

# TBM 터널 굴진시 Jamming이 발생하는 지반의 공학적 특성에 대한 연구

Article **01**

A Study on Engineering Characteristics of Weak Rock Ground happened TBM  
Jamming accident in Tunnelling



유길환

한국건설안전기술협회 부회장  
공학박사

## Abstract

Mechanized tunnelling by TBMs has been extensively adopted for last two decades. Nevertheless, only few case histories have been reported. Unlike NATM tunnels, the case histories of the weak zone have been seldom reported for the mechanized tunnelling, even in the other countries. In this study, a collapse of TBM tunnel occurred in the severely altered weak rock zones between volcanoclastic rocks and granitic rocks was briefly described. A systematic geotechnical investigation, which was performed to examine the cause of the collapse, was carried out at the site and then characteristics of the rocks in the zones were evaluated. Moreover, This study propose a guide line of estimateing the possibility of collapse in TBM tunnels through comparing experimental results with surveying results of general rocks.

Key words: Case history, TBM tunnel, collapse, ground investigation, engineering properties

## 요지 (Abstract)

20여 년 전부터 TBM 등에 의한 기계화 터널공법이 국내에서도 보편적으로 적용되고 있음에도 그들의 적용에 따른 시공상 문제점들이 거의 보고되고 있지 않다. 이는 NATM 터널에서와는 달리, 해외에서도 불량한 지반조건에서 기계화 터널시공 중에 발생하였던 사고사례에 대한 연구는 희귀한 편이다. 본 연구에서는 먼저 화산쇄설암류의 지층 경계부에서 심하게 변질된 연약 암반대에서 발생된 터널붕락 사례를 소개하며, 그 붕괴원인을 분석하기 위한 일환으로 실시된 체계적인 지반조사를 통하여 연약 암반의 특성을 규명하였다. 또한 그 연약암반대에 대한 실험결과와 일반 암반에서의 측정범위를 비교하여, 터널붕괴 위험성을 판단할 수 있는 지표를 설정하였다.

핵심용어: 사례연구, TBMTunnel, 붕락, 지반조사, 공학적 특성

## 1. 서론

세계 각국에서는 경제발전과 더불어 기계화 및 자동화 터널 굴착공법이 정착되어가고 있으며, 이러한 추세에 맞추어 국내 터널기술도 기계화 시공법의 수요증대에 따른 요구를 충족시키기 위한 방향으로 진보되고 있다. 국내 터널기계화 시공법은 1980년대 중반에 도입되어 20여 년 동안 다양한 분야에서 연구·개발되어 짧은 기간에 기술축적을 이루고 다양한 공종에 적용되고 있다. 하지만 장비의 기종선택 및 지반조사의 미흡에 따른 문제 등으로 실패사례도 상당수 있으며, 이러한 사고사례는 향후 터널기술 발전의 초석이 되고 있다.

일반적으로 가장 많이 적용된 터널공법은 오랜 역사를 지닌 NATM공법이며, 이 공법에 대한 실패 및 개선 사례는 수많이 보고되고 있다. 근래에 이르러 TBM 및 shield와 같은 기계화 터널공법이 점차 확대하여 적용되고 있지만, 이에 대한 실패사례는 좀처럼 보고되지 않았다. 기계화 터널공법을 효과적으로 적용하기 위해서는 가급적 적용상의 문제점을 많이 축적 및 개선하려는 노력이 필요할 것이다. 특히 터널붕괴 현장에서의 지반특성의 조사 및 거동의 재분석을 통하여 그러한 실패가 거듭되지 않도록 노력하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 먼저 TBM터널 굴진 중 연약한 암반지대(화산쇄설암류의 지층 경계부에서 심하게 변질된 암반)에서 발생한 터널붕락 사례를 소개하였다. 붕락지점을 중심으로 시료채취, 육안관찰, 현장 및 실내 암반실험을 체계적으로 수행하였다. 그들의 결과들을 종합적으로 분석하여 연약암반대의 공학적 특성을 규명하였다. 최종적으로, 이 결과들을 일반 암반(초연암~극경암)의 값들과 비교를 통하여 붕괴위험 수준을 예측하기 위한 지표를 마련하였다.

