

Tunnel 붕락구간 굴착 · 보강공법 방안

이 용 재

초 록

터널 굴진 중 암질 불량으로 붕락이 발생함에 따라 우선 막장을 폐쇄하여 추가 붕락의 방지를 위해 응급 조치를 취한 후, 주변 지반조사를 시행하고 암질에 적합한 굴착 공법과 보조 공법을 적용하여 터널 안정성을 확보하고자 당초 설계 현황과 표준단면, 표준 지보패턴, 지형 및 지질 등을 분석하고, 검토구간의 문제점 분석과 대책방안을 검토 한다.

주요어 : 터널 굴착, 붕락, 지반조사, 굴착 공법, 터널 안정성

1. 서 론

터널 굴진중 암질 불량으로 붕락이 발생하여 우선 막장을 폐쇄하여 추가 붕락을 방지 후 주변 지반조사를 시행하여 암질에 적합한 굴착 공법과 보조 공법을 적용하여 터널 안정성을 확보하였다.

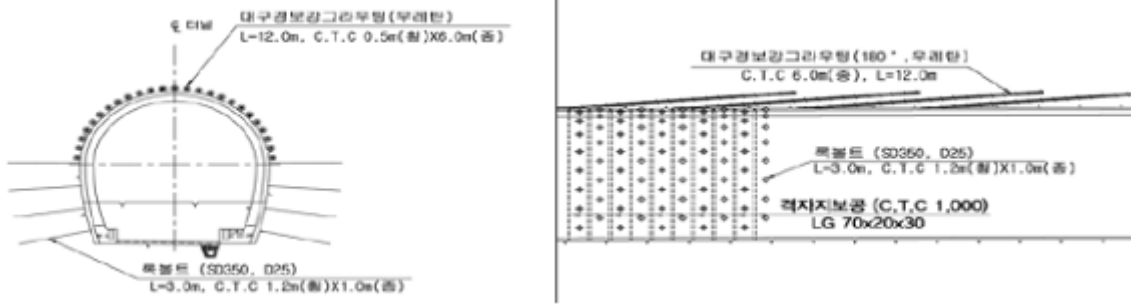
당초 설계현황과 표준단면 표준지보패턴 지형 및 지질 등을 분석하고, 문제점 분석과 대책방안을 검토한다. 당초 설계시 막장상부 지층이 풍화암으로 반영되었으나 현 지층은 풍화토로 지하수가 유입되면서 점차 강도를 상실하고 이완되면서 토사 탈락이 발생하였다. 또한 터널피복 4.5m인 저토피 계곡부는 편마암 변질대 암반에 지하수가 침투해 암석이 탈락되며 낙반이 발생하였다.

이에 추가지반조사를 선진수평시추, TSP탐사, 시추조사 3공을 실시하여 파악된 암질 불량구간 터널 지보패턴을 격자지보에서 강지보로, 숏크리트 두께 8~16cm를 20cm로 보강하고, 락볼트를 축벽보강 네일로 변경하여 지보 능력을 향상시켰다. 따라서 보강 방안은 터널 주변 변위를 고찰해 볼 때 터널 굴착시 발생한 최대 변위량은 터널의 안정성에 크게 영향을 미치므로 이를 검토 분석하고, 숏크리트 최대 압축응력은 허용치 이내 여부를 검토하고, 축벽보강과 선지보 네일 축력을 검토 판단 하였다.

2. 본 론

2.1 현황 및 문제점 분석

2.1.1 현황



· 지보공:

- 락볼트(D25, L=3.0m, CTC 1.0m × 1.2m)
- 강섬유보강 슛크리트 12cm~16cm
- 지지보재: LG-50×20×30(CTC 1.2~1.5m), LG-70×20×30(CTC 1.0m)

대구경 강관 보강 후(우레탄, 120, C.T.C 0.4m) 3m굴진 중 (설계 PS-6 일반발파, 시공 : PS-6 기계굴착) 막장 상부에서 6m(폭)×2m(길이)×1m(높이) 규모의 낙반발생 및 막장 후방 9m 부근의 슛크리트 Crack(폭 5mm, 터널 횡방향 균열) 발생하였다.

