

繰返し荷重下の鋼球層の沈下挙動に与える载荷速度の影響

Effect of loading velocity on residual settlement of granular layers under cyclic loadings

河野 昭子*・松島 亘志**

Akiko Kono and Takashi Matsushima

* 工修 財団法人 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 (〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38)

** 工博 筑波大学 准教授 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

Cyclic loading tests were performed on 1/3 scale steel ball layer to investigate the effect of the loading velocity on the settlement of granular layer. Two types of loading velocity (standard loading and impact loading) are used in the test and the residual settlement of the layer with respect to the number of cycles was measured. At the same time, the motion of the grains on the vertical front surface of the vessel was captured by high speed camera and Particle Imaging Velocimetry (PIV) was adopted to quantify the grains motion. It turned out that the cumulative settlement in the impact loading is caused by the grain motion during the unloading regime of each loading cycle. Moreover, the corresponding simulations were performed by Discrete Element Method (DEM), which indicated that the contact points between grains under the loading plate are lost during the unloading regime in the impact loading. Therefore, it is concluded that the discrete nature of granular layer plays an important role in the cumulative settlement of the layer.

Key Words : granular layer, cyclic loading, loading velocity, DEM, PIV

キーワード: 粒子層, 繰返し荷重, 载荷速度, 個別要素法, 粒子画像流速測定法

1. はじめに

鉄道線路の一種であるバラスト軌道(有道床軌道ともいう, 図-1 参照)の道床バラスト層は, 比較的粒度の揃った碎石を締め固めた粒子集合体であり, 材料費が安価でありながら適度な弾性, 走行荷重の分散, 雨水排水など様々な機能を有している. しかし, まくらぎから伝達される繰返し列車荷重による道床バラスト層の塑性沈下は免れず, 特に一部のまくらぎ下のバラストが局所的に沈下することで発生する'浮きまくらぎ'は, 騒音・振動の増加, 道床バラスト部の劣化促進の大きな一要因となるため, 保守現場の長年の悩みとなっている.

この'浮きまくらぎ'は, 路盤状態の悪い箇所, あるいはレール継目部などのレール表面凹凸部の周辺でしばしば発生することが知られている. 前者は路盤部の局所沈下が原因であることが調べられている¹⁾. 一方, 後者についてのこれまでの研究では, 落錘式試験機を用いた実験結果²⁾や, 実線における測定事例³⁾などから, 列車通過時の通常の動的応答波形(5Hz 程度の振動数)に, レール表面の凹凸部で発生する衝撃成分(50Hz 程度の振動数)が重畳されることが知られている(図-2). しかし, そうした衝撃成分が, 道床バラスト層の'残留沈下'(鉛直方向の残留変位量)を促進させる力学的メカニズムについては, 未だに明らかにされていない.

そこで本研究では, 荷重振幅を制御しながら, 衝撃荷重レベルの高速の繰返し载荷が可能なステッピングモータ式の試験装置を用いた繰返し载荷試験, および個別要素法(DEM)シミュレーションを行って, 衝撃繰返し载荷が残留沈下量に及ぼす影響につ

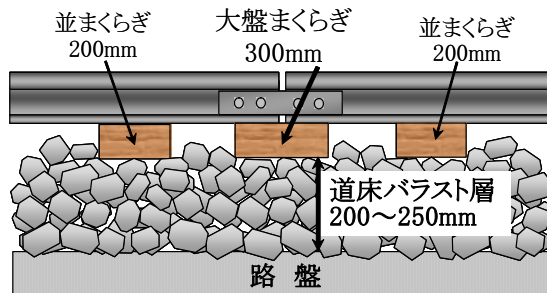


図-1 バラスト軌道の構造

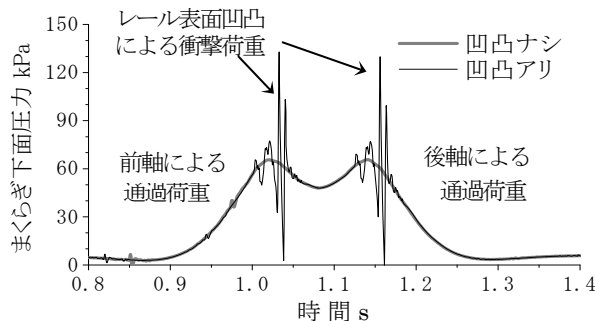


図-2 まくらぎ下面圧力波形例

いて検討を行った。

なお、実験は、バラスト粒子を模した碎石を用いた供試体でも行っている⁴⁾が、本研究では、球要素DEMシミュレーションとの比較を意図して行った、球形粒子(鋼球)を積んだ供試体の実験結果について報告する。

2. 繰返し载荷実験

2.1 試験装置

図-3 に試験機の全体写真と载荷部の図を示す。载荷部は、ステッピングモータの回転・反回転によってネジ棒が上下する仕組みとなっている。モータの回転方向は、図中の制御用ロードセルで設定荷重を感知すると反転し、これによって一定荷重の繰返し载荷が行なわれる。モータの回転速度は、モータ1回転に要するパルス数と1秒間に発生させるパルス数を設定することで制御され、これによって载荷速度を設定する。繰返し载荷間隔は、モータの回転数を設定することで、载荷速度とは別に制御することが可能である。

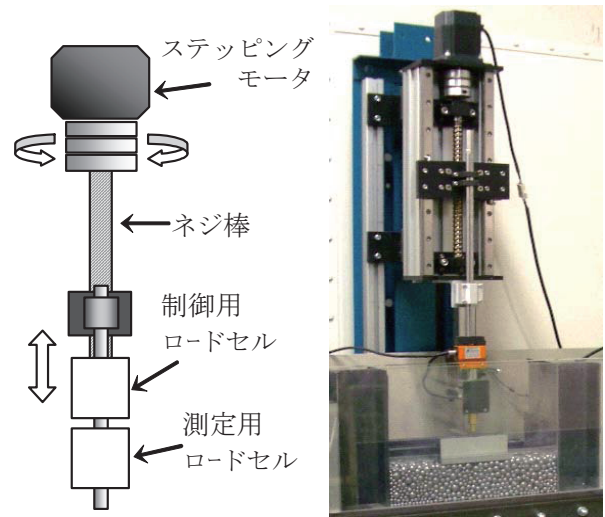


図-3 繰返し载荷試験機

2.2 試料と供試体

本研究では、球要素 DEM シミュレーションとの比較を意図して、バラスト層に球形粒子(鋼球)を用いた実験を行った。用いた鋼球は6種類の粒径のベアリング球で、図-4 に示すように粒径分布が実バラストの1/3相似粒度の範囲に収まるように配合した。

供試体は、図-1 に示すバラスト軌道の構造を参考とし、粒径と同様 1/3 の粒子層厚さとした(図-5)。ただしバラスト下の路盤はモデル化せず、底面、側面、奥行き方向の境界は剛な土槽壁となっている。奥行は载荷板の3次元な動きを避けるため40mmと薄くした。また载荷板幅は鋼球バラスト層上では安定が悪いため、やや大きめの150mmとしている。

