

# 論文 外力周波数が道床バラスト層の変形挙動に与える影響に関する解析的検討

河野 昭子<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38)

E-mail : kono.akiko.43@rtri.or.jp

粗粒砕石で構成される道床バラスト層の変形挙動について、近年、外力周波数の影響に着目した研究が報告されつつある。道床バラスト層の変形は従来、道床バラスト層上のまくらぎの変位量によってマクロな観点で評価されてきたため、外力周波数が道床バラスト層内のバラスト粒子のミクロな挙動に与える影響は観察されていない。そこで本研究では、近年、活用事例が増加しつつある個別要素法を用いて土槽内の模型バラスト層において実施された繰返し載荷実験を再現し、異なる周波数条件における繰返し載荷シミュレーションを行った。またシミュレーション結果より、従来の評価指標であるバラスト層表面の載荷板の変位量と同時に、個別要素法によって得られる粒子間接触力や配位数に着目し、ミクロな変形挙動も観察した。バラスト層下部の底面剛性は、バラストマット有り無しの2通りとし、底面剛性が模型バラスト層の変形挙動に与える影響についても観察した。

**Key Words :** *Ballasted Track, Discrete Element Methods, Cyclic Loading Test, Validation*

## 1. はじめに

バラスト軌道における道床沈下特性については、これまで国内外で多くの既往研究が報告され、道床沈下を急進させる影響要因に着目したものから、その影響要因を排除または影響度を低減させるための対策工法を提案するものまで、多岐に渡る<sup>1,2)</sup>。そして、それらの研究においては、荷重-変位関係、つまり外力の大きさや向きと軌道部側の弾性項に着目したものが主流となっている。

他方、外力の周波数や速度、また軌道部側の固有振動数や振動モードに着目した研究も報告され<sup>3,4)</sup>、道床バラスト層が変形し易い周波数帯等が明確になりつつある。ただし、これらの既往研究における実験的検討では、インパルス加振試験などによって弾性波の応答を扱っており、道床バラスト層の変形は塑性変形をほとんど伴わない弾性領域内の変形である。同様に、解析的検討でも、解析モデルはフォークトユニットでつながれた質点系を用いることが多く、道床バラスト層の変形は弾性領域内となっている。

これらに対して近年、加振試験装置の制御機能の向上等により、載荷周波数40Hz程度までの実験的検討が行われており、道床沈下に対する外力の周波数の影響についても明らかにされつつある<sup>5)</sup>。

本研究では、近年、活用事例が増加しつつある個別要

素法（以下、DEM）を用いた離散体バラスト軌道モデル<sup>6,7,8,9)</sup>を用いて、上述の道床沈下と外力周波数の関係に着目したシミュレーションを実施した。シミュレーション結果より、マクロな観点で模型バラスト上の載荷板の変位量に対する外力周波数の影響を観察すると同時に、ミクロな観点で、模型バラスト層内の粒子間接触点力分布や配位数に対する外力周波数の影響を観察した。

## 2. 解析モデルの妥当性の検証

DEMを用いた離散体バラスト軌道モデルは、これまで、道床沈下やバラスト流動を抑制する対策工法の定性的評価に主に用いられてきた。

本章では、前章で述べた解析的検討の前段階として、離散体モデルの定量的精度を確認するために行った、土槽内に敷設した模型バラスト層の繰返し載荷実験と、実験の再現シミュレーションの結果を示す。

### (1) 実験方法

#### a) 模型バラスト層

図-1に、模型バラスト層の繰返し載荷実験の実施状況を示す。土槽のサイズは幅1000mm、奥行300mmであり、バラスト層の厚さは250mmとした。また、バラスト砕石は、新品の安山岩バラスト砕石を用いた。

なお、土槽内の模型バラスト層は実際のバラスト軌道とは境界条件が異なり、これによりバラスト層の密度も異なる。ただし今回は「解析モデルの妥当性の検証」を目的としたため、DEMによる繰返し載荷シミュレーションの計算負荷の低減を考慮すると、バラスト碎石の数を最小限に留めることも重要となる。

そこで、バラスト碎石の最大粒径が概ね60mmであること、平均粒径が概ね30mm程度であることを考慮し、土槽の奥行は平均粒径の10倍の300mmとした。また、土槽の幅については、実軌道の道床肩が400mm程度であることから、ここでは載荷板の両側を350mmとした。

なお、土槽内に構築した模型バラスト層の密度は、 $1.59\sim 1.63\text{g/cm}^3$ で、実軌道の締固め後の密度 $1.67\text{g/cm}^3$ <sup>10)</sup>に対して2～5%小さな値となっている。

#### b) 載荷板

載荷板には、一辺300mmの正方形の板を用いた。載荷荷重を確認するために圧電フィルム式荷重センサをアルミ板で挟んだ。バラスト層と接触する下部板はコンクリート板とした。

