

状態基準メンテナンスの高度化による 軌道保守の革新

公益財団法人鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部長
村本 勝己



1. はじめに

軌道は鉄道の最も基本的な構成要素の一つで、レール・まくらぎ・バラスト（道床）およびそれを支える路盤等でシンプルに構成されているが、それゆえに、それぞれのパーツの僅かな状態の変化で、乗り心地や沿線環境、さらには安全性に大きな影響を及ぼす。したがって、安全で安定した列車運行のために、特にバラスト軌道は日々のメンテナンスによって、軌道状態を健全に保つ必要がある。

軌道のメンテナンス技術の発展は、主に繁忙線区における列車密度の増大や高速化による軌道への負担増加に対応するため、軌道検測車の開発やマルチプルタイタンパー（以下、MTTという）の導入などのメンテナンスの機械化が主体であった。しかしながら、地域鉄道も含めた鉄道路線の持続可能性向上のためには、軌道メンテナンスのさらなる低コスト化を、安全を犠牲にすることなく達成しなければならない。

そこで、本講演では、軌道のメンテナンスコストのさらなる低減を目指して、「認知と予測」をキーワードに鉄道総研の最近の技術開発を紹介し、それらの技術を活用した軌道メンテナンスの革新について提案する。

2. 軌道のメンテナンスの概要

軌道に発生する変状は様々であるが、列車走行によって発生する主な変状は、①軌道の変形（図1、以下、軌道変位という）、②レールの傷や摩耗（図2）、③道床・



図1 軌道変位の例（レール継目部の高低変位）

路盤の劣化、④まくらぎ・締結装置の劣化に大別される。①の軌道変位のメンテナンスに対しては、軌道検測車の開発やMTT（図3）の導入によって、早い時期から機械化が進められてきたが、閑散線区では未だにハンドタイタンパ（以下、TTという）による継目落ちなどのスポット補修が主体である。②のレール傷や摩耗に対するメンテナンスは、疲労層の予防保全的除去や急曲線のレール波状摩耗除去に対してレール削正車が使用されているものの、多くの場合はレール交換で対応せざるを得ないため、軌道メンテナンスコストの多くを占める。③の道床・路盤の劣化に対しては、新幹線等でバラスト交換作業車が導入されているものの、



図2 レールの摩耗例（側摩耗）

人力と汎用の軌陸バックホー等を使用した道床交換や路盤改良が主体であり、そもそも閑散線区ではほとんど行われていない。④のまくらぎ・締結装置交換は定期的に行われるものではないが、近年は、閑散線区の本まくらぎのPCまくらぎ化に伴って一時的に件数が増加している線区がある。

日常の軌道メンテナンスの基本となる軌道変位は、



図3 マルチプルタイタンパ(MTT)

軌道検測車(図4)や手押し式軌道検測装置等で検測され、鉄道総研が開発した「LABOCS」(図5)などの軌道変位管理ツールによってデジタル情報として管理される。軌道変位には、鉄道事業者ごとに整備基準値や管理目標値などが定められており、それを超過すると一定期間内に軌道変位保守を投入するのが一般的である(図6)。保守投入のタイミングが軌道変位量に基づいて定められることから、軌道変位保守においては、状態基準メンテナンスが概ね確立しているといえる。



