

집중호우로 인한 ○○터널 사갱 붕괴 원인 분석 및 대책에 관한 연구 A Study of Analysis and Countermeasure of the Collapsed inclined shaft by a Heavy Rain

윤태국¹⁾, Tae-Gook Yoon, 이유석²⁾, You-Suk Lee, 오혁희³⁾, Hyuk-Hee Oh,
김동수⁴⁾, Dong-Soo Kim, 이송⁵⁾, Lee-Song

- 1) 정회원, 토질 및 기초 기술사, 한국시설안전기술공단 차장, Assistant Director, Korea Infrastructure Safety and Technology Cooperation
- 2) 한국시설안전기술공단 사원, Employee, Korea Infrastructure Safety and Technology Cooperation
- 3) 정회원, 한국시설안전기술공단 지하시설실장, Director, Korea Infrastructure Safety and Technology Cooperation
- 4) 정회원, 한국시설안전기술공단 파견관, Delegate, Korea Infrastructure Safety and Technology Cooperation
- 5) 정회원, 공학박사, 서울시립대학교 교수, Professor, The University of Seoul

개요(SYNOPSIS) : In August 2002, side wall of OO tunnel, at the Bonghwa, Kungbuk province, Korea, was collapsed by abruptly applied heavy soil and water pressure to side wall from a inclined shaft when there was a heavy rain.

These days, Inclined shaft is used for the purpose of reducing construction time, using ventilation system, using the out of carrying equipment and mucking when we construct tunnel in the world. Recently constructed tunnel has the source of inclined shafts, but the more time elapse, we lose the source of the inclined shaft such as exact position, condition, and the fact that whether inclined shaft is exist or not.

Therefore, this study inspected the interior's appearance, analyzed structure to evaluate the reason of collapsing side wall and this study also performed the repairing work. Finally, we show improving maintenance method to prevent that similar accident that might be happened.

주요어(Key words) : Inclined shaft, torrential rain, maintenance, repairing work

1. 서론

지난 2002년 8월에 중부 일원의 집중호우시 경북 봉화군 소재 ○○터널에서 기 시공되어 있는 사갱부분에 급격한 토압 및 수압이 작용하여 벽체 라이닝 콘크리트 일부가 붕괴되어 열차운행에 지장을 초래한 사고가 발생하였다.

이러한 사갱은 국내외의 각종 터널을 시공함에 있어 시공 연장을 분할하여 공기의 단축을 꾀하거나 버력반출, 재료반입을 위해 작업상 임시로 설치하는 경우와 통로환기, 대피로, 배수 등을 위한 항구적인 설비로 하는 경우도 있다. 이러한 사갱은 최근 터널의 장대화가 됨에 따라 그 활용성이 나날이 증가하고 있는 것이 현실이다.

최근에 시공된 터널 사갱 자료는 비교적 잘 관리되고 있으나 시간이 경과함에 따라 사갱의 정확한 위치, 상태 등의 자료가 잘 관리가 되지 않고 있으며 특히 준공시기가 오래된 경우에는 사갱의 유·무마저 파악이 안되고 있다.

이에 본 연구에서는 이번 사고가 발생한 터널에 대하여 자료조사, 주변여건조사, 지형 및 지질조

사, 외관조사, 구조해석 등을 통하여 정확한 사고 발생 원인을 분석하고자 하였으며 근원적인 보수·보강 공사를 수행한 대책방안을 검토하였다. 또한 현재 국내외에 산재해 있는 터널의 사갱부분에 대한 유지관리 개선방안 등을 제시함으로써 유사한 사고의 발생을 미연에 방지하고자 한다.

