

암반사면의 안정성검토 및 보강방안에 관한 사례연구

A Case Study on The Stability and Reinforcement Method at a Rock Slope

천병식* 이승언** 공진영*** 임주헌****

Chun, Byung Sik Lee, Seung Eun Kong, Jin Young Lim, Joo Heon

ABSTRACT

This study analyzes stability and the reason of slope failure about cut slope on stony mountain in Acheondong, Guri and suggests the reasonable reinforce method. Based on the results of the subsurface exploration, laboratory tests, and the numerical analysis of finite element method, the potentials of plane and wedge failure are highly estimated. The safety factor was 1.2 under dry and 1.06 wet condition. The most proper reinforce method to raise the safety factor more than 1.5 was the way to control displacement by using step retaining wall, earth anchor, wire mesh, and rock anchor.

1. 서론

일반적으로 암반사면안정의 해석의 진행순서는 대상 구간에 대한 암질 평가, 불연속면의 상태 등의 현장조건을 조사하고, 이를 근거로 한 수치해석을 통한 사면의 안정성을 분석하고 사면안정 검토를 실시하여 현재 상태의 사면의 안정상태를 평가하고, 불안정한 구역에 대해서는 주변 현황 및 지형·지질 상태 등에 적합한 사면안정을 위한 보강대책을 수립·제시하는 순으로 이루어진다.

그러나 암반사면의 경우 파괴형태에 관한 정성적인 평가가 주를 이루며 이에 대한 보강대책 또한 탈락가능암괴나 전 사면에 걸쳐서 전체적인 보강이 주를 이루므로 시간 및 경제적인 손실이 크다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 보강이 요구되는 사면을 선정하여 정성적인 해석과 동시에 정량적인 해석을 수행하여 경제성과 안정성을 모두 고려한 적절한 보강대책을 제시하고자 한다.

* 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수·공학박사 ·E-mail : hengdang@unitel.co.kr

TEL : (02)2220-0326 FAX : (02)2281-0378

** 대립산업(주) 대리

*** 한양대학교 대학원 석박사과정 토목공학과

**** 한양대학교 대학원 석사과정 토목공학과

2. 지표지질조사

본 연구의 대상 사면은 구리시 아천동 일대 절개사면으로 공사 중 암반파쇄대에 의해 지엽적인 파쇄가 발생하여 추가보강이 요구되었다. 따라서 시추조사시 발생하는 진동으로 인한 위험으로 추가 시추조사는 할 수 없었고 지표지질만을 조사하여 암반상태를 파악하여 안정성 해석을 한 사례이다.

연구 대상 사면은 선캠브리아기 흑운모 편마암과 화강편마암이 기반암으로 분포하며 제4기 충적층이 편마암을 피복하고 있다. 이러한 석산 절토사면에 대하여 암반파쇄대가 관입되어 있는 STA. No. 7 지점과 특정한 불연속면군이 두드러지게 나타나는 STA. No. 8 지점으로 구분하여 조사하였다. 강도시험(슈미트해머시험, 지질해머시험, 점하중시험)와 지표질리조사(클리노폼파스, 경사계, 프로파일 게이지)를 실시하였다.



(a) STA. No. 7



(b) STA. No. 8

그림 1. 조사지역 절리분포

강도시험 결과는 표 1과 같다.

표 1. 암석강도 시험 결과

위치	슈미트 해머 수치 : SHV	슈미트 해머 평균수치	슈미트 해머 강도 (kg/cm ²)	일축압축강도(24 Is) kg/cm ² : PLS	비고	기타
Section I	13~44	26	377.17 ~ 438.33	140.8	풍화암~연암	SHV, PLS 기준
Section II	15~56	32	519.88 ~ 1223.2	1075.7	연암~보통암	"

* Is: Point Load Index

표 2. 정량적 현장 암판정 기준(도로설계요령)

암석종류	일축압축강도 (kg/cm ²) (건조상태):UCS	점하중강도 (kg/cm ²): PLS	슈미트 해머수치 : SHV	급속흡수율(%) : QAI	비고 (해머에 의한 타격)
극경암석	1,600 이상	88 이상	60 이상	0.24 이하	큰 해머로 타격시 튕기며 용이하게 깨어지지 않는다.
경 암 석	1,300~1,600	56~88	51~60	0.47~0.24	큰 해머로 타격시 약간 깨어진다.
보통암석	1,000~1,300	37~56	44~51	0.80~0.47	큰 해머로 타격시 균열을 따라 크게 떨어진다.
연 암 석	700~1,000	18~37	34~44	1.65~0.80	보통해머로 타격시 비교적 용이하게 깨어진다.
풍화암석	300~700	0~18	10~34	9.25~1.65	보통해머로 용이하게 소편으로 깨어지며, 때로는 손으로도 쪼개진다.

