

バラスト軌道のマイクロメカニクスに着目した解析手法の改良

河野 昭子*

Improvement of Numerical Method Focusing on Micro Mechanics of Ballasted Track

Akiko KONO

Numerical simulation by DEM have been adopted as analysis methods for focusing on micromechanics of ballasted tracks. However, DEM simulation has issues of low quantitative accuracy because DEM models are subjected to be simplified to reduce a computational load. Therefore, DEM code was parallelized by using Open MP to decrease computing time that contribute to improve quantitative accuracy by using more precise models. Then the author validates simulation results by comparing with measured data from real railway lines.

キーワード：バラスト軌道，道床沈下，離散体モデル，個別要素法，V&V

1. はじめに

材料の微視構造に着目するマイクロメカニクスは、金属材料の研究分野¹⁾が始まりと言われているが、その後、土や砂で構成される地盤材料の研究にも適用されてきた²⁾。これは、巨視的には一つの弾塑性体である連続体を、粒子と空隙から構成される粒子集合体として扱うもので、実験分野では例えばPIV³⁾などの可視化手法が、解析分野では例えばDEM⁴⁾などの離散体モデル化手法が用いられてきた。その後、微視的観察により得られた情報から構成則を導きマクロな連続体モデルに取り入れる「ミクロからマクロへ」の観点での研究も進められてきた⁵⁾。

他方、バラスト軌道の道床バラスト層の変形挙動や劣化現象の観察や予測においても、微視構造つまりバラスト碎石の個々の物性や挙動に着目した測定手法、解析手法が開発され、用いられてきた。例えばレール継目部の道床沈下急進箇所において、衝撃荷重下の道床振動と道床沈下の関連性を検証するために、バラスト碎石サイズの加速度計を用いて、列車通過時の道床振動加速度の測定が行われている⁶⁾。

また解析分野ではバラスト軌道の離散体モデルが開発され、カント区間の道床流動や道床更換後の初期沈下を抑制する工法を検討する上で、DEMシミュレーションが行われている^{7) 8)}。ただし、DEMシミュレーションにおいては、連続体モデルの解析と比較して計算負荷が著しく高いというデメリットがあった。また計算負荷低減のために解析モデルの粒子形状の精度を下げることで、道床バラスト層のマクロな残留変位である道床沈下の値が、実現象と比較して著しく増大する事例があった⁹⁾。

そこで本研究では、DEMプログラムの接触判定のプ

ロセスを改良し、並列化による計算速度の向上を図ると同時に、高速化の効果がトレードオフとまらない範囲で解析モデルを精緻化した。その上で、道床更換後の初期沈下を再現し、実測結果との比較により、精度を確認した。

なおDEMシミュレーションにおいては、筑波大学で開発された“DEM-CS”¹⁰⁾を筑波大学と鉄道総研との共同研究で改良した“DEMCS-track”¹¹⁾を用いてきたが、従来はシングルコアで実施していた。よって“DEMCS-track”を並列計算が可能となるように改良することとした。

2. 解析手法の改良

2.1 並列化による計算速度の向上

個別要素法の計算速度を向上する方法としては、主に①接触判定の領域設定を効率化する、②接触判定と接触力の計算プロセスを並列化する方法が検証されている。

②については、OpenMPを用いた事例が多く見られ、検証のために‘スピードアップ’(逐次計算に要する計算時間を並列計算に要する計算時間で除した値)が示されている。例えば和田らの研究では¹²⁾、OpenMPによる並列計算のスピードアップについて、プログラムの構造や粒子径、計算機の条件による影響を検証している。そして、粒子径を格子の一辺の1/200とした場合、スレッド数16におけるスピードアップが11から14程度となることを示している。また同時に、粒子径を1/400とした場合は、同じくスレッド数16においてスピードアップが9程度まで下がることを示している。

大塚らの研究でも、OpenMPによる高速化を試みているが、スピードアップはスレッド数8における3.08が最大となり、それ以上のスレッド数では若干低下する傾向が示されている¹³⁾。

本研究で用いる“DEMCS-track”は、接触判定の効率

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

化は行われているが¹⁴⁾、シングルコアで計算を行っているため、上述の研究を参考とし、OpenMPによる並列化を試みた。また、スピードアップの程度として、最大10程度を目標とした。

