

バラスト軌道における 沈下の再発を再現する



中村 貴久
Takahisa Nakamura
軌道技術研究部
軌道・路盤研究室
エキスパートマネージャー



河野 昭子
Akiko Kono
鉄道力学研究部
軌道力学研究室
主任研究員

はじめに

バラスト軌道は、レール、レール締結装置、まくらぎ、そしてその下に敷き詰められた「バラスト」と呼ばれる碎石で構成されています(図1)。バラストは、列車の重さを分散させる役割を果たしていますが、列車が何度も通過するうちに少しずつ沈み込んでいきます。この沈下量が場所によって異なると、レールレベルの高さに凹凸が生じ、乗り心地の悪化や列車の走行安全性の低下につながってしまいます。

このため、鉄道では定期的にレールレベルの凹凸を測定し、沈下した部分を整える保守作業が行われています。具体的には、沈下した位置のレールをジャッキで持ち上げ、専用の機械でまくらぎの下にバラストをつき込む「つき固め作業」が行われています(図2)。

しかし、つき固め作業を行ったにもかかわらず、しばらく列車が通過していくうちに同じ位置のレールで再び沈下が生じて、作業前とおおむね同じ形状の沈下が現れるケースが確認されています(図3)。海外ではこの現象を「バラストメモリー

(Ballast Memory)」と呼んでいます¹⁾。まるでバラストが「レールの元の沈下形状を覚えている」かのような振る舞いを示すためです。

本稿では、このバラストメモリー現象を再現するために行った実験方法と、なぜその現象が起こるのかを明らかにするための解析方法について紹介します。

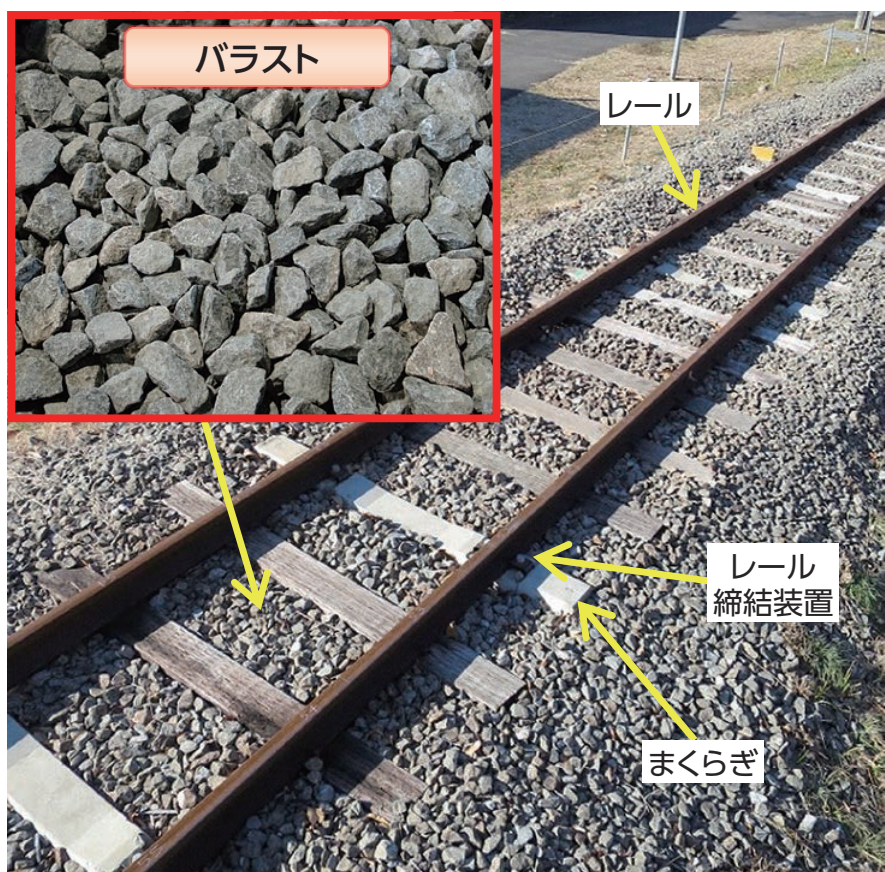


図1 バラスト軌道の構造

バラストメモリーは どこで起きているのか

実際のバラスト軌道において、レールレベルの凹凸を測定したデータを使って、バラストメモリーの発生状況の実態を調べました。実態調査の対象は、新幹線のバラスト軌道区間としました。なお、構造物境界部やレール継目部、排水不良、バラスト劣化など、局所的な沈下を生じやすい要因(図4)が存在する区間を除外し、そのような影響を受けにくい区間を対象としました。

