

복층터널 안정성 분석을 위한 빔-스프링 모델 개발

이상현¹ · 안준상² · 강경남³ · 김병찬⁴ · 송기일^{5*}

¹비회원, 인하대학교 토목공학과 석사후연구원

²비회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정

³비회원, 인하대학교 토목공학과 석사과정

⁴정회원, (주)베이스소프트 건설IT연구소 연구소장

⁵정회원, 인하대학교 토목공학과 부교수

Development of beam-spring model to analyse the stability of double-deck tunnel

Sang-Hyun Lee¹ · Joon-Sang An² · Kyung-Nam Kang³ · Byung-Chan Kim⁴ · Ki-Il Song^{5*}

¹Korea, INHA University, Postmaster researcher, Dept. of Civil Engineering

²Korea, INHA University, Graduate student, Dept. of Civil Engineering

³Korea, INHA University, Graduate student, Dept. of Civil Engineering

⁴Korea, BasisSoft, Inc, Chief Engineer, Construction IT Laboratory

⁵Korea, INHA University, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering

*Corresponding Author : Ki-Il Song, ksong@inha.ac.kr

Abstract

In this study, as an initial study for development of stability analysis program of a double-deck tunnel during life cycle, a structural analysis solver based beam-spring model for the double-deck tunnel is constructed. Effect of parameters (slab supporting type, depth of the tunnel and ground elastic modulus) is analyzed with the beam-spring model. The model is also compared and verified by commercial structural analysis program. It is considered that the slab supporting type affects the integrated behavior with segment lining and influence of intermediate slab on the stability of the tunnel decreases as the tunnel depth increases. The relationship between the ground elastic modulus and the effect of the intermediate slab on the segment lining needs further investigation.

Keywords: Double-Deck Tunnel, Transversal Tunnel Section, Beam-Spring Model, Intermediate Slab, Slab Supporting Type

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
19(2)301-317(2017)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.2.301>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received March 17, 2017

Revised March 24, 2017

Accepted March 27, 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

초 록

본 연구는 복층터널 생애전주기 안정성 평가 프로그램 개발을 위한 초기 연구로서, 복층터널 안전성 분석을 위한 빔-스프링 모델 기반의 구조해석 솔버를 개발하였다. 구축된 복층터널의 빔-스프링 모델을 사용하여 중간슬래브 지지방식, 터널심도 및 지반탄성계수가 복층터널의 안정성에 미치는 영향에 대하여 분석하였으며, 상용 구조해석 프로그램과 비교검토를 수행하였다. 중간슬래브의 지지방식은 세그먼트 라이닝과 일체화 거동에 영향을 미치고, 터널심도가 깊어질수록 중간슬래브가 복층터널의 안정성에 미치는 영향력이 상대적으로 작아지는 것으로 판단된다. 지반탄성계수와 중간슬래브가 세그먼트 라이닝 부재력 분포에 미치는 영향의 관계는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

주요어: 복층터널, 횡단방향 터널, 빔-스프링 모델, 중간슬래브, 슬래브 양단지지방식

1. 서론

현재까지는 산악지형을 관통하거나, 도심지 지하에 건설하는 터널이 일반적이었다면, 최근에는 해저터널, 복층터널, 다목적터널 등 다양한 형태의 터널 설계 및 시공 방법에 대한 연구가 진행 중이다. 다양한 터널 중에 최근 활발한 연구가 진행 중인 복층터널은 단일 터널만으로 상, 하행 왕복차로를 구축할 수 있어, 공간 효율성 측면에 뛰어난 장점을 가지고 있다. 이러한 공간 효율성은 복층터널 내부에 위치하는 중간슬래브(intermediate slab)에 의해 확보되고, 복층터널의 구조적인 안정성을 확보하기 위해서는 이에 대한 영향을 검토해야 한다.

복층터널의 주요 인자 중에 하나인 중간슬래브의 거동을 분석하기 위한 다양한 연구가 진행되었다. Kim and Kim (2012)는 슬래브의 형상 및 지지방식을 조사하였고, 구조해석을 통하여 슬래브 두께 및 하부공간 활용이 가능한 유효 단면적을 산정하였다. Park et al. (2016)은 중간슬래브에 설치되는 비상대피로에 의해서 발생하는 응력집중현상에 대하여 수치해석을 수행하였다. 비상대피로에 의하여 내민보 형태로 변환된 중간슬래브에 응력집중현상이 발생하고, 이에 대한 보강 방안의 필요성을 제안하였다. Lee and Moon (2016a; 2016b)은 복층터널의 내부슬래브 설치가 세그먼트 라이닝 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 내부슬래브의 설치 유무, 연결형식 및 축압계수(K_0)를 변수로 하여 부재력 검토를 수행하였고, 내부슬래브가 터널 세그먼트 라이닝에 미치는 영향이 크다고 제안하였다.

터널의 안정성을 평가하기 위해서는 응력-변형률에 대한 검토가 필요하다. ITA (2000)는 터널 세그먼트 구조물의 외부 하중에 대한 거동을 분석하는 방법을 해석적 모델(analytical model)과 수치해석적 모델(numerical model)로 구분하였다. 단면형태 및 지반조건 등의 제약이 있는 해석적 방법과 달리 수치해석적 방법은 형태, 지반조건뿐만 아니라 세그먼트 라이닝의 조인트 등과 같은 복잡한 구조적 특징을 반영할 수 있다(Ahmet, 2010). 다양한 수치해석적 방법 중 빔-스프링 (beam-spring) 방법은 보 요소와 스프링 요소를 사용해서 터널 구조물과 지반을 표현하고, 이에 대한 터널 안정성을 분석할 수 있는 해석방법이다. 해석을 위한 구조물의 강성행렬 구성이 상대적으로 쉽기 때문에 다양한 연구에 사용되었다. Klar et al. (2008)은 터널 굴착과 파이프라인이 지반침하에 미

치는 영향 분석을 위해서 빔-스프링 모델을 적용하였고, 파이프라인 조인트에서 발생하는 강성 저하 및 지반과의 상호작용을 모델링하여 수치해석에 반영하였다. Lee et al. (2015)은 하중조건 및 조합에 따른 부재력 크기 등을 비교하여 세그먼트 라이닝 설계에 대한 합리적인 설계개념을 제안 및 이론적인 방법과 빔-스프링 모델을 비교하여 연구를 수행하였다. Nikkhah et al. (2016)은 빔-스프링 모델에서 세그먼트 연결부 배치와 연결부에서의 회전 스프링 강성이 해석결과에 미치는 영향에 대하여 해석 및 부재력 해석을 수행하였다.

본 연구는 설계, 시공 및 운영단계를 포함한 생애전주기(life cycle)에 대한 복층터널 안정성 평가 프로그램 개발을 위한 초기 연구로서, 구조해석 솔버(solver) 구축에 대한 내용이다. 복층터널 중간슬래브의 지지방식에 따른 세그먼트 라이닝의 거동을 분석하였고, Excel VBA 프로그램을 사용하여 빔-스프링 모델을 구축하였다. 중간슬래브 지지방식, 복층터널 심도 및 지반탄성계수 파라미터 변화가 터널 세그먼트 라이닝 부재력 분포에 미치는 영향을 분석하였고, Midas civil 2012+ 프로그램을 사용하여 구축된 모델을 비교검토하였다.

