

バラストの沈下再発に与えるつき固め作業の影響

中村 貴久* 廣尾 智彰* 河野 昭子**

Impact of Tamping Work on Repeated Ballast Settlement

Takahisa NAKAMURA Tomoaki HIROO Akiko KONO

It has been confirmed that the track irregularity gradually returns to its original shape after ballast tamping for the ballast track even under the same track and support structure conditions. However, the details of this mechanism are not revealed. Therefore, we surveyed an actual situation using track inspection data for this phenomenon. In addition, we performed tests with small model, discontinuum analysis for ballast density after ballast tamping and cyclic loading test to reveal the mechanism of the reversion in settlements after and before ballast tamping.

キーワード：バラストメモリ、小型模型試験、不連続体解析、バラスト密度、つき固め作業

1. はじめに

バラスト軌道では、列車の繰返し荷重でまくらぎ下のバラストに沈下が生じ、レールレベルに不同沈下（以下、軌道変位）が生じることで、乗り心地が悪化するとともに列車の走行安全性が低下する。特に、図1に示すような盛土と高架橋の境目といった軌道の支持剛性が急激に変化する構造物境界部や、衝撃的に著大な荷重が生じやすいレール継目部などにおいて、バラストの沈下が大きくなりやすいことがわかっている^{1)~5)}。

バラスト軌道では、定期的に軌道変位が検測され、軌道変位が大きい箇所に対してレールレベルを平坦に整正する保守作業が実施される。保守作業では、レールをジャッキでこう上し、タイタンパと呼ばれる専用の振動機器を用いてまくらぎ下にバラストをつき込む作業（以下、つき固め作業）が行われる。つき固め作業によってレールレベルが整正されるとともに、まくらぎ下のバラストの粒子配列は大きく変化する。そのため、前述した構造物境界部やレール継目部といった沈下が生じやすい特定の場所を除けば、つき固め作業後の軌道変位の分布形状がつき固め作業前と同じ分布形状に戻ることは考えづらい。しかし、線路長手方向に同じ断面の軌道および支持構造物が連続した区間でも、つき固め作業後に作業前と同じ位置で沈下が再発して、作業前と同じ軌道変位の分布形状に戻る箇所が確認されており、その原因の詳細は明らかになっていない。なお、海外ではこのような軌道変位の分布形状が元に戻る現象を“Ballast Memory”と称している⁶⁾（以降、バラストメモリ）。

本研究では、バラストメモリのメカニズム解明の一環

として、軌道検測データよりバラストメモリの発生状況を分析するとともに、小型模型試験によりバラストメモリの再現試験を実施した。また、つき固め作業後のバラスト密度に着目した不連続体解析を実施し、つき固め作業がバラストメモリに及ぼす影響を検討した。

2. バラストメモリの実態調査

2.1 バラストメモリの発生状況の分析

軌道検測データを用いて、つき固め作業前後の高低変位波形の経時変化からバラストメモリに該当する箇所を抽出し、発生状況を分析した。バラストメモリ発生箇所のデータ抽出条件は、ロングレール区間を対象とし、高低変位の発生しやすい分岐器区間、伸縮継目（EJ）区間、接着絶縁継目（IJ）区間、道床交換の前後4m未満の区間、構造物境界部の前後10m未満の区間、レール溶接部の前後2m未満の区間を除外した。また、バラストの劣化の影響を排除するために、道床交換から5年以内の箇所を対象とした。さらに、つき固め作業前に最大の高低変位が発生していた箇所と同じ箇所、つき固め作業後に3mm以上の高低変位が再発するサイクルを2回以上繰り返した箇所を、バラストメモリの発生箇所と判定

