

# 철도사면 파괴 원인 및 대책공법 적용을 위한 강도정수 결정

## Cause of Rail Road Slope Failure and Determination of Soil Strength for Remedy

이 승 현\* / 김 병 일\*\*

Lee Seung Hyun / Kim Byoung Il

### Abstract

Rail road slope can be failed because of existence of unexpected soft subsoil. Purpose of this study is verifying the cause of rail road slope failure and determination of soil strength for remedy. Drilling some boreholes, cone penetration test and field vane test were executed in order to find out the cause of slope failure. In addition, laboratory test was conducted in order to determine soil strength of soft soil sampled as undisturbed state. As a result of both the in-situ and the laboratory tests, the cause of slope failure is thought to be propagation of failure zone by progressive rupture of overconsolidated clay. Soft soil strength was determined through back analysis of the failed slope.

**Key words** : cause of slope failure, in-situ tests, progressive rupture, back analysis

### 요 지

철도사면은 예상치 못한 연약지반의 존재로 인해 붕괴될 수 있다. 이 연구는 철도사면의 파괴원인을 규명하고 대책공법 적용을 위한 강도정수를 결정하는데 그 목적이 있다. 사면파괴의 원인을 파악하기 위하여 시추조사, 콘관입시험, 현장베인시험 등이 수행되었다. 또한 연약지반의 강도정수를 구하기 위해 불교란상태로 시료를 채취하여 실내시험을 수행하였다. 현장원위치시험 및 실내시험 결과 사면 파괴의 원인은 과압밀점토의 점진적 파괴에 따른 연약지반 강도저하영역의 전파에 기인한 것으로 밝혀졌다.

**핵심용어** : 사면파괴의 원인, 현장원위치시험, 점진적인 파괴, 역해석

### 1. 서 론

설계에 사용되는 여러 가지 지반정수들은 지반조사에 의해서 결정되는데 지반조사시 시추공 간격을 좁히는데 한계가 있으므로 시추공 사이에 존재하는 연약지반을 발견하지 못하는 경우가 많다(한국지반공학회, 2003; 박용원 외, 2004). 이런 경우 국지적으로 존재하는 하부 연약층의 존재로 인해 성토 작업중 사면파괴가 발생할 수 있다. 본 연구의 목적은 경기도 안산 소재 철도 사면 성토구간(STA. 22+593 ~ STA. 22+911)에 발생한 사면파괴의 원인을 규명하고 대책공법 적용을 위한 강도정수를 결정하는데 있다. 사면파괴는 두개

의 교대 사이에 시공되고 있던 철도사면에 대하여 약 150m 구간에 걸쳐 발생하였는데 최종 성토고 6m에 못 미쳐 4.5m 높이로 성토하던 중 사면파괴가 발생하였다. 사면파괴양상은 원호활동 양상을 나타내었으며 사면파괴로 인해 인접해 있던 논바닥이 융기되어 있음을 확인할 수 있었다. 철도사면 파괴원인규명을 위하여 대 상지반에 대하여 콘관입시험 및 현장베인시험을 수행 하였으며 시추공 내에서 채취한 불교란 시료에 대해서 실내시험을 수행함으로써 지반의 강도정수를 결정하였다. 콘관입시험결과와 현장베인시험결과를 상호비교하여 안산지역의 콘계수(Bowles, 1988)를 결정해 보았으며 실내시험 및 현장 원위치시험 결과와 역해석을 통하여 대책공법 적용을 위한 강도정수를 결정하였다.

\* 정희원, 선문대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · E-mail : shlee02@sunmoon.ac.kr

\*\* 정희원, 명지대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사 · E-mail : bikim@mju.ac.kr

## 2. 지반조사

성토사면의 파괴원인규명과 그에 따른 대책을 수립하기 위한 자료를 얻기 위하여 지반조사를 실시하였는

데 총 6개소의 시추공과 8 회의 콘관입시험 및 현장배인시험을 수행하였다. 지반조사 위치를 평면상에 개략적으로 나타내면 다음의 그림 1과 같다.

