

構造物分野の省人化技術

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、鉄道構造物の建設やメンテナンスにおける安全性の確保が不可欠である。しかしながら、少子高齢化にともなう生産年齢人口の減少や近年の働き方改革にともなう労働環境の変化により、鉄道事業に係る要員の確保が困難になりつつある。本講演では、構造物分野における省人化技術を紹介し、さらなる省人化のための今後の研究開発について概説する。

2. 構造物分野の現状と課題

鉄道構造物の建設やメンテナンスに係る要員の確保が困難になる一方、橋りょうやトンネル等の鉄道構造物の老朽化が進行している。また、最近では、自然災害の激甚化、頻発化で鉄道構造物が被災する事例が多く発生している。このように、鉄道構造物に係る業務

は、年々増加している。

鉄道構造物の安全性は、法令等に基づき確保されている。「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」¹⁾では、鉄道の建設と施設の保全に関する事項が示され、定期検査の周期等は告示に示されている。2001年改正の省令では、技術基準の性能規定化が示された。これ以降の技術基準の改訂では、順次、性能照査型の設計法に移行し、現在では、すべての技術基準が性能照査型の設計法へ移行した。しかしながら、鉄道構造物の設計実務では多くの仕様規定が残されている。例えば、コンクリート構造物の建設では、性能照査の前提となる構造細目が存在し、複雑な鉄筋の組立て等、これに対応できる熟練技能者の確保が課題となっている。また、メンテナンスでは、技術基準において、2年ごとの定期検査が定められており、目視と打音を基本とした調査、人の経験に基づく判断を基本とした診断は、いずれも、人が労力と時間をかけて実施するため、検査員の確保が課題となっている。



図1 建設分野における省人化技術の例

このような状況において、鉄道システムを維持、発展させていくためには、鉄道構造物の安全性を確保したうえで、建設とメンテナンスを省人化する必要がある。

3. 省人化に関するこれまでの取り組み

3.1 建設に関する省人化技術

設計や施工に関する最近の省人化技術の例を図1に示す。橋りょう、盛土、トンネル等の各種鉄道構造物を対象に、デジタル技術を用いた施工方法や建設機械を用いた施工方法が開発されている。

「プレキャスト高架橋の設計・施工」²⁾は、性能設計により、新技術を適用して施工を省人化した事例である。コンクリート構造物の建設では、場所打ちコンクリートによる労働集約型の施工から、プレキャスト構造を用いた機械施工の適用により施工の省人化が期待できる。プレキャスト構造を適用するおもな目的は、工期短縮や狭隘箇所での施工であるが、工場製作の部材を現地で組み立てるため、施工が省人化できる。ま

た、部材は、工場製作となるため、品質向上やそれに伴うメンテナンス性が向上する。北陸新幹線高架橋への適用にあたっては、柱と梁の接合部にモルタルスリーブ継手を用いた接合方法を開発した(図2、図3)。適用にあたっては、載荷試験により性能確認を行い、設計・施工指針³⁾を整備した。

3.2 メンテナンスに関する省人化技術

メンテナンスに関して、鉄道総研で取り組んだ最近の省人化技術の例を図4に示す。橋りょう、盛土、トンネル等の各種鉄道構造物を対象に、デジタル技術を用いた各種検査手法を開発した。

「トンネルの検査支援システム」^{4),5)}は、デジタル技術を活用して、トンネルのメンテナンスを省人化した事例である。トンネルの定期検査は、事務所での画像確認や、変状マーキング、健全度判定等に多くの労力と時間を要する。また、暗いトンネル内で、過去の検査結果と現地の変状を突合せて、目視や打音の実施箇所を特定しなければならない。そこで、事務所での作業



