

軌道・構造物分野における研究開発のコア技術の高度化

構造物技術研究部長 田所 敏弥



1. はじめに

鉄道を安全かつ安定的に運行するためには、軌道や構造物の安全性の確保、それを維持するためのメンテナンスが不可欠である。一方、鉄道を取り巻く環境は、近年、大きく変化しており、研究開発に活用するコア技術を高度化することによって課題を解決し、持続可能な鉄道システムを構築することが求められている。本講演では、軌道・構造物分野におけるこれまでの研究開発のコア技術の活用例を紹介するとともに、コア技術の高度化の取り組みについて概説する。

2. 軌道・構造物分野の現状と課題

近年の自然災害の激甚化、頻発化、広域化により、災害があらゆる場所で日常的に発生するようになった。特に豪雨災害は、被害規模が年々増加しており、地震との複合災害も懸念されている。また、少子高齢化にともなう生産年齢人口の減少により、メンテナンスに関わる要員の確保が困難になっており、地域鉄道においては、事業継続が困難になりつつある。さらに、橋りょうやトンネル等の鉄道構造物の平均経年は60年を超え、老朽化が年々進行している。このような現状において、鉄道総研では、以下のような研究開発に取り組んできた。

(1) 自然災害に対する強靱化(安全性の向上)

線状の施設である鉄道の機能維持においては、災害に対する弱点箇所を抽出し、補強することが重要である。地震や豪雨災害に対する事前対応として、各種の性能評価法や補強工法を開発してきた。さらに、災害が発生した場合に被害を迅速に検知し、早期復旧するための工法や列車の運行再開可否判断手法を開発してきた。

(2) ICT・IoTの活用(メンテナンスの省人化)

メンテナンスを省人化するため、ICTやIoTを活用し、現場作業の機械化、自動化、また、熟練技能者の減少に対応する現場作業の脱技能化、施設や設備の長寿命化に取り組んできた。さらに、最近のセンサーやドローン、AIの技術革新を踏まえ、それらを活用した軌道や構造物の各種検査支援システムの開発に注力してきた。軌道分野では、列車前方に設置した携帯端末から取得した列車動揺や画像情報を用いた列車巡視システムを開発している。また、構造物分野では、AIを用いたトンネルの変状検知による検査支援システムを開発している。

(3) 技術基準の整備

技術基準は、研究開発成果を社会実装する役割があるが、最近のICTやBIM／CIMといったデジタル技術を実務で適用できるように、技術基準や関連する手引き等を適宜、改訂している。

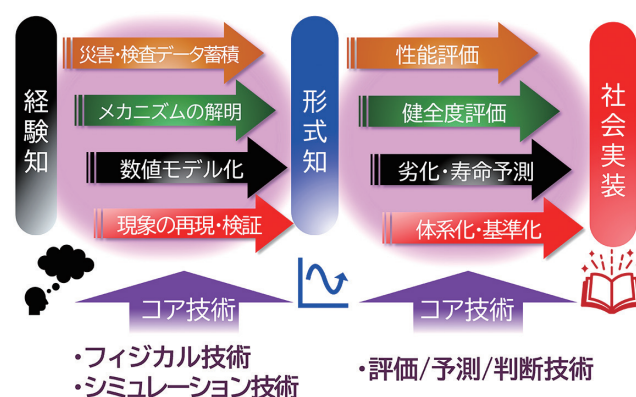


図1 課題解決のためのコア技術の活用

安全性の向上とメンテナンスの省人化を目的に、図1に示すように研究開発のコア技術を活用してきた。軌道・構造物分野では、脱線事故や地震、豪雨災害における経験や知見を蓄積し、安全性に関する技術を向上し、技術基準等を通じて体系化してきた。さらに、それらを定期的に更新することによって、研究開発成果を社会実装してきた。また、メンテナンスにおいても、現場の経験に基づき技術を体系化してきた。これらのいわゆる経験知を、事故・災害やメンテナンスにおけるデータ蓄積、現象のメカニズム解明、数値モデル化、さらには、現象の再現・検証を行い形式知としてきた。これらの過程において、実験や計測等のフィジカル技術やシミュレーション技術といったコア技術を活用してきた。さらに、形式知となった情報に対して、性能や健全度の評価、劣化・寿命予測、体系化・基準化を行うことによって、研究成果を社会実装し、安全性の向上やメンテナンスの省人化を実現してきた。この過程では、評価、予測、判断技術といったコア技術を活用してきた。このように、経験知から、形式知、さらには、社会実装する過程において、研究開発を加速・効率化する手段として、様々なコア技術を活用してきた。

