

숫자와 그림으로 보는 터널이야기

- 제5강 도심지 터널 붕괴사고 -

김영근 | ㈜건화 지반터널부 부사장, 한국터널지하공간학회 부회장, 공학박사, 기술사

본 고에서는 국내외에서 발생한 터널붕락 사고사례를 중심으로 터널사고 발생원인 분석과 메커니즘, 주요 리스크와 이에 대한 대책 그리고 사고현장에 대한 응급 복구 및 보강대책 등을 중심으로 기술하고자 한다. 터널공사에서 발생 가능한 지오리스크와 이로 인한 터널 붕락 및 붕괴 특성을 면밀히 검토하여, 터널사고로부터 얻을 수 있었던 여러 가지 교훈과 사고 이후 개선되거나 달라진 공사체계와 시스템 등에 대하여 기술하였다.

[표 1] 국내외 주요 도심지 터널 붕괴 사고 사례

내 용	공 법
1 영국 Heathrow 급행철도 터널 붕락사고와 교훈	NATM 터널
2 싱가포르 MRT Nicoll Highway 사고와 교훈	수직구/개착터널
3 타이완 가오슝 MRT 터널 사고와 교훈	TBM 터널
4 도쿄 대단면 TBM 터널 지반함몰 사고와 교훈	TBM 터널
5 후쿠오카 지하철 대단면 NATM 터널 붕락사고와 교훈	NATM 터널
6 상하이 메트로 TBM 하저터널 붕락사고와 교훈	TBM 터널
7 호주 Forestfield 공항철도 TBM 터널 사고와 교훈	TBM 터널
8 독일 Rastatt TBM 철도터널 붕락 사고와 교훈	NATM 터널
9 캐나다 오타와 LRT 터널 붕락 및 싱크홀 사고와 교훈	NATM 터널
10 브라질 상파울루 메트로 NATM 터널 붕락 사고와 교훈	NATM 터널
11 국내 도심지 터널붕락 및 싱크홀 사고와 교훈	TBM / NATM 터널

1. 영국 히드로 급행철도 터널 붕락사고와 교훈

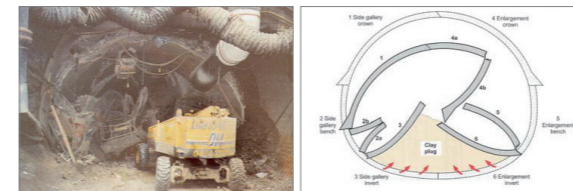
히드로 급행철도(Heathrow Express, HEX) 터널 프로젝트는 히드로 공항과 런던 중심부에 있는 패딩턴 역을 연결하는 프로젝트로서, 프로젝트 관리는 처음부터 여러 가지 어려움에 직면했으며, 그 중에는 제한된 예산문제, 경직되고 복잡한 조직, 제대로 이해되지 않은 NATM 공법과 관련된 기술적 문제가 있었다.

이러한 결과로 직접적으로 취해진 몇 가지 결정은 전체 프로젝트를 위태롭게 했고, 1994년 10월 21일 밤에 터널 붕괴 사고가 발생하게 되었다.

[그림 1] 영국 히드로 급행철도(HEX) 터널 붕락사고(영국,1994)



[그림 2] 터널 붕락 및 붕락 메커니즘



■ 새로운 기술의 적용과 시행착오

NATM 터널공법은 오스트리아에서 개발되어 광범위하게 적용되었으며, 이후 영국에서 대형 도심지 터널공사인 히드로 공항철도 터널에 처음으로 적용되었다. 이러한 이유로 NATM 공법 도입초기에 설계 및 시공상 많은 시행착오를 거듭하였고, 특히 런던 점토층(London Clay)과 같은 연약지반에 대한 기술 노하우와 경험이 적어 발주처 및 시공사의 시공상의 잘못이나 관리상의 문제가 발생하여 심각한 붕괴사고를 초래하였다.

■ 터널붕락 사고 원인과 메커니즘

본 터널의 붕락사고의 원인은 런던 점토층의 지반공학적 특성을 고려하지 않은 설계와 NATM 공법의 특성을 이해하지 못한 시공상의 결함으로 발생한 것으로 파악되었다. 즉 연약 점토층에서의 수직구와 3개의 터널을 동시에 시공하고, 바닥 인버트(Invert)를 평편하게 하여 링폐합 구조(Ring Closure)를 제대로 형성하지 못하고, 건물하부구간에서의 무리한 잭그라우팅으로 인해 터널에 심각한 영향을 미쳐 지속적인 터널변형과 숏크리트 라이닝의 손상으로 인하여 터널 붕괴가 발생하게 되었다.

■ 터널사고 방지에 대한 해결책

본 터널사고가 발생한 직후 발주처에서는 솔루션팀을 구성하여 터널복구방안을 수립하고 주요 대책을 제시하였다. 기술 솔루션으로 붕괴구간에 코퍼댐(coffer dam)을 시공하여 복구공사를 수행하도록 하였으며, 조직 솔루션으로는 공사비 위주에서 품질과 안전가치를 중심으로 공사 목표를 조정하도록 개선하였다. 또한 정보 흐름구조를 만들어 공사담당자와 책임자에 대한 통지와 공사에 대한 이해를 증진하도록 하고, 의사결정과정에서 모든 공사담당자들이 참여하고 의사소통을 개선하도록 하였다. 아울러 터널공사에서의 안전과 리스크 평가를 시행하도록 하여 리스크 관리를 보수적으로 진행하도록 하였다.

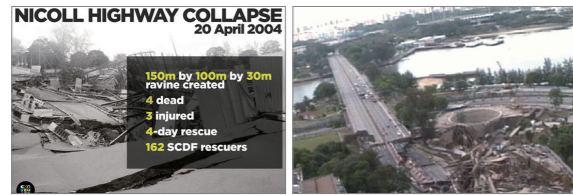
■ 터널붕괴 사고와 교훈

본 터널사고는 그 당시 영국에서 진행되어 왔던 발주자 및 시공자와의 계약관계, 프로젝트 관리방식 및 발주시스템에 대한 제반 문제점을 확인할 수 있는 좋은 계기가 되었다. 특히 영국 HSE 위원회와 영국토목학회(ICE) 및 영국터널학회(BTA)를 중심으로 심도 깊은 논의와 연구를 진행하여 [NATM 터널에서의 안전시공] 및 [지하터널공사에서의 리스크 관리] 등의 보고서를 발간하여 지하터널공사에서의 공사관리시스템을 혁신적으로 개선시키고 발전하게 되었다.

