터널 시공시 터널의 안정성 및 주변 구조물의 영향 검토

글 | 차 승 훈 토목기술부 사원 02-3433-7761 | E-mail : chocopie@ssyenc.com

자연지반에 터널을 시공하게 되면 터널 주변 지반의 응력상태가 변하게 되고, 변화된 지반의 응력상태가 지반의 고유강도보다 클 경우에는 지반은 파괴되어 큰 변형을 일으키게 된다. 터널 주변 지반의 변형은 지표면에까지 영향을 미치며, 만약 지표면에 중요 구조물이 위치할 경우 구조물은 큰 피해를 입을 수 있다.

1. 개요

자연지반은 최초의 지층이 생성된 후 변성작용을 겪으면서 지반 자체의 응력을 가지 있는데 이를 초기응력이라고 한다. 자연지반은 초기응력 상태에서 안정한 상태를 유지하고 있으므로, 자연지반의 응력상태는 지반의 고유강도 이하에서 평형을 유지하고 있음을 알 수 있다. 이러한 자연지반에 터널을 시공하게 되면 터널 주변 지반의 응력상태가 변하게 되고, 변화된 지반의 응력상태가 지반의 고유강도 보다 클 경우에는 지반은 파괴되어 큰 변형을 일으키게 된다. 터널 주변 지반의 변형은 지표면에까지 영향을 미치며, 만약 지표면에 중요 구조물이 위치할 경우 구조물은 큰 피해를 입을 수 있다.

일반적으로 터널 굴착시 지반의 과도한 변형을 방지하기 위해 터널 시공 전에 강관다단그라우팅 등으로 지반을 보강하여 지반의 강도를 증가시키거나, 터널 굴착 후 숏크리트나 록볼트와 같은 지보재를 설치하여 굴착후 지반의 이완 및 변형을 줄이기도 한다. 본 기사에서는 터널 굴착시 터널의 안정성과 터널과 인접한 철로의 안정성을 수치해석을 통해 검토하는 방법에 대해 알아보고자 하며, 이를 위해 실제 터널 시공사례를 적용하였다.

1.1 해석 개요

OO 복선화 노반공사현장의 OO 제2터널은 표준지보패턴 Ⅴ형식으로 연암과 경암으로 구성된 지반을 통과하고, 경부선(상, 하)과 가야선을 횡단하여 시공된다. 터널 굴착시 터널 및 기존 철로의 안정성은 2D 유한차분 프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)에 탄 · 소성 모델을 적용하여 터널 굴착시 지표면의 침하량(철도 레일의 변위), 터널 주변의 변위, 그리고 지보재의 응력을 산정한 후 허용값과 비교하여 검토하였다.

1.2 해석 프로그램(FLAC 2D) 개요

FLAC은 Explicit 유한차분법으로 운동 방정식의 해를 얻음으로서 지반에 관련된 토목 구조물 해석에 이용되는 수치해석 프로그램이다.

FLAC은 해당 대상체(연속체)를 유한한 개수의, 절점에서 서로 연결된 요소로 분할하고 각 절점에서 시간 단계에 따라 운동 방정식의 해를 구하므로, 해석 대상체의 거동에 대한 시간적 추이를 감지할 수 있는 이점이 있으며, 불규칙한 모양의 요소망 구성, 여러 가지 물성치 모델 및 경계 조건의 적용이 용이하다.

유한차분법 특징

- 재료의 탄성, 탄 · 소성 특성을 고려
- 굴착 및 성토의 해석
- 사용 가능 요소 : 삼각, 사각, 평면 변형요소, 봉, 보, joint 요소
- 재료의 구성 법칙 : Hook의 탄성, Mohr-Coulomb 소성, 비등방성 소성, 변형연화(soft softening), 변형경화(strain hardening)

FLAC에서 사용되는 계산 과정은 2가지 기본적인 계산 방식이 반복 실행된다.

