

鉄道固有の力学的問題に関わる最近の研究

上半 文昭*

Recent Research on Railway-specific Dynamic Issues

Fumiaki UEHAN

Railway system is composed of many sub-systems such as overhead contact lines, vehicles, tracks and structures, which interact with each other and show complex dynamic behaviors. We are working on elucidation and countermeasures of railway-specific phenomena caused by the interaction of the sub-systems such as damage due to natural disasters, train running safety, and deterioration of structures, using our own simulation and experiment/measurement technologies. In this report, as our research examples in the field of railway dynamics, we present some recent research works related to improvement of resilience against natural disasters, digitalization of structures maintenance, hybridization of OCL/pantograph simulation, weight reduction of train car body.

キーワード：橋りょう免震化，局所的強風，画像計測，車上計測，高速パンタグラフ試験装置，構造最適化

1. はじめに

鉄道は、それぞれが複雑な機構を有する電車線構造、車両、軌道、土木構造物などで構成されるシステムであり、それらが相互に作用して生じる自然災害による被害、列車の乗り心地や走行性、設備の劣化・損傷、騒音・振動などの複雑な鉄道固有現象の解明と対策が常に望まれている。本稿では、鉄道総研独自の数値シミュレーション技術や、実験・計測・評価技術を用いて、力学的問題として鉄道固有現象にアプローチする研究・開発事例を紹介する。まず、自然災害に対する強靱化の事例として、橋りょうの支承免震化による走行安全性向上および局所的な強風に対する車両挙動の解明、構造物メンテナンスのデジタル化の事例として、ビデオカメラを用いた構造物振動測定および車上計測によるたわみ測定手法を紹介する。次に、独自の実験設備と制御・シミュレーション技術を総合的に活かした研究事例として、高速パンタグラフ試験装置を用いた集電系ハイブリッドシミュレーション、鉄道車両の性能向上に加えて輸送エネルギー効率改善による脱炭素化への貢献も想定される構造最適化による車両鋼体の軽量化について、順次紹介する。

2. 自然災害に対する強靱化

2.1 橋りょうの支承免震化による走行安全性向上

橋りょうの支承に、すべり支承や積層ゴム支承等の免震支承を適用すると、構造物の長周期化と免震支承のエネルギー吸収により大規模地震時の構造物の損傷が軽減

され復旧性が向上する。一方、橋軸直角方向の支承の変形が大きくなり、地震時走行安全性の低下が懸念されるため、地震時走行安全性の確保が課題となる。このため、鉄道橋では免震支承は積極的に採用されてこなかった。

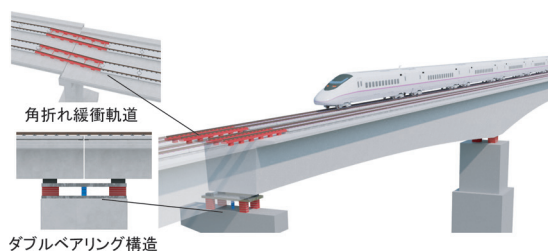
そこで、橋りょうの支承免震化によって、復旧性の向上に加えて地震時走行安全性の向上を図ることを目的として、地震時の列車と構造物の動的相互作用解析¹⁾による検討を実施した。構造物や支承の特性、列車速度、地震動の種類や規模等をパラメータに、数万ケースに及ぶ膨大な解析を行い、免震化によって、復旧性と地震時走行安全性を同時に向上できる条件を調査した。その結果、橋脚は固有周期 1.0 秒以上で、かつ免震支承を大規模地震時に桁上で卓越周期が 2.0 秒以上に長周期化するように設定することにより、復旧性と地震時走行安全性の両方を向上できることを明らかにした。さらに、免震効果が最大限発揮されるように、橋りょう端部の角折れや目違いを抑制できる構造を考案した(図 1(a))。

5 径間連続桁橋りょう(橋長 400m)にこれらを適用することにより、図 1(b) に示す解析結果例のように、L2 地震動でも列車が脱線せず、走行安全性の向上が図れること、さらに橋脚の応答が 50% 以上低減され、損傷が軽減され復旧性も向上することが確認できた。

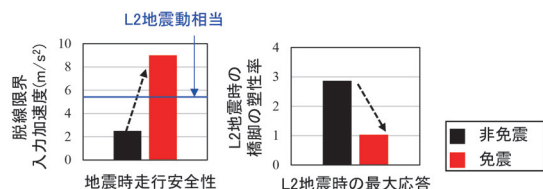
2.2 局所的な強風の車両挙動への影響

近年、強風災害に対する鉄道事業者の認識が高まるにつれ、ビル風など周囲の建築物や構造物の影響を受けた局所的な強風や、高速列車に対するトンネルまばたき区間の影響など、これまで考慮されてこなかった事象に対する車両の走行安全性の検討が求められている。これらは、直ちに車両の走行安全性を脅かすものではないが、

