

콘크리트궤도 적용 경부고속철도의 시공 중 토압 경향 분석 연구

An analysis study on earth pressure trends during construction of Gyeongbu High Speed Railway using Concrete Track

김기환[†] 김대상* 나성훈** 신기대***
Ki-Hwan Kim Dae-Sang Kim Sung-Hoon Na Ki-Dae Shin

ABSTRACT

The construction of concrete track for the first time in Korea gives lots of meanings to civil engineering in various aspects. Settlement level needs to be kept minimal for the safety of the track. Concrete track has different structural characteristics comparing to conventional ballast track, so load distribution in concrete track is also different. Since it is the first time to build concrete track, there are very few experience and data available on the subject. Therefore it is important to evaluate how much load is transferred to the ground due to the running vehicle in concrete track and to determine the optimal thickness of layers.

In this research, 9 individual earth pressure cells were installed at OOOk930 site in 2nd stage of Kyungbu high speed railway during under construction. The in-situ pressure data were measured at each layers during pump-car and locomotive were moving on the high speed railway surface.

1. 서 론

콘크리트궤도의 본격적인 국내도입을 계기로 콘크리트궤도용 노반 설계기준의 필요성이 대두되었으나, 국내의 경우 경부고속철도 2단계 구간의 빠른 궤도 형식변경(자갈궤도 -> 콘크리트궤도)으로 이를 설계 기준에 충분히 반영하지 못한 부분이 있다. 콘크리트궤도를 처음 적용해 보는 우리의 입장에서는 경험부족으로 인한 과감한 규정 변경은 현실적으로 쉬운 판단이 아니었다. 현재 규정은 토공 재료 및 품질기준, 층 두께, 기울기 기준 등 많은 부분에서 보수적인 기준이 적용되고 있는 것이 사실이다.

또한, 궤도의 구조적 안전성 측면에서 침하 기준을 최소한으로 억제할 필요가 있으며, 자갈궤도와는 다른 구조적 특성으로 궤도 구조의 하중 분산 능력 또한 주요한 의미를 갖는다. 따라서 고속열차 주행 시 어느 정도의 하중이 노반으로 전달 될 것인지에 대하여 파악하는 것은 향후 국내 실정에 적합한 층 두께를 평가할 수 있다는 측면에서 의의가 크다.

본 논문에서는 경부고속철도 2단계 구간 중 고성토이면서 원지반 조건이 취약한 OOOk930 지점에 9개의 토압계를 설치하여, 펌프카와 기관차를 이용한 주행속도 변화에 따른 심도별 토압을 측정하고, 그 결과를 분석하였다.

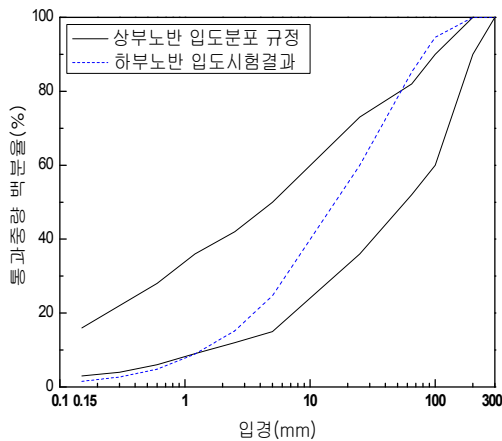
† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 연구원
E-mail : kkhxx@krri.re.kr
TEL : (031)460-5352 FAX : (031)460-5814
* 정회원, 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 책임연구원
** 정회원, 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 선임연구원
*** 정회원, 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 연구원

2. 현장 조건 및 계측기 설치 현황

다짐상태를 평가하기 위하여 현장 입도분석, 들밀도 시험, 함수비를 측정하였다. <그림 1>과 <표 1>은 하부노반에서 채취된 시료의 입도분석 결과이다. 5mm체 통과율은 24.7%로 토사 함유량이 타 공구와 비교할 때 상대적으로 많은 개소였다. 100mm체 통과율은 94.6%로 고속철도 상부노반 입도 분포기준을 만족하는 재료를 사용하고 있으며, 100mm 보다 큰 입경 재료의 함량은 타 공구와 비교할 때 높지 않았다. 1mm이하 입경 재료의 경우 입도분포를 부분적으로 만족하고 있지 못함을 알 수 있었다. <표 2>는 물 치환법을 이용한 현장밀도시험 결과로 습윤 단위중량 2.262t/m³, 건조단위중량 2.137t/m³이었고, 전체 함수비는 5.87%이었다.

