

# 論文 軌道状態に着目した鉄道 RC 桁式高架橋の部材振動低減対策

渡辺 勉<sup>\*1</sup>・曾我部 正道<sup>\*2</sup>・徳永 宗正<sup>\*1</sup>・松岡 弘大<sup>\*2</sup>

**要旨:** 標準的な鉄道 RC 桁式高架橋 2 橋を対象とした数値解析モデルを構築し、軌道状態に着目した部材振動低減対策について検討を行った結果、軌道パッドのばね定数を 60MN/m から 30MN/m にすることにより、車両長 25m 及び軸距 2.5m に起因するピークでは中間スラブ及び張出スラブの応答加速度がほぼ同等レベル、速度により異なるが概ね 40~70Hz より高周波の帯域において低ばね定数化による応答低減効果 (270km/h で 1/10 程度) が得られること、概ね 20Hz 以上の周波数帯ではレール凹凸の影響が大きい、車輪がレール締結間隔ごとに加振されることに起因する周波数帯ではほぼ同等の応答レベルとなること等を明らかにした。

**キーワード:** 桁式高架橋, 高速鉄道, 部材振動, 軌道構造, 構造物音, 動的相互作用

## 1. はじめに

列車走行による構造物音<sup>1)</sup>に関する研究はこれまでも多くなされてきたが、比較的剛性の大きな鉄筋コンクリート (以下、RC という) 高架橋及びその構成部材については、構造物音が問題となる事例が少なく、体系的な検討がなされていないのが実情である。しかし近年、列車速度が飛躍的に向上したことにより、構造物に起因する騒音が小さいと考えられてきた 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、構造物音の予測手法を構築するにあたり、最終的なシミュレーションモデルとして、有限要素法による構造解析と境界要素法による音響解析のカップリング手法を用いる予定である。この手法では、車両、軌道、構造物の動的相互作用を考慮した有限要素法により構造物の振動速度を求め、それを音響解析の入力条件とすることにより、境界要素法を用いて音の伝搬を解析することとなる。この手法による騒音予測では、膨大なパラメータが介在するため、有限要素法による振動速度の算出段階において、相当の解析精度を確保する必要がある。

部材の振動速度を解析的に算出することは容易ではない。振動系車両の移動走行、非定常・非線形の連成振動問題を表現するために、本研究では数値解析手法として、モード変換した運動方程式を Newmark 法で解く手法を用いたが、この場合、構造物の設計で用いられるよりも高い周波数領域、すなわち、部材レベルの高次振動モードまでを検討対象としなければならず、考慮する振動モード、要素分割、時間刻みを適切に選択する必要がある。

近年建設されている高速鉄道では、盛土の代替として RC ラーメン高架橋、RC 及び PC 桁式高架橋が採用されるのが一般的である。これまで筆者らは、鉄道 RC ラーメン高架橋を対象として構造物音の支配的な周波数成分となる 200Hz 程度までの振動を対象とした数値解析モデ

ルを構築し、車両/軌道/構造物からなる全体系の各種パラメータに着目した検討を行ってきた<sup>2)</sup>が、路線延長に占める割合の大きな RC 桁式高架橋についても引き続き検討を行う必要がある。

本研究では、筆者らが想定している最終的なシミュレーションモデルである有限要素法と境界要素法のカップリング手法のうち、有限要素法による構造解析を対象とし、以下の点に着目して新たに検討を行った。

- (1) 軌道パッドのばね定数のみが異なる同一形式の標準鉄道 RC 桁式高架橋 2 橋を対象とした数値解析モデルを構築し、200Hz までの振動を対象とした現象解明を行う。
- (2) 軌道状態に着目し、鉄道 RC 桁式高架橋の部材振動低減対策について数値解析的に検討する。

なお、物体が振動している時の物体のごく近傍の粒子速度は物体の振動速度と一致することが知られており、音を評価する場合には振動速度の方が適切ではあるが、振動規制法等にあるように、対象物の振動を評価する場合は加速度で評価することが一般的であること、周波数領域において加速度を速度に簡単に変換できること、実際の計測においては加速度の方が S/N 比が良好で比較的簡単に計測することができること等から、本研究では振動速度ではなく振動加速度で応答を評価することとした。

