

講演概要 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

河野 昭子¹

¹ 正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 国分寺市光町二丁目八番地 38)

E-mail: kono.akiko.43@rtri.or.jp

従来用いているバラスト軌道の離散体シミュレーション手法において、計算負荷の高かった個別要素法の接触判定のループを OpenMP で並列化した。更に鉄道総研で所有する大型計算機「究 2」を用いることで、計算速度が従来の約 10 倍となった。改良したシミュレーション手法を用いて、道床更換直後の軌道支持剛性および初期沈下をシミュレーションで再現し、現場における実測結果と比較した結果、シミュレーション結果は、実測結果の平均値プラスマイナス σ (標準偏差) の範囲に収まり、定量的精度も大幅に向上した。

Key Words: Discrete Element Method, Ballasted track, OpenMP, Ballast renewal, V&V

1. はじめに

バラスト軌道の沈下や流動を定性的に評価する手法として、離散体モデルを用いた解析的検討が国内外で広まりつつある^{1,2)}。しかし、それらの検討において定量的精度には課題があり³⁾、更に解析時間が長い(計算負荷が高い)というデメリットがあった。

その一方で近年、スーパーコンピュータを用いた並列計算により、大規模なシミュレーションを効率的に行う試みも報告されている⁴⁾。

そこで本研究においても、既存の3次元個別要素法コード“DEMCS-track”⁵⁾を OpenMP により並列化し、計算速度の向上を図ると同時に、バラスト碎石のモデルの見直しを行った上でシミュレーションを行い、実測結果との比較を行ったので、報告する。

2. 従来モデルの課題

バラスト軌道の沈下進みについては多くの実験的検証が報告されている。例えば、実物大試験軌道において、荷重振幅 100kN、載荷周波数 10Hz の正弦波荷重を繰返し載荷した場合、初期の沈下進みは、載荷 1 万回程度の間で急進し、累積沈下量は 2.5mm 程度となっている⁶⁾。

これに対して従来の離散体シミュレーションにおいては、土層内の模型バラスト層において、初期の沈下量が載荷 100 回目で 0.27mm となる場合もあり³⁾、実験結果よりも著しく大きい沈下量を示していた。

この原因の一つは、バラスト碎石を球集合体でモデル

化する際に、稜角の再現が不十分だった点がある。図-1 に Lees の視認印象法⁷⁾による角張度の例を示す。図より、実際のバラストの角張度が 650 程度であるのに対して、従来のバラスト碎石モデルの角張度は 450 程度と、角張度が低いことが明らかである。

そこで、図-1 に示す「アスペリティ要素」⁸⁾を導入した結果、モデルの角張度は 600 程度まで向上した。

ただし、バラスト碎石モデルにおいて構成球の数が増えるほど、計算負荷が増加するというデメリットもある。

また、定量的精度が低かった原因の二点目は、解析モデルの構築における道床の「締固め」が不十分だった点がある。既往の研究より、十分に締固められた道床バラスト層の見かけの密度は 1.67g/cm³とされているが⁹⁾、離散体モデルによる道床バラスト層の締固めシミュレーションは、やはり計算時間の制約により、十分ではなかったといえる。

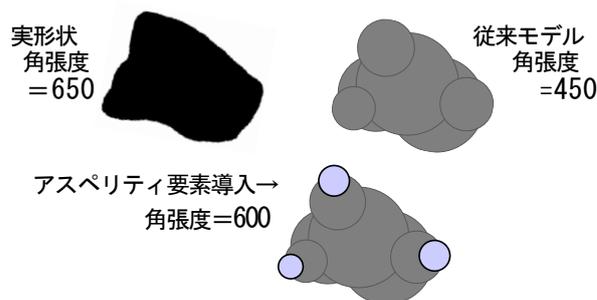


図-1 バラスト碎石モデルの修正

以上の2点により、離散体シミュレーションの定量的精度を向上する上では、まず計算速度の向上が先決であるといえることから、次章に示す通りの改良を行った。

3. 計算速度の向上

個別要素法の計算過程は、図-2 に示す通り極めてシンプルであるが、計算負荷の大きな要因となっているのがフロー中の「構成球同士の接触判定」である。これは、各要素が、計算領域内の他の要素と接触しているかどうか判定するプロセスであるが、例えば本研究で用いた図-3のバラスト軌道モデルは、バラスト要素が約3万個あるため、接触判定だけで4億回以上の計算が発生する。

