

흙쌓기 구간에서 콘크리트궤도 강화노반의 두께 결정에 관한 연구

Determination on the Reinforced Roadbed Thickness of Concrete Track at Embankment Section

이일화[†] · 이성진* · 신민호** · 황선근*** · 이창진****

Il-Wha Lee · Sung-jin Lee · Min-Ho Sin · Sun-Kun Hwang · Chang-jin Lee

Abstract Recently the more stable roadbed is required due to the high speed and design load. Therefore the reinforced roadbed was introduced as the solution. But the thickness and stiffness of reinforced roadbed in design code is being conservatively assessed by the foreign code without considering the domestic construction condition. In this paper, adequate Young's modulus, drain capacity, freezing depth, economical efficiency, bearing capacity, construction condition and 3-D finite element method were employed to determine the proper thickness of reinforced roadbed at the embankment section.

Keywords : Reinforced roadbed, Thickness, Settlement, Concrete slab, Cyclic loading test, High-speed Railroad

요 지 최근 철도의 고속화 및 중량화로 인하여 보다 안정적인 토공노반 구조가 요구된다. 그 대안으로 강화노반이 도입되어 적용하고 있다. 하지만 현 설계기준에 적용되어진 콘크리트궤도 강화노반의 강성 및 두께는 국내의 지반의 특성 및 공학적인 평가 없이 외국의 기준을 임의적이고 보수적으로 결정하고 있다 따라서 본 논문에서는 콘크리트궤도 흙쌓기 구간에서의 강화노반 두께를 합리적으로 결정하기 위하여 국내 시공조건을 고려, 적정 탄성계수, 배수성능, 동결심도, 경제성, 지지력 등을 검토하고 이를 바탕으로 유한요소해석을 실시하여 적정 두께를 제시하였다.

주 요 어 : 강화노반, 강화노반의 두께, 노반침하, 콘크리트궤도, 반복재하시험, 고속철도

1. 서 론

강화노반은 최근 열차의 축중과 주행속도가 증가하면서 궤도부담력이 크게 증가하여 노반의 지지강성 증대, 배수 촉진, 연약화 방지 등을 목적으로 적용되고 있다. 강화노반은 1993년 고속철도 공사시방서[3]에 포함되어 고속철도건설에 적용된 이후 2003년에 고속철도 전문시방서[4]에서 개정되었으며, 일반철도에서는 철도설계기준[5]에서 처음으로 도입되었다. 강화노반은 자갈도상궤도구조인 경부고속철도 1단계 구간에서 본격적으로 적용되었으며, 콘크리트궤도인 2단계 구간에서도 유사하게 적용하였다. 현재 국

내 콘크리트궤도 강화노반의 두께는 외국기준보다 다소 안전측으로 설계되어 있다. 따라서 경제적인 설계를 위해서는 열차의 주행 안전성 및 승차감과 궤도의 유지보수비용을 고려한 최적의 강화노반 적정두께를 결정할 필요가 있다. 강화노반을 비롯하여 토공노반의 설계시에는 지질조건, 재료조건, 시공조건, 열차운행조건 등을 복합적으로 고려하여 실정에 맞는 기준을 결정하는 것이 중요하다. 특히 콘크리트궤도에서는 하중분산 특성을 충분히 반영하여 설계하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 고속철도 흙쌓기 구간에서 콘크리트궤도용 강화노반의 합리적인 설계두께를 결정하기 위하여 설계기법, 강화노반구조, 시공사례 및 설계인자 등을 검토하고 유한요소해석을 통한 설계변수를 검토하였다.

[†] 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원
E-mail : iwlee@krti.re.kr

TEL : (031)460-5326 FAX : (031)460-5319

* 정희원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원

** 정희원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 수석연구원

*** 정희원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원

**** 정희원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 연구원

2. 콘크리트궤도 강화노반의 구조 및 재료

강화노반은 궤도와 노반의 경계부에 설치되며, 재료는 주로 입도조정쇄석을 사용한다. 자갈도상궤도에서는 침목 5개 정도의 거리에서 집중하중 형태로 하중이 작용하기 때문에 강화노반의 역할은 노반의 지지력을 강화하는 것이 주 목적이었으며, 부수적으로 과도한 침하나 관입방지, 배수성능 향상 등을 달성하기 위하여 일반적으로 60cm 이상의 두께를 가지는 쇄석강화노반을 적용하였다. 그러나 분포하중으로 작용하는 콘크리트궤도에서는 강화노반의 역할과 설계값에 대하여 별도의 검토가 필요하다. Fig. 1은 일반적인 콘크리트궤도 및 노반의 구조예를 나타낸 것이다. 콘크리트궤도의 상부구조는 레일, 체결장치, 침목, 상부 콘크리트층(TCL, Track Concrete Layer), 하부콘크리트층(HSB, Hydraulically Stabilized Base course)으로 구성된다. 노반은 강화노반층과 상부노반, 하부노반 원지반으로 구성된다. 여기서 강화노반은 궤도의 경계부에 설치되며, 하중의 분산, 배수, 동결방지, 지지강성 균일화, 침하억제 등의 다양한 역할을 한다.

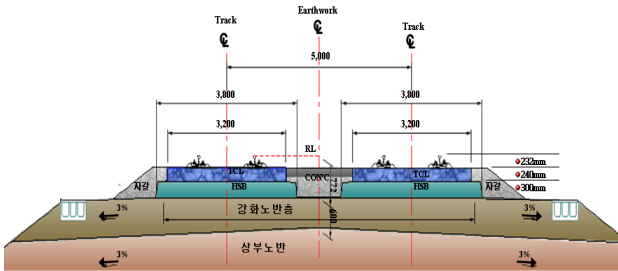


Fig. 1. Track and roadbed structure of high speed concrete track

강화노반재료의 선정기준은 쇄석, 슬래그 등으로 비중, 흡수량, 마모감량, 일축압축강도, 단위중량, 수정CBR 등으로 재료의 적합성을 확인하고 고속철도의 경우 재질의 경도, 내구성, 편평도, 모래당량, 입도 등 물리적 성질에 따라 재료를 선택할 수 있도록 규정되어 폭 넓은 재료의 선택이 가능하다. 재료선정기준은 아래와 같다.