* 鉄道力学研究部長



(a) 免震構造の提案



(b) 免震化の効果 (橋脚固有周期 1.5 秒の場合)

図1 支承免震化による地震時走行安全性の向上



図2 風洞試験の様子

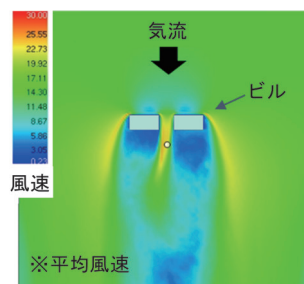


図3 風速場評価結果の例

走行安全性と輸送安定性の両立を図る上では重要な課題である。

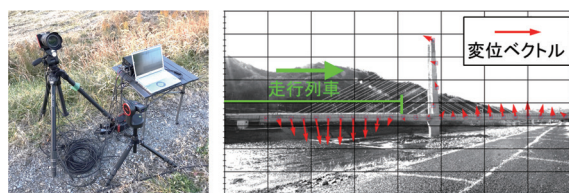
そこで、縮尺 1/40 模型を用いた風洞試験を実施して、ビル風の影響を受けた条件における線路上の風速分布や車両に働く空気力を測定し (図2)、風速が増加する割合や領域、およびそれが車両に働く空気力に及ぼす影響等を調査した。また、風洞試験に先立ち、気流解析ソフトを用いてビル周辺の風速場解析を実施し (図3)、風洞試験条件設定の検討に用いるとともに、風洞試験後には解析結果の妥当性の検証を行った。

これらの試験および解析の結果、ビル間やビルの外側で風速増加率が大きくなる傾向があることを確認するとともに、気流解析ソフトによる風速場解析結果が概ね妥当であることを確認した。しかし、風洞試験条件 (ビル配置条件や風速測定範囲等) をさらに拡張して再度試験を行う必要があること、また、気流解析精度についても向上の余地があることが確認された。今後これらの課題に取り組み、走行安全性の低下が想定される要注意箇所への把握や、運転規制用風速計設置位置の妥当性判定などに活用できるよう、ビル条件 (ビルの大きさ、配置等) と風速増減との関係を整理する計画である。

3. 構造物メンテナンスのデジタル化

3.1 ビデオカメラを用いた構造物振動測定

鉄道の構造物の検査を客観的な数値情報に基づいて定量的に行う手段として、ビデオカメラによる構造物の多点振動測定システム²⁾ (図4(a))を開発した。同システムは、計測対象を撮影したデジタル画像情報をもとに、表面の模様を輝度情報のパターンとして取り扱い、移動



(a) 測定システム (b) 斜張橋の変位測定結果例

図4 ビデオカメラによる多点振動測定システム

または変形する前後の二画像間での位置の探索を行うことで、画像内の任意の点の変位の大きさと方向を求めるものである。一例として、列車走行中の斜張橋 (支間 135m×2) を約 200m 離れた位置から撮影した場合の測定結果例を示す (図4(b))。橋りょう上の多数点の変位ベクトルを、時々刻々計算して構造物全体系の振動挙動を把握することができ、最大たわみについても、近傍からのレーザ測定結果³⁾ に対して誤差 5% 程度で測定できた。

次に、橋りょうの支承部検査への適用事例を示す。支承変状による桁のあおりが発生した支間 8.5m の鋼橋を対象として、ビデオ撮影での支承の変状検出を試みた。支承から約 15m 離れた位置 (図5(a)) から同一橋台上の同一形状の 2 支承の列車通過時振動を同期測定した。その結果、変状支承の鉛直変位が無変状支承より約 0.2mm (約 2 倍) 増大する異常の発生を検出できた (図5(b))。

