

## レール表面凹凸部の道床バラスト層の変形挙動に関する検討

河野 昭子\* 浦川 文寛 相川 明 名村 明 (鉄道総研)  
松島 亘志 (筑波大学大学院)

## Deformation of the Ballast Layer around the Rail Joints

Akiko KONO\*, F. Urakawa, A. Namura, A. Aikawa (Railway Technical Research Institute)  
T. Matsushima (Tsukuba University)

The dynamic response of ballasted track under running vehicle was measured at the test track. Those results show that the impact loadings occur and the residual settlement of ballast layer increases when a vehicle passes through on a rail with a dent like a welded rail joints. Then 3D-DEM simulations were carried out for a sleeper on ballasted track model under loading wave which imitates contact loadings between rails and sleepers during vehicle passing. The results show that the impact loading accelerates the dynamic behavior of ballast grains and loses contact force between grains. These phenomena seem to increase the residual settlement of ballast layer.

キーワード：有道床軌道，レール継目部，道床バラスト層，個別要素法，粒状体

(Keywords, Ballasted Track, Rail Joints, Ballast Layers, Discrete Element Method, Granular Assemblage)

## 1. はじめに

バラスト軌道においてはレール継目部などのレール表面凹凸部において道床バラスト層が局所的に沈下する現象がしばしば観測されている。しかし実現場においては、レール表面凹凸の有無だけでなく、道床バラスト層下部の路盤の条件など複数の軌道条件が複雑に影響し合うため、レール表面凹凸による影響を抽出するのは困難である。

そこで本研究では、試験軌道においてレール表面凹凸の有無に着目したモーターカ走行試験を実施し、軌道動的応答への影響について検討した。

同時に3次元個別要素法バラスト軌道モデルを用いて、まくらぎへの入力荷重における衝撃成分の有無に着目したシミュレーションを行い、衝撃成分が道床バラスト層の変形挙動に与える影響について検討した。

## 2. モーターカ走行試験

## (2.1) 試験条件

試験軌道は図1に示すように、鉄道総研日野土木実験所内に敷設されたコンクリート路盤上に構築した。また試験ケースはレール表面に『凹凸あり』と『凹凸なし』の2通りとした。『凹凸あり』における凹凸形状を図2に示す。これはレール溶接部形状として用いられている形状<sup>1)</sup>を参考としたもので、新品レールの表面に加工した。

## (2.2) 測定項目

本試験では、従来の動的応答測定と同様に輪重、レール

圧力、レール振動加速度、まくらぎ振動加速度を測定した。

## (2.3) 試験結果

測定結果より、レール圧力、まくらぎ変位の時系列波形を図3(1),(2)に示す。各図、左図(a)が『凹凸なし』(走行速度40.9km/h)、右図(b)が『凹凸あり』(走行速度40.6km/h)の結果である。また図中の灰色線が測定波形、黒色線が100Hzのローパスでフィルタ処理をした結果を示す。

まず図3(1)に示すレール圧力の測定波形(灰色線)では、特に後軸において高周波成分が著しいが、これはモーター

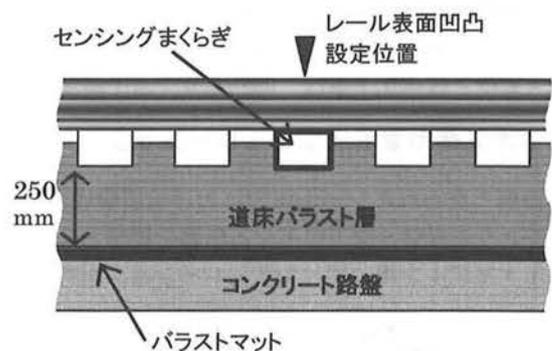


図1 試験軌道

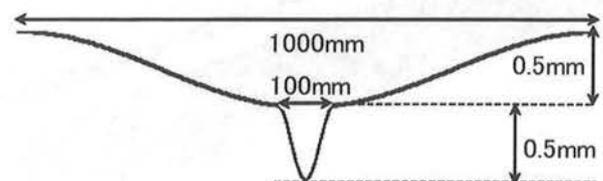


図2 レール表面凹凸形状

カの車輪フラットの影響と  
考えられる。

一方、ローパスフィルタ処  
理をした黒色線の波形では、  
図(a)の凹凸なしの場合は前  
軸、後軸通過時の最大荷重が  
いずれも 18kN 程度となり、  
図(b)の凹凸ありの場合では、  
凹凸なしと同程度の軸通過  
荷重に、レール表面凹凸によ  
る衝撃成分が重畳し、最大荷  
重は前軸で 26kN、後軸で  
27kN 程度となる。

