

鉄道高架橋の構造物音の発生メカニズムと  
低減対策に関する研究

Research on Structure Borne Sound Mechanism of Railway

Viaducts and Reduction Countermeasure

2015 年 7 月

渡辺 勉

Tsutomu WATANABE

鉄道高架橋の構造物音の発生メカニズムと  
低減対策に関する研究

Research on Structure Borne Sound Mechanism of Railway

Viaducts and Reduction Countermeasure

2015 年 7 月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

渡辺 勉

Tsutomu WATANABE

— 目 次 —

1 章 序論	
1. 1 研究の背景	1
1. 2 本研究の目的	3
1. 3 本研究の構成と特徴	3
2 章 列車走行に伴う鉄道沿線騒音の概要	
2. 1 本章の概要	7
2. 2 鉄道沿線騒音の音源別の特徴	7
2. 3 鉄道沿線騒音の対策の種類	15
2. 4 鉄道沿線騒音の対策技術の変遷	21
2. 5 鉄道沿線騒音の予測手法	23
2. 6 本章の結論	24
3 章 防振軌道の高速鉄道への適用性	
3. 1 本章の概要	28
3. 2 解析対象軌道	29
3. 3 解析手法	34
3. 4 解析結果	41
3. 5 本章の結論	48
4 章 鋼鉄道橋の構造物音の低減対策	
4. 1 本章の概要	50
4. 2 構造物音低減効果の確認試験	51
4. 3 構造物音低減効果の推定	60
4. 4 本章の結論	62
5 章 鉄道 RC ラーメン高架橋の構造物音発生メカニズムの解明とその低減対策	
5. 1 本章の概要	64
5. 2 解析手法	66
5. 3 基本ケースの解析結果と解析手法の妥当性の実証	78
5. 4 各種パラメータの影響に関する解析結果	88
5. 5 本章の結論	104
6 章 鉄道 RC 桁式高架橋の構造物音発生メカニズムの解明とその低減対策	
6. 1 本章の概要	106
6. 2 解析手法	110
6. 3 解析結果	115

6. 4	本章の結論	132
7 章	結論	
7. 1	本章の概要	135
7. 2	各章の結論	135
7. 3	今後の展望と課題	140

謝辞

研究業績書



# 1章 序論

## 1.1 研究の背景

鉄筋コンクリート（以下 RC という）高架橋は、盛土の代替として提案された構造形式で、東海道新幹線で大規模に使用されて以降、施工やレールレベルの管理が容易であることから、山陽新幹線、東北新幹線において多用されている構造形式である。

図 1-1 に代表的な鉄道コンクリート構造物であるラーメン高架橋と桁式高架橋を示す。ラーメン高架橋は、中間スラブ、張出スラブ、高欄、縦梁、横梁、柱、基礎が剛結して構成されており、不静定構造、合理的な断面、支承不要などの特徴があり、工費を抑えることができる。山陽新幹線の岡山以西開業以降はラーメン高架橋の両端に調整桁を有するゲルバー式が一般的である。一方、桁式高架橋は、プレストレストコンクリート（以下 PC という）又は RC の桁と RC の橋脚基礎から構成されており、工期が短い箇所、高橋脚の箇所、軟弱地盤などで用いられている。桁式高架橋にも種類があるが、既設構造物ではスパン 20m 程度の T 形断面の RC 桁が多く、これは主桁、中間スラブ、張出スラブ、高欄、横梁などで構成されている。

こうしたコンクリート構造物から発生する構造物音は、その他の音源に比べて寄与度も小さく、従来から問題になることはほとんどなかった。しかしながらその他の音源で対策が進んできたこと、列車速度の向上により構造物の部材の動的応答が増大していることなどから、コンクリート構造物においても構造物音の発生が懸念されることとなった。とりわけ今後、300km/h 超の新幹線を実現していく場合には、現象解明と対策実現が重要なファクターの一つとなることが予想される。

図 1-2 に本研究の背景と構造物音の発生、伝播の概念図を示す。構造物音は、構造物の部材レベルの振動（以下、部材振動）に起因するものであり、その伝播系には車両、軌道、構造物の様々なパラメータが介在する大規模かつ複雑な現象である。また、振動の周波数帯は数 Hz から数百 Hz にわたるマルチスケールで多自由度問題である。振動の伝播系は、車輪/レール間の変動作用

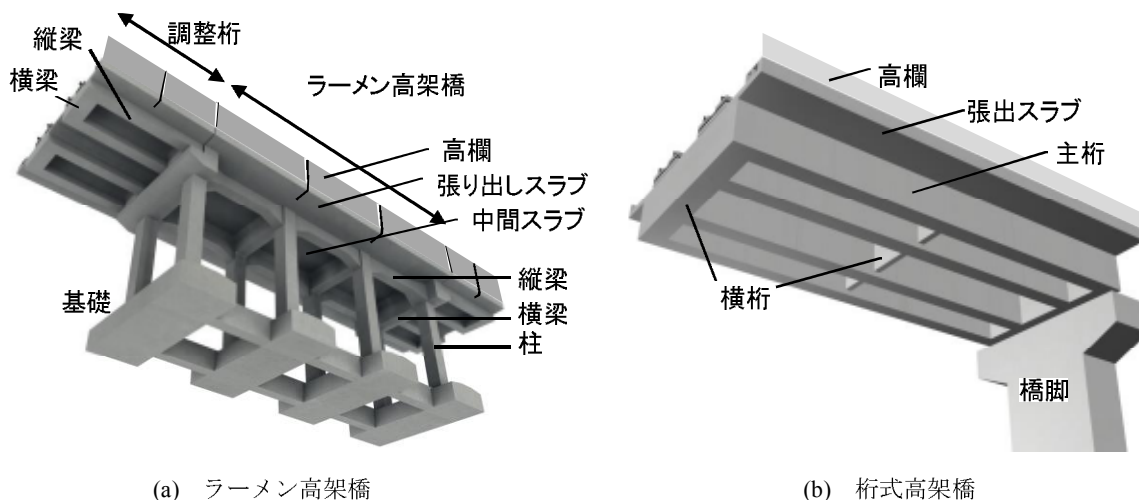


図 1-1 代表的な鉄道コンクリート構造物の例

力によって発生した振動が各部材に伝わり、その部材の表面振動が構造物音として空間に伝播していくものである。構造物音のメカニズムの解明には、RC 高架橋の部材レベルでの高次の振動を明確化することが重要となるが、この分野の研究は、これまでは限定的な研究成果に留まっていたが、主たる課題は次の3点が挙げられる。

(1)理論的な計算手法の構築

現在の構造物音の予測手法は、構造物の測定データから伝達関数などを介して加振力を逆算し、これを用いて行う手法や、部分的な解析モデルを用いたものが主であり、車両、軌道、構造物の任意の諸元を精緻にモデル化できる手法は存在しなかった。また実測応答に基づく手法は、パラメータが異なるような新形式の車両、軌道、構造物へは対応しづらいという課題がある。

車両の走行から音の伝播までを、積み重ねて演繹法的に解こうとした場合、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が現状では現実的な選択となる。前者と後者は、有限要素節点の速度データを媒介として接続されることとなる。本研究の主題は、特に前者の有限要素法による振動の計算であるが、構造物音の解明のための車両走行による構造物の振動は、数 Hz から 200Hz 程度までの現象を取り扱う必要があり、メッシュの大きさ、数値計算上の積分間隔の問題から、大規模問題とならざるを得ない。

(2)RC 高架橋の部材振動特性の解明

構造物音の音源となるのは、部材振動モードであるが、これまであまり課題とされていなかった分野であること、計測技術が稚拙であったことなどに起因して、RC 高架橋の部材振動モードの分析は行われていなかった。このため、構造物音の現象解明には実構造物に対する振動モード形状の同定が必要不可欠である。

同様に列車走行に対する実構造物の連成応答挙動も未解明であり、効率的な多チャンネル計測システムを用いた応答評価が不可欠である。

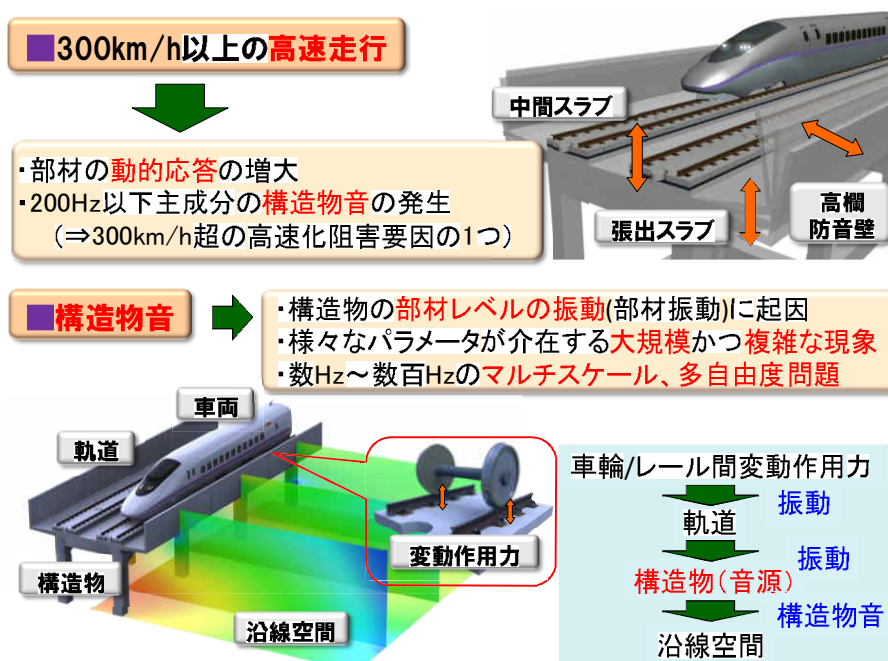


図 1-2 本研究の背景と構造物音の発生、伝播の概念図

### (3)RC 高架橋の構造物音発生メカニズムの解明

図 1-3 に RC 高架橋の構造物音の発生メカニズムに影響する各種パラメータを示す。車両については、車両質量（ばね上、ばね間、ばね下）、車両長、軸距などである。軌道については、軌道変位、レール凹凸、軌道構造、レール締結間隔、軌道支持条件などである。構造物については、構造形式、各種材料特性、非構造部材、減衰などである。車両のばね上質量およびばね下質量車両、軌道、構造物の各種パラメータが部材の周波数応答特性に及ぼす影響は未解明である。実測においても要因分析や対策効果の推定は可能であるが、特定の速度断面で切り取った結果の解釈に過ぎず、部分的な解釈に留まっていた。

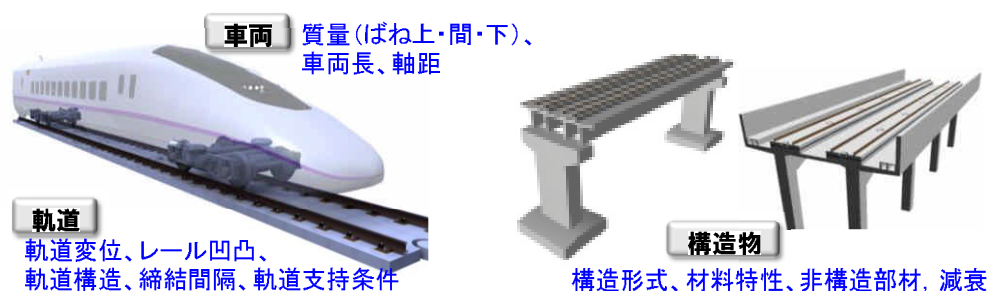


図 1-3 RC 高架橋の構造物音の発生メカニズムに影響する各種パラメータ

## 1. 2 本研究の目的

以上のように RC 構造物における構造物音は、高速化などにより新たな課題として認識され始めたが、解析能力、解析手法、測定手法などに起因して、体系的な検討、現象解明は不十分であった。そこで本研究は以下のような目的を定めた。

- (1)車両/軌道/構造物のパラメータを精緻に考慮可能な解析手法の構築
- (2)標準 RC 高架橋の大規模連成モデルの構築、手法の妥当性の実証
- (3)各種パラメータが周波数ごとの部材応答特性に及ぼす影響の解明

## 1. 3 本研究の構成と特徴

図 1-4 に本研究の構成と特徴を示す。本論文は 7 章で構成されている。以下にその概要を示すとともに、特徴を新規性の観点から整理した。

「第 1 章 序論」は、本研究の導入部であり、本研究の背景、目的、構成と特徴を簡潔に整理したもので、以降の各章の位置づけと、個々の研究との相関を示した。

「第 2 章 列車走行に伴う鉄道沿線騒音の概要」は、列車走行に伴って発生する鉄道沿線騒音の概要および本研究に係る既往の知見を整理したもので、本研究の主題である構造物音のみならず、車輪/レール間音、車両機器音、車両空力音、集電系音について、音源別の特徴、沿線騒音の対策の種類、変遷、予測手法の観点から取りまとめた。その結果、構造物音の現象解明および低減対策の検討の必要性、防振軌道による低減対策の実現の検討の必要性、数値解析を用いた構造物音の予測手法の構築の必要性を提示した。

「第 3 章 防振軌道の高速度鉄道への適用性」は、構造物音の効果的な対策と考えられている防振軌道について、数値解析を用いて高速鉄道への適用性を論じたものである。安全かつ平滑に鉄

道車両が走行することは、以降の章における重要な前提条件となるため、マス・スプリングシステムからなる防振軌道の成立性を、最初に明らかにしておくこととした。

我が国の高速鉄道では、軌道支持ばねの極めて小さい防振軌道の導入は進んでいないが、本研究では数値解析により、共振増幅の有無、境界区間の設置方法、走行安全性、乗り心地などの観点から従来軌道も含む各種軌道を比較して総合的に論じた点に特徴がある。高速走行に対する解析評価では長い軌道延長と、高次モードまで考慮した数値解析が必要となるが、スーパーコンピュータを用いた数値実験により定量的に明らかにした。

「第4章 鋼鉄道橋の構造物音の低減対策効果」は、構造物音の効果的な対策と考えられている防振軌道について、より騒音が問題になり易い鋼橋を対象として、その効果を実証的に論じたものである。防振軌道の防振効果は、以降の章における重要な前提条件となるため、その実用性を最初に明らかにしておくこととした。

前述のように、測定条件を揃えて実車両を走行させることは実務的には困難であるため、本研究では、マス・スプリングシステムの要件を揃えた実物大の構造物・軌道模型を製作して本質的な要因を抽出した試験を実施することとした。本模型は、支持剛性のプロパティを調整できること、低速ではあるが実車両走行が可能などの特徴を有している。更にその試験結果を外挿するため営業線における走行試験を行い、防振効果を明らかにした。さらに、鉄筋コンクリート床版を弾性支持した重量級マス・スプリングシステムによる低周波振動への効果も実証した。

「第5章 鉄道RCラーメン高架橋の構造物音発生メカニズムの解明とその低減対策」は、本論文の中核をなす部分である。鉄道の高速化に伴い顕在化したRCラーメン高架橋の構造物音の問題は、前述のように同構造形式が路線延長の相当部分を占めることから喫緊の課題と言える。

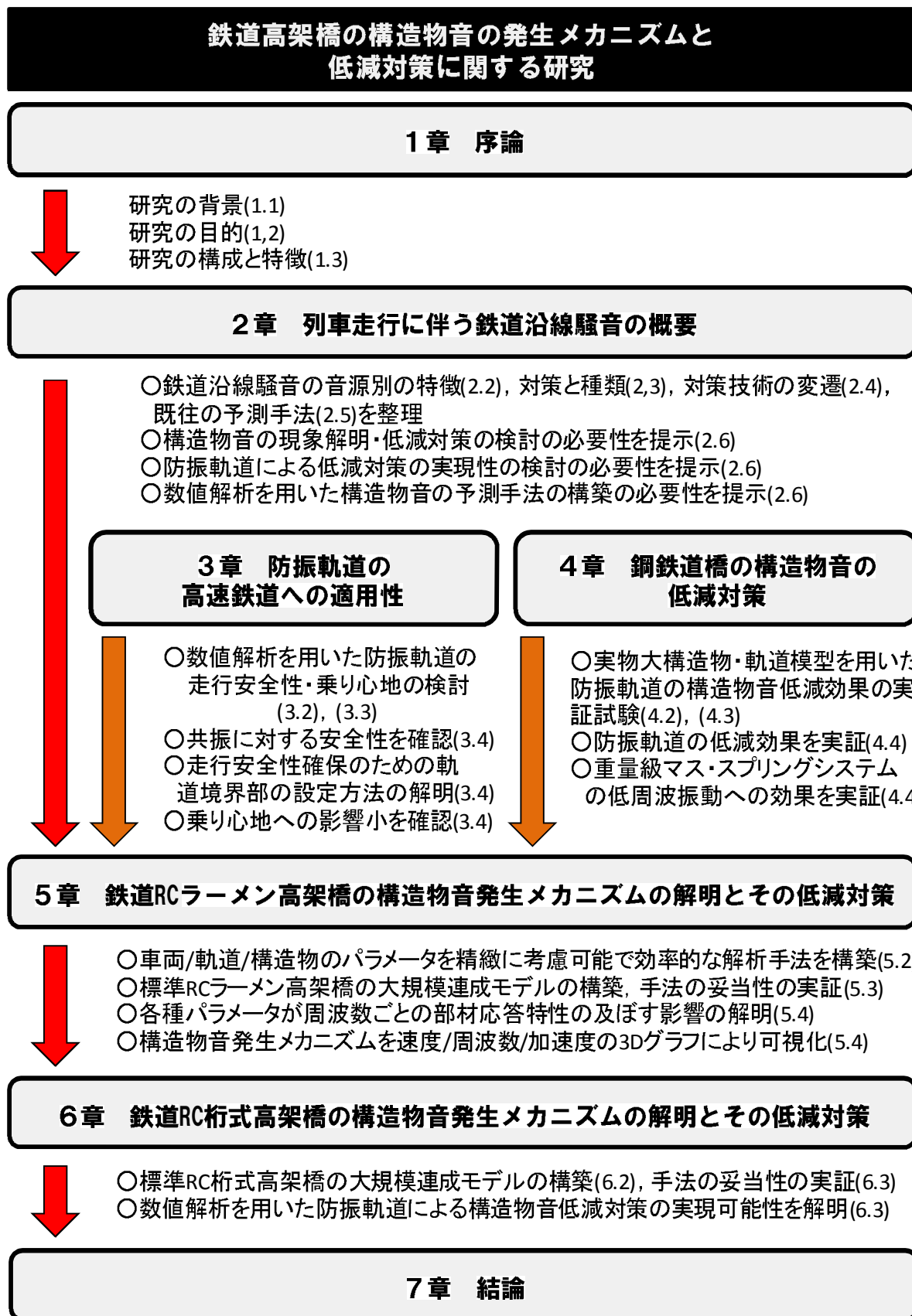
本研究では、マルチスケール問題を効率的に解くため、列車走行、車輪/レールの接触、軌道の応答、構造物への加振力算出を担う車両/軌道系モデルと、加振力から構造物の応答を算出する軌道/構造物系モデルとから構成される、弱連成系の振動伝播モデルからなる解析手法を新たに構築した。高架橋のモード寄与率の観点からも、スケールの異なる両者を分離することが可能となり、それぞれにモーダルリダクションを適用することにより、計算効率を10倍とすることを可能とした。本手法の妥当性は、実際の営業線での計測データをもとに実証した。

また、本研究では、解析結果を列車速度、周波数、加速度パワースペクトルによる3Dグラフで可視化することにより、構造物音発生メカニズムを定量的に明らかにした。これまでの数値解析では、数ケースの速度段が限界であり個々の応答のピーク解釈などに明快性を欠いたが、本研究では、3Dグラフの解像度を上げることにより、メカニズムの実像を浮き彫りにし適切な解釈を行うことを可能とした。この中でスーパーコンピュータにおける多重並行処理の実現の貢献も大きい。従来、node単位だった数値計算を、nodeを構成する24個のcoreに自動的に割り振ることにより、計算効率は24倍となった。これらの数値解析結果は、マルチアレイ配置された加速度計によるモード分析、各速度段における検証を経て信頼性を確認している点も特徴として挙げられる。本研究では、これらの数値解析法に基づき、第3章、第4章で整理した前提条件も加味して、with/without分析により支配要因や各種対策効果について考察した。

「第6章 鉄道RC桁式高架橋の構造物音の発生メカニズムの解明とその低減対策」は、RCラーメン高架橋について比較的構成割合の大きい構造形式であるRC桁式高架橋について検討した。基本的な研究手法は第5章と同様であるが、構造形式が異なる点において、実務的に有益な知見

が得られている。また、設計上の構造緒元は同一であるが、軌道パッドのばね定数が異なる2橋を解析対象としている点が特徴である。さらに、防振軌道に特化したパラメータ解析を合わせて実施し、防振軌道による構造物音の低減対策の実現可能性を示した。

「第7章 結論」では、各章で得られた結論をまとめて述べるとともに、今後の展望と課題を示し本研究の結論とした。



本章の概要(7.1), 各章の結論(7.2), 今後の展望と課題(7.3)

図 1-4 本研究の構成と特徴

## 2 章 列車走行に伴う鉄道沿線騒音の概要

### 2. 1 本章の概要

第 2 章では、列車走行に伴って発生する鉄道沿線騒音の概要および本研究に係る既往の知見を整理する。本研究の主題である構造物音のみならず、その他の音源についても、音源別の特徴、沿線騒音の対策技術の種類、歴史的な変遷、予測手法の観点から取りまとめる。

鉄道沿線騒音は、車両、軌道、構造物および地上の条件によってさまざまに変化する。鉄道沿線騒音の音源は、音の発生個所と発生メカニズムの観点から、図 2-1 に示すように、本研究で対象とする①構造物音の他に、②車輪/レール間音、③車両機器音（ギア、ファン、エンジンなど）、④車両空力音、⑤集電系音に大別される。一般に、列車速度が 130km/h 程度までの在来線については、これらのうち、①構造物音、②車輪/レール間音、③車両機器音の 3 つが主要な音源となる。200km/h から 300km/h を超える速度で高速走行する新幹線については、④車両空力音、⑤集電系音も主要な音源となるのが特徴である<sup>2-1)</sup>。

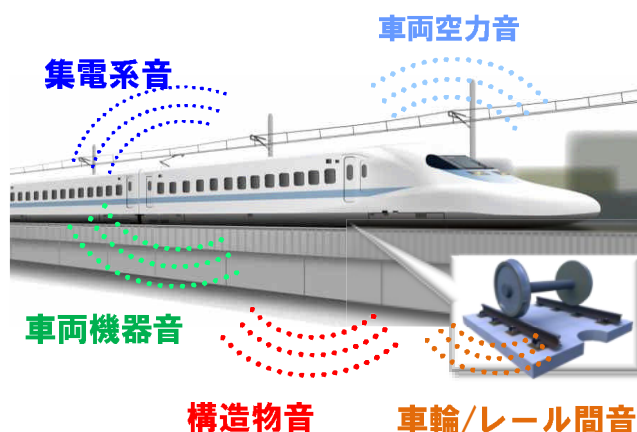


図 2-1 鉄道沿線騒音の概要

### 2. 2 鉄道沿線騒音の音源別の特徴

本節では、鉄道沿線騒音の音源別の特徴を述べる。本研究では構造物音を対象とするため、車輪/レール間音、車両機器音、車両空力音、集電系音については概略に留めることとする。

なお、鉄道沿線騒音に関わる環境基準は、公害対策基本法第 9 条の規定に基づき、「新幹線鉄道騒音に関わる環境基準について」が告示されている。表 2-1 に示すように、基準値が定められているが、これらの値は各音源から発生した音の総合音であり、音源別の基準値は定められていない。また、在来線についても同様に、「在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての騒音対策の指針」が通達されているが、総合音に対する等価騒音レベルの基準値が定められている。



表 2-1 鉄道騒音に関わる環境基準

(a) 新幹線鉄道に関わる環境基準

地域の類型	基準値
I (住居地域)	70dB
II (商工業地域)	75dB

(b) 在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての騒音対策の指針について

新線	等価騒音レベル(L <sub>Aeq</sub> )として、昼間(7~22時)については60dB(A)以下、夜間(22時~翌日7時)については55dB(A)以下とする。なお、住居専用地域等住居環境を保護すべき地域にあつては、一層の低減に努めること。
大規模改良線	騒音レベルの状況を改良前より改善すること。(現状非悪化)

### 2.2.1 構造物音

図 2-2 に構造物音の概要を示す。図 2-3 にコンクリート橋の例、図 2-4 に鋼橋の例、図 2-5 に鋼・複合橋（合成桁）の例をそれぞれ示す。構造物音は、車輪およびレールの表面に必ず存在する数  $\mu\text{m}$  オーダーの凹凸や線路方向の波長数  $\text{m}$  オーダーの軌道変位などに起因して発生する変動作用力が車輪とレールを振動させ、その振動がまくらぎや軌道スラブなどの軌道構造、さらに軌道を支持する土木構造物に伝わり、各部材の振動面から音が放射されることによって発生する。図 2-3 のようなコンクリート橋の構造物音と図 2-4 のような鋼橋の構造物音は、発生メカニズムは基本的に同じであるが、特性が異なるため、以下にそれぞれに分けて記述する。

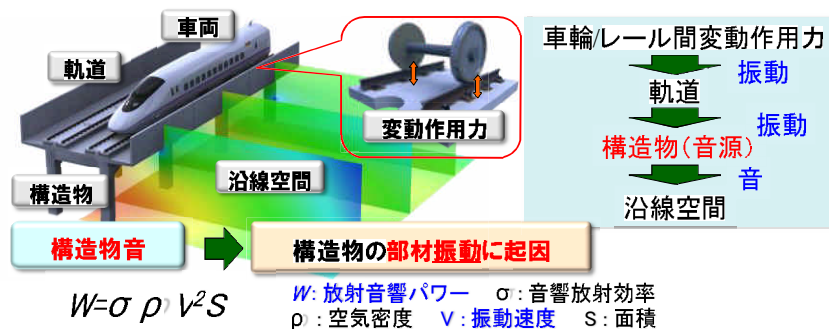


図 2-2 構造物音の概要



(a) ラーメン高架橋



(b) 桁式高架橋

図 2-3 コンクリート橋の例



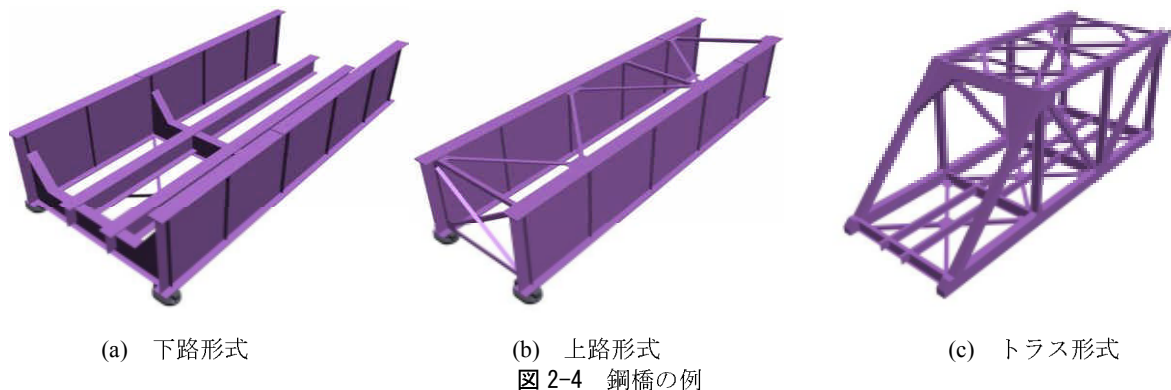


図 2-4 鋼橋の例



図 2-5 鋼・複合橋（合成桁）の例

表 2-2 新幹線の沿線構造物の内訳<sup>2-2)</sup>

	開業	路盤 (%)	橋梁 (%)	高架橋 (%)	トンネル (%)	備考
東海道新幹線	1964年	53	11	22	13	バラスト軌道
山陽新幹線	1972年岡山以东 1975年岡山以西	12	9	28	50	バラスト軌道, スラブ軌道
九州新幹線	2004年新八代以南 2011年新八代以北	8	11	32	49	スラブ軌道
東北新幹線 (東京 - 盛岡)	1982年大宮-盛岡 1985年上野-大宮 1991年東京-上野	5	16	56	23	スラブ軌道
東北新幹線 (盛岡 - 八戸)	2002年	14	4	9	73	スラブ軌道
東北新幹線 (八戸 - 新青森)	2010年	15	5	18	62	スラブ軌道
上越新幹線	1982年	1	11	49	39	スラブ軌道
北陸新幹線	1997年高崎-長野 2015年長野-金沢	15	9	25	51	スラブ軌道
北海道新幹線	2016年(予定)新函館北斗以南	8	4	23	65	スラブ軌道

(1) コンクリート橋

鉄道橋は、当初鋼橋を中心に建設されてきたが、東海道新幹線が1964年に開業してから、特にまくらぎを鋼桁で直接支持する無道床鋼橋の騒音に対する苦情が頻発した。社会全体の騒音に対する関心の高まりとともに、新幹線および在来線においては、無道床鋼橋は用いられなくなり、コンクリート橋や図 2-5 のような床版にコンクリートを打設した鋼・複合橋（合成桁）が採用されるようになり、コンクリート橋が鉄道橋の主流となっている。

コンクリート高架橋や橋梁における構造物音は、一般に数十 Hz～1000Hz の範囲の周波数成分を持ち、新幹線のような高速鉄道では、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おり<sup>2-1)</sup>、後述するその他の音源に比べて低い周波数領域に偏っている。

表 2-2 に新幹線の沿線構造物の内訳を示す。新幹線のコンクリート高架橋については、大量のコンクリート構造物を効率的に建設していくために、汎用性のある RC ラーメン高架橋、RC 桁式高架橋および PC 桁式高架橋については、標準設計が採用されている。近年ではトンネルが占める割合が増加しているが、1982 年開業の東北および上越新幹線においては、沿線の構造物の約 5 割を高架橋が占めている<sup>2-2)</sup>。表 2-3 にラーメン高架橋の標準設計における部材寸法の例を示す<sup>2-3)</sup>。構造物音の音源となりやすい板状の部材である中間スラブは中央スパンについて見れば、寸法 7.8m×4.4m(一部 4.8m)、厚さ 0.28m で、1 次固有振動数は 20Hz 付近に統一されている、張出スラブについても、上下線で異なるが、上りは張出長さ 2.750m, 2.550m, 2.525m, 2.500m, 下りは張出長さ 2.550m, 2.325m, 2.300m, 張出基部の厚さは 0.43m, 先端は 0.2m で、1 次固有振動数は 9～15Hz に統一されていることなどから、標準設計のされたコンクリート高架橋では振動特性が大きく異なることがわかる。したがって、代表的なラーメン高架橋および桁式高架橋の振動特性の把握を行うことにより、沿線の大半のコンクリート高架橋に対しての構造物音の評価および低減対策の検討が可能となる。

鉄道沿線騒音に対する寄与度の観点からみると、コンクリート橋の構造物音はその他の音源に比べて寄与度が小さいものであった<sup>2-4)</sup>。しかしながら、後述するが、その他の音源で対策が進んでいることや列車速度の向上により構造物の部材の動的応答が増大していることなどから、鉄道沿線騒音に対する構造物音の寄与度の増大により、これまで問題となることが少なかったコンクリート橋についても従来以上の構造物音の発生が懸念されるようになってきている。実際に、高架橋区間と盛土区間の低周波音測定結果の比較より、10～60Hz 程度の低周波音の成分には、車両空力音に加えて、構造物音が大きく影響を及ぼしていることが指摘されている<sup>2-5)</sup>。したがって、現象解明そのものが不十分なコンクリート橋の構造物音については、実測および数値解析を用いて、周波数ごとの主要な要因の抽出、各種パラメータの詳細な感度分析および対策工の検討などを行うことが求められている。

