

構造物に関する最近の研究開発

館山 勝*

Recent Research and Development on Structural Technology

Masaru TATEYAMA

In the Structural Technology Division, we developed new technology concerning railway structures, including seismic design, retrofitting, maintenance, reduction of construction cost and establishment of design standards.

This paper describes the fundamental concepts of the objects, several examples of our research results and subjects of the research and development.

キーワード：構造物，技術基準，維持管理，延命化，耐震設計，耐震補強

1. はじめに

構造物技術研究部では近年、既設構造物の耐震性評価や補強に係わる技術開発、地下水や駅に係わる環境対策、性能や経済性に配慮した工法開発、技術基準に関する設計法の整備などに取り組んでいる。ここでは、構造物に関する最近の研究開発成果について紹介する。

2. 耐震性評価・補強に関する研究

近年、内閣府より東海・東南海地震や首都圏直下地震などの想定地震動が示され、鉄道や高速道路、原子力施設などの重要構造物に対しては、このような巨大地震に対する対応が求められている。ここでは、新たに構築した地震応答解析法や橋梁支承部のモデル化、大型振動試験装置について紹介する。

この他、対策が遅れている基礎部の耐震補強法として、鋼矢板を用いた簡便で経済的な既設基礎耐震補強工法を開発した。また、固結度の小さい小土被りの地山では地震被害を受けやすいため、模型実験や数値解析によりトンネルの耐震性能を確認した。これらの詳細については本誌別稿を参照されたい。

2.1 断層～車両系の地震応答解析法の構築¹⁾

我が国には多くの活断層が存在しているため、断層近傍における鉄道構造物の耐震補強や車両の地震時挙動を合理的に検討するためには、地震動を精緻に予測する必要がある。そこで本研究では、震源断層を含む大規模な岩盤領域における地震動の伝播過程を考慮するとともに（マクロ解析）、軟弱な堆積層における局所的な地震動の

変化の影響も考慮し（ミクロ解析）、2つの解析手法をカップリングさせることにより、両者の影響を評価できる地震動の予測法を新たに開発した。また、連続する高架橋群においては各地点で異なる地震動が入力されるため、構造物間の相互作用を適切に評価する必要がある。そこで、調整桁の固定側、可動側の鋼棒ストッパーの影響を実験的に評価し、その結果に基づいて鉄道高架橋を「群」として考えた場合の隣接構造物間の相互作用をモデル化することで、精度の高い構造物群の解析が可能となった（図1）。

なお、本研究は国土交通省の補助金を受けて実施したものである。

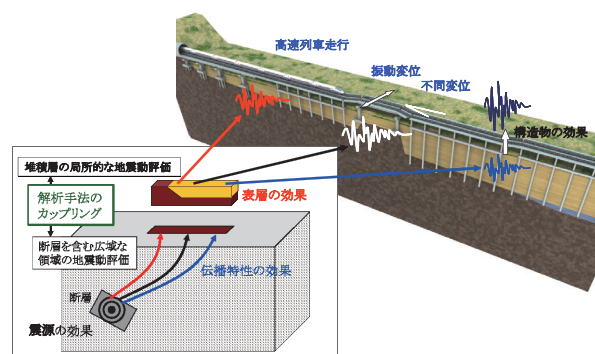


図1 断層～車両系の地震応答解析法のイメージ

2.2 RC橋梁における支承部のモデル化²⁾

鉄筋コンクリート橋梁の支承部は、主に支承本体と橋脚天端に埋め込まれた移動制限装置により構成されているが、動的解析を行う際のモデル化について十分な検討が行われてこなかった。そこで本研究では、移動制限装置として一般的に用いられている鋼角ストッパーの地震時の挙動を正負交番載荷試験により明らかにし、従来は具体的なモデル化方法が確立されていなかった支承部の非線形モデルを提案した（図2）。このモデルを用いて、

* 構造物技術研究部 部長

特集：構造物技術

橋梁全体系の時刻歴動的解析を行うことにより、これまで設計では考慮できなかった桁の衝突現象の影響評価が可能となる。また本研究では、FEM解析と正負交番荷重試験により、桁座の支圧耐力と鋼角ストッパーの水平耐力の関係を明らかにした。これらによると鋼角ストッパーの水平耐力は、桁座上端が支圧耐力に達しても低下せず、ストッパー下端部が支圧耐力に達した時点で決定されることが明らかとなった。これにより、鋼角ストッパーの桁座の埋め込み長を短縮できる目途が得られた。

