

저토피 구간 지보패턴 변경을 통한 시공사례



안창윤

현대산업개발(주) 과장
인천국제공항연결철도
(cyahn@hyundai-dvp.com)



정재욱

현대산업개발(주) 차장
강남순환 7-1공구



전수근

현대산업개발(주) 부장
강남순환 7-1공구
현장소장



이종민

현대산업개발(주) 부장
볼리비아바네가스교량
현장소장



여용석

서울특별시 계장 도시기반시설본부
강남순환도시고속도로
민자구간 총괄

1. 개요

강남순환 도시고속도로 7-1공구의 STA.0+640~0+760은 최소토피고 8.5m(성산대교방향)의 저토피 터널구간이다. 원설계시 저토피 구간의 지보패턴은

성산대교방향 STA.0+670~0+690(20m)에 TYPE-5가 적용되었고, 그 외 구간은 TYPE-4로 적용되어 있다. 이에 저토피 구간의 안정적인 굴착을 위해 추가 시추조사를 수행하여 현장 지반조건에 적합한 지보패턴으로 변경/시공한 사례를 소개하고자 한다.

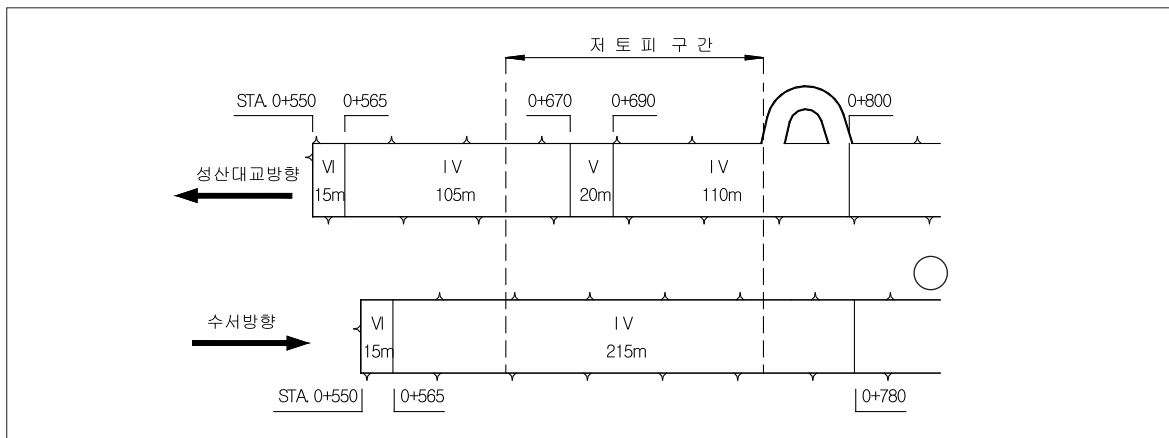


그림 1. 구간별 지보패턴(원안)

2. 원설계 현황

원설계시 저토피 구간의 지보패턴을 그림 1에 나타내었으며, 저토피 구간에 적용된 지보패턴 Type-4, Type-5은 표 1과 같다.

3. 추가 지반조사 결과(1, 2차)

① 추가 지반조사 계획

저토피 구간에 대해 2차에 걸쳐 지반조사가 수행되었으며, 1차 지반조사 시 토피고가 낮은 성산대교

표 1. 적용 지보패턴

Type - 4			Type - 5		
굴진장	상·하반단면 / 1.2m		굴진장	상·하반단면 / 1.0m	
숫크리트	강섬유보강 t = 16.0cm		숫크리트	강섬유보강 t = 20.0cm	
록볼트 (D = 25mm)	중/횡간격	1.2m/1.5m	록볼트 (D = 25mm)	중/횡간격	1.0m/1.0m
	길이	5.0m		길이	5.0m
보조공법	-		보조공법	Fore Poling	
격자지보공	LG-95×22×32		격자지보공	LG-95×22×32	

