

## 대규모 절취사면의 설계와 안전진단에 관한 연구

### A study on the design and safety inspection of large cut-slope

이수곤<sup>1)</sup>, Su-Gon Shin, 이경수<sup>2)</sup>, Kyoung-Su Lee, 정상훈, Sang-Hun Jung, 강병호<sup>3)</sup>, Byoung-Ho Kang

<sup>1)</sup> 서울시립대 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

<sup>2)</sup> 서울시립대 공과대학 토목공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

<sup>3)</sup> 서울시립대 공과대학 토목공학과 석사과정, M.Sc. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul.

**SYNOPSIS** : This study area show the complicated geological figure and some developed small fault area in southern of Korea. Because of insufficient investigation and design for the big slope, even the safety analysis by the specific institution, in the event, there were 6 times failure and 6 time safety analysis. After all, The height and remedial work cost of the slope became much bigger then early stage.

**Key words** : fault area, slope, safety analysis, failure.

## 1. 서 론

본 연구지역은 안산암 분포 지역이며 소규모 단층대, 핵석, 화강암의 관입 등으로 인하여 매우 복잡한 지질특성을 보인다(그림 1). 이런 복잡한 지·질 상태임에도 불구하고 불충분한 조사·설계로 인해 6차례 붕괴가 발생하였고 매 붕괴 마다 안전진단 및 설계변경이 이루어진 결과 높이 45m의 사면이 145m로 높아졌으며 당초설계에 의한 공사비의 8배까지 소요되었다. 이에 본 연구에서는 붕괴사례의 연구를 통하여 붕괴원인을 분석하고자 한다.

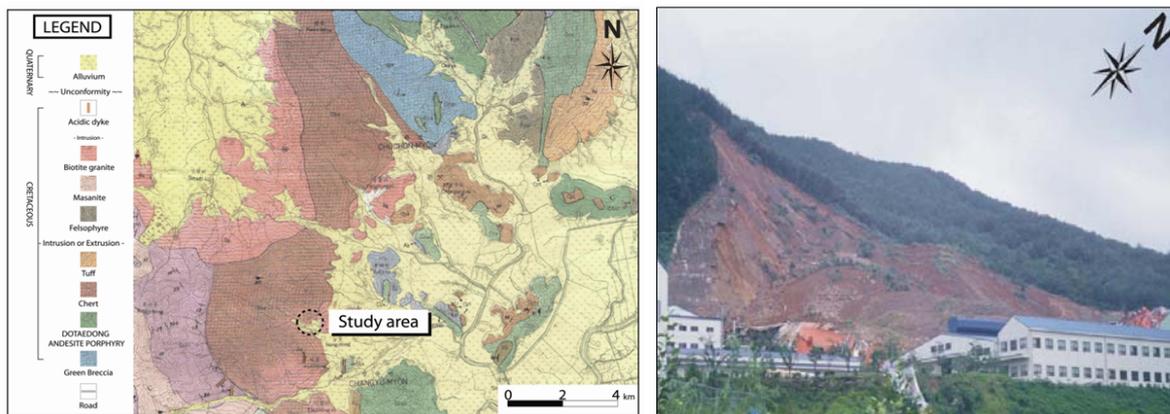


그림 1. 연구지역의 지질현황 및 전경 (KIGAM 1964)

## 2. 본 론

연구 지역은 좌측부와 우측부 사면으로 구분되어 시공 및 관리된 상황에서 총 6차례의 붕괴가 일어나 그에 따른 6차례의 안전진단을 수행하였고 안전진단 시 지질조사 및 설계내용은 표 1 과 같다.

