

# 수치해석을 통한 이완하중에 따른 터널 라이닝의 거동 분석

## Numerical Analysis of Tunnel Lining under Loosening Load

박 정 진 <sup>1</sup>	Park, Jung-Jin	김 용 민 <sup>2</sup>	Kim, Yong-Min
황 택 진 <sup>3</sup>	Hwang, Taik-Jean	정 상 섬 <sup>4</sup>	Jeong, Sang-Seom

### Abstract

Cost effective design and construction are necessary to establish the design concept of tunnel lining. Loosening load acting on the concrete lining is compared with Terzaghi tunnel theory and numerical analysis. It is analyzed under the condition of weathered rock and soil with varying in-situ stress ratio ( $K_0$ ). Based on the result, loosening load calculated by Terzaghi tunnel theory is much greater than numerical analysis results. And the load calculated in weathered soil is larger than weathered rock condition. As in-situ stress ratio increases, the stress acting on the tunnel lining decreases in Terzaghi theory rapidly, whereas there is little effect in numerical analysis.

### 요 지

본 연구에서는 콘크리트 라이닝의 설계개념을 명확히 정립하여 라이닝뿐만 아니라 주지보재의 경제적인 설계 및 시공이 가능토록 하기 위하여, 콘크리트 라이닝에 작용하는 지반이완하중을 Terzaghi의 이론적 방법과 수치해석 방법을 이용한 다양한 해석방법에 따라 비교하였다. 그리고 풍화토, 풍화암에서의 각기 다른 지반조건과 측압계수( $K_0$ ) 변화에 따른 터널 콘크리트 라이닝에 작용하는 지반이완하중을 비교 분석하였다. 본 연구 결과, Terzaghi의 지반이완하중은 수치해석 결과보다 다소 크게 나오는 경향이 있었고 풍화암보다 풍화토에서 다소 큰 지반이완하중이 산정되었다. 또한, 측압계수가 증가할수록 터널 라이닝에 미치는 단면력은 Terzaghi의 이론식을 사용 시 측압계수가 증가할수록 감소하는 반면 수치해석 방법을 사용 시 그 증감 영향은 미미하였다.

**Keywords :** Concrete lining, In-situ stress ratio ( $K_0$ ), Loosening load, NATM, Terzaghi tunnel theory, Unbalanced force

## 1. 서 론

일반적으로 콘크리트 라이닝 설계개념은 역학적 기능을 부가시키는 개념과 역학적 기능을 부가시키지 않는 개념으로 분류되며, 국내에서는 터널사용 개시 후 락볼트나 슛크리트의 알칼리 골재반응 등으로 인한 1

차지보재의 열화 등에 의한 주지보재를 임시구조물로 고려하여 콘크리트 라이닝에 역학적인 기능을 부가하여 설계한다.

그러나 역학적 기능을 부가하여 설계 시 콘크리트 라이닝에 작용하는 외력인 지반이완하중에 대한 규명이 명확히 이루어지지 않으므로 전토평 하중이나 재래식

1 정회원, 연세대학교 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

2 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

3 정회원, 동의대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Dongeui Univ.)

4 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

터널공법(ASSM)의 이완하중 산정방법인 Terzaghi의 수정이완하중 등 과다한 이완하중이 적용된다(김선홍 등, 2011).

또한, 국내에 NATM이 도입된 80년대에는 굴착하중을 주지보재(1차 지보재)가 부담하는 개념으로 대부분의 콘크리트라이닝이 무근 콘크리트로 설계 및 시공하였으나, 당시에는 기술력의 부족으로 약 10년 정도 공용 후에 의한 슛크리트 품질부족과 무근 콘크리트 라이닝의 균열발생 등의 문제점들이 제기되었다. 이는 사회적 안전의식 상승과 맞물려 지반조건과 관계없이 모든 콘크리트 라이닝 설계 시 역학적인 기능을 부가한 구조 계산이 적용되는 결과를 초래하는 한 요인으로 작용하였다.

본 연구에서는 콘크리트 라이닝의 설계개념을 명확히 정립하여 터널의 콘크리트 라이닝뿐만 아니라 주지보재의 경제적인 설계 및 시공이 가능토록 하기 위해, 콘크리트 라이닝에 작용하는 지반이완하중을 Terzaghi의 이론적 방법과 FLAC을 이용한 수치해석 방법으로 산정하여 비교 분석하였다.

또한, 축압계수의 변화는 터널의 주지보재인 슛크리트의 휨응력 거동에 영향을 준다(유광호 등, 2008). 따라서 풍화토과 풍화암의 각기 다른 지반조건에서 축압계수( $K_0$ )의 변화에 따른 콘크리트 터널 라이닝에 작용하는 단면력을 축력, 전단력, 휨모멘트 별로 비교 분석하였다.

## 2. 지반이완하중 산정방법

NATM에서는 슛크리트와 락볼트 등 1차 지보재가 터널의 내구연한 동안 충분한 지보역할을 한다면 콘크리트 라이닝에 지반이완하중이 작용하지 않는 것이 일반적이다. 하지만 지반이 연약하거나 슛크리트의 부식 발생 등 1차 지보재가 그 능력을 상실할 경우, 변위가 수렴되지 않는 상태에서 라이닝을 타설 할 경우에는 추가로 발생하는 이완하중을 고려해야 한다. 이완하중의 원인으로는 슛크리트나 락볼트와 같은 1차 지보재의 지지력 상실과 터널 주변의 근접시공에 의한 지반의 2차 변형을 들 수 있다(서성호 등, 2002).

대표적으로 지반이완하중을 산정하는 방법에는 Terzaghi의 이론식과 수정된 Terzaghi의 암반하중분류표, Bierbäumer 이론식, RMR과 Q-system을 이용한 경험식 그리고 수치해석에 의한 방법 및 발파영향에 의한 방법 등이 있다

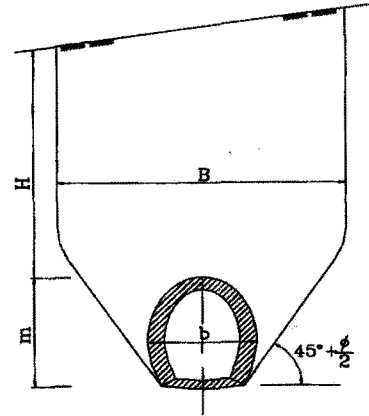


그림 1. Terzaghi의 지반이완하중

(도로설계편람, 2010). 본 연구에서는 실제 터널설계에 많이 사용되고 있는 Terzaghi이론식과 수치해석 방법을 이용하여 터널 콘크리트 라이닝에 작용하는 지반이완하중을 산정하였다.

