

## 個別要素法による普通継目部の道床沈下シミュレーション

鉄道力学研究部 軌道力学研究室  
主任研究員 河野 昭子

### 1. はじめに

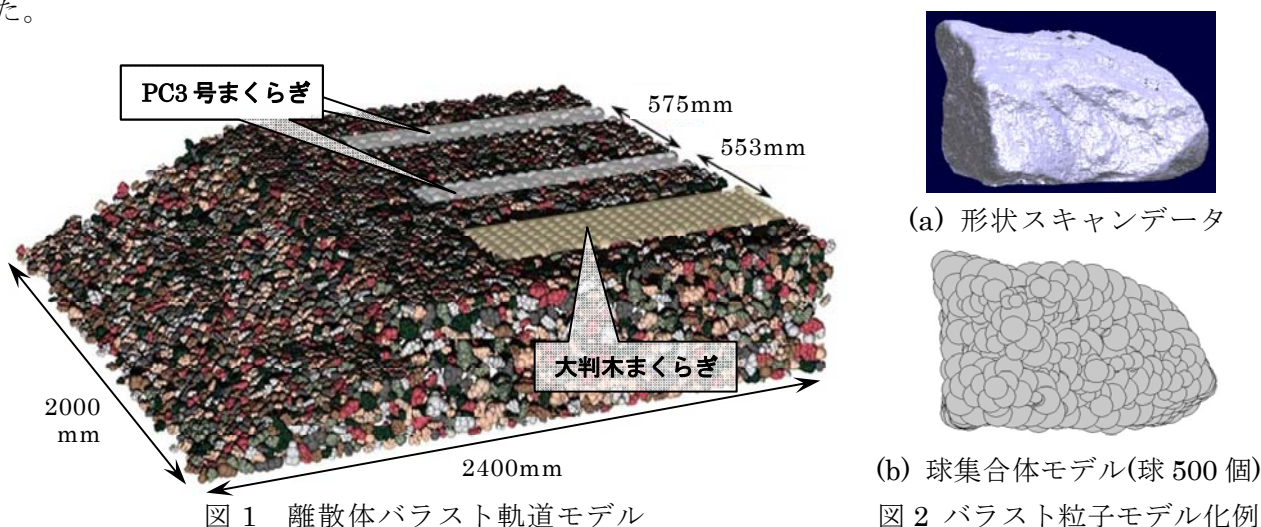
バラスト軌道における局所的なバラスト劣化や道床沈下促進の対策として、これまで様々な工法が提案されているが、軌道条件別の最適な対策工法の選定基準は明確になっていない。そもそも軌道弱点箇所、例えば普通継目部周辺の衝撃荷重を受ける範囲における道床沈下・劣化の促進に関しては、再現実験が困難であることなどから、明確な影響要因が把握されていない。

そこで本研究では、レール継目部動的応答解析モデルと離散体バラスト軌道モデルを用いたシミュレーションを行い、普通継目部の遊間・継目落ち・段差が継目部周辺の道床バラスト層の沈下に与える影響度を把握した。加えて、簡易な対策工法として軌道パッド低ばね化、まくらぎ下弾性化を組合せて適用した条件のシミュレーションを行い、残留沈下量の減少傾向を観察した。

### 2. 離散体バラスト軌道モデル

図1に個別要素法(以下、DEM)を用いて構築した‘離散体バラスト軌道モデル’を示す。このモデルでは、道床バラスト層をバラスト粒子単位でモデル化しているため、粒子集合体の特徴である粒子の再配置、粒子間の荷重伝達やせん断による粒子の滑りなどを直接再現することが可能である。例えばバラスト軌道の場合、道床バラスト層の局所的な沈下促進や道床流動が問題視されているが、この‘離散体バラスト軌道モデル’では、こうした現象の直接的な再現が可能である。