#### c) 載荷条件

載荷条件は、既往研究における実物大試験において、最大荷重がまくらぎ1本辺り154kNと設定されていること<sup>11)</sup>を参考とし、本実験における載荷板のサイズが300mm×300mmであることから、最大荷重20kN、最小荷重1kNとした。載荷周波数は上述の既往研究<sup>11)</sup>における実験条件を参考とし、7Hzとした。

また実験における載荷回数数は1000回としたが、DEMによる繰返し載荷シミュレーションでは100回とした。

#### d) 土槽底部条件

土槽底部の条件は、土槽底部とバラスト層の間に、図-2に示すバラストマット(K=4.5タイプ)を敷き込んだ条件(以下、底面マット条件)と敷き込まない条件(以下、底面鋼製条件)の2通りとした。

### (2) 解析方法

#### a) 離散体バラスト層モデル

図-3に、図-1に示す土槽内の模型バラスト層の再現モデルを示す。土槽および載荷板のサイズは実験と同一とした。

本研究で用いた離散体モデルは、各要素を球の集合体でモデル化していることから、載荷板要素は361個の球で、またバラスト要素は10個または20個でモデル化した。

なお、バラスト要素は全部で1980個となり、バラスト軌道在来線を想定したまくらぎ1本モデル<sup>12)</sup>の約1/10の個数に留まった。

#### b) 載荷条件

載荷条件は、荷重振幅については前節で述べた実験と同様に最小荷重1kN、最大荷重20kNとしたが、載荷周波

数は8Hzと20Hzとした。これは7Hzで設定した場合、1波辺りのステップ数が循環小数となり、観察点に誤差が生じるためである。

#### c) DEMパラメータ

表1にDEMパラメータを示す。土槽要素は鋼製板を、載荷板要素はコンクリート板を想定した値とした。また



図-1 模型実験実施状況



図-2 底面マット条件 (バラストマット)

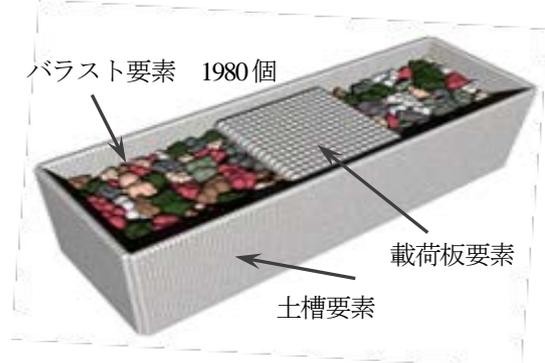


図-3 離散体モデルによる模型バラスト層の再現

表-1 DEMパラメータ

			バラスト要素	載荷板	土槽	
					底面鋼製	底面マット
ばね係数 (N/m)	法線方向	$K_n$	$6.88 \times 10^6$	$6.88 \times 10^6$	$1.77 \times 10^7$	$2.0 \times 10^6$
	接線方向	$K_s$	$1.72 \times 10^6$	$1.72 \times 10^6$	$6.92 \times 10^6$	$0.8 \times 10^6$
減衰係数 (N·s/m)	法線方向	$C_n$	375	230.5	525	637
	接線方向	$C_s$	187.5	115.25	262.5	255
摩擦係数 (度)		$\mu$	45	20	20	20

土槽要素の底面は、バラストマット（以下、マット）の有り無しの2通りの値を用いた。マット有りの条件では、バラストマットのばね係数が100mm×100mmの供試体で4.5MN/mであることから、DEMモデルにおいても底面のばね係数が同様となる値を求めた。

バラスト要素については、粒子間ばね係数と減衰係数は従来値を用いた<sup>13)</sup>。また粒子間摩擦係数は、模型実験と複数の粒子間摩擦係数による再現シミュレーション結果<sup>14)</sup>から決定した。

#### d) 解析コード

解析コードは、筑波大で開発された剛接球集合体モデル「DEM-CS」<sup>15)</sup>を、鉄道総研と筑波大学の共同研究で改良した「DEMCS-track」<sup>16)</sup>を用いた。

### (3) 結果の比較

載荷板の変位波形については、図-4に示すように、繰返し荷重により増減する変位（バラスト層の弾性変形）を「変位振幅」、載荷開始前の載荷板位置と、一定回数載荷後の除荷時の載荷板位置との差（沈下量）をここでは「残留変位」と示す。

図-5に、実験およびシミュレーションにおける載荷板の変位波形を示す。図中黒色細線が底面鋼製条件、灰色太線が底面マット条件の結果を示す。

まず各条件の変位振幅の平均値は、底面鋼製条件において実験結果で0.4mm、シミュレーション結果で0.44mm、底面マット条件において実験結果で0.74mm、シミュレーション結果で0.83mmで、いずれも解析結果が10~12%大きい値を示している。

