

파쇄대 팽창성 암반구간에서 터널의 붕락 후 응급대책과 경제성 및 안정성을 위한 대체공법 검토



- 우리협회 사외이사
- 건설안전기술사
- 토목시공 기술사
- 도로 및 공항 기술사
- CMP 자격증
- APEC 자격증

유길환 | 쌍용건설 상무

본 논문에서는 세계적으로 알려져 있지 않은 팽창성 암반 내에서 TBM터널을 굴진하는 중에 발생한 붕괴사례를 연구대상으로 하고 있다. 터널 붕락이후 긴급한 지반보강을 실시하여 추가붕락을 예방하였고, 계측기를 매설하여 계측을 통한 지반거동을 분석하여 터널의 안정성을 확인하였다. 또한, 미 굴착구간은 다양한 지반조사와 수치해석을 통한 예측분석을 실시한 결과 현 공법으로 터널을 계속 굴진할 경우 추가붕괴현상이 예측되어서 경제성 및 안정성을 바탕으로 대체공법이 검토·적용되어 굴진이 완료되었다.

1. 서론

터널 기계화 시공은 인건비 감소와 경제성 및 공기단축과 환경 문제 등에 대응하기 위하여 터널 굴착의 주류로 발전되어 오고 있다. 다양한 터널 시공이 증가하면서 설계단계에서 암반 거동을 예측하기 위한 수치해석 기법들도 급속도로 발전하였다. 이러한 수치해석 기법은 터널지하 공동, 구조물의 기초, 사면 및 시공 중 구조물

의 안정성 모니터링에 이르기까지 적용범위가 확장되면서 지중 구조물의 효율적 설계에 기여하였다. 하지만 지중 구조물의 역학적 거동을 정확하게 예측하는 것은 아직까지 쉽지 않은 문제이며, 예측의 신뢰도는 해석에 사용되는 입력자료의 정확성에 전적으로 의존한다.

녹산 하수처리 방류관거 제 2터널에서 발생한 TBM의 Jamming으로 인한 공기지연을 극복하기 위하여 신속한 터널 내 지반조사와 선행지반 계측을 통해 터널공법 변경이 이루어졌다. 변경된 공법은 터널의 시점부로부터 Shield TBM이 굴착하는 것이며, 이로 인하여 현 막장면에서 TBM을 수거해야 하고, 기 굴착된 공간에서의 안정성을 검토할 필요가 있다. 본 논문에서는 막장면에서 계측을 통한 터널 거동을 실측하여 향후 안정성을 검토하였으며, 정밀 조사로부터 산출된 설계정수를 이용하여 유한 요소법에 의해 현 막장 및 미굴착 구간의 안정성 평가를 실시하였으며 경제성과 안정성을 바탕으로 공법변경되어 성공적으로 굴진이 완료되었다.

2. 대상현장 및 붕괴현황

2.1 현장개요 및 지반특성

부산시에서는 협소한 도시공간의 해결을 위해 강서지구 개발사업을 중점적으로 추진하고 있으며, 이곳에서는 녹산 국가산업단지, 명지주거단지, 신호 산업단지 및 신항만이 연계되어 건설되고 있다. 녹산 국가 산업단지 및 인근지역의 발생하수를 통합처리하는 녹산하수처리장 방류관거는 연안해역의 오염방지로 인한 어족보호 및 낙동강 하구 철새도래지 보존에 따른 환경문제 해결 측면에서 문화재 보호구역 외부에 위치한 가덕도 동남단 해저수심 10m 이상 심해에 방류되도록 설계되었다.

Fig.1 가덕도 일원의 지질도에 나타난바와 같이 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 매봉, 국수봉지역에 분포하고 있으며, 관입 시 심한 열 변질로 납석화 및 고령토화 작용을 받아 이 일대가 온통 백색의 표면색을 띤다.

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

2.2 터널붕락 현황 및 보강

본 연구의 대상현장은 녹산 하수처리장 방류관거 현장의 제2 육상관로터널 구간으로, 가덕도 산악지대를 관통하는 4490m 연장의 TBM 터널로 설계되어 시공 중 3776m구간에서 터널붕락으로 인한 TBM 헤드부의 Jamming으로 공사가 중단되었다.

