

대단면 터널의 굴착기술

On the Drilling Technic of Large Section Tunnel

Kawakita, M. T*

Oots, T. R

1. 머리말

일본의 도오메이(東名)·메이신(名神) 고속도로는 1969년에 전 구간이 개통된 이래 일본의 기간 교통망으로서 산업·경제의 발전에 크게 기여했음은 물론 연선지역의 개발에도 중요한 역할을 해왔다. 1996년 현재 고속도로의 총 연장은 6,000km를 넘어서게 되어 오늘날 고속도로의 역할은 더욱더 중요해져서 지역사회에 필요불가결한 사회자본으로서 인식되게 되었다. 그러나 최근 도오메이·메이신고속도로는 예상을 넘는 교통량의 증가로 여러 곳에서 정체가 발생하여 고속도로 고유의 기능인 고속성을 잃어가고 있다.

제2 도오메이·메이신고속도로는 이러한 현상에 대한 근본적인 대책과 도오메이·메이신고속도로를 보완하는 새로운 도로망 형성을 위해 총 연장 490km의 6차선 고속도로로 계획되었다.

이 중에서 현재는 1993년 11월 시행명령이 내려진 303km에 대해 공사를 진행하고 있다.

제2 도오메이·메이신고속도로는 안전하고 쾌적한 고속주행을 확보하기 위해 6차선으로 계획되어 터널의 굴착단면적이 약 200m²인 평활한 대단면 터널이 된다.

표준단면(안)은 그림 1-1과 같다.

또 노선 전체가 주로 산간부를 통과하는 완만한 도로선형을 채택함으로써 구조물 비율이 매

우 높고, 그 중에서도 터널의 정비계획구간은 전체의 20%에 달한다.

현재 계획되어 있는 터널 갯수는 합계 100개. 총 연장은 약 128km이다.

제2 도오메이·메이신고속도로의 터널은 굴착 폭이 18m를 넘는 평활한 대단면으로 되어 있다.

이 정도 규모의 터널은 일본에서도 지하발전소나 석유비축 등의 양호한 암반을 선정하여 시공한 사례가 있을 뿐이고, 아직 대규모 산성구조물 터널의 시공에는 없다. 이 때문에 터널의 안정적이고 합리적인 단면형상과 지부구조 등의 설계상의 과제, 막장의 안정 대책 및 대량의 터널군을 효율적으로 굴착하기 위한 시공상의 과제

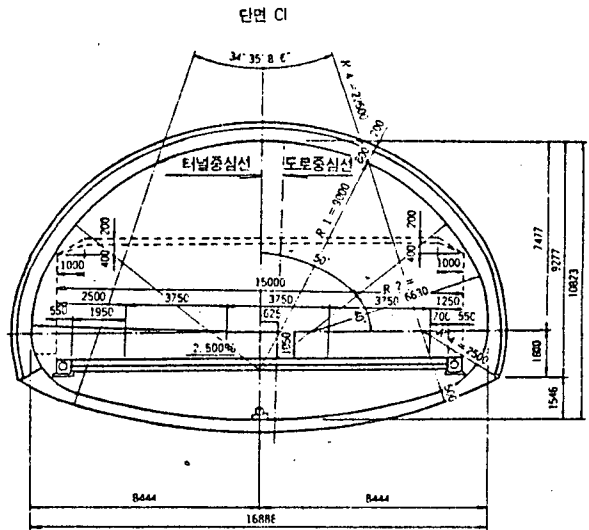


그림-1 제2도메이·메이신 터널 표준단면(안)