底面条件で比較すると、底面鋼製条件に対して底面マット条件では、実験で約1.85倍、シミュレーションで約1.89倍で、ほぼ同程度の相対比を示している。

次に各条件における載荷100回終了後の残留変位は、底面鋼製条件において実験結果で0.2mm、シミュレーション結果で0.28mm、底面マット条件において実験結果で0.9mm、シミュレーション結果で0.8mmとなっている。つまり、底面鋼製条件ではシミュレーション結果の方が4割大きい値を示し、底面マット条件では実験結果の方が約1割大きい値を示している。ここで底面マット条件の実験結果では、最初の約3秒間程度（載荷約20回）で残留変位の増加量が大きく、徐々に収束している。

これは、比較している載荷回数が100回程度で、いわゆる「初期沈下過程」であり、この沈下過程の載荷板変位量は、バラスト碎石の初期配置の違いによる影響が大きいことが一要因と考えられる。

ただしシミュレーションの場合、実験とは異なり、粒子の初期配置が全く同じ模型バラスト層モデルにおいて載荷実験が可能であることから、実験における初期配置の異なる供試体で見られるほどの顕著な差は低減される。

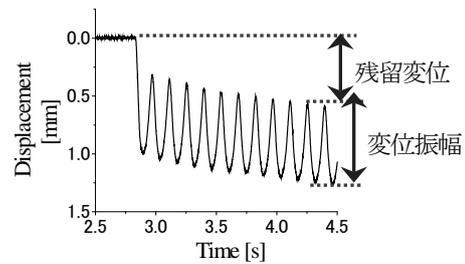
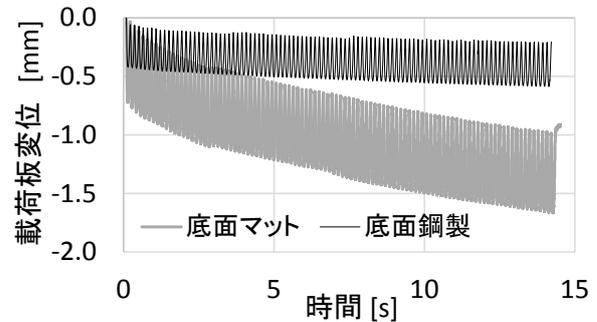
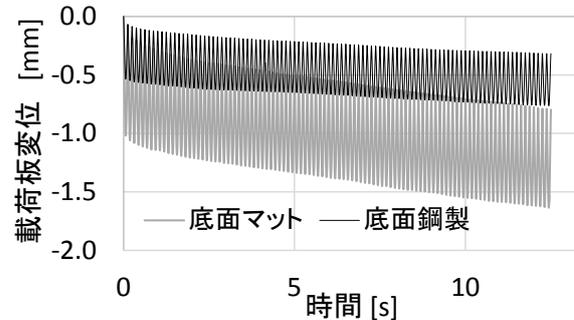


図-4 変位振幅と残留変位の定義



(a) 実験結果



(b) シミュレーション結果

図-5 実験とシミュレーションにおける載荷板変位

以上より、本研究におけるDEMシミュレーションにおいては、定量的評価は行わず、各条件における解析結果の相対比較を行うものとする。

### 3. 載荷周波数の影響に関する解析的検討

前章で用いた離散体バラスト層モデルを用いて、油圧式載荷試験装置では制御が不安定となる30Hz以上の周波数における繰返し載荷シミュレーションを行った。

載荷周波数は8Hz、20Hz、32Hz、50Hzの4通りとした。ここで8Hzは従来の実物大実験における周波数帯を、20Hzおよび32Hzは高速走行時の軸通過荷重に起因する周波数帯を、更に50Hzは継目落ち等のレール表面凹凸部に起因する周波数帯を想定した。

#### (1) 載荷板の変位振幅と沈下進みの関係

全てのシミュレーション結果より、図-4で示した残留変位と変位振幅について、載荷100回後の残留変位と載

荷100回の変位振幅の平均値の関係を図-6に示す。

図より、いずれの底面条件においても、残留変位と変位振幅の両者が、载荷周波数が高くなるほど大きくなる傾向が見られる。特に载荷周波数50Hzで、変位振幅（底面鋼製条件）と残留変位（底面鋼製条件およびマット）が急激に増加する傾向が見られる。

各周波数条件において底面条件を比較すると、残留変位はいずれも底面マット条件において大きい値を示すが、変位振幅については、载荷周波数50Hzの条件でのみ、底面鋼製条件において大きい値を示している。

