

열차 하중 작용 시 특정형상 인공자갈이 혼합된 도상층에서의 침하 거동 평가

김대상

한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부

Evaluation of settlement behavior of ballasted layer mixed with specially shaped artificial ballasts under train loading

Dae Sang Kim

Advanced Railroad Civil Engineering Division, KRRI

요약 도상 자갈층은 열차하중을 분산하고 지지하는 중요한 역할을 수행하나, 큰 공극으로 인하여 열차 동하중 작용 시 침하가 발생하여 지속적인 유지보수가 필요하다. 본 논문에서는 특정한 형상의 인공자갈 3종류 (정사각형상, 테트라포드형상, 육각형상) 를 혼합한 도상 자갈층을 2 차원 개별 요소 해석법을 이용하여 모델링하고, 열차 동하중에 의한 도상 층의 침하 특성을 평가하기 위하여 침묵에 의한 반복 재하 시험을 실시하였다. 동 해석 결과 침묵 하부에서 작은 힘의 전달경로가 형성된 테트라 포드형의 인공 자갈이 포함된 도상 층에서 침하가 가장 작게 발생하였다. 또한, 도상층 내 접촉력 분포로부터 오목 형상을 갖는 테트라 포드 형상을 포함한 인공 자갈 혼합 도상에서 힘의 다중 전달 경로를 형성하기 쉬우며, 이를 통하여 도상 층으로 전달된 열차 하중이 보다 다양한 경로로 균등하게 분산될 수 있는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과로부터 반복 열차 하중 재하 시 오목 형상의 인공 자갈이 혼합된 도상 층에서 훨씬 효과적으로 침하 발생을 저감시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다. 도상 층에서의 이와 같은 침하 저감 효과는 유지보수를 절감할 수 있는 자갈궤도 구조에 대한 가능성을 보여준다.

Abstract The ballast layers play a key role in distributing and supporting a trainload. On the other hand, it settles down by dynamic train loading due to large void ratios. Consequently, it requires continuous maintenance. In this paper, ballast layers mixed with three types of specially shaped artificial ballast (AB) (Rectangular, Tetrapod, Hexagonal) were modeled by using a two dimensional DEM (Discrete Element Method). Repeated loading tests were performed to evaluate the settlement behavior of the ballast layers. The smallest settlement was observed in the case of the ballast layer mixed with Tetrapod AB than in other cases, according to an analysis of the force transfer routes. In addition, contact force analysis showed that the Tetrapod AB, which has a concave shape, could easily make small and multi-channel force-transfer routes. This means that the stress in the ballast layer by the train loading transferred through the sleeper uniformly was distributed well by the AB. Therefore, the settlement of the ballast layer mixed with the concave-shaped Tetrapod AB could be reduced effectively under a repeated train loading. The effects of a decrease in settlement of the ballast layer highlight the possibility of a maintenance-free ballasted track.

Keywords : Artificial ballast, Settlement, Train Loading, Stress Transfer, Discrete Element Method

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 10, 2020

Revised April 20, 2020

Accepted June 5, 2020

Published June 30, 2020

1. 서론

열차 운영 중 유지보수를 전제로 건설되는 자갈궤도와 Maintenance free를 전제로 건설되는 콘크리트 슬래브 궤도의 장점을 최대화하고 단점을 최소화한 궤도구조를 모색하고자 특정형상의 인공자갈에 대한 연구를 진행하였다. 형상을 특화한 인공자갈을 고안하고 이를 침목과 도상자갈의 경계에 분산 배치하여 침목으로부터 전달되는 열차하중을 보다 균등하게 분산시키는 역할을 효율적으로 할 수 있도록 개발하였다. 인공자갈을 함께 적용한 자갈도상에서 열차하중의 분산 성능은 자갈의 마모 및 파쇄로 인한 침하 발생을 크게 줄임으로서 궤도틀림으로 인한 유지보수를 최소화할 수 있는 자갈궤도 구조를 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

최근 유럽과 일본, 우리나라를 중심으로 자갈궤도의 구조 개량을 통하여 유지보수 주기를 증가시켜 유지보수 비용을 줄이려는 다양한 연구가 진행되고 있다. 예를 들면, 침목의 구조를 개량한 프레임 침목과 광폭 침목 등에 대한 연구가 수행된 바 있었으며[1], 자갈도상에 시멘트 몰탈을 주입하여 도상 자갈층의 강성을 높이는 콘크리트 도상화에 대한 연구도 진행된 바 있다.