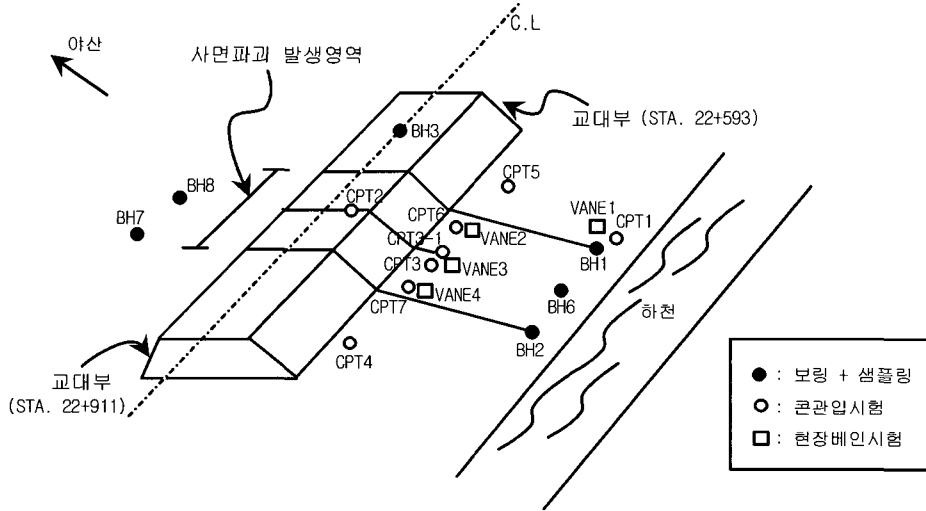


그림 1. 지반조사위치 평면도

표 1. 시추공별 매립층 및 연약층 두께

보링공	BH1	BH2	BH3	BH6	BH7	BH8
매립층 두께(m)	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.6
연약층두께(m)	5.0	5.9	2.5	5.5	2.5	3.9

각각의 시추공에 대해서는 연약지층을 대상으로 1.5m 간격으로 피스톤 샘플링을 통해 불교란 시료를 채취 하였으며 연약지반이 아닌 흙에 대해서는 표준관입시험을 수행하여 교란 시료를 얻었다. 콘관입시험의 주목적은 사면파괴구간 및 인접구간에 대한 연약층의 심도 확인에 있으며 연약층의 비배수 전단강도는 현장 배인시험을 통하여 구하도록 하였다.

### 3. 현장원위치시험 및 실내시험 결과

사면파괴의 원인규명을 위하여 그림 1에 나타낸 바와 같이 소정의 위치에 대한 현장원위치 시험(콘관입시험, 표준관입시험)결과와 보링을 통해 얻은 샘플링 시료를 이용한 기본물성시험 및 압밀시험, 강도시험등의 실내시험결과들을 나타내면 다음과 같다.

#### 3.1 현장원위치 시험결과

##### 3.1.1 표준관입시험

현장원위치 시험으로는 앞서 언급한 바와 같이 표준관입시험 및 콘관입시험을 하였다. 표준관입시험을 통

해 구한 6공의 시추주상도를 통해 볼 때 사면파괴가 발생한 지역의 토질은 지표면으로부터 매립층, 연약층, 풍화토층, 풍화암층의 분포를 보이며 시추공에 따라 차이가 있으나 약 0.5m 두께의 매립층 아래로 3~6m 두께의 연약층이 존재한다. 시추공 별 매립층 및 연약층 두께를 표로 나타내면 다음의 표 1과 같다.

연약층 아래에 분포하는 풍화토층에 있어 N값은 13~50사이의 분포를 보인다.

