

論文 鉄道 RC ラーメン高架橋の部材振動に影響を及ぼす各種パラメータに関する解析的検討

渡辺 勉^{*1}・曾我部 正道^{*2}・徳永 宗正^{*3}

要旨：本研究では、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列車通過時の構造物の部材振動を求める手法を新たに構築した。車両及び軌道に着目したパラメータ解析を行った結果、列車速度 270km/h では 20Hz 以下の応答は単純な荷重列の繰返し、20Hz～100Hz では車両のばね下質量及びレール凹凸、100Hz～150Hz ではレール締結間隔、150Hz を超える領域ではレール凹凸の影響が支配的であること、軌道パッドの低ばね化により 80Hz 以上の領域で応答が低下すること、車軸配置を変更することにより軸距 2.5m に起因する応答のピークが消失することなどを明らかにした。

キーワード：部材振動、構造物音、高速鉄道、動的相互作用、鉄道 RC ラーメン高架橋

1. はじめに

列車走行による構造物音^{1),2)}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ない、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。

これまで筆者らは、構造物音の原因となる RC 高架橋の 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うち、まず構造物の各種パラメータに着目した検討を行ってきた³⁾が、車両及び軌道についても引き続き検討を進めていく必要がある。そこで、本研究では以下の点に着目した。

- (1) 解析の効率化を図る観点から、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手法を新たに構築する。
- (2) 上記解析モデルを用いて、車両、軌道、構造物の各種パラメータが、構造物の部材振動に及ぼす影響を定量的に評価する。

2. 検討手法

2.1 解析手法

図-1 に解析対象構造物を示す。表-1 に各要素の材料定数を示す。対象構造物は、ブロック長 25m の 3 径間 RC ラーメン高架橋と前後のスパン 10m の調整桁（単版桁）である。基礎は杭形式（RC 打込み杭）である。

図-2 に解析モデルの概要を示す。構造物音を適切に評価するためには、構造物の高次の部材振動モードを考慮することも重要であるが、加振源となる車両のばね下質量を高周波数領域まで加振する必要があり、500Hz を超えるレールの高次振動モードまで再現することが求められる。これまでは車両/軌道/構造物の全体系を一体としてモデル化していた³⁾（以下、旧モデルという）が、構造物の振動モードの大半がレールの振動モードよりも低い次数で存在するため、レールの高次振動モードを再現しようとする、考慮すべき振動モード次数が膨大となり一度の解析に長時間を要することとなり、パラメータの影響を個別に検討していく手法としては、解は得られるが、実用的ではないという問題点があった。そこで、

*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)

*3 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 工修 (正会員)

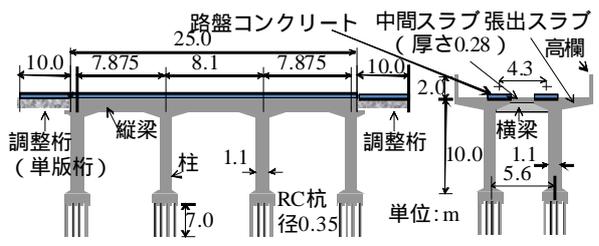
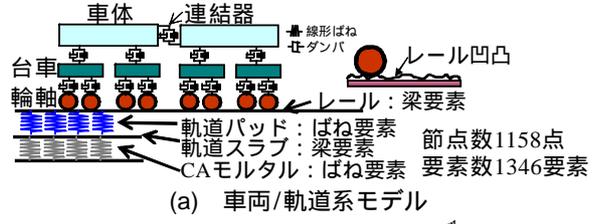
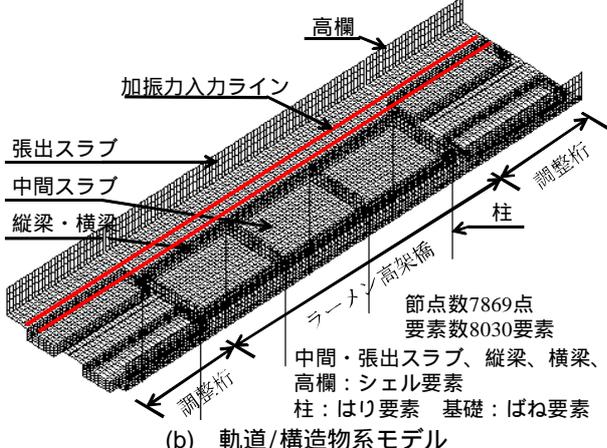


