

특정형상의 인공자갈이 혼합된 도상자갈층의 지지성능과 응력전달특성

김대상
한국철도기술연구원

Economic Evaluation on Geosynthetic Reinforced Abutment for Railways

Dae Sang Kim
Advanced Railroad Civil Engineering Division, KRRI

요약 본 연구에서는 교대에 작용하는 수평력을 저감시키는 총 11 케이스의 설계에 대한 건설비 분석을 실시하였다. 역T형 교대의 뒤채움재 개선과 토목섬유 보강재를 이용하여 교대를 보강한 철도용 보강 교대(Reinforced Abutment for Railways) 적용을 고려한 2종류의 교대 형식에 대하여 검토하였다. 첫 번째 종류의 경제성 분석에서는 역T형 교대의 배면 뒤채움 재료의 내부 마찰각을 35°에서 40°와 50°로 증가시키는 케이스를, 두 번째 종류의 경제성 분석에서는 토목섬유를 적용한 철도용 보강 교대 설계 케이스에 대한 경제성을 비교 분석하였다. 뒤채움 재료의 개선을 통해 내부 마찰각을 40° 혹은 50°로 적용할 때 교대에 가해지는 수평토크는 하중 조건에 따라 18~48% 까지 감소하였으나 교대 건설 비용 저감효과는 2.0~3.9%로 크지 않았다. 그러나, 철도 교대 구조로서 토목섬유 보강 교대를 적용한 결과 교대에 작용하는 수평력을 이론적으로 0까지 저감시킬 수 있어 교대 벽체 두께, 저판 길이 및 말뚝 기초의 수 및 재질 변경으로 최대 30%까지 건설비 저감 효과가 있는 것으로 검토되었다.

Abstract This paper evaluated the construction costs of 11 design cases to decrease the horizontal forces applied to the abutment. They include two abutment types, which are to improve backfill materials for a reversed T-shaped abutment and geosynthetic Reinforced Abutment for Railways (RAR). The first type of economic analysis was that the internal friction angles of backfill materials were increased from $\phi=35^\circ$ to $\phi=40^\circ$ and 50° for a reversed T-shaped abutment. In addition, the second type was the cases with the design of geosynthetic RAR. When friction angles of 40° or 50° were applied through the improvement of the backfill material, the decrease in construction cost of the abutment was not large (2.0~3.9%), even though the horizontal forces applied to the abutment had decreased to 18~48%. In the case of applying the RAR, however, a maximum 30% cost reduction was evaluated by the decrease in horizontal force to "0" theoretically. The cost reduction resulted from the decrease in wall thickness, base slab size, and number and material change of pile foundation for the abutment.

Keywords : Abutment, Backfill Materials, Economic Evaluation, Horizontal forces, Reinforced Abutment for Railway

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 August 29, 2019

Revised October 11, 2019

Accepted December 6, 2019

Published December 31, 2019

1. 서론

열차하중을 지지하는 궤도형식은 국내 뿐 아니라 전세계에서 자갈궤도와 콘크리트 슬래브궤도로 크게 양분되어 적용되고 있다. 자갈궤도는 유지보수를 전제로 건설되며, 콘크리트 슬래브궤도는 유지보수비용 저감(Maintenance free)을 목표로 개발되었다. 따라서, 자갈궤도는 초기 건설비가 낮은 대신 유지보수 비용이 크고, 콘크리트 슬래브궤도는 초기 건설비용이 고가이며, 유지보수 비용이 적게 소요된다고 알려져 있다. 따라서, 유지보수 비용 저감이 가능한 자갈궤도를 건설할 수 있다면, 금상첨화일 수 있을 것이다.

동 연구에서는 자갈궤도의 유지보수 비용의 많은 부분을 차지하고 있는 도상 자갈의 마모 및 파쇄로 인한 열화를 최소화하여 유지보수 비용을 저감시킬 수 있도록 도상 자갈층 상부와 침목 하부 경계에 특정형상의 인공자갈을 배치하였다. 이를 통하여 열차하중에 의한 도상 층내 발생 응력을 효율적으로 균등하게 분산 관리함으로써 개개의 자갈, 특히 모서리부에서의 응력 집중을 감소시켜 도상 자갈의 마모 및 파쇄에 기인한 침하를 줄여 유지보수 주기를 연장하고 비용을 저감시킬 수 있는 방안을 제안하고자 한다.