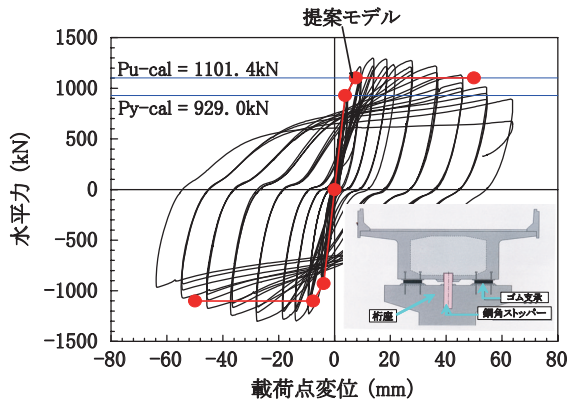


図2 RC橋梁の支承部と提案モデル

2.3 大型振動試験装置³⁾

1995年兵庫県南部地震においては、高架橋などの鉄道構造物に大きな被害が生じた。さらに2004年新潟県中越地震では、営業列車としては初の新幹線脱線事故が発生し、構造物のみならず軌道・車両の地震時挙動についての解明や脱線対策の提案が急務となっている。そこで、鉄道総研内において震度7クラスの地震動の模擬や鉄道台車の荷重が可能な大型2次元振動試験装置の作製に着



機能	性能
加振方向	水平2方向
最大積載重量	50トン
振動台寸法	7m×5m
最大変位	X: ±100 (cm) Y: ±25 (cm)
最大加速度	X: 1000 (gal) Y: 2000 (gal)
加振周波数	0.01~20 (Hz)

実験対象: 実台車, 実軌道, 1/2スケールの高架橋柱, 1/5スケールの地盤



図3 大型振動試験装置の性能と実験状況

手し、平成20年11月に完成した(図3)。

本装置はレベル2地震動における高架橋上の変位に相当した地震動を模擬することが可能で、構造物模型および実軌道、実台車の搭載が可能となるように、加振ストローク±100cm、最大加振加速度2G、最大荷重重量500kNの仕様とした。今後、地震時の車両の動的挙動の解明や、軌道・電車線柱・建築上家・構造物などの連成挙動、耐震対策等における研究への活用が見込まれている。

なお、本試験装置は国土交通省の補助金を受けて作製したものである。

3. 維持管理・延命化に関する研究

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、それらの補強、延命化に関する技術の確立は喫緊の課題である。以下にトンネルや橋梁に関する最近の研究を紹介する。

この他、コンクリート部材の欠陥を非接触で探傷するためのレーザーによる高精度リモートセンシングシステムや、高架橋群の損傷判定を遠隔で精度よく行うことが可能な地震時損傷評価システムの開発については、本誌別稿を参照されたい。

3.1 トンネルの変状監視システム⁴⁾

導電材料を用いたひび割れ検知システムは、コンクリート表面に塗布された導電材料がひび割れによって破断し電気を通さなくなることを利用したもので、一度に広範囲を計測できるメリットがあるが回路内のどの位置でひび割れが発生したかを特定できない。そこで、回路シミュレーション解析による抵抗値と測定値を比較することにより、ひび割れの発生位置を特定できる技術を開発した。また、ひび割れ変位計や導電材料を用いたひび割れ検知計の計測出力を無線化する技術も開発し、安全かつ経済的なトンネルの変状監視が可能となった(図4)。

なお、開発したシステムは小型・小電力で、計測器とレコーダーの配線の作業が不要となるため、列車間合いの短い場所でも計測器の設置が容易である。

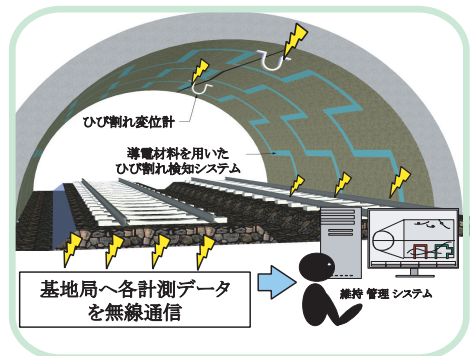


図4 変状監視システムのイメージ

3.2 開削トンネルの施工記録管理手法⁵⁾

トンネルの維持管理は、ひび割れで健全度を判定する機会が多いが、これまで乾燥収縮などに起因する材料ひび割れと、施工後に生じた有害なひび割れを判別する方法は確立されていなかった。そこで実際の開削トンネルにおいて、施工時から供用後まで継続してひび割れの発生や進展状況を観察すると同時に、施工記録の分析を行った。

その結果、材料ひび割れは、施工時の打設ブロックの割付け、硬化時の温度変化と拘束、打設したコンクリートの品質に大きく依存していることを把握し、現在生じているひび割れが、施工に起因したひび割れか否かを判別する簡易な方法を提案した。さらに、水分量の移動や温度変化を考慮した解析手法の提案により、材料ひび割れ発生の定量的判定が可能となった。

