

GLI(Ground-Lining Interaction)모델을 이용한 터널 콘크리트라이닝의 현장 설계변경 사례에 대한 연구

장석부^{1)*}, 이수열²⁾, 서영호³⁾, 윤기항⁴⁾, 박연준⁵⁾, 김수만⁵⁾

A Study on Field Change Case of Tunnel Concrete Lining Designs Using GLI(Ground Lining Interaction) Model

Seok-Bue Chang, Soo-Yul Lee, Young-Ho Suh, Ki-Hang Yun, Yeon-Jun Park,
Su-Man Kim

Abstract GLI model was verified to consider the interaction between a ground and a tunnel lining and to rationally reduce the ground load acting on the secondary lining(concrete lining) of a tunnel. In this study, the economy and the construction condition of tunnel concrete linings designed by a conventional frame model at Lot O of OO line were highly enhanced through a field design change using GLI model. For a few safe considerations, not only about 50% saving of reinforcing steel could reduce the material cost but also the wide space between bars could make it easy to pour concrete mix without voids. There was large saving effect of reinforcing steel for poor ground conditions because Terzaghi's load used in the conventional frame model produces too much high loads for those conditions.

Key words GLI model, Ground-lining interaction, Concrete lining reinforcement, Steel reinforcement concrete, Poor ground tunnel, Load transfer

초 록 지반과 터널라이닝의 상호작용을 고려한 GLI모델은 기존의 Terzaghi 이완하중과 골조모델을 이용한 방법에 비해 터널의 2차라이닝(콘크리트라이닝)에 작용하는 지반하중을 합리적으로 경감할 수 있음이 입증된 바 있다. 이에 본 연구에서는 기존의 골조모델을 이용하여 설계된 ○○선○공구의 콘크리트라이닝에 대해 GLI모델을 도입한 현장설계를 통해 경제성 및 시공성을 개선하였다. 다양한 안전측 고려사항에도 불구하고 철근량의 약 50%가 감소하여 철근자재비를 감소시킬 수 있었고 적절한 철근간격을 확보하여 콘크리트 밀실충전이 용이하였다. 지반조건이 불량한 터널일 수록 더 큰 철근량 절감효과가 있었으며, 이는 Terzaghi 이완하중이 불량한 지반에서 과도하게 산정되기 때문이다.

핵심어 GLI모델, 지반-라이닝 상호작용, 콘크리트라이닝보강, 철근보강콘크리트, 불량지반터널, 하중전이

1. 서 론

우리나라 도로, 철도와 같은 대부분의 교통터널은 지

보재와 2차라이닝인 콘크리트라이닝으로 지지되는 구조로 건설되고 있다. 터널지보재는 슛크리트와 록볼트가 주지보재로 고려되고 있으며 지반과 지보재가 상호작용하면서 굴착하중을 분담할 수 있는 수치해석법을 통해 보강량의 적정성을 판단하는 것이 보편화되었다. 그러나, 콘크리트라이닝은 지반을 단순히 반력스프링으로 고려한 골조모델이 사용됨에 따라 콘크리트라이닝과 지반의 상호작용을 적절히 고려하지 못하는 문제를 내포하고 있으며 이는 과다설계의 주원인으로 지목되어 왔다.

