

構造物に関する最近の研究開発

舘山 勝*

Recent Research and Development in Structural Technology

Masaru TATEYAMA

Railway Technical Research Institute has been researching practical technology related to design and construction of railway structures. The principal subjects of the research activity consist of seismic retrofitting, maintenance for previously constructed structures, reduction of construction cost, and establishment of design standards. This review describes the recent trend in structural research, and introduces several examples of the research results and subjects of the research and development in the Railway Technical Research Institute.

キーワード：構造物，耐震化，津波対策，維持管理，リニューアル，モニタリング，技術基準，耐震設計

1. はじめに

鉄道総研では、既設構造物の耐震化や延命化に係わる技術開発、性能や経済性に配慮した工法開発、鉄道構造物の設計基準に関する研究などに取り組んでいる。具体的には、都市部に多い旧式構造物の耐震化技術、津波対策、変状構造物におけるモニタリング技術、大規模リニューアル技術などについて研究開発を進めている。また、技術基準の性能規定化に伴う改訂業務を担当している。

ここでは、構造物に関する最近の研究開発の取り組みについて述べる。

2. 耐震化技術

兵庫県南部地震を契機に、空港や港湾、鉄道や高速道路など、重要度の高い社会基盤施設に対しては大地震に対しても十分な耐震性を有することが社会的に求められ、鉄道においても、鋭意、対策が進められてきた。特に、新幹線や利用者の多い都市鉄道においては、主として脆性的破壊が懸念される RC 構造物のせん断破壊対策として、高架橋柱や単柱橋脚、開削トンネルの中柱などに対して、鋼板巻きなどによる補強が進められてきた。また、橋桁についても落橋防止工の設置や支承部の補強が施されてきた。これらのことから、東北地方太平洋沖地震では、巨大地震の割には地震動による被害が限定的であり、兵庫県南部地震のような、橋梁の落橋、高架橋の崩落などの甚大な被害は生じなかった。

一方、東北地方太平洋沖地震以降、首都直下地震など想定地震動に対するリスクが見直されており、その対応は喫緊の課題となっている。特に首都圏など大都市においては、鉄道の建設年次が古いことに起因して、レンガや石積み、無筋コンクリートなどの旧式構造物や、耐震性が低い土構造物が多数存在する。このため、より安価で効率的な耐震化技術の開発が求められている。

図1は、鉄道総研において最近開発を進めてきた、駅上家や鋼橋梁、盛土や土留め壁など、これまで着目されてこなかった耐震弱点箇所に対する対策や、車両の地震時走行安全性の向上策などの耐震化技術¹⁾を示したものである。いずれも、営業線下での施工を想定した実務的な方法であり、今後の適用拡大が期待できる。

しかしながら、特に都市部の土構造物においては、明治、大正時代に造られた耐震性が低い盛土や、石積み壁、

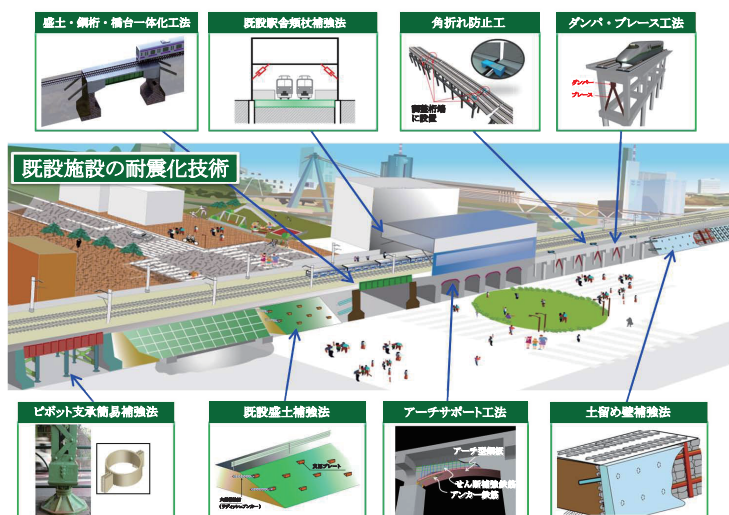
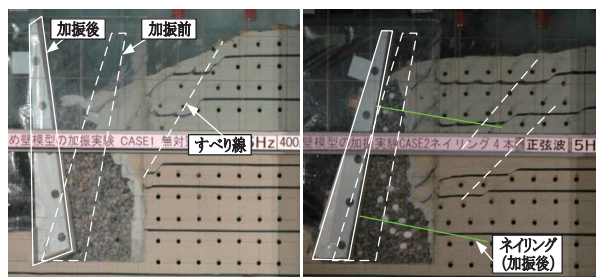