* 日本 道路公團 道路技術課

항 목	검 증 내 용	검 증 방 법	검증결과와 반영
• 터널단면형상	경제성과 안전성을 겸비한 단면(가로세로 비율)을 검토	느슨한 토압 지보응력 복공응력	합리적인 단면으로 재검토(가로세로 비율, 인버트반경)
• 지보패턴	각 지보부재의 효과를 검토하여 경제적이면서 또 안정성이 있는 대단면용 패턴을 검토한다.	지반거동 록볼트축력 배면토압 빔칠 콘크리트 응력	표준지보패턴의 재검토
• 2차복공콘크리트의 구조 및 형상	복공두께, 구조의 검증 장기내구성의 검토	동일 지반에서 복수의 복공두께, SFRC 및 유근, 무근을 시행하여 비교검토 복공재하상태 계측	지반구분에 따른 복공두께 및 복공구조(무근 or 철근구조)를 결정
• 인버트	양질지반에서의 공비절감 가능성을 검토 형상, 구조, 빔칠효과 및 장기내구성의 검토	유무, 복수의 형상을 시행해 비교검토 인버트에 작용하는 토압측정	구조, 형상의 결정 설치기준의 설정
• 상하행선의 이격거리	적절한 이격거리의 검토 선진갱 후진갱의 영향정도	후진갱이 선진갱에 미치는 영향을 조사 선진갱의 계측에 의한 거동파악	지반에 따른 적절한 이격거리의 기준설정
• 보조공법 (先受工)	각종 보조공법의 효과 선수공을 도입한 지보구조의 검토	몇 가지의 선수공을 시행해 비교검토 (시공길이, 범위)	지반에 따른 적절한 선수공의 기준작성
• 굴착공법	초(超)대단면 터널 시공에 있어서의 합리적 시공법, 분할 등의 검토	동일 지반등급에서 숏벤치(막장분할, 도갱 포함), CD 등을 시공하여 비교검토	지반에 적합한 기본굴착공법, 분할 등을 책정
• 각부 보강공	효과적인 각부 보강공의 선정과 적절한 시공시기의 확인	지반의 선행변위, 지보공의 변위 계측	보다 간단한 평가방법(2차원 해석 등)의 확립
• 복공의 시공	위와 같음	복공의 품질 확인(타설방법, 탈형시기, 크랙, 방수공 등)	복공 시공법의 확립
• 전방탐사	터널굴착을 안전하게 진행하는데 가장 적합한 전방탐사 방법을 검토	효과적이라고 생각되는 방법의 시행	가장 적합한 막장 전방지반탐사 시스템의 확립
• 종합검토	설계·시공요령 및 기준 등의 작성	시험시공의 결과를 종합적으로 평가하여 각종 대단면용 요령, 기준 등을 작성한다.	

등 기존의 기술을 답습하는 것만으로는 해결할 수 없는 여러 가지 기술적인 과제가 있다. 일본 도로공단에서는 이들 문제에 대해 각종 검토를 해 오고 있으며, 현지에서의 시험시공을 통해 앞

으로도 검토를 계속 해나갈 예정이다. 표-1은 대단면 터널에서의 주요 검토항목과 검증계획을 나타낸 것이다.

여기에서는 이들 검증과제 중 효율적인 굴착

기술에 대해, 특히 TBM도갱 선진 확폭굴착공법에 관한 검토사항 및 기술적 과제에 대해 기술하고자 한다.

2. TBM 도갱 선진확폭굴착공법

1. 굴착공법의 기본안

현재까지 시공된 굴착단면도 130m²급의 3차선 터널 시공방법은 그림-2와 같은 것이 선정되고 있다. 대부분은 지반조건에 맞추어 채택되는데 이 중에서는 상반선진공법이 가장 많고, 지내력이 부족한 갱구부에서는 측벽도갱 선진공법, 막장의 안정이 나쁜 터널에서는 중벽분할공법(CD공법이나 DD공법)이 채택되고 있다. 제2도오메이·메이신터널에서도 기본적으로는 같은 시공법이 검토대상이지만, 연장당 시공수량이 늘어나기 때문에 시공속도를 떨어뜨리지 않기 위해서도 종래 이상으로 크게 분할하여 대형 기계 설비 투입을 검토할 필요가 있다.