現在は、測定対象に応じた効果的な画像撮影手法の検討などを行い、検査対象の拡大を図っている。

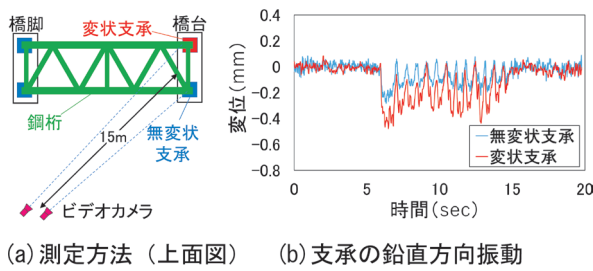


図5 支承の変状検出試験結果

3.2 車上計測によるたわみ測定手法

構造物の維持管理のさらなる低コスト化および効率化を目的として、走行列車上で得られる軌道変位から橋りょうの代表的な性能指標である橋りょうたわみを評価する手法の構築を進めている。ここでは、走行列車の先頭および最後尾車両の二か所で計測した軌道変位を用いて、その差から車両が通過した橋りょうのたわみ最大値を推定する。理論的検討により図6に示す先頭および最後尾車両の軌道変位の差の最大値が橋りょうの最大たわみに比例することを明らかにし、この特徴を活かして変換係数を利用した独自の推定手法を提案した。実路線で得られた先頭および最後尾車両の軌道変位測定データに適用した結果、提案手法は誤差10%程度で橋りょうのたわみ最大値を推定できることが確認できた(図7)。ただし、本手法は2箇所の軌道変位が必要あること、適用範囲が列車速度100km/h以下であることなどの制約を有する。現在は手法を拡張し、一般的な軌道検測車の活用や高速鉄道への拡張を進めている。

4. 高速パンタグラフ試験装置を用いた集電系ハイブリッドシミュレーション

架線・パンタグラフ間の動的相互作用を考慮したパンタグラフの性能評価を定置で行うことを目的として、高速パンタグラフ試験装置を用いた集電系ハイブリッドシミュレーション(以下、HS)を開発した。集電系HSは、パンタグラフの加振試験と架線運動のリアルタイムシミュレーションを融合することで、パンタグラフの仮想的な走行試験を定置で行える効率的な手法である。過去に鉄道総研では、比較的高い周波数応答特性を有する加振機(以下、加振機)を用いた集電系HS(以下、高周波対応HS)を開発した⁴⁾。図8に示すように集電系HSでは、加振機などの加振装置がパンタグラフ舟体を上下方向に加振する力(接触力)を架線モデルに与えて架線モデルの運動をリアルタイムで計算し、得られたトロリ線変位を用いて加振装置が舟体を加振する。上記の高周波対応HSは、20Hzまでの架線の振動を再現することができる。この周波数は、列車速度360km/hのパ

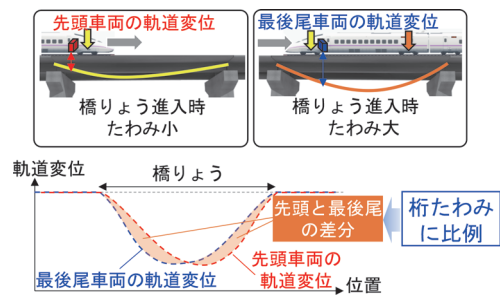


図6 先頭車両と最後尾車両が橋りょう上を通過する際の軌道変位の差分

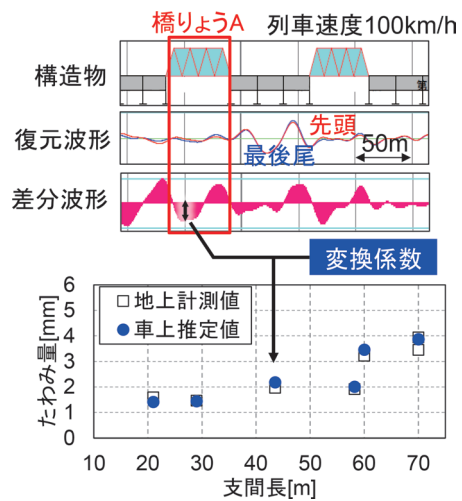


図7 たわみ量の車上推定値と地上計測値の比較

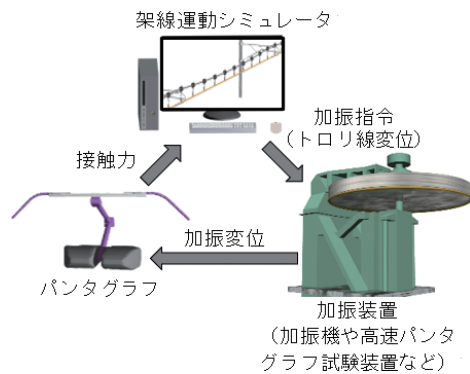


図8 集電系ハイブリッドシミュレーションの構成

ンタグラフがハンガを通過する周波数(以下、ハンガ周期)に相当することから、高周波対応HSはハンガ周期に起因する現象を再現することができる。しかし、走行による架線とパンタグラフのしゅう動や、架線偏位を表現できなかった。