동 연구에서는 자갈궤도의 장수명화 및 도상층 두께 저감에 초점을 맞춘 특정 형상의 인공자갈에 대한 연구를 수행하였다. 침목 하부에 인공자갈과 자갈도상층을 개별요소법(DEM, Discrete Element Method)을 이용하여 모델링하고[2], 다양한 열차 동하중 특성을 고려한 반복하중 재하 시 도상층에서의 침하, 자갈 입자간의 발생 응력 및 그 전달 특성에 대하여 검토하였다[3].

2. 인공자갈을 포함한 도상층 모델링

2.1 자갈 모델링

도상자갈 및 도상층 모델링 시 사용한 입력변수는 Table 1과 같다. 입자의 밀도는 SiO₂ 입자의 표준적인 값을 사용하였다. 입자 간 마찰각은 표준적인 실험값을 이용하였다. 접촉 모델은 수치해석의 안정성 측면을 고려하여 선형 스프링을 이용하였다. 댐핑은 진동에너지를 소산시키는 중요한 요소이나, 정확한 실험값을 얻기 어려우므로 어느 정도의 범위에서 변화시켜 가면서 그 영향을 평가하였다[4, 5, 6].

자갈의 불규칙한 형상은 8개의 원 요소로 모델링 하였다. Fig. 1은 모델링한 자갈 입자의 예를 보여준다. 도상

층 구성 자갈입자의 입도분포는 Fig. 2와 같이 표준적인 도상자갈 입자의 입도시험 규격 범위(22.4 ~ 63 mm)를 따랐다.

인공자갈은 블록형과 오목형상을 고려하여 Fig. 3의 3가지 형상으로 설정하였다. (Fig. 3(a)-(c))

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

Density of grains	2.64 g/cm ³
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

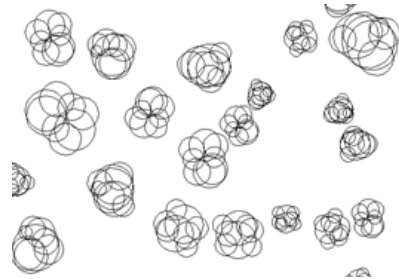


Fig. 1. Example of ballast grain shape with 8 circles

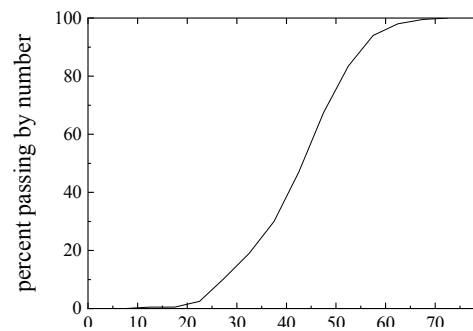


Fig. 2. Size distribution of ballast grains

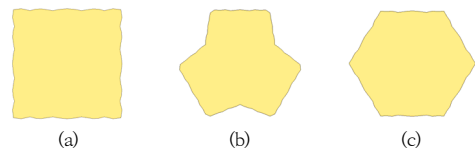


Fig. 3. Three types of artificial ballast grain (a) Type A(Rectangular) (b) Type B(Tetrapod) (c) Type C(Hexagonal)

2.2 침목과 도상자갈층 모델링

앞서 서술한 입자 모델을 이용하여, 열차반복하중 재하시 도상층의 동적거동 특성을 평가하기 위하여 "침목-도상자갈층의 모델"을 다음과 같은 순서로 작성하였다[7].

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

Fig. 4는 해석에 사용한 완성된 모델을 보여준다. Type O는 인공자갈을 부설하지 않은 천연 도상자갈만을 사용한 모델이다. 인공자갈 형상별로 모델명은 Type A(정사각형), Type B(테트라포드형), Type C(육각형)으로 표기하였다.