ここで、全ての条件について、各载荷回における変位振幅と「沈下進み」の値の関係を図-7に示す。ここで「沈下進み」とは各载荷回における残留変位の増加分を示す。

図より、载荷周波数8Hzの条件において、底面鋼製条件の場合、変位振幅は0.50mmから0.56mm、沈下進みは载荷1回目は0.05mmであるが、その後は0.012mm以下に著しく減少し、底面マット条件の場合、変位振幅は0.63mmから0.70mm、沈下進みは载荷1回目に0.044mmであるが、その後は0.18mm以下に著しく減少する傾向がみられる。

同様に载荷周波数20Hzの条件において、底面鋼製条件の場合、変位振幅は0.5mmから0.62mm、沈下進みは载荷1回目に0.03mmであるが、その後は0.008mm以下に著しく減少し、底面マット条件の場合、変位振幅は0.64mmから0.74mm、沈下進みは载荷1回目に0.035mmであるが、その後は0.014mm以下に著しく減少する傾向がみられる。

また、载荷周波数32Hzの条件において、底面鋼製条件の場合、変位振幅は0.53mmから0.66mm、沈下進みは载荷1回目の0.021mmを最大値として、それ以下の値を示し、底面マット条件の場合、変位振幅は0.69mmから0.79mm、沈下進みは载荷1回目の0.026mmを最大値として、それ以下の値を示す。

更に、载荷周波数50Hzの条件において、底面鋼製条件の場合、変位振幅は0.82mmから0.93mm、沈下進みは载荷1回目の0.04mmを最大値として、それ以下の値を示し、底面マット条件の場合、変位振幅は0.75mmから0.84mm、沈下進みは载荷1回目の0.021mmを最大値として、それ以下の値を示す。

これらより、载荷周波数8Hz、20Hzでは、変位振幅が载荷1回目の値に対して载荷2回目以降は急激に減少する傾向が見られるのに対し、载荷32Hz、50Hzでは、载荷2回目以降に急激に減少する傾向は見られない。これは、载荷周波数8Hz、20Hzでは、载荷1回目に模型バラスト層の体積収縮が発生し、粒子構造が安定することを示唆しているが、この点については後節(3)で確認する。

次に底面条件を比較すると、载荷50Hzの場合のみ、

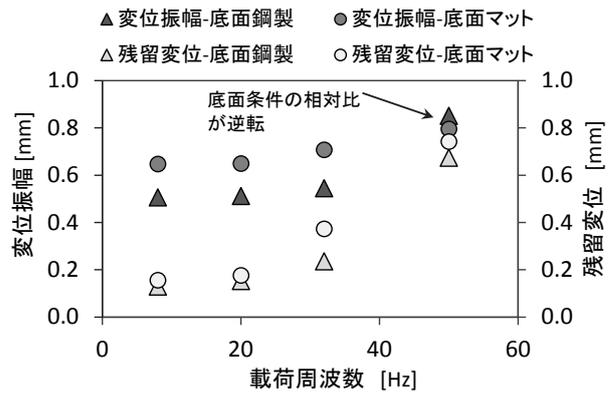
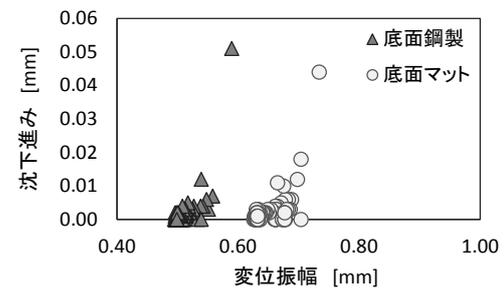
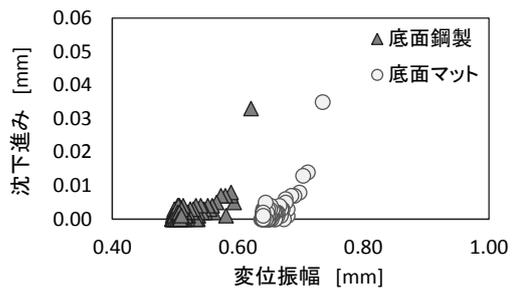


