

노반에 작용하는 수직응력 및 침하량에 관한 기초연구

Basic research to evaluate the vertical stresses and settlements on the subgrade

김대상* 이진욱* 이수형*
Dae-Sang Kim Jin-Wuk Lee Su-Hyung Lee

ABSTRACT

Various amplitudes and frequencies of axle loads are applied to the domestic conventional line. Vertical stresses and settlements on the subgrade may be changed depending on the variation of axle loads. This paper introduces the research results to estimate vertical stresses and settlements on the subgrade with numerical analysis(Distinct Element Method), full scale test, and field test.

1. 서론

본 연구에서는 열차중 재하 시의 도상자갈의 거동 및 도상자갈이 노반에 작용하는 수직응력 및 침하량을 파악하기 위하여 개별요소법(DEM)을 이용한 수치해석과 실험형 시험 및 현장 시험을 수행하였다. 수치해석과 시험을 통하여 침목-도상자갈-노반으로 전달되는 수직응력 및 침하량에 대한 결과를 얻었다. 그 결과들을 상호 비교하여 개발한 프로그램의 철도 분야에의 적용성을 평가하고 국내 캐드노반에 작용하는 수직응력 및 침하량에 대한 현재까지의 연구 결과를 정리하고자 한다.

2. 본론

2.1 수치해석결과

개발한 2차원 개별요소법(DEM) 프로그램을 이용하여 도상자갈을 원형으로 모델링하고 입도를 랜덤하게 발생시켰다. 현 국유철도의 도상자갈의 입경을 고려하여 원형입자의 반지름의 크기가 1.1cm에서 3.2cm 범위에 있도록 조정하였다. 랜덤한 입도분포는 Mixed congruential method를 사용한 난수발생 프로그램을 이용하여 0과 1사이의 랜덤수(random number)를 발생시키고 이 값과 평균입자크기, 최대 및 최소 입자크기로부터 원하는 입도분포를 구하였다. 그림 1은 200개의 입자를 발생시켰을 때의 도상자갈의 반경에 따른 입자수의 분포이다.



그림 1 반지름에 따른 발생입자의 수
(랜덤입도분포의 경우)

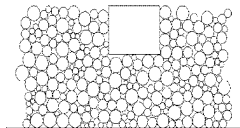


그림 2 침목과 도상자갈 해석모델

그림 2는 랜덤한 입자분포를 갖는 도상자갈에 침목을 모델링 한 예를 보여준다. 간극비를 0.24(노수한 상태)로, 수치해석 모델의 크기는 50cm(도상길이)*100cm(도상폭)인 경우로 본 경계 범위 내의 총 입자수는 239개이다. 경계조건은 주기경계를 이용하였다.

계산에서 사용한 입자 접촉면에 대하여 법선방향 및 접선방향에 대한 스프링상수는 파동방정식으로 부터 해석대상 매질 중을 전파하는 탄성파속도 V_p 및 V_s 를 이용하여 식(1a),(1b)와 같이 구하였다.

$$k_n = \frac{\pi \rho V_p^2}{4}, \quad k_s = \frac{\pi \rho V_s^2}{4} \quad (1a),(1b)$$

여기서, ρ : 입자의 밀도

표 1은 노반에 작용하는 수직 응력을 구하기 위한 입력변수들이다. 침목의 경우 연속체이므로 불연속체인 자갈과 노반보다 큰 스프링계수 값을 갖게 된다.

표 1 계산에 사용된 입력 변수들

재료	밀도 (tonf/m ³)	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	k_n (N/m)	k_s (N/m)	c_n (kg/sec)	c_s (kg/sec)	Φ (°)
자갈	2.64	762	213	1.203E+07	9.402E+05	631.668	176.569	37
침목(목)	0.64	3800	890	7.255E+07	3.980E+06	9441.674	2211.339	30
노반 (조립토)	2.64	457	229	4.328E+06	3.085E+05	378.835	189.832	30

본 프로그램에서는 입자 과정을 고려할 수 없어서 과정에 의한 에너지 발산이 가능하지 않다. 따라서 자연현상에서는 발생할 수 없는 급격한 입자운동이 발생할 가능성이 있다. 이와 같은 점을 보완하기 위하여 점성계수의 경우 과감치가 발생하지 않는 범위 내에서 가능한 큰 점성계수 값을 사용하였다.

