

축력의 영향을 고려한 슛크리트-강지보 합성 라이닝의 비선형 거동 분석

유지환* · 김정수** · 김문겸***

Yu, Jeehwan*, Kim, Jeongsoo**, Kim, Moon Kyum***

Analysis of Nonlinear Behaviors of Shotcrete-Steel Support Lining Considering the Axial Force Effects

ABSTRACT

Bending and axial forces simultaneously occur at the cross-section of a shotcrete lining reinforced with steel supports due to the tunnel geometry. The shotcrete has changing flexural stiffness depending on the axial forces and, as a result, severely nonlinear behavior. The mechanical properties of a shotcrete-steel composite also depend on the type of steel support. This study presents a fiber section element model considering the effect of axial force to evaluate the nonlinear behavior of a shotcrete-steel composite. Additionally, the model was used to analyze the effects of different types of steel supports on the load capacity. Furthermore, a modified hyperbolic model for ground reaction, including strain-softening, is proposed to account for the ground-lining interaction. The model was validated by comparing the numerical results with results from previous load test performed on arched shotcrete specimens. The changes in mechanical responses of the lining were also investigated. Results show a lining with doubly reinforcement rebar has similar load capacity as a lining with H-shaped supports. The use of more materials for the steel support enhances the residual resistance. For all types of steel reinforcement, the contribution of steel supports during peak load decreases as the ground becomes stiffer.

Key words : Steel supports, Shotcrete, Composite cross-section, Fiber section element, Ground stiffness, Ultimate analysis

초 록

강지보로 보강된 터널 슛크리트 라이닝은 그 기하학적 형태로 인해 외부하중이 작용됨에 따라 휨 모멘트와 축력이 동시에 발생하게 된다. 슛크리트는 축력 수준에 따라 휨 강성이 달라지며, 이로 인한 심한 비선형 거동을 보인다. 또한 강지보 유형에 따라 역학적으로 상이한 지보 성능을 가진다. 본 연구에서는 화이버 단면 요소(fiber section element)를 이용해 압축력과 휨 모멘트를 동시에 받는 강지보-스�크리트 라이닝의 비선형 합성거동을 평가할 수 있는 수치모델을 제시하였고, 이를 활용해 강지보 유형에 따른 합성지보 성능을 수치적으로 분석하였다. 또한, 지반-구조물 상호작용을 구현하기 위해 지반의 연화(softening) 거동을 고려하여 수정된 hyperbolic 모델을 제시하였다. 제시된 수치모델은 기존 아치형 실험체의 하중실험 결과와 해석결과를 비교하여 검증하였으며, 수치해석을 통해 강지보 유형에 따른 라이닝의 합성거동을 분석하였다. 해석결과를 통해, 복철근 형태의 강지보가 기존 H형강과 유사한 극한 하중 지지력을 가지는 것을 확인하였다. 또한 강제량 증가가 잔류 지지력 향상에 크게 기여하였으며, 지보재 주변의 지반강성이 증가함에 따라 강지보 유형에 따른 최대 하중지지력 개선 효과는 작아짐을 확인하였다.

검색어 : 강지보, 슛크리트, 합성단면, 화이버 단면 요소, 지반 강성, 극한해석

* 용인시청 도시개발과 실무관 (Yongin City Hall · pumba05@gmail.com)

** 정희원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 박사후연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jeongsookim@kict.re.kr)

*** 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Yonsei University · applymkk@yonsei.ac.kr)

Received November 7, 2016/ revised December 15, 2016/ accepted January 3, 2017

1. 서론

New Austrian Tunnelling Method (NATM)은 지반 굴착 후 숏크리트, 락볼트 등의 지보재를 설치하여 지반의 지지력을 최대로 활용하는 터널 시공방법으로, 숏크리트에 강지보를 보강함으로써 숏크리트의 지보성능을 향상시키고 막장면의 안전성을 확보하게 된다. 지금까지의 NATM 터널 구조물 설계는 숏크리트 등의 1차 지보재가 최종적으로 하중을 받지 못하는 것으로 고려하여, 콘크리트 라이닝 설계에 이들 지보재의 하중지지능력을 반영하지 않는다. 그러나 최근 터널 라이닝의 경제적인 설계에 대한 수요가 높아지면서 터널 구조물에도 성능기반설계(performance based design)를 도입하려는 움직임이 존재하고 있다(Hur et al., 2013). 성능기반설계는 터널 구조물의 경제적 설계를 가능하게 하지만, 구조물의 전체적인 보유능력(capacity)을 평가해야 하기 때문에 재료 및 구조적 특성을 고려한 정교한 해석을 필요로 한다. 한편, 경제적인 터널 라이닝의 설계를 실현하기 위해 1차 지보재에 의한 하중지지능을 콘크리트 라이닝 설계에 반영하고, 더 나아가 Norwegian Method of Tunneling (NMT)와 같이 강재로 보강된 1차 지보재만으로 터널 라이닝을 설계하려는 연구들이 진행되고 있다(Lee et al., 2001; Shin et al., 2006; Jeon et al., 2011). NMT는 경암 등의 양호한 지반에 적용하는 터널공법으로 락볼트 및 강봉 다발과 강섬유로 보강된 숏크리트를 최종 영구 지보재로 사용하기 때문에 경제성 제고뿐만 아니라 지보재의 시공 및 유지관리가 용이하다(Grimstad et al., 2002). 특히, 숏크리트는 심한 비선형 거동을 보이므로, 이를 고려해 영구 지보재로서의 성능을 평가하는 것이 요구된다. 어떠한 설계법이 더 적절한가에 대한 논의가 필요하겠지만, 숏크리트 라이닝의 하중지지성능에 대한 합리적이고 정교한 평가가 설계 단계에서 이루어져야 하는 것은 분명하다.

축력의 작용은 숏크리트의 휨 강성을 크게 향상시키며, 강지보-숏크리트 부재의 최대하중성능 및 합성거동에 중요한 영향을 미친다. 그러나 국내외 터널 라이닝 설계 기준은 대부분 휨 모멘트만 작용하는 보 및 슬래브에 근간한다. ASTM, JSCE, 그리고 EFNARC은 숏크리트의 역학적 성능을 보 시험에 대한 휨 시험을 통해 평가하고 있으며(Lee et al., 2007), 한국도로공사에서는 KS F 2408에 준한 시험방법을 제시하고 있다(Korea Expressway Corporation, 2001). 이러한 이유로 라이닝 부재의 하중지지성능에 대한 대부분의 연구들은 휨 시험을 토대로 이루어져 왔다. 숏크리트 부재(Kim et al., 2011; Ji et al., 2011; Park and Kim, 2013)와 강지보-숏크리트 합성부재(Yoo et al., 1997; Lee et al., 2008; Park et al., 2010)에 대한 휨 시험이 다수 수행되었으나, 이러한 접근은 축력과 휨 모멘트를 동시에 받는 라이닝의 하중조건을 반영하지 못하므로 실제 휨 강도 및 파괴거동 평가에 한계가 있다. 이러한 한계점을 극복하기

위해 최근 터널 형상을 갖는 콘크리트 또는 숏크리트 실험체(Mashimo et al., 2002; You et al., 2008)와 강지보-숏크리트 실험체(Moon et al., 2012)에 대한 하중실험이 수행되기도 하였으나, 강지보-숏크리트 라이닝의 합성거동과 축력에 의한 영향이 완전히 밝혀지지는 않은 상태이다.

