

バラスト軌道に関する最近の研究開発

古川 敦*

Recent Tendencies in the Maintenance for Ballasted Tracks

Atsushi FURUKAWA

Ballasted tracks are widely used as a main track structure. In this track structure, regular track maintenance work is needed because the track geometry deteriorates under the influence of dynamic track loads. Therefore, several researches for the prediction and prevention of the deterioration of ballasted tracks, and the maintenance of deteriorated ballasted tracks are being done by RTRI or other organizations in the world. In this paper, the author will introduce some research results about ballasted tracks done by RTRI and mention the future tendencies of the researches in the field.

キーワード：バラスト軌道，道床沈下，保守作業，保守計画，つき固め

1. はじめに

軌道構造の多くを占めるバラスト軌道では、バラスト道床の漸進的な沈下・変形が生じるため定期的な保守が欠かせない。このため、国内外でバラスト軌道の保守量削減に向けた研究・開発が進められている。本稿では、バラスト道床の保守に関わるものを中心に、鉄道総研における最近の研究開発成果および今後の方向性について述べる。

2. バラスト軌道に関する研究の概説

バラスト軌道に関する研究は、以下のように分類できる。

- ① バラスト道床の沈下メカニズム
- ② バラスト道床の沈下則
- ③ バラスト軌道の検査と状態評価
- ④ バラスト軌道の保守計画
- ⑤ バラスト軌道の保守作業
- ⑥ バラスト軌道のライフサイクルコスト評価
- ⑦ 特異箇所（構造物境界等）への対応
- ⑧ 地震対策

①は、バラスト軌道の最も基本的な技術項目であり、古くから国内外で様々な研究が進められてきた。日本でも戦前から研究が行われてきたが、体系的に取りまとめられたのは、1950年代の「軌道破壊理論」に始まる^{1) 2)}。最近では、大規模シミュレーションにより、列車荷重荷時のまくらぎやバラスト粒子の挙動が明らかにされつつある。

②については、実物大模型軌道載荷試験結果に基づく実験式が提案されている³⁾。また、最近ではFEMやDEMを用いた解析的な沈下予測モデルが開発されている。しかしながら、現時点でバラスト軌道の設計に供することができる実用的な解析モデルは得られておらず、設計の際には、前記実験式が用いられることが多い。

一方、バラスト道床の沈下そのものではないが、軌道変位の経時変化を予測する方法も各種提案されている。日本では、1978年に提案されたS式⁴⁾がよく知られている。鉄道総研で開発した保守計画策定支援システムでは、指数平滑法によって過去の軌道検測データの履歴から予測する方法を用いている⁵⁾。

③については、軌道検測車から得られるデータを用いた道床状態の評価法が提案されている。データとしては、加工された軌道変位データ（5m弦正矢や高低検測差）や軸箱加速度が用いられる⁶⁾。

④については、数理計画法を用いたマルチプルタイタンパ（以下、マルタイ）の最適運用計画策定システムが開発、実用化されている。これについては4章で詳述する。

⑤については、マルタイのメーカーを中心に、つき固め時の最適な加振周波数などの検討が行われている。また鉄道総研では、道床厚さが設定より薄い箇所や道床劣化箇所に対応した保守方法、およびつき固め後のまくらぎ支持状態評価法を開発している。これらについては3章で紹介する。

⑥に関しては、バラスト軌道では重軌条化、PCまくらぎ化、まくらぎ本数増等により構造を強化すると、建設費は増加するが道床沈下量が減少し、保守費を削減できる。このため、両者の和であるライフサイクルコスト（以下、LCC）が最小となる軌道構造が最も経済的となる。日

* 軌道技術研究部 部長（現 研究開発推進部 JR 部長）

特集：軌道技術

本では上述の軌道破壊理論に基づく「最適軌道構造」が良く知られており、国鉄におけるバラスト軌道の構造決定に用いられていた。鉄道総研では、数理計画法を用いた軌道構造の長期最適化計画策定のシステム化を進めている⁷⁾。