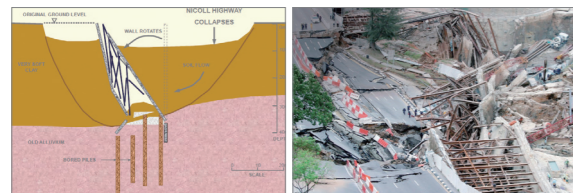
2. 싱가포르 MRT 니콜 하이웨이 붕락사고와 교훈

2004년 4월 20일 오후 3시 30분경 싱가포르 MRT 공사 중 니콜 하이웨이(Nicoll Highway)가 붕괴되는 사고 발생했다. 본 사고는 싱가포르의 건설 산업에 깊은 영향을 미쳤다. 이 사고를 통해 깊은 굴착공사를 할 수 있는 자격을 갖춘 지반 기술자를 임명하고 임시공사에 대한 권한 제출을 요구하는 등 규제가 강화되었다. 이 붕괴사고로 4명이 사망하고 3명이 부상당했다. 프로젝트 몇몇 당사자들이 법정에서 기소되었고, 프로젝트 완료가 지연되었다.

[그림 3] 니콜 하이웨이 붕락사고(싱가포르, 2004)



[그림 4] 니콜 하이웨이 붕락사고 메카니즘



■ 지반공학에서 해석오류와 설계

연약지반 중에 구축되는 흙막이 가시설 설계에서 연약 점토에 대한 합리적인 지반물성 산정과 평가는 매우 중요한 것으로, 해석상에 잘못된 평가나 오류는 과소설계를 가져오게 되어 결과적으로 붕괴사고에 대한 기본적인 원인을 제공한 사례이다.

특히 지반기술자는 지반설계시 해석결과에 대한 지나친 과신을 가져서는 안 되고, 지반물성적용 및 해석 프로세스와 결과 분석에 상당한 주의를 가져야 한다.

■ 계측 모니터링과 시공관리의 중요성

본 붕괴사고의 경우 시공 중 다양한 계측데이터로부터 과도한 지반거동, 심각한 벽체변형 등을 감지할 수 있었으며, 이에 대한 합리적인 역해석 등을 통하여 설계 및 시공상의 문제점을 확인하여 붕괴사고를 방지할 수 있었을 것이다. 하지만 시공자의 공사비 및 공기를 우선시 하는 관행과 지반관련 전문가가 현장에 없어 지반공학적인 문제에 대한 부실평가 그리고 자격이 없는 계측담당자에 의해 수행된 계측결과 무시 등으로 붕괴사고까지 이르게 되었다.

■ 사고 방지에 대한 해결책

본 붕괴사고가 발생한 직후 발주처에서는 사고조사위원회를 구성하여 입찰, 설계 및 시공에 대한 전 과정에 대한 철저한 조사로 주요 사고 원인을 규명하고, 재발 방지 대책을 제시하였다. 기술적으로 붕괴구간을 되메워 완전 복구하여 고속도로가 가능한 빨리 운행토록하고, MRT를 변경하여 신설하는 방안을 수립하였다. 또한 건설시스템으로는 공사비/공기 위주에서 품질과 안전을 중심으로 공사목표로 조정하고, 관련 제도와 정책을 정비하여 모든 지하공사에서의 안전 리스크 관리를 의무화하고, 설계변경 절차를 엄격히 제한하도록 하였으며, 시공 중 전문가가 현장에 상주하여 공사를 관리하도록 하였다.

■ 붕괴 사고와 교훈

본 붕괴사고는 그 당시 싱가포르에서 진행되어 왔던 발주자 및 시공자와의 계약관계, 프로젝트 관리방식 및 발주시스템에 대한 제반 문제점을 확인할 수 있는 확실한 계기가 되었다. 특히 싱가포르 사고조사위원회(COE)와 육상교통부(LTA) 및 노동부(MOM) 등을 중심으로 심도 깊은 논의와 연구를 진행하여 [건설공사에서의 통합안전관리시스템 TSMS, Total Safety Management System] 및 [PSR 프로세스, Project Safety Review], [DiS 제도, Design for Safety] 등을 제정하여 지하공사에서 공사관리시스템을 혁신적으로 개선시키고 발전하게 되었다.

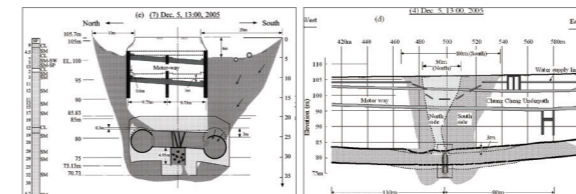
3. 타이완 가오슝 MRT 터널 붕락사고와 교훈

2005년 12월 4일 오후 3시 30분경 대만 가오슝 MRT 공사 중 TBM 터널이 붕괴되는 사고가 발생했다. 본 사고는 타이완에서 도심지역에 적용되어 왔던 지하공사(Underground construction)에 깊은 영향을 미쳤다. 본 사고를 통해 지하공사에서 입찰단계에서부터 자격을 갖춘 지반전문 기술자가 조사, 설계 및 시공에 관여하도록 하는 등 많은 규제가 강화되었다. 또한 TBM 터널공사에서의 대규모 터널 붕괴사고는 상당한 기술적 문제점을 제기하는 계기가 되었으며, 대규모 복구공사로 인하여 MRT 개통을 지연시키는 막대한 피해까지 가져오게 되었다.

[그림 5] 가오슝 MRT 터널 붕락사고(타이완, 2004)



[그림 6] 파이핑 파괴로 진행되는 붕락 메카니즘



■ TBM 터널에서의 횡갱(NATM)공사의 문제

일반적으로 도심지 지하철과 같은 터널공사에서는 상하행의 병렬터널을 굴진한 후, 두 개의 터널을 연결하는 방재목적의 피난연결통로(횡갱, cross passage)를 설치하게 된다. 특히 지반이 연약한 경우에는 본선터널은 TBM 공법을 이용하지만, 피난연락갱의 경우 어쩔 수 없이 NATM 공법을 이용하여 굴착을 수행하게 된다. 특히 횡갱굴착공사시 굴착에 앞서 주변지반의 차수성능을 철저히 확인하여 지하수 유입을 제어하도록 해야 한다. 연약지반상의 NATM

공사는 상당한 리스크를 가지므로 시공 중 엄청난 주의를 기울여 관리해야만 한다.

■ 연약지반의 지반공학적인 특성 규명 및 지반기술자 중요성

본 붕괴사고의 경우 피난연락갱 하부 센프 공사 중 갑작스러운 파이핑(piping) 현상으로 발생한 것으로, 연약지반에 대한 그라우팅 품질관리, 즉 횡갱하부에 대한 지반그라우팅 개량체에 대한 그라우팅 성능 확인이 매우 중요함을 알 수 있다. 또한 공사지역의 지반의 고유한 특성과 공학적 거동 특성을 설계 단계에서 파악하도록 해야 하며, 시공 중에 이를 확인하도록 해야 한다. 이를 위해서는 자격을 갖춘 경험 있는 지반 전문가가 설계 및 시공에 관여하도록 해야 한다.