なお、低周波音とは、日本では概ね 1Hz～100Hz の音とされている。その中でも、人間の耳では特に聞こえにくい音 (20Hz 以下の音) を超低周波音と呼ぶ<sup>2-6)</sup>。低周波音は工場、建設作業、風力発電設備からの騒音問題として取り上げられることが多い。

表 2-3 ラーメン高架橋の標準設計における部材寸法の例<sup>2,3)</sup>

型式	径間	ブロック長	高さ	図面番号	張出し			中間スラブ				線路直角方向		厚さ		固有振動数							
					長さ(m)	先端	付根b	スパン①		スパン②		スパン③		スパン④		d4	(m)	乗出スラブ		中間スラブ			
								線路方向	線路方向	線路方向	線路方向	線路方向	線路方向	上り	下り			側径間	中央径間	側径間	中央径間	側径間	中央径間
スラブ軌道(直壁)	背割式	4	7.00	ERB-027-73022	2.750	2.550	0.200	0.430	7.600	7.800	7.800	7.600	7.600	4.400	0.280	12.8	11.3	21.0	20.4	20.4	21.0		
		4	8.50	ERB-027-73023	2.750	2.550	0.200	0.430	7.600	7.800	7.800	7.600	7.600	4.400	0.280	12.8	11.3	21.0	20.4	20.4	21.0		
		4	10.00	ERB-027-73024	2.750	2.550	0.200	0.430	7.600	7.800	7.800	7.600	7.600	4.400	0.280	12.8	11.3	21.0	20.4	20.4	21.0		
	片背割式	4	35	12.00	ERB-027-73025	2.750	2.550	0.200	0.430	7.600	7.800	7.800	7.600	7.600	4.400	0.280	12.8	11.3	21.0	20.4	20.4	21.0	
		4	35	14.00	ERB-027-73026	2.550	2.350	0.200	0.430	7.600	7.800	7.800	7.600	7.600	4.800	0.280	14.8	13.0	17.8	17.8	17.8	17.8	
		4	35	7.00	ERB-027-73027	2.750	2.550	0.200	0.430	7.690	7.800	7.800	7.690	7.690	4.400	0.280	12.8	11.3	21.0	20.4	20.4	21.0	
	東京有壁間	背割式	4	8.50	ERB-027-73028	2.750	2.550	0.200	0.430	7.590	7.800	7.800	7.590	7.590	4.400	0.280	12.8	11.3	21.0	20.4	20.4	21.0	
			4	35	10.00	ERB-027-73029	2.750	2.550	0.200	0.430	7.390	7.800	7.800	7.390	7.390	4.400	0.280	12.8	11.3	21.0	20.4	20.4	21.0
			4	35	12.00	ERB-027-73030	2.750	2.550	0.200	0.430	7.490	7.800	7.800	7.490	7.490	4.400	0.280	12.8	11.3	21.0	20.4	20.4	21.0
		ゲルバー式	4	35	14.00	ERB-027-73031	2.550	2.350	0.200	0.430	7.440	7.800	7.800	7.440	7.440	4.800	0.280	14.8	13.0	17.8	17.8	17.8	17.8
			4	35	8.50	ERB-027-73002	2.750	2.550	0.200	0.430	7.575	7.800	7.800	7.575	7.575	4.400	0.280	12.8	11.3	21.0	20.4	20.4	21.0
			4	35	10.00	ERB-027-73003	2.750	2.550	0.200	0.430	7.425	7.800	7.800	7.425	7.425	4.400	0.280	12.8	11.3	21.0	20.4	20.4	21.0
一般区間		ゲルバー式	4	12.00	ERB-027-73004	2.750	2.550	0.200	0.430	7.475	7.800	7.800	7.475	7.475	4.400	0.280	12.8	11.3	21.0	20.4	20.4	21.0	
			4	35	14.00	ERB-027-73005	2.550	2.350	0.200	0.430	7.325	7.800	7.800	7.325	7.325	4.800	0.280	14.8	13.0	18.2	17.8	17.8	18.2
			3	25	7.00	ERB-027-73006	2.750	2.550	0.200	0.430	7.125	7.800	7.800	7.125	7.125	4.400	0.280	12.2	10.8	21.6	21.0	21.6	21.6
有壁間(一般区間)		ゲルバー式	3	25	8.50	ERB-027-73007	2.750	2.550	0.200	0.430	6.975	7.800	6.975	6.975	6.975	4.400	0.280	12.2	10.8	21.6	21.0	21.6	21.6
			3	25	10.00	ERB-027-73008	2.750	2.550	0.200	0.430	7.025	7.800	7.025	7.025	7.025	4.400	0.280	12.2	10.8	21.6	21.0	21.6	21.6
			3	25	12.00	ERB-027-73009	2.750	2.550	0.200	0.430	6.875	7.800	6.875	6.875	6.875	4.800	0.280	14.1	12.3	19.7	18.2	19.7	19.7
	逆L型	3	25	14.00	ERB-027-73010	2.525	2.325	0.200	0.430	8.300	7.800	8.300	8.300	8.300	4.750	0.280	14.3	12.6	17.7	16.7	17.7	17.7	
		4	35	7.00	ERB-027-74001	2.525	2.325	0.200	0.430	7.450	7.800	7.800	7.450	7.450	4.750	0.280	10.1	8.9	18.2	18.2	18.2	18.2	
		4	35	8.50	ERB-027-74002	2.525	2.325	0.200	0.430	7.400	7.800	7.800	7.400	7.400	4.750	0.280	10.1	8.9	18.2	18.2	18.2	18.2	
	有連床軌道(直壁)	逆L型	4	35	10.00	ERB-027-74003	2.525	2.325	0.200	0.430	7.350	7.800	7.800	7.350	7.350	4.750	0.280	10.1	8.9	18.7	18.2	18.2	18.7
			4	35	12.00	ERB-027-74004	2.525	2.325	0.200	0.430	7.400	7.800	7.800	7.400	7.400	4.750	0.280	10.1	8.9	18.2	18.2	18.2	18.2
			4	35	14.00	ERB-027-74005	2.525	2.325	0.200	0.430	7.250	7.800	7.800	7.250	7.250	4.750	0.280	10.1	8.9	18.7	18.2	18.2	18.7
	有連床軌道(直壁)	逆L型	3	25	7.00	ERB-027-74006	2.525	2.325	0.200	0.430	7.050	7.800	7.800	7.050	7.050	4.750	0.280	10.1	8.9	18.7	18.7	18.7	18.7
			3	25	8.50	ERB-027-74007	2.525	2.325	0.200	0.430	7.000	7.800	7.800	7.000	7.000	4.750	0.280	10.1	8.9	18.7	18.7	18.7	18.7
			3	25	10.00	ERB-027-74008	2.525	2.325	0.200	0.430	6.900	7.800	7.800	6.900	6.900	4.750	0.280	10.1	8.9	18.7	18.7	18.7	18.7
有連床軌道(直壁)	逆L型	3	25	12.00	ERB-027-74009	2.525	2.325	0.200	0.430	6.950	7.800	7.800	6.950	6.950	4.750	0.280	10.1	8.9	18.7	18.7	18.7	18.7	
		3	25	14.00	ERB-027-74010	2.525	2.325	0.200	0.430	6.800	7.800	7.800	6.800	6.800	4.750	0.280	10.1	8.9	20.1	18.7	20.1	18.7	
		3	30	16.00	ERB-027-74011	2.500	2.300	0.200	0.430	8.850	7.800	8.850	8.850	8.850	4.700	0.280	10.3	9.1	17.1	17.1	17.1	17.1	
有連床軌道(直壁)	逆L型	4	35	7.00	ERB-027-74001	2.525	2.325	0.200	0.430	7.450	7.800	7.800	7.450	7.450	4.750	0.280	14.5	12.7	22.4	22.4	22.4	22.4	
		4	35	8.50	ERB-027-74002	2.525	2.325	0.200	0.430	7.400	7.800	7.800	7.400	7.400	4.750	0.280	14.5	12.7	22.4	22.4	22.4	22.4	
		4	35	10.00	ERB-027-74003	2.525	2.325	0.200	0.430	7.350	7.800	7.800	7.350	7.350	4.750	0.280	14.5	12.7	23.1	22.4	22.4	23.1	
有連床軌道(直壁)	逆L型	4	35	12.00	ERB-027-74004	2.525	2.325	0.200	0.430	7.400	7.800	7.800	7.400	7.400	4.750	0.280	14.5	12.7	22.4	22.4	22.4	22.4	
		4	35	14.00	ERB-027-74005	2.525	2.325	0.200	0.430	7.250	7.800	7.800	7.250	7.250	4.750	0.280	14.5	12.7	23.1	22.4	22.4	23.1	
		3	25	7.00	ERB-027-74006	2.525	2.325	0.200	0.430	7.050	7.800	7.800	7.050	7.050	4.750	0.280	14.4	12.6	20.1	20.1	20.1	20.1	
有連床軌道(直壁)	逆L型	3	25	8.50	ERB-027-74007	2.525	2.325	0.200	0.430	7.000	7.800	7.800	7.000	7.000	4.750	0.280	14.4	12.6	20.1	20.1	20.1	20.1	
		3	25	10.00	ERB-027-74008	2.525	2.325	0.200	0.430	6.900	7.800	7.800	6.900	6.900	4.750	0.280	14.4	12.6	20.1	20.1	20.1	20.1	
		3	25	12.00	ERB-027-74009	2.525	2.325	0.200	0.430	6.950	7.800	7.800	6.950	6.950	4.750	0.280	14.4	12.6	20.1	20.1	20.1	20.1	
有連床軌道(直壁)	逆L型	3	25	14.00	ERB-027-74010	2.525	2.325	0.200	0.430	6.800	7.800	7.800	6.800	6.800	4.750	0.280	14.4	12.6	21.7	20.1	21.7	20.1	
		3	30	16.00	ERB-027-74011	2.500	2.300	0.200	0.430	8.850	7.800	8.850	8.850	8.850	4.700	0.280	14.7	12.8	18.4	18.4	18.4	18.4	

## (2) 鋼橋

鋼橋は道床の有無によって騒音が大きく異なる。まくらぎを鋼桁で直接支持する無道床鋼橋の場合、鋼部材の振動により放射される音に加え、転動音などの車輪/レール間音が直接沿線に伝播されることになる。前述のとおり、無道床鋼橋は用いられなくなってきた。しかしながら、鋼材が高強度であるため長スパン化が可能であること、現場架設が容易であること、工場製作により品質管理が容易であることなどから、コンクリート床版を有する鋼・複合橋（合成桁）については、近年でも一般的に用いられている。

鋼橋における構造物音は、一般に100Hzから2000Hz付近の範囲の周波数成分であり<sup>2-7)</sup>、コンクリート橋の構造物音よりもやや高い周波数成分となっている。近年では、コンクリート床版を有する鋼・複合橋（合成桁）の採用が一般的となっており、転動音などの車輪/レール間音が直接放射される状態はなくなってきたが、鋼桁のウェブなどの大きな平板状の部材から放射される音が主要な音源となる<sup>2-8)</sup>。このため、ウェブには制振材や制振コンクリートなどの各種対策が追加されるのが一般的である。また、在来線の下路形式の鋼・複合橋（合成桁）において、コンクリート床版の上にフローティング・ラダー軌道を採用し、隣接するRCラーメン高架橋と同等の騒音レベルが実測された事例もあり、コンクリート橋と遜色ない環境性能を有する鋼橋が実現されている<sup>2-9)</sup>。

### 2.2.2 構造物音以外の音源

#### (1) 車輪/レール間音

車輪/レール間音は、その発生機構別に転動音、衝撃音、きしみ音に分けられる。図2-6に転動音の発生メカニズム、図2-7にレール継目の一例、図2-8に分岐器の一例を示す。

転動音は、車輪がレール上を転がって移動するときに車輪の踏面とレール頭頂面の微細な凹凸に起因して車輪とレールが振動し、車輪とレールの振動面から放射される音である。新幹線車両では、レンジ製踏面研磨子の採用により、車輪の踏面状態は良好であるため、転動音の大きさはレールの頭頂面状態に大きく依存する。転動音対策として、レール頭頂面を平滑にする対策が実施されており、大きな効果を上げている。

衝撃音は、レール継目や分岐器、車輪のタイヤフラットなどの不整に起因して車輪/レールから発生する音である。近年増加しているロングレール区間では、前述のような不整に起因する衝撃音は発生しない軌道状態に整備されつつある。

きしみ音は、列車が急曲線区間を通過するときに車輪に働く横方向のクリープ力により、車輪がその固有振動数で大きく振動するために発生する音である。きしみ音は高温の耳障りな音色であるため、騒音レベルの上昇以上に問題になることが多い。

#### (2) 車両機器音

車両搭載機器を含めた駆動系から発生する音には、主電動機冷却用ファンの騒音、歯車装置の騒音（ギヤ音）、たわみ軸継ぎ手からの騒音、ディーゼルエンジン音、主平滑リアクトルなどからの電磁音、およびコンプレッサの稼働音などがあるが、これらの機器・装置から発生する騒音で沿線騒音への影響が確認されているのは、主電動機ファン音、ギヤ音、気動車のエンジン音であ

る。

### (3) 車両空力音

車両空力音は、高速で走行する車両周囲の空気の流れが時間的に変動することにより発生する音で、新幹線特有の騒音である。車両空力音は指向性マイクロホンなどを用いた測定によりその音源位置が特定できるようになってきている。具体的な音源には、車両の先頭部、ドア部、パンタグラフ、台車、車両間隙間、ケーブルヘッド、給排気用ルーバ構造などがある。

### (4) 集電系音

集電系音は新幹線特有の騒音であるとされている。集電系音は、パンタグラフ部位から発生する騒音の総称であるが、集電系音は、集電系空力音、パンタグラフの離線によって生じるスパーク音およびパンタグラフとトロリ線の摺動に伴う摺動音からなる。スパーク音はかつては主要な音源であったが、複数のパンタグラフを電気的につなぐことでスパークの発生を防ぐ対策（高圧母線引き通し）により、スパーク音はほぼ改善されており、現在の新幹線では集電系音の主音源は空力音となっている。

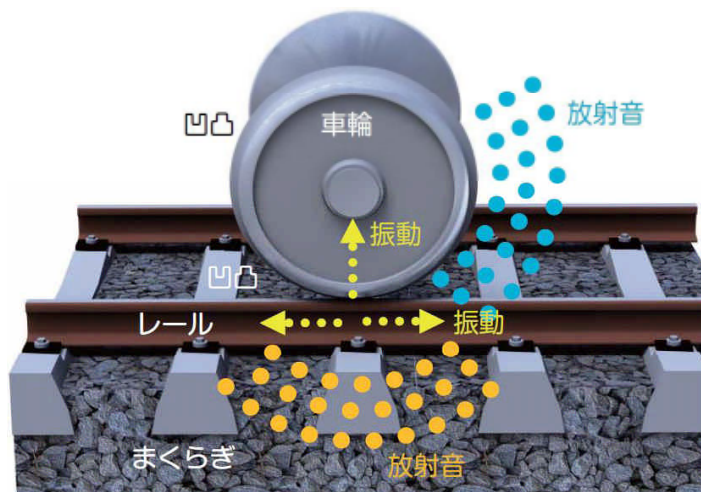


図 2-6 転動音の発生メカニズム <sup>2-10)</sup>

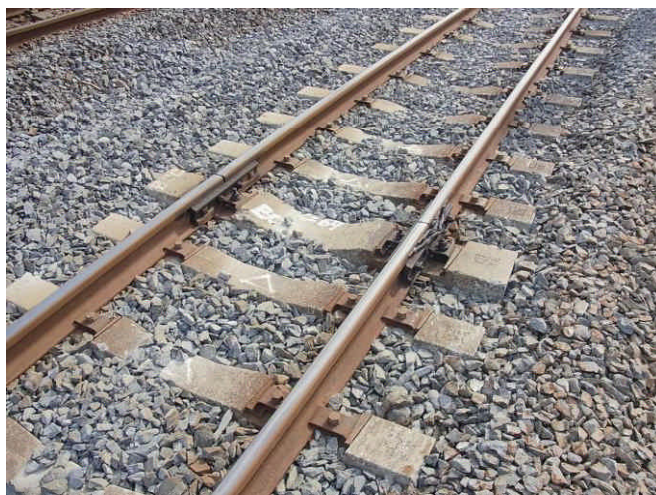


図 2-7 レール継目の一例

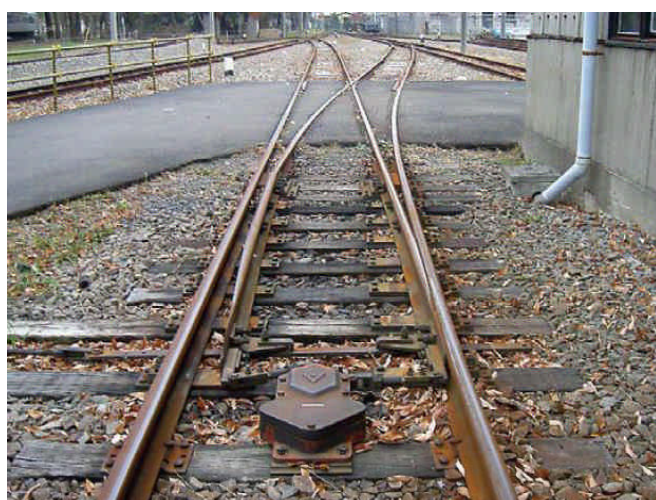


図 2-8 分岐器の一例 <sup>2-11)</sup>



### 2.3 鉄道沿線騒音の対策の種類

本節では、鉄道沿線騒音の対策について述べる。なお、本研究では構造物音を対象とするため、車輪/レール間音、車両機器音、車両空力音、集電系音については概略に留めることとする。

#### 2.3.1 構造物音

図2-9に構造物音の対策に関する考え方を示す。図2-2に示したように、構造物音は、車輪/レール間で発生した変動作用力が車輪とレールを振動させ、その振動がまくらぎや軌道スラブなどの軌道構造、さらに軌道を支える土木構造物に伝わり、各部材の振動面から音が放射される現象であり、加振源、振動伝播系、音伝播系において対策を講じることとなる。

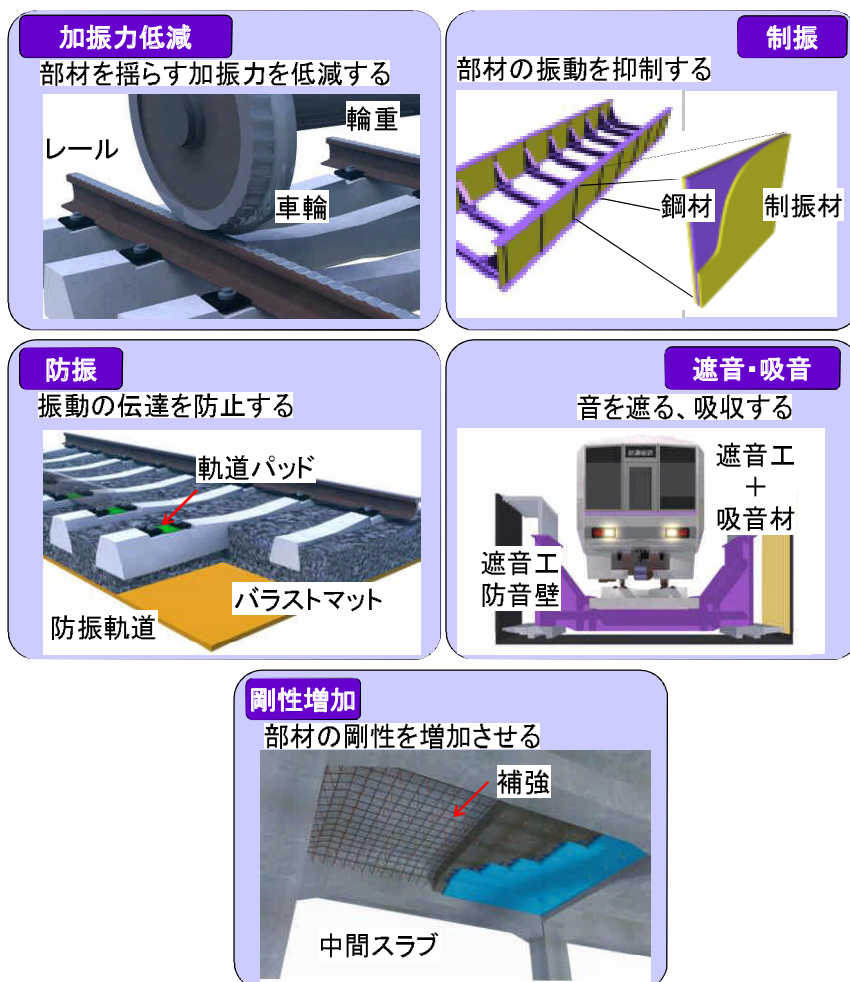


図 2-9 構造物の対策に関する考え方

#### (1) 加振力の低減

図2-9に示す「加振力低減」とは、構造物音の加振源となる車輪/レール間に働く加振力を低減することにより、構造物音を低減する対策である。新幹線においては、車輪踏面およびレール頭頂面の平滑化することにより、構造物の振動源となる車輪/レール間に働く加振力を低減し、その結果、構造物音が低減された<sup>2-12)</sup>。また、車両の軽量化も構造物音の低減に効果がある。コンクリ

ート高架橋区間において、軸重を約80%にしたことにより、構造物は2dB程度低減された事例がある<sup>2-13)</sup>。

## (2) 防振

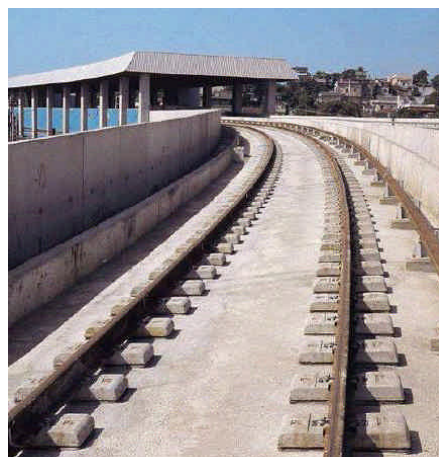
図2-9に示す「防振」とは、車輪/レール間における加振源から構造物音を放射する構造物の各部材までの振動伝播経路において、ばね定数の小さい弾性材を配置し、振動の伝達を遮断・低減する対策である。具体的には、低ばね定数軌道パッド<sup>2-14)</sup>、<sup>2-15)</sup>、バラストマット<sup>2-16)</sup>、<sup>2-17)</sup>、まくらぎ底面に弾性材を配置した弾性まくらぎ<sup>2-18)</sup>、防振軌道<sup>2-19)</sup>、<sup>2-20)</sup>、弾性まくらぎ軌道<sup>2-21)</sup>、フローティングスラブ軌道<sup>2-22)</sup>、フローティング・ラダー軌道<sup>2-23)</sup>などがあり、それぞれ低減効果をあげている。図2-10に防振軌道の一例を示す。

ただし、「防振」による対策においては、例えば防振軌道の固有振動数を $f_0$ とすると、 $f_0$ の1.4倍以上の高い周波数帯においては低減効果が得られるが、それより低い周波数帯では逆に応答が増加することとなる。このため、低減効果の領域を低い周波数帯に拡大するためには、支持ばね定数を低下させるか、重量を大きくするか、あるいは両者の組み合わせによって、固有振動数 $f_0$ をより低い周波数帯に移行する必要がある。

走行安全性の観点から見ると、軌道支持ばね定数が小さい「防振」軌道では軌道の変形が大きくなることが予想されること、共振の発生が考えられること、このため車両の走行安全性や乗り心地が従来の軌道構造に比べて悪化するのではないかという懸念があることなどから、新幹線では導入実績がないのが実状である。しかしながら、今後の列車の速度向上に伴う騒音振動に対する環境性能の実現のためには、軌道による対策についてもその実現性を検討しておく必要があると考える。



(a) 弾性まくらぎ軌道<sup>2-18)</sup>



(b) Low Vibration System<sup>2-19)</sup>



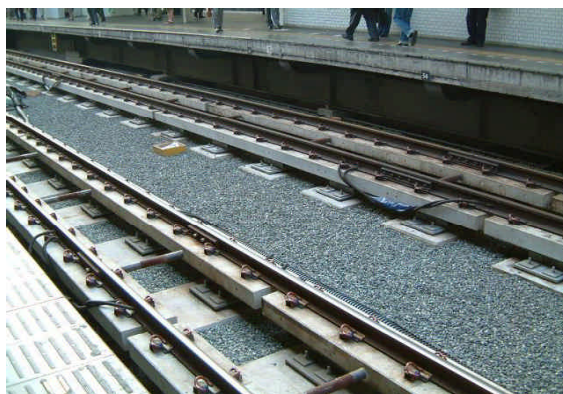
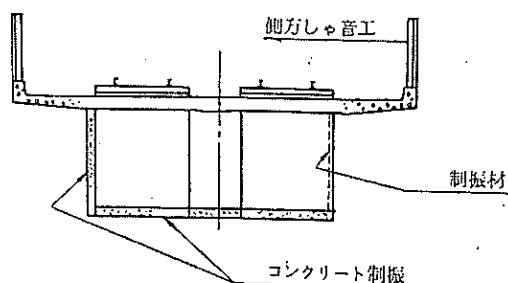
(c) フローティング・ラダー軌道<sup>2-22)</sup>

図 2-10 防振軌道の一例

### (3) 制振

図 2-9 に示す「制振」とは、ウェブなどの音源になりやすい板状の部材に対して粘弾性樹脂を貼付し、振動エネルギーを熱エネルギーに変換することにより振動を抑制する対策である。具体的には、ゴム系材料などの粘弾性樹脂の伸縮を利用する制振材、鋼板と鋼板の間に樹脂を充填し、そのせん断変形を利用する制振鋼板、制振コンクリートなどを用いて部材の振動を低減する対策である<sup>2-24), 2-25), 2-26)</sup>。主に、図 2-11 のように、鋼橋や鋼・複合橋（合成桁）において用いられる対策であり<sup>2-27)</sup>、相対的に質量が大きなコンクリート橋では制振のために大きなエネルギーが必要とされるため用いられた事例はほとんどない。

図 2-11 スラブ軌道合成桁の制振鋼の一例<sup>2-26)</sup>

### (4) 遮音・吸音

図 2-9 に示す「遮音・吸音」とは、列車走行によって各音源から発生した音を沿線への音響伝播経路において、防音壁、遮音工、吸音材などによって音を遮断・吸収する対策である。

防音壁については、東海道新幹線の開業直後に沿線の騒音が特に問題となったのを契機に設置されるようになった。その後が開業した新幹線は、防音壁が建設時から設置されるのが基本となっている。また、大都市圏の在来線においても防音壁の設置が一般的になっている。

遮音工は、図 2-12 に示すように鋼橋の鋼部材の外側を別の新たに設置する部材で覆うものである。東海道新幹線の開業直後に頻発した無道床鋼橋の騒音への対策として、全線に亘って遮音工が実施された。これらの時期に設置された遮音工においては、経年劣化がみられるようになり、

その老朽化対策として、新型の仮面遮音工も開発されている<sup>2-28)</sup>。

吸音材は、前述の遮音工と併用されることが多い。パネル状に加工されており比較的軽量である。吸音パネルの取り付けは、鋼製型枠や押え金物をボルトで固定する構造となっており、固定ボルトの振動による緩みあるいは錆に対する配慮が必要となる。

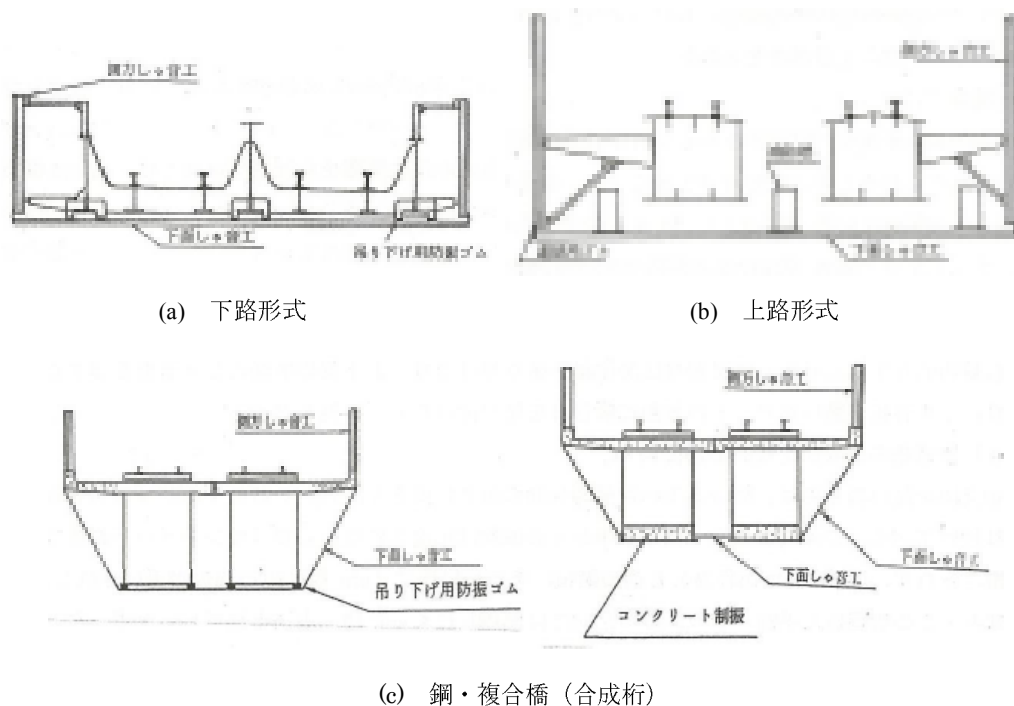


図 2-12 鋼橋および鋼・複合橋（合成桁）における遮音工の例<sup>2-27)</sup>

### (5) 剛性増加

図 2-9 に示す「剛性増加」とは、剛性が高い構造物ほど振動が小さい傾向がみられるという知見を応用して、ある部材を増し厚するなどして剛性を増加させ、部材の振動を低減する対策である。本対策は地盤振動の分野で事例があるが、定量的に評価するには至っていないのが実状である。また数値実験レベルであるが、図 2-13 に示すように中間スラブの剛性を増加させることにより構造物音の低減効果が得られると試算された例もある。詳細は 5 章で検討した<sup>2-29)</sup>。

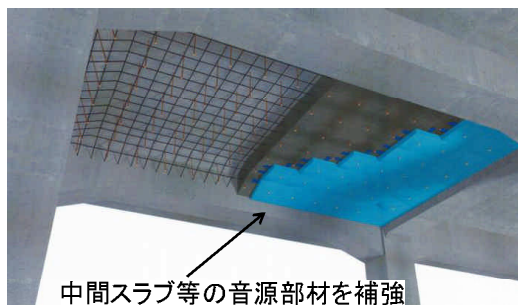


図 2-13 中間スラブの剛性増加による構造物音低減対策の例<sup>2-29)</sup>

### 2.3.2 構造物音以外の音源

#### (1) 車輪/レール間音

車輪/レール間音は、その発生機構別に転動音、衝撃音、きしみ音に分けられる。

転動音の対策は、音源となる車輪とレールの振動を抑えることが基本となる。そのためには、車輪とレールの間で発生する加振力を小さくする方法と、車輪とレールの振動を抑える方法が考えられる。前者は、車輪踏面およびレール頭頂面の平滑化であり、車輪踏面の平滑化を維持するために定期的な車輪転削が行われている。またレール頭頂面の平滑化については、もともとレール削正が新幹線ではじめられた対策であるが、現在では在来線においても広く実施されている。後者の車輪およびレールの制振については、レールに制振材を取り付ける対策やレールを防音材で多く対策が行われた例がある<sup>2-30)</sup>。