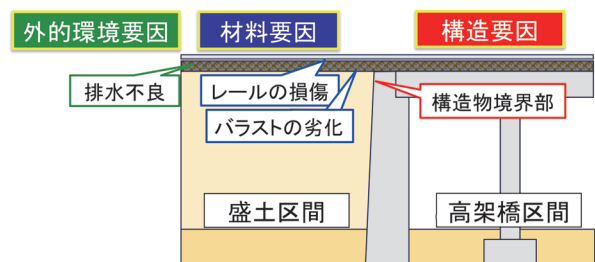


図1 バラスト軌道の沈下要因

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

** 鉄道力学技術部 軌道力学研究室

した(図2)。

2.2 分析結果

調査延長980kmのうち、上記の条件で抽出した区間は合計96.3kmであり、区間内でバラストメモリが388箇所発生していた。盛土、切土、橋りょう、高架橋、トンネルの5つの構造物別に、延長1kmあたりに対するバラストメモリの箇所数を示す(図3)。全区間の平均である4.0箇所/kmと比較すると、盛土では5.5箇所/km、切土では7.6箇所/kmとなっていたため、土構造物区間でバラストメモリが発生しやすい傾向であることがわかった。道床交換後の軌道の沈下の進みは、高架橋やトンネル区間よりも軌道の支持剛性が低い土構造物区間の方が速いことから、本抽出条件では土構造物区間においてバラストメモリの発生箇所が多かったと考えられる。

また、バラストメモリ発生箇所において実施されたつき固め作業と作業後の軌道状態について分析を行った。つき固め作業としては定期的実施するマルチプルタイタンパ(以下、MTT)によるもの、およびそれ以外に必要なに応じて実施するハンドタイタンパ(以下、HTT)によるものが存在する。ここでは、バラストメモリの再発状況を検討するため、上述の388箇所のうち、MTTおよびHTTによるつき固め作業が年平均2回以下の153箇所をランダムに抽出し、つき固め作業から1年後

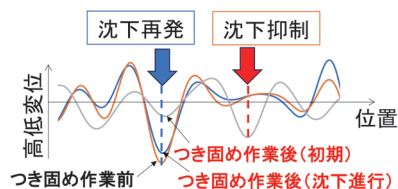


図2 バラストメモリの発生例

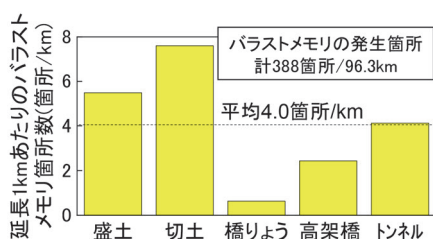


図3 構造物別の延長1kmあたりのバラストメモリ箇所数

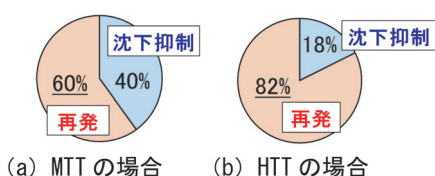


図4 保守作業によるバラストメモリ再発割合

の高低変位が3mm以上を「再発」、3mm未満を「沈下抑制」と判定して集計した。なお、分析にあたり年間の作業回数に上限を設けた理由は、つき固め作業1回毎にその後の軌道状態を分析して集計するため、短期間に複数回つき固め作業と沈下を繰り返した特定の箇所が存在した場合に、その特定箇所が全体の集計データに対して大きな影響を与えるためである。図4にMTTおよびHTTのつき固め作業後の再発と解消の割合を示す。つき固め作業から1年後の時点で、再発した割合は、MTTのつき固め作業で6割に対して、HTTのつき固め作業では8割以上と大きかった。このことから、つき固め作業がバラストメモリの発生に影響を与えることが考えられた。ここで、つき固め作業時の軌道のこう上量は、つき固め作業前の高低変位に依存しており、MTTのつき固め作業前の高低変位の平均値は4.1mmであるのに対し、HTTのつき固め作業前の高低変位の平均値は5.2mmであり、HTTの方が大きかった。ここで、再発割合がMTTとHTTで異なった要因として、MTTの場合は1~2年に1回の頻度で、概ね全線にわたってつき固め作業を実施し、軌道整正を行っている。一方、HTTの場合は、MTTの保守頻度よりも沈下の進行が早い保守多投入箇所を対象に施工することが多い。そのため、MTTよりもHTTの方が、バラストメモリの発生箇所施工する可能性が高いことから、本抽出条件ではHTTの再発割合が大きかったと考えられる。従って、つき固め作業時の軌道のこう上量がバラストメモリの発生に影響を及ぼした可能性がある。