## 2. 터널 굴착에 불리한 지질조건 및 터널 붕락사례

### 2.1 기계화굴진에 불리한 특수지반에서의 터널굴착

터널굴착에 불리한 영향을 주는 인자들은 지층경계부에서의 암반의 별질작용, 절리가 발달된 파쇄암반, 단층대, 지하공동, 지하수의 유입, 풍화변질대, 팽창성암반 구간 등이 있으며, 이와 같은 지반을 특수지반으로 분류할 수 있다. 해외의 문헌을 살펴보면, 이러한 불리한 지반조건에서의 터널시공 사례는 NATM터널에 대하여 대부분 연구되어 왔으나(Barton, et al., 1974; Bieniawski, 1978; ISRM, 1981), TBM이나 shield TBM과 같은 기계화시공에 관련된 연구에 대해서는 소수만이 존재하고 있는 실정이다. Barton(2000)은 사례 연구를 통하여 잘 알려진 경험적 암반분류법(Q-system)을 TBM 터널에 적합하도록 수정한 암반분류법인 QTBM 법을 제안하였다. Einstein(2000)은 Opalinus 혈암지대에서의 TBM굴착에 대한 사례를 발표한 바 있으며, Alber(2000)는 경암에서의 TBM의 굴진속도가 경제성에 미치는 영향을 연구하였다. Barla(1999)는 TBM을 이용한 대구경 터널굴착 진행 중 발생 가능한 용출수에 대한 대책을 연구하였으며, Hamza et al(1999)은 카이로 시에서 시행된 터널공사에서 슬러리 실드 TBM시공으로 인한 지반의 거동에 대해 연구하였다. Fu et al(1998)은 단층과 습곡을 포함한 구조지질과 연관된 시공 상의 문제점을 언급하였으며, Qu(1985)와 Xiao et al(2000)은 지층응력이 큰 습곡지역에서 전단변형이 크고 지배적일 경우와 그렇지 못할 경우를 구분하였으며, 지층경계면에서의 전단파쇄대가 터널굴진 중 안정성에 크게 영향을 미치게 된다고 발표하였다.

국내의 경우, 산악지역은 용암분출에 의한 지층경계면이 많이 존재하고 지층경계면에서의 암반 변질작용으로 인해 변질대가 발달한 지역이 많다. 그러나 국내의 터널기술이 1980년대 이후 급성장해오고 있음에도 불구하고 팽창성 변질대와 같은 불리한 지질에 대한 기계화 굴착사례가 거의 보고되지 않고 있으므로 국내지질에 맞는 경험적 굴착공법을 선정함에 있어서 애로사항이 많은 실정이다.

## 2.2 특수지반에서의 TBM터널 붕락사례

국내의 몇몇 보고서(Hudson & Harrison, 1992; Qu, 1985; Lei et al, 1995; Ma et al, 2000)에서 지층경계면의 압착에 의한 시추공 매몰, 전단파쇄대에 흑연 및 석탄이 끼인 연약 석탄대에서의 팽창 및 2차 전단으로 터널이 붕락된 사례에 대하여 보고 된 바 있다. 하지만 이러한 것들은 대부분 NATM터널에서의 사고사례이다. Pelizza et al(2001)의 연구에 의하면 TBM 터널에서는 굴착시공 중에 암반의 압착에 의한 협착 사고가 일어날 수 없다고 주장한 바 있다. 그러나 중국 황하의 분수사업을 위한 터널 접속공사구간에서 TBM 협착 사고가 발생하였다(Shang et al, 2004). 이 사고는 이회암과 카르스트 석회공동이 존재하는 지역에서 발생한 것으로서 터널굴진에 불리한 많은 조건이 조합된 상태에서 발생한 것이다. 사고가 발생한 암반지대는 석회암이 깊은 습곡 단층부에서 지하수의 영향을 받아 심한 변질 작용을 일으켜 연약한 이회암과 각력암으로 변질되어 소요의 강도를 발휘하지 못하게 되어 붕락과 함께 TBM이 협착되었다. 이 보고서는 특수지질 조건에 대하여 일반적인 암반지대에서의 경험적인 기계화 굴착은 적합하지 않으며, 특수지반 발생 우려가 있는 지점의 터널설계에 있어

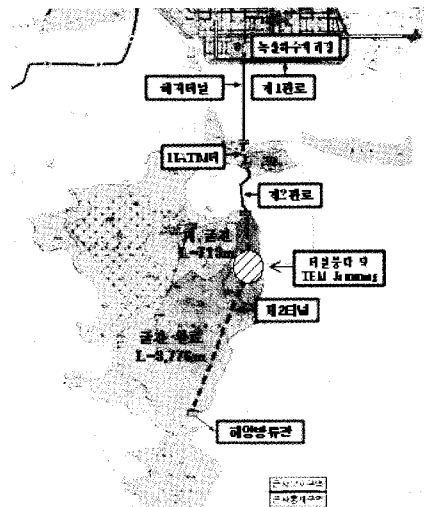
서는 철저한 조사결과를 통해 적절한 시공법을 적용하는 것이 필요하다고 하였다. 또한 최근 압착성 지반조건에서의 붕락 및 협착 사고가 발생된 사례(Aydin et al, 2004; Yassaghi & Salari-Rad, 2005)를 보면, 화성암 암괴의 접촉부에서 변질작용에 의한 연약한 암반층은 압착성지반의 양상을 띠는 지반조건하에서 TBM굴착은 적합하지 않으며, 오히려 드릴링과 발파를 조합한 굴착 방법을 이용하여 유도터널을 시공한 후에 TBM을 이용하여 잔여굴착을 실시하도록 추천하고 있다.