近年の鉄道を取り巻く環境の変化によって、新たな課題も生じている。軌道・構造物分野の研究開発においては、経験式や実験式から脱却し、シミュレーション技術を活用する研究事例が多くなったが、それとともないV&Vや研究開発のスピードアップ、シミュ

レーションに用いる構成則の検証には、実験技術の高度化が課題となっている。また、ICT・IoT技術の進歩とともに膨大なビックデータが蓄積されるようになったが、これらをメンテナンス実務で活用するには、理論的な検討や検証が課題となっている。さらに、老朽化した大量の施設や設備を限られた要員でメンテナンスするには、高度な技術の一般化とともに、得られた技術的知見の再活用が課題となっている。そのため、持続可能な鉄道システムを構築するには、これらの課題を解決することが求められている。

3. コア技術の活用例

3.1 軌道・構造物分野のコア技術

軌道・構造物分野の研究開発のコア技術の例を図2に示す。コア技術は、フィジカル技術、シミュレーション技術、評価・予測・判断技術に分類される。

フィジカル技術には、独創的な大型試験装置や特徴的な要素試験装置がある。前者の例として、大型振動台、総合路盤試験装置、大型降雨実験装置、2軸疲労載荷装置がある。後者の例として、2軸疲労載荷装置、衝撃振動試験の計測システムであるIMPACTUSがある。また、軌道検測装置も特徴的な要素試験装置と考えられる。

鉄道固有の理論や知識に基づいたシミュレーション技術には、列車と構造物の連成を考慮した走行シミュレーション、脱線シミュレーション、また、粒子法を用いた河川橋脚の洗掘シミュレーション、さらには、



図2 軌道・構造物分野のおもな研究開発のコア技術の例

駅構内の利便性の向上や駅改良時の検討に用いられる旅客流動シミュレーションがある。

評価・予測・判断技術には、列車走行の安全確保とメンテナンスの省人化に貢献する軌道保守管理データベースシステム（以下、LABOCS）がある。また、コンクリート構造物の剥落予測手法は、技術基準として整備されているとともに、最新技術を取り込むべく研究開発が進められている。

3.2 フィジカル技術(2軸疲労载荷装置)

軌道のフィジカル技術として、図3に示すレール締結装置の2軸疲労载荷装置がある。台車が急曲線を通過する際、外軌に作用する横圧は、第1軸は軌間外側へ、第2軸は軌間内側へ作用する。これを模擬するため、輪重と横圧の合力を2方向から交互に载荷する日本独自の評価方法が確立しており、鉄道構造物等設計標準・同解説（軌道構造）¹⁾やISOの技術仕様書²⁾に反映されている。

本载荷装置の活用例として、ボルトが緩まないレール締結装置である無螺締式レール締結装置³⁾の性能評価試験がある。本载荷装置を用いて新たに開発したレール締結装置のレール頭部の左右変位量、締結ばねの発生応力、100万回繰返し载荷後の各部材の状態を確認し、安全性を評価した。この結果を踏まえて、開発した締結装置を現地に試験敷設し、社会実装に向けた検証を進めている。

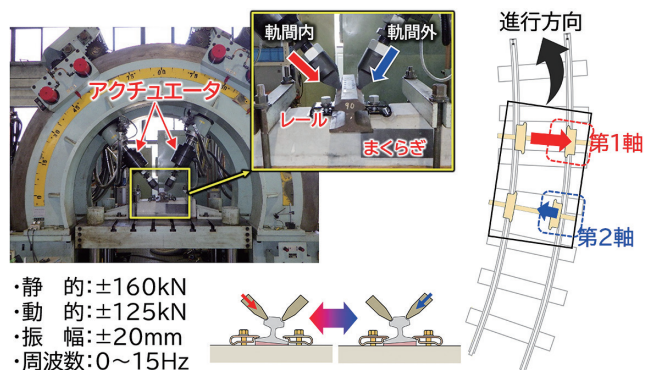


図3 フィジカル技術
(レール締結装置の2軸疲労载荷装置)

3.3 フィジカル技術(鉄道システムの振動台試験装置)

