

列車走行に伴う RC 高架橋の部材振動特性の解明

鉄道力学研究部 構造力学研究室

副主任研究員 渡辺 勉

1. はじめに

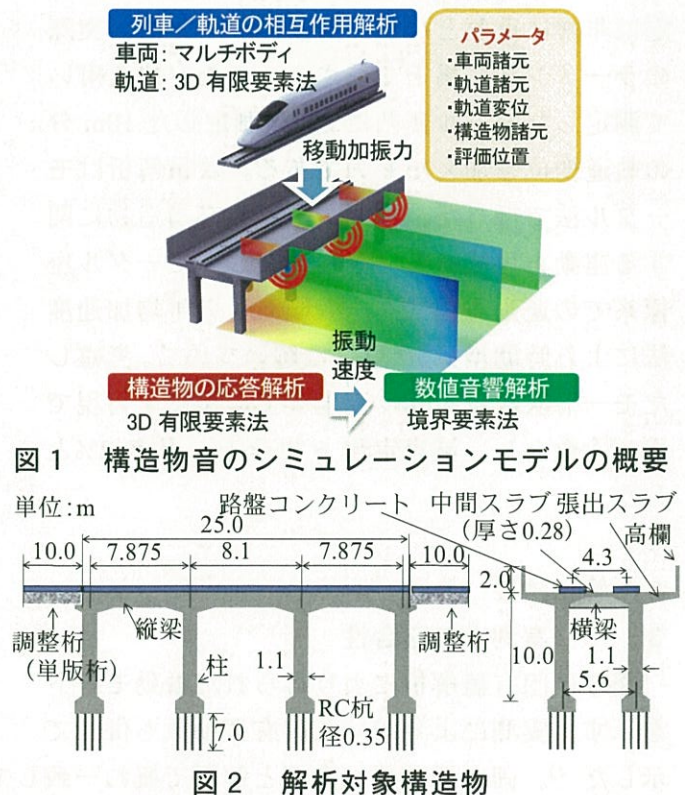
構造物音は、車両の走行による構造物の部材振動に起因して発生する音である。具体的には、車輪及びレール表面に存在する微細な凹凸や軌道変位によって車輪/レール間の作用力が変動すると同時に、車輪/レールの振動を引き起こし、その振動が構造物に伝播し、構造物の各部材が振動することにより音が放射される現象であり、スラブのような面部材が構造物音の音源になりやすい。コンクリート高架橋や橋梁における構造物音は、一般に数 10~1000Hz の範囲の周波数成分を持ち、高速鉄道ではその中でも 200Hz よりも低周波領域が支配的になると言われている¹⁾。近年、列車速度の向上により、構造物の振動に起因する騒音が比較的小さいと考えられていた鉄筋コンクリート（以下、RC という）高架橋においても、部材の動的応答の増大に伴う構造物音の顕在化が懸念されるようになってきた。筆者らは、構造物音のシミュレーションモデルとして、図 1 に示すような有限要素法と境界要素法のカップリングによる解析手法を開発している。数値解析により構造物音が解析できれば、様々なパラメータの影響を取り入れた数値実験を行えるメリットがある。本研究では上記カップリングモデルのうち、有限要素法による構造解析部分を対象として、以下の目的で検討を行った。

- ① 構造物音の原因となる 200Hz までの振動を効率的に解析できる数値解析モデルの構築
- ② 各種パラメータに着目した部材振動に関する周波数ごとの支配要因の分析
- ③ 部材応答に対する列車速度の影響分析

2. 解析手法

図 2 に解析対象構造物を、表 1 に材料定数をそれぞれ示す。ここでは、新幹線の標準的な RC ラーメン高架橋を対象とした。具体的には、ブロック長 25m の 3 径間 RC ラーメン高架橋と隣接するスパン 10m の調整桁である。

図 3 に解析モデルの概要を示す。軌道及び構造物は有限要素法でモデル化した。メッシュ刻みはレール締結間隔 0.625m の 1/4 を基本とした。軌道パッドのばね定数は 60MN/m である。本研究では、車両、軌道、構造物からなる全体系を、車両/軌道モデルと軌道/構造物モデルに分割することとした。この手法により、個々のモデルの解析自由度を全体系で解析する場合に比べて大