시공현황은 대구경 강관보강(우레탄 180°, C.T.C 500) 종방향 C.T.C 0.4× 6.0m로 25공 3열이며, 붕락 후 응급조치사항은 막장면 압성토 및 슛크리트 폐합, 공동부 채움그라우팅 실시, 측벽NAIL 추가보강 하였다.

주변 지반조사는 갱내 선진수평보링(42m), 탄성과 탐사(TSP)실시하였다.

2.1.2 붕락원인 분석

당초 설계시 보통풍화~심한풍화의 편마암으로 예상했던 암반이 함탄층과 편마암 변질대가 혼재된 상태로 분포하고, 지하수가 유입되면서 점차 강도를 상실하고 이완되면서 낙반이 발생하였고, 함탄층과 편마암 변질대의 이완하중 증가로 인해 슛크리트 균열이 발생 되었다.



2.2 안정성 검토

2.2.1 터널 안정해석

본 붕락 구간에 대하여 안정성, 경제성 등을 고려하여 기존 강관다단 그라우팅과 병행하여 측벽보강 네일, 갱외선지보 공법을 적용하는 대책방안을 검토하였다. 이에 대한 지보패턴 적용, 보강공법 적용의 적정성 및 안정성 검증을 위하여 안정성 검토를 실시하였다. 터널 보강공법 변경을 계획한 구간 중 안정성 검토 위치는 지층조건을 고려하여 가장 취약한 구간을 선정하였다.

2.2.2 지반 조사

2.2.2.1 시추 조사

시추조사는 붕락 구간에 대하여 보강으로 안정적 굴진을 위해 지층분포 상태를 확인을 위하여 시추조사 3공 및 실내시험을 실시하였으며 결과는 다음과 같다

첫째, 풍화토는 최상부 지층으로 전 조사지점에서 4.0~8.0m의 층후로 분포가 확인되고 있다. 표준관입시험에 의한 N값은 18회/30cm~50회/12cm로 보통조밀~매우조밀한 상대밀도를 나타낸다. 색조는 담갈색, 담회색, 암회색을 띠며 습윤한 함수상태를 보인다.

둘째, 풍화암은 지표하 7.5~8.0m 하부에서 6.0m 이상의 층후로 분포가 확인되고 있다. 탄층 및 편마암 변질대가 교호하고 단층점토 및 단주상 코아로 채취되며 색조는 암회색 및 암갈색이 우세하다.

셋째, 연암과쇄대는 기반암인 편마암의 단층과쇄대 구간으로 TB-3번 공에서 단층점토 및 암편상, 단주상코아로 채취되며, 지표하 4.0m 하부에서 9.0m의 층후로 분포가 확인되고 있다. TCR(코아회수율)은 24~38%, RQD(암질지수)는 0~11%를 보이며 색조는 담갈색을 띠고 있다.

넷째, 연암은 기반암인 편마암의 연암으로 TB-3공에서 지표하 13.0m 하부에서 6.0m의 층후를 확인하였다. TCR(코아회수율)은 46~73%, RQD(암질지수)는 6~43%를 보이며 색조는 담회색을 띠고 있다.

시추연장 12m부터 단층과쇄대가 관찰되었으며, 단층 과쇄대는 시추종료지점까지 분포하고 있는 것으로 파악되었다. 단층 과쇄대 구간의 코아회수율은 매우 불량하였으며 대부분 단층점토, 모래 및 각력으로 분해되어 암반의 강도를 기대하기 어려운 상황으로 미보강 터널굴착시 지하수와 토사의 유출과 암석의 붕락이 예상된다.

