

수치해석을 통한 일반철도의 강화노반 침하량 및 수직응력 평가

Evaluation of Settlements and Vertical Stress of Reinforced Subgrade of Conventional Railroad through Numerical Analysis

김대상*, 박영곤**, 하태욱***, 신민호****
Kim, Dae-Sang, Park, Young-Kon, Ha, Tae-Wook, Shin, Min-Ho

ABSTRACT

The reinforcing subgrade has the many advantages to maintain the quality of ballast track. It has also the function to prevent the softening of subgrade by mud-pumping. Therefore, active application of it is being expected for the future constructions of Korean railroad. In this paper, behaviors of the reinforced subgrade applied to conventional railroad were investigated through 3-D numerical analyses. The applicability of the reinforced subgrade to conventional railroad was evaluated by analyzing the distributions of the settlements and vertical stress of reinforced subgrade.

1. 서론

고속철도의 국내 도입과 함께 채택 사용되고 있는 강화노반은 궤도틀림 감소나 궤도하부의 하중 분산 능력을 강화할 수 있는 구조로써 그 적용 범위가 확대될 전망이다. 강화노반은 그 의미 그대로 노반에 강성이 큰 층을 일정 두께 부설함으로써 노반의 지지력을 확보하고 노반에서 발생하는 침하량을 감소시키고자 하는 목적으로 개발되었다. 또한 강화노반은 도상자갈의 노반으로의 관입에 따라 발생하는 도상자갈의 침하를 억제하는 기능도 가지고 있다. 본 논문에서는 탄성모델을 이용한 3차원 수치해석을 통하여 일반철도에 강화노반을 적용하였을 경우 발생하는 층별 침하량 및 수직응력과 하중 분포 범위에 대한 분석을 수행하여 일반철도에 강화노반을 적용하였을 경우 발생할 수 있는 문제에 대하여 검토하였다.

2. 일반철도의 강화노반 적용 현황

그림 1은 성토부의 노반구조도이다. 궤도하부의 노반구조는 도상 아래에 강화노반, 상부노반, 하부노반으로 구성되어 있다. 강화노반은 상부노반의 상부에 강성이 큰 재료로 이루어진 층을 부설함으로써 상부노반의 변형을 최소화하기 위해 사용된다. 또한, 강화노반은 도상부의 자갈이 상부노반으로 관입됨으로써 발생하는 궤도틀림을 감소시키고 도상 표면의 침투수가 상부노반으로 유입하는 것을 차단하는 기능이 있어서 분니 발생 억제효과가 있다. 강화노반의 재료로는 일본의 경

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
*** 전남대학교 자원공학과 박사과정
**** 한국철도기술연구원 수석연구원, 정회원

우 쇄석, 아스팔트 콘크리트와 고로슬래그가 사용되고 있으나, 국내에서는 현재 입도 조정된 쇄석만을 사용하고 있다.

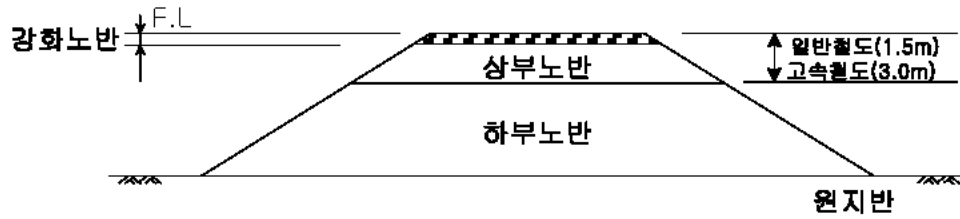


그림 1. 성토부 노반구조도

국내의 강화노반 설계기준은 표 1과 표 2와 같다. 일반철도 건설 시 적용되는 철도설계기준(노반편)에 의하면 강화노반의 두께는 궤도구조 조건(장대레일(표 1)과 이음매레일(표 2))과 상부노반의 지반반력계수(K_{30})에 따라 결정된다. 강화노반두께는 장대레일의 경우 20cm~35cm 범위로, 이음매레일의 경우에는 35cm~65cm 범위로 K_{30} 에 따라 설계하도록 규정되어 있다. 강화노반의 강성은 일반철도에서는 지반반력계수(K_{30})를 고속철도에서는 평판재하시험의 재재하시 변형률계수(E_{v2})로 규정되어 있다. 수치해석 시 사용한 탄성계수는 고속철도 토공구간의 탄성계수를 준용하여 사용하였다.

