

석회암 지대의 저토피 터널 설계 및 해석 사례

문상호, 나승훈, 이상필 (GS건설 지하공간팀)

1. 서론

석회암은 퇴적암의 일종으로 우리나라에는 고생대 초에 바다에서 퇴적된 조선누층군의 대석회암층군에 속하는 석회암이 강원 남부(영월, 평창, 정선, 삼척), 충북 북동부(단양, 제천) 일대에 분포하고 있다. 본 사례는 이들 지역 중 충북 제천의 석회암 지대의 저토피 터널 설계 및 안정성 해석 사례로, 석회암지역의 경우 용식작용에 의하여 공동이 복잡하고 비정형적으로 분포하고 있어 공동파악에 어려움이 있고 석회암 공동에 의한 터널 붕락 사례가 다수 보고되고 있어 설계 및 시공에 주의가 요구된다.

당 구간에서는 석회암 지대의 저토피 터널 구간을 통과하기 위하여 대구경 강관다단 그라우팅공법, 개착공법, Pipe roof공법 등의 다양한 공법이 검토되었고 저토피 상부보강을 위하여 압성토, 콘크리트 되메움 등이 검토되었으며 통과공법으로는 안정성, 시공성, 경제성을 고려하여 저토피 상부를 콘크리트로 보강한 후 대구경 강관다단 그라우팅을 실시하여 터널을 굴착하는 공법을 선정하였다. 선정된 보강공법의 안정성을 검증하기 위하여 3차원 전산 해석을 실시하였고 시공시 안정성 확보를 위하여 선진수평보링, 천공 시 bit 굴진을 체크 등을 계획하였으며 석회암 공동 발견 시에 대한 보강대책을 수립하였다.

2. 현황 및 지질개요

2.1 노선개요

태백선 제천~쌍용1공구 현장은 제천시에서 입석리까지 총 연장 14.29 km의 복선 전철 건설공사 현장으로 본선터널 3개(송학터널 5,985m, 두학터널 460m, 시곡터널 300m), 사경 3개(L=1,475m)와 본선교량 8개(L=2,267m), 정거장 2개(제천, 입석리)로 이루어져 있다.



그림 1. 태백선 제천~쌍용1공구 노선 개요 및 저토피 구간 위치

2.2 지질특성 및 석회암 지대 현황

송학터널이 위치하는 지형의 산릉과 계곡은 NNW-NNE 방향으로 배열되어 조사지역의 NE 방향인 영월지역으로 연속되고 있다. 당 현장의 석회암 지대는 그림 2와 같고 저산지는 고생대에 속하는 석회암을 불규칙하게 관입한 화강암류로 구성되어 있는 것으로 예측된 바 있다. 그러나 터널을 굴착하며 살펴본 결과, 석회암 공동은 송학터널 시점 갱구사면(그림 3.(a))과 두학터널 내 STA.5K+740(그림 3.(b))에서 비정상적인 형상으로 나타나 그라우팅 채움을 실시하여 보강하였고 이와 같이 과업구간 전체가 비정상적으로 분포하는 석회암 지대 영향권에 포함되어 있을 것으로 예상된다.

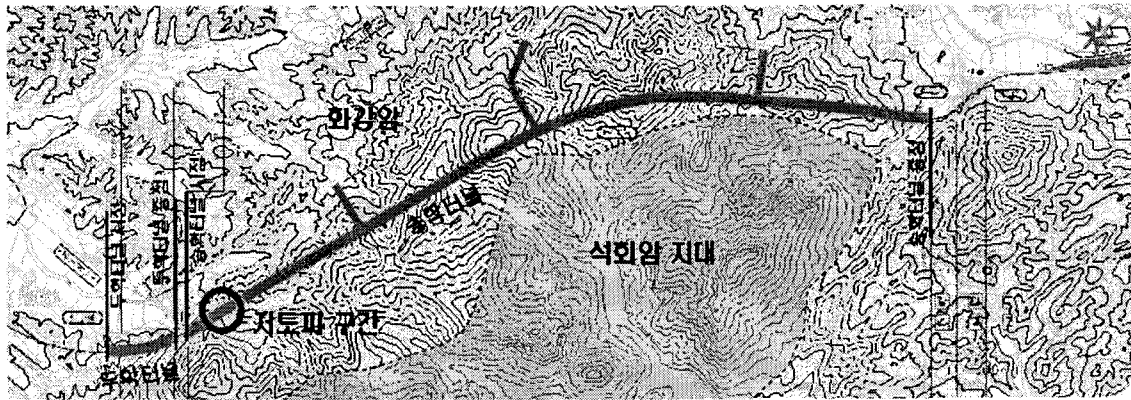


그림 2. 원 설계 석회암 지대 현황



(a) 송학터널 시점갱구사면

(b) 두학터널 (STA.5K+740)