2.1.1 負荷チェック

効率的なスピードアップを図るために、まず、シミュレーション過程における計算時間を測定し、計算負荷の割合を把握した。

バラスト要素約20000個、構成球要素約220000個を用いて実物大軌道の断面を再現した大規模モデル(図1(a)参照)を用いてシミュレーションを行った際の各実行過程における負荷割合を表1に示す。なお表中の「結果出力」とは、粒子位置や接触点の情報出力のことである。これらの情報は膨大となるため、出力ファイルのサイズを抑えるために指定したステップ数毎(概ね10000ステップ毎)に出力する設定としている。そこで、負荷割合の測定においても、結果出力が発生するステップと発生しないステップに分類した。

なお、負荷チェックに用いた解析モデルのDEMパラ

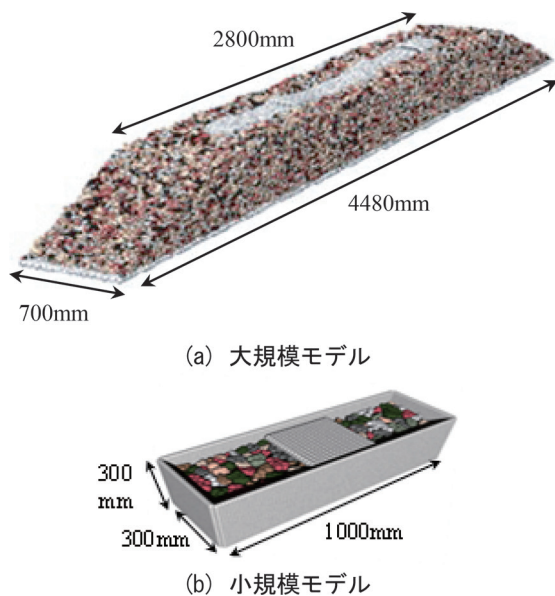


図1 負荷チェックに用いた解析モデル

表1 各実行過程の負荷割合

実行内容		負荷割合 [%]	
		結果出力アリ	結果出力ナシ
構成球同士の接触判定、接触力算出	変数の初期化	5.16	15.48
	所属Boxの登録 接触判定 接触力計算	27.87	83.57
球集合体要素への作用力の加算 並進・回転の算出		0.12	0.95
結果の出力(指定したステップ毎)		66.85	0.00

メータを表2に示す。

表1より、結果出力アリでは、負荷割合は「結果の出力(出力ファイルへの書き込み)」が全体の66.85%を占めるのに対して、結果出力ナシでは、負荷割合は「接触判定、接触力計算」が全体の83.57%を占めている。これより、大規模モデルにおけるシミュレーションでは、計算結果の出力ファイルへの書き出しにも時間を費やすことが明らかであるが、この点についてはbinary形式にすることで時間の短縮が期待できる。また、結果の出力は、通常10000stepに1回程度に設定しているため、計算速度を向上する上では「接触判定、接触力算出」のループを並列化するのが、最も効率的であると判断した。

2.1.2 並列数と計算時間の関係

接触判定と接触力計算のループをOpenMPにより並列化した後、前節で示した「大規模モデル」と合わせて、バラスト要素数が1/10程度の「小規模モデル」(図1(b))において同一シミュレーションを1000step実施し、スレッド数毎の計算時間を測定した。その結果を図2に示す。図中、左軸は大規模モデル、右軸は小規模モデルの値を示す。また、各スレッド数における「スピードアップ」を表3に示す。

ところで並列化においては、通信等によって生じるオーバーヘッドがスレッド数に伴い増加するため、図2においても、計算時間の減少傾向がスレッド数の増加に伴い緩やかになる。ただし、少なくともスレッド数32までは計算時間が減少し、増加に転じる傾向は見られない。

また表3より、大規模モデルの場合、スレッド数1

表2 解析パラメータ

		バラスト要素	まくらぎ要素
粒子間接触ばねのばね係数(N/m)	K_n	9.09×10^6	
	K_s	2.27×10^6	
粒子間ダンパの減衰係数(N·s/m)	C_n	608	
	C_s	304	
スライダの摩擦係数(度)	μ	36	20
時間増分(s)		5.0×10^{-6}	

