

繰返し荷重下のバラスト粒子層の沈下挙動
に与える急速載荷の影響と微視的考察

2010年11月

河野 昭子

繰返し荷重下のバラスト粒子層の沈下挙動
に与える急速载荷の影響とその微視的考察

河野 昭子

システム情報工学研究科

筑波大学

2010年 11月

～ 目 次 ～

1、序論	
1.1 研究の背景	1
1.2 実列車通過荷重波形の特徴	2
1.3 本研究の目的と用いる試験装置・手法	4
1.3.1 ステッピングモータ式高速載荷試験装置	5
1.3.2 Particle Imaging Velocimetry (粒子画像流速測定法)	8
1.3.3 Discrete Element Method (個別要素法)	9
1.4 本論文の構成	12
2、既往の研究	
2.1 実線における軌道動的応答測定	15
2.2 試験施設内における軌道動的応答試験	18
2.3 実物大軌道における繰返し載荷試験	19
2.4 軌道のモデル化と動的応答シミュレーション	20
2.5 離散体モデル化手法を用いたバラストに関する研究	22
3、模型粒子層を用いた繰返し載荷実験による載荷速度の影響の検討	
3.1 実験概要	28
3.1.1 粒子層供試体の概要	28
3.1.2 試料	28
3.1.3 荷重条件	29
3.1.4 測定項目	31
3.2 実験結果 — 測定波形	33
3.2.1 砕石層実験結果	33
3.2.2 鋼球層実験結果	35
3.3 実験結果 — 残留沈下量と載荷回数との関係	37
3.3.1 砕石層における残留沈下量の変化	37
3.3.2 鋼球層における残留沈下量の変化	39
3.4 実験結果 — 各載荷回における変位振幅と沈下進みの関係	41
3.4.1 砕石層実験結果	42
3.4.2 鋼球層実験結果	43
3.5 第3章のまとめ	44

4、PIVによる粒子層の変形と粒子の挙動の観察	
4.1 画像解析手法	45
4.2 画像撮影条件	45
4.3 画像解析条件	45
4.4 画像解析結果 – 砕石層	47
4.4.1 繰返し載荷過程の粒子の残留変位の観察	47
4.4.2 各載荷回における粒子の動的挙動の観察	52
4.5 画像解析結果 – 鋼球層	62
4.5.1 繰返し載荷過程の粒子の残留変位の観察	62
4.5.2 各載荷回における粒子の動的挙動の観察	68
4.6 第4章のまとめ	76
5、DEMによる実験の再現シミュレーション	
5.1 鋼球層モデルのシミュレーション概要	78
5.1.1 シミュレーションモデル	78
5.1.2 DEMパラメータの設定	79
5.1.3 単調載荷シミュレーションによる鋼球要素の摩擦係数・減衰係数の検討	81
5.1.4 繰返し載荷条件	81
5.2 鋼球層モデルのシミュレーション結果	82
5.2.1 シミュレーション波形例	82
5.2.2 残留沈下量と載荷回数との関係	85
5.2.3 各載荷回における変位振幅と沈下進みの関係	89
5.2.4 繰返し載荷過程の鋼球要素の残留変位の観察	89
5.2.5 各載荷回における粒子の動的挙動の観察	96
5.2.6 粒子間接触力の観察	104
5.3 砕石層モデルのシミュレーション概要	114
5.3.1 シミュレーションモデル	114
5.3.2 球集合体による砕石試料のモデル化	115
5.3.3 DEMパラメータの設定	115
5.3.4 繰返し載荷条件	117

5.4 砕石層モデルのシミュレーション結果	118
5.4.1 シミュレーション波形例	118
5.4.2 残留沈下量と載荷回数との関係	122
5.4.3 各載荷回における変位振幅と沈下進みの関係	125
5.4.4 繰返し載荷過程の鋼球要素の残留変位の観察	127
5.4.5 各載荷回における粒子の動的挙動の観察	129
5.4.6 粒子間接触力の観察	138
5.5 第5章のまとめ	148
6、一自由度減衰系モデルと DEM による考察	
6.1 一自由度減衰系の振動	151
6.2 DEM 砕石層モデルの単純化	152
6.3 DEM とバネ-ダンパモデルにおける調和外力応答の比較	153
6.3.1 荷重作用時の応答	153
6.3.2 除荷後の挙動	158
6.4 DEM シミュレーションにおける除荷後の粒子挙動	158
6.5 第6章のまとめ	162
7、結論	
7.1 本研究で得られた知見の整理	163
7.2 今後の課題	164

第1章

序論

1.1 研究の背景

我が国に鉄道システムが誕生して以来、車両の高速化や大量輸送化に伴い様々な形式の線路が開発されて来たが、まくらぎと路盤の間に粗粒砕石を敷き込んだ‘バラスト軌道’は最もオーソドックスな軌道形式で、今でも日本の鉄道の9割を占めている。このバラスト軌道の道床バラスト層は、層厚が200mm～250mmであるのに対して、粒径20mm～60mmの極めて粗粒の砕石で構成されている。これにより道床バラスト層は、建設費が安価でありながら、荷重分散や排水などの様々な機能を有するが、一方で、まくらぎを介して伝わる列車の繰返し通過荷重による沈下は免れない。

特に問題視されるのは、隣接するまくらぎの沈下量の相対的な差異が著しい場合で、まくらぎ数本程度以下の狭い範囲の道床バラスト層が局所的に沈下した場合には、道床バラスト層とまくらぎの間に隙間が生じる‘浮きまくらぎ’¹⁾ (図1.1)が発生する。この‘浮きまくらぎ’は、騒音振動の増加や道床バラスト層の劣化促進の一要因と言われながら、現在のところ予防法は無く、まくらぎの上下振動の増加が目視で確認される状態になって初めて対策工が施されるケースがほとんどである。その対策工も、まくらぎ下弾性化²⁾やまくらぎ・バラスト間の隙間の充填工法³⁾などの対処療法が主流で、それによる施工後の一時的な改善は見られるものの、長期的な効果が確認された事例はほとんど見あたらず、一度‘浮きまくらぎ’が発生した箇所は、繰返し対策工法を施さなければならないのが実状となっている。

ところで、この‘浮きまくらぎ’は、主にレール継目部などのレール表面凹凸部の周辺あるいは路盤状態の悪い箇所や構造物変化箇所で発生していることから、その発生原因としては、①レール表面凹凸に起因する列車通過時の衝撃荷重 (図1.2) による場合と、②バラスト層の下層の支持状態の違いによる場合⁴⁾とが考えられている。しかし、前者①の原因による‘浮きまくらぎ’の発生メカニズムは、再現実験が困難であることなどから、未だに明らかにはされていない。

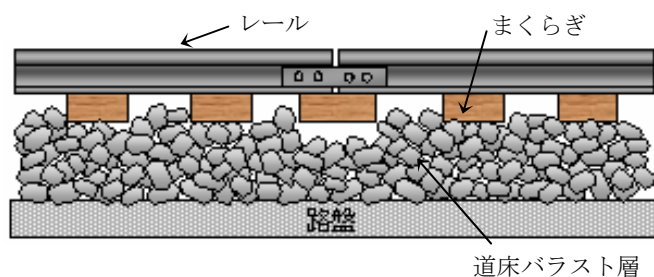


図1.1 浮きまくらぎ

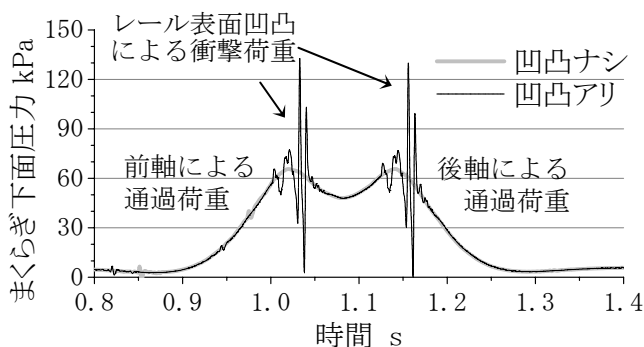


図1.2 まくらぎ下面圧力波形例

第1章 序論

他方、道床バラスト層の沈下特性に関しては、実物大試験軌道を用いた何十万回オーダの繰返し载荷実験が行なわれており^{5) 6)}、道床バラスト層が図1.3のような沈下特性を示すことが知られている。つまり道床バラスト層では、新設または保守直後に急激な沈下が生じた後、沈下量の増加は収束するが、その後も徐々に沈下が続く。これより道床バラスト層の沈下は前者の『初期沈下過程』と後者の『漸進沈下過程』に分けられる。

この沈下曲線に与える影響要因に関する研究としては、軌道構造やまくらぎ形状、道床厚さなどに着目した^{7) 8)}ものも多く、軌道への外力に着目したものは、軸通過荷重の最大・最小値に着目したものがある⁹⁾が、先述の衝撃荷重に着目したものは、試験機の制約等があり、ほとんど行われていない。

一方、道床バラスト層の動的挙動に関する既往研究では、衝撃荷重に着目した検討も多く、荷重作用時の軌道各部の動的応答に着目した輪軸落下試験など落錘式の実験結果が報告されている^{10) 11)}。また実際の列車通過荷重下における軌道動的応答測定事例も複数あり¹²⁾、道床バラスト層の振動を測定した結果も報告されており、衝撃荷重によってバラストの振動加速度が増加することが示されている¹³⁾。

つまり、前者では長期的な観点による「繰返し载荷→残留沈下の増加」の関係、後者は短期的な観点による「列車通過荷重→動的挙動」の関係について検討されており、多くの知見も得られている。一方で、「短期的な動的挙動」の繰返しが「長期的な残留沈下の増加」とどう関連しているか、と言う点に関しては、ほとんど扱われていない。

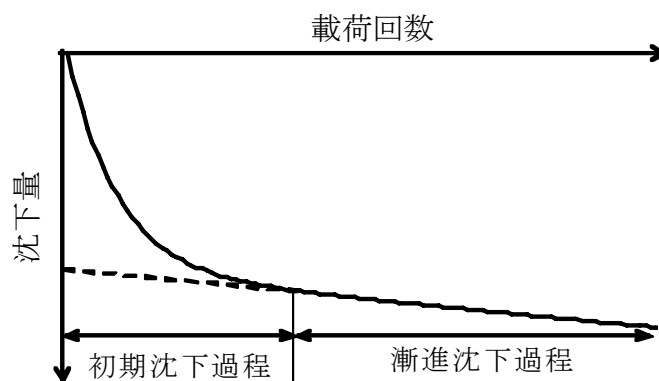


図1.3 道床バラスト層の沈下曲線

1.2 実列車通過荷重波形の特徴

前節で述べた‘レール表面凹凸部’および‘浮きまくらぎ’箇所の列車通過荷重波形について、波形の特徴を図1.4に示す。図1.4(1)はレールに締結された1本のまくらぎからバラスト層に伝達する荷重波形の一般部における特徴である。列車では1つの台車に2組の輪軸があり、前軸通過による荷重が0となる前に後軸の荷重が加わり、図に示すように荷重は2つの山を示す。

ここで、まくらぎと道床バラスト層の間に隙間が生じ‘浮きまくらぎ’となった場合の荷重波形の特徴を図1.4(2)の黒色実線で示す。バラスト層との間に隙間が生じることにより、隣接するまくらぎに比較して列車通過による荷重が小さくなるのが特徴である。

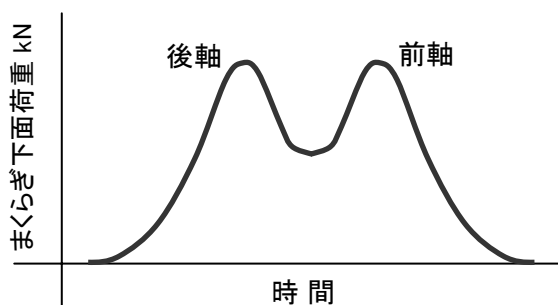
また、レール表面に凹凸がある場合の荷重波形の特徴を図1.4(3)に示す。レール表面の凹凸を列車が通過する際に発生する衝撃成分が重畳されるが、この衝撃成分はレール表面凹凸形状や列車走行速度などによって異なる。

次に、図1.5に実現場のレール溶接部におけるレール表面凹凸形状と、そのレール溶接部直下のまくらぎ下面圧力（まくらぎからバラスト層に伝達する力）の実測波形を示す。

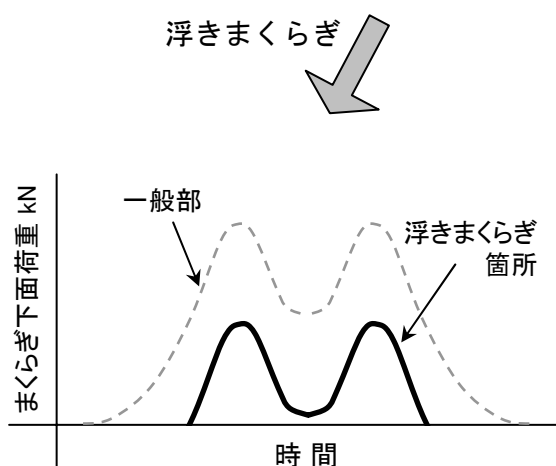
図1.5(1)に示すレール溶接部の凹凸により、図1.5(2)中の矢印で示す衝撃成分が重畳されているのが明らかである。また前軸と後軸の通過荷重の最大値が小さく、更に二つの山の間で完全に荷重が0となることから、このレール溶接部では‘浮きまくらぎ’となっているといえる。

更に、荷重波形の一部を拡大した図より、衝撃成分の荷重作用時間は0.007s程度であり、周波数にすると140Hz程度となる。

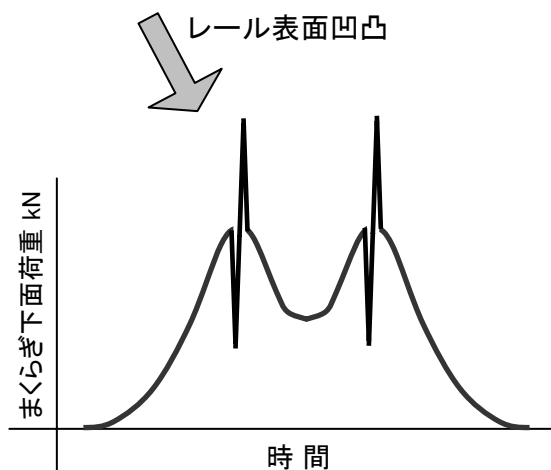
ただし、この衝撃成分の周波数は、レール表面凹凸の形状（特に列車走行方向の波長）と列車走行速度によって異なる。



(1) 列車通過荷重波形の特徴（一般部）

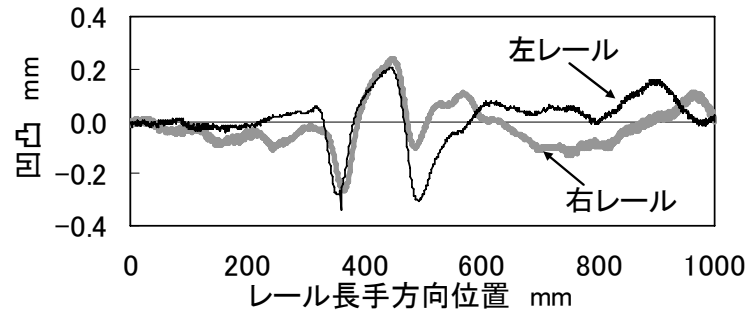


(2) 浮きまくらぎ箇所の列車通過荷重波形の特徴

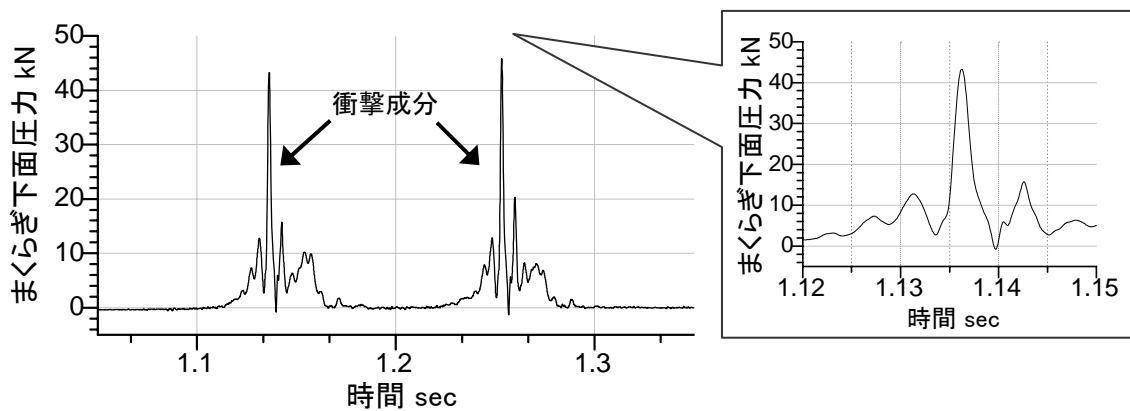


(3) レール表面凹凸部の列車通過荷重波形の特徴

図1.4 実列車通過荷重波形の特徴



(1) レール表面凹凸 実測波形例



(2) まくらぎ下面圧力 実測波形例

図1.5 レール溶接部における実測結果例

1.3 本研究の目的と用いる試験装置・手法

1.1で述べた背景に対して本研究では、特にレール継目部などの‘レール表面凹凸部付近に発生する浮きまくらぎ’に着目し、車輪がレール表面凹凸部を通過する際に発生する衝撃荷重が道床バラスト層の沈下に与える影響に対象を絞り、『衝撃荷重によって道床バラスト層の局所的沈下が促進されるかどうか』について実験とシミュレーションによって検討する。

また検討を行う上では、前節で述べた道床バラスト層の特徴一層厚に対して構成粒子が粗粒一に着目し、粒子層内の『粒子の挙動』を観察すると同時に、シミュレーションにおいても粒子1つ1つの単位でモデル化を行う『離散体シミュレーション手法』を用いることとする。

更に実験およびシミュレーションにおいては、粒子層の動的挙動に着目すると同時に、繰返し载荷過程での残留沈下量の変化も観察することで、『短期的挙動と長期的挙動の両者の関連性』について検討を行うこととする。これらの目的に対して、本研究では以下の試験装置および手法を用いることとした。

1.3.1 ステッピングモータ式高速载荷試験装置

従来、鉄道研究分野における繰返し载荷試験装置は油圧式の载荷機構を有したものが主流であり、特に実物大実験においては、実列車通過荷重レベルの数十kNの荷重による何十万回と言うオーダの繰返し载荷実験が行なわれている¹⁴⁾。ただし油圧式の場合、高周波の载荷には向かず、数mmオーダの変位を伴う条件では、追従可能な载荷周波数は10Hz 前後と言われている。

これに対し、加振装置によって高周波加振を行なう試験装置も開発されているが、このタイプの加振機の場合、中心荷重が設定されるため完全な除荷が不可能である¹⁵⁾。

本研究では、①最大1~2kNの一定荷重振幅で、② 荷重一波の作用時間が0.01s オーダで、③ 繰返し载荷間に完全な外力除荷が可能な繰返し荷重を再現することを目的とし、高速载荷が可能なステッピングモータ (図1.6) に着目し、図1.7 に示す繰返し载荷試験装置を開発した。

ステッピングモータは図1.6に示すように、内側の回転子と外側の固定子から構成され、回転子には回転方向周上にN極とS極が交互に配置され、固定子の相巻線の励磁電流を切り替えることで、1ステップずつ回転する。回転子のN極とS極の組の数をNr、固定子の相数をPとした場合、モータ固有のステップ角は式1.1で示される¹⁶⁾。

$$\text{ステップ角} = 360 / (Nr \times 2) / P \quad \dots (1.1)$$

ここで図1.6 (本研究で用いた仕様) は、回転子のN極とS極が50対、固定子が5相の場合のステッピングモータなので、ステップ角は式(1.1)より0.72度となる。また、上述の励磁電流の切り替えを指示する入力パルスの頻度 (1秒間の回数) は、本研究で用いた仕様では、500pps, 1000pps, 5000pps, 10000ppsの4通りの設定が可能である。つまり500ppsの場合、1/500秒間に0.72度、つまり1秒間でモータが1回転する速度であり、10000ppsの場合は、1秒間で20回転する速度である。

次に、高速载荷試験装置の全体図を図1.7(a)に、载荷機構の詳細を図1.7(b)に示す。

図1.7(a)より、試験装置の载荷機構は、ステッピングモータに連結した精密ボールネジの回転により载荷ロットが上下する仕組みとなっている。载荷方向には反力板は設置せず、载荷ユニットの背面を支柱に固定している。本試験装置においては、最大荷重はロードセルの性能により2kNとし、それ以上の荷重が作用した場合はモータの回転が止まる仕組みとしている。

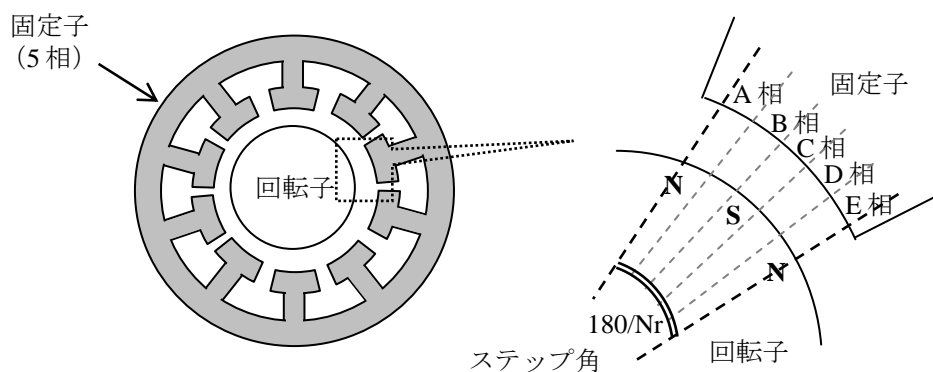


図1.6 ステッピングモータの仕組み

第1章 序論

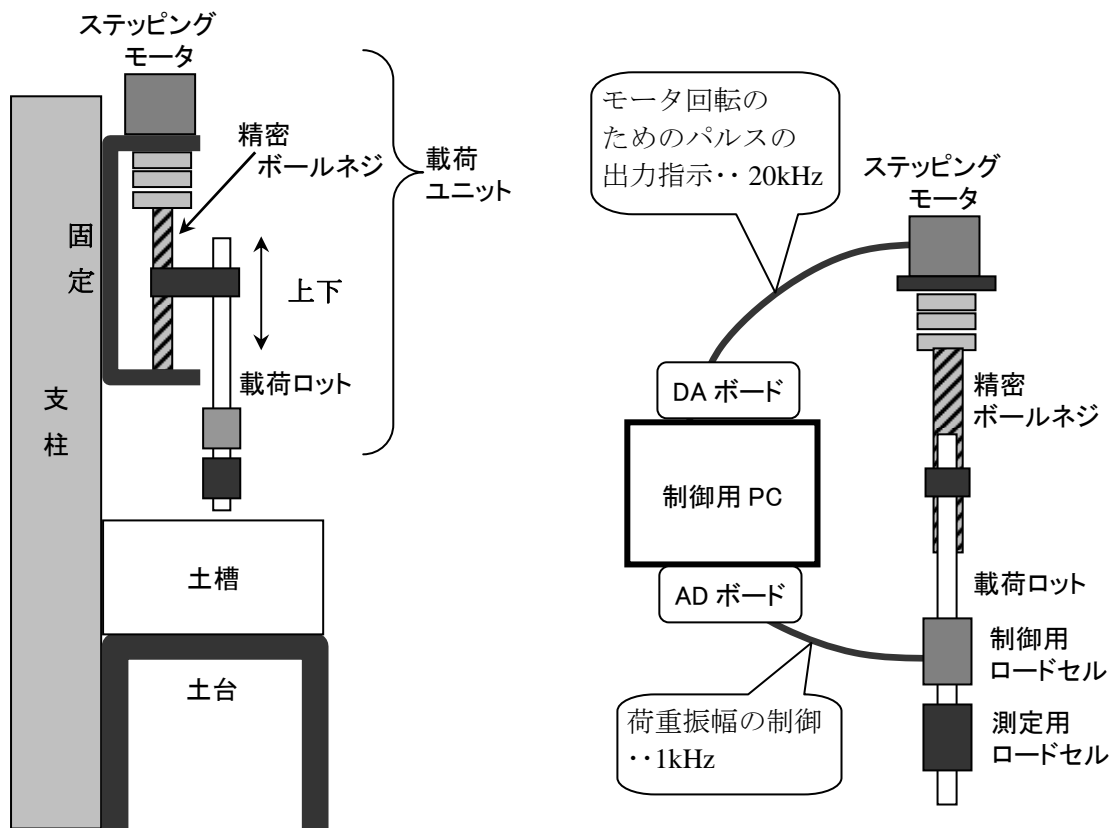
次に図1.7(b)より、荷重ロットの先には制御用ロードセルと測定用ロードセルを設置している。ここでは、測定データの収録容量や制御用PCがフリーズした場合のことを考慮し、制御用と測定用のロードセルを別々に設置した。

制御用PC内の制御ソフトは、ステッピングモータが回転するためのパルス出力を指示すると同時に、一定荷重振幅を保つために、制御用ロードセルからの測定値を逐次チェックし、それが設定最大荷重に達した場合、モータの回転を一瞬停止させ反転の指示を出す。ここでDAボードとADボードは、荷重速度が速いことなどから制御の精度を重視し、個別に設置した。

更にモータ回転のパルスの出力指示においては、荷重ロットの一回復分のパルス数、つまり上下1回の振幅が設定可能であり、これにより同じ荷重速度でも異なる荷重間隔による繰返し荷重が可能となる。

以上、この試験装置では、一連の繰返し荷重において荷重速度、荷重間隔（時間）、荷重振幅が制御可能であるが、本研究においては正弦波荷重時のような荷重制御あるいは変位制御は採用しなかった。

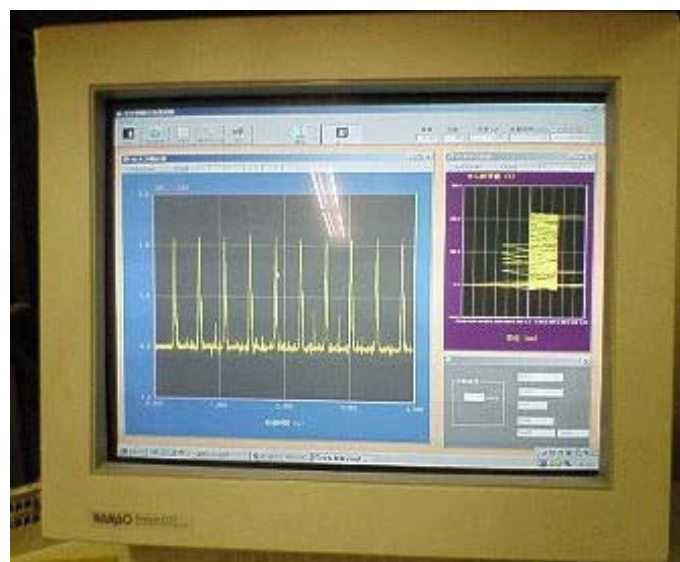
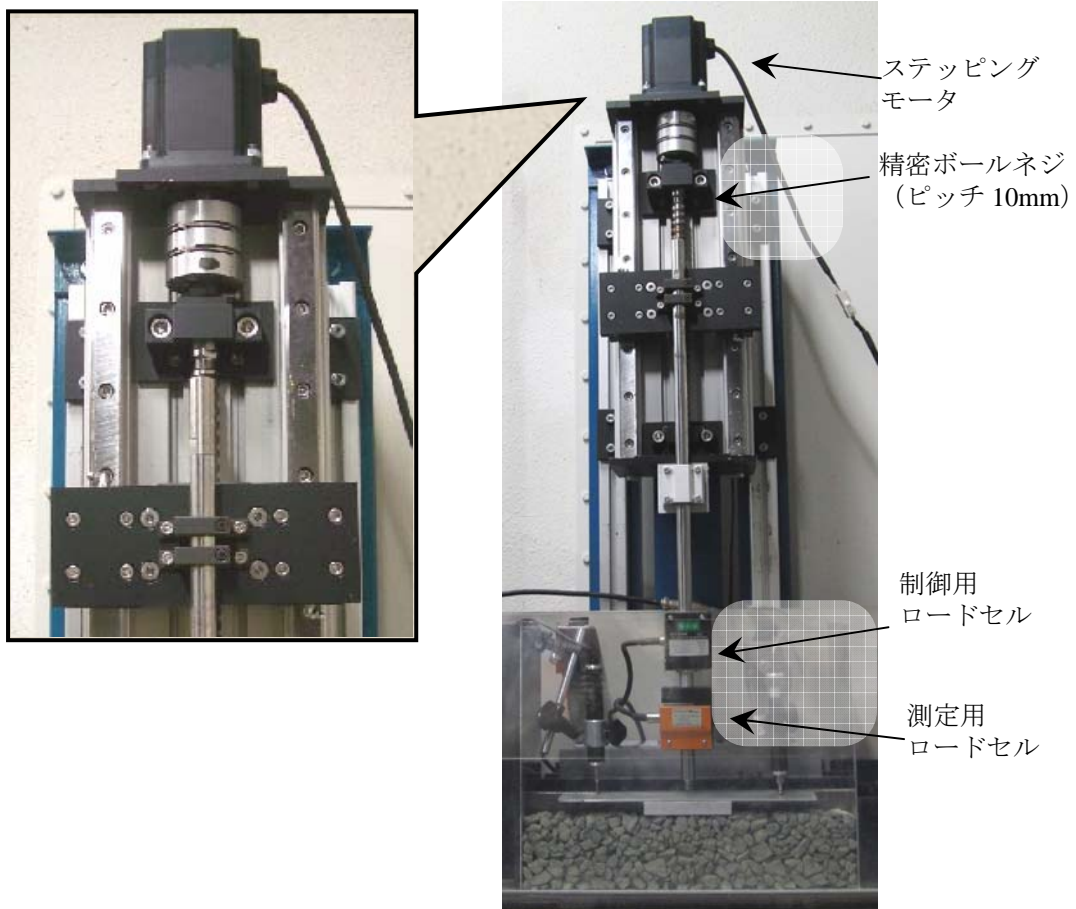
図1.8に試験装置の写真を示す。



(a) 試験装置の全体図

(b) 試験装置の荷重機構

図1.7 ステッピングモータ式高速荷重試験装置



制御用ソフト画面

図1.8 試験装置の写真

1.3.2 Particle Imaging Velocimetry (粒子画像粒子測定法)

砂や細粒砕石の粒子層の変形特性を観察する上で、従来様々な方法で画像撮影と画像解析が行われて来たが、土槽前面にドットを打ったメンブレンを貼る方法¹⁷⁾や、供試体にトレーサを混入させる方法¹⁸⁾などが主流であった。

これに対して流体分野では、トレーサ不要で、撮影した画像情報のみから粒子の運動を可視化する Particle Imaging Velocimetry (以下、PIV法)¹⁹⁾が用いられていた。土質工学分野には、Boltonら²⁰⁾によって、このPIV法が導入され、その後、日本国内でも土質実験に取り入れられた結果が報告されている。それらの多くは静的荷重下における粒子層のひずみ分布に関するもの²¹⁾であり、本研究で行う衝撃的な荷重下における粒子の動的挙動に関しては事例が少ないが、トレーサが不要である点などから、PIV法は有効な手法と考え、採用することとした。

PIV法では、**図1.9**に示すように、分割した画像の各格子点を中心としたパターン領域のサイズを決め、その矩形単位で画像情報を分析する。その後、比較する別の画像において、設定したサーチ領域内の画像情報を分析し、各パターン領域との相関が高いパターン領域を探すことで、比較する画像間の移動方向や移動量、移動速度を求める。

より精確な画像解析を行う上では、大前提として鮮明な写真を撮ることが必須であるが、上述の格子点の間隔やパターン領域およびサーチ領域のサイズによって、得られる情報も異なるため注意が必要である。本研究における各条件については、4章において述べる。

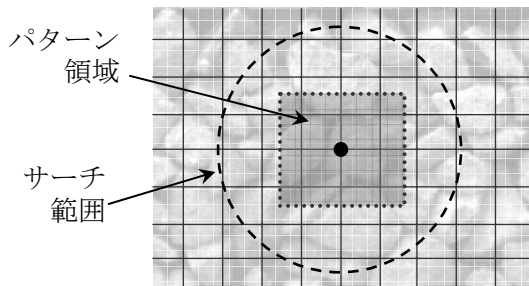


図1.9 PIVにおける画像解析条件



図1.10 画像撮影状況

1.3.3 Discrete Element Method (個別要素法)

道床バラスト層のモデル化においては、従来、弾性連続体²²⁾を用いることがほとんどであったが、本研究の目的に対して、粒子一つ一つを粒子単位でモデル化し、その個々の挙動を観察することが有益である。この粒子単位でのモデル化（以下、離散体モデル）による道床バラスト層の沈下特性の検討においては、不連続変形法（DDA）^{23) 24)}や個別別要素法（以下、DEM）を用いた検討が行われている。

本研究で用いるDEMは、Cundallによって提案された手法^{25) 26)}であるが、現在では汎用ソフトの開発も進み、2次元では円や多角形、3次元では球や多面体によってモデル化された要素のシミュレーションが可能となっている。これにより、砂や碎石の集合体の変形メカニズムに関する研究分野においてはポピュラーな手法の一つとなりつつあり、道床バラストの研究分野でも取り入れられている。

本研究では、松島²⁷⁾²⁸⁾によって開発された、球要素DEMシミュレーションソフト‘DEM3D-CS’を用いる。このソフトでは、砂や碎石のような不規則形状を球集合体によってモデル化した要素も対象としている。

(1) 基本モデル

DEMにおいては、基本的に粒子は剛体であり変形をしない。粒子間の接触は図1.11に示す通りに法線方向と接線方向のばね-ダンパでモデル化される。また粒子間の滑りを再現するために、せん断方向のスライダも導入されている。

(2) 接触判定

円および球要素のDEMにおいては、接触判定は極めてシンプルであり、図1.12に示すように、接触する粒子の中心間距離と半径の和によって判定される。

これに対して、多面体要素のDEMにおいては、接触判定が複雑であることから、前出のCundallによって開発された‘3DEC’（Itasca社）では、図1.13に示す‘仮想面’と言う概念が取り入れられている²⁹⁾。ただし、これにより異常貫入が発生する事例も報告されている³⁰⁾。

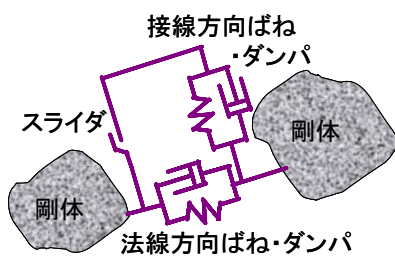


図 1.11 DEM モデル

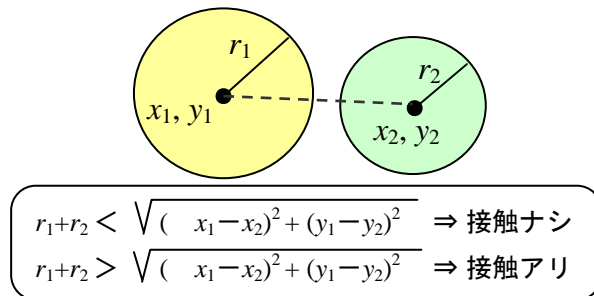


図 1.12 DEM における接触判定

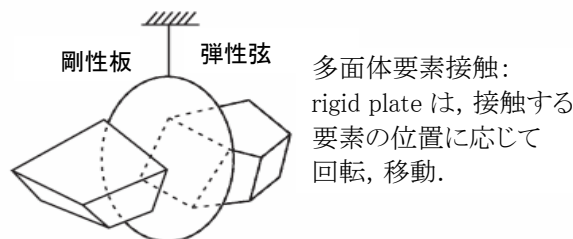


図 1.13 多面体要素の接触判定例（Cundall²⁹⁾）

第1章 序論

(3) 運動方程式

上記の接触判定において粒子同士の微小な貫入が発生した時、図1.9に示すばね-ダンパ部に接触力（式(1.2)）が発生する。これにより、各粒子において、式(1.3)に示す運動方程式が立てられる。

$$\text{法線方向の粒子間接触力} \quad F_n = k_n \Delta U_n + C_n \frac{\Delta U_n}{\Delta t} \quad \cdots (1.2)\text{a}$$

$$\text{接線方向の粒子間接触力} \quad F_s = k_s \Delta U_s + C_s \frac{\Delta U_s}{\Delta t} \quad \cdots (1.2)\text{b}$$

ここで、 $\Delta U_n, \Delta U_s$ は、それぞれ粒子同士の接近量の法線方向成分と接線方向成分である。

$$\text{X方向の運動方程式} \quad m\ddot{x} = F_n \times \cos\alpha + F_s \times \sin\alpha \quad \cdots (1.3)\text{a}$$

$$\text{Y方向の運動方程式} \quad m\ddot{y} = F_n \times \sin\alpha + F_s \times \cos\alpha - mg \quad \cdots (1.3)\text{b}$$

$$\text{回転方向の運動方程式} \quad I\ddot{\phi} = r \times F_s \quad \cdots (1.3)\text{c}$$

ここで式(1.3)は、2次元（XY座標）の場合のX方向、Y方向、回転方向の運動方程式であり、Y方向マイナス側に重量 g が作用する。3次元の場合は並進3成分、回転3成分の合計6成分の運動方程式が立てられる。

これらの運動方程式は、DEMでは陽解法で解かれるが、本研究で用いた‘DEM3D-CS’では、‘蛙飛び法’によって運動方程式が解かれている。

(4) パラメータの設定方法

DEMシミュレーションを行う上では、図1.11に示すばね-ダンパに、それぞればね係数と減衰係数を与える必要がある。

ばね係数については、式(1.5)に示すヘルツの理論³¹⁾を用いる方法、式(1.6)に示す粒子層の弾性波速度を用いる方法³²⁾ などがある。

$$K_n = \sqrt[3]{\frac{2}{9} \left(\frac{E}{1-\nu^2} \right)^2 r P} \quad \cdots (1.5)$$

ここで、 E は材料のヤング率、 ν はポアソン比、 r は要素の半径、 P は接触点における法線方向の応力である。

$$K = m \frac{V^2}{\Delta X^2} \quad \cdots (1.6)$$

ここで、 V は波動伝播速度、 m は粒子の質量、 X は粒子同士の中心間距離である。

本研究においては、鋼球要素モデルのDEMパラメータ設定においてはヘルツの理論を、碎石要素モデルでは、道床バラスト層のP波速度およびS波速度の測定値を参考にしてばね係数を設定した。

減衰係数については、式(1.7)に示す1自由度減衰系における臨界減衰係数 $c_c = 2\sqrt{mk}$ を用いる方法と、式(1.8)に示す、ばね-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 e_b と減衰係数の関係を用いる方法などがある。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad \dots (1.7)$$

$$e_b = \exp\left(-\frac{h\pi}{\sqrt{1-h^2}}\right), \quad h = \frac{c}{2\sqrt{k \cdot m}} \quad \dots (1.8)$$

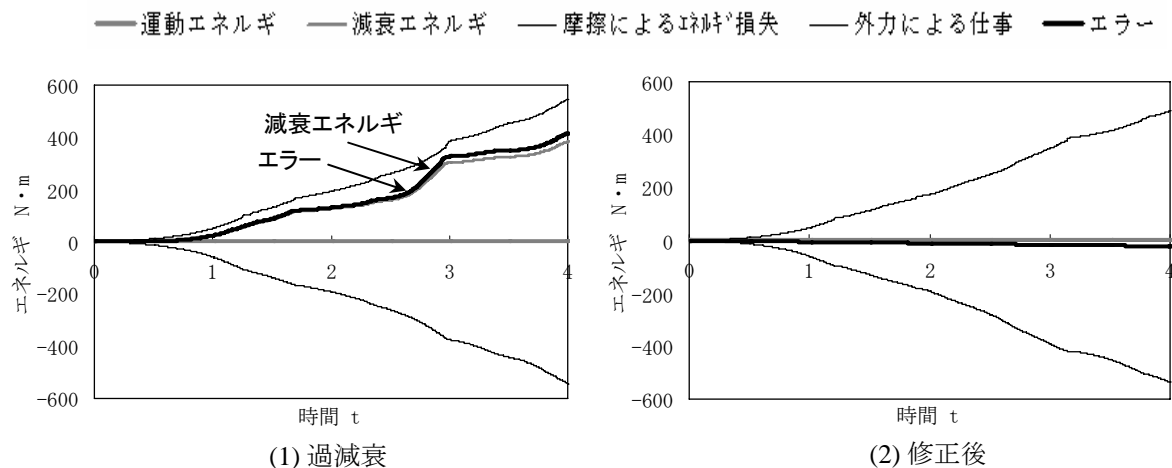
ここで e_b は反発係数、 k は粒子間ばね係数、 c は粒子間ダンパの減衰係数、 m は粒子の質量である。

更にDEMにおいて重要なのが、シミュレーションにおける時間ステップである。前出の'3DEC' (Itasca社) では、式(1.9)を用いて、計算対象のモデルのばね係数と質量から自動的に「許容される Δt 」の値が提示されるが、実際は、その値より更に小さめに設定している。

$$\Delta t < 2\sqrt{m/k} \quad \dots (1.9)$$

(5) エネルギー収支

上述の方法で安全な Δt を与えたつもりであっても、行っている計算の信頼性は必ずしも保証されていない。これに対して、モデルの全体系のエネルギー収支をチェックする方法³³⁾が提案されている。これは、外力による仕事、粒子のポテンシャルエネルギーと運動エネルギー、粒子間ばねの収縮によるひずみエネルギー、粒子間ダンパにおける減衰エネルギー、粒子間の摩擦によるエネルギー損失の合計値をチェックし、その値が著しく大きい場合は、修正が必要と判断される。図1.14は、単調载荷シミュレーションにおいて、減衰係数に過減衰の値を入力した場合と修正後のエネルギー収支である。



※ポテンシャルエネルギーとひずみエネルギーはスケールが大きいため図示していない。

図 1.14 エネルギー収支による計算精度のチェック例

1.4 本論文の構成

第2章では、鉄道分野における道床バラスト層の動的応答および沈下特性に関する既往の実験的検討と、道床バラスト層のモデル化に関する既往の研究を紹介する。

第3章では、筑波大学において開発されたステッピングモータ式高速載荷試験装置を用いた碎石層および鋼球層における繰返し載荷実験の結果を報告する。ここでは、載荷速度の影響に着目し、衝撃的な‘高速載荷’とその1/10の載荷速度の‘標準載荷’による繰返し載荷を行なった。実験結果より、従来の模型実験と同様に、載荷板の残留沈下量と載荷回数、また‘変位振幅’と‘沈下進み’の関係について比較を行った。

第4章では、上記の繰返し載荷実験における碎石層および鋼球層の粒子層内の粒子の挙動をPIV法によって画像解析し、観察する。ここでは粒子の動的挙動に対する載荷速度の影響を把握するために、初期沈下過程および漸進沈下過程における各載荷回における短期的な粒子の移動（載荷過程⇒除荷過程⇒除荷後）を観察する。更に、繰返し載荷過程における粒子の残留変位に対する載荷速度の影響を把握するために、長期的な粒子の移動（載荷前⇒初期沈下後⇒漸進沈下過程）を観察する。これにより、粒子層を構成する粒子の短期的挙動と長期的挙動の関連性を検討する。

第5章では、DEMを用いた鋼球層および碎石層の実験の再現シミュレーションを試みる。ここではシミュレーション結果より、第3章に示す実験における載荷板の残留沈下量、‘変位振幅’および‘沈下進み’との比較を行うと同時に、第4章に示す画像解析結果との比較を行う。これにより、DEMによって粒子層の衝撃荷重下における動的挙動や、繰返し載荷による沈下特性が再現可能であるかどうか検証する。

第6章では、碎石層上の載荷板を一自由度減衰系の質点と捉え、調和外力作用時の質点の運動と外力振動数との関係について、碎石モデルを用いたDEMシミュレーションと、一自由度減衰系のモデルを用いて考察した。ここでは、碎石層上の載荷板の固有振動数に着目し、支持系が粒子層の場合についても、シンプルな一自由度減衰系と同様な応答を示すかどうか検証すると同時に、粒子層の動的挙動が顕著となる外力周波数の領域について検討を行う。

第7章では、本研究で得られた知見を整理し、今後の課題について示した。

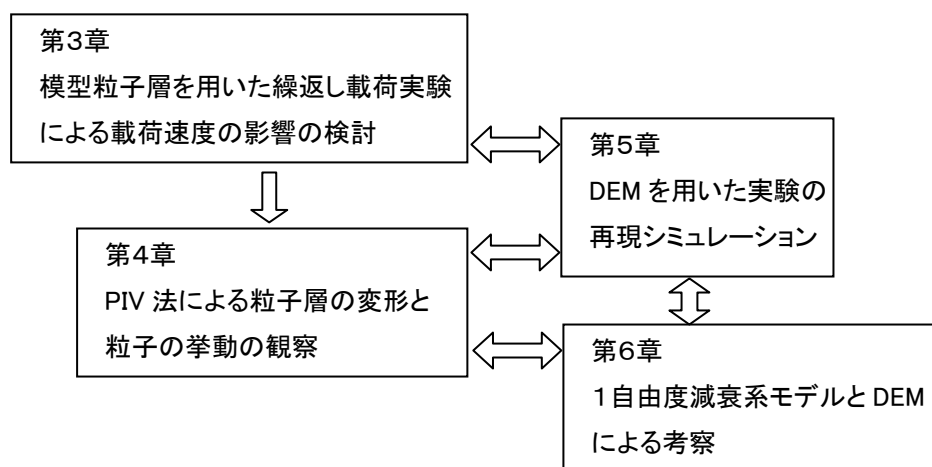


図 1.15 本論文の構成

第1章の参考文献

- 1) 石田誠,河野昭子：浮きまくらぎの軌道に与える影響, 新線路, vol52, No11, pp29-31, 1998
- 2) 河野昭子, 堀池高広, 鈴木貴洋：レール継目部沈下対策工法の効果, 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, pp283-284, 2005
- 3) 青木宣頼：道床細粒化箇所への補修方法の研究, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, pp553-554, 2007
- 4) 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
- 5) たとえば, 佐藤裕：繰返荷重による道床沈下の実験, 鉄道技術研究報告, No65, pp13-18, 1959
- 6) たとえば, 名村明, 石川達也ほか：有道床軌道の道床沈下の定量化に関する基礎的検討, 鉄道総研報告, vol7, No10, pp47-54, 1993
- 7) たとえば, 名村明, 木幡行宏, 三浦清一：有道床軌道の最適まくらぎ形状に関する検討, 応用力学論文集, vol6, 2003
- 8) 関根悦夫, 石川達也, 河野昭子：道床バラストの繰返し塑性変形に及ぼす道床厚さの影響, 鉄道総研報告, vol19, No2, pp17-22, 2005
- 9) 名村明, 木幡行宏, 三浦清一：有道床軌道の繰返し変形挙動に及ぼす荷重とまくらぎ形状の影響に関する実験的研究, 土木学会論文集, No779/IV-66, pp53-68, 2005
- 10) 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
- 11) 鈴木貴洋, 石田誠：輪軸落下試験による軌道構造別動特性の検討, 第57回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2002
- 12) たとえば, S.Miura, N.Abe, M.Ishida：Dynamic Load on Rail Welding Joints, Proc. of Intel. Railway Conf. S-TECH' 93, 1993
- 13) 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
- 14) たとえば, 名村明, 木幡行宏, 三浦清一：道床バラストの繰返し変形特性と推定法, 応用力学論文集, vol5, 2002
- 15) 佐藤裕ほか：道床碎石の粒度に関する実験, 鉄道技術研究報告, No242, pp1-14, 1961
- 16) 坂本正文：ステッピングモータの使い方, オーム社, 2003
- 17) 桃谷尚嗣, 関根悦夫：移動荷重載荷方式を用いた模型実験による強化路盤の変形特性, 鉄道総研報告, vol17.No2, pp23-28, 2003
- 18) 関根悦夫, 石川達也：地震時における有道床軌道の変形挙動, 鉄道総研報告, vol19, No2, pp23-28, 2005
- 19) 木村一郎, 植村知正, 奥野武俊：可視化と情報計測, 近代科学社, 2001
- 20) D.J.White, W.A.Take, M.D.Bolton, S.E.Munachen：A deformation measuring system for geotechnical testing based on digital imaging, close-range photogrammetry and PIV image analysis, 15th Int. Conf. on Soil Mech. And Geotech, Engng., pp539-542, 2001
- 21) D.J.White, W.A.Take, M.D.Bolton：Soil Deformation measurement using PIV and photogrammetry, Geotechnique, vol.53, No.7, pp619-631, 2003
- 22) 桃谷尚嗣, 堀池高広：車両走行によるレール継目部の衝撃荷重の評価, 鉄道総研報告, vol19, No2, pp29-34, 2005
- 23) Shi, G.H.：Block system Modeling by Discontinuous Deformation Analysis, Univ. of California, Berkeley, Dept. of Civil eng., 1989
- 24) 石川達也, 堀池高広：不連続体解析手法を用いたバラスト道床の変形挙動の検討, 鉄道総研報告, vol16, No4, pp17-22, 2002

第1章 序論

- 25) Cundall,P.A. : A Computer Model for Simulating Progressive, large-scale movements in Blocky Rock Systems. Proc. of the Symp.on Intl. Society of rock Mechanics, voll.1, No2-8, p129-136,1971
- 26) Cundall,P.A. and Stark ODL. : A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, Geotechnique, 29 (1),pp47-65,1979
- 27) 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
- 28) T.Matsushima, J.Katagiri et.al : 3D shaped Characterization and Image-Based DEM Simulation of the Lunar Soil Simulant FJS-1, Journal of Aerospace engineering January 2009, ASCE, pp15-23,2009
- 29) Cundall.P.A : Formulation of a Three-Dimensional Distinct Element Model -Part1:A Scheme to Detect and Represent Contacts in a System Composed of Many Polyhedron Blocks,, Intl.J.Rock Mech.,Min. Sci.& Geomech. Abstr., 25, pp107-116, 1988
- 30) 河野昭子, 浦川文寛ほか : 多面体要素を用いたDEM三軸圧縮試験の試み, 第43回地盤工学研究発表会講演集, pp823-824 (CD-ROM) , 2008年
- 31) Hertz, H.: Uber die Berührung fester elastischer Korper (On the contact of elastic solids), J.reine und angewandete Mathematik, 92, 156-171, 1882.
- 32) 伯野 元彦 : 破壊のシミュレーション 森北出版, 1997

第2章

既往の研究

2.1 実線における軌道動的応答測定

鉄道分野の研究において重要なのは、まずは現場の状況を把握することであり、実列車走行下の実線における列車通過時の‘軌道の動的応答測定’が行われている¹⁾²⁾。この‘軌道動的応答測定’では従来、**図2.1**に示すように、軌道部への外力となる『輪重』³⁾（走行列車の車輪とレールの接触力）、軌道側の応力としてレールからまくらぎへ伝達する『レール圧力』、またレールの曲げによって発生する『レール曲げ応力』、また軌道各部の応答として『レール振動加速度』、『まくらぎ変位』、『まくらぎ振動加速度』、『道床振動加速度』が測定される。

現地測定の対象としては、レール溶接部などレール表面の凹凸によって衝撃荷重の発生が予想される区間で行われる例が多く⁵⁾、**図2.2**⁶⁾に示すように、レール表面の凹凸（実測形状）による輪重や道床振動加速度の実態が把握されている。更に、衝撃荷重発生箇所における道床沈下の追跡調査も行われ⁷⁾⁸⁾、‘浮きまくらぎ’が道床の長期的沈下に影響を及ぼすことが明らかにされている。

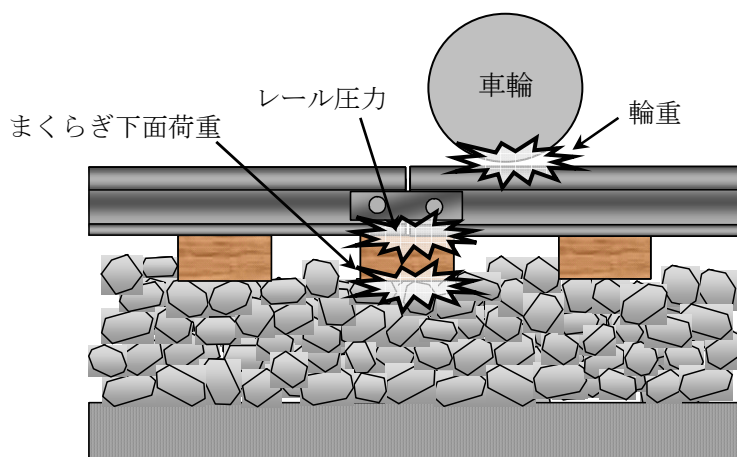
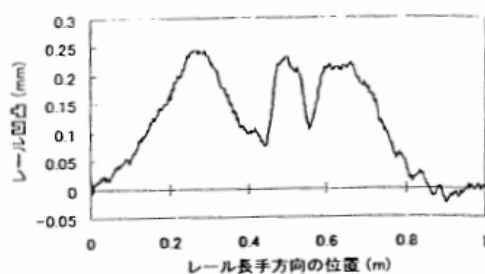
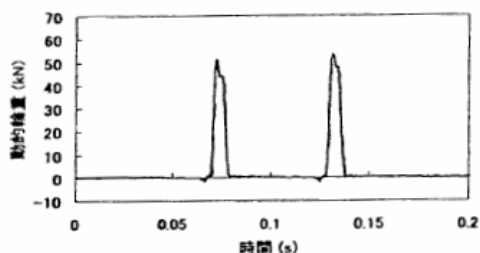


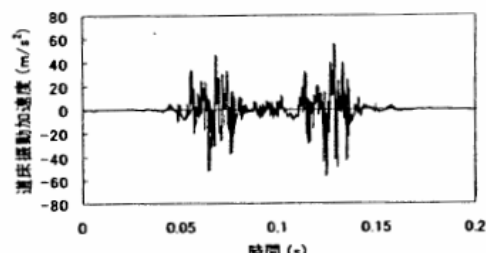
図 2.1 軌道動的応答測定における測定項目



(1) レール頭頂面凹凸形状



(2) 輪重測定値



(3) 道床振動加速度測定値

図 2.2 レール表面凹凸による動的応答⁶⁾

第2章 既往の研究

ところで、道床振動加速度の測定においては、従来1軸の加速度センサを用いていたため、現場におけるセンサ設置が困難であったが、その後、3次元方向の振動加速度が測定可能な『センシングストーン』（図2.3）が開発され⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾、より精確な道床振動加速度の測定が可能となった。

また、軌道動的応答特性の測定においては、まくらぎから道床バラスト層に伝達する『まくらぎ下面圧力』の測定が課題となっていたが、センサ・まくらぎ・道床の厚さのバランスにより、従来は試験線における測定に留まり、現場での測定は不可能であった。しかし、薄型のシートフォースセンサ¹²⁾を採用した現場敷設可能な『センシングまくらぎ』（図2.4-2.5）が開発され¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾、実列車走行下での『まくらぎ下面圧力』の測定が可能となり、加えてまくらぎ下面に設置した75個のセンサにより荷重分布状況の把握が可能となった（図2.6）¹⁶⁾。

更に、これらの新たなセンシング技術による現場測定において、現地に設置した測定用PCと職場に設置した監視用PCをインターネットでつなげた『遠隔自動測定システム』（図2.7）も開発され¹⁷⁾、これにより長期間にわたって現場の測定データを取得することが可能となっている。

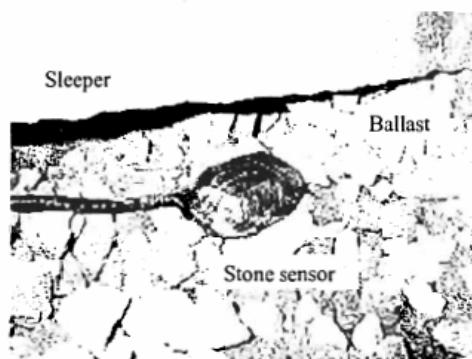


図 2.3 センシングストーン⁹⁾

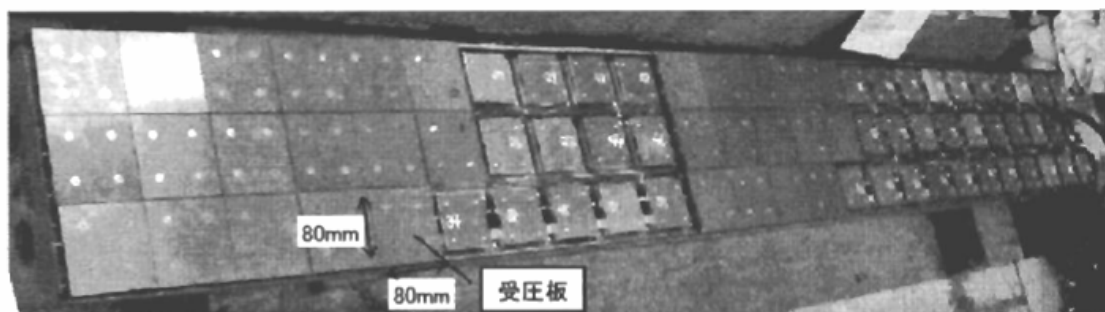


図 2.4 センシングまくらぎ¹⁶⁾



図 2.5 センシングまくらぎ敷設状況¹⁵⁾

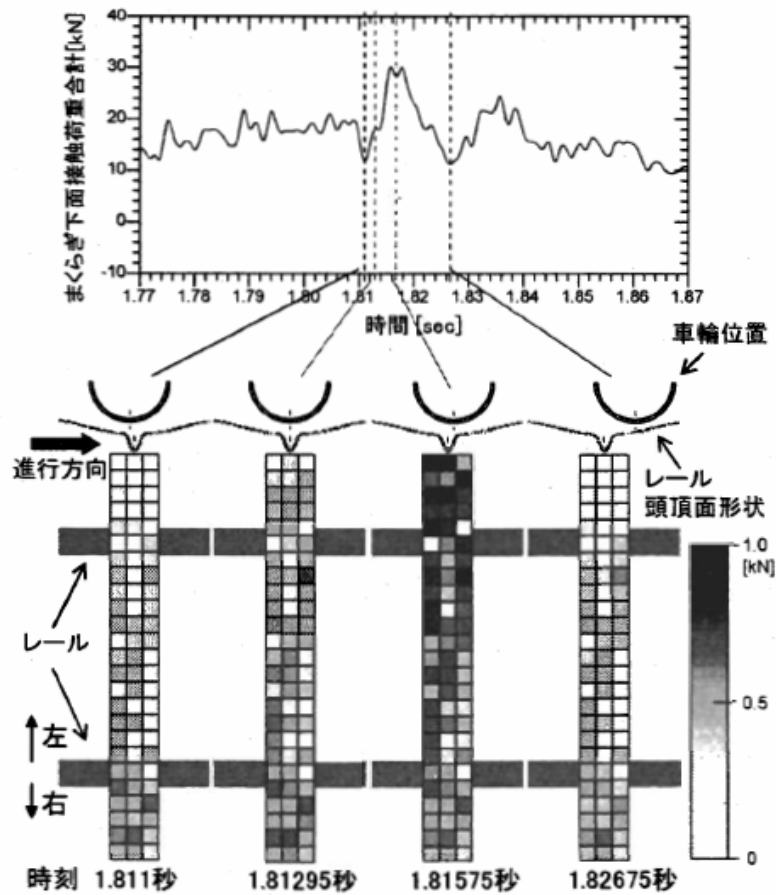


図 2.6 センシングまくらぎ測定結果から得られる時系列の荷重分布変化¹⁶⁾

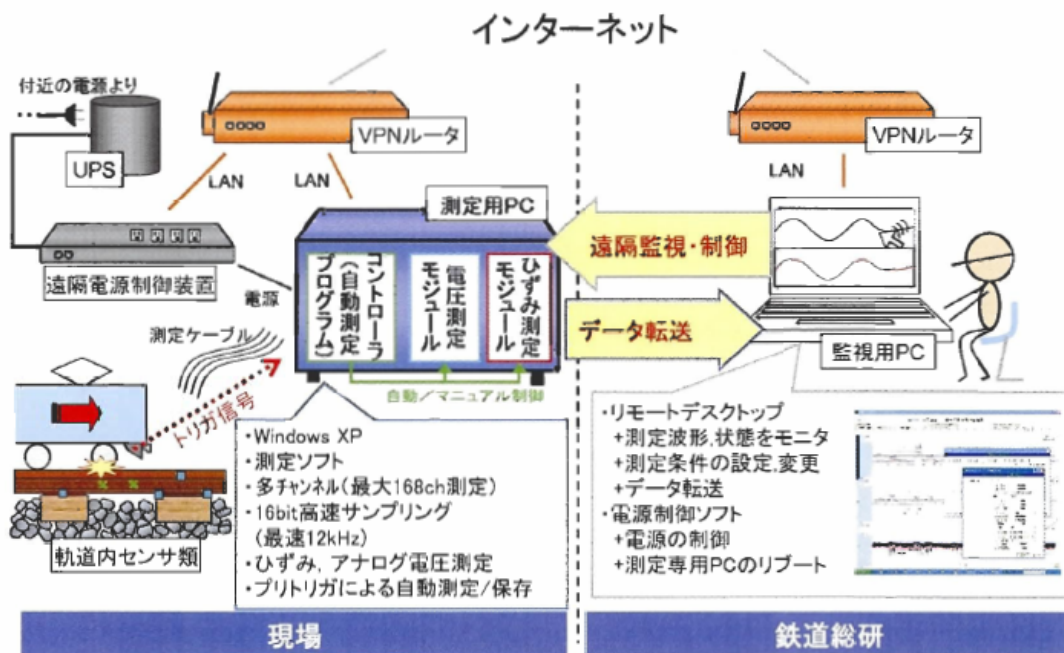


図 2.7 遠距離自動遠隔測定システムの構成¹⁷⁾

2.2 試験施設内における軌道動的応答試験

前節で述べた通り、現地試験に関する技術は目覚しく発展しているが、一方で営業線における測定は手続き上困難な面があったり、また測定データ自体も‘その現場個別の環境’の影響を強く受けることも多く、特別な影響要因に絞った検証や、特定の対策工法の効果を比較する上では、適さない場合もある。

これに対して、試験施設内の試験装置や試験線におけるモーターカ走行試験¹⁸⁾、また実物車輪を落下させて衝撃荷重を発生させる輪軸落下試験^{19) 20)}などによって、軌道の動的応答に関する実物規模の実験が行なわれている。

軌道破壊理論の確立を目的とした研究では、屋外に敷設された実物大試験軌道において、静的載荷試験、周波数応答試験、繰返し載荷試験が行なわれ、軌道各部の周波数応答特性が明らかとなっている²¹⁾。

輪軸落下試験では、測定結果の応答波形(図2.8)を用いて軌道各部のばね係数や減衰係数が求められている¹⁹⁾。最近の研究では、バラスト軌道のばね係数が30~40MN/m、減衰係数が80~100M・s/mとされている²⁰⁾。ただし、路盤や軌道パッドの条件が異なる4通りの試験結果であり、更に車輪をレールのまくらぎ間位置に落下させた条件での結果であるため、バラスト層のばね係数および減衰係数そのものを表してはいない。

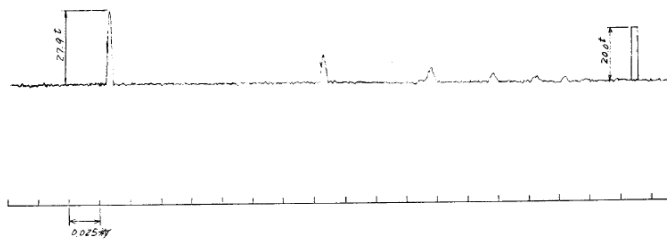


図 2.8 輪軸落下試験測定波形¹⁹⁾

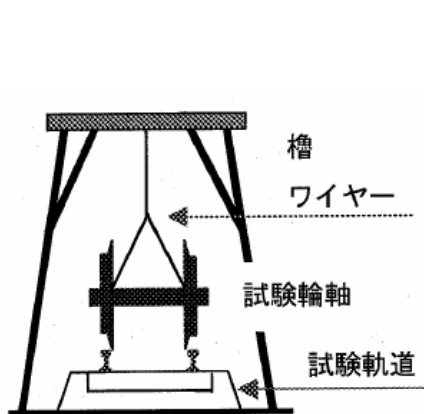


図 2.9 輪軸落下試験仕様²⁰⁾

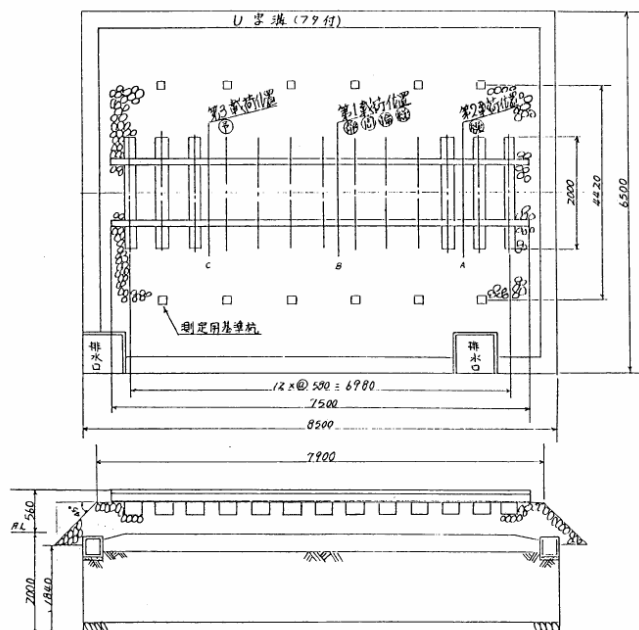


図 2.10 構内実物大試験軌道²²⁾

2.3 実物大軌道における繰返し载荷試験

既に述べた軌道動的応答（列車通過荷重作用時とその前後の軌道の短期的な挙動）に関する研究の一方で、繰返し荷重下における軌道の長期的な沈下特性の研究も数多く行われている²³⁾。繰返し荷重による道床バラスト層の沈下特性の把握は、設計基準や保守管理手法の確立に必須であり、これらの研究の中には、複雑なバラスト軌道の沈下特性の定量化を目的としたものもある²⁴⁾²⁵⁾。

これらの研究においては通常、**図2.12**に示す軌道沈下曲線を図中の式で近似している。また、初期の急激な沈下を示す「初期沈下過程」では「バラスト粒子間の間隙が詰まる」現象によって、その後の「漸進沈下過程」では「バラスト粒子が側方へ流動する」現象によって沈下が生じると考えられている。

更に実物大試験軌道を用いた繰返し载荷実験には、道床厚やまくらぎ形状の影響²⁶⁾²⁷⁾など軌道条件の違いに着目した検討から、軌道への外力の条件に注目した研究²⁸⁾まで様々なものがある。例えば、载荷周波数2～8Hz程度の領域で外力の周波数の影響に着目した実験からは、この周波数の領域内では、道床の変位に大きな影響がないことが報告されている²⁵⁾ (**図2.13**)。

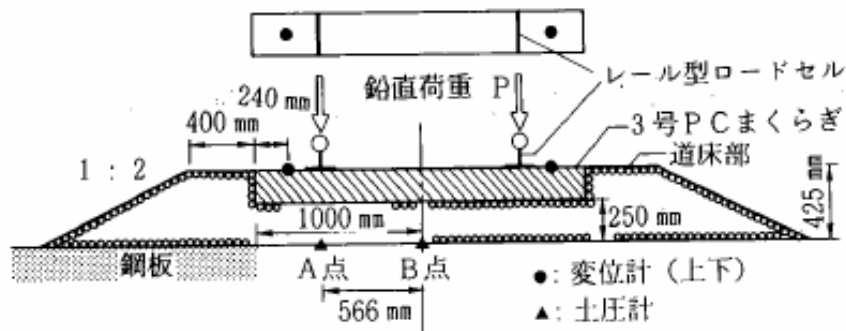
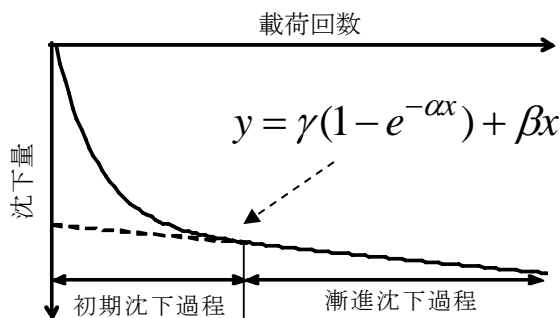


図2.11 実物大試験軌道仕様²⁵⁾



X = 繰返し载荷回数
 α = 初期沈下過程の長さを示す係数
 γ = 初期沈下量を示す係数
 β = 漸進沈下過程の沈下進み係数

図2.12 道床バラスト層の沈下曲線と近似式

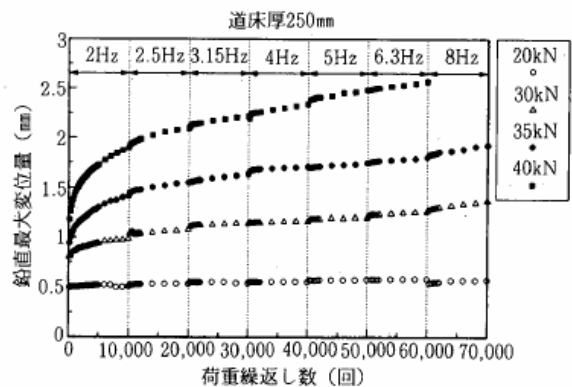


図2.13 载荷周波数の影響²⁵⁾

2.4 軌道のモデル化と動的応答シミュレーション

軌道の動的応答のメカニズムを知る上で、従来、軌道の動特性モデルの検討が行われて来たが²⁹⁾、図2.14に示す‘軌道動的応答モデル’³⁰⁾は、基礎研究分野から実用利用までの広範囲で用いられている。

このモデルにおいては、レールはティモシェンコ梁、まくらぎ以下の支持部は、ばね-ダンパにつながれた質点でモデル化されている。また、車輪とレール間に設定した接触ばねにより、レール表面の凹凸による接触荷重を発生させ、軌道各部の動的応答を求めるものである。

例えば図2.15に示すように、実際のレール表面凹凸の測定データを入力して行なったシミュレーション結果は、同じ現場の軌道の動的応答の時系列波形と、ほぼ一致している。

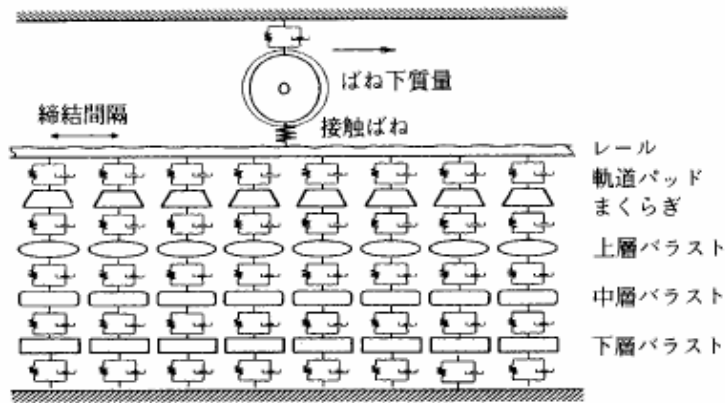


図2.14 軌道動的応答モデル²⁾

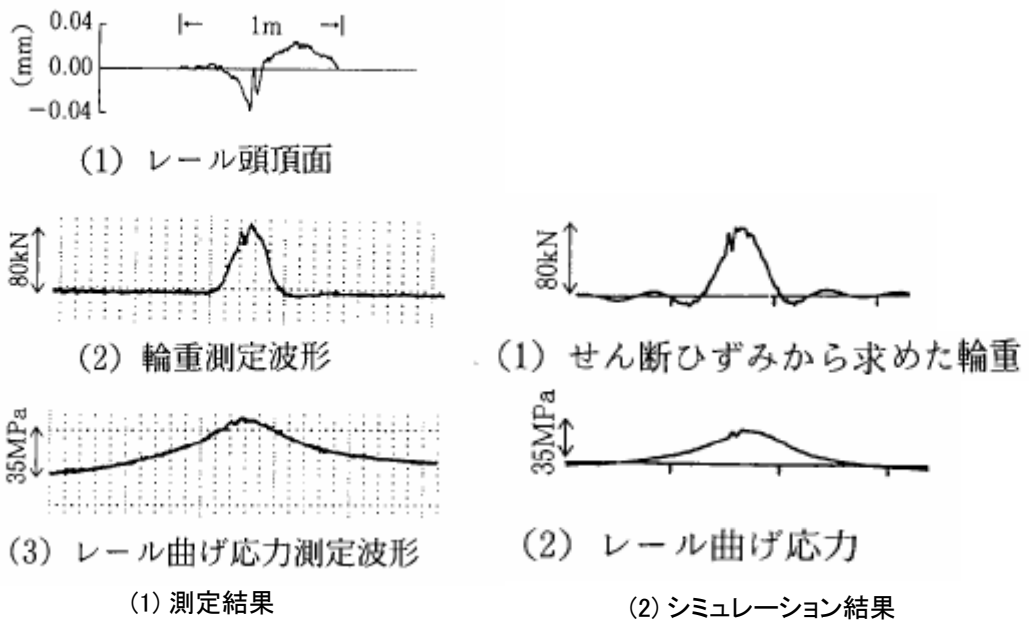


図2.15 軌道動的応答シミュレーション結果例²⁾

その後、図2.16 に示す半車体モデルが開発され³¹⁾、より実現に近い再現シミュレーションが可能となり、また前輪と後輪がモデル化されたことで、軸間距離（図2.17）が軌道沈下へ与える影響についてもシミュレーションによる検討が行われている³²⁾。

他方、道床バラスト層を弾性連続体でモデル化し（図2.18）、FEMによって弾性変形の解析が行われている³³⁾。これによりレール継目部の条件による軌道の動的応答がシミュレーションによって再現されている（図2.19）。

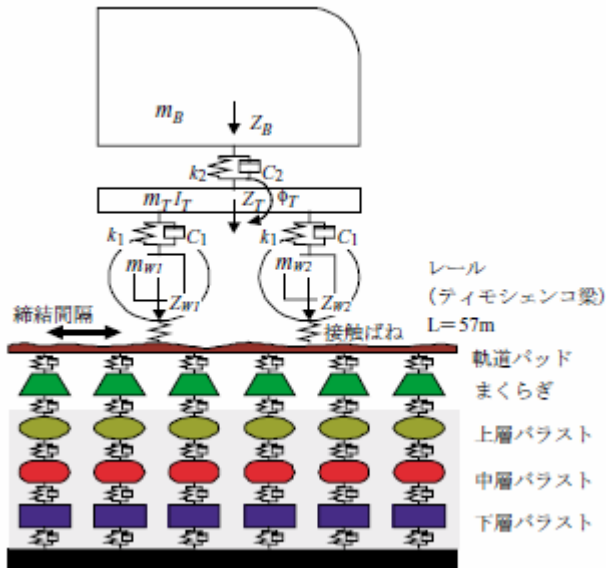


図2.16 軌道動的応答モデル（半車体）³²⁾

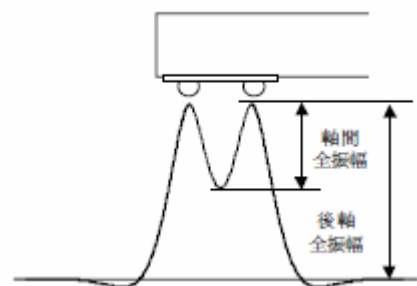


図2.17 軸間距離³²⁾

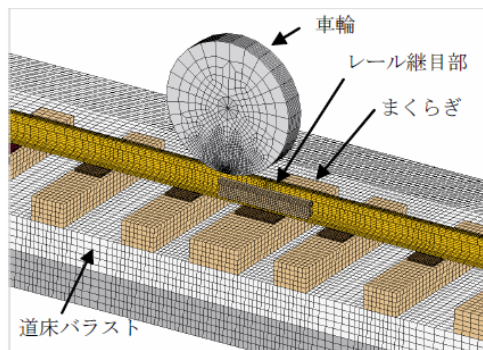


図2.18 解析モデル³³⁾

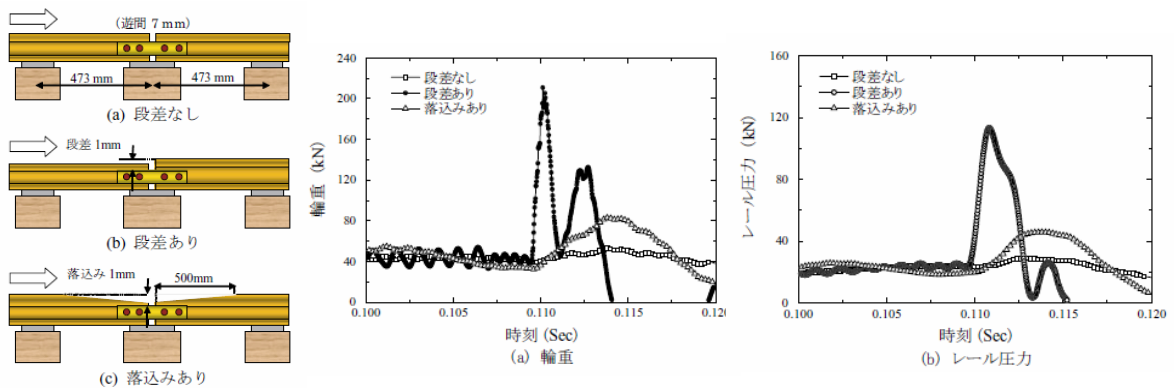


図2.19 レール継目部のモデル化と解析結果³³⁾

2.5 離散体モデル化手法を用いたバラストに関する研究

軌道の動的応答に関しては、従来、多くのシミュレーションが行われて来たが、道床バラスト層の塑性沈下に起因する‘沈下挙動’に関しては、ばね-ダンパ-質点系モデルや弾性連続体モデルでは再現が不可能であった。

これに対して、不連続変形法 (DDA)³⁴⁾や個別要素法 (DEM)³⁵⁾といった離散体モデル化手法-バラスト粒子単位のモデル化-が取り入れられるようになり、現在ではバラストに関する研究分野で広く用いられている。

日本においては、1990年代に道床バラスト層の変形特性の研究にDDAが取り入れられ³⁶⁾³⁷⁾、三軸試験の再現シミュレーション³⁸⁾や模型バラスト層 (図2.20) モデルを用いたまくらぎ周辺のバラスト粒子の挙動の観察³⁹⁾などが行われている。

またDEMによるバラストのモデル化では、円集合体を用いた軌道縦断面モデル (図2.21) による粒子の移動の観察が行われている⁴⁰⁾。ここで用いられているパラメータを表2.1に示す。

その後、多面体要素約20000個によって構成されるバラスト軌道モデルの構築と汎用多面体DEMソフト‘3DEC’ (Itasca社)を用いたシミュレーションも行われ⁴¹⁾、実列車荷重波形を入力した場合の軌道の動的応答が再現されている (図2.22)。

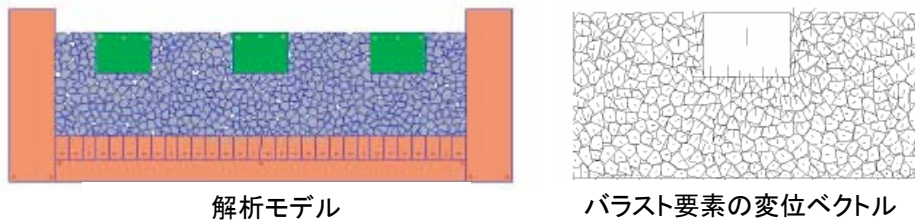


図 2.20 DDA のシミュレーション例³⁹⁾

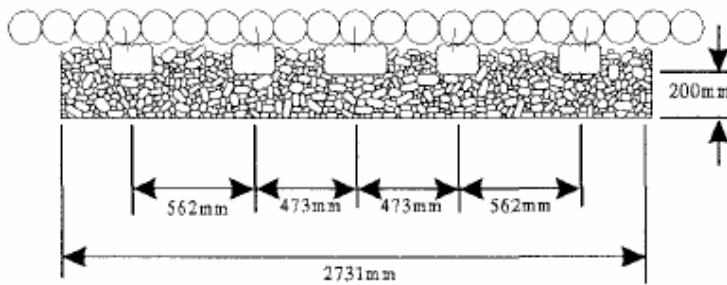


図 2.21 円集合体による軌道縦断面モデル⁴⁰⁾

表 2.1 2D-DEM における DEM パラメータ例⁴⁰⁾

バラスト	法線方向ばね定数	2.0×10^8	N/m
	せん断方向ばね定数	5.0×10^7	N/m
	密度	2690.0	kg/m ³
	摩擦係数	0.268	
まくらぎ (木)	弾性係数	1.8228×10^{10}	N/m ²
	密度	1170.0	kg/m ³
レール (50N)	縦剛性 E1x	411.6×10^7	Kg·cm ²
	密度	50.4	kg/m