## 3. 대상현장 및 터널 붕괴현황

### 3.1 현장개요 및 지질특성

#### 3.1.1 현장개요

본 연구대상은 녹산 국가 산업단지 및 인근지역의 발생하수를 통합 처리하기 위한 녹산하수처리장 방류관거 공사현장이다. 이 공사는 연안해역의 오염방지로 인한 어족보호 및 낙동강 하구 철새도래지 보존에 따른 환경

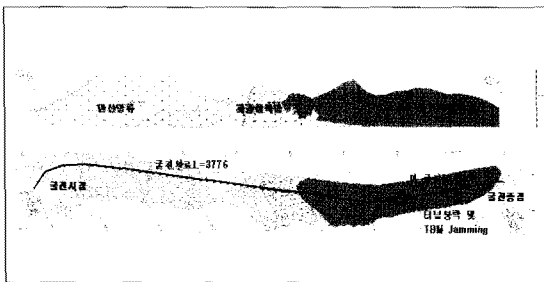


[그림 1] 공사개요도

문제를 해결하는 측면에서 문화재 보호구역 외부에 위치한 가덕도 동남단의 해저수심 10m 이상인 심해에 방류되도록 계획되었다. 대상현장은 [그림 1]에서 볼 수 있는 바와 같이 녹산에서 가덕도로 연결되는 해저실드터널과 가덕도 지역의 NATM터널, TBM 터널 및 실드 TBM 등으로 구성된 관로 구간으로 이루어져 있다. 그 중 제2터널 구간은 가덕도 산악지대를 관통하는 4,490m 연장의 TBM 터널로 설계되었으며, 시공 중 3,776m구간에서 터널붕락으로 인한 TBM 헤드부의 jamming으로 공사가 중단되었다.

### 3.1.2 지질특성

[그림 2]에서는 가덕도 일원의 지질 종?단면도, 터널구간 및 터널붕락 지점을 보여주고 있다. 이 일대의 지질은 백악기 경상계의 상부 유천층군과 불국사관입암류로 대별된다. 유천층군은 하부로부터 안산암질 화산각력암, 안산암류로 구성되어 있고 불국사관입암류는 화강섬록암이 주류를 이루고 있다. 안산암질 화산각력암은 터널 앞 구간인 응봉산 일대에 분포하며, 주로 암편이 안산암으로 된 회색-암회색의 응회암으로 구성되어 있다. 화강섬록암은 터널 중간부에 위치한 매봉과 국수봉지역에 분포하고 있으며, 관입 시 심한 열 변질로 납석화 및 고령토화 작용을 받아 이 일대가 온통 백색의 표면색을 띤



[그림 2] 제 2터널의 지질 종·평면도

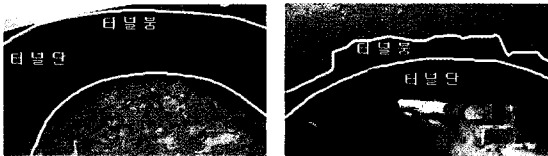
다. 터널 종점구간에 위치한 안산암류는 주로 반상안산암의 형태로서 본 지역의 대부분에 걸쳐서 폭 넓게 분포하고 있으며 아주 견고한 상태이다.

### 3.2 터널붕락 현황

본 터널의 굴진위험구간으로 예측되었던 지점은 당초 지질조사에서 안산암과 화산각력암이 넓게 분포하는 가덕도의 중앙부에 화강섬록암이 관입되어 형성된 화산각력암 층의 지층경계부이었다. 하지만 지층경계부를 통과한 후에도 예측한 것보다 심한 파쇄대 및 연약대가 출현하여 TBM의 jamming과 함께 지하수 유출 및 암반의 부분적인 붕락이 발생하였다. [사진 1] 및 [사진 2]에서 볼 수 있듯이 TBM head부와 clamping pad가 암반에 밀착되는 부분을 중심으로 터널 천단부에 붕락이 크게 발생하였다. 이때, 절리면을 따라 암편이 200mm 이하의 크기로 분쇄되면서 탈락되었고, 물을 흡수하여 팽창하면서 TBM 헤드부를 죄어버렸다.

TBM의 jamming이 발생한 변질대 구간에서 터널의 단기적인 안정성을 확보하기 위하여 붕락된 버력을 인력으로 제거하면서 강지보와 와이어 메쉬를 30~50cm 간격으로 설치하였고, 강지보와 강지보 사이를 강토류판으로 보강하여 붕락의 진행을 방지하였다. 그리고 일부 붕락이 발생된 구간에서 응력집중으로 인한 추가 붕락을 예방하기 위한 배면 그라우팅을 실시하였다. TBM head 전면부의 버력을 인력으로 제거해 가면서 약 2m의 작업공간을 확보하고 길이 3~4m 정도의 소규모 forepolling을 실시한 후 head부에 낀 버력을 제거하려 하였으나, 기계에 붙은 버력이 분해 되면서 콘크리트처럼 굳어 TBM 구동에 실패하였다. 결과적으로, 공법변경 후 현 막장면의 안정성을 유지한 상태에서 TBM을 해체

하여 수거해야 하기 때문에 TBM 헤드부의 강판을 지반에 남겨두었으며, 기 굴착된 막장부에서 계측을 통하여 터널 거동과 지보패턴의 안정성을 확인하였다.



