

# 繰返し衝撃荷重下の道床バラスト層の動的挙動と沈下特性

河野 昭子\* 松島 亘志\*\*

## The Dynamic Response and the Residual Deformation of Ballast Layer under Cyclic Impact Loadings

Akiko KONO Takashi MATSUSHIMA

Cyclic impact loading tests were performed both experimentally and numerically to examine the effect of impact loading on both dynamic response and settlement of a shallow granular layer like a ballasted layer. It was found that residual settlement under cyclic impact loadings are increased compared with another one under ‘Standard’ cyclic loadings. PIV results suggest that the above mentioned results are caused by the dynamic response of grains during impact ‘off-loading’, which can loosen the granular columns and lead to a volumetric increase. Furthermore, DEM results show that many grains loss contact points during impact ‘off-loading’. Then 4 patterns of loading waves are applied to the discrete ballasted track model by DEM simulations. Those results also show that impact loadings increase both dynamic response and residual settlement of the model.

キーワード：衝撃荷重，高速載荷試験装置，PIV，個別要素法，粒状体，バラスト軌道モデル

### 1. はじめに

レール継目部やレール溶接部では、まくらぎ数本範囲の局所的な道床沈下により浮きまくらぎが発生する事例が、しばしば観測されている。この一要因として、列車がレール表面の凹凸を通過する際に発生する衝撃荷重の影響が指摘されているが、衝撃荷重が道床バラスト層の沈下に及ぼす影響に関しては、現場における継続的観測や再現実験が困難であることなどから明らかにはされていない。

そこで本研究では、筑波大学と共同で開発したステッピングモータ式高速載荷試験装置を用いて、1/3 模型道床バラスト層（以下、碎石層）における繰返し衝撃載荷実験を行うと同時に、実験中の碎石層画像を PIV 処理し、碎石粒子の挙動を観察する。また個別要素法（以下、DEM）による実験再現シミュレーションにより、実験では得がたい粒子間接触力などの情報を用いた検討を行う。

更に、離散体バラスト軌道モデルにおいて、レール表面凹凸部の列車通過荷重波形を模擬した、高周波成分を含む荷重波形を入力し、道床バラスト要素の動的挙動と残留沈下量に及ぼす影響について検討する。

### 2. 模型碎石層における繰返し衝撃載荷試験

#### 2.1 試験装置

荷重一波の作用時間が 0.01s オーダで、かつ各載荷間に完全除荷が可能という条件で、図 1 に示すステッピングモータ式高速載荷試験装置<sup>1)</sup>を開発した。載荷部はステッピングモータの回転・反転によりネジ棒が上下する仕組みで、土槽部分は幅 800mm × 高さ 500mm × 奥行 300mm で、前面はアクリル板である。

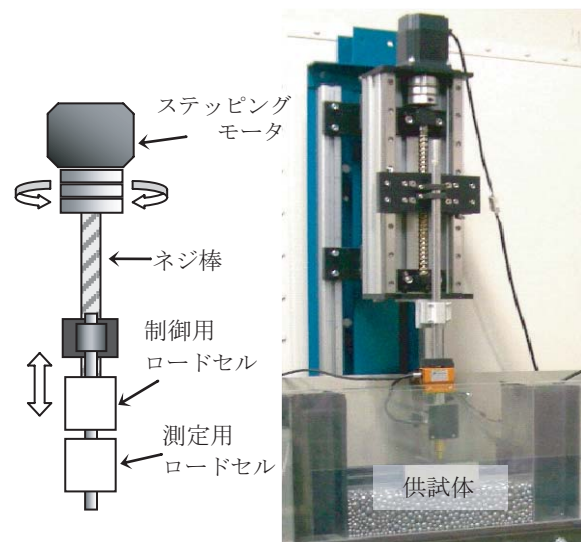


図 1 ステッピングモータ式高速載荷試験装置

\* 鉄道力学研究部（軌道力学）

\*\* 筑波大学大学院（システム情報工学研究科）

特集：軌道技術

2.2 実験および実験再現シミュレーションの条件

2.2.1 供試体とDEMモデル

図2に実験供試体と実験再現シミュレーションにおけるDEMモデルのサイズを示す。層厚は実軌道の1/3程度を想定し80mmとし、幅は境界の影響を低減させるため、実際のまくらぎ間の1/3より広めに375mmとした。奥行方向は載荷部直下の粒子挙動を前面から観察するため40mmと薄くした。載荷板は継目部大盤まくらぎ300mmの1/3の100mmと比較のために150mmの2通りとした。