이를 위하여 우선 특정 형상의 인공자갈이 침목 하부에 배치된 자갈도상층을 개별요소법(DEM, Discrete Element Method)을 이용하여 모델링하고, 열차하중을 고려한 반복 하중 재하 전에 하중 재하 시 침목~도상 간 최대발생 응력, 도상층 내부에서의 입자 간에 발생하는 응력의 전달 경로 및 크기와 입자의 이동 경향을 검토하였다[1, 2]. 동 해석에 사용된 모델은 비록 2차원이거나, 모델링 및 해석시간 단축에 장점이 있으며 입자형상에 대해서는 인공자갈을 포함하여 최대한 실물에 가깝게 상세한 모델링을 수행하였다.

2. 해석프로그램 및 모델링

본 프로그램은 이차원의 원 요소 및 선분 요소와 각각의 강체 접촉 입자를 다룰 수 있다. 접촉 판정은 (1)원 요소와 원 요소 사이, (2)원 요소와 선분 요소 사이, (3)선분 요소와 선분 요소 사이의 3가지에 대하여 검토된다. (1)은 일반적으로 개별요소법에서 많이 사용되고 있는 Cundall(1971) [3]의 방법과 같으며 (1), (2) 및 (3)에 대한 구체적인 접촉판정에 대한 프로그램 개발 개요는 일

본토목학회에서 발행한 지반에 관한 해석기술 강습회 자료집 (2012) [2]에 자세히 수록되어 있다.

2.1 자갈 모델링

본 해석에서 사용한 도상자갈 입자에 대한 입력변수는 Table 1과 같다. 입자의 밀도는 SiO₂ 입자의 표준적인 값으로 하였다. 입자 간 마찰각도, 광물의 표준적인 실험값을 이용하였다. 한편, 접촉 모델은 보다 현실적인 모델로는 접촉압에 의존하는 Hertz 이론으로부터 구해야 하나, 수치해석의 안정성의 측면에서 선형 스프링을 이용하였다. 댐핑은 진동에너지 소산시키는 중요한 요소이나 실험값을 얻기 어려우므로 어느 정도의 범위에서 변화시켜 가면서 그 영향을 평가하고자 하였다.

Table 1. DEM parameters used in this study(2D) [4,5]

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

입자 형태에 대해서는 실제 모래 입자의 2차원 영상으로부터 얻어진 불규칙한 형상을 동적 최적화(Dynamic optimization)기법에 의하여 8개의 원 요소로 모델화한 입자를 사용하였다. 얻어진 입자 모델의 예는 Fig. 1과 같다.

입도분포는 Fig. 2와 같이 표준적인 도상자갈 입자의 입도시험 규격 범위(22.4 ~ 63 mm)를 고려하여, 크기(2 cm ~ 6 cm)로 하였다.

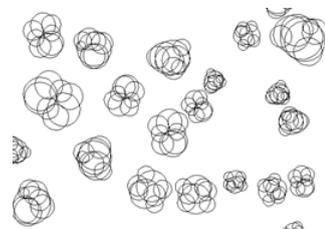


Fig. 1. Example of ballast grain shape with 8 circles [6]

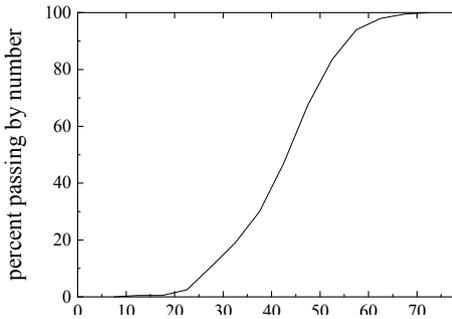


Fig. 2. Size distribution of ballast grains

인공자갈은 능각이 풍부한 형상을 고려하여 Fig. 3의 3가지 형상으로 설정하였다. 모델링은 도상자갈 입자와 마찬가지로 원을 연결하는 모델을 이용하였다 (Fig. 3(a)-(c)).

