

콘크리트 슬래브 궤도 흙쌓기 구간의 강화노반 두께에 관한 연구

A Research on the Reinforced Roadbed Thickness of Concrete Slab Track on Embankment Section

신승진* 신민호** 박종관*** 이일화****
Shin, Seung-Jin Shin, Min-Ho Park, Jong Guan Lee, Il-Wha

ABSTRACT

An active application of concrete track is being expected for the future constructions of Korea railroad. For the successful construction and design in embankment section, the roadbed behavior should be reasonably estimated using the proper analysis method. In this research, behaviors of reinforced roadbed constructed with the determined stiffness and thickness at embankment section were estimated through various design parameters and numerical analysis. A three dimensional finite element method was employed to determine the proper reinforced roadbed thickness at embankment section. The displacement and vertical stress caused by train loading were estimated and compared with the field test results. The bearing characteristics of concrete track roadbed were presented. Moreover, the method to determine thickness of reinforced roadbed was proposed.

1. 서 론

최근 고속철도의 대중화로 보다 안정적인 토공노반 구조가 필요하기 때문에 강화노반층이 도입되어 설계에 반영되었다. 국내 철도에 설계에 있어 체계적인 강화노반에 대한 설계방법을 연구개발에 노력을 기울이고 있지만 선진국의 설계기법과 설계기준을 그대로 답습하여 적용하는 실정이다. 그러나 토공노반의 설계시 필요한 기본적인 요소는 국내 지형, 지질, 시공조건, 열차운영조건 등을 복합적으로 고려하여 실정에 맞는 설계기준을 결정하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 적정한 콘크리트궤도용 강화노반의 설계두께를 결정하기 위하여 강화노반설계기법, 강화노반구조 및 시공사례들을 조사, 연구하여 국내 실정에 적합한 강화노반 두께의 결정 방안을 제시하고자 하였다.

2. 콘크리트궤도용 강화노반

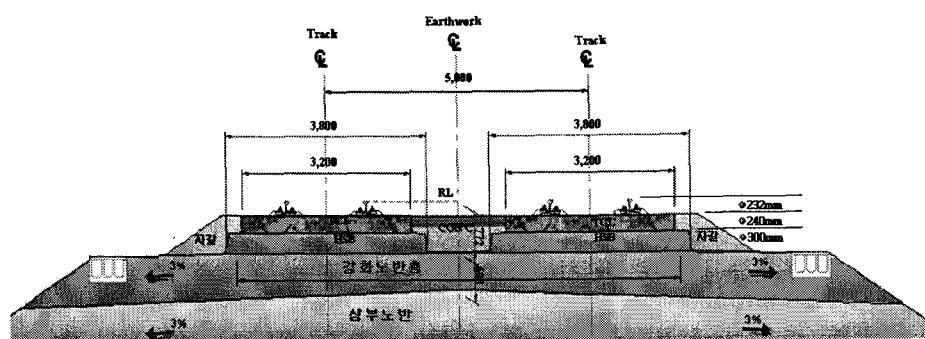


그림 1. 콘크리트궤도 및 노반의 구조(경부고속철도 2단계)

* 두산건설(주) 신분당선 3공구 소장, 정회원
E-mail : rokshin@doosan.com

TEL : (031)701-4145 FAX : (031)701-4150

** 한국철도기술연구원 수석연구원 ***서울산업대학교 교수 ****한국철도기술연구원 선임연구원

그림 1은 콘크리트 궤도의 구조와 구성을 나타내고 있다. 콘크리트 궤도의 상부구조는 레일, 레일패드, 베이스플레이트, 플레이트패드, 침목, 상부콘크리트층(TCL, Track Concrete Layer), HGT(HSB, Hydraulically Stabilized Base course, 하부콘크리트층)으로 구성된다. 하부구조는 강화노반층과 상부노반, 하부노반, 원지반으로 구성된다.

3. 콘크리트 궤도 강화노반의 설계조건

콘크리트 궤도용 강화노반 설계시 고려되어야 할 사항은 구조물이 전체적으로 안정해야 하며, 구조물의 부재는 소요강도를 가지며, 변위량이 허용치 이하여야 한다. 뿐만 아니라 노반 내의 배수를 고려하여 최대한 수위를 낮추고 하중을 널리 분포시켜 노반면에서의 하중강도를 충분히 줄이고, 특히 장기잔류침하에 대하여 안정하여야 한다. 콘크리트 궤도의 설계원리가 충족해야 할 요구조건은 차량으로부터 바퀴를 거쳐 레일로 전달되는 정·동역학적 힘을 손실 없이 노반으로 유도하는 것이다. 본 절에서는 이러한 영향조건을 고려하여 국내 환경에 적합한 강화노반의 설계방안을 분석하였다.

