

일반철도 강화노반 두께의 고속철도 적용 가능성 연구

Examine the Applicability of the Thickness of Conventional Railroad Reinforced Roadbed at High-speed Railroad

이진욱† 이성혁* 사공명**
Jin-Wook Lee Sung-Hyok Lee Mynun Sagong

ABSTRACT

The design standard for the thickness of reinforced roadbed is divided into high-speed and conventional railroad because dynamic characteristics of train loadings differ depending on the train speed. Due to the national plan for increasing the train speed for both conventional and new railroad lines, it is necessary to examine the applicability of concrete tracks and feasibility of the train speed increase on the conventional lines with the current thickness of the reinforced roadbed. In this study, a real-scale test was performed to monitor the dynamic characteristics of the reinforced roadbed with a thickness of 20cm and the train speed of 200km/h, 300km/h, and 400km/h. The test results were then compared with the design code to investigate the applicability of the conventional reinforced roadbed when the trains operate with higher speed.

1. 서론

최근 국토해양부에서는 국가통합교통체계효율화법 제4조 제5항의 규정에 의하여 국가기간교통망계획(2001~2020) 제2차 수정계획을 확정 고시하였다. 국가기간교통망계획에 따르면 철도분야에서는 X자형과 □자형의 국가 철도망을 구축할 계획으로 현재 건설·운영 중인 노선은 230km/h급으로 고속화, 계획·설계 중인 노선은 250km/h급으로 고속화 하는 간선철도 고속화를 통한 철도기능 효율화 관련 내용을 주요 내용으로 고시하였다. 국가철도망 구축계획을 살펴보면 호남고속철도의 광주~목포 노선은 기존선 활용도 고려하고 있다.

이와 같이 향후 건설되는 철도는 200km/h이상의 고속철도로 건설되며 경제성 등을 고려하여 기존선을 활용한 고속화가 추진될 가능성이 높다. 또한 열차속도 증가에 따른 안전성 확보와 유지보수비 절감을 위하여 콘크리트 궤도 채택이 예상된다.

이에 따라 향후 건설되는 철도에서의 강화노반 두께는 현재 철도설계기준 노반편에서 제시하고 있는 고속철도 기준인 40~50cm를 채택할 수 밖에 없다. 하지만 이러한 기준은 경부고속철도와 호남고속철도에서 적용하고 있는 설계속도 350km/h에 맞추어 제시된 기준으로서 300km/h이하 대역에서는 열차의 안정성을 확보하면서 강화노반 두께 저감이 가능할 것으로 판단된다.

따라서 본 논문에서는 실험을 통하여 일반철도 강화노반 두께기준 20cm에서의 열차속도 200km/h의 적용여부를 판단하고 동일 선로에서 속도향상에 따른 철도노반의 침하특성을 분석함으로써 기존선의 콘크리트 궤도의 적용성과 속도향상 가능성을 검토하였다. 또한 일반철도에서는 입도조정부순돌(M-40)을 강화노반재료로 제시하고 있으나 고속철도에서 적용하고 있는 강화노반은 보조도상과 입도조정층으로 이원화 되어 있으며 입도를 포함한 별도의 품질기준을 제시하고 있으므로 본 논문을 통해서

† 교신저자, 한국철도기술연구원, 신교통인프라연구실

E-mail : jinugi@krrl.re.kr

* 한국철도기술연구원, 고속철도인프라시스템연구단

** 한국철도기술연구원, 신교통인프라연구실

기존선의 입도조정부순돌에 대한 고속철도 강화노반 적용 가능성을 파악하였다. 실험에 사용된 콘크리트 궤도는 현재 경부고속철도 2 단계에 적용되고 있는 레다-2000을 부설하였으며 재하하중과 주파수는 열차속도 200km/h, 300km/h, 400km/h에 상응하여 결정하였다

2. 실험 모형실험 장치

2.1 개요

일반철도 강화노반 기준에서의 콘크리트 궤도 적용성과 동일 선로에서 열차속도 증가의 가능성을 노반의 동적 거동을 통하여 확인하기 위하여 실험을 수행하였다. 그림 1에서 보는바와 같이 실험 통합성능시험 시스템은 토조, 하중재하 장치와 하중 반력대로 구성되어 있다. 이외에 자동제어장치, 펌프실, 냉각장치 등이 있다. 하중재하 장치의 사양은 최대 동적 하중이 250kN이며, 가진 진동수는 100Hz, 동적 변위는 ±125mm이다. 토조는 폭(W) 4.5m, 깊이(D) 4m, 길이(L) 20m의 크기로 그림 2에 나타내었다.

