

# 실대형실험에 의한 아스팔트 직결궤도의 토압 특성

## Earth Pressure Characteristics of Asphalt Directly Fastened Track by the Full-scale test

이성혁<sup>\*†</sup>, 이진욱<sup>\*</sup>, 류태진<sup>\*</sup>, 원상수<sup>\*</sup>

Seong-Hyeok Lee<sup>\*†</sup>, Jin-Wook Lee<sup>\*</sup>, Tae-Jin Lyu<sup>\*</sup>, Sang-Soo Won<sup>\*</sup>

**Abstract** Asphalt directly fastened track has various advantages such as easy secure of surface smoothness, rapid construction, and simple maintenance when derailment and ground settlement occur. In Germany, there has been no maintenance applied to the Asphalt directly fastened track for twenty years after construction, and it has also been reported that the Asphalt directly fastened track, compared with concrete slab track, is effective for noise reduction. Asphalt directly fastened track is a structure in which the Asphalt roadbed directly supports train load transferred from sleeper or concrete slab. The stress level acting on the roadbed in the structure may be affected by the thickness of Asphalt mixture layer. Therefore, in this study earth pressures were measured through a full-scale test under static and dynamic loads, simulating the actual train load and field conditions, by varying the thickness of Asphalt mixture layer. In the experimental study, the stress level measured on the roadbed depending on the Asphalt layer thickness was compared and evaluated whether it satisfies the empirical allowable stress level.

**Keywords** : Asphalt directly fastened track, Asphalt roadbed, Earth pressure

**초 록** 아스팔트 직결궤도는 노반 표층의 평탄성 확보가 쉽고 시공성이 우수하며 탈선과 지반침하 등의 문제 발생 시 유지보수가 쉬운 장점이 있다. 독일의 경우 아스팔트 직결궤도 부설 이후 20년간 유지보수 사례가 없으며, 콘크리트 궤도와 비교하여 우수한 소음 저감 효과가 있는 것으로 보고하고 있다. 이러한 아스팔트 직결궤도는 침목 또는 콘크리트 슬래브로부터 전달되는 열차하중을 아스팔트 노반이 직접 지지하는 구조로서 아스팔트 혼합물층 두께에 따라 노상에 작용하는 응력수준에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 본 논문에서는 실제 열차하중 및 현장 조건과 유사하게 재현이 가능한 실대형실험을 통해 아스팔트 두께별 정, 동적 하중 재하 시 작용하는 토압 등을 측정하였다. 이를 통해 아스팔트 두께별 노반의 응력변화를 비교하였으며, 경험식에서 제시하는 노반 허용응력값에 대한 만족여부를 검토하였다.

**주요어** : 아스팔트 직결궤도, 아스팔트 노반, 토압

## 1. 서 론

아스팔트 직결궤도는 아스팔트 노반에 침목 및 패널을 직접 설치하는 구조로서, 노반 표층의 평탄성 확보가 쉽고 콘크리트 궤도에 비해 빠른 시공이 가능하며, 지반침하 등의 문제 발

† 교신저자: 한국철도기술연구원(shlee@krrri.re.kr)

\* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 첨단인프라연구단TFT

생 시 유지보수가 용이한 장점이 있다. 현재 한국철도기술연구원에서는 2012년부터 철도용 아스팔트 노반 및 궤도구조를 개발에 착수하였으며[1], 본 논문에서는 아스팔트 직결궤도의 최적 두께 선정을 위한 연구의 일환으로 수행한 실험의 일부를 보고한다. 직결궤도의 특성상 침목 또는 슬래브로부터 전달되는 열차하중을 아스팔트 노반이 직접 지지하므로 아스팔트 혼합물층 두께에 따라 노반에 작용하는 응력수준에 영향을 미칠 것으로 예상되므로, 아스팔트 노반 두께별 실험 단면을 구성하여 정, 동적 하중 재하에 따른 토압 거동 특성 분석을 목적으로 계획하였다. 또한 경험식에서 제시하는 노반 허용응력과 비교하여 이에 대한 만족여부를 검토하였다.

