

離散体モデルを用いたバラストメモリー 発生条件の基礎的検討

河野 昭子* (公益財団法人鉄道総合技術研究所)

Basic Study About Factors of “Ballast Memory” by Using Discrete Element Models

Akiko Kono*, (Railway Technical Research Institute)

DEM simulations are carried out to observe “Ballast Memory”, rearrangement of ballast grains during cyclic loading process after tamping operation for several models with different values of sleeper lifting. Simulation results enable to observe the process of grain motion from the point of view about lifting values and ballast layers compactness. Then it is confirmed that lifting values effect on the difference of grain motion property during tamping operation and under cyclic train loadings.

キーワード：バラスト軌道，バラストメモリー，道床沈下，軌道こう上，タンピング，個別要素法
(Ballasted Track, Ballast Memory, Ballast Settlement, Track Lifting, Tamping, DEM)

1. バラストメモリーとは

マルチ施工による軌道保守後の道床沈下の再進行について、Selig らは図 1 の測定事例を示している⁽¹⁾。図の横軸はマルチ施工時の軌道こう上量、縦軸は保守後 66 週間後の道床沈下量である。

図より、横軸のこう上量が 0mm から約 20 mm の範囲、また 20 mm から 55mm の範囲で、それぞれ、こう上量と 66 週間後の沈下量に線形関係が見られる。これらを異なる 2 本の直線で近似した場合、こう上量 20mm 付近が変曲点となり、こう上量が 20mm より大きい範囲では、こう上量に対する 66 週間後の沈下量の比が低減している。

これより、こう上量が 20mm 以下の場合に道床バラスト層内のバラスト粒子が元の配置に復元しやすいことが想定され、「粒子配置が記憶されている」ように見られることか

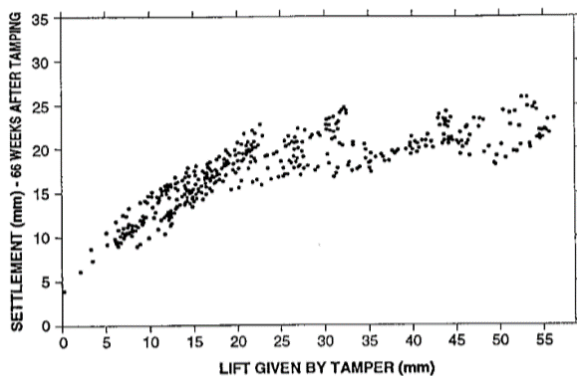


図 1 軌道こう上量と道床沈下量の関係⁽¹⁾

ら「バラストメモリー」と称されている⁽¹⁾。

本研究では、離散体モデルを用いた DEM シミュレーションによりこう上量の異なる条件におけるまくらぎ下の粒子配置の変化について観察したので報告する。

2. 解析方法

〈2・1〉 解析モデル 粒子配置の変化を観察し易くするために、ここでは 2 次元 DEM を用いた。解析モデルを図 2 に、解析モデルに用いた要素の粒度分布を図 3 に示す。

