

## 집중호우로 붕괴된 절토부 사면의 사면안정 처리에 관한 연구 A Study on Failed Slope Stability by Localized Torrential Downpour

신희순<sup>1)</sup>, Hee-Soon Shin, 배규진<sup>2)</sup>, Gyu-Jin Bae, 이승호<sup>3)</sup>, Seung-Ho Lee,  
정용진<sup>4)</sup>, Yong-Jin Jeong, 심정훈<sup>5)</sup>, Jeong-Hoon Shim

- 1) 한국지질자원연구원 탐사개발연구부 연구부장, Research Chief, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
- 2) 한국건설기술연구원 토목연구부장, Research Fellow, Civil Eng. KICT
- 3) 상지대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Sangji Univ.
- 4) 대원토질(주) 대리, Deputy Section Chief, Daewon Soil Co., Ltd
- 5) 상지대학교 토목공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil Engineering, Sangji Univ.

**SYNOPSIS** : Continuous road improvement is required by situation that need link between cities by special quality that is our country's topography enemy that most of country have consisted to mountain district. According to this, occurrence of large cutting slope is formed necessarily. Cutting slope are very weak real condition because of concentrative downpour and can know easily by example of typhoon Rusa. This study did helpful in slope design and carrying out suitable reinforcing method.

**Key words** : failed slope, downpour, stability, reinforcement

### 1. 서론

국토의 70%가 산지로 이루어져 있는 우리 나라의 지형적인 특성으로 인하여 도시간의 연계성을 필요로 하는 상황에 의해 지속적인 도로공사가 요구되고 있다. 이에 따라 대규모 절개사면의 발생은 필연적으로 형성되고 있다. 이러한 절개사면들은 집중적인 강우에 매우 취약한 실정이며 태풍 루사 등의 예로 쉽게 알수 있다. 본 연구는 집중적인 강우로 인하여 일부 붕괴가 발생한 사면의 현상태 및 장기적 측면에서의 안정성확보를 위하여 현장분석 및 실내 분석을 통한 안정성 평가를 실시하여, 최종적으로 장기 안정성 확보를 위한 검토를 수행하여 현장여건에 적합한 보강공법 검토 및 대책을 수립하여 성공적인 사면보강 사례를 제공함으로써 향후 사면설계 및 시공에 참고가 되는 것을 목적으로 하였다.

### 2. 현장현황

본 사면을 포함하는 부근의 지형은 두 능선의 골짜기에 위치하고 있으며, 중생대 쥐라기 내지 삼첩기에 관입한 엽리상 화강암류와 관입상으로 분포하는 각석암으로 이루어져 있다. 이들 중에서 본 사면은 각석암이 분포하는 지역으로 지표부에 분포하는 각섬암과 주위의 엽리상 화강암은 심하게 풍화되어 있다. 거의 손으로 만지면 부스러지는 정도의 완전풍화 상태로 강우시에는 풍화토와 붕적층이 섞여 채차

사면활동이 일어날 위험성을 내포하였다. 또한, 사면에서 보이는 암석들은 암반의 형태가 아니라 지반중에 박혀 있는 핵석의 형태를 띄고 있으며, 이러한 핵석형태의 암석들은 지반의 움직임에 저항하는 힘으로서 보다는 움직임을 유발시키는 하중으로 작용하기 쉬운 것으로 판단되었다.

