



저토피, 편토압 터널의 변위발생공간에 대한 보강사례



이상은
강원대학교
에너지·자원공학과 교수



강문구
두산건설(주) 토목설계팀
차장



장우상
두산건설(주) 부장
현장소장



안성울
(주)사이텍이엔씨
대표이사

1. 서론

지방도 424호선중 평창군 봉평면에서 홍천군 내면을 연결하는 8,364m의 구간내에 시공중인 ○○○터널(L=2,050m)의 종점측 갱구부의 저토피, 편토압 구간에서 굴착완료 후 측압으로 내공변위와 슛크리트 균열이 발생하였다. 따라서 변위계측자료와 지반조사 결과를 토대로 3차원적 해석을 수행하여 기 시공된 터널의 상태를 파악하고 보강방안을 수립하여 그 적정성을 검토하였다.

2. 지형 및 지질

이 지역의 북동쪽에는 오대산이 위치하고 있으며, 오대산의 최고봉인 비로봉(▲1,563.4m)으로 부터 계방산(▲1,577.4m) 및 운두령(▲1,089m)으로 이어져 보래령으로 이어지는 산맥이 발달하여 있다. 보래령은 다시 서측으로 회령봉(▲1,309.4m) 및 흥정산(▲1,276.5m)으로 이어지고 있다. 수계는 보래령을 중심으로 북측으로는 청계동 방향으로 흐르고 있으며, 남



그림 1. 지질 현황도

측으로는 보래동 및 덕거리 방향으로 소하천이 발달하고 있다.

이 구간의 지질도를 나타내면 그림 1과 같으며, ○○○ 터널을 포함하여 이 일대는 시점측으로 선캠브리아기의 혼성호상흑운모편마암이 넓게 분포되어 있고 북측으로는 흑운모화강암이 분포되어 있다. 편마암 지역에는 부분적으로 산성 및 중성암맥이 관입되어 있으며 우백질상의 편마암이 분포되어 있다.

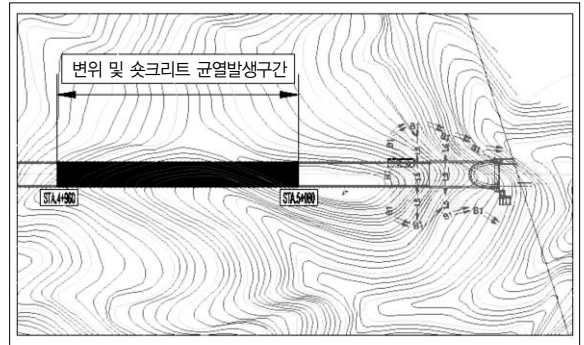


그림 2. 변위 및 숏크리트 균열 발생구간

3. 터널시공 및 계측결과

3.1 시공현황

금번 내공변위와 숏크리트 균열 발생구간은 그림 2와 같이 종점측 갱구부 STA.4+960~STA.5+080의 연장 120m로서 표 1과 같이 지보패턴은 IV와 V로 상, 하반 분할굴착으로 시공이 되었으며, 상반굴착은 2005년 8월 10일부터 10월 6일, 하반굴착은 2005년 8월 26일부터 10월 12일 사이에 완료되었다. 이 구간의 지형은 시점에서 종점측으로 볼 때 변위 및 숏크리트 균열발생구간의 우측으로 계곡부가 발달하고 있어 폭 5m, 깊이 5m 정도의 깊은 수로가 발달하고 있다. 이 중 STA.5+000과 STA.5+063의 횡단면도를 도시하면 그림 3과 같다.

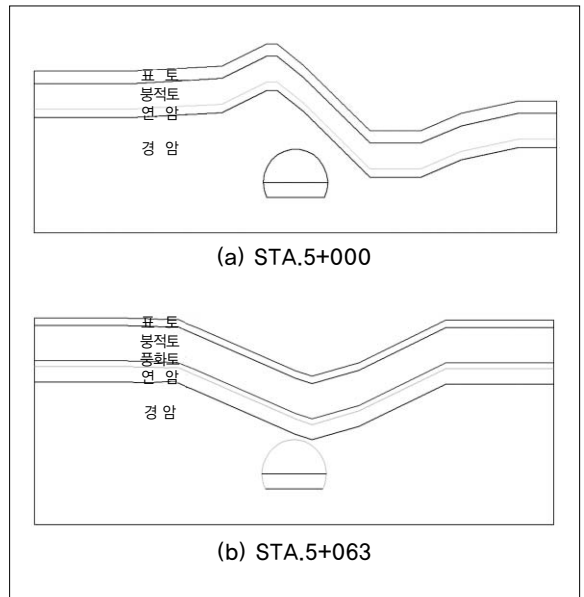


그림 3. 횡단면도

표 1. 지보패턴 및 보강방법

구 분	지보패턴	굴진장	굴착방법	록볼트	숏크리트 두께	강지보	라이닝	비 고
굴착 및 지보방법	Type IV	상부:1.5m 하부:3.0m	상,하반 단면 분할굴착	종:1.5m 횡:1.5m	12.0cm	△50×20×30	무근 콘크리트 (t=30cm)	STA.4+960 ~ STA.4+979
	Type V	상부:1.2m 하부:1.2m	상,하반 단면 분할굴착	종:1.5m 횡:1.5m	16.0cm	△70×20×30	철근 콘크리트 (t=40cm)	STA.4+979 ~ STA.5+080
보강방법	· Type V는 천단부 봉락방지를 위해 상반 120° 포어폴링 공법 실시							

3.2 변위계측

터널의 계측관리 기준치는 각 나라마다 여러 기준들이 있으나, 시공단계에서 발생하는 변위량과는 다소의 차이가 있을 수 있다. 따라서 계측관리 기준치는 그 현장과 유사한 터널의 경험치를 근거로 설정하는 것이 바람직하나, 토피가 얇을 때는 지형의 영향을 많이 받기 때문에 보다 엄격한 기준치를 설정하는 것이 중요하다. 표 2는 본 터널 현장에 적용된 계측 관리기준치를 나타낸 것이다.

위 계측관리 기준치는 터널 토피가 10~50m 구간의 일반적인 현장의 기준치로서 본 현장과 같이 종점측 갱구부의 토피가 터널 상부로부터 9.4~17.0m 정도인 편토압 구간임을 감안할 때 당초 30mm에서 토피의 1/1,000(프랑스 공업성 추천)인 10~15mm 정도가 적정한 것으로 여겨진다.