<표 1> 입도분포 특성

위치	5mm체 통과율	100mm체 통과율	최대 입경	비고
000k930	24.7%	94.6%	200mm	하부노반



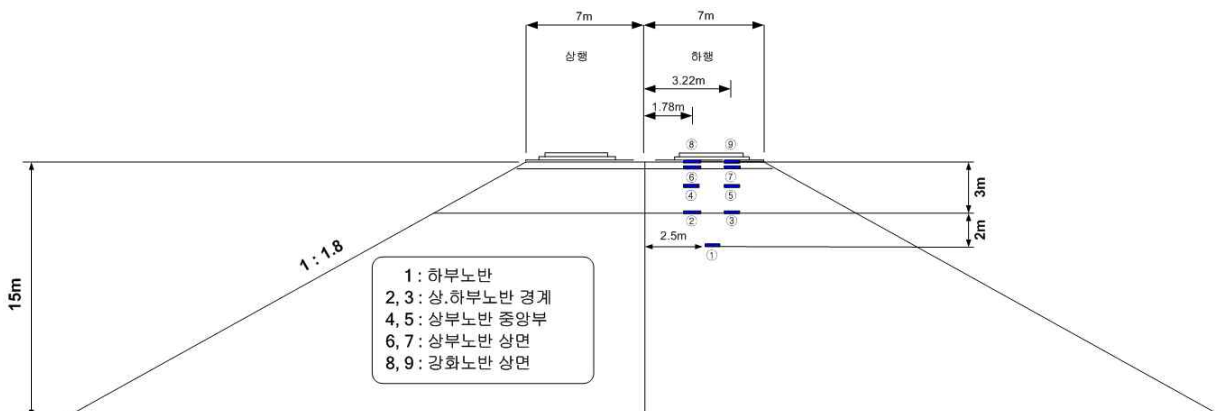
<그림 1> 하부노반 입도분포

<표 2> 단위중량 및 함수비

위치	습윤 단위중량 (tf/m ³)	건조 단위중량 (tf/m ³)	함수비 (%)	비고
000k930	2.262	2.137	5.87	하부노반

시험 단면에 대한 토공 작업은 2006년 5월 30일 시작하여 동년 7월 14일까지 57일 동안 하부노반 성토(성토고, 12.12m)를 완료하였으며, 상부노반 성토(성토고, 14.59m)는 동년 8월 7일까지 13일에 완료하였다. 이 후 동년 8월 17일에 강화노반 층(45cm)을 시공 완료한 후 선로 측구 등 추가 공정 등이 완료된 10월 24일에 최종기면(최종 성토고, 15.25m)을 완성하였다. 흙 쌓기 시공 평균속도는 상부노반은 19cm/day, 하부노반은 21cm/day로 상당히 빠른 속도로 진행된 것을 알 수 있다.

시험이 실시된 000k930 지점은 경부고속철도 2단계 구간 중 원지반 조건이 상대적으로 취약하고 성토고가 15m 이상인 곳으로서, 시공 중 및 열차 운행 중 발생하는 노반 내 발생 응력 수준을 평가하기 위하여 <그림 2>와 <사진 1>과 같이 총 9개의 토압계를 설치하였다.



<그림 2> 토압계 설치위치



<사진 1> 토압계 설치 전경

3. 현장시험

현재 모든 시공이 완료되어 개통을 앞둔 경부고속철도 2단계 구간의 OOK930 지점에서 수행된 시험의 목적은 고속열차 개통 전 이동하중에 대한 심도별 토압 분포 경향 및 정량적인 계측값을 분석해봄으로써 콘크리트궤도의 응력 전달 수준 파악 및 국내 노반 층 두께의 적정성을 평가해 보기 위함이다.

<표 3>은 시험에 사용된 차량의 제원으로, 펌프차를 이용한 이동하중 시험의 경우 HSB층 완료 후 수행되었으며, 기관차를 이용한 이동하중 시험은 레일 설치가 완료된 후 진행되었다.