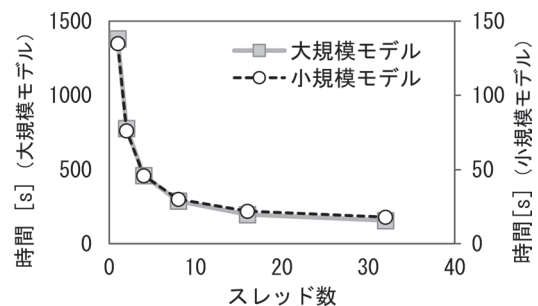


図2 並列処理後のスレッド数と計算時間

表3 並列処理後のスレッド数と計算時間

スレッド数	計算時間 [s]		スピードアップ	
	大規模モデル	小規模モデル	大規模モデル	小規模モデル
1	1382	135	1.00	1.00
2	777	76	1.78	1.78
4	461	46	3.00	2.93
8	288	30	4.80	4.50
16	197	22	7.02	6.14
32	157	18	8.80	7.50

では1382秒かかる計算が、32並列の場合は157秒となり、この時のスピードアップは8.8となる。また小規模モデルの場合でも、スレッド数1では135秒かかる計算が、32並列では18秒となり、この時のスピードアップは7.5となっている。

なお、従来のワークステーションを用いたシングルコアにおける計算時間と、上述の大型計算機を用いたシングルコアにおける計算時間を比較すると、大型計算機の方が約1割計算時間が短かった。並列化による効果とは別に、この計算機の性能による効果も考慮した場合、同条件の計算に費やす時間が、従来に比較して全体で約十分の一となった。

2.2 解析モデルの精緻化

2.2.1 バラスト粒子のイメージベースモデリング

離散体モデルにおいては砂や岩石のような不規則形状をモデル化する際に、多面体を用いる場合¹⁵⁾と球集合体を用いる場合¹⁶⁾があるが、多面体による接触判定では判定法によっては異常貫入が発生する事例もあるため¹⁷⁾，“DEMCS”では球集合体モデルを採用している。モデル化においては、実際のバラスト碎石の3次元形状をレーザースキャナで測定し、3次元座標データを用いて、動的最適化法¹⁸⁾によって球を配置させる。また道床バラスト層のモデル化において重要なのが粒度分布であるが、実現場に導入される新品バラストについては、図3に示す粒度分布範囲が定められている。そこでバラスト碎石の形状測定は、図に示すふるい目毎に行い、各バラスト要素モデルを作成した上で、図3の粒度分布範囲内に収まるように配合した。

ところでバラスト碎石のような角張った形状をモデル化する場合、図4に示すように、構成球の半径が小さいほど、実形状とくに稜角の角張りを精緻に再現できるが、構成球を小さくすると球の個数は増えるため、計算効率の面ではデメリットとなる。特に、本研究の対象としている実軌道の断面寸法（図5参照）を条件とした場合、まくらぎ一本分のみの範囲をモデル化しても、バラスト

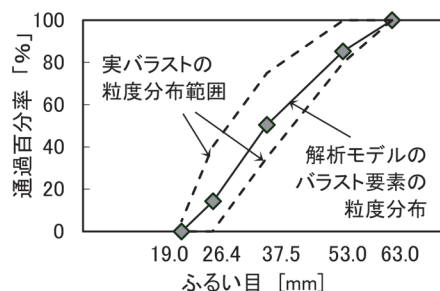


図3 新品バラストの粒度分布範囲

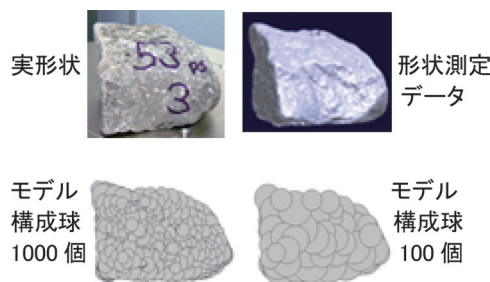


図4 球集合体によるバラスト碎石のモデル化例

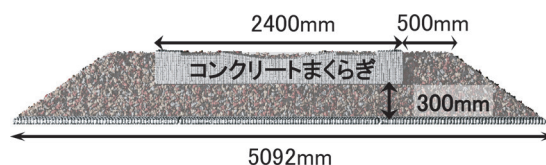


図5 バラスト軌道モデルの断面サイズ

要素（粒径20～60mm）の個数は30000個前後となるため、一要素を構成する球の個数は極力減らすことが望ましい。

2.2.2 角張度の定量的評価

バラスト碎石の品質を評価する上では「稜角に富むこと」（粒子が円磨化していないこと）が望ましいとされているが、従来「角張」の評価は目視によるものであり、定量的な数値基準は示されていない。粒子形状の「角張度= Angularity」については、定量的評価法も提案されているが¹⁹⁾、実軌道レベルでバラスト碎石の形状データを取得し分析を行うことは、作業効率の面で非現実的ともいえる。