그림 3. 송학터널과 두학터널 석회암 공동 현황

2.3 저토피 구간 현황

송학터널 저토피 구간의 최소 토피고는 0.81m로 NATM 터널의 기본이 되는 arching 효과를 기대하기 어려워 원 설계는 개착공법을 적용하였다. 그러나 저토피 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)가 실시되었

고 시추결과는 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 구성되어 있어 지반조건이 불량하지는 않을 것으로 판단되었다. 다만, 시추공 TB-5의 1.4~2m, 4.2~4.5m와 TB-6의 0.8~1.7m에서 core loss가 발생하여 당 구간에도 석회암 공동이 분포할 수 있을 것으로 판단되었다.

표 1. 저토피 구간 시추조사 결과 (C/L : core loss)

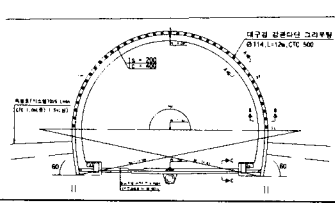
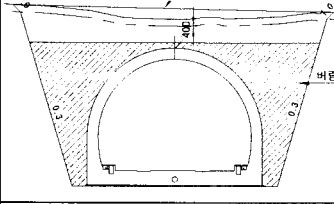
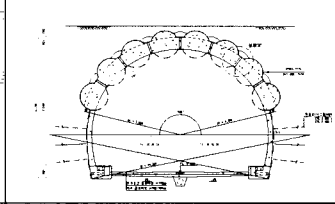
구분	TB-5 (m)	TB-6 (m)	TB-7 (m)
Silty sand	0~1	0~0.6	0~1.2
연암	1~4.5 C/L(1.4~2, 4.2~4.5)	0.6~1.7 C/L(0.8~1.7)	-
경암	4.5 ~	1.7~	1.2~

3. 굴착 및 보강공법

3.1 저토피 구간 통과공법

저토피 구간 통과공법으로 표 2와 같이 대구경 강관다단그라우팅 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 공사비가 높은 단점이 있다.

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 압입하고 관내를 굴착한 후 관을 연결한 다음 콘크리트 라이닝으로 마감
공법 개요	-대구경 강관다단 그라우팅 (φ114mm, L=12m, 상반180°)	-되메움, 라이닝(t=80cm) 상단에 버림 콘크리트 타설	-강관 삽입, 그라우팅 후 연결 (φ1800mm, L=20m, 120°)
특징	-무개착 공법으로 민원최소. -차수와 지반의 보강효과를 동시에 얻을 수 있음. -극저토피 시 별도의 상부 보강공법 필요.	-개착 시 발파에 따른 민원이 예상되고 시공 중 사면 안정화 공법이 필요함. -공사 진입로 개설 시 민원 및 추가비용 소요 예상.	-무개착 공법으로 민원최소. -작업대 및 플랜트설치 공간이 필요함 -연암 이상의 암반의 경우 시공성이 매우 낮음
선정	강관다단그라우팅+상부보강		

따라서 당 구간의 적용공법으로 표 3과 같이 극 저토피 구간에도 시공실적이 있고 공정이 비교적 간단하며 공사비가 타 공법에 비하여 경제적인 대구경 강관다단 그라우팅공법을 선정하였고 특히, 구조물의 중요도를 고려할 때, 대구경 강관다단 그라우팅($\phi=114$, $L=12m$, 상반 180° , 4span)이 저토피 구간 33m에 시공되도록 설계하였다.

표 3. 강관다단 그라우팅을 이용한 극 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) ($\phi=60$, $L=10\sim 15m$, 3span)	-철근보강콘크리트 ($t=40cm$)+앵커볼트 보강($L=5\sim 7m$)
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 상반시공 각도

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 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,횡 C.T.C. 1.5m)를 시공하고 이를 중 방향 및 횡 방향으로 연결한 후 콘크리트를 타설하도록 설계하였다.