여기에 더해 제2 도오메이·메이신의 비교적 연장이 긴 터널의 효율적인 굴착공법으로 TBM도갱 선진확폭굴착공법을 도입하기로 하였다. 이 공법은 대단면 터널의 단면 내에 미리 TBM을 이용하여 도갱을 굴착해 두고, 지질상황의 파악, 물빼기 효과에 의한 지반개량, 지반이 불안정한 개소에서의 사전보강, 굴착시 막장의 안정 확보, 발파시의 심빼기 효과, 공사중의 도갱환기 등 다 목적으로 활용함으로써 효율적이면서 안전하게 확폭굴착을 하는 것이다. 이 공법에 이용하는 TBM의 굴착지름은 도갱에서의 사전보강 등 작업성을 고려하여 $\phi 5.0\text{m}$ 로 하고, 도갱의 위치는 상부 중앙을 기본으로 하여 진행하고 있다. 또 TBM도갱 굴착 후의 확폭굴착은 상반 선진굴착공법을 이용하기로 하였다(그림-3).

또한 TBM도갱 선진확폭굴착공법에 대해서는 제2 도오메이·메이신의 대단면 터널시험시공 공사인 기요미즈(清水) 제3 터널공사와 구리히가시(栗東)터널 공사의 결과를 근거로 하여 이

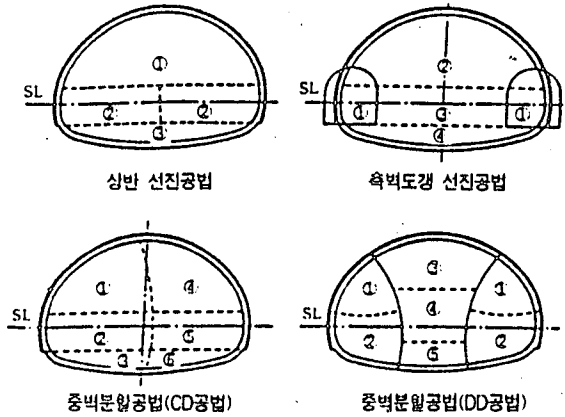


그림-2 대단면 터널의 굴착공법

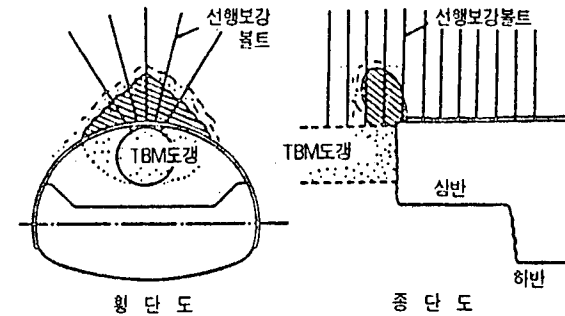


그림-3 TBM도갱 선진확폭굴착공법 개념도

공법의 적용범위를 결정해 갈 예정이다.

2. TBM도갱 선진확폭굴착공법 시험 시공의 평가

제2도 오메이·메이신터널에서의 시험시공에 앞서서 1993년~1995년에 걸쳐서 아키다(秋田) 자동차도로 유다(湯田) 제2터널(L=2.413m)에서 2차선 터널에 대한 시험시공을 실시하였다. 시험시공에서는 $\phi 3.5\text{m}$ 의 폴실드형 TBM에 의해 상부 중앙도갱을 시공하고, 그 후 전단면에서 확폭굴착을 하였다.

이 시험시공에서 검증된 항목을 아래에 기술한다.(사진-1, 2)

(a) TBM도갱의 굴착

유다(湯田) 제2터널은 지질의 변화가 심해서 TBM굴착에 그다지 적합한 지질조건은 아니었

지만, 본격 굴진에 들어간 구간에서는 월간 300m 정도의 진행(최대 월진 335m)이 가능하였다. 이에 따라 TBM에 의한 고속굴진의 목표가 세워졌다.