### 2.1 Terzaghi의 이론식

Terzaghi(1946)는 비점착성의 건조한 조립토에 대해서 그림 1과 같은 형태의 파괴면에 대하여 다음과 같은 식을 제안하였다(천병식 등, 2001).

얇은 터널에 대하여 연직암반하중  $P_{roof}$ 는 식 (1)과 같다.

$$P_{roof} = \frac{\gamma \times B}{2 \times K \times \tan \phi} \left( 1 - e^{-K \frac{2H}{B} \tan \phi} \right) \quad (1)$$

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

여기서,  $P_{roof}$ 는 연직이완하중( $\text{kN/m}^2$ ),  $\gamma$ 는 지반 단위중량( $\text{kN/m}^3$ ),  $B$ 는 지반 이완범위(m),  $K$ 는 축압계수,  $\phi$ 는 지반 내부마찰각,  $H$ 는 토피(m),  $b$ 는 터널 폭(m),  $m$ 은 터널 높이(m)이다.

### 2.2 수치해석에 의한 방법

터널의 2차 라이닝에 작용하는 하중의 크기 및 양상은 근본적으로 1차 지보재와 지반의 평형조건에 의하여 결정된다. 이러한 평형조건에서 1차 지보재의 지지력이 상실되면, 지반과 2차 라이닝은 각각의 상대적 변형특성에 따라 하중을 분담하게 된다. 2차 라이닝의 강성이 지반에 비하여 상대적으로 높거나 지반의 변형특성 및 강도가 낮을수록 2차 라이닝의 분담율은 높

아진다.

또한, 1차 지보재가 지지하고 있던 하중은 지반과 2차 라이닝이 분담할 하중의 크기에 결정적으로 영향을 미치게 된다. 이러한 관점에서, 2차 라이닝 해석에는 라이닝 타설 전의 지반과 1차 지보재의 평형조건이 반영되어야 하며, 이는 재래의 골조해석방법의 적용은 불가능하며 2차 라이닝-지반-1차 지보재 상호작용을 고려할 수 있는 수치해석 방법의 적용이 불가피하다.

현재 터널 수치해석은 2차 라이닝 타설 이전의 굴착과 지보단계까지만 이루어지고 있으나, 순차적 해석이 가능한 수치해석 특성상 2차 라이닝 타설과 1차 지보재 지지력 상실 단계까지의 확장이 가능하다. 즉, 굴착과 지보 완료 후에 라이닝 요소를 설치하고 1차 지보재를 제거하면, 1차 지보재가 공유했던 지반요소의 절점에는 불평형력(unbalanced force)이 발생하여 지반과 2차 라이닝에 대한 새로운 평형조건을 구하게 된다.

이 방법은 2차 라이닝 설치이전의 지반과 1차 지보재의 하중이력을 고려할 수 있는 장점이 있으며, 기존의 해석방법 중 해석단계를 확장하였기 때문에 손쉽게 실무에 적용할 수 있는 장점이 있다. 또한, 기존의 골조해석에서 요구되는 지반하중 산정과 지반반력계수 산정 등의 불필요한 작업을 줄일 수 있다(김시격 등, 2009).

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. 지보재 제거는 지반하중을 지지하는 지보재 반력이 상실되어 지반과 지보재의 평형상태가 깨어짐으로써 지반은 다시 거동하게 된다. 이때 이미 설치된 콘크리트라이닝에는 그림 2와 같이 터널변위에 대해

평형상태에 이를 때까지 하중이 작용하게 된다(장석부 등, 2010).

### 3. 콘크리트 라이닝 단면해석

콘크리트 라이닝의 단면해석은 Terzaghi의 이론식과 유한차분 프로그램인 FLAC에서 산정된 불평형력(unbalanced force)을 통하여 산정된 지반이완하중을 Midas-civil 구조해석 프로그램을 이용하여 콘크리트 라이닝에 작용하는 단면력을 산정하였다.

#### 3.1 해석단면 모델링

지반 조건은 그림 3(a)와 같이 터널 폭(B) 11.28m, 높이(H) 7.4m의 터널 단면에 44.69m의 토피고를 적용하였다. 그리고 지반은 풍화토 또는 풍화암의 물성을 넣어 해석을 수행하였다. 경계조건은 그림 3(b)와 같이 메쉬의 좌우는 X방향 구속을, 하부는 Y방향 구속을 하였고 좌우폭은 터널폭(B)의 5B만큼 상하폭은 상부는 터널 높이(H)의 6H, 하부는 6.5H를 두었다.

해석에 적용된 요소(element)는 라이닝은 빔(beam) 요소, 락볼트는 케이블(cable) 요소이며, 총 절점수는 8,700개이다. 지반과 터널 부근에는 두 재료간의 큰 강성차이 및 지반이완하중으로 인한 소성 변형이 예상되므로 조밀한 메쉬를 사용하였고, 터널로부터 거리가 멀어질수록 메쉬의 밀도를 감소시켰다.

본 유한요소 해석에서 지보재는 탄성모델(linear-elastic)을 적용하였으며, 풍화토와 풍화암은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 각 모델에 필요한 재료정수는 각각 표 1, 2와 같다.