하중 재하는 변위제어에 의한 하중재하방식으로 수치해석을 수행하였다. 변위 제어는 침목을 하 방향으로 5mm 이동한 후 상 방향으로 5mm 이동하여 원래의 위치로 반복 재하 하도록 하였다. 그림 3에서 보는바와 같이 침목의 상하방향 이동속도는 10cm/sec로 정하였다. 그림 3의 X축은 계산횟수와 시간을 의미하고 Y축은 침목의 중심으로부터 도상·노반 경계면까지의 거리의 변화를 나타낸다. 노반 면으로부터 침목 중심까지의 거리가 초기에 40cm에서 39.5cm로 감소했다가 원래의 위치로 증가하는 운동을 반복하고 있음을 보여준다.

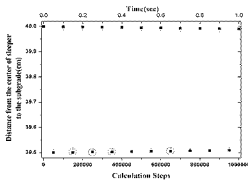


그림 3 계산동안의 침목거동

그림 4는 계산 과정 동안 노반에 가해지는 평균 수직응력으로 0.15초, 0.25초, 0.35초, 0.65초에서 노반에 작용하는 수직응력이 피크치를 가지고 0.15초에서 최대값(0.345kgf/cm^2)을 보여 준다. 0.05초의 경우 피크치를 보이지 않는데 이는 침복에서 도상에 가하는 작용력이 아직 노반 면에 도달하지 않았기 때문이라고 판단된다.

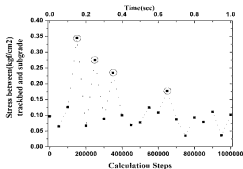


그림 4 노반면에 작용하는 평균수직 응력값의 변화

2.2 실험형 시험결과

2.2.1 시험조건

실제 현장과 같은 선로 단면과 열차하중을 재하 할 수 있는 종합레노노반장치를 이용한 반복재하시험을 통하여 노반에 발생하는 토양과 침하량을 검토해 보았다. 사진 1은 한국철도기술연구원이 보유하고 있는 종합레노노반시험 장치를 이용하여 준비된 시험체를 보여 준다. 도상자갈과 노반높은 실제 신설선에서 사용되고 있는 재료를 사용함으로써 신설선 상태와 같은 조건이 되도록 조성하였다.



사진 1 종합레노노반장치와 실험형시험 시험체

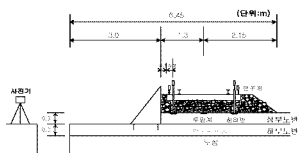


그림 5 삼대형 시험 횡단면도

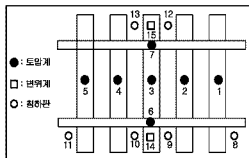


그림 6 계측기 배치도 및 번호

그림 5는 삼대형 시험 횡단면도로, 시험체 정면에 투명 아크릴판을 설치하여 시각적으로 도상자갈의 거동을 관찰할 수 있도록 하였다. 그림 6은 시험에 사용된 계측기인 도압계, 변위계, 침하계의 배치도 및 일련번호이다.

시험하중은 I-22 표준 활하중을 적용하였으며 기준선 속도항상의 목표 최고속도인 200km/h에 대하여 장대래일에 적용하는 충격계수를 고려하였다. 따라서 충격계수는 1.6을, 설계윤중은 14.3ton을, 설계속중은 28.6ton으로 선정하여 반복재하 하였다. 그림 7은 시험에 사용한 하중을 정리한 그림이다. 반복하중 재하 전에 도상을 충분히 안정화시키기 위하여 도상부를 실제 현장 수준과 비슷한 조건이 되도록 다짐을 실시하였다. 이를 위하여 MTT(Multiple Tie Tamper) 작업 주파수에 해당하는 높은 주파수(35Hz)와 열차의 서행에 해당하는 낮은 주파수(0.5Hz)로 반복 하중을 가하였다. 안정화 작업 후에 정하중을 재하하여 노반의 강성을 평가하였다.

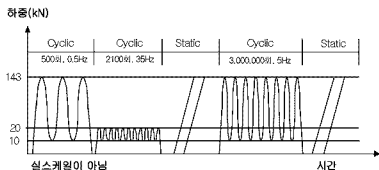


그림 7 시험 시 사용한 하중

2.2.2 시험결과

그림 8과 9는 반복재하 횡수에 따른 탄성 토압의 크기 변화(각 사이클 당 최대값과 최소값의 차이)를 토압계 3번과 7번에서 측정한 결과로, 하중재하 지점 근처에서의 탄성토압이 0.4~0.9kgf/cm²범위에서 증감하는 것을 알 수 있다. 변위계 9번(그림 10)과 10번(그림 11)에서 계측한 탄성변위는 비슷한 경향을 보였다. 초기의 탄성 침하는 1.5mm정도로 큰 값을 보였으나, 반복재하 횡수의 증가와 함께 900,000회 정도까지 탄성 변위는 감소하였다. 반복재하횡수가 1,000,000회를 초과한 이후의 탄성변위량은 0.5~0.8mm 범위에서 안정화 되었다.

