

단조 및 반복 동하중 작용 시 테트라포드형 인공자갈이 혼합된 도상층 자갈의 이동 궤적 평가

김대상

한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부

Evaluation of particle trajectory of ballasted layer mixed with tetrapod shaped artificial ballasts under monotonic and cyclic dynamic loadings

Dae Sang Kim

Advanced Railroad Civil Engineering Division, KRRI

요 약 열차하중을 반복적으로 작용 받는 자갈궤도의 도상자갈은 지속적으로 이동을 하게 되는데 동 연구에서는 이를 정량적으로 가시화하고자 하였다. 이를 위하여 테트라포드 형상의 인공자갈을 혼합한 도상 자갈층을 개별 요소 해석법을 이용하여 모델링하고, 단조 및 반복 동 하중 작용 시 도상층에서의 자갈에 대한 이동 궤적을 정량적으로 평가하였다. 단조 하중 하에서 침목, 도상층 상부에 부설된 오목형 테트라포드 인공자갈, 하부 자갈 입자 간의 점착과 활동 상호작용으로 열차 하중에 의한 침목으로부터 도상자갈에 작용하는 최대 수직하중을 약 1/2 수준으로 저감시킬 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 반복 동 하중 작용 시 하중 재하 크기 및 주파수 증가에 따라 자갈 이동량이 증가하며, 침목 바닥에서 시작된 원호 활동이 노반 경계면까지 도달하는 것을 가시적으로 확인할 수 있었다. 또한, 테트라포드형 인공자갈 입자의 오목 형상에 기인한 인공자갈과 인공자갈 하부 자갈 입자 사이에서 다수의 점 접촉으로 열차하중분산 경로가 다양화되어 인공자갈층이 부설되어 있지 않은 경우와 비교할 때 자갈의 이동량이 상대적으로 작았다.

Abstract Ballast particles move continuously under a train loading. In this paper, the movement of ballast particles was visualized quantitatively. The ballast layer mixed with tetrapod-shaped artificial ballast (AB) was modeled using a two-dimensional DEM (Discrete Element Method). The particle trajectories in the ballast layer were evaluated quantitatively under monotonic and cyclic dynamic loads. In the case of a monotonic load, the peak vertical forces applied to the ballast layer could be decreased by approximately 50% by the interaction among sleeper, concave type tetrapod artificial ballast on top of the ballast layer and gravels consisting of a ballast layer. Under cyclic dynamic loads, particle movement increased with increasing amplitude and frequency of input loadings. The circular sliding starting from the bottom of the sleeper reached the subgrade boundary by visualization. In addition, the movement of ballast particles was relatively small in the case of tetrapod artificial ballasts than in the case without them. This originated from the concave-shaped tetrapod artificial ballast with multi-contact points between the artificial ballast and ballast grain to distribute the train loading uniformly in the ballast layer.

Keywords : Artificial Ballast, Particle Trajectory, Tetrapod, Cyclic Loading, Visualization

본 연구는 국가과학기술연구회 글로벌 연구협력 네트워크 구축사업 “고기능성 인공자갈개발(Development of high-performance Artificial Ballast)”의 연구비지원에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Dae Sang Kim(KRRI)

email: kds@krri.re.kr

Received March 18, 2021

Revised April 16, 2021

Accepted July 2, 2021

Published July 31, 2021

1. 서론

자갈궤도에서 열차 하중 작용 시 도상층 내부의 자갈 이동 및 회전을 정량적으로 평가하기는 쉽지 않다. 열차 반복 연직 동하중이 작용할 때 자갈이 이동하고 회전하여 자갈간 마모 및 파쇄가 발생하는 것은 사실이나, 이를 확인할 수 있는 정량적 평가는 어려운 문제 중의 하나이다. 열차 반복 동하중 작용 시 자갈의 이동 및 회전량을 정량적으로 평가하기 위한 연구는 실험을 통하여 수행된 바 있으나, 도상층의 일부 단면 등 국부적인 개소를 대상으로 하거나 자갈의 형상을 모델링이 쉽도록 이상화한 원형 자갈 형상에 제한되거나 응력전달에 대한 연구가 진행된 바 있다 [1,2].