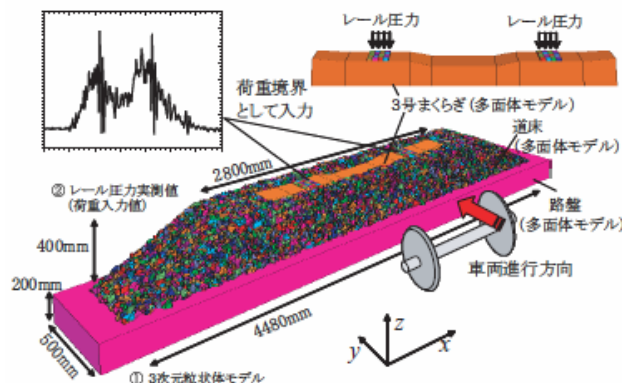
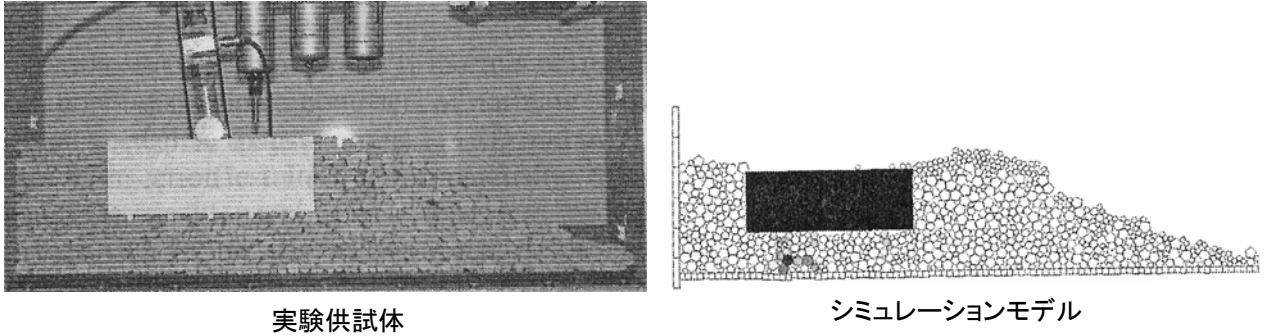


図 2.22 多面体モデルを用いた DEM シミュレーション例⁴¹⁾

他方、フランスでは、五角柱の鋼棒を用いた実験（図2.23）と合わせて、5角形要素によるDEMシミュレーションが行われ、繰返し荷重下の残留沈下量の比較が行われている⁴²⁾⁴³⁾。また合わせてバラストの多面体によるモデル化も行われている（図2.24）⁴⁴⁾。

一方イギリスでは、バラスト粒子の球集合体によるモデル化の事例が多く⁴⁵⁾⁴⁶⁾、角張ったバラスト粒子を球集合体で表現する上での合理的なモデル化手法について、実験とDEMシミュレーションの比較による検討が行われている（図2.25）⁴⁷⁾。



実験供試体
シミュレーションモデル
図 2.23 五角柱鋼棒による実験供試体と五角形 DEM モデル⁴⁴⁾

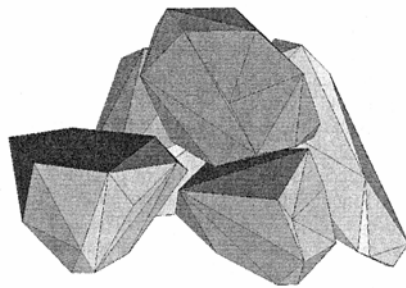
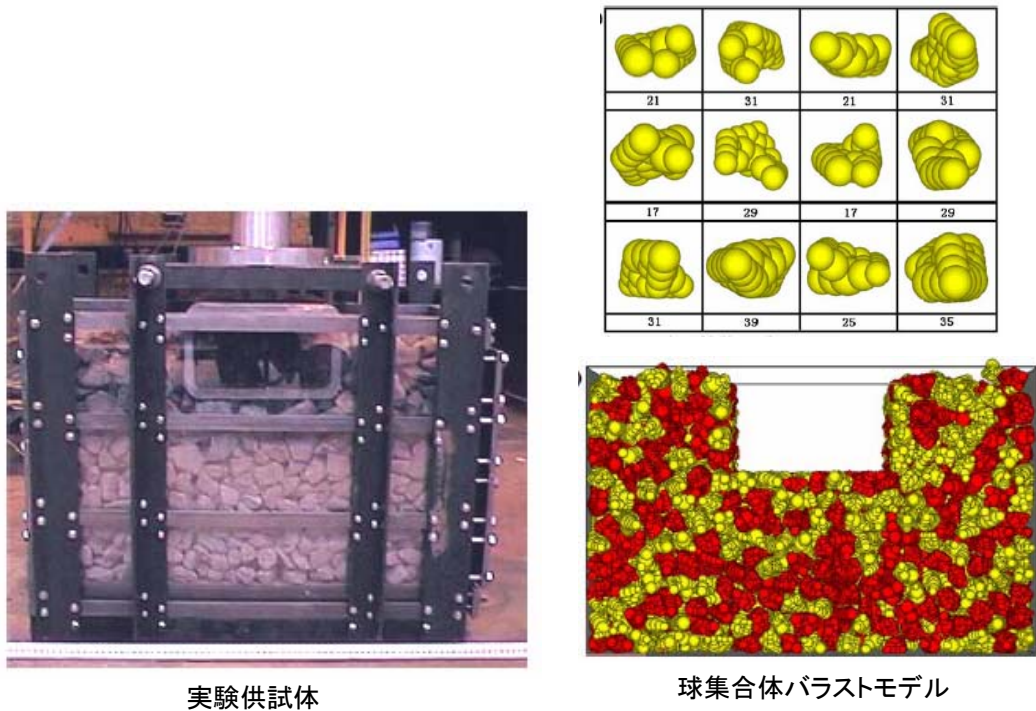


図 2.24 多面体によるバラストのモデル化⁴⁴⁾



実験供試体
球集合体バラストモデル
図 2.25 実験と球集合体 DEM シミュレーションの比較⁴⁷⁾

第2章 既往の研究

大型三軸試験とDEMシミュレーションの比較においては、ただだか10個の球から構成される四面体形状のバラストモデルでも、頂点部分に小さな球‘Asperity’を追加するだけで（図2.26）、シミュレーションにおける初期剛性が増加するという報告もある⁴⁸⁾。

更に合衆国では、内部に細粒粒子を含む円要素を用いて、DEMによるバラストの破砕シミュレーションも行われている（図2.27）⁴⁹⁾。

ところで、DDAやDEMの離散体シミュレーション手法自体は、汎用ソフトやフリーソフトの入手が可能となり一般的となったが、問題となるのはバラスト粒子のモデル化である。

特にバラストのような角張った不規則形状は形状の再現が重要といえるが、最近では測定技術も発達し、3次元デジタイザ⁴¹⁾を用いた形状測定（図2.28）や、レーザースキャナを用いた形状測定（図2.29）⁵⁰⁾が行なわれている。

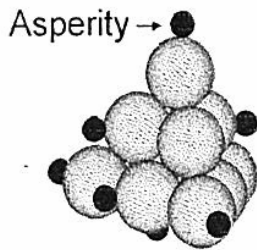


図 2.26 球集合体によるバラストのモデル化例⁴⁸⁾

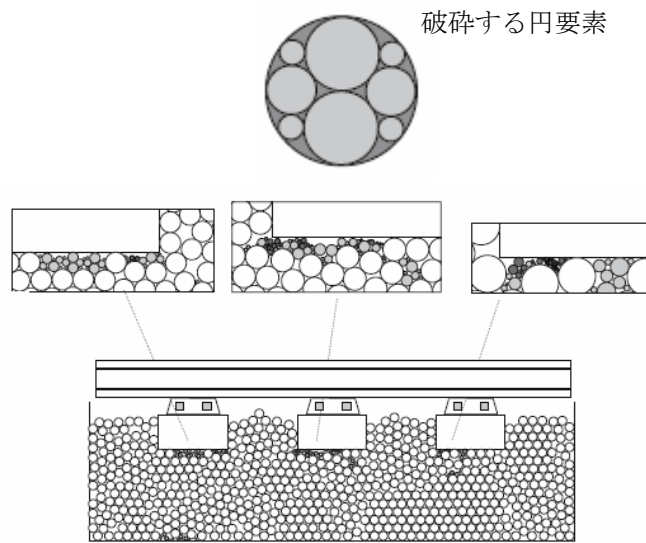


図 2.27 バラスト破砕モデル⁴⁹⁾



図 2.28 デジタイザを用いたバラスト3次元形状測定方法⁴¹⁾



図 2.29 レーザースキャナによる測定結果⁵⁰⁾

第2章の参考文献

- 1) S.Miura, N.Abe, M.Ishida : Dynamic Load on Rail Welding Joints, Proc. of Intel. Railway Conf. S-TECH'93, 1993
- 2) 石田誠, 三浦重, 河野昭子 : 軌道動的応答モデルとその解析結果, 鉄道総研報告, vol11, No2, pp19-26, 1997
- 3) 加藤武, 矢澤英治 : 輪重・横圧の地上測定, 新線路 vol53, No11, 1999
- 4) 相川明, 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
- 5) 石田誠, 河野昭子, 三浦重 : レール曲げ応力に与える軌道支持剛性の影響, 第52回土木学会年次学術講演会概要集, IV-521-522, 997
- 6) 石田誠, 鈴木貴洋 : 軌道動的応答モデルによる道床沈下予測, 日本鉄道施設協会誌, vol41, No8, pp585-588, 2003
- 7) 石田誠, 名村明, 鈴木貴洋 : 軌道沈下の実態と予測モデル, 鉄道力学論文集, No6, pp17-20, 2002
- 8) 石田誠, 名村明, 鈴木貴洋 : 営業線における道床沈下測定試験結果, 日本鉄道施設協会誌, vol41, No4, pp272-275, 2003
- 9) 相川明, 鷹尾良行ほか : 道床加速度の三軸測定装置の開発, 日本機械学会第13回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp193-194
- 10) A.Aikawa, Y.Takao et.al : Development of a Measuring Instrument for Triaxial Acceleration and Ballast Particle Railway Engineering 2007, 2007
- 11) 石田誠, 相川明 : バラスト軌道の動的挙動, RRR 2008-8, pp18-21
- 12) 藤本由起夫, T.A.Setyano : 圧電フィルムを用いたシート型衝撃力測定センサ, 日本機械学会論文集, C-73, 725, pp184-191, 2007
- 13) 相川明ほか : まくらぎ下面圧力とバラスト挙動に関する現場測定法の開発, 鉄道総研報告, vol22.No8, pp23-28, 2008
- 14) 相川明, 浦川文寛ほか : まくらぎ下面の動的荷重分布測定のためのセンシングまくらぎの開発と応用, 鉄道力学論文集, No12, pp73-78, 2008
- 15) A.Aikawa, F.Urakawa et.al : Sensing Sleeper for Dynamic Pressure Measurement on a Sleeper Bottom induced by Running Train, Railway Engineering 2009
- 16) 浦川文寛, 相川明ほか : 「センシングまくらぎ」を用いたまくらぎ下面とバラスト砕石層との接触荷重の測定, 15回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-rail2008) 講演論文集, pp551-554
- 17) 浦川文寛, 相川明ほか : 軌道動的応答の長期測定を目的とした遠隔自動測定システムの開発, 鉄道力学論文集No31, pp23-28, 2009
- 18) 堀池高広, 向井明ほか : レール継目部の沈下対策工法の開発, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp59- 2001
- 19) 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
- 20) 鈴木貴洋, 石田誠 : 輪軸落下試験による軌道構造別動特性の検討, 第57回土木学会年次学術講演会概要集, 2002
- 21) たとえば, 長藤敬晴, 野口達雄 : ガイドウェイ試験装置による土路盤上有道床軌道の特性試験 (第2次), 鉄道技術研究所速報, vol79, No14, pp171-172, 1979
- 22) 内田雅夫ほか : ガイドウェイ試験装置による土路盤上有道床軌道の特性試験 (第4次) -盛土強化路盤の場合, 鉄道技術研究所速報, vol82, No64, pp1-50, 1982
- 23) たとえば, 名村明, 石川達也ほか : 道床沈下に関する研究, 日本施設協会誌, vol32, No1, pp26-29, 1993

第2章 既往の研究

- 24) 名村明, 石川達也ほか: 有道床軌道の道床沈下の定量化に関する基礎的検討, 鉄道総研報告, vol7, No10, pp47-54, 1993
- 25) 石川達也, 名村明ほか: 道床バラスト部の繰返し変形特性の定量化に関する検討, 鉄道総研報告, vol8, No11, pp31-36, 1994
- 26) 名村明, 木幡行宏, 三浦清一: 有道床軌道の最適まくらぎ形状に関する検討, 応用力学論文集, vol6, 2003

- 27) 名村明, 木幡行宏, 三浦清一: 有道床軌道の繰返し変形挙動に及ぼす荷重とまくらぎ形状の影響に関する実験的研究, 土木学会論文集, No779/IV-66, pp53-68, 2005
- 28) 名村明, 木幡行宏, 三浦清一: 道床バラストの繰返し変形特性と推定法, 応用力学論文集, vol5, 2002
- 29) 三浦重: 軌道構造の動特性モデルの構築, 鉄道総研報告, vol9, No12, pp7-12, 1995
- 30) 石田誠: 軌道動的応答モデルの溶接部疲労寿命予測への応用, 新線路, vol52, No4, pp1-6
- 31) たとえば, 鈴木貴洋: 軌道構造変化箇所が生じる輪重変動メカニズムの検討, 第16回土木学会年次学術講演会概要集, 2004
- 32) 石田誠, 鈴木貴洋: 軸間距離の軌道沈下への影響に関する一考察, 鉄道総研報告, Vol18, No3, pp47-52, 2004
- 33) 桃谷尚嗣, 堀池高広: 車輪走行によるレール継目部の衝撃荷重の評価, 鉄道総研報告, Vol19, No2, pp29-34, 2005
- 34) Shi, G.H.: Block system Modeling by Discontinuous Deformation Analysis, Univ. of California, Berkeley, Dept. of Civil eng., 1989
- 35) たとえば, Cundall, P.A.: A Computer Model for Simulating Progressive, large-scale movements in Blocky Rock Systems. Proc. of the Symp. on Intl. Society of rock Mechanics, vol1.1, No2-8, p129-136, 1971
- 36) 石川達也, 大西有三: 道床バラストの繰返し変形挙動に対する不連続変形法 (DDA) の適用, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp205-217, 1998
- 37) 石川達也, 関根悦ほか: バラスト軌道の不連続体解析に対する粒子特性の力学的影響評価, 応用力学論文集, vol10, pp513-522, 2007
- 38) 石川達也, 大西有三: 粗粒材の三軸試験結果へのDDA適用に関する一考察, 第30回土質工学研究発表会概要集, 1995
- 39) 石川達也, 堀池高広: 不連続体解析手法を用いたバラスト道床の変形挙動の検討, 鉄道総研報告, vol16, no4, pp17-22, 2002
- 40) 鬼頭昭人, 長戸博ほか: 個別要素法を用いた軌道の動的挙動解析, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, vol54, No4, pp814-815, 1999
- 41) 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投擲応答解析, 鉄道総研報告, vol23, No2, pp11-16, 2009
- 42) G.Saussine: Vibration Dynamics of Confined Granular Materials, Physical Review E74, The American Physical Society, pp031302-1-10
- 43) G.Saussine, C.Cholet et.al: Modelling Ballast Behaviour under Dynamic Loading. Part I A 2D Polygonal Discrete Element Method Approach, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, pp2842-2859, 2006
- 44) G.Saussine, C.Cholet et.al: Modelling Ballast Behaviour under Cyclic Loading Using Discrete Element Method, Proc. of 'Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena', Balkema, pp649-658, 2004
- 45) O.Haririche, G.R.McDowell: Discrete Element Modelling of Cyclic Loading of Crushable Aggregates, Granular Matter, vol5, pp147-151, 2003

- 46) W.L.Lim, G.R.McDowell : Discrete Element Modelling of Railway Ballast, *Granular Matter*, vol7, pp199-29,2005
- 47) M.Lu, G.R.McDowell : The Importance of Modelling Ballast Shape in the Discrete Element Method, *Granular Matter*, vol9, pp69-80,2007
- 48) M.Lu,G.R.McDowell : Discrete Element Modelling of Railway Ballast under Triaxial Conditions, *Geomechanics and Geoengineering an International Journal*, vol3, No4, pp257-270, 2008
- 49) S.L.Guerrero, L.E.Vallejo : Discrete Element Method Analysis of Railtrack Ballast Degradation during Cyclic Loading, *Granular Matter*, vol8, pp195-204,2006
- 50) 福田和彰 : イメージベースDEMを用いた不規則形状粒子集合体のせん断強度予測とサイズ効果の検討,筑波大学修士論文, 2010

第3章

模型粒子層を用いた繰返し載荷実験による
載荷速度の影響の検討

3.1 実験概要

3.1.1 粒子層供試体の概要

本実験で用いた粒子層供試体の寸法を図3.1に示す。粒子層の高さは実軌道の約1/3の80mmとし、幅は境界の影響を低減させるために、実際のまくらぎ間の1/3よりも広めに375mmとした。奥行方向の厚さは、載荷部直下の砕石挙動を前面から観察するために、40mmと薄くした。

また載荷板は、実際のまくらぎ幅（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種類を用いた。

粒子層の供試体構築の際には、実際の道床バラスト層の締固め後の密度 約1.67 g/cm³¹⁾（間隙比 0.617 程度）を参考にして試料の投入量を決め、それを3回に分けて投入し、各段階において木片で粒子層上面を叩きながら敷き詰めた。その後、供試体と同じ幅の載荷板を載せ、準静的に0.1 kN の載荷を5 回行った。この結果、砕石層の供試体の平均的な間隙比は0.618、鋼球層の供試体の平均的な間隙比は0.642であった。

3.1.2 試料

本実験において、砕石層の試料は実バラストで用いられる安山岩砕石の細粒サイズのものを、鋼球層の試料は表3.1に示す6通りの粒径のベアリング球を用いた。図3.2に各試料を示す。

またいずれの試料も、図3.3に示す粒度分布となるように粒度調整を行った。ここで図中の点線は実バラストの粒度範囲²⁾の1/3相似粒度の範囲を示している。

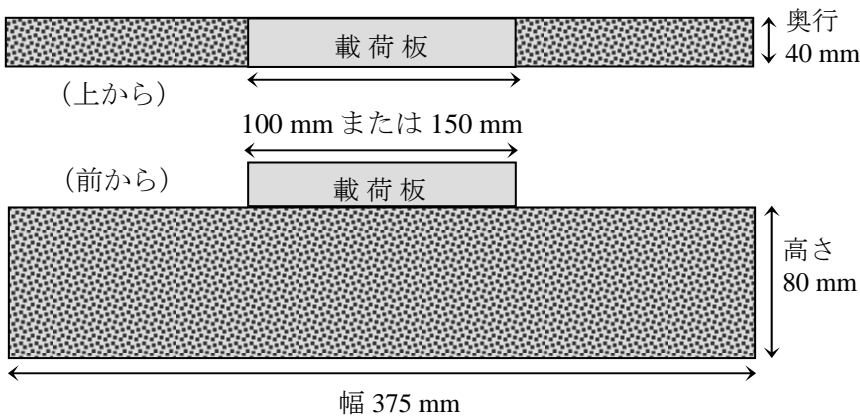


図3.1 供試体寸法

表 3.1 鋼球試料の粒径

	粒径 mm
①	19.05
②	17.46
③	14.28
④	11.00
⑤	8.73
⑥	7.14



図3.2 実験試料

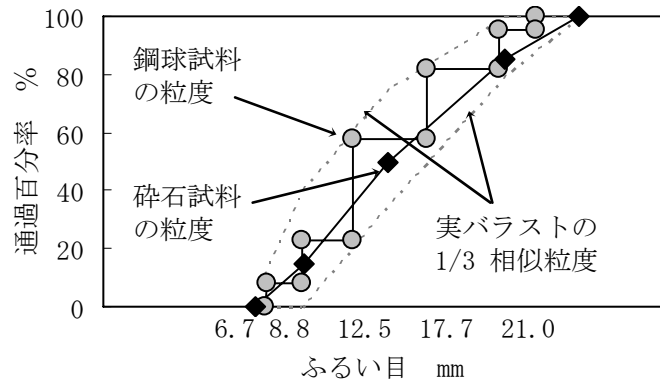


図3.3 実験試料の粒度分布

3.1.3 荷重条件

(1) 荷重振幅

鋼球層実験の荷重振幅の決定においては、まず事前に載荷速度1mm/sの単調載荷実験を行なった。その結果、図3.4に示すように、鋼球層では200N程度を超えた荷重が出ないことから、ここでは荷重振幅を200Nとした。

次に碎石層実験であるが、従来の実物大繰返し載荷実験における設定荷重は、実軌道におけるレール圧力（片側）レベルを参考にし、通常、30kN～50kN程度の載荷荷重が設定される。しかし本実験は、碎石層が実軌道の1/3縮尺であるため、相似則³⁾を考慮した荷重に換算する必要がある。そこで、実物大における40kNの荷重を後述の2通りの方法で換算した結果、実験では荷重振幅を0.53 kNおよび0.36 kNとした。

まず前者の0.53kNは、実験における載荷荷重 F を「碎石層を変形させる弾性力」と考え、式(3.1)から換算した。

$$F = l^2 E \varepsilon \quad \dots (3.1)$$

ここで模型寸法 l の相似率は1/3、弾性係数 E とひずみ ε の相似率は1であるから、 F の相似率は1/9となる。よって実軌道における40kNの荷重を想定した場合、本実験では1/9の4.44kNと算出されるが、先述の通り、実験供試体は奥行が薄く、実軌道の1/3の更に0.12倍である。よってここでは、まくらぎの単位面積辺りの荷重値を合わせ、設定荷重を0.53 kNとした。

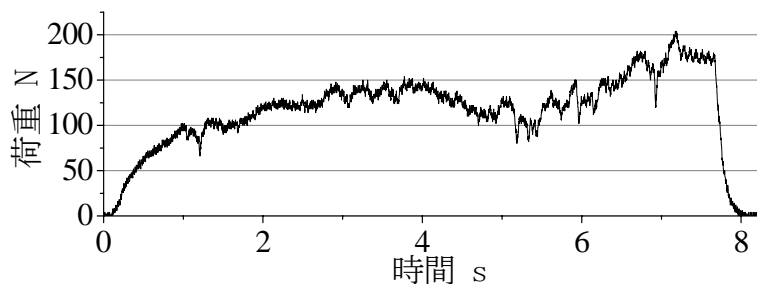


図3.4 鋼球層の単調載荷実験結果

次に後者の0.36kNは、式(3.2)に示す、浅い基礎の支持力公式を参考とした。

$$\frac{Q}{B} = cN_c + \gamma_2 D_f N_q + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_r \quad \cdots (3.2)$$

ここで c は粘着力、 D_f は土かぶり厚、 γ_1 、 γ_2 は単位体積質量、 N_c 、 N_q 、 N_r は内部摩擦角による係数で、 Q が外力、 B は載荷幅である。ただし、式(2.1)における第一項と第二項は本実験においては無視でき、更に両辺を B で除した結果、式(2.2)の通りとなり、 Q/B^2 の値は供試体のサイズによらない値となる。

$$\frac{Q}{B^2} = \frac{1}{2} \gamma_1 N_r \quad \cdots (3.3)$$

ここで $Q=F/W$ (F : 載荷荷重、 W : 奥行) とすると、実軌道の幅300mm、奥行2000mmの大盤まくらぎに片側40kNが載荷された場合の Q/B^2 の値は444kN/m³となり、これを実験における幅100mm、奥行40mmの載荷板に適用すると、載荷荷重 F は0.18kNとなる。しかし、本試験機で用いたロードセルの性能上、0.18kN程度の荷重振幅の制御が高速載荷の場合に不安定になったため、本実験では、上述の倍の0.36kNとした。

(2) 載荷速度

第1章で述べたように、レール表面凹凸部における衝撃荷重成分は100Hzを越え、列車走行速度やレール表面凹凸形状などによっては数百Hzとなる場合もあるため、これらの現象を再現するためには、実験においても荷重作用時間が0.01s以下で載荷を行うことが目標となる。

本研究で用いたステッピングモータ式高速載荷試験装置では、荷重1波の荷重作用時間が0.01s程度の高速載荷が可能であるが、AD・DAボードのサンプリング間隔により、このレベルの載荷速度の場合、瞬間的に設定より著大な荷重が出るなど、繰返し載荷における荷重振幅の一様性が悪くなる場合がある。

よって予備実験で検討した結果、荷重1波の荷重作用時間を0.02s程度とすると繰返し載荷の荷重振幅の制御が安定したため、この条件による載荷を‘高速載荷’、その1/10の載荷速度における載荷を‘標準載荷’とした。それぞれの荷重波形の例を図3.5に示す。

ただし本試験で用いた繰返し載荷試験装置は、一連の繰返し載荷過程で載荷速度が一定であるのに対して、碎石層の物性は繰返し載荷過程において変化するため、設定荷重値が出るまでの荷重作用時間は厳密には異なり、荷重一波の作用時間も変化する。よってここでは、載荷回数50回程度の予備載荷試験を行い、載荷40～50回における荷重波形が、先述の作用時間となるように載荷速度を調整した。

(3) 載荷パターン

載荷パターンは、基本的には標準載荷および高速載荷の各ケースで速度一定とし、載荷回数は10000回（一部5000回）とした。

以上の実験条件を表3.2にまとめる。

第3章 模型粒子層を用いた繰返し載荷実験による載荷速度の影響の検討

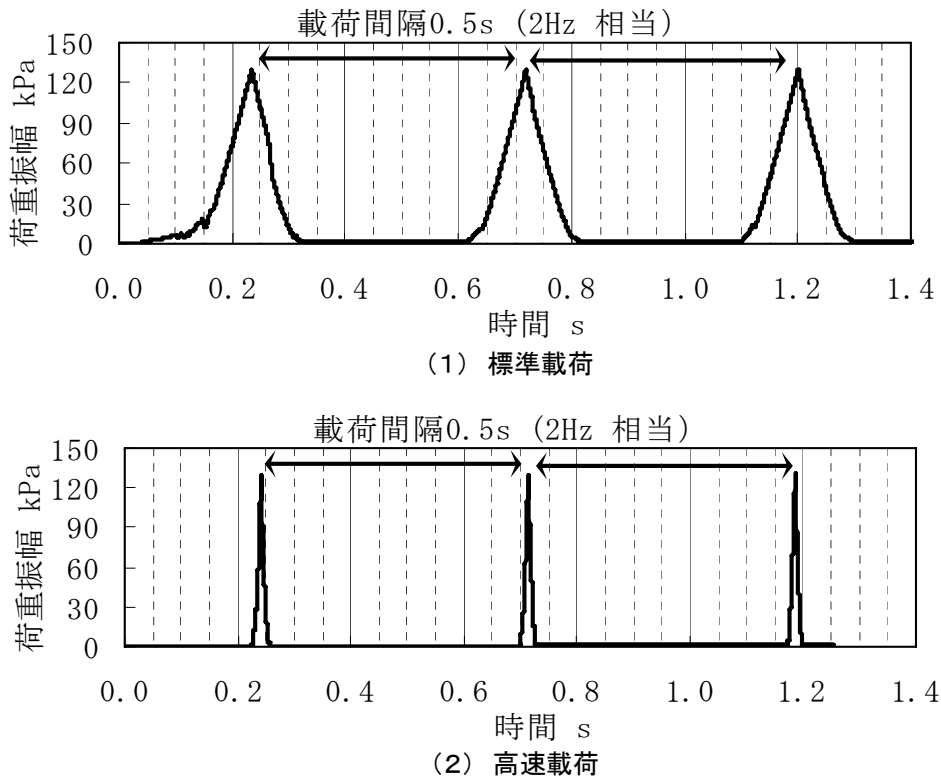


図3.5 載荷波形例

表 3.2 実験条件

	実験 試料	載荷 板幅 (cm)	荷重 振幅 (kN)	載荷速度 (mm/s)		載荷回数
				標準	高速	
S1a	碎石	10	0.53	8	80	10000回 (一部5000回)
S1b				4.5	45	
S2		15	0.80	10	100	1000回
K1	鋼球	15	0.20	5	50	1000回

3.1.4 測定項目

本実験においては、図3.6 に示すように、制御用ロードセルの他に測定用ロードセルも設置し、試験装置の載荷部から載荷板へかかる荷重を直接測定した。また同図に示すように2本の接触式変位計を設置し、それらの平均値を載荷板の変位置とした。



図3.6 測定機器の設置



(1) 碎石層供試体



(2) 鋼球層供試体

図 3.7 実験供試体

3.2 実験結果 — 測定波形

碎石層および鋼球層における繰返し載荷実験結果より、載荷荷重と載荷板変位の測定波形の事例を下記に示し、載荷初期と載荷後期の測定波形を比較する。

3.2.1 碎石層実験結果

表3.2中に示した碎石層による実験ケースS1a（載荷板幅10cm，荷重振幅0.53kN）について、図3.8に標準載荷，図3.9に高速載荷における載荷荷重と載荷板変位の測定波形を示す。各図とも(1)が載荷荷重波形，(2)が載荷板変位波形である。また図3.8(1)，(2)および図3.9(2)において、左図a)は載荷初期の10回分つまり載荷1～10回目の測定波形を、また右図b)は、載荷終了直前10回分つまり9991～10000回の測定波形を示す。また図3.9(1)においては、波形の荷重作用時間を確認するために横軸スケールを小さくし、左図a)は載荷1～2回目の測定波形を、右図b)は載荷9999～10000回の測定波形を示す。

まず図3.8(1a)より、標準載荷における載荷荷重波形においては、載荷1回目のみ荷重作用時間が0.3sと長くなっているが、載荷2回目以降は、ほぼ0.2sで載荷速度設定の際に想定した荷重作用時間となっている。

ここで載荷1回目で荷重作用時間が長い理由としては、載荷履歴のない初期状態の粒子層においては、初期載荷において、粒子層と載荷板の接触過程で粒子層表面の初期の凹凸が平滑化される現象や、粒子層内部で設定荷重を支持するための荷重伝達経路の形成過程で粒子の配置が大きく変化する現象が起こるためと考えられる。そして載荷2回目以降は、載荷1回目における粒子の配列の変化によって荷重が伝達しやすくなり、設定荷重に達するまでの時間は短く、そしてほぼ一定になることが考えられる。

このことは図3.8(2a)に示す載荷板変位波形からも確認される。つまり、載荷1回目の載荷時には載荷板が0.7mm程度変位するが、その後の回復量は0.2mm程度で約0.5mmが残留変位として残るのに対し、載荷2回目以降の各載荷回の残留変位の増加分は約0.1mm以下となっている。

次に図3.8(1b)より、標準載荷における載荷9991～10000回の載荷荷重波形では、荷重作用時間が全体的に0.18s程度で、載荷初期より1割程度短くなっている。これは、上述の繰返し載荷過程における荷重伝達経路の形成が、10000回近い載荷によって更に進み、それによって、より短い時間で設定荷重に達することを意味している。

また図3.8(2b)に示す載荷板変位波形より、載荷10000回直前の段階では残留沈下量の変化はほとんどなく、載荷時の載荷板変位も除荷時の載荷板変位も、ほぼ同程度となり、弾性的な挙動が卓越していると考えられる。

次に図3.9(1a)に示す高速載荷における載荷荷重波形においては、載荷1回目および2回目において、荷重作用時間は0.02sで、載荷速度設定の際に想定した荷重作用時間となっている。

また図3.9(1b)に示す高速載荷における載荷9999回目および10000回目の荷重波形においても荷重作用時間はほぼ0.02sで、荷重作用時間の大きな変化は見られない。

一方、載荷板変位波形においては、図3.9(2a)に示す載荷1～10回目においては、残留沈下量が約0.1～0.4mmずつ増加するのに対して、図3.9(2b)に示す載荷9991～10000回目では、残留沈下量の増加はほとんど見られない点で、標準載荷と同様の傾向となっている。ただし図3.9(2a)に示す高速載荷1～10回目の載荷板変位の測定波形において、載荷1回目における残留沈下量は、標準載荷ほど大きい値とはなっていない。

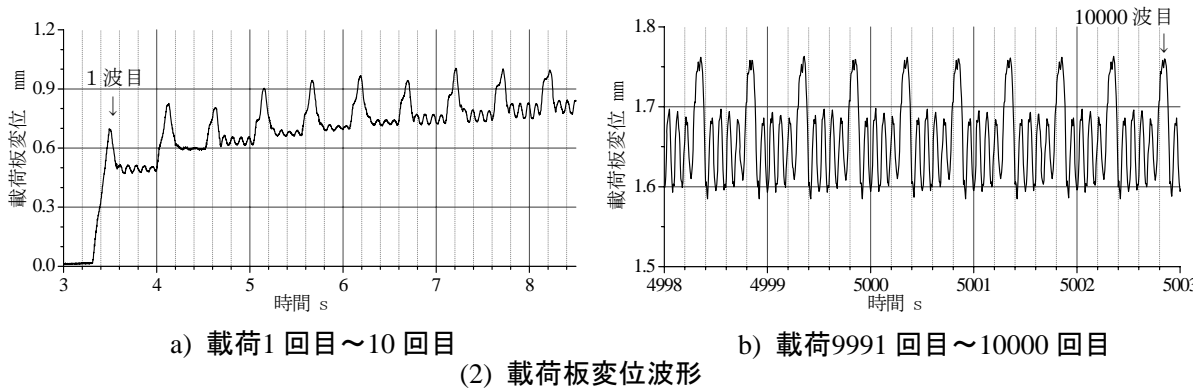
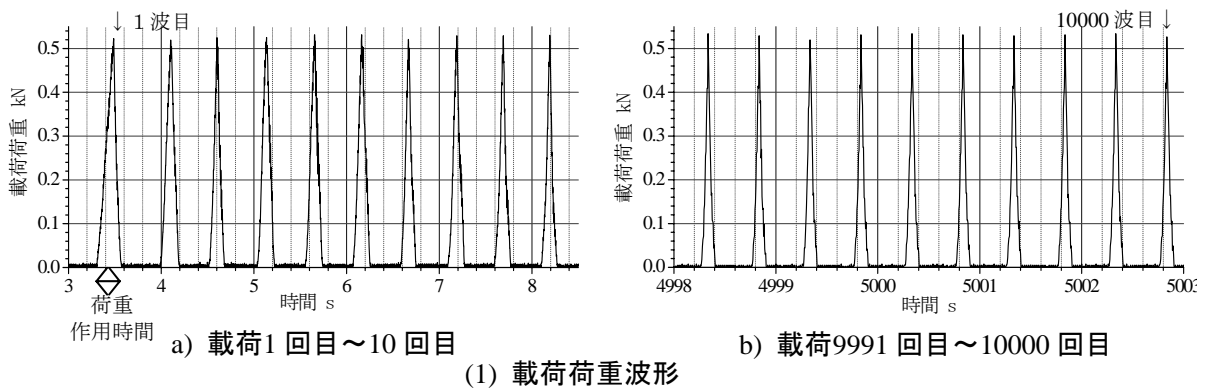


図3.8 標準载荷測定波形例 (S1a, 碎石層 载荷板幅10cm 荷重0.53kN)

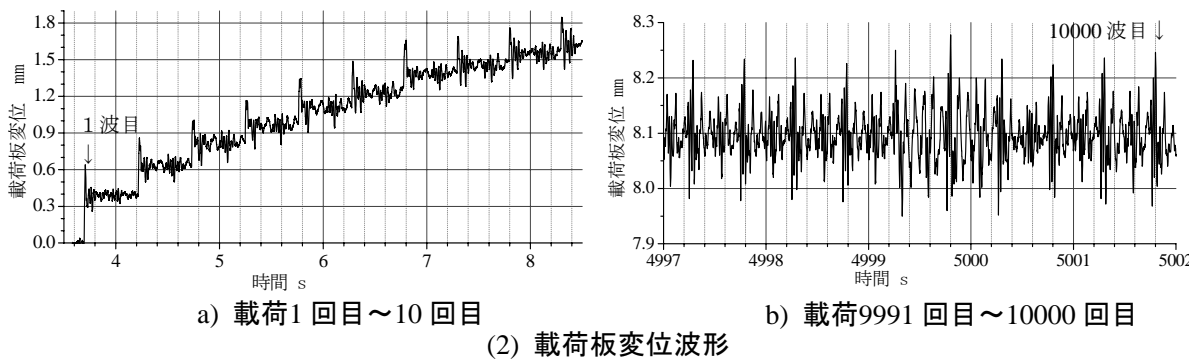
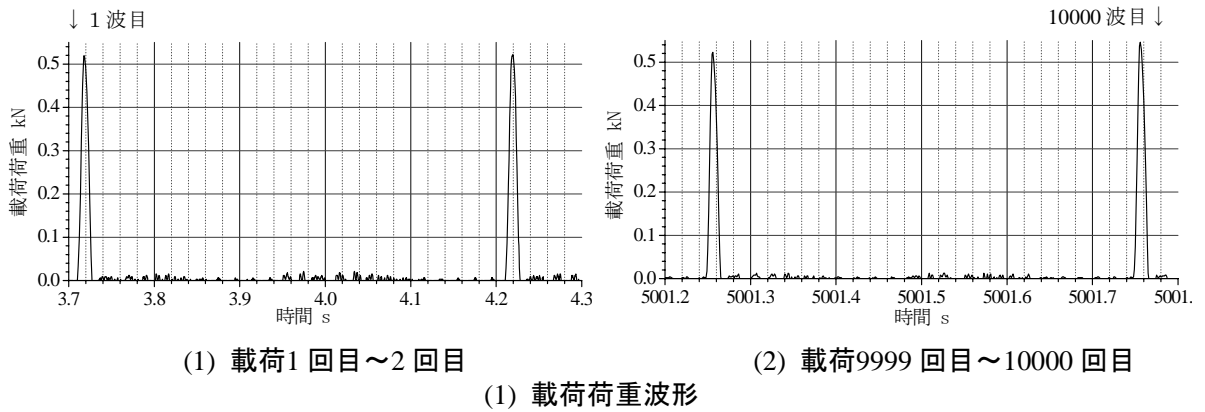


図3.9 高速载荷荷重測定波形例 (S1a, 碎石層 载荷板幅10cm 荷重0.53kN)

3.2.2 鋼球層実験結果

表3.2中に示した鋼球層による実験のケースK1（載荷板幅15cm，荷重振幅0.2kN）について，図3.10に標準載荷，図3.11に高速載荷における載荷荷重と載荷板変位の測定波形を示す．各図とも(1)が載荷荷重波形，(2)が載荷板変位波形である．また図3.10(1)，(2)および図3.11(2)において，左図a)は載荷初期の10回分つまり載荷1～10回目の測定波形を，また右図b)は，載荷終了直前10回分つまり991～1000回の測定波形を示す．また図3.11(1)においては，波形の荷重作用時間を確認するために横軸スケールを小さくし，左図a)は載荷1～2回目の測定波形を，右図b)は載荷999～1000回の測定波形を示す．

まず図3.10(1a)より，標準載荷における載荷荷重波形においては，載荷1回目のみ荷重作用時間が0.4sと長くなっているが，載荷2回目以降は，ほぼ0.2sで載荷速度設定の際に想定した荷重作用時間となっている．また荷重振幅においては，載荷1回目と2回目は設定荷重に達する前に除荷に転じているが，これは載荷間隔（次の載荷に入るまでの時間）を設定しているために載荷途中で反転してしまったと考えられる．

この載荷1回目で荷重作用時間が長い現象は碎石層の場合と同様の傾向であるが，特に鋼球層の場合で顕著である．また図3.10(2a)に示す載荷板変位波形においても，載荷1回目の波形は，最大荷重時のピークが見られたのち，ほとんど変位は回復せず，0.6mm程度の残留変位が生じている．

この理由としては，鋼球層は表面が極めて滑らかなベアリング球を用いているため，先述の碎石層よりも設定荷重（碎石層の場合の半分以下ではあるが）を支持するための荷重伝達経路の形成による粒子の配置の変化が更に顕著になるためと考えられる．

ただし図3.10(1b)に示すように，載荷991～1000回の載荷荷重波形では，荷重作用時間が全体的に0.12s程度と短くなることから，鋼球層においても繰返し載荷過程における荷重伝達経路の形成が進み，それによって，より短い時間で設定荷重に達する状態になると言える．

次に図3.11(1a)に示す高速載荷における載荷荷重波形においては，載荷1回目の荷重作用時間は0.024sとなるが，載荷2回目は0.02sであり，載荷速度設定の際に想定した荷重作用時間となっている．また図3.11(1b)に示す高速載荷における載荷999回目および1000回目の荷重波形においては，荷重作用時間は0.018s程度と若干短くなり，標準載荷と同様の傾向を示している．

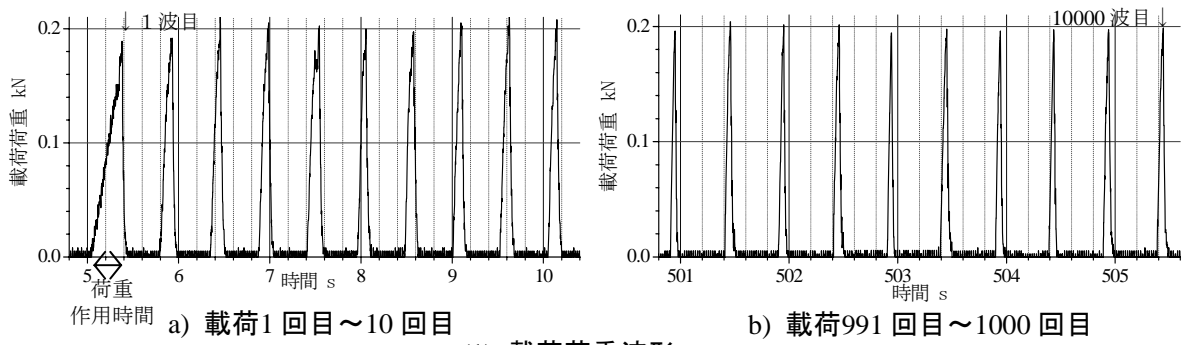
また載荷板変位波形においては，図3.11(2a)に示す高速載荷における載荷1～10回目においては，残留沈下量がほぼ約0.3mm前後で，ほぼ一定割合で増加するのに対して，図3-2(2b)に示す載荷991～1000回目では，残留沈下量の増加は0.015mm前後ずつと著しく減少している．

以上より，鋼球層においても，載荷初期には粒子構造が不安定であることから残留変位の増加が著しいが，繰返し載荷によって粒子構造が安定すると，残留変位が発生しにくくなると同時に，設定荷重に到達する時間は早くなる傾向が見られた．

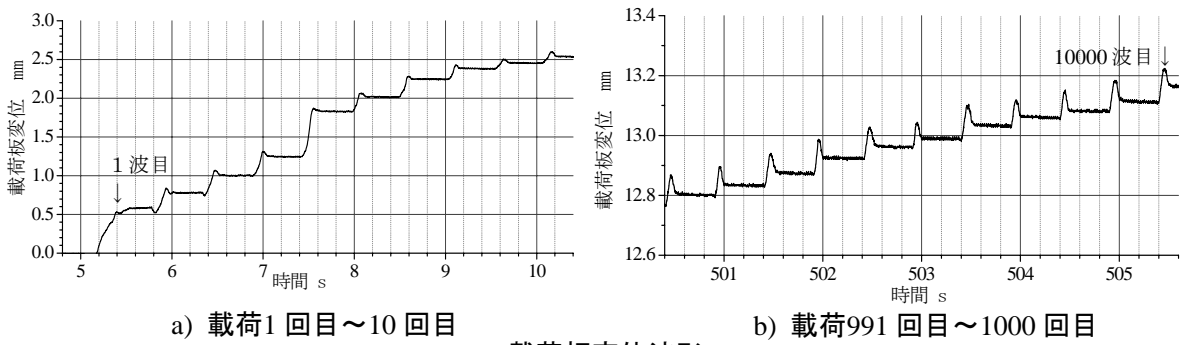
載荷速度の影響について 図3.10(2a)と 図3.11(2a)を比較すると，載荷1回目の沈下量の大きさや，載荷2回目以降の残留沈下量の減少傾向において，碎石層ほど明瞭な差異は見られない．

この理由として，鋼球層は碎石層に比較して粒子同士の滑りが発生しやすいことから，粒子構造の違いやちょっとした外的要因に敏感に反応し，その結果，同様の実験結果でもバラツキが大きく，その中の1つの実験結果の比較だけでは，明確な傾向が見え難いことが考えられる．

以上，碎石層および鋼球層における繰返し載荷実験における測定波形事例より，粒子層の残留変位は載荷初期に著しく，その後，粒子層の粒子構造が徐々に安定することで，残留変位の増加割合が減少する傾向が見られたが，この特徴は，実際の道床バラスト軌道におけるバラスト層の沈下特性でも共通している．

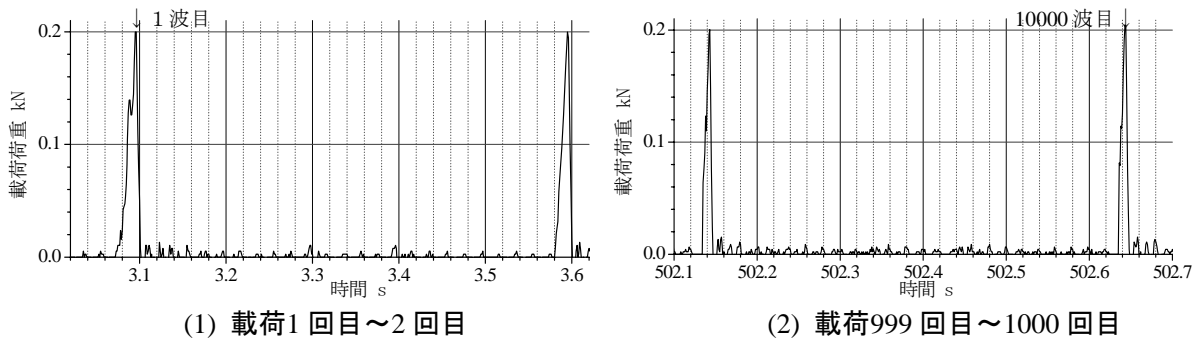


(1) 载荷荷重波形

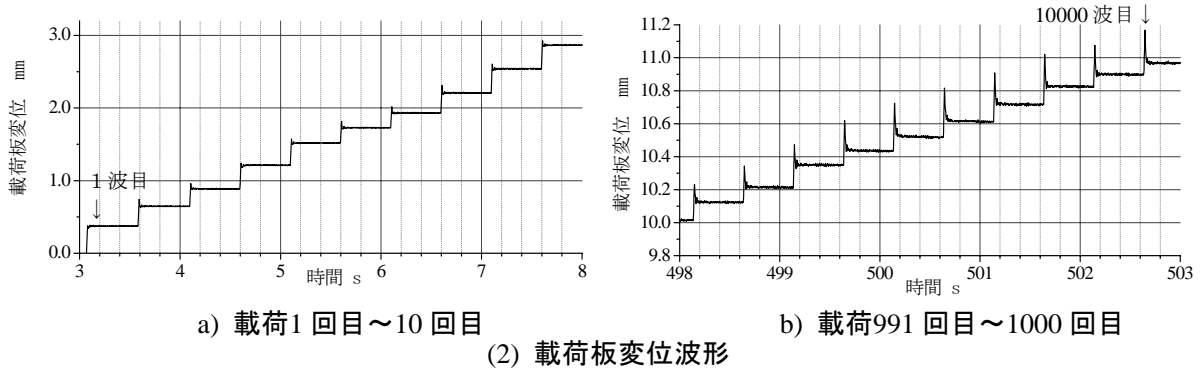


(2) 载荷板変位波形

図3.10 標準载荷 測定波形例 (K1, 鋼球層载荷板幅15cm 荷重0.2kN)



(1) 载荷荷重波形



(2) 载荷板変位波形

図3.11 高速载荷 荷重測定波形例 (K1, 鋼球層载荷板幅15cm 荷重0.2kN)

3.3 実験結果 — 残留沈下量と載荷回数との関係

繰返し載荷過程において、各載荷時における粒子層の変形は、前節で示した通り、除荷によって完全には回復せずに残留変位が生じ、それによって沈下が進んでいく。特に道床バラスト層において問題となるのは、この残留沈下量の増加である。よって、ここでは、粒子層の残留沈下量の変化に着目し、次に各載荷回における碎石層の変形に着目し、各現象に対する載荷速度の影響について検討する。

3.3.1 碎石層における残留沈下量の変化

(1) 載荷速度一定の場合

図3.12に実験結果より残留沈下量と載荷回数との関係を示す。図3.12(1)が実験ケースS1a（載荷板10cm，荷重0.53kN），図3.12(2)が実験ケースS1b（載荷板10cm，荷重0.36kN），図3.12(3)が実験ケースS2（載荷板15cm，荷重0.8kN）である。いずれの図も、黒色細線2本が高速載荷2回の結果、灰色太線2本が標準載荷2回の結果を示している。横軸は載荷回数で、対数表示としている。

図3.12(1)より、実験ケースS1aの標準載荷では、載荷1回目で0.696mmまたは0.588mmの残留沈下が生じた後、残留沈下量の増加割合は減少し、載荷10000回終了時の残留沈下量は2.2mmまたは1.62mmとなる。一方、高速載荷では、載荷1回目では0.158mmまたは0.219mmの残留沈下が生じ、その後も残留沈下量は増加を続け、載荷10000回終了時の残留沈下量は、11.6mmまたは8.1mmとなる。

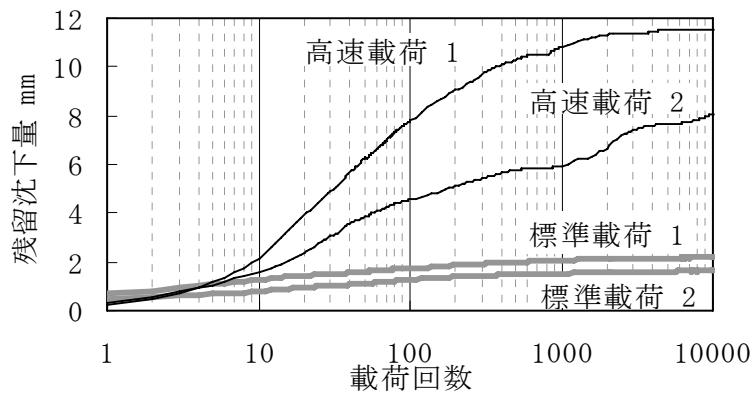
つまり、載荷10000回終了時の残留沈下量を比較すると、高速載荷の方が標準載荷の4～5倍となっている。

次に図3.12(2)より、荷重振幅が小さい実験ケースS1bにおいては、標準載荷の載荷1回目で0.164mmまたは0.10mmの残留沈下が生じた後、残留沈下量の増加割合は減少し、載荷5000回のケース（濃灰色太線）では載荷終了時の残留沈下量が0.642mm、載荷10000回のケースでは載荷終了時の残留沈下は0.67mmとなる。つまり、このケースの荷重振幅レベルの標準載荷では、載荷5000回程度以降における残留沈下量の増加は、微々たるものとなっている。一方、高速載荷では、載荷1回目では0.098mmまたは0.071mmの残留沈下が生じ、その後も残留沈下量は増加を続け、載荷10000回終了時の残留沈下量は2.345mmまたは1.4mmとなっている。

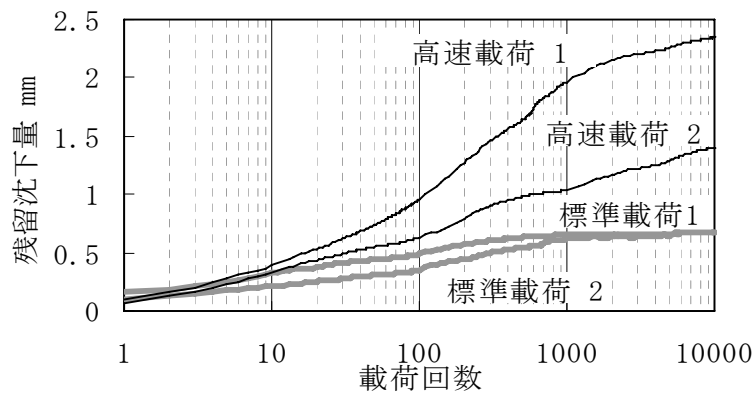
つまり、載荷終了時の残留沈下量を比較すると、高速載荷の方が標準載荷の2～3倍となっている。

更に図3.12(3)より、載荷板幅を広くした実験ケースS2（ただし載荷板単位面積あたりの荷重は上述S1aと同等）においては、標準載荷の載荷1回目で0.329mmまたは0.377mmの残留沈下が生じた後、残留沈下量の増加割合は減少し、載荷1000回終了時の残留沈下量は1.276mmまたは1.768mmとなる。一方、高速載荷では、載荷1回目では0.104mmまたは0.517mmの残留沈下が生じ、その後も残留沈下量は増加を続け、載荷1000回終了時の残留沈下量は3.815mmまたは5.881mmとなっている。

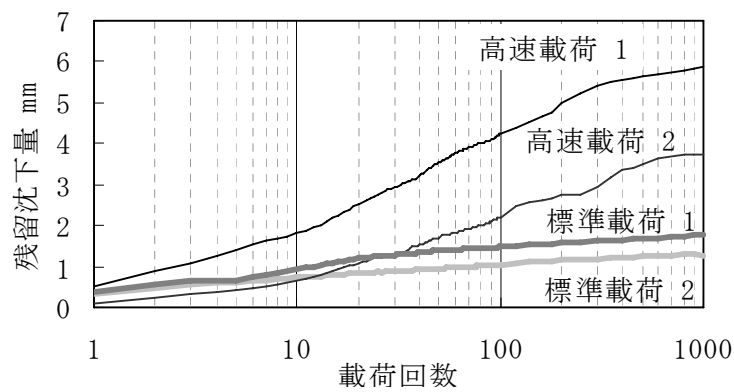
つまり、載荷終了時の残留沈下量を比較すると、高速載荷の方が標準載荷の2～3倍となっている。



(1) ケースS1a - 碎石層 載荷板10cm 荷重0.53kN



(2) ケースS1b - 碎石層 載荷板10cm 荷重0.36kN



(3) ケースS2 - 碎石層 載荷板15cm 荷重0.8kN

図3.12 粒子層の沈下曲線 - 載荷回数と残留沈下の関係

第3章 模型粒子層を用いた繰返し載荷実験による載荷速度の影響の検討

以上3通りの実験結果より、様々な条件下において、碎石層の沈下特性に載荷速度の影響が現れ、その定性的傾向はほぼ一致している。つまり、標準載荷では『載荷初期に比較的大きな残留沈下が発生した後、沈下は急速に収束する』のに対して、『高速載荷では載荷初期の残留沈下は標準載荷と同程度以下であるが、その後も沈下が継続する』ことで、載荷1000~10000回終了時には残留沈下量が著しく大きくなる。

ただし、載荷初期における載荷速度の影響に関しては高速載荷において残留沈下量が大きい結果もあり、このことから載荷初期の残留沈下量は供試体の初期状態のバラツキを含むことが考えられ、各条件2回ずつの実験結果のみで、明確な傾向を把握したというのには疑問が残る。これに対し、繰返し載荷過程全般における残留沈下量の増加割合と言う点では、高速載荷において著しく大きくなるという定性的傾向が明確に現れている。

また、各試験ケースにおける載荷速度の影響のほかに、上述の3通りの試験結果より、載荷板の単位面積あたりの荷重が同等となっているS1aとS2の結果を比較すると、載荷1000回終了時の残留沈下量は、標準載荷においてケースS1aの方がケース2aの約1.18倍、高速載荷において約1.52倍となっている。前述の式(3.2)を参照すると、浅い基礎の支持力は載荷板の幅で割った値が一定となっていることから、碎石層の沈下進みである残留沈下量は、同様の荷重レベルでも載荷板の幅の影響を受けることを示している。

(2) 載荷速度を変更した場合

次に、実験ケースS1aと同条件で、標準載荷を1000回行った後、供試体を再構築せずにそのまま高速載荷を1000回行う実験を行なった。その実験結果より、残留沈下量と載荷回数の関係を図3.13に示す。図中の黒線と灰色線は、いずれも全く同条件で2回行った結果を示す。

図より、標準載荷過程では、最初の100回程度で残留沈下量が急速に増加した後、徐々に収束し、載荷1000回後の残留沈下量は2.06mmまたは1.77mm程度となっている。その後、高速載荷に切り替えると、再び残留沈下量の増加割合が大きくなり、特に1回目(黒線白抜丸)では残留沈下量の増加が続き、高速載荷1000回における沈下量の増分は3.25mmとなる。一方2回目(灰色白抜丸)では、高速載荷300回目程度から徐々に残留沈下の増加は小さくなるが、高速載荷1000回における沈下量の増分は、1.47mmとなる。

これは、標準載荷1000回で残留沈下量の増加が収束した段階、つまり一定荷重振幅の繰返し載荷によって粒子構造が確立された段階の供試体であっても、載荷速度を速くすると、荷重振幅が同程度であるにもかかわらず、再度、残留沈下量は増加傾向に転じている。このことから、載荷速度は、粒子構造の形成にも影響を与えることが考えられるが、詳細は次章で検討する。

3.3.2 鋼球層における残留沈下量の変化

図3.14に、鋼球層を用いて行った実験ケースK1の実験結果より、残留沈下量と載荷回数の関係を示す。図中、黒色細線2本が高速載荷2回の結果、灰色太線2本が標準載荷2回の結果を示している。横軸は載荷回数を対数で表示している。

図より、標準載荷では載荷1回目で0.801mmまたは0.028mmの残留沈下が生じた後、残留沈下量は増加を続け、載荷1000回終了時の残留沈下量は9.88mmまたは13.42mmとなる。一方、高速載荷では、載荷1回目では0.47mmまたは0.715mmの残留沈下が生じた後、残留沈下量は増加を続け、載荷1000回終了時の残留沈下量は20.79mmまたは20.42mmとなる。

つまり載荷1000回終了時の残留沈下量は、高速載荷の方が残留沈下量の15~2倍となっており、この定性的傾向については、先述の碎石層を用いた実験と共通している。一方で、載荷1回目の残留沈下量に

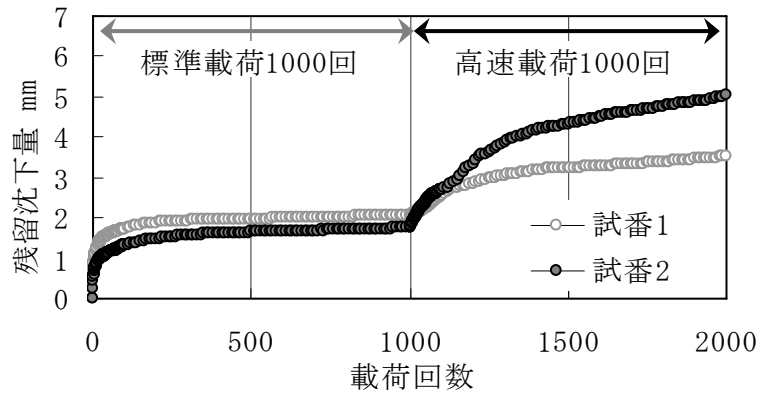


図3.13 粒子層の沈下曲線 - 載荷回数と残留沈下の関係

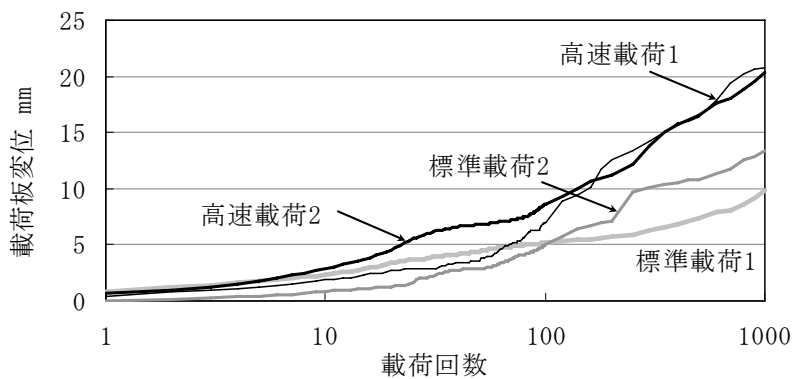


図3.14 粒子層の沈下曲線 - 載荷回数と残留沈下の関係
(鋼球層 載荷板15cm 荷重0.2kN 1000回載荷)

については、鋼球層の実験では高速載荷の方が大きくなることもあり、碎石層で得られた傾向ほど明確ではない。また、碎石層の実験の標準載荷で見られた、残留沈下量の増加割合の低下傾向も、鋼球層の実験では不明瞭である。

このことは、前節でも述べたように、鋼球層においては粒子構造のバラツキが粒子層の残留沈下量にも大きな影響を及ぼすことを示しており、各条件たった2回の実験では特徴的な傾向が得られたとは言い難い。そこで、載荷速度を100回に短縮した条件で、標準載荷および高速載荷で各5回ずつ行った実験結果より残留沈下量と載荷回数の関係を 図3.15(1)(2) に、また載荷1回目と載荷100回終了時の残留沈下量を 図3.16 にプロットする。

図3.15より、標準載荷および高速載荷のいずれにおいても、残留沈下量と載荷回数の関係はバラツキが大きいことが明確であるが、図3.16より、載荷1回目の残留沈下量は、ばらつくものの標準載荷の方が高速載荷よりも大きく、載荷100回目の残留沈下量は、こちらもばらつくものの高速載荷の方が標準載荷より大きくなる傾向が見られる。

よってこの定性的傾向は、前項の碎石層の実験結果と一致していることから、鋼球層においても、繰返し載荷過程の沈下特性に関しては、基本的に碎石層と同様の定性的傾向、つまり載荷1回目の残留沈下量は標準載荷の方が大きい、その後の残留沈下量の増加割合は高速載荷の方が大きく、載荷回数が増えるほど高速載荷の残留沈下量が標準載荷に比較して大きくなる傾向が把握された。

第3章 模型粒子層を用いた繰返し載荷実験による載荷速度の影響の検討

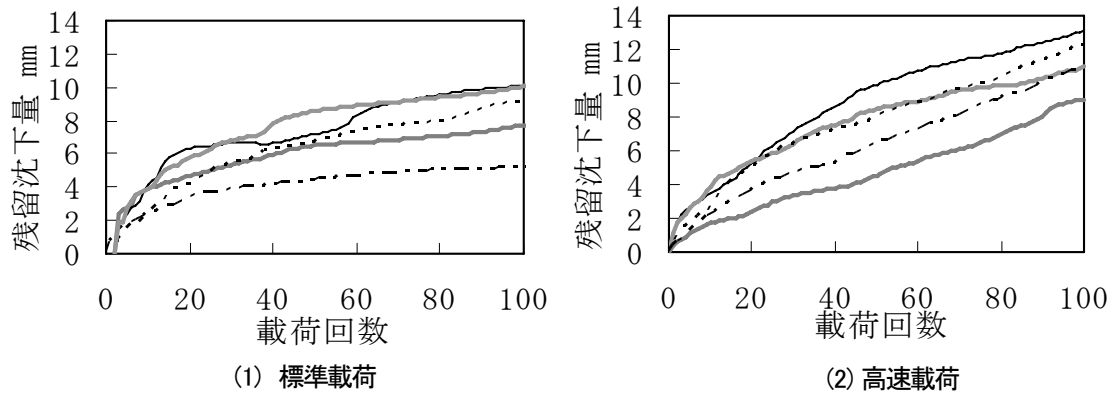


図3.15 粒子層の沈下曲線 - 載荷回数と残留沈下の関係
(鋼球層 載荷板15cm 荷重0.2kN 100回載荷)

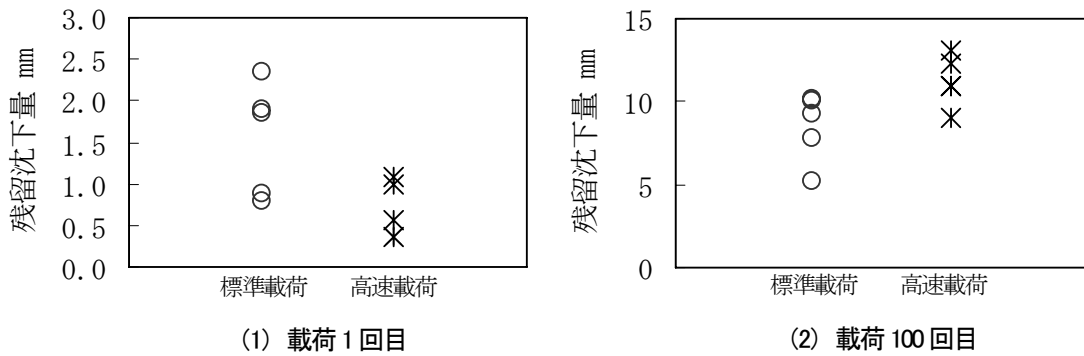


図3.16 載荷1回目および載荷100回目の残留沈下量

3.4 実験結果 - 各載荷回における変位振幅と沈下進みの関係

前節では、繰返し載荷過程における残留沈下量の増加傾向について検討を行ったが、次に、各載荷回における‘変位振幅’と‘沈下進み’（図3.17）、つまり載荷による弾性的な変形と、除荷後に回復しない残留変位量の増加分に対する載荷速度の影響について検討を行う。

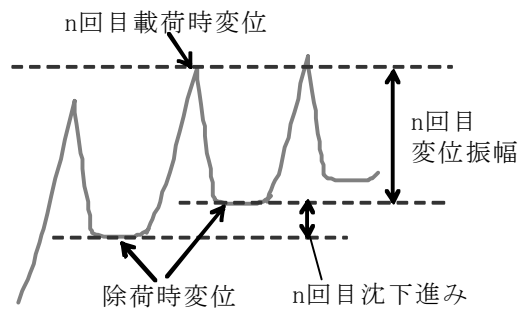


図3.17 各載荷回の変位振幅と沈下進みの定義

3.4.1 砕石層実験結果

図3.18に、実験ケースS1aおよびS1bにおける各載荷時の変位振幅と沈下進みの関係を示す。図において横軸が変位振幅、縦軸は沈下進みであり、図中の黒色星印が高速載荷、灰色菱印が標準載荷の結果である。

図より、いずれの載荷速度、荷重振幅においても、載荷1回目は変位振幅および沈下進みが共に大きくなるが、その後、変位振幅の減少に伴い沈下進みも減少する傾向が見られる。ただし、高速載荷の結果は、標準載荷の結果に比較して全体的にバラツキが大きい。

ここで、各載荷回の変位振幅に対する沈下進みの割合を算出した結果より、各ケース10000回分の平均値を実験2試番について算出した結果を図3.19にプロットする。図中灰色四角が荷重振幅0.53kNのケース1a、黒色菱形が荷重振幅0.36kNのケース1bで、更に図中の右列が高速載荷、左列が標準載荷の結果を示す。

図より、変位振幅に対する沈下進みの割合の平均値は、高速載荷の場合の方が大きい傾向が見られ、特に荷重振幅が大きいケース1aでより顕著である。

これらより高速載荷の場合、載荷過程における短期的な変位振幅が標準載荷と同程度であっても、沈下進みの割合が僅かながら大きいと考えられる。これは、前節で述べた『高速載荷において残留沈下量の増加が継続する』現象と矛盾しないことから、この各載荷回における微小な差異が、載荷1000~10000回の過程において結果的に大きな差異として現れると考えられる。

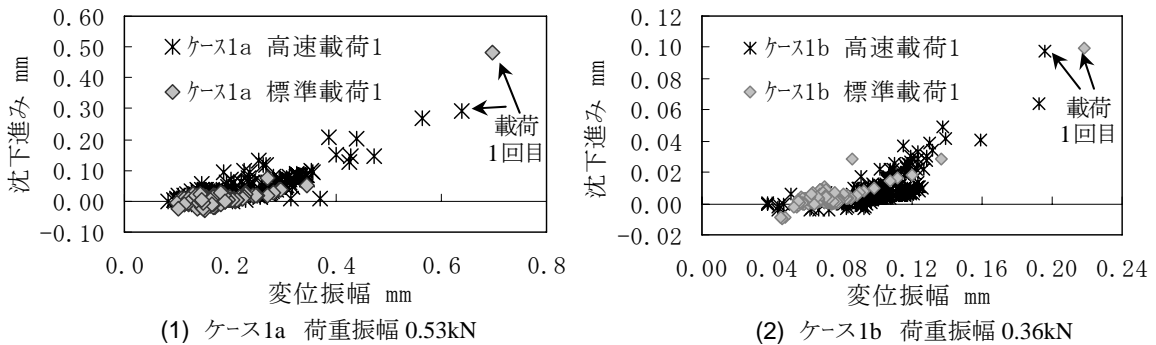


図3.18 各載荷回の変位振幅と沈下進みの関係（砕石層）

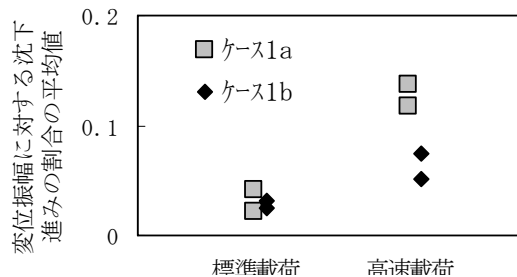


図3.19 変位振幅に対する沈下進みの割合の平均値

3.4.2 鋼球層実験結果

図3.20 に、前節で述べた鋼球層の繰返し載荷100回ケースにおける変位振幅と沈下進みの関係を示す。図において横軸が変位振幅、縦軸は沈下進みであり、図中の黒色星印が高速載荷、灰色菱形印が標準載荷の結果である。

図より、載荷1回目の変位振幅および沈下進みは特に標準載荷で大きいのが、その後、著しく減少する。また変位振幅の減少に伴い沈下進みも減少する傾向が見られる。

ここで、先述の碎石層の場合と同様に、載荷100回の各載荷回の変位振幅に対する沈下進みの割合を算出した値の平均値を図3.21にプロットする。ここで前節の図3.15において、標準載荷では載荷20回目程度以降で沈下曲線の傾きが緩やかになる傾向が見られることから、平均値の算出においては、載荷1～100回の平均値（灰色菱形印）とともに載荷21～100回の平均値（黒色星印）も示す。

図より、載荷1-100回の平均値については標準載荷と高速載荷の差異は不明瞭であるが、載荷21～100回の平均値では、それぞれバラツキは大きいものの、高速載荷において若干標準載荷より大きい傾向が見られる。

これらより鋼球層においても碎石層と同様に、高速載荷では各載荷回の沈下進みの割合が僅かながら大きくなること、そして、それによって繰返し載荷100～1000回の過程において結果的に大きな差異として現れることが考えられる。

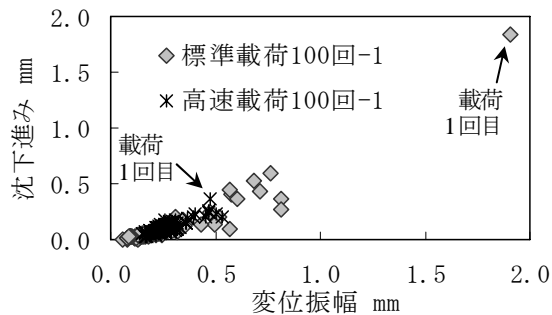


図3.20 各載荷回の変位振幅と沈下進みの関係 (鋼球層)

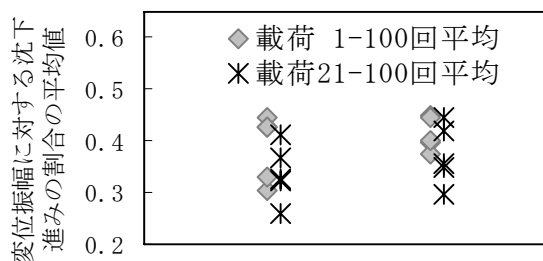


図3.21 変位振幅に対する沈下進みの割合の平均値 (鋼球層)

3.5 第3章のまとめ

実験試料，載荷板幅および荷重振幅の異なる様々な条件下で，各2通りの載荷速度による繰返し載荷実験を行い，粒子層の沈下特性を検討した結果，以下のことが明らかとなった。

- (1) 繰返し荷重下の粒子層の荷重波形および変位波形より，碎石および鋼球のいずれの粒子層においても，載荷履歴のない載荷1回目では，設定荷重を支持できる粒子構造を形成するまで載荷板が沈下するため，設定荷重に到達するまでの時間が長く，それに伴い残留沈下量も大きくなる。

この現象は標準載荷において顕著であり，載荷初期の残留沈下量の増加は，高速載荷よりも標準載荷において大きい傾向が見られる。

- (2) 繰返し荷重下の粒子層の残留沈下量（荷重除荷後も残る粒子層の塑性沈下量）と載荷回数との関係を示した沈下曲線は，いずれも道床バラスト層の沈下曲線（図3.8）と同様に‘初期沈下過程’と‘漸進沈下過程’を示した。

特に標準載荷では，初期沈下過程と漸進沈下過程が明瞭に表れ，載荷初期に著しい残留沈下量が生じた後は，沈下進み（残留沈下量の増加量）は著しく減少する。

一方，高速載荷では，初期沈下過程と漸進沈下過程が不明瞭で，標準載荷のような「著しい沈下進みの減少」は見られない。

- (3) 以上の結果，繰返し載荷1000～10000回終了時の残留沈下量は，最も顕著な例で，高速載荷において標準載荷の5倍程度になる。
- (4) 各載荷回の載荷時の弾性的な変位量である変位振幅と，沈下進みについて比較を行ったところ，高速載荷では，変位振幅に対する沈下進みの割合が，標準載荷よりも若干大きいことが示された。この際は微々たるものであるが，繰返し載荷過程では徐々に蓄積し，結果的に高速載荷における残留沈下量が大きくなるといえる。

以上より『衝撃的な高速載荷によって粒子層の残留沈下は促進される』ことが明らかとなった。また粒子層の短期的・長期的変形挙動において載荷速度が影響を及ぼすこと，その影響による定性的傾向が，初期沈下過程と漸進沈下過程では異なることが明らかとなった。

ただし本章での検討は，粒子層表面に設置した載荷板の変位に関する情報によるものであり，碎石層の変形をマクロな観点から検討した結果であるため，粒子層内部の変形のメカニズムについては明らかになっていない。

これより，次章では，粒子層の変形挙動の詳細観察を行うこととする。

第3章の参考文献

- 1) 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，pp2383-2348, 1993
- 2) 三浦重ほか：新しい線路一軌道の構造と管理一，日本鉄道施設協会，1997年
- 3) 江守一郎，斉藤孝三，関本孝三：模型実験の理論と応用，技報堂出版，2000

第4章

PIVによる粒子層の変形と
粒子の挙動の観察

4.1 画像解析手法

粒子層の変形挙動の観察においては、PIV法¹⁾ (Particle Imaging Velocimetry = 粒子画像流速法) を用いた。PIV法は、そもそも流体分野の可視化実験手法として用いられていたが、Boltonら²⁾によって土質工学分野の実験に取り入れられ、その後、日本国内でも、PIV法を取り入れた可視化実験が報告されている³⁾。

本研究においては、繰返し載荷過程全体における粒子の残留変位と、各載荷回の載荷・除荷過程における粒子の動的挙動の両者に着目し、載荷速度の影響を検討した。また画像撮影は、実験ケースS2およびK2において行なった。

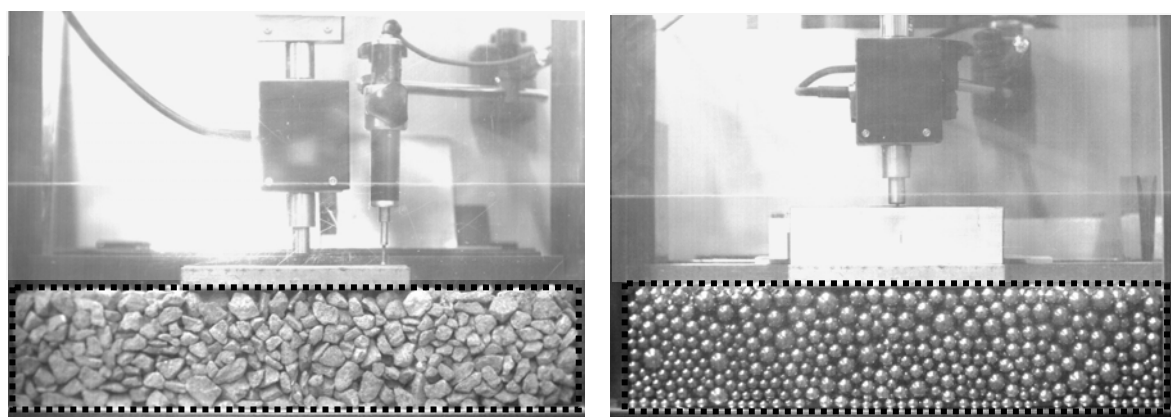
4.2 画像撮影条件

画像撮影は、標準載荷で50fps (0.02秒毎)、高速載荷では500fps (0.002秒毎) の速度で行った。この場合、繰返し載荷1000回 (約500秒) の全過程において画像撮影を継続することは、画像容量が膨大になることから現実的ではないため、標準・高速載荷のいずれにおいても、以下の繰返し載荷回数において撮影を行った。

- ・載荷 1～20 回 … 標準載荷 約500枚, 高速載荷 約5000枚
- ・載荷101～110 回 … 標準載荷 約250枚, 高速載荷 約2500枚
- ・載荷301～310 回 … 標準載荷 約250枚, 高速載荷 約2500枚
- ・載荷601～610 回 … 標準載荷 約250枚, 高速載荷 約2500枚
- ・載荷990～1000 回 … 標準載荷 約250枚, 高速載荷 約2500枚

4.3 画像解析条件

撮影画像より、図4.1 に示す碎石層部分 (縦80 mm×横375 mm) の領域を切り取り、画像解析を行った。



(1) 碎石層

(2) 鋼球層

図4.1 PIVに用いた高速度カメラ画像の領域

第4章 PIVによる粒子層の変形と粒子の挙動の観察

PIV法では、**図4.2**に示すように、画像の分割数、各節点を中心としたパターン領域のサイズ、更にサーチ範囲を設定する。ここでは**図4.3**に示すように、約3.5mm幅で縦横に分割し、パターンサイズは一辺11mmの正方形、サーチ領域は20mmとした。なおパターンサイズは、実験試料の平均粒径が11mmであることから、この値とした。

また、後述する繰返し荷重下の碎石層の動的挙動の観察においては、指定した载荷回における‘载荷過程’、‘除荷過程’、‘除荷後’の粒子の移動を可視化し、更に载荷前後の残留変位への影響も可視化する。ここで、‘载荷過程’の挙動は、**図4.4**に示す载荷前と最大荷重時の画像から、また‘除荷過程’の挙動は同図に示す最大荷重時と荷重が0の瞬間の画像より、また除荷後の挙動は荷重0の瞬間とその後0.1s後の画像を用いて解析を行う。

更に、载荷前後の残留変位分については、同**図4.4**に示す载荷前と除荷後の画像を用いて、解析を行うこととする。

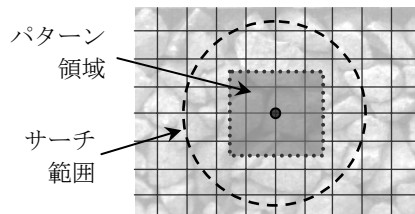


図4.2 PIVにおける画像解析条件

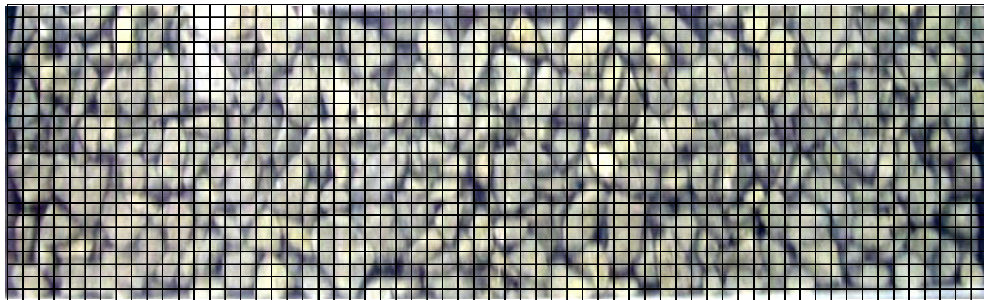


図 4.3 画像の分割

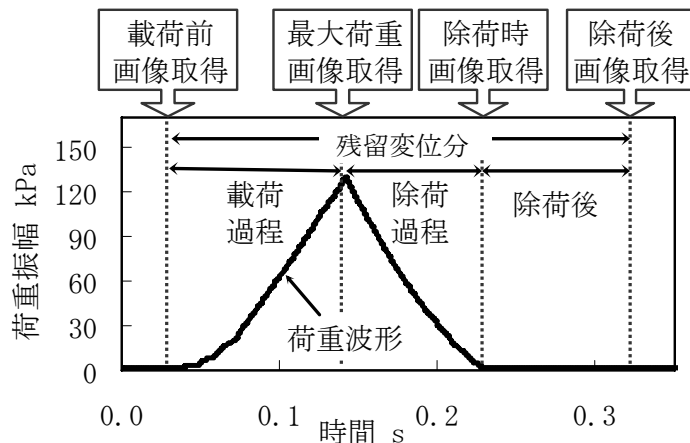


図4.4 各载荷回の粒子の挙動観察における画像取得箇所

4.4 画像解析結果 - 碎石層

4.4.1 繰返し載荷過程の粒子の残留変位の観察

図4.5 に前章で示したケースS2の沈下曲線（図3.12(3)）より，載荷初期の部分拡大したものを(1)に，載荷過程全般を図(2)に示す．ここで，載荷12回目において，標準載荷と高速載荷における残留沈下量はほぼ同じ値で，この後，高速載荷の残留沈下量が標準載荷を超えて増加して行く．

そこで，載荷板の変位においては同じ値となる載荷12回までの碎石層内部の粒子の残留変位を観察すると同時に，図4.5 (2) に示すように，載荷12回～載荷100回，載荷100～載荷1000回間の粒子の残留変位も観察した．

(1) 碎石層内の残留変位

図4.6 に用いた画像と画像解析結果を示す．解析結果では，図4.6(2) が繰返し載荷開始前と載荷12回終了後の間，図4.6(3)が載荷12回終了後と載荷100回終了後の間，図4.6(4)が載荷100回終了後と載荷1000回終了後の間の残留変位を示す．各図とも左側a)が標準載荷，右側b)が高速載荷の結果である．

まず図4.6 (2) より，繰返し載荷前と標準載荷12回終了後の画像解析結果において，左図a)の標準載荷では碎石層のせん断方向の粒子の移動が明瞭であるのに対して，右図b)の高速載荷では，載荷板下左側で碎石層上部の粒子が著しく下方に移動しているが，載荷板下右側では粒子の移動は碎石層表層のみで，左右が著しく非対称であり，また載荷板外側の粒子は，上方へ向かって膨張するように移動している．

