



Shield TBM 터널 공사중 사고/트러블 사례 분석

근간에도 서울지하철 7, 9호선에서 계속적으로 검토·적용되고, 기타 터널링 시공방법들과 함께 적용사례가 증가되는 Shield TBM 터널공법은 천층터널 또는 연약지반 조건에 적합한 공법이지만, 실드장비의 결함, 예상치 못한 지반상태 조우, 부적절한 장비의 선택등의 이유로 시공중에 사고가 종종 발생되고 있다. 본 고에서는 국내 및 해외 일본의 Shield TBM 터널공법의 사고와 관련된 보고서와 시공자료를 토대로 사고사례를 조사하고 사고원인을 분석하였다.

01 서론

2000년도 부산지하철 수명만 하저통과구간을 시초로 하여 국내 시공사례가 증가하는 Shield TBM 공법은 기타 기계화 터널 시공법과 함께 향후 터널 연장의 장대화 추세에 부응되어 국내 활용도가 더욱 높아질 것으로 예상되는 터널 굴착공법이다.

특히 Shield TBM공법은 지반조건이 열악한 얇은 심도의 터널에 적용성이 우수한 공법으로 인식되고 있으나, 부적절한 장비 선정, 터널 시공중 장비결함, 예상치 못한 지반조건 조우등의 문제로 인하여 시공중 사고/트러블 사례가 종종 발생되고 있다.

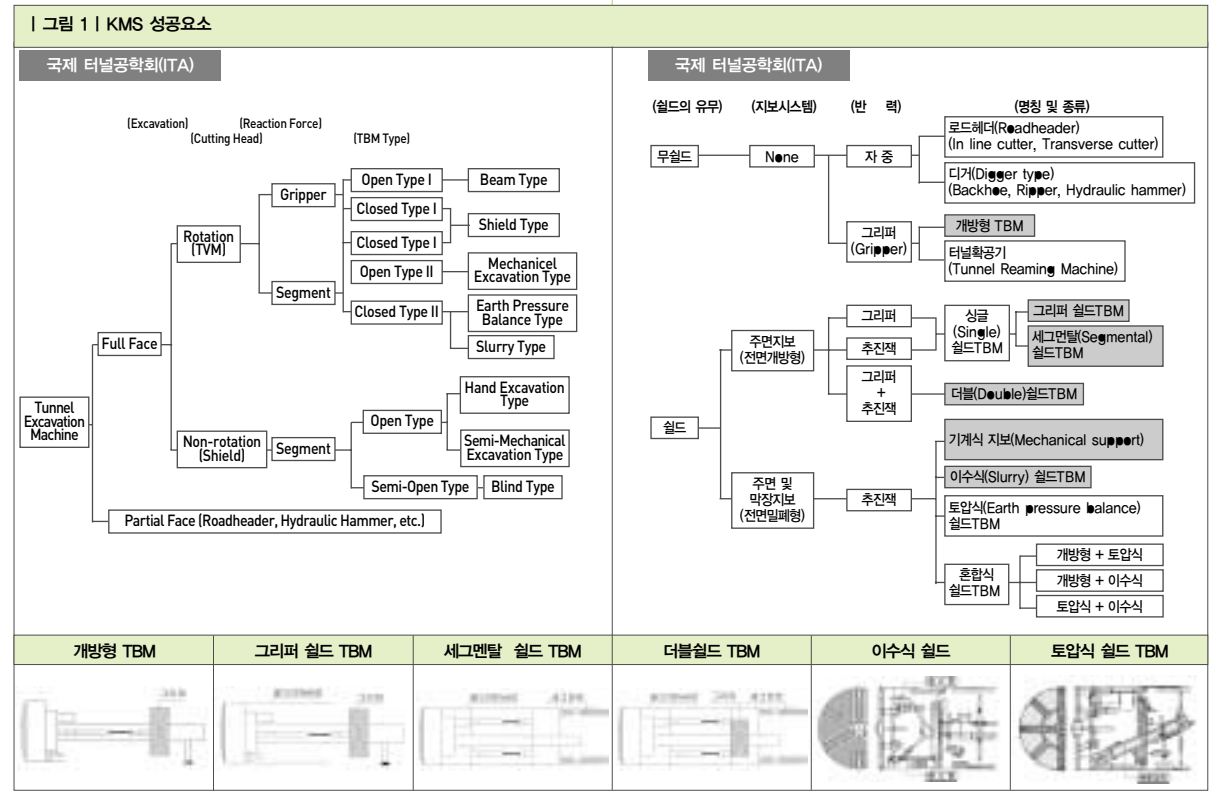
이에 대하여 기계화 시공법에 대한 이해를 돕기 위하여 터널에 적용되는 기계화 굴착공법에 대한 해외 및 국내 분류안을 제고하고, 국내 및 해외 Shield TBM 굴착공법 적용시에 대한 트러블 사례조사를 통하여 국내 Shield TBM굴착공법 적용시 안전시공을 위한 주요한 기초자료로 활용하고자 한다. 조사된 해외

Shield TBM 굴착공법 트러블 사례조사는 Shield TBM 적용사례가 풍부하고, 공사중 사고/트러블에 대한 연구보고 자료가 많은 일본 사례를 중심으로 하였다.

