

일반적으로 암피복 두께가 얇은 지역에 굴착되는 저토피 터널구간에서는 약간의 여굴이 발생하더라도 진행성 여굴로 인하여 쉽게 터널의 붕괴를 초래할 수 있으므로 지질조건에 맞는 작업순서 및 적합한 보강공법을 적용한 시공이 요구된다.

계곡부 저토피구간 터널보강공법 및 시공사례

글 | 송재민 과장 중앙선 북선전철 덕소-원주간 5공구 건설공사 현장 031-774-0480 이메일 | ssyj@ssyenc.com

1 개요

일반적으로 암피복 두께가 얇은 지역에 굴착되는 저토피 터널구간의 풍화암 지반은 토립자와 같은 거동을 나타내는 특징이 있다. 특히 터널 상부에 지하수위가 높고 터널 천단부에 토사나 풍화대가 위치하는 경우 비록 약간의 여굴이 발생하더라도 진행성 여굴로 인하여 쉽게 터널의 붕괴를 초래할 수 있으므로 지질조건에 맞는 작업순서 및 적합한 보강공법을 적용한 시공이 요구된다.

00철도현장의 경우, 설계단계에서의 지반현황과 시공중 실측 결과와의 차이로 터널피복두께가 감소하여 터널의 안정성이 우려됨에 따라 저토피구간 터널 시공을 위한 보강공법을 수립하고 수치해석에 의해 터널 안정성을 검토하여 터널굴착을 완료한 사례를 소개하고자 한다.

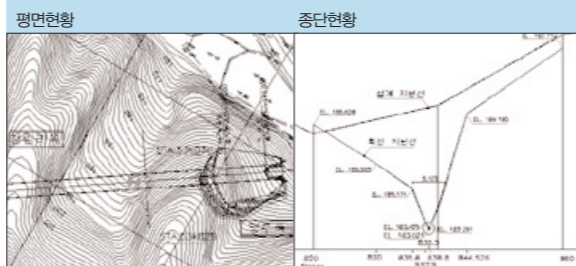
2 현장 및 지층현황

2.1 현장 현황

당현장의 53km 860 지점의 터널 계곡부 평면 및 종단현황을 살펴보면 <그림 1>과 같다.

현장 실측결과에 의한 계곡부의 종단 측량성과표는 <표 1>

■ 그림 1. 터널 계곡부 지형현황



과 같으며 최소토피 위치는 53km 838.5 지점의 3.229m로 확인되었다.

■ 표 1. 터널 계곡부 측량성과표

구분	53Km800	53Km820	53Km838.5	53Km840
설계지반고	191.30	188.10	189.62	189.96
실측지반고	193.30	188.60	183.021	184.60
계획고	170.68	170.92	171.142	171.16
굴착고	179.33	179.57	179.792	179.81
설계토피고	11.97	8.53	9.828	9.79
실측토피고	13.97	9.03	3.229	4.79

2.2 지층 현황

본 구간의 지층현황은 기 실시된 시추조사결과를 살펴보면 아래 <표 2>와 같이 분적토, 풍화암층, 연암층 순으로 구성되어 있으며, 각 지층의 특성은 <표 3>과 같다.

계곡부 구간의 최소 토피 위치인 53km 838.5 지점의 실측자료에 의한 횡단 지층현황은 <그림 2>와 같다.

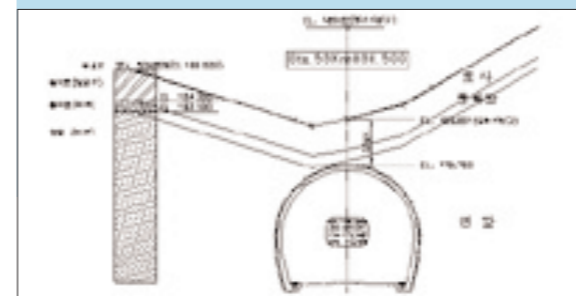
■ 표 2. 삼성터널 계곡부 지층구성(보령위치 : EL. 186.50, 53Km828)

지층	측정 E.L	두께	추정 E.L	비고
분적토	186.50~184.30	2.2m	183.021~180.821	
풍화암	184.30~183.5	0.8m	180.821~180.021	
연암	183.50 이하	-	180.021 이하	