① 적용된 운동 방정식에서 새로운 운동량(가속도, 속도, 변위)을 구하고

② 재료의 물성치와 관계식에서 내부 응력과 상호 작용력을 구하는 과정

2. 검토 조건

2.1 해석단면 선정 및 모델링

(1) 해석단면 선정

터널의 해석단면은 OO 제2터널과 기존철로(경부선,가야선)의 위치, 그리고 지층구성을 고려하여 가장 불리한 단면으로 설정하였으며, 대표 해석단면은 OO 제2터널이 경부선(상,하)과 가야선을 횡단하며, 터널의 토피고는 약 8m인 STA. 4+640 부근을 해석단면으로 선정하였다. 해석단면의 지층구성과 굴착방법을 정리하면 〈표 1〉과 같다.

〈표 1〉 해석단면의 지층구성과 굴착방법

위치	표준지보패턴	토피고	굴착방법	보조공법
STA 4+640	TYPE V	약 8m	전단면 굴착	강관다단그라우팅 (ø114, t = 6㎜)

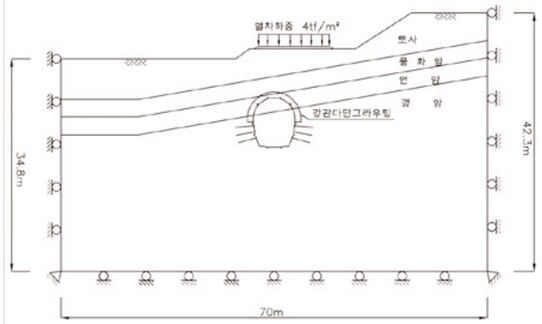
(2) 해석 영역 및 경계 설정

지반 및 터널의 모델링은 시추주상도 및 측량자료를 근거로하여 실제형상과 비슷한 형태가 되도록 모사하였으며, 해석 영역은 터널 굴착시 지반의 응력 및 변형이 거의 없는 영역까지 확장하여 경계 조건으로 설정하였으며, 이를 〈그림 1〉에 나타었다.

① 경계조건

- 해석 영역
  - 좌 · 우 경계길이 : 터널폭의 3배 이상
  - 하부 경계길이 : 터널 높이의 2배 이상
  - 상부 : 지표면
- 경계조건
  - 좌 · 우 경계 : 롤러(수평방향 변위 구속)
  - 하부 경계 : 롤러(수직방향 변위 구속)

〈그림 1〉 해석단면 모델링(TYPE Ⅴ - STA. NO 4+640)

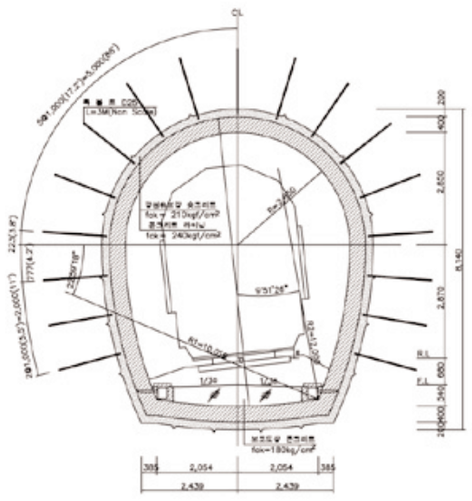


② TYPE Ⅴ 터널의 개요

OO 제2터널 표준지보패턴 TYPE Ⅴ의 굴착방법 및 지보재 설치방법 등을 정리하면 〈표 2〉와 같다.

〈표 2〉 터널 표준지보패턴 TYPE Ⅴ의 굴착방법 및 지보재 설치방법

굴 진 장 (m)			1.0
S/C 두 께 (cm)			20
록볼트 (D25)	길이 (m)		3
	개 수		6
	간격 (m)	종	1.0
		횡	1.0
강관다단그라우팅			(ø114, t = 6㎜)



(3) 지보재 모델링

본 해석에서 지반의 구성모델은 암반의 항복거동을 비교적 잘 표현할 수 있는 것으로 알려진 Mohr-Coulomb Plasticity Model을 적용하여 터널굴착에 따른 지반의 변형 및 지보재의 부재력을 계산하였다.

터널에서 사용되는 지보재의 대표적인 두가지 형태는 숏크리트와 록 볼트이다. 숏크리트는 Beam 요소로 모델링하며, 각 절점에서 자유도 3(2방향 변위와 회전)인 2차원 요소로 휨 저항이 중요한 구조요소로 사용된다. 록 볼트는 Cable 요소로 모델링을 하는데 암반에서의 특정 위치에 정착하거나 부착한 1방향 축요소이므로 암반의 변형으로 Cable 길이에 따라 힘이 발생되며 Pretension의 도입도 가능하다.