자갈의 이동 및 회전량은 자갈간의 접촉력과 함께 도상 자갈의 마모 및 파쇄에 직접적으로 연관되므로, 자갈 궤도의 유지보수 주기 및 수명과 상관성이 높다. 동 연구에서는 자갈궤도의 장수명화에 초점을 맞춘 도상층 내부에서의 다중 하중분산 경로를 통한 응력 분산이 용이한 테트라포드형 인공자갈 혼합 도상층에 대한 연구를 수행하였다[3,4]. 테트라포드 형상 인공자갈의 도상층 상부 부설 유무에 따른 도상층 내에서 자갈의 이동 궤적에 대한 평가를 수행하였다. 이를 위하여 침목 하부에 인공 자갈과 자갈도상층을 개별요소법(DEM, Discrete Element Method)을 이용하여 모델링하고, 다양한 열차 동하중 특성을 고려한 반복하중 재하 시 자갈 입자의 이동 특성에 대하여 평가하였다.

2. 테트라포드 인공자갈 모델링

자갈로 구성된 도상층 모델링 시 사용한 입력변수는 Table 1과 같다. 입자 간 마찰각은 표준적인 실험값을 이용하였다. 접촉 모델은 수치해석의 안정성 측면을 고려하여 선형스프링을 이용하였다. 댐핑은 정확한 실험값을 얻기 어려워 어느 정도의 범위에서 변화시켜 가면서 그 영향을 평가하였다[5-7].

자갈의 불규칙한 형상은 원 요소로 모델링 하였다. Fig. 1은 모델링한 테트라포드형 인공자갈 입자의 예를 보여준다. 인공자갈은 자갈입자의 최대 크기 수준으로 Fig. 2와 같이 제작하였다. 열차하중 재하 시 도상층의 정·동적 거동 특성을 평가하기 위하여 침목-도상자갈층의 모델을 다음과 같은 순서로 작성하였다.

Table 1. DEM parameters used in this study(2D)

Density of grains	2.64 g/cm ²
Spring constant (Normal)	1.0 × 10 ⁹ g/s ²
(Tangential)	0.25 × 10 ⁹ g/s ²
Coefficient of viscosity (Normal)	1.0 × 10 ¹ g/s
(Tangential)	0.5 × 10 ¹ g/s
Coefficient of friction between Grains	0.5
Analytical boundary size	100 × 100 cm
Ballast size	2 ~ 6 cm
Thickness of line element	1.0 mm
Calculation time interval	5.0 × 10 ⁻⁵ s

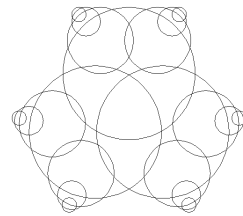


Fig. 1. Tetrapod artificial ballast grain with circles

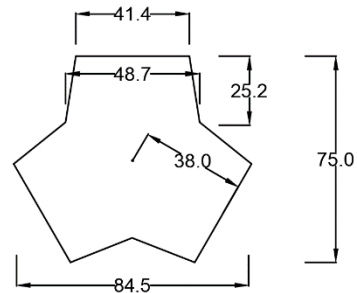
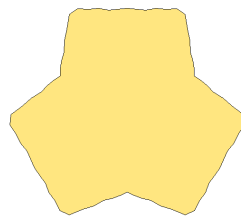


Fig. 2. Tetrapod type artificial ballast grain (mm)



- (1) STEP 1 : 바닥 도상층 생성
- (2) STEP 2 : 인공 자갈층 생성
- (3) STEP 3 : 침목 설치
- (4) STEP 4 : 침목 측면 자갈 설치

도상층 구성 자갈입자의 입도분포는 표준적인 도상자갈 입자의 입도시험 규격 범위(22.4 ~ 63 mm)를 따랐다.

Fig. 3은 해석에 사용한 완성된 모델을 보여준다. 인공 자갈을 부설하지 않은 천연 도상자갈만을 사용한 모델 (a)와 테트라포드형 인공자갈층을 갖는 모델 (b)를 제작 하였다.

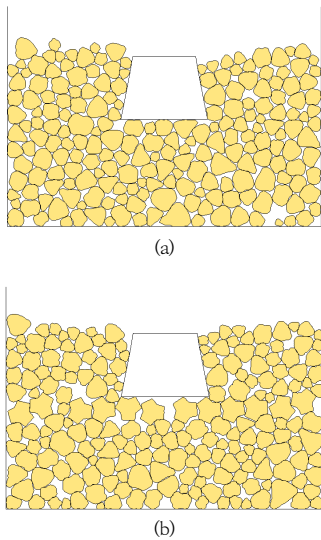


Fig. 3. Initial configurations of the models in this study
 (a) Without artificial ballast grain (w/o AB)
 (b) With tetrapod type artificial ballast grain (w AB)

3. 정재하시험

반복 동재하시험을 수행하기에 앞서, 우선 도상자갈층의 기본 특성을 파악하기 위하여 침묵에 의한 연직 일방향 재하시험에 의한 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 분석하였다. Fig. 4는 인공자갈이 없는 경우와 테트라포드형 인공자갈층이 부설된 경우에 대한 일방향 재하시험으로, 침묵에 작용하는 연직하중의 시각이력을 보여준다. 침묵의 재하속도는 1.0 cm/s이며, 10초 동안 10 cm의 연직변위를 가하고 있다.