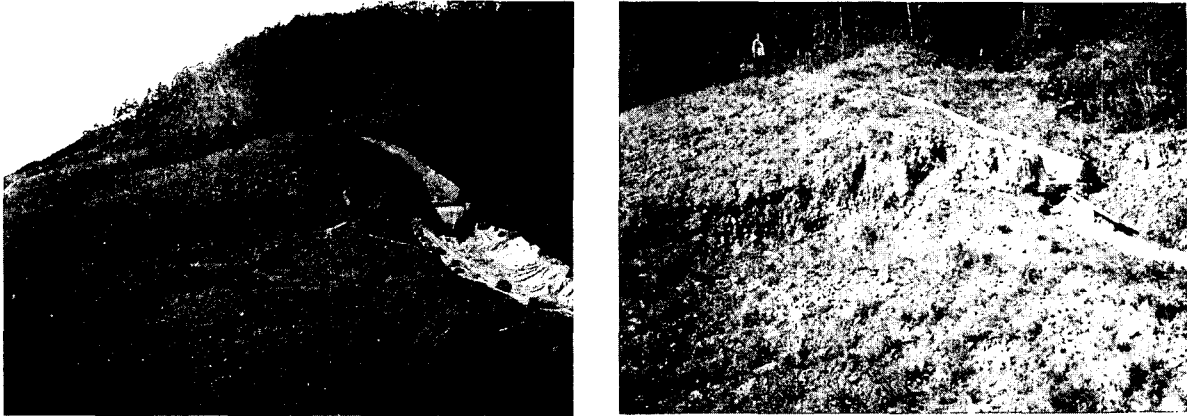


그림 1 붕괴가 발생한 사면의 현장 사진

붕괴가 일어난 사면상부에서는 이미 예전의 산사태들로 인해 나무의 굵은 줄기가 위로 굽거나, 인장균열에 의해 나무의 뿌리가 긴장되어 있거나 또는 나무가 고사되는 현상 등 사면상부의 지반이 움직였던 현상이 관찰되었다.

### 3. 지반정수

본 사면지역의 4곳에서 교란된 시료를 채취하여 안정성 검토를 위한 사면 해석시 필요한 물성치인 점착력(c), 마찰각( $\phi$ ), 단위중량( $\gamma_t$ )을 얻기 위해 통일분류법을 실시하였다. 실내시험을 실시한 결과 표 1과 같이 점토질모래(SC) 또는 실트질모래(SM)로 나타났다.

표 1 실내시험결과

구 분	No.1	No.2	No.3	No.4
함수비( $w$ )	27.4%	32.0%	35.2%	39.0%
200번체 통과량	22%	18%	22%	17%
액성한계(LL)	38.1%	31.5%	42.4%	39.9%
소성한계(PL)	25.9%	24.8%	36.2%	28.1%
소성지수(PI)	12.2%	6.7%	6.2%	11.8%
통일분류법	SC	SM	SM	SM

대상사면에서 채취한 시료를 통일 분류법을 실시한 후 자연지반의 토질종류별 설계정수와 비교하여 사면안정 해석시 지반정수를 결정하였다.

표 2 사면에 적용한 지반정수

구분	단위중량 $\gamma_i(t/m^3)$	점착력 $c(t/m^2)$	마찰각 $\phi(^{\circ})$	비고
풍화토	1.9	1.5	20	
풍화암	2.0	3.0	35	

#### 4. 현 사면에 대한 안정성분석

현장 답사 결과 본 사면의 붕괴를 유추한 결과 그림 2와 같이 블록파괴와 원호파괴 두가지 경우에 의해 붕괴가 발생한 것으로 추정하였다.