3. 小型模型によるバラストメモリの再現試験

3.1 模型条件

2章の実態調査の結果から、MTTによるつき固め作業でもバラストメモリの発生が確認されたことから、比較的作業品質のばらつきが小さく、沈下が生じやすいと考えられる土構造物区間におけるMTT作業時の軌道のこう上量に着目して、小型模型を用いた移動載荷試験によりバラストメモリの再現試験を行った(図5)。小型模型の縮尺は1/5とし、模型材の寸法や載荷質量について相似則⁷⁾を考慮して模型を作成した。小型模型の軌道



図5 小型模型の移動載荷試験状況

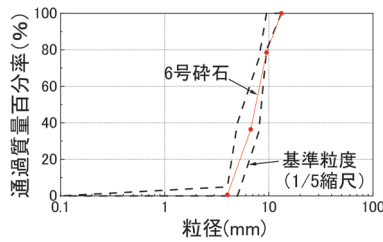
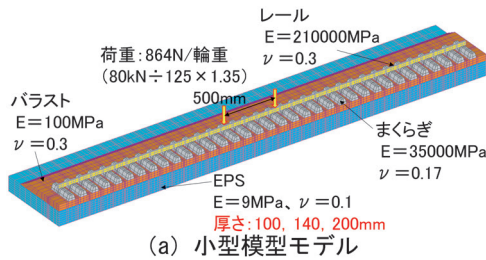
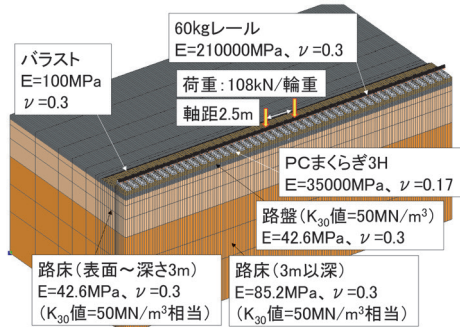


図6 6号砕石の粒度分布



(a) 小型モデルモデル



(b) 実軌道モデル (K₃₀値=50MN/m³)

図7 路盤モデルの層構成の検討に用いた解析モデル

延長は4,000mm(実スケールで20m)とし、土構造物上における標準軌のバラスト軌道を模擬して道床厚は60mm(実スケールで300mm)とした。モデル用のバラストとしては相似則を考慮した基準粒度を満たすように6号砕石を使用した(図6)。軌きょうモデルは、PCまくらぎ3Hを模擬した模型まくらぎ(モルタル製)35本、60kgレール相当の曲げ剛性とした矩形断面の模型レール2本の構成とした。路盤モデルは発泡スチロール(以下、EPS)とし、地盤反力係数K₃₀値=50MN/m³の一般的な土路盤と同程度の剛性となるようにFE解析により厚さを決定した。具体的には、図7に示す実軌道の解析モデル(以下、実軌道モデル)における路盤変位と同等なるように、小型モデルの解析モデル(以下、小型モデルモデル)におけるEPSの厚さをパラメータ(100, 140, 200mm)とした解析を行った。

解析に用いた荷重荷重は、輪重80kNに285km/hで走行する新幹線の速度衝撃率1.35倍⁸⁾および相似則を考慮して設定し、小型モデルモデルでは輪重864N、実軌道モデルでは輪重108kNとした。また、レール要素に1台車を想定した軸距にて2軸分を作用させた。なお、

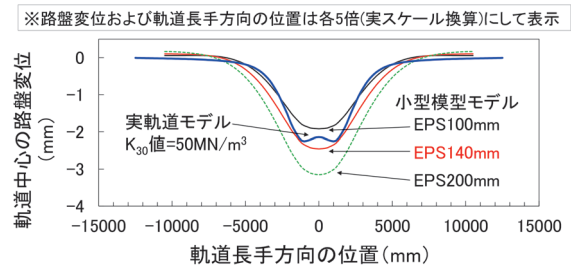


図8 FE解析で得られた路盤変位量

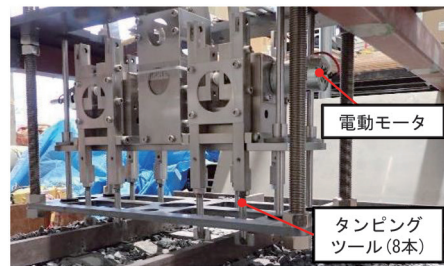


図9 MTTの模型

荷重および材料特性は図7中に示している。

図8にFEM解析で得られた路盤変位量を示す。図中に示す路盤変位および軌道長手方向の位置は、実スケールに換算して示している。小型モデルモデルの路盤変位が実軌道モデル(路盤剛性K₃₀値50MN/m³)と同程度になったEPSの厚さは140mmであった。