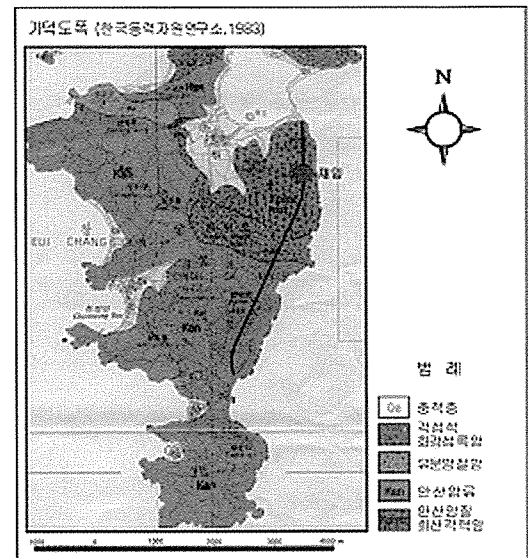


Fig 1. 가덕도 일원의 지질도

본 연구의 대상현장의 사고지점은 당초 지질조사에서 안산암과 화산각력암이 넓게 분포하는 가덕도의 중앙부에 화강섬록암이 관입되어 형성된 화산각력암 측의 지층경계부를 통과하는 지대로서 불안정한 지반출현을 예측하였으나 경제적인 측면에서 산악지반에 유리한 TBM으로 설계되어 터널을 굴진하였다. 하지만 예측한 것보다 심한 상태의 연약대가 출현하여 TBM Jamming과 지하수 유출과 함께 암반의 부분적인 붕락이 발생되

었다. 특히 Fig 1 과 Photo 1 및 2에 나타난 바와 같이 TBM Head부 지점과 Clamping Pad가 암반에 밀착되는 부분을 중심으로 터널 천단부에 붕락이 크게 발생되었다.

TBM Jamming이 발생한 변질대 구간에서 터널의 단기적인 안정성을 확보하기 위하여 붕락된 버력을 인력으로 제거하면서 강지보와 와이어 메쉬를 30~50cm 간격으로 설치하였고, 강지보와 강지보 사이를 강도류판으로 보강하여 터널의 붕락을 방지하였다. 그리고 일부 붕락이 발생된 구간의 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 콘크리트를 부어서 굳어진 것과 같이 작업이 불가능하여 TBM을 구동하였으나 실패하였다.

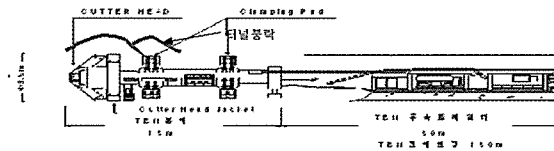


Fig 1. TBM Jamming 및 붕락위치

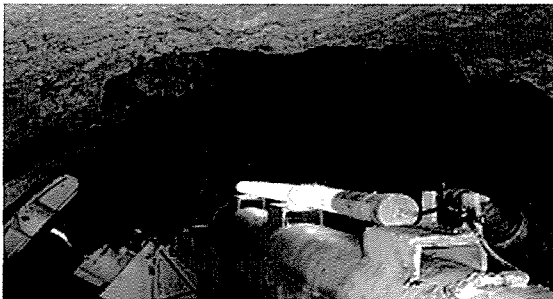


Photo 1. Clamping Pad부 붕락



Photo 2. TBM Head부 붕락

3. 터널붕락과 TBM Jamming의 원인 분석을 위한 지반조사

터널 붕락 및 Jamming이 발생한 구간에서 지질 및 암질의 조사는 터널붕락 및 TBM Jamming의 원인을 분석하고, 수치해석을 통한 터널의 안정성확보를 위한 설계정수로 사용하기 위하여 세밀하게 수행되었다. 조사 구간은 TBM 터널의 진행방향에 따라 변질대 구간이 발달된 3,726m에서 3,776m까지 50m구간에 대해 갱내 지질조사와 함께 각 5m 간격으로 암석 코어 및 함몰암석을 채취하여 암반의 공학적 특성을 검토하였다.