- ① 강화노반 흙쌓기 재료는 압축성이 작고 입도분포가 양호한 재료를 사용하며, 견고하고 내구적인 부순돌, 자갈, 모래 등의 재료이어야 한다.
- ② 혈암, 점판암, 이암, 사암 등과 같은 암에서 강도가 현저히 낮거나 박리현상이 뚜렷한 암은 사용해서는 안 된다.

강화노반의 지지력이나 두께의 결정은 이론적인 방법으로 설계하는 것으로 되어 있으나, 실질적으로는 경험적인 값을 많이 사용하고 있다. Table 1은 고속철도 노반설계기술을 확보하고 있는 국가의 강화노반 지지강성 및 두께에

대한 비교를 나타내는 표로서 특이한 것은 일본의 경우, 아스콘층이 상부에 적용되어 강화노반의 두께를 150mm만 규정된 것을 알 수 있다.

Table 1. Thickness and stiffness of reinforced roadbed

		한국 (경부고속철도 2단계)	독일 (300km/h급)	일본 (신간선)	
두께	보조 도상층	300mm이상	400mm	아스 콘층	50mm
	입도 조정층	300mm이상		강화 노반	150mm
지지 강성	보조 도상층	120MPa(E_{v2})	120MPa (E_{v2})	11kgf/cm ³ (K_{30})	
	입도 조정층	80MPa(E_{v2})			

3. 강화노반 두께 결정 시 고려 사항

국내 강화노반의 주재료인 쇄석은 일정 강도 이상의 암을 파쇄, 입도조정하여 사용하여야 하기 때문에 파쇄 및 이동에 소요되는 경비가 과다하다. 따라서 경제성면에서는 강화노반의 두께를 줄이는 것이 유리하다. 두께 20cm 절감 시 km당 약 4천만원이 절감되는 것으로 검토된 바 있다[2]. 따라서 보다 합리적인 적정 두께의 강화노반을 설계하는 것이 필요하다.

궤도는 노반위에 각종 궤도용품을 연결한 구조로서 그 요소마다 역학적인 특색이 있고 자갈도상궤도와 콘크리트궤도용의 거동도 상이하기 때문에 역학적 해석에 있어 많은 어려움이 있다. 자갈도상궤도의 경우에는 하중재하점을 중심으로 불연속적인 구조체로 하중이 분산되고 자갈이라는 완충층을 통과하여 노반으로 전달되는 하중을 검토한다. 그러나 콘크리트궤도의 경우에는 연속적인 강체에 분포되는 하중을 노반층에서의 전달하중으로 환산하여 사용하게 된다. 따라서 전달되는 하중측면에서는 콘크리트궤도 노반으로 전달되는 응력이 작기 때문에 구조적으로 안전하며, 탄성선형해석 상으로는 상부노반만으로도 충분히 지지할 수 있지만, 배수, 지지강성 연속성 확보 등의 이유로 인하여 강화노반을 필요로 하게 된다. 반면 자갈도상궤도와는 달리 동상방지 및 잔류침하를 최소화할 목적으로 하는 강화노반 두께의 설계는 그 의미가 약해진 것으로 판단된다.

먼저 현재 동상방지를 위한 국내환경조건에 적합한 동상방지층 설계방법이 개발되어 있지 않아 현재 미국의

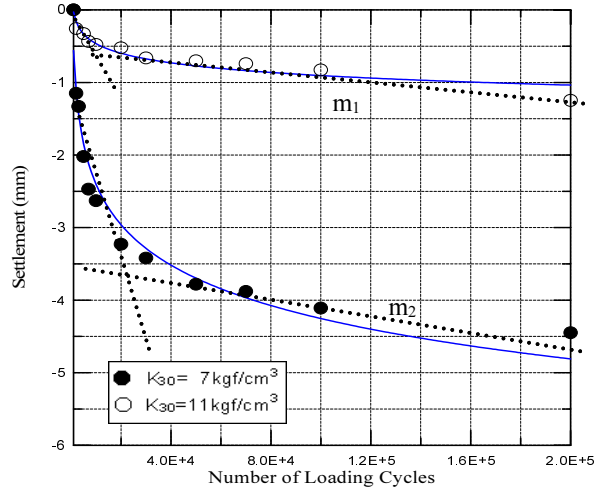
AASHTO 설계법과 일본의 TA설계법을 혼용하여 사용하고 있다. 통상적으로 도로에서 동결심도는 80~100cm로 결정하고 있으며, 쌓기부, 깎기부 및 경계부 등의 구분 없이 동상방지층을 최소 15cm 이상으로 적용하고 있다. 동상은 수분의 공급, 영하의 온도, 동상에 민감한 토질의 세가지 요소가 갖추어질 때 발생되며 이러한 요소 중 하나라도 만족하지 못하면 동상은 발생되지 않는 것으로 알려져 있다. 또한 원지반이 동상성 재료인 경우에는 2m 이상까지 모세관 현상을 발생시켜서 동결되지만, 일반적인 토질의 경우 모관상승고가 2m 이하로 깎기고가 2m 이상이면 동상에 영향이 적다. 따라서 원지반 기준으로 깎기고가 2m 이상인 경우에는 동상방지층을 별도로 설치할 필요가 없는 것으로 보고되었다[6].

