

# 계측 데이터 역해석을 통한 쉴드 TBM 터널 세그먼트의 작용하중 평가

이규필<sup>1\*</sup> · 장수호<sup>2</sup> · 배규진<sup>2</sup> · 최순욱<sup>3</sup> · 안창윤<sup>4</sup>

<sup>1</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 수석연구원  
<sup>2</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 선임연구위원  
<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 전임연구원  
<sup>4</sup>정회원, 현대산업개발 토목설계팀 과장

## Evaluation of shield TBM segment acting load through monitoring data back analysis

Gyu-Phil Lee<sup>1\*</sup> · Soo-Ho Chang<sup>2</sup> · Gyu-Jin Bae<sup>2</sup> · Soon-Wook Choi<sup>3</sup> · Chang-Yoon Ahn<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Senior Researcher, KICT Geotechnical Engineering Research Institute  
<sup>2</sup>Senior Research Fellow, KICT Geotechnical Engineering Research Institute  
<sup>3</sup>Researcher, KICT Geotechnical Engineering Research Institute  
<sup>4</sup>Manager, HDC Civil Engineering Team

\*Corresponding Author : Gyu-Phil Lee, freely@kict.re.kr

### Abstract

To design segment lining, loads such as self weight, vertical load, horizontal load, ground reaction, water pressure, backfill grouting pressure et al. have to be considered. Earth pressure and water pressure are the major factor to design segment lining such as concrete strength, segment thickness and amount of rebar et al.

To analysis earth pressure and water pressure acting on segment lining, filed monitoring and back analysis are performed in this study.

**Keywords:** Segment lining, Field monitoring, Earth pressure, Back analysis

### 초 록

세그먼트 라이닝 설계시 고려하는 하중은 자중, 연직하중, 수평하중, 지반반력, 수압, 뒤 채움 주입압, 부력 등이 있으며, 이 가운데 토압과 수압은 세그먼트 라이닝 설계시 콘크리트 강도, 세그먼트 라이닝의 두께 및 철근량 등을 결정하는데 가장 큰 영향을 미치는 주요 인자이다.

따라서 본 연구에서는 쉴드터널 시공단계별 계측결과를 토대로 세그먼트 라이닝에 발생하는 힘모멘트 계산하였으며, 이를 역해석 결과와 비교분석을 통하여 세그먼트 라이닝에 작용하는 토압 등을 분석하였다.

**주요어:** 세그먼트 라이닝, 현장계측, 토압, 역해석

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association  
19(6)905-913(2017)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.6.905>

eISSN: 2287-4747  
pISSN: 2233-8292

Received September 19, 2017

Revised October 11, 2017

Accepted October 20, 2017



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 © 2017, Korean Tunnelling and Underground Space Association

[www.kci.go.kr](http://www.kci.go.kr)

## 1. 서론

셸드터널 세그먼트 라이닝은 재질에 따라 RC 세그먼트와 강재 세그먼트 등으로 구분된다. 이 가운데 RC 세그먼트는 공장이나 현장에서 미리 제작된 프리캐스트(precaster) 세그먼트를 조립하여 설치되는 터널 라이닝으로서, 셸드터널에서 필수적으로 사용되는 구조체이다. 특히, 셸드터널 세그먼트는 셸드 TBM의 추진을 위한 반력지지 구조물로서의 역할과 공사 중의 안정성 확보는 물론이고 영구적인 터널 라이닝의 역할도 하게 된다(Lee et al., 2012).

이러한 셸드터널 세그먼트 라이닝은 횡방향의 평면 구조물로서 단면 설계를 수행하는 것이 일반적이며, 국내 설계의 경우에도 구조해석은 구간을 대표하는 지층을 대상으로 하거나, 지반조건이 불량한 구간, 토피가 가장 낮은 구간, 수압이 가장 높은 구간, 상재하중이 가장 큰 구간 등과 같이 설계상 취약한 특징이 있는 구간을 대상으로 횡방향 단면설계를 수행하고 있다(Kim et al., 2017).

세그먼트 라이닝 설계시 고려하는 하중은 자중, 연직하중, 수평하중, 지반반력, 수압, 뒤채움 주입압, 부력 등이 있으며, 이 하중들은 연직방향 하중, 수평방향 하중, 반력의 형태로 모델링 된다. 이외에도 시공중의 추력 및 시공시 하중, 완공후의 내부 시설물 자중(제트팬 및 기타시설물 등) 및 지반침하영향 등을 고려하여야 한다(Lee and Moon, 2016).

