발견되었다.
- 2) 사면붕괴형태는 사암층 사이의 단층점토면을 따라 $16-18^\circ$ 경사에서 두차례에 대규모에 걸친 평면파괴가 발생되었으며 두차례의 평면파괴 모두 전면부의 암맥을 제거함으로써 붕괴가 발생된 것으로 분석되었다.
- 3) 사면활동 규모는 폭 200m, 길이 200m 정도의 삼각형 형태로 산정상부로 부터 도로방향(N50-60E)으로 발생하여 붕괴량이 $278,000m^3$ 정도에 이른다.

- 4) STA.7+480-580 구간은 현재 도로면 방향의 암맥이 암반활동을 방지하나 4차선 확장으로 암맥제거시 활동가능성이 있을 것으로 사료되므로 선대책을 수립 조치한 후에 4차선 확장을 실시하여야 할 것으로 분석되었다.
- 5) 사면안정대책으로 활동암반 전량을 제거하는 방안과 상부 일부 암반을 제거하고 억지말뚝과 옹벽설치 방안을 제안한다.
- 6) 현재 활동암반이 현 시공선 선단부에 박혀 안정한 상태를 유지하므로 활동면 상부쪽에서 활동저지 대책을 취한 후에 도로면의 암괴를 제거하여야 한다.

참고문헌

1. 유 재일, 유 병욱, 1991-1993, 사면안정처리에 관한 연구 (I - III), 한국도로공사.
2. 지반연구실(1992-1993), “기술자문검토 사례집”, 한국도로공사 도로연구소
3. 지반연구실, 1994.12., 현장기술자문검토서(사면분야), 한국도로공사 도로연구소.
4. 정창희, 1986, 일반지질학개론, p585-591.
5. Lee, Dai-Sung(1987), "Geology of Korea", Geological Society of Korea, Kyohak-Sa, pp175~187.
6. Hoek, E. & Bray, J.W., 1977(1981). Rock Slope Engineering. Revised Second (Third) Edition. Institute of Mining and Metallurgy, London, 358 pp.