## 2. 検討手法

### 2.1 解析手法

図-1 に対象構造物を示す。表-1 に各構成要素の材料定数を示す。スパン 20m の標準的な単線並列の RC 桁式高架橋 2 橋を対象とした。2 橋は、同一図面で設計施工された構造形式が全く同じで軌道パッドのばね定数のみが異なる。A 橋の軌道パッドのばね定数の公称値が 60MN/m、B 橋が 30MN/m である。軌道構造はどちらも RC スラブ軌道である。基礎は直接基礎である。

図-2 に解析モデルの概要を示す。本研究では、過去

\*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 工修 (正会員)

\*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 博(工) (正会員)

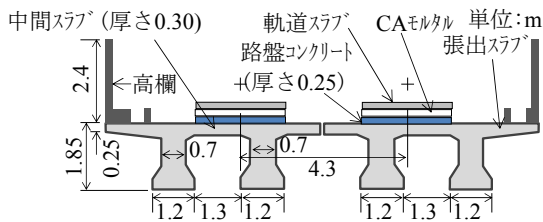
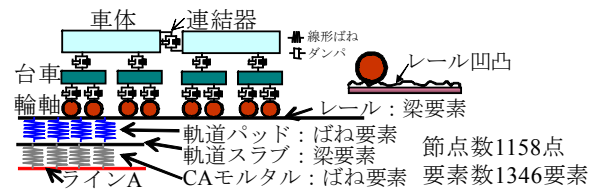
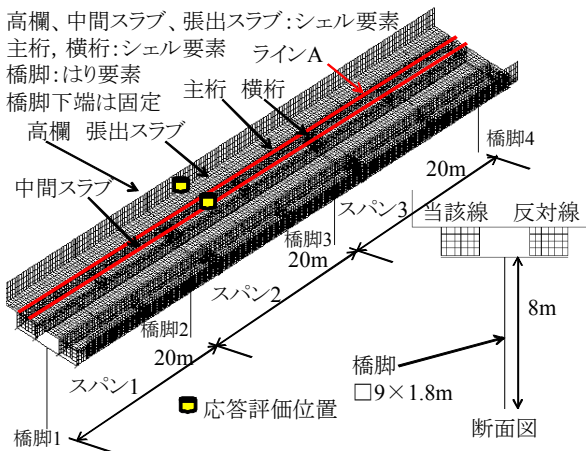


図-1 解析対象構造物



(a) 車両/軌道系モデル



(b) 軌道/構造物系モデル

図-2 解析モデルの概要

の知見を参考に、車両/軌道/構造物からなる全体系を、同図に示す「ライン A」を境に車両/軌道と軌道/構造物とで系を分割した手法を用いることとした<sup>3)</sup>。具体的には、車両/軌道系モデルで加振力を求め、これを軌道/構造物系モデルに入力して構造物の部材振動を求めることとし、加振力の受渡しは別途構築したプログラムで加振力入力ラインへのプリ処理を自動化した手法である。車両/軌道系モデルの延長は 60m、軌道/構造物系モデルの延長はスパン 20m の同一桁式高架橋を 3 連配置し 60m とした。なお、端部の橋脚(橋脚 1 及び橋脚 4)には、本桁の半分の重量を付加した。応答評価は中央のスパン 2 で行うこととした。

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<sup>3)</sup>。ここで、このように全体系を 2 つの系に分割することは解析の効率化に寄与するが、全体系としての相互作用は必ずしも再現されなくなるという懸念がある。しかしながら、実際の列車走行による構造物の応答を測定すると、ある程度のばらつきが存在する。詳細は後述するが、全

表-1 各要素の材料定数

		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 (A 橋)
		30 (B 橋)
軌道スラブ	寸法(mm)	4930×2340×190
	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	31
CA モルタル	弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	3500
	厚さ(mm)	25
高架橋 コンクリート	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	25
減衰定数(%) (全てのモードで一値)		2%