Table. 1은 일반적인 암석의 역학 특성치와 연암 및 Jamming이 발생된 구간에서의 암석에 대한 역학 특성치를 비교한 것이다. 조사된 팽창성 암반은 일반 암석의 역학 특성치 중 가장 열악한 값이나 그 이하의 값을 나타내고 있으며, 비교적 약한 연암층보다 열악한 역학치를 가지고 있다. Jamming구간의 암석은 팽윤도 시험결과 약 30%정도의 팽윤도를 나타내며, 이로부터 Jamming 위험이 있는 팽윤도는 30%내외일 것으로 판단되며, 정량적 기준이 될 수 있는 팽창압의 범위와 팽창변형률은 포항이암층의 Slaking, 팽창 및 전단강도 특성(이영휘,

1996)에서 0.1kg/cm² ~ 10kg/cm², 0.4%~35%의 범위를 보인 것으로 보고 되어있다. 표. 1은 암반을 분류하기 위한 시험 및 광물분석을 통하여 연약지반과 연구대상 지

반의 팽창성 암반 특성을 비교하여 팽창성암반의 붕락 위험 가능성을 판별하는 기준으로 선정하였다.

Table. 1 연구대상 지반의 팽창성 암반 특성

시험 종류		결과의 범위	연암인 경우	팽창성암(붕락지점)	
일반암반분류	RQD	25이하~90이상	25~50	20	
	Q분류	1.0이하~40.0이상	1.0~4.0	0.007	
	탄성파탐사	700~4,200m/s	1,200~2800m/s	1,200m/s	
	슈미트해머에 의한 압축강도	50이하~2,000이상	280~560kg/cm ²	51kg/cm ²	
	RMR	20이하~100이상	21~40	14~13	
	Q-system	0.001~1,000	-	0.001	
	SRF(응력저감지수)	20.0~0.5	-	15~10	
실내시험	비중	1.8~3.2	2.0~2.5	2.10	
	실내 탄성파속도	2,000~5,800m/s	2,700~4,300m/s	1500m/s	
	점하중강도	50이하~2,000kg/cm ²	280~560kg/cm ²	45kg/cm ²	
	슬레이크내구성	30이하~98이상	30~60	18	
광물분석	육안관찰	회색	회색	담회, 회백, 절리발달	
	침수후강도변화	50이하~2,000kg/cm ²	138 ~ 251kg/cm ²	측정불가	
	XRF(안산암)	SiO ₂ 함량		61.36%	63.39~68.87%
		Na ₂ O함량		1.82%	0.30~0.39%
	팽윤도	-	-	30%	
	XRD분석	albite, calcite, clinochlore, muscovite, quartz	calcite, clinochlore, muscovite, quartz	quartz, muscovite, kaolinite, zeolite	
	편광 현미경 관찰	석영, 사장석, 불투명광물		석영, 사장석, 불투명광물, 점토광물	
Swelling Test	팽윤압 : 0.1kg/cm ² ~ 10kg/cm ² , 팽창변형률 : 0.4%~35%				

4. 터널붕락이후 굴진여부의 결정을 위한 물리탐사

터널붕락이후 막장부와 미굴착구간을 대상으로 지반 조사를 실시하여 선형지반을 예측하고 굴착 위험구간을 분석해서 현 TBM으로 계속 굴착할 수 있는지를 검토 하였다. 먼저 미굴착구간의 지반조사 기법으로 외측에서 접근 가능 구간에 대해서는 지표부로부터 전기비저항 탐사를 스웨덴 ABEM사의 Terrameter 장비를 이용하여 한국 자원 연구소에서 개발된 DIPRO를 사용한 역산을 기초로 해석을 수행하였으며, 막장부와 막장 전방의 암반을 대상으로 터널굴착 위험구간을 분석하기 위하여 발전된 탄성과탐사인 3D-TSP탐사를 실시하였다.