##### 3.1.2 콘관입시험

조사위치별로의 연약층 두께는 깊이에 따른 콘선단저항값을 근거로 하여 결정하였는데 그림 1에서 CPT3-1위치에서의 콘선단저항값의 분포 및 콘계수 ( $N_k$ ) 15를 적용하여 추정된 비배수 전단강도는 다음의 그림 2와 같다.

각각의 조사위치에서의 콘선단저항값은 대체로 그림 2에서와 같은 분포를 보이는데 비교적 연약지반이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 그림 2에서 비배수 전단강도는 연약지반결정에 있어 판단자료로 삼기 위해

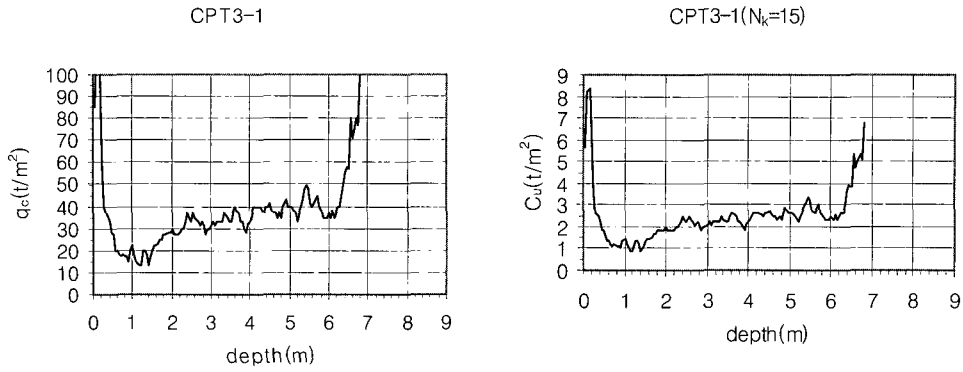


그림 2. 콘선단저항값 및 비배수 전단강도(CPT3-1)

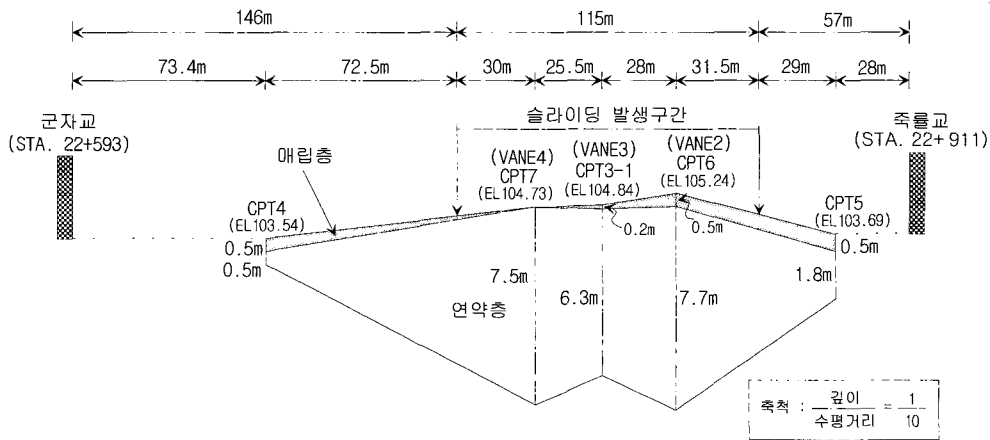


그림 3. 연약층 분포 종단면도(콘관입시험)

나타낸 것으로 콘계수( $N_k$ ) 15는 이후에 나타낼 베인 강도값과의 비교를 통하여 결정한 것이다. 그림 2에 나타낸 깊이에 따른 비배수전단강도의 분포양상과 일반적으로 연약지반 판정기준으로 삼고 있는 비배수강도값을 참조하여 연약지반의 판단은 콘계수를 적용하여 구한 비배수 전단강도값  $4 t/m^2$ 를 기준으로 하였다. 그림 1과 그림 2를 통해 나타낸 방법을 이용하여 콘관입시험위치에 관련하여 사면중축방향으로 콘관입시험을 통해 구한 연약층의 두께를 그림으로 나타내면 다음의 그림 3과 같다.

