

3 次元 DEM を用いた軌道水平加振時のバラスト挙動観察

○ [土] 河野 昭子 (鉄道総研) [土] 松島 亘志 (筑波大学大学院)

Behavior of Ballast Grains during Shaking Table Test Using a 3D-DEM Model

○Akiko Kono (Railway Technical Research Institute)

Takashi Matsushima (Tsukuba University)

A series of shaking table test had been already performed with full-scale ballasted test tracks using newly constructed shaking table test machine. On the other hand, discrete element ballasted track models have made for examining and observing of the deformation mechanism of ballast layer. Then we tried to simulate the shaking table test above mentioned using the discrete element ballasted track model to observe not only motions of the sleeper and ballast grains but also contact force between a sleeper and ballast grains under excitation. DEM simulation results show that 1) flow of the ballast grains around shoulder is predominant during ballasted track deformation process under horizontal excitation, (2) the contact forces between sleeper ends and ballast grains don't increase although under excitation with 800gal maximum acceleration because the ballast grains which contact to sleeper ends although move under horizontal excitation.

キーワード : 3次元個別要素法, 離散体バラスト軌道モデル, 水平方向加振, 粒子間接触力

Key Words : 3D-DEM, Discrete Ballasted Track Model, Horizontal Excitation, Contact force of Grains

1. はじめに

水平加振を受けるバラスト軌道の挙動に関しては、既に実物大実験による検討が行われており、最大加振加速度が道床横抵抗力の減少や、道床肩の変形に与える影響について報告されている^{1), 2)}。これらの既往の研究結果は、水平加振過程でバラストとまくらぎ間の摩擦力が減少することや道床肩のバラストが流動することを示唆している。

これに対し、個別要素法 (以下、DEM) による上記の既往実験の模擬シミュレーションを行ったところ、最大加振加速度の増加によりまくらぎの相対変位や道床肩のバラストの変位が著しく増加する定性的傾向が得られた³⁾。

また DEM では、実験では観察が困難なバラストとまくらぎ間の摩擦力やバラスト個々の挙動の履歴を把握することが可能である。そこで、同様の離散体バラスト軌道モデルを用いて、水平方向加振シミュレーションを行い、まくらぎおよびバラストの挙動、まくらぎ・バラスト間の接触力の履歴を観察したので報告する。

2. シミュレーション概要

2.1 シミュレーションモデル

本研究では DEM シミュレーション過程における接触判定の精度を考慮し、図 1 に示すように、球集合体で軌道の各部をモデル化した。

軌道断面のサイズは在来線の一般的な形状を参考とし、

縦断方向の幅は、境界条件の影響を考慮して 700mm とした。まくらぎ要素のサイズは PC3 号まくらぎを参考とし、質量については、PC3 号と同様のものと、その 1.5 倍の 2 通りの条件とした。

バラスト要素は、実バラストの 3 次元形状の実測データを用いて⁴⁾ 動的最適化法⁵⁾ によって 1 粒子 10 個の球でモデル化し、その後、実バラストの粒径分布を参考として粒度調整した。

更に、実際の道床バラスト層を締固めた状態の見かけの密度 1.67g/cm^3 ⁶⁾ を参考としてモデルでも締固めを行った結果 1.64g/cm^3 程度で収束し、用いたバラスト要素は 19044 個となった。

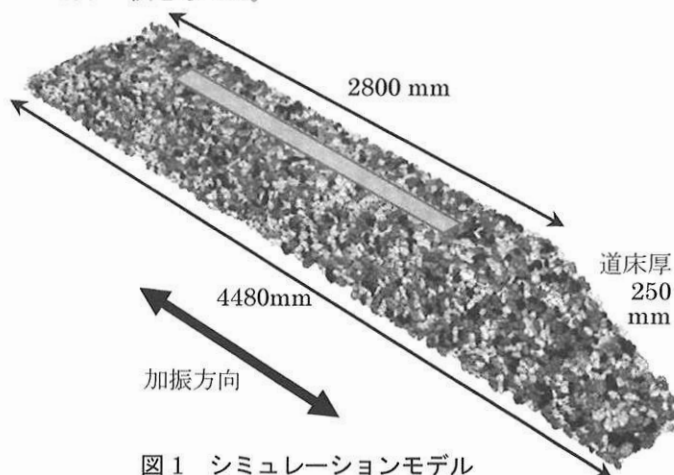


図 1 シミュレーションモデル

2.2 加振条件

加振条件において、周波数は 5Hz、最大加振加速度は 400gal と 800gal の 2 通りとし、各条件で 5 波加振させた。ここで加振方向は軌道横断面の側方方向とし、シミュレーションモデルの路盤要素に速度を与えた。