인공자갈이 없는 경우 최초에 발견되는 최대(peak)하중은 15 kN 수준으로, 도상자갈 입자의 전단에 의한 활동이 발생하면서 하중이 급격하게 감소하고 있다. 이와 같은 간헐적인 활동은 재하시간 10초 동안 3차례 발생하였으며, 점점 그 최대강도가 상승하였다. 이와 같은 점착과 활동(Stick & Slip)의 반복거동은 마찰성 입상체의 특징이다. 인공자갈이 있는 경우는 초기 18 kN 수준으로 인공자갈이 없는 경우와 비슷한 수준이나, 1차 활동 이

후 최대강도는 점진적으로 감소하는 경향을 보였다.

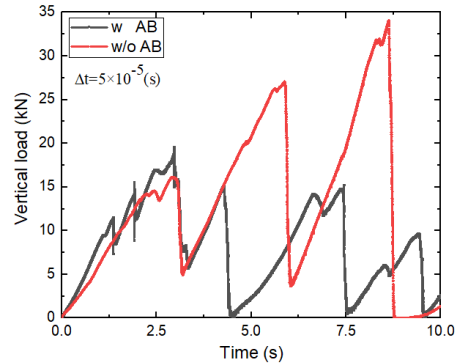


Fig. 4. Time history of vertical load acting on the sleeper under monotonic loading

Fig. 5와 Fig. 6은 시험동안의 입자의 이동궤적을 나타내고 있다. 입자 이동과 활동 저항측면에서 테트라포드형 인공자갈 부설의 경우가 인공자갈이 없는 경우보다 보다 안정성이 크며, 특히 표층자갈의 이동량이 상대적으로 작게 발생하였다.

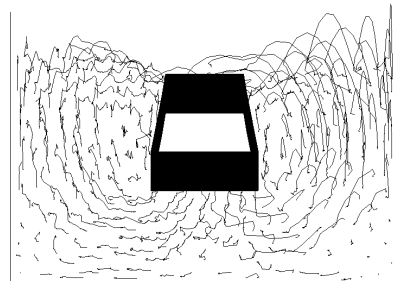


Fig. 5. Particle Trajectory during monotonic loading w/o AB

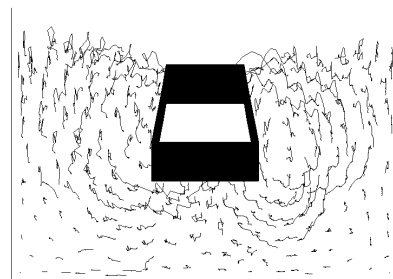


Fig. 6. Particle Trajectory during monotonic loading w AB

4. 반복 동재하시험

열차 반복하중 재하시험을 위한 수치해석은 "일정속도 재하조건에서의 한계하중 제어조건"으로 수행하였다. 침목을 일정한 속도로 연직방향으로 움직여서 하중을 가하고, 설정한 한계 연직하중에 도달한 시점에서 재하 방향을 반전시키고, 역방향으로 동일한 속도로 재하하였다. Fig. 7은 침목의 연직 위치 및 연직하중에 대한 시각 이력의 예를 보여준다. 재하 방향의 반전까지의 소요시간은, 도상자갈층의 강성에 의존하므로 각각의 재하에서 다른 값을 보인다. 이와 같은 이유로 본 실험에서의 재하 주파수(진동수)는 초기 설정 값이 아니라 관측 값으로 해석 중 반복 재하 횟수를 총 재하시간으로 나눈 평균값이다.

Fig. 7의 예에서 침목 이동속도 20 mm/s, 100 mm/s, 200 mm/s의 3케이스에 대하여 설정 한계하중의 최대값을 1 kN, 5 kN, 10 kN의 3종류로 설정하였다. 그 결과 가진 주파수는 5 ~ 6.5 Hz 범위에 있었으며, 이는 300 km/h 고속열차의 주행 시의 대차에 의한 작용주파수 수준에 해당된다. 설정 한계하중 최대값은 단조하중 작용 시 침목에 발생하는 최대값 수준을 고려하여 결정하였다.