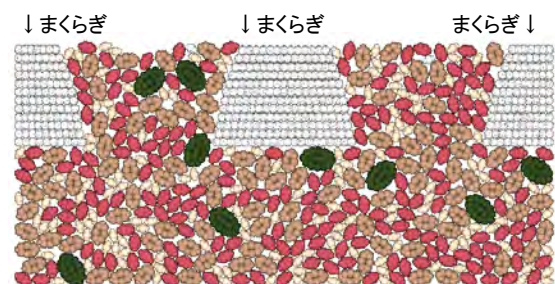


図 2 解析モデル

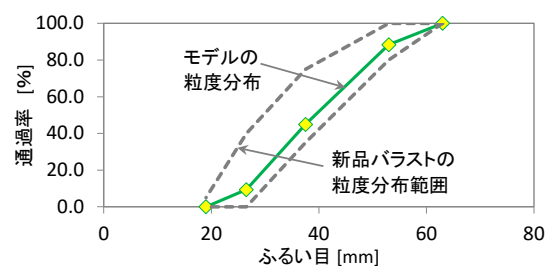


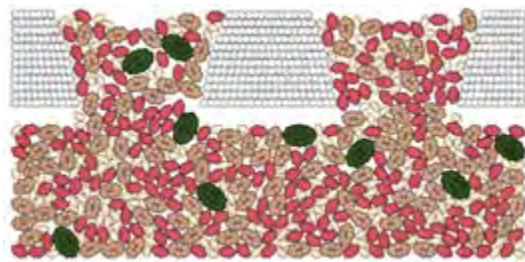
図 3 構成要素の粒度分布

本検討では、実バラストの不規則形状が粒子挙動に与える影響を排除するために、バラスト要素はシンプルな楕円形の粒子とした。楕円の長軸・短軸比は、実バラストの形状の長軸・中軸比を参考とした⁽²⁾。図 2 中の粒子の色は粒径によって分類した。

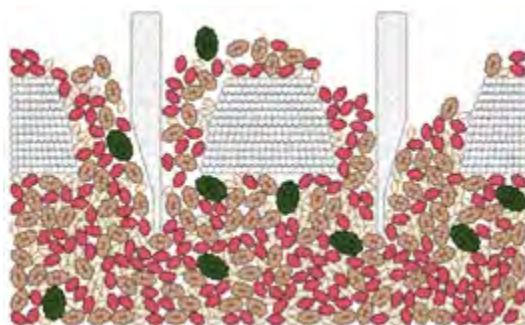
バラスト層の厚さは 300mm とした。まくらぎ要素は 3H 型まくらぎのレール下の断面寸法を再現し、左右のまくらぎは各々、断面中央で二分割した片側モデルとした。まくらぎ間隔は 581mm とした。

〈2・2〉 解析プロセス 図 4 に解析プロセスを示す。まず軌道こう上プロセスでは、こう上量の条件に従いまくらぎ要素を上昇させる。次に、タンピングプロセスでは、図中に示す 2 本のツールを下降させ、35Hz の振動を与え、タンピングを行う。

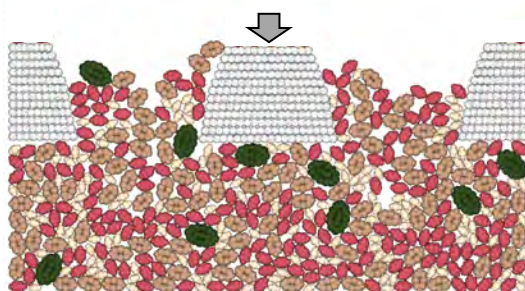
なお、タンピングプロセスでは、ある程度締固まった後にタンピングを続けた場合、まくらぎ下の粒子間接触点が減少に転じるが、その秒数はこう上量により異なる。よって、タンピングプロセスの長さは、各条件において、まくらぎ下の粒子間接触点が最大となるまでの秒数とした。



a) 軌道こう上プロセス (こう上量 40mm)



b) タンピングプロセス (こう上量 40mm)



c) 単調载荷プロセス (こう上量 40mm)

図 4 シミュレーションのプロセスの例

その後、まくらぎ要素を変位制御で下降させ、単調载荷を行い、まくらぎ下の応力鎖の変化を観察した。

〈2・3〉 解析条件等 軌道こう上量は 10mm、20mm、30mm、40mm の 4 通りとする。

各条件におけるタンピングプロセスの長さを表 1 に示す。数値はタンピング時間とツールのスクィーズ距離である。

また DEM シミュレーションには、筑波大学で開発された 2 次元 DEM コード「CR01e」⁽³⁾ を用いた。

3. 解析結果

〈3・1〉 タンピングによる粒子配置変化 図 5 に解析モデルの初期の粒子配置を、また図 6 に 4 通りのこう上量条件におけるこう上→タンピング後の粒子配置を示す。いずれも中央まくらぎの下部周辺を拡大している。