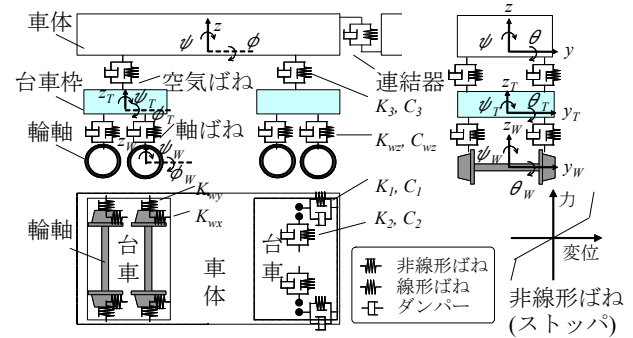


図-3 車両の力学モデル

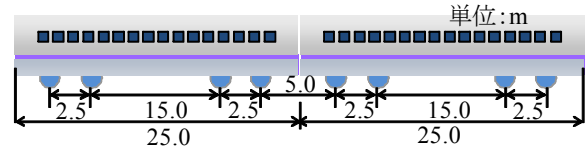


図-4 車両の軸配置の概要

体系を分割しても概ね実測のばらつきの範囲内に収まることを確認した上で、本手法を、数多くのパラメータの影響を数値解析的に効率的に検討していく実用的な手法と位置付け、本研究では、本手法を用いて検討を行うこととした。

## 2.2 車両の力学モデル

図-3 に車両の力学モデルを示す。図-4 に車両の軸配置の概要を示す。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力学モデルで、1 車両あたり 31 自由度を有する。列車は、車両モデルを車端に設けたばねとダンパで連結して構成する。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。

## 2.3 軌道及び構造物の力学モデル

軌道及び構造物は有限要素法によりモデル化する。車両/軌道系モデルでは、図-2(a)に示すように、レール及び軌道スラブをはり要素、レールと軌道スラブの間に配置される軌道パッド及び軌道スラブ下の CA モルタルをばね要素でモデル化した。本モデルで CA モルタル相当のばね要素のばね反力を求め、これを加振力として軌道/構造物系モデルのレール位置と路盤コンクリート等による荷重分散を考慮した加振力入力ラインに入力する。解析メッシュはレールの振動モード形状を適切に再現する

ためレール締結間隔 0.625m の 1/4 (約 0.15m) とした。なお、解析で用いる軌道パッドのばね定数は、左右レール変位と輪重の測定結果から算出した軌道のばね定数の実測値を参考<sup>4)</sup>に、公称値の 3 倍の値を使用した。

軌道/構造物系モデルでは、図-2(b)に示すように、高欄、張出スラブ、中間スラブ、主桁及び横桁はシェル要素、橋脚ははり要素でモデル化した。路盤コンクリートはその厚さの 1/2 を中間スラブに付加した。事前の検討より、地盤をモデル化しても構造物音に寄与する周波数帯 (概ね 20Hz 以上) における各部材の応答に与える影響が小さいことを確認したうえで、橋脚下端は固定とした。解析メッシュ刻みは車両/軌道系モデルと同じとした。

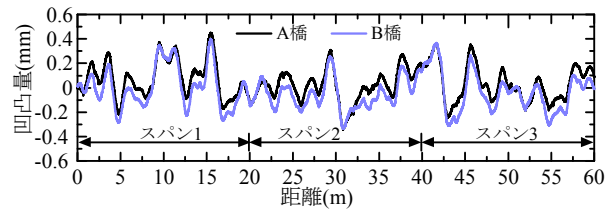
## 2.4 車輪とレール間の力学モデル

車輪とレール間の動的相互作用力は、両者の幾何形状と相対変位から接触点及び接触角を求めて算出する。具体的には、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、フランジ圧によりレール頭頂面は水平方向に移動し、レールにねじりが発生する。このレールとレール締結装置からなるねじり抵抗をばね要素で表現した。

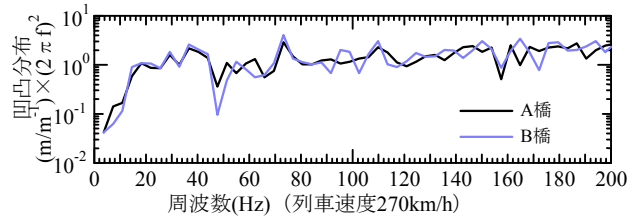
図-5 に解析に用いたレール凹凸及び軌道変位を示す。列車走行に伴い車輪とレール間に発生する変動作用力が構造物の部材を振動させる加振源となるため、レール凹凸及び軌道変位の設定が非常に重要となる。解析では、構造物 A 橋、B 橋それぞれで長さ 1m の測定器を用いて実際に測定したレール凹凸に、別途測定した 10m 分の軌道変位を足し合せたものを使用した。これは、過去の知見より 1m の測定器による短波長のレール凹凸のみでは 1~数 m 波長の軌道変位に起因する加振力を適切に再現できないことわかっているため、別途測定した中長波長の軌道変位を付加することとした。なお、測定波長に起因すると思われる特異なピークはフィルターを用いて適宜除去した。以下の記述におけるレール凹凸とは、前述の軌道変位を含んだものとする。