合計約100km分の区間に対して調査した結果、約390箇所でバラストメモリーが確認されました。特に多く見られたのは、盛土や切土といった「土構造物」の区間でした(図5)。橋やトンネルのようにバラストを高い剛性で支持する構造に比べると、土構造物は列車からの荷重による影響を受けて、バラストの沈下が進みやすいことが関係していると考えられます。

また、つき固め作業の方法との関係も調べました。つき固め作業には、一度に長い区間を施工する大型のつき固め専用機械(マルチプルタイターパー)で行う方法と、必要な箇所だ



図2 小型のつき固め専用機械を用いたつき固め作業

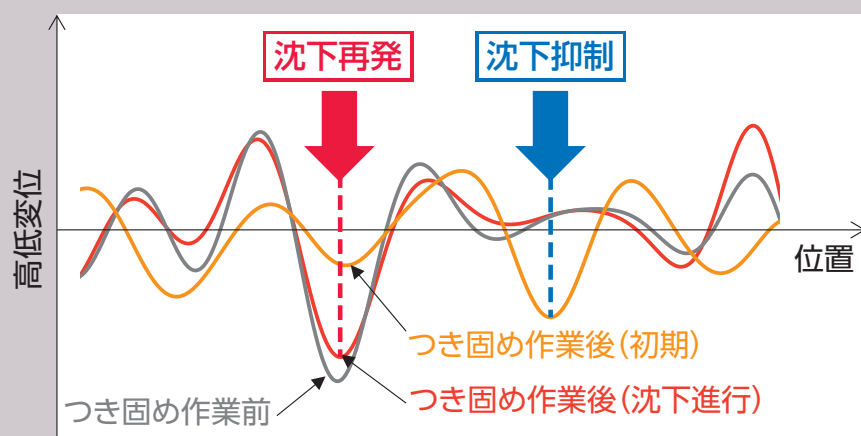


図3 バラストメモリーの発生例

外的環境要因

材料要因

構造要因

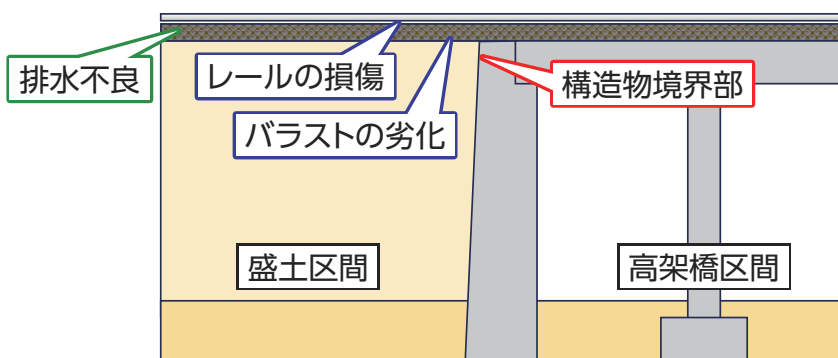


図4 バラスト軌道の沈下要因

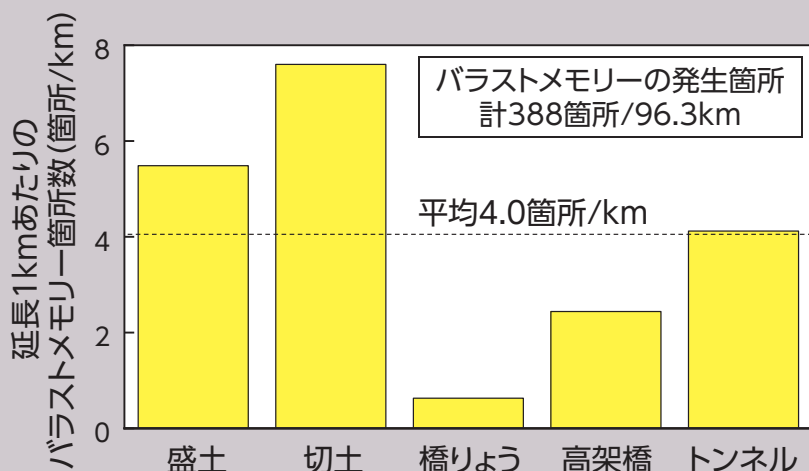


図5 構造物別の延長1 kmあたりのバラストメモリー箇所数

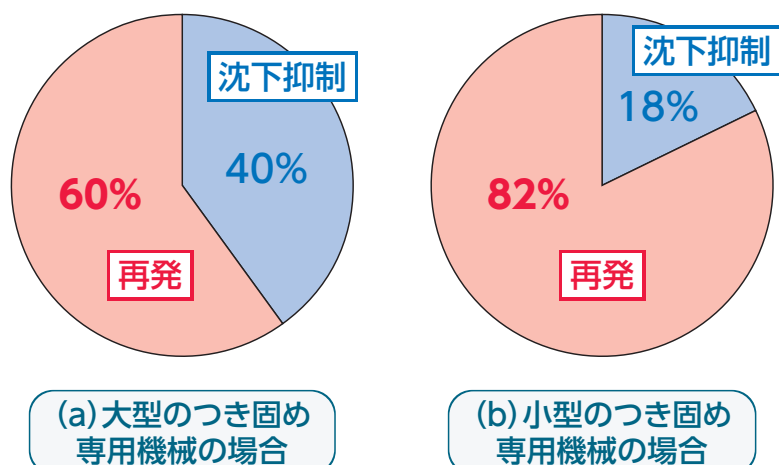


図6 つき固め作業によるバラストメモリー再発割合



図7 車両模型の走行状況

けを人が操作する小型の方法があります。分析の結果、作業後1年以内に沈下が再発する割合は、小型の方が高いことがわかりました(図6)。ただし、これは機械の性能の差というよりも、沈下が大きい「問題のある場所」に小型の方法を使うことが多いためと考えられます。

ここで重要となるのは、「つき固め作業を行う際に、沈下したレールをどれだけ持ち上げた(こう上量)か」、つまりレールレベルのこう上量になります。当然、沈下が大きい場所ほど、つき固め作業時のこう上量も大きくなります。このことが、バラストメモリーと深く関係している可能性が考えられます。

模型実験で 「元に戻る現象」を再現

次に、バラストメモリーを実験で再現するため、実物のバラスト軌道および車両の5分の1スケールで模擬した小型模型を製作し、車両が走行する状況を模擬した試験を行いました(図7)。ここでは、前節の実態調査対象である新幹線において主に用いられており、かつ試験の再現性を確保する観点から、つき固め作業の機械操作が自動化されている大型のつき固め専用重機に着目し、そのつき固め作業を小型模型により再現しました(図8)。