* 참고 : 본 점하중 강도, 슈미트 해머수치는 국내의 화강암에서 측정한 상관관계식을 이용한 수치이다.(LEE,S.G, LEE,S 대한토목학회지, 1994)
 $UCS_d = 397.5966 + 17.78277 \times PLS_d : (r = 0.916)$ 와
 $Log UCS_d = 2.3734 + 0.01645 \times SHV_d : (r = 0.945)$
 여기서 UCSd와 PLSd는 kg/cm^2 단위이다.



(a) Schmidt Hammer Test



(b) Point Load Test



(c) Hammer 타격

그림 2. 강도시험

구간별 현장조사 결과 사면의 불연속면은 토사 및 암반 파쇄물로 충전된 경우가 많고 파쇄가 심하며, 지하수차별 풍화에 의해 차별풍화가 심하고 일부구간은 소규모 암괴탈락 등 붕괴가 진행되고 있다. 사면의 구배는 1:0.58(55°)로 이루어져 있으며 암반의 특이한 점은 외관적으로 볼 때 전체적으로는 암석으로 이루어져 있는 것으로 보이나, 매우 심한 풍화로 인해 전체를 암반으로 보고 불연속체 해석을 할 정도가 아니라 연속체 해석을 하는 것이 보다 합리적이라 판단되는 지층을 이루고 있다(안윤성 외, 1994).

표 3. STA. No. 7 지점

현장상태		<ul style="list-style-type: none"> · 전반적으로 파쇄가 많이 이루어졌으나 암석강도 강함 · 지중으로 향하는 파쇄대 존재 · 파쇄정도가 심하며 풍화암과 암편 및 사질토와 암석 쇄편이 혼재하는 상태
강도	Schmidt Hammer 반발치(SHV)	· 13~48(풍화암 ~ 보통암)
	평균일축압축 강도(24-Is) kg/cm^2	· 140.8
	지질해머타격시험	<ul style="list-style-type: none"> · 해머 2~3회 타격시 맑은 소리를 내며 파괴됨. · 해머의 송곳 부분으로 긁어도 자국이 잘 생기지 않음
절리상태		· 파쇄정도가 매우 심하며 불특정 다수의 절리군
절리간격		· 100 mm 간격
JRC0		· 4

표 4. STA. No. 8 지점

현장상태		· STA. NO. 8지점의 전사면에 여러 군의 불연속면 존재
강도	Schmidt Hammer 반발치(SHV)	· 25~56(풍화암 ~ 경암)
	평균일축압축 강도(24-Is) kg/cm^2	· 140.8
	지질해머타격시험	<ul style="list-style-type: none"> · 해머 3~6회 타격시 맑은 소리를 내며 파괴됨. · 해머의 송곳 부분으로 긁어도 자국이 잘 생기지 않음
주절리		<ul style="list-style-type: none"> · N144W/NW68, N85E/SE49 (췌기 파괴위험)포함 총 4군의 절리군 · N114E/SW46, N98E/SW40, (평면 파괴위험)포함 총 4군의 절리군
절리간격		· 200~2000 mm 간격
JRC0		· 6~10

3. 수치해석

3.1 기본가정사항

본 수치해석은 STA. No. 7 지점을 대표단면으로 선정하여 검토하였으며, 건기시와 우시기 각각 검토하였다. 우기시는 극한 상태를 고려한 완전포화를 가정하였다. 사면 주변의 지반 상태는 붕적토, 풍화암, 연암, 경암으로 이루어져 있고 기반암은 편마암에 해당하며 심한 풍화상태로 절리 및 단층이 발달되어 있고 전반적인 절리의 주향과 경사각이 사면의 주향과 경사각과 유사하여 매우 불리한 조건을 이루고 있다.