## 2.5 数値解析法

効率的な数値解析を行うために、車両及び構造物に関する運動方程式をモーダル変換する。得られる車両及び構造物のモーダル座標系上での運動方程式を 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。ただし、運動方程式が非線形であることから、不釣合力が十分小さくなるまで  $\Delta t$  内において反復計算を行う<sup>3)</sup>。解析におけるモード次数は、500Hz 程度までの振動を再現できる次数とし、解析時刻刻みは 0.5msec である。なお、各モードで減衰定数が設定可能であるが、本解析では表-1 に示した通りすべてのモードで 2% とした。



(a) 凹凸量と距離の関係



(b) 凹凸分布と列車速度から決まる周波数の関係

図-5 解析に用いたレール凹凸及び軌道変位

表-2 解析ケース

CASE	パラメータ	備考
A	-	基本ケース, A 橋(60MN/m)
B	-	基本ケース, B 橋(30MN/m)
A-2	レール凹凸	凹凸有り→凹凸無し
A-3.1	軌道パッドばね定数	60MN/m→30MN/m
A-3.2		60MN/m→20MN/m
A-4	列車速度	160~370km/h(10km/h 刻み)

## 2.6 解析ケース

表-2 に解析ケースを示す。A 橋、B 橋を対象とした解析を基本ケースとした。パラメータスタディは、A 橋を基本として行った。CASE A-2 では、レール凹凸の有無の影響を検討するために、図-5 で示したレール凹凸を与えないケースで解析を行った。CASE A-3 では、軌道パッドのばね定数の影響を検討するために、60MN/m を 30MN/m 及び 20MN/m に変更して解析を行った。CASE A-4 では、列車速度の影響を検討するために、160~370km/h まで 10km/h 刻みで解析を行った。

## 2.7 解析モデルの妥当性の検証方法

基本ケースの解析結果と実測との比較により、解析モデルの妥当性の検証を行った。着目点は図-2 中に示す位置である。加速度の計測には圧電型加速度計 (リオン PV85, 感度: 6.42pC/(m/s<sup>2</sup>), 測定周波数範囲 1~7kHz) を、たわみの計測にはリング式変位計を使用した。データ収録はサンプリング周波数 2kHz でプリアンプ及び AD ボードを介してノート PC に収録した。

## 3. 検討結果

### 3.1 基本ケース (CASE A, CASE B)

#### (1) 解析における加振力の時刻歴波形と周波数特性

図-6 に A 橋において (CASE A) 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た加振力の時刻歴波形及びその時刻歴波形の周波数分析結果の 1 例を示す。列車速度は 270km/h である。時刻歴波形より、1 軸が通過するたびにピークが表れて