02 터널 기계화 시공법 분류 및 실드 장비별 특성분석

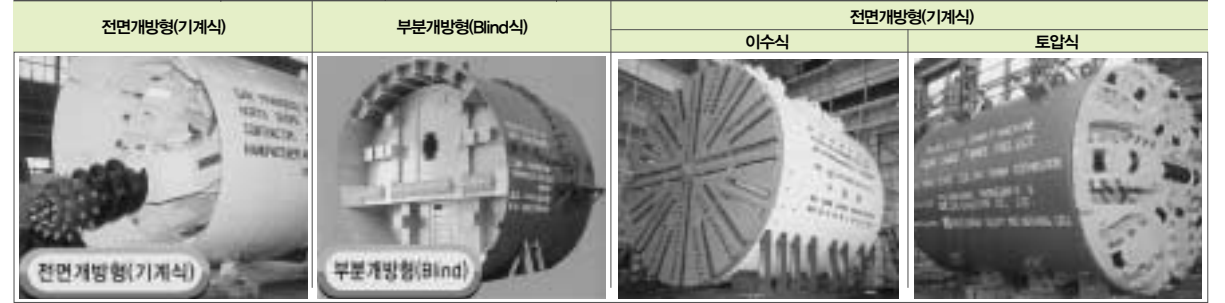
2-1. 터널 기계화 시공법 분류

ITA Working Group No. 14 (Mechanized Tunnelling)에서 규정한 국제적 터널기계화 시공법(TBM) 분류에 대한 정의는 그림 1과 같다. 이는 기계화 시공분야에서 기술선진국이라 할 수 있는 일본, 노르웨이, 독일, 스위스, 오스트리아, 이탈리아 그리고 프랑스등 7개국의 터널협회가 작성 제출한 것을 재작성한 것이며, 국내에서도 기계화 시공장비 명명에 대한 많은 혼돈을 최소화 하고져 (사)한국터널공학회에서 국내 기계화 시공법 분류기준(안)을 선정한다 있다.



| 표 1 | Shield TBM 장비 종류 분류

구분		주요 장비 특성
전면개방형	수굴식(手掘式)	■ 격벽이 없고 막장의 대부분이 개방되어 있는 실드
	반기계식(半機械式)	■ 굴삭형식에 따라 수굴식, 반기계식, 기계식으로 분류
부분개방형 및 밀폐형	기계식(機械式)	■ 막장 자립성이 양호한 지반에 주로 사용
	블라인드식	■ 부분개방형 : 격벽의 일부에 개구면적이 조절되도록 토사반출구를 설치한 실드
밀폐형	이수식	■ 굴삭한 토사를 막장과 격벽간의 컷터 챔버에 반입
	토압식 / 토압식 이토압식	■ 이수나 토압에 의해 막장을 지지하는데 충분한 반력을 작용시켜 막장안정 확보



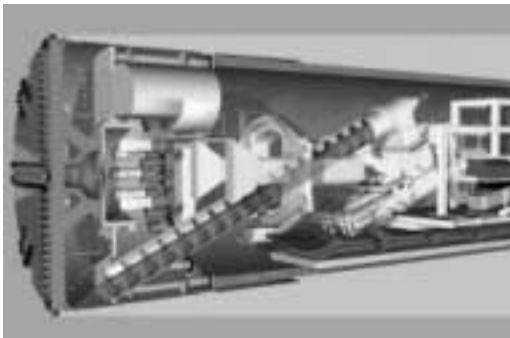
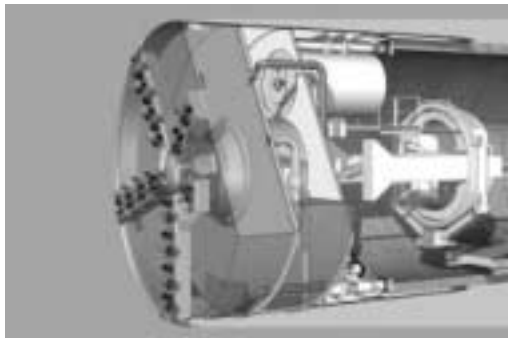
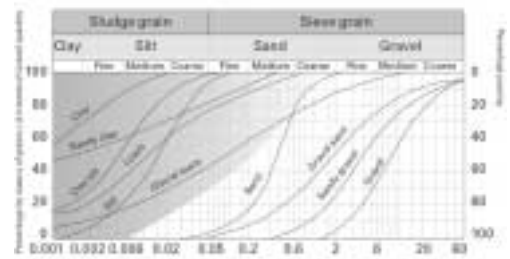
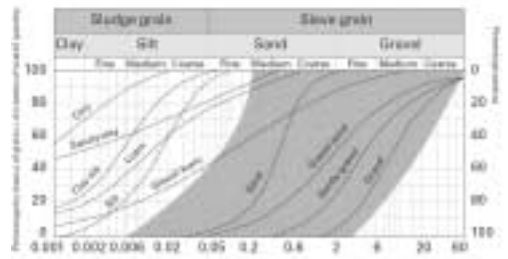
2-2. 실드 장비종류 및 특성분석