衝撃音の対策は、車輪フラットとレール継目部の解消が挙げられる。車輪フラットについては、増粘着研磨子や滑走検知装置の導入によるフラットの防止、フラットが生じた場合の車輪削正による対応が基本である。レール継目については、ロングレールの採用が効果的ではあるが、ロングレール化が不可能な区間もあるため、レール継目部形状を改良する取り組みが進められている。また、ラダーマクラギを用いて急曲線区間においてもロングレール化する取り組みも行われている<sup>2-31)</sup>。

きしみ音の対策は、車輪の応答を小さくする（防音車輪の採用）、車輪・レール間の摩擦・クリープ特性を改良する（例：レールや車輪フランジへの塗油、散水、摩擦調整剤・摩擦緩和材の採用など）、曲線通過時の横方向のクリープ力を弱める（操舵台車の採用）などが挙げられる。急曲線内軌頭頂面と車輪間の摩擦を緩和する車輪/レール摩擦緩和システム「FRIMOS」もこの対策の1つである<sup>2-32)</sup>。

### 2.3.3 車両機器音

車両機器音において、騒音で沿線騒音への影響が確認されているのは、主電動機ファン音、ギヤ音、気道車のエンジン音である。

主電動機ファン音の対策としては、主電動機ファンの取り付け位置がモータケーシングの外（外扇型モータ）から内（内扇型モータ）に変更され、大きな騒音低減効果を上げている。また、ファンの小型化、ファンそのものをなくす技術開発も行われている。

ギヤ音の対策としては、歯車のかみ合い精度を上げるために歯車の加工精度を上げることや歯車の直径と歯数の比を小さくすること（小モジュール化）が有効である。また、歯車箱の剛性をあげることもギヤ音の低減に効果がある。

### 2.3.4 車両空力音

車両空力音の具体的な音源には、車両の先頭部、ドア部、パンタグラフ、台車、車両間隙間、ケーブルヘッド、給排気用ルーバ構造などがある。

車両の先頭部については、形状の流線形化と平滑化が行われており、表面形状変化に起因した空力音が発生しないための対策がなされている<sup>2-33)</sup>。

台車部分については、車輪、台車が収納されているキャビティ構造、車両側面の切り欠き部な

ど多くの不整があり、これらの部分から大きな空力音が発生している。台車部空力音は防音壁によって遮蔽することができるため、地上点での騒音レベルに対する寄与が小さいが、車両上部が平滑化された車両では、台車部空力音の寄与は相対的に高くなる。対策としては、台車部騒音の遮蔽効果を兼ねた台車カバーの採用が行われている<sup>2-34)</sup>。

車両間隙間については、全周囲にわたって間隙があり、空力音が発生している。この音は外ホロの取り付けによってある程度緩和されるが、近年では全周ホロを備えた車両が開発され、車両間隙部からの空力音が大幅に低減された<sup>2-35)</sup>。

ルーバは、多くの形式の新幹線車両において、車両肩部や床下側面などに設けられている。列車進行方向に垂直な方向のルーバの格子構造から顕著な空力音が発生する場合がある。ルーバ構造からの空力音は、格子棒の断面の大きさ、格子の間隔、列車速度などから決まる顕著な周波数成分を持つ場合が多い近年の車両では、ルーバ構造の低騒音化および防音壁によって沿線への音の伝播が遮蔽される車両下部への移設などの対策がとられており、これらの音源の寄与度は小さくなっている。

ケーブルヘッドは、高圧引き通し線が車両間をわたる箇所に設けられており、この装置から空力音が発生する。近年の車両では、車間渡り装置の小型ジョイント化や車両基本断面内への収納などの対策が行われている。

### 2.3.5 集電系音

集電系空力音対策としては、パンタグラフにあたる流れの制御と発生した音の遮蔽を意図したパンタグラフカバーが1980年代後半に開発され、一定の効果を挙げた。その後、更なる高速化を目指す過程で、パンタグラフカバー自身からも空力音が発生していることがわかり、パンタグラフカバーによる対策には限界があることが明らかになった。平成9年以降に登場した車両では、低騒音パンタグラフの開発および碍子カバーの採用(500系)、低騒音パンタグラフ+碍子カバー+2面側壁の組合せ(700系)、低騒音碍子の採用(E2系1000番代)などの対策が実用化され、集電系の低騒音化が進んだ<sup>2-36)</sup>。

スパーク音については、高圧母線引き通しを実施することにより、スパーク音の問題はほぼ解消された。

表 2-4 新幹線における騒音の音源別対策の変遷<sup>2-37)</sup>

年代	対策対象音源	低減対策
1966	車輪/レール間音（転動音）	防音壁の設置
1971	構造物音	バラストマット
1973	車輪/レール間音（転動音）	車輪踏面状態の改善
1975	車輪/レール間音（転動音） 構造物音（鋼橋）	制振工，下面遮音工
1983	車輪/レール間音（転動音）	レール削正
1988	集電系音（空力音）	パンタグラフカバーの設置
1990	集電系音（スパーク音）	高圧母線引き通し
1992	車両空力音	空調装置などの屋根上機器を車両下部へ移設
1997	集電系音（空力音）	低騒音パンタグラフや碍子カバーなどの設置
2007	車両空力音	車両連結部の全周ホロの設置 集電系部の低騒音化 台車カバーの設置 吸排気用ルーバ騒音対策

## 2. 4 鉄道沿線騒音の対策技術の変遷

本節では、第 2 章第 3 節で示した鉄道沿線騒音の対策技術が時代とともにどのように用いられてきたかを整理した。在来線と新幹線を区別して以下に示す。

在来線における騒音は、①構造物音、②車輪/レール間音、③車両機器音（主電動機ファン音）の 3 つが主要な音源となるが、近年ファンの低騒音化が進んでおり、その結果、転動音、構造物音の相対的な寄与度が大きくなるケースもある<sup>2-37)</sup>。しかしながら、気動車、機関車などではそれぞれからの独自の駆動装置の音、補助機器の音などが発生し、気動車の力行時のエンジン音や機関車の機器冷却用のファン音が、騒音の寄与度が大きくなる場合もあること、在来線では現在でも多数存在する無道床鋼橋では構造物音の寄与度が大きくなること、急曲線区間においてはきしみ音、定尺レール区間でのレール継目部の衝撃音の寄与度が大きくなることなど、鉄道沿線騒音に対して状況によって大きく異なるものである。

新幹線における騒音は、①構造物音の他に、②車輪/レール間音、③車両機器音（ギア、ファン、エンジンなど）、④車両空力音、⑤集電系音からなるが、それぞれの寄与度は時代とともに変遷してきた。表 2-4 に、新幹線における騒音に対する音源別対策の変遷を示す<sup>2-38)</sup>。

- ① 1964 年の新幹線の開業当初は防音壁が設置しておらず、沿線における騒音は、ほぼ転動音で占められていた。
- ② 1966 年頃から防音壁の設置が進められ、沿線騒音は大きく低減された。
- ③ 1971 年頃から構造物音対策としてバラストマットが敷設されたが、もともと構造物音の寄与度が小さかったため、沿線騒音の低減に対する寄与度が小さかった。

- ④ 1973年頃から車輪踏面状態の改善により沿線騒音において車輪/レール間音（転動音）が低減された。その結果、車輪/レール間音と並んで集電系音（スパーク音）が新幹線鉄道騒音の主要な音源となった。
- ⑤ 1975年頃に鋼橋での制振工，下面遮音工によって鋼橋区間での車輪/レール間音が大幅に低下した。
- ⑥ 1983年頃からレール削正の実施により車輪レール間音（転動音）が大幅に低下した。ここまで実施された車輪/レール間音の対策により，沿線騒音は集電系音（スパーク音，空力音）の寄与度が大きくなるようになった。
- ⑦ 1988年頃に，パンタグラフカバーの設置により，集電系音（空力音）が低減された。
- ⑧ 1990年頃に，高圧母線引き通し（複数個のパンタグラフを電氣的につなぐことによりスパークの発生を防ぐ対策）が実施され，スパーク音はほぼ発生しなくなった。その結果，パンタグラフを含めた車両上部からの空力音の寄与度が相対的に大きくなった。空力音は転動音などの他の音源に比べて速度依存性が大きいいため，新幹線の速度向上にあたっては空力音対策が必須となった。
- ⑨ 1992年頃には，空調装置などの屋根上機器を車両下部へ移設したことにより，車両上部空力音が低減された。
- ⑩ 1997年頃から導入された車両では，低騒音パンタグラフや碍子カバーなどにより集電系の空力音が低減された。その結果，これらの車両においては，集電系を含む車両上部から発生する空力音の寄与度と転動音をはじめとする車両下部から発生する騒音の寄与度はほぼ同等レベルとなった。
- ⑪ 2007年頃には，車両連結部の全周ホロの設置，集電系部の低騒音化，台車カバーの設置，吸排気用ルーバ騒音対策などが実施されている。

以上のように，現在では新幹線の沿線騒音においては突出して寄与度の大きい音源がなくなってきたことがわかる。このような状況下においては，新幹線開業当時は寄与度が小さかった構造物音については，条件によっては相対的に沿線騒音に対する寄与度が大きくなる可能性がある。また，近年の速度向上により，構造物の部材の動的応答が増大する傾向にあることなどから，沿線騒音に対して構造物音の影響が無視できないケースが想定される。

このように構造物音は，在来線においては依然として無道床橋梁などでは寄与度が大きいこと，新幹線においては前述のような各種対策や近年の速度向上により新たな課題として認識されつつある現象であることがわかる。特に新幹線において大半を占めるコンクリート橋から発生する構造物音については，これまで体系的な検討がなされていないのが実状である。今後さらなる低騒音化を実現するには，構造物音の現象解明を行い，その他の音源を含めて総合的に低減対策を検討していく必要があると考えられる。

表 2-5 鉄道沿線騒音の予測手法における適用条件

(a) 在来線<sup>2-39)</sup>

パラメータ	条件
線路	平坦かつ直線，レール頭頂面凹凸形状は良好，ロングレール区間
軌道	バラスト軌道，スラブ軌道
構造物	コンクリート構造物，盛土，平地（鋼橋の場合，別途検討が必要）
車両	電車，車輪踏面にタイヤフラットや波状摩耗なし
列車速度	50～150km/h
音源	転動音，構造物音，主電動機ファン音（有限長の線音源）

(b) 新幹線<sup>2-40)</sup>

パラメータ	条件
車両	現在営業しているすべての車両編成
列車速度	150km/h から各車両の最高速度
軌道	スラブ軌道，バラスト軌道，各種防振軌道 ※バラスト軌道，防振スラブ軌道，弾性まくらぎ直結軌道，低ばね定数レール締結装置，バラストマット）については，スラブ軌道からそれぞれの軌道に応じて低減定数を定めている。
構造物	コンクリート高架橋，盛土，平地
防音壁	直立型防音壁，防音壁高さの制限なし
騒音評価点	上下線中心から水平距離が 12.5m～50m，防音壁上端よりも低い位置
音源	車両下部騒音（転動音，ギア音，空力音）→離散点音源列（半空間放射） 構造物音（コンクリート高架橋の場合のみ考慮）→→離散点音源列（半空間放射） 車両上部空力音→離散点音源列（半空間放射） 集電系音（空力音，スパーク音）→離散点音源列（全空間放射）

## 2. 5 鉄道沿線騒音の予測手法

鉄道沿線騒音の予測手法は，在来線および新幹線のそれぞれで予測手法が開発されている<sup>2-39)</sup>、<sup>2-40)</sup>。適用条件は表 2-5 に示すとおりである。これらの予測手法は実測データをベースに構築された手法であるが，鉄道から発生する騒音を音源別にモデル化し，それぞれの音源からの寄与の足し合わせるにより沿線の観測点における騒音レベルを予測するものであり，音源とパワーレベルを，音源要素，軌道，構造物，車両種別や列車速度ごとに細かく定めているため，様々な状況での騒音レベルの予測が可能となっている。ただし，これらの予測手法の騒音伝播モデルにおいては，鉄道沿線に設置されている防音壁を除いて，トンネルなどの鉄道構造物や周辺建築物の影響は考慮されていないため，予測手法の適用可能な観測地点が限定される問題点があった。近年この問題を解消するために，予測手法の適用範囲を拡張した取り組みがなされている<sup>2-41)</sup>、<sup>2-42)</sup>、<sup>2-43)</sup>。

一方で、有限要素法によりラーメン高架橋や桁式高架橋の数値解析モデルを構築し、構造形式ごとに振動特性を評価する研究も行われている<sup>2-44), 2-45)</sup>。また、レイリー・リッツ法に基づく曲げ振動解析により、構造物音の新たな予測手法が開発されている<sup>2-46)</sup>。これらの数値解析に基づく手法は、構造物音の現象解明、前述の既往の予測手法では対応できない構造形式への対応、対策工の効果の定量化に有効なツールとなるものと考えられる。ただし、構造物への加振力としては、前者の手法は実際に列車が走行した際の構造物の部材振動の実測データを用いていること、後者の手法は走行荷重ではなく定点加振としている。また、有限要素法と境界要素法により沿線における構造物音を解析的に求める研究も行われている<sup>2-47), 2-48), 2-49)</sup>が、輪重、車軸配置、列車速度、車両の振動系などの車両に関する各種パラメータ、軌道支持剛性、レール締結間隔、レール凹凸、軌道変位などの軌道に関する各種パラメータ、部材の剛性、非構造部材、減衰などの構造物に関する各種パラメータが、構造物の部材振動および構造物音における周波数帯ごとに寄与する影響度について、詳細に分析するには至っていないのが実状である。今後は各種パラメータの影響を詳細に評価可能なシミュレーションベースの予測手法の精緻化が求められている。

## 2. 6 本章の結論

第2章では、列車走行に伴って発生する鉄道沿線騒音の概要および本研究に係る既往の知見を整理した。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 東海道新幹線が1964年に開業した直後、無道床鋼橋の騒音が社会問題化した。その後、鉄道においては、無道床鋼橋は用いられなくなり、コンクリート橋や鋼・複合橋が鉄道橋の主流となっている。
- (2) 新幹線の沿線騒音において、各種音源別の対策が行われた結果、突出して寄与の大きな音源がなくなった。このような状況下においては、新幹線開業当時は寄与度が小さかったコンクリート橋の構造物音については、条件によっては相対的に沿線騒音に対する寄与度が大きくなる可能性がある。
- (3) コンクリート橋の構造物音は、近年の速度向上により、新たな課題として認識されてきた現象であり、現象解明や低減対策の検討は限定的な内容に留まっているのが実状である。したがって、現象解明そのものが不十分なコンクリート橋の構造物音については、実測および数値解析を用いて、周波数ごとの主要な要因の抽出、各種パラメータの詳細な感度分析および対策工の検討などを行うことが求められている。
- (4) 構造物音の対策は、加振力低減、防振、制振、遮音・吸音、剛性増加などの観点から検討することができる。このうち、軌道支持ばね定数の低下を伴う防振については、列車の走行安全性の低下が懸念されるため、新幹線では導入実績がないのが実状である。しかしながら、今後の列車の速度向上に伴う騒音振動に対する環境性能の実現のためには、防振軌道による対策についてもその実現性を検討しておく必要があると考える。
- (5) 現在の在来線および新幹線における騒音の予測手法は実測データをベースに構築された手法である。数値解析による試みも見られるようになってきたが、輪重、車軸配置、列車速度、車両の振動系などの車両に関する各種パラメータ、軌道支持剛性、レール締結間隔、レール



凹凸、軌道変位などの軌道に関する各種パラメータ、部材の剛性、非構造部材、減衰などの構造物に関する各種パラメータが、構造物の部材振動および構造物音における周波数帯ごとに寄与する影響度について、詳細に分析するには至っていないのが実状である。今後は各種パラメータの影響を詳細に評価可能なシミュレーションベースの予測手法が求められている。

### 参考文献

- 2-1) 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
- 2-2) 高津俊司，土井充：日本の高速鉄道 その軌跡と今後の展望，鉄道ピクトリアル，No.800，pp.142-153，2008.2
- 2-3) 日本国有鉄道，東北新幹線工事誌 大宮盛岡間，1983
- 2-4) 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.284-289，2004.6
- 2-5) 高見創，菊池勝浩：明かり区間走行時に生じる高速列車の低周波音分析，鉄道総研報告，Vol.23，No.7，pp.5-10，2009.7
- 2-6) 環境省：よくわかる低周波音，2007
- 2-7) 長倉清：構造物音の特性と低減対策，JREA，Vol.50，No.12，pp.51-53，2007.12
- 2-8) 連重俊，平野廣和：鋼橋低音域騒音低減工法の開発と試験施工，土木学会論文集，No.735/VI-59，pp.131-144，2003.6
- 2-9) 日高直樹：弾直軌道及びラダー軌道の振動騒音評価，新線路，Vol.61，No.3，pp.40-43，2007.3
- 2-10) 北川敏樹：転動音を予測して低減する，RRR，Vol.69，No.7，pp.4-7，2012.7
- 2-11) 中橋順一：分岐器での走行安全性を解析する，RRR，Vol.70，No.2，pp.16-19，2013.2
- 2-12) 古川敦：鉄道軌道における環境対策，建設の施工企画，No.695，pp.46-51，2008.1
- 2-13) 北川敏樹，善田康雄，小方幸恵，浅倉康二，新田浩：車両の軸重と騒音における一考察，平成11年鉄道技術連合シンポジウム (J-rail1999)，pp.109-112，1999
- 2-14) A. Wang, O.G. Bewes, S.J. Cox, and C.J.C Jones : Measurement and modelling of noise from the Arsta bridge in Stockholm, *Proceedings of 9th International Workshop on Railway Noise*, Feldafing, Germany, 2007.9
- 2-15) K.P. Kostli, C.J.C Jones, and D.J. Thompson : Experimental and theoretical analysis of railway bridge noise reduction using resilient rail fasteners in Burgdorf, Switzerland., *Proceedings of 9th International Workshop on Railway Noise*, Feldafing, Germany, 2007.9
- 2-16) 佐藤吉彦：バラストマットの開発，鉄道技術研究報告，1973
- 2-17) Y.Ban and T.Miyamoto : Noise control of high-speed railways, *Journal of Sound and Vibration*, No.43, pp.273-280, 1975
- 2-18) 佐藤吉彦：有道床弾性まくらぎ軌道の開発，鉄道技術研究報告，1978
- 2-19) 佐藤吉彦，大石不二夫，安藤勝敏，三浦重：防振G型スラブ軌道の開発実用化，日本鉄道施設協会誌，Vol.25，No.8，pp.33-35，1987

- 2-20) sonneville : Low Vibration Track, <http://www.sonneville.com/>
- 2-21) 堀池高広, 高尾賢一, 須永陽一: 着脱式弾性まくらぎ直結軌道(D型弾直軌道)の開発, 鉄道総研報告, Vol.12, No.6, pp.25-30, 1998.6
- 2-22) 桃谷尚嗣, 鈴木健司, 名村明, 藤井光治郎, 安藤勝敏, 芦谷公稔, 堀池高弘: コイルばね防振軌道の性能と評価, 鉄道総研報告, Vol.15, No4, pp27-32, 2001
- 2-23) 奥田広之, 浅沼潔, 松本信之, 涌井一: フローティング・ラダー軌道の耐荷性能と環境性能の評価, 鉄道総研報告, Vol.17, No9, pp9-14, 2003
- 2-24) 谷口望, 半坂征則, 碓山晴久, 上月隆史, 棚橋明朗, 依田照彦: ゴムラテックスモルタル被覆を用いた低騒音鋼橋の開発に関する研究, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.164-1171,2009
- 2-25) 市川篤司, 池田学, 川原田亨: 制振鋼板を用いた鋼橋の騒音低減効果および設計施工法, 鉄道総研報告, Vol.12, No.9, pp.33-38, 1998.9
- 2-26) 半坂征則, 林巖, 岩附信行, 御船直人, 森川広一, 香川美仁: 拘束型磁性制振材による鋼鉄道橋の振動低減効果の予測, 機械学会論文集C編, No.683, pp.1756-1763, 2003.7
- 2-27) (公財)鉄道総合技術研究所: 鋼橋防音工の手引き, 1987.7
- 2-28) 江口博康, 名倉隆雄: 東海道新幹線鋼橋防音工の老朽劣化対策—新型消音鋼板の開発—, 日本鉄道施設協会誌, Vol.46, No.8, pp.59-62, 2008.8
- 2-29) 白井貴之, 笠倉亮太, 渡辺勉, 仁平達也: 超高強度繊維補強コンクリートによるRCスラブの補強工法の開発, コンクリート工学年次大会 2014, Vol.36, No.2, pp.1243-1248, 2014
- 2-30) 間々田祥吾, 半坂征則, 佐藤潔, 鈴木実: 遮音機能を有するレール防音材の開発. 鉄道総研報告, Vol.21, No.2, pp.27-30, 2007.2
- 2-31) 上田敬生: 小田急線におけるバラストラダー軌道の導入, 日本鉄道技術協会誌, Vol.51, No.12, 2008.12
- 2-32) 伴巧, 深貝晋也, 陳樺, 名村明, 菊池圭介, 地子給和行: 曲線内軌用定置式摩擦緩和システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.26, No.12, pp.35-38, 2012.12
- 2-33) 飯田雅宣: 高速車両の先頭形状, RRR, Vol.70, No.4, pp.28-31, 2013.4
- 2-34) 遠藤知幸, 田中修司, 齋藤裕之: E5系新幹線電車(量産車)のグランクラスの導入とデザイン, 日本鉄道技術協会誌, Vol.54, No.4, 2011.4
- 2-35) 北山茂, 鳥居昭彦: N700系新幹線車両の低騒音化技術, 騒音制御, Vol.32, No.2, pp.133-137, 2008.2
- 2-36) 柴田勝彦, 平井誠, 針山隆史, 佐々木裕一: 東北新幹線“はやて”搭載 環境にやさしい静かなパンタグラフ, 三菱重工技報, Vol.40, No.3, pp.154-157, 2003.5
- 2-37) 北川敏樹, 長倉清, 緒方正剛: 在来鉄道における騒音予測法, 鉄道総研報告, Vol.12, No.12, pp.41-46, 1998.12
- 2-38) 長倉清: 新幹線鉄道騒音対策, 日本鉄道施設協会誌, Vol.46, No.8, 2008.8
- 2-39) 北川敏樹, 長倉清, 緒方正剛: 在来鉄道における騒音予測手法, 鉄道総研報告, Vol.12, No.12, pp.41-46, 1998

- 2-40) 長倉清, 善田康雄 : 新幹線沿線騒音予測手法, 鉄道総研報告, Vol.14, No.9, pp.5-10, 2000
- 2-41) 長倉清 : トンネル坑口騒音の予測と対策, 鉄道総研報告, Vol.17, No.11, pp.13-18, 2003
- 2-42) 長倉清, 安部由布子, 北川敏樹, 小方幸恵 : 鉄道沿線における高所空間に適用可能な騒音予測手法, 鉄道総研報告, Vol.23, No.7, pp.23-28, 2009
- 2-43) 斎藤英俊, 小方幸恵, 長倉清 : 建物の立地条件が騒音レベルに与える影響の定量評価, 鉄道総研報告, Vol.25, No.11, pp.5-10, 2011
- 2-44) 北川敏樹, 長倉清 : 鉄道コンクリート高架橋の振動解析, 日本機械学会第19回環境工学総合シンポジウム2009講演論文集, pp.86-88, 2009.7
- 2-45) 上妻雄一, 長倉清 : 新幹線コンクリート高架橋の振動・音響特性, 鉄道総研報告, Vol.25, No.11, pp.17-22, 2011.11
- 2-46) 半坂征則, 佐藤大悟, 間々田祥吾, 鈴木実, 長倉清 : コンクリート高架橋における構造物音の予測手法, 鉄道総研報告, Vol.24, No.9, pp.11-16, 2010.9
- 2-47) Q. Li, Y.L.Xu, D.J.Wu : Concrete bridge-borne low-frequency noise simulation based ontrain-track-bridge dynamic interaction, Journal of Sound and Vibration, No.331, pp.2457-2470, 2012
- 2-48) X.Z. Li, L.Z. Song, X. Zhang\*, D.X. Wang, J.Q. Zhang, B. Su : Spectra characteristics of vibration and bridge-borne noise of a railway concrete viaduct, *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2014*, pp.1113-1118, 2014
- 2-49) Quanmin Liu, Xiaozhen Li, Xun Zhang, Zhijun Zhang : Structure-borne noise study of composite steel bridge on high-speed railway, *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2014*, pp.1189-1194, 2014

## 3 章 防振軌道の高速鉄道への適用性

### 3. 1 本章の概要

第3章では、構造物音の効果的な対策と考えられている防振軌道について、数値解析を用いて高速鉄道への適用性を検討する。

列車振動に対する環境性能の実現は、高速鉄道に固有の非常に重要な課題となっている。わが国を代表する交通機関である新幹線は、都市圏の住宅地に密接した狭隘な条件の中で運行されている区間も多く、環境との調和を図るために、開業当初から現在に至るまで、車両、軌道、構造物および地盤など、様々な技術分野において、振動低減対策に関する研究が行われてきた。

このうち軌道による対策としては、近年、在来線において各種防振軌道の導入が進められ効果を挙げている<sup>3-1)3-2)</sup>が、新幹線においては導入にまで至っていないのが実情である。この理由としては、軌道支持ばね定数が小さい防振軌道では軌道の変形が大きくなることが予想されること、共振の発生が考えられること、このため車両の走行安全性や乗り心地が従来の軌道構造に比べて悪化するのではないかという懸念があることなどが挙げられる。とりわけ走行安全性は、高速鉄道にとって最も重要な要件であり、防振軌道の適用性を判断するためには、何よりもまず数値解析による定量的な性状把握が必要不可欠となる。振動や騒音などに対する振動性能の評価は、現状の技術レベルでは実軌道上での実車走行試験が最も確実でかつ信頼性の高い手法であるといえるが、そのためにも走行安全性の検証が急務となっている。

数値解析により定量的な評価を行うためには、一定区間以上の軌道構造を連続的にモデル化し、振動系としてモデル化した車両をその上で走行させて性能評価を行う必要がある。特に軌道構造による優劣を定量的に検討する場合には、FEMなどを用いて離散的なモデル化を行う必要があるが、解析自由度が膨大となること、車両と軌道の相互作用力を考慮しなければならないことなどの理由から、実際には限定的な検討にとどまっていたのが現状である。

そこで本章では、車両と構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARS II を用いて、スーパーコンピュータを用いた数値実験を行い、今後、実用化が期待される5種類の防振軌道について、高速鉄道への適用性を検討することとした。具体的には、以下に示す項目について検討を行った。

- (1) 防振軌道は、一般に軌道支持ばね定数が小さく、固有振動数も低いいため共振速度が低下する。このため、軌道の共振有無について明らかにする。
- (2) 防振軌道は、一般に軌道支持ばね定数が小さく、列車荷重に対する軌道変形が大きくなるため、車両の走行安全性の低下が懸念される。走行安全性に対する列車速度、軌道支持ばね定数、隣接軌道構造との境界部、ユニット継目(以下、製造、施工単位をユニットという)の影響などを定量的に明らかにする。
- (3) 防振軌道上における車両の乗り心地について、上記(2)と同様の観点から検討を行う。

## 3.2 解析対象軌道

図3-1、表3-1に解析対象軌道を示す。防振軌道5種類、その比較検討用としてPCまくらぎバラスト軌道、スラブ軌道、弾性まくらぎ直結軌道の3種類、合計で8種類を検討対象とした。

図3-2に防振軌道のユニット概念図を示す。車両の走行安全性は、一般的に軌道や構造物の局所的な変位に支配されることが知られているが<sup>3-3)</sup>、このため軌道支持ばね定数とともに、隣接軌道構造との境界部、軌道中間部におけるユニット単位やユニット境界の処理が重要となってくる。このような観点から、以下、図3-1をベースに各軌道構造の特徴について概説する。

軌道構造1は、1984年に建設された東北新幹線の低速区間(最高時速110km/h)である赤羽台トンネルで用いられているフローティングスラブ軌道である。スラブ断面は3.2m×0.52mで1ユニット長が30mである。フローターの間隔は3mピッチで配置されている<sup>3-4)</sup>。

軌道構造2は、ドイツのICE (Inter City Express)が走行する高速区間(最高時速250km/h)で用いられているフローティングスラブ軌道である。スラブ断面は2.8m×0.5mである。このフローティングスラブ軌道の特徴は、連続スラブ構造をしておりユニット毎の継目がないことである。また、フローティング区間入口から段階的に変化させて、軌道支持ばね定数をスムーズに変化させている<sup>3-5)</sup>。

軌道構造3は、コイルばね防振軌道システムを利用した防振軌道である。同軌道は、在来線のトンネルの振動対策として導入実績がある。スラブ断面は2.83m×0.47mで1ユニットが20mである。フローターの間隔は端部で0.625mピッチ、中央部で1.25mである<sup>3-2)</sup>。

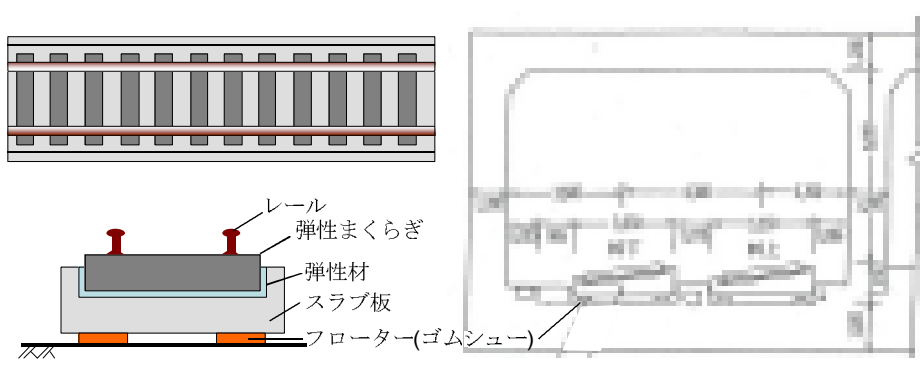
軌道構造4は、フローティング・ラダー軌道であり、断面は0.46m×0.185m×2本である。1ユニット長は6.15mでフローターの間隔は1.25mである<sup>3-1)</sup>。

軌道構造5は軌道構造4と同じラダー軌道であるが、フローターの剛性が軌道構造4に比べて3倍になっている。

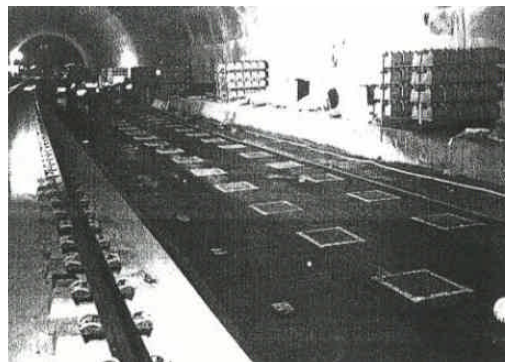
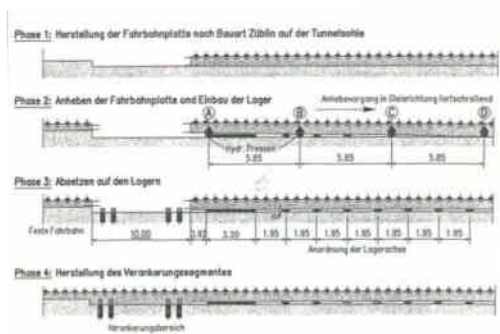
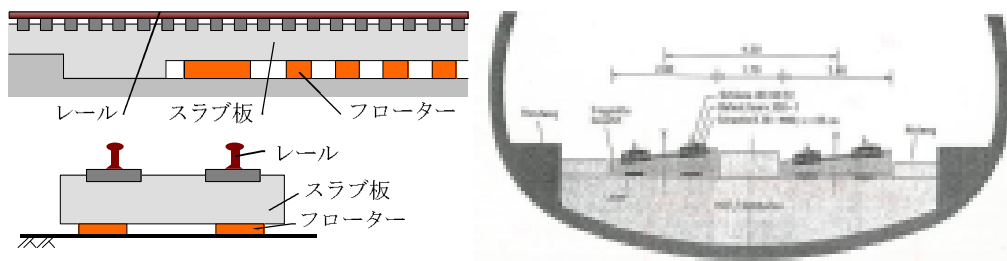
軌道構造6は、スラブ軌道で、スラブ断面はスラブ中央で0.71m×0.16m×2である。スラブ下にCAモルタルが充填されており、全面で剛に支持されている<sup>3-7)</sup>。