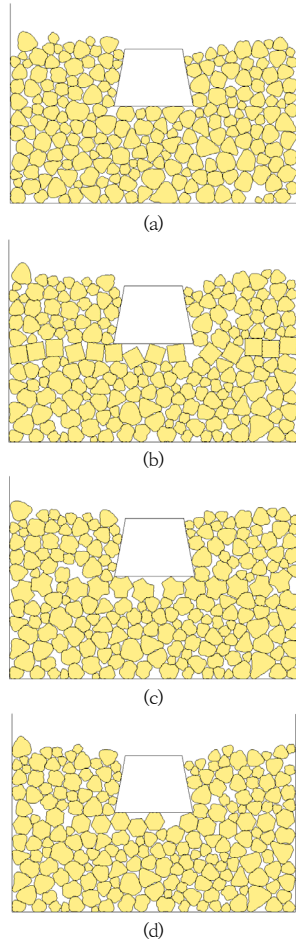


Fig. 4. Initial configurations of the models in this study
 (a) Without artificial ballast grain (Type O) (b) With type A artificial grains (c) With type B artificial grains (d) With type C artificial grains

3. 모사열차 반복하중시험

모사열차 반복하중시험을 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. 5는 침목의 연직 위치 및 연직하중에 대한 시간 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.

예를 들면, Fig. 5의 예에서 침목 이동속도 20 (mm/s), 100 (mm/s), 200 (mm/s)의 3케이스에 대하여 설정 한계하중의 최대값을 1 kN, 5 kN, 10 kN의 3종류로 설정하였다. 그 결과 각 케이스에서 1초 사이에 5 ~ 6.5회 진동하여, 가진 주파수는 5 ~ 6.5 Hz 범위로, 고속열차가 가진 진동 주파수 범위에 속하였다.

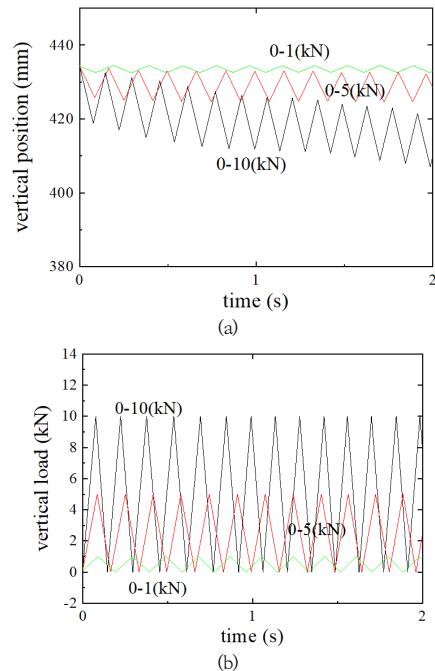


Fig. 5. Examples of input motions of the cyclic loading test
 (a) Vertical position of sleeper
 (b) Vertical load acting on sleeper

3.1 인공자갈이 없는 도상층 침하

인공자갈층이 없는(Type O) 도상모델에서의 반복재하 시 응답해석 결과를 정리하였다. 먼저 Fig. 6은 재하 주파수를 5.4 ~ 10.6 Hz 범위로 조정한 후에 재하 하중의 폭을 0 ~ 1 kN, 0 ~ 5 kN, 0 ~ 10 kN의 3가지로 변화시킨 경우에 대한 반복 재하횟수와 침묵 침하량(y) 변화를 평가한 결과이다. 재하하중의 최대값이 큰 경우에서 침묵 침하가 빠르게 진행되었다. 특히 0 ~ 10 kN의 경우 100회의 반복 재하에서 10 cm를 초과하는 매우 큰 침하가 발생하여 도상 자갈 이동량이 크게 발생한 것으로 판단되었다.

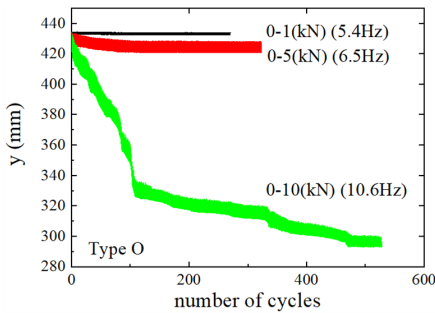


Fig. 6. Responses of vertical settlement for different loading amplitude in Type O model

Fig. 7은 동일 하중 재하조건(0 ~ 5 kN)에서 재하 주파수를 변화시켰을 때의 침하 진전을 보여준다. 재하 주파수가 클수록 입자에 큰 운동에너지를 주기 때문에 침하량도 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 침하 진행 속도는 반복재하횟수 증가에 따라 점차 작아져서, 침하의 진행과 함께 도상자갈층의 지지강성이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

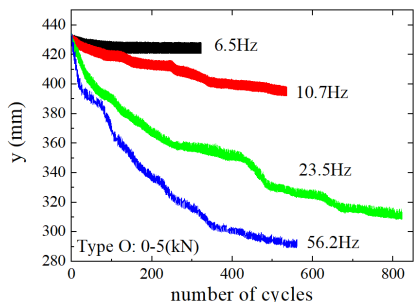


Fig. 7. Responses of vertical settlement for different loading frequency in Type O model

