

극 저토피 구간을 NATM 터널 설계 사례



문상호
GS건설 지반팀



나승훈
GS건설 지반팀



이상필
GS건설 지반팀

1. 서론

NATM 터널은 shotcrete, rock bolt 등을 주 지보재로 사용하여 터널을 굴착하는 공법으로 갱구부, 저토피부, 관통부 등 3차원 arching 효과(Sinha, 1989)를 발휘할 수 없는 구간은 터널 굴착 시 안정성 확보를 위하여 추가의 보조 보강공법을 적용하여야 한다. 본 사례는 이 중 하나

인 극 저토피 구간에 시공될 NATM 터널의 설계 및 안정성 해석 사례로, 산악 및 도심지의 저토피 터널부는 상기의 이유로 터널 붕락 사례가 다수 보고되고 있어 설계 및 시공에 주의가 요구된다.

여러 가지 보조보강 공법 중 당 구간에서는 저토피 구간을 통과하기 위하여 대구경 강관단단 그라우팅공법, 개착공법, pipe roof공법 등의 다양한 공법이 검토되었고



그림 1. 태백선 제천~쌍용1공구 노선 개요 및 극 저토피 구간 위치

저토피 상부보강을 위하여 압성토, 콘크리트 퇴매움 등이 검토되었으며 통과공법으로는 안정성, 시공성, 경제성을 고려하여 상부를 콘크리트로 보강한 후 대구경 강관다단 그라우팅을 실시하여 터널을 굴착하는 공법을 선정하였다. 선정된 보강공법의 안정성을 검증하기 위하여 3차원 전산해석을 실시하였고 시공 시 안정성 확보를 위하여 선진수평보링, TSP 탐사, 천공 시 bit 굴진을 체크 등을 계획하였다.

2 현황 및 지질개요

2.1 노선개요

태백선 제천~쌍용1공구 현장은 제천시에서 입석리까지 총 연장 14.29 km의 복선전철 건설공사 현장으로 본 선터널 3개(송학터널 5,985m, 두학터널 460m, 시곡터

널 300m), 사갱 3개(L=1,475m)와 본선교량 8개(L=2,267m), 정거장 2개(제천, 입석리)로 이루어져 있다.

2.2 저토피 구간 현황

송학터널 저토피 구간의 최소 토피고는 0.81m로 원 설계에서는 NATM 터널 굴착 대신 개착공법을 적용하였다. 그러나 당 구간에 진입하기 위해서는 폭 3m 도로의 약 70여호 민가를 통과해야 하므로 극심한 민원이 예상되어 민원을 최소화 하며 시공성을 확보할 수 있는 공법이 요구되었다.

지반조사 보고서(2004)에 따르면 본 구간에 3공의 시추(TB-5, TB-6, TB-7, 그림 2 참조)가 실시되었고 시추 결과는 표 1과 같다. 일반적으로 계곡부는 유수에 의한 세굴로 풍화대가 발달해 있고 하상 퇴적물로 충적지층이 형성되어 있으나 시추조사 결과, 본 구간은 지표에서 0.6~1.2m 이하에서 연암 및 경암층의 매우 강한 지반으로 구

표 1. 극 저토피 구간 시추조사 결과 (C/L : core loss)

구분	TB-5 (m)	TB-6 (m)	TB-7 (m)
Silty sand	0~1	0~0.6	0~1.2
연암	1~4.5 C/L(1.4~2, 4.2~4.5)	0.6~1.7 C/L(0.8~1.7)	-
경암	4.5 ~	1.7~	1.2~