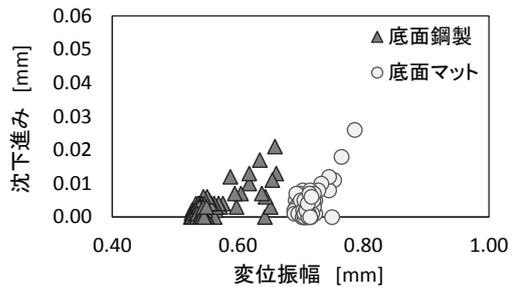
図-6 载荷100回後の残留変位と変位振幅平均値の関係



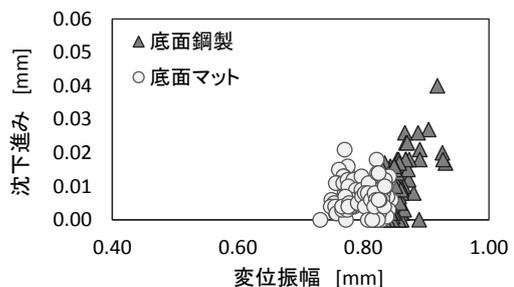
(a) 8Hz 载荷



(b) 20Hz 载荷



(c) 32Hz 载荷



(d) 50Hz 载荷

図-7 各载荷回の変位振幅と沈下進みの関係

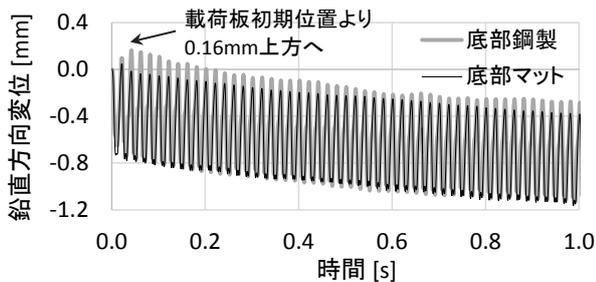


図-8 50Hz 载荷における载荷板の変位波形

変位振幅が底面鋼製条件において大きい傾向が見られ、更に変位振幅が大きい载荷回においては、沈下進みも底面鋼製条件において大きい傾向が明らかとなっている。

この50Hzにおける傾向について、底面鋼製条件と底面マット条件の载荷板変位波形を、図-8に合わせて示す。

図より50Hz载荷においては、底面鋼製条件の場合、载荷1回目および2回目の最小荷重時に载荷板が初期位置より上方へ変位し、最大0.16mmとなる挙動が見られる。その後、急激に沈下が進み、载荷15回目程度から沈下進みが減少し、その後、再び沈下が進む。ここで、载荷板の位置が最大となる载荷2回目終了時を基準とすると、载荷100回終了時の残留変位は0.84mmとなる。

他方、底面マット条件の場合、载荷1回目の最小荷重時に载荷板が若干上方へ移動するが、载荷2回目以降は、ほぼ同程度の沈下傾向を示す。ここで、载荷板の位置が最大となる载荷1回目終了時を基準とすると、载荷100回終了時の残留変位は0.79mmとなり、底面鋼製条件よりも小さな値となる。

これは、荷重周波数が高周波となったことで、底面鋼製条件の場合は、载荷初期に载荷板がはね上がる現象が起きたのに対して、底面マット条件の場合、マットの弾性により、底面とバラスト層の間の接触力が緩和され、はね上がる現象が抑制されたと考えられる。

## (2) 模型バラスト層内の粒子挙動の観察

図-9にシミュレーション結果より、载荷1回~5回における粒子間接触点数の変化を示す。

図より载荷周波数8Hzの条件において、底面鋼製条件の場合、初期の粒子間接触点数は5818個で、その後、载荷によって最大荷重時に6133個まで増加し、最小荷重時には5182まで減少する。その後、概ね5000個~6200個の間で増減する。これに対して底面マット条件の場合、粒子間接触点数は、初期は5702個、その後の最大荷重時および最小荷重時にそれぞれ6082個、5019個で、その後、概ね5000個~6200個の間で増減する。これらより底面条件による顕著な差は見られない。