つまり，載荷板の変位量という測定値からは同程度の残留沈下量を示す碎石層内部において，図に示すように明らかに異なる粒子の移動が観察されている．

次に図4.6 (3)より，載荷12回後から載荷100回目までの画像解析結果において，左図a)の標準載荷では粒子の移動が図4.6(2)に比較して小さくなるのに対し，右図b)の高速載荷では更に粒子の移動が著しく，特に載荷板外側の粒子の上方への移動が特徴的である．

更に図4.6 (4)より，載荷100回目～1000回目までの画像解析結果において，左図a)の標準載荷では更に粒子の移動が更に小さくなり，碎石層上層で，主に側方への流動が見られるのみであ

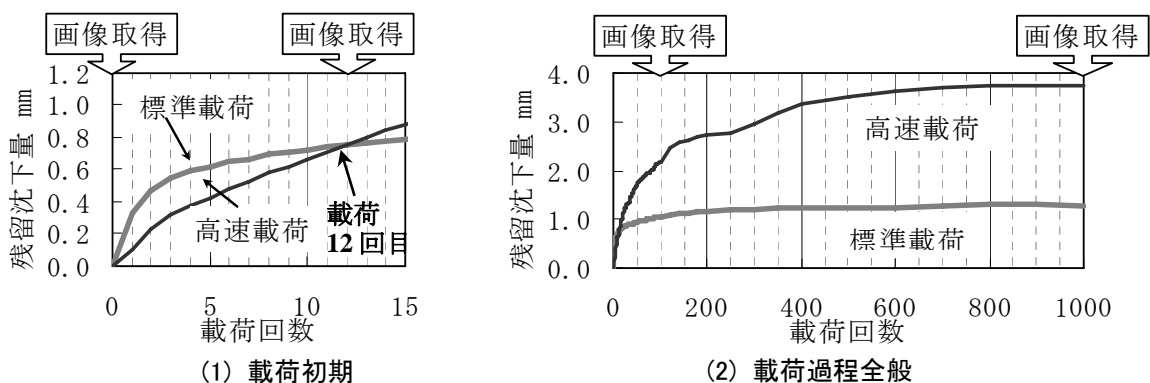
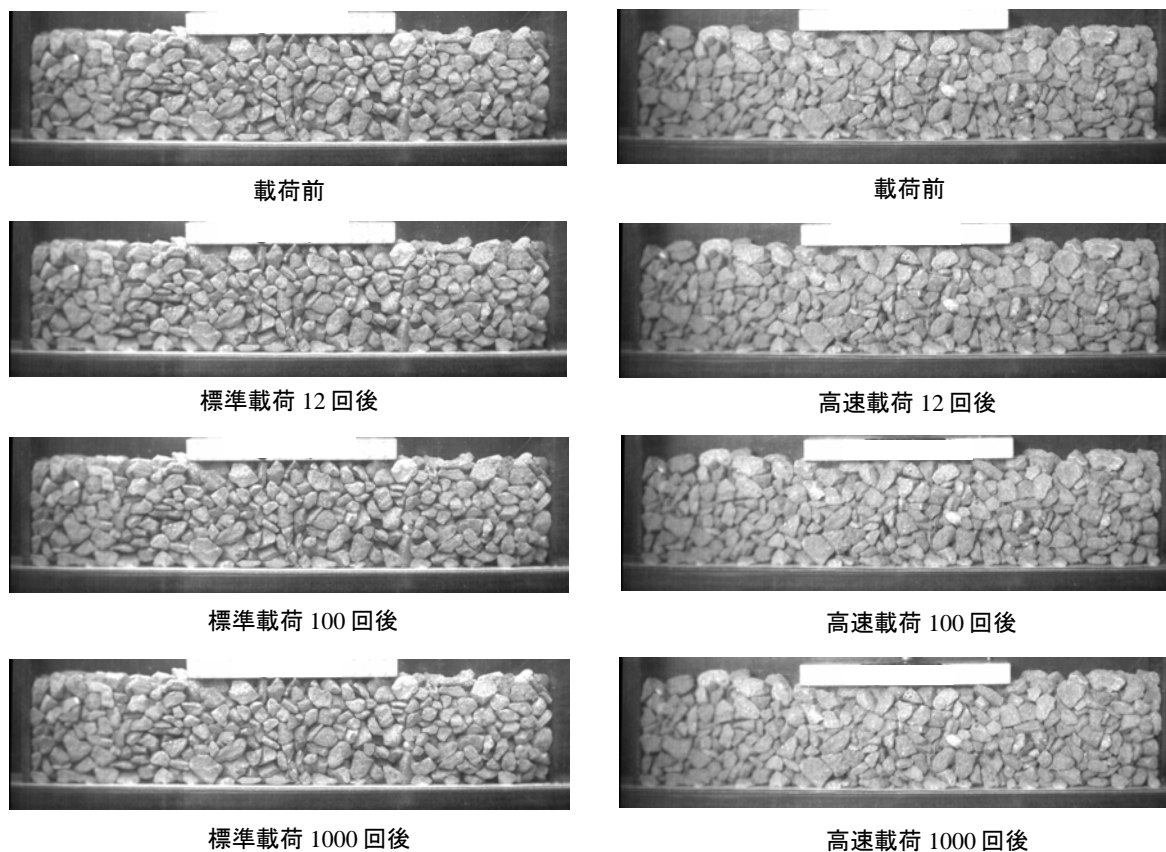
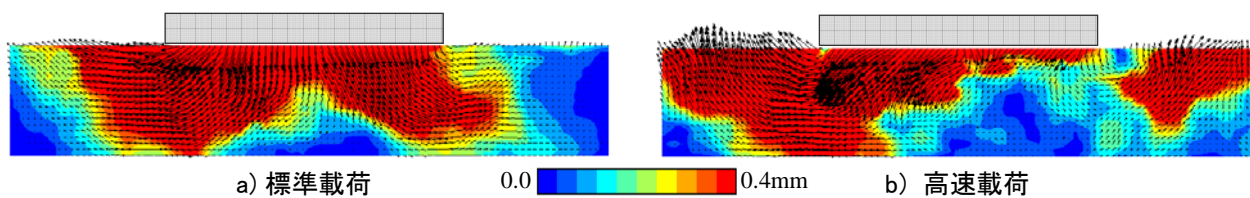


図4.5 ケースS2の沈下曲線（碎石層 載荷板幅15cm 荷重0.8kN）

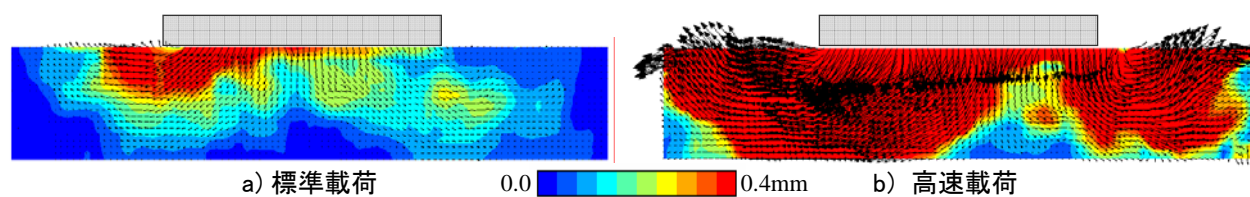
第4章 PIVによる粒子層の変形と粒子の挙動の観察



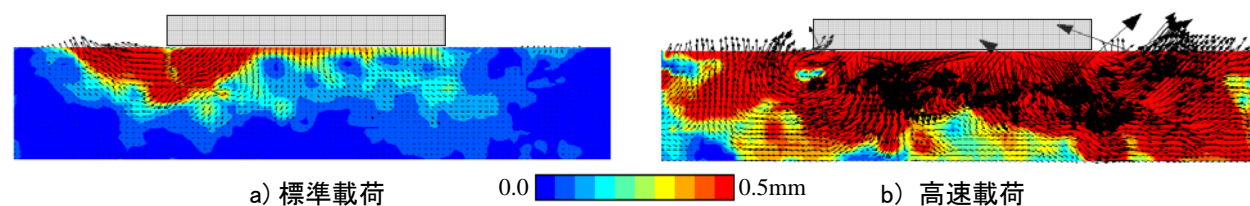
(1) 解析に用いた画像



(2) 荷重前 ⇒ 荷重12回終了後



(3) 荷重12回終了後 ⇒ 荷重100回終了後



(4) 荷重100回終了後 ⇒ 荷重1000回終了後

図4.6 繰返し荷重過程における粒子の残留変位の画像解析結果

るが、右図b)の高速載荷では依然として粒子の挙動が著しく、載荷板下の粒子の下方への移動だけでなく、外側の粒子の上方への移動も見られる。

つまり、載荷速度が砕石層内部の粒子の移動に与える影響は、繰返し載荷過程全般にわたって現れ、特に高速載荷においては、砕石層内部の体積膨張的な挙動が特徴的といえる。

(2) 体積ひずみとせん断ひずみ

次に、図4.6 に示す各節点の変位量から、各メッシュの最大せん断ひずみと体積ひずみ（膨張を正とする）を算出し、砕石層の変形の特徴を比較する。図4.7 に算出した最大せん断ひずみの分布を、図4.8 に算出した体積ひずみの分布を示す。各図とも(1)は繰返し載荷開始前と載荷12回終了後の、(2)は載荷12回終了後と載荷100回終了後の間、(3)は載荷100回終了後と載荷1000回終了後の間で生じる最大せん断ひずみまたは体積ひずみを示す。また、左側a)が標準載荷、右側b)が高速載荷の結果である。

図4.7(1)より、載荷前から載荷12回後までの変形においては、標準載荷では載荷板下部分に最大せん断ひずみが0.05以上の領域（橙色～赤色部）が分布するのに対して、高速載荷では載荷板下および載荷板の両側で最大せん断が大きくなっている。次に図4.7(2)より、載荷12回後～載荷100回後までの変形においては、特に高速載荷において最大せん断ひずみが大きい値を示し、特に載荷板下の砕石層表層部および載荷板外側でも最大せん断ひずみが0.1を超える（赤色部）領域が分布している。更に図4.7(3)より、載荷100回後～載荷1000回後までの変形においては、やはり高速載荷において最大せん断ひずみが大きい値を示し、ここでも載荷板下から外側にかけて、おもに砕石層の上層で最大せん断ひずみが0.1を超える領域が分布している。

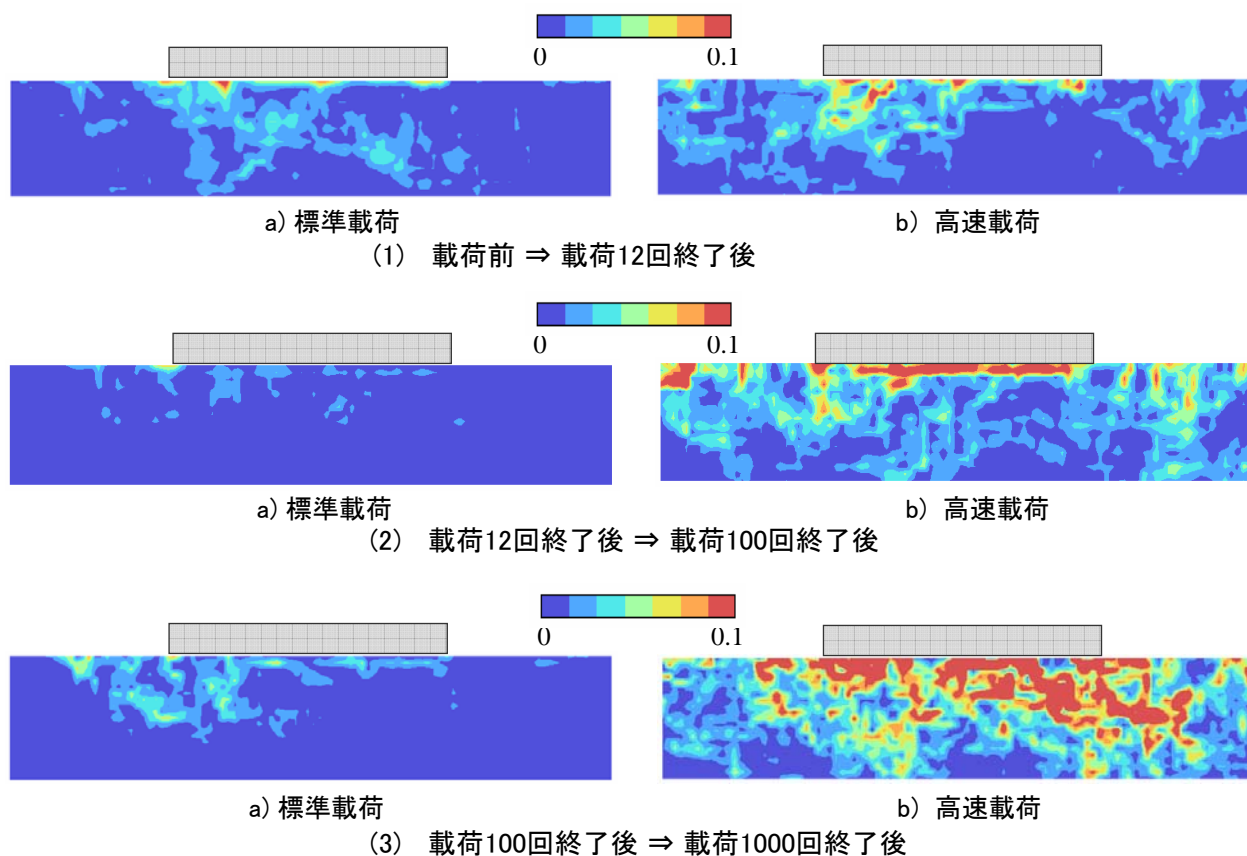


図4.7 繰返し載荷過程における最大せん断ひずみの分布

第4章 PIV による粒子層の変形と粒子の挙動の観察

次に図4.8に示す体積ひずみについては、まず図4.8(1)より、荷重前から荷重12回後までの変形においては、標準荷重よりも高速荷重において体積膨張（橙色～赤色部）と体積収縮（緑色～青色部）が混在しているのが明瞭に現れている。また図4.8(2)より、荷重12回後～荷重100回後までの変形においては、高速荷重で、荷重板直下で体積ひずみが-0.1以下（体積収縮）を示す領域が分布すると同時に、荷重板外側部分では体積ひずみが0.05以上（体積膨張）の領域が見られる。更に図4.8(3)より、荷重100回後～荷重1000回後までの変形においては、やはり高速荷重において体積膨張および体積収縮が明瞭に混在し、特に荷重板下の砕石層上層部では、体積ひずみが0.1以上または-0.1以下の領域が分布する。

以上に示した最大せん断ひずみおよび体積ひずみが大きい領域は、図4.6において粒子の移動が著しい領域とほぼ一致することから、砕石層内部の変形においては、せん断変形と体積変化の両者が同程度に混在していると考えられ、どちらかだけが卓越する傾向は明瞭ではない。

ここで更に、最大せん断ひずみと体積ひずみの比較を行うために、図4.7 (1)に示す各節点における最大せん断ひずみの値を横軸に、図4.8 (1)に示す各節点における体積ひずみの値を縦軸にプロットした図を近似曲線とともに図4.9 に示す。図より、最大せん断ひずみは標準荷重で0.12程度まで、高速荷重で0.14程度まで分布し、両者の差異は小さい。一方体積ひずみは、標準荷重では-0.07～+0.05程度まで分布するのに対して、高速荷重では-0.08～+0.12程度まで分布し、特に体積ひずみのプラス方向（体積膨張）の分布領域が広がっている。

つまり、荷重初期の砕石層の変形においては、特に高速荷重では体積膨張が標準荷重に比較して卓越すると考えられる。

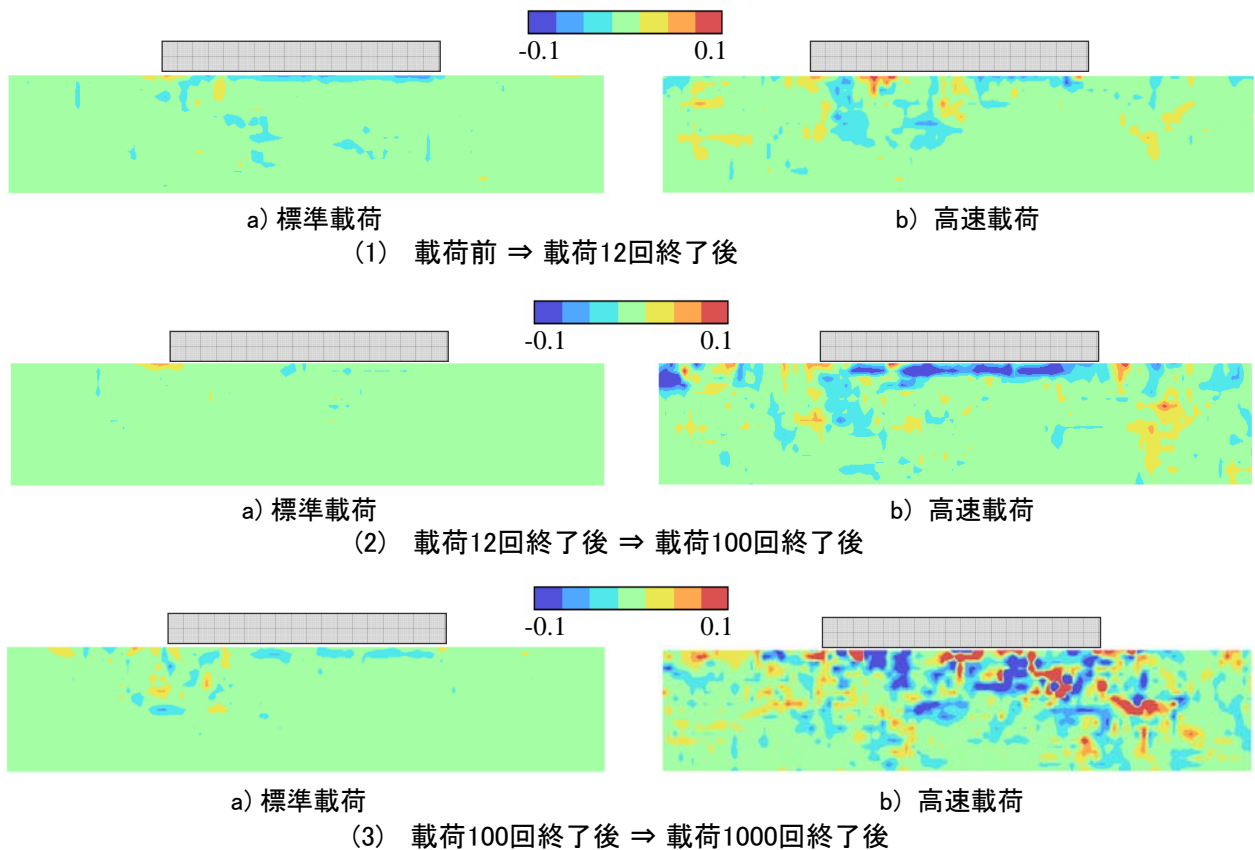
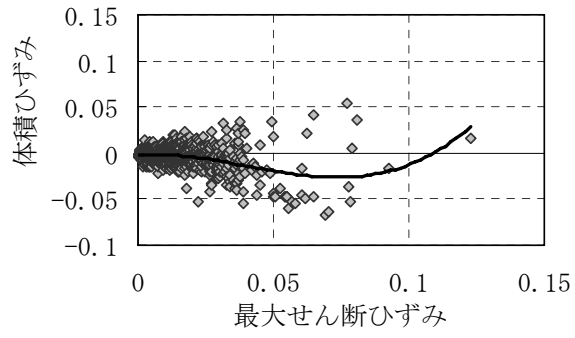
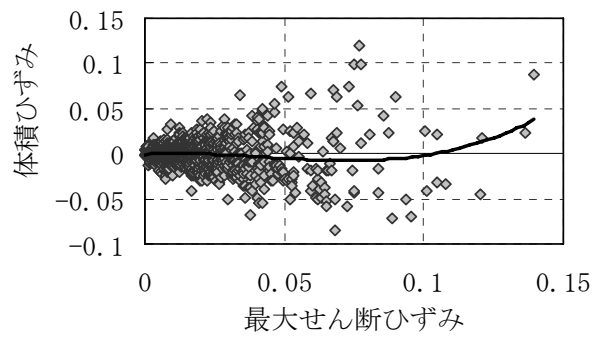


図4.8 繰返し荷重過程における体積ひずみ（2次元）の分布



(1) 標準载荷



(2) 高速载荷

図4.9 各節点の最大せん断ひずみと体積ひずみ (2次元)

第4章 PIVによる粒子層の変形と粒子の挙動の観察

4.4.2 各載荷回における粒子の動的挙動の観察

次に各載荷回における粒子の挙動を観察するために、載荷1回目、100回目、1000回目の載荷過程・除荷過程・除荷後0.1s間の粒子の動的挙動を観察した。ここで載荷過程の挙動は、**図4.4**に示す載荷前と最大荷重時の画像より、除荷過程の挙動は最大荷重時と荷重が0の瞬間の画像より、また除荷後の挙動は荷重0の瞬間とその後0.1s後の画像を用いて解析を行った。更に、同**図4.4**に示す載荷前と除荷後の画像を用いて、各載荷回の粒子の残留変位分も解析した。

(1) 碎石層内の変位

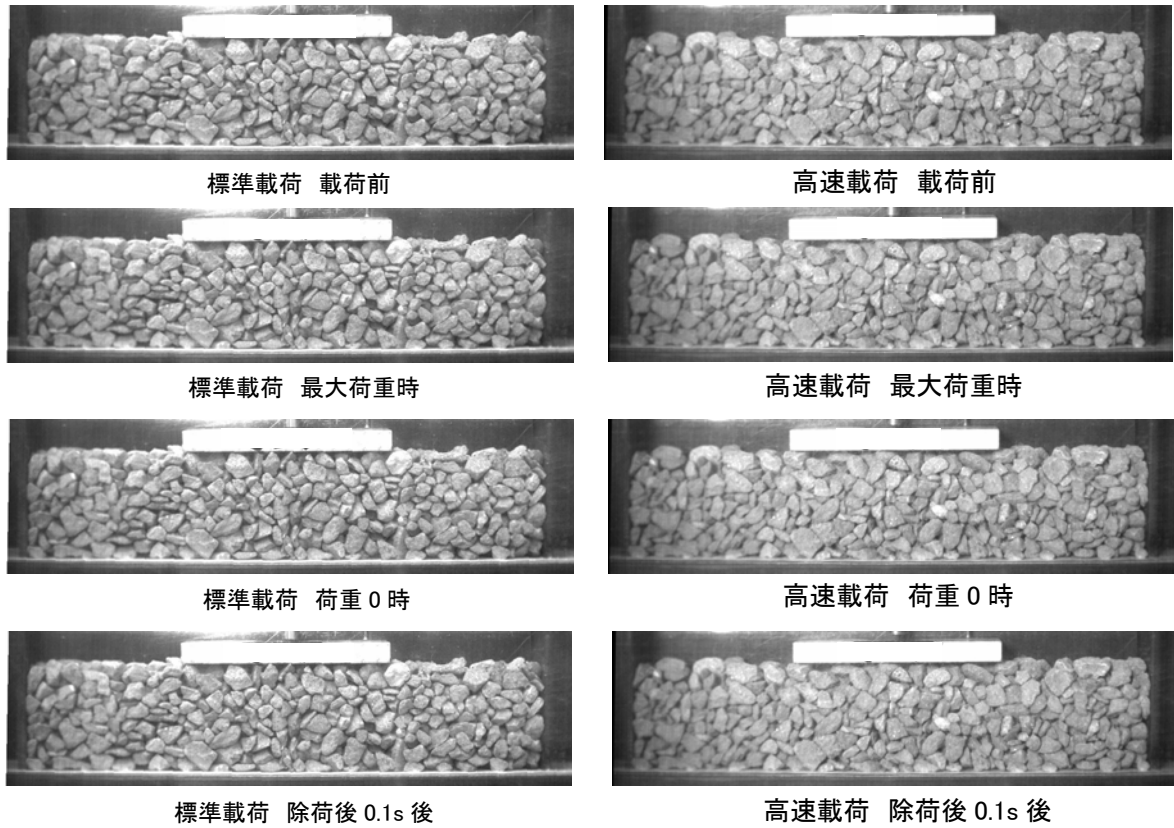
図4.10に載荷1回目の、**図4.11**に載荷100回目の、**図4.12**に載荷1000回目の解析画像と解析結果を示す。各図とも(1)が解析画像、(2)が載荷過程、(3)が除荷過程、(4)が除荷後の粒子挙動の解析結果である。また各図とも(5)が載荷前と載荷後の画像から得られる残留変位分を示す。また各図、右**図a**)は標準載荷、左**図b**)は高速載荷の結果である。図中、赤色部は変位が0.2mm以上であることを示し、黄色→緑色→青色となるほど変位が小さくなることを示している。矢印は移動の方向と大きさを示している。

まず**図4.10(2)**より、載荷1回目の載荷過程において、標準載荷では、載荷板下からせん断方向に粒子が著しく移動するのに対し、高速載荷では載荷板下の粒子の移動は標準載荷より若干小さいが、載荷板外側では、標準載荷より粒子の移動が大きくなっている。次に**図4.10(3)**より、除荷過程においては、標準載荷では載荷板下の碎石層部分で粒子の上方への移動が見られるのに対し、高速載荷では碎石層全体で粒子の上方への移動が見られ、特に載荷板下で著しい挙動が見られる。更に**図4.10(4)**より、除荷後の粒子の挙動は、特に高速載荷で明らかで、除荷過程で上方へ移動した粒子が下方へ戻る挙動が見られる。また載荷1回目前後の残留変位分を示す**図4.10(5)**より、標準載荷では載荷過程の粒子の移動(**図4.10(2)**)がほとんど同様に残留するのに対して、高速載荷では、載荷過程だけでなく、除荷過程や除荷後の粒子の移動の成分が残留変位分に影響している。

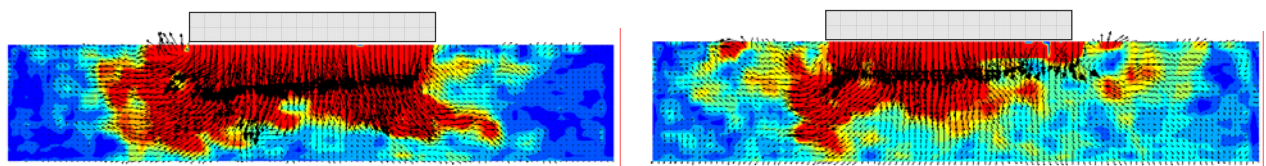
次に**図4.11**より、載荷100回目の載荷過程において、標準載荷では粒子の移動が載荷1回目と比較して著しく減少するが、高速載荷においては載荷板下方および載荷板の外側で、著しい粒子の移動が見られる。また**図4.11(3)**の除荷過程においても、標準載荷では粒子の移動が載荷1回目と比較して現象しているのに対して、高速載荷では依然として粒子の上方への移動が著しい。このため、**図4.11(4)**の除荷後においては、標準載荷ではほとんど粒子の移動が見られないのに対して、高速載荷では載荷板下の碎石層上層部で粒子の下方へ戻る挙動が見られる。更に載荷100回目前後の残留変位分を示す**図4.11(5)**より、標準載荷では載荷板下の碎石層上層で若干の粒子の移動が見られるのに対して、高速載荷では、碎石層全体で不規則な粒子の残留変位が見られ、これは載荷過程・除荷過程・除荷後の粒子の移動を反映していると考えられる。

次に**図4.12**より、載荷1000回目においては、標準載荷および高速載荷のいずれにおいても粒子の移動はかなり減少していることが明らかである。ただし高速載荷においては、載荷過程および除荷過程で粒子の移動が見られ、除荷後および残留変位分についても、若干ではあるが、依然として残留変位が生じているのが明らかである。

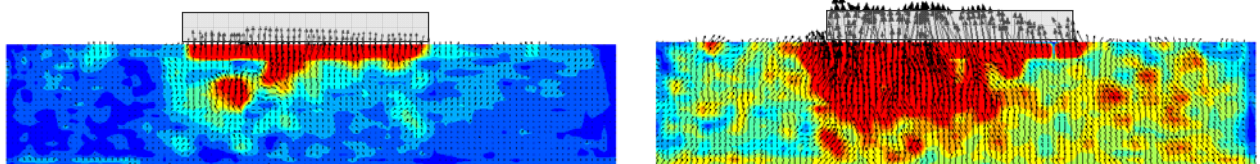
以上より、各載荷回の粒子の動的挙動においては、特に高速載荷における除荷過程および除荷後の粒子の挙動が特徴的であり、更にその動的挙動が残留変位分にも反映されていることから、高速載荷において残留変位の増加が収束しにくい理由として、各載荷回の動的挙動が長期的沈下特性にも影響を与えることが考えられる。



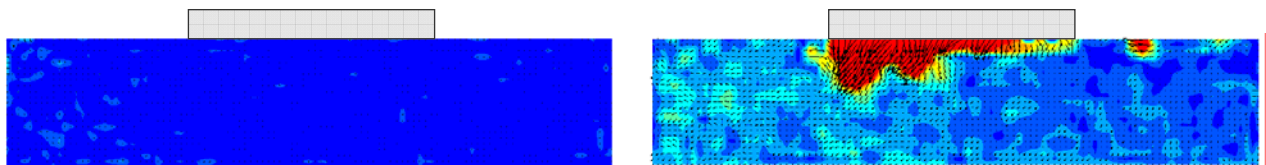
(1) 解析に用いた画像



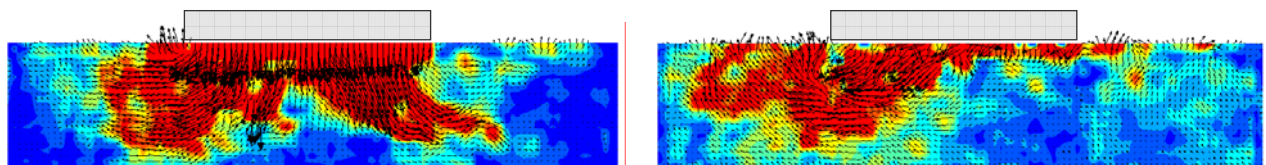
(2) 載荷過程



(3) 除荷過程



(4) 除荷後

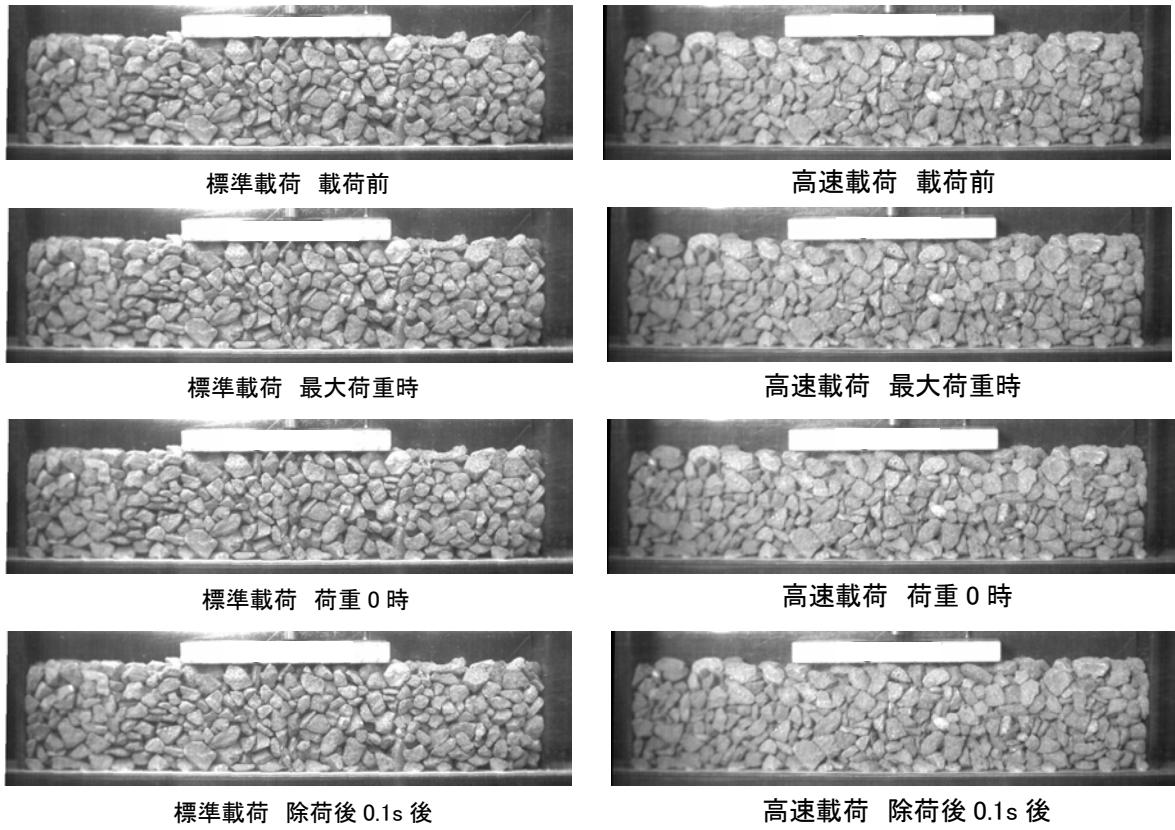


(5) 残留変位分

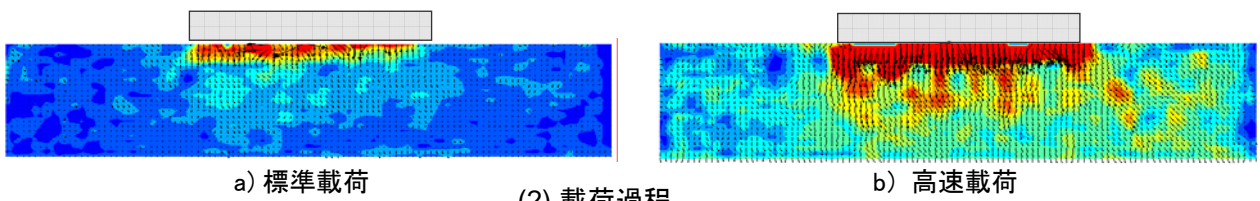
0 0.2mm

図4.10 載荷 1 回目の粒子の挙動

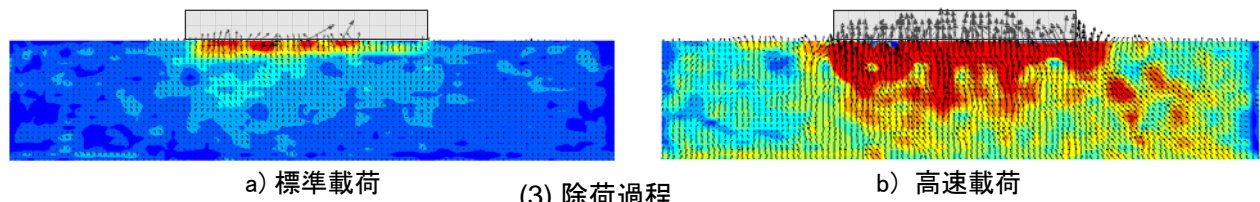
第4章 PIVによる粒子層の変形と粒子の挙動の観察



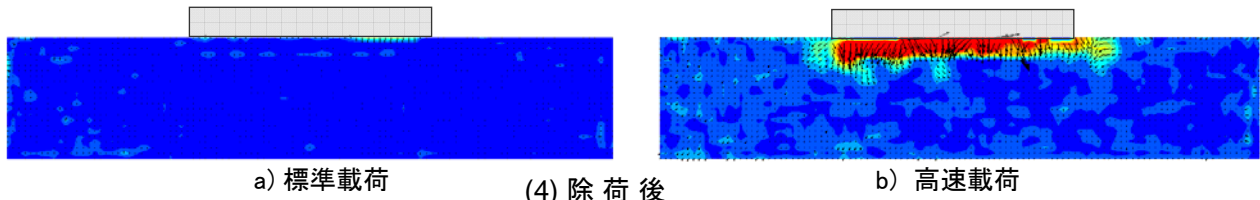
(1) 解析に用いた画像



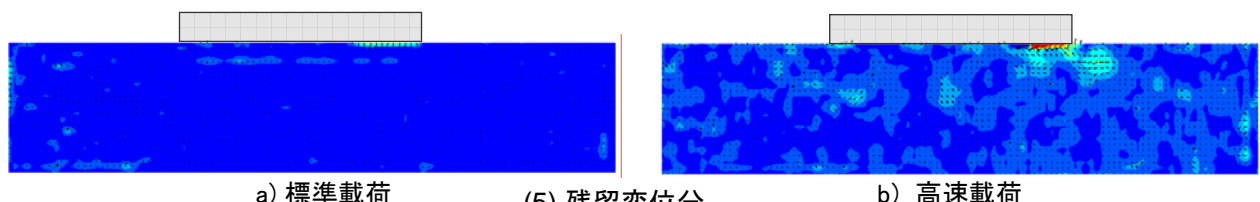
(2) 載荷過程



(3) 除荷過程



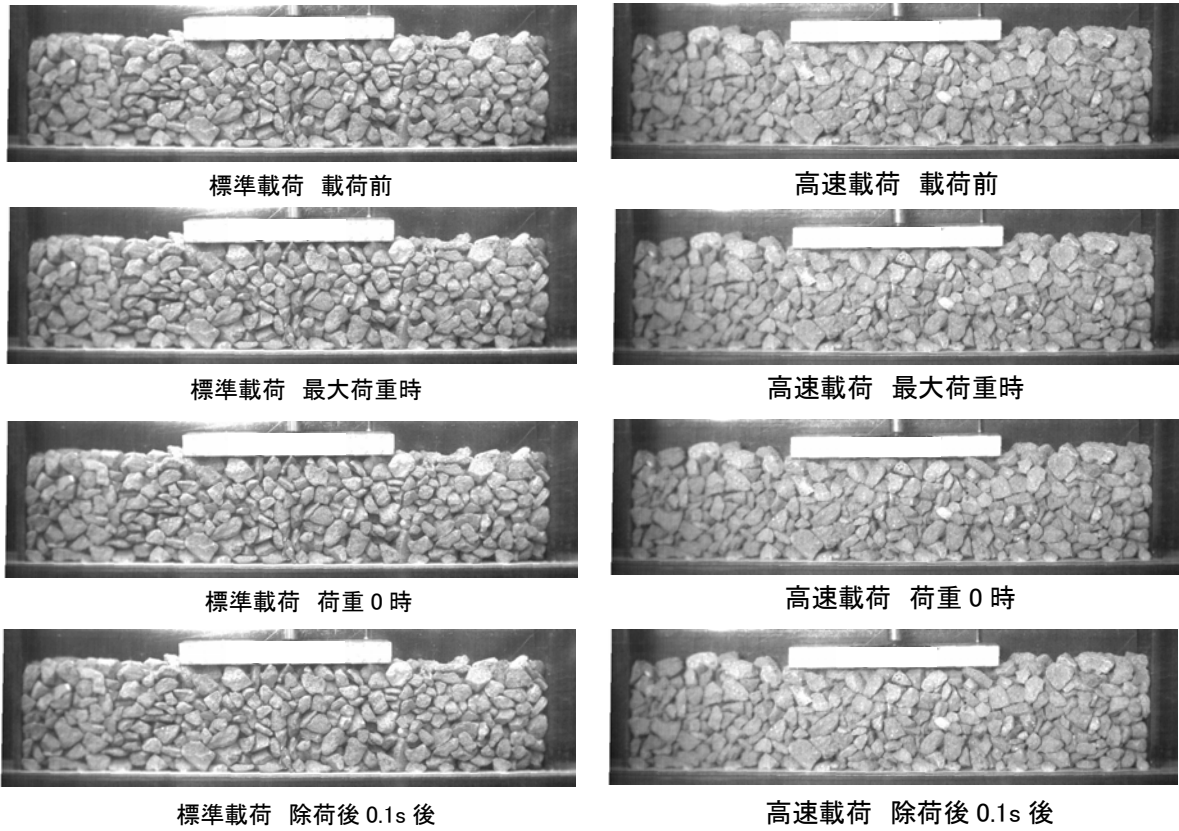
(4) 除荷後



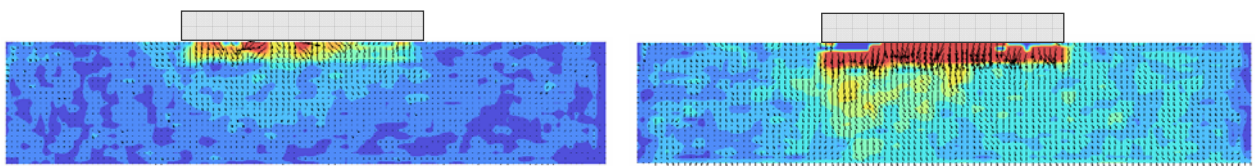
(5) 残留変位分

0 0.2mm

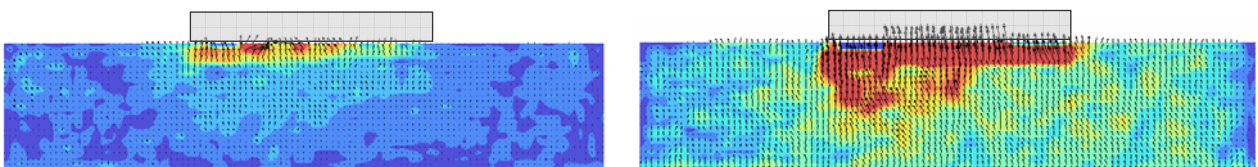
図4.11 載荷100回目の粒子の挙動



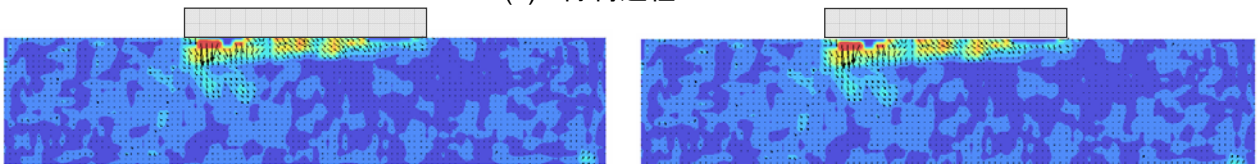
(1) 解析に用いた画像



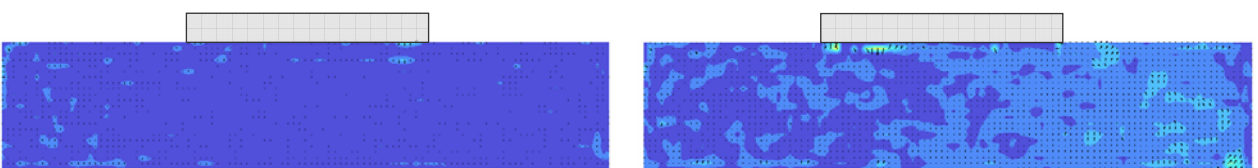
(2) 載荷過程



(3) 除荷過程



(4) 除荷後



(5) 残留変位分

0 0.2mm

図4.12 載荷1000回目の粒子の挙動

(2) 体積ひずみとせん断ひずみ

次に図4.10に示した載荷1回目の各節点の変位量から、各メッシュの最大せん断ひずみを算出した結果を図4.13に、体積ひずみを算出した結果を図4.14に示す。いずれの図も(1)が載荷過程、(2)が除荷過程、(3)が除荷後、(4)残留変位分の各ひずみを示す。

図4.13(1)より、載荷過程では、碎石層全体において、標準載荷の方が最大せん断ひずみの大きい領域（橙色～赤色部）が広く分布している。特に載荷板下の碎石層表層部分で最大せん断ひずみが0.05以上（赤色部）となるのと同時に、載荷板下部の碎石層全体で、最大せん断ひずみが0.04以上（橙色～赤色部）の領域が分布している。一方、高速載荷でも、載荷板下の碎石層表層部で最大せん断ひずみが0.05以上となるのと同時に、載荷板下の左側では、最大せん断ひずみが0.04以上となる領域が見られる。

次に図4.13(2)より、除荷過程では、載荷過程とは逆に、碎石層全体において、高速載荷の方が最大せん断ひずみの大きい領域が広く分布している。特に載荷板下の碎石層表層部分で最大せん断ひずみが0.05以上（赤色部）となるのと同時に、載荷板下部だけでなく載荷板外側においても、碎石層全体で最大せん断ひずみが0.04以上（橙色～赤色部）の領域が分布している。

更に図4.13(3)より、除荷後においては、除荷過程と同様に、碎石層全体において、高速載荷の方が最大せん断ひずみの大きい領域が見られる。ただし最大せん断ひずみが0.05を越える領域

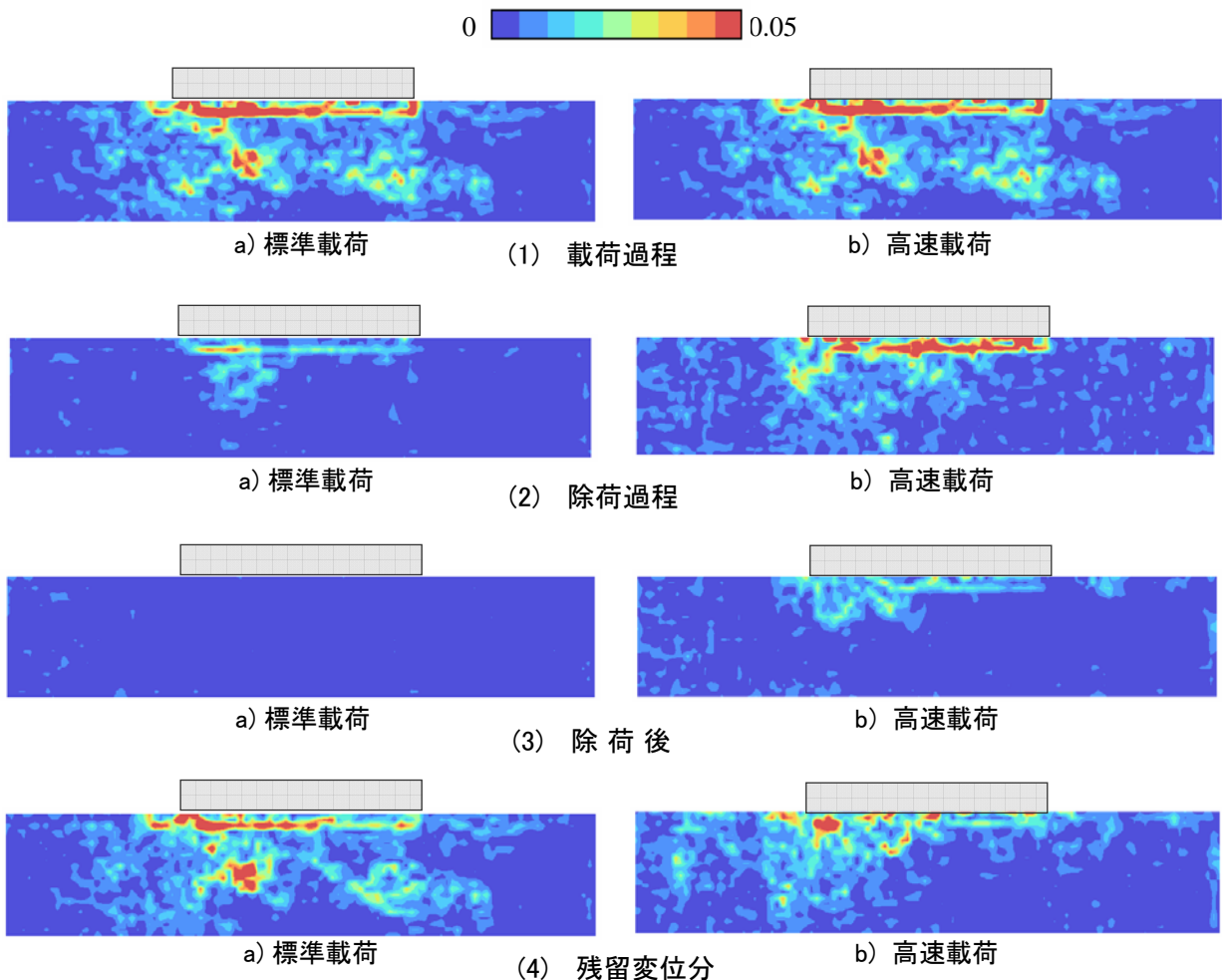


図4.13 載荷1回目における最大せん断ひずみ

域は見られず、荷重板下で0.03～0.04の領域が見られる程度である。これに対して標準荷重においては、最大せん断ひずみは0.01未満と小さな値となっている。

また図4.13(4)より、荷重前後の画像の解析結果である残留変位分においては、砕石層全体において、標準荷重の方が最大せん断ひずみの大きい領域が明瞭となっている。

以上に示した最大せん断ひずみが大きい領域は、図4.10において粒子の移動が著しい領域とほぼ一致する。

次に図4.14に示す体積ひずみについては、まず図4.14(1)より、荷重過程では、砕石層全体において、標準荷重の方が体積ひずみの大きい領域が明瞭である。特に荷重板下の砕石層表層部分では体積ひずみが-0.03以下（濃青色）となり、体積収縮が見られる。また荷重板下部の中層部においても体積ひずみが-0.03以下の部分や逆に0.03以上の部分（赤色部）が数箇所、局所的に混在しているのが見られ、これは、砕石層の初期配置から荷重によって粒子の配列が変わる挙動が起きていると考えられる。一方高速荷重においては、荷重板下の砕石層表層において体積ひずみが-0.03以下となっているが、その他の部分では、標準荷重ほどの明瞭な体積ひずみの分布は見られない。

次に図4.14(2)より、除荷過程では、荷重過程とは逆に、砕石層全体において、高速荷重の方が体積ひずみの大きい領域が広く分布している。特に荷重板下の砕石層表層部分で、体積ひずみが+0.03を超える領域が集中しているが、それ以外の砕石層全体においても、-0.01～0.01程度の領域が混在している。

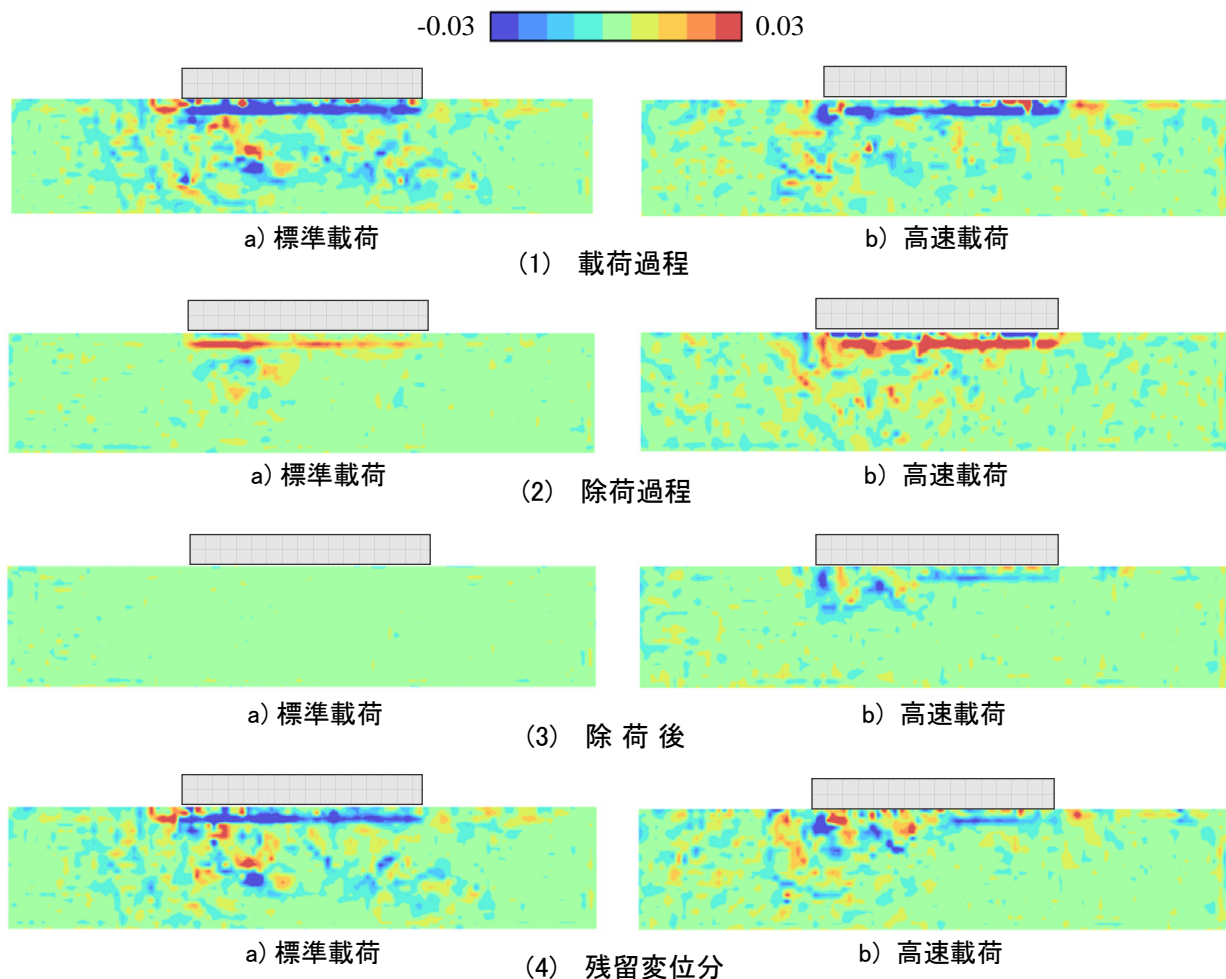


図4.14 荷重1回目における体積ひずみ（2次元）

第4章 PIVによる粒子層の変形と粒子の挙動の観察

更に図4.14(3)より、除荷後においては、除荷過程と同様に、碎石層全体において、高速載荷の方が体積ひずみの大きい領域が見られる。ただし、体積ひずみの比較的大きい領域は載荷板下周辺に集中し、それ以外では載荷過程および除荷過程ほどの差異は見られない。

また図4.14(4)より、載荷前後の画像の解析結果である残留変位分においては、碎石層全体において、標準載荷の方が体積ひずみの大きい領域が明瞭となっている。特に標準載荷では、図4.14(1)の載荷過程における体積ひずみの分布と同様となっているのに対して、高速載荷では、載荷板下の碎石層表層の体積収縮が、標準載荷より小さい値となっている。

以上に示した体積ひずみが大きい領域は、図4.10において粒子の移動が著しい領域とほぼ一致する。

ここで、最大せん断ひずみと体積ひずみの比較を行うために、図4.13に示す各節点における最大せん断ひずみの値を横軸に、図4.14に示す各節点における体積ひずみの値を縦軸にプロットした図を近似曲線とともに図4.15に示す。図4.15(1)が載荷過程、図4.15(2)が除荷過程、図4.15(3)が除荷後、図4.15(4)が残留変位分の各ひずみを示す。

まず図4.15(1)より、載荷過程において、標準載荷および高速載荷のいずれでも、最大せん断ひずみの増加に伴い体積ひずみの値も一側に増加する傾向が見られる。これは、載荷過程において体積収縮が卓越することを示しているが、縦軸の体積ひずみの値は、いずれも $-0.08 \sim +0.02$ 程度の範囲で分布している。一方、横軸の最大せん断ひずみは、標準載荷において 0.105 程度まで分布し、高速載荷より大きな値を取る。

次に図4.15(2)より、除荷過程において、標準載荷および高速載荷のいずれでも、最大せん断ひずみの増加に伴い体積ひずみの値も+側に増加する傾向が見られる。これは、除荷過程において体積膨張が卓越することを示しているが、縦軸の体積ひずみの値は、標準載荷で $+0.03$ 程度まで分布するのに対して、高速載荷では $+0.075$ 程度まで広く分布している。また横軸の最大せん断ひずみも、標準載荷では 0.03 程度までであるのに対して、高速載荷では 0.07 程度まで広く分布する。

また図4.15(3)より、除荷後において、標準載荷では最大せん断ひずみも体積ひずみも著しく小さいのに対し、高速載荷では、最大せん断ひずみも体積ひずみも標準載荷の3倍程度の値の範囲に分布している。

更に図4.15(4)より、載荷前後の残留変位分については、標準載荷では最大せん断ひずみの増加に伴い体積ひずみの値が一側に増加する傾向であるのに対して、高速載荷では、最大せん断ひずみ 0.02 程度を超える領域で、体積ひずみの値が+に増加する傾向が見られる。

以上より、載荷1回目における碎石層の動的挙動と残留変位について、標準載荷では、載荷過程で碎石層が詰まることによる碎石層の変形が卓越し、その後の除荷過程で、詰まった碎石層が若干戻るものの、載荷過程における変形が残留変位として残るものと考えられる。一方、高速載荷では、載荷過程で碎石層が詰まることによる碎石層の変形が生じるものの、その後の除荷過程で、詰まった碎石層が著しく膨張に転じ、その挙動が残留変位にも影響を残すものと考えられる。

更に、図4.15に示した最大せん断ひずみと体積ひずみの関係の変化を観察するために、載荷10回、100回、1000回における近似曲線を図4.16に示す。図中、緑色線が載荷過程、青色線が除荷過程、ピンク色太線が除荷後、黒色太線が残留変位分を示す。

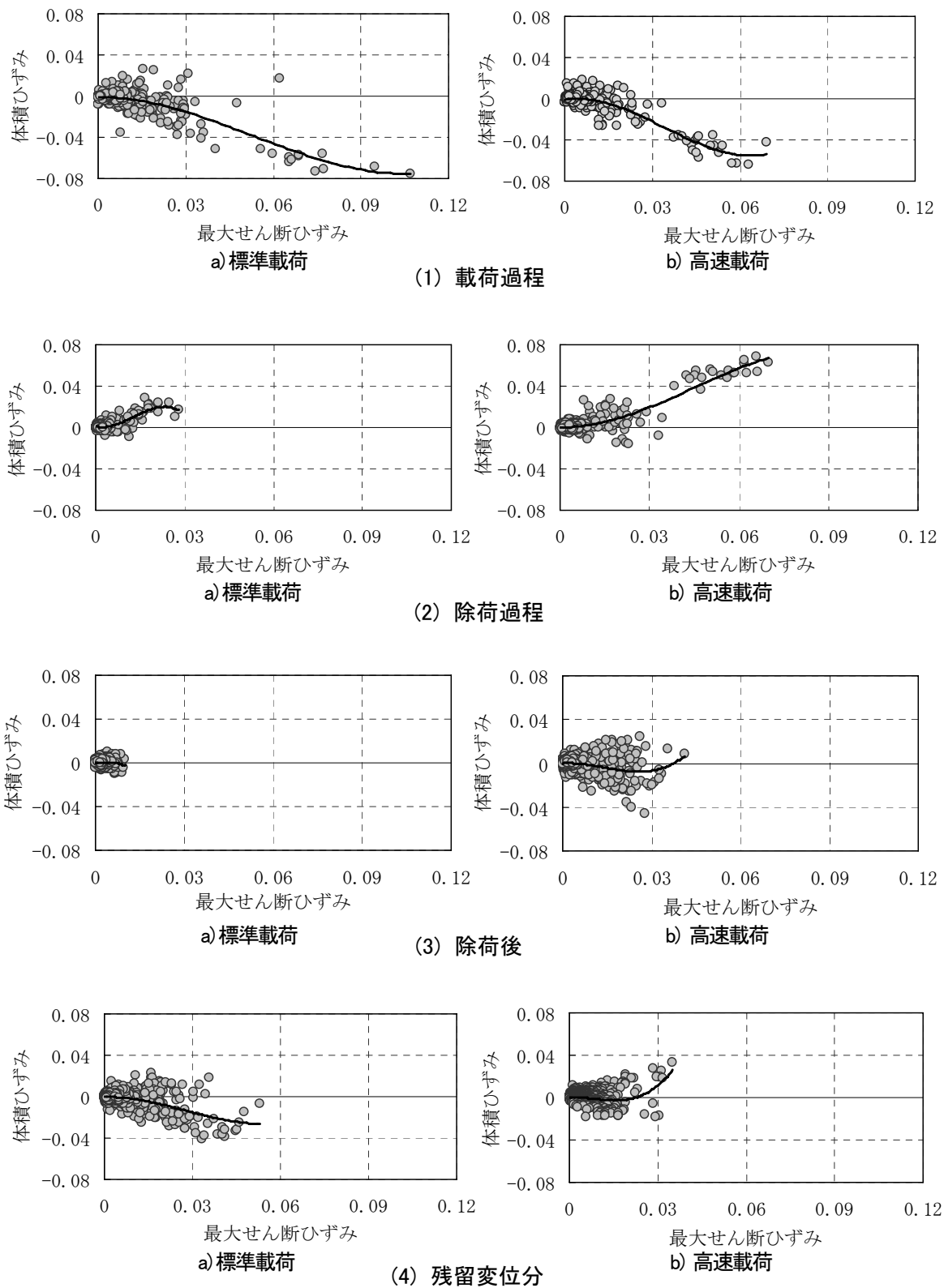


図4.15 载荷1回目における最大せん断ひずみと体積ひずみ（2次元）の関係

第4章 PIVによる粒子層の変形と粒子の挙動の観察

図4.16(1)より载荷10回目では、標準载荷の载荷過程における最大せん断ひずみおよび体積ひずみが、载荷1回目の約1/4~1/5に減少するのに対して、除荷過程における最大せん断ひずみと体積ひずみは、若干減少する程度である。一方高速载荷においては、载荷過程では最大せん断ひずみも体積ひずみも载荷1回目と同程度であるが、除荷過程の最大せん断ひずみは約1.5倍に増加する。また除荷後については载荷1回目の半分程度となり、残留変位分は、標準载荷ではわずかに体積収縮側に近似曲線がシフトするのに対して、高速载荷では体積膨張を示している。

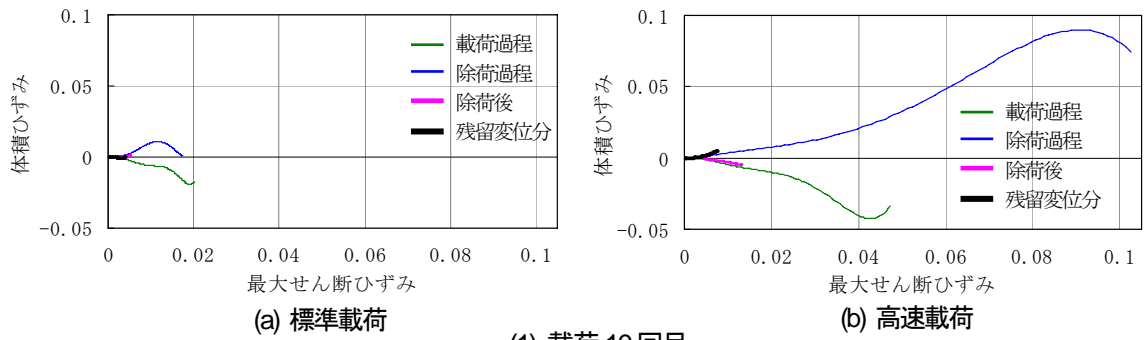
次に図4.16(2)より载荷100回目では、いずれの载荷速度においても、最大せん断ひずみおよび体積ひずみが载荷10回目の半分程度に減少する。また標準载荷では、载荷過程と除荷過程の最大せん断ひずみの大きさが同程度となり、また体積ひずみも土が逆であるが同程度の値を示している。これに対して高速载荷では、依然として载荷過程に比較して除荷過程における最大せん断ひずみと体積ひずみが大きい特徴が継続して見られている。残留変位分については、標準载荷でも若干の体積膨張を示し、また高速载荷でも同様に体積膨張を示している。

更に図4.16(3)より载荷1000回目では、標準载荷では最大せん断ひずみおよび体積ひずみが、载荷100回目と同程度の値を示しているが、高速载荷では最大せん断ひずみも体積ひずみも载荷100回目の半分程度に減少する。また高速载荷では、除荷過程において最大せん断ひずみも体積ひずみも载荷過程よりも大きい傾向が継続されている。残留変位分については、標準载荷および高速载荷のいずれでも、体積膨張を示している。

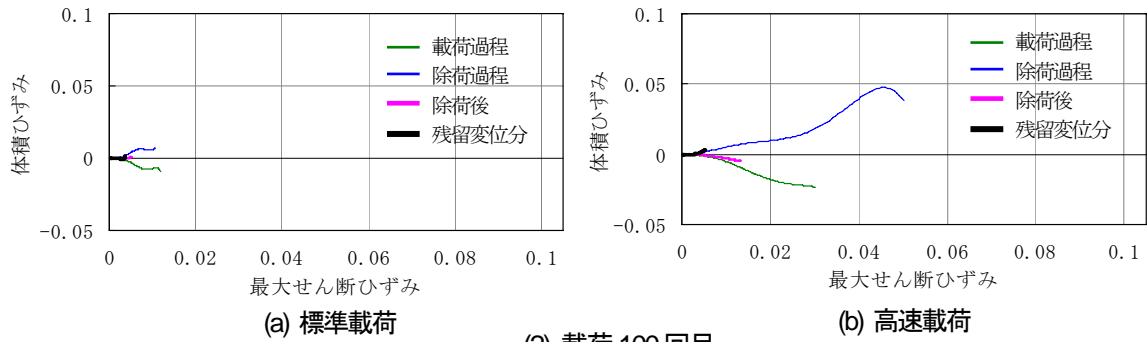
以上より、標準载荷においては、载荷1回目で碎石層内部の碎石同士が詰まった後は、比較的早い段階で粒子構造が安定し、载荷100回目を越える頃からは、载荷過程と除荷過程で同程度の体積収縮と体積膨張が繰り返されることから、碎石の変形も弾性的な挙動が卓越すると考えられる。

一方で高速载荷においては、载荷1回目で見られた体積膨張を伴うせん断変形は、载荷100回目ではむしろ増加し、更に、この傾向は载荷100回目程度でも継続すると考えられる。

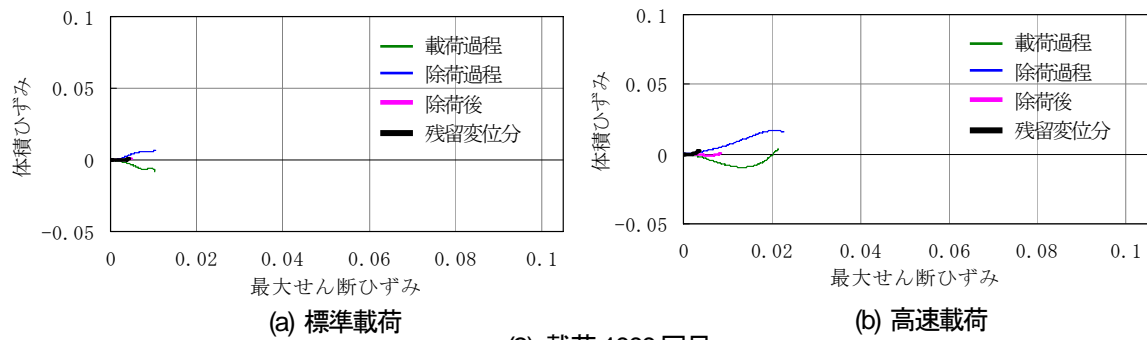
つまり高速载荷においては、除荷過程における体積膨張が碎石層の変形に影響を及ぼし、このことが、前章で述べた「载荷板の沈下が収束し難い」沈下特性の要因となると考えられる。



(1) 載荷 10 回目



(2) 載荷 100 回目



(3) 載荷 1000 回目

図4.16 最大せん断ひずみと体積ひずみ（2次元）の関係の変化

4.5 画像解析結果 - 鋼球層

4.5.1 繰返し载荷過程の粒子の残留変位の観察

図4.17に前章で示した繰返し载荷実験結果のケースK1の沈下曲線(図3.14)より、载荷初期の部分拡大したものを図(1)に、载荷過程全般を図(2)に示す。図より鋼球層においては载荷65回目前後で、標準载荷と高速载荷における残留沈下量がほぼ同じ値となり、この後、高速载荷の残留沈下量が標準载荷を超えて増加して行く。しかし本実験においては、载荷70回目前後の画像取得はしていないことと、鋼球層の変形は碎石層より著しかったことから、载荷0回～载荷1回、载荷1回～载荷10回、载荷10回～载荷100回、载荷100回～载荷300回、载荷300回～载荷600回、载荷600回～载荷1000回と細かく分割して、各载荷間の粒子の残留変位を観察した。

(1) 鋼球層内の残留変位

図4.18に解析に用いた画像を、図4.19に各画像からの画像解析結果を示す。図4.19は、上から载荷回数順に示し、各図とも左側a)が標準载荷、右側b)が高速载荷の結果である。

まず図4.19(1)より、繰返し载荷前と標準载荷1回終了後の画像解析結果において、標準载荷および高速载荷の両者で、载荷板直下の粒子の移動よりも、载荷板下から载荷板外側への粒子の移動が著しい。これは特に左図a)の標準载荷の方で顕著で、载荷板左側では、移動量が1mmを超える(図中赤色部)領域も見られる。次に図4.19(2)より、载荷1回終了後から载荷10回目終了後の画像解析結果においても、载荷板下から载荷板外側への粒子の移動が顕著であるが、標準载荷では、図4.19(1)に示す载荷1回目よりも変位量は全体的に半分以下となるのに対し、高速载荷では载荷1回目と同程度の変位量となっている。次に図4.19(3)より、载荷10回後から载荷100回目までの画像解析結果においては、標準载荷および高速载荷の両者で、依然として载荷板下から载荷板外側への粒子の移動が見られるが、载荷板下の粒子の下方への移動も同程度見られる。また高速载荷における変位量の方が標準载荷に比較して明らかに大きくなり、傾向が逆転している。更に図4.19(4)(5)(6)でも、高速载荷の方が標準载荷より移動量の大きい傾向が継続している。ただし、これらの画像解析結果においては、広範囲に亘って青色で塗りつぶされた部分があり、これはPIV解析において正しくパターン認識がされなかった部分である。この原因としては、これらの画像間における粒子の移動量が大き過ぎたことが考えられる。

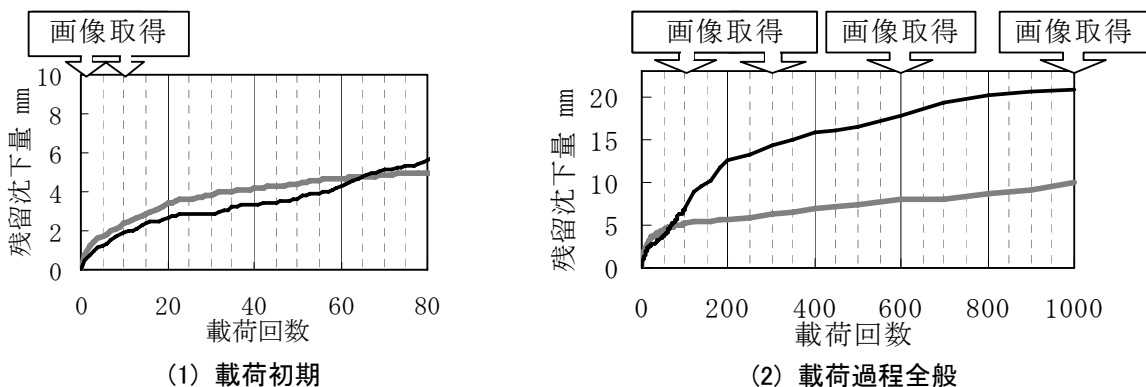


図4.17 ケースK1の沈下曲線(鋼球層 载荷板幅15cm 荷重0.2kN)

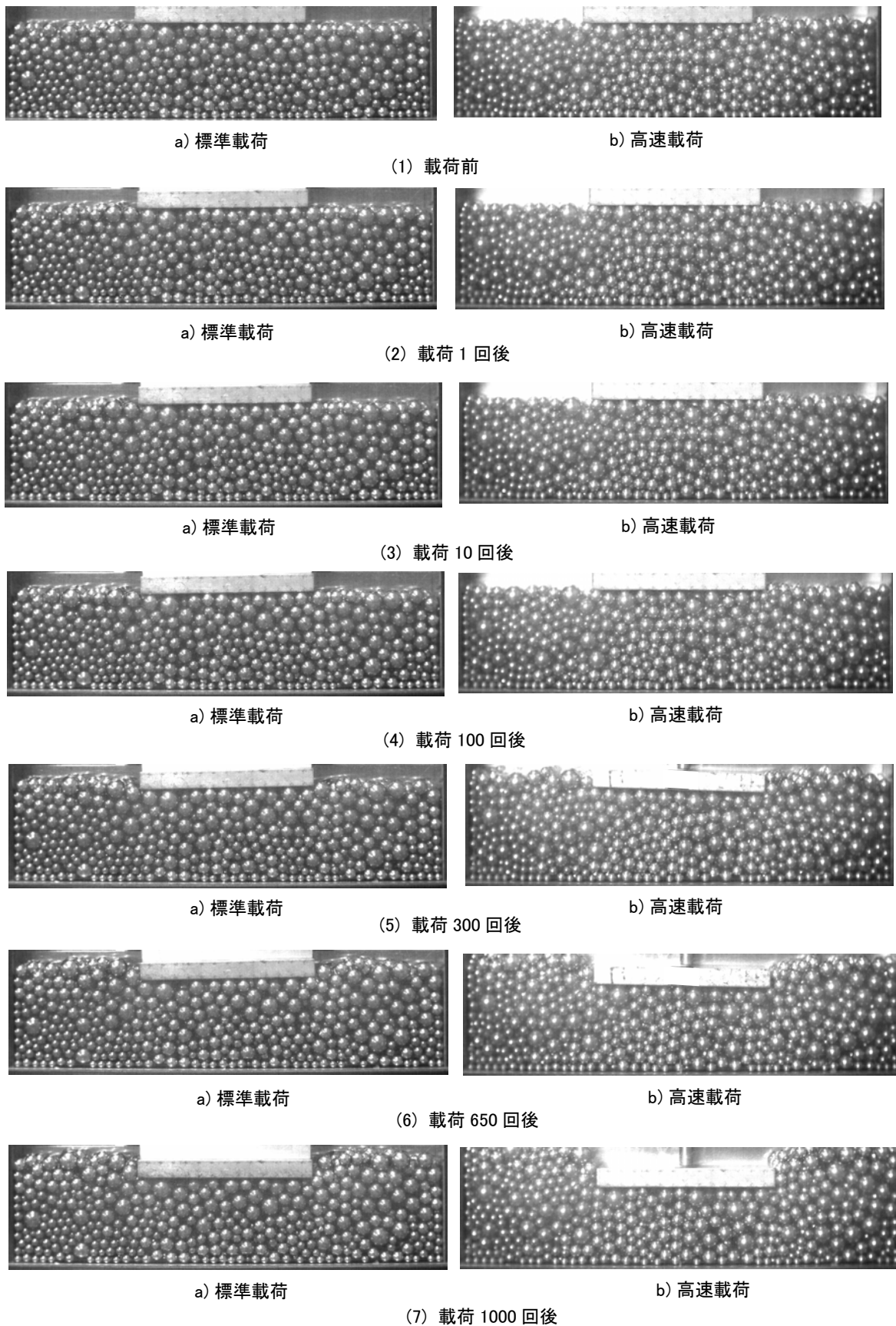


図4.18 繰返し載荷過程における粒子の残留変位の画像解析結果

第4章 PIVによる粒子層の変形と粒子の挙動の観察

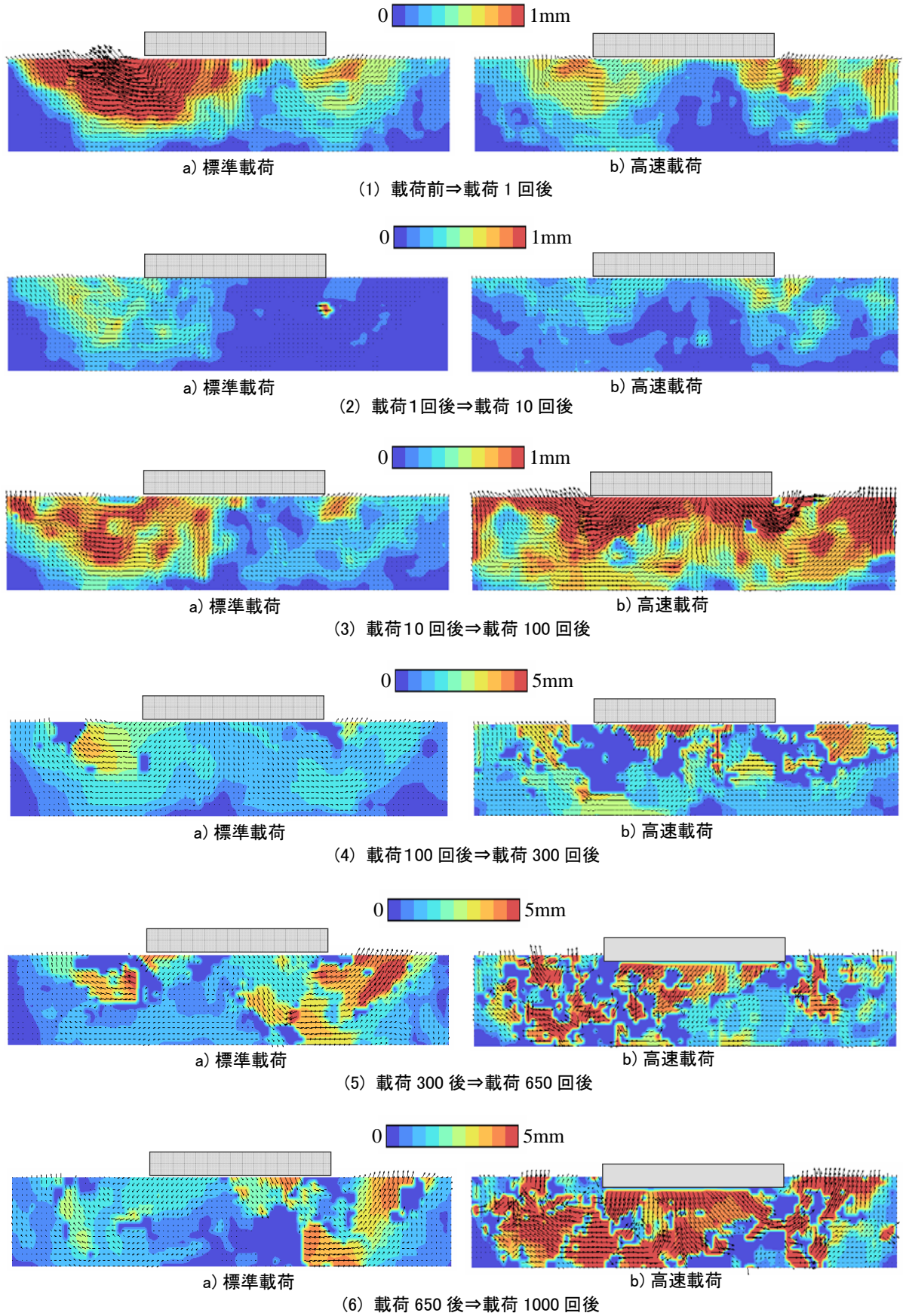


図4.19 繰返し载荷過程における粒子の残留変位の画像解析結果

全体的には、繰返し荷重過程で、初期には標準荷重の方が粒子の移動が著しいのに対して、途中でその傾向が逆転しており、この点においては、前節で示した碎石層の傾向と一致している。ただし、その逆転が起きる荷重回数については、碎石層と鋼球層で異なっている。これについては、図3.15より、同じ鋼球層においてもバラツキが大きいことが予想されるが、いずれにしても、荷重速度による影響の傾向は、繰返し荷重過程で変化することが確認された。

(2) 体積ひずみとせん断ひずみ

次に、図4.19に示す各節点の変位量から、各メッシュの最大せん断ひずみと体積ひずみを算出し、鋼球層の変形の特徴を比較する。図4.20に算出した最大せん断ひずみの分布を、図4.21に算出した体積ひずみの分布を示す。各図とも(1)は繰返し荷重開始前と荷重1回終了後の、(2)は荷重1回終了後と荷重10回終了後の間、(3)は荷重10回終了後と荷重100回終了後の間で生じる最大せん断ひずみまたは体積ひずみを示す。また、左側a)が標準荷重、右側b)が高速荷重の結果である。

図4.20(1)より、荷重前から荷重1回後までの変形においては、標準荷重では荷重板外側の鋼球層表層で最大せん断ひずみが0.2以上の領域（赤色部）が分布し、高速荷重では荷重板外側で最大せん断0.1～0.12程度（薄緑色～黄色部）の領域が分布し、標準荷重より若干小さい。