⑦については、橋台裏や踏切端など、軌道の剛性が急変する箇所では道床の沈下が速いことが知られており、国内外で様々な対策が検討されている。鉄道総研では、自動沈下補正まくらぎによる対策法を開発している⁸⁾。

⑧については、地震による加振でバラスト道床の安定性が低下することが知られており、特に加振中の道床横抵抗力の評価方法について検討が進められている。これについては、本号に関連論文を掲載している。

この他に、道床抵抗力は、バラスト軌道の性能として重要な事項であるが、日本ではロングレールに関する研究開発の一環として扱われている。

3. バラスト軌道の保守作業に関する研究

3.1 FWD によるつき固め後のバラスト支持力の評価

まくらぎ下のバラスト状態はつき固めによって変化するため、この変化をつき固め直後に知ることができれば、施工管理に有用である。これに対し鉄道総研では、まくらぎ端部で小型 FWD (Falling Weight Deflectometer) 測定を行い、軌道補修の高品質化を目的とした力学的な施工管理方法の開発を進めている^{9) 10)}。

本評価法では、FWD 測定から得られるまくらぎの支持剛性を評価するまくらぎ支持ばね係数 (以下、 K_s : 図 1 (a) 参照) と、まくらぎの支持状態を評価する応答変位遅延時間 (以下、 T_D : 図 1 (b) 参照) を指標として用いる。これまでに試験線および営業線の軌道補修においてその有効性を検討したところ、軌道補修前後のつき固め補修効果 (図 2) や浮きまくらぎ箇所のまくらぎ支持状態を定量的に評価できることを確認している。

3.2 道床厚が薄いバラスト軌道の補修

通常のタイタンパ (以下「TT」) を用いたつき固め作業では、まくらぎ底面より 100mm 程度の深さまで TT のツールが挿入されてまくらぎ下にバラストがつき固められる。しかし、構造物の条件等によって道床厚が 100mm よりも薄い場合、ツールの挿入が困難になるため作業性が著しく低下する。また道床厚に対するバラストの粒径

