터널 시공 중 지반 관련 사고 사례의 원인 분석과 지반 조사 결과의 활용에 관한 검토

Case Study on the Tunnel Collapses during the Construction and Application of Geotechnical Investigation

박남서[1], Nam-Seo Park, 이치문[2], Chi-Moon Lee, 강상호[3], Sang-Ho Kang

Abstract

It is considered in this paper that the main causes of tunnel collapse during the construction were the insufficiency of data of geotechnical investigations, or their limits due to special ground condition such as its heterogeneity and anisotropy. It is thought that safety of ground can be affected by the geological conditions such as presences of discontinuities in good intact rocks, and considered to be necessary that awareness of the conditions of discontinuities in advance is important to apply adequate reinforcement measures. It is also shown that a serious accident had occured because of the unawareness of the permeable alluvial deposits at the top of the tunnel. And it is shown that the example of application of the results of geotechnical investigation such as face-mapping, pilot boring etc. during tunnel construction, and a serious deformation of tunnel under special geological condition. Therefore, it is strongly recommended to perform an adequate geotechnical investigation to confirm the geotechnical conditons of ground before design, and supplimentary investigation is also needed depending on conditions for safe and econonic construction.

요 약

본 고에서는 지반 조건의 불균질성 및 이방성에 기인하는 사전 지반 조사의 한계성, 혹은 충분치 못한 사전 지반 조사에 의해 터널 시공 중 발생되었던 터널 사고 사례들을 검토, 분석하고 지반 조사의 터널 설계 및 시공에서의 활용에 대하여 고찰하였다. 본문에서는 암석(intact rock) 자체는 양호할지라도 암반 내에 존재하는 불연속면들의 발달 상태 등 지질공학적 요인에 의하여 암반이 취약해지는 경우, 지반 내에 발달하는 불연속면의 사전 인지와 이에 대한 대책 공법 수립의 필요성, 충분하지 못한 사전 지반 조사에 의해 터널 상부에 존재하는 충적층을 사전에 예측하지 못하여 발생된 사고 사례들과 시공 중 지반 조사(막장 관찰, 갱내 선진시추 조사 등) 결과가 터널의 시공에 적용된 예와 특수한 지반조건에서의 터널 변형 사례등을 검토하였다. 결론적으로 터널 시공에 있어서 대상 지반의 지질공학적 특성을 충분히 파악할 수 있는 적절한 지반 조사를 충실히 이행하면 지반 관련 사고를 미연에 방지할 수 있고 경제적인 시공이 될 수 있을 것으로 판단하였다.

주요어 : 불연속면 (discontinuities), 불균질성 (heterogeneity), 이방성 (anisotropy), with dipping, against dipping, 충상단층 (thrust fault), 측압비 (lateral earth pressure ratio)

1) 대덕공영 주식회사, 대표 이사
2) 대덕공영 주식회사, 이사
3) 대덕공영 주식회사, 사원

1. 서 언

합리적인 설계를 위한 지반 조사의 역할은 대상 구조물의 최적 위치를 설정하는 일에서부터 시공 방법의 선정이나 안정성을 확보하는 일에 이르기까지 필요한 각종 정보를 제공하는 것이다. 인간 생활 환경의 확대에 따라 지하 공간의 활용이 강조되면서 불리한 지반 조건에서 공사를 수행하여야 하는 경우가 점차 많아지고, 발생하는 문제에 있어서도 다양하고 복잡하여 이를 해결할 수 있기 위해서는 토목 시공뿐만 아니라 토질, 지질을 포함한 기초 지반에 대한 폭넓은 이해가 필요하게 된다.

본 고에서는 이러한 관점에서 과거 터널 붕괴 사고의 지질공학적 원인을 고찰하고, 터널 설계 및 시공 중 지반 조사 방법과 그 적용 실례를 살펴보았다.

2. 터널 붕괴의 일반적인 원인과 유형

2.1 터널 붕괴의 원인

터널의 붕괴는 부적절한 지보 형식이나 지보재 설치 및 타설 시간의 지연 등 설계 및 시공불량에 기인하는 원인 외에도 갑작스런 지하수 유입, 불균질성·이방성 (heterogeneous and anisotropic)인 지반 특성에 기인하기도 한다

표 1. 터널의 붕괴를 유발하는 요인

지반적 요인	인위적 요인	
	부적절한 설계	시공 불량
o 소성압 o 편토압 및 사면포행 (creep) o 산사태 o 지반 이완영역 확대 o 수 압 o 지지력 부족 o 지반침하 o 근접공사 o 급격한 지반변화 o 팽창성 지반 o 과대한 측압비	o 굴착방법 o 부적절한 지보재 (뿜어부침 콘크리트, 록볼트, 강지보공) o 배수 불량 o 부적절한 지반보강방법 o 인버트처리 불량	o 배면공극 (측벽 및 천정부) o 뿜어부침 콘크리트의 두께 부족 및 강도불량 o 계측활용의 부적절 o 배수처리 불량

2.2 터널붕괴시 나타나는 현상

터널에 작용하는 하중이 설계 시 고려한 하중 조건보다 큰 경우 (설계 중에 고려치 못한 특이 조건) 시공 불량으로 인하여 변위가 발생하고 붕괴로까지 전이되는 경우가 있는데, 실제 개개의 터널에서 이러한 원인을 찾는 것 자체는 쉽지 않다.

표 2.에는 터널의 붕괴 전에 나타날 수 있는 현상들에 대하여 개략적으로 정리하여 수록하였다. 이러한 현상이 나타날 경우에는 터널의 안정성을 도모할 수 있는 적절한 터널 보강공이 강구되어야 한다.