숏크리트 내 강지보 효과를 반영하기 위한 수치해석 연구들 또한 이루어져왔다. 강지보에 의한 숏크리트 라이닝의 지지력 향상을 고려하기 위해 Ha et al. (2008)과 Lee et al. (2008)은 선형 합성보 이론에 근거해 등가물성을 산정하고 이를 수치해석에 적용하였다. 그러나 숏크리트는 비선형 거동이 현저할 뿐만 아니라 비선형 특성이 라이닝에 작용하는 압축력에 영향을 받기 때문에, 이러한 접근은 숏크리트의 실제 거동을 합리적으로 묘사하는데 한계가 있다. 한편, Mashimo et al. (2002)는 실험과 더불어 재료적 비선형성을 고려할 수 있는 수치모델을 제시하였으나, 강지보의 하중지지 능력을 해석에 고려하지 않아 제한적인 거동 분석만 이루어졌다. 앞서 살펴본 바와 같이, 숏크리트 라이닝 해석은 통상 선형 합성보 이론에 근간하거나 강지보의 지보효과를 무시하고 있어, 숏크리트-강지보 합성부재의 비선형 합성거동과 축력의 영향을 반영하는데 제한적이다. 따라서 여러 강지보 유형에 따른 합성부재의 거동 특성이 수치해석을 통해 터널 지보재의 경제성 제고 측면에서 검토될 필요가 있다.

이러한 이유로 본 연구에서는 압축력과 휨 모멘트가 동시에 발생하는 강지보-숏크리트 합성부재의 비선형 거동을 수치해석적으로 평가하였다. 프레임 요소 기반의 화이버 단면 요소(fiber section element)를 이용해 터널 구조체를 생성하고, 극한상태의 지반-구조물 상호작용을 구현할 수 있도록 지반의 변형률 연화(strain-softening) 거동을 고려한 수정 hyperbolic 모델을 지반 스프링 요소에 적용해 터널 유한요소모델을 형성하였다. 개발된 해석모델의 검증과 숏크리트의 역학적 거동에 관한 재료물성을 도출하기 위해 축력과 휨을 동시에 받는 하중조건으로 수행된 실험결과(Mashimo et al., 2002)에 대해 역해석을 수행하였다. 해석모델을 활용하여 H형강, 단철근, 복철근으로 보강된 숏크리트 단면에 대한 해석을 수행하여, 강지보 유형에 따른 지보효과와 주변 지반과의 상호작용에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 비선형 유한요소 해석 모델

2.1 터널 구조체

2.1.1 화이버 단면 요소

프레임 요소에 바탕을 둔 화이버 단면 요소는 Fig. 1과 같이 프레임 요소 단면을 여러 개의 화이버로 분할하고, 각 화이버에 대해 재료의 1축 응력-변형률 관계를 정의함으로써 합성거동을

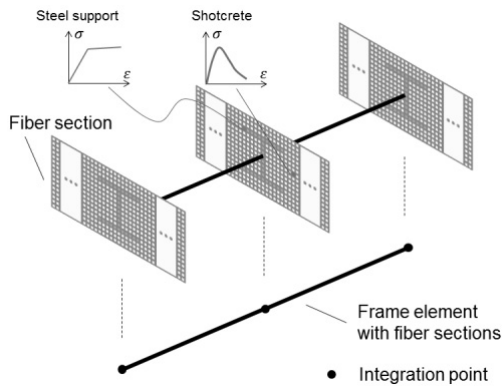


Fig. 1. Fiber Section Element (Kim et al., 2014)

구현하게 된다. 요소 내 수치적분점에서 축 변형률과 곡률이 주어지면, 이를 이용해 화이버의 수직 변형률을 산정하고 화이버에 할당된 구성방정식으로부터 응력 및 응력 합(resultant forces), 그리고 단면 강성행렬을 계산한다. 화이버 단면 요소는 적은 전산비용으로 재료적 비선형성을 고려한 다양한 합성단면 거동을 재현해 낼 수 있어, 강제 보강된 슛크리트 터널 라이닝과 같이 지반-구조물의 상호작용이 중요한 문제에 대해 적합하며, 효율적인 해석이 가능하다. 또한 터널 라이닝 설계에서 널리 사용되는 보-스프링 모델에 적용할 수 있는 장점을 가진다.

화이버 단면 요소의 정식화는 강성도법, 유연도법 의해 이뤄질 수 있는데, 통상 유연도법이 널리 사용된다. 유연도법에 의한 정식화는 앞서 결정된 단면 강성행렬을 이용해 단면 유연도 행렬을 구하고, 이를 힘 형상합수를 이용해 요소 유연도 행렬을 결정한다. 일반적인 유한요소해석은 강성도법에 의해 이뤄지므로, 요소 유연도 행렬은 요소 강성행렬로 변환된다. 일반적인 강성도법 기반의 유한요소 정식화와 달리 변위 형상합수를 사용하지 않기 때문에 축 변형률과 곡률을 점점변위로부터 직접 산정할 수 없다. 이로 인해 요소상태 결정을 위한 반복계산이 수반되지만, 적은 요소만으로도 재료의 비선형 거동을 효과적으로 평가할 수 있어 널리 사용되고 있다. 위의 화이버 단면 요소 정식화는 유연도법에 기반 하지만, 최종적인 해의 결정을 위해 강성도법 형태로 전환되므로, 혼합법이라 불리기도 한다. 화이버 단면 요소에 대한 상세한 정식화 과정 및 전체 해석 프로세스는 관련 연구(Taucer et al., 1991; Spacone et al., 1996; Filippou et al., 1999; Kim et al., 2014)를 참고할 수 있다.

2.1.2 슛크리트 구성방정식

스�크리트는 낮은 인장강도와 취성적 재료특성을 가지고 있기 때문에 강섬유를 혼입하는 것이 보편적이다. 강섬유에 의한 인장보강효과를 고려해 슛크리트의 구성방정식은 압축영역과 인장영역에