<표 3> 시험 차량 제원

모델명	중량(tonf)		길이(m)	폭(m)	
	차체중량	축당중량		차 폭	바퀴 폭
JX-H3717(펌프차)	27	10	11.6	2.160	1.850
GT26CW(기관차)	132	22	20.787	3.175	1.432

총 9개의 토압계 중 1, 2, 4, 6, 8번 토압계의 데이터를 중점적으로 분석하였다. 그 이유는 3, 5, 7, 9번 토압계의 경우 대체로 작은 값이 측정되었는데, 이는 구속압과 다짐 후 변형에 의해 토압계 경사의 영향이 있을 것으로 추정된다.

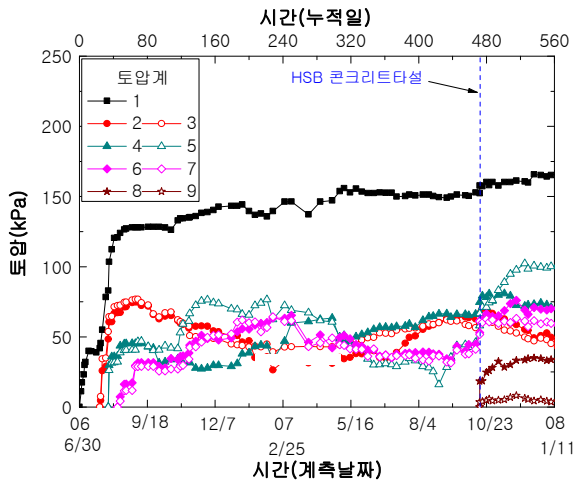
펌프차를 이용한 시험에서는 1) 토압계 설치 지점에 뒷바퀴가 정지한 경우의 심도별 토압 경향 분석, 2) 토압계 설치 지점을 중심으로 일정한 거리에 펌프차가 정지한 경우의 심도별 토압 경향 분석, 3) 주행속도 변화(10, 20, 30, 40km/h)에 따른 심도별 토압 경향 분석을 하였으며, 기관차를 이용한 시험에서는 1) 정지상태에 가까운 5km/h의 속도로 이동 시 심도별 토압 경향 분석, 2) 주행속도 변화(20, 40, 60, 80km/h)에 따른 심도별 토압 경향 분석을 하였다.

쌓기 토체 내 응력변화를 측정하기 위하여 토압계에 의한 데이터 획득은 연구원에서 보유하고 있는 EDX-2000A(32ch) 장비를 활용하였다.

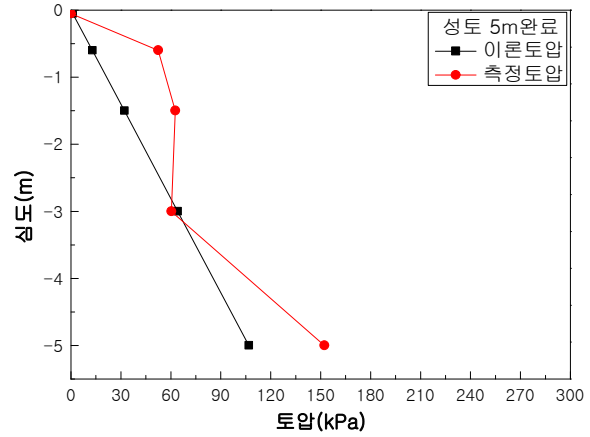
4. 시공 중 토압

<그림 3>은 쌓기 시공 중 상재하중 증가로 인한 토압변화로서, 상재하중 증가에 따라 토압이 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 시공 완료 시점에 측정된 최대 토압은 최하층 1번 토압계에서 152kPa

이었다. HSB 콘크리트 타설 후 하부노반에서 5.5kPa, 상·하부노반 경계면에서 6.8kPa, 상부노반 중앙에서 7.6kPa, 상부노반 상면에서 8.6kPa, 강화노반 상면에서 18.4kPa의 토압이 증가한 것을 알 수 있다. <그림 4>는 쌓기 시공 완료 후 심도별 연직토압 분포를 나타내고 있으며, 깊이 5m에서 이론식에 의해 산정된 토압에 비하여 1.4배 크게 측정되었음을 알 수 있다.