供試体作成の際は、粒度調整した鋼球を3度に分けて投入し、粒子層を上面から木片で叩いて締め固めた後、供試体と同じ幅の载荷板を用いて、1kNで10回ほど载荷した。

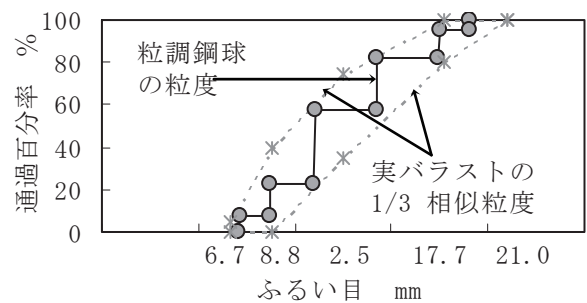


図-4 試料の粒径分布

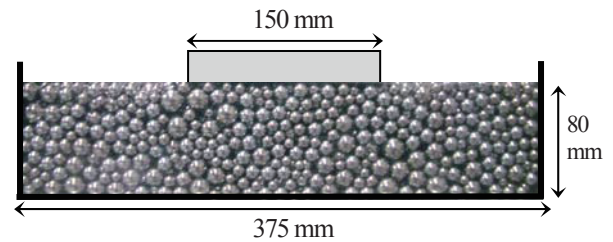


図-5 供試体サイズ

2.3 载荷条件

载荷荷重振幅は、沈下速度にもっとも影響を及ぼす因子である。荷重振幅が材料の準静的せん断強度に比べて大きすぎると、わずかの繰返し荷重で沈下が進みすぎる一方、小さすぎると、相当数载荷してもほとんど沈下しなくなる。そこで、ここでは動的な影響が出ない程度にゆっくりと単調载荷(载荷速度1mm/s)を行い、得られた荷重ピーク値(約200N、図-6)を荷重振幅としている。この程度の値にすると、後述のように1000回程度の载荷で10mm程度の沈下が発生し、繰返し荷重による沈下の漸増挙動が観測できる。

本研究では、図-2 に示す列車通過時の基本応答波形である‘標準载荷’ (载荷速度5mm/s、一波の想定荷重作用時間0.2s) および、重畳される衝撃荷重成分のみを想定した‘高速载荷’ (载荷速度50mm/s、一波の想定荷重作用時間0.02s) を、それぞれ繰返し载荷する実験を行ない、粒子の動的応答と残留沈下の両者に与える载荷速度の影

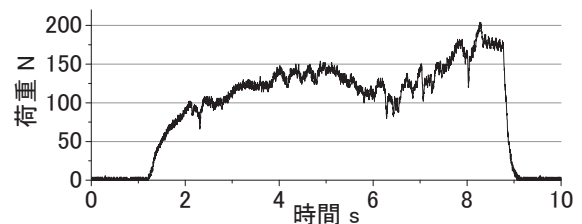


図-6 载荷波形例

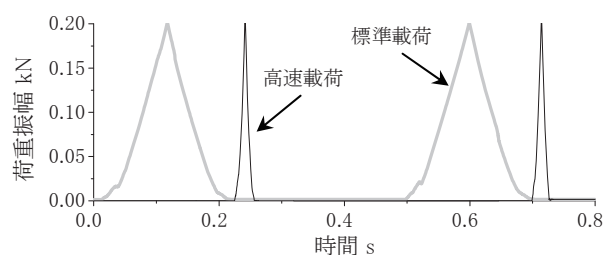


図-7 载荷波形例

響を観察した。それぞれの荷重波形の例を図-7 に示す。なお荷重速度については、予備試験において荷重 40～50 回において想定荷重作用時間となる速さを設定した。

2.4 実験結果

図-7 に、標準荷重および高速荷重での荷重波形を示す。最初の 1 波を除き、ほぼ想定した荷重作用時間(0.2s および 0.02s)となっていることがわかる。

得られた残留沈下(荷重板の除荷時の鉛直方向変位)と荷重回数の関係を図-8 に示す。図の横軸は対数表示する。

図より明らかなように、荷重が進むにつれ、標準荷重と比べて高速荷重の沈下進みが顕著となり、沈下量の差が大きくなっていることがわかる。荷重 1000 回終了時の最終沈下量は、標準荷重で 9.88mm, 13.42mm, 高速荷重では 20.79mm, 20.42mm となっていて、高速荷重の方が、1.5～2 倍の値となっている。一方、荷重の初期段階では、そのような傾向は見られず、むしろ標準荷重のほうが沈下量が大きくなっている。このような傾向は、砕石を用いた実験⁴⁾においても観測されており、粒子形状によらない応答特性であると考えられる。

3. PIV による粒子層の観察

上述の繰返し荷重実験における粒子の応答特性のメカニズムを検討するために、繰返し荷重実験中に 50fps (標準荷重) および 500fps (高速荷重) で粒子層前面の画像を取得し、PIV(Particle Image Velocimetry)を用いて粒子運動の解析を行った。

3.1 PIV 解析条件

PIVは時刻の異なる 2 枚の画像に対して、画像パターンの比較を行って変形分布を求める手法であり、様々な工学分野で広く用いられている⁵⁾。本研究では、図-5 に示されるように粒子ひとつひとつが明瞭に認識できる画像を用いることから、パターン認識を行うエリアは、平均粒径を同じ一辺 11mm の正方形として設定した。一方、解析メッシュ(エリアの中心点座標)は 3mm としており、エリアをオーバーラップさせながら変形分布を解析している。

3.2 粒子の動的応答の観察

2.4 で述べた残留沈下量は、各荷重時の沈下のうち除荷過程で戻らなかった沈下量を示しているが、ここでは 1 回の荷重中の粒子の動的応答を観察するために、荷重過程、除荷過程、除荷後の粒子の挙動を別々に観察することとする。そのために、図-10 に示すように、荷重過程の挙動は荷重前と最大荷重時の画像を、除荷過程の挙動は最大荷重時と除荷時の画像を、除荷後の挙動は除荷時と除荷後 0.1s 後の画像をそれぞれ選んで PIV 解析を行った。更に荷重前と除荷後の画像より、各荷重回での残留変位分布も求めた。

図-11 にそれらの結果を示す。図-11(a)が荷重 1 回目、図-11 (b)が荷重 100 回目での解析で、それぞれ①が荷重過程、②が除荷過程、③が除荷後、④が残留変位を示す。また各図とも、左側(a)が標準荷重、右側(b)が高速荷重の結

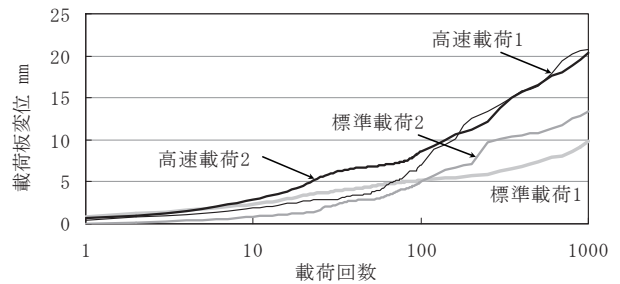


図-8 実験結果

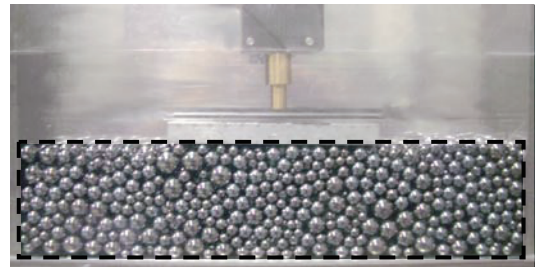


図-9 粒子層部分の画像

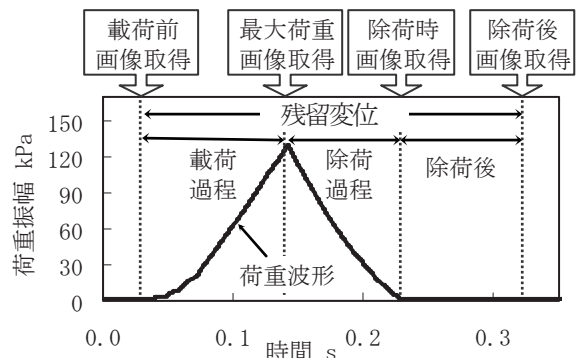


図-10 各荷重回における画像取得箇所

果である。

図-11(a) より、荷重 1 回目の荷重過程では、粒子層内で明瞭な円弧すべりが発生し、それにより沈下が発生していることがわかる。また、このすべり量は標準荷重の方が高速荷重に比較して大きい。これは、高速荷重においては、すべり円弧で仮定される準静的な釣り合い状態が成立しておらず、1次元圧縮的な動的振動モードが含まれていることが原因であると考えられる。高速荷重での除荷過程において、粒子の膨張運動が観察されていることも、このような動的な影響であると考えられる。