## 2. 실험실형

### 2.1 실험단면 및 하중조건

#### 2.1.1 실험단면 조성

실험 노반에 사용된 흙노반 재료는 통일분류법상 SW 재료로서, 철도설계기준의 쌓기 재료 구분상 A군에 속하며 최대건조단위밀도는  $22.5\text{kN/m}^3$ , 최적함수비는 5.5%이다. 강화노반 재료는 일반철도의 강화노반 재료인 입도조정부순골재(KS F2525, M-40)를 사용하였고 최대건조단위밀도는  $22.9\text{kN/m}^3$ , 최적함수비는 6.5%이다. 다짐시험은 상부노반은 KS F 2312의 D방법으로, 강화노반은 E방법으로 수행하였다.

아스팔트 노반 재료는 현재 국내에는 적용기준이 없으므로 일본의 아스팔트 노반 기준을 검토하여 적용하였다. 일본의 경우 유도상용 아스팔트 노반에 조립도 아스팔트 혼합물 5cm를 적용하지만[2] 본 연구에서는 수분 침투와 피로 파괴에 대한 내구성 등을 고려하여 밀입도 아스팔트 혼합물을 적용하였다. 일본의 철도용 밀입도 아스팔트는 국내에서 사용하고 있는 일반도로 포장용 아스팔트와 물리역학적 특성이 유사하다.

아스팔트 노반 두께의 변화에 따른 토압 특성 등을 고찰하기 위해 실험 노반 단면은 강화노반층 40cm 위에 아스팔트 노반을 각각 10cm, 20cm, 30cm 두께로 구분하여 조성하였으며, 이는 각각 Case 1, Case 2, Case 3로 표기하였다. Fig. 1은 본 실험에서 조성된 노반의 단면도이며, 강화노반 하부에는 흙노반 3.6m를 조성하였다. 노반 내 토압 측정을 위한 토압계는 강화노반 상면으로부터 0.2m 깊이에 매설하였으며, 탄성변위 측정을 위해 침목 상부에는 변위계를 설치하였다. 본 실험은 아스팔트 상부에 단침목을 설치하여 집중하중에 의해 작용하는 아스팔트 직결궤도 노반의 거동을 측정하였다.

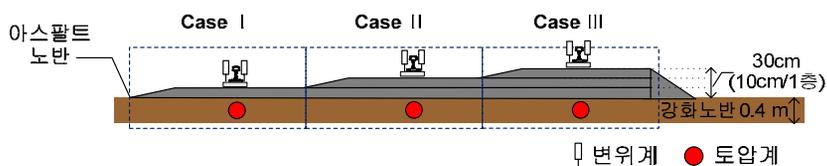


Fig. 1 Experimental cross section and instrumentations of Asphalt directly fastened Track

### 2.1.2 하중조건

실대형실험은 정재하 및 동재하 실험으로 나누어 수행하였다. 정재하 실험은 레일당 0~180 kN 범위에서 30kN씩 단계별로 하중을 재하 및 제하하였다. 동재하 실험의 하중 조건은 KTX 동력차의 대차중심 거리 14m와 윤중 85kN을 적용하였다. 여기서, 레일에 작용하는 하중은 충격하중으로 KTX 윤중 85kN에 충격계수 1.8을 곱한 후  $83 \pm 70$ kN의 정현파 하중으로 산정하였으나, 단침목 조건에 의한 하중 분담율 40%를 고려하여  $34 \pm 28$ kN을 재하하였다[3]. 반복재하 횟수는 경부고속철도 1단계 구간의 연간 누적통과톤수 18MGT에 해당하는 100만회로 선정하였다[4].