鉄道システムの地震時の安全性の向上のためのフィジカル技術として、中型振動台と大型振動台がある。それぞれ特徴ある試験装置であり、地震時の鉄道システムの破壊メカニズムの解明や性能評価、対策工の開発などに活用されている。

中型振動台は、毎時120mmの散水機能を有しており、降雨と地震の複合災害を模擬した試験が可能である。過去には、降雨後に地震が発生し、盛土が崩壊した事例がある。降雨時の土中の水分量によっては、通常、地震時に崩壊しない盛土であっても、崩壊する場

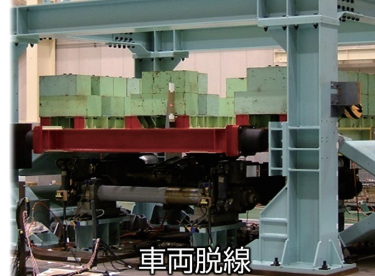
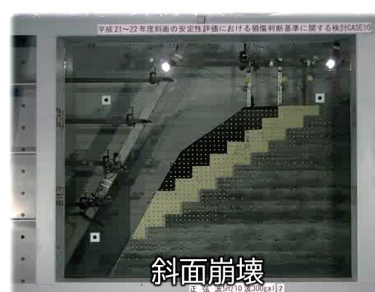
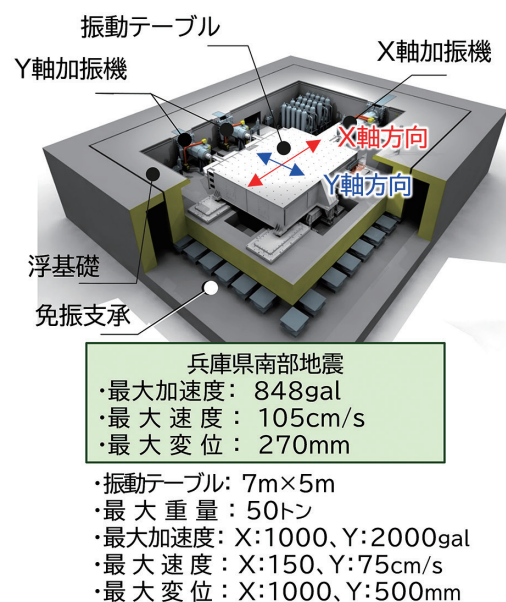


図4 フィジカル技術(鉄道システムの地震時の安全性向上のための振動台試験装置)

合があることを振動台実験により確認している⁴⁾。災害が激甚化している現在、この装置の活用によって、対策工等の新技術の開発が期待されている。

大型振動台の仕様、および使用例を図4に示す。大型振動台は、7m×5mの振動台テーブルに最大重量50トンの積載が可能である。加振能力は、兵庫県南部地震において観測された断層直下型の地震動を包含しており、震度7クラスの巨大地震を再現することができる。これまで、鉄筋コンクリート構造の鉄道高架橋柱や斜面を対象とした加振試験が実施され、破壊メカニズムの解明や性能評価法を開発してきた。また、構造物以外では、実大のバラスト軌道や台車を対象に地震時の挙動を再現し、破壊や脱線メカニズムの解明、さらには対策工を開発してきた。

3.4 評価技術（迅速な災害復旧のための橋脚の性能評価法）

近年の豪雨災害においては、洗掘による河川橋脚の根入れ減少や底面露出にともなう支持力減少により、橋脚の安定性が著しく低下する場合がある。被災後に行われる衝撃振動試験は、衝撃荷重による自由振動を周波数解析することによって固有振動数を求める非破壊検査法である。固有振動数を簡易に計測でき、その変化から橋脚の健全度を推定できることから、鉄道事業者において広く利用されている。鉄道総研では、1987年に初代システムを提供して以降、随時改良しており、2024年にリリースしたIMPACTUSでは、加速度計を圧電型から水晶式に変更し、センサーを小型化、高精度化し、可搬性と評価精度を向上させた。

衝撃振動試験では、橋脚の健全度低下の有無は判断できるが、性能の定量的評価は困難であった。そのため、載荷試験により橋脚の安定性を確認し、運行再開までに数か月を要する場合があった。そこで、図5に

