

鉄道構造物の維持管理と検査・診断技術

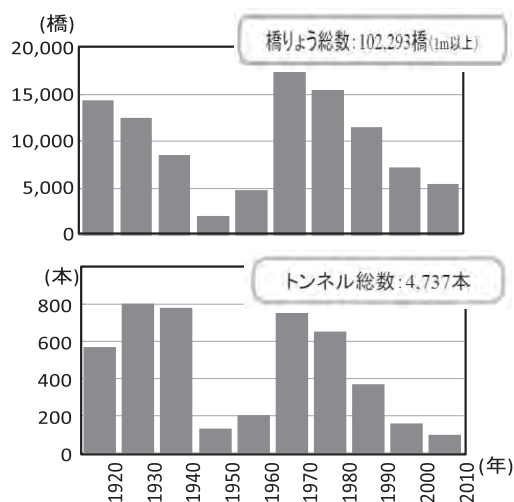
小 島 芳 之

鉄道構造物の検査・診断技術は、鉄道の将来にわたる安全・安定輸送を維持・向上させる上で必要不可欠な技術である。本稿では、まず、鉄道構造物の維持管理と検査・診断の考え方を示した上で、検査・診断技術の現状を概説し、構造物の状態監視システム、健全度診断法・変状予測法、維持管理 DB システムを取り上げて状態監視保全を確実に進めるために鉄道総研が行ってきた研究開発成果の一端とこれからの展開などについて紹介する。

キーワード：鉄道構造物、維持管理、検査・診断、研究開発、橋りょう、高架橋、土構造物、トンネル

1. はじめに

鉄道は、構造物、軌道、電気設備、通信設備等の多様な施設群と車両で構成される複合システムであり、巨大な装置産業である。現在、鉄道事業者では、安全・安定輸送の維持・向上のために施設のメンテナンスに多くのリソースが投入されており、鉄道営業経費に占めるメンテナンス費の割合は40%に達している。構造物についていえば、路線の8割が土構造物、1割が橋りょう・高架橋、1割がトンネルで構成されている。図—1に示すように、橋りょう・高架橋とトンネル両者とも戦前と高度経済成長期に建設されたものが大半であり、平均経年は各々60年と64年に達しており、100年を超えているものも少なくない。



国交省鉄道局調べ(2012年)をもとに作成

図—1 橋りょう・高架橋とトンネルの経年分布

今後、経年を積んだ鉄道施設が更に増えてゆけば、そのメンテナンスに一層多くのリソースが必要になることは必定である。熟練技術者の減少と少子高齢化の影響も考えれば、メンテナンス技術の高度化・システム化により業務の効率化を進めることは、鉄道事業者の喫緊の課題であるといえる。

本稿では、鉄道構造物を対象とした維持管理と検査・診断技術の現状を概説した上で、鉄道総研が実施している検査・診断技術に関する研究開発の一端を紹介する¹⁾。

2. 鉄道構造物の維持管理の体系

一般に施設の保全の考え方には「事後保全」と「予防保全」がある。事後保全は、損傷を発見してから対策を講じる考え方で、予防保全は、計画的に検査を行って損傷が起こる前に対策を講じる考え方である。

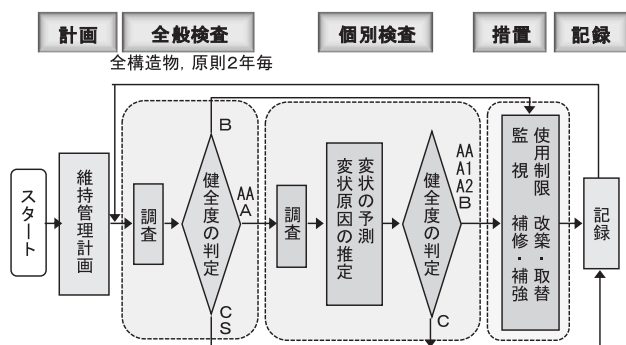
鉄道（日本国有鉄道）の分野では、他の分野に先がけて予防保全の概念に基づいた施設の維持管理が1970年頃から行われてきた。これは、定期的に検査を行い必要なものに対策を行う「時間計画保全」を柱としたものであり、構造物については「土木建造物取替の考え方」(1974年)として基準化された。また、構造物の検査を専門に実施する「構造物検査センター」という機関が全国の鉄道管理局に配置され、1987年の国鉄民営分割後もこの体制がJR各社に引き継がれた。