次に図-11(b) の荷重 100 回目では、標準荷重、高速荷重の両方で、変位レベルは荷重 1 回目と比較して小さくなっているため、スケールを大きくして表示している。標準荷重では顕著な変形は見られず、繰返し荷重によって安定な粒子構造が形成されていることが予想される。一方、高速荷重では、荷重・除荷過程・除荷後を通して、粒子の動的な圧縮・膨張変形が発生し、結果として大きな残留変位を生じている。特に、除荷過程および除荷後の膨張変形は、荷重に対する安定な粒子構造の形成を阻害し、沈下の継続をもたらす要因であると考えられる。

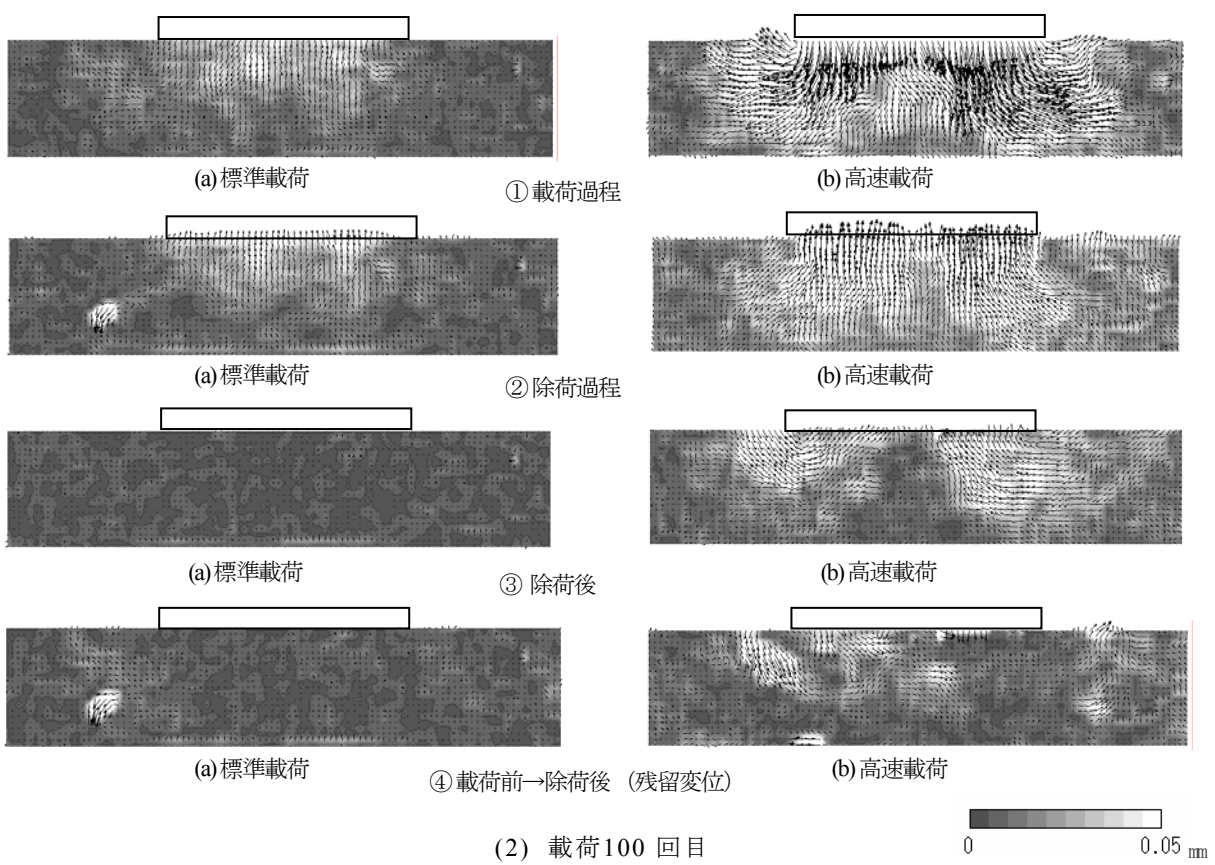
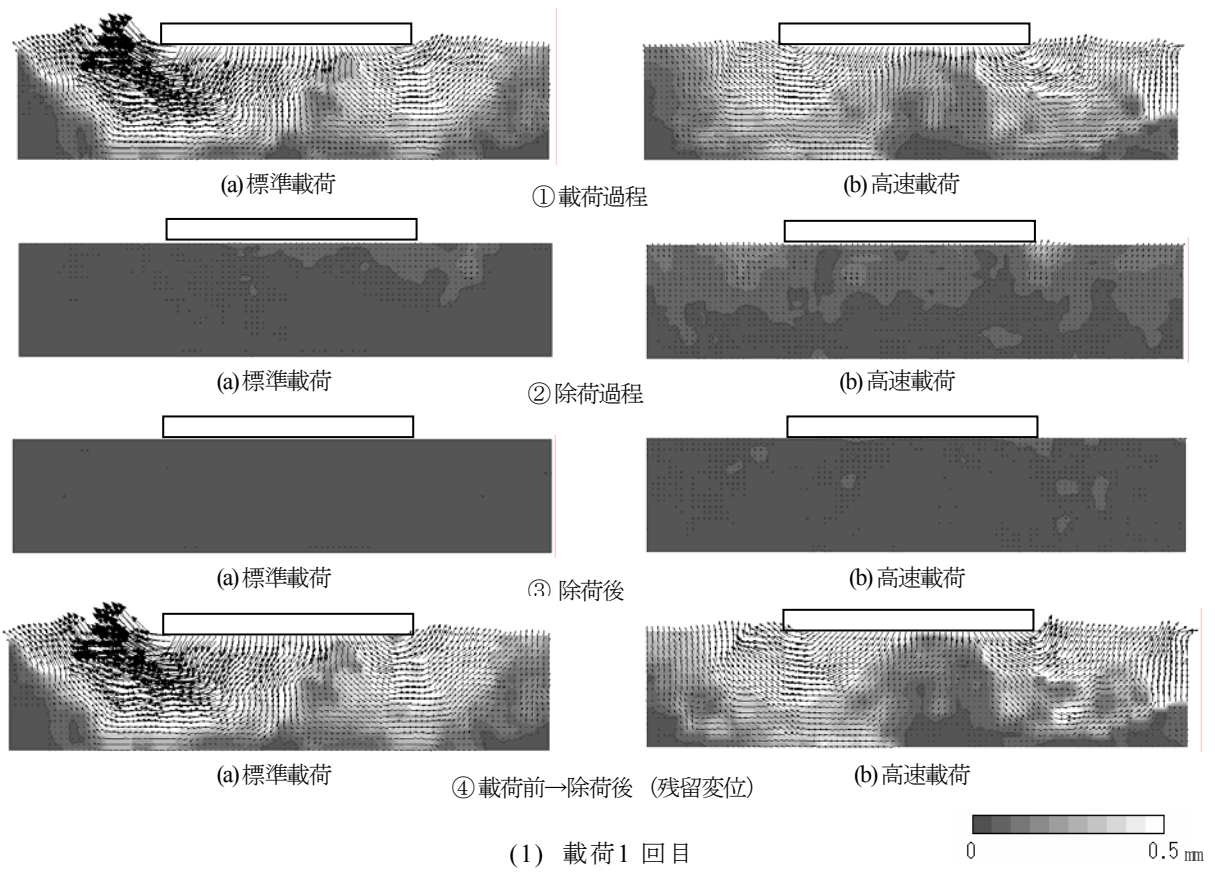