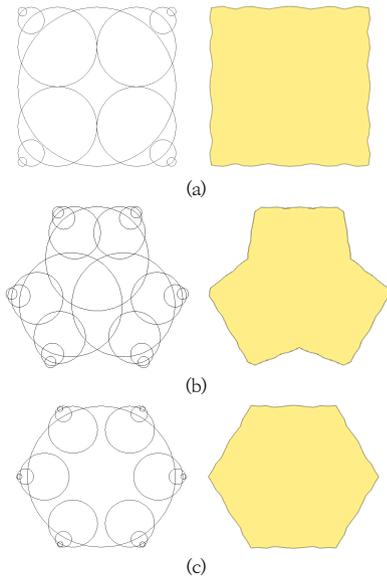


Fig. 3. Three types of artificial ballast grain (a) Type A (Rectangular) (b) Type B (Tetrapod) (c) Type C (Hexagonal)

2.2 침목과 도상자갈층 모델링

앞서 서술한 입자 모델을 이용하여, 침목 지지력 확인을 위한 재하시험 용 "침목-도상자갈층의 모델"을 다음과 같은 순서로 작성하였다.

(1) STEP 1 : 바닥 도상층 생성

인공 자갈층 하부의 도상자갈층을 작성하기 위하여, 1

m × 1 m의 토조에 입자를 랜덤하게 발생시킨다. 토조 벽면 부근의 도상자갈 입자의 밀도 저하를 방지하기 위해서, 토조 벽과 자갈 입자의 마찰은 0으로 한다. 중력에 의하여 자갈 입자가 낙하하면서, 위로부터 판 요소로 1.0 kN/m의 일정 압력을 가하면서 자갈 입자를 밀어 내려서 자갈층을 생성한다(Fig. 4).

(2) STEP 2 : 인공 자갈층의 작성

STEP 1의 압력판을 제거하고 인공 자갈을 서로 겹치지 않도록 일렬로 배치하여 중력으로 낙하시켜 인공자갈층을 생성한다(Fig. 5).

(3) STEP 3 : 침목 설치

침목 모델(상면 20 cm, 하면 27.6 cm, 높이 20 cm)을 발생시켜, 수평 변위 및 회전을 구속한 상태에서 아래로 5.0 N/m의 압력으로 밀어서 안정화시킨다(Fig. 6).

(4) STEP 4 : 침목 측면 자갈 설치

침목 측면의 자갈 입자를 STEP 1과 동일한 방법으로 준비하고 자유 낙하시켜 안정화시킨다. 이 때, 침목은 STEP 3과 같이 수직 방향 압력을 가한 상태였다(Fig. 7).

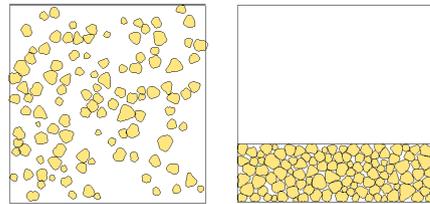


Fig. 4. Initial (left) and the final state (right) of STEP 1

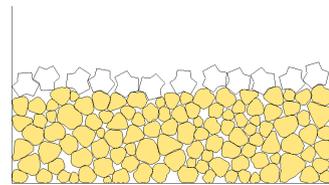


Fig. 5. Generation of artificial ballast layer of STEP 2

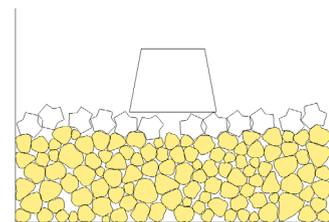


Fig. 6. Sleeper installation of STEP 3

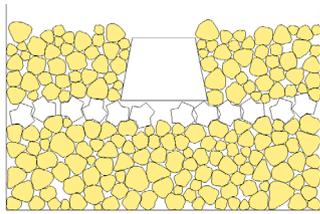


Fig. 7. Side ballast grain installation of STEP 4

최종적으로 마찰이 없는 토조 벽면을 마찰이 있는 토조(마찰 계수는 입자와 입자사이와 같이 0.5)로 변경한다. Fig. 8은 해석에 사용한 완성된 모델을 보여준다. Type O는 인공자갈을 부설하지 않은 천연자갈만을 사용한 모델명이다. 인공자갈 형상별로 모델명은 Type A(정사각형), Type B(테트라포드형), Type C(육각형)으로 표기하였다.