3.1 설계하중

고속 주행시 발생하는 동적 변동은 충격하중을 유발하게 되는데, 속도의 증가에 비례하는 경향이 있다. 따라서 노반설계시 열차의 하중은 동적 충격하중을 고려하여 설계하여야 한다. 자갈도상궤도의 경우에는 최대 1.8배의 하중을 사용하나, 콘크리트 궤도에서는 충격계수는 1.17을, 곡선부 캔트부족량은 1.2를 적용하는 것이 적절한 것으로 검토되었다.

$$\begin{aligned} \text{강화노반 설계를 위한 동적 윤증} &= 12.5(\text{축중}) \times 1.17(\text{동적계수}) \times 1.2(\text{캔트부족계수}) \\ &\approx 17.5\text{ton} \end{aligned}$$

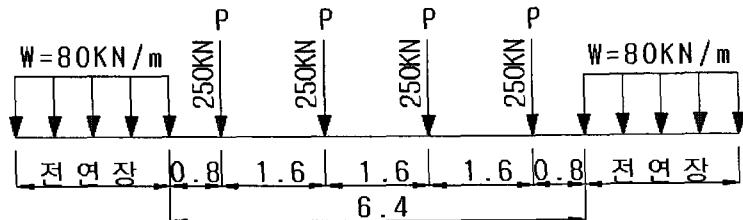


그림 2. HL-25하중 배치

3.2 강화노반의 지지력

강화노반면의 지지력기준은 2차변형계수(E_{V2})기준으로 $120\text{MN}/\text{m}^2$ 이상이 확보되어야 하기 때문에 두께 결정시 기본적으로 노반의 지지력은 확보되도록 하여야 한다.

3.3 설계변수의 검토

강화노반의 적정두께를 결정하기 위해서는 노반을 구성하는 구성단면과 재료에 대한 설계변수 연구가 요구된다. 강화노반의 상부구조로는 레일을 포함하여 침목, TCL층, HSB층이 있고 강화노반의 하부구조로는 노반이 있다. 상부의 궤도의 형식과 노반의 설계기준은 정해져 있기 때문에 설계변수 검토에서는 강화노반의 강성 및 두께에 따른 변위와 응력에 대한 분석이 필요하다.

3.4 동결심도

노반의 동결 발생조건은 수분의 공급, 영하의 온도, 동상에 민감한 토질의 세가지 요소가 갖추어질 때 동상이 발생되며 이러한 요소 중 하나라도 만족하지 못하면 동상은 발생되지 않는 것으로 보고되고 있

다. 특히 흙쌓기구간 상부노반의 동결은 모관현상에 의하여 수분의 공급이 있어야 가능하나, 고속철도 흙쌓기구간에서는 조립질의 재료들이 엄격하게 적용되고 배수가 원활하므로 수분의 공급이 존재하지 않게 된다. 따라서, 흙쌓기 구간에서 동결은 실질적으로는 발생하지 않는다고 할 수 있다. 암쌓기구간에서는 동결에 대한 고려가 필요치 않으며, 흙쌓기 구간에서는 원활한 배수를 위한 최소두께만 설치하면 된다. ASSHTO설계법과 일본의 TA설계법에 따르면 동상방지를 위한 최소두께는 15cm를 제안하고 있다.

3.5 강화노반의 잔류침하

강화노반의 재료는 성토재료중 A군에 속하는 매우 양호한 재료이며, 다짐기준 또한 매우 높기 때문에 강화노반의 자체의 압축이나 압밀은 발생하지 않는다. 또한 전체 노반고 중 강화노반이 차지하는 두께는 크지 않기 때문에 별도로 고려하지 않는다.

3.6 강화노반시공의 경제성

강화노반재료는 일정 강도 이상의 압을 현장에서 파쇄, 입도조정하여 사용하여야 하기 때문에 파쇄 및 이동에 소요되는 경비가 과다하다. 따라서 경제성면에서는 강화노반의 두께를 줄이는 것이 유리하다.

