

건설공사 사고사례(주로 연약지반에서)

박성재¹⁾, Sung-Zae Park

¹⁾부산대학교 공과대학 토목공학과 교수(공학박사)

1. 서론

연약지반의 안정과 지지력에 관하여 이론과 실제현상의 관계를 논의하기 위해서는 실제로 파괴된 구조물 사례를 이론적으로 해석하고, 그 결과를 실제현상과 비교한 자료는 실제 설계 시공에 있어서 매우 유익한 자료가 될 것이다.

우리 나라에도 사고 사례가 많지만, 책임만 추궁하는 사회여건 때문에 체계적인 연구가 이루어지지 않았다. 앞으로 이러한 사례가 많이 공개되어야 하고 정책적으로도 양성화시킬 수 있는 유인책이 있어야 할 것이다. 금번 기회에 이러한 관점에서 많은 사고사례 중 연약지반에서의 몇 가지 사고 사례를 소개하고자 한다.

2. 연약점토의 전단특성

2.1 안정해석과 전단강도

사면안정성을 계산 할 때에는 흙을 단순한 모델로 생각한다. 즉 강소성체 모델로 어느 응력까지는 흙에 변형률이 크지 않은 탄성체 성격을, 임의의 응력에 도달하면 흙은 소성화 되어 응력은 변화하지 않아도 변형률이 발생한다. 이와 같이 상태를 흙이 파괴로 정의하고, 그 응력조건을 파괴기준이라고 칭한다. 흙의 경우는 여러 가지의 파괴기준이 제안되어 있지만 Mohr-Coulomb의 기준을 가장 많이 이용하며, C와 ψ 의 강도정수로서 파괴기준을 정의한다.

하지만 실제의 흙이 강소성체와 다른 어떠한 성질을 갖게되면, 아무리 고급스런 계산방법을 동원해도 신뢰성이 낮은 결과밖에 기대할 수 없다. 따라서 안정해석법의 신뢰성을 논의할 때는 흙의 전단특성을 올바르게 파악해야 한다.

2.2 강도증가

점성토 지반의 비배수 전단강도는 일반적으로 심도에 따라 증가

$$c = c_0 + mz$$

여기서, m은 심도방향 증가율 (=c/p)

$$m(=c/p) = 0.11 + 0.0037 I_p \quad (\text{Skempton})$$

이방성일 경우, $I_p \approx 15 \sim 20$ 일 경우(중간토) 작음 \rightarrow 변형이 큼

2.3 점토의 전단특성

진행성 파괴현상 : 동일한 응력아래서 시간의 경과에 따라 진행성을 나타냄

강도의 이방성 : 퇴적이력에 따라 특성이 다름, $q_{u1} > q_{u2}$ 의 경향, 엄밀한 안정해석을 위해서는 활동면의 강도 변화 필요 → 매우 복잡

강도의 시간효과 : 전단속도가 빠르면 전단강도 큼, 10%정도의 오차

시료의 교란 : 시료채취시 발생, 응력해방과 기계적 교란

3. 안정해석법

3.1 극한평형법

절편법 → Fellenius법, Bishop법, Spencer법, Janbu법, Morgenstern-Price법 → 사면의 안전율이나 활동력 및 저항력만 산출 → 수평 변형량은 구할 수 없음

3.2 수치해석법

극한평형법의 문제점 보완

유한요소법 : 탄성(선형)·비선형·탄소성·탄점소성 등, 지반의 응력과 변형계산에 주로 이용되었지만, 안정해석도 가능

유한차분법 : FDM (FLAC 등)

경계요소법 : Boundary Element Method

개별요소법 : Discrete Element Method (UDEC 등)

Hybrid : 복합 요소

①DDA (개별요소법+유한요소 : Manufolding 기법)

②경계요소+유한요소

4. 사고 사례

4.1 사례 1

낙동강 하구지역 ○○도로 성토(신설구간)

1) 전단파괴 현황

①발생 일시 : 1993. 8. 19 AM 7:00 경, 전단파괴로 양측 융기발생

②설계조건 및 현황비교

㉠땡드레인 : 간격 → 1.2×1.6, 심도 → 25.1m

㉡성토 현황 비교표

단위(m, cm)

위 치	설 계		시 공			기준일자
	계획고	침하량	성토고	침하량	수평변형량	
0K+010	9.99	130.2	8.997	145.90	63.057	1993.8.17
0K+120	9.56	123.7	8.385	160.30	58.857	1993.8.17

2) 전단파괴 원인분석

①지반조사와 토질시험의 미흡

지반조사 : 1개소

토질시험 : 물리시험 5회, 역학시험(압밀과 직접전단 시험) 1회

지층변화에 따른 토질정수의 파악 불가능 → 심도별로 시료채취

$\phi = 0$ 해석을 위한 UU Test나 일축압축시험 미실시

단계성토에 따른 지반의 강도증가 확인용 조사 미실시.

②설계 변경

원설계(S.D) → 시공사 자체 검토 (미반영) → 발주처 방침(P.S.D)

③현장 상황

㉠상층부가 모래질 분포 → 강우에 의한 수위변화 영향 큰 지역

㉡공정이 가장 빠른 지역 → 절토구간의 버력을 본 공구를 통과하여 인접공구에 반출
토록 계획 → 불가 → 급속성토

㉢'93 여름은 강우빈도와 강우량이 많은 해 → 하천 횡단을 위한 공사용 가교 유실.
→ 성토제체는 상당히 포화

㉣4월말과 5월 중순경 성토시 계측에 의한 안정성 분석결과와 현장의 시각에 의한
관찰상 문제로 방치했던 지역

㉤절토구간의 공정상 하천넘어 반출 계획된 토사를 가교유실로 인하여 본 파괴 지역
에 성토를 실시.