一方、道床バラスト層の品質を管理する上では、①バラスト粒子形状、②粒度分布、③締固め度が重要であることから、‘離散体バラスト軌道モデル’を構築する上でも、これらの点に留意しなければならない。まず図2に示すように、実際のバラスト粒子の3次元形状をスキャンし、その実形状データを用いて、ここでは‘動的最適化法<sup>1)</sup>’によって球集合体でモデル化した。その後、図3に示す粒度分布に調整した上でバラスト粒子を投入し、締固めを行った。締固めにおいては、見かけの密度が $1.67\text{g/cm}^3$ <sup>2)</sup>となるように調整した結果、バラスト粒子の個数は25870個となった。



### 3. シミュレーション概要

#### (1) シミュレーション手法

前節で述べた‘離散体バラスト軌道モデル’では、粒子個々は剛体要素であり弾性変形しないため、例えばレールをモデル化した場合、列車通過時のレールの曲げを表現することはできない。そこで本研究では、図4に示す‘レール継目部動的応答解析モデル’<sup>3)</sup>を用いて、様々な条件の普通継目部周辺における列車通過時のレール圧力（レール底部からまくらぎに伝達する外力）波形を算出し、その波形を‘離散体バラスト軌道モデル’の3本のまくらぎ要素に入力することで、列車通過荷重下の道床バラスト層の変形挙動を再現した。DEMシミュレーションには筑波大学が開発した‘DEM3D-CS’<sup>1)</sup>を用いた。

#### (2) 継目部諸元

本研究において継目部諸元は、図5に示す遊間、継目落ち、段差の値を組合せた。離散体バラスト軌道モデルによるDEMシミュレーションでは、表1に示す10通りの継目部諸元における軌道動的応答シミュレーションで得られたレール圧力波形を入力した。車両走行速度は120km/hとした。

### 4. 継目部各諸元－遊間・継目落ち・段差－の影響度

#### (1) 動的応答シミュレーションにおけるレール圧力波形の例

継目部各諸元が軌道の動的応答に与える影響を観察するために、動的応答シミュレーション結果より、図6に示す継目部直下の大判木まくらぎと隣接する前方1本目のPC3号まくらぎにおけるレール圧力波形を図7に示す。図中の4つの例は、表1の継目部諸元①②⑥⑧のシミュレーション結果である。

図7(a)(b)より、継目部直下および隣接する前方1本目の各まくらぎにおいて、継目部諸元①つまり遊間、継目落ち、段差がすべて0の場合のレール圧力は、最大で各々27kN、25kN程度である。また遊間のみ12mmとした継目部諸元②の場合、継目部通過時の高周波成分が若干大きくなるものの、顕著な差異はない。次に継目落ちを2.5mmとした継目部諸元⑥では、軸通過による2つの凸型波形の直前に、車輪が継目落ち部に進入した際のレール圧力の急激な減少が見られ、その後、軸通過荷重に継目部通過による高周波成分が重畳し、最大値は継目部直下で75kN、隣接する前方1本目で67kN程度となる。更に、段差を1.0mm(前方レールが高い上り段)とした継目部諸元⑧では、継目部通過