<그림 3> 쌓기 중 토압 변화

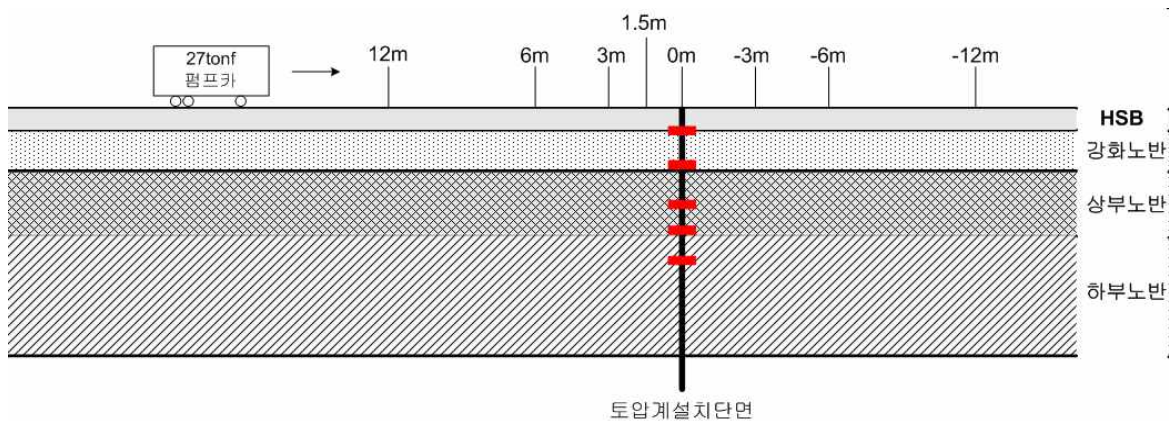


<그림 4> 심도별 연직토압 분포

5. 정·동하중 재하 시 발생 토압

5.1 펌프카

상재하중에 의한 발생 토압을 평가하기 위하여, HSB 층의 시공이 완료된 상태에서 자중 27tonf의 펌프카를 이용하여 정하중과 동하중 재하 시에 성토체 내에서 발생하는 응력 변화를 측정하였다. <그림 5>는 현장시험 개요도이며, <사진 2>와 <사진 3>은 시험전경이다.



<그림 5> 시험 개요도



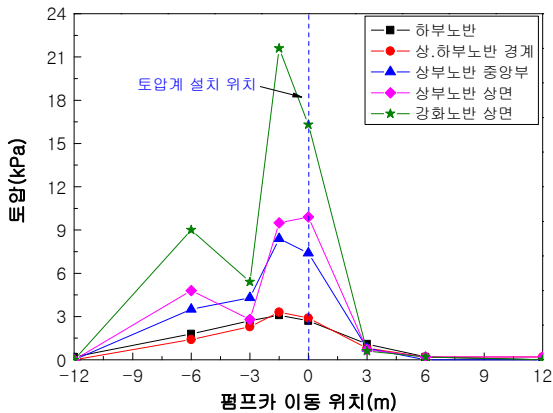
<사진 2> 펌프카 시험전경



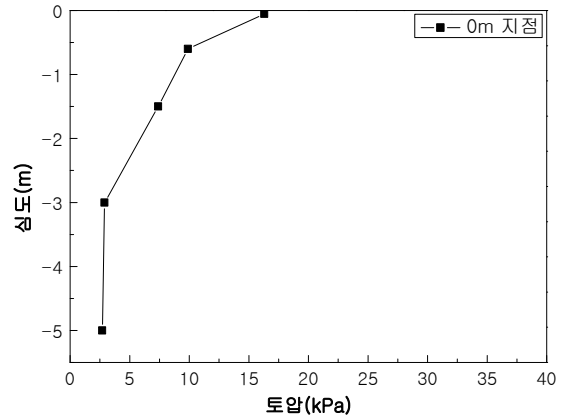
<사진 3> 토압측정

<그림 6>은 정하중 재하 시 펌프카 위치에 따른 토압의 변화를 나타낸 결과로서, 펌프카를 토압계가 설치되어 있는 지점(0m)으로부터 뒷바퀴 기준으로 12m, 6m, 3m, 1.5m, 0m, -3m, -6m, -12m 위치에 정지시의 토압변화를 측정하였다. 1.5m 이격된 8번 토압계에서 최대 21kPa의 추가 응력이 발생한 것을 알 수 있다.

<그림 7>은 펌프카의 이동위치가 0m인 지점에서의 심도별 토압을 나타낸 것으로, 심도 3m에서 상부로 올라갈수록 응력이 점진적으로 증가하는 경향을 보이며, 최대값은 16.3kPa 임을 확인할 수 있다.