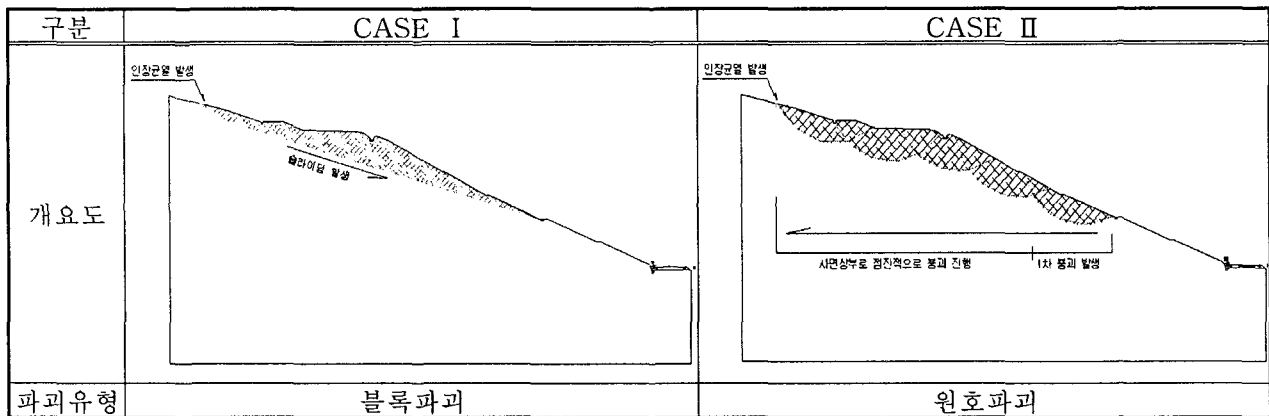


그림 2 사면 붕괴발생 요인

CASE I 은 사면상단의 인장균열이 발생한 지점부터 붕괴가 끝난 제2소단까지 상대적으로 강도정수가 큰 풍화암층을 따라 비원호 파괴형태로 발생한 경우로 본 경우 파괴선 하부는 풍화암층으로 가정할 수 있다.

CASE II 는 사면하부(제2,3소단)에서 국부적으로 붕괴(원호파괴)가 발생하여 점진적으로 사면 상부까지 붕괴가 진행된 적으로 추정한 경우이다.