図-11 各載荷回の粒子の挙動 (PIV解析結果)

4. DEM シミュレーション

本章では、前章の鋼球層繰り返し載荷実験に対応する個別要素法(Discrete Element Method, 以下DEM)シミュレーション⁶⁾を行う。DEMは、パラスト層のような粒状体の力学挙動を解析するのに適した手法であり、全く同じ粒子堆積構造に対して、様々な載荷速度を与えてその影響を調べることができること、粒子運動のほか、粒子間接触力など、実験で得ることの難しい情報を得られること、などのメリットがあるが、粒子間に設定するパラメータの値によって、現象が変わってしまうなどの問題もあることに注意が必要である。

4.1 DEM パラメータ

DEMでは、剛体要素の要素間を法線方向と接線方向のバネとダンパでモデル化し、接線方向のスライダによって粒子間の滑りをモデル化する(図-12)。球形粒子間の接触応答については、拘束圧依存のヘルツの理論⁷⁾が知られているが、本研究では簡単のため、線形バネを用いる。ヘルツ理論を用いる場合との違いは今後の検討課題である。

法線方向の線形接触バネの剛性は、式(1)のヘルツの式を用いて求めた。

$$K_n = \sqrt[3]{\frac{2}{9} \left(\frac{E}{1-\nu^2} \right)^2 r P} \quad \dots (1)$$

接線方向の粒子間バネ係数 K_s は、式(2)⁶⁾を用いて、式(1)~(4)項に示す値を代入して求めた。

$$K_s = \frac{G}{E} K_n = \frac{K_n}{2(1+\nu)} \quad \dots (2)$$

ここで式(1)、(2)ともに、 E は材料のヤング率、 ν はポアソン比である。式(1)の r は粒子の半径、 P は接点における法線方向の荷重である。

粒子間バネ係数の異なる要素が接触した場合の粒子間接触力の計算においては、両者の粒子間バネ係数の相乗平均の値を用いた。

粒子間の減衰係数は、バネ-ダンパの付いた質点が接触して跳ね返る運動における反発係数を e_b とすると、バネ係数 k とダンパの減衰係数 c の関係は式(3)の通りとなることから、式(3)に後述(1)~(4)項に示す値を代入して求めた。

$$e_b = \exp\left(-\frac{h\pi}{\sqrt{1-h^2}}\right), \quad h = \frac{c}{2\sqrt{k \cdot m}} \quad \dots (3)$$

ここで e_b は反発係数、 k は粒子間バネ係数、 c は粒子間ダンパの減衰係数、 m は粒子の質量である。

(1) 鋼球要素のパラメータ

鋼球要素の粒子間バネ係数の算出では、 E は鋼材のヤング率 2.0×10^5 MN/m²、 ν は0.28、 r は表-1に示す6通りの鋼球の半径を代入した。法線方向荷重 P は、鋼球層の初期の粒子間接触力の平均値が0.09Nであったため、この値とした。粒子間減衰係数は、鋼球の反発係数 e_b を0.989⁶⁾として算出した例があるが、ここでは減衰の影響を検証するために、 e_b を0.6とした条件でも計算を行った。また摩擦係

数 μ は0.3⁶⁾とした。

(2) 土槽要素のパラメータ

土槽要素の粒子間バネ係数の算出では、 E は鋼材のヤング率 2.0×10^5 MN/m²、 ν は0.28、 r は土槽要素の平均的な半径15mmを代入した。法線方向荷重 P は初期の鋼球要素と土槽要素の接触力の平均値が0.35Nであったため、この値とした。粒子間減衰係数は e_b を0.4⁶⁾として算出した。摩擦係数 μ は単調載荷実験と単調載荷シミュレーションの結果を比較し0および0.1としたが、詳細は次節で述べる。

(3) 載荷板要素のパラメータ

載荷板要素の粒子間バネ係数の算出では、 E はアルミのヤング率 7.0×10^4 MN/m²、 ν は0.28、 r は載荷板要素の平均的な半径7.5mmを代入した。また式(1)の法線方向荷重 P は、載荷板を設置した状態における鋼球要素と載荷板要素の粒子間接触力の平均値が0.0137Nであったため、この値とした。粒子間減衰係数は e_b を0.4⁶⁾として算出した。

(4) 加力棒要素のパラメータ

加力棒要素の粒子間バネ係数の算出においては、加力棒要素の法線方向荷重 P が、繰返し載荷過程で0~200Nまで大きく変化するため決定が難しい。よってここでは、同程度の粒径の鋼球要素と同じ値を用いた。

表-1に本研究で設定したパラメータの値を示す。

4.2 シミュレーションモデル

図-13にシミュレーションモデルを示す。供試体のサイズおよび鋼球の粒径分布は実験と同様とした。また、土槽、載荷板、加力棒部は球集合でモデル化した。

ところで土槽要素は、実験では鋼板であるが、モデルでは球集合体であり(図-13)、土槽要素の構成球要素を小さくしても凹凸ができる。この凹凸の影響を調べるために、土槽要素を用いずに計算領域内に鋼球層を配列しただけのモデル(境界面に摩擦ナシ)と、土槽要素を用いるが、その要素の摩擦係数を0としたモデルで単調載荷を行う。

更に、土槽要素の摩擦係数については0.4を用いた例⁶⁾があるが、本研究のモデルでは上記の通りに土槽要素に凹

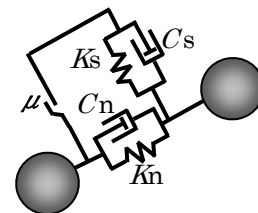


図-12 DEM モデル

表-1 DEM パラメータ

	粒径 mm	粒子間バネ係数 K_n (g/s ²)		粒子間減衰係数 C_n (g/s)	
		法線方向	接線方向	法線方向	接線方向
鋼球1	19.05	2.19E+9	8.57E+8	1.80E+3	1.10E+3
鋼球2	17.46	2.13E+9	8.33E+8	1.50E+3	9.80E+2
鋼球3	14.28	1.99E+9	7.79E+8	1.10E+3	7.00E+2
鋼球4	11.00	1.83E+9	7.14E+8	7.00E+2	4.50E+2
鋼球5	8.73	1.69E+9	6.61E+8	4.80E+2	3.00E+2
鋼球6	7.14	1.58E+9	6.18E+8	3.50E+2	2.20E+2
土槽	15.00	3.08E+9	1.20E+9	1.49E+5	9.30E+4
載荷板	15.00	5.13E+8	1.97E+8	2.77E+4	1.72E+4
ロット	6.00	1.58E+9	6.18E+8	5.92E+4	3.70E+4

凸があるため、構成球要素の摩擦係数を調整する必要がある。そこで、土槽要素の摩擦係数を変えた単調荷重シミュレーションを行い、実験結果と比較した。

図-14に単調荷重シミュレーションの結果を示す。図中、黒色細線は土槽要素ナシ、濃灰色太線は土槽要素アリで摩擦係数0、黒色太線が土槽要素アリで摩擦係数0.1の結果を示す。図より土槽要素アリの場合、構成球要素の摩擦係数が0であっても、土槽要素ナシの場合に比較して荷重が出やすく、特に荷重4秒（荷重板変位4mm）以降で差異が大きい。また土槽要素アリでの摩擦係数を0.1とした場合は、ピーク強度は200Nを越え、実験結果より大きな荷重が出る。そこで本研究では、図に示した摩擦係数0を基本条件として用いると同時に、ピーク強度が160Nほど大きく出た摩擦係数0.1でも計算を行うこととする。