図 - 1 解析対象構造物



(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

車両/軌道と軌道/構造物とで系を分割し、前者のモデルで加振力を求め、これを後者の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する手法を新たに構築した(以下 新モデルという)。これにより個々のモデルの解析自由度を低減し、旧モデルに比べて大幅に解析時間を削減した上でレールの高次振動モードを再現することが可能となり、効率的で実用的な解析手法を実現した。

車両/軌道系解析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。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。一方、実際の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。全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。

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	
軌道スラブ	寸法(mm)	4930 × 2340 × 190	
	ヤング係数(kN/mm ²)	31	
CA モルタル	弾性係数(N/mm ²)	3500	
	厚さ(mm)	25	
高架橋コンクリート	ヤング係数(kN/mm ²)	26.5	
調整桁コンクリート	ヤング係数(kN/mm ²)	25	
減衰定数(%) (全てのモードで一律の値)		2%	
地盤 N 値	深度 (m)	0 ~ -2	5
		-2 ~ -5	15
		-5 ~ -7	30
		-7 ~	50

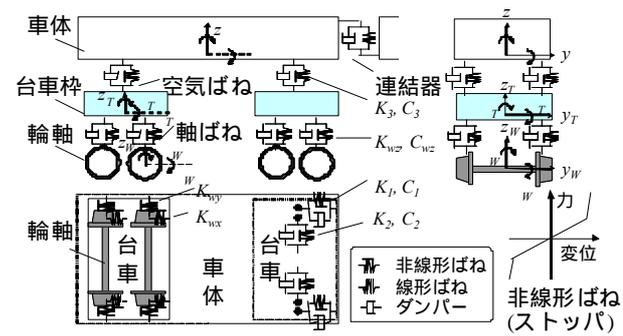


図 - 3 車両の力学モデル

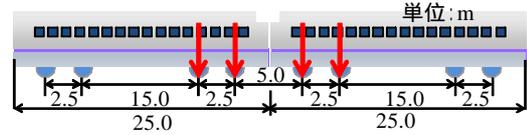


図 - 4 車両の軸配置の概要

2.2 車両の力学モデル

図 - 3 に車両の力学モデルを示す⁴⁾。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質点と仮定し、それらをばねとダンパー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ー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、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。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、縦梁及び横梁はシェル要素、柱ははり要素、基礎はばね要素でモデル化した(旧モデルでは柱下端を固定)。解析メッシュ刻みはレール締結間隔の4分の1(約 0.15m)とした。なお、

解析で実際に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ばね定数の実測値⁵⁾を参考に、公称値の3倍の値を使用した。

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、接触後はレール小返りばねで表現している。図-5に解析に用いたレール凹凸を示す。旧モデルでは、長さ1mの測定機を用いて測定した2m分の凹凸を繰返し与えていた。新モデルでは、それらの凹凸に別途測定した10m分の凹凸を足し合せ、長波長成分を付加した。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。

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 Δt 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 Δt 内において反復計算を行う⁴⁾。解析におけるモード次数は、400Hz 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。

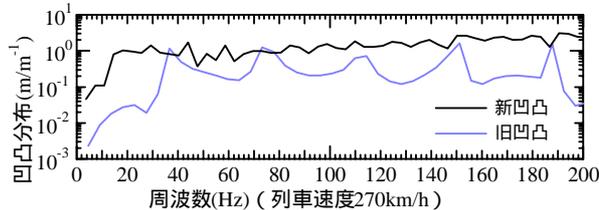
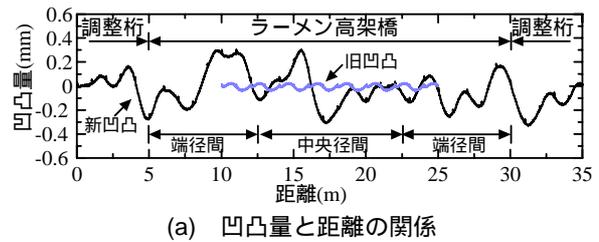
2.6 解析ケース