일본 터널표준시방서 실드편에 의하면 실드는 막장과 작업실을 분리하는 격벽구조 형식에 의하여 <표 1>과 같이 전면개방형, 부분개방형, 밀폐형의 3종류로 분류된다. 이중 국내 실드터널의 경우 전면개방형 및 부분개방형 실드타입의 적용사례는 없으며, 토압식

(EPB, Earth Pressure Balanced shield) 및 이수식(Slurry Shield)의 적용사례가 대부분이다. EPB 실드의 경우 1970년대 초 일본에서 시작되었으며, 첫 번째 EPB실드는 도쿄에서 사용되었다. 그 이후로 토압식 실드는 Earth-Pressure 실드, Pressure Holding 실드, Slime 실드, Soil Pressure 실드, Confined Soil

실드, Mud Pressure 실드 또는 Muddy Soil 실드등의 많은 이유로 제작되었으며, 지금에 와서 EPB(Earth Pressure Balanced Type)라는 하나의 명칭으로 지칭하였다. EPB 실드는 굴착된 토사가 챔버내에서 지지매개체로 작용하며, 회전면판(Cutting Head)에 부착된 비트에 의해 굴착되어진 지반이 챔버(Chamber) 후방에 설치된 배토장치(Screw Conveyor)에 의해 굴착챔버에서 제거되면서 지반을 굴착하게 된다.

표 2 | EPB 실드와 Slurry 실드의 비교

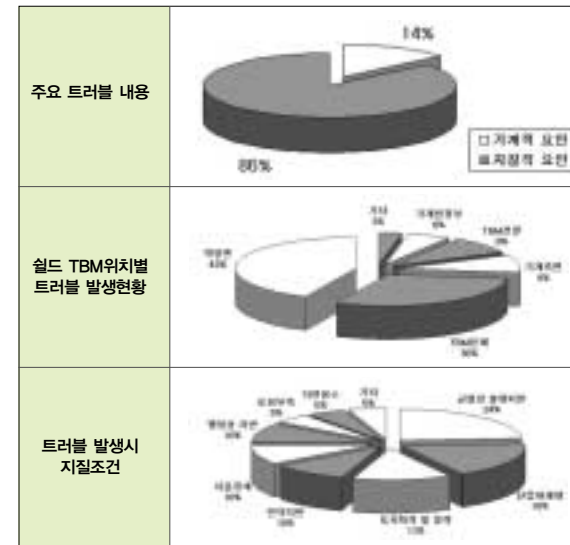
구분	EPB Shield TBM(토압식)	Slurry Shield TBM(이수가압식)
개요도		
공법개요	■ 토압개로 측정된 막장압을 챔버내 채워진 굴착토와 실드 추력으로 대응	■ 챔버내 이수를 가압하여 굴착면에 작용하는 수압 및 토압에 대응
지반조건	 <ul style="list-style-type: none"> ■ 함수비가 높은 연약지반에 적용시 막장압 조절 다소 곤란 ■ 3bar 이하의 저수압에 적용성 우수 	 <ul style="list-style-type: none"> ■ 0.5bar 이하의 저수압 토사지반에 적용시 지반용기 발생 ■ 파쇄대 조우시 이수 이탈 초래
버려처리	<ul style="list-style-type: none"> ■ 컨베이어 및 버력대차로 지상반출 ■ 버력 처리 시간 증가 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 파이프에 의한 유체수송으로 반출 ■ 배기관 폐쇄 및 파열 우려
환경성	■ 버력에 의한 환경문제 없음	■ 이수 발생으로 산업폐기물 발생
작업부지	■ 지상 설비 간단(협소한 작업공간에서 가능)	■ 지상설비 복잡, 이수플랜트 설치
경제성	■ Slurry Type에 비해 저가	■ EPB Type보다 10% 증대
적용사례	■ 서울지하철 704공구, 광주지하철 1호선 분당선(왕십리~선릉간) 등 다수	■ 서울지하철 909공구, 704공구, 00대교 한강 하저 통신구, 부산지하철 230공구 등다수

