

DEMによる繰返し荷重周波数のバラスト沈下特性への影響評価

(財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○ 河野 昭子
筑波大学 正会員 松島 亘志

1. はじめに

バラスト軌道の沈下特性に関しては、これまで主に実験による検討が行なわれているが、シミュレーションによる検討においては、バラスト部をバネ-ダンパや弾性連続体でモデル化したものが用いられていた。これらのモデルは、列車通過時の軌道の動的応答等の予測には適しているが、バラスト部の塑性沈下を直接表現することはできない。特に道床バラスト部は、厚さ約 25cm の層が粒径約 2~6cm の粗粒の碎石で構成されているため、弾性連続体モデルでは、バラスト粒子の運動に起因する道床バラスト部の変形を正確に表現することは難しい。

そこで本研究では、離散体解析手法の一つである個別要素法（以下DEM）をバラスト軌道沈下モデルに適用し、繰返し荷重周波数がバラスト部の沈下特性に与える影響について検討し、また、バラスト粒子個々の運動を観察した。ここでは、DEM では最も基本的な、円要素を用いたモデルを用いて間隙率の異なるモデルを作成し繰返し荷重を行なった。

2. シミュレーションの概要

2-1 モデル：図1に解析モデルを示す。円の粒径分布は表1の通りで、実バラストの粒径分布と同様である。図1中の長方形の荷重部は木まくらぎ(並)の幅および厚さとし、下部境界から荷重部底面までの厚さも、実際のバラスト軌道と同様とした。横方向の幅は、実際のまくらぎ間隔よりも広くしている。

2-2 入力パラメータ：DEM では、図2に示すように、粒子間の接触をバネとダンパ（法線および接線方向）とスライダ（接線方向）でモデル化するが、これらのパラメータは、理論式によって導出される場合や、実験によって推定される場合がある。ここでは、バネ定数はバラストの密度 ρ と P 波および S 波速度から算出^{*)}した値 $Kn=4.13 \times 10^8$ 、 $Ks=1.01 \times 10^8$ 、減衰定数は、粒子の反発係数から算出^{*)}した値 $Cn=6780$ 、 $Cs=3390$ 、また表面摩擦係数 μ は 0.5 とした。

更に計算ステップの時間間隔（以下 Δt ）は、シミュレーション過程における全体エネルギー誤差^{*)}が十分小さくなる値^{*)}として、 $\Delta t=1.0E-6s \sim 1.0E-07s$ とした。

2-3 間隙率(2次元)の調整：図1に示す円要素を入れた容器を約 100Hz で左右に振動させ、締固めを行った。振動時間は、1,2,3,4,6,10 秒の6通りとし、全てのケースで振動後2秒間静止させた。各ケースで、まくらぎ底面の高さから下部の間隙率を算出した結果を図3に示す。

2-4 繰返し荷重条件：繰返し荷重シミュレーションにおいては、荷重荷重は1kN、繰返し荷重周波数は2Hz、20Hz、50Hz とし、いずれも100回荷重を行なった。

3. シミュレーション結果

3-1 繰返し荷重周波数の影響

(1) 残留沈下量：図4に、締固め前（間隙率0.194）のモデルに対して3通りの荷重周波数で繰返し荷重を行なった結果より、荷重回数と残留沈下（除荷時のまくらぎ位置の変位量）の関係を示す。荷重周波数2Hzでは、実バラストの繰返し荷重試験と同様に、荷重初期は急激に沈下するが、その後、漸進的に沈下する傾向が現れている。