時の高周波成分が著しく増大し、最大値は継目部直下で174kN、前方1本目で126kNに上る。

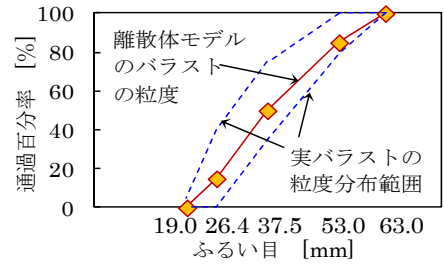


図3 道床バラストの粒度分布

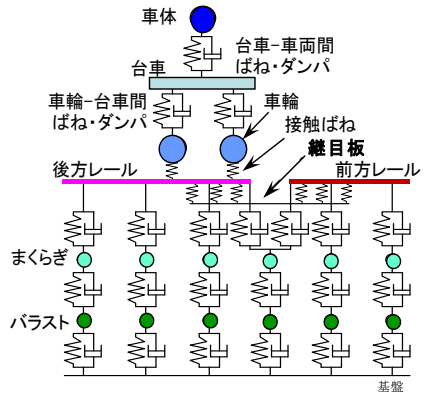


図4 レール継目部動的応答解析モデル

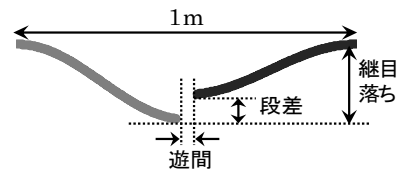


図5 普通継目部モデル

表1 継目部諸元

	遊間 mm	継目落ち mm	段差 mm
①	0	0.0	0.0
②	12	0.0	0.0
③	12	1.0	0.0
④	12	1.5	0.0
⑤	12	2.0	0.0
⑥	12	2.5	0.0
⑦	12	2.5	0.5
⑧	12	2.5	1.0
⑨	12	2.5	1.5
⑩	12	2.5	2.0

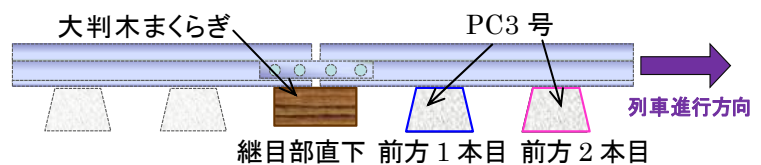


図6 モデル縦断面図

(2) DEMシミュレーションにおけるまくらぎ変位波形の例

次に継目部各諸元が道床バラスト層の変形挙動に与える影響を観察するために、図7に示したレール圧力波形を入力したDEMシミュレーション結果より、まくらぎ変位波形を図8に示す。

図8(a)(b)より、継目部諸元①と②の場合、継目部直下および隣接する前方1本目の各まくらぎの変位波形はほぼ同様で、まくらぎ変位の最大値は0.61~0.67mmであり、残留沈下量も継目部直下で約0.08mm、前方1本目で約0.13mmと小さい値である。

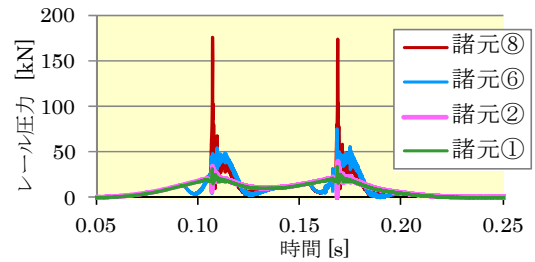
次に継目落ちを2.5mmとした継目部諸元⑥では、まくらぎ変位の最大値は継目部直下で1.24mm、前方1本目で1.38mmと著しく増加し、残留沈下量も継目部直下で0.44mm、前方1本目で0.58mmと増加する。更に段差を1.0mmとした継目部諸元⑧では、まくらぎ変位の最大値は継目部直下で1.8mm、前方1本目で1.75mmと増加し、残留沈下量も継目部直下で0.73mm、前方1本目で0.84mmと更に増加する。

(3) 継目部諸元と道床バラスト層の残留沈下量の関係

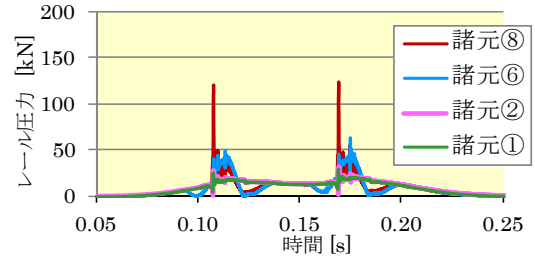
ここで、図8で示したDEMシミュレーション結果のまくらぎ変位波形から得られる二軸通過後の残留沈下量について、10通りの継目部諸元における値を図9に示す。図の横軸はまくらぎの位置(図6に示した継目部直下、前方1本目と2本目)を示す。