ところが、1999年に山陽新幹線のトンネル等で続発した深刻なコンクリート片剥落事故を教訓として、

鉄道構造物の維持管理のあり方が強く問われ、検査体制の見直しや新技術の開発・導入を飛躍的に進める契機となった。そして、2007年に国土交通省鉄道局により「鉄道構造物等維持管理標準」（以下「維持管理標準」という）^{2), 3)}が制定され、新たな鉄道構造物のメンテナンス体系が確立された。

一方、2012年の笹子トンネルでの天井板崩落事故を契機に、インフラの維持管理が喫緊の課題であることが全国で再認識され、安倍内閣「日本再興戦略」（2013.6）、アクションプラン「安全・便利で経済的な次世代インフラの構築」、国交省「インフラ長寿命化基本計画」（2013.11）など、国を挙げて推進体制が構築されたことは承知のとおりである。鉄道構造物でも事故に繋がりがかねない剥落事象の発生を完全に抑止するには至っていなかったことから、国交省鉄道局では「鉄道構造物の維持管理に関する基準の検証会議」が開催され、維持管理標準のメンテナンス体系を確実に実行するために、よりきめ細かな維持管理を行うべきこと等が2014年に提言された。

図一2は、維持管理計画からはじまり、原則2年毎に全構造物に対して行う全般検査、詳細調査を行う個別検査、措置（監視、補修・補強等）、記録までの一連の行為を供用期間中繰り返し行うという、維持管理標準に示されたメンテナンスサイクルの概略を示し



注）AA:緊急に措置 A1:早急に措置
A2:必要な時期に措置 B:必要に応じて監視
C:必要に応じて重点的に調査 S:変状なし

図一2 構造物の維持管理手順³⁾に加筆

たものである。この体系は、橋りょう・高架橋、土構造物、トンネル等の全ての鉄道構造物で共通に行うものである。鉄道事業者は、現在、この流れに沿って維持管理を行っており、これにより鉄道構造物の安全性は格段に向上したものと考えられる。

3. 鉄道構造物における検査・診断技術の現状

本稿の主題である「検査・診断技術」は、図一2に示した全般検査、個別検査、措置の一つである監視のための技術を指すものである。すなわち以下に示すようである。

- ①全般検査における調査（センシング・モニタリング）および診断（健全度判定）の技術
- ②個別検査における詳細調査、長期間の監視（モニタリング）および診断（健全度判定）の技術

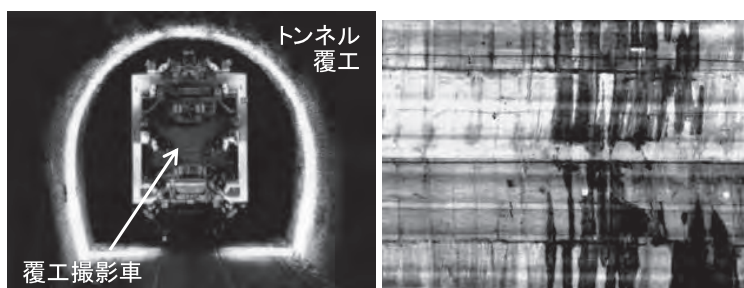
(1) 全般検査段階の調査技術

全般検査では、路線全長を対象として2年毎に目視とハンマー打音による調査を行って問題となる変状を抽出（センシング）するとともに、進行度合いを監視（モニタリング）し、診断（健全度判定）を行う。

目視とハンマー打音調査は、熟練すれば信頼性が高まるものの、非効率、定性的、個人差がある、記録に残しにくい等の課題があり、検査者の技術力向上や記録のDB化等とともに、検査の効率化、定量化、客観化が望まれている。近年では、主にトンネル覆工を対象として、目視の代替である表面撮影システム（たとえば図一3）や、打音調査の代替である非破壊検査システム（電磁波、赤外線、打診音、レーザー等）の開発・導入・実用化が大手事業者を中心に進められており、従来に比較して検査効率と精度が格段に向上した確な診断が可能になっている。