2.2.2.2 TSP 탄성과 탐사

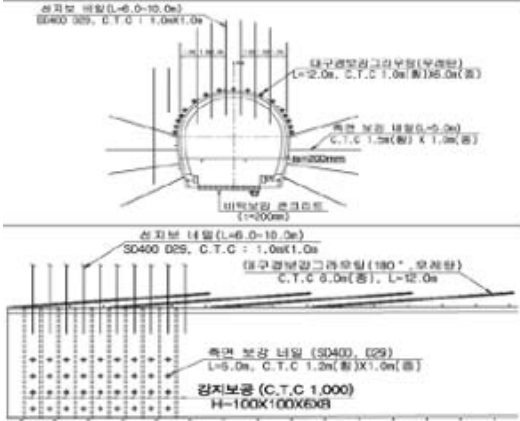
TSP 탄성과 탐사는 막장 전방의 지질 경계, 단층 과쇄대 등의 불연속면 분포특성 확인을 위하여 를 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

암반상태는 전체적으로 불량할 것으로 예상되며, 일부구간은 단층 및 과쇄가 심하게 나타나고 있을 것으로 예상되며, 불연속면과 터널노선과의 교차양상을 분석한 결과, 터널 굴착시 암반조건이 매우 불량할 것으로 예상되므로 토사유출 및 붕락을 방지하기 위한 보강공법이 필요할 것으로 판단된다.

2.2.3 검토조건

본 검토구간에 대하여 안정성 확보, 원활한 공정진행 및 준공공기 준수를 위하여 안정성, 시공성 및 경제성 등을 고려한 대책방안은 다음과 같이 검토하였다.

대구경 강관그라우팅+갱외선지보네일+갱내보강네일



- 지보공
- 보강네일링 (D29, L=5.0m, 8공/m)
- 강섬유 보강 슛크리트(20cm)
- 강지보재: H-100×100×6×8 (C.T.C 1.0)
- 보조공법
- 대구경 보강그라우팅(우레탄, L=12m, 상반180°) : CTC 0.5(횡)×6.0(중)m 25공 1열(기시공)
- 대구경 보강그라우팅(L=12m, 상반180°) : CTC 0.5~1.0(횡)× 6.0(중)m 17공 총 14열
- 갱외 선지보 네일(L=90.0) : CTC 1.0~1.2m(횡)× 1.0(중)m

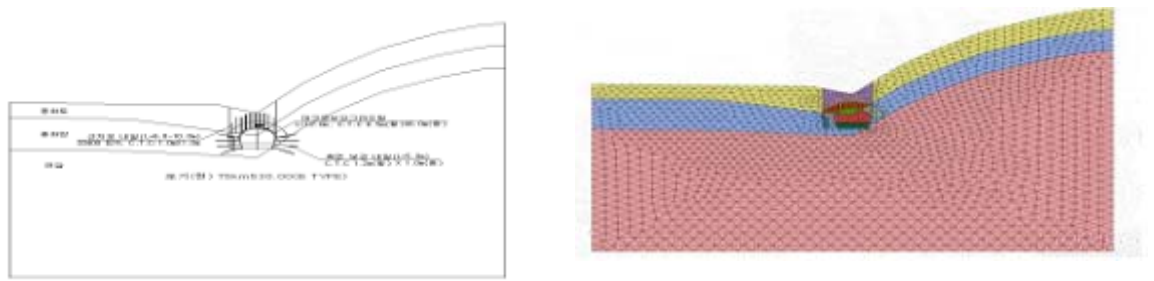
저토포이고 지하수 유입이 많고 편마암 변질대의 풍화암이 자립력이 부족하고 장기 소성변형의 우려가 큰 지반이므로 갱외선지보네일 공법으로 보강하고 갱내에서 대구경 강관보강(우레탄)을 병행하여 터널의 안정성을 확보하고, Rock bolt는 함탄층과 변질대에서 효과가 미흡하므로 압력그라우팅을 통한 측벽 보강네일로 안정성을 확보하며, 격자지보를 H형 강지보로 적용하고 슛크리트 두께를 12~16cm에서 20cm로 증가시켜 지보능력을 향상시킨다.

