

特集：構造物技術

鉄道構造物の新設設計・既設補強設計に関する最近の研究開発

神田 政幸*

Recent Research and Development on New Construction Design and Existing Reinforcement Design for Railway Structures

Masayuki KODA

Kumamoto Earthquake in April 2016 and Western Japan Heavy Rain in July 2018 caused damage to many railway structures and hindered railway operations. On the other hand, large-scale renewal construction of terminal stations in urban areas is increasing to improve convenience and elevated railway construction also follows too. The technical issues surrounding railway structures in this situation range from construction of new structures to improvement of existing structures; also to disaster countermeasures. The paper outlines the major R & D examples on new construction design and existing reinforcement design for railway structures that RTRI has been working on.

キーワード：鉄道構造物，新設構造物，既設構造物，建設・改良，災害対策

1. はじめに

平成 28 年 4 月の熊本地震（2016 年），平成 30 年 7 月豪雨（2018 年）や台風 19 号による大雨・暴風等（2019 年）では，鉄道構造物に被害をもたらし，鉄道運行に支障を及ぼした。一方，都市部では利便性向上を目的とした，連続立体交差化工事が進められ，最近ではターミナル駅の大規模改良工事が増加しつつある。このように鉄道構造物を取り巻く技術課題は，鉄道の新設構造物の建設や既設構造物の改良から災害対策と広範に及ぶ。

鉄道総研では新たな基本計画「RESEARCH 2025」のもと，2020 年度より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に寄与する先端的な研究開発を進めることとした。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，鉄道総研が取り組んできた鉄道の新設構造物の設計技術，既設構造物の補強設計技術に関係

する研究開発の例を概説し，最後に研究開発の実用化例を示す。なお，本展望解説の詳細は，第 331 回鉄道総研月例発表会 HP¹⁾ を参照されたい。

2. 鉄道構造物に関する研究開発

鉄道の新設構造物の設計技術（材料開発，設計法，配筋法を含む），既設構造物の補強設計技術（補強工法，構造解析法，耐震診断法，計画法を含む）を表 1 に研究開発の用途，キーワードと一緒に示す。新設構造物の設計技術は No.1～4，既設構造物の補強設計技術は No.5～8 であり，対象構造物として橋梁・高架橋（No.1, 2），地下構造物（No.3, 6），仮設構造物（No.4），擁壁・橋台（No.5），駅建築（No.7, 8）に分けられる。

2.1 新設構造物の設計技術

図 1 に新設構造物の設計技術 No.1～4 の概要を示す。

(1) 無機系短繊維補強コンクリートの開発²⁾

鋼繊維補強コンクリートは，ひび割れ幅の拡大抑制を期待し連続合成桁の中間支点部の負曲げ区間や，剥落対策としてラーメン高架橋の片持ちスラブなどに用いられ

表 1 鉄道の新設構造物の設計技術，既設構造物の補強設計技術

No	新設/既設	用途	タイトル	キーワード
1	新設	建設・改良	無機系短繊維補強コンクリートの開発	バサルト繊維，エポキシ含浸，材料開発
2	新設	建設・改良	ストッパー周辺の桁座・桁端に対する設計法	鋼棒ストッパー，桁座・桁端，設計法
3	新設	建設・改良	小断面ボックスカルバートにおける合理的な配筋方法の開発	ボックスカルバート，帯筋の配筋法，施工性
4	新設	建設・改良	線路下ボックスカルバート構築時の線路周辺地盤への影響と簡易工事桁の設計法	線路下横断工，緩み領域，簡易工事桁設計法
5	既設	災害対策	施工性向上に着目した擁壁，橋台の耐震補強工法の開発	擁壁，石積み擁壁，橋台，地山補強材，工法
6	既設	建設・改良	既設開削トンネル側壁の開口に関する構造解析手法	開削トンネル，切広げ工事，構造解析法
7	既設	災害対策	既存鉄骨造旅客上家の耐震性能評価手法	地平上屋/高架上屋，鉄骨造，耐震診断法
8	既設	建設・改良	VR 技術を用いた鉄道駅空間の視認性評価	VR 技術，駅空間，視認性，快適性，混雑度