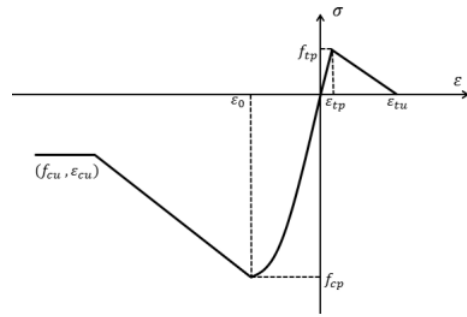


Fig. 2. Constitutive Model for Shotcrete

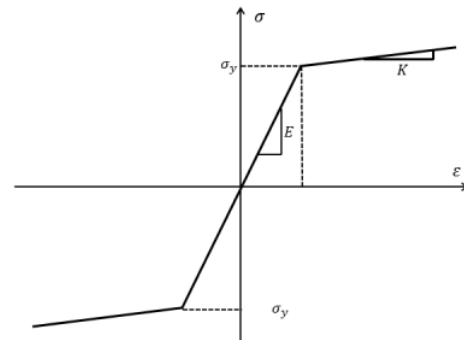


Fig. 3. Constitutive Model for Steel

대해 각각 Kent & Park (Kent and Park, 1971) 모델과 Linear softening 모델(Darvall and Mendis, 1985)을 적용하였다. Fig. 2는 슛크리트의 구성방정식을 나타내며, 여기서 f_{cp}와 ε₀는 슛크리트의 최대 압축강도와 이때의 변형률, f_{ct}와 ε_{ct}는 슛크리트의 잔류 압축강도와 이때의 변형률, f_{tp}와 ε_{tp}는 최대 인장강도와 이때의 변형률, ε_{tu}는 극한 인장변형률이다. 위의 구성방정식 모델은 주로 콘크리트 재료에 사용되지만, 강섬유 보강된 슛크리트와 콘크리트가 유사한 거동 특성을 보인다는 연구 결과(Leung et al., 2005)에 근거하여 본 연구에서 활용되었다.

2.1.3 강제 구성방정식

강재는 모두 선형 등방경화(Linear isotropic hardening) 재료로 정의되었다.

Fig. 3은 선형 등방경화모델의 모식도로 E는 강제 탄성계수, σ_y는 강제 항복응력, K는 강재의 경화계수를 의미한다.

2.2 지반-구조물 상호작용

프레임 요소를 활용한 터널 해석모델에서 터널 라이닝과 주변 지반 간의 상호작용은 종종 법선방향 스프링에 의해 모델링 된다 (ITA, 1988; Kim and Park, 2009). 터널 천정부와 같이 지반 지지력 상실이 예상되는 영역을 고려하기 위해, 압축 전단 스프링

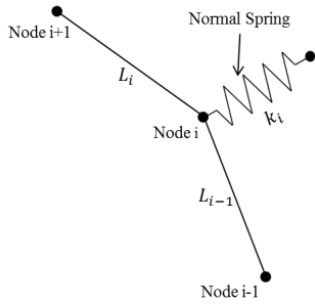


Fig. 4. Ground-Structure Interaction through Normal Spring (Oreste, 2007)

요소를 사용하였다. 스프링 요소를 라이닝과 직각을 이루도록 생성하여 수직(normal) 지반 지지력만 전달될 수 있도록 하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이, 절점 i 에 연결된 스프링 강성 k_i 는 인접한 프레임 요소의 길이와 폭에 의해 영향을 받으며, Eq. (1)과 같이 기술된다.

$$k_i = \eta \cdot \left[\frac{(L_{i-1} + L_i)}{2} \cdot b \right] \quad (1)$$

여기서 η 는 비선형 지반반력계수(지지력-변위 선도의 접선 기울기), L_{i-1} 와 L_i 는 스프링 k_i 의 좌우에 인접한 프레임 요소의 길이, 그리고 b 는 프레임 요소의 폭이다.

지반의 비선형 거동 및 항복을 모사하기 위해 hyperbolic 모델이 종종 사용된다(Oreste, 2007; Do et al., 2014). 그러나 이 모델은 지반의 경화만 고려할 수 있기 때문에, 지반-구조물 상호작용을 고려하기에는 한계가 있다. 특히, 터널 구조물이 극한상태에 이르렀음에도 인접 지반이 계속 경화만 발생하는 것은 실제적으로 불가능하다는 점에서, 인접 지반의 변형을 연화 거동을 지반모델에 반영할 필요가 있다. 이러한 이유로, 본 연구는 Fig. 5의 수정된 hyperbolic 모델을 사용하여 지반 지지력을 모사하였다.

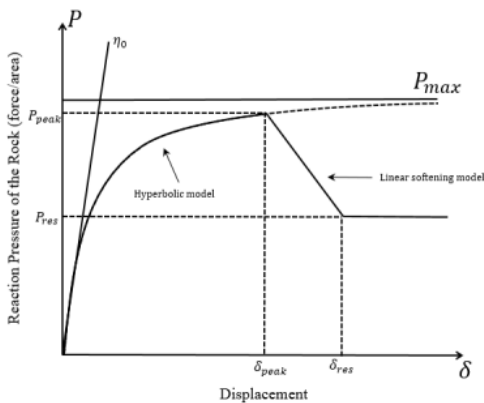


Fig. 5. Modified Hyperbolic Model for Ground Reaction

여기서 P_{max} 는 단위면적당 작용하는 지반의 상한계 반력, P_{peak} 와 δ_{peak} 는 단위면적 당 작용하는 최대 지반반력과 이 때 발생하는 법선방향 지반변위, P_{res} 와 δ_{res} 는 단위면적 당 작용하는 잔류 지반반력과 이 때 발생하는 법선방향 지반변위, η_0 는 반력-변위 선도의 초기 기울기(지반반력계수)이다. 이 모델에서 초기 경화구간과 P_{peak} 이후 변형을 연화 구간은 각각 기존 hyperbolic 모델과 선형 변형을 연화 모델이 적용되었으며, 입력변수의 결정에 관한 자세한 사항은 Oreste (2007)과 Lee et al. (2007)을 각각 참고할 수 있다.

3. 슛크리트의 재료모델과 물성 결정

3.1 축력과 휨 모멘트를 받는 슛크리트 부재의 하중 실험

스�크리트의 모델에 대한 재료 물성을 역해석으로 결정하기 위해 Mashimo et al. (2002)의 터널모형실험 결과를 이용하였다. Mashimo et al. (2002)은 아치형 실험체에 여러 개의 유압잭을 사용해 실제적인 지반하중을 모사하였다. 특히, 아치형 실험체 형상 때문에 축력과 휨모멘트가 동시에 발생할 수 있는 조건이므로, 기존의 3점 휨 시험 방식에 의한 슛크리트 부재 평가방법보다 실제적인 라이닝 하중 상태를 재현할 수 있다. 이 실험에서 사용된 슛크리트는 인축압축강도 21.2 MPa로 설계되었으며, 강지보재의 타설없이 $0.8\phi \times 60$ mm 규격의 강섬유로 보강되었다. 하중실험은 직경 9700 mm, 폭 1000 mm, 두께 300 mm를 갖는 반원형 모양으로 제작된 실험체의 좌-우측($10 \sim 40^\circ$) 8곳에 유압실린더로 하중(10 kN/jack)을 가한 후, 천단부에서 변위하중을 추가하는 방식으로 수행되었다.