軌道構造7は、新幹線で一般的に用いられている3号PCまくらぎバラスト軌道である<sup>3-8)</sup>。

軌道構造8は、新幹線のトンネル区間における振動対策に用いられた低弾性H型の弾性まくらぎ直結軌道であり、まくらぎ下面に防振ばねが貼り付けられ支持される構造となっている<sup>3-9)</sup>。

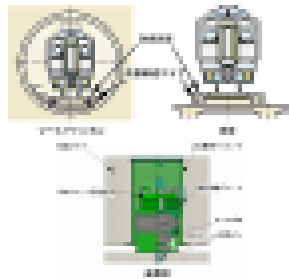
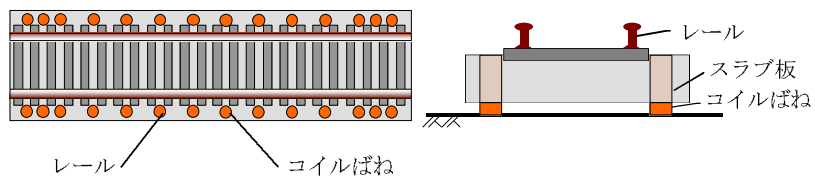


(a) 軌道構造 1 フローティングスラブ軌道 1<sup>3-4</sup>

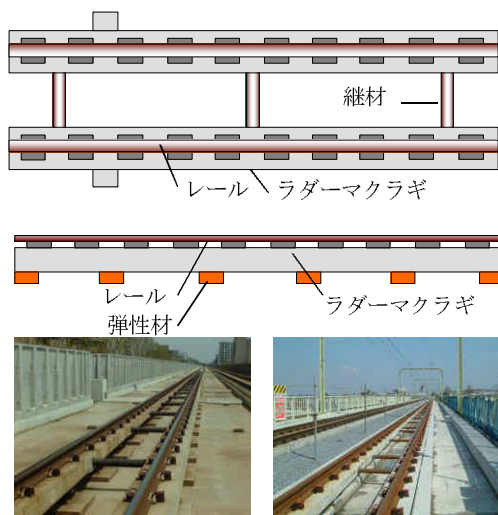


(b) 軌道構造 2 フローティングスラブ軌道 2<sup>3-5</sup>

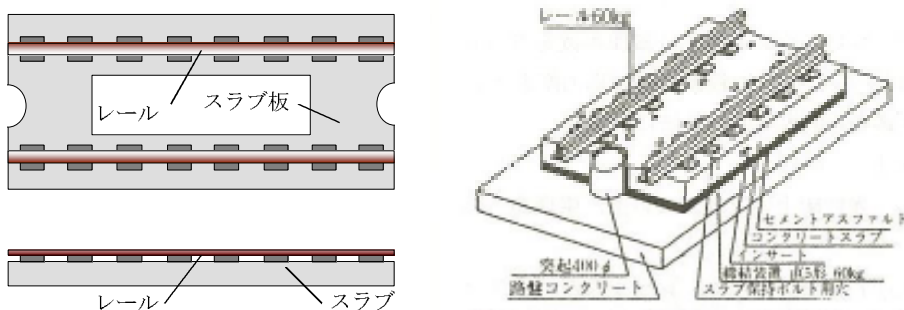
図 3-1 解析対象軌道の概要



(c) 軌道構造3 フローティングスラブ軌道<sup>3-2)</sup>

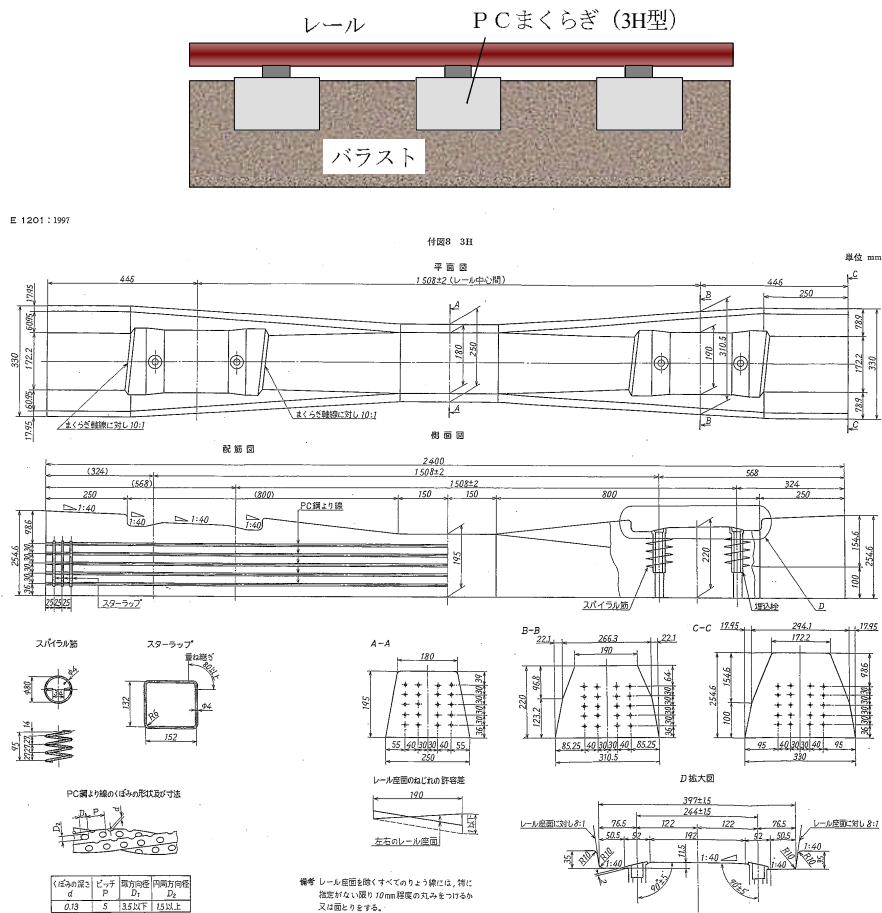


(d) 軌道構造4, 5 フローティング・ラダー軌道<sup>3-1)</sup>

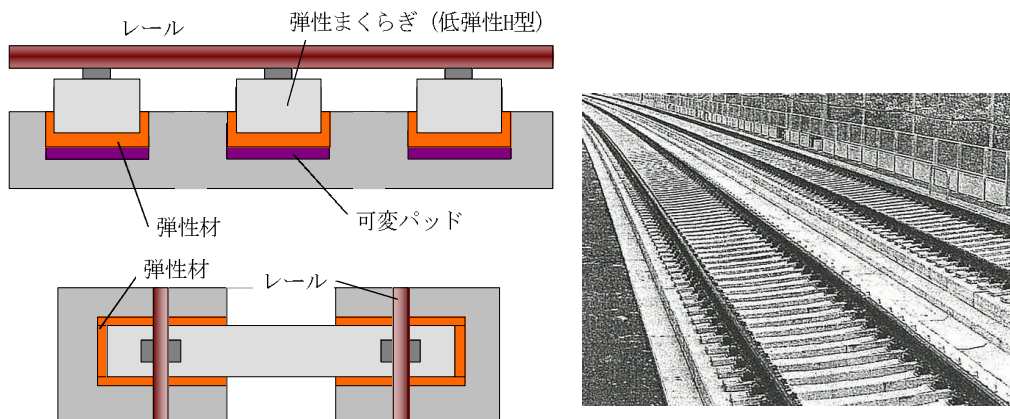


(e) 軌道構造6 スラブ軌道<sup>3-7)</sup>

図3-1 解析対象軌道の概要



(f) 軌道構造 7 PCまくらぎバラスト軌道 3-8)



(g) 軌道構造 8 弾性まくらぎ直結軌道 3-9)

図 3-1 解析対象軌道の概要



表 3-1 解析対象軌道

軌道構造	構造形式	備考
1	フローティング スラブ 1	赤羽台トンネルで使用 質量が大きい
2	フローティング スラブ 2	ドイツ ICE で使用 連続スラブ構造
3	フローティング スラブ 3	コイルばね防振軌道 システム
4	フローティング ラダー1	質量が小さい ラダーマクラギ端部も支持
5	フローティング ラダー2	同上
6	スラブ	高速区間既設タイプ スラブ軌道
7	PC まくらぎ バラスト軌道	高速区間既設タイプ 3H 型
8	弾性まくらぎ直結	高速区間既設タイプ 低弾性 H 型

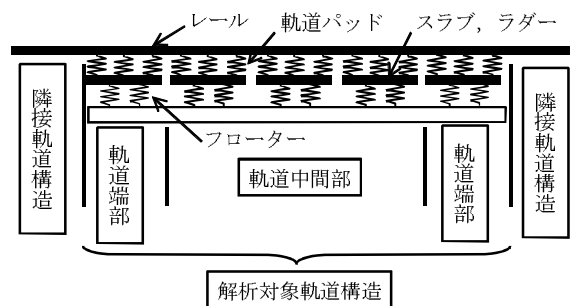


図 3-2 防振軌道のユニット概念図

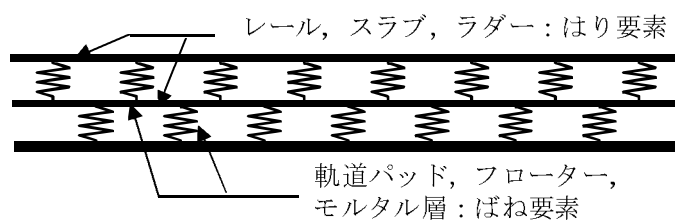
## 3.3 解析手法

解析には車両と鉄道構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARSIII(Dynamic Interaction Analysis for Shinkansen Train And Railway Structure)を用いた。

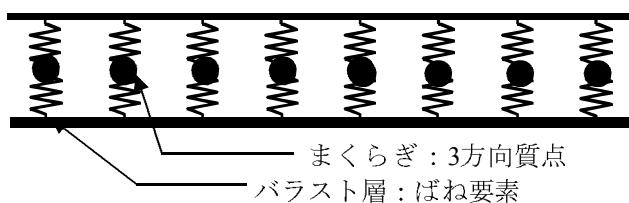
DIASTARSIIIは、鉄道総合技術研究所で開発された鉄車輪/レール系車両と線路構造物の動的相互作用現象を解析するための汎用プログラムである<sup>3-3),3-10)</sup>。以下に、DIASTARSIIIに用いた解析手法を示す。

## 3.3.1 軌道構造モデル

図3-3に軌道構造モデルを示す。図3-3に示すように、レール、スラブおよびラダーマクラギははり要素で、軌道パッド、フローター、モルタル層およびバラスト層をばね要素で、PCまくらぎ、弾性まくらぎは3方向に自由度を持つ質点でモデル化した。新設の新幹線では、高架橋やトンネル区間などの剛なコンクリート路盤上への適用が対象となるため路盤以下はモデル化せず剛とした。軌道中間部の列車走行性を表現するため解析対象軌道の解析モデル延長は100mとした。また、それぞれの軌道構造の前後にはレールを剛なはりでモデル化したプレ・ポストラン区間を設け、列車はプレラン区間からポストラン区間まで走行するものとした。本研究では、軌道狂いは考慮せず、直線走行として線路直角方向への自由度は拘束した。解析モデルの節点数は5000節点程度となっている。



(a) 軌道構造のモデル化 (その1)



(b) 軌道構造のモデル化 (その2)

図3-3 解析対象軌道のモデル化の概念図

表 3-2 に軌道構造モデルの入力諸元を示す。軌道構造の入力諸元は、それぞれ文献など<sup>3-1,2,4,5,11,12)</sup>を参考に一般的な値を用いた。なお、レールと軌道パッドについては、すべての軌道で共通の物性値を用いた。

軌道構造モデルの運動方程式は、各要素の剛性マトリックスを重ね合わせ、全体座標系において、式(3.1)のように表せる。

表 3-2 入力諸元一覧

(a) 各軌道構造の入力諸元

要素	はり要素		ばね要素		質点	その他の要素
	断面積 (m <sup>2</sup> )	断面2次モーメント (m <sup>4</sup> )	フローター (MN/m)	弾性材 (MN/m)	まくらぎ重量 (kN)	
1	1.857	0.05117	182	120	-	-
2	1.400	0.02916	14	-	-	-
3	1.346	0.02536	12	-	-	-
4	0.170	0.0004854	10	-	-	-
5	0.170	0.0004854	30	-	-	-
6	-	-	-	-	3.19	200(MPa):バラスト変形係数
7	0.227	0.0004847	-	-	-	3500(N/mm <sup>2</sup> ):CA モルタル
8	-	-	-	30	2.60	

(b) レールおよび軌道パッドの入力諸元

ヤング係数 (kN/m <sup>2</sup> )	断面積 (m <sup>2</sup> )	単位重量 (kN/m <sup>3</sup> )	単位質量 (kN/m <sup>3</sup> /g)	ポアソン比	ねじり定数 (m <sup>4</sup> )	断面2次 Iy (m <sup>4</sup> )	ばね定数 (1 締結)	
							鉛直	水平
21000000	0.00775	7.850	0.801	0.3	$2.35 \times 10^{-7}$	$3.09 \times 10^{-5}$	60	20

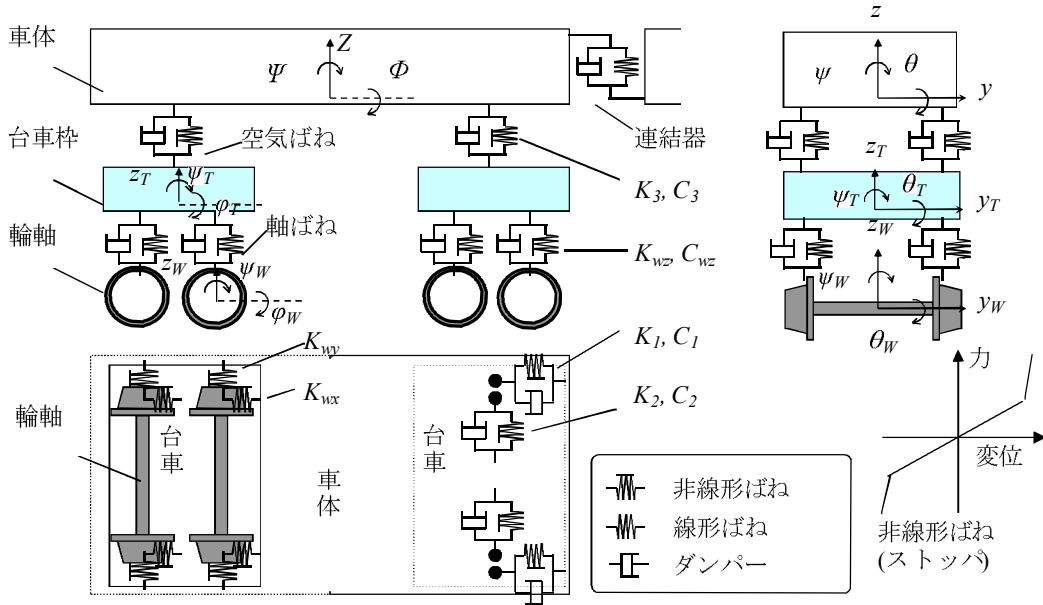


図 3-4 車両モデル

$$M^B \ddot{X}^B + C^B \dot{X}^B + K^B X^B = F_L^B + F_T^B(X^V, X^B) + F_N^B(X^B) \quad (3.1)$$

ここで、 $X^B$ は軌道構造の変位ベクトル、 $M^B, C^B, K^B$ は、それぞれ軌道構造の質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスである。また、 $F_L^B$ は軌道構造に働く荷重ベクトル、 $F_T^B(X^V, X^B)$ はレール面での車両との相互作用力で、式(3.1)の符号を逆にしたものを全体座標系に変換し、これを近傍節点に分配した節点荷重ベクトル、 $F_N^B(X^B)$ は外力扱いとした軌道構造モデル内の非線形バネ力の荷重ベクトルである。ただし、本研究のような常時の列車走行性の問題では、ばねはすべて線形範囲で挙動をしている。

### 3.3.2 車両モデル

図 3-4 に車両モデルを示す。車両モデルには、完全 1 車両の三次元モデル(31 自由度)を用いた。車両の力学モデルでは、車体・台車・輪軸を剛体質点と仮定した。各車体は、重心位置で水平 ( $y$ )、鉛直( $z$ )、ローリング( $\phi$ )、ピッチング( $\theta$ )、ヨーイング( $\psi$ )の 5 自由度を持つ。また、各台車も、それぞれ重心位置で水平( $y_T$ )、鉛直( $z_T$ )、ローリング( $\phi_T$ )、ピッチング( $\theta_T$ )、ヨーイング( $\psi_T$ )の 5 自由度を持つ。輪軸は、水平( $y_w$ )、鉛直( $z_w$ )、ローリング( $\phi_w$ )、ヨーイング( $\psi_w$ )の 4 自由度を持つ。ただし、本解析では直線走行であるため、線路直角方向、ローリングおよびヨーイングの自由度は拘束した。

これら剛体質点でモデル化した車体・台車・輪軸の各要素を、バネ・ダンパで結合し、車両モ

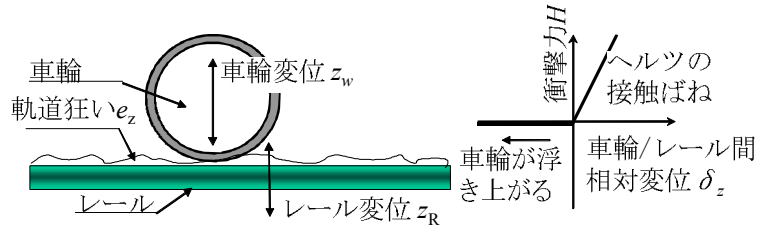


図 3-5 車輪/レール間の鉛直方向の力学モデル

デルを構成した。実車では、各構成要素間に、著大な相対変位を抑制できるストップパが設けられている。これを考慮できるよう、バネの一部には、バイリニア形の非線形バネを用いた。

具体的な車両諸元は、近年の高速新幹線車両を参考に仮定した。軌道の変形は、輪軸の载荷数により大きく変動する。このため、車両モデルを6両連結して列車を構成することとした。

車両系の運動方程式は、車両座標系において、車体と台車間の非線形バネ項を右辺に移項し、式(3.2)のように表せる。

$$M^V \ddot{X}^V + C^V \dot{X}^V + K^V X^V = F_L^V + F_I^V(X^V, X^B) + F_N^V(X^V) \quad (3.2)$$

ここで、添え字  $V, B$  はそれぞれ車両、構造物を表す。 $X^V$  は車両の変位ベクトル、 $M^V, C^V, K^V$  は、それぞれ車両の質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックス、また、 $F_L^V$  は主として風荷重などの車両への荷重ベクトル、 $F_I^V(X^V, X^B)$  は構造物との相互作用力、 $F_N^V(X^V)$  は外力扱いとした車両モデル内の非線形バネ力の荷重ベクトルである。

### 3.3.3 車両とレール間のモデル

本研究では、鉛直方向の挙動の検討が主となるため、図 3-5 に車輪/レール間の鉛直方向の力学モデルを示す。輪軸の剛性は十分であると仮定すると、車輪とレール間の鉛直方向相対変位は、各車輪に対して式(3.3)のように表すことができる。

$$\delta_z = z_R - z_W + e_z + e_{zo}(y) \quad (3.3)$$

ここに、 $z_R$  と  $z_W$  はそれぞれレールと車輪の接触点における鉛直変位、 $e_z$  は図 3-5 に示すレール上に存在する鉛直方向の軌道狂い、 $e_{zo}(y)$  は接触位置変化による車輪半径変化に伴うレールと車輪の初期接触位置からの鉛直変位である。それぞれ鉛直上向きを正とする。ただし、本研究では軌道狂いは考慮していない。 $\delta_z$  が正か 0 の場合、車輪はレール上で接触していると見なす。 $\delta_z$  が負の場合、車輪はレール上でジャンプしていると考ええる。

車輪がレール上を接触して走行する場合、(3.4)式に示すような衝撃力  $H$  が車輪とレールに生じる。

$$H = H(\delta_z) \quad (3.4)$$

車輪とレールがそれぞれ二次曲面から構成されている場合、 $\delta$  と衝撃力  $H$  との関係はヘルツの接触バネにより記述することができる。

### 3.3.4 数値解析法

式(3.1)および式(3.2)で示した、車両および構造物に関する運動方程式を連立して解く。車両と軌道構造との相互作用力には、前述のように、鉛直方向については接触力を考慮する。

効率的な数値解析を行うために、車両および構造物の運動方程式をモーダル変換する。得られる車両およ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。この際、数値解析速度を向上させるために、時間増分  $\Delta t$  内における収束回数をモニターし、 $\Delta t$  の大きさをプログラム内で自動的に調整する手法を用いた。解析に用いた  $\Delta t$  は、0.0005 秒を標準とした。

### 3.3.5 解析結果の評価方法

数値実験は、解析対象軌道 8 種類と列車速度 5 種類(100, 200, 260, 300, 360km/h)をパラメータとして解析を行った。

列車走行性は、走行安全性と乗り心地により評価される。構造物の走行安全性の照査は、すべての車輪に対して、脱線係数および輪重減少率の応答値が設計限界値を下回ることを確認することにより行われる<sup>3-13)</sup>。軌道狂いや曲線の影響を除く、橋梁などの構造物の変形に対する輪重減少率の設計限界値としては、37%が提案されているが、これを連続する新設の軌道構造に対して適用するのは不適切であると考えられる。このように、新設される軌道構造の優劣を議論するための適切な評価手法は提案されていないため、本研究では、輪重変動の実測値を参考値として走行安全性の評価の目安を定めることとした。

図 3-6 にスラブ軌道上を走行する新幹線の輪重変動の時刻歴データを示す。同図は、新幹線が列車速度 250km/h 前後で走行した時のものであり、開業前のレールが平滑な状態で得られたものである。同図に示すように新幹線の輪重変動はレールが平滑な状態でも常時 $\pm 10 \sim 20$ kN 程度(輪重変動率 10%~25%)生じていることがわかる。これは、レール面の微少な凹凸が存在することに起因する輪重変動と考えられる。今回の解析モデルでは、軌道構造のみをモデル化しているので、上記測定データを踏まえ輪重減少率の目安値を 5%とした。輪重変動率は式(3.5)で表される。

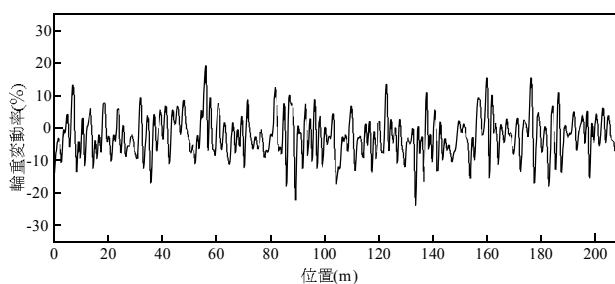
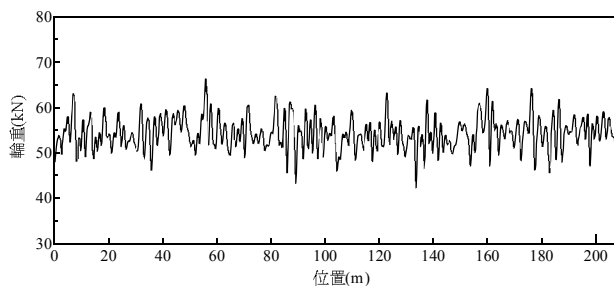
$$\Delta P/P_s = \frac{P_d - P_s}{P_s} \quad (3.5)$$

ここに、 $P_d$  は動輪重、 $P_s$  は静輪重、 $\Delta P/P_s$  は輪重変動率である。このうち、負側の値を輪重減少率と呼ぶ。

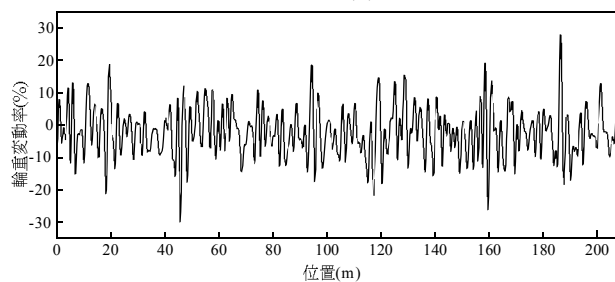
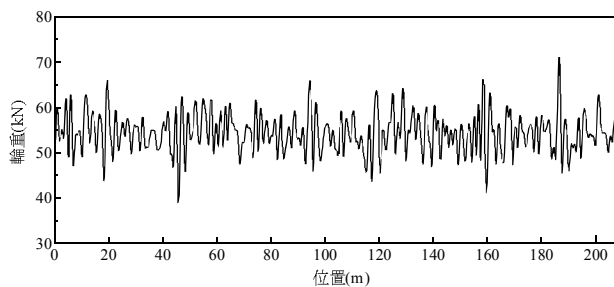
乗り心地の照査は、車体加速度の応答値が設計限界値を超えないことを確認することにより行なわれる。

図 3-7 に鉛直方向の乗り心地の設計限界値と振動加速度の関係<sup>3-13)</sup>を示す。図から橋梁などの構造物の変形に対する鉛直方向の車体加速度の設計限界値は、 $0.5\text{m/s}^2$  となるが、これらの限界

値は単発的な過渡応答に対して定められたもので、輪重減少率の目標値の設定の考え方と同様に、新設の軌道構造に対して適用するのは不適切であると考えられる。本研究では、輪重変動率と同様に、実測などを参考に車体加速度の目安値を  $0.2\text{m/s}^2$  と定めた。



(a) A地点における輪重の実測値と輪重変動率の時刻歴波形



(b) B地点における輪重の実測値と輪重変動率の時刻歴波形

図 3-6 輪重の実測値と輪重変動率の時刻歴波形

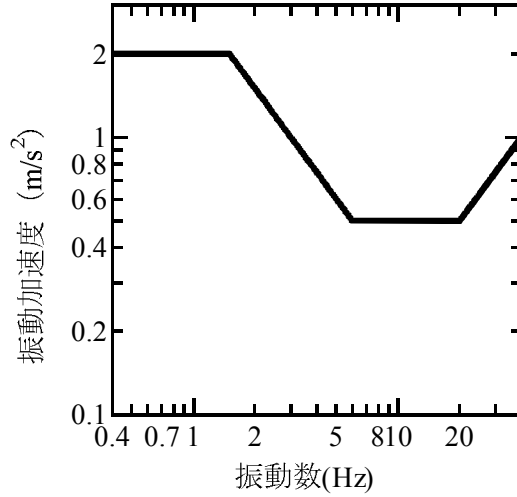


図 3-7 鉛直方向の乗り心地の設計限界値

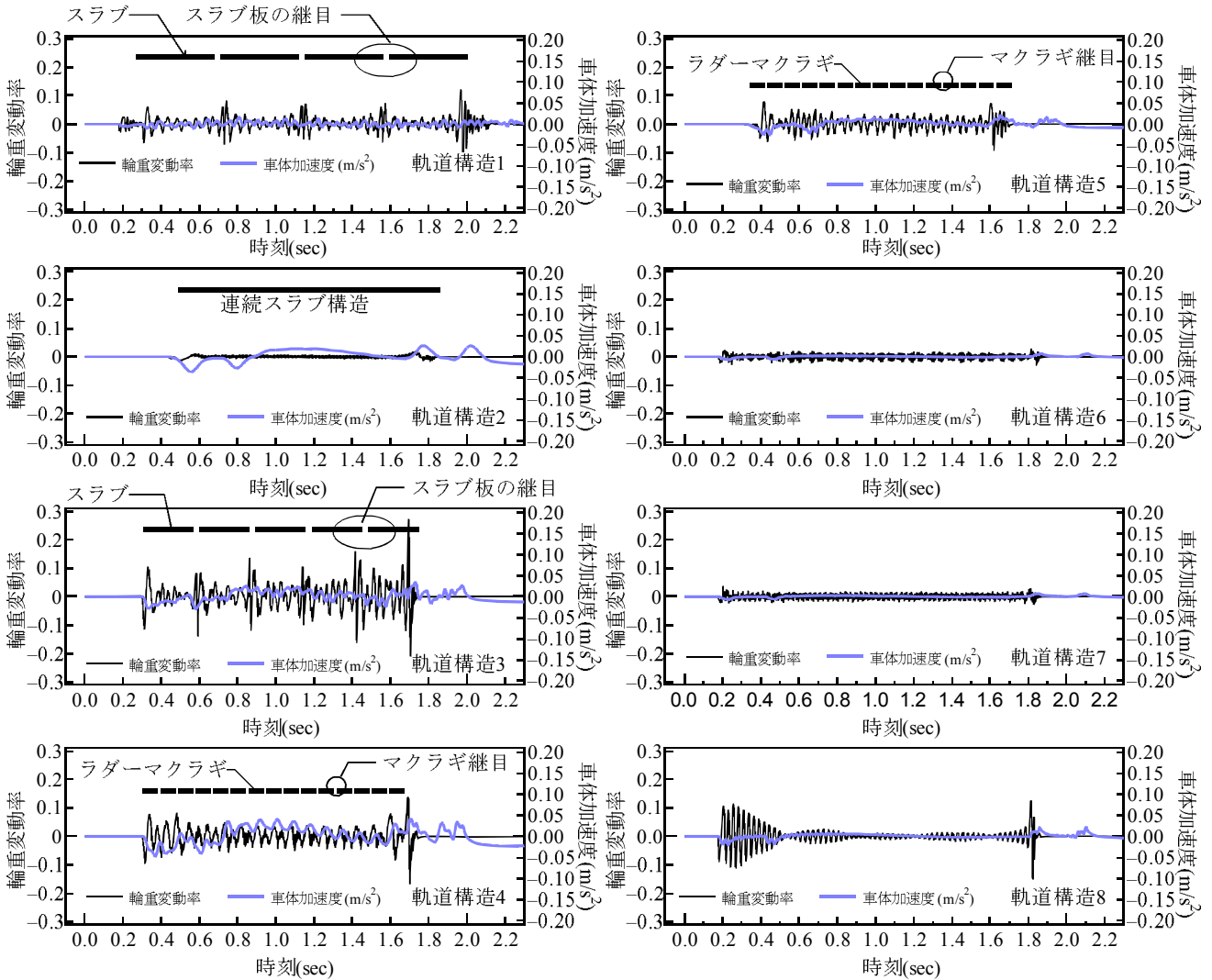


図 3-8 軌道中間部および軌道端部における輪重減少率と車体加速度の時刻歴波形



表 3-4 各軌道構造の鉛直方向の固有振動数

軌道構造	鉛直方向の最低次モード振動数 (Hz)	実測による鉛直方向の固有振動数 (Hz)	1mあたりの支持ばね定数 (MN/m/m)	軌道構造	鉛直方向の最低次モード振動数 (Hz)	実測による鉛直方向の固有振動数 (Hz)	1mあたりの支持ばね定数 (MN/m/m)
1	22	-	49	5	46		48
2	9	-	14	6	161	168	1013
3	10	-	19	7	188		99400
4	28	21	16	8	86	-	96

