

NATM 시공 사고 사례에 의한 개선방안 연구

A Study On a Method of Improvement From Domestic NATM Case

이 상 응*
Ree, Sang Ung

ABSTRACT

NATM as method of tunneling has been applied to construction of domestic subway, roads, rail way, water way etc.

Accordingly, we have NATM's many drafts and constuctional results, but many problems and accidents have occurred under construction of tunnel using NATM for shortage of technical data, Poorness of constructional improvement, systemic inconsistency etc.

Especially, everyone was shocked at Gupo's train wrecking accident lately.

The Purpose of this thesis is presentation of means for setting technical problems, by looking into Gupo's train wrecking accident and home records that applying NATM in tunneling failed, to minimize future safety accidents we find that the general problms of home fifteen sites having occured accidents is badly geological survey, nonconfirmation of base rock's state, formal measuring management, shortage of specialists, systemical discrepancy and that disregarding NATM's rules makes general problems.

The results of this study are Summarised as follows :

1. We advise repletion of design standards to practice crosshole test for confirming connected rock base on vertical section of tunnel.
2. We advise to practice pre-boring and pre-grouting for a weak layer difficult in applying NATM.
3. We advise systemic improvements that field servicer can construct tunnel of his own free will considering base rock's state at tunnel
4. We advise that specialist, who can make a conduct and supervise above mentioned items as well as measuring managements, should be posted at field.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라에서의 터널 건설은 NATM이 도입되기 전까지는 Steel Rib와 콘크리트 라이닝(Lining)을 주지보재로 하는 재래식 공법으로 시행되어 왔으나 1980년대 초 서울지하철 3, 4호선

및 부산지하철 건설에 NATM 터널공법을 도입 적용하여 큰 성과를 얻었으며, 이후 서울 2기 지하철(5, 6, 7, 8호선), 서울외곽 지하철(분당선, 과천선, 일산선), 고속도로, 철도, 지중선 전력구, 경부 고속전철 등의 공사에 대부분 적용되고 있다.

본논문은 최근 발생한 구포열차사고 등을 비롯한 국내 NATM 실패사례를 교훈으로 향후 NATM 공사시 발생될 수 있는 안전사고를 최소화하는데 다소나마 도움이 되고자 기술적인 개선방안을 제시하는 데 그 목적을 두었다.

1.2 연구방법 및 범위

본연구에서는 91년 이후 국내에서 발생한 NATM사고사례(지표면 함몰) 중 15건의 자료를 수집 정리하고 NATM 관련서적 및 기존 연구자료를 참고하여 터널사고와 붕괴유형과 붕괴구간의 암질상태를 통계적으로 파악함으로써 문제점을 도출하고자 하였으며, 이를 토대로 개선방안을 제시하였다.

터널의 붕괴유형은 수집된 사고사례 자료를 정리하여 무지보 막장면, 상반굴착구간, 하반굴착구간에서의 붕괴로 구분하였으며, 계곡부 구간에서의 붕괴도 병행하여 분류하였고 붕괴구간의 암질상태는 암편회수율(R.Q.D), 파쇄대의 존재 유무, 지하수의 영향도 고려하여 구분하였다.

2. NATM의 개요

2.1 NATM의 기본개념

NATM은 재래식 지보공법과는 다르게 시공전, 단 한번의 설계에 의하여 진행되는 것이 아니라, 설계·시공·계측이 서로 밀접한 관련을 가지고 진행되는 Feed-Back Control 방식을 도입하고 있다.

즉 당초의 조사만으로는 지질·용수 등의 상황을 완전히 파악하기가 곤란하므로 시공중의 관찰 또는 계측에 의하여 설계가 변경되어야 한다는 발전된 공법이다.

지반내에 터널을 굴착하면 굴착면 주변의 지반은 3축응력상태에서 1축응력상태로 된다. 이 때 소멸되는 지반응력 때문에 접선응력이 크게 증가하게 되어 지반은 내측으로 변위를 일으키며, 변위크기는 지반의 고유강도와 새로이 형성된 응력의 크기에 좌우된다.

다음 그림에서 보여주는 바와 같이 반경방향으로 작용하는 응력은 벽면변위가 증가함에 따라 급격히 감소하지만 변위가 어느 한계를 넘으면 지반이 이완되기 시작하므로 원래의 지반강도는 완전히 상실되고 터널주변의 지반은 하중으로 지보공에 작용하게 된다.

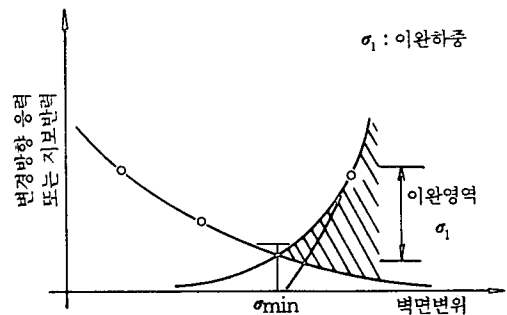


Fig-1 Relation of radial stress(σ_r), and side face displacement(U)

NATM 공법은 이러한 원리를 토대로 지반 자체가 주지보재 역할을 감당할 수 있도록 슛크리트와 강지보재 및 락볼트 등으로 지반을 보강해주는 공법이다.