図2 北陸新幹線プレキャスト高架橋

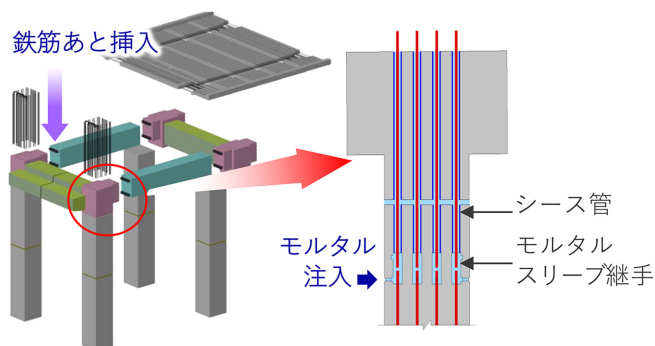


図3 モルタルスリーブ継手を適用した高架橋



図4 メンテナンス分野における省人化技術の例

の省人化のため、変状抽出および健全度判定アプリを開発した。このアプリでは、AIが変状画像を自動マーキングし、健全度判定を行い、目視や打音の実施箇所である要注意箇所を選定する。また、トンネル内での作業の省人化のため、要注意箇所の投影装置を開発した。移動式のプロジェクションマッピング装置で、トンネル内に要注意箇所を鮮明に表示し、検査を効率化する（図5）。変状抽出・健全度判定のアプリは、鉄筋露出や錆汁等の多種多様な変状を90%以上の精度で抽出できることを確認した。アプリの使用で、事務所作業を1/50以下に削減できる。さらに、要注意箇所投影装置は、暗いトンネル内において調査箇所をあらかじめ投影できるため、現場での詳細な指示が不要となり、現地調査に要する時間を1/2以下にできる。なお、山岳、シールド、開削等の様々なトンネル形状に対応可能で、アプリと投影装置は今年度の販売を予定している。

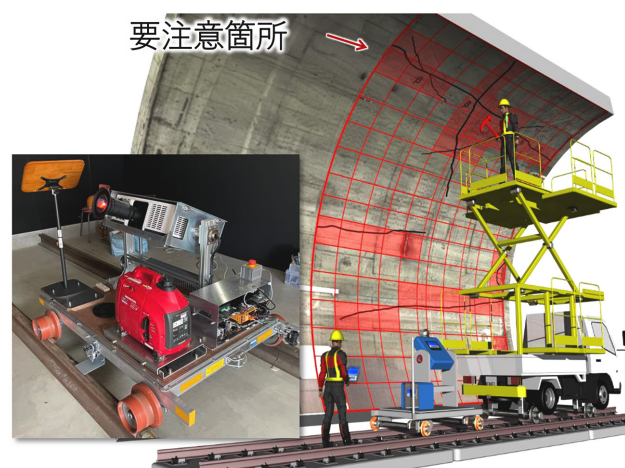


図5 トンネル要注意箇所投影装置

4. 省人化のための研究開発

4.1 建設分野において果たすべき役割

構造物の建設分野において、鉄道総研が果たすべきと考えている役割を図6に示す。

Forefrontに位置づけられる構造物のシミュレーション技術の例である「性能設計による設計・施工」⁶⁾では、有限要素解析（以下、FEM）による構造細目の解消や鉄筋配置の最適化で施工を省人化する。コンクリート構造物は、技術基準等に示された構造細目にしたがって鉄筋を配置するが、耐震基準の強化に伴い鉄筋量が増大している。特に、ラーメン高架橋の接合部においては、骨組み解析の前提となる、剛度を確保するため、鉄筋が輻輳し、鉄筋組立には、熟練の技能者が必要となる。そこで、FEMを用いて構造物の性能

におよぼす鉄筋配置の影響を評価することで、鉄筋の最適化、簡素化が可能となる。ここでは、接合部の大外に配置する軸方向鉄筋の曲げ内半径を 3ϕ （ ϕ ：鉄筋径）と 10ϕ とした解析例を示した（図7）。曲げ内半径により接合部の応力状態が大きく異なることがわかる。なお、FEMの結果は、実験結果との比較により、十分な精度を有していることを確認している（図8）。FEMにより精度よい性能評価が可能になることから、性能に基づいた鉄筋配置を行うことによって、鉄筋を簡素化し、施工の省人化が期待できる。