### 3. 4 解析結果

#### 3.4.1 モード解析結果

表 3-4 にモード解析によって得られた各軌道構造の鉛直方向の最低次モードの固有振動数および 1m あたりの支持ばね定数を示す。また、同表に解析モデルの妥当性を示すために行ったインパルスハンマーによる加振試験によって得られた軌道構造の固有振動数の実測記録を示す。防振軌道は鉛直方向の最低次モードの振動数が比較検討用の軌道よりも低く、1m あたりの支持ばね定数も小さいことがわかる。固有振動数は従来から新幹線で用いられている軌道構造 8 の弾性まくらぎ直結軌道と比較して 1/2~1/10 程度となっており、1m あたりの支持ばね定数も 1/2~1/7 となっている。

また、固有振動数を解析値と実測値で比較すると、軌道構造 4 の実測値が解析値を下回っている。この原因としては、実測による加振が微少な変位レベルで行われたため、弾性材の荷重変位曲線において勾配が小さい、すなわち、ばね定数が小さい部分であったためと考えられる。軌道構造 6 では実測値が解析値を上回っているが、これは実測による加振が微少な変位レベルで行われたため、バラストの荷重変位曲線において勾配が大きい、すなわち、ばね定数が大きい部分であったためと考えられる。一方、在来線において列車を静的に載荷した際のラダーマクラギの沈下量は、実測値 1.57mm に対して DIASTARSIII によって求めた解析値 1.50mm と比較的良い一致を示していた。

#### 3.4.2 時刻歴波形

図 3-8 に軌道中央部および軌道端部の各軌道構造における 260km/h 走行時の輪重変動率と車体加速度の時刻歴波形をそれぞれ示す。輪重減少率に着目すると、防振軌道（軌道構造 1~5）は、比較検討用の軌道（軌道構造 6~8）と比べて、軌道構造 2 を除き、輪重減少率が大きくなっている。また、軌道構造 1,3,4,5 の時刻歴波形では、一定周期で輪重変動が大きくなっていることがわかる。解析上の各輪軸の走行位置を算定すると、この輪重変動は防振軌道のユニット継目に起因するものであることが分った。一方、軌道構造 2 は、継目なしで軌道が連続するため、大きな輪重変動が発生してない。このように、防振軌道では、ユニット継目が輪重変動率に及ぼすおよぼす影響が大きいと考えられる。

また、防振軌道では、隣接軌道構造との境界部を想定した軌道端部でも輪重変動が大きくなっている。これらは軌道支持ばね定数の隣接軌道構造との差により生じるものであるが、一般には、軌道支持ばね定数の変化の勾配を工夫するなどにより、改善が図られる。実軌道の施工ではこの点も重要となる。

車体加速度に着目すると、隣接軌道構造との境界部で応答が生じており、軌道中間部での応答は比較的小さいことがわかる。

#### 3.4.3 軌道の応答

図 3-9 に列車速度が軌道中間部のレールの最大変位に及ぼす影響を示す。図から各軌道構造ともに列車速度の増加に伴って、最大変位がほとんど変わることがなく、顕著な共振応答は見られなかった。このため、各軌道とも共振に対しては安全であると考えられる。

#### 3.4.4 走行安全性

##### (1) 列車速度の影響

図 3-10、図 3-11 に列車速度と輪重減少率の関係を示す。軌道中間部と軌道端部では、輪重減少率の発生原因が異なるため、両者を分けて整理した。図から各軌道構造ともに列車速度の増加に伴って、輪重減少率が大きくなっていることがわかる。

ユニット継目のない軌道構造 2 を除く各種防振軌道は、3 種類の比較検討軌道と比べて輪重減少率が大きくなっている。この原因は前述のようにユニット継目と隣接軌道構造との境界である。

隣接軌道構造との境界である軌道端部では、軌道中間部よりも大きな輪重減少率となっているが、これについては、隣接軌道構造との境界部において、その境界前後に適切な緩衝構造を配置し、軌道の支持ばね定数の急激な変動がないようにすれば、輪重変動が減少し、列車走行性を向上できることが明らかになっている<sup>3-14</sup>。

よって、走行安全性を考える上ではユニット継目の処理方法が重要なファクターとなると考えられる。

##### (2) ユニット継目部の軌道支持ばね定数の影響

ユニット継目部の支持ばね定数が輪重変動に与える影響を明らかにするために、軌道構造 4 のフローティング・ラダー軌道を取り上げ検討を行った。

図 3-12 ユニット継目の支持剛性の概念図を示す。ユニット継目の支持ばね定数は、軌道の支持長さに併せて静的に負担重量を計算し設定される場合が多い。同図でも端部のフローターの支持ばね定数は中央部の支持ばね定数  $K$  の  $1/2$  となっている。ここでは、このユニット継目の軌道支持ばね定数を変化させながら解析を行った。

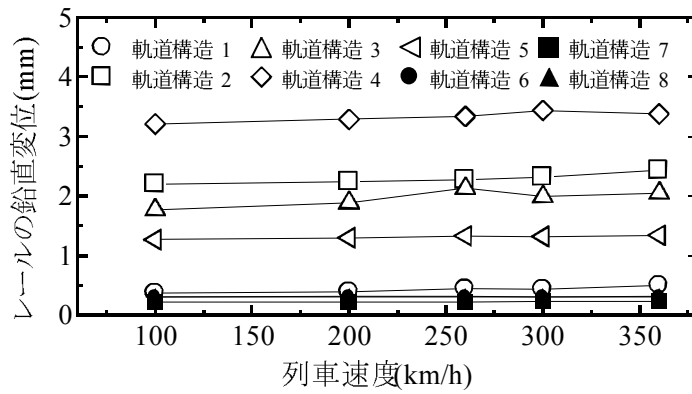


図 3-9 レール変位の最大値

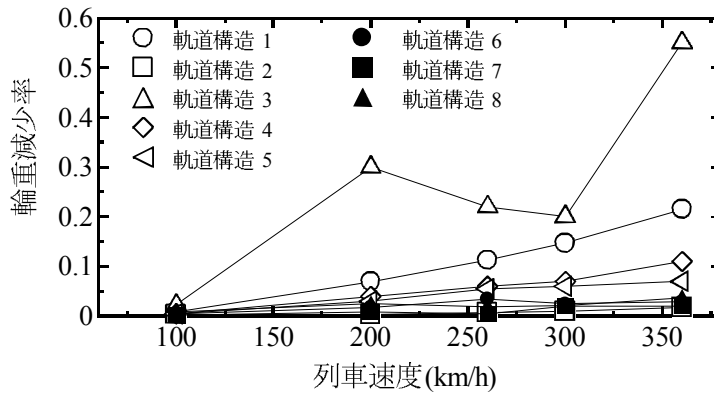


図 3-10 軌道中間部における輪重減少率

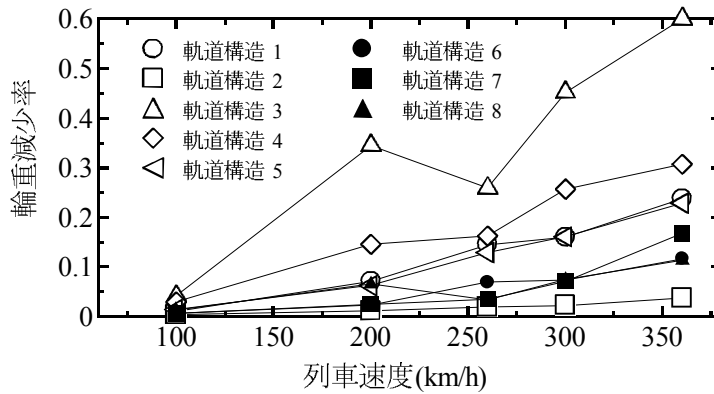


図 3-11 軌道端部における輪重減少率

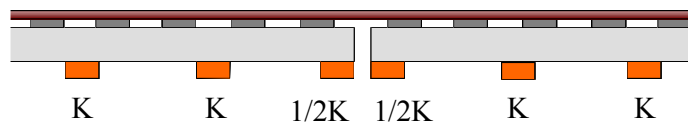


図 3-12 ユニット継目の支持剛性の概念図

図 3-13 にユニット継目の軌道支持ばね定数を変化させたときの輪重減少率を示す。列車速度は 260km/h である。軌道支持ばね定数を中央部の 0.5 あるいは 0.6 倍程度に設定すると、輪重減少率が極小になっていることがわかる。これらの最適ばね定数は軌道の動特性により変化すると考え

られる。一方、ユニット継目に対して適切に処理を行わない場合には、応答が大きくなることも推察される。

### (3) 軌道支持ばね定数の影響

軌道支持ばね定数が小さいと、ユニット継目間や隣接軌道構造との境界部で変位差が出やすくなる。そこで軌道構造 4 のフローティング・ラダー軌道を取り上げ、軌道支持ばね定数の影響について検討した。なおユニット継目の軌道支持ばね定数は中央部の支持ばね定数  $K$  の 1/2 とした。

図 3-14、図 3-15 に軌道支持ばね定数と輪重減少率の関係を示す。軌道中間部と軌道境界部では、輪重減少率の発生原因が異なるため、両者を分けて整理した。ここで、軌道支持ばね定数は 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 MN/m とした。列車速度は 100, 200, 260, 300, 360m/h とした。

軌道中間部と軌道端部を比べると、図 3-10、図 3-11 の結果と同様に軌道端部の輪重減少率の最大値の方が軌道中間部よりも大きくなっている。

軌道中間部の輪重減少率は、軌道支持ばね定数や列車速度によらずほぼ 5%前後で推移していることがわかった。具体的な軌道の支持ばね定数については、今後、防振性能の観点から更に検討を行っていく必要がある。

一方、隣接軌道構造との境界部では、軌道支持ばね定数や列車速度の影響が大きい。よって、柔らかい軌道支持ばね定数を選択した場合や高速区間では、支持剛性遷移区間を長くとりなどして対策を行う必要があると考えられる。

## 3.4.5 乗り心地

### (1) 列車速度の影響

図 3-16、図 3-17 に列車速度が車体加速度に及ぼす影響を示す。軌道中間部と軌道境界部では、車体加速度の発生原因が異なるため、両者を分けて整理した。同図から各軌道構造ともに列車速度の増加に伴って、車体加速度が大きくなっていることがわかる。

各種防振軌道は、3 種類の比較検討軌道と比べて輪重減少率が大きくなっているが、これらの値は軌道中間部で最大でも  $0.1\text{m/s}^2$  (0.01g) 程度であり、問題のない値であると言える。このため列車走行性の観点から防振軌道の適用性を検討する場合には、走行安全性が重要となると考えられる。

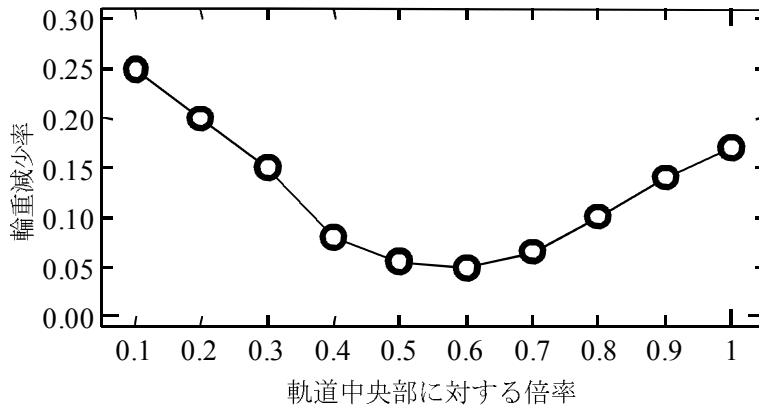


図 3-13 ユニット継目の軌道支持ばね定数が輪重減少率に及ぼす影響 (列車速度 260km/h)

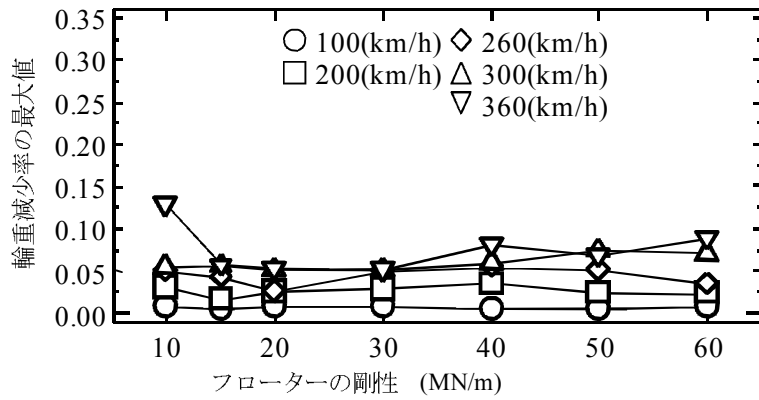


図 3-14 軌道支持ばね定数が及ぼす影響 (軌道中間部, フローティング・ラダー軌道)

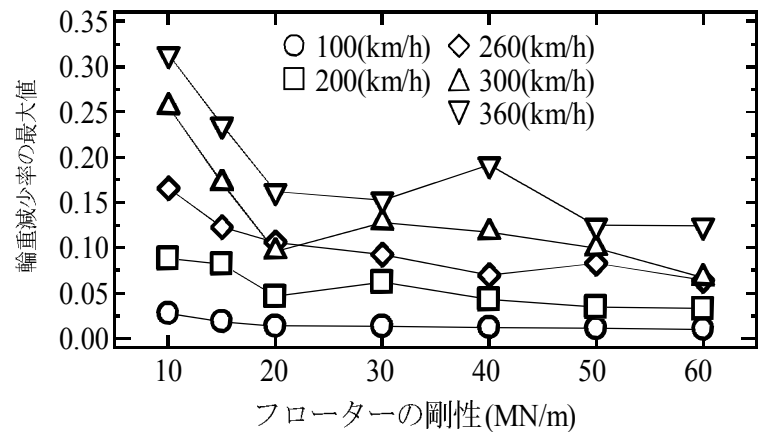


図 3-15 軌道支持ばね定数が及ぼす影響 (軌道端部, フローティング・ラダー軌道)

### (2) 継目部の支持剛性の影響

走行安全性の評価と同様に、ユニット継目部の支持剛性が車体加速度に及ぼす影響を明らかにするために、軌道構造4のフローティング・ラダー軌道を取り上げ検討を行った。

図3-18にユニット継目の軌道支持ばね定数を変化させたときの車体加速度を示す。列車速度は260km/hである。輪重減少率と同様に、軌道支持ばね定数を中央部の0.5倍程度に設定すると、車体加速度が極小になっていることがわかる。また、ユニット継目の処理を行わなくても、乗り心地にはほとんど問題がないと推察される。

### (3) 軌道支持ばね定数の影響

走行安全性の評価と同様に、軌道支持ばね定数の影響について検討した。なお、ユニット継目の軌道支持ばね定数は中央部の支持ばね定数  $K$  の1/2として設定した。

図3-19に軌道支持ばね定数が車体加速度に及ぼす影響を示す。これらの値は最大でも  $0.1\text{m/s}^2$  ( $0.01\text{g}$ ) 程度であり、問題のない値であると言える。

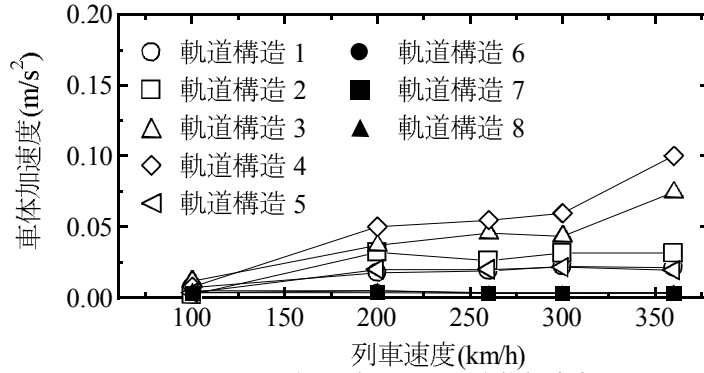


図 3-16 軌道中間部における車体加速度

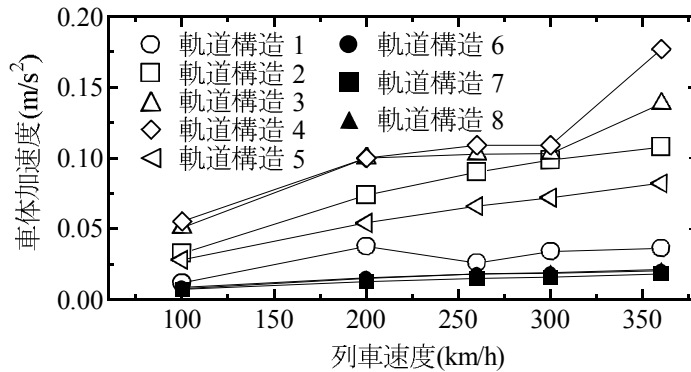


図 3-17 軌道端部における車体加速度

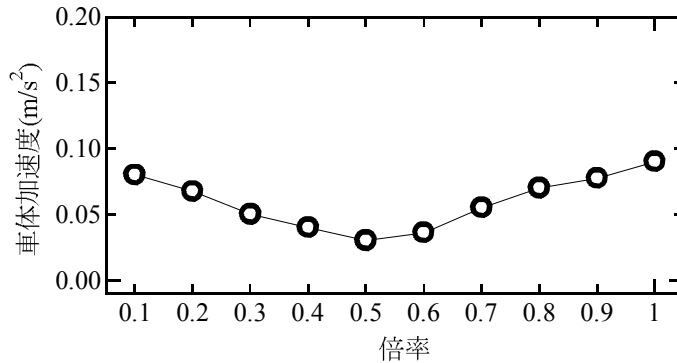


図 3-18 端部フローターの剛性が車体加速度に与える影響列車速度 260(km/h)

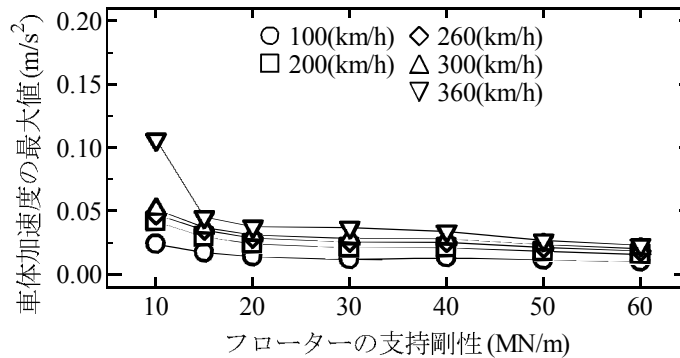


図 3-19 フローターの支持剛性の影響 (軌道中間部, フローティング・ラダー軌道)

## 3.5 本章の結論

第3章では、構造物音の効果的な対策と考えられている防振軌道について、数値解析を用いて高速鉄道への適用性を検討した。

車両と構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARS II を用いて、数値実験を行い、防振軌道5種類を対象とした。以下に本章で得られた知見を示す。

- (1) 防振軌道は一般に軌道支持ばね定数が小さく、固有振動数は、 $1/2 \sim 1/10$  となっている。しかしながらレールの最大変位については、顕著な共振が認められず、防振軌道は共振に対して安全であると考えられる。
- (2) 防振軌道上を走行する車両の走行安全性は、ユニット継目、隣接軌道構造との境界部の影響を受ける。前者については適切にユニット継目の軌道支持ばね定数を設定することにより、列車速度 360m/h 程度までは輪重減少率を 5%以内に抑えることが可能であり、平滑な走行を確保できると考えられる。後者については、隣接軌道構造との遷移区間を調整することにより、走行安全性の確保を図っていくのがよいと考える。
- (3) 防振軌道を走行する車両の車体加速度は、最大でも  $0.1\text{m/s}^2$  (0.01g) 程度と極めて良好である。このため防振軌道の適用性を検討する場合には、乗り心地は全く問題にならないと考える。

以上のように本章では、各種防振軌道や支持ばね定数と高速列車走行性の関係について、数値実験により明らかにし、適用可能な構造や範囲を定量的に示した。本章で得られた知見を前提条件として、第5章および第6章において鉄道 RC 高架橋の構造物音発生メカニズムの解明とその低減対策の検討を行うこととした。

## 参考文献

- 3-1) 奥田広之，浅沼潔，松本信之，涌井一：フローティング・ラダー軌道の耐荷性能と環境性能の評価，鉄道総研報告，Vol.17, No9, pp9-14, 2003
- 3-2) 桃谷尚嗣，鈴木健司，名村明，藤井光治郎，安藤勝敏，芦谷公稔，堀池高弘：コイルばね防振軌道の性能と評価，鉄道総研報告，Vol.15, No4, pp27-32, 2001
- 3-3) 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，No724/ I -62, pp83-102, 2003.1
- 3-4) 榊原貞臣，岡本茂：東北新幹線・通勤別線的设计・施工計画—上野～大宮間 赤羽台トンネル—，トンネルと地下，pp417-421, 1985.5
- 3-5) Viktor Enoekl and Udo Lenz : First Mass-Spring System in a high-speed railway line , Eisenbahntechnische Rundschau, Vol.9, pp527-538, 2003
- 3-6) 鈴木健司，渡辺弘之，塩川英世，山本与一，吉田成一郎，峯垣明，時弘みどり：コイルばね防振軌道の実験および設計・施工，清水建設研究報告，No.73, pp.43-58, 2001.4
- 3-7) 須田征男，長門彰，徳岡研三，三浦重，新しい線路—軌道の構造と管理—，社団法人 日本鉄道施設協会，pp.414-437, 1997



- 3-8) 日本工業標準調査会：JIS E1201 プレテンション式PCまくらぎ，1997
- 3-9) 日本鉄道建設公団盛岡支社：東北新幹線工事誌（盛岡・八戸間），pp.473-502.2003.3
- 3-10) 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，No513/I-31，129-138，1995.4
- 3-11) 加藤八州夫：レール・Rail，pp58，1987
- 3-12) 村本勝己，関根悦夫，蔣関魯：繰返し荷重をうける道床バラストの粒度と強度・変形特性に関する検討，第36回地盤工学研究発表会，pp1185-1186，2001.6
- 3-13) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）pp55-78，2006
- 3-14) 名村明，松尾浩一郎，三浦重：支持弾性遷移区間の軌道の挙動解析，鉄道総研報告，Vol.11，No2，1997

## 4 章 鋼鉄道橋の構造物音の低減対策

### 4. 1 本章の概要

第 4 章では、構造物音の効果的な対策と考えられている防振軌道について、より騒音が問題になりやすい鋼製の鉄道橋梁（以下、鋼鉄道橋）を対象として、その低減効果を実証的に論じる。

鋼鉄道橋は、古くから多数の建設実績がある。鋼鉄道橋を用いる利点としては、鋼材が高強度であるため長スパン化が可能であること、現場架設が容易であること、工場製作により品質管理が容易であることなどが挙げられる。一方で鋼鉄道橋は、部材が薄板構造で振動しやすいため、構造物音が大きくなるとの指摘もあり、鉄道橋では都市内での適用が避けられる事例も見られる<sup>4-1)</sup>。

構造物音を低減する手法としては、音源となるウェブやフランジから周辺環境への伝播経路を遮断する防音壁や床版スラブの設置、音源となるウェブやフランジへの防振材の添付など、既に様々なものが提案されている。これに加えて、加振源と音源との間の伝達経路を改善する手法も提案されている。すなわち、構造物音を引き起こす車輪からの加振力による振動伝達を、レールと鋼鉄道橋の音源となる各部材との間で遮断する手法である。

このような背景の中、筆者らは、加振源と音源との間の伝達経路の更なる改善を目的として、新しい構造形式であるダブルフローティング型鋼鉄道橋を開発した。図 4-1 にダブルフローティング型鋼鉄道橋の概要を示す。構造形式は、都市内での適用を想定し、架道橋などで採用事例の多い下路桁方式となっている。本構造形式では、軌道構造に防振性能に優れたフローティング・ラダー軌道を採用している<sup>4-2),4-3)</sup>。フローティング・ラダー軌道は、ラダーマクラギの線路方向の高い曲げ剛性により輪荷重の分散を図っており、併せて軌道の低ばね支持により荷重伝達低減を図っている。本構造形式では、フローティング・ラダー軌道の下に、さらに防振材を用いた鉄筋コンクリート床版（以下、フローティング床版）を構築している。このフローティング床版は、鉄筋コンクリート床版を防振材で支持した重量級のマス・スプリングシステムであり、主として 100Hz よりも低い周波数領域の加振力伝達低減効果を図ったものである。

本章では、このようなマス＝スプリングシステムの要件を揃えた実物大の構造物・軌道模型を製作し、本質的な要因を抽出した試験を実施することとした。本模型は、支持剛性のプロパティを調整できること、低速ではあるが実車両走行が可能などの特徴を有している。更にその試験結果を外挿するため営業線における走行試験を行い、防振効果を明らかにする。具体的には、このダブルフローティング型鋼鉄道橋の構造物音低減効果を以下の手法により推定することとした。

- (1) 実物大橋梁模型に対してインパルス加振試験を実施して、レールから部材への振動伝達特性を把握するとともに、各フローティング手法で低減効果が得られる周波数帯を明らかにする。
- (2) 実物大橋梁模型に対して列車走行試験を行い、各フローティング手法による構造物音低減効果を明らかにする。

(3)(2)の試験結果に対して音源解析手法<sup>4.4)</sup>および騒音予測手法<sup>4.5)</sup>を適用し、営業線におけるダブルフローティング型鋼鉄道橋の構造物音低減効果を推定する。

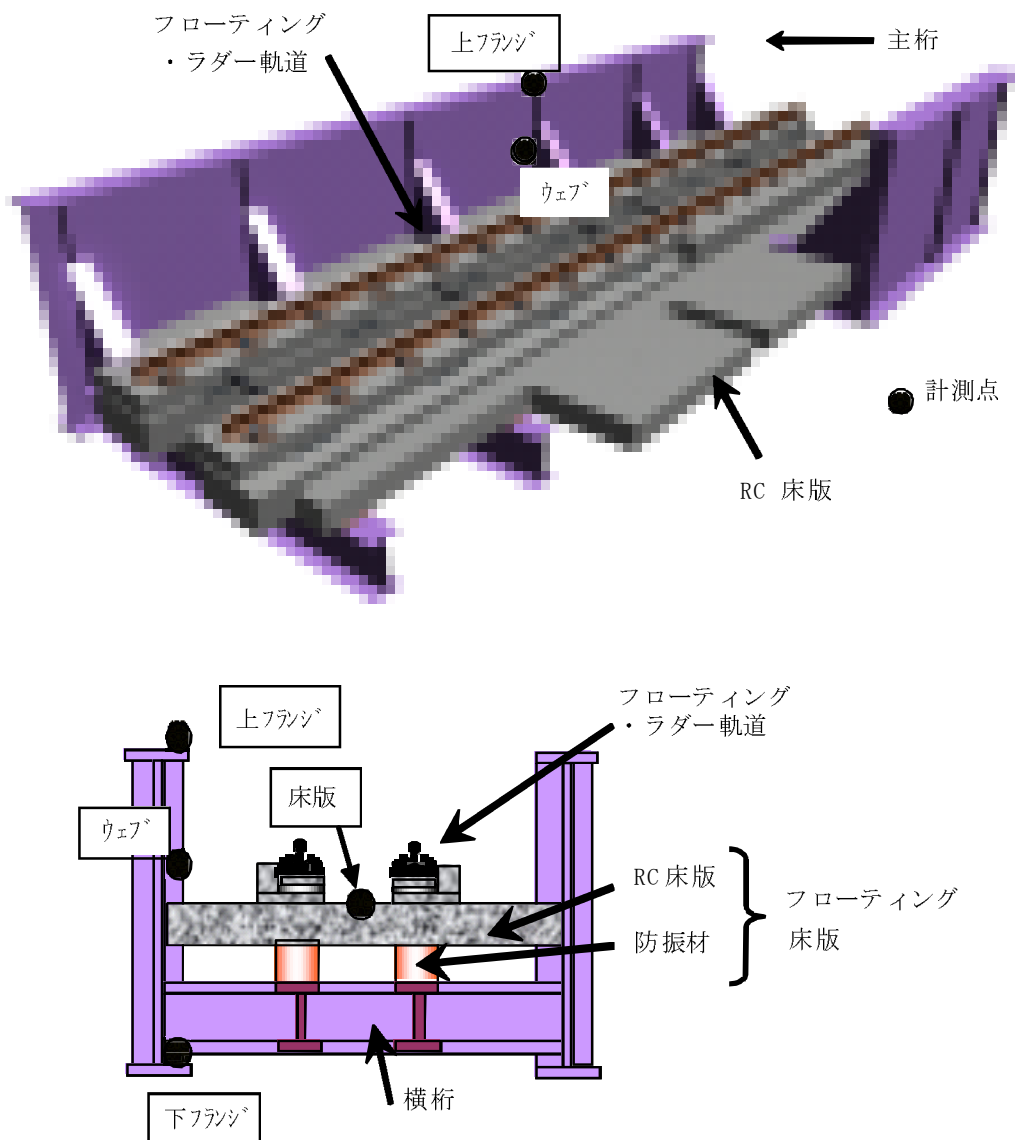


図 4-1 ダブルフローティング型鋼鉄道橋の概要

## 4. 2 構造物音低減効果の確認試験

### 4.2.1 試験方法

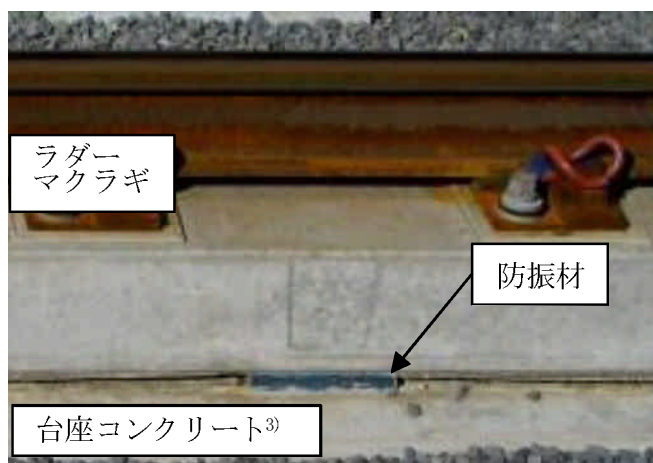
構造物音低減効果の確認は、実構造物を測定することにより実証的に実施するのが現在の技術レベルでは最も定量的かつ精度の良い手法であると言える。しかしながら営業線などにおいて、列車の走行条件、軌道や構造物の支持条件を整えること、あるいは条件変更を行うことは、一般的に困難であり、定量的な評価を行うことは列車運行上も経済上も制約が大きい。そこで本研究ではまず、実物大の模型桁を用いて構造物音低減効果の基本性状を把握することにした。

図4-2 に試験線に架設した実物大模型桁の概要を示す。本模型桁の断面は、在来線を対象として桁長約35mの条件で設計されたものを、断面形状はそのまま桁長を短縮し12mとしている。軌道構造には、フローティング・ラダー軌道を敷設し、さらにその下のフローティング床版は縦桁と横桁の交差部分で防振材により弾性支持された軌道と床版のダブルフローティング構造である。

表 4-1 に試験ケースを、表 4-2 に材料物性値を示す。本鋼鉄道橋の構造物音低減効果を確認するために、ラダーマクラギおよびコンクリート床版の支持条件を変えて、インパルス加振試験および列車走行試験を行った。走行列車は標準的な在来線車両で 2 両編成である。なお、本模型桁は、曲線半径 180m の急曲線区間に架設されており、列車の最高速度は 45km/h に制限される。また、CASE1 および CASE3 の試験ケースにおいてラダーマクラギの剛支持としているが、列車通過時のラダーマクラギの沈下量測定の結果、1.0mm 程度沈下しており、完全剛支持ではない擬似的な直結軌道である。



