

# 構造物に関する最近の研究開発

谷村 幸裕\*

## Recent Research and Development in Structural Technology

Yukihiro TANIMURA

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 environmental technologies in railway stations. 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，耐震補強，維持管理，音環境

### 1. はじめに

鉄道総研では、鉄道構造物の耐震補強や維持管理、設計や環境対策に関する研究開発を実施している。

まず、地震対策に関しては、1995年の兵庫県南部地震の被害を契機として鉄道構造物の耐震補強が進められてきたが、その後も2004年の新潟県中越地震や2011年の東北地方太平洋沖地震などで被害を繰り返している。現行の設計基準でも、大規模地震にはある程度の損傷が生じることを前提としているため、多少の被害はやむを得ないものの、旧基準で設計された既設構造物には大きな被害を生じるものがある。このため、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、迅速に有効な耐震対策を進めていく必要がある。このため、様々な形態の地震被害を軽減するための耐震補強工法などの耐震対策技術の研究開発を実施している。

また、鉄道総研では、今春、鉄道の地震リスクの軽減に向けた研究をよりダイナミックに進展させるため、「鉄道地震工学研究センター」を発足させた。鉄道地震工学の拠点として、関連の記録、データベースの保管、技術者育成支援、地震発生時の情報提供、復旧関連支援に取り組んでいるところである。構造物の地震対策に関する研究開発については、従来は専ら構造物技術研究部にて実施してきたが、今後は鉄道地震工学研究センターと連携し、より安全、安心な鉄道の実現につながる取り組みを実施したいと考えている。

次に、維持管理に関しては、我が国のインフラの老朽化対策が課題となっているが、とりわけ鉄道構造物は明治期以来建設されてきた構造物をそのまま使用している

ものが多いうえ、鉄道の特性上取り替えが難しいケースも多く、厳しい状況にある。しかし、建設から間もなく変状を生じて補修を繰り返している構造物がある一方で、建設されてから相当長期間経過しても健全性を維持している構造物も多数存在しており、耐久性の高い構造物を建設し適切に維持管理していくことが重要になっている。そこで、精度の高い劣化予測技術、簡便で実用的な検査技術、効果の高い補修補強技術などの研究開発を実施している。また、構造物の健全性には問題が無くても、機能上の問題などから大規模改修が必要となる場合もあるため、これに対応するための工法や設計法の開発を実施している。

このように、構造物に関する諸課題に対応するための様々な研究開発を進めているところであるが、ここでは、最近の主な研究開発の概要について紹介する。

### 2. 地震対策に関する研究開発

1995年の兵庫県南部地震以降、耐震補強は主に高架橋柱と落橋防止を対象として進められてきたが、これらの対策が進むとともに、それ以外の構造物の地震被害も注目されるようになってきた。そこで、様々な形態の被害に対応した地震対策の技術開発を実施している。

鉄道構造物は古くから建設されてきたため、建設当時の技術レベルでは十分な耐震性が確保されていない構造物も多数存在する。石積み壁もその一つであるが、壁面に一体性が無く、地震時に一部の積み石が不安定化するとそれが全体に伝播し、脆性的に崩壊する可能性がある。このため、従来技術の耐震補強では、剛な一体壁面を積

\* 構造物技術研究部 部長

特集：構造物技術

み石前面に構築したうえで地山補強材を打設するか、もしくは地山補強材を密に打設して一部の不安定化をも生じさせないようにする必要があった。そこで、図1に示す、崩壊防止ネットと地山補強材による石積み壁の耐震補強工法の開発を目的とした実験的・解析的な検討を実施したところ、崩壊防止ネットによる積み石の引き留め、拘束効果および地山補強材による背面地盤の安定化効果が発揮され、効果的な耐震補強が可能であることが明らかになった<sup>1)</sup>。実験により把握された補強メカニズムから、補強効果を担保するために避けるべき破壊形態として、ネットの破断、地山補強材の引き抜け、石積み壁の内的安定の喪失、過度の背面地盤の変形の4項目を抽出し、静的解析法、動的解析法による応答値算定モデルを提案した。提案した解析法により、現実的な仕様でL2地震時においても復旧性を確保するための耐震補強を行うことを確認し、石積み壁の耐震補強マニュアルを作成した。