* 構造物技術研究部長

るが、さびの発生により美観が低下することが懸念される。そこで、さびの発生がない玄武岩由来（バサルト：Basalt）の無機繊維であるバサルト繊維に着目し、これを用いた短繊維補強コンクリートを開発した。

(2) ストッパー周辺の桁座・桁端に対する設計法³⁾

近年の大地震により、橋梁のストッパー周辺の桁座・桁端が多数損傷した。ストッパー周辺の桁座・桁端の損傷過程や破壊性状等は現在のところ明らかとなっておらず、修復性を考慮した設計は行なわれていない。そこで、鋼棒ストッパーを対象に、桁座・桁端に生じ得る損傷メカニズムを明確にし、早期の機能回復が可能な桁座・桁端の設計法を示した。

(3) 小断面ボックスカルバートにおける合理的な配筋方法の開発⁴⁾

現行の配筋方法（照査の前提）を小断面ボックスカルバートに適用した場合、帯鉄筋の間隔が小さくなり、施工が困難になる場合が多い。そこで、載荷実験及び数値解析から、配筋詳細が軸方向鉄筋の座屈や変形性能に及ぼす影響を検討し、小断面ボックスカルバートにおいて遵守すべき帯鉄筋の間隔や、その適用範囲を示した。

(4) 線路下ボックスカルバート構築時の線路周辺地盤への影響と簡易工事桁の設計法⁵⁾

近年、踏切除去や河川改修等を目的として、線路直下を低土被りで掘進し、線路下ボックスカルバートを新設する工事が数多く実施されている。この工事において鉄道への影響を最小限に抑えるため、ボックスカルバート躯体部分のみを小断面で連続掘削し、躯体を構築する特殊工法が採用される。そこで、線路下の小断面掘削時の線路直下の地盤の緩みを推定した上で、この緩みを勘案した簡易工事桁の設計法を示した。

2.2 既設構造物の補強設計技術

図2に既設構造物の補強設計技術No.5～8の概要を示す。

(1) 施工性向上に着目した擁壁、橋台の耐震補強工法の開発⁶⁾

擁壁や橋台などの抗土圧構造物は、橋梁や土構造物の境界部に構築され、その周辺には道路、河川、宅地などが存在する場合が多い。したがって、用地境界があることに起因する施工上の制約も多くなる。これらの抗土圧構造物は、耐震性が低く耐震補強の必要性が高い一方で、補強対象数が膨大なため、効率的な補強が求められる。このような課題に対して、地山補強材を用いた施工環境に合致する複数の補強工法を提案した。

(2) 既設開削トンネル側壁の開口に関する構造解析手法⁷⁾

近年、地下鉄駅の商業利用や出入口の増設、切広げによる線路増設など、既設の開削トンネルの側壁の一部を撤去して開口を設置するリニューアル工事が増加している。この場合、従来開口部分が受け持つ断面力は、開口部周辺の側壁等に再配分されるため、この影響を精度良

