

路盤～車輪間の大規模並列計算モデル

鉄道力学研究部 軌道力学研究室

主任研究員 相川 明

1. はじめに

バラスト軌道の劣化現象の解明および対策に活用することを目的に「路盤～車輪間の大規模並列計算モデル」を開発中である。本稿では、まず、路盤～車輪間の大規模並列計算モデルの概要を紹介し、次に、バラスト集合体解析モデルを用いて、衝撃荷重載荷時のバラストの応答を再現し、本モデルが軌道劣化の現象解明と課題解決にどのように関与できるかについて紹介する。

2. 路盤～車輪間の大規模並列計算モデルの概要

図-1は路盤～車輪間の大規模並列計算モデルの模式図である。本モデルは、「車輪・レールの転がり接触解析モデル」、「レール・まくらぎ解析モデル」および「バラスト集合体解析モデル」の3つからなり、車輪から路盤までの全体系での動的挙動を2kHzの高周波域まで再現する。ここに、車輪・レールの転がり接触解析モデルは、自走する車輪とレール間の転がり接触挙動を有限要素モデルにより表現し、接触面に発生する動的な力を計算する¹⁾。また、レール・まくらぎ解析モデルは、まくらぎにより離散的に支持される軌きょう構造を詳細な有限要素モデルにより表現し、

これに車輪・レール間で発生した動的な力を入力し、まくらぎ下面からバラスト層に伝わる動荷重を計算する^{2),3)}。さらに、バラスト集合体解析モデルは、稜角を有する碎石の詳細形状を四面体要素の集合体で模擬し、バラスト層の動的応答を計算する。本バラストモデルは、汎用のFEM四面体要素からなり、弾性体個別要素法(QDEM)、および、大規模並列有限要素法のいずれのソルバーでも共通に利用できる。いずれを用いるかは、問題の性質により使い分ける。

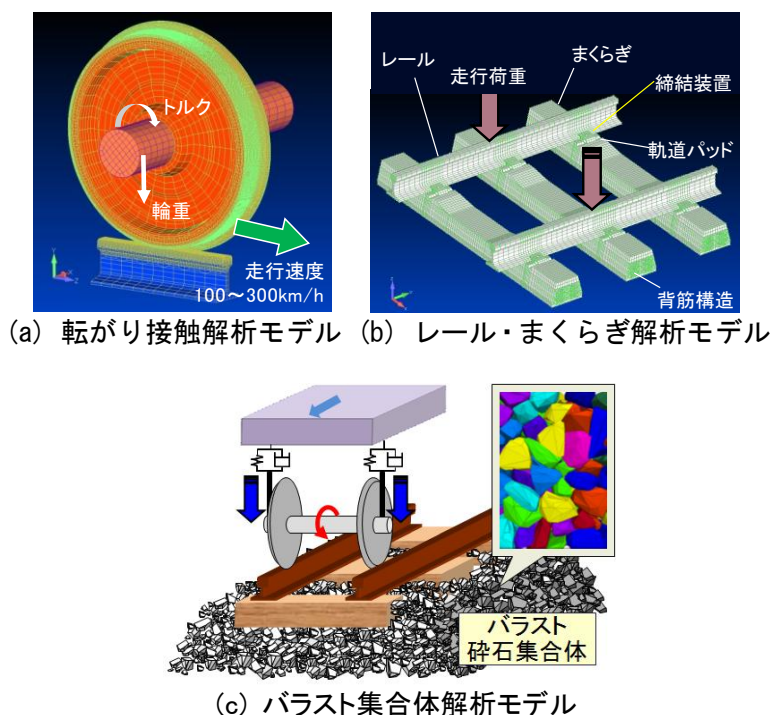


図-1 路盤～車輪間の大規模並列計算モデルの全体構成

3. 衝撃荷重に対するバラストの応答特性

車輪・レール間で発生する動荷重がバラストに伝わることにより、軌道の劣化現象は進行する。ここでは、良好な路盤条件の在来線軌道での現場測定結果を用いて、スペクトル分析により、バラストに伝わる衝撃荷重の実態とバラストの応答の特徴を把握する^{4),5)}。

図-2は、在来線において特急列車通過時のまくらぎと、その直下(約10cmの深さ)のバラストに関する振動加速度のリニアスペクトルである。図より、バラストに伝わる動荷重は、低周波域から高周波域までの広帯域の成分からなり、高周波領域にも大きな振幅を有することがわかる。