표 1. 강화노반 설계기준(일반철도~장대레일)

| 재 료 | 입도조정 쇄석 또는 고로슬래그쇄석(cm) | 배수층 (cm) | 수경성입도조정 고로슬래그쇄석 (cm) | 배수층 (cm) |
|---|------------------------|----------|----------------------|----------|
| 상부노반조건 | | | | |
| 흙쌓기($K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^2$) | 20 | 0 | 15 | 0 |
| 흙쌓기($7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^2$) | 35 | 0 | 25 | 0 |
| 땅깎기, 평지($K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^2$) | 20 | 15 | 15 | 15 |
| 땅깎기, 평지($7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^2$) | 35 | 15 | 25 | 15 |

표 2. 강화노반 설계기준(일반철도~이음매레일)

| 재 료 | 입도조정 쇄석 또는 고로슬래그쇄석(cm) | 배수층 (cm) | 수경성입도조정 고로슬래그쇄석(cm) | 배수층 (cm) |
|---|------------------------|----------|---------------------|----------|
| 상부노반조건 | | | | |
| 흙쌓기($K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^2$) | 35 | 0 | 25 | 0 |
| 흙쌓기($7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^2$) | 65 | 0 | 50 | 0 |
| 땅깎기, 평지($K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^2$) | 35 | 15 | 25 | 15 |
| 땅깎기, 평지($7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^2$) | 65 | 15 | 50 | 15 |

3. 수치해석 방법

3.1 수치모델링

수치해석은 상용 유한차분해석 프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 3D Version 2.1을 사용하였다. 수치해석 모델은 그림 2와 같다. 단선 자갈도상궤도의 모델은 침목 39개, 시공기면 폭 8.0m, 종단길이 24.0m로 선로 종단방향의 경계에서의 영향을 최소화하도록

결정하였다. 시공기면 하 20m까지 모델링함으로써 하부 경계의 영향이 최소화되도록 하였다. 레일은 빔요소로, 레일과 침목사이의 레일패드라는 미끄러짐과 분리 현상을 모델링 할 수 있는 인터페이스 모델을 사용하였다. 도상두께는 2급선 기준인 30cm로, 강화노반은 강화노반 설계기준에서 최소 두께인 20cm로 모델링 하였고 기울기 3%를 고려하였다. 경계조건으로는 4개의 옆면은 수평방향을, 바닥면을 수직방향을 각각 구속하였다.

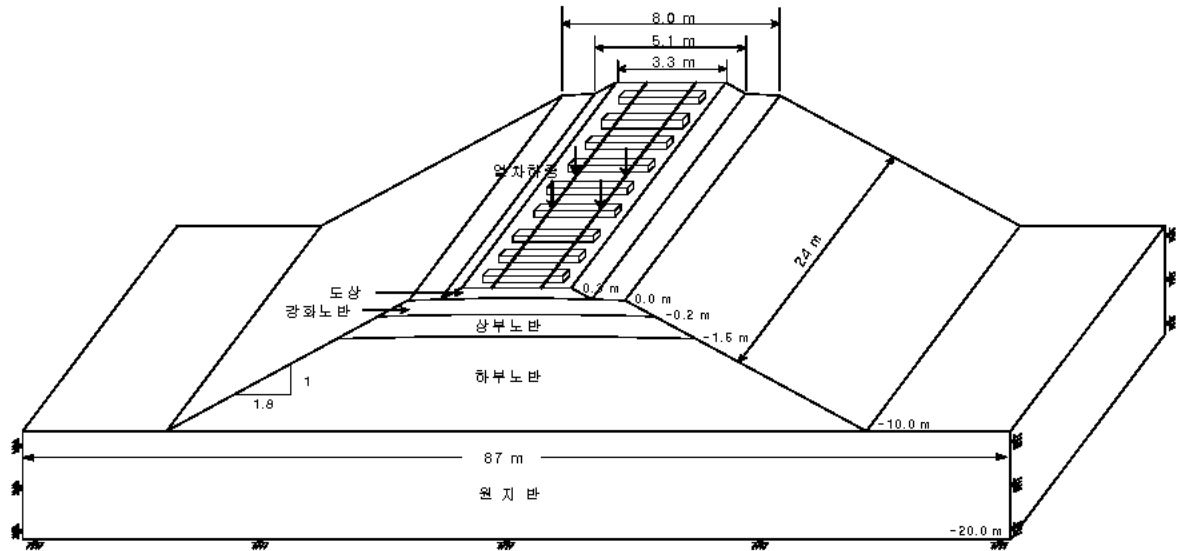


그림 2. 수치해석 모델

해석 시 사용된 궤도재료 및 궤도하부에 대한 물성은 표 3 및 표 4와 같다. 강화노반, 상하부노반 및 원지반은 탄성 재료로 모델링하였다.