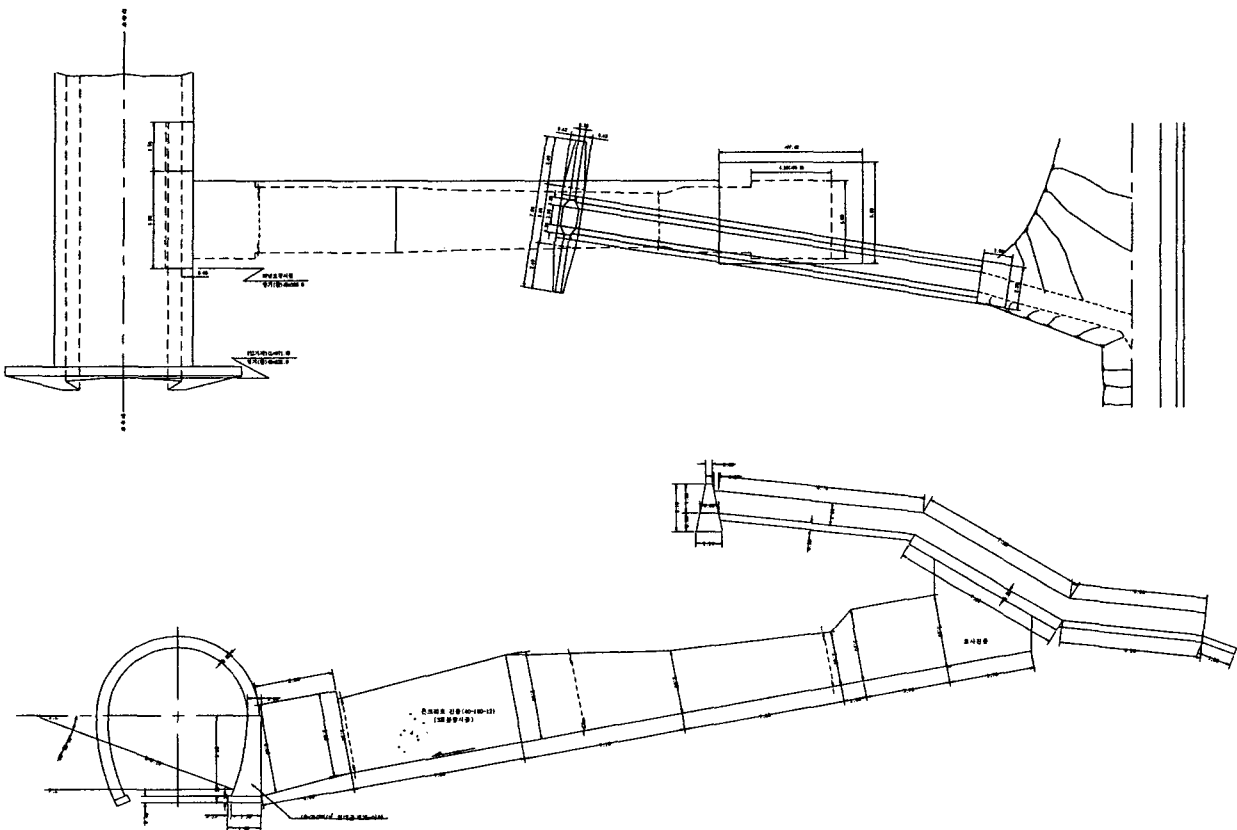
2. 본론

2.1 ○○터널

○○터널은 경북 봉화군 □□면 소재의 철도터널로서 시공법은 재래식 공법(ASSM공법)을 사용한 터널이다. 준공년도 1955년으로서 준공된지 47년 경과한 구조물로서 단선 4종형의 말굽형 터널이다. 터널의 총연장은 971m이며 평면선형은 터널의 입구로부터 좌측으로 굽은 상태이다. 준공당시 설계, 시공 기술이 현재는 상이하여 일반적으로 기존의 표준도에 의하여 설계, 시공된 것으로 조사되었으며 콘크리트 라이닝의 경우 설계 기준강도는 측벽부의 경우 100kgf/cm^2 , 아치부의 경우 120kgf/cm^2 으로 추정된다. 또한 배수형식은 중앙배수방식을 채택하였으며 입출구부에서 양측벽부로 시공되어 있는 배수로를 통하여 배수되는 전형적인 배수형 터널이다.

2.2 사고 개요

사갱 붕괴사고는 2002년 8월 7일 22:30분경 터널입구로부터 120m지점에서 사갱이 위치한 터널 우측벽체로부터 붕괴사고가 발생하였다. 붕괴로 인하여 기 시공되어 있는 사갱 선단부 $3.5 \times 5.0\text{m}$ 의 콘크리트 라이닝 부분이 붕괴되었을 뿐 아니라, 측벽의 1 Span에서도 균열이 다수 발생한 상태였다. 또한 사갱 전체에 포함되어 있는 토사 및 라이닝 콘크리트 부분이 터널 내로 유입됨에 따라 철도 선로 일부가 매몰되어 사고 당시는 열차 운행이 불가한 상태였으며, 시설물 관리주체에서 신속한 사고 대처를 함에 따라 선로내에 있는 콘크리트 및 토사는 익일 전부가 제거된 상태였다.