(a) 列車走行時の状況



(b) 防振材（ラダーマクラギ下）

図 4-2 実物大模型桁の列車走行時の状況および防振材の設置状況



(c) 防振材（床版下）

図 4-2 実物大模型桁の列車走行時の状況および防振材の設置状況

表 4-1 試験ケース

CASE	ラダーマクラギ	コンクリート床版
1	剛支持	剛支持
2	フローティング・ラダー軌道	剛支持
3	剛支持	フローティング床版
4	フローティング・ラダー軌道	フローティング床版

※CASE4 がダブルフローティング型鋼鉄道橋

表 4-2 材料物性値

		材料定数・重量
軌道パッドばね定数 (MN/m)		60
防振材ばね定数 (MN/m)	ラダーマクラギ用	25
	床版用	50
フローティング・ラダー軌道総重量 (kN)		155
床版コンクリート総重量 (kN)		314
鋼材総重量 (kN)		290

#### 4.2.2 低減効果の評価方法

ダブルフローティング型鋼鉄道橋の構造物音低減効果の評価は、インパルス加振試験では、

4-1 に示すように桁部材（床版、主桁上フランジ、主桁ウェブ、主桁下フランジ）に取り付けた加速度計（リオンPV85）において、レール頭頂面を打撃した際に測定された振動加速度およびインパルスハンマ（東陽テクニカ086D50型）の加振力の時刻歴データをフーリエ変換し、振動加速度スペクトルを加振力スペクトルで基準化した周波数応答関数（以下、アクセラランス）で行った。また、列車走行試験では、桁部材（床版、主桁上フランジ、主桁ウェブ、主桁下フランジ）に取り付けた加速度計（リオンPV85）より得られた振動加速度の時刻歴データから振動加速度レベル $L_a$ を求め、式(4.1)に基づき、振動加速度レベルを振動速度レベル $L_v$ に変換して評価することとした<sup>44)</sup>。ここで、 $f$  は1/3オクターブバンド中心周波数である。

$$L_v = L_a - 20 \log(2\pi f) + 46 \quad (4.1)$$

ここで、 $f$  は1/3オクターブバンド中心周波数である。

構造物音の音源となるのは、一般に主桁、縦桁および横桁のウェブやフランジであると考えられる。そこで別途加速度計（リオンPV85）を20個アレイに配置（格子状に高密度配置）して、モードの腹となると推定されている箇所をインパルスハンマ（東陽テクニカ086D50型）で加振し、各部材の振動モードを分析した。具体的には、基準点と各測定点とのクロススペクトルから振動モードの候補をストックし、各候補のフーリエ振幅と位相に基づきモード図を作成した。

なお、騒音の評価は沿線に設置した騒音計を用いて行うことも考えられるが、本模型桁は桁架設にあたり地盤を3m程度掘削して桁を架設しており、床版裏（桁下）および模型桁から離れた位置での騒音については、ピット内での反響音が含まれると考えられる。またピットから外への音の伝播経路についても通常とはかなり異なった条件であるといえる。したがって、列車走行試験では軌道中心から12.5m地点の騒音測定も行ったが、本構造形式の構造物音低減効果の評価をするにあたっては対象外とすることとした。

#### 4.2.3 インパルス加振試験の結果

図4-3にインパルスハンマでレール頭頂面を打撃した際の主桁ウェブ、床版、主桁上フランジ、主桁下フランジのアクセラランスを示す。なお、アクセラランスとは、部材の応答加速度を加振力で除した値である。

主桁ウェブのアクセラランスは、50Hz付近にピークがあり、剛支持構造のCASE1と比較して、CASE3およびCASE4で低減効果があることがわかる。また、その他の周波数帯でも各ケースで低減効果があるが、その中でもCASE4の低減効果が最も大きかった。

図4-4に主桁ウェブの振動モード分析結果を示す。アレイ配置した加速度計から50Hz付近の振動モードは主桁ウェブの一次モードであることがわかった。

床版のアクセラランスは、CASE1と比較して、CASE2ではおよそ150Hz以上、CASE4では190Hz付近で低減効果があることがわかる。CASE3では、低減効果は見られず、30～80Hz、200Hz付近でアクセラランスが増加していることがわかる。

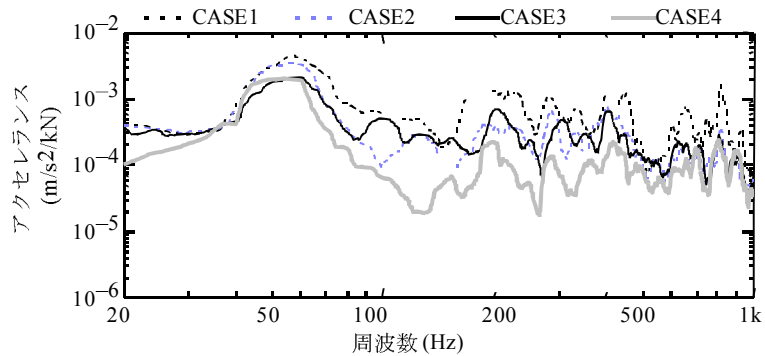
主桁上フランジのアクセラランスは、CASE1と比較して、CASE2では400Hz以上、CASE3では50Hz～600Hzで低減効果があることがわかる。CASE4ではCASE2とCASE3の低減効果を包

含する形で低減効果が得られることがわかる。

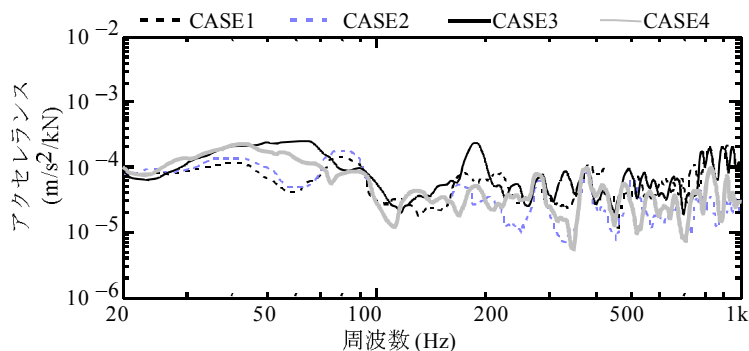
主桁下フランジのアクセラランスは、CASE1と比較して、CASE2では200Hz以上、CASE3およびCASE4ではおよそ100Hz以上で低減効果があることがわかる。

アクセラランスの大きさを部材レベルで見ると、主桁ウェブのアクセラランスが他の部材に比べて大きいことがわかる。特に主桁ウェブの一次固有振動数に相当する50Hz付近が最も大きく、この周波数帯域のCASE4の低減効果が明らかになった。

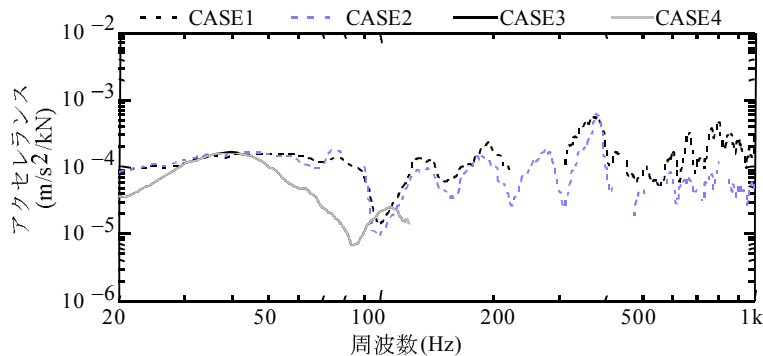
このように、鉄筋コンクリート床版を防振材で支持した重量級のマス・スプリングシステムにより、より低い周波数領域で低減効果が得られることがわかった。



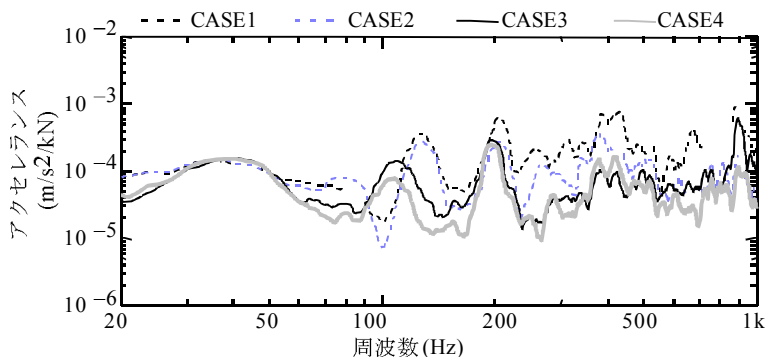
(a) 主桁ウェブ



(b) 床版



(c) 主桁上フランジ



(d) 主桁下フランジ

図 4-3 インパルスハンマによる衝撃加振試験結果



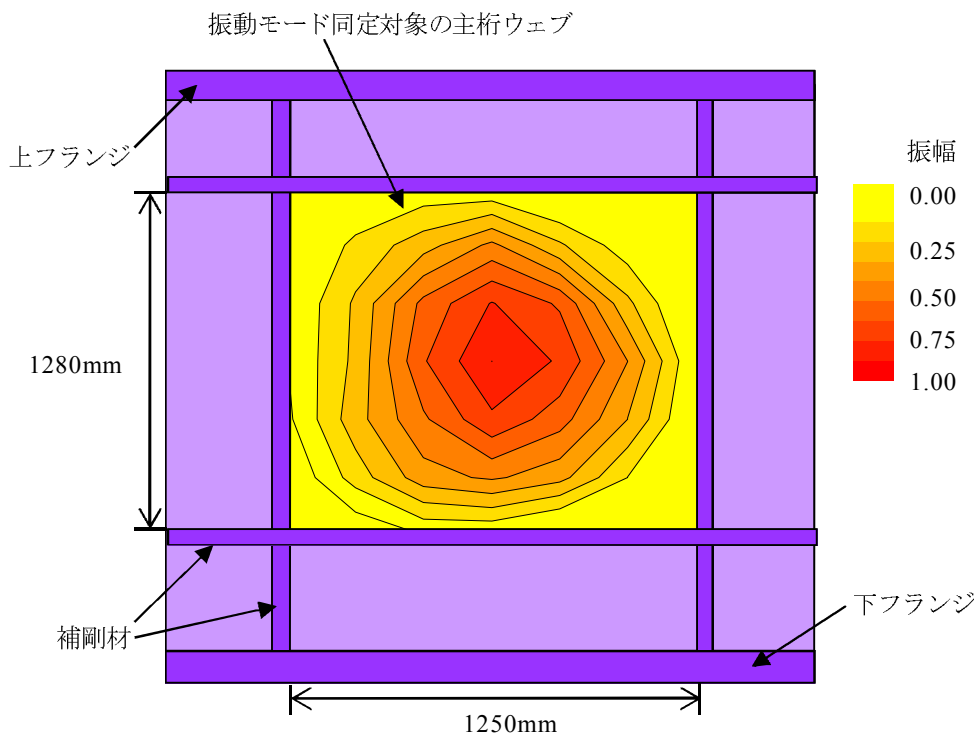


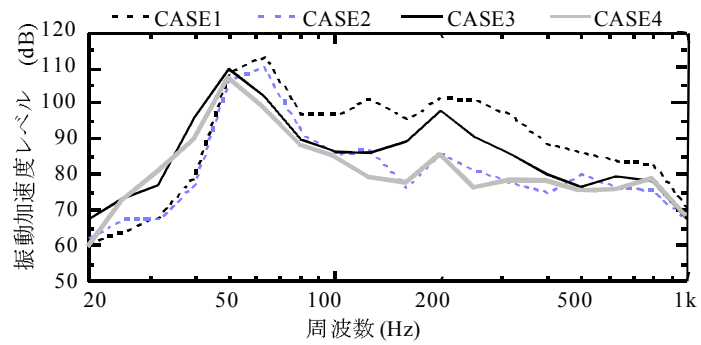
図 4-4 主桁ウェブの 50Hz 付近の振動モード

#### 4.2.4 列車走行試験結果

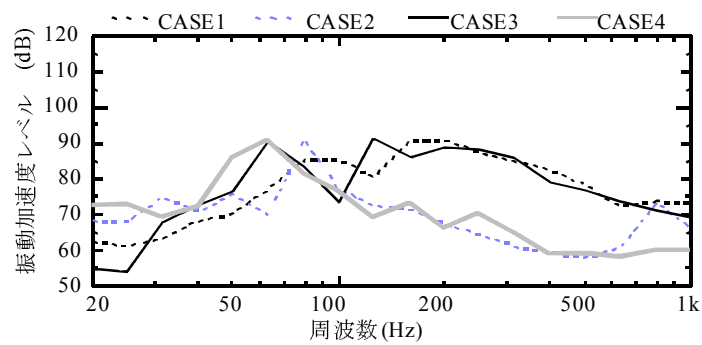
##### (1) 振動加速度レベルによる比較

図4-5に列車通過時（列車速度約40km/h）の主桁ウェブ、床版、主桁上フランジ、主桁下フランジの1/3オクターブバンド振動加速度レベル（A特性補正なし）を示す。同図の振動加速度レベルの大きさを部材レベルで比較すると、インパルス加振試験と同様に、主桁ウェブの振動加速度レベルが最も大きく、主桁ウェブの振動が支配的であることがわかる。

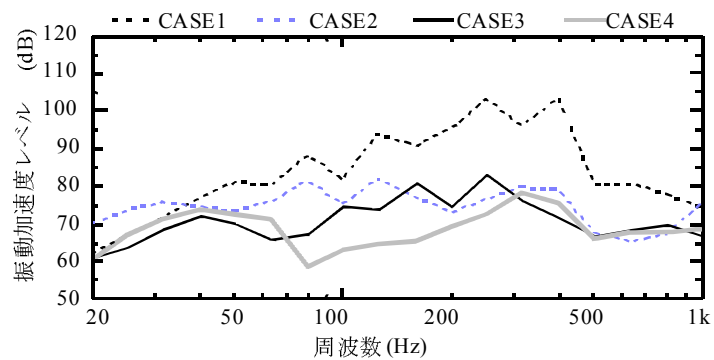
主桁ウェブの振動加速度レベルを見ると、剛支持構造のCASE1に比べて、80Hz以上でCASE2, 3, 4の低減効果があることがわかる。フローティング床版を有するCASE3, 4はCASE1でおよそ60Hz付近だったピークが低周波数側へシフトし、ピーク振動加速度レベルも小さくなっていることがわかる。CASE2とCASE4がおよそ150Hz以上の帯域でほぼ同程度の振動加速度レベル、CASE2とCASE3がおよそ100Hz以下の帯域でほぼ同程度の振動加速度レベルであることから、主桁ウェブにおけるフローティング床版による低減効果はおよそ150Hzより低い周波数帯域、フローティング・ラダー軌道による低減効果は、およそ100Hzより高い周波数帯域となっていることがわかる。図4-4のアクセラランスと比べると、どの部材においても500Hz程度までの振動加速度レベルがピークとなる周波数帯や各ケースの値の大小関係の傾向が良く似ていることが明らかとなった。



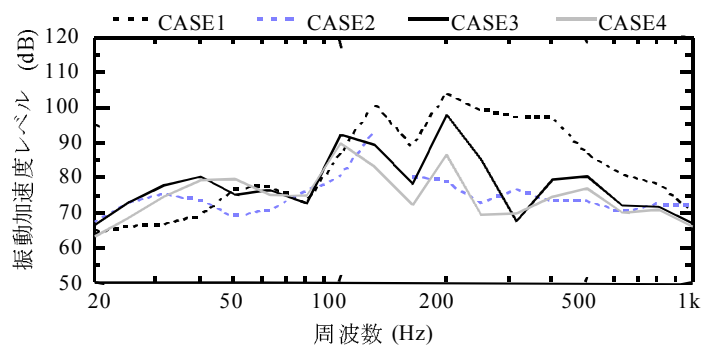
(a) 主桁ウェブ



(b) 床版

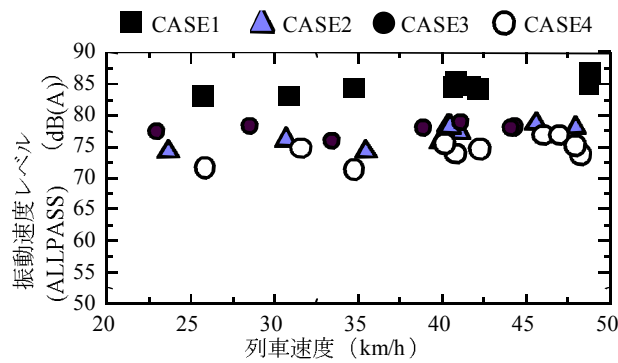


(c) 主桁上フランジ

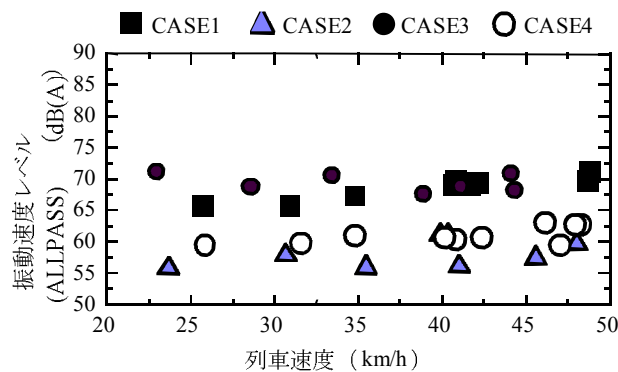


(d) 主桁下フランジ

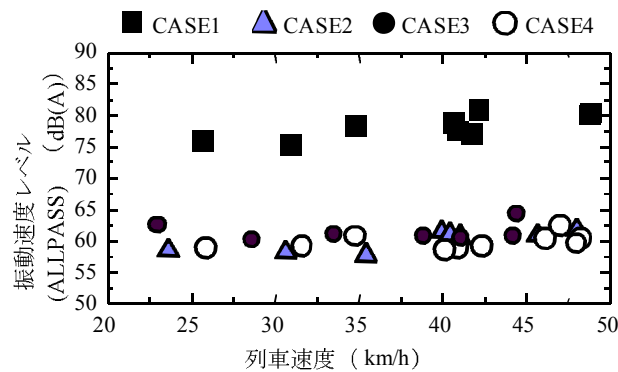
図 4-5 列車通過時の 1/3 オクターブ振動加速度レベル (列車速度約 40km/h)



(a) 主桁ウェブ



(b) 床版



(c) 主桁上フランジ

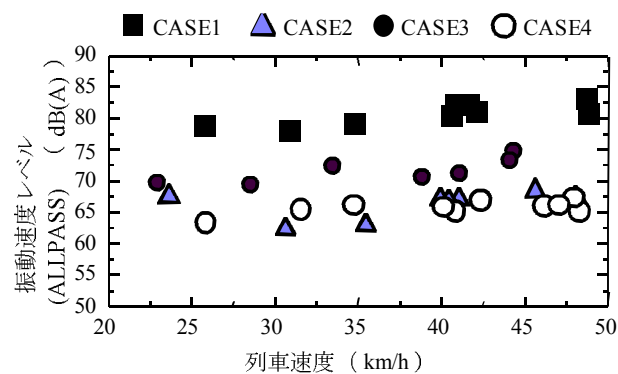


図4-6 列車速度と振動速度レベル (A特性補正あり, オールパス値) との関係

## (2) 振動速度レベルによる比較

図4-6に列車速度と桁部材の振動速度レベルのオールパス値 (A特性補正あり) との関係を示す。ここでの振動速度レベルは、列車通過時に得られた振動加速度レベルから求めているが、振動速度は、次の式(4.2) に示すように、放射音パワー $W$ に直接関連するパラメータであるため、構造物騒音の評価に対して適切な指標であると考えられる。ここで、 $\sigma$ は音響放射効率、 $\rho$ は空気密度、 $c$ は空気中の音速、 $\bar{v}$ は振動速度実効値 (A特性補正あり)、 $S$ は音響放射面積である。

$$W = \sigma \rho c \bar{v}^2 S \quad (4.2)$$

図4-6の振動速度レベルを部材レベルで比較すると、アクセラランスおよび振動加速度レベルと同様に主桁ウェブの振動速度レベルが最も大きく、主桁ウェブが騒音に対しても支配的であることがわかる。以下、主桁ウェブを中心に述べる。

主桁ウェブの振動速度レベルを見ると、列車速度約40km/hで剛支持構造のCASE1に比べて、CASE2で7.5dB(A)、CASE3で6.1dB(A)、CASE4で10.1dB(A)の低減効果が得られた。このように、鋼橋の構造物音に大きく寄与する主桁ウェブの振動速度レベルで大幅な低減効果が得られることがわかった。

床版の振動速度レベルについては、列車速度約40km/hでCASE1に比べて、CASE2およびCASE4で5~8dB(A)の低減効果が見られるが、CASE3は同程度または増加しているものも見られる。これは、剛支持床版でもともと固定されていたものが、床版の拘束が弱まったために振動しやすくなった結果であると考えられる。

## 4. 3 構造物音低減効果の推定

### 4.3.1 推定方法

平成7年に環境庁より「在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての騒音対策の指針について」が示された。この中で、在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての沿線環境への影響評価にあたって、等価騒音レベルによる評価を基本とすることが適当であると述べられている<sup>4-6)</sup>。等価騒音レベルは、騒音の発生頻度や継続時間を含めた評価を行うことが可能であり、鉄道のみならず道路交通など広く用いられている物理的な指標である。そこで、本研究においても、ピーク騒音レベルによる評価と合わせて、等価騒音レベルによる評価も行うこととした。ここで、本研究における試験結果および文献4-7)を参考に、鋼鉄道橋の構造物音に大きく寄与する主桁ウェブの振動速度に着目し、音源解析手法<sup>4-4)</sup>などを用いてピーク騒音レベルおよび等価騒音レベルを推定し、各ケースの評価を行うこととした。ここで、式(4.2)に示したように放射音パワーは、一般に、部材の音響放射面積に影響を受けるため、本形式の鋼鉄道橋で一番面積の大きな主桁ウェブ(1.25m×1.28m)を用いて評価することは妥当であると考えられる。

騒音レベルの推定に当たり、推定条件を以下に示す。まず、構造物音パワーは、列車速度の3乗則に比例するものとし、測定で得られた主桁ウェブの振動速度レベルを在来線の営業速度を考慮した列車速度50、60、70および80km/hに換算する。次に文献4-4)を参考に、主桁ウェブからの

放射音パワーレベルを求める。さらに、文献 4-6)を参考にピーク騒音レベルおよび等価騒音レベルを推定する。ピーク騒音レベルについては、推定条件として測定で得られた振動速度レベルをすべてそれぞれの列車速度に換算しているため、それぞれの列車速度におけるピーク騒音レベルの平均値となる。また、等価騒音レベルについては、軌道中心から 12.5m 地点における単発騒音暴露レベルをもとめ、列車長 120m (20m 車両で 6 両編成)、列車運転本数を 180 本として推定した。

#### 4.3.2 推定結果

図4-7に上記の仮定条件の下でのピーク騒音レベルの平均値および等価騒音レベルの推定結果を示す。同図に示すように、ピーク騒音レベルの平均値については、剛支持構造のCASE1に比べて、CASE2では7.5dB(A)、CASE3で5.4dB(A)、CASE4で10.5dB(A)の低減効果があり、等価騒音レベルについては、CASE1に比べて、CASE2では7.6dB(A)、CASE3で5.4dB(A)、CASE4で10.4dB(A)の低減効果があることが推定された。

図4-8に軌道中心から12.5m地点における各ケースのピーク騒音レベル（平均値）の推定値と在来線における実測値（リオンNL04で測定）を示す。同図は、図4-7で得られた推定値の検証のために、構造形式が本模型桁と類似し、支持条件がCASE2と同等の在来線の鋼鉄道橋の実測値と比較を行ったものである。ここで、在来線騒音は、転動騒音や主電動機ファン騒音などが考慮すべき主要な音源として挙げられる<sup>1)</sup>。しかし、実測を行った区間が直線区間であることや鋼鉄道橋の構造物音の寄与率が転動騒音を上回る事例も報告されていることなどから<sup>4)</sup>、実測値には主桁ウェブが構造物音に大きく寄与しているものと推察される。したがって、推定値には主桁ウェブの影響しか考慮されていないが、推定値の信頼性を評価する一つの指標にはなりうると思われる。CASE2の推定値と実測値を比較することにより、推定値はある程度信頼性があることを確認することができた。さらに、参考までに、図4-8には、弾直軌道が敷設されたRCラーメン高架橋（鋼下路桁から起点側へ100m程度の位置、直線区間）の実測値も示した。これにより、本研究で開発したダブルフローティング型鋼鉄道橋により、弾直軌道が敷設されたRCラーメン高架橋と同等、もしくはそれ以下のレベルにまで構造物音を低減できる可能性があることがわかった。

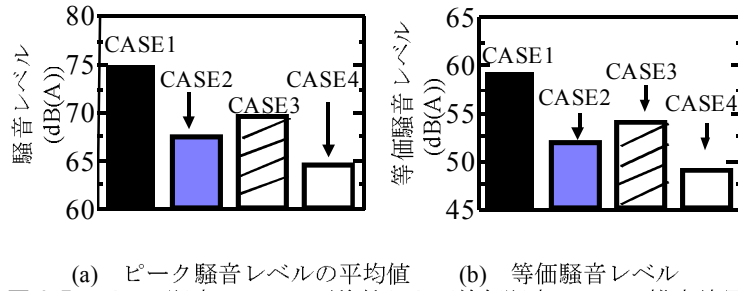


図 4-7 ピーク騒音レベルの平均値および等価騒音レベルの推定結果

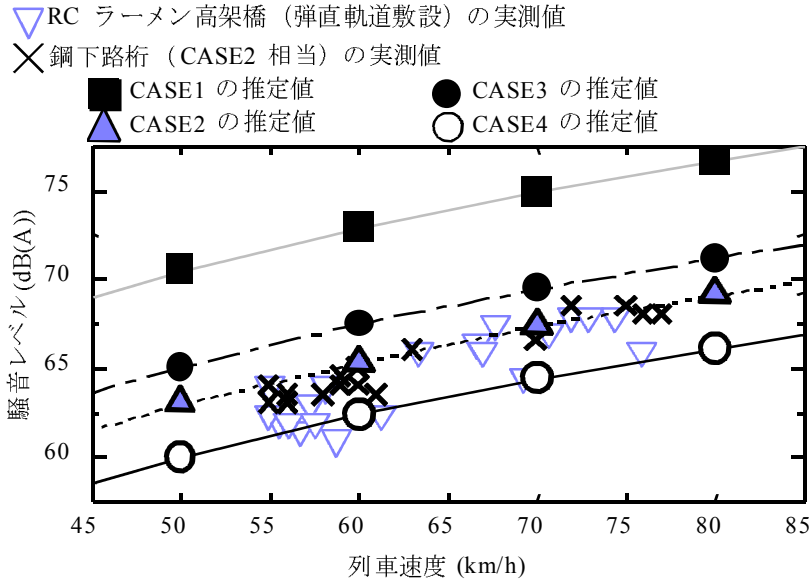


図 4-8 軌道中心から 12.5m 地点における各ケースのピーク騒音レベル (平均値) の推定値と在来線における実測値

#### 4. 4 本章の結論

第 4 章では、構造物音の効果的な対策と考えられている防振軌道について、より騒音が問題になりやすい鋼鉄道橋を対象として、その効果を実証的に論じた。

フローティング・ラダー軌道と弾性支持コンクリート床版を用いた新しい構造形式のダブルフローティング型鋼鉄道橋を開発し、実物大の構造物・軌道模型による走行試験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 実物大模型桁のインパルス加振試験により、剛支持構造と比較してダブルフローティング構造では、主桁ウェブの固有振動数にあたるアクセラランスのピーク値を低減できることがわかった。また、およそ100Hz以上ではフローティング・ラダー軌道、50Hz～100Hzではフローティング床版の低減効果が得られ、ダブルフローティング構造ではそれらを包含する形で低減効果が得られることがわかった。このように、重量級のマス・スプリングシステムにより、より低い周波数領域で低減効果を得られることがわかった。

- (2) 実物大模型桁のインパルス加振試験により、アクセラランスが最も大きくなる部材は、主桁ウェブであることを確認した。また、主桁ウェブの卓越周波数はおよそ50Hzであり、これはアレ配置した加速度計を用いたモード分析によりウェブの一次の固有振動数であることがわかった。
- (3) 実物大模型桁の列車走行試験により、構造物音と密接な関係にある主桁ウェブの振動速度レベルの低減効果を定量的に評価した。剛支持構造に対して、フローティング・ラダー軌道では7.5dB(A)、フローティング床版では6.1dB(A)、ダブルフローティング構造では10.1dB(A)の振動速度レベルの低減効果を確認した（列車速度約40km/h）。
- (4) 騒音予測手法と上記列車走行試験結果に基づき、軌道中心から12.5m地点におけるピーク騒音レベルおよび等価騒音レベルを予測した。剛支持構造に対して、ダブルフローティング構造では、ピーク騒音レベルで10.5dB(A)、等価騒音レベルで10.4dB(A)の低減効果が得られると推定した（列車速度70km/h換算）。

以上のように本章では、防振軌道の防振効果を実物大の構造物・軌道模型を用いた走行試験および営業線における走行試験を行い、その防振効果を定量的に明らかにした。本章で得られた知見を前提条件として、第5章および第6章において鉄道RC高架橋の構造物音発生メカニズムの解明とその低減対策の検討を行うこととした。

なお、本章における一連の研究は、国土交通省の補助金を受けて実施した。

#### 参考文献

- 4-1) 善田康雄他：現場技術者と設計者のための実用騒音・振動制御ハンドブック，pp.681-692，エヌ・ティー・エス，2000
- 4-2) 奥田広之，浅沼 潔，松本信之，涌井一：フローティング・ラダー軌道の耐荷性能と環境性能の評価，鉄道総研報告，pp.9-14，Vol.17，No.9，2003.9
- 4-3) 涌井 一，松本信之，奥田広之，浅沼 潔：フローティング・ラダー軌道の性能と用途，新線路，pp.24-26，Vol.56，No.5，2002.5
- 4-4) 半坂征則，杉本一朗，長倉 清，間々田祥吾：鋼構造物騒音の部材ごとの寄与度解析および対策材料の検討，鉄道総研報告，pp.21-26，Vol.21，No.2，2007.2
- 4-5) 北川敏樹，長倉 清，緒方正剛：在来鉄道における騒音予測手法，鉄道総研報告，pp.41-46，Vol.12，No.12，1998.
- 4-6) 環境庁在来鉄道騒音指針検討会：在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての騒音対策の指針について，1995
- 4-7) 小芝明弘，阪本謙二，内藤 繁，志村雄三：制振鋼板を用いた低騒音鋼橋の研究，鉄道総研報告，pp.27-34，Vol.7，No.2，1993.2

## 5章 鉄道 RC ラーメン高架橋の構造物音発生メカニズムの解明とその低減対策

### 5.1 本章の概要

第5章では、本研究で対象とする鉄筋コンクリート（以下、RC という）ラーメン高架橋の構造物音に関して、車両/軌道/構造物の各種パラメータの影響を考慮可能な汎用的な解析手法を構築し、RC 高架橋の部材振動特性を解明する。さらに、本解析手法を用いて with/without 分析により、車両/軌道/構造物の各種パラメータが部材の周波数応答特性に及ぼす影響を明らかにし、RC 高架橋の構造物音発生メカニズムの解明、並びに列車速度、周波数、加速度パワースペクトルによる 3D グラフの構築により解析結果の可視化を行う。本章は本論文の中核をなす部分となる。

第2章でも整理した通り、鉄道における沿線騒音のうち、列車走行による構造物音は、車輪およびレールの表面に必ず存在する数  $\mu\text{m}$  オーダーの凹凸や線路方向の波長数 m オーダーの軌道変位などに起因して発生する変動作用力（以下、加振力という）が車輪とレールを振動させ、その振動がまくらぎや軌道スラブなどの軌道構造、さらに軌道を支持する土木構造物に伝わり、各部材の振動面から音が放射されることによって発生する。コンクリート高架橋や橋梁における構造物音は、一般に数十 Hz～1000Hz の範囲の周波数成分で決まり、高速鉄道では、その中でも 200Hz よりも低い周波領域が支配的になると言われている<sup>5-1),5-2)</sup>。