이 가운데 토압과 수압은 세그먼트 라이닝 설계시 고려해야 하는 하중 가운데 콘크리트 강도, 세그먼트 라이닝의 두께 및 철근량 등을 결정하는데 가장 큰 영향을 미치는 주요 인자이다.

따라서 본 연구에서는 세그먼트 라이닝에 작용하는 토압 및 수압을 분석하기 위하여, 세그먼트 라이닝 제작단계에서 철근에 변형율계(strain gauge)를 설치하였다. 셸드터널 시공단계별 계측결과를 토대로 세그먼트 라이닝에 발생하는 휨모멘트를 계산하였으며, 이를 역해석 결과와 비교분석을 통하여 세그먼트 라이닝에 작용하는 토압 등을 분석하였다.

## 2. 문헌고찰

ITA working group (2000)에서는 세그먼트 라이닝에 작용하는 토압 및 수압에 대하여 다음과 같이 제시하고 있다. 세그먼트 라이닝에 작용하는 수압은 정수압으로 하며, 토압은 라이닝 원주방향 또는 연직/수평방향 토압을 적용한다. 연직토압은 등분포 하중으로 고려하며 심도가 낮은 터널의 경우는 전토피고를 고려하여 연직토압을 산정하고, 깊은 심도의 터널의 경우에는 Terzaghi's formula 등에 의해 산정된 토압을 적용한다. 또한 수평토압은 등분포 하중 등으로 산정한다.

그러나 전 토피고를 고려하는 심도가 낮은 터널과 Terzaghi's formula를 적용하여 연직토압을 산정하는 깊은 터널에 대하여 명확한 기준은 제시되어 있지 않다.

Ove Arup & Partners (2012)에서는 연약지반에 시공하는 터널은 전 토피하중을 고려하나, 토피고에 따라 과다설계가 될 수 있다. 토피고  $3D_0$  ( $D_0$ : 세그먼트 라이닝 외경)이하인 토피고가 낮은 터널은 전 토피하중을 고려하고,

그 이상의 토피고에서는 Terzaghi's formula 등에 의해 산정된 토압하고 있다. 이 경우 현장지반조건은 조밀한 모래지반 또는 과압밀 점토 지반에 국한하여 Terzaghi's formula 등에 의해 산정된 토압을 적용한다고 명기하였다.

일본 터널표준시방서 쉘드공법·동해설(2006)에서는 토피고가  $1D_0$  이하인 경우에는 soil-arching 효과를 기대할 수 없기 때문에 일반적으로 전 토압을 적용하며, 사질토에서는 토피  $1\sim 2D_0$ , 점성토에서는 단단한 점성토 지반 ( $N \geq 8$ )의 조건에서 토피고가 토피  $1\sim 2D_0$  이상인 경우 이완토압을 적용하는 경우가 많다고 기술하고 있다.

### 3. 세그먼트 라이닝 현장계측

#### 3.1 계측현장 개요

##### 3.1.1 지반조건

본 연구에서 현장계측을 수행한 지반조건은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 지표면에서 쉘드터널 천단부까지의 토피고는 약 19 m로 매립층과 점토층으로 구성되어 있으며, 지하수위는 G.L. -8 m이다. 현장계측 대상 쉘드터널은 퇴적모래층을 관통하여 시공되었으며 쉘드터널 하부는 풍화토로 구성되어 있다. 세그먼트 라이닝 설계시 적용한 각 지층별 지반정수는 Table 1과 같다.

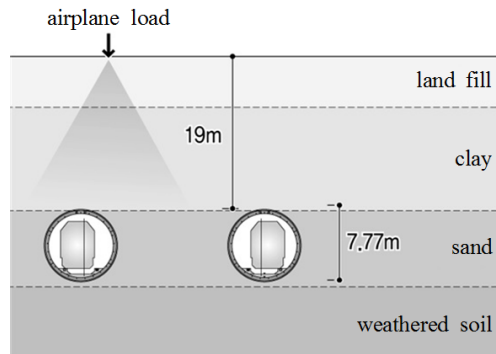


Fig. 1. Ground condition

Table 1. Soil property

	Unit weight (kn/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kpa)	Angle of internal friction (°)
Landfill	20.0	0	29
Clay	18.5	45	0
Sand	19.0	0	27