표 2. 터널의 붕괴 전 나타나는 일반적인 현상

갱구 · 갱문	터 널	지 반
o 균 열 o buckling o 앞으로 전도	o 균열 (전단, 인장, 어긋남) o 과대한 박리, 박락 (migration) 현상 o 측벽부 침하 o 토사유입 o 지하수 누수 및 용출	o 침 하 o 함 몰 o 활 동 (sliding)

2.3 지반 요인별 터널 붕괴의 일반적 유형

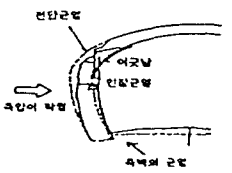
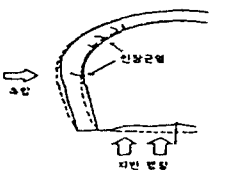
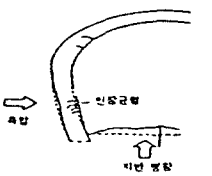
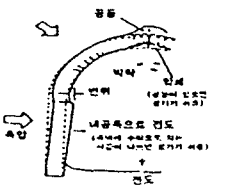
2.3.1 소성압

1) 지반 조건

터널 굴착에 의하여 터널 주변지반의 응력상태는 변화하며, 터널주변 지반의 강도가 토피압에 비하여 현저하게 작은 경우 또는 강도 열화가 현저한 경우에는 터널 주변에 생긴 소성영역이 확대되어 터널의 지보에 하중으로 작용한다. 이러한 소성압이 발생하기 쉬운 지반의 지질조건은 풍화변질을 받은 결정편암, 단층 파쇄대, 사문암, 석고를 다량 함유한 지반, 신제 3기층의 이암 및 응회암, 충상 단층에 의해 측압비가 큰 지반 등이다.

2) 소성압에 의한 터널의 변형 형태와 터널내의 균열

표 3. 소성압에 의한 터널의 변형특징

특징	① 측벽 또는 아치 어깨부의 수평균열	② 내공 축소	③ 지반팽창에 의한 인버트 히빙	④ 크라운부 파쇄 및 측벽전도
그림				

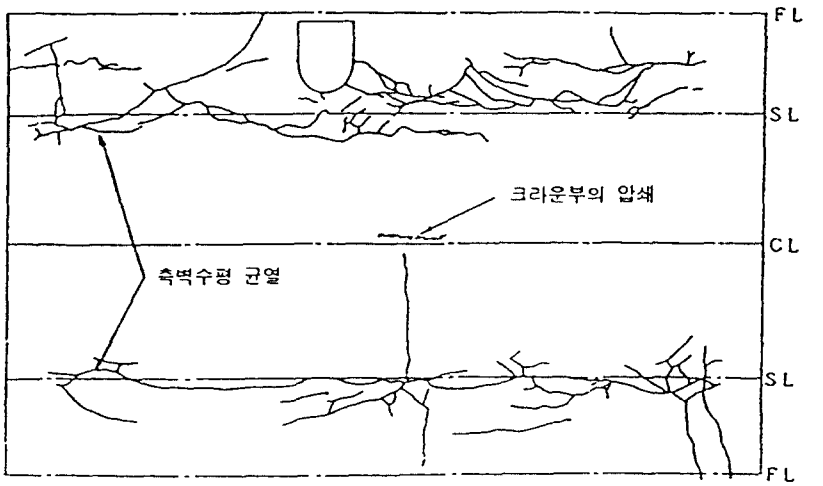


그림 1. 소성압 발생시 터널의 균열 및 변위 예

2.3.2 편토압

1) 원 인

터널의 좌우에 작용하는 지반압이 현저하게 불균형인 상태를 편토압이라고 하며, 일반적으로 사면지형에 터널이 존재하는 경우에 편토압의 문제점이 발생하는 경우가 많으나 경우에 따라 이방성인 지반에서 측압비가 큰 경우에 편토압이 발생할 수도 있다.

표 4. 편토압 및 사면포행

요 소	균열 및 붕괴를 유도하는 조건
지 형	자연지형 : 얇은토피, Talus, 붕괴지, 활동성 지형, 하천과 접하는 사면 인공지형 : 절토사면, 택지조성, 댐 담수에 따른 수위상승 및 저하에 동반하는 사면붕괴 등
지 질	풍화대, 연암 (이암, 세일, 편암), 유동성 지반, 활동성 지반
기 상	호우, 지진

2) 현 상

편토압 및 사면포행에 따른 지반의 변형특성 및 균열발생 특성은 그림 2. 및 그림 3.과 같다.

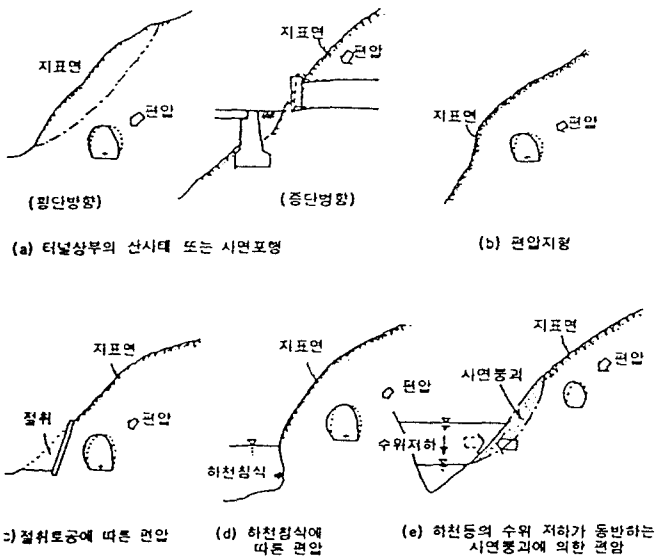


그림 2. 편토압 및 사면포행에 의한 변형특성 모식도

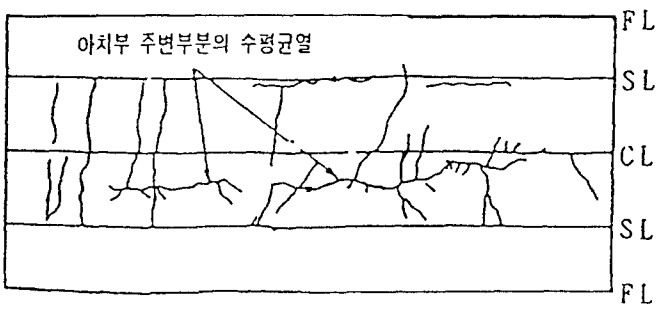


그림 3. 편토압, 사면포행에 의해 나타나는 터널의 균열 전개도의 예

2.3.3 지반이완 영역의 확대

1) 원 인

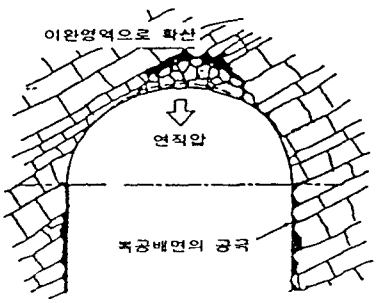
터널굴착시 주변 지반의 이완이 진행되면 지반의 자중이 커지고, 발파진동에 의하여 지반이 열화되며, 또한 지하수위 유출 등으로 풍화 절리면의 결합도가 저하되거나 특히 사질지반의 경우 세립실트분의 유실로 인하여 점착력이 저하된다. 이러한 요인외에도 시공상 문제인 터널지보공 배면의 공극, 지보공의 두께 부족 및 지보부재의 열화 등을 들 수 있다.