㉥성토속도 : 약 8.4~9.3 cm/day

㉦1회당 성토고 : 30cm를 능가 (평균 40~59cm)

④계측관리

㉠기준치 미설정

㉡인식부족 : 매설 또는 측정자료 정리를 해석이라고 평가 → 결과를 수시로 공사에
반영할 수 있도록

㉢공사관리의 주도적인 역할

㉣계측빈도와 예산 : 최소 2 회/주 이상.

㉤관리체제 : 행정상 관리체제, 공사와 시험실의 운용체제

4.2 사례 2

낙동강 하구지역 ○○ 도로 성토(확장구간)

1)현황

성토고 : 2.64 ~ 4.26m, 침하량 : 23~48cm, 균열폭 : 1~2cm, 연장 50m 내외

2)원인분석

- ①계측기 간격 : 200m의 간격도 연약지반의 도로에 많지 않다.
- ②정확한 토질조사와 시험결과 : BX 구경의 조사
- ③토취장 확보 : 발주후 토취장 관계로 약 1.0m 성토후 방치 → 확보후 급속성토(7.0 및 5.5cm/day)
- ④파괴형상 : 선단파괴와 저부파괴의 중간형태, 栗原(Kurihara) 기준치보다 작은 값(0.77~1.33cm)에서 균열이 발생하였다. $S_h/S_v \approx 0.55 \sim 1.0$
- ⑤계측빈도
- ⑥계측관리의 이해부족 : 자료는 실험실 담당자 손에서 그침 → 토공사를 실시하는 공사부서와의 긴밀한 공조체제가 필요
- ⑦계측관리 전문인원의 절대부족
- ⑧계측기기 관리 : 계측기 선택, 매설방법, 초기치 관리, 파손시 신속한 복구와 자료 수정

3)대책

- 10K+260 지점은 경사계가 없는 지역이므로 육안관찰에 의한 균열발생
- 지표변위말뚝 설치(경사계 없는 지역)
 - 진행성이지만 양이 작음 (1.33~0.77cm에서 0.32~0.27cm로 감소)
 - 균열부를 PP매트 설치지점까지 굴착 확인
 - 사면붕괴를 일으킬 정도의 심각한 상태가 아님
 - 경사계를 1개소 추가 매설
 - 일정기간의 방치로 압밀에 의한 강도회복을 기대키로 함
 - 2~3 개월 경과 후 10ton 이상의 PE Mat 포설하고 시험성토(30cm)
 - 필요시 별도의 대책 수립

4.3 사례 3

낙동강 하구지역 (○○○ IC 접속구간)

1)현황

기존 고속도로 IC의 접속구간으로 곡률이 큰 작은 부분에 해당함

현장 방문시 균열이 발생 중이었음

도로가 회전하는 구간이므로 법선 방향으로 균열이 발생함

사면 발생지역 주변의 Box 문제 발생 : 팽창줄눈(Expansion Joint)의 균열과 Box 주변의 부등침하

2)원인분석

공기부족과 예산회계법의 한계 → 급속 성토

3)대책

성토체 일부제거와 방법

앵커인장 : Box의 날개벽(Wing)에 설치

바닥 슬래브 천공과 강봉(Pin) 삽입과 턴바클의 인장

바닥 슬래브의 덧씌우기와 실리콘 처리



<사진 4.1> 전단 균열부 복구 후 개통시 사진(암성토 부위)



<사진 4.2> 전단 균열부 인근의 개통시 사진(Box 주변)