<그림 2-1> ○○터널 사갱 붕괴 사고 평면도 및 종단면도



〈그림 2-2〉 ○○터널 사갱 붕괴 사고 전경
(좌 : 사갱 전경, 우 : 붕괴 선단부 콘크리트 라이닝 및 지반상태)

2.3 사고 원인 분석

2.3.1 외관조사

외관조사는 크게 콘크리트 라이닝부분, 사갱부분 등으로 구분하여 실시하였다.

콘크리트 라이닝 부분을 조사한 결과 사갱을 시공한 후 기존의 콘크리트 라이닝과 일체화 시공을 함에 있어 철근, Rock Bolt 등으로 체결을 하지 않았음은 물론 Chipping 도 전혀 이루어지지 않은 상태에서 사갱연결부를 시공함에 따라 취약한 시공이음부가 조사되었다. 또한 Spring Line부에 수평방향의 사갱 연결부가 있음은 물론 시공시 수직방향을 시공이음부가 있어 직사각형의 취약부가 조사되었다. 반면 일반적인 터널을 유지관리함에 있어 세척, 청소 등이 이루어지지 않음에 따라 해당개소가 사갱이 있는지 유무도 조사가 되지 않았다.

사갱 입구부를 조사한 결과 사갱 시공시 사갱도내에 일반 토사로 되메움을 실시함에 있어 다짐상태가 불량하여 사갱 출구부 1.3m 위치까지는 이끼, 잡풀 등이 조사되었다. 또한 사갱 출구부가 위치한 부위의 주변의 작은 계곡이 형성되어 있음으로 인하여 충분히 우수의 유입을 가정할 수 있었으나 당시의 시공능력, 시공정도 등을 고려할 때 측구, 배수구 등은 전혀 시공되어 있지 않았으며 이로 인하여 해당지역의 집중강우로 인하여 기 시공되어 있는 사갱위치에 과다한 우수가 유입됨에 따른 사고이다.

2.3.2 주변지반 상황

○○터널이 위치한 경북 봉화군 일원의 지질은 주로 춘양화강암층이 주를 이루는 상태로서 낙동강 유역의 충적층도 조사되었다. 이 중 터널 주변의 주된 주반으로서의 울리통의 편상 화강암이 각섬석 화강암은 통남층에 관입하였다. 또한 복운모 화강암은 각섬석 화강암에 거의 팽행하여 분포되어 있으며 이를 관입한 상태이다. 이는 해발 630m 위치의 노루재를 중심으로 조사된 결과로서 본 암은 중립질의 암상으로 입상조직을 보여 주나 위치별로는 반상조직을 나타낸다. 흑운모와 백운모가 다 같이 함유되어 있으나 흑운모가 백운모 보다 함량에 있어서 항상 우세하며 곳에 따라서는 백운모가 전혀 함유되지 않는 구간도 있다.

2.3.3 해석적 검토

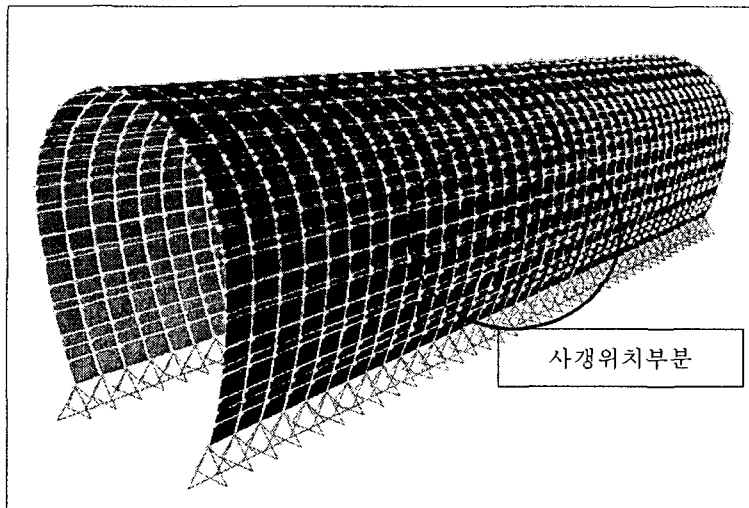
1) 개요

대상 구조물은 전술한 바와 같이 우측 측벽부에 사갱이 위치해 있으며 그 길이는 본선터널 종방향으로 5m이며 높이는 S.L까지이다. 시공은 ASSM공법의 중앙배수로 되어있으나 집중호우시 높아진 수두의 영향이 사갱을 통해 구조물에 영향을 줌으로서 콘크리트 라이닝의 허용응력을 초과하여 구조물이 취약해 질 수 있는 조건이다. 더구나 본 구조물은 본선 터널과 사갱의 접속부에 시공이음부가