供試体の密度は、実験では約1.67g/cm<sup>3</sup><sup>2)</sup>となるように作成し、DEMモデルでも同程度の密度となるように締固め、最終的には1.64g/cm<sup>3</sup>となった。

2.2.2 実験試料および砕石要素

図3に実験試料の粒度分布を示す。試料は甲州産の安山岩の細粒砕石で、実バラストの1/3相似粒度となるように調整を行った。また、実験試料のモデル化においては、DEMシミュレーションにおける接触判定の精度を重視し、球集合体要素を用いた。モデル化においては動的最適化法<sup>3)</sup>を用いた。

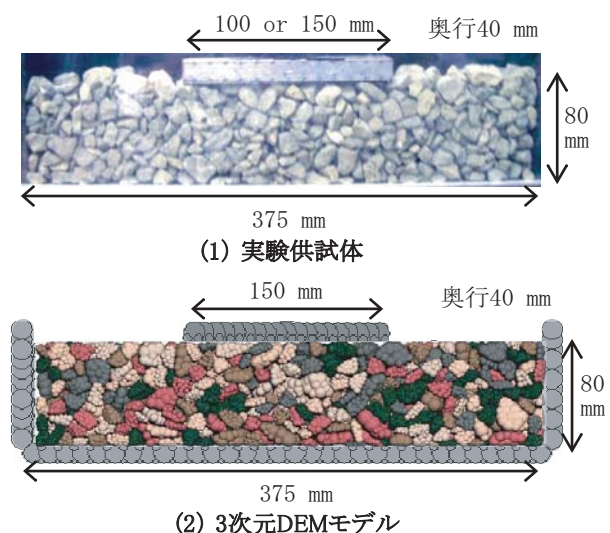


図2 供試体およびモデルの概要

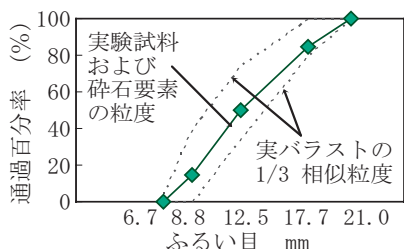


図3 実験試料と砕石要素の粒径分布



図4 実験試料のモデル化例

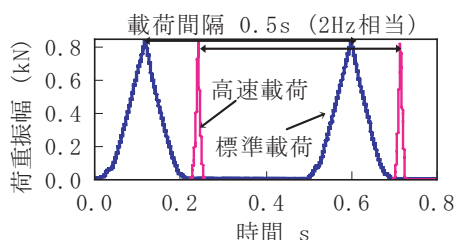


図5 載荷荷重波形例

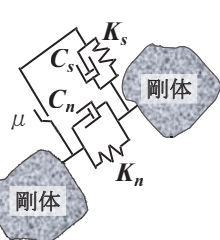


図6 DEMの接触モデル

図4に砕石要素の例を示す。本研究では、既往の研究を参考とし<sup>4)</sup>、一粒子20球でモデル化した。バラスト粒子のモデル化における最適な構成球の数に関しては、今後の検討課題とする。

2.2.3 載荷条件

荷重振幅は、実物大実験におけるまくらぎ載荷荷重40kNを参考とし、供試体が1/3模型であり奥行方向が薄いことを考慮し、ここでは0.53kN<sup>1)</sup>(載荷板幅100mmの場合)および0.8kN(載荷板幅150mmの場合)とした。

ステッピングモータ式高速載荷試験装置では一波の荷重作用時間が0.01s程度まで短縮可能であるが、ロードセルのサンプリング性能を考慮し、ここでは衝撃的な載荷として、初期沈下後の荷重作用時間が0.02sとなるように載荷速度100mm/sを設定した(以下、高速載荷)。また比較のため、高速載荷の1/10の載荷速度10mm/sでも同様の繰返し載荷試験を行った(以下、標準載荷)。載荷間隔は、いずれも0.5s間隔とした。図5に標準載荷と高速載荷の荷重波形例を示す。