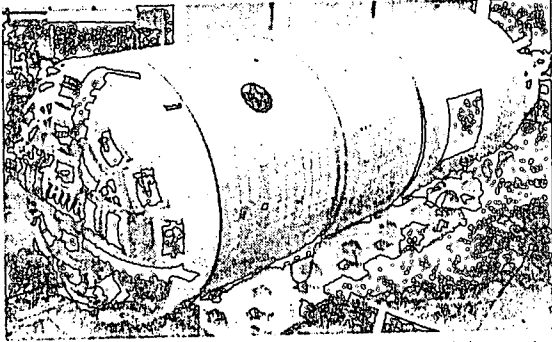


사진-1 유다(湯田) 제2터널에서 사용된 TBM(φ3.5m)



사진-2 유다(湯田) 제2터널에서의 화폭굴착상황

(b) 물빼기효과

유다(湯田) 제2터널에서는 TBM도갱 굴착시의

구간 용수량의 총계는 약 1,300l/min이었지만, 도갱관통 후에는 600l/min으로 감소하였다. 또 화폭굴착시 막장 상태가 상반부는 도갱주변 외에는 거의 마른 상태라서 상반의 막장이 안정되어 시공성이 크게 향상된 것으로 보고되고 있다.

(c) 화폭굴착의 진행과 지보패턴

화폭굴착에서는 TBM도갱으로 인해 전방의 지질상황을 파악할 수 있다는 점, TBM도갱이 존재함으로써 막장의 안정성이 높아지고 있는 점, 물빼기 효과에 의해 지반이 개량되고 있는 점 등을 고려하여 표-2와 같이 1발과 진행길이를 1단계 올리고 여기에 맞추어 종단방향의 록볼트 간격도 진행길이기도 똑같이 넓혀 시공하여 별다른 문제없이 시공할 수 있었다.

또 실제 시공속도는 상기 조건에서 상정했던 것에 비해 1.3~1.8배 정도 더 빨리 시공되고 있는데 이것은 전방의 지질상황이 파악되기 때문에 지보패턴 선택을 예정대로 할 수 있었고, 보조공법의 시공이 거의 없었기 때문이다.

(d) 환기효과

관통하고 있는 TBM도갱을 이용하여 환기를 함으로써 화폭공사중 터널 내를 효율적으로 환기시킬 수 있다. 유다 제2터널에서는 본갱서쪽 갱구를 차폐하고 거기에 팬을 장치해 갱내 공기를 빨아 내는 동쪽 갱구에서 흡기, 서쪽 갱구에서 배기를 하는 환기방식을 채택하였다. 이 터널

표-2 유다(湯田) 제2터널과 표준터널의 지보패턴 비교

패 턴	TBM도갱 선진 전단면굴착공법								일 반 NATM									
	굴 진 길 이 (m)	록 볼 트				강제 지보공		숫 크 리 트 (cm)	2 차 복 공 (cm)	굴 진 길 이 (m)	록 볼 트				숫 크 리 트 (cm)	2 차 복 공 (cm)		
		길 이 (m)	간격(m)		상 반	하 반	상 반				하 반	길 이 (m)	간격(m)				상 반	하 반
			둘 레 방 향	연 장 방 향									둘 레 방 향	연 장 방 향				
CI	2.0	3.0	2.0	1.5	없음	없음	10	30	1.5	3.0	1.5	1.5	없음	없음	10	30		
CII	1.5	3.0	1.5	1.5	H-125	없음	10	30	1.2	3.0	1.5	1.2	H-125	없음	10	30		
DI	1.2	4.0	1.2	1.2	H-125	H-125	10	30	1.0	4.0	1.2	1.0	H-125	H-125	15	30		