〈표 3〉 터널 지보재의 모델링

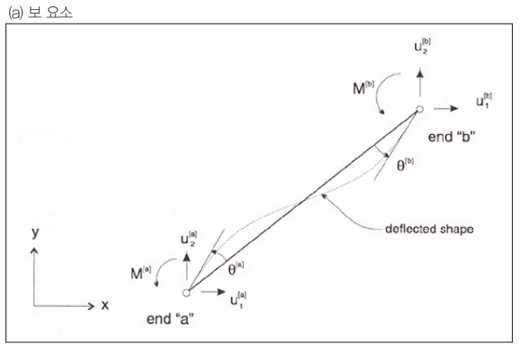
구 분	지 반	숏크리트	록볼트
사용요소	Plain Strain	Beam Element	Cable Element

① Beam Element Formulation : 숏크리트

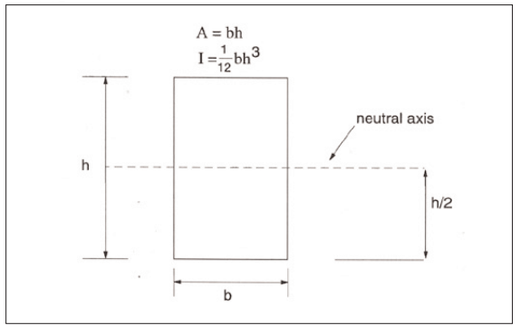
Beam Element는 각 Node 끝에서 자유도가 3인(두개의 변위와 하나의 모멘트) 직사각형 단면을 가진 기본적인 2차원 요소로 전형적인 Beam Element의 재질과 기하학적인 특성에 의해 정의되며, 어떠한 경우에도 파괴한계가 없는 선형 탄성재료로 거동한다고 가정한다. Beam Element는 〈표 3〉과 같이 단면적(A), 단면 2차 모멘트(I)를 가지며, Endpoint a, b와 길이 L에 의하여 정의된다.

〈표 4〉 숏크리트의 구성모델 및 단면형상

(a) 보 요소



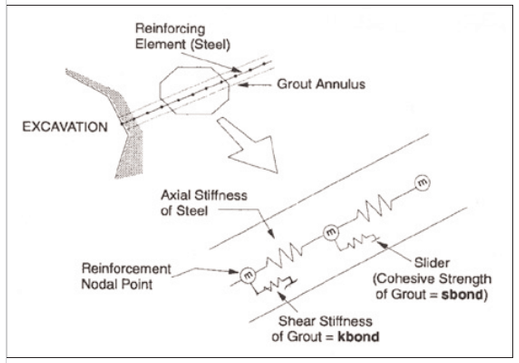
(b) 사각형 보 단면



② Cable Element Formulation : 록 볼트

일반적으로 보강재의 축방향 거동은 전적으로 Reinforcing Element에 지배된다고 가정할 수 있다. Reinforcing Element는 보통 Steel Bar나 록 볼트가 될 수 있다. Reinforcing Element는 가늘기 때문에 Bending Resistance에 거의 영향을 주지 않으며(특히, 록 볼트의 경우), 일축인장(Uniaxial Tension - 압축은 허용하지 않음)에 지배를 받는 1차원 부재(Member)로 다루어진다. 1차원 구성 Model은 Reinforcing Element의 축방향 거동을 나타내기에 충분하다. 수식으로 표현하면 축방향 Stiffness는 보강재의 단면적(A), Young's Modulus(E)로 나타낼 수 있다.

〈그림 2〉 록 볼트 구성모델



2.2 해석순서 및 하중분담율

(1) 시공단계의 모형화

시공단계의 모형화는 터널의 시공 전에 보강공법 시공이 이루어지는 점을 감안하여 경부선의 열차하중이 작용하는 지반의 초기응력상태 재현을 위한 초기단계와 강관다단그라우트공법의 시공이 이루어지는 시공 0 단계를 터널의 굴착해석 이전단계로 설정하였다.