2) 특 징 (그림 4. 및 그림 5. 참조)

① 이완 영역의 확대는 터널천정부에서 터널 축 방향으로 균열이 발생하며

② 아치부 어깨에 수평 또는 비스듬한 균열

③ 드물지만 터널천단부의 붕락 등이 있다. (그림 4. 참조)



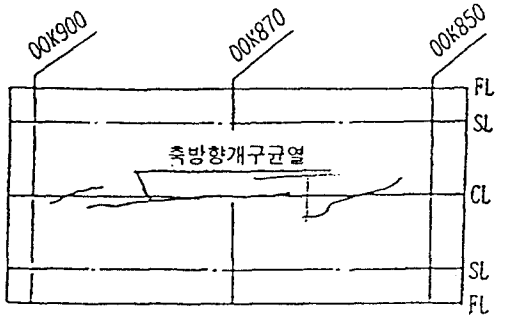


그림 4. 지반이완으로 인한 붕락 모식도

그림 5. 지반이완으로 인한 터널 균열 전개도 예

3. 시공 중 터널 붕괴 사례

3.1 사례 1 (서울지하철 ○호선 ○-○○ 공구)

3.1.1 지질 조건

하저 터널 공사 구간은 선캠브리아기에 해당되는 경기 편마암 복합체 흑운모 화강암 지역으로써 단층 파쇄대, 절리 등이 매우 불규칙하게 발달하고 있고 불연속면을 따라 2차 충진된 얇은 띠상의 흑연이 매우 불규칙하게 분포하는데 흑연의 물리적 성질에 기인하는 slip에 의하여 경면화 (slickenside)된 경우가 대부분이어서 이것이 터널 공사 중 가장 큰 암반의 불안정 요인이 되었다.

① 하행선 횡갱 구간 (그림 6. 참조)

막장 부근의 불연속면이 횡갱굴진 방향에 대하여 against dipping 방향이었고, 막장 천단부 2~3m 상단에 graphite가 협재되는 shear zone이 형성되어 있었으며 용수 상태는 습윤 내지 소량의 지하수가 비치는 정도이었다.

② 하행선 본선 구간 (그림 7. 참조)

불연속면의 연속성이 매우 강하고 sheared되어 있으며 gouge의 협재가 두드러지는 거의 단층 성격이 강한 주 불연속면의 방향성은 with dipping의 방향이었고 불규칙하게 발달하는 절리계 중 일부에는 graphite가 많이 협재되고 slickenside화되어 있으며 막장 진행 방향에 대하여 against dipping으로 주 불연속면과 더불어 불규칙하게 발달하는 절리계의 조합으로 인한 wedge failure가 발생하였다.

3.1.2 원인 분석

설계단계에서 지반 조건의 평가는 몇 번에 걸쳐 실시된 지질 조사 결과에 의존하였다. 이러한 조사는 시추 조사 및 물리 탐사, 그리고 부분적인 실내 시험을 포함하고 있는데 본 지반에서 중요한 요소로 작용한 암반층의 파쇄대에 대한 고려가 적절하지 못하였다. 다음은 설계 시 적용된 암반 분류와 시공 중 확인된 RMR에 의한 실제 암반 분류(전체 터널 길이에 대하여 각 암반이 차지하는 백분율)의 비교를 나타낸 것이다.

표 5. 설계 시와 실제의 암반 분류 비교

암반 분류	경 암 양질암	연 암 보통암	풍화암 불량암	풍 화 토 극불량암
설계시	57	36	7	-
시공시	35	36	21	8

위 표에서도 알 수 있드시 실제 시공 시 밝혀진 지반 조건은 설계 당시에 예측된 지반 조건과 많은 차이가 나는 것으로 확인되었다.