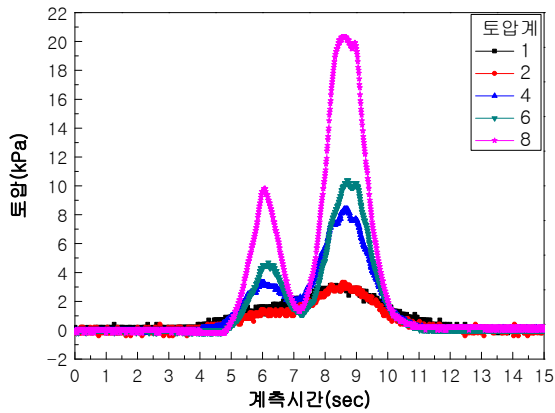


<그림 6> 펌프카 이동에 따른 토압 변화

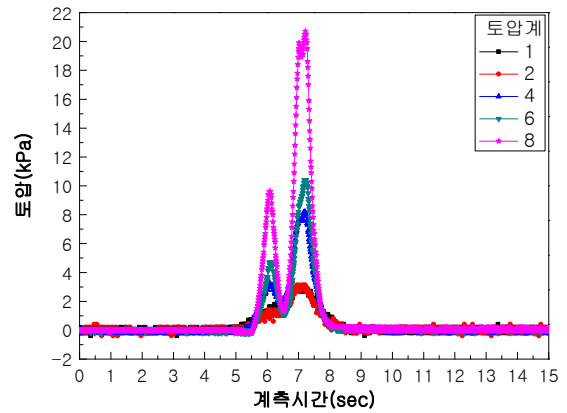


<그림 7> 0m 지점의 심도별 토압

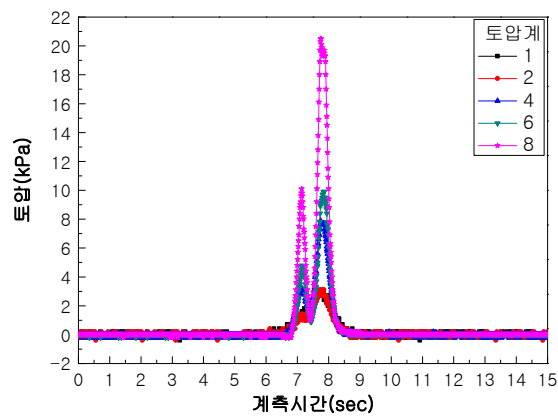
또한, <그림 8-a>~<그림 8-d>는 이동하중 재하 시 쌓기부의 토압 변화를 평가하기 위하여 펌프카 주행속도 별(10, 20, 30, 40km/h) 발생응력을 측정한 결과이다. 두 개의 반사인 파형을 확인할 수 있으며, 앞쪽의 작은 반사인 파형은 차량의 앞바퀴에 의한 것이고, 뒤쪽의 큰 반사인 파형은 차량 뒷바퀴에 의한 결과이다. 동 속도대역에서 이동하중 작용 속도 증가에 따른 응력 증가는 미미한 수준이었으며, 최대 추가응력은 약 21kPa이었다. 하부노반 상면에서 측정된 응력은 강화노반 상면 발생응력의 1/7 수준이었다.