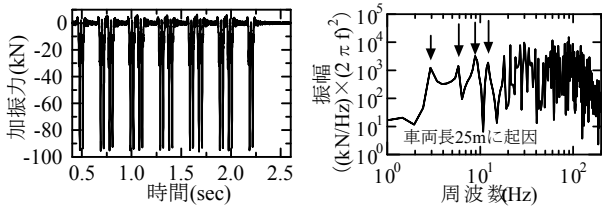


図-6 加振力の時刻歴波形(270km/h)と周波数分析結果

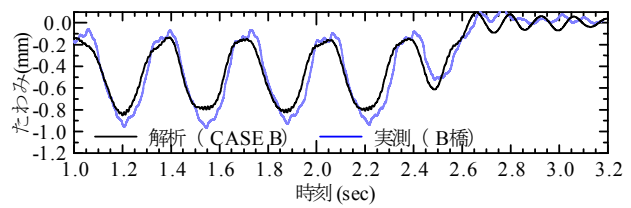
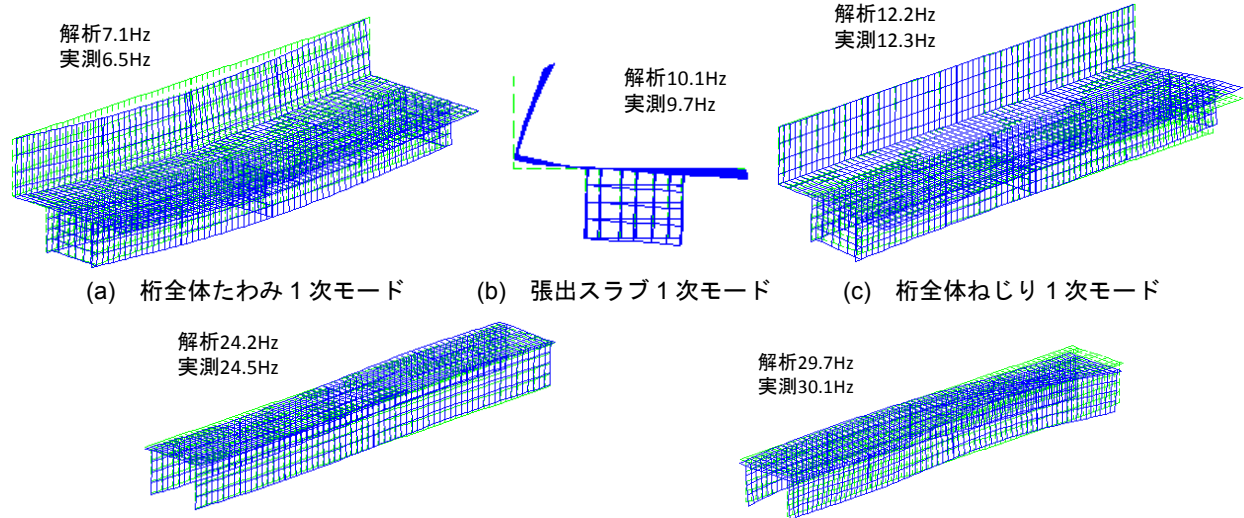


図-7 たわみに関する時刻歴波形 (270km/h)



(d) 桁全体たわみ 2次モード(中間スラブ, 主桁を表示) (e) 桁全体ねじり 2次モード(中間スラブ, 主桁を表示)

図-8 固有値解析により求めた振動モード形 (A 橋で実測)

いることがわかる。また、その波形の周波数成分をみると、列車速度 270km/h と車両長 25m から決まる 3Hz の整数倍でピークが生じていることがわかる。

このような加振力が車両/軌道系モデルで計算され、軌道/構造物系モデルの対応する節点にそれらの加振力を与え、構造物の応答が計算される。

### (2) たわみの時刻歴波形

図-7 に、B 橋において列車速度 270km/h におけるスパン中央のたわみの時刻歴波形の解析 (CASE B) とリング式変位形による実測との比較を示す。同図に示すように、本研究で構築した解析モデルにより、スパン中央のたわみの実現象を概ね再現できていることがわかる。

### (3) 振動モード形

図-8 に固有値解析により求めた振動モード形を示す。実測 (A 橋で実測) における固有振動モードの同定は、加速度計をアレイ配置して計測した加速度応答に対して、クロススペクトル法で振動モードの候補を抽出した上で、MAC 検定に基づき固有振動数及び振動モード形を同定した<sup>5)</sup>。同図に示すように、実測と解析で固有振動数がほぼ一致していることがわかる。

### (4) 応答加速度の周波数特性 (速度 270km/h)

図-9 及び図-10 に A 橋及び B 橋の中間スラブ及び張出スラブにおける鉛直加速度に関する周波数応答特性を示す。応答評価位置は図-2(b)に示す位置である。実測はある程度データがばらつくので、比較対象の実測デ

ータの本数は 5 本のうち最大値と最小値を帯で示した。同図に示すように、両橋ともねじりの 2 次モードに起因する 30Hz の応答のピークなど実現象を概ね再現できていることがわかる。ただし、ねじりの 1 次モードに起因する 12Hz や張出スラブの 30~50Hz など、解析で過小評価となっている周波数帯がある。これらについては、地盤をモデル化の影響、1m を超える中長波長の軌道変位の測定方法などを含めて今後さらに検討していきたい。

また A 橋及び B 橋の実測を比較すると、A 橋 (60MN/m) に比べて軌道パットが低ばね化されている B 橋 (30MN/m) の方が、概ね 50Hz 以上の帯域で応答が 1/10 程度に小さくなっており、軌道パットの低ばね化の効果を実測で確認することができた。