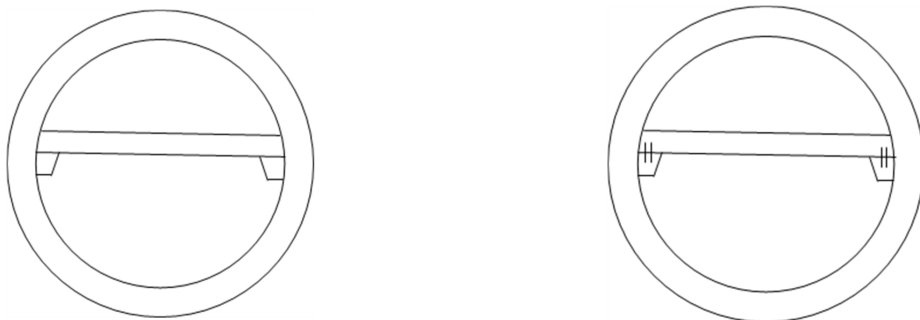
2. 복층터널의 개요

2.1 일반 사항

복층터널은 한 번의 굴착으로 분리된 두 공간을 확보할 수 있는 특수한 터널이다. 따라서 도심지 지하공간개발에 있어서 공간효율성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라, 사용목적에 따라 교통터널, 공동구 및 배수로 등의 다목적 시설로 활용될 수 있다. 프랑스 A86 터널, 일본 Ome 터널 및 말레이시아 SMART 터널 등의 복층터널이 시공되어 운영 중에 있다.

2.2 복층터널의 중간슬래브

복층터널의 중간슬래브는 터널 내부에 위치하는 구조물로서 중간슬래브 상부를 통행하는 차량하중과 중간슬래브의 자중을 지지하여야 한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이, 중간슬래브의 양 끝단은 세그먼트 라이닝과 연결된다.



(a) Simple support intermediate slab

(b) Fixed support intermediate slab

Fig. 1. Supporting type of intermediate slab

Fig. 1(a)에서는 양단 분리형(simple support), Fig. 1(b)에서는 양단 고정형(fixed support)의 형상을 보여주고 있다. 지지방식의 차이는 중간슬래브와 세그먼트 라이닝의 거동에 영향을 미치며, 양단 분리형의 경우 세그먼트 라이닝에 설치된 브라켓에 중간슬래브를 얹어서 차량하중 및 중간슬래브의 자중을 지지하는 구조인 반면, 양단 고정형의 경우 중간슬래브가 세그먼트 라이닝 및 브라켓과 결합되기 때문에 일체거동의 영향을 받는다(Lee and Moon, 2016).

3. 터널의 구조해석

3.1 세그먼트 라이닝의 해석법

터널의 주요 지지구조물인 세그먼트 라이닝은 외부하중, 교통하중 및 환경적 영향으로부터 터널의 안정성을 확보하는 주요 구조요소이다. 때문에 터널의 형상, 경계조건 등을 고려하여 세그먼트 라이닝의 지보재 역할을 평가하여야 한다. ITA (2000)에 따르면 세그먼트 라이닝의 구조적 안정성을 평가하는 방법은 크게 해석적 방법과 수치해석적 방법으로 구분할 수 있고, 각 방법들은 장단점이 존재한다. Elastic Equation Method, Terzaghi의 이완토압 모델 등과 같은 해석적 방법은 다른 방법에 비하여 계산이 비교적 쉽고 빠르기 때문에 수치해석적 방법 또는 예비 설계를 위한 검증용 해석방법으로 사용될 수 있다. 그러나 해석적 방법은 세그먼트 라이닝을 균일한 강성의 부재로 가정하며 터널의 형상이나 조건을 적용함에 있어 제약이 존재한다(Ahmet, 2010). 반면에 수치해석적 방법의 경우 터널 구조물의 형상, 강성 및 재료의 거동모델을 정의하여 이에 대한 응력과 변형률의 관계를 분석할 수 있으며, 빔-스프링 모델, 유한요소법(Finite Element Method) 및 유한차분법(Finite Differential Method) 등의 다양한 기법들이 있다. Fig. 2에서는 Elastic Equation Method와 유한요소법의 예를 보여주고 있다. 이 중 빔-스프링 모델은 해석적 방법과 달리 세그먼트 연결부에서의 강성저하를 표현할 수 있고, 세그먼트 라이닝의 응력 거동을 분석하는데 있어서 다양한 응용이 가능하기 때문에 오랜 기간에 걸쳐 다양한 연구가 수행되었다(Klar et

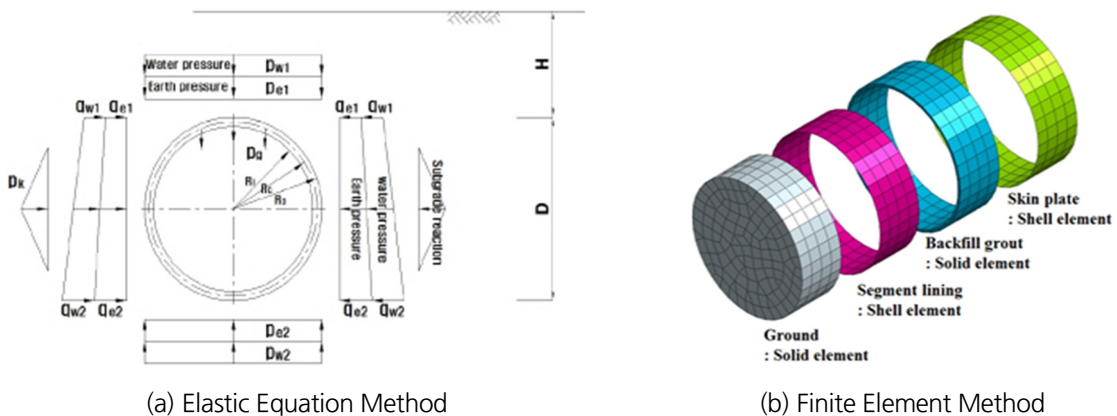


Fig. 2. Analysis types for segment lining

al., 2008; Lee et al., 2015; Nikkah et al., 2016).

본 연구는 설계, 시공 및 운영단계를 포함한 생애전주기에 대한 복층터널 안정성 평가 프로그램 개발을 위한 초기 연구로서, 빔-스프링 모델을 통한 복층터널 구조해석 솔버 구축을 수행하였다.

3.2 빔-스프링 모델

복층터널 세그먼트 라이닝은 공장에서 제작된 프리캐스트 세그먼트를 터널 시공 현장으로 운반 후, 현장에서 조립된다. 이 때 세그먼트의 조립되는 부위는 각 세그먼트보다 더 약한 휨강성을 가진다. 빔-스프링 모델은 복층터널의 세그먼트 연결부에 대하여 Fig. 3과 같이 표현할 수 있다(JSCE, 1996).