고속철도 토공 구간에서는 흙쌓기 재료로 조립질의 재료들이 엄격하게 적용되고 배수가 원활하여 수분이 공급되지 않으므로 동상방지층의 설치를 생략할 수 있지만, 안전측의 설계를 위하여 최소두께만 설치하면 충분한 역할을 할 것으로 판단된다.

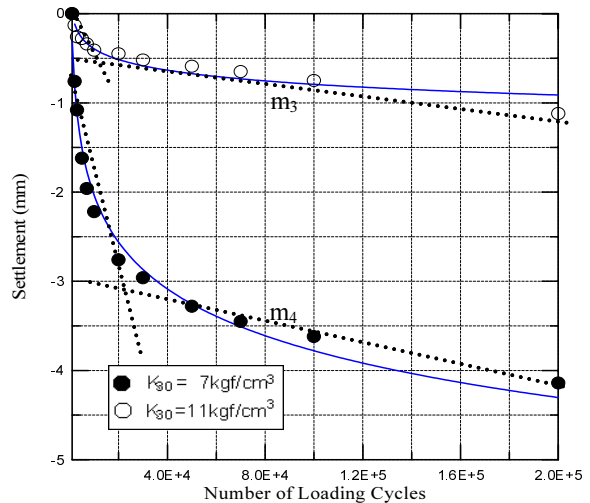
두 번째로 잔류 침하 최소화에 대한 내용은 다음과 같다. 콘크리트궤도는 침하발생 시 유지보수가 어려우므로 토공부 침하를 최소화 하여야 하는 것은 매우 중요한 관리 기준이다. 이러한 침하는 즉시침하(1차)와 장기침하(2차)로 구분할 수 있으며 즉시침하는 성토하중 재하 시 짧은 시간 내에 발생하므로 성토작업 중에 침하가 완료되므로 문제되지 않는다. 장기침하의 발생 원인으로는 원지반의 압밀침하, 토공사체의 압축침하, 열차의 반복하중에 의한 소성침하가 원인이 된다. 따라서 철도처럼 반복적으로 하중이 작용하는 경우는 초기침하보다는 장기간 침하에 대한 검토가 필요하다. 이러한 소성침하에 대한 검토를 위하여 반복재하 시험 결과를 비교 분석하였다[8]. 수행한 시험은 자갈도상궤도의 강화노반두께에 따른 노반의 지지력 특성을 파악하고 강화노반층에서 발생하는 소성침하량과 열차통과톤수에 따른 궤도침하의 추이곡선, 강화노반층의 강화효과 등을 유추하고자 하는 시험이다.

Fig. 2는 시험조건에 의한 각 단면별 강화노반의 두께가 40cm와 60cm이고 상부노반의 지지력(평판재하시험치 K_{30})이 각각 7kg/cm^3 과 11kg/cm^3 일때 재하횟수별 침하특성을 나타낸다. 가로축은 열차하중의 재하횟수를 나타내며 세로축은 잔류침하량을 나타낸다. Fig. 2(a)에서 접선의 기울기 m_1 , m_3 가 동일한 지반조건($K_{30}=11\text{kg/cm}^3$)이며, Fig. 2(b)에서 m_2 , m_4 가 동일한 지반조건($K_{30}=7\text{kg/cm}^3$)으로 유사한 기울기를 가진다. 그림에서 알 수 있듯이 각 시험조건에서 잔류침하량은 상부노반의 지지력 조건만 동일하다면 강화노반의 두께와는 영향이 없는 것을 알 수 있다. 현재

고속철도 설계기준상 상부노반의 지지력기준이 결정되어 있고, 강화노반이 자체적인 압축이나 압밀이 발생하지 않기 때문에 강화노반의 두께 결정시 잔류침하량 평가는 제외하여도 될 것으로 판단된다.



(a) Thickness of reinforced roadbed : 40cm



(b) Thickness of reinforced roadbed : 60cm

Fig. 2. Residual settlement at reinforced roadbed

4. 강화노반의 설계법

현재 국내의 철도 노반의 일반적인 설계는 노선의 구간별로 정해진 시방 기준에 따라 입도 및 평판재하시험의 지지력계수 등을 기준으로 설계 시공되는 것이 일반적이다. 그러나 보다 합리적인 설계를 위해서는 궤도 단면 및 원지반 조건, 강화노반 재료 조건을 고려하여 보다 상세한 설계를 수행하는 것이 바람직할 것이다. 강화노반의 설계법은 다음과 같은 네가지 방법으로 크게 분류될 수 있다.

4.1 궤도의 연속탄성해석

Zimmermann 및 Talbot 등은 궤도를 구성하는 모든 요소는 탄성체이며 레일은 연속적 탄성체상의 보라는 이론적, 실험적 결론을 얻어 궤도변형에 대한 미분방정식의 해로부터 궤도각부에 작용하는 응력을 계산하여 노반의 설계강도를 계산하였다. 그러나 이 해석법은 지반의 상태를 전혀 고려하지 못한다[11].

4.2 Barber의 2층계 탄성해석

Bossinesq의 탄성해석을 응용한 Barber의 2층계 탄성해석[11]을 이용하여 노반설계에 적용하였다. 노반 표면에 작용한 노반압력(1윤중에 의한 하중만 고려)에 의해 노반 표면이 허용변형량 이내로 될 때의 노반 두께를 구하는 것으로 이 방법은 2층계의 탄성체에 있어서 강화노반과 상하부노반에 생긴 변형을 경계에서 연속시키는 것은 불가능하여 근사해로 계산된다. 즉 노반과 노상으로 이루어진 지반을 단일 지반으로 변환시키는 근사해로 얻어진다.