なお、上記の手法を用いる場合には膨大な情報を保存し管理する必要があるため、三次元CAD図をベースとしたデータベースを構築し施工記録を手軽に管理できる方法も同時に開発した(図5)。

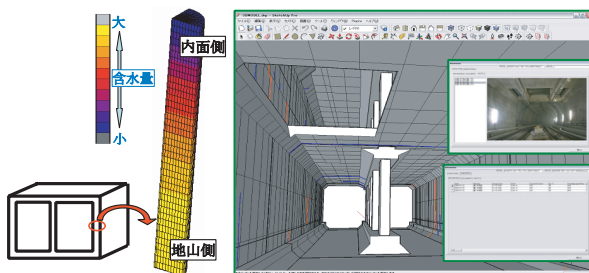


図5 解析モデルと施工記録管理用データベース

3.3 鋼桁の疲労き裂の対策手法⁶⁾

下路プレートガーダーや下路トラスといった下路桁形式の既設鋼鉄道橋では、床組部材の疲労変状が問題となっている。特に、縦桁・横桁連結部からは多くの疲労き裂が発生しており、これが進展した場合、部材の破断を引き起こし、列車の走行に重大な影響を及ぼす恐れがある。そこで、この縦桁・横桁連結部に着目し、変状調査、解析および荷重実験によって疲労き裂の発生原因を明らかにし、き裂の補強法を提案した。

本研究では、変状の実態調査を実施し、縦桁・横桁連結部に発生する疲労き裂の特徴を発生部位毎に整理した。また、FEM解析ならびに実橋梁部材を用いた荷重実験によって、これらのき裂の発生原因を明らかにし、補強法を提案した(図6)。荷重実験によって発生部位における応力の低減効果を確認した結果、適切な補強を行うことによって発生応力が半分程度に低減するため、余寿命を約8倍に延ばすことが可能となる。現在、実施工に向けた検討を進めている。

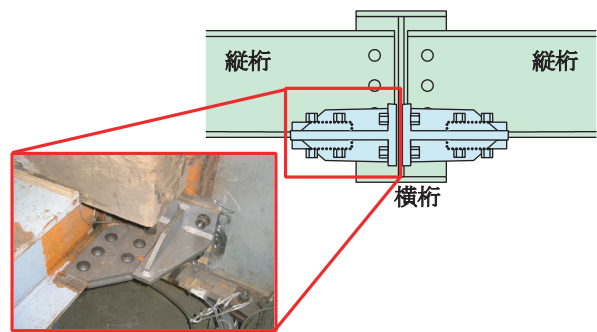


図6 縦桁下端に対する補強例

3.4 ラーメン高架橋の梁の補強工法⁷⁾

RC ラーメン高架橋は、大正末期頃から建設されるようになってきたが、経年による劣化対策や機能改善の観点から、耐久性や耐震性等の向上を目的としてリニューアルを行う場合がある。これまで、高架橋のRC柱に関して数多くの研究がなされ、様々な補強工法が開発されてきたが、RC梁に関しては研究開発事例が少ないのが現状である。そこで高架橋の梁部材を対象に、鋼板と形鋼で構成されるアーチ型鋼材を用いた補強法(以下、アーチサポート工法、図7)を東急建設と共同開発した。

本工法について、上層梁を模擬した試験体による荷重試験により、せん断補強鉄筋、アーチ型鋼板、アンカー鉄筋等の形状、および配置について検討した。さらに、昭和初期に建設された高架橋の上層梁を模擬した実大試験体による交番荷重試験を行い、アーチサポート工法で補強された上層梁が所要の性能を確保していることを確認した。アーチサポート工法は、せん断補強鉄筋や施工時の型枠の配置が簡略化できることから、従来のコンクリート巻立て工法に比べ、施工性、工期、コスト、景観に優れた工法である。

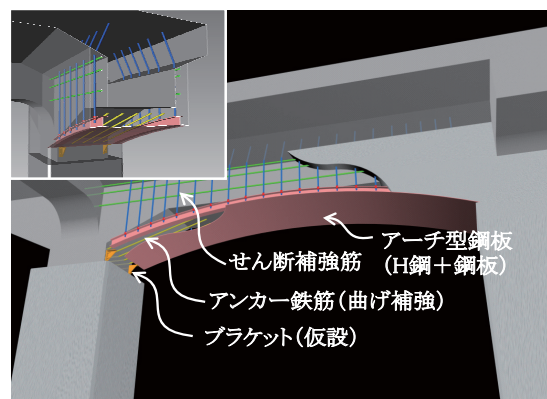


図7 アーチサポート工法

4. 技術基準等の整備状況

鉄道総研では、国交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行っている。最

特集：構造物技術

近の基準を取り巻く状況としては、平成13年に省令（国土交通省令第151号）が、従来の仕様規定から性能規定へ改正され、コンクリート標準、土構造標準が性能規定型設計標準に改められた。残る設計標準に関しても、順次、性能規定化への変更が進められている。以下に設計標準の整備状況を紹介する。