그림 1과 그림 3을 통해 알 수 있듯이 사면의 종단면을 따르는 연약층의 두께는 슬라이딩 발생구간내의 경우 6.3~7.7m의 분포를 보이며 양측교대 근처에서의 연약층 두께 0.5m와 1.8m에 비하여 큰 값을 알 수 있다. 따라서 본 사면파괴지역의 경우 연약층의 두께는 양측교대에서 사면파괴구간으로 진행하면서 점차 커지는 양상을 보이는 것으로 판단된다.

### 3.1.3 현장베인시험

그림 1과 그림 3에 나타나 있듯이 사면파괴 발생구간 및 그 인접지반에 분포하는 연약지반의 전단강도 측정을 위하여 현장베인시험을 실시하였는데 각각의 시험위치에서의 비배수 전단강도의 분포는 다음의 그림 4와 같다.

베인강도값의 전체적인 분포를 볼 때 깊이가 증가함에 따라 선형적인 강도증가양상은 보이지 않으며 4개 조사위치에 대하여 6m 심도까지 강도값이  $3.2 t/m^2$ 을 넘지 않는다. 또한 조사위치별로 예민비는 대체로 10 이상의 값을 보인다. 베인강도값과 콘선단저항값의 상관관계를 알아보기 위하여 콘계수 15를 적용하여 구한 강도분포를 그림으로 나타내면 다음의 그림 5와 같다.

그림 5를 통해 알 수 있듯이 콘계수 15를 적용하여 구한 연약지반의 전단강도는 현장베인시험으로 구한 강도와 잘 일치하며 이를 이용하여 앞서 언급한 바대로 콘관입시험을 통해 얻은 선단저항값의 분포로부터