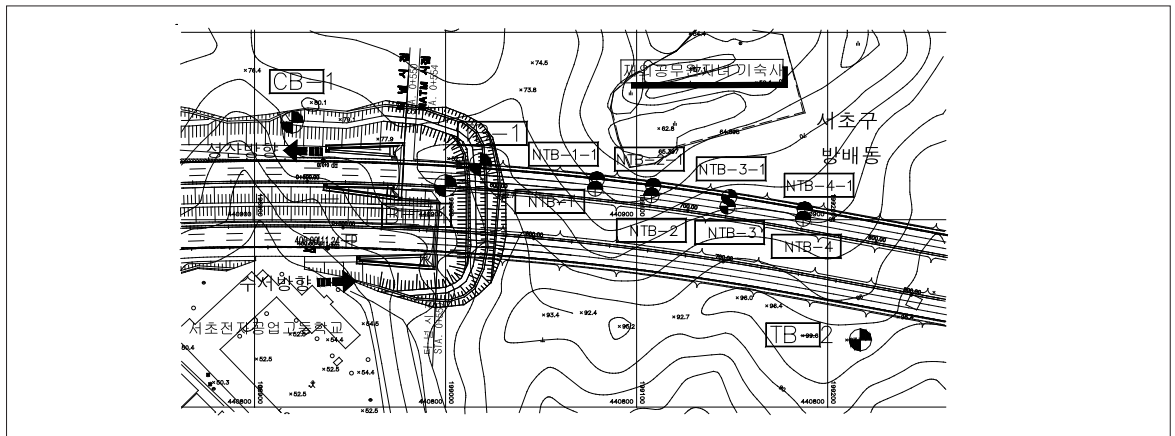


그림 2. 1, 2차 추가 시추조사 위치

방향 터널중심선을 따라 4개소의 시추조사가 수행되었다(NTB-1~4). 또한, 저토피인 성산방향의 횡방향 지반조건을 파악하기 위한 2차 지반조사가 1차 지반조사 위치의 성산대교방향 좌측 S.L에서 수행되었다(NTB-1-1~4-1).

② 종방향 지반조건(1차 시추조사, 2011.6)

그림 3과 같다.

③ 횡방향 지반조건(2차 시추조사, 2011.10)

1,2차 시추조사 결과를 반영한 터널 횡단도는 표 2와 같다.

4. 지보계획 변경

① 암반 분류 결과

1차 추가 지반조사의 시추 코아에 대해 터널 심도에 서의 RMR 평가를 수행하였다(표 3 참조). RMR 평가

에 의한 암반 분류 결과 그림 3의 종단지층현황에서 연암은 암반Ⅳ등급 경암은 암반Ⅱ~Ⅲ등급으로 분류되었다.

② 구간별 지보패턴 결정

터널 굴착 안정성은 터널 천단 상부의 암반상태에 큰 영향을 받으므로, 지반조사로부터 결정된 암반등급 및 횡방향 지반조건을 반영하여 저토피 구간 지보패턴을 재검토 하였다.

- 터널 천단상부 0.5H(H: 터널높이) 구간의 암반등급에 따라 지보패턴 적용
- 0.5H 구간에 토사가 분포하는 경우 TYPE-5-1의 추가 지보패턴을 제안

저토피 구간은 성산대교방향에서 수서방향으로 상향 경사를 나타내는 지형을 보이며, 예상 암선의 분포 역시 이와 같아 수서방향의 경우 1.0D이상의 토피코가 확보되므로 원설계 지보패턴인 TYPE-4를 동일하게 적용하였다. 검토결과를 바탕으로 그림 5와 같이 구간별 지보패턴을 변경하였다.

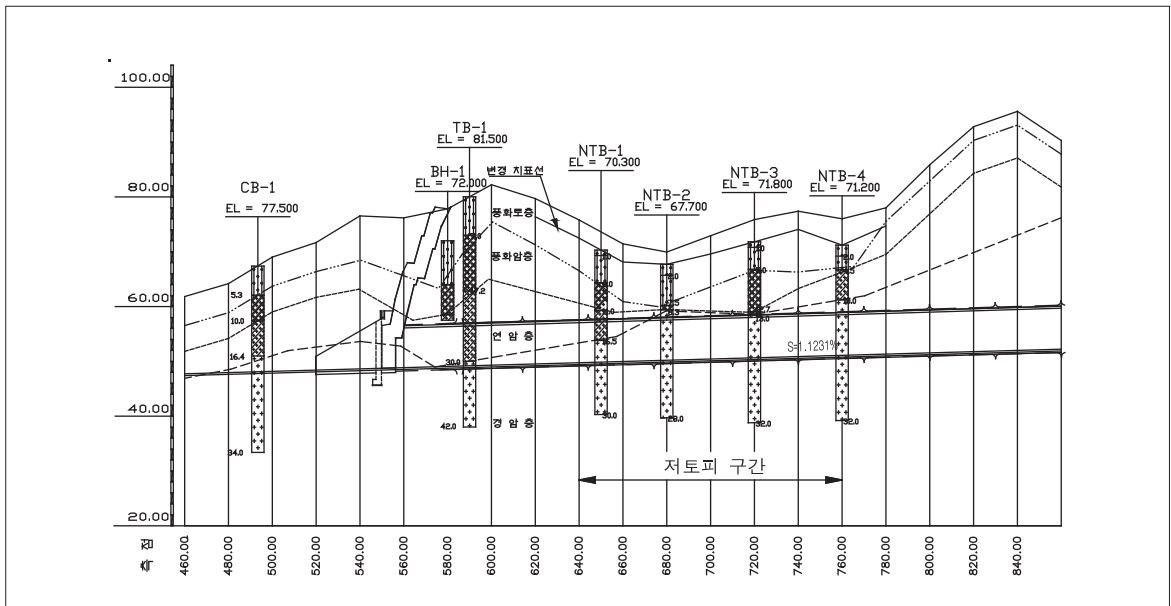


그림 3. 종단지층현황(성산대교방향 기준)