そこで本研究では、Lees²⁰⁾の「視覚印象による角張度」により実バラストとモデルの角張度（以下、Angularity）を評価した。これは評価する形状をLeesが提案したチャートと目視により比較し、同程度の角張形状の数値をAngularityとするものである。ただし目視のため評価者によって誤差もあるため、本研究では2名で評価した値の平均値を用いた。

3次元形状を測定した20個のバラスト碎石とその球集合体モデルについてAngularityを求めた結果を表4に示す。表より解析モデルのAngularityは全体的に実形状

より低く、両者の差の値は50~200となり、20粒子のうち3粒子において200、4粒子において150となる。

ここで、実バラストの形状とモデル化したバラスト要素の形状の例を図6に示す。それぞれのAngularityは、図6(a)に示す要素の実形状では500、モデルでは450となり、図6(b)に示す要素の実形状は650、同モデルでは450となっている。つまり、構成球の数を一定としてモデル化した場合、実形状のAngularityが大きいほど、モデル化によるAngularityの低下が大きくなることが示された。

冒頭で述べた通り、従来のバラスト軌道の離散体モデルにおいて繰返し载荷下における道床沈下量を求めると、シミュレーション結果が実現象に比較して数倍レベルになっていた。この要因としては、初期のバラスト要素の締固め度が不十分であったことも考えられるが、それと同時に、バラスト要素の稜角の再現が不十分で、実バラストにおける「円磨化したバラスト碎石」に近い形状であったことも影響しているといえる。

表4 実形状とモデルのAngularity

実形状 Angularity	モデル Angularity	Angularity の値の差	試料数
500	400	100	1
500	450	50	2
550	450	100	5
550	500	50	1
600	450	150	4
600	500	100	4
650	450	200	3

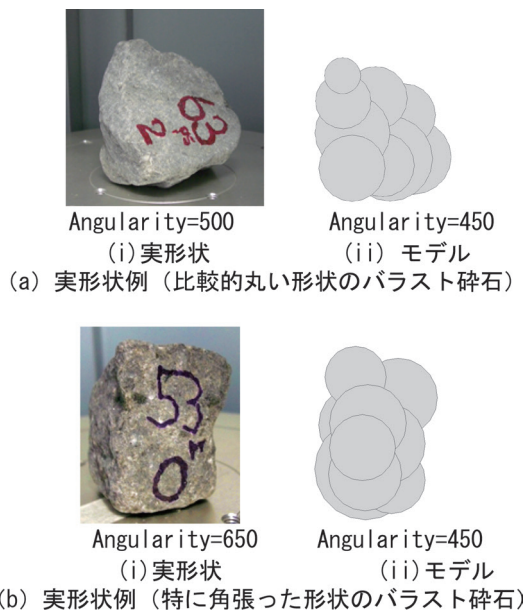


図6 Angularityの例

2.2.3 Asperity 要素²¹⁾の導入

McDowellら²¹⁾は、球集合体でモデル化したバラスト要素を用いたDEMシミュレーションを行っているが、バラスト要素の角張度が、粒子集合体のせん断強度等に影響を与えるとして「Asperity 要素」の導入を提案している。これは、球を組み合わせた四面体形状の要素に、半径の小さい球を付加する方法である。これにより、Asperityを導入した粒子集合体においては、粒子集合体のせん断強度等が向上する結果を示している。

そこで本研究においても、構成球の数を極力抑えた上でAngularityの値を実形状に近づけるために、表4に示した実形状とモデルのAngularityの差の値が150以上となるバラスト7粒子のモデル化においては、Asperity要素を導入することとした。その例として、図7に4個のAsperity要素を付加した結果を示す。この形状について同様の手法でAngularityを評価した結果、構成球10個ではAngularityが450だったのに対して、構成球14個では600に向上した。同様に他の6粒子についても、3粒子は450から550に、3粒子は450から600に向上した。