図-3は、まくらぎとバラストに関する変位スペクトルをもとに、まくらぎーバラスト間の変位応答倍率を求めたものである。図中の縦軸の1からの減少量は、厚さ10cmあたりのバラスト層の振動低減効果を意味する。図より、約200Hz以上の周波数では、衝撃荷重の振幅が1/3～1/5に減少しており、バラスト層は高周波の振動成分を大幅に減少させる優れた能力を有することが分かる。一方、低い周波数領域では1に近い応答倍率のところもあり、バラスト層は低周波の振動成分を低減する能力が殆どないといえる。

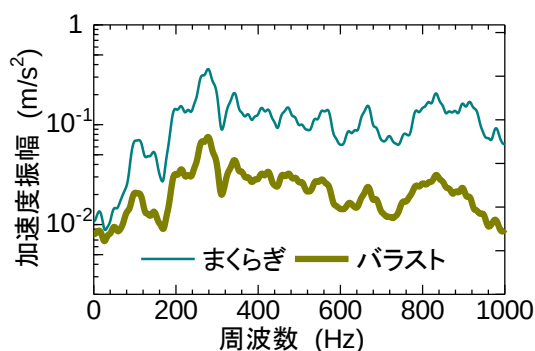


図-2 加速度スペクトル

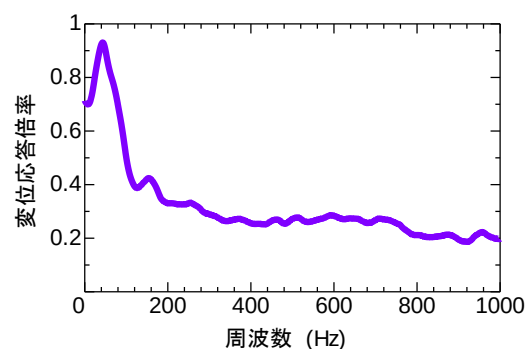


図-3 まくらぎーバラスト間の変位応答倍率

4. 実測荷重に対する過渡応答解析

バラスト表面に加えられた動荷重はバラスト内部を弾性波として伝わり、応力が集中することにより砕石に微細な劣化現象が発生する。本章では、開発中のバラスト集合体解析モデルを用いた有限要素法解析により、列車走行時の衝撃荷重に対する、バラスト層内における応力集中現象を再現する。

まず、三次元デジタイザを用いて約 4000 個のバラスト砕石の形状を測定し、図-4 のように、DEM 多面体モデルと、同サイズ同形状の FEM 四面体 2 次要素で表現した。

つぎに、図-5 に示すように、DEM により多面体モデルを締め固め、その後、砕石の配置と接触情報を維持したまま、多面体モデルを四面体 2 次要素の有限要素モデルに置き換えた。なお、砕石間の接触については、接触点同士を剛ばね要素で 3 並進方向を結合することで表現した。

モデル上面の中央に、まくらぎ下面荷重の実測波形(在来線特急列車の先頭台車通過時、走行速度 120 km/h、測定面積 8cm×8cm)を入力した。時間刻

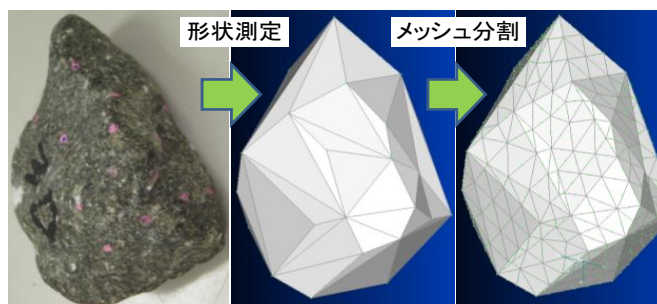


図-4 砕石単体の DEM および FEM モデル

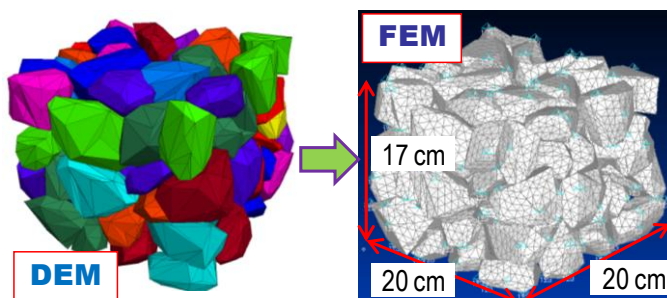


図-5 砕石集合体モデルの構築手順

みは $10\mu\text{s}$ である。

図-6 は載荷荷重が最大となる時刻における碎石内部のミーゼス応力分布(中心を通る縦断面)である。図より、応力は碎石全体に様に作用するのではなく、一部の稜角(接触部)が局所的に変形して非線形なばねとして作用し、その部分のみに応力が集中することがわかる。本解析では、載荷荷重 $1.2\text{ kN}(0.1875\text{ MPa})$ に対し、接触部近傍で最大で 43 MPa の応力が発生した。