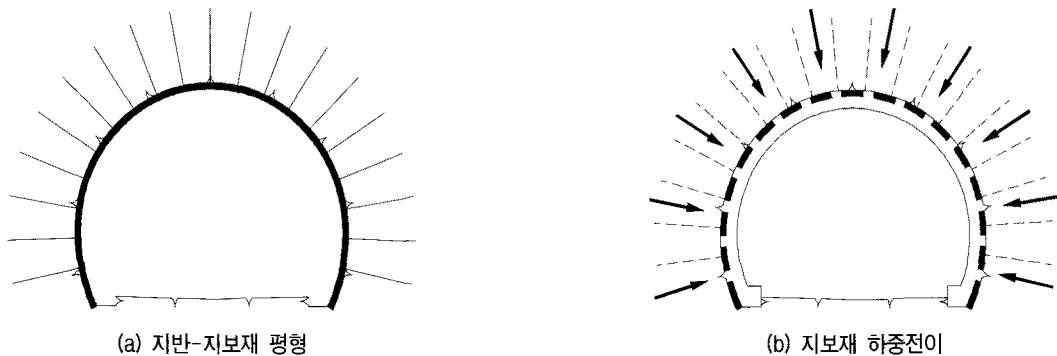
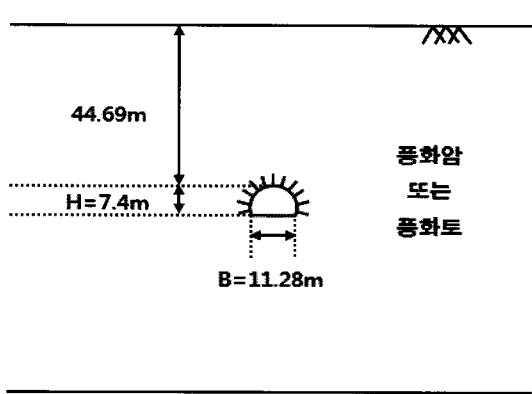
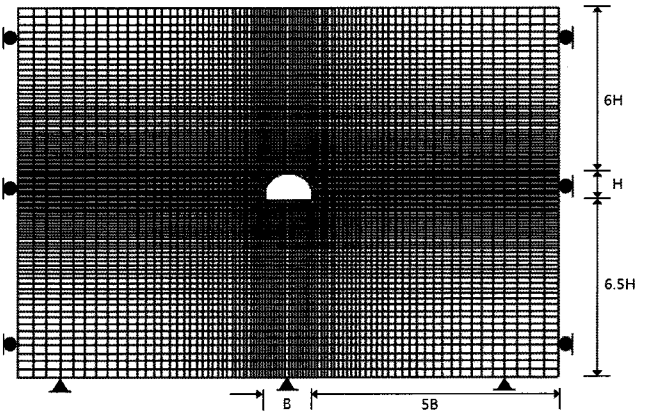


그림 2. 수치해석 모델



(a) 지반 조건



(b) 경계 조건

그림 3. 해석 단면

표 1. 지반 물성치

구 분	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	변형계수 (MPa)	포아송비
풍화토	20	5	32	60	0.33
풍화암	22	50	35	250	0.30

표 2. 콘크리트 라이닝 물성치

구 분	폭 (m)	두께 (m)	단면적 (m <sup>2</sup> )	단면2차모멘트 (m <sup>4</sup> )	탄성계수 (MPa)
아치부, 측벽부	1.0	0.3	0.3	$1.44 \times 10^{-4}$	0.33

### 3.2 지반반력계수의 결정

해석에 사용된 지반반력계수는 탄성이론에 근거한 지반공동이론식을 사용하였다. 이는 미공병단, AFTES에서 사용하는 이론적 근거가 충분한 공식으로 식 (4)와 같다.

$$K_s = \frac{E_s}{(1+\nu)R} L \quad (4)$$

여기서,  $K_s$ 는 단위점선 길이 당 스프링계수,  $E_s$ 는 주변지반의 변형계수,  $\nu$ 는 포아송비,  $L$ 은 부재 길이,  $R$ 은 라이닝의 등가반경( $R = \sqrt{A/\pi}$ )이다. 지반스프링은 압축력에만 저항 할 수 있도록 지반반력계수를 적용하였으며 풍화토, 풍화암 지반에서의 지반반력계수 산정

결과는 표 3과 같다.

### 3.3 하중계수 및 하중조합

터널의 2차 라이닝의 구조설계에 고려하는 하중은 운영 중 작용여부가 불확실하고 구조물의 안정성 측면에서는 모든 하중이 작용하는 경우보다 일부 하중들이 작용하는 경우가 구조적으로 더 불리할 수 있다. 따라서, 강도 설계법에서 운영 중 고려될 수 있는 다양한 하중들에 대한 다양한 하중조합에 대해 안정성을 확보하도록 하고 있다(허도학, 2008).

하중조합은 콘크리트구조설계기준(2007)을 기준으로 조합하였으며, 표 4와 같다.

표 3. 지반반력계수 산정결과

구 분	변형계수 (MPa)	터널 단면적 (m <sup>2</sup> )	등가환산반경 (m)	포아송비	지반반력계수 (kN/m <sup>3</sup> )
풍화토	60	76	4.9	0.33	9207
풍화암	250	76	4.9	0.30	39246

표 4. 하중조합 (콘크리트구조설계기준, 2007)

구 분	자중(D)	연직이완하중( $P_v$ )	수평이완하중( $P_H$ )	비 고
Comb.1	1.4	1.4	-	강도 검토
Comb.2	1.2	1.4	1.6	
Comb.3	0.9	1.4	1.6	
S. L	1.0	1.0	1.0	사용성 검토

#### 4. 지반이완하중 산정

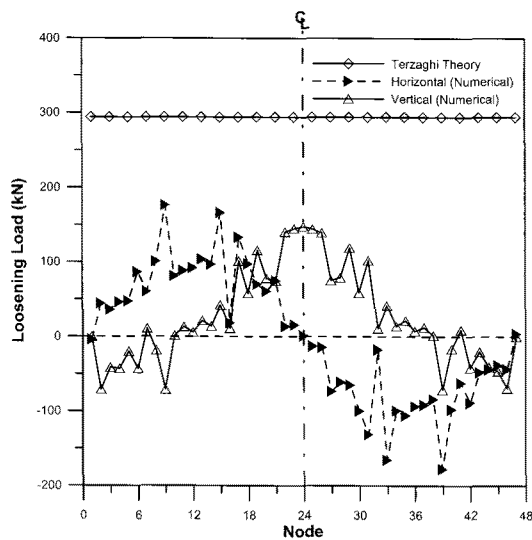
##### 4.1 지반이완하중 비교

터널구조물을 터널 단면방향과 진행방향으로 3차원

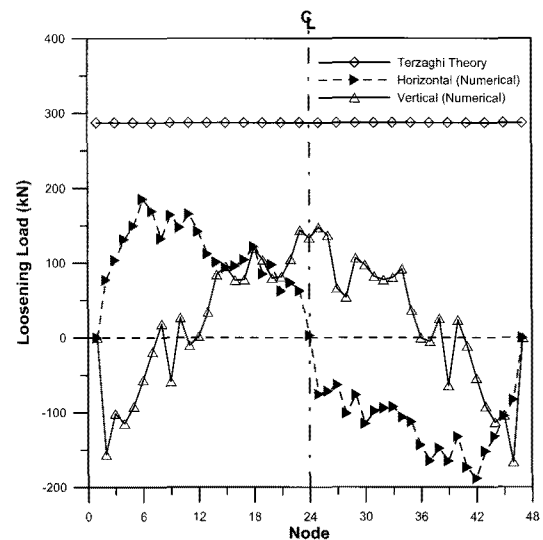
표 5. Terzaghi의 이론식을 이용한 지반이완하중( $kN/m^3$ ) 산정결과