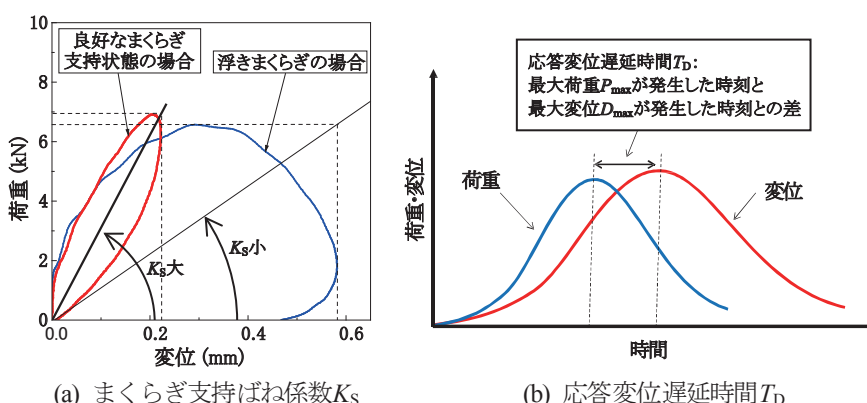


図 1 FWD から得られる評価指標

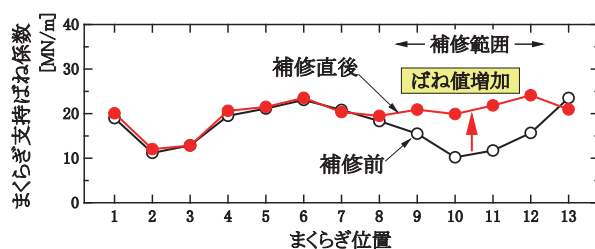


図 2 つき固めによる K_s の変化

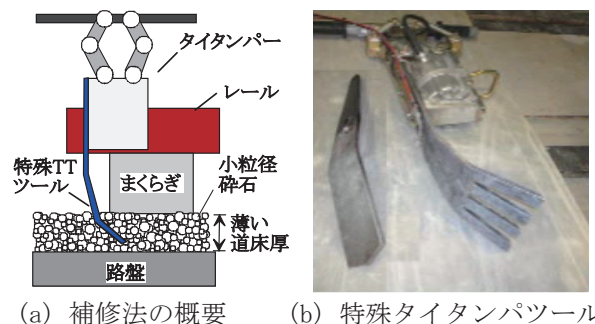


図 3 道床厚が薄いバラスト軌道の補修法

の比率が大きく、まくらぎ下のバラストの締め固め状態にばらつきが生じやすくなる。このため、このような箇所では軌道変位が早期に発生しやすい。そこで、道床厚が薄い箇所に対して効果的な軌道補修方法を開発した¹¹⁾。

本工法は、バラストよりも小粒径の単粒度碎石を用いて、特殊 TT によるつき固め作業を行うものである。特殊 TT は、図 3 に示すように通常 TT のつき固めツールを深く角折れさせ、道床厚が薄い箇所でもまくらぎ下まで碎石をつき固めることができる形状としたものである。また、小粒径の碎石を効率良くつき固めることができるようにツール先端幅を通常 TT の 2 倍に広げると共に、バラストへの刺さり難さを解消するために先割れ形状とした。

本工法については、実物大模型軌道によって効果を確認し、用いる碎石の粒径は、道床厚の半分以下とする必要があることが明らかとなっている。また、営業線における試験施工により、施工後 10 ヶ月を経過した後も良好な軌道状態を維持できていることを確認している。

3.3 細粒土混入バラスト軌道の補修

バラスト軌道でしばしば発生する浮きまくらぎは、乗り心地を悪化させる要因であるほか、バラストの細粒化や噴泥の原因となる。このため、浮きまくらぎ発生箇所ではバラストへの細粒土混入率が増加し、つき固めの効果が持続できなくなる。これに対しては道床交換が効果的であるが、コストを要することとなる。

そこで、道床交換が不要な補修法として、2液混合型の生分解性ポリマーをTTを用いてバラストと共にまくらぎ下に充填する工法を開発した（以下、ポリマー混合工法）¹²⁾。この方法では、図4に示すようにTTを用いてポリマーをまくらぎ下に充填するため、特別な工具が不要である。

本工法については、実物大模型試験で性能を確認した後、営業線で試験施工を行い、補修後10ヶ月経過した後も良好な軌道状態を維持できていることを確認している。

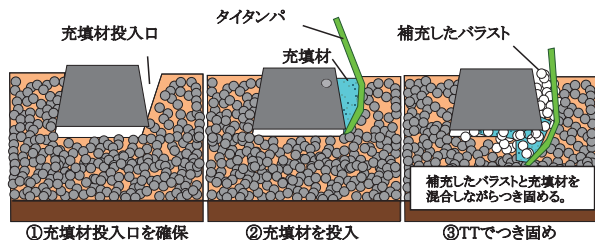


図4 ポリマー混合工法の概要

4. バラスト軌道の保守計画策定に関する研究

4.1 マルタイ運用計画策定支援システム

バラスト軌道における連続的な軌道整備（総つき固めと軌道変位修正）に用いられるマルタイの運用計画は、軌道状態や作業条件（保守基地レイアウト、作業制限時期、他工事との競合等）を考慮した上で担当者が立案しており、多大な労力と時間を要していた。これに対し鉄道総研では、様々な制約条件を数式で表現した上で、①軌道状態（ロット毎の標準偏差の総和）を最小とする、②ある軌道状態の制約の下で、マルタイの総作業量（または作業延長）を最小化する、のいずれかの最適化問題を

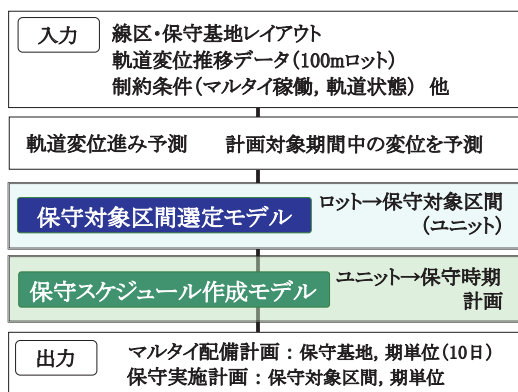


図5 マルタイ運用計画策定支援システム

を解いて、マルタイの運用計画を策定するシステムを開発している¹³⁾。図5に本システムの概要を示す。

本システムは当初1台のマルタイ用に開発されたが、現在では、複数台のマルタイや、レール削正車、道床交換作業車等の運用計画を策定できるよう、機能を拡張している¹⁴⁾。