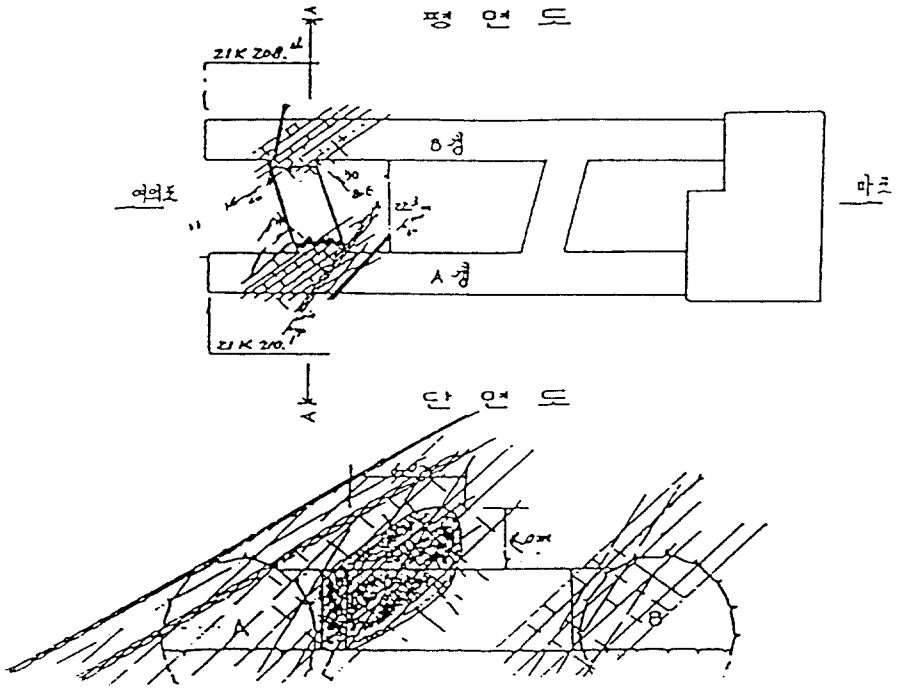


그림 6. 하행선 횡갱 구간 사고 현황

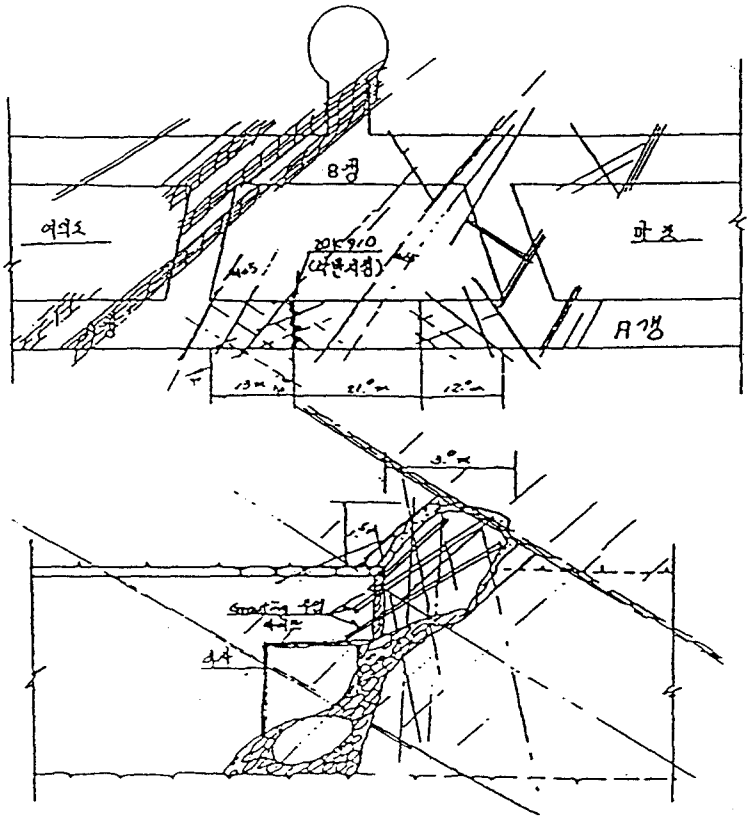


그림 7. 하행선 본선 구간 사고막장 현황

3.2 사례 2 (서울지하철 O-OO 공구)

3.2.1 현황

지질 조건은 slickenside가 발달하는 단층 파쇄대로서 굴착 당시 불연속면에 대하여 against dipping의 방향성을 보이고 있었으며 구성 암석은 Pre-Cambrian 흑운모 편마암 (상부 : 풍화암, 하부 : 연암)이었다.

3.2.2 붕락 사고 발생현황 (그림 8. 참조)

발파 후 갱내 버럭 반출 중 막장 배면에 발달되어 있던 단층대를 따라 천정부를 포함한 막장에서부터 터널 붕괴사고 발생하여 지표면이 함몰되었다.

3.2.3 원인 분석

풍화암 내에 존재하는 단층 파쇄대가 직접적인 원인이었으며 발파 진동이 이를 촉진시켰다고 판단된다. 사고의 원인이 되었던 단층 파쇄대는 터널 진행 방향에 대하여 직각 방향으로 약 50° 의 경사를 가지고 있어서 기존의 시추 조사시 인지되지 않았었다. 사고 후 사고 지점에서 단층 점토가 관찰되는 점 등으로 미루어 보아 굴착이 진행되면서 단층대를 따라 지하수가 누출됨으로서 파쇄대의 충진물을 동시에 유출시켜 공극을 확대시킴으로써 대규모 붕괴로 발전된 것으로 판단된다.