### 2.2 실대형실험 측정 결과 및 분석

정재하 실험에 의한 아스팔트 노반 두께별 토압 측정 결과는 Fig. 2와 같다. 정재하 실험의 최대 하중인 72kN 재하 시 토압은 아스팔트 노반 두께 10cm일 때 261.3kPa, 20cm에서 140.2kPa, 30cm일 때 74.6kPa로 나타났다. 이를 비교하면, 아스팔트 노반 30 cm의 경우는 10 cm일 때 보다 약 72% 저감되었고, 20cm의 경우보다는 약 47%가 저감되는 것으로 분석되었다. 정재하 실험 결과 아스팔트 노반의 두께가 증가 할 수록 아스팔트 하부의 노반에서 작용하는 토압 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

Fig.3은 동재하 실험 측정 결과이다. 동재하 실험 결과는 측정된 데이터의 최대값을 취하여 나타내었다. 아스팔트 노반 두께 10cm의 경우 토압은 약 150kPa, 20cm, 30cm에서의 토압은 각각 약 112kPa과 약 63kPa로 측정되었다. 아스팔트 노반 두께 30cm에서 측정된 토압은 10cm에서의 결과와 비교하여 약 58% 작았으며, 20cm일 때 보다 약 44% 저감하는 것으로 분석되었다. 이러한 토압 저감 효과는 정재하실험의 분석결과와 비교할 때 비교적 작은 값이나, 동재하 실험의 경우도 아스팔트 노반이 두꺼워 질수록 강화노반에 작용하는 토압은 감소하는 것으로 확인하였다. Table 1은 정재하 및 동재하 실험의 토압 측정 결과를 정리하여 나타낸 것이다.

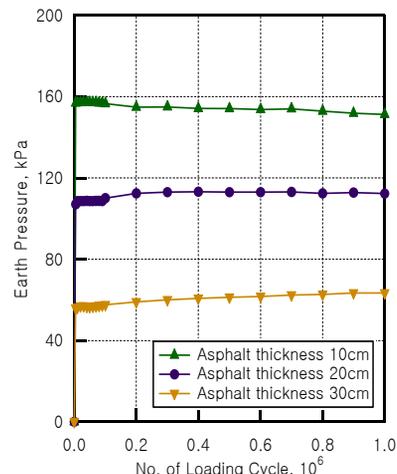
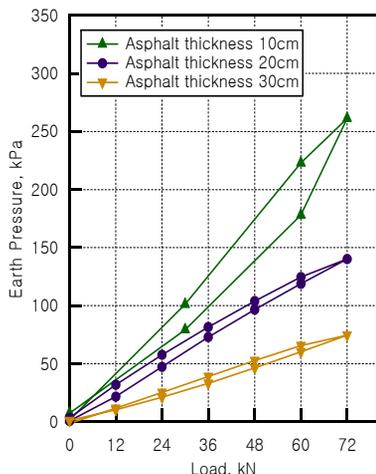


Fig. 2 Measurement result for earth pressure by static loading

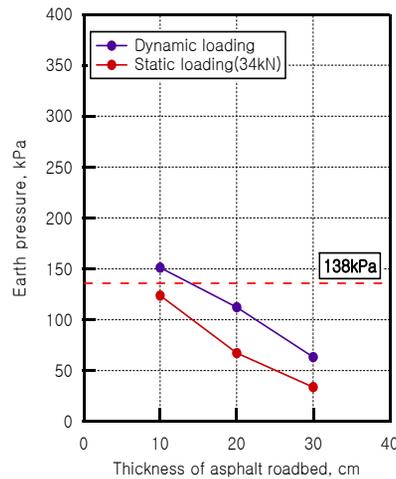
Fig. 3 Measurement result for earth pressure by dynamic loading

**Table 1** Measurement results of earth pressure by full-scale test

Asphalt thickness(m)	Earth pressure(kPa)	
	Static loading test	Dynamic loading test
0.1	261.3	150.0
0.2	140.2	112.0
0.3	74.6	63.0