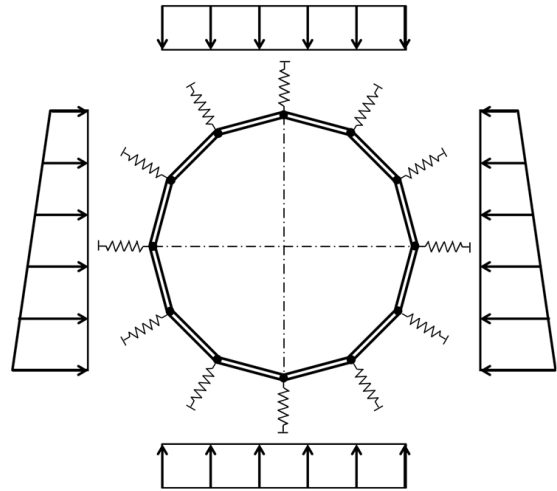
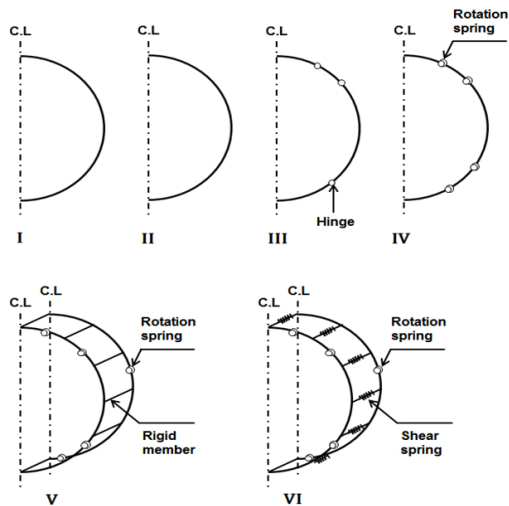


Fig. 3. Beam-spring model for TBM segmental linings **Fig. 4.** Model of Beam-Spring Method (Ahmet, 2010) (JSCE, 1996)

I-IV 모델은 복층터널의 길이방향 요소를 고려하지 않은 2D 모델이다. I모델의 경우 연결부위에 의한 강성저하를 고려하지 않은 균일한 강성을 지닌 세그먼트 라이닝 모델이고, II모델은 강성저하 효과를 고려하되 세그먼트 라이닝 전 구간에 걸쳐 균일한 강성저하를 반영하였다. III, IV모델은 세그먼트 라이닝의 연결부위를 힌지 또는 회전 스프링으로 표현하여 강성저하효과의 위치 및 방향성을 부여할 수 있다. V 및 VI 모델은 길이방향으로 연결된 세그먼트 링의 연결을 강체요소 또는 전단스프링으로 표현하여 터널의 종단방향의 응력거동을 고려할 수 있는 3D 모델이다. 본 연구에서는 복층터널 안정성 평가 프로그램 개발의 초기 단계로써, 비교적 단순한 형태의 II모델을 채택하여 복층터널 구조해석 솔버의 모델을 구축하였다.

Fig. 4에서는 빔-스프링 모델의 개요를 보여주고 있다. 복층터널의 빔-스프링 모델은 세그먼트 라이닝을 표현하는 보 요소와 지반반력을 표현하는 스프링 요소들로 구성이 된다. 실제 세그먼트 라이닝은 호 형상의 세그먼트

들이 조립되어 원형의 터널을 형성하고 외부로부터의 하중을 지지하지만, 빔-스프링 모델에서의 세그먼트 라이닝은 곡선의 호를 단순화하여 직선형태의 보 요소의 결합으로 구성된 다각형 형태의 세그먼트 라이닝으로 표현한다.

세그먼트 라이닝은 외부하중에 대해 변형을 일으킨다. 이 때 발생하는 변형은 지반과의 상호작용에 의하여 지반반력을 유발하는데, 터널의 빔-스프링 모델에서는 각 절점에 연결된 스프링 요소로 지반반력을 표현하여 지반과 세그먼트 라이닝 간의 상호작용을 표현한다. 지반반력은 주동토포의 형태로 작용되어야 하는데, 즉, 터널 세그먼트 변형에 의하여 발생하는 지반반력은 변형이 터널 중심으로부터 멀어지는 방향으로 발생할 때 작용되어야 한다(Do et al, 2014). 일반적으로 지반반력 스프링은 각 절점에서 방사방향으로 연결되어 세그먼트 라이닝에 지반반력을 가하게 된다. 추가적으로 세그먼트 라이닝에 대하여 접선방향으로 지반반력 스프링을 설치하여 지반과 세그먼트 라이닝 사이의 마찰저항력 저하에 의해 발생하는 활동에 대하여 고려하는 경우도 있지만, 보수적 관점에서 방사방향 지반반력 스프링만을 적용한다.

복층터널의 빔-스프링 모델 전체강성행렬(system stiffness matrix)은 보 요소와 스프링 요소를 조합하여 구성하는데 Fig. 5를 통해 확인할 수 있다. 전체강성행렬은 모델의 각 절점위치에서 전체강성에 기여를 하는 해당 보 요소들과 스프링 요소들의 요소강성행렬(element stiffness matrix)을 각 위치에서 합산하였다. 이 때, 모델의 하중, 변위뿐만 아니라 구성요소인 보 요소 및 스프링 요소들의 강성행렬 또한 전역좌표계(global coordinate) 상의 값으로 표현되어야 하는데 행렬식 (1), (2)를 통해 확인할 수 있으며 행렬식에서 사용된 기호는 각각 세그먼트 라이닝 탄성계수(E), 세그먼트 라이닝 단면적(A), 단면 2차모멘트(I), 보 요소의 길이(L), 지반반력 스프링계수(K) 그리고 보 요소의 국부 좌표계(local coordinate)로부터 전역좌표계로의 전환 시 발생하는 회전각도에 대한 cosine(C) 그리고 sine(S)이다.