2.2 재래식 터널공법과 NATM의 비교

재래식 터널공법과 NATM 공법을 개념별·시공성·경제성으로 각각 구분하여 기술하면 다음 표와 같다.

1) 개념별에 따른 공법 비교

(1) 지보의 설계와 하중

Table-1 Comparison of tunneling construction I

| | 재래식 | N A T M |
|---|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1 | 지보의 파괴원인은 휨 모멘트(Bending Moment)이다. | 지보의 주된 파괴원인은 전단력이다. |
| 2 | 주로 경험으로 지보를 결정하여 지보공으로 전이완하중을 지지하기 때문에 지보공 단면이 커진다. | 지반의 이완을 고려하지 않기 때문에 슛크리트, 락볼트, 스틸리브 등이 전단력에 저항하는 것을 고려하여 설계한다. |
| 3 | 시공중 지보재 규격의 적합성을 점검할 수 없다. | 시공중 계측에 의하여 점검하고 설계 및 시공에 반영한다. |

(2) 지보의 성질

Table-2 Comparison of tunneling construction II

| | 재래식 | N A T M |
|---|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1 | 스틸리브(Steel Rib)와 콘크리트 복공 또는 라이닝(Lining)이 주 지보재 역할을 한다. | 지반 자체가 가장 중요한 지보재이며 슛크리트, 락볼트, 스틸리브 등은 지반 본래의강도 유지 및 보강하는 역할을 한다. |

(3) 지보재의 역할

Table-3 Comparison of tunneling construction III

| | 재래식 | N A T M |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | • 스틸리브(Steel Rib) 1, 2차 라이닝 콘크리트(Lining Concrete)와 함께 주변지반 이완에 대한 하중을 지지하며 초기에는 지반으로부터 하중을 지지하는 동시에 낙석 등에 대한 방지 역할을 한다. | • 슛크리트(Shotcrete) 굴착면을 평활하게 하여 응력 집중을 완화시키고 굴착면의 풍화 등에 의한 이완을 억제시킨다. 또한 지반의 내벽면에 구속압을 주어 지반을 초기에 안전시킨다. |
| 2 | • 콘크리트 라이닝 스틸리브와 함께 작용하여 이완하중을 지지한다. | • 락볼트(Rock Bolt) 암반의 절리를 따라 발생하는 활동을 방지하며, 슛크리트와 동시에 작용하여 지반의 항복력을 증가시킨다. |
| 3 | | • 스틸리브(Steel Rib) 굴착 이후 암반보호에 효과적이며 슛크리트의 전단보강 및 하중분산재로 작용된다. |
| 4 | | • 와이어 매쉬(Wire Mesh) 터널 굴착 후 지반의 강도가 약할 때 슛크리트의 부착을 촉진시키며 강도 증진 효과를 기대할 수 있다. |

2) 안전성

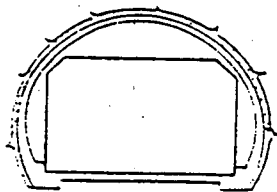
Table-4 Comparison of tunneling construction IV

| | 재래식 | N A T M |
|---|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 지반의 이완을 허용하기 때문에 지표 침하가 있어 지하구조물 등의 안전이 확보되지 않는다. | 터널 주변지반의 이완을 허용하지 않으므로 지표침하를 억제할 수 있다. 또한 계측으로 터널 주변지반의 거동을 파악하여 사전에 안전대책을 수립한다. |

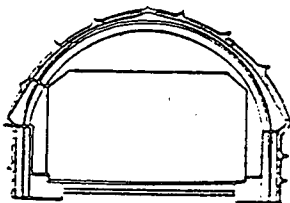
3) 시공성

Table-5 Comparison of tunneling construction V

| | 재 래 식 | N A T M |
|---|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 큰 규격의 스틸리브와 콘크리트 라이닝으로 지보하게 되므로 단면의 변화부 등에 시공이 용이하지가 않다. | 쑏크리트나 락볼트의 지보는 단면의 변화와 변형, 단면에 대처하기 쉬우므로 터널의 교점, 분지점, 단면변화부 등의 시공에 유리하다. |
| 2 | 분할시공이 용이하지 않다. | 소단면씩 분할해서 시공하는 것이 비교적 용이하므로 나쁜 지질을 굴착할 때도 보조공법이 소규모로도 가능하다. |



(a) NATM



(b) 재래식 공법(ASSM)

Fig-2 Comparison of tunnel section

2.3 국내 도입 경위

NATM은 부산 지하철 1호선과 서울 지하철 3·

4호선에서 먼저 도입되었는데 지하철 3·4호선이 통과하는 노선구간은 교통밀집지역으로 도로폭이 좁은 구 시가지를 통과하게 되며, 계획된 지하철노선 연변구간에는 수많은 인접건물 및 지하매설물이 타지역보다 밀집되어 있고 기존 1호선 및 2호선 하부를 관통하도록 계획되어 있어 인접건물 및 지하매설물을 보호할 수 있는 터널 시공법인 NATM의 필요성이 논의되게 되어 지하철 3·4호선 도심지 지하철 건설에 적용하였다.