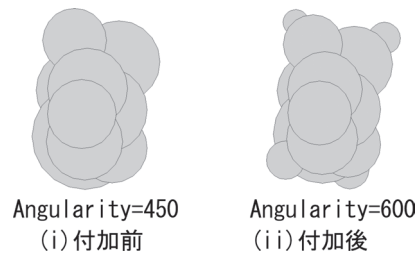


図7 Asperity要素を付加したモデルの例

3. 精度の検証

3.1 解析モデルにおける締固め度の調整

改良後のシミュレーションの精度を検証する上では、実軌道における実測データが必要不可欠であるが、ここでは、道床更換翌日の列車走行時の初期沈下の実測データを用いて検証を行うこととする。

まず上記データと比較する上では、道床更換直後の道床の状態を解析モデルで模擬する必要があるが、須長ら²²⁾は、実物大試験軌道の締固め過程の道床の密度を測定し、その変化を図8の通りに示している。同図より道床の密度は締固めの初期では1.40g/cm³程度であるが、緩詰めから密詰めへと締固めが進むと密度も向上し、最終的に1.67g/cm³程度となる。

これに対して現場における道床更換時には密度の測定は困難であることから、本研究では締固め度が低いことも想定し、図5に示した断面形状の道床に充填するバラスト要素の個数を調整し、見かけの密度が1.67g/cm³（バ

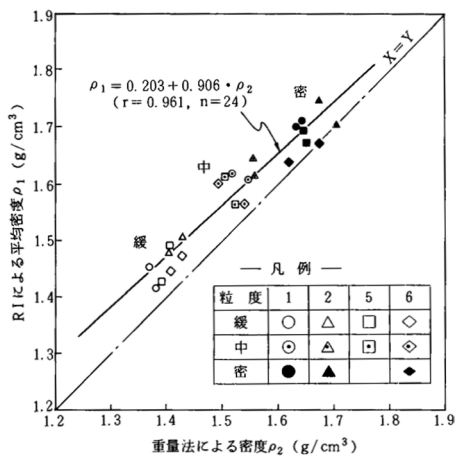


図8 道床の締め固め過程の密度変化²²⁾

ラスト要素 30440 個), 1.60g/cm³ (バラスト要素 29500 個), 1.57g/cm³ (バラスト要素 29140 個) 1.50g/cm³ (バラスト要素 28410 個) となる 4 通りの解析モデルを構築した。以下, 密度の高いモデルから「モデル A」「モデル B」「モデル C」「モデル D」と記す。

まくらぎ要素も球集合体要素であるが, 形状および要素の質量は標準軌用の「3H 型」コンクリートまくらぎの寸法および質量 (JIS E 1201) を再現した。

各モデルのまくらぎ下部分の道床層を幅 300mm×高さ 125mm のメッシュに分割し, 各メッシュの見かけの密度を分布図で示した結果を図 9 に示す。図より, 各モデルにおいてメッシュ毎のばらつきはあるものの, 全体平均としては上記で示した密度に調整されている。

3.2 軌道支持剛性の実測結果との比較

前述の通り実現場においては, 道床の密度を精度よく測定するのは困難であり, 通常, 図 10 に示す小型 FWD 試験²³⁾ により軌道支持剛性を測定している。この手法は, 小型の重錘をまくらぎ上に落下させ, 重錘とまくらぎ間の作用荷重とまくらぎの鉛直方向の変位を測定する方法である。

そこで, 先述の 4 通りの解析モデルについて, 当該試験と同様に重錘要素をまくらぎ要素に落下させるシミュレーション (図 11) を行い, 解析モデルの軌道支持剛性を求めた。解析パラメータは表 2 に示した通りである。

上述の方法により得られた各モデルの軌道支持剛性の値を図 12 に示す。ここで図の横軸は, 各モデルの見かけの密度とした。また図中の点線は, 実際の道床交換箇所の実測値の範囲 (37~38kN) を示す。同図より, 解析モデルの密度と軌道支持剛性は, ほぼ線形の関係を示している。また, 実測結果との比較においては, モデル B の軌道支持剛性が実測結果と最も近い。このモデル B の密度は, 先述の通り, 従来用いられている「十分に締め固めた道床」の密度 1.67g/cm³ より小さい値であるが,