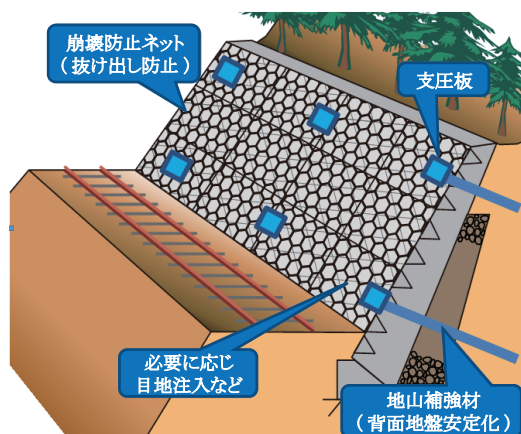


図1 石積み壁の耐震補強方法の模式図<sup>1)</sup>

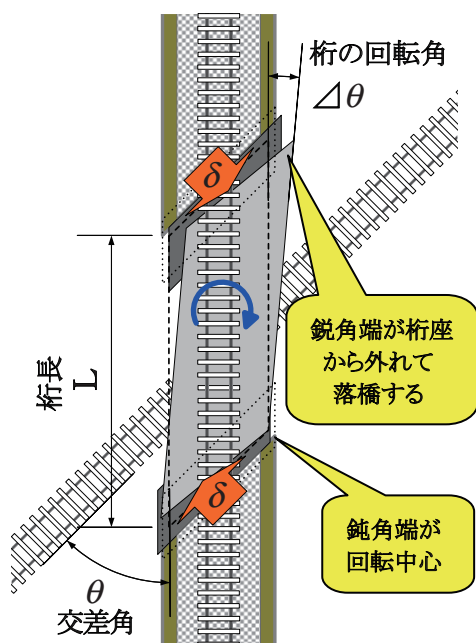


図2 斜角橋台が変位により桁が回転する破壊モード<sup>2)</sup>

斜角を有する橋りょうも地震により変状を生じやすい構造物として知られており、過去の大規模地震時に支承が破壊されて桁が水平方向に回転し、場合により落橋する被害事例も生じている。このため、既設の斜角橋りょうの耐震性能を適切に評価する手法の確立が望まれていた。従来は、斜角橋りょうの地震の桁回転挙動は、桁がパラペットや隣接桁に衝突することにより生じると考えられてきたが、斜角橋台の地震時挙動が不明で、橋りょう全体の挙動も十分に解明できていなかった。そこで、斜角橋台に着目した模型振動実験を実施し、斜角橋台は地震時に壁前面方向に累積変位していく挙動を明らかにした。また、橋台に支持される斜角橋りょう全体系に着目した模型振動実験により、地震時の斜角橋りょうの桁回転挙動の要因は、桁のパラペットや隣接桁への衝突だけではなく、図2に示すように、橋台等下部工間の相対変位も要因であることを明らかにした<sup>2)</sup>。さらに、斜角橋りょうの橋台の相対変位と桁の回転角の関係をモデル化し、それを基にL1地震時は列車走行安全性、L2地震時は落橋に対する安全性を指標として、実務において簡易に耐震診断を行えるノモグラムおよび耐震診断フローを作成した。

橋脚も地震で被害を受けやすい構造物であり、旧基準で設計された鉄筋コンクリート (RC) 橋脚にも耐震性が低いものが存在する。これまでに開発されてきた耐震補強工法はラーメン高架橋柱を対象としたものが多く、断面形状や鉄筋量が異なり、軸方向鉄筋の途中定着 (段落し) を有する橋脚に関して、適切な補強工法とその設計法の開発が望まれていた。そこで、既設 RC 橋脚の構造諸元の調査結果を反映した模型の載荷実験を行い、変形性能算定式を低鉄筋比領域に拡張できることを明らかにするとともに、辺長比の大きい RC 橋脚に配慮したじん性補強工法、曲げ補強工法を考案し、載荷実験によりその補強効果を確認した。

また、過去の地震において既設 RC 橋脚は、図3に示



図3 RC橋脚の軸方向鉄筋途中定着部の被害例

すように軸方向鉄筋の途中定着部で損傷を受ける事例が多数発生している。この対策としてRC巻立てにより補強する方法があるが、河川内のRC橋脚は河積阻害率や施工条件などの制約が厳しく、適用が困難になることが多い。そこで、橋脚断面の増加を抑えた図4に示すような帯状鋼板を用いた補強工法を考案し、載荷実験により本工法によって耐震性が向上することを検証した<sup>3)</sup>。

鋼橋においては、過去の地震において支承部に多く損傷が生じている。種々の形式の鋼製支承について、地震時の評価法と補強法について検討を行っており、最近では、鋼トラス橋や合成桁に多く用いられているピン・ローラー支承の検討に取り組んでいる。また、隣接する鋼桁と鋼桁をつなぐ桁連結工も、落橋対策の重要な部位であるが、その地震時の挙動については十分に明らかにされていない。そこで、図5に示す、桁連結工およびその周辺部の局所有限要素モデルによる衝撃の影響を考慮した動的解析を行い、その結果を踏まえた構造全体系モデルにおける地震応答解析を実施し、これらの検討結果をもとに、実務での適用を考慮した耐震診断法および補強法を提案できるように検討を進めている<sup>4)</sup>。