존재하여 취약부가 존재하는 것을 고려하여 수두의 증가가 구조물에 미치는 영향을 해석적으로 접근하고자 하였으며 구조해석 범용 프로그램인 SAP2000을 사용하였다.

2) 해석적 가정

본 구조물은 준공 후 상당한 시간이 지난 관계로 충분한 자료수집이 불가하였으며 결함현상과 여러 여건을 조합해 볼 때 수압에 의한 변상으로 판단되므로 본 해석적 접근의 변수(parameter)는 수두의 높이로 한정을 한다. 지점조건은 스프링과 힌지를 사용하였으며 콘크리트 라이닝의 설계두께는 50cm이나 시공오차를 고려해 40cm로 한정하였다.



<그림 2-3> 해석모델

3) 해석결과

① 수두 0m

배수터널의 특성을 고려하여 배수가 원활한 경우로서 중앙배수로의 거동이 완벽한 상태를 가정한 상태이다. 해석결과 배수작용이 원활하여 배수능력범위의 지하수위일 때의 종방향 응력상태를 나타낸다. 사갱의 토압만이 작용하며 이로 인해 시공이음부 주변 응력변화가 특징적이지만 허용응력 이내이다.

② 수두 3m

지하수위가 터널 바닥으로부터 3m일때 수압과 토압이 작용할 때의 해석결과이다. 수두가 3m(S.L 근접)까지 올라가도 시공이음부 주변은 인장응력상태이지만 배면, 내면모두 허용응력의 범위이내이다. 종방향과 횡방향응력을 비교해 보면 횡방향 시공이음부에 응력이 집중됨을 알 수 있다.

③ 수두 7m

수두가 7m에 이르면 종방향응력(S11)의 인장응력범위가 넓어지며 터널 바닥부분의 휨응력증가와 함께 전단응력이 비교적 크게 증가한다. 또한 바닥부분의 횡방향응력도 인장응력이 발생하기 시작한다. 만약 구조물의 시공품질상태가 불량하다면 구조물에 영향을 줄 수 있는 정도라 판단된다.

④ 수두14m

지하수위를 점차 높여가며 응력의 변화를 살펴보면 터널 하면에서 14m의 수압이 작용하면 터널 바닥부분의 전단응력은 2~2.4kgf/cm²의 범위로 허용전단응력($0.25\sqrt{f_{ck}}=2.5\text{kgf/cm}^2$)에 도달하며 휨 인장응력은 2.2~4.4kgf/cm²로 허용인장응력($0.42\sqrt{f_{ck}}=4.2\text{kgf/cm}^2$)을 초과한다.

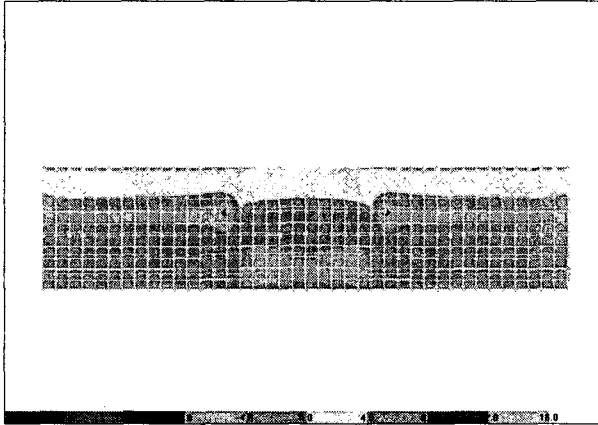
여기서 간과해선 안 될 사항은 다음과 같은 터널의 조건으로 상기와 같은 결함발생시점에 변수

가 있을 수 있다.