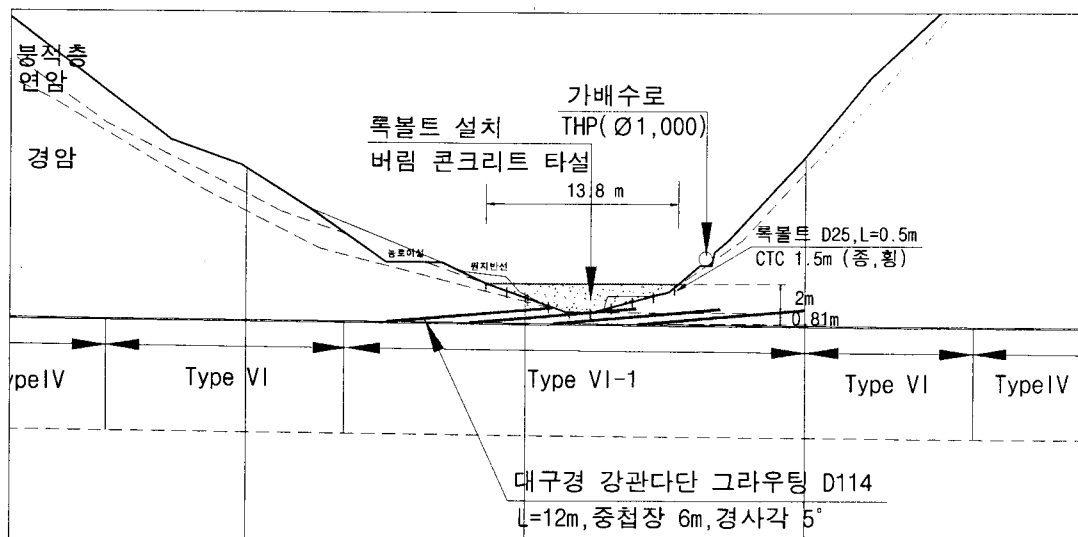


그림 4. 송학터널 저토피 통과공법 단면도

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, 숯크리트는 Extract element를 이용한 Plate element, 록볼트와 강관다단 그라우팅은 Embedded truss element를 사용하였다.

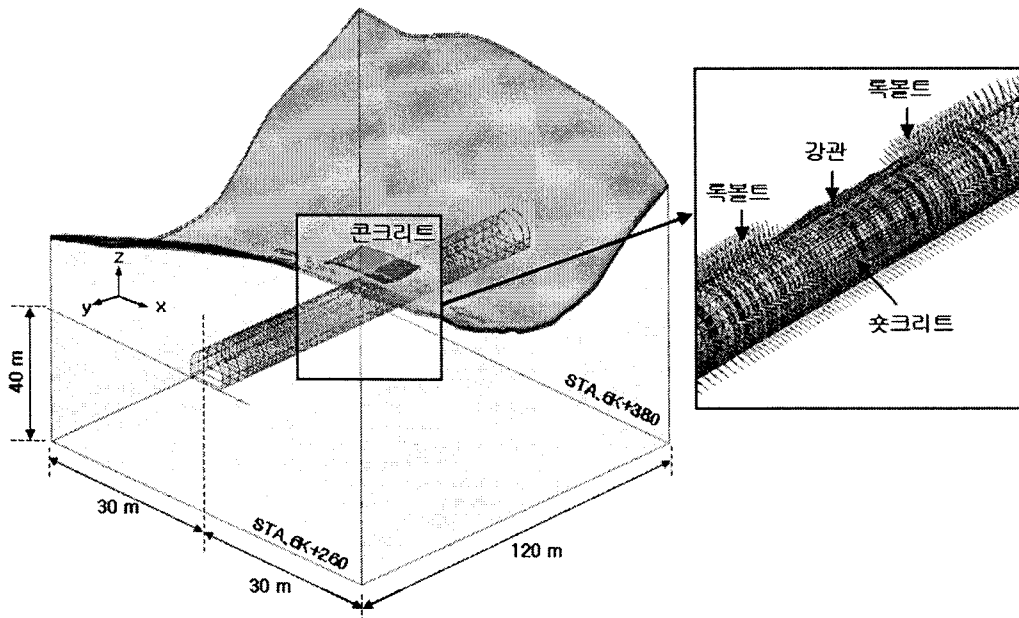


그림 5. 해석모델 개요 및 적용 지보재

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. 저토포 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 4 및 표 5와 같이 산정하였고 시공단계(Construction stage, C/S)는 그림 6과 같이 Type II~Type VI-1까지 총 172 단계이다.