에서 채택된 환기방식과 일반적인 터널(TBM도갱이 없고 연장이 같은 터널)의 환기방식을 비교하면 이 유다 제2터널의 환기설비는 일반 터널의 3/4로 경감된다. 이것은 TBM도갱을 통풍관으로 사용함으로써 압력손실이 작아지는 점(압력손실은 통풍관 지름의 5곱으로 반비례)과 누풍율이 작기 때문이다.(그림-4)

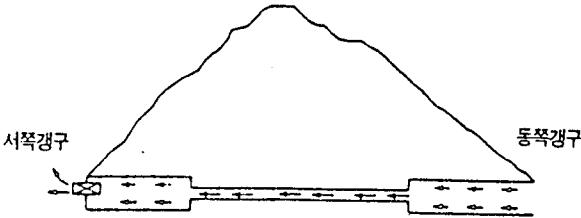


그림-4 유다(湯田) 제2터널에서의 공사중 환기방식

(e) 심빼기 효과

TBM도갱 선진확폭굴착공법에서는 확폭굴착시에 TBM도갱이 자유면이 되기 때문에 폭파를 위한 천공 수와 장약량을 줄일 수 있다. 이 터널에서 확폭굴착시의 단위면적당 사용된 천공수와 장약량의 실적은 표준적인 벤치식 굴착공법에 비해 약 30% 줄어들었다. 그러나 이 터널의 지질이 비교적 연질이었으므로 정량적인 평가를 위해서는 지질조건이 다른 터널에서의 검증이 필요하다.

3. TBM선진도갱의 효과적인 활용

TBM도갱 선진확폭굴착공법의 앞에서도 기술했지만, 유다(湯田) 제2터널에서의 시험시공으

로 효과를 확인할 수 있었다(표-3).

이러한 이점을 살려 TBM도갱을 보다 적극적으로 활용하여 대단면 터널을 더욱 효율적으로 시공하는 것이 중요한 과제라 할 수 있는데 현재 아래와 같은 항목이 검토되고 있다.

표-3 TBM도갱에 의한 효과

항 목	효 과 내 용
물빼기 효과	시공성·안전성의 향상, 보조공법의 감소
지질조사 효과	지보패턴, 보조공법의 적성화
심빼기 효과	폭파효율의 향상, 폭파소음·진동의 저감
갱도환기효과	환기설비·동력의 경감, 대용량 환기의 가능성

(a) TBM도갱에서의 사전보강·선행지보

확폭굴착시 천단의 누락·붕락에 대해 TBM도갱에서의 사전 안전대책으로서 도갱에서부터 케이블볼트 등으로 사전보강과 선행지보 시공을 계획하고 있다.(그림-5)

이러한 방법은 지금까지 일본의 터널공사에서 표준적으로 활용된 사례가 없기 때문에 아래와 같은 과제가 있다.

① 도갱에서부터 케이블볼트 등을 급속히 타설할 수 있는 시공시스템의 확립.

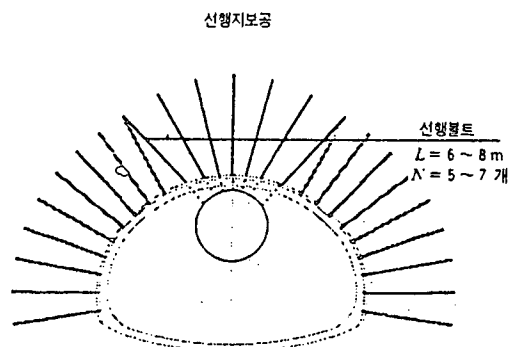
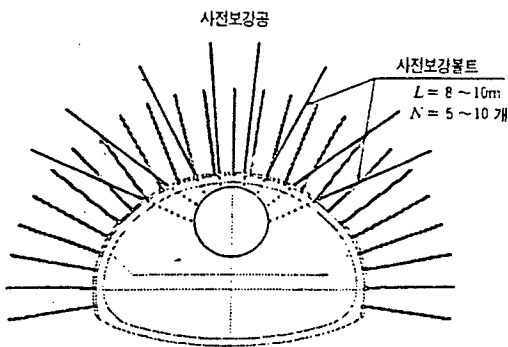


그림-5 사전보강공·선행지보공의 계획(안)

천공·삽입·정착재 충전 등에 대한 두가지 측면에서의 검토(재료 및 시공기계)는 2차선 터널에서의 시험시공으로 기본적인 시공성을 확인하였다. 그러나 본격적인 시공을 위해 기요미즈(清水) 제3터널에서 확인된 시공성을 검증할 예정이다.

