

離散体モデルを用いた道床バラスト層の変形挙動解析

河野 昭子* 松島 亘志**

Simulation of Ballasted Layer Deformation Using Discrete Element Model

Akiko KONO Takashi MATSUSHIMA

Discrete Element Model is applied to simulating deformations of granular assemblage under various boundary conditions. This paper shows two latest ones of discrete ballasted track models; one is ‘rail-joint model’ which has three sleepers consisting of one wooden sleeper and two ‘PC3’, with the spans at the actual rail-joint, and the other is a ‘cant model’ which has a sleeper, ‘PC3’, with 75mm of cant. The simulation results using ‘rail-joint model’ indicate that the impulse caused by vertical difference between jointed rails affects the residual settlement of ballasted layer. Another simulation results using ‘cant model’ indicate that the direction of loadings according to the running speed affects the motions of ballast grains.

キーワード：バラスト軌道，離散体モデル，個別要素法，レール継目部，カント

1. はじめに

鉄道の技術開発においては、現地測定による鉄道現場の実態把握や、実験による個別要因の影響度の定量的把握が最重要であるが、試験装置で再現できる現象は限定されるうえ、現行技術では測定が困難な事象もある。

他方、近年では、コンピュータ処理能力の向上に伴い、鉄道工学分野においても計算モデルの構築や解析的検討が行われている。軌道技術分野においても様々な計算モデルが活用されているが、粗い碎石層である道床バラスト層については、バラスト碎石単位でモデル化する‘離散体モデル’が国内外で採用されつつある^{1) 2) 3)}。

鉄道総研においても、バラスト軌道の離散体モデルに関する研究が行われており^{4) 5) 6)}、個別要素法（以下、DEM）を用いた筆者らの基本モデルについては、既報⁷⁾で報告している。その後、より現場の条件を考慮したモデルを作成し、解析的検討を行ったので、ここでは、そのうちの2件の事例を報告する。

2. モデルの共通条件

ここで報告する離散体バラスト軌道モデルを構成するバラスト要素は、いずれも実際のバラスト碎石の3次元形状を元に‘動的最適化法’⁸⁾を用いて、球の集合体でモデル化している。球の数は多い方がバラスト碎石の実形状に近づくが、計算負荷を考慮し、ここでは1つのバラスト要素は10個の球でモデル化している。

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

** 筑波大学大学院 システム情報系

表1にDEMパラメータを示す。パラメータの根拠については、既報⁷⁾で述べた通りである。

DEMシミュレーションにおいては、筑波大学が開発した球剛接個別要素法コード‘DEM-CS’を鉄道総研が一部改良した‘DEMCS-track’を用いた。

3. 普通継目部モデル

3.1 モデル概要

図1に普通継目部を想定した離散体バラスト軌道モデルを示す。このモデルでは、継目部直下の大判木まくらぎと隣接するPC3号まくらぎ2本を配置し、まくらぎ

表1 モデル共通のDEMパラメータ

		まくらぎ要素	バラスト要素	路盤要素
粒子間ばね係数 (N/m)	Kn	9.09×10^6		6.00×10^4
	Ks	2.27×10^6		2.31×10^4
粒子間減衰係数 (N・s/m)	Cn	608		104.7
	Cs	304		65
粒子間摩擦角	μ	20度	36度	20度

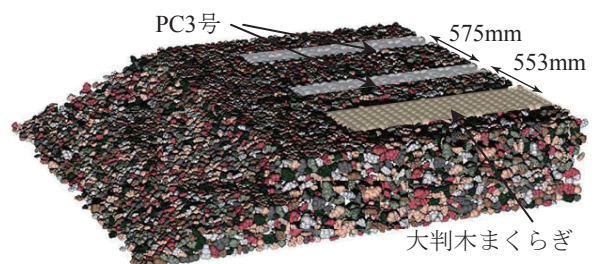


図1 離散体バラスト軌道「継目部モデル」

特集：鉄道力学

間隔は大判木まくらぎ中心から順に、553mm, 575mm とした。道床厚はPC3号まくらぎ下部で200mm, 大判木まくらぎ下部で234mmである。計算負荷を考慮し、半軌道モデルとした。