본 해석은 Z-Soil F.E.M해석 프로그램을 이용하였으며 Drucker-Prager 모델을 적용하였다(박연준 외, 1999, Duncan, 1996). 수치해석을 위한 조건은 다음과 같으며 시추조사결과는 기존에 천공된 자료로부터 얻었다.

- 지반의 물성값은 지반조사를 통하여 얻은 지질조사 결과로부터 토사, 풍화토, 풍화암, 연암으로 구분하여 세분화 된 물성값을 적용하였다.
- 수치해석은 2차원, 정해석으로 실시한다.

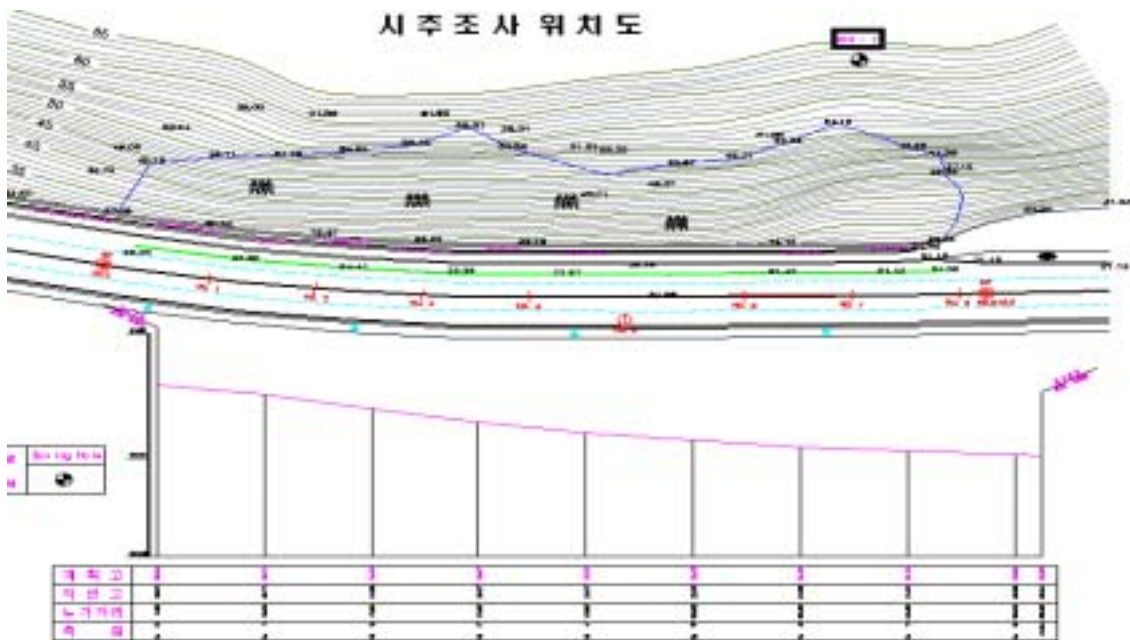


그림 3. 해석 단면의 지질조사 위치도

수치해석에 사용된 지반정수는 표5, 6, 7과 같다.

표 5. 적용 지반정수

구분	단위중량 (tonf/m ³)	변형계수 (tonf/m ³)	점착력 (tonf/m ²)	내부마찰각 (°)	포아송비	투수계수 (cm/sec)
토사	1.9	5,000	0.0	30	0.35	5x10 ⁻⁴
풍화암	2.1	50,000	5.0	31	0.33	5x10 ⁻⁵
연암	2.2	120,000	19	32	0.30	5x10 ⁻⁶
보통암	2.4	500,000	60	35	0.24	-
경암	2.6	2,000,000	200	42	0.21	1x10 ⁻⁸
극경암	2.7	6,000,000	600	46	0.19	-

표 6. 앵커 물성치

구 분	들출길이(m)	앵커 설치 간격	정착장(m)	자유장(m)	앵커전장(m)
	여유장				
type-1	1.5	C.T.C 4m×4m	6.0	5.0	13

표 7. 콘크리트 용벽

시공 높이(m)	폭	두께	단위중량	탄성계수
10	2m/단	1.2m/단	2.5 tonf/m ³	2.0×10 ⁷ tonf/m ²

3.2 안전율을 고려한 사면보강

해석결과, 대상사면은 평면파괴나 쉐기파괴의 가능성이 높고 안전율은 건기시 1.2, 우기시 1.06으로 나타났다. 따라서 석축상단에서부터 약 7m 높이까지 계단식 용벽을 설치하고 5단의 어스앵커로 보강하여 해석을 수행하였다(이지수 외, 2001).