図4 軌道検測車

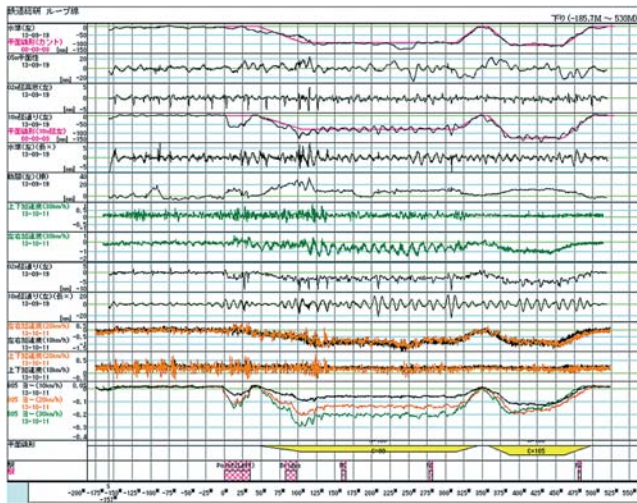


図5 LABOCSによるチャート表示画面

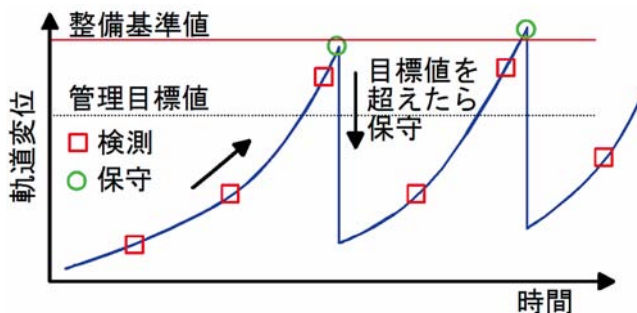


図6 一般的な軌道変位保守計画の概念

3. 軌道の状態基準メンテナンスの高度化

軌道のメンテナンスコストの低減を目指して、鉄道総研で進めている軌道の状態基準メンテナンスの高度化に向けた3つの取組みを以下に示す。

(1) 高頻度検測と軌道変位の将来予測 (認知と予測技術の応用)

現行の軌道変位保守は、基本的に直近の軌道変位が整備基準値等のしきい値を越えているかどうかで保守投入の判断を行う。これに対して、図7に示すように、将来の予測値を組合せることで、余裕を持って保守計画を立てることが可能となり、保守機械や作業者の運用計画のさらなる効率化が期待できる。

鉄道総研が開発した慣性正矢軌道検測装置¹⁾(図8)は、営業車両に搭載して専用の軌道検測車と同等の正確な軌道変位を測定することが可能で、現在、新幹線や在来線で導入が進められている。本装置を使用することによって、例えば在来線では3ヶ月に1回程度だった軌道検測が、営業車両によって高頻度に行うことが可能となる。

高頻度な軌道検測が可能になると、軌道変位の将来予測の精度を向上させることが可能となるが、迅速な保守計画策定のために大規模データの効率的な処理が必要となる。そこで、鉄道総研では、従来頻度の軌道

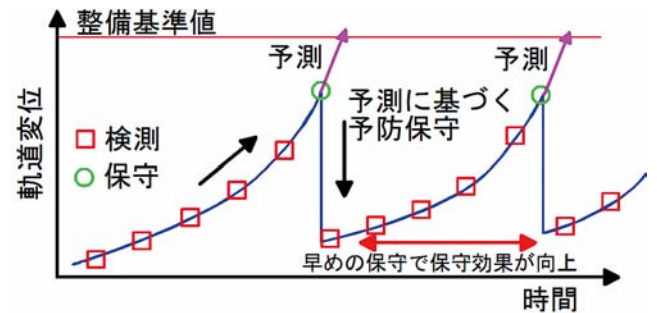


図7 予測に基づく軌道変位保守計画の概念



図8 慣性正矢軌道検測装置(車体装架型)

検測で使用されていた軌道保守計画システムを高頻度検測対応とした、高頻度検測対応版軌道保守計画システム²⁾(図9)を新たに開発した。本システムは、大規模な高頻度検測データを効率的に処理することが可能で、将来の軌道変位を確率分布として予測し(図10)、さらに逐次追加される測定データに基づいて予測精度を自動的に向上させる学習機能を実装している。この学習機能により、単純な回帰予測と比較して予測誤差を40%低減することができる(図11)。さらに、高頻

度検測の利点を活かし、軌道変位の急進を予測する機能や季節変動の大きい箇所将来予測も可能となった。

なお、統計的手法に基づく軌道変位の将来予測は、軌道を構成する構造や材料特性に大きな変更がない場合に限り有効であり、道床交換や路盤改良を行ったり、軌道構造を大きく変更した場合には高精度な予測は困難である。そこで、鉄道総研では、列車による繰り返し荷重条件下のバラストの弾塑性変形を客観的な条件だけで再現できる構成モデル(図12)を九州大学と共同で開発した³⁾。図13は、バラストの三軸圧縮試験で得られた材料定数を用いて、実物大のバラスト軌道模型を用いた繰り返し載荷試験を有限要素解析でシミュレーションした結果であるが、客観的条件だけでバラスト軌道の沈下進みを精度よく予測できることが確認された。今後は、計算速度を向上させる手法について検討を進める。