콘크리트라이닝은 일반적으로 터널변위가 수렴된 상

¹⁾ 정회원, (주)유신코퍼레이션 터널부 상무

²⁾ 정회원, 수원대학교 토목공학과 대학원 박사과정

³⁾ 정회원, 현대건설 부장

⁴⁾ 정회원, 현대건설 과장

⁵⁾ 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

* 교신저자 : sbchang@yooshin.co.kr

접수일 : 2010년 2월 9일

심사 완료일 : 2010년 2월 22일

게재 확정일 : 2010년 2월 23일

태에서 타설되기 때문에 원칙적으로는 지반하중이 작용하지 않는다(한국터널공학회, 2009). 또한, 배수구조이므로 수압이 작용하지 않는 것이 원칙이므로 콘크리트라이닝에는 자체 자중만이 작용하는 것으로 고려할 수 있다. 국내에 NATM이 도입된 초기에는 이러한 개념을 근간으로 대부분의 콘크리트라이닝이 무근으로 시공되었으며, 하천통과, 붕락발생, 또는 토사터널 구간과 같이 일부 구간에 한해 최소철근비 수준의 철근보강을 하였다. 그러나, 1990년대 중반부터 구조계산을 통한 콘크리트라이닝 보강이 이루어지면서 개착구조물과 동일한 방식의 골조모델(frame model)이 적용되기 시작했다. 주요 하중으로는 지반하중과 수압을 들 수 있는데, 전자는 Terzaghi 이완하중법이 적용되었고 후자는 잔류수압개념이 적용되었다.

Terzaghi 이완하중법은 본래 지반이완을 허용할 수 밖에 없는 재래식 강재지보방식에 적용되는 방식(Proctor & White, 1961)이므로 기본적으로 지반과 밀착성이 강화된 현대 터널공법에는 적합지 않다. 또한, 지보재 설치 후에 타설되는 콘크리트라이닝에 이완하중을 작용시키기 때문에 과다한 보강이 요구된다. 반면에 잔류수압은 배수터널인 경우에도 배수층의 장기적 통수능 저하를 고려하여 적용하고 있으며(이인모 등, 2000), 수압 자체가 크지 않기 때문에 라이닝 보강량에 미치는 영향은 미소하다.

GLI모델은 콘크리트라이닝이 설치되는 시공과정과 지반의 하중이력을 고려할 수 있는 새로운 방법이다. 본 모델의 기본개념은 질량-스프링의 이상적 모델로 설명될 바 있으며, 이론적 적정성은 지반-지보 반응곡선을 이용하여 굴착-지보-2차라이닝(콘크리트라이닝)의 상호작용이 검증되었다(서성호 등, 2002). 본 GLI모델의 핵심개념은 콘크리트라이닝에 작용하는 하중의 근원을 터널지보재에 작용하는 하중으로 고려한 것이다. 즉, 터널지보재가 굴착하중을 지반과 분담하고 있는 상

태에서 지보재의 열화 등에 의해 지지력을 상실하면, 지보재의 하중이 콘크리트라이닝으로 전이되는 것이다. 본 GLI모델은 저토피 풍화대 터널의 콘크리트라이닝 설계에도 적용된 바 있다(장석부 등, 2006).

본 논문에서는 기존의 골조모델로 설계된 콘크리트라이닝의 문제점을 검토하고 현장여건을 고려하여 GLI모델을 이용한 현장설계 적용사례를 소개하였다. 지하수압, 건조수축 등의 하중은 당초 설계와 동일하게 기존의 골조모델을 이용하고 지반하중만을 GLI모델을 이용하여 콘크리트라이닝 단면력을 산출하였다. 지반조건에 따라 3개의 터널단면에 대해 분석하여 지반조건별 기존 골조모델과 GLI모델에 따른 보강량 차이를 평가하였다.

2. 터널콘크리트 라이닝 해석모델

2.1 골조해석모델

골조해석모델은 개착구조물 구조계산에 일반적으로 적용되고 있으며, 그 이유는 지반에 비해 구조물 강성이 높아 지반과 구조물 상호작용의 중요성이 낮고 지반하중 산정이 명료하기 때문이다. 터널콘크리트라이닝에 적용되어 온 골조해석모델에서는 Terzaghi 이완하중과 측압계수로부터 산정된 연직 및 수평하중을 Fig. 1(a)와 같이 빔요소로 구성된 라이닝에 작용시킨다. 지반은 Fig. 1(b)와 같이 연직압축력에만 반력이 발생하는 축력(스프링)요소로 고려된다.

골조해석법의 장점은 계산법이 비교적 단순하고 하중이 명료한 문제의 경우에는 계산 신뢰성이 높다. 그러나 터널콘크리트라이닝 해석측면에서는 다음과 같은 단점을 내포하고 있다.

- 1) Terzaghi 이완하중이 과다하여 과다보강의 주요인이 된다.
- 2) 복잡한 지반조건을 고려하기 곤란하다.