■ 표 3. 터널 계곡부 각 지층의 특성

지층	특성	비고
분적토	유수, 중력 등에 의해서 비교적 근거리에서 운반, 퇴적되어 형성된 층으로 유기물을 함유한 황갈색의 자갈석인 실트질 모래층으로 지표로부터 유입되는 물을 다량 함유하고 있는 습윤상태임.	
풍화암	모암인 흑운모 화강암의 풍화대를 이루고 있는 층으로, 기반암이 HW(Highly Weathered Condition)상태로 풍화되어 있으며 석영을 제외한 대부분의 구성광물들이 변색되거나 착색되었고, 암구조는 유지하고 있으나 강도가 약하여 시추굴진시 실트질 모래로 분해됨.	
연암	기반암인 흑운모 화강암의 연암층으로, 절리간격 50~100mm 내외의 F-4(Highly Fractured)의 균열상태 및 S-4(Soft)의 강도를 보임.	- TCR : 59.6 - RQD : 12.9
막장지질현황	Carbonate shale이 분포하여 지하수와 접촉시 swelling에 의해 연약화되어 지반자체의 아치효과(arching effect)에 의한 지내력을 기대할 수 없는 상태이며, 천단부에는 파쇄대가 분포	

■ 그림 2. 터널 계곡부 현황 단면도



이상과 같이 삼성터널 계곡부는 토피가 매우 작고, 막장관찰결과 Carbonate shale이 분포하여 지하수와 접촉시 swelling에 의해 연약화 되어 지반자체의 아치효과(arching effect)에 의한 지내력을 기대할 수 없는 상태이다. 또한, 천단부에는 파쇄대가 분포하여 발파공법 적용시 부분적인 낙반이 우려되며 발파시 과도한 지반이완도 예상되므로 이를 방지 할 수 있는 지반 보강공법의 적용이 요구된다.

3 보강대책 검토

3.1 여굴의 발생원인 및 대책

일반적으로 여굴 발생은 불가피하며 저토피 구간에서의 진행성 여굴은 터널붕괴를 초래할 수 있으므로 조기에 진행성 여굴을 차단하는 것은 매우 중요하다.

■ 표 4. 진행성 여굴의 발생원인, 예측 및 대책방안

진행성 여굴의 발생원인	진행성 여굴의 예측 및 대책방안
- 갑작스런 지하수 유입량 증가	- 막장에서 작업하는 기능인력의 경계심
- 불충분한 치수대책	- 적절한 인원배치
- 얇은 풍화암· 풍화토층의 굴착으로 인한 손상	- 진후의 정확한 예견과 신속한 판단
- 터널 단면내 총적층 위치	- 굴착면의 신속한 실링 슛크리트 타설
- 모래 또는 자갈 Lenses	- 적절한 시공중 배수
- 시추조사용의 불충분한 되메우기	- 슛크리트에 작용하는 과도한 수압을 방지하기 위한 수발공 설치
- 부적절한 보조공법의 시행	- 지보 작업의 연속성
- 굴진장 과대	
- 기타	

진행성 여굴을 방지하기 위해서는 진행성 여굴을 초래할 가능성이 있는 위험한 상황을 예측하고 작업순서(Working cycle)를 조절하는 것이 가장 적합한 방법이다. 또한, 진행성 여굴을 차단하기 위한 가장 중요한 요소는 시간이므로, 진행성 여굴 발생 초기에 즉각적인 조치가 취해져야 한다. 즉, 굴착중 비정상적 건조토사가 흘러내리거나, 지하수의 유입으로 진행성 여굴이 발생할 우려가 있는 지점은 지반유실을 방지하기 위해 적절한 보강재료를 이용해 차단하여야 한다.

3.2 지반보강 공법 검토

■ 표 5. 지반보강공법 검토

구분	1안	2안	3안
개요	갱내: 강관다단그라우팅	갱내: Pipe-umbrella공법	갱내: 차수그라우팅 갱외: 지상수직그라우팅
장점	경제성 양호 시공성 양호	천단부 안정성 유리	치수 효과 양호
단점	지하수 유동시 안정성 미흡	경제성 매우불리 시공성 불리	경제성 다소불리 시공성 불리
선정안	◎		
검토의견	저토피부(계곡구간)의 지표조사 결과 평상시 물의 흐름이 없는 풍화암 이상의 지반으로 예측되어, 지상수직그라우팅 및 갱내차수그라우팅을 실시하여도 주입효율을 기대하기 곤란할 것으로 예측되므로, 강관다단그라우팅을 시행하여 터널의 안정성을 확보하는 것이 적절할 것으로 판단된다.		