(2) 個別検査～監視段階の詳細調査、長期監視技術

個別検査では、全般検査で抽出された変状を詳細に調べた上でより細かく診断し、必要な措置を選択す



図一3 トンネル覆工の撮影状況と連続展開画像の例⁴⁾

る。また、措置の選択肢の一つとして、監視（モニタリング）が位置づけられている。

個別検査～監視段階では、構造物のひび割れ、変形、歪み、振動特性、材料特性等の専門的な調査と長期監視が、変状の状態に応じて適宜行われる。現状では、長期間にわたって自動計測による監視が行われることは少ないが、近年急速に技術が進展している ICT を活用して常時状態あるいは地震時等の異常時状態を想定した監視システムの開発が進められており、徐々に実用化されつつある。

（3）診断技術

全般検査、個別検査、監視における診断法は十分に体系化されておらず、熟練技術者の経験に頼っているのが現状である。鉄道総研では、定量的・客観的な診断が可能になるように、構造物の特性に応じた変状メカニズムや変状の長期予測に関する基礎研究や診断システムの開発を、橋りょう・高架橋、土構造、トンネルの構造物毎に地道に進めてきた。たとえば、橋りょう基礎の健全度を衝撃振動試験によって定量的に評価するシステム（IMPACT）が1980年代後半に開発され、以後改良を重ねながら現在でも多くの事業者にご利用頂いている。

以上の（1）～（3）で述べたように、現在の鉄道構造物の維持管理は、時間計画保全を一步進めた「状態監視保全」（状態を監視していて損傷に至る前に対策を講じる保全方法）の概念も取り入れたものになりつつある。しかしながら、このような維持管理技術の高度化の機運は、JR や地下鉄等の大手事業者を中心とした一部の事業者あるいは線区にとどまっているのが現状であり、一層の高度化・システム化を推進する必要がある。状態監視保全を鉄道全体で進めていくためには、更なる技術革新が求められている。

4. 鉄道総研の研究開発

（1）研究開発課題

現在、鉄道総研では、状態監視保全に基づいた維持管理を本格的に進められるように、これまでの研究実績を踏まえて、検査・診断～措置～記録のシステム化・定量化・効率化、構造物の延命化、全体コスト低減を実現できる次の課題に取り組んでいる。

- ① ICT、非破壊検査技術を活用したセンシング・モニタリングによる状態監視システムの開発
- ② 変状メカニズムの解明と定量的で客観的な健全度

診断法、変状予測法の開発

- ③ 経済的で延命効果の高い補修・補強、リニューアル技術の開発
- ④ 維持管理計画や記録の支援技術（DB 等）の開発、事業者間連携体制の構築

以降、検査・診断技術に関わる①、②、④の一端を紹介する。

（2）状態監視システム^{5), 6)}

鉄道総研では、構造物の状態監視法の研究を古くから進めてきたが、2005 年以降には研究を加速化し、安全性を支障する可能性のある箇所を監視する様々な無線センサとこれを適切に配置してデータ伝送を行う技術を開発し、状態監視ネットワークシステムを構築した。

図—4 は、橋りょう、高架橋、土構造物、トンネルの各構造物毎に開発した無線伝送手段を有する監視技術の代表例をまとめたものである。

この図の中央に、状態監視ネットワークシステムの伝送手段イメージも示す。センサの多くは、設置コスト低減の観点からバッテリー運用のものである。センサは必要なタイミングでウェイクアップし、データは、伝送頻度や遅延許容時間、伝送量等に応じて適切な手段により拠点まで伝送される。リアルタイム性もさることながら、巡回や列車通過時の車上収集方法を検討するなど、伝送コストに見合う手段を選択することが重要である。