철도설계 지침 및 편람[5]에서는 유도상 궤도 및 콘크리트 궤도에 대하여 상부구조 하면의 노반에서 작용하는 허용압력을 Heukelom & Klomp의 경험식을 통해 제시하고 있다. 여기서, 식 (1)의  $\sigma_z$ 는 노반의 허용압력(N/mm<sup>2</sup>),  $E_{v2}$ 는 반복평판재하 시험의 두 번째 하중 단계에서 취한 탄성계수이다. 따라서 강화노반의  $E_{v2}$  기준인 120MPa를 적용하였을 때, 허용압력은 재하횟수 100 만회에서 138kPa로 산정된다. 이를 정재하 및 동재하 실험에서 측정된 강화노반의 토압과 비교하여 나타내면, Fig. 4와 같다. Fig. 4의 정재하 실험 결과는 KTX 운중 85kN에 대하여 단침목 조건의 하중 분담율 40%를 고려한 재하 하중 34kN일 때의 토압으로 나타내었다. 그 결과를 살펴보면, 아스팔트 노반 두께에 따른 정재하 실험 측정결과는 모두 허용압력 138kPa를 만족하는 것을 확인하였다. 동재하 실험 결과는 아스팔트 노반 두께 10cm에서 측정된 노반 압력이 허용압력을 상회하는 것으로 나타났다.

$$\sigma_z = \frac{0.006E_{v2}}{1 + 0.7 \log N} \tag{1}$$



**Fig. 4** Comparison for between full-scale test results and allowable stress

Fig. 5는 침목에서 측정된 정적하중 재하 및 제하에 따른 변위 거동이다. 최대하중 72kN에서 발생한 최대 변위는 아스팔트 노반 두께가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났으며, 각각의 측정값은 10cm일 때 10.1mm, 20 cm에서 9.2mm, 30 cm일 때 6.7mm이다. 하중이 완전히 제거된

뒤의 잔류변위를 살펴보면, 아스팔트 두께 10cm와 20cm의 경우 약 7mm 정도로 유사하게 발생하였으나, 30cm에서의 잔류 변위는 4mm로서 상당량 감소하였다.

Fig. 6은 아스팔트 노반 두께별 침묵에서 측정된 탄성변위를 나타낸 것이다. 탄성변위량은 동재하 실험 시 측정되는 변위의 최대값과 최소값의 차인 Peak-to-Peak을 이용하여 구하였다. 아스팔트 두께별 10, 20, 30cm에서 발생하는 탄성변위는 각각 약 0.6, 0.4, 0.7mm로서, 아스팔트 노반 두께에 따른 탄성변위량은 그 차이가 크지 않은 것을 확인하였다. Table 2는 변위 측정 결과를 정리한 것이다.