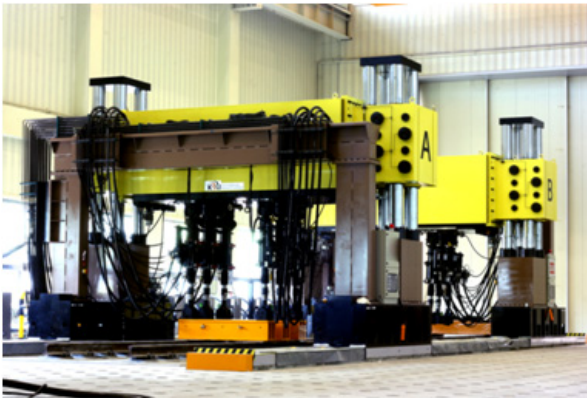


그림 1. 하중재하 장치



그림 2. 토조전경

2.2 콘크리트 슬래브궤도 및 노반

2.2.1 콘크리트 슬래브궤도

실험에 조성한 콘크리트 궤도는 경부선 2단계에 적용된 레다 2000을 사용하였으며 그림 3에서 보는 바와 같이 도상 콘크리트(TCL:Track Concrete Layer)와 노반 강화 콘크리트(HSB:Hydraulically Stabilized Base)로 구성되었다. 콘크리트 침목은 Bi-Block형 콘크리트 침목을 사용하였으며 침목지지간격은 65cm이다. 도상 콘크리트의 강도(fck)는 실린더 압축강도 30MPa이며, 폭은 3.2m, 높이 240cm이다. 노반강화 콘크리트는 강화노반상에 콘크리트 층의 두께 300cm이며 강도(fck)는 실린더 압축강도는 12MPa이며 폭은 3.8m로 하였다.

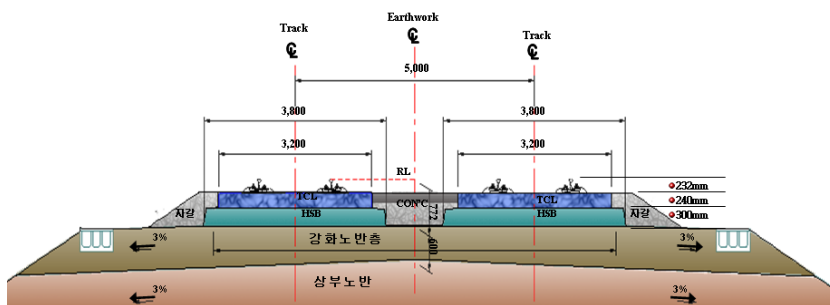


그림 3. Rheda - 2000

2.2.2 시험 조성노반

실대형 시험의 시험단면을 조성하기 위하여 사용한 강화노반 재료는 일반철도의 강화노반기준을 만족하는 입도조정부순돌(M-40)을 사용하였으며 상부노반 시료는 고속철도 설계기준(노반편)에 제시되어 있는 기준을 만족시키는 시료를 사용하였다. 상부노반 재료의 시험결과 흙쌓기 재료는 노반설계기준의 구분류상 A군에 속하는 SW로서 상부노반 설계기준을 만족하고 있다. 상부노반 재료의 입도분포곡선과 다짐특성곡선은 그림 4와 같다.