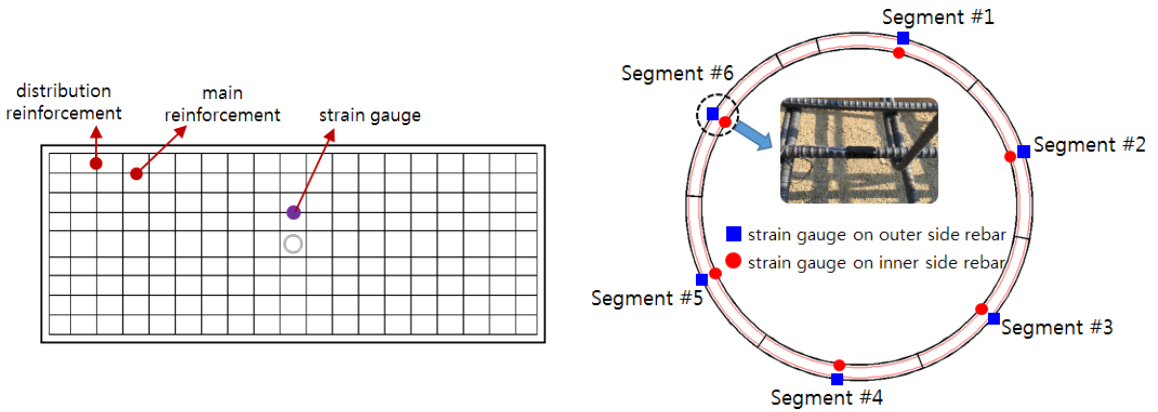
##### 3.1.2 세그먼트 제원

쉘드터널 시공에 적용된 세그먼트 제원은 Table 2에서 보는 바와 같이 외경 7,770 mm, 내경 7,070 mm, 두께

350 mm, 길이 1,500 mm이며, 콘크리트 강도 45 MPa, 철근 강도 400 MPa로 설계되었다. 세그먼트 1개 링은 4개의 A-type 세그먼트, 2개의 B-type 세그먼트 및 1개의 key 세그먼트로 구성되어 있다.

**Table 2.** Segment specification

Classification	Specification	Note
Uniaxial strength of concrete	45 MPa	
Yield strength of rebar	400 MPa	
Outer diameter	7,700 mm	
Inner diameter	7,070 mm	
Thickness	350 mm	
Width	1,500 mm	



**Fig. 2.** Installation of strain gauge



**Fig. 3.** Data logger

### 3.2 계측기 설치

본 연구에서는 현장계측을 통한 프리캐스트 세그먼트의 역학적 거동분석을 위하여, Fig. 2에서 보는 바와 같이 세그먼트 제작 시 철근에 스트레인 게이지 부착 완료 후 게이지가 부착된 세그먼트 조립 시공 후 현장계측을 수행하였다. 스트레인 게이지는 A-type, B-type 세그먼트 중앙부 상·하 주철근에 부착하였다.

데이터 획득을 위하여 그림 3에서 보는 바와 같이 자동계측설비를 현장에 설치하였으며, 계측 종료시까지 10분 간격으로 자동계측을 수행하였다(Fig. 3).

### 3.3 계측결과 및 분석

2 ring-beam 모델을 이용한 설계 검토시 세그먼트 라이닝에 발생하는 휨 모멘트는 일반적으로 Fig. 4와 같이 천장부와 인버트부에 정모멘트가, 좌우 측벽부에서는 부모멘트가 발생하며, 토압 및 수압 등 하중은 세그먼트의 휨모멘트 및 원형구조물인 실드터널 구조물형상 특성에 의하여 축력으로 지지하게 된다.

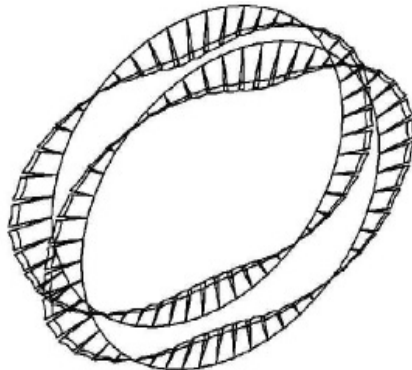


Fig. 4. Bending moment diagram

본 연구에서는 현장계측을 통하여 세그먼트 라이닝에 발생하는 휨모멘트 산정 후 역해석을 통하여 세그먼트 라이닝에 작용하는 하중을 분석하기 위하여 세그먼트 제작 시 철근망에 변형율계를 설치 현장계측을 수행하였으며, 각 계측지점별 계측결과는 Fig. 5~9와 같다. 6번 세그먼트의 계측결과는 공사 중 계측기 연결선 망실로 인하여 계측이 수행되지 않았다.