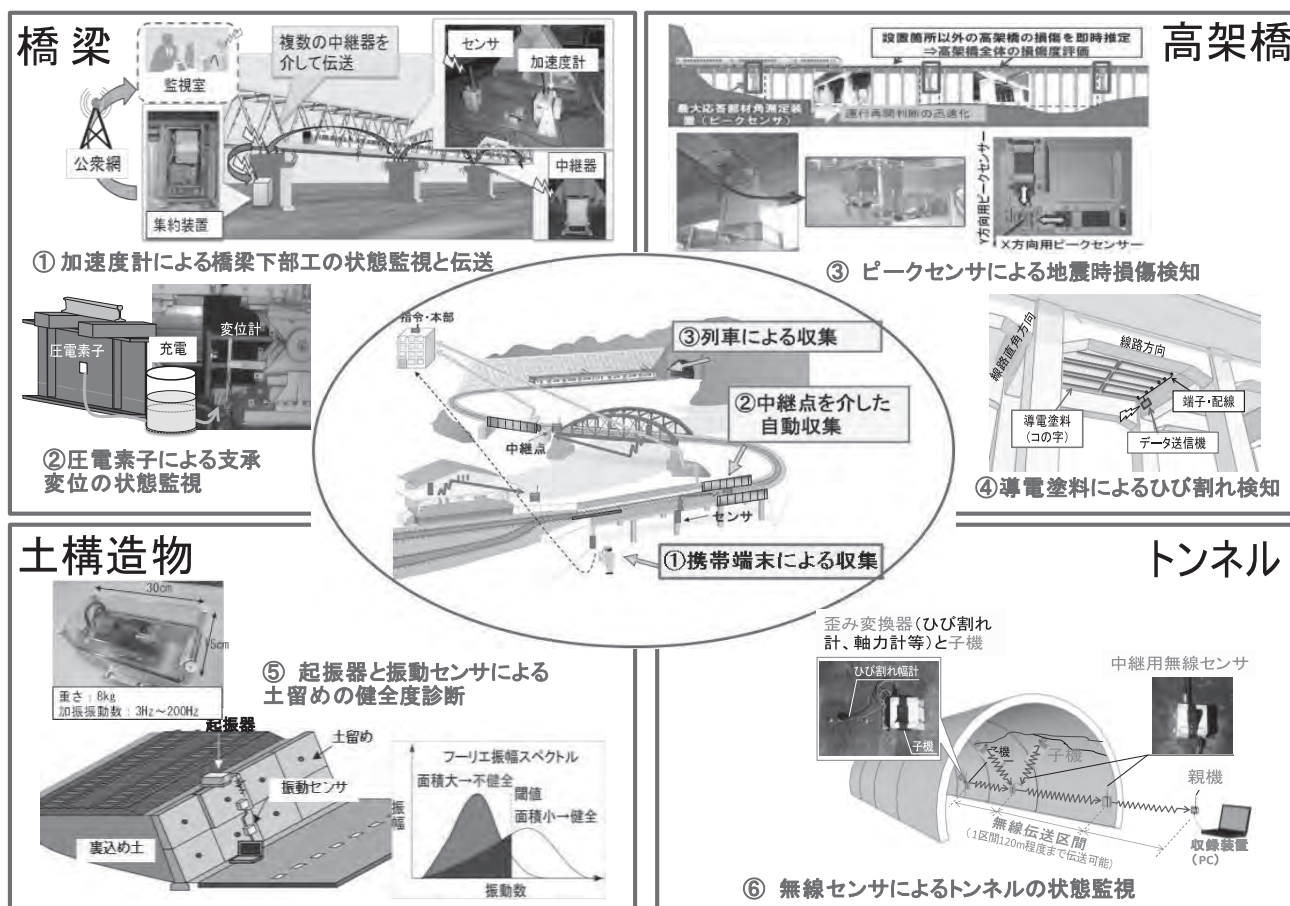
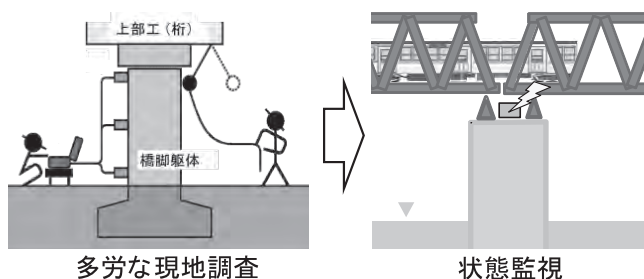
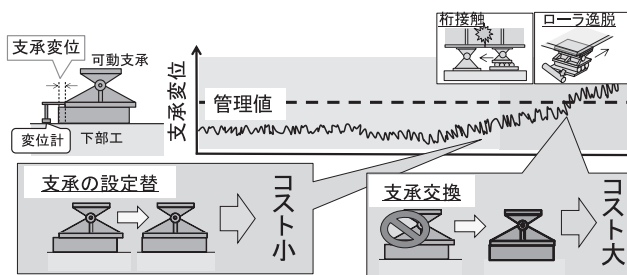
以下に、橋りょうとトンネルの例を紹介する。