4.3 유한요소 해석

일본에서는 3차원 유한요소해석으로부터 간편한 Barber의 2층계 탄성해석으로 변환하는 방법을 제안하였다[11]. 3차원 유한요소해석에 의한 계산은 노반의 형상을 합리적으로 해석할 수 있지만 설계 파라메타를 여러 가지로 바꾼 해석의 경우는 복잡해진다. 그래서 보다 간편한 2차원 유한요소해석 결과를 근사할 수 있도록 하였다. 특히 계산을 간편화하기 위하여 Barber의 2층계 탄성 해석결과와 유한요소해석을 근사할 수 있도록 하였다.

4.4 소성변형을 해석

TTC(Transportation Technology Center)에서는 열차의 반복하중을 고려하여 노반의 파괴를 방지할 수 있는 도상 두께의 설계법을 제안하였다. 이 설계법에서는 열차의 동하중, 반복하중, 노상의 종류, 노상의 압축강도, 응력상태, 회복탄성계수(Resilient Modulus)를 고려하여 도상의 두께를 설계하였다. 이는 다른 설계법보다 노반의 상태를 충분히 고려할 수 있는 설계법이라 할 수 있다. 다양한 노반과 자갈층조건에 대한 설계차트가 Li et al.(1996)[13]에 의해서 제안되었으며 자갈층 두께는 설계에 필요한 설계정수를 결정한 다음, 변형영향 요소를 구한 후 설계기준 도표를 이용하여 요구되는 자갈도상의 두께를 결정하였다. 설계방법은 두가지가 제안되었는데 첫 번째는 노상의 점진적인 파괴를 방지하기 위하여 노상표면의 누적된 소성변형율에 기초한 설계기준을 제안하였고 두 번째는 노반의 급작스러운

파괴를 방지하기 위하여 소성변위에 기초한 설계기준을 제안하였다.

5. 콘크리트궤도 강화노반의 적정두께 결정 방안

콘크리트궤도 강화노반의 적정 두께를 결정하기 위한 여러 가지 요인들을 검토하였다. 검토 결과, 기존 자갈도상궤도용 강화노반과는 역할에 있어 다소 차이가 있는 것으로 파악되었으며, 설계방법 또한 다르게 적용하여야 할 것으로 검토되었다. 가장 큰 차이는 자갈도상궤도의 경우에는 응력의 집중으로 인한 작용하중 분산이 가장 큰 목적이었으나, 콘크리트궤도의 경우에는 하중이 분포하중으로 작용하기 때문에 작용하중이 작아지고, 노반의 쌓기 조건이 상향조정되기 때문에 노반의 지지력 측면에서는 추가적으로 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다. 콘크리트궤도용 강화노반의 적용은 지지력을 확보하는 측면도 있지만, 그 보다 배수능력의 향상, 동결의 방지, 적절한 탄성 확보, 침하 제어 등이 더 중요할 것으로 판단된다. 따라서 자갈도상궤도와 같이 강화노반의 두께가 두꺼울 필요가 없으며, 주요 목적을 충족시킬 수 있는 적절한 두께를 결정하는 것이 필요하다. 강화노반의 형상 및 재료에 대한 사항은 설계기준에 명시되어 있고, 변경의 필요성이 크게 없으므로 콘크리트궤도용 강화노반 설계시 요구되는 사항은 강화노반의 두께에 대한 것으로 두께 결정에 요구되는 직접적인 사항은 적절한 탄성 확보를 위해 필요한 설계변수 검토가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 이를 위한 해석을 수행하여 정해진 상부의 궤도 형식과 노반의 설계기준에 따라 강화노반의 강성 및 두께에 따른 변위와 응력을 분석하였다.

6. 설계변수 검토를 위한 유한요소 해석

유한요소해석은 탄성선형해석을 기본으로 하며, 작용하중에 대한 궤도 및 노반의 각부에서의 응력 및 변위를 검토하였다. 검토시의 기준은 명확히 제시되거나 사용되는 것이 없기 때문에 궤도설계시 적용되는 독일 고속철도 궤도 강성 판정기준중 콘크리트궤도의 주행안정성 측면에서 제안하는 탄성변위 관리목표치 3mm(레일기준)를 기준으로 하였다.

콘크리트궤도에서의 강화노반 특성을 검토 위해 흙쌓기 구간의 대표단면을 중심으로 범용유한요소 해석프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 단면의 구성은 3차원 선형탄성모델을 이용하였으며, 작

용하중은 HL-25하중을 사용하였으며, 하중분포 특성을 정확히 규명하기 위하여 대차형상을 고려, 4개의 집중하중을 재하하였다. 해석내용은 조건별 강화노반의 응력-변형 특성을 파악하기 위하여 기본 모델에 대한 검토후, 강화노반층의 강성, 두께, 폭에 따른 응력-변위를 검토하였으며, 하중조건에 따른 노반층내의 응력특성을 검토하였다.

6.1 해석 단면

실제 거동을 해석하기 경부고속철도 2단계 표준단면을 이용하여 레일, 침목, TCL층, HSB층, 강화노반, 노반으로 모델링하였으며 패드는 스프링으로 연결하였다. 단면은 궤도중심을 기준으로 Symmetric 모델을 적용하였으며, 선로 길이방향은 대칭모델을 적용하였다. 해석단면으로 가정된 단면의 높이는 노반을 포함하여 총 3.05m로 모델링을 하였다. 레일은 UIC60단면의 제원으로 Beam 요소로 모델링을 하였으며, 레일을 제외한 콘크리트궤도 및 노반은 Solid Homogeneous 요소로 모델링 하였다. 콘크리트궤도에 대해서는 침목의 크기는 0.2m×1.2m×0.3m이며 간격은 침목의 중앙부에서 65cm 간격으로 TCL층에 매입되어 있는 것으로 모델링을 하였다. TCL층의 크기는 1.5m×11.9m, 두께는 24cm, HSB층은 크기는 1.8m×11.9m, 두께는 30cm로 모델링을 하였다.