4.3 荷重条件

シミュレーションでは、荷重振幅および荷重速度ともに実験と同条件とし、荷重速度は標準荷重で5mm/s、高速荷重条件で50mm/sとした。

4.4 シミュレーション結果

(1) 荷重波形のチェック

図-15に実験とシミュレーションの荷重初期の荷重波形例を示す。図-15(1)が実験結果、図-15(2)がシミュレーション結果で、各図(a)が標準荷重で、(b)は高速荷重の各条件のシミュレーション結果を表している。

図-15より、標準荷重の実験結果と、同じ標準荷重のシミュレーション結果を比較すると、荷重1回目においてシミュレーションでは実験結果より0.23秒程度長く荷重が続くのに対し、荷重2回目以降の荷重作用時間は実験における設定値の0.2sの6割程度となっている。

また同様に高速荷重の実験結果とシミュレーション結果を比較すると、荷重1回目においては荷重作用時間がほぼ同程度であるのに対して、荷重2回目以降では荷重作用時間が実験における設定値の0.02sの5~6割程度となる。

ここで荷重1回目の初期沈下については、鋼球層の初期配置の差異による影響でバラツキが顕著に現れるとカンがられるため、今回のシミュレーション結果でも、実験とモデルで鋼球の配置が全く同じでなかったことが主な要因と思われる。一方、荷重2回目以降において、同じ荷重速度でも設定荷重に達するまでの時間がシミュレーションの方が短い傾向となっている原因としては、(1)シミュレーションにおける荷重板要素が剛体であるのに対し、実際の荷重板には微小なたわみも発生している可能性があること、(2)加力棒要素の粒子間バネ係数を一定値にしているが、式(2)を考慮すると、0~200Nの振幅で変化する繰返し荷重下では加力棒要素の粒子間バネ係数も変化する、この2点が考えられる。

ただし、標準荷重と高速荷重の荷重作用時間が1:10である点に関しては、実験結果もシミュレーション結果も一

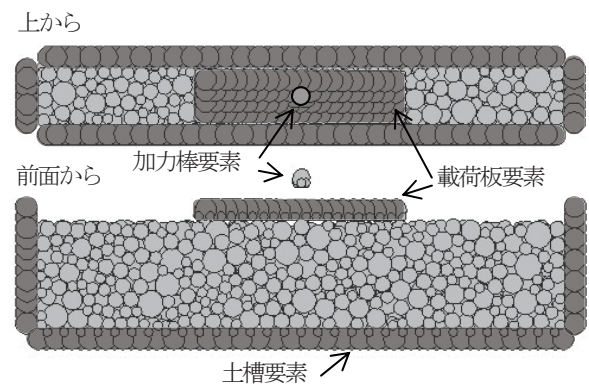


図-13 シミュレーションモデル

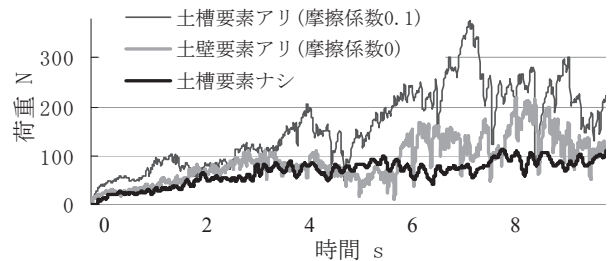


図-14 単調荷重シミュレーション結果

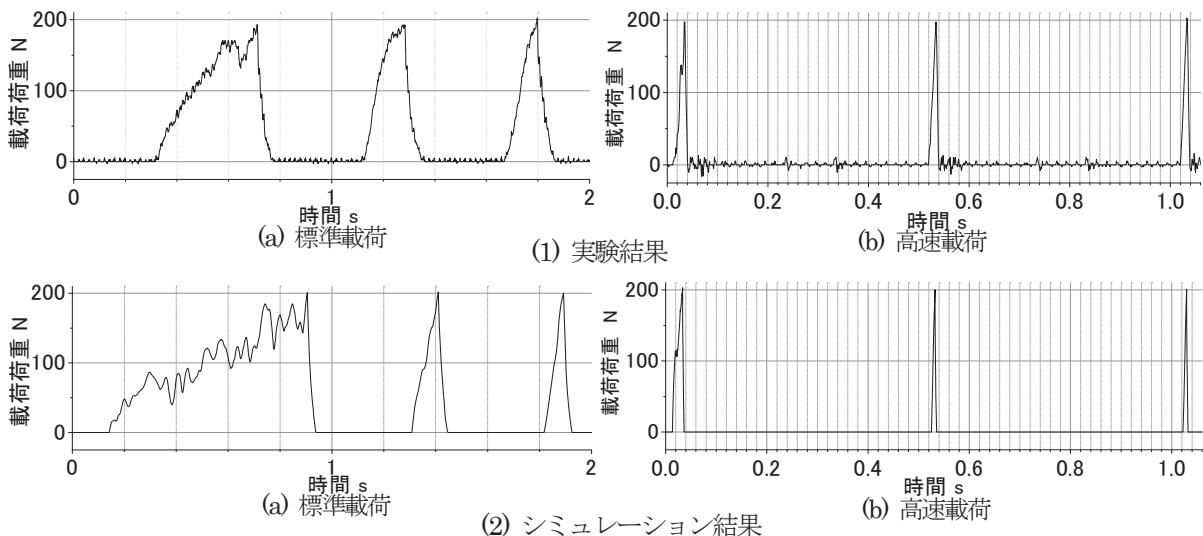


図-15 実験とシミュレーションの荷重波形の比較

致していることから、‘載荷速度の影響’と言う点に関しては、このシミュレーション結果を用いることとする。

(2) 残留沈下量に対する載荷速度の影響

シミュレーション結果より載荷回数と残留沈下量の関係を図-16に示す。図-16(1)は実験結果で、図7に示した結果に加えて、載荷回数100回程度で複数回行った実験結果も合わせて示す。図-16(1a)が標準載荷、図-16(1b)が高速載荷実験の結果であるが、いずれも同条件の実験結果でありながらバラツキが大きいことが明らかである。ただし、標準載荷では載荷初期に残留沈下量が増加した後、載荷20回程度以降は、沈下量の増加が小さくするのに対して、高速載荷では載荷初期の残留沈下量は小さいが、載荷100回目までは沈下量がほぼ直線的に増加する傾向が見受けられる。

また図16(2)はシミュレーション結果であるが、まず摩擦係数0と0.1のケースを比較すると、載荷100回目の残留沈下量は、標準載荷で2mm程度、高速載荷で3mm程度の差異があり、摩擦係数0.1の方が小さい値となる。

また各摩擦係数における標準載荷と高速載荷の比較をすると、摩擦係数0の場合は載荷初期の残留沈下量は標準載荷で大きいですが、載荷20回程度で高速載荷の残留沈下量が標準載荷の残留沈下量を抜いている。一方、摩擦係数0.1のケースでは、載荷初期で標準載荷における残留沈下量が大きい点と、その後の残留沈下量の増加が高速載荷において大きい点については共通した傾向となるが、載荷100回終了時点で、まだ標準載荷の残留沈下量の方が高速載荷よりも0.4mmほど上回っている。

図16(1a)およびb)の実験結果と比較すると、摩擦係数を0としたシミュレーション結果の標準載荷の残留沈下量は実験結果の範囲内にあると言えるが、高速載荷の残留沈下量は実験と比較して小さく、特に曲線の傾きがシミュレーションでは実験と比較して小さくなっている。この一因としては、土槽要素を球集合体でモデル化したことによる要素表面の凹凸が影響している可能性が考えられる。

