

構造物技術に関する最近の研究開発

谷村 幸裕*

Recent Research and Development in Structural Technology

Yukihiro TANIMURA

Recent research and development in railway structures in Railway Technical Research Institute have focused on maintenance of the existing structures, seismic retrofitting, development of construction technologies considering performance and economic efficiency and environmental countermeasures for comfort improvement, etc. This review firstly describes technologies for monitoring and diagnosis of the existing structures. Secondly, it describes technologies for performance improvement of the existing structures and stations, such as noise reduction, spatial expansion and comfort improvement at stations. Finally, it describes technologies for seismic countermeasures, including earth structures with high resistance to tsunami and improvement of seismic performance of the existing structures.

キーワード：構造物，維持管理，健全度診断，補修補強，耐震

1. はじめに

鉄道総研では、鉄道構造物に関する技術開発として、設計、維持管理技術、耐震対策技術や環境対策技術の研究開発に取り組んでいる。そして、2010年度より5年間にわたり、基本計画－RESEARCH 2010－を実施し、安全性の向上や低コスト化などを目標に掲げて研究開発を推進してきた。このうち、構造物技術に関する鉄道の将来に向けた研究開発として、新しい状態監視保全技術、構造物のリニューアル技術の革新、地震に対する安全性向上などの課題を設定し取り組んできた。また、鉄道の基礎研究や実用的な技術開発についても、鉄道のイノベーションを目指して着実に取り組んできた。

本稿では、これらのうち構造物の診断・モニタリング技術、リニューアル技術および耐震技術に関連する最新の研究開発成果の概要について述べる。

2. 構造物の診断・モニタリング技術

2.1 構造物診断・モニタリングの概要

鉄道構造物の健全度は、2年周期の通常全般検査で目視によって判定される場合が殆どである。しかし、建設以来長期間経過した構造物の増加に伴い、目視のみでは判定困難となる場合が増えることが考えられる。また、措置が必要と判定された場合でも、すぐに補修・補強せず、監視により経過観察する場合も多い。このような背景から、簡便かつ高精度な健全度判定技術やモニタリング技術の開発が望まれている。

* 構造物技術研究部 部長

これまでにトンネルの変状監視手法¹⁾などを開発してきたが、橋梁の状態監視²⁾およびトンネル路盤の健全度診断³⁾を開発したのでこれらの概要について述べる。

2.2 橋梁の状態監視技術

橋梁の状態監視技術として、橋脚の振動を計測する加速度センサー、桁と橋脚間の支承変位を計測する変位センサーおよびセンサーの電源としての鋼桁の振動発電と蓄電池からなる計測システムを開発した。また、現地に立ち入ることなく自動データ収集可能な無線伝送装置を組み合わせたシステムを開発した(図1)。このうち、橋脚の計測に関しては、橋脚の固有振動数と高い相関を有する常時微動のパワースペクトル面積比(全面積と低振動数域の面積比)等を利用した健全度診断指標を新たに提案した。この指標を用いて、橋脚の健全度を長期的に監視できることを、実橋梁を用いて確認した。

2.3 トンネル路盤の健全度診断技術

インバートのない鉄道トンネルにおいて、軌道スラブ直下の路盤コンクリートが走行車両による繰返し荷重で

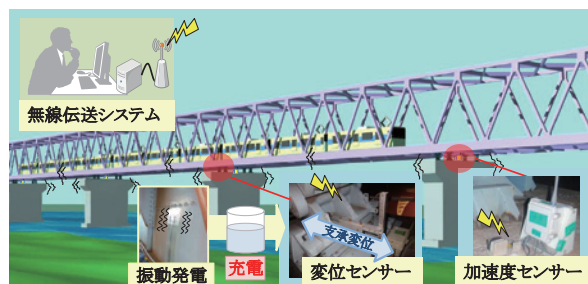


図1 橋梁の状態監視システムの概要

特集：構造物技術

沈下し、路盤コンクリートの変状や軌道変位が発生する
 場合がある（図2）。これらの変状は軌道検測値の異常
 として把握できるが、変状原因が軌道側と路盤側のどち
 らによるものなのかを区別することが困難であった。