（a）橋りょうの状態監視システム⁷⁾

前述の全般検査は主に目視により行われているが、検査員の技術レベルに差がある場合や目視自体が困難な箇所に対しては、健全度判定のバラツキ等が避けられない。そこで、健全度に影響する計測項目をセンサで定期的、長期的に監視し、構造物が限界状態に至る前に異常を検知して列車運行不能の回避と安全性向上を目指す状態監視システムを試作した。ここでは橋脚と支承の例を示す。

① 橋脚

橋脚は、特に河川橋りょう等において、洗掘や河床低下で橋脚を支持する地盤が侵食され、目視では確認困難な地盤中の橋脚の安定性について検査する必要がある。この安定性の程度は、固有振動数の大きさと評価する衝撃振動試験を行うことが一般的であるが、図—5 に示すように固有振動数の代わりとなる指標を用いてモニタリングすることで検査の省力化が期待できる。

図ー4 鉄道構造物の種々のモニタリング技術と状態監視ネットワークシステム⁶⁾ ⑥を一部修正図ー5 橋脚の検査の省力化⁷⁾図ー6 支承の対策コスト低減のイメージ⁶⁾

そこで、橋脚に常設する MEMS 加速度センサーにより常時計測可能な指標として、列車通過時に生じる橋脚の加速度振幅の比（橋軸直角方向加速度の最大振幅と橋軸方向加速度の最大振幅の比）と常時微動のパワースペクトルの面積比の二つの指標を提案した。図ー4①に示した状態監視・伝送システムを構築して2年間の計測を行った結果、提案した指標は固有振動数の代替指標として有効であることを確認した。

②支承

支承は、橋りょうの維持管理で特に注意すべき部材の一つである。変状には、支点の移動、可動不良、あおり等があり、いずれも進行した場合は支承変位に変化が表れる。目視では確認困難な支承変位の進行性を

把握できれば、対策の優先度を考慮して維持管理コストの低減が期待できる。

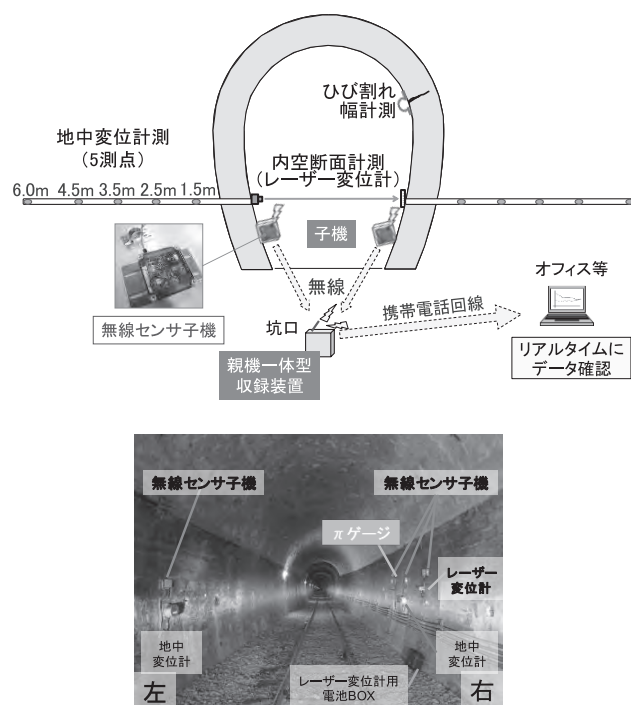
そこで、数分～数十分間隔で温度変化に対する支承変位を静的に測定したり、数日毎に列車通過時の数秒～数十秒間の支承変位を動的に測定することで、経年による支承の状態変化を確認するシステム（図ー4②、図ー6）を開発した。特徴の一つとして、列車通過時の鋼桁部材の振動を圧電素子で電気エネルギーに変えて測定することが挙げられる。これにより、運用に要する電池交換のコスト低減を図った。本システムを実橋りょうに設置し桁温度と支承変位を計測した結果、振動発電による電力のみで約2年以上計測が継続でき、支点の移動や支承の可動不良等の支承の状態変