一方、鉄道総研では、新しい大型試験設備である高速パンタグラフ試験装置が2021年にしゅん功した⁵⁾。図9に示すように高速パンタグラフ試験装置は、底面にト

ロリ線を取り付けた回転円盤を最高周速度 500km/h で回転させながら、回転円盤を上下方向に加えて左右方向にも加振できるため、架線偏位も表現することができる。さらに、パンタグラフへの通電が可能な他、試験室内の温度・湿度を変化させられるため、パンタグラフの総合的な試験を行うことができる。

そこで、高周波対応 HS の課題を解決するために、高速パンタグラフ試験装置を加振装置として用いる集電系 HS (以下、全般性能評価 HS) を新たに開発した⁶⁾。高周波対応 HS と全般性能評価 HS との性能比較表を表 1 に示す。全般性能評価 HS は、高周波対応 HS と比較すると加振装置の可動部の質量が大きいため、表現可能な架線振動の周波数範囲は 2Hz までに制限されるものの、走行によるしゅう動や架線偏位の影響に加えて、通電によるすり板の温度上昇や環境温度・湿度の影響も考慮することができる。

走行速度 300km/h の条件で実施した全般性能評価 HS の試験結果を図 10 に示す。上段は架線偏位、下段は舟体上下変位を示しており、全般性能評価 HS と架線・パ

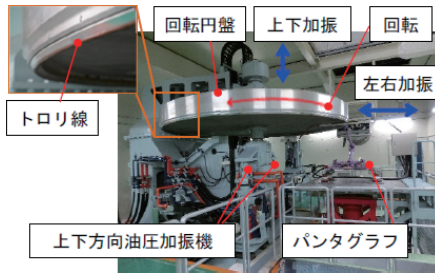


図 9 高速パンタグラフ試験装置

表 1 高周波対応 HS と全般性能評価 HS の機能比較

	高周波対応 HS	全般性能評価 HS
架線振動	~20 Hz まで	~2 Hz まで
架線偏位	なし	あり
しゅう動	なし	あり
通電	なし	あり
環境温度設定	なし	あり
湿度設定	なし	あり

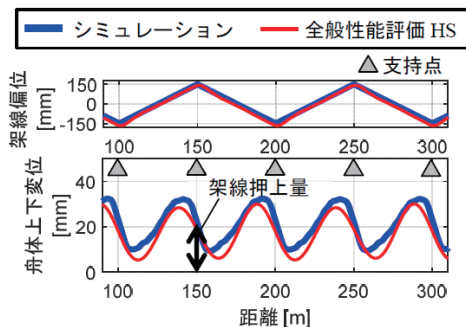


図 10 走行速度 300km/h での集電系 HS 試験結果

ンタグラフ系シミュレーションの結果を比較している。両者の結果は概ね一致していることから、全般性能評価 HS を用いることで、パンタグラフ通過時の支持点における架線押上量を定置で評価可能なことがわかる。

5. 構造最適化による車両鋼体の軽量化

最近の鉄道車両は、走行性能、利便性、安全性など様々な点で高性能化が進む一方、機器の増設や衝突安全設計により車両重量が増加傾向にあるため、車両構体の軽量化が求められている。軽量化の設計手法の一つに構造最適化手法があるが、鉄道車両の設計においては、まだ一般的ではない。そこで、鉄道車両の構造最適化による軽量化設計手法の確立を目的として、骨組構造の車両構体を対象に、強度、剛性が確保され、さらに骨組構造に適した制約条件を設定できるよう機能拡張を行い、製造可能な軽量化構体が導出できる構造最適化手法を開発した。

ある原型となる構造に基づいて与えられた設計要件を満たす構造を求める手法として形状最適化、トポロジー最適化手法がある⁷⁾。外形形状を設計変数とする形状最適化や、内部構造も設計変数とするトポロジー最適化は、FEM 解析、感度解析、最適化手法を組み合わせる構造最適化を実施する手法である。これらは、多数の設計変数を設定できるため、最適化の自由度は高いが収束性の点を考慮し、最適性基準法などの適当な最適化計算アルゴリズムの適用が必要となる。提案手法では、トポロジー最適化により荷重伝達経路を同定し、これをもとに形状最適化の初期形状を決定する。続けて、形状最適化により詳細な評価を行い、軽量化された最終形状を導出する(図 11)。また、最適化された形状が製造可能な形状でなければならないため、断面形状が一定の条件、面外に形状変化しない条件、曲げ加工などで型が抜けるようにする条件などを定義可能とした。