3. NATM 사고 사례

NATM은 국내의 도시터널 및 산악지 터널에 약 805 이상이 적용되고 있으며, 공사목적(지하철, 도로, 철도, 지중선 전력구 등)에 따라서도 터널공사 대부분에 적용되고 있다.

본장에서는 91년부터 현재까지의 자료를 토대로 시공이 이미 완료되었거나 또는 현재 시공 진행중에 있는 NATM 시공현황 및 NATM 시공에 따른 사고 사례 15개 현장을 추출하여 연구대상으로 선정하였다.

3.1 국내 NATM 현황

1) 지하철 터널

도심지의 인구집중으로 인한 극심한 교통난 및 생활권의 확대 등으로 서울을 비롯한 부산, 인천, 대구 등의 대도시에는 교통량 해소를 위한 대책수립이 불가피하게 되었으며, 이에 대한 대책의 일환으로 새로운 지하철노선을 건설하거나 기존 지하철노선을 연장하는 등의 작업이 진행되고 있는 실정이다.

서울의 경우 기 완료되어 있는 지하철 2, 3, 4호선을 약 16km 정도 연장하는 공사를 완료하였으며, 지하철 5호선(L=57.9km), 6호선(L=36.1km), 7호선(L=45.6km), 8호선(L=19.7km)

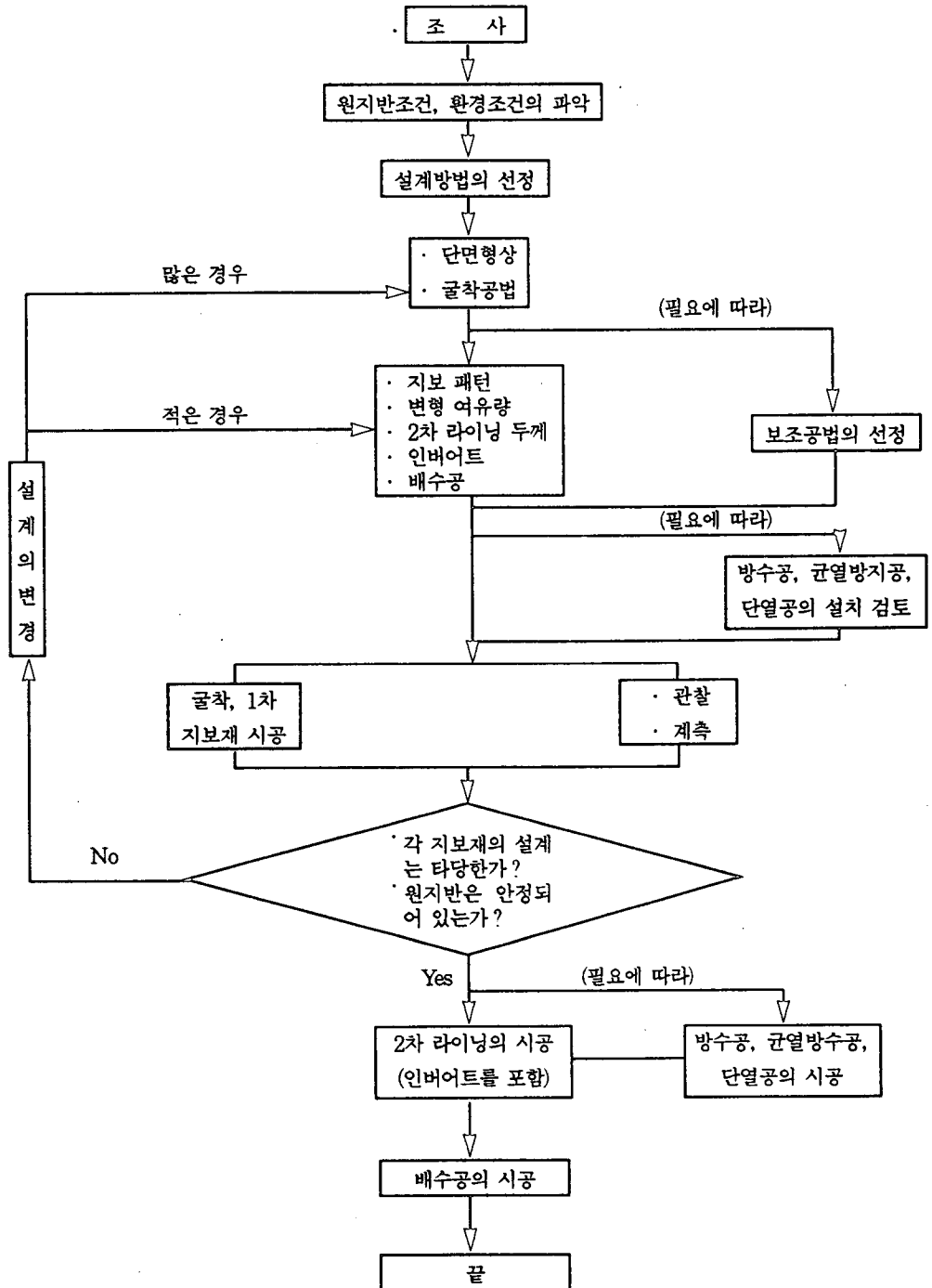


Fig-3 Flow chart of design and construction for NATM

신설계획을 수립하여 현재 작업이 활발히 진행중이거나 공사 발주되고 있다.