図より、遊間、継目落ち、段差を全て0mmとした条件①および遊間のみ12mmとした条件②に対し、継目落ちを設定した条件③~⑥では継目落ちの増加に伴い残留沈下量も増加し、特に前方1本目で増加傾向が顕著である。更に段差を設定した条件⑦~⑩では段差の増加に伴い継目部直下の残留沈下量が増加し、段差2.0mmの場合では継目部直下の残留沈下量が最も大きくなる。他方、前方2本目のまくらぎでは段差の影響は極めて小さい。

以上より、道床バラスト層の残留沈下に対して継目落ちや段差が影響を及ぼすことは明確であり、また、その影響度は継目部直下と隣接するまくらぎと異なる傾向が示された。このことは、普通継目部周辺の道床沈下対策工法を講じる上では、継目部直下だけでなく隣接するまくらぎ下の沈下特性にも着目する必要があることを示唆している。

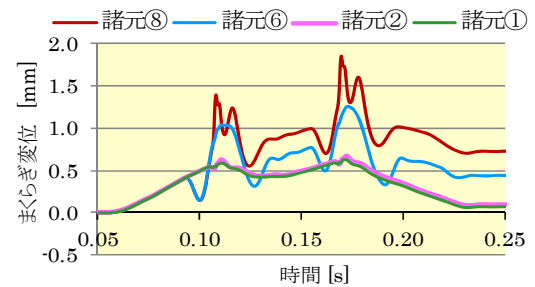


(a) 継目部直下

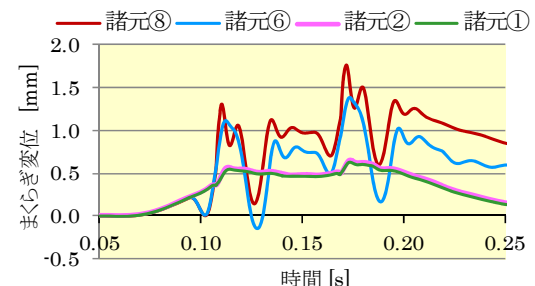


(b) 前方1本目

図7 レール圧力波形例



(a) 継目部直下



(b) 前方1本目

図8 まくらぎ変位波形例 (DEM結果)

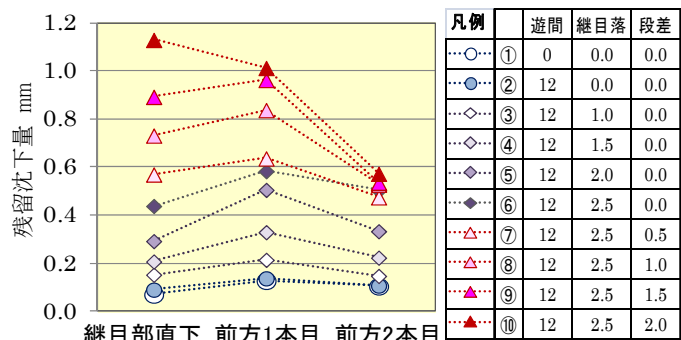


図9 継目諸元と残留沈下量の関係 (DEM結果)

## 5. 軌道弾性化の影響度

図 10 に示す軌道弾性化条件で実施した DEM シミュレーションで得られた結果より、継目部直下のまくらぎ変位波形を図 11 に示す。継目部諸元は、表 1 に示す継目部諸元⑦で統一した。

図 11 より、継目部直下と前方 1 本目で軌道パッド低ばね化のみを実施した Rr 条件(図 10(c))のまくらぎ変位波形において、前軸および後軸通過時のまくらぎ変位は無対策条件より減少し、二軸通過後の残留沈下量も減少する。これに対し継目部直下の継目部直下でまくらぎ下弾性化を実施した W0 と Wr(図 10(a)(b))では、前軸および後軸通過時のまくらぎ変位は無対策条件の 3 倍近くに上るが、二軸通過後の残留沈下量は無対策条件より減少する。これは、まくらぎ下の弾性化によりまくらぎ自体の変位振幅は大きくなるものの、これが道床バラスト層の残留沈下を促進させないことを示している。