2.3 DEM パラメータ

シミュレーションにおける DEM パラメータを表 1 に示す。ここで粒子間ばね定数 Kn および Ks は碎石層の弾性波速度から算出する方法⁷⁾を採用し、粒子間減衰係数は、式(1)における反発係数 e_b が 0.2⁸⁾ となる値を求めた。

$$e_b = \exp\left(-\frac{h\pi}{\sqrt{1-h^2}}\right), \quad h = \frac{c}{2\sqrt{k \cdot m}} \quad \dots (1)$$

粒子間摩擦係数は既往の研究⁹⁾を参考とし、ここでは 36 度とした。

2.4 シミュレーションソフト

本研究のシミュレーションでは、筑波大学で開発された DEM3D-CS¹⁰⁾を用いている。

表 1 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)	法線方向	Kn	9.09×10^6		6.00×10^4
	接線方向	Ks	2.27×10^6		2.31×10^4
粒子間減衰係数 (N・s/m)	法線方向	Cn	608		105
	接線方向	Cs	304		65.0

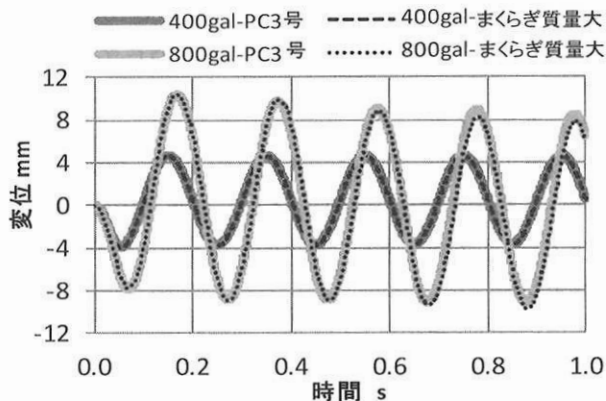


図 2 まくらぎ要素の水平方向変位

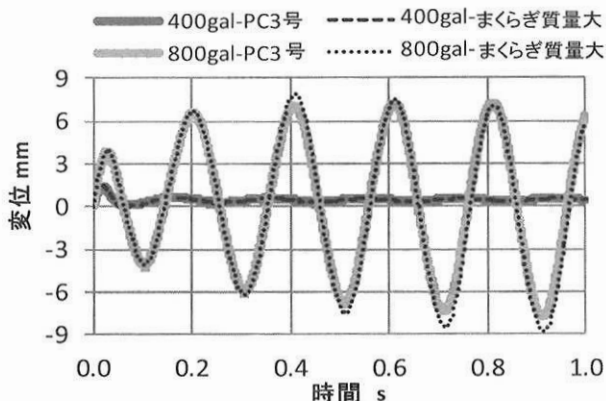


図 3 路盤要素に対するまくらぎ要素の水平方向相対変位

3. シミュレーション結果

3.1 まくらぎの挙動

図 2 にまくらぎ要素の水平方向変位を示す。図より、最大加振加速度が 400gal の場合は、まくらぎ条件 2 通りのいずれにおいても、5Hz の加振周波数に対してまくらぎ要素も 5Hz の振動を示すが、800gal の場合は、まくらぎ条件 2 通りのいずれにおいても、まくらぎ要素の振動の周期が 0.02s ほど長くなる。これは路盤要素の強制加振方向が反転した瞬間、まくらぎ要素は 0.02 秒程度遅れて（側方に振られてから）変位方向が変わる挙動を示している。

次に図 3 に、強制加振している路盤要素に対するまくらぎの相対変位を示す。図より、最大加振加速度 400gal の場合は加振開始時に振幅 1.4mm 程度の相対変位が生じるが、その後は振幅 0.9mm 程度となっている。一方、最大加振加速度 800gal の場合は、加振開始時に振幅 4.0mm 程度の相対変位が生じた後、相対変位の振幅は徐々に増加し、5 波目では PC3 号条件で振幅 13mm 程度、まくらぎ質量大の条件で振幅 14mm 程度となる。

以上より、まくらぎ要素の水平方向変位および水平方向相対変位に対しては、最大加振加速度が影響を及ぼすのに対して、まくらぎ質量の影響は、今回の 1.5 倍程度では僅かであった。

