

면진층 구조를 가진 다중셸 해저터널의 응력 저감 효과

김대상, 김웅진*
한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부

Stress Reduction Effect of Multi-shell Undersea Tunnel with Seismic Isolation Layer

Dae Sang Kim, Ungjin Kim*
Advanced Railroad Civil Engineering Division, Korea Railroad Research Institute

요약 일반적으로 해저 터널은 고수압 조건을 고려해야 한다. 고수압 조건 하에서 구조물에 가해지는 외력에 저항하기 위해서는 두꺼운 라이닝 두께를 필요로 하며, 이는 터널 굴착 단면적 증가로 인한 공사비 증가로 이어진다. 본 논문에서는 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 2중 라이닝의 사이에 탄성재를 설치하여 면진 구조를 형성한 다중셸 터널 형식을 제안하고 유한요소 수치해석을 수행하였다. 콘크리트 재료의 외측 라이닝과 금속 재료의 내측 라이닝 사이에 댄퍼와 탄성재 채움으로 이루어진 면진 구조를 가진 터널을 수심 80 m에서의 수압 및 토압이 작용하는 조건으로 모델링하고, 지진 하중 작용 시 다중셸 터널의 거동을 분석하였다. 면진층은 내, 외측 라이닝의 연결을 강결에서 탄성 연결로 변화시켜 외측 라이닝에 작용하는 응력의 상당 부분을 흡수하는 역할을 하며 내측 라이닝에 작용하는 부재력을 크게 저감시키는 것으로 나타났다. 외측 라이닝의 두께가 얇을수록, 내측 라이닝의 두께가 두꺼울수록 내측 라이닝의 하중 분담이 커지므로 부재력이 증가하는 경향을 보였다.

Abstract Generally, high water pressure conditions should be considered in undersea tunnels. A large lining thickness is required to resist the external load under high-pressure conditions, which increases the construction costs due to an increase in the cross-sectional area of tunnel excavation and tunnel lining thickness. This paper proposed a multi-shell tunnel, which has an elastic seismic isolation layer between the double linings, and finite element numerical analyses were conducted. The tunnels with a seismic isolation layer between the concrete outer lining and the steel inner lining are modeled underwater conditions at a depth of 80 m, and earth pressures and the behaviors of multi-shell tunnels under seismic load were analyzed. The seismic isolation layer changes the connection between the inner and outer linings from rigid to elastic, absorbing a significant part of the stress acting on the outer lining and greatly reducing the member force of the inner lining. The load distribution of the inner lining increased as the outer lining was thinner and the inner lining was thicker, so the member force of it tended to increase.

Keywords : Undersea Tunnel, Multi-shell, Earthquake, Seismic Isolation Layer, Numerical Analysis

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(대륙간 연결을 위한 해저철도 핵심기술 개발, PK2304A2)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Ungjin Kim(KRRI)

email: ujkim@krri.re.kr

Received May 31, 2023

Accepted July 7, 2023

Revised July 6, 2023

Published July 31, 2023

1. 서론

최근 해저터널은 육지와 섬의 연결, 혹은 국가간 연결을 위한 유용한 교통 수단으로 일본, 영국, 프랑스, 중국 등 여러 국가에서 활발하게 건설 및 연구되고 있다. 해저터널은 지상 구조물과 달리 고수압 조건에서의 문제를 고려하여야 한다. 유입수량의 제어 조건을 고려하여 배수, 배수 개념을 설정하고 터널 라이닝에 작용하는 높은 수압을 지지할 수 있도록 안정성을 확보하여 설계하여야 한다[1]. 추가로 지진 시 피해를 막기 위한 내진설계가 필요하다.

위와 같은 조건에서의 해저터널은 비대한 라이닝 두께를 필요로 하며 이는 터널 굴착 및 구조물 단면적 증가로 인한 공사비 증가로 이어진다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 복합재 세그먼트[2], 2중 라이닝 등의 연구가 이루어졌다. 2중 라이닝은 싱글 라이닝과 비교하여 방수 및 기밀성 측면에서의 장점이 있어 실무 적용 및 연구가 증가하고 있다[3-5].