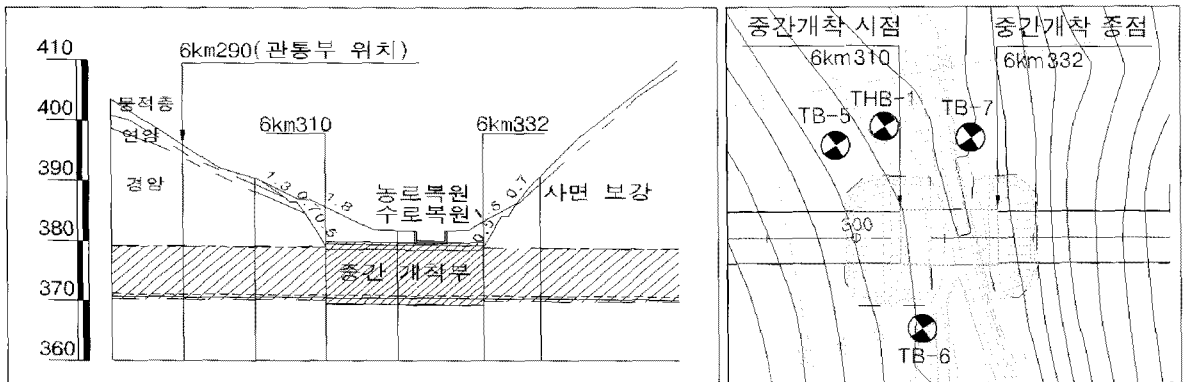


그림 2. 원 설계 저토피 설계 및 시추 현황

성되어 있어 지반조건이 불량하지는 않을 것으로 판단되었다. 다만, 시추공 TB-5의 1.4~2m, 4.2~4.5m와 TB-6의 0.8~1.7m 에서 core loss가 발생하여 석회암 공동에 대한 주의가 요구된다.

3. 굴착 및 보강공법

3.1 저토피 구간 통과공법

저토피 구간 통과공법으로 표 2와 같이 대구경 강관다단 단그라우팅 공법, 개착공법, pipe roof공법 등이 검토되었다. 이 중 개착공법은 진입로 개설과 개착에 따른 민원과 시공성 저하가 우려되고 pipe roof공법은 연암이상의 구간에 적용할 시 시공성이 저하되고 공정이 복잡하며 공

표 2. 송학터널 저토피 구간 통과공법 비교

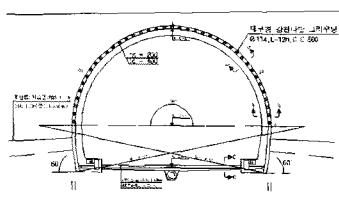
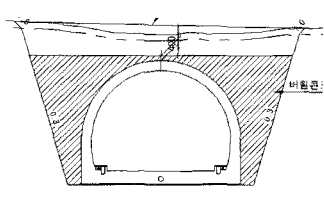
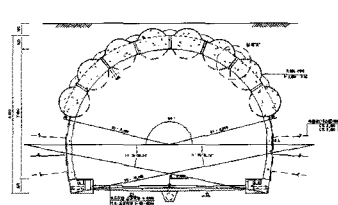
구분	대구경 강관다단 그라우팅	개착공법	Pipe roof 공법
개요도			
공법 설명	- 강관을 천단 및 어깨부에 삽입한 후 그라우팅을 실시하여 지반강성을 증가시킨 후 굴착하는 공법	- 저토피 구간 양쪽을 개착한 후 개착 라이닝을 타설하고 버림 콘크리트로 되메운 후 상부 복토.	- 대구경 steel pipe를 삽입하고 관내를 굴착한 후 관을 연결한 다음 콘크리트 라이닝으로 마감
공법 개요	- 대구경 강관다단 그라우팅 ($\Phi 114\text{mm}$, L=12m, 상반 180°)	- 되메움, 라이닝(t=80cm) 상단에 버림 콘크리트 타설	- 강관 삽입, 그라우팅 후 연결 ($\Phi 1800\text{mm}$, L=20m, 120°)
특징	- 무개착 공법으로 민원최소. - 차수와 지반의 보강효과를 동시에 얻을 수 있음. - 저토피 시 별도의 상부 보강공법 필요.	- 개착 시 발파에 따른 민원 이 예상되고 시공 중 사면 안정화 공법이 필요함. - 공사 진입로 개설 시 민원 및 추가비용 소요 예상.	- 무개착 공법으로 민원최소. - 작업대 및 플랫폼 설치 공간이 필요함 - 연암 이상의 암반의 경우 시공성이 매우 낮음
선정	강관다단그라우팅+상부보강		

