

# 실대형 재하시험을 통한 슬래브궤도 노반의 연직토압 평가

## Assessment for Vertical Earth Pressure of Roadbeds Applied to Slab Track Structure by Real-scale Loading Tests

이태희†      이진욱\*      원상수\*\*      이성희\*\*\*  
Tae-Hee Lee      Jin-Wook Lee      Sang-Soo Won      Seong-Hyeok Lee

### ABSTRACT

Recently, concrete slab track is mostly used to satisfy requirements for safety of high-speed train operation and economical efficiency of maintenance. Due to structural characteristics of ballast track structures, roadbeds under the ballast experience a state of high stress. In case of slab track structures, however, its roadbeds place on a condition of low stress less than roadbeds of ballast track structures as increasing of the loading area. In this study, vertical earth pressure under slab track structures was investigated through real-scale loading tests and theoretical analysis to compare with each other.

### 1. 서 론

철도 궤도구조는 열차하중의 안정적인 지지를 위하여 노반의 강성을 고려한 적정한 수준의 하중분산 기능이 요구된다. 궤도구조를 거쳐 노반에 분산되는 응력산정을 통하여 노반에 필요한 강성을 결정할 수 있으며, 노반의 재료 및 물성기준을 정할 수 있다. 국내 저속도 대역의 기존노선의 경우 도상자갈궤도의 노반조건 및 열차하중에 따른 토압특성에 대한 연구가 진행되어 성과를 거두고 있으며, 국외에서도 도상자갈궤도의 노반압력을 정확히 산정하고 최적의 설계기준을 마련하고자 많은 연구를 수행하고 있다. 그러나 도상자갈궤도는 구조적 특성상 침묵에서 노반상면으로 전달되는 응력분포면적이 작아 응력집중도가 크며, 이로 인하여 노반상면이 높은 응력상태에 놓이게 된다. 따라서 도상자갈궤도는 열차의 고속화에 따른 열차하중의 안정적인 지지를 위하여 높은 수준의 노반강성이 요구되며, 또한 고빈도의 유지보수를 요하게 된다. 결국 신설되는 고속선에서는 이러한 문제점을 해결하고자 슬래브궤도가 적용되어 운행되고 있으며, 향후 슬래브궤도에 대한 관심이 더욱 높아질 것이라 전망된다.

슬래브궤도의 경우 침묵과 슬래브 구조의 일체거동이 유도되는 구조적 특징을 가지고 있어 자갈궤도에 비하여 넓은 노반응력분포면적을 기대할 수 있다. 본 논문에서는 국내 고속선에 적용되고 있는 슬래브궤도의 노반에 전달되는 연직토압을 검토하고자 하였으며, 이를 위해 슬래브궤도구조와 노반을 포함한 실물대형 모형실험환경을 구축하였다. 구축된 실험 환경에서 0kN에서 180kN까지 30kN간격으로 하중을 증대 시키며 정재하 시험을 수행하였다. 또한 실험결과를 이론적 해석결과와 비교하여 노반으로 전달되는 연직토압의 이론추정치를 검토해 보고자 하였다.

† 교신저자, 한국철도기술연구원 석사 후 연수연구원, 신교통인프라연구실  
E-mail : [thle83@krri.re.kr](mailto:thle83@krri.re.kr)

\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 신교통인프라연구실

\*\* 한국철도기술연구원 연구원, 신교통인프라연구실

\*\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 고속철도인프라시스템연구단

## 2. 실물대형모형 실험

### 2.1 실험체 조성 및 센서 구성

국내 고속철도에 적용되고 있으며 본 실험에 사용된 슬래브 궤도의 구조는 그림 1과 같다. 이를 바탕으로 그림 2와 같은 폭4.5m×길이20m×깊이4m의 토조에 실물대형 실험환경을 조성하였다. 토조 조성에 사용된 재료의 입도분포곡선과 다짐곡선을 각각 그림 3, 4와 그림 5, 6과 같으며, 철도설계기준에 부합한 노반 재료임을 확인 할 수 있다.