中間スラブと張出スラブの応答を比較すると、9~12Hz の帯域で張出スラブの 1 次モードや桁のねじり 1 次モードに起因して張出スラブの応答が大きいが、それより高周波の帯域では中間スラブの方が応答が大きい傾向にある。したがって、以後のパラメータの影響検討では、20Hz 以上の帯域で応答が大きい中間スラブに着目して議論を進めることとする。

## 3.2 数値解析による各種パラメータの影響評価(列車速度 270km/h)

### (1) レール凹凸の有無の影響

図-11 に A 橋において、レール凹凸の有無が中間スラブの鉛直加速度応答に及ぼす影響を示す。20Hz までの

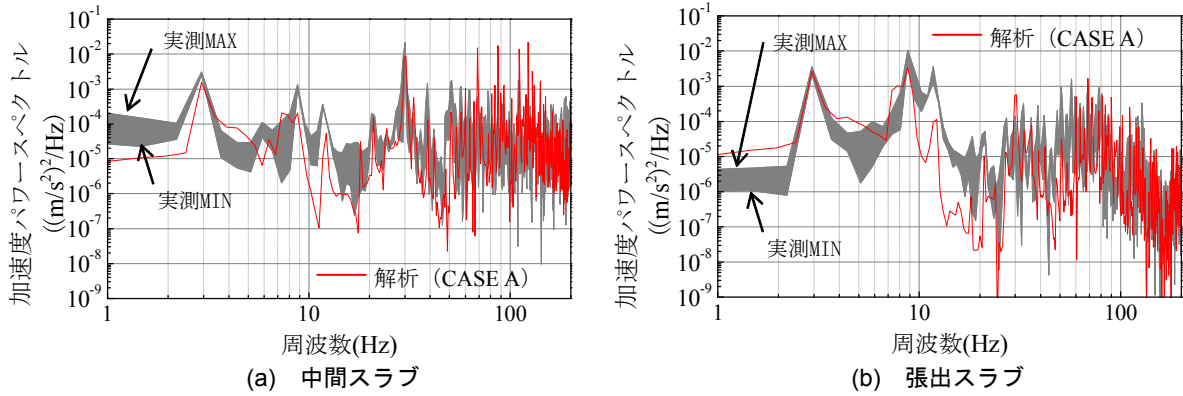


図-9 A橋における鉛直加速度の周波数応答特性（列車速度270km/h）

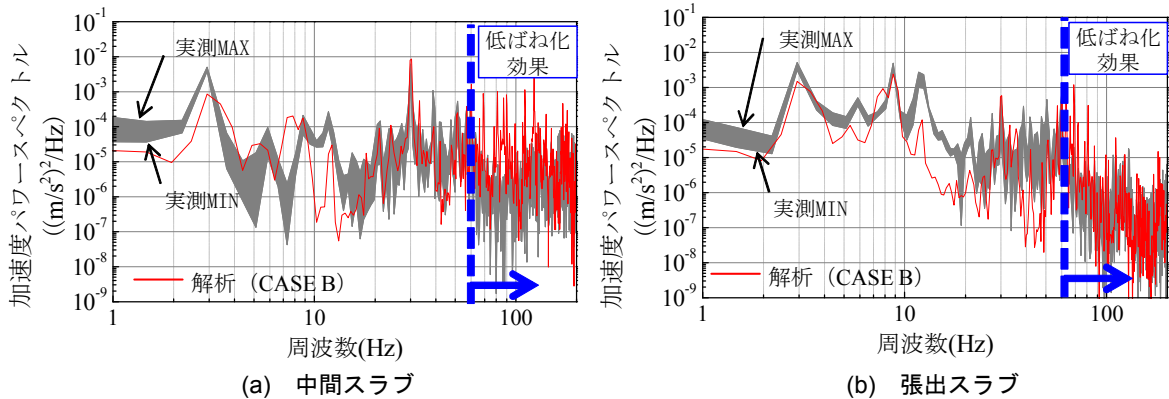


図-10 B橋における鉛直加速度の周波数応答特性（列車速度270km/h、A橋に比べ軌道パッドを低ばね定数化）

帯域では、基本ケースとレール凹凸無しのケース（CASE A-2）で応答に違いが見られないが、20～100Hzの帯域及び150Hz以上の帯域では、応答に違いが見られ、レール凹凸の影響を受ける周波数帯であることがわかる。