3.2 역해석을 통한 슛크리트 재료물성 결정

시멘트 계열 재료들의 물성 평가에서 특히 어려운 부분은 인장에 관련된 역학적 특성을 결정하는 것이다. 화이버 단면 요소에서 활용되는 재료모델은 기본적으로 1축 하중조건 하에서 얻어진 응력-변형을 관계이기 때문에, 기존 휨 시험에 의해 도출된 재료 물성은 적용에 한계가 있다. 인장 변형을 또한 측정이 용이하지 않다. 이러한 이유로 Elsaigh et al. (2011)의 역해석 방법에 강섬유 보강에 따른 영향에 대한 Kim et al. (2014)의 가정을 적용해 슛크리트의 재료물성을 결정하였다. 이 방법은 실험에 의해 도출된 하중-변위 선도와 가정된 해석모델의 결과가 일치할 때까지 재료 구성방정식의 입력변수를 바꾸어가며 수치해석을 반복적으로 수행함으로써 재료물성을 추정하는 방법이다. 본 연구에서는 실험을 통해 추정이 어려운 f_{cu} , ϵ_{cu} , f_{tp} , ϵ_{tu} 를 역해석의 목표변수로 설정하였다. 실험에 의한 측정이 용이한 f_{cp} 는 목표변수에서 제외되었으며, ϵ_0 는 일반적인 사용되는 압축변형을 0.002를 가정하였다. 일반적으로 ϵ_{tp} 는 압축영역의 초기 응력-변형률 선도의 기울기가

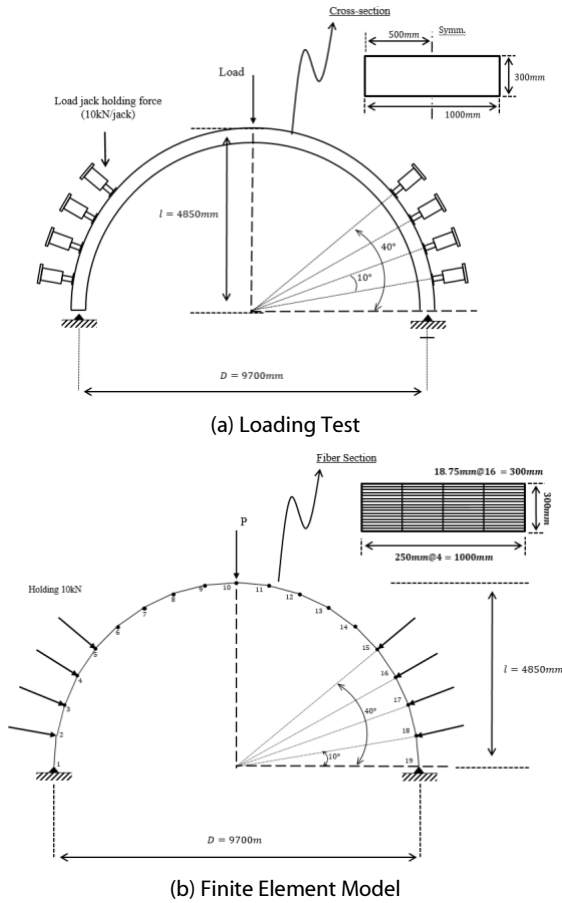


Fig. 6. Schemes of Experiment (Mashimo et al., 2002) and Numerical Model

인장영역의 것과 동일하다는 가정을 사용해 결정되며, 본 연구에서도 이 가정을 사용하였다.

-shotcrete의 최종적인 입력물성이 수치해석과 실험 결과의 비교를 통해 결정되기 때문에, 입력물성을 정량적으로 평가해주는 지표가 필요하며, 이를 위해 결정계수 R^2 (coefficient of determination)이 사용되었다. 수치해석을 통해 얻은 하중-변위선도를 실험 결과에 대한 회귀식으로 고려하여 R^2 을 계산하였다. R^2 이 1에 가까워질수록 가정된 입력 물성이 실험에 사용된 shotcrete를 잘 모사하고 있음을 의미하며, 본 연구에서는 $R^2 \geq 0.95$ 인 shotcrete 물성이 사용되었다.

역해석에 의한 shotcrete 재료물성을 결정하기 위해 Fig. 6과 같이 실험조건과 동일하게 유한요소모델을 생성하였다. 해석모델은 18개의 화이버 단면 요소로 구성되며, 요소 단면은 가로방향으로 4개, 깊이방향으로 16개의 화이버로 분할되었다. 합성 지보에 대한 해석모델의 구현을 위해 OpenSees ver.2.4.3 (McKenna, 2011)이 사용되었다. 또한, 지반의 연화 거동을 해석모델에 반영하기 위해 OpenSees에서 제공되는 hyperbolic 모델을 수정하였다. OpenSees

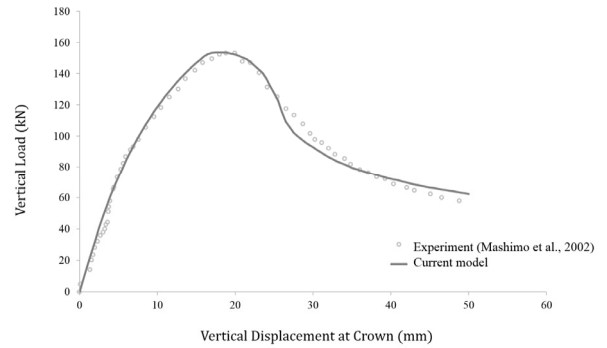


Fig. 7. Comparison with Experimental and Numerical Results ($R^2 = 0.97$)

Table 1. Input Variables of Shotcrete

Constitutive model	Parameters					
	f_{cp} (MPa)	ϵ_0	f_{cu} (MPa)	ϵ_{cu}	f_{tp} (MPa)	ϵ_{tu}
Kent & Park model (compression)	22	0.002	4.4	0.006	-	-
Linear softening model (tension)	-	-	-	-	2.8	0.004

는 프로그램 코드가 공개되어 있어, 이를 가공해 새로운 재료모델의 구현이 가능하다.

역해석에 활용된 해석 데이터는 천단에서의 하중-변위 선도이며, 상관계수 0.95 이상을 충족할 때까지 shotcrete의 재료물성을 바꾸어 가며 실험에 의해 얻어진 하중-변위선도에 상응하는 재료물성을 추정하였다. 이를 통해 최종적으로 Table 1과 같이 재료물성을 도출하였으며, 이때의 하중-변위선도를 Fig. 7에 나타내었다.

4. 강지보-shotcrete 합성부재의 비선형 합성거동 분석

압축력과 휨 모멘트를 동시에 받는 강지보-shotcrete 라이닝의 하중지지능력, 단면력, 지반-구조물 상호작용을 분석하기 위해 추가로 유한요소모델을 생성하였다. 역해석에 사용된 모델을 수정하여 Fig. 8과 같이 해석 모델을 생성하였다. 적용하중은 연직 및 수평토폰이며, 토압계수 0.5를 적용해 수평토폰이 연직토폰에 의존적으로 결정되도록 하였다. 측벽부 거동을 모사하기 위해 모델 양단은 수직 변위와 회전 변위가 구속되도록 경계조건을 설정하였다(horizontally clamped roller). 또한, 주변 지반과의 상호작용을 모사하기 위해 지반스프링을 해석모델에 포함시켰다. 다만, 천단 주변 지반은 이완되어 하중을 지지할 수 없다고 고려하여 해당 영역에는 지반 스프링을 설치하지 않았다. 해석모델이 최대하중

이후의 거동까지 예측할 수 있도록 호장법(arc length method)이 적용되었으며, 이를 통해 절점변위 및 연직토압의 크기가 결정되도록 하였다.