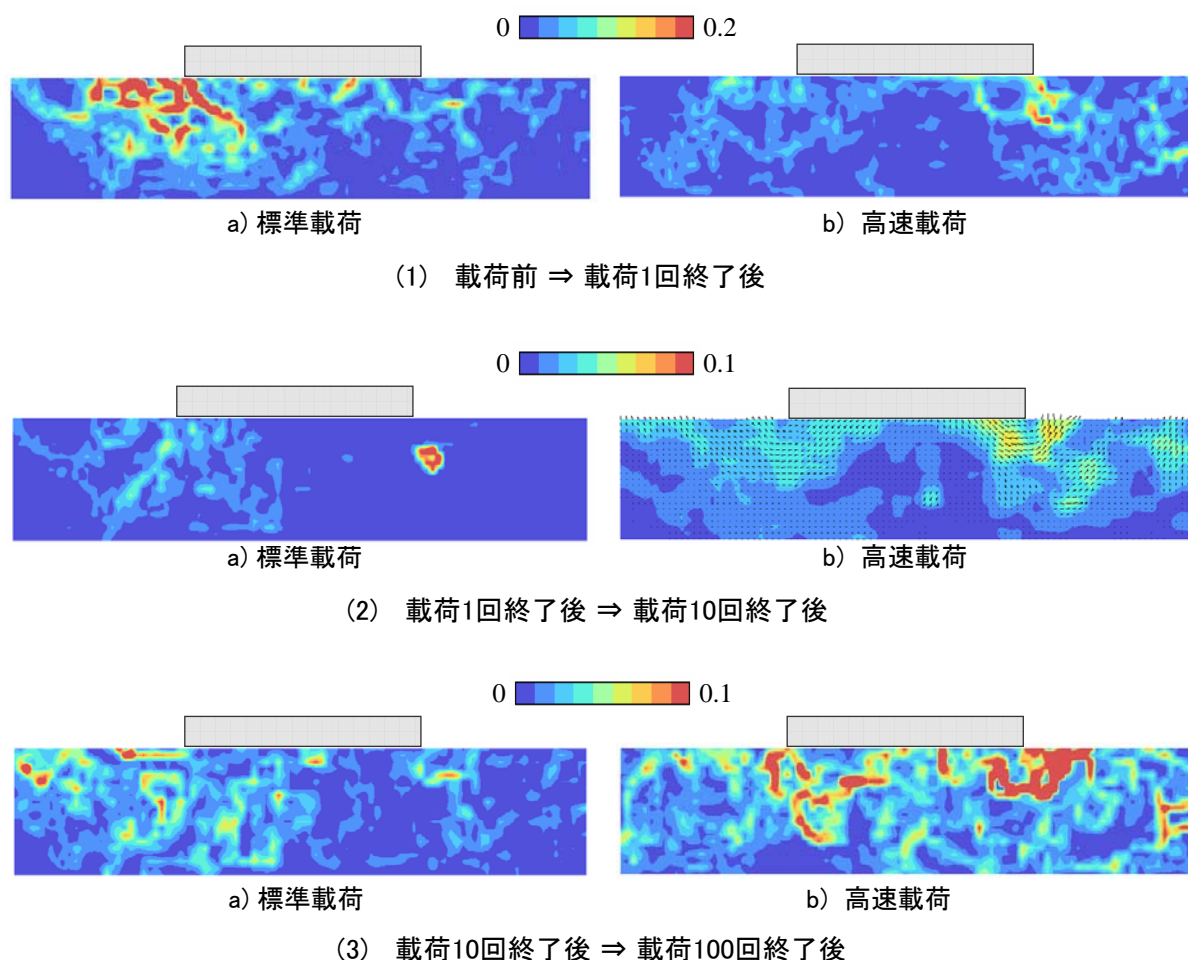


図4.20 繰返し荷重過程における最大せん断ひずみの分布

第4章 PIVによる粒子層の変形と粒子の挙動の観察

次に図4.20(2)より、荷重1回後～荷重10回後までの変形においては、標準荷重および高速荷重のいずれにおいても、荷重板外側部で最大せん断ひずみが0.05以上の領域が分布する。また標準荷重では、碎石層右側部において、局所的に大きい最大せん断ひずみが生じている。

更に図4.20(3)より、荷重10回後～荷重100回後までの変形においては、全体的に高速荷重において最大せん断ひずみが0.1を超える領域が広く分布している。

次に図4.21に示す体積ひずみにおいて、まず図4.21(1)より、荷重前から荷重1回後までの変形においては、標準荷重では荷重板外側の鋼球層表層で体積膨張（赤色部）と体積収縮（濃青色部）が混在して分布するのに対して、高速荷重では標準荷重より小さな体積ひずみが荷重板外側に分布している。次に図4.21(2)より、荷重1回後～荷重10回後までの変形においては標準荷重と高速荷重で、荷重板外側部分に体積膨張と体積収縮が混在して分布している。また標準荷重では、碎石層右側部において、局所的に大きな体積収縮と体積膨張を示す領域が隣接していることから、ここでは粒子が著しく移動したものと考えられる。更に図4.21(3)より、荷重10回後～荷重100回後までの変形においては、高速荷重において体積膨張および体積収縮が明瞭に混在している。

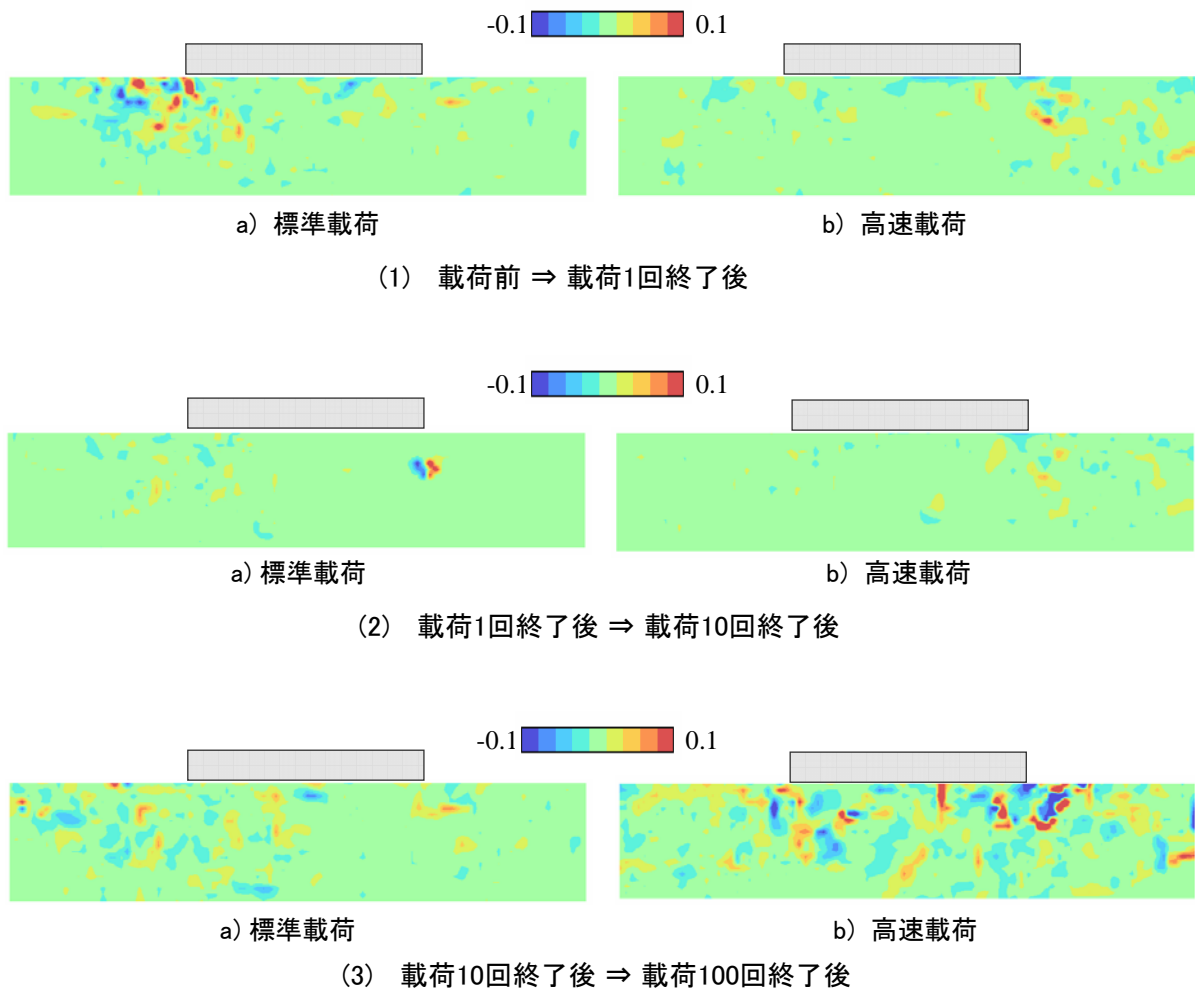


図4.21 繰返し荷重過程における体積ひずみ（2次元）の分布

以上に示した最大せん断ひずみおよび体積ひずみが大きい領域は、**図4.19**において粒子の移動が著しい領域と一致しており、鋼球層内部の変形においては、せん断変形と体積変化の両者が同程度に混在していると考えられ、どちらかだけが卓越する傾向は見られなかった。

ここで更に、最大せん断ひずみと体積ひずみの比較を行うために、**図4.20**に示す各節点における最大せん断ひずみの値を横軸に、**図4.21**に示す各節点における体積ひずみの値を縦軸にプロットした図の近似曲線を**図4.22**に示す。図中黒色点線が載荷前～載荷1回後の、灰色太線が載荷1回後～載荷10回後の、黒色太線が載荷10回後～載荷100回後の結果を示す。また左側図(1)は標準載荷、右側図(2)は高速載荷の結果である。

図より、標準載荷においては、載荷前から載荷1回後の間では横軸の最大せん断ひずみが0.36程度まで達するが、その後の載荷1回後～10回後では0.18程度に減少し、更に載荷10回後～100回後では0.15程度に減少する。

また体積ひずみは全体的にプラスの値、つまり体積膨張が卓越しているが、載荷1回後～10回後では、最大せん断ひずみが0.05～0.1の領域で体積収縮を示している。

次に高速載荷においては、載荷前から載荷1回後の間では横軸の最大せん断ひずみが0.13程度、また載荷1回後～10回後でも0.07程度で、いずれも標準載荷における値の1/3から1/2程度となっているが、載荷10回後～100回後では0.52程度まで増加し、標準載荷の4倍程度に達している。

また体積ひずみも全体的にプラスの値、つまり体積膨張が卓越している。

以上より、鋼球層の残留変位においては、いずれの載荷速度においても体積膨張の傾向が明確であるが、標準載荷では載荷回数とともに最大せん断ひずみと体積ひずみの両者が減少し、高速載荷では増加する傾向が明らかである。

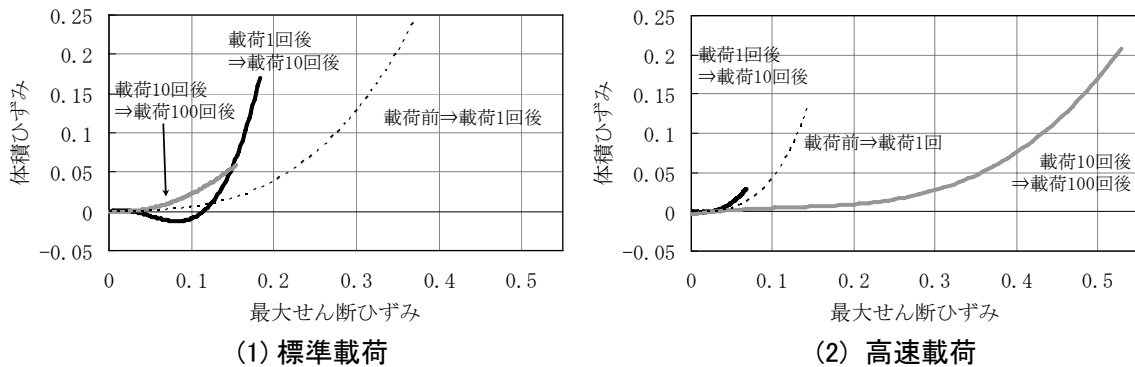


図4.22 各節点の最大せん断ひずみと体積ひずみ（2次元）

第4章 PIVによる粒子層の変形と粒子の挙動の観察

4.5.2 各載荷回における粒子の動的挙動の観察

次に各載荷回における粒子の挙動を観察するために、載荷1回目、100回目、1000回目の載荷過程・除荷過程・除荷後0.1s間の粒子の動的挙動を観察した。ここで載荷過程の挙動は、**図4.4**に示す載荷前と最大荷重時の画像より、除荷過程の挙動は同図の最大荷重時と荷重が0の瞬間の画像より、また除荷後の挙動は荷重0の瞬間とその後0.1s後（粒子の挙動がほぼ収束）の画像を用いて解析を行った。更に、同図に示す載荷前と除荷後の画像を用いて、各載荷回の粒子の残留変位分も解析した。

(1) 鋼球層内部の変位

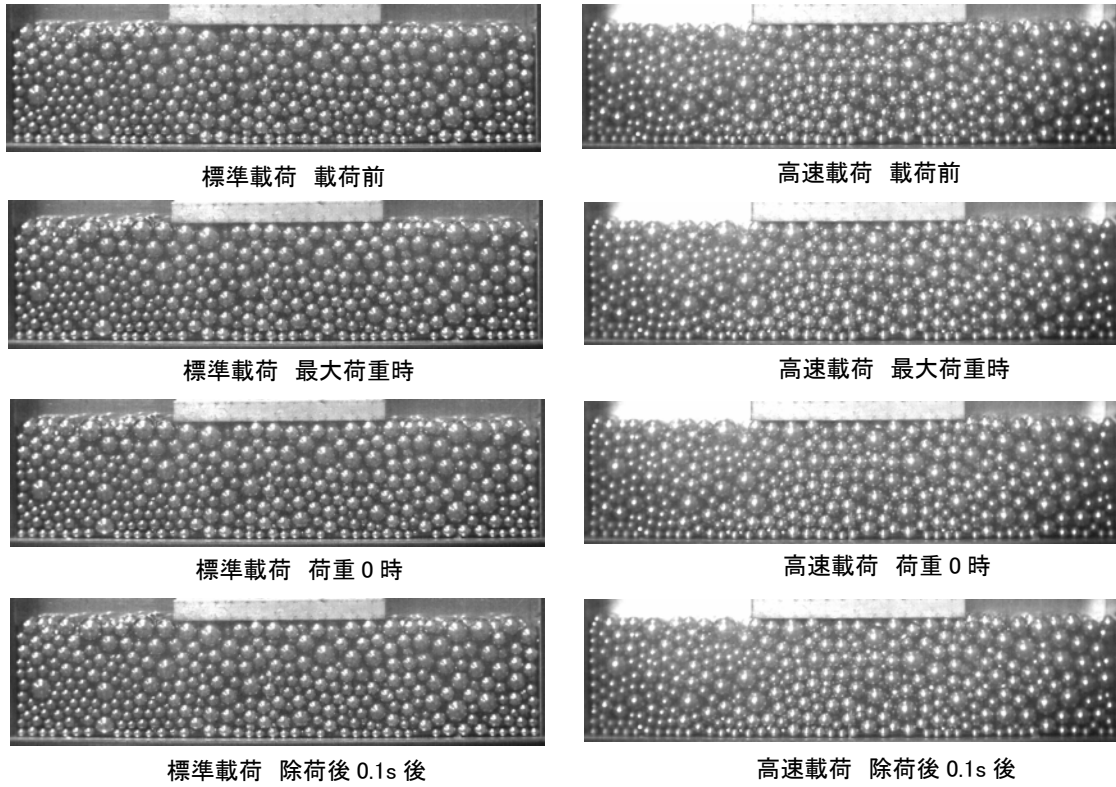
図4.23に載荷1回目の、**図4.24**に載荷100回目、**図4.25**に載荷1000回目の解析画像と解析結果を示す。各図とも(1)が解析画像、(2)が載荷過程、(3)が除荷過程、(4)が除荷後の粒子挙動の解析結果である。また各図とも(5)が載荷前と載荷後の画像から得られる残留変位分を示す。また図(1)~(5)において、右図a)は標準載荷、左図b)は高速載荷の結果である。図中、赤色部の変位は各図の右下に示したスケールの値であり、黄色→緑色→青色となるほど変位が小さくなることを示している。矢印は移動の方向と大きさを示している。

まず**図4.23(2)**より、載荷1回目の載荷過程において、標準載荷では、載荷板下から載荷板外側へ粒子が著しく移動するのに対し、高速載荷では、同様な粒子の移動が見られるものの、全体的に変位量は著しく小さい。次に**図4.23(3)**より、除荷過程においては、標準載荷では載荷板右側で若干の粒子の移動が見られるのに対し、高速載荷では鋼球層上層部で粒子の上方への移動が見られ、その移動量も標準載荷より大きい。更に**図4.23(4)**より、除荷後の粒子の挙動は、いずれの載荷速度でも小さいが、全体的に高速載荷の方が僅かに大きい値を示す領域が見られる。また載荷1回目前後の残留変位分を示す**図4.23(5)**より、標準載荷では、**図4.23(1)**に示す載荷過程の変位が、ほぼ同様に残留するのに対して、高速載荷では、載荷過程だけでなく、除荷過程の粒子の移動の成分が残留変位分に影響している。

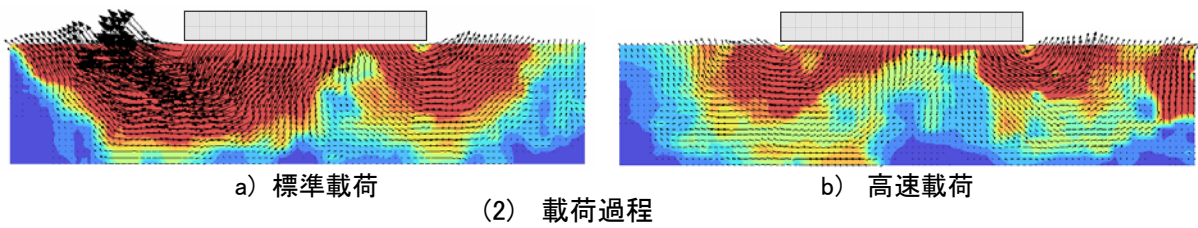
次に**図4.24(2)**より、載荷100回目の載荷過程において、標準載荷では粒子の移動が載荷1回目に比較して減少するが、高速載荷においては鋼球層全体で粒子の移動量が増加し、特に載荷板下から外側への粒子の移動が顕著であると同時に載荷板直下の下方への移動も見られる。また**図4.24(3)**の除荷過程においては、標準載荷では載荷板下部において粒子の上方への移動が見られるのに対して、高速載荷では、鋼球層全体で粒子の上方への移動が見られ、変位量も標準載荷より大きい。また**図4.24(4)**の除荷後においては、標準載荷ではほとんど粒子の移動が見られないが、高速載荷では鋼球層全体で粒子の移動が見られる。また載荷100回目前後の残留変位分を示す**図4.24(5)**より、標準載荷および高速載荷において、載荷過程の粒子の移動だけでなく、除荷過程の粒子の移動も残留変位分に影響しているのが明らかである。

また**図4.24(2)~(5)**より、載荷100回目の載荷過程、除荷過程、除荷後において、標準載荷よりも高速載荷の方が粒子の移動が大きい点、またその結果、残留変位分も大きい点で、**図4.23**の載荷1回目とは逆の傾向を示している。ただし高速載荷の載荷過程における粒子の移動において、載荷100回目の載荷板下から載荷板外側への粒子の移動は著しく減少するのに対して、載荷板下の粒子が下方へ移動する動きは継続されている。

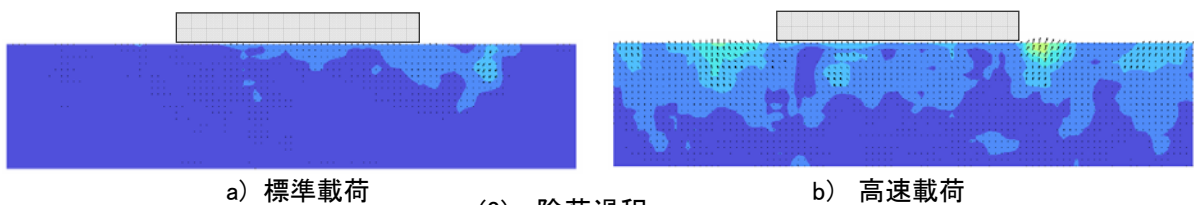
更に**図4.25(2)~(5)**より、載荷1000回目の載荷過程、除荷過程、除荷後においては、いずれの載荷速度においても粒子の移動が著しく小さくなるが、ここでも高速載荷の方が標準載荷よりも粒子の移動が大きい傾向が続いている。また粒子の移動方向は、載荷100回目と同様に、



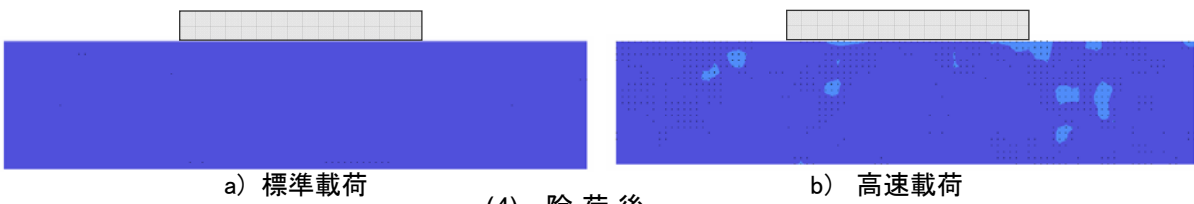
(1) 解析に用いた画像



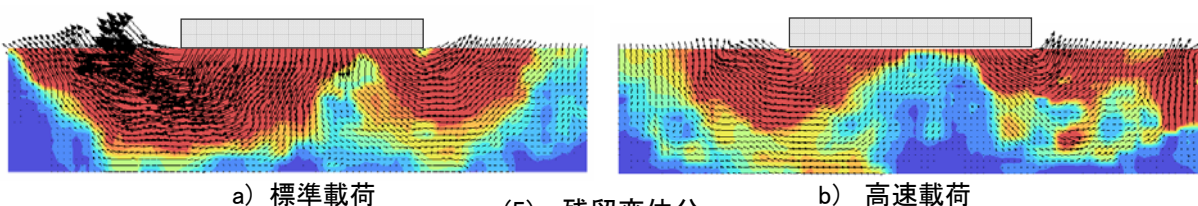
(2) 載荷過程



(3) 除荷過程



(4) 除荷後



(5) 残留変位分

c 0.5mm

図4.23 載荷1回目の粒子の挙動

第4章 PIVによる粒子層の変形と粒子の挙動の観察

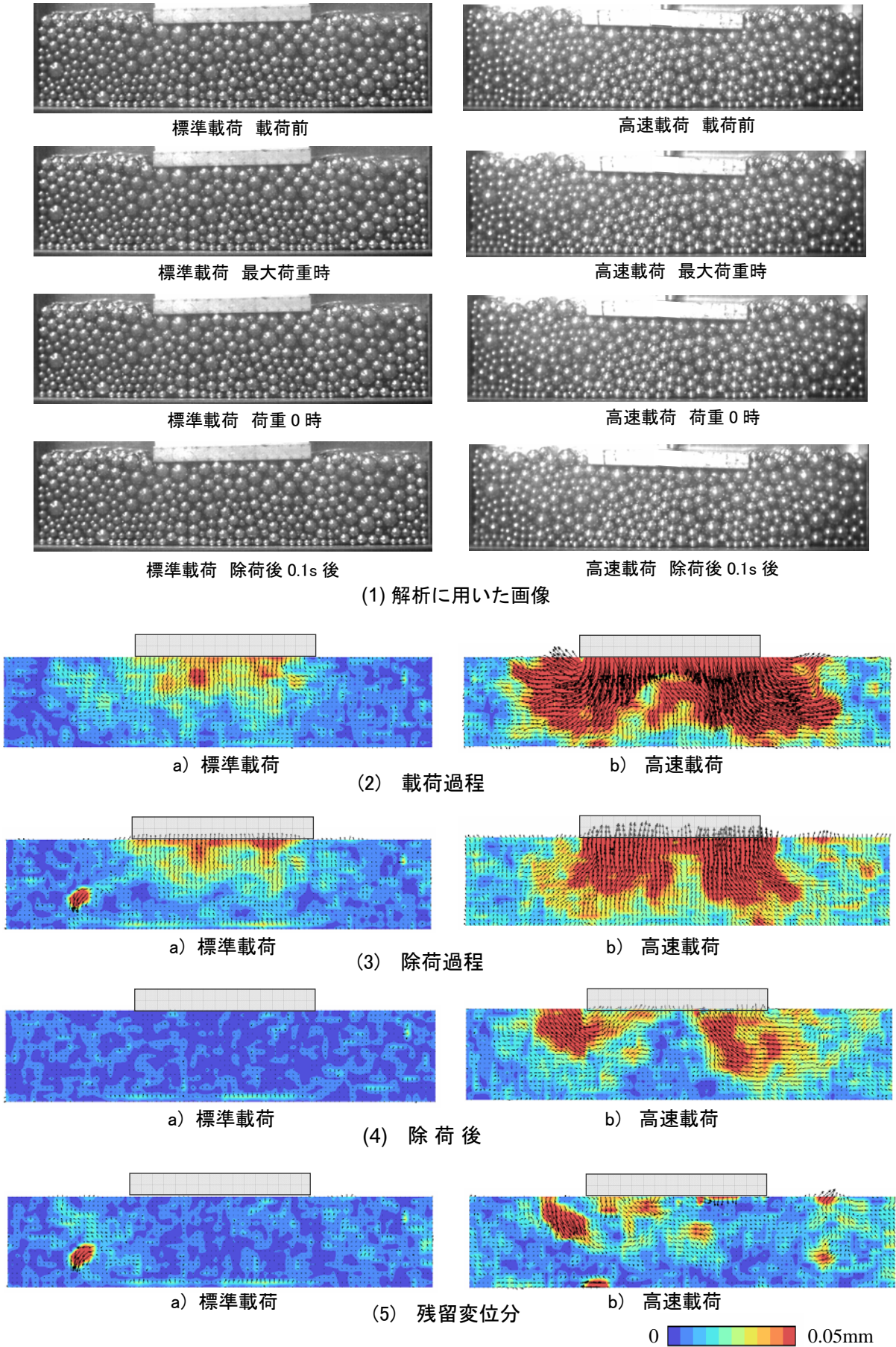
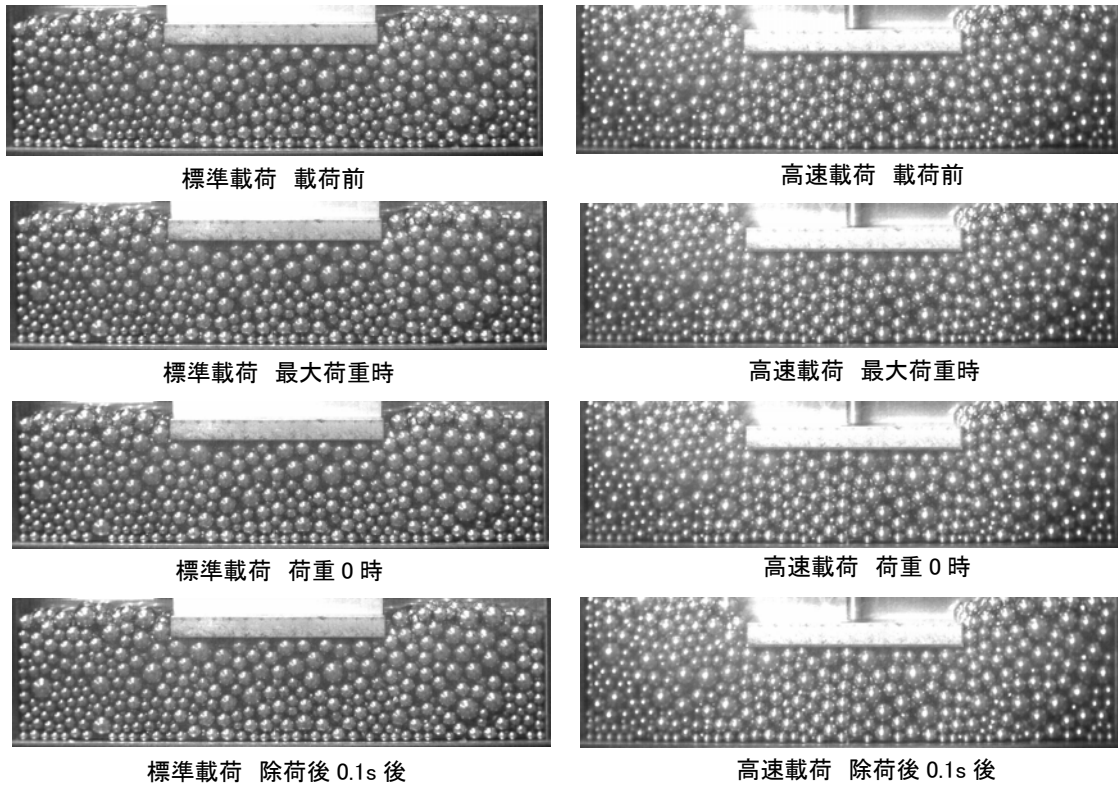
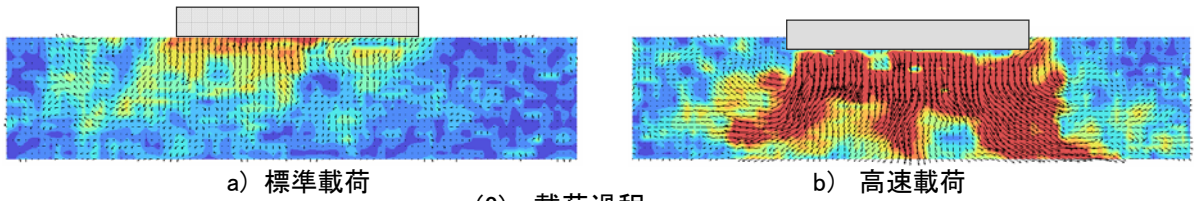


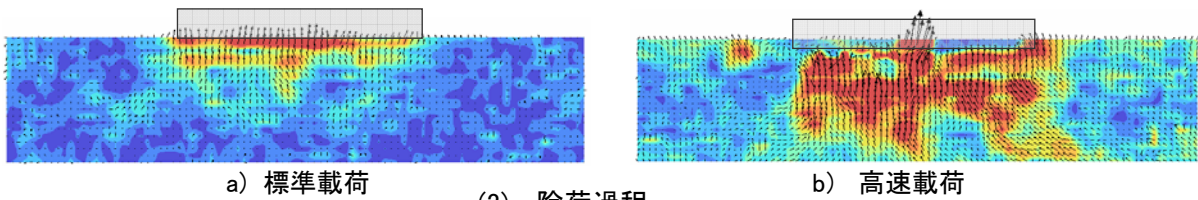
図4.24 荷重100回目の粒子の挙動



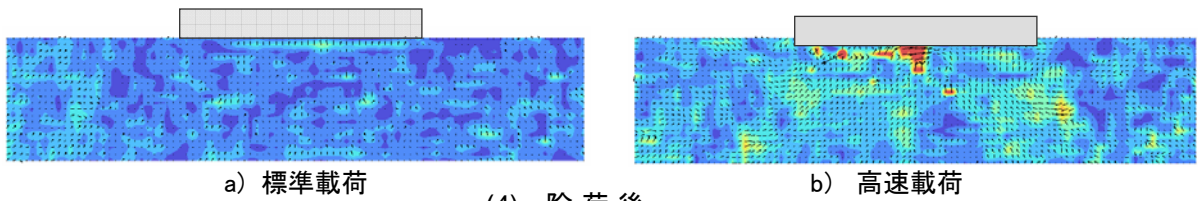
(1) 解析に用いた画像



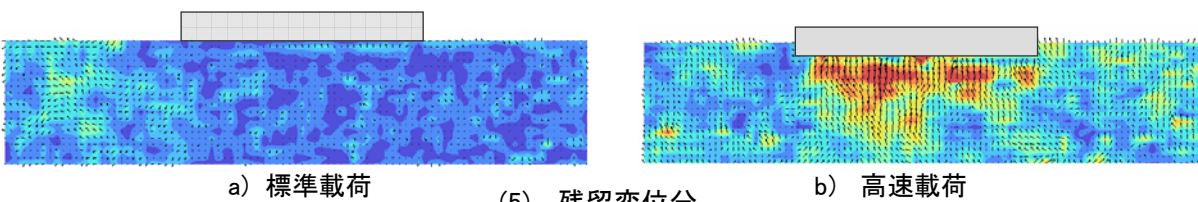
(2) 載荷過程



(3) 除荷過程



(4) 除荷後



(5) 残留変位分

0 0.05mm

図4.25 載荷1000回目の粒子の挙動

第4章 PIVによる粒子層の変形と粒子の挙動の観察

載荷板下から載荷板外側への粒子の移動は小さく、載荷板直下における粒子の下方の移動が卓越している。

以上より、各載荷回の粒子の動的挙動においては、特に高速載荷における除荷過程および除荷後の粒子の挙動が特徴的であり、更なるその動的挙動が残留変位分にも反映されていることから、高速載荷において残留変位の増加が収束しにくい理由として、各載荷回の動的挙動が長期的沈下特性にも影響を与えることが考えられる。

(2) 体積ひずみとせん断ひずみ

次に図4.23に示した載荷1回目の各節点の変位量から、各メッシュの最大せん断ひずみを算出した結果を図4.26に、体積ひずみを算出した結果を図4.27に示す。いずれも図(1)が載荷過程、図(2)が除荷過程、図(3)が除荷後、図(4)残留変位分の各ひずみを示す。

図4.26(1)より、載荷過程において、標準載荷では、載荷板左外側部および鋼球層表層部で最大せん断がひずみが0.05以上の領域（橙色～赤色部）が広く分布している。一方、高速載荷でも、載荷板右外側部で最大せん断ひずみが0.05以上の領域が見られるが、全体的に標準載荷よりは小さい。

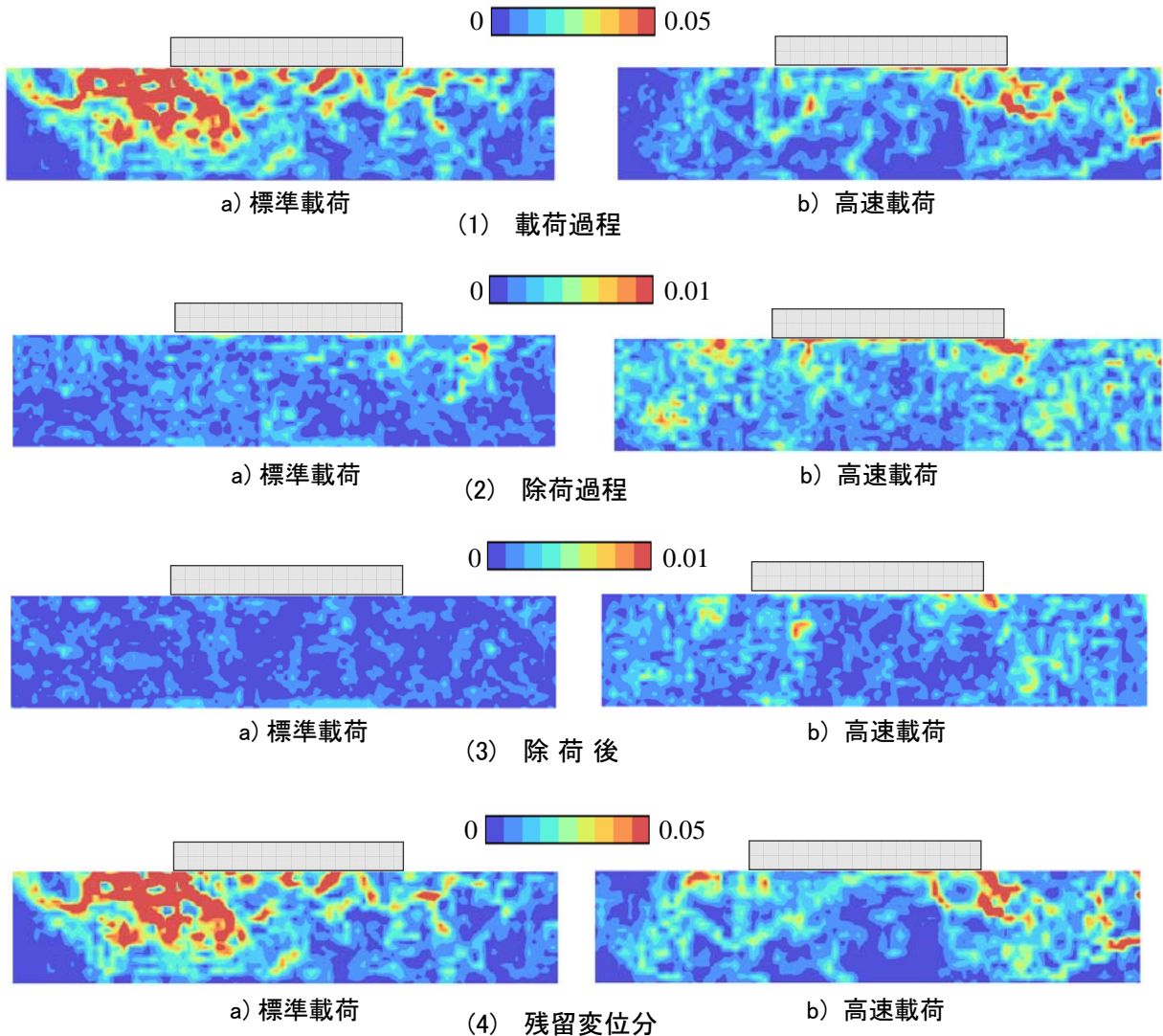


図4.26 載荷1回目における最大せん断ひずみ

次に図4.26(2)より、除荷過程では、標準载荷および高速载荷のいずれにおいても、最大せん断ひずみは全体的に小さくなるが、高速载荷の方が最大せん断ひずみが若干大きい領域が分布している。更に図4.26(3)より、除荷後においては、標準载荷および高速载荷のいずれにおいても、最大せん断ひずみは全体的に小さくなるが、高速载荷の方が最大せん断ひずみが若干大きい領域が分布している。また図4.26(4)より、载荷前後の画像の解析結果である残留変位分においては、標準载荷および高速载荷のいずれにおいても、図4.26(1)の载荷過程とほぼ同様の分布状況となっている。

次に図4.27に示す体積ひずみについては、まず図4.27(1)より、载荷過程において、標準载荷では、载荷板左外側部で体積膨張と体積収縮が0.1以上の領域が混在して分布しているが、高速载荷においては、载荷板右側部で若干の体積膨張と体積収縮が見られるものの、標準载荷に比較すると小さい値となっている。また図4.27(2)より、除荷過程においては、载荷過程とは逆に、鋼球層全体において、高速载荷の方が体積ひずみの大きい領域が広く分布している。ここでは载荷板外側だけでなく、载荷板直下部でも同程度に体積膨張と体積収縮が見られる。

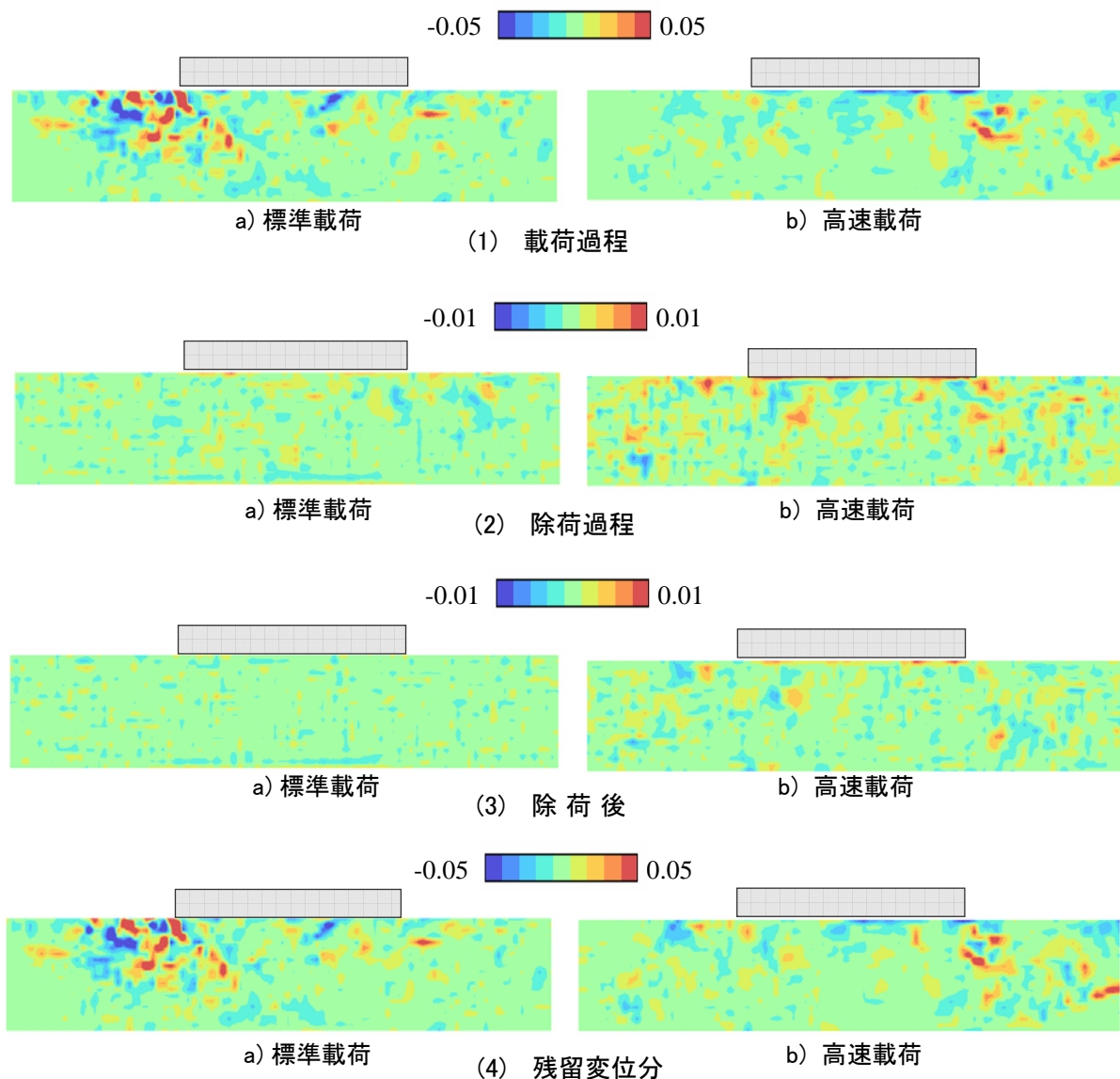


図4.27 载荷1回目における体積ひずみ（2次元）

第4章 PIVによる粒子層の変形と粒子の挙動の観察

更に図4.27(3)より、除荷後においては、除荷過程と同様に、鋼球層全体において、高速載荷の方が体積ひずみの大きい領域が見られる。また図4.27(4)より、載荷前後の画像の解析結果である残留変位分においては、標準載荷および高速載荷のいずれにおいても、図4.26(1)の載荷過程とほぼ同様の分布状況となっている。

ここで、繰返し載荷過程における最大せん断ひずみと体積ひずみの比較をするために、図4.26に示す各節点における最大せん断ひずみの値を横軸に、図4.27に示す各節点における体積ひずみの値を縦軸にプロットした図の近似曲線を図4.28に示す。図(1)は載荷1回目、図(2)は載荷10回目、図(3)は載荷100回目で、各図のスケールは近似曲線を見やすくするために変えている。また図中、緑色線が載荷過程、青色線が除荷過程、ピンク色太線が除荷後、黒色太線が残留変位分の結果の近似曲線を示す。

まず図4.28(1)より載荷1回目では、標準載荷および高速載荷のいずれにおいても、載荷過程では、最大せん断ひずみの増加に伴い体積ひずみも+側で増加する傾向を示し、また除荷過程でも同様の傾向であるが、ひずみの大きさは載荷過程より著しく小さくなるため、残留変位分は載荷過程の変形がほぼ同様の傾向として現れている。また載荷速度で比較すると、標準載荷では載荷過程の最大せん断ひずみが0.38、体積ひずみも0.25までに及ぶのに対して、高速載荷では最大せん断ひずみが0.12、体積ひずみも0.08程度で、標準載荷の約1/3と小さい。これらの傾向は図4.23に示した粒子の移動状況を反映しており、特に載荷過程で体積膨張の傾向が強いのは、図4.23に示された、粒子の載荷板下から外側への移動を反映したものと考えられる。

次に図4.28(2)より載荷10回目では、標準載荷における載荷過程では、最大せん断ひずみの増加に伴い体積ひずみは-側へ増加する傾向へと変化するが、除荷過程では載荷1回目と同様に体積ひずみは+側へ増加する傾向が継続する。ひずみの値は載荷過程では載荷1回目の約1/40と激減するが、除荷過程は載荷1回目と同程度である。一方、高速載荷では、載荷過程および除荷過程において、最大せん断ひずみに伴って体積ひずみが+側に増加する傾向が継続している。またひずみの値は、載荷過程では載荷1回目の約半分に減少しているが、除荷過程では逆に若干増加する。載荷速度で比較すると、載荷過程では高速載荷のひずみが標準載荷の約6倍、除荷過程でも約3倍となり、載荷1回目の傾向と逆転する。これらの傾向は、図4.24において、標準載荷の載荷過程では粒子の側方流動がほとんど見られなくなるのに対して、高速載荷では、この現象が継続していることを反映したものと考えられる。

次に図4.28(3)より載荷100回目では、標準載荷では載荷過程で最大せん断ひずみの増加に伴い体積ひずみは-側へ増加し、除荷過程では体積ひずみは+側へ増加する傾向で、載荷10回目と同様の傾向が継続している。またひずみの値は載荷過程および除荷過程において、載荷10回目より若干減少するが、差異は小さい。一方、高速載荷では、載荷過程で最大せん断ひずみの増加に伴い体積ひずみが-側へ増加する傾向へと変化するが、除荷過程においては最大せん断ひずみに伴って体積ひずみが+側に増加する傾向が継続している。ひずみの値は、載荷過程では載荷10回目の約1/5に、除荷過程でも半分程度に減少している。また載荷速度で比較すると、載荷過程および除荷過程において、高速載荷のひずみが標準載荷の若干大きい値を示すが、差異は載荷10回目より小さくなる。これらの傾向は、図4.24において、高速載荷の載荷過程でも、粒子の側方流動がほとんど見られなくなっていることを反映したものと考えられる。

以上より、鋼球層においては、標準載荷および高速載荷のいずれにおいても、載荷初期の載荷過程では載荷板下から外側への粒子の流動によって体積膨張が卓越し、その後、その現象が収束すると体積収縮の傾向が強くなるが、その現象の変換点は載荷速度によって異なっている。

つまり今回画像解析を行った実験では、標準載荷では載荷10回目で既に傾向が逆転するのに対して、高速載荷では載荷100回目で逆転が見られている。

更にひずみの値の減少傾向においても、標準載荷においては載荷10回目までに著しく減少するのに対して、高速載荷では10回目以降で減少している。

載荷速度の影響に関しては、載荷1回目において標準載荷における変形が高速載荷より大きいこと、またその後の載荷過程では、高速載荷の方が標準載荷より大きいという定性的傾向において、砕石層と同様の傾向が観察された。

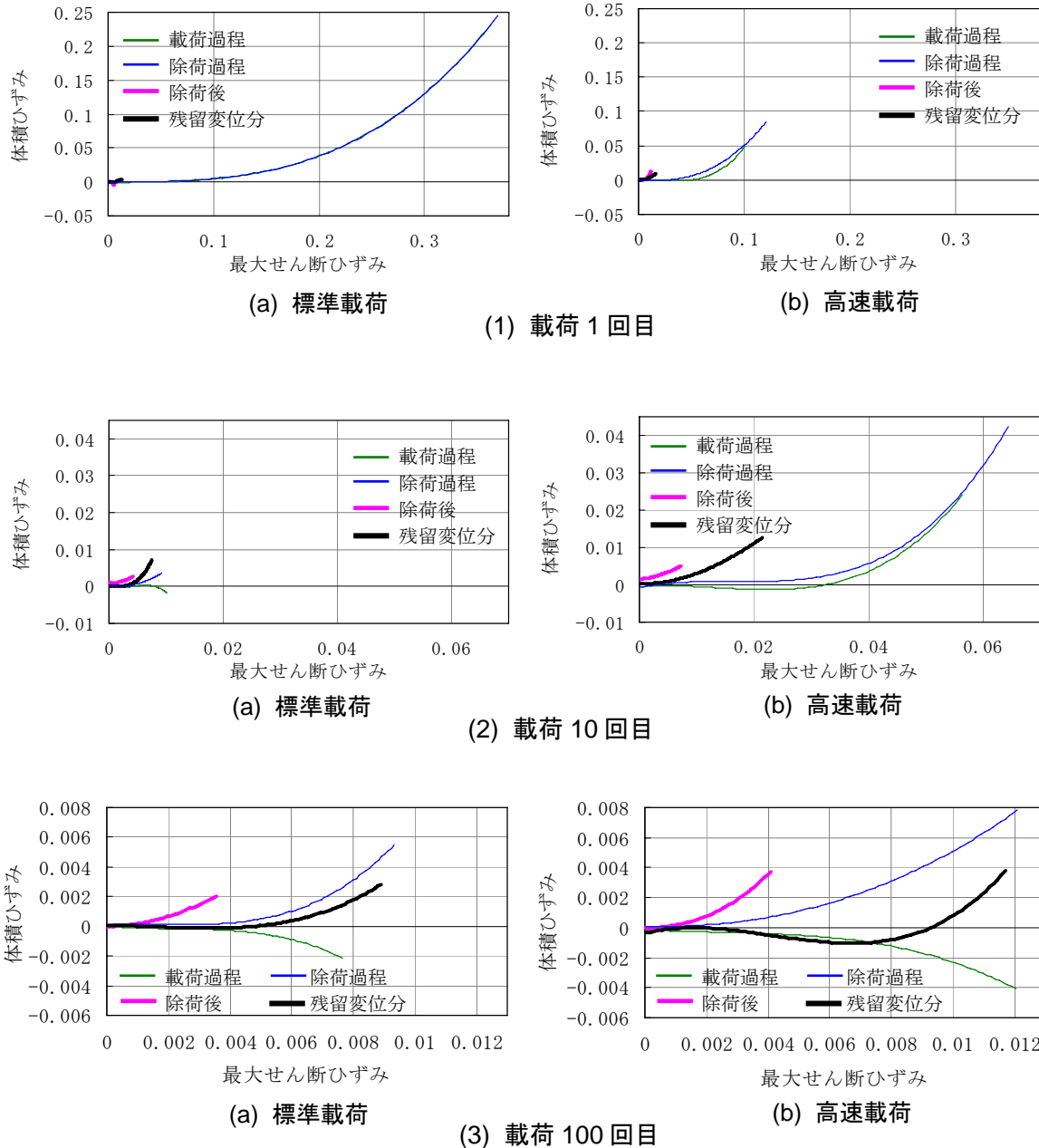


図4.28 最大せん断ひずみと体積ひずみ（2次元）の関係の変化

4.6 第4章のまとめ

PIV法を用いた繰返し荷重下の粒子層の残留変位および動的挙動の両者を観察した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 載荷1000回の繰返し載荷過程の粒子の残留変位を観察した結果より、碎石層の場合、標準載荷の初期沈下過程では粒子の下方への残留変位が顕著で、変位量も全体的に高速載荷より大きい。しかし、その後の漸進沈下過程では、粒子の残留変位は著しく減少する。一方、高速載荷の場合、初期沈下過程における粒子の下方への残留変位は標準載荷より小さいが、載荷板下から外側への粒子の残留変位が特徴的で、その現象は載荷100回を越えても顕著に見られた。

また鋼球層の残留変位においては、初期沈下過程で標準載荷における粒子の残留変位量が大きく、漸進沈下過程では高速載荷において粒子の残留変位が増加する点では、碎石粒子の場合と同様の傾向であった。しかし鋼球層において、標準載荷および高速載荷で、載荷1回目から載荷板下から外側への残留変位が卓越した点では、碎石粒子の場合と異なっていた。

- (2) 初期沈下過程および漸進沈下過程における粒子層内の粒子の動的挙動を観察した結果より、碎石層の場合、標準載荷では初期沈下過程の載荷過程で粒子が下方へ著しく移動すると、そのほとんどが残留変位となり、漸進沈下過程では粒子の移動は著しく減少した。一方、高速載荷の場合、初期沈下過程から除荷過程における粒子の上方への移動が顕著で、これに伴い除荷後にも粒子が下方へ落下するような挙動が見られ、この現象は漸進沈下過程でも継続される。

また鋼球層の動的挙動においては、初期沈下過程で標準載荷における粒子の移動量が大きく、また高速載荷において除荷過程の粒子の挙動が著しい点で、碎石粒子の場合と同様の傾向であった。しかし、標準載荷における初期沈下過程の載荷過程では、粒子の移動は著しいものの、碎石層で見られた下方への移動よりも、載荷板外側への移動の方が卓越していた。

- (3) 画像解析結果から最大せん断ひずみと体積ひずみを算出し、その関係を比較した結果、碎石層の場合、標準載荷および高速載荷のいずれにおいても、載荷過程では体積収縮、除荷過程では体積膨張を示した。また載荷前後の残留変位分については、標準載荷における初期沈下過程においてのみ体積収縮の傾向となったが、標準載荷の漸進沈下過程および高速載荷では載荷初期から、体積膨張の傾向が強かった。

一方、鋼球層の場合、標準載荷および高速載荷のいずれでも、載荷過程と除荷過程の両方で体積膨張の傾向が見られた点で、碎石粒子の場合と異なっている。また、標準載荷では載荷10回目以降、高速載荷では載荷100回目以降の載荷過程で体積収縮の傾向へと変化するが、この点も碎石粒子の場合と反対の傾向となっている。

以上より、いずれの粒子層も、繰返し載荷過程において粒子の動的挙動の特徴が変化するが、その傾向は碎石層と鋼球層では異なる。この理由としては、鋼球層は粒子形状が球形である上に表面摩擦係数も小さいため、供試体構築時の間隙が碎石層に比較して密であり、初期沈下過

程の体積収縮が少ないと考えられること、また碎石粒子同士のような噛み合わせがないために、
載荷による流動が起きやすいことが考えられる。更に、鋼球層の実験条件において、鋼球層の
支持力に対して荷重振幅が大き過ぎたともいえる。

ただし、碎石層も鋼球層も、高速載荷下において残留沈下量が促進される傾向は共通してお
り、本章の粒子挙動の観察より、高速載荷における「除荷過程の粒子が上方へ飛ぶような挙
動」と、その挙動による「粒子層の体積膨張」が影響していることが示唆された。

ところで道床バラスト層に関しては、『初期沈下過程ではバラスト粒子の間隙が詰まる現象
が卓越し、漸進沈下過程ではバラスト粒子の側方流動が卓越する』と言う説があるが、本実験
における碎石層でも、同様な現象が監察された。よって、衝撃荷重を受ける道床バラスト層に
おいても、碎石層と同様に「体積膨張を伴うバラストの側方流動が継続的に発生している可能
性」が考えられる。

本章で明らかとなった粒子層内部の粒子の挙動の特徴に関しては、更に、そのメカニズムを
知る上で粒子間の接触状況等を把握する必要があるが、実験結果からはその情報は得られない。

よって次章では、個別要素法による実験の再現シミュレーションを行い、実験では得られな
い情報を得ることで、更に載荷速度の影響について詳細を検討する。

第4章の参考文献

- 1) 可視化情報学会：PIVと画像解析技術，朝倉書店，2004
- 2) D.J.White, W.A.Take, M.D.Bolton：Soil Deformation measurement using PIV and photogrammetry, Geo-
technique, vol.53, No.7, pp619-631, 2003
- 3) 竿本 英貴 「粒子-流体系に対する可視化実験と数値解析」，筑波大学博士論文

第5章

DEMによる実験の
再現シミュレーション

5.1 鋼球層モデルのシミュレーション概要

繰返し載荷試験をDEMシミュレーションによって再現するとき、載荷回数を極力実験に近づけることが課題となる。しかし現実的には、実験のような何千～何万回の載荷回数をDEMシミュレーションで稼ぐのは、計算時間の上で難しい。

ただし鋼球要素の場合は、球集合体の砕石要素を用いるシミュレーションと比較すると格段に計算速度が早くなるため、ここではまず鋼球層の実験の再現シミュレーションを行うこととする。

ここで比較する実験は、3章で述べた、鋼球層におけるケースK1とする。またシミュレーションには、1章で述べた'DEM3D-CS'^{1,2)}を用いる。

5.1.1 シミュレーションモデル

図5.1に供試体モデルの概要、図5.2に鋼球要素の粒径分布を示す。供試体のサイズおよび鋼球の粒径分布は、いずれも実験と同様とした。また、土槽、載荷板、加力棒は図5.3に示すように、実際は板または円柱であるが、球集合体としてモデル化した。

ここで土層要素は、実際は平滑な鋼板を球集合体でモデル化しているために、図5.3に示すような微小な凹凸が存在する。これはシミュレーションと実験結果を比較する上で影響を及ぼすことが予想されるが、球集合体要素の構成球の数を増やす事は、計算効率の悪化にもつながる。よって本研究では、土槽要素のモデル化において、この凹凸の溝が鋼球要素の最小粒径の半径の1/3以下となるように調整した(図5.4参照)。

供試体作成においては、粒度調整を行った鋼球要素を自由落下させた後、供試体の幅と奥行が同じ板要素によって繰返し載荷を行ない、締固めた。最終的な鋼球要素数は1120個である。

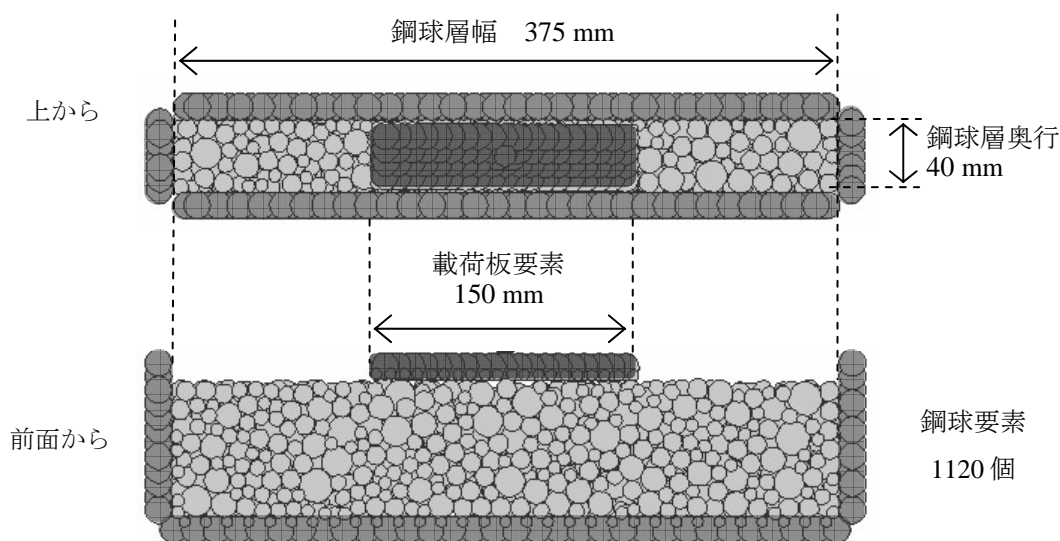


図5.1 供試体の概要

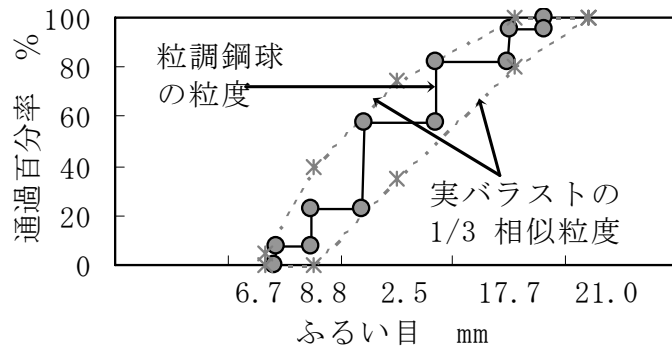


図5.2 鋼球要素の粒径分布

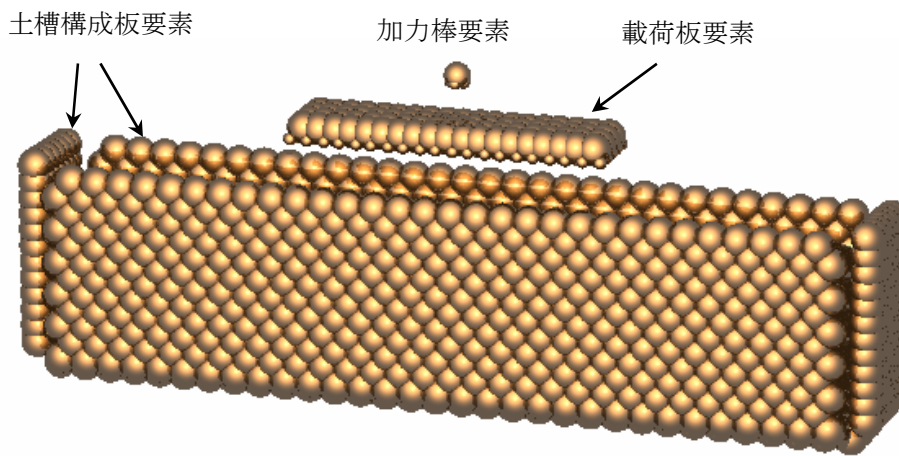


図5.3 土槽・載荷板・加力棒 各要素

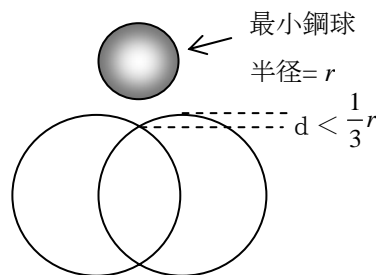


図5.4 球集合体板要素の調整

5.1.2 DEMパラメータの設定

(1) 粒子間ばね係数

鋼球要素の粒子間ばね係数については、式(5.1)に示すヘルツの理論³⁾が知られている。これにより、式(5.1)中の P で示される法線方向粒子間接触力の変化に応じて、逐次計算し直す事例もあるが⁴⁾、本研究では簡単のため、鋼球層の初期状態における法線方向粒子間接触力の平均値を P とし、一定値とする。

また接線方向の粒子間ばね係数 K_s は、式(5.2)⁴⁾によって求めた。

$$K_n = \sqrt[3]{\frac{2}{9} \left(\frac{E}{1-\nu^2} \right)^2 r P} \quad \dots (5.1)$$

$$K_s = \frac{G}{E} K_n = \frac{K_n}{2(1+\nu)} \quad \dots (5.2)$$

ここで式(5.1), (5.2)ともに, E は材料のヤング率, ν はポアソン比である. 式(5.1)の r は要素の半径, P は接触点における法線方向の荷重である.

鋼球層モデルにおいては, E には鋼材のヤング率 2×10^{11} Pa, ν には鋼材のポアソン比0.28, r には鋼球要素の平均粒径11mmから5.5mmを代入した. また P については上述の通り, 鋼球層の初期状態の法線方向粒子間接触力の平均値が約0.1Nであったので, この値を代入した. その結果, K_n は 1.83×10^6 N/m, K_s は 7.14×10^6 N/mとなるが, ここでは簡単のため, $K_n = 2.00 \times 10^6$ N/m, $K_s = 7.81 \times 10^6$ N/mとした.

(2) 減衰係数

粒子間の減衰係数は, ばね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, ばね係数 k とダンパの減衰係数 c の関係は式(5.3)の通りとなることから, 式(5.3)に想定する反発係数を代入して求めた.

$$e_b = \exp\left(-\frac{h\pi}{\sqrt{1-h^2}}\right), \quad h = \frac{c}{2\sqrt{k \cdot m}} \quad \dots (5.3)$$

ここで e_b は反発係数, k は粒子間ばね係数, c は粒子間ダンパの減衰係数, m は粒子の質量である. 今回実験で用いた鋼球を用いて簡易な衝突実験を行なったところ, 反発係数は0.4~0.6の間でバラついた. そこでここでは, 鋼球要素の反発係数として, 0.4, 0.6, また比較のために0.8を想定して減衰係数を求めた. 以下, 反発係数0.4から減衰係数を算出したケースを『減衰大』, 反発係数0.6から算出したケースを『減衰中』, 反発係数0.8から算出したケースを『減衰小』と記述する. 設定したこれらのDEMパラメータを表5.1に示す.

また, 計算時間ステップ Δt は 5.0×10^{-6} sとした.

表5.1 DEMパラメータ

粒子間バネ係数 (N/m)		粒子間減衰係数 (N·s/m)		
法線方向 K_n	接線方向 K_s	法線方向 C_n	接線方向 C_s	反発係数
2.0×10^6	7.81×10^5	58.4	36.5	0.4
		33.5	20.9	0.6
		14.8	9.25	0.8

第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション

5.1.3 単調載荷シミュレーションによる鋼球要素の摩擦係数と減衰係数の検討

鋼球の摩擦係数としては、 $0.1^5)$ や $0.3^4)$ とされている例があるが、本実験で用いたベアリング球は表面が研磨処理されていることから、表面摩擦係数がかなり小さいものと考えられる。そこで、鋼球要素の摩擦係数を0.0, 0.1, 0.3の3通りとして単調載荷シミュレーションを行い、実験結果と比較した。ここで土層要素の摩擦係数は、鋼球要素の摩擦係数と共通の値とした。また載荷速度は、実験と同様に 1mm/s とした。

図5.5に単調載荷シミュレーション結果より載荷板変位と荷重の関係を実験結果とともに示す。

図5.5(1)に示す実験結果例では、載荷板変位 1mm で荷重が 100N 程度まで増加した後、載荷板変位 6mm までは $100\sim 140\text{N}$ の間で緩やかに変化し、その後 200N 程度まで荷重が出ている。

これに対して図5.5(2)に示す3通りの摩擦係数によるシミュレーション結果では、図5.5(2)(a)に示す摩擦係数0.3と0.1の場合では、摩擦係数0.3においては載荷板変位 2mm で 2000N までに荷重が増加し、その後、激しく増減を繰り返しながら、7秒後には 3000N を超えている。実験結果と比較すると、約15倍の荷重が出ていることから、実験の再現シミュレーションに用いる摩擦係数としては大き過ぎるといえる。一方、図5.5(2)(b)に示す摩擦係数0.1と0.0の場合では、前者では載荷板変位 1mm で荷重が 200N 程度まで増加した後、増減を繰り返しながら、載荷板変位 7mm には 300N 程度に達している。また後者の摩擦係数0.0の場合では、荷重は著しく小さくなり、摩擦係数0.1の場合の約 $1/10$ 程度で、最大荷重も 40N 程度に留まる。

ここで、図5.5(1)に示す実験結果例における鋼球層と、今回のシミュレーションにおける鋼球層モデルの鋼球の配置は、厳密には全く異なっていることから、実験結果と合致させて良いとはいえない。ただし、荷重のオーダとしては、摩擦係数0.1の場合のシミュレーション結果が、実験結果例と同程度となっていることから、本研究においては、鋼球要素および土槽要素の摩擦係数は0.1を用いることとする。

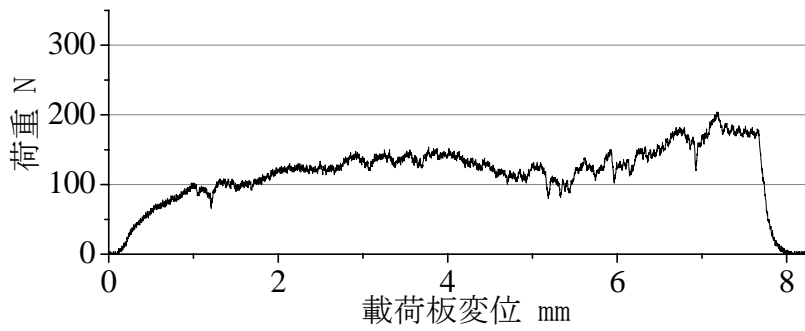
次に図5.5(3)に、摩擦係数は0.1とし、3通りの減衰係数（反発係数0.4, 0.6, 0.8より算出）を用いて行ったシミュレーション結果を示す。ここでの単調載荷速度は 1mm/s であるが、減衰係数が異なると、載荷板変位 1mm 以降では荷重の増減がそれぞれ異なっている。ただし、ここでの減衰係数は供試体を構成する 1120 個の粒子間の減衰係数であるため、粒子層としての変形の傾向に対しては、粒子間減衰係数との規則的な相関性は見られない。

ここで、図5.5(2)のシミュレーション結果は、図5.5(1)の実験結果に比較して、荷重の増減が激しく、特に摩擦係数が大きいほど顕著になる。この要因としては、土槽要素および載荷板要素が球集合体であるため、その表面の凹凸が影響していることが考えられる。よって、これ以降のシミュレーション結果の検証においても留意する必要がある。

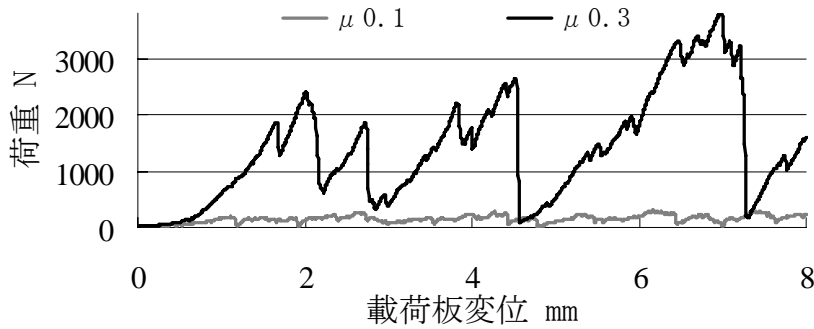
5.1.4 繰返し載荷条件

本シミュレーションにおいて繰返し載荷条件は、繰返し載荷実験のK1ケースと同様に、荷重振幅は 200N 、載荷速度（加力棒の上下速度）は標準載荷で 5mm/s 、高速載荷で 50mm/s とした。

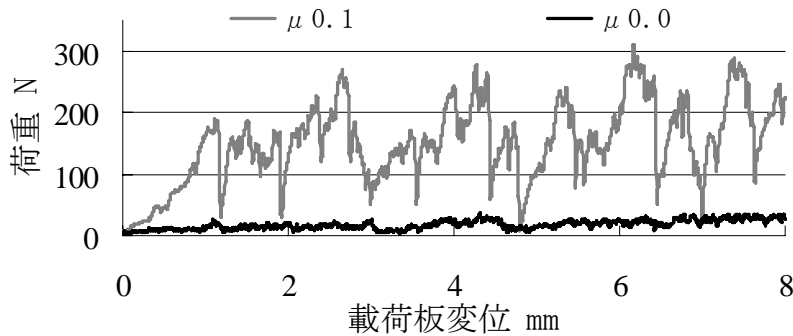
また載荷間隔は、実験では標準載荷も高速載荷も同様に 0.5s 間隔としたが、シミュレーションにおいては計算時間の節約のために、標準載荷では載荷初期は 0.3s 、その後は 0.2 秒とし、高速載荷では約 0.1 秒とした。



(1) 実験結果例

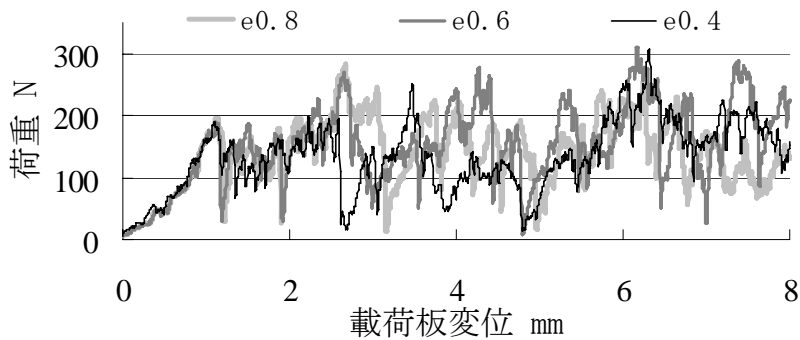


(a) $\mu=0.1$ と $\mu=0.3$ の比



(b) $\mu=0.0$ と $\mu=0.1$ の比

(2) 摩擦係数を変えたシミュレーション結果



(3) 減衰係数を変えたシミュレーション結果

図5.5 単調载荷実験とシミュレーションの比較

5.2 鋼球層モデルのシミュレーション結果

5.2.1 シミュレーション波形例

シミュレーション結果より、**図5.6.1**に载荷1～10回目の、**図5.6.2**に载荷70～80回目の载荷荷重の荷重波形と载荷板の変位波形を示す。いずれも**図(1)**が減衰係数大(反発係数0.4)、**図(2)**が減衰係数中(反発係数0.6)、**図(3)**が減衰係数小(反発係数0.8)の場合のシミュレーション結果を示す。更に各図とも、左上の**図a)**は標準载荷における荷重波形、左下の**図b)**が同じく変位波形、右上の**図c)**は高速载荷における荷重波形、右下の**図d)**が同じく変位波形を示す。ここで**図(c)**においては、载荷荷重波形1波を拡大するために3波または4波のみ示している。

図5.6.1より、まず**図5.6.1(1)**の減衰係数大の場合において、**図5.6.1(1)a)**の標準载荷の荷重波形は、载荷1回目のみ荷重作用時間が約0.6sと長く、また载荷途中で急激に荷重が激減しているが、载荷2回目以降は荷重作用時間0.13秒前後でほぼ一定の波形を示す。これに伴い**図5.6.1(1)b)**の変位波形でも、载荷1回目の最大荷重時に約2.35mmの変位のピークを示した後、除荷後に約2.1mmが残留沈下量として残るが、载荷2回目以降では、変位振幅は0.2～0.3mmでほぼ一定となり、沈下進みも载荷1回目に比較して著しく減少する。

一方、**図5.6.1(1)c)**の高速载荷の荷重波形は、载荷1回目のみ荷重作用時間が0.03s程度と若干長い、载荷2回目以降は荷重作用時間0.013秒前後でほぼ一定となる。これに伴い**図5.6.1(1)d)**の変位波形でも、载荷1回目の最大荷重時に約1.2mmの変位のピークを示した後、一度0.1mmほど変位が減少するが、再度変位はピークと同程度に戻る。この「高速载荷の除荷時に一度変位が減少して戻る波形」は载荷1～2回目で顕著であるが、载荷3回目以降徐々に見られなくなる。

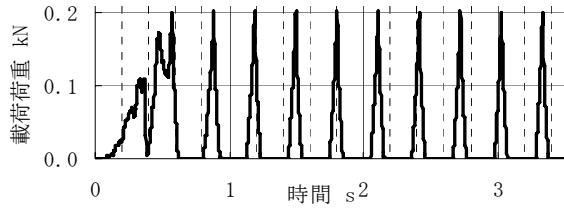
これらの傾向は、減衰係数の異なる**図5.6.1(2)**、**図5.6.1(3)**でもほとんど変わらず、载荷1～10回目の段階では、減衰係数の影響は、標準载荷および高速载荷で、ほとんど現れないといえる。

ここで、上述の「標準载荷および高速载荷において、载荷1回目のみ荷重作用時間が長く、その後は、ほぼ一定となる」傾向は、3章の実験結果でも同様に見られた傾向である。また、高速载荷の変位波形(各**図d)**)で見られた「载荷1～2回目において、最大荷重時の変位のピークが除荷時に一度減少した後、再度戻る」傾向も、3章の実験結果で同様に見られている。

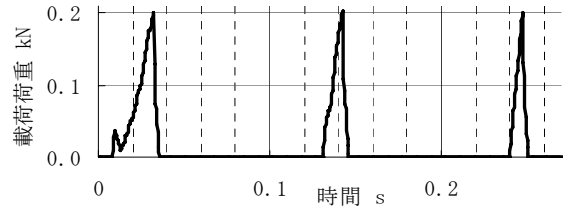
これより、繰返し荷重下の鋼球層の载荷初期の変形挙動に関しては、DEMシミュレーションによって実験の再現がほぼ可能といえる。

次に载荷70～80回目の波形を示した**図5.6.2**より、減衰係数大の場合の**図5.6.2(1)**では、**図5.6.2(1)a)c)**に示す標準载荷および高速载荷の荷重波形において、荷重作用時間はほぼ一定の状態が継続している。また**図5.6.2(1)b)d)**の変位波形でも、変位振幅は標準载荷および高速载荷で約0.8～0.9mmで一定の状態が継続し、また沈下進みも**図5.6.1**の载荷初期に比較して著しく減少している。

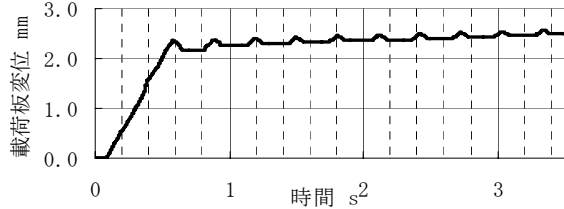
一方、減衰係数中の場合の**図5.6.2(2)**では、**図5.6.2(2)a)c)**の標準载荷および高速载荷の荷重波形において、荷重作用時間ほぼ一定の状態が継続しているが、**図5.6.2(2)b)d)**の変位波形では、標準载荷では変位振幅および沈下進みがほぼ一定であるのに対し、高速载荷では変位振幅および沈下進みの両者において増加傾向が見られる。特に载荷73回目(時刻6.88s時)の変位振幅は約1.7mmで、载荷71回目の変位振幅の2倍近くになり、これに伴い、沈下進みも载荷71回目の3倍程度となっている。



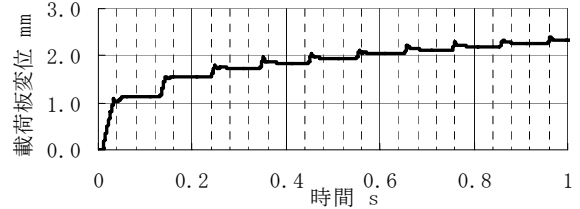
a) 標準載荷 荷重



c) 高速載荷 荷重

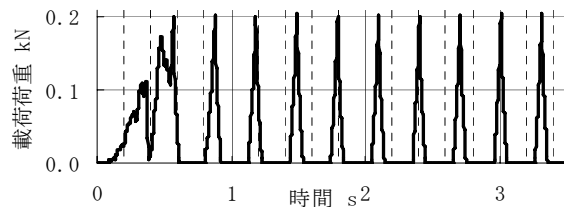


b) 標準載荷 変位

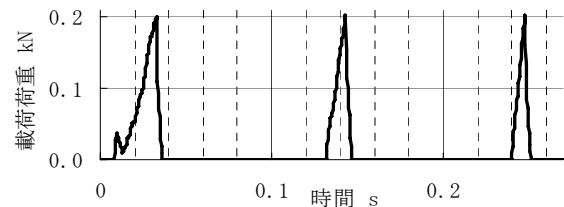


d) 高速載荷 変位

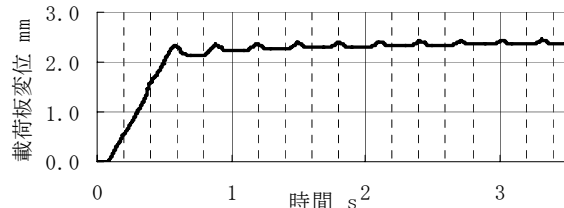
(1) 減衰係数大 $e=0.4$



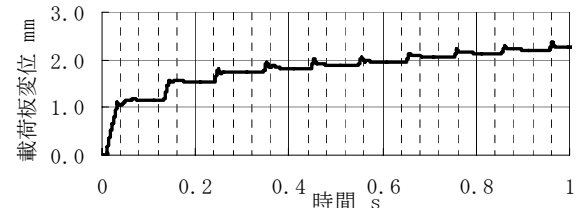
a) 標準載荷 荷重



c) 高速載荷 荷重

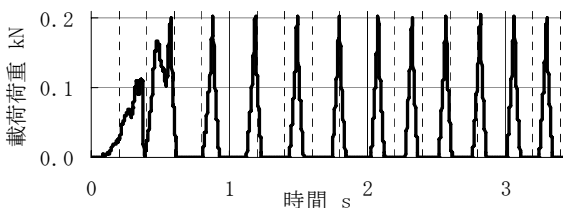


b) 標準載荷 変位

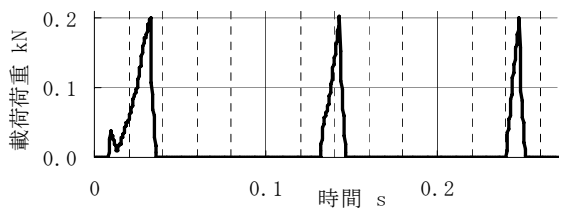


d) 高速載荷 変位

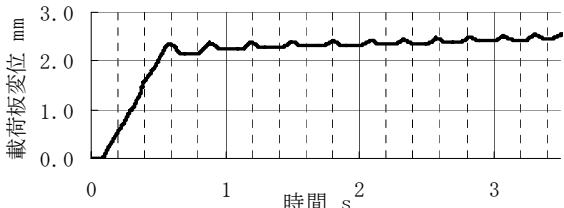
(2) 減衰係数中 $e=0.6$



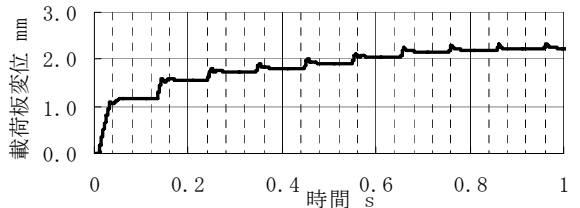
a) 標準載荷 荷重



c) 高速載荷 荷重



b) 標準載荷 変位



d) 高速載荷 変位

(3) 減衰係数小 $e=0.8$

図5.6.1 載荷1~10回目のシミュレーション結果

第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション

次に減衰係数小の場合の図5.6.2(3)では、減衰係数大の図5.6.2(1)と、定性的にも定量的にも同様の波形を示している。ただし、図5.6.2(3b)に示す標準載荷の載荷板変位波形では、沈下進みが減衰係数大および中の波形に比較して大きくなっている。

ここで、図5.6.2に示す載荷70～80回の段階で減衰係数中においてのみ見られた「高速載荷において変位が増加する」傾向に関して、3章の実験結果でも「漸進沈下過程では、高速載荷において沈下進みが大きい」傾向が見られている。ただし図5.6.2に示す載荷70～80回の段階では、減衰係数中の場合にしかこの現象が表れていないが、減衰大および減衰小では載荷100回以降に表れる（後述）ことから、減衰係数が鋼球要素個々の挙動には影響を及ぼすといえる。

また、図5.6.1および図5.6.2の両図において見られた共通の傾向としては、載荷2回目以降の荷重波形において、荷重作用時間が標準載荷で0.13秒前後、高速載荷で0.013秒前後となり、実験における1波の荷重作用時間の6～7割程度となっている。シミュレーションにおいては、標準載荷および高速載荷の載荷速度と荷重振幅を実験と同様にしていることから、シミュレーションモデルでは、実験供試体よりも速く設定荷重に達していることとなる。

この要因としては、①実験で用いた載荷板はアルミ板であり、厚さが15mmあるものの、載荷時に若干の弾性変形（たわみ）が生じている可能性があるのに対し、シミュレーションでは載荷板は完全に剛体モデルであること、②シミュレーションにおける土槽要素は球集合体であるため、若干ではあるが凹凸があり、実験では土槽壁面部で流動していた鋼球が、シミュレーションでは凹凸にはまって動きにくくなる可能性があること、③実験装置の加力棒はモーターから繋げられた鋼棒であるため、載荷時にここでも若干の弾性変形が生じている可能性があること、が考えられる。