■ 사고 원인 조사와 복구대책 수립

본 붕괴사고가 발생한 직후 발주처에서는 타이완 건설연구소를 중심으로 사고조사위원회를 구성하여 설계 및 시공에 대한 철저한 조사로 주요 사고 원인을 규명하고, 복구대책을 제시하였다. 주요 복구대책으로는 사고 구간에 대한 다이아프램 월을 설치하고, 연결구간에는 지반동결공법을 적용하여 지반을 보강한 후 붕락구간의 토사와 손상된 세그먼트를 제거하고, 개착공법으로 세그먼트 라이닝을 조립한 후 되메워 최종적으로 복구공사를 무사히 마칠 수 있었다. 또한 사고원인으로부터 도심지 지하철공사에서의 시공 리스크를 관리할 수 있는 지반전문가를 현장에 상주하여 공사를 관리하도록 도심지 지하공사관리시스템을 개선하였다.

■ 붕괴 사고와 교훈

본 붕괴사고는 타이완에서 진행되어 왔던 도심지 지하공사에서의 시공관리 문제, TBM 터널공사에서의 횡갱 시공에 대한 제반 문제점을 확인할 수 있는 계기가 되었다. 특히 가오슝 당국 및 사고조사위원회 등을 중심으로 심도 깊은 논의와 검토를 진행하여 본 붕괴사고에서의 사고원인 규명과 재발방지 대책을 수립하는 등 타이페이 도심지 지하공사에서 공사관리시스템이 개선되었다.

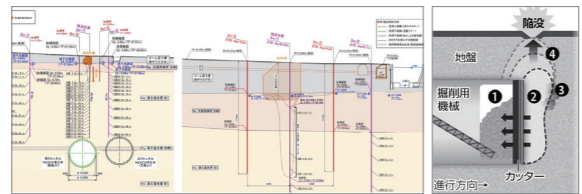
4. 도쿄 대단면 TBM 터널 지반함몰 사고와 교훈

2020년 10월 18일 오전 9시 30분경 도쿄 외곽순환도로 TBM 터널공사 중 지반함몰(Sinkhole) 사고가 발생하였고, 각종 매스컴에 대대적으로 보도되어 일본에서 굉장한 이슈가 되었다. 본 사고는 일본 도심지역에 적용되어 상대적으로 안전하다고 믿어왔던 도심지 지하터널건설공사에 대한 신뢰성에 상당한 영향을 미쳤다. 도심지 도심지 터널공사에서 지반함몰 사고는 TBM 시공관리기술의 문제점을 제기하는 계기가 되었으며, 지반보강공사와 주변주택에 대한 보상 등으로 인한 민원으로 터널공사에 심각한 지장을 초래하게 되었다.

[그림 7] 도쿄외곽고속도로 TBM 터널 공사중 지반함몰 사고(도쿄, 2020)



[그림 8] 지반 함몰과 붕락 메커니즘



■ 도심지 TBM 터널에서의 지반함몰 및 지반공동 발생 문제
 쉴드 TBM 터널공사에서는 지반을 굴진하면서 발생하는 다양한 굴진 데이터로부터 시공관리를 진행하게 되며, 일정구간을 굴진한 후 커터헤드 교환 및 수리를 위한 정지(CHI, Cutter Head Intervention)를 반복하게 된다. 특히 대단면 쉴드 TBM의 경우 굴진데이터 및 배토량 관리에 대한 경험치가 부족하여 과굴착에 대한 이상 여부를 관리하기가 어렵고, 정지구간에서의 장비와 지표면에서의 안정여부(침하 및 함몰 발생)를 지속적으로 확인하도록 해야 한다.

■ TBM 터널공사에서의 굴진관리 및 시공관리의 중요성
 본 지반함몰 사고는 쉴드 TBM 굴진시 지층특성이 변화하는 구간에서 야간 정지 후 쉴드 장비의 재굴진 중에 과굴착으로 인한 주변 지반의 이완과 굴뚝 모양으로 확대되어 지표면에 함몰과 공동이 발생한 것으로, 쉴드 TBM 터널시공시에 굴진데이터 관리, 배토량 관리 및 TBM 정지 구간에서의 안전관리 등의 중요성을 확인할 수 있다. 또한 공사구간에 대한 지반의 분포 특성과 거동 특성을 상세히 정확히 파악하도록 해야 하며, TBM 굴진시 이를 반영하여 품질관리에 활용하도록 해야 한다.

■ 철저한 사고 원인 조사와 재발방지 대책 수립
 본 지반함몰 사고가 발생한 직후 국토교통성을 중심으로 사고조사위원회를 구성하여 지반조사 및 TBM 시공자료 분석을 통한 주요 사고원인과 발생 메커니즘을 규명하고, 지반보강 및 재발방지 대책을 제시하였다. 지반보강대책으로는 지반구간과 주변영향 구간에 대하여 고압분사교반공법을 적용하여 지반을 보강하고, 주변 영향구간에 대한 상세조사를 통하여 보상대책구역을 선정하여 보상을 실시하였으며, TBM 터널공사에서의 재발방지대책 및 안전관리대책을 수립하고 이를 지역 주민들에게 공지하도록 함으로써 시스템을 개선하였다.

■ TBM 터널공사 지반함몰 사고와 교훈
 본 지반함몰 및 공동발생 사고는 일본에서의 도심지 터널공사에서의 안전관리, TBM 터널공사에서의 굴진 및 배토관리 등 도심지 터널공사에 대한 제반 문제점을 확인할 수 있는 계기가 되었다. 특히 국토교통성 사고조사위원회 등을 중심으로 1년 이상의 시간에 걸쳐 심도 깊은 논의와 분석을 진행하여 본 사고에서 사고원인 규명과 재발방지대책 등을 수립하였다. 또한 일본 도심지 TBM 터널공사에서의 시공관리 및 안전관리시스템을 재확인하는 계기가 되었다.

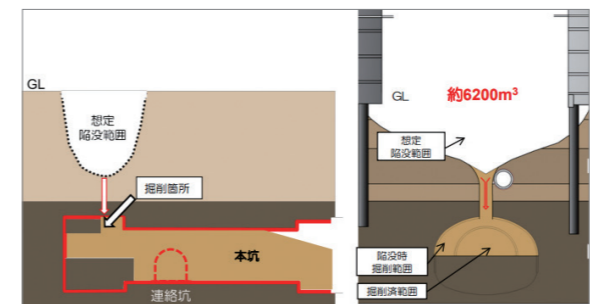
5. 후쿠오카 지하철 대단면 NATM 터널 붕락사고와 교훈

후쿠오카시 지하철 나나쿠마선 연장공사 현장에서 2016년 11월 8일 5시15분경 하카타역 앞 교차로 부근 도로 포장면에 균열이 발생하고, 이후 5시 20분경 도로 남쪽이 함몰, 5시 30분경 도로 북쪽이 함몰, 7시 20분경 도로 중앙부가 함몰되기에 이르렀다. 지하철 공사현장에서는 11월 8일 0시 40분경부터 지보공 103기 부근 굴착을 시작했으며 4시 25분경 연속적인 부분 붕락을, 4시 50분경에는 막장천단에서 이상출수를 관측하여 5시 00분경 작업원 9명 전원의 지상 대피를 완료, 5시 10분경 차량 등의 진입금지 조치가 완료된 바 있었다.