示すように、橋脚の上下流側の鉛直応答差に着目し、両者の振幅比から橋脚の底面露出率を推定する手法を開発した。さらに、底面露出率、橋脚く体傾斜等の影響を考慮した支持力算定手法⁵⁾を開発し、運行再開に要する期間短縮が可能となった。このように健全度の定性的な評価に用いられていた計測技術から、橋脚の残存支持力を定量的に評価し、迅速に災害復旧するための性能評価法を開発した。

4. コア技術の高度化の取り組み

4.1 コア技術の高度化の課題と解決策

軌道・構造物分野の研究開発では、シミュレーションを活用する研究事例が多くなり、それにともないV&Vや研究開発のスピードアップ、シミュレーションに用いる構成則の検証において、実験技術の高度化が課題となっているが、これに対しては、試験設備の高度化等によって、論理的、実践的な本質を探究する（①Logical Examination）。また、蓄積された膨大なビックデータをメンテナンス実務で活用するには、理論的な検討や検証が課題であるが、これに対しては、フィジカル技術とシミュレーション等の技術融合を促進する（②Fusion Promotion）。さらに、大量の老朽化した施設や設備を限られた保守要員でメンテナンスするためには、高度な技術の一般化と得られた技術的知見の再活用が課題であるが、これに対しては、蓄積されたナレッジを活用する（③Knowledge Application）。これら①②③に対応した取り組みを以下に紹介する。

4.2 軌道のフィジカル技術の高度化

①Logical Examination：理論的・実践的な本質の探究の取り組みの例として、軌道のフィジカル技術の

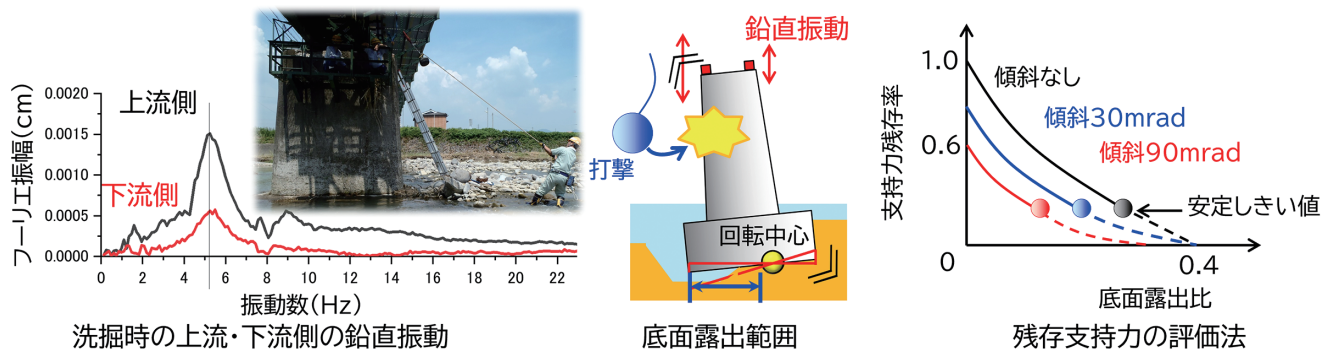


図5 構造物の評価技術（迅速な災害復旧のための橋脚の性能評価法）

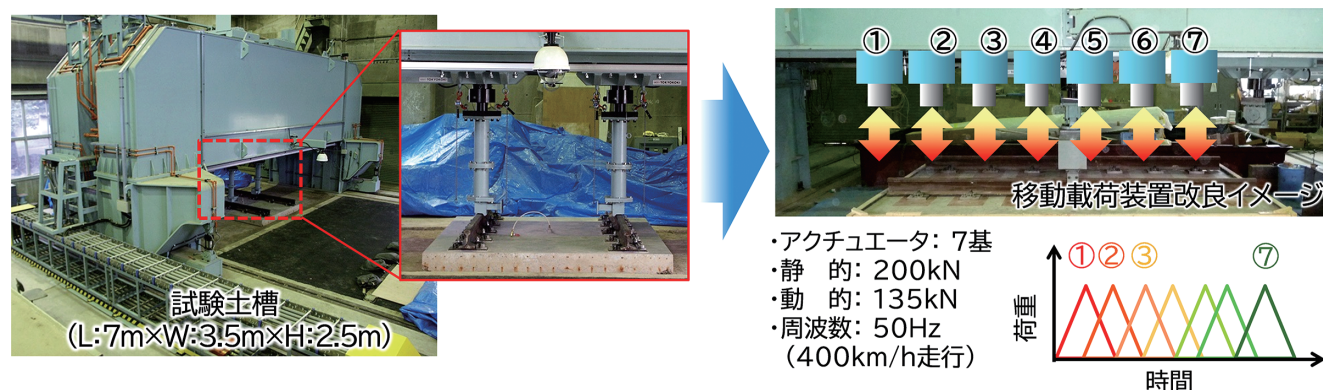


図6 軌道のフィジカル技術の高度化(総合路盤試験装置の改良)