4.4 사례 4

○○ 고속도로 ○○공구 : 전단균열

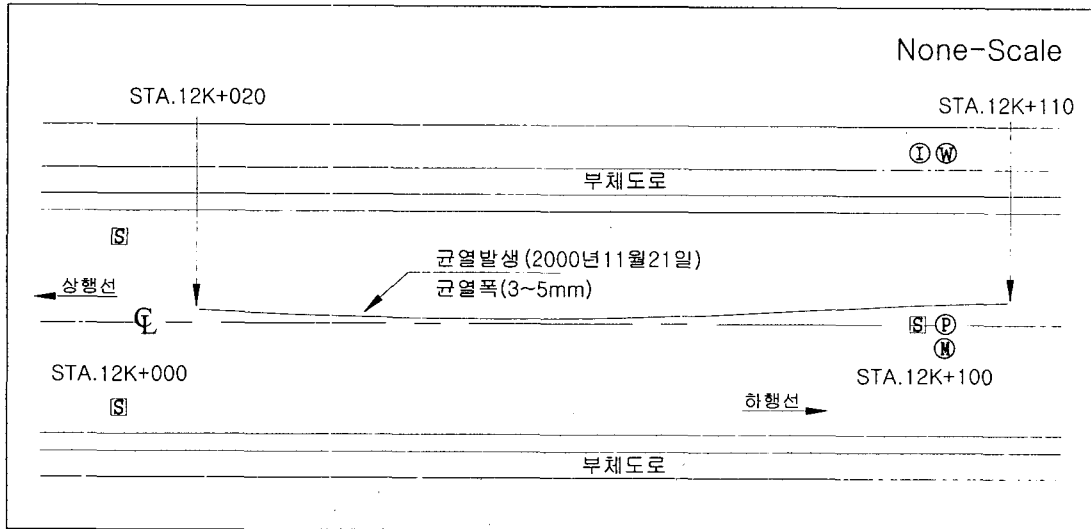
1) 현황

전단균열 발생 : 발생일시 - 2000. 11. 21

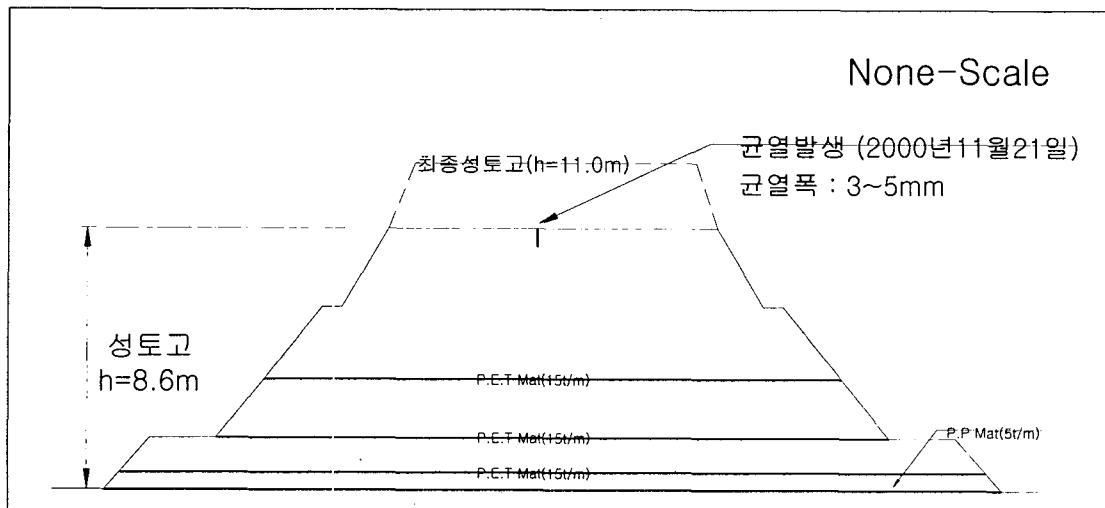
성토고 : 약 8.6m

균열연장 : 90m 내외

균열 폭 : 3~5mm



<그림 4.1> 균열 현황 (평면도)



<그림 4.2> 균열 현황 (단면도)



<사진 4.3> 균열 현황 사진 (1)



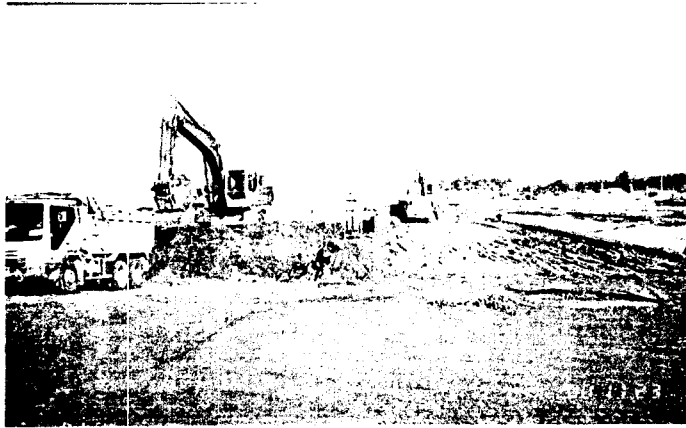
<사진 4.4> 균열 현황 사진 (2)



<사진 4.5> 균열 현황 사진 (3)