[그림 9] 후쿠오카 지하철 NATM 터널 붕락사고(일본, 2016)



[그림 10] 터널붕락 및 도로함몰 사고 개요도



■ 대단면 터널에서의 지질 및 지하수 리스크
 본 현장에서는 시공 중에 설계상 예측한 지질 및 지반조건과 다른 지질 및 지하수 조건에 대한 기술적 대책을 수립하여 반영하였으나 대규모 터널 붕락사고가 시공 중에 발생하여 도로함몰에 이르게 되었다. 사고 원인조사를 통하여 지질 및 지하수에 대한 원인과 설계 시공에 관한 원인을 10가지로 분석하고, 특히 암토피고가 작은 풍화암층과 미

고결 대수 모래층에서 선진도갱 굴착에 의한 영향으로 천단부에 유리가 형성되어 급격히 토사와 지하수가 터널내로 유입되면서 붕락이 발생한 것으로 분석되었다.

■ 대단면 NATM 터널에서의 보조공법 시공
 본 현장에서는 암토피고를 확보하기 위한 터널단면 변경 및 지반특성을 반영한 분할굴착 변경 및 보조공법 변경 등 보다 안전한 축으로 설계를 변경하여 시공하였으나, 결과적으로는 붕괴사고에 이르게 되었다. 본 현장과 같은 지반불량 구간에서는 주지보에 추가적으로 시공되는 보조공법(강관보강그라우팅)의 경우 지보성능 확인 등에 대한 품질 및 시공관리가 무엇보다 중요하다는 것을 알 수 있다. 따라서 보조공법을 적용하기 위해서는 터널주변 지반의 특성을 파악하고 이에 적합한 보조공법을 선정하고 적용하도록 하며, 반드시 시험시공을 통하여 그 적정성을 검증하여야만 한다.

■ 사고 원인 조사와 복구대책 수립
 주요 복구방안으로 사고구간에 대한 지상 그라우팅에 의한 지반개량을 확실하게 실시하고, 터널 내에서는 붕락된 터널구간을 완전히 토사로 채우고 지보벽체를 설치한 후 수발공을 설치하여 지하수위를 제어하도록 하였다. 또한 터널주변 지반을 그라우팅하여 인공지반을 형성한 후 NATM 공법으로 재굴착하여 최종적으로 복구공사를 무사히 마칠 수 있었다.

■ 도심지 대단면 NATM 터널 붕락사고와 교훈
 본 붕락사고는 도심지 지하철 공사에서의 지질 리스크 관리문제, NATM 터널공사에서의 보조공법 시공에 대한 제반 문제점을 확인할 수 있는 계기가 되었다. 특히 후쿠오카 당국 및 사고조사 위원회 등을 중심으로 심도 깊은 논의와 검토를 진행하여 본 붕괴사고에서의 사고원인 규명과 재발방지 대책 등을 수립하여 일본 도심지 NATM 터널공사에서의 안전시공관리시스템이 개선되었다.

6. 상하이 메트로 TBM 하저터널 붕락사고와 교훈

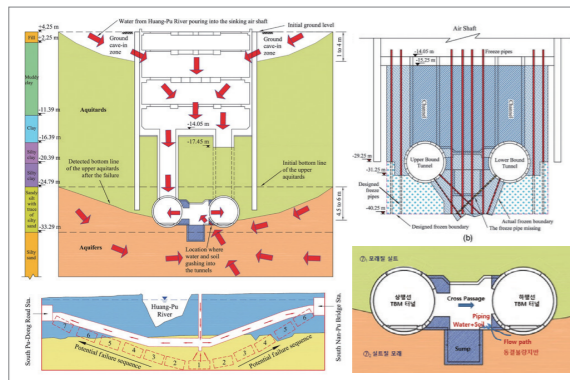
2003년 상하이 지하철 4호선의 사고는 중국 지하철 역사상 가장 심각한 사고 중 하나였다. 이는 인공지반 동결공법에 의해 굴착된 피난 연결통로의 일차적인 파괴를 포함하고, 이후에 대규모의 물과 토사의 침투, 엄청난 지반침하, 기존 구조물의 급속한 침하, 황푸 강을 따라 인접한 제방의 붕괴, 부지의 홍수, 그리고 건물과 지하철의 붕괴를 포함한다.

터널 사고는 모래층 내에서 피난연락갱의 파괴가 직접적인 원인이었다. 처음에는 침투수가 동결지반을 무너뜨리고 나서 물과 토사가 피난연락갱과 터널 내로 쏟아져 들어왔다. 대규모 지반붕괴의 결과로 지표면은 4m 정도까지 침하했고 기존 구조물들은 손상되었다.

[그림 11] 상하이 메트로 TBM 터널 붕락사고(중국 상하이, 2003)



[그림 12] 터널붕락 및 도로함몰 사고 개요도



■ 연약지반에서의 동결공법과 리스크

본 현장에서는 연약지반의 하저구간으로 피난연락갱 시공 시 지반개량 효과를 증진하기 위해 인공동결공법을 적용

하였다. 하지만 설계보다 작은 동결심도와 동결파이프 시공으로 피난연락갱 주변 지반보강의 상태가 양호하지 않았으며, 특히 하절기에 냉동장치 이상으로 여러 시간 동결지반의 온도가 상승하는 원인을 제공하게 되었다. 특히 사고가 발생한 지층은 실트질 모래층의 대수층으로 액상화가 발생하기 쉬운 지층으로서 동결지반의 결함으로 쉽게 지하수가 침투된 것으로 분석되었다.

■ TBM 터널에서의 피난연락갱 시공 리스크

본 사고는 TBM 공법으로 시공된 상하행의 본선터널을 연결하는 피난연락갱 구간에서 발생하였다. 특히 연약지반 구간에 NATM 공법으로 시공되는 피난연락갱은 시공 리스크가 가장 큰 취약한 구간이라 할 수 있다. 일반적으로 피난연락갱 주변 연약지반을 개량하기 위한 지반 보강그라우팅 또는 인공동결공법이 시공 전후에 수행되지만, 연약지반의 개량효과를 공학적으로 확인하고 검증하는 것이 필수이다.