두 가지 방법의 지반 탐사에 의한 선형지반의 위험성 예측·분석 결과 전기비저항 분포를 통해 TBM 터널굴진 시 취약대구간은 Fig. 3의 1차 조사구간과 Fig. 4의 2차 조사구간에서 탐사된 결과로부터 터널 시점구간 40m와 300~620m 구간 320m로서 총 360m 구간으로

예상된다. 그리고 단층 파쇄대와 절리군이 교차하는 지점 310~330m, 480~500m, 600~620m는 터널붕락이 발생할 가능성이 있는 것으로 추정되었으며, 3D-TSP (3 Dimensional Tunnel Seismic Prediction)탐사 결과는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 막장 전방 미굴착구간에서 좌측면보다 우측면의 역학적 특성이 열악한 것으로 예측된다. 예상되는 TBM thrust는 20~30bar, RMR은 10~20내외(NATM 시공시 Type V), 원지반의 탄성계수는 3~4GPa이 주를 이룰 것으로 판단된다. 예측거리 300m구간은 대체적으로 현 TBM 본체가 위치해 있는 구간에 비해 열악한 편이나 그중 특히 No.6+93~+37구간 56m, No.5+97~+84구간 13m, No.5+55~+52구간 3m에서는 붕락의 위험을 내포하고 있는 곳으로 TBM 굴진에 어려움을 겪을 것으로 예상되고 있으며, 거리오차 및 noise 영향으로 인하여 분석 신뢰도가 떨어지는 400m 구간 예측에서도 No.5+27~+4+79구간의 약 50m에서 TBM 굴진 위험구간이 또 다시 출현할 것으로 우려된다.