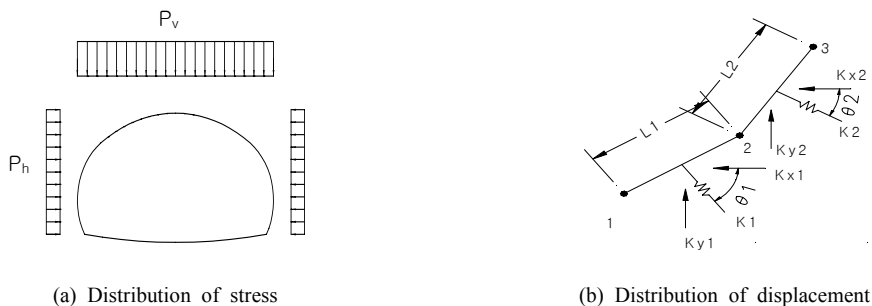


Fig. 1. Frame analysis model.

- 3) 터널굴착 및 지보 과정을 고려할 수 없다.
- 4) 원형이 아닌 터널의 경우 지반반력계수 산정이 모호하다.

2.2 GLI모델

GLI모델의 이론적 검증 및 설계적용 사례는 기존 문헌(서성호 등, 2002, 장석부 등, 2006)에 수록되어 있으므로 본 논문에서는 간단히 소개토록 한다. GLI모델은 기존의 터널수치해석이 굴착과 지보과정으로 한정된 것을 콘크리트라이닝 시공과정까지 확장한 것으로 이해할 수 있다.

Fig. 2 는 GLI모델에 대한 수치해석과정을 도시한 것이다. 좌측의 그림은 일반적인 터널안정해석을 위한 굴착 및 지보에 대한 수치해석과정으로 지반은 초기응력 단계에서 굴착 및 지보에 의해 응력이 재분배되고 지보

재에 하중이 발생하게 된다. 이 때는 지반과 지보재가 평형상태를 이루고 있기 때문에 콘크리트라이닝이 추가로 설치되어도 지반하중은 작용하지 않는다. 즉, 굴착과 지보가 완료된 최종 수치해석결과가 콘크리트라이닝에게는 초기조건이 되는 것이다.

터널 주변의 근접시공이 발생하지 않는 조건에서 콘크리트라이닝에 하중이 작용하기 위해서는 지보재의 열화로 인한 지지력 상실이 발생하여야 한다. 수치해석에서는 지보재를 수치모델로 구현한 구조요소(structural element)를 제거하는 방법으로 지보재의 지지력 상실을 반영할 수 있다. 지보재의 제거는 지반하중을 지지하는 지보재 반력이 상실되어 지반과 지보재의 평형상태가 깨어짐으로써 지반은 다시 거동하게 된다. 이때 이미 설치된 콘크리트라이닝에는 터널변위에 대해 평형상태에 이를 때까지 하중이 작용하게 된다.

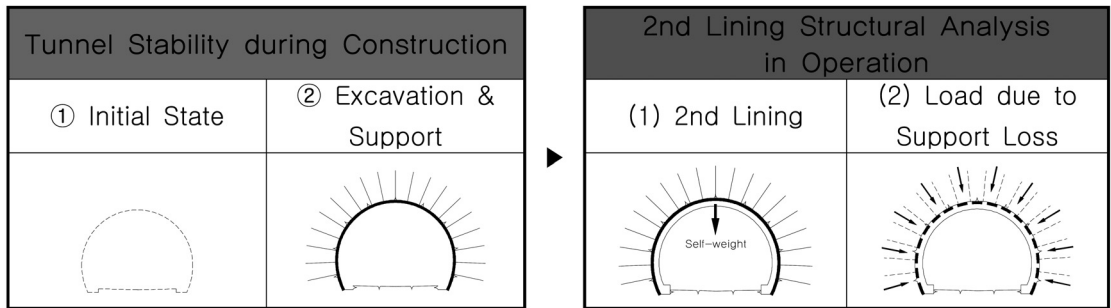


Fig. 2. Numerical analysis procedure of GLI model.