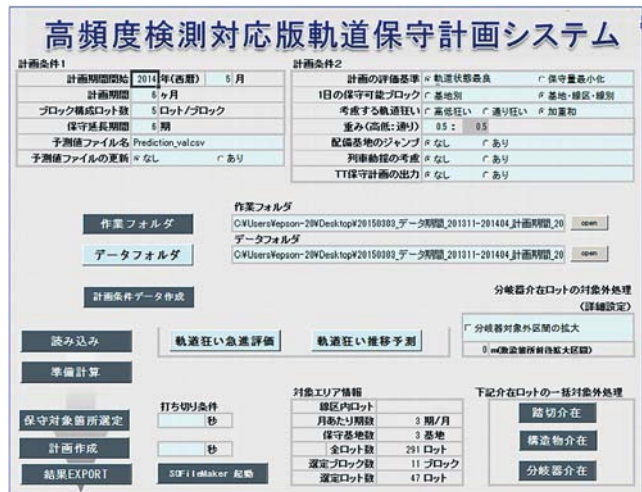


図9 高頻度検測対応版軌道保守計画システム

(2) レールや道床・路盤の保守を組合せた軌道変位保守 (新たな状態量の認知)

軌道のメンテナンスは軌道変位だけでなく、レールや道床・路盤の変状に対しても行うことが必要であるが、これらのメンテナンスを個々に計画するのではなく、必要に応じて組合せることで補修効果を向上させることが定量的に明らかになりつつある。

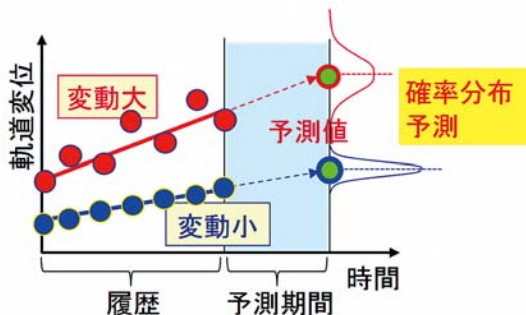
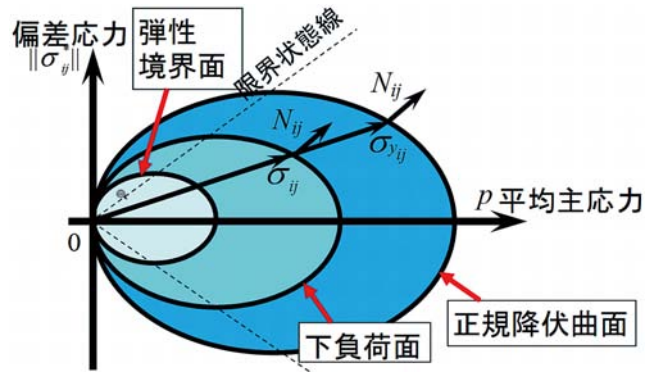


図10 軌道変位の確率分布予測



$$f(\sigma_{ij}) = p \left\{ 1 + \left(\frac{\|\eta_{ij}\|}{m} \right)^2 \right\} \quad p \equiv -\sigma_{rr} / 3, \quad \eta_{ij} = \sigma_{ij}^* / p, \\ \sigma_{ij}^* \equiv \sigma_{ij} + p\delta_{ij}$$