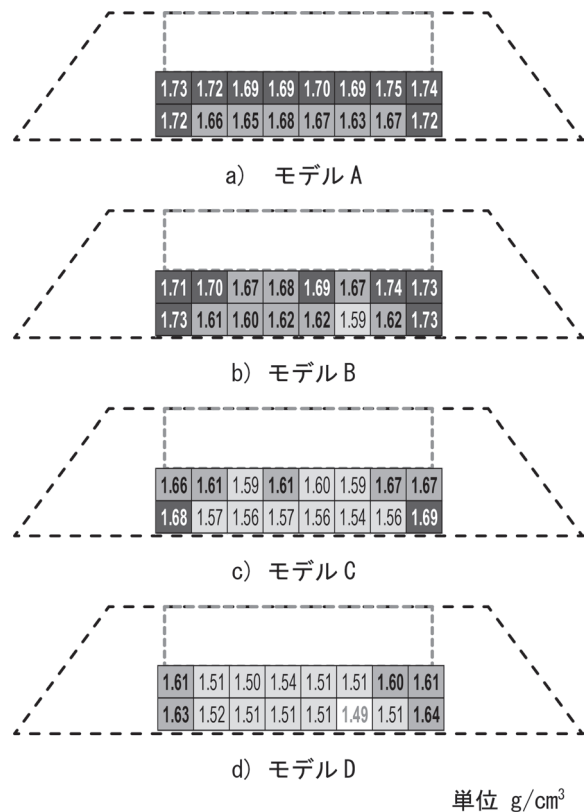


図9 解析モデルの密度分布



図10 小型 FWD を用いた軌道支持剛性測定²³⁾

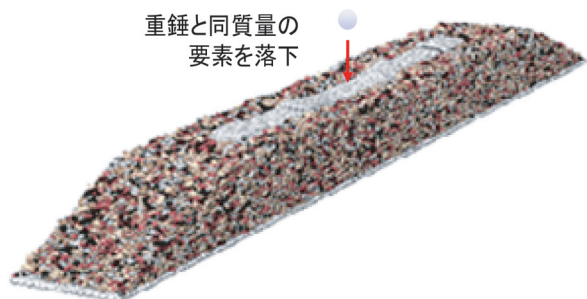


図11 小型 FWD の再現シミュレーション

実測現場が道床交換直後であったことから, 条件として合致する。

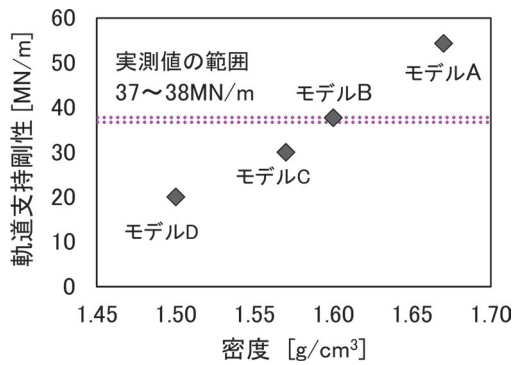


図 12 解析モデルの軌道支持剛性

3.3 道床交換直後の初期沈下の比較

前節で道床交換後の軌道支持剛性が最も近かった「モデル B」を用いて、道床交換翌日の列車約 70 編成通過過程の道床沈下を再現する。解析パラメータは表 2 に示した通りである。また解析モデルの境界面は、軌道横断面側と側面側ともに物理境界としたが、側面側は図 11 に示す通り、バラスト要素とは接触していない。

まくらぎ要素に入力する列車通過荷重波形を図 13 に示す。図は車両の一台車（前軸と後軸）通過時にまくらぎ一本がレール底面から受ける荷重波形であるが、本解析では一編成 20 台車とし、70 編成分つまり合計 1400 回、図に示す荷重波形を、まくらぎ要素の中心に鉛直方向の外力として入力した。なお計算時間は、図 13 の一台車波形に約 2 時間を要するため、1400 回の計算終了までには約 117 日（4ヶ月弱）を要した。

図 14 に、まくらぎ要素の鉛直方向変位の時系列波形の一部を示す。図より、まくらぎ要素の変位は台車通過による増減を繰り返しながら、残留変位も累積していく。ここでは一編成の沈下進みとして、20 台車毎の除荷時の変位の差分を算出した。一方、比較する実測値については、合計 26 箇所測定された道床交換翌日の沈下進みのデータより平均値と標準偏差 σ を求めた。これらより、平均値と平均値 $\pm \sigma$ を「モデル B」のシミュレーション結果と合せてプロットした結果を図 15 に示す。