Fig. 8 (a), (b), (c)는 동일한 하중 재하범위(0 ~ 5 kN)에서, 재하 주파수를 변화시켰을 때의 침목 침하 및 자갈 입자 중심의 이동 궤적의 진전을 보여준다. 재하 주파수가 클수록 입자에 큰 운동에너지가 작용하기 때문에 침하량도 증가하고 자갈 이동량도 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 침하 진행과 함께 침하 진행 속도는 점차 작아져 도상자갈층의 변형에 대한 저항이 증가하는 것을 알 수 있다.

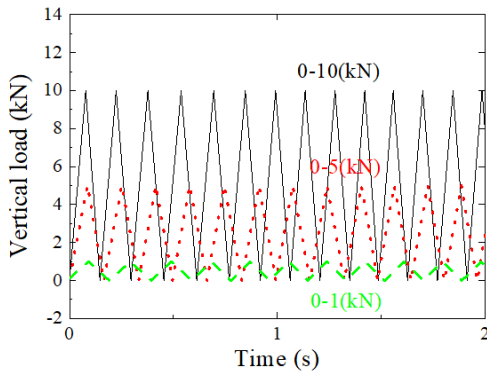
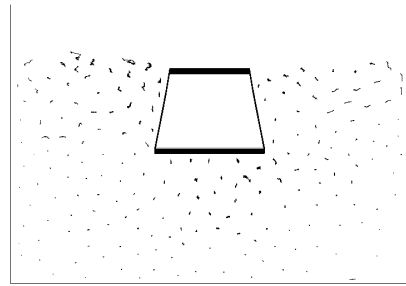
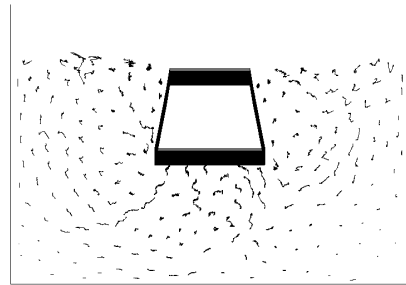


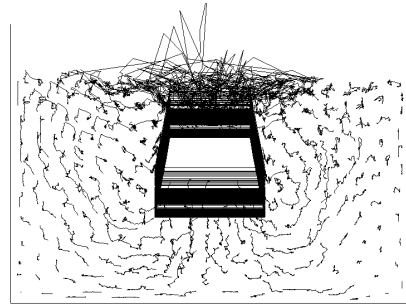
Fig. 7. Vertical load acting on sleeper of the cyclic loading test



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Particle trajectory in 0 ~ 5 kN cyclic loading amplitude depending on frequency (w/o AB) (a) 6.5 Hz (b) 10.7 Hz (c) 23.5 Hz

(c)의 경우 자갈입자 중심위치의 궤적은 좌우 비대칭 변형이 발생하였고, 토조 바닥면까지 도달하는 원호 활동이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 동일한 재하 하중범위 (0 ~ 5 kN)에서 재하 주파수를 변화했을 때의 침목의 침하 진행을 보여주고 있다. 재하주파수가 클수록 자갈 입자에 큰 운동에너지가 작용하므로 침하량도 증가하는 것을 알 수 있다. 가진 주파수별 침목 침하량 변화는 Table 2와 같다.

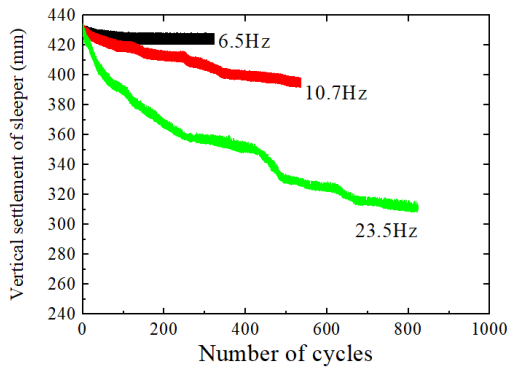


Fig. 9. Vertical settlement of sleeper in 0-5 kN cyclic loading amplitude depending on frequency (w/o AB)

Table 2. Vertical settlement of sleeper in 0-5 kN cyclic loading amplitude depending on frequency (w/o AB)

Loading frequency (Hz)	Time (sec)	Settlement (mm)
6.5	50	6.3
10.7	50	36
23.5	35	120