표 3. 강관다단 그라우팅을 이용한 저토피 터널 시공사례

현장/터널명	특징	터널 보강공법	상부지반 보강공법
북부도시고속도로 3공구	- 최소 토피고 (좌선 2.67, 우선 5.33m) - TBM+NATM확공	- 강관다단 그라우팅(수평) ($\Phi = 60$, L=10~15m, 3span)	- 철근보강콘크리트(t=40cm) + 앵커 볼트 보강(L=5~7m)
서해안고속도로 21공구(영광2터널)	- 최소 토피고 (상행 6.3m, 하행 5.6m)	- 강관다단 그라우팅 ($\Phi = 76.3$, $\alpha = 150^\circ$, L=16m, 6span)	-
경전선 3공구 (진례터널)	- 하상 구간으로 최소 토피고 3.5m	- 직천공 강관다단그라우팅 ($\Phi = 114$, $\alpha = 150^\circ$, L=12m, 3span)	- 상부 grouting (측벽 S.L.line, 천단1m)

Φ : diameter, L : length, α : 강관다단 그라우팅 상반 시공범위

사비가 높은 단점이 있다.

따라서 당 구간의 적용공법으로 표 3과 같이 저토피 구간에도 시공실적이 많고 공정이 비교적 간단하며 공사비가 타 공법에 비하여 경제적인 대구경 강관다단 그라우팅

공법을 선정하였고 특히, 구조물의 중요도를 고려할 때, 대구경 강관다단 그라우팅($\phi=114$, $L=12m$, 상반 180° , 4span)이 저토피 구간 33m에 시공되도록 설계하였다.

표 4. 송학터널 저토피 구간 상부 보강공법 비교

구분	상부 콘크리트 보강	상부 토사 되매우기
공법개요	- 연암구간까지 부분 개착을 실시한 후 콘크리트를 타설하여 극 저토피 상부에 Slab을 시공.	- 극 저토피 상부 일정 높이를 토사로 메운 후 다짐기를 사용하여 다짐을 실시.
단면도		
특징	- 대구경 강관다단 시공을 위한 토피 확보를 위하여 실시하는 공법. - 콘크리트를 연암층에 지지시키기 위하여 부분 개착이 필요함.	- 대구경 강관다단 시공을 위한 토피 확보를 위하여 실시하는 공법. - 당 현장 적용 시 진입로가 협소하므로 소형 백호와 소형트럭으로 압성토를 실시.
장점	- 토사 되매우기에 비하여 상대적으로 안전한 공법임. - 그라우팅을 실시할 때, 그라우팅재가 지반으로 분출될 위험이 적음.	- 소형장비로 시공이 가능하므로 시공이 상대적으로 간편. - 추가 개착이 필요없고 공사비가 저렴.
단점	- 콘크리트 운반 및 타설 계획 수립 필요. - 터널시공 완료 후 콘크리트 제거 시 소음 및 진동 유발 우려가 있음.	- 시공오차나 장비의 한계로 인하여 그라우팅재가 지반으로 분출될 위험이 있음. - 그라우팅이 불충분할 경우 막장붕괴 위험이 있음.
선정	앵커볼트보강(L=0.8m) + 상부 콘크리트	