또한 부산, 인천, 대구 등의 도시에서도 부산지하철 2호선(L=57.9km) 및 인천지하철 1호선(L=23.02km), 대구지하철 1호선(L=27.60km) 등의 공사가 NATM을 이용하여 진행되고 있다.

지하철공사를 위한 터널공법은 주로 NATM을 적용하고 있으며 터널구간도 도시에 따라 다소 차이가 있으나 서울지하철 5호선의 경우에는 전체 연장의 50% 이상을 차지하고 있다.

2) 도로터널

도심지간의 연결을 위한 고속도로, 국도 등의 신설공사는 산악지를 통과하여야 하는 터널공사가 필연적이며, 현재 국내에서도 NATM을 이용한 터널 작업이 활발하게 진행되고 있다.

국내 도로터널에 대한 현황은 건설부 도로국 발주 22개 현장과 한국도로공사에서 발주된 27개 현장이 NATM을 이용하여 시공중인 것으로 조사되었다.

3) 철도터널

철도터널에 대한 시공현황은 전라선의 수송능력 증강 및 지역개발을 촉진하기 위하여 신라~순천간 총 124.3km 기존노선을 확장하고 있는 전라선 복선 사업현장 8개소를 조사하였다.

4) 지중선 전력구 터널

전력의 안정적인 공급과 도심지 미관을 증진시키기 위하여 송전노선 제통연결 및 배전선 지중화 작업의 일환으로 시행되고 있는 8개의 전력구 터널이 NATM으로 시공중인 것으로 조사되었다.

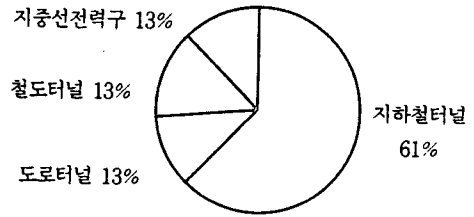


Fig-4 Status of NATM accident for constructional types

3.2 사고사례

91.11 이후 국내에서 발생된 NATM 대형합몰 사고의 발생된 비율을 살펴보면 지하철공사에서 60%, 도로터널 및 지중선 전력구터널, 철도터널에서 40%가 발생된 것으로 나타나고 있다.

1) 지하철 터널사고 예

Table-6 Accident case of NATM I

| 구분 | 사고현장 | 사고일자 | 사고 위치 |
|-------------|--------|-----------|--------------|
| 서울 및 외곽 지하철 | 과천 A공구 | '91. 8.26 | |
| | B공구 | '91. 9.27 | 과천 찬우물고개 주변 |
| | 5-A공구 | '91.11. 7 | 제2마장교 청계천 주변 |
| | 5-B공구 | '91.11.27 | 당산동3가 한성병원 앞 |
| | 5-C공구 | '92. 2.11 | 여의도 MBC앞 사거리 |
| | 분당 A공구 | '92. 8.26 | 경원대학 주변 |
| | 2-A공구 | '92. 9.22 | 신정동 계남국교 주변 |
| | 5-D공구 | '93. 1. 7 | 구 시립병원 주변 |
| | 5-E공구 | '93. 2. 1 | 안양천 고수부지 주변 |

2) 도로, 철도, 지중선 전력구터널 사고 예

도로, 철도, 지중선 전력구터널 시공에 따른 터널사고는 91년 이후 크고 작은 터널합몰사고가 총 6건이 발생된 것으로 조사되었으며, 이중 도로터널에서 2건, 철도터널 2건, 지중선 전력구터널에서 2건이 발생되었다.

특히 지주인 전력구터널 공사 중 93. 3월 28일 경부선 하행선상(구포)에서 발생된 대형합몰사고는 254명(사망 : 78명, 부상 : 176명)이라는 엄청난 인명피해 및 재산피해를 수반하게 되었다.

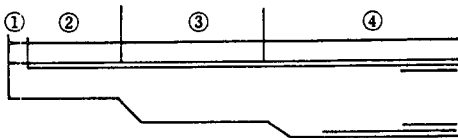
Table-7 Accident case of NATM II

| 구분 | 터널명 | 사고일자 | 사고위치 |
|-------------|-----------|------------|---------------|
| 도로터널 | A터널 | '92.1~92.6 | 강원도 홍천군 서석면 |
| | B터널 | 92. 2. 4 | 충북 제천시 백운면 |
| 철도터널 | 전라 A공구 | 92.10. 1 | 전남 곡성군 |
| | B공구 | 92. 4. 3 | 전남 승주군 |
| 지중선 력구터널 | 전력구 건설공사A | 93. 4.21 | 성산 I.C 북단 녹지대 |
| | 전력구 건설공사B | 93. 3.28 | 구포역 주변 |

4. NATM 터널의 사고원인 분석

4.1 터널사고 유형

공사중 발생한 터널사고는 무지보 막장면에서의 붕괴, 인버트 링폐합 구간에서의 붕괴로 대별될 수 있으며, 발생위치별에 따른 터널붕괴 형태는 <그림-5>와 같다.