MTTのつき固め作業の再現するため、MTTのタンピングツール(以下、ツール)の寸法や質量、およびつき固め作業時のツール自体の変位振幅やスクイズ量を、ブラッサー&トイラー社製09-16DMTTのタンピングユニットを参考に、相似則を考慮した縮尺1/5の構造でMTT模型を製作した⁹⁾(図9)。

3.2 試験条件

解析と同条件の輪重864Nを模型レールに作用させるため、台車模型の重量を350kgf(3430N/4輪)とし、軸距は500mmとした。台車模型による載荷は、小型モデルの軌道延長4,000mm(まくらぎ35本分)のうち、中央の2.0m区間(まくらぎ17本分)を速度500mm/sで自走により定速走行させて実施した。なお、小型モデルの中央のまくらぎをまくらぎNo.9とし、定速走行したまくらぎ17本分について、まくらぎNo.1~No.17と付番した。

試験手順を表1に示す。はじめに、つき固め作業履歴および載荷履歴をバラスト軌道に与えるための予備載荷試験を行った。つき固め作業は、MTT模型を用いてまくらぎ下のバラストにツールを挿入し、まくらぎを挟むような方向にツールを動かし(以下、スクイズ)、バラストから引き抜く過程を1セットとして再現した。また、

表 1 試験手順

試験手順	試験ケース	内容	载荷回数
1	予備载荷	MTT模型によるつき固め作業 (※まくらぎNo.7~11はスクイズ無し)	
2	予備载荷	移動荷重载荷試験	4万回
3	ケース1	MTT模型によるつき固め作業	
4	ケース1	移動荷重载荷試験	4万回
5	ケース2	MTT模型によるつき固め作業	
6	ケース2	移動荷重载荷試験	4万回

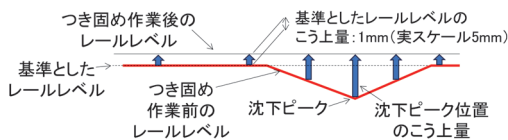


図 10 つき固め作業前後のレールレベルのイメージ

全てのまくらぎに対して、同じつき固め条件となるように実施した。ここで、局所的なバラストの沈下を再現するため、予備载荷試験のつき固め作業のみ、小型模型の中央部にあたるまくらぎ No.7~11 に対して MTT 模型によるスクイズを実施せず、ツールの挿入のみを行った。予備载荷では、台車模型にて 4 万回走行 (2 万往復・8 万軸分の走行) を行った。次に、载荷 1 ケース目および 2 ケース目では、台車模型の载荷後に 1 セットのつき固め作業および 4 万回走行の载荷試験をそれぞれ行った。つき固め作業前の軌道整正の方法は、最も沈下していないまくらぎを基準とし、基準+1mm (実スケール 5mm) となるように軌道全体をこう上した (図 10)。したがって、沈下量が多い箇所ほどこう上量が大きくなる。2 章で抽出した実軌道 96.3km におけるつき固め作業前の高低変位の平均値は 5mm 程度であり、本試験条件のこう上量は実軌道の状態を考慮して設定した。

3.3 試験結果

図 11 に定速走行区間 (まくらぎ No.1~No.17) における 4 万回走行後のまくらぎの沈下量の分布を示す。予備载荷によってまくらぎ No.7 から No.11 の区間に局所的に大きな沈下が生じた。载荷 1 ケース目では、予備载荷によって沈下量が最も大きくなったまくらぎ No.7 から No.11 の区間において、やや小さいが局所的な沈下が再発した。载荷 2 ケース目では、载荷 1 ケース目で沈下が再発したまくらぎ No.7 から No.11 の区間において、まくらぎ No.7 の沈下量がやや大きくなったが、前後の区間と概ね同程度の沈下量となった。