次に荷重周波数20Hzでは、荷重10回程度まで沈下が進んだ後、漸進的な沈下に移行しているが、荷重65回目で沈下傾向が変化し、沈下の増加率は大きくなる。

更に荷重周波数50Hzでは、荷重7回目で急激に沈下が増加した後、漸進的な沈下に移行するが、更に荷重28回目以降、沈下率が増加している。

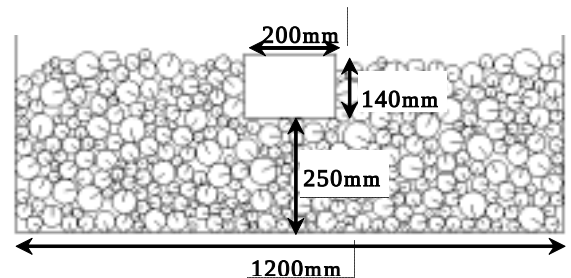


図1 シミュレーションモデル

表1 円要素の粒径

粒径分布 (バラスト)	
ふるい目 (mm)	通過率
0.063	1
0.053	0.8
0.0375	0.37
0.026	0
0.019	-

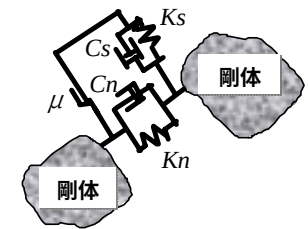


図2 DEMにおける接触モデル

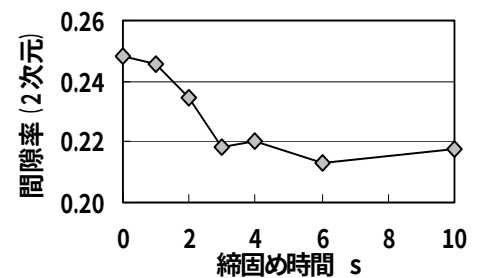


図3 締固め時間と間隙率

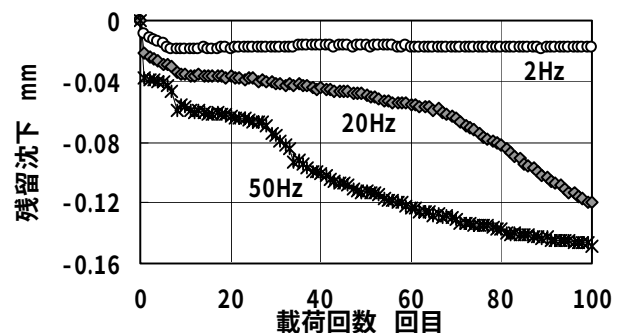


図4 荷重周波数の異なる繰返し荷重過程の残留沈下量

キーワード: バラスト軌道、繰返し荷重、荷重周波数、DEM (個別要素法) 連絡先: 国分寺市光町2-8-38 Tel: 042-573-7291 Fax: 042-573-7289

これらより、繰り返し荷重下の粒子集合体は、荷重の周波数の影響も受けること、また荷重周波数が高い場合、沈下が収束したように見えても、再び増加に転じる可能性があることが確認された。

(2) **粒子集合体のエネルギー収支**：DEMにおいては、粒子集合体全体のエネルギー(各粒子のポテンシャルエネルギー、運動エネルギー、粒子間バネの歪エネルギー、粒子間ダンパによるエネルギー減衰、粒子間摩擦によるエネルギー損失、外力による仕事)の収支の情報も得ることができる。

そこで、周波数を3通りに変えた繰り返し荷重シミュレーション結果より、荷重周波数2Hzの場合の各エネルギーの値を基準とした、荷重周波数20Hzおよび50Hzの場合の各エネルギーの割合を算出して比較した(図5)。図より、粒子集合体の各エネルギーのうち、荷重周波数の影響を著しく受けるのが粒子の運動エネルギーであり、これに伴い、粒子間ダンパにおけるエネルギー減衰も、荷重周波数の増加に伴い大きくなることが確認できる。一方、粒子間バネの歪エネルギーは、荷重周波数が小さいほど大きくなる。

(3) **粒子間の接触および滑り**：更にDEMでは、粒子の移動や回転の他に、粒子間の接触や滑りの状況を把握することが可能である。ここで、繰り返し荷重過程における、粒子間の接触点で滑りが起きている点数の接触点数に対する割合を図6に示す。図より、粒子間の滑りの割合は、繰り返し荷重過程で増減を繰り返すが、荷重周波数が高くなるほど、全体的な滑りの割合が多くなることが明らかである。このことは、(2)で述べた、荷重周波数の増加に伴い粒子の運動エネルギーが大きくなることと関連すると考えられ、更に、粒子間の滑りによって、粒子集合体の残留沈下(塑性変形)が増加することが考えられる。

3-2 粒子集合体の間隙率の影響

次に、図3に示す締固め10秒後(間隙率0.158)のモデル(以下、締固め)と、締固め前のモデルにまくらぎ面の上下で繰り返し予備荷重(1kN、2Hzで50回)をして同程度の間隙率にしたモデル(以下、予備荷重)に対して、周波数50Hzの繰り返し荷重シミュレーションを行なった。その結果を3-1で述べた締固め前のモデル(間隙率0.194)の結果とともに図7に示す。図より、間隙率が0.158の二つのモデルでは、荷重40回目以降の沈下の増加率は、ほぼ同程度であるが、初期沈下量において大きな差が出ている。ここで、両モデルの初期状態における接触力の分布を図8に示す。これより、締固めの場合、まくらぎ下に粒子との隙間があり、底面右側の角で粒子と接している。予備荷重の場合でも、図8の初期状態においては、底面右側の角でのみ粒子と接しているが、アニメーションによると、荷重開始後すぐに、まくらぎ下の粒子に接触力が発生し、荷重面を支持している。この間隙率0.158の両モデルでは、間隙率は同程度であるが、粒子の詰まり具合が不均一であるため、初期沈下過程における大きな差異の原因となったものと考えられる。

