

# 터널 설계인자 평가에 따른 콘크리트 라이닝 철근량 절감에 관한 연구

강시온<sup>1</sup> · 임영덕<sup>2</sup> · 신정호<sup>3</sup> · 김상환<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>비회원, 호서대학교 대학원 토목공학과 석사과정

<sup>2</sup>비회원, (주)대한콘설탄트 부사장

<sup>3</sup>비회원, (주)정민이엔지 대표이사

<sup>4</sup>정회원, 호서대학교 토목공학과 교수

## A study on the reduction of concrete lining re-bar according to the tunnel design factors

Si-On Kang<sup>1</sup> · Young-Duck Lim<sup>2</sup> · Jeong-Ho Shin<sup>3</sup> · Sang-Hwan Kim<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University

<sup>2</sup>Vice President, Daehan Consultants Co., Ltd.

<sup>3</sup>President, Jungmin Engineering Co., Ltd.

<sup>4</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University

\*Corresponding Author : Sang-Hwan Kim, Kimsh@hoseo.edu

### Abstract

This paper presents a study on the reduction of concrete lining re-bar according to the tunnel design factors. The design of the concrete lining increases the reinforcing re-bar according to the application of excessive load, and the economical efficiency is reduced. In order to improve the economical efficiency of tunnel construction, rational standards are required for the design factors of concrete lining. Therefore, this research analyzed the characteristics and problems of the design factors applied to the design of concrete lining. Also, the economical review of the concrete lining for design factor application was compared with the amount of reinforcing re-bar calculated from the section design using numerical analysis. The results show that the amount of re-bar is varied according to the design factors. That is, the required amount for re-bar in the tunnel concrete lining could be reduced in the design stage. The results of this study may be useful for economic design of concrete lining in the future.

**Keywords:** Tunnelling, Concrete lining, Relaxation load of ground, Coefficient of ground reaction, reinforcing rebar

### 초 록

본 논문은 터널 설계 시 설계 인자에 따른 콘크리트 라이닝 철근량 절감에 관한 연구이다. 콘크리트 라이닝의 설계는 과다한 하중적용에 따라 철근보강이 증가하게 되며, 경제성이 줄어들게 된다. 터널 시공의 경제성을 향상시키기 위해서는 콘크리트 라이닝의 설계인자에 대해 합리적인 기준이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 라이닝의

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
20(1)197-209(2018)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.1.197>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received December 13, 2017

Revised January 3, 2018

Accepted January 9, 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

설계에 적용되는 설계 인자에 대하여 특징 및 문제점을 분석하였다. 또한 설계인자 적용에 대한 콘크리트 라이닝의 경제성 검토는 수치해석을 이용하여 단면설계를 통해 산정된 철근 보강량을 비교하였다. 분석 결과에 의하면 콘크리트 라이닝 설계 시 설계 인자의 적용에 따라 필요 철근량이 다르게 나타났다. 따라서 이 연구를 통하여 콘크리트 라이닝의 철근량을 경감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이 연구 결과는 향후 콘크리트 라이닝의 경제적 설계를 위하여 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**주요어:** 터널, 콘크리트 라이닝, 지반이완하중, 지반반력계수, 철근보강

## 1. 서론

국내 터널공사의 NATM 도입 초기에는 콘크리트 라이닝을 내장재 기능으로 고려하여 최소두께 30 cm의 무근 콘크리트로 적용하였으며, 최근에는 콘크리트 라이닝의 구조적 역할이 요구되면서 내구연한 동안 구조체로서의 역학적 기능을 하도록 규정하고 있다. 따라서 콘크리트 라이닝은 자중, 지반이완하중, 잔류수압, 온도하중 등 여러 가지 하중을 고려하여 설계되어지고 있다(Kim et al., 2010).

터널 콘크리트 라이닝 설계 시에 적용하는 암반이완하중과 잔류수압의 크기, 형태 및 산정방법이 설계자에 따라 다양하게 적용되고 있는 것이 현실이다(Chun and Sin, 2000). 초기 콘크리트 라이닝의 강도가 24 Mpa일 때 콘크리트 라이닝 두께를 30 cm 이상으로 설계하여 시공되었으나 최근 27 Mpa의 강도로 증가함에도 불구하고 라이닝 두께가 40 cm 이상으로 설계·시공되고 있으며, 지하철 9호선의 경우 60 cm의 두께로 시공된 경우도 있다(Kim et al., 2015).

이론적으로 굴착에 의한 지반하중은 이미 1차 지보재가 지지하고 있기 때문에 원칙적으로 2차 라이닝에는 터널 이완하중이 작용하지 않는다(Park et al., 2013). 그러나 지반조건이 열악하거나 숏크리트의 부식 등에 의해 1차 지보재가 지보 능력을 상실할 경우를 고려하여 콘크리트 라이닝 설계 시 지반이완하중을 적용하여 설계하여야 한다(Chun and Sin, 2001). 그러나 기존의 이완하중 산정 방법은 하중을 과다하게 산정하는 것으로 알려져 있으며(Kim et al., 2013), 그에 따라 철근보강이 과다하게 산정되는 문제점을 내포하고 있다. 철근보강이 늘어남에 따라 콘크리트 라이닝의 안전율은 증가하지만 그에 따라 경제성이 줄어들게 된다.