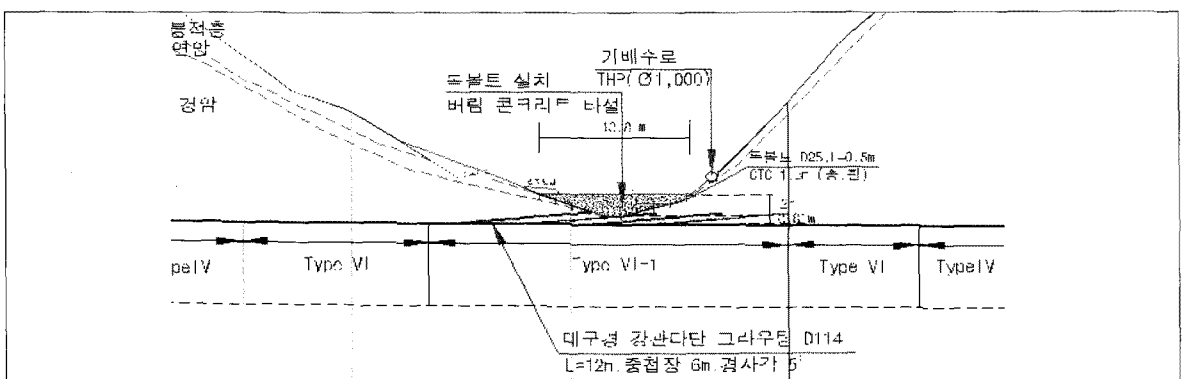


그림 3. 송학터널 저토피 통과공법 단면도

3.2 저토피 상부 보강공법

강관다단 그라우팅의 적용 시 시공오차 등을 고려할 때, 토피고 확보를 위하여 토사 되메우기 후 다짐을 실시하는 방법, 보강토를 이용하여 토피고를 확보하는 방법, 그리고 현장타설 콘크리트를 이용하여 콘크리트 덮개를 시공하는 방법 등 추가 안정화 방안이 필요하다. 이들 방법 중 당 현장에는 표 4와 같이 안정성이 가장 우수한 상부콘크리트 보강공법을 적용하였다. 또한 콘크리트와 지반을 일체화시키기 위하여 상부 콘크리트 타설 전에 록볼트($\phi=25$, $L=0.8m$ 지반근입 $0.5m$, 중,형 C.T.C. $1.5m$)를 시공하고 이를 종 방향 및 횡 방향으로 연결한 후 콘크리트를 타설하도록 설계하였다.

4. 안정성 검토

4.1 안정성 검토 개요

변경공법 적용에 대한 전산해석을 3차원 유한요소 해석 프로그램인 MIDAS/GTS(2006)를 이용하였다. 당 구간의 지형을 MIDAS/TGM을 통하여 그대로 모사하였고 해석영역은 측방 3D이상, 하부 3D 이상, 상부는 지표면으로 설정하였다. 해석에 사용된 element로 지반과 콘크리트는 solid element, 솟크리트는 extract element를 이용한 plate element, 록볼트와 강관다단 그라우팅은 embedded truss element를 사용하였다 (그림 4 참조).

지반은 시추조사 결과를 바탕으로 붕적층과 하부의 경암층으로 구분하였고 상부 지표면의 경계조건은 자유면, 측면은 수평변위(x축 및 y축 변위) 구속, 하부는 수직변위(z축 변위)를 구속하였다. 극 저토피 구간의 강관다단 그라우팅 시 가압에 의한 상부보강 콘크리트의 균열 또는 파괴가 예상되어 시공 시 과도한 가압을 실시하지 않을 예정이므로 해석 시에도 그라우팅에 의한 지반개량을 고려하지 않고 강관의 강성만을 고려하였다. 해석에 사용된 지반 및 지보재 정수는 터널해석보고서(2004)에 근거하여 표 5 및 표 6과 같이 산정하였고 시공단계