구 분	측압계수( $K_0$ )		
	0.5	1.0	2.0
풍화토	474.86	294.07	155.40
풍화암	481.73	287.20	148.91

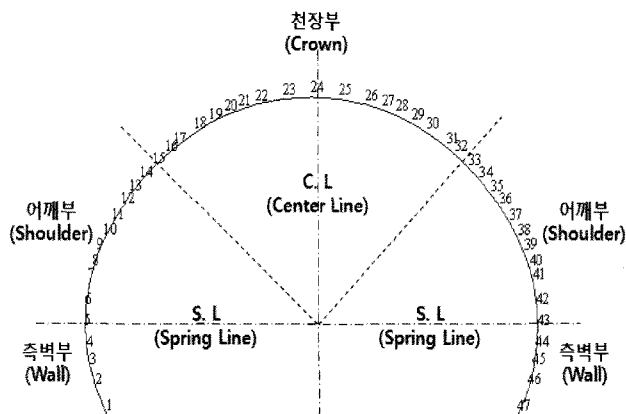
적인 구조임을 감안한다면 설계와 안정성 검토에는 3차원 해석에 의한 실제 현장상황의 재현이 필요하다. 그러나 국내의 NATM 터널설계의 경우, 3차원 해석은 시간적, 경제적인 문제로 실무 적용에 제약을 받게 되므로 2차원 해석에 의한 검토를 실시하고 있는 실정이다(김동욱 등, 2003). 국내 터널설계에 사용하고 있는 하중분담율은 천단변위를 기준으로 산정한 것으로, 터널굴착시 막장진행에 따른 3차원 효과를 반영하는 하중분담율은 수도권 지하철 공사현장에서 토사지반에 일반적으로 적용하는 터널 굴착시 40%, Soft 쏫크리트 타설시



(a) 풍화토

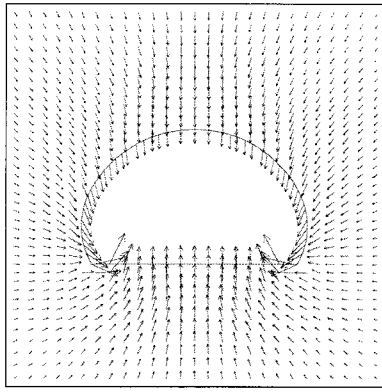


(b) 풍화암



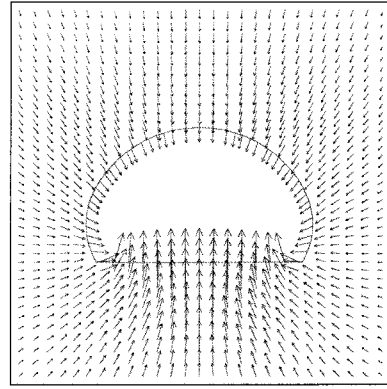
(c) 각 노드의 위치

그림 4. 이론식과 수치해석의 지반이완하중 비교( $K_0=1.0$ )



천단부 최대변위:39.46(cm)

(a) 풍화토



천단부 최대변위:3.173(cm)

(b) 풍화암

그림 5. 지반의 변위벡터 비교( $K_0=1.0$ )

30%, Hard 슛크리트 단계 30%로 적용하였다.

수치해석에 의한 지반이완하중은 터널 라이닝 시공 후 평형상태에 놓여있던 지반이 지보재의 열화로 인하여 불평형 상태로 변화될 때 발생하는 불평형력을 지반 이완하중을 묘사하였다. 이러한 수치해석에 의한 결과와 Terzaghi 이론식을 이용한 지반이완하중 산정결과를 표 5와 같으며, 이론식과 수치해석을 통해 풍화토, 풍화암 지반에서 각각 산정된 이완하중은 그림 4(a)와 (b)에 비교 도시하였다. 각 노드별 위치는 그림 4(c)에 도시하였다.

Terzaghi의 이론식에 의한 지반이완하중은 풍화토, 풍화암 지반에서 큰 차이를 보이지 않았으며 라이닝의 전단면에 등분포로 작용하게 된다. 하지만, 수치해석을 통해 산정된 이완하중은 전반적으로 Terzaghi의 이론식보다 평균 약 30%정도 작게 산정되었으며, 각 위치마다 하중이 다르게 작용하게 된다.

특히, 그림 4에서 수치해석에 의한 이완하중은 수직 방향으로는 천장부에서 풍화암과 풍화토는 큰 차이가 없었지만 어깨부나 측벽부로 갈수록 풍화토가 증가하였고, 수평방향으로는 풍화암이 풍화토보다 크게 발생하였다. 이러한 지반이완하중 작용은 그림 5의 지반의 변위벡터를 보더라도 풍화암이 풍화토보다 수평방향의 변위가 더 크게 발생했음을 관찰할 수 있다.

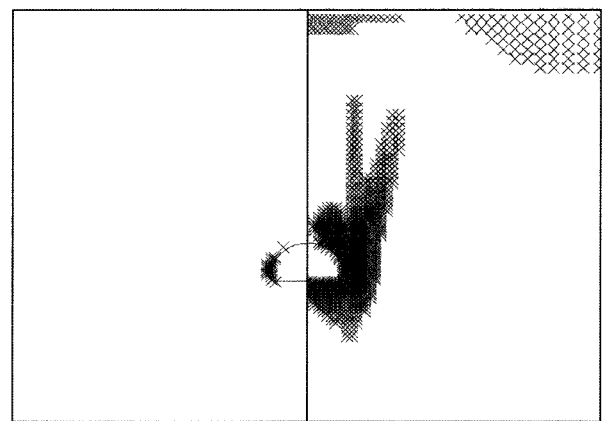
따라서, 이러한 수평방향의 지반이완하중은 축압계수( $K_0$ )가 높은 지반에서 이완하중이 라이닝 단면에 작용하는 효과를 나타내었고, 이는 라이닝의 단면력을 감소시키는 것으로 나타났다. 또한, 터널 천단부에서 발생한 변위에 대해 검토한 결과 풍화토가 풍화암보다 더 크게 발생한 것으로 나타났다.