지하철의 시공비용을 분석한 결과 터널 공사비중 구조물공이 25%로 토공 다음으로 높은 비율을 차지하고 있으며 토공, 지보공 및 지반보강은 다양한 공법과 설계방법으로 보편적인 설계기준 정립이 곤란하므로, 터널 시공의 경제성을 향상시키기 위해서는 콘크리트 라이닝의 설계에 적용되는 설계인자에 대해 합리적인 기준 제시가 필요하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트 라이닝의 경제성 향상을 위하여 철근량 절감에 관한 연구를 수행하기 위해 설계 시 적용되는 설계인자에 대해 분석하였다. 또한 콘크리트 라이닝에 설계 검토항목을 적용하여 수치해석을 수행하였으며, 단면 설계를 통해 산정된 철근 보강량을 비교 분석함으로써 설계 인자 적용에 따른 경제성 검토를 수행하였다.

## 2. 터널 콘크리트 라이닝 설계 인자

### 2.1 개요

콘크리트 라이닝의 설계개념은 국가별로 상이하며, 국내의 경우 설계기준에 내구연한 구조체로서의 역학적 기능을 보유하도록 명기되어 있어 설계 시 발생 가능한 다양한 하중에 대한 하중조합을 고려하여 설계하고 있다. 일반적으로 콘크리트 라이닝의 설계는 지반이완하중, 수압, 온도 하중 및 건조축수 등을 고려하여 수행된다. 하중의 적용이 증가 할수록 콘크리트 라이닝의 안전성이 증가하지만 그에 따라 단면제원 및 철근 보강량이 증가되어 경제성이 감소하게 된다. 따라서 본 장에서는 콘크리트 라이닝 대한 경제성 확보를 수행하기 위해 주로 적용되는 설계 인자에 관하여 특징 및 문제점을 분석하였다.

### 2.2 지반이완하중

배수형 방수형식 터널에서는 1차 지보재가 터널의 내구연한 동안 충분히 지보역할을 한다면 콘크리트라이닝에는 배수재 기능저하에 따른 잔류수압 이외의 하중이 작용하지 않을 수 있다. 그러나 지반 조건이 열악하거나 쏘크리트의 부식 등으로 인해 1차 지보재가 지보 능력을 상실할 경우를 대비하여 이완하중을 고려하고 있으나 국내외 지반 이완하중 산정방법에 대한 설계 기준 조사 결과 지반이완하중을 산정하는 것에 어려움이 있다(Kim et al., 2013).

Table 1. Estimation of relaxed rock loads

Classification		Calculation theory
Theoretical method	Bierbäumer (1913)	$p_{roof} = \alpha \times H \times \gamma$ Low ground level : $\alpha = 1$
	Terzaghi's method (1946)	$H \leq 5B: \alpha = 1 - \frac{\tan\Phi \times \tan^2(45 - \Phi/2) \times H}{b + 2m \times \tan(45 - \Phi/2)}$ $H > 5B: \alpha = \tan^4(45 - \Phi/2)$ $p_{roof} = \frac{\gamma \times B}{2K \times \tan\Phi} (1 - e^{-K(2H/B)\tan\Phi})$ $B = 2 \times [(b/2) + m \times \tan(45 - \Phi/2)]$
Empirical method	Terzaghi's rock load classification	$p_{roof} = 0.2 \sim 0.6(B + H_t)$
	Unal (1983)	$p_{roof} = \frac{\gamma \times b \times [100 - R]}{100}$
	Barton et al. (1974)	$J_n \geq 3 \quad p_{roof} = \left[ \frac{2.0}{J_r} \right] Q^{-\frac{1}{3}} (\times 10^2 kPa)$ $J_n < 3 \quad p_{roof} = \frac{2.0 J_n^2 Q^{-\frac{1}{3}}}{3.0} (\times 10^2 kPa)$
Numerical analysis method		Ground Lining Interaction (G.L.I)

국내에서는 대표적인 이완하중 산정 방법에는 Terzaghi, Bierbäumer의 이론적 방법과 Terzaghi의 암반하중 분류표, RMR 또는 Q-system을 이용한 경험식 그리고 수치 해석에 의한 방법 등이 있으며 Table 1과 같다. 본 연구에서는 Terzaghi의 이론식, Terzaghi의 암반하중분류표, 수치해석을 이용한 GLI 상호작용모델의 지반이완하중을 적용하여 경제성 검토를 수행하였으며 적용된 이완하중산정 방안의 내용은 다음과 같다.