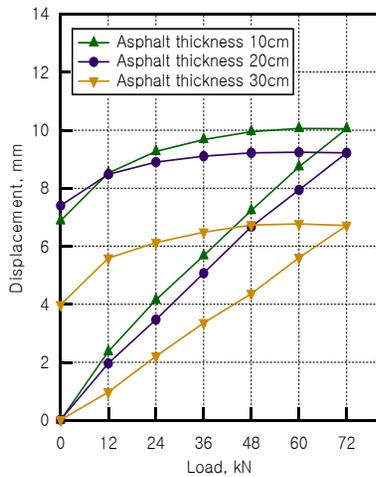


Fig. 5 Displacement of sleeper by static loading

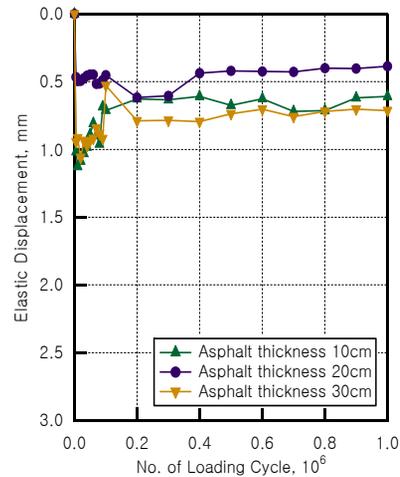


Fig. 6 Elastic displacement of sleeper by dynamic loading

Table 2 Measurement results of displacement by full-scale test

Asphalt thickness(m)	Displacement(mm)	
	Static loading test	Dynamic loading test
0.1	10.1	0.6
0.2	9.2	0.4
0.3	6.7	0.7

#### 4. 결론

본 논문에서는 아스팔트 노반 두께별 노반을 조성하여 정, 동적 하중 재하에 따른 노반 압력의 변화를 비교 및 분석하였고, 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 정재하 실험 측정 결과, 아스팔트 노반 두께 30cm의 토압은 74.6kPa로서 10cm의 경우보다 72%, 20cm와 비교 시 약 47% 감소하는 것으로 나타났다. 동재하 실험의 아스팔트 노반 두께 30 cm에 대한 토압 측정 결과는 63kPa이며, 아스팔트 두께 10cm와 비교하여

58%, 20cm일 때 보다 44% 감소하였다. 이러한 결과를 통해 정, 동적 하중에 의해 노반에 작용하는 압력은 아스팔트 노반 두께가 증가함에 따라 저감 효과가 있는 것으로 확인하였다. 철도설계 지침 및 편람에서 제시하는 경험식에 의한 노반 허용압력과 본 연구에서 수행한 실험의 측정결과와 비교한 결과, 동재하 실험의 아스팔트 노반 두께 10cm의 결과를 제외하고 노반 허용압력 이내의 값을 보였다. 따라서 직결궤도용 아스팔트 노반의 최소 두께는 10cm이상일 필요가 있음을 알 수 있다.

(2) 정재하 실험에 의한 침묵 변위 측정 결과, 아스팔트 두께가 증가함에 따라 최대하중에서 발생하는 변위량과 하중 제거 시 잔류변위는 감소하는 것을 확인하였다. 동재하 실험 시 측정된 탄성변위량은 아스팔트 노반 두께별 그 차이가 작았으며, 약 0.4~0.7mm 범위내에 있는 것을 확인하였다. 따라서 아스팔트 노반 두께의 증가는 탄성변위에 대한 영향보다는 아스팔트 노반 하부로의 토압 저감 효과가 큰 것을 확인하였다.

현재 한국철도기술연구원에서는 아스팔트 궤도 구조별 특징 및 요구성능에 부합하는 철도용 아스팔트 개질제 및 혼합물을 개발 중이며, 또한 아스팔트 궤도를 위한 광폭 침묵 및 슬래브 패널을 개발 중에 있다. 본 연구에서 사용한 아스팔트는 일반 도로 포장용 아스팔트이며 사용 침묵 역시 자갈도상 궤도용이므로 향후 보다 엄밀한 검토를 위해서는 철도용 아스팔트 혼합물과 침묵 및 슬래브 패널의 개발이 완료된 시점에서 실험 및 수치해석적 검토를 수행할 예정이다.

## 참고문헌

- [1] KRRI (2012) Development of asphalt roadbed and track system suited to speed up, Korea Railroad Research Institute.
- [2] Railway Technical Research Institute(2007) Design standards for railway structures and commentary earth structures, railway technical research institute.
- [3] Makoto Sugana(1996) A study on reasonable design method for reinforcing railroad roadbed, Kenyusha, Inc. pp. 129-130.
- [4] Korea Railway Network Authority(2006) KTX Daegu~Ulsan (Track 4Gongu) track laying and other construction, detail design report, Korea Railway Network Authority.
- [5] Korea Railway Network Authority(2012) Railway design principle & handbook, Korea Railway Network Authority.