3.2 解析条件と入力荷重

表2に本解析で設定した継目部諸元および対策工法の条件を示す。

表2に示す各条件を反映した入力荷重波形より、条件⑤⑦⑨の3ケースの波形を図2に示す。この入力荷重波形は、レール継目部動的応答モデル⁹⁾に表2に示す継目部諸元および対策工法の条件を入力して得られたレール圧力（レール底面からまくらぎへ伝達する荷重）波形である。図2のa)は継目部直下の大判木まくらぎ、b)は隣接する1本目のPC3号まくらぎ、c)は隣接する2本目のPC3号まくらぎへの入力荷重波形である。

3.3 入力荷重と道床沈下の関係

図2に示した3ケースの荷重波形を入力したDEMシミュレーション結果より、まくらぎ変位波形を図3に示

す。図より、まくらぎ変位のピーク値は、入力荷重のピーク値が大きいほど増加し、それに伴い残留沈下量（図中赤矢印部分）も増加する傾向が明らかである。

表2に示す①～⑨の9ケースのDEMシミュレーション結果より、3本の各まくらぎへの入力荷重の最大値と

表2 継目部諸元および対策工法条件

	遊間 mm	継目落ち mm	段差 mm	対策工法
①	12	0.0	0	なし
②	12	1.0	0	なし
③	12	1.5	0	なし
④	12	2.0	0	なし
⑤	12	2.5	0	なし
⑥	12	2.5	0.5	なし
⑦	12	2.5	1.0	なし
⑧	12	2.5	1.5	なし
⑨	12	2.5	2.0	なし
⑩	12	2.5	2.0	継目まくらぎで軌道パッド低ばね化
⑪	12	2.5	2.0	継目まくらぎで軌道パッド低ばね化 とまくらぎ下弾性化
⑫	12	2.5	2.0	継目まくらぎと隣接まくらぎ1本で 軌道パッド低ばね化

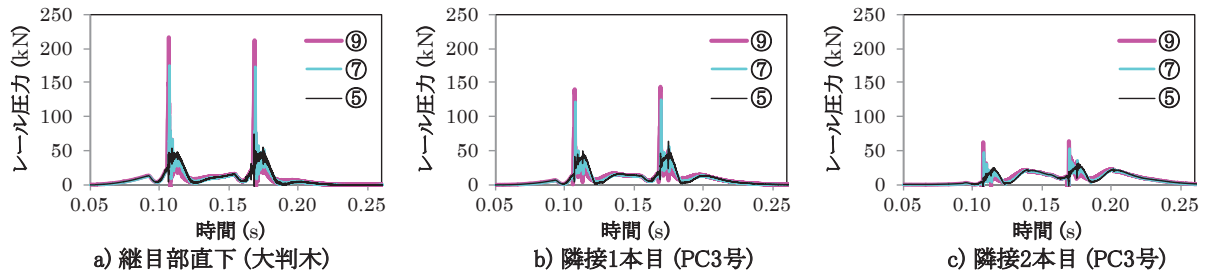


図2 入力荷重波形例

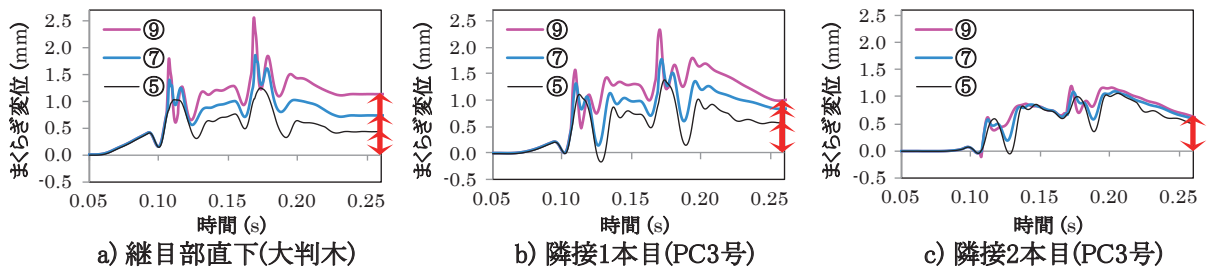


図3 まくらぎ変位波形例 (DEMシミュレーション結果)