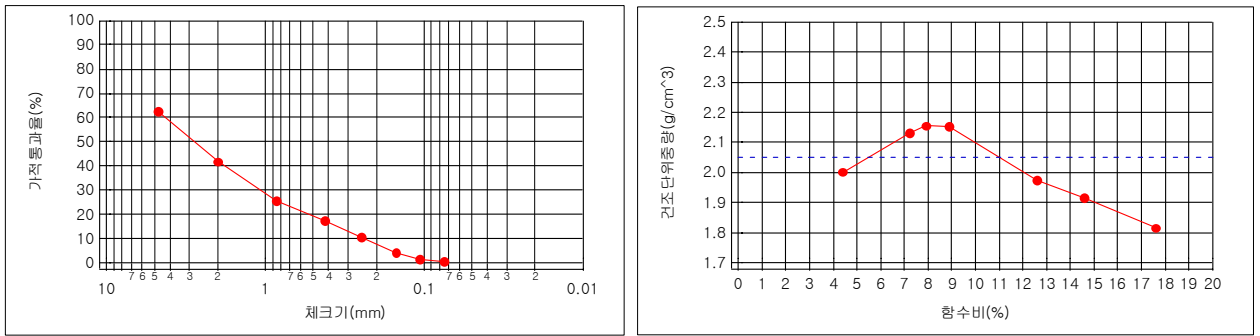


그림 4. 상부노반 입도분포와 다짐특성 곡선

2.3 재하하중 조건

레일에 작용하는 하중은 열차의 속도에 의해 발생하는 충격하중을 적용시킨다. 충격하중은 활하중에 충격계수를 곱하여 구하는데, 정확한 충격계수는 정적하중과 동적하중을 현장에서 계측하여 구하여야 하나 각 선로별 편차가 크므로 기존의 제안식을 사용하였다. 충격계수는 고저틀림에 의한 차체 상하 진동에 따른 관성력과 차륜/레일간 요철에 기인하는 차량 스프링 부분의 상하진동에 따른 충격력을 고려한 계수이며 속도의 증가에 따라 비례적으로 증대하는 것으로 알려져 있으며 본 연구에서는 일본에서 적용하고 있는 식(1)을 이용하여 충격계수를 산정하였으며 최대값은 1.8이다.

$$i = 1.0 + 0.3(v/100) \tag{1}$$

시험 시 재하 진동수는 차량의 축간 거리(d), 열차주행 속도(V), 통과주기(T)로부터 식(2)에 의하여 구할 수 있다.

$$f = 1/T = V/d \tag{2}$$

실대형시험에 적용한 열차는 KTX 열차로서 대차중심거리는 동력차의 대차중심 거리 14m를 적용하였으며 시험하중은 KTX의 축중 170kN을 적용하였다. 재하횟수는 1년간의 누적 통과톤수 14MGT에 해당하는 100만회를 재하횟수로 하였다. 하중제어로 재하를 하는 경우에는 완전히 하중을 제하하면 하중이 0이 되는 위치에서의 제어가 곤란하기 때문에 제하측은 어느 정도의 하중을 남기는 경우가 일반적이다. 따라서 본 시험에서는 모든 시험케이스에서 그림 5와 같이 최대하중과 최소하중의 차가 100kN이 되는 Sin파로 하중을 재하하였다.

2.4 계측항목과 위치

계측기는 그림 6에서 보는 바와 같이 노반의 지중변위 4개소, 콘크리트 웨도 구성품의 변위 4개소 그리고 토압 4개소를 설치하여 동하중을 재하하면서 계측하였다. 토압계와 지중변위를 계측하기 위한 침하계는 강화노반 최상부에 설치하고 최상부로부터 0.5m, 1.5m, 2.5m에 설치하여 계측하였다. 콘크리트

궤도의 경우, HSB층과 TCL층 때문에 노반내 변위를 위한 침하봉 설치 기준점을 토조 바닥에 설치하여 계측하였다. 콘크리트 궤도 구성품의 변위는 레일과 침목, TCL층과 HSB층에 변위계를 설치하였다. 변위계와 토압계, 데이터 로거는 일본 Kyowa 제품을 사용하였다.