4.2 材料交換を考慮した保守計画

レール凹凸の増加や道床の劣化等が進むと、マルタイ作業の効果が減少し、保守頻度が増加する。これに対し、レール削正や道床交換等の材料保守を行うことで、一時的に保守コストが増加しても、長期的なコストは低下することがある（図6）。鉄道総研では、前項のマルタイ運用計画策定支援システムを発展し、材料交換を含めた長期的な軌道保守計画策定システムを開発している⁶⁾。本システムは、軌道変位や軸箱加速度を用いて材料状態を評価し、その評価結果に応じてLCCが最小となる軌道保守計画を出力するものである。

現在、実データとの照査によりモデルの精度や適用可能範囲を精査しているところである。

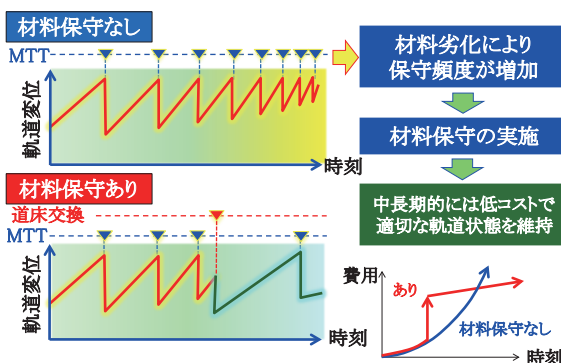


図6 材料保守を併用した軌道のLCCの概念

5. 今後の展望

ここまで述べたように、バラスト軌道では様々な保守作業が必要であるため、国内外で様々な非バラストの軌道構造が開発されてきた。したがって、今後新規に開業する路線や連続立体交差化等の大規模改良区間で、バラスト軌道が新設されることは少ないと想定される。

一方で軌道は線状構造物であり、途切れることが許されないため、横まくらぎ+バラスト道床の組み合わせが持つ保守性の高さは捨て難い。日本は地震や大雨などの大規模な自然災害にたびたび見舞われるが、万が一構造物に変状が生じて、バラストを補充してつき固めを行えば早期に復旧が可能であるバラスト軌道は、今後も主要な軌道構造として使い続けられるであろう。そのために必要となる主な技術開発課題として、以下の事項が挙げられる。

特集：軌道技術

① 道床沈下則

2章で述べたように、バラスト道床の沈下則については各種実験式が得られている。これらは、定点での繰り返し載荷試験から導かれたものであるが、今後は、移動荷重を模擬した載荷試験により、列車走行の実態に即した実験式を得ることが望まれる。合わせて、まくらぎの形状変更や弾性まくらぎの投入、あるいは道床厚の変化などに対応し、道床の沈下を精度良く推定できる、実用的な解析モデルの開発が望まれる。

一方、バラスト軌道は、同一の構造であっても沈下量や劣化の度合いに地点毎の差異が大きい。したがって軌道検測データから得られた大量のデータをもとに、ばらつきを考慮した統計的な沈下予測法も必要と考えている。

② 保守作業の手順の最適化

3章で、鉄道総研が開発した工法をいくつか紹介したが、理想的なバラスト軌道の保守実現のためには、以下の各ステップを統合した手順の確立が望まれる。

- 1) バラスト軌道の状態評価
- 2) 1) に応じた最適な保守方法の選択
- 3) 保守直後の状態再評価、およびその結果に応じた再施工要否の判定

このうち2)の保守方法には、つき固めまたは道床交換といった工種の選択から、マルタイによるつき固め時のツール貫入深さ、スクイーズ時間、スクイーズ圧といった施工時のパラメータ選択も含まれる。3)には3章で紹介したFWDが該当するが、マルタイ作業と組み合わせた、システムチックな施工法となるよう進めている。