[사진 1] TBM head부 붕락 [사진 2] Clamping pad 주변부 붕락

## 4. 봉괴위치에서의 지반조사, 시험 및 결과

### 4.1 시료채취위치 및 시험의 종류

#### 4.1.1 시료채취 위치

TBM의 jamming이 발생된 막장면을 중심으로 암반 특성을 분석하기 위하여 [그림 3]에 나타난 바와 같이 막장면으로부터 전방 50m(No. 1~No. 10)까지 5m 간격으로 암석코어 및 함몰암석을 채취하고, 추가적으로 TBM 1~TBM 12까지 채취하여 총 22개소의 시료를 채취하였다. 지반이 양호한 지역은 철근콘크리트 및 암석 코어채취용 SY-1805C DD160E 모델을 사용하여 지름(φ)54mm, 길이(L) 200~500mm의 시료를 채취하였고, 변질대구간은 휴대용 암석채취기를 이용하였다.

본 현장에서는 먼저 육안관찰을 통하여 불연속면의 방향성, 간격, 연속성, 거칠기, 강도, 간극, 충전물, 누수 및

불연속면의 수 등을 조사하여 RQD, Q값 및 RMR을 산정하였다. 또한 현장탄성파 속도 및 schmidt hammer 강도시험을 각 지점에서 실시하였다.

#### 4.1.2 시험종류

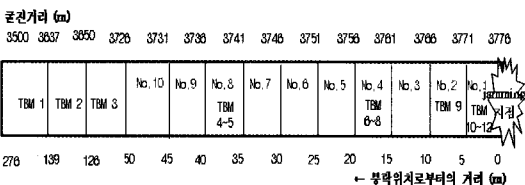
실내시험으로는 [그림 3]에서 언급된 10개소에서 얻어진 암석시료를 이용하여 비중시험, 실내 탄성파속도, 점하중강도, 슬레이크 내구성 시험 등의 기초 물성시험을 실시하였다. 또한 기존의 비변질대와 변질대 구간에서 12개(TBM1~TBM12)의 추가 시료를 채취하여 육안 및 현미경 관찰, 화학분석(XRF)시험, 팽윤도 시험, X선 회절(XRD)분석 등의 성분분석 시험을 실시하였다. 표 1은 각 변질대에서 채취한 시료를 이용한 성분분석 시험의 실시 현황을 나타내고 있다.

### 4.2 현장 및 실내시험 결과

#### 4.2.1 현장시험 결과

조사지역에서 실시된 각종 관찰 및 시험결과는 표 2에서와 같다. 주로 불연속면 및 절리에 대하여 실시된 육안 관찰에 의하면, 대상지반은 단층활면이 매우 발달되어 있으며, 심한 풍화작용을 받은 단층에서는 점토로 충전되어 있는 경우도 있었다. 절리 빈도로부터 산출한 RQD 값은 20~35 % 범위로서 불량 또는 매우 불량한 암반으로 분류되었으며, Q값도 0.01이하의 V 등급을 나타내어서 역시 매우 불량한 암반으로 판정되었다.

현장 탄성파속도시험 결과에 의하면, 대상구간의 암반은 전반적으로 탄성파 속도가 낮은 풍화암으로 나타나고 있다. 즉, 막장면으로부터 5~10m구간은 거의 토사지반에 가까운 탄성파 속도를 나타내었으며, 10~45m



[그림 3] 현장시험 및 시료채취 위치도

[표 1] 변질대에서 채취된 시료에 대한 성분분석 시험의 종류

시료명	시료 구분	채취지점 굴진거리(m)	시험 및 분석						비고
			물성 강도	XRF	박편관찰	침수관찰	팽윤도	XRD	
No. 1 TBM 10 TBM 11 TBM 12	각력암 점토	3776-3771	○		○	○	○	○	강변 질대
No. 2 TBM 9	안산암	3771-3766	○	○	○			○	
No. 4 TBM 6 TBM 7 TBM 8	안산암 단층 점토	3761-3756	○				○	○	약변 질대
No. 8 TBM 4 TBM 5	안산암 단층 점토	3741-3736	○	○	○			○	
TBM-3	단층점토	3650	○					○	비변 질대
TBM-2	안산암	3637	○		○				
TBM-1	안산암	3500	○	○	○	○		○	

[표 2] 현장 불연속면 조사 및 실험 결과

구 간	RQD (%)	Q	현장탄성파 속도(m/s)	슈미트해머 (avg)	환산강도 kg/cm <sup>2</sup>	RMR	비 고
No.1	20	0.007	1200	6.5	51	14	강변질대
No.2	20	0.005	1300	6.5	51	13	강변질대
No.3	30	0.009	2000	23	128	19	약변질대
No.4	35	0.009	2000	22	119	19	약변질대
No.5	25	0.006	2700	30	210	14	약변질대
No.6	27	0.008	2500	28	182	19	약변질대
No.7	25	0.004	1900	20	104	14	약변질대
No.8	30	0.007	2100	25	148	19	약변질대
No.9	28	0.009	2000	24	138	19	약변질대
No.10	30	0.01	2800	35	279	21	약변질대

구간에서는 강한 풍화대가 형성되었음을 알 수 있었다.