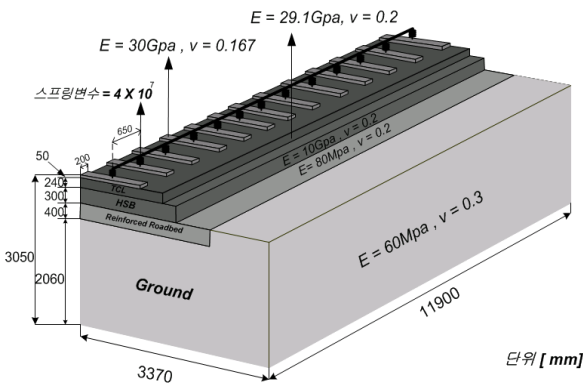


Fig. 3. Three-dimension analysis model

6.2 해석 물성치

노반의 선형탄성해석을 위하여 정확한 노반 물성치를 산출하는 것은 어렵기 때문에 그 동안 연구에서 적용되었던 물성치 중에서 국내 고속철도 건설조건에 부합되는 값을 선택적으로 사용하였다[1,8-11,13-15]. Table 2는 본 해석에서 사용된 강화노반, 노반 및 궤도의 물성치를 나타내고 있다.

Table 2. Properties of track and roadbed

재 료	물 성	값
Rail	탄성계수	210GPa
	포아송비	0.3
	단면적	$7.75 \times 10^{-3} \text{m}^2$
	단면2차모멘트	$3.09 \times 10^{-5} \text{m}^4$
Pad	Stiffness	$40 \times 10^3 \text{kN/m}$
Sleeper	탄성계수	29.1GPa
	포아송비	0.167
TCL	탄성계수	29.1GPa
	포아송비	0.2
	두께	0.24m
HSB	탄성계수	10.0GPa
	포아송비	0.2
	두께	0.3m
Reinforced Roadbed	탄성계수	80MPa
	포아송비	0.2
	두께	0.4m
Ground	탄성계수	60MPa
	포아송비	0.3
	두께	2.06m

6.3 해석모델의 응력-변위 특성

콘크리트궤도에서의 강화노반 조건에 따른 변형특성을 파악하기 위하여 강화노반층의 강성, 두께, 폭, 하중조건에 따른 응력-변위를 검토하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 기본 모델에 대한 설계하중작용시의 수직변위(U22) 및 수직응력(S22)변위 특성이다. 재하된 4축의 집중하중은 콘크리트궤도의 HSB층 및 TCL층을 통하여 분포하중으로 작용하며 전달된 하중은 노반으로 균일하게 전달되는 나타났다. TCL층과 HSB층의 저면부에서는 비슷한 응력분포를 나타내지만, 길이방향 모서리부에서 응력이 다소 집중되는 것으로 나타났다. Fig. 6은 하중작용시의 변위의 범위를 나타내는 그림으로서 4개의 집중하중 하에 균일하게 변위가 발생하였다. 레일에서의 변위 범위는 2.6~2.9mm 이며, 강화노반면에서의 변위 범위는 1.4~1.5mm로 TCL층 및 HSB층과 유사한 범위를 나타내고 있다.

자갈도상궤도의 하중 분포는 침목 통하여 노반으로 전달되는데 응력이 중첩되어 작용하며 응력작용의 범위가 불규칙적이다. 하지만, 콘크리트궤도에서는 작용하중이 콘크리트층(TCL, HSB)층을 통하여 분산하여 작용하므로 작용면적이 크고 골고루 분포하며, 응력수준이 낮아 자갈도상궤도보다 안정적이다. Fig. 6과 Fig. 7은 강화노반의 두께가

40cm이고 탄성계수가 80MPa인 경우의 강화노반의 상하부면에 작용하는 수직응력을 나타낸 그림이다. 작용응력의 범위는 30~40kPa이며, 중앙부에 응력이 가장 큰 것으로 나타났다. 상부면의 경우, HSB층의 가장자리부가 가장 큰 것으로 나타났으나 반복하중을 고려하면 무시하여도 될 것으로 판단된다.

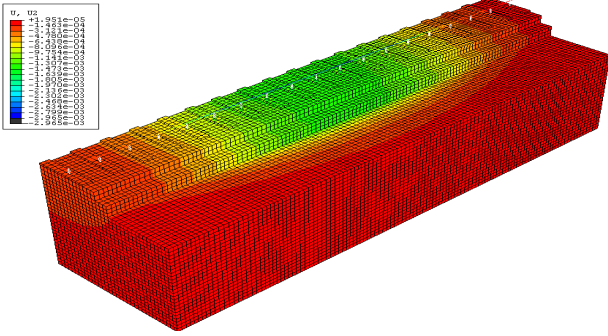


Fig. 4. Displacement contour on loading (U22)

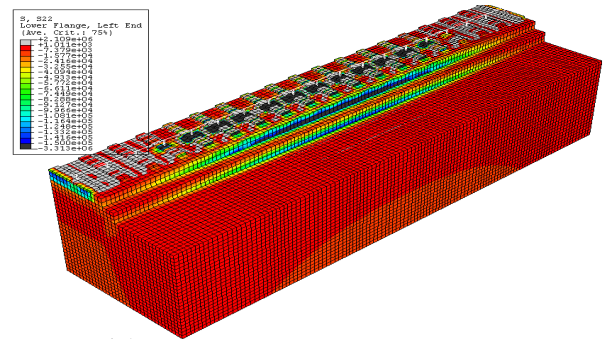


Fig. 5. Stress contour on loading (S22)