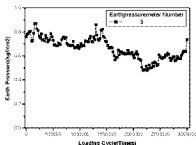


그림 8 탄성 토압 변화(도압계 3번)

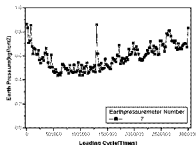


그림 9 탄성 토압 변화(도압계 7번)

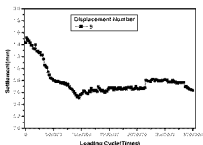


그림 10 탄성 변위 변화(변위계 9번)

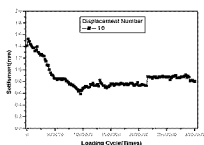


그림 11 탄성 변위 변화(변위계 9번)

2.3 현장 시험결과

충북선의 목해-동광간 88.7km~89.1km 상선에서 토압과 침하량을 측정하였다. 이 지역은 노반이 연약하여 노반분리가 다발하는 지역으로 도상자갈의 노반으로의 관입 현상이 뚜렷하게 발생되는 곳이었다.

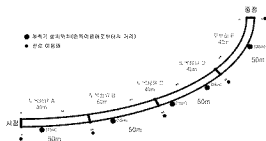


그림 12 현장시험 계측기 위치도

도상자갈부 50cm를 신천한 자갈로 자갈경환을 실시한 후에 갱환면 하부에 토압계와 침하계를 설치하고 토압과 침하량을 측정하였다. 노반의 흙은 통일 분류(USCS)로 CL계역이었다.

그림 12는 현장시험 시의 계측기 설치 위치를 보여 준다. 토압계는 도상자갈과 노반의 경계면에 설치하였으나 침하는 침목의 침하량을 측정하였다.

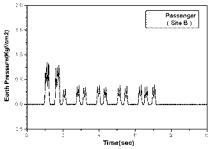


그림 13 토압측정 결과(여객-Site B)

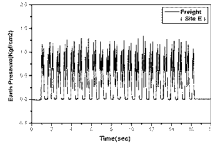


그림 14 토압측정 결과(화물-Site E)

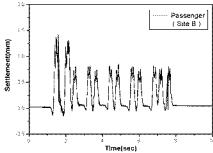


그림 15 침하량 측정 결과(여객-Site B)

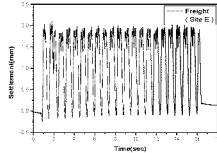


그림 16 침하량 측정 결과(화물-Site E)

Site B의 경우 토압은 여객 열차의 경우 기관차가 통과할 때 최대 0.735kgf/cm^2 였으며, 객차가 통과할 때는 $0.3\sim 0.4\text{kgf/cm}^2$ 정도였다. 화물차의 경우 여객 열차보다 최대 1.34kgf/cm^2 의 토압이 거의 일정하게 측정되었다. 토압이 증가한 이유는 증복선 상선 구간이 부연탄을 수송하는 화물열차가 운행되는 구간으로 화물 적재 시에 측중이 증가했기 때문으로 판단된다.

침목의 침하량은 토압과 분포 형태가 유사하였다. 여객 열차의 기관차 통과 시에는 1.42mm 의 침하가 발생하였고 객차 통과 시에는 0.75mm 정도의 침하량이 측정되었다. 화물차의 경우에는 침하량이 2.1mm 발생하였다.

3. 결론

노반에 작용하는 토압과 침하량은 도상의 두께, 노반의 강성에 대한 상대, 열차하중의 크기, 레일과 침목의 종류에 따라 어느 정도의 범위를 가질 것으로 판단된다.

1) 변위계어셈블을 통한 수치해석 결과 얻어진 토압(0.345kgf/cm^2)은 실험형 시험($0.4\sim 0.9\text{kgf/cm}^2$)이나 현장시험($0.3\sim 1.34\text{kgf/cm}^2$)보다 약간 작은 값이었다. 이는 도상부에 사용하는 자갈을 2차원 원형 입자로 모델링하여 입자 사이의 접촉에서 발생할 수 있는 수직력에 기인한 모멘트를 충분히 묘사하지 못했기 때문이라고 판단된다.

2) 현장 시험에서 측정된 침하량은 실험형 시험과 비슷한 범위에 있었다. 그러나 현장 시험 결과로부터 열차의 종류(여객과 화물, 기관차와 객차)에 따라 발생하는 침하량이 그 형태나 크기에서 다른 것을 확인할 수 있었다.

3) 개발한 수치해석 프로그램으로 도상자갈의 거동을 평가할 수 있다는 가능성을 확인하였다.