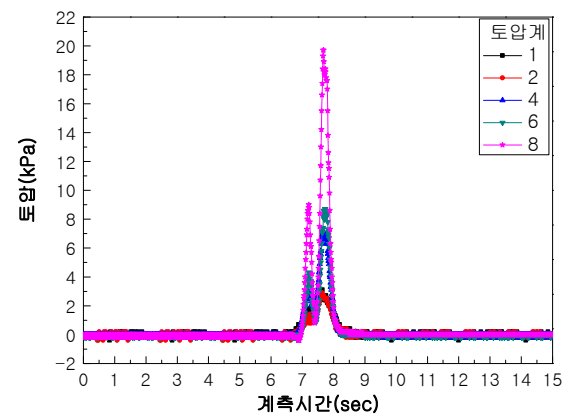
(a) 10km/h



(b) 20km/h



(c) 30km/h



(d) 40km/h

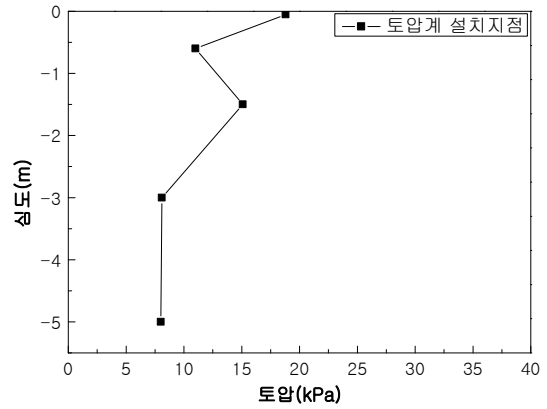
<그림 8> 펌프카 주행 속도별 토압변화

5.2 7578 기관차

<사진 4>와 같이 7578 기관차를 이용하여 주행속도(5, 20, 40, 60, 80km/h) 변화에 따른 심도별 토압을 평가하였다. <그림 9>는 기관차의 운행속도를 정지에 가까운 5km/h로 이동 중 일 때, 토압계 설치 지점에서의 심도별 토압을 나타낸 것으로, 펌프카 측정결과와 같이 상부로 올라갈수록 응력이 증가하는 경향을 보인다. 최대값은 펌프카의 16.3kPa 보다 약 15.3%가 증가한 18.8kPa이 측정되었다.

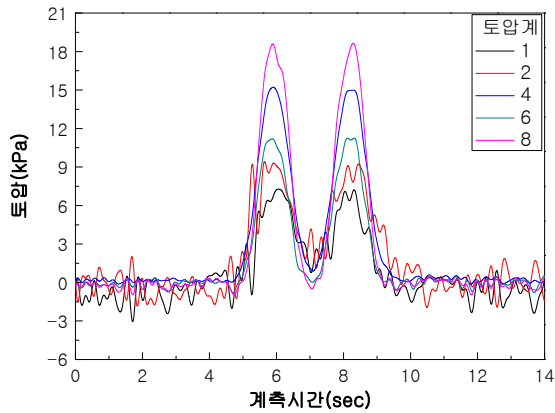


<사진 4> 기관차 시험 전경(하행)

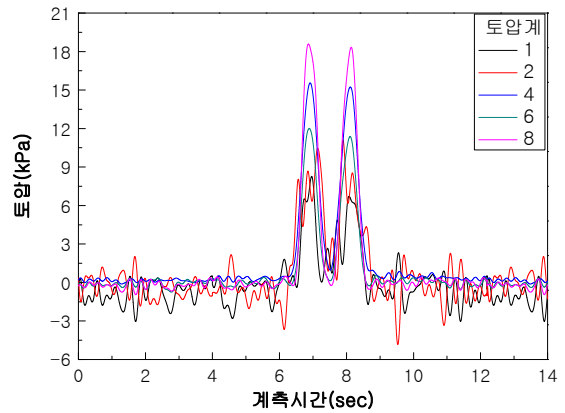


<그림 9> 토압계 설치지점 토압분포

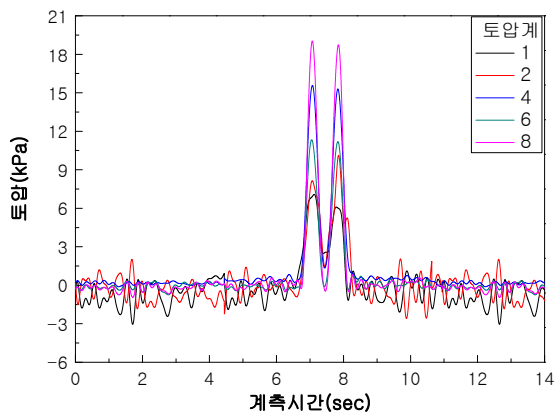
<그림 10>에 나타난 바와 같이 최대값은 18 ~ 20kPa로 점진적으로 증가하나, 운행 속도별로 크게 차이가 나지 않았다. 6번 토압계가 4번 토압계의 설치 위치보다 낮은 심도에도 불구하고 작은 토압이 측정되었다. 이는 매립된 토압계가 다짐 후 수평을 유지하지 않았을 것으로 추측된다.