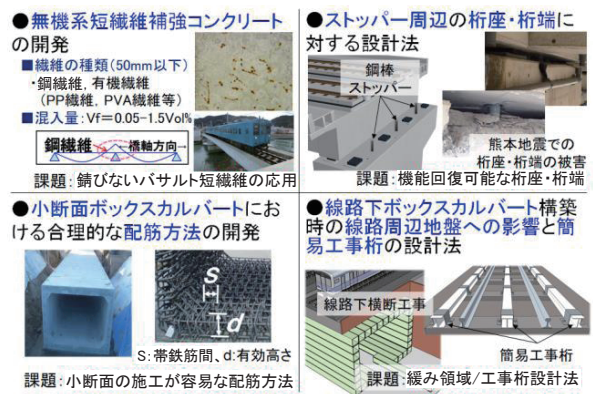


図1 新設構造物の設計技術

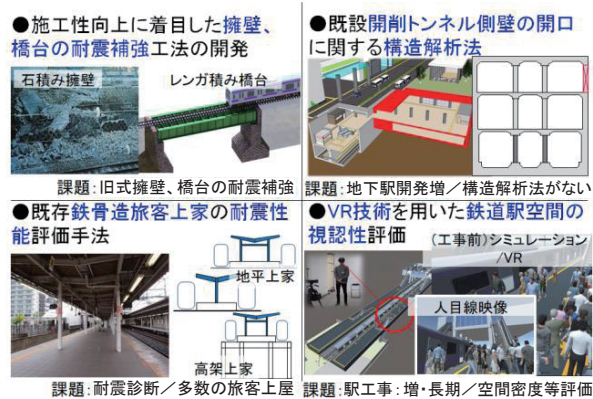


図2 既設構造物の補強設計技術

く把握することが求められる。そこで、三次元FEM解析によりこの影響を明らかにしたうえで、二次元骨組解析モデルを用いる設計法を提案した。

(3) 既存鉄骨造旅客上家の耐震性能評価手法⁸⁾

特定鉄道等施設の地震に対する安全性を向上させるため、耐震補強の実施について努力義務を課す耐震省令が2013年4月より施行された。そこで、鉄骨造旅客上家に対して、構造形式（地上上屋/高架上屋）や構造種別（標準上屋/その他）に応じた耐震性能の評価方法を検討し、耐震診断可能な耐震診断指針を示した。

(4) VR技術を用いた鉄道駅空間の視認性評価⁹⁾

鉄道駅などの空間評価は、パース等を用いて検討されてきたが、三次元CADやBIM、モデリングソフト、VR技術の進展により、視覚的にわかりやすい空間提示が可能となってきた。そこで、鉄道駅の案内サイン等の見え方や駅空間の混雑度、快適性などの空間評価にVR技術を用い、これを旅客流動シミュレーションと連携することで、シミュレーション結果に応じた視認性の評価を試みた。

3. 研究開発の実用化例

3.1 GRS 一体橋梁（補強盛土一体橋梁）と適用例

(1) GRS 一体橋梁の概要

GRS 一体橋梁（補強盛土一体橋梁：Integral Bridges

with Geosynthetics - Reinforced Soils) は、補強土工法を併用したセメント改良アプローチブロックと、直接基礎形式のインテグラル橋梁からなる構造形式を基本とし、背面補強盛土と橋台壁は、面状補強材を介して連結された構造である(図3)¹⁰⁾。桁・橋台形式橋梁と比較し、支承部がないためこのメンテナンスが不要になること、同図の施工手順により、背面補強盛土の沈下が充分収束した後に橋台壁を構築することで背面補強盛土の沈下が橋梁躯体に与える影響が抑制されること、桁・橋台・背面補強盛土間が結合され明確な構造境界がないため、走行性の向上が期待される。また、地震に対しては構造的弱部となる支承部がなくなり、背面補強盛土と橋台壁が連結されていることや、ラーメン構造化により反対側の橋台の背面補強盛土の受働抵抗などによって、耐震性の大幅な向上が期待できる。この工法は「補強盛土一体橋梁(GRS 一体橋梁)の設計・施工指針(平成29年3月)」¹¹⁾として手引きが発刊され、整備新幹線の盛土区間の部分的橋梁区間や、山岳トンネル間の沢地形の横断区間の標準的な橋梁型式となっている。

(2) 津波災害時の再構築構造物としての適用例

東北地方太平洋沖地震及び直後の津波により、三陸鉄道は橋梁、盛土、路盤が流出し、甚大な被害を受けた。旧・ハイペ沢橋梁は、防潮堤のない切り立った海食崖に挟まれた地形に位置し、河川・県道が同一箇所で見交するPC下路桁(L=32.16m:第1径間)と、RC桁(L=16.60m:第2径間)からなるが、起点方橋台と桁2連、両橋台の背面盛土が流出した¹²⁾。そこで、橋梁の構造形式として、桁と橋台が結合され津波抵抗性の高いGRS 一体橋梁を採用し、2径間のSRC下路桁式GRS 一体橋梁とした(図4)。なお、三陸鉄道北リアス線の復旧工事では、津波抵抗性を高める観点から、ハイペ沢橋梁のほかにも2橋(松前川橋梁:2径間のRC床版式GRS 一体橋梁L=27.40m, コイコロベ沢橋梁:2径間のRC床版式GRS 一体橋梁L=39.86m)でGRS 一体橋梁が採用された。