계측결과 변형율계가 설치된 세그먼트 라이닝 시공 후 약 90m 굴진 시(약 250시간)까지는 지반굴착 후 발생하는 지반내 응력 재분배 등의 효과로 계측결과가 변화하는 것으로 나타났다.

이후 철근에 발생하는 변형율은 일정한 값으로 수렴하는 것으로 나타났으며, 계측종료시점에서는 변형율계가 설치된 모든 주철근에서 압축 변형율이 계측되었다.

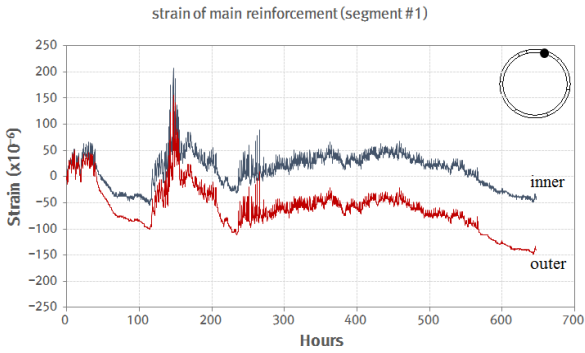


Fig. 5. Monitoring result of segment No. 1

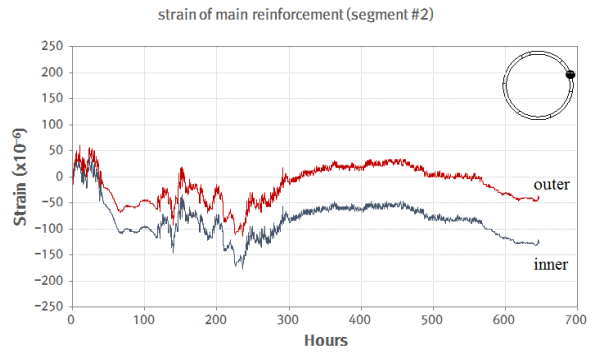


Fig. 6. Monitoring result of segment No. 2

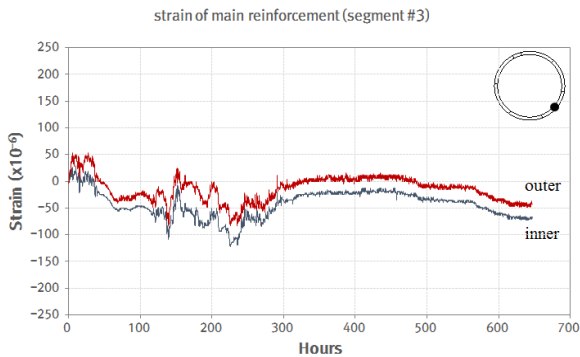


Fig. 7. Monitoring result of segment No. 3

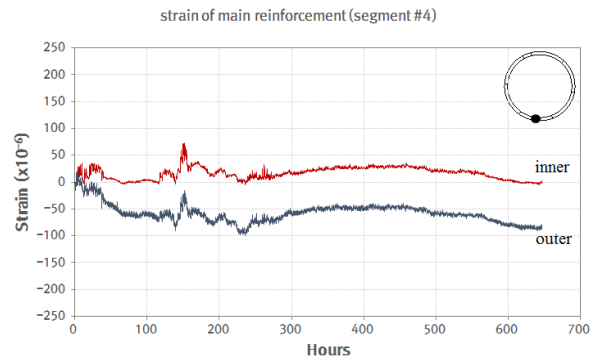


Fig. 8. Monitoring result of segment No. 4

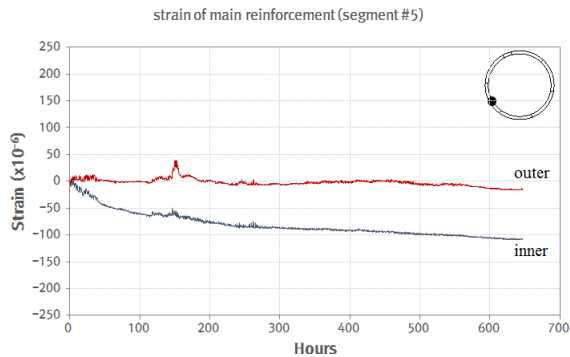


Fig. 9. Monitoring result of segment No. 5

따라서 세그먼트 라이닝은 휨모멘트에 의한 인장지배단면으로 거동하지 않고, 압축지배단면으로 거동하는 것으로 판단된다.