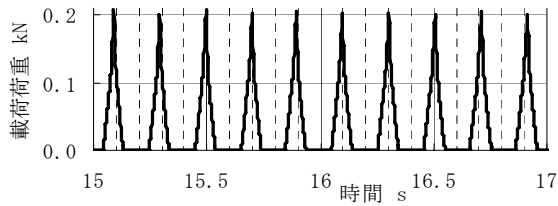
5.2.2 残留沈下量と載荷回数との関係

図5.7.1に、シミュレーション結果より、繰返し載荷200回における残留沈下量と載荷回数との関係を示す。図5.7.1(1)は3通りの減衰係数ごとに載荷速度の比較をした図で、図5.7.1(1)(a)が減衰係数大、図5.7.1(1)(b)は減衰係数中、図5.7.1(1)(c)は減衰係数小の条件における結果である。また図5.7.1(2)は図5.7.1(1)と同じ結果を2通りの載荷速度ごとに減衰係数の比較をした図で、図5.7.1(2)(a)が標準載荷、図5.7.1(2)(b)が高速載荷である。また図5.7.2は鋼球層における載荷100回の実験結果で、標準載荷および高速載荷の実験5回分の結果を示す。

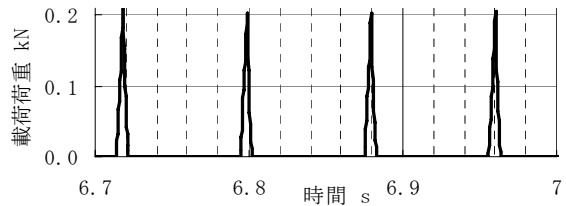
図5.7.1のいずれの沈下曲線も、まず‘初期沈下’が発生し、その後、漸進的沈下過程を示す沈下特性が共通して表れている。

図5.7.1(1)(a)-(c)より、いずれの減衰係数条件においても、標準載荷（灰色太線）では載荷1回目に約2.2mmの著しい残留沈下が生じた後、沈下進みは急激に減少し、載荷2回目以降の199回の繰返し載荷過程での沈下進みが約2mmであり、載荷1回目の残留沈下量とほぼ同程度となっている。ただし図(a)に示す減衰係数大の場合では、載荷140回前後で急激な沈下進みが一時的に見られるが、その後、沈下進みは再び収束する。

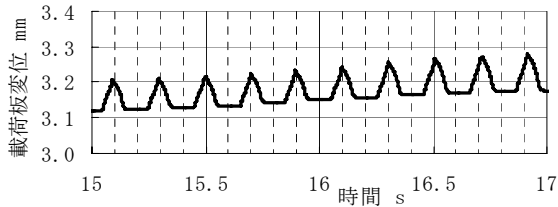
一方、高速載荷では、いずれの減衰係数条件においても、載荷10回目程度までは標準載荷より緩やかに残留沈下が増加した後、沈下進みは徐々に減少し、沈下曲線の傾きは標準載荷とほぼ同程度となる。しかし図(a)に示す減衰係数大の場合では載荷140回前後および170回以降で、また図(b)に示す減衰係数中の場合では載荷80～110回の間で、更に図(c)に示す減衰係数小の場合では載荷160回以降で沈下進みが突然増加している。



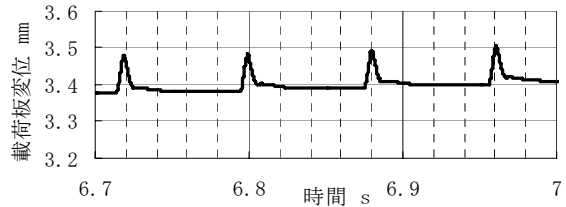
a) 標準載荷 荷重



c) 高速載荷 荷重

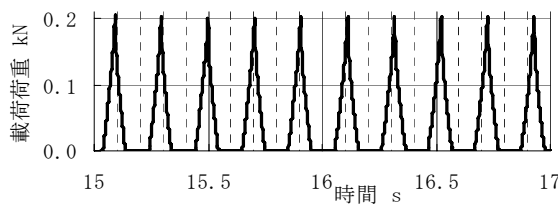


b) 標準載荷 変位

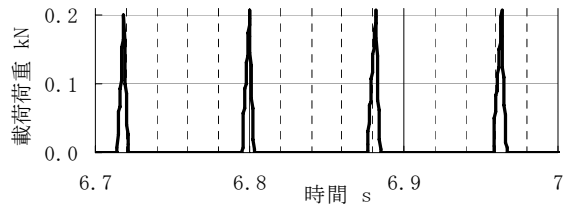


d) 高速載荷 変位

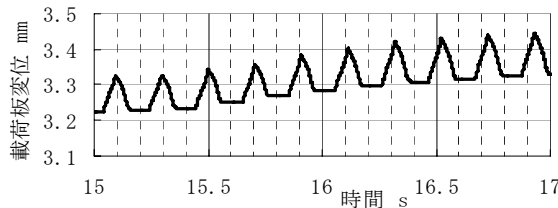
(1) 減衰係数大 $e=0.4$



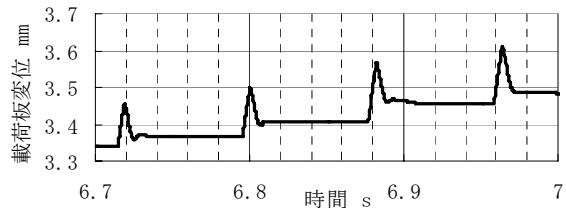
a) 標準載荷 荷重



c) 高速載荷 荷重

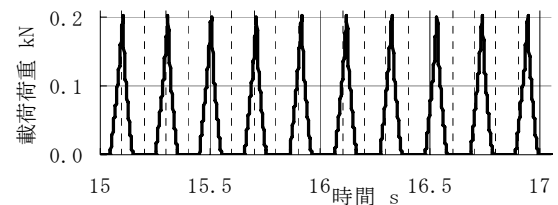


b) 標準載荷 変位

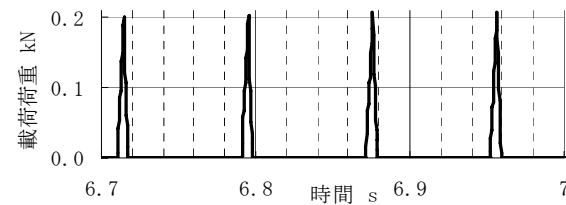


d) 高速載荷 変位

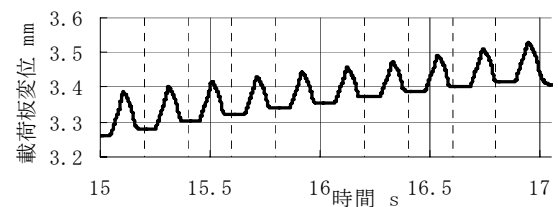
(2) 減衰係数中 $e=0.6$



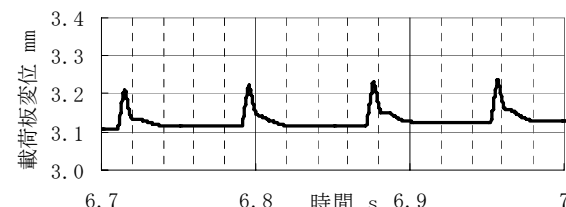
a) 標準載荷 荷重



c) 高速載荷 荷重



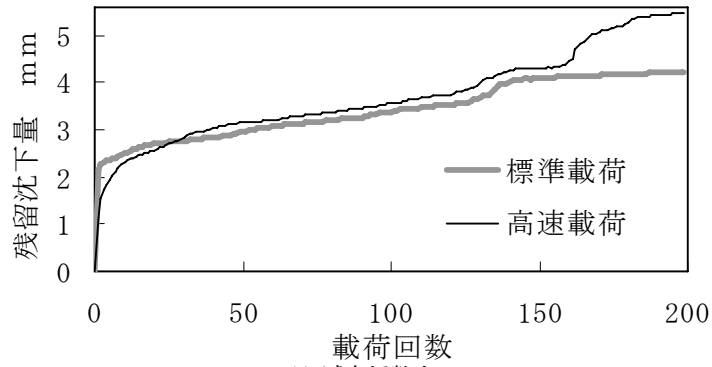
b) 標準載荷 変位



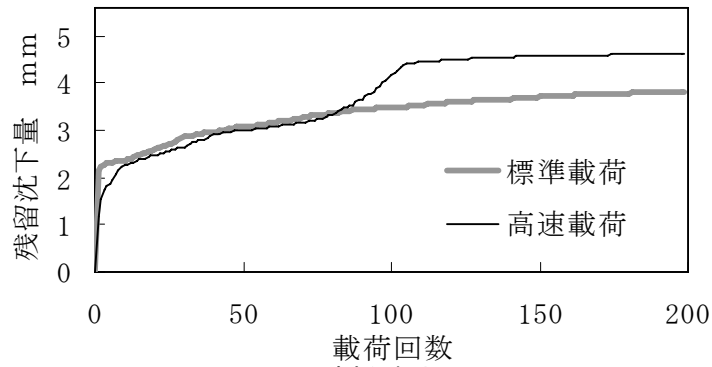
d) 高速載荷 変位

(3) 減衰係数小 $e=0.8$

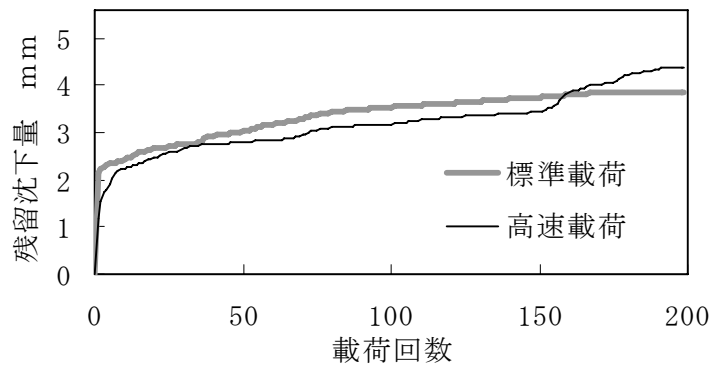
図5.6.2 載荷71~80回目のシミュレーション結果



(a) 減衰係数大 $e=0.4$

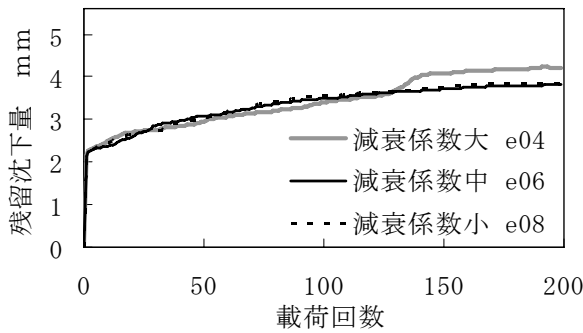


(b) 減衰係数中 $e=0.6$

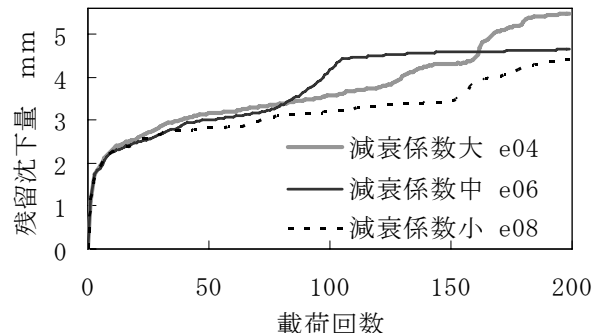


(c) 減衰係数小 $e=0.8$

(1) 载荷速度による比較



a) 標準载荷



b) 高速载荷

(2) 減衰係数による比較

図5.7.1 繰返し载荷過程における残留沈下量と载荷回数との関係

これらの挙動により、荷重200回終了時の残留沈下量は、いずれの反発係数においても高速荷の方が標準荷よりも大きく、この傾向は、鋼球層の実験結果で見られた傾向と一致する。

図5.7.1(2)に上記で述べた結果を荷重速度ごとに整理すると、まず図5.7.1(2)(a)より、標準荷においては減衰係数による差異は小さく、特に荷重1回目の残留沈下量は、減衰係数大の場合で2.159mm、減衰係数中の場合で2.150mm、減衰係数小の場合で2.159mmと、差異は極めて小さい。ただし上述の通り、減衰係数大の場合のみ一時的に沈下進みが増加するが、その後の沈下曲線の傾きは、他の2ケースとほぼ同程度となっている。

次に図5.7.1(2)(b)より、高速荷においては、荷重10回目程度までは残留沈下量の際は小さく、減衰係数大の場合で2.25mm、減衰係数中の場合で2.231mm、減衰係数小の場合で2.228mmとなっている。しかし、それ以降、沈下曲線の傾きの差異は先述の通り、徐々に大きくなる。

以上より、実験結果との定性的比較においては、①荷重初期の残留沈下量は標準荷の方が大きい、②標準荷において、荷重初期で沈下進みが著しく減少するのに対して、高速荷では徐々に減少する、③繰返し荷重終了時には高速荷の残留沈下量が標準荷より大きい、と言う点においては、いずれのシミュレーション結果も一致していた。

ただし、高速荷における漸進沈下過程の沈下進みについては、シミュレーションでは一時的に著しく沈下進みが増加するのに対し、実験ではコンスタントに沈下進みが大きかった。

また図5.7.2に示す実験結果（図3.14と同じ結果）と比較すると、実験結果では荷重1回目の残留沈下量が標準荷で0.80～2.35mm、高速荷で0.36～1.08mmであるのに対して、シミュレーション結果では標準荷で2.15～2.16mm、高速荷で1.12～1.17mmであり、標準荷では実験結果の範囲内、高速荷では実験結果の範囲より若干大きめの値となっている。また同様に荷重100回目の残留沈下量については、実験における標準荷で7.77～12.40mm、高速荷で9.05～13.12mmであるのに対して、シミュレーション結果では標準荷で3.38～3.54mm、高速荷で3.57～4.16mmであり、いずれも実験結果の半分以下の値に留まっている。

以上の実験結果とシミュレーションの差異に関しては、その一要因として、シミュレーションにおける土槽要素の表面凹凸の影響が考えられる。この微小凹凸により、鋼球が土槽要素の凹凸にはまって安定している状態と、ある時突然滑りが発生し、粒子構造が大きく変化する状態とが繰返し起きている可能性がある。

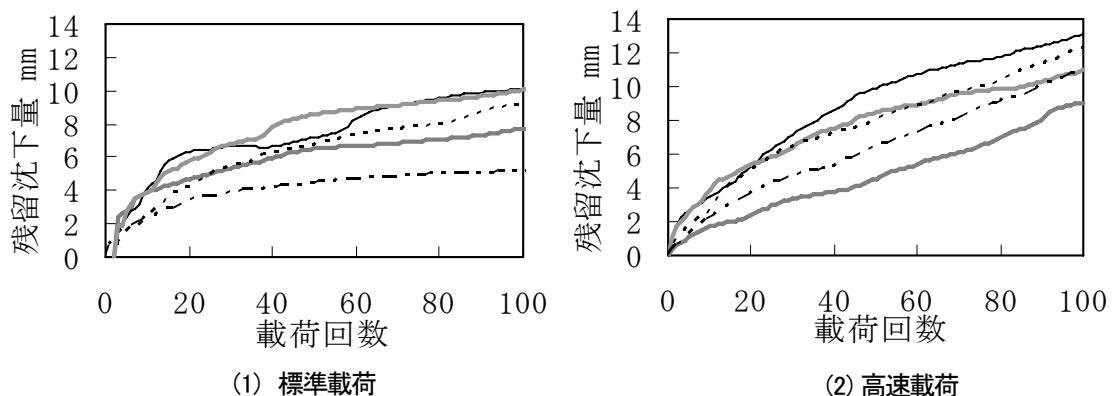


図5.7.2 繰返し荷重過程における残留沈下量と荷重回数との関係
(鋼球層の実験結果)

第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション

また、今回シミュレーションは、減衰係数を変えた3ケースの条件で行ったが、上述の高速載荷における沈下曲線の差異は、減衰係数が異なることで若干鋼球要素の挙動が変わり、それにより繰返し載荷過程における粒子構造にも差異が生じ、特に摩擦係数の小さい鋼球要素の集合体では、粒子構造の微小な差異が、集合体の大きな変形につながると考えられる。

5.2.3 各載荷回における変位振幅と沈下進みの関係

図5.8.1に繰返しシミュレーションにおける変位振幅と沈下進みの関係を、また図5.8.2に変位振幅に対する沈下進みの割合の平均値を示す。

図5.8.1において、図(1)が減衰係数大、図(2)が減衰係数中、図(3)が減衰係数小の条件における結果を示す。また左図a)はデータ全体を、また図b)は変位振幅が減少して一定となった載荷過程におけるデータを拡大して示している。図中の黒色星印が高速載荷、白色丸印が標準載荷の結果である。

図より、いずれの減衰係数においても、載荷1回目では標準載荷において変位振幅および沈下進みの両者が著しく大きく、高速載荷ではその半分程度となっている。全体的に、変位振幅と沈下進みの関係はほぼ線形に見えるが、データが集中する、変位振幅は0.25mm以下、沈下進みは0.1mm以下の範囲では、ややバラツキが見られる。

次に図5.8.2より、各載荷回の変位振幅に対する沈下進みの割合の平均値は、いずれの減衰係数においても高速載荷の方が大きくなっている。ここで各値は、減衰係数大の条件において、標準載荷で0.123、高速載荷で0.171、減衰係数中の条件において、標準載荷で0.128、高速載荷で0.203、また減衰係数小の条件においては、標準載荷で0.124、高速載荷で0.137となっている。

ここで、高速載荷において変位振幅に対する沈下進みが大きい傾向は、実験でも見られた傾向であり、この点では定性的に一致した結果となっている。

また鋼球層の実験結果から求めた変位振幅に対する沈下進みの割合の平均値は（図3.20参照）、初期載荷におけるデータを抜いた場合でもバラツキが大きい、標準載荷で0.25～0.42、高速載荷で0.3～0.45の範囲を取り、シミュレーション結果の2倍以上となっている。

この原因としては、上述の残留沈下量においても述べた通り、シミュレーションモデルにおける土槽要素の表面凹凸の影響が考えられる。

5.2.4 繰返し載荷過程における鋼球要素の残留変位

次に、第4章において繰返し載荷実験中の鋼球層の画像解析を行ったように、シミュレーション結果からも、鋼球層内部の要素の挙動を観察することとする。まずは、載荷200回の繰返し載荷過程における残留変位を観察する。

図5.9.1に載荷前→載荷20回後、図5.9.2に載荷20回後→載荷70回後、図5.9.3に載荷70回後→載荷100回後、図5.9.4に載荷100回後→載荷200回後の鋼球要素の残留変位を示す。各図とも、図(1)(2)が減衰係数中の場合の標準載荷と高速載荷、また図(3)が減衰係数大の場合の高速載荷、図(4)が減衰係数小の場合の高速載荷のシミュレーション結果である。

まず図5.9.1より、載荷前から載荷20回後の要素の残留変位においては、いずれのケースでも

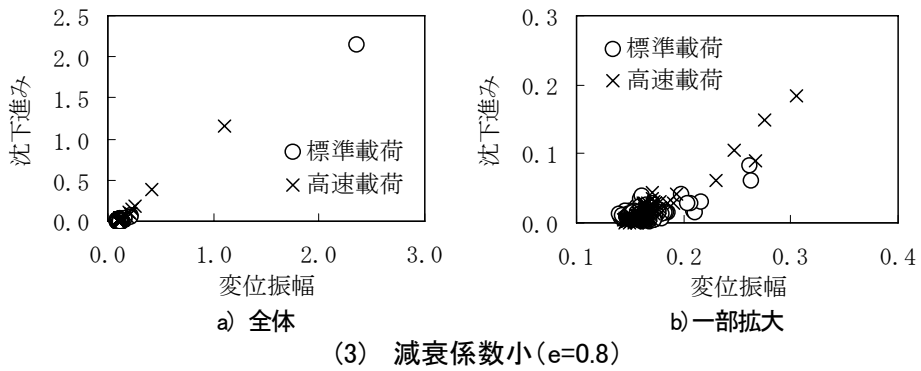
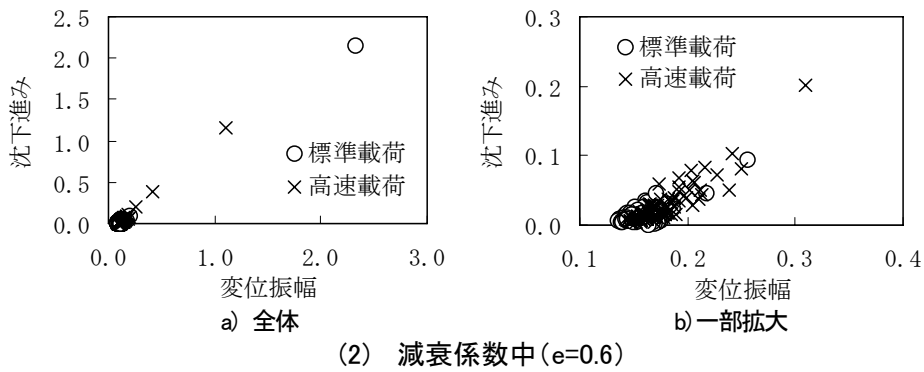
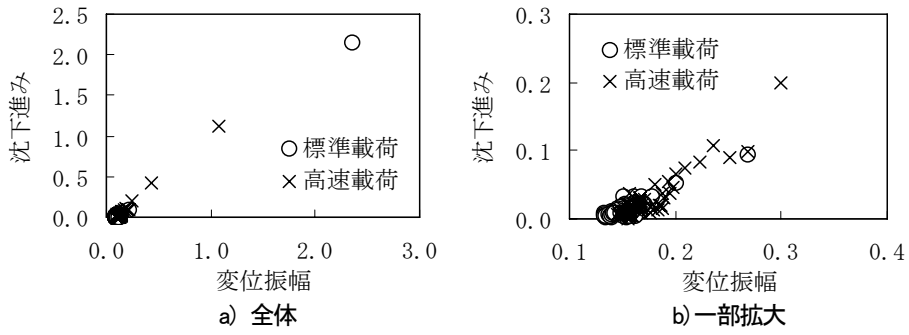


図5.8.1 各载荷回の変位振幅と沈下進みの関係

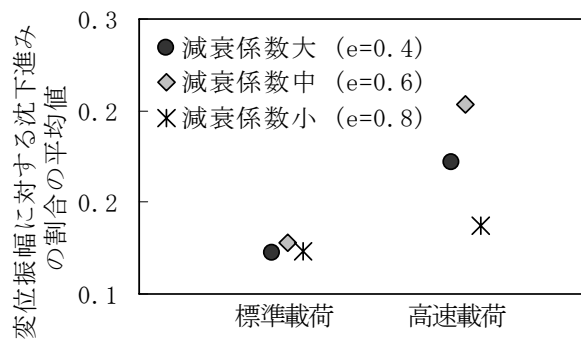


図5.8.2 変位振幅に対する沈下進みの割合の平均値

第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション

載荷板下から載荷板外側へ要素が側方流動し、鋼球層上面では上方への移動が著しい。載荷板の左右では移動量は異なり、特に載荷板左側で著しい移動が見られる。また図(1)(2)より載荷速度による差異を比較すると、載荷板の左右において、標準載荷の方が、移動量の大きい要素が、鋼球層のより深い部分まで多く見られるが、高速載荷においても、鋼球層上面で標準載荷と同程度の要素の移動が見られている。また図(2)～(4)より減衰係数による差異を比較すると、移動方向や移動量が全く同じではないが、顕著な差異は見られない。

次に図5.9.2より、載荷20回後から載荷70回後の鋼球要素の残留変位においては、いずれのケースでも要素の移動量は著しく減少する。図(1)(2)より載荷速度による差異を比較すると、図(1)の標準載荷では、載荷板左側で依然として要素の移動が見られるのに対して、高速載荷では載荷板右側における要素の移動が明瞭である。また図(2)～(4)より減衰係数による差異を比較すると、図(3)の減衰係数大の場合では鋼球層の表層、特に右側部で要素の側方への移動が著しくなるが、図(2)の減衰係数中と図(4)の減衰係数小の場合では、大きな差異は見られない。

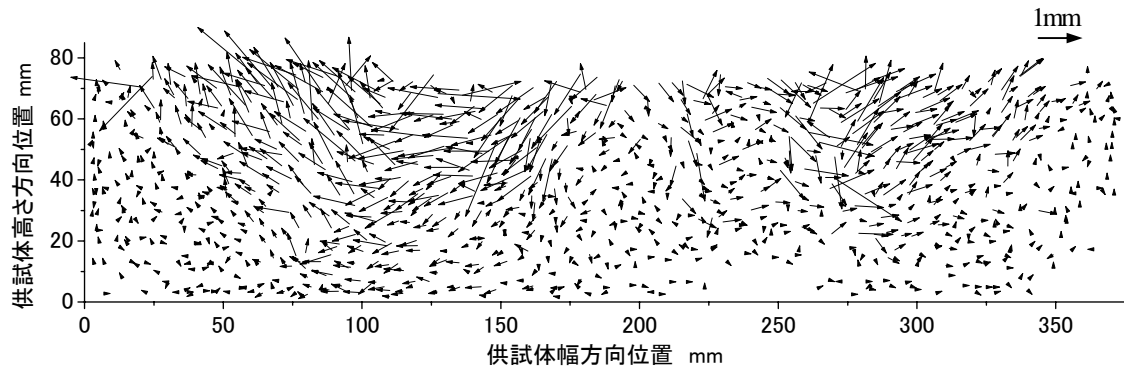
また図5.9.3より、載荷70回後から載荷100回後の鋼球要素の残留変位においては、いずれの減衰係数、載荷速度においても、基本的に要素の移動量は減少しているが、図(2)に示す減衰係数中の場合の高速載荷において、載荷板右側で要素の移動が著しく大きくなる。この現象は、前節5.2.2で示した沈下曲線における、減衰係数中の場合の載荷70回目～載荷110回目までの急激な沈下進みの増加過程における要素の挙動を示している。ここで、図(1)の減衰係数中の標準載荷および図(4)の減衰係数小の場合の高速載荷でも、載荷板右側で側方へ移動する要素が複数見られるが、いずれも小さな値に留まっている。

更に図5.9.4より、載荷100回後から載荷200回後の鋼球要素の残留変位においては、図(1)の減衰係数大の場合の標準載荷では著しい要素の移動は見られないが、図(2)の減衰係数が同程度で高速載荷の場合では、載荷板外側で側方への移動が大きい要素が複数見られる。更に図(3)の減衰係数中の場合では載荷板の左右で、また減衰係数小の場合では載荷板右側で要素の移動が著しくなっている。この現象は、前節5.2.2で示した沈下曲線における、減衰係数大および小の場合における載荷130回目以降で見られた急激な沈下進みの増加過程における要素の挙動を示している。

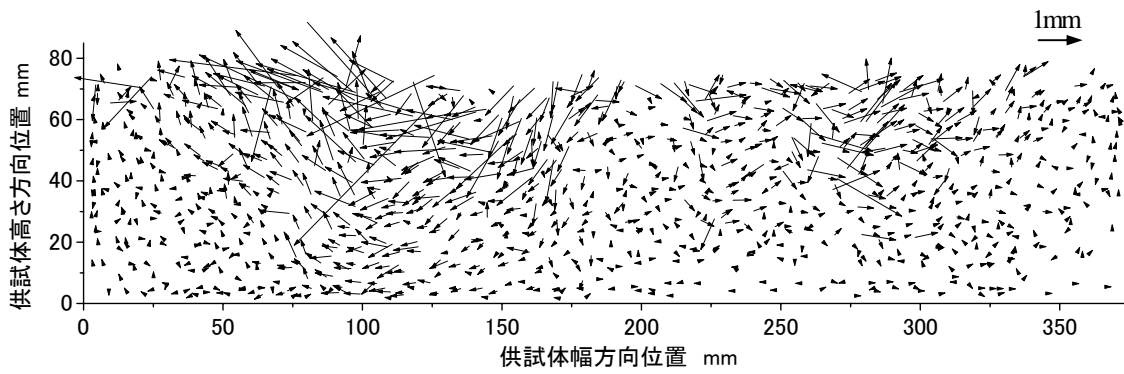
漸進沈下過程における残留変位の突然の増加は、発生するタイミングが減衰係数によって異なるが、その発生箇所はいずれも載荷板の右側で共通している。つまりこの箇所においては、鋼球の配置がモデル供試体作成時から崩れやすい状態だったことが考えられるが、大きな変形に至る要素間滑りの発生のタイミングは、減衰係数の違いによる要素の挙動の微妙な差異によって異なると考えられる。

以上の鋼球層シミュレーション結果を実験における画像解析結果と比較すると、①粒子の挙動として載荷板下から外側への流動のような移動が卓越している点、②載荷1回目では、高速載荷における要素の移動が標準載荷より小さい点、③初期沈下後、高速載荷における要素の移動が標準載荷よりも大きい点において、定性的に合致している。

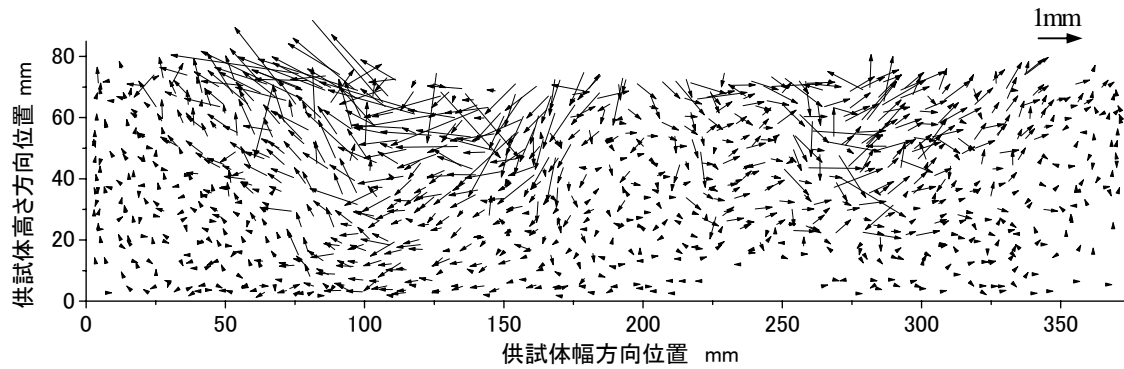
しかし高速載荷シミュレーション結果では、実験結果で得られた、載荷数十回以降の全般的な要素の著しい移動は見られず、一時的かつ局所的に鋼球要素の移動が激化する箇所が見られている。この原因としては、前出の通り、土槽要素の凹凸による影響が考えられ、鋼球層モデルの中にも、凹凸によって要素の配置が安定している箇所と、凹凸からはずれて、瞬間的に突然大きな移動が発生する箇所とが混在していると考えられる。



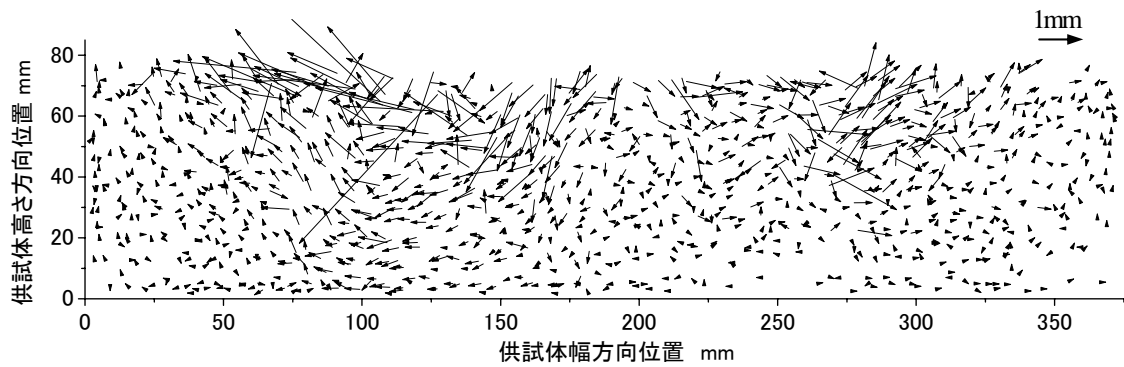
(1) 減衰係数中 ($e=0.6$) 標準载荷



(2) 減衰係数中 ($e=0.6$) 高速载荷



(3) 減衰係数大 ($e=0.4$) 高速载荷



(3) 減衰係数小 ($e=0.8$) 高速载荷

図5.9.1 鋼球要素の残留変位 载荷前～载荷20回後

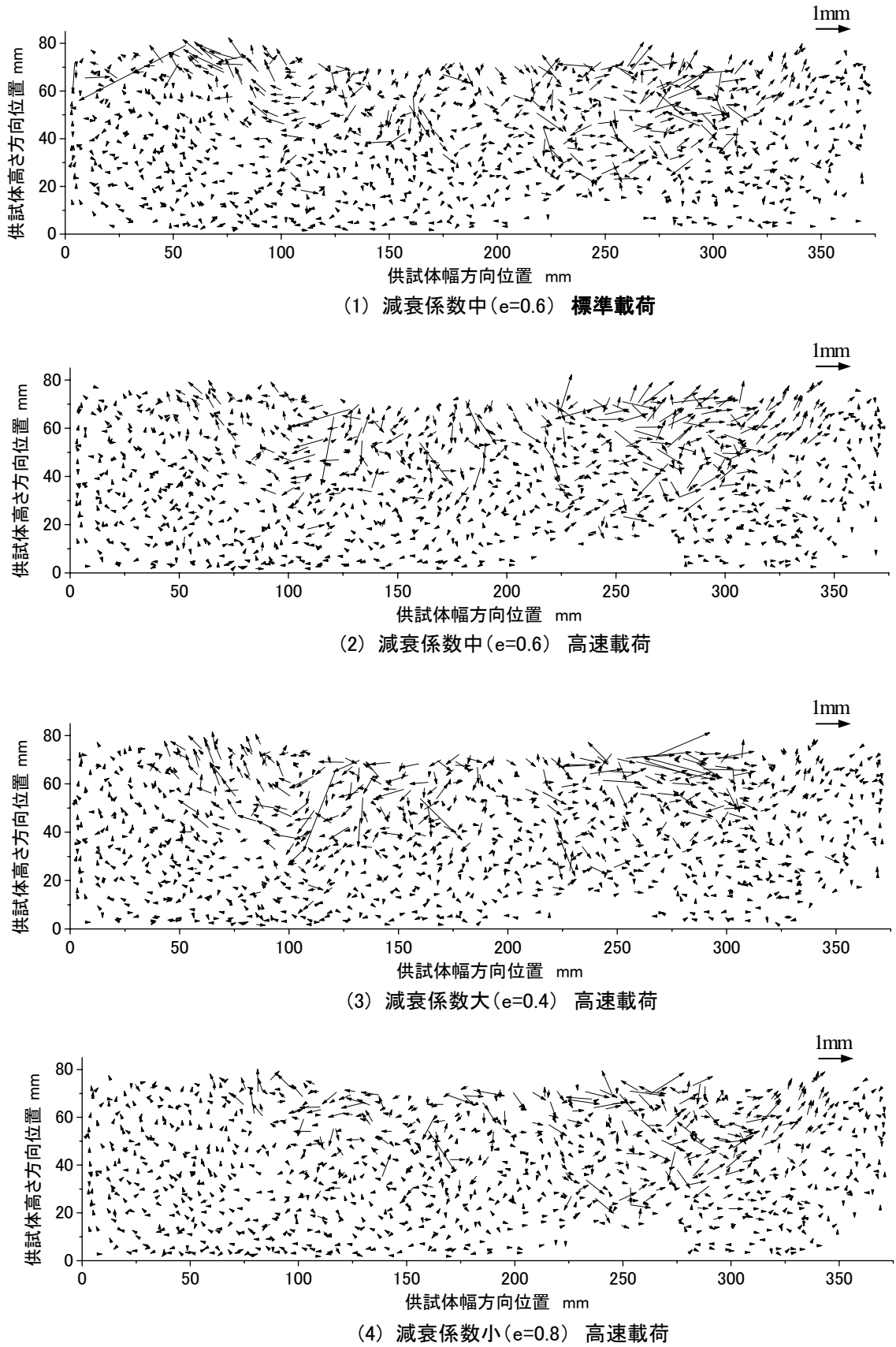
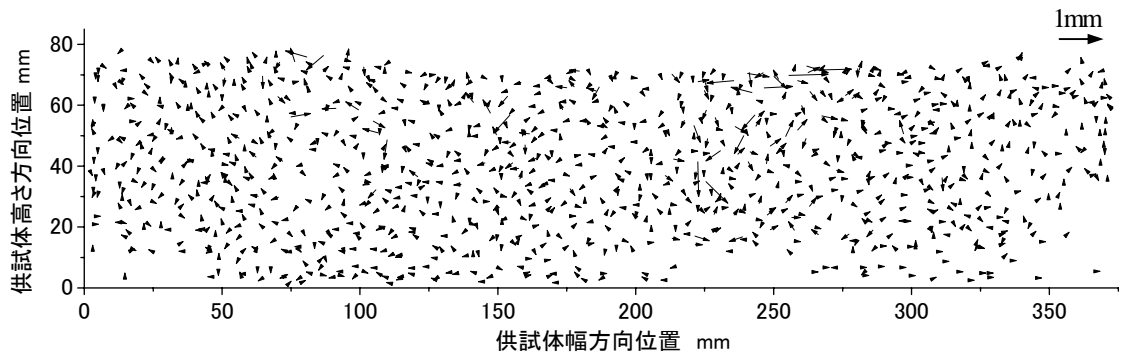
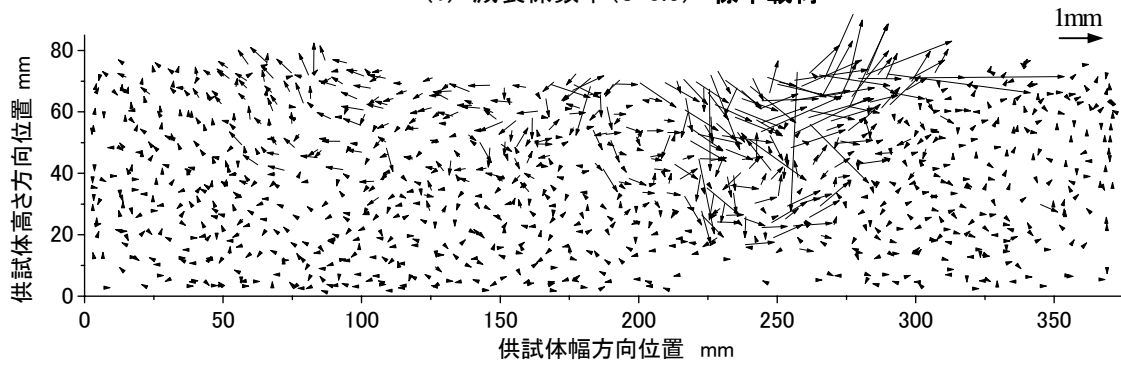


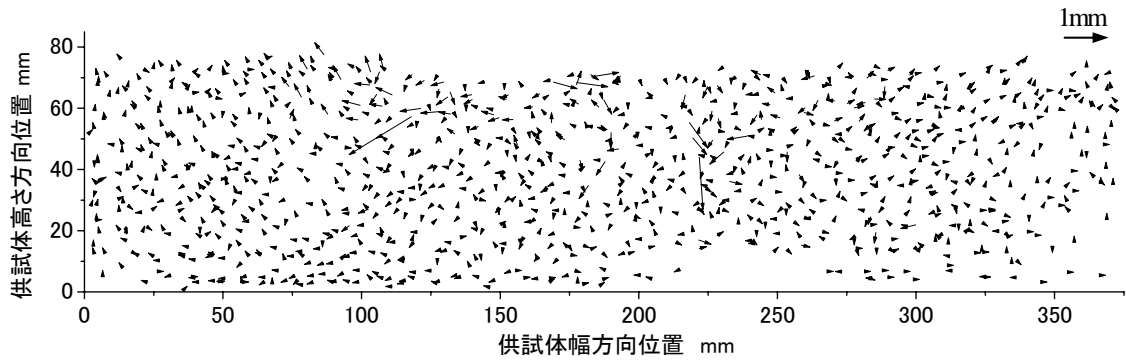
図5.9.2 鋼球要素の残留変位 載荷20回後～載荷70回後



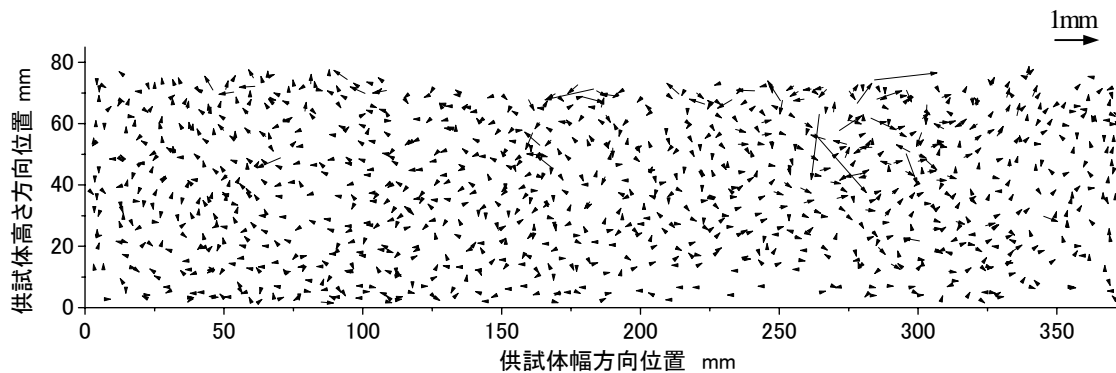
(1) 減衰係数中 ($e=0.6$) 標準載荷



(2) 減衰係数中 ($e=0.6$) 高速載荷

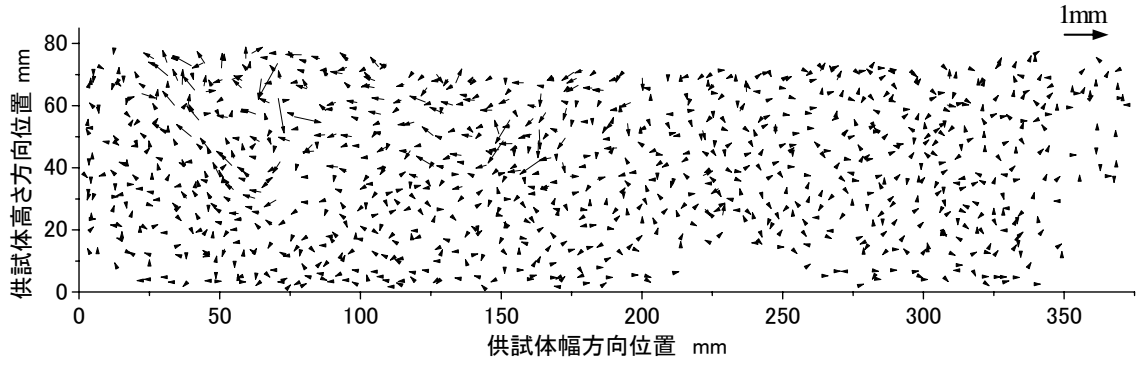


(3) 減衰係数大 ($e=0.4$) 高速載荷

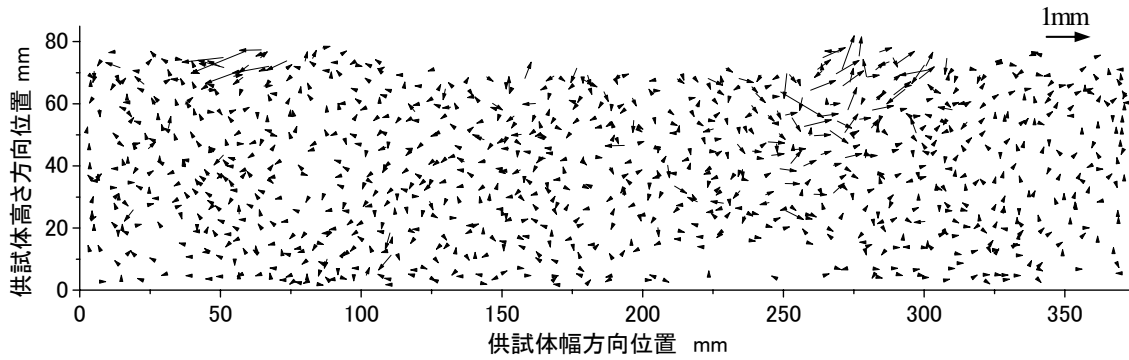


(4) 減衰係数小 ($e=0.8$) 高速載荷

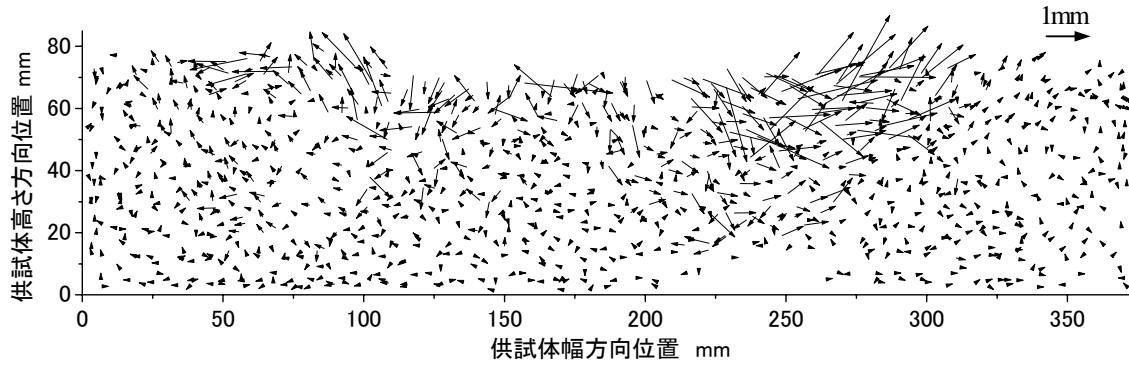
図5.9.3 鋼球要素の残留変位 載荷70回後～載荷100回後



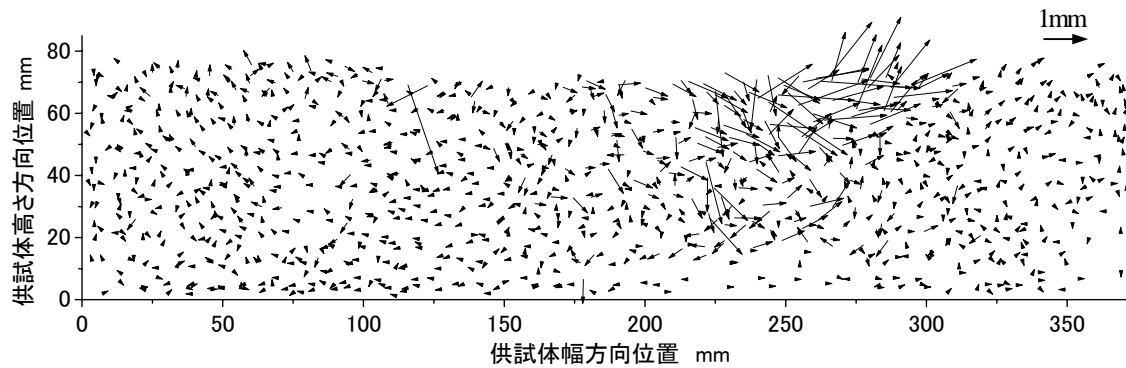
(1) 減衰係数大($e=0.6$) 標準載荷



(2) 減衰係数中($e=0.6$) 高速載荷



(3) 減衰係数小($e=0.4$) 高速載荷



(4) 減衰係数中($e=0.8$) 高速載荷

図5.9.4 鋼球要素の残留変位 載荷100回後～載荷200回後

5.2.5 各载荷回における鋼球要素の動的挙動の観察

(1) 移動方向と移動量

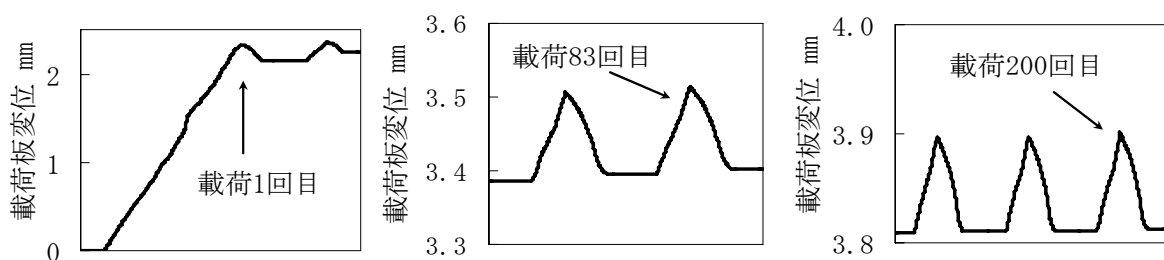
次に第4章における画像解析と同様に、鋼球要素の動的挙動の観察を行う。ここでは、減衰係数3通りのシミュレーション結果より、減衰係数中（反発係数0.6）の場合の結果について標準载荷と高速载荷の比較を行う。

ここで、動的挙動の観察を行った载荷回における载荷板の変位波形を図5.10に示す。载荷83回目は、前出の5.2.2および5.2.4において、沈下進みおよび粒子の残留変位の増加が著しい载荷回として選択した。

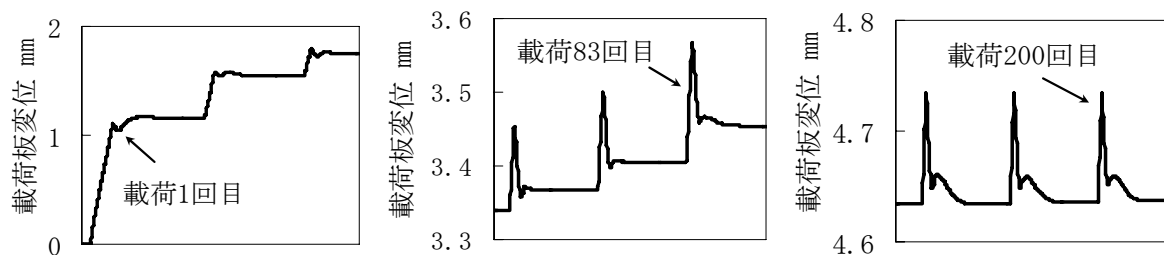
図5.11.1に载荷1回目、図5.11.2に载荷83回目、図5.11.3に载荷200回目の結果を示す。また各図、図(1)が载荷過程（载荷前⇒最大荷重時）、図(2)が除荷過程（最大荷重時⇒荷重0時）、図(3)が除荷後（荷重0時⇒それから約0.1秒後）で、更に図a)が標準载荷、図b)が高速载荷における挙動を示す。

まず図5.11.1(1)より、载荷1回目の载荷過程において、標準载荷では、载荷板下から载荷板外側への要素の移動および载荷板下の要素の下層への移動が顕著に見られるのに対し、高速载荷では、同様な要素の移動が見られるものの、全体的に変位量は著しく小さい。次に図5.11.1(2)より、除荷過程においては、標準载荷では鋼球層表層部の一部の要素に不規則な移動が見られるのに対し、高速载荷では载荷板外側部分で要素の上方への移動が明瞭に表れているが、移動量自体は小さい。更に図5.11.1(3)より、除荷後の要素の挙動において、標準载荷では、载荷板外側で载荷時の要素の移動が元に戻るような挙動が見られるのに対して、高速载荷では、鋼球層上層部全体で不規則な要素の移動が見られ、標準载荷と比較して移動量も大きい。

次に図5.11.2(1)より、载荷83回目の载荷過程において、標準载荷および高速载荷のいずれにおいても要素の移動は著しく減少するが、高速载荷では载荷板右側部分で、移動量の著しい要



(1) 標準载荷シミュレーションにおける载荷板変位波形



(2) 高速载荷シミュレーションにおける载荷板変位波形

図5.10 動的挙動の観察を行った载荷回における波形

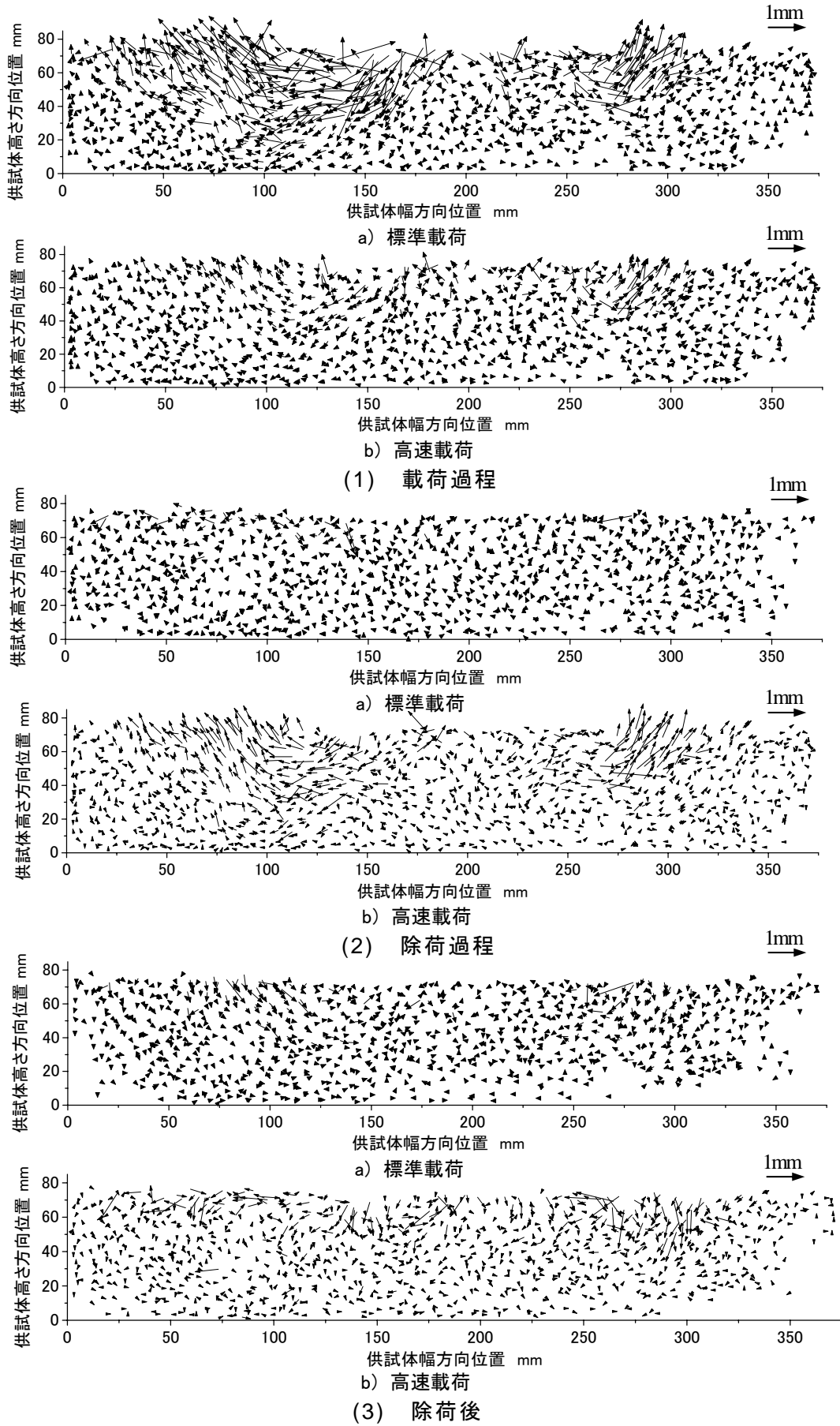


図5.11.1 荷重1回目の鋼球要素の挙動

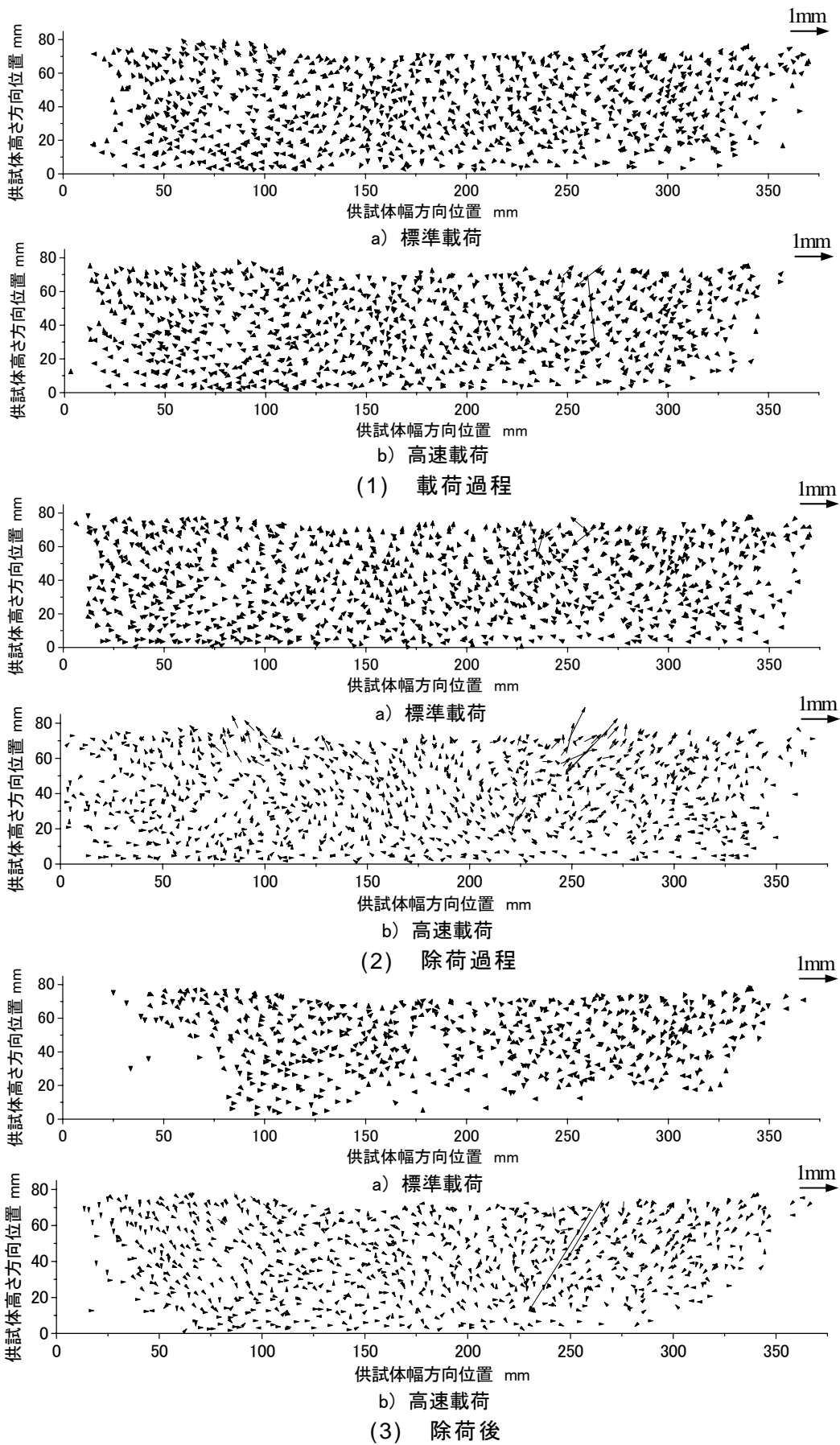


図5.11.2 荷重83回目の鋼球要素の挙動

第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション

素が見られる。また図5.11.2(2)より、除荷過程においては、標準載荷では、載荷板右側部分の鋼球層表層部で不規則な移動が若干見られるのに対し、高速載荷では載荷板の両側部分で要素の上方への移動が明瞭に表れている。更に図5.12.1(3)より、除荷後の要素の挙動において、標準載荷では、ほとんど移動の見られない領域も広く分布するのに対して、高速載荷では、載荷板の右側で下方への移動が著しい要素が2点ほど見られる。

更に図5.11.3(1)より、載荷100回目の載荷過程においては、標準載荷および高速載荷のいずれにおいても要素の移動は更に減少し、載荷速度による差異はほとんど見られない。一方図5.11.3(2)に示す除荷過程においては、標準載荷では、要素の移動が著しく収束しているのに対して、高速載荷では依然として、載荷板の両側部分で要素の上方への移動が明瞭に表れている。また図5.12.1(3)より、除荷後の要素の挙動において、標準載荷では、移動の見られない領域が更に広く分布するのに対して、高速載荷でも、要素の移動は著しく小さくなっている。

これらの結果を鋼球層の画像解析結果と比較すると、①載荷初期の載荷過程で、標準載荷における粒子の移動量が著しい、②除荷過程では、高速載荷における粒子の上方への移動が著しく、この挙動は漸進沈下過程でも継続される。③除荷過程の粒子の挙動により、除荷後の粒子の挙動も高速載荷の方が大きい、と言う点で、ほぼ一致した傾向が見られる。

また図5.11.2より、載荷83回目の高速載荷における要素の移動においては、載荷過程では載荷板の右側で移動量の大きい要素が2点ほど見られ、この2要素は除荷過程においても上方への著しく移動し、更に除荷後の下方への移動量も大きな値となっている。

つまり、前出の5.2.2および5.2.4で見られた、減衰係数中の場合の高速載荷における、載荷71回目以降の残留沈下量の増加は、上述の図5.11.2で見られた高速載荷における局所的な要素の挙動が影響要因であることが考えられる。また、載荷83回目で著しい移動が見られたのは、たった2要素のみであるが、今回のシミュレーションモデルのように構成要素数が1120個程度である場合、更に鋼球のような粒子同士が滑り易い材料の集合体である場合、このような一部の要素の挙動が、鋼球層全体の変形挙動に影響を及ぼすことも示唆された。

(2) 体積ひずみとせん断ひずみ

第4章において、画像解析結果からメッシュ要素の最大せん断ひずみと体積ひずみを算出したが、ここでは鋼球要素の移動量および移動方向を一定間隔の格子点で平均化させ(図5.12)、各メッシュ要素のひずみとして算出した。ここで、平均化に用いる鋼球要素は各格子点を中心に半径が6mm(鋼球要素の平均粒径11mmを参考とし)の範囲内のものを選択し、ここでは供試体の幅方向および高さ方向の2次元座標について、各成分の移動量を単純に平均化させた。

ここで例として図5.13に、載荷1回目の標準載荷の載荷過程と載荷1回目の高速載荷の除荷過程の鋼球要素の挙動について、図5.11.1(1a)および同(2b)に示した要素の座標データを直接を用いた図と、上述の通りに格子点で平均化データを用いた図を示す。図(1)が標準載荷過程、図(2)が高速除荷過程であり、また各図、図a)が要素のデータ、図b)が格子点における平均化したデータを図示したものである。

図より、標準載荷過程および高速除荷過程のいずれにおいても、局所的に移動量の大きい要素の動きは平均化したデータではなまっているが、鋼球要素の挙動の特徴は、格子点において

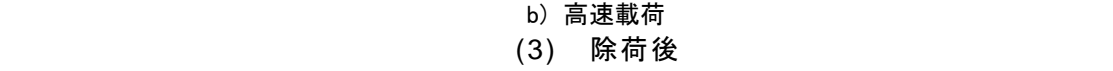
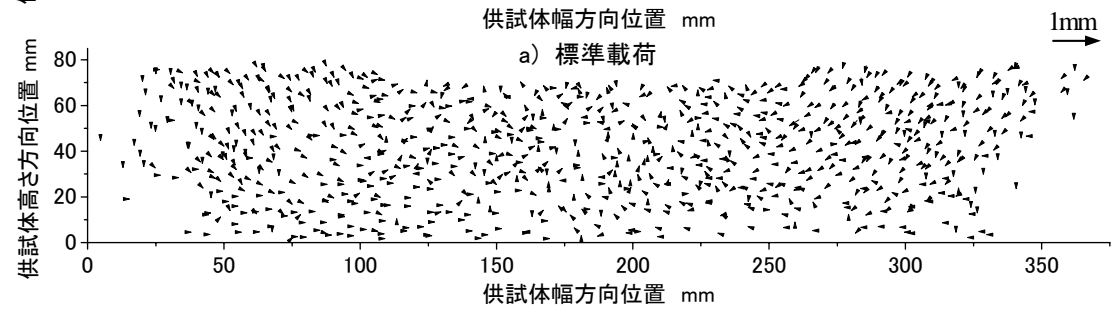
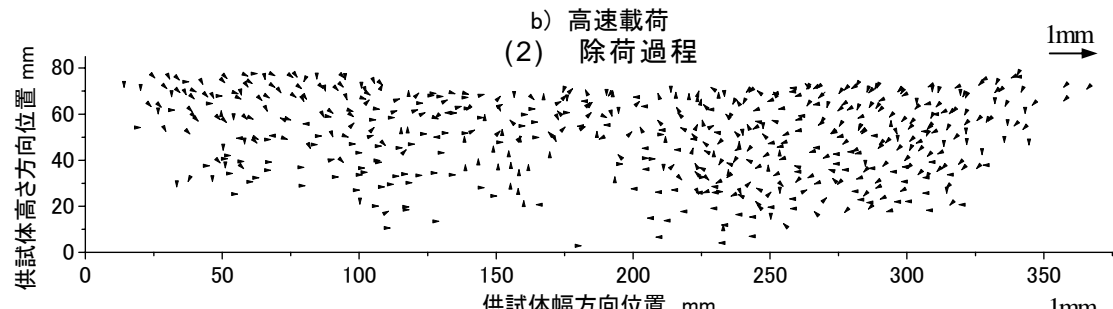
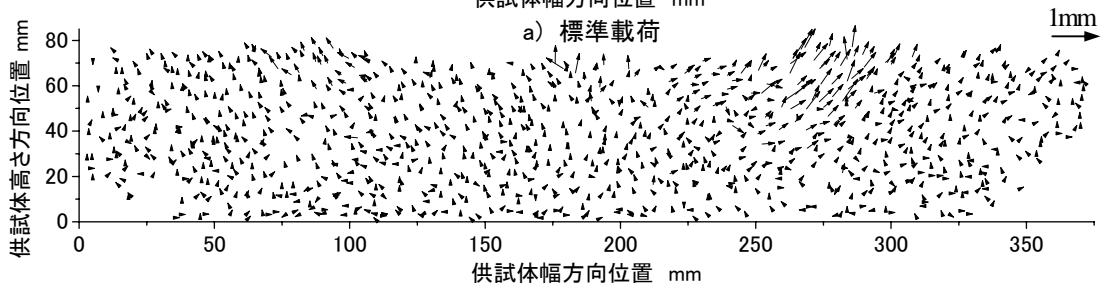
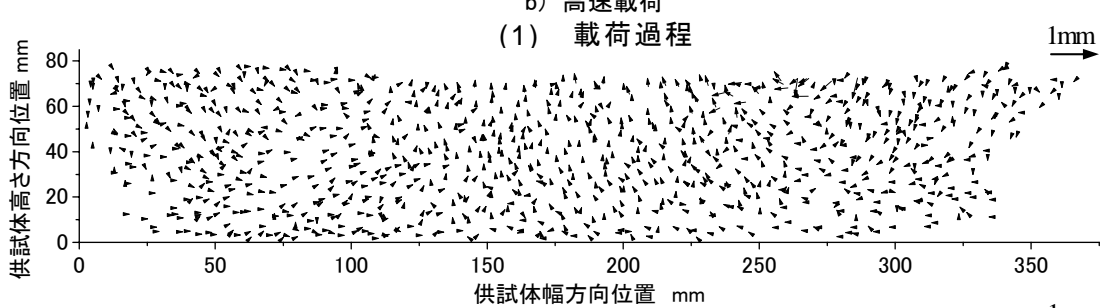
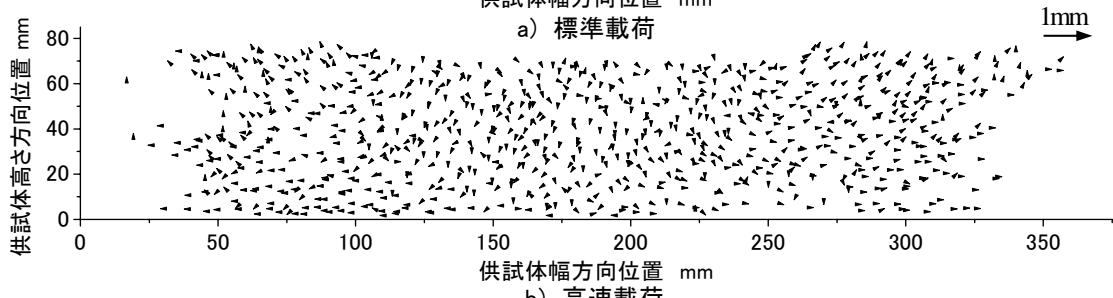
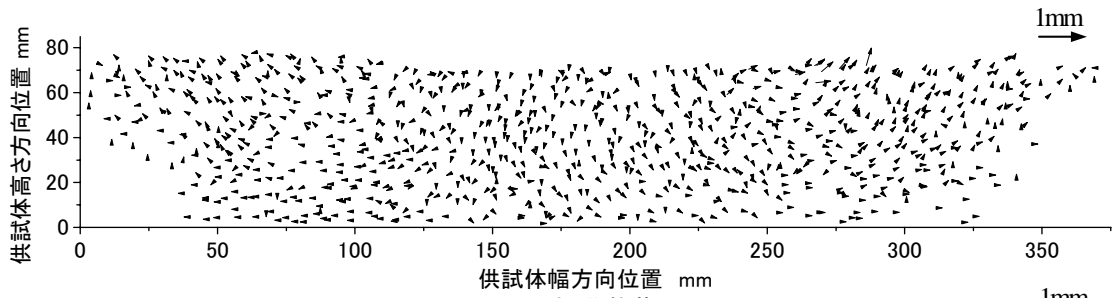


図5.11.3 載荷200回目の鋼球要素の挙動

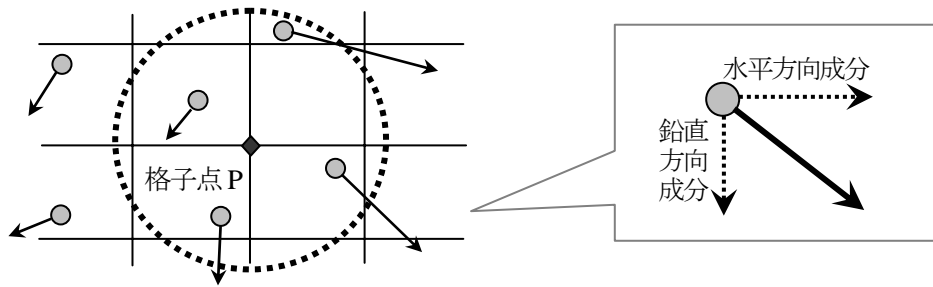
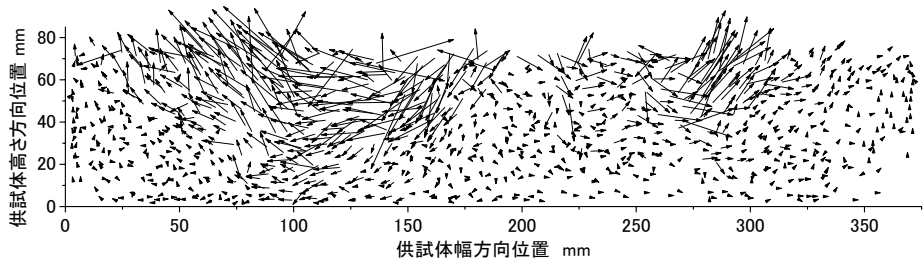
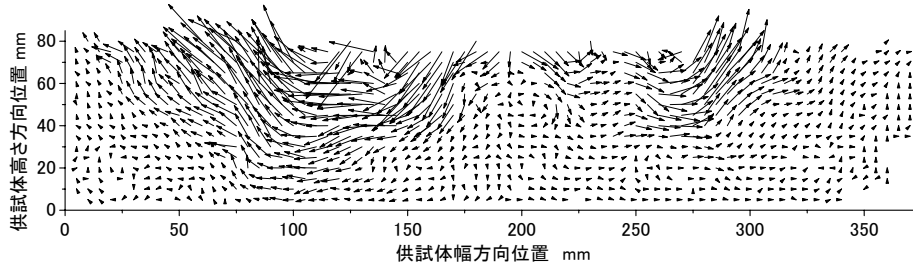


図5.12 格子点における周辺要素の移動量・移動方向の平均化

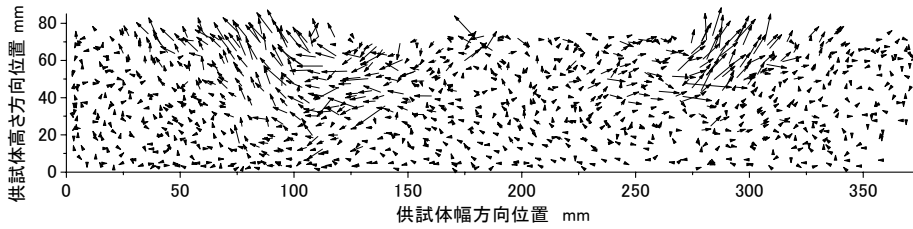


a) 鋼球要素の座標位置データ

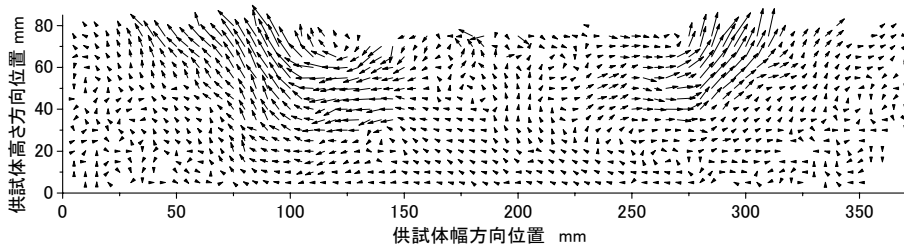


b) 5mm 間隔の格子点で平均化したデータ

(1) 標準载荷 1 回目の载荷過程



a) 鋼球要素の座標位置データ



b) 5mm 間隔の格子点で平均化したデータ

(2) 高速载荷 1 回目の除荷過程

図5.13 鋼球要素の挙動の平均化前後の比較

平均化した後も明瞭に表されている。よって、これらのデータより最大せん断ひずみと体積ひずみを算出し、以下、比較を行うこととする。

図5.14に、横軸に最大せん断ひずみ、縦軸に体積ひずみをプロットしたデータの近似曲線を示す。図(1)が載荷1回目、図(2)が載荷83回目、図(3)が載荷200回目で、各図中、緑色線が載荷過程、青色太線が除荷過程、ピンク色太線が除荷後、黒色太線が載荷前後の残留変位分を示す。

まず図5.14(1)より載荷1回目では、標準載荷および高速載荷のいずれにおいても、載荷過程および除荷過程で、最大せん断ひずみの増加に伴い体積ひずみもプラス側に増加する体積膨張の傾向を示す。載荷速度で比較すると、載荷過程において標準載荷では最大せん断ひずみが0.9を超え、体積ひずみも0.6を越えるのに対して、高速載荷では最大せん断ひずみが0.2、体積ひずみも0.1程度で、標準載荷に比較して著しく小さい。一方、除荷過程においては、標準載荷では最大せん断ひずみが0.1程度まで激減し、体積ひずみも0.03程度となるのに対し、高速載荷では、最大せん断ひずみが0.3、体積ひずみが0.2程度と増加し、標準載荷の5倍程度となる。除荷後においては高速載荷が標準載荷の1.5倍程度となる。残留変位分については、標準載荷では載荷過程の近似曲線とほぼ同様の曲線となるのに対し、高速載荷では最大せん断ひずみが0.1と減少し、また体積ひずみもマイナス0.1程度となる。これは、高速載荷では除荷後に粒子が下方へ戻る挙動が見られることから、若干の体積収縮の傾向を示すと考えられる。

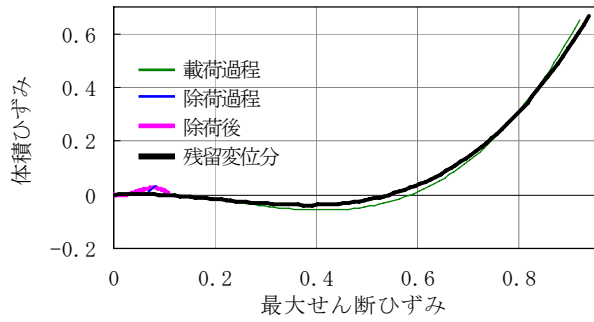
次に図5.14(2)より載荷83回目では、標準載荷におけるひずみは全体的に載荷1回目に比較して著しく減少するのに対して、高速載荷では載荷1回目の半分程度となっている。また載荷過程においては、標準載荷および高速載荷において最大せん断ひずみの増加に伴い体積ひずみが若干一側へ増加する体積収縮の傾向へと変化している。また除荷過程においては、標準載荷で若干の、また高速載荷では著しい体積膨張の傾向を示す。更に除荷後については体積ひずみはいずれの載荷速度でも小さい。残留変位分については、標準載荷では最大せん断ひずみが0.02程度と著しく小さくなるのに対して、高速載荷では載荷1回目とほぼ同程度であり、最大せん断ひずみ0.2程度までは体積ひずみが減少し、その後、プラス方向への増加へと転じる。

更に図5.14(3)より載荷200回目では、標準載荷および高速載荷のいずれにおいても、ひずみは全体的に図5.14(2)の載荷83回目の1/10程度まで減少する。また標準載荷および高速載荷のいずれにおいても、載荷過程では体積収縮の傾向を示し、除荷過程では、最大せん断ひずみの増加に伴い体積ひずみが一旦減少した後、プラス方向へ転じる傾向を示す。また残留変位分は、いずれの載荷速度においても、体積収縮を示す。

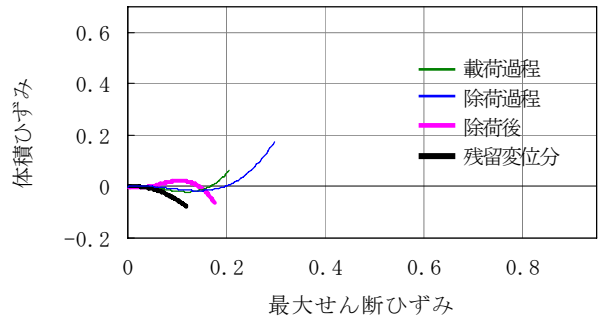
以上の結果を鋼球層の実験結果と比較すると、①載荷初期の載荷過程において体積膨張の傾向が見られること、②除荷過程においては全般的に体積膨張の傾向が続くこと、③載荷1回目におけるひずみの値は、標準載荷の方が高速載荷より著しく大きいこと、④漸進沈下過程におけるひずみの値は、高速載荷の方が標準載荷より大きいこと、④載荷100回以降では、標準載荷と高速載荷でひずみの値は同程度となること、において定性的傾向は一致している。

以上より、繰返し荷重下の粒子の動的挙動に関しては、特に高速載荷において特徴的な除荷過程の粒子の著しい挙動と、それによる体積膨張の傾向は、シミュレーションにおいても再現されているといえる。

第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション

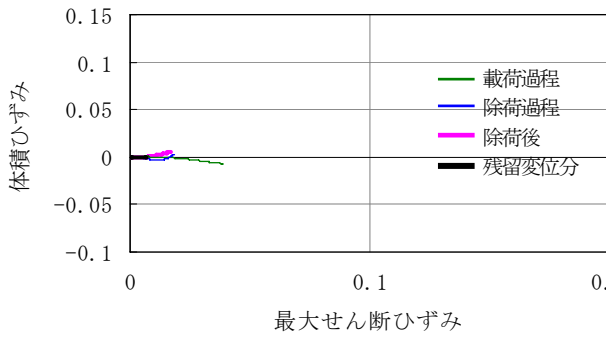


(a) 標準載荷

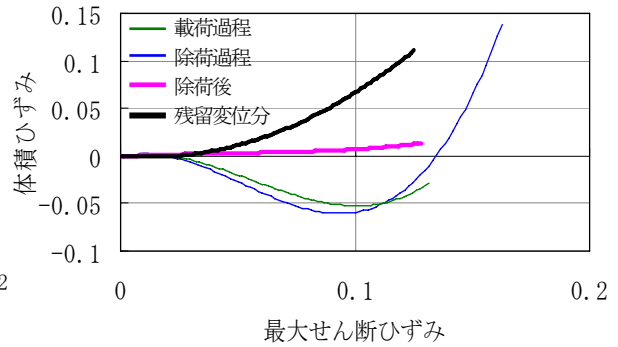


(b) 高速載荷

(1) 載荷1回目

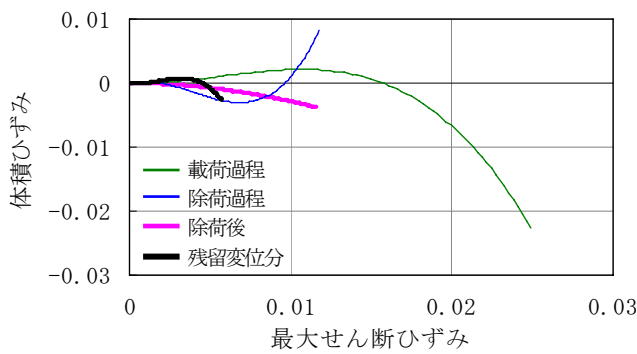


(a) 標準載荷

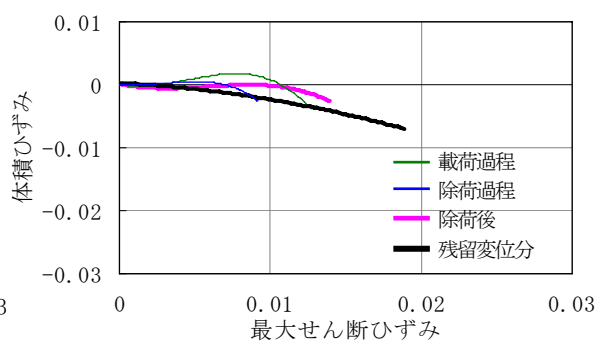


(b) 高速載荷

(2) 載荷83回目



(a) 標準載荷



(b) 高速載荷

(3) 載荷200回目

図5.14 最大せん断ひずみと体積ひずみ（2次元）の関係の変化

5.2.6 粒子間接触力の観察

次に、前節で観察した鋼球要素の動的挙動に対して、その挙動の要因ともいえる粒子間接触力の分布状況について観察を行なう。この粒子間の接触力については、実験による観察が困難であるが、DEMシミュレーションによって情報を得ることが可能となる。これにより、粒子の特徴的な挙動を引き起こす要因を把握することも可能となる。