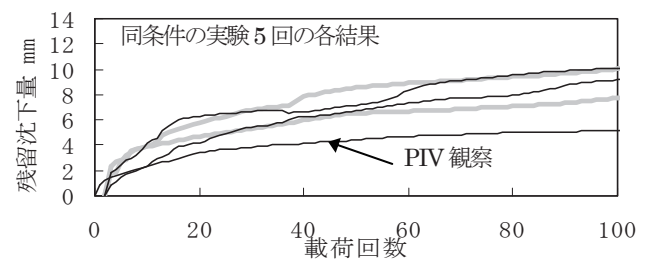
また摩擦係数を0.1としたシミュレーション結果は、いずれの載荷速度でも実験結果と比較して残留沈下量は全体的に小さい値となっているが、標準載荷では沈下が速やかに収束するのに対して、高速載荷では沈下が傾向する傾向は同様となっている。

(3) 載荷・除荷過程の粒子の挙動に対する載荷速度の影響

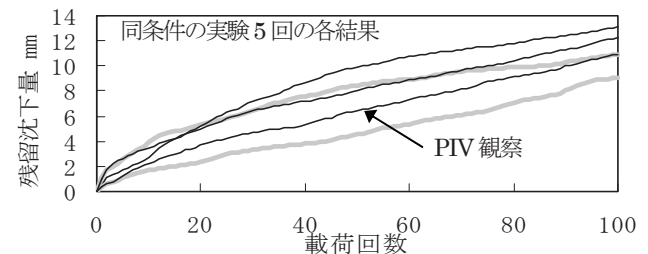
図-16より、摩擦係数を0としたシミュレーション結果では、載荷1回目で標準載荷の残留沈下量が大きく、載荷100回目では高速載荷の残留沈下量が標準載荷より増加した傾向が見られ、この点については実験結果と同様の傾向となっていることから、鋼球個々の動的挙動についても比較を行うこととする。

標準載荷条件と高速載荷条件のシミュレーション結果より、載荷1回目の載荷過程の挙動を図-17に、載荷100回目の除荷過程の粒子の挙動を図-18に示す。

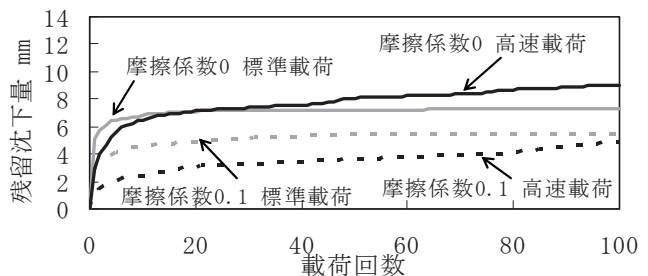
まず図-17より、載荷1回目の載荷過程においては、標準載荷条件において粒子の挙動が著しく、載荷板外側への粒子の流動も見られ、PIVによる観察結果とほぼ一致して



(1-a) 実験結果 (標準載荷)



(1-b) 実験結果 (高速載荷)



(2) DEM シミュレーション結果

図-16 残留沈下量に対する載荷速度の影響

いる。また高速載荷条件においては、粒子の挙動が標準載荷と比較して小さいと言う点は実験結果と一致しているが、特にシミュレーション結果は、粒子の挙動が実験と比較して著しく小さい傾向となっている。

次に図-18より載荷100回目の除荷過程においては、高速載荷条件における粒子の挙動が標準載荷条件に比較して著しく、PIVによる観察結果とほぼ同様の傾向である。

よって、DEMシミュレーション結果において、載荷・除荷過程における粒子の挙動に見られる載荷速度の影響については、実験結果と同様の傾向が得られた。

ただし定量的な精度には課題が残っており、特に実際には滑らかな面である土槽要素の壁面等を球集合体でモデル化する上での粒子間摩擦係数の考え方については、より詳細検討が必要と言える。

(4) 減衰係数の影響

図-19に減衰係数を変更して行ったシミュレーション結果より、載荷回数と残留沈下量の関係を、基本条件とともに示す。図より減衰係数を大きくすると(反発係数を小さくすると)、載荷初期の残留沈下量は、いずれの載荷速度でも短期的に増加するが、その後の沈下進みの収束は早く、またその後の沈下曲線の傾きも小さい。また標準載荷と高速載荷における沈下曲線の特徴に着目すると、減衰係数を大きくした場合でも、標準載荷で載荷初期の沈下が大きい点、その後の沈下進みは高速載荷において大きい点で同様となっている。

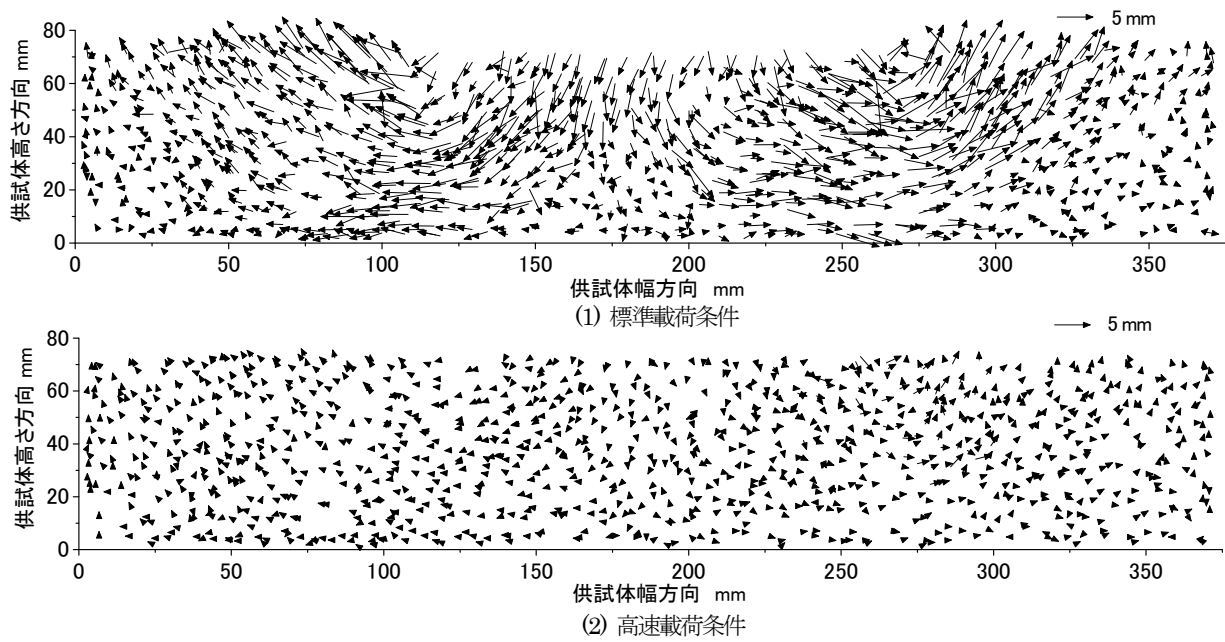


図-17 荷荷1回目の荷荷過程の粒子挙動 (シミュレーション結果)