まず沈下進みの実測値は、1 編成目で平均 0.37mm、標準偏差 0.20mm であるが、2 編成目では平均 0.14mm、

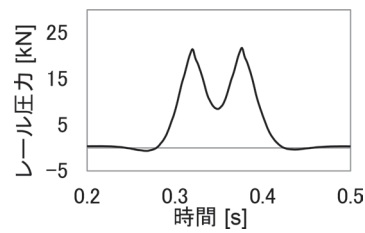


図 13 入力荷重波形（一台車通過過程）

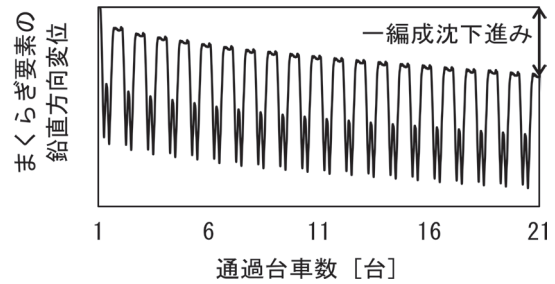


図 14 シミュレーションにおけるまくらぎ要素の変位

標準偏差 0.12mm と急激に減少し、その後も徐々に収束し、10 編成目以降は 0.053mm から -0.026mm の間で変動する。これは、道床交換後は、締固め作業を行うものの間隙の割合が大きいいため沈下進みの平均値が大きく、更に粒子配列のバラツキも大きいいため沈下進みの標準偏差も大きくなることを表している。そして、その後の列車通過により間隙は圧縮され、列車通過荷重に対する粒子構造も形成されるため、沈下進みの平均値および標準偏差の両者が減少し、収束する。

これに対して、図中黒色菱形印で示す「モデル B」を用いたシミュレーション結果における沈下進みは、1 編成目で 0.57mm、2 編成目で 0.14mm となり、1 編成目が実測値平均値より大きい値を示すものの、実測値の平均値 $+\sigma$ の値の範囲内に含まれる。また 10 編成目以降は 0.048mm から -0.002mm の間で変動するが、ここでも実測値の平均値 $\pm \sigma$ の範囲内に収まっている。

以上より「モデル B」のシミュレーション結果は、道床交換後の現場の軌道支持剛性と、作業翌日の列車通過過程の沈下進みの両者において実測結果の範囲内となったことから、十分な精度を有することが確認できた。

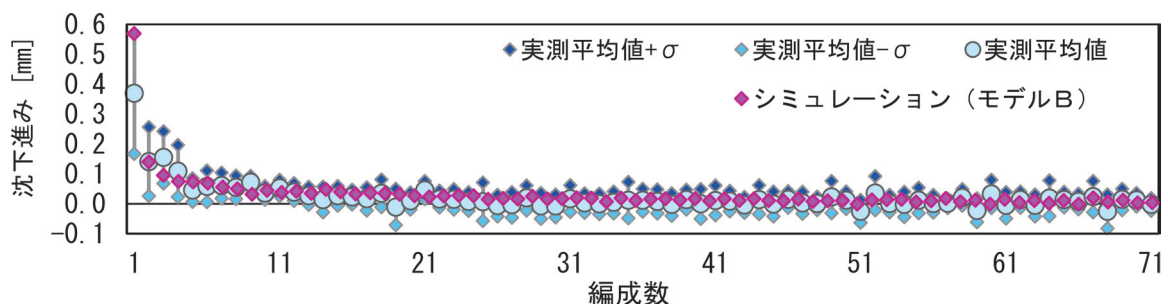


図 15 シミュレーション結果と実測値の比較¹⁴⁾

4. おわりに

バラスト軌道のマイクロメカニクスに着目した解析手法として、離散体モデルを用いたDEMシミュレーション手法を改良した。得られた知見は以下の通りである。

- ・3次元個別要素法プログラムのOpenMPによる並列化により、32並列におけるスピードアップが8.8となった。
- ・計算速度の向上によりバラスト要素モデルの精緻化を図った結果、バラスト要素の角張度（Leesの視覚印象法による）が450から600に向上した。
- ・道床更換翌日の列車70編成通過過程を想定した初期沈下シミュレーションを行い、実測データと比較した結果、解析における沈下進みが実測データの平均値 $\pm\sigma$ （標準偏差）の範囲内に留まり、十分な精度を有することが確認できた。