通勤型車両を対象に構造最適化を実施して軽量化構体

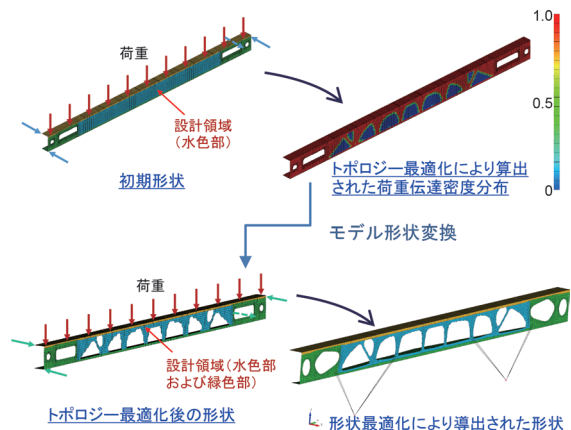


図 11 構造最適化の流れ

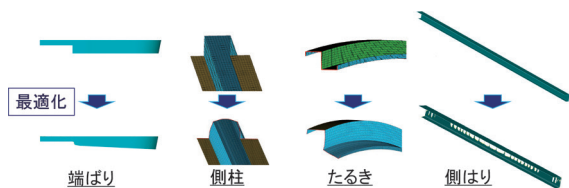


図 12 構造最適化による軽量化構造

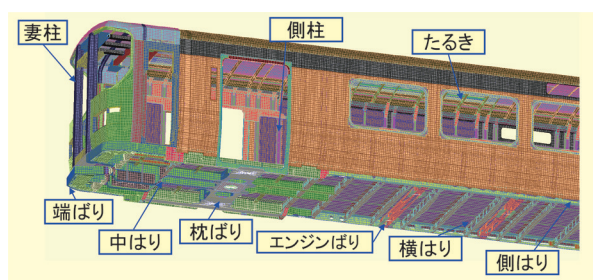


図 13 軽量化構造を適用した車両構体

構造を導出した。最適化の条件としては、目的関数として設計領域の質量、制約条件として剛性保持、最大応力が耐力以下とし、得られた形状が製造可能となるよう制約条件を与えた。荷重ケースは、構体荷重試験を模擬した車両全体の応力解析から得られた各部材への負荷を適用した。各部材ごとに形状の制約条件を設定して構造最適化を実施し、軽量化された形状を得た。主な部材を図 12 に示す。側柱やたるきなどは、従来にない独特の断面形状となっているが、形状の制約条件により製造および実使用が可能な構造となっている。台枠の側ばりは、既存の車両では開口部ではなく、補強材が当てられていることが一般的であるが、構造最適化の結果としては、長手方向の中央寄りの側面に多数の開口部を有する形状となった。柱や帯など各部材に対して軽量化構造を適用することにより構体全体の重量は、約 7% 減となった（図 13）。

6. まとめ

鉄道固有現象の力学的問題に関わる最近の研究事例の概要を紹介した。これらの事例は、鉄道の安全化や鉄道システムの革新に向けて、鉄道総研独自の数値シミュレーション技術や実験・計測・評価技術を用いて、力学的問題としてアプローチしたものである。多くが現状は基礎研究段階にあり、これから実問題に適用してさらなる技術検証と実用化を図る所存であるので、鉄道事業者をはじめとする関係各位の御指導・御協力を引き続きお願いする次第である。なお、本研究の一部は、国土交通省の技術開発費補助金を受けて実施した。

文 献

- 1) 涌井一, 松本信之, 松浦章夫, 田辺誠: 鉄道車両と線路構造物の連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.513, I-31, pp.129-138, 1995
- 2) 上半文昭: ビデオカメラとドローンを用いた構造物検査技術の開発, 鉄道総研報告, Vol.35, No.9, pp.41-46, 2021
- 3) 上半文昭: 構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」の開発, 鉄道総研報告, Vol.21, No.12, pp.17-22, 2007
- 4) 小林樹幸, 山下義隆, 白田隆之, David P. STOTEN: 多自由度架線モデルを用いた集電系ハイブリッドシミュレーション手法, 鉄道総研報告, Vol.32, No.6, pp.11-16, 2018
- 5) 小山達弥: 高速パンタグラフ試験装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.35, No.9, pp.5-10, 2021
- 6) 小林樹幸, 小山達弥, 原田智: 高速パンタグラフ試験装置を用いた集電系ハイブリッドシミュレーション手法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.12, pp.47-52, 2021
- 7) 西脇眞二, 泉井一浩, 菊池昇: トポロジー最適化, 丸善, pp.1-17, 2013