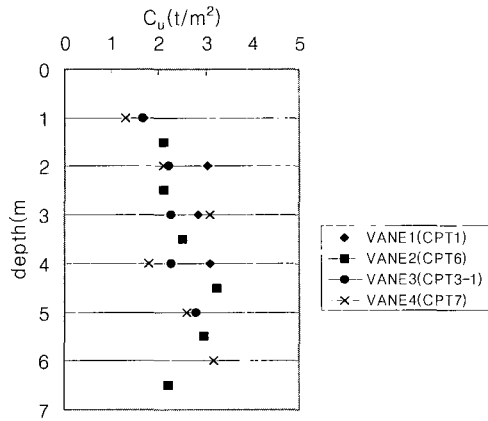


그림 4. 베인시험으로 구한 비배수 전단강도의 분포

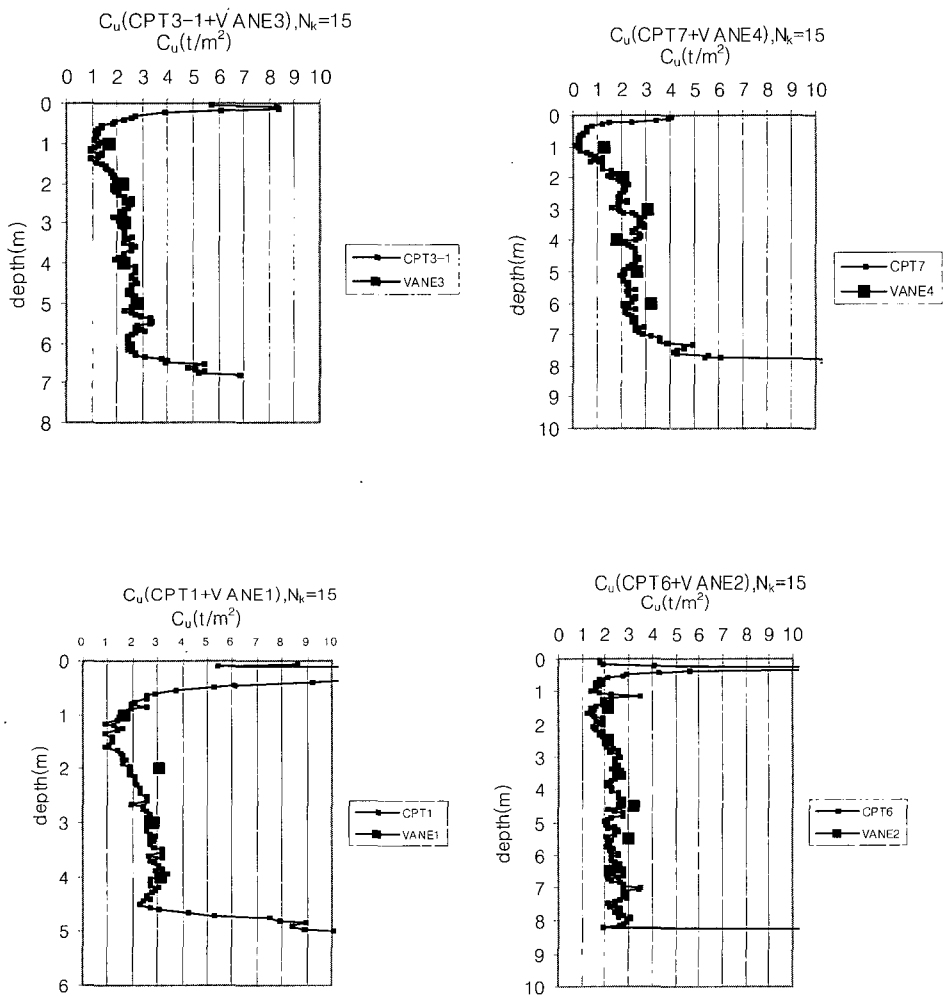


그림 5. 베인시험과 콘관입시험으로부터 구한 비배수 전단강도의 비교

콘계수를 적용하여 연약지반의 두께를 결정하였다.

### 3.2 실내시험결과

실내시험을 위하여 각각의 시추공으로부터 피스톤

샘플러를 이용하여 채취된 불교란 시료에 대한 기본물성시험과 강도시험을 수행하였다. 기본물성시험결과로

부터 사면파괴 발생구간 및 그 인접구역에 있는 연약 지반은 CH 또는 CL로 분류되었다. 실내시험으로 연약 지반의 강도를 결정하기 위해 비압밀비배수 삼축시험을 수행하였는데 시추공 별로 삼축시험결과를 요약하면 다음의 표 3과 같다.

그림 1과 표 3을 통해 볼 때 삼축시험으로부터 구한 강도값은 하천측 근처의 시추공(BH1, BH2)에서 얻은 시료에 대한 값이 그밖의 시추공에 대하여 구한 강도값에 비하여 작는데 다만 BH6의 경우 3m심도에서의 강도값이 BH1과 BH2에서의 강도값보다 약 2배이상 큰 값을 보임을 알 수 있다. BH3의 시료에 대한 강도값은 1.5m 깊이에서  $2.93 t/m^2$ 으로 같은 깊이에서의 BH1과 BH2시료에 대한 강도값에 비하여 큰 값을 보인다.

#### 4. 사면파괴 원인규명 및 대책공법 적용을 위한 강도정수 결정

사면파괴지역 중앙부의 개략적인 종단면도는 다음의 그림 6과 같다. 그림 6에서 성토체 하부의 지층은 지표면으로부터 매립층, 연약층, 풍화토, 풍화암의 순으로 구성되어 있는데 연약층의 경우 비배수강도에 의해 3개의 층으로 구분하여 나타내었다.

그림 6에 나타나 있는 성토체(embankment)에 발생한 슬라이딩의 주원인은 현장원위치시험 및 실내시험결과를 통해 볼 때 제체하부에 존재하는 연약지반 때문인 것으로 판단된다.