- 0 단계 : 초기평형, 지반보강공법 적용
- 1 단계 : 전단면 굴착
- 2 단계 : 연성숏크리트+록볼트 설치
- 3 단계 : 강성숏크리트 설치

(2) 하중분담율

터널 막장부의 종방향 및 횡방향 아치 효과에 의한 주변 지반의 3차원적 변형거동을 2차원해석에서 모사하기 위하여 하중분담율 개념이 도입되었다. 하중분담율은 지반변위, 숏크리트 및 록볼트와 같은 지보재의 하중 등이 해석결과에 큰 영향을 미치며, 지반물성치, 터널크기, 굴진장 등의 영향을 받는다.

장석부(1998)는 하중분담율의 주요 영향요소인 터널의 크기(D), 굴진장(L), 숏크리트 두께(T) 및 지반의 탄성계수(E) 등과 같은 4개 인자의 조합에 대한 72경우의 3차원 해석을 통해 얻은 굴착(α)-연성 숏크리트(β)-경성 숏크리트(γ) 단계에 대한 회귀분석을 통해 하중분담율을 결정할 수 있는 산정식을 제시하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$\alpha = 3.340L + 3.778 \ln Ex\beta = 100 - (\alpha + \gamma)x \cdot \gamma$$
$$= -3.126 + 3.391D$$

여기서, D : 터널 주변장에 대한 등가원주로부터 환산된 직경

〈표 5〉 해석에서 적용한 하중분담율

구분	하중분담율(%)		
	굴착 시	Soft S/C, R/B 설치 시	Hard S/C 설치 시
TYPE V	53	28	19

2.3 지반 및 지보재 특성값 결정

해석에 사용된 입력 물성치는 일축압축강도, RQD, 절리 간격 및 절리 상태 등을 고려한 RMR 분류와 공내재하시험 결과와 경험치를 토대로 탄성계수, 점착력 및 내부 마찰각을 결정하여 적용하였으며, 토사 및 풍화토의 지반정수는 문헌 및 경험치를 이용하여 산정된 결과값을 이용하였다. 또한, 암반 탄성계수 산정시 풍화암 구간은 공내재하시험값을 적용하였으며, 연 · 경암 구간의 경우는 공내재하시험값이 과다하여, RMR 경험식 값과 비교하여 작은 값을 적용하였다. 〈표 6, 7〉는 지반의 특성값 및 작용하중을 나타내었으며, 〈표 8, 9〉는 숏크리트와 록볼트의 특성값을 나타나었다.

〈표 6〉 해석시 적용한 지반의 특성값

구 분	탄성계수 (tf/m²)	포아송비 (ν)	단위중량 (tf/m³)	점착력 (tf/m²)	마찰각 (°)	비고
토사	3,000	0.35	1.90	1.5	28	
풍화암	20,000	0.30	2.00	5.0	33	
연암	500,000	0.26	2.40	10.0	35	
경암	710,000	0.23	2.60	30.0	38	
보강 1	56,000	0.29	2.10	10.0	33	풍화암
보강 2	보강 효과 고려 안함					연 · 경암

〈표 7〉 측압계수 및 작용하중

구분	측압계수(K_0)	작용하중
기반암(연암,경암 구간)	0.5, 1.0, 1.5	열차하중 : 4 t/m²

〈표 8〉 숏크리트 특성값

특성값 / 구 분	압축강도(kgf/㎠)	탄성계수E (tf/m²)	TYPE V	
			단면적(m²)	단면2차모멘트(10^{-4}m⁴)
연한 숏크리트	100	500	0.20	6.66
강한 숏크리트	210	1,500	0.20	6.66

〈표 9〉 록볼트 특성값

특성값 / 구 분	Area(D25) (m²)	탄성계수 E (tf/m²)	인장강도 (tf)	K_{bond} (tf/m²)	S_{bond} (tf/m)
록볼트	5.06×10^{-4}	21,000	13.3	1.36×10^{6}	41.23

2.4. 관리기준

터널 굴착시 발생하는 천단변위와 내공변위에 대한 관리기준은 〈표10~12〉에 나타내었고, 철도의 선로정비 기준과 지보재의 허용응력은 〈표 12~14〉에 각각 나타내었다.