そこで、路盤コンクリートの起振器試験から得られる
 伝達関数（振動数ごとに起振器を入力とした時の路盤コ
 ンクリートの応答振幅比）の面積（揺れやすさに相当）
 を指標とし、この値が大きいと路盤側の要因、小さいと
 軌道側の要因と判定する健全度診断法を開発した。実ト
 ンネルの試験や数値解析により、路盤コンクリート直下
 の空洞率を推定できることを明らかにした。

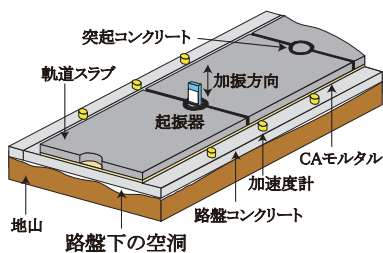


図2 トンネル路盤コンクリートの起振器試験

3. 構造物のリニューアル技術

3.1 構造物補修・補強の概要

鉄道構造物は取替えが困難であるため、建設後長期間
 経過した構造物の増加に伴い、大規模な補修・補強が必
 要となるケースが増えるものと考えられる。また、駅の
 利用状況の変化等に伴い、機能上の要求から大規模改修
 が必要となる場合も増えるものと考えられる。

これまでに、高架橋の梁や高欄の補修・補強工法^{4) 5)}、
 PC 桁の補強工法⁶⁾ や鋼橋梁のリニューアル工法^{7) 8)} を
 開発してきたが、さらに高架橋スラブの補強技術⁹⁾ およ
 び柱の取替え・移設技術¹⁰⁾ を開発した。また、駅空間
 の機能向上のためのリニューアル技術として、地下駅新
 旧トンネルの接続工法¹¹⁾ や、既設高架駅のシェルター
 化工法を開発したので、これらの概要を述べる。

3.2 スラブの補強技術⁹⁾

鉄筋コンクリート（RC）ラーメン高架橋スラブにお
 いて、鉄筋腐食による耐力の低下や、列車通過時の振動
 や騒音の低減に対応するため、UFC（超高強度繊維補強
 コンクリート）ボードを用いた補強工法を開発した。

本工法は、スラブ下面に UFC ボードを設置し、無収
 縮モルタルを充填して既設スラブと一体化する（図3）。
 実験等により、耐力が大幅に回復・向上することを確認
 している。また、従来の全断面修復工法に比べて大掛
 かりな足場を必要としないことから施工性が向上するこ
 と、薄肉軽量の UFC ボードを用いるため基礎への負担
 が小さいこと、スラブの剛性が高まることから振動や騒

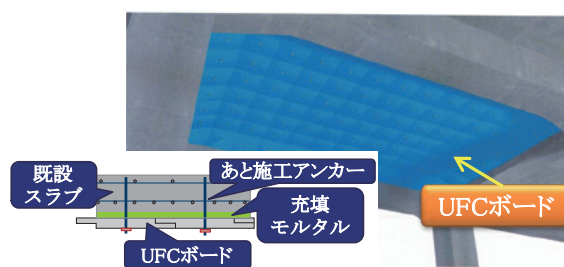


図3 UFC ボードによるスラブ補強工法

音を低減できること等の特徴を有している。

3.3 柱の取替え・移設技術¹⁰⁾

コンクリート充填鋼管（以下、CFT）柱を用い、大規
 模な仮設物を必要としない柱の取替え・移設工法を開発
 した（図4）。本工法は、経年劣化した柱の取替えにより、
 高架橋の耐震性向上、長寿命化対策となるほか、柱の移
 設により高架下空間の有効利用ができる。

本工法は CFT 柱を用いるのが特徴であるが、これを
 実現するため既設の RC 梁に設置する接合方法を開発し
 た。既設 RC 梁の横から孔をあけて鋼棒を挿入し、周囲
 に鋼板を取り付けて梁を抱き込むことで、梁と柱の間で
 力を伝達できる構造となっている。また、本工法では、
 施工中に鋼管を仮支柱として用いることで、仮設物を省
 略できるとともに工期を短縮することができる。