次に、各対策工法が二軸通過後の残留沈下量に与える影響度について、継目部直下と隣接する 2 本の前方まくらぎについて図 12 に示す。

まず、継目部直下のみ軌道パッド低ばね化とまくらぎ下弾性化の両方を実施した W0 条件では、継目部直下の残留沈下量は最も減少するが、前方 1 本目では無対策条件よりむしろ増加してしまう。そこで、加えて前方 1 本目を軌道パッド低ばね化した Wr 条件では、継目部直下と前方 1 本目で残留沈下量が減少するが、前方 2 本目で無対策条件より増加する。他方、継目部直下と前方 1 本目で軌道パッド低ばね化のみ実施した Rr 条件では、全てのまくらぎで残留沈下量が減少する。

以上より、軌道弾性化をする場合、隣接するまくらぎの荷重分担が変化することにより、残留沈下量の減少傾向にも影響を及ぼすことが示された。

## 6. おわりに

離散体バラスト軌道モデルを用いた DEM シミュレーションにより、普通継目部の諸元と軌道弾性化が道床バラスト層の残留沈下に与える影響について解析的検討を行った。本研究では定性的傾向の把握と相対比較に留まったが、今後はモデルの定量的精度の検討を進めていきたい。

## 参考文献

- 1) T.Matsushima, H.Saomoto (2002) : Discrete Element Modeling for Irregularly-Shaped Sand Grains, Proc.of Numerical Methods in Geotechnical Engineering, pp239-246
- 2) 須長誠：ガンマ線を用いた道床バラストの密度測定法，第 28 回土質工学研究発表会,pp2383-2384, 1993
- 3) 鈴木貴洋、石田誠、阿部和久、紅露一寛：レール継目部で生じる輪重変動に関する一考察、鉄道力学論文集、No.8、pp.35-40、2004

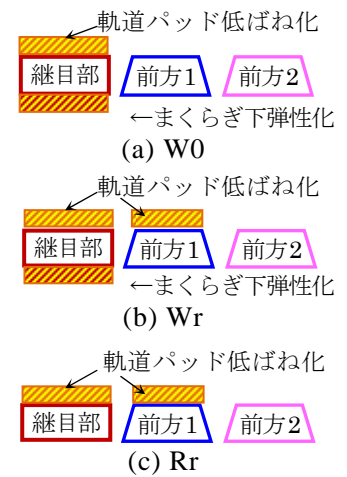


図 10 軌道弾性化条件

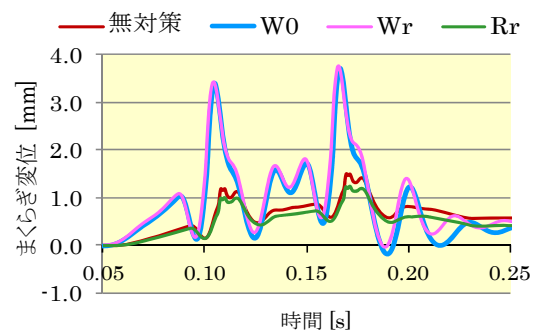


図 11 継目部直下の大判木まくらぎのまくらぎ変位波形 (DEM 結果)

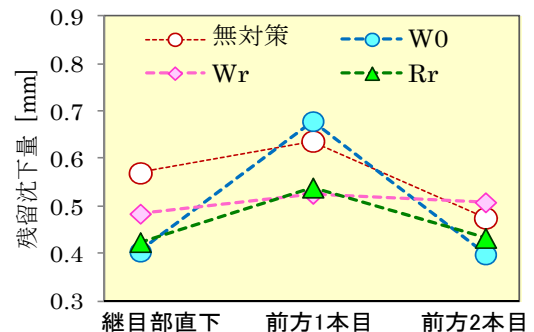


図 12 各対策工法における残留沈下量