#### 4.2 소성영역 분포

터널 굴착시 주변 지반의 소성범위는 적절한 지보재 설치 및 지반보강으로 최소화 될 수 있으나, 지보재와 보강지반이 지지력을 상실하는 경우에는 과대변위를 수반하면서 소성범위가 크게 증가할 것으로 예상할 수 있다.

그림 6(a)는 풍화토 지반조건에서 슛크리트와 락볼트 설치 및 천단부 지반보강이 수반된 터널굴착을 묘사한 최종 수치해석결과로서 측벽부에 약간의 소성범위를 보이고 있다. 이때, 지보재 보강지반의 지지력이 상실된 조건을 가정하여 슛크리트와 락볼트 요소를 제거하면, 그림 6(b)와 같이 소성범위가 지표까지 확장되며 수치해석적으로 수렴이 되지 않는 결과를 얻을 수 있다.

이로부터 지보재와 보강지반의 지지력 상실에 의한 지반거동을 묘사할 수 있으며, 지보재와 보강지반이 상



(a) 지보 완료 시

(b) 지보재 제거 시

그림 6. 지보재 유무에 따른 소성영역 분포

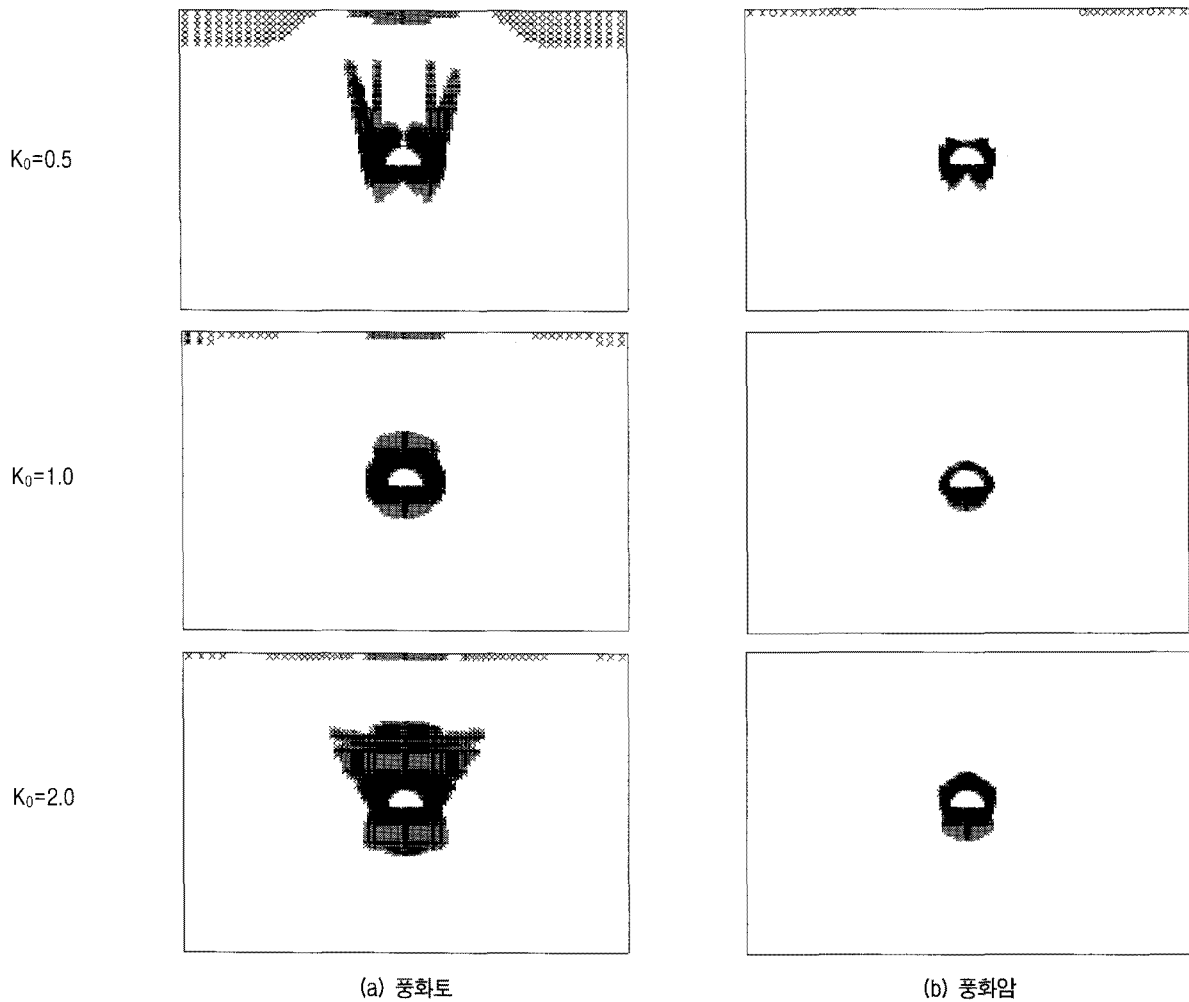


그림 7. 측압계수의 변화에 따른 소성영역 분포

실한 지지력은 2차 라이닝 하중으로 전이된다(장석부 등, 2006).

소성영역은 터널 설계 시 이완하중을 예측 하는데 중요한 역할을 하기 때문에 소성영역의 영향범위를 분석 하였으며, 지반조건과 측압계수( $K_0$ )에 따른 터널 주변 지반의 소성영역 분포를 그림 7에 도시하였다. 풍화토에서의 소성영역 분포는 풍화암보다 그 영향 범위가 넓으며 지표면까지 소성영역이 도달함을 알 수 있다. 또한 측압계수가 1일 때에는 소성영역의 범위가 터널 전반부에 걸쳐 원형으로 고르게 분포함을 알 수 있다.

## 5. 단면력 산정

하중조합에 따른 콘크리트 라이닝에 작용하는 최대 단면력을 산정하여 각각 축력, 전단력, 휨모멘트별로 도시하였다.

### 5.1 축력

풍화토, 풍화암 지반에서 콘크리트 라이닝 단면에 작용하는 축력은 그림 8, 표 6과 같다. 그림 8(a)의 풍화토 지반에서의 축력을 비교해보면 측압계수가 0.5일 경우 Terzaghi이론식에 의하여 산정된 축력은 수치해석 모델보다 2~3배 크게 산정되었다.

또한, 그림 8(b)의 풍화암 지반에서는 측압계수가 증가할수록 Terzaghi이론식은 감소하였으나, 반대로 수치해석 모델은 점차 증가하였다. 특히, 천장부와 측벽부에서 증가경향이 뚜렷하여 측압계수를 2로 적용했을 경우에는, 수치해석 결과가 Terzaghi이론식보다 오히려 더 높은 결과 값을 나타내었다.