표 3 궤도 재료의 물성치

| 재료 | 모델 | 물성 | 값 |
|------|----------|----------------|-----------------------------------|
| 레일 | 빔요소 | 탄성계수 | 200 GPa |
| | | 포아송비 | 0.3 |
| | | 단면적 | $7.69 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ |
| | | 단면2차모멘트 | $3.06 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ |
| 레일패드 | 인터페이스 요소 | 축방향강성 (레일패드강성) | $40 \times 10^3 \text{ kN/m}$ |
| 침목 | 솔리드요소 | 탄성계수 | 40 GPa |
| | | 포아송비 | 0.167 |

표 4 궤도 하부의 해석 물성치

| 층 / 물성 | 도상 | 강화노반 | 상부노반 | 하부노반 | 원지반 |
|-----------|-------|------|------|------|------|
| 탄성계수(MPa) | 133.9 | 120 | 80 | 60 | 30 |
| 포아송비 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| 두께(m) | 0.3 | 0.2 | 1.3 | 8.5 | 10.0 |

3.2 작용 하중 결정

작용하중으로는 일반열차 대차 1대의 주행하중을 정적 집중하중으로 환산하여 고려하였다. 주행윤중(P_d)은 정적윤중(P_s)에 열차속도의 함수인 속도 충격률을 곱하여 구한 값을 사용하였다. 일반적으로 속도에 따른 충격계수는 열차속도를 V 라고 하면, 장대레일은 $1+0.3V/100$ 를 적용한다. 2급선 설계속도인 150km/hr 에 대하여, L-22하중을 정적윤중으로 적용하면 아래와 같이 주행윤중을 산정할 수 있다. 결정된 주행윤중은 그림 2와 같이 레일 상부 4 지점에 정적 집중하중으로 재하 하였다.

$$P_d = P_s \times (1 + 0.3V/100) = 107.8 \times (1 + 0.3(150/100)) = 156.3 \text{ kN}$$

4. 해석 결과 및 분석

그림 3은 종단방향 침하량 분포를 깊이에 따라 나타낸 것이다. 레일 상부에서의 침하는 윤중이 작용하는 지점에서 2.53mm 발생하였다. 이는 승차감을 고려한 열차의 허용침하량 기준인 2~5mm범위 내에 있었다. 강화노반 상부의 최대 침하는 2.25mm로 일본에서 적용되고 있는 탄성허용침하량 기준인 2.5mm를 만족하였다. 그림 3을 보면 대부분의 침하가 상부노반 아래에서 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 상하부노반의 다짐관리 또한 중요하다고 판단된다. 원지반의 최대침하량도 0.55mm 발생하여, 레일 상부에서 최대 침하의 21.7%가 발생하였다. 이는 종단방향에 대한 경계 및 구속조건에 대한 영향으로 판단된다. 도상층과 강화노반층에서는 최대 침하가 윤중 작용지점(11.1m, 12.9m)에서 발생하였으나 상부 노반에서부터는 윤중 작용 지점간의 중앙 12m 지점에서 발생하였다. 또한 상부 노반 상부에서부터 최대 침하 발생 양상이 변화함을 알 수 있었다.