文献

- 1) 大南正瑛（編）：マイクロメカニクス入門，オーム社，1980
- 2) 例えば 佐武正雄：土の構造とメカニクス - ミクロからマクロへ - 3. 土のマイクロメカニクス入門，土と基礎（社団法人地盤工学会），Vol.50, No.7, pp.49-54, 2002
- 3) D.J. White, W.A. Take, M.D. Bolton : Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry, *Geotechnique*, Vol.53, No.7, pp.619-631, 2003.
- 4) C. O'Sullivan, L. Cui, S.C. O'Neill : Discrete Element Analysis of the response of granular materials during cyclic loading, *Soils and Foundations*, Vol.48, No.4, pp.511-530, 2008.
- 5) Soga, K., C. O'Sullivan, Modelling of geomaterials behavior : *Soils and Foundations*, Vol.50, No.6, pp.861-875, 2010.
- 6) Aikawa, A., et.al : Development of a measuring instrument for triaxial acceleration on a ballast particle, *Proc. Railway Engineering*, 2007.
- 7) Kono, A. : DEM simulation about the effect of the sleeper shape on the Ballast Migration, *Proc. 8 th Int'l. Conf. on DEM*, 2019.
- 8) 河野昭子 : OpenMPを用いた並列化による離散体シミュレーションの速度と精度の向上，第25回鉄道工学シンポジウム論文集，CD-ROM，2021
- 9) Kono, A. : Validation of numerical simulation using 3 d-discrete element ballasted track model, *Computers in Railways XVI : Railway Engineering Design and Operation*, WIT Press, Southampton UK, pp.169-177, 2018.
- 10) Matsushima, T., Saomoto, T.: Discrete Element Modelling for Irregularly-Shaped Sand grains, *Proc. Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, pp.239-246, 2002.
- 11) Kono, A., Ferrellec. J.F., Nhu. V.H., Saussine. G. : Ballasted tracks tamping analysis and optimization using DEM, *Proceedings of WCRR 2019*, 2019.
- 12) 和田 直樹ほか：粒子接触判定計算のOpenMPによる最適化，情報処理学会研究報告，Vol.2012-HPC-136, No.3, 2012
- 13) 大塚順：個別要素法による粉粒体シミュレーションへのOpenMP並列の適用，ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム，p.52, 2012
- 14) 河野昭子，松島亘志：DEMによる単粒度碎石層の残留変位予測における定量的精度の検証，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.77, No.2, 2022
- 15) Saussine. G. and Azema. E., Gautier. P.E., Peyroux. R., Radjai. F. : Numerical modeling of the tamping operation by Discrete element Approach, *Proc. WCRR 2008*, 2008.
- 16) Suhr. B., and Six. K. : Parametrization of a DEM model for rail-way ballast under different load cases, *Granular matter*, Vol.19, No.4, 64, 2017.
- 17) 河野昭子 ほか：多面体要素を用いたDEM三軸圧縮試験の試み，第43回地盤工学会研究発表会講演概要集，pp.823-824, 2008
- 18) Matsushima, T. and Saomoto, T. : Discrete Element Modelling for Irregularly-Shaped Sand grains, *Proc. Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, pp.239-246, 2002.
- 19) Kono, A. and Sekine, E., Kohata, Y. : An Evaluation Method for the Shape of Ballast Grains Using their Digitalized Data, *Quarterly Report of RTRI*, Vol.42, No.1, pp.26-31, 2001.
- 20) Lees. G : A New Method for Determining the Angularity of Particles, *Sedimentology*, Vol.3, No.1, pp.2-21, 1964.
- 21) McDowell. GR et al. : Discrete element modelling of scaled railway ballast under triaxial conditions, *Granular Matter*, Vol.18, No.3, 66, 2016.
- 22) 須長誠，榎本秀明：ラジオアイソトープを用いた道床バラストの密度測定，鉄道総研報告，Vol.6, No.10, pp.47-54, 1992
- 23) 中村貴久，桃谷尚嗣，谷川光：保守後の軌道の支持状態を診る，RRR，Vol.76, No.2, pp.16-19, 2019