ここで、粒径 60mm の 4 要素 (図中濃緑色) に A,B,C,D の記号を付し、図 5 の初期位置と図 6 のタンピング後の位置を比較する。

まず、こう上量 10mm では、要素 A,B,C の位置はほぼ初期と同じで、要素 D のみ、まくらぎ下方向へ移動している。

次に、こう上量 20mm では、要素 A がまくらぎ下へと移動し、要素 C と D は姿勢が変わり、要素 B は位置も姿勢もほとんど変わっていない。

また、こう上量 30mm でも、要素 A がまくらぎ下へ移動し、要素 C と D は姿勢が変わり、要素 B は位置と姿勢が若干変化している。

最後に、こう上量 40mm では、要素 A がまくらぎ下の中央部付近まで移動し、要素 C と D も姿勢を変えながら、まくらぎ下へと移動している。また要素 B も姿勢が変化している。

表 1 各こう上量条件におけるタンピングプロセス

こう上量	タンピング 1	タンピング 2	タンピング 3	タンピング 4
10mm	3秒-15mm	2秒-10mm	—	—
20mm	3秒-15mm	2秒-10mm	2秒-10mm	2秒-10mm
30mm	3秒-15mm	3秒-15mm	3秒-15mm	3秒-15mm
40mm	3秒-15mm	4秒-20mm	4秒-20mm	4秒-20mm

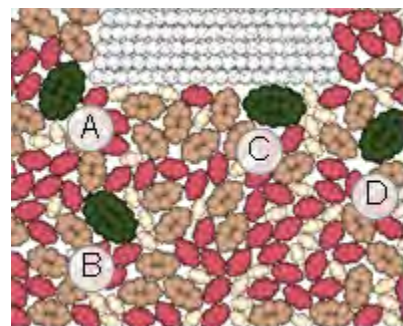


図 5 まくらぎ下の粒子配置 (初期)

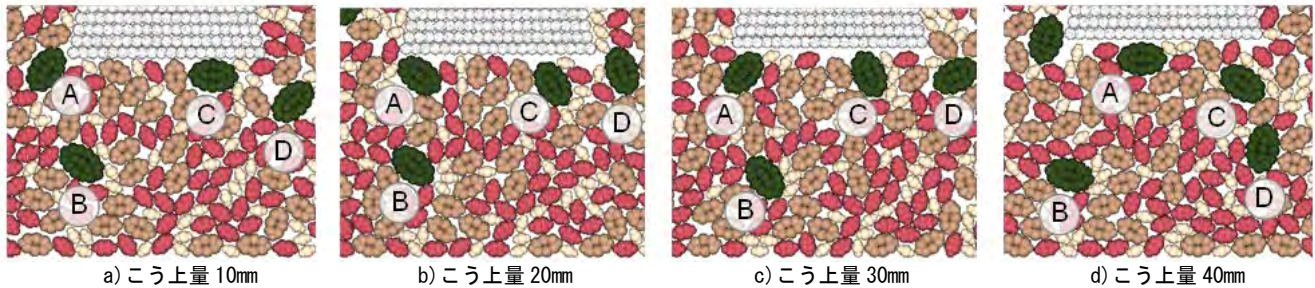


図 6 まくらぎ下の粒子配置 (タンピング後)

更に、図 5 で示した初期の粒子配置からタンピング後の過程における各粒子の移動量と移動方向を図 7 に示す。各矢印の始点が初期の粒子位置、終点がタンピング後の粒子位置である。また、図中、黒色太線矢印は、初期においてまくらぎ下の外側に位置していた粒子を示している。

図より、こう上量が増加するほど、タンピング過程における、まくらぎの外側から移動する粒子の数が增加すること、また移動量も長くなることが明らかである。

以上より、こう上量が増加すると、まくらぎ下の空間の体積も増加するため、タンピング中に、粒子がまくらぎ間からまくらぎ下へと移動し易いことが確認できた。また、本解析の粒度分布条件では、こう上量 10mm では、まくらぎ下の粒子配置がほとんど変わらないのに対し、こう上量 20mm 以上では変化することが確認できた。