一方、車輪がレール締結間隔0.625mごとに加振されることに起因する周波数は120Hz（ $=270/3.6/0.625$ ）であり、120Hz付近の帯域では、レール凹凸の有無に関わらず同程度の応答となることがわかる。

(2) レール凹凸の違いの影響

図-12にレール凹凸の違いが中間スラブの鉛直加速度応答に及ぼす影響を示す。A橋及びB橋で軌道パッドのばね定数を同じにして、凹凸の違いのみを検討した。図-5に示したように、もともとの凹凸にそれほど大きな違いが見られないため、図-11で示したような大きな応答の違いは見られないことがわかる。

(3) 軌道パッドのばね定数の影響

図-13に軌道パッドのばね定数の違いによる中間スラブの鉛直加速度応答に及ぼす影響を示す。軌道パッドを基本ケースの60MN/mに比べて、30及び20MN/mと低ばね化するとどちらも概ね60Hz以上の帯域で応答が低下した。レール凹凸無しのケース（CASE A-2）で応答が低減されなかった100Hz～150Hzの周波数帯の応答も低下した。一方、40～60Hzの帯域では、基本ケースと同程度あるいは若干応答が増加した。この傾向は、図-9及び図-10で示した実測の傾向と概ね同じ傾向である。

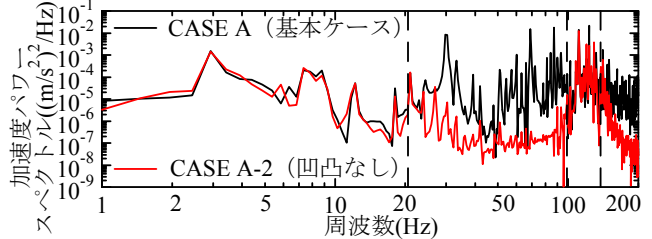


図-11 レール凹凸の有無による中間スラブの鉛直加速度応答への影響（270km/h）

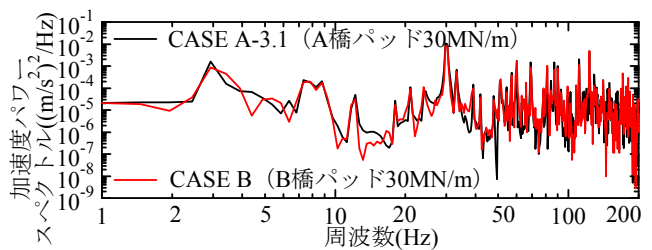


図-12 レール凹凸の違いによる中間スラブの鉛直加速度応答への影響（270km/h）

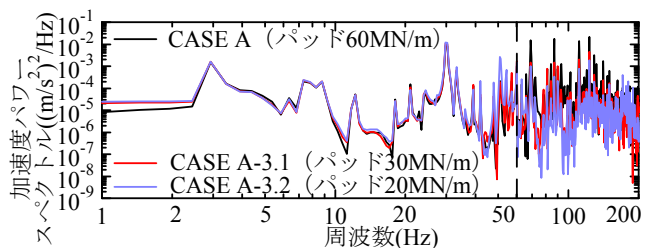


図-13 軌道パッドのばね定数の違いによる中間スラブの鉛直加速度応答への影響（270km/h）

柔らかい軌道パッドでレールを支持し、軌道支持ばね定

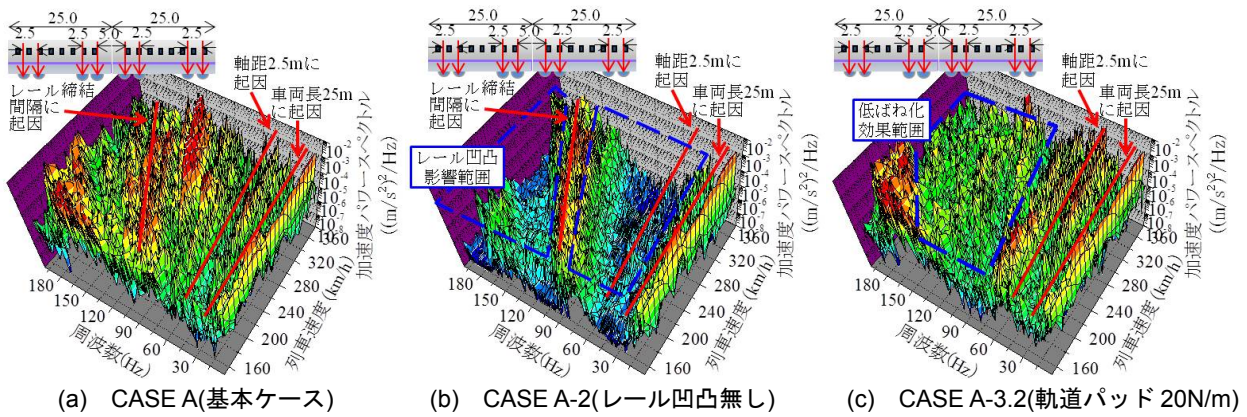


図-14 列車速度の違いによる影響

数をより小さくする方法は、地盤振動対策工法として鉄道において広く行われているが、低ばねによる中間スラブにおける振動低減効果が得られる周波数帯の傾向は、既往の地盤振動測定結果の傾向と概ね一致した<sup>6)</sup>。

#### (4) 列車速度の影響

図-14 に列車速度の違いが中間スラブの鉛直加速度応答に及ぼす影響を示す。取り上げたケースは、基本ケース (CASE A, レール凹凸有り, 軌道パッド 60MN/m), レール凹凸無し (CASE A-2), 軌道パッドを低ばね化したケース (CASE A-3.2) である。それぞれを俯瞰的に比較すると、各ケースとも、車両長 25m に起因するピーク (270km/h で 3Hz) が速度の増大とともに周波数がシフトすることがわかる。CASE A と CASE A-2 を比較すると、概ね 20Hz 以上の周波数帯でレール凹凸の影響が大きい、車輪がレール締結間隔 0.625m ごとに加振されることに起因するピーク周波数 (270km/h で 120Hz) では、両者でほぼ同等の応答レベルでシフトすることがわかる。