4. 콘크리트궤도 강화노반의 적정두께 결정 방안

콘크리트궤도 강화노반의 적정 두께를 결정하기 위한 여러 가지 요인들을 분석해 보았다. 검토 결과, 기존 자갈도상궤도용 강화노반과는 역할에 있어 많은 차이가 있는 것으로 파악되었으며, 설계방법 또한 다르게 적용하여야 할 것으로 검토되었다. 가장 큰 차이는 자갈도상궤도의 경우에는 응력의 집중으로 인한 작용하중 분산목적이 가장 큰 요인이었으나, 콘크리트궤도의 경우에는 하중이 분포하중으로 작용하기 때문에 작용하중이 작아지고, 노반의 쌓기 조건이 상향조정되며 때문에 노반의 지지력 측면에서는 추가적으로 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다. 콘크리트궤도용 강화노반의 적용은 지지력을 확보하는 측면도 있지만, 주요 목적은 배수능력의 향상, 동결의 방지, 적절한 탄성 확보, 침하 제어 등일 것으로 판단된다. 따라서 자갈도상궤도와 같이 강화노반의 두께가 두꺼울 필요가 없을 것으로 판단되며, 주요 목적을 충족시킬 수 있는 적정한 두께를 결정하는 것이 필요하다. 강화노반의 형상 및 재료에 대한 사항은 설계기준에 명시되어 있고, 변동의 필요성이 크게 없으므로 콘크리트궤도용 강화노반 설계시 요구되는 사항은 강화노반의 두께에 대한 것이다. 두께결정에 요구되는 직접적인 사항은 적절한 탄성 확보를 위해 필요한 설계변수 검토가 필요할 것으로 판단되어 본 연구에서는 이를 위한 유한요소해석을 수행하였다.

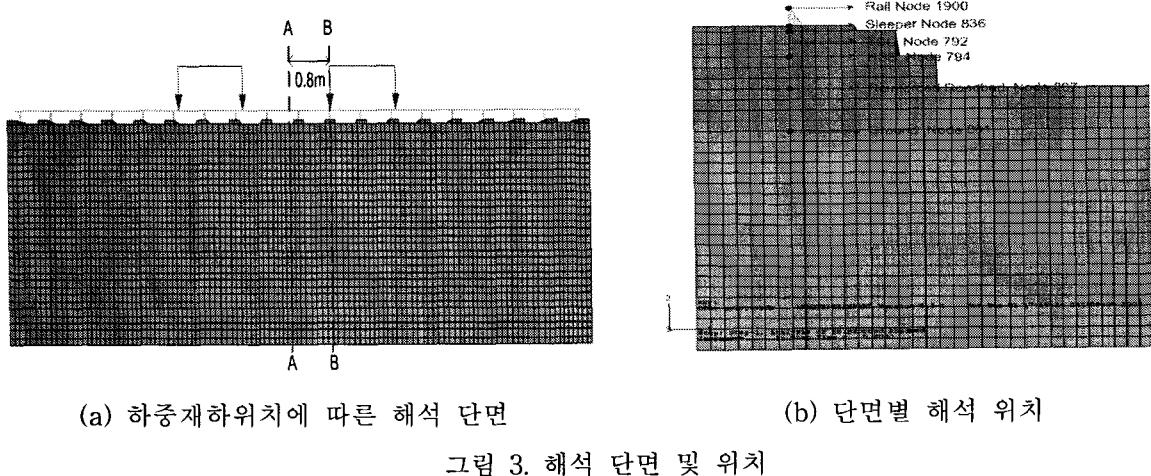
5. 해석조건

표 1. 궤도 및 노반의 물성치

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

콘크리트궤도에서의 강화노반층 특성을 검토하기 위해 흙쌓기 구간의 대표단면을 중심으로 범유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 단면의 구성은 3차원 선형탄성모델을