부재 단면의 폭과 두께는 각각 1000 mm, 300 mm이며, NATM

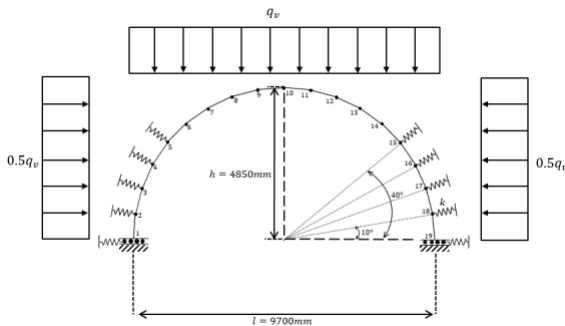


Fig. 8. Finite Element Model for Analyzing the Composite Behaviors of Primary Lining

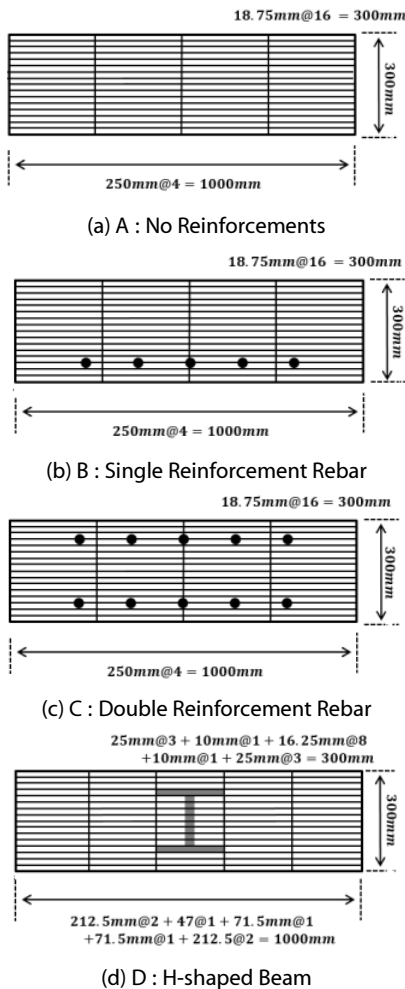


Fig. 9. Fiber Sections

Table 2. Constitutive Model and Parameters for Steel Supports

Constitutive model		Parameters		
		E (GPa)	σ_y (MPa)	K (GPa)
Linear isotropic hardening model	H-shaped beam (SS400)	200	278	2.00
	Steel rebar (SD400)	200	400	2.00

Table 3. Parameters of Modified Hyperbolic Model for Ground

Content type	Parameters			
	P_{peak} (kPa)	δ_{peak} (cm)	P_{res} (kPa)	δ_{res} (cm)
Values	67.2	8	40.3	12

과 NMT에서 주로 사용되고 있는 H150×150×10×7 형강과 D19 철근(단철근, 복철근)이 강지보로써 적용되었다. 합성단면에 대한 화이버 단면을 Fig. 9에 나타내었으며, 슛크리트, 강재, 그리고 지반에 적용된 재료물성은 각각 Tables 1~3에 제시된 바와 같다. 여기서 Table 3에 제시된 값들은 5등급 암반(E_0 : 200 MPa, c : 20 kPa, and ϕ : 30°)에 대한 재료물성에 상응한다.

4.1 강지보 슛크리트 합성부재의 하중 변위 응답 및 단면력 변화

강지보 유형별 합성부재의 거동을 Figs. 10 and 11에 나타내었다. 각각은 연직토압 변화에 따른 천단변위 변화와 각 절점에서의 휨모멘트 및 축력을 도기한 것이다. Fig. 10에서 강지보 유형에 관계없이 초기 하중-변위 구간의 라이닝의 강성은 거의 동일하게 얻어진다. 이는 낮은 하중 수준에서 휨 보다 축력에 의해 합성부재의 저항이 발현되어, 단면 내 면적비가 작은 강재의 지지효과는 사실상 무시될 수 있음을 보여주는 것이다. 그러나 하중이 증대됨에 따라, 슛크리트의 인장응력이 인장강도에 이르게 되면서, 휨 거동이 지배적이 되고 강재에 의한 지지효과가 가시적으로 나타나게 된다. 아치