상, 하반굴착 후 2005년 12월까지 본 구간은 2mm 이하의 미소한 변위로 수렴이 되었으나, 2006년 8월 게릴라성 집중호우 뒤 9월부터 7~8mm로 12월까지 변위가 다시 증가하였으며, 현재는 12~56mm까지 변위가 증가된 상태로 터널 변위기준치인 10~15mm를 상회하고 있다. 아울러 터널 좌, 우측벽에 다수의 슛크리트 균열이 수직 및 수평하게 발생되어 암반 이완대의 범위가 상당히 진척되어 있는 실정이며, 패턴 IV, V의 지보로는 그 기능을 발휘하지 못하는 것으로 판단된다.

2007년 6월 6일까지 계측된 측점별 내공변위 결과는 그림 4와 같으며, 그림 5는 STA.4+985 측점에 대한 변위결과를 시간대별로 표현한 것이다. 2005년 1차 수렴

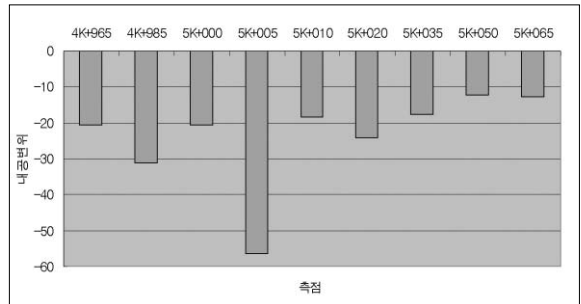


그림 4. 측점별 내공변위량

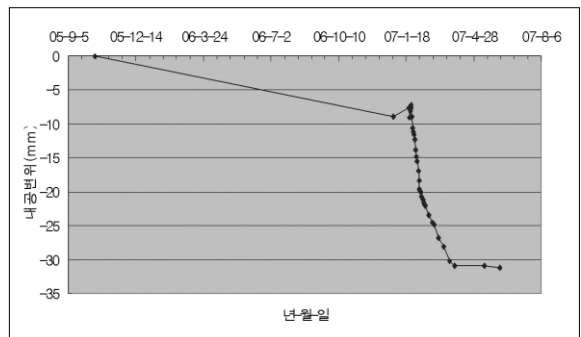


그림 5. 시간경과에 따른 내공변위 예(STA.4+985)

이후 우기시마다 변위가 미소하게 증가하다가 2007년 1월부터 3월까지 급격한 증가양상을 보이고 있다. 현재 6월 6일을 기준으로 할 때 3월에 비하여 미소한 증가를 보였으나, 장마 및 게릴라성 집중호우가 시작되면서 지표수 유입에 따른 지반내 과잉간극수압의 증가와 편토압 지형 등에 의하여 추가로 변위가 증가될 것으로 보인다. 여기서 3월부터 6월까지의 미소한 변위증가는 지반 내 지하수가 거의 빠져나간 상태인 갈수기이기 때문인 것으로 판단되었다.

표 2. 계측관리 기준치

항 목	관 리 기 준 I			관 리 기 준 II
	내 공 변 위	Type 1 - 3	15mm	
Type 4 - 6		30mm	3mm/day가 3일 계속	50mm
천 단 침 하	Type 1 - 3	15mm	3mm/day가 3일 계속	30mm
	Type 4 - 6	30mm	3mm/day가 3일 계속	50mm

3.3 숯크리트 균열

이 구간에 대한 숯크리트 균열은 터널 좌측벽면에서 6곳, 우측벽면에서 14곳에서 관찰되었으며, 이를 나타 내면 표 3과 같다. 좌측벽면의 수직균열과 우측벽면의 수평균열에 의한 현상은 저토퍼 갱구부로서 상당한 수 평압력과 편토퍼를 받고 있는 증거이며, 특히 수평균열 현상은 그 구간이 큰 압력으로 매우 불안정한 상태에 놓 여 있음을 의미하고 있다. 따라서 이 구간은 지반내 지 표수 유입으로 지반강도의 저하 및 지형 특성상 변위가 꾸준이 증가하고 있고 숯크리트의 수직 및 수평균열이 다수 발달하고 있으므로, 지표수 침투를 방지하고 암반 의 강도를 증진시킬 수 있는 차수+지반강도증진 개념의

보강공법이 요구된다고 할 수 있다. 이때 발생된 균열의 전경 예는 그림 6과 같다.

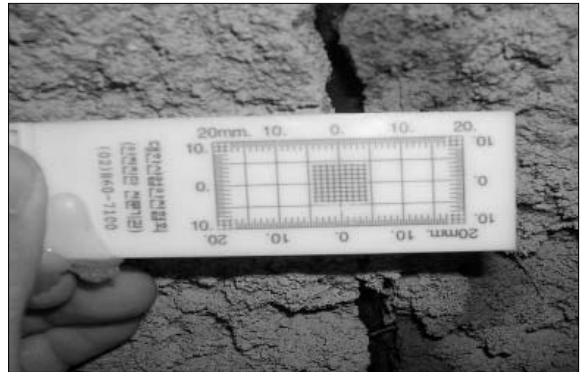


그림 6. 숯크리트 균열전경 예

표 3. 숯크리트 균열현황

측점 (STA)	터널측벽 (시점-종점)	균열폭 (mm)	균열길이 (m)	균열방향 및 특징	설계 지보패턴	시공 지보패턴
4+973	좌측	1.0	1.9	수직균열	4	4
4+985	"	1.0	2.2	"	5	5
5+005	"	7.0	3.5	"	5	5
5+007	"	0.5	2.2	"	5	5
5+016	"	0.5	1.3	"	5	5
5+040	"	0.5	1.7	"	5	5
5+071	"	5.0	4.0	"	5	5
4+983	우측	1.0	0.7	수평균열 (벽체하단에서 1.5m)	5	5
4+985	"	1.0	0.5	"	5	5
4+988	"	1.0	0.4	"	5	5
4+990	"	1.0	0.3	"	5	5
4+992	"	1.0	0.4	"	5	5
4+994	"	1.0	0.4	"	5	5
5+003	"	1.5	1.6	수평균열 (벽체하단에서 2.0m)	5	5
5+007	"	1.5	1.3	"	5	5
5+008	"	1.5	1.0	"	5	5
5+012	"	1.0	0.3	수평균열 (벽체하단에서 1.5m)	5	5
5+013	"	1.0	0.3	"	5	5
5+014	"	1.0	0.3	"	5	5
5+015	"	1.0	0.4	"	5	5
5+016	"	1.0	0.3	"	5	5

4. 조사 및 암반분류

4.1 지반조사

지반조사는 터널 상부에서 수직시추와 터널내에서 측벽시추를 실시하였으며, 그 조사일정 및 조사구간을 나타내면 표 4와 같다. 시추코어의 암분류는 한국도로공사 기준과 지질조사표준품셈을 적용하였으며 표 5는 그 결과를 나타낸 것이다.

