

## 車両と軌道の各種パラメータがRC ラーメン高架橋の部材振動に与える影響

鉄道総研 正会員 ○渡辺 勉 鉄道総研 正会員 曾我部 正道 鉄道総研 正会員 徳永 宗正

**1. 目的** 近年、列車速度が飛躍的に向上したことにより、騒音が比較的小さいと考えられていた RC 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発生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、有限要素法と境界要素法のカップリングにより解析することを予定している。数値解析によって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。以上のような背景から本研究では、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を構築し、②車両と軌道の各種パラメータに着目して、構造物の応答に関する周波数帯ごとの支配的な要因について現象解明を行ったので報告する。

**2. 解析手法** 図1に解析モデルの概要を、図2に車両の力学モデルを示す。本研究では、車両、軌道、構造物からなる全体系を、車両/軌道系モデルと軌道/構造物系モデルに分割することとした。このような手法によれば、個々のモデルの解析自由度を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/軌道系モデルにおける数値解析には、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 DIASTARSIII を用いた。また、軌道/構造物系モデルにおける数値解析には、線路構造物の汎用構造解析プログラム DIARIST を用いた。

解析対象構造物は、全長 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。径間は 7.9m+8.0m+7.9m、柱断面は 1.1m×1.1m、柱高さは 10.0m、柱中心間隔は 5.6m、中間スラブの厚さは 0.28m、高欄は高さ 2m (直壁形) の RC ラーメン高架橋である。中間スラブ、張出スラブ、高欄、縦梁及び横梁はシェル要素で、レール及び柱ははり要素で、軌道パッドはばね要素でモデル化した。地中梁、地盤は、沿線騒音のうち構造物に起因する音が主要因となると考えられる周波数帯 (概ね 70Hz~160Hz) にはほとんど影響しないことからモデル化していない。路盤コンクリート (厚さ 0.25m) は重量のみを考慮し、剛性は非考慮である。解析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。

車輪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表現した。

図3に解析に用いたレール凹凸の空間周波数ごとの凹凸分布を示す。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  $\Delta t$  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ものとし、減衰定数は全モードで 2%とした。

表1に解析ケースを示す。CASE1 を基本ケースとし、CASE2 では車両のパラメータを変更した。CASE3 では軌道のパラメータを変更した。

**3. 解析結果** 図4に車両/軌道系モデルにおける CA モルタルに相当するある 1 つのばね要素で計算される加振力の時刻歴波形及びその時刻歴波形を 0.5~2.5 秒の 2 秒間に対して周波数分析

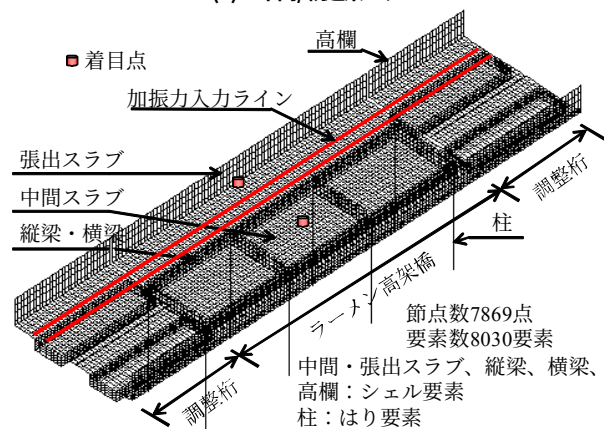
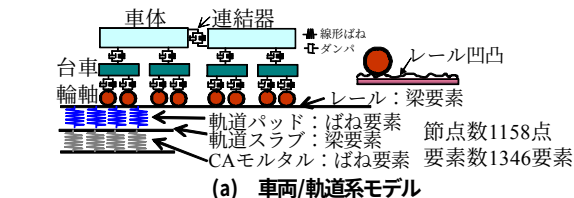


図1 解析モデルの概要

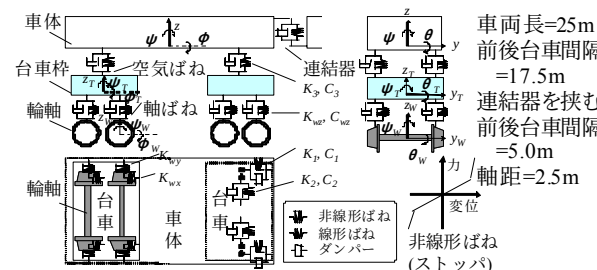


図2 車両の力学モデル (1車両25m)