そこで、図-4 に示すように計算領域をボックス分割し、各バラスト要素の前後左右上下のボックス内の要素に対してのみ接触判定を行い、自身から遠い要素との接触判定は省略することとした。

更に、このプロセスのループをOpenMPにより並列処理し、鉄道総研で所有する大型計算機「究2」を用いてシミュレーションを実施した。図-5に、「究2」における並列数と解析時間の関係を示す。図より、並列化をしない場合に1382秒かかる計算が、32並列では157秒まで短縮した。

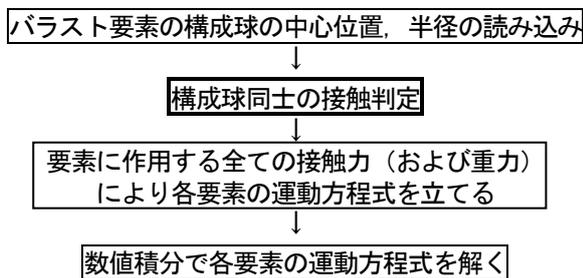


図-2 個別要素法の計算過程



図-3 離散体バラスト軌道モデル (標準軌)

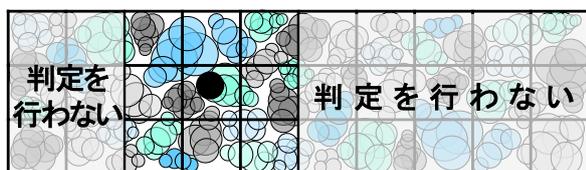


図-4 計算領域のBox分割

また従来の、ワークステーションを用いたシングルコアでの計算時間と比較すると、総合的に計算速度は約10倍となった。

4. 実測値との比較

(1) 解析モデル

道床更換翌日の列車走行時の初期沈下を再現する上では、道床更換直後の道床バラスト層の状態を解析モデルで模擬する必要がある。そこで、既往研究⁹⁾を参考とし、見かけの密度の異なる3通りの解析モデルを構築した。各モデルの見かけの密度は、モデルA=1.67g/cm³、モデルB=1.60g/cm³、モデルC=1.50g/cm³とした。

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-6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。

(2) 軌道支持剛性の比較

前節で示した3通りの締固め度の解析モデルについて、まず軌道支持剛性の実測値との比較を行う。ここで実現場では、小型FWD¹⁰⁾によって軌道支持剛性を測定したことから、解析モデルにおいても小型FWD試験を再現し、解析モデルの軌道支持剛性を求めた。