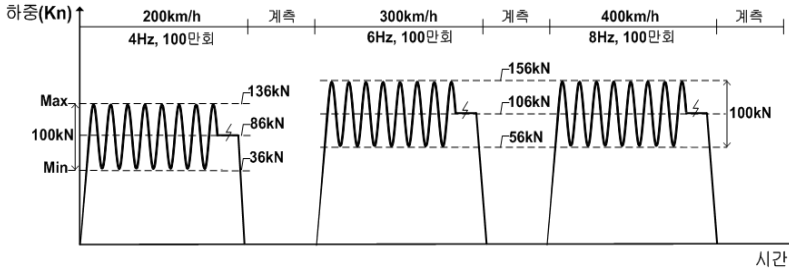


그림 5. 재하 하중과형

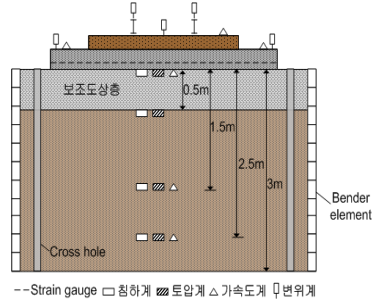


그림 6 계측기 매설위치

2.5 시험방법

토조내에 부설한 하부노반과 상부노반의 다짐도를 철도설계기준에서 제시하는 값에 만족시키기 위하여 시험 전 다짐시험을 수행하였다. 다짐시험결과 다짐롤러를 이용하여 무진동 2회, 진동 7회로 다짐을 한 경우, 고속철도 콘크리트 슬래브 궤도의 기준치인 $K_{30} \geq 110\text{MN/m}^3$, $E_{v2} \geq 80\text{MN/m}^2$, $E_{v2}/E_{v1} < 2.3$, 다짐도 $\geq 95\%$ 을 모두 만족시켰다. 재하순서는 200km/h에 해당하는 운중 135kN하중을 4Hz로 100만회 재하 후 속도향상 영향을 파악하기 위하여 300km/h, 400km/h에 해당하는 하중 156kN을 각각 6Hz, 8Hz로 100만회씩 재하하였다.

3. 시험결과 분석

일반철도 강화노반 두께를 갖는 선로에서의 200km/h급의 콘크리트 슬래브 궤도의 적용성 검토와 동일 선로에서 속도향상 시 노반의 동적 거동을 분석하기 위하여 일반철도 설계기준인 20cm 두께의 강화노반상에서 열차의 속도증가에 따른 궤도와 노반변위 및 토압을 측정하여 분석하였다.

3.1 노반 지중 침하량

그림 7은 열차속도 증가에 따른 상부노반의 지중 누적 침하량을 나타내고 있다. ●는 강화노반 최상부의 침하량이며 ■은 강화노반면으로부터 0.5m, ▲은 1.5m, ▼은 2.5m깊이에서의 평균 침하량이다. 침하량은 노반 상부일수록 많이 발생하고 있으며 속도증가 시마다 누적 침하량이 증가하는 특징을 보이고 있다. 또한 200km/h속도와 300km/h 속도에서는 재하횟수에 따라 누적 침하량은 계속해서 침하가 발생하고 있으나 열차운행 1년에 해당하는 100만회의 반복에서는 침하 증가량이 점차 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

200km/h 속도로 1년간 주행한 결과 강화노반면에서의 누적 침하량은 0.78mm발생하였으며 300km/h와 400km/h로 1년간 주행한 결과 강화노반면의 침하는 각각 0.24mm와 0.15mm씩 증가하였다.

각 속도대역에서의 노반면 최종 누적침하량을 콘크리트 궤도에서의 열차하중에 의한 흩쌓기 허용 잔류침하량 기준 5mm와 비교해 보면 강화노반 두께 20cm인 경우, 모든 속도 대역에서의 잔류침하량은 기준을 만족시키고 있음을 알 수 있다. 고속철도 콘크리트 궤도에서의 흩쌓기 허용 잔류침하량 기준은 30mm이하이며, 이는 원지반 침하량과 성토체 침하량 및 궤도구조에 의한 침하량 25mm와 열차하중에 의한 침하량 5mm를 포함한 값이다.

그림 8은 열차속도에 따른 상부노반의 지중 탄성침하량을 나타내고 있다. 지반내 2.5m와 1.5m에서의 탄성침하량은 열차의 속도에 관계없이 0mm에 가까운 값을 나타내고 있으며, 지반내 0.5m와 강화노반면에서의 탄성침하량은 열차속도에 관계없이 각각 0.05mm~0.07mm와 0.12mm~0.16mm정도이며 반복 횟수에 영향을 미치지 않고 대개 일정한 추이를 나타내고 있다. 또한 탄성침하량은 열차속도의 영향을 많이 받

지 않을 뿐만 아니라 열차운행 횟수의 영향도 거의 받지 않는 것으로 파악되었다. 탄성침하량 기준으로 검토한 결과 20cm의 강화노반 두께에 대해 200km/h의 속도로 주행 시 노반의 탄성침하량 기준 2.5mm를 만족하고 있음을 알 수 있었으며 동일 선로상에서 열차의 속도를 400km/h까지 증가 시에도 노반의 탄성침하량은 기준을 만족시키고 있다.