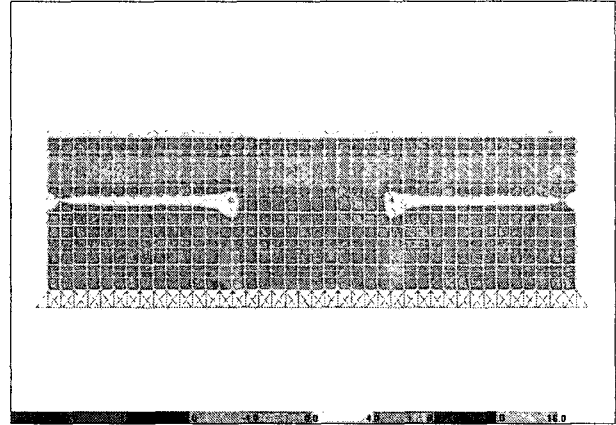
첫째, 터널의 공용연수

둘째, 재래식공법으로 시공되어진 관개로 콘크리트의 강도편차가 큼

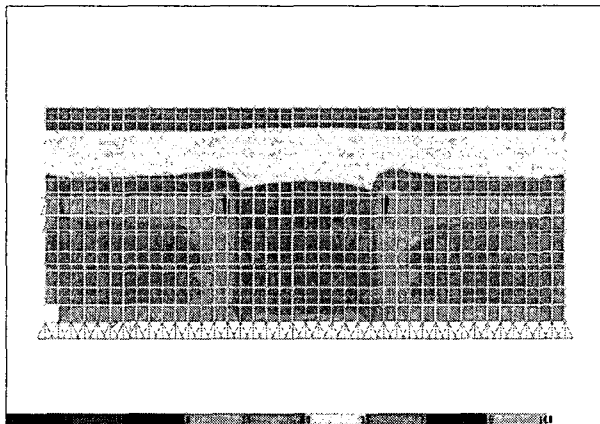
셋째, 사갱이 위치한 터널의 환경여건상 시공이음부나 주변부의 균열과 누수, 기타 결함이 많음
이상과 같이 해석가정을 전제로 할 때 집중호우로 터널주변의 배수능력의 저하와 함께 사갱을 통한 지하수위의 증가가 터널라이닝의 붕괴의 주원인임을 확인할 수 있었다.



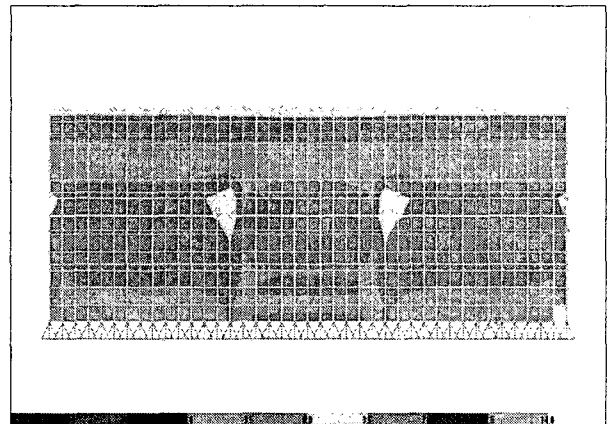
<그림 2-4> 상시 응력상태 (S11, 터널배면)



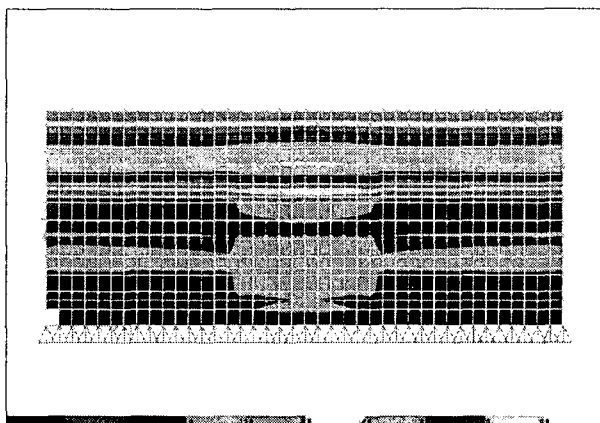
<그림 2-5> 상시 응력상태 (S11, 터널내면)