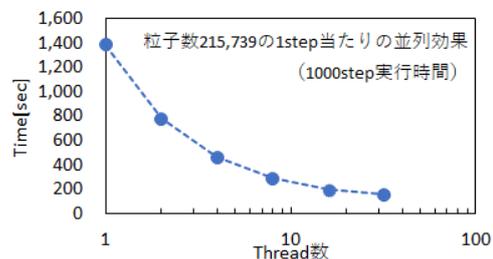


図-5 並列数と計算時間の関係

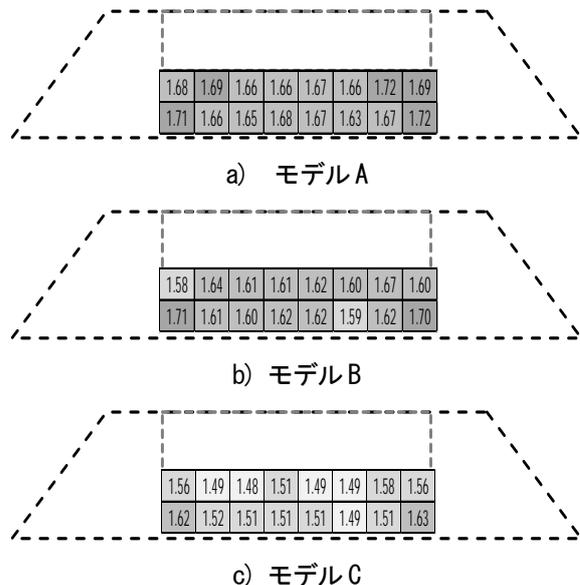


図-6 解析モデルの密度分布

小型 FWD の再現シミュレーションより得られる、まくらぎ要素に作用する荷重と鉛直方向の変位の関係の例を図-7 に示す。従来、この荷重-変位曲線における荷重の最大値と変位の最大値から軌道支持剛性が求められるため、ここで示す解析結果からも同様の方法で軌道支持剛性を算出した。

各モデルの見かけの密度と軌道支持剛性の関係を図-8 に示す。図中の点線は、実測値の範囲を示す。図より、バラスト層の密度を 1.60g/cm^3 としたモデル B の軌道支持剛性が実測結果と一致している。このモデル B の密度は従来用いられている「十分に締め付けたバラスト層」の密度 1.67g/cm^3 より小さい値となるが、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。

(3) 初期沈下の比較

次に、前節で示した 3 通りの解析モデルを用いて初期沈下シミュレーション（ここでは道床交換翌日の 70 編成通過時の沈下の再現）を行う。

ここで、まくらぎ要素に入力する列車通過荷重波形を図-9 に示す。図は一台車通過時の荷重波形であるが、ここでは一編成 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繰り返し入力した。

また比較する実測値については、合計 12 箇所測定された道床交換翌日の沈下進みデータの平均値と標準偏差 σ を求め、平均値と平均値 $\pm \sigma$ の値をプロットした。

実測値のプロットとシミュレーション結果を合わせて図-10 に示す。図より、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

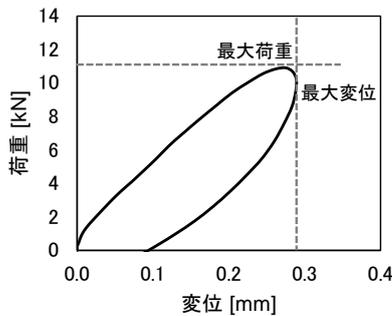


図-7 小型 FWD 再現シミュレーションにおける荷重-変位曲線の例

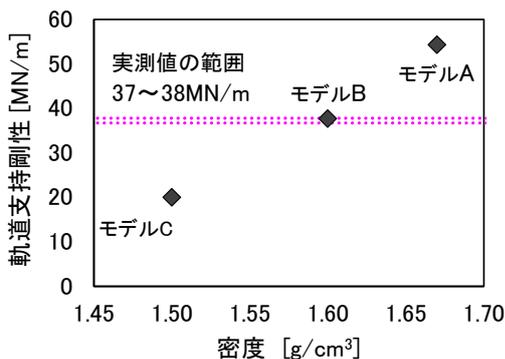


図-8 解析モデルの軌道支持剛性

は平均 0.14mm 、標準偏差 0.12mm と急激に減少し、その後徐々に収束し、10 編成目以降は 0.053mm から -0.026mm の間で変動する。

これに対して、シミュレーション結果を比較すると、前節の軌道支持剛性と同様にモデル B の結果が実測値の平均値 $\pm \sigma$ の範囲内に収まることが明らかである。

ここでモデル B 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 $\pm \sigma$ 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。