3.2 バラストの挙動

次にバラスト要素の挙動を詳細観察するため、図 4 に示すまくらぎ底面より下部に位置する 4 つのバラスト要素 A1~A4 と、道床肩および斜面に位置する 4 つのバラスト要素 B1~B4 について変位の履歴を観察する。

まず図 5 に最大加振加速度 400gal の場合の各バラスト要素の変位履歴を示す。図 5(1)がバラスト要素 A1~A4、(2)が B1~B4 の場合の結果である。波形を見易くするために(1)(2)の縦軸のスケールは変えている。

図 5(1)より、まくらぎ下面より下部にあるバラスト要素 4 個については、いずれも加振開始時に 0.4~0.8mm の相対変位が生じた後、一度初期位置から 0.15mm 程度の位置に戻り、その後、振幅 0.2~0.3mm の振動を示す。また、加振による振動とは別に、小刻みな振動が重畳しているが、これはバラスト個々の固有振動を示している。

次に図 5(2)の斜面部分のバラスト要素は、図 5(1)の要素に比較して動きが顕著で、加振開始時の相対変位は 1.5~1.8mm であり、またその後、徐々に外側へと移動し、5 波加振後の移動量の水平方向成分は、斜面上層の要素（図 4 中の B3）では約 9mm に及んでいる。

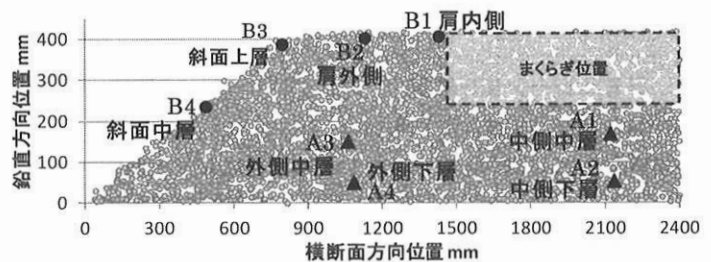
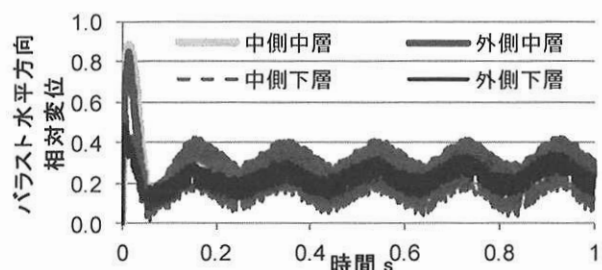
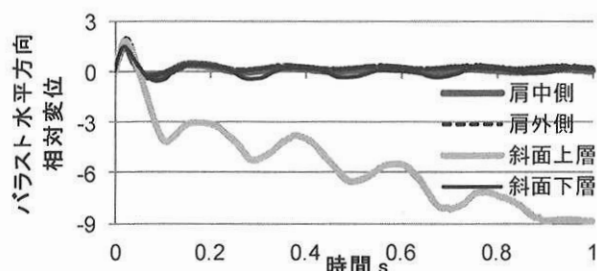