본 논문에서는 내진 설계를 고려한 해저터널 구조로 2중 라이닝의 사이에 탄성재를 설치하여 면진 구조를 형성한 다중셸 터널 형식을 제안하였다. 다중셸 터널은 Fig. 1과 같이 콘크리트의 외측라이닝과 금속재료(강재 등)로 구성된 내측라이닝의 사이에 댐퍼와 탄성재 채움으로 이루어진 면진 구조를 설치하여 지진과 같은 터널 외부로부터의 하중을 흡수하여 내측 라이닝 및 터널 내부 구조물을 보호할 수 있는 터널 구조이다. 다중셸 터널을 유한요소법으로 모델링하고 지진과 같은 동하중 작용시 다중셸 터널의 응력 전달 메커니즘 및 하중 분담 수준을 평가하였다.

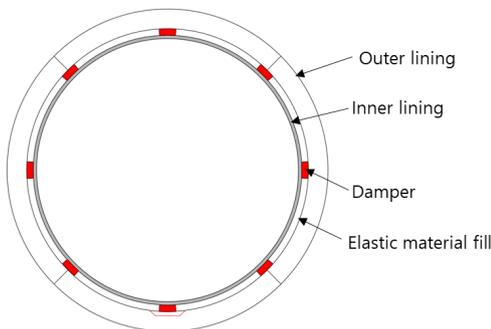


Fig. 1. Concept drawing of Multi-shell tunnel

2. 수치해석 개요

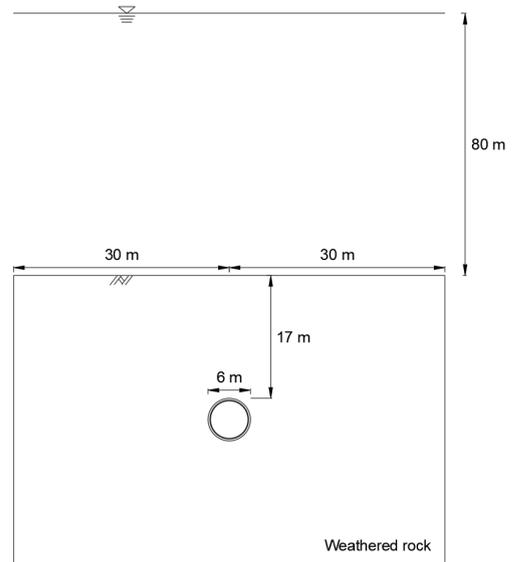
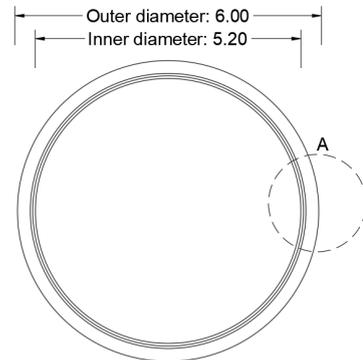
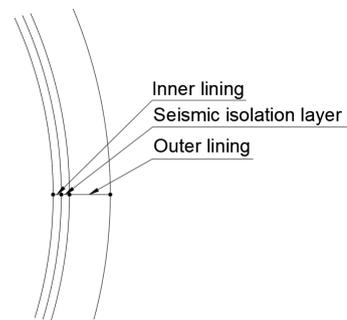


Fig. 2. Analyses modeling



(a)



(b)

Fig. 3. Modeling of multi-shell tunnel
(a) Cross section of multi-shell (b) Detail of "A"

Table 1. Material properties

Items	Materials	Models	Unit weights (kN/m ³)	Saturated unit weights (kN/m ³)	Friction angles (°)	Cohesions (kN/m ²)	Elastic moduli (kN/m ²)	Poisson's ratios
Ground	Weathered rock	Mohr-Coulomb	20	22	33	30	200,000	0.3
Outer lining	Concrete	Linear elastic	24	24	-	-	25,000,000	0.25
Seismic isolation layer	Rubber	Linear elastic	15	15	-	-	8,000	0.49
Inner lining	Steel	Plate	78	78	-	-	210,000,000	0.3