저토피 구간 지보패턴 변경을 통한 시공사례

표 2. 횡방향 지반조건 및 강관단면 보강범위

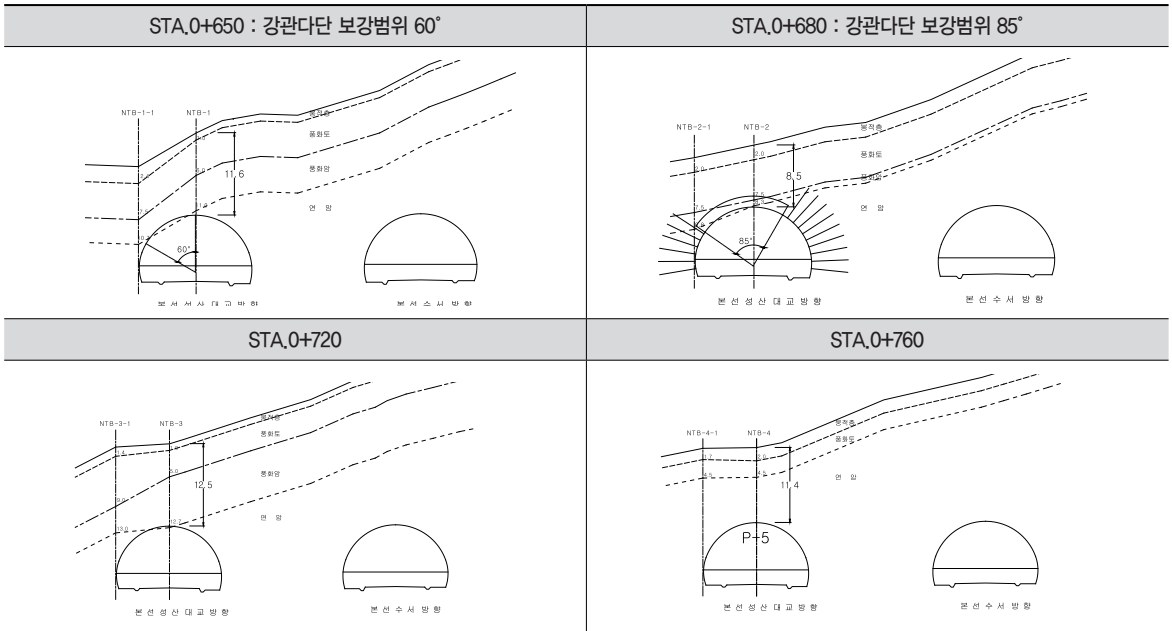


표 3. 터널구간 암반 분류 결과

구 분	굴진깊이(m)	TCR(%)	RQD(%)	한국도로공사 분류기준	RMR 분류	Q-System
NTB-1	30	73~100	0~93	연암~경암	Ⅱ~Ⅳ	Ⅱ~Ⅳ
NTB-2	28	100	86~90	경암	Ⅱ	Ⅱ~Ⅲ
NTB-3	32	93~100	36~66	연암~경암	Ⅲ~Ⅳ	Ⅲ~Ⅳ
NTB-4	32	100	53~95	보통암~경암	Ⅱ~Ⅲ	Ⅱ~Ⅲ

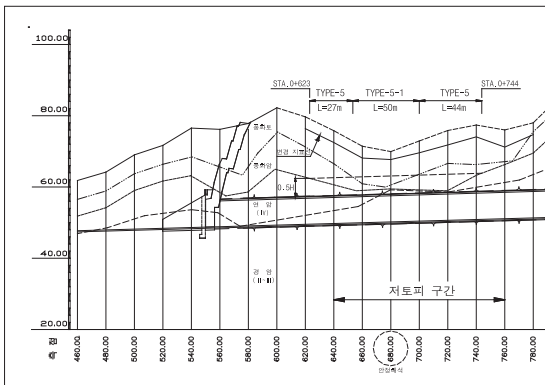


그림 4. 지보패턴 결정(성산대교방향)

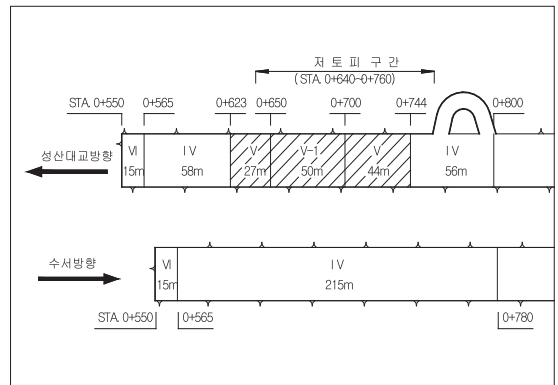


그림 5. 구간별 지보패턴(변경)

5. 지보패턴 TYPE-5-1 제안

① 강관다단 종방향 간격

강관다단의 종방향 간격은 터널 막장 하부에서 45+ ϕ 2의 파괴선을 가정하여 강관이 파괴영역 밖에 위치할 수 있도록 종방향 간격을 결정함으로써, 막장 전방 천단의 이완하중을 효과적으로 지지할 수 있도록 하였다(그림 6).

본 현장의 저토피 구간 막장은 암반Ⅱ~Ⅳ등급으로 토사터널과 차이가 있으나, 지반의 불확실성을 감안하여 토사터널에서의 막장 예상파괴면을 적용 하였다. 막장 지반조건은 안전측 검토를 위해 가장 불리한 조건인 암반Ⅳ등급($\phi = 35^\circ$)에 대하여 검토하였다.