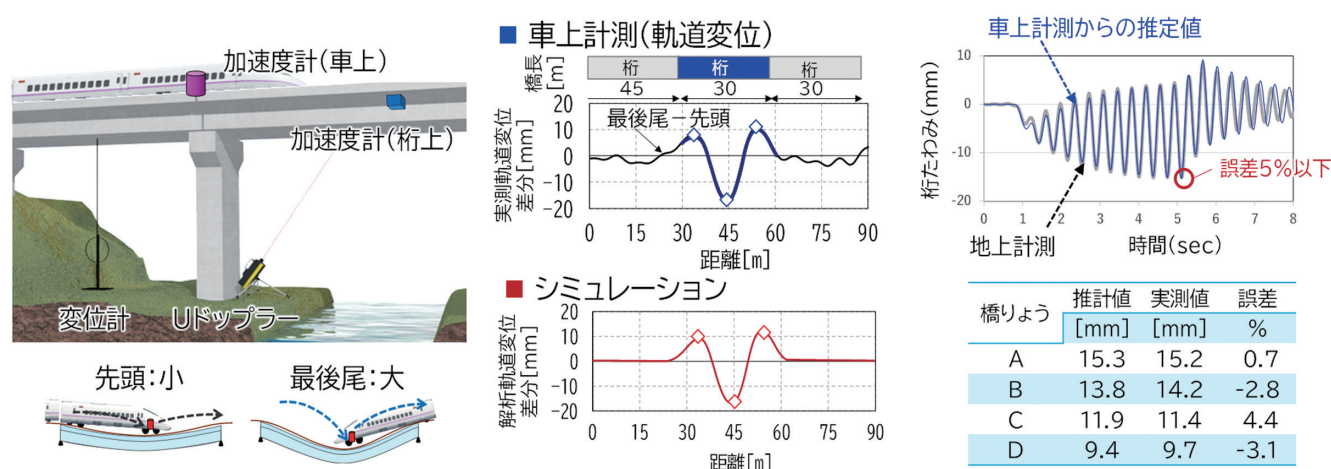


図7 構造物の計測技術とシミュレーションの融合(橋りょうのたわみ量の推定)

高度化がある。軌道分野の研究開発では、図6に示す実物大の軌道や路盤に対して列車荷重を連続的に載荷できる総合路盤試験装置により、軌道の変状や補修工法を評価している。本試験装置の活用例として、路盤層にあらかじめ敷き詰めたバラストにグラウトを充填することで、施工間合いの2～3時間で、高剛性の路盤改良層を構築する工法⁶⁾を開発した。

総合路盤試験装置については、2基のアクチュエータによる定点載荷であるが、図6に示すようにアクチュエータを多軸化し、移動荷重を模擬できる載荷装置への改良を計画している。改良後は、アクチュエータを現状の2基から7基に増設し、7基のアクチュエータの載荷を制御することで、時速400km/hでの車輪移動を模擬できるようになる。今後は、新たな総合路盤試験装置を活用し、軌道や路盤に対する変状評価、対策工の開発を行う。

4.3 計測技術とシミュレーションの技術融合

②Fusion Promotion: 技術融合の取り組みの例として、列車の走行安全とメンテナンスの省人化に関する橋りょうのたわみの計測技術とシミュレーションの技術融合がある。

橋りょうのたわみは、橋りょうの健全度評価において、重要な指標となる。ひび割れ等の変状増加により、剛性が低下するとたわみが増大し、乗り心地や走行安全性を脅かす。また、剛性の低下にともなって、列車走行時に振幅が急増する共振が発生する場合がある。このような要注意橋りょうは、たわみを計測する必要があり、変位計やUドップラー等の地上からの計測技術や桁上に設置した加速度計から推定する計測技術が開発されてきた。しかし、これらの計測技術は、計測に多大な時間と労力を要するため、車上計測により共振する橋りょうを抽出する方法を開発した。この計

