

QDEM-FEM によるバラスト軌道の振動特性と沈下挙動の解析

海洋研究開発機構	正会員	○西浦 泰介
鉄道総合技術研究所	正会員	相川 明
鉄道総合技術研究所	正会員	坂井 宏隆
海洋研究開発機構	正会員	阪口 秀

1. 目的

本研究では、粘弾性変形する多粒子群の運動を計算可能な Quadruple Discrete Element Method (QDEM) [1] と Finite Element Method (FEM) を用いて、バラスト軌道の沈下メカニズムを明らかにすることを目的とする。バラスト軌道は、列車からの繰り返し衝撃荷重によってバラスト層が沈下するため、定期的にバラストの交換などのメンテナンスが必要である。そのため、メンテナンスコストを低減するために、バラスト軌道劣化に対する種々の対策工や保守工法、軌道構造の最適化を実現するために、バラスト軌道の沈下メカニズムを明らかにすることが重要である。しかし、これまで実験観測や数値計算によってバラスト粒子群の振動や沈下挙動を調べるのが難しかったため、バラスト軌道の振動特性と沈下挙動の関係を明らかにした研究例は無い。

2. 解析手法

粒状体の運動を計算する通常の Discrete Element Method (DEM) では、常に隣接 2 粒子間での相互作用力をモデル化するのに対し、ここで用いる QDEM は隣接 4 粒子間で生じる粘弾性応力テンソルを連続体力学に準じて算出して、その応力テンソルから 4 粒子に働く力を求める。そのため QDEM の利点は、実際の材料特性をモデル中にそのまま用いることができ、物体の変形や振動特性を再現できることである。また、物体間に接触力を考慮して個々の物体を QDEM で計算することによって、DEM と同様に多体運動の解析が可能である。さらに、構成式を四面体要素単位で陽的に解くため並列計算効率が良く、本研究では Graphics Processing Unit (GPU) を用いて QDEM を並列化し計算の高速化を図った。なお本手法は、これまでに片持ち梁試験を行い、FEM や解析解との比較を行った結果、FEM の一次要素計算と同等の計算精度が有ることを確認している [2]。

本研究では、列車の走行によって発生するレールからまくらぎへの入力変位を FEM によって計算し [3]、バラストとまくらぎの運動を QDEM で計算することによって、バラスト軌道の振動特性と沈下挙動を解析した。まず、FEM を用いて、車輪とレール間の接触回転機構を考慮した計算を行い、レールとまくらぎの連結部分であるレールパットにおける変位を求める。なおここでは、車輪は一定のトルクによって進行方向に加速状態にある。つぎに、個々のバラスト粒子とまくらぎに対して四面体要素分割を行い QDEM でモデル化し、まくらぎに FEM で計算した変位を入力する。この時、個々のバラスト粒子形状はランダムに設定し、重力落下させてバラスト粒子層をモデル化した。さらに、バラスト粒子間およびバラストとまくらぎ間の接触力は DEM の接触ロジックを用いて計算した。ここでは、まくらぎ 4 本分の領域を計算対象として、列車走行によって発生するまくらぎおよびバラストの 3 次元的な挙動を調べ、バラスト軌道の沈下メカニズムを検討した。

3. 結果

図 1 にまくらぎとバラストの変位を示す。列車は X 方向下向きに走行しており、車輪の通過によってまくらぎがたわみ、まくらぎ中央下部分のバラストが特に大きく動いている様子が伺える。ここで、X 方向手前から 2 本目のまくらぎ中央鉛直断面における変位を図 2 に示す。まくらぎが一次モードで振動することによって、振幅が大きいまくらぎ中央部分ではバラストの沈下が大きくなり、またまくらぎ端付近のバラスト粒子はまくらぎの中央方向に向かって動いていることが分かる。一方、水平方向のバラスト層の挙動については、図 3 に示す様に、まくらぎ直下とまくらぎ間に存在するバラスト粒子では異なる動きをしていることが確認できる。

キーワード QDEM, DEM, シミュレーション, バラスト軌道, 沈下, 振動

連絡先 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25 (国研) 海洋研究開発機構 TEL045-778-5960