### 5.2 전단력

풍화토, 풍화암 지반에서 라이닝 단면에 작용하는 전

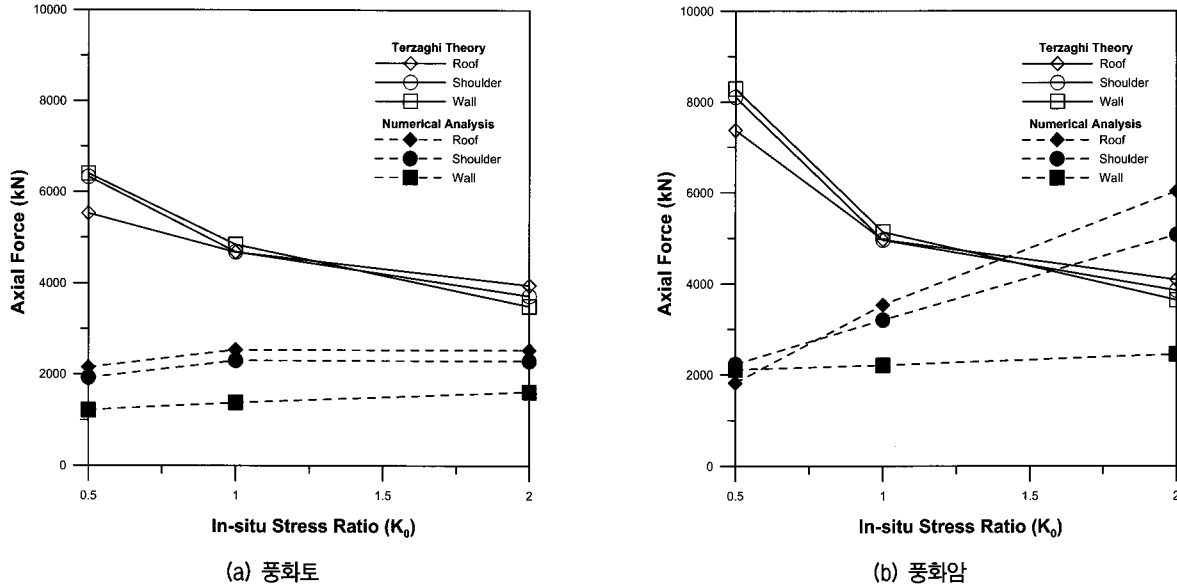


그림 8. 축력 비교결과

표 6. 라이닝 단면에 작용하는 축력(kN)

구 분		Terzaghi 이론식			수치 해석		
		$K_0=0.5$	$K_0=1.0$	$K_0=2.0$	$K_0=0.5$	$K_0=1.0$	$K_0=2.0$
풍화토	천장부	5526.04	4675.85	3955.28	2155.26	2535.49	2531.16
	어깨부	6326.57	4683.62	3724.17	1928.01	2300.23	2292.33
	측벽부	6399.03	4842.84	3497.16	1218.83	1379.50	1617.37
풍화암	천장부	7370.92	4963.65	4088.36	1820.22	3534.73	6031.51
	어깨부	8101.33	4958.82	3853.48	2232.62	3203.61	5076.35
	측벽부	8289.49	5134.21	3642.62	2111.47	2209.80	2450.35

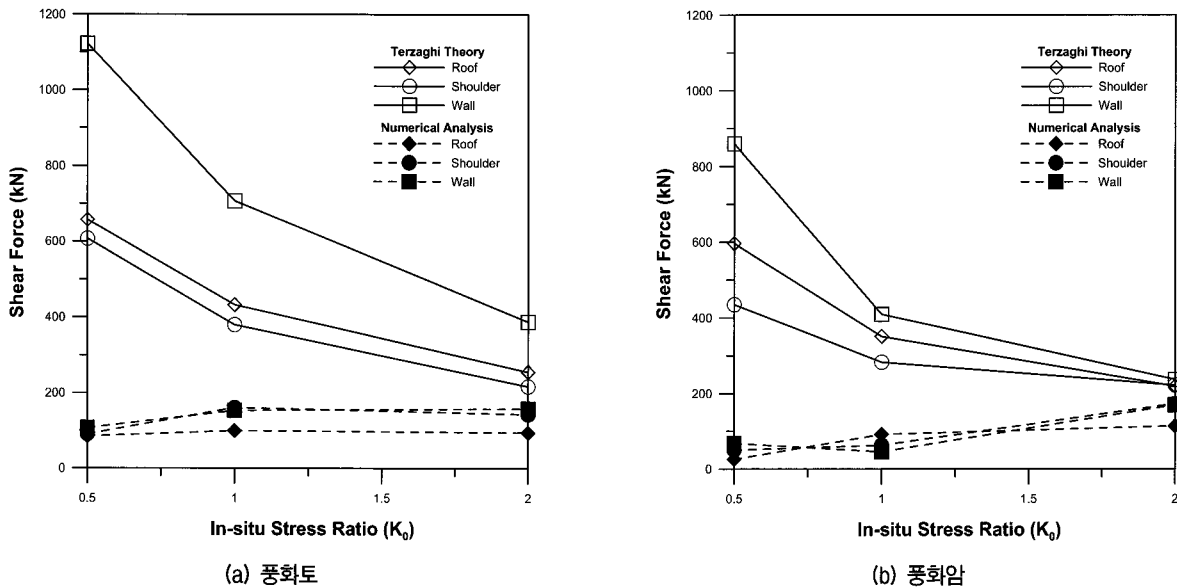


그림 9. 전단력 비교결과

단력은 그림 9, 표 7과 같다. 그림 9(a)의 풍화토 지반에서 전단력을 비교해보면 Terzaghi의 이론식은 축압계수가 증가할수록 급격히 감소하였다. 특히, 측벽부에서는

천장부나 어깨부보다 다소 큰 경향으로 전단력이 감소함을 알 수 있었다.

