

特集：既設構造物の維持管理・診断・補強技術

既設鉄道構造物の維持管理・診断・補強に関する最近の取り組み

神田 政幸*

Recent Research and Development on Maintenance, Diagnosis and Reinforcement of Existing Railway Structures

Masayuki KODA

Maintenance of existing railway structures is becoming more and more important for safe and stable transportation of railways. On the other hand, the severe meteorological disasters in recent years have caused enormous damage to railway structures and hindered railway operations. The technical issues surrounding railway structures are wide-ranging, including labor-saving measures for maintenance and management of existing railway structures, disaster countermeasures, and early recovery measures after disaster. In this paper, we outline the direction of research and development related to maintenance, diagnosis, and reinforcement of the existing railway structures that the Railway Technical Research Institute is working on, with showing examples of research and development.

キーワード：鉄道構造物，既設構造物，維持管理，診断，補強

1. はじめに

鉄道の安全・安定輸送のため、既設の鉄道構造物のメンテナンスの重要性は益々高まっている。一方、近年の激甚化する気象災害が鉄道構造物に甚大な被害をもたらし、鉄道運行に支障を及ぼす場合も生じている。鉄道構造物を取り巻く技術課題は、既設の鉄道構造物の維持管理の省力化・省人化策、及び事前の災害対策、災害後の早期復旧策と広範に及ぶ。

鉄道総研では新たな基本計画「RESEARCH 2025」のもと、自然災害を含む安全性の向上、及びデジタル技術による省力化・省人化に寄与する先端的な研究開発を2020年度より進めることとした。具体的には、データを基本としたシミュレーション・ネットワーク等のデジタル技術を応用した、異常時対応としての「災害対策技術（早期復旧技術を含む）」に寄与する研究開発のほか、平常時対応としての「維持管理技術」、「建設・改良技術」に寄与する研究開発を重点的に行うこととしている。

本展望解説では、これまで鉄道総研が取り組んできた

既設鉄道構造物の維持管理・診断・補強に関する最近の研究開発の例を概説し、最後に研究開発の実用化例として、構造変更による既設鋼橋梁の補強技術を示す。なお、本展望解説の詳細は、第340回鉄道総研月例発表会HP¹⁾を参照されたい。

2. 既設鉄道構造物の維持管理・診断・補強に関する研究開発

鉄道総研が取り組んできた既設鉄道構造物の維持管理・診断・補強に関する最近の研究開発の例を表1に示す。同表には、対象構造物・用途・キーワードも示した。橋梁・高架橋の維持管理の研究開発はNo.1, 2で、駅施設の診断・補強の研究開発はNo.3, 4で、土構造・トンネルの診断・補強の研究開発はNo.5~7である。以下では、No.1~No.7の研究開発を個々に概説する(図1)。

(1) 画像及びFEMを用いたRC桁のひび割れ発生要因分析²⁾

RC構造物の個別検査では、発生しているひび割れ等

表1 既設鉄道構造物の維持管理・診断・補強に関する最近の研究開発の例

No	研究開発名	対象構造物	用途	キーワード
1	画像及びFEMを用いたRC桁のひび割れ発生要因分析	橋梁・高架橋	個別検査	ひび割れ, 画像, FEM, 要因分析
2	3次元画像を活用した構造物目視検査支援システム	構造物全般	全般検査	3次元画像, 目視検査, SIM, 変状進行性
3	駅火災時の避難安全検証支援システム	駅施設	診断	火災, 避難安全性, 個人行動モデル, 旅客流動
4	吊り長さの短い駅舎天井の耐震改修工法	駅施設	補強	吊り天井, 角型鋼管による耐震補強, 騒音対策
5	粘着力を有する背面地盤から擁壁に作用する地震時土圧の算定方法	擁壁	診断・補強	粘着力, 地震時主働土圧, 遠心模型実験, 耐震補強
6	のり面工と地山補強材による既設盛土の耐震補強設計法	盛土・切土	診断・補強	のり面工の遮水性, のり面工・地山補強材の連結, 耐震補強
7	山岳トンネルの盤ぶくれメカニズムと対策の効果	トンネル	診断・補強	盤ぶくれ, モニタリング, 地山劣化法, 補強

* 構造物技術研究部長

の変状要因の推定が行われる。これは現在及び将来の構造物の性能を評価し、監視・補修や将来の補強の有無に繋げる維持管理上の必要不可欠な行為である。そこで、撮影画像からひび割れを自動抽出し、抽出結果を非線形有限要素解析により再現することで、変状要因（死荷重、列車荷重、温度、収縮・クリープの影響など）を推定可能とした。これにより微細なひび割れ情報（ひび割れの幅・長さ、発生位置、数量）から、将来の補修時期や補修範囲の決定に繋がるデータが得られる。