図1 鉄道総研が開発した既設構造物の耐震化技術

* 構造物技術研究部 部長

特集：構造物技術

もたれ壁などが多数存在し、対策必要箇所が膨大となる。このため、現行の耐震標準を満たす補強を全線に行おうとすると多大な費用と期間を要することとなる。したがって、限られた予算で対策を施すのであれば、対象箇所を絞り込んで100点満点の補強を行うよりは、広い範囲に対して70点程度の簡易な補強を行う方が実務的である。そこで鉄道総研では、十分な耐震設計が行われていない古い形式の盛土や土留め壁に対して、簡易な補強法・設計法を検討しているところである。



(a) 無対策 (400gal加振後) (b) 2段補強 (800gal加振後)

図2 模型もたれ壁の加振実験

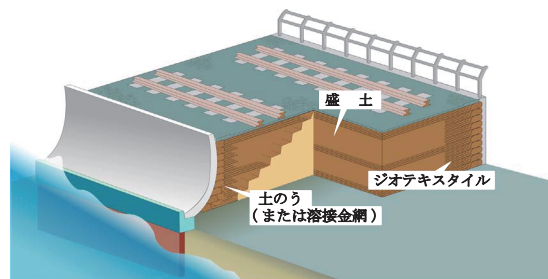
図2に一例として、1/10スケールのもたれ壁模型に対する振動実験結果²⁾を示す。ネイリング(地山補強材)を用いて、最も危険と考えられる脆性的な破壊形態(転倒)を回避できるような簡易な補強法の効果を確認したもので、無対策に対して2段ネイリング補強しただけであっても、耐震性が2倍以上に高まっている。他の形式についても簡易な補強法について、順次、検討を進めているところである。

3. 津波対策技術

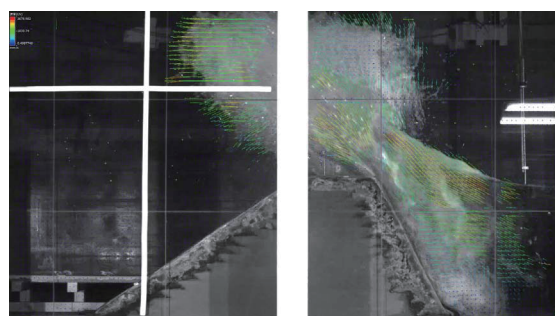
東北地方太平洋沖地震での津波被害は甚大であり、津波被害のメカニズム解明や合理的な対策法の検討が各機関において進められている。このうち復興構想会議では、「巨大津波による被害を防ぐための具体的な方策として、避難システムの構築とともに多重津波防御施設が有効である」としている。そこで鉄道総研ではRRR工法を用いて鉄道盛土を津波の多重防御施設として再構築する方法を提案³⁾し、研究開発を進めている(図3)。本工法は防潮堤として使用された事例は無いものの、海岸や河川護岸の復旧工事において適用された実績があり、津波抵抗性も高いことが期待されている。現在、津波越流実験により、その性能について検証しているところである。

一方、鉄道を多重防御施設として盛土主体で復旧した場合においても、河川や道路の交差部においては橋梁構造とする必要がある。これに対して、鉄道総研が開発を進めている補強土併用(GRS)一体橋梁の適用を提案している。本工法は、支承が無い構造であることから高い

維持管理性、経済性を有するだけでなく、高い津波耐力を有することが示唆される。現在、三陸鉄道の北リアス線の橋梁流出箇所の復旧工事において、本工法の適用が計画されている。



