

철도교 접속부 노반 탄성계수 변화에 따른 윤중변동 영향 분석

Effect of Subgrade Elastic Modulus Variation on Dynamic Wheel Loads at Railway Bridge Transition Zones

이용재*, 장승엽†, 최준혁*

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

초록 철도 교량 접속부는 상대적으로 강성이 낮은 토공부에서 강성이 큰 교량 구조물로 연결되어 궤도 지지강성 변화가 큰 구간이다. 궤도 지지강성이 급격하게 변화하는 구간을 열차가 통과할 경우, 동적 윤중의 변동이 증폭되어 차량의 승차감과 주행안전성이 저하될 뿐만 아니라, 궤도 구성요소의 피로 누적과 손상을 가속시켜 유지보수 주기 단축과 보수 비용 증가로 이어질 수 있다. 이에 본 연구에서는 국내 접속부 설계기준에 따라 유한요소 해석프로그램 Abaqus를 이용하여 교량 접속부를 모델링하고 2차원 열차-궤도-교량 동적 상호작용 해석을 실시하여 철도교 접속부의 강성 변화에 따른 동적 윤중변동과 궤도의 응답을 분석했다. 접속부 구성 요소 중 시멘트 처리 노반(cement treated base, CTB)과 시멘트 처리 자갈(cement treated gravel, CTG)의 탄성계수를 변화시켜 해석한 결과 CTB/CTG 탄성계수가 증가할수록 동적 접속부에서 동적윤중 변동이 감소하고 자갈도상압력이 감소하는 것으로 나타났다.

주요어 : 철도교량 접속부, 궤도지지강성, 열차-궤도-교량 동적 상호작용, Abaqus, 동적윤중변동

1. 서 론

철도 교량의 접속부는 궤도 지지강성이 급격히 변하는 구간으로, 교량과 노반의 강성 차이로 인해 동적 윤중 변동이 크게 발생한다. 이러한 동적 윤중 변동은 차량의 승차감과 주행 안전성 뿐만 아니라 유지보수에도 영향을 미친다. 따라서 교량 접속부에서는 궤도 지지강성 차이를 최소화하는 것이 중요하다. 국내 철도 설계 기준인 KR C-04020[1]에서는 이러한 문제를 해소하기 위해 접속부를 강화하여 노반 강성을 높여 궤도 지지강성 차이를 줄이도록 설계하도록 명시하고 있다. 본 연구에서는 접속부 구성 요소 중 시멘트 처리 노반(cement treated base, CTB)과 시멘트 처리 자갈(cement treated gravel, CTG)의 탄성계수 변화에 따른 동적 윤중 변동을 분석하였다. 이를 위해 유한요소 해석 프로그램인 Abaqus를 이용하여 열차-궤도-교량 간의 동적 상호작용 해석을 수행하였다.

2. 모델링

해석 모델은 먼저, KR C-04020의 토공을 선시공하고 어프로치 블록을 후시공하는 형태의 접속부를 3차원 응력요소(3D stress, C3D10)를 사용한 3차원 모델링과 평면응력요소(plane stress, CPS4R)를 사용한 2차원 모델링을 하고, 두 모델이 같은 거동을 할 수 있도록 2차원 모델에서 요소의 폭(thickness)을 조정해 3차원 모델의 정적하중을 가해 처짐이 같아지도록 모델링 했다. 그 후, 2차원 모델에 KTX 열차 20량을 모델링하고 열차-궤도-교량 동적 상호작용 해석을 수행했다. 3차원 접속부 모델링은 다음 Fig. 1과 같다. 차량의 모델링은 Lee(2025)[2]의 모델을 참고해 모델링 했다.

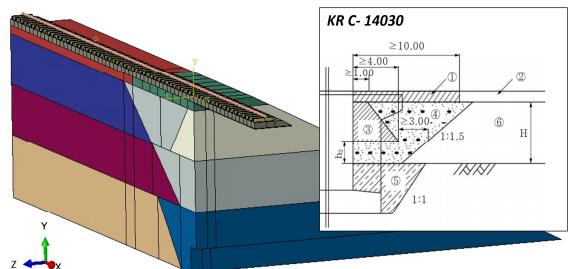


Fig. 1. 3D track modelling at bridge transition zone

† 교신저자: 국립한국교통대학교 교통시스

템공학과 (syjang@ut.ac.kr)