幅に削減することができ、効率的に解析を行うことが可能となる。車両/軌道モデルにおける数値解析は、鉄道総研開発の車両と鉄道構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARS III を用いた²⁾。また、軌道/構造物モデルには線路構造物の汎用構造解析プログラム DIARIST を用いた。

図4に DIASTARS III の車両の力学モデルを示す。車体、台車及び輪軸を剛体と仮定し、それらをばねとダンパでリンクした三次元モデルで、1車両あたり31自由度を有するものである。列車は、車端に設けたばねとダンパで車両を連結して構成する。本研究では、車両長25m、輪重60kN程度の一般的な新幹線車両6両とした。車両とレール間の動的相互作用力については、鉛直方向の接触力は Hertz の接触ばねで、水平方向の接触力は車輪フランジとレールが接触するまではクリープ力で、接触後はレールの小返りばねでそれぞれ表現した。

図5に解析に用いたレール凹凸及び軌道変位を示す。列車走行に伴い車輪とレール間に発生する変動作用力が構造物の部材を振動させる加振源となるため、レール凹凸及び軌道変位の設定は非常に重要となる。同図のデータは、実際のラーメン高架橋上で長さ1mの測定機を用いて測定したレール凹凸に、別途測定した10m分の軌道変位を加えたものである。数値解析はモーダル法で行った。車両、軌道及び構造物に関する運動方程式をモーダル変換し、モーダル座標系での運動方程式を、Newmark の平均加速度法により時間増分 Δt 単位に解いていく。考慮したモード次数は400Hz程度までの振動を再現できる次数とし、減衰定数 ξ は全モードで2%とした。

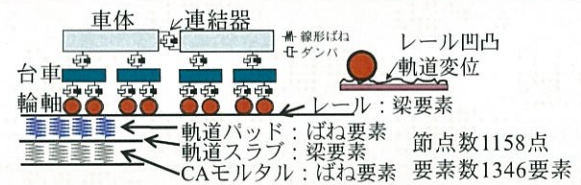
3. 解析結果

3.1 実測との整合性

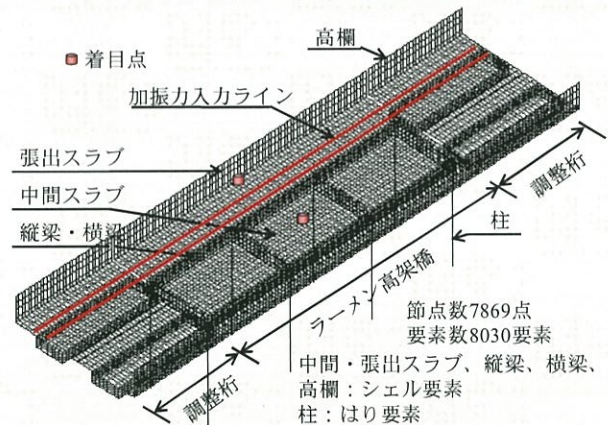
図6に固有値解析により得られた振動モードを示す。実測により求めた固有振動数も併せて示した³⁾。固有振動数は実測と解析で概ね一致していることがわかる。なお、実測では、構造物

表1 材料定数

		材料定数
レール種別		60kg レール
軌道パッド公称ばね定数 (MN/m)		60
軌道スラブ	寸法(mm)	4930×2340×190
	ヤング率 (kN/mm ²)	31
CAモルタル	ヤング率 (kN/mm ²)	3.5
	厚さ(mm)	25
高架橋	ヤング率 (kN/mm ²)	26.5
調整桁	ヤング率 (kN/mm ²)	25
減衰定数(%) (全てのモード)		2%



(a) 車両/軌道モデル (DIASTARS III)²⁾



(b) 軌道/構造物系モデル (DIARIST)