3.3 지보패턴 검토

저토피 구간(53Km820~850, L=30m)에 대하여 원 설계 시 적용된 지보패턴-IV에 대하여 수치해석을 통하여 안정성을 검토하였다.

■ 표 6. 지보패턴-IV에 대한 해석 단계별 지보재 응력

구 분	숏크리트 응력(kgf/cm ²)						록 볼트 최대축력(tf)	
	최대 휨 압축응력		최대 휨 인장응력		최대 전단응력		K _o =0.5	K _o =1.5
	K _o =0.5	K _o =1.5	K _o =0.5	K _o =1.5	K _o =0.5	K _o =1.5		
step 6	13.61	96.23	2.11	5.06	1.07	1.99	0.61	2.17
적용 기준	0.4×f _{ck} = 0.4×210		0.42×√f _{ck} = 0.42×√210		0.25×√f _{ck} = 0.25×√210		0.5×f _t ×A = 0.5×3500×A	
허용치	84.0		6.1		3.6		8.6	

검토결과 암피복이 얇은 천단부에서 숏크리트 휨압축응력이 96.23kgf/cm²이 발생하여 허용휨압축응력 84.0kgf/cm²을 초과하여 발생하므로 터널의 안정성이 확보되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 저토피 구간(53Km820~850, L=30m)에 대하여 <표 6>과 같이 보강공법을 검토하였다.

천단부에 강관단단그라우팅 및 휘폴링을 시공하여 막장 안정성을 확보한 후 상부지반의 이완 및 여굴의 과다발생을 방지하기 위하여 상부반단면은 링컷 기계굴착에 의해 시공하고, 굴진장 및 지보재(록볼트 & 격자지보)간격은 0.8m의 지보패턴 VI-1로 시공하는 것이 터널 안정성 확보 측면에서 바람직한 것으로 판단된다.

보강방안으로 검토된 지보패턴 VI-1에 대하여 수치해석을 통한 터널안정성 검토결과 숏크리트 응력, 록볼트 축력, 지반 소성영역의 발생 범위로 판단할 때 터널 안정성이 확보되는 것으로 나타났다.

■ 표 7. 지보패턴-IV-1에 대한 해석 단계별 지보재 응력

구 분	숏크리트 응력(kgf/cm ²)						록 볼트 최대축력(tf)	
	최대 휨 압축응력		최대 휨 인장응력		최대 전단응력		K _o =0.5	K _o =1.5
	K _o =0.5	K _o =1.5	K _o =0.5	K _o =1.5	K _o =0.5	K _o =1.5		
step 6	9.78	33.08	1.04	4.30	1.13	1.84	0.66	2.24
적용 기준	0.4×f _{ck} = 0.4×210		0.42×√f _{ck} = 0.42×√210		0.25×√f _{ck} = 0.25×√210		0.5×f _t ×A = 0.5×3500×A	
허용치	84.0		6.1		3.6		8.6	

■ 표 8. 저토피부 보강방안 검토-1

구 분	당 초	변 경
지보패턴	지보패턴-IV 불량한 지반	지보패턴-VI-1 불량한 지반
지반종류, 암분류	(Q-Value=1~4, RMR=41~60) 전체토피는 최소 2D이상 되는 지반이며, 터널 천단부에서 최소 1D이상 풍화암층이 존재	(TCR =59.6, RQD=12.9) 전체토피는 터널 천단부에서 최소 3,229m로 존재
1회 굴진장 굴착방법	1.5m 상,하 반단면 굴착 (상, 하부 발파굴착)	0.8m 상,하 반단면 굴착 (상부 링컷기계굴착, 하부 발파굴착)
숏크리트두께 록볼트(SD35)	15cm D25,L=4m,C.T.C=중1.5m,횡1.5m ※전단면 적용	20cm D25,L=4m,C.T.C=중0.8m,횡1.5m ※보조공법 적용구간은 미적용
격자지보	간격 : 1.5m, LG-50×20×30	간격 : 0.8m, LG-70×20×30

■ 표 9. 저토피부 보강방안 검토-2

구 분	당 초	변 경
내부라이닝	철근보강, t=40cm	철근보강, t=40cm
보조공법	상부 90° 휘폴링, (16공) (C.T.C 횡 6', 중 3,000m) 필요시 가인버트 설치	상부 90° 휘폴링 (10공) (C.T.C 횡1.0m, 중 3.0m) 상부 120° 강관단단그라우팅 (31공) (C.T.C 횡 400mm, 중 4.0~7.5m)
개요도		