シミュレーションにおける載荷条件も実験と同様とし、荷重振幅は0.8kN(載荷板幅150mm)とした。

2.2.4 DEMパラメータ

DEMでは、図6に示すように、剛体要素間の接触をばね-ダンパで、滑りをスライダでモデル化している。ここで粒子間ばね定数は砕石層の弾性波速度から算出<sup>5)</sup>し、 $K_n=9.67 \times 10^5 \text{ N/m}$ 、 $K_s=3.63 \times 10^5 \text{ N/m}$ とした<sup>4)</sup>。粒子間減衰係数は、式(1)における反発係数 $e_b$ が0.2<sup>6)</sup>となる値として $C_n=6.78 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ 、 $C_s=3.39 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ とした。

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

ここで $k$ は粒子間バネ係数、 $m$ は粒子の質量である。粒子間摩擦角は、27度<sup>4)</sup>および36度<sup>7)</sup>の2通りとした。

2.3 実験およびシミュレーション結果

2.3.1 残留沈下量の変化

図7に実験で得られた砕石層の残留沈下量と載荷回数との関係を示す。図中、赤線および青線が載荷板幅100mmで荷重振幅0.53kNを10000回載荷行ったケース1、薄赤線および薄青線が載荷板幅150mmで荷重振幅0.8kNを1000回載荷行ったケース2における残留沈下量の値を示す。いずれも各ケース2回行った実験結果の平均値を示している。

図7より、いずれの実験ケースでも、載荷10回目程度までは標準載荷と高速載荷で明瞭な差異は見られないが、載荷10回目以降では、標準載荷(図中青線・薄青線)と高速載荷(図中赤線・薄赤線)の沈下曲線の傾きの差異が大きくなるのがわかる。これにより、図7に示すケース1の載荷10000

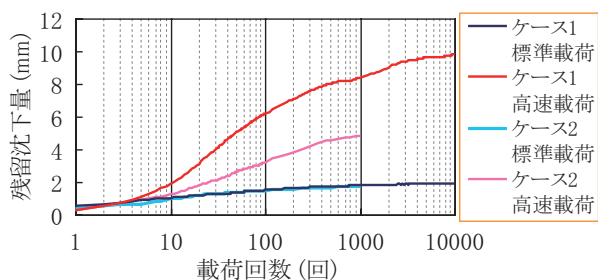


図7 実験結果 - 残留沈下量と载荷回数との関係

回終了時の残留沈下量の平均値は、標準荷重で2.18mm、高速荷重で9.82mmで、高速荷重の方が著しく大きくなった。また図7に示すケース2の载荷1000回終了時でも同様に、標準荷重で1.52mm、高速荷重で4.81mmと高速荷重の方が著しく大きくなった。

次に、実験再現シミュレーション結果を図8に示す。図8は繰返し载荷100回における载荷回数と残留沈下量の関係で、同条件の実験結果（ケース2各2回）と併せて示す。また図中の凡例の $\mu$ は粒子間摩擦角を示す。

図より、粒子間摩擦角27度の場合では、標準荷重10回目までに1.34mm程度の残留沈下が生じた後、沈下進みは激減し、载荷100回後の残留沈下量は1.95mmとなる。一方、高速荷重では、载荷10回目までに1.68mm程度の残留沈下が生じた後、沈下進みは減少するが曲線の傾きは大きく、载荷100回終了時の残留沈下量は3.21mmとなった。また粒子間摩擦角36度の場合には、標準荷重と高速荷重の沈下傾向は同様であるが、沈下量は全体的に粒子間摩擦角27度の場合よりも小さく、载荷100回後の残留沈下量は標準荷重で1.32mm、高速荷重で2.52mmとなる。

以上より、実験とDEMシミュレーションのいずれの結果からも、载荷速度が残留沈下量に影響を及ぼし、特に

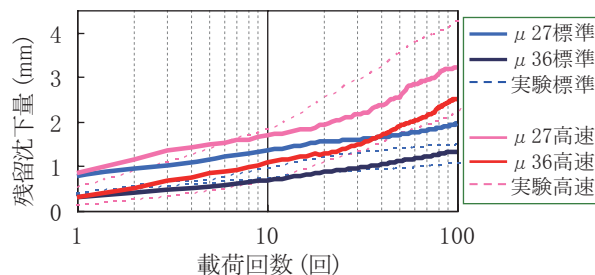


図8 DEM結果 - 残留沈下量と载荷回数との関係

载荷10回目以降で顕著となる傾向が表れ、衝撃的な高速载荷下で残留沈下が促進されることが明らかとなった。

更にDEMによって繰返し载荷下の碎石層の沈下の再現が可能で、定性的には実験結果と同様の沈下傾向を表すことが示された。ただし粒子間摩擦角27度の標準荷重の結果は、同条件の2回の実験結果（図中青色点線）の範囲より大きい値となることから、定量的精度を上げるためには、パラメータの詳細検討が必要といえる。