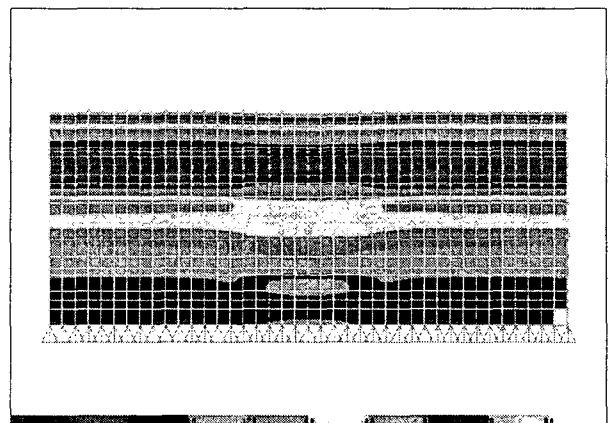
<그림 2-6> 수두 3m (S11, 터널배면)



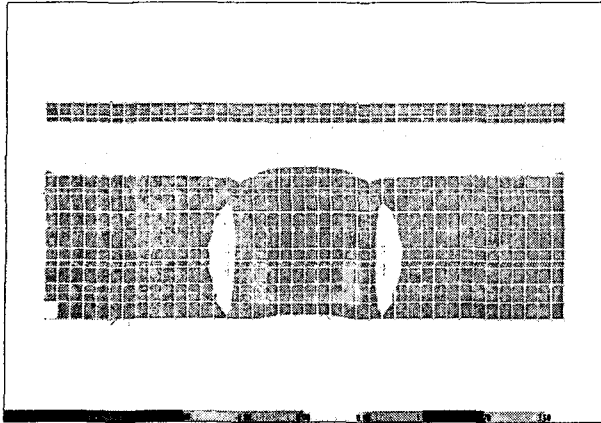
<그림 2-7> 수두 3m (S11, 터널내면)



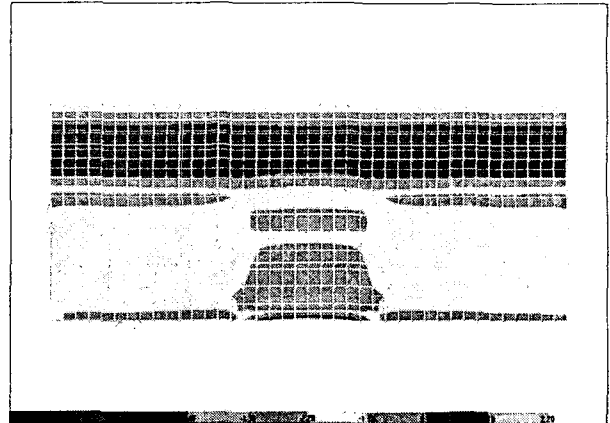
<그림 2-8> 수두 3m (S22, 터널배면)



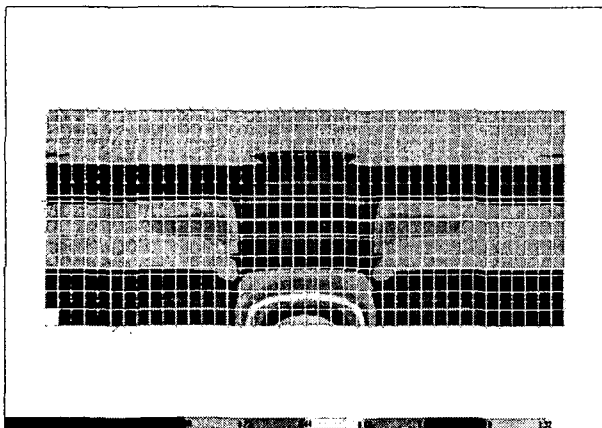
<그림 2-9> 수두 3m (S22, 터널내면)



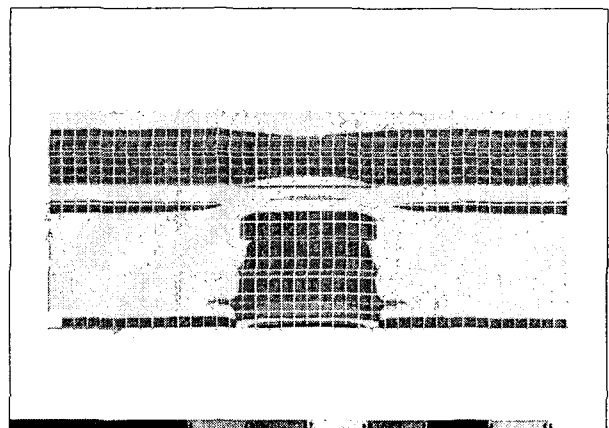
<그림 2-10> 수두 7m (S11, 터널내면)