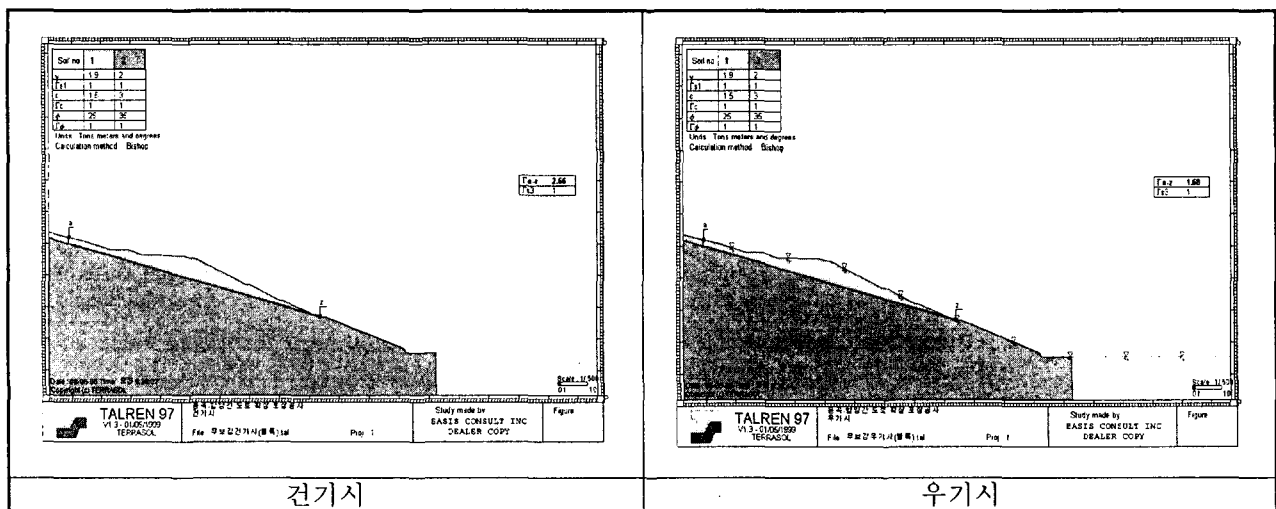


그림 3 CASE I 에 대한 검토

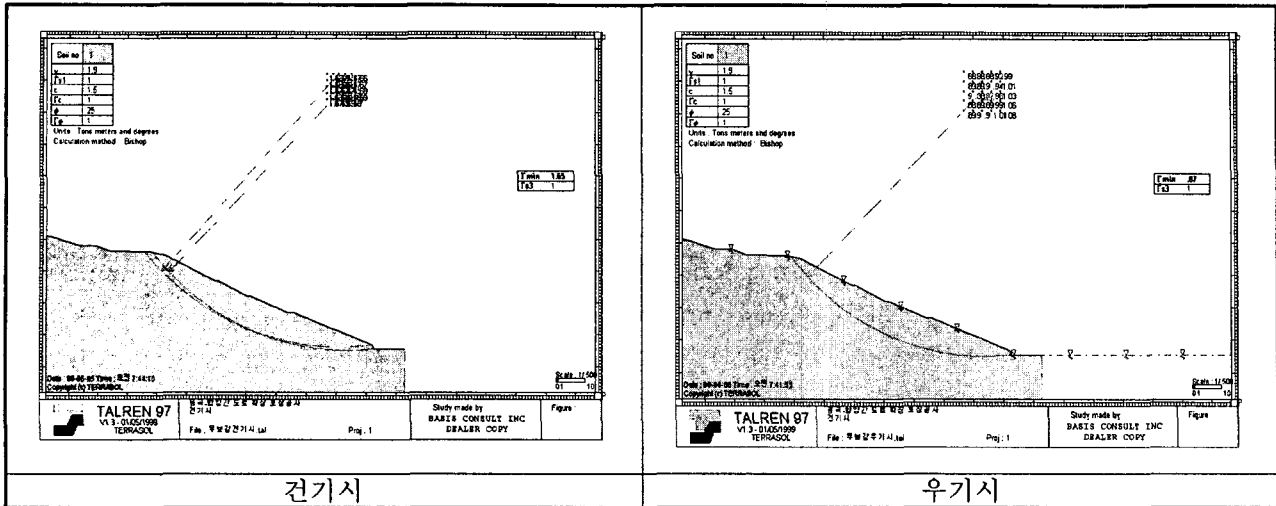


그림 4 CASE II에 대한 검토

이에 따라 상기의 두가지 경우에 대하여 해석을 실시하여 사면이 붕괴된 거동 특성을 파악하여 사면 보강공을 적용시 수행할 해석방법을 결정하였다. 대상 사면에 대하여 CASE I 과 II에 대한 해석결과는 다음 표 3와 같다.

표 3 붕괴가 발생한 대표단면 해석결과

CASE	안 전 율		비고
	건기시	우기시	
I	2.66	1.68	블록파괴
II	1.65	0.87	원호파괴

사면이 붕괴된 가능성에 대하여 해석을 실시한 결과 CASE I에 대해서는 사면이 한계평형상태일때의 안전율 1 보다 크게 상회하고 있으므로 해석결과 안정한 것으로 나타나 본 사면에 대하여 블록이론을 적용하기에는 곤란하다고 판단되며, CASE 2에 대한 결과는 건기시에는 기준안전율을 만족하나 우기시는 만족치 못하는 것으로 나타났다. 이는 사면이 붕괴된 시점이 우기인점을 감안한다면 원호파괴를 적용한 CASE 2의 파괴 형태가 블록파괴를 적용한 CASE I보다 좀 더 현장상황을 대표 할 수 있다고 판단되므로, 사면 보강공을 적용한 후 사면안정해석시 파괴형태를 원호파괴로 적용함이 타당하다고 판단하였다.

## 5. 보강사면에 대한 안정성분석

본 연구대상 사면에 대한 안정성 검토를 수행한 결과, 전술한 바와 같이 지하수나 강우의 유입 등으로 인하여 원호파괴가 발생할 수 있는 가능성을 내포하여 안정성에 문제가 있을 것으로 분석되어 붕괴가 발생한 지역의 사면의 안전성을 확보하기 위해서는 추가 보강이 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 현재 붕괴된 붕괴토가 사면의 안정성에 불리할 것으로 판단하여 붕괴토를 제거하여 구배조정을 수행한후 본 사면에서 적용가능한 보강방법인 FRP 보강그라우팅과 억지말뚝을 시공하는 공법에 대하여 사면 안정성분석을 수행하였으며 각 공법에 대한 제원은 다음 표 4와 같다.