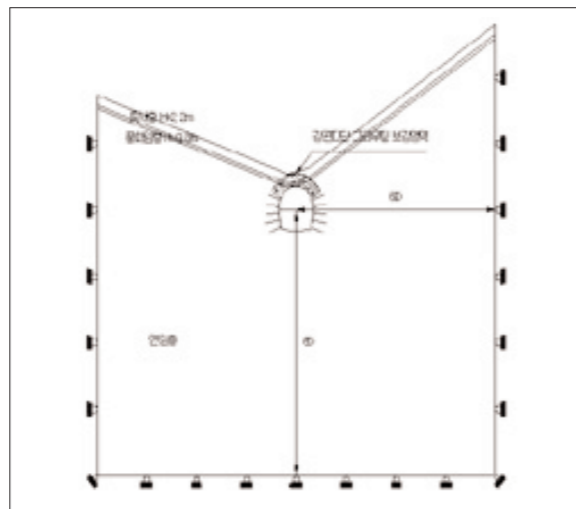
4 수치해석에 의한 터널의 안정성 평가

4.1 수치모델 및 입력물성치

시추조사 결과, 해석구간의 터널 상부 피복토층은 토사층 2.2m, 풍화암층 0.8m가 분포하고 있는데, 해석시 모델링의 어려움과 보다 안전측의 해석을 위하여 토사층 3.0m로 단순화하여 해석요소망을 작성하였다. 또한 토피가 얇아 지표로 돌출되는 록볼트는 임의로 길이를 줄여 해석을 수행하였다.

■ 표 8. 지보패턴-IV-1 해석단면 및 모델링

지보패턴 : IV-1	구 분	적용 치
	굴착공법	상·하반 분할굴착
	굴진장	1.5m
	Shotcrete 두께	15cm(Wire Mesh)
	Rock Bolt	4.0m 길 이
		SD35, D25 규 격
		중방향 : 1.5m 간 격



■ 표 11. 적용사례를 바탕으로 한 하중 분담율

하중분담율	60 - 20 - 20	50 - 25 - 25	40 - 30 - 30
특 징	· 일반 자체의 지보역할이 매우 클 경우	· 상·하반 분할 굴착시 하반의 굴착에 적용하는 경우가 많은 경우	· 풍화암 이하의 지반은 굴착 후 시간경과에 따라 큰 범위로 응력해방이 발생하게 된다
적용터널	둔내, 대관령	용평, 남산 1호 쌍굴	육십령, 수리-수암, 부산-대구
지보패턴	I, II	III, IV	V, VI
검토의견	본 해석 적용 지보패턴은 IV로서 적용사례를 바탕으로 하면 50-25-25를 적용하여야 하나, 해석구간의 지형적인 조건(저토피부, 편토압)을 고려하여 안전측으로 상반 굴착시 40-30-30, 하반 굴착시 50-25-25를 적용하여 해석을 수행하였다.		

■ 표 12. 해석에 적용된 지반물성치

구 분	γ (tf/m ³)		E (kgf/cm ²)		ν		c (kgf/cm ²)		φ (°)	
	1*82°	3**	1*82°	3**	1*82°	3**	1*82°	3**	1*82°	3**
토 사	-	1.9	-	266	-	0.35	-	0.15	-	30
풍화암	2.1	2.1	2,000	2,000	0.30	0.30	1.5	1.5	30	30
연 암	2.3	2.3	30,000	30,000	0.25	0.25	2.5	2.5	35	35
경 암	2.5	-	121,000	-	0.22	-	3.5	-	40	-

단, * : 적용 지보패턴 III, ** : 적용 지보패턴 IV

■ 표 13. 지보재의 물성치

구 분	연한 숏크리트	강한 숏크리트	록볼트
E (kgf/cm ²)	50,000	150,000	2,100,000

■ 표 14. 강관단단 그라우팅에 의해 보강된 영역의 물성치

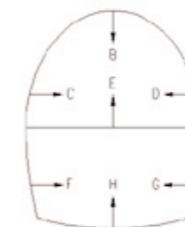
구 분	γ (tf/m ³)	E (kgf/cm ²)	ν	c (kgf/cm ²)	φ (°)
그라우팅 보강영역	2.2	12,000	0.25	3.0	40

4.2 해석결과

■ 표 15. 지보패턴-IV-1에 대한 해석 단계별 변위 (단위 : mm, + : 내측변위, - : 외측변위)