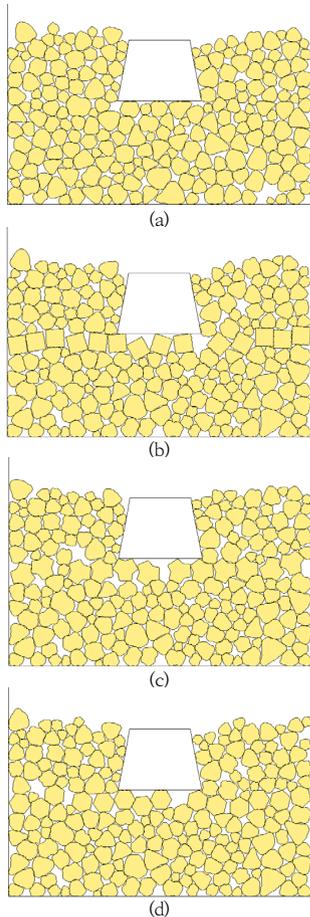


Fig. 8. Initial configurations of the models in this study (a) Without artificial ballast grain (type O) (b) With type A artificial grains (c) With type B artificial grains (d) With type C artificial grains

3. 재하시험 결과 분석

반복 동재하시험을 수행하기에 앞서, 우선 도상자갈층의 기본 지지력 특성을 파악하기 위하여 침묵에 의한 연직 일방향 재하시험에 의한 시물레이션을 수행하고 그 결과를 분석하였다. Fig. 9는 Type O(인공자갈이 없는 경우)에 대한 일방향 재하시험으로, 침묵에 작용하는 연직하중의 시각이력을 보여준다. 침묵의 재하속도는 1.0 cm/s이며, 10초 동안 10 cm의 연직변위를 가하였다. 최초에 발견되는 최대하중은 15 kN 수준으로, 도상자갈 입자의 전단에 의한 활동이 발생하면서 하중이 급격하게 감소하고 있다. 이와 같은 간헐적인 활동 현상은 재하시간 10초 동안 3차례 발생하였으며, 점점 그 최대강도가 상승하였다. 이와 같은 점착과 활동(Stick & Slip)의 반복거동은 마찰성 입상체의 주요한 특징이다.

Fig. 10은 재하 각 단계에서의 도상층의 변형 형상과 접촉력 분포를 보여준다. 1차 최대강도 부근인 (Fig. 10(b), $t = 2.5$ s)에서는 침묵 직하에서 매우 큰 접촉력이 연결되는 힘의 연결구조(force chain)가 보여지며, 이 영역의 입자만으로 상재하중을 지지하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 10(c) ($t = 3.25$ s)는 입자간 미끄러지는 활동 직 후로 힘의 연결구조(force chain)의 붕괴와 입자의 재배열에 의하여 Fig. 10(b)와 비교할 때 힘의 전달 경로가 크게 달라진 것을 알 수 있다.

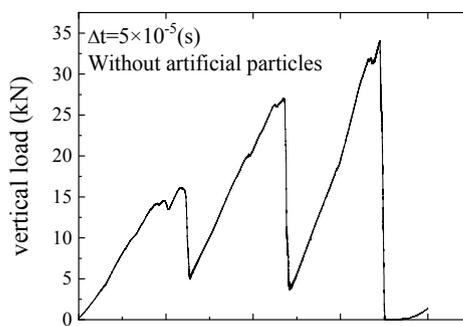


Fig. 9. Time history of vertical load acting on the sleeper under monotonic loading of Type O (without artificial grains) model

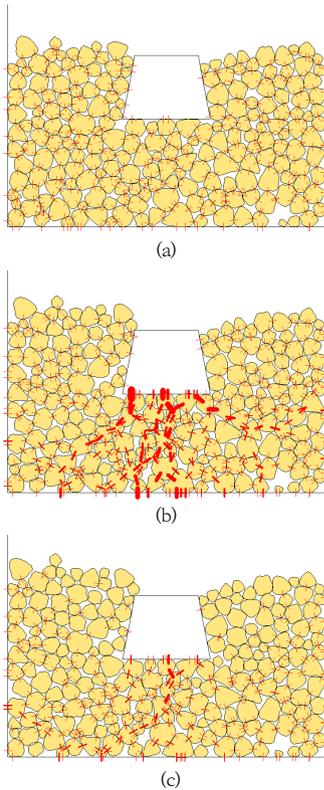


Fig. 10. Evolution of the configuration and contact forces under monotonic loading in Type O model (a) Initial state (b) Just before the 1st peak ($t=2.5s$) (c) Right after the 1st sliding ($t=3.25s$)

Fig. 11에서는 Type A, B, C 재하시험에서의 연직 하중에 대한 시각이력을 보여준다. Type A와 Type C 는 1차 최대하중이 25 ~ 30 kN 수준으로, Type O보다 크게 나타났다. Type B는 18 kN정도로 Type O와 비슷한 수준을 보였다. Fig. 12는 각각의 1차 최대하중 발생시점에서의 입자 배치와 힘의 연결구조(force chain)에 대한 양상을 보여주고 있다. 최대하중을 발현하고 있는 Type A와 Type C에서는 보다 집중된 힘의 연결구조(force chain)가 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.