図 4 観察したバラスト要素

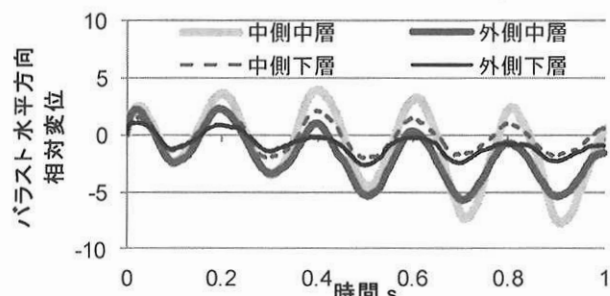


(1) まくらぎ下面下部のバラスト要素

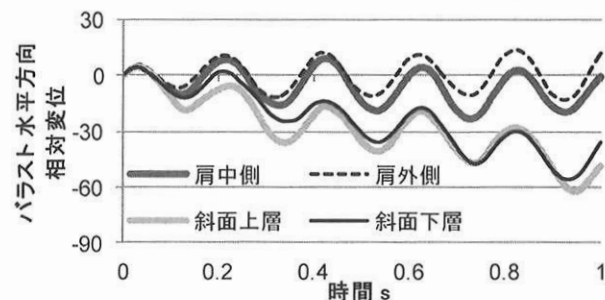


(2) 道床肩および斜面のバラスト要素

図 5 バラスト要素の変位履歴 400gal

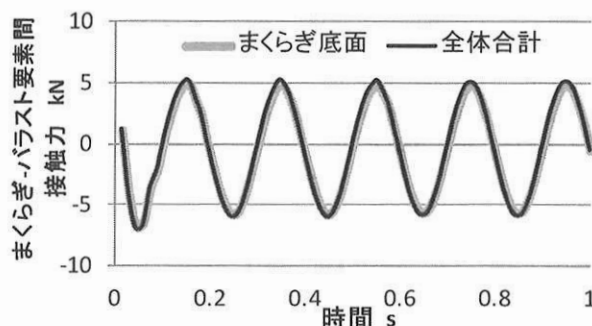


(1) まくらぎ下面下部のバラスト要素

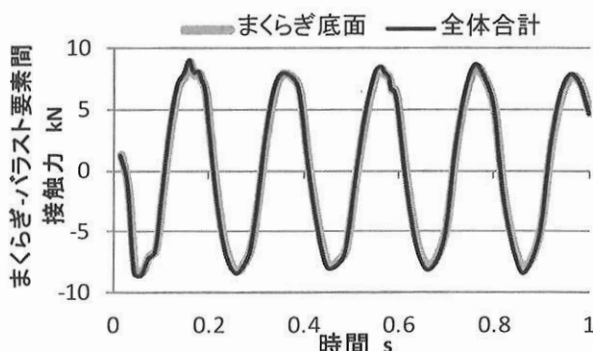


(2) 道床肩および斜面のバラスト要素

図 6 バラスト要素の変位履歴 800gal



(1) 最大加振加速度 400gal



(2) 最大加振加速度 800gal

図 7 まくらぎ要素とバラスト要素間の接触力

次に図 6 に最大加振加速度 800gal の場合の各バラスト要素の変位履歴を示す。図 6(1)がバラスト要素 A1~A4、(2)が B1~B4 の場合の結果である。波形を見易くするために(1)(2)の縦軸のスケールは変えている。

図 6(1)より、まくらぎ下面より下部にあるバラスト要素は、加振開始時に 1.8~2.4mm の相対変位が生じた後、2~8mm 程度の振幅で振動しながら徐々に外側に移動し、加振 5 波後は 1~3mm ほど移動している。

一方、図 6(2)に示す斜面部分のバラスト要素は、図 5 に示した最大加振加速度 400gal の場合の 10 倍近い相対変位を示し、斜面上層の要素 (図 4 中の B3) では加振過程で著しく外側へと移動し、加振 5 波後は約 60mm ほど外側へ移動している。

以上より水平加振中のバラストの挙動においては、まくらぎ下面より下部および軌道横断面の中側に位置するバラスト要素は、拘束圧が大きいために相対変位は比較的小さいが、道床肩や斜面部分のバラスト要素は拘束されていないため、バラスト要素の変位は著しくなる。

既往の振動台実験結果^{1),2)}からも、水平方向加振後に道床肩部の断面積が減少することが報告されていることから、バラスト軌道においては、水平加振によって道床肩や斜面の変形が先行するといえる。

3.3 まくらぎ要素とバラスト要素間の接触力

次に、実験では測定が困難な、加振過程におけるまくらぎ-バラスト間の接触力の変化を観察する。

図 7 に、PC3 号条件のシミュレーション結果より、まくらぎ底面要素とバラスト要素間の接線方向接触力と、まくらぎ要素とバラスト要素間の接触力の水平方向成分合計値を合わせて示す。ここで、後者の水平方向成分合計値は、まくらぎ底面要素とバラスト要素間の接線方向接触力、まくらぎ側面要素とバラスト間の接線方向接触力およびまくらぎ端面要素とバラストの法線方向接触力の合計である。図 7(1)は最大加振加速度 400gal、(2)は 800gal の場合の結果である。

図より、いずれの条件においても、まくらぎ要素の各面とバラスト要素との接触力の水平方向合計値に対して、まくらぎ底面要素とバラスト要素間の接触力が大きな割合を示すことが明らかである。

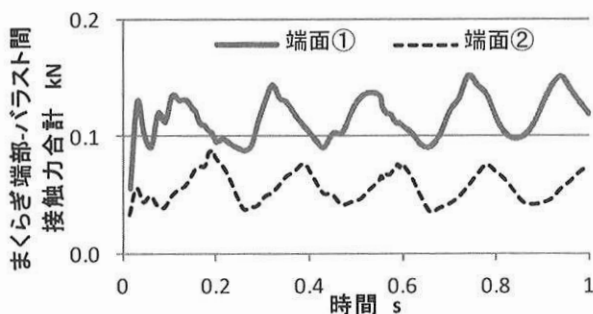
また接触力の振幅は、最大加振加速度 400gal の場合は 10kN 程度であるのに対して、最大加振加速度 800gal の場合では 16kN 程度となっている。つまり、まくらぎ底面要素とバラスト要素間の接触力の水平方向成分は、最大加振加速度の影響を受け、この場合約 1.6 倍となっている。