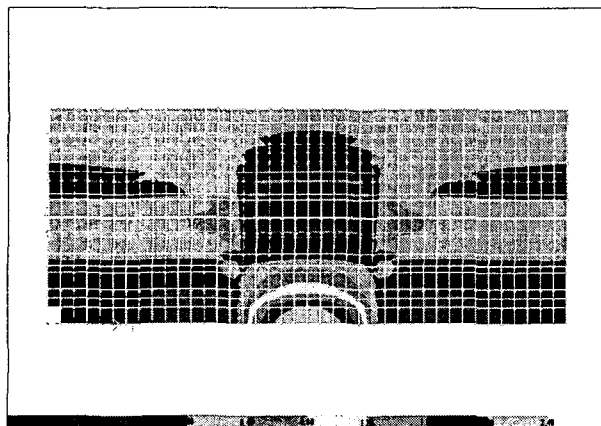
<그림 2-11> 수두 7m (S22, 터널배면)



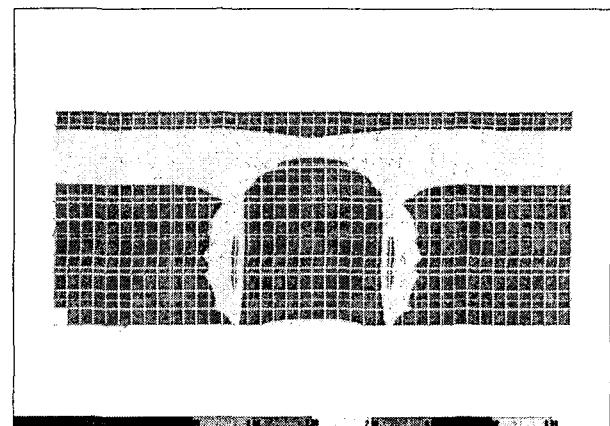
<그림 2-12> 수두 7m (S23)



<그림 2-13> 수두 14m (S22, 터널배면)



<그림 2-14> 수두 14m (S23)



<그림 2-15> 수두 14m (S11, 터널배면)

2.3.3 사고 원인 분석

사고 원인 분석은 전술한 바와 같이 여러 원인이 복합적으로 작용하였으며 이를 크게 분류하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 사갱과 원 터널 사이의 일체화 시공 미비

사갱을 시공한 후 ○○터널의 라이닝과의 연결부를 시공함에 있어 철근, Rock Bolt 등으로 체결을 하지 않았음은 물론 Chipping 도 전혀 이루어지지 않은 상태에서 사갱연결부를 시공