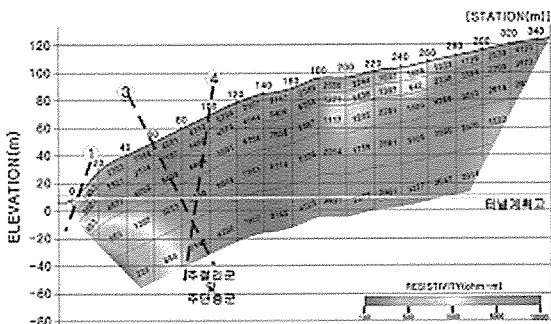


Fig 3. 1차 조사구간의 전기비저항 탐사결과

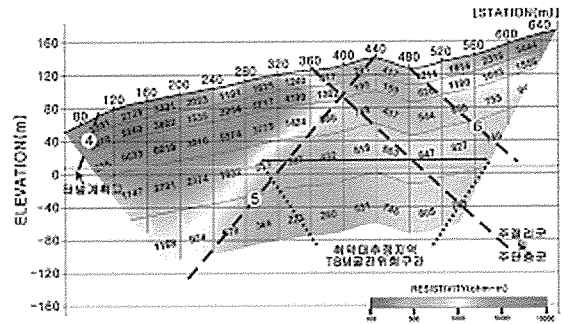


Fig 4. 2차 조사구간의 전기비저항 탐사결과

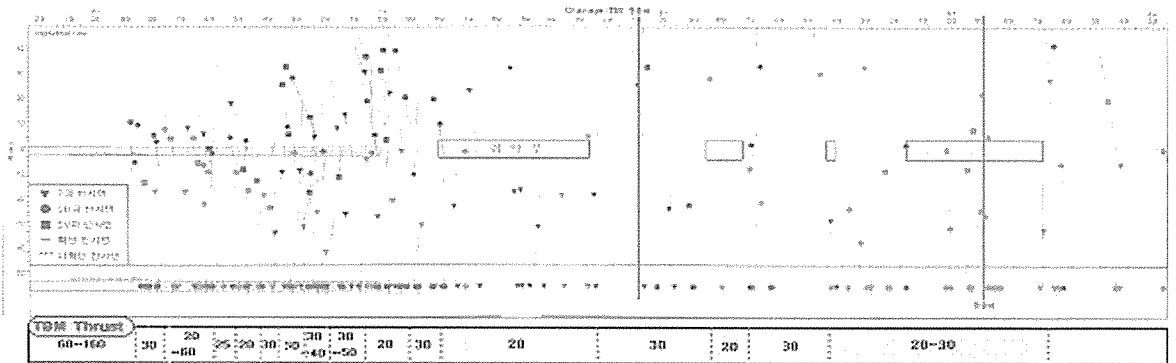


Fig 5. 막장 전방 미굴착구간 지반에 대한 3D-TSP결과

5. 팽창성암반의 붕락가능성 분석

5.1 계측을 통한 막장의 안정성 평가

터널붕락지점 지반보강 통한 지반의 거동을 분석하여 터널의 안정성을 확인하기위하여 계측기를 설치하였다. 계측 계획 구간은 당초 막장면으로부터 5m 및 10m 지점의 강변질대 구간에 2개소를 설정하였으나, 천공작업 시 연약지반 구간에서의 암반 이완 현상으로 흠이 형성되지 않아 막장면으로부터 13.5m 지점과 19.5m 지점을 계측구간으로 재설정하였다.

계측 시점의 막장 현황은 Fig 6에 나타난 바와 같이 막

장면 지반보강을 3~4m 깊이로 그라우팅이 완료된 상태이며, 강변질대 구간인 막장 후방 약 25m 지점까지는 50~30cm 간격으로 강지보를 설치하고, 강지보와 강지보 사이의 공간을 강토틀판으로 보강하여 붕락 및 지반 팽창을 억제하였다.

계측항목으로는 내공변위, 천단침하, 지중변위 및 락볼트 축력 등을 대상으로 측정이 실시되었으며, 측정공은 A 및 B지점 동일하게 직경 38mm로서 터널 축선을 기준으로 상부 5개소에 1m단위로 4m깊이까지 천공하였다. 계측기간은 약 2개월에 걸쳐 실시되었고, 총 27회 계측이 이루어졌다.

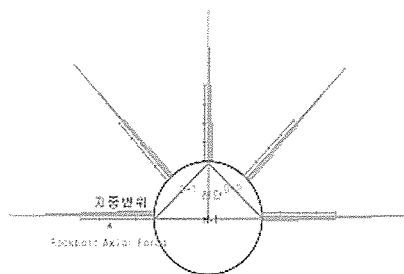
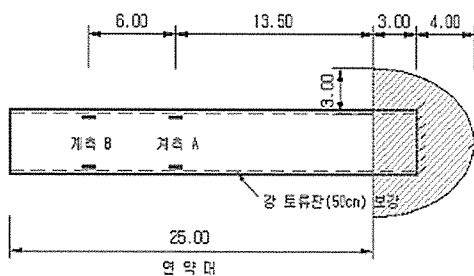


Fig 6. 계측기 매설위치 및 매설 현황

시간경과에 따른 천단침하량은 A지점과 B지점 동일하게 천단침하는 1mm정도의 변위가 발생하였으며, 내공변위 측정 결과도 수평측선 H-1의 경우 0.19mm의 변위가 발생하였고, D-1과 D-2의 경우, 0.1mm이하의 미소한 변위가 발생되었다.

지중변위와 록볼트 축력은 1m, 2m, 3m 및 4m 깊이로 다점식 매설하여 심도별 변위를 알아보았다. 계측결과는 지중변위는 모두 1.0mm이하로 발생하였으며, 록볼트 축력도 계측된 결과가 1.5mm이하의 미소한 변위가 발생되었다. 이는 본 현장이 연약대임을 감안할 때, 굴착당시 붕락과 지반 불안정에 따른 초기지보 설치로 인한 안정성 확보와, 굴착시점과 계측시점간의 오랜 시간경과에 따른 원지반의 자체 안정화에 의한 결과로서 추가 지반보강은 필요치 않은 것으로 판단되었다.

5.2. 수치해석을 통한 TBM 해체공간과 미굴착 구간의 안정성 평가

본 연구에서의 수치해석은 상용프로그램인 Pentagon 3D를 이용하였다. 실내시험 결과를토대로 작성된 설계

정수를 해석에 사용하였으며, 해석 구간은 TBM붕락구간인 Sta. No. 07+63~No. 07+13 지점과 3D-TSP탐사 및 전기비저항탐사 구간의 미굴착구간 Sta. No. 07+13~No. 00+20지점을 대상으로 하였다.