表-2に解析ケースを示す。構造物の各種パラメータについては、文献3で取り上げているので、ここでは、軌道と車両のパラメータに着目した。

CASE2では、車両を図-3で示した車両モデルではなく荷重列とし、ばね下質量の影響を検討した。

CASE3、4及び5では軌道に関するパラメータとして、レール凹凸、レール締結間隔及び軌道パッドのばね定数の影響を検討した。レール締結間隔の影響の検討では、締結間隔を0.625mから連続支持としているが、連続支持は、レール相当のはり要素に離散的に設けられた節点すべてにばね要素を結合することによって連続支持をモデル化した。ただし、単位長さあたりの軌道支持ばね定数が同じになるように、基本ケースよりも軌道パッド相当のばね定数を低減した。

CASE6及び7では車両に関するパラメータとして、列車速度及び車軸配置の影響を検討した。車軸配置は、基本ケースについては図-4に示すとおりであるが、CASE7では、隣接する車軸の加振周期を逆位相にすることにより両者の加振を打ち消しあうことを期待して車軸配置を変更した。具体的には、軸距2.5mから3.0mに変更(車両長、台車位置は変更せず)したものをCASE7-1、隣接車両の後輪と前輪の間隔を5.0mから3.75mに変更



(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

表-2 解析ケース

CASE	パラメータ	備考
1	-	基本ケース
2	車両のモデル化	31自由度モデル 荷重列
3	レール凹凸	凹凸有り 凹凸無し
4	レール締結間隔	間隔0.625 連続支持
5	軌道パッドばね定数	60MN/m 30MN/m
6	列車速度	160~370km/h (10km/h刻み)
7-1	車軸配置	軸距2.5m 3.0m (車両長25m)
7-2		前後車輪間隔5.0m 3.75m (車両長23.75m)

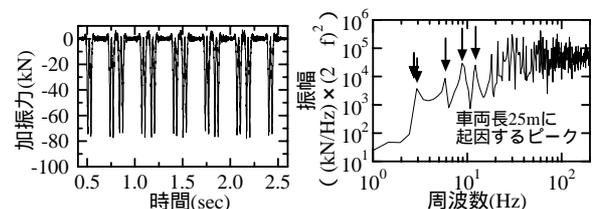


図-6 加振力の時刻歴波形(270km/h)と周波数分析結果

(車両長23.75mに変更、軸距は変更せず)したものをCASE7-2として設定した。

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-1中に示す位置である。加速度の計測には圧電型加速度計(感度:6.42pC/(m/s²),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ADボードを介してノートPCに収録した。なお、柱上部の変位については、加速度計によって得られた加速度データを積分することにより求めた。その際、基線ずれについては適宜補正した。

3. 検討結果

3.1 基本ケース(CASE1)

図-6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

周波数分析を行った結果を示す。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。

(1) 振動モード形

図 - 7 に固有値解析により求めた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する⁶⁾。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。

(2) たわみの時刻歴波形 (列車速度 270km/h)

図 - 8 に中間スラブ及び張出スラブにおけるたわみの時刻歴波形を示す。着目点は図 - 1 中に示す位置である。旧モデルの結果と実測を併せて示す。中間スラブのたわみについては、解析で概ね再現できていることがわかる。一方、張出スラブのたわみについては、実測を見ると、張出スラブと柱上端部でたわみ差が生じており、列車が片線だけに載荷されたことにより、ラーメン高架橋が全体として線路直角方向にロッキング振動を生じていることがわかる。解析結果を見ると、柱下端を固定条件で解析していた旧モデルでは、ロッキング振動が再現できず、実測と大きく乖離していた。新モデルで基礎に相当するばね要素を新たに追加することにより、張出スラブのたわみ挙動の再現性を改善できたことがわかる。