해저 터널용 다중셀 구조의 거동을 분석하기 위하여 유한요소 수치해석을 수행하였다. Fig. 2와 같이 외경 6 m의 터널을 해저 80 m, 토피고 17 m의 풍화암 지반에 건설하는 조건으로 가정하고 모델링하여 수심 100 m에서의 수압 및 토압 작용 조건에서 지진 하중 작용 시 다중셀 터널의 거동을 파악하였다. 해석영역은 터널 중심으로부터 양측면까지 30 m로 설정하였다. 하부경계는 깊이 40 m에서 기반암이 나오는 것으로 가정하여 터널 중심으로부터 20 m 하부로 설정하였다. 다중셀 터널의 모델은 Fig. 3과 같이 외측라이닝, 면진층, 내측라이닝으로 구성하였다. 15 Node, Plane stain 요소를 이용하여 지반, 외측라이닝, 면진층을 모델링하였으며, 내측라이닝에는 plate 요소를 이용하였다. 해석에 사용된 재료, 모델, 물성값은 Table 1에 정리하였다.

Table 2. Analysis cases

Case No.	Analysis variables	Thickness of Layer (mm)		
		Seismic isolation layer	Outer lining	Inner lining
S-1	Thickness of Seismic isolation layer	0	300	50
S-2		50	300	50
S-3		100	300	50
S-4		150	300	50
O-1	Thickness of Outer Lining	50	200	50
O-2		50	250	50
O-3		50	300	50
O-4		50	350	50
I-1	Thickness of Inner Lining	50	300	20
I-2		50	300	30
I-3		50	300	40
I-4		50	300	50

다중셀 터널을 구성하는 각 층의 두께를 변수로 하여 해석케이스를 결정하였다. 외측라이닝 두께 300 mm, 면진층 두께 50 mm, 내측라이닝 두께 50 mm를 기본

케이스로 설정하였다. 여기서 면진층의 두께는 0, 50, 100, 150 mm, 외측라이닝은 200, 250, 300, 350 mm, 내측라이닝은 20, 30, 40, 50 mm로 변화시키며 해석하였다. 해석케이스는 Table 2와 같다.

다중셀 터널의 지진하중 재하 시 거동을 분석하고 변형 흡수 성능을 평가하기 위하여 응답변위법을 적용하여 지진 하중을 재하하였다. 지진 시 발생하는 지반의 변위를 구조물에 강제로 적용하기 위하여 Eq. (1)의 단일 코사인법을 이용하여 Fig. 4와 같이 지반의 변위를 산정하였다.

$$U_h(x) = \frac{2}{x^2} \cdot S_v \cdot T_G \cdot \cos\left(\frac{\pi x}{2H}\right) \quad (1)$$

여기서, S_v 는 지표층 지반의 고유주기에서의 기반암 설계속도 응답 스펙트럼, T_G 는 지층의 고유주기, H 는 지층의 두께이다.

단일 코사인법은 지반내 변위의 분포를 코사인 함수로 표현하며, 수평변위의 크기는 기반암의 설계응답스펙트럼과 고유주기에 의하여 결정된다[6].