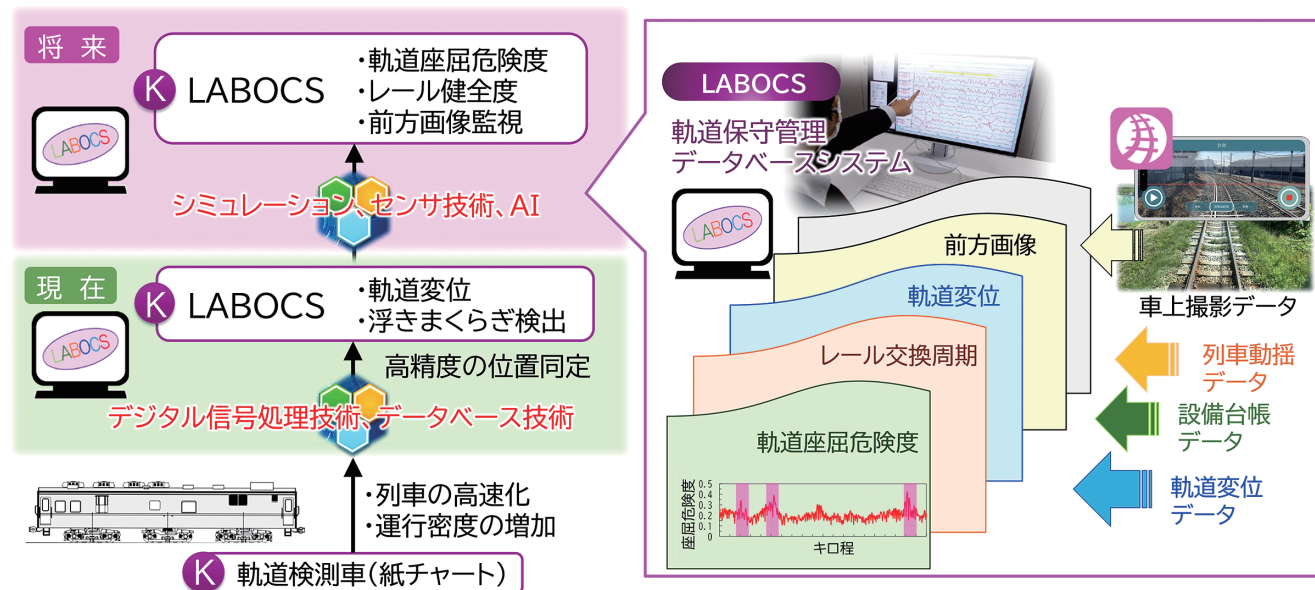


図8 LABOCSにおけるナレッジの活用と更新

測技術により、共振する橋りょうが抽出できるようになったが、たわみ量の絶対値の推定はできない。

そこで、車上計測で得られた軌道変位とシミュレーションで得られた軌道変位から、たわみ量を算出する方法⁷⁾を開発した。図7に示すように、車上計測で得られた最後尾と先頭車両の軌道変位の差分の3つのピークに着目し、シミュレーションにおけるピークと一致するように固有周期と減衰定数を同定する手法を開発した。そして、同定された固有振動数と減衰定数を用いて走行シミュレーションを行うことで、橋りょうのたわみ量の絶対値を算定することが可能になる。地上計測と比較したところ、誤差5%以内で精度よくたわみの絶対値を推定できることを確認した。本手法の適用範囲は、単純桁であるが、今後は、連続桁や橋台裏の背面盛土の沈下による支承のあり検知等への拡大を目指している。このように計測技術とシミュレーションを融合した独創的な手法のさらなる高度化に取り組んでいる。

4.4 LABOCSにおけるナレッジの活用と更新

③ Knowledge Application：ナレッジの活用に関する軌道分野の取り組みの例として、図8に示す列車の走行安全とメンテナンスの省人化に関するLABOCS⁸⁾がある。