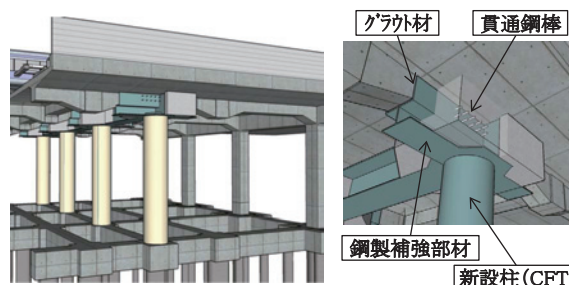


図4 高架橋柱の取替え・移設工法

3.4 地下駅空間拡張のためのリニューアル技術¹¹⁾

都市部の地下駅では、混雑緩和などを目的とし、既設
 トンネルの一部を開口して新設トンネルと接続する工事
 が増加している。開口幅が大きくなると、既設トンネル
 に大規模な補強が必要となる場合があるが、これを必要
 としない接続構造を開発した。提案方法は、既設トンネ
 ルの上床版を抱き込むように逆梁を設置し、十字配置の
 アンカーで新旧接続する構造である（図5）。新旧トン
 ネルを横断方向に一体化するとともに、逆梁で線路方向
 に荷重を分散し、既設部の補強を不要としている。実物
 大模型の載荷実験等を行い、接続部が一体的に挙動し、
 先行破壊しないことを検証している。

2層2径間の地下駅に幅12mの開口を設ける場合の
 試算によると、既設部補強量の低減により、従来と比較

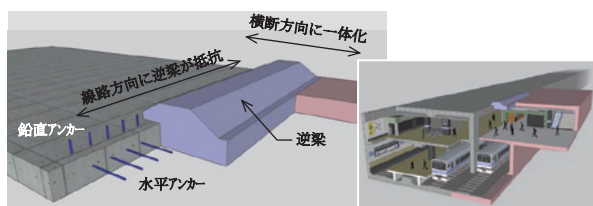


図5 地下駅の新旧トンネル接続工法

して10%程度のコストダウンを図ることができる。

3.5 高架橋駅ホームのシェルター化技術

地上駅ホームは屋外環境の影響を受けやすく、快適性に劣る場合がある。そこで、既設高架橋駅ホームを、壁と屋根で覆われたシェルター型ホームへリニューアルする工法を開発した(図6)。

ホームをシェルター化する場合、壁やホームドアなどを新たに設置する必要があるが、既設高架橋の補強を避けるためには、重量増とにならないようにしなければならない。そこで、ホームの屋根に着目し、通常の場合はスレート製や鉄製の屋根が線路上まで張り出しているのに対し、シェルター型ホームでは、設置範囲をホーム直上に限定し、材料を膜材に取り替えることで大幅な軽量化を実現した。また、壁材も軽量の鋼製サンドイッチパネルを採用するなどにより、既設高架橋を補強することなくシェルター化することを可能にした。

一方、シェルター化することにより夏季温熱環境の悪化が懸念されるが、模型実験などによりホーム上の気温が外気温よりも過度に高くないようにするための開口量を明らかにした。

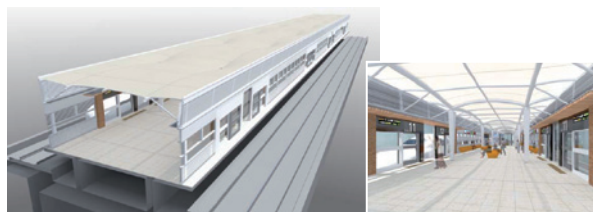


図6 シェルター型ホームのイメージ図

4. 構造物の耐震技術

4.1 耐震技術の研究開発状況

将来の発生が懸念されている南海トラフや首都圏直下の地震に対して、様々な形態の地震被害を軽減するための耐震技術の研究開発を実施してきた。1995年兵庫県南部地震以降に進められてきた高架橋柱の耐震補強に関しては、様々な耐震補強工法を開発し、耐震補強設計指針¹²⁾を刊行している。また、RC橋脚軸方向鉄筋途中定着部の補強工法¹³⁾、旧式鋼橋のピボット支承の補強工法¹⁴⁾、石積み壁の補強工法¹⁵⁾などを開発してきた。