中央部に沈下を与えたバラス

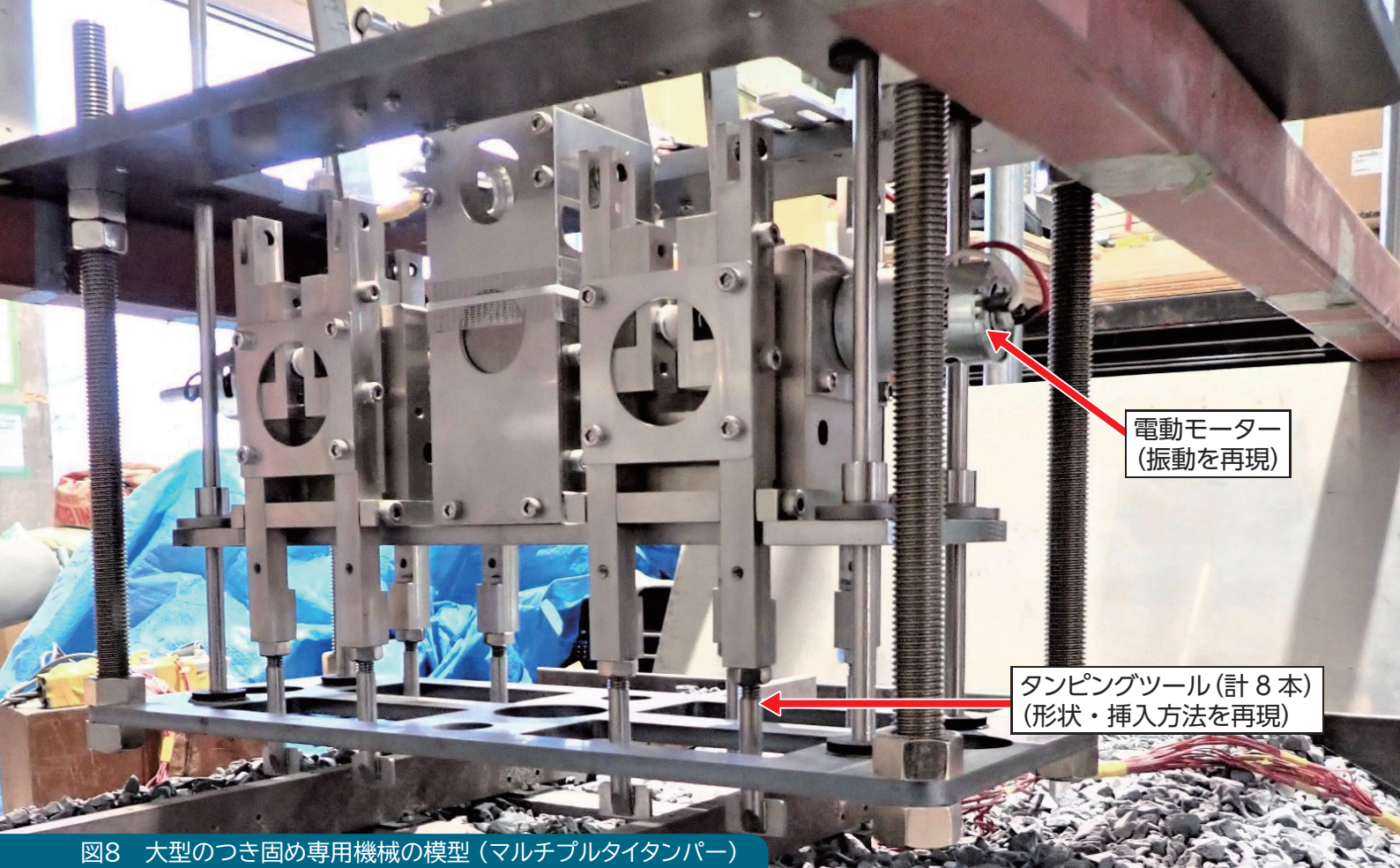


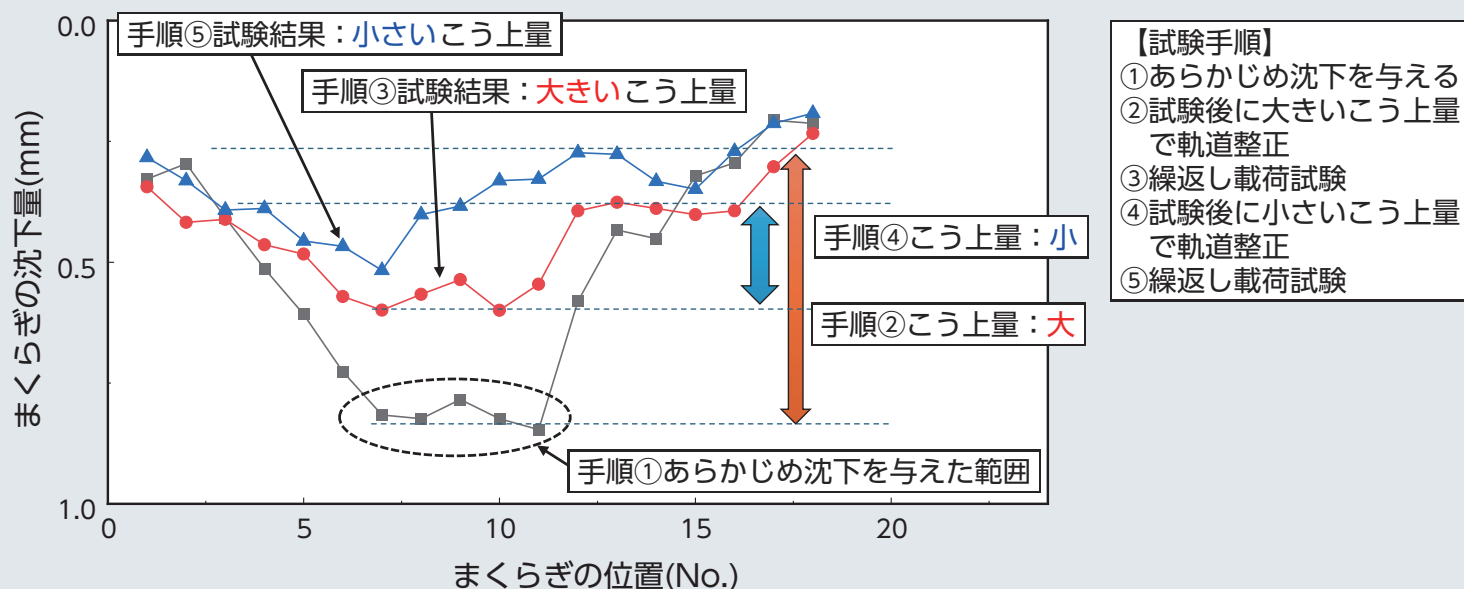
図8 大型のつき固め専用機械の模型 (マルチプルタイタンパー)

ト軌道の模型に対してつき固め作業を実施した後、車両模型を走行させて、繰り返しの列車荷重を負荷させました。その結果、こう上量が多い条件では、同じ位置で再び沈下が起こることが確認できました。一方、同じ位置でもこう