### 2.3.2 碎石粒子の動的挙動

次に、実験中に撮影した碎石層部分の画像をPIV処理し、载荷速度が碎石層内の粒子挙動に与える影響を観察した。図9に粒子の移動方向および移動量をベクトル図とコンタ図で示す。

図9(1)は载荷1回目の载荷過程、図9(2)は载荷1回目の除荷過程、図9(3)は载荷50回目の除荷過程の粒子の動的挙動を示す。ここで、载荷過程は「载荷前と最大荷重時」の画像を、除荷過程は「最大荷重時と除荷後」の画像を用いて解析を行った。また各図、左図(a)は標準荷重、右図(b)は高速荷重の結果を示す。

図9(1)より载荷1回目の载荷過程では、標準荷重における粒子のせん断方向への移動が著しいのに対し、高速

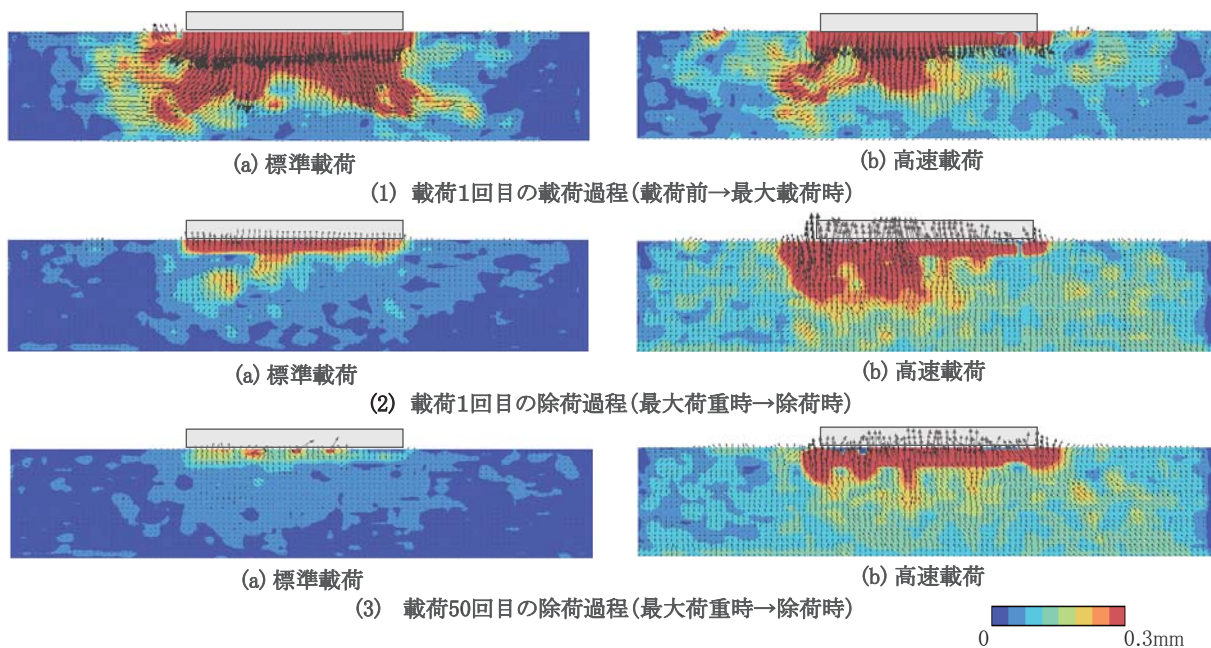


図9 各载荷回における碎石の変位（実験結果）

特集：軌道技術

荷重における粒子の移動は、標準荷重に比較して小さいことがわかる。次に図9(2)より、その後の除荷過程では、標準荷重における粒子の移動は荷重板下で見られる程度であるが、高速荷重では粒子の上方への移動が荷重板下で顕著であると同時に、砕石層全体でも見られる。更に図9(3)より、荷重50回目の除荷過程では、標準荷重における粒子の移動は著しく減少するが、高速荷重では砕石層全体で粒子の動的挙動が継続している。