化を把握できることが実証された。

(b) トンネルの状態監視システム^{8), 9)}

トンネルは、地圧の作用によりひび割れや変形が長期間進展し、対策を余儀なくされる場合がある。トンネルは延長方向に長い地中構造物なので、変状監視には多大な労力を要するが、低コストでメンテナンス頻度の少ない無線センサを開発し、計測データの長距離伝送を実現した(図—4⑥)。これまでにいくつかの変状トンネルの監視計測に適用されており、図—7は、在来線の単線断面のトンネル坑内に多種(ひび割れ幅、地中変位分布、内空断面)の無線センサを設置して監視計測を実施している例である。

また、得られた膨大な計測データに含まれる変動や



図—7 トンネルの監視システムの設置例⁹⁾



RC桁の劣化予測

誤差を除去する手法や、その結果をもとに、数値解析により変状の進行性を予測する手法の開発も進めているところである。

(3) 健全度診断法・変状予測法

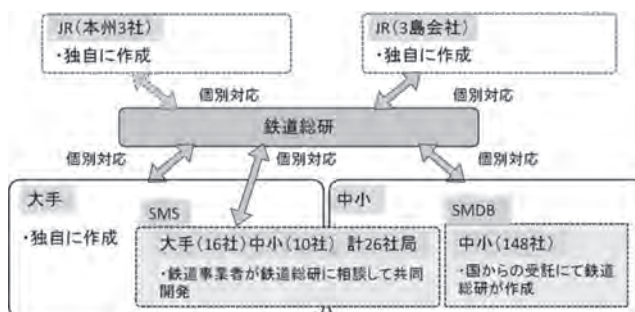
状態監視ネットワークシステムの構築とともに、変状メカニズムを解明し、シミュレーション手法を確立することは基本的に重要である。例えば、図—8に示すようなRC構造物(高架橋等)の劣化予測法、山岳トンネルの地圧による変状予測法を開発した。

また、画像等の検査情報と構造物の諸元、地形・地質、補修歴等の基本情報から変状を自動抽出し、原因推定や健全度診断を行うトンネル健全度診断システムも開発し実用化されている。

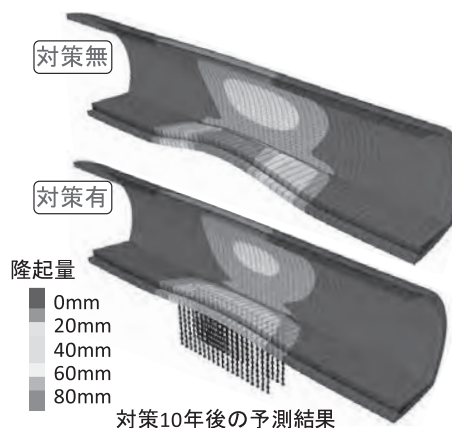
(4) DB システム^{6), 10)}

現在、鉄道構造物の維持管理DBは、図—9に示すように各々の事業者の実情に応じて構築され、運用されている。

図中のSMS(構造物管理支援システム)は、2002年度より14の鉄道事業者(大手民鉄、公営地下鉄)と鉄道総研が共同開発し、2006年度より運用開始さ



図—9 維持管理DBの開発状況⁶⁾



山岳トンネルの変状予測

図—8 変状予測シミュレーションの例⁵⁾

図一 10 構造物管理支援システム (SMS) ¹⁰⁾

れたDBシステムである。SMSの運営管理を実施する協議会を設立し、システムのバージョンアップ等の検討や維持管理に関する情報交換を進めています。2015年2月現在、27社が協議会に加盟している。SMSは、図一10に示すように、DBサーバー、クライアント事務所端末、現地で記録を行うタブレットPCのハードウェア構成となっており、図の下段に示すDBは、構造物毎に検査履歴等の情報がリンクする構成になっている。

5. 今後の展開

(1) 状態監視システムの高度化

近年注目されているスマートメーターなどに採用されたWi-SUNという次世代無線通信規格を用いて、鉄道施設のモニタリング実証実験を進めている¹¹⁾。また、膨大な取得データから設備状態を把握するために、複数データ間の関係に注目して状態変化を検出する手法の開発にも取り組んでいる。

画像情報を有効活用するための画像取得方法（見えない所や接近できない所へのドローンの活用等）、解析方法（画像の重ね合せ、ひび割れ抽出、進行性把握）の研究にも取り組んでいる。さらに、建設情報を維持管理段階でも活用できるDBシステム、CIMを活用し三次元CADをベースにした維持管理情報ネットワークシステムの構築に向けた研究開発を進めている。