- ① 막장면에서의 붕괴
- ② 상반굴착구간에서의 붕괴
- ③ 하반굴착구간에서의 붕괴
- ④ 인버트 링폐합 구간에서의 붕괴

<Fig-5> Type of collapse in NATM

1) 무지보 막장면에서의 붕괴 비율

조사된 자료에 의하면 무지보 막장면에서의 발생한 붕괴는 총 9건이며, 지하철터널에서 6건, 도로터널 1건, 지중선 전력구터널 2건이 발생한 것으로 조사되었다.

Table-8 Rate of accident occurrence in the face

| 구분 | 지하철 터널 | 도로 터널 | 철도 터널 | 지중선 전력구터널 | 계 |
|-------------|-----------|----------|----------|--------------|-----|
| 발생건수 | 1 | 1 | - | 2 | 0 |
| 발생비율 (%) | 66.7 | 11.1 | - | 22.2 | 100 |

2) 지보가 설치된 상반구간에서의 붕괴

본형태의 붕괴는 많이 발생되지는 않았지만 수집된 자료 중 서울 외곽지하철 사고 중 1건이 이에 속한다.

Table-9 Rate of accident occurrence in the tunnel

| 구분 | 지하철 터널 | 도로 터널 | 철도 터널 | 지중선 전력구터널 | 계 |
|-------------|-----------|----------|----------|--------------|-----|
| 발생건수 | 1 | - | - | - | 1 |
| 발생비율 (%) | 100 | - | - | - | 100 |

3) 하반굴착구간에서의 붕괴

조사된 자료 중 5건이 하반굴착구간에서의 붕괴가 발생되었다.

Table-10 Rate of accident occurrence in the tunnel

| 구분 | 지하철 터널 | 도로 터널 | 철도 터널 | 지중선 전력구터널 | 계 |
|-------------|-----------|----------|----------|--------------|-----|
| 발생건수 | 2 | 1 | 2 | - | 5 |
| 발생비율 (%) | 40 | 20 | 40 | - | 100 |

4) 인버트 링폐합 구간에서의 붕괴

대부분이 터널에서는 인버트 굴착 후 링폐합이 이루어지게 되면 내공변위도 일정값에 수렴하게 되고 터널은 안정된 상태에 도달하게 되므로 터널붕괴의 위험은 크지 않으며, 사고사례에는 이러한 유형의 붕괴는 발생되지 않은 것으로 조사되었다.

5) 계곡부에서의 붕괴

터널굴착 계획구간의 일부가 계곡부를 통과하여야 하는 경우 기반암이 급격히 하강하여 터널단면은 상부의 토압을 받게 되며, 계곡부의 특성으로 우수 및 지하수가 집중되고 토압과 함께 수압의 영향도 받게 되므로 계곡부 통과 터널구간은 취약부위가 되며 조사된 사고사례 중 4건이 이에 해당된다.

Table-11 Rate of accident occurrence in the tunnel

| 구분 | 지하철 터널 | 도로 터널 | 철도 터널 | 지중선 전력구터널 | 계 |
|----------|--------|-------|-------|-----------|-----|
| 발생건수 | 1 | 2 | 1 | - | 4 |
| 발생비율 (%) | 25 | 50 | 25 | - | 100 |

4.2 사고원인 분석

본장에서는 터널사고의 원인을 분석하기 위하여 NATM 사고 15개 현장 중 최근 많은 인적 피해 및 물적 손실을 초래하였던 구포열차사고 현장을 대표적으로 선정하여 조사 설계시와 굴진 시공시의 문제점으로 구분하였다.

1) 조사 설계상의 문제점

(1) 지질조사 결과

터널시공을 위한 지질조사 시추공 간격이 너무

길어 지층의경계 및 형상을 명확히 파악하기가 곤란하였으며, 시공 전 조사된 지질조사 결과치와 붕괴 직후 실시된 지질조사 결과치는 터널을 굴진하여야 할 계획 암반선이 10m 이상 아래에 위치하고 계획된 터널 굴진구간은 호박 자갈층이 분포하고 있는 것으로 나타나고 있다.

(2) 지반조사에 사용되는 시추구경

시추조사시 사용된 시추구경은 BX가 대부분으로 풍화토, 풍화암에서는 코아가 회수되지 않아 설계단계에서 불충분한 지반정보자료에 의하여 지층을 추정하여 분류하고 <표-15>와 같이 유형화된 표준지보패턴으로 결정하므로 실제굴착시와는 차이가 있었다.

(3) 지하수의 측정

일반적으로 지하수위의 측정은 시추조사를 끝으로 시추공을 되메우기를 하고 있기 때문에 수위변화를 측정하기가 곤란하다.