표 1. 당초 설계부터 6차 안전진단까지의 지질조사 및 설계내용

발생 횟수 붕괴 일자	안전성 평가횟수	지표 지질 조사	시추공수		물리탐사	실내시험(회)		사면안정성 수치해석		보강방법
			시추 깊이(m)	사면과 이격거 리		토질전 단시험	암석절리면 전단시험	과괴형태	지하수 조건	
실시 설계 '95.4	x	x	6 연암 -1m 50m		x	x	x	x	x	L-type retaining wall, Anchor
1st '98.3	1차	×	4공 연암 -1m 사면내		x	3	x	Circular Failure	지표면까지	H-pile Anchor
2nd '99.4	2차	×	6공 연암 -1m 사면내		x	5	x	Circular Failure	지표면까지	H-pile
3rd '99.8	3-1차	o	×	×	x	x	x	x	x	Anchor, Shotcrete
	3-2차	x	x	x	○	x	x	Non Circular	60% over MW	Soil Nailing
4th '00.10	4차	○	6공 연암 -1m 사면내		x	x	x	Circular	CW-HW boundary	Grouting
5th '01.08	5차	×	×	x	x	x	x	Circular	지표면 -3m	Grouting in cracks, horizontal drains
6th '02.08	6차	○	22공 (7공BIPS수행) 40~75 m 사면내		○	자연 3회 포화 3회	8 (암석 5회, 단층점토 포함 3회)	Non circular	지표면까지	Anchor (25m 길이 3*5m 간격), pile

### 2.1 사면 당초 설계

당초 사면설계(Kim 1995)는 해당 사면에서부터 50m 이격된 거리에서 수행한 시추자료를 바탕으로 HW 으로 추정하였으며 그에 따라 표준경사 1:1(45°)로, 사면의 높이를 45m로 설계하였다(그림 2).

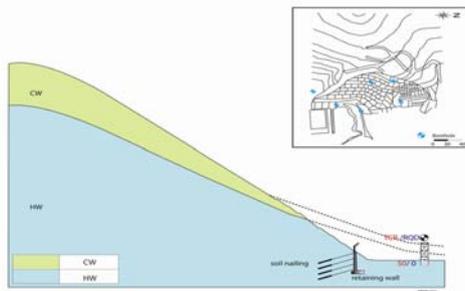


그림 2. 당초 설계의 지질조사와 설계내용

## 2.2 1차 안전진단

대상 사면의 사면하부 굴착공사 중 집중호우로 인하여 좌·우측부로 구분되어진 본 사면의 우측부에서 상부 사면의 안쪽과 바깥쪽에서 인장균열이 가로, 세로 방향으로 길이 160~270m, 폭 0.1~1.3m가 발생하여 1차 안전진단(Lee 1998)을 수행하였다(그림 3).

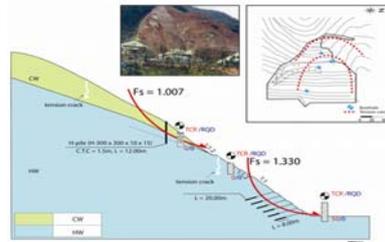


그림 3. 1차 안전진단의 지질조사와 설계 내용 및 현장사진

## 2.3 2차 안전진단

1차 붕괴가 일어난 후 당초 설계대로 사면공사 도중에 좌측사면부에서 붕괴가 발생하여 2차 안전진단(Kim 1999)을 수행하였다. 지하수가 하루에 4ton정도 토사와 암석의 경계면에서 용출되고 있었으며 사면 내에서 붕괴가 점차적으로 진행되는 것으로 조사되었다(그림 4).

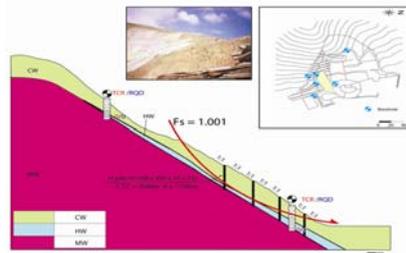


그림 4. 2차 안전진단의 지질조사와 설계 내용 및 현장사진

## 2.4 3차 안전진단

사면의 좌측부에서 2차 안전진단에 따른 보강이 지연된 상황에서 호우로 인해 상부 토사와 암석의 경계면에서 하루에 4ton 정도의 지하수가 용출되어 그 결과 사면붕괴가 2차 붕괴지역의 좌측부 쪽에서 폭 40m, 길이 70m, 깊이 4.5m의 크기로 일어났다(그림 5). 지표지질조사와 지구물리탐사가 2차 붕괴의 원인분석을 위하여 수행 되었는데, 그 결과 단층점토를 포함하는 단층대가 폭 0.5~2.0m로 사면 내에 발달하고 있으며, 이 단층대가 사면의 안정성에 상당한 영향을 줄 수 있다고 조사되었다(Kim 1999). 이에 반해 3차 안전진단(Chang et al. 2000)에서는 단층대에 의한 붕괴가능성에 대한 고려 없이 기존 시추결과만을 이용하여서 CW soil에서의 circular failure와 CW soil ~HW rock 경계면에서의 non-circular failure만을 고려하였으며, 토사층에 대한 soil nailing(12~18m)로 설계할 것을 제안하였다.