Schmidt hammer를 이용한 현장 암반강도 측정결과에 의하면, 약변질대 구간의 SHV(schmidt hardness

value) 값의 범위는 대부분 20~30이며 그들의 평균값이 25 정도이므로, 추정되는 일축압축강도는 148 kg/cm<sup>2</sup> 정도이다. 강 변질대 구간인 터널 막장 부근에서는 SHV(schmidt hardness value) 값이 10 이하이어서 추정 일축압축강도는 51 kg/cm<sup>2</sup>으로 매우 약한 강도를 보였다.

현장 및 실내실험 자료로부터 구할 수 있는 6가지 변수, 즉 신선암의 일축압축강도, RQD, 불연속면의 간격 및 상태, 불연속면의 방향 등의 변수에 점수를 주어 암반을 평가하는 RMR값은 주로 13~21(IV, V 등급)로 불량 또는 매우 불량한 암반으로 판정되었다.

#### 4.2.2 실내실험 결과

##### (1) 탄성파 및 강도시험

실내실험 결과는 [표 3]에 나타난 바와 같다. 밀도는 막장면 근처에서의 2.10g/cm<sup>3</sup> 정도로서 다른 지점에 비해 작은 값을 나타내며, 비변질대로부터 강변질대로 진행됨에 따라 약간씩 감소해가고 있음을 알 수 있다. 실내 탄성파속도 측정결과는 현장 값보다 약간 높게 나타났으며, 측정값의 대부분은 일반적인 풍화암의 범위에 속해있다. 특히, 막장면은 매우 취약구간이고, 15~20m와 30~40m 구간에서도 속도가 작게 얻어졌

다. 막장면 강변질대 구간에서의 압축강도(UCS)는 45 kg/cm<sup>2</sup>으로 매우 약한 강도를 나타내며, 막장면에 도달하기 전에서도 100~120 kg/cm<sup>2</sup> 정도로 강도가 역시 작은

편이다. 이는 열수 변질작용이 활발하게 작용하여 암편의 강도가 현저하게 줄어들었을 것으로 추정된다.

채취된 암석에 대한 슬레이크 지수는 40 이하의 값을 보이며, 막장면에서 20m까지와 35~45m구간에서 30이하의 매우 낮은 내구성을 나타내는 것으로 보아 이들 구간을 매우 취약한 구간으로 분류할 수 있다. 즉, 조사구간에서는 전체적으로 풍화도가 높지만, 특히 막장면에서는 더욱 심하게 풍화가 진행되었던 것으로 판단된다.







[표 3] 실내 암석시험 결과

구 간	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	실내탄성파 속도(m/s)	UCS(avg) kg/cm <sup>2</sup>	슬레이크 지수(%)	비 고
No.1	2.10	1500	45	18	강변질대
No.2	2.10	1600	45	20	강변질대
No.3	2.15	2300	115	28	약변질대
No.4	2.15	2300	110	28	약변질대
No.5	2.13	3000	130	38	약변질대
No.6	2.14	2800	122	35	약변질대
No.7	2.13	2200	100	29	약변질대
No.8	2.15	2400	120	31	약변질대
No.9	2.15	2300	115	30	약변질대
No.10	2.20	3100	230	40	약변질대

(2) 침수 후 강도변화

침수 전후의 암편 시료에 대한 점하중 강도변화를 표 4에 요약하였다. 비변질대 암편은 침수 후에도 강도 변화가 거의 발생하지 않았지만 약변질대 암편시료는 약 46%의 강도 저하가 발생하였다. 강변질대의 암편시료인 경우 건조상태에서의 환산 일축압축강도는 135 kg/cm<sup>2</sup>으로 매우 낮게 나타났고, 침수 후에는 강도 측정이 불가할 정도로 심하게 강도가 저하됨을 알 수 있었다.

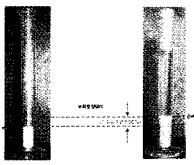
[표 4] 침수 전·후의 강도변화

구분	침수 전	침수 후	침수 후의 상태
약 변질 시료			
	UCS: 251kg/cm <sup>2</sup>	UCS: 138kg/cm <sup>2</sup>	가압 시 부서짐
강 변질 시료			
	UCS: 135kg/cm <sup>2</sup>	UCS: 10kg/cm <sup>2</sup>	가압 시 쉽게 파쇄됨

(3) 팽윤도 시험

암반의 부피팽창을 관찰하기 위한 팽윤도 시험 결과를 표 5에서와 같이 요약하였다. 팽윤도 시험에서 원 시료의 팽윤도가 2ml/2g로 나타는 반면에, gel 상태에서 물과 반응할 경우 약변질대의 시료(소량의 점토광물 및 불투명광물이 함유된 암)에서는 팽윤하지 않았으나, 점토광물 및 불투명광물이 다량으로 함유된 약변질대와 강변질대의 시료에서는 부피가 50%까지 팽창을 하였다. 이 결과에서와 같이 풍화정도가 심할수록, 점토 및 불투명광물이 많을수록 점토화되기 쉽고 팽윤도가 크다는