현장배인시험 및 실내 삼축시험으로 구한 전단강도

의 깊이에 따른 분포는 다음의 그림 7과 같다.

현장배인시험은 VANE 1을 제외하고는 슬라이딩 구간 또는 그 근처에서 실시하였으며 성토사면의 종방향으로의 중심선에서부터 하천측에 있는 지반에 대하여 시험을 한 것이다. 그림 7에는 실내삼축시험결과를 아울러 나타내어 하천측의 시추공에서 얻은 시료에 대한 삼축시험강도를 배인강도와 비교하고자 하였다. 그림 7을 통하여 알 수 있듯이 전반적으로 강도는 연약층 두께 1m 까지는 증가하는 양상을 보이다가 두께 1m 이후에서는 거의 일정한 값들을 보인다. 하천측 지반에 대한 보링공 BH1, BH2 그리고 BH6로부터 샘플링한 시료를 통해 구한 압밀시험결과 그리고 배인강도시험으로부터 얻은 예민비를 깊이에 대하여 나타내면 다음의 그림 8과 같다.

그림 8로부터 알 수 있듯이 하천측 연약지반의 경우 과압밀비는 6이상으로 보이며 예민비의 경우도 두 개의 점을 제외하고는 모두 7이상의 값들을 보인다. 따라서 하천측 연약지반은 과압밀된 연약지반으로 판단된다. 과압밀점토는 전단시 변형이 증가함에 따라 강도가 최대점에 이르렀다가 잔류상태로 떨어지는 특성이 있으므로 이를 사면파괴원인과 관련지으면 사면파괴의 원인은 점진적 파괴에 따른 연약지반 강도저하영역의 전파에 기인한다고 추정된다.

따라서 슬라이딩 발생구간의 연약지반의 비배수강도는 그림 7에 실선으로 나타낸 바와 같이 강도분포에 있어 하한치에 근접하는 값을 취하도록 하였는데 연약

표 3. 연약지반의 전단강도

공번호	BH1		BH2		BH3		BH5	BH6		BH7	BH8	
	1.5	3.0	1.5	3.0	1.5	3.0	1.5	3.0	4.5	1.5	1.5	
삼축(UU)비배수강도 ( $t/m^2$ )	1.39	2.06	2.42	1.5	1.13	2.93	6.95	4.15	4.6	4.52	3.8	3.5