4. おわりに

DEMを用いて繰り返し荷重シミュレーションを行い、粒子集合体の塑性沈下に荷重周波数が影響すること、また粒子集合体の詰まり具合の不均一性が初期沈下に影響することを確認した。今後は、モデルの要素形状を実バラストに近づけると同時に、モデルのパラメータについても模型試験などによって検証し、信頼度を上げていきたい。

参考文献：1) 河野 昭子、松島 亘志 (07)：列車通過荷重下の粒子集合体変形挙動のDEM解析[投稿中]，第42回地盤工学研究発表会講演集
2) T. Matsushima, K. Konagai(01)：Grain-Shape Effect on Peak Strength of Granular Materials, Computer Methods and Advances in Geomechanics, pp361-366

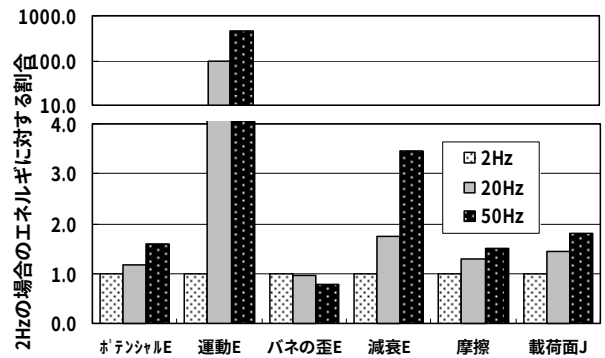


図5 各エネルギーの周波数2Hzの時の値に対する割合

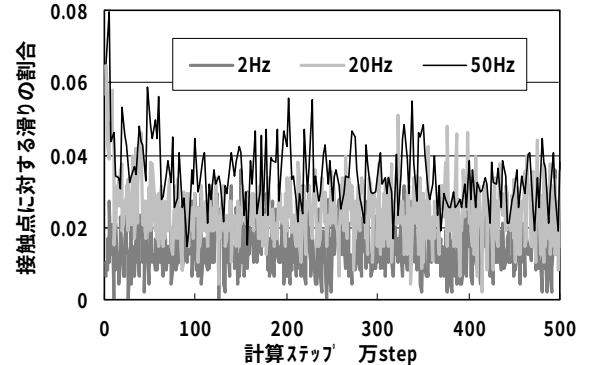


図6 粒子間の滑りの点数の粒子間接触点数に対する割合

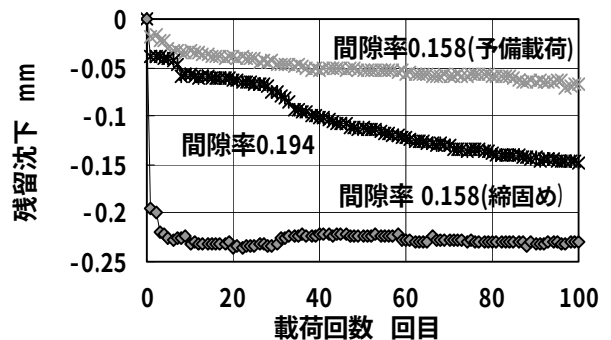


図7 間隙率と沈下傾向の比較

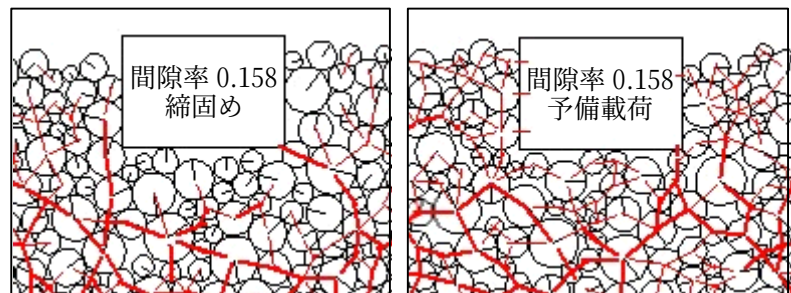


図8 間隙率0.158のモデルのまくらぎ下面周辺の接触力の分布