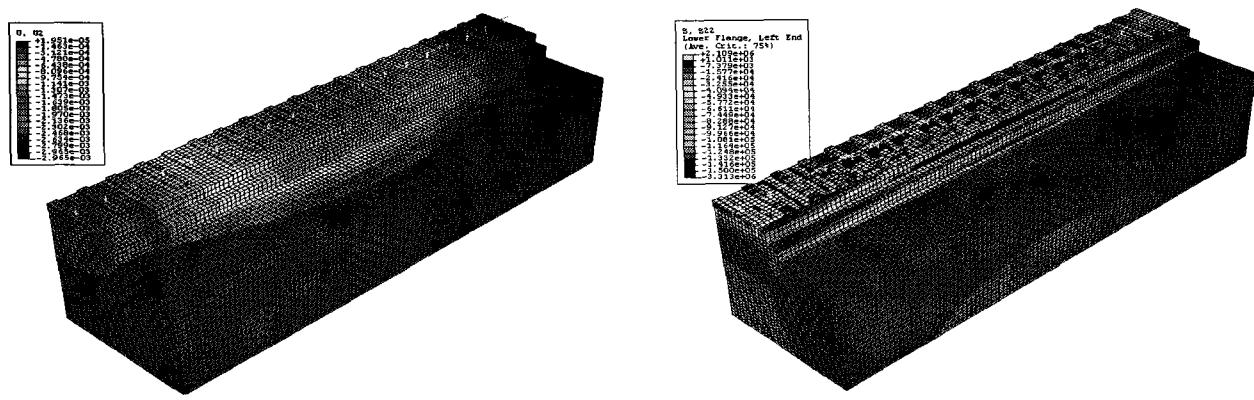
이용하였으며, 작용하중은 그림 2와 같이 HL-25하중을 사용하였으며, 하중분포 특성을 정확히 규명하기 위하여 4개의 집중하중을 적용하였다. 연행하중을 사용하기 때문에 하중조건에 따라 노반내 최대응력이나 변위의 발생지점이 변화하게 된다. 최대응력의 발생지점은 상부구조인 경우에는 하중재하 직하부이며, 하부구조에서는 하중재하의 중심부가 된다. 측정위치는 그림 3(b)와 같이 레일, 침목, TCL층, HSB층, 강화노반층, 노반의 6개의 측점지점으로 정하였다.



6. 해석 결과

6.1 해석모델의 응력-변위 특성

그림 4와 그림 5는 기본 모델에 대한 설계하중 작용시의 변위 및 응력 특성이다. 재하된 4축의 집중하중은 콘크리트궤도층을 통하여 분포하중으로 작용하며, 전달된 하중은 노반으로 균일하게 작용하는 것으로 나타났다. 그림 4는 하중작용시의 변위의 범위를 나타내는 그림으로서 4개의 집중하중 하에 균일하게 침하가 발생하였다. 레일에서의 변위는 2.6~2.9mm이며, 강화노반면에서의 변위는 1.4~1.5mm로 TCL층 및 HSB층과 유사한 변위 범위를 나타내고 있다. 그림 5는 하중 작용시의 수직방향 응력의 범위를 나타내는 그림으로서 하중이 직접적으로 전달되는 침목에서 가장 큰 응력을 나타내며, 아래층으로 전달되면서 응력은 급격히 작아지는 것을 알 수 있다. TCL층과 HSB층에서는 하면부에서는 비슷한 응력분포를 나타내지만, 길이방향 모서리부에서 응력이 다소 집중되는 것으로 나타났다.



6.2 강화노반의 두께의 영향

강화노반의 변형계수는 80MPa로 고정하였으며, 강화노반의 두께는 0~100cm의 범위에 대하여 콘크리

트래도 및 노반의 각 측정 위치에서의 변위를 검토하였다. 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. 그림 6 및 그림 7은 강화노반의 변형계수 및 두께의 변화에 따른 각부에서의 변위량의 변화를 나타낸 그림으로서 변형계수는 10MPa에서부터 160MPa까지 두께는 100cm까지 고려하였다. 그림 6은 레일에서의 변위량으로서 강화노반의 변형계수가 60MPa 이상인 경우, 두께에 상관없이 3mm를 만족하는 것으로 나타났다.