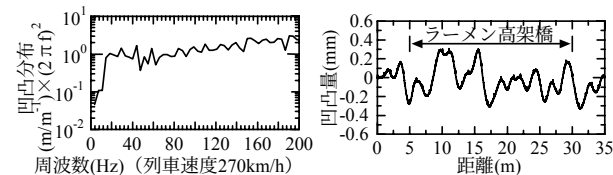


図3 凹凸分布

表1 解析ケース

| CASE | パラメータ    | 備考                             |
|------|----------|--------------------------------|
| 1    | -        | 基本ケース                          |
| 2-1  | 車両のモデル化  | 31 自由度モデル→荷重列                  |
| 2-2  | 車両の質量    | 車体、台車、輪軸質量 30%減                |
| 2-3  | 車両長      | 前後車輪間隔 5.0m→3.75m (車両長 23.75m) |
| 3-1  | レール凹凸    | レール凹凸なし                        |
| 3-2  | レール締結間隔  | 通常 0.625m→連続支持                 |
| 3-3  | 軌道パッドの剛性 | ばね定数 60→30MN/m                 |

キーワード 構造物音、数値解析、高速鉄道、RC ラーメン高架橋、相互作用

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 TEL042-573-7290

を行った結果を示す。時刻歴波形より、1軸が通過するたびにピークが表れていることがわかる。また、その波形の周波数成分を見ると、列車速度270km/hと車両長25mから決まる3Hzの整数倍でピークとなっていることがわかる。これらのピークには、図2に示したように、車両長以外の幾何学的要因も含まれていると考えられる。

図5に振動モード形を示す。実測により求めた固有振動数も併せて記載した<sup>1)</sup>。実測と解析で固有振動数がほぼ一致した。

図6に応答加速度の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1に示した中間スラブと張出スラブである。列車速度と車両長から決まる基本加振周波数 $3\text{Hz}=1/(25/(270/3.6))$ の整数倍ごとにピークを生じていることがわかる。実測と解析を比較すると、両部材ともに解析は実測のばらつき範囲内に概ね収まっていることがわかる。

図7に車両及び軌道の各種パラメータが中間スラブの応答加速度に与える影響を示す。

CASE2-1では車両を図2で示した31自由度系の力学モデルではなく、車両の静止輪重に相当する一定力の荷重列とした。図7(a)を見ると、概ね20Hz以上の周波数帯域で荷重列の方が、応答が小さい。したがって、この周波数帯域では、車両のばね下質量の影響が大きいと考えられる。

CASE2-2では車両の質量を30%低減した。図7(b)を見ると、概ね100Hzより低周波領域及び180Hzより高周波領域で車両の質量を低減した影響が表れることがわかる。

CASE2-3では車両長を25mから22.5mに変更した。図7(c)を見ると、車両長を変更すると、25mでは3Hzの整数倍ごとにピークを生じていたが、22.5mではそのピークがシフトし、 $3.3\text{Hz}(=1/(22.5/(270/3.6)))$ の整数倍でピークが生じていることを確認した。

CASE3-1ではレール凹凸が無い状態で列車を走行させた。図7(d)を見ると、概ね20Hzより高周波領域では、基本ケースに比べて応答が低減されていることがわかる。一方、100~140Hz程度の周波数帯域では、レール凹凸の有無に関わらず応答がほぼ同程度であることがわかる。これは、列車速度270km/hで走行するばね下質量がレール締結間隔0.625mごとに受ける反作用による加振周波数が120Hz $(=270/3.6)/0.625)$ であることに起因すると考えられる。

CASE3-2ではレールを連続支持にした。図7(e)を見ると、レール締結間隔に起因する120Hz付近のピークが低減されていることがわかる。

CASE3-3では軌道パッドのばね定数を60MN/mから30MN/mに低ばね化した。図7(f)を見ると、概ね70Hz以上の周波数帯域で低ばね化により応答が低減されていることがわかる。

**4. まとめ** 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を構築し、実測との比較を行い、概ね実現象を再現できることを確認した。②車両と軌道の各種パラメータに着目して解析を行った結果、限られた条件ではあるが、速度270km/hにおける周波数帯ごとの支配的な要因を明らかにした。今後はその他の速度やパラメータについても検討を行っていきたいと考えている。

## 参考文献

1) 松岡弘大他：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.