(2) 健全度診断法・変状予測法の高度化

様々な環境条件下で発生する構造物の特性に応じた時間依存の変状メカニズムを解明し、シミュレーション手法を開発するという、診断・予測技術の高度化に資する基礎的な研究を、今後も継続して進めてゆく予

定である。

将来、これらの手法やAIを活用した診断システムを開発し、状態監視システムとDBシステムを包含した維持管理統合支援システムに発展させることが期待される。

(3) DBシステムの高度化

クラウド環境の広がりや蓄積媒体の低価格大容量化により莫大なデータが蓄積されれば、そのデータ分析によって、適切な維持管理計画の策定等に活用できるものと考えられる。例えば、健全度判定ルールをデータ分析によって作成し、維持管理に活用する手法の開発等が考えられる。

鉄道総研では、全国の鉄道事業者から検査記録等の情報提供をお願いし、その情報をもとにDBを構築して種々の研究開発を行い、その成果を実務に役立てて頂くことを目的とした「構造物維持管理技術情報検討会」の実施に着手した。この取組みにより、各種手引類や事例集の作成、判定アルゴリズムの精緻化、研究開発の必要な重点項目の抽出、更には事業者毎に所有している技術の共有や課題の解決、事業者間の協力体制の構築など、多くの成果が期待できる。

6. おわりに

鉄道施設のうち構造物に着目し、維持管理と検査・診断の考え方を概説した上で、状態監視保全を確実に進めるために鉄道総研が実施中の検査・診断技術に関する研究開発動向の一端を、今後の展開も含めて紹介した。

鉄道施設の検査・診断技術を向上させるには、ハード面のみならず、ソフト面も含めて幅広いアプローチ

が必要である。大手事業者のみならず中小事業者や地方交通線でも手軽に活用できる安価で簡易な技術を開発したり、維持管理のために多くの事業者が共有・協力できるしくみを作ることも重要であると考えている。今後もこのような視点を持って幅広く研究開発を進めたいと考えている。

延命化・リニューアル技術等の他の重要な維持管理技術には本稿では触れていない。延命化・リニューアル技術については、別稿¹²⁾をご覧頂ければ幸いである。

なお、本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

J C M A

《参考文献》

- 1) 小島芳之：鉄道施設の検査・診断技術の最前線，RRR，Vol.74，No.2，pp.4-7，2017.
- 2) 鉄道総合技術研究所編（国土交通省鉄道局監修）：鉄道構造物等維持管理標準・同解説，2007.
- 3) 市川篤司：鉄道構造物の新しい維持管理体系，鉄道総研報告，Vol.19，No.12，pp.1-5，2005.
- 4) 小島芳之，鶴飼正人：トンネルの健全度診断，RRR Vol.63，No.5，pp.14-19，2005.
- 5) 谷村幸裕：構造物の状態監視ネットワークによる維持管理，第28回鉄道総研講演会，pp.35-41，2015.
- 6) 小島芳之，野末道子：鉄道構造物の維持管理におけるITの活用，土木技術，Vol.71，No.5，pp.14-19，2016.
- 7) 阿部慶太，吉田善紀，仁平達也，野末道子：鉄道橋りょうの経年変化をモニタリングする，RRR，Vol.73，No.2，pp.8-11，2016.
- 8) 津野究，西金佑一郎：トンネルの健全性を診断する，RRR，Vol.74 No.2，pp.12-15，2017.
- 9) 森瀬喬士，嶋本敬介，津野究，川越健，幸田真也，坂本寛章：地圧を受ける変状トンネルにおけるモニタリングシステムの構築，第72回土木学会年次学術講演会Ⅲ-349，2017.
- 10) 菊地誠：構造物管理支援システムの開発，日本鉄道技術協会誌，Vol.51，No.12，pp.26-29，2008.
- 11) 岩澤永照，羽田明生，流王智子：鉄道現場におけるWi-SUNを利用した状態監視システムの適用可能性の検証（ITS研究会 交通センシング，通信，情報処理，一般），電気学会研究会資料，ITS，Vol.2015，No.23，pp.1-7，2015.
- 12) 小島芳之：鉄道構造物の延命化・リニューアル技術，建設機械施工，Vol.69，No.9，pp.64-68，2017.

〔筆者紹介〕

小島 芳之（こじま よしゆき）
公益財団法人鉄道総合技術研究所
構造物技術研究部
主管研究員