### 2.2.1 Terzaghi 이론식

Terzaghi (1946)의 이론식은 비점착성의 건조한 조립토에 관하여 Fig. 1과 같은 형태의 파괴면을 가정하였으며, 얇은 심도에서의 연직 이완하중  $P_{roof}$  산정에 관하여 식 (1)을 제시하였다.

$$p_{roof} = \frac{\gamma \times B}{2K \times \tan\Phi} (1 - e^{-K(2H/B)\tan\Phi}) \tag{1}$$

여기서,  $B = 2 \times [(b/2) + m \times \tan(45 - \Phi/2)]$

- |                                 |                               |
|---------------------------------|-------------------------------|
| $P_{roof}$ : 연직이완하중( $kN/m^2$ ) | $\gamma$ : 지반단위중량( $kN/m^3$ ) |
| $K$ : 토압계수                      | $\Phi$ : 내부마찰각                |
| $b$ : 터널 폭( $m$ )               | $m$ : 터널 높이( $m$ )            |
| $H$ : 토피( $m$ )                 | $B$ : 지반이완범위( $m$ )           |

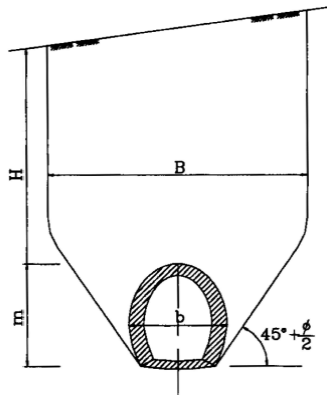


Fig. 1. Assumption of Terzaghi's rock pressure theory

Terzaghi 이론식의 경우 천층터널 및 양호한 암질구간에 적용할 경우 지나친 이완하중이 발생 될 수 있다. 제시된 식 (1)은 기존에 제시된 식 (2)에서 점착력을 고려하지 않은 식으로써, 특수한 경우에 해당된다. 따라서 지반이완 하중에 Terzaghi의 이론식을 적용할 경우에는 지반조건을 고려하여 과하게 산정되는 이완하중을 합리적으로 조정할 필요가 있다.

$$p_{roof} = \frac{\gamma \times 2C}{2K \times \tan\Phi} (1 - e^{-K \tan\Phi H/B}) \quad (2)$$

### 2.2.2 Terzaghi 암반분류법

Terzaghi 암반하중분류표(1946)은 터널이 굴착되고 지보공을 설치했을 때 터널 주변지반의 아치작용에 의해 지반의 이완이 일정범위까지만 진행 된다고 가정하였으며 Fig. 2와 같다. 지반의 상태에 따라 9등급으로 구분하고 있으나 개괄적으로 분류되어 있으며 암질의 객관적 평가가 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 Rose (1982)는 RMR을 이용하여 수정된 Terzaghi 암반분류를 제시하였으며 Table 2와 같다.

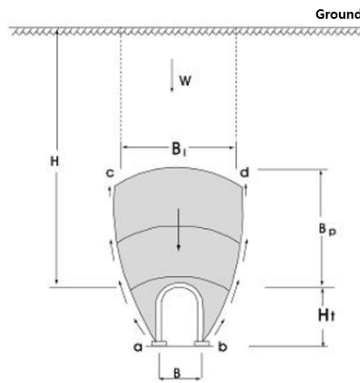


Fig. 2. Terzaghi's rock road classification

Table 2. Terzaghi's rock load classification (Rose, 1982)

Rock condition	RQD	Rock load Hp ft (m)	Remarks
1. Hard and intact	95~100	0	Light lining required only if spalling or popping occurs
2. Hard stratified or schistose	90~99	0~0.5B	Light support, mainly for protection against spalls
3. Massive, moderately jointed	85~95	0~0.25B	Load may change erratically from point to point
4. Moderately blocky and seamy	75~85	0.25B~0.20(B+Ht)	No side pressure
5. Very blocky and seamy	30~75	(0.20~0.60)(B+Ht)	Little or no side pressure
6. Completely crushed and chemically intact	3~30	(0.6~1.10)(B+Ht)	Considerable side pressure Softening effect of seepage towards requires either
6a. Sand and gravel	0~3	(1.10~1.40)(B+Ht)	continuous support for lower ends of rebs or circular ribs
7. Squeezing rock, moderate depth	NA	(1.10~2.10)(B+Ht)	Heavy sider pressure invert struts required
8. Squeezing rock, great depth	NA	(2.10~4.50)(B+Ht)	Circular ribs are recommended
9. Swelling rock	NA	Up~250 ft (75 m) Irrespective of value of (B+Ht)	Circular ride are required In extreme cases use yielding support

### 2.2.3 지반-라이닝 상호작용모델을 이용한 GLI 모델

지반-라이닝 상호작용 모델(Ground Lining interaction)은 지반과 1차 지보재가 분담하여 지지하고 있는 지반 이완하중이 1차지보재의 지지력 상실에 의하여 콘크리트 라이닝으로 전이되는 하중을 지반하중으로 고려하는 방법이다, Fig. 3은 GLI모델에 대한 수치해석 과정을 나타낸 것이며, Fig. 4는 굴착과 동시에 지보재 설치를 가정한 지보반응곡선을 나타낸 것이다.