Slurry 실드의 경우 일본에 많이 분포하고 있는 홍적세 충적층 지반을 굴진하는 사례가 많은 도시터널 굴진시 EPB실드가 체수모래층 굴진이 곤란한 점을 개선하기 위하여 개발된 공법이다. 실드의 앞부분에 칸막이 벽을 설치하여 밀폐된 막장쪽에 이수를 가압하여 밀어 넣는 것으로 막장의 안정성을 확보(막장전방 밀크레이크 형성)하고 그와 동시에 회전 컷터에 의해 절삭한 토사를 이수로 만들어 지상으로 유체수송하는 방법으로 지반을 굴착하게 된다. 이러한 EPB 및 Slurry 실드 장비의 특성을 상호비교하면 (표 2)와 같다.

03 Shield TBM 적용시 주요 트러블 원인 분석

Shield TBM 굴진시 주요 트러블 요인으로는 크게 지질적 트러블 요인과 기계적 트러블 요인으로 구분 할 수 있다. 본 고에서는 Shield TBM 적용시, 가장 중요한 사안이 적용 지반 조건에 상응되는 최적의 장비형식 선정임을 감안하여 지질적요인으로 인해 발생하는 트러블 요인에 대하여 검토하고자 한다.

표 3 | Shield TBM 트러블 사례 현황



04 공사중 사고/트러블 사례 분석

4-1. 사고사례 I (2003. 4 ; 국내)

1) 공사개요

서울시 구로구~영등포 일원 OO 전력구 공사

2) 사고개요

- ① Ø3.5m의 Shield TBM 굴진중 갑작스런 막장내 유입수 증가(최대 1,785m³/일)로 굴진작업 지연
- ② 일평균 2.2m/일의 굴진작업 진행중 약 12m³의 1차붕락 발생 → 응급대책으로서 우레탄 보강그라우팅 실시
- ③ 4일후 약 8m³ 규모의 2-1차 및 약 24m³ 규모의 2-2차 추가 붕괴 발생 → 응급대책으로서 우레탄 및 SGR 충전 그라우팅 실시 및 공사중지 요청

그림 2 | 굴진에 따른 유입수 변화량

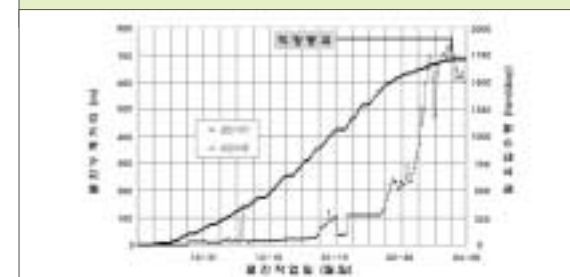


그림 3 | 붕락 개요도

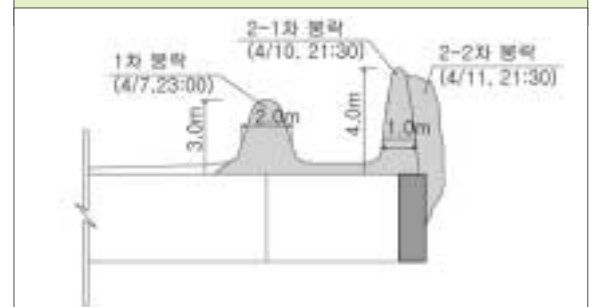
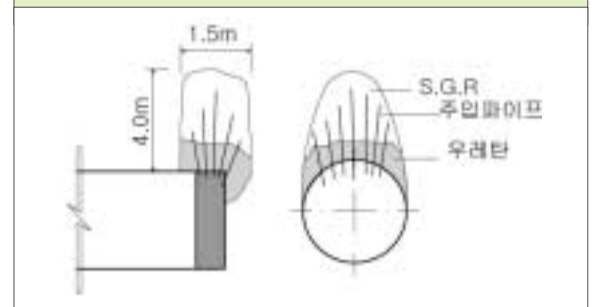


그림 4 | 보강 개요도



3) 사고원인

① 본 지역의 과거 고지형도를 분석한 결과 터널 진행방향 우측에서 좌측으로 유입되는 비교적 큰 하상인 OO천이 위치하고 있어 OO천을 따라 상당히 두텁게 풍화대가 발달되어 있음.