(a) RRR工法の適用イメージ



(b) 津波越流実験の画像解析例

図3 防潮鉄道盛土の開発

4. リニューアル技術

鉄道は道路などに比べていち早く社会基盤整備が進められてきたことから老朽構造物が多く存在し、老朽化の程度が小さい場合には、部分的な補修や補強などの措置が施される。老朽化が著しく進んだ構造物に対しては、営業線下において大規模なリニューアル工事が行われるが、特に都市部ではリニューアルの際に、機能向上や性能向上も求められる。

近年、RC高架橋のスラブの老朽化が進み、耐力の低下が懸念されている。また、列車の高速化に伴って、振動や騒音の低減が求められる場合がある。そこで、デッ

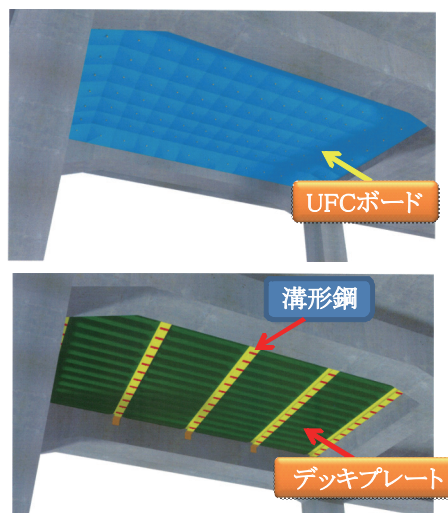


図4 高架橋スラブの補強法

キプレートならびに UFC ボードを用いた高架橋スラブの補強工法を開発⁴⁾している(図4)。本工法は、スラブ下面にデッキプレートもしくは UFC ボードを設置し、無収縮モルタルを充填して一体化するものであり、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ため施工性が向上し、耐荷力の向上も期待できる。また、デッキプレートを用いた場合には大幅にスラブ剛性が高まることから、振動や騒音の低減効果が期待でき、UFC ボードについては薄肉軽量のため、基礎への負担が小さいなどの特徴がある。

本工法の補強効果については、載荷試験を実施し、耐荷力および剛性が大きく向上することを確認している。さらに解析によって、デッキプレートを用いた場合には列車走行による構造物音が 2dB 程度低減されることを確認している。

一方、既設高架橋に対して、RC の柱部材をコンクリート充填鋼管 (CFT) 柱に取り替える技術開発⁵⁾を進めている(図5 (b))。本工法の特徴は、性能の低下した高架橋柱を、耐荷力・変形性能に優れた CFT 柱に取り替えることにより耐震性が高まるのに加えて、駅上層への建築物の建て増しなどにも対応可能となる。また、図5 (a) のように梁も補強することにより積極的に柱間隔を拡げ、旅客の流動性向上や高架下利用空間を拡大する際に活用できる。

本工法の検証として CFT 柱の接合部の載荷実験等を行い、梁～柱接合部の構造の妥当性、耐荷力・変形性能を確認している。また、既設 RC 高架橋を対象に試設計を行い耐震性能の向上効果を検証した結果、柱本数が減少した図5 (a) の場合でも、耐震性能を2倍程度向上させることが可能であることを確認している。