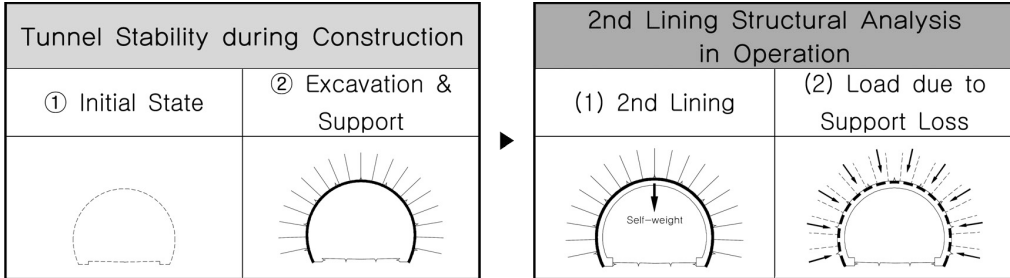


Fig. 3. Numerical analysis procedure of GLI model (Chang et al., 2010)

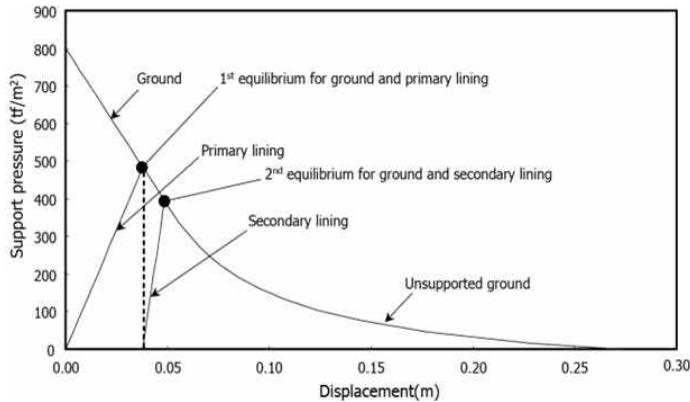


Fig. 4. Reaction ground curve of GLI model (Seo et al., 2002)

일반철도와 고속철도 단면에 대하여 암반 등급별 대표물성치, 토피고를 매개변수로 수치해석적인 방법을 사용하여 지반하중의 크기를 산정하였으며, 결과 값에 대한 다중회기분석을 통하여 식 (3)을 도출하였다(Kim et al., 2013).

$$P = \left[ \frac{\gamma \times (B + H) - c}{7 \tan \phi} \right] \times e^{-\frac{E}{1000(\gamma \times B)}} \quad (3)$$

$$B = 2 \left[ \frac{b}{2} + h \times \tan \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \right]$$

- 여기서, h: 터널 높이(m)                                        b: 터널 폭(m)  
 $\gamma$ : 지반의 단위중량(kN/m<sup>3</sup>)                                  B: 변형계수(kN/m<sup>2</sup>)  
 $\theta$ : 내부마찰각( $^\circ$ )    c: 점착력(kN/m<sup>2</sup>)  
H: 토포고(단, H > 80 m 인 경우, H = 80을 적용)

### 2.3 잔류 수압

비배수형 터널의 경우 정수압을 고려하면 되기 때문에 문제가 발생되지 않으나, 배수형 터널에서 장기적인 배수기능 저하가 우려될 경우에는 잔류수압을 고려하여 설계하게 된다. 비배수형 터널의 경우에는 정수압을 고려하면 되나, 배수형 터널의 경우에는 콘크리트 라이닝 배면에 배수층을 설치하므로 원칙적으로는 수압은 고려하지 않아도 된다. 그러나 부직포를 배수층으로 적용하였을 경우에는 장기적인 배수기능 저하가 발생할 수 있기 때문에 수압에 의한 하중을 적용하여 설계하게 되며 설계 시 적용하는 수압의 형태는 Fig. 5 과 같다. 관용적으로 적용하는 수압의 크기는 식 (4)를 이용해 적용하고 있다.

$$\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3} \times H_t \times \gamma_w \tag{4}$$