■ 사고 원인 조사와 복구대책 수립

사고 원인은 피난연락갱 주변지반의 동결상태 불량으로 인한 모래층에서의 파이핑(piping)으로 물과 토사가 터널 내로 급격히 유입되고 주변 지반이 유실되었으며, 이후 세그먼트 라이닝 파괴와 지상도로 함몰에 따라 건물붕괴에 이르게 된 것으로 파악되었다. 복구 방안으로는 지하연속체 공법과 JSP(Jumbo Special Pile)공법을 적용하여 흙막이 굴착공사 후 손상된 구조물을 제거한 후 개착터널을 시공하는 방법이 적용되었다.

■ 하저 TBM 터널 붕락사고와 교훈

본 사고는 TBM 공사의 연약지반에서의 지질 리스크 문제, 피난연락갱 공사에서의 인공동결공법의 품질관리 문제점 등을 확인할 수 있었고, 특히 지하터널공사에서의 설계변경 절차 및 시공관리 방법 등 건설공사 관리상의 제반 문제점을 확인할 수 있는 계기가 되었다.

7. 호주 Forrestfield 공항철도 TBM 터널 사고와 교훈

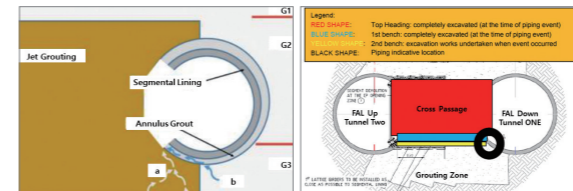
2018년 9월 22일 토요일 오전 11시 45분 경, 피난연락갱 (Cross passage) Dundas와 제터널 라이닝 링인버트 사이의 경계에서 누수(leak)가 발생했다. 누수는 Forrestfield 역에서 북쪽으로 약 200m 떨어진 피난연락갱 Dundas(CP12) 굴착과정에서 발생했다. 지하수 유입을 막기 위해 즉각적인 노력을 기울였지만, 상당한 수압으로 인해 유입량은 초당 약 50리터로 증가했고 그 결과 200m³ 이상의 모래와 토사가 터널로 유입되었다.

9월 23일 일요일 아침, Dundas 도로에 인접한 지표면에 싱크홀이 형성되었다. Dundas 도로의 일부 구간은 폐쇄되었고, 예방 조치로 두 TBM이 모두 중단되었다. 그날 늦게 인접한 TBM 터널 주변 인버트에 그라우트를 주입하기 시작했고, 며칠 후 유입량이 크게 감소했으며, 지하수 유입은 10월 3일 수요일에 완전히 멈추게 되었다. 지하수의 압력과 관련 하중으로 인해 피난연락갱 지점 근처에서 약 16개의 터널 링 약 26m구간이 변형되었다.

[그림 13] Forrestfield 공항철도 TBM 터널 붕락사고(호주 Perth, 2018)



[그림 14] 지하수 유입을 일으킨 경우 Flow Path



■ TBM 터널에서의 지반그라우팅 리스크

본 TBM 터널구간의 피난연락갱 시공 시 지반개량 효과를 증진하기 위하여 TBM 굴진전에 제트 그라우팅(jet grout-

ing)을 적용하였으며, TBM 굴진 완료 후 피난연락갱 굴착 전에 피난연락갱 주변에 인공지반동결공법(artificial ground freezing)을 적용하였다. 사고가 발생한 구간은 하부에 모래층의 대수층이 분포하고 있어 피난연락갱 굴착 시 피난연락갱 주변 지반 그라우트체의 결함과 갭을 통하여 지하수가 터널 내부로 급격하게 침투된 것으로 분석되었다.

■ TBM 터널에서의 피난연락갱 시공 리스크

본 사고는 TBM 공법으로 시공된 상하행의 본선터널을 연결하는 피난연락갱 구간에서 발생하였다. 본 현장에서는 피난연락갱 주변 지반을 개량하고 차수성을 확보하기 위하여 지반 보강그라우팅과 인공동결공법이 적용되었지만, 라이닝과 지반 그라우트체의 갭, 지반 그라우트체의 결함, 배면 그라우트의 결함 등으로 복합적인 문제가 생기면서 침수 사고로 이어진 것으로 분석되었다.

■ 사고 원인 조사와 복구 방안 수립

사고 원인은 피난연락갱 주변 지반의 갭(gap)과 내부 결함(defect)으로 인한 하부 모래층에서의 파이핑(piping)으로 물과 토사가 터널 내로 급격히 유입되고 주변 지반이 유실됨에 따라 지상도로 함몰에 이르게 된 것으로 파악되었다. 복구 방안으로는 터널을 재시공하지 않고 손상된 라이닝을 보강하는 방안을 채택하였다. 보강공법으로는 손상된 라이닝을 절삭하여 강재(SGI) 라이닝을 설치하도록 하였으며, 화재 등에 대비하기 위하여 강재(SGI) 표면에 스프레이를 타설하였다.

■ TBM 터널 사고와 교훈

본 사고는 토사지반의 TBM 터널에서 배면 그라우팅 품질관리, 피난연락갱 구간의 지반그라우팅 품질관리, 피난연락갱 주변 지반에 대한 지반동결공법의 시공관리 그리고 NATM으로 굴착되는 피난연락갱의 시공관리 상의 문제점 등을 확인할 수 있었고, 특히 TBM 터널공사에서의 설계변경 절차 및 시공관리 방법 등의 건설공사의 관리상의 제반 문제점을 확인할 수 있는 계기가 되었다.

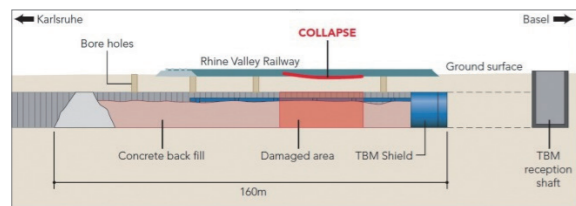
8. 독일 Rastatt TBM 철도터널 붕락 사고와 교훈

2017년 8월 12일 오전 11시경 터널 공사현장의 센서는 터널 위에 있는 기존 노선의 선로가 침하하고 있음을 나타냈다. 노선을 따라 설치된 신호가 위험으로 나타나 모든 열차는 자동으로 운행이 중단되었다. 아래 그림에서 보는 바와 같이 약 6~8m 길이의 선로구간에서 0.5m 정도 함몰되었다. 이 구간의 터널 토피고는 4~5m로 터널의 길이에 걸쳐 지반을 -33°C의 냉각액으로 동결하여 터널을 안정시킨 상태였다. 터널은 완전히 얼어붙은 재료를 통해 205m의 길이에 걸쳐 작동하도록 시공되었다. 상부 지반 및 궤도 함몰 직후 과도한 지하수 유출로 인해 처음에는 터널에 접근할 수 없었으며, 터널 붕락의 돌파가 임박한 것으로 추정되었다.