그림 5 | 대상구간 지질도



- ② 설계당시의 지반조사 결과 및 시공중 추가 시추조사를 통하여 본 OO천 통과구간은 풍화암층으로 조사되어 막장 붕락의 위험이 없을 것으로 판단하였으나, 추후 실시된 막장면 선진 수평시추조사에 의하면 막장면에서 15m까지는 거의 완전풍화된 풍화도가 분포하고 그 이후 에도 풍화암층 중간중간에 토사화된 파쇄대가 분포하고 있는 것으로 조사됨.
- ③ 따라서 터널내 유입수는 풍화암층을 굴진하면서 풍화암층내에 발달된 절리면을 따라 심부의 지하수가 유입되는 것으로

추정되며 유입되는 수량의 과다로 Segment 배면의 Back Fill주입재가 굳기전에 지하유입수의 영향으로 뒷채움 주입재 의시멘트 성분이 유실되며 지하유입수는 Segment배면 공극 을 타고 막장내로 유입되는 것으로 추정되었음.

④ 풍화암 구간을 굴진해 가면서 Segment배면으로 유입되는 지하수는 계속적으로 증가되었고 상당량의 유입수는 막장내 로 유입되면서 막장면 풍화암의 절리면이나 파쇄대, 풍화토 지층을 세굴시켜 막 장붕락이 발생된 것으로 판단하였음.

4) 대책방안

(1) 막장면 주변 보강방안

가) 1단계 : 후방 유입수 차단

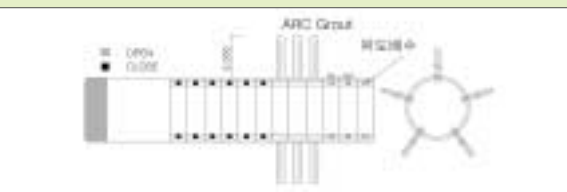
① 보강사유

Segment배면에서 유입되는 유입수 차단. 단, 후방 전구간 차단시 막장면 유출량이 증가될 우려가 있으므로 장비 후 방 3.0~5.0m구간만 차수.

② 보강방법

- Segment 주입홀을 이용하여 공후 5.0m주입관을 설치 하여 ARC그라우팅 실시
- 막장면으로의 유출수량 증가가 관측될 시 차수 후방 Segment 주입구를 일부 열어 유도배수 실시
- ARC 그라우팅(천공경 38mm, 천공길이 5.0m, 천공수 5공/m, 5.0m실시)
- 뒷채움재 : ARC Grout, 자갈+모래

그림 6 | 막장면 주변보강 개요도



나) 2단계 : 막장 전면부 선진보강 그라우팅

① 보강사유

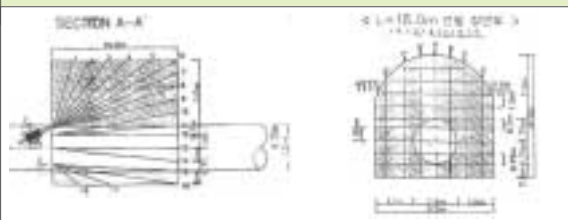
막장전방 지질의 강도저하와 지속적인 지하수 유출로 막장 전방 지반 이완

② 보강방법

- 소형 천공기를 이용 장비내부에서 수평 그라우팅 실시
- 천공경 40.5mm로 15m길이 보강

- 이중관 룯드를 사용하여 물에 대한 희석에 강하고 강도발 현이 큰 ASG그라우팅 실시

그림 7 | 막장 전면 선진보강 그라우팅 개요도



다) 3단계 : 지상에서의 수직보강 그라우팅

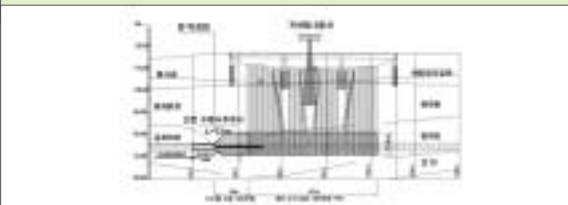
① 보강사유

터널 주변부 지반보강을 위하여 지상에서 수직 그라우팅에 의한 터널주변지반 보강

② 보강방법

- 지상 OO천 하상에서 실시하는 수직보강 그라우팅 공법
- 막장 전면부 선진보강 그라우팅공법과 동일한 ASG그라우팅 보강 적용
- 천공간격 1.0~1.2m

그림 8 | 지상 수직보강 그라우팅 종단도



② 터널 상부 구조물 기초보강

(1) 보강사유

터널노선과 횡단하는 지하철 O호선 교각 무물통 기초 하부 보강으로 구조물 침하 요소 제거

(2) 보강방법

길이 30m의 마이크로 파일 34공 경사보강

그림 9 | 터널 상부구조물 기초 보강 개요도



4-2. 사고사례II (일본)