以上より、こう上量がある程度大きな箇所にて局所的な沈下が再発し、こう上量が小さな箇所では沈下の再発が抑制される傾向を示した。本試験では実軌道と異なり、こう上量の大小にかかわらず全てのまくらぎに対して同

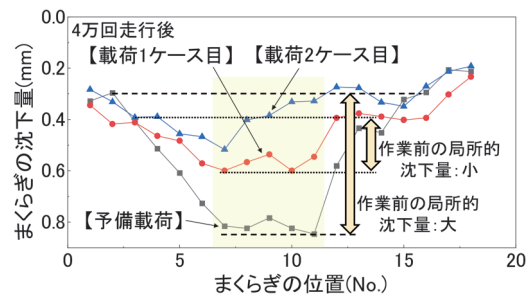


図 11 4 万回走行後のまくらぎの沈下量の分布 (移動荷重载荷試験)

じ条件でつき固め作業を実施した。よって、こう上量が大い箇所においてつき固め作業後のバラストの密度が小さくなり、沈下量が大きくなったと考えられる。なお、本試験においては沈下量に関わらずつき固め作業を各まくらぎに対して 1 セットずつ実施したが、実軌道で MTT を使用したつき固め作業を実施する際は、現場の状況やこう上量を考慮して現場作業員の経験に基づき、まくらぎ毎につき固め作業のセット数を設定している。

4. 不連続体解析によるつき固め作業後のバラスト密度の評価

3 章の小型模型試験の結果により、つき固め作業前の沈下量がバラストメモリに影響を与える可能性が確認された。ここでは、バラストメモリのメカニズムを検討するために、個別要素法 (以下、「DEM」とする。) による不連続体解析を実施した。DEM は多数の固体粒子の運動を、粒子ごとの並進および回転の運動方程式に基づいて時刻歴に解き進める解析手法であり、解析プログラムには DEMCS-track を用いた¹⁰⁾。これまでの研究で、つき固め作業時のこう上量とバラストの粒子配置および変形挙動の関係を検討し、DEM を用いた解析的検討を実施してきたが¹¹⁾、つき固め作業の軌道のこう上量が沈下に与える影響については検討していなかった。そこで、こう上量がつき固め作業によるバラストの密度の変化に与える影響を評価するとともに、バラスト密度が作業後の初期沈下に与える影響も検討した。

4.1 解析モデルの条件

つき固め作業過程におけるバラストの挙動を 3 次元的に観察するため、まくらぎ 1 本分のバラスト軌道の解析モデルを構築した。図 12 に解析モデルを示す。まくらぎは 3H まくらぎとし、ほぼ同じ寸法となるようにモデル化した。バラスト要素は、安山岩バラストの 3 次元形状測定データに基づいて、10 個~16 個の個体粒子の集合体要素で構成し¹²⁾、新品バラストの粒度分布範囲を再現できるように 9 種類の形状を作製した。なお、本解

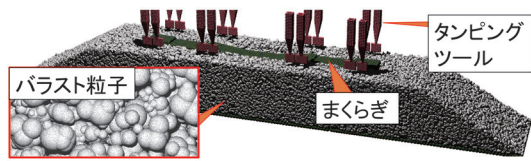


図 12 解析モデルの概観

表 2 解析モデルの要素・個体粒子数

要素	要素数			個体粒子数		
	こう上量 5mm	こう上量 10mm	こう上量 20mm	こう上量 5mm	こう上量 10mm	こう上量 20mm
バラスト	48920	48810	48700	587160	585756	584335
まくらぎ	1			5662		
路盤	3			7402		
ツール	16			7488		

表 3 各要素の材料特性

		バラスト	まくらぎ	路盤	ツール
ばね 係数	法線 方向	[N/m] 9.09×10^6	9.09×10^6	3.75×10^4	5.50×10^8
	接線 方向	[N/m] 2.27×10^6	2.27×10^6	9.38×10^3	2.16×10^8
減衰 係数	法線 方向	[N·s/m] 7.88×10^2	7.88×10^2	73.9	8.28×10^3
	接線 方向	[N·s/m] 3.94×10^2	3.94×10^2	37	5.20×10^3
摩擦係数	[deg]	36 / 43	20	20	10