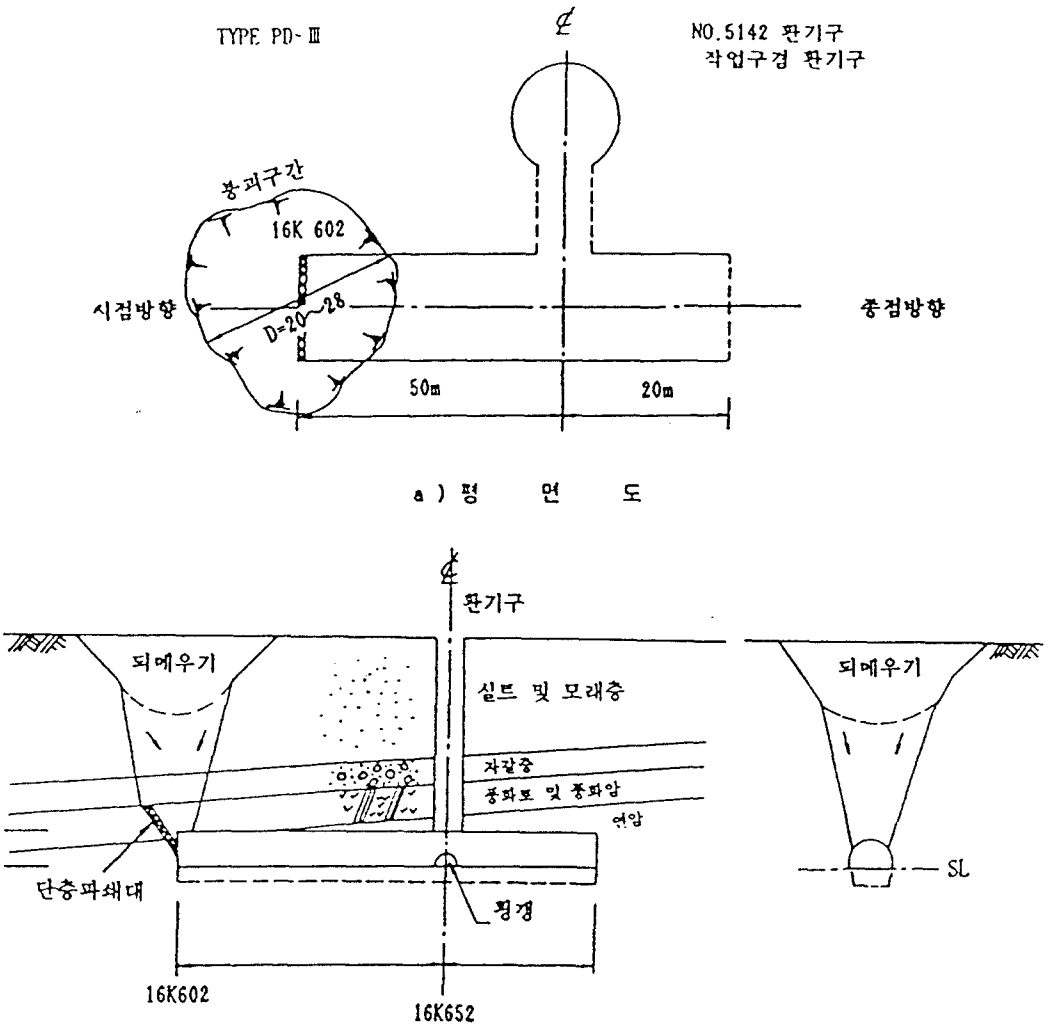


그림 8. 붕괴지점 평면 및 단면도

3.3 사례 3 (부산 ○○ 구간 지중선 전력구 터널 붕괴사고)

3.3.1 현황

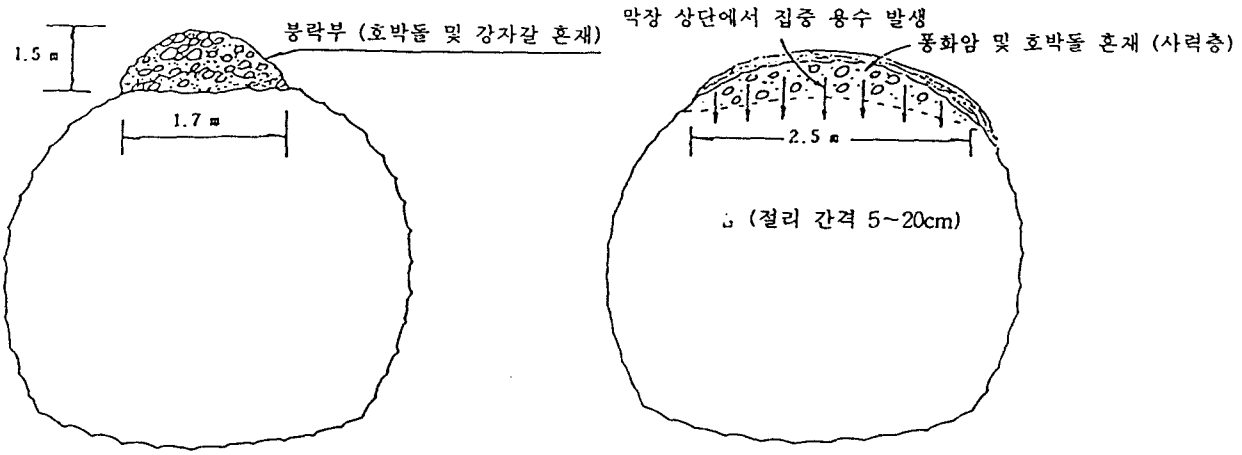
1) 붕괴사고 개요

당초 계획선대로 터널을 No 9 지점까지 굴진하면서 수 차례에 걸친 붕락 및 과다한 지하수 용출로 인하여 No 11 지점부터 기존의 선형을 변경하여 터널을 재굴진하는 과정에서 경부선 철도가 횡단하고 있는 지점의 하부 터널 막장면이 붕괴되면서 철도 지반이 함몰되어 대형 열차사고가 발생된 사례이다.

2) 지질조건

붕괴 사건 후 여러 기관에서 실시한 지질조사 결과를 보면 각 기관마다 약간의 차이는 있으나 공통적으로 기반암은 종단구배가 급격히 변화하고 풍화 및 절리가 매우 발달되어 있으며 터널 상부지층은 진동 등에 예민한 연약점토층 (실트질 점토 : N치 6이하)이 두텁게 분포하고 있음이 지적되었다.

3.3.2 막장 상태



No 10+2.703 (#4 → #3 수직구 방향 350m 지점) No 8+16.703 (#4 → #3 수직구 방향 376m 지점)

그림 9. 막 장 상 태

3.3.3 사고 현황

1) 사고 지점 : No 6+00 (#4 → #3 수직구 약 450m 지점) (그림 10. 참조)

2) 사고 개요 : 1993. 3. 28 17시 25분 경 터널 굴진 작업을 진행하던 중 터널 막장붕괴로 인하여 칠로가 함몰되어 무궁화호 열차 (서울 → 부산)가 전복되어 사망 78명 등 많은 인명 피해 발생하였다.

3.3.4 사고 원인 분석

설계 당시 충분하지 못한 사전 지반 조사 자료에 의해 계곡부 충적층의 발달 상태를 미리 예측하지 못한 상태에서 실제 지반의 악조건에 대한 충분한 고려없이 NATM 공법을 적용한 것이 주요 사고 원인으로 지적되었다.