구 분	A*	B	C	D	E	F	G	H
1	K _o =0.5	0.62	0.73	0.03	0.09	0.28	-	-
	K _o =1.5	0.36	0.47	0.49	0.55	0.22	-	-
2	K _o =0.5	0.83	1.00	0.07	0.16	0.53	-	-
	K _o =1.5	0.40	0.56	0.88	0.98	0.39	-	-
3	K _o =0.5	0.97	1.18	0.11	0.24	0.77	-	-
	K _o =1.5	0.30	0.49	1.27	1.43	0.58	-	-
4	K _o =0.5	0.89	1.10	0.26	0.48	-	0.24	0.28
	K _o =1.5	-0.26	-0.09	2.09	2.28	-	1.38	1.30
5	K _o =0.5	0.80	1.00	0.30	0.54	-	0.32	0.36
	K _o =1.5	-0.49	-0.34	2.33	2.54	-	1.81	1.76
6	K _o =0.5	0.69	0.89	0.34	0.59	-	0.40	0.44
	K _o =1.5	-0.82	-0.67	2.61	2.86	-	2.34	2.32

해석단면의 천단 및 내공 변위 개념도



단, A*는 터널 직상부의 지표침하

■ 표 16. 지보패턴-IV-1에 대한 해석 단계별 지보재 응력

구 분	숏크리트 응력(kgf/cm ²)						록 볼트 최대축력(tf)	
	최대 휨 압축응력		최대 휨 인장응력		최대 전단응력		K _o =0.5	K _o =1.5
	K _o =0.5	K _o =1.5	K _o =0.5	K _o =1.5	K _o =0.5	K _o =1.5		
2	2.97	6.08	0.00	0.00	0.05	0.43	0.30	1.07
3	8.79	18.31	0.00	0.00	0.19	0.87	0.57	2.13
4	9.27	27.35	2.51	3.17	0.23	0.97	0.64	2.22
5	9.67	31.65	3.03	4.15	0.43	1.35	0.65	2.23
6	11.97	36.99	3.50	5.64	1.09	1.93	0.67	2.24
적용 기준	0.4×f _{ck} = 0.4×210		0.42×√f _{ck} = 0.42×√210		0.25×√f _{ck} = 0.25×√210		0.5×f _t ×A = 0.5×3500×A	
허용치	84.0		6.1		3.6		8.6	

본 대상구간에 대해서 계획된 터널 지보패턴의 적정성을 판단하기 위해서 해석을 수행한 결과, K_o=0.5인 조건에서 최대 지표 침하(0.97mm) 및 천단변위(1.18mm)가 발생하였고, K_o=1.5에서 최대 내공변위(2.86mm)가 발생하였다.

지보재 응력은 K_o=1.5에서 최대로 발생하였는데, 숏크리트의 최대 휨 압축 및 인장응력과 최대 전단응력은 각각 36.99kgf/cm², 5.64kgf/cm², 1.93kgf/cm², 록볼트의 최대 축력은 2.24tf로 발생하였다.

따라서, 터널 변위 및 지보재 응력이 허용치 보다 작게 발생하여 터널의 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단되었다.

5 터널 굴착

수치해석 결과를 바탕으로 보강방안을 검토한 결과, 천단부에 강관단단그라우팅 및 휘폴링을 시공하여 막장 안정성을 확보한 후 상부지반의 이완 및 여굴의 과다발생을 방지하기 위하여 상부 반단면은 링컷 기계굴착에 의해 시공하고, 굴진장 및 지보재(록볼트 & 격자지보)간격은 0.8m를 적용하였다.

일반적으로 저토피구간에서는 아칭효과(Arching Effect)를 기대할 수 없는 형태로 상부에서 작용하는 하중을 직접지지할 수 있는 강성의 구조체가 터널 천단부에 형성되어야만 굴착에 따른 터널의 안정성을 확보할 수 있다. 이와 유사한 시공사례를 살펴볼 때, 산악터널의 경우 갱외보강공법(예, 수직그라우팅 등)보다는 갱내보강공법(RPUM, 강관단단, AT케이싱 등)을 적용하는 사례가 많았으나, 도심지 천층터널에서는 갱외에서 수행하는 보강공법 적용사례도 드물지 않았다.

당현장의 경우 작업로가 확보되지 않은 계곡부임을 고려할 때, 작업효율이 떨어지는 갱외보강 공법대신에 터널내부에서 수행할 수 있는 보강공법을 적용함으로써 시공성 및 경제성을 확보하면서 공기내에 터널굴착을 완료할 수 있었다.