上量が小さい条件では、沈下の再発は抑えられる傾向にありました(図9)。

模型実験においても「こう上量が多いほど、また沈みやすい」という現象を確認することができました。

図9 走行後のまくらぎの沈下量の分布



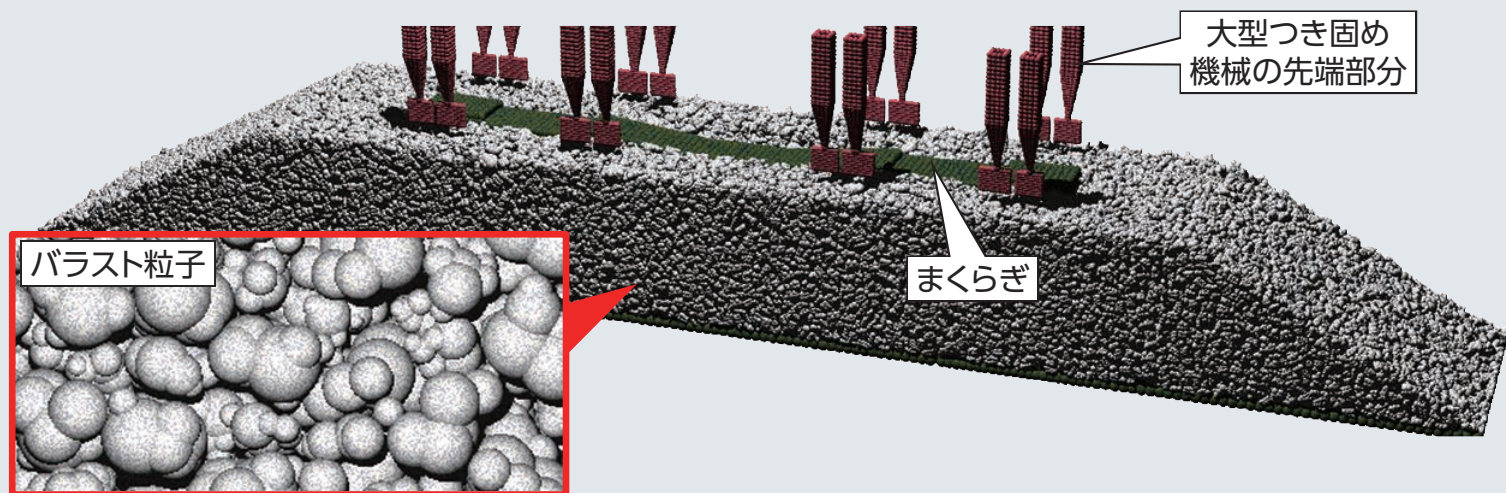


図10 解析モデルの概観

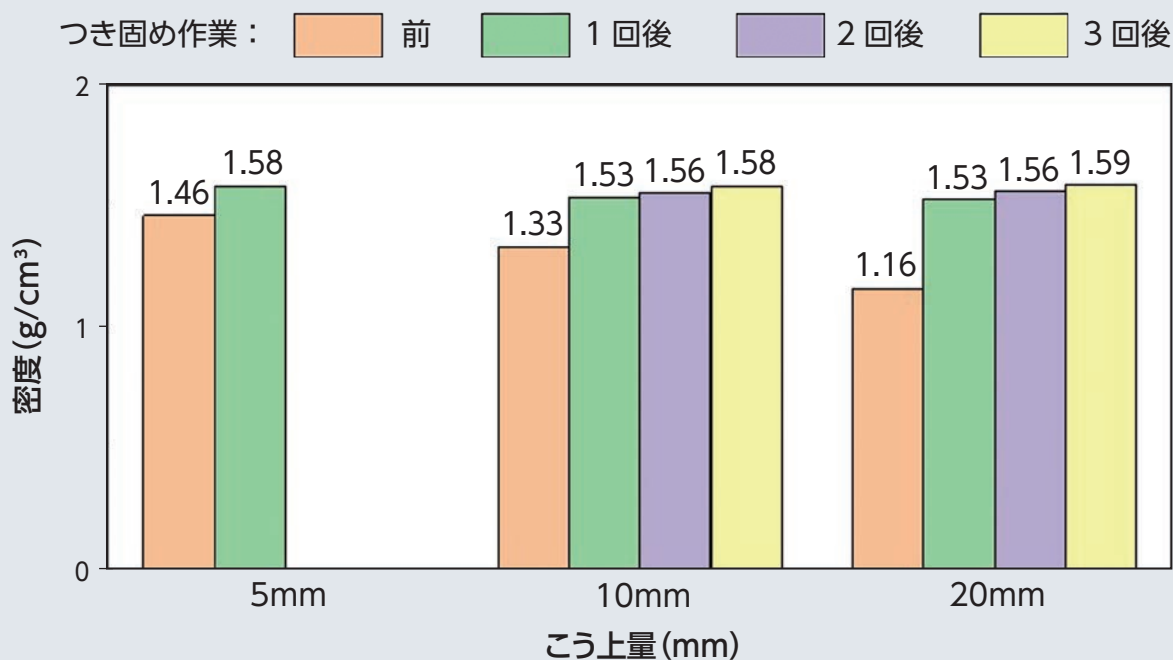
バラストの中で何が起きているのか

前節の小型模型試験で確認された本現象について、その原因を明らかにするため、大型のつき固め専用重機によるつき固め作業を、実物大スケールでシミュレーションにより再現しました。本解析では、バラスト粒子一つ一つの挙動を詳細に追跡しています(図10)。その結果、つき固め作業後には、まくらぎの直下にあるバラストの「詰まり具合(密度)」が沈下挙動に大きく影響していることがわかりました。

こう上量が5mmの場合と、それより大きい

10mmおよび20mmの場合を比べました。つき固め作業前のバラストは、列車の荷重を受けた密な状態を再現するため、密度を 1.60g/cm^3 に設定しています。ここで、まくらぎのこう上によって生じる、まくらぎ下面とバラスト上面の隙間を含めたまくらぎ下全体の空間を対象として密度を評価しました。つき固め作業を行うと、この隙間にバラストがつき込まれることで密度は回復しますが、こう上量が5mmの場合では、つき固め作業1回後のバラストの密度が 1.58g/cm^3 となり、こう上量が10mmおよび