2) 원인분석

급박한 공기로 급속 성토



<사진 4.6> 성토 현황

3) 대책

성토체 일부 제거

4.5 사례 5

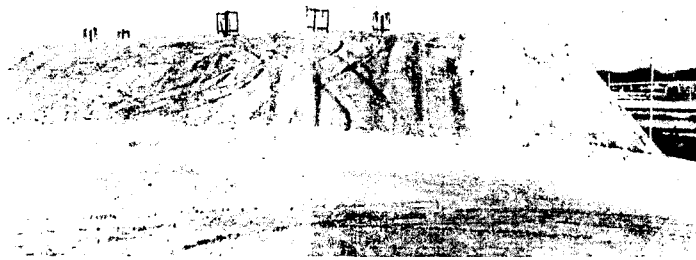
○○ 고속도로 ○○공구 : 전단파괴

1) 현장 현황

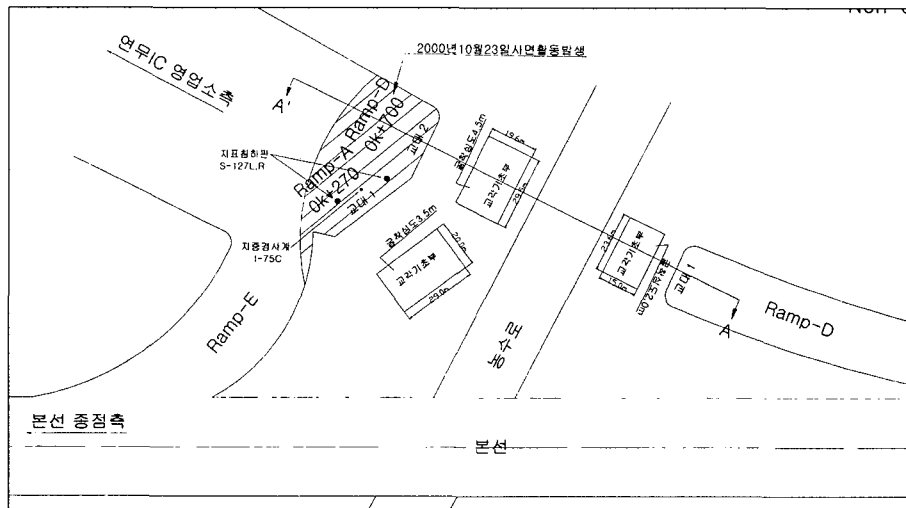
2000. 10. 23 전단파괴 발생

성토고 : 약 8.4m,

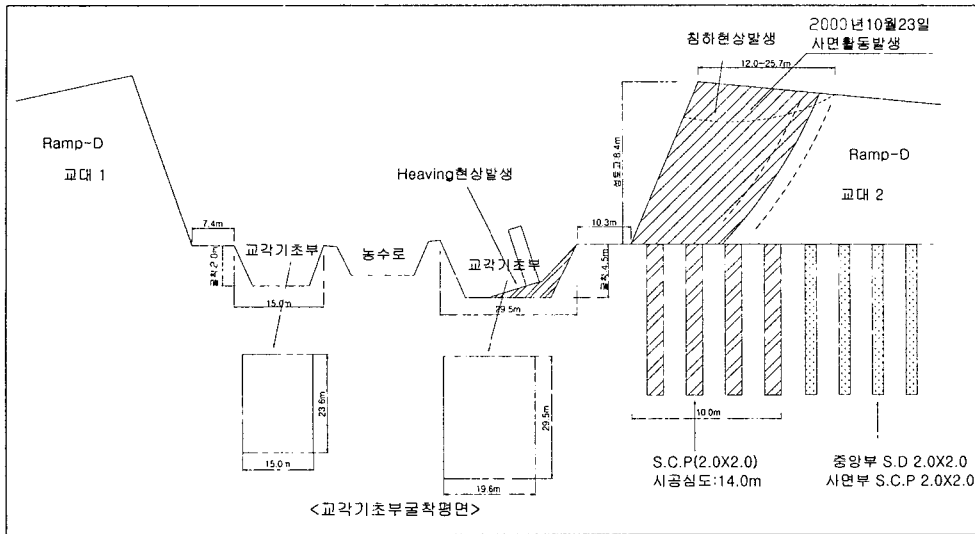
발생규모 : 도로사면의 길이 12.0~25.7m, (사면부 전면측으로) 폭 75.2m



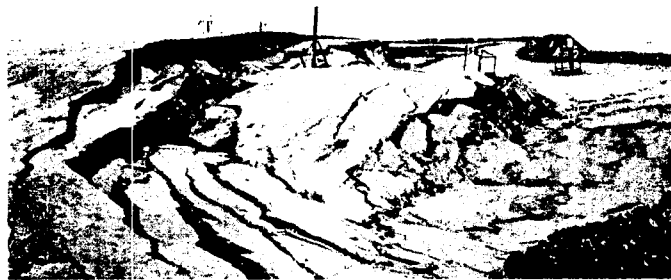
<사진 4.7> 균열 발생 전 현황사진



<그림 4.3> 균열 현황 (평면도)



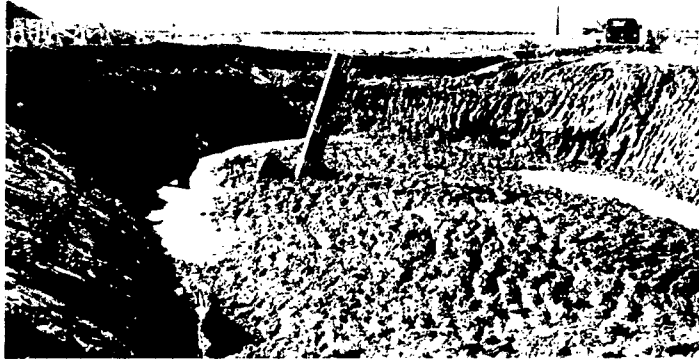
<그림 4.4> 균열 현황 (단면도)



<사진 4.8> 균열 발생 후 현황사진(1)



<사진 4.9> 균열 발생 후 현황사진(2)



<사진 4.10> 균열 발생 후 현황사진(3)



<사진 4.11> 균열 발생 후 현황사진(4)

2) 원인 분석

구조물 주변의 부족한 공기
기초공 설치를 위한 가설적인 굴착심도와 성토고

3) 대책

성토체 일부 제거



<사진 4.12> 전단파괴 후 성토체 제거 현황

4.6 사례 6

1) 현황

낙동강 주변 경사지역에 택지 조성

옹벽과 수목이 하천 측으로 활동파괴를 일으킴



<사진 4.13> 전단파괴 현황 (1)



<사진 4.14> 전단파괴 현황 (2)



<사진 4.15> 전단파괴 현황 (3)



<사진 4.16> 전단파괴 현황 (4)

2) 원인

하천 인접지역의 바닥경사와 편토압
연약지반 분포
급속 성토

3) 대책

양방향에서 체질
일정 높이로 되메움

4.7 사례 7

국도 ○○호 선 활동붕괴사고

1) 사고 현황

- ① 1997년 10월 27일 발생한 국도35호선 활동붕괴 사고가 발생했다.
- ② 연약지반 상에 건설된 석·금산 지역에 접한 국도35호선은 1985년 시공 중에 성토사면의 활동 붕괴사고가 2회(금산교 교대부근, 금번 파괴 지역에서 양산시측) 있었고 이를 복구하고 안정화시키기 위하여 3년 정도 방치한 후 1988년에 준공하였던 사례가 있다.
- ③ 국도35호선 석·금산지역 도로 양측 지하에 대형 가스관이 매설 되었는데(토지공사측 $\phi=750\text{mm}$ 의 LNG관은 사용중에 있으며, 석·금산측의 가스관은 사용되지 않는 상태이다. 또 석·금산 측에 상수도관이 매설되어 있었다.
- ④ 국도35호선을 중앙에 두고 동측은 석·금산 구획정리 사업이 사업기간, 1994. 9. 30~1998. 9. 29으로 시행자는 석·금산지구 토지 구획정리 조합 시공자는 D사와 H사가 시공하고 있었다. 서측은 한국토지공사 양산·물금지구 택지개발 사업 조성공사 중의 2단계 공사구간에 1단계 시험성토가 이뤄진 상태에 있었다.
- ⑤ 국도35호선에 접한 석·금산 구획정리 사업 지구내 연약지반에 속한다. 당초 설계에 예상 못했던 연약지반에 대하여 D지질, P공업대학 산업과학 기술연구소 등에 의뢰하여 수차에 걸쳐 안전대책을 수립하는 등의 시공 및 감리측의 노력은 있었다.
- ⑥ 1997년 10월 27일 오후 18:00경 석·금산 구획정리 측의 성토 공사로 인하여 성토사면이 활동붕괴 되면서 국도35호선을 수직·수평으로 변형시켜 표면측량 성과에서는 3.2m, 수평이동이 있었고 매설관은 4.2m(가스공사, 매설 당시 초기치 기준) 정도 수평으로 이동되었다고 한다.
당시 매설된 상수도관이 파열되어 용출수로 인한 침수로 석·금산측 도로 일부가 침수되었고 도로는 석·금산측은 침하되고 토지공사측은 융기하는 등 심한 균열이 발생하여 국도35호선의 교통 소통이 중단되었다.