図3 解析モデルの概要

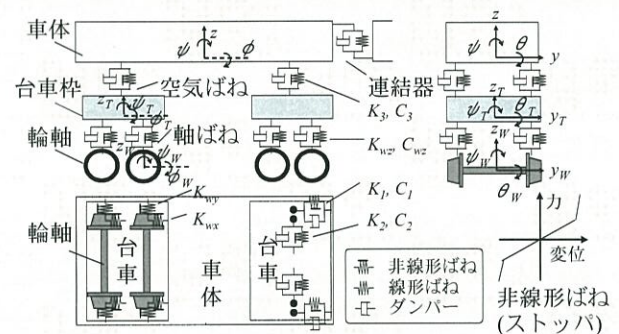


図4 車両の力学モデル

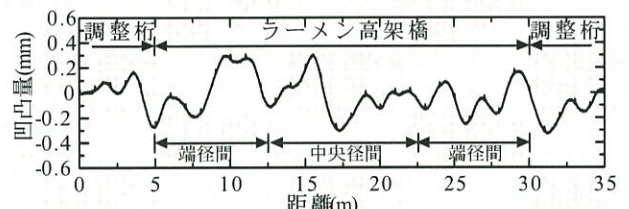


図5 解析に用いたレール凹凸及び軌道変位

の各部材に加速度計をアレイ配置して計測した加速度に対してクロススペクトル法とMAC検定によりモード形を同定した。

図7に加速度パワースペクトルに関する実測と解析の比較を示す。着目点は図3に示した通り、音源になりやすい板状の部材である中間スラブと張出スラブを取り上げた。列車速度は270km/hである。実測は圧電型加速度計を用いた。データはサンプリング周波数2kHzで収録し、プリアンプ及びA/Dボードを介してノートPCに保存した。図7より、解析により、車両長25mの繰返し加振による3Hz(=1/(25/(270/3.6)))とその整数倍の周波数におけるピークをとらえているとともに、両部材とも解析結果は概ね実測のばらつきの範囲内に収まっていることがわかる。以上の結果より、本研究で提案した数値解析モデルにより実現象を概ね再現できることを確認した。なお、本手法はRCラーメン高架橋だけでなく、RC桁式高架橋等、各種構造形式に対応可能である⁴⁾。

3.2 周波数ごとの支配要因の分析

図8に主なパラメータ解析の結果を示す。部材は中間スラブを取り上げ、列車速度は270km/hである。図7の解析諸元を基本ケースとした。基本ケースをベースとしたwith/without分析により、ある1つのパラメータが影響を及ぼす周波数帯を明らかにすることができる。例えば、20~30Hzより低周波領域では車両質量(図8(b))、車両長(図8(c))及び中間スラブの剛性(図8(f))の影響が大きいこと、20Hzより高周波領域では車両のばね下質量(図8(a))、レール凹凸(図8(d))の影響が大きいこと、軌道パッドのばね定数(図8(e))は概ね60Hzより高周波領域で影響が大きいこと、等がわかった。以上の結果を整理すると図9のようになる。冒頭にも述べたように、構造物音は構造物の部材振動に起因するものであるため、本章での振動に関する分析結果が構造物音に対する支配要因の検討にも適用できると考えられる。ただし、沿線騒音は構造物音以外の成分も複合したものであるため、騒音の実測値には図8の結果ほど明確な違いが現