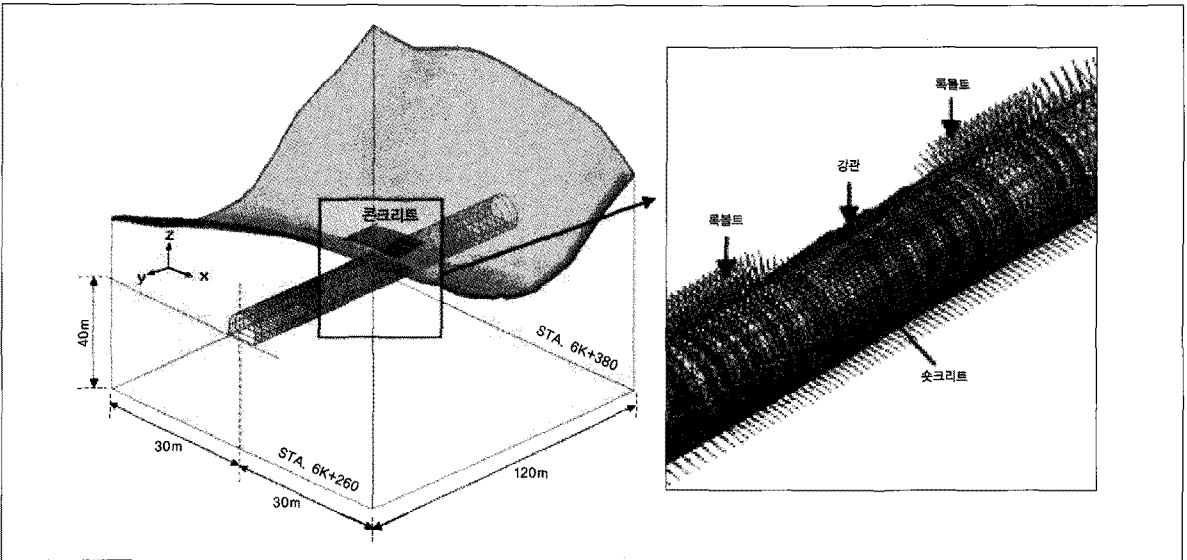


그림 4. 해석모델 개요 및 적용 지보재

(construction stage, C/S)는 그림 5와 같이 Type II~ Type VI-1까지 총 172 단계이다.

4.2 안정성 검토 결과

터널은 종 방향과 횡 방향의 3차원 arching effect에 의하여 거동하므로 굴착에 따른 변위결과에서 나타나듯이 굴착 전 각 축점의 내굴변위가 이미 변하고 있는 것을 볼 수 있다. 천단변위는 극 저토피부 상반굴착 시 거의 대부분이 발생하여 하반굴착(C/S 84 부터)에 따른 변위는 거의 발생하지 않았고 극 저토피부 통과 전에 비하여 통과후가 크게 나타나는데 이는 변위가 토피와 밀접한 관계

를 가지고 있기 때문으로 보인다. 터널의 최대 천단 변위는 0.861 mm, 최대 측벽변위는 좌측과 우측에서 각각 0.109 mm와 0.103 mm로 매우 미소하게 발생하였다.

쏯크리트 압축응력 분석을 위하여 먼저 시작부 경계의 영향을 제거하기 위하여 모델의 시점부에 타설되는 쏯크리트는 해석에서 제외하였다. 초기에 최대 쏯크리트 응력은 모델 시점부 측벽하단에서 발생하여 굴착과 함께 증가하다가 C/S 20 이후에 일정한 경향을 보였다. 그리고 극 저토피부 상반굴착이 끝나가는 C/S 76부터 증가한 후 종점부에서 토피가 높아지면서 다시 증가하는 경향을 보였다. 쏯크리트 압축응력은 터널의 측벽 하단부에서 국부적으로 비교적 크게 발생하는데 이는 터널 굴착 시 우각부

표 5. 해석에 사용된 지반 정수

구분	단위중량(tf/m ³)	탄성계수(tf/m ²)	내부마찰각(°)	점착력(tf/m ²)	포아송비
붕적층	1.7	2×10^3	25	0.5	0.35
경암	2.5	6.5×10^5	38	50	0.22
콘크리트 덮개	2.5	1.5×10^6	40	500	0.2

표 6. 해석에 사용된 지보재 정수

구분	단위중량(tf/m ³)	탄성계수(tf/m ²)	단면적(m ²)	포아송비
Soft shotcrete	2.4	5.0×10^5	-	0.2
Hard shotcrete	2.4	1.5×10^6	-	0.2
Rock bolt	7.85	2.1×10^7	5.07×10^{-4}	0.01
강관	7.85	2.1×10^7	∅114, t=6mm	0.01