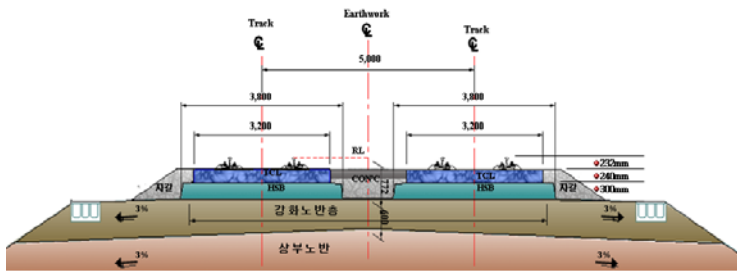


그림 1. 슬래브 궤도 구조



그림 2. 실대형 실험 토조 전경

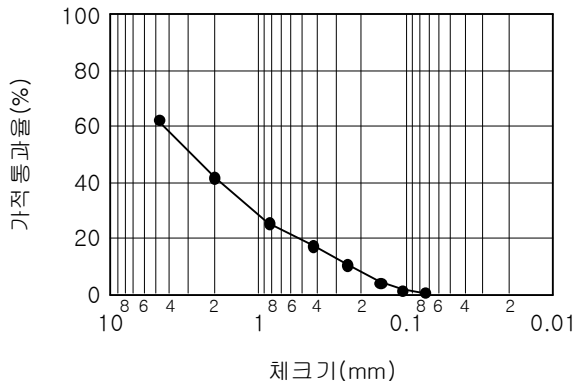


그림 3 상부노반 입도분포곡선

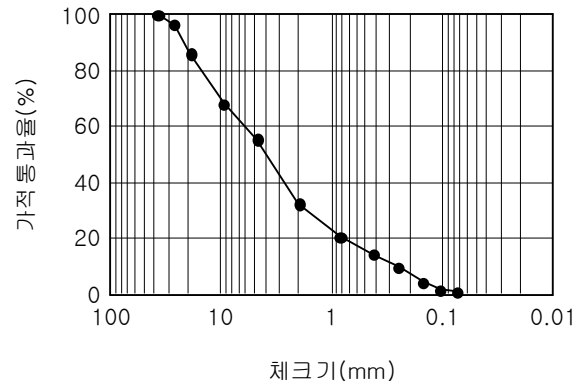


그림 4 강화노반 입도분포곡선

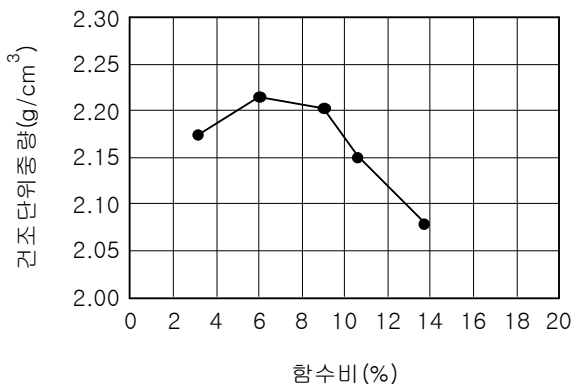


그림 5 강화노반 다짐곡선

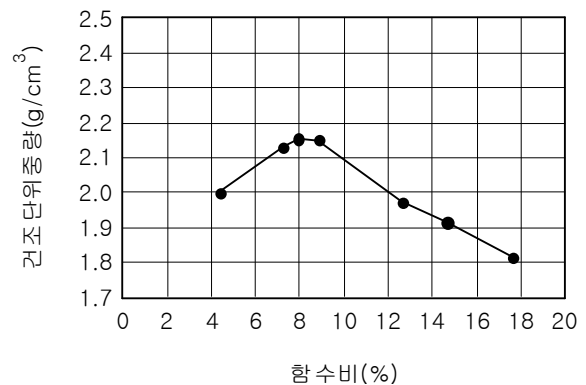


그림 6 상부노반 다짐곡선

조성된 상부노반의 다짐도 검증을 위하여 그림 7, 8과 같이 해당지점의 노반 다짐 후 반복평판재하시험과 들밀도시험을 수행하였다. 시험결과는 표 1과 같이 다짐기준을 만족하고 있다.