同様に载荷周波数32Hzの条件において、底面鋼製条件の場合、载荷によって最大荷重時に5867個まで増加し、

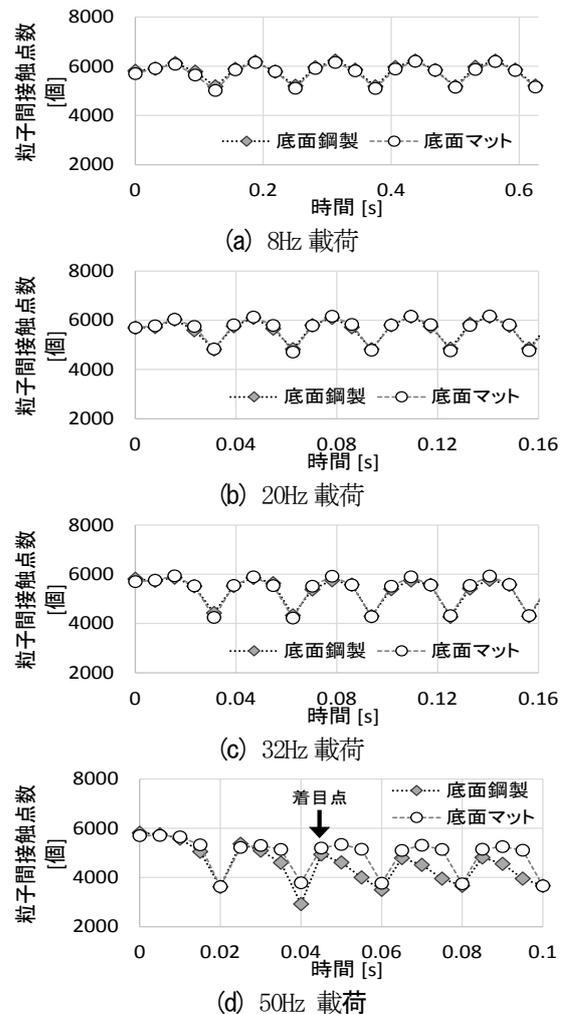


図-9 载荷1~5回目の粒子間接触点数

最小荷重時には4425まで減少する。その後、概ね4300個~5900個の間で増減する。これに対して底面マット条件の場合、粒子間接触点数は最大荷重時および最小荷重時にそれぞれ5936個、4245個で、その後、概ね4200個~6000個で増減する。これらより底面条件による顕著な差は見られないが、8Hzと比較すると、最大荷重時に約200個、最小荷重時で約800個、接触点数が減少している。

次に、前節において载荷板の変位振幅と沈下の関係が他の载荷周波数条件とは異なる傾向が見られた载荷周波数50Hzの条件について観察する。

図より底面鋼製条件の場合、载荷開始と同時に粒子間接触点は減少し、最大荷重時において5578個、最小荷重時には3620個まで激減する。その後も概ね3000個から5800個の間で増減するが、最小荷重時に急激に減少した後、接触点数が回復するものの、他の条件で見られた最大荷重時に増加する傾向は見られない。

他方、同じ载荷周波数50Hzでも、底面マット条件の場合、载荷1回目は初期の粒子間接触点数から減少する傾向を示すものの、载荷2回目からは、他の载荷周波数条件と同様に、最大荷重時に増加し最小荷重時に減少す

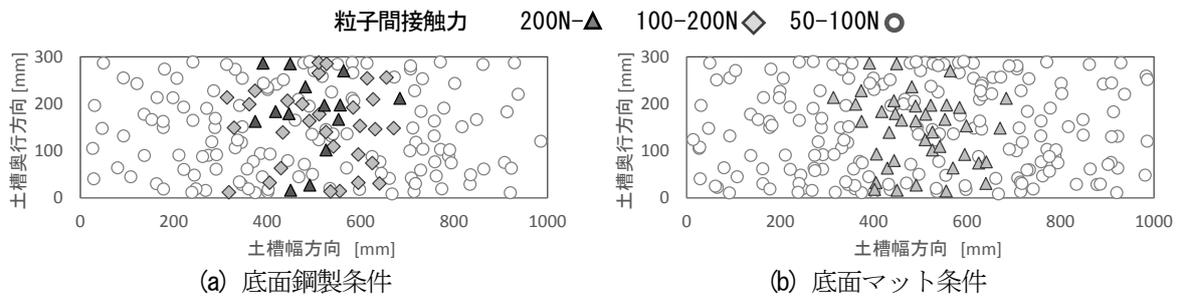


図-10 荷重3回目荷重過程の粒子間接触力の分布

る傾向を示す。接触点数としては、概ね3600個から5700個の間となり、全体的に接触点数は減少している。

以上より、前節で述べた底面鋼製条件の場合の50Hz荷重における荷重板のはね上がりについては、荷重板だけでなくバラスト層内のバラスト粒子もはね上がっていることを示唆している。

ここで、図-9(d)中に示した荷重3回目の荷重過程で、底面鋼製条件およびマット条件における粒子間接触点数が近い値となっている瞬間（図中の矢印部分）における、土槽底面とバラスト層の間の粒子間接触力の分布を図-10に示す。

図より、底面鋼製条件の場合、鋼材とバラスト粒子の接触を想定していることから、粒子間接触力が200Nを超える接触点が14点、100Nを超える接触点が30点、分布している。他方底面マット条件の場合、ゴム製のバラストマットとバラスト粒子の接触を想定していることから、粒子間接触力が200Nを超える接触点は消失し、100Nを超える接触点が40点分布している。

このことから、同じ荷重レベルと荷重周波数であっても、底面鋼製条件の場合、荷重過程でバラスト層底部で発生する粒子間接触力が著大となることから、その反発力によりバラスト粒子がはね上がり、荷重板の変位振幅が増加するものと考えられる。

### (3) 模型バラスト層内の粒子構造の観察

前節(1)において、荷重周波数8Hzおよび20Hzの条件においては、荷重2回目以降で変位振幅が著しく減少するのに対して、荷重周波数32Hzと50Hzではその傾向が見られないことを示した。

また前節(1)および(2)において、荷重周波数50Hzの条件において、底面鋼製条件の場合、荷重初期に荷重板が初期位置より0.16mm上昇すること、変位振幅が底面マット条件の場合より大きくなること、更に、粒子間接触点数が除荷過程だけでなく荷重過程においても減少する傾向を示した。