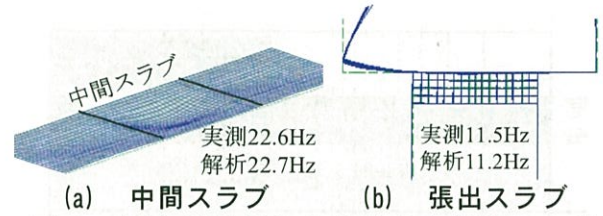


図6 固有値解析により求めた振動モード

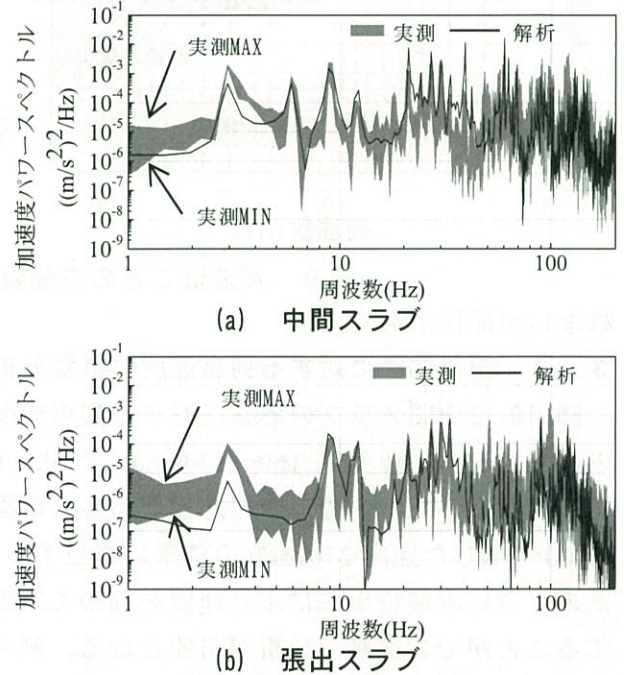


図7 実測と解析の比較 (270km/h)

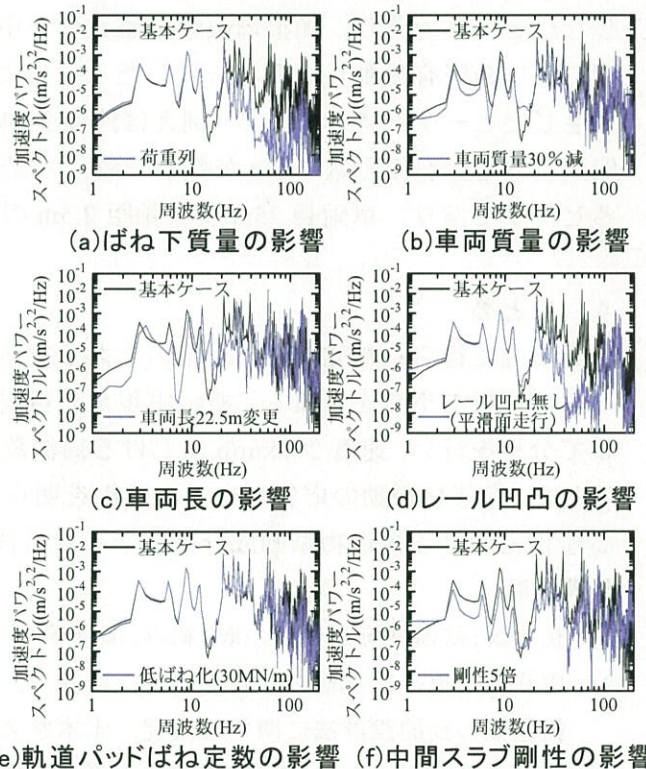


図8 パラメータ解析の結果(中間スラブ, 270km/h)

れは、沿線騒音は構造物音以外の成分も複合したものであるため、騒音の実測値には図8の結果ほど明確な違いが現

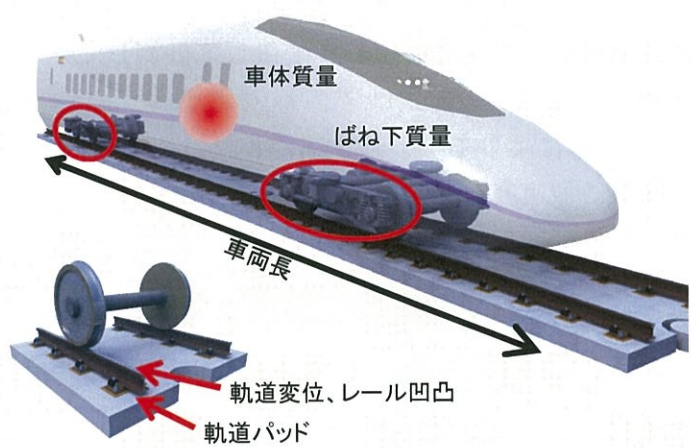
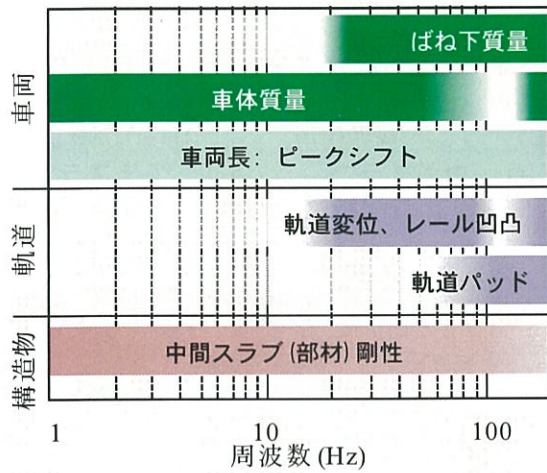