그림 7. 반복평판재하시험



그림 8. 들밀도시험

표 1. 철도노반의 다짐기준 및 실험노반의 계측값

구분	강화노반(보조도상)	상부노반
DIN 18 134	$E_{v2} \geq 120 \text{MN/m}^2$ $E_{v2}/E_{v1} < 2.2$	$E_{v2} \geq 80 \text{MN/m}^2$ $E_{v2}/E_{v1} < 2.3$
KS F 2311	최대건조밀도의 100% 이상	최대건조밀도의 95% 이상
실험 노반	$E_{v2} = 131.6 \text{MN/m}^2$ $E_{v2}/E_{v1} = 1.9$ 상대다짐도 = 106.2%	$E_{v2} = 77.3 \text{MN/m}^2$ $E_{v2}/E_{v1} = 2.1$ 상대다짐도 = 97.5%

상기의 물성 및 다짐도 검토를 거친 후 조성된 노반의 강화노반면, 지반내 0.5m, 지반내 1.5m, 지반내 2.5m 지점에 그림 9와 같이 토압계를 설치하여 계측을 준비하였다. 계측에 사용된 데이터로거와 센서의 사양은 표 2와 같다.

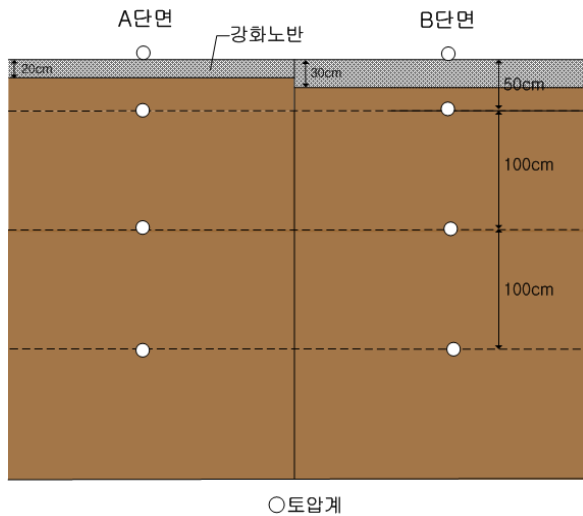


그림 9. 각 단면의 토압계 설치도

표 2. 데이터로거 및 토압계 사양

구분	사양
데이터로거	- Model : MGCpuls - Data transfer rate : 338,000S/s - 제조사 : HBM
토압계	- 제조사 : Kyowa - 용량 : 200kPa, 500kPa - 200kPa : 강화노반면, 지반내 0.5m - 500kPa : 지반내 1.5m, 지반내 2.5m

## 2.2 하중 재하

그림 10과 같이 하중 재하 장치를 통하여 구축된 슬래브 케도에 하중을 가하였다. 0kN에서 180kN 까지 30kN간격으로 하중을 증가 시키며 재하 하였으며, 각 하중 단계에서 약 10분간 재하상태를 유지 하였다. 또한 180kN에 도달한 후 30kN의 간격으로 제하를 하며 측정 결과를 수집하였다.