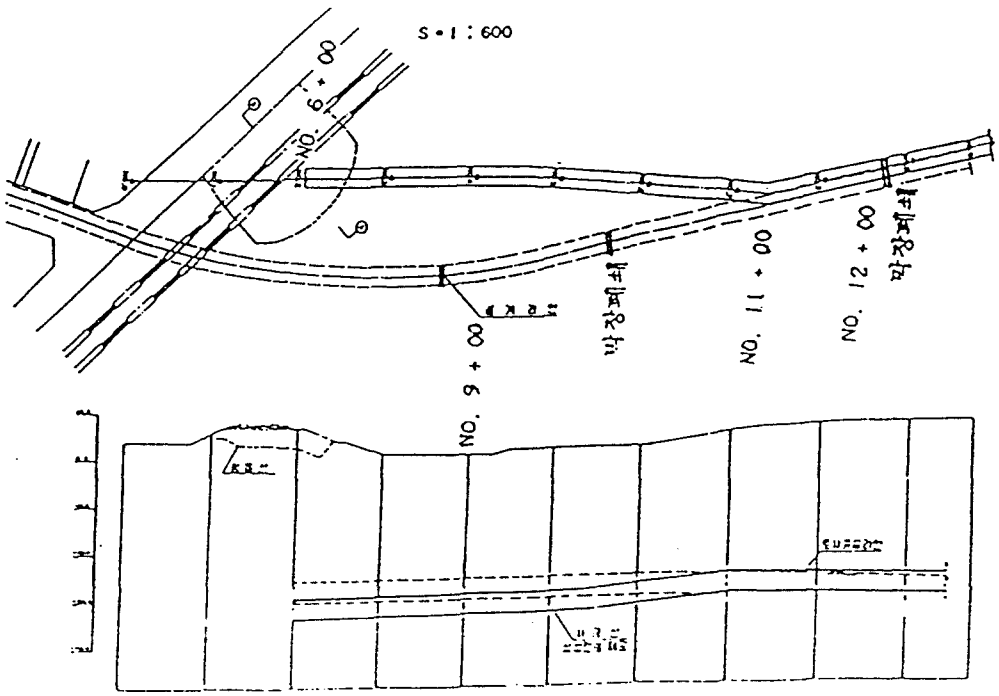


그림 10. 철도 붕괴 현황도

4. 터널 건설 단계별 지반 조사 계획 및 그 적용 사례

4.1. 지반조사의 단계

지반조사에는 시공 단계에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다.

계획 단계	➡	설계 단계	➡	시공 단계	➡	유지 관리단계
예비조사	➡	본조사	➡	보완 조사	➡	특정 조사 (계측 조사)

4.2 터널 지반 조사

예비 조사 단계에서는 치명적인 지형 및 지질 조건을 우회할 수 있는 방안이 충분히 검토되어야 한다. 터널 조사에 있어서는 조사 범위가 매우 넓게 되기 때문에 본 조사보다는 오히려 시공 단계 보완 조사·계측에 더 비중이 주어지게 된다. 완공 후 계속적인 계측 조사를 통하여 터널의 안정성을 지속적으로 확보하여야 한다.

4.3 지반 조사의 적용 사례

4.3.1 사례 4 (한강 하저 터널 건설 공사 : 터널 시공 중 보완 조사 사례)

1) 개요

한강 하저의 지질은 커다란 단층구조와 다수의 수반 단층들이 존재하고 터널 바닥 밑까지 내려오는 깊은 풍화대의 발달과 미끄러운 경면 (Slickenside)이 발달된 흑연층의 협재 등 지질구조적으로 불규칙한 지반조건이다. 따라서 실시설계시 충분한 지반조사가 시행되었다

하더라도 시공 중에 예상치 못한 암반상태가 출현되는 경우가 많았는데 이는 암석 자체의 강도는 양호하다 하더라도 암반 상태는 불연속면의 상태 등 지질공학적 요인에 의해 불량한 상태이었기 때문이다.

한강 하저터널의 특수성에 따른 최대의 안전시공을 확보하기 위하여 막장에서의 정밀 지질조사가 실시되었고 수평 선진시추조사 및 슬라임 체크 등의 조사자료를 토대로 지반보강 주입공사의 범위 및 굴착공법 등을 검토하여 합리적으로 신속하게 적용시행하였다.

2) 막장관찰

정밀한 현장관찰과 판단으로 예상하지 못했던 지질조건 (파쇄대, 풍화대, 단층, 용수대층)의 출현에 대비하여 사고를 미연에 방지할 수 있도록 하였다.

3) 갱내 수평 선진시추조사

터널막장 전방 지질상황의 변화와 용수량을 사전에 정확히 파악하여 적절한 굴착 및 보강공법 적용을 위하여 한강 하저터널 공사구간에서는 굴착전에 막장 전방 25m를 수평 시추조사하고 터널 20m를 굴착하고 다시 25m를 시추조사하는 방법을 반복하였다. 또한 시추공을 이용하여 투수시험, 용수량측정, 탄성파탐사, 공내재하시험 등을 실시하여 지반 상태 파악에 활용하였다.

4) 천공 슬라임을 이용한 지질조사

터널을 굴착하면서 막장에 수발공을 설치하거나 지수를 위한 주입공사를 할 경우 반드시 천공을 하게 되는데 이때 발생되는 천공수의 색상과 슬라임을 자세히 관찰하면 암쇄설물, 토성분, 운모, 장석, 석영대 등을 구분할 수 있으므로 터널 안전 시공에 적절히 대처할 수 있다.

5) 위의 결과를 종합하여 암반 상태를 예상하여 그라우팅 패턴을 결정하여 지반을 보강한다. 아래는 연약대에 대한 그라우팅 패턴의 예를 보인다.

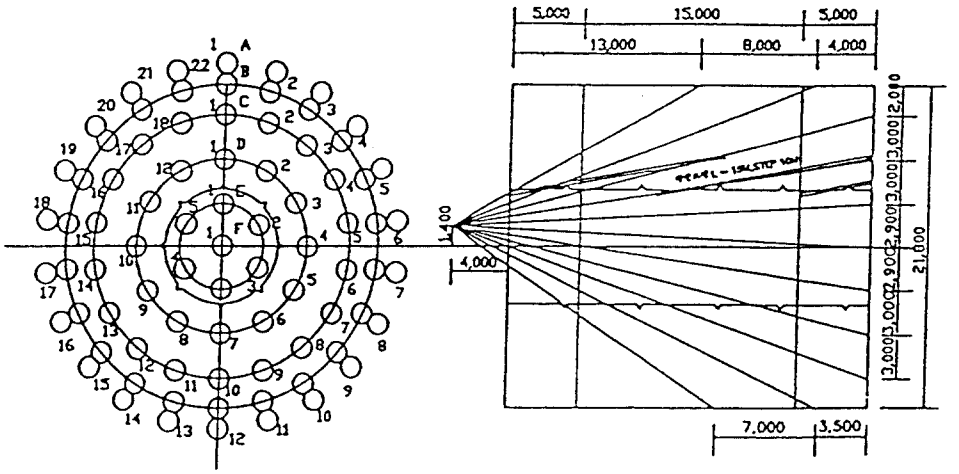


그림 11. 파쇄 연암 (풍화암 혼재) 그라우팅 패턴
(RMR 암반 분류 Ⅲ~Ⅳ 등급)