시추조사 결과 화강암 지대로 홍갈색 및 담홍색을 띠며, 부분적인 파쇄가 일부 발달하고 있으나 특이할 만한 구조적 지질작용은 없는 것으로 확인되었다. 풍화상태는 보통~약간 정도이고 부분적으로 절리면의 산화 또는 변색되어 있는 것이 특징이다.

4.2 암반분류

암반분류는 비슷한 거동의 그룹으로 암석이나 암반을 분류하여 각 그룹의 특성을 이해할 수 있는 기준을 마련하고 설계를 위한 정량적 데이터를 획득하여 정보를 전달하는 근거를 마련하는데 그 목적이 있다. 암반분류법은 객관적이고 간편하며 대상으로 하는 모든 암반에 적용될 수 있어야 하고 설계와 시공에 필요한 정보를 제공하며, 계획단계에서부터 조사, 설계, 시공에 이르는 모든 과정에서 일관성 있게 적용될 수 있는 객관적 지표로 활용된다.

특히, NATM의 경우 굴착방법이나 지보형식을 결정하기 위해 대상암반을 일정한 기준에 의하여 분류하여야 하며, 이는 많은 자료와 시공경험 등을 필요로 한다.

본 대상구간에서는 암반을 수치적으로 점수화하여 정량적으로 분류할 수 있고 암반의 강도정수를 추정할 수 있는, 현재 국내에서 가장 많이 적용하고 있는 RMR 분

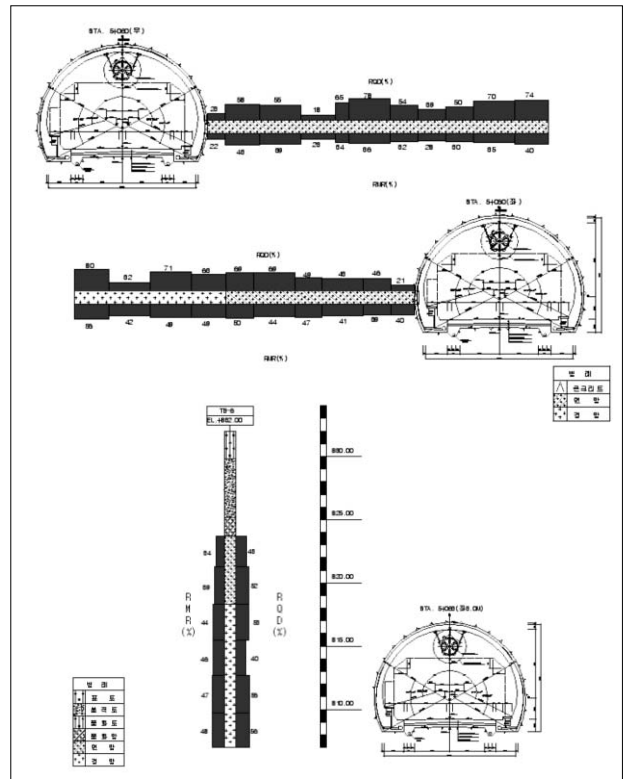


그림 7. 시추코어의 암반분류 결과

표 4. 지반조사 일정

구분	조사구간	조사기간
측벽보링	TB-1 : STA.5+000 (우측벽)	'07. 6. 11
	TB-2 : STA.5+000 (좌측벽)	'07. 6. 12
	TB-3 : STA.5+060 (우측벽)	'07. 6. 13
	TB-4 : STA.5+000 (좌측벽)	'07. 6. 14
수직보링	TB-5 : STA.5+004 (좌 3.0m)	'07. 06. 11 ~ '07. 06. 13
	TB-6 : STA.5+063 (좌 3.0m)	'07. 06. 13 ~ '07. 06. 15

표 5. 시추조사 결과 요약

구 분	공번	심도(m)	암 종	TCR(%) (코어회수율)	RQD(%) (암질지수)	비 고
수평보링	TB-1	0.0~0.4	숫크리트			
		0.4~2.0	연암	93	48	화강암
		2.0~25.0	경암	98~100	56~81	화강암
	TB-2	0.0~0.3	숫크리트			
		0.3~1.5	연암	92	31	화강암
		1.5~25.0	경암	94~100	42~94	화강암
	TB-3	0.0~0.2	숫크리트			
		0.2~20.0	연암	58~100	18~78	화강암
		20.0~25.0	경암	94~100	70~74	화강암
	TB-4	0.0~0.3	숫크리트			
		0.3~14.0	연암	84~100	21~69	화강암
		14.0~25.0	경암	97~100	32~80	화강암
수직보링	TB-5	0.0~1.3	표토			실트질모래
		1.3~7.5	붕적토			실트섞인 모래질 자갈 및 호박돌
		7.5~8.5	풍화토			실트질모래
		8.5~11.2	풍화암			실트질모래
		11.2~19.6	연암	89~100	50~96	화강암
	19.6~25.0	경암	100	86~100	화강암	
	TB-6	0.0~2.2	표토			실트질모래
		2.2~6.8	붕적토			실트섞인 모래질 자갈 및 호박돌
		6.8~8.3	풍화암			실트질모래
		8.3~13.7	연암	95~100	43~52	화강암
13.7~25.0		경암	91~100	40~56	화강암	

류방법을 적용하였다. 이 방법은 분류된 암반등급에 따라 지보패턴을 적용하기 쉽고, 분류자 개개인의 숙련도에 따른 오차를 줄일 수 있는 방법이다.