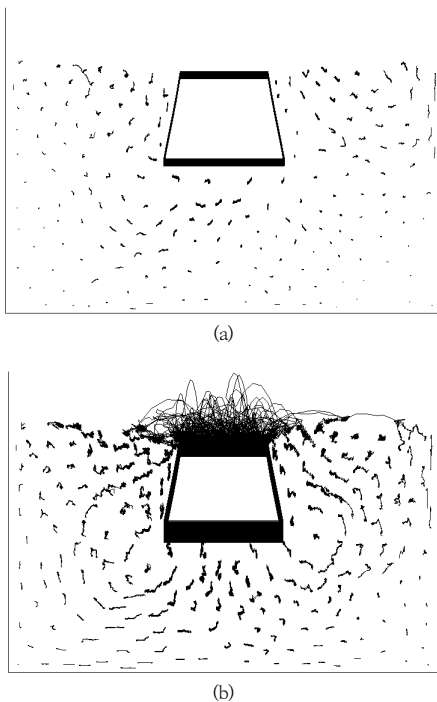


Fig. 10. Particle trajectory in 0-5 kN cyclic loading amplitude depending on frequency (w AB)
(a) 0-5 kN, 8.0 Hz (b) 0-10 kN, 8.4 Hz

Fig. 10은 테트라포드형 인공자갈층이 부설된 경우에서 재하 하중을 0 ~ 5 kN에서 0 ~ 10 kN로 증가한 경우에 대한 자갈 입자 중심의 이동 궤적을 보여준다. 자갈의 이동 궤적으로부터 인공자갈이 부설되지 않은 경우와 비교하여 자갈의 이동량이 작은 것을 알 수 있다. 이는 테트라포드 인공자갈 입자의 오목 형상에 기인한 인공자갈과 인공자갈 하부의 자갈 입자 사이에서 다수의 점 접촉으로부터 열차하중분산 경로가 다양화되었기 때문으로 판단된다.

5. 결론

도상자갈층 내부 자갈의 이동량을 정량화 및 가시화하기 위한 목적으로 도상자갈층 상부에 테트라포드형 인공자갈층을 부설한 경우에 대한 단조하중 및 열차하중을 모사한 해석결과는 다음과 같다.

- 1) 도상층 상부에 적용한 오목형 테트라포드형 인공자갈은 그 형상적 특성으로 단조하중 재하 시 점착과 활동(Stick & Slip) 메카니즘으로 자갈과 침목사이에 발생하는 최대 수직하중을 1/2 수준으로 저감시키는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 반복 동하중 및 주파수 크기 증가에 따라 침하량과 자갈 이동량이 증가하였으며, 침목 하부로부터 노반 경계면까지 도달하는 원호 활동이 발생하는 것을 가시적으로 확인할 수 있었으며, 이는 열차 동하중에 의하여 도상층 하부까지도 자갈 마모가 발생될 수 있음을 의미한다.
- 3) 오목형상의 테트라포드 인공자갈과 인공자갈 하부의 자갈 입자 사이에서의 접촉점의 증가로 열차하중이 보다 균등하게 분산되어 인공자갈이 없는 경우와 비교하여 자갈 간의 응력 집중 및 상대적인 이동량이 작음을 알 수 있었다. 이로부터 도상 표층에 테트라포드형 인공자갈을 적용하는 경우 자갈 마모 및 파쇄로 인한 유지보수 작업을 저감시킬 수 있을 것으로 예상된다.

References

[1] S. Kim, S. K. Hwang, "Development of 2-D DEM (Discrete Element Method) algorithm to model ballast

and sleeper”, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.6, No.3, pp.174-178, 2003.

- [2] D. S. Kim, “Characteristics of bearing capacity and stress transfer of ballasted layer mixed with specially shaped artificial ballasts”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 20, No. 12, pp. 15-20, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.12.15>
- [3] D. S. Kim, “Evaluation of settlement behavior of ballasted layer mixed with specially shaped artificial ballasts under train loading”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 21, No. 6, pp. 35-40, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.6.35>
- [4] R. Klaus, “Frame-sleeper track promises a longer life”, *Railway gazette international*, 7, pp.369-369, 2002.
- [5] Japanese Society of Civil Engineers, Ground analysis technology (Discrete Element method) Training, pp.175-176, JSCE, 2012.
- [6] T. Matsushima, "Grain-to Grain Interaction Affecting Dynamic Deformation of Granular Slope", Doctoral dissertation, University of Tokyo, Japan, 1997.
- [7] T. Matsushima, R. Blumenfeld, “Fundamental structural characteristics of planar granular assemblies: Self-organization and scaling away friction and initial state” *Physical Review E*, 95(3), 032905. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1103/physreve.95.032905>

김 대 상(Dae-Sang Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울대학교 대학원 자원공학과 (공학석사)
- 2000년 3월 : 동경대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 4월 ~ 2002년 6월 : 서울대학교 지진공학연구센터 전임연구원
- 2002년 6월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

지반공학, 궤도토목