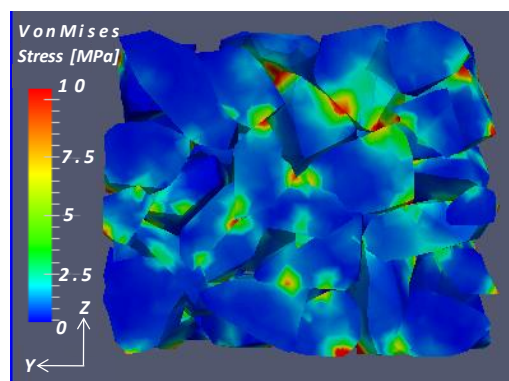


図-6 実測荷重波形入力時の応力分布

5. インパルス加振による波動伝播解析

本章では、バラスト集合体解析モデルを用いて、バラスト層にインパルス加振による衝撃荷重が加わったときのバラスト層内における波動伝播現象を再現する。

図-7(a)に示すように、碎石集合体モデルの上面の中央部($8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$)に、振幅 10 kN 、幅 $5\mu\text{s}$ の矩形波を入力した。計算の時間刻みは $1\mu\text{s}$ である。解析結果の一例を図-7(b)に示す。図は、 $t=60\mu\text{s}$ におけるバラスト層縦断面のミーゼス応力分布である。解析結果より、碎石集合体内部では、弾性波動は、まず加振された碎石内部を進行し、碎石内部で拡散と反射を繰り返す。この波の内、他の碎石との接触点に到達した一部の波が接触点を介して隣接する碎石に伝達される。つぎに、波動は、隣接した碎石内部を拡散と反射を繰り返して進み、接触点にて一部の波が他の碎石に伝わる。また、多点より伝わった波が、碎石内部で合流する。このように、碎石の複雑構造内の接触点を介して、波が分岐と合流を繰り返しながら伝わるのがわかった。

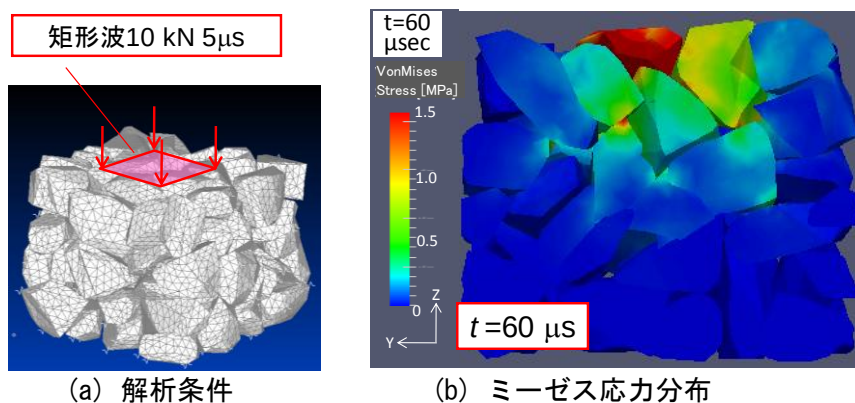


図-7 碎石集合体の波動伝播解析

図-8は、碎石集合体モデルの載荷点直下にある碎石について、深さが異なる4つの接触点に関するミーゼス応力の時刻歴応答である。図より、加振点から遠ざかるほど応答のピーク値の立ち上がりが緩やかになり、また、波に含まれる高周波振動が徐々に減少して、波形が滑らかになる傾向がわかる。なお、モデル下端でのピーク到達時刻は $240\mu\text{s}$ であり、波動の伝播速度は 710 m/s とインタクトな岩塊(3610 m/s)の場合の約1/5になった。