2) 원인

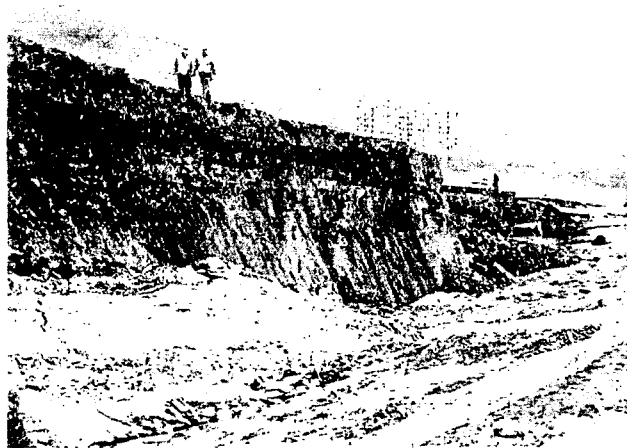
- ① 국도35호선 활동붕괴 사고원인은 석·금산 구획 정리 공사에 따른 연약지반 상의 당초 설계가 부적절 하였고 안전대책을 위한 보고서 등에 제안된 연약지반 대책에 따른 시공도 부적절하게 이뤄졌는바, 연약지반상의 성토에 따른 철저한 배수, 계측관리등 시공관리가 적절하지 못한 상태에서 급속 성토가 이뤄졌기 때문이다.
- ② 본 검토 과정에서 긴급대책 방안을 제시하였다. 긴급대책으로는 연약지반상에 임시가설 도로 건설에 지오그리드 등을 이용한 신기술을 도입하여 단시일내 우회도로를 개설하였고 이에 대한 유지 관리를 철저히 하도록 하였다.
또한 사면 활동붕괴가 발생하지 않았던 인접 S-7 계측 지점에(석·금산측, 활동 붕괴 후 추가로 매설한 경사계)에서도 급격한 지반변형이 발생하여 대형사고가 우려되는 위험한 상태가 발생하였는바 계측결과를 분석한 결과를 토대로 긴급히 1997년 11월 19일부터 24일 사이에 석·금산 측의 기 성토된 토사를 1m 이상 절토를 실시함과 동

시에 토지공사측도 압성토를 긴급히 시공토록 하고 석·금산 측의 집수정의 배수를 독려하여 지반변형을 억제하므로써 제2의 대형 사고를 미연에 방지 할 수 있었다.

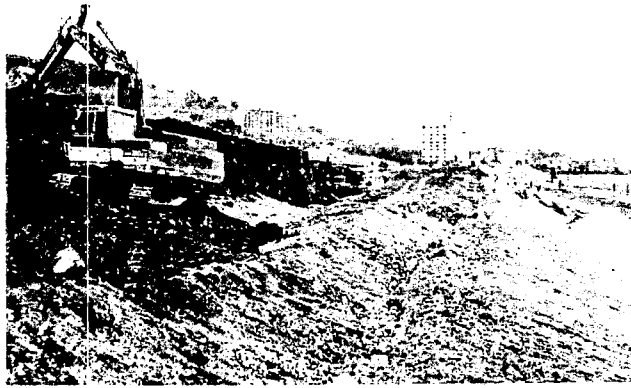
- ③시험성토 구간에 사면 활동붕괴시 지반의 수평변형, 지반응기등에 따른 급격한 간극수압, 토압의 증가가 있었고(당일 계측치는 정전으로 전산자료 망실) 지표경사계, 전단면 침하계, 그리고 지중경사계 등의 파손이 있었다.

시험성토 지역의 집수정에서의 양수는 계측자료에 의하면 시험성토 구간을 크게 벗어나지 않았고 더욱이 국도35호선까지는 집수정에 의한 양수로 인한 지하수위 저하 등의 영향은 미치지 않았기 때문에, 시험시공지역의 양수는 사면활동과 무관하다.

- ④국도35호선 확장(35m)으로 인한 문제점은 본 검토에서 제안한 적극적인 연약지반 처리에 의한 지반안정 대책(P.B.D 공법)을 채택할 필요가 있으며, 지하매설관은 이를 보호하기 위한 지반안정 공법이나 매설관 자체를 선재하중 공법등으로 소정의 압밀침하를 시킨후 이설하는 방안이 검토되어야 할 것이다. 또한, 석·금산지구의 추가 단지 계획에 대한 장기적인 대책을 수립하여 국도35호선이나 LNG Gas관(기타 각종 매설물) 및 인접주택단지에 영향을 주지 않도록 해야 할 것이다.