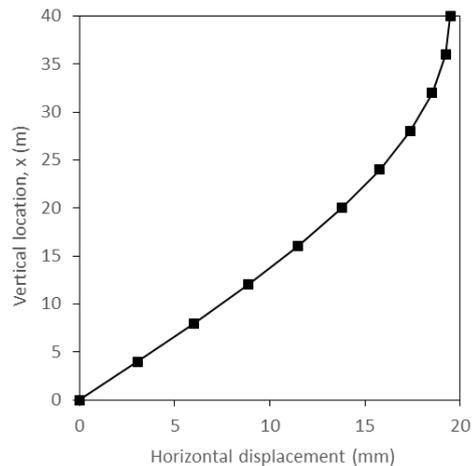


Fig. 4. Ground deformation by response displacement method

3. 해석결과 및 분석

3.1 면진층의 하중 저감 성능

다중셀 터널에 지진 하중 작용 시 면진층 적용의 효과를 파악하기 위하여 면진층 두께를 변화시켜 해석하였다. Fig. 5는 지진 하중 작용시 면진층 두께에 따른 내측 라이닝의 부재력을 비교한 그래프이다. 면진층을 적용하지 않는 경우와 비교하여 면진층을 적용하는 경우 축력은 93.2 ~ 94.5%, 전단력은 15.5 ~ 17.3%가 저감되는 반면, 모멘트는 34.0 ~ 41.1% 증가하는 결과를 보였다. 모멘트는 증가하였으나 축력이 크게 저감되어 면진층에 의한 내측라이닝의 하중저감 효과를 확인하였다. 면진층의 두께에 따른 부재력의 변화는 두께가 50 ~ 150 mm로 변화하여도 큰 차이를 보이지 않았다.

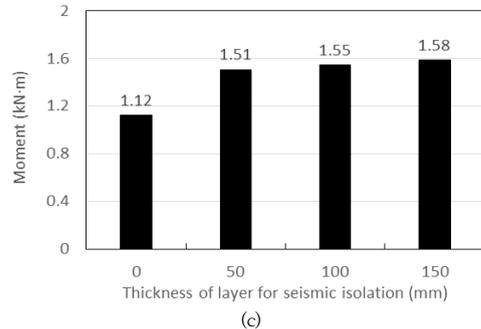
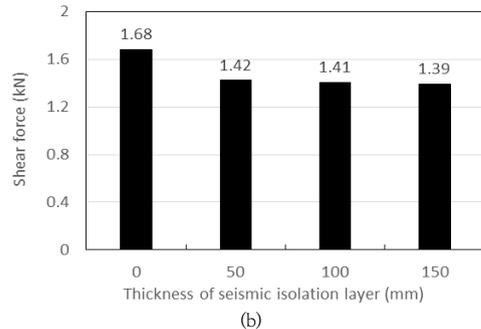
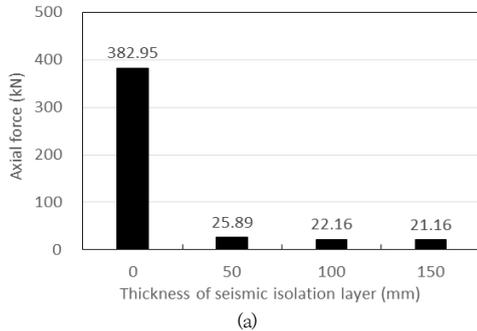


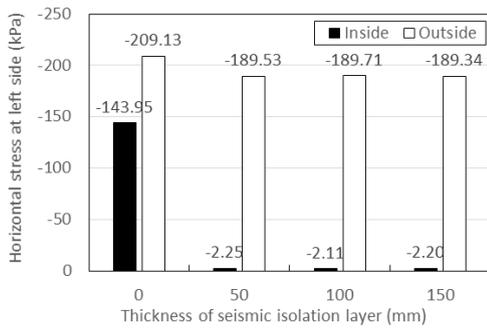
Fig. 5. Member forces of inner lining according to thickness of seismic isolation layer
(a) Axial force (b) Shear force (c) Moment

지진하중 작용 시 면진층의 유무에 따라 축력의 감소를 보이는 원인은 면진층에 의한 내, 외측 라이닝 사이의

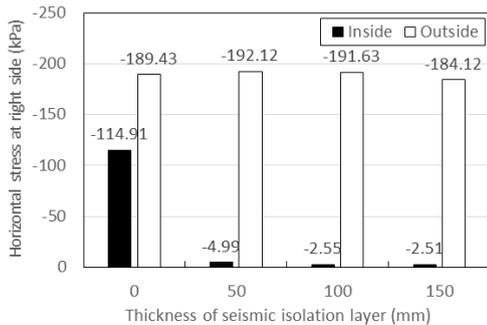
Table 3. Axial force distribution of inner lining

Items	Before seismic load	After seismic load
Without seismic isolation layer		
With seismic isolation layer		