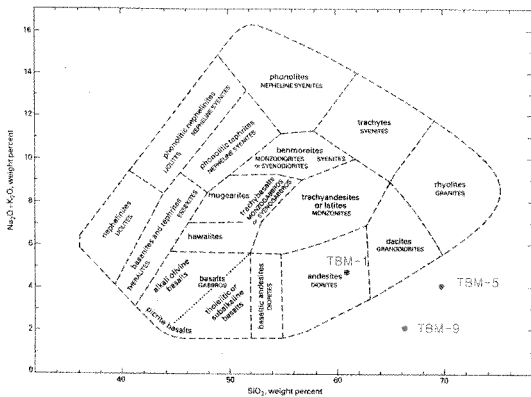
[표 5] 팽윤도 실험결과

시료 번호	시료채취 위치	원시료 (mL/2g)	팽윤도 (mL/2g)	팽윤도 시험
TBM-3 (비변질대)	3,650m	2	2	
TBM-4 (약변질대)	3,740m	2	2	
TBM-6 (약변질대)	3,760m	2	3	
TBM-11 (강변질대)	3,775m	2	3	
TBM-12 (강변질대)	3,775m	2	3	

사실을 알 수 있었다.

(4) 화학분석

조사구간에 분포하는 암석의 정확한 분류를 위하여 3개소의 시료(TBM-1, 5, 9)를 이용하여 화학분석(XRF)을 실시하였다. 화학분석의 결과를 통한 SiO<sub>2</sub> 함유량과 K<sub>2</sub>O 및 Na<sub>2</sub>O의 함유량에 따른 암의 종류로 구분하여 [그림 4]에 표시하였다. 이 암석분석 분포도에 표시된 바와 같이 비변질대 시료 TBM-1은 안산암으로 분류되었고, 변질대 시료 TBM-5와 TBM-9는 열수작용에 의한 암석의 화학성분이 변질되어 암석 분류표에서 벗어나 있음을 알 수 있다.



[그림 4] 화학분석에 의한 암석 분포도

(THE INTERPRETATION OF IGNEOUS ROCKS : K.G. Cox, J.D. Bell and R.J. Pankhurst, 1979 p.14)

(5) 편광현미경에 의한 관찰

편광 현미경을 통한 시료의 변질정도를 관찰하였다. [표 6]과 같이 강변질대 구간의 시편은 암석의 탈색, 간극 및 부피의 증가, 강도의 저하, 새로운 점토광물이 형성되었고, 물리적 특성은 변질도가 높을수록 장석이 심하게 변질되었으며, 장석은 대부분 점토광물로 변질되

어 나타났었다.

[표 6] 편광 현미경에 의한 관찰결과

구분	비변질대	약변질대	강변질대
시편			
검출 광물	장석, 불투명광물	장석, 불투명광물, 점토광물	장석, 불투명광물, 점토광물

또한 황철석으로 판단되는 불투명광물의 함량이 증가하며, 2차적으로 형성된 석영맥 주변부에 밀집된 점으로 미루어 불투명광물은 열수변질작용과 관련되어 2차적으로 형성된 열수변질산물임을 알 수 있다.

(6) X선 회절분석

[표 7]에서는 X선 회절분석 시험(XRD) 결과를 나타내고 있다. 비변질대에서는 안산암을 구성하는 대표적인 광물인 석영(quartz), 조장석(albite) 및 초기 변질광물인 흑운모(muscovite)가 주로 산출되었으나, 약변질대에서는 그 외에 열수변질 광물인 불석(zeolite)이 산출되었으며, 강변질대구간에서는 열수변질 광물인 고령토

[표 7] X-선 회절(XRD) 분석결과

시료명	위치	광물조성	비고
TBM-1	3500m	albite, muscovite, quartz	비변질대 시료
TBM-3	3650m	muscovite, calcite(방해석), clinocllore(탄사록나석)	비변질대 시료
TBM-4	3740m	muscovite, quartz	약변질대 시료
TBM-6	3760m	quartz, zeolite*	약변질대 시료
TBM-9	3771m	quartz, muscovite, kaolinite*	강변질대 시료
TBM-11	3775m	muscovite, quartz	강변질대 시료
TBM-12	3775m	muscovite, quartz, kaolinite*	강변질대 시료

\* 점토광물



(kaolinite)가 산출되었다. 이와 같이 고령토와 불석의 산출, 황철석의 산포, 탈색(decolorization) 등이 발달되어 있는 것을 종합하면 약변질대구간과 강변질대구간에서는 열수 변질작용이 활발하게 진행되었던 것으로 판단할 수 있다.

### 5. 일반적인 암반특성과의 비교

파쇄대 연약암 지대 또는 절리군이 복합적으로 발달된 변질암 지형에서는 TBM과 같은 기계화 터널굴착 시에 굴진 위험구간으로 분류되는 특수지형이다. 그러나 그들에 대하여 터널붕괴 위험도를 정량적으로 규정하는

지표는 존재하지 않는다. 또한 팽창성 암반에 대해서는 간단히 팽윤도 시험에 근거하여 정성적으로 추정하는 방법이 있으며, 팽창압 또는 팽창율에 근거하여 정량적으로 평가할 수는 있지만 그 결과를 이용하여 직접 위험도를 판정하기란 쉽지 않다.