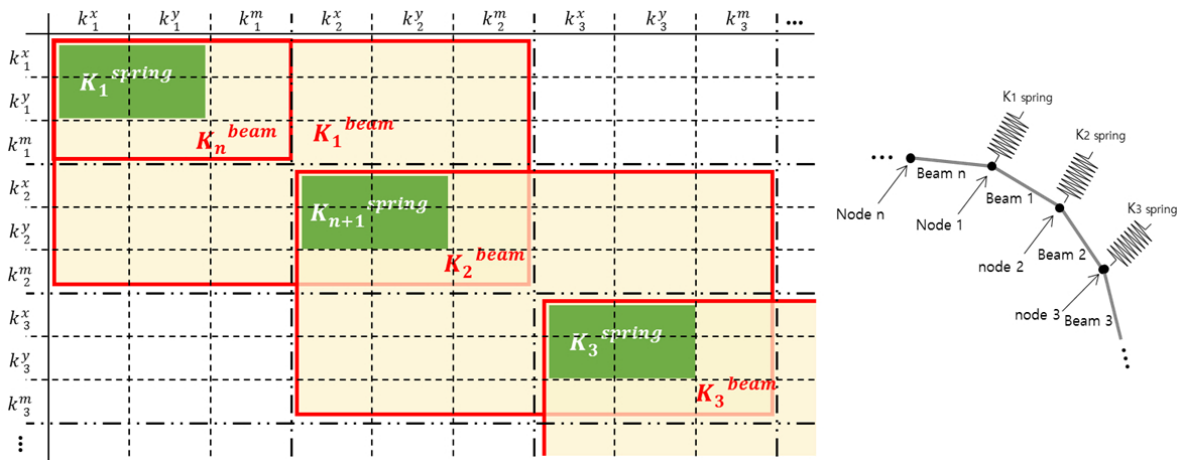


Fig. 5. System stiffness matrix of Beam-Spring model for tunnel

$$[K^{beam}] = \frac{E}{L} \begin{bmatrix} AC^2 + \frac{12I}{L^2} S^2 & \left(A - \frac{12I}{L^2}\right) CS & -\frac{6I}{L} S & -\left(AC^2 + \frac{12I}{L^2} S^2\right) & -\left(A - \frac{12I}{L^2}\right) CS & -\frac{6I}{L} S \\ & AS^2 + \frac{12I}{L^2} C^2 & \frac{6I}{L} C & -\left(A - \frac{12I}{L^2}\right) CS & -\left(AS^2 + \frac{12I}{L^2} C^2\right) & \frac{6I}{L} C \\ & & 4I & \frac{6I}{L} S & -\frac{6I}{L} C & 2I \\ & & & AC^2 + \frac{12I}{L^2} S^2 & \left(A - \frac{12I}{L^2}\right) CS & \frac{6I}{L} S \\ & & & & AS^2 + \frac{12I}{L^2} C^2 & -\frac{6I}{L} C \\ & & & & & 4I \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[K_g^{spring}] = K \begin{bmatrix} C^2 & CS & -C^2 & -CS \\ CS & S^2 & -CS & -S^2 \\ -C^2 & -CS & C^2 & CS \\ -CS & -S^2 & CS & S^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

4. 복층터널의 빔-스프링 모델

4.1 해석 Flow chart

복층터널의 해석은 Fig. 6과 같은 순서로 진행된다. 우선 복층터널의 형상, 제원, 지반 및 세그먼트 라이닝의 물성치를 결정하여 모델의 하중조건, 지반반력 조건 등을 결정하였다. 입력된 값을 기반으로 모델을 구성하는 보 및 스프링 요소의 강성행렬을 구한 뒤 복층터널의 전체강성행렬을 구축하였다. 힘, 강성 그리고 변형률 간의 관계에 의하여 복층터널의 변형량은 전체강성행렬과 하중행렬의 계산을 통하여 획득할 수 있다. 최종적으로 획득한 세그먼트 라이닝의 변형량으로부터 세그먼트 라이닝의 부재력을 획득할 수 있다.

4.2 복층터널 빔-스프링 모델의 제원

복층터널 모델의 제원은 Fig. 7과 같다. 복층터널의 외경은 15.2 m, 세그먼트 라이닝의 두께는 450 mm이며 세그먼트 라이닝의 폭은 2 m로 설정하였다. 중간슬래브의 두께는 400 mm이고, 중간슬래브가 설치되는 세그먼트 라이닝의 위치는 모델 해석의 편의를 위해 터널의 천단부를 기준으로 시계방향으로 각각 90, 270°C 지점에서 터널 중앙을 수평으로 가로지르도록 하였으며 길이는 터널의 내경과 동일한 14.3 m이다.

세그먼트 라이닝은 Key 세그먼트를 포함 9개의 세그먼트로 구성되었지만, II번 빔-스프링 모델을 채택하였기 때문에, 세그먼트 연결부에 의한 강성저하 효과는 세그먼트 라이닝 전구간의 강성의 저하로 단순화하여 나타내었다.

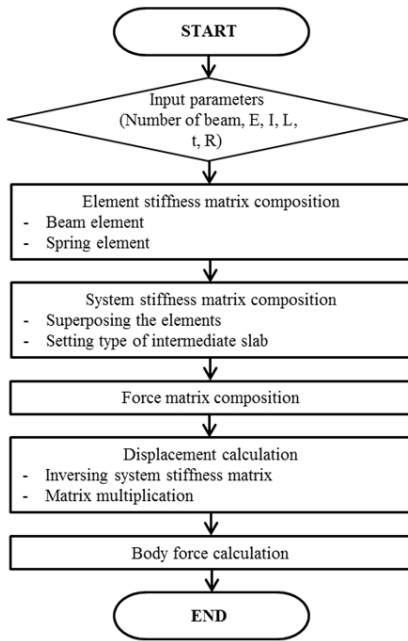


Fig. 6. Flow chart of Beam-Spring model calculation

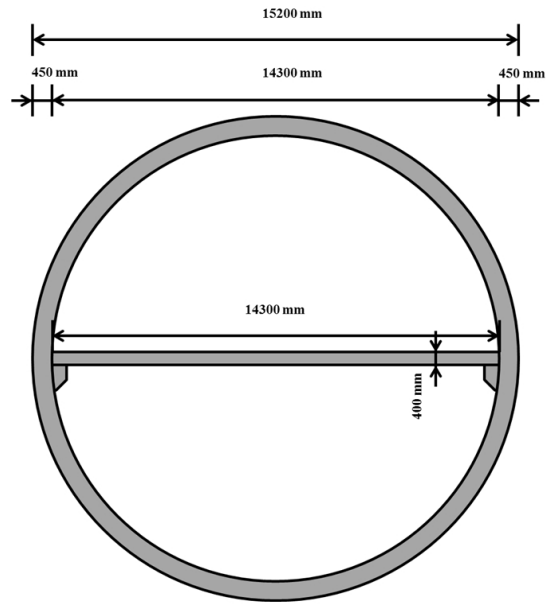


Fig. 7. Cross-section of double-deck tunnel

4.3 지반, 터널 재료의 물성치 및 계수 설정

해석모델에 입력되는 물성치 및 계수는 관련 여부에 따라 크게 세그먼트 라이닝 및 중간슬래브를 표현하는 보 요소와 지반반력을 표현하는 스프링 요소로 나눌 수 있다. 복층터널의 세그먼트 라이닝 및 중간슬래브에 적용된 물성치는 Table 1에서 보여주고 있다.

세그먼트의 결합부위의 강성은 세그먼트의 강성보다 약하기 때문에 빔-스프링 모델 해석 시 결합부위의 강성 저하 효과를 고려해야 한다. Muir wood (1975)는 세그먼트 결합부위에서의 강성저하 효과를 고려하여 식 (3)을 제안하였다.

Table 1. Properties of segment lining and intermediate slab

	Properties
γ_{conc} (unit weight)	26 kN/m ³
E_{conc} (elastic modulus)	38.82 GPa
N (number of segments)	6 EA
I (moment of inertia)	$1.519 \times 10^{-2} \text{ m}^4$
I_e (moment of inertia of force transmission zone)	$1.059 \times 10^{-2} \text{ m}^4$

$$I_e = I_j + \left(\frac{4}{n}\right)^2 \cdot I \quad (I_e \leq I, n > 4) \quad (3)$$

I_e 는 유효 단면 2차모멘트이며 세그먼트 연결부위의 힘 전이 영역 단면 2차모멘트(I_j)와 세그먼트 라이닝의 단면 2차모멘트(I) 그리고 세그먼트의 개수(n)를 고려하여 획득할 수 있다. 세그먼트 간의 조인트 부위는 세그먼트 라이닝의 몸체부위와 달리 단면특성이 다르다. 연결부위의 형상, 연결볼트 형식 및 가스켓 등 요소들의 영향을 받기 때문에 세그먼트 라이닝의 단면 2차모멘트가 아닌 응력이 전이되는 영역의 단면 2차모멘트를 고려하여야 한다. Bickel et al. (1996)은 세그먼트 연결부위에 의한 세그먼트 라이닝의 강성 저하를 일체형 세그먼트 라이닝 강성의 60~80% 수준으로 제안하였다. 본 연구에서는 Bickel et al. (1996)의 제안을 참고하여 과도한 안전측의 해석을 방지하고자, 강성 저하 효과를 70%로 고려하여 유효 단면 2차모멘트를 $1.059 \times 10^2 \text{ m}^4$ 로 결정하였다.