(1) 粒子間接触点数の変化

減衰係数中の条件における載荷1回目、載荷83回目、載荷200回目の荷重作用下での粒子間接触点数の変化を図5.15に示す。各図とも右図a)が標準載荷、左図b)が高速載荷である。また、図の横軸は時間で、左縦軸が粒子間接触点数、右縦軸が載荷荷重で、灰色丸印が接触点数、黒色実線が載荷荷重を示す。

まず図5.15(1)より、載荷1回目の標準載荷では、設定荷重0.2kNに到達する途中で、一度載荷荷重が著しく減少し、その後また増加する。この載荷荷重が減少する0.38s時において、粒子間接触点数も一時的に減少していることから、この瞬間に鋼球要素の著しい移動が発生したことが考えられる。その後も400個前後の粒子間接触点数の増減が見られた後、除荷時にも接触点数が減少した後、元の3000個程度まで戻っている。一方、同じく高速載荷では、載荷し始めの0.01s程度で接触点数が一気に500個程度減少した後、しばらく一定値を保った状態で荷重は最大値となり、その後、除荷過程で接触点数が著しく減少し、除荷時には1500個程度まで激減している。

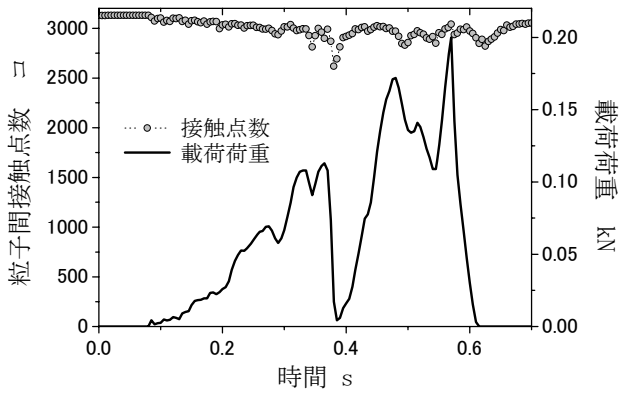
次に図5.15(2)より、載荷83回目の標準載荷では、接触点数の増減は載荷1回目に比較して著しく減少し、載荷し始めと除荷時に若干減少しているのみである。一方、同じく高速載荷では、載荷1回目と同様に、載荷し始めの0.01s程度で接触点数が減少した後、しばらく一定値を保った状態で荷重は最大値となり、その後、除荷過程で接触点数が著しく減少している。ただし接触点の減少量は、載荷時で約250個、除荷時に1000個程度となり、載荷1回目と比較すると、7割程度に減少している。

更に図5.15(3)より、載荷200回目の標準載荷では、接触点数の増減は更に減少し、載荷83回目に見られた載荷し始めの段階における接触点数の減少は見られず、除荷時のみ、100個程度の接触点の減少が見られる。一方、同じく高速載荷では、載荷1回目、83回目と同様に、載荷し始めの0.01s程度で接触点数が減少した後、しばらく一定値を保った状態で荷重は最大値となり、その後、除荷過程で接触点数が著しく減少している。ここでの接触点の減少量は、載荷時で200個、除荷時で900個程度となり、載荷83回目と比較すると、若干減少している。

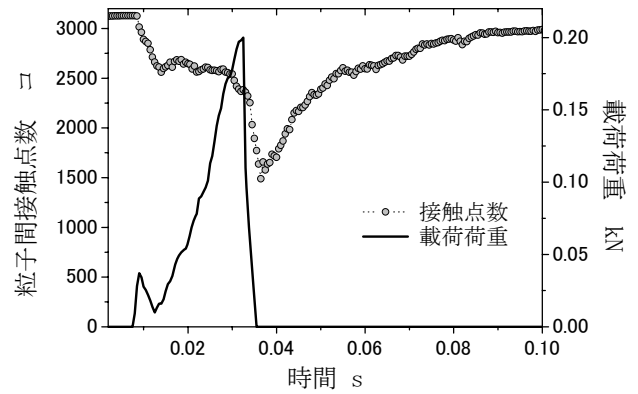
以上より、高速載荷においては、繰返し載荷200回の全般において、各載荷回の載荷過程および除荷過程で接触点数の著しい増減が生じることが明らかとなった。これにより、どのような現象が起きているか、以下で観察を行う。

(2) 粒子間接触状況

粒子間接触力の分布状況を更に詳細に観察するため、図5.15において、載荷過程で接触点数が減少した瞬間と、荷重が最大となる瞬間については、法線方向粒子間接触力の分布の状況と、

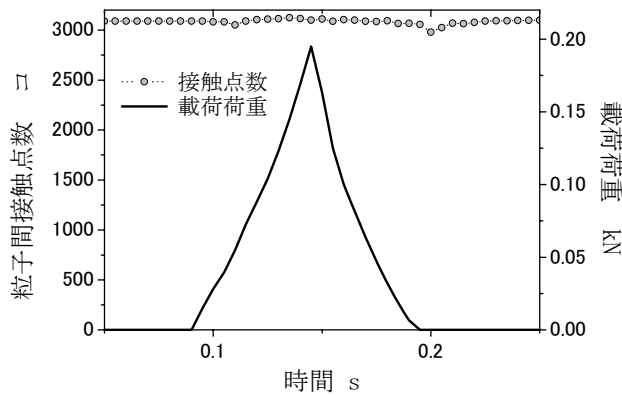


a) 標準載荷

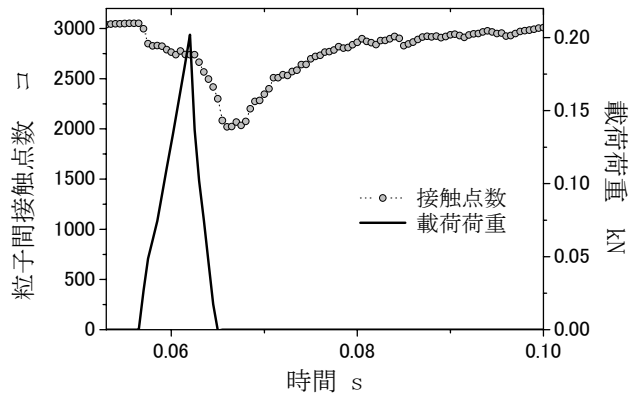


b) 高速載荷

(1) 載荷1回目

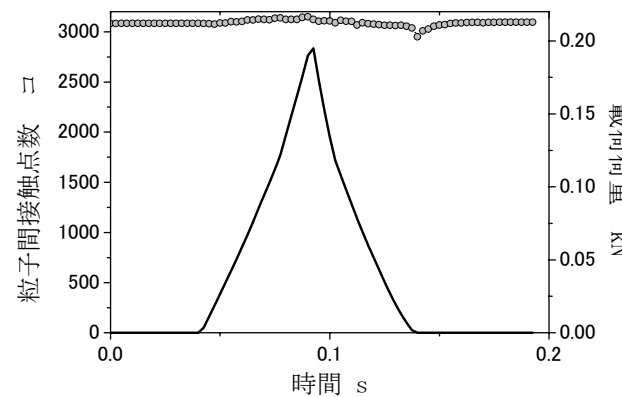


a) 標準載荷

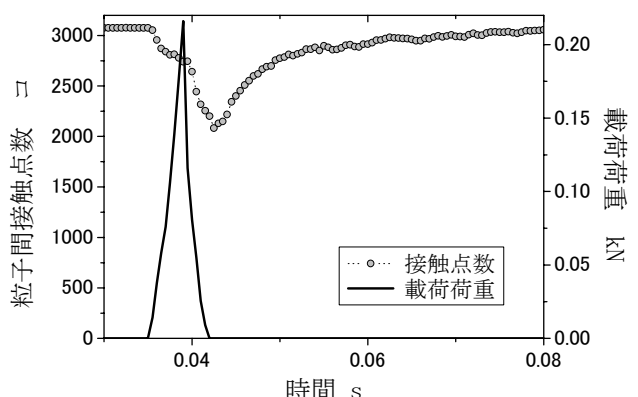


b) 高速載荷

(2) 載荷83回目



a) 標準載荷



b) 高速載荷

(3) 載荷200回目

図5.15 荷重作用過程における粒子間接触点数の変化

各接触点における接触力の方向を、また接触点が著しく減少する除荷時については、法線方向粒子間接触力の分布の状況と、最大荷重時には接触するが除荷時に接触を失う点の分布を示す。

図5.16.1～図16.1.3 が載荷1回目、図5.17.1～図5.17.3 が載荷83回目の粒子間接触状況で、図5.16&17.1が載荷過程の接触点数減少時、図5.16&17.2が最大荷重時、図5.16&17.3が除荷時の状況を示す。また図各図において図(1)は法線方向粒子間接触力の分布の状況を示し、図(2)は粒子間接触点における接触力の方向について、鉛直から水平方向を10度ごとに分割し、その各方向の接触力の和を全方向の接触力の和で除した値を示す。

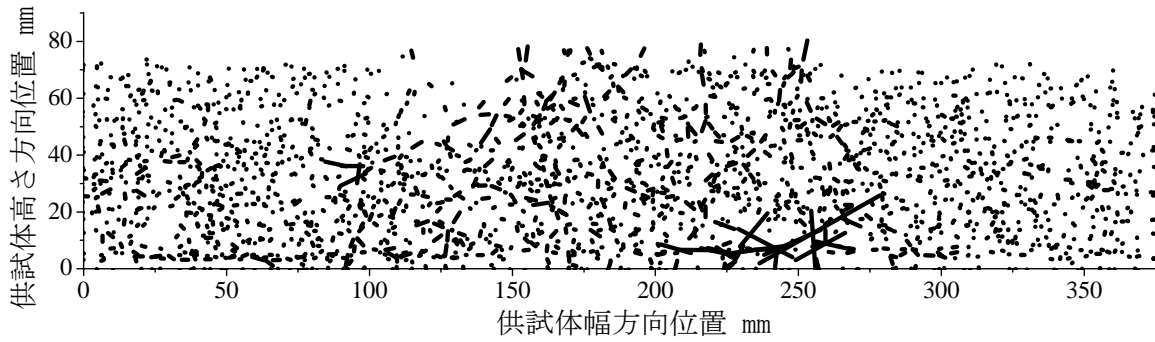
まず図5.16.1(1)より、載荷1回目の載荷過程で接触点数が減少する瞬間において、法線方向粒子間接触力は全体的に小さいが、標準載荷では鋼球層の下層部分で粒子間接触力の大きい部分が見られるのに対して、高速載荷では、鋼球層表層の載荷板直下で粒子間接触力の大きい点が鉛直やや斜め方向に見られ、その右側部分でも粒子間接触力が比較的大きい点が、鋼球層下部に向けて、鉛直斜め方向に見られる。この瞬間の接触力の作用方向について、図5.16.1(2)より、標準載荷および高速載荷のいずれでも、接触力の割合が卓越する角度は見られないが、標準載荷では鉛直方向から60～70度でピークが見られるのに対して、高速載荷では、鉛直方向の接触力の割合はむしろ小さくなっている。前者は、図(1)a)において鋼球下層に局所的に見られる粒子間接触力を含むと考えられ、また後者については、図(1)b)において接触力の伝達が鉛直やや斜め方向に向いていることを反映していると考えられる。

次に図5.16.2(1)より、載荷1回目の最大荷重時においては、標準載荷および高速載荷のいずれでも鋼球層の載荷板下部を中心に大きな粒子間接触力が発生し、特に高速載荷では、載荷板と接触する複数の接触点で粒子間接触力がほぼ鉛直方向に卓越している。この瞬間の接触力の作用方向について、図5.16.2(2)より、標準載荷では鉛直方向で、高速載荷では鉛直方向から10～20度の方向で接触力の割合が卓越している。

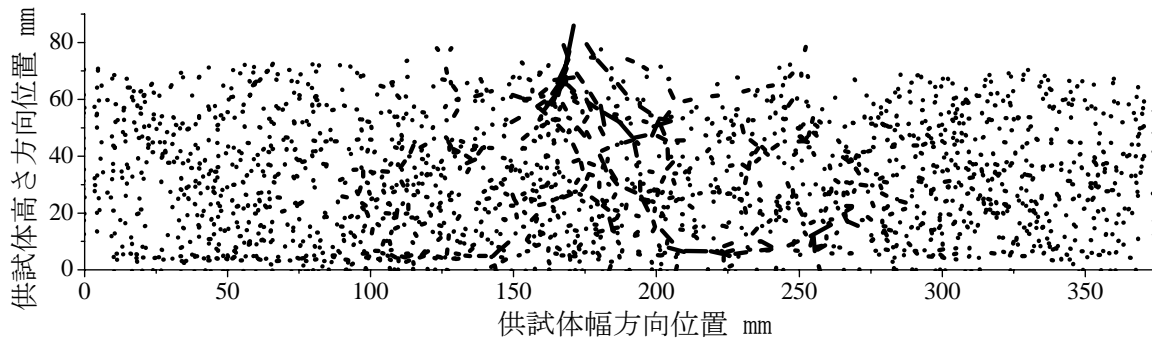
ところで前出の図5.15(1)より、最大荷重時の粒子間接触点数は、標準載荷では2900個程度であるのに対して、高速載荷では2400個程度と少なくなっている。載荷荷重が同様であることを考えると、高速載荷では少ない接触点数で標準載荷と同じ荷重を支持するため、図5.16.2(1)に示すように粒子間接触力が標準載荷と比較して大きくなると考えられる。

更に図5.16.3(1)より、載荷1回目の除荷時において、法線方向粒子間接触力は全体的に激減するが、特に高速載荷では、標準載荷と比較して、接触点数が減少しているのが明瞭である。また接触点を失う点は、載荷板下だけでなく、鋼球層の上層で全体的に分布している。この瞬間の接触力の作用方向について、図5.16.3(2)より、標準載荷および高速載荷において、鉛直方向～10度までの方向と、鉛直方向から60～90度の方向で接触力の割合が大きくなっている。これは除荷時において、水平方向の粒子間接触力は失われにくいことを表していると考えられる。

以上より、載荷1回目における粒子間接触力の状況の傾向としては、①載荷過程の途中においても高速載荷では、鋼球層中を荷重が伝達しつつあること、②最大荷重時において高速載荷では粒子間接触点数は少なく、法線方向粒子間接触力は標準載荷より大きいこと、③除荷時において高速載荷では、粒子間接触が1000点近く失われ、それは鋼球層上層全体に分布すること、④法線方向接触力の作用方向については、いずれの載荷速度でも顕著に卓越する方向は見られないこと、が観察された。

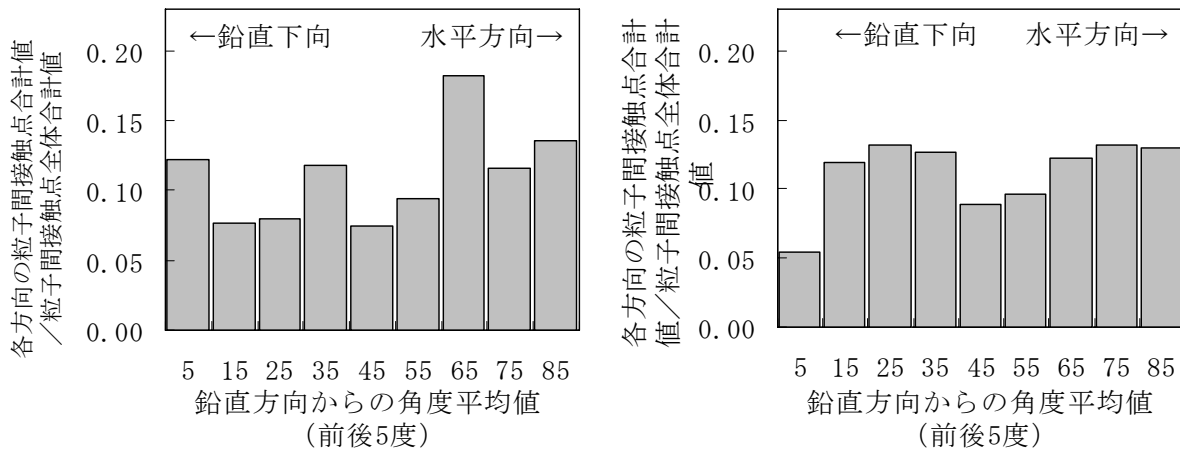


a) 標準載荷



b) 高速載荷

(1) 法線方向粒子間接触力と方向

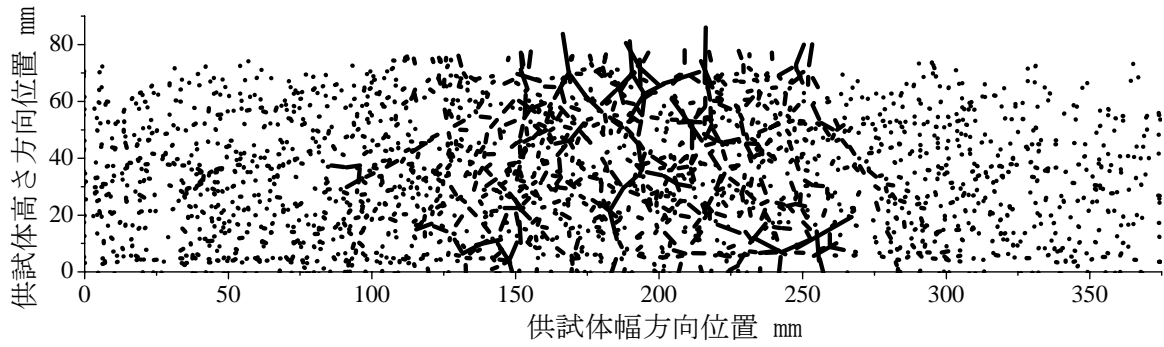


a) 標準載荷

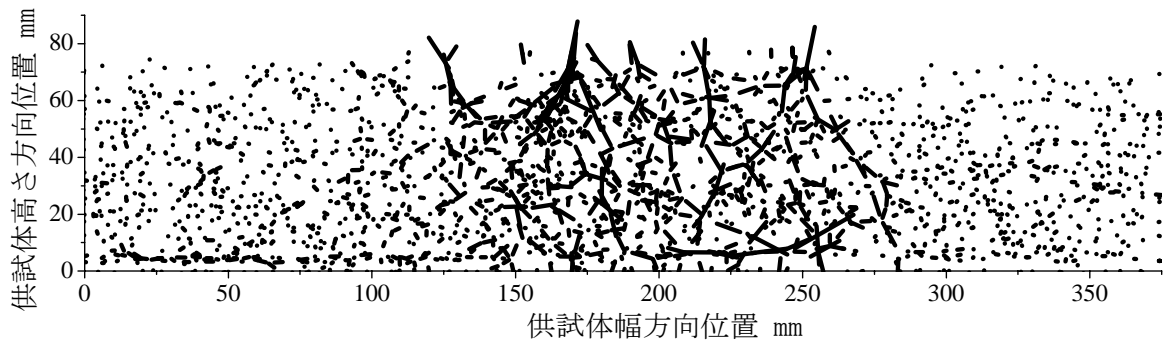
b) 高速載荷

(2) 粒子間接触点の角度とその方向の接触力の割合

図5.16-1 載荷1回目の接触点減少時の粒子間接触状況

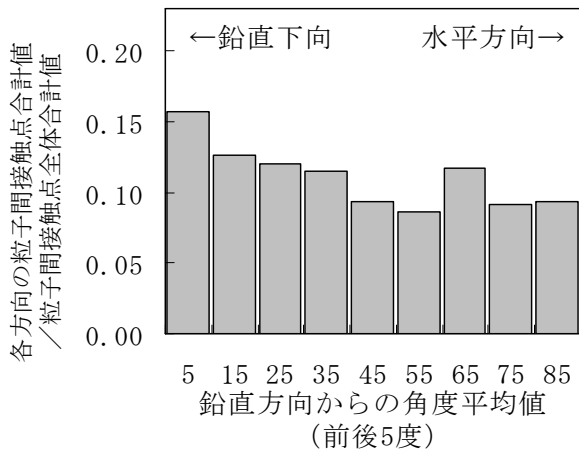


a) 標準載荷

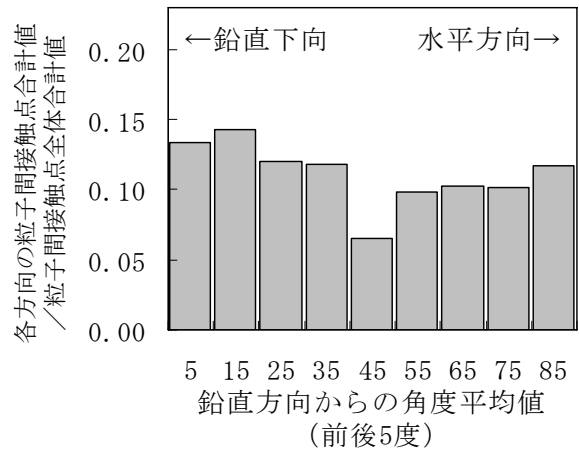


b) 高速載荷

(1) 法線方向粒子間接触力と方向



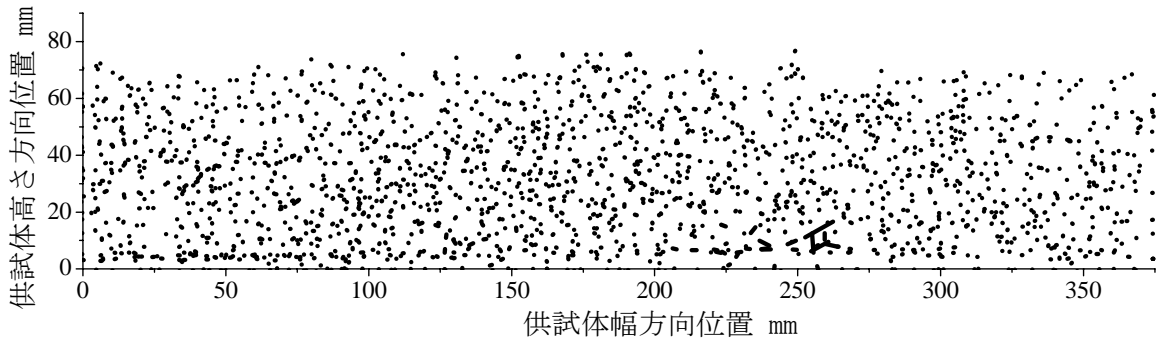
a) 標準載荷



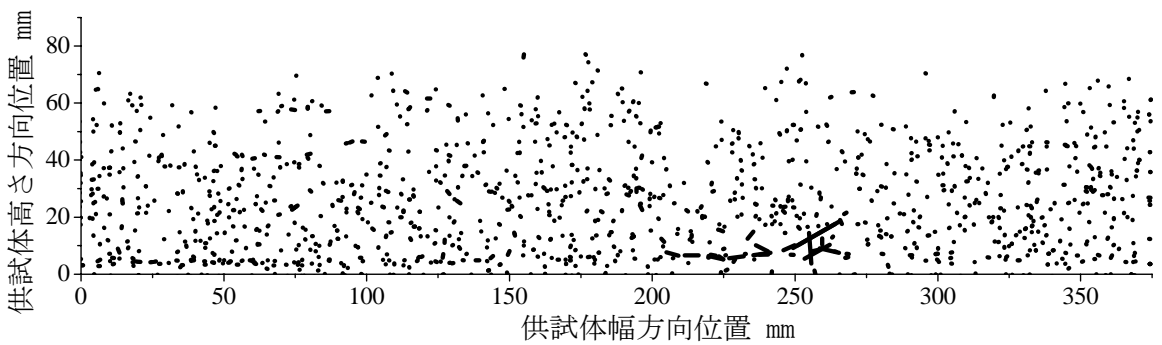
b) 高速載荷

(2) 粒子間接触点の角度とその方向の接触力の割合

図5.16-2 載荷 1 回目の 最大荷重時 の粒子間接触状況

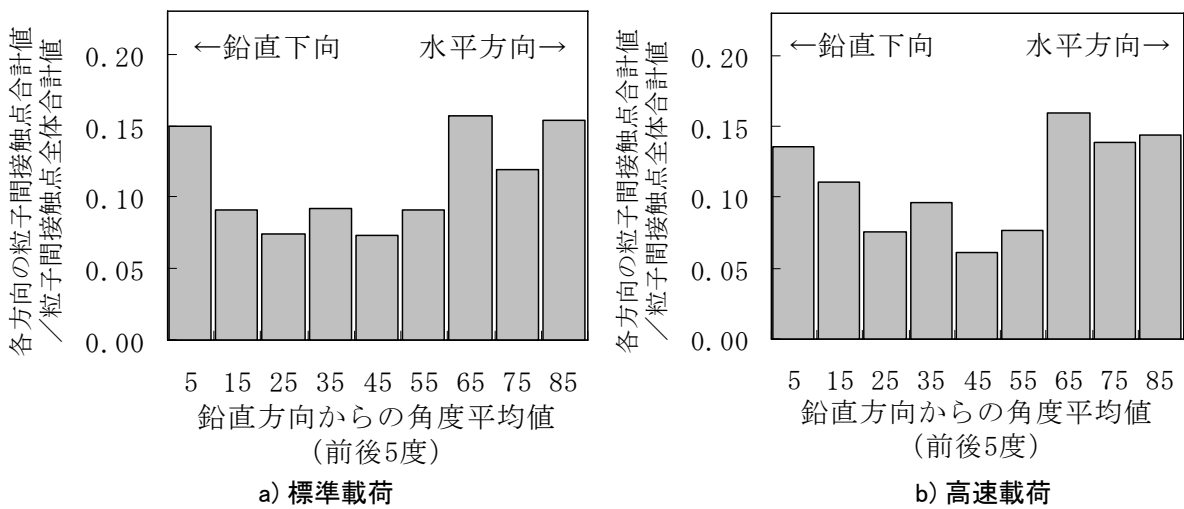


a) 標準載荷



b) 高速載荷

(1) 法線方向粒子間接触力と方向



(2) 粒子間接触点の角度とその方向の接触力の割合

図5.16-3 載荷1回目の除荷時の粒子間接触状況

これらは、載荷履歴のない供試体に初めて載荷を行った載荷1回目の状況であるが、次に、漸進沈下過程となる載荷83回目の粒子間接触状況を観察する。

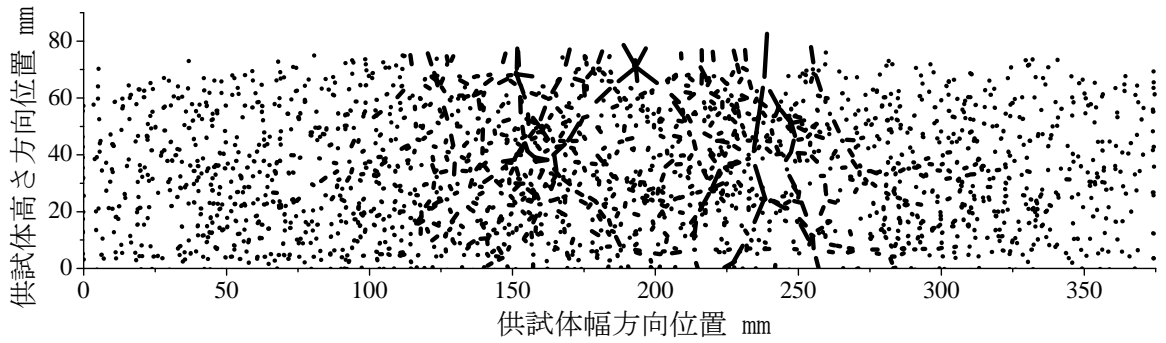
図5.17.1(1)より、載荷83回目の載荷過程で接触点数が減少する瞬間において、法線方向粒子間接触力は全体的に小さいが、標準載荷および高速載荷のいずれでも、載荷板下部分で粒子間接触力の大きい点が鉛直方向に見られる。この瞬間の接触力の作用方向について図5.17.1(2)より、標準載荷および高速載荷のいずれでも鉛直方向の荷重の割合が最も大きく、特に高速載荷では全体の20%を越えている。その後、鉛直方向からの角度が大きくなるに従い、荷重の割合も減少し、40度～90度ではほぼ同程度となっている。前出の図5.16.1(2)に示す載荷1回目の傾向と比較すると鉛直方向の荷重の割合が増加していることから、繰返し載荷によって載荷荷重を伝達する粒子構造が確立されつつあるものと考えられる。

次に図5.17.2(1)より、載荷83回目の最大荷重時においては、標準載荷および高速載荷のいずれでも鋼球層の載荷板下部を中心に大きな粒子間接触力が発生している。この瞬間の接触力の作用方向について、図5.17.2(2)より、標準載荷では図5.17.1(2)に示した載荷途中の分布とほぼ同様であるのに対して、高速載荷では、鉛直方向よりも鉛直方向から10～20度の方向で接触力の割合が若干増加し、鉛直方向～20度の間で全体の35%程度の粒子間接触力が発生している。また図5.17.2(2)b)における接触方向60～70度のピークについては、図5.17.2(1)で鋼球層下層に見られる、側方方向への荷重の伝達を反映していると思われる。

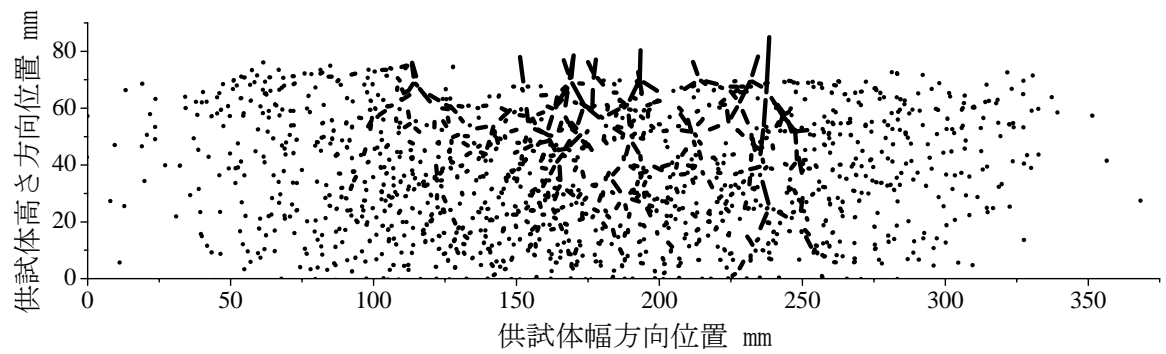
更に図5.17.3(1)より、載荷83回目の除荷時において、法線方向粒子間接触力は全体的に激減するが、特に高速載荷では、標準載荷と比較して、接触点数が減少しているのが明瞭である。また接触点を失う点は、載荷板下だけでなく、鋼球層の上層で全体的に分布している。この瞬間の接触力の作用方向について、図5.17.3(2)より、標準載荷では水平方向で、また高速載荷では鉛直方向～10度の方向と、鉛直方向から60～90度の方向で接触力の割合が大きくなっている。この傾向は載荷1回目と同様である。

以上より、載荷83回目における粒子間接触力の状況の傾向を載荷1回目と比較して異なる点は、①載荷過程の途中において、標準載荷および高速載荷で、鋼球層中を荷重が伝達しつつあるのが明瞭であること、②荷重作用時の法線方向接触力の作用方向は、いずれの載荷速度でも、鉛直方向から0～20度の間において接触力の割合が大きいことが観察された。

つまり粒子層は繰返し載荷によって粒子構造が変化し、それによって粒子の動的挙動の特徴も変わることから、粒子層における短期的な挙動と長期的な残留沈下の増加—つまり粒子層の変化—は互いに影響を及ぼしあうといえる。

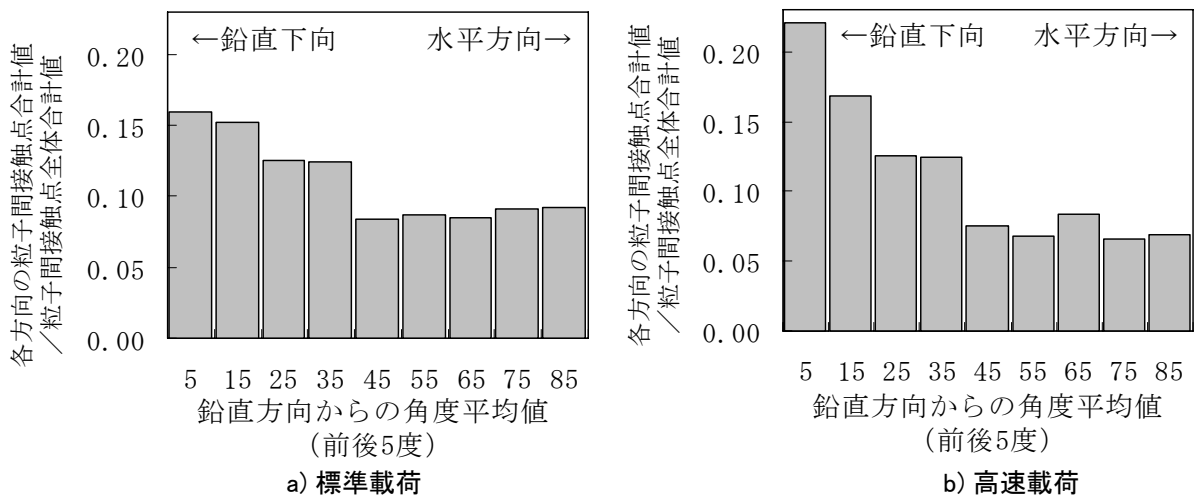


a) 標準載荷



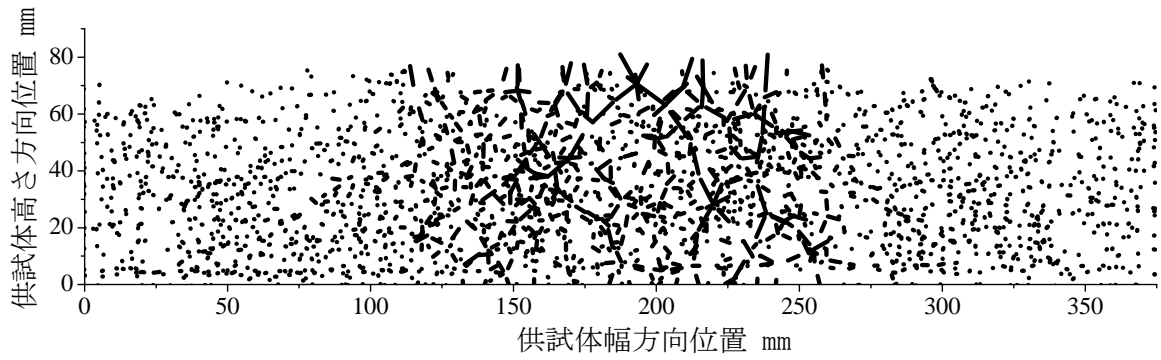
b) 高速載荷

(1) 法線方向粒子間接触力と方向

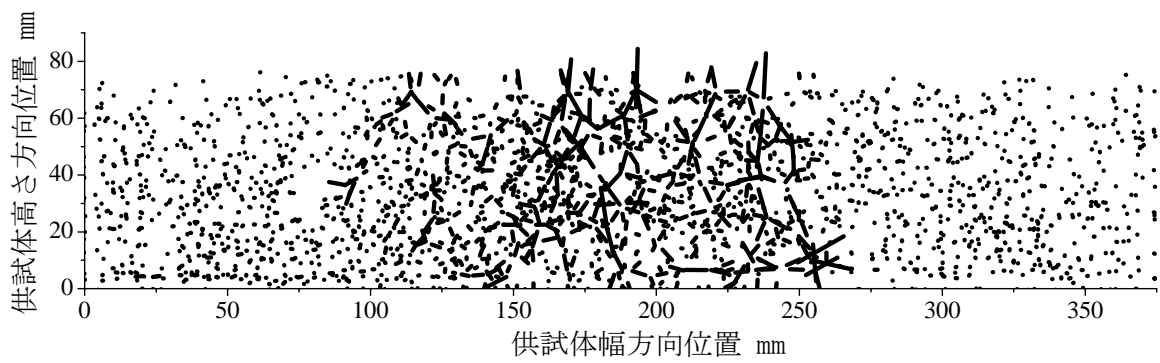


(2) 粒子間接触点の角度とその方向の接触力の割合

図5.17-1 載荷83回目の接触点減少時の粒子間接触状況

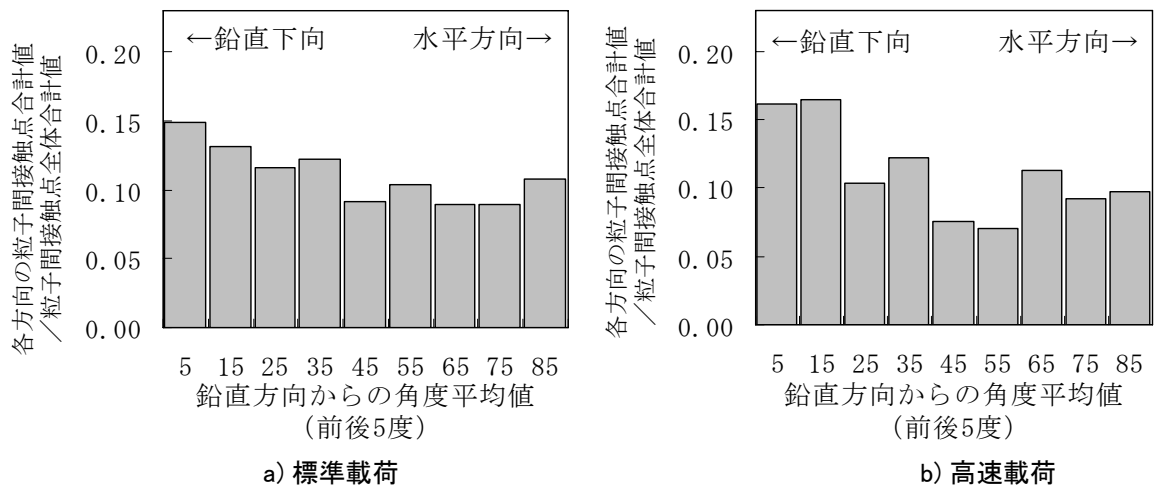


a) 標準載荷



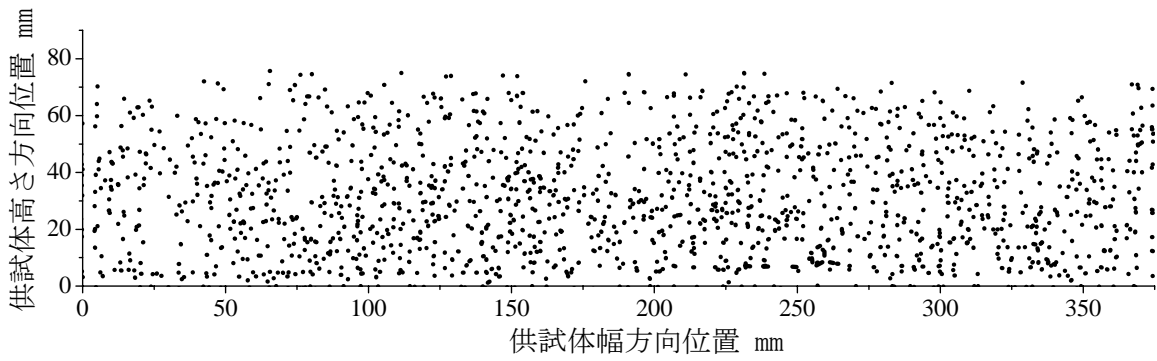
b) 高速載荷

(1) 法線方向粒子間接触力と方向

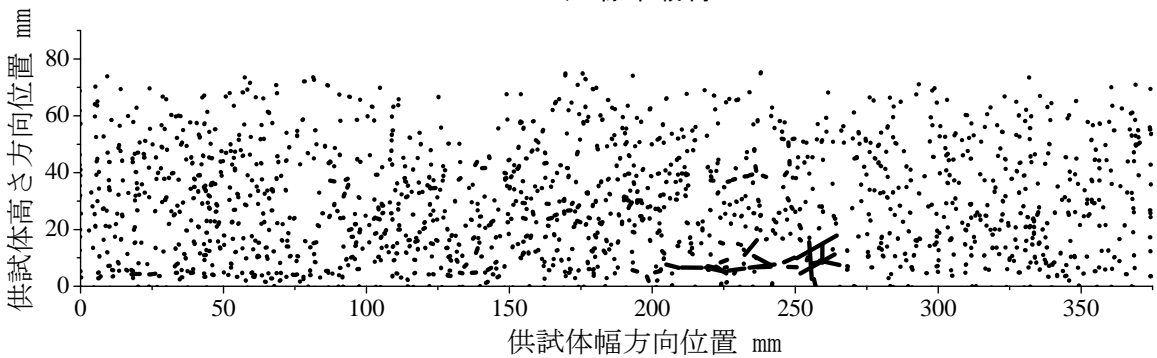


(2) 粒子間接触点の角度とその方向の接触力の割合

図5.17-2 載荷83回目の最大荷重時の粒子間接触状況

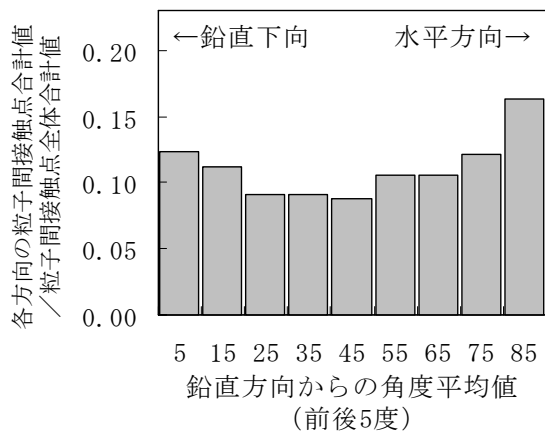


a) 標準載荷

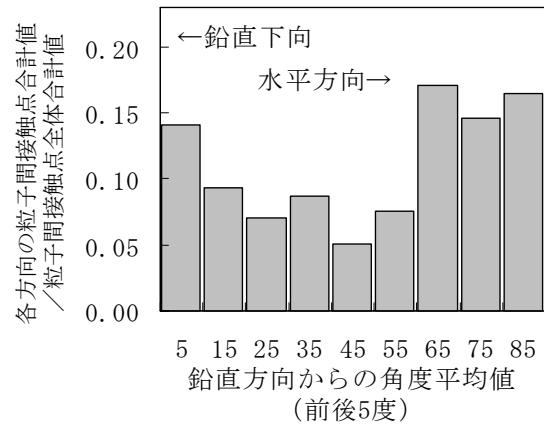


b) 高速載荷

(1) 法線方向粒子間接触力と方向



a) 標準載荷



b) 高速載荷

(2) 粒子間接触点の角度とその方向の接触力の割合

図5.17-3 載荷83回目の除荷時の粒子間接触状況

5.3 砕石層モデルのシミュレーション概要

実験で用いた細粒砕石の実形状を元にした砕石粒子のモデル化を行い、砕石層の実験の再現シミュレーションを行う。ここで比較する実験は、3章で述べた、砕石層におけるケースS2とする。またシミュレーションには、1章で述べた'DEM3D-CS'を用いる。

5.3.1 シミュレーションモデル

図5.18に供試体モデルの概要、図5.19に砕石要素の粒径分布を示す。供試体のサイズおよび砕石の粒径分布は、いずれも実験と同様とした。また、土槽、載荷板、加力棒は前節図5.3に示したように、球集合体としてモデル化した。

供試体モデル作成の際には、砕石層の密度（間隙比）が実験時と同様の 1.64g/cm^3 （0.58）となるように砕石要素数を決定し、土槽要素に投入した。ただし砕石要素の場合、前節の鋼球要素と異なり、要素表面に凹凸があり、粒子間摩擦角も大きい（後述）ことから締固めが困難である。そこで砕石要素に関しては、供試体構築の段階では粒子間摩擦角を0として目標の密度まで締固め、その後、後述の摩擦角に戻した。

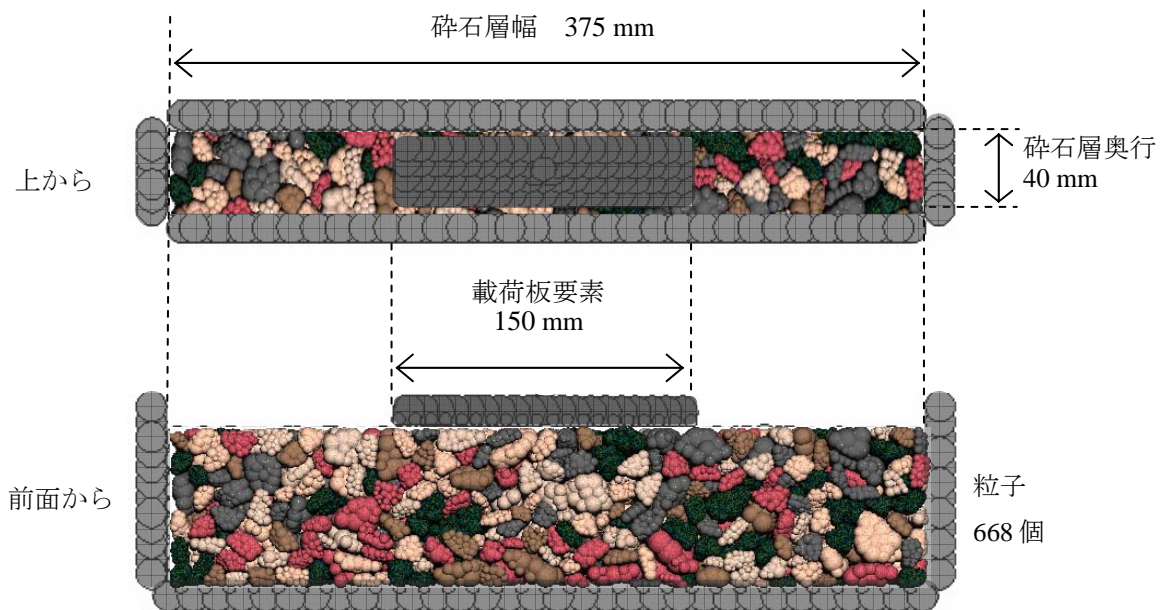


図5.18 供試体の概要

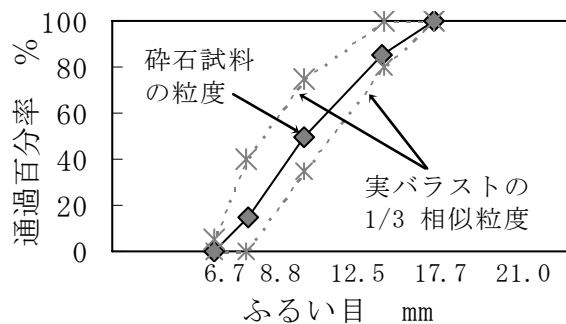


図5.19 砕石要素の粒径分布

5.3.2 球集合体による碎石試料のモデル化

砂や碎石などの不規則形状を粒子単位でモデル化する場合、多面体を用いる場合と球集合体を用いる場合があるが、本研究では、接触判定の精度および計算効率を考慮して、球集合体でモデル化した。以下にモデル化の手順を示す。

(1) 碎石試料の形状測定

実験で用いた碎石試料から50個を任意に選び、各碎石粒子の3次元形状を測定した。形状測定には、**図5.20**に示すRolandDG株式会社製のレーザスキャナ‘PICZA’を用いた。PICZAは、**図5.20(1)**に示すように物体を乗せたテーブルが回転し、側面から照射されるレーザによって精密な形状測定が行なわれる。測定の際には、レーザ光が側面から照射されるため、回転テーブル上への物体の設置方法に工夫が必要であるが、ここでは粘土を用いている⁶⁾。**図5.20(3)**に碎石粒子の形状測定結果を、PICZAのビューワによって示した例を示す。

(2) 不規則形状のモデル化手法

不規則形状粒子の球集合体モデル化において、本研究では、松島ら⁷⁾によって導入された‘動的最適化法’を用いたモデル化コードを用いた。2次元形状の場合の動的最適化法の概念を**図5.21**に示す。ここでは任意に発生させた円と実粒子の輪郭との間に、円の法線方向を向いた仮想ばねを設定し、粒子表面に向かう仮想力を作用させる。1つ目の球と粒子表面に作用する仮想力の合計値が収束解に到達したところでstep1が終了し、2つ目の円、3つ目・・・と設定したstep数だけ続く。

この手法により一つの碎石粒子を球10個、20個、50個でモデル化した結果を**図5.22(1)**に示す。図より、構成球の数が少ないと全体的には粒子形状は丸く、表面の凹凸も大きくなる。これに対して構成球が増えるほど、碎石粒子の稜角が明瞭となり、表面の凹凸も小さくなる。本研究で用いた安山岩碎石は、稜角に富む角張った形状であることから、モデル化においては構成球の数を増やすことが望ましいが、それによって計算効率は悪くなることが懸念される。

最適な構成球の和に関しては、粒子個々の形状に対する誤差指標の検証⁸⁾と同時に、粒子集合体としてのマクロな特性についても検証が行われ⁸⁾、構成球10個の碎石モデルのシミュレーションと実験結果に整合性が見られた例⁸⁾がある。ここでは、形状測定を行った碎石粒子の質量から各試料の体積を算出し、球集合体モデルの体積と比較した。図より構成球10個、20個、50個の場合では大きな差異が見られないことから、ここでは構成球20個とした。ただし、最適な構成球の数に関しては、今後の課題とする。

5.3.3 DEMパラメータの設定

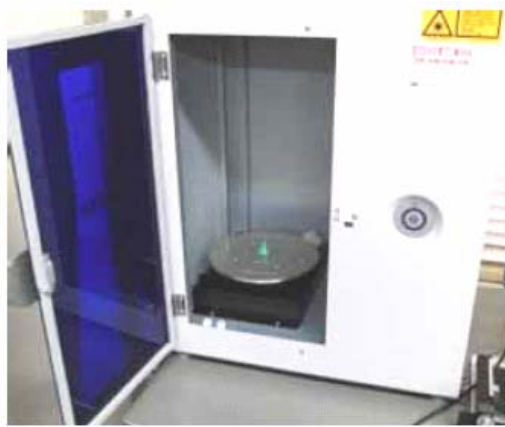
(1) 粒子間ばね係数

碎石要素の粒子間ばね係数については、波動方程式と振動方程式から導かれる式(5.4)⁹⁾によって決定する方法がある。

$$K = m \frac{V^2}{\Delta X^2} \quad \cdots (5.4)$$

ここで、 V は波動伝播速度、 m は粒子の質量、 X は粒子同士の間隔である。

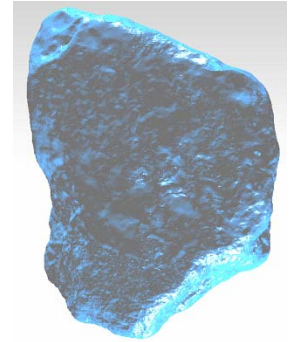
実バラスト層の場合、P波速度が450m/s程度、S波速度が225m/s程度という測定結果があり、



(1) レーザー式形状測定機 外観



(2) 砕石粒子測定状況⁶⁾
(粘土による固定)



(3) 測定結果表示例

図5.20 砕石試料の形状測定

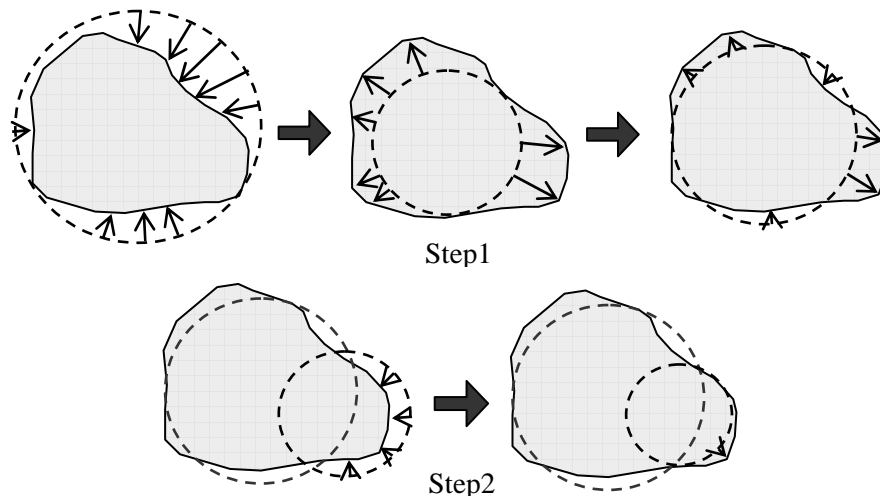
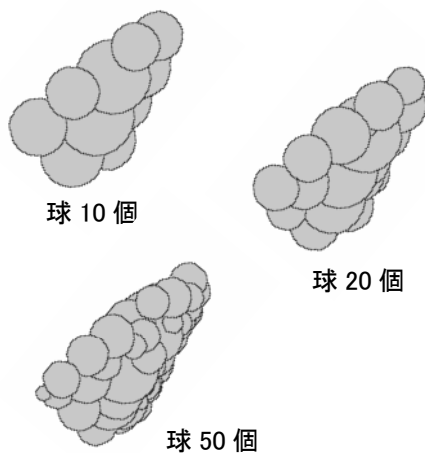
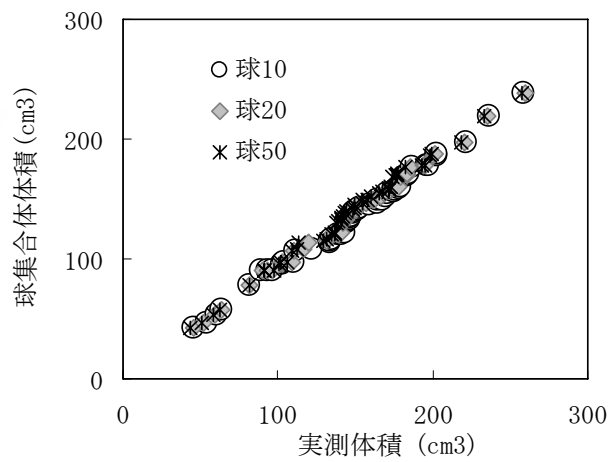


図5.21 動的最適化法の概念⁷⁾



(1) 構成球数の比較



(2) 試料とモデルの体積比

図5.22 球集合体砕石モデルの例

第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション

また平均粒径が約33mm，安山岩碎石の密度が 2.67g/cm^3 であることから，これらの値を式(5.4)に代入すると，実バラストについては $k_n=9.0\times 10^6\text{N/m}$ ， $k_s=2.3\times 10^6\text{N/m}$ 程度となる。

しかし本実験で用いた碎石試料は，実バラストの1/3 相似粒径の細粒碎石であるため，上記の値を用いるのは不適切と考えられる。そこで，本実験で用いた細粒碎石のモデルにおいては， $9.67\times 10^5\sim 1.0\times 10^6\text{N/m}$ の値が用いられている例がある⁸⁾ことから，ここでは $k_n=9.67\times 10^5\text{N/m}$ ， $k_s=3.63\times 10^5$ とする。

(2) 減衰係数

粒子間の減衰係数は，前節の式(5.3)に想定する反発係数を代入して求めた。

碎石の反発係数については，形状の異なる岩石の落下試験結果¹⁰⁾を参考にして，0.2，0.4，0.6を想定して減衰係数を求めた。以下，反発係数0.2から減衰係数を算出したケースを‘減衰大’，反発係数0.4から算出したケースを‘減衰中’，反発係数0.6から算出したケースを‘減衰小’と記述する。

(3) 摩擦角

粒子間の摩擦角については，砂や細粒碎石の球集合体モデルを用いたシミュレーション事例を参考にして27度および45度⁸⁾で，またバラスト粒子の多面体モデルを用いたシミュレーション事例を参考にして36度¹¹⁾によっても行うこととした。

これらのDEMパラメータを表5.2に示す。

5.3.4 繰返し载荷条件

本シミュレーションにおいて繰返し载荷条件は，繰返し载荷実験のS2ケースと同様に，荷重振幅は0.8kN，载荷速度（加力棒の上下速度）は標準载荷で10mm/s，高速载荷で100mm/sとした。また载荷間隔は，実験では標準载荷も高速载荷も同様に0.5s 間隔としたが，シミュレーションにおいては計算時間の節約のために，標準载荷では载荷初期は0.3s，その後は0.2秒とし，高速载荷では約0.1秒とした。

表5.2 DEMパラメータ

粒子間バネ係数 (N/m)		粒子間 摩擦角 (度)	粒子間減衰係数 (N・s/m)		
法線方向 K_n	接線方向 K_s		法線方向 C_n	接線方向 C_s	反発係数
9.67×10^5	3.63×10^5	27	10.25	6.28	0.4
		36	16.7	10.25	0.2
			10.25	6.28	0.4
			5.89	3.6	0.6
		45	10.25	6.28	0.4

5.4 砕石層モデルのシミュレーション結果

5.4.1 シミュレーション波形例

シミュレーション結果より、**図5.23.1**に荷重1～3回目の、**図5.23.2**に荷重18～20回目の荷重の荷重波形と荷重板の変位波形を示す。いずれも**図(1)**が粒子間摩擦角27度、**図(2)**が粒子間摩擦角36度、**図(3)**が粒子間摩擦角45度の場合のシミュレーション結果を示す。更に各図とも、左上の**図a)**は標準荷重における荷重波形、左下の**図b)**が同じく変位波形、右上の**図c)**は高速荷重における荷重波形、右下の**図d)**が同じく変位波形を示す。

図5.23.1より、まず**図5.23.1(1)**の粒子間摩擦角27度の場合において、**図5.23.1(1a)**の標準荷重の荷重波形は、荷重1回目で荷重作用時間が約0.18sであるが、荷重2回目および3回目における荷重作用時間は約0.1秒でほぼ一定となる。これに伴い**図5.23.1(1b)**の変位波形でも、荷重1回目の最大荷重時に約1.0mmの変位のピークを示した後、除荷後に約0.77mmが残留沈下量として残るが、荷重2回目以降では、変位振幅は0.5mmでほぼ同程度で、沈下進みも荷重1回目に比較して著しく減少する。

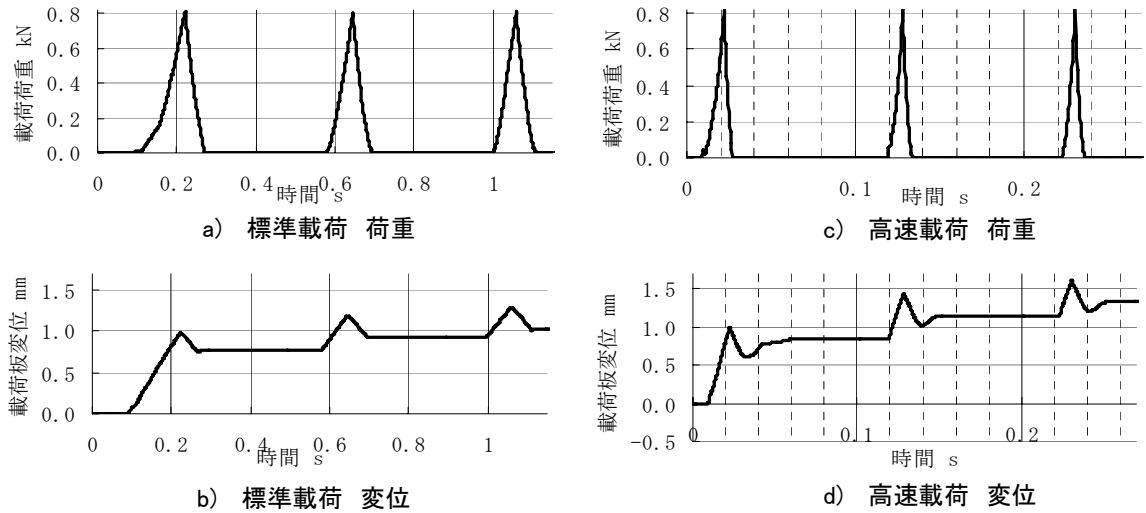
一方、**図5.23.1(1c)**の高速荷重の荷重波形は、荷重1回目で荷重作用時間は0.02s程度であるが、荷重2回目および3回目における荷重作用時間は約0.018秒でほぼ一定となる。これに伴い**図5.23.1(1d)**の変位波形でも、荷重1回目の最大荷重時に約1.0mmの変位のピークを示した後、一度0.6mm程度まで変位が減少した後、再度変位は0.8mm程度に戻る。この「除荷時に一度変位が減少して戻る波形」は荷重2回目および3回目においても波形に現れている。

次に**図5.23.1(2)**の粒子間摩擦角36度の場合において、いずれの荷重速度でも荷重波形の特徴は**図5.23.1(2)**とほぼ同様であるが、変位波形においては、波形の特徴は同様であるが、値が異なっている。**5.23.1(2b)**に示す標準荷重における変位波形では、荷重1回目の最大荷重時の変位が約0.7mmであり、粒子間摩擦角27度の場合の約7割程度となる。また除荷後の残留沈下量も約0.35mmで、粒子間摩擦角27度の場合の6割弱となる。また**図5.23.1(2d)**の高速荷重における変位波形でも、荷重1回目の最大荷重時の変位が約0.7mmで、粒子間摩擦角27度の場合の7割程度となり、除荷後の残留沈下量も約0.35mmで、粒子間摩擦角27度の場合の5割弱となる。

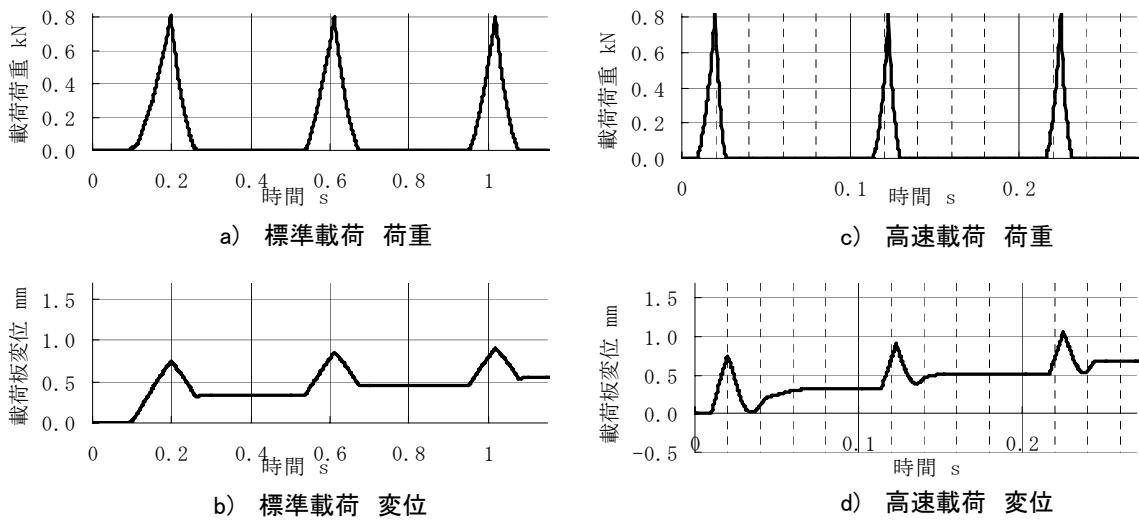
更に**図5.23.1(3)**の粒子間摩擦角45度の場合では、荷重波形の特徴も異なる。**5.23.1(3a)**に示す標準荷重の荷重波形は、荷重1～3回目で荷重作用時間は約0.2秒で一定であり、特に荷重2回目および3回目の荷重波形は、粒子間摩擦角27および36度の場合と異なる。一方で**5.23.1(3c)**に示す高速荷重の荷重波形では、荷重1～3回目で荷重作用時間は荷重1回目からほぼ一定となるが、波形自体は粒子間摩擦角27および36度の場合と同様となっている。更に変位波形にも差異が見られ、**5.23.1(3b)**に示す標準荷重における変位波形では、荷重1回目の最大荷重時の変位は約0.7mmで、粒子間摩擦角36度の場合と同程度であるが、除荷後の残留沈下量は約0.1mmで、粒子間摩擦角36度の場合の1/3以下となる。また**図5.23.1(3d)**の高速荷重における変位波形でも、荷重1回目の最大荷重時の変位は約0.7mmで、粒子間摩擦角36度の場合と同程度であるが、荷重1回目の除荷時には、一度変位がマイナスの値を示した後、残留沈下量が約0.2mm程度となり、荷重2回目および3回目でも、ほぼ同様な波形を示している。この変位がマイナスを示すのは、荷重板が初期位置より上方へ飛び上がる現象を示している。

これより、粒子間摩擦角の大きさは、最大荷重時および除荷時の変位、また残留沈下量にも

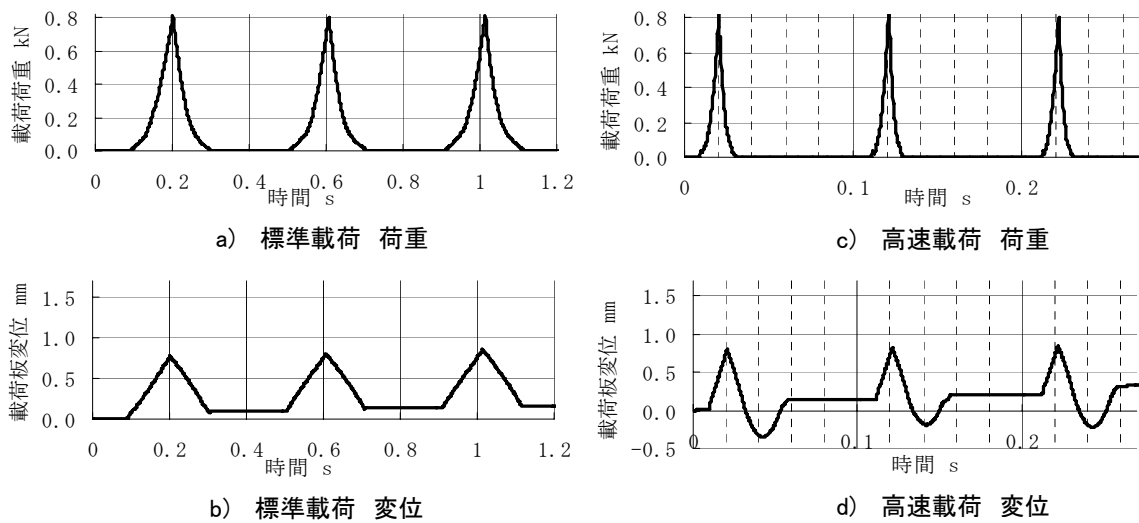
第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション



(1) 摩擦角 27 度



(2) 摩擦角 36 度



(3) 摩擦角 45 度

図5.23.1 載荷1~3回目のシミュレーション波形

影響を与えるといえる。

ここで、上述の「標準荷重および高速荷重において、荷重1回目のみ荷重作用時間が長く、その後は、ほぼ一定となる」傾向は、3章の実験結果および前節の鋼球層シミュレーションでも同様に見られた傾向である。また、高速荷重の変位波形（各図d）で見られた「荷重1～2回目において、最大荷重時の変位のピークが除荷時に一度減少した後、再度戻る」傾向も、3章の実験結果および前節の鋼球層シミュレーションで同様に見られている。

これより、繰返し荷重下の砕石層の荷重初期の変形挙動に関して、DEMシミュレーションによる実験の再現はほぼ可能であるが、定量的には粒子間摩擦角の影響が明瞭に表れている。

次に荷重18～20回目の波形を示した図5.23.2より、粒子間摩擦角27度の場合の図5.23.2(1)では、図5.23.2(1)a)c)に示す標準荷重および高速荷重の荷重波形において、荷重作用時間はほぼ一定の状態が継続している。また図5.23.2(1)b)d)の変位波形でも、変位振幅は標準荷重および高速荷重で0.3mm前後で一定の状態が継続し、また沈下進みも図5.23.1の荷重初期に比較して著しく減少している。

また、粒子間摩擦角36度の場合の図5.23.2(2)でも、図5.23.2(2)a)c)の標準荷重および高速荷重の荷重波形における荷重作用時間ほぼ一定の状態が継続し、図5.23.2(2)b)d)の変位波形でも、変位振幅は標準荷重および高速荷重で0.3mm前後で一定の状態が継続し、また沈下進みも図5.23.1の荷重初期に比較して著しく減少している。ここで変位振幅0.3mmは図5.23.2(1)の粒子間摩擦角27度の時とほぼ同じ値である。

一方で粒子間摩擦角45度の場合の図5.23.2(3)では、荷重波形および変位波形において、粒子間摩擦角27度および36度の時と異なる特徴を示す。特に5.23.2(3)c)に示す標準荷重の変位波形では、変位振幅が0.55mm程度で、粒子間摩擦角27度および36度の場合に比較して2倍近い値となっている。この値は、図5.23.1の荷重1回目の変位波形において、粒子間摩擦係数27度、36度、45度の場合において共通している変位振幅とほぼ同じ値となっている。

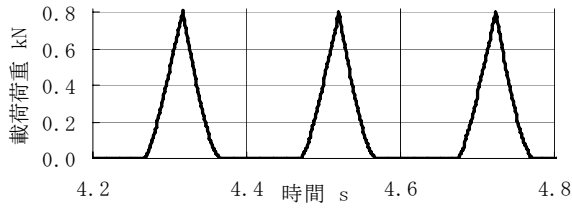
つまり、粒子間摩擦角27度および36度の場合は、荷重1回目に大きな残留沈下量が発生した後、変位振幅および沈下進みともに徐々に減少するのに対して、粒子間摩擦角45度の場合は、荷重1回目における残留沈下量は小さいものの、その後も変位振幅および沈下進みともに荷重1回目とほぼ同じ状況が継続されていると考えられる。これは、実験結果や鋼球層のシミュレーションと比較しても全く異なる現象であることから、繰返し荷重下の粒子層の挙動を正確に再現できていない可能性が大きい。

以上より、砕石層シミュレーションにおける粒子間摩擦角の設定においては、実験結果との比較において、定量的な差異が生じるだけでなく、挙動自体が異なる可能性もあることから、注意が必要といえる。

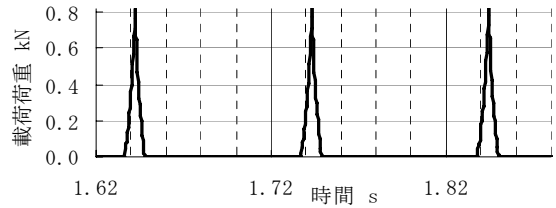
また、図5.23.1および図5.23.2の両図において見られた共通の傾向としては、荷重2回目以降の荷重波形において、荷重作用時間が標準荷重で0.13秒前後、高速荷重で0.013秒前後となり、実験における1波の荷重作用時間の6～7割程度となっている。シミュレーションにおいては、標準荷重および高速荷重の荷重速度と荷重振幅を実験と同様にしていることから、シミュレーションモデルでは、実験供試体よりも速く設定荷重に達していることとなる。

この要因としては、5.2.1で述べた通りであるが、シミュレーション結果における標準荷重と高速荷重の荷重作用時間は、ほぼ1:10となっていることから、この2条件で荷重速度の影響を比較することとする。

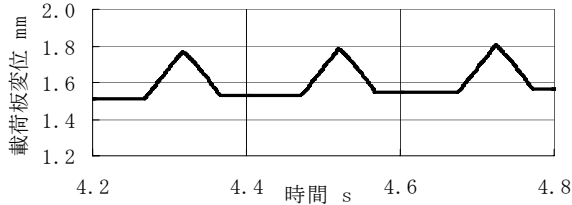
第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション



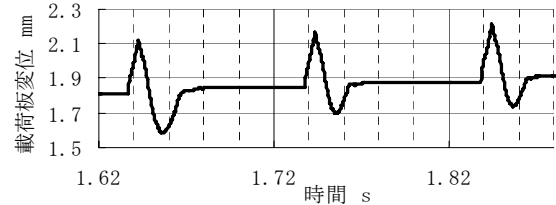
a) 標準载荷 荷重



c) 高速载荷 荷重

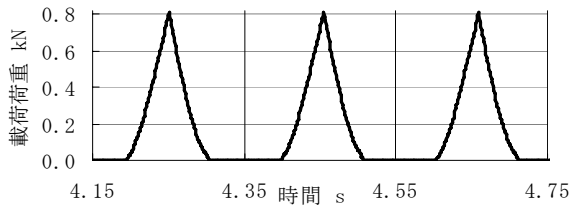


b) 標準载荷 変位

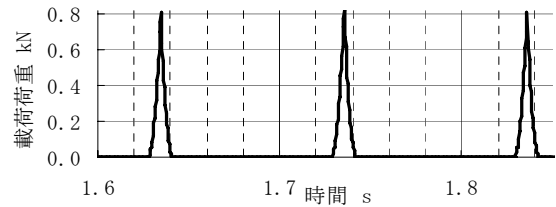


d) 高速载荷 変位

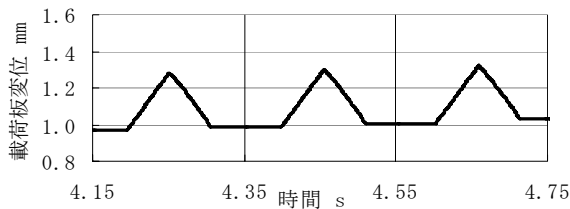
(1) 摩擦角 27 度



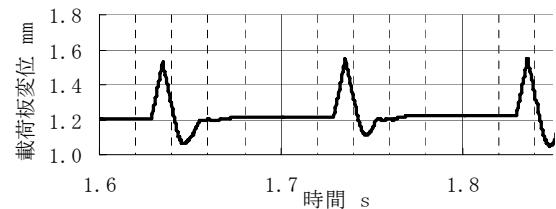
a) 標準载荷 荷重



c) 高速载荷 荷重

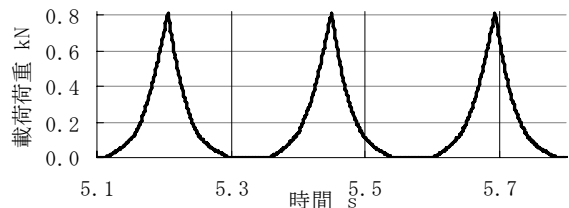


b) 標準载荷 変位

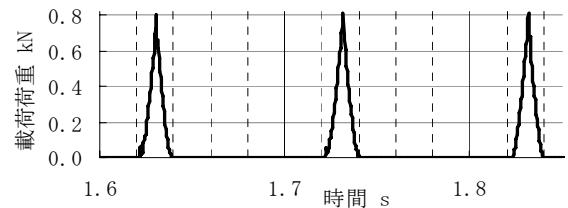


d) 高速载荷 変位

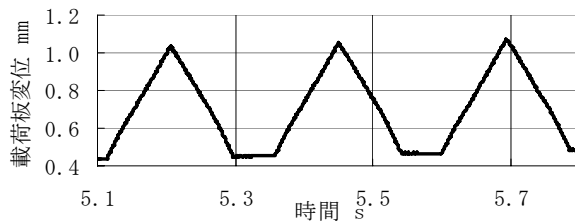
(2) 摩擦角 36 度



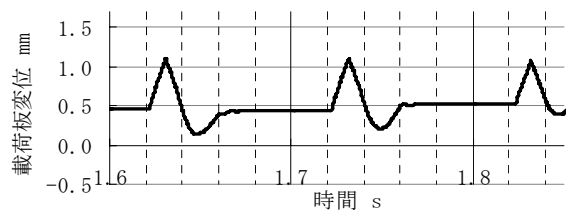
a) 標準载荷 荷重



c) 高速载荷 荷重



b) 標準载荷 変位



d) 高速载荷 変位

(3) 摩擦角 45 度

図5.23.2 载荷18~20回目のシミュレーション波形

5.4.2 残留沈下量と載荷回数との関係

シミュレーション結果より、繰返し載荷過程における残留沈下量と載荷回数との関係を示す。ここで図5.24.1は3通りの粒子間摩擦角の結果を載荷20回まで示し、図5.24.2は3通りの粒子間摩擦角の結果（粒子間摩擦角36度で一定）を載荷20回まで示した、図5.24.3は、粒子間摩擦角36度で減衰係数中の場合のシミュレーション結果と実験結果を載荷50回まで示している。

図5.24.1のいずれの沈下曲線も、まず‘初期沈下’が発生し、その後、漸進的沈下過程を示す沈下特性が共通して表れている。

図5.24.1(1)に示すシミュレーション結果より、3通りの粒子間摩擦角のいずれにおいても、載荷1回目では標準載荷と高速載荷の残留沈下量が同程度となるが、その後、高速載荷の沈下進みが若干大きく、載荷20回終了時の残留沈下量も高速載荷の方が大きくなっている。ただし粒子間摩擦角45度の場合においてのみ、高速載荷10回目以降で残留沈下が減少する傾向が見られるが、先述した通り、粒子間摩擦角45度の場合においては、実験と異なる粒子の挙動が起きている可能性がある。

また、残留沈下量の値では、繰返し載荷20回終了時において、図5.24.1(1a)の粒子間摩擦角27度の場合には標準載荷で1.55mm、高速載荷では1.92mmとなり、図5.24.1(1b)の粒子間摩擦角36度の場合には標準載荷で0.87mm、高速載荷では1.30mmとなり、図5.24.1(1c)の粒子間摩擦角45度の場合には標準載荷で0.47mm、高速載荷では0.59mmとなり、粒子間摩擦角の増加に伴い残留沈下量が小さい減少する傾向が見られる。ここで、図5.24.1(2)の実験結果と比較すると、標準載荷では粒子間摩擦角36度の場合、また高速載荷では粒子間摩擦角27度と36度の両方が同程度の値を示している。

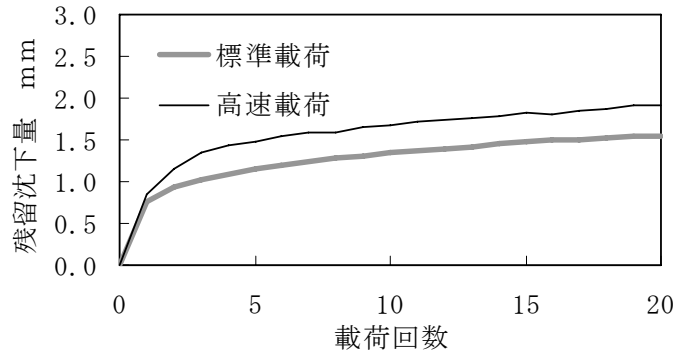
次に図5.24.2(1)に示すシミュレーション結果より、3通りの減衰係数のいずれにおいても、載荷1回目では標準載荷と高速載荷の残留沈下量が同程度となるが、その後、高速載荷の沈下進みが若干大きく、載荷20回終了時の残留沈下量も高速載荷の方が大きくなっている。

また、残留沈下量の値においては、減衰係数による差異はほとんど見られず、いずれも沈下曲線が微妙に異なるものの、載荷20回目の残留沈下量は、標準載荷で1.1mm前後、高速載荷で1.29～1.42mmで、大きな差異は見られない。

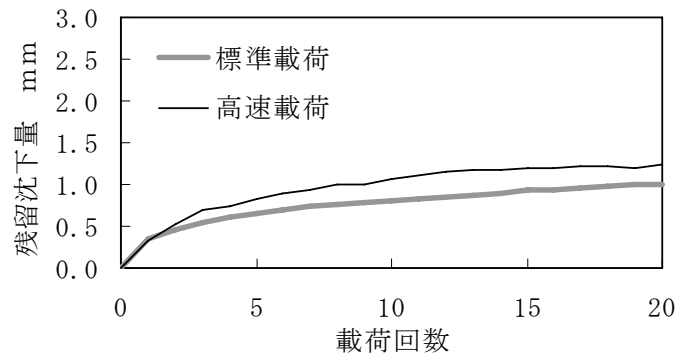
また図5.24.3よりシミュレーション結果と実験結果を比較すると、標準載荷では載荷数回目までの初期沈下が発生した後、沈下進みが収束する傾向が、また高速載荷では沈下進みが収束し難い傾向が表れている。ここで高速載荷における沈下曲線は、2回の実験結果において大きな差異が見られるが、シミュレーション結果は、実験における残留沈下量が小さかった方と近い値となっている。

以上より、粒子間摩擦角36度で行ったシミュレーション結果の沈下曲線は、定性的にも定量的にも、実験と近い結果が得られていることから、碎石層の沈下挙動についても、DEMによる再現シミュレーションが可能であるといえる。ただし載荷1回目の残留沈下量の傾向に関しては、実験結果では（バラツキがあるものの）「標準載荷の方が高速載荷より大きい」結果も見られるのに対して、シミュレーション結果では、標準載荷と高速載荷でほぼ同程度の値となっている。この差異の要因として、供試体モデル作成時に、碎石要素の粒子間摩擦角0として十分に締固めを行っていることから、実験における供試体に比較して密詰め状態になっていた可能性が考えられ、これにより、実験における標準載荷の載荷1回目に観察された粒子間の間隙が詰まることによる体積収縮が抑えられていた可能性がある。

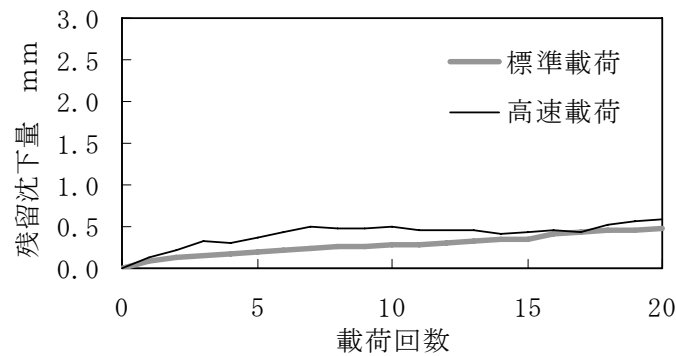
第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション