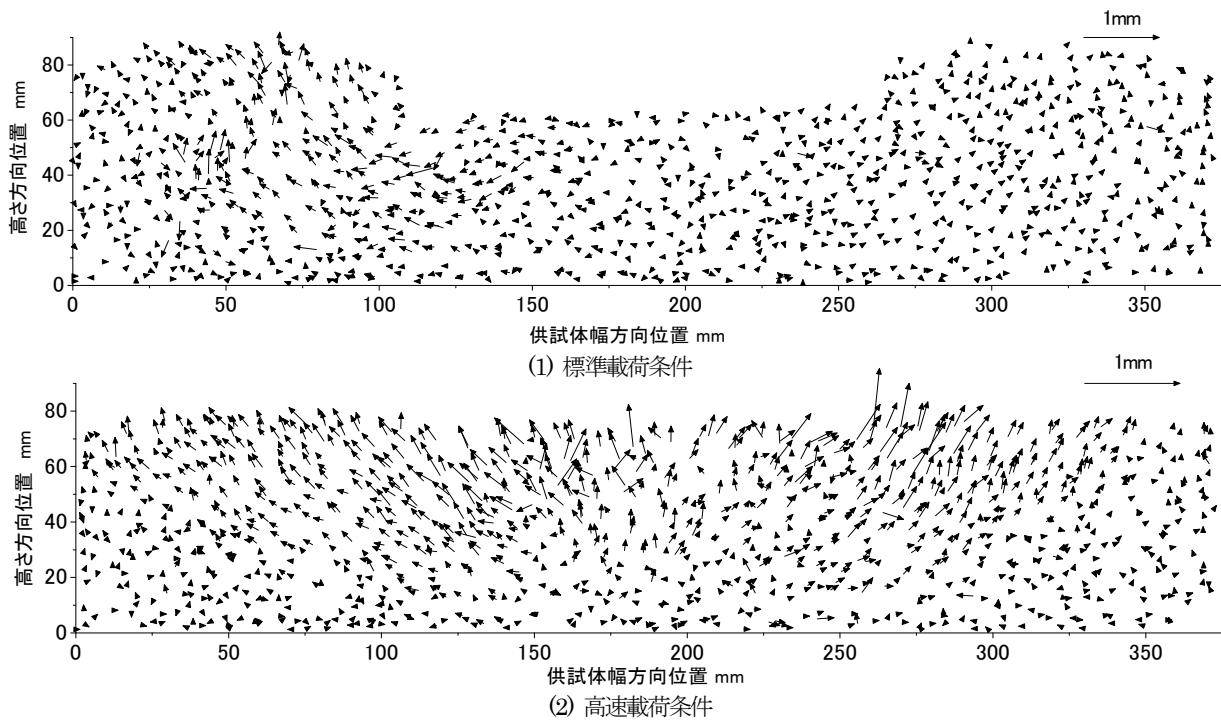


図-18 荷荷100回目の除荷過程の粒子挙動 (シミュレーション結果)

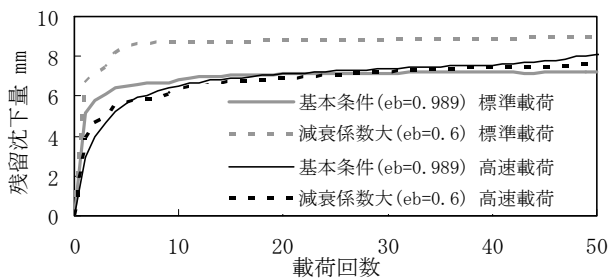


図-19 減衰係数を変えたシミュレーション結果

5. 考察

繰返し荷重下の鋼球層の動的な挙動に対する荷荷速度の影響に関しては、DEMシミュレーション結果においても実験と同様の傾向が得られた。ただし、それらの挙動の特徴が、いかなる原因によるものかは実験結果からだけでは把握できないため、DEMシミュレーション結果から得られる情報を用いて詳細検討を行なう。

5.1 載荷 1 回目の載荷過程における傾向

前章において、載荷 1 回目の載荷過程においては、標準載荷の方が高速載荷よりも載荷板の沈下量が大きい傾向が確認されている。これは、高速載荷においては、載荷板変位が標準載荷より小さい段階でも大きな応力が発生することを意味している。

ここで、高速載荷 1 回目の載荷過程では、載荷板変位が 3.42mm の時に最大荷重(200N)に達するが、その瞬間の鋼球層内部の接触力の分布と、標準載荷において同じ載荷板変位となる瞬間の接触力の分布を比較する。

図-20 に標準載荷と高速載荷において載荷板変位が約 3.42mm の瞬間の法線方向接触力の分布を、図-21 に接線方向接触力/法線方向接触力の値の分布を示す。粒子間接触点の数は、標準載荷で 1775 点であるのに対して、高速載荷では 1124 点で、高速載荷では接触点数が著しく少ない。

図-20 より、載荷過程における載荷板の変位が同じ状態でも、鋼球層の法線方向の粒子間接触力は高速載荷下で全体的に大きい値を示し、特に載荷板下において接触力 10N 以上の点が集中している。これに対して標準載荷では接触力 2N 未満の点が多く分布し、10N 以上の点は載荷板下に 3 点ほど見られる程度である。

次に図-21 より、接線方向接触力/法線方向接触力の値は、標準載荷では 0.1 以上の点が鋼球層全体に分布し、また 0.3 以上の点も載荷板外側部分で鋼球層上層部まで分布するが、高速載荷では、そもそも粒子間接触が失われている点も多いことから、接線方向接触力/法線方向接触力の値も 0.1 以上および 0.3 以上のいずれの点も不均一に分布している。

これらより、載荷速度によって鋼球層内の粒子間接触力の伝播の状況は異なることが明らかであり、高速載荷下では、急激な載荷過程で短時間で荷重が伝播し、それにより

載荷板が標準載荷の場合ほど下降しない段階で、載荷板と鋼球層の間の荷重が設定値に達するものと考えられる。一方、標準載荷では、緩やかな載荷板下降の過程で鋼球層内に荷重が分散・伝達され、その過程で設定荷重を支持できる粒子構造が確立されるものと考えられる。

5.2 載荷 100 回目の除荷過程における傾向

3 章の実験結果と 4 章において、載荷 100 回目の除荷過程において、高速載荷下において粒子の上方への運動が著しい傾向が得られた。

そこで図-22 に、載荷 100 回目の除荷時（載荷荷重が 0 になった瞬間）・除荷後(載荷荷重が 0 になった 0.2 秒後)の法線方向粒子間接触力の分布を示す。図-22(1)が除荷時、図-22(2)が除荷後の図で、各図左側の図(a)が標準載荷条件、右側の図(b)が高速載荷条件の結果を示す。

図-22(1)より除荷時においては、標準載荷条件では接触点が 1882 点であるのに対して、高速載荷条件では 694 点まで激減している。つまり高速載荷では、急激な除荷による粒子の上向きの運動によって、粒子間の接触力が著しく減少すると考えられる。

ただし図-22(2)に示すように、除荷後には高速載荷の場合も接触点は回復している。この時の接触力の平均値は、標準載荷条件で 0.217N、高速載荷条件で 0.185N で、図-23 に示すように各接触点の接触応力をソートした値を見ても、標準載荷の方が若干大きな値となる。

以上より、高速載荷においては、除荷時に激減した接触点が、その後回復されるものの、粒子同士の接触力は標準載荷に比較して小さくなる。よって、除荷過程で粒子同士が一度離れる運動は、その後の載荷過程において沈下進みが収束しない要因となっていると考えられる。