본붕괴구간은 지하수의 영향이 예상되는 낙동강 인접지역임을 감안하지 못하고 계절별에 따라 수시로 변동되는 지하수위 측정을 실시하지 않아 터널 내 지하수 용출에 대한 사전대책이 고려되지 않았다.

(4) 유한요소법(F.E.M)

일반적으로 터널 해석은 유한요소법(F.E.M)을 사용하고 주로 실시하고 있으며, 해석에 사용되고 있는 지반특성치의 입력자료가 설계자마다 차이가

Table-12 Comparison of situ results

| 실시 설계시 지질조사 결과 | | | | 붕괴 직후의 지질조사 결과 | | | |
|----------------|------|-------|----------|----------------|-------------|-----|----------|
| 심도(m) | 층 구분 | N치(회) | R.Q.D(%) | 심도(m) | 층 구분 | 3~4 | R.Q.D(%) |
| 지표~0.8 | 자갈층 | - | - | 지표~5.0 | 세사질이토 | 2~3 | - |
| 0.9~7.0 | 모래층 | 0~12 | - | 5.1~15.0 | 이토 | 5~8 | - |
| 7.1~11.8 | 자갈층 | 40 | - | 15.1~21.0 | 이토질 세사 | 16 | - |
| 11.9~23.3 | 풍화암층 | - | - | 21.1~28.5 | 모래, 자갈, 호박돌 | - | - |
| 23.4~ | 연암층 | - | - | 28.6~ | 연암층 | - | - |

있고 코아가 회수되지 않은 지층에서는 입력자료를 가정하여 사용하고 있어 실제의 현장상황과는 차이 점이 발생된다.

교하기 위하여 붕괴 직후 여러 기관에서 각기 다른 Program을 사용하여 나타난 구조검토 결과를 비교하였다.

아래의 표는 실시 설계서에 대한 검토 결과를 비

Tabel-13 Comparison of F.E.M results

| | 실시 설계서 | 붕괴 직후 1 | 붕괴 직후 2 |
|------------|------------------|---------------|-------------------|
| 사용 Program | MISES 3 | MISES 3 | TAFEM |
| 검토 결과 | • 지중침하 : 0.2cm | • 지표침하 : 14cm | • 지중침하 : 2.5cm |
| | • 터널천정부 : 0.12cm | | • 터널천정부 : 21.73cm |
| | • 터널측벽부 : 0cm | | • 터널측벽부 : 0.06cm |

Tabel-14 Comparison of input data

| | 실시 설계서 | 붕괴 직후 1 | 붕괴 직후 2 |
|-----------|----------------------|---------------------|---------------------|
| 점 착 력 | 1.0t/m ² | 1.0t/m ² | 1.0t/m ² |
| 내 부 마 찰 각 | 20° | 10° | 10° |
| 탄 성 계 수 | 2000t/m ² | 250t/m ² | 250t/m ² |

Table- 15 The geomechanic Classification

(a) 암반분류 매개변수와 평점(1MPa=10kg/cm²)

| | 분류매개변수 | | 평 점 | | | | | | |
|---|--------------|--------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------|-----|
| | 1 | 암석 강도 | 점재하 지수 일축압축강도 | >8Pa >200MPa | 4-8 100-200 | 2-4 50-100 | 1-2 25-50 | 5-25 | 1-5 |
| | 평 점 | | 15 | 12 | 7 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| 2 | R. Q. D | | 90-100% | 75-90 | 50-75 | 25-50 | <25 | | |
| | 평 점 | | 20 | 17 | 13 | 8 | 3 | | |
| 3 | 불연속면의 간격 | | >2 | 0.6-2 | 200-600mm | 60-200 | <60 | | |
| | 평 점 | | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 | | |
| 4 | 불연속면의 상태 | | 거칠다 불연속, 밀착, 신선 | 약간 거칠다 간극<1mm 약간 풍화 | 약간 거칠다 간극<1mm 강하게 풍화 | 경면 또는 Gouge (5mm 또는 간극 1-5mm | 연한 Gouge 5mm 이상 또는 간극 1-5mm | | |
| | 평 점 | | 30 | 25 | 20 | 10 | 0 | | |
| 5 | 지 하 수 | 터널길이 100m 당의 용수 | 없음 | <10L/분 | <10-25 | 25-125 | >125 | | |
| | | 응력비 | 또는 없음 | 0.01-0.01 | 0.1-0.2 | 0.2-0.5 | >0.5 | | |
| | 간극수압 최대응력 | | | | | | | | |
| | | 일 반 | 또는 건조 | 약간 습윤 | 습윤 | 중정도의 압력수 | 물 문제가 중요 | | |
| | 평 점 | | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 | | |

(b) 절리의 방향성에 의한 평점 조정

| 절리의 주향경사 | | 매우 유리 | 유 리 | 보 통 | 불 리 | 매우 불리 |
|----------|-----|-------|-----|-----|-----|-------|
| 평 점 | 터 널 | 0 | -2 | -6 | -10 | -12 |
| | 기 초 | 0 | -2 | -7 | -15 | -25 |
| | 사 면 | 0 | -2 | -25 | -50 | -60 |