これらより、衝撃的な高速荷重下では、除荷過程の粒子の著しい動的挙動により粒子構造の安定が妨げられることが予想され、そのことが、沈下進みが標準荷重ほど収束しない原因と考えられる。

2.3.3 DEMモデルによる動的挙動再現性の確認

2.3.2と同様に、実験再現シミュレーション結果からも荷重1回目の荷重・除荷過程、荷重50回目の除荷過程の粒子挙動を観察した。図10に要素の移動方向および移動量をベクトルで示す。図10(1)が荷重1回目の荷重過程、図10(2)が荷重1回目の除荷過程、図10(3)が荷重50回目の除荷過程の粒子の動的挙動を示す。

図より、荷重1回目の荷重過程では標準荷重における粒子の移動が著しい点、その後の除荷過程では高速荷重における粒子の上方への移動が顕著である点、更に荷重50回目の除荷過程において高速荷重における粒子の動的挙動が継続されている点において、実験とほぼ同様の傾向が得られている。ただし、荷重1回目の標準荷重の荷重過程の粒子の移動が実験結果より若干小さいのは、粒状体の初期状態のバラツキによるものであり、今後の課題である。

2.3.4 粒子間接触の変化

粒状体の変形・沈下においては、粒子個々の変形よりも粒子同士の配置、接触や滑りの影響が大きい。これに

対し実験では、こうした情報を得ることが困難であるが、DEMのような離散体モデルを用いることで、これらの情報が得られる。そこで、実験再現シミュレーション結果から荷重作用時の粒子間接触点数の変化を観察した。

図11に荷重荷重波形と粒子間接触点数の時間変化を示す。図11(1)が荷重1回目、図11(2)が荷重50回目で、各図とも左図(a)が標準荷重、右図(b)が高速荷重の結果である。

図11(1)より、荷重1回目では標準荷重の荷重開始直後に粒子間接触点数が100点ほど減少するが、その後最大荷重時に向かって徐々に接触点は回復し、最大荷重時直前で一瞬接触点数が減少した後、最大荷重時では荷重開始前より若干増加する。その後の除荷過程では400点ほど接触点数が減少するが、除荷後に回復する。

一方、高速荷重では荷重直後に接触点数は400点ほど急激に減少し、その後、最大荷重時に向かって接触点数は100点ほど戻るが、その後の除荷過程で更に激減し、除荷時には接触点数は700点ほどまでに減少する。その後0.06秒ほどで接触点数は回復するが、荷重前よりも100点ほど減少したままとまっている。

次に図11(2)に示す荷重50回目では、標準荷重の荷重過程では最大荷重に向かって粒子間接触点数は増加し、最大荷重時には荷重前より300点ほど多く、その後の除荷過程では元に戻り、除荷時には荷重前より200点ほど減少するが、除荷後にほとんどの接触点が回復する。

一方、高速荷重では荷重直後に接触点数が100点ほど減少した後、最大荷重時に向かって増加し、最大荷重時には荷重前より200点ほど接触点数が増加するが、その後の除荷過程で急激に1000点以上の接触点数が失われ、除荷時の接触点数は950点程度となる。