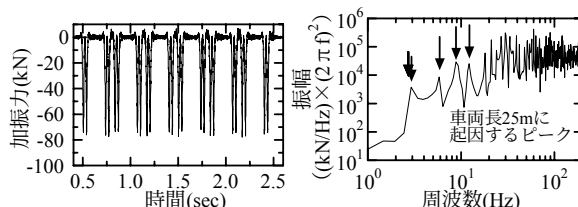


図4 加振力の時刻歴波形(270km/h)と周波数分析結果

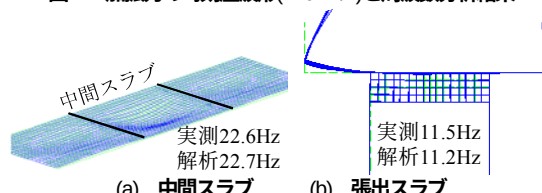
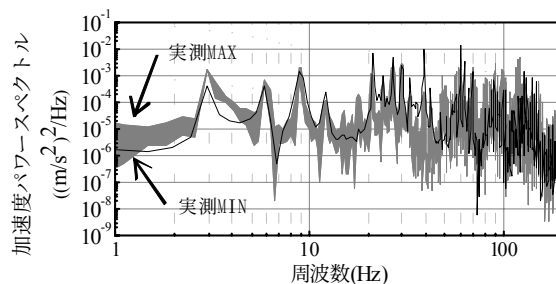
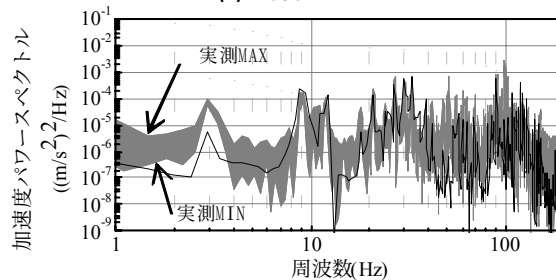


図5 固有値解析により求めた振動モード

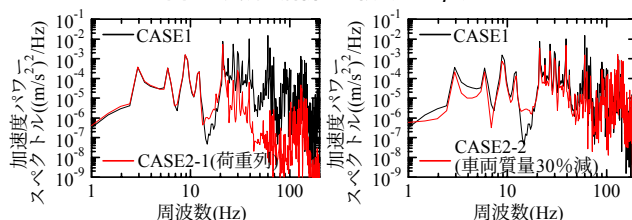


(a) 中間スラブ



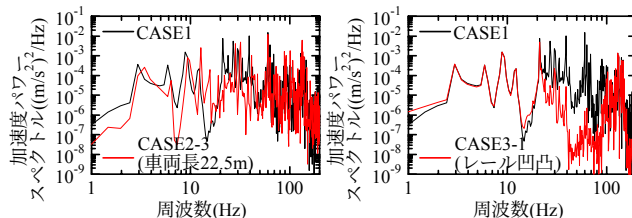
(b) 張出スラブ

図6 実測と解析の比較 (270km/h)



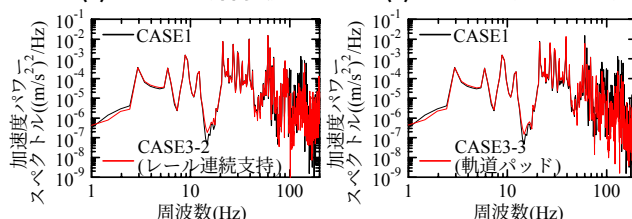
(a) CASE2-1 (車両のモデル化)

(b) CASE2-2 (車両の質量)



(c) CASE2-3 (車両長)

(d) CASE3-1 (レール凹凸)



(e) CASE3-2 (レール締結間隔)

(f) CASE3-3 (軌道パッドの剛性)

図7 各種パラメータが中間スラブの応答加速度に与える影響 (270km/h)