지반에 대한 물성치는 Table 2와 같다. 지반반력 스프링계수(K)는 USACE (1997)이 제안한 식 (4)를 사용하였고, Table 2의 지반탄성계수(E_{ground}), 포아송비(ν) 및 터널 반경(R)을 입력하였다. 추후 지반탄성계수 변화가 세그먼트 라이닝 부재력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Table 2와 같이 3가지 경우의 지반탄성계수를 각각 적용하였다.

Table 2. Properties of ground

		Properties
γ_{ground} (unit weight)		19 kN/m ³
E_{ground} (elastic modulus)	Case 3-1	3.52 MPa
	Case 3-2	7.04 MPa
	Case 3-3	10.56 MPa
ν (Poisson's ratio)		0.33
K_0 (coefficient of lateral earth pressure)		0.5

$$K_r = \frac{E_{ground}}{R(1 + \nu)} \quad (4)$$

빔-스프링 모델에서 지반반력 스프링은 각 절점 당 하나의 스프링만이 설치된다. 하지만 실제 지반은 세그먼트 라이닝 전체 면적과 맞닿아 지반-세그먼트 라이닝 간의 상호작용을 통하여 지반반력을 제공한다. 따라서 Fig. 8과 같이 모델에 적용되는 지반반력 스프링의 강성은 절점을 중심으로 각 스프링이 분담하는 영역만큼을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 각 스프링이 절점에 양 방향으로 연결된 보 요소의 절반 길이만큼의 영역을 분담하기 때문에 식 (5)와 같이 지반반력 스프링계수를 보정하였다.

$$K_r (\text{each unit spring}) = K_r \cdot \left(2 \times \frac{l}{2}\right) \cdot L \quad (5)$$

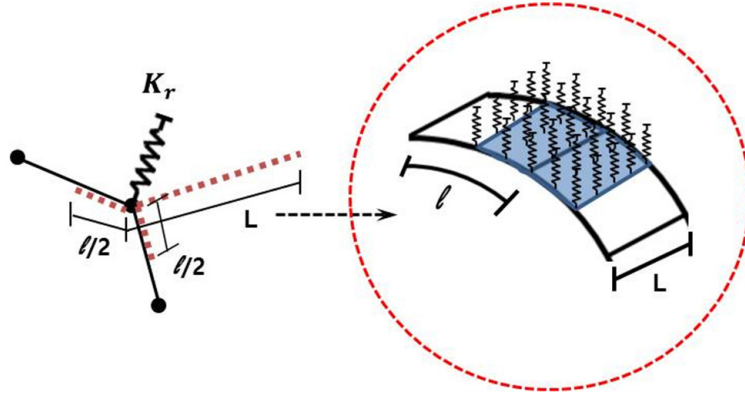


Fig. 8. Tributary area of subgrade reaction spring

4.4 하중조건

복층터널의 빔-스프링 모델에서의 하중조건은 Fig. 9와 같이 설정하였다. 터널 천단부에 작용되는 연직하중은 터널의 천단부로부터 지표면까지의 심도에 대한 전토평하중을 고려하였고, 터널의 측면에 작용하는 수평하중은 수평토압계수(K_0)를 고려하여 계산하였다. 복층터널 심도 변화에 따른 전토평하중 증가 또는 감소가 세그먼트 라이닝 부재력에 미치는 영향을 분석하고자, 각각 10, 20, 30 m의 터널 심도를 적용하였다. 토압은 심도가 깊을수록 커지는 삼각분포 하중 형태지만 본 연구에서는 하중조건을 단순화하여 Fig. 9와 같이 등분포하중을 적용하였다. 추후 프로그램 개발을 위한 추가 연구 시 다양한 하중모델을 적용할 계획이다.

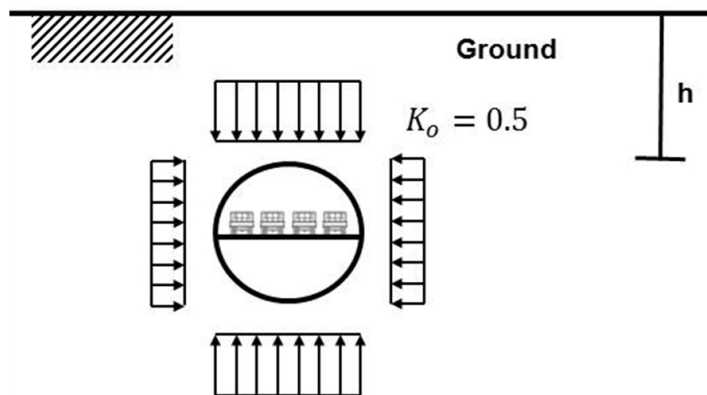


Fig. 9. Load condition of Beam-Spring model for double-deck tunnel

복층터널의 중간슬래브에 작용하는 하중은 중간슬래브의 자중과 차량에 의한 교통하중을 적용해야 한다. 자중은 콘크리트의 단위중량과 중간슬래브 부피를 고려하여 등분포 하중을 적용하였고, 복층터널 내부를 주행하는 차량은 Table 3과 같이 도로교 설계기준(Ministry of Construction and Transportation, 2010)을 참고하여 DB-13.5 모델을 적용하였다. 추후 복층터널의 용도를 고려하여 다양한 차량하중 조건을 적용할 계획이다.

Table 3. DB Load model(Ministry of Construction and Transportation, 2010)

Load Class	Total Weight (kN)	Front wheel weight (kN)	Rear wheel weight (kN)
DB-24	432	24	96
DB-18	324	18	72
DB-13.5	243	13.5	54

4.5 중간슬래브 지지방식

빔-스프링 모델에서의 양단 분리형 및 양단 고정형 중간슬래브는 Fig. 10과 같은 구조요소로 표현하였다. 양단 분리형 중간슬래브의 경우, 브라켓 상단에 거치되어 단순 지지되기 때문에, 중간슬래브 자중 및 차량하중이 양끝 단에서 연직하중으로 세그먼트 라이닝에 전달이 된다. 하지만 양단 고정형 중간슬래브의 경우, 세그먼트 라이닝에 완전히 결속되기 때문에 양단이 고정된 보(fixed end beam)와 유사하다. 때문에 양단 고정형 중간슬래브의 경우 자중과 차량하중에 의한 연직하중뿐만 아니라 모멘트까지 세그먼트 라이닝에 전달된다.