4.1 鋼・合成標準⁸⁾

平成15年度に、「鉄道鋼・合成構造物設計標準に関する委員会」（委員長：依田照彦 早稲田大学教授、幹事長：館石和雄 名古屋大学教授）が設けられ、4年間にわたる審議を経て成案を得た。その後、解説の精査や付属資料の整備、設計ツールの整備を進め、平成21年7月に新たに改定した設計標準が発刊された（図8）。



図8 改定した鋼・合成構造物設計標準

本標準の主な改定点としては、性能照査型設計法への移行、多様化する構造物への適用性拡大、耐久性の明確化、大規模地震対応の照査法の導入などが挙げられる。また編構成としては、鋼構造物と合成桁の照査における共通の事柄に関しては共通編として整理し、第I編「共通編」、第II編「鋼構造物編」、第III編「合成桁編」の3編構成とした。さらに、参考資料として、構造計画編と施工編を作成した。

4.2 基礎標準

平成17年から3年間の期間で「基礎構造物設計標準に関する委員会」（委員長：日下部治 東京工業大学教授、幹事長：古関潤一 東京大学教授）が設けられ、平成20年7月に開催された最終委員会にて成案を得た。

本標準の主な改定点としては、性能照査型設計法への移行、地盤反力係数や地盤抵抗モデルの見直し、載荷試験による設計法の見直しなどが挙げられる。また、高性能材料（高強度鉄筋、ポリマー泥水等）、シートパイル基礎、回転杭、機械式鋼管継手などの新材料・新技術の適用法について示した。

現在、付属資料や設計ツールの整備を進めており、平成21年度内を目指して発刊準備を進めている。

4.3 耐震設計標準

平成18年から改定作業を開始し、改定委員会（委員長：

佐藤忠信 神戸学院大学教授、幹事長：澤田純男 京都大学防災研究所教授）による審議（委員会3回、幹事会9回）を経て、平成21年9月に最終委員会を終えた。主な改定点としては、性能設計における要求性能の考え方の提示、国際基準（ISO）との整合性からのL2地震動の定義の変更とスペクトルの見直し、応答値の算定法の精度向上、免震や制震構造などの新技術への対応強化、経済性照査（TCM）法の概念の提示などが挙げられる。

本件に関しては今後、約1年間で付属資料の整備、計算例や設計計算ソフトとの整備を行い、平成22年度中の出版を目指している。

5. おわりに

構造物に係わる設計や施工に関する技術開発はこれまで多くの実績を上げてきたが、まだ取り組むべき課題も多い。特に、地震対策や老朽化が進む既設構造物の延命化対策については喫緊の課題であり、研究成果の早期実用化が望まれている。実用化を進めるにあたっては、鉄道事業者ならびに関係各位のご支援を頂くこととなるが、ご協力を願いたい。

文献

- 1) 川西智浩, 室野剛隆：剛性マトリクス法とFEMを結合させた広域な地震動評価方法, 鉄道総研報告 Vol22, No.1, 2008.1
- 2) 岡本大, 田所敏弥, 松枝修平, 佐藤勉, 松橋宏治：地震応答解析における鋼角ストッパーのモデル化に関する一考察, 鉄道力学論文集 No.12, 2008.7
- 3) 館山勝：大型振動試験装置, RRR, 第65巻第11号, (財)研友社, 2008.11
- 4) 津野究, 中西祐介, 仲山貴司：無線センサを活用したトンネル変状監視システム, RRR, Vol.66, No.2, pp.18-21, 2009.2
- 5) 新井泰, 大石敬司, 蒲地秀矢, 有賀貴志, 瀧浦猛朗：開削トンネルの維持管理に資する情報の収集, 活用に関する検討, トンネル工学報告集第18巻, pp.267-274, 2008.11
- 6) 杉本一郎：開床式鋼鉄道橋の縦桁・横桁連結部の疲労き裂, 施設研究ニュース, No.212, pp.3-4, 2008.4
- 7) 前田欣昌, 黒岩俊之, 谷村幸裕, 田所敏弥：アーチ型鋼材により補強したT形RC梁の変形性能に関する載荷試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1105-1110, 2009.7
- 8) 杉本一郎, 池田学：鉄道構造物等設計標準（鋼・合成構造物）改定の要旨, 鉄道総研報告 Vol23, No.5, 2009.5