2011年の東北地方太平洋沖地震では、対策が進んで

いた高架橋柱などでは被害が少なかったが、津波による被害や、高架橋上の電化柱や上家に被害が生じ、新たな課題が浮き彫りとなった。本稿では、最近の研究開発成果のうち、津波越流に強い盛土構造¹⁶⁾、高架橋の中層梁挿入による損傷制御¹⁷⁾、慣性質量ダンパを用いた高架橋上家の耐震化¹⁸⁾について概要を述べる。

4.2 地震および津波越流に強い盛土構造¹⁶⁾

津波による盛土の被害要因を明らかにするため、模型実験を実施した。その結果、まず地震の揺れによって盛土堤体とのり面工が損傷し、その後に襲来する津波越流によって、盛土堤体が侵食されるとともに盛土堤体山側のり尻付近の支持地盤が侵食されて安定を失い、盛土が破壊することが明らかになった。

そこで、のり面工と盛土堤体内部に面状補強材を敷設して耐震性と津波越流時の侵食に対する抵抗性を向上させ、さらに盛土堤体最下層にセメント安定処理した粒度調整砕石と面状補強材を併用したセメント改良礫土スラブを構築して支持地盤の洗掘による侵食と盛土堤体の不安定化を防止する、新しい盛土構造を開発した(図7)。模型実験の結果、従来構造の盛土は越流開始6分後に半分が侵食されたのに対し、開発した盛土構造では盛土堤体の侵食は殆ど発生しなかった。

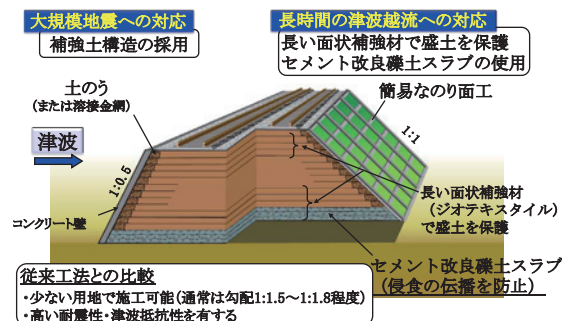


図7 地震および津波越流に強い盛土構造の概要

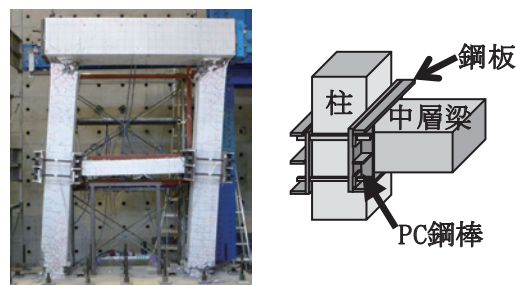


図8 中層梁挿入による耐震補強工法

4.3 既設高架橋の梁増設による損傷制御¹⁷⁾

既設高架橋柱の耐震補強工法として一般的に用いられている鋼板巻立て補強工法等は、RC柱のせん断破壊による高架橋の崩壊を防止することを目的としており、大規模地震に対してはある程度の損傷を前提としている。

特集：構造物技術

巨大地震に対しても構造物の復旧性と列車の走行安全性を向上するためには、構造物の損傷と変形を抑制することが重要である。そこで、既設高架橋に取替え可能な梁を増設し、柱の損傷を抑制する工法を開発した(図8)。本工法は、高架橋柱の中間部に梁を増設し、地震時の変形を抑制するとともに、取替え可能な梁を損傷させることで復旧性が向上する特徴を有している。

4.4 慣性質量ダンパを用いた高架上家の耐震化¹⁸⁾

高架橋に付帯する旅客上家(以下、高架上家)は、高架橋に対して質量が小さく、高架橋と高架上家の固有周期比が近い場合に高架上家の地震時応答が大きくなる傾向があった。またこのことは、地震時に高架上家の懸垂物に大きな加速度を作用させ、高架上家柱脚に大きなせん断力が生じる原因となっていた。そこで、このような性状を有する高架駅に対して、慣性質量の付与が可能な制振ダンパ(以下、慣性質量ダンパ)を適用して高架上家を耐震化する方法を提案した(図9)。

大型振動台を用いた実験と質点モデルを用いた解析によって、慣性質量ダンパの適用により上家の地震時応答を低減する効果があること、付与する慣性質量の大きさにより制振効果を調整できることを明らかにした。また、ホーム上に慣性質量ダンパを設置する場合には、旅客流動や列車運行を阻害しないように方杖型に設置することが考えられるので、この場合の効果を二次元フレーム解析で検証した。