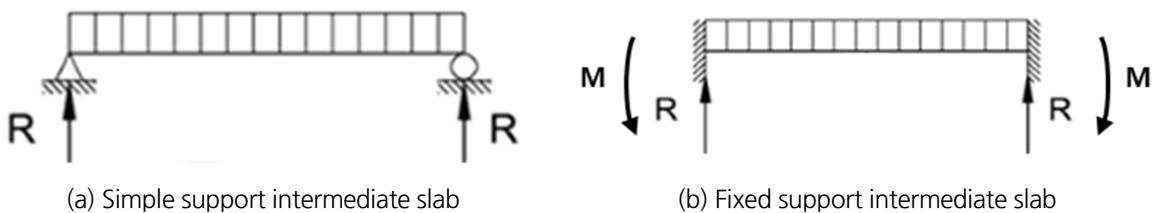


Fig. 10. Structural elements of intermediate slab

5. 해석결과

본 연구에서는 Excel VBA를 통해 구축한 복층터널의 빔-스프링 모델에서 중간슬래브의 지지방식, 터널 심도 및 지반탄성계수 조건을 Table 3과 같이 변화시켜가며 세그먼트 라이닝의 부재력의 변화를 검토하였다. 구축된 모델은 Midas civil 2012+ 프로그램으로 비교검토 하였다.

Table 4. Analysis cases of beam-spring model

case	E_{ground} (MPa)			Depth (m)			Supporting type of intermediate slab		
	3.52	7.04	10.56	10	20	30	Noslab	Simple	Fixed
1-1		○		○			○		
1-2		○		○				○	
1-3		○		○					○
2-1		○		○			○		
								○	
2-2		○			○		○		
								○	
2-3		○				○	○		
								○	
3-1	○			○			○		
								○	
3-2		○		○			○		
								○	
3-3			○	○			○		
								○	
									○

5.1 중간슬래브 지지방식에 따른 부재력 검토

중간슬래브의 지지방식이 세그먼트 라이닝에 미치는 영향을 분석하고자 터널이 중간슬래브가 적용이 안 된 경우(case 1-1), 양단 분리형 중간슬래브가 적용된 경우(case 1-2) 및 양단 고정형 중간슬래브가 적용된 경우(case 1-3)에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 11는 7.04 MPa의 지반탄성계수를 가지는 지반에서 10 m의 심도에 위치한 터널의 중간슬래브 지지방식에 따른 부재력을 나타낸 그래프이다. 중간슬래브의 설치 유무가 세그먼트 라이닝의 휨 모멘트의 변화를 나타내는 것을 확인할 수 있다. Case 1-2, case 1-3의 경우, 중간슬래브가 설치된 90도 부근에서 가장 큰 휨모멘트가 발생한 것을 볼 수 있으며, case 1-2가 case 1-3보다 최대 휨모멘트가 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 세그먼트 라이닝과 완전히 연결되어 일체화 거동을 하는 case 1-3과 달리, case 1-2는 단순 지지되어 세그먼트 라이닝에 미치는 영향이 적다는 것을 확인할 수 있다. 구축된 빔-스프링 해석 모델은 Midas civil 2012+ 프로그램으로 동일한 조건에 대하여 모델링을 하여 Fig. 12와 같이 비교검토 되었다.

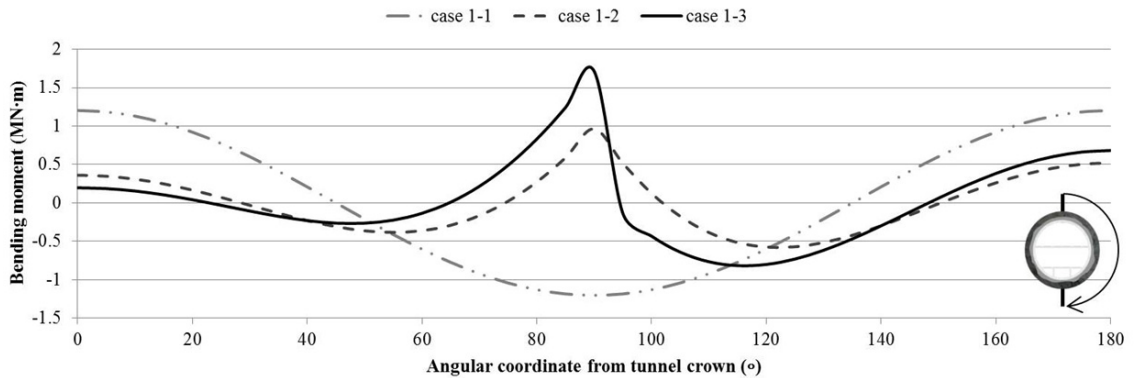


Fig. 11. Bending moment diagram of segment lining depending on intermediate slab supporting type

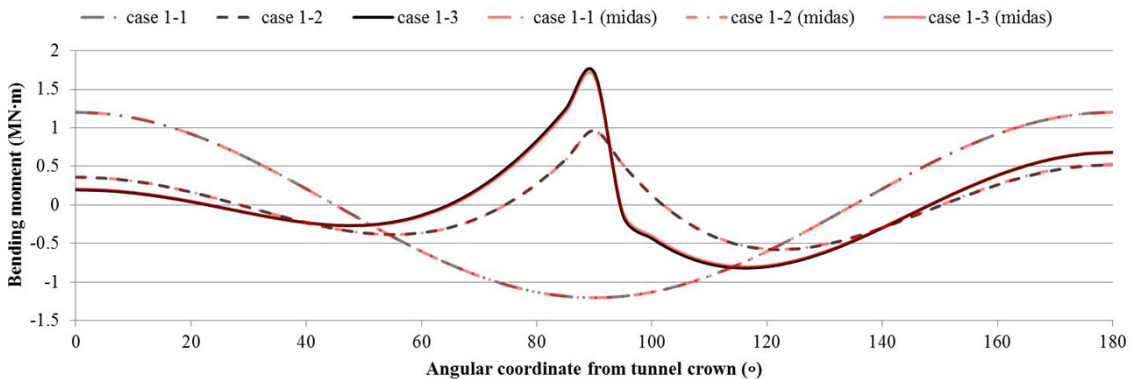
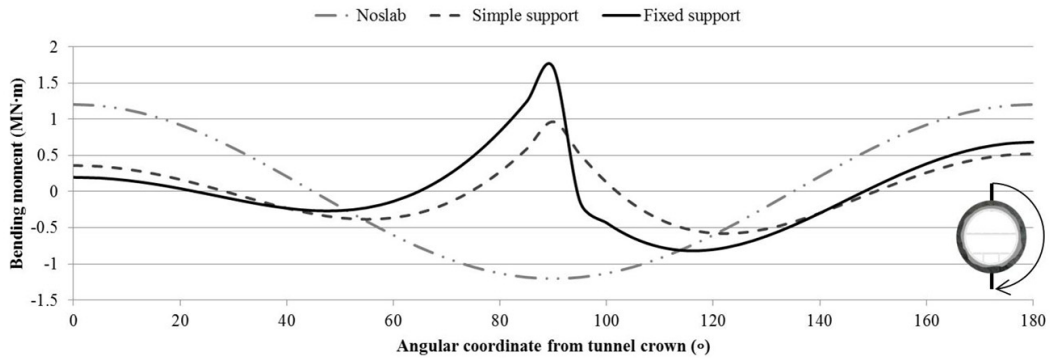