두 지점의 시추중 STA.5+060의 시추코어로부터 암반분류 결과를 도시하면 그림 7과 같다. RMR 값이 40~60범위의 값을 보이고 있으나, 관찰결과 절리면의 방향이 터널축에 평행한 수직으로 발달하고 있어 불리 또는 매우 불리로 적용할 경우 IV등급의 암반에 속한다고 볼 수 있다.

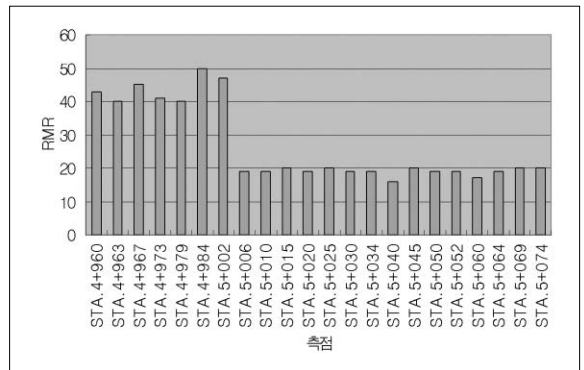


그림 8. 각 측정별 RMR 결과

한편, 2005년 9월 5일부터 2005년 10월 15일까지 조사된 막장 Mapping 결과를 토대로 RMR 분류가 실시되었으며, 각 측정별 관찰된 결과는 그림 8과 같다. STA.4+960에서 STA.5+002까지는 40~50정도의 값을 보이고 있으나 그 이후 구간은 20이하의 값을 나타내었다. 막장관찰 결과만으로 볼 때 본 구간에 적용된 지보패턴 IV와 V는 적절하나, 이 구간이 갱구부 저토피 편토압 구간이고 터널 상부에 계곡수로가 발달된 점을 감안할 때 지하수 침투를 억제하는 차수공법과 지반강도를 증진시키는 보강공법을 추가로 적용하는 것이 터널의 안정성 향상을 위해 필요한 것으로 판단된다.

4.3 물성치 산정

현장조사 및 시험과 더불어 해석지반의 지반특성치 결정은 매우 중요하다고 할 수 있다. 지반특성치는 해석 결과의 신뢰도에 가장 큰 영향을 미치므로, 설계에 적용할 지반특성치를 터널 변위결과를 3차원 해석에 의한 역추적과 원설계 자료 등을 근거로 제시하였다.

대상구간의 시추결과에서 암반이 III등급에 해당하나 절리의 주향이 높은 경사로 터널굴진방향과 평행을 이루거나 굴진방향과 불규칙하게 사교하고 있으므로 점수 보정을 할 경우 IV등급의 암반에 속한다고 할 수 있다. 따라서 원설계 보고서에서 설정한 IV등급 암반에 해당하는 500MPa이나 사레분석의 중간값인 2.6GPa 정도의 값으로 설정하는 것이 바람직하나, 오랜 기간동안 변위가 증가함에 따라 주변암반이 심하게 이완되었을 것으로 판단되기 때문에 터널에서 측정한 내공변위값을 토대로 역추적에 의하여 변형계수값을 결정하였다(6차

참조).

한편, 단위중량(γ_t), 포아송비(ν), 점착력(c), 내부마찰각(ϕ) 등은 원설계를 준용하였으며, 그 결과는 표 6과 같다. 또한 흙에 대한 물성치 역시 원설계시 적용한 값을 사용하였다.

5. 보강공법 선정

중점측 갱구부 저토피 구간에 대한 통과공법으로 원설계는 지보패턴 V로 계획되어 있으며, 터널내 계곡수 유입을 차단하기 위해 Pre-Grouting 보강, 터널 천단부 토피가 충분하지 않으므로 강관그라우팅 실시 등을 보강하여 그림 9와 같이 터널의 안정성을 확보하는 방안이 검토되어 있다. 이 방안은 암반 토피의 부족과 지표수 침투 등에 의한 강도저하 등을 고려할 때 적절한 것으로 판단되며, 특히 차수와 지반보강을 고려한 Pre-Grouting과 강관그라우팅의 적용은 저토피 편토압 구간에서 터널의 영구적인 안정성 확보를 위해 바람직한 것으로 여겨진다.

한편, 2005년 시공시 막장 Mapping 결과를 토대로 지보패턴 IV와 V를 적용하여 시공한 결과 2005년 12월경에 2mm 이내의 변위로 수렴이 완료되었기 때문에 현장에서 적용한 지보패턴은 적정하였던 것으로 평가할 수 있다. 그러나 2006년 여름철 계절라성 집중호우시 지표수 침투에 따른 간극수압의 증가 및 암반강도의 저하 등이 동반되어 그 구간의 변위가 다시 증가하기 시작함으로써 지금까지 최대 50mm 이상의 변위가 발생하였다. 변위발생과 더불어 터널 좌, 우측벽면에 슛크리트 균열이 발생하였고, 더욱이 수평균열이 발생함에 따라 터널의 붕괴 위험이 크게 되었다.

보강구간은 원설계와 마찬가지로 동일한 구간을 보강하는 것이 타당한 것으로 판단되며, 다만 오랜 시간동안 변위가 꾸준히 증가함으로써 주변지반의 이완이 크게