Forefrontに位置づけられるデジタル技術を用いた施工方法の例である「盛土の施工」⁷⁾では、デジタル技術で労力と時間のかかる盛土の品質管理のための現場試験を省人化する。盛土の施工では、転圧後、所定の地点で密度試験および剛性確認の載荷試験することが技術基準で定められている（図9）。構造物の性能を確保するため必要な試験であるが、多地点での現場試験が求められており、技能者の確保が困難になりつつある。そこ

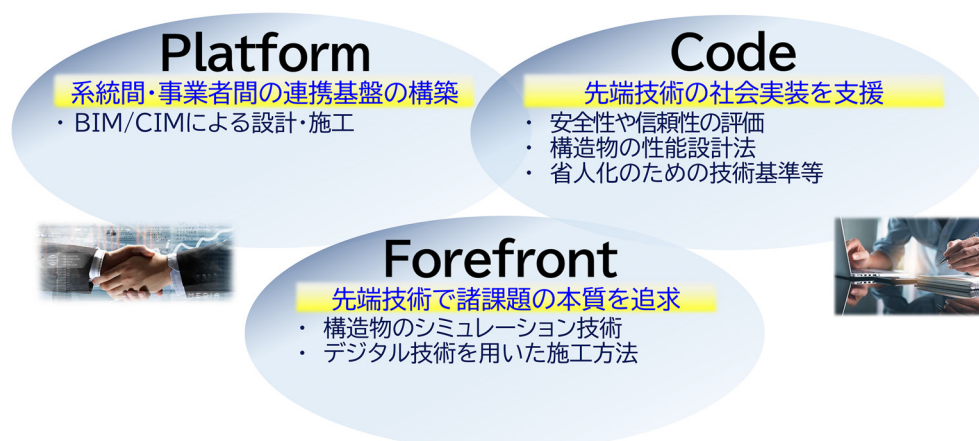


図6 建設分野における鉄道総研の果たすべき役割

で、転圧後の沈下量の推移から密度、剛性を推定し、現場試験を省略することで、施工管理を省人化する。また、3Dスキャナにより沈下量を面的管理することで、施工不良箇所の抽出精度が向上する。さらに、将来的には、GPSによる自動運転との連携により、さらなる省人化が可能になる。このようにデジタル技術を活用した施工管理の推進で、盛土の施工の省人化が期待できる。

Platformに位置づけられる「BIM/CIMによる設計・施工」⁸⁾では、BIM/CIM (Building/ Construction Information Modeling) の活用により、計画から設計、施工、メンテナンスまでの円滑な情報伝達で、各段階の業務を省人化する。設計段階では、BIM/CIM 情報から、設計で用いる骨組みモデルを自動作成すること

ができる。鉄道総研では、BIM/CIMと骨組みモデルを用いた解析ツールの連携手法を開発し、プロトタイプのプログラムを公開している。将来的には、性能設計に有用なFEMとの連携手法の開発を目指す。施工段階では、3次元の鉄筋情報を鉄筋組立の手戻り防止等に活用できる。

4.2 メンテナンス分野において果たすべき役割

構造物のメンテナンス分野において、鉄道総研が果たすべきと考えている役割を図10に示す。

Forefrontに位置づけられる変状計測技術の例である「ドローンによる調査」⁹⁾では、ドローンによる変状情報の取得を自動化、高速化し、調査を省人化する。鉄道総研では、ドローンに関する研究開発を実施してきたが、最近のドローンの飛躍的な技術進歩を踏まえて、定期検査への適用を目指す。具体的には、コンクリート構造物を対象に、ひび割れ、かぶり、浮き等の変状

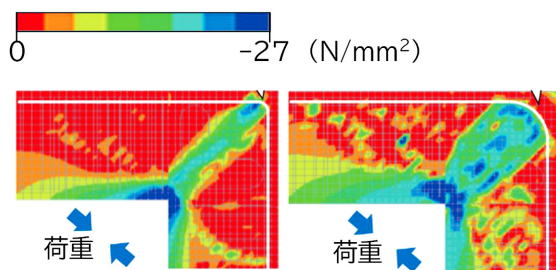


図7 FEMによる接合部の応力状態 (左: 3φ 右: 10φ)