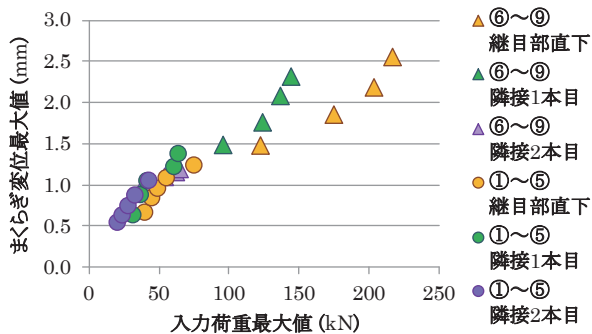


図4 入力荷重最大値とまくらぎ変位最大値の関係

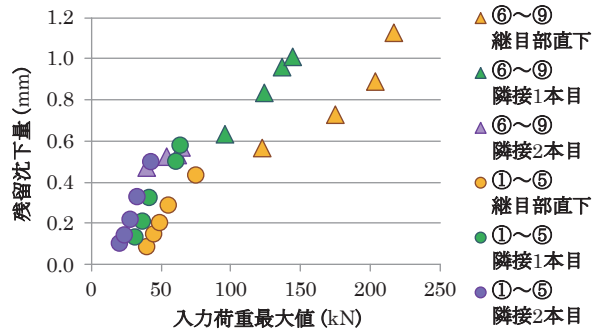


図5 入力荷重最大値と残留沈下量の関係

まくらぎ変位の最大値の関係を図4に、同様に入力荷重波形の最大値と残留沈下量の関係を図5に示す。

図4と図5より、まくらぎ変位最大値も残留沈下量も入力荷重最大値と強い相関性を示し、図中27点のデータにおける相関係数は、図4のまくらぎ変位最大値で0.95、図5の残留沈下量で0.88と高い値を示す。これは、従来の弾性連続体モデルにおける荷重-変位関係と合致する。

ただし、図中で記号を分類した、まくらぎ位置および継目諸元ごとに見ると、継目部直下の大判木まくらぎでは、入力荷重最大値とまくらぎ変位最大値および残留沈下量の関係が、「段差アリ」と「段差ナシ」では明らかに異なる。つまり、道床バラスト層の変形においては、入力荷重の大小だけではなく、複雑な荷重履歴の影響を受けることが明らかで、こうした現象を直接再現できるのは離散体モデルならではの強みである。

3.4 対策工法施工後の道床内部の観察

表2に示す⑨～⑫の4ケースのDEMシミュレーション結果より、各まくらぎの残留沈下量を図6に示す。

図より、継目部直下のみ軌道パッドを低ばね化した⑩と、これに加えてまくらぎ下を弾性化した⑪の場合、継目部直下の残留沈下量は減少するが、隣接する前方1本目のまくらぎでは、⑩ではほとんど減少せず、⑪では逆に増加する。他方、継目部直下と隣接するまくらぎで軌道パッドを低ばね化した⑫では、継目部直下だけでなく隣接する1本目のまくらぎでも残留沈下量が減少する。

ここで図6に示す⑨⑪⑫（表2参照）における道床バラスト層内部の前軸通過時の粒子間接触力の分布を図7に示す。図より、無対策の条件⑨では、継目部を前軸が通過する瞬間に、継目部直下で粒子間接触力が500Nを超える点が多く集中するが、軌道パッド低ばね化とまくらぎ下弾性化を行った条件⑪では、継目部直下で粒子間接触力が500Nを超える点は著しく減少する。他方、継目部と隣接する1本目のまくらぎで軌道パッドを低ばね