[그림 15] Rastatt 철도 TBM 터널 사고(독일 Rastatt, 2017)



[그림 16] 터널 붕괴 및 레일 함몰 현황도



■ TBM 통과구간에서의 지반동결 리스크

본 TBM 터널구간은 기존 철도하부를 저토피로 통과하는 구간으로 TBM 굴진공사 지반개량 효과를 증진하기 위하여 TBM 굴진 전 기존 철도하부 지반에 지반동결공법을 적용하였다. 사고가 발생한 구간은 하부에 모래층의 대수층이 분포하고 있어 세그먼트 라이닝 배면 그라우팅과의 겹을 통하여 지하수가 터널 내부로 급격하게 침투된 것으로 분석되었다.

■ 저토피 철도하부통과구간에 터널 리스크

본 사고는 기존 철도하부를 TBM 공법으로 저토피 터널로 통과하는 구간에서 발생하였다. 특히 기존 열차가 운행되는 구간에 저토피로 통과하는 것은 상대적으로 시공리스크가 큰 취약한 구간이라 할 수 있다. 본 현장에서는 지반을 개량하고 차수능을 확보하기 위하여 지반동결공법이 적용되었지만, 지속적인 열차하중과 주변 지반 온도상승으로 동결체가 약화되고 폭우로 인한 지하수위 상승으로 라이닝 배면으로 지하수가 유입되고, 터널 주변 지반이 이완되고 이완영역이 급격히 확대되면서 지반함몰이 발생한 것으로 판단되었다.

■ 사고 원인 조사와 복구 방안 수립

사고는 TBM 막장 후방의 세그먼트 라이닝 설치구간에서 발생한 것으로, 지반동결체의 내부 결함(defect)과 라이닝 배면의 갭(gap)으로 인한 모래층에서의 파이핑(piping)으로 지하수와 토사가 터널 내로 급격히 유입되고 주변 지반이 유실됨에 따라 지반 함몰과 궤도 손상에 이르게 된 것으로 파악되었다. 긴급복구로는 손상·붕락구간을 콘크리트로 채우고, 콘크리트 플러그를 설치하여 손상부를 차단하였으며, 상부에 콘크리트 슬라브를 시공하여 기존 철도운행을 재개하도록 조치하였다. 복구 방안으로는 TBM 터널과 TBM 장비를 포기하고 붕락 및 영향구간에 대한 개착박스 터널로 재시공하는 방안을 채택하였다.

■ TBM 터널 사고와 교훈

본 사고는 토사지반에 지반동결공법의 시공관리, TBM 터널에서 배면 그라우팅 품질관리 그리고 동결지반을 슬러리 타입의 TBM 공법으로 굴진되는 시공관리 문제점을 확인할 수 있었고, 특히 기존 철도하부 저토피 구간 터널공사에서의 설계변경 절차 및 시공관리 방법 등의 건설공사 관리상의 제반 문제점을 확인할 수 있는 계기가 되었다.

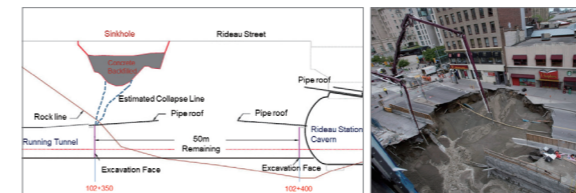
9. 캐나다 오타와 LRT 터널 붕락 및 싱크홀 사고와 교훈

2016년 6월 8일 오전 10시 30분경 Ottawa 시내 Sussex 드라이브와 교차하는 Lideau 스트리트에 대형 싱크홀이 발생하였다. 이 싱크홀은 Lideau 스트리트의 여러 차선의 도로를 붕괴시켰으며, Lideau 스트리트에 주차된 밴과 근처의 신호등이 싱크홀에 가라앉았다. 또한 싱크홀로 수도관이 파손되고 가스관이 새어 인근 건물 여러 곳이 곳에서 피해가 발생했다. 다행히 부상자는 보고되지 않았지만, 주변의 몇몇 건물들은 물, 전기, 가스가 없는 상태로 남겨졌다. 싱크홀은 국내외 언론에 의해 광범위하게 보도되었다. 싱크홀은 Ottawa LRT의 도심지 터널공사 구간에서 발생했으며, 그 당시 작업자들은 지하 Lideau 지하 정거장에서 작업을 수행하고 있었다. 싱크홀의 결과로 터널은 붕괴되었고 싱크홀 발생지점에서 수백 미터 떨어진 곳까지 차단되었으며, 싱크홀로 인해 지하 터널공사 진행이 상당한 영향을 받았다. 싱크홀이 발생했을 당시 지하터널은 거의 완성되었으며, 약 2.5km 길이의 터널 중 50m 정도만 남아 있는 상태였다.

[그림 17] Ottawa LRT 터널 싱크홀 사고 (캐나다 Ottawa, 2016)



[그림 18] 터널 붕괴 및 레일 함몰 현황도



■ NATM 터널 복합지반에서의 지반 리스크

NATM 터널구간은 석회암층에 발달한 빙적토 계곡(glacial valley)구간으로 조사 및 설계 당시부터 지반 리스크(georisk)를 확인하고 이에 대한 대책을 반영하여 파이프 루프

(pipe roof) 보강 등을 적용하여 시공하였다. 본 사고가 발생한 구간은 비교적 양호한 석회암에서 연약 토사층인 빙적토층으로 변화하는 지질변화 구간으로, 터널 굴착에 따른 지반이완이 진행됨에 따라 천단부 보강 파이프 사이로 지하수가 터널 내부로 급격하게 침투하였으며, 상부 토사층이 급격히 약화되고 지반이완이 확대되어 지상도로에 이르러 싱크홀이 발생한 것으로 분석되었다.

■ NATM 터널 사고에서의 지반 리스크의 분담과 책임

본 터널 사고는 사고발생 직후 도로하부에 있는 400mm 상수도관이 파열되어 도로가 완전히 침수되는 상황으로 발전하였다. 이에 상수도관의 커풀링에서의 누수가 싱크홀 사고의 주요한 원인이 되었다는 주장과 연약 토사구간에서의 터널 시공관리의 부실로 인한 것이라는 주장이 대립되었고, 이는 발주처와 시공자간의 주요 소송쟁점이 되었다. 이후 사고조사위원회의 면밀한 조사와 검토를 통하여 싱크홀 사고원인은 터널 공사와 관련이 있음을 확인하였다.

■ NATM 터널 싱크홀 사고 원인 조사와 복구 방안 수립

사고 원인은 연약토사층 구간의 본선터널 천단부 파이프 루프 보강구간으로 지하수가 급격히 물과 토사가 터널 내로 급격히 유입되고 주변 지반이 유실됨에 따라 지상도로 함몰에 이르게 되어 싱크홀이 발생한 것으로 파악되었다. 복구 방안으로는 싱크홀 구간은 콘크리트 채움을 실시하고, 이후 지상보강 그라우팅으로 터널 붕락구간 및 주변 지반을 보강하는 방안을 채택하였다.