표 4. 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 5. 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	Φ114, t=6mm	0.01

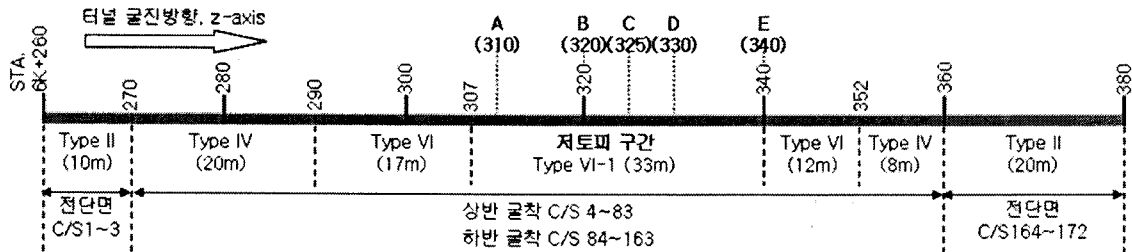


그림 6. Construction stage(C/S)에 따른 시공순서 모식도

4.2 안정성 검토 결과

터널은 종 방향과 횡 방향의 3차원 Arching effect에 의하여 거동(Sinha, 1989)하므로 굴착에 따른 변위결과에서 나타나듯이 굴착 전 각 축점의 내공변위가 이미 변하고 있는 것을 볼 수 있다. 천단변위는 저토피부 상반굴착 시 거의 대부분이 발생하여 하반굴착(C/S 84 부터)에 따른 변위는 거의 발생하지 않았고 저토피부 통과 전에 비하여 통과후가 크게 나타나는데 이는 변위가 토피와 밀접한 관계를 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.

쏫크리트 압축응력 분석을 위하여 먼저 시작부 경계의 영향을 제거하기 위하여 모델의 시점부에 타설되는 쏫크리트는 해석에서 제외하였다. 초기에 최대 쏫크리트 응력은 모델 시점부 측벽하단에서 발생하여 굴착과 함께 증가하다가 C/S 20 이후에 일정한 경향을 보였다. 그리고 저토피부 상반굴착이 끝나가는 C/S 76부터 증가한 후 종점부에서 토피가 높아지면서 다시 증가하는 경향을 보였다. 쏫크리트 압축응력은 터널의 측벽 하단부에서 국부적으로 비교적 크게 발생하는데 이는 터널 굴착 시 우각부에 응력이 집중되기 때문이다. 쏫크리트의 최대 압축응력은 8.469 kgf/cm² 로 쏫크리트 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.

해석결과를 종합적으로 분석해 보면 천단변위, 쏫크리트 응력, 록볼트 축력은 극히 미소하거나 허용치의 1/10 수준이고 저토피부에서의 지반변위 및 지보내 응력은 이보다 훨씬 작게 나타났는데 이는 저토피부의 상재하중(암반 0.81m+콘크리트 2m)이 작고 저토피 구간이 지보재에 의해 충분히 보강되었기 때문으로 판단된다. 굴착에 따른 지반변위 및 지보재 응력변화를 종합하면 표 6과 같다.

표 6. 해석결과 그래프 및 Construction stage 83단계(저토피 상반굴착 완료) 결과

구분	해석결과 그래프	Construction stage 83 단계 결과
천단 변위		
측벽 변위		
최대 슛크리트 응력		
최대 록볼트 축력		

5. 저토피 구간 시공계획

5.1 저토피 구간 시공 및 계측계획

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 7과 같다.

표 7. 저토피 구간 시공계획 및 굴착 순서도

1단계	2단계	3단계
<ul style="list-style-type: none"> 가농로/가배수로, 저토피 상부 록볼트+콘크리트보강 	<ul style="list-style-type: none"> 저토피부 터널 상반굴착 및 강관다단 그라우팅시공 	<ul style="list-style-type: none"> 저토피부 터널 상반굴착 및 강관다단 그라우팅 보강완료
4단계	5단계	6단계
<ul style="list-style-type: none"> 저토피부 보강 및 터널 굴착완료 	<ul style="list-style-type: none"> 농로/수로복원 	<ul style="list-style-type: none"> 저토피부 라이닝 타설완료