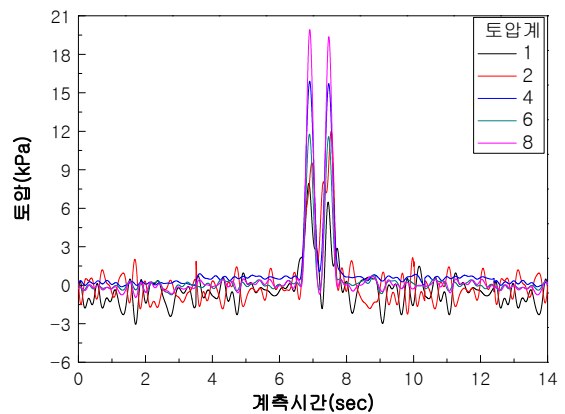
(a) 20km/h



(b) 40km/h



(c) 60km/h

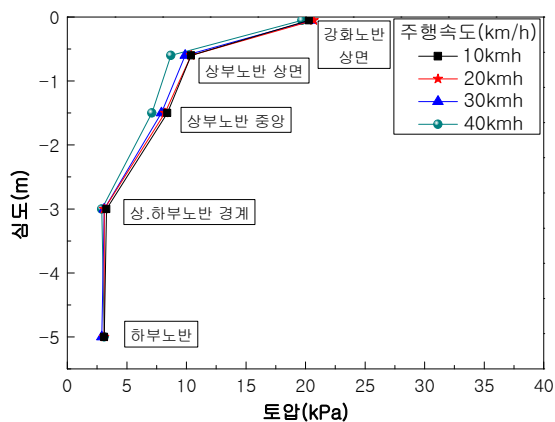


(d) 80km/h

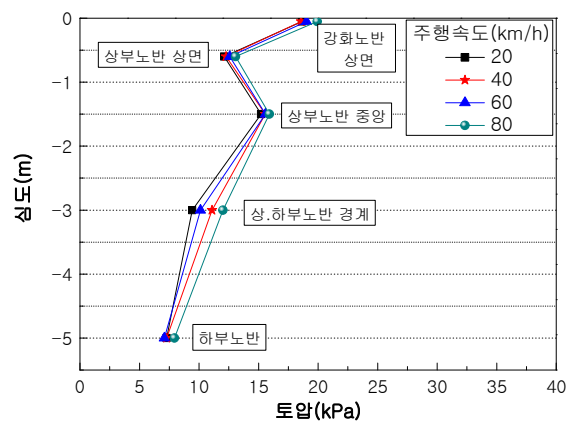
<그림 10> 기관차 주행 속도별 토압변화

6. 시험결과 분석

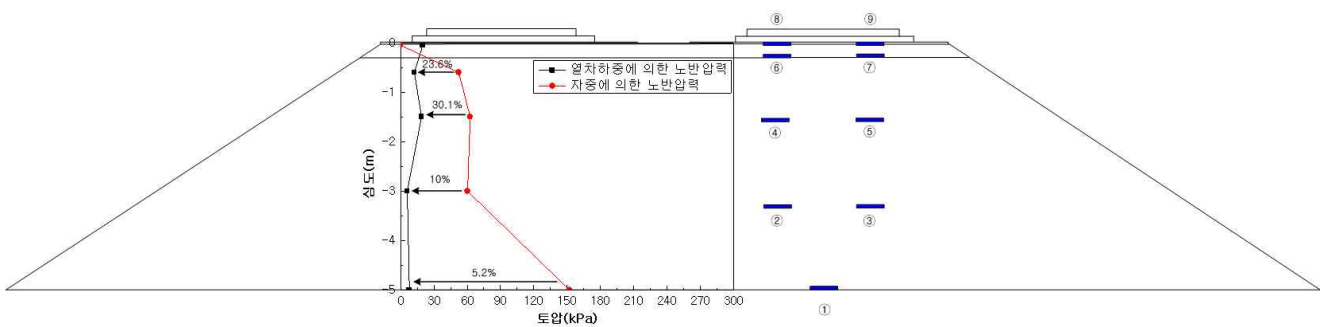
펌프카와 기관차를 이용하여 이동하중 재하 시 주행속도 변화에 따른 심도별 토압분포를 평가하였다. <그림 11>~<그림 12>와 같이 측정값에 대한 상대적인 차이는 있지만, 토압 분포는 심도 1.5m 지점(상부노반 중앙부)에서 크게 증가하였다가 점차 작아지는 동일한 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 노반 상부에 작용하는 열차하중에 의한 노반압력은 성토 심도에 따라 현저히 감소하게 되는데, 실측된 자료 [鐵道構造物等設計標準同解説 土構造物, 1992]에 의하면, 성토(흙)노반 심도 3m에서 성토구조물 자중의 약 10%정도가 된다는 보고가 있다. 본 논문의 시험결과는 <그림 13>과 같이 성토 심도 3m에서의 자중은 60.35kPa이고, 80km/h 주행 시 열차하중에 의한 토압은 6kPa로, 성토구조물 자중의 약 10% 수준이므로, 유사한 결과를 얻을 수 있었다.