LABOCSでは、各検査データのデジタル信号処理技術やデータベース技術により、軌道変位の計測や浮きまぐらぎの検知が行われている。現在、軌道のデジタルメ

ンテナンスツールとして拡張するため、シミュレーション、センサー技術、AIを活用した軌道部材の状態評価法等の研究成果の実装を進めている。このうち、軌道座屈危険度⁹⁾の評価では、軌道検測車に搭載されたLiDARセンサーから道床形状を把握する手法と、軌道の高低変位から浮きまぐらぎを推定する手法を組み合わせ、道床横抵抗力を推定し、それを基に軌道の座屈発生温度を推定する。また、レール健全度¹⁰⁾の評価では、軌道検測で得られるまぐらぎの浮き量やレール頭頂面凹凸、およびシミュレーションで得られた簡易推定式により、レール応力を推定する。一方、経年レールを用いた疲労試験より疲労限度を求め、これらの結果からレールの寿命を推定する。さらに、軌道座屈危険度やレール健全度の評価に加え、携帯情報端末を活用した列巡視支援アプリ Train Patroller¹¹⁾で取得した前方画像により、列車の走行安全に影響する要因を抽出する機能を開発する。

このように、これまで蓄積されてきたナレッジを新しい研究成果で更新し、LABOCSを継続的に高機能化することで、列車の走行安全とメンテナンスのさらなる省人化を目指す。