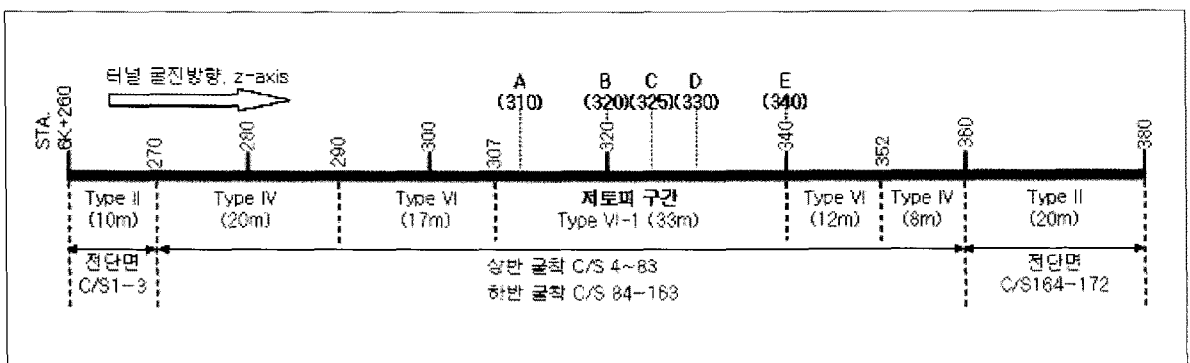


그림 5. Construction stage(C/S)에 따른 시공순서 모식도

에 응력이 집중되기 때문이다. 슛크리트의 최대 압축응력은 8.469 kgf/cm² 로 슛크리트 허용 압축응력인 84 kgf/cm² 이하였다.

록볼트 축력 해석에서도 시작부 경계의 영향을 제거하기 위하여 모델의 시점부에 시공되는 록볼트는 해석에서

제외하였다. 록볼트 축력의 최대값은 굴착과 함께 증가하다 모델의 시점부 Type IV 상단에서 최대값이 발생하여 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 해석모델의 최대 록볼트 축력은 0.711 tonf 로 허용 록볼트 축력인 8.87 tonf 이하였다.

표 7. 해석결과와 그래프 및 Construction stage 83단계(저토피 상반굴착 완료) 결과

구분	해석결과와 그래프	Construction stage 83 단계 결과
천단 변위	<p>Construction Stage</p> <p>Roof Displacement (mm)</p> <p>Legend: A (STA. 6K+310), B (STA. 6K+320), C (STA. 6K+330), D (STA. 6K+340), E (STA. 6K+350)</p>	
측벽 변위	<p>Construction Stage</p> <p>Wall Displacement (mm)</p> <p>Legend: A (STA. 6K+310), B (STA. 6K+320), C (STA. 6K+330), D (STA. 6K+340), E (STA. 6K+350)</p>	
최대 슛크리트 응력	<p>Construction Stage</p> <p>스틉크리트 응력 (kgf/cm²)</p>	
최대 록볼트 축력	<p>Construction Stage</p> <p>록볼트 축력 (tonf)</p>	

해석결과를 종합적으로 분석해 보면 천단변위, 숏크리트 응력, 록볼트 축력은 극히 미소하거나 허용치의 1/10 수준이고 극 저토피부에서의 지반변위 및 지보내 응력은 이보다 훨씬 작게 나타났는데 이는 극 저토피부의 상재하중(암반 0.81m+콘크리트 2m)이 작고 극 저토피 구간이 지보재에 의해 충분히 보강되었기 때문으로 판단된다. 굴착에 따른 지반변위 및 지보재 응력변화를 종합하면 표 7과 같다.

5. 저토피 구간 시공계획

당 현장에서는 강관다단 그라우팅의 그라우트재를 과다하게 압력 주입할 시에는 그라우트재가 상부로 분출될 위험이 있고 대부분의 강관다단 그라우팅이 경암내에 시공되므로 과다한 압력 그라우팅을 실시하지 않고 강관과

강지보의 강성을 이용하여 터널 천단부를 지지하는 것이 적절할 것이다. 또한, 계곡부의 붕적층 하부로 유수가 유입될 시 터널 내에서 차수보강(우레탄 보강 등)을 실시하여 안정성을 확보할 예정이다. 저토피 구간 시공계획 및 굴착순서를 요약하면 표 8과 같다.

당 구간은 굴착 전 선진수평보링으로 막장전방을 파악할 예정이고, 굴착 시 강관다단 천공에 따른 bit 굴진을 체크 등을 통하여 막장전방에 분포할 수 있는 석회암 공동을 확인할 예정으로 이상 징후 발견 시 즉각 굴착을 중지하고 보강을 실시할 예정이다.

또한, 중간 개착부를 극 저토피 공법으로 변경하면 개착부가 없어지므로 1) 극 저토피부에 일상계측 3개 단면 추가, 2) 중간개착부 정밀계측을 최저 토피부인 STA.6K+325 구간으로 이동, 3) 극 저토피부에 지표침하계측 6개소, 지중 수평변위계 4개소, 지하수위계 4개소를 추가하여 시공 중 안정성을 확보할 예정이다.