그림 10. 하중재하 장치를 이용한 재하-제하 시험 전경

## 3. 실험결과 및 분석

정재하 시험결과에서 180kN의 하중에 도달했을 때, 토압계가 설치된 각 깊이에서의 측정값은 그림 11과 같다. 강화노반면에 설치된 토압계의 측정값은 토압계의 상면이 콘크리트 슬래브 면에 직접 접하므로 접촉면의 상태에 따라 응력집중도가 변화할 것으로 예상할 수 있다. 이로 인하여 강화노반면에서 측정되는 토압의 경향에 다소 편차가 있을 것으로 판단되며, 실험결과 약 17~22kPa의 값을 얻을 수 있었다. 본 논문에서는 평균치인 18.6kPa를 사용하여 분석을 진행하였으나, 토압계와 슬래브케도면의 균질한 접촉상태를 유지할 수 있는 방안에 대하여 검토가 요구된다.

측정된 결과와 함께 토압추정에 주로 사용되는 Boussinesq 방법과 Milovic 등이 제안한 강체 위의 성토체 내에서 토압 분포를 산정하는 방법을 적용하여 계산된 결과를 비교하여 나타내었다. 두 가지 방법의 적용을 위해 토압의 작용면적을 실험노반에 설치된 슬래브케도의 전체 면적(3.8×3.85m)으로 가정하였으며, 재하하중이 가정된 작용면적에 등분포하중의 형태로 가해진다고 가정하였다. 향후 작용면적과 하중작용의 형태에 대하여 수치해석을 통한 검증이 필요할 것으로 판단된다. 측정값과 두 방법에 의해 예측된 값을 표 3에 나타내었다. 비교 결과 Boussinesq 방법의 경우, 약 1.2배에서 약 6.8배가량의 차이를 확인할 수 있으며, 이는 노반의 측면과 하부가 콘크리트로 이루어진 토조에 접하고 있어 슬래브 케도에서 전달되는 토압의 상당량을 분담하기 때문에 발생하는 차이라 판단된다. 그러나 노반의 하부를 강체로 가정하고 계산된 Milovic 등의 방법에서 이러한 영향이 고려되는 것을 알 수 있으며, 측정값과의 비교결과 약 0.9배에서 약 4.3배가량으로 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 콘크리트 측벽의 하중 분담효과도 고려할 수 있다면 더욱 신뢰성 있는 이론값을 도출할 수 있을 것이라 판단된다.

그림 11을 통하여 강화노반의 두께가 각각 20cm, 30cm인 A, B단면의 측정값을 비교해 보았으며, A, B 단면의 측정값은 지반내 1.5m 까지 약 10%가량의 차이가 발생하고 하부로 갈수록 그 차이가 점점 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 강화노반의 두께가 증가할수록 하중분산효과가 증대되는 것을 확인할 수 있었다.

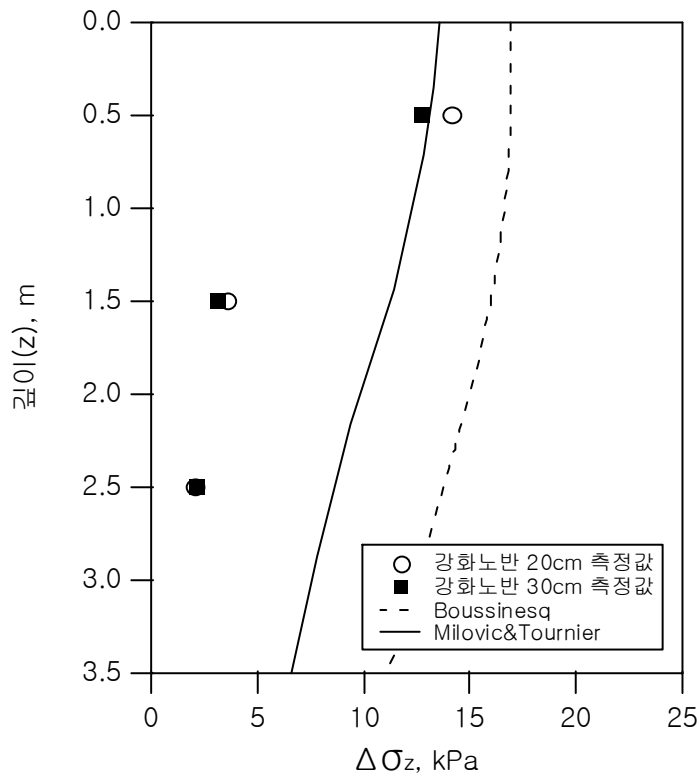


그림 11. 깊이에 따른 연직토압 변화(180kN 재하 시)