표 4 적용된 공법의 제원

구 간	공 법 제 원	비 고
STA. 76	- FRP보강 그라우팅 공법 C.T.C 2.5×2.5m(직거리) L = 8.0m, 10.0m - 억지말뚝 수평간격 = 2.5m L = 14.0m, ϕ=355mm	- 수평배수공 - 수평간격 : 5.0m - L = 16m

FRP 보강 그라우팅 후 원 지반의 전단강도는 다음 표 5 및 표 6과 같이 제시한 값의 범위에서 증가함을 알 수 있다.(한국지반공학회, 한국도로공사, 서울대학교, 2002) 단, 이 값은 절대치가 아니며 균열 및 절리상태, RQD 등에 따라 조정 적용한다.

표 5 FRP 보강 그라우팅 공법의 개발 연구보고서(2002.9 한국지반공학회)

구 분 적용 지반	보강간격 (C. T. C) (m)	보강후 증가된 지반강도정수		비 고
		점착력증가량 (ΔC) (t/m <sup>2</sup> )	내부마찰각(θ) (°)	
토 사 풍 화 암 암 파쇄대	1.5 × 1.5	0.5~2.5	거의 변화 없음	C값 증가율 ▶ 토 사 : 70% 이상 ▶ 풍화암 : 50% 이상 ▶ 암파쇄대 : 35% 이상 Program 해석시 FRP관의 인발내력 또는 인장 강도 는 별도 계산해야 함.
	2.0 × 1.5	0.4~1.8		
	2.0 × 2.0	0.3~1.4		
	2.5 × 2.0	0.2~1.0		
	2.5 × 2.5	0.2~0.8		
	3.0 × 2.5	0.2~0.8		
	3.0 × 3.0	0.1~0.6		

표 6 FRP 보강 그라우팅 공법의 설계기법(2002.2 한국도로공사, 서울대학교)

구 분 적용 지반	보강간격(C.T.C) (m)	보강후 증가된 지반강도정수	
		점착력 증가량(ΔC) (t/m <sup>2</sup> )	내부마찰각(θ) (°)
사질토, 풍화암지반 또는 파쇄암반 등 그라우팅 효과가 양호한 지반	1.5×1.5	1.7~2.3	거의 변화없음
	2.0×2.0	1.6~2.0	
	2.5×2.5	1.4~1.8	
	3.0×3.0	1.1~1.5	

본 사면의 안정성 해석에서는 FRP 보강 그라우팅후 증가된 지반의 강도정수를 표 9 와 같이 적용하였다.

표 7 FRP 보강 그라우팅 공법 적용후 증가된 지반의 강도정수

구 분	단위중량 (t/m <sup>2</sup> )	점착력(t/m <sup>2</sup> )		내부 마찰각 (°)	비 고
		보강전	보강후 2.5m×1.5m		
토 사 층	1.9	1.5	3.0	25	

사면에 FRP 보강 그라우팅과 함께 적용된 억지말뚝의 제원은 다음 표 8과 같으며, 억지말뚝의 삽입이 완료된 후 말뚝두부의 보호를 위하여 콘크리트 보호캡을 설치하였다.

표 8 강관 및 H-PILE 제원

구분	외경(mm)	두께(mm)	
강관	355	8	
H-pile 150×150×7×10	-	-	

FRP 보강 그라우팅과 억지말뚝을 함께 붕괴된 사면에 보강 공법 적용후 사면안정 검토 결과는 다음 그림 4와 표 9와 같다.