Table 1. Ground condition and support pattern of tunnels

	PD-4	PD-5	PD-6
Ground Condition			
Shotcrete	16 cm (SFRC)	20 cm (SFRC)	20 cm (SFRC)
Concrete Lining	40 cm (steel reinforced)	40 cm (steel reinforced)	60 cm (steel reinforced)
Auxiliary Method	Fore-poling (If necessary)	Steel pipe & multi-step grouting method	Pre-grouting, Horizontal jet grouting (steel pipe inserted)

Table 2. Ground properties

Layers	Elastic Modulus	Poisson's Ratio	Friction Angle(°)	Cohesion	Unit Weight (kN/m ³)
Soil A(Sand)	15 MPa	0.35	31.0	15 kPa	18.0
Soil B(Gravel)	55 MPa	0.33	35.0	0.0	20.0
Whethered Rock	280 MPa	0.30	35.0	70 kPa	22.0
Weak Rock	1.2 GPa	0.25	40.0	500 kPa	24.0
Hard Rock	12 GPa	0.20	45.0	1.0 MPa	26.0
Reinforced Layer	235 MPa -1.5 GPa	0.20	Original Layer	100 kPa -2.0 MPa	23.0

3. 당초설계 현황

본 현장은 ○○선 ○공구로서 지하철 복신티널이 지하 20 m 정도에 위치한다. 지반조건은 한강충적지대의 영향을 받아 지표로부터 약 20 m 정도의 모래층 및 모래자갈층이 위치하고 그 하부에는 비교적 얇은 풍화암층이 위치한다. 본 구간의 대표단면은 총 3개로서 지반 조건, 굴착공법, 지보량은 Table 1과 같으며, 토사 A는 충적모래층이고 토사 B는 충적 모래자갈층을 의미한다.

콘크리트라이닝의 설계강도는 24 MPa, 단위중량은 25 kN/m³이고, 보강철근의 항복강도는 300MPa이다. 설계하중으로는 라이닝자중, 지반하중(연직, 수평), 잔류수압, 콘크리트건조수축이 고려되었으며 골조모델이 사용되었다. 지반하중의 연직하중은 Terzaghi 이완하중법을 이용하였고 수평하중은 축압계수 0.5를 적용하였다. PD-5, 6은 토사층에 위치하여 이완하중고가 토피를 초과하기 때문에 전토피가 적용되었고 PD-4는 터널천정부가 풍화암층에 위치하여 이완하중고는 0.4(터널폭+터널높이)를 적용하였다. 지반하중의 재하방식은 Fig.1(a)와 같다. 잔류수압은 Fig. 3과 같이 배수층의 기능저하를 고려하여 측벽 바닥부의 배수관에서는 수압이 '0'이고 천정부로 갈수록 증가하여 최대수압은 터널높이의 0.5배가 되도록 하였다. 건조수축하중은 온도하중으로 환산되어 반영되었다.

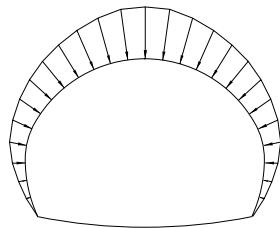


Fig. 3. Residual water pressure acting on tunnel concrete lining.

강도설계법을 위한 하중조합은 다음의 3가지 조합을 적용하였으며, 균열검토를 위해 하중계수를 1.0으로 한 하중조합을 추가하였다.

- 하중조합-1 : 1.54 (자중 + 지반수직하중) + 1.8 (지반수평하중)
- 하중조합-2 : 1.54 (자중 + 지반수직하중) + 1.8 (지반수평하중 + 잔류수압)
- 하중조합-3 : 1.155 (자중 + 지반수직하중) + 1.35 (지반수평하중 + 잔류수압) + 1.125 (건조수축하중)

4. GLI모델을 이용한 현장설계

4.1 현장설계 개요

현장 설계변경은 지반하중 이외에 모든 조건은 당초설계와 동일한 골조모델을 이용하여 콘크리트라이닝 단면력을 산출하였다. 지반하중은 GLI모델에서는 연직과 수평성분을 구분할 수 없기 때문에 안전측으로 하중계수를 1.8로 하였다. GLI모델 적용을 위한 해석프로그램은 FLAC(Itasca, 2000)을 사용하였고 Table 2는 당초 설계시 적용된 지반물성치로서 변경설계에도 동일하게 적용되었다.