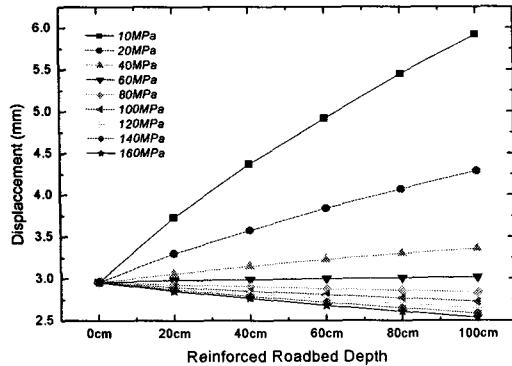


그림 6. 변형계수 및 두께에 따른 레일의 변위량

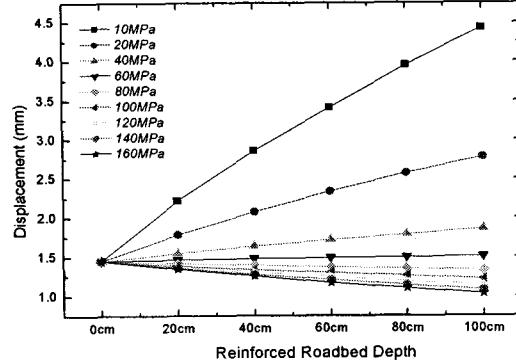


그림 7. 변형계수 및 두께에 따른 노반의 변위량

6.3 강화노반면의 응력 특성

자갈도상궤도의 하중의 분포는 침목 통하여 노반으로 전달되는데 응력이 중첩되어 작용하며 응력작용의 범위가 불규칙적이다. 하지만, 콘크리트궤도에서는 작용하중이 콘크리트층(TCL, HSB)층을 통하여 분산되어 작용하므로 작용면적이 크고 골고루 분포하며, 응력수준이 낮아 자갈도상궤도보다 안정적이다.

그림 8과 그림 9는 강화노반의 두께가 40cm이고 탄성계수가 80MPa인 경우의 강화노반의 상하부면에 작용하는 수직응력을 나타낸 그림이다. 작용응력의 범위는 30~40kPa ($0.3\text{--}0.5\text{kg/cm}^2$)이며, 중앙부에서 응력이 가장 큰 것으로 나타났다.

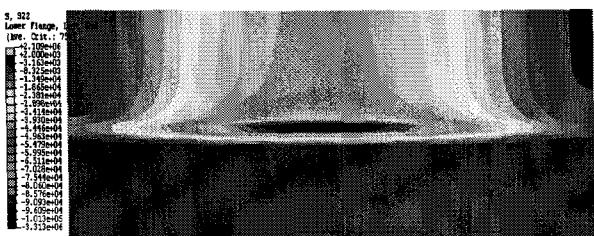


그림 8. 강화노반 상부면의 수직응력

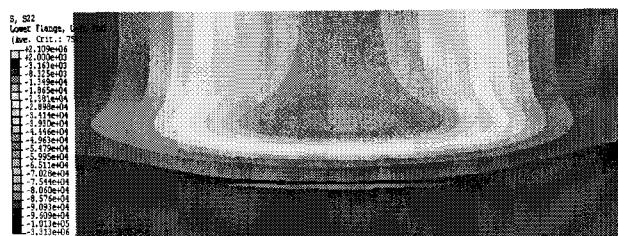


그림 9. 강화노반 하부면의 수직응력

7. 결 론

고속철도 흙쌓기 구간에서의 콘크리트 궤도의 강화노반 두께를 산정하기 위하여 본 연구에서 다양한 설계 변수를 검토하여 적정두께를 도출하는 방안을 제시하고자 하였다. 콘크리트궤도 강화노반에 대한 검토 결과 다음과 같다.

- 1) 콘크리트궤도 흙쌓기 구간에서의 강화노반 두께를 결정하기 위한 검토조건으로는 노반의 지지력, 설계변수, 배수성능, 동결심도, 적정 탄성계수, 경제성 등을 검토하여야 한다.
- 2) 흙쌓기 구간에서는 조립의 양질재료만 사용되기 때문에 원활한 배수 및 동결방지 목적으로서의 강

화노반은 최소두께만 설치되면 된다.

- 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 구간에서의 강화노반의 두께는 재료의 변형계수만 확보된다면 두꺼울 필요가 없다.
- 4) 설계변수에 대한 검토 결과, 흙쌓기 구간에서의 강화노반 두께는 최소두께(15cm) 이상만 만족하면 되는 것으로 나타났으나, 재료의 입경, 다짐도 등을 고려하여 다소 여유있게 설치하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이일화, 황선근, 김현기(2000), 고속전철 강화노반의 침하특성에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, Vol.20, pp681-690
2. 이일화, 이수형, 강윤석(2006), 고속철도 콘크리트궤도용 흙노반의 거동특성, 한국철도학회 논문집, pp298-304
3. 김한종, 이상진, 김재학, 박대근(2006), 콘크리트 궤도 적용을 위한 궤도/노반 인터페이스 검토, 춘계학술대회, pp423-431.
4. 한국철도기술연구원(2006), “철도토공구간의 원지반 안정성 강화 기술개발 연구용역 보고서”
5. 한국철도시설공단(2005), “철도설계기준(노반편)”
6. Bowles, J. E.(1988), “foundation analysis and design”, 4th edition, McGraw-Hill
7. Li D. and Selig E. T.(1998), “Method for Railroad Track Foundation Design I, II”, J. of Geotech. Eng, Vol.124, No.4