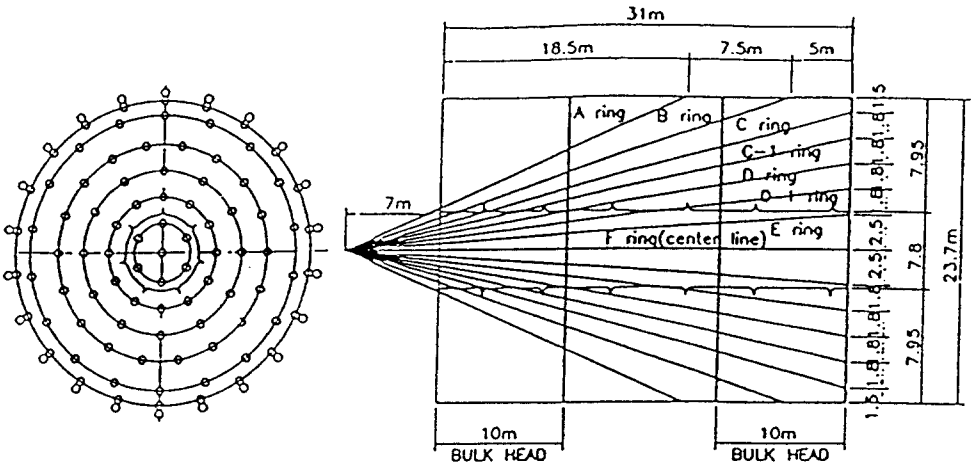


그림 12. 토사 구간(부분적 풍화대) 그라우팅 패턴
(RMR 암반 분류 V 등급)

4.3.2 사례 5 (영동선 산골터널 긴급 보강공사 : 유지 관리 단계의 특정 조사 및 보강 공사 사례)

1) 터널 이력

본 터널은 1995년과 1996년 사이에 실시된 정밀안전진단 결과 일부 구간에서 심각한 터널의 변형이 관측되었는데 이는 준공 이후 계속적으로 진행되어 온 것으로 판단되었다.

2) 지형 및 지질 (그림 13. 지질 단면도 참조)

본 지역 주변은 캠브로-오르도비스기에 걸쳐 퇴적된 대석회암층군을 기저로하여 페름기의 변성퇴적암이 그 상부를 평행부정합으로 피복하고 있다.

이들 변성퇴적암 상부에는 백악기에서 고제3기에 해당되는 퇴적암 및 화산암류가 부정합 또는 관입상으로 분포되어 있다. 이들 암석들은 수회의 조산운동에 의해 습곡을 이루고 있으며 철도터널은 페름기 지층내 함탄층 직상부의 사암 또는 탄질세일 등 비교적 불안정한 지반을 관통하고 있다.

3) 조사 결과

지표지질 조사에 의하면 본 터널을 횡단하는 주향 E-W ~ N 70° E, 경사 N~NE의 대규모 thrust 2매가 인지되고 있으며, 터널 내 수평시추 조사결과 터널측벽부에서 thrust와 관련된 것으로 판단되는 단층각력, 단층점토 및 탄질세일 등이 수매 인지된다. 이 thrust는 그림 13.에서 보는 바와 같이 철도터널 주변에서 충상단층 여러 매가 터널과 교차하여 지표에 노출되어 있다. 이는 지표에서 인지되는 2 매의 thrust 이외에도 지반 내에 숨어있는 수매의 단층에 의해 엽편상 구조 (thrust imbricate fan)를 이루고 있으며, 특히 이들 엽편상 구조는 본 보강공사 구간 내에 집중되어 있어 지반의 교란을 심화시킨 것으로 판단된다.

따라서 횡압력이 크게 작용하여 형성되는 thrust 발달 지역의 지반 특성을 파악하기 위하여 실시한 공내재하시험 결과 측압계수 K_0 ≒ 2.0~2.4로 추정하였다. (그림 14. 참조)

4) 원인 분석

본 터널의 경우 3~4매의 엽편상 구조를 보이는 충상단층의 파쇄대 내에 철도터널이 건설되어 있어서 준공 후 30 여년간 지속적으로 터널의 변형이 계속되어 왔다. 특히, 높은 횡압에 의해 형성되는 충상단층의 특성상 터널이 위치하는 지반 내에 작용하는 측압이 매우 높아 터널의 변형을 가속화시킨 것으로 판단된다.

5) 보강공법

본 터널의 내공단면이 이미 건축한계 이내로 축소되어 있어 강지보공이나 숏크리트 등을

시공할 수 없으므로 배면지반의 강도 증가를 통한 안정화 공법을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단하여 Invert 버팀 콘크리트, 폴리 우레탄 그라우팅액 주입, Lattice Girder 설치 등으로 본 터널을 보강하였다.

6) 보강 결과 분석

내공변위 및 천단침하핀, 지중변위계를 설치하여 계측한 결과 우레탄 그라우팅이 완료된 이후부터 내공 변위가 수렴되어 지반이 안정화 단계로 접어드는 계측 결과를 보이고 있다.