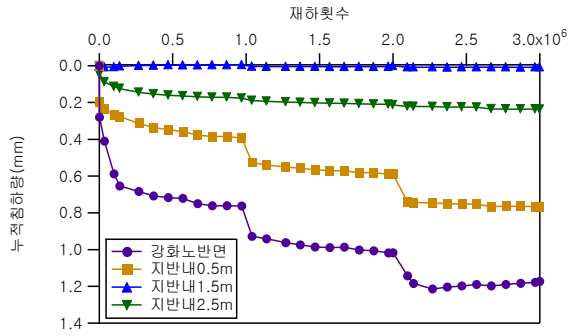


그림 7. 속도향상에 따른 누적침하량

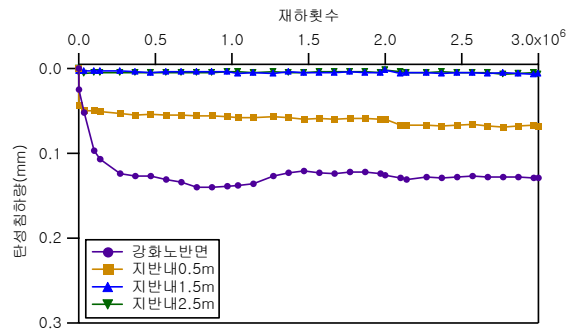


그림 8. 속도향상에 따른 노반의 탄성침하

3.2 궤도 누적침하량

그림 9는 열차속도 증가에 따른 궤도구성품의 누적침하량을 나타내고 있다. ▼는 궤도의 누적침하량이며 ▲은 침목, ■은 TCL층, ●은 HSB층의 누적침하량이다. 레일의 침하량에 비해 침목과 HSB층, TCL층은 침하량이 상대적으로 적게 발생하고 있으나 전체적인 침하의 특성은 동일한 형태를 나타내고 있다. 이러한 특징은 궤도시스템이 하나의 구조체로 거동함을 나타내고 있음을 뜻한다. 다만 레일의 경우는 레일과 침목 사이에 설치되어 있는 패드의 영향으로 인해 하중이 재하되는 초기의 침하가 급격히 증가하는 경향을 보이고 있으나 침하의 패턴은 다른 시스템과 동일함을 알 수 있다. 열차속도 200km/h 일 때의 하중재하 시에는 하중 재하횟수에 따라 모든 궤도시스템의 침하량이 증가하는 경향을 보이고 있으나 열차속도 300km/h과 400km/h일 때의 재하횟수에 따른 침하량의 증가는 거의 발생하지 않고 있다. 레일의 경우, 200km/h에서는 0.38mm가 증가하였으며 300km/h와 400km/h에서는 각각 0.01mm, 0.03mm가 증가하였다. 궤도시스템의 최하부 층인 HSB층의 누적침하량은 200km/h인 경우 0.58mm, 300km/h에서는 0.28mm 증가한 0.86mm, 400km/h에서는 0.14mm가 증가한 1.0mm가 발생하였다. TCL층의 누적침하량은 200km/h인 경우 0.62mm, 300km/h에서는 0.41mm 증가한 1.03mm, 400km/h에서는 0.32mm가 증가한 1.35mm가 발생하였다. TCL층과 HSB층에서 발생하는 침하량의 차이는 열차속도에 따라 0.04mm~0.35mm가 발생하고 있으며 이러한 현상은 레다 궤도 구축 시 HSB층을 타설 양생 후 TCL층을 타설함으로써 발생하는 TCL층과 HSB층 사이의 미세한 공극에 의해 발생한 것으로 판단되며 속도증가에 따른 누적 침하량의 증가량이 감소는 200km/h의 열차하중과 진동으로 인한 노반의 다짐효과에 기인한 것으로 판단된다.