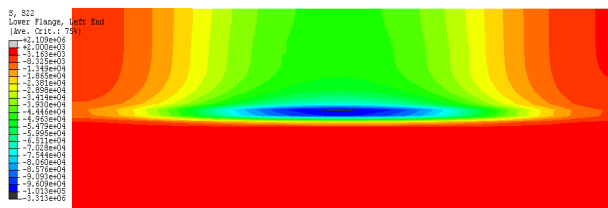


Fig. 6. Vertical stress of reinforced roadbed (upper face)

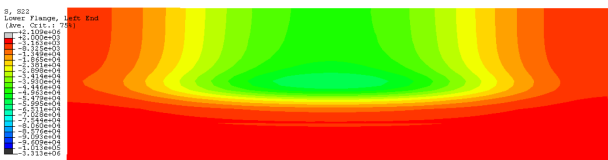


Fig. 7. Vertical stress of reinforced roadbed (bottom face)

6.3.1 하중조건에 따른 변위

재하하중은 고속철도 설계하중의 축배치를 포함한 최대

하중을 고려하였다. 궤도 및 노반의 부담력은 실제 운행하는 차량 중의 최대 축중을 감당 할 수 있어야 하므로 모든 조건을 만족할 수 있는 표준 열차 하중(HL25, High speed railway Live load)을 재하 적용하였다.

노반설계시에는 열차의 동적하중을 고려하여야 한다. 일반적으로 국내에서는 일본의 장대레일 충격계수식을 적용하고 있으며, 이 경우 설계속도를 350km/h 일때 충격계수는 2.05로 실제 설계하중의 두배 이상이 된다. 이는 기존의 자갈도상궤도를 목표로 산출되었기 때문이며, 콘크리트궤도에 적용하는 것은 적절하지 못하다. 콘크리트궤도는 자갈도상궤도에 비해 노반면에 작용면적이 넓으며, 작용응력이 낮고 궤도틀림에 대한 값이 작기 때문에 토공노반에 작용하는 합리적인 동적 설계하중을 위해 동적계수는 1.17[2]을 적용하였으며, 곡선부 캔트 부족량은 1.2를 사용하였다. 설계하중은 배치를 포함한 최대하중을 고려하여 정적윤중(P_s)에 속도함수인 충격률을 곱한 주행윤중(P_d)을 산정하였다(식 (1)). Fig. 8에서 나타낸 것은 실제 열차의 대차간격을 고려하여 17.5t의 하중을 1.6m 간격으로 4개의 집중하중을 재하시켰다.

$$P_d = P_s \times \left(1 + \frac{0.3V}{100}\right) \quad (1)$$

$$= 12.5 \times 1.17 \times 1.2 = 17.5t$$

Fig. 8처럼 연행하중을 사용하게 되면 재하위치에 따라 노반내 최대응력이나 변위의 발생지점이 변화하게 된다. 최대응력의 발생지점은 상부구조인 경우에는 하중재하 직하부(B-B)이며, 하부구조에서는 하중재하의 중심부(A-A)가 된다. Fig. 9는 위치별 변위특성을 나타내는 그림으로서 하중재하의 중심부의 노반층 변위가 하중재하 직하단면보다 크게 나왔으나 최대 3mm 이하였으며, 레일의 변위는 하중재하 직하부가 큰 것을 알 수 있었다.

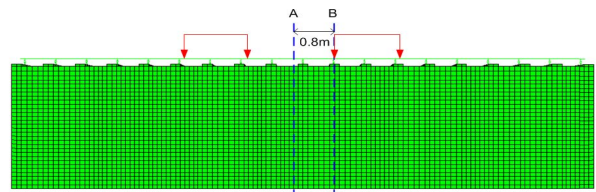


Fig. 8. Axle loading locations

6.3.2 재료 변형계수의 영향

본 절에서는 강화노반 재료의 강성변화에 따른 변위 특성을 검토하였다. 노반의 두께는 40cm로 고정하였으며 강화노반의 강성은 탄성계수를 기준으로 10~160MPa의 범위에 대하여 콘크리트궤도 및 노반의 각 측정 위치에서의 변위를 검토하였다.

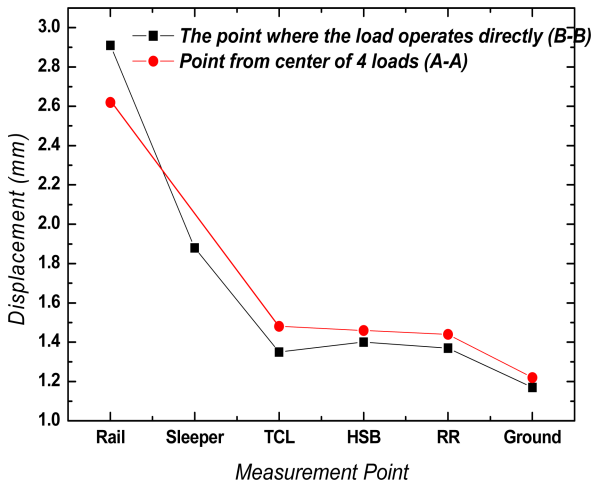
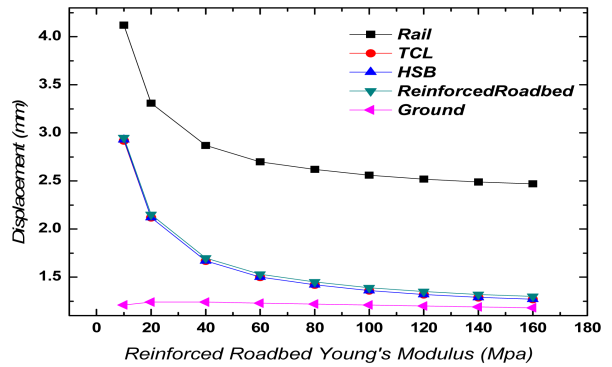