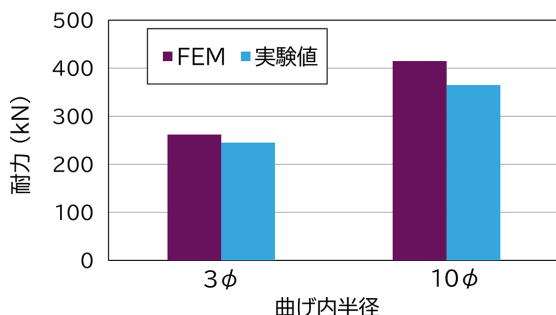


図8 FEMおよび実験による接合部の耐力

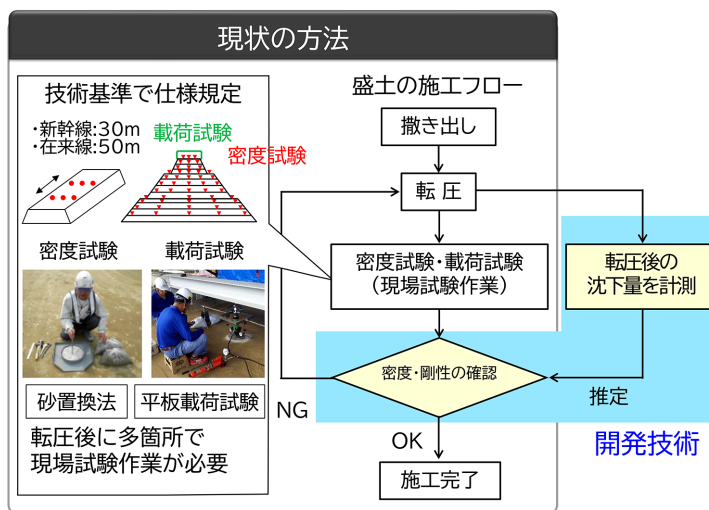


図9 盛土の施工フロー

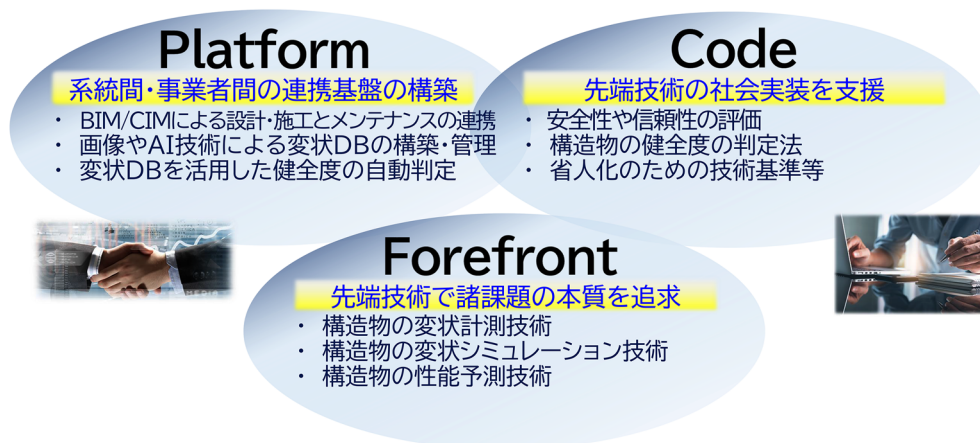


図10 メンテナンス分野における鉄道総研の果たすべき役割

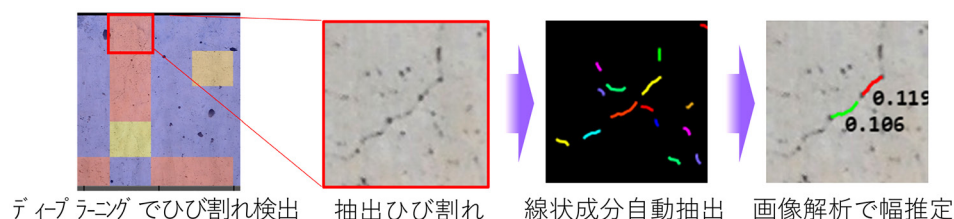


図11 デジタル画像によるひび割れ幅の推定

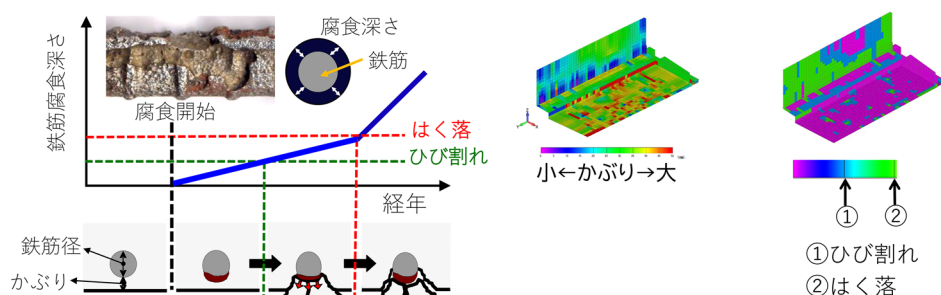


図12 シミュレーションによるコンクリート構造物の劣化予測

情報を取得する。ひび割れについては、AIによりひび割れ幅を計測する。これまでの研究⁹⁾により、ディープラーニングでひび割れを検出し、画像解析によるひび割れ幅の算定する要素技術を確認した(図11)。今後は、性能予測に求められる取得データの精度、構造物における計測位置、計測頻度を検討し、実務でのドローンの運用や計測方法を確立する。そして、定期検査へ適用することで、調査の省人化が期待できる。

ForefrontおよびCodeに位置づけられる変状シミュレーション、性能予測に対応する「新設構造物の診断と検査周期延伸」¹⁰⁾では、BIM/CIMの活用とシミュレーションによる性能予測で定期検査を省人化する。設計情報、つまりBIM/CIM情報から、FEMモデルを自動作成するツールを開発する。また、かぶり等のしゅん工情報をBIM/CIMを介して、FEMモデルに反映する。さらに鉄筋の劣化モデルを用いてコンクリートのはく落を予測する(図12)。経年による鉄筋腐食に起因するひび割れ、はく落、さらには、残存耐力を予測することが可能となり、定期検査の周期延伸の可否が判断できる。このように、仕様規定型のメンテナンスから性能規定型のメンテナンスに移行することによって、メンテナンスの省人化が期待できる。