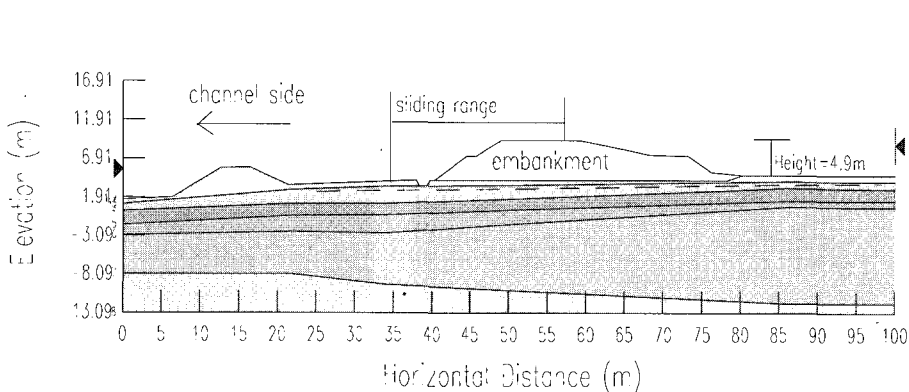


그림 6. 사면파괴부의 종단면도

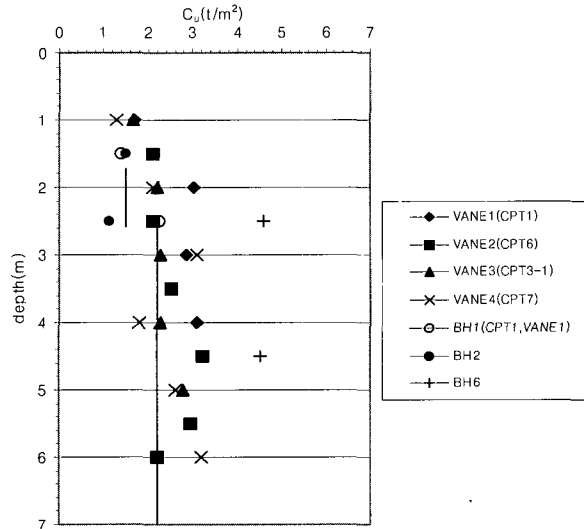


그림 7. 배인전단강도 분포

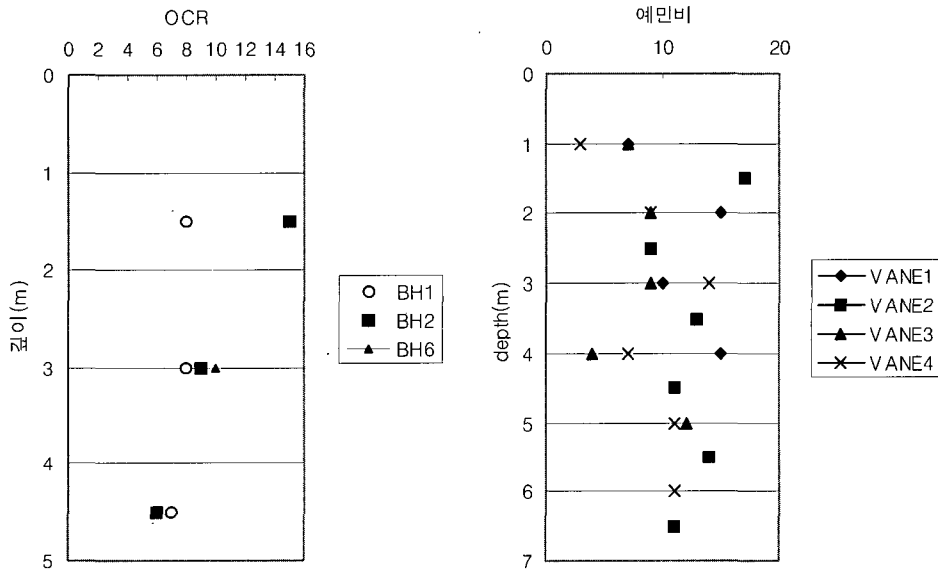


그림 8. 과압밀비 및 예민비

지반 상부 1m 두께에 대해서는  $1.5 t/m^2$ 의 강도를 적용하고 그 하부지반의 비배수강도는  $2.2 t/m^2$ 으로 본다.

이상에서 결정한 강도정수값을 이용하여 사면안정 해석을 한 결과 안전율이 1.13으로서 이론적으로는 슬라이딩이 발생하지 않는다. 따라서 역해석 개념으로 안전율 1을 만족하도록 하부 연약지반의 비배수 강도를 결정하면  $1.88 t/m^2$ 이며 이때의 사면안정 해석결과는 다음의 그림 9와 같다. 사면해석은 GEO-SLOPE(2002)사에서 개발한 사면해석 프로그램인 SLOPE/W을 이용하여 하였다. 사면해석방법은 여러

가지 사면안정해석법 중 가장 보편적이고 비교적 타당한 값을 주는 것으로 알려진 Bishop 간편법을 적용하였다(Anderson & Richards, 1987).

사면보강공법 검토시 그림 9에 나타난 안정해석결과에 근거하여 사면파괴구간의 연약지반을 두 개의 층으로 나누어 각각  $1.5 t/m^2$  와  $1.88 t/m^2$ 의 비배수 강도를 적용할 수 있다. 대책공법 적용을 위한 강도정수 적용시 파괴가 발생한 연약지반에 대한 디크스트로피(thixotropy)효과와 지반파괴영역에 대한 정확한 평가가 필요하다.