② 강관다단 횡방향 보강범위

강관다단의 최대 보강범위는 지반조건이 가장 불리한 STA.0+680을 기준으로 판단하였으며, 안정성 해석결과 보강범위를 천단부 70°로 적용하여도 안정성이 확보되었으나(“6. 지보패턴 TYPE-5-1 안정성 검토” 참조), 록볼트가 토사구간에 위치하지 않도록 보강범위를 천단부 85°로 조정하였다.

③ 지보패턴 TYPE-5-1 제안

지반 불확실성을 고려, 보조공법은 강성이 큰 대구경 강관다단그라우팅으로 적용 하였으며, 강관다단의 지지점인 강지보의 지지력 증대를 위해 격자지보에서 H형강으로 변경하였다.

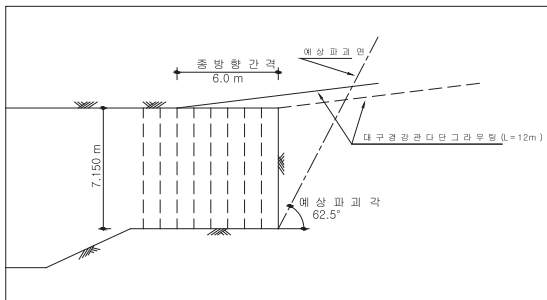


그림 6. 강관다단 종방향 간격

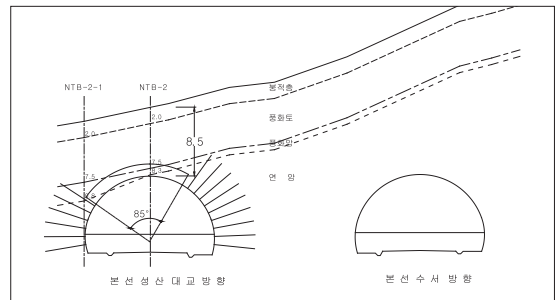


그림 7. STA.0+680 대구경 강관다단 보강범위

표 4. 지보패턴 TYPE-5-1

TYPE-5-1		
굴진장	상·하 반단면 / 1.0m	
숏크리트	강섬유보강 t = 20.0cm	
록볼트 D = 25mm	종/횡간격	1.0m/1.0m
	길이	5.0m
라이닝	350mm	
보조공법	대구경 강관다단그라우팅 (ϕ 114, t = 5.6mm, L = 12.0m, C.T.C500, 6m중첩, 40~85°)	
강지보	H-125×125×6.5×9	

6. 지보패턴 TYPE-5-1 안정성 검토

지보안정 검토는 풍화토 층후가 가장 깊고 터널 천단상부의 암층후가 가장 얇아 지반조건이 가장 불리한 STA.0+680(성산대교방향)을 대표단면으로 선정하였

으며, 안정측 설계를 위하여 해석 모델링에서 경암선을 무시하였다.

검토결과 성산대교방향 천단변위는 최대 9.981mm(하향), 내공변위는 최대 5.888mm(내측)이고 수렴하는 경향을 보이며, 록볼트 축력은 최대 28.010kN,

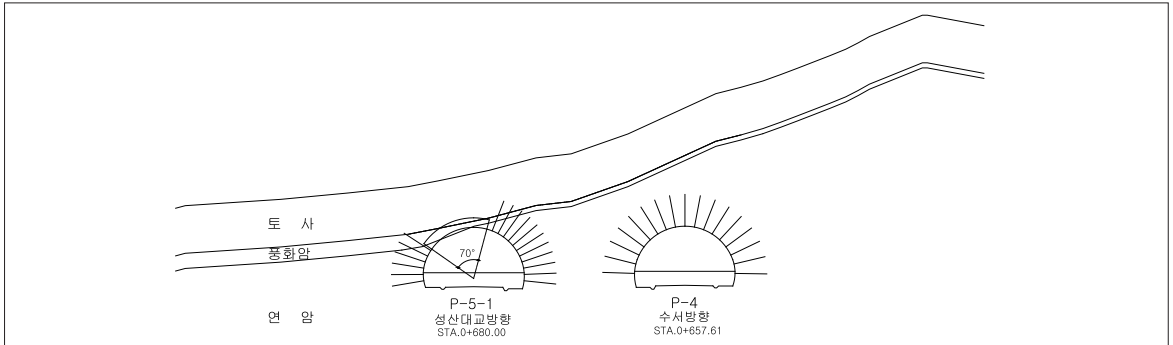


그림 8. 대표단면

표 5. 해석 결과(계속)