〈3・2〉 载荷過程の応力鎖の変化 タンピング後の単調载荷過程 (1mm/s の変位制御) における、まくらぎ下の応力鎖の分布を図 8 に示す。図の線分の長さは、粒子間接触点における法線方向接触力の大きさ、線分の中心は接触点の位置、線分の向きは法線方向接触力の作用方向を示す。

また、図中の水色太線は、初期の解析モデル (軌道こう上前) を単調载荷した場合の応力鎖分布で、赤色細線はタンピング後の応力鎖を示している。

図より、いずれの条件でも、まくらぎ底面部からバラスト層の下層に向けて、応力鎖が発達する傾向が見られる。

初期条件と比較すると、こう上量 10mm の場合では、まくらぎ底面部やバラスト層の底面部において、初期条件と一致する応力鎖が見られる。また、こう上量 20mm の場合では、バラスト層の底面部で初期条件と一致する応力鎖が見られるが、まくらぎ底面部付近では一致は見られない。更に、こう上量 30mm、40mm では、初期条件と一致する応力鎖は著しく減少することが確認できた。

更に、応力鎖の全体的な分布において、こう上量 10mm では図のまくらぎ右下側に、こう上量 20mm では図のまくらぎ下左側に偏るのに対して、こう上量 30mm および 40mm では左右の偏りが減少し、応力鎖がまくらぎ両側のせん断方向に、ほぼ均等に発達するのが明らかである。