본 현장에서 붕괴가 발생하였던 강변질대 구간의 암반과 일반 암반에 대한 각종 실험결과치의 상호 비교는 흥미로운 결과를 보여줄 수 있다. [표 8]에서는 '초연암~극경암'과 '연암'에 대한 실험값의 범위(신회순 등, 2000)와 본 대상현장에서의 결과들을 비교하고 있다. 이 표에서 보면, 특이하게도 강변질대의 암반에 대한 '일반암반분류'의 결과들이 모두 초연암의 하한계와 같

거나 그 보다 아주 작게 산출되기도 하였다. 그리고 '실내 시험'에 의한 탄성과 속도, 점하중강도 및 슬레이크 내구성이 초연암의 하한계 이하로 얻어졌다. 또한 강변질대에 대한 팽윤도 시험에서 부피팽창이 약 50%로 얻어졌다는 것은 흥미로운 사실이다. 단지 암반특성만으로 터널의 붕괴 위험도를 예측하기에는 상당히 무리가 있을 것이다. 그러나 이 표에서 볼 수 있는 바와 같이, 어떤 암반이 초연암에 대한 실험값 보다 낮게 산출되었을 때, 그 암반에서는 터널붕괴 위험이 있다고 지표를 설정하는 것은 크게

[표 8] 연구대상 지반의 암석과 일반 암석 사이의 공학적 특성에 대한 비교

시험 종류	일반 암의 범위 (초연암 ~ 극경암)	연암 (본 현장)	강변 질대		
일반 암반 분류	RQD	25이하~90이상	25~50	20	
	탄성파탐사	700~4,200m/s	1,200~2800m/s	1,200m/s	
	슈미트해머 압축강도	50이하~2,000이상	280~560kg/cm <sup>2</sup>	51kg/cm <sup>2</sup>	
	RMR	20이하~100이상	21~40	14~13	
	Q-system	0.001~1,000	0.7~2.0	0.001	
SRF (응력저감지수)	20.0~0.5	5.0~7.0	15~10		
실내 실험	비중	1.8~3.2	2.0~2.5	2.10	
	실내 탄성파속도	2,000~5,800m/s	2,700~4,300m/s	1,500~1,600m/s	
	점하중강도	50이하~2,000kg/cm <sup>2</sup>	280~560kg/cm <sup>2</sup>	45kg/cm <sup>2</sup>	
	슬레이크내구성	30이하~98이상	30~60	18~20	
현장 암석	육안관찰	회색	회색	담회 및 회백색, 절리발달	
	침수 후의 강도변화	50이하~2,000kg/cm <sup>2</sup>	280~560kg/cm <sup>2</sup>	측정불가	
	XRF	Si $\alpha$ 함량	52.00~66.00%	52.0~66.0	63.39~68.87%
		(안산암) Na $\alpha$ +K $\alpha$ 함량	1.80~6.0%	1.8~6.0%	2.42~2.80%
	팽윤도(cc/2g)	2	2	3	
	점도광물(XRD)	-	-	kaolinite, zeolite	
	편광 현미경 관찰	장석, 불투명광물	장석, 불투명광물	장석, 불투명광물, 점도광물	

무리가 없을 것으로 사료된다.

실무적인 관점에서 보면, 터널설계단계 또는 굴진 중에 [표 8]에서 제시하고 있는 몇 가지의 간단한 실험(위에서 언급)을 통하여 TBM터널에서의 붕괴 위험구간을 지정하고 대책을 수립한다면 효과적으로 과업을 완수할 수 있다고 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 연약한 열수변질대 지반에서 TBM터널을 굴진하는 중에 발생된 붕괴구간을 중심으로 정밀 지반조사를 실시하여 암반의 특성을 분석하였다. 이와 같은 조사 및 분석을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 조사대상터널의 막장면 부근은 변성암대(연약대)로서 지하수와 접촉하면서 열수변질작용이 급격히 진행됨에 따라 절리 및 불연속면이 잘 발달하였으며 매우 약한 강도를 나타내었다. 붕괴된 변질구간의 시편강도는 수침 후 강도측정이 불가할 정도로 저하되었으며, 팽윤도 실험에서 50%까지 부피가 팽창하였다. 또한, X선 회절 분석 시험(XRD) 결과로부터 열수변질광물인 황철석, 고령토 및 불석 등을 함유하고 있음을 확인하였으며, 편광

현미경에 의하여 불투명한 광물이 다량 검출되었고 슬레이크 내구성이 18% 정도로 낮게 나타나는 등으로 고령토화 현상이 현저하였다.

(2) 터널붕락이 발생된 강변질대 암반은 일반적인 암석(연암 포함)이 가지는 공학적 특성값의 하한계 이하 값으로 나타나고 있어서 터널붕락에 결정적인 역할을 하였을 것으로 판단되었다. 특히, 암반분류를 위하여 적용되는 각종 지수들, 그리고 실내 탄성파 속도, 점착중강도 및 슬레이크 내구성이 초연암의 하한계 이하로 나타났다. 따라서 본 현장의 실험결과를 근거로 할 때, 초연암의 공학적 특성값의 하한계를 TBM터널 붕괴 위험수준으로 생각할 수 있었다.