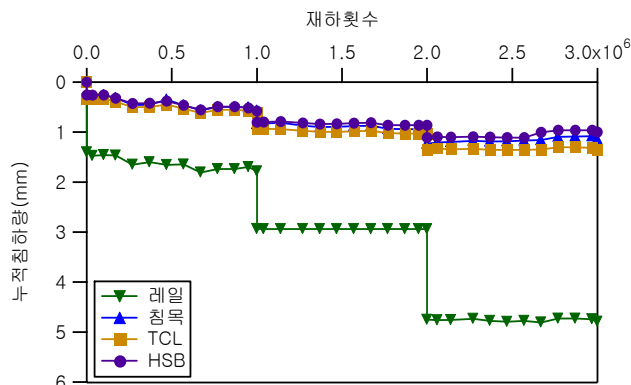


그림 9. 속도향상에 따른 궤도의 누적침하량

3.3 노반 토압

열차속도에 따른 하중 재하 횟수별 노반내 토압 변화는 그림 10과 같다. 초기 200km/h로 주행 시에는 토압계 위치에 따라 토압의 차이는 있지만 전체적으로 하중재하횟수에 따라 토압이 감소하는 경향을 보이고 있다. 토압감소의 원인은 토압계가 노반내에 설치되어 있어 재하하중에 의한 노반침하 시 토압계도 노반과 같이 침하가 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 현상은 노반의 지중변위가 재하초기에 재하횟수에 따라 침하가 많이 발생하게 되는 특징과 함께 나타나게 된다. 따라서 열차속도 300km/h와 400km/h로 주행 시에는 재하하중이 증가함에 따라 노반에 작용하는 하중은 증가하지만 노반의 침하량의 증가가 200km/h에 비해 거의 발생하지 않으므로 인해 하중 재하 시 발생한 토압 또한 재하횟수에 따라 감소하는 특징이 상대적으로 적게 나타났다.

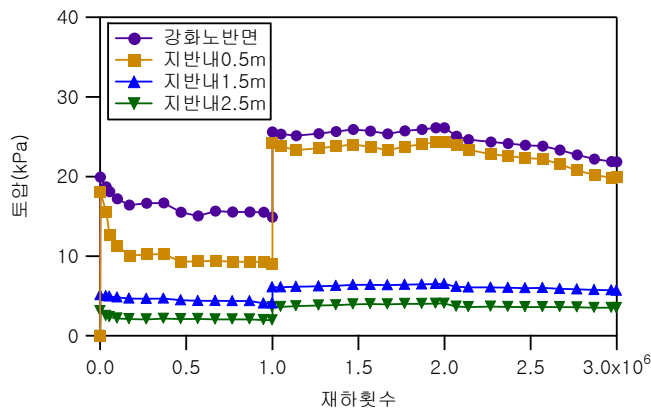


그림 10. 속도향상에 따른 노반 최대토압

4. 결 론

일반철도 기준인 강화노반 두께20cm에서의 200km/h급 콘크리트 궤도의 적용성 여부와 동일선상에서의 속도향상 가능성을 검토하기 위하여 20cm두께의 강화노반상에 콘크리트 궤도를 부설하여 실험시험을 실시하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 철도설계기준(2011)에서 제시하고 있는 일반철도의 강화노반 두께기준 20cm를 콘크리트 궤도에 적용한 경우, 열차속도200km/h에서의 누적 잔류침하량이 고속철도설계기준의 흙쌓기 허용잔류침하량 5mm를 만족하며 동일선로에서 400km/h까지의 속도향상 시에도 허용잔류침하량 기준을 만족한다.
- 2) 노반표면에 임의 한계 이상의 처짐 발생시 표층 균열 발생을 방지하기 위하여 제한을 두고 있는 노반 표면의 탄성침하량 기준 2.5mm를 열차속도에 관계없이 만족한다.
- 3) 상부노반면의 잔류침하량과 탄성침하량을 고려하면 일반철도 강화노반 두께 기준인 20cm 두께의 강화노반에서 200km/h급 콘크리트 궤도의 적용이 가능하며, 열차의 속도향상도 가능한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이일화, 이성진, 신민호, 황선근, “흙쌓기 구간에서 콘크리트궤도 강화노반의 두께 결정에 관한 연구”, 한국철도학회 논문집, 제12권, 제6호, 2009.
2. 신은철, 양희생, 최찬용, “노반재료의 소성침하 예측식을 이용한 강화노반 두께 산정”, 한국철도학회 춘계학술대회, 2008.
3. 한국철도시설공단(2011), “철도설계기준 노반편”
4. 한국철도시설공단(2006), “경부고속철도 대구~울산간 궤도부설 기타공사, 실시설계보고서”