〈표 10〉 천단침하의 관리기준치(터널반경 5.0m 기준) 단위(cm)

-도로설계편람(1), pp.611-30

주의 레벨 / 지반	A(경암)	B(연암)	C(풍화암)
I	0.3~0.5	0.5~1.0	1.0~3.0
II	1.0~1.5	1.5~4.0	4.0~9.5
III	3.0~4.0	4.0~11	11~27

주의레벨 Ⅰ : 지반은 안정되어 있지만 이완영역의 발생한계에 도달하기 때문에 굴착에 약간의 주의를 요함.

주의레벨 Ⅱ : 이완영역이 발생하는 것으로 생각됨.

주의레벨 Ⅲ : 명확하게 이완영역이 발생하기 때문에 시공의 어려움이 예상되므로 굴착방법 및 지보공법 등의 선택에 주의를 요함.

〈표 11〉 내공변위 관리기준치(ASCE : Franklin, 1976)

- 도로설계편람(1), pp.611-30

주의 레벨	관리기준	처 치
I	내공변위의 속도가 막장에서 5mm/day보다 크게되거나, 또는 숏크리트에 부분적인 균열이 발생한다. 지하수가 침투한다.	책임기술자에게 보고한다.
II	내공변위의 속도가 막장에서 10mm/day, 후방에서 5mm/day보다 크게된다. 숏크리트에 상당한 균열이 발생한다. 지하수가 침투한다.	책임기술자에 보고함과 동시에 지보재, 록볼트, 숏크리트를 추가 시공한다.
III	변위가 가속된다. 균열이나 지하수의 침투가 레벨 2를 넘는다.	책임기술자에게 보고한다. 굴착을 정지하고, 잠정적으로 강지보재와 긴 길이의 록볼트를 시공한다. 조사한다.

〈표 12〉 내공변위에 의한 시공관리 기준(터널반경 5.0m 기준)

단위(cm)

관리기준 / 지 반		주의수준 I		주의수준 II
		내공변위	변위속도	내공변위
경암지반		2.0~3.0	0.5/day 3일간 지속	3.0~5.0
애추지반		3.0~5.0	0.5/day 3일간 지속	5.0~7.0
토사계 지반	사질토	2.0~3.0	0.5/day 3일간 지속	3.0~5.0
	점성토	3.0~5.0	1.0/day 3일간 지속	5.0~7.0
팽창성지반		10.0	3.0/day 3일간 지속	20~30
대응책		계측결과, 현장상황을 종합적으로 판단하고 대책을 결정, 계측회수를 많이 하고 주의해서 시공		대책강구(공법 변경, 보조공법 추가 또는 지보부재추가)

〈표 13〉 선로보수 정비기준

구분 / 종별	기준			비고
궤 간	+ 10mm − 2mm			스랙을 가한 치수라도 35mm이내이어야 함 (철건 2장1절6조)
수 평	본 선 7mm 측 선 9mm			
줄 마 춤 (방 향)	본 선 7mm 측 선 9mm			레일길이 10m에 대하여
편 마 춤 (고 저)	본 선	직 선	7mm	레일길이 10m에 대하여
		곡 선	3mm	레일길이 2m에 대하여
	측 선	직 선	9mm	레일길이 10m에 대하여
		곡 선	4mm	레일길이 2m에 대하여

〈표 14〉 지보재 허용응력 및 허용축력 결정

구 분		단위	허용응력		비고
			f_{ck} = 210kg/cm²		
숏크리트	휨압축응력	kgf/cm²	4.0 · f_{ck}	84.0	
	전단응력	kgf/cm²	0.25 · $\sqrt{f_{ck}}$	3.62	
록볼트	축력	tonf	0.5×(35,000tfm²)×(0.0254m/2)²·π = 8.6		

3. 수치해석 결과

연암층과 경암층을 통과하는 OO 제2터널을 전단면으로 굴착할 경우 수치해석 결과는 시공단계별 변위와 부재력으로 나누어서 정리하였으며, 이 값 중 최대변위와 최대부재력을 허용기준치와 비교하여 터널의 안정성 및 기존 철로의 영향성을 검토하였다.

3.1 해석단계별 변위 검토

(1) 변위 검토요약

측압계수(K_0)가 0.5, 1.0, 1.5일 경우에 대한 터널의 시공단계별 변위를 정리하면 〈표 15〉와 같다.