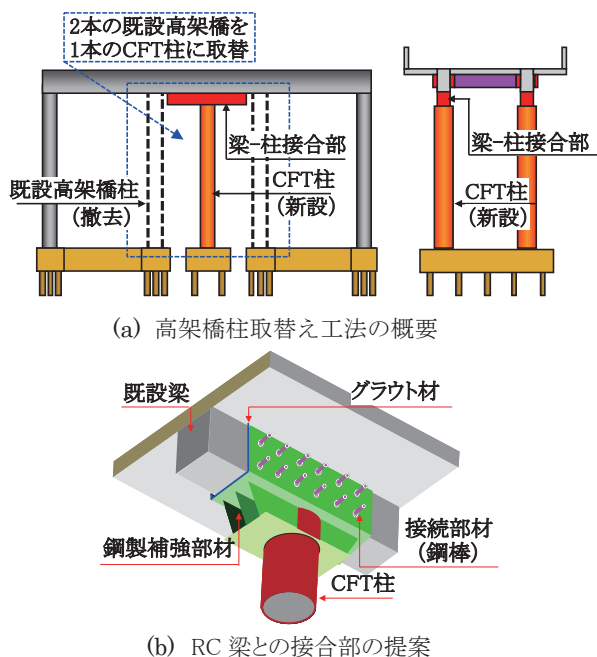


図5 CFT 柱を用いた高架橋柱取替え工法

なお、梁の補強に関しては既にアーチサポート工法を開発しており、ここで紹介したスラブ補強、柱の取替え工法の開発により、老朽高架橋の全面改修への対応も可能となる。

この他、地下駅の改築にあたっては、近年、混雑緩和や機能向上などを目的とした空間拡幅の需要があり、既設躯体の一部を開口し、新設躯体と接続する大規模なリニューアル工事が増加している。そこで、拡幅規模や施工過程、既設躯体の老朽化状態を考慮した設計法を提案するとともに、効果的な接続構造や補強技術についても、別途、開発を進めている。

5. モニタリング技術

鉄道橋梁の高経年化に伴い、特に長大橋梁のメンテナンスは重要課題となっている。そこで、列車通過時振幅比、傾斜角、支承変位、固有振動数など長大橋梁の維持管理における健全度判断指標を提案し、センサとデータ伝送を用いた長大橋梁モニタリングシステムの開発⁶⁾を行っている。

計測用センサの開発においては、安価で耐久性に優れ、かつ長期的な電源の確保を実現することが重要な課題であった。そこで、安価で省電力な MEMS (微小電気機械素子) 技術を用いて、列車振動検知機能、固有振動数算出機能などを装備した耐久性が高い加速度・傾斜センサを新たに開発した(図6)。さらに、圧電素子により列車振動を電気に変え蓄電することで、長期的に各種センサの電源を確保するシステムを開発した。現在、センサや電源システムを実際の鉄道長大橋梁で試用し、列車通過時振幅比、傾斜角、支承変位、固有振動数などの長大橋梁の健全度判断指標を常時モニタリングしており、

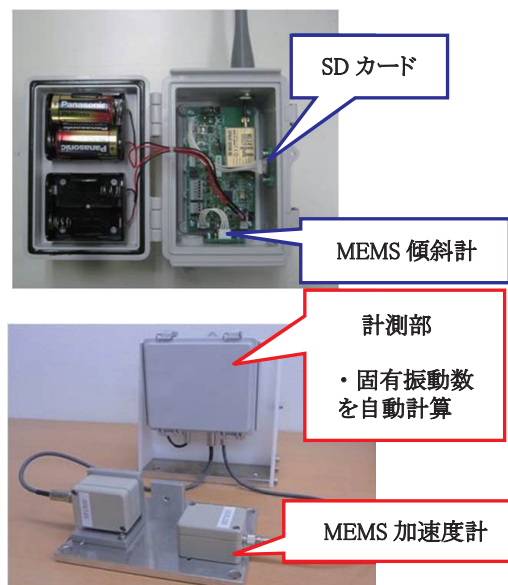


図6 開発した MEMS センサ

特集：構造物技術

長期的に安定して計測できることを確認している。

この他、トンネルの変状を無線センサネットワークを利用して状態監視する技術開発も進めている。

6. 耐震設計標準の改訂

鉄道総研では国土交通省からの委託により、鉄道構造物等設計標準および維持管理標準の整備を進めている。最近の基準を取り巻く状況としては、平成13年に省令が、従来の仕様規定から性能規定へ改正され、順次、性能規定化への変更が進められている。

このうち、平成11年に制定された『鉄道構造物等設計標準・耐震設計編（以下、耐震標準）』について改訂を行った。本標準については、東北地方太平洋沖地震についても対応可能であることの検証を加え、平成24年7月に国土交通省より通達がなされ、9月に耐震設計標準同解説⁷⁾が出版された。