次に図 8 に、まくらぎ要素の両端面要素とバラスト要素間の法線方向接触力を示す。図 8(1)は最大加振加速度 400gal、(2)は 800gal の結果を示す。

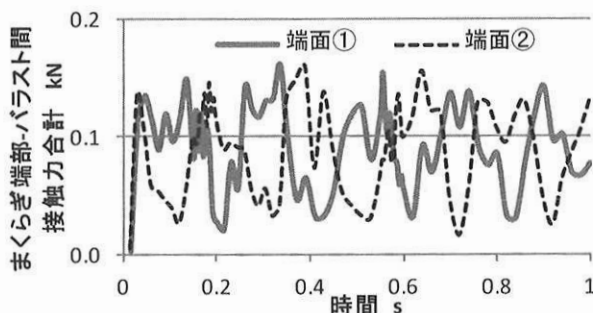
図 8(1)より最大加振加速度 400gal の場合、端面①と端面②の接触力は、互いに反対側に位置することから、ほぼ逆位相の波形を示している。また加振開始時にまくらぎ要素の相対変位が生じることから、端面①の接触力の増減の中心位置が端面②よりも 0.1kN ほど大きくなっているが、両端面の接触力の増減の振幅は 0.04~0.06kN で、ほぼ同程度となっている。

次に図 8(2)より、最大加振加速度 800gal の場合も、端面①と②ではほぼ逆位相の波形を示すが、それぞれの波形は図 8(1)に比較して細かい増減が含まれている。また、それぞれの波形の振幅は 0.1 前後で最大振動加速度 400gal に比較して増大するが、最大値は 0.15kN 程度で、増加傾向は見られない。

これは、最大加振加速度 800gal の場合は道床肩のバラストの挙動も著しくなるため、端面要素と接触していたバラスト要素が流動を起こし、端面から離れる現象を示唆しているといえる。



(1) 最大振動加速度 400gal



(2) 最大振動加速度 800gal

図 8 まくらぎ要素端面とバラスト要素の接触力

4. おわりに

バラスト軌道離散体モデルを用いて、3次元 DEM による水平方向加振実験の再現シミュレーションを試みた。

離散体モデルを用いることで、実験では測定が困難なバラスト粒子個々の挙動や、まくらぎ要素とバラスト要素間の接触力の履歴の観察が可能であることが示された。

ただし定量的な点については課題が残るため、今後は参考とした実物大実験の結果と定量的な比較をし、モデルの精度を向上させることを目標とする。

参 考 文 献

- 1) 中村貴久、関根悦夫ほか：実物大バラスト軌道の大型振動台試験 その 1，土木学会第 65 回年次学術講演会講演要旨，pp463-464 (CD-ROM)，2010
- 2) 中村貴久、関根悦夫、白江雄介：大型振動台試験によるバラスト軌道の耐震性能評価，鉄道総研報告，vol24，No12，pp23-28，2010
- 3) 河野昭子、松島亘志：3次元個別要素法によるバラスト軌道振動台実験の再現シミュレーション，鉄道工学シンポジウム講演概要，pp81-84，2011
- 4) 福田和彰、松島亘志、山田恭央：イメージベース DEM による碎石の一面せん断試験シミュレーション，「実務利用を目指すマイクロジオメカニクス」に関するシンポジウム 発表論文集，pp7-10，2008
- 5) 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 回地盤工学研究会発表論文集，pp357-358，2002
- 6) 須長誠：ガンマ線を用いた道床バラストの密度測定法，第 28 回土質工学研究発表会，pp2383-2384，1993
- 7) 伯野 元彦：破壊のシミュレーション 森北出版，1997
- 8) 中島祐一ほか：落石の運動エネルギーと落下姿勢が衝突挙動に及ぼす影響，第 7 回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，2004
- 9) 河野昭子ほか：レール表面凹凸部の道床バラスト層の変形挙動に関する検討，第 17 回鉄道技術連合シンポジウム論文集，pp571-574，2010
- 10) T.Matsushima：3-D Image-based Discrete element Modeling for Irregularly-Shaped Grains, Proc.2nd Intl. PFC Symp. Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods, Balkema, pp421-427，2004