図9 周波数ごとの支配要因の分析結果 (速度 270km/h)

れない可能性がある。

3.3 部材応答に対する列車速度の影響分析

図10に中間スラブの応答に対する列車速度の影響を示す。速度は160~370km/hで5km/h刻みで解析した。赤線で囲った速度の応答が図7(a)で示した速度270km/hの結果に相当する。このように本解析手法により速度を細かく設定することができ詳細な分析が可能となる。例えば、黒丸で囲ったピークは速度によってシフトしないピークであり、加振周波数の整数倍と中間スラブの固有振動数が概ね一致したことにより生じたピークと考えられる(例えば速度240km/hと軸距2.5mから決まる加振周波数26Hzと中間スラブの固有振動数26Hzが概ね一致)。また、青線で示したピークは、速度とともにシフトするピークであり、車両長25m及び軸距2.5mの繰返し加振に起因するものである。

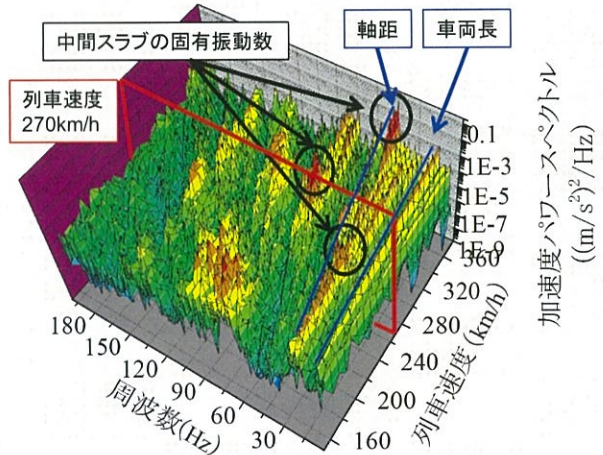


図10 中間スラブの応答に対する速度の影響

4. まとめ

本研究で得られた知見は、以下のとおりである。①200Hzまでの部材振動を効率的に解析できる数値解析モデルを構築し、概ね実現象を再現できることを確認した。②各種パラメータに着目して分析を行い、速度270km/hにおける周波数帯ごとの部材振動に関する支配的な要因を明らかにした。③部材振動の応答ピークの要因を明らかにした。今後はその他のパラメータの影響検討、高速化における構造物振動成分に関する対策技術の検討等を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 長倉清: 鉄道騒音問題への取り組み, 日本音響学会誌, Vol.66, No.11, pp.571-576, 2010
- 2) 曾我部正道, 松本信之, 藤野陽三, 涌井一, 金森真, 宮本雅章: 共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.724/I-62, pp.83-102, 2003
- 3) 松岡弘大, 貝戸清之, 渡辺勉, 曾我部正道: 走行列車荷重を利用したRC鉄道高架橋の部材振動の同定と動的挙動の把握, 土木学会論文集, Vol.67, No.3, pp.545-564, 2011
- 4) 渡辺勉, 曾我部正道, 徳永宗正, 松岡弘大: 軌道状態に着目したRC桁式高架橋の部材振動低減対策, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, 2014