〈표 15〉 시공단계별 터널의 변위

(단위: mm, →(+), ↑(+))

검토위치		해 석 단 계								
		K_0 = 0.5			K_0 = 1.0			K_0 = 1.5		
		단계 1	단계 2	단계 3	단계 1	단계 2	단계 3	단계 1	단계 2	단계 3
지표침하		−0.188	−0.282	−0.341	−0.119	−0.169	−0.200	−0.049	−0.070	−0.08
천단침하		−0.457	−0.682	−0.826	−0.337	−0.484	−0.575	−0.215	−0.327	−0.405
인버트변위		0.162	0.249	0.305	0.126	0.193	0.237	0.091	0.136	0.166
Spring Line 내공변위	좌	0.025	0.027	0.032	0.144	0.218	0.266	0.270	0.416	0.509
	우	−0.022	−0.025	−0.031	−0.113	−0.171	−0.208	−0.209	−0.319	−0.391

주) 1 단계 : 전단면 굴착
2 단계 : 연성숏크리트 + 락볼트 설치
3 단계 : 강성숏크리트 설치

(2) 변위 검토결과

3종류의 측압계수에 대한 각 시공단계별 최대변위는 〈표 16〉에 나타내었으며, 터널의 지표, 천단, 인버트, 그리고 내공변위량은 1mm 이하로 터널 굴착시 발생하는 변위의 크기는 미미하여 터널의 안정성에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 또한 최대지표변위도 선로정비 기준에 제시된 허용변위보다 작으므로 터널굴착으로 인한 기존 철로의 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

〈표 16〉 시공단계별 최대변위

(단위 : mm, → (+), ↑ (+))

구 분		발생 단계 K_0	변 위
최대 지표침하량		0.5	−0.341
최대 천단침하량		0.5	−0.826
최대 인버트변위량		0.5	0.305
최대 내공변위량	좌	1.5	0.509
	우		−0.391

3.2 해석단계별 숏크리트 작용응력 및 록볼트 축력

K_0값에 따른 시공단계별 지보재의 부재력은 〈표 17, 18〉에 나타내었으며, 터널굴착시 숏크리트 및 록볼트에 발생하는 부재력은 허용값보다 작으므로 터널의 지보재(숏크리트, 록볼트)는 안정할 것으로 판단된다.

〈표 17〉 응력 검토요약

(숏크리트 단위:kgf/cm², 록볼트 단위:tonf/EA)

구 분		해 석 단 계		
		K_0 = 0.5 전단면 굴착 후	K_0 = 1.0 전단면 굴착 후	K_0 = 1.5 전단면 굴착 후
숏크리트	휨압축 응력	9.83	7.74	11.22
	전단응력	0.29	0.48	0.77
록볼트 축력		0.11	0.19	0.27

주) 1 단계 : 전단면 굴착
2 단계 : 연성숏크리트+락볼트 설치
3 단계 : 강성숏크리트 설치

〈표 18〉 지보재의 응력 검토결과

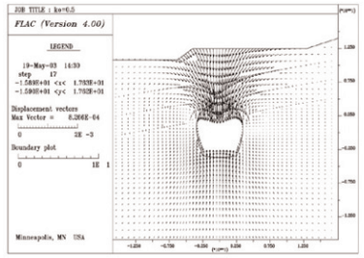
구 분		발생 단계		허용응력	검토
		K_0	부재력		
숏크리트	최대 휨압축 응력 (kgf/cm²)	1.5	11.22	84.0	84.0>11.22 OK
	최대 전단 응력 (kgf/cm²)	1.5	0.77	3.62	3.62>0.77 OK
최대 록볼트 축력 (tonf/ EA)		1.5	0.27	8.6	8.60>0.27 OK

3.3 터널 굴착시 지반의 변위 양상 및 지보재 응력분포

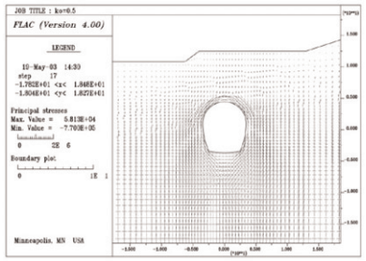
경부선과 가야선 하부를 횡단하는 OO 제2터널을 전단면굴방법으로 시공하였을 경우의 터널 주변의 변위 양상과 지보재의 응력 분포는 〈그림 3〉과 같다.