<사진 4.17> 전단파괴 현황 (1)



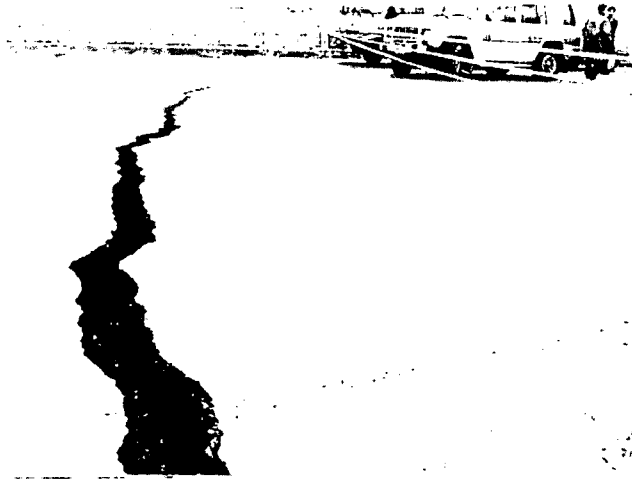
<사진 4.18> 전단파괴 현황 (2)



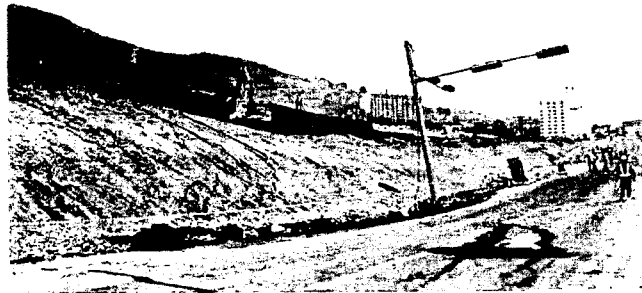
<사진 4.19> 전단파괴 현황 (3)



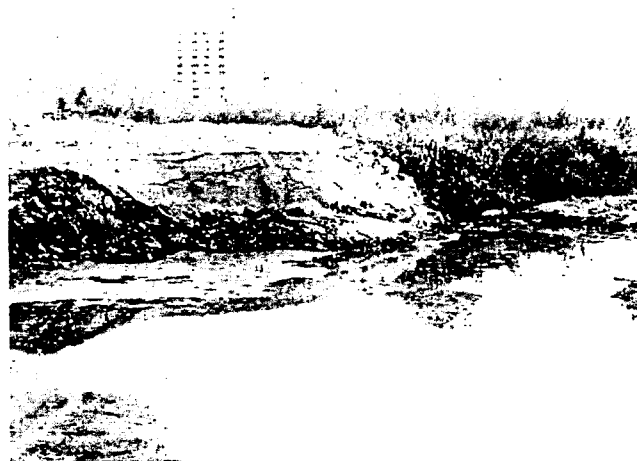
<사진 4.20> 전단파괴 현황 (4)



<사진 4.21> 전단파괴 현황 (5)



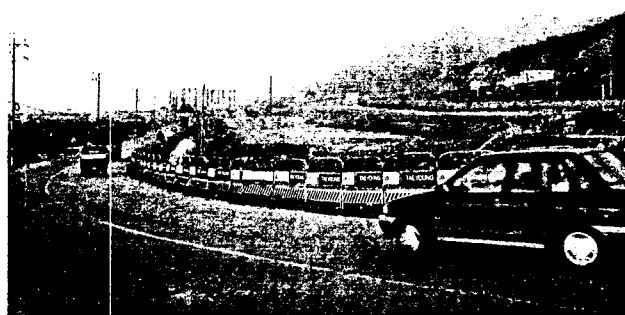
<사진 4.22> 전단파괴 현황 (6)



<사진 4.23> 전단파괴 현황 (7)



<사진 4.24> 전단파괴 현황(8)과 가스관로 매설상태



<사진 4.25> 전단 파괴 후의 보강공사와 성토

4.8 사례 8

구포 철도 전복사고

1) 현황

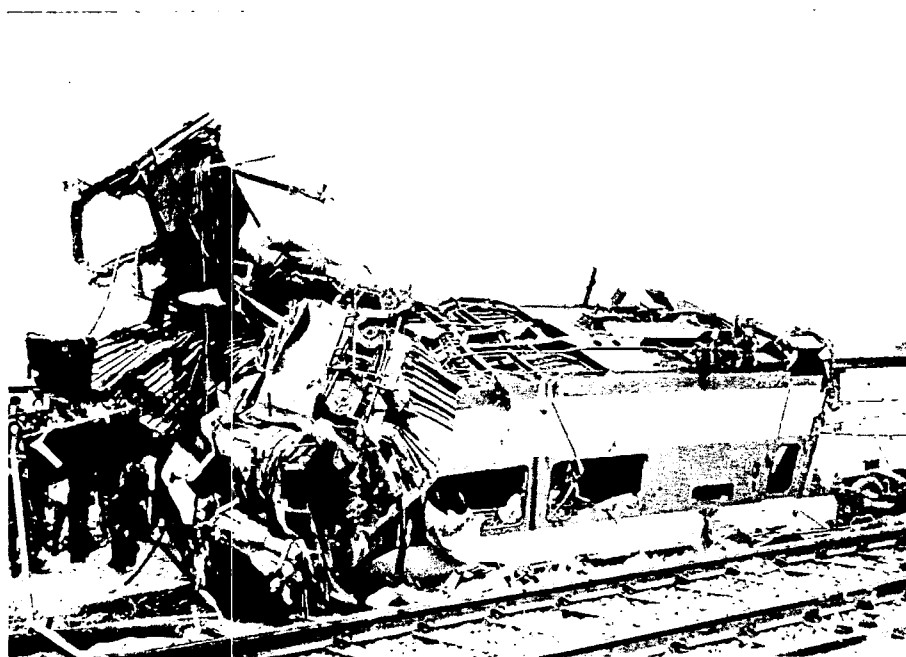
1993년 3월 28일 오후 5시 25분경에 발생한 부산의 구포 철도 전복사고는 사망 75명을 포함하여 256명의 사상자가 발생한 대규모의 사고이었던 바 이에 대하여 토목 공학의 기술적인 관점에서 사고원인을 밝힌 것이다.