기존의 GLI모델 적용사례(장석부 등, 2006)는 터널

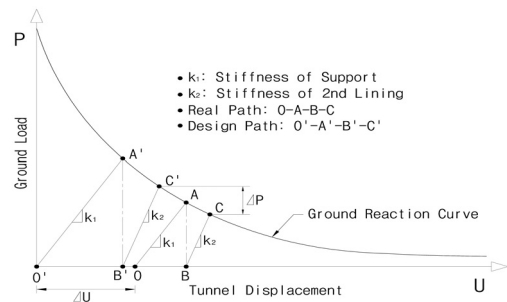


Fig. 4. Design strategy for poor ground tunnel using GLI model.

안정해석 종료후 콘크리트라이닝이 타설되는 조건이 적용되었다. 당 현장은 지반조건이 매우 불량하고 GLI 모델의 적용실적이 많지 않은 점을 고려하여 보다 안전성을 높이는 방안을 강구하였다.

Fig. 4는 현장설계 접근방법을 지반-지보재 반응곡선으로 도시한 것이다. 터널수치해석시에는 하중분배율의 적용으로 ΔU 의 변위가 발생한 후에 지보재가 설치된다. 따라서, 지보재 반응곡선은 점O에서 점A의 경로를 거치고 이후 설치되는 콘크리트라이닝은 점B에서 점C의 경로를 따른다. 콘크리트라이닝 설계시에는 지반하중을 더 보수적으로 반영하기 위해 ΔU 를 '0'으로 고려함으로써 ΔP 만큼 더 큰 하중이 작용토록 하였다. 즉, 콘크리트라이닝이 설치되기 전에 지보재는 굴착과 동시에 설치되는 조건으로 해석하여 지보재에 작용할 수 있는 최대하중을 구현하였다. 콘크리트라이닝이 타설된 후 지보재가 제거되면 하중전이로 인해 콘크리트라이닝은 점B'에서 점C'경로를 따르게 된다.

4.2 해석결과 및 성과

GLI모델을 이용하여 3개 단면에 대한 터널 콘크리트 라이닝 해석결과는 Table 3과 같다. 지반조건이 불량할

수록 모멘트는 크게 증가함을 알 수 있으며, 축력 또한 같은 경향을 보이나 토피의 영향으로 인해 PD-5가 PD-6에 비해 약간 높다. 최대 모멘트는 PD-5와 PD-6과 같이 측벽과 인버트가 만나는 우각부에서 발생하는 것이 일반적이거나 PD-4는 바닥부분의 지반조건이 경암으로 매우 양호하기 때문에 암층경계부인 어깨부에서 최대모멘트가 발생하였다.

이상의 결과를 토대로 하중조합을 통한 보강철근량을 산정하여 당초설계와 현장설계를 천정 및 측벽부에 대해 비교하면 Table 4와 같다. 지반조건이 불량할수록 당초설계와 현장설계의 철근보강량 차이는 크게 발생하였다. 이로부터 경험설계법인 Terzaghi 이원하중이 지반조건이 불량할수록 과다하게 산정됨을 알 수 있다.

전체적으로 현장에서는 약 50% 정도의 철근자재비를 절감하여 자재비 상승에 의한 현장 부담 경감과 더불어 사업비 또한 절감할 수 있었다. 시공성 측면에서는 PD-6의 경우 주철근 직경은 감소하고 간격이 증가하여 주철근간 공간이 68 mm에서 123 mm로 약 2배가 증가하였다. 이는 라이닝콘크리트의 최대 골재 크기가 25 mm인 점을 고려하면 밀실한 콘크리트 타설이 훨씬 더 용이해졌음을 알 수 있다.