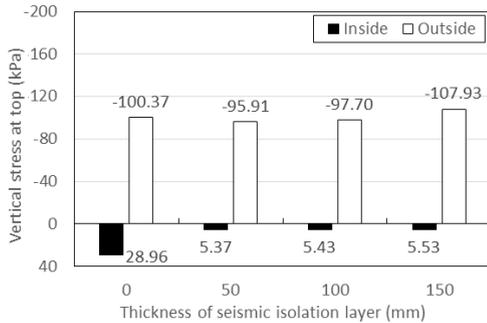
연결이 강결에서 탄성 연결로 변하며 이에 따른 응력 흡수 효과에 의한 것으로 판단된다. Table 3은 지진 하중 작용 전, 후의 축력 분포를 면진층 적용 여부에 따라 비교한 그림이다. 면진층을 적용하지 않은 경우 지진 하중 작용 전 수압 및 토압이 외측라이닝을 통해 내측 라이닝에 작용하여 라이닝의 측면이 압축, 상하부 면이 인장을 받는 분포를 보이나 면진층을 적용하는 경우(Case S-2) 측면에서 구속압이 작용하지 않아 라이닝 상부에서 인장, 하부에서 압축을 받는 분포를 보여준다. 지진 하중 작용 후에도 마찬가지로 면진층을 적용한 경우 내, 외측 라이닝의 연결이 약한 상태에서 변형이 가해져 라이닝 좌상부에서만 인장이 발생한 형태의 분포를 보였다.



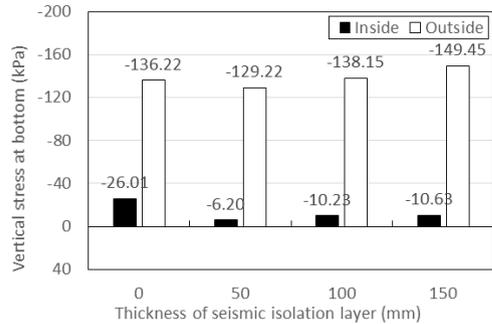
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. Stress reduction between outside and inside of tunnel according to thickness of seismic isolation layer

(a) Horizontal stress at left side (b) Horizontal stress at right side (c) Vertical stress at top (d) Vertical stress at bottom

Fig. 6은 지진 하중 작용 시 터널 내외측의 응력을 면진층 두께에 따라 나타낸 그래프이다. 터널의 좌, 우측의 수평응력과 상, 하부의 수직 응력을 비교하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 면진층을 적용하지 않는 경우 수평응력의 터널의 내 외측에서의 변화는 31.1 ~ 39.3% 저감하여 터널 외부에서 작용하는 응력의 60% 이상이 내측 라이닝에 전달되나 면진층을 적용하는 경우 97.4 ~ 98.9%의 수평응력을 면진층에서 흡수하여 내부라이닝에는 수평응력이 거의 전달되지 않는 것을 볼 수 있다. 수직응력의 경우 면진층이 없는 경우 71.1 ~ 80.9%, 면진층이 있는 경우 92.5 ~ 95.2%의 저감을 보여 마찬가지로 면진층의 응력흡수 효과를 볼 수 있었다.

3.2 외측 라이닝 두께 변화에 따른 하중 저감 효과

Fig. 7은 외측 라이닝의 두께가 200 ~ 350 mm로 변화함에 따른 부재력의 변화를 나타낸 그래프이다. 외측라이닝이 두꺼워질 경우 축력은 25.60 ~ 25.97 kN으로 거의 변하지 않으나 전단력은 1.90 kN에서 1.26 kN로 33.6% 저감되며, 모멘트는 1.74 kN·m에서 1.39 kN·m로 20.1% 저감되는 것을 확인하였다. 이는 외측 라이닝 두께 변화에 따라 내부라이닝에서 하중 분담 특성이 달라짐을 의미한다. 따라서 설계 시에는 외측라이닝에 의한 내측라이닝의 부재력 저감효과를 고려할 필요가 있다.