(3) 加速度の周波数応答特性 (列車速度 270km/h)

図 - 9 に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。着目点は図 - 1 中に示す位置である。新旧の解析モデルを比較すると、新モデルでは 100Hz 以上の応答が大きくなり、実測の再現性が改善されていることがわかる。これは、新モデルでモデルを分割したことにより個々のモデルでの解析自由度が減少し、加振力算定の車両/軌道系モデルにおいて、解析モード次数が旧モデルより高次まで考慮可能となり、高周波の加振力まで適切に再現できるようになったためと考えられる。

解析と実測を比較すると、車両長 25m と列車速度 270km/h から決まる 3Hz の整数倍のピークの位置は解析で表現できている。また、30Hz までの応答は実測と解析でよく一致しており、列車走行に伴う加振によるピークは再現できていることがわかる。このように、解析精度を確保しつつ、解析の効率化(解析時間 1/10 程度)を図ることが可能となった。一方、中間スラブの 50Hz 付近の帯域では、レール凹凸に長波長成分を付加したことによる若干の改善は見られるが、依然として実測に比べて解析が小さくなっている。また張出スラブについては、8Hz 以下の帯域、15Hz 付近の帯域、70Hz 付近の帯域で解析が実測に比べて小さくなっており、引き続き精度向

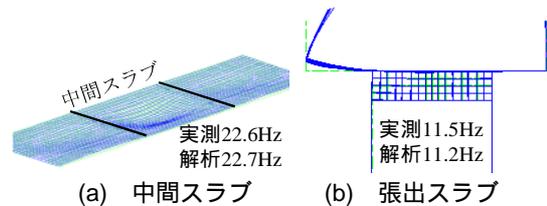
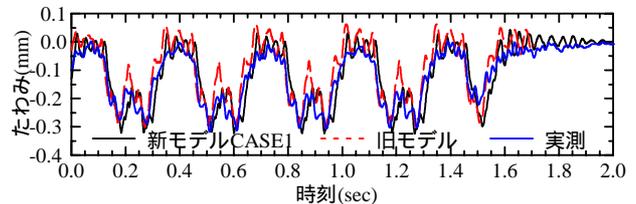
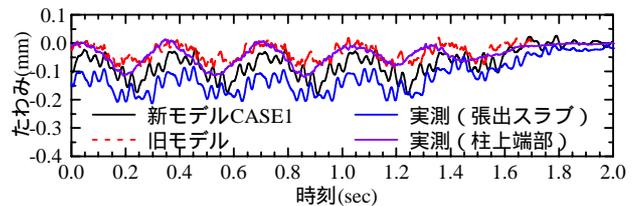


図 - 7 固有値解析により求めた振動モード

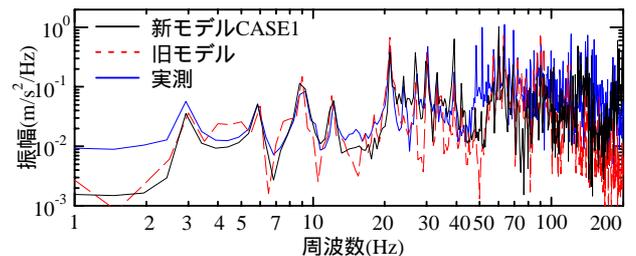


(a) 中間スラブ (列車速度 270km/h)

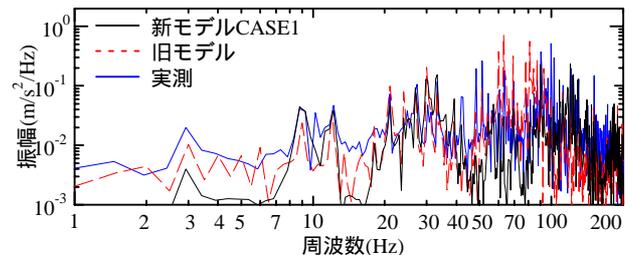


(b) 張出スラブ (列車速度 270km/h)