Platform、ForefrontおよびCodeに位置づけられる変状データベースの構築、性能予測に対応する「既設構造物の診断と検査周期延伸」では、データベースの活用による性能予測で定期検査を省人化する。新設構造物では、シミュレーションに基づく性能予測で省人化を目指

すが、既設構造物は、詳細な設計・施工の情報がないため、シミュレーションが行えない。既設構造物においては、ドローン等を用いて収集した変状情報や過去の検査記録をもとにしたデータベースとAIを活用した変状の進展予測や性能予測で省人化を目指す。この手法は、地域鉄道への適用も想定している。データベースによる性能予測では、学習データの情報量が重要となるため、鉄道事業者間のデータ共有、連携が不可欠となる。鉄道総研では、連携の体制づくりに取り組むことを考えている。また、診断では、維持管理標準の健全度判定例を用いる場合が多いが、目視を前提とした現在の判定基準をデジタル情報に対応した判定基準にする必要がある。さらに、デジタル情報から自動で健全度判定を行う手法の開発を目指す。これらを実現するためには、変状情報のデータベースの構築が前提となる。

Codeに位置づけられる「省人化のための技術基準等整備」では、調査や診断の省人化技術を社会実装するため、技術基準等整備を支援する。目指すべき技術基準の方向を表1に示す。調査では、目視と打音の調査から、カメラによるデジタル画像やドローンを使用した調査を目指す。診断では、健全度判定例や人の経験に基づく判断から、新設構造物を対象としたシミュレーションによる判断、既設構造物を対象とした変状データベースとAIによる判断を目指す(図13、図14)。現在の技術基準では、変状をグレード分類し、おおよその性能を把握し、安全側の基準値で健全度を判定している。安全性に問題はないが、正確な性能は確認で