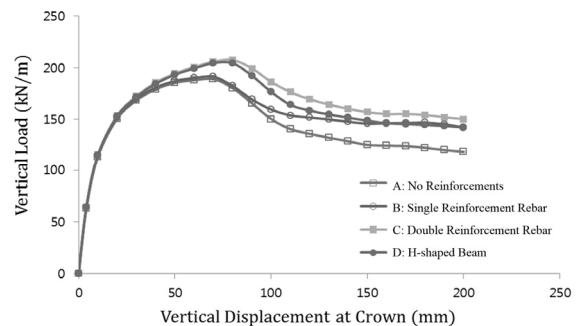


Fig. 10. Load-Displacement Curves

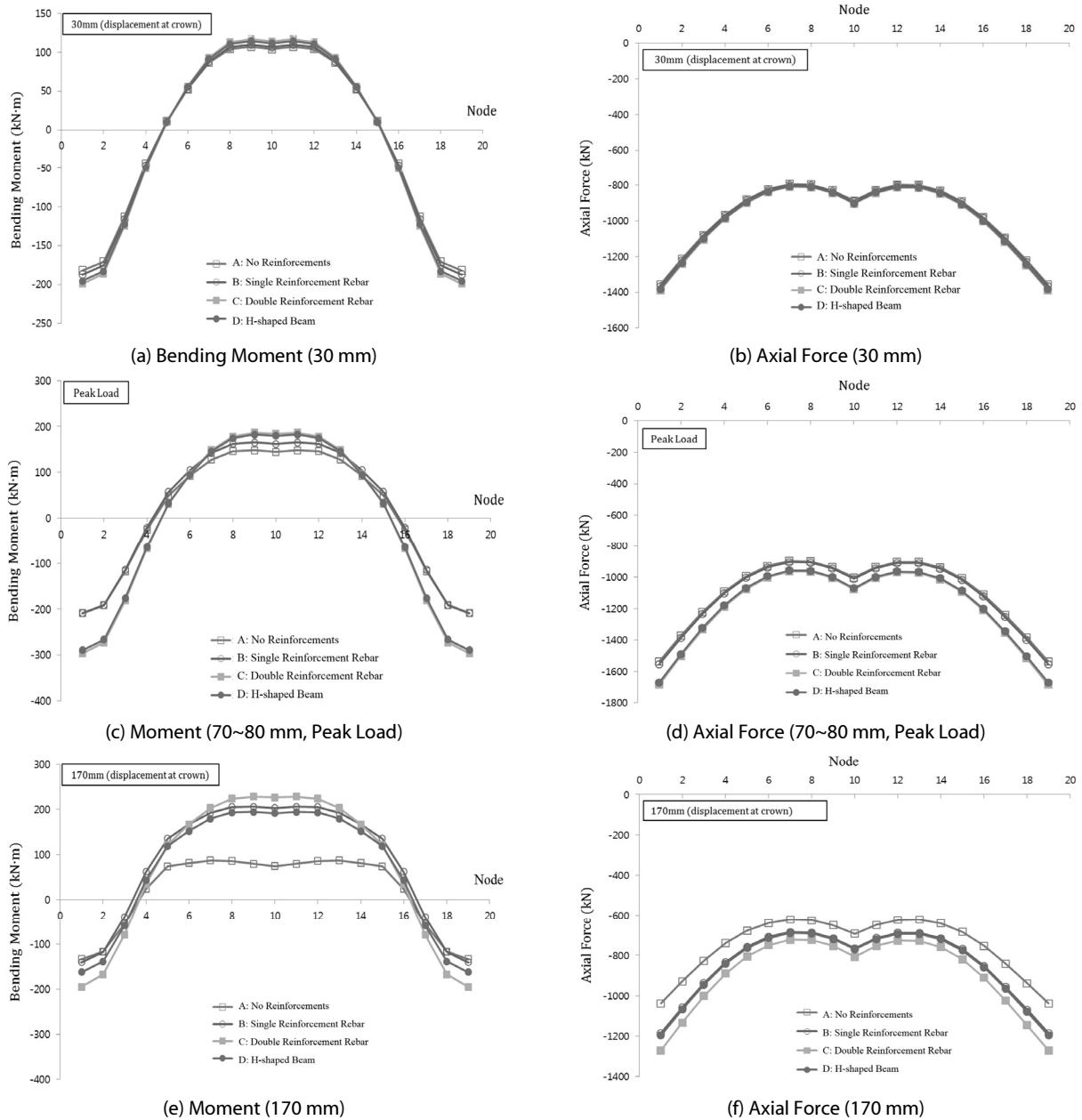


Fig. 11. Bending Moment and Axial Force Diagrams

형상으로 인해 부재 전 영역에 걸쳐 정, 부모멘트가 발생하게 되므로 그 결과 무보강 및 단철근 단면은 복철근 및 H형강 보강 단면에 비해 낮은 최대 지지력을 보이고 점차 하중지지력을 상실하게 된다.

Fig. 12는 최대 휨 모멘트 및 축력이 발생된 위치에서의 강제 화이버의 응력추이를 나타낸 것이다. 최대하중 이후 강제 보강된 슛크리트의 하중-변위선도는 모두 단철근 보강된 부재의 잔류 하중 150 kN/m로 수렴하게 되는데, 이는 Fig. 12의 강재의 응력추이를

통해 다음과 같이 설명할 수 있다. 강재의 항복은 측벽부에서 먼저 발생하고, 이후 하중 증가에 대해 라이닝은 측벽에 인접한 부분과 천단부로 하중이 전이되면서 저항하게 된다. 그리고 최대하중 이후 추가적인 변형에 저항하기 위해 슛크리트는 연화되면서 응력 수준이 감소한다. 그 결과 전체 지지력은 강재의 휨 저항력에 의해 결정되는데, 최대하중 이후 변형이 증대됨에 따라 정 모멘트 작용 영역이 지배적이 된다(Fig. 11). 따라서 단면 하단에 위치한 강재가 항복되면서 추가적인 하중지지력은 더 이상 발휘되지 못하기 때문

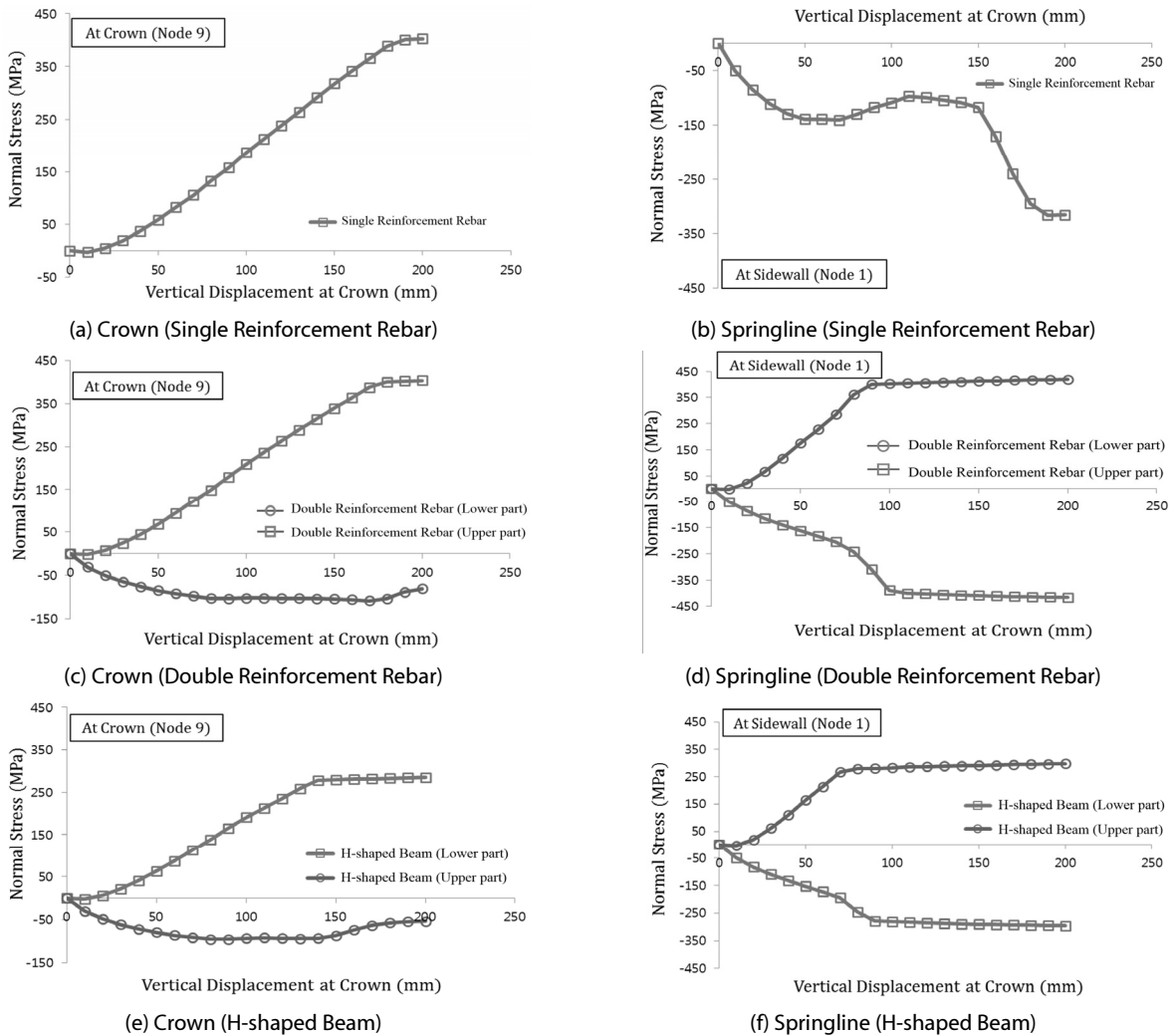


Fig. 12. Stress History of Steel Supports

에 단철근 단면은 가장 낮은 하중지지력을 가지게 된다. 복철근과 H형강 단면은 상단의 강재의 추가적인 저항이 가능하므로, 중립축이 이동에 의해 추가 지지력을 확보할 수 있다.