수치해석은 무지보 굴착에 대한 해석과 TBM공법을 이용하여 굴착한 경우의 해석 결과값을 Fig. 7와 같이 나타내어 미굴착구간의 변위와 이완영역 분포를 평가하였다. 미굴착구간 내의 이완영역대로는 Sta. No. 07+19, Sta. No. 06+53, Sta. No. 05+90, Sta. No. 05+55, Sta. No. 04+60 등 5개 지점을 중심으로 분포하였으며, 특히, Sta. No. 06+50지점에서 최대 천단변위 65mm와 측벽변위 50mm가 발생하여 가장 취약한 구간으로 평가되었다.

위의 방법을 통하여 미굴착 구간의 안정성을 평가한 결과, 다수의 취약구간이 산재할 것으로 판단되었고, TBM thrust(굴진압력)가 낮은 값을 보임에 따라 지속적인 TBM 공법을 통한 굴진은 현 시점과 같은 Jamming이나 붕락과 같은 위험한 상황이 출현하게 되는 충분한 가능성을 내포하고 있을 것을 판단되었다.

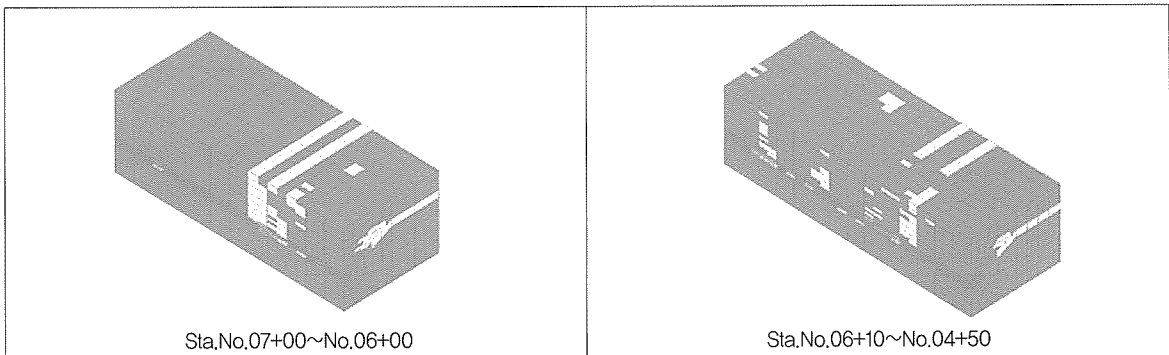


Fig 7. 미굴착구간의 변위와 이완영역 분포

6. 미 굴착구간의 대책공법선정

미굴착구간의 선형예측 및 수치해석 결과 TBM공법으로 굴착할 경우 문제가 발생할 가능성을 내포한 구간은 Fig. 8에 나타난 바와 같이 총 굴진거리 713m 중 절반 이상인 413m이다. 이러한 불리한 지반은 1m 굴진 후 지반보강 및 pre grouting 등 보조공법을 병용하여 통과하여야 하므로 공사기간이 지연될 뿐 만 아니라, Jamming이 발생할 경우에는 TBM의 구동이 불가능하므로 공사가 중단되게 될 것이다. 따라서 경제성 및 안정성을 바탕으로, TBM 해체 후 가장 최적의 공법 선정을 검토하였다.

당초설계 시 미굴착구간의 예정공기는 TBM 굴착 2.2개월, 장비반출 1개월, 라이닝 콘크리트타설 10.3개월 등 총 13.3개월이 소요되며, 공사비는 45.6억원으로 책정되었다. 하지만 미굴착구간의 소성영역대에서 추가적인 Jamming이 발생되면 그에 따른 추가경비와 공기지연이 불가피하다. 이에 공기 및 경제성을 고려하여 공법변경을 실시할 경우 역방향에서 굴진해서 현 막장과 관

통되도록 하는 두 가지 대책방안이 검토되었다. Table 2에 정리된 바와 같이 공법변경 1안(Shield-TBM)과 공법변경 2안(NATM)을 비교·검토한 결과, 2안은 발파에 의한 민원발생 및 공기지연에 따른 추가경비가 소요되기 때문에 배제되었으며, 공사비가 70억 정도 증액되었지만 그 외의 추가경비가 발생되지 않는 1안이 변경공법안으로 결정되었다.