化した条件⑫では、継目部直下および隣接する1本目のまくらぎいずれにおいても、粒子間接触力が500Nを超える点は減少する。

次に図8に、条件⑪⑫における一台車通過前後のバラスト各要素の位置の変化を矢印で示す。図より、条件⑪では、継目部に隣接する前方1本目のまくらぎの底部左

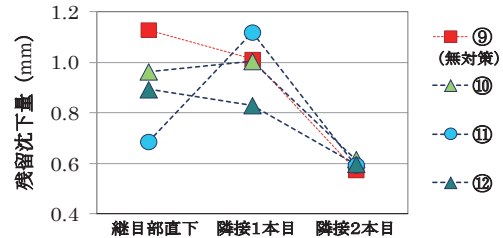


図6 対策工法による残留沈下量の変化

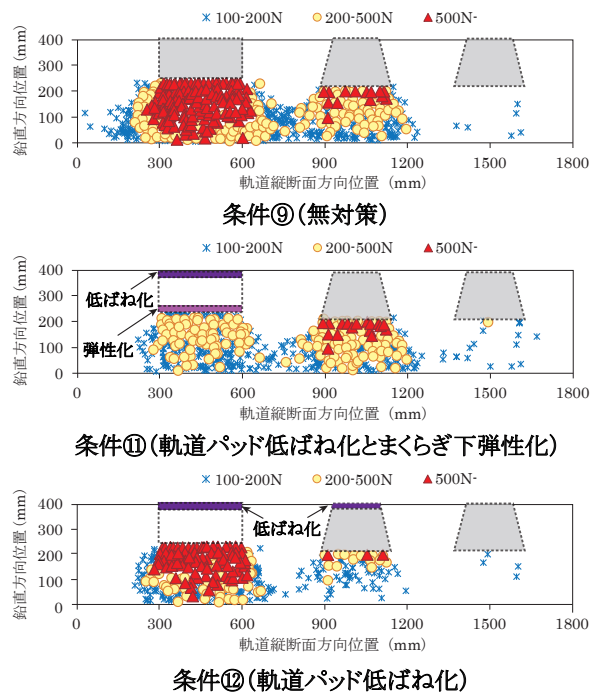


図7 前軸通過時の粒子間接触力分布

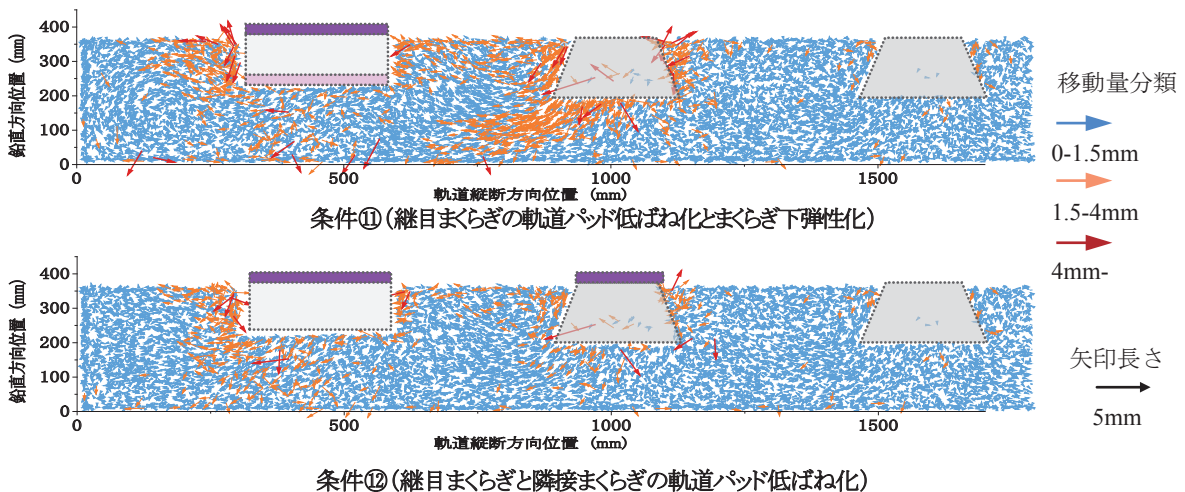


図8 一台車通過前後のバラストの挙動

特集：鉄道力学

端において、バラストが側方方向に流れる挙動が、⑫と比較して顕著であり、図6に示された傾向と合致する。

つまり、軌道弾性化などの対策工法を施した場合、当該まくらぎに隣接するまくらぎの荷重分担率も変化し、これに伴いまくらぎを支持する道床バラスト層内部のバラスト碎石の動きも変化することが確認された。