③ 複数工種を組み合わせた軌道保守

4章で、複数の保守用車運用計画や材料交換計画策定システムを紹介したが、さらに一歩進めて複数の保守作業を同時に行うことで、より保守コストを下げられる可能性がある。例えば、現在マルタイとレール削正車は独立に運用されているが、レール削正を行うと輪重変動が抑制され、道床沈下が小さくなるので、マルタイと同時に作業を行うことで、LCCを削減出来る可能性がある。このような、複数工種を組み合わせた最適保守計画の策定システムについて、現在検討を進めている。

④ 保守体制の見直し

以上の保守作業を低コストで行うためには、作業間合いを十分に確保した上で、昼間に実施するのが望ましい。欧州では単線双方向運転が採用され、複線の片側を閉鎖し、昼間に保守が行われている。本方式の実現のためには、信号システムの大規模変更や駅間への渡り線挿入など、超えるべきハードルは高いが、バラスト軌道を適切に維持するため、是非とも実現が望まれる。

6. おわりに

バラスト軌道は鉄道開業以来用いられており、今後

も大きく姿を変えることなく使い続けられると考えられる。少子高齢化により鉄道運輸収入が大きく伸びず、かつ労働力の確保が困難となってくる中、既設のバラスト軌道を使い続けるには、5章に述べたような、様々な技術開発が今後とも必要となる。鉄道総研では、関係各位と協力し、今後ともバラスト軌道の保守改善に向けた検討を進めていく所存である。

なお、FWD および軌道構造の長期最適化計画策定に関する研究の一部は国土交通省の補助金により実施した。

文 献

- 1) 佐藤裕：軌道力学，鉄道現業社，1972
- 2) 佐藤裕：繰返荷重による道床沈下の実験，鉄道技術研究報告，No.65，1959
- 3) 国土交通省監修：鉄道構造物等設計標準・同解説－軌道構造，丸善，2012
- 4) 杉山徳平：軌道狂い進みの実態調査とその解析，鉄道技術研究報告，No.1081，1978
- 5) 森本勝，三和雅史：指数平滑法を用いた軌道狂い進みの予測法，土木学会第69回年次学術講演会，VI-346，1997
- 6) 三和雅史，木村寛淳，山中雅司：レールおよび道床状態を考慮した軌道保守方法の最適選択モデルの構築，鉄道総研報告，Vol.26，No.2，pp.13-18，2012
- 7) 吉田尚史，矢坂健太，三和雅史：長期的な経済性を考慮した軌道保守計画モデルの構築，第20回鉄道技術連合シンポジウム，2014
- 8) 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.17-22，2013
- 9) 伊藤孝記，中村貴久，村本勝己，佐野禎：FWDを用いた軌道支持剛性に関する基礎的検討，第48回地盤工学会研究発表会，2013
- 10) 伊藤孝記，中村貴久，村本勝己：実物大模型によるFWDを用いた軌道支持剛性評価法の検証，土木学会第69回年次学術講演会（DVD），VI-364，2014
- 11) 中村貴久，咲村隆人，村本勝己，伊藤孝記：道床厚が薄いバラスト軌道における軌道補修方法の開発，土木学会第69回年次学術講演会（DVD），VI-550，2013
- 12) 咲村隆人，中村貴久，村本勝己，黒坂恵一，山名哲史：タイタンパを用いた生分解性ポリマー混合工法の開発，土木学会第69回年次学術講演会（DVD），VI-541，2013
- 13) 三和雅史，石川達也，大山達雄：軌道状態推移予測モデルの構築と最適保守計画作成のための全整数型数理計画モデル分析，土木学会論文集，No.681/IV-52，2001
- 14) 三和雅史，矢坂健太，吉田尚史，松本亮介，佐々木陽，松丸和貴：複数台の保守用車運用を考慮した軌道保守計画モデル，鉄道総研報告，Vol.28，No.6，pp.35-40，2014