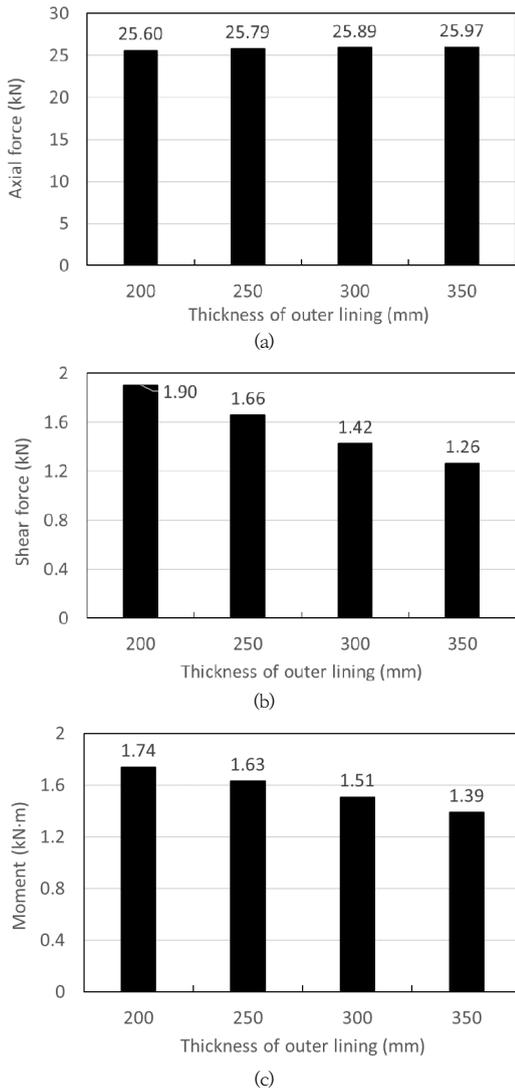


Fig. 7. Member force of inner lining according to thickness of outer lining
(a) Axial force (b) Shear force (c) Moment

3.3 내측 라이닝 두께의 영향

Fig. 8은 내측 라이닝의 두께가 25 ~ 100 mm로 변할 때 지진 하중 작용시 부재력을 나타낸 그래프이다. 내측 라이닝 두께 증가에 따라 축력은 2배, 전단력은 29배, 모멘트는 59배로 증가하였다. 이는 내측 라이닝의 두께가 증가할수록 외력에 대한 내측라이닝의 하중분담이 커지기 때문으로 판단된다. 지진 하중시 부재력은 내측 라이닝이 얇을수록 작게 나타나지만 내측라이닝은 궤도 하중 및 열차 동하중을 지지해야 하는 구조이므로 설계 시에는 이를 고려하여 결정해야 할 것이다.

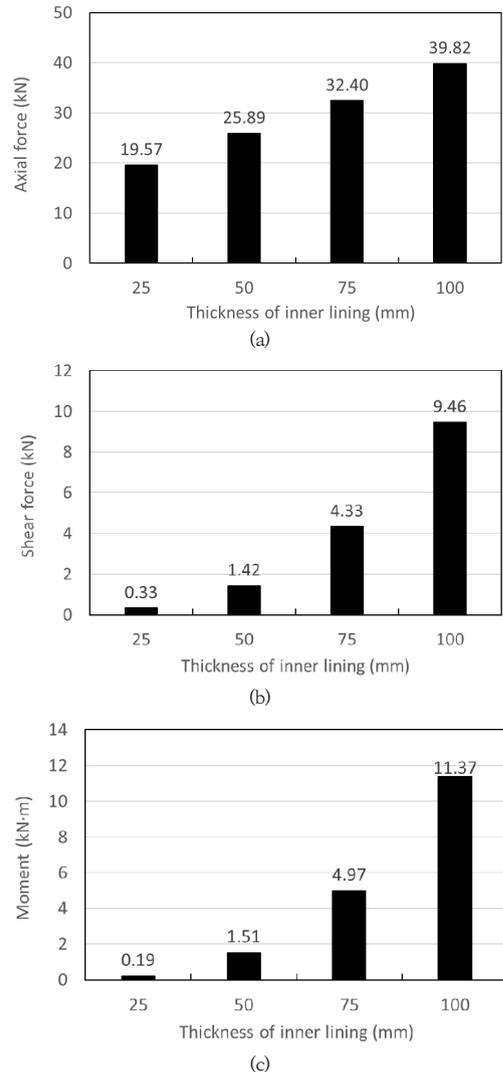


Fig. 8. Member force of inner lining according to thickness of inner lining
(a) Axial force (b) Shear force (c) Moment