(a) 摩擦角 27度

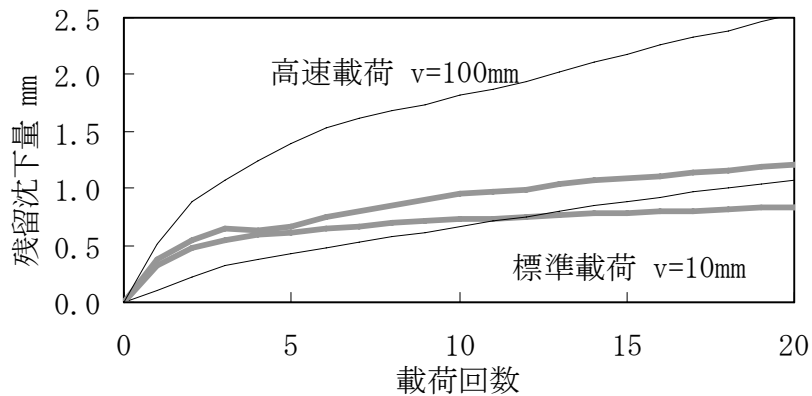


(b) 摩擦角 36度



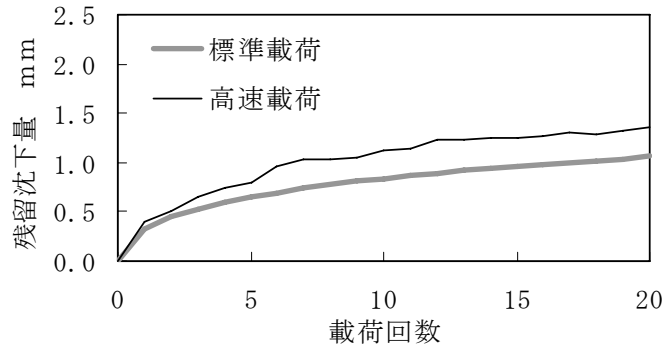
(c) 摩擦角 45度

(1) シミュレーション結果

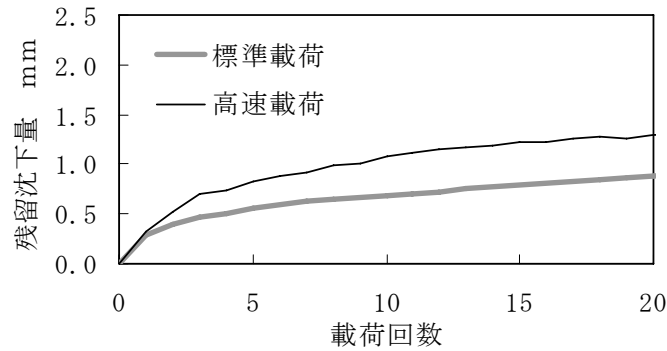


(2) 実験結果

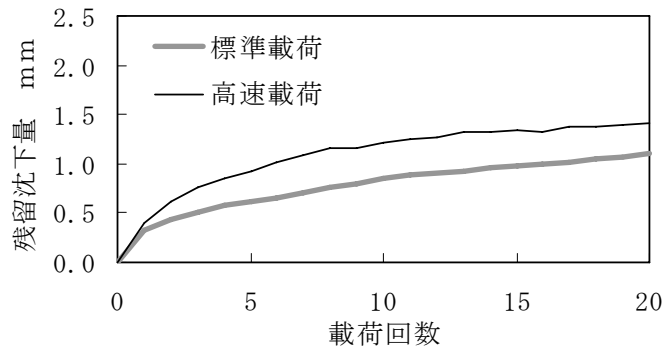
図5.24.1 繰返し载荷過程における残留沈下量と载荷回数との関係



(a) 摩擦角 36 度 反発係数

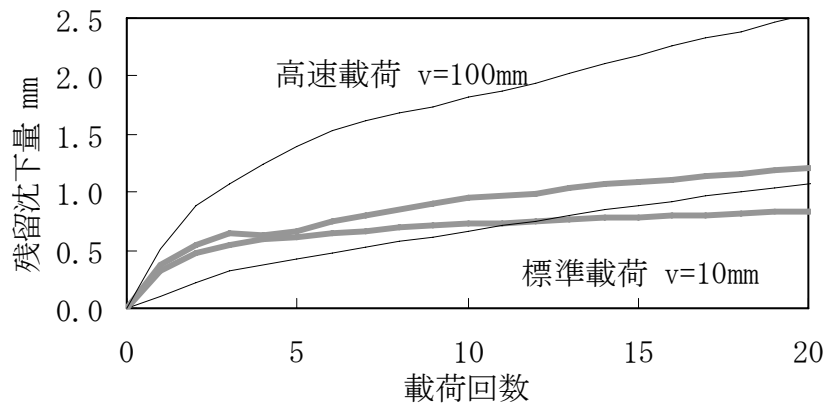


(b) 摩擦角 36 度 反発係数



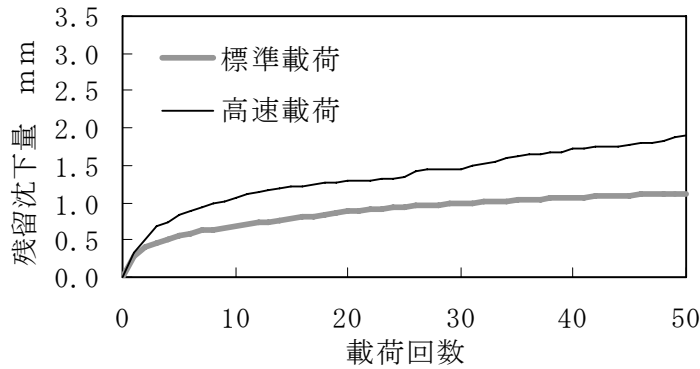
(c) 摩擦角 36 度 反発係数

(1) シミュレーション結果

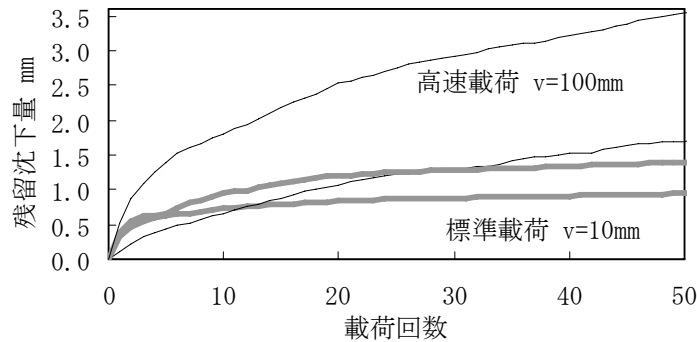


(2) 実験結果

図5.24.2 繰返し载荷過程における残留沈下量と载荷回数の関係



(1) シミュレーション結果 摩擦角 36 度 反発係数



(2) 実験結果

図5.24.3 繰返し载荷過程における残留沈下量と载荷回数との関係

5.4.3 各载荷回における変位振幅と沈下進みの関係

図5.25.1に繰返しシミュレーションにおける変位振幅と沈下進みの関係を、また図5.25.2に変位振幅に対する沈下進みの割合の平均値を示す。

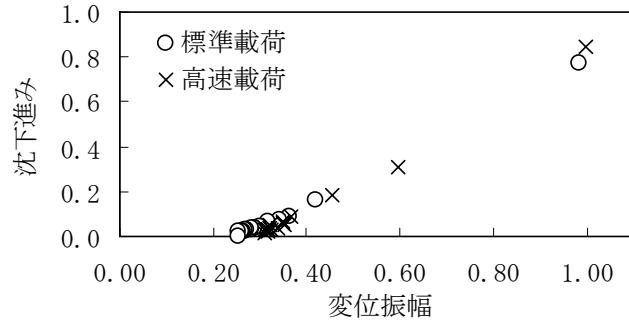
図5.25.1の図(1)は粒子間摩擦角27度、図(2)が粒子間摩擦角36度、図(3)が粒子間摩擦角45度の条件における結果を示す。図中の黒色星印が高速载荷、白色丸印が標準载荷の結果である。

図5.25.1(1)より、粒子間摩擦角27度の場合、変位振幅は標準载荷および高速载荷のいずれにおいても、载荷1回目の約1mmから漸進沈下過程の約0.25mmまで幅広い値をとる。これに伴い沈下進みも、载荷1回目の0.8から漸進沈下過程の0.2mm程度の値をとる。また図5.25.1(2)より、粒子間摩擦角36度の場合、変位振幅は標準载荷および高速载荷のいずれにおいても、载荷1回目の0.75mmから漸進沈下過程の約0.25mmまでの間の値をとる。これに伴い沈下進みも、载荷1回目の0.8から漸進沈下過程の0.2mm程度の値をとる。他方、図5.25.1(3)の粒子間摩擦角45度の場合では、変位振幅は標準载荷および高速载荷のいずれにおいても、载荷1回目では0.8mm前後となり、粒子間摩擦角27度および36度の場合と同程度の値となっているが、その後の変位振幅の減少幅は小さく、漸進沈下過程においても、0.6mm程度の変位振幅が生じている。一方で沈下進みは、载荷1回目でも0.1mm前後であり、粒子間摩擦角27度および36度の場合と大きく異なる傾向となっている。この粒子間摩擦角45度における傾向は、5.4.1の変位波形から予測していた通りであり、特殊な現象が発生しているといえる。

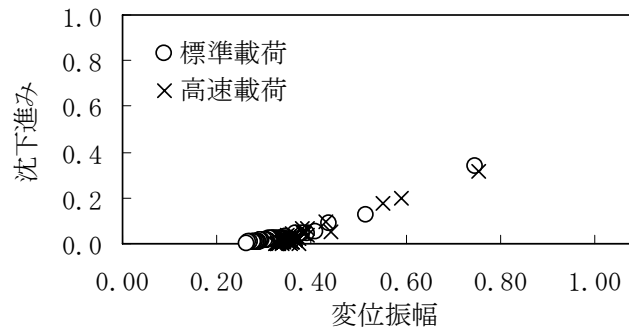
次に図5.25.2より、各载荷回の変位振幅に対する沈下進みの割合の平均値は、粒子間摩擦角27度の条件において、標準载荷で0.162、高速载荷で0.177、粒子間摩擦角36度の条件において、

標準荷重で0.065，高速荷重で0.066，また粒子間摩擦角45度の条件においては，標準荷重で0.036，高速荷重で0.042となっている．つまりいずれの粒子間摩擦角においても高速荷重の方が若干大きい値を示しているが，その差異は著しく小さい．

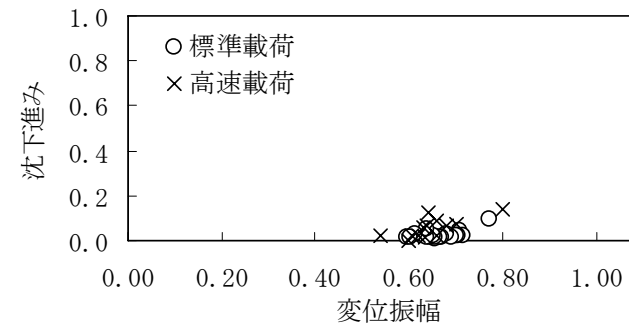
ここで，高速荷重において変位振幅に対する沈下進みの割合が小さかった要因としては，鋼球層シミュレーションの結果からも考えられたように，土層要素の凹凸の影響が考えられる．



(1) 摩擦角27度



(2) 摩擦角36度



(3) 摩擦角45度

図5.25.1 各荷重回の変位振幅と沈下進みの関係

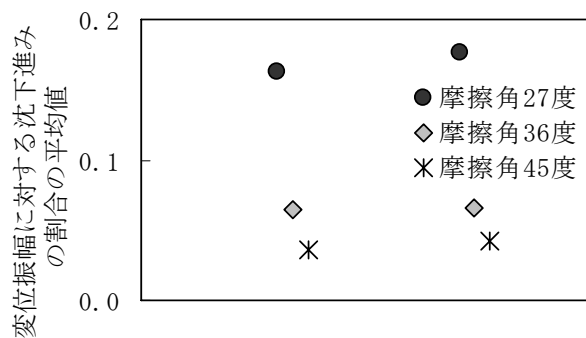


図5.25.2 変位振幅に対する沈下進みの割合の平均値

5.4.4 繰返し載荷過程における砕石要素の残留変位

第4章において繰返し載荷実験中の砕石層の画像解析を行ったように、シミュレーション結果からも、砕石層内部の要素の挙動を観察することとする。まず、載荷50回の繰返し載荷過程における残留変位を観察する。ここでは、粒子間摩擦角36度で減衰係数中の条件における結果を用いる。

図5.26.1に載荷前→載荷1回後、図5.26.2に載荷1回後→載荷20回後、図5.26.3に載荷20回後→載荷50回後の砕石要素の残留変位を示す。各図とも、図(1)が標準載荷、図(2)が高速載荷の結果である。

まず図5.26.1より、載荷前から載荷1回後の要素の残留変位においては、標準載荷および高速載荷において、載荷板下から載荷板外側または砕石層下方への要素の移動が見られ、全体的に標準載荷の方が移動量が高速載荷より大きい。高速載荷でも移動量の著しい要素が1点見られるが、全体的には標準載荷より小さい。

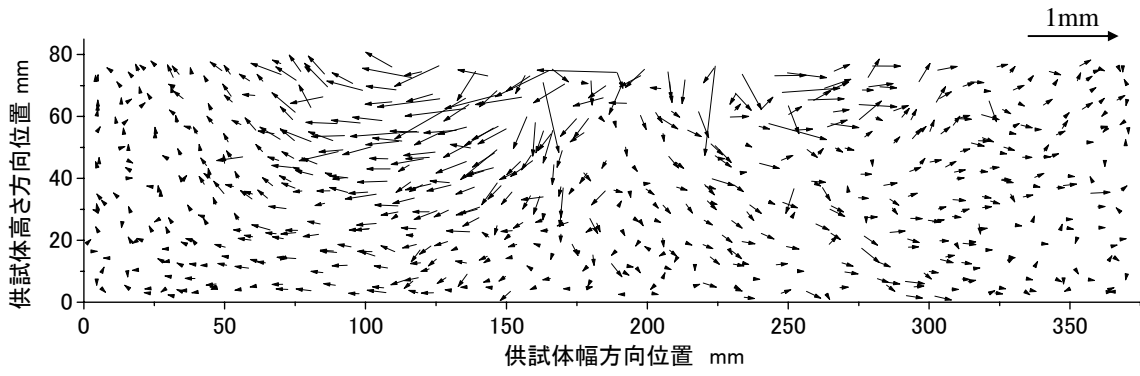
次に図5.26.2より、載荷1回後から載荷20回後の砕石要素の残留変位においては、標準載荷および高速載荷において、載荷板下から載荷板外側および砕石層下方への要素の移動が依然として見られるが、特に載荷板外側への要素の流動が顕著になっている。載荷板下から砕石層下方への移動は、特に標準載荷で減少するのに対して、高速載荷では砕石層中層まで移動量の大きい要素が分布する。

更に図5.26.3より、載荷20回後から載荷50回後の砕石要素の残留変位において、標準載荷では全体的に移動量が著しく減少するが、載荷板下から載荷板外側および砕石層下方への要素の移動は継続している。また高速載荷では、全体的に移動量は減少するものの、載荷板下から載荷外側および砕石層下方への要素の移動が依然として見られ、特に載荷板右側部の砕石層表層における要素の上方への移動や、載荷板右端部における砕石層下方への移動が顕著である。

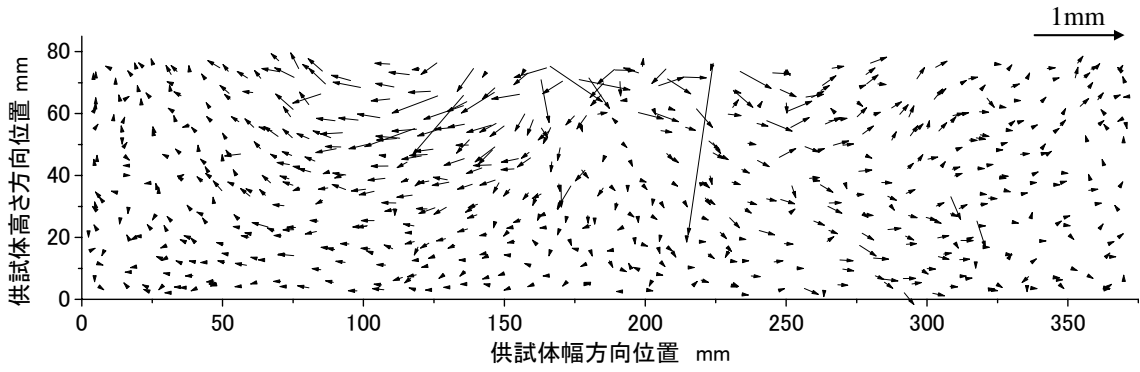
以上の砕石層シミュレーション結果を実験における画像解析結果と比較すると、①載荷初期においては、載荷板下から砕石層下方への粒子の移動が卓越するが、その後の漸進沈下過程では、載荷板下から外側への流動のような移動が顕著となること、②載荷1回目では、標準載荷における要素の移動が高速載荷に比較して顕著であること、③漸進沈下過程においては、高速載荷における要素の移動が標準載荷に比較して顕著であること、において、定性的に一致している。

一方で、図5.26.3より、高速載荷における載荷20回後～載荷50回後の残留変位は、実験に比較して移動量の減少が顕著で、全体的に実験結果より小さな移動量に留まっている。この原因としては、鋼球要素シミュレーションの場合と同様に、土槽要素の表面の凹凸の影響が考えられる。特に図5.26.3において、土槽要素の底面および側面に近い砕石要素の移動量が小さいことから、上記の影響の可能性が大きいといえる。

ところで、5.4.2で述べた残留沈下量と載荷回数の関係において、砕石層シミュレーション結果では、載荷1回目の残留沈下量が標準載荷と高速載荷でほぼ同程度であり、その要因として、供試体モデルの砕石要素が十分に締められていた可能性を示した。しかし図5.26.1より、要素の残留変位は標準載荷の方が全体的に大きいことが明らかであり、また載荷板下の左側部分

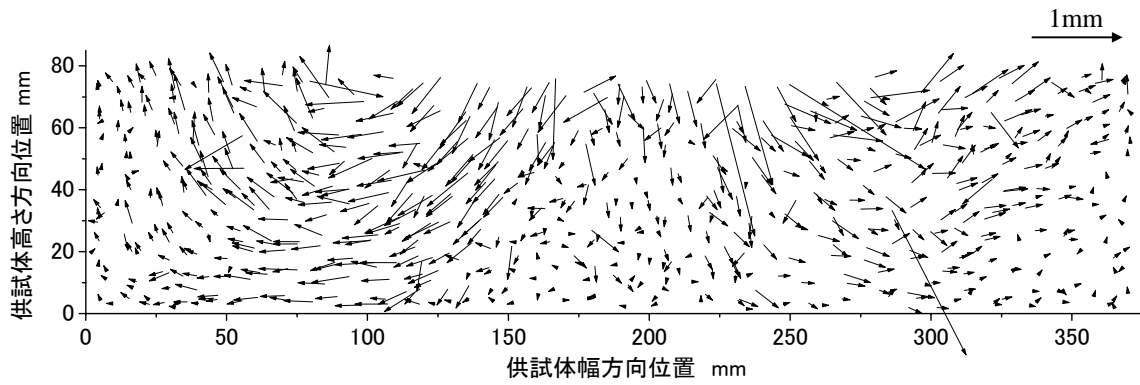


(1) 標準載荷

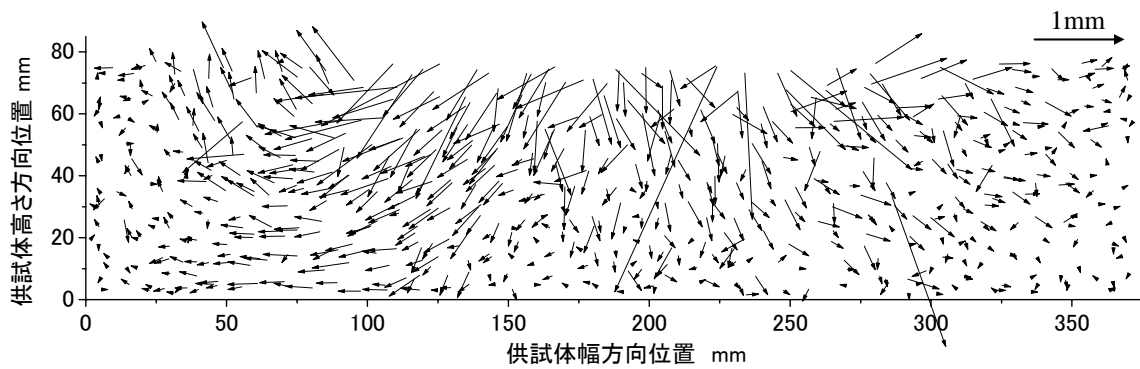


(2) 高速載荷

図5.26.1 砕石要素の残留変位 載荷前～載荷1回後



(1) 標準載荷



(2) 高速載荷

図5.26.2 砕石要素の残留変位 載荷1回後～載荷20回後

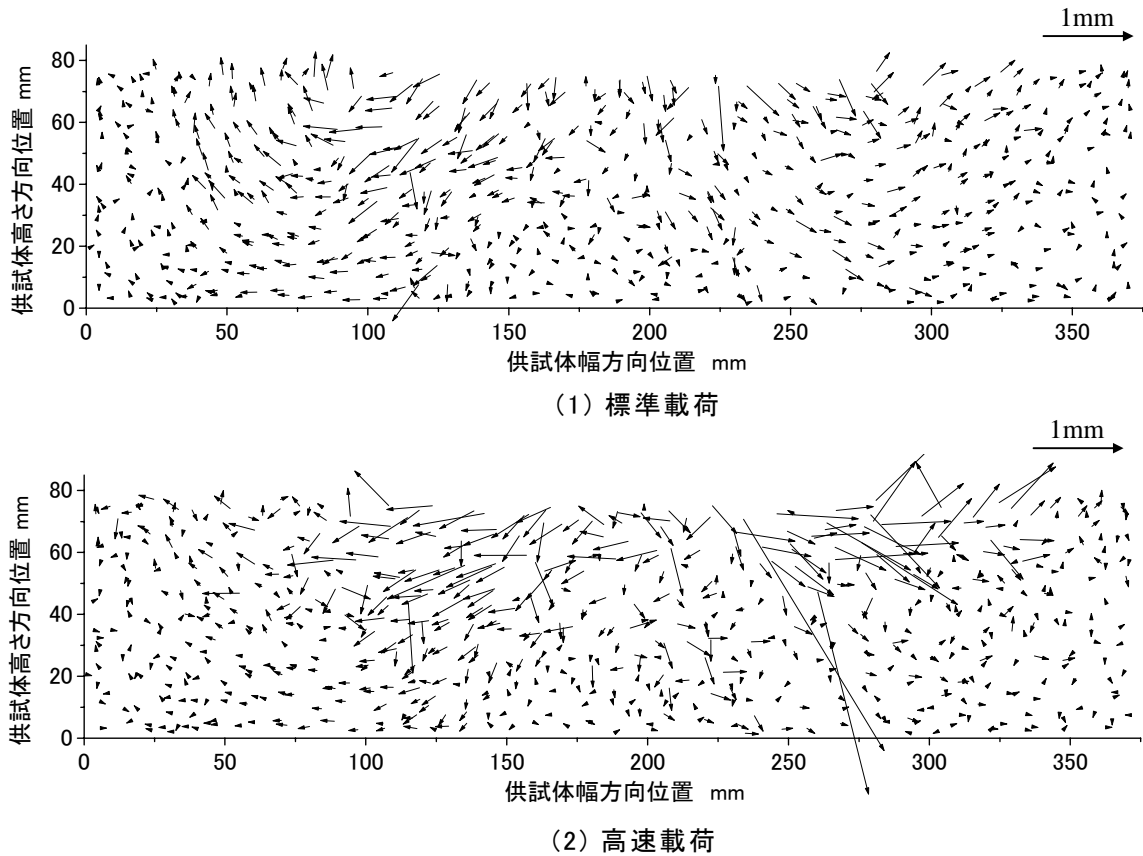


図5.26.3 砕石要素の残留変位 荷重20回後～荷重50回後

では、砕石要素が下方へ詰まる挙動も見られている。一方、高速荷重では、全体的な移動量は小さいものの、荷重板下で下方へ著しく移動（移動量0.6mm）する要素が見られることから、この局所的な挙動によって荷重板の沈下が促進されたことも考えられる。

つまり、繰返し荷重下の砕石層の変形挙動に関しては、荷重板の残留沈下量を示す沈下曲線のみでは詳細のメカニズムを検討するのは困難であり、特に粗粒の粒子層における局所的な変形の特徴を把握する上では、構成粒子の個々の挙動に着目することが重要であるといえる。

5.4.5 繰返し荷重過程における砕石要素の動的挙動の観察

(1) 移動方向と移動量

次に第4章における画像解析と同様に、砕石要素の動的挙動の観察を行う。ここでは、粒子間摩擦角36度で減衰係数中の条件における結果について標準荷重と高速荷重の比較を行う。

また、動的挙動の観察を行った荷重回における荷重板の変位波形を図5.27に示す。図より荷重20回目および50回目では沈下進みが荷重1回目と比較して収束していることから、漸進沈下過程として検討を行う。

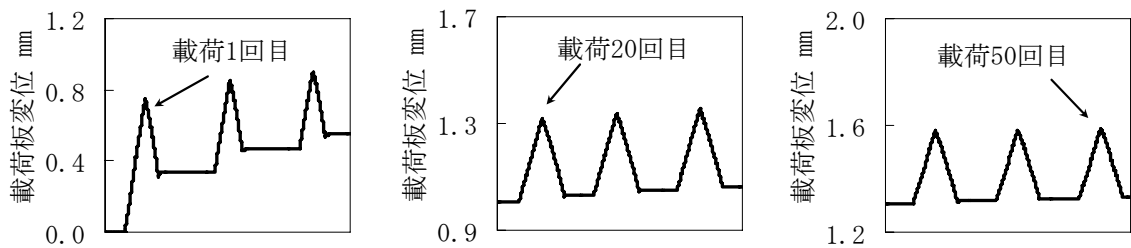
図5.28.1に荷重1回目、図5.28.2に荷重83回目、図5.28.3に荷重200回目の結果を示す。また各図、図(1)が荷重過程（荷重前⇒最大荷重時）、図(2)が除荷過程（最大荷重時⇒荷重0時）、図

(3)が除荷後（荷重0時⇒それから約0.1秒後）で，更に図a)が標準載荷，図b)が高速載荷における挙動を示す。

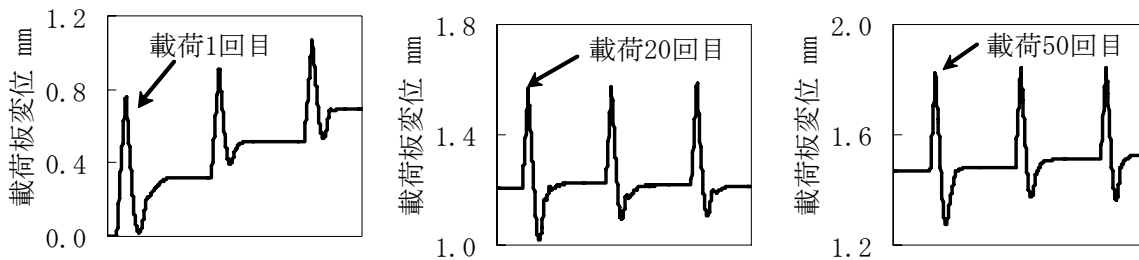
まず図5.28.1(1)より，載荷1回目の載荷過程において，標準載荷では，載荷板下部で碎石層下方への要素の移動が顕著で，更に載荷板外側でも側方への要素の移動顕著に見られるのに対し，高速載荷では，同様な要素の移動が見られるものの，全体的に移動量は小さい．次に図5.28.1(2)より，除荷過程においては，標準載荷では載荷板直下部分で要素の移動が若干見られるのに対し，高速載荷では載荷板下部の碎石層上層において，要素の上方への移動が顕著となっている．また図5.28.1(3)より，除荷後の要素の挙動において，標準載荷では，要素の移動が著しく小さいのに対して，高速載荷では，載荷板下部の碎石層上層において，除荷過程で上方へ移動した要素が戻るような下方への移動が顕著である．

次に図5.28.2(1)より，載荷20回目の載荷過程において，標準載荷および高速載荷のいずれにおいても要素の移動は減少し，特に標準載荷では，載荷板下部で若干要素が下方へ移動する程度であるのに対して，高速載荷では同様な挙動が見られ，移動量も標準載荷より大きくなっている．次に図5.28.2(2)より，除荷過程においては，標準載荷では載荷板直下部分で要素の上方への移動が若干見られるのに対し，高速載荷では同様な挙動が依然として顕著に見られる．更に図5.28.2(3)より，除荷後の要素の挙動において，標準載荷では，要素の移動が著しく小さいが，高速載荷では，載荷板下部の碎石層上層において，除荷過程で上方へ移動した要素が戻るような下方への移動が若干見られる．

更に図5.28.3(1)より，載荷50回目の載荷過程においては，標準載荷および高速載荷のいずれにおいても要素の移動は更に減少するが，標準載荷では載荷板下部で要素が下方へ移動するのに対して，高速載荷では，載荷板下部の要素の下方への移動だけでなく，載荷板外側の碎石層



(1) 標準載荷シミュレーションにおける載荷板変位波形



(2) 高速載荷シミュレーションにおける載荷板変位波形

図5.27 動的挙動の観察を行った載荷回における波形

第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション

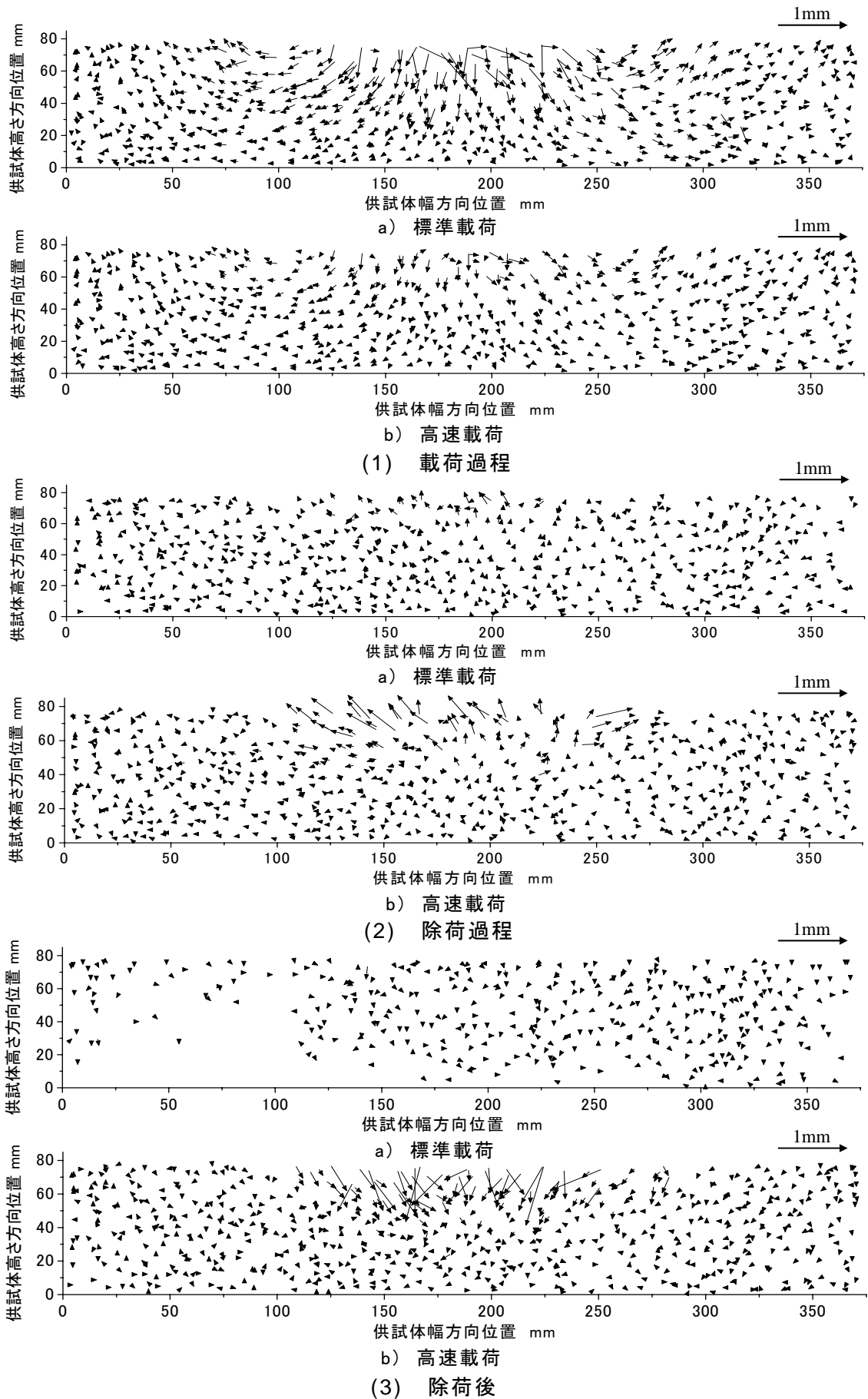


図5.28.1 載荷1回目の碎石要素の挙動

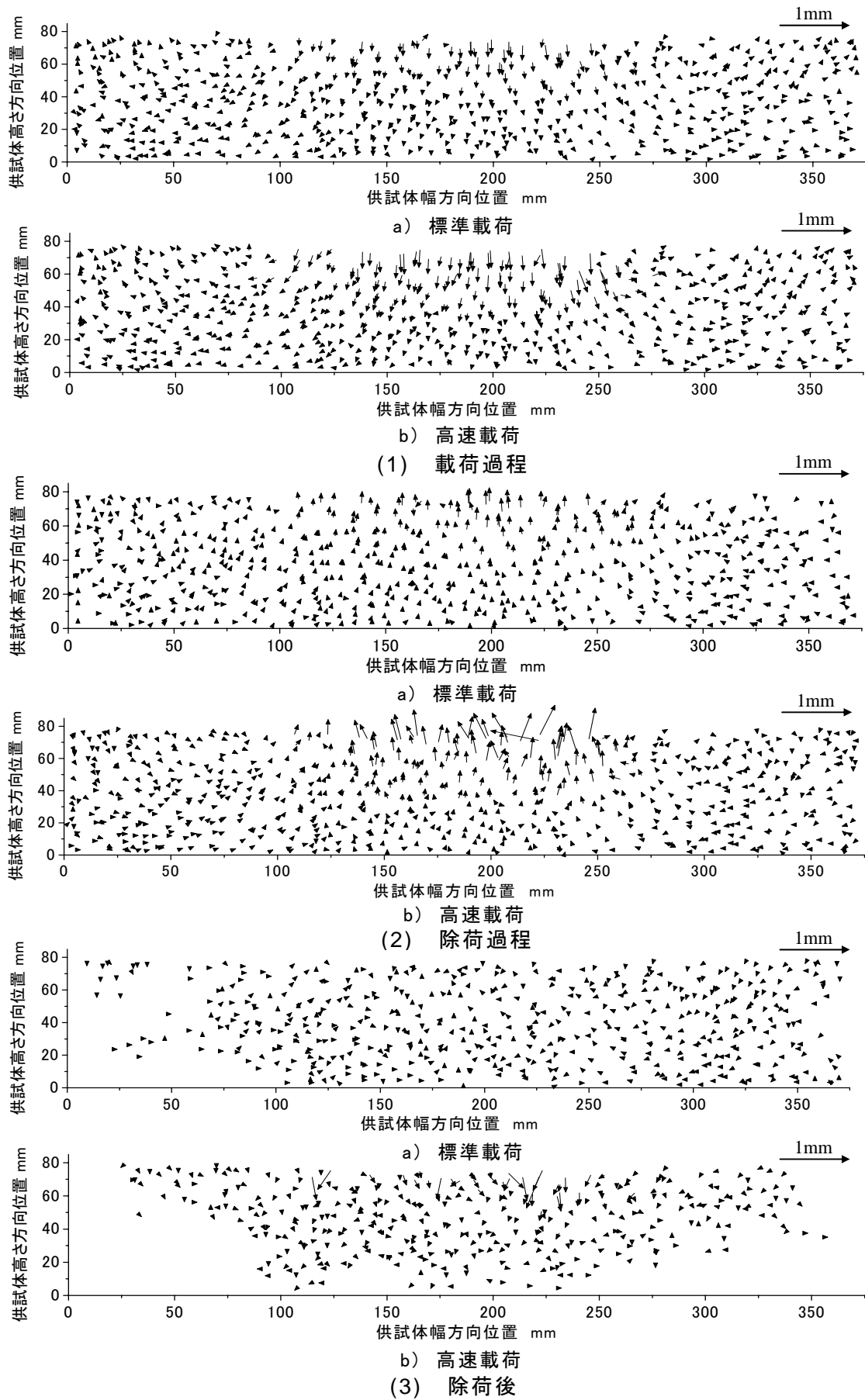


図5.28.2 荷重20回目の砕石要素の挙動

第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション

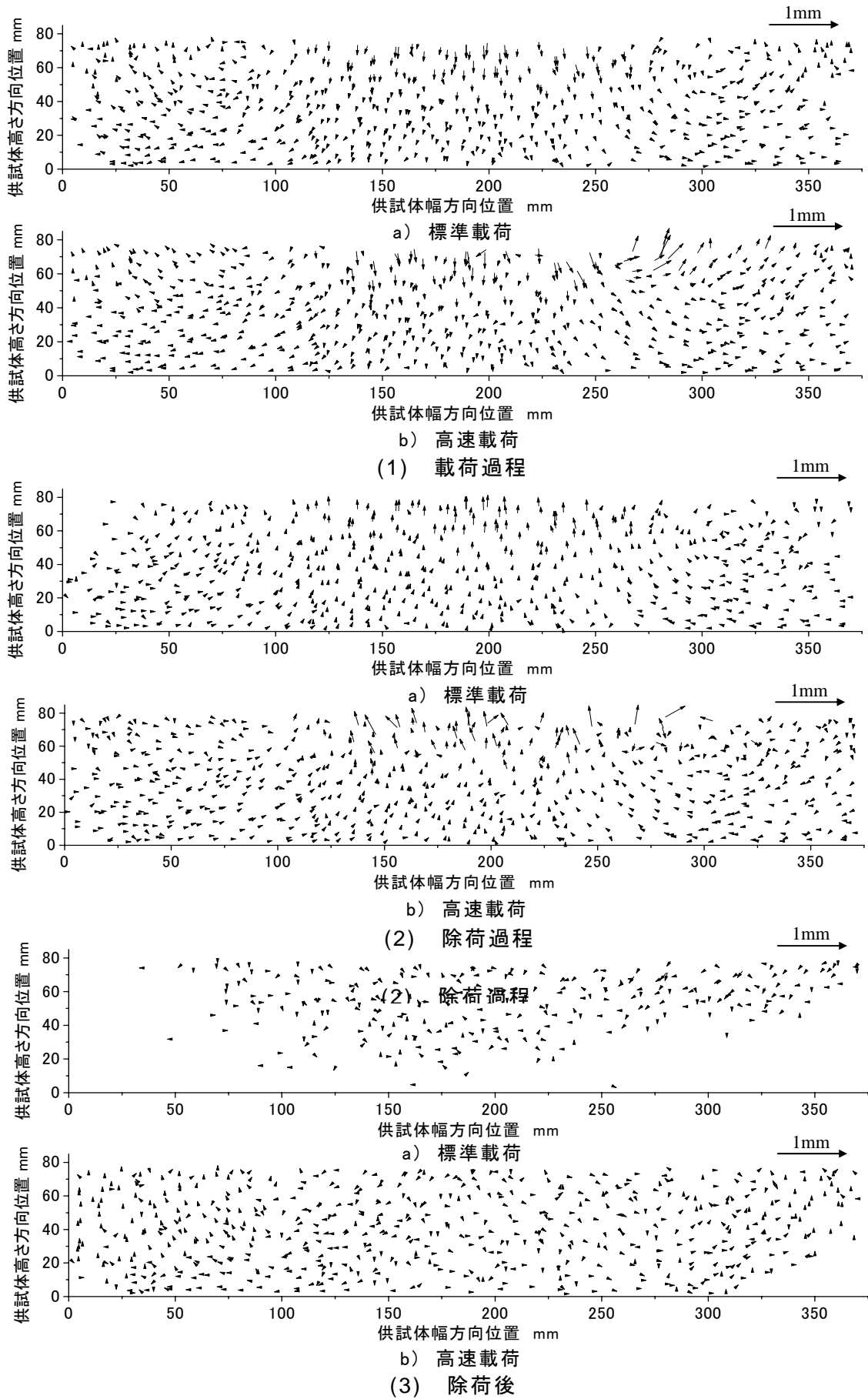


図5.28.3 載荷50回目の砕石要素の挙動

上層部における粒子の移動が見られる。また図5.28.3(2)に示す除荷過程においては、標準載荷および高速載荷で粒子の上方への移動は減少するが、高速載荷では依然として、載荷板外側の砕石層上層部でも要素の上方への移動が見られる。更に図5.28.3(3)より、除荷後の要素の挙動において、標準載荷では、移動の見られない領域が更に広く分布するのに対して、高速載荷では要素の移動が見られるものの、全体的に著しく減少し、載荷板下部の要素の下方への移動もほとんど見られなくなっている。

これらの結果を砕石層の画像解析結果と比較すると、①載荷初期の載荷過程では、標準載荷における粒子の移動量が著しい、②除荷過程では、高速載荷における粒子の上方への移動が著しく、この挙動は漸進沈下過程でも継続される。③除荷過程の粒子の挙動により、除荷後の粒子の挙動も高速載荷の方が大きい、と言う点で、ほぼ一致した傾向となっている。

(2) 体積ひずみとせん断ひずみ

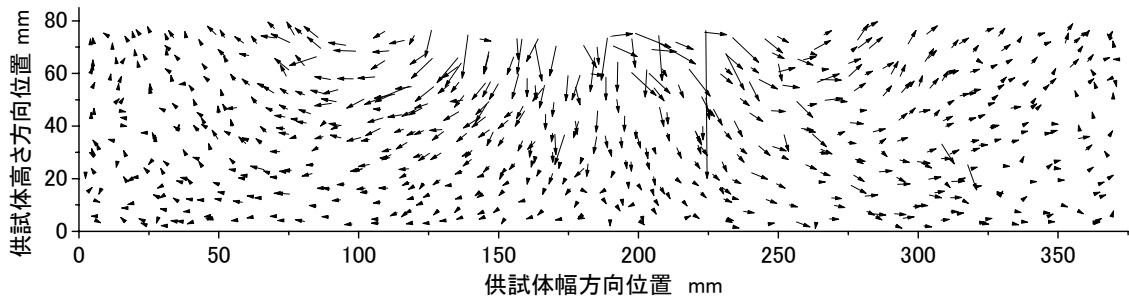
5.2.5の鋼球要素シミュレーション結果で示した方法を用いて、ここでも砕石要素の移動量および移動方向を一定間隔の格子点で平均化させ、各メッシュ要素のひずみを算出した。ここで、平均化に用いる砕石要素は各格子点を中心に半径が6mm（砕石要素の平均粒径11mmを参考とし）の範囲内のものを選択し、ここでは供試体の幅方向および高さ方向の2次元座標について、各成分の移動量を単純に平均化させた。

ここで例として図5.29に、載荷1回目の標準載荷の載荷過程と載荷1回目の高速載荷の除荷過程の鋼球要素の挙動について、図5.28.1(1a)および同(2b)に示した要素の座標データを直接を用いた図と、上述の通りに格子点で平均化データを用いた図を示す。図(1)が標準載荷過程、図(2)が高速除荷過程であり、また各図、図a)が要素のデータ、図b)が格子点における平均化したデータを図示したものである。

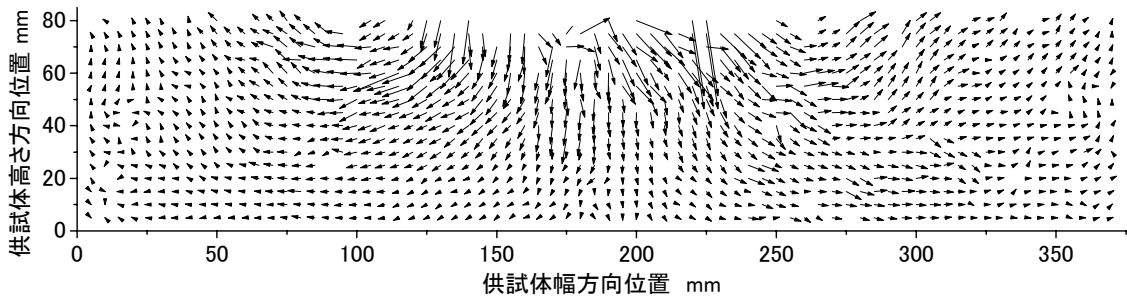
図より、標準載荷過程および高速除荷過程のいずれにおいても、局所的に移動量の大きい要素の動きは平均化したデータではなまっているが、鋼球要素の挙動の特徴は、格子点において平均化した後も明瞭に表されている。よって、これらのデータより最大せん断ひずみと体積ひずみを算出し、以下、比較を行うこととする。

図5.30に、横軸に最大せん断ひずみ、縦軸に体積ひずみをプロットしたデータの近似曲線を示す。図(1)が載荷1回目、図(2)が載荷20回目、図(3)が載荷50回目で、各図中、緑色線が載荷過程、青色線が除荷過程、ピンク色太線が除荷後、黒色太線が載荷前後の残留変位分を示す。

まず図5.30(1)より載荷1回目では、標準載荷および高速載荷のいずれにおいても、載荷および除荷過程、また残留変位分において、最大せん断ひずみの増加に伴い体積ひずみもプラス側に増加する体積膨張の傾向を示す。載荷速度で比較すると、載荷過程において標準載荷では最大せん断ひずみが最大で0.13、体積ひずみは0.01程度まで増加するのに対し、高速載荷では最大せん断ひずみが0.1と標準載荷より小さいが、体積ひずみは最大0.02程度で標準載荷より大きい値を示す。また除荷過程においては、標準載荷では最大せん断ひずみは0.05程度まで半減し、体積ひずみ±0.01の値をとるのに対し、高速載荷では、最大せん断ひずみが0.1程度まで、また体積ひずみも0.08程度まで増加する。除荷後については、高速載荷で体積収縮を示す。残留変位分については、標準載荷では最大せん断ひずみは最大0.15程度、体積ひずみは最大0.03程度

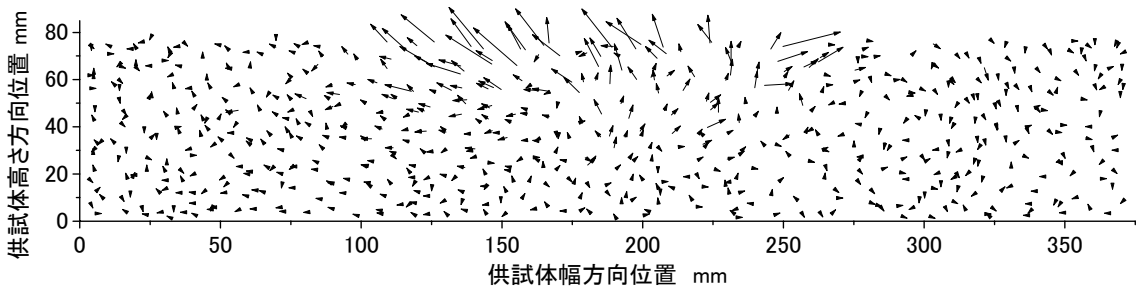


a) 碎石要素の座標位置データ

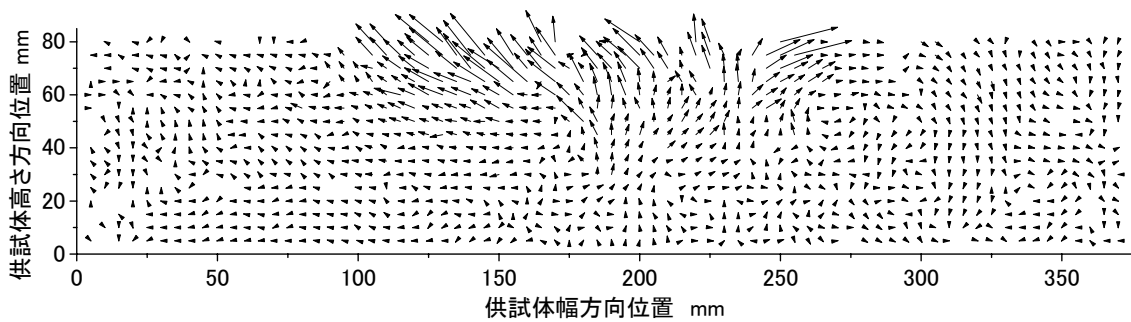


b) 5mm 間隔の格子点で平均化したデータ

(1) 標準載荷 1 回目の載荷過程



a) 碎石要素の座標位置データ



b) 5mm 間隔の格子点で平均化したデータ

(2) 高速載荷 1 回目の除荷過程

図5.29 碎石要素の挙動の平均化前後の比較

までの値をとるのに対して、高速載荷では、高速載荷では最大せん断ひずみは0.15程度まで、体積ひずみは最大0.02程度で標準載荷とほぼ同様の傾向である。

次に図5.30(2)より載荷20回目では、標準載荷において載荷過程と除荷過程の最大せん断ひずみは、いずれも最大0.03程度までの同程度の値を取り、体積ひずみは載荷過程でマイナス0.01程度、除荷過程でプラス0.01程度と値は同程度となる。これに伴い、残留変位分は載荷1回目と比較して著しく減少し、体積ひずみは0付近であり、若干体積収縮の傾向を示す。一方、高速載荷においては、載荷過程では最大せん断ひずみ、体積ひずみのいずれも標準載荷の2倍程度の値を取るが、体積収縮の傾向へと変化する。一方除荷過程では、依然として著しい体積膨張の傾向を示し、体積ひずみはプラス0.035程度に上る。これに伴い、残留変位分においても、最大せん断ひずみは0.05程度まで、体積ひずみは0.035程度までの値をとり、標準載荷より著しく大きい値となっている。

更に図5.30(3)より載荷50回目では、標準載荷では載荷20回目と同様に、載荷過程と除荷過程における最大せん断ひずみの値が同程度であり、また体積ひずみも載荷過程のマイナスの値と除荷過程のプラスの値がほぼ同程度となる。これに伴い、残留変位分は更に減少する。一方、高速載荷でも、載荷20回目と同様に、載荷過程で体積収縮、除荷過程と残留変位分において体積膨張の傾向が依然として継続している。標準載荷と比較をしても、載荷過程の最大せん断ひずみは約2倍、また除荷過程の最大せん断ひずみは約2.5倍、体積ひずみは約4倍となり、残留変位分も、著しく大きい。

以上の結果を碎石層の実験結果と比較すると、① 除荷過程においては、全般的に体積膨張の傾向が続くこと、② 載荷1回目におけるひずみの値は、標準載荷の方が高速載荷より著しく大きいこと、③ 漸進沈下過程におけるひずみの値は、高速載荷の方が標準載荷より大きいこと、④ 載荷100回以降では、標準載荷と高速載荷でひずみの差異は小さくなること、において定性的傾向は一致している。ただし、実験における初期沈下過程において、標準載荷で体積収縮の傾向が見られたのに対して、シミュレーションでは体積膨張の傾向となっていた。この原因としては、碎石層モデルは粒子間摩擦角を0にして締固めを行ったため、実験で発生しうる、初期の粒子間の間隙が詰まる現象がほとんど見られなかった可能性がある。これは、供試体の初期状態に左右されるため、シミュレーション特有の現象ではなく、実験でも締固めの方法によっては起こりうるといえる。

以上より、繰返し荷重下の粒子の動的挙動に関しては、特に高速載荷において特徴的な除荷過程の粒子の著しい挙動と、それによる体積膨張の傾向は、シミュレーションにおいても再現されたといえる。

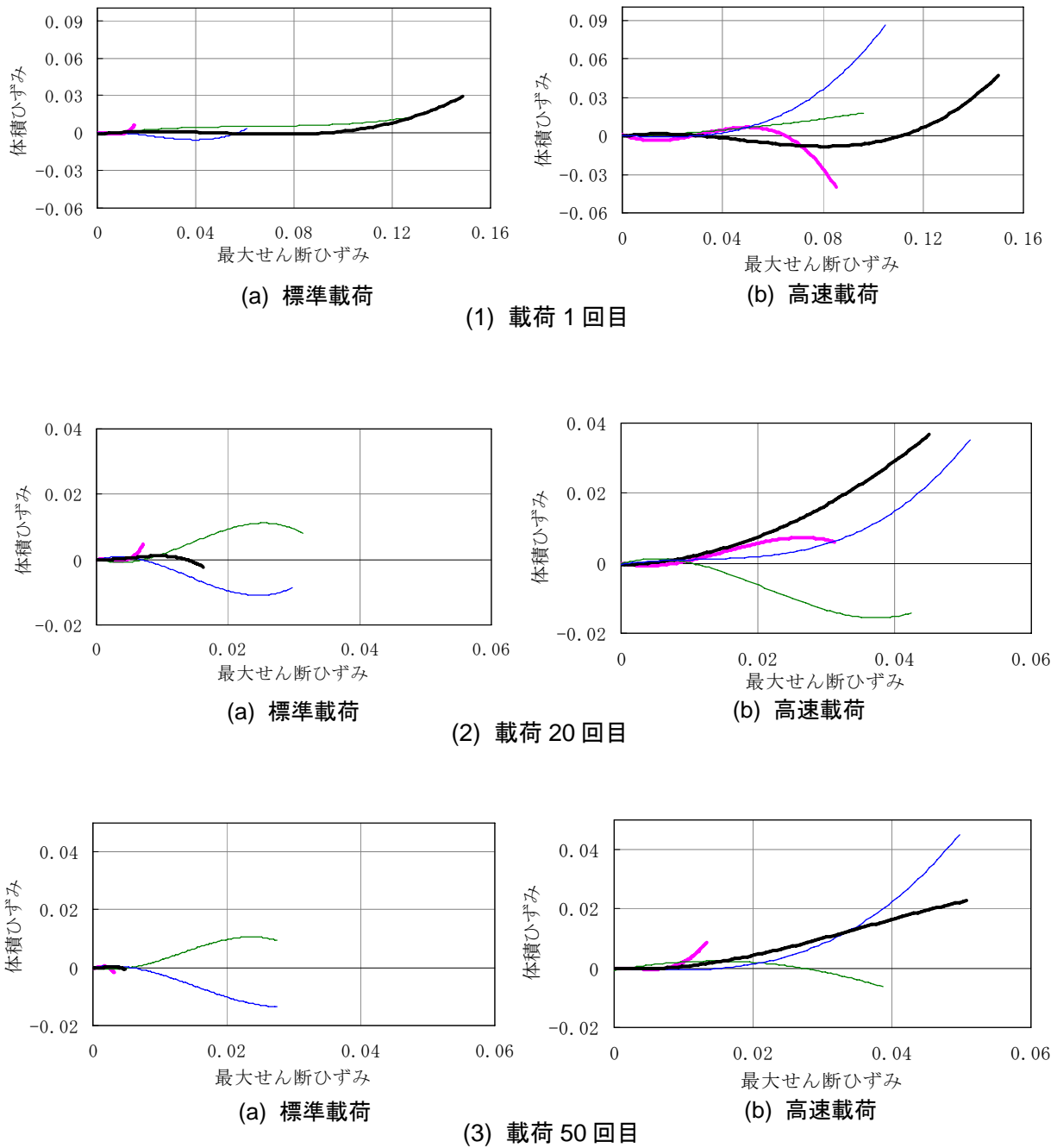


図5.30 最大せん断ひずみと体積ひずみ（2次元）の関係の変化

5.4.6 粒子間接触力の観察

次に、前節で観察した碎石要素の動的挙動に対して、その挙動の要因ともいえる粒子間接触力の分布状況について観察を行なう。この粒子間の接触力については、実験による観察が困難であるが、DEMシミュレーション結果を用いることで、どのような粒子間接触状況が特徴的な粒子の挙動を引き起こすか、考察が可能であるといえる。ここで用いるのは、前節と同様に、粒子間摩擦角36度で減衰係数中の場合のシミュレーション結果である。

(1) 粒子間接触点数の変化

図5.31に載荷1回目、載荷20回目、載荷50回目の荷重作用下での粒子間接触点数の変化を示す。各図とも右図a)が標準載荷、左図b)が高速載荷である。また、図の横軸は時間で、左縦軸が粒子間接触点数、右縦軸が載荷荷重で、灰色丸印が接触点数、黒色実線が載荷荷重を示す。

まず図5.31(1)より、載荷1回目の標準載荷では、載荷が始まった瞬間に粒子間接触点数が100点ほど減少し、その後、最大荷重時に向かって徐々に接触点数は戻り、最大荷重時直前で一瞬接触点数が減少した後、最大荷重時には載荷開始前の接触点数より若干増加している。一方、高速載荷では、載荷が始まった瞬間に接触点数は200点ほど減少し、その後も載荷荷重が0.5kN程度になるまでは減少を続け、最大荷重時には100点ほど回復するが除荷過程で400点ほど減少した後、除荷時に更に600点近くが瞬間的に減少し、この時の粒子間接触点数はたった700点ほどとなっている。その後徐々に接触点数は回復し、除荷後0.07s程度で接触点数は安定するが、載荷前に比較して100点ほど減少したままである。

次に図5.31(2)より、載荷20回目の標準載荷では、載荷1回目とは異なり、最大荷重時に向かって接触点数は徐々に増加し、最大荷重時には載荷前よりも300点ほど増加している。その後、徐々に接触点数は戻るが、除荷時に一度300点ほど減少した後、接触点数は載荷前とほぼ同数へと戻り安定する。一方、高速載荷では、載荷1回目と同様に、載荷開始直後に接触点数が減少するが、その後、最大荷重時に向かって接触点数は回復し、更に最大荷重時には載荷前より200点ほど接触点数は増加する。しかし、その後の除荷過程で再び接触点数は減少し、除荷時には約700点が瞬間的に減少するが、その後0.03s程度で接触点数は載荷前とほぼ同数に戻り安定する。

更に図5.31(3)より、載荷50回目の標準載荷では、載荷20回目とほぼ同様の傾向が継続し、載荷前後の接触点数の増減もほとんど起こらない。更に高速載荷においても載荷20回目とほぼ同様の傾向が継続する。

以上の結果を鋼球要素シミュレーション結果と比較すると、高速載荷において、粒子間接触点数の増減が著しいこと、またその傾向が漸進沈下過程においても継続されることにおいて、同様の傾向となっている。ただし、図5.31(2)および図5.31(3)で見られる「最大荷重時において粒子間接触点数が載荷前より増加する傾向」は鋼球要素シミュレーションでは見られなかった特徴である。これは、碎石要素は一粒子20球からなる不規則形状であり、載荷によって粒子間の間隙が縮小し、粒子同士の接触点が増加することを示唆している。このことは、鋼球層と碎石層の動的挙動および沈下特性の差異にもつながる大きな要因であると考えられる。

第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション

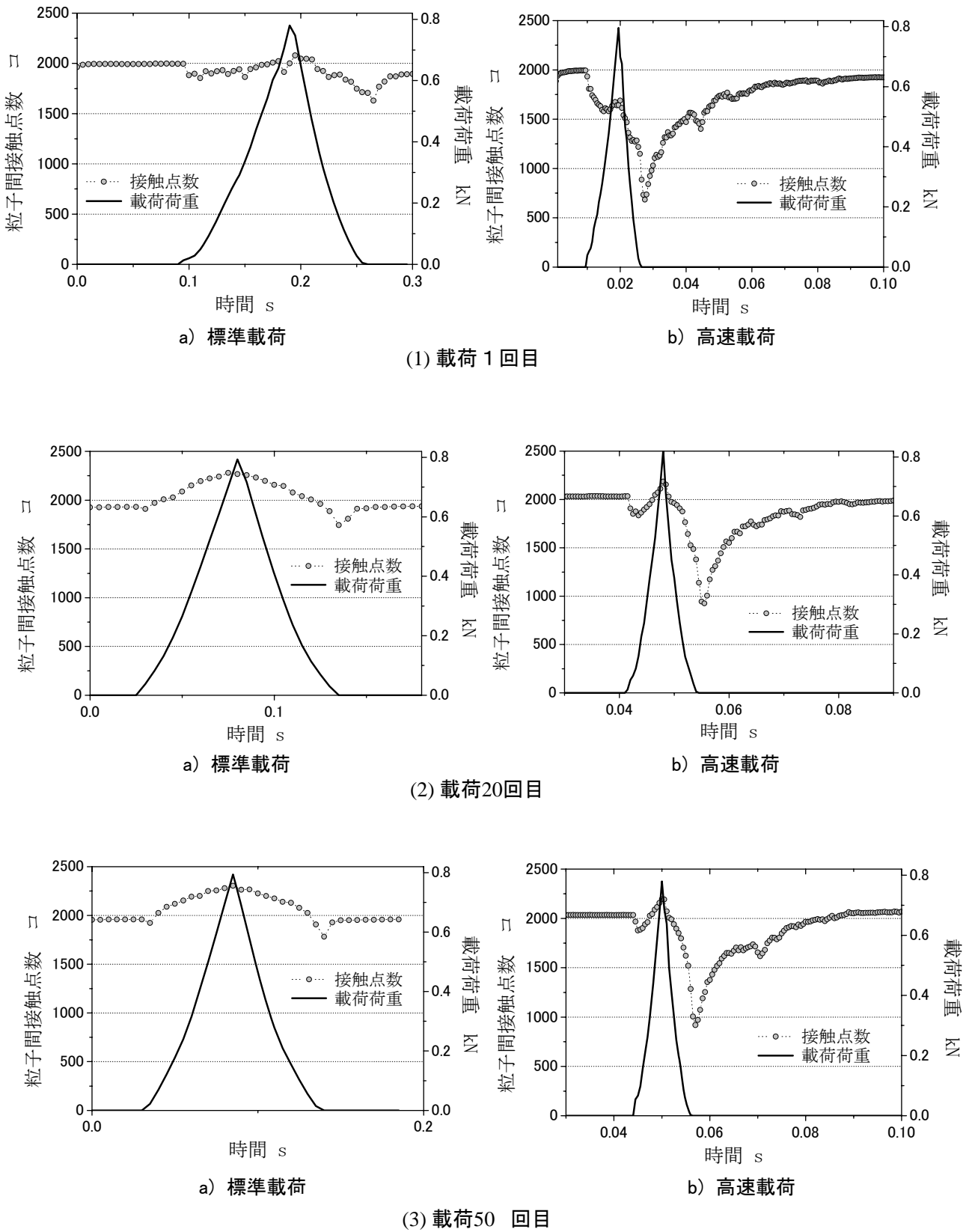


図5.31 荷重作用過程における粒子間接触点数の変化

(2) 粒子間接触状況

粒子間接触力の分布状況を更に詳細に観察するため、**図5.31**において、載荷過程で接触点数が減少した瞬間と、荷重が最大となる瞬間について、法線方向粒子間接触力の分布の状況と、各接触点における接触力の方向を、また接触点が著しく減少する除荷時については、法線方向粒子間接触力の分布の状況を示す。

図5.32.1～図5.32.3 が載荷1回目、**図5.33.1～図5.33.3** が載荷50回目の粒子間接触状況で、**図5.32&33.1**が載荷過程の接触点数減少時、**図5.32&33.2**が最大荷重時、**図5.32&33.3**が除荷時の状況を示す。また図各図において**図(1)**は法線方向粒子間接触力の分布の状況を示し、**図(2)**は粒子間接触点における接触力の方向について、鉛直から水平方向を10度ごとに分割し、その各方向の接触力の和を全方向の接触力の和で除した値を示す。

まず**図5.32.1**より、載荷1回目の載荷過程で接触点数が減少する瞬間において、標準載荷では法線方向粒子間接触力は全体的に小さいが、高速載荷では、載荷板下部において大きな粒子間接触力が発生し、特に載荷板と接する部分で鉛直方向の著大な接触力が見られる。この瞬間の接触力の作用方向について、**図5.32.1(2)**より、標準載荷および高速載荷のいずれでも、鉛直方向の荷重の割合が特に大きく、全体の25%以上となっている。接触方向が10度以上の荷重の割合においては、標準載荷では10～20度はむしろ少なく、20～40度で再び増加するのに大して、高速載荷では、鉛直方向からの角度が増加するに伴い、接触力の割合は減少する。

ここで**図5.31(3)**の荷重波形と比較すると、上記の瞬間において、標準載荷ではほとんど載荷荷重が出ていない段階であるのに対して、高速載荷では既に載荷荷重が0.5kN程度にまで達しているため、荷重の伝達経路が確立されつつあると考えられる。

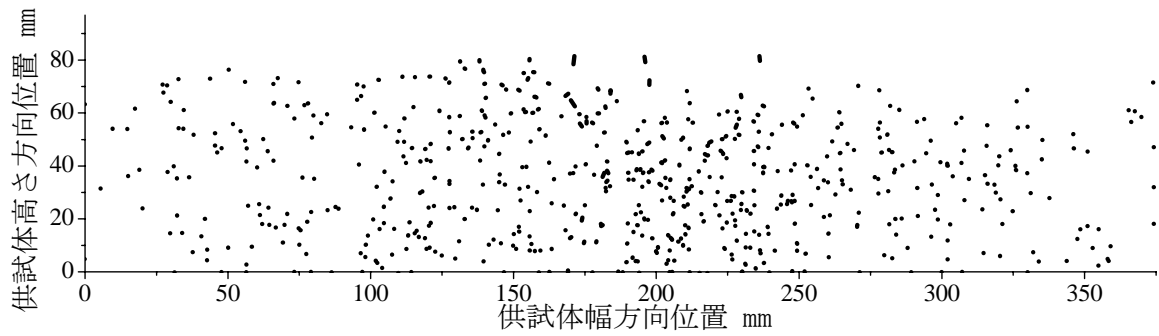
次に**図5.31.2**より、載荷1回目の最大荷重時においては、標準載荷においても高速載荷と同様に載荷板下部で大きな粒子間接触力が発生し、いずれの載荷速度においても、載荷板と接触する複数の接触点で粒子間接触力がほぼ鉛直方向に卓越している。この瞬間の接触力の作用方向について、**図5.32.2(2)**より、標準載荷および高速載荷において鉛直方向の荷重の割合が著しく大きく、全体の28%程度となる。更に接触方向の鉛直方向からの角度が増加するに伴い、接触力の割合は減少する。

更に**図5.32.3(1)**より、載荷1回目の除荷時において、法線方向粒子間接触力は全体的に減少するが、特に高速載荷では接触点数の減少が著しく、載荷板下部周辺に、接触点を失う要素が分布している。

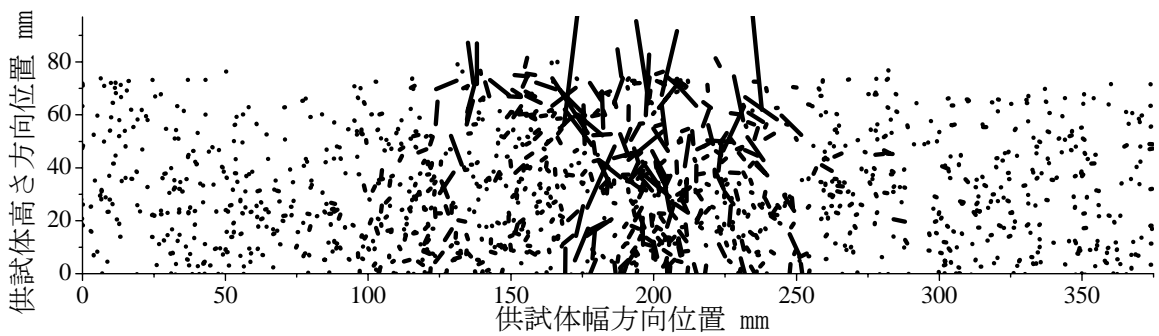
以上より、載荷1回目における粒子間接触力の状況の傾向としては、①載荷過程の途中においても高速載荷では、砕石層中を荷重が伝達しつつあること、②除荷時において高速載荷では、粒子間接触が1000点近く失われ、それは載荷板下部に集中すること、③法線方向接触力の作用方向については、いずれの載荷速度でも鉛直方向に卓越すること、が観察された。

これらは、載荷履歴のない供試体に初めて載荷を行った載荷1回目の状況であるが、次に、漸進沈下過程となる載荷50回目の粒子間接触状況を観察する。

図5.33.1(1)より、載荷50回目の載荷過程で接触点数が減少する瞬間において、標準載荷および高速載荷のいずれでも、載荷板下部で粒子間接触力の大きい点が鉛直方向に見られる。ただし高速載荷では、載荷板下部の右側部で粒子間接触点の多くが失われると同時に、載荷板との接触点においては、標準載荷よりも著しく大きい粒子間接触力が発生している。この瞬間の接触力の作用方向について**図5.33.1(2)**より、標準載荷および高速載荷のいずれでも鉛直方向の荷