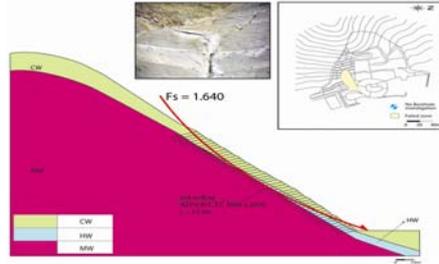


그림 5. 3차 안전진단의 지질조사와 설계 내용 및 현장사진

## 2.5 4차 안전진단

연속적인 붕괴가 보강공사 도중에 일어났으며, 인장균열과 미세균열들이 사면의 우측부 상부에 인장균열과 미세균열들이 발달하고 있는 것이 확인되어 4차 안전진단(Kim 2000)을 실시하였다. 4차 지표지질조사 시 핵석에 대한 존재를 언급함에도 불구하고 시추조사를 연암 1m까지, 핵석이 존재하지 않는 양호한 암반으로 판단해 수치해석을 수행하였다. 그러나 사면안정성 평가 시 원호파괴가 MW rock 하부의 지층까지 발생할 것이라고 가정하여 사면안전율이 높게 나왔다(그림 6).

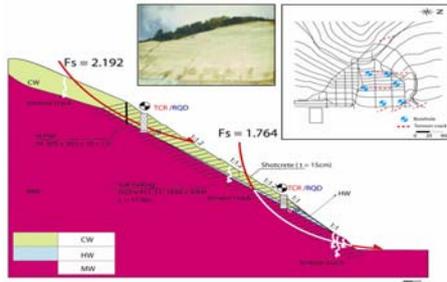


그림 6. 4차 안전진단의 지질조사와 설계 내용 및 현장사진

## 2.6 5차 안전진단

보강으로 시공된 역지말뚝과 우측사면 상부에 5~20cm의 인장균열, 50~120cm 단차가 연속적으로 발생하여 5차 안전진단을 수행하였다(Han 2001). 수치해석으로 표층에 토사에 대해 원호파괴만을 고려함에 따라 안전율이 비교적 높게 나와 적은양의 보강만이 제안되었다(그림 7).

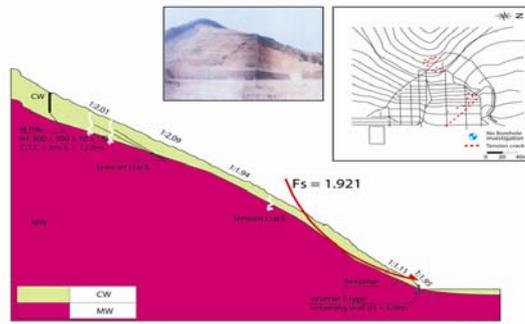


그림 7. 5차 안전진단의 지질조사와 설계 내용 및 현장사진

## 2.7 6차 안전진단

집중호우로 인해 높이 120m, 최대 폭 230m, 면적 34,000m<sup>2</sup>의 대규모 사면 붕괴가 발생하여서 6차 안전진단(Choi et al. 2003)을 수행하였다. 지표면 하부 30~35m에 대규모 단층대가 존재하는 것으로 나타나고 이 단층대에 충전된 단층으로 인해 직선적인 붕괴가능성이 높다고 판단하여 사면 경사를 1:1.7(30°)로 완화하고 보강으로 ground anchor 와 H-pile로 설계하였다(그림 8 & 9).