図13 変状データベースによる診断で性能予測

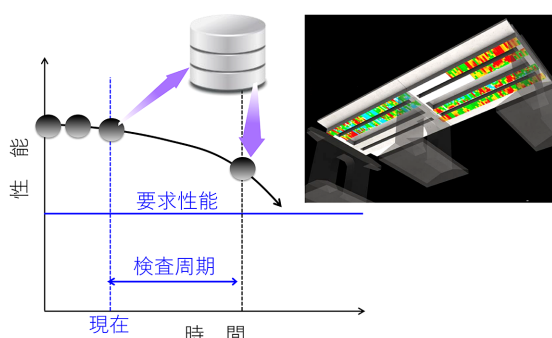


図14 シミュレーションによる診断で性能予測

きないため、すべての構造物に2年ごとの検査を行っている。そのため、経年の増加にしたがって、詳細検査や補修・補強の負荷が増大する。一方、性能予測に基づいた検査では、構造物の現在と将来の性能が把握できるため、周期延伸の可否の判断ができる。このような方法を推進するためには、性能予測を実施するためのツールを整備し、性能予測の作業負荷を低減することが不可欠となる。あわせて、これらの新技術を社会実装するための技術基準等の整備が求められる。

5. おわりに

鉄道構造物の建設では、FEMによる性能設計、デジタル技術による施工管理、BIM/CIM等のプラットフォームと連携した設計と施工を推進し、省人化を実現する。メンテナンスでは、デジタル技術による調査、シミュレーションやデータベースを活用した性能予測と検査周期の延伸で省人化を実現する。また、新技術を社会実装するための技術基準等の整備の支援によって、持続可能な鉄道システムを実現する。鉄道総研では、今後も構造物分野の省人化のための研究開発を推進する。引き続き、ご支援とご協力をお願いしたい。

表1 技術基準の目指すべき方向

	現在の技術基準	目指すべき方向
調査	目視、打音	デジタル画像、ドローン等
診断	健全度判定例 人の経験	新設構造物： シミュレーション等 既設構造物： 変状データベースと AI等
検査 周期	すべて2年	性能予測に基づいて 設定

参考文献

- 1) 土木関係基準調査研究会：解説 鉄道に関する技術基準（土木編，第四編）2024
- 2) 喜多直之，三倉寛明，岡本大，田所敏弥：建築プレキャスト工法の鉄道高架橋への展開，コンクリート工学，Vol.55，No.9，pp.815-819，2017
- 3) （公財）鉄道総合技術研究所：モルタルスリーブ継手を用いたプレキャストラーメン高架橋の設計・施工指針，2015
- 4) 仲山貴司，山下雄大：ディープラーニングを用いたトンネルの健全度自動判定システム，日本鉄道施設協会誌，Vol.62，No.10，pp.51-54，2024
- 5) 清水達貴，仲山貴司，三輪陽彦，大原勇，石井貴大，野城一栄：トンネル検査時要注意箇所投影装置の検証，トンネル工学報告集，Vol.33，2023
- 6) 鈴木瞭，中田裕喜，渡辺健：L型RC柱梁接合部の変形や隣接部材の耐力に着目したハンチの設計に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.2，pp.337-342，日本コンクリート工学会，2024
- 7) 笠原康平，中島進，天野友貴，藤澤真一郎，木口峰夫：盛土転圧時の沈下量情報を用いた剛性評価法に関する一検討，第59回地盤工学研究発表会，地盤工学会，2024
- 8) 小西亮太，渡辺健，大野又稔，石橋奈都実：BIM/CIMと照査の連携によるRC構造物の設計作業時間削減の提案，JREA，Vol.67，Vol.1，pp.47594-47597，2024
- 9) 上半文昭，池田学，松岡弘大：ビデオカメラとドローンを用いた構造物検査技術の開発，鉄道総研報告，Vol.35，No.9，pp.41-46，2021
- 10) 土木学会：複合構造レポート，根拠に基づく構造成能評価のための点検・解析の技術体系を目指して，2022