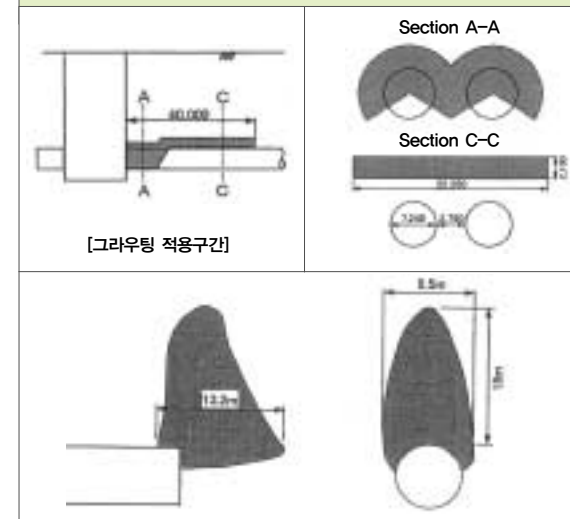
1) 공사개요

전면 개방형 쉴드공법에 의한 도심 단선 병렬 철도터널 건설현장

2) 사고개요

- (1) Shield TBM 굴착계획선 상부 25m내 강도 높은 고결실트와 세사의 호층지반이 분포하며 세사층은 포화상태로 높은 지하수위와 간극수압 유지
- (2) 당초 발진부로부터 전방 80m구간에 약액주입에 의해 터널 외주를 도넛모양으로 그라우팅계획 하였으나, 지반강도가 예측보다 높은 고결실트층 출현으로 인해 그라우팅 범위를 당초의 50%로 축소
- (3) Shield TBM 굴진에 의해 약 38m구간 통과시 막장내 다량의 상부호층세사 토립자 및 지하수가 막장내 유입
- (4) 이로 인하여 지상 도로 함몰

그림 10 | 그라우팅 영역 및 막장면 붕락 개요도



3) 대책방안

- (1) 사고발생 직후 Cutter Face 틈사이 흡주머니 충전으로 지하수 유입 제어
- (2) 추가 지반조사에 의한 이완조사 범위 확인 및 공동발생구간 그라우팅 충전 계획 수립
- (3) 추가 지반조사 결과에 의거하여 약액주입 그라우팅에 의한 보강범위 확장

(4) 전면 밀폐형 Shield TBM으로 장비 개선 및 0.12~0.14MPa의 막장지보압으로 막장안전 확보

4-3. 사고사례III (1990. 1 ; 일본)

1) 공사개요

동북 신칸선 어도정(御徒町)터널 상부 토사붕괴

2) 사고개요

- (1) 동경 태동(台東)구의 JR어도정(御徒町)역 고가교 직하부에서 토사붕괴
- (2) Shield TBM 굴진중 막장면 붕괴방지 및 막장면 유출수 저감을 위한 보조공법으로 압기(壓氣)공법 및 약액주입 공법 적용

그림 11 | 사고 전경

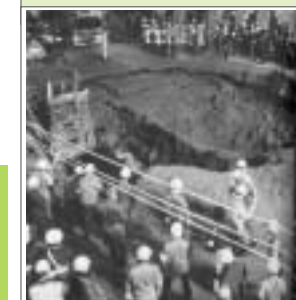
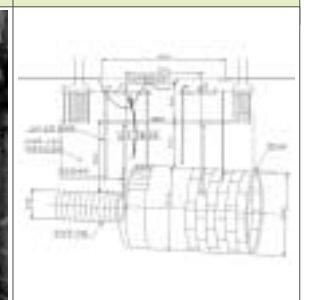


그림 12 | 사고현황도



- (3) 막장내 유출수 저감을 위한 약액주입공법으로는 막장전면에 LW Grouting을 적용하였으나, 부실 약액 주입 시공으로(설계수량의 약 50%만 주입) 막장면 유입수 계속적으로 증가함.
- (4) 이에 따라 압기압을 상승시켰으며(상시 0.1N/mm², 사고시 0.115N/mm²), 이로 인하여 막장전면에서 약 14m정도의 토피층 용기 및 붕괴사고 발생
- (5) 12(중)× 10(횡)m, 깊이 5m정도의 지반함몰이 발생되었으며, 통행중인 차량 4대 함몰 및 13명의 부상자 발생

4-4. 사고사례 IV (1994. 11 ; 일본)