Table 3. Analysis results using GLI model

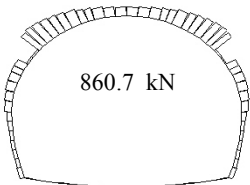
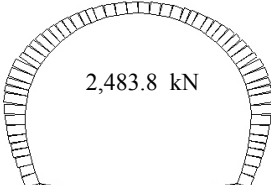
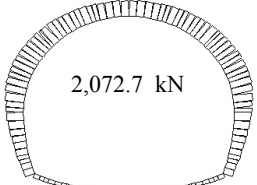
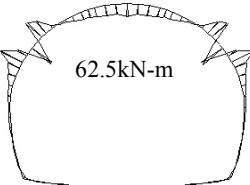
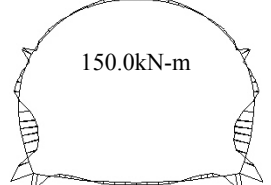
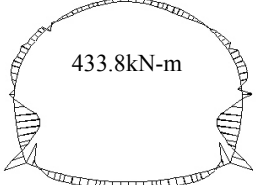
	PD-4	PD-5	PD-6
Axial Force	 <p>860.7 kN</p>	 <p>2,483.8 kN</p>	 <p>2,072.7 kN</p>
Moment	 <p>62.5kN-m</p>	 <p>150.0kN-m</p>	 <p>433.8kN-m</p>

Table 4. Reinforcement steel required in original and field design (@ ; interval)

Pattern	Original Design			Field Design			Steel Weight (Field/Ori.)
	main bar	shear bar	distribution bar	main bar	shear bar	distribution bar	
PD-4	D19@125	D13@150	D13@150	D19@200	D13@300	D13@150	68.0%
PD-5	D25@125	D13@150	D16@150	D19@150	D13@300	D13@150	49.3%
PD-6	D32@100	D19@150	D16@150	D22@125	D13@300	D16@150	37.6%

5. 결론

GLI모델의 이론적 배경 및 적용사례는 기존 논문에서 이미 수록된 바 있다(서성호 등, 2002, Chang et. al., 2003, 장석부 등, 2006). 본 논문에서는 지반조건이 불량한 터널현장에서 당초 골조모델로 철근보강된 콘크리트라이닝의 합리적 설계를 위해 GLI모델을 적용하였다. 당초 설계의 기본 설계개념을 유지하기 위해 잔류수압, 건조수축 하중 등은 기존의 골조모델을 이용하였고 지반하중만 GLI모델을 적용하였다.

다만, 본 현장의 터널이 불량한 지반조건과 도심 저토피에 위치함을 고려하여 GLI모델 적용시 다음과 같은 안전조치를 추가로 고려하였다.

- 1) 터널지보재에 가능한 최대 하중이 작용하도록 하중분배율은 적용하지 않았다. 즉, 콘크리트라이닝으로 전이될 하중을 최대한 발생시키기 위해 굴착과 동시에 지보재가 설치되는 이상적 조건을 가정하였다.
- 2) 콘크리트라이닝의 배근계획시에는 발생한 단면력에 대해 산정된 보강 철근량보다 다소 높은 철근량을 적용하였다.

위 사항 외에 기본적으로 GLI모델은 지보재 지지력이 100% 상실되는 조건을 가정하므로 이미 어느 정도 안전율이 고려되어 있다. 그럼에도 불구하고 골조모델에 비해 콘크리트라이닝 보강량이 작게 발생한 것은 역설적으로 기존의 골조모델 해석법이 상당한 과다설계를 유도했음을 알 수 있다.

본 현장에서는 GLI모델의 안전측 적용에도 불구하고 다음과 같은 개선효과를 얻을 수 있었다.

- 1) 당초설계에 비해 철근량을 50% 정도 절감하였다.
- 2) 철근간격 증대를 통한 콘크리트 밀실충전이 용이해져 콘크리트라이닝 품질관리가 용이해졌다.
- 3) 현장설계변경 당시 발주예산대비 철근자재비 급등에 대한 현장부담이 경감되었다.
- 4) 본 현장사례를 토대로 GLI 모델의 실제 적용성이 검증되었다.