3.2 인공자갈이 있는 도상층 침하

Fig. 8은 Type B 인공자갈층 모델에서 재하 주파수를 7.4 ~ 8.4 Hz로 조정하여 재하 하중변화가 침하에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과 Fig. 6의 Type O 모델과 같이 재하하중이 증가할수록 침하량이 커지는 경향은 보였으나 침하발생량은 Type O와 비교하여 1/3 수준으로, 힘의 분산경로가 상대적으로 많은 테트라형의 인공자갈이 혼합된 도상층에서 침하 저감 효과가 큰 것을 확인할 수 있었다.

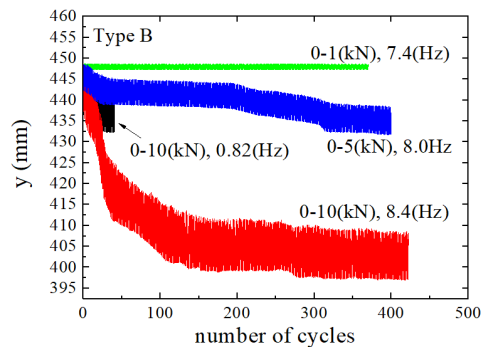


Fig. 8. Responses of vertical settlement for different loading amplitude in Type B model

Fig. 9는 재하하중이 0 ~ 5 kN의 경우 및 0 ~ 10 kN의 경우에 대한 최종 재하 시의 입자 배치 및 힘의 전달경로를 보여준다. 이로부터 침묵 하부에서 분기하고 있는 힘의 전달경로가 형성된 것을 알 수 있다. 특히 침묵 직하부에서 Type B 인공자갈에 작용하는 힘을 보면 Type B 입자의 오목 형상으로부터, 인공자갈 하부의 자갈 입자와 다수의 점에서 접촉하여 견고한 맞물림이 형성되고 있는 형상을 보여준다. 이 힘의 연결구조에 의하여 침묵 하부의 힘이 분산되었으며, 침하가 감소할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

다른 형상의 인공자갈 모델의 재하 시험과 비교를 한 결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서는 Type O, A, B, C의 각 경우에 대하여 재하주파수를 동일한 수준으로 조정하고 재하하중을 0 ~ 10 kN으로 고정한 경우의 침하의 진전양상을 보여준다. 동 하중재하 조건에서 침하 발생량의 크기는 Type O > Type A > Type C > Type B 순이었다. 이와 같은 침하발생량 차이의 원인을 조사하기 위하여 최종 재하시의 입자 배치 및 힘의 전달경로를 Type A 및 C에 대하여 나타낸 것이 Fig. 11이다. 이로부터 Type A의 인공자갈은 정사각형으로 면의 방향이

4개로, Type C 인공자갈의 6개와 비교하여 작으므로, 힘의 전달을 위한 분기 시 방향에 대한 선택의 개수가 적으며, 따라서 불안정한 기둥형 구조를 형성하고 있는 모습을 볼 수 있었다. Type C는 Type A와 비교하여 보다 안정한 힘의 골격구조의 방향이 많아서 침목 하부에서 작은 힘의 연결통로가 형성되나, Type B(Fig. 9)와 비교하면 입자 오목부가 없으므로 힘의 골격구조의 안정성에 있어서 Type B보다는 부족하였다. 이와 같은 원인이 결과적으로 총 침하량 차이에 반영되고 있는 것으로 판단된다.