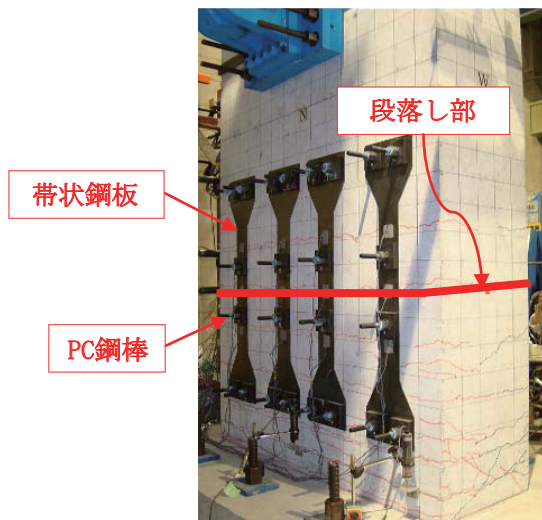


図4 帯板貼り付け工法<sup>3)</sup>

ところで、2004年新潟県中越地震では、山岳部の傾斜地盤上の道路や鉄道盛土が大きな被害を受けた。その一因として地震直前の台風の影響による盛土内の水位線や飽和度の上昇が考えられている。このように降雨の影響を受ける盛土の地震時挙動を詳細に検討するには、不飽和土の動的挙動を考慮した解析手法が必要と考えられるが、その適用性は明らかになっていない。そこで、傾斜地盤上の盛土に降雨散水を与えた後に加振を行う模型実験を対象として、三相系多孔質体理論に基づく動的解析手法を用いた解析を行った。解析モデルを図6に示す。実験と解析結果の比較から手法の妥当性の検証を行うとともに、水位形成の有無による盛土の変形量の違いを要素の応力経路や応力～ひずみ関係から説明することができ、不飽和盛土の地震時挙動を予測する上で有用な手法となることが確認できた<sup>5)</sup>。

### 3. 維持管理に関する研究開発

鉄道構造物は、定期または不定期の検査によって健全度を判定し、必要な対策を実施することで維持管理されている。検査においては、対象構造物の目視調査により変状の有無を確認し、必要に応じて詳細な調査を実施し、劣化予測により将来とも必要な性能を満足するかどうか照査し、不足することが懸念される場合は、適切な時期に必要な対策が実施される。そこで、簡便で精度の高い調査法や劣化予測手法、性能照査法などの研究も実施するとともに、有効な対策法の開発を実施している。