여기서,  $H_t$ : 터널 높이

토사층:  $\frac{1}{2} H_t$

암반층:  $\frac{1}{3} H_t$

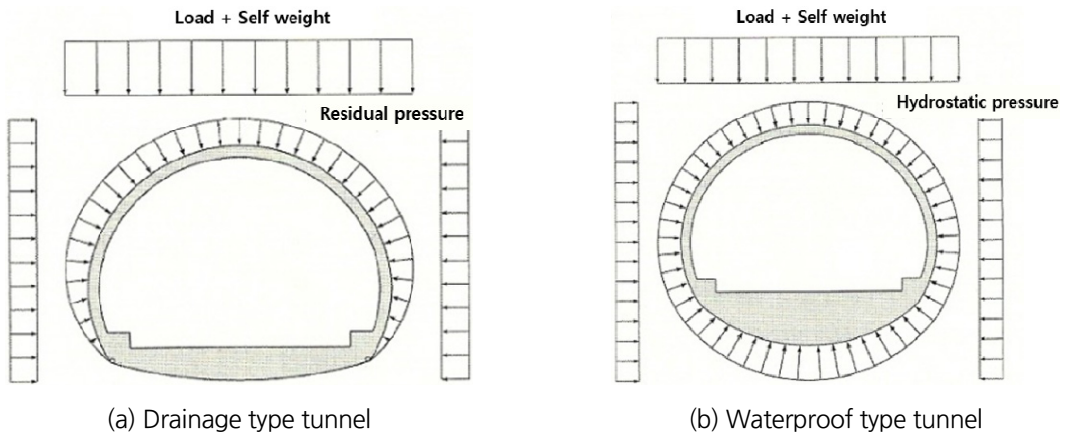


Fig. 5. Water pressure effect by tunnel types

## 2.4 지반반력계수

터널의 1차 지보재 및 콘크리트라이닝 구조계산 시 지반반력계수는 구조해석의 결과에 미치는 영향이 상당히 크므로 합리적인 산정방법이 필요하다. 국내에서 지반반력계수를 산정하는 방법에는 Wölfer 공식, 지반공동이론, 수치해석을 이용한 산정 방법이 있으며 Table 3과 같다.

**Table 3.** Coefficient of ground reaction

Classification	Wölfer's formula	AFTES's fomula
Equation	$K_S = \frac{E_S}{R} L$	$K_S = \frac{E_S}{(1+\nu)R} L$
Relevant evidence	Duddeck's model	Elastic theory

Wölfer 공식은 Duddeck (1982)이 최초로 제안한 모델식이고 간략식이다. 이론에 대한 관련 근거가 미흡하나 국내에서는 일반적으로 안전율을 확보하는 측면에서 Duddeck 모델을 적용 하고 있다.

지반공동이론은 탄성이론에 근거한 이론이며, 이는 미공병단, AFTES 에서 사용하는 이론적 근거가 충분한 공식으로 식 (5)와 같다.

$$K_S = \frac{E_S}{(1+\nu)R} L \quad (5)$$

여기서,  $E_S$ : 주변지반의 탄성계수

$\nu$ : 주변지반의 포아송비

R: 터널의 반경(m)

L: 보 요소 1개의 길이(m)

$K_S$ : 단위접선 길이 당 스프링계수

## 3. 수치 해석을 이용한 콘크리트라이닝 경제성 검토

### 3.1 해석 개요

본 연구에서는 콘크리트 라이닝 설계에 적용되는 설계 인자에 따라 보강되는 철근량을 비교하여 경제성을 검토하기 위해 지중골조해석모델을 이용하였으며 그 결과를 비교하였다. 터널 대상은 지하철 복선 표준단면으로 토피 15 m의 풍화토 조건과 풍화암 조건의 터널로 가정하였다. 사용 재료는 설계기준강도  $f_{ck} = 24 \text{ Mpa}$ 의 콘크리트와 항복강도  $f_y = 300 \text{ Mpa}$ 의 철근을 사용하였다. 콘크리트 라이닝의 두께는 풍화암의 경우 40 cm, 풍화토



의 경우 50 cm로 가정하였으며 단면도 및 해석모델링은 Fig. 6와 같다. 해석에 적용된 지반에 대한 물성치는 Table 4와 같으며, 설계 인자에 대한 해석 Case는 Table 5와 같다. 해석에 적용된 하중 값 들은 Table 6과 같다.