표 8. 극 저토피 구간 시공계획 및 굴착 순서도

1단계	2단계	3단계
- 가배수로/가배수로, 극 저토피 상부 록볼트+콘크리트보강	- 저토피부 터널 상반굴착 및 강관다단 그라우팅시공	- 저토피 터널 상반굴착 및 강관다단 그라우팅 완료
4단계	5단계	6단계
- 저토피부 보강 및 터널굴착 완료	- 농로/수로복원	- 저토피부 라이닝 타설완료

6. 맺음말

본 사례는 극 저토피 구간에 시공될 터널에서 상부에 되메움을 실시하고 NATM 터널 굴착을 계획한 터널 설계 사례로 당 구간의 최소 토피고 0.81m는 국내 산악터널 중 최소인 것으로 조사되어 성공적으로 굴착이 완료될 시 국내 터널굴착 기술을 한 단계 더 높일 수 있는 계기가 될 것으로 생각된다. 현재 당 저토피 구간의 굴착이 진행중이고 굴착이 완료되면 시공사례에 대한 발표를 실시할 예정이다. 마지막으로 당 구간의 설계 및 안정성 검토 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 극 저토피 구간 통과를 위하여 대구경 강관다단 그라우팅공법, 개착공법, Pipe roof공법 등이 검토되었다. 이중 대구경 강관다단 그라우팅 공법은 당 현장과 같은 저토피 구간에도 시공실적이 많고 공사비가 상대적으로 저렴하므로 당 구간에는 강관다단 그라우팅($\phi=114$, $L=12m$) 4 span을 상반 180°에 시공하고 저토피 상부에 록볼트($\phi=25$, $L=0.8m$, 중, 횡 C.T.C. 1.5m) 시공 후 콘크리트를 타설(최대높이 2m)하여 터널을 굴착하는 것으로 설계하였다.

(2) 강관다단 그라우팅을 적용하여 3차원 지반안정성 해석을 실시한 결과, 최대 천단변위는 0.861 mm, 최대 측벽변위는 좌측과 우측에서 각각 0.109 mm와 0.103 mm로 매우 미소하게 발생하였다. 최대 슛크리트 압축응력은 8.469 kgf/cm² 로 슛크리트 허용 압축응력인 84 kgf/cm² 이하였고 최대 록볼트 축력은 Type IV 구간의 상부에서 0.711 tonf으로 허용 록볼트 축력인 8.87 tonf

이하였다.

해석결과를 종합적으로 분석해 극 저토피부에서의 지반변위 및 지보내 응력은 극히 미소한데 이는 극 저토피부의 상재하중(암반 0.81m+콘크리트 2m)이 작고 극 저토피 구간이 지보재에 의해 충분히 보강되었기 때문으로 판단된다.

(3) 대부분의 강관다단 그라우팅이 경암내에 시공되므로 과도한 압력 그라우팅을 실시하지 않고 강관과 강지보의 강성을 이용하여 터널 천단부를 지지할 계획이고 계곡부의 봉적층 하부로 유수가 유입될 시 터널 내에서 차수보강(우레탄 보강 등)을 실시하여 안정성을 확보할 예정이다. 또한, 굴착 전 선진수평보링을 실시하고 굴착 시 강관다단 천공에 따른 bit 굴진율 체크 등을 통하여 막장전방을 예측하며 시공 중 계측을 실시하여 안정성을 확보할 예정이다.

참고문헌

1. GS건설(주), 2004, 제천~쌍용간 복선전철제1공구건설공사 실시설계보고서, p 804
2. GS건설(주), 2004, 제천~쌍용간 복선전철제1공구건설공사 지반조사보고서, p 709
3. GS건설(주), 2004, 제천~쌍용간 복선전철제1공구건설공사 터널해석보고서, p 1112
4. (주)MIDAS IT, 2006, MIDAS GTS User manual, p 115
5. Sinha, R. S., 1989, Underground structure (Design and instrumentation), p 527