図12 バラスト構成モデルの材料降伏関数

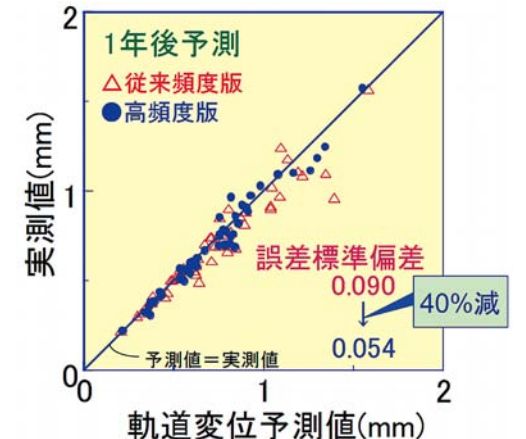


図11 学習機能による予測精度向上効果

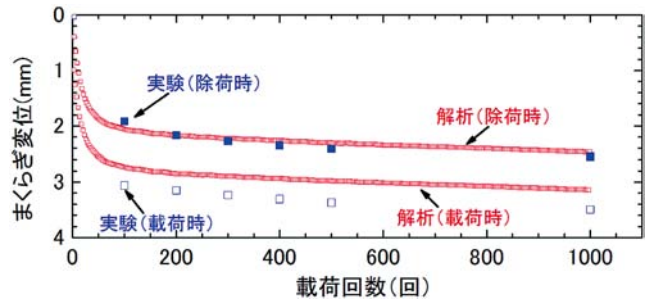


図13 有限要素解析によるシミュレーション結果

例えば、レール波状摩耗発生箇所において、波状摩耗管理とMTTによる軌道変位補修を組合せて行くと、補修後の軌道変位進みが半減するという結果が得られている⁴⁾。すなわち、軌道保守計画策定の際に波状摩耗の管理も合わせて考慮することで、さらなるコスト低減が期待できる。レール波状摩耗の補修法としては、レールの表面を削るレール削正が有効であるが、補修計画を効率的に策定するためには、波状摩耗の発生位置と程度を迅速かつ正確にモニタリングする必要がある。鉄道総研では、可搬式で、車内騒音から波状摩耗に起因する成分だけを抽出して波状摩耗の発生箇所と摩耗量を簡易に推定することが可能なレール波状摩耗モニタリング装置⁵⁾(図14)を開発した。本装置は、営業車で簡易に波状摩耗の発生箇所を特定することが可能であり(図15)、効率的なレール削正作業の計画が策定可能となる。

また、MTTやTTによる軌道変位保守においては、現状では仕上げ線形のみ管理されており、つき固め後のバラスト密度やまくらぎ支持剛性などの力学的な管理は行われていない。バラストのつき固め作業は、作業者の練度や作業手順の違いによってバラツキが発生しやすく、作業直後の仕上げ線形は問題なくても、列車走行回数に伴って、徐々に軌道変位として

顕在化してしまう可能性がある。そこで、鉄道総研では、盛土の締固め管理などに使われている重錘落下式たわみ測定装置(FWD)を応用して、軌道の支持剛性を評価する手法と測定装置(図16)の開発を進めている⁶⁾。本手法は、軌道上に重錘を落下させて応答荷重と変位を測定し、軌道の支持ばね(図17)を推定する手法であり、本手法を併用して仕上がりを確認しながらMTTによる軌道保守を行うと、軌道変位進みが概ね半減するという結果が得られている。

(3) リスクを考慮した軌道保守計画

(画像によるリスクの認知とデジタル化)

軌道保守計画策定における軌道変位保守投入の優先度は、鉄道事業者が定めた整備基準値を超過する順位に基づくのが基本思想である。基本的に列車は脱線しないのが前提であり、脱線後のリスクが特に高い箇所に関しては、脱線防止ガード等で脱線自体を防止することとしている。しかし、脱線防止ガードは保守コストの増加要因であり、すべての軌道にガードを設置するのは非現実的である。そこで、仮に列車が脱線した場合に発生する輸送障害や事故などのイベントを想定し(図18)、想定被害に基づいたリスクを軌道変位保守投入の優先度に反映できれば、経済性と安全性を両



図14 レール波状摩耗モニタリング装置



図16 軌道支持剛性評価装置(トロリータイプ試作機)