2) 취약한 부위의 중첩

Spring Line부에 수평방향의 사갱 연결부와 수직방향의 시공이음부가 중첩되어 직사각형의 취약부가 형성

3) 준공 후 공용연수가 오래됨에 따른 관리자료 미비

터널이 준공된지 47년이 경과함에 따라 사갱의 위치 및 상태 등을 정확히 파악하는데는 한계가 있어 보수·보강을 실시하지 않음

4) 사갱 시공 상태 불량

사갱 시공시 일반 토사로 되메움을 실시함에 있어 다짐상태가 불량

5) 사갱 입구부 배수로 미비

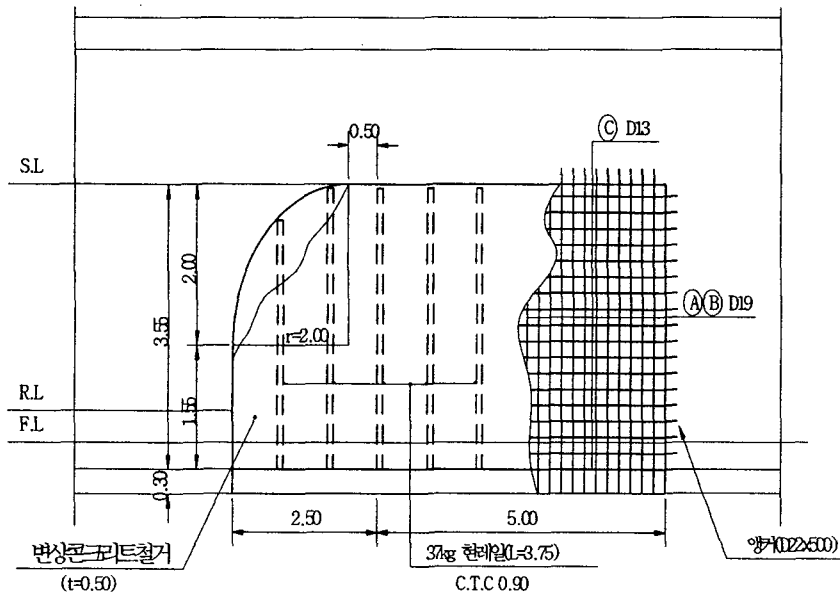
사갱 입구부 주변으로 측구, 배수구 등이 시공되어 있지 않음

6) 집중호우로 인한 배수 능력 초과

2.4 보수보강 방안

사고 발생 직후 관리주체의 신속한 대처로 우선 파손된 콘크리트 라이닝 덩어리 및 토사는 익일 전부가 치워졌으며 터널 부분에 대한 보수·보강은 정확한 원인 분석 후 다음과 같은 방법으로 보수·보강이 이루어 졌다.

- 1) 사갱 입구부의 임시 배수로 시공
- 2) 토사 및 콘크리트 파손물 제거
- 3) 균열부 및 콘크리트 라이닝 파손 부위 파취
- 4) Chipping 및 표면처리
- 5) 철근 및 앵커 시공 후 콘크리트 라이닝 타설 (t=50cm 이상)
- 6) 사갱 되메움 작업 (콘크리트 3단 분리 타설)
- 7) 영구 배수로 시공
- 8) 공사기간 중 지속적인 계측(시공이음부 주변 양측 2개 Span)을 실시함에 있어 계측항목은 내공변위 측정, 균열진행측정, 배수량 측정 등을 실시함



<그림 2-16> 보수 보강 방안

3. 결론

○○터널은 경북 봉화군 □□면 소재의 철도터널로서 준공년도는 1955년으로서 준공된지 47년 경과한 구조물로서 단선 4종형의 말굽형의 전체길이 971m의 철도터널이다. 사갱 붕괴사고는 2002년 8월 7일 22:30분경 터널입구로부터 120m지점에서 사갱이 위치한 터널 우측벽체로부터 붕괴사고가 발생하였다. 붕괴로 인하여 기 시공되어 있는 사갱 선단부 3.5×5.0m의 콘크리트 라이닝 부분이 붕괴되었을 뿐 아니라, 측벽의 1 Span에서도 균열이 다수 발생한 상태였다. 이의 사고 원인을 분석하고 이에 따른 보수·보강 대책 방안을 수립하여 성공적으로 시공 완료하였다. 조사 결과 사고 원인은 다음과 같이 분석되었다.

- 1) 사갱과 원 터널 사이의 일체화 시공 미비
- 2) 취약한 부위의 중첩
- 3) 준공 후 공용연수가 오래됨에 따른 관리자료 미비
- 4) 사갱 시공 상태 불량
- 5) 사갱 입구부 배수로 미비
- 6) 집중호우로 인한 배수 능력 초과

이러한 사고의 경우를 접하면서 현재 국내외에 산재해 있는 터널의 사갱부분에 대한 유지관리 개선방안으로서 사갱의 정확한 위치, 상태의 조사 및 관련자료의 유지관리와 정확한 자료가 없는 터널에 대한 조사 등을 실시함으로써 유사한 사고의 발생을 미연에 방지하고자 한다.

참고문헌

1. 한국시설안전기술공단 : 정밀점검 및 정밀안전진단 세부지침, 1996.
2. 한국시설안전기술공단 : 정밀점검 및 정밀안전진단 실무요령(터널편), 2002
3. 철도청 : 변상터널의 보강공법에 관한 연구, 1998.
4. 양승영 강필중 공저,형설출판사 : 야외지질학, 1987
5. 한국건설기술연구원 : RC구조물 보수·보강재에 관한 조사연구, 1996
6. 한국자원연구소 : 한국지질도 서울도폭,1982
7. 사단법인 일본터널기술협회 : 터널보강·보수에 관한 연구보고서, 1986.
8. 사단법인 일본터널기술협회 : 록볼트 및 슛크리트에 의한 터널개축에 관한 조사보고서(2), 1986.
9. 건설교통부, 시설안전기술공단 : 콘크리트 구조물의 균열·누수 보수·보강 전문시방서, 1999.
10. 사단법인 일본철도총합기술연구소 : 변상터널 대책공 설계 매뉴얼, 1998.
11. Department of the Army : Tunnels and Shafts in Rock, 1982.