4.2 강 지보량 증가에 따른 하중지지성능 분석

합성 라이닝의 강재량 변화에 따른 지지성능 변화를 검토하였다. 보강 단면 유형 및 강재량을 달리하여 연직도압-천단변위 선도를 도출하고, 이로부터 각 선도의 최대하중 및 잔류하중을 정리해 Tables 4-6에 나타내었다. 단철근 단면의 경우 철근량이 증가하여도 최대하중의 변화가 나타나지 않았고, 최대하중 이후의 잔류 지지력의 증가만 관찰되었다. 최대하중 이후 모멘트가 전체 부재 거동에 대해 지배적이 되고 슛크리트에 의해서만 부 모멘트가 저항되므로, 해석결과처럼 단철근의 지보효과가 최대하중의 증가 없이 최대하중 이후에 나타나는 것은 타당하다고 판단된다. 한편

부 모멘트에 저항이 가능한 복철근과 H형강 단면은 최대하중이 증가되었다. 특히, 복철근 단면은 강재량이 증가됨에 따라 잔류 지지력이 크게 향상되었다. 그러나 최대하중 및 잔류지지력이 강재 증가량에 대해 선형적으로 비례하지는 않았다. 이는 다량의 강재 사용이 효과적인 합성 라이닝의 최대 및 잔류지지력 향상으로 이어지지 않음을 의미한다.

Table 4. Peak and Residual Load Capacities of Shotcrete Linings : Single Reinforcement Rebar

Content type	# of rebar			
	0	4	6	8
Peak load capacity (kN/m)	189.12	191.55	192.23	192.78
Residual load capacity (kN/m)	123.16	138.25	147.68	154.89

Table 5. Peak and Residual Load Capacities of Shotcrete Linings : Double Reinforcement Rebar

Content type	# of rebar (Upper/Lower)			
	0	4/4	6/6	8/8
Peak load capacity (kN/m)	189.12	205.38	211.41	217.03
Residual load capacity (kN/m)	123.16	143.44	162.18	176.33

Table 6. Peak and Residual Load Capacities of Shotcrete Linings : H-shaped Beam

Content type	Dimension of H-shaped beam			
	No reinforcements	H100×100	H125×125	H150×150
Peak load capacity (kN/m)	189.12	195.86	200.31	206.74
Residual load capacity (kN/m)	123.16	130.37	137.46	146.81

4.3 지반 강성이 터널 구조물의 최대 하중지지력에 미치는 영향

초기 지반강성이 터널 구조물의 하중지지성능에 미치는 영향을 분석하여 Fig. 13에 나타내었다. 여기서 지반강성과 최대 하중지지력은 각각 초기 탄성계수가 200 MPa인 지반과 무보강 라이닝의 최대 하중지지력을 이용해 정규화 하였으며, k_i 는 초기 스프링 강성, k_{200} 는 탄성계수 200 MPa 조건의 지반에 상응하는 초기 스프링 강성, P_{shs} 는 강제 보강된 숏크리트 라이닝의 최대 지지력, P_{sh} 는 무보강 숏크리트 라이닝의 최대 지지력이다. 초기 지반강성이 증가됨에 따라 강재가 합성 지보의 지지력에 미치는 영향이 감소되었으며, 합성 지보의 최대 하중지지력은 지반강성이 증가됨에 따라 일정한 값으로 수렴하였다. 터널 시스템에 작용하는 전체

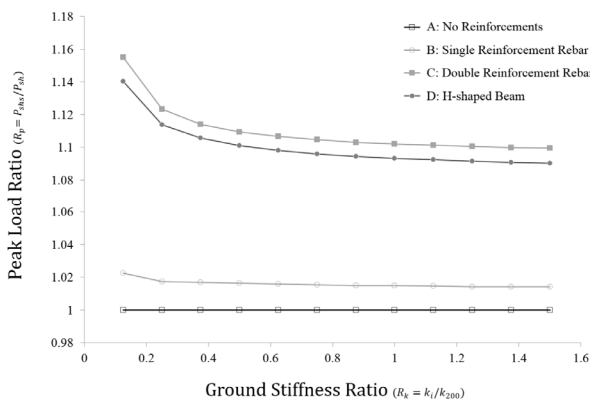


Fig. 13. Effect of the Initial Ground Stiffness

하중은 지반과 구조체의 강성에 따라 분배되는데, 지반강성이 높아짐에 따라 외력의 상당 부분을 구조체 주변의 지반이 분담하게 되기 때문에 이러한 결과가 나타나게 되었다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 수치해석을 통해 강제 보강된 숏크리트 라이닝의 비선형 합성거동을 수치적으로 분석하였다. 지보재의 비선형 합성 거동을 구현하기 위해 화이버 단면 요소를 사용하였으며, 지반의 연화 거동을 고려한 수정된 hyperbolic 모델을 개발해 해석모델에 적용하였다. 제시된 해석모델은 축력과 모멘트가 동시에 발생하는 실규모인 아치형 구조물의 하중-변위 응답을 제한해 냈으며, 여러 강지보 유형에 따른 숏크리트-강 지보 합성 라이닝의 하중성능을 평가하는데 활용되었다. 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 단철근, 복철근, H형강이 보강된 숏크리트 라이닝의 최대 및 잔류 지지력이 검토되었다. 초기 하중-변위 발생 구간에서 합성 지보는 강지보 유형에 상관없이 유사한 강성을 나타낸다. 그러나 최대 및 잔류 지지력은 강지보 유무 및 강지보 유형에 따라 변하게 되며, 복철근 및 H형강 보강 단면의 지보효과가 큼을 확인할 수 있었다. 두 단면은 주어진 하중 및 기하조건에서 무보강 단면에 비해 약 10~15%의 최대 지지력 증가를 보였다. 반면, 단철근 보강 단면은 터널 라이닝에서 발생하는 축력부부 모멘트에 대한 저항력이 낮아 다른 강제 보강 단면에 비해 낮은 최대 하중지지력을 가지며, 최대 하중지지력 관점에서는 사실상 지보효과가 없다고 판단된다. 그러나 잔류 지지력에 대해서는 지보 효과가 나타나는 것으로 확인되었다.
- (2) 터널 라이닝의 휨 모멘트는 숏크리트가 항복됨에 따라 정 모멘트 영역이 확대되었으며, 이러한 경향은 강 지보 유무 및 유형과 무관하게 관찰되었다. 이는 축력부부 모멘트에 의해 터널 라이닝의 항복이 1차적으로 발생하고, 이후 천단 및 아개부 라이닝이 추가적인 변형 증가에 대해 저항해주는 하중 전이 매커니즘을 가지기 때문으로 판단된다. 축력은 외력이 증가됨에 따라 증가하다가 최대 지지력 발생 후에 감소하였다.
- (3) 강제량의 증가는 합성지보의 하중 지지성능을 개선시켰다. 단철근 단면의 경우 철근 수가 증가됨에 따라 가시적인 최대 지지력 증가로 나타나지 않았지만, 잔류 지지력이 증가되었다. 복철근 단면과 H형강 단면의 경우 강제량이 증가됨에 따라 최대 및 잔류 지지력이 모두 향상되었으며, 특히 복철근 단면의 잔류 지지력 향상이 크게 증대되는 것을 확인하였다. 그러나 강제량의 증가가 최대 및 잔류 지지력의 선형적 증가 관계를