갱외 선지보 네일을 지표부터 강관그라우팅 상단 및 지표부터 터널천단 하부까지 보강하여 터널 상부지반의 안정성을 확보한다. 당초 강관그라우팅보강은 갱외선지보와의 간섭 최소화를 위해 공 재배치를 천단부 선지보 CTC 1.0m와 일치하게 총 25공에서 총 17공으로 한다.

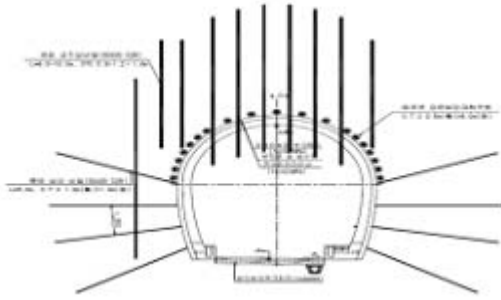
조사 된 지반조건에 대한 보강효과가 우수하고, 경제성 및 시공성이 우수한 변경 대구경 보강그라우팅 + 갱외선지보네일 + 갱내보강 네일을 적용한다.

2.2.3.1 검토 분석

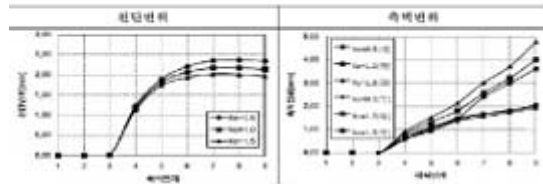
해석조건 및 모델링의 터널 안정해석은 MIDAS/GTS 해석프로그램을 이용하여 실시하였다. 해석 모델은 지반은 M/C 탄소성모델을 적용하고, 지보재는 탄성모델을 적용하였으며, 압계수는0.5, 1.0, 1.5조건에 대하여 분석을 실시하였다.



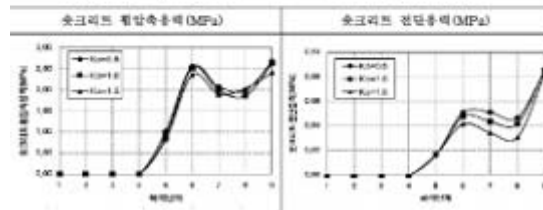
구분	지표배형	
굴착방법	상하 천단부 굴착	
굴착방(㎝)	1.0	
숏크리트 두께(mm)	200(강선유 보강)	
터널굴 천단보강 그라우팅 (수레일)	깊이(㎝)	15.0
	간격(㎝)	0.5(평) × 5.0(중)
측벽보강배형 (D29, SD400)	깊이(㎝)	5.0
	간격(㎝)	1.0(평) × 1.0(중)
선지보배형 (D29, SD400)	깊이(㎝)	5.0~10.0
	간격(㎝)	1.0(중) × 1.0(평)



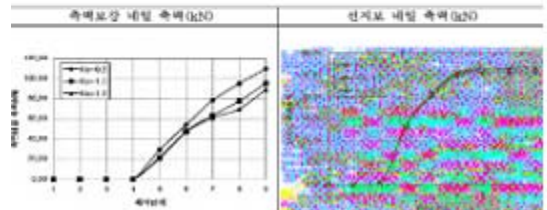
해석 단계	변위 (mm)								
	Ko=0.5			Ko=1.0			Ko=1.5		
	천단부	좌측벽	우측벽	천단부	좌측벽	우측벽	천단부	좌측벽	우측벽
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	-0.001	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.009	-0.001	0.001
4	1.328	0.668	0.663	1.183	0.795	0.671	1.134	0.908	0.876
5	1.895	1.133	1.093	1.819	1.336	0.945	1.735	1.635	1.045
6	2.207	1.499	1.427	2.069	1.805	1.579	1.937	2.189	1.499
7	2.344	2.401	1.676	2.169	2.666	1.661	2.019	3.018	1.872
8	2.363	3.008	1.944	2.174	3.212	1.721	2.009	3.713	1.808
9	2.337	3.612	2.003	2.197	4.013	1.933	1.966	4.778	2.065
최대	2.363	3.612	2.003	2.174	4.013	1.933	2.019	4.778	2.065