<그림 11> 깊이별 주행속도 변화에 따른 토압분포(펌프카)

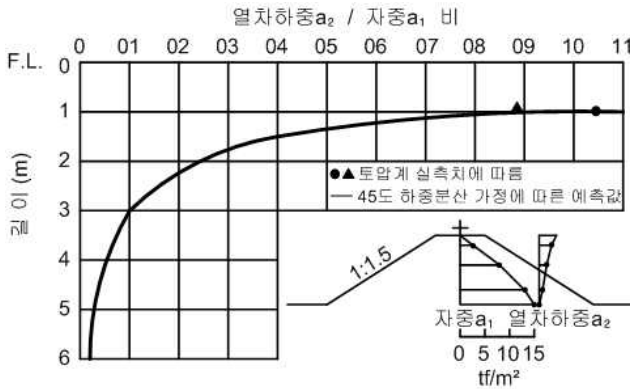


<그림 12> 깊이별 주행속도 변화에 따른 토압분포(기관차)

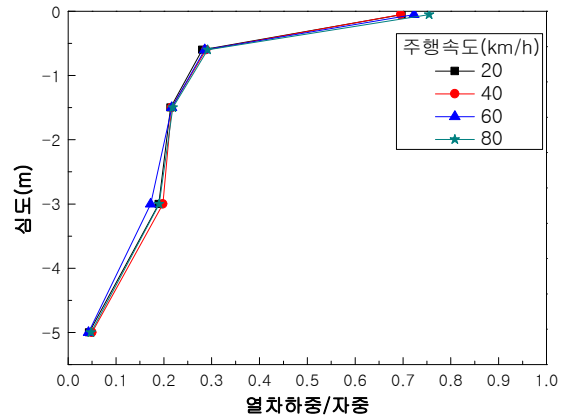


<그림 13> 자중 및 열차하중에 의한 토압의 변화(기관차 80km/h 주행 시)

<그림 14>의 (a)와 (b)는 성토내에서의 열차하중에 의한 연직응력과 자중에 의한 연직응력의 비를 나타낸 그래프이다.



(a) 하쿠신선 실측치, 2120 기관차



(b) 경부고속철도 2단계구간 실측치, 7578 기관차

<그림 14> 성토내에서의 열차하중에 의한 연직응력과 자중에 의한 연직응력의 비

7. 결론

토공 상 콘크리트궤도의 이동하중 재하 시 성토체 내의 하중 분산을 평가하기 위하여 경부고속철도 2단계 구간에 위치한 OOKk930 지점에 상부노반과 하부노반에 토압계를 설치하였다. 실 열차하중은 펌프카와 기관차를 이용하여 모사하였으며, 속도대역은 각각 10~40km/h와 20~80km/h 였다. 본 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 쌓기 구간의 시공 중 계측된 토압은 심도가 증가함에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 보였으며, 시공 중 성토체 자중에 의한 토압은 심도 3m에서는 60.35kPa로 이론식에 의한 토압 64.11kPa보다 6% 작게 나타났으며, 심도 5m에서는 152.2kPa로 이론식에 의한 토압 106.85kPa 보다 42%정도 크게 나타났다.
- (2) 펌프카와 기관차의 이동하중에 대하여 최대 21kPa의 추가응력이 발생하였으며, 심도가 증가할 수록 점차 감소하는 경향을 보였다.
- (3) 상하부노반 경계인 심도 3m 지점에서의 자중에 의한 발생 토압은 60.35kPa이고, 기관차 80km/h 주행 시 열차하중에 의한 최대 발생 토압은 6kPa로, 10% 수준임을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

1. 양신추 등(2008), "콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 대한 연구", 최종보고서, 한국철도시설공단, pp. 321~439.
2. 김대상, 유충현, 김기환(2007), "건설 중인 경부고속철도 콘크리트궤도 기초침하 평가", 한국철도학회 추계학술발표회, pp. 361~366
3. 최찬용, 이성혁, 황선근(2007), "철도하중에 따른 강화노반 두께별 토압 특성", 대한토목학회 논문집, 제 27권 2호, pp. 217~224
4. 임종석(2004), "지표면 피하중 재하에 따른 사질토지반 지중연직응력 증가량의 Boussinesq 이론값에 대한 실험적 고찰, 한국지반공학학회 논문집, 제 20권 9호, pp. 7~15