(2) 3次元画像を活用した構造物目視検査支援システム³⁾

鉄道構造物の全般検査は目視主体で行われ、変状箇所の写真と変状に関するコメントのみを記録する 경우가多い。そこで、画像から構造物の3次元画像を作成し、構造物の状態や周辺環境を3次元画像で直感的に確認でき、かつ変状抽出や記録作成を支援することができる目視検査支援システムを開発した。これは動画撮影した2次元画像データから Structure from Motion (SfM) を用いて、3次元画像を半自動で生成するシステムである。検査時期の異なる構造物を同一画面上で視覚的に直接比較できることや、過去の3次元画像をタブレット等で現場に持参し現況の構造物と比較することで、構造物の変状進行性の把握が可能となる。

(3) 駅火災時の避難安全性検証支援システム⁴⁾

駅の火災時における避難安全性は、一般的に建築基準法の仕様規定（避難口までの距離の制限など）を適用することで担保されている。しかしながら、列車の発着に合わせて多くの旅客が移動・滞留する駅では、法律で定められた最低限のレベルではなく、階段・エスカレータ・エレベータ等の駅設備のほか、誘導案内や運用面からもより安全な駅空間が求められる。そこで、火災発生時の煙の拡散シミュレーションと個人行動モデルを導入した旅客の避難流動シミュレーションを組み合わせることで、駅の旅客の避難安全性を検証するシステムを開発した。

(4) 吊り長さの短い駅舎天井の耐震改修工法⁵⁾

吊り長さの短い高架下駅舎天井では、天井裏空間の確保の観点から一般的な耐震改修工法である耐震ブレースの適用が困難である。また、天井裏空間を阻害せずに安価に耐震改修可能な工法はこれまで存在しなかった。そこで、このような高架下駅舎天井に対して、角型鋼管を用いた施工が容易で安価な耐震改修工法を開発した。加えて、高架下駅舎空間の快適性向上のために、同工法に併設可能な列車騒音対策の有効性を示した。これらは鉄道総研オリジナルの工法である。

(5) 粘着力を有する背面地盤から擁壁に作用する地震時土圧の算定方法⁶⁾

既設擁壁の背面地盤は粘着力を有する地盤材料で構築されていることが多い。この場合、L2地震動のような極めて大きな地震動に対して、従来のように粘着力の影



図1 既設鉄道構造物の維持管理・診断・補強に関する最近の研究開発の例

響を無視して擁壁の耐震診断、耐震補強を行うことは不合理となる場合がある。本研究では、遠心模型実験により解明した粘着力による地震時主働土圧の発現メカニズムと、これを踏まえた地震時主働土圧の算定法やコストダウン効果を示した。

(6) のり面工と地山補強材による既設盛土の耐震補強設計法⁷⁾

既設盛土は降雨対策を目的としてのり面工が施工される場合が多いが、耐震診断や補強設計においてこの効果は考慮されていない。本研究では、既設盛土に設置されたのり面工による遮水効果、ならびにのり面工と地山補強材の連結による一体化の効果を明らかにするとともに、これらの効果を考慮した既設盛土の耐震補強設計法を提案した。併せて、耐震補強時に活用できる新しいのり面工を開発した。

(7) 山岳トンネルの盤ぶくれメカニズムと対策の効果⁸⁾

山岳トンネルでは、地山変状により内空断面が縮小する場合がある。対策工として裏込注入やロックボルト等があるが、これらの効果は定量的に評価されてこなかった。本研究では、内空変位等をリアルタイムにモニタリングするシステムを構築するとともに、数値解析により対策効果を定量的に評価した上で、モニタリングデータに基づき対策工の効果を推定し、内空変位速度を抑制可

能な対策工の設計法を示した。

3. 構造変更による既設鋼橋梁の補強技術⁹⁾¹⁰⁾

3.1 鋼桁・橋台・盛土一体化工法の概要

桁・橋台形式橋梁は橋台構築後に背面盛土を施工するため、盛土構築に伴う橋台の引込み沈下や側方移動が生じる場合がある。一方、経年した鋼橋梁では鋼桁や支承部の腐食、及び背面盛土の沈下の発生が懸念される他、地震等の異常時に土圧を受ける橋台や背面盛土の脆弱な耐震性を要因とした橋台の傾斜やひび割れ、背面盛土の沈下が生じ、場合によっては落橋に至る場合がある。