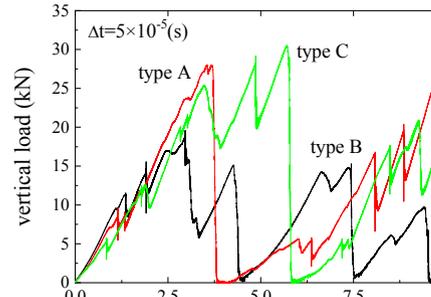


Fig. 11. Time history of vertical load under monotonic loading of type A, B and C models

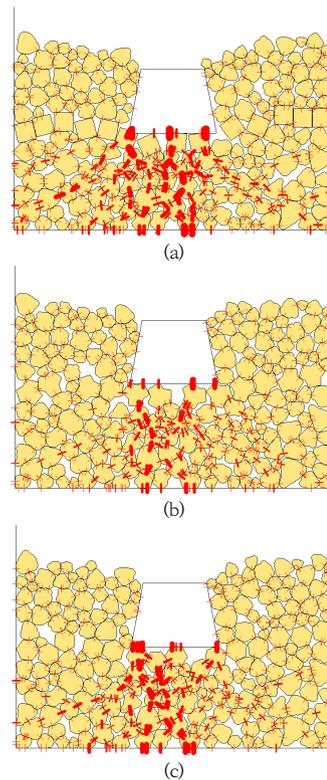


Fig. 12. Grain configuration and force chains near the first peak (a) type A ($t = 3.75 s$) (b) type B ($t = 2.5 s$) (c) type C ($t = 3.35 s$)

4. 결론

3종류의 특정 형상 인공자갈을 혼합한 도상자갈층과 침목을 2차원 개별요소법을 활용하여 단계별로 모델링하였다. 침목에 의한 연직 일방향 하중 재하시험을 실시하고 도상자갈층에서의 지지성능과 응력 전달 메커니즘에

대하여 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 도상층의 변형 형상과 접촉력 분포로부터, 1차 최대강도에서 침목 직하에서 매우 큰 접촉력이 연결되는 힘의 연결구조(force chain)를 보였으며, 연결구조가 발현된 영역의 입자만으로 상재하중을 지지하는 것을 확인할 수 있었다. 최대하중 직 후 입자간 미끄러짐 활동으로 힘의 연결구조가 붕괴되며, 입자의 재배열에 의해 힘의 전달경로가 크게 달라지는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 연직재하시험을 통한 도상층에서의 지지성능은 Type A(정사각형)와 Type C(육각형)에서 25~30 kN으로 크게 나타났고, Type B(테트라포드형)와 Type O(천연자갈)는 15~18 kN 수준으로 낮았다. 이로부터 연직하중 지지력 측면에서 형상에 기인한 힘의 연결구조 변화가 발생하고 있으며, 큰 지지하중이 발현하는 Type A와 Type C에서 보다 집중된 힘의 연결구조가 발현되는 것을 알 수 있었다.

본 해석을 기초로 제작한 인공자갈을 활용한 충격하중 재하시험을 실시 중에 있으며, 동 결과에 기초하여 자갈 궤도에서의 성능확인을 위한 실험시험 및 현장 부설계획을 준비 중에 있다.

References

- [1] 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.
- [2] D. S. Kim, S. H. Lee, S. H. Lee, S. B. Lee, "Study on the stresses distribution of ballast bed using DEM (Discrete Element Method) Analysis", *Autumn Conference of The Korean Society for Railway*, pp.56-61, 2005.
- [3] P. A. Cundall, "A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems", In: *Proceedings of the Symposium of International Society of Rock Mechanics*, vol. 1, Nancy: France: 1971.
- [4] Japanese Society of Civil Engineers, Ground analysis technology (Discrete Element method) Training, pp.175-176, JSCE, 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*, 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