3.2 シートパイル補強工法と適用例

(1) シートパイル補強工法の概要

シートパイル補強工法は、既に実用化されていた新設基礎用のシートパイル基礎工法の技術を既設構造物基礎の耐震補強に応用した技術である(図5)¹³⁾。具体的には、既設基礎を囲むようにシートパイルを打設した上で、シートパイルと既設フーチングを増しフーチングにより一体化させる工法である。その際、シートパイルは必ずしも既設基礎の強固な支持層に到達させる必要は無く、その根入れ長はフーチング幅と同程度を基本として、一般には中間層で打ち止めることとしている。また、既設フーチング下面のシートパイルで囲まれる内部を、地盤改良しなくとも補強効果を発揮することができる。この

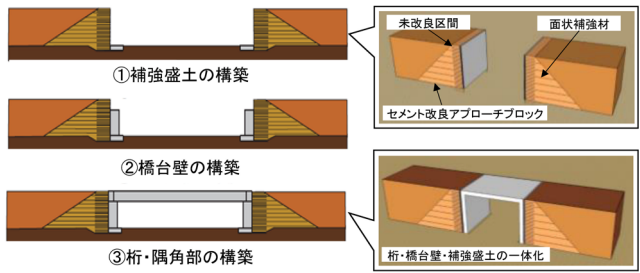


図3 GRS 一体橋梁(補強盛土一体橋梁)



図4 ハイペ沢橋梁(三陸鉄道北リアス線)

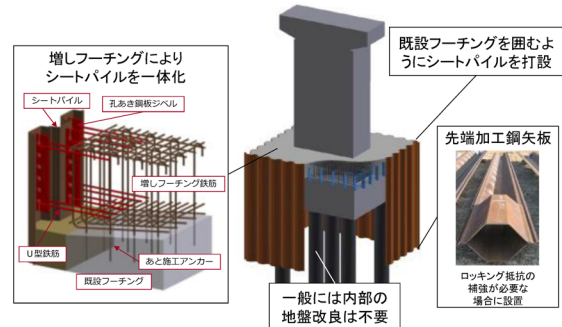


図5 シートパイル補強工法

シートパイル補強工法の要素技術は、シートパイルによる既設基礎部材の補強技術(防御効果)、シートパイルと増しフーチングの接合技術、先端加工シートパイルによる支持機能、及び液状化地盤も含めたシートパイル補強基礎のモデル化とその設計法からなる。本工法については、「鋼矢板を用いた既設鉄道構造物基礎の耐震補強工法(シートパイル補強工法)設計・施工マニュアル(案)(第3版)(平成28年11月)」¹⁴⁾が発刊されている。

(2) 洪水災害時の鉄道河川橋梁の段階的強化復旧技術としての適用例

平成24年7月九州北部豪雨による洪水で、JR九州久大線の隈上川橋梁(上部工:7径間上路式デッキガード、下部工:小判型橋脚・直接基礎N値19~50超の玉石混り砂礫層, 1931年建設)まわりの河床が洗い流され、橋梁基礎の支持地盤の吸出しにより、P2橋脚が約350mm沈下した¹⁵⁾。被災後の衝撃振動試験では健全度の低下があるものの、橋脚の傾斜はほぼなかった。これより載荷試験等による支持地盤の緩みを除去することで再供用可能と判断し、各種載荷試験を実施し運行再

開に繋げた。具体的には、水タンク鉛直載荷試験（機関車荷重 DE10 の 90% 載荷）により沈下の収束を確認し、機関車による走行試験（制動荷重を付与する列車停止試験を含む）を行い、沈下がほぼ収束したことを確認した。これらの一連の載荷試験により被災後、約 1 か月（8 月 25 日）で運行再開が可能となった。その後の本復旧では、対象橋梁基礎をシートパイル補強工法により補強し、2013 年 4 月に徐行解除とした（図 6）。