図 - 8 たわみに関する時刻歴波形



(a) 中間スラブ (列車速度 270km/h)



(b) 張出スラブ (列車速度 270km/h)

図 - 9 鉛直加速度の周波数応答特性

上を図る必要がある。

なお、列車速度 270km/h 周波数分析は、時刻歴波形の列車通過中の 2 秒間を切出して FFT を施した。以下の波形処理はこれと同様に行う。

3.2 各種パラメータの影響

(1) 車両のモデル化、レール凹凸、締結間隔の影響

図 - 10 に車両を荷重列でモデル化した場合(CASE2)、図 - 11 にレール凹凸が無い場合(CASE3)、図 - 12 にレール支持間隔を連続支持にした場合(CASE4)の中間スラブの鉛直応答加速度への影響に関する周波数分析結果を示す。同図に示すように、22Hz 程度までの低周波領域

では、3つのケースともに基本ケースとの違いがほとんど見られない。したがって、この領域では単純な移動荷重の繰返しのみによって応答が決まることがわかる。

20Hz～100Hz程度の領域では、荷重列によってモデル化したCASE2及びレール凹凸無しのCASE3では、基本ケースに比べて応答が大幅に低下した。したがって、この領域では車両のばね下質量やレール凹凸の影響を受けて応答が決まることがわかる。

100Hz～150Hz程度の領域では、レール凹凸が無いにも関わらず、CASE3は基本ケースとほぼ同等の応答となった。ここでレール締結間隔0.625mを列車速度270km/hで通過するとき、車輪が軌道側から受ける加振周波数は120Hzであり、概ねこの領域と一致する。一方で、レールを連続支持したCASE4では締結間隔と列車速度から決まる加振周波数が存在しないことから、基本ケースに比べてこの領域での応答が低下した。したがって、この領域では、ばね下質量が締結間隔ごとに加振されることによって応答が決まることがわかる。

150Hzを超える領域では、20～100Hzの領域と同様に、車両のばね下質量やレール凹凸の影響を受けて応答が決まることがわかる。

(2) 軌道パッドのばね定数の影響

図-13に軌道パッドばね定数の違いによる中間スラブの鉛直応答加速度への影響を示す。軌道パッドのばね定数を30MN/mとしたCASE5では、通常用いられる60MN/mの軌道パッドを使用した基本ケースに比べて、80Hz以上の領域で応答が低下した。一方、80Hzより低い領域では、基本ケースと同程度の応答あるいはCASE5の方が増加した領域もあった。柔らかい軌道パッドでレールを支持し、軌道支持ばね定数をより小さくする工法は、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する⁷⁾。

(3) 列車速度の影響

図-14に列車速度の違いによる中間スラブの鉛直応答加速度への影響を示す。列車速度は160km/h～370km/hまで10km/h刻みで計算した。同図には構造物の加振力についても示した。270km/hで軸距2.5mの繰返しに起因して30Hzのピークが出るが、そのピークは360km/hでは40Hzにシフトしており、中間スラブの固有振動数40Hzと加振周波数(軸距2.5mでは360km/hで40Hz)が近接していくことから応答が急増している。また、加振力で290km/hで65Hz付近のピークは別途行ったレール凹凸無しの解析ではピークが消失したことからレール凹凸が原因であると考えられる。中間スラブの応答は固有振動数と加振周波数(軸距2.5mでは290km/hで32Hz)