次に図 3 (2)に示す、まくら  
ぎ変位の測定波形をフィル  
タ処理をした黒色線波形よ  
り、図(a)の凹凸なしの場合  
は前軸通過時に最大変位が  
0.37mm 程度、後軸通過時に  
0.45mm 程度となる。また図  
(b)の凹凸ありの場合、レール  
圧力波形ほど明瞭な衝撃成  
分は見られず、前軸通過時の  
変位も凹凸なしの場合とほぼ  
同程度であるが、後軸通過時  
の最大変位が 0.5mm 程度で、  
凹凸なしの場合よりも若干大  
きい値となる。また、モータ  
ーカ通過後に残留する沈下量  
は、凹凸なしで 0.5mm 程度、  
凹凸ありで 0.7mm 程度で、  
凹凸ありの方が 0.2mm 大き  
い値となっている。

以上より、レール表面凹凸の  
中心の落ち込みが 1mm の凹  
凸部を約 40km/h でモータ  
ーカが通過した際、軸通過時  
の荷重に約 8kN の衝撃荷重  
成分が重畳する一方で、まくら  
ぎ変位波形には明瞭な衝撃成  
分は表れない。ただし後軸通  
過時の最大変位と残留沈下量  
は、凹凸ありで若干増加す  
る。

### 3. 3次元個別要素法シミュレーション

測定波形で見られたレール圧  
力における衝撃成分の有無  
が、バラストの挙動と沈下に  
与える影響を観察するために、  
以下に示すモデルを用いて、  
シミュレーションを行った。