Fig. 9. Difference of displacement A-A and B-B section

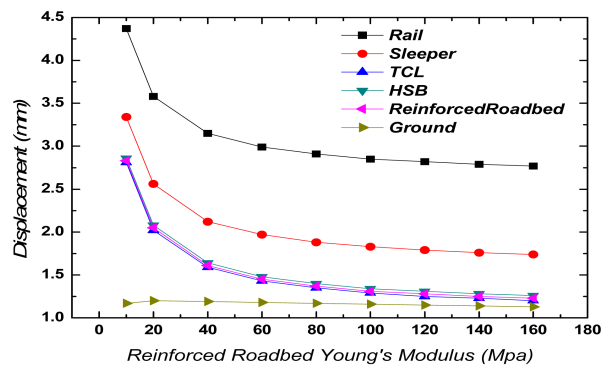
Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)는 각 단면에서의 강화노반 변형 계수별 변위를 나타낸 그림으로서 전체적인 변위발생 형태는 지수함수형태의 감소를 보이며, 약 60MPa 이상에서는 선형적인 거동을 보여 최소 변형계수는 60MPa 이상으로 하여야 함을 알 수 있다. 변위는 레일패드의 영향으로 레일에서 가장 큰 값을 보이며, TCL, HSB, 강화노반층은 비슷한 값을 나타내고 있다. 현재 설계기준에서는 강화노반의 2차 변형계수(E_{v2})값을 120MPa 이상으로 시공하도록 규정되어 있기 때문에 이에 상관하는 탄성계수값은 80MPa 이므로 변형계수에 따른 노반의 변위특성은 영향을 받지 않을 것으로 판단된다. 독일(고속철도 궤도강성 판정기준)에서 콘크리트궤도의 주행안정성 측면에서 제안하고 있는 레일에서의 탄성변위로서 관리목표치가 3mm인 것을 감안할 때 레일의 최대변위가 발생하는 B-B단면(하중재하 중심부)의 경우에도 노반의 탄성계수가 60MPa 이상이면 만족하는 것으로 나타났다.

6.3.3 강화노반 두께의 영향

본 절에서는 강화노반의 두께에 따른 변위 특성을 검토하였다. 노반의 변형계수는 80MPa로 고정하였으며, 강화노반의 두께는 0~100cm의 범위에 대하여 콘크리트궤도 및 노반의 각 측정 위치에서의 변위를 검토하였다. Fig. 11(a)와 Fig. 11(b)는 강화노반과 상부노반의 지지력은 일정(80MPa)하고 강화노반의 두께변화만을 변화하였을 때 측정위치별 탄성변위량을 나타내고 있다. 해석결과는 강화노반의 두께와 침하량의 관계는 선형적인 관계를 나타내고 있으며, 본 논문에서 적용하고 있는 독일 고속철도 궤도강성 판정기준(3mm)을 모두 만족하며 두께에 따른 변위량의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

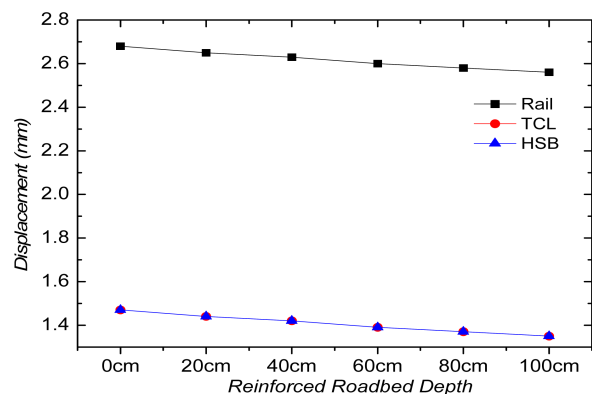


(a) A-A section

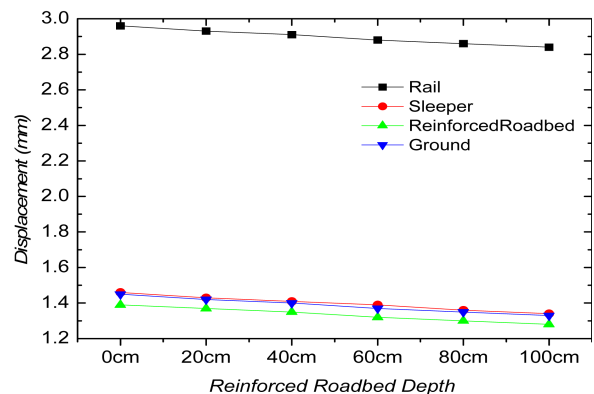


(b) B-B section

Fig. 10. Displacement according to Young's Modulus



(a) A-A section



(a) B-B section

Fig. 11. Displacement according to the reinforced roadbed thickness

6.3.4 강화노반의 변형계수 및 두께에 따른 변위량 특성

Fig. 12(a)와 Fig. 12(b)는 강화노반의 변형계수 및 두께의 변화에 따른 각부에서의 탄성변위량 변화를 나타낸 그림으로서 변형계수는 10MPa에서부터 160MPa까지 강화노반의 두께는 100cm까지 고려하였다. 변형계수 10MPa는 상당히 연약한 지반을 대표하며, 변위량 특성의 상대비교를 위하여 사용하였다. Fig. 12(a)는 레일에서의 변위량으로서 강화노반의 변형계수가 60MPa이상인 경우, 두께에 상관없이 3mm를 만족하는 것으로 나타났다. Fig. 12(b)는 노반에서의 변위량으로서 강화노반의 변형계수가 60MPa이상인 경우, 노반에서의 탄성변위 목표치인 1.5mm를 두께에 상관없이 만족하는 것으로 나타났다.