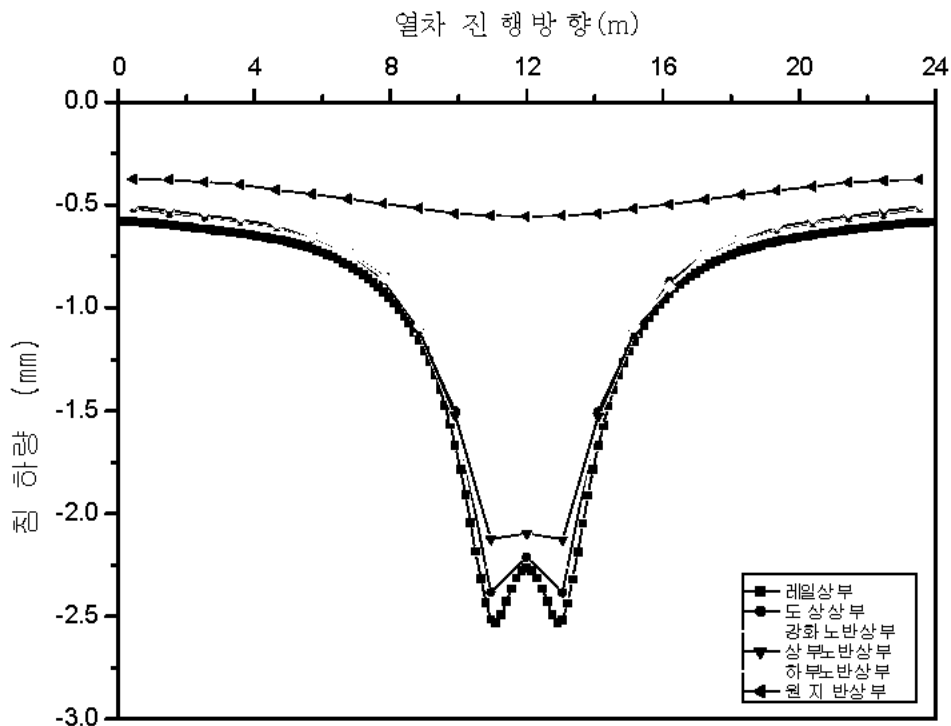


그림 3. 종단 침하량 깊이별 분포

그림 4는 종단 방향 수직응력의 깊이별 분포이다. 강화노반에 작용하는 수직응력은 열차하중 작용 지점에서 70.97kPa이 발생하였다. 하부에 전달되는 수직응력은 깊이에 따라 감소하여 상부노반 상부에서의 최대값이 49.88kPa로 29.74% 감소하는 것으로 나타났다. 하부노반 상부에서는 수직응력의 최대값이 23.04kPa로 57.54%, 원지반 상부에서는 수직응력 최대값이 2.50kPa로 96.48% 감소하였다. 원지반에서의 수직응력 감소는 현저하여 열차 하중에 의한 원지반으로의 응력 전달은 크지 않음을 확인할 수 있었다.

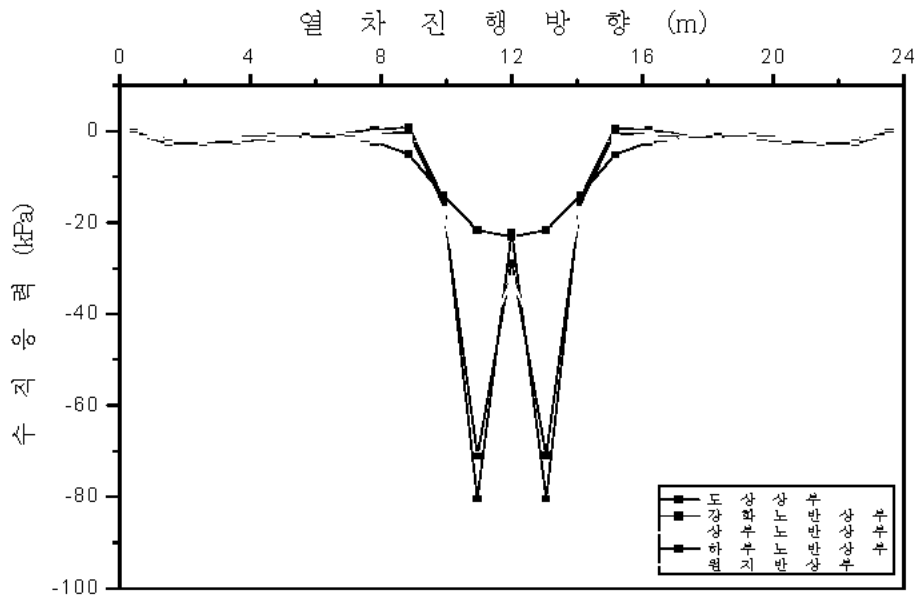


그림 4. 종단 수직응력 깊이별 분포

그림 5와 그림 6은 윤중 재하점 아래에서의 침하량 및 수직응력 변화를 보여준다. 깊이 5m 지점에서 침하량과 수직 응력이 급격히 감소함을 확인할 수 있다. 이는 일반 철도의 설계하중 작용 시에 윤중의 주된 영향 범위가 하부노반의 중앙부 정도임을 의미한다.