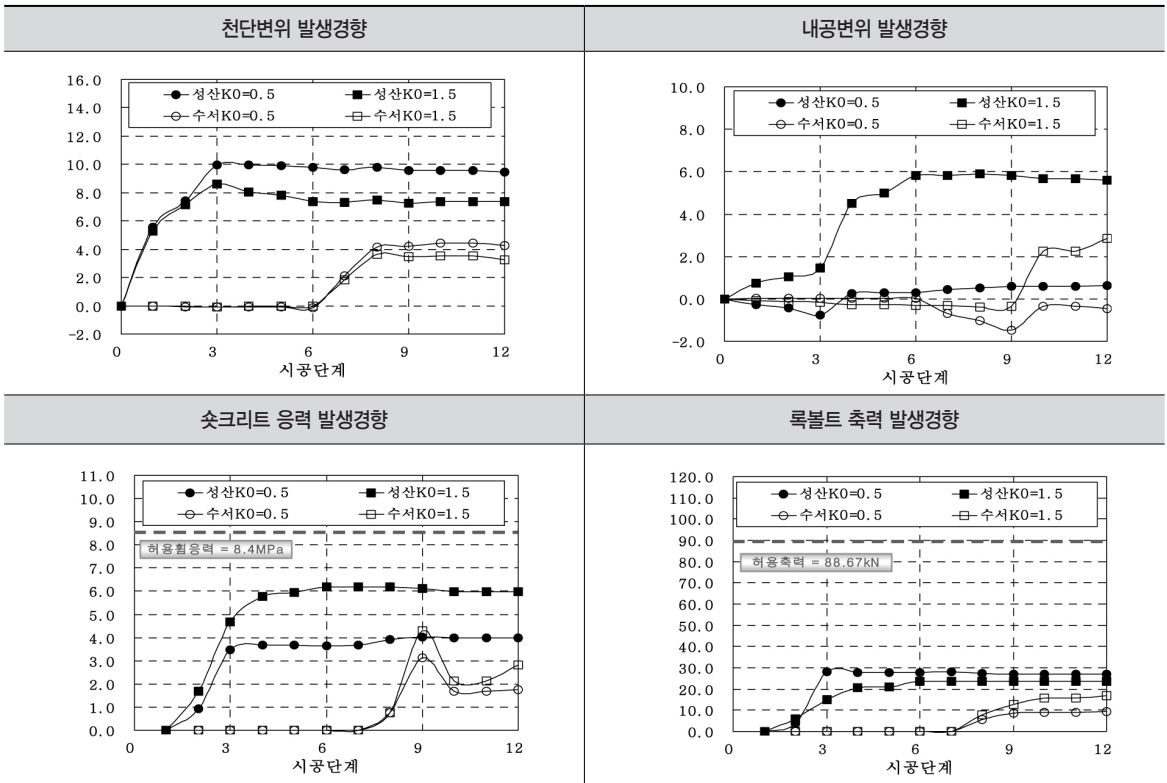
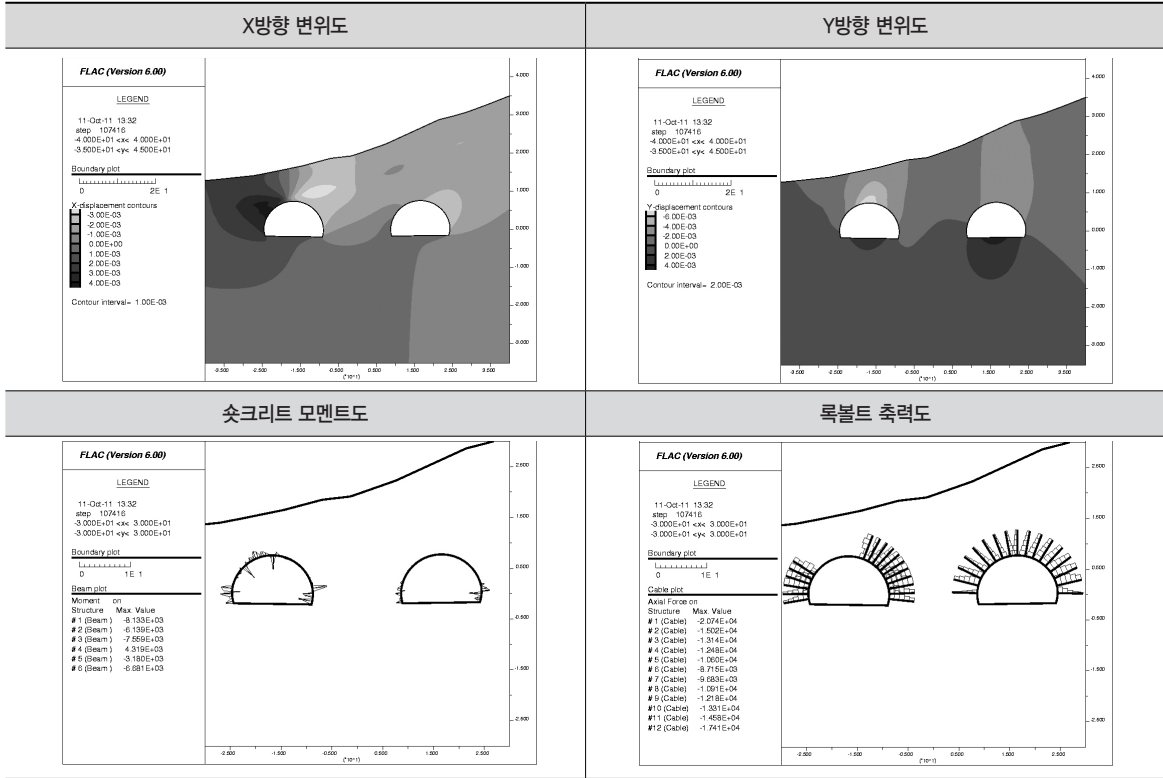


표 5. 해석 결과



슛크리트 응력은 최대 6.203MPa으로 허용치 이내로 안정성이 확보되므로 TYPE-5-1은 적정한 것으로 검토되었다.