그림 9(b)의 풍화암 지반에서도 축압계수가 증가할수



표 7. 라이닝 단면에 작용하는 전단력(kN)

구 분		Terzaghi 이론식			수치 해석		
		$K_0=0.5$	$K_0=1.0$	$K_0=2.0$	$K_0=0.5$	$K_0=1.0$	$K_0=2.0$
풍화토	천장부	657.11	432.50	256.10	84.66	98.87	94.09
	어깨부	607.05	379.56	217.36	90.08	160.59	142.91
	측벽부	1122.44	706.69	387.79	106.73	152.59	157.95
풍화암	천장부	596.18	351.09	219.14	25.02	91.15	113.54
	어깨부	434.92	283.34	222.29	49.30	62.38	173.03
	측벽부	859.59	409.13	237.13	66.96	45.12	169.60

록 전단력은 감소하는 경향이었으나, 터널 전단면에서 전단력이 수렴하는 경향을 나타내었다. 즉, 측압계수가 증가할수록 Terzaghi이론식과 수치해석의 결과 차이는 줄어들었으며, 전단면에서 고른 분포를 보였다.

### 5.3 휨모멘트

풍화토, 풍화암 지반에서 라이닝 단면에 작용하는 휨모멘트는 그림 10, 표 8과 같다. 그림 10(a)의 풍화토 지

반에서 휨모멘트를 비교해보면 측압계수가 증가할수록 수치해석 결과는 미소하게 증가하는 반면, Terzaghi의 이론식에서는 측압계수가 초기 0.5에서 2로 변했을 때 1/3로 휨모멘트가 급격히 감소함을 알 수 있었다.

또한, 그림 10(b)의 풍화암 지반에서는 측압계수가 0.5일 경우 풍화토보다 휨모멘트 크기는 절반정도를 나타내었으며, 측압계수가 증가할수록 풍화토보다 그 감소영향이 작았으며 전단면에서 휨모멘트가 수렴하는 경향을 나타내었다.

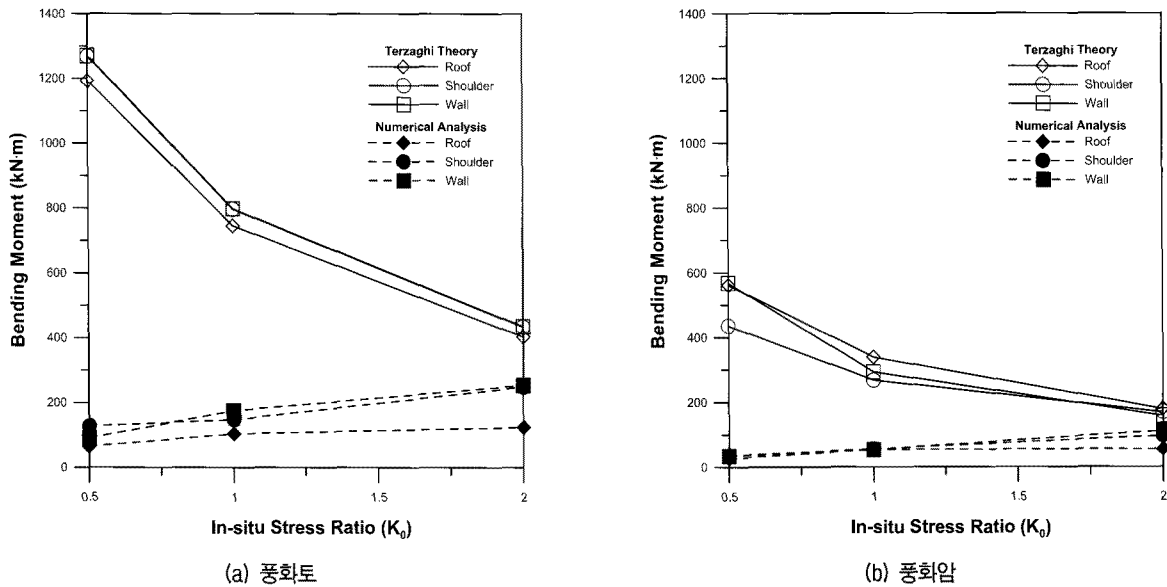


그림 10. 휨모멘트 비교결과

표 8. 라이닝 단면에 작용하는 휨모멘트(kN·m)

구 분		Terzaghi 이론식			수치 해석		
		$K_0=0.5$	$K_0=1.0$	$K_0=2.0$	$K_0=0.5$	$K_0=1.0$	$K_0=2.0$
풍화토	천장부	1192.40	745.47	402.65	64.71	103.91	124.15
	어깨부	1269.10	796.14	433.36	127.73	147.21	248.20
	측벽부	1270.16	797.50	434.96	90.93	175.08	253.24
풍화암	천장부	561.64	338.03	179.07	26.32	53.57	55.50
	어깨부	434.95	267.08	168.86	34.93	54.97	96.82
	측벽부	567.42	292.63	157.63	33.89	53.31	112.32

표 9. Terzaghi의 이론식에 의한 단면력( $K_0=1$ )