표 6. 대상구간 암반의 물성치

단위중량 (KN/m ³)	변형계수 (MPa)	포아송비	점착력 (MPa)	내부마찰각 (°)
21.2	200	0.3	0.3	32

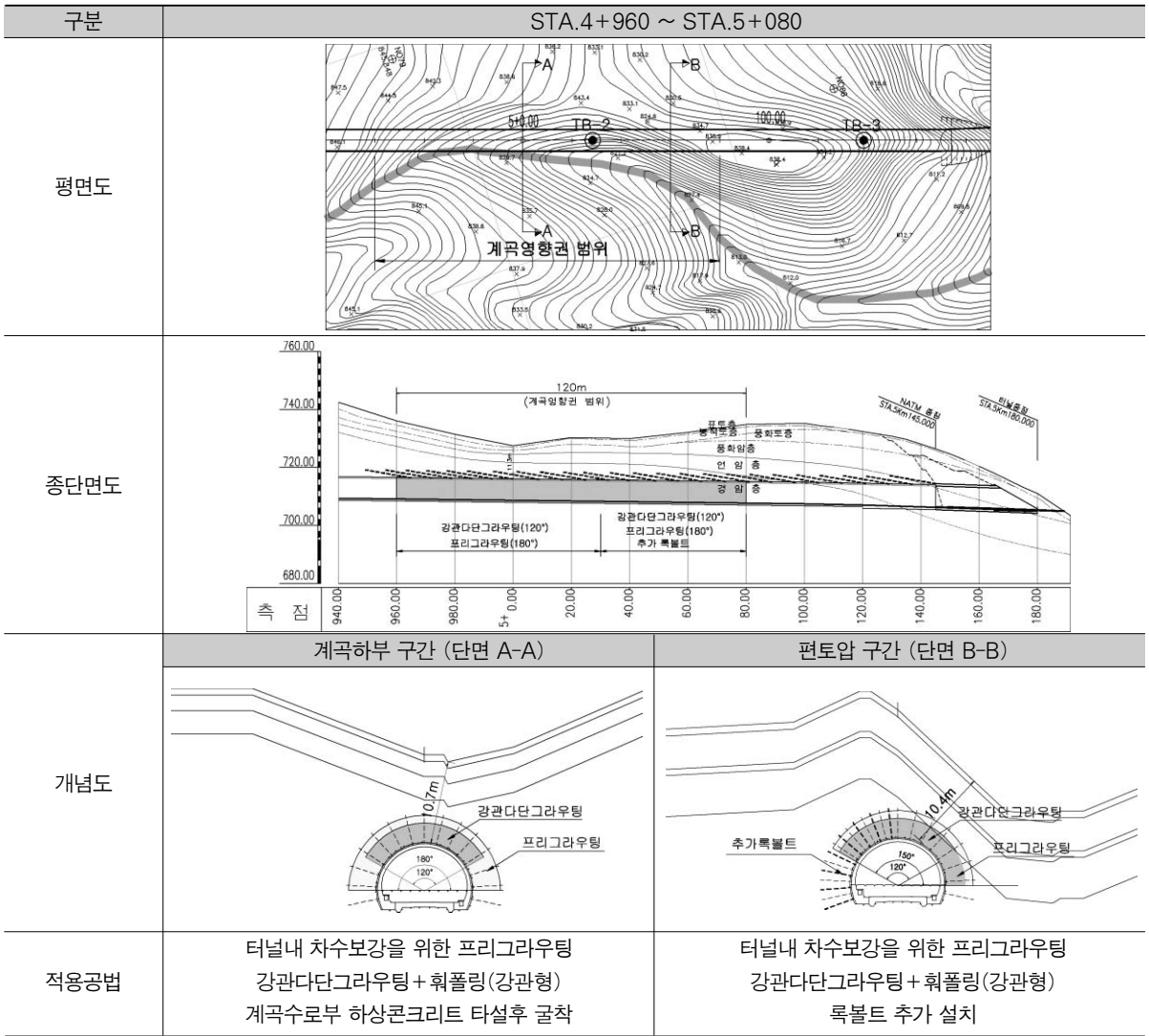


그림 9. 저토피 구간 통과공법(원설계)

확장·발달하였고, 좌, 우측벽면 숏크리트 균열상태로 볼 때 강관그라우팅 상부만 보강된 원설계로는 터널의 전체적인 안정성 확보가 곤란한 것으로 판단되므로 그림 10과 같이 터널 측벽하부까지 전면 보강할 것을 추천한다. 이때 강관보강길이는 터널의 폭을 고려하여 8.0m이고 그 간격은 2m×2m이다.

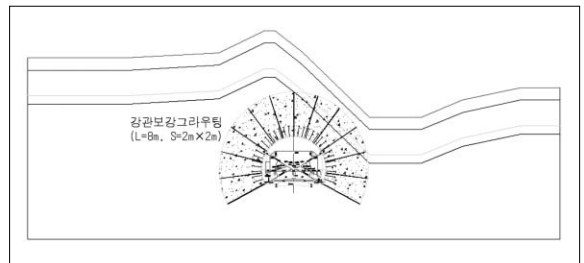


그림 10. 대상 구간의 보강도

6. 안정성 해석 및 결과

이 장에서는 먼저 VisualFEA 프로그램을 이용하여 3차원 해석에 의한 하중분담율 및 암반 지층에 대한 변형계수값을 산출하였다. 이 산출된 결과를 이용하여 대표적인 2단면에 대하여 보강전, 후의 2차원 해석을 수행하고 터널의 안정성을 평가하였다.

6.1 3차원 해석에 의한 역추적

굴착이 완료된 이후의 보강이므로 수치해석 프로그램으로 현장 시공상태와 적합하게 해석하는 것은 불가능하다. 따라서 불가피하게 굴착이 진행되는 상태로 그림 11과 같이 상반굴착(1.2m 굴진장) - 강지보 및 연한 숯

크리트 타설 - 굳은 숯크리트 타설순으로 해석에 적용하였다. 3차원으로 해석을 수행하기 때문에 2차원 Mesh(X-Y 평면)을 이용하여 Z방향으로 1막장을 1.2m 씩 확대연장하여 해석을 실시하였다. 따라서 X-Y 평면 상에서 횡방향으로 3D 이상, 상향으로는 지표면, 하향으로는 2.5D 이상의 범위로 안정해석을 실시하였다. 구현한 해석모델은 그림 12와 같다.

이때 측압계수는 터널 굴착바닥을 기준으로 할 때 대상구간의 심도가 18~28m에 속하므로, 최근 국내에서 30m 이내의 심도에서 측정된 측압계수 1.32~3.03를 고려하여 중간정도의 값인 2.0으로 선정하였다.