ここでは、これらの現象に模型バラスト層内の粒子構造が影響していると考え、各バラスト要素に接触する他のバラスト要素との接触点を示す配位数について観察することとする。なお、配位数は図-11に示すように、模

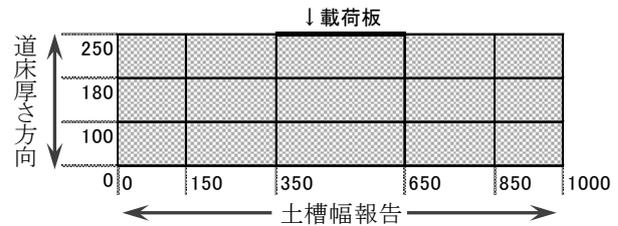


図-11 配位数の観察エリアの分割

道床厚さ方向	250						
	180						
	100						
		0	150	350	650	850	1000

(a) 荷重開始前

道床厚さ方向	250	2.62	2.42	2.52	2.39	2.40
	180	2.81	2.76	3.07	2.74	2.78
	100	3.16	3.23	2.99	3.41	2.98

(b) 8Hz 荷重1回後

道床厚さ方向	250	2.20	2.18	2.07	1.91	1.81
	180	2.53	2.47	2.72	2.34	2.27
	100	3.06	2.99	2.81	2.89	2.49

(c) 32Hz 荷重1回後

道床厚さ方向	250	1.97	1.35	1.04	1.60	1.87
	180	2.26	1.86	1.90	1.84	2.48
	100	2.89	2.76	2.32	2.81	2.73

(d) 50Hz 荷重1回後

図-12 底面マット条件の配位数の分布

型バラスト層の横断面を土槽幅方向に5エリア、道床厚さ方向に3エリアの合計15エリアに分割し、各エリア内の粒子間接触点数を同エリア内のバラスト要素数で除した値を示す。

図-12に底面マット条件における荷重前と、8Hz、32Hz、50Hzの荷重1回終了時の配位数の分布を示す。図より、図-12(a)の荷重開始前では、模型バラスト層内の配位数は2.4~3.4程度の値を示し、特に下層になるほど大きくなる傾向が見られる。これに対して図-12(b)~(d)に示す荷重1回後では、8Hz荷重では荷重開始前より

若干減少するものの2.1~3.0程度の値の範囲であるが、32Hz载荷では载荷板直下のエリアで1.04、また50Hz载荷では同じく载荷板直下とその周辺で0.8~1.0と著しく小さい値を示している。

これより前節(1)において、32Hz载荷と50Hz载荷で、载荷2回目に変位振幅が減少しなかった一因として、配位数が減少すること、つまり载荷板直下および周辺で、模型バラスト層の密度が緩まることが考えられる。

次に図-13に50Hz载荷条件における载荷2回後の瞬間の配位数の分布を、底面鋼製条件と底面マット条件の両者について示す。図より、図-13(a)の底面鋼製条件では、载荷板直下で配位数が上層で0.64、中層で0.88、下層でも1.36と著しく小さい値となっている。他方、図-13(b)の底面マット条件では、やはり配位数は著しく減少しているものの、载荷板下の下層では2.25となっている。

これより前節(1)および(2)で示した通り、50Hz载荷の場合、底面鋼製条件において、模型バラスト層が著しく緩み、これによって変位振幅や残留変位が増加すると考えられる。

#### 4. まとめ

DEMを用いて土槽内の模型バラスト層のモデルを作成し、底面条件と载荷周波数の異なる条件における繰返し载荷シミュレーションを行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 道床バラスト層のマクロな変形に着目し、载荷板の変位波形を観察した結果、载荷周波数8Hz, 20Hz, 32Hz, 50Hzの4通りでは、载荷周波数が高くなるほど変位振幅および残留変位が増加した。また底面条件2通りを比較したところ、底面剛性が高い方が低い場合よりも変位振幅と残留変位の両者が減少したが、载荷周波数50Hzの場合の変位振幅は、底面剛性が低い方が小さい値となった。
- 2) 道床バラスト層のミクロな変形挙動に着目し、バラスト粒子の粒子間接触点数の変化を観察した結果、粒子間接触点数は増減し、载荷過程で増加し、最大荷重後の除荷過程では減少する傾向が見られた。ただし、底面鋼製条件で载荷周波数50Hzの場合においては、载荷過程においても接触点数が減少し、更に最小荷重時には著しく減少した後、若干回復するという特異な挙動を示した。
- 3) 繰返し载荷初期における模型バラスト層内の配位数の分布を観察したところ、载荷周波数が高くなるほど、载荷板下部およびその周辺における配位数が減少する傾向が確認された。特に50Hz载荷においては、载荷