공법변경으로 인한 현 막장에서 굴진이 중단된 TBM 기계를 해체하여 회수하기 전 TBM Jamming과 터널상부 붕락이 발생된 구간에 Pregrouting을 실시하고 TBM 헤드부 강판을 지반에 남겨두어 해체공간의 안정성을 확보하였으며, 지반 팽창으로 인한 붕락된 막장은 강도류판을 설치한 후 내부 Grouting 뒷채움으로 응력집중을 예방하였다.

또한, 앞에서 기술된 바와 같이 미굴착구간의 안정성 평가 결과로부터 현행되었던 TBM공법으로 계속 굴진할 경우 소성영역대에서의 추가적인 Jamming 발생 가능성이 확인되어 경제적인 여건을 고려한 종합적인 분석결과 공법변경의 당위성이 입증되었다.

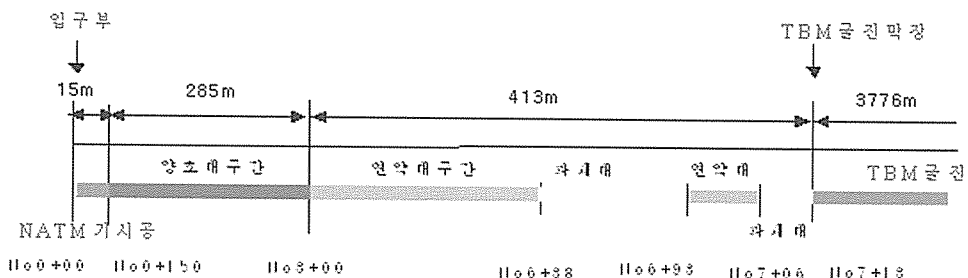
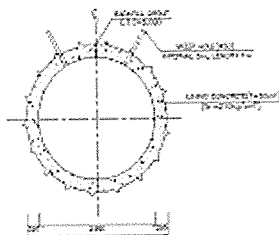
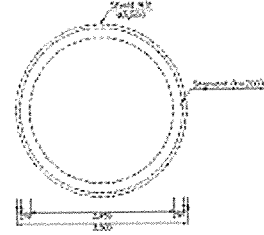
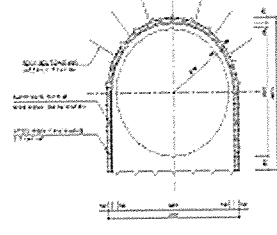


Fig 8. 탐사를 통한 지반분포 현황

Table 2 대책공법의 경제성 및 안정성 검토(녹산방류관거 공법변경보고서, 2004)

구분	당초(TBM)	변경 1안(Shield-TBM)	변경 2안(NATM)
공법개요도			
공기(월)	굴착: 2.2 장비반출:1 라이닝:10.3	굴착: 7 장비반출:2 장비조립:4 라이닝:1	굴착: 24 장비반출:1 라이닝:8
	합계 : 13.5	합계 : 14	합계 : 33
공사비 (억원)	공사비:45.6	공사비:116.3 (70.7 증액)	공사비:92.9(47.3증액) 임시방류 시설유지:71.3 어업피해 보상:28.5.
	합계 : 45.6	116.3	192.7
비고	연약대 재망발생 시 추가 공기 및 경비발생	민원 최소화 확실한 공기	공기 및 공사비 증가

4. 결론 및 제언

본 연구 대상현장 터널붕락 및 TBM Jamming으로 인한 터널의 안정성확보와 공기지연을 극복하기 위하여 터널의 시점부로부터 Shield TBM이 굴착하는 것으로 공법 변경이 이루어졌으며, 터널의 붕괴가 발생한 원인을 규명하기 위하여 갱내 지질조사와 지반보강패턴결정, 계측을 통한 지반거동을 분석하여 현 막장면의 안정성 확인, 유한 요소법에 의해 현 막장 및 미굴착 구간의 TBM굴진에 대한 안정성 평가를 실시하여 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 터널붕락 및 TBM Jamming발생된 구간의 원인을 파악하기위해 실시된 지반조사결과 열수변질작용으로 변질된 팽창성 지반으로 판명되었고, 암석은 팽윤도 실험에서 팽창율이 30% 정도, 강도는 흡습상태에서 점하중 강도가 45Kg/cm²이며, Schmidt hammer에 의한 강도가 51 Kg/cm²로 자연상태에 비하여 강도가 현저히 저하되는 현상이 나타났다. 그리고 편광현미경 관찰결과 열수변질광물인 황철석, Kaolinite 및 Zeolite 등을 함유하고 있으며, 불투명한 광물이 다량 검출되었고 슬레이크 내구성이 18%정도로 낮게 나타나는 등 고령토화 현상이 현저하다.