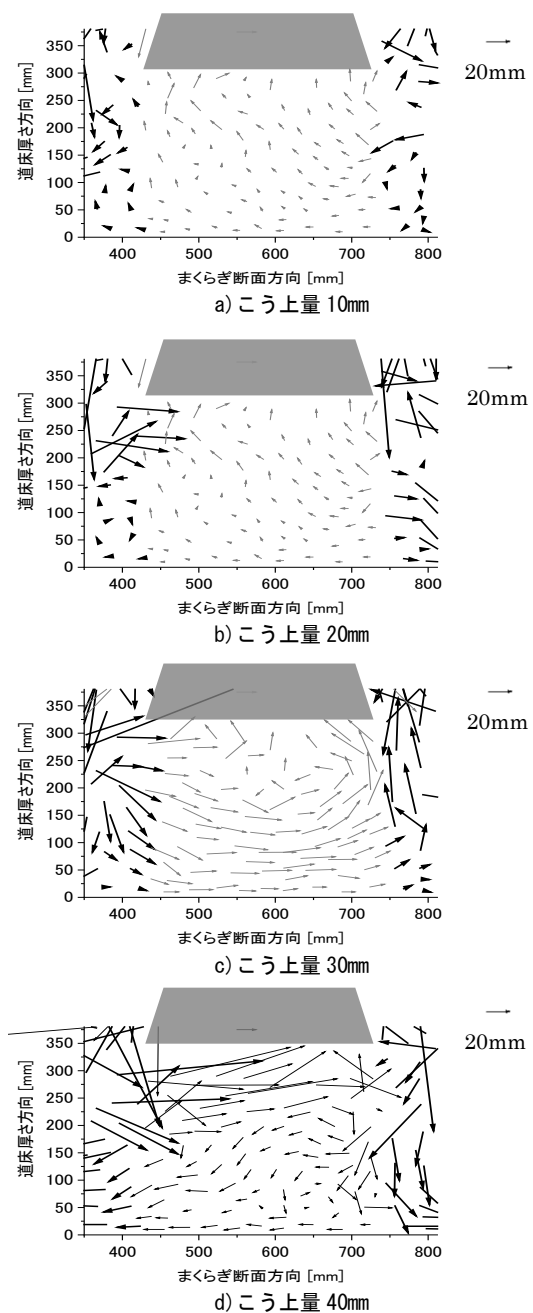


図 7 まくらぎ下の粒子の移動ベクトル

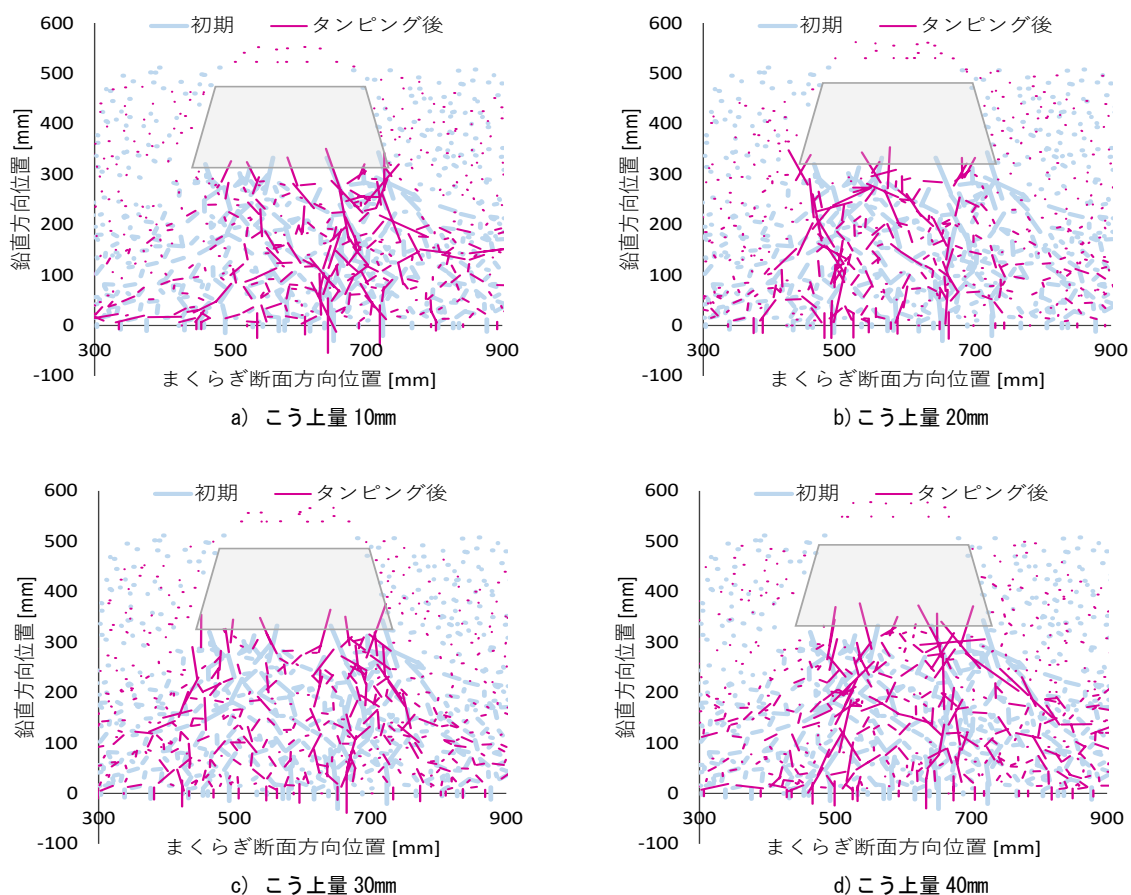


図 8 単調載荷過程における応力鎖の分布

4. まとめ

バラストメモリーの発生条件を把握するために、シンプルな 2 次元 DEM モデルを用いて、軌道こう上～タンピングの過程をシミュレーションで再現し、粒子挙動を観察した。

実バラストの粒度分布を参考とした条件においては、こう上量 10mm の条件では、まくらぎ下の粒子配置や載荷時の応力鎖の分布がほとんど変化しなかったのに対して、こう上量 20mm 以上では変化が見られ、こう上量が大きくなるほど、まくらぎ下への粒子移動が顕著となることが確認された。

文 献

- (1) Earnest T.Selig and John M.Waters : Track Geotechnology and Substructure Management (1994)
- (2) 榎本秀明ほか：道床バラストの形を測る、RRR、Vol.51, No.8, pp.12-15 (1994)
- (3) 地盤工学会 TC35 国内委員会：個別要素法 (DEM) セミナーテキスト (2007)