道床厚さ方向	1.37	0.69	0.64	1.04	1.55
	1.60	1.14	0.88	1.36	1.90
	2.41	2.08	1.36	2.13	2.35

(a) 底面鋼製条件

道床厚さ方向	1.62	0.88	1.04	0.91	1.82
	2.08	1.47	1.71	1.40	2.20
	2.83	2.45	2.25	2.49	2.64

(b) 底面マット条件

図-13 50Hz 载荷 2 回後の配位数の分布

開始直後に载荷板下部の配位数が著しく減少し、その傾向は、底面マット条件よりも底面鋼製条件において顕著であった。

- 4) 今回観察した模型バラスト層の変形挙動は、载荷回数たかだか100回程度の初期沈下過程であるが、载荷開始直後においても载荷周波数が模型バラスト層の粒子構造に影響を与えることは、その後の漸進沈下過程の沈下進みにも影響を与える要因となると考えられる。
- 5) 今後、実軌道条件における解析モデルの妥当性を検証した上で、軌道弾性化などの従来の道床沈下抑制工法について、外力の周波数に着目した評価に用いたい。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) たとえば、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.
- 3) 相川明: バラスト軌道の動的応答特性に関する力学的評価, 鉄道総研報告, vol28, No6, pp23-28, 2014
- 4) 坂井宏隆, 浦川文寛, 相川明: バラスト層内における衝撃荷重の減衰特性の把握, 第 67 回土木学会年次学術講演会講演要旨, 2011
- 5) K.Senda, et. al : Influence of Roadbed and Ballast Vibration on Track Settlement in High-speed Railway, The proceedings of Railway Engineering 2017. CD-ROM, 2017.
- 6) G.Saussine, C.Cholet et al : Modeling Ballast Behavior under Cyclic Loading Using Discrete Element Method, Proceedings of 'Cyclic Behavior of Soils and Liquefaction Phenomena', Balkema, pp. 649-658, 2004.
- 7) J.F.Ferrellec and G.R.McDowell : Innovative sleeper design analysis using DEM', Advance in Transportation Geotechnics, pp. 692-697, 2012
- 8) Tutumluer, E., Discrete element modeling of railroad ballast settlement, In Proceedings of the 2007 AREMA Annual Conference, Chicago, Illinois, September 9-12, 2007.

- 9) Zhou, T., Hu, B., Sun, J., Liu, Z., Discrete Element Method Simulation of Railway Ballast Compactness During Tamping Process, *Open Electrical & Electronic Engineering Journal*, 7, 103-109, 2013.
- 10) 須長誠：ガンマ線を用いた道床バラストの密度測定法, 第28回土質工学研究発表会, pp2383-2384, 1993
- 11) 須江政喜, 堀雄一郎：営業線軌道におけるレール下面圧力測定, 土木学会第70回年次学術講演会, VI-522, pp.1043-1044, 2015
- 12) 河野昭子, 松島亘志：繰返し衝撃荷重下の道床バラスト層の動的挙動と沈下特性, 鉄道総研報告, vol.24, No.12, pp.47-52, 2010
- 13) 河野昭子：離散体モデルを用いた重畳波荷重下のバラスト層変形挙動に関する解析的検討, 鉄道工学論文集 No14, pp1-8, 2015
- 14) A.Kono : Validation of Numerical Simulation using 3D-DEM Ballasted Track Model, *Proceeding of CompRail2018* (投稿中), 2018
- 15) T.Matsushima and H.Saomoto, Discrete Element Modelling for Irregularly-shaped Sand Grains', *Proceedings of NUMGE2002: Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, pp. 239-246, 2002.
- 16) 河野昭子, 松島亘志：離散体モデルを用いた道床バラスト層の変形挙動解析, 鉄道総研報告 Vol.28 No.12 pp.41-46, 2014

(2018.4.6 受付)

## NUMERICAL EVALUATION OF EFFECT OF LOADING FREQUENCY ON DEFORMATION OF THE BALLASTED LAYER

Akiko KONO

Recently, researchers notice that the effect of loading frequency on deformation of the ballasted layer composed of coarse crushed stones. The deformation mechanism of ballasted layer is evaluated by measuring data of displacement of sleepers on ballasted layer from the macro views. However, the effect of loading frequency on the behavior of ballast grains inside the ballasted layer has not observed enoughly. So the author carried out cyclic loading simulation using DEM model, which become widely used in railway field nowadays. Then the author shows the numerical results of displacement of loading plate on ballasted layer from the macro views. At the same time, the author observed the inter particle contact force between ballast grains and coordinate values of ballasted layer by using the results from DEM. Furthermore, the DEM simulations were carried out at the two cases of stiffness of bottom base on which ballasted layer.