현장계측결과 최대 변형율은 1번 세그먼트에서 약  $207 \times 10^{-6}$ 의 인장 변형율이 계측되었다.

계측된 변형율로 철근콘크리트 구조물의 이론적 해석을 통하여 계측지점에 발생하는 휨모멘트를 산정할 수 있다.

최대 압축 변형율이 발생한 1번 세그먼트 외측에 배근된 철근의 변형율은 0.000155로 압축측에 설치된 철근이 항복하지 않는 조건에 해당된다. 따라서 콘크리트가 최대변형률 0.003에 도달하기 전에 인장철근은 항복하게 되고, 압축철근의 변형율은 파괴시 극한변형율에 도달하지 않는다. 이 경우 세그먼트 부재의 압축측에 설치된 철근은 무시하고 인장측 철근만을 고려한 단철근으로 해석할 수 있다(Lee et al., 2010).

따라서 1번 세그먼트 인장측 철근에 발생한 최대 변형율( $207 \times 10^{-6}$ ) 및 세그먼트 제원을 토대로 세그먼트 라이닝에 발생하는 최대 휨모멘트는 480.5 kN-m 인 것으로 나타났다.

## 4. 현장조건을 고려한 수치해석

### 4.1 해석조건

본 연구에서는 2 ring-beam 모델을 이용하여 세그먼트 라이닝 발생하는 휨모멘트를 계산하였다.

수치해석 시 지반스프링상수는 세그먼트 주변지반과 뒤채움 그라우트의 2층지반을 고려한 Muirwood의 식 사용을 적용하였으며(식 (1)), 회전스프링상수 및 전단스프링상수는 일본 토목구조물 설계표준·동해설 식을 적용하였다(식 (2) 및 식 (3)).

$$\text{지반스프링상수 } k_r = \frac{3E_0}{(1 + \nu)(5 - 6\nu)R_c} \quad (1)$$

$$\text{회전스프링상수 } k_m = \frac{M}{\theta} = \frac{x(3h - 2x)bE_c}{24} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{전단스프링상수} \quad & \text{반경방향: } k_{sr} = \frac{192EI}{(2b)^3} \\ & \text{접선방향: } k_{st} = \frac{L_j h E}{b(1 + \nu)} \end{aligned} \quad (3)$$

수치해석에 적용한 지반스프링상수, 회전스프링상수 및 전단스프링상수는 Table 3과 같다.

**Table 3.** Spring constant to numerical analysis

Classification	Input data	Note
Subgrade spring constant	2,927 kN/m	
Rotary spring constant	244,234.38 kN · m/θ	
Shear spring constant	Circumference 378,794 kN/joint	
	Radial 2,898,933 kN/joint	

## 4.2 하중조건

세그먼트 라이닝에 작용하는 연직토압은 전토피( $2.5D_0$ ,  $D_0$ : 세그먼트 라이닝 외경) 하중으로 고려하였으며, 수평토압은 정지토압계수를 적용하였다. 수치해석 시 적용한 하중조건은 Fig. 10과 같다.

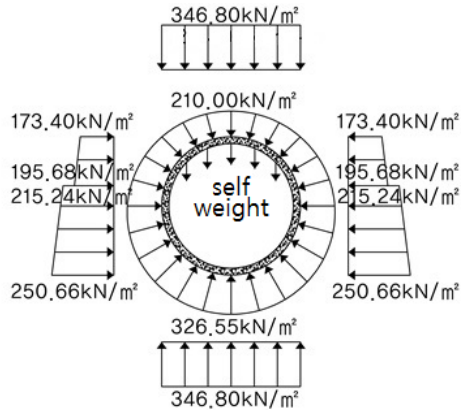


Fig. 10. Load condition to numerical analysis

## 4.3 해석결과 및 분석

세그먼트 라이닝 설계시에는 일반적으로 고정하중, 연직토압, 수평토압, 연직방향 수압, 수평방향 수압, 활하중 등과 같은 작용하는 하중에 따라 하중계수를 고려한 하중조합 조건에 대한 검토를 수행하나, 본 연구에서는 모든 하중계수가 1.0인 사용하중 조건에 대하여 검토하였다.