構造物の変状には様々な形態があるが、トンネルや高

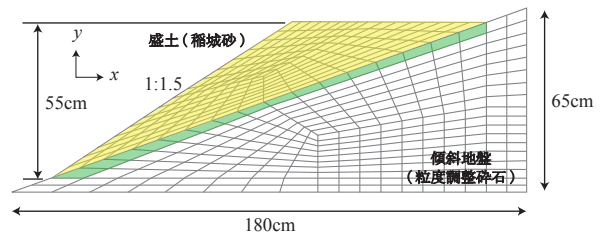


図6 降雨の影響を受ける盛土の解析モデル<sup>5)</sup>

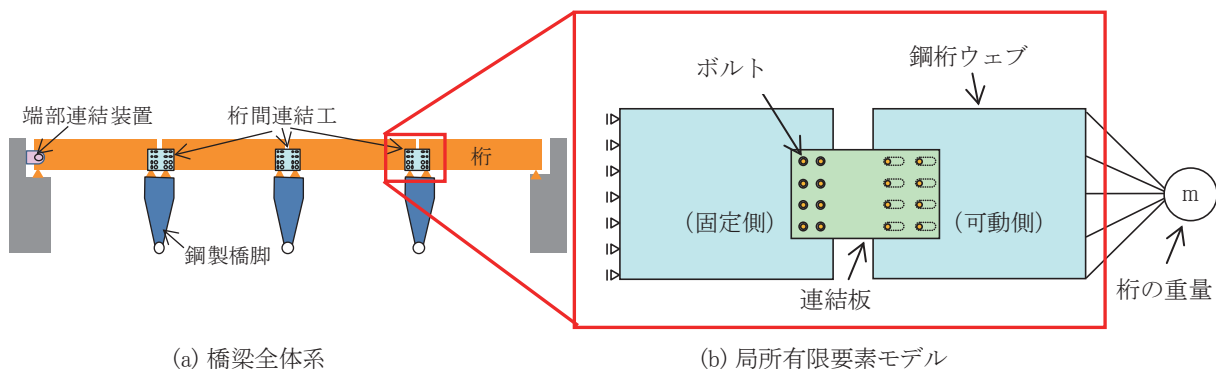


図5 桁連結工の解析モデル例<sup>4)</sup>

特集：構造物技術

架橋においてはコンクリート片のはく落がしばしば生じており、維持管理上の問題となっている。

高架橋の場合は、内部の鉄筋が腐食してかぶりコンクリートのはく落するケースが多く、比較的かぶりが小さい場合や、中性化や塩害により鉄筋が腐食しやすい場合にはく落が生じやすいことが知られている。スラブや梁などはく落する可能性のある部材の数量は膨大であるが、長期間経過しても全く問題を生じていない場合も多い。そこで、いつ頃、どこではく落が生じるかを予測することが重要であり、そのための基礎研究としてコンクリートのはく落現象の解明に取り組んでいる。

一方、山岳トンネルでは、地圧の作用によりトンネルが変形して、図7に示すように覆工に圧を生じ、覆工片がはく落して列車の走行安全性が損なわれることがある。しかし、覆工の破壊挙動が不明であるため、圧によるはく落に対する安全性の定量的な指標が確立されていなかった。そこで、模型実験と、覆工の圧を表現できる手法を用いた数値解析を、種々の材料からなる山岳トンネル覆工（無筋コンクリート、短繊維補強コンクリート、鉄筋コンクリート、レンガ等）について実施し、圧発生時のトンネルの内空縮小率を明らかにした<sup>6)</sup>。そして、実トンネルを想定した数値解析により、維持管理の実務における簡易な指標となるように、地山の種類、トンネル構造毎に、圧による剥落発生時の水平内空縮小率の目安を示した。

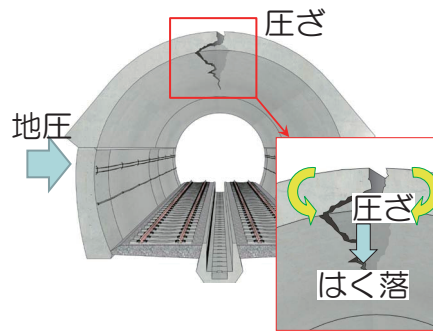


図7 圧ざによる覆工片のはく落



図8 駅の音環境に関する被験者試験例

#### 4. 駅の音環境に関する研究開発

我が国では、少子高齢化が進み、昨今の駅機能情報が多様化する中で、高齢社会に対応した駅空間の音環境設計手法の整備を目指し、高齢者にも配慮した駅の音声情報提供手法に関する研究に取り組んでいる。駅の音環境の現状把握を目的としてアンケート調査を実施したところ、利用者にとって案内放送は気になる音源ではあるが、聞き取りにくい放送は好ましくない音として認知されていることが明らかになった。そこで、案内放送の適切な音量を定量的に把握するために、図8に示すような被験者試験を実施し、駅の音環境の快適さを高めるための検討を実施している<sup>7)</sup>。

#### 5. おわりに

最近の構造物に関する研究開発のうちの一部についてその概要を紹介した。この他にも様々な研究開発を行っているが、今後とも、構造物に関する諸課題に迅速に取り組む、的確に対応し、質の高い成果を提供していきたいと考えている。

#### 文献

- 1) 佐々木徹也, 窪田勇輝, 中島進, 渡辺健治, 池本宏文, 藤原寅士良, 鬼頭和也, 橘内真太郎: 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
- 2) 猿渡隆史, 西岡英俊, 山田孝弘: 斜角桁の地震時回転挙動への下部工変位の影響に関する実験的検討, 第69回土木学会年次学術講演会, 2014 (投稿中)
- 3) 大本晋士郎, 大越靖広, 奥西淳一, 獅子目修一: 帯板鋼板を用いたRC橋脚の段落し補強効果の検討, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集, V-075, pp.149-150, 2013
- 4) 斉藤雅充, 池田学, 今田大元: 桁連結工を有する鋼鉄道橋の地震時応答特性評価, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014 (投稿中)
- 5) 松丸貴樹, 渦岡 良介: 傾斜地盤上の不飽和盛土を対象とした三相系多孔質体理論に基づく地震応答解析, 第49回地盤工学研究発表会, 2014
- 6) 平田亮, 野城一栄, 小林俊彦, 長山喜則: 覆工材質の違いによる変形性能に関する実験的研究, 土木学会トンネル工学報告集, Vol.23, pp.87-92, 2013
- 7) 伊積康彦: 駅コンコースにおける音環境の実態調査と被験者試験, 日本音響学会 2013年秋季研究発表会講演論文集, pp.1117-1120, 2013