構造物音に関する研究はこれまでも多くなされてきたが、鋼橋などに比べて比較的剛性の大きな RC 高架橋およ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状である。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。RC 高架橋の構造物音の問題は、同じような構造形式の高架橋が新幹線の路線延長の大半を占めることから喫緊の課題であるといえる。

現在実務で用いられている構造物音の予測手法は、構造物の計測データから伝達関数などを介して加振力を逆算し、これを用いて行う手法や、部分的な解析モデルを用いたものが主であり、車両、軌道、構造物の任意の諸元を精緻にモデル化できる手法は存在しなかった。また、このような実測応答に基づく手法は、パラメータが異なるような新形式の車両、軌道、構造物へは対応しづらいという課題がある。

そこで筆者らは、構造物音シミュレーションモデルとして、従来のような実測応答に依らない、**図 5-1** に示すような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新たに構築することとした。

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播を解析することとなる。このような手法によれば、振動および音の伝播系に存在するさまざまなパラメータの影響を取り入れた数値実験を行うことができるメリットがある。例えば、実測データの蓄



積がない新形式の車両、軌道および構造物が開発された場合や対策工を実施した場合の影響などを定量的に評価することが可能となるとともに、走行試験などでは設定が難しい列車速度においてもそれらの評価が可能となる。しかしながら一方で、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。本研究では前者のメリットを優先し、今後実際の線区における具体的な対策工の提案などに繋げていく予定である。

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。

構造物音は、列車走行により発生した変動作用力が車両、軌道、構造物と伝播し、構造物の表面から音が放射される現象である。その発生メカニズムの解明には、振動伝播系を構成する車両、軌道、構造物の各種パラメータの影響を定量的に明らかにする必要がある。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に着目し、基礎的な検討を行ってきた<sup>5-3)</sup>が、解析精度や予測手法としての実用性の観点から、解析手法の高精度化、効率化、パラメータ分析の深度化を引き続き検討を進めていく必要がある。また、今後列車がさらに高速化した場合を想定して、高速域における構造物音への影響や対策方法の検討を行う必要がある。

本章では、筆者らが構築する構造物音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について、以下の点に着目して新たに検討を行った。なお、解析手法の妥当性の検証は、部材振動および沿線騒音の実測データを用いて行うが、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、車両/軌道/構造物の各種パラメータの影響を検討する際には、構造物の部材振動に着目して評価することとした。

- (1) 加振源から構造物音放射面までの振動伝播系に介在するパラメータの影響を効率的に把握していくために、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) 上記モデルを用いて、高速列車通過時の各部材の応答について、200Hz までの振動を対象とした現象解明を行う。
- (3) さらに、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。
- (4) 列車速度、周波数、加速度パワースペクトルによる 3D グラフによる解析結果の可視化を行い、各列車速度における構造物の応答ピークに関する構造物音発生メカニズムを定量的に明らかにする。

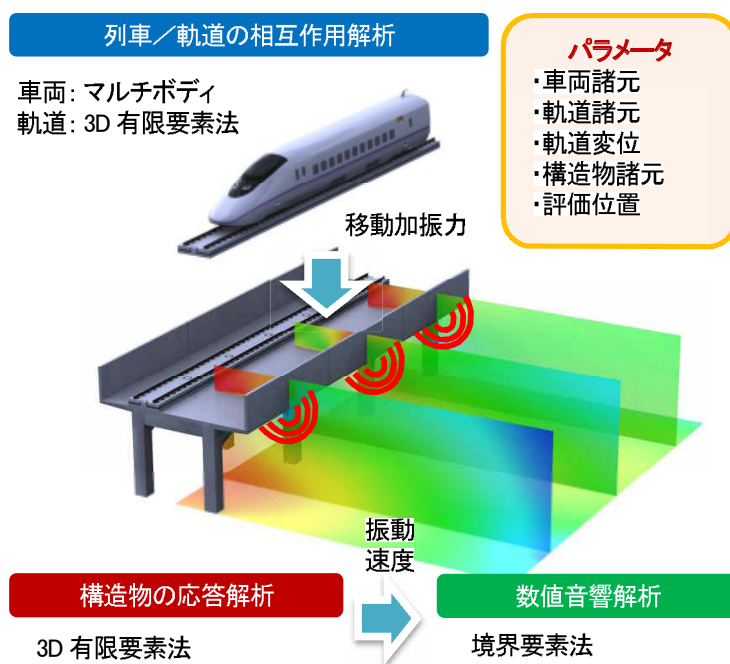


図 5-1 構造物音シミュレーションモデルの概要

## 5. 2 解析手法

### 5.2.1 解析手法の概要

図5-2に解析対象構造物を示す。表5-1に各要素の材料定数を示す。対象構造物は、ブロック長25mの標準的な3径間RCラーメン高架橋と前後のスパン10mの調整桁である。RCラーメン高架橋は、径間は7.875m+8.1m+7.875m、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、高欄高さは2m(直壁形)、縦梁断面は0.85m×1.4m、横梁断面は0.85×1.3m、路盤コンクリートは2.5m×0.25mである。基礎形式は杭形式(RC打込み杭)で直径0.35m、長さ7.0m、本数は1柱当たり13本である。軌道構造は、一般的な普通スラブ軌道である。

図5-3に解析モデルの概要を示す。前述のとおり構造物音は大規模かつ複雑な連成問題であり、対象とする周波数帯は数Hz～200Hz程度までとなり、マルチスケールの問題である。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、変動作用力(加振源)となる車両のばね下質量およびレールの高い周波数領域までの振動を再現する必要があり、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。しかしながら一方で、車両/軌道/構造物のそれぞれの振動特性に着目すると、軌道は概ね100Hz以上に振動モードを持つが、構造物については100Hzよりも低い周波数領域に数多くの振動モードが存在する。このように卓越周波数帯の違いに着目すると、マルチスケールの問題でありながら、車両/軌道系と軌道/構造物系の問題は弱連成問題とみなすことができ、両者を分離することによりモーダルリダクションが可能となる。

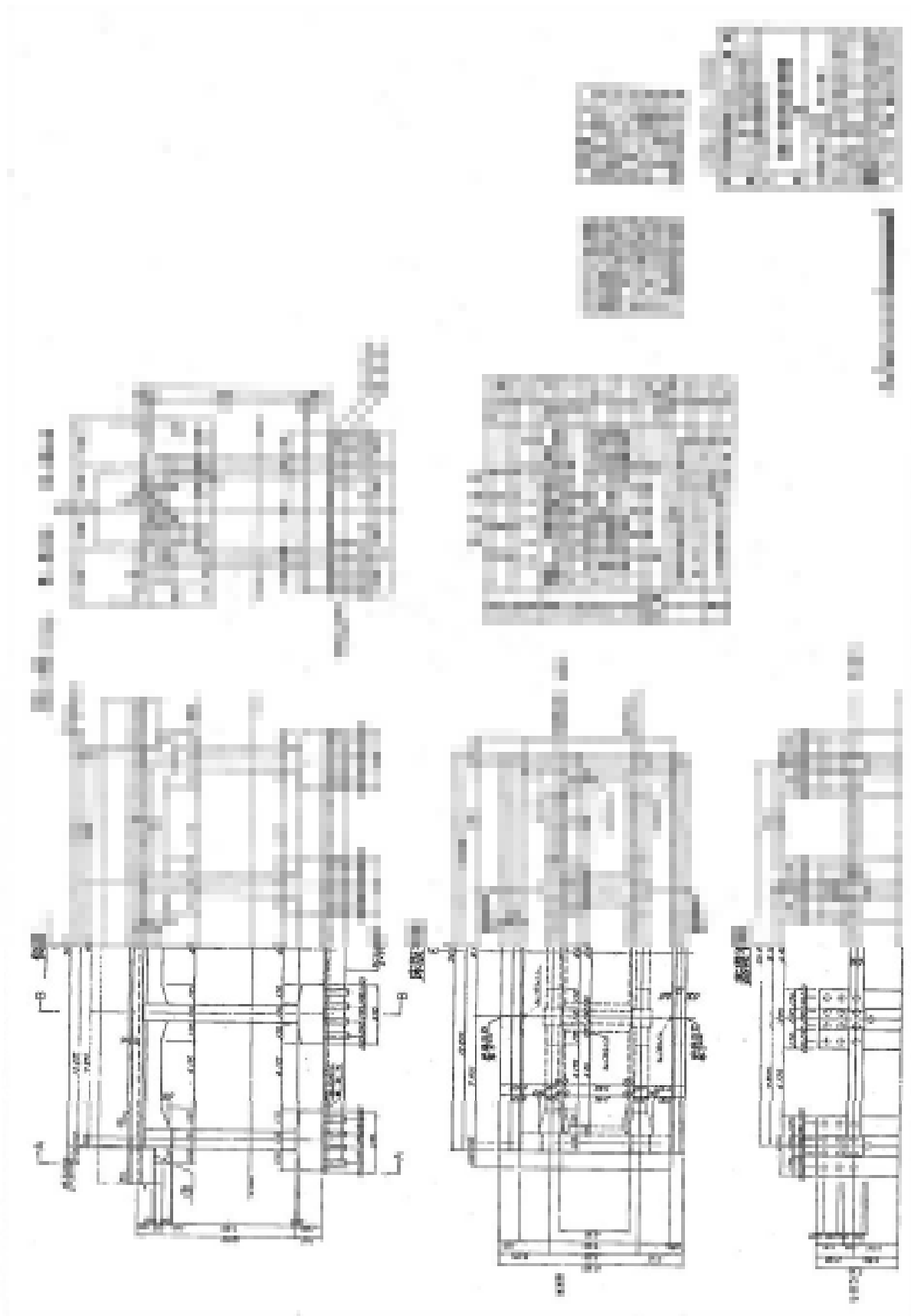
本研究の基礎検討段階においては、構造物音に関わる車両/軌道/構造物の全体系を一体としてモデル化していた<sup>5-3)</sup>(以下、一体型モデルという)。数値解析には鉄道総研開発の車両と鉄道構造物

の動的相互作用解析プログラムDIASTARSIIIを用いていた<sup>5-4)</sup>。しかしながら、後述するが軌道変位に起因すると考えられる20Hz～80Hz程度の周波数帯の応答の再現性は精度の高いものではなかった。これは、多自由度の大規模問題を強連成問題として扱うために、計算機能力の大半を構造物の振動モードに使用することとなり、構造物音の加振源となる車輪/レール間の変動作用力を発生させるレールの振動モードが再現できていなかったのが原因であった。この基礎検討段階の手法は、精度は低いものの解は得られていたが、考慮すべき振動モード次数が膨大となって一度の解析に長時間を要しており、解析時間の観点からも実用的ではなかった。

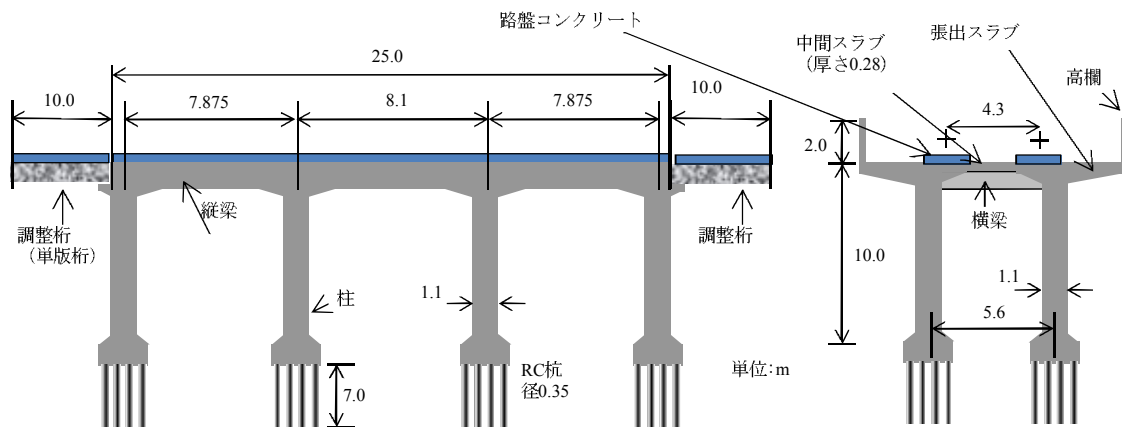
そこで、前述のとおり、卓越周波数帯の違いの観点からスケールの異なるこれらの問題を弱連成問題として扱うこととし、車両/軌道と軌道/構造物とで系を分割し、前者のモデルで加振力を求め、これを後者のモデルに入力して構造物の部材振動を求めることとし、加振力の受渡しは別途構築したプログラムで加振力入力ラインへのプリ処理を自動化する手法を新たに構築した(以下、分離型モデルという)。具体的には、一体型モデルでは、図5-3(b)中の加振力入力ライン(ラインA)上に図5-3(a)の車両/軌道モデルを構築していた。分離型モデルでは、ラインAで両者を分離したモデルとした。これにより全体系を同時に解析する場合に比べて、解析自由度を大幅に低減することが可能となり、一体型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。具体的には、一体型モデルで240時間程度要していたものが、分離型モデルでは、車両/軌道系モデルによる加振力計算に30時間程度、軌道/構造物系モデルによる応答計算に0.5時間程度、合計30数時間程度で解析が可能となった。

車両/軌道系解析モデルにおける数値解析には、一体型モデルと同様に、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<sup>5-4)</sup>。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>5-5)</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。

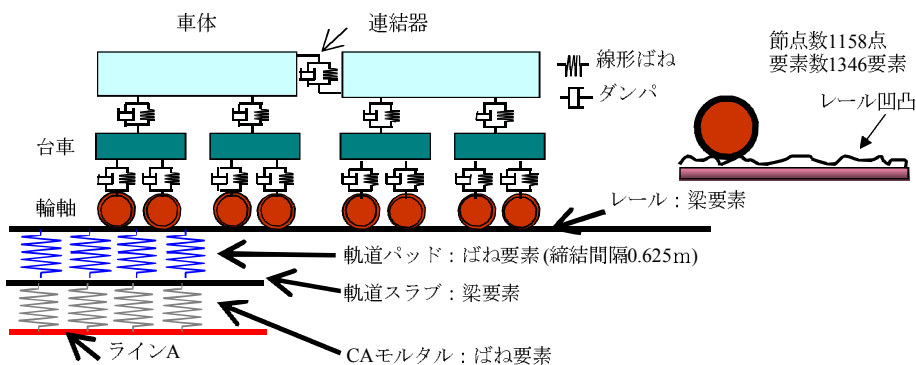


(a) 一般図

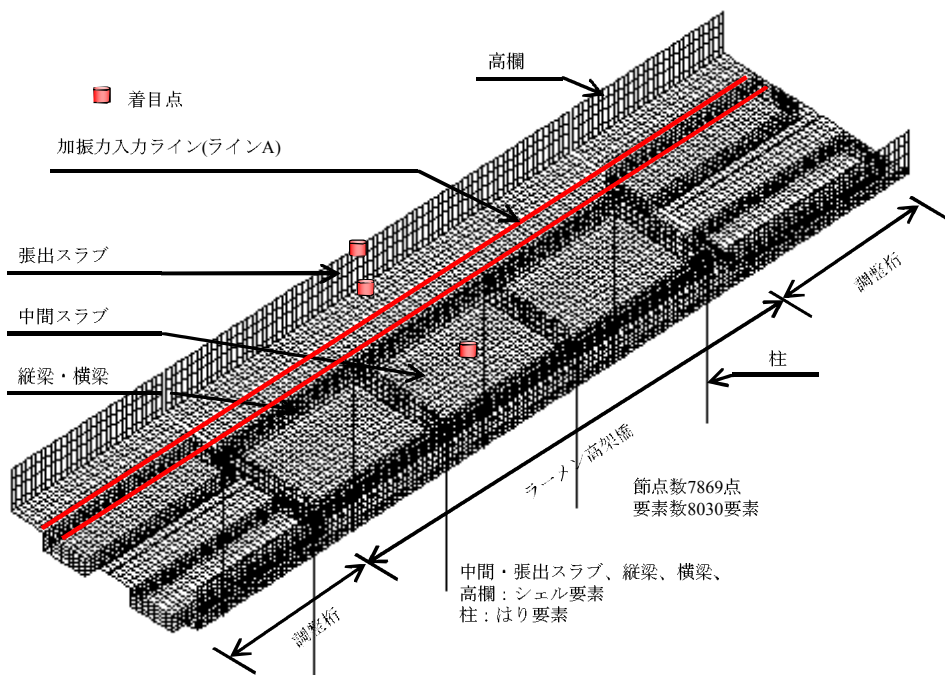


(b) 概略図

図5-2 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5-3 解析モデルの概要

表 5-1 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 <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> )	26.5
調整桁 コンクリート	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	25
減衰定数(%) (全てのモードで一律の値)		2%

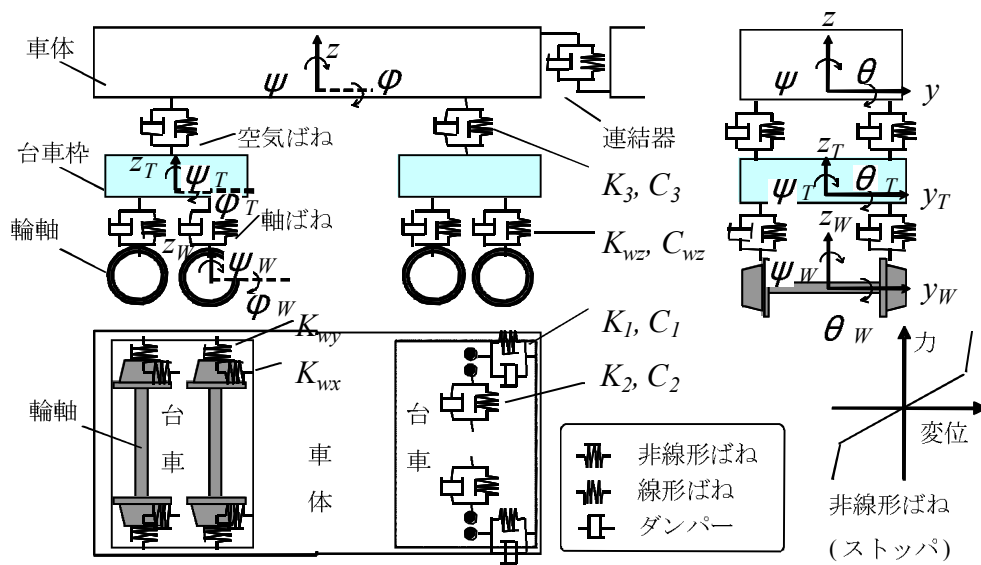


図 5-4 車両の力学モデル

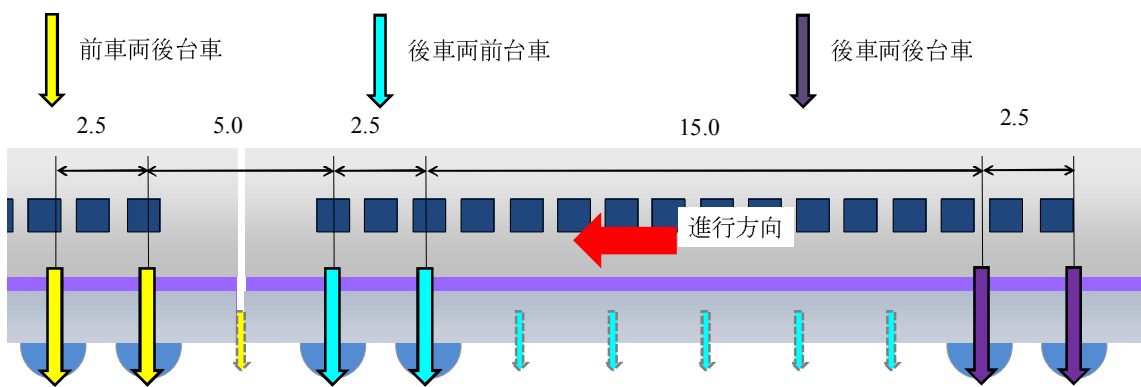
### 5.2.2 車両の力学モデル

図5-4に車両の力学モデルを示す。図5-4に車両の軸配置の概要を示す。車体、台車および輪軸を剛体と仮定し、それらをそれぞれの特性に応じたばね $K_N$ とダンパ $C_N$  ( $N$ は図5-4中の記号)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(車体5自由度、台車5自由度、輪軸4自由度)を有する。列車は、車両モデルを車端に設けたばね $K_c$ とダンパ $C_c$ 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。また、図5-5(b)および(c)には、パラメータスタディで使用した軸配置も併せて示した。25mの新幹線車両は、軸距が2.5m、前後台車中心間距離が17.5m、連結器を挟む台車中心間隔が7.5mとなっている。このように、すべての軸配置が2.5mの倍数となっているのが特徴的である。

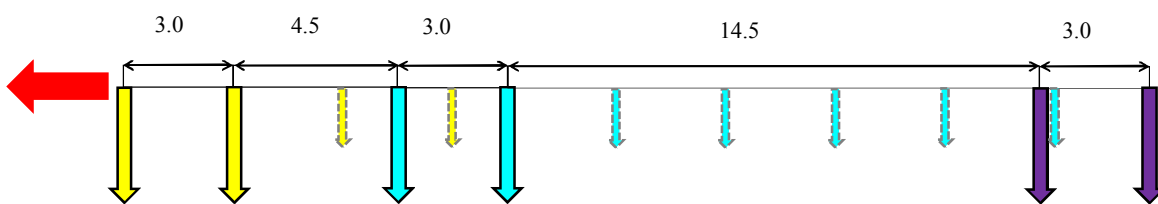
### 5.2.3 軌道および構造物の力学モデル

軌道および構造物は有限要素法によりモデル化する。このため、任意の形状をモデル化することが可能である。車両/軌道系モデルでは、図5-3(a)に示すように、レールおよび軌道スラブをはり要素、軌道パッドおよび軌道スラブ下の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など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。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<sup>5-6)</sup>を参考に、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5-3(b)に示すように、高欄、張出スラブ、中間スラブ、縦梁および横梁はシェル要素、柱、はり要素でモデル化した。軌道部材については、重量のみを考慮し、スラブに付加した。事前の検討より、地中梁や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かったので、モデル化を省略することとし、柱下端を固定とした。

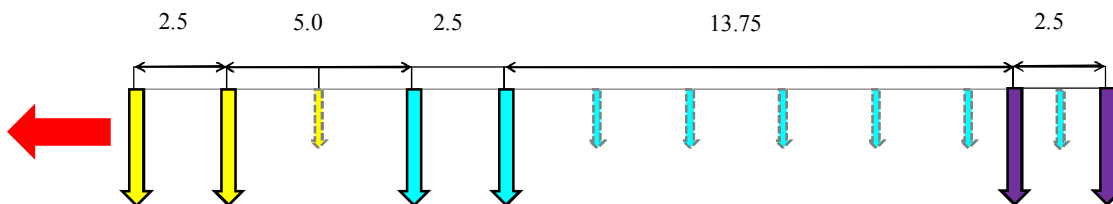
両者のモデルともに、メッシュ刻みはレール締結間隔(0.625m)の1/4間隔に相当する0.15625mを基本とした。車両/軌道系モデルでは総節点数1158点、総要素数1446要素、軌道/構造物系モデルでは総節点数7953点、総要素数は7946要素である。



(a) 基本配置



(b) 軸距変更 (2.5m→3.0m)

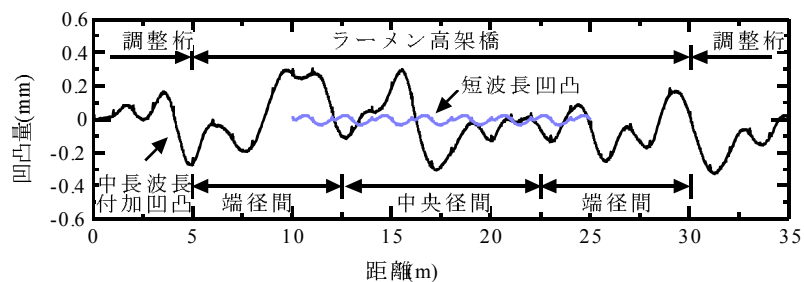


(c) 前後台車間距離変更(15.0→13.75m)に伴う

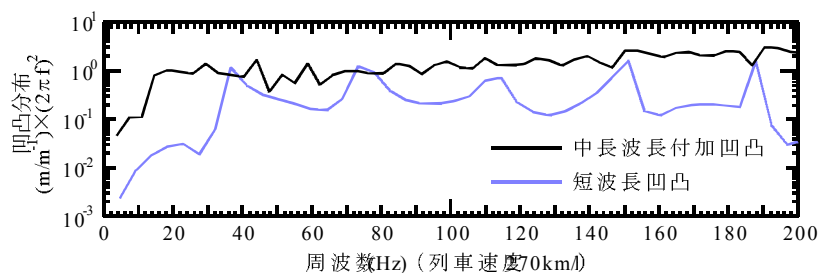
車両長(25.0→23.75m)変更

図 5-5 車両の軸配置の概要





(a) 凹凸量と距離の関係



(b) 凹凸分布と周波数（速度 270km/h）の関係

図 5-6 解析に用いたレール凹凸

## 5.2.4 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およ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、接触後はレールに輪重と横圧が作用することになり、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 5-6 に解析に用いたレール凹凸を示す。一体型モデルでは、解析対象構造物上のスラブ軌道において、長さ 1m の測定機を用いて測定した 2m 分の凹凸（以下、短波長凹凸という）を繰り返して与えていた。しかしながらこれでは、波長数  $m$  オーダーの軌道変位に起因する加振力が不足していると考え、分離型モデルでは、解析対象構造物上ではないが、在来線のスラブ軌道において実測した短波長凹凸に新たに測定した 10m 分の軌道変位を足し合せ、長い波長成分を付加した（以下、中長波長付加凹凸という）。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。10m 分の軌道変位の計測方法としては、マグネットスタンドをレール上に固定し、それらを両端の不動点とし、水準糸に十分張力をかけた状態で両者を結ぶ。そして、1m ピッチごとに水準糸に差し金を当て、その状態を 1600 万画素のデジカメで撮影し、これを画像分析したうえで、さらに水準糸の自重によるたわみを補正して 10m 分の軌道変位を得た。本方法は簡易な計測方法であり信頼性については検証の余地が残るが、数  $m$  単位のレール凹凸を直接計測できる適切な方法は現在のところ存在しないのが実状であり、本研究では、この軌道変位を適用することとした。なお、鉄道の軌道管理の分野では軌道検測車などによって軌道変位を測定する技術が存在するが、本解析のような音響解析を対象とする数  $mm$  単位以下の微小な凹凸量を

表 5-2 解析ケース

CASE	パラメータ										
	車両				軌道				構造物		
	車両モデル	質量	軸距 (m)	車両長 (m)	レール凹凸	パッド剛性 (MN/m)	締結間隔 (m)	軌道スラブ	スラブ剛性	非構造部材剛性 <sup>***</sup>	減衰 (%)
1 <sup>*</sup>	31自由度	設計値	2.5	25	考慮	60	0.625	普通スラブ	設計値	非考慮	2
2-1	荷重列	静輪重	2.5	-	-	60	0.625	普通スラブ	設計値	非考慮	2
2-2	31自由度	30%減	2.5	25	考慮	60	0.625	普通スラブ	設計値	非考慮	2
2-3	31自由度	設計値	3.0	25	考慮	60	0.625	普通スラブ	設計値	非考慮	2
2-4	31自由度	設計値	2.5	23.75	考慮	60	0.625	普通スラブ	設計値	非考慮	2
3-1	31自由度	設計値	2.5	25	非考慮	60	0.625	普通スラブ	設計値	非考慮	2
3-2	31自由度	設計値	2.5	25	考慮	30	0.625	普通スラブ	設計値	非考慮	2
3-3	31自由度	設計値	2.5	25	考慮	60	連続	普通スラブ	設計値	非考慮	2
3-4	31自由度	設計値	2.5	25	考慮	60	0.625	防振スラブ	設計値	非考慮	2
4-1	31自由度	設計値	2.5	25	考慮	60	0.625	普通スラブ	5倍	非考慮	2
4-2	31自由度	設計値	2.5	25	考慮	60	0.625	普通スラブ	設計値	考慮	2
4-3	31自由度	設計値	2.5	25	考慮	60	0.625	普通スラブ	設計値	非考慮	5

\*CASE1は基本ケース

\*\*\*非構造部材の剛性、コンクリートのヤング係数が設計値より大きくなる場合があることを総合的に考慮

※列車速度は160~370km/hで10km/h刻み。270km/hを基本に各ケースを比較

計測する精度があるとは言い切れないため、本研究では前述の簡易な計測方法による軌道変位を適用した。

### 5.2.5 数値解析法

効率的な数値解析を行うために、車両、軌道および構造物に関する運動方程式をモーダル変換する。得られる車両およ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。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、解析時間刻みは 0.0005sec とした。また、周波数分析は 4096 点（観測時間約 2 秒、 $\Delta f=0.49\text{Hz}$ ）とした。

### 5.2.6 解析ケース

表 5-2 に解析ケースを示す。車両/軌道/構造物の各種パラメータに着目した。CASE1 を基本ケースとする。列車速度は各パラメータに影響するので、各ケースに対して列車速度を 160~370km/h で 10km/h 刻みで計算した。

CASE2 は車両に関するパラメータで、CASE2-1 は、車両の振動系の影響を検討するために、車両を図 5-5 で示した 31 自由度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（荷重間隔は車両の軸配置同等）とした。CASE2-2 は、車両の質量の影響を検討するために、車

体、台車、輪軸の質量を一律30%減少させ、ばね定数はそのままとした。CASE2-3およびCASE2-4は車軸配置の影響を検討するために、軸距および車両長を変更した。図5-5(b)および(c)に示すように、軸距変更は前車両後台車2軸の加振ピッチと後車両前台車2軸が逆位相になるように、車両長変更は当該車両前台車2軸の加振ピッチと同車両後台車2軸の加振ピッチが逆位相になるように長さを変更した。

CASE3は軌道に関するパラメータで、CASE3-1はレール凹凸の影響を検討するために、図5-6に示した凹凸を与えずに平滑なレール上に車両を走行させた。CASE3-2は軌道パッドの低ばね化の影響を検討するため、ばね定数を1/2にした。CASE3-3はレール締結間隔の影響を検討するために、通常間隔0.625mのレール締結間隔を連続支持した状態に変更した。その際、レールに相当するはり要素の各節点すべてにばね要素を配置して連続支持を模擬した。ただし、単位長さ当たりの軌道支持ばね定数は、基本ケースと同じになるようにした。CASE3-4は軌道スラブの支持剛性の影響を検討するために、普通スラブ軌道から防振スラブ軌道に変更した<sup>5-7)</sup>。その際、図5-3(a)で示したCAモルタルに相当するばね要素のばね定数を弾性材相当のばね定数(100×100×25mmの試験片で2.4MN/m)に変更した。

CASE4は構造物に関するパラメータで、CASE4-1は中間スラブの剛性の影響を検討するために、中間スラブの剛性を5倍にした。この値は、図5-7に示すような現在提案されている中間スラブの補強工法で、実際に曲げ剛性を試験した結果をもとに設定した<sup>5-8)</sup>。本補強工法は、既設の中間スラブの底面にUFCパネルをアンカー筋により吊下げ、軸方向筋と配力筋を設置し、隙間に無収縮モルタルを注入することで、中間スラブの底面を補強する工法である。はつり作業は実施せず、既設スラブと補強部はアンカー筋によって応力が伝達される。CASE4-2は勾配コンクリートや路盤コンクリートなどの非構造部材やコンクリートのヤング係数などの材料定数の違いの影響を検討した。非構造部材については、実構造物の応答および固有振動数に影響を与えることが知られている。また、コンクリートのヤング係数については、骨材の種類や品質の程度および地域によって大きく変動することが知られている。そこでこれらの影響が剛性増加の方向に作用したとして、コンクリートのヤング係数を設計値に対して一律3倍とし、見かけの剛性増加を考慮した。CASE4-3では構造物の減衰の影響を検討するため、構造物の減衰定数を5%とした。このとき、車両/軌道系モデルは2%のままである。