上述の課題を橋梁の架け替えをせずに解決する鋼桁・橋台形式橋梁の延命化・高耐災化策の実現を目的として、橋台と背面盛土を地山補強材により結合させ、鋼桁と橋台をRC巻立てでラーメン構造とすることにより、鋼桁・橋台・盛土部の一体化補強策を提案した。このような構造形式橋梁を「鋼桁・橋台・盛土一体化橋梁 (Integral Bridge with Nail-Reinforced Soils)」と呼び、補強方法を「鋼桁・橋台・盛土一体化工法」と言う(図2)。この補強技術は、新しい橋梁形式である「補強盛土一体橋梁 (Integral Bridge with Geosynthetic-Reinforced Soils)」の基本コンセプトを既設の鋼桁・橋台形式橋梁の補強に応用したものである。

3.2 実大試験橋梁による検証試験

鉄道総研では、鋼桁・橋台・盛土からなる実大規模の試験橋梁を構築し、地山補強材による橋台・背面盛土の結合や、鋼桁・橋台のRC巻立てによる一体化の施工実験を実施し、その施工可能性を確認した。また、一体化施工前後の静的荷重試験や起振機試験の他、長期動態計測、鋼桁の温度伸縮を模擬した繰返し水平荷重試験、耐震性を確認する正負交番水平荷重試験を実施した。以下では、実大試験橋梁を用いた一連の実証試験結果を示す。

桁長 13.32m の実大試験橋梁に対し、一体化施工後の温度変化による鋼桁の伸縮作用が橋台天端、背面盛土に及ぼす影響を把握することを目的として、試験橋梁に計測機器を取り付け、補強後の1年間の動態計測を実施した。年間の鋼桁の温度変化は約 30℃/年(午前0時計測)であり、これに対して A1 橋台天端と背面盛土天端の相対水平変位は約 1.0mm/年(A2 橋台側は約 1.5mm/年、線膨張係数から算定される自由端試験橋梁の伸びは 4.80mm)であった。1年間の動態計測ではあるが、門型ラーメン構造化と背面盛土の拘束により鋼桁の変形量は抑えられ、背面盛土の沈下や鋼桁・橋台結合部のひび割れ等の変状は生じず、安定した鋼桁の伸縮挙動を呈した。

鋼桁・橋台の一体化施工による試験橋梁の活荷重応答の低減効果(鋼桁中央部の発生曲げモーメントやたわみ



図2 鋼桁・橋台・盛土一体化橋梁と補強盛土一体橋梁

が理論上、半減すること)を確認するため、起振機(重量 53kN, 最大起振力 ±60kN, 最大振動数 30Hz)重量による静的鉛直荷重試験、起振機による振動試験を一体化施工前後において実施した。起振機重量による静的鉛直荷重試験、振動試験の両者において一体化施工前後で支間中央の鋼桁下フランジのひずみはほぼ半減した。その後に実施した軌道荷重レベル(70kN/m, Total: 910kN)の静的鉛直荷重試験では、桁端部の曲げひずみが上側引張りを示し、鋼桁両端の橋台との結合により鋼桁両端が十分固定されていることが確認された(図3)。

次に耐震性を確認するため、一体化施工後の試験橋梁に対して、桁を橋軸方向に加力する正負交番水平荷重試験を実施した。正負交番水平荷重試験結果より、L2地震相当の水平力に対して A1 橋台天端の最大水平変位量は 10mm 程度となり、除荷後の残留水平変位は 5mm 未満と極小さいことを確認した(図4)。荷重試験終了後に躯体コンクリートの損傷や橋台背面盛土の沈下状況を確認したが、L2地震相当の水平力作用時においても、早期復旧可能な極めて軽微な損傷であることが明らかになった。

3.3 実鋼橋梁への適用

対象橋梁は橋長 13.42m の架道橋で、下部工は直接基礎形式の重力式無筋コンクリート橋台である。当該鋼橋梁の耐震対策を目的に施工条件、工事コスト等を総合的

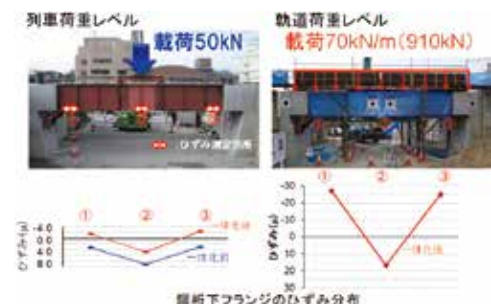


図3 鋼桁下フランジのひずみ分布(静的鉛直荷重試験)