析ではつき固め作業前後のバラストの挙動を相対比較で検討することとし、路盤をモデル化していない。

解析モデルは、軌道のこう上量が5mm, 10mm, 20mmとなる3ケースとした。バラスト軌道の解析モデルの作成の手順は、以下の通りである。まず、つき固め作業前の道床厚がそれぞれ295mm, 290mm, 280mmとなるようにバラスト要素を投入する。次に、バラストの密度が 1.60t/m^3 となるように締め固める。その後、各道床上にまくらぎ要素を設置し、まくらぎ天端までバラストを投入する。なお、バラストの投入量は全ケースで同量である。

解析モデルの要素数とバラスト要素等を構成する個体粒子数を表2に示す。各要素の材料特性はこれまでの研究¹¹⁾を参考に設定した。表3に各要素の材料特性を示す。個体粒子数が合計60万個を超える大規模モデルのため、スーパーコンピュータにより36並列で計算した。

4.2 つき固め作業のこう上量とバラスト密度の関係

4.2.1 解析条件

3種類のこう上量の解析モデルに対して、まくらぎ要素をバラストの層厚が300mmとなる位置まで上昇させ、軌きょうのこう上を再現した。その後、ツール下降-スクイズ1秒間-ツール上昇を1セットとした、つき固め作業の再現を行った。ツール自体の変位振幅は、実際のMTTのつき固め条件と同様に、水平方向の変位

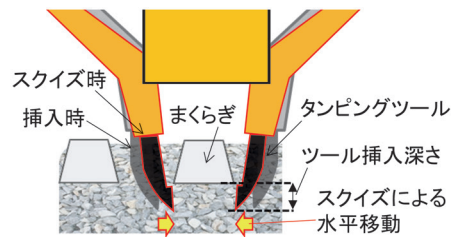


図 13 スクイズ過程のタンピングツールの水平移動のイメージ

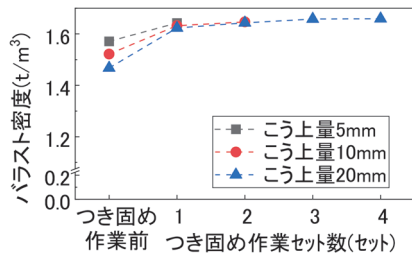
振幅を $\pm 2\text{mm}$ 、振動周波数を35Hzとした。ツールの下降時および上昇時の鉛直方向の移動時間は、実際のMTTの施工時に撮影した動画を分析し、0.53秒間とした。ツールの下降深さは、全ての条件で統一し、タンピングツール先端がまくらぎ底面から100mm下の位置になるように変位制御にて挿入した。スクイズ過程では、実作業を精緻に再現するように、ツール要素を振動させながらまくらぎを挟み込むように水平移動させ(図13)、ツール要素に作用するまくらぎ直角方向の水平荷重が50kNに達したところで、ツール要素の水平移動が停止するように荷重制御を行い、水平移動が停止した後は振動のみを継続させた。

つき固め作業は、こう上量5mmに対して1セット実施した。また、こう上量10mmとこう上量20mmについては、こう上量5mmの場合においてつき固め作業を1セット行った後のバラストの密度の平均値を求めたうえで、その値とバラスト密度が同程度になるまで、つき固め作業を繰り返した。その結果、10mmに対して2セット、同20mmに対して4セットのつき固め作業を実施した。これにより、1セットごとに異なるバラストの密度の条件、およびこう上量によらずバラストの密度が一定の条件で、まくらぎ下のバラストの密度分布と沈下量の関係を検討した。

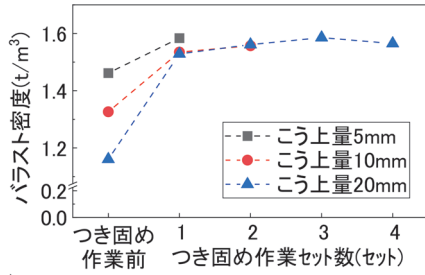
4.2.2 解析結果

各こう上量におけるつき固め1セット毎の密度変化を図14に示す。図14(a)はまくらぎ下面から300mmのバラスト全層の密度の平均値(以下、深さ300mm範囲の密度)、図14(b)はまくらぎ下面から100mmのバラスト上層の密度分布の平均値(以下、深さ100mm範囲の密度)、である。