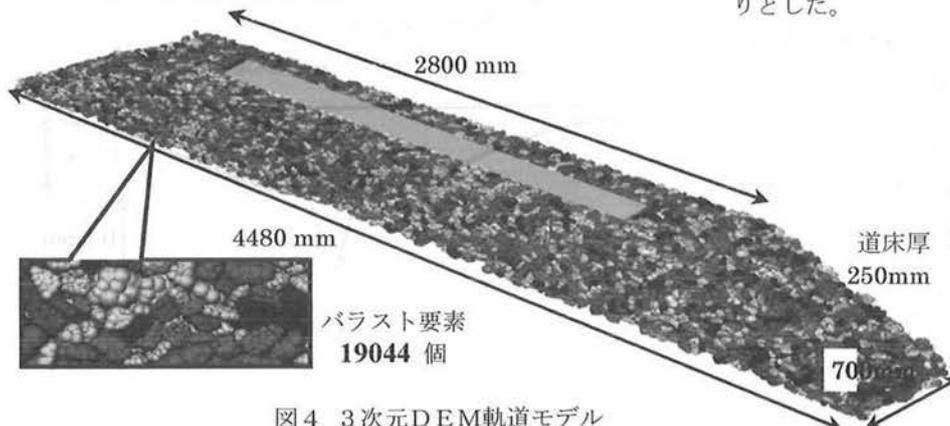


図 4 3次元DEM軌道モデル

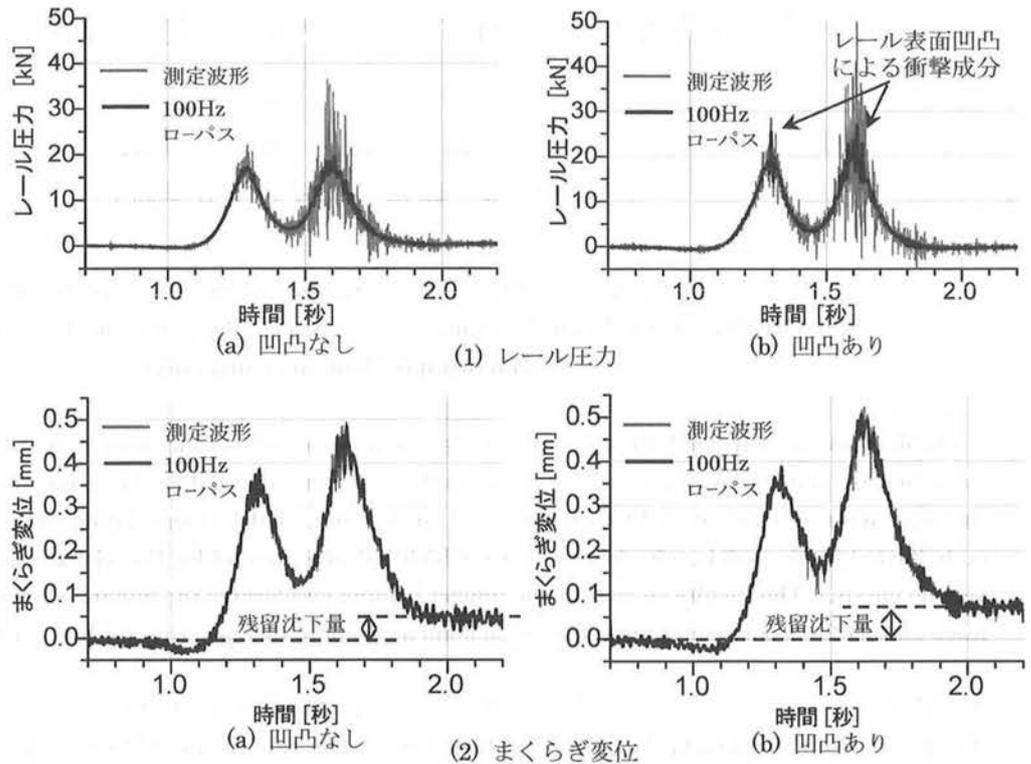


図 3 モーターカ試験測定波形例

#### (3-1) モデルの概要

図 4 に実軌道上の PC まくらぎ 1 本を再現した 3 次元個別要素法モデルを示す。バラスト要素は、多面体要素モデルにおいて見られた接触判定のエラー<sup>2),3)</sup>を解消するために、ここでは球集合体要素を用いている。一つのバラストは実バラストの 3 次元形状データを用いて、10 個の球の組み合わせでモデル化した。

#### (3-2) DEMパラメータ

本モデルにおける DEM パラメータを表 1 に示す。バラスト要素の粒子間ばね係数は道床バラスト層の弾性波速度から算出し<sup>4)</sup>、減衰係数は式(1)において反発係数  $e_b$  が 0.2<sup>5)</sup> となる値とした。路盤要素の粒子間ばね係数は、コンクリート路盤上のバラストマットのばね係数<sup>6)</sup>を参考とした。

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

粒子間摩擦角は既往の研究より 27 度<sup>7)</sup> と 36 度<sup>8)</sup> の 2 通りとした。

表 1 DEMパラメータ

バラスト & まくらぎ	ばね係数 [N/m]	法線方向 $K_n$	$9.09 \times 10^6$
		接線方向 $K_s$	$2.27 \times 10^6$
	減衰係数 [N·s/m]	法線方向 $C_n$	608
		接線方向 $C_s$	304
バラスト まくらぎ	摩擦角 [度]	$\mu$	27, 36 20
路盤	ばね係数 [N/m]	法線方向 $K_n$	$6.0 \times 10^4$
		接線方向 $K_s$	$2.31 \times 10^4$
	減衰係数 [N·s/m]	法線方向 $C_n$	104.7
		接線方向 $C_s$	65
	摩擦角 [度]	$\mu$	20

〈3・3〉 シミュレーション条件

まくらぎ要素への入力荷重波形は、図 3 に示すモーターカ走行実験におけるレール圧力波形を参考として、図 5 に示す、凹凸あり(黒色点線)と凹凸なし(灰色線)の 2 通りの荷重波形を用いた。いずれの入力荷重波形も前軸通過荷重は全く同様とし、凹凸ありの場合のみ、軸通過荷重最大時の前後 0.005 秒間で最大 8kN の衝撃成分を重ねた。

〈3・4〉 シミュレーション結果

(1) まくらぎ変位波形

シミュレーション結果より、まくらぎ変位波形を図 6 に示す。図 6(1)が摩擦角 27 度、図 6(2)が摩擦角 36 度のケースの結果で、図中の灰色太線が凹凸なし、黒色線が凹凸ありの荷重波形を入力した結果である。

図 6(1)に示す摩擦角 27 度のケースでは、凹凸なしの場合、まくらぎ変位は 0.3mm 程度まで増加した後、0.18 mm 程度まで減少するのに対して、凹凸ありの場合、最大変位は 0.45mm 程度まで増加し、その後の変位減少時も 0.28mm となり、凹凸なしに比較して最小変位が著しく増加する。

一方、図 6(2)に示す摩擦角 36 度のケースでは、凹凸なしの場合、まくらぎ変位は 0.23mm 程度まで増加した後、0.1mm 程度まで減少するのに対し、凹凸ありの場合、最大変位は 0.31mm 程度まで増加し、その後の 0.11mm 程度と