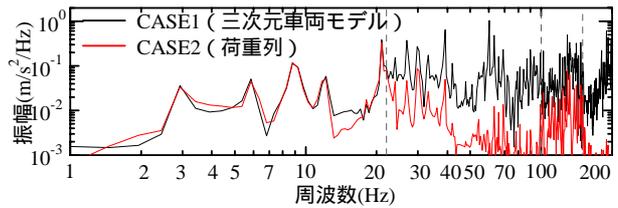


図-10 車両のモデル化の違いによる応答への影響

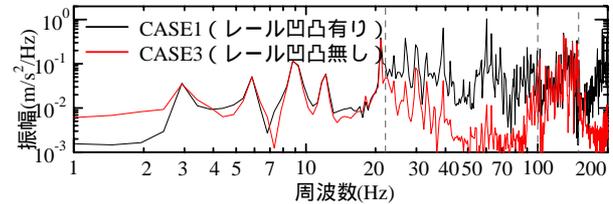


図-11 レール凹凸の有無による応答への影響

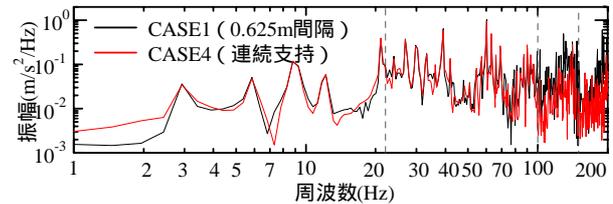


図-12 レール締結間隔の違いによる応答への影響

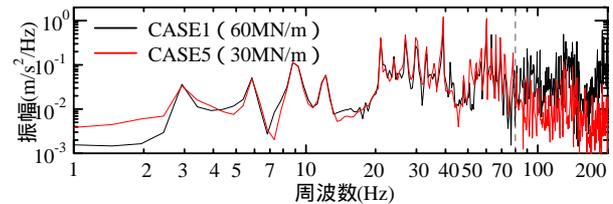


図-13 軌道パッドばね定数の違いによる応答への影響

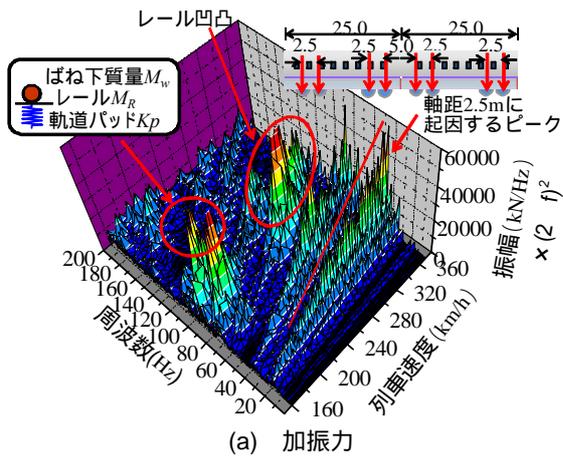
の2倍と近接する影響によると考えられる。180km/h付近で80～100Hz付近の加振力のピークはで80～100Hz付近のピークは、ばね下質量とレール質量及び軌道パッドで構成されるばねマス系の固有振動数とばね下質量がレール締結間隔0.625mから受ける反作用による加振周波数と近接していることが原因と考えられる。

(4) 車軸配置の影響

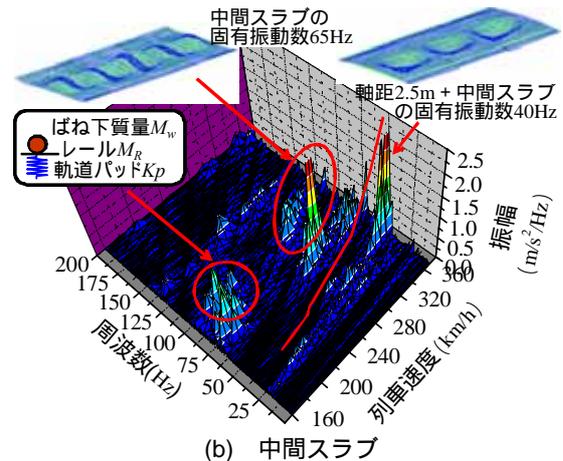
図-15に車軸配置の違いによる中間スラブの鉛直応答加速度への影響を示す(以下、図-4に示した車軸配置を基本配置という)。車軸配置を変更すると、基本配置で生じていた320km/h～370km/hのピーク値が減少あるいは消失していることがわかる。これは、基本配置では軸距2.5mに起因する加振周波数と車両長25mに起因する加振周波数の10倍が完全に一致するが、車軸配置を変更したことにより両者の加振周波数が一致しなくなったためと考えられる。その他の周波数帯においても応答ピークの増減、ピークの消失等が見られるが、その要因については構造物の振動特性と合わせて詳細に検討していく必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。