■ NATM 터널 싱크홀 사고와 교훈

본 사고는 복합지반의 암반구간과 토사지반의 경계부 NATM 터널에서 파이프 루프공법의 시공관리, 본선터널과 정거장 터널의 관통부 시공관리, 터널 상부의 상수도관 등에 대한 지장물관리 상의 문제점 등을 확인할 수 있었고, 특히 NATM 터널공사에서의 지질 리스크 대응 및 시공관리 등 문제점을 확인할 수 있었다.

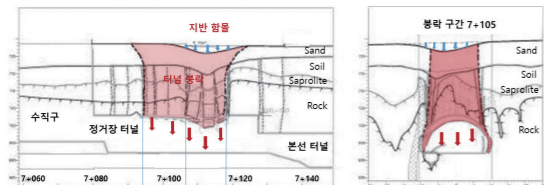
10. 브라질 상파울루 메트로 NATM 터널 붕락 사고와 교훈

2007년 1월 12일 오후 2시경 브라질 상파울루 메트로 공사 중 터널이 붕괴되어 7명의 사망자가 발생하는 대형사고가 발생하였다. 본 사고는 브라질 상파울루 도심지 터널공사 공사에 적용되어 왔던 NATM 터널공사에 심각한 영향을 미쳤다. 본 사고를 통해 NATM 터널공사에서 굴착 및 보강방법과 지질 및 지반 리스크 관리상에 여러 가지 문제점이 확인되었다. 특히 도심지 구간을 통과하는 NATM 터널에서의 터널 및 수직구 붕괴사고는 조사, 설계 및 시공상의 기술적 문제점을 제기하는 계기가 되었으며, 터널 붕괴사고 원인 및 발생 메커니즘을 규명하기 위하여 사고조사위원회를 구성하여 철저한 조사를 진행하게 되었다. Pinheiros 정거장 터널사고는 동측 터널에서 굴착 작업이 거의 완료되었을 때, 정거장 터널의 굴착 끝지점에서 수직구 방향으로 벤치 굴착 작업을 수행하는 동안 발생했다. 첫 번째 붕괴 징후는 약 14시 30분에 터널 내부에서 발생했으며, 14시 54분에 터널 붕락은 Capri 거리에 큰 지반함몰 형태로 확대되었다.

[그림 19] 상파울루 메트로 NATM 터널 붕락 사고 (브라질 상파울루, 2007)



[그림 20] 터널 붕괴 및 레일 함몰 현황도



■ NATM 터널 층상/풍화암반에서의 지질 리스크

사고 원인은 엽리와 차별풍화가 발달한 흑운모 편마암구간에서 정거장 터널굴착 중 측벽의 연약층이 파괴되어 천

단부의 암반 능선(rock ridge)이 붕락되면서 지상으로 함몰에 이르게 되었으며, 이후 수직구까지 붕괴된 것으로 파악되었다. 따라서 지질변화 구간에서 막장뿐만 아니라 주변 터널의 암반 상태를 확인하는 것이 무엇보다 중요하므로 지질상태를 면밀히 관찰하고 이에 대하여 보다 적극적으로 대응하여야만 한다.

■ NATM 터널 사고에서의 계약 방식과 리스크의 책임

본 터널 사고는 지질 및 암반 조건이 매우 복잡한 구간에서 발생한 붕락사고로 7명의 사망자가 발생하였고, 주변 도로가 함몰되고 건물이 손상되는 상황으로 발전하였다. 이후 사고조사 위원회의 면밀한 조사와 검토를 통하여 설계 및 시공의 총체적인 시스템의 문제점이 확인되었지만 주요 사고 원인은 지질 리스크로 결론지었다.

■ NATM 터널 붕락사고 원인조사와 복구 방안 수립

사고 원인은 설계 당시 확인하지 못한 지질특성(차별풍화의 암반능선 구조, 측벽 뒤의 열화된 흑운모층 등)으로 시공 중 측벽의 연약층이 파괴되면서 천단부의 암반 능선(rock ridge)이 붕락되면서 지상으로 함몰에 이르게 되었으며, 수직구까지 붕괴된 것으로 파악되었다. 복구 방안으로는 붕괴 구간에 가시설 공법을 적용하여 단계별로 재굴착하고, 개착 박스 구조물을 설치하는 방안을 채택하였다.

■ NATM 터널 붕락사고와 교훈

본 사고는 터널 공사에서의 지질 리스크 관리가 얼마나 중요한지를 보여주는 대표적인 붕괴사례로, 사고 발생 이후 대처 및 긴급 대책방안 수행 등에 심각한 문제까지 확인되었고, 부적절한 대응으로 인하여 대형 인명사고로 이어졌다는 점이다. 특히 철저한 조사 결과를 바탕으로 사고 발생 시 대응시나리오 등에 대한 긴급구난계획(contingency plan) 등과 같은 안전 관리가 대폭 강화되는 계기가 되었으며, 브라질 지하터널공사에서의 안전 관리 및 리스크 관리시스템이 근본적으로 개선되었다.

11. 국내 도심지 터널 붕락 및 싱크홀 사고와 교훈

1) 서울시 지하철 TBM 터널 싱크홀 사고

2014년 8월 5일 석촌지하차도에서 폭 2.5m, 깊이 5m, 연장 8m의 싱크홀이 발생했다. 또한 13일에도 석촌지하차도 중심부 도로 밑에 폭 5~8m, 깊이 4~5m, 연장 70m의 공동이 추가로 발견됐다.

이후 14일 지하철 9호선 3단계 건설을 위해 지하차도 하부를 통과하는 실드 터널 공사가 싱크홀 발생 원인으로 추정되었다. 본 사고는 도심지 터널공사의 지하안전영향평가를 의무화하는 계기가 되었다.

[그림 21] 서울시 지하철 TBM 터널 싱크홀 사고 (2014, 서울)



2) 인천 도시철도 NATM 터널 붕락 및 싱크홀 사고

2012년 2월 18일 인천도시철도 2호선 201공구 지점에서 40m 검단사거리부근의 6차선도로 한복판이 무너져 내리는 싱크홀 사고가 발생했다. 이번 사고는 지하철 공사 중 대형 상수도관 파열로 누수현상이 발생해 지반이 약해져 붕괴된 것으로 파악했다.

[그림 22] 인천 도시철도 NATM 터널 붕락 및 싱크홀 사고 (2012, 인천)



3) 별내선 지하철 NATM 터널 붕락 및 싱크홀 사고

2020년 8월 26일 구리시 교문동의 한 아파트 인근 도로가 내려앉으며 직경 16m, 깊이 21m 대형 싱크홀이 발생했다.