なる。つまり、凹凸ありと凹凸なしの場合の最大変位の差異に比較して、最小変位の差異は僅かなものとなる。

以上より、摩擦角 27 度と 36 度のケースを比較すると、摩擦角 27 度の場合、入力荷重に衝撃成分が重畳ことにより荷重減少時のまくらぎ変位の戻りが小さくなり、沈下が残留し易いことが明らかである。

更に図 6 と図 3 の実測結果を比較すると、最大変位量は摩擦角 27 度では若干大きく、36 度では若干小さいが、オーダは同程度の値を示している。

(2) バラスト要素の挙動の観察

シミュレーション結果より、凹凸なしの場合の載荷前後のバラスト要素の移動量に対する凹凸ありの場合の移動量の増加分を図 7 に示す。図 7(1)が摩擦角 27 度、図 7(2)が摩擦角 36 度のケースの結果である。

図より、いずれの摩擦角のケースにおいても、凹凸ありの場合はまくらぎ下および道床側面でバラスト要素の移動が増加している。特に図 7(1)に示す摩擦角 27 度の場合では、まくらぎ下の道床層深部まで移動量が増加するバラスト要素が分布している。

これより、摩擦角 27 度のケースでは、入力荷重に重畳される衝撃成分によってバラスト要素の残留変位の増加が著しく、それによりまくらぎ沈下量も増加するといえる。

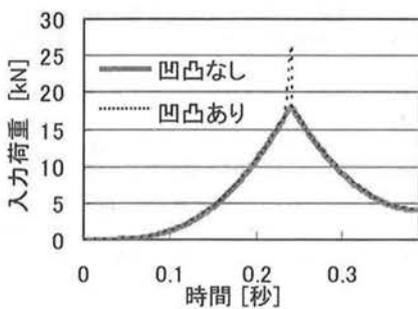


図 5 入力荷重波形

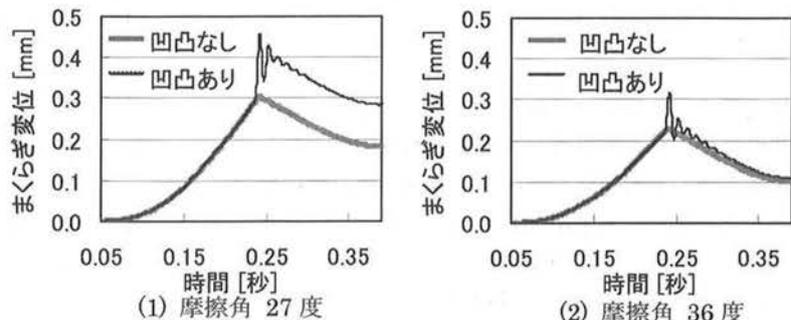
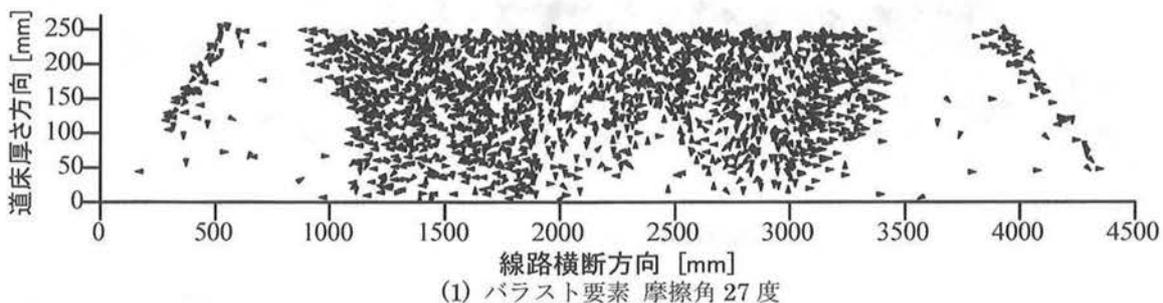
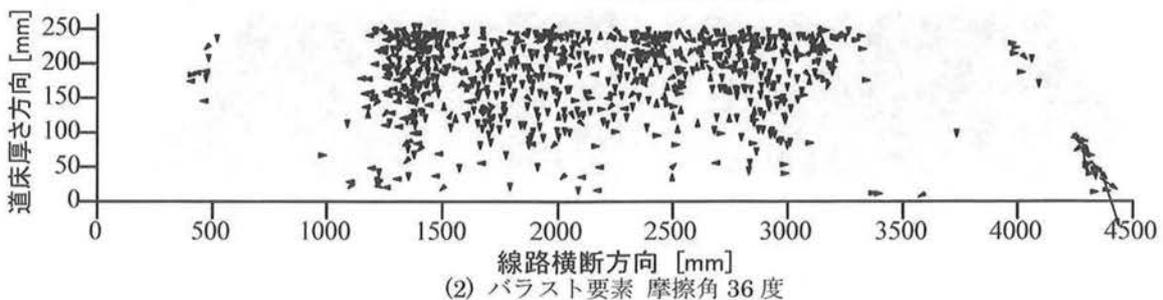