표 3 측정값과 이론적 추정값의 비교

위치	토압(kPa)				<i>boussinesq</i> 방법 측정값		<i>Milovic</i> 방법 측정값	
	Bossinesq	Milovic	측정값		강화노반 20cm	강화노반 30cm	강화노반 20cm	강화노반 30cm
			강화노반 20cm	강화노반 30cm				
지반내 0.5m	16.95	13.11	14.17	12.70	1.20	1.33	0.93	1.03
지반내 1.5m	16.00	11.32	3.58	3.18	4.47	5.03	3.16	3.56
지반내 2.5m	13.79	8.62	2.04	2.10	6.76	6.57	4.23	4.10

일본의 철도구조물등설계표준동해설(1992)에 의하면 성토체 내에서의 열차 하중의 영향 범위는 열차 하중에 의한 응력이 10%정도로 되는 깊이이며, 약 3m정도의 깊이까지로 고려하여도 무리가 없다고 명시되었다. 본 실험을 통하여 강화노반면 이하에서 측정된 토압을 강화노반면에서 측정된 토압의 평균치로 나누어 토압비를 산정하였고 표 4에 나타내었다. 표 4를 통하여 지반내 2.5m에서 약 11%의 토압비를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 지반내 2.5m 부근이 열차의 영향 범위라 판단되며, 향후 심도 있는 검토를 통해 열차 하중의 영향 범위를 보다 명확히 고찰할 수 있다면, 현행 설계기준에서 상부노반을 3m로 규정하고 있으나 이의 축소도 가능할 것으로 판단된다.

표 4 토압비 산정 결과

측정위치	토압비(%)	
	강화노반 20cm	강화노반 30cm
지반내 0.5m	76.28	68.28
지반내 1.5m	19.25	17.10
지반내 2.5m	10.97	11.29

또한 A, B단면의 하중증가에 따른 토압변화를 측정위치별로 나타내면 그림 12, 13과 같으며, 각 단면의 측정위치에서 하중증가에 따른 토압변화의 기울기를 산정하면 표 5와 같다. 이를 통하여 깊이가 증가함에 따라 기울기가 감소하며 0에 가까워지는 경향을 확인 할 수 있으며, 앞서 검토한 A, B단면의 측정값의 차이, 토압비와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 특히 보조도상층의 두께가 두꺼운 B단면의 경우 토압이 상대적으로 감소하고 있어 A단면에 비해 보조도상층으로 인한 하중 분산효과가 있음을 확인할 수 있다.

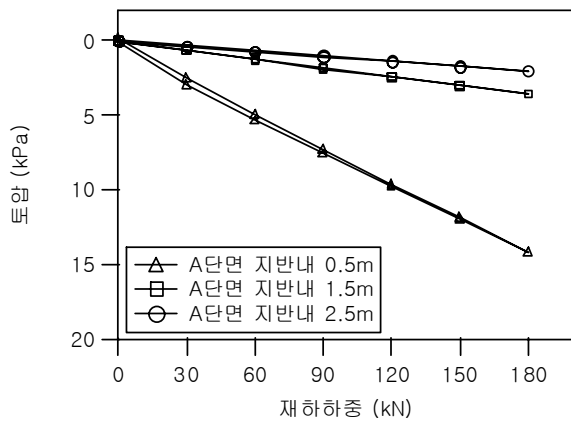


그림 12 하중증가에 따른 토압분포 (강화노반 20cm)