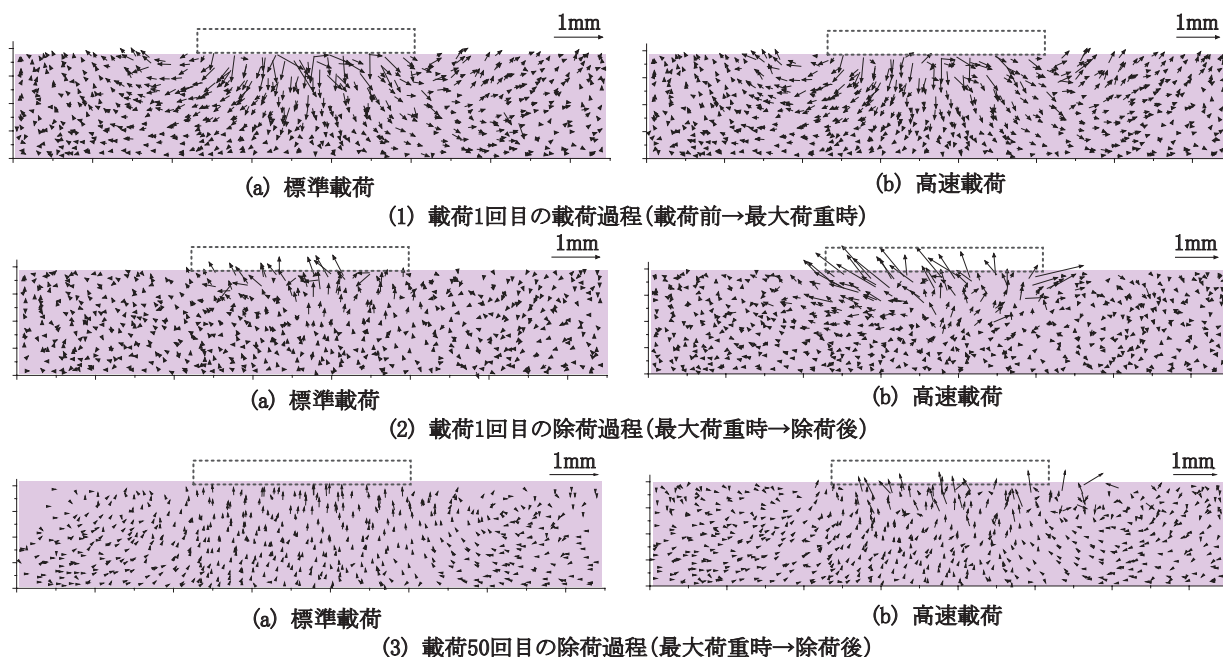


図10 各荷重回における砕石の動的挙動 (DEMシミュレーション結果)

以上より、標準荷重においては、荷重履歴のない荷重1回目では粒子間接触点数の増減があるものの、荷重50回目では粒子構造が安定し、荷重作用時には粒子の接触点が十分増加し、除荷時の接触点喪失は微小となる。一方、高速荷重では、荷重1回目だけでなく荷重50回目においても粒子間接触点数の増減が激しく、特に除荷過程の減少が著しい。この結果は、先に述べた「衝撃的な高速荷重下において、粒子構造の安定が妨げられる」現象を裏付けているといえる。

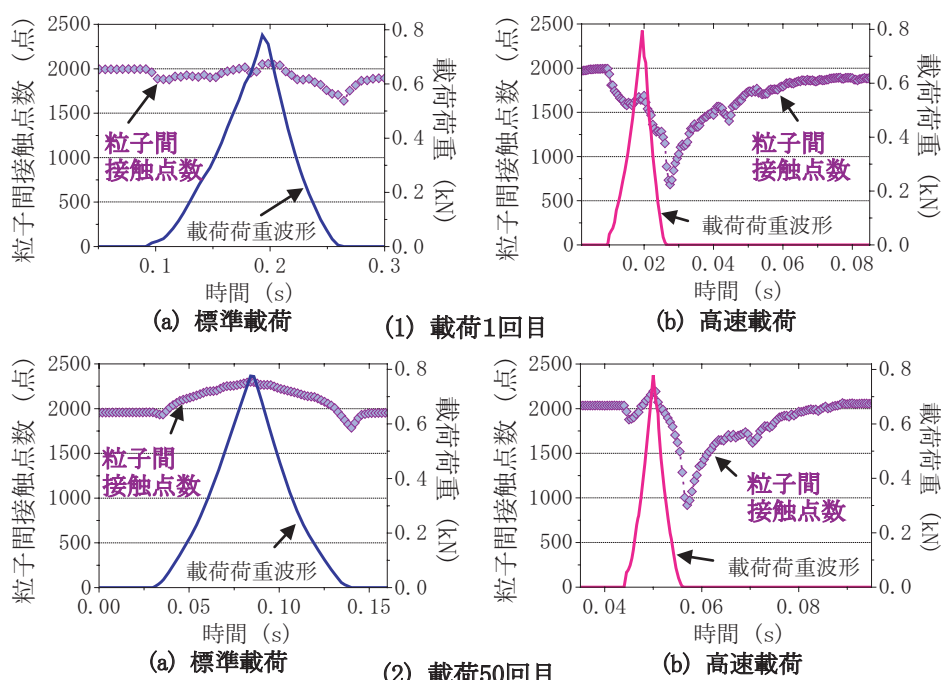


図11 荷重作用時の粒子間接触点数の変化 (DEMシミュレーション結果)

### 3. 離散体バラスト軌道モデルへの展開

前章では模型砕石層において単純な荷重波形による検討を行ったが、ここでは実際の道床バラスト層における動的挙動と残留沈下量を予測するために、図12に示す離散体バラスト軌道モデルを用いたDEMシミュレーションを行い、列車通過荷重を模擬した荷重波形を入力する。