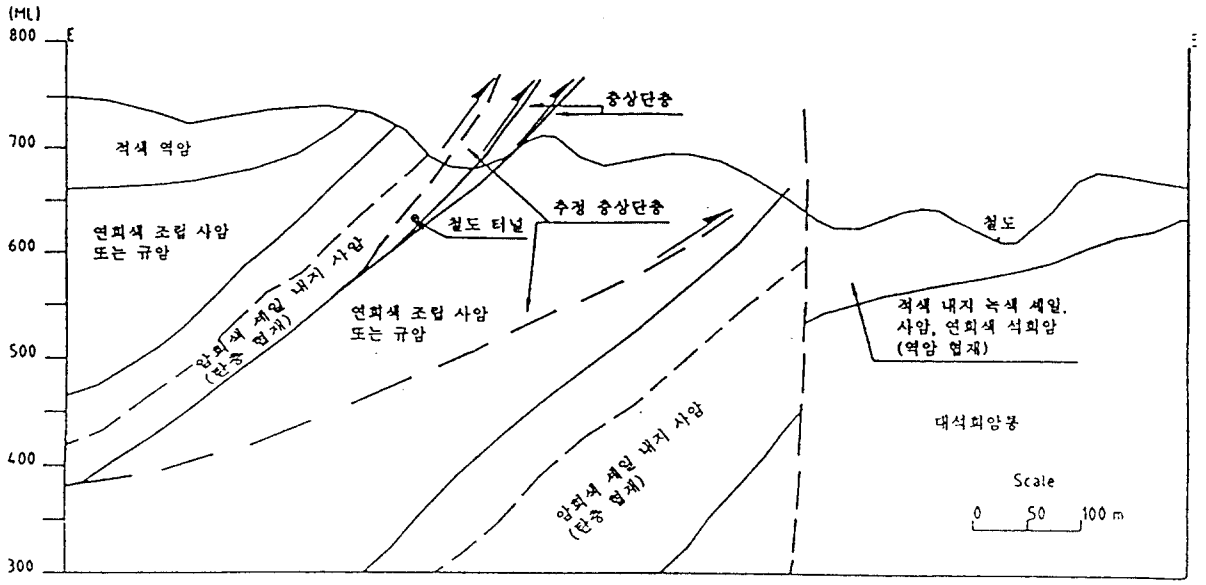


그림 13. 지질 단면도

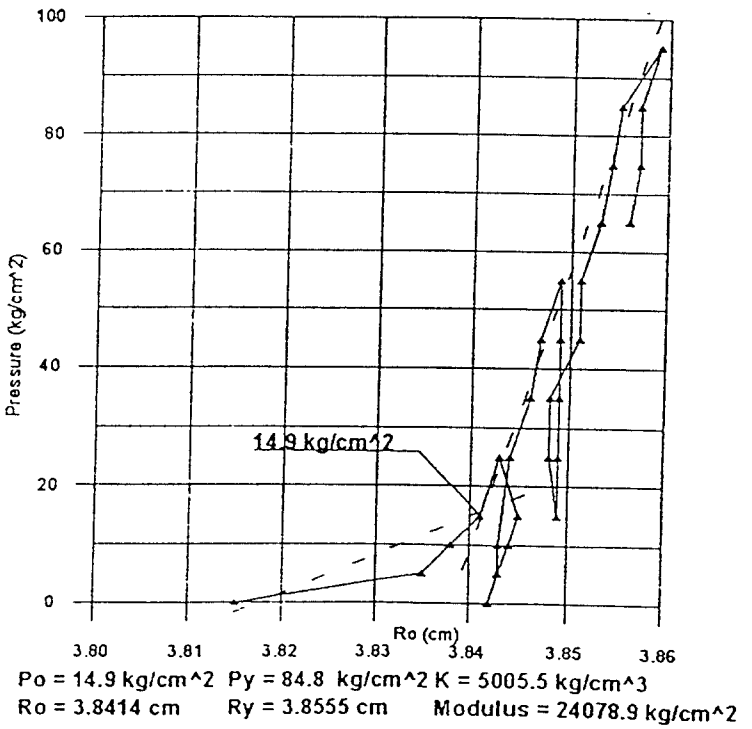


그림 14. 공내재하시험 결과 (예)

8. 결 언

1) 터널 시공에 있어서 지질공학적 조사를 충실히 이행한다면 많은 부분의 사고를 미연에 방지하고 경제적인 시공을 할 수 있음을 앞의 여러 사례에서 알 수 있었다.

2) 사례 1의 터널 시공 중 낙반 사고에서 알 수 있듯이 특히 복잡한 지질 구조를 가지는 지반에서는 사전 시추 조사만으로는 연속적인 지반 자료를 제공할 수 없으므로 터널시공 중 막장 관찰 조사, 선진 시추조사 등 보완조사를 지속적으로 수행할 필요가 있다.

3) 사례 2의 지반 함몰 사고에서 알 수 있듯이 지반 내에 발달하는 특징적인 불연속면의 파악은 매우 중요하다.

4) 사례 3과 같은 미고결 퇴적층 지역의 시추 조사시에는 각 지층의 심도를 정확히 확인해야 하며 터널 노선 종단상의 지형적 특성, 지층 구성, 지질 구조 등의 요인들을 감안하여 조사 빈도를 결정하는 것이 필요하다.

5) 단층, 절리 등과 같은 지질구조적 인자, 특히 충상 단층 (thrust fault)에 의해 대규모 파쇄대가 발달하는 지역에서는 현장 시험 혹은 실내 시험 등을 통하여 측압비를 구하여 설계에 반영하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. 일본 (재) 철도종합기술연구소 (평성 2년), "터널 보수보강 매뉴얼" pp. 47~107
2. 영주지방철도청(1997) "영동선 통리~심포리간 산골터널 긴급보강공사 준공 보고서" p. 9, 17
3. 서울특별시 지하철건설본부(1994) "지하철 5호선 건설공사 특별안전진단 (5-18, 5-15 및 5-12 공구) 보고서" pp. 37~38
4. 우종태, 서강천(1996), "서울지하철 5호선 5-18공구 건설공사 한강하저터널 지반분석 및 보강공법" pp. 139~172
5. 한국건설안전기술협회(1993), "지중선 전력구 안전진단 보고서 (북부산변전소~구포삼거리간)" pp. 10~15, 76~79
6. 서울특별시 도시 철도공사 고덕시설사업소(1997), "지하철 공사의 실무 참고" pp. 90~102
7. 대한토목학회 (1992), "지하철 5호선 5-14 공구 터널 사고 원인 및 복구 대책 연구 용역 보고서" pp. 16~17, 35~43
8. Park, Nam-seo *et al.*(1997), "Reinforcement of Railway Tunnel in Fault Zone", Environmental & Safety Concerns in Underground Construction pp. 267~273