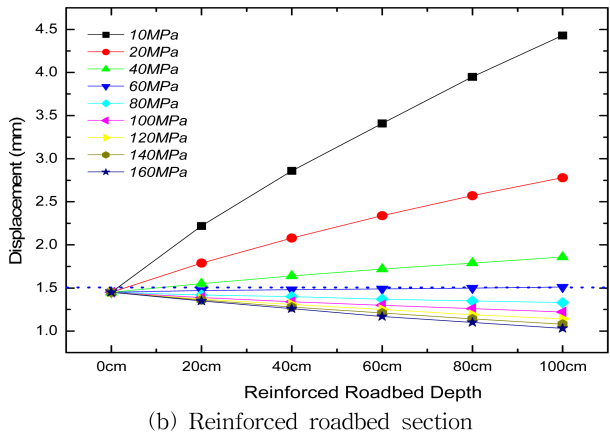
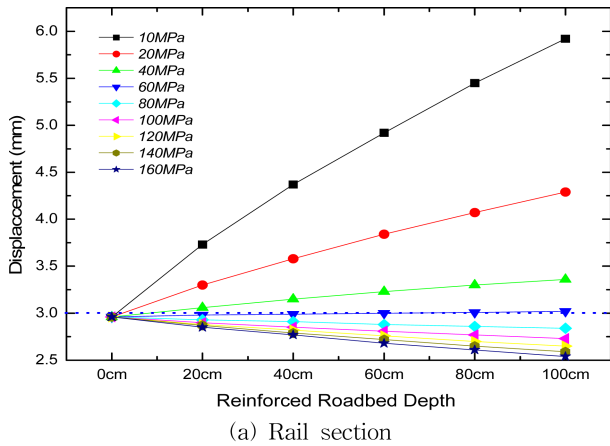


Fig. 12. Displacement according to the thickness and Young's modulus of reinforced roadbed

7. 결론

흙쌓기 구간에서의 콘크리트 궤도 강화노반 두께를 결정하기 위하여 본 연구에서 다양한 설계 조건을 검토하여 적정두께를 제시하고자 하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를

정리하면 다음과 같다.

1. 콘크리트궤도 흙쌓기 구간에서의 강화노반 두께를 결정하기 위한 검토조건으로는 적정 탄성계수, 배수성능, 동결심도, 경계성, 지지력 순으로 검토하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.
2. 이 중 지지력 및 적정 탄성계수는 설계기준에서 별도로 정하기 때문에 특별한 검토가 필요 없는 것으로 판단된다. 배수성능 및 동결심도의 경우, 고속철도 흙쌓기 구간에서는 조립의 양질재료만을 사용하고 별도의 배수시설을 설치하기 때문에 동결방지를 위해 최소두께 확보만으로 충분할 것으로 판단된다.
3. 유한요소해석을 통한 강화노반의 변형계수 및 두께의 변화에 따른 각 부의 변위량 검토 결과, 강화노반의 변형계수가 60MPa이상인 경우, 두께에 상관없이 변위량을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 흙쌓기 구간에서 재료의 변형계수만 확보된다면 강화노반의 두께는 현재의 설계기준보다 줄일 수 있는 것으로 나타났다.
4. 각 설계변수에 대한 종합적인 검토 결과, 고속철도 흙쌓기 구간에서의 강화노반 두께는 최소두께(15cm)만 만족하면 되는 것으로 나타났으나, 재료의 입경(D_{max} 125mm), 다짐도 등을 고려하여 250mm 이상으로 하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 한국철도 기술연구원(2003), “고속전철 선로구축물 시스템엔지니어링 기술개발 보고서.”
2. 한국철도기술연구원(2008), “철도토공구간 원지반 안정성 향상 연구.”
3. 한국철도시설공단(1993), “고속철도 공사시방서.”
4. 한국철도시설공단(2003), “고속철도 전문시방서.”
5. 한국철도시설공단(2001), “철도설계기준,” 노반편.
6. 김철문, 이호상, 이경하, 진정훈(2007), “도로포장 설계기준 개선(동상방지층),” 대한토목학회 학회지 제 55권, 제 2호, pp.33-40.
7. 김한중, 이상진, 김재학, 박대근(2006), “콘크리트 궤도 적용을 위한 궤도/노반 인터페이스 검토,” 한국철도학회 춘계학술대회, pp.423-431.
8. 이일화, 김현기, 황선근, 조용권(2000), “고속전철 강화노반의 침하특성에 관한 연구,” 대한토목학회 논문집, Vol. 6-d, pp. 681-690.
9. 이일화, 이수형, 강윤석(2006), “고속철도 콘크리트궤도용 흙노반의 거동 특성,” 한국철도학회 논문집, pp.298-304.
10. 이수형(2005), “수치해석을 통한 콘크리트 궤도 하부 강화노반의 적정성 검토,” 한국철도학회 춘계학술대회, pp.680-685.
11. 鐵道綜合技術研究所(1992), “鐵道構造物等 設計基準おの

ひ同解説(土構造物編).”

12. J. E. Bowles(1988), “Foundation analysis and design,” 4th edition, McGraw-Hill.
13. D. Li and E. T. Selig(1998), “Method for railroad track foundation design,” I, II, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 124, No. 4.
14. Etsuo Sekine and Katsumi Muramoto(1995), “Bearing capacity of actual existing roadbed,” RTRI Report, Vol. 9, No. 7.
15. Makoto Ishida, Shigeru Miura, Akiok(1997), “The influence of track stiffness on track dynamic behaviour,” OR of RTRI, Vol. 38, No. 3.

접수일(2009년 1월 20일), 수정일(2009년 9월 25일),
게재확정일(2009년 12월 8일)