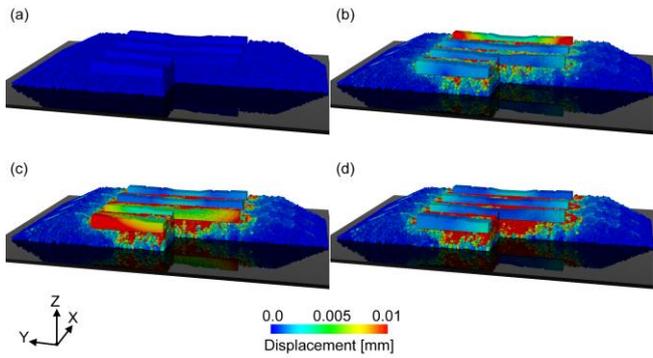


図1 車輪通過時のバラスト軌道の変位。
(a) $t=0.0s$, (b) $t=0.1s$, (c) $t=0.2s$, (d) $t=0.3s$

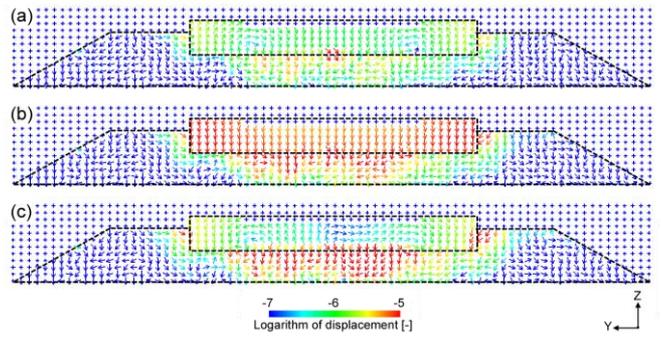


図2 バラスト軌道鉛直断面における変位分布。
(a) $t=0.1s$, (b) $t=0.2s$, (c) $t=0.3s$

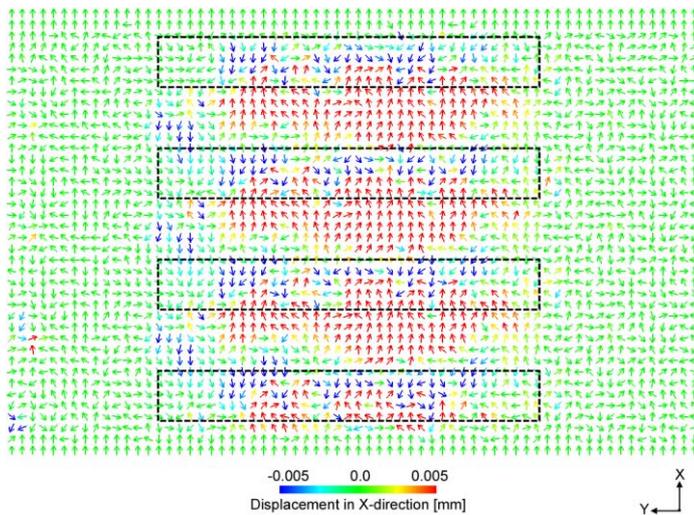


図3 車輪通過時 ($t=0.3s$) のバラスト層水平断面
(まくらぎ底面から10cm下)における積算変位分布

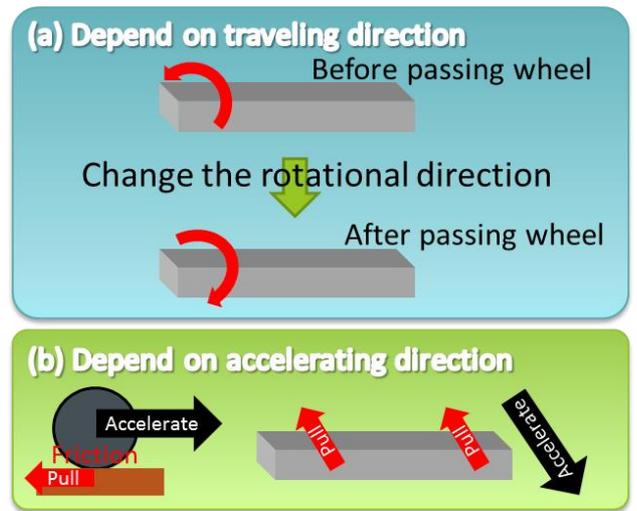


図4 (a)列車の走行方向と(b)加速方向に
依存したバラスト層の水平移動メカニズム

まず、まくらぎ直下のバラスト粒子は、まくらぎの半分を境に X 方向の変位方向が逆転しており、図 4 (a) に示す様に車輪通過前後でまくらぎの剛体回転方向が変わることが大きく影響していると考えられる。一方、まくらぎ間に存在するバラスト粒子は、図 4 (b) に示す様に車輪の加速方向と反対側にまくらぎが引っ張られることによって、バラスト層が動いているものと考えられる。

4. 結論

QDEM と FEM の連成によるバラスト軌道の解析手法を開発し、バラスト層の 3 次元挙動に対する列車の走行方向や加速方向の影響を数値計算により初めて明らかにした。さらに、そのバラスト挙動には、まくらぎの振動特性や剛体回転運動が大きく影響していることも分かった。今後、より詳細にバラスト軌道の沈下メカニズムを明らかにし、本手法によってメンテナンスコストの低減に向けた有益な情報が得られることが期待される。

参考文献

[1] D. Nishiura, Akira Aikawa, Hide Sakaguchi, “Development of Viscoelastic Multi-Body Simulation and Impact Response Analysis of a Ballasted Railway Track under Cyclic Loading”, Materials, 10, 615 (2017)
 [2] D. Nishiura, Hirotaka Sakai, Akira Aikawa, Satori Tsuzuki, Hide Sakaguchi, “Novel discrete element modeling coupled with finite element method for investigating ballasted railway track dynamics” Computers and Geotechnics, (In Press)
 [3] H. Sakai, M. Takagaki, M. Hayashi, A. Aikawa, “Analysis of rolling contact behavior between wheel and rail through large-scale parallel computing”, Quarterly Report of RTRI, 55, 171-175 (2014)