(c) 평점 합계에 의한 암반 분류

| 평 점 | 100-81 | 80-61 | 60-41 | 40-21 | <20 |
|------|--------|-------|-------|--------|-----|
| 암반분류 | I | II | III | IV | V |
| 기 술 | 매우 양호 | 양 호 | 보 통 | 약간 약하다 | 약하다 |

2) 시공상의 문제점

(1) 막장면에 대한 암질 확인

NATM은 굴착중에서도 암질변화구간 및 암질 불량구간에 대하여 막장면 암질 확인조사(Pre Boring)를 실시하여 조사 결과에 따라 굴착패턴 및 지보패턴을 변경하여 시공하는 것이 기본개념이나 막장면에 NATM 시공이 불가능 호박자갈층이 분포하고 과도한 지하수가 용출됨에도 굴착중 막장면에 대한 확인조사가 이루어지지 않았다.

(2) 시공사와 감독관의 협조체제

터널굴진중 암질상태 변화에 따라 안전하게 굴착 패턴 및 지보패턴이 현장에서 탄력적으로 변경 시공되어야 하나, 시공사와 감독관의 유기적인 협조체제의 부족으로 터널사고 발생 후 설계변경이 이루어지고 있다.

(3) 계측관리

현장에 설치되어 있는 계측기는 제 기능을 발휘하지 못하고 있으며, 계측관리의 주요항목인 초기 측정이 제대로 이루어지지 않고 있어 굴착중 측정된 계측자료를 이용하지 못하고 있다.

(4) 기타사항

① 막장면 암반에 대한 절리 주향과 경사를 기록하는 막장도(FIELD MAPPING)는 작성되고 있으나, 이를 정확히 파악하여 조치할 수 있는 능력

이 부족하다.

② 발파에 대한 전문인력이 부족하고, 암질변화 구간마다 진동측정을 하여 조치하여야 하나 이루어지지 않고 있다.

③ 대부분의 터널 시공은 원도급자와 하도급자로 구성되어 있어 작업자들에 대한 안전관리 지시가 제대로 전달되지 않고 있다.

④ 최근에는 책임감리제를 도입하고 있는 현장이 다수 있으나 과거에는 책임감리가 아닌 시공감리제로서, 설계자는 설계로서 책임을 다하고 감독자는 기술적인 사항보다도 행정적인 사항에 중점을 두고 있어 현장여건이 고려된 설계변동 등이 제대로 이루어지지 않고 있다.

3) 사고원인에 대한 고찰

NATM 사고원인에 대한 분석을 실시하기 위하여 최근 발생한 구포열차사고 현장을 대표적으로 선정하여 분석한 결과, 조사설계시 실시된 지질조사 결과와 시공시의 지층의 상이함, 불충분한 토질자료로 물성치를 가정하여 지보패턴 결정, 굴착중 설계된 지층과 상이한 구간에 대한 암질확인조사의 미흡, 형식적인 계측관리 등이 터널붕괴의 요인으로 나타나고 있다.

상기의 분석 결과는 국내 NATM 15개 사고현장에서도 공통적인 문제점으로 나타나고 있으며,

Table-16 Summary of accident case of tunnel construction

| 사고현장 | 암분류 | 파쇄대 존재 | R.O.D | 지하수 영향 | 터널내 사고위치 | 계곡부 | 비 고 |
|------|-----|--------|-------|--------|----------|-----|----------------|
| A | 풍화토 | × | — | ○ | 막장면 | × | 서울 및 외곽 지하철 |
| B | 풍화암 | ○ | 0% | ○ | 막장면 | × | |
| C | 풍화암 | × | — | ○ | 막장면 | × | |
| D | 풍화토 | × | — | × | 막장면 | × | |
| E | 풍화토 | × | — | ○ | 막장면 | × | |
| F | 풍화암 | ○ | 0% | ○ | 막장면 | × | |
| G | 연 암 | ○ | 0% | ○ | 상반구간 | ○ | |
| H | 풍화토 | × | — | ○ | 하반구간 | × | |
| I | 풍화토 | ○ | — | ○ | 반구간 | × | |
| J | 풍화암 | ○ | — | ○ | 막장면 | ○ | 도로터널 |
| K | 연암층 | ○ | 10% | ○ | 하반구간 | ○ | |
| L | 풍화암 | ○ | 7% | ○ | 하반구간 | ○ | 철도터널 |
| M | 석회암 | ○ | — | × | 하반구간 | × | |
| N | 풍화암 | ○ | — | × | 막장면 | × | 지중선 전력구 |
| O | 풍화암 | ○ | 15% | ○ | 막장면 | × | 터널 |

* 사고현장의 순서는 임의로 정하였음.

15개 사고현장에 대한 붕괴유형 및 지질상태를 정리하여 다음과 같은 표를 요약할 수 있었다.

5. 개선방안

본장에서는 본문에 수록된 NATM 사고 사례 15개 현장에서 공통적으로 분석된 문제점에 따른 개선사항을 조사설계, 시공중, 계측관리, 감리·감독에 관한 사항으로 구분하여 추가 제시하고자 한다.