4. 결론

본 연구에서는 해저 터널을 건설하는 방법으로 면진 구조를 가진 다중셀 터널을 제안하였다. 수심 100 m에서의 수압 및 토압 작용 조건으로 다중셀 터널을 수치 모델링하고 응답변위법으로 지진 하중을 모사하여 하중 작용시 다중셀 터널의 거동을 평가하였다.

- (1) 면진층은 내, 외측 라이닝의 연결을 강결에서 탄성 연결로 변화시켜 외부라이닝에 작용하는 응력의 상당 부분을 흡수하는 역할을 한다. 이에 따라 내

부라이닝에 작용하는 부재력을 크게 저감시킬 수 있다. 면진층 고무의 두께는 일정 수준 이상을 확보하면 내부라이닝의 부재력에 큰 영향을 미치지 않는다.

- (2) 외측라이닝 두께 변화에 따라 내부라이닝에 전달 되는 응력 차이가 발생하며, 내측라이닝의 좌우 응력 차와 상하부 응력 차에 의해 전단력과 모멘트가 변화한다. 외측라이닝의 두께가 두꺼울수록 내측라이닝의 부재력이 감소하는 경향을 보이며 설계시에는 이를 고려하여야 한다.
- (3) 내측라이닝의 두께가 두꺼울수록 외력에 대한 내측라이닝의 하중분담이 커지므로 부재력이 증가한다. 내측 라이닝은 궤도 및 열차 동하중을 지지해야 하는 구조임을 감안할 때 내측라이닝 설계 시에는 외력에 의한 영향보다 터널 내부의 하중을 고려하는 것이 바람직하다.

References

- [1] J. H. Shin, D. I. Park, E. J. Joo, "Effect of hydraulic lining-ground interaction on subsea tunnels", *Tunnelling Technology*, Vol.10, No.1, pp.49-57, 2008.
- [2] W. Zhang, A. Koizumi, "Behavior of composite segment for shield tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.25, No.4, pp.325-332, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/i.tust.2010.01.007>
- [3] S. Wang, L. Ruan, X. Shen, W. Dong, "Investigation of the mechanical properties of double lining structure of shield tunnel with different joint surface", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90, pp.404-419, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/i.tust.2019.04.011>
- [4] Japan Tunnelling Association, "Challenges and changes: Tunnelling activities in Japan 1994.", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.10, No.2, pp.203-215, 1995.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(95\)00008-M](https://doi.org/10.1016/0886-7798(95)00008-M)
- [5] K. Feng, C. He, Y. Fang, Y. Jiang, "Study on the mechanical behavior of lining structure for underwater shield tunnel of high-speed railway", *Advances in Structural Engineering*, Vol.16, No.8, pp.1381-1399, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1260/1369-4332.16.8.1381>
- [6] D. Park, J. H. Shin, S. U. Yun, "Seismic Analysis of Tunnel in Transverse Direction Part I: Estimation of Seismic Tunnel Response via Method of Seismic Displacement", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.6, pp.57-70, 2010

김 대 상(Dae Sang Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울대학교 대학원 자원공학과 (공학석사)
- 2000년 3월 : 동경대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 4월 ~ 2002년 6월 : 서울대학교 지진공학연구센터 전임연구원
- 2002년 6월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>

지반공학, 궤도토목

김 응 진(Ungjin Kim)

[정회원]



- 2008년 2월 : 성균관대학교 사회 환경시스템공학과 (학사)
- 2010년 2월 : 성균관대학교 건설 환경시스템공학과 (석사)
- 2021년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 교통시스템공학 (박사)
- 2021년 7월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

지반공학, 궤도토목