본 현장 연구사례에서 주목할 사항은 모든 터널현장

에서 철근보강량 절감효과를 기대할 수 있는 것은 아니다. 예를 들면 산악암반터널에서는 현재도 무근콘크리트를 적용하고 있기 때문에 GLI모델을 적용해도 절감효과를 기대할 수 없다. 다만, 기존의 양호한 암반터널의 콘크리트라이닝에 적용한 ‘발파에 의한 이완하중’과 같이 그 근거가 모호한 구조계산보다는 GLI모델 적용시 무근콘크리트의 구조적 적정성을 공학적으로도 검토할 수 있는 객관적이고 정량적인 계산방법이 될 것으로 판단된다.

결론적으로 GLI모델은 기존의 골조모델에 비해 지반조건과 터널굴착 및 지보조건을 정교하게 고려할 수 있는 장점이 있다. 특히 지반조건이 불량할수록 기존 골조모델에 적용하고 있는 Terzaghi 이완하중은 과다설계를 유도하므로 GLI모델 적용시 합리적 설계가 가능하다. 따라서, 터널콘크리트 라이닝 구조계산에 GLI모델을 적용함으로써 무근 라이닝이 적용되는 산악암반터널은 공학적 근거 제시가 가능하고 지반조건이 불량한 터널에서는 합리적 설계를 유도할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 서성호, 장석부, 이상덕, 2002, 지반-1차지보재-2차라이닝의 상호작용을 고려한 터널 2차라이닝 해석 모델, 한국암반공학회지, 제12권, 제2호, pp.107-114
2. 이인모, 김주현, L. N. Reddi, 2000, 흙/부직포 시스템에서 투수능 저하현상-투수능저하현상의 이방성을 중심으로-, 대한토목학회 논문집, 제20권, 제3호, pp.229-242
3. 장석부, 허도학, 문현구, 2006, 지반-라이닝 상호작용 모델을 이용한 터널 2차라이닝 설계에 관한 연구, 터널기술, 제8권, 제8호, pp.365-375
4. 한국터널공학회, 2009, 터널설계기준해설서, 도서출판 싸이아알, ISBN 978-89-92259-27-9 93
5. Chang, S. Seo, S., Lee, S., 2003, Design of the secondary tunnel lining using a ground-primary support-secondary lining interaction model, International Symposium on the Fusion Technology of Geosystem Engineering, Rock Engineering and Geophysical Exploration, Seoul, Korea, Nov. 18-19, pp.109-114
6. Itasca Consulting Groups, 2000, FLAC Ver 4.0 Manual, Minneapolis, Minnesota, USA
7. Proctor, R.V. & White, T.L., 1961, Rock tunneling with steel supports, Commercial shearing & stam, pp. 277



장 석 부

1990년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1992년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
1997년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학박사
Tel: 02-6202-0835
E-mail: sbchang@yooshin.co.kr
현재 (주)유신코퍼레이션 터널부 상무



이 수 열

1978년 연세대학교 공과대학 토목공학과
Tel: 02-746-2172
E-mail: 7865375@hdec.co.kr
현재 수원대학교 토목공학과 박사과정



윤 기 항

1995년 고려대학교 공과대학 토목환경공
학과 공학사
1997년 고려대학교 공과대학 토목환경공
학과 공학석사
Tel: 02-467-6312
E-mail: yoondoc@yahoo.com
현재 현대건설(주) 토목사업부 과장



서 영 호

1986년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공
학사
1988년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학
석사
1993년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학
박사
Tel: 02-456-0711
E-mail: skkim@dic.co.kr
현재 현대건설(주) 토목사업본부 부장



박 연 준

1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공
학석사
1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원 토
목공학과 공학박사
Tel: 031-220-2580
E-mail: yjpark@suwon.ac.kr
현재 수원대학교 토목공학과 교수



김 수 만

1971년 고려대학교 토목공학 공학사
1981년 고려대학교 토목공학 공학석사구조
공학
1985년 고려대학교 토목공학 공학박사구조
공학
Tel: 031-220-2159
E-mail: smkim@suwon.ac.kr
현재 수원대학교 토목공학과 교수