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

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

5.2 석회암 공동 보강계획

2절에서 언급했듯이 원 설계 노선은 석회암 지대를 피하여 설계되었지만, 터널을 굴착하면서 송학터널 시점 갱구사면과 두학터널에서 석회암 공동이 발견되었고 시추공 TB-5의 1.4~2m와 4.2~4.5m와 TB-6의 0.8~1.7m에서 Core loss가 발생하여 석회암 공동의 분포가 우려되므로 그에 따른 대책이 필요하다. 표 8은 실시설계보고서(2004)의 석회암 공동 대책 공법으로 보강권 6m 이내는 콘크리트로 채움, 그 외는 모래채움을 실시한다. 그러나, 대규모의 공동이 터널 하부에 존재할 경우에는 지지력 문제가 발생하므로 보강권 외부에 존재하는 공동이라도 버림콘크리트 또는 시멘트밀크 그라우팅을 실시하여야 한다. 또한, 네트워킹 형태로 분포하는 공동은 시멘트 모르타르 그라우팅을 실시하고 Sink hole 구간은 FRP 다단 그라우팅과 필요 시 시멘트 밀크 그라우팅을 실시하여 공동을 보강할 예정이다.

표 8. 저토피 구간 석회암공동 대책공법

중규모 공동		대규모 공동	
굴착면 인접, 직경 0.5~3.0m	굴착면 인접, 직경 3.0m 이상	굴착면 이격, 직경 3.0m 이상	
<ul style="list-style-type: none"> 공동폭: $0.5m < S < 3.0m$ 보강심도: $d > 2S$ 최대보강심도: $d_{max} = 6.0m$ 	<ul style="list-style-type: none"> 공동폭: $S > 3.0m$ 보강심도: $d_{max} = 6.0m$ 철근콘크리트라이닝보강 	<ul style="list-style-type: none"> 보강심도: $d_{max} = 6.0m$ 철근콘크리트라이닝 보강 	
<ul style="list-style-type: none"> 공동폭: $0.5m < S < 3.0m$ 보강심도: $d > 2S$ 최대보강심도: $d_{max} = 10.0m$ 인버트 단면 철근콘크리트라이닝 보강 	<ul style="list-style-type: none"> 공동폭: $S > 3.0m$ 보강심도: $d_{max} = 10.0m$ 인버트 단면 철근콘크리트라이닝 보강 	<ul style="list-style-type: none"> 보강심도: $d_{max} = 6.0m$ 인버트 단면 철근콘크리트라이닝 보강 	

6. 맺음말

저토피 구간은 NATM 공법의 근간이 되는 Ground arching 형성이 어려워 터널굴착 시 낙반, 붕괴 등의 사고가 다수 발생하므로 주의하여 굴착하여야 한다. 특히 당 현장과 같은 석회암 지대는 용식작용에 의하여 석회암공동이 비정형적이고 산발적으로 분포하므로 저토피 구간 통과 시 더 많은 주의가 요구된다. 본 검토의 내용을 정리하면 다음과 같다.

1) 원 설계 노선은 석회암 지대를 피하여 설계되었지만, 터널을 굴착하면서 송학터널 시점 갱구사면과 두학터널에서 석회암 공동이 발견되었고 최소 토피고가 0.81m인 송학터널 저토피 구간에서 실시된 시추조사 결과, 시추공 TB-5의 1.4~2m, 4.2~4.5m와 TB-6의 0.8~1.7m에서 Core loss가 발생하여 석회암 공동의 분포가 우려된다.

2) 저토피 구간설계 시 민원 최소화와 시공성 확보를 위하여 대구경 강관다단 그라우팅공법, 개착공법, Pipe roof공법 등이 검토되었다. 이중 대구경 강관다단 그라우팅 공법은 당 현장과 같은 극 저토피 구간에도 시공실적이 있고 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, 종,횡 C.T.C. 1.5m) 시공 후 콘크리트를 타설(최대높이 2m)하여 터널을 굴착하는 것으로 설계하였다.

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

4) 대부분의 강관다단 그라우팅이 경암내에 시공되므로 과도한 압력 그라우팅을 실시하지 않고 강관과 강지보의 강성을 이용하여 터널 천단부를 지지할 계획이고 계곡부의 붕적층 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 굴진을 체크 등을 통하여 막장전방을 예측하며 시공 중 계측을 실시하여 안정성을 확보할 예정이다.

터널 보강권 6m 이내에 공동이 존재할 때는 콘크리트로 채움을 실시하고 그 외는 모래 채움을 실시한다. 그러나 대규모의 공동이 터널 하부에 존재할 경우에는 지지력 문제가 발생할 수 있으므로 보강권 외부에 존재하는 공동이라도 버림 콘크리트 또는 시멘트밀크 그라우팅을 실시하여야 한다.

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