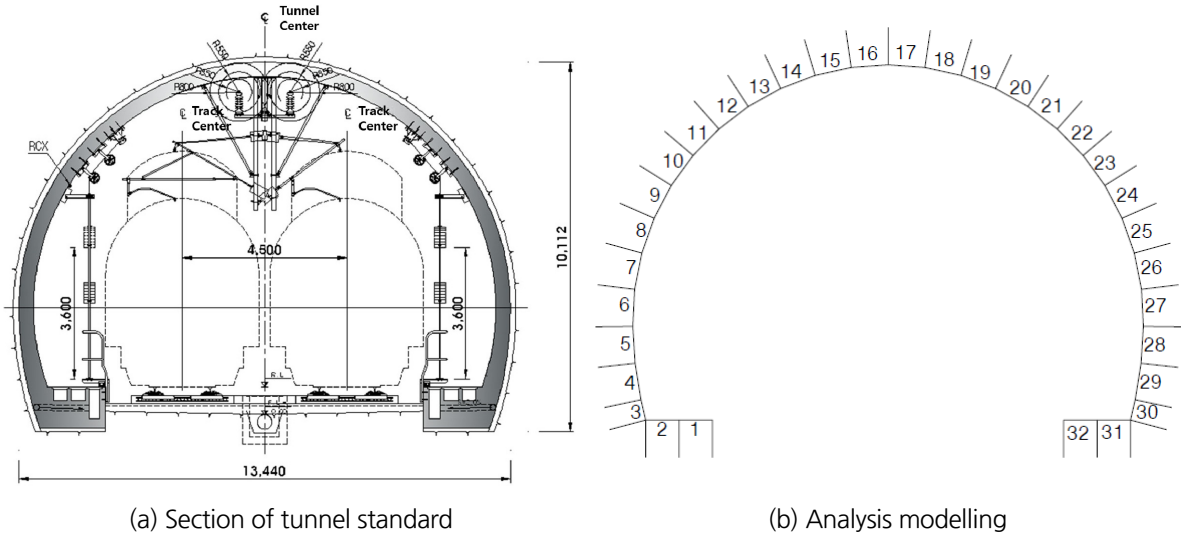


Fig. 6. Numerical analysis model

Table 4. Material parameters for ground

Classification	Unit weight ( $kN/m^3$ )	Cohesion (kPa)	Internal friction angle ( $^\circ$ )	Elastic modulus (MPa)	Poisson ratio	Ground level
Weathered soil	20	5	32	60	0.33	15
Weathered rock	22	50	35	250	0.30	15

Table 5. Numerical case

Classification		Fomula	Residual pressure	Coefficient of ground reaction
Case 1	Terzaghi's rock load classication	Weathered soil: $P = 0.6 (B + H_t)$ Weathered rock : $P = 0.4 (B + H_t)$	$P_\omega = \frac{1}{2} \times H_t \times \gamma_\omega$	$K_S = \frac{E_S}{(1 + \nu) R}$
Case 2	Terzaghi's theory (consider C)	$P_{roof} = \frac{\gamma B \times 2C}{2K \times \tan \phi} \left( 1 - e^{-\frac{\kappa \tan \phi 2H}{B}} \right)$		
Case 3	G.L.I Model	$P = \left[ \frac{\gamma \times (B + H) - c}{7 \tan \phi} \right] \times e^{-\frac{E}{1000(\gamma \times B)}}$		

**Table 6.** Application value of numerical analysis

Classification			$P_{roof}$ ( $kN/m^2$ )	Redual pressure $kN/m^2$	Coefficient of ground reaction ( $kN/m^3$ )
Weathered soil	Case 1	Terzaghi's rock load classification	291.48	50.178	9022
	Case 2	Terzaghi Terzaghi's theory (consider C)	207.99		
	Case 3	G.L.I Model	180.13		
Weathered rock	Case 1	Terzaghi's rock load classification	213.84	50.178	37594
	Case 2	Terzaghi Terzaghi's theory (consider C)	181.40		
	Case 3	G.L.I Model	164.64		

### 3.2 해석 결과

지반조건 및 Case별 수치해석 수행결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7(a)는 풍화토 조건에서의 해석 결과이며 각각의 Case 모두 바닥부에서 가장 큰 부재력을 보여주고 있다, 또한 어깨부에서 바닥부로 갈수록 점차적으로 부재력이 증가하는 것으로 나타나고 있다. 천장부에서는 Case 별로 가장 큰 부재력의 차이를 보여주고 있으며 Case 1의 부재력 값에 비해 Case 2는 63%, Case 3은 23%정도로 작용하는 것으로 나타났다.

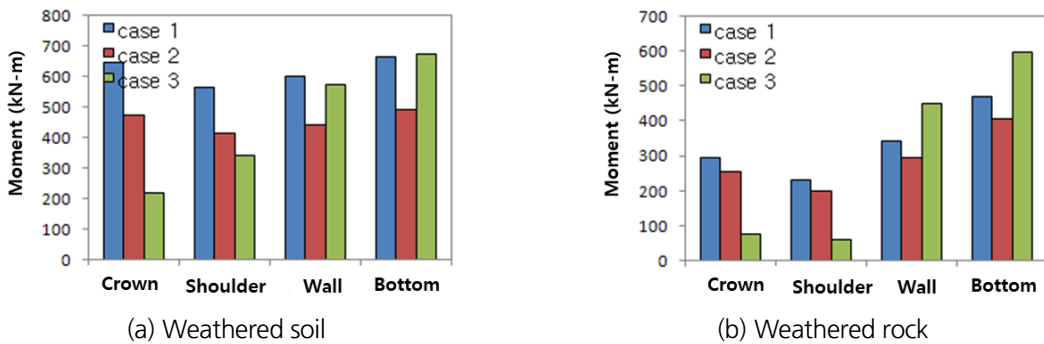
**Fig. 7.** Numerical analysis result

Fig. 7(b)는 풍화암 조건에서의 해석 결과이며, 바닥부에서 가장 큰 부재력을 나타내고 있다. Case별 모두 천장부에서 어깨부로 갈수록 부재력이 감소하였으며, 어깨부에서 바닥부로 갈수록 부재력이 증가하는 것으로 나타났다. Case별로 천장부에서 가장 큰 부재력의 차이를 보여주고 있으며 Case 1의 부재력 값에 비해 Case 2는 86%, Case 25%정도로 작용하는 것으로 나타났다.