4. おわりに

本解説展望では、鉄道総研が取り組んできた鉄道の新設構造物の設計技術、既設構造物の補強設計技術に関する研究開発の例を概説し、研究開発の実用化例を示した。

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を重点的に行う。今後の取り組み例を図 7 に示す。例えば「災害対策技術（早期復旧）」では、盛土・河川橋梁に対して対降雨診断法や、地震も含めた災害対策に関する研究開発を行う。「維持管理技術」では、維持管理標準の改訂として、手引きの整備を継続的に実施する。また、検査の効率化や予防保全のために、目視検査支援にデジタル技術を応用した研究開発を行う。「建設・改良技術」では、設計標準の改訂の他に、工期短縮・省力化に繋がるプレキャスト化や長スパン化の取り組みを行う。これらの鉄道構造物に関わる研究開発が、安全で持続可能な鉄道に繋がるよう尽力する予定である。

文 献

- 1) 神田政幸：鉄道構造物技術に関する研究開発，第 331 回 鉄道総研月例発表会資料，2019.7 < <https://www.rtri.or.jp/events/getsurei/2019/mr331.html> >
- 2) 仁平達也：無機系短繊維補強コンクリートの開発，第 331 回 鉄道総研月例発表会資料，2019.7
- 3) 轟俊太郎：ストッパー周辺の桁座・桁端に対する設計法，第 331 回 鉄道総研月例発表会資料，2019.7
- 4) 中田裕喜：小断面ボックスカルバートにおける合理的な配筋方法の開発，第 331 回 鉄道総研月例発表会資料，2019.7
- 5) 仲山貴司：線路下ボックスカルバート構築時の線路周辺地盤への影響と簡易工事桁の設計法，第 331 回 鉄道総研月例発表会資料，2019.7
- 6) 中島進：施工性向上に着目した擁壁，橋台の耐震補強工法の開発，第 331 回 鉄道総研月例発表会資料，2019.7



図 6 隈上川橋梁（JR 九州久大線）

<p>■ 災害対策（早期復旧）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 対降雨診断（盛土／河川橋梁） ● 対降雨＆耐震対策（盛土／河川橋梁） 	
<p>■ 維持管理技術</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 維持管理標準改訂（手引き） コンクリート構造物手引き 発刊予定 ● 検査の効率化（目視からデジタル） ● 予防保全（予測から保全計画策定） 	<p>3Dバーチャル構造物</p>
<p>■ 建設・改良技術</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 設計標準改訂 開削標準、シールド標準、山岳標準 コンクリート標準 ● 工期短縮（プレキャスト、長スパン化） 	<p>プレキャスト高架橋</p>

図 7 今後の取り組み例

- 7) 仲山貴司：既設開削トンネル側壁の開口に関する構造解析手法，第 331 回 鉄道総研月例発表会資料，2019.7
- 8) 清水克将：既存鉄骨造旅客上家の耐震性能評価手法，第 331 回 鉄道総研月例発表会資料，2019.7
- 9) 石突光隆：VR 技術を用いた鉄道駅空間の視認性評価，第 331 回 鉄道総研月例発表会資料，2019.7
- 10) 野中隆博，神田政幸，館山勝，龍岡文夫：補強盛土一体橋梁（GRS 一体橋梁）の開発，橋梁と基礎，Vol.47, No.8, pp.54-56, 2013
- 11) (公財) 鉄道総合技術研究所，(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構編：補強盛土一体橋梁（GRS 一体橋梁）の設計・施工指針，2017
- 12) 進藤良則：津波で被災した橋梁基礎を再利用した GRS 一体橋梁の施工，特集東日本大震災からの復旧・復興（その 1）-道路，鉄道，港湾，空港-，基礎工，Vol.43, No.7, pp.54-57, 2015.7
- 13) 西岡英俊，樋口俊一，西村昌宏，神田政幸，山本忠久，平尾淳一：シートパイルによる既設杭基礎の耐震補強効果に関する模型実験，地盤工学ジャーナル，Vol.5, No.2, pp.251-262, 2010
- 14) (公財) 鉄道総合技術研究所，(株) 大林組，新日鉄住金(株)：鋼矢板を用いた既設鉄道構造物基礎の耐震補強工法（シートパイル補強工法）設計・施工マニュアル（案）（第 3 版），2016.11
- 15) 海老原毅：九州北部豪雨における鉄道の被災状況と復旧，特集最近の豪雨災害の特徴と復旧，基礎工，Vol.43, No.6, pp.68-71, 2015.6