図14(a)より、深さ300mm範囲の密度では、つき固め作業1セット後のバラスト密度は、こう上量5mmの場合が 1.64t/m^3 と最も大きくなった。こう上量10mmでは2セット後に密度は 1.65t/m^3 、こう上量20mmでは4セット後に密度は 1.66t/m^3 となり、つき固め回数が増加することで、こう上量5mmよりもバラスト密度が増加した。次に、図14(b)より、深さ100mm範囲の密度は、全体的に深さ300mm範囲の密度よりも小さ



(a) まくらぎ下面から深さ 300mm までの範囲



(b) まくらぎ下面から深さ 100mm までの範囲

図 14 つき固め過程 1 セット毎の密度変化

くなった。なお、つき固め作業前の密度が小さいのは、まくらぎこう上によって生じたまくらぎ下面とバラスト上面の間の空隙が密度の計算に含まれるためである。また、つき固め作業により、その隙間にもバラストがつき込まれることでつき固め作業後のバラスト平均密度が増加するが、こう上量 10mm および 20mm の場合はつき固め作業を繰り返しても密度は最高で 1.56t/m^3 となり、こう上量 5mm の場合の 1.58t/m^3 と比較して密度が小さいままであった。これはツールの幅がまくらぎの長さに対して細く、かつレール周辺のみをつき固めることから、複数回繰り返しても、まくらぎ下の空間をバラストで十分には埋められず、密度を増加させられなかったと考えられる。

以上より、こう上量が大きい場合はこう上量が小さい場合と比較して、つき固め回数を増加させることでまくらぎ下からの深さ 300mm 範囲の密度は同程度とすることが出来るものの、深さ 100mm 範囲の密度が小さい状態となる場合があることがわかった。

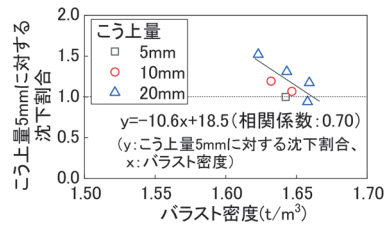
4.3 バラスト密度とまくらぎ沈下量の関係

4.3.1 解析条件

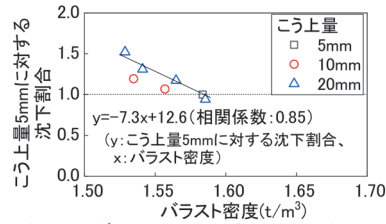
こう上量とバラストの密度が、つき固め作業後のまくらぎ沈下量に与える影響度を検証するために、各こう上量のつき固め作業後に繰り返し载荷のシミュレーションを行った。载荷条件は、最小荷重 5kN、荷重振幅 110kN、周波数 10Hz の鉛直方向の正弦波とし、载荷回数はおおよそ一編成分の軸数に相当する 50 回とした。

4.3.2 解析結果

こう上量 5mm の沈下量でこう上量 10mm および



(a) まくらぎ下面から深さ 300mm までの範囲



(b) まくらぎ下面から深さ 100mm までの範囲

図 15 こう上量 5mm に対する沈下割合(载荷 50 回目)

20mm の沈下量を正規化した (以下、沈下割合)。载荷 50 回目における沈下割合とバラストの密度 (深さ 300mm 範囲の密度および深さ 100mm 範囲の密度) の関係を図 15 に示す。また、同図には全ケースに対して求めた回帰式と相関係数を合わせて示す。沈下割合とつき固め作業後のバラスト密度には相関関係が見られ、深さ 300mm 範囲の密度 (相関係数 0.70) よりも、深さ 100mm 範囲の密度 (相関係数 0.85) の方が強い相関性を示した。