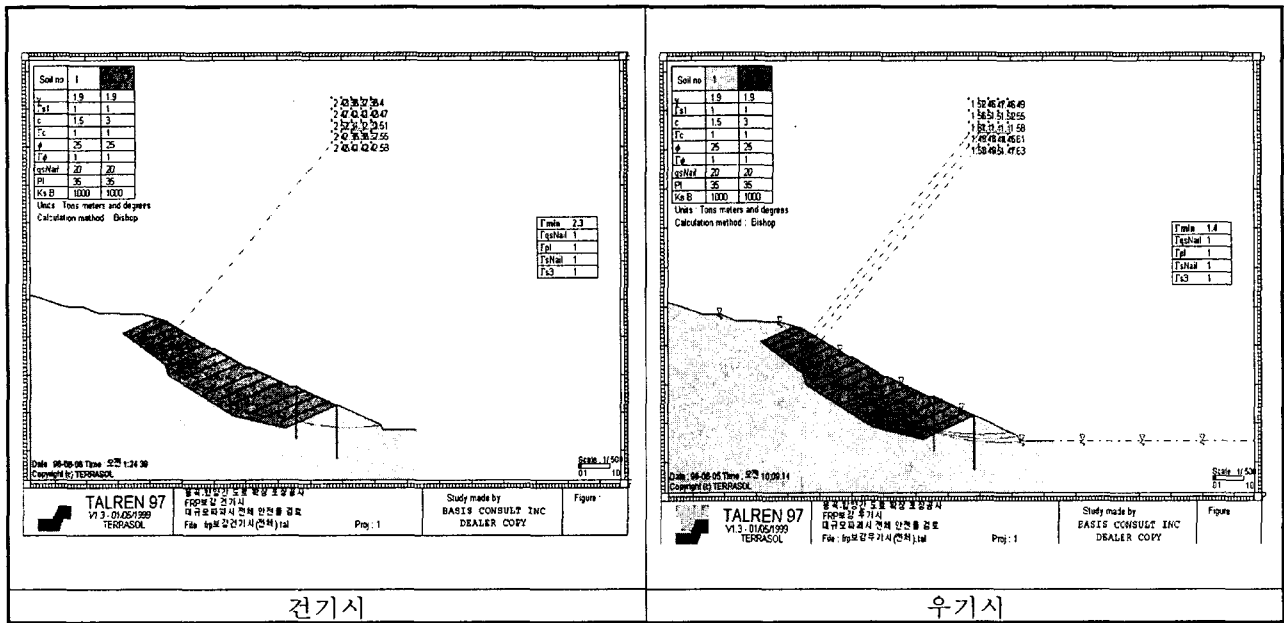


그림 4 구배조정과 보강공법에 대한 안정성 해석결과

표 9 구배조정과 보강후 사면 안정성 해석결과

검토 단면	안전율		판정	비고
	건기시	우기시		
STA.76	2.3	1.4	O.K	<건기시> F.S≥1.5 <우기시> F.S≥1.2

상기의 결과를 살펴보면 보강후 안전율이 기준 안전율보다 다소 높게 계산 되었음을 알 수 있다. 이는 본 사면이 붕적토와 토사로 이루어져 있고, 이미 붕괴가 발생하여 현재 붕괴가 진행되고 있음을 감안한다면 적절한 안전율이라 판단되므로, 본 구간에 대하여 적절한 사면 보호공이 적용되었다고 판단된다.