조계산은 간편하나 과다설계 되며, 실제 거동과 차이가 크므로, 보다 합리적 구조계산 방법인 탄성 스프링-보 요소 방법을 적용하였다. 안정성 판단은 강관에 작용하는 휨응력으로 다음 식(1)에 의해 판단한다(도로설계편람, 국토부, 2010)

7. 대구경 강관다단그라우팅 안정 검토

보조공법으로 적용한 대구경 강관다단그라우팅의 지보안정성 검토방법은 단순 골조모델 방법과 탄성 스프링-보 요소 방법이 있다. 단순 골조모델 방법은 구

$$\text{휨응력, } \sigma_b = \frac{M}{Z} < \text{강관 허용응력, } \sigma_a = 140\text{MPa} \quad (1)$$

① 이완하중 산정

지반조건이 가장 불리한 STA.0+680(성산대교)은

표 6. 이완하중 산정조건

지반조건	토 피고	터널 폭	터널 높이
풍 화 토	8.6 m	15.9 m	7.15 m(상반)

표 7. 이완하중 산정결과

구 분	이완하중 산정식	이완하중 P(kN/m)
Terzaghi 이론해	<ul style="list-style-type: none"> c≠0인 경우 $P_{\text{root}} = \frac{B \left[\gamma - \frac{2c}{B} \right]}{2K \times \tan \phi} \left(1 - e^{-k \tan \phi \frac{2H}{B}} \right)$ c=0인 경우 $P_{\text{root}} = \frac{\frac{B}{2} \gamma}{K \times \tan \phi} \left(1 - e^{-k \tan \phi \frac{2H}{B}} \right)$ 	59.3
Bierbaumer 이론해	$P_1 = \frac{P}{B} = \gamma H \left\{ 1 - \frac{(\tan \phi \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}))H}{(b+2m \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2}))} \right\}$	72.4

터널 천단상부 지반이 대부분 풍화토로 이루어져있다. 따라서, 강관에 작용하는 이완하중은 Terzaghi 이론해 및 Bierbaumer 이론해를 적용하여 산정하였다.

② 스프링 계수 산정

도로설계편람(2010)에서는 막장배면(K₁), 무지보구간(K₂), 지보설치된 구간(K₃)의 스프링 계수를 다음과 같이 제시하고 있다.

K₁은 막장 전방 원지반의 스프링 계수이며, 문헌자료를 참조하여 지반반력계수 k_g를 산정하였고, 횡방향 간격은 C.T.C 500mm를 적용하였다

$$K_1 = k_g d = 45,000 \text{ kN/m}^3 \times 0.5\text{m} = 22,500 \text{ kN/m}^2$$

여기서, K₁ : 터널굴착 후 선진보강 지보재가 설치되기 전의 막장배면지반의 지반반력계수로부터 구한 스프링 계수

k_g : 막장배면지반의 지반반력계수

d : 횡방향 설치간격(d×1의 단위면적)

K₂ : 선진보강 지보재와 지반의 복합강성을 나타내는 스프링 계수

$$K_2 = \frac{\gamma H d}{(\delta_1 + \delta_2)}$$

여기서, γH : 단위면적당 상재하중(P_v)

δ₁ : 터널굴착 후 선진보강지보재가 설치되기 전의 막장배면지반의 침하량

δ₂ : 선진보강지보재 설치 후 무지보구간의 천단침하량

K₃ : 선진보강 지보재와 영구지보재(숏크리트) 그리고 지반과의 복합강성을 나타내는 스프링 계수

$$K_3 = \frac{\gamma H d}{(\delta_1 + \delta_3)}$$

여기서, δ₃ : 선진보강지보재 설치 후 지보구간의 천단 침하량

도로설계편람(2010)에 제시된 K₂는 상반 굴착 후 숏크리트 타설 전까지의 누적 변위에 따른 스프링 계수이며, K₃는 숏크리트 타설 후까지의 누적 변위에 따른 스프링 계수를 나타내며, 앞서 수행된 2차원 수치해석(FLAC 2D)의 성산대교방향 천단변위로부터

스프링 계수 K_2 , K_3 를 산정하였다. δ 는 표 5의 천단 변위 발생경향으로부터 K_2 산정 시에는 무지보시 변위 5.545mm, K_3 산정 시에는 슛크리트 타설 후 변위 9.978mm를 적용하였다.

③ 구조해석

구조해석은 종방향 설치간격 6m 조건으로 모델링 하였으며, 도로설계편람(2010)에 언급된 하중계수 α , β 는 안전측 설계를 위하여 1.0으로 적용하였다.