해석 단계	숏크리트 휨압축응력 (MPa)			숏크리트 전단응력 (MPa)		
	Ko=0.5	Ko=1.0	Ko=1.5	Ko=0.5	Ko=1.0	Ko=1.5
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	1.008	0.872	0.825	0.016	0.017	0.017
6	2.557	2.518	2.359	0.051	0.040	0.042
7	3.071	1.855	1.895	0.061	0.044	0.034
8	1.987	1.856	2.033	0.047	0.042	0.031
9	2.682	2.632	2.413	0.055	0.056	0.052
최대	2.682	2.632	2.413	0.055	0.056	0.052
허용	0.4	0.4	0.4	0.37	0.37	0.37



해석 단계	측벽보강 내일 축력 (kN)			선지보 내일 축력 (kN)		
	Ko=0.5	Ko=1.0	Ko=1.5	Ko=0.5	Ko=1.0	Ko=1.5
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.007	0.007	0.010
4	0.000	0.000	0.000	13.101	13.223	13.762
5	29.096	21.840	20.695	20.346	20.528	21.018
6	54.109	47.619	46.624	24.992	25.382	25.789
7	78.442	63.484	61.188	25.520	25.963	26.417
8	90.047	77.621	70.077	25.623	26.127	26.676
9	110.065	95.281	89.305	25.632	26.163	26.828
최대	110.065	95.281	89.305	25.632	26.163	26.828
허용	129.5	129.5	129.5	129.5	129.5	129.5



3. 결 론

터널 주변의 천단부 최대 변위량은 Ko = 0.5일 때 최대 2.363mm이며 내공 최대 변위량은 Ko = 1.5일 때 4.778mm(→)로 나타났다. 이러한 결과를 고찰해 볼 때 터널 굴착시 발생한 최대 변위량은 터널의 안정성에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

숏크리트 최대 압축응력은 해석 결과 Ko = 1.5일 때 터널 우측 천단부에서 2.682MPa, 숏크리트 최대 전단응력은 해석 결과 Ko = 1.5일 때 0.086MPa이며 이는 허용치이내이므로 터널 및 지보재 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

측벽보강 및 선지보 측면내일의 최대 인장 축력은 Ko = 0.5일 때 110.065kN으로 나타났으며, 선지보내일의 최대 인장 축력은 Ko = 1.5일 때

26.828kN으로 나타났다. 이는 본 터널에 사용된 선지보의 허용 인장 축력 128.5 kN을 하회하는 수치로 발생 인장 응력에 의한 측면네일 및 선지보네일의 파괴현상은 발생되지 않을 것으로 예상된다.

따라서 추가조사 된 지반조건에 대한 보강효과가 우수하고, 경제성 및 시공성이 우수한 대구경 보강그라우팅 + 갱외 선지보네일 + 갱내 보강네일을 적용 안정적으로 붕락 방지 굴착하였다.

참고문헌

- [1] 한국철도시설공단(2007)설계기준노반편
- [2] 한국철도시설공단(2005)설계기준노반편
- [3] 국토해양부(2008)도로설계편람제5편교량
- [4] 동해선포항~삼척(영해~후포)철도건설8공구설계보고서
- [5] 동해선포항~삼척(영해~후포)철도건설8공구지반조사결과
- [6] 동해선포항~삼척(영해~후포)철도건설8공구공사특별시방서
- [7] 동해선포항~삼척(영해~후포)철도건설8공구TSP탐사및수평시추조사보고서
- [8] 이종만,곽현준,김영근,백기현,조철현(2001)"터널내탄성파탐사를이용한전방지질예측및평가", 터널기술, vol.3,no.3,pp.45-56.
- [9] 한국지구물리탐사학회(2002), " 토목환경분야 적용을 위한 물리탐사실무지침",pp.253-261
- [10] 동해선포항~삼척(영해~후포)철도건설제8공구현장사진, 현장 데이터