수치해석결과 상기 해석조건 및 작용하중에 대한 사용하중 조건에서 세그먼트 라이닝에 발생하는 최대 휨모멘트는 446.3 kN-m로 현장계측에 의해 계산된 최대 휨모멘트 480.5 kN-m 보다 약 7% 오차로 매우 유사한 결과를 도출하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 세그먼트 라이닝에 작용하는 토압 및 수압을 분석하기 위하여 현장계측을 수행하였다. 또한 계측결과를 토대로 세그먼트 라이닝에 발생하는 휨모멘트 계산 및 현장조건 등을 고려한 역해석 결과와 비교분석을 통하여 세그먼트 라이닝에 작용하는 토압 등을 분석하였다.

1. 천단부 토피고 19 m를 고려한 전토피 하중과 정수압조건을 고려한 수치해석결과(load factor = 1) 세그먼트 라이닝에 발생하는 최대 휨모멘트는 세그먼트 라이닝 제작 시 설치한 변형울계 현장계측결과를 토대로 산정된 휨모멘트는 약 7% 오차위로 매우 유사한 결과를 도출하였다.



2. 따라서 모래 및 점토지반으로 구성되어 있는 지반조건 및 토피고가  $2.5D_0$  이하인 경우, 세그먼트 라이닝 설계 시 토압 및 수압은 전토피 하중 및 정수압 조건을 고려하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.
3. 현장계측결과 세그먼트 라이닝 시공 후 약 90 m 굴진 시(약 250시간)까지 계측결과가 변화하였으며, 이후 철근에 발생하는 변형율은 일정한 값으로 수렴하는 것으로 나타났다. 따라서 모래 및 점토지반에서는 약  $12D_0$  ( $D_0$ : 세그먼트 라이닝 외경) 쉴드 TBM 굴진 시까지 back fill grouting 및 응력 재분배 등의 영향을 받는 것으로 판단된다.
4. 세그먼트 라이닝은 원형단면의 특성상 축력이 지배적이어서 압축부재로 거동하나, 모래 및 점토층에 시공되는 세그먼트 라이닝은 휨모멘트가 크게 발생할 수 있으며 이 경우 인장부재로 거동하는 것으로 알려져 있다. 계측 대상 쉴드터널은 모래층을 관통하고 상부에 점토층이 분포하고 있으므로, 세그먼트 라이닝은 인장부재로 거동할 것으로 예상되었다. 그러나 현장계측결과 계측종료시점에서는 변형율계가 설치된 모든 주철근에서 압축 변형율이 계측됐으며, 해당 현장의 세그먼트 라이닝은 인장부재가 아니라 압축부재로 거동하는 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## References

1. International Tunnelling Association Working Group 2 (2000), “Guidelines for the design of shield tunnel lining”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 307-311.
2. Japan Society of Civil Engineers (2006), “Standard specifications for tunneling -2006: Shield Tunnels”, pp. 39-55.
3. Kim, H., Kim, H., Shin, K., Ahn, S. (2017), “A Study on the factors influencing the segment lining design solved by beam-spring model in the shield tunnel”, Journal of the Korean Tunnelling and Underground Association, Vol. 19, No. 2, pp. 179-194.
4. Lee, G.-P., Hwang, J.-H., Shin, H.-S., Hong, S.-K. (2010), “Mechanical behaviour of waterway culvert structure assembled by precast segments”, Journal of the Korean Tunnelling and Underground Association, Vol. 12, No. 2, pp. 193-200.
5. Lee, G.P., Park, Y.T., Choi, S.W., Bae, G.J., Chang, S.H., Kang, T.S., Lee, J.S. (2012), “An experimental study on mechanical behavior of shield segment with high-strength concrete and high-tension rebar”, Journal of the Korean Tunnelling and Underground Association, Vol. 14, No. 3, pp. 215-230.
6. Lee, H.-S., Moon, H.-K. (2016), “Numerical study on the connection type of inner-slab in double deck tunnel”, Journal of the Korean Tunnelling and Underground Association, Vol. 18, No. 5, pp. 441-451.
7. Ove Arup & Partners Ltd (2012), “Steel fibre reinforced precast concrete segmental tunnel lining design-desk study report”, pp. 12-13.