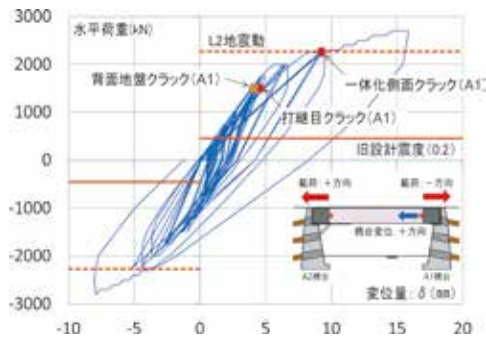


図4 A1 橋台天端の水平荷重－水平変位関係（正負交番水平載荷試験）



図5 鋼桁・橋台・盛土一体化工法の実鋼橋梁への適用

に比較検討した結果、鋼桁・橋台・盛土一体化工法が採用された。実施工の詳細は、参考文献 11 が詳しい（図 5）。

本工法により既設橋梁の架け替えと比べ、大幅な工事費の削減と工期短縮を図ることができた。一体化施工後の列車通過時の鋼桁中央のたわみ量は、一体化施工前と比較して 1/2~1/3 に低下し、これにより鋼桁の長寿命化が期待できる。また、ラーメン構造化により支承部がなくなり、支承部の清掃等の維持管理を省略することができる。さらに桁端部の RC 巻き立てと桁重量の増加により、騒音低減効果があることも明らかになった。

4. おわりに

本展望解説では、これまで鉄道総研が取り組んできた既設鉄道構造物の維持管理・診断・補強に関する最近の研究開発の例を概説し、最後に研究開発の実用化例として、構造変更による既設鋼橋梁の補強技術を示した。

冒頭で説明した通り、今後はデータを基本としたシミュレーション・ネットワーク等のデジタル技術を応用した異常時対応としての「災害対策技術（早期復旧技術を含む）」に寄与する研究開発のほか、平常時対応としての「維

持管理技術」、[建設・改良技術]に寄与する研究開発に重点的、かつ迅速に取り組む予定である。例えば、鉄道河川橋梁や鉄道盛土の耐降雨診断法や災害対策に関する研究開発や、検査の効率化や予防保全のための鉄道コンクリート構造物や鉄道トンネルの目視検査支援や補修・補強工法に関する研究開発である。現在はコロナ禍の長期化により鉄道経営が厳しい状況にあるが、アフターコロナを見据えた安全で持続可能な鉄道に繋がる研究開発成果の具体的活用方法を含めて追求していきたい。

文献

- 1) 神田政幸：鉄道構造物に関する最近の研究開発，第 340 回 鉄道総研月例発表会資料，2020.9 〈<https://www.rtri.or.jp/events/getsurei/2020/mr340.html>〉
- 2) 渡辺健ほか：画像および FEM を用いた RC 桁のひび割れ発生要因分析，鉄道総研報告，Vol.35，No.7，2021.7
- 3) 小林裕介，宮本祐輔，笠原康平，内藤直人，向嶋宏記，神馬和歌子：構造物の三次元モデル化により目視検査を支援する，RRR，Vol.77，No.9，pp.8-11，2020.9
- 4) 石突光隆，山本昌和：火災発生時における駅構内の避難安全性検証システムの提案，鉄道総研報告，Vol.33，No.9，pp.41-46，2019.9
- 5) 清水克将，三木広志，山田聖治：吊り長さの短い駅舎天井の耐震改修工法，鉄道総研報告，Vol.34，No.6，pp.47-52，2020.6
- 6) 尾崎匠，Hong Kimhor，中島進，古関潤一：粘着力を考慮した地震時主働土圧合力を導出する一般式，第 54 回地盤工学研究発表会，論文番号 21-8-5-07，2020
- 7) 藤本達貴，中島卓哉，松丸貴樹，中島進，倉上由貴，杉山健太：のり面工と地山補強材の定着効果を考慮した鉄道盛土の耐震補強設計法，令和 2 年度土木学会第 75 回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ -132，2019
- 8) 嶋本敬介ほか：山岳トンネルの盤ぶくれメカニズムと対策工の効果，鉄道総研報告，Vol.35，No.7，2021.7
- 9) 神田政幸，館山勝，小林裕介，杉本一郎：構造変更による旧式鋼橋梁のリニューアル，RRR，Vol.69，No.10，pp.4-7，2012.10
- 10) 神田政幸，館山勝，龍岡文夫：構造境界の耐震化—鋼桁・橋台・盛土一体化工法，基礎工，Vol.45，No.12，pp.65-67，2017.12
- 11) 早川雄馬，沖野俊介，佐名川太亮：小田急小田原線旧恩田川橋梁の耐震補強事業について—既設盛土一体化橋梁工法の採用—，地盤工学会誌，Vol.69，No.4，pp.27-30，2021.4