### 3.3 철근 보강량에 따른 경제성 검토

철근 보강량 비교는 주철근 직경과 배치간격을 기준으로 하였으며, 제반 기준은 Korea Concrete Institute (2012)

을 준용하였다. 철근량은 사용하중에 대한 균열조건도 만족하도록 산정하였다. 수치해석 결과에 따라 산정된 철근량은 Fig. 8과 같다.

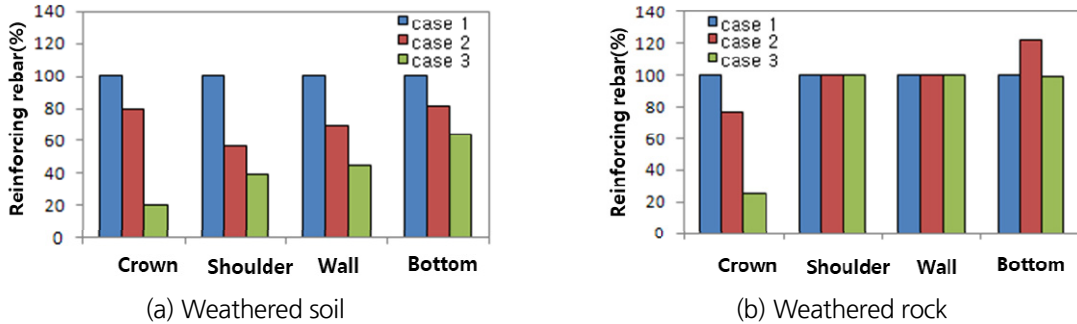


Fig. 8. Result of reinforcing rebar estimation

Fig. 8(a)는 풍화토 지반에서의 Case별로 해석 조건에 따른 산정된 철근 보강량이다. Case 2의 경우 Case 1의 경우 보다 19.1~21.1%의 필요 철근량이 감소한 결과를 나타내었고 Case 3의 경우 27.1~80.3%의 필요 철근량이 감소한 것으로 나타났다.

Fig. 8(b)는 풍화암 지반에서의 해석조건에 따라 산정된 철근 보강량이다. 천장부에서는 풍화토와 유사하게 Case 1을 기준으로 Case 2는 23.6%, Case 3은 75%의 필요 철근량이 감소하는 것으로 나타났다. 어깨부와 측벽부는 이완하중에 따라 단면력의 차이는 보였으나 철근량 산정결과는 동일하게 나타났다. 이는 어깨부와 측벽부의 경우 터널 단면두께가 충분하여 철근량의 증가없이 내하력을 확보한 것으로 판단된다.

Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 콘크리트 라이닝에 적용된 설계인자에 따라 콘크리트 라이닝의 필요 철근량이 다르게 산정됨을 알 수 있었으며, 경제성을 향상시키기 위해서는 합리적으로 설계인자를 고려해야 한다고 판단된다. 예를 들어 Terzaghi의 이론식은 토피고에 따라 이완하중이 증가하게 되는데 천층 터널 및 암질이 양호할 경우에 이론식을 그대로 적용한다면 지나친 이완하중으로 인해 콘크리트의 단면 및 필요 철근량이 증가하게 된다. 또한 지반조건이 양호할 때에는 점착력을 고려하여 이완하중을 산정하는 것이 역학적으로 타당하다고 판단되며 그에 따라 콘크리트 라이닝에 대해 경제성을 확보 할 수 있을 것이라고 판단된다.

배수형 방수형식터널의 경우 콘크리트 라이닝 배면에 배수층을 설치하므로 원칙적으로는 수압을 고려하지 않아도 된다. 콘크리트 라이닝에 작용하는 수압을 제외하여 작용하중을 경감시킬 수 있으며 이는 경제성 향상에 도움이 될 수 있다. 그러나 부직포를 배수층으로 적용하였을 경우에는 장기적인 배수기능 저하가 발생 될 수 있기 때문에 잔류수압을 고려하는 것이 더욱 합리적이라고 판단된다. 따라서 콘크리트 라이닝 설계 시에 경제성 확보를 위해 일방적으로 하중을 경감시키기 보다는 안전성 확보를 전제로 합리적인 하중규모 경감 및 하중의 산정이 이루어 져야 할 것이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 콘크리트 라이닝의 경제성 향상을 철근량 절감에 관한 연구를 수행하기 위해 설계 시 적용되는 설계인자에 대해 분석 하였다. 또한 콘크리트 라이닝에 설계 검토항목을 적용하여 수치해석을 수행하였으며, 단면 설계를 통해 산정된 철근 보강량을 분석하였다. 연구 결과를 요약 정리하면 다음과 같다