1) 공사개요

치바(千葉)현 선교(船橋)시 동업 고속철도(東葉高速鐵道) 건설현장

2) 사고개요

(1) 주요 지반상태로는 충적사질토층과 홍적사질토층이 혼재된

상태의 지층상태를 보이며, 노선주변 성문천(城門川)의 영향으로 높은 지하수위 분포

- (2) 굴착 완료후 실드장비 해체작업 중, 실드기 스킨플레이트(Skin Plate)와 장비도달 위치의 신설역사와의 지수마감부 위에서 높은 지하수에 따른 고수압으로 인해 토사+지하수가 지수막을 뚫고 유입 및 지표함몰
- (3) 함몰규모는 5.4(중)×4.4(횡)m정도(약 40m³)이며, 이와 동일한 양이 터널내로 유입
- (4) 부상자나 가옥의 피해는 없었으나, 주차되어 있던 승용차 1대 함몰



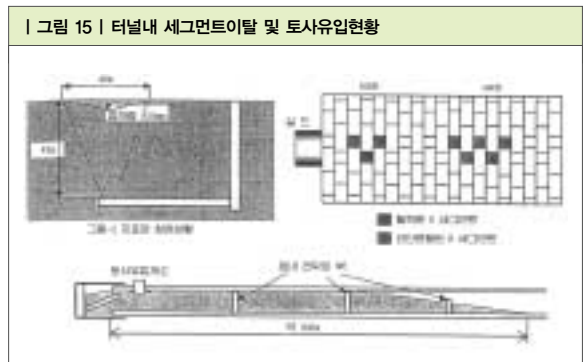
4-5. 사고사례 V (일본)

1) 공사개요

연장 1,500m의 이토압실드 적용 현장

2) 사고개요

- (1) 주요 지반조건으로 터널 계획구 구간에는 N치 50이상의 충격 사력층이 분포하고 있으며, 터널상부로는 N치 0~4정도의 충적층이 분포하고 있음
- (2) 실드굴진 중, 막장면 후방에서 일부 세그먼트가 이탈 또는 변형되면서, 터널내부로 토사유입
- (3) 세그먼트 배면에 Back Fill 그라우팅시 주입압력을 급격히 과도하게 상승시켜 그라우팅을 실시하였으며, 그 이후 세그먼트 주입기구를 빼낸 후, 세그먼트 이탈 또는 변형 발생
- (4) 이는 Back Fill 작업 중 주입압에 의한 세그먼트 체결볼트 파손 및 세그먼트 탈락이 직접적인 사고원인으로 판단됨. 또한 세그먼트 이음부간의 지수고무가 압축변형되어 마찰저항이 작아지고 볼트에 큰 전단력이 발생됨에 따라 세그먼트 탈락을 용이하게 했을 것으로 추정됨.



3) 대책방안

- (1) 사고발생 후 이탈 세그먼트를 중심으로 실드주변지반을 고압 분사 교반 그라우팅공법으로 고결
- (2) 총 200m 구간에 대하여 3부분의 격벽설치 후, 지보공 보강과 함께 터널갱내 유입토사 제거

4-6. 사고사례 VI (1993. 2 ; 일본)

1) 공사개요

동경도 강동구 염빈(鹽浜) 1정목(丁目) 풍주 급수소 송수관 신설 공사중 옛츄섬(越中島)터널

2) 사고개요

- (1) 터널내 메탄가스가 폭발하여 갱내에서 작업하던 5명이 사망하고, 1명이 중상을 입음



- (2) 메탄가스 폭발은 오후 11시 30분경이며, 갱내에서는 당시의 최종 링을 조립하고 있는 과정이었음
- (3) 폭발 직전 중앙감시실에서 경보가 울리고 가스농도기록계의 수치가 급격히 상승하였으며, 안전관리팀은 막장부근 작업원

- 에게 현황을 유선으로 알리고 가스농도측정을 위하여 갱내로 이동
- (4) 한편 같은시간 측량을 위하여 갱내로 들어간 작업원은 터널내 약 400m정도 진입시 폭발음을 들었고, 막장으로 달려갔지만 약 1,200m지점에서 조명이 끊어져 외부로 대피
- (5) 산소호흡기 및 조명등을 들고 갱내로 다시 투입됐지만 1,280m부근에서 1명의 사망자를 발견하고, 폭발비산으로 인한 시야확보 불가로 인하여 외부로 다시 대피
- (6) 119구조 신고는 익일 2시경 하였고, 이후 갱내에 남아있던 4명의 사망자중 2명은 익일 아침에 운반되었고, 일시적인 메탄농도 상승에 의한 구출작업 중단으로 잔여 2명의 사망자는 저녁에서야 외부로 운반할 수 있었음
- (7) 사고당시 공사는 총 1,428.5m 터널굴진 중, 100m 만을 남겨둔 상황이었음