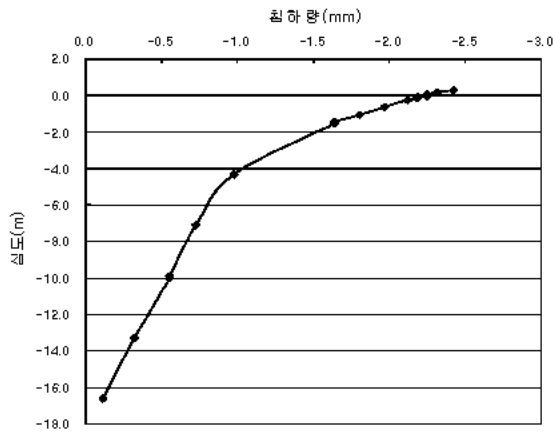


그림 5. 윤중 재하점 하부의 침하량 변화

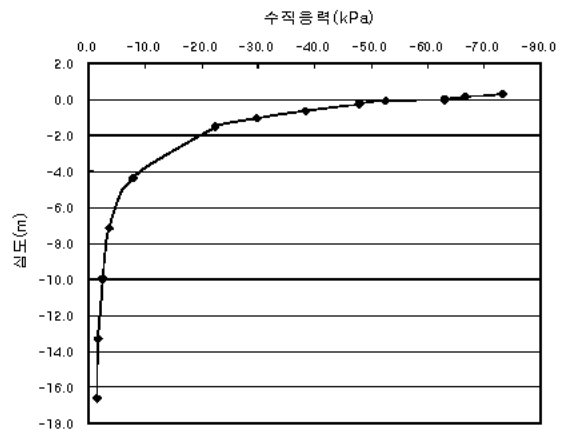


그림 6. 윤중 재하점 하부의 수직응력 변화

5. 결론

본 연구에서는 3차원 수치해석을 수행하여 일반철도에 강화노반을 적용하였을 경우에 강화노반, 상부노반, 하부노반, 원지반에서 발생하는 침하량과 수직응력 분포를 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 강화노반에서의 최대침하량은 2.25mm이었고, 이는 일본에서 적용되고 있는 탄성허용침하량 기준인 2.5mm를 만족하였다. 도상 및 강화 노반층의 경우 윤중 작용점에서 최대 침하가 발생하였으나 상부노반층 하부에서는 윤중 작용점 중앙에서 발생함으로써 그 분포 양상이 변화함을 확인할 수 있었다.
- 2) 강화노반에서 발생된 최대수직응력은 70.97kPa이었다. 수직응력의 분포 양상을 분석해 본 결과 상부노반 상부에서 발생하는 수직응력(49.88kPa)은 강화노반 상부에서 발생하는 수직응력(70.97kPa)에 비해 29.72% 감소함으로써 강화노반은 두께에 비교하여 상당히 큰 하중 분산효과가 있음을 확인할 수 있었다.
- 3) 윤중 재하점의 깊이별 분포 양상을 보면 침하량과 수직 응력은 깊이에 따라 감소하였다. 또한 윤중 작용 시 그 영향 범위는 하부노반 상부에서 급격히 감소함으로써 윤중의 영향은 하부노반 중앙부에서 수렴하는 것을 알 수 있었다.

향후에는 강화노반 하부의 탄소성해석 및 레일 패드의 인터페이스 모델링을 좀 더 강화한 수치해석적 연구가 수행되어야 할 것이다. 불연속성이 강한 도상 및 강화노반을 적절히 모델링할 수 있는 수치 해석적 방법에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단되며 이는 현장 실험 결과와의 연계를 통하여 그 적합성을 검증해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 철도총합기술연구소(1992), “철도구조물등 설계기준 및 동해설, 토구조물편” 일본 철도총합기술연구소
2. 김대상 외 3인(2005), “일반철도와 고속철도의 강화노반두께에 관한 연구” 한국철도학회 논문집
3. Itasca Consulting Group Inc. (1997) "FLAC3D Manual: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Version 2.0." Itasca Consulting Group Inc., Minnesota, USA.