* 한국교통대학교 교통정책 · 시스템공학과

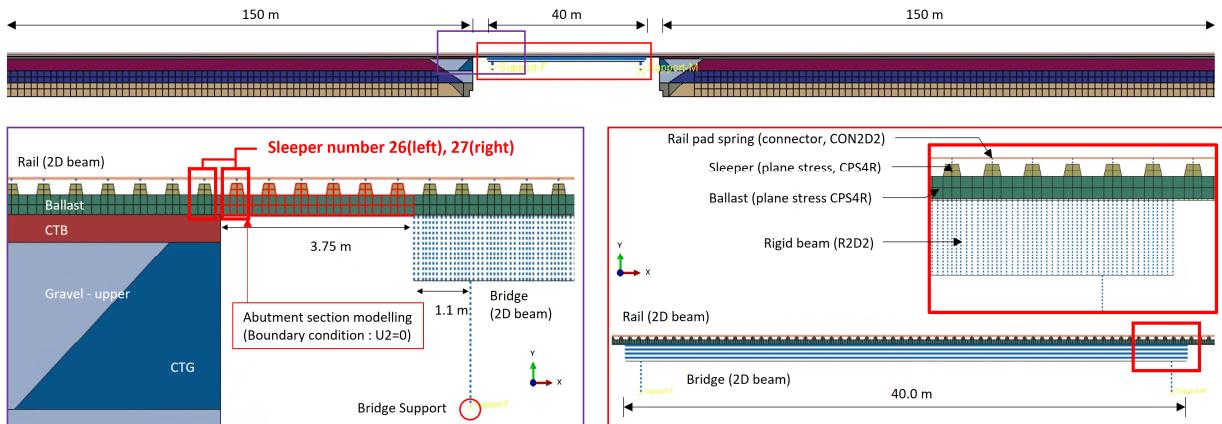


Fig. 2. 2D Track-bridge interaction modelling

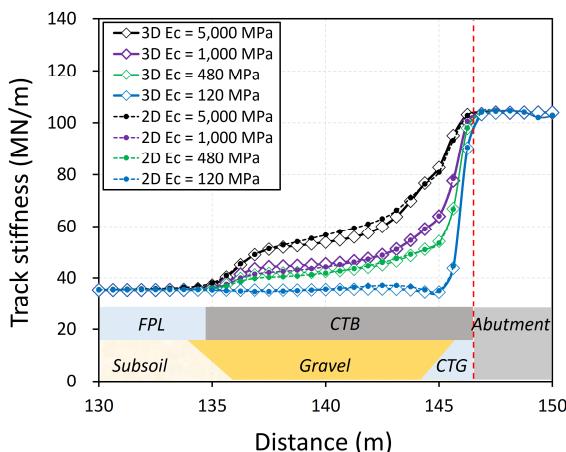


Fig. 3. Track stiffness at bridge transition zone

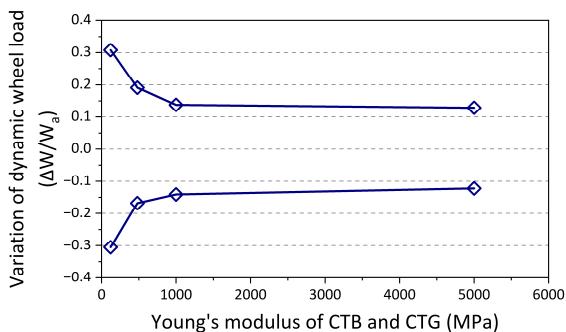


Fig. 4. Analysis results of dynamic wheel load variation

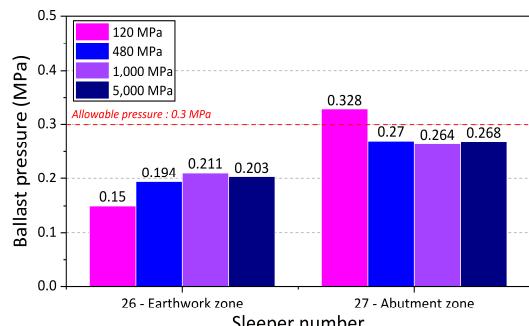


Fig. 5. Analysis results of ballast pressure

3. 해석결과

철도교량 접속부 노반의 구성 요소인 시멘트 처리 노반(CTB)과 시멘트 처리 자갈(CTG)의 탄성계수를 설계 최솟값인 120 MPa에서 480, 1000, 5000 MPa까지 증가시키며 해석을 수행했다. 먼저, 3차원 및 2차원 모델의 침목 위치에 각각 100 kN의 하중을 가하여 레일 처짐을 측정하고 이를 통해 궤도 지지강성을 산정했다. 그 결과, Fig. 3과 같이 CTB와 CTG의 탄성계수가 증가함에 따라 궤도 지지강성이 점진적으로 증가하여 교량과 노반 사이의 강성 차이가 감소함을 확인하였다. 3차원과 2차원 모델의 정적 거동이 유사하게 나타났다. 이후, 2차원 열차-궤도-교량 동적 상호작용 해석을 통해 노반 강성이 증가함에 따라 동적 윤중 변동과 자갈도상 압력이 감소하며, 일정 수준 이상에서는 값이 수렴하는 것으로 나타났다. 또한, CTB와 CTG의 탄성계수를 설계 최솟값으로 설정할 경우 자갈도상압력이 허용 기준인 0.3 MPa를 초과하는 것으로 나타났다. 따라서, 자갈도상 압력을 허용 기준 이하로 유지하기 위해서는 노반 강성의 증가가 필요하나, 실제 철도교에서 이를 구현하기는 어려우므로 광폭 침목 설치와 같은 대안이 필요할 것으로 판단된다.

후기

이 연구는 2025년 국립한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

참고문헌

- [1] KNR(Korea National Railway) (2015) Pile up, KR C-04020.
- [2] Y.J. Lee, S.Y. Jnag, S.I. Kim, J.H Choi, S.W. Yoo(2025) Impact of bridge resonance on dynamic responses of track in hihg-speed railways, *Journal of the Korean Society for Railway*, 28(1), pp. 17-31.