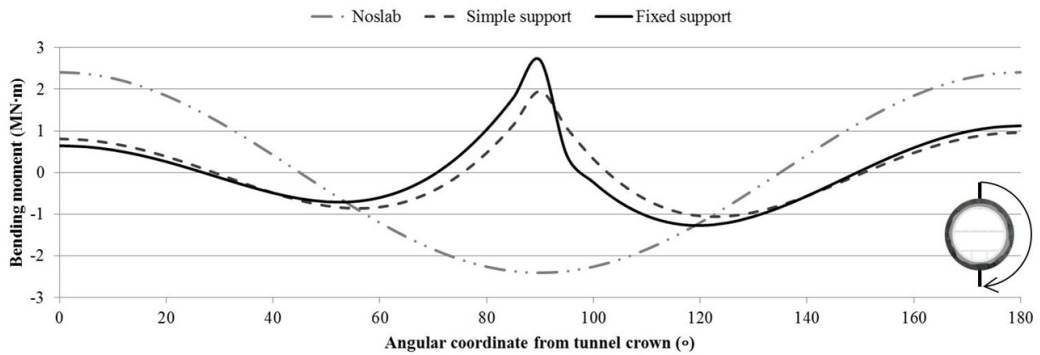
Fig. 12. Comparison between beam-spring model and Midas civil 2012+

5.2 터널 심도 변화에 따른 부재력 검토

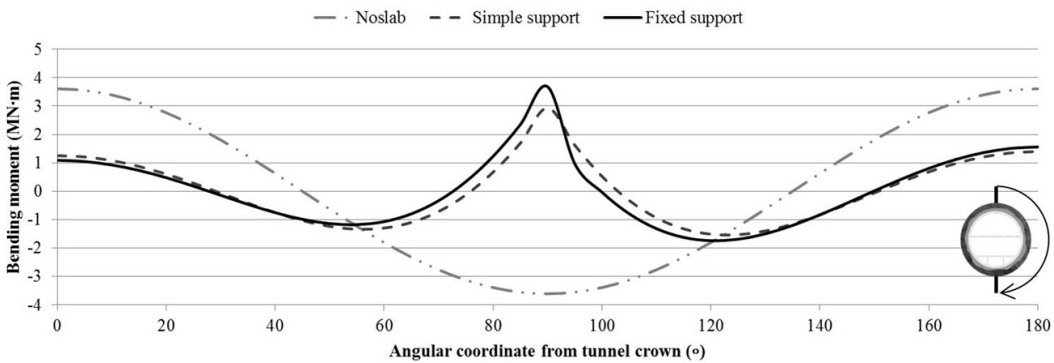
지반탄성계수가 7.04 MPa인 지반에서 복층터널의 심도가 10 m(case 2-1), 20 m(case 2-2) 및 30 m(case 2-3)로 증가할 때 세그먼트 라이닝 부재력 분포를 각각 Fig. 13에서 확인할 수 있다. 터널의 심도가 깊어지면서 휨모멘트 값은 증가를 하지만 중간슬래브가 휨모멘트 값에 미치는 영향의 변화를 발견할 수 있다. 심도가 비교적 얇은 10 m에서는 중간슬래브가 존재하지 않는 경우 최대 휨모멘트의 값이 1.2 MN·m이고 중간슬래브가 존재하는 경우 양단 자유형은 0.97 MN·m, 양단 고정형은 1.7 MN·m의 최대값이 발생하였다. 하지만 심도가 증가하여 20 m 및 30 m로 증가한 경우, 중간슬래브가 없는 세그먼트 라이닝과 중간슬래브가 존재하는 세그먼트의 최대 휨모멘트의 격차가 많이 줄어들었다. 특히 심도 30 m의 조건에서 중간슬래브가 없는 경우와 양단 고정형 슬래브 모두 3.6 MN·m의 최대 휨모멘트를 보였다. 이는 중간슬래브가 세그먼트 라이닝에 미치는 영향력이 터널 심도가 깊어지면서 증가하는 토압의 영향력보다 작아지기 때문인 것을 알 수 있다.



(a) H=10 m (case 2-1)



(b) H=20 m (case 2-2)



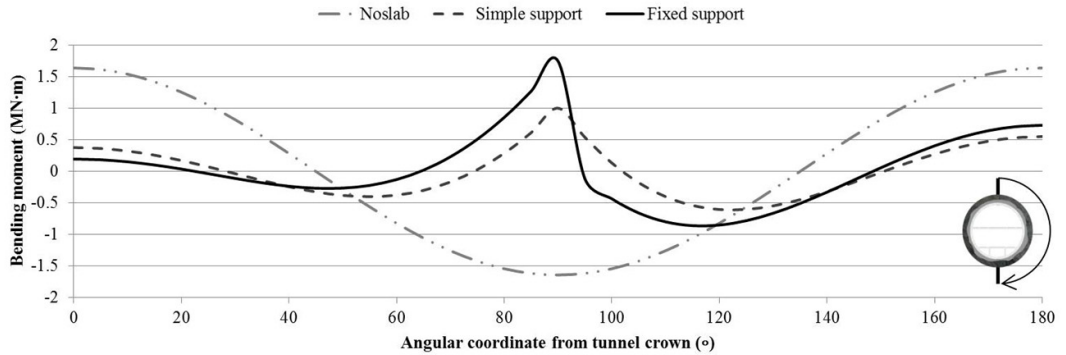
(c) H=30 m (case 2-3)

Fig. 13. Bending moment diagram of segment lining depending on the depth of double-deck tunnel