図11 つき固め作業前後のバラストの密度変化



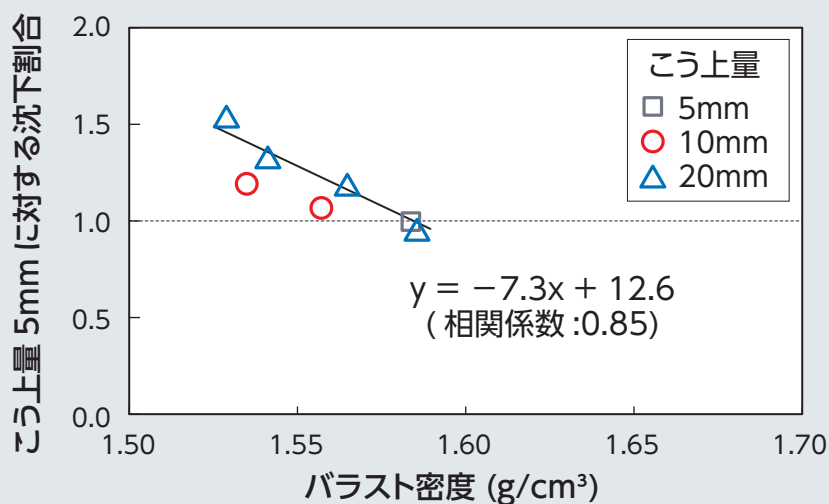


図12 こう上量5mmに対する沈下割合（载荷50回目）

20mmの場合の 1.53g/cm^3 よりも高くなりました（図11）。また、10mmおよび20mmの場合では、つき固め作業をさらに2回繰り返すことで、こう上量5mmの場合と同じ密度に達することがわかりました。なお、 1.53g/cm^3 から 1.58g/cm^3 への密度増加は一見すると小さな差に見えますが、既往の研究では、バラスト密度が 0.02g/cm^3 増加するとバラストの沈下量が15%低減することが確認されています⁴⁾。

さらに、バラストの密度と列車荷重によるまくらぎ沈下量の関係を調べるため、シミュレーションを行いました。载荷回数は、おおよそ一編成分の車軸通過回数に相当する50回としました。解析結果は、こう上量5mmの場合の沈下量を基準とし、こう上量10mmおよび20mmの場合の沈下量を比率として整理しています（以下、沈下割合）。その結果、こう上量の大小にかかわらず、つき固め作業後のバラストの密度が高いほど、列車荷重による沈下が小さくなる傾向が確認されました（図12）。

以上より、つき固め作業によってまくらぎの支持状態は改善されるものの、こう上量が多い場合には、1回のつき固め作業ではまくらぎ直下のバラストの密度が十分に高まらず、空隙が残ります。つき固め回数を重ねれば密度は回復しますが、バラストの密度が十分

に高くない状態で列車が走行すると沈下が生じやすくなります。これがバラストメモリーの原因であると考えられます。

おわりに

本稿では、直接的に見ることができないバラストの挙動と沈下の関係を、実験とシミュレーションにより再現しました。これにより、バラストメモリーという現象は偶然ではなく、つき固め作業時のこう上量と、その後のバラストの詰まり方が大きく関係していることが明らかとなりました。

バラスト軌道が大きく沈下した箇所では、つき固め作業によりまくらぎ下のバラストを十分に密にしないと、再び同じ位置が沈んでしまう可能性があります。今後は、こう上量に応じてつき固めの方法を工夫するなど、より効果的な保守への展開が期待されます。RRR

文 献

- 1) Earnest T.Selig and John M.Waters: Track Geotechnology and Substructure Management, 1994
- 2) 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ックド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
- 3) 中村貴久, 河野昭子: バラストの劣化を抑制するハンドタイタンパに関する検討, 土木学会論文集, vol.81, No.21, 2025