1. 콘크리트 라이닝에 적용된 설계 인자에 따라 필요 철근량을 산정한 결과 풍화토의 경우 Case 2는 Case 1보다 19.1~21.1%의 필요 철근량이 감소한 결과를 나타내었고 Case 3은 27.1~80.3%의 필요 철근량이 감소한 것으로 나타났다. 풍화암에서는 Case 1을 기준으로 Case 2는 23.6%, Case 3은 75%의 필요 철근량이 감소하는 것으로 나타났다.
2. 콘크리트 라이닝에 적용된 설계인자에 따라 콘크리트 라이닝의 필요 철근량이 다르게 산정됨을 알 수 있었으며, 경제성을 향상시키기 위해서는 합리적으로 설계인자를 고려해야 한다고 판단된다.
3. 이완하중 산정시 Terzaghi 이론식(1945)은 지반의 점착력을 고려하지 않는 영향 등으로 인해 이완하중을 과대평가하는 경향이 있다. 특히 Terzaghi 이론식은 지반조건이 불리해 질수록 이완하중을 더욱 과대평가한다는 점에 유의해야하며 지반의 점착력을 고려한 식을 적용하는 것이 역학적으로 타당하다고 판단된다.
4. 비배수 방수형식의 터널에서 장기적인 배수기능의 저하가 발생될 수 있기 때문에 잔류수압을 고려하는 것이 합리적이라고 판단된다. 따라서 콘크리트 라이닝 설계 시에 경제성 확보를 위해 일반적으로 하중을 경감시키기 보다는 안전성 확보를 전제로 합리적인 하중규모 경감 및 하중의 산정이 이루어 져야 한다.

본 연구는 라이닝 두께 40 cm와 50 cm를 갖는 철도 터널의 경우에 대하여 수행된 것으로 단면규모 및 라이닝 두께의 변동시 이완하중 변동에 따른 철근량 산정 경향이 본 결과와 다를 수 있다. 설계 인자의 적용에 따라 콘크리트 라이닝의 철근 보강량이 달라지는 결과를 확인 하였으며, 향후 콘크리트 라이닝 설계 시 설계기준에 대하여서는 특정방법을 규정하기보다는 설계자가 다양하게 기술적인 접근을 하여 경제적인 설계를 할 수 있도록 일반화시킴이 바람직할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2017년 건설기술연구사업의 ‘도심지 소단면(φ3.5 m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술 개발(17SCIP-B105148-03)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## References

1. Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974), "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support", *Rock Mechanics*, Vol. 6, No. 4, pp. 189-236.
2. Bierbäumer, A. (1913), "Die dimensionierung des tunnelmanerwerks." pp. 101.
3. Chang, S.B., Lee, S.Y., Suh, Y.H., Yun, K.H., Park, Y.J., Kim, S.M. (2010) "A study on field change case of tunnel concrete lining designs using GLI (Ground Lining Interaction) Model", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 20, No. 1, pp. 58-64.
4. Chun, B.S., Sin, S.W. (2000), "A case study on the design loads of tunnel concrete lining", *Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 2, pp. 5-8.
5. Chun, B.S., Sin, S.W. (2001), "A study on the design loads of NATM tunnel concrete lining", *Journal of Korean Society for Rock Mechanics Tunnel & Underground*, Vol. 11, No. 2, pp. 96-108.
6. Duddeck, H., Erdmann, J. (1982), "Structural design models for tunnels", *Proceedings of the Tunnelling 82*, Brighton, pp. 83-91.
7. Kim, H.K., Lee, C., Lee, S.W., Park, J.W. (2015), "Study on the optimal construction of a concrete lining in a weathered rock", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 17, No. 1, pp. 33-47.
8. Kim, J.J., Lee, J.K., Kim, J.U., Yoo, H.K. (2013), "Evaluation of rock load based on critical shear strain concept on tunnels", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 6, pp. 637-652.
9. Kim, S.H., Park, I.J., Moon, H.K., Shin, Y.S. (2010), "A study on behavioral characteristics of concrete lining based on the equations of relaxed rock loads", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 12, No. 6, pp. 443-450.
10. Korea Concrete Institute (2012), *Concrete Structure Standard*, Kimoondang, Seoul, pp.57-268.
11. Park, K.H., Shin, Y.W., Kim, J.J., Yoo, H.K. (2013), "A study on the estimation method of rock load applied to concrete lining using back analysis", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 5 pp. 1957-1968.
12. Rose, D. (1982), "Revising Terzaghi's tunnel rock load coefficient", *Proceedings of the 23rd U.S Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, California, pp. 953-960.
13. Seo, S.H., Chang, S.B., Lee, S.D. (2002), "An analysis model of the secondary tunnel lining considering ground-primary support-secondary lining interaction", *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 12, No. 2, pp. 107-114.
14. Terzaghi, K. (1946), *Rock Defects and Loads on Tunnel Supports*, Massachusetts, Harvard University, pp. 17-99.
15. Unal, E. (1983), *Development of design guidelines and roof-control standards for coal-mine roofs*, Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University.