以上より、本解析においてつき固め作業後の载荷 50 回までの初期沈下量に対しては、深さ 300mm 範囲よりも、深さ 100mm 範囲のバラスト密度の方が、大きな影響を与えることが示唆された。また、本解析結果により、つき固め作業 1 セット後のバラスト密度は、大きいこう上量の方が小さく、沈下量が大きくなった。このことから、小型模型試験における同一箇所での沈下の再発は、局所的な沈下箇所のこう上量が大きいことで、その前後のこう上量が小さい箇所よりもバラスト密度が小さかったため、局所的な沈下箇所でも沈下が再発したと考えられる。

5. まとめ

つき固め作業のこう上量とバラストの密度に着目した試験および解析を実施し、軌道構造および支持構造が同一の区間において、つき固め作業後のバラスト密度がバラストメモリに及ぼす影響を検討した。得られた成果を以下に示す。

- 1) 新幹線区間の軌道検測データよりバラストメモリの実態を調査した結果、MTT によるつき固め作業ではバラストメモリが 6 割、HTT では 8 割以上の箇所でも発生しており、つき固め作業がバラストメモリの発

生に影響を与える可能性があることがわかった。

- 2) バラストメモリの発生メカニズムを検討するため、バラスト軌道の1/5縮尺模型に対して、模型MTTによるつき固め作業後に移動載荷試験を実施した。その結果、軌道のこう上量が大きい場合にバラストメモリが発生すると考えられた。また、こう上量が小さい場合には局所的な沈下が生じにくく、バラストメモリが生じにくいことがわかった。
- 3) MTTによるつき固め作業後のバラスト密度と、列車荷重の繰返し載荷による初期沈下の関係を検討するため、不連続体解析(個別要素法)を実施した。その結果、こう上量が大きい場合に、載荷50回までの初期沈下量が大きくなることに対して、つき固め作業後のまくらぎ下100mmまでの範囲のバラスト密度が十分に増加しないことが影響している可能性があることがわかった。

文 献

- 1) 中村貴久, 桃谷尚嗣, 高橋貴蔵, 渡邊明之, 佐伯和浩, 中出千博: バラストを用いたプレパケットコンクリートによる路盤の強化方法, 第15回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 J-RAIL, pp.119-122, 2008
- 2) 関根悦夫, 村本勝己: 営業線路盤の支持力特性に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.9, No.7, pp.19-24, 1995
- 3) 景山隆弘, 中村貴久: 劣化したバラストの沈下を抑制する低強度安定処理工法, 日本鉄道施設協会誌, 60巻, 8号, pp.619-622, 2022
- 4) 細田充, 小納谷優希, 水谷淳, 寺下善弘: 冬季に増加するレール折損を未然に防ぐ, RRR, Vol.80, No.6, pp.38-43, 2023
- 5) 村本勝己, 中村貴久, 櫻井祐: 自動沈下補正補助まくらぎを用いたレール継目部の浮まくらぎ対策, 鉄道総研報告, Vol.27, No.4, pp.6-17, 2013
- 6) Earnest T.Selig and John M.Waters: Track Geotechnology and Substructure Management, 1994.
- 7) 香川崇章: 土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文集, 第275号, pp.69-77, 1978
- 8) 伊藤孝記, 桃谷尚嗣, 景山隆弘, 中村貴久: 累積損傷度理論による列車速度を考慮した新幹線盛土の塑性沈下量の評価, 土木学会論文集, Vol.79, No.7, pp.1-19, 2023
- 9) 中村貴久, 高浦真行, 景山隆弘, 早川容平: バラスト軌道の道床安定作業による道床横抵抗力の回復メカニズム, 鉄道総研報告, Vol.37, No.3, pp.9-15, 2023
- 10) T.Matsushima and H.Saomoto 'Discrete Element Modelling for Irregularly-shaped Sand Grains', Proc. NUMGE 2002: Numerical Methods in Geotechnical Engineering, pp. 239 - 246, 2002.
- 11) Kono, A., Ferrellec, J.F., Nhu, V.H., Saussine, G.: Ballasted tracks tamping analysis and optimization using DEM, Proceedings of WCRR 2019, 2019.
- 12) 河野昭子, 松島亘志: DEMによる単粒度碎石層の残留変位予測における定量的精度の検証, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.77, No.2, pp.339-348, 2021