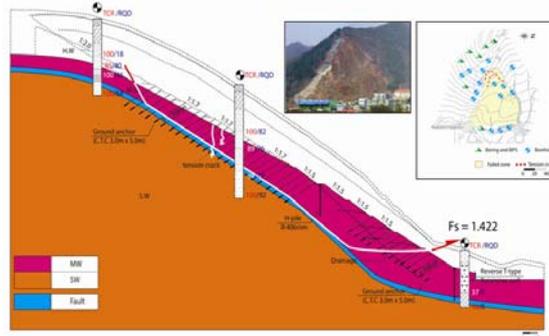


그림 8. 6차 안전진단의 지질조사와 설계 내용 및 현장사진



그림 9. 6차 안전진단에 따라서 수행된 사면경사 완화와 앵커시공 전경

## 2.8 기술적인 문제점

### 2.8.1 시추조사

대규모 절취사면 기본설계 시 사면 내 시추조사가 수행되지 않고 사면에서 50m 정도 떨어져 있는 지점에서 수행한 시추조사 결과로 지층을 구분하였으며, 대부분의 시추조사가 연암층 아래 1m 깊이 까지만 수행되었다. 이러한 짧은 시추는 사면의 안정성에 큰 영향을 미치는 단층이 사면하부에 존재할 시 확인할 수 없으므로 사면높이의 깊이 까지 수행되었어야 했다.

### 2.8.2 지표지질조사

6차 안전진단의 지표지질 조사결과에 따르면 붕괴의 주요원인은 사면에 분포하는 단층이 주요원인 이었다고 분석되었지만, 당초 설계 시에는 부적절한 지표지질조사로 인해 단층에 대한 방안을 설계에 반영하지 못하였다.

### 2.8.3 지층구분

당초 설계와 1~5차 안전진단에서 수행된 지층구분 방법은 시추조사 시 시추주상도(borehole log)에 암석 알갱이로 발견되면 MW 암반으로 판단하고 시추를 종료하였는데, 이 방법은 암석과 암반의 개념을 혼동하였기 때문이다. 이것은 5차까지의 안전진단에서 연암층(두께 10~30m)으로 판단한 지층(MW TCR<10(%), RQD=0(%))을 6차 안전진단에서 HW rock mass (두께 3~5m)판단하였다.

### 2.8.4 사면안정성 수치해석 방법

1~5차 안전진단 시 수치해석은 토사와 HW 암반에서 지하수위를 토층두께의 60%까지만 지정하여 원형파괴 또는 비원형파괴로 설계하였는데, 이는 우리나라의 사면설계기준인 지표면까지 분포하는 것과 차이를 보인다. 또한 단층대가 사면내 약 -30~35m심도에서 분포하여 직선파괴가 발생하고, 이때 지하수위는 Jewell(1999)이 추천한 것과 같이 토층두께의 100% 지표면까지 적용하였다. 그 결과 건기시  $F_s=0.957$ , 우기시  $F_s=0.393$ 으로 건기시에도 위험한 것으로 드러나 집중호우로 인한 천재지변은 아닌 것으로 판단된다(그림 10 & 11).

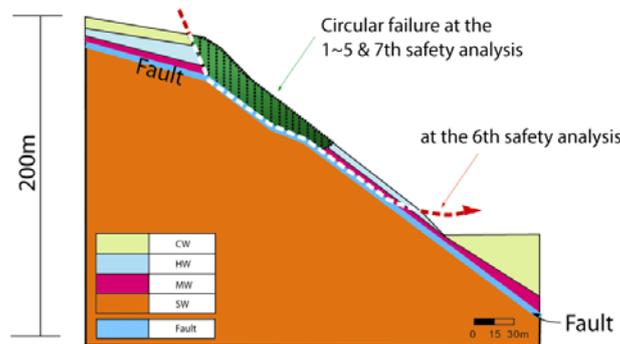


그림 10. 1차~7차 안전진단에서 사면안정성 수치해석 방법의 차이점(Lee et al. 2003)

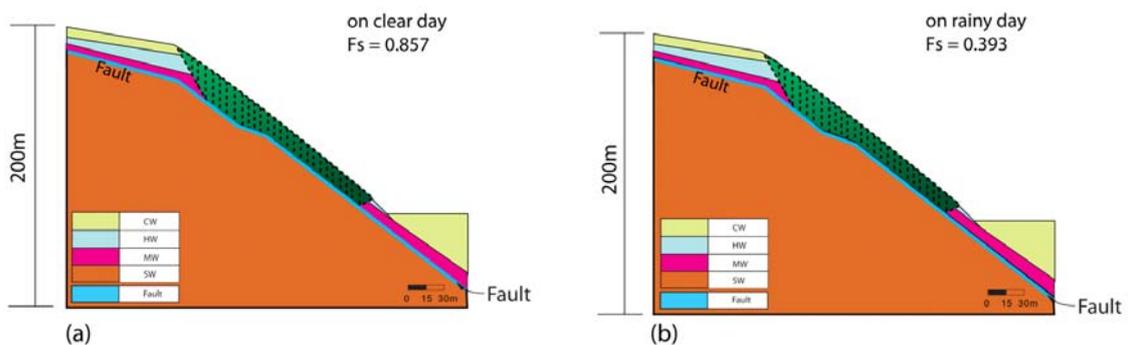


그림 11. 사면에 존재하는 단층대를 고려한 수치해석 결과(Lee et al. 2003)  
(a) 건기시(on clear day) 안전율  $F_s = 0.857$ , (b) 우기시(on rainy day) 안전율  $F_s = 0.393$