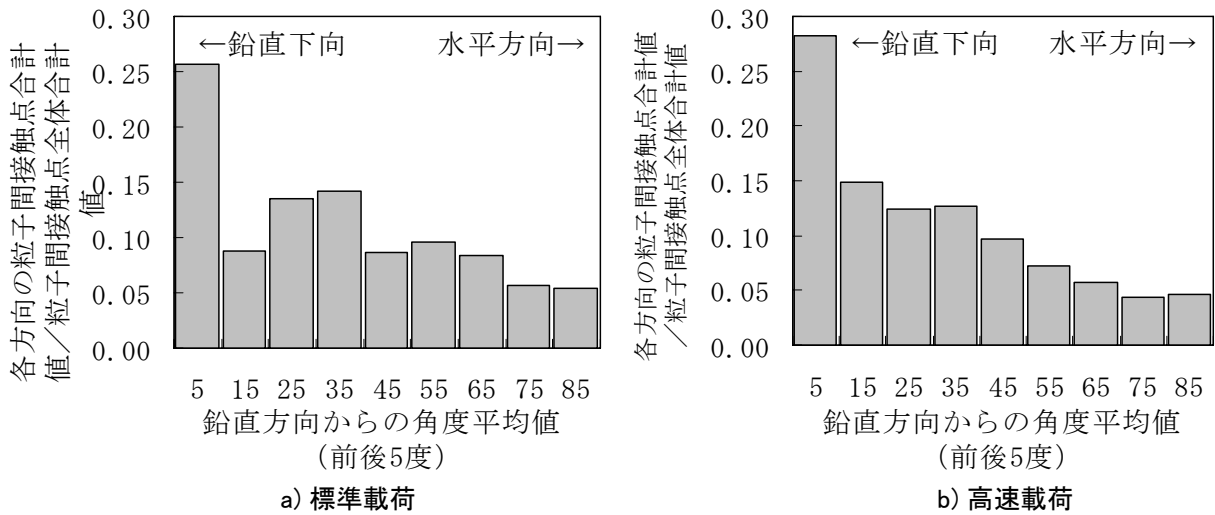


a) 標準載荷



b) 高速載荷

(1) 粒子間接触力と方向

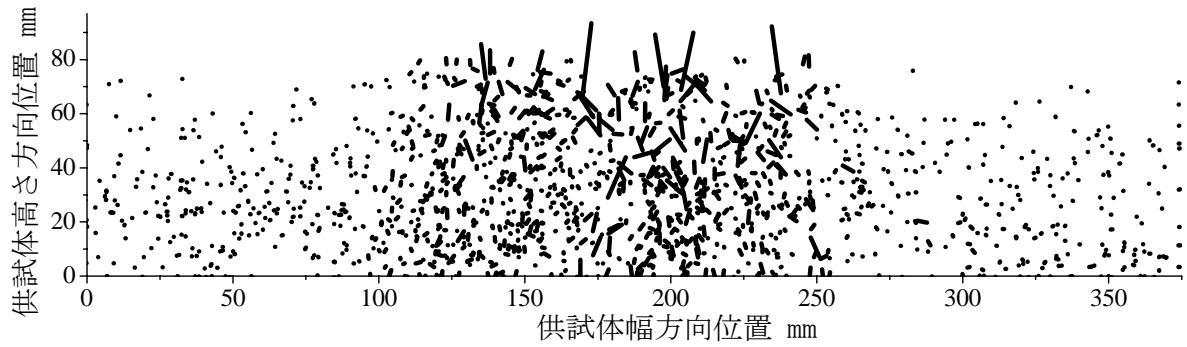


a) 標準載荷

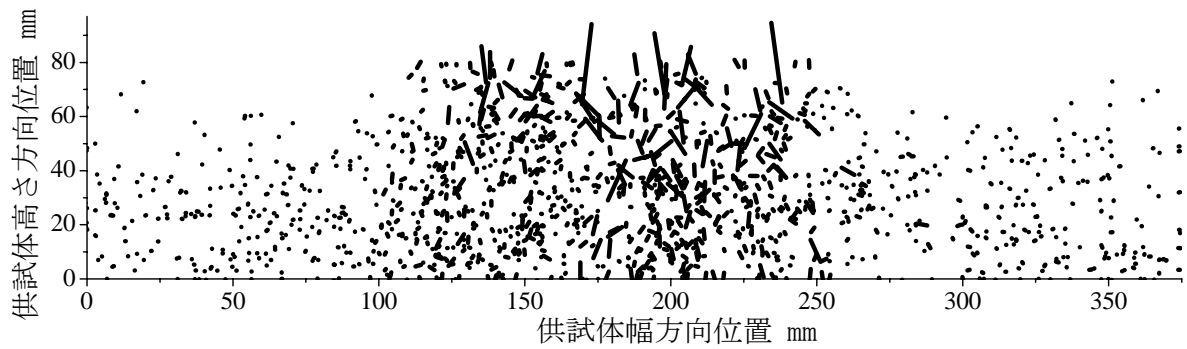
b) 高速載荷

(2) 粒子間接触点の角度とその方向の接触力の割合

図5.32.1 載荷1回目の接触点減少時の粒子間接触状況

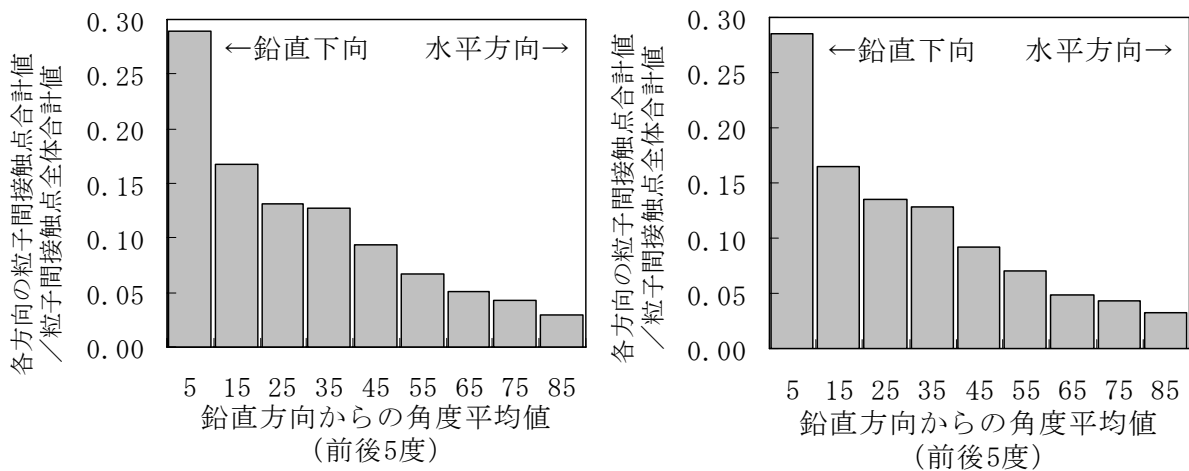


a) 標準载荷



b) 高速载荷

(1) 粒子間接触力と方向

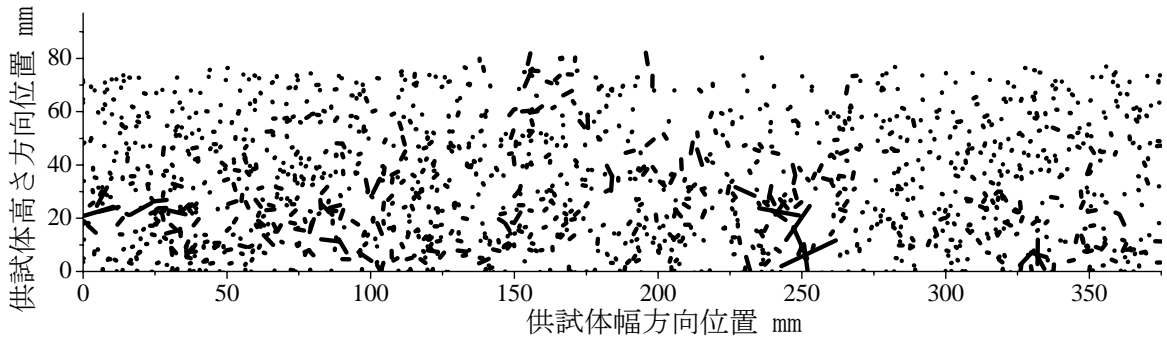


a) 標準载荷

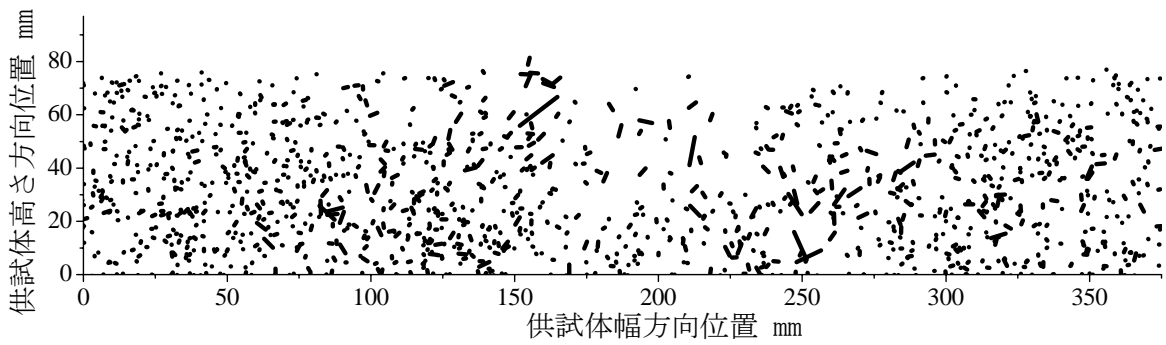
b) 高速载荷

(2) 粒子間接触点の角度とその方向の接触力の割合

図5.32.2 载荷1回目の最大荷重時の粒子間接触状況

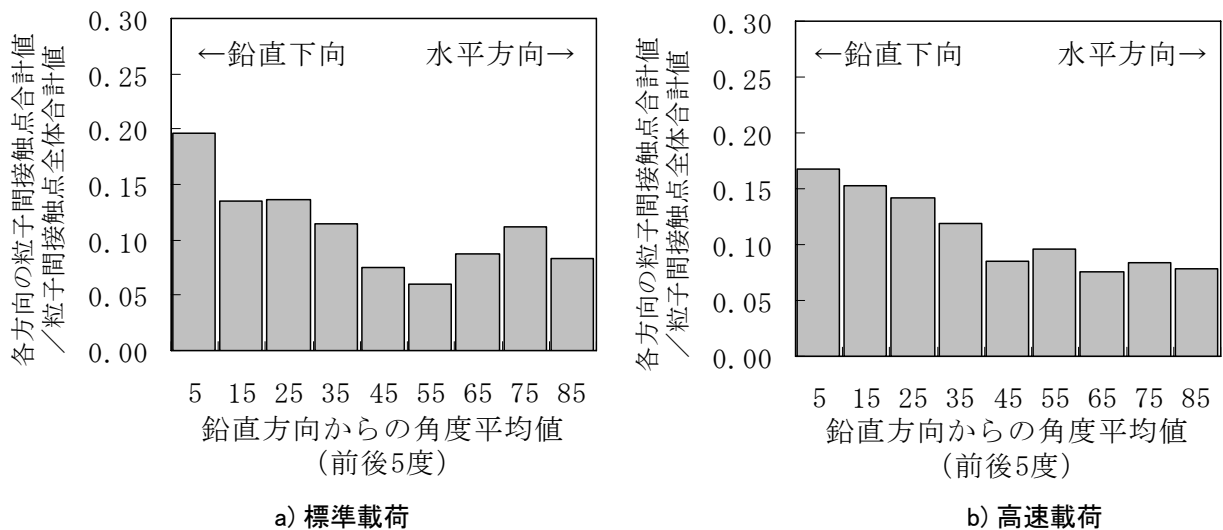


a) 標準载荷



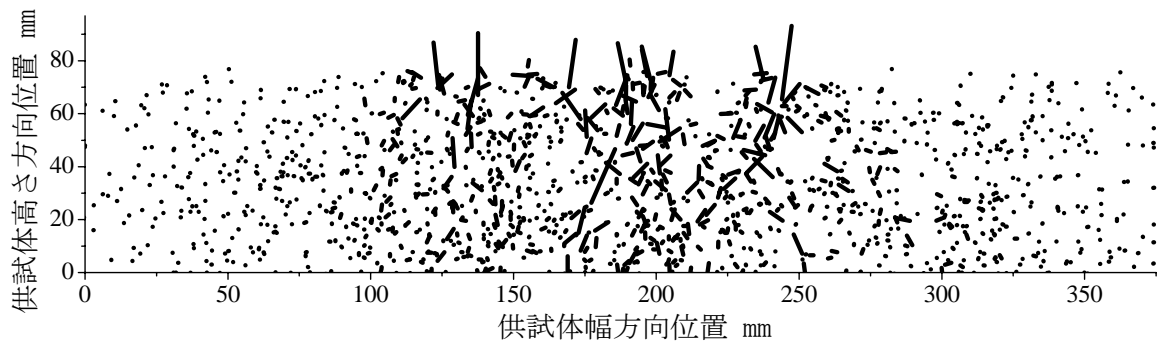
b) 高速载荷

(1) 粒子間接触力と方向

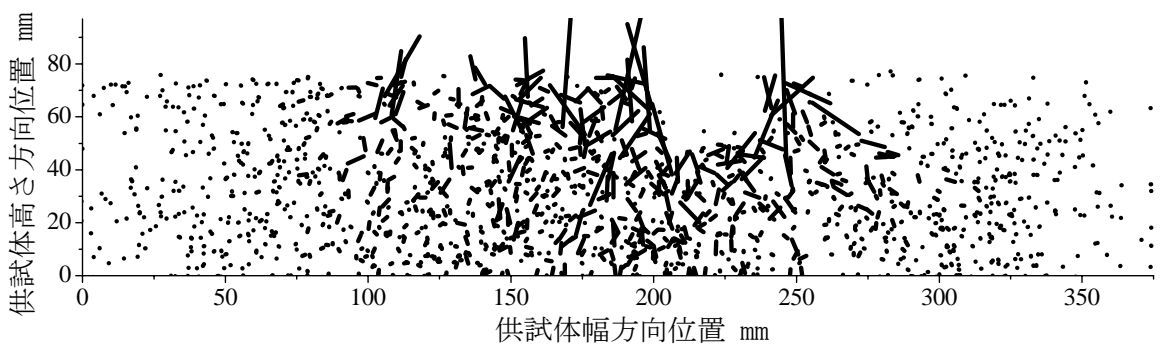


(2) 粒子間接触点の角度とその方向の接触力の割合

図5.32-3 载荷1回目の除荷時の粒子間接触状況

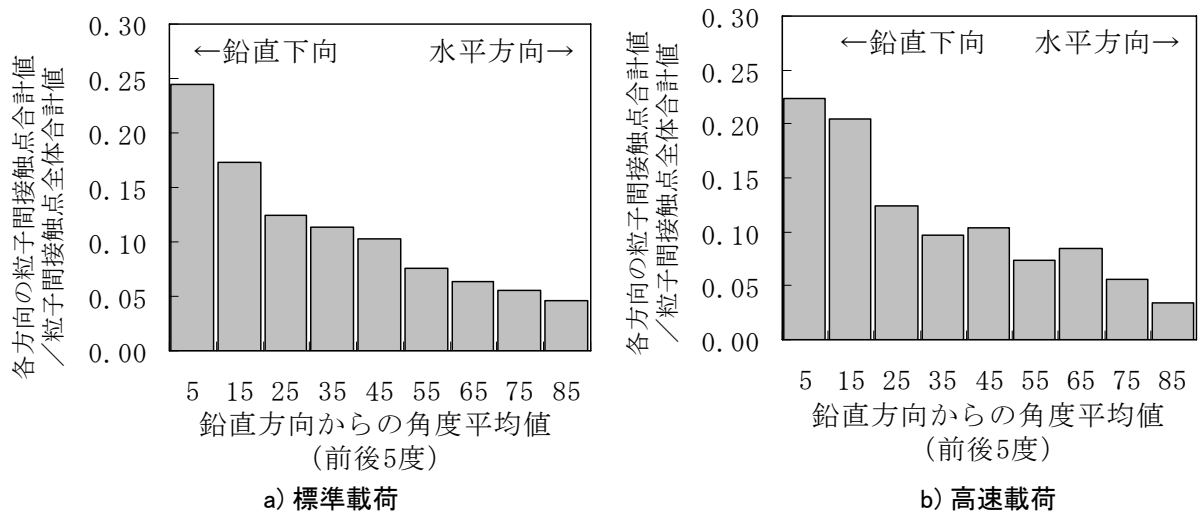


a) 標準載荷



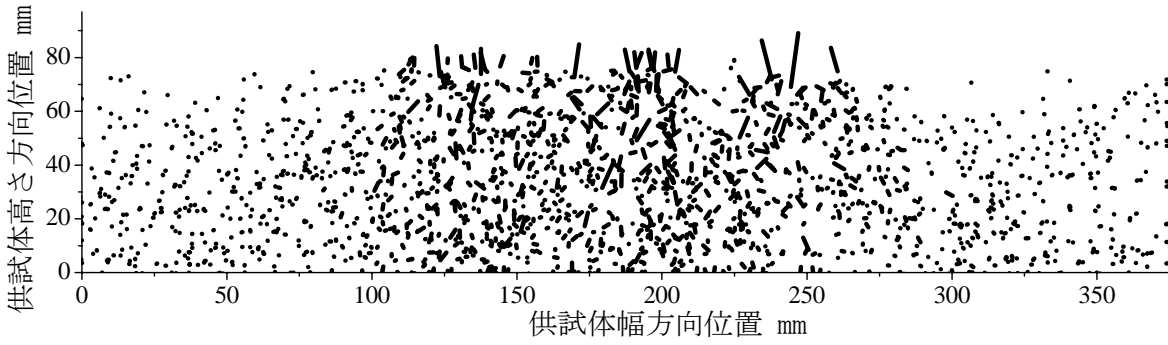
b) 高速載荷

(1) 粒子間接触力と方向

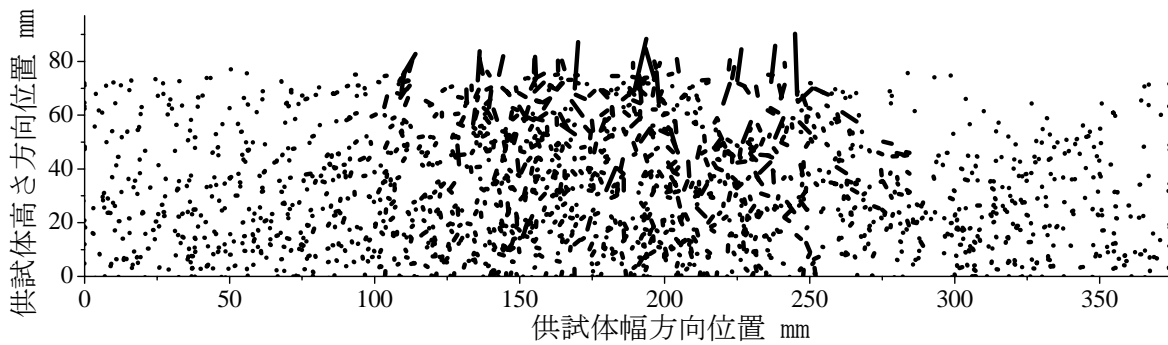


(2) 粒子間接触点の角度とその方向の接触力の割合

図5.33.1 載荷50回目の接触点減少時の粒子間接触状況

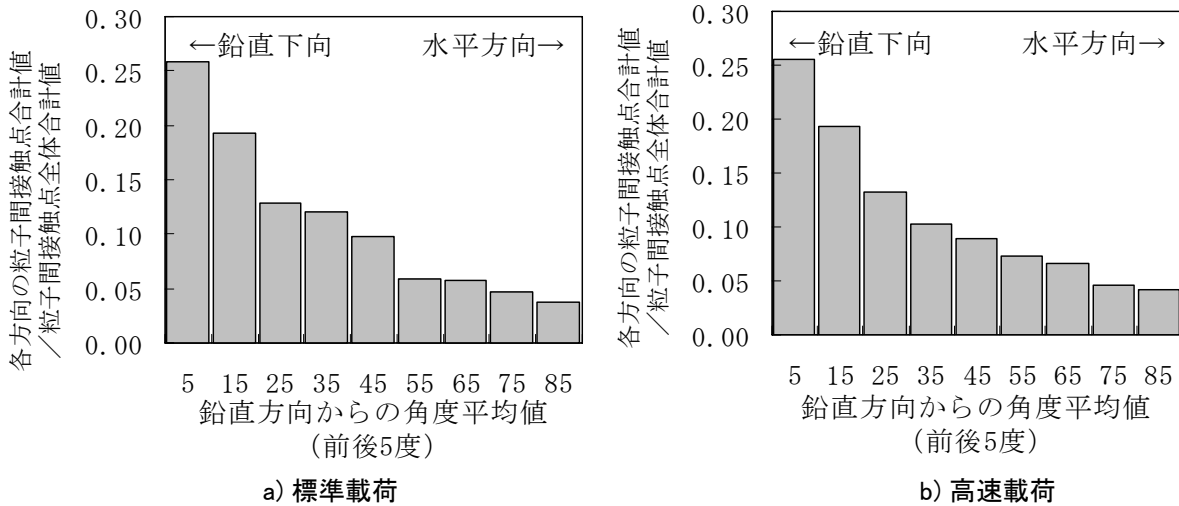


a) 標準载荷



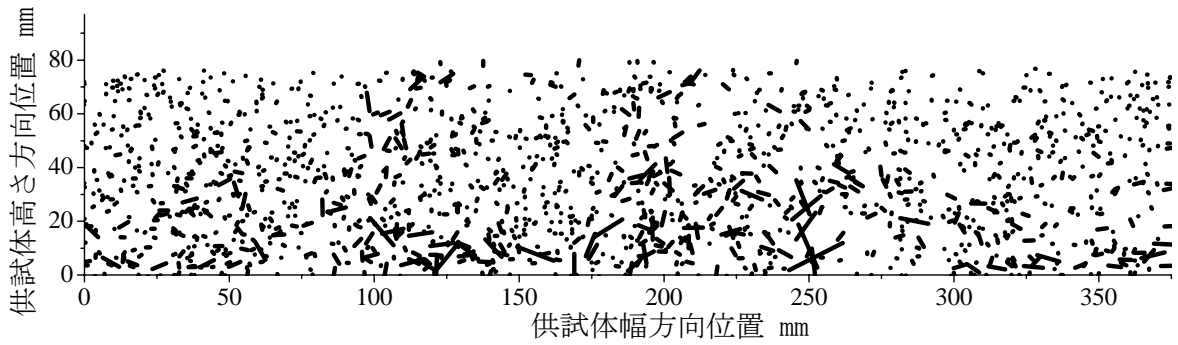
b) 高速载荷

(1) 粒子間接触力と方向

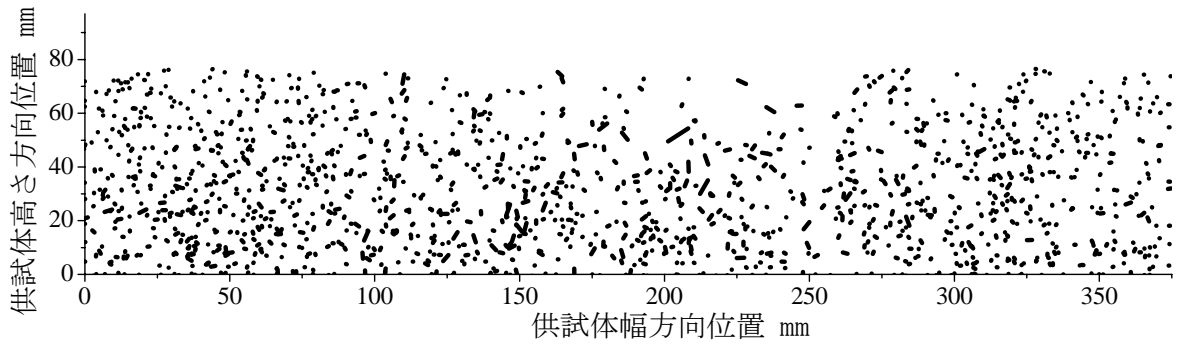


(2) 粒子間接触点の角度とその方向の接触力の割合

図5.33.2 载荷50回目の最大荷重時の粒子間接触状況

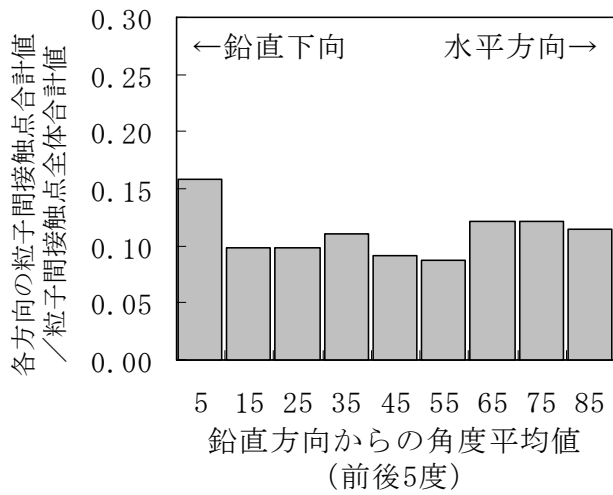


a) 標準载荷

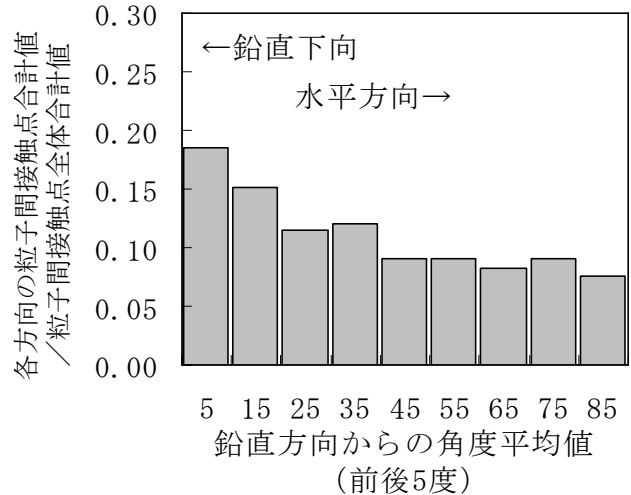


b) 高速载荷

(1) 粒子間接触力と方向



a) 標準载荷



b) 高速載

(2) 粒子間接触点の角度とその方向の接触力の割合

図5.33.3 载荷50回目の除荷時の粒子間接触状況

第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション

重の割合が最も大きく、標準載荷では全体の約25%、また高速載荷でも全体の22%程度となっている。その後、鉛直方向からの角度が増加するのに伴い、荷重の割合も減少する。

次に図5.33.2(1)より、載荷20回目の最大荷重時においては、標準載荷および高速載荷のいずれでも碎石層の載荷板下部を中心に大きな粒子間接触力が発生している。また標準載荷では、載荷板との接触点数が高速載荷より多く、また接触力もほぼ均等であるのに対し、高速載荷では載荷板との接触点数は標準載荷に比較して少なく、これによって、粒子間接触力も大きい点が複数見られる。この瞬間の接触力の作用方向について、図5.33.2(2)より、標準載荷および高速載荷のいずれでも鉛直方向の荷重の割合が最も大きく、全体の25%程度となっている。

更に図5.33.3(1)より、載荷50回目の除荷時において、法線方向粒子間接触力は全体的に激減するが、特に高速載荷では、標準載荷と比較して、接触点数が減少しているのが明瞭である。また接触点を失う点は、主に載荷板下部に分布するが、載荷板外側の碎石層上層でも、接触店が失われている。

以上の結果を鋼球要素シミュレーション結果と比較すると、載荷途中および最大荷重時に載荷板下部において大きな粒子間接触力が生じること、また高速載荷の除荷過程で、粒子間接触が失われる点が分布することにおいて、同様の傾向となっている。一方、粒子間接触力の作用方向については、鋼球層では載荷1回目では卓越する角度が明瞭には見られなかったのに対し、碎石層では、いずれの載荷段階においても、鉛直方向の荷重の割合が卓越していた点で、傾向が異なる。この要因としては、碎石層モデルでは締固めを十分に行ったことから、不規則形状の要素の配列が、鉛直方向の荷重が伝達しやすい状態で安定していた可能性が考えられる。

5.5 第5章のまとめ

DEMによる、鋼球層モデルと碎石層モデルの繰返し載荷シミュレーションを行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 繰返し載荷過程の載荷板の沈下曲線では、鋼球層および碎石層のいずれの場合においても、実験と同様に「初期沈下過程」と「漸進沈下過程」が明瞭に表れた。これより、DEMによって粒子層の沈下特性が再現可能であるといえる。
- (2) 載荷200回（鋼球層モデル）あるいは載荷50回（碎石層モデル）終了時の残留沈下量は、高速載荷の方が標準載荷より大きく、この点で実験結果と定性的に一致した。ただし、定量的には、シミュレーション結果における沈下量が実験結果に比較して小さい傾向となった。この一因として、今回のモデルにおいて、土層要素を球集合体でモデル化したため、表面の凹凸が影響を及ぼすことが考えられる。
- (3) 変位振幅と沈下進みの関係においては、鋼球層および碎石層のいずれの場合においても、高速載荷において沈下進みの割合が若干大きい傾向が見られ、この点は実験結果と定性的に一致した。
- (4) 繰返し載荷過程の粒子の残留変位を観察した結果、初期沈下過程では標準載荷における粒子の移動の方が著しいのに対して、漸進沈下過程では高速載荷における粒子の移動が著しい傾向となり、この点で実験結果の画像解析結果と定性的に一致した。ただし、鋼球層モデルのシミュレーションにおいては、粒子層内部の局所的な残留変位が一時的に顕著となり、その後再び収束する現象が見られ、実験結果と異なった。この要因として、土層要素の表面の凹凸が影響を及ぼすことが考えられる。
- (5) 初期沈下過程および漸進沈下過程における粒子の動的挙動を観察した結果、初期沈下過程では標準載荷の載荷過程で粒子の移動が大きく、高速載荷では、載荷過程の粒子の移動は小さいが、除荷過程で粒子の上方への移動が著しい傾向が得られた。また漸進沈下過程では、標準載荷における粒子の動的挙動は著しく減少するのに対して、高速載荷では、特に除荷過程における粒子の移動が継続している傾向が得られた。これらの傾向は、実験結果の画像解析結果と定性的に一致する。
- (6) 要素の移動を格子点において平均化させたデータより算出した最大せん断ひずみと体積ひずみの比較より、除荷過程においては、全般的に体積膨張の傾向が続く点、載荷1回目におけるひずみの値は、標準載荷の方が高速載荷より著しく大きい点、漸進沈下過程におけるひずみの値は、高速載荷の方が標準載荷より大きい点、更に載荷100回以降では、標準載荷と高速載荷でひずみの差異は小さくなる点において、実験結果と定性的に一致している。ただし、実験において見られた、初期沈下過程における標準載荷の載荷過程の体積収縮の傾向は見られなかった。これは供試体モデルの初期状態による影響が大きいと考えられ、特にシミュレーションではモデル作成の段階で摩擦係数を0として締め固めを行なったため、密詰となっていた可能性が考えられる。
- (7) DEMシミュレーションによってのみ得られる情報として粒子間接触点のデータがあるが、初期沈下過程および漸進沈下過程における粒子間接触点数の変化を観察した結果、鋼球層および碎石層のいずれにおいても、高速載荷において、除荷過程で著しい接触点の減少が起きる。この瞬間の粒子間接触力の分布を見ると、高速載荷下では、載荷板下部のみだけでなく、その周囲の広範囲で粒子間接触点が失われる。

第5章 DEMによる実験の再現シミュレーション

- (8) 粒子間接触点数の変化において砕石層モデルでは、最大荷重時の前後で、接触点数が載荷前よりも増加する傾向が見られるが、これは鋼球層モデルでは見られない。これは、砕石要素は一粒子20球からなる不規則形状であり、載荷によって粒子間の間隙が縮小し、粒子同士の接触点数が増加することを示唆している。このことは、鋼球層と砕石層の動的挙動および沈下特性の差異にもつながる要因であると考えられる。
- (9) 粒子間接触点における接触力の作用方向について、鋼球層モデルでは載荷初期には顕著な傾向が見られなかったが、漸進沈下過程において、鉛直方向の接触力の割合が卓越する傾向が見られる。一方、砕石層モデルでは、載荷初期から鉛直方向の接触力の割合が卓越していたことから、砕石層モデルの供試体は締固めの過程において、鉛直方向の荷重が伝達しやすい粒子構造が確立されている可能性がある。
- (10) DEMパラメータにおいて、減衰係数と粒子間摩擦角を変えた複数の条件でシミュレーションを行ったが、減衰係数による直接的な影響は、明確に認められなかったのに対して、粒子間摩擦角は定性的、定量的に影響を及ぼし、特に砕石層モデルで粒子間摩擦角を45度としたシミュレーションでは、変位波形や沈下曲線から、実験や鋼球層モデルでは見られない傾向が表れたことから、粒子間摩擦角の設定には注意が必要といえる。

以上より、高速載荷において沈下進みの増加が継続する原因として、除荷過程の粒子の著しい動的挙動により「粒子間接触点が広範囲で失われ」、これにより載荷過程で確立される荷重を支持するための粒子構造も失われるためと考えられる。

よって、これらの高速載荷において顕著な「粒子の短期的な挙動」は、繰返し載荷課程における長期的な粒子層の「残留沈下の促進に影響を与える」といえる。

また本章の結果より、DEMシミュレーションにおいて、繰返し載荷実験の再現は、ほぼ可能であるといえる。ただし定量的精度を向上させる上では、モデルおよびDEMパラメータの更なる検証が不可欠である。

また、繰返し載荷実験との比較を行なう場合、極力、実験結果と同レベルの載荷回数を稼ぐことが必須となるが、特に球集合体による不規則形状要素モデルにおいては、現時点では計算時間がかかるため、難しい課題といえる。

一方で、従来、シミュレーションによる道床バラスト部の動的応答・変形のメカニズムの検討においては、短期的な応答や弾性変形の再現に限られていたことから、本シミュレーションのように、繰返し載荷における残留変位、残留沈下量を再現できたことは、有意義といえる。

第5章の参考文献

- 1) 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
- 2) T.Matsushima, J.Katagiri et.al : 3D shaped Characterization and Image-Based DEM Simulation of the Lunar Soil Simulant FJS-1, Journal of Aerospace engineering January 2009, ASCE, pp15-23,2009
- 3) Hertz, H : Uber die Berührung fester elastischer Korper (On the contact of elastic solids), J.reine und angewandete Mathematik, 92, 156-171, 1882.
- 4) 粉体工学会 : 粉体シミュレーション入門, 2001年
- 5) P.W.Rowe : The Stress-Dilutancy relations for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc. Royal Soc.Loadon, Seires A, vol.269,pp117-141,1962
- 6) 福田和彰 : イメージベースDEMを用いた不規則形状粒子集合体のせん断強度予測とサイズ効果の検討,筑波大学修士論文, 2010
- 7) 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年7月
- 8) 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年11月
- 9) 伯野 元彦 : 破壊のシミュレーション 森北出版, 1997

第6章

一自由度減衰系モデルと
DEM による考察

3章から5章までの検討においては、載荷速度が10倍異なる2通りの載荷速度による繰返し載荷実験およびDEMシミュレーションを行い、粒子層の動的挙動および沈下特性に及ぼす載荷速度の影響を観察した。その結果、高速載荷の場合、粒子層の動的挙動が激しくなり、それに伴い沈下も促進されることが明らかとなった。しかし、載荷速度の影響を検討する上では、2通りの載荷速度では不十分といえる。

そこで本章では、基本的な一自由度減衰系モデルとDEMの両者を用いて、粒子層の動的挙動が促進される外力の条件について検討を行う。ただし一自由度減衰系モデルを扱う上では、簡単のため外力を調和外力で単純化した。

6.1 一自由度減衰系の振動

図6.1に示すシンプルな1質点減衰系においては、質点の運動は式6.1で示され、変位 x は、式(6.2)で示される自由振動となる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad \cdots (6.1)$$

ここで、 m は質点の質量、 c は減衰係数、 k はばね係数である。

$$x = e^{-\sigma t} (a \cos \omega_d t + b \sin \omega_d t) \quad \cdots (6.2)a$$

$$\sigma = \omega_n \zeta \quad \cdots (6.2)b$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad \cdots (6.2)c$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \cdots (6.2)d$$

ここで、 ω_n 系の固有角振動数、 c は減衰係数である。

また、質点に図6.2に示す調和外力が作用する場合、質点の運動は式(6.3)で示され、変位 x は、式(6.4)で示される強制振動となる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = A(1 - \cos \omega t) \quad \cdots (6.3)$$

ここで、 ω は外力の固有角振動数、 A は荷重振幅である。

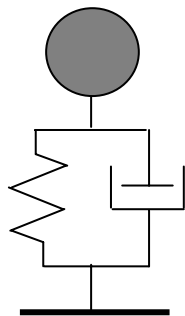


図 6.1 1 自由度減衰系

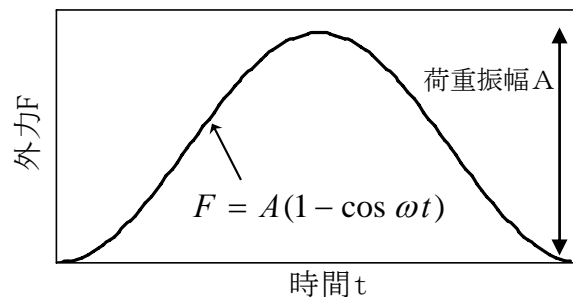


図 6.2 調和外力

$$x = \frac{A}{2} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{2\sqrt{(k-m\omega^2)^2 + c^2\omega^2}} \cos(\omega t - \phi) \right) \dots (6.4)a$$

$$\tan \phi = \frac{c\omega}{k - m\omega^2} \dots (6.4)b$$

ただし、式(6.4)は、式(6.3)の特解に当たるため、一般解は式(6.5)に示す通りとなる。

$$x = e^{-\sigma t} (a \cos \omega_d t + b \sin \omega_d t) + \frac{A}{2} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{2\sqrt{(k-m\omega^2)^2 + c^2\omega^2}} \cos(\omega t - \phi) \right) \dots (6.5)a$$

$$\text{ここで、 } a = \frac{A}{2} \left\{ \frac{k - m\omega^2}{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2} - \frac{1}{k} \right\}, \quad b = \frac{A}{2\omega_d} \left\{ \frac{\sigma(k - m\omega^2) + c\omega_2}{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2} - \frac{\sigma}{k} \right\} \dots (6.5)b$$

6.2 DEM砕石層モデルの単純化

図6.3に、前章の実験再現シミュレーションで用いた砕石層モデルにおける、除荷後の載荷板の振動を示す。図より、載荷板がほぼ一定の振動周期で減衰振動するのが明らかである。

ここで、砕石層を単純な一自由度減衰系のバネダンパ、載荷板を質点と考え、載荷板の応答を式(6.2)に当てはめると、表6.1に示すように、式中の各係数が求まる。

これらの値を式(6.5)にあてはめることで、あらゆる周波数の調和外力における質点の応答を簡単に知ることが可能である。

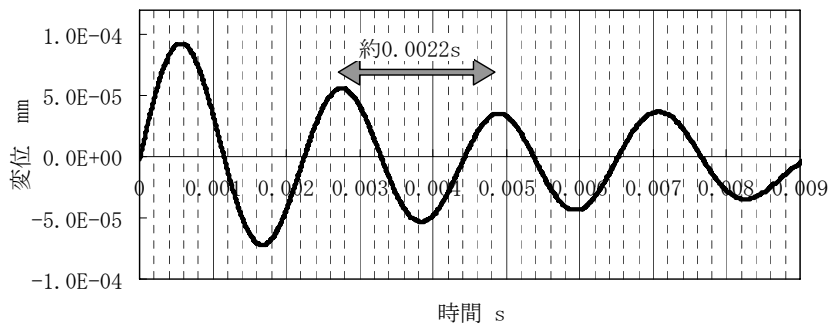


図 6.3 砕石層モデル DEMにおける載荷板要素の自由振動

表 6.1 載荷板を一自由度減衰系の質点と見た場合の各係数

固有角振動数	ωn	2.8588E+03
減衰固有角振動数	ωd	2.8532E+03
減衰率	σ	1.7982E+02
系のばね係数	k	1.5453E+06
系の減衰係数	c	6.8000E+01
係数	a	0.0000E+00
係数	b	1.0000E-04

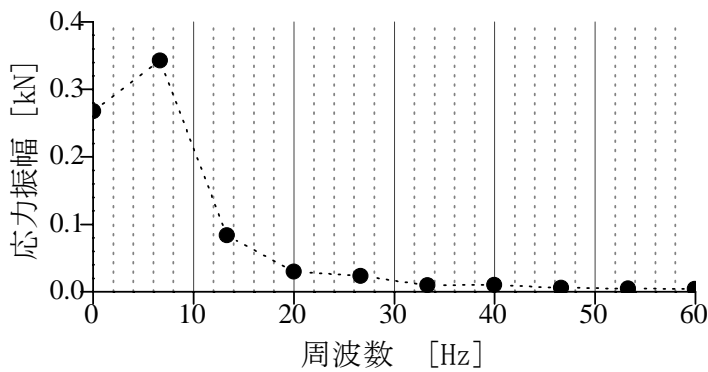
6.3 DEMと一自由度減衰系モデルにおける調和外力応答の比較

図6.4に、砕石層の実験再現シミュレーションにおける、漸進沈下過程の標準载荷と高速载荷の波形の周波数特性を示す。図より、標準载荷では約6.7Hz、高速载荷では約67Hzの周波数においてピークが表れている。更に上述により、砕石層モデルにおける载荷板の固有振動数は、約455Hzと言う結果が得られている。よってここでは、これらの振動数を含んだ9通りの振動数（表6.2）による調和外力が作用した場合の载荷板の運動について、式(6.5)によって応答を計算すると同時に、砕石モデルに直接調和外力を入力したDEMシミュレーションを行い、結果を比較することとする。ここで荷重振幅は、実験の際に設定した荷重振幅0.8kNとした。

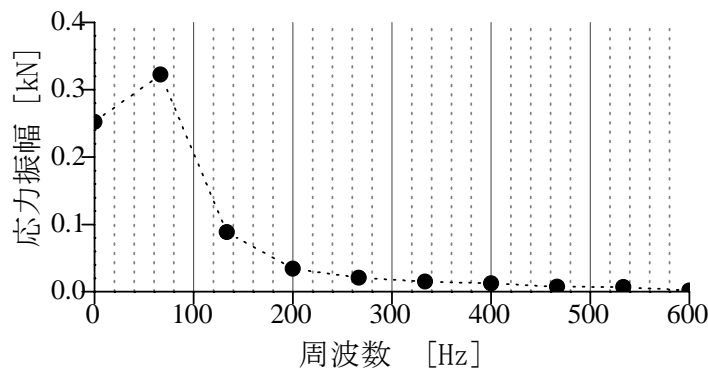
6.3.1 荷重作用時の応答

(1) 応答変位波形

図6.5に载荷板（質点）の応答変位波形を示す。更に各図、図(1)は外力振動数 ω が表6.2に示す10Hzから455Hz、図(2)は外力振動数455Hz～5000Hzの結果を示す。更に各図(a)が一自由度減衰系のバネダンパモデルから求めた解で、(b)がDEMシミュレーション結果である。いずれも、 $-$ が沈下方向を示す。



(1) 標準载荷



(2) 高速载荷

表 6.2 外力周波数と荷重振幅

外力振動数
10Hz
100Hz
200Hz
400Hz
445Hz
600Hz
1000Hz
2500Hz
5000Hz

図 6.4 実験再現 DEM シミュレーションにおける
载荷荷重波形のスペクトル

第6章 一自由度減衰系モデルとDEMによる考察

図6.5(1a)の一自由度減衰系モデルで求めた質点の変位波形において、外力振動数10Hzでは、きれいな余弦波形を示し、最大変位は0.53mm程度となる。次に外力振動数100Hzでも、変位波形および最大変位は10Hzの場合と大きな差異は見られないが、若干歪んだ余弦波形を示す。これは、外力振動数の増加により、式(6.1)aの第一項に示す、質点の固有振動の振幅が増加することを示す。また外力振動数200Hzになると、波形はほぼ余弦波形を示すが、最大変位が0.61mmと増加し、更に外力振動数400Hzでは応答に大きな変化が現れ、変位波形のピークは0.5周期から0.7周期程度まで移動し、最大変位も0.81mmと著しく増加する。また系の固有振動数に近い455Hzの場合では、変位波形および最大変位において外力周波数400Hzの場合とほぼ同様となるが、変位波形のピークが、更に0.75周期程度まで移動する。また荷重1周期終了時の変位は、外力振動数10Hzの場合は0に戻るが、100Hzでは-0.02mm、200Hzでは-0.06mm、400Hzでは-0.17mmとなり、455Hzではプラスに転じて0.07mmとなる。

これに対して図6.5(1b)より、上記と同じ外力振動数の調和外力を入力したDEMシミュレーション結果において、外力振動数10Hz～455Hzの5通りで、最大変位は図6.5(1a)に示した結果とほぼ同程度の値となるが、応答変位波形の形には差異が見られる。まず外力振動数10Hzおよび100Hzでは、荷重1周期の前半つまり荷重の増加過程において、モデルの解と比較して大きな変位が発生し、その後の荷重の減少過程においては変位の戻りが遅く、荷重1波終了時の変位は、外力振動数10Hzの場合で0.68mm、100Hzの場合で0.70mmとモデルの解よりも著しく大きくなる。これはDEMシミュレーションにおける砕石層モデルは、単純なバネ-ダンパではなく、粒子集合体であるため塑性変形も発生する。よってDEMシミュレーション結果における荷重1周期終了時の変位は、ほとんどが残留沈下分となる可能性があるが、詳細は次節で検討する。

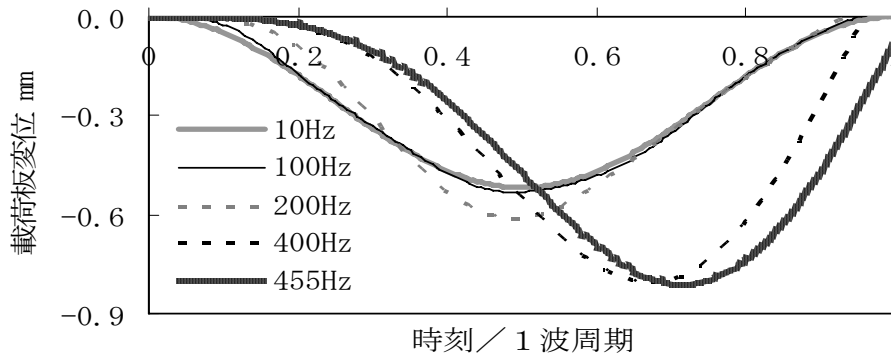
次に図6.5(2a)の一自由度減衰系モデルで求めた質点の変位波形において、系の固有振動数よりも大きい外力振動数600Hzでは、最大変位は0.64mmと減少し、また変位波形のピークは更に移動し0.9周期程度となる。更に外力振動数が1000Hzを超えると、変位波形のピークは見られず荷重1周期終了時の変位は、外力振動数1000Hzで0.58mm、2500Hzで0.15mm、5000Hzで0.04mmと著しく減少していく。

これに対して図6.5(2b)より、DEMシミュレーション結果では、外力振動数600Hzにおける最大変位は0.71mmでモデルの解より若干大きい。変位波形の形はほぼ同様である。更に外力振動数1000Hz以上では、荷重1周期終了時の変位が、外力振動数1000Hzで0.53mm、2500Hzで0.14mm、5000Hzで0.04mmと、モデルの解とほぼ一致する。

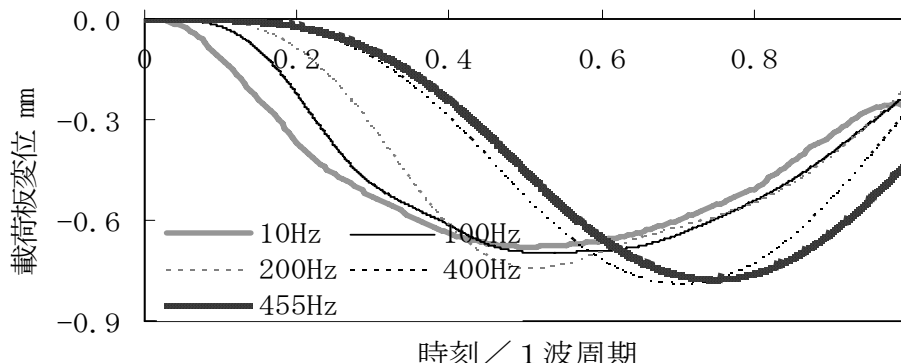
以上より、一自由度減衰系モデルおよびDEMシミュレーションのいずれにおいても、外力周波数に対する応答変位は、① 外力振動数が固有振動数に近づくほど最大変位が大きくなる、② 外力振動数400Hz程度から応答が遅れ、応答変位波形のピークが荷重1周期の後ろ側へずれる、③ 外力振動数が固有振動数より大きい領域では、外力振動数が増加するほど荷重1周期における最大変位は小さくなる、という3点において同様の傾向が得られた。また、モデルの解とDEMシミュレーション結果との差異は、外力振動数が小さいほど大きい。

(2) 応答荷重波形

図6.6 に応答荷重波形を示す。更に各図、図(1)は外力振動数 ω が表6.2に示す10Hzから455Hz、

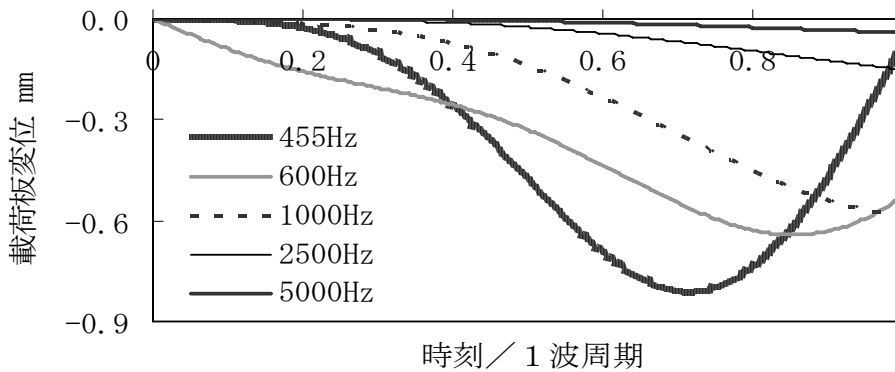


(a) バネダンパモデルから求めた応答波形

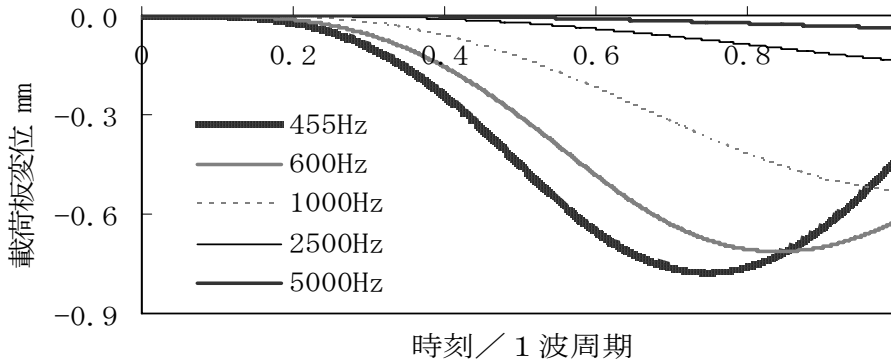


(b) DEM シミュレーション結果

(1) 外力振動数が固有振動数より小さい領域



(a) バネダンパモデルから求めた応答波形



(b) DEM シミュレーション結果

(2) 外力振動数が固有振動数より大きい領域

図 6.5 応答変位波形の比較

第6章 一自由度減衰系モデルとDEMによる考察

図(2)は外力振動数455Hz～5000Hzの結果を示す。更に各図(a)が一自由度減衰系のバネダンパモデルから求めた解で、(b)がDEMシミュレーション結果である。

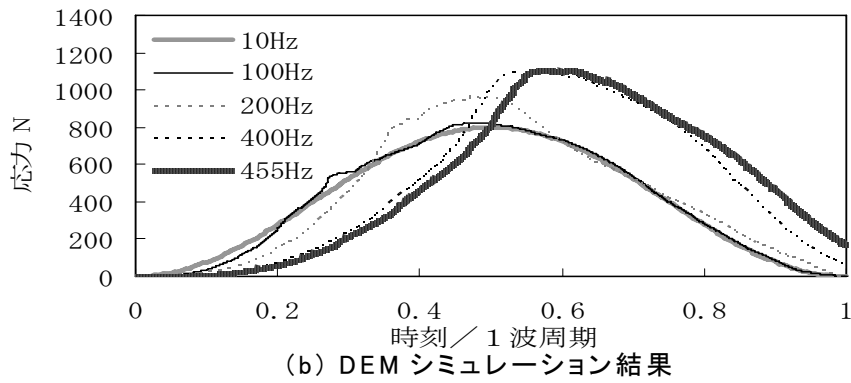
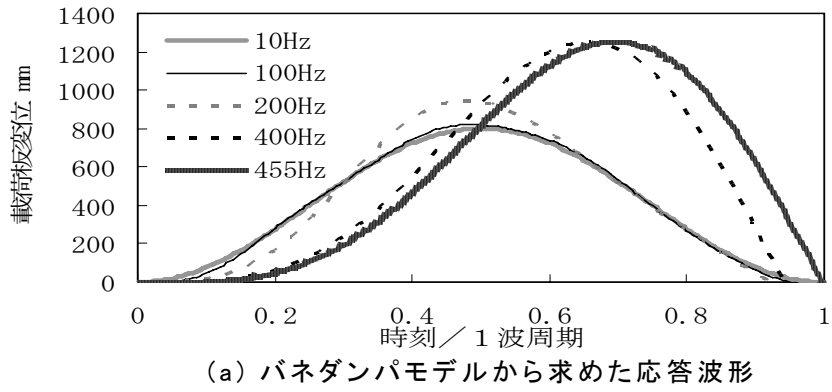
図6.6(1a)の一自由度減衰系モデルで求めた質点の応答荷重波形において、外力振動数10Hzでは、きれいな余弦波形を示し、最大荷重も800Nで、荷重振幅の値と一致している。次に外力振動数100Hzでも、応答荷重波形は10Hzの場合とほぼ同様であるが、最大荷重が820Nと若干増加している。また外力振動数200Hzになると、波形は余弦波形を示しているが、最大荷重が945Nと著しく増加する。更に外力振動数400Hzでは応答に大きな変化が現れ、応答荷重波形のピークは0.5周期から0.7周期程度まで移動し、最大荷重も1249Nと著しく増加する。また系の固有振動数に近い455Hzの場合では、荷重波形のピークは更に0.75周期程度まで移動し、最大荷重は1255Nとなる。

これに対して図6.6(1b)より、上記と同じ外力振動数の調和外力を入力したDEMシミュレーション結果において、外力振動数が10Hzでは応答荷重波形および最大荷重においてモデルの解とほぼ一致し、また100Hzおよび200Hzの場合でも、最大荷重の値はモデルの解と同程度の値となるが、応答荷重波形が若干歪んでいる。一方、外力振動数400Hzおよび455Hzの場合では、いずれも0.5周期まではモデルの解と同様の応答荷重波形を示すが、その後、最大荷重が1100N前後に達すると、徐々に荷重は減少する。この差異についても、DEMシミュレーションにおける碎石層が粒子集合体であることが影響すると考えられる。つまり、碎石層モデルにおいては、最大荷重が1100Nとなった段階から粒子の移動が進み、それにより載荷板下において荷重が増加しなくなると同時に、その過程で残留沈下が発生すると考えられ、これは前出の応答変位波形の傾向と矛盾しない。

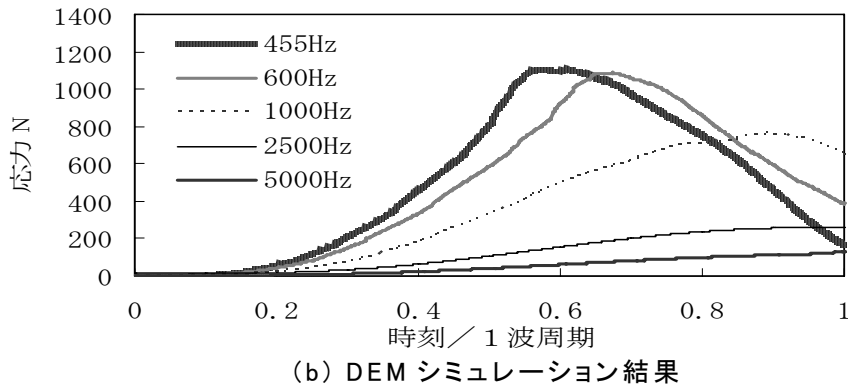
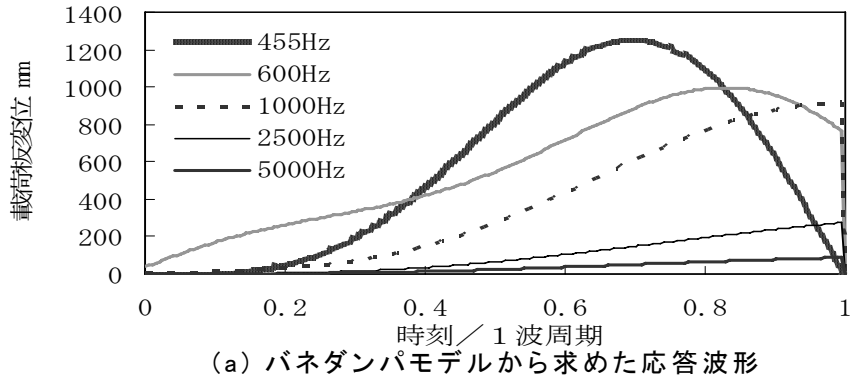
次に図6.6(2a)の一自由度減衰系モデルで求めた質点の荷重波形において、系の固有振動数よりも大きい外力振動数600Hzでは、最大荷重は997Nと減少し、荷重波形のピークは更に移動し、0.9周期程度となる。また外力振動数が1000Hzを超えると、荷重波形のピークは見られず、荷重1周期終了時の応答荷重は、外力振動数1000Hzで918N、2500Hzで275N、5000Hzで88Nと著しく減少していく。

これに対して図6.6(1b)より、DEMシミュレーション結果では、外力振動数600Hzにおける最大荷重は1087Nでモデルの解より若干大きく、荷重波形も著しく異なり、外力周波数400Hzおよび455Hzの場合と同様の波形を示す。一方、外力振動数1000Hz以上では、波形はほぼモデルの解と同様となり、荷重1周期終了時の荷重は、外力振動数1000Hzで727N、2500Hzで262N、5000Hzで128Nと減少傾向となるが、モデルの解と比較すると若干大きい値となる。

以上より、一自由度減衰系モデルおよびDEMシミュレーションのいずれにおいても、外力周波数に対する応答荷重は、① 外力振動数が固有振動数に近づくほど最大荷重が大きくなる、② 外力振動数400Hz程度から応答が遅れ、応答荷重波形のピークが荷重1周期の後ろ側へずれる、③ 外力振動数が固有振動数より大きい領域では、外力振動数が増加するほど荷重1周期における最大荷重は小さくなる、と言う3点において同様の傾向が得られた。ただし、外力振動数が系の固有振動数に近い領域では、モデルの解とDEMシミュレーション結果とで応答荷重波形に大きな差異が表れ、これはDEMにおける碎石層モデルの粒状性が影響しているといえる。



(1) 外力振動数が固有振動数より小さい領域



(2) 外力振動数が固有振動数より大きい領域

図 6.6 応答荷重波形の比較

6.3.2 除荷後の挙動

図6.7に、6.3.1にて行ったDEMシミュレーションの荷重1波終了時から継続してシミュレーションを行った結果より、載荷板の変位を示す。ここでは特に、実験における荷重波形の周波数と近い10Hzおよび100Hzの場合の運動と、比較のために、系の固有振動数に近い455Hz、その約5倍となる2500Hzの場合の結果を示す。各図中、灰色太線部は図6.6で示した荷重作用時の応答変位で、黒色太線部が、その後のシミュレーション結果である。

まず図6.7(1)より、実験における標準荷重に近い10Hzの載荷後において、載荷板の変位は除荷直後に0.05mmほど増加した後、緩やかな増加傾向を見せた後、0.32mm程度で安定する。これは除荷後の残留沈下量を示すといつてよい。

次に図6.7(2)より、実験における高速荷重に近い100Hzの載荷後において、載荷板の変位は一度マイナスとなり、-0.112mm程度をピークに元に戻り、0.26mmにおいて安定する。これは、載荷板が除荷後に一度1mmほど飛び上がり、その後、砕石表面に再設置する挙動を示す。また、ここでも約0.26mmが残留沈下量を示すといつてよい。

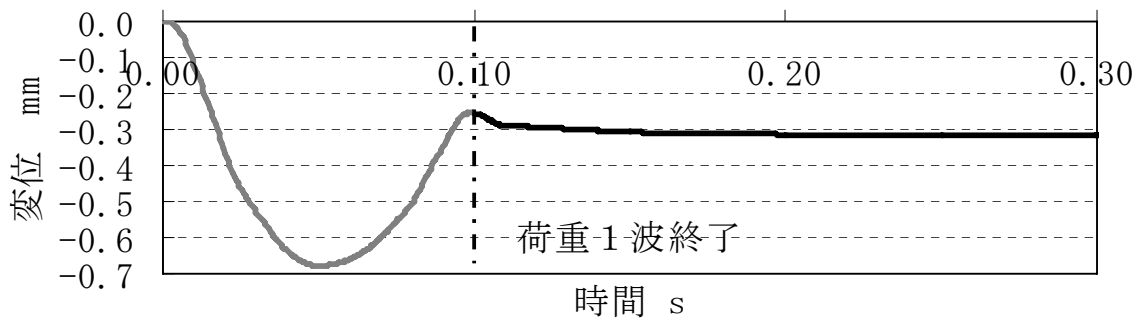
また図6.7(3)より、載荷板の固有振動数に近い455Hzの載荷後において、載荷板の変位はマイナス方向へ著しく増加し、この後、-60mm程度でピークを示した後、元に戻る。ここで、この条件においては、外力振動数455Hz、荷重振幅800Nという非現実的な荷重をしていることから、載荷板が60mmも飛び上がる現象が実際に起こるとは考え難いため、実験結果の考察においては比較対象とはできない。

更に図6.7(4)より、載荷板の固有振動数よりはるかに大きい2500Hzの載荷後においては、載荷板はプラスおよびマイナス方向へ増減を繰り返した後、変位0.04mm程度で安定する。上記と同様に、外力振動数2500Hz、荷重振幅800Nという条件も非現実的であるが、固有振動数より大きくなると、逆に載荷板の応答は微小になることが示された。

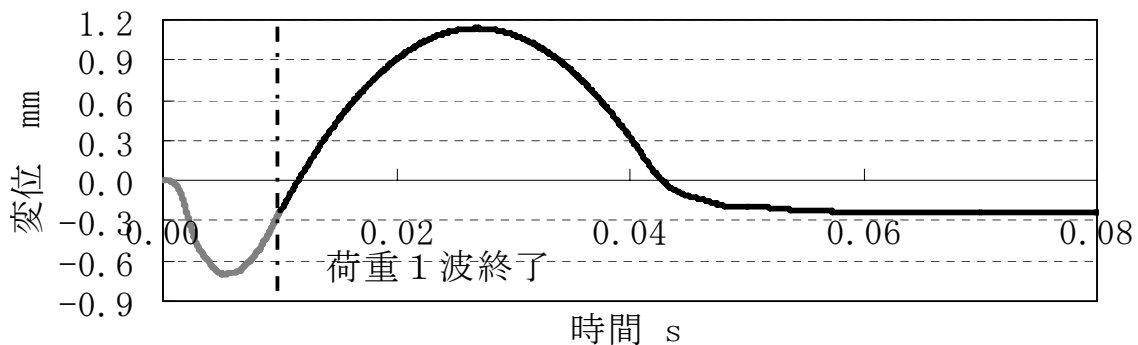
6.4 DEMシミュレーションにおける粒子の除荷後の挙動

ここで、5章における実験の再現シミュレーションにおいて行ったように、砕石要素の挙動を観察する。図6.8.1に外力振動数10Hzの場合の動的挙動を、図6.8.2に外力振動数100Hzの場合の動的挙動を示す。また各図、図(1)は載荷過程、図(2)は除荷過程、図(3)は除荷後の動的挙動で、図(4)は載荷前後の残留変位分を示す。ところで図(2)については、最大荷重時と各ケースで除荷後に載荷板変位が図6.7においてマイナスのピークを示した時点の要素位置データを用い、図(3)は、載荷板変位のマイナスのピーク時と変位が安定した時点の要素位置データを用いた。

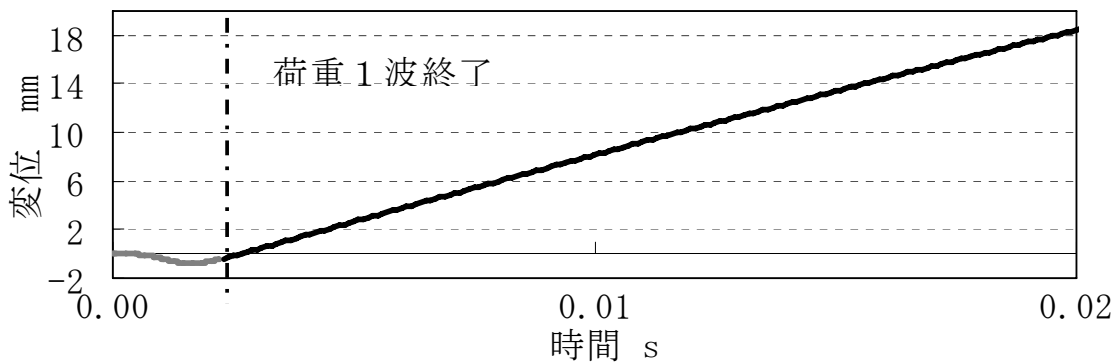
図6.8.1および図6.8.2より、図(1)の載荷過程における粒子の移動は、外力振動数10Hzと100Hzでほぼ同程度であるが、10Hzの場合において載荷板下で移動量が1mmを超えた粒子が見られ、若干10Hzの方が移動量が大きい。次に図(2)の除荷過程では、100Hzの場合で明らかに粒子の移動が著しく、図6.7に示した載荷板の情報への運動に伴い、砕石要素も顕著な応答を示している。ただし10Hzの載荷においても、載荷板直下において粒子の上方への移動が見られる。また図(3)の除荷後においては、除荷過程の応答に伴い、粒子が落下する(元に戻る)様子が顕著にみられるが、ここでも外力周波数100Hzの場合に著しくなっている。更に載荷前後の残留変位分を



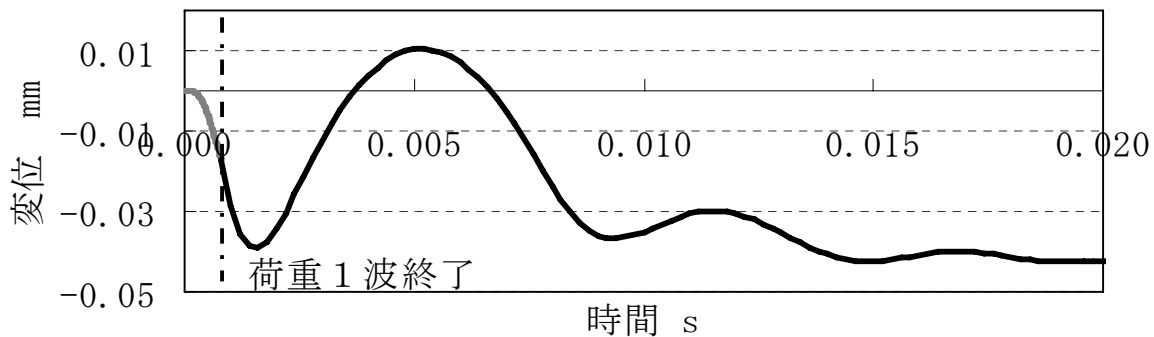
(1) 10Hz



(2) 100Hz

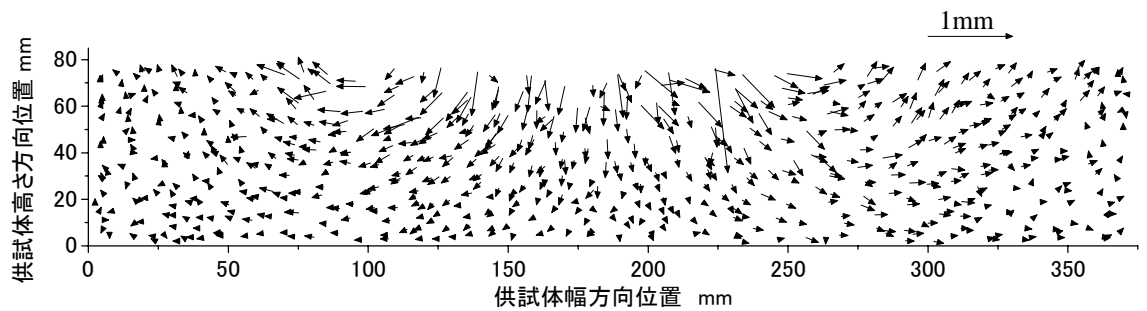


(3) 455Hz

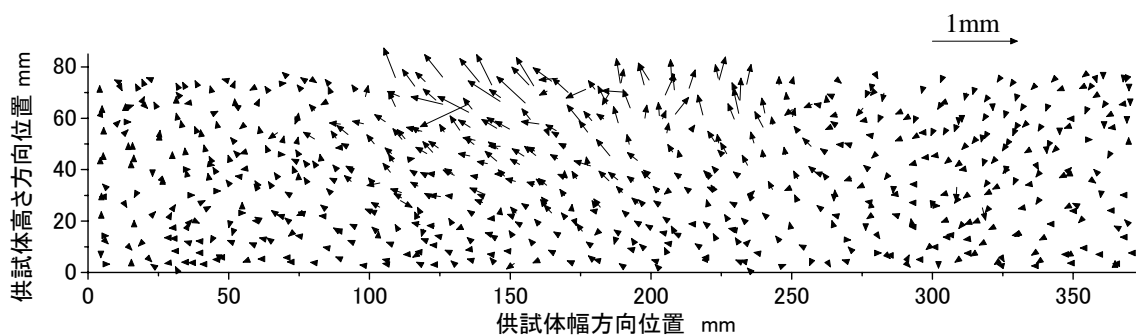


(4) 2500Hz

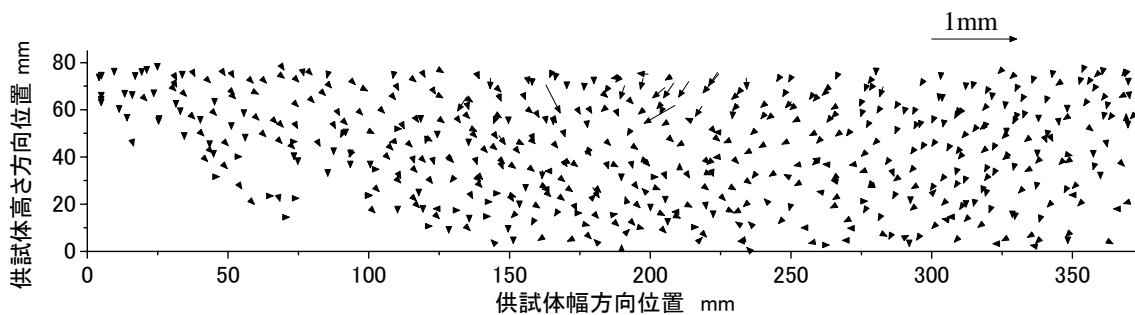
図 6.7 DEM シミュレーションによる除荷後の載荷板の運動



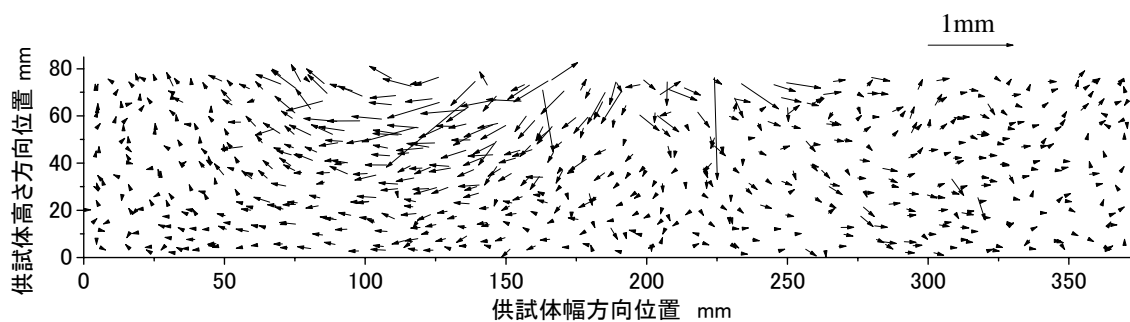
(1) 荷重過程



(2) 除荷過程

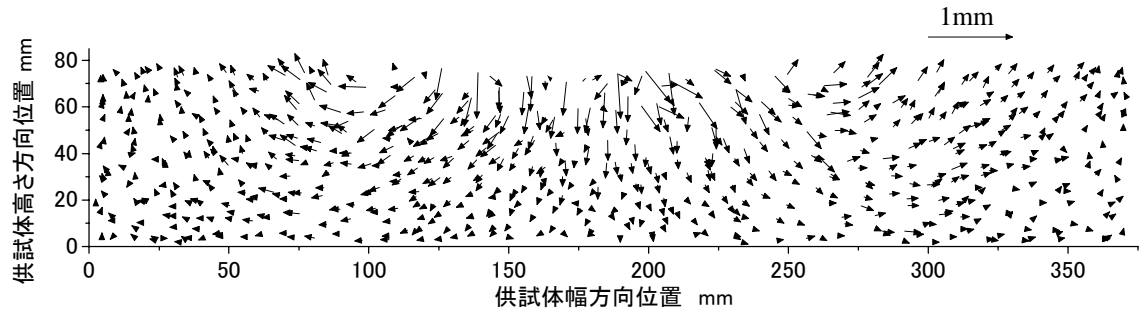


(3) 除荷後

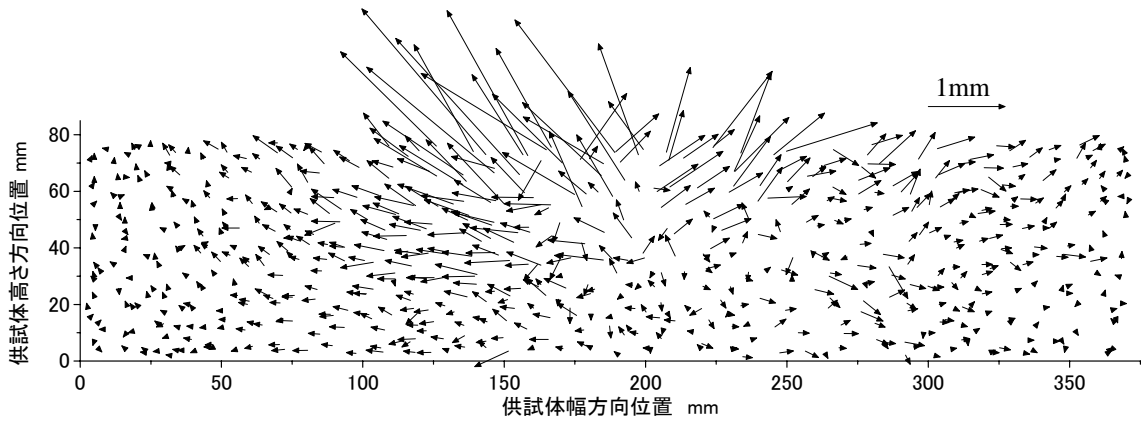


(4) 荷重前後の残留変位分

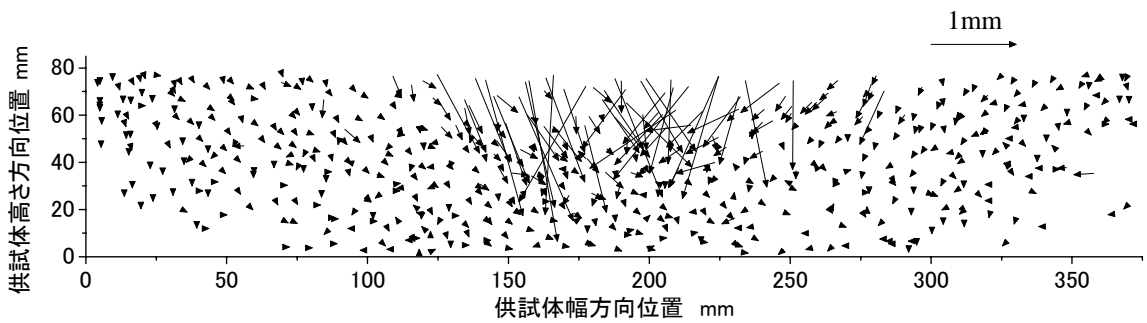
図6.8.1 DEMシミュレーションにおける碎石要素の挙動 10Hz 荷重



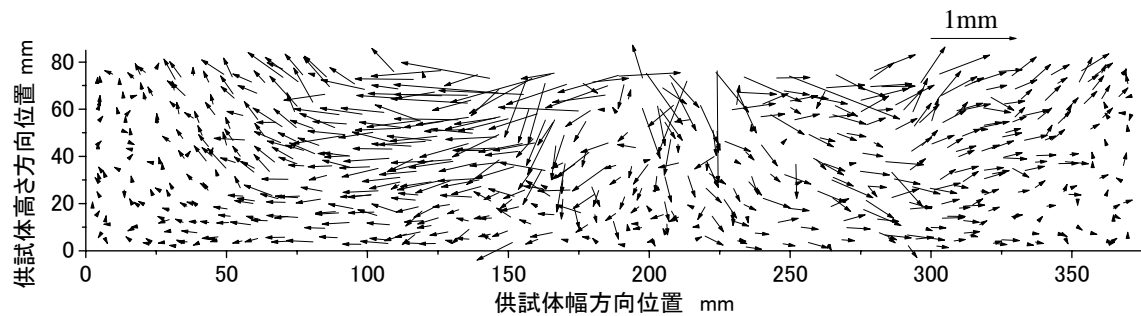
(1) 載荷過程



(2) 除荷過程



(3) 除荷後



(4) 載荷前後の残留変位分

図6.8.2 DEMシミュレーションにおける碎石要素の挙動 100Hz 載荷

第6章 一自由度減衰系モデルとDEMによる考察

示す図(4)においても、粒子の移動量は全体的に外力周波数100Hzの場合で大きくなっている。ただし、図6.7に示す載荷板変位においては、外力周波数10Hzの場合で0.32mm、100Hzの場合で0.26mmであることから、載荷板の変位が必ずしも粒子層内部の局所変形を示しているとはいえず、この点は5章でも述べた通りである。

6.5 本章のまとめ

粒子層を単純なバネダンパ系、載荷板をバネダンパにつながる質点と考え、基本的な一自由度減衰系モデルとDEMの両者を用いて、載荷板（質点）の動的応答の検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 一自由度減衰系モデルによる解とDEMシミュレーション結果を比較した結果、荷重作用時の最大変位および最大荷重は、外力振動数が系の固有振動数に近づくにつれて大きくなり、その後、固有振動数を超えて外力振動数が大きくなると、再び減少する傾向において同様の傾向が得られた。
- (2) 一自由度減衰系モデルおよびDEMシミュレーションから得られる応答変位波形および応答荷重波系を比較した結果、各外力周波数におけるピークの位置は、ほぼ同様の傾向となった。ただし波形を詳細に見ると、特に外力振動数が系の固有振動数近傍またはそれ以下の場合において明確な差異が見られた。また荷重減少過程において、DEMシミュレーション結果では、変位の回復量が小さくなる傾向に関しては、砕石層モデルにおいて、塑性変形が生じていたことを示唆している。
- (3) DEMシミュレーションにおいて、荷重1波終了後の載荷板の運動を観察した結果、外力振動数100Hzの場合において、載荷板が飛び上がる傾向が見られたが、10Hzの場合は見られなかった。また、この載荷板の飛び上がりは、外力振動数が系の固有振動数に近い場合に顕著となるが、2500Hzになると、載荷板の振動は1/100のオーダーとなった。
- (4) DEMシミュレーション結果より、砕石要素の載荷前後の残留変位分を観察した結果、外力振動数が100Hzの場合の方が10Hzの場合に比較して、全体的に粒子の動的挙動は顕著であるが、載荷板の残留沈下量は、10Hzの場合の方が若干大きくなっている。これより、載荷板の応答が、粒子層内部の動的挙動を必ずしも反映しているとはいえない。

以上より、粒子層上の載荷板の動的応答に関しては、粒子層をバネダンパで単純化させたモデルによって、外力の振動数との関連性を把握することが可能であると同時に、DEMシミュレーションにおいても「**粒子層上の載荷板の固有振動数**」に着目した検討が可能であることが示された。ただし粒子層特有の「粒子層内部の粒子配置の変化による残留変位および残留沈下量」という点に関しては、単純な一自由度減衰系のモデルでは把握できないため、DEMのような離散体モデルによる検討が必須である。

また、粒子層上の載荷板の沈下に与える載荷速度の影響に関しては、載荷板の固有振動数を把握することによって、「**沈下を促進する載荷速度（または載荷振動数）**」を予測することが可能であるといえる。

第7章

結 論

7.1 本研究で得られた知見

道床バラスト層の1/3スケールの粒子層において、衝撃的な荷重と、その1/10の荷重速度による繰返し荷重を、実験とシミュレーションで行なった結果より、以下の知見が得られた。

(1) 荷重速度が粒子層の動的挙動および残留沈下量に影響を与える

- ・実験およびDEMシミュレーション結果より、荷重速度が粒子層の動的挙動および残留沈下量に影響を与えることが明らかとなった。ただしその影響の表れ方は‘初期沈下過程’と‘漸進沈下過程’で異なり、粒子層の荷重履歴が関与することが示唆された。
- ・荷重履歴のない粒子層の間隙が詰まる現象は、高速荷重よりも標準荷重において顕著に見られたと同時に、衝撃的な高速荷重による残留沈下量の増加は‘漸進沈下過程’において顕著に現れた。

(2) 衝撃的な高速荷重により残留沈下量は促成された

- ・第3章で述べた繰返し荷重実験結果より、残留沈下量と荷重回数の関係を検討した結果、標準荷重と高速荷重では沈下曲線が著しく異なり、特に衝撃的な高速荷重では、繰返し荷重過程における沈下進みが標準荷重よりも著しく大きく、最終沈下量も最も顕著なケースで標準荷重の数倍の値を示した。この傾向は、荷重振幅や荷重板の幅、実験試料を変えたケースにおいても同様に見られた。
- ・同様に繰返し荷重実験結果より、各荷重回の粒子層の沈下進みに与える影響について、変位振幅と沈下進みの関係を検討した結果、高速荷重の場合、変位振幅に対する沈下進みの度合いは、標準荷重より僅かに大きい値を示した。この傾向は、荷重振幅や荷重板の幅、実験試料を変えたケースにおいても同様に見られた。

(3) 粒子層内の粒子の動的挙動が残留沈下量に影響を及ぼす

- ・PIV解析による粒子挙動の観察結果より、高速荷重下では、特に除荷過程の粒子の上方への挙動が著しく、この現象は荷重1000回でも継続されている。このことは、急激な除荷過程において砕石層内部の粒子構造が乱される現象が継続されることを示唆している。
- ・同様に画像解析結果より、荷重過程-除荷過程および荷重前後のせん断ひずみと体積ひずみの関係を検証した結果、標準荷重では、荷重1回目の荷重過程で体積収縮に伴う著しいせん断ひずみが生じ、そのほとんどが塑性変形分として残留するが、その後の荷重10回、100回では、せん断ひずみも体積ひずみも著しく小さくなる。一方、高速荷重では、荷重1回目では荷重過程と除荷過程の体積ひずみ、せん断ひずみは同程度であるが、その後の荷重10回目および100回目では、除荷過程の著しい体積膨張に伴うせん断ひずみが生じ、塑性変形分も荷重10回目から体積膨張の傾向を示す。

(4) DEMによって繰返し荷重下の粒子層の動的挙動と沈下現象が再現可能である

- ・DEMモデルを用いて実験の再現シミュレーションを試みた結果、実験結果で見られた ①高速荷重下において残留沈下量がより大きくなる点、②標準荷重の荷重1回目の荷重過程において粒子の移動が著しい点、③高速荷重の繰返し荷重過程全般において除荷過程の粒子の上方への移動が著しい点、において、実験と定性的に一致した傾向が得られた。

(5) 衝撃的な高速荷重下では、粒子間接触点の増減が激しく、特に除荷時に激減する

- ・DEMによって得られる粒子間接触力の情報により、高速荷重下では荷重作用過程で接触点

数の増減が激しく、特に除荷過程において瞬時的に接触点数が半減する。また、高速載荷の除荷時において、粒子間接触点が載荷板下近傍を中心に失われることも明らかとなった。

(6) 粒子の動的挙動は、外力振動数が粒子層上の載荷板の固有振動数に近いほど顕著となる

- ・DEMシミュレーションと合わせて、シンプルな一自由度減衰系のモデルを用いた検討を行った結果、両者において、載荷板（質点）の挙動が載荷板の固有振動数に近づくほど激しくなる傾向が得られた。ただし、除荷後の載荷板の挙動に関しては、DEMシミュレーションによる検討が望ましい。

以上より、『衝撃荷重下の粒子層の残留沈下の促進』には、『除荷過程における粒子構造の乱れ』が考えられる。これは粒子集合体が圧縮力には強い一方で、引っ張り力には抵抗できないことから、十分予想される現象である。つまり『急激な除荷』が粒子層の残留沈下量を促進するともいえることから、衝撃荷重下での粒子層の沈下を抑制するには『除荷の緩和』が必要と考えられる。

また『レール継目部における浮きまくらぎ』の発生要因として、衝撃荷重による粒子層の残留沈下量の促進が関与している可能性が示唆された。

これを実際の道床バラスト層の問題として考える場合、衝撃荷重下における局所的沈下を抑制することで、浮きまくらぎの発生を予防する方法としては、① 除荷を遅らせられるような緩衝部材の導入、② 除荷時にも拘束圧がある程度保持できる道床バラスト部の構造、などが有効と考えられる。

ただし、現実的な対策工法を講じる上では、以下の課題も残っている。

7.2 今後の課題

(1) 高速載荷が可能な試験装置の開発

本研究においては1/3模型実験による検討を行ったが、実際のバラスト軌道の沈下挙動を把握する上では、実物大規模の実験が必須といえる。よって、今回の模型実験レベルの高速載荷が可能で、更に実物大レベルの載荷が可能な試験装置の開発が望まれる。

(2) モデルの精度とパラメータの検討

本研究において、DEMによって衝撃荷重下の粒子層のような極めて動的な挙動の再現が可能であることが示された。これにより、実験では観察し難い粒子間接触力などの情報を得ることが可能となり、粒子集合体の変形メカニズムの検討において、有益といえる。

更に、従来の道床バラスト層のシミュレーション手法においては、短期的かつ弾性的な挙動の把握に留まっていたが、DEMを用いる事で、繰返し載荷による残留沈下量の増加現象を、直接的に再現することができた。

ただし、定量的な精度向上を目的とする場合、モデルの作成方法—例えば球集合体モデルの場合、構成球の最適な数—や、合理的なDEMパラメータについて課題がある。

(3) 計算速度の向上

実現場の道床バラスト層の沈下現象に関して定量的な沈下予測をする場合、実物大実験においては何十万～何百万の繰返し载荷が行なわれる。また、特定の影響要因に着目した模型実験においても、一般的には何千回～何万回の繰返し载荷が行われる。よって、こうした実験結果とDEMシミュレーションを相補的に活用する上では、DEMシミュレーションにおいても、ある程度の繰返し载荷回数を稼ぐ必要がある。

現在はプログラムの並列化やコンピュータにおけるCPUの複数化により、また昨今ではGPUの導入など、処理能力は日々向上しているが、DEMシミュレーションが実用レベルで有効活用されるためには、更なる計算速度向上が必要といえる。

(4) 離散体バラスト軌道モデルと実列車通過荷重波形の入力

本研究においては、模型粒子層において、単純化した载荷波形を入力した実験を行なったが、実際の道床バラスト層の沈下現象を検討する場合、供試体は実バラスト軌道であることが望ましく、特に浮きまくらぎの発生メカニズムを明らかにする上では、入力荷重を軸通過荷重と衝撃荷重が重畳された列車通過荷重波形に近づける必要がある。今後は、上述の点について検討を進めると同時に、図7.1に示す離散体バラスト軌道モデルを用いた、より実用的観点における検討を行いたい。

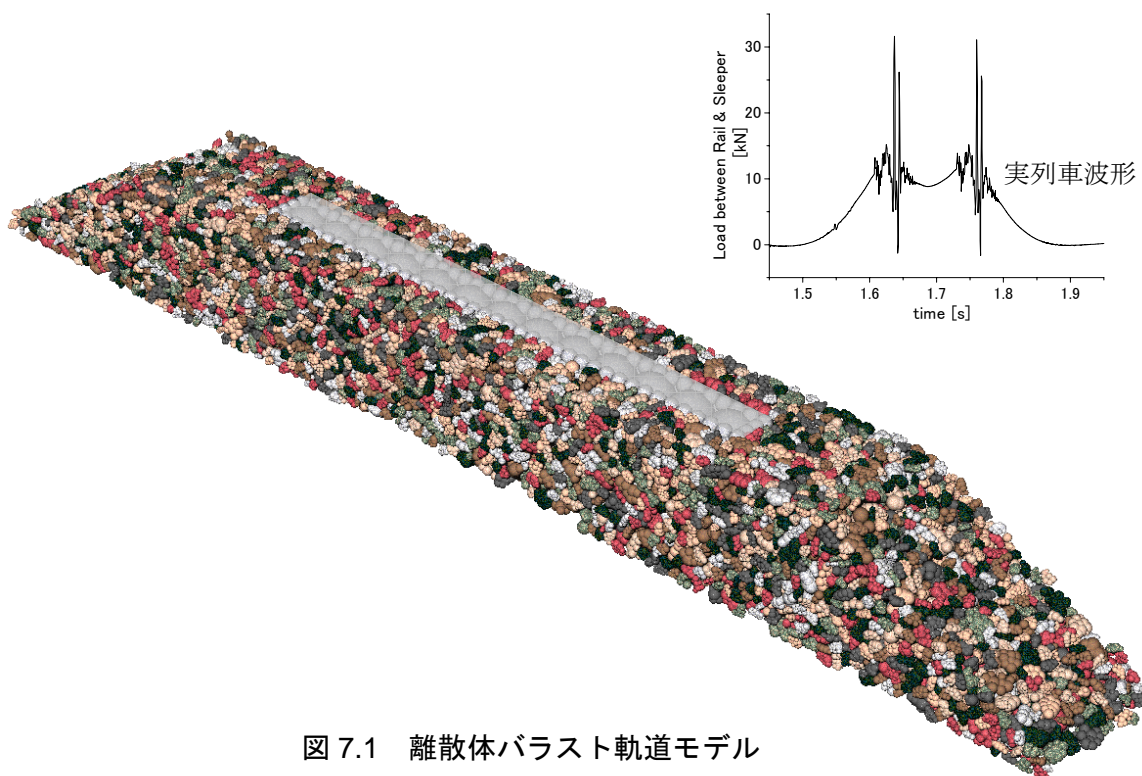


図 7.1 離散体バラスト軌道モデル

謝辞

本論文の作成にあたり、お世話になった方々に心より感謝申し上げます。

松島亘志先生（筑波大学大学院システム情報工学研究科 准教授）には、先生ご自身の研究がご多忙な中、本論文の査読として研究全般に関する御指導をいただきました。

また、査読をしていただいた山田恭央先生（筑波大学大学院システム情報工学研究科 教授）、木幡行宏先生（室蘭工業大学大学院工学研究科 教授）、亀田敏弘先生（筑波大学大学院システム情報工学研究科 准教授）、庄司学先生（筑波大学大学院システム情報工学研究科 准教授）に、この場をお借りして、心よりお礼申し上げます。

約半年前に予備審査をしていただきながら、論文の仕上げが遅れてしまいましたが、予備審査の場での先生方からの的を得た鋭いご指摘・ご意見には大変感動し、特殊な分野の研究にもアドバイスをいただけることを、幸せに感じました。

大学には、休学期間を含め実に5年近くお世話になってしまいましたが、松島先生のご指導は『ピアノソナタ全楽章を練習して持って行ったら、レッスンは最初の1小節で終わってしまった』とも例えられるほど丁寧かつ妥協が無く（いや実はかなり妥協されていたかも）、私は‘のだめ’のように「前に進みたい・・・」と焦った時期もありましたが、何事も、無理に進めば大きな落とし穴があることも学びました。

また、本研究のメインの1つとなった高速載荷試験装置の開発にあたっては、技官の飯高さんに並々ならぬご尽力をいただきました。私の雑駁な要望に対して、常に的確な回答と対応をしていただき、心より感謝しております。

私の職場における力不足ゆえに十分な研究費が確保できない状況でも、この論文を仕上げられたのは、ひとえに飯高さんが開発された試験装置、そして松島先生が開発されたシミュレーションソフトのおかげです。更にPIVでは、地盤研究室の先輩である筈本英貴氏のシミュレーションソフトを使わせていただきました。

職場におきましては、いろいろと難しい状況の中、名村明氏（鉄道総研軌道力学研究室長）には小さなチャンスをつなげ続けていただきました。サラリーマンの私にとって、室長のご理解がなければ、学位取得もあり得なかったと思います。更に本研究を行う上で、名村室長の学位論文等を度々参照させていただき、時にアドバイスをいただくこともありました。これら全てに対して、この場をお借りして御礼申し上げます。

また離散体バラスト軌道モデルの研究を、職場内でも賛否両論ある中、可能性を信じて応援し、支持して下さった鈴木康文氏（鉄道総研 主管研究員）と石田弘明氏（鉄道総研 鉄道力学研究部長）にも、心より御礼申し上げます。

おかげ様で、松島先生のモデル化手法による離散体バラスト軌道モデルも、やっと現場に近い条件によるシミュレーションが可能な状態となりました。

私の研究のモチベーションは、「軌道の保守現場のお役に立ちたい」という一点につきませんが、今後は、この離散体バラスト軌道モデルを活用して、「保線現場の長年の悩み」を少しでも軽減できるよう、現場に足を運び、現場の方々の話に耳を傾けつつ、この4年2ヶ月で学んだことは常に心に留めて、頑張っ参りたいと思います。

最後になりますが、いつもいつも未熟な私を見守り、応援し、時には‘喝！’を入れて下さった総研内外の女性ドクターの先輩方に、心より御礼申し上げます。

そしてこの数年間、不義理をした家族・友人・仲間にも、この場を借りてお詫びしますと同時に、遠くから見守り続けて下さったことに心より感謝いたします。

平成22年10月 河野 昭子