

2차원 철도교 접속부 열차-궤도-교량/노반 동적상호작용 해석

2-Dimensional Train-Track-Bridge/Subsoil Dynamic Interaction Analysis at Railway Bridge Transition Zone

이용재*, 장승엽†, 최준혁*

Yong Jae Lee*, Seung Yup Jang†, Jun Hyuck Choi*

초록 이 연구에서는 2차원 평면요소를 적용한 유한요소해석 모델을 이용하여 철도교 접속부에서의 열차-궤도-교량/노반 동적상호작용 해석을 수행하였다. 모델 검증을 위해 일반적으로 많이 적용되는 질량-스프링/댐퍼 모델의 해석결과와 비교 분석한 결과 동일한 정적 강성을 갖도록 모델링했음에도 평면요소 모델을 적용한 경우 노반의 처짐이 더 크고, 더 넓게 분포하는 것으로 나타났고, 이러한 처짐의 차이가 노반과 교대 경계에서 동적 윤중 변동을 더 증가시키는 것으로 나타났다. 결과적으로 평면요소 모델이 노반의 변형과 응력의 분배를 고려할 수 있어 접속부 평가에 더 적합한 것으로 평가되었다.

주요어 : 열차-궤도-교량/노반 동적 상호작용, 철도교량, 접속부, 평면요소

1. 서 론

철도교 접속부는 지지강성의 불연속성과 노반의 부등침하로 인해 궤도틀림이 빈번하게 발생하여 유지보수가 집중되는 구간이다. 유지보수 저감을 위해서는 적절한 강성 설계와 노반 침하 방지 대책 수립, 정밀한 시공이 요구된다.

철도교 접속부 설계의 적정성을 검토하기 위해서는 열차-궤도-교량/노반 동적 상호작용 해석이 필요하다. 일반적으로 Fig. 1(a)와 같이 궤도와 노반을 질량과 스프링·댐퍼의 조합으로 이상화한 질량-스프링/댐퍼 모델이 주로 적용되고 있다. 그러나, Winkler 스프링으로는 노반의 변형과 응력 분배를 고려하기 어렵고, 또 단일 스프링/댐퍼로 모사하기에는 교량 접속부 노반은 너무 복잡한 구조로 이루어져 있다(Fig. 2 참조). 3차원 해석모델을 적용하기에는 해석모델이 너무 커지고, 해석 소요시간이 증가한다.

이러한 문제점을 보완하기 위해 이 연구에서는 2차원 평면요소를 적용하여 철도교 접속부를 모형화하는 방안을 검토하였다. 모델의 검증을 위해 2차원 평면요소 모델 해석결과와 질량-스프링/댐퍼 모델의 해석결과를 비교·분석하였다.

2. 해석모델

상용 구조해석 프로그램인 Abaqus를 사용하여 해석을 수행하였다.

질량-스프링/댐퍼 모델은 침목과 도상을 질량을 가진 절점으로 모사하고, 레일-침목, 침목-도상, 도상-노반을 연직방향의 스프링과 댐퍼로 연결하였다. 평면요소 모델에서는 침목, 도상, 노반을 평면응력 요소(plane stress element)를 사용하여 모델링했다. 질량-스프링/댐퍼 모델의 스프링 상수는 3차원 정적해석에서 얻은 처짐과 같아지도록 정하고, 감쇠계수는 문헌[1]의 값을 인용하였다. 평면요소의 탄성계수는 KCS 47 10 25[2]의 값을 적용하되, 3차원 정적해석에서 얻은 처짐과 같아지도록 요소의 유효폭을 조정하였다. 도상과 노반의 감쇠 특성은 Rayleigh 댐핑을 적용하고, 문헌[3]의 값을 인용하였다.

두 모델 모두 레일과 교량은 2차원 보(beam)로 모델링했다.

열차는 선행 연구[4]와 동일하게 질량을 가지는 강체와 스프링/댐퍼를 연결하여 모델링하고, 동력차 2량, 동력객차 2량, 객차 2량으로 구성된 6량 편성을 300 km/h로 이동시켜 해석하였다.

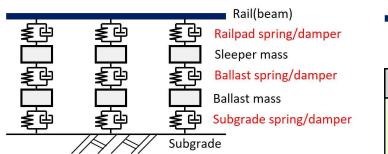
3. 결과 및 분석

Fig. 3은 노반과 교대 경계 바로 옆 접속부 노

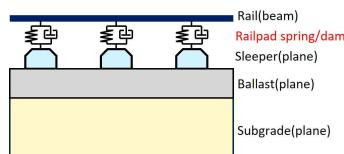
† 교신저자: 국립한국교통대학교 교통시스

템공학과 (syjang@ut.ac.kr)

* 한국교통대학교 교통정책·시스템공학과



(a) Mass-spring/damper model
(MSD model)



(b) Plane element model
(PE model)