4. 在来線カント付軌道モデル

4.1 モデル概要

図9に曲線部を想定したカント付の離散体バラスト軌道モデルを示す。カントは75mm，まくらぎはPC3号まくらぎである。また、まくらぎ両側から境界面までの距離は、まくらぎ底部側面から200mmとしている。

4.2 解析条件と入力荷重

図10に、3通りの列車走行速度を想定した入力荷重方向を示す。条件は3通りで、走行速度73km/hで均衡速度の場合（荷重方向はまくらぎ面に垂直）、走行速度100km/hでカント不足の場合、走行速度50km/hでカント超過の場合を想定している。

荷重は最小1kN，最大60kN，周波数10Hzの正弦波とした。実際には外力の最大荷重と周波数も走行速度によって変化するが、ここでは荷重の作用方向の違いによる影響を観察するため、荷重と周波数は統一した。

4.3 荷重作用方向とまくらぎ変位の関係

図11に、正弦波載荷1波目と5波目のまくらぎ要素

の変位履歴（軌道横断面）を示す。図(a)がカント不足、(b)均衡速度、(c)カント超過の場合の結果である。いずれも原点がまくらぎ要素の初期位置である。

まず図11(a)のカント不足の場合、1波目では載荷過程で外軌側下方へ移動した後、除荷過程で元の方向へ戻り、残留変位は約0.4mmとなっている。5波目でも載荷・除荷過程で同様の動きを見せるが、5波目の残留変位は約0.15mmと減少する。

次に図11(b)の均衡速度の場合、1波目では載荷過程で内軌側下方に移動した後、外軌側下方へ移動し、除荷後の残留変位は約0.15mmとなっている。5波目でも載荷・除荷過程で同様の動きを見せ、5波目の残留変位は約0.13mmと若干減少する。

更に図11(c)のカント超過の場合、1波目では載荷過程で内軌側下方に移動した後、ほぼ鉛直下方に移動し、除荷後の残留変位は約0.25mmとなっている。5波目でも載荷・除荷過程で同様の動きを見せ、残留変位は約0.25mmで1波目と同程度となっている。

荷重作用方向の3条件を比較すると、正弦波荷重1波目における変位振幅も、また初期から5波目までの残留変位も、(b)の均衡速度の場合に最も小さく、カント不足の条件下において最も大きな値を示している。