4.5 技術基準におけるナレッジの活用と更新

③ Knowledge Application：ナレッジの活用に関する構造物分野の取り組みの例として、図9に示すメンテナンスに関する技術基準がある。

構造物のメンテナンスについては、メンテナンスの

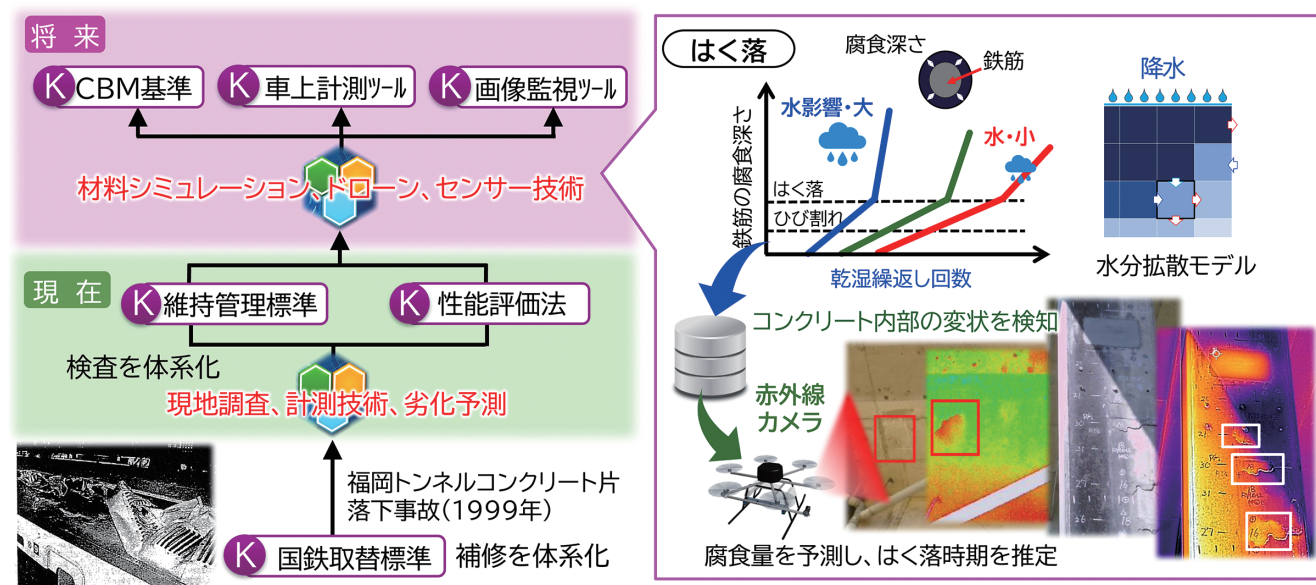


図9 技術基準におけるナレッジの活用と更新

ナレッジの蓄積である取替標準¹²⁾が国鉄時代に制定され、補修方法が体系化された。そして、国鉄民営化後、1999年に山陽新幹線福岡トンネルにおいて、走行中の新幹線にコンクリート片が落下、衝突する事故が発生し、コンクリートの耐久性が社会問題となった。それを受け、2004年に鉄道構造物等維持管理標準¹³⁾（以下、維持管理標準）が制定され、検査が体系化された。維持管理標準の制定にあたっては、大規模な構造物の現地調査が実施された。調査では、様々な計測技術や、コンクリート中の鉄筋腐食等の劣化予測法、構造物の性能予測法が開発された。維持管理標準の制定から20年以上が経過した現在、材料のシミュレーション技術やドローン等の各種調査技術、赤外線等のセンサー技術が大きく進歩している。例えば、劣化予測に用いる鉄筋腐食速度については、調査結果をもとに、安全側に設定したものであるが、コンクリート内部に分布する水分量の経時変化を拡散理論による水分移動解析¹⁴⁾を活用することで、環境に応じた鉄筋腐食速度や腐食開始時期を精度よく算定できる可能性がある。また、ドローンやセンサーの性能も飛躍的に向上したことから、目視では確認できないコンクリートの浮きを赤外線カメラで検知することができるようになる。これらの技術を組み合わせることで、コンクリートのはく落時期を精度よく予測することが可能になり、検査周期の延伸や労力を要する打音調査の削減が期待できる。

このように、これまで蓄積されてきたナレッジを新

しい研究成果で更新し、コンクリート構造物の性能予測技術を社会実装することで、メンテナンスのさらなる省人化を目指す。

5. おわりに

鉄道の安全性向上とメンテナンスの省人化においては、フィジカル技術の高度化が課題であるが、独創的な試験装置を活用、改良することで、メカニズム解明の深度化と新技術の開発を強化する。また、ビックデータのメンテナンス実務での活用には、理論的な検討・検証が課題であるが、計測技術とシミュレーションの技術融合により新たなソリューションを提案し、研究開発を加速する。さらに、社会実装にあたっては、高度な技術の一般化と活用、得られる技術的知見の再活用が課題であるが、軌道保守管理システムや構造物の技術基準を中核のナレッジとして、継続的に高機能化する。

このように、鉄道総研では、研究開発のコア技術の高度化を推進し、持続可能な鉄道システムの構築を目指す。今後とも、ご支援と協力をお願いしたい。

参考文献

- 1) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（軌道構造），丸善出版，2011

- 2) ISO/TS 18973:2025, Railway infrastructure — Rail fastening systems — Two directional test method for resistance to repeated loading, 2025
- 3) 山岡大樹, 弟子丸将, 玉川新悟: 既設PCまくらぎに適用可能な無螺締板ばね式レール締結装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.38, No.12, pp.1-46, 2024
- 4) 松丸貴樹, 小島謙一, 館山勝: 浸透水の影響を受けた盛土の地震時挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集C, Vol.70, No.1, pp.135-149, 2014
- 5) 中島進, 佐名川太亮, 小松灯, 横山大智: 洗掘で被災した河川橋りょうの残留支持力の推定法, 本鉄道施設協会誌, 第62巻, 第10号, pp.47-49, 2024
- 6) 伊藤壱記, 桃谷尚嗣, 木次谷一平: 既設線省力化軌道と同時に施工可能な路盤改良工法の開発, 鉄道総研報告, Vol.34, No.4, pp.1-10, 2025
- 7) 松岡弘大, 服部紘司: 車上計測された軌道変位に基づく共振橋りょうの桁たわみ推定法, 鉄道総研報告, Vol.39, No.10, pp.1-10, 2025
- 8) 古川敦: パソコンで軌道を管理する-LABOCSの開発-, RRR, Vol.73, No.6, pp.16-19, 2016
- 9) 西宮裕騎, 中村貴久: 車上計測データを活用した軌道座屈安定性の評価手法, 日本鉄道施設協会誌, Vol.63, No.9, pp.40-43, 2025
- 10) 細田充, 高橋信貴, 佐野国光, 弟子丸将: レール応力に影響を及ぼす浮きまくらぎやレール凹凸の発生状態に着目した経年レールの疲労寿命評価, 日本機械学会論文集, Vol.91, No.941, 2025
- 11) 田中博文, 趙博宇, 蘇迪, 長山智則: 携帯情報端末を活用した低コストな列車巡視支援方法の開発, 鉄道総研報告, Vol.39, No.1, pp.21-48, 2025
- 12) 日本国有鉄道施設局土木課: 土木構造物の取替の考え方, 日本鉄道施設協会, 1974
- 13) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編), 丸善出版, 2007
- 14) 橋本龍, 渡辺健: 水分状態と骨材・鉄筋による内部拘束を考慮したRC断面の収縮解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.47, No.1, pp.1794-1799, 2025