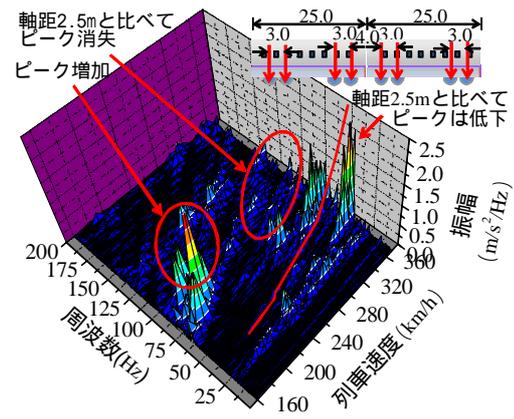
(a) 加振力



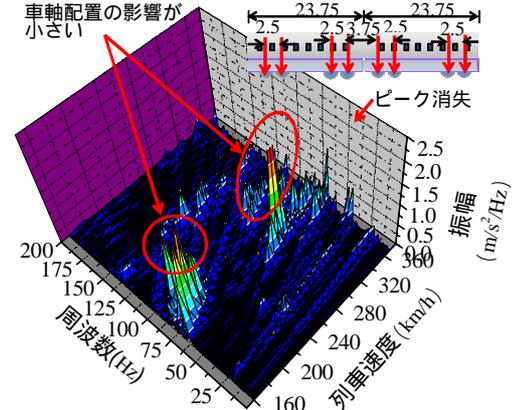
(b) 中間スラブ

図 - 14 列車速度の違いによる応答への影響

- (1) 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手法を新たに構築した。その結果、解析精度を確保しつつ、解析自由度を低減させることができ、解析の効率化を可能にした。
- (2) 列車速度 270km/h で走行した場合の中間スラブの 200Hz までの応答特性のうち、20Hz 以下では単純な荷重列の繰返し、20Hz ~ 100Hz の領域では車両のばね下質量及びレール凹凸、100Hz ~ 150Hz の領域ではレール締結間隔、150Hz を超える領域ではレール凹凸の影響が支配的であることがわかった。
- (3) 軌道パッドの低ばね化により、列車速度 270km/h で走行した場合においては、80Hz 以上の領域で中間スラブの応答が低下することがわかった。
- (4) 列車速度の違いによって応答のピークがシフトすることがわかった。特に、軸距 2.5m に起因するピークは 320km/h を超えると急激に増大する。一方、車軸配置を変更すると、軸距 2.5m に起因する加振周波数と車両長 25m の加振周波数の 10 倍とが一致しなくなるため、それらに起因するピークが減少あるいは消失することがわかった。



(a) 軸距を 2.5m から 3.0m に変更



(b) 連結器を挟む前後車輪間隔を 5.0m から 3.75m に変更

図 - 15 車軸配置の違いによる応答への影響

参考文献

- 1) 長倉清：新幹線鉄道の騒音問題，日本音響学会誌，Vol.60，No.5，pp.284-289，2004.5
- 2) 北川敏樹：鉄道騒音の特性と防止策，日本音響学会誌，Vol.64，No.10，pp.629-634，2008.10
- 3) 渡辺勉，曾我部正道，後藤恵一，浅沼潔：構造物音評価のための RC ラーメン高架橋の振動性状評価法，鉄道力学論文集，Vol.14，pp.136-143，2010.7
- 4) 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.83-102，2003.1
- 5) 守田武史，田中靖幸，廣本勝昭，横山秀史，岩田直泰：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
- 6) 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
- 7) 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