표 8. 스프링계수 산정결과

구분	Terzaghi 이론해		Biebaumer 이론해	
	K_2	K_3	K_2	K_3
스프링 계수(kN/m ²)	10,694.3	5,943.1	13,056.8	7,256.0

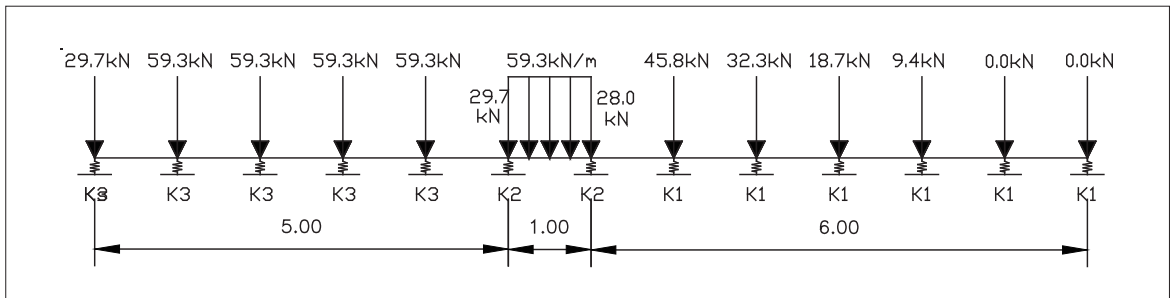


그림 9. Terzaghi 이론해에 적용시

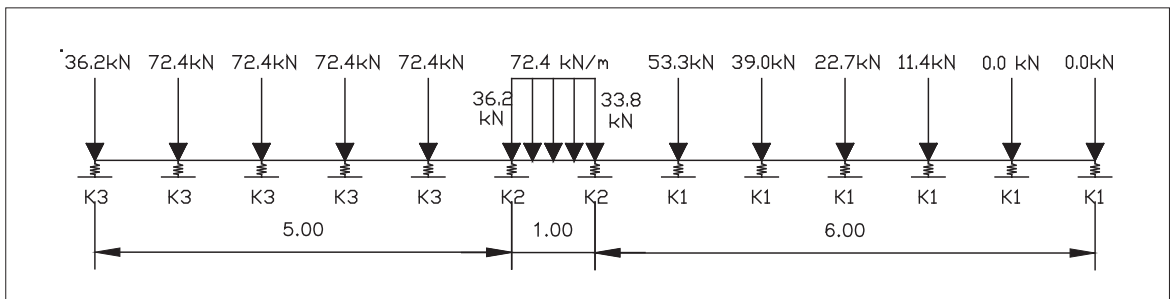


그림 10. Bierbaumer 이론해에 적용시

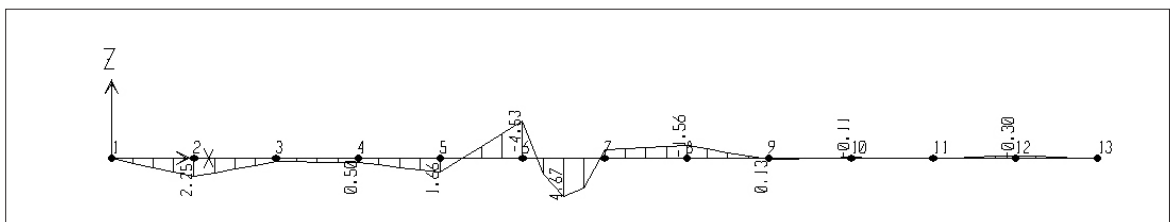


그림 11. 모멘트도(Terzaghi 이론해)

저토피 구간 지보패턴 변경을 통한 시공사례

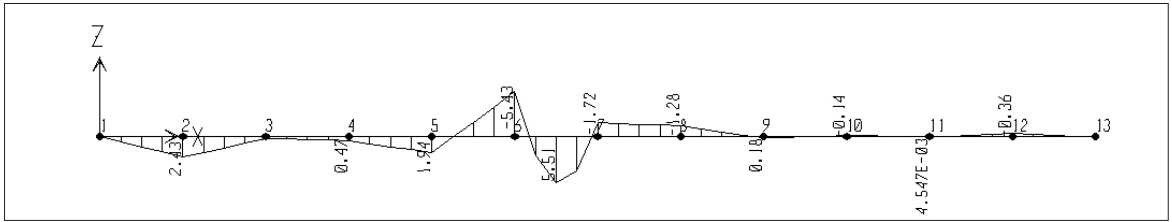


그림 12. 모멘트도(Bierbaumer 이론해)

표 9. 구조해석결과

구분	발생모멘트M(kN·m)	단면계수 Z(m ³)	발생응력 σ _b (kPa)	허용응력 σ _a (MPa)	결과 (σ _b /σ _a)
Terzaghi 이론해	4.67	4.955 × 10 ⁻⁵	94.24	140	O.K.(67.3%)
Bierbaumer 이론해	5.51	4.955 × 10 ⁻⁵	111.9	140	O.K.(79.4%)

예측 이완하중에 의한 강관의 발생 모멘트로부터 강관의 허용 휨응력을 검토하였으며, 발생응력은 허용치의 67.3 ~ 79.4%로 안전한 것으로 검토되었다.