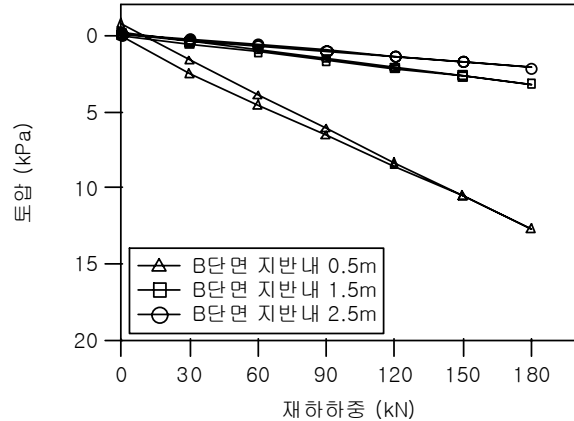


그림 13 하중증가에 따른 토압분포 (강화노반 30cm)

표 5 재하하중-토압 곡선의 기울기 산정 결과

측정위치	재하하중-토압 곡선의 기울기(토압/재하하중)	
	강화노반 20cm	강화노반 30cm
지반내 0.5m	약 0.079	약 0.071
지반내 1.5m	약 0.020	약 0.018
지반내 2.5m	약 0.011	약 0.012

#### 4. 결론

폭 4.5m의 토조에 슬래브 궤도구조를 갖는 철도노반을 구성하였으며, 토압 측정을 위해 강화노반면, 지반내 0.5m, 1.5m, 2.5m 지점에 토압계를 설치하였다. 0kN에서 180kN까지 30kN간격으로 하중을 가하며 정재하 시험을 수행하였으며, 실험 결과를 통하여 다음의 결론은 도출하였다.

(1) 측정값은 Boussinesq 방법과 약 1.2 ~ 6.8배가량의 차이가 발생하였으며, 토조의 하면을 강체로 가정하여 산정하는 Milovic 등의 방법과 0.9~4.3배가량의 차이가 발생하였다. 노반의 측면에 구성된 콘

트리트의 하중분담효과가 고려될 수 있다면 더욱 신뢰성 있는 이론값을 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

(2) 강화노반의 두께가 각각 20cm, 30cm인 A, B단면의 측정값 비교결과, 지반내 1.5m까지 약 10% 가량의 차이가 발생하였으며 하부로 갈수록 차이가 점점 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

(3) 강화노반면 이하에서 측정된 토압을 강화노반면에서 측정된 토압의 평균치로 나누어 토압비를 산정하였고, 지반내 2.5m에서 약 11%의 토압비를 얻을 수 있었다. 이를 통하여 지반내 2.5m 부근이 열차의 영향 범위라 판단되며, 향후 심도 있는 검토를 통해 열차 하중의 영향 범위를 보다 명확히 고찰할 수 있다면, 현행 설계기준에서 상부노반을 3m로 규정하고 있으나 이의 축소도 가능할 것으로 판단된다.

(4) Boussinesq 방법과 Milovic 등의 방법을 적용하기 위해 토압의 분포면적을 슬래브레도하부면의 전체면적(3.8m×3.85m)으로 가정하고 등분포하중의 형태로 가하여 산정하였다. 향후 수치해석 등을 통하여 분포면적과 하중형태에 대한 검증이 요구된다.

### 참고문헌

1. 한국철도시설공단, “경부고속철도 대구~울산 간(궤도 4 공구) 궤도부설 기타 공사, 실시설계보고서,” 2006.
2. 건설교통부, “철도설계기준(노반편),” 한국철도시설공단, pp. 83, 2005.
3. H.G. Poulos and E.H. Davis, “Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics,” The University of Sydney, 2006.
4. Milovic, D.M. and Tournier, J.P., "Stresses and displacements due to rectangular load on a layer of finite thickness," Soils and Foundations, Vol.11, No.1, pp.1-27, 1971.
5. 運輸省 鐵道局, “鐵道構造物等設計標準·同解説 土構造物,” 鐵道總合技術研究所, 1992.