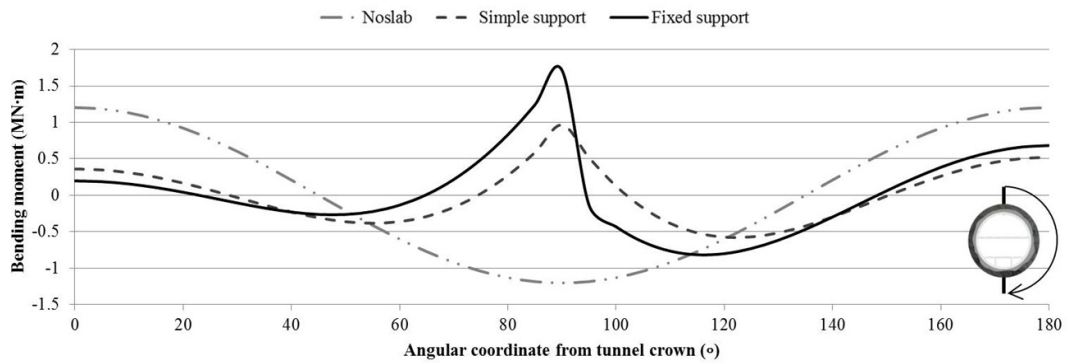
5.3 지반탄성계수 변화에 따른 부재력 검토

지반탄성계수는 빔-스프링 모델에서 지반반력 스프링계수에 영향을 미치는데, 지반반력 스프링계수는 세그먼트

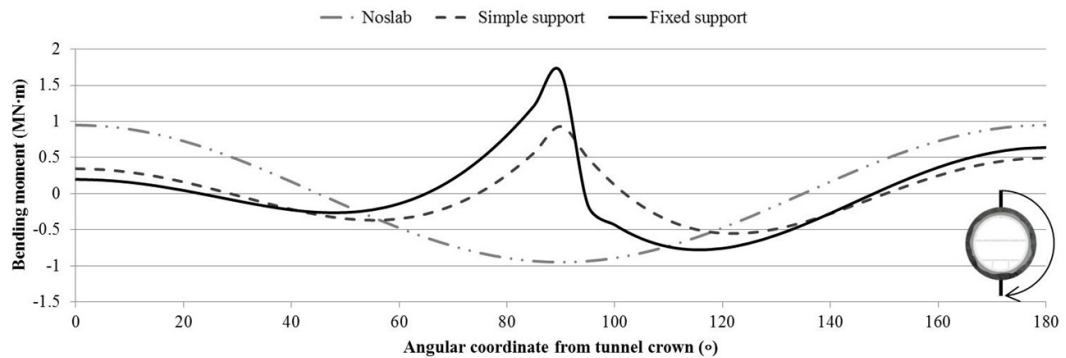
트 라이닝의 변형과 이에 대한 지반반력의 관계를 설명한다. 지반탄성계수의 변화가 세그먼트 라이닝 부재력 분포에 미치는 영향을 분석하고자 지반탄성계수가 3.52 MPa(case 3-1), 7.04 MPa(case 3-2) 및 10.56 MPa(case 3-3)인 지반에 심도 10 m의 위치에 복층터널의 빔-스프링 모델을 해석하였다. Fig. 14를 통하여 지반탄성계수가



(a) $E_{ground} = 3.52$ MPa (case 3-1)



(b) $E_{ground} = 7.04$ MPa (case 3-2)



(c) $E_{ground} = 10.56$ MPa (case 3-3)

Fig. 14. Bending moment diagram of segment lining depending on the elastic modulus of the ground

증가함에 따라 세그먼트 라이닝의 부재력은 감소하지만, 중간슬래브가 세그먼트 라이닝에 미치는 영향력은 상대적으로 커지는 것을 확인할 수 있다. 지반탄성계수가 증가할수록 중간슬래브가 없는 경우의 휨모멘트가 감소되는 정도는 중간슬래브가 존재하는 경우의 휨모멘트가 감소되는 정도 보다 더 컸다. 이러한 중간슬래브가 세그먼트 라이닝 부재력 분포에 미치는 영향과 지반반력의 관계에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 설계, 시공 및 운영단계를 포함한 생애전주기에 대한 복층터널 안정성 평가 프로그램 개발을 위한 초기 연구로서, 빔-스프링 모델을 활용한 복층터널의 구조해석 솔버 구축을 위한 연구를 다루었다. 복층터널 중간슬래브의 지지방식에 따른 세그먼트 라이닝의 거동을 분석하였고, Midas civil 2012+ 프로그램을 사용하여 구축된 모델을 비교검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 복층터널의 중간슬래브는 지지방식에 따라 양단 분리형 및 양단 고정형으로 분류된다. 두 슬래브는 세그먼트 라이닝과 연결정도의 차이가 있으며, 이는 세그먼트 라이닝의 응력거동에 영향을 미칠 것으로 판단된다.
2. 중간슬래브는 세그먼트 라이닝 휨모멘트의 분포형태에 큰 영향을 미친다. 중간슬래브가 설치된 지점에서의 휨모멘트를 크게 증가시킨다. 이는 세그먼트 라이닝이 중간슬래브 자중 및 차량하중의 영향을 받아 발생한 것으로 판단된다. 또한 중간슬래브의 지지방식의 차이는 세그먼트 라이닝과의 일체화 거동 정도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.
3. 터널 심도가 깊어짐에 따라 중간슬래브에 의해 증가하는 휨모멘트의 상대적 크기는 줄어든다. 이는 터널 심도가 깊어지면서 증가하는 토압의 영향이 중간슬래브에 의한 휨모멘트 증가 효과보다 더 큰 것으로 판단된다.
4. 지반탄성계수가 증가할수록 중간슬래브가 세그먼트 라이닝에 미치는 영향력이 증가하는 경향을 나타내었다. 지반탄성계수는 세그먼트 라이닝의 변형에 의한 지반반력과 밀접한 관계를 갖는데, 지반반력과 중간슬래브가 세그먼트 라이닝 부재력 분포에 미치는 영향력에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 복층터널 중간슬래브 지지방식, 심도 및 지반반력 파라미터 변화가 터널의 세그먼트 라이닝에 미치는 영향을 분석하여 복층터널의 안정성을 평가하는 초기 연구이다. 추후 복층터널의 안정성 분석을 위한 중요한 자 및 복층터널 빔-스프링 모델의 개선 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 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. Ahmet, G.C. (2010), "Evaluation of structural analysis methods used for the design of TBM segmental linings", Master's thesis, Middle East Technical University.
2. Bickel, J.O., Kuesel, T.R., King, E.H. (1996), "Tunnel Engineering Handbook", Chapman and Hall. New York (ITP).
3. Do, N.A., Dias, D., Oreste, P., Djeran-Maigre, I (2014), "A new numerical approach to the hyperstatic reaction method for segmental tunnel linings", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 38, No. 15, pp. 1617-1632.
4. ITA (International Tunnelling Association) Working Group No.2, (2000), "Guidelines for the design of shield tunnel lining", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 15, No. 3, pp. 303-331.
5. JSCE. (1996), "Japanese Standard for Shield Tunnelling, Japan Society of Civil Engineers", The third edition, Tokyo.
6. Kim, H.S., Kim, H.M. (2012), "A study on cross sectional characteristics and available area for using the lower space in TBM road tunnels", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 14, No. 22, pp. 141-157.
7. Klar, A., Marshall, A.M., Soga, K., Mair, R.J. (2008), "Tunneling effects on jointed pipelines", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 45, No. 1, pp. 131-139.
8. Lee, H.S., Moon, H.K. (2016a), "Behavior of the Segment Lining due to the Middle Slab and the Lateral Pressure Coefficient in Duplex Tunnel", *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE* Vol. 26, No. 3, pp. 192-200.
9. Lee, H.S., Moon, H.K. (2016b), "Numerical study on the connection type of inner-slab in double deck tunnel", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 18, No. 5, pp. 441-451.
10. Lee, Y.J., Kim, K.L., Jeong, K.W., Hong, E.J, Kim, S.H., Jeon, D.C. (2015), "A study on the design of shield tunnel lining in high water pressure condition", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 17, No. 3, pp. 227-236.
11. Ministry of Construction and Transportation. (2010), *Bridge Design Specification*, Ministry of Construction and Transportation, Korea.
12. Nikkhah, M., Mousavi, S.S., Zare, S., Khademhosseini, O. (2016), "Evaluation of structural analysis of tunnel segmental lining using beam-spring method and force-method (Case study: Chamshir water conveyance tunnel)", *Journal of Mining and Environment*. (Published online: 27 May 2016)
13. Park, H.B., Cho, Y.K., Lee, Y.H., Kim, S.M. (2016), "Numerical Analysis of Middle Slab Behavior in Double-Deck Tunnel Considering Emergency Evacuation Space", *Korea concrete institute conference*, Vol. 28, No. 1, pp. 43-44.
14. US Army Corps of Engineering (USACE) (1997), "Tunnels and shafts in rock", *Engineering manual 1110-2-2901*, Washington (USA).
15. Wood M. (1975), "The Circular Tunnel in Elastic Ground", *Geotechnique*, Vol. 25, No. 1. pp. 115-127.