4.4 荷重作用方向とまくらぎ回転の関係

図12に、正弦波1波目と5波目のまくらぎ回転角度（初期方向に対する角度で、反時計周りを正）を示す。図中実線が載荷1波目、点線が載荷5波目の結果である。

図より、いずれの条件でも、載荷1波目に外軌側が下

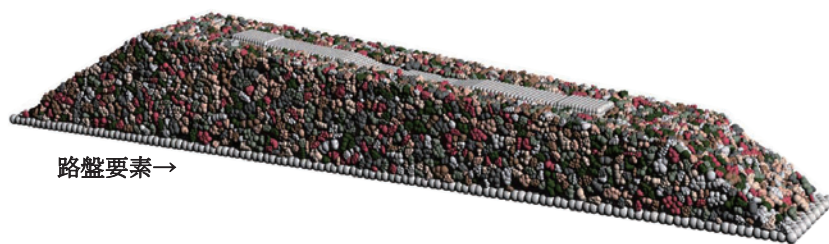


図9 離散体バラスト軌道「カント付モデル」

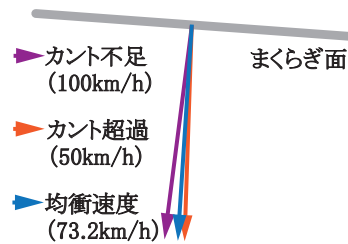


図10 入力荷重の作用方向

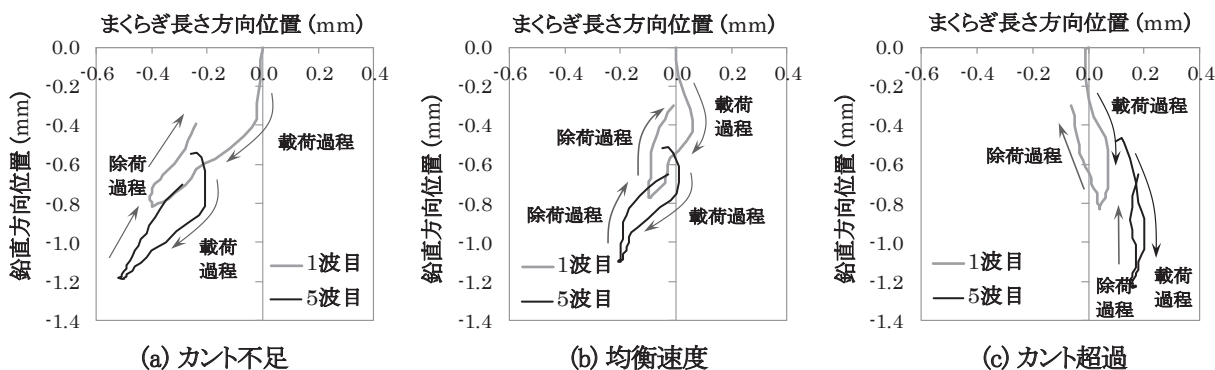


図11 まくらぎ変位（1波目，5波目）

に傾く形でまくらぎが約 0.07 度回転し、除荷過程ではほとんど戻らない。また、載荷 5 波目開始時には、回転角度は 0.1 度程度で、載荷・除荷過程での変動は 0.03 度程度である。ここで、まくらぎ長さを考慮すると、0.1 度の回転により、外軌側端部は内軌側端部に対して約 3.5mm 下降することになり、この挙動がバラスト要素の挙動と関連することが考えられる。

4.5 荷重作用方向とバラスト挙動の関係

図 13 に、バラスト要素の初期位置と正弦波 10 波載荷後のバラスト位置を矢印で示す。図 (a) がカント不足、図 (b) がカント超過を想定した荷重方向条件の結果である。いずれも矢印の始点が初期位置、終点は 10 波載荷後の位置方向を示し、矢印の長さは 10 倍に拡大している。

まず図 13 (a) のカント不足の場合、まくらぎ中心から外軌側のバラスト要素で移動距離が長い傾向が見られる。特に道床上層部のバラスト要素の外軌側下方への動きと、まくらぎ端部（外軌側）のバラスト要素の鉛直下方への動きが顕著である。

図 13 (b) のカント超過の場合、バラスト要素の挙動は全体的に図 13 (a) と同様であるが、まくらぎ中心から外軌側のバラスト要素の動きは、図 13 (a) よりも若干小さく、まくらぎ中心付近でまくらぎ直下のバラスト要素

が内軌側下方へ移動している。また、内軌側の道床肩部分で、バラスト要素の移動距離が若干長くなっている。

カント付軌道においては、外軌側端部の道床厚さは内軌側端部より約 140mm 厚く、バラスト碎石の平均粒径の約 33mm で単純に割っても、4 個ほど多く積み重なることとなる。これにより、カント付軌道のまくらぎ下では、外軌側のバラスト要素が内軌側に比較して移動しやすい傾向が確認された。

次に図 14 に示す、まくらぎ底面付近のバラスト要素 160 個を抽出し、載荷 1 波目に各要素に働く荷重の最大値と各要素の変位振幅を図 15 に示す。図 (a) はカント不足、図 (b) はカント超過の場合をそれぞれ示す。