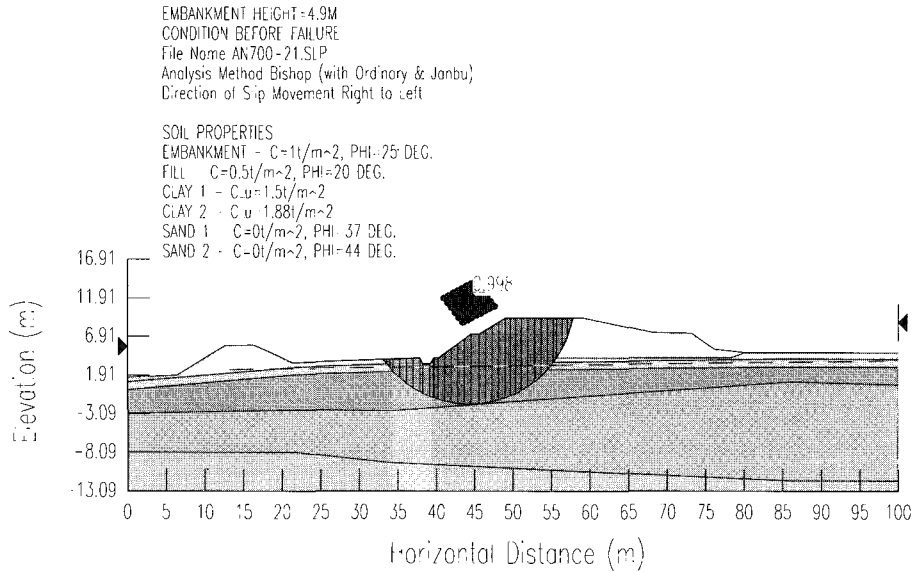


그림 9. 사면안정 역해석

## 5. 결 론

철도사면 파괴원인 규명을 위하여 보링시험, 콘관입 시험, 현장배인시험과 실내시험을 통하여 철도사면 하부 연약지반의 존재를 파악하고 연약지반강도를 파악하였다. 실내시험과 현장원위치시험을 통해 구한 연약지반강도를 상호 비교분석하였으며 시험결과를 기초로 하여 역해석을 통해 대책공법 적용에 필요한 연약지반 강도정수를 결정하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 파괴가 발생한 철도사면 하부의 연약지반에 대한 현장원위치시험 및 실내시험결과를 통해 볼 때 연약지반은 과압밀지반으로 사면파괴의 원인은 점진적 파괴에 따른 연약지반 강도저하영역의 전파에 기인한다고 판단된다.
2. 콘관입시험결과와 현장배인시험결과를 상호비교 분석한 결과 안산지역에 대한 콘계수는 15의 값을 보였다.
3. 실내시험과 현장원위치시험결과를 참조하여 역해석을 수행하여 대책공법 적용을 위한 강도정수를 결정하였는데 대책공법 적용시에는 연약지반 강도에 관한 디소트로피(thixotropy) 효과와 지반파괴영역에 대한 정확한 평가가 필요하다.

## 감사의 글

이 논문은 2000년도 선문대학교 교내학술비 지원을 받았음을 밝혀둡니다.

## 참 고 문 헌

- 박용원, 이병철, 김병일, 이승현, 김영욱, 김윤상(2004), 기초공학, 대영사, 서울
- 한국지반공학회(2003), 구조물기초설계기준해설, 구미서관, 서울
- Anderson, M. G. & Richards K. S.(1987), Slope Stability, JOHN WILEY & SONS
- Bowles, J. E.(1988), Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill Book Company
- GEO-SLOPE(2002), SLOPE/W Manual, GEO-SLOPE International, Canada

- ◎ 논문접수일 : 2004년 6월 10일
- ◎ 심사의뢰일 : 2004년 6월 11일
- ◎ 심사완료일 : 2004년 9월 10일