## 6. 결론

사면의 안정성 분석을 위하여 기존자료분석을 하고 정밀지표지질조사를 수행하여 대상사면을 포함한 사면주변부에 대하여 지질구조(단층, 연약대 유무)분포여부 및 발달상태, 균열발생상태(발생위치 및 규모, 방향성, 진행성여부) 등을 조사하였다. 이에 따른 안정성분석을 포함한 보강대책에 대한 연구결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 본 조사지역의 지질분포는 중생대 주라기 내지 삼첩기에 관입한 엽리상 화강암류와 관입상으로 분포하는 각섬암으로 이루어져 있다. 이 사면의 지표부에 분포하는 각섬암과 주위의 엽리상 화강암은 심하게 풍화되어 있어, 거의 손으로 만지면 부스러지는 정도의 완전풍화상태이며 사면 풍화토내에는 큰 암석형태의 핵석(core stone)이 발달하고 있으며 강우시에는 풍화토와 붕적층이 섞여 핵석이 지하수의 흐름을 차단하여 사면활동이 일어날 위험성을 내포하고 있다.
- (2) 붕괴가 일어났던 사면 상부에서 산 정상부에 이르기까지 이미 예전의 여러차례 산사태들로 인해 사면상부의 지반이 움직였던 증거(지반의 반복적인 인장균열, 암반내 불연속면의 변위현상, 굽은 나무, 긴장되어 있는나무뿌리, 고사목 등)들이 많이 발견되었다. 즉, 본 사면주변의 지반은 이번 붕괴가 발생하기 오래전부터 수차례 붕괴가 발생하여 형성된 것이며 이전 여러차례의 산사태로 인하여 지반이 이미 이완이 심하며 전단강도 등이 손실된 상태에 있었던 것으로 판단된다.
- (3) 대상사면 지역의 각섬암은 암석자체로서는 강도가 매우 높은 경암의 성질을 지니지만, 풍화가 되면 점토광물이 형성되어 팽창성이 크고 물의 흡수성이 강한 토사를 형성하여 강우시에는 많은 물을 흡수하게 되고 이 붕괴의 원인으로 지반의 하중이 증가가 심해지고, 또한 전단강도의 약화로 지반파괴가 쉽게 일어날 수 있는 지반적인 성질이 붕괴의 원인으로 판단된다.
- (4) 사면의 붕괴 가능성에 대하여 사면안정해석을 실시한 결과, 본 사면은 사면저부에서 발생한 국부적인 파괴(원호파괴)를 시작으로 사면 상단까지 붕괴가 진행된 경우일 가능성이 높다고 판단되며, 따라서 본 사면에 대한 해석시 원호파괴로 파괴포락선을 설정하였다.
- (5) 한계평형 이론에 의한 사면의 안정성 해석 분석을 수행한 결과, 건기시는 안정한 것으로 분석되었으나 우기시 사면의 최소 안전율이 확보되지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 본 사면에 대하여 사면보강공이 필요하며, 보강방법으로는 FRP 보강그라우팅 또는 이와 유사한 공법을 적용하여 원지반의 강도정수 증가와 활동에 저항하는 저항력을 증진할 필요가 있다. 이와 동시에 사면 하단부 지역에 억지말뚝을 추가 보강하여 사면의 장·단기적인 안정성을 확보토록 하는 것이 안정성 측면에서 바람직할 것으로 판단된다.
- (9) 사면의 지형적 여건 및 지반공학적 특성을 고려하여 지표수의 유입을 방지하기 위하여 산마루 측구를 시공하여야 하며, FRP 보강그라우팅 등과 같은 사면보강 시공시 병행되는 수평배수공도 필히 시공하여 사면내의 지하수위 저하에 역할을 할 수 있도록 하여야 한다.

## 참고문헌

1. 정형식, 이승호, 김태남, 신희순(2001), “고속도로 대절토사면 안정성평가에 관한 연구”, 사면안정 학술 발표회, pp.113~120.
2. 유병옥, 황영철, 정형식, 이승호(1999), “절토사면의 안정성 평가를 위한 점검항목 제안”, '99사면안정 위원회 학술발표회 논문집, pp.88~97.
3. 사면안정(1994), 한국지반공학회, pp.320~327.
4. 임승태, 최신의 사면안정공법(1994), 기술경영사, pp.97~122.
5. 응곡~함양간 도로확장 및 포장공사 절토부 사면안정 검토연구(2002), (사)한국지반공학회
6. 지경~김화간 도로확장 및 포장공사 사면안정 검토연구(2002), 상지대학교.
7. 추동~병지방간 도로확장 및 포장공사 대절토부 사면안정 검토 보고서(2002), 상지대학교
8. FRP 보강 그라우팅 공법의 설계기법 연구(2002), 한국도로공사, 서울대학교, pp.69~71.
9. Forrester, K.(2001), *Subsurface Drainage for Slope Stabilization*, ASCE PRESS, pp.91~101.