싱크홀 사고 발생 원인은 별내선 터널 공사로, 본 공사는 2015년에 착수해 2024년 12월 완공 예정으로 공사를 진행 중이었으나, 별내선 3공구 지하터널(1~3터널) 구간이 포함된 도로에 대형 싱크홀 사고가 발생한 것이다.

[그림 23] 별내선 지하철 NATM 터널 붕락 및 싱크홀 사고 (2020, 구리)



4) 부산 지하도로 NATM 터널 붕락사고

2023년 2월 25일 0시 40분경 부산 동래구 미남교차로 근처 지하 60m 지점에 있는 만덕~센텀 대심도 터널 공사 현장 천장에서 토사 750m³가 쏟아졌다. 당시 이로 인한 인명 피해는 없었다.

토사 유출에 따른 영향 범위가 반경 10m 이내로 분석됐고, 도시철도 3호선 터널과 32m가량 떨어져 있어 영향이 없을 것으로 평가되었다. 이후 상세한 사고 원인 조사를 통하여 보강공사가 진행되었다.

[그림 24] 부산 지하도로 NATM 터널 붕락사고 (2023, 부산)



요약 Summary 국내외 주요 도심지 터널 붕괴 사고 사례 - 주요 특징 정리 요약

구분	내용	비고	
1	터널	영국 Heathrow 급행철도 터널 / NATM 공법	
	특징	영국 최초의 대규모 NATM 공법 적용현장으로 터널 굴착중	
	원인	지반 보강그라우팅 부실로 터널 붕괴 및 지반침하 발생	
2	터널	싱가포르 Nicoll Highway MRT 터널 / 개착 공법	
	특징	연약지반상의 대규모 수직구 및 가시설 공사중	
	원인	설계 오류 및 시공관리 부실로 가시설 및 도로 완전붕괴	
3	터널	타이완 가오슝 MRT 터널 / TBM 공법	
	특징	TBM 터널 피난연락경(Cross Passage) NATM 굴착 리스크	
	원인	피난연락경 NATM 굴착중 파이핑(Piping)발생후 붕괴	
4	터널	도쿄 대단면 도로터널 / TBM 공법	
	특징	도심지 대심도 구간(40m 이하)에서의 대단면 TBM 터널굴진	
	원인	TBM 정지시 지반이완 및 도로까지 연결되는 싱크홀 형성	
5	터널	후쿠오카 대단면 지하철 터널 / NATM 공법	
	특징	정거장 터널구간에서의 대단면 NATM 분할 굴착	
	원인	암토피고 부족으로 지반이완 및 토사 유입으로 터널 붕괴	
6	터널	상하이 메트로 하저터널 / TBM 공법	
	특징	하저 연약지반구간 TBM 터널로 굴진후 피난연락경 굴진중	
	원인	피난연락경 NATM 굴착중 파이핑(Piping)발생후 터널 붕괴	
7	터널	호주 Forestfield 공항철도 터널 / TBM 공법	
	특징	TBM 본선타널 굴진후 피난연락경 굴진중	
	원인	피난연락경 NATM 굴착중 토사 및 지하수 유입과 지반함몰	
8	터널	독일 Rastatt 철도터널 / TBM 공법	
	특징	철도하부 TBM 통과구간에 대한 지반동결공법 적용	
	원인	동결지반에 대한 품질관리부실로 철도 및 TBM 장비 함몰	

구분	내용	비고	
9	터널	캐나다 오타와 LRT 터널 / NATM 공법	
	특징	대단면 정거장 터널에서 본선타널 굴착중	
	원인	토사층과 암반층 경계부에서의 터널 붕괴 및 지반함몰	
10	터널	브라질 상파울루 메트로 터널 / NATM 공법	
	특징	대형 수직구에서 정거장 터널 및 본선타널 굴착중	
	원인	지질 리스크로 1차 터널붕괴 및 2차 수직구 붕괴 발생	
11	터널	국내 도심지 지하철 터널 / NATM 공법 및 TBM 터널	
	특징	도심지 지하철 구간 NATM 및 TBM 터널 굴착중	
	원인	지질 및 지반리스크에 의한 붕괴 및 지반함몰(싱크홀) 발생	

■ 제5강을 마치면서 - 도심지 터널 붕괴사고와 교훈

지하터널공사에서의 해외 터널사고 사례를 중심으로 터널 사고의 발생 원인과 그 영향에 대하여 고찰하였다. 터널에서 발생한 다양한 사고 형태와 특성을 검토하고 주요 문제점 분석을 통하여 얻은 요점을 정리하면 다음과 같다. 터널공법은 크게 NATM 공법과 TBM 공법으로 구분되며, NATM 공법과 TBM 공법이 적용된 모든 터널공사에서 터널사고가 꾸준히 발생하고 있다. 최근까지도 NATM 공법과 TBM 공법에서의 사고사례가 보고되고 있으며, 특히 도심지 터널공사에서의 사고가 많이 발생하고 있으며, 상대적으로 그 영향(결과)도 심각한 것으로 확인되었다. 터널사고의 원인은 크게 지질 및 지반 문제, 설계상의 오류와 해석 문제 그리고 시공기술 부족과 관리 문제로 구분할 수 있다. 지질 및 지반 문제는 터널공사의 가장 교유한 문제로 설계 단계에서의 충분한 지반조사와 시공단계의 지질 및 암반평가 작업의 중요성을 확인하여 준다. 또한 설계과정에서의 해석 오류로 인한 잘못된 지보선정과 시공경험이 부족한 기술자의 터널현장 관리가 가장 근본적인

사고원인이라 할 수 있다.

터널사고는 터널 작업자의 피해뿐만 아니라 도심지 터널의 경우 지상인프라에 상당한 손상 그리고 주변 환경에 심각한 영향을 주게 된다. 또한 터널 사고로 인하여 사고수습과 복구로 인한 추가 공사비 증가 및 공기 지연은 매우 심각한 문제로, 일반적으로 터널 사고의 발생 원인에 따라 발주자 뿐만 아니라 시공자(또는 설계자)의 책임 여부와 보험자의 재무적 손실까지 영향을 미친다. 해외에서 발간된 터널 사고조사 보고서상에 터널사고를 방지하기 위한 가장 주요한 방법이 바로 리스크 분석을 통한 리스크 관리(Risk Management)이다. 이는 국제터널협회(ITA)를 중심으로 정량적 리스크 분석기법에 대한 가이드라인을 제시하고 있다. 이는 선제적이면서 적극적인 예방(pro-active) 대책으로 터널공사에 적용되어 운용되고 있으며, 설계 단계에서부터 운영관리 단계까지 프로젝트 모든 단계에서 운용되도록 하고 있다. 🇰🇷