図9 慣性質量ダンパ

5. おわりに

構造物に関する最近の研究開発の概要を紹介した。今後とも、構造物に関する技術課題の解決に向けて、質の高い成果を迅速に提供していきたいと考えている。

文献

- 1) 津野究, 平田亮: 無線センサネットワークを活用したトンネルの変状監視手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.6, pp.25-30, 2014
- 2) 阿部慶太 他: 列車通過時加速度振幅比と傾斜角を用いた鉄道橋梁橋脚の状態監視手法, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.18, pp.205-212, 2014
- 3) 篠田昌弘, 窪田勇輝, 坂本寛章, 御崎哲一: トンネル路盤コンクリートの健全度診断手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.28, No.8, pp.17-22, 2014
- 4) 田所敏弥, 谷村幸裕, 轟俊太郎, 前田友章, 前田欣昌: アーチ型鋼材を用いたラーメン高架橋梁の補強工法の開発, 鉄道総研報告, Vol.25, No.2, pp.17-22, 2011
- 5) 橋本学, 松本光矢, 谷村幸裕, 野村敏雄, 福井真男: 高靱性セメントボードによる既設高欄の補修・補強工法, 土木学会第65回年次学術講演会 V-595, 2010
- 6) 渡辺健, 堀慎一, 轟俊太郎, 谷村幸裕: プレストレストコンクリート桁に対する部分鋼板補強工法の開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.6, pp.31-36, 2013
- 7) 神田政幸, 須賀基晃, 横山知昭, 鶴山勝, 杉本一朗: 鋼桁・橋台・盛土一体化による旧式橋梁の耐震補強, 鉄道総研報告, Vol.26, No.4, pp.29-34, 2012
- 8) 吉田善紀, 谷利晃, 杉本一朗: 既設鋼橋のリニューアルのための合成構造化の開発, 鉄道総研報告, Vol.26, No.4, pp.17-22, 2012
- 9) 白井貴之, 笠倉亮太, 渡辺勉, 仁平達也: 超高強度繊維補強コンクリートによるRCスラブの補強工法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1243-1248, 2014
- 10) 斎藤雅充, 上村寿志, 池田学, 杉本一朗, 谷口望, 依田照彦: 既設高架橋接合部に着目したCFT柱によるリニューアル技術, 鉄道総研報告, Vol.28, No.8, pp.11-16, 2014
- 11) 仲山貴司, 津野究, 牛田貴士, 焼田真司, 室谷耕輔: 既設開削トンネル側壁の開口に関する構造解析手法の検討, 土木学会論文集F1, Vol.71, No.1, pp.29-40, 2015
- 12) 公益財団法人鉄道総合技術研究所: 既存鉄道コンクリート高架橋柱の耐震補強設計指針, 2013
- 13) 鬼頭直希, 中田裕喜, 岡本大, 奥西淳一, 谷村幸裕: 既設RC橋脚の変形性能と耐震補強効果の評価方法, 鉄道総研報告 Vol.29, No.3, pp.53-58, 2015
- 14) 池田学, 芝寛, 吉田直人, 黒田智也: ピボット支承を有する旧式鋼橋の耐震性評価および補強法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.2, pp.23-28, 2011
- 15) 佐々木徹也 他: 崩壊防止ネットと地山補強材を併用した石積み壁の耐震補強方法に関する傾斜・振動台実験, 第49回地盤工学研究発表会, 2014
- 16) 渡辺健治, 松浦光佑, 藤井公博, 工藤敦弘: 大地震および長時間の津波越流に対して粘り強い鉄道盛土構造の開発, JREA, Vol.57, No.11, pp.39058-39060, 2014
- 17) 古屋卓稔, 中田裕喜, 田所敏弥, 岡本大: 中層梁を増設したRCラーメン高架橋の耐震性能に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.871-876, 2014
- 18) 山田聖治, 三木広志, 清水克将: スマートパッシブ制振ダンパを用いた鉄道建築物の耐震性能評価, 鉄道総研報告, Vol.28, No.8, pp.41-46, 2014