### 2.8.5 soil nailing 설계 및 시공

짧은 시추심도와 부적절한 지층구분을 바탕으로 수치해석을 실시한 결과 길이가 12~18m인 soil nailing을 시공하였으나 더 깊은 -30~35m 지점의 단층대가 실제로 활동이 예상되는 것으로 활동력을 견디기에는 불충분한 보강이었다.

## 2.8.6 계측 결과의 활용

3차 붕괴 이후에 좌측부에 계측기를 설치 및 관측하여 왔는데, 사면이 활동하면서 soil nailing에 압력이 과다하게 걸려 계속되는 변위를 측정하였음에도 불구하고 적절한 대책이 수립되지 않아 결국 6차 붕괴가 발생하였다.

## 2.8.7 제도적인 문제점

본 지역은 산지를 절취하여 농공단지를 조성하면서 관할권문제로 하나의 사면이 2부분으로 나누어지면서 각기 다른 소관부처들에 의해 조사·설계, 시공, 관리가 되었다. 이런 근본적인 문제로 인해 좌측부와 우측부에서 교대로 발생할 때마다 담당구간만 보강을 실시하여 부분적으로 대응하게 되었고 결국 전체적인 보강을 적절한 시기에 하지 못하여 반복된 붕괴의 중요한 요인으로 판단된다.

## 3. 결론 및 제언

본 연구 사면의 6차례 반복되는 붕괴는 기술적 제도적인 요인이 복합적으로 작용하여 발생한 대표적인 사례라고 판단된다. 이런 기술적 제도적인 문제를 해결하기 위해서는 철저한 지질조사를 위한 적절한 지질조사비용의 반영, 지질 조사·설계·시공·유지관리의 일관된 기술체계, 절취사면 관리기관 간의 유기적인 협조가 필요한 것으로 사료된다.

## 사사

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(사면 붕괴 예측 및 대응 기술 개발) 연구비의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### \*참고문헌

1. Chang, K. T., Jewell, R. A., Barley. T., Yoon, K. J., Yu, B. S., Kim, K. T., Kang, C. K. and Kwon, B. K.(2000), "김해 내삼농공단지 사면보강공사 사면 안정성 분석 및 안정대책", Kumoh National Institute of Technology(KIT), Gumi, Korea..
2. Choi, K., Jung, H. H., Lee, S. G., Mi, H. S., Lee, J. H., and Park, J. H.(2003), "내삼농공단지 산사태 원인 규명 및 복구대책 수립 연구 용역 종합보고서", Korea Forest Research Institute (KFRI), Seoul, Korea..
3. Han, S. S.(2001), "김해 내삼지구 협동화 단지 사면 안전 진단 보고서", 한상속건설기술연구소, Busan, Korea.
4. Jewell, R. A.(1999), "Further results for landslide soil nailing", Confidential memorandum. 5.
5. Kim, C. H.(1995), "주촌면 내삼농공단지 개발사업 기본계획.설계. 한성개발공사", Gimhae, Gyeongsangnam-do, Korea..
6. Kim, H. S.(1999), "김해 내삼 농공단지 사면보강공사 사면 안정성 검토 및 안정대책 종합보고서", 길평엔지니어링, Geumjeong-gu, Busan, Korea..
7. Kim, H. S.(2000), "김해 내삼지구 사면 안전진단 용역 검토보고서", 길평엔지니어링, Busan, Korea..
8. Lee, J. W.(1998), "김해 내삼지구 사면 안정대책 수립을 위한 지반조사", 동아지질, Geumjeong-gu, Busan, Korea.
9. Lee, S. G., Yang, H. S., and Hwang, U. S.(2003), "A case study of large-scale slope failure in Granite - Andesite contact area.", The Geological Society of Korea(GSK), 35.