2) 사고 원인

- ①설계를 위한 현황조사 즉 지상·지하에 대한 기초적인 조사가 소홀하였다. 이로인하여 #4 작업구의 위치가 설계당시의 지점에서 다소 변경되었다. 이는 공정이나 예산등에 차질을 주게 되어 사고의 간접적인 영향으로 나타날 수 있다고 판단된다.
- ②설계를 위한 지반조사 성과 중 지층의 상태가 실제와 상이하어, 실제보다 안정측으로 설계되었다. 이는 시공자의 예측을 흐리게 하는 원인이 된다.
- ③설계를 위한 지반조사에서 연약지반에 대한 자연시료채취나 시험성과가 전혀 없는 것은 지반공학적인 기본개념이 결여된 소치로 생각된다. 설계자는 연약지반상에 놓인 철도구조물의 안전성을 설계서에서는 수차례나 강조하면서도, 실제 FEM 설계 해석에 적용된 토성치 그리고 계층 위치등은 소홀히 취급되었다.
- ④도시형 터널이고 상부에 연약층인데도 터널굴진 방법이 기계식이 아닌 발파 방법을 채택한 것도 사고의 원인으로 되었다.
- ⑤현장시공 관리가 소홀하여 #4작업구 위치등이 설계대로 되어 있지 않는 등 시공노선의 정확성을 지키지 못했다.
- ⑥수차례에 걸쳐 본 사고와 유사한 붕괴 및 함몰 사고가 있었는데도 현장 보강대책이 늦어진 것은, 현장 감독, 감리 그리고 시공관리에 소극적으로 대처한 탓으로 볼 수 있고 이러한 작업 환경과 분위기가 이어져 중요한 시설물인 경부선 철도를 관통하는 시점에도 기본적으로 지켜야 할 안전수칙을 도외시하였다.
- ⑦중요한 철도시설물 하부를 관통하면서 수직, 수평보링등 시공조사의 불충분, 무계획적이고 비정상적인 발파, 지보공의 지연등이 사고의 원인이 되었다.
- ⑧시공관리, 안전관리를 위한 현장계측이 소홀하였다. 막장붕괴는 피할 수 없었다 하더라도, 지표의 침하를 계측하였거나 안전 감시요원을 배치하였다면 인명사고는 미연에 방지할 수 있었다.
- ⑨지반조건이 상층부는 연약지반인데다가 지하수위가 높고 터널위의 암반두께는 터널직경과 비슷할 정도로 얇고 균열이 심한층으로된 암반층 위에 투수성이 큰 호박돌층이 존재하고 있어서 터널시공시 막장붕괴가 일어날 가능성이 큰 지층이었다.



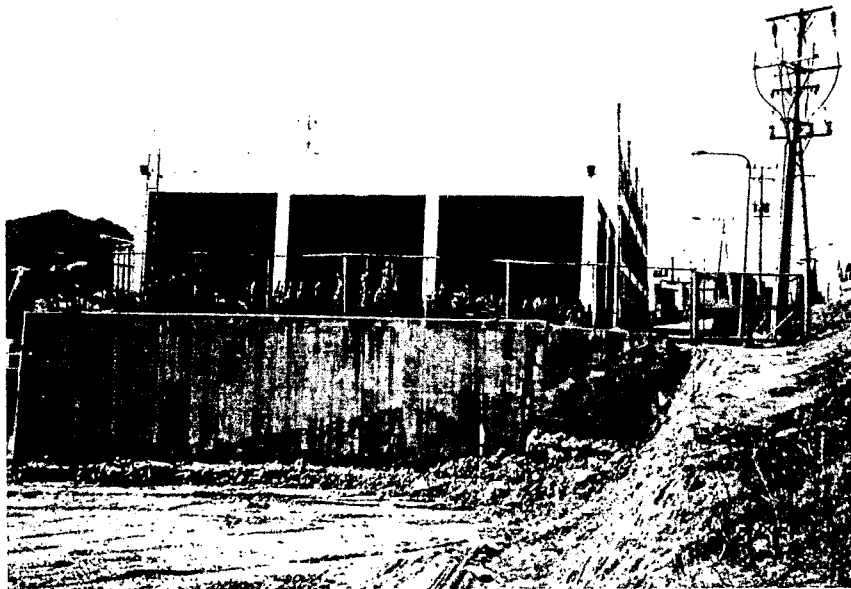
<사진 4.26> 항공사진 (1993.3.29)