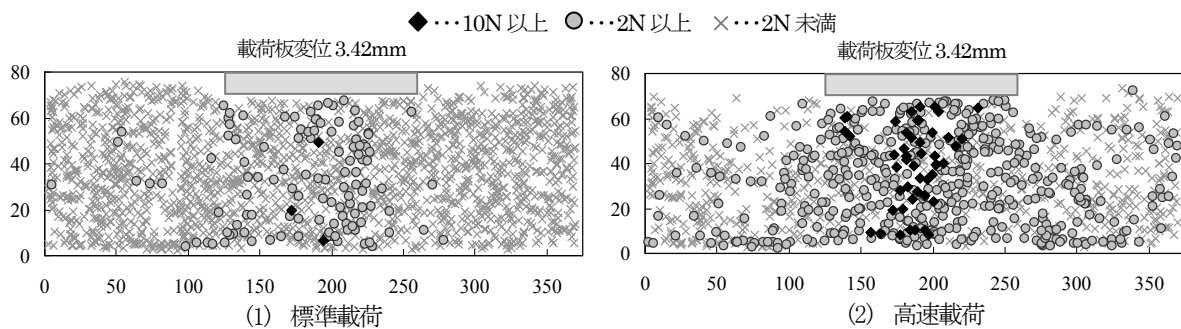


図-20 載荷板変位が同じ瞬間の法線方向接触力の分布

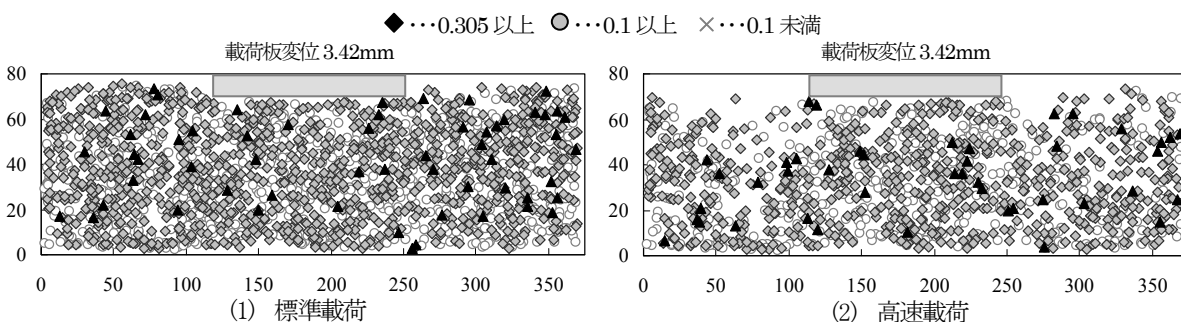


図-21 載荷板変位が同じ瞬間の接線方向接触力/法線方向接触力の値の分布

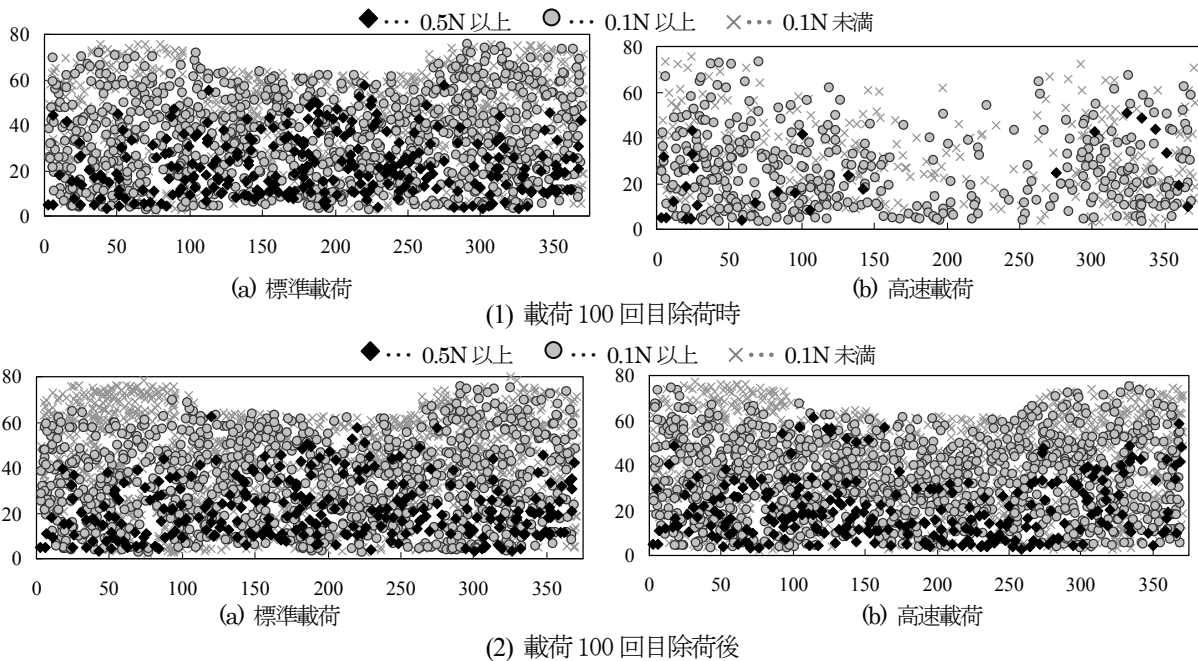


図-22 載荷 100 回目の除荷時および除荷後の法線方向粒子間接触力分布

6. まとめ

鋼球層における、2通りの載荷速度の繰返し載荷試験と球要素を用いた5通りの載荷速度の繰返し載荷DEMシミュレーションの結果より、以下の知見が得られた。

- ・ 載荷 1000 回の鋼球層の実験において、載荷初期には載荷速度の影響が明瞭でなかったが、載荷 100 回目程度から標準載荷と高速載荷の沈下進みの差が拡大し、最終的には高速載荷における残留沈下量が 1.5~2 倍となった。
- ・ 繰返し荷重下の粒子の動的応答を PIV によって観察したところ、載荷 1 回目の載荷過程では標準載荷における粒子の移動が著しかったが、その後、標準載荷における粒子の移動は減少した。一方、高速載荷では、載荷初期から除荷過程の粒子の動的応答が顕著で、この現象は載荷初期だけでなく載荷 100 回目でも継続していた。
- ・ 載荷 1 回目の載荷過程と 100 回目の除荷過程の粒子の挙動を観察したところ、DEM シミュレーション結果と上述の実験結果で同様な動的挙動の特徴が得られた。
- ・ 載荷 100 回目の除荷時、除荷後の粒子間接触力の分布を観察した結果、高速載荷条件では除荷時に接触点が激減する傾向が見られた。その後、接触点は回復されるが、粒子間接触力は標準載荷条件に比較して小さくなる。

以上より、繰返し衝撃荷重下の鋼球層で沈下が継続する原因は、除荷過程の粒子層の反発膨張によって粒子接触点が失われることが原因であることが示唆された。一方、標準載荷レベルの載荷速度では、この現象は見られず、沈下は速やかに収束する。実際の鉄道バラスト粒子においても、同様の現象が生じることが予想されることから、レール表面凹凸部付近の列車通過荷重によるバラスト層の局所的な沈下を防止するためには、まくらぎから伝達する高周波振動下でバラスト層の拘束圧が失われないような対策工法を検討することが有効であると考えられる。

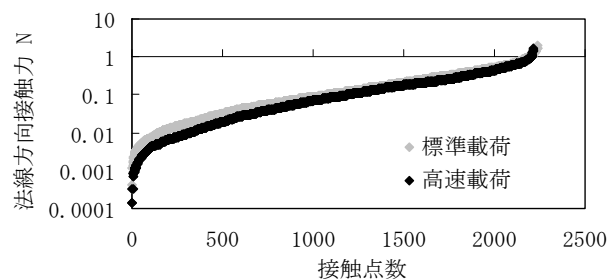


図-23 除荷後の粒子間接触力の値の分布

参考文献

- 1) 村本勝巳、中村貴久：軌道構造変化箇所における浮きまくらぎ発生メカニズムとその対策、土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, pp539-540, 2007
- 2) たとえば、佐藤吉彦：落重試験による軌道各部特性係数の算出、鉄道技術研究所速報, No74-153, 1974
- 3) 相川明ほか：レール溶接部を通過する列車荷重に対するバラストの挙動測定と不連続変形法解析、鉄道力学論文集, No11, pp27-32, 2007
- 4) 河野昭子、松島亘志：「繰返し衝撃荷重下の碎石層の粒子挙動の観察」、土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, pp 1139-1140, 2009年 (CD-ROM)
- 5) D.J.White, W.A.Take, M.D.Bolton : Soil Deformation measurement using PIV and photogrammetry, Geotechnique, vol.53, No.7, pp619-631, 2003
- 6) 粉体工学会編：「粉体シミュレーション入門」, 1998
- 7) Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper (On the contact of elastic solids), J.reine und angewandete Mathematik, 92, 156-171, 1882.

(2010年 3月9日 受付)