② 지반성상의 차이로 인해 천단의 누락 혹은 봉락의 발생 가능성을 따져보고 범위 및 하중의 정도를 정량적으로 파악할 필요가 있다. 여기에 대해서는 이완 범위, 하중 등을 계속하여 검토할 예정이다. 또한 당초 계획에서는 TBM도갱 굴착시에 봉락이 발생한 개소에 8~12m의 케이블볼트로 사전보강을 계획하였다.

③ 확폭굴착과 병행작업이 가능하게 되면 사전보강·선행지보 작업의 효율을 현격하게 높일 수 있다. 따라서 효율적인 작업순서를 검토할 필요가 있다.

(b) TBM도갱내 계측치의 효과적인 이용

TBM도갱에서 얻을 수 있는 선행변위(TBM 시공시+본갱 접근에 따른 변위)로 인해 사전에 본갱의 지보패턴과 보조공법을 상정할 수 있다. 여기에 대해서는 선행변위와 본갱 굴착시의 변위량, 시공지보패턴 등의 관련을 분석해 검증할

예정이다.

(c) 도갱을 이용한 효율적인 폭파방법 검토

TBM도갱으로부터 터널 횡단방향에 선상으로 발파구멍을 선행굴착하여 폭파하는 팬컷트드릴 공법의 채택을 검토하였다. 이 공법은 극히 일부의 광산에서 실시하였던 사례밖에 없지만 TBM도갱의 사용에 따라 다른 작업으로부터 독립하여 천공작업을 할 수 있기 때문에 사이클타임이 단축되어 급속시공이 가능하게 된다.(그림-6)

그러나 발파구멍이 선상으로 되기 때문에 선단부와 입구의 간격이 크게 다르고, 각 구멍의 길이가 각기 다르기 때문에 장약량, 구멍 간격의 설정방법이나 작업정밀도의 확보 등의 과제가 있다. 또 TBM도갱에서 뿐만 아니라 주변 구멍에 대해서는 막장 방향에서의 천공도 검토할 필요가 있다.

또 막장으로부터의 폭파방법으로는 뇌관·폭약 등의 새로운 재료를 이용한 효율적인 폭파기술을 검토하고 있으며, 특히 천단부의 안정성과 여굴의 감소를 꾀할 수 있는 초정밀도뇌관 등을 이용한 스무스블래스팅의 도입도 고려하고 있다. 그러나 종합적인 경제성도 고려되어야만 한다.