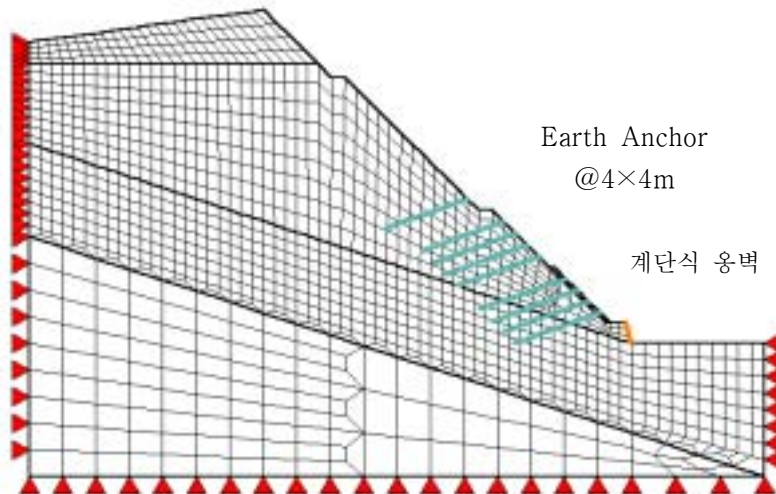


그림 4. 보강단면

3.2.1 용벽

현재 사면의 법면이 불안정한 상태에 놓여 있으므로 계단식 용벽을 시공하고 법면의 우수와 지하수가 사면 내로 유입되는 것을 방지하기 위한 시설을 설치하여야 한다. 계단식 용벽은 반드시 10m 간격마다 Joint를 두고 그림 5와 같이 철근배근을 하여 시공한다.

3.2.2 앵커

계단식 용벽 상부에는 5단의 앵커를 추가 보강하였다. 4단 앵커를 제외한 모든 앵커는 모두 Φ 12.7mm 6연선 강선으로 수직·수평 간격은 각각 4m이며, 자유장 7m, 정착장 6m로 보강하였다. Earth Anchor는 절리가 불리한 방향으로 발달해 있고 풍화 상태가 심하며 절리면 들의 틈새가 매우 큰 것으로 볼 때, 강선길이는 기존보다 3m 늘어 13m로 하고, 강선수는 6가닥, 정착장은 6m로 한다.

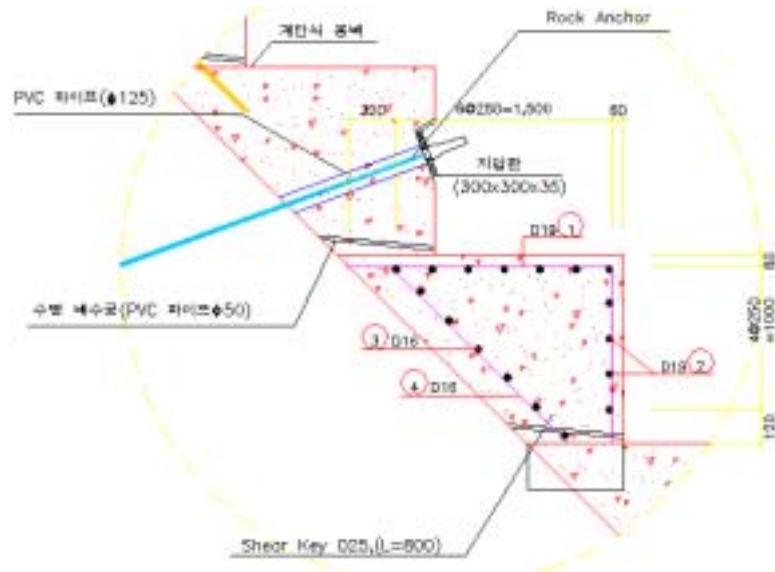


그림 5. 계단식 옹벽 배근도

STA. No. 7 지점을 대표단면으로 선정하여 수치해석기법에 의한 사면 안정성 검토를 수행하였다. 사면내에 지하수가 존재하지 않는 건기와 모델 좌·우측 경계면에 삼각형 분포의 경계수압을 각각 $65.2t/m^2$, $20.0t/m^2$ 작용시키는 우기로 나누어 해석하였다. 우기시는 darcy법칙을 따르는 steady-state flow analysis를 수행하여 지반내 간극수압을 구하였다. 옹벽하단에 위치해 있는 석축은 Beam 요소로 보고 해석하였고, 콘크리트의 물성치(탄성계수)를 적용하였으며, 석축하부는 힌지로 보고 해석하였다(Griffith, 1999). 전체적인 안정해석은 응력수준 증가법을 이용하여 모의과괴해석을 수행한 결과, FEM해석에 의한 사면 안전율은 다음과 같다.