둘째, TBM Jamming이 발생한 변질대 구간에서 터널의 단기적인 안정성을 확보하기 위하여 붕락된 버력을 인력으로 제거하면서 강지보와 와이어 메쉬를 30~50cm 간격으로 설치하였고, 강지보와 강지보 사이를 강도류판으로 보강하여 터널의 붕락을 방지하였으며, 일부 붕락이 발생된 구간의 응력집중으로 인한 추가 붕락을 예방하기 위한 배면 그라우팅을 실시하였다.

셋째, 지반보강이 완료된 연약대 구간을 계측기를 설치하여 지반변위를 통한 터널의 안정성을 확인한 결과 미소한 변위가 발생되었다. 이러한 변위양상은 적절한 지보패턴의 적용으로 터널의 안정성을 확보하였음을 의미한다.

넷째, 미굴착구간의 선형예측 및 수치해석 결과 TBM

공법으로 굴착할 경우 문제가 발생될 가능성을 내포한 구간은 총 굴진거리 713m 중 절반 이상인 413m로 조사되었다. 이러한 불리한 지반에서 터널굴착은 터널의 안정과 공기지연 등 문제점이 발생되어 대책공법으로 다양한 공법들이 경제성 및 안정성을 바탕으로 검토되었으나 역방향에서 굴진하는 Shield터널공법이 최적안으로서 채택될 수 있었다.

상기의 터널붕락에서 얻어진 교훈을 통하여 설계시에 충분하고 체계적인 지반조사가 수행되어야 하며, 다양한 해석이 추가되어야 할 필요성을 알려주고 있다. 그리고 터널붕락 후 신속한 대책을 강구하여 터널의 안정성확보와 경제적인 시공방안을 검토하여 성공적인 과업을 수행하였으며, 본 연구에서와 같은 조사 및 분석법이 실무에 널리 활용 및 보완되어서 향후 터널기술 발전에 크게 기여될 수 있기를 기대한다.

참고문헌

1. 건설교통부 (1996), 콘크리트 표준시방서.
2. 건설교통부 (1999), 터널설계기준.
3. 김창용, 박치현, 배규진, 홍성완, 오명렬 (2000), "터널 붕락특성과 시공 중 보강공법 선정방법 개발", 터널과 지형공간, 한국암반공학회 Vol. 10, pp.418-429.
4. 녹산방류관거 실시설계 보고서 (1995, 1997).
5. 양형식, 전양수 (2002), "FLAC을 이용한 터널 역해석 프로그램의 개발", 한국암반공학회지, Vol.12, No.1.
6. 이두화 외 (2001), "일본의 터널 기계화 시공 발전 현황 및 사례분석", 한국터널공학회 제2차 터널 기계화 시공기술 심포지움 논문집, pp.11-32.
7. 정성교 외 (1996), 토질시험법.
8. Bappler, D.I.K. (2001), Learning from experience. Tunnels and Tunnelling International 33 (10), pp.25-27.
9. Barton N. (2000), TBM Tunnelling in jointed and faulted rock. Balkema, the Netherlands, pp.3-104, pp.147-149.
10. Bieniawski Z.T. (1973), Engineering Classification of Jointed Rock Masses, Trans. S. African Inst. Civil Engrs. 15, pp.335-342.
11. Pelizza S., Grasso P., Xu S.L. (2001), Tunnelling by TBM—an overview of international issues relevant to China. Workshop "Tunnel Boring Machines and Related Engineering Practice", Beijing, Sept. Unpublished.