〈그림 3〉 전단면 굴착시 지반의 변형 및 지보재의 응력 분포

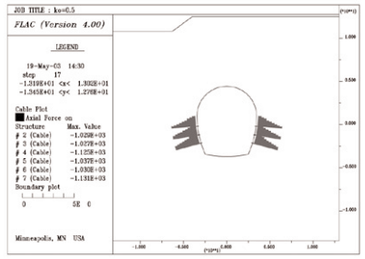
1. Deformed Mesh (K_0=0.5, 전단면 굴착후)



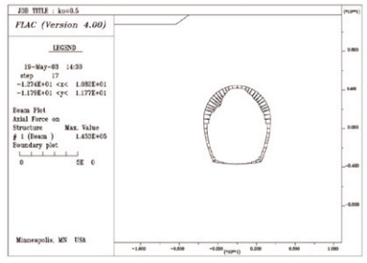
2. 주응력도



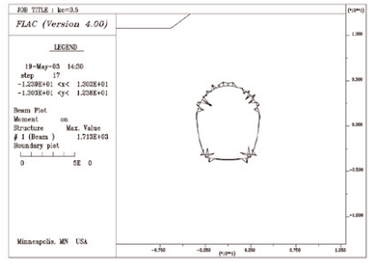
3. 록볼트 축력도



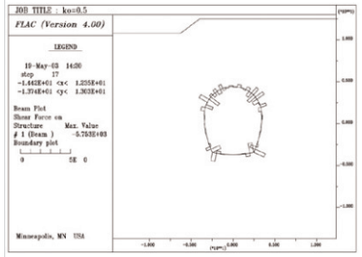
4. 숏크리트 축력도



5. 숏크리트 모멘트도



6. 숏크리트 전단력도



4. 결 론

OO 복선화 노반공사현장의 OO터널은 표준지보패턴 Ⅴ형식으로 연암과 경암으로 구성된 지반을 통과하고, 경부선(상, 하)과 가야선을 횡단하여 시공됨에 따라 OO 터널 굴착이 기존 철로에 미치는 영향 및 터널의 안정성을 검토하였으며 검토결과는 다음과 같다.

1. 터널 굴착시 지표면에 발생하는 최대변위는 지반의 측압계수(K_0) 0.5일 때 0.4mm 정도 발생하였으며, 이 값은 선로정비 기준에서 제시한 편마춤 허용변위(3mm) 보다 작으므로 기존 철로(경부선,가야선)에 레일빔 보강을 시공하지 않아도 철로는 안정할 것으로 판단된다.
2. 최대천단변위량은 측압계수(K_0) 0.5일 때 발생하며, 그 값은 1mm 이하로 천단변위 관리기준의 '주의레벨 Ⅰ 수준(3mm~5mm)' 이하이며, 인버트와 터널 내부에 발생하는 변위도 1mm 이하로 변위의 크기가 미미하여 터널의 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.
3. 숏크리트 및 록볼트에 발생하는 최대부재력은(11.22kgf/cm², 0.3tonf) 허용응력(84kgf/cm², 8.6tonf) 보다 작으므로 터널의 지보재(숏크리트, 록볼트)는 구조적으로 안전할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원(1999), 도로설계편람(Ⅰ), 건설교통부
2. 한국건설기술연구원(1999), 도로설계편람(Ⅱ), 건설교통부
3. 한국도로공사(2001), 도로설계요령(4권 터널), 한국도로공사
4. 한국지반공학회(2000), 지반공학시리1(토목기술자를 위한 암반공학), 한국지반공학회
5. 한국철도기술공사(2000), OO 복선화노반공사 지반조사보고서, 철도청
6. 한국터널공학회(2002), 터널공학시리즈1(터널의 이론과 실무), 한국터널공학회
7. 장석부, 문현구(1998), "터널 설계조건을 고려한 하중분배율의 정량적 산정에 관한 연구" 한국지반공학회지 v.14, n.5, pp.5-16
8. 이준석 외 (2000), "터널용 강관다단공법의 설계기법에 관한 연구", 대한토목학회논문집, Vol. 20 pp.305-314
9. Itasca Consulting Group, Inc (2000), FLAC Theory and Background, Itasca Consulting Group, Inc.