3) 사고원인

- (1) 본 옛츄섬(越中島)터널은 점성토층 및 롬(Loam)지반을 통과하고 있으며, 사고발생 지점은 매물단구력층(段丘礫層)의 상부에 위치하고 있음
 - (2) 본 사고발생지점에는 사전 시추조사에서는 발견할 수 없었던 메탄가스가 피압된 상태로 존재하고 있었으며, 본 공사의 발주처인 동경도 수도국은 특기시방서에 유독가스 검지대책을 수행하도록 명기하고 있음
 - (3) 갱내 메탄가스는 Shield TBM 굴진시 테일셀부를 통하여 갱내로 유입된 것으로 추정되며, 사고후 조사결과 지중 메탄가스 농도는 78%전후이며, 지하수중에도 25~75%의 수용성 메탄가스가 포함되어 있는 것으로 조사됨
 - (4) 점화원은 막장으로부터 5~15m위치에 토사압송펌프 작동을 위한 스위치나 세그먼트를 조립하는 호이스트 크레인의 모터에 발생된 일시적 스파크에 의한 것으로 조사됨
 - (5) 무엇보다 주요한 것은 본 현장의 가스누설 유무는 갱외의 중앙감시실에서 Monitoring하며, 기준치 25%이상의 메탄가스 출현시 경보기가 작동되도록 계획되었음
- 또한 경보기 작동시 중앙감시실 → 막장내로 유선을 통하여 연락 및 대피하는 시나리오로 계획되어 있었으나, 늦은 저녁시간 대에서의 가스누출로 인하여 작업원의 주의부족(저녁식사후 잡지를 읽고 있었다고 함)이 본 사고의 직접적 원인으로 조사됨

05 결론

- (1) 본 고는 국내 적용사례가 계속적으로 증가되고 있는 Shield TBM에 대하여 국내 및 해외 Shield TBM굴진시 발생했던 사고/트러블 사례를 분석하였으며, 이를 통하여 국내 설계 및 시공 기술자들에게 안전사고 방지를 위한 경각심을 되새기고, 국내 Shield TBM 터널 시공시 안전시공을 위한 참고자료로 활용하고자 하였다.
- (2) Shield TBM 굴진시 주요 트러블 요인으로는 크게 기계적 요인과 지질적인 요인으로 나눌 수 있으며, 86%이상의 경우가 지질적 요인에 의하여 사고/트러블이 발생되고 있는 것으로 조사되었다.
- (3) 사고/트러블 발생 사례별 원인을 분석하면
 - ① 설계단계에서 지반특성 파악 미흡으로 시공시 예상치 못한 용수 및 막장붕락발생, ② 부실공사에 의한 현장 위험요소 증가, ③ 현장근로자의 안전관리 주의소홀로 인한 사고발생 등으로 분류될 수 있다.
- (4) 국내 설계여건상 계획 가능한 지반조사 범주내에서 세밀한 지층상태 확인에는 많은 제한요소가 발생되게 되며, 시공단계에서도 터널굴착 과정중 지질변화에 따른 문제점에 봉착하였을 경우 현장에 상주하는 시공자와 감리자의 유기적인 협조를 통하여 원인분석, 대책수립, 즉각적인 보강시공이 요구되나 공사비 증액요인 발생시 즉각적인 보강 내지 설계변경 조치가 어려운 실정으므로 이에 대한 개선책이 요구된다. S

◎ 참고문헌

1. G.Angnostou and K.Kovari(1996), "Face Stability Conditions With Earth-Pressure-Balanced Shields", Tunnelling and Underground Technology, Vol.11, No.2, pp.165~173
2. G.Angnostou and K.Kovari(1994), "The Face Stability of Slurry-shield-driven Tunnels", Tunnelling and Underground Technology, Vol.9, No.2, pp.165~174
3. S.Fuoco, A.Lucarelli and E.Pasqualini(1998), "Contribution to the Definition of Tunnel Face Stability of Deep Tunnel in Continuous Media", Tunnels and Metropolises, Balkema, Rotterdam
4. S.Konishi, T.Tamura, H.Shimizu(2000), "Simple Method to Evaluate Face Stability for Sand Strata with Clay Layers", 土木學研究論文・報告集 第10卷 2000年 11月 論文(2)
5. S.Konishi, T.Tamura, T.Nishiyama(2002), "Tunnel Face Stability of Sand Ground with a Clay Layer on the Crown", 土木學研究論文・報告集 第12卷 2002年 11月 論文(4)
6. 電力工事技術委員會(2001), "TBM工法(掘削工事)例調査", 社団法人日本電力建設業協會