본 검토에서는 현장특성상 암반 토포가 작기 때문에 천단변위 결과를 기준으로 하중분담율을 결정하였다. 하중분담율은 그림 13과 같으며 41%-31%-29%로 산

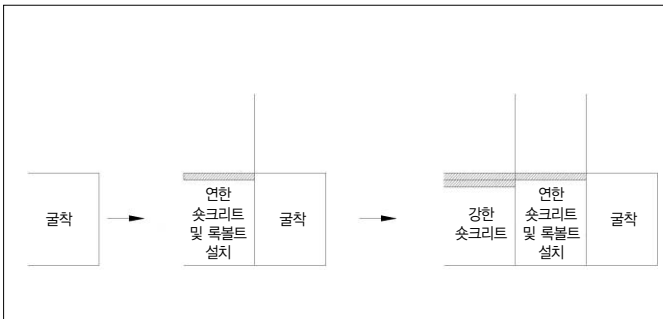


그림 11. 굴착 및 지보재 순서도

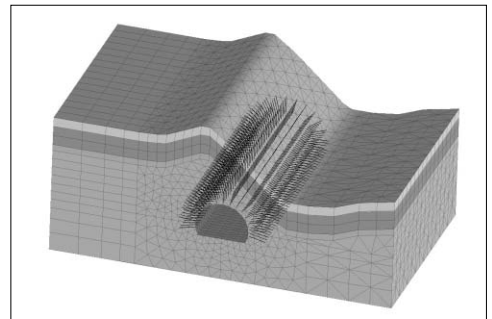


그림 12. 해석모델

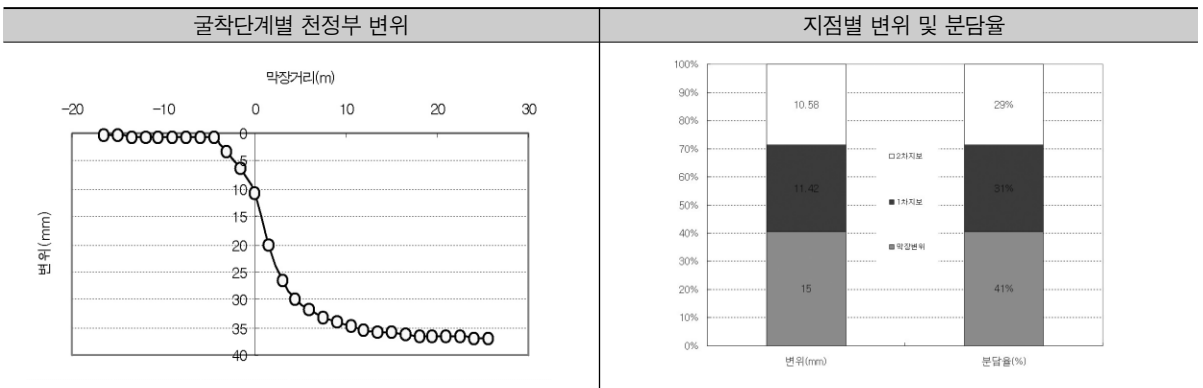
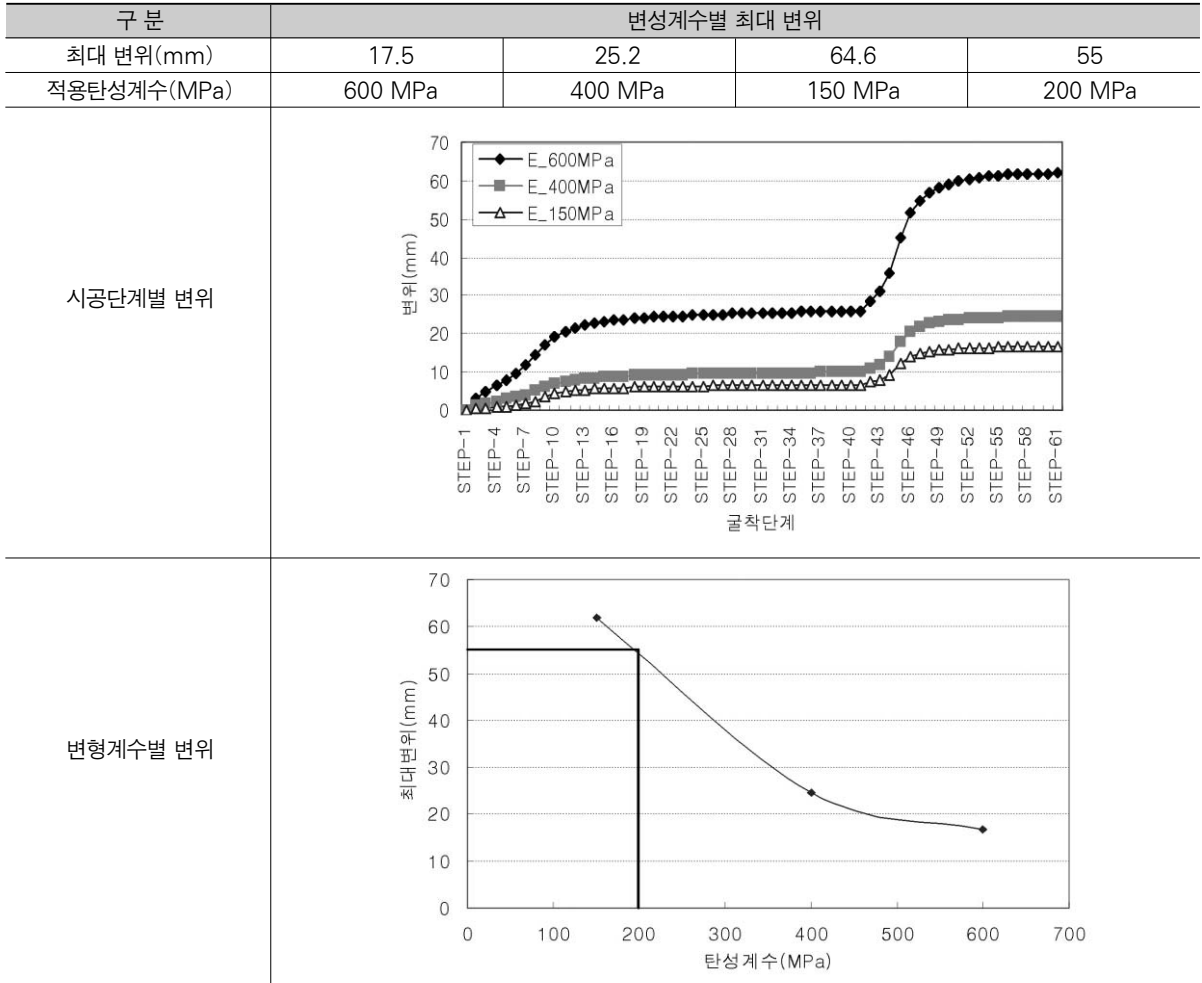


그림 13. 하중분담율 결과도

표 7. 변형계수별 변위 관계



정되어 2차원 안정성 해석시 40%-30%-30%을 적용하였다.