5. まとめ

離散体シミュレーション手法における道床沈下予測の定量的精度を向上するために、個別要素法コードの接触判定プロセスの並列化により計算速度の向上を図った。

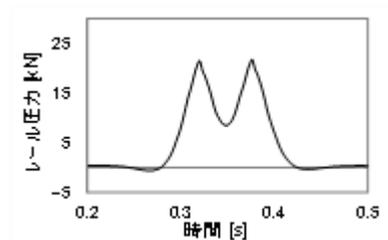
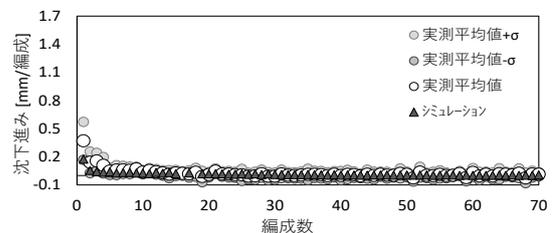
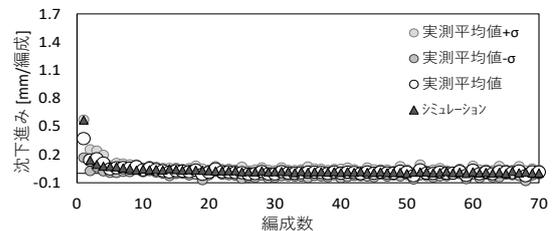


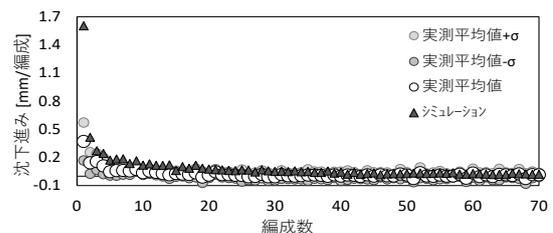
図-9 初期沈下シミュレーションにおける入力荷重



a) 実測値とモデル A の結果



b) 実測値とモデル B の結果



c) 実測値とモデル C の結果

図-10 初期沈下 (70 編成通過過程) の比較

また、角張を精緻化したバラスト碎石の解析モデルを用いて、道床更換後を想定した軌道支持剛性、初期沈下を再現したところ、シミュレーション結果は、実測結果の平均値± σ （標準偏差）の範囲に収まることを確認した。

参考文献

- 1) B, Suhr, K, Six : Parametrization of a DEM model for railway ballast under different load cases, Granular matter, Vol.19, No.64, 2017
- 2) Xuecheng Bian, et.al : Micromechanical Particle Interactions in Railway Ballast through DEM Simulations of Direct Shear Tests, Intl. Journal of Geomechanics, Vol.19, No.5, 2019
- 3) A. Kono : Validation of Numerical Simulation using 3D-DEM Ballasted Track Model, Proceedings of CompRail2018, 2018
- 4) 坂井宏隆, 唐津卓哉 : 大規模並列有限要素法による一台車モデルの曲線走行シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.34, No.8, 2020
- 5) 河野昭子, 松島亘志 : 離散体モデルを用いた道床バラスト層の変形挙動解析, 鉄道総研報告 Vol.28 No.12 pp.41-46, 2014
- 6) 古川敦, 泉英治 : 実物大バラスト軌道模型載荷試験による軌道沈下量算定式の導出, 第 15 回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集, pp403-406, 2008
- 7) G, Lees, : A New Method for Determining the Angularity of Particles, Sedimentology, Vol.3, No.1, pp.2-21, 1964
- 8) G. R. McDowell, et.al : Discrete element modelling of scaled railway ballast under triaxial conditions, Granular Matter, Vol.18, No.66, 2016
- 9) 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, pp47-54, 1992
- 10) 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

(Received April 2, 2021)

(Accepted June 4, 2021)

IMPROVEMENT OF COMPUTING TIME AND QUANTITATIVE ACCURACY OF DEM SIMULATION BY PARALLELIZATION WITH OPEN-MP

Akiko KONO

3D-DEM code “DEMCS-track” was modified by parallelization with Open MP to decrease computing time and to improve the quantitative accuracy of simulations. Then the computing time at the case with 1382 seconds decrease to 157 seconds. Ballast grain models are also elaborate to sharpen the angularity by using “Asperity”. The track stiffness and initial settlement of ballasted layer derived from DEM simulation are included in the range of measured data from real railway lines.