갖는 것은 아니므로 초과적인 강제 사용은 비용 및 시공 측면에서 적절하지 않다고 판단된다. 또한, 합성라이닝의 성능 향상과 시공적 측면을 고려했을 때, 복철근 유형의 강지보 활용이 고려될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 ‘지반-지보재간 상호작용을 고려한 대심도 NATM터널의 최적설계’와 산업통상자원부 에너지기술평가원의 ‘과력발전의 발전효율 향상을 위한 연근해용 수평축 회전 3 kW급 원통형 과력발전 시스템 개발(20160708-001)’의 재정적 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Darvall, L. P. and Mendis, P. (1985). "Elastic-plastic softening analysis of plane frames." *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 111, No. 4, pp. 871-888.
- Do, N. A., Dias, D., Oreste, P. and Djeran-Maigre, I. (2014). "The behaviour of the segmental tunnel lining studied by the hyperstatic reaction method." *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 489-510.
- Elsaigh, W. A., Robberts, J. M. and Kearsley, E. P. (2011). "Modeling the behavior of steel-fiber reinforced concrete ground slabs. I : Development of material model." *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, Vol. 137, No. 12, pp. 882-888.
- Filippou, F. C. D., Ambrisi, A. and Issa, A. (1999). "Effects of reinforcement slip on hysteretic behavior of reinforced concrete frame members." *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 3, pp. 327-335.
- Grimstad, E., Kankes, K., Bhasin, R., Magnussen, A. W. and Kaynia, A. (2002). *Rock mass quality Q used in designing reinforced ribs of sprayed concrete and energy absorption*. Norwegian Geotechnical Institute.
- Ha, T. W., Kim, D. Y., Shin, Y. W. and Yang, H. S. (2008). "Evaluation methods of shotcrete lining stresses considering steel rib capacities by two-dimensional numerical analysis." *Tunnelling Technology, Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 10, No. 3, pp. 269-282 (in Korean).
- Hur, J. S., Kim, S. R., Hwang, J. D., Seo, Y. W. and Jung, M. K. (2013). "A study on the performance-based design methodology for tunnels through case study on the tunnel built by the prescribed design." *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 4, pp. 415-429 (in Korean).
- Jeon, S. H., Shin, Y. W. and Yoo, H. K. (2011). "A study on concrete lining stress changes considering load supporting capacity of primary supports of NATM tunnel." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 4, pp. 147-154 (in Korean).
- Ji, Y. H., Jeong, J. S., Jeong, C. K. and Lee, S. H. (2011). "A study on the flexural toughness characteristics of the half-circle type steel fiber reinforced shotcrete." *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 13, No. 2, pp. 83-95 (in Korean).
- Kent, D. C. and Park, R. (1971). "Flexural members with confined concrete." *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 97, No. 7, pp. 1969-1990.
- Kim, J. S., Yu, J. H. and Kim, M. K. (2014). "Numerical study on shotcrete lining with steel reinforcement using a fiber section element." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 3, pp. 919-930 (in Korean).
- Kim, S. H., Park, I. J. and Kim, J. T. (2011). "The strength characteristic of shotcrete reinforced with improved shape steel fiber." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 12, pp. 127-136 (in Korean).
- Korea Expressway Corporation (2001). *Enhancement and quality control of steel fiber reinforced shotcrete (II)* (in Korean).
- Lee, D. H., Lee, S. K. and Bak, D. H. (2001). "Design of tunnelling applied NMT in depth rock mass." *Proc. of Korean Society for Rock Mechanics Conference, Korean Society for Rock Mechanics*, pp. 1-15 (in Korean).
- Lee, S. D., Park, Y. J., Lim, D. C., Son, J. H., You, K. H. and Kim, S. M. (2008). "A numerical study on the behavior of shotcrete reinforced by various steel supports." *Tunnel & Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 18, No. 3, pp. 226-238 (in Korean).
- Lee, S. P., Ryu, J. H., Lee, S. D., Jeon, S. W. and Lee, C. I. (2007). "Performance improvement and durability evaluation of shotcrete for permanent tunnel support." *Tunnel & Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 17, No. 4, pp. 266-284 (in Korean).
- Leung, C. K. Y., Lai, R. and Lee, A. Y. F. (2005). "Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition." *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 4, pp. 788-795.
- Mashimo, H., Isago, N., Yoshinaga, S., Shiroma, H. and Baba, K. (2002). "Experimental investigation on load-carrying capacity of concrete tunnel lining." *Proc. of the 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, ITA, Sydney, Australia*, pp. 1-10.
- McKenna, F. (2011). "OpenSees : a framework for earthquake engineering simulation." *Computing in Science and Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 58-66.
- Moon, S. H., Shin, Y. W., Kim, S. H. and Yoo H. K. (2012). "A study on load bearing capacity of composite member with steel rib and shotcrete in NATM tunnel." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 5, pp. 221-229 (in Korean).
- Oreste, P. P. (2007). "A numerical approach to the hyperstatic reaction method for the dimensioning of tunnel supports." *Tunnelling and underground space technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 185-205.
- Park, S. S. and Kim, S. J. (2013). "Effect of steel-fiber distribution on flexural strength and toughness of shotcrete mimicked-concrete specimen." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 6, pp. 53-62 (in Korean).
- Park, Y. J., Lee, J. K., Noh, B. K., You, K. H. and Lee, S. D. (2010).

- “Flexural behavior of reinforced ribs of shotcrete for various configurations of reinforcements.” *Tunnel & Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 20, No. 3, pp. 169-182 (in Korean).
- Shin, H. S., Kim, D. G., Chang, S. H. and Bae, G. J. (2006). “A study on failure mechanism and load-bearing capacity of single-shell tunnel lining.” *Tunnelling Technology, Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 8, No. 3, pp. 273-287 (in Korean).
- Spacone, E., Filippou, F. C. and Taucer, F. F. (1996a). “Fibre beam-column model for non-linear analysis of R/C frames : Part I. Formulation.” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, No. 7, pp. 711-725.
- Taucer, F., Spacone, E. and Filippou, F. C. (1991). *A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures*. Report UCB/EERC 91/17. Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley.
- Yoo, C. S., Kim, Y. J., Bae, G. J. and Moon, H. D. (1997). “An experimental study on load bearing capacity of lattice girder as a steel support in tunnelling.” *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 13, No. 4, pp. 163-176 (in Korean).
- You, K. H., Jung, J. S. and Park, Y. J. (2008). “A tunnel mock-up test and numerical analysis on steel fiber reinforced shotcrete.” *Tunnel & Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 18, No. 2, pp. 107-117 (in Korean).