5.1 조사 설계상에 관한 사항

1) 지반조사시 지층변화구간 및 계곡부구간에는 터널 종단상의 연결된 암반선 파악이 곤란하므로 상기의 구간의 물리탐사법, 즉 탄성파시험을 적용하여 실시할 수 있도록 설계기준을 보완할 필요가 있다.

2) 지반조사시 사용되는 시추경은 대부분 BX로 파쇄대, 풍화토, 풍화암 구간의 코아회수가 제대로 이루어지지 않아 지층의 경계를 명확히 파악하기가 곤란하므로 NX이상의 대구경 시추경을 이용한 지반조사를 실시한다.

3) 시추공의 간격이 길고 심지어는 터널 입·출구부에서 실시된 지질조사 결과를 도면의 종단상에서 연결하여 암층을 추정하고 있어 파쇄대 및 연약층의 확인이 곤란하므로 지층변화가 예상되는 지역에 따라 시추간격을 조정한다.

4) 지반조사시 천공된 시추공을 이용하여 공사 완료 시점까지 지하수위 변동상태를 관측하여 터널 내 지하수 용출에 따른 사전대책을 수립한다.

5) 단층대의 불연속면이 예상되거나 절리가 심한 구간은 경사시추를 실시하여 불연속면의 구조를 파악한다.

6) 터널의 유한요소해석(R.E.M)은 정확히 시

추조사 결과를 토대로 하며 절리방향, 지하수 용출을 고려하여 설계에 적용한다.

5.2 시공상에 관한 사항

1) 공사 전 수행된 지반조사자료를 정리, 분석하여 공사중에도 비교가 가능하도록 하며 지질상태가 상이할 경우에는 확인조사를 실시한다.

특히 터널굴진중 NATM이 적용되기 곤란한 연약지층, 즉 암반의 절리 및 풍화가 심하고 파쇄대가 존재하는 자립시간 이내의 지보설치가 곤란한 막장면에 대하여는 선진보링(Pre Boring)을 실시하여 암질상태를 확인한 후 선보강(Pre Grouting)으로 지반을 개량하고 굴진한다.

2) 막장도면을 작성하여 실제의 지반상태, 지하수 용출상태, 지질구조의 기하학적 특성을 분석하고 계측자료를 비교하여 지보패턴 및 굴착패턴을 현장에서 선시공할 수 있도록 시공회사와 감독청의 유기적인 협조체제를 확립할 수 있는 제도적인 개선이 필요하다.

3) 터널굴착공법은 지반조건 및 주변여건을 고려하여 상세한 시공순서를 도면화하여 작업관련자 모두가 쉽게 알 수 있도록 한다.

4) 발파에 대한 전문인력이 부족하며 발파진동으로 인한 주변지반의 영향이 예상될 경우에는 발파진동 측정을 실시하여 발파장의 축소 및 무진동 발파 등의 대책이 적용되어야 한다.

5.3 계측관리상의 개선방안

1) 안전성 확보가 최우선임을 부각시킨다.

2) 계측이 형식적으로 시행되지 않도록 설계에 반영하고 감독은 물론 시공자도 안전관리면에서 시행토록 한다.

3) 수입품에만 의존하는 국내 현실에서 탈피하기 위하여 계측 기자재의 국내개발이 활성화되도록 유도한다.

4) 계측은 측정 결과의 정리 수준을 넘어 해석능력을 갖춘 전문인력을 늘려 나갈 수 있도록 전문기술자 양성을 유도한다.

5) 계측초기치를 누락시키지 않도록 하고 계측자료의 정리와 분석의 의무화를 실시한다.

6) 터널의 상부지반이 지하수위가 높고 연약지반에 철도와 같은 중요구조물인 경우 지표침하나 지중변위를 반드시 측정하여야 한다.

5.4 감리 감독에 관한 사항

1) 고급기술자를 상주감리자로 하여 실질적인 감리기능을 할 수 있도록 하며, 현장 투입 전에 감리요원에 대한 교육을 시행하고 정기교육방안도 마련한다.

2) 공사 발주와 동시에 감리를 시행하여 NATM의 특수성에 비추어 공사중지상태에서도 감리를 상주시키도록 한다.

3) 감리차원에서 계측관리를 수행하도록 하고 분석능력을 갖춘 기술자를 현장에 배치한다.

4) 현장을 총괄해야 하는 감독은 기술적으로 공사를 이끌어 나갈 수 있는 소양을 갖춘 전문인력이 필요하다.

6. 결 론

터널사고구간은 R.Q.D(Rock Quality Designation) 15% 미만의 지하수 용출이 과다하고 파쇄대가 존재하는 무지보 막장면에서 가장 많이 발생된 것으로 분석되었으며 계측부가 위치하고 있는 터널구간에서의 붕괴도 다수 발생된 것으로 나타나고 있는 바, 조사설계시 지반조사자료의 미흡, 굴착중 암질상태의 미확인, 형식적인 계측관리, 전문인력의 부족 및 제도적인 모순이 사고 사례 15개 현장의 공통적인 문제점으로 분석되었다.