ここで本研究の離散体バラスト軌道モデルは、次に示す4点において、先行モデル<sup>7)</sup>・<sup>8)</sup>とは条件が異なる。

- (1) 接触判定におけるエラーを解消するために、バラスト粒子は球集合体でモデル化した。
- (2) 実際の道床バラスト層に近い物性とするために、密度を調整した結果1.64g/cm<sup>3</sup>となった。
- (3) 境界の影響を低減するために、まくらぎ前後方向の幅を700mmに拡大した。
- (4) 路盤部要素のパラメータとして、コンクリート路盤+バラストマットを想定した値<sup>9)</sup>を与えた。

#### 3.1 シミュレーション条件

##### 3.1.1 DEMパラメータ

本モデルにおけるDEMパラメータを表

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)	$K_n$	$9.09 \times 10^6$	$6.00 \times 10^4$
	$K_s$	$2.27 \times 10^6$	$2.31 \times 10^4$
粒子間減衰係数 (N・s/m)	$C_n$	608	104.7
	$C_s$	304	65
粒子間摩擦角	$\mu$	20度	36度
		36度	20度

1に示す。バラスト粒子の粒子間摩擦係数は道床バラスト層の弾性波速度から算出し<sup>5)</sup>、減衰係数は前出の式(1)において反発係数が0.2<sup>6)</sup>となる値を設定した。粒子間摩擦角は36度とした。

##### 3.1.2 荷重条件

レール表面凹凸部における列車通過荷重を模擬した入力荷重波形を図13に示す。ここで実列車の通過荷重波形は前軸と後軸の二つの山を示すが、衝撃成分の影響のみを抽出するために、1軸分を想定した波形とし、ここでは単純に10Hzの正弦波とする。

衝撃成分については図13に示すように、実事例を参考とした急激な荷重減少と荷重増加を組み合わせたケースAと、ケースAの急激な荷重増加部分のみのケースB、同様にケースAの急激な荷重減少部分のみのケースC、また衝撃成分なしのケースOの合計4通りとする。

#### 3.2 シミュレーション結果

図14にまくらぎ下面荷重、図15にまくらぎ変位のシ

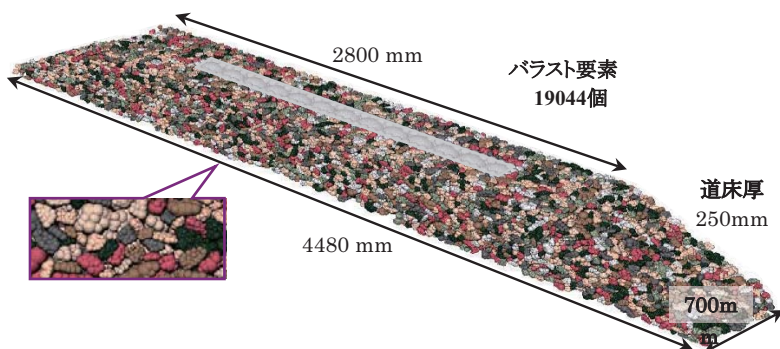


図12 3次元DEMバラスト軌道モデル

特集：軌道技術

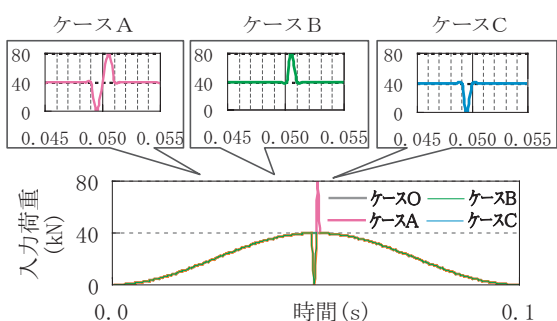


図13 入力荷重波形

ミュレーション結果より0.04s以降を示す。

図14よりケースAでは、入力荷重の急激な減少によってまくらぎ下面荷重も25kN程度まで減少するが、その後、入力荷重の増加に伴いまくらぎ下面荷重も50kN程度まで増加する。次に急激な荷重増加のみのケースBでは、入力荷重の増加に伴いまくらぎ下面荷重も55kN程度まで増加する。更に急激な荷重減少のみのケースCでは、入力荷重の減少に伴いまくらぎ下面荷重も25kN程度まで減少し、その後、入力荷重は増加しないが、まくらぎの慣性により、まくらぎ下面荷重は44kN程度まで増加する。