Fig. 1. Schematic diagram of track models

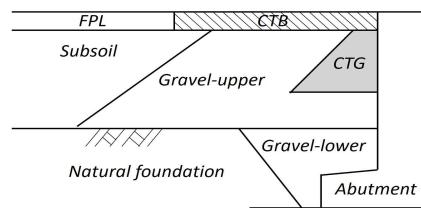


Fig. 2. Structure of railway bridge transition zone [2]

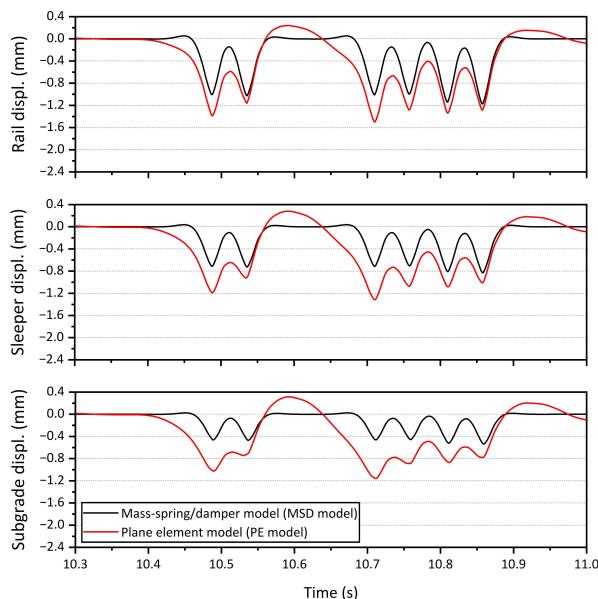


Fig. 3. Vertical displacement

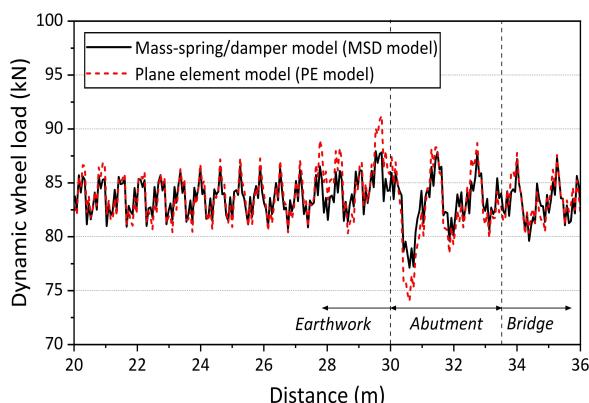


Fig. 4. Dynamic wheel load

반 위에 놓인 침목 위치에서 레일, 침목, 노반의 연직방향 절대처짐을 비교한 것이다.

Fig. 3에서 질량-스프링/댐퍼 모델에 의한 처짐보다 평면요소모델에 의한 처짐이 더 크고, 더 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 이는 두 모델의 감쇠 특성의 차이에 따른 영향도 있지만, 그보다는 평면요소 모델이 도상과 노반을 연속체로 모델링하기 때문에 하중 작용점으로부터 영향거리가 Winkler 스프링 모델보다 더 크게 나타나고,

따라서 인접한 두 축하중의 영향이 상호 중첩되는 것이 주요 원인이라고 판단된다. Fig. 4에서 이러한 처짐의 차이가 결과적으로 노반과 교대 경계에서 동적 윤중변동이 약 4~5% 더 커지는 결과를 가져왔음을 알 수 있다.

4. 결론

이 연구에서는 2차원 평면요소를 적용한 유한요소해석 모델을 이용하여 철도교 접속부에서의 열차-궤도-교량/노반 동적상호작용 해석을 수행하고, 모델 검증을 위해 일반적으로 많이 적용되는 질량-스프링/댐퍼 모델의 해석결과와 비교 분석하였다.

해석결과를 종합하면 질량-스프링/댐퍼 모델에 비해 평면요소를 적용한 모델은 노반의 변형과 응력 분배를 고려할 수 있어 철도교 접속부의 거동을 평가하는 데 더 적합할 것으로 판단된다.

후기

이 연구는 2025년 국립한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

참고문헌

- [1] S.C. Yang, J.H. Lee(2012) Development of a numerical method of vertical train/track interaction in the track section with hanging sleepers, *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(3), 251-256.
- [2] Korea Construction Specification Center(2019) KCS 47 10 25 Earthwork, <http://www.kcsc.re.kr/>
- [3] C.A. Ribeiro, A. Paixão, E. Fortunato, R. Calçada (2015) Under sleeper pads in transition zones at railway underpasses: numerical modelling and experimental validation, *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(11), 1432-1449.
- [4] Y.J. Lee, S.Y. Jang, S.I. Kim, J.H Choi, S.W. Yoo(2025) Impact of bridge resonance on dynamic responses of track in high-speed railways, *Journal of the Korean Society for Railway*, 28(1), 17-31.