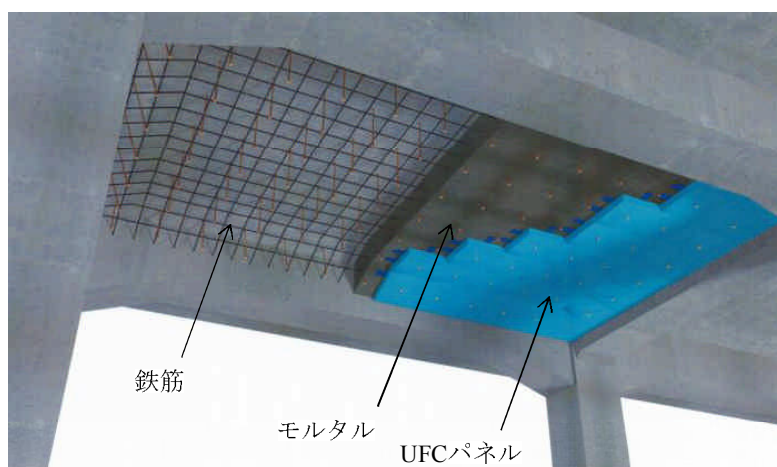


図5-7 中間スラブの補強工法の例

### 5.2.7 解析手法の妥当性の検証方法

解析モデルの妥当性の検証は、実測との比較により行った。比較項目は、列車通過時の応答加速度と各部材の振動モード形である。

図 5-8 に計測対象部材と計測点配置を示す。図 5-3 にも示したように、中間スラブ、張出スラブおよび高欄に着目とし、加速度を大規模アレイ配置し、複雑に連成する構造物の部材振動を明らかにした。加速度計は、振動モードの腹と節になると想定される位置に配置した。加速度計の使用台数は 25 台であるが、各部材の高次の振動モードをとらえること、他の部材との連成の影響を判別することを目的として、25 台の加速度計のうち 5 台程度は当該部材に隣接する部材に設置した。

図 5-9 に RC ラーメン高架橋の部材振動モードの同定手法の概念図を示す。具体的には、列車通過時の振動加速度を計測し、クロススペクトル法により各部材の振動モード形の候補を抽出する。そして、MAC 検定に基づき振動モードを同定するものである<sup>5-9)</sup>。

列車通過時の応答加速度の計測に使用した加速度計は、圧電型加速度計（感度：6.42pC/(m/s<sup>2</sup>）、計測周波数範囲 1Hz～7kHz）を使用し、データ収録はサンプリング周波数 2000Hz で AD ボードを介してノート PC に収録した。ただし、1000Hz 以上の周波数成分はアンチエイリアシングフィルターにより除去した。また、周波数分析は時刻歴波形の列車通過中の 2 秒間を切り出して FFT を行った。

### 5.2.8 解析結果の評価方法

解析結果の評価は、冒頭で述べた通り構造物音の支配的な周波数成分を考慮して、200Hz までの周波数領域を対象として行う。

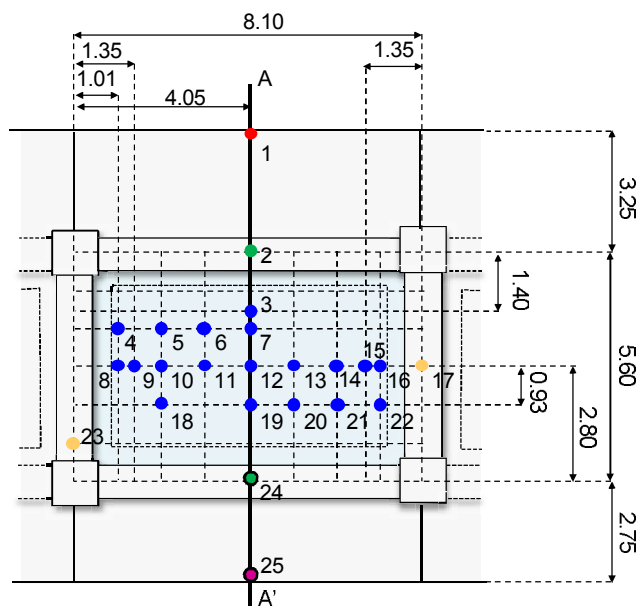
各周波数帯の応答値の評価方法については、加速度のパワースペクトルで評価することとした。ただし、解析手法の妥当性の検証結果を示した 5.3.3 においては、加速度パワースペクトル、振動速度レベルを用いて評価し、さらに、軌道中心から 12.5m 地点の音圧レベルの結果も合わせて示すこととした。なお、音圧レベルの計算は数値音響解析プログラム SYSNOISE を用いて行った。

音圧レベルと振動速度の関係は式(5.1)および式(5.2)<sup>5-9)</sup>で示される通りであるが、速度ではなく、加速度で評価した理由としては、振動規制法や計量法などにもあるように、ものの振動を評価する場合に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は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などである。

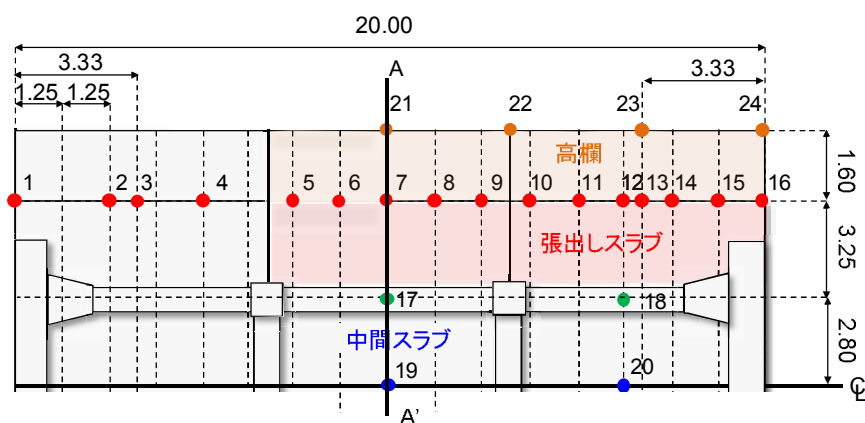
$$L_p = 10 \times \log(W_k / W_0) \quad (5.1)$$

$$W_k = \sigma \rho c \bar{v}_k^2 S \quad (5.2)$$

ここで、 $L_p$  は音圧レベル、 $W_k$  は放射音パワー、 $W_0$  は放射音の基準値、 $\sigma$  は音響放射効率、 $\rho$  は空気の密度、 $c$  は音速、 $\bar{v}_k$  は振動速度実効値、 $S$  は面積を示す。なお、ここではまず周波数ごとの 1 つ 1 つの応答のピークがどのような要因により生じているかを詳細に評価することを目的とした。振動および騒音に関して一般的な表現方法である 1/3 オクターブバンドごとのレベル表記は、共



(a) 計測点配置1 中間スラブ



(b) 計測点配置2 張出スラブ, 高欄

図5-8 計測対象部材と計測点配置

振ピークを平均化してしまうことが懸念されたため、解析手法の妥当性の検証の一部の結果を除き、そのような表現は用いていない。

加振力の評価方法については、力と変位が概ね 1:1 の関係にあるとして、加振力を加速度相当の成分に揃えるために、FFT により求めた加振力の周波数成分に $(2\pi f)^2$ を乗じた。

列車速度の違いが各部材の応答特性に与える影響の評価方法については、解析結果を列車速度、周波数、加速度パワースペクトルによる 3D グラフで可視化することとした。これまでの数値解析および実際の走行試験においては、本研究で実施するような 160km/h~370km/h までを 10km/h 刻みで走行した例はなく、そのような細かい速度で走行試験を行うことは、営業線を利用する以上、現実的に困難であった。本研究では、これまで数ケースの速度が限界であり、応答の個々のピークがどのような要因で生じているか、その解釈などに明快性を欠いたが、本研究では、3D グラフの解像度を上げることにより、ピークの発生メカニズムの実像を浮き彫りにし適切な解釈を

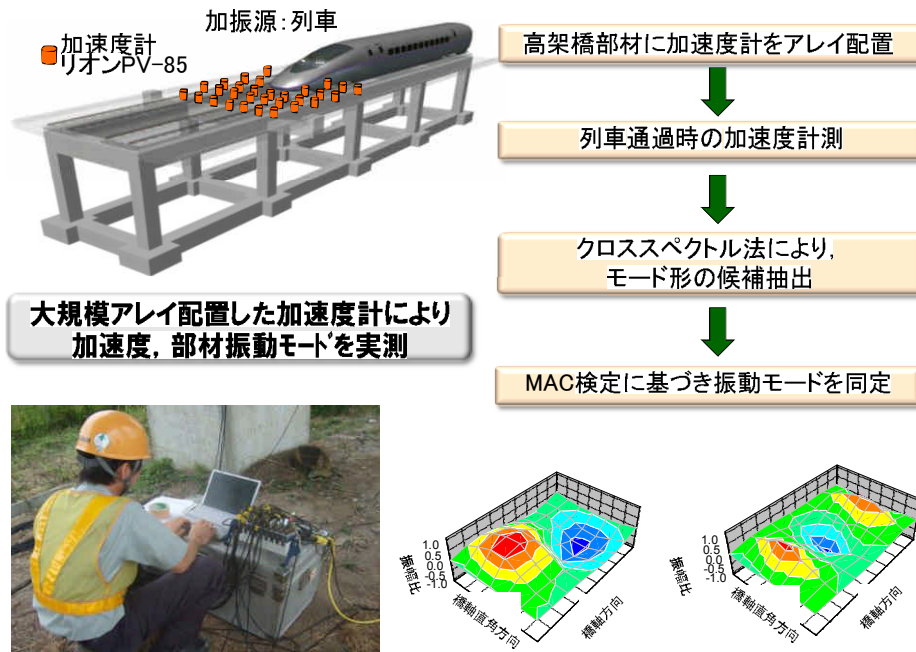


図 5-9 RC ラーメン高架橋の部材振動モードの同定手法の概念図

行うことが可能となる。

なお、本章におけるこれらの解析および評価には、スーパーコンピュータにおける多重並行処理の実現の貢献も大きい。従来、node 単位だった数値計算を、node を構成する 24 個の core に自動的に割り振ることにより、計算効率は 24 倍となった。このようなことから、車両/軌道/構造物の各種パラメータの with/without 分析に加えて、列車速度の検討も効率的に実行することが可能となった。

### 5. 3 基本ケースの解析結果と解析手法の妥当性の実証

#### 5.3.1 振動モード

図 5-10 に解析対象構造物の固有振動モードを示す。図 5-11 および図 5-12 に対象構造物の中間スラブおよび張出スラブ、高欄の固有振動モードの実測結果をそれぞれ示す。計測点は図 5-8 に示した通りである。高架橋全体の線路方向および線路直角方向の固有振動モードは 2.6Hz および 2.7Hz で現れる。ただし、本モデルでは柱下端を固定しており、地盤、地中梁および基礎構造を適切にモデル化すると全体振動モードの固有振動数は変化すると考えられる。張出スラブの振動モードは 11.1Hz で現れる。張出スラブは中間スラブや高欄と連成したモードも数多く存在する。中間スラブの振動モードは、1 次モードが 21.0Hz で現れ、モードが増えるほどモードの腹と節の数が増えていく。

これらの振動モードの実測による検証に関しては、文献 5-10)で詳細に報告しているが、実測に基づく張出スラブの固有振動数は 11.5Hz、中間スラブの 1 次振動モードは 20.8Hz であり、それより高次のモードについても概ね整合しており、解析モデルとしてのある程度の精度は確保されていると考える。



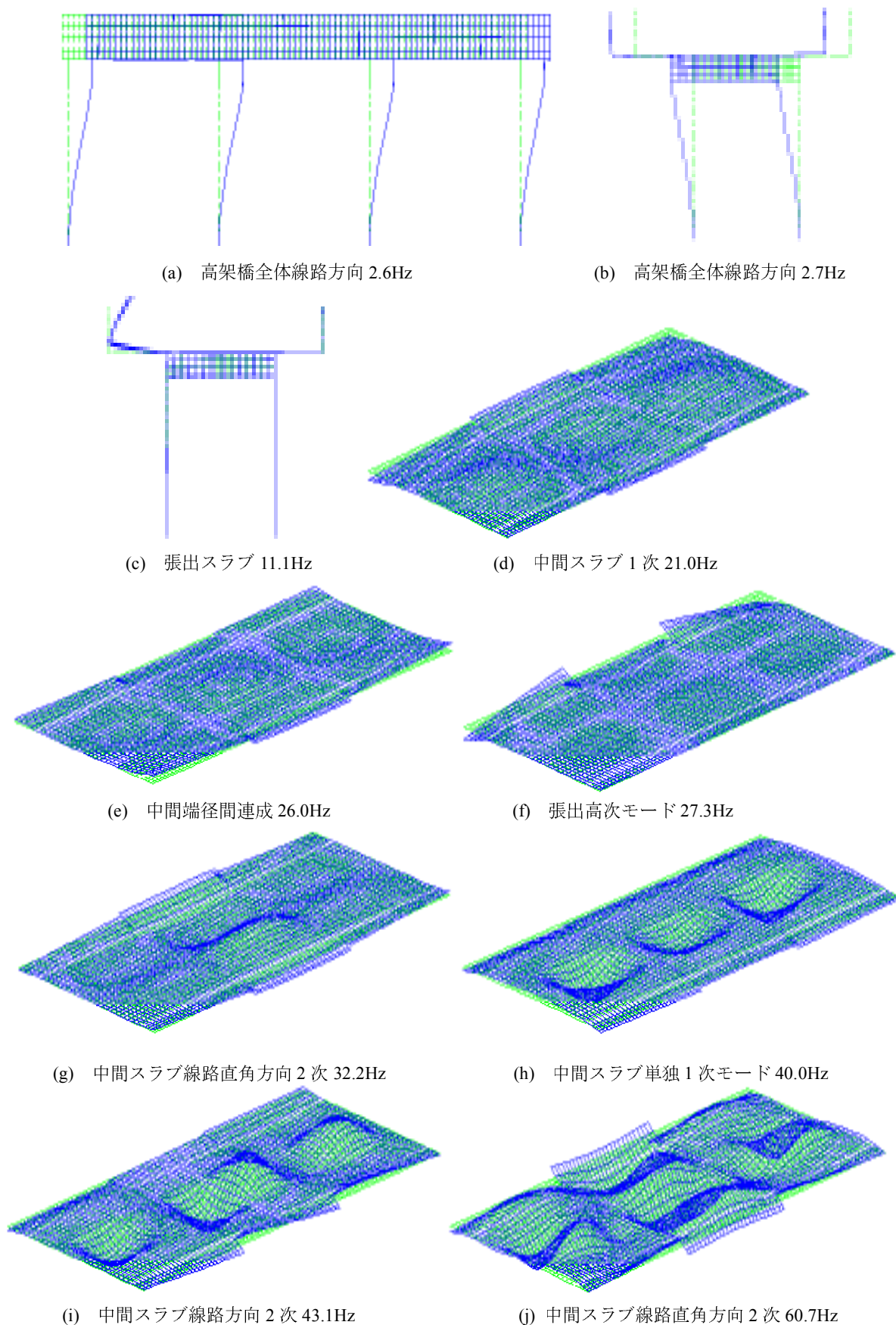


図 5-10 解析対象構造物の固有振動モード

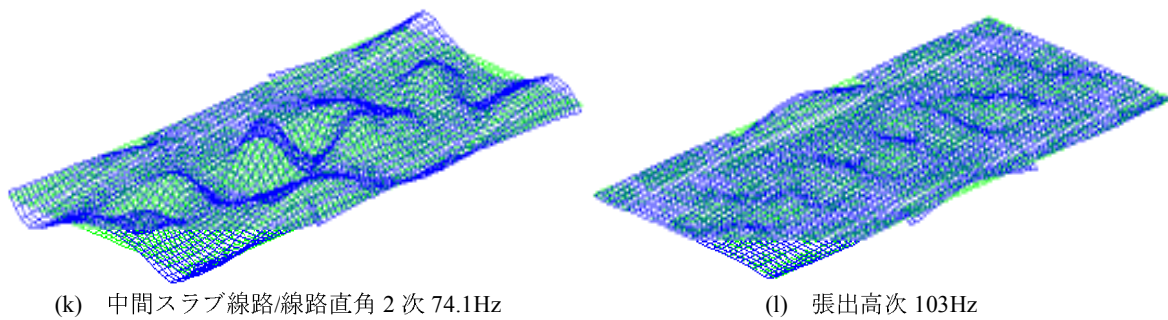


図 5-10 解析対象構造物の固有振動モード

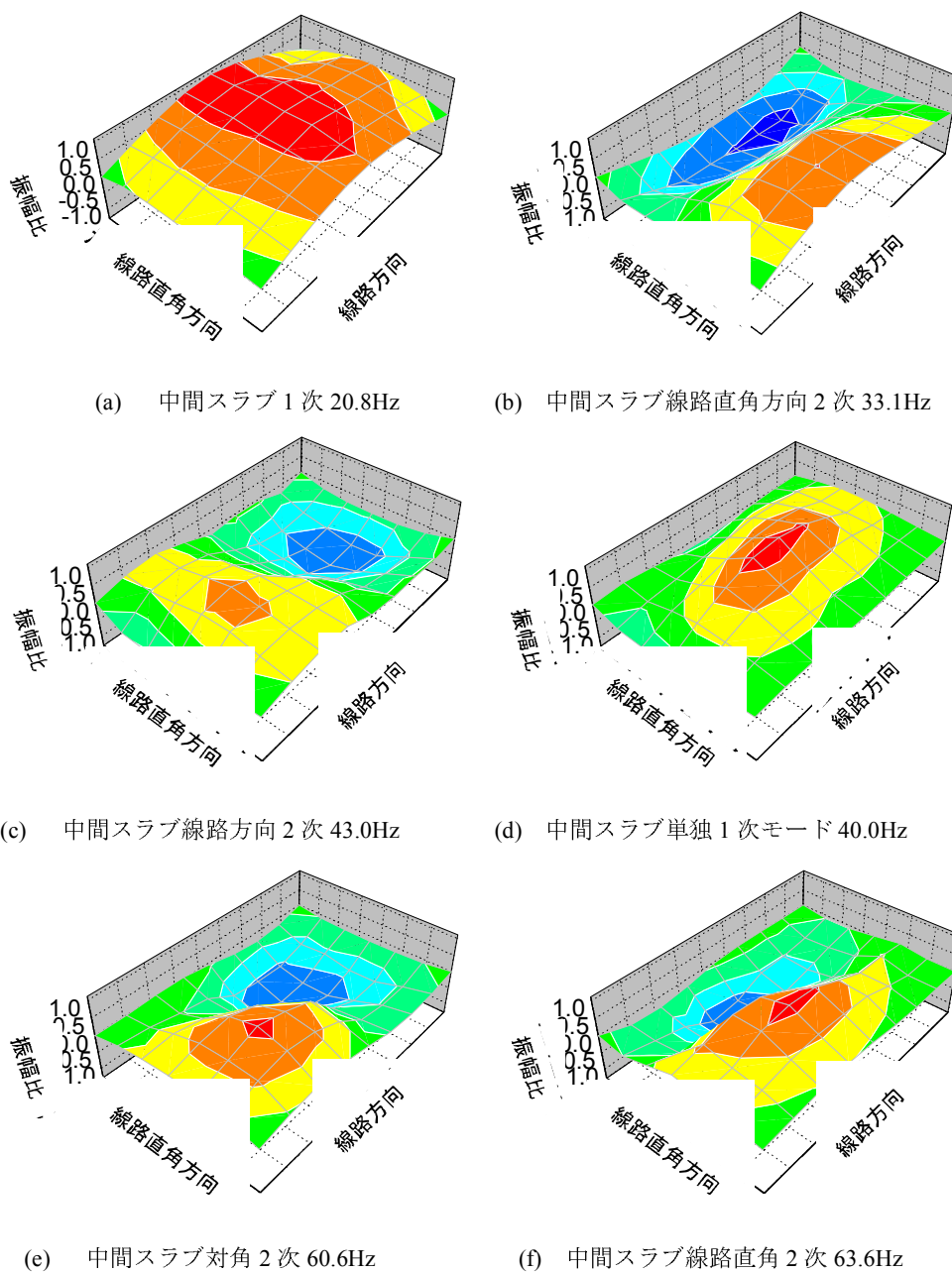


図 5-11 対象構造物の中間スラブにおける固有振動モードの実測結果



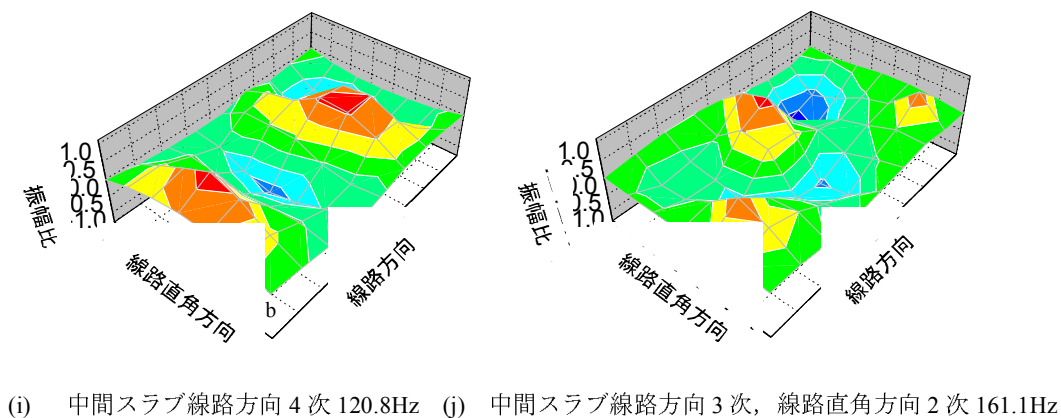
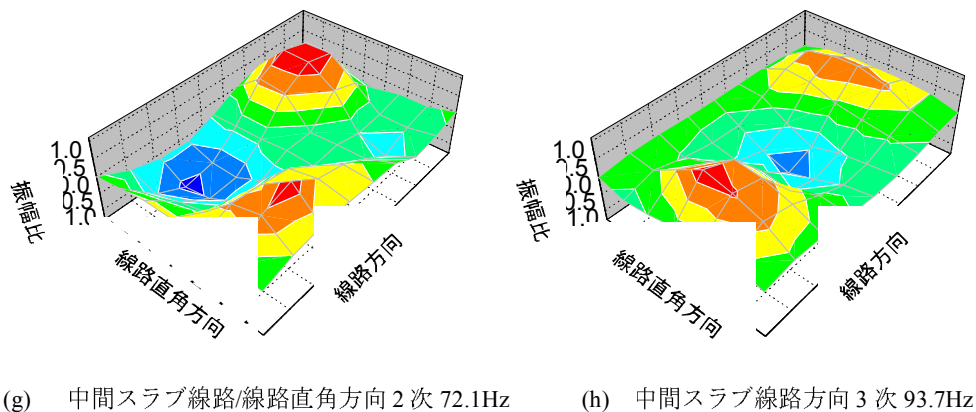


図 5-11 対象構造物の中間スラブにおける固有振動モードの実測結果

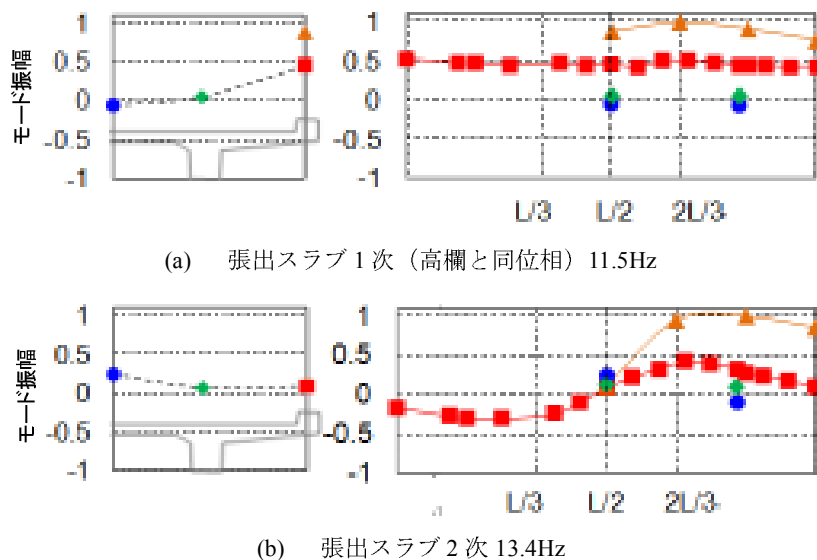
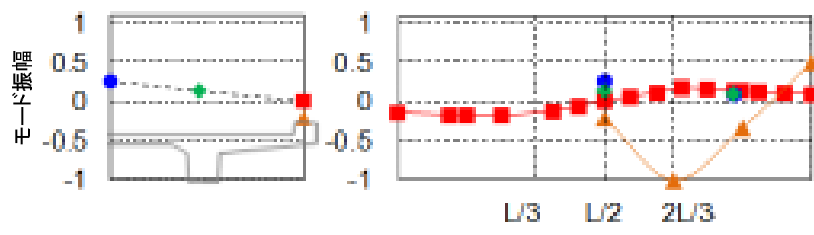
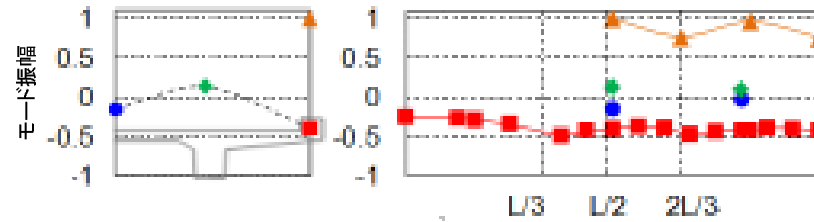


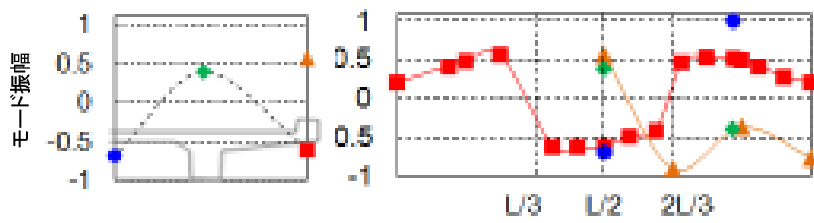
図 5-12 対象構造物の張出スラブ, 高欄における固有振動モードの実測結果



(c) 高欄 2次 20.8Hz



(d) 張出スラブ 1次 (高欄と逆位相) 26.2Hz



(e) 張出スラブ 1次 (伸縮目地を挟む張出スラブ同士が逆位相) 41.3Hz

図 5-12 対象構造物の張出スラブ，高欄における固有振動モードの実測結果

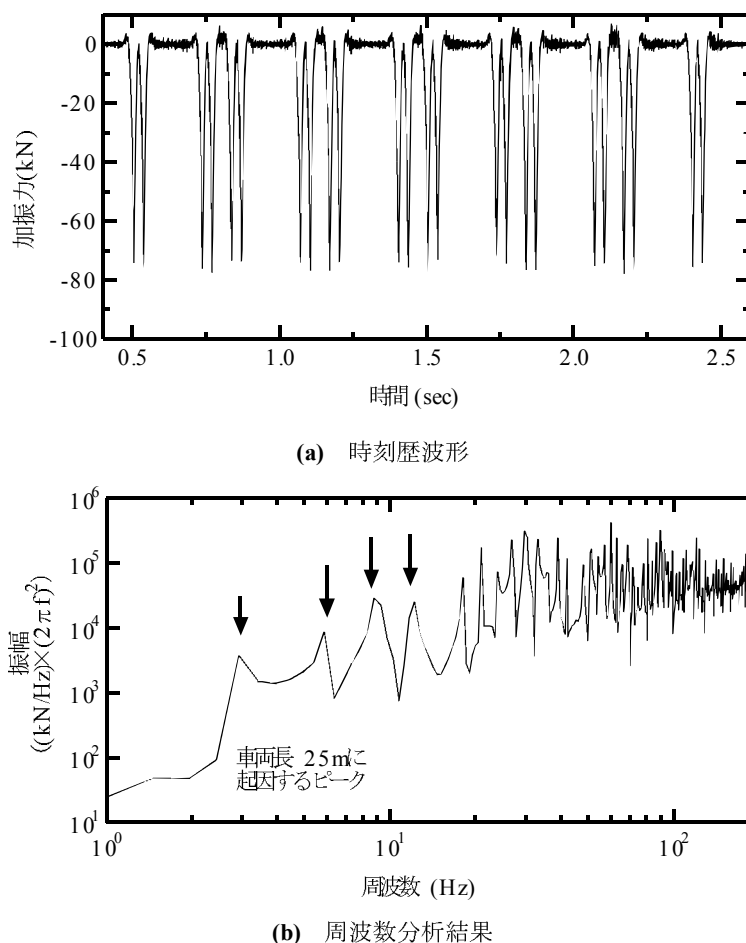


図 5-13 加振力の時刻歴波形と周波数分析結果(270km/h)

### 5.3.2 加振力の特徴

図 5-13 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 つのばね要素のばね反力の時刻歴波形および周波数分析結果を示す。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応答のピークが現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 から決まる基本加振周波数 3Hz ( $= (270/3.6)/25$ ) の整数倍でピークとなっていることがわかる。

分離型モデルでは、このような波形が車両/軌道系解析モデルの CA モルタルに相当する各ばね要素ごとに計算され、これを軌道/構造物系モデルの対応する節点に加振力としてそれぞれ与えることにより、構造物の応答が計算される。

### 5.3.3 各部材の周波数応答特性

図 5-14 に解析対象構造物の中間スラブ、張出スラブおよび高欄における実測と解析の比較を示す。同図 (a) には加速度パワースペクトルの比較、同図 (b) には振動速度レベルの比較を示す。列車速度は 270km/h で、着目点は図 5-3 (b) に示す位置である。実測が有するある程度のばらつきを

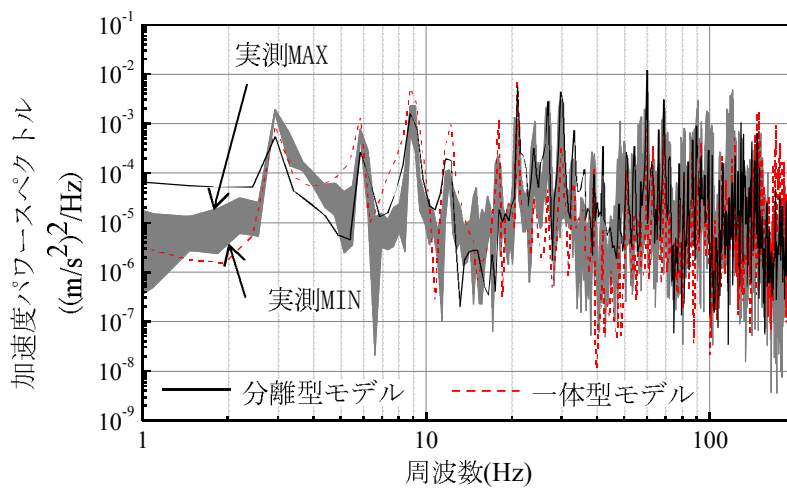
考慮して、解析結果に対して列車 10 本程度（部材ごとに異なる）の実測と比較することとした。

図 5-14 (a) に示すように、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。