図 6 まくらぎ変位 (シミュレーション結果)



(1) バラスト要素 摩擦角 27 度



(2) バラスト要素 摩擦角 36 度

図 7 荷重作用前後のバラストの移動履歴の「凹凸なし」に対する「凹凸あり」の増分

(3) バラスト粒子間接触点における滑り

シミュレーション結果より、凹凸ありの場合の衝撃荷重最大時における粒子間接触点の接線方向接触力/法線方向接触力の値の分布を図 8 に示す。図 8(1)が摩擦角 27 度、図 8(2)が摩擦角 36 度の時の結果である。また図中、黒色菱形印は比の値が 0.726 (tan36) 以上となる接触点、灰色菱形印は 0.509(tan27) 以上となる接触点を示す。

図 8(1)に示す摩擦角 27 度の場合、接線方向接触力/法線方向接触力の値が 0.726 を超える点が 17 点、0.509 を超える点が 233 点あり、合計 250 点で粒子間の滑りが発生する。

一方、図 8(2)に示す摩擦角 36 度の場合、接線方向接触力/法線方向接触力の値が 0.726 を超える点は 145 点、0.509 を超える点が 1621 点に上るが、この条件で粒子間の滑りが発生するのは 0.726 を超える点のみであるため、145 点でのみ粒子間の滑りが発生する。

つまり摩擦角 27 度のケースでは、衝撃荷重が最大になる瞬間に、摩擦角 36 度のケースよりも 105 点多く粒子間の滑りが発生する状態となり、これにより残留変位が増加するバラスト要素も多くなることが考えられる。

4. おわりに

レール表面凹凸の有無に着目したモーターカ走行試験と 3 次元DEM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) モーターカ走行試験より、レール表面に凹凸がある場合、軸通過荷重に衝撃成分が重畳される。まくらぎ変位の時系列波形には、この衝撃成分の影響は明瞭には表れないが、後軸通過時の最大変位やモーターカ通過後の残留変位は、凹凸がある場合に若干増加した。
- (2) モーターカ走行試験より得られたレール圧力波形を模擬した入力荷重を用いて 3 次元DEMシミュレーション

を行った結果、バラスト要素の摩擦角が小さい場合、衝撃成分が重畳された後のまくらぎの最小変位が、衝撃成分がない場合に比較して大きくなった。これは、バラスト要素の摩擦角が小さくなることで粒子間滑りの発生箇所が増え、それにより多くのバラスト要素の移動量が増加することが要因となると考えられる。

- (3) モーターカ走行試験における試験軌道の条件を再現した 3 次元DEMモデルを用いたシミュレーションより、レール圧力波形を入力した場合のまくらぎ変位波形において、試験結果とほぼ同程度の変位量を示した。

以上より、レール表面凹凸を車輪が通過する際に発生する衝撃成分によって、まくらぎの残留沈下量は促進されるが、その影響は、バラスト要素の摩擦係数が増加することで軽減されることが示唆された。

文 献

- (1) 石田誠ほか：レール頭頂面凹凸と溶接部曲げ疲労の関係、鉄道総研報告, Vol.4, No.7 p.8-15 (1990)
- (2) 河野昭子ほか：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, pp823-824 (2008)
- (3) 河野昭子ほか：離散体バラスト軌道モデルを用いたまくらぎ下弾性化の影響の検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, pp539-540(CD-ROM) (2010)
- (4) 伯野 彦彦：破壊のシミュレーション森北出版 (1997)
- (5) 中島祐一ほか：落石の運動エネルギーと落下姿勢が衝突挙動に及ぼす影響, 第 7 回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集 (2004 年)
- (6) 名村明：有道床軌道の繰返し変形と評価法に関する研究, 北海道大学学位論文 (2004)
- (7) 福田和彰, 松島亘志, 山田恭央：イメージベース DEM による砕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)
- (8) 浦川文寛, 相川明：三次元個別要素法によるバラスト軌道の動的応答解析, 鉄道総研報告, vol23, No2, pp11-16 (2009)