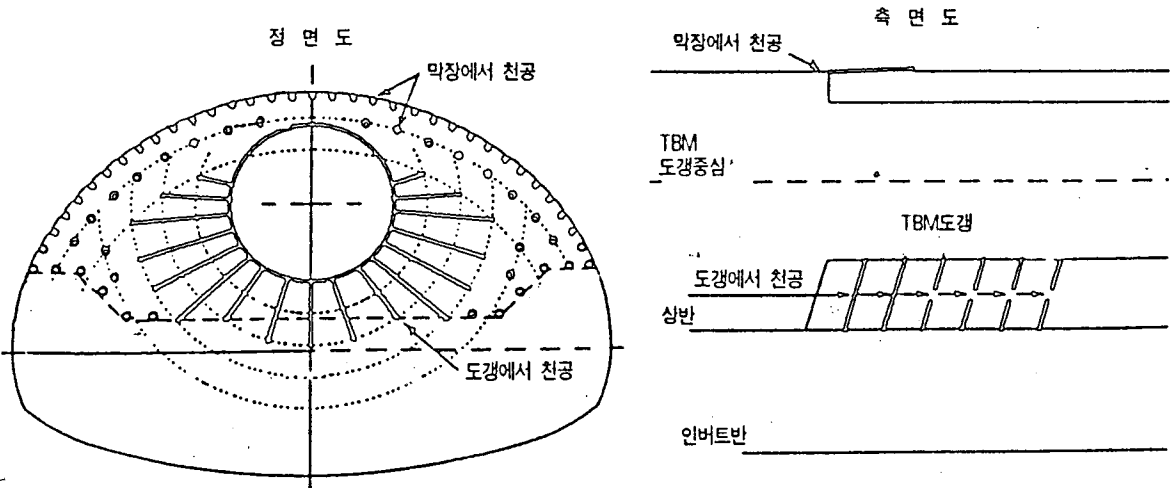


그림-6 도갱을 이용한 폭파방법 개요도

3. 기요미즈 제3터널에서의 시험시공

제2 도오메이 기요미즈(清水) 제3터널공사(신 세3기 사암·이암 위주의 지질)는 제2도오메이·메이신의 대단면 터널 시험시공 공사로서 1995년 3월에 발주되었다. 이 공사는 TBM도갱 선진확폭 굴착공법을 채택하였으며, 1996년 6월에 TBM 도갱굴착을 위한 TBM이 굴진을 시작하여 1997년 5월에 굴착을 완료하였다. 그 후 계속되는 확폭굴착에는 앞서기술한 TBM도갱효과의 확인을 시작으로 지반의 변위·이완 영역·지보 부재에 생기는 응력 등 여러가지를 계측함으로써 단면형상, 터널지보구조, 최적 지보량, 인버트 및 복공구조 등의 검증을 실시할 예정이다.

이 공사의 TBM도갱은 지질상황을 고려하여 동쪽 갱구 바로 앞에서 U턴 하기로 하였다. 또 도갱굴착에 이용되는 $\phi 5.0\text{m}$ 의 TBM은 불량지질에서도 대응이 가능한 실드타입 기계이며, $R=30\text{m}$ 의 급곡선 시공이 가능한 중절기구를 갖추고 있다(그림-7, 사진-3).

현재까지는 TBM도갱 굴착이 완료된 정도이므로 여기에서는 현시점에서 확인된 항목에 대해 소개한다.

(a) 물빼기 효과

하행선 굴착시에는 평상시 용수량 $80\text{l}/\text{min}$,

최대 용수량 $700\text{l}/\text{min}$ 의 돌발용수도 확인되었지만 U턴 후의 상행선 시공시에는 용수가 거의 없었으므로 TBM도갱에 의한 물빼기 효과는 충분히 확인되었다고 할 수 있다.

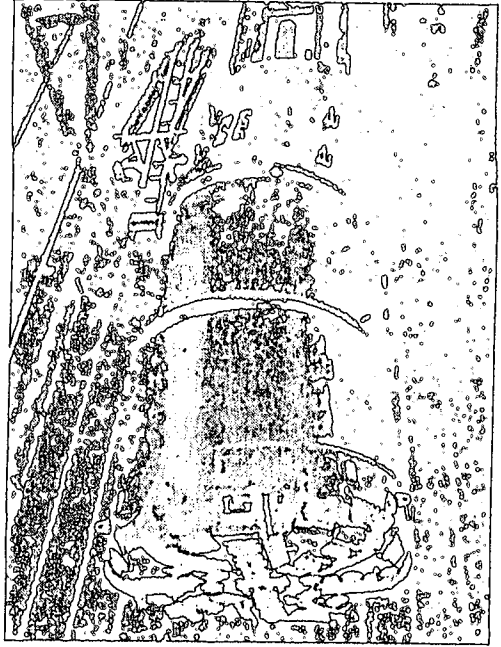


사진-3 기요미즈(清水) 제3터널에서 사용된 TBM($\phi 5.0\text{m}$)