표 8. FEM해석에 의한 사면 안전율

구분	보강 전		보강 후	
	건기시	우기시	건기시	우기시
안전율	1.20	1.06	1.60	1.54

4. 결론

본 연구는 경기도 구리시 아천동 인근에 위치한 절개 암반사면의 안정성을 검토하였다. 대상 사면의 예비 판정을 위해 지표지질조사를 수행하였고 이를 토대로 전체사면은 하나의 풍화대와 그 하부에 암반으로 구성된 연속체 해석을 하는 것이 합리적일 것으로 판단되어 Z-Soil F.E.M해석 프로그램을 이용하여 실제 현장조건과 부합되는 해석을 수행하였다. 해석 결과를 통해 사면붕괴원인과 안정성을 분석하고, 계단식 하부석축의 안정성을 검토 한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 대상 사면면의 불연속면은 토사 및 암반 파쇄물로 충전된 경우가 많고 파쇄가 심하며, 지하수차별 풍화에 의해 차별풍화가 심하고 일부구간은 소규모 암괴탈락 등 붕괴가 진행되고 있다. 암반의 특이한 점은 외관적으로 볼 때 전체적으로는 암석으로 이루어져 있는 것으로 보이나, 매우 심한 풍화로 인해 전체를 암반으로 보고 불연속체 해석을 할 정도가 아니라 연속체 해석을 하는 것이 보다 합리적이다.
- (2) Drucker-Prager 모델을 이용하여 건기시와 우기시 각각에 대하여 유한요소해석을 실시한 결과 안

전율은 1.5이하(건기시 1.2, 우기시 1.06)로 나타났다. 따라서, 종합적으로 판단해 볼 때, 본 사면은 보강에 의한 안정성 확보가 요구되는 것으로 평가되었다.

- (3) 앵커공과 계단식옹벽을 보강하였을 때의 안전율 증가영향을 유한 요소해석을 통하여 평가해본 결과 안전율이 건기시 1.60, 우기시 1.54로 건기시의 경우는 0.4, 우기시에서는 0.48의 안전율의 증가가 발생하는 것으로 나타났다.
- (4) 앵커의 안정성을 평가하기 위한 목적으로 앵커에 대한 유한요소해석을 실시한 결과 한계상태($F_s=1$) 시 하부지점에서 최대 1.84 tonf 으로 가장 작은 축력이 발생하며, 그 이외에서는 1.0 tonf 미만의 축력이 발생하였다. $F_s=1.5$ 즉 허용안전율을 만족하기 위한 요구 최대 앵커 축력은 계단식 옹벽 구간인 2단 앵커에서 66.57 tonf으로 계산되었다. 이 값은 앵커의 허용 인장력 67.0t/m²을 만족하는 것으로 평가되었다.

참 고 문 헌

- (1) 박연준, 채영수, 유광호, 백영식(1999), “절편법과 유한차분법에 의한 사면안정해석 비교연구”. 한국지반공학회 논문집, 제15권, 제6호, pp.263-272.
- (2) 안윤성, 김연중(1994), 암반사면 안정성 평가 및 보강설계, 대한지질공학회, Vol.4, No.3, pp.343-356.
- (3) 이지수, 박혁진, 민경덕, 구호본(2001), 불연속면의 특성을 고려한 보은지역 암반사면 안정성해석, 대한자원환경지질학회, Vol.34, No6, pp.601-615.
- (4) Duncan, J.M.(1996), State of the art : limit equilibrium and finite-element analysis of slope. J. Geotech. Engng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs. Vol.22, No.3, pp.577-596
- (5) Griffith, D.V. & Lane, P.A.(1999), "Slope stability analysis by finite element", Geotechnique 49, No.3, pp.387-403.