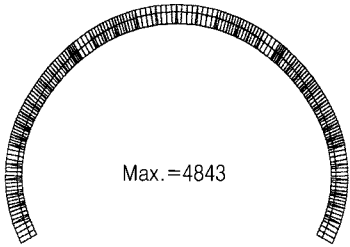
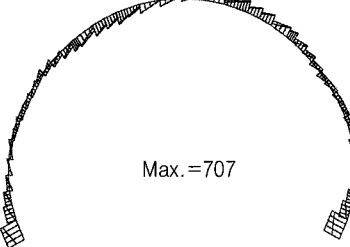
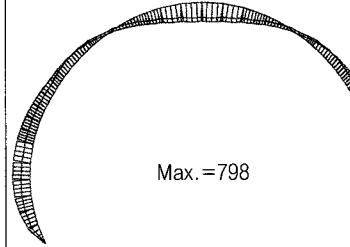
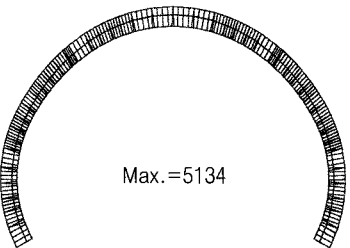
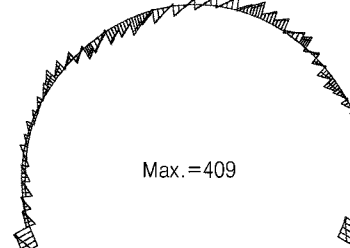
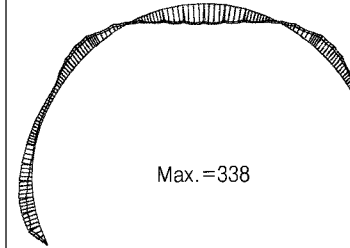
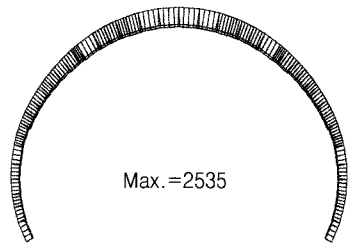
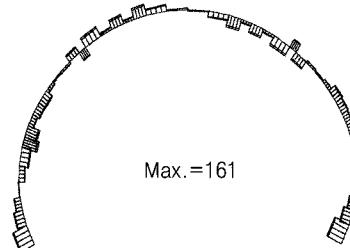
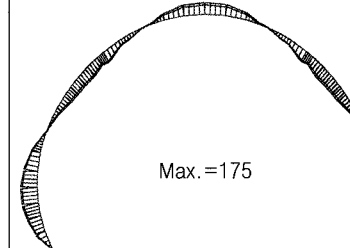
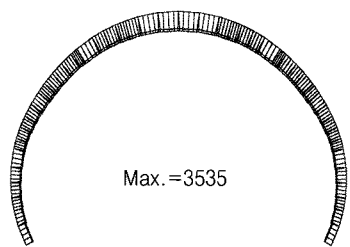
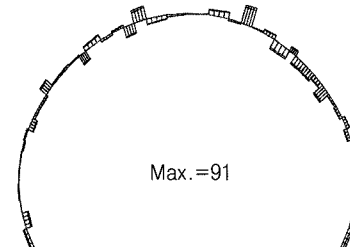
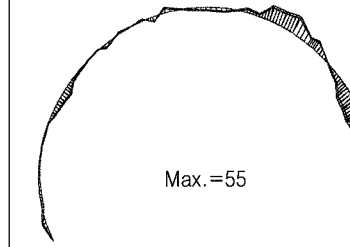
구분	축력(kN)	전단력(kN)	휨모멘트(kN·m)
풍화토	 Max. =4843	 Max. =707	 Max. =798
풍화암	 Max. =5134	 Max. =409	 Max. =338

표 10. 수치해석 방법에 의한 단면력( $K_0=1$ )

구분	축력(kN)	전단력(kN)	휨모멘트(kN·m)
풍화토	 Max. =2535	 Max. =161	 Max. =175
풍화암	 Max. =3535	 Max. =91	 Max. =55

#### 5.4 단면력 분포

콘크리트 라이닝에 걸리는 단면력 검토 결과, 축압계수( $K_0$ )가 1일 경우일 때의 Terzaghi의 이론식과 수치해석에 의한 방법에 따른 최대 단면분포는 표 9, 10과 같다. 풍화토, 풍화암 지반에서 최대 단면력은 수치해석 방법을 적용 시 Terzaghi의 이론식보다 작게 산정되었다.

#### 6. 결론

본 연구에서는 지반이완하중 산정에 일반적으로 사용되는 Terzaghi의 이론식과 수치해석을 이용하여 풍화

암, 풍화토의 각각 다른 지반조건에서 다양한 축압계수의 변화를 주면서 콘크리트 라이닝에 작용하는 단면력을 산정하여 각각을 비교 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 라이닝-지반-1차 지보재의 상호작용을 고려하여 산정된 지반이완하중은 Terzaghi의 이론식에 비해 천장부 기준 약 30%정도 작게 산정되었으며, 단면 위치에 따라 작용하는 하중의 크기가 일괄적이지 않기 때문에 기존의 설계방법에 비해 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

- (2) 터널 주변 지반의 소성영역은 풍화도가 풍화암보다 넓은 분포를 나타내었고 축압계수에 따라 소성영역 분포가 확연히 달라지기 때문에 터널 설계를 위한 이완하중 산정 시 주요한 설계 인자는 지반조건(상태)과 축압계수임을 확인하였다.
- (3) 터널 라이닝의 단면력 산정 결과, 축압계수가 증가함에 따라 Terzaghi의 이론 방법이 단면력이 크게 감소하여 수치해석 방법의 결과와 유사해짐을 알 수 있었고, 수치해석 방법은 축압계수에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원이 주관하고 (주)유신이 공동연구하며 연세대학교에서 위탁시행하는 철도터널 라이닝 설계 합리화 방안 연구(과제번호:2011-8-0055)에 의하여 연구비가 지원된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2007), 콘크리트구조설계기준.
2. 국토해양부 (2010), 도로설계편람 제6편 터널.
3. 김동욱, 정상국, 유오식, 이송 (2003), 지반의 소성을 고려한 하중 분담율 연구, 한국철도학회 2003년도 추계학술대회논문집(II), pp.3-607.
4. 김선홍, 문연오, 김기림, 정원준, 김찬동 (2011), 기술동향 분석을 통한 철도터널 설계 개선방안 고찰, 유신기술회보, 제 17호, pp. 54-65.
5. 김시격, 박성식 (2009), 콘크리트 라이닝의 설계방법 및 최근 해석 기법, 터널기술학회지, 제 11권, 제 4호, pp.14-24.
6. 서성호, 장석부, 이상덕 (2002), 지반-1차라이닝-2차라이닝의 상호작용을 고려한 터널 2차라이닝 해석모델, 한국암반공학학회 터널과 지하공간, 제 12권, 제 2호, pp.107-114.
7. 유광호, 정지성, 임영수, 박연준 (2008), 축압계수에 따른 슛크리트의 거동의 수치해석적 검증, 한국암반공학학회 국제학술대회 논문집, pp.365-376.
8. 장석부, 이수열, 서영호, 윤기향, 박연준, 김수만 (2010), GLI (Ground-Lining Interaction)모델을 이용한 터널콘크리트라이닝의 현장 설계변경 사례에 대한 연구, 한국암반공학학회지, 제 20권, 제 1호, pp.58-64.
9. 장석부, 허도학, 문현구 (2006), 지반-라이닝 상호작용 모델을 이용한 터널 2차라이닝 설계에 관한 연구, 한국터널공학학회 학술논문집, 제 8권, 제 4호, pp.365-375.
10. 천병식, 신영완 (2001), NATM 터널 콘크리트 라이닝 설계하중에 관한 연구, 한국암반공학학회지, 제 11권, 제 2호, pp.96-108.
11. 허도학, 장석부, 문현구 (2008), 지반-라이닝 상호작용모델을 이용한 터널 2차라이닝 설계에 대한 연구, 한국시스템공학학회지, 제 45권, 제 4호, pp.370-380.

(접수일자 2011. 5. 20, 심사완료일 2011. 7. 14)