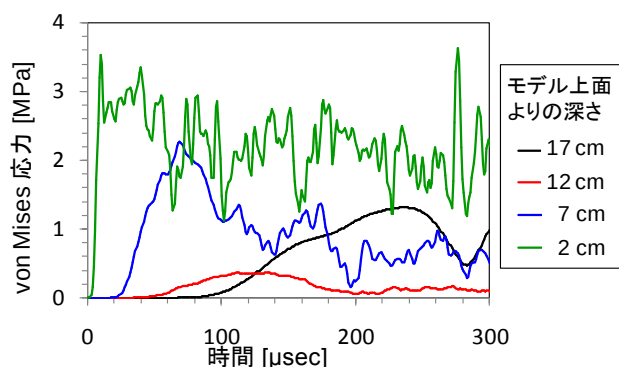


図-8 ミーゼス応力の時刻歴応答

6. 碎石集合体モデルの変形挙動特性

前掲の図-7(a)の解析条件にて、さらに詳細な時間刻み $0.1\mu\text{s}$ にて、5万ステップの過渡応答解析を実施した。図-9は、加振点近傍の鉛直変位応答である。図より、インパルス加振に対して、碎石集合体全体が、一様に上下方向に一定周期で振動していることがわかる。これは、本碎石集合体の上下方向伸縮に関する1次の固有モードであり、その固有振動数はおよそ1700Hzであった。なお、本解析で用いたバラスト単体モデルの1次の固有振動数は、平均で約20kHzであり、集合体の固有モードは、それらより1桁低くなった。図-10に、碎石集合体の変形状態の例を示す。

以上のように、バラスト集合体解析モデルを用いることにより、碎石集合体の内部の応力状態や、全体および局所の変形特性に関しても詳細に再現しうることが確認できた。

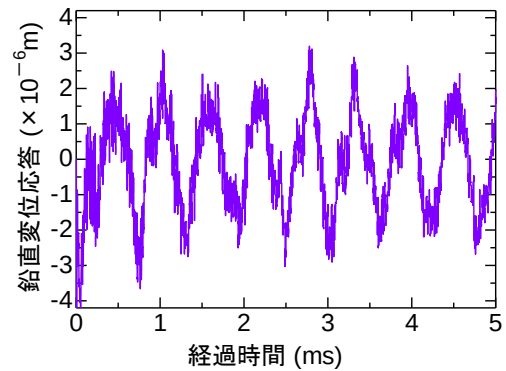
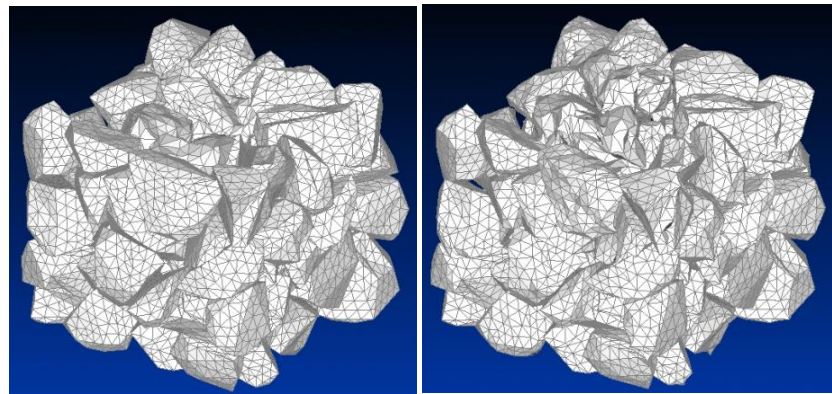


図-9 加振点近傍の鉛直変位応答



(a) $t=0.780\text{ ms}$ の変形

(b) $t=2.780\text{ ms}$ の変形

図-10 集合体の変形状態の解析例

7. まとめ

本稿では、バラスト集合体解析モデルを用いて、衝撃荷重載荷時のバラストの応答を再現し、本モデルの利用可能性について紹介した。今後、摩擦減衰や境界非線形性を含めた接触部モデルの精緻化、および、解析の大規模化により、バラスト劣化挙動再現の深度化が可能と考える。

参考文献

- 1) 高垣昌和，他：動的転がり接触解析による車輪・レール間の挙動評価，日本機械学会第25回計算力学講演会，2012.10.
- 2) 坂井宏隆，浦川文寛，名村明，相川明：列車荷重を用いた過渡応答解析によるPCまくらぎの振動特性，鉄道工学シンポジウム論文集，土木学会，15，pp.73-80，2011.7.
- 3) 坂井宏隆，浦川文寛，相川明，名村明：振動特性を考慮した種々の構造を持つPCまくらぎの3次元FEM解析，土木学会論文集，67，A2(応用力学特集号)，2011.9.
- 4) 相川明：実軌道測定に基づくバラストに加わる衝撃荷重とその減衰特性，鉄道総研報告，第27巻，第3号，2013.4.
- 5) 相川明，坂井宏隆：バラスト層に伝わる衝撃荷重と振動低減効果に関する現場測定，土木学会第67回年次学術講演会，2012.9.