耐震標準の改訂のポイント⁸⁾は以下の通りである。

- ① 関連する国際基準との整合を図るため、耐震標準も性能設計法に移行するとともに、様々な点で国際基準に配慮した。表1に、本標準における鉄道構造物に要求される性能を示す。
- ② 近年急速に発展した地震観測網で得られた多数の地震記録を分析し、L2地震動の標準応答スペクトルを見直した(図7)。また、東北地方太平洋沖地震では、標準応答スペクトルを短周期側で大きく上回る地震が多数発生したことに鑑み、標準応答スペクトルに加えて、短周期が卓越した地震動も限定的に規定した。
- ③ 地盤や構造物の応答値を合理的に算定できるように算定方法を見直した。また、東北地方太平洋沖地震

表1 鉄道に要求される性能

| 性能 | 設計地震動 | 内容 | 適用 |
|-----|--------------|-------|-------|
| 安全性 | L2地震動 | 崩壊防止 | 全構造物 |
| | L1地震動 | 走行安全性 | 全構造物 |
| 復旧性 | 復旧性照査地震動(L2) | 修復性 | 重要構造物 |

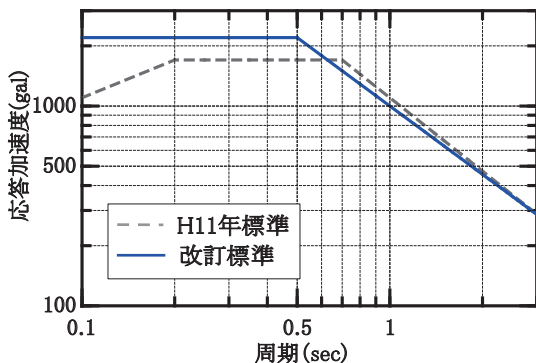


図7 L2地震動（スペクトルⅡ）

で電車線柱が多数折損したことを受けて、高架橋上の電車線柱の応答値の算定方法を新たに盛り込んだ。

- ④ 津波や地表断層変位などを『地震随伴事象』と定義し、路線計画を含めて構造計画の段階で適切に配慮することとした。

なお、現在、複合構造物設計標準の性能規定化に向けた改訂作業が進められており、平成25年度初に原案ができる見込みである。

7. おわりに

鉄道総研では、構造物の設計や施工、維持管理に関する技術開発を継続的に進めており、これまで多くの技術を提供してきたが、まだまだ取り組むべき課題も多い。特に、多岐に亘る構造物に対する大規模地震対策については、関係箇所が連携・分担して、効率的に研究開発を進める必要がある。また、老朽化が進む既設構造物の延命化対策についても同様であり、安価で効果的な対策の実用化が求められている。

今後とも鉄道事業者ならびに関係各位のご支援を頂きながら、研究開発の早期実用化に取り組む所存である。

文 献

- 1) 館山勝：地上設備の耐震化技術，第24回鉄道総研講演会要旨集，鉄道総合技術研究所，pp.21-27，2011.11
- 2) 中島進，阿部慶太，渡辺健治，篠田昌弘：既設鉄道擁壁の耐震補強技術の開発に関する取り組み，地盤工学会誌，Vol.61，No.1，pp.10-13，2013.1
- 3) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道の災害復旧・復興に向けた技術提案，pp.25-29，2011.12
- 4) 白井貴之，岡本大，黒岩俊之，笠倉亮太：超高強度繊維補強コンクリートを用いたスラブの補強工法の検討，土木学会第67回年次学術講演会 V-215，pp.429-430，2012.9
- 5) 上村寿志，齊藤雅充，谷口望，北川淳一，西村昌宏，依田照彦，桜井淳：複合構造物を活用した既設鉄道RC高架橋のリニューアル手法に関する基礎的研究，構造工学論文集 Vol.59A，土木学会，2013.3
- 6) 阿部慶太，王林，真井哲生，篠田昌弘，中島進，江原季映：実物大土留め模型による土留めの長期計測と微動振動特性の関係に関する検討，第57回地盤工学シンポジウム平成24年度論文集，pp.253-258，2012.11
- 7) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，2012.9
- 8) 室野剛隆，水野寿洋：鉄道構造物の耐震設計基準の改訂とその概要，日本鉄道協会誌，Vol.50，No.12，pp.37-39，2012.12