본 사례에 근거하여 열수변질에 의해 팽윤도를 보이는 암반 구간에서 TBM의 jamming 또는 붕락의 발생가능성에 대하여 평가를 실시하는 것은 대단한 의미를 지닐 수 있다. 특히, 세계적으로 이러한 사례가 잘 보고되고 있지 않을 뿐만 아니라 그의 발생가능성에 대한 평가기준이 존재하지 않기 때문이다. 따라서 터널설계 시 터널 굴착공법 및 장비선정 기준을 위하여 유의한 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

### 참고문헌

1. 건설교통부 (1999), 터널표준시방서.
2. 김창용, 박치현, 배규진, 홍성완, 오명렬 (2000), 터널 붕락특성과 시공 중 보강공법 선정방법 개발, 터널과 지형공간, 한국암반공학회 논문집, Vol. 10, pp. 418-429.
3. 녹산방류관거 실시설계 보고서 (1995, 1997).
4. 이상준, 서경원, 배규진, 이석원 (2000), 지질공학적 특성을 고려한 터널 붕락 분석과 합리적인 터널 붕락 추론에 관한 기본 연구, 한국지반공학회 논문집, 제16권, 제5호, pp. 117-127.

참고 문헌

5. 신희순, 선우준, 아두화 (2000), 토목기술자를 위한 지질구조 및 암반분류. 구미서관 pp. 112-200.
6. Aydin, Ozbek A. and Cobanoglu I. (2004), Tunnelling in difficult ground: a case study from Dranaz tunnel, Sinop, Turkey. *Engineering Geology* 74. pp. 293-301.
7. Alber M. (2000), Advance rate of hard rock TBMs and their effects on project economics. *Tunnelling and Underground Space Technology* 15(1), pp. 55-64.
8. Barla G. (1999), Larger diameter TBM tunnel excavation in weak environmental conditions. *News Journal, International Society for Rock Mechanics* 5(3), pp. 48-54.
9. Barton N. (1995), Permanent Support for Tunnels Using NMT, KGE, pp. 1-26.
10. Barton N. (2000), TBM Tunnelling in jointed and faulted rock. *Balkema*, pp. 3-104 and 147-149.
11. Barton N., Lien R., and Lunde J. (1974), Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mechanics*, 6(4), pp. 189-236.
12. Bieniawski Z. T. (1978), *Rock Mechanics Design in Mining and Tunnelling*, Balkema, 272p.
13. Einstein H. H. (2000), Tunnels in Opalinus Clayshalea review of case histories and new developments. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(1), pp. 3-29.
14. Fu B. J. (1998), Mega Hydro Projects for transferring water from Southern to Northern China. *News Journal, International Society for Rock Mechanics*, 5(2), pp. 25-30.
15. Hamza M., Ata.A. and Roussin A.(1999),Ground movements due to the construction of cut-and-cover structures and slurry shield tunnel of the Cairo Metro. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 14(3), pp. 281-289.
16. Hudson J. A. (1989), *Rock Mechanics Principles in Engineering Practice*, CIRIA, 72p.
17. Hudson, J. A. and Harrison, J. P. (1992), A new approach to studying complete rock engineering problems. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 25. pp. 93-105.
18. HSE. (1996), *Safety of New Austrian Tunnelling Method(NATM) Tunnels*, pp. 15-28.
19. ISRM: International Society for Rock Mechanics (1981),In: Brown ET, editor. *Rock characterization testing and monitoring. ISRM suggested methods*. Oxford: Pergamon Press, pp. 211.
20. Lei X. Y, Swoboda G., and Zenz G. (1995), Application of contact friction interface element to tunnel excavation in faulted rock. *Computers and Geotechnics*, 17, pp. 349-370.
21. Pelizza S., Grasso P. and Xu S. L. (2001), Tunnelling by TBM – an overview of international issues relevant to China. *Workshop on Tunnel Boring Machines and Related Engineering Practice*, Beijing, Sept. Unpublished.
22. Qu Y. X. (1985), Engineering geological prediction of inter-layer shear zones. *Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Research on Engineering Geomechanics*. Geological Publishing House, Beijing, pp. 87-97 (in Chinese).
23. Shang Y., Xue J., Wang S., Yang Z. and Yang J. (2004), A case history: Tunnel boring machine jamming in an inter-layer shear zone at the Yellow River Diversion Project in China. *Engineering Geology* 71. pp. 199-211.
24. Xiao Y. X., Lee C.F. and Wang S.J. (2000), Spatial distribution of interlayer shear zones at Gaobazhou dam site, Qingjiang River, China. *Engineering Geology* 55, pp. 227-239.
25. Yassaghi, A. and H. Salari-Rad (2005), Squeezing rock conditions at an igneous contact zone in the Taloun tunnels, Tehran-Shomal freeway, Iran: a case study, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 42, pp. 95-108.