한편, 여러 변형계수값을 적용하여 해석한 결과로부터 내공변위값을 도시하여 회귀분석하였으며, 계측시 내공변위에 해당하는 변형계수를 역으로 추정하였다. 해석결과로부터 구한 변형계수별 변위는 표 7과 같다. 현재까지 계측된 내공변위 최대값 55mm 정도를 고려할 때 주변 암반의 변형계수는 200MPa로 산정되었다.

6.2 2차원 연속체 해석에 의한 안정성 해석

6.1절에서 검토된 하중분담을 및 변형계수값을 이용하여 터널 보강전, 후에 대한 안정성을 파악코져 수행되었다. 해석위치는 그림 3과 같이 가장 저토피인 STA.5+000 지점과 편토압이 가장 심한 STA.5+060 지점 2곳을 선정하였다(표 8). 해석단계별 하중분담을은 표 9와 같다. 이때 강관보강 물성치는 오랜 기간 변

표 8. 해석위치 선정

지보 패턴	측 점	단면 선정	굴 착	축압계수
TYPE-V	STA.5 +000	저토피 구간	상·하 반 단면 굴착	2.0
TYPE-V	STA.5 +060	편토압 구간	상·하 반 단면 굴착	2.0

표 9. 해석단계별 하중분담율

STEP	시공순서	하중분담율
0	초기 지중응력 발생	-
1	상반 굴착	40%
2	상반 soft shotcrete + 록볼트	30%
3	상반 hard shotcrete	30%
4	하반 굴착	40%
5	하반 soft shotcrete + 록볼트	30%
6	하반 hard shotcrete	30%

위증가로 주변지반이 충분히 이완되었으므로, 기존 여러 사례로부터 참조하여 암반변형계수의 10배인 2,000 Mpa를 적용하였으며, 해석 프로그램은 유한차분법인 FLAC 5.0을 사용하였다.

STA.5+000의 보강 전 해석결과 최대 내공변위량은 48.72mm로 나타났으며, 강관그라우팅 보강 후 4.81mm로서 변위관리 기준치인 10mm 미만으로 안정하게 평가되었다. 또한 슛크리트 최대 휨압축응력은 보강 이전에는 21.9Mpa로 허용압축응력 8.4Mpa를 초과하나 보강 이후는 5.96Mpa의 응력이 작용하여 허용응력의 71% 이내로 나타났다. 전단응력 역시 보강 전에는 0.38Mpa, 보강 후는 0.018Mpa로 미소한 값을 보였다. 한편, 그림 14와 같이 해석단계별 소성도는 보강 전

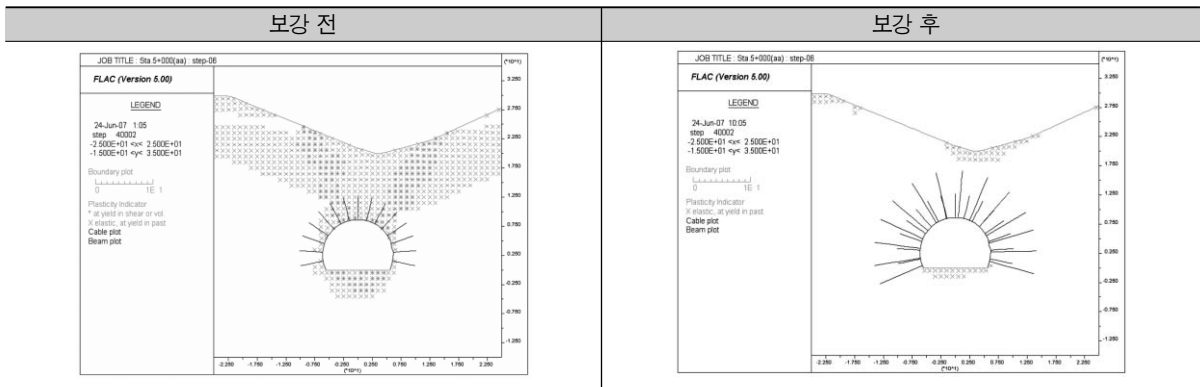


그림 14. 소성 해석결과도 (STA.5+000)

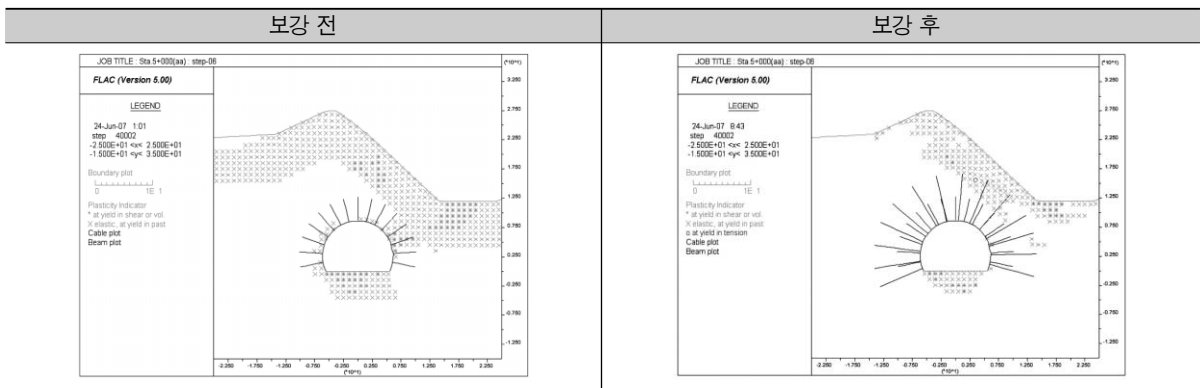


그림 15. 소성 해석결과도 (STA.5+060)

에는 터널 아치부에서 지표까지 그리고 터널 하부에서 소성파괴 현상을 보이고 있으나, 보강 이후는 소성역이 발생하지 않아 터널의 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

STA.5+060의 보강 전 해석결과 최대 내공변위량은 47.84mm, 슛크리트 휨압축응력은 30.7MPa, 전단응력은 0.84MPa로 모두 허용치를 초과하였다. 보강 후 결과는 최대 내공변위량이 6.36mm, 슛크리트 휨압축응력은 5.36MPa, 전단응력은 0.025MPa로 모두 허용치 이내로 나타났다. 해석결과중 소성도를 나타내면 그림 15와 같다. 보강 전에는 터널 우측 아치부에서 지표까지 연결되어 있고 하부에서 소성파괴 현상을 보이고 있으나, 보강 이후에는 터널 하부에만 소규모의 일부 소성역이 있으나, 이것은 FEM해석에서 일반적으로 나타나는 현상으로 판단된다.