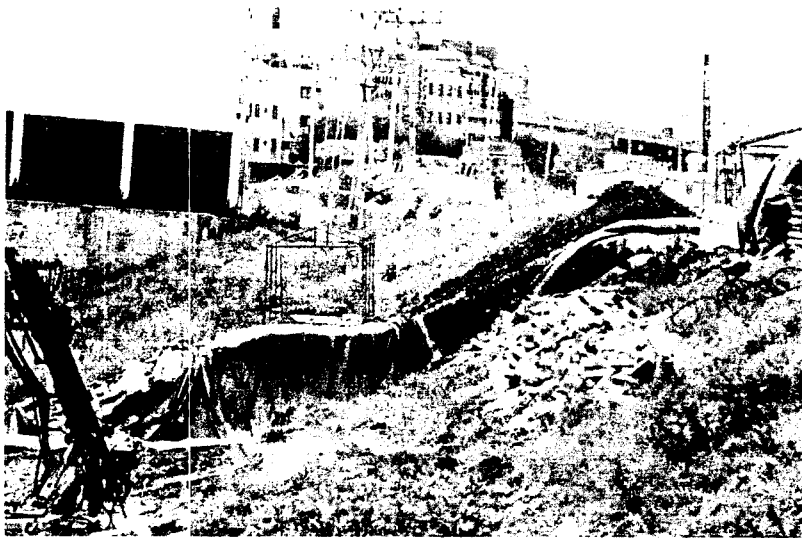
<사진 4.27> 사고 현황 (1)



<사진 4.28> 사고 현황 (2)



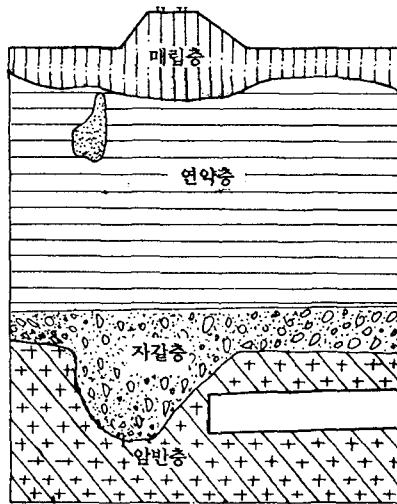
<사진 4.29> 배수펌프장 침하현상



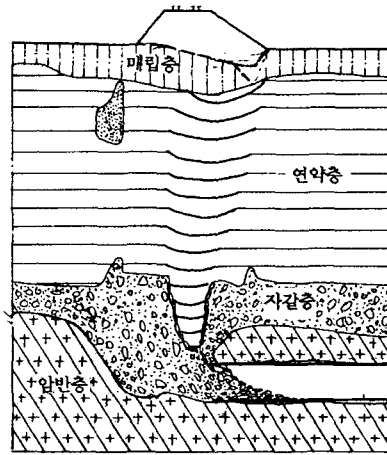
<사진 4.30> 함몰형태



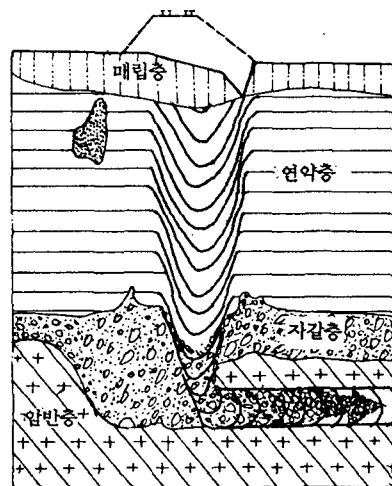
<사진 4.31> 붕괴사고시의 터널내 유입된 토사



함몰전

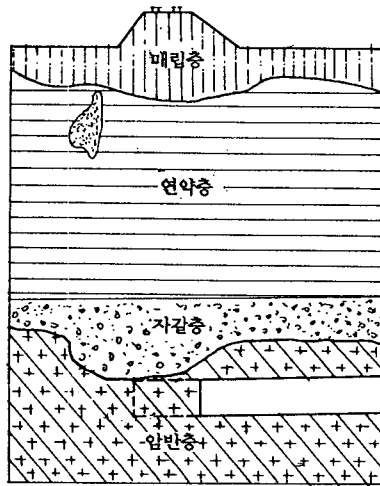


함몰진행

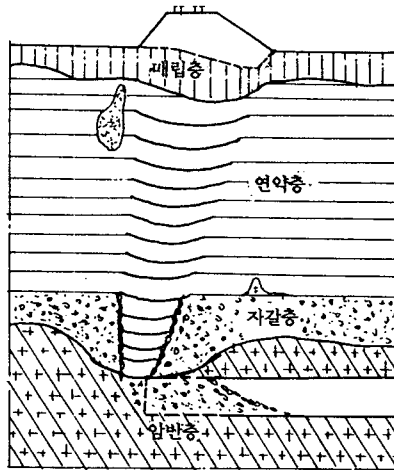


함몰완료

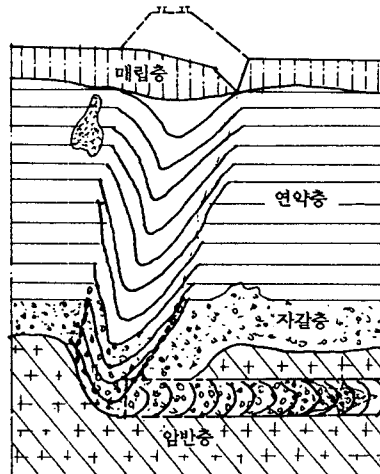
<그림 4.5> 함몰과정(a)



함몰전



함몰진행



함몰완료

<그림 4.6> 함몰과정(b)

5. 결론

이상 몇 가지 사고사례들 중 사고원인을 종합해 보면 공통적인 사항이 있음을 알 수 있다. 즉

- 1) 지반조사와 토질시험이 미흡하여 당초설계, 변경설계 등이 현장 여건에 맞지 않았다.
- 2) 토취장이 사전에 확보되지 않아 시공공정이 잘 조정되지 않았다.
- 3) 계측 계획, 계측기 설치, 계측 빈도, 계측치 분석 등에 오류가 있었고, 특히 계측 관리 전문인력이 절대 부족하다.

등으로 요약되는바 이를 해결하기 위해선 이에 대한 건설교통부 설계기준의 수정과 발주처의 예산편성이 우선되어야 한다고 본다.