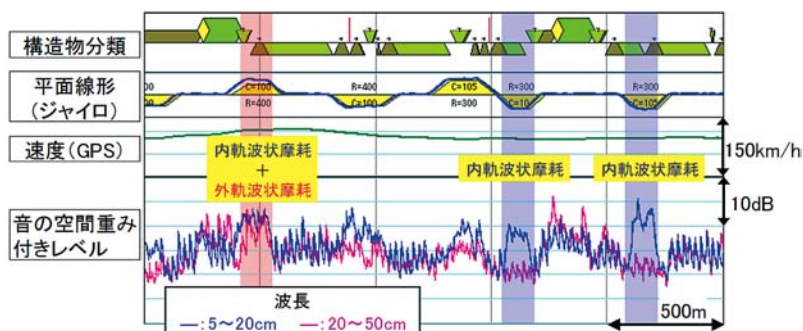


図15 波状摩耗発生箇所の測定例

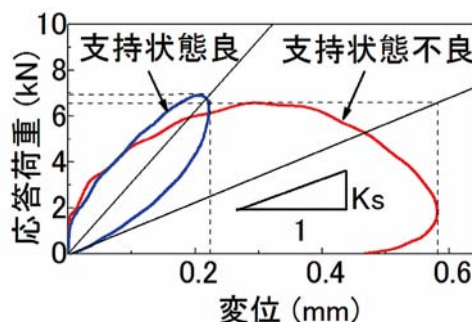


図17 軌道支持ばね係数Ks

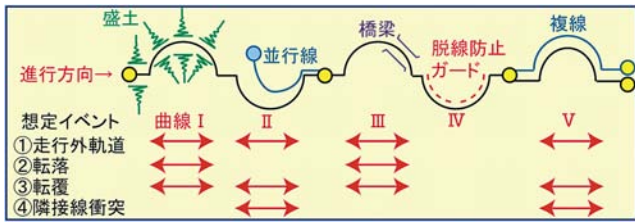


図18 脱線時に想定されるリスクの例(曲線部)

線区	No	キロ程 (m)	線形	位置	種別	内容	距離	信頼度
1	1	18400m	2°5' 18400m	8m	橋梁	橋脚	~3m	高
2	2	18400m	2°5' 18400m	8m	橋梁	橋脚	~3m	高
3	3	26200m	2°5' 26200m	8m	公衆	人	~3m	低
4	4	26500m	2°5' 26500m	8m	公衆	車	~5m	低
5	5							

図19 画像による沿線リスク要因の自動抽出

立させた軌道メンテナンスの実現が可能となると考えられる。

本手法をシステム化するためには、リスクをシステムで使用できるようにデジタル化したリスクデータベースの構築が必要となる。リスクデータベースの基本データとしては、設備等台帳と線区の輸送情報(輸送量、運転情報、速度等)があるが、脱線後の被害想

定には、これらに加えて沿線環境の情報が必要となる。この沿線環境のリスクをデジタル化するために有効なのが画像データの活用であり、鉄道総研ではステレオカメラの動画から、沿線の構造や障害物を識別して、自動的に沿線環境のリスク要因をデジタル化するシステムの開発を進めている(図19)。軌道検測データ(走行安全性)とリスクデータベース(脱線後の被害)を組合せて評価することで、安全性を確保しつつより経済的な軌道保守計画を策定できるものと考えている。

4. 軌道メンテナンスの革新に向けて

本講演で提案する高度な軌道の状態基準メンテナンスの要素は

- ①高頻度検測と軌道変位の将来予測
- ②レールや道床・路盤の保守を組合せた軌道変位保守
- ③リスクを考慮した軌道保守計画

の3つから成る。これらを組み合わせた軌道の高度な状態基準メンテナンスのイメージを図20に示す。鉄道総研では、クラウド版LABOCSによってこれを具体化し、安全性と経済性が両立したメンテナンスを実現したいと考えている。

なお、高頻度軌道検測は局所的な軌道の変状を迅速に把握することができるので、図21に示すようなスポットの軌道変位保守で機動的に対応すれば、MTTの投入回数を減らしても線区の安全性を確保すること