요약하면, 본 대상구간은 지형상 갱구부 저토포 편토압 구간으로서 여름철 이상기후로 인한 집중호우로 지표수가 침투되어 암반내 수압이 증가하고, 침투수 유입시 암반절리의 풍화가 진행되고 암반의 강도가 저하됨으로써 이완영역이 확장된 것으로 판단된다. 또한 1.5D 이내의 저토포 구간으로 터널상부의 암토포가 부족하여 NATM 시공의 원리인 아치효과를 발휘하기 어려울 뿐만 아니라 갱구부 편경사가 심하여 편측 토압의 영향으로 현재 시공된 지보패턴으로는 터널의 안정성 확보가 곤란한 것으로 생각된다. 따라서 이 구간에 대한 보강은 지표수 침투를 억제할 수 있는 차수공법과 편측이나 암토포가 부족하여 발생하는 암반의 지지력을 증대시킬 수 있는, 즉 지반강도를 증진시킬 수 있는 강관그라우팅 공법을 적용하여 터널의 안정성을 확보하는 것이 바람직하다. 터널 슛크리트 벽면의 수직 및 수평균열관찰, 시추조사, 내공변위 및 지형적 여건 등을 감안할 때 터널 Crown부에서 터널 측벽 바닥까지 강관그라우팅 보강을 추천한다.

7. 결론

○○○터널(L=2,050m) 구간중 과도한 변위가 발생한 STA.4+960~STA.5+060(L=120m) 구간에 대한 현장 관찰결과 저토포, 편토압 지형과 지표수 유입에 따른 큰 측압에 의해 전구간에 걸쳐 변위관리 기준치인 10~15mm를 상회하는 변위가 발생하였다. 슛크리트 균열을 관찰한 결과 좌측벽면에서는 수직균열, 우측벽면에서는 위험성이 높은 수평균열이 다수 발달하여 슛크리트가 지보재로서의 기능을 상실하였다. 따라서 본 검토에서는 수직 및 측벽보링, 막장 Mapping, 현장변위 계측자료, 슛크리트 균열관찰 등을 이용하여 최대한 현장에 적합하도록 3차원 해석을 수행함으로써 주변 암반의 변형계수 및 하중분담율을 결정하였다.

이와 같이 검토된 자료를 바탕으로 대표적인 단면 2 곳을 선정하여 2차원 터널 안정성 해석을 수행하였다.

한편, 수직 및 측벽수평시추, 막장 Mapping 결과 예상되는 절리 및 소규모 파쇄대 방향은 터널축을 따라 수직 및 사교하는 형태로 발달되어 있으므로, 암반분류결과 Ⅲ등급에 속하나 터널과 절리 방향성을 고려하면 Ⅳ등급의 암반에 해당된다. 시추에 의한 지층구분선과 암반등급 결과를 토대로 3차원 해석에 의한 역추적 결과 현장 계측치에 해당하는 변형계수는 200MPa이고, 하중분담율은 굴착 41%, 연한 슛크리트 및 록볼트 31%, 굳은 슛크리트 29%로 산정되어 2차원 안정성 해석이 40%-30%-30%을 적용하였다.

3차원 해석으로부터 구한 하중분담율 및 변형계수값을 토대로 2 지점에서 2차원 해석을 수행한 결과 보강 전에는 최대변위가 STA.5K+000 지점에서 48.72mm, STA.5K+060 지점은 47.84mm로 관리기준치인 10mm를 초과하였다. 슛크리트 지보재의 경우 최대 휨압축응력은 두 지점 모두 21.9MPa 및 30.7MPa로 허용압축응력 8.4MPa을 초과하였으며, 슛크리트의 전단응력 역시 허용응력을 초과하여 0.38 및 0.84MPa로

나타났다. 보강전 안정성 검토 결과로 볼 때 이 구간의 지보재로는 터널의 안정성을 확보하지 않는 것으로 검토되었다.

강관보강그라우팅 간격 $2\text{m} \times 2\text{m}$, 길이 $L=8\text{m}$ 로 전면 보강을 실시할 경우 최대 내공변위량은 STA.5K+000에서 4.81mm, STA.5K+060에서 6.36mm, 숏크리트 최대 휨압축응력은 5.96MPa 및 5.36MPa, 전단응력은 0.018MPa 및 0.025MPa로서 모두 허용치 이내로 나타남으로 터널의 안정성에는 문제가 없는 것으로 판단된다. 소성역 검토 결과 보강전 STA.5K+000에서는 터널 아치부에서 지표까지, STA.5K+060에서는 터널 우측 아치부에서 지표까지 연결되어 있고 하부에서 역시 소성파괴 현상을 보이므로 터널의 안정성을 확보하기 어려우나, 강관보강그라우팅 시공에 의해 터널 주변에 소성역이 발생하지 않아 터널의 안정성이 확보된 것으로 판단된다. 그러나 이 결과는 대상구간에서 취약한 단편적인 단면을 기준으로 해석한 결과이고, 해석의 특성상 암반내에 발달하고 있는 모든 절리 및 지하수 영향

등을 고려할 수 없기 때문에 시공시는 반드시 계측을 실시하여 최종적으로 안정성을 파악하는 것이 필요하며, 여름철 집중호우가 발생하기 이전에 보강하여 추가적인 변위가 발생하지 않도록 조치하는 방안을 추천한다.

참고문헌

1. Rock Mass Classification—A Practical Approach in Civil Engineering, B. Singh & R. K. Goel, Elsevier, 1999.
2. Engineering in Rock Masses, F. G. Bell, Great Britain, 1992.
3. 통리-신리간(신리재터널) 도로 확·포장공사 변위발생구간 (STA.4+120~4+420)의 인버트 시공에 따른 터널의 안정성 검토보고서, (사)한국지반환경공학회, 2004.
4. 터널의 이론과 실무, 한국터널공학회, 구미서관, 2003.
5. 토질조사 보고서, (주)유신코퍼레이션, 2001.
6. 터널보고서, (주)유신코퍼레이션, 2001.
7. 계측관리 보고서, (주)서신엔지니어링, 2005, 2007.