8. 시공중 계측결과

저토피 구간인 STA.0+675~0+685에 대한 계측결과,

표 10. 계측결과 및 시공전경(계속)

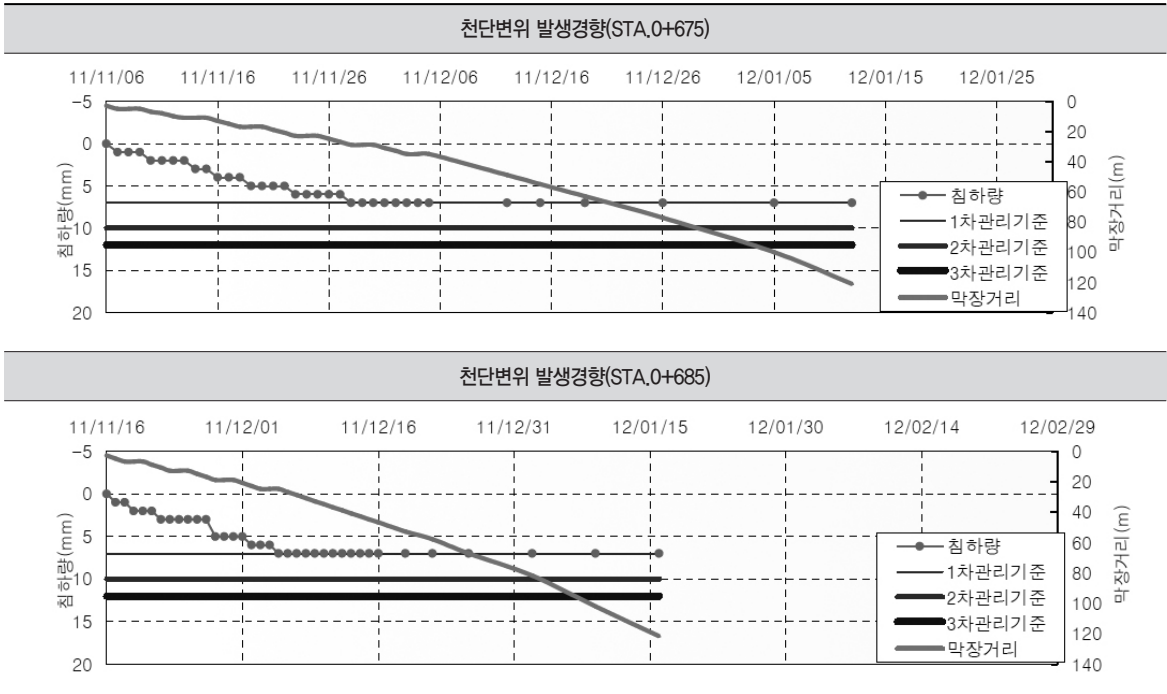






표 10. 계측결과 및 시공전경

시공 전경(막장 Face mapping)	시공 전경(H형 강지보 설치)
	
시공 전경(천공)	시공 전경(강관다단 설치 완료)
	

최대변위 7mm에서 수렴하여 막장 안정이 확보되었으며 해석 시 예측치인 9.981mm와 유사한 경향을 보였다.

9. 결론

최소토피고 8.5m의 저토피 터널의 안정적인 시공을 위하여 종방향 및 횡방향의 추가 지반조사 결과를 바탕으로 지보계획을 변경 후 성공적으로 시공을 완료한 사례를 소개하였다. 본 현장에서는 합리적인 지보패턴 변경을 위하여 다음과 같은 검토를 수행

하였으며, 시공중 철저한 계측관리 및 매 막장 Face Mapping을 통한 RMR 평가를 수행하여 변경된 지보패턴의 적정성을 확인하는 등 철저한 시공관리로 성공적으로 굴진을 완료할 수 있었다.

1) 저토피 구간의 종방향 및 횡방향 지반조건 파악을 위하여 2차례의 추가 지반조사(2011.6, 2011.10)를 수행하였으며, 시추 코어에 대하여 RMR 분류를 수행하여 암반을 재분류 하였다.

2) 추가 지반조사 결과를 반영, 종단현황으로부터 구간별 지보패턴을 변경하였으며 지보패턴은 터널 천

단 상부 0.5H 범위의 지반조건을 기준으로 결정하였고, 터널 천단 상부에 토사 층후가 깊게 분포하는 50m 구간의 안정성 확보를 위하여 예비패턴인 TYPE-5-1을 제안하였다.

3) 변경된 구간별 지보패턴의 적정성을 검증하기 위해 2차원 수치해석 및 탄성 스프링-보 요소 방법을 이용하여 대구경 강관다단의 안정검토를 수행하였다.

4) 시공중에는 Face Mapping 및 막장의 RMR 평가를 수행하여 지반조사에 의한 변경 지보패턴의 적정성을 확인하였다.

참고 문헌

1. 한국터널공학회(2010), 터널 붕괴 사례집, pp.43 ~ 46.
2. 장석부, 신휴성, 김상균(2008.9), 주제발표(4) 터널 보조공법 -선진보강 공법을 중심으로-, 제1회 터널기술 토론회, 한국터널공학회