図20 高度な軌道の状態基準メンテナンスのイメージ



図21 高頻度の軌道検測を活かした軌道変位保守の例

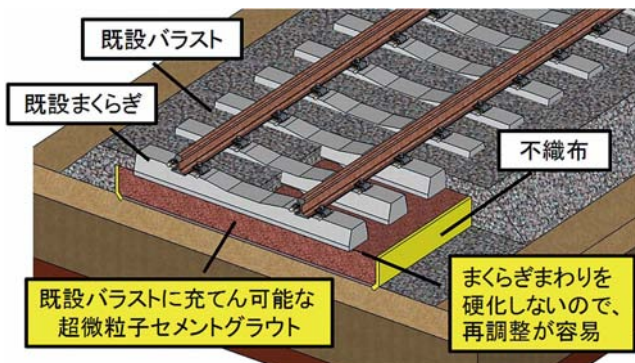


図22 低コスト既設線省力化軌道(開発中)

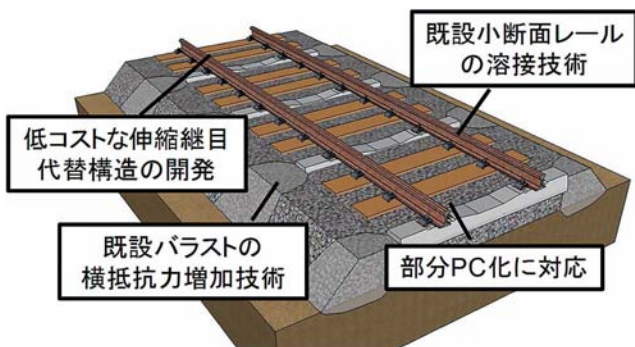


図23 低コストロングレール軌道(開発中)

が可能となると考えられる。ただし、変状が頻発する線区においては、この手法でメンテナンスコストを低減するのは困難である。この場合は、既設の軌道材料や軌道構造の改良によってライフサイクルコストの低減を検討する必要がある。鉄道総研では、レール交換頻度低減のための新型熱処理レールの提案や、低コスト既設線省力化軌道⁷⁾(図22)、低コストロングレール軌道等(図23)の開発等によって、軌道のライフサイクルコストの低減を目指している。

5. おわりに

本講演では、軌道メンテナンスの革新に向けて、「認知と予測」をキーワードに、状態基準メンテナンスの高度化を主に提案したが、メンテナンスコスト低減のためには、メンテナンス効率の改善だけでなく、メン

テナンス量そのものを減らすことも重要である。現在、鉄道総研では、低コストに導入できる既設バラスト軌道の改良技術や、地域鉄道の持続可能性に貢献できる技術開発に集中的に取り組んでいる。

今後とも、鉄道総研の軌道技術開発にご理解・ご協力頂ければ幸いです。

本稿で示した軌道の支持剛性評価手法と測定装置に関する研究開発の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) 坪川, 矢澤, 小木曾, 南木: 車体装架型慣性正矢軌道検測装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.26, No.2, pp.7-12, 2012
- 2) 佐野, 三和, 山口, 吉田, 矢坂, 坂口: 高頻度軌道検測データの軌道状態診断および保守計画策定への活用方法, 鉄道総研報告, Vol.29, No.8, pp.47-52, 2015
- 3) 岡安, 村本, 中村, 弾性限界面を考慮した下負荷面モデルによるバラストの繰返し負荷挙動の予測, 第49回地盤工学研究発表会, pp.1025-1026, 2014.
- 4) 松本, 三和, 吉田, 矢坂, 桶谷, 原田: レール削正と軌道変位保守の同時期実施を考慮した軌道保守計画法, 鉄道総研報告, Vol.30, No.10, pp.41-46, 2016
- 5) TANAKA, H., SHIMIZU, A. and SANO, K.: Development and verification of monitoring tools for effective maintenance of rail corrugation, Proceedings of The 6th IET Conference on Railway Condition Monitoring 2014, Birmingham, 2014.
- 6) 谷川, 中村, 桃谷: 細粒土混入率が高いバラスト軌道の支持剛性評価に関する研究, 土木学会論文集, Vol.72, No.3, 2016 (12月掲載予定)
- 7) 測上, 高橋, 中村, 桃谷: 超微粒子セメントを用いたてん充道床軌道の開発, 鉄道総研報告, Vol.30, No.10, pp.23-28, 2016