これに伴い図15より、衝撃荷重成分作用時の最大変位(鉛直下向き)は、ケースOで0.46mmであるのに対し、ケースAで0.57mm、ケースBとCで0.56mmと同程度である。ここで図14より、ケースBとCでは、まくらぎ下面荷重の最大値は10kNほど異なるが、その差異はまくらぎ変位には反映されていない。

入力荷重除荷後0.02秒の残留沈下量は、衝撃成分を重畳しないケースOで0.085mmであるが、重畳した3ケースでは0.1mm前後で同程度となっている。つまり衝撃荷重が重畳される場合、ケースCのように荷重のピークは増加しない場合でも、残留沈下量は増加することが示された。

次に図16に粒子間接触点数の変化を示す。いずれのケースでも10Hzの余弦波荷重が増加する前半では粒子間接触点数が2700点ほど増加し、その後、ケースOでは徐々に接触点数が元に戻るのに対して、ケースAとCでは急激な荷重減少によって接触点数が7700点ほど失われ、ケースBでは急激な荷重増加で接触点数が5000点ほど失われた後、2000点が瞬間的に回復し、再度4000点ほど失われる。荷重除荷後の粒子間接触点数は、ケースOでは54600点程度、ケースABCでは53800点程度で安定する。

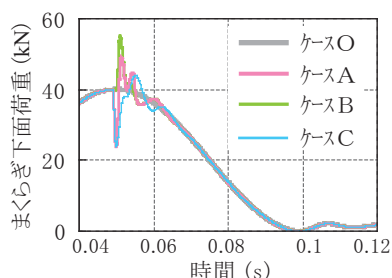


図14 まくらぎ下面荷重

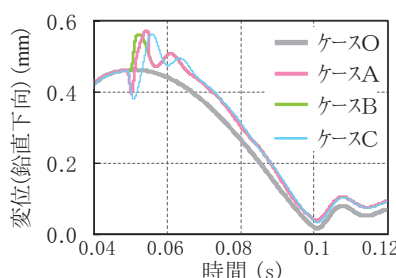


図15 まくらぎ変位

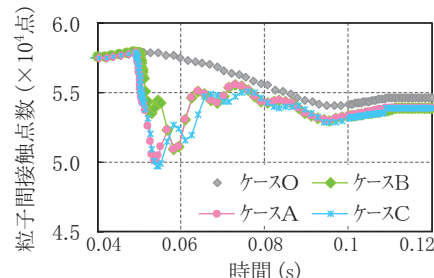


図16 粒子間接触点数

4. まとめ

衝撃的な荷重が道床バラスト層の動的挙動および残留沈下に与える影響を解明するために、模型実験とDEMによる検討を行った結果、衝撃荷重下では除荷過程で碎石粒子の動的挙動が激化し、粒子間接触点が失われる現象が観察された。更に繰返し衝撃荷重下では、上記の現象により粒子構造が安定せず、载荷10回目以降でも沈下進みが収束し難いことが示された。

同様の検討を離散体バラスト軌道モデルで行った結果、10Hzの正弦波に1000Hz程度の衝撃成分が重畳された場合、バラスト粒子の動的挙動の激化と粒子間接触点の喪失が起こり、残留沈下量が増加した。

今後はDEMモデルの精度を向上させると同時に、入力荷重波形を実軌道条件を反映させたものとしたい。

文献

- 1) 河野昭子:繰返し荷重下のバラスト粒子層の沈下挙動に与える急速荷重の影響とその微視的考察, 筑波大学学位論文, 2010
- 2) 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
- 3) 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, 2002.7
- 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メカニクス」に関するシンポジウム発表論文集, pp7-10, 2008.11
- 5) 伯野元彦:破壊のシミュレーション森北出版, 1997
- 6) 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, 2004.11
- 7) 浦川文寛, 相川明:三次元個別要素法によるバラスト軌道の動的応答解析, 鉄道総研報告, vol23, No2, pp11-16, 2009
- 8) 河野昭子ほか:離散体バラスト軌道モデルを用いたまくらぎ下弾性化の影響の検討, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, pp539-540 (CD-ROM), 2010
- 9) 名村明:有道床軌道の繰返し変形と評価法に関する研究, 北海道大学学位論文, 2004