(b) TBM의 굴진속도

상하행선의 월평균 굴진속도를 비교하면 표-4

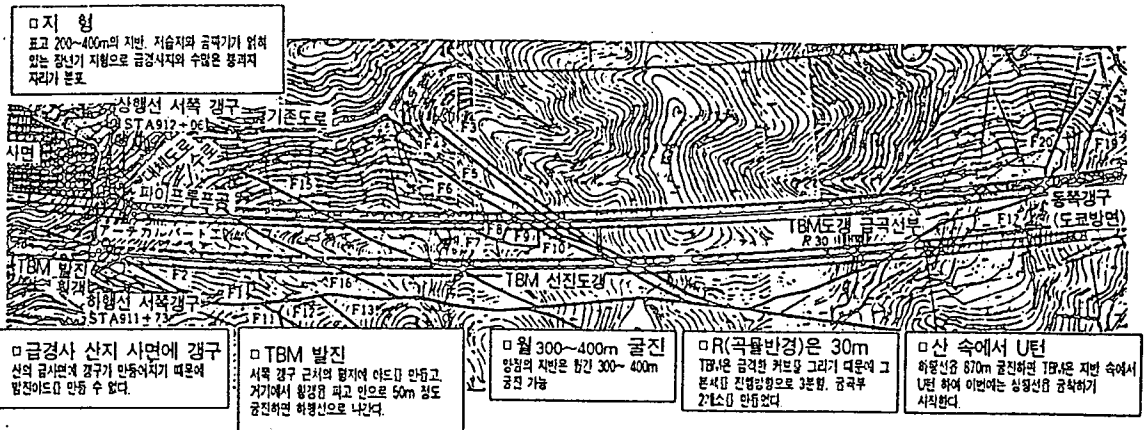


그림-7 기요미즈(清水) 제3터널 평면도

와 같이 U턴 후 상행선 굴착시의 진행이 빠르다. 그 요인으로는 주로 물이 빠짐으로써 물빠기 등의 대책이 불필요하였다는 점과 붕락후의 대책을 원활하게 시공할 수 있었다는 점을 들 수 있다.



사진-4 기요미즈(清水) 제3터널 TBM의 관통상황

표-4 기요미즈 제3터널 TBM 추진속도 실적

시 공 구 간	TBM 월간 굴진속도 (m/월)
하행선 굴착시	233
상행선 굴착시(U턴 후)	280

c) 그 외의 효과

TBM도갱에서 지질을 확인함으로써 확폭굴착의 시공방법 결정에 참고가 되는 지질데이터를 충분히 얻을 수 있었다. 또 붕락개소와 균열이 많은 개소에 대해서는 도갱에서 선정보강이 필요한 개소를 판단할 수 있어 확폭굴착에 크게 도움이 되었다.

4. 맺음말

TBM도갱 선진확폭굴착공법에서의 확폭굴착은 이제부터 본격적으로 시작이다. 앞으로 시험시공을 통해 이 공법에 관계된 과제의 검증은 물론, 여러 가지 기술적 과제에 대해 검증·검토를 통해 대면 터널의 합리적인 설계, 효율적인 시공법을 확립해야 할 것이다.

또 터널구조체의 구축 외에 환기방법, 조명방법, 고속도로 지역에서의 교통운용 등 여러 가지 과제가 남아 있다. 이들 과제에 대해서도 충분히 검토하여 안전하면서 또 쾌적한 주행을 확보할 수 있는 터널을 건설해 나갈 예정이다.

大深度 地下鐵道

都心地의 新設鐵道建設은 過密化로 인하여 地上은 물론 地下에도 점차 困難視되고 있다. 大深度가 되면 既設의 地上, 地下 構造物에 미치는 影響이 적고 驛과 驛을 近線으로 맺어지는 merite가 있다.