また、CASE A と CASE A-3.2 を比較すると車両長 25m 及び軸距 2.5m に起因するピーク (それぞれ 270km/h で 3Hz 及び 30Hz) ではほぼ同等の応答レベル、速度により変化するが概ね 40~70Hz より高周波の帯域 (270km/h では 60Hz) において軌道パッド低ばね定数化による応答低減効果が見られることがわかる。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見は以下のとおりとなる。

- (1) 軌道パッドのばね定数のみが異なる同一形式の標準的な鉄道 RC 桁式高架橋 2 橋を対象とした数値解析モデルを構築し、桁のたわみ、振動モード形及び応答加速度における実測と解析との整合性から実現象を概ね再現できることを確認した。
- (2) 計測データより、軌道パッドのばね定数を 60MN/m から 30MN/m に低ばね化することにより、列車速度 270km/h において中間スラブ及び張出スラブの加速度パワースペクトルが 1/10 程度に低減されることが

わかった。数値解析モデルを用いた解析結果でも概ね同じ傾向となった。

- (3) 概ね 20Hz 以上の周波数帯でレール凹凸の影響が大きい、車輪がレール締結間隔 0.625m ごとに加振されることに起因するピーク周波数 (270km/h で 120Hz) では、両者でほぼ同等の応答レベルでシフトすることがわかった。
- (4) 軌道パッドを低ばね定数化すると、車両長 25m 及び軸距 2.5m に起因するピーク (それぞれ 270km/h で 3Hz 及び 30Hz) ではほぼ同等の応答レベル、速度により変化するが概ね 40~70Hz より高周波の帯域 (270km/h では 60Hz) において軌道パッド低ばね定数化による応答低減効果が見られることがわかった。

#### 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.571-576，2010.11
- 2) 渡辺勉，曾我部正道，徳永宗正：車両/軌道/構造物の各種パラメータが鉄道 RC ラーメン高架橋の部材振動特性に及ぼす影響に関する数値解析的検討，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.69，No.2(応用力学論文集 Vol.16)，pp.I\_821-I\_832，2013.9
- 3) 曾我部正道ほか：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.83-102，2003.1
- 4) 守田武史ほか：低ばね定数軌道パッド敷設による地盤振動に対する影響，土木学会第 60 回年次学術講演会，pp.221-222，2005.9
- 5) 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
- 6) 吉岡修，芦屋公稔：軌道の支持ばね係数低下が地盤振動低減に与える効果，鉄道総研報告，Vol.5，No.9，pp.31-37，1991.9