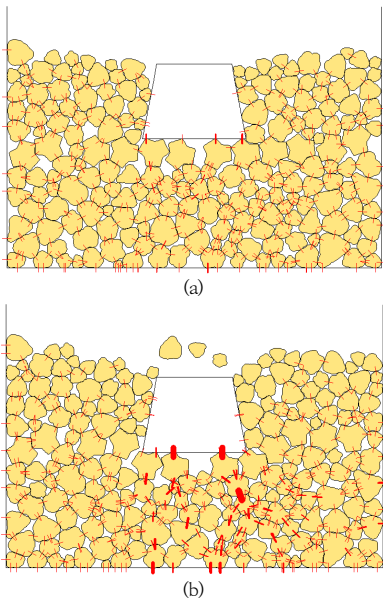


Fig. 9. Grain configuration and force chains at the last loading

(a) Type B, 0-5 kN, 8.0 Hz (b) Type B, 0-10 kN, 8.4 Hz

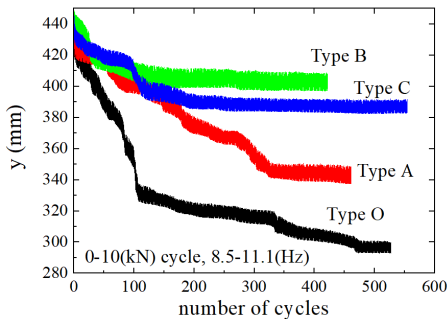


Fig. 10. Evolution of vertical settlement for different type of artificial ballast grains

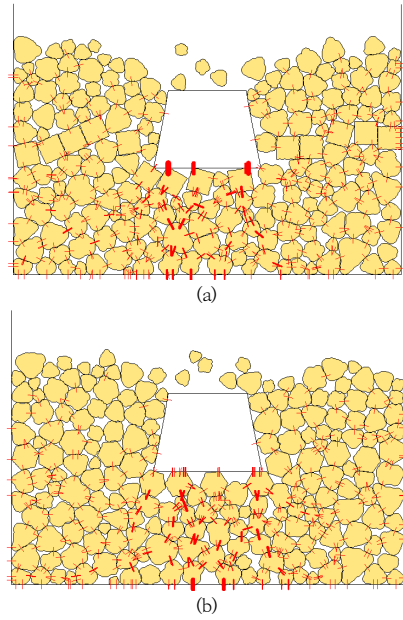


Fig. 11. Grain configuration and force chains at the last loading

4. 결론

3종류의 특정 형상 인공자갈을 혼합한 도상자갈층과 침목을 2차원 개별요소법을 활용하여 모델링하였다. 반복열차하중 재하 시 침목 직하에 부설한 형상이 다른 3종류의 인공자갈(Type A, B, C) 층이 도상층의 침하 거동에 미치는 영향에 대하여 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 수치해석의 모든 경우에서 100 ~ 200회 정도의 초기 재하 동안에 큰 침하가 발생하였고, 그 이후 점진적으로 침하가 감소하여 도상층의 부설 초기 침하 저감을 위한 다짐의 중요성을 확인할 수 있었다. 또한, 재하 하중의 진폭이 클수록, 재하주파수가 높을수록 침하가 크게 발생하는 결과를 알 수 있었다.
- 2) 인공자갈을 부설한 경우와 부설하지 않는 경우를 비교했을 때, 침하 발생량은 Type O > Type A > Type C > Type B의 순으로 인공자갈을 부설한 경우에서 작게 발생하였다. 특히, 침목 하부에서 힘의 다중 전달경로가 형성된 테트라형 인공자갈 (Type B)에서 침하 발생이 작았다.
- 3) 반복 하중 재하 시의 도상층 내 접촉력 분포를 살

해보면, 오목한 테트라포드 형상에서 작은 힘의 다중 전달경로를 형성하기 쉬운 것을 알 수 있었다. 따라서, 상대적으로 작은 재하하중을 반복적으로 재하하는 경우 큰 하중에 저항하는 작은 수의 힘의 연결구조가 아닌 작은 하중을 다양한 경로로 분산 가능한 힘의 전달구조가 생기기 쉽도록 인공자갈의 형상을 결정하는 것이 도상층의 침하를 저감시키는데 효과가 있을 것으로 판단되었다.

References

- [1] R. Klaus, "Frame-sleeper track promises a longer life", *Railway gazette international*, 7, pp.369-369, 2002.
- [2] P. A. Cundall, "A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems", *Proceedings of the Symposium of International Society of Rock Mechanics*, vol. 1, Nancy, France, 1971.
- [3] D. 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.
- [4] Japanese Society of Civil Engineers, "Ground analysis technology (Discrete Element method) Training", JSCE, pp.175-176, 2012.
- [5] T. Matsushima, "*Grain-to Grain Interaction Affecting Dynamic Deformation of Granular Slope*", Doctoral dissertation, University of Tokyo, Japan, 1997.
- [6] T. Matsushima, R. Blumenfeld, "Fundamental structural characteristics of planar granular assemblies: Self-organization and scaling away friction and initial state" *Physical Review E*, Vol. 95, No. 3, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.032905>
- [7] 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>

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