図 15 (a) より、カント不足の条件下では、全体的にまくらぎ下外軌側のバラスト要素の変位振幅が大きい傾

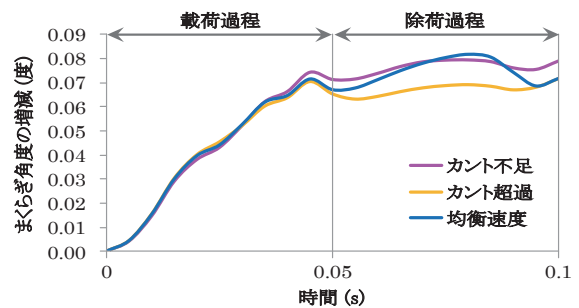


図 12 まくらぎの回転角度（反時計周りが正）

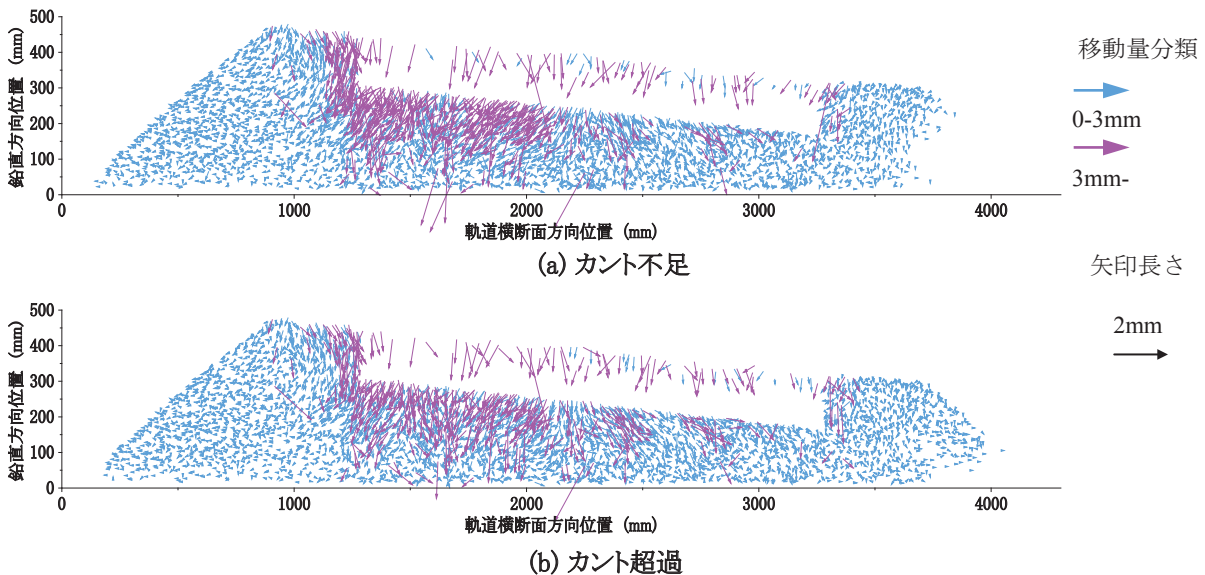


図 13 バラスト要素の初期から正弦波載荷 10 波後の位置変化

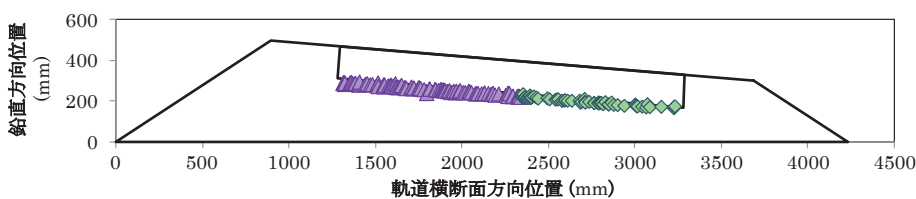


図 14 抽出したバラスト要素の位置

特集：鉄道力学

向を示し、特に変位振幅が 1mm 前後のバラスト要素では、縦軸の最大荷重値は小さいことから、荷重を十分支持する前に、移動していることがわかる。

また図 15 (b) より、カント超過の条件下では、全体的にまくらぎ下外軌側でバラスト要素の変位振幅が大きい傾向を示すが、カント不足条件ほど明瞭ではない。

加えて図 16 に、上記の 160 個の要素について、バラスト要素移動方向ごとに、各要素の移動距離の合計値を算出した結果を示す。均衡速度の方向（鉛直下向きから外軌側へ約 4 度）を基準とし、外軌側が+、内軌側が-の値としている。

図より、カント不足条件においては均衡速度方向に対して外軌側へ 15 ～ 60 度の移動方向となるバラスト要素の移動距離合計値が、カント超過条件に比較して著しく大きい傾向が見られる。全体的に見ても、カント超過の場合では、均衡速度の方向より内軌側への要素の移動が顕著となっている。

以上より、カント付軌道では、荷重作用方向によってバラスト要素の挙動が異なるが、外軌側のまくらぎ下バラスト要素が動きやすい傾向は、全ての荷重作用方向条件で共通していた。

5. おわりに

鉄道総研と筑波大学の共同研究で開発した、離散体バラスト軌道モデルを用いた DEM シミュレーションの解析事例を報告した。DEM は、地盤工学分野における活用実績が急増している¹⁰⁾が、鉄道技術分野においては、未だ活用実績は少ない。

よって今後は、解析モデルおよびコードの改良を進めると同時に、様々な境界条件における実験との比較を行っていきたい。

文 献

- 1) G.Saussine, C.Cholet et.al : Modelling Ballast Behaviour under Cyclic Loading Using Discrete Element Method, Proc. of 'Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena', Balkema, pp649-658, 2004.
- 2) M.Lu, G.R.McDowell .1998. The Importance of modeling ballast particle shape in the discrete element method. Granular Matter 9, 69-80.
- 3) E.Tutumluer et.al : AREMA Gradations Affecting Ballast Performance Using Discrete Element Modeling (DEM) Approach, Proc. of 'the AREMA 2009 Annual Conference', 2009.
- 4) 石川達也, 堀池高広 : 不連続体解析手法を用いたバラスト道床の変形挙動の検討, 鉄道総研報告, Vol.16, No.4,

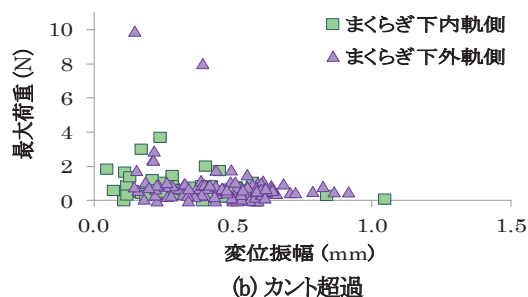
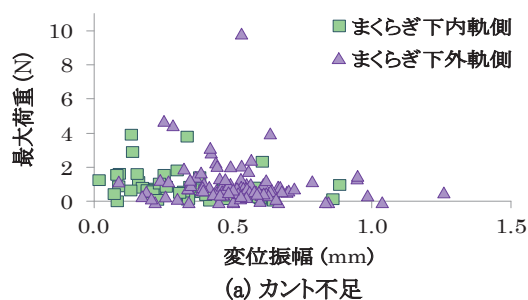


図 15 まくらぎ下のバラスト要素の荷重変位関係

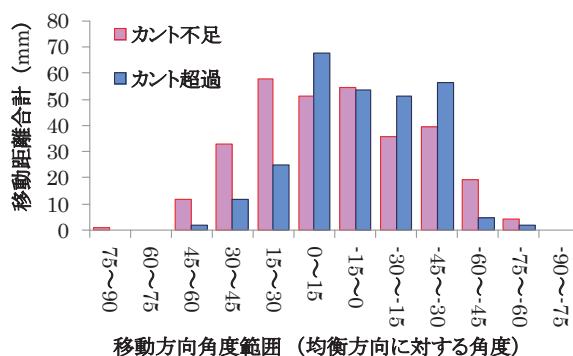


図 16 移動方向ごとの移動距離の全体合計値

pp.17-22, 2002

- 5) 浦川文寛, 相川明 : 三次元個別要素法によるバラスト軌道の動的応答解析, 鉄道総研報告, Vol.23, No.2, pp.11-16, 2009
- 6) 河野昭子, 松島亘志 : 普通継目部周辺のバラスト粒子間接触力に関する解析的検討, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.16, pp.29-36, 2012
- 7) 河野昭子, 松島亘志 : 繰返し衝撃荷重下の道床バラスト層の動的挙動と沈下特性, 鉄道総研報告, Vol.24, No.12, pp.47-52, 2010
- 8) 松島亘志, 竿本英貴 : 複雑な砂粒子形状の個別要素モデル化手法の提案, 第 37 回地盤工学会発表論文集, pp.357-358, 2002 年 7 月
- 9) 鈴木貴洋, 石田誠, 阿部和久, 紅露一寛 : レール継目部で生じる輪重変動に関する一考察, 鉄道力学論文集, No.8, pp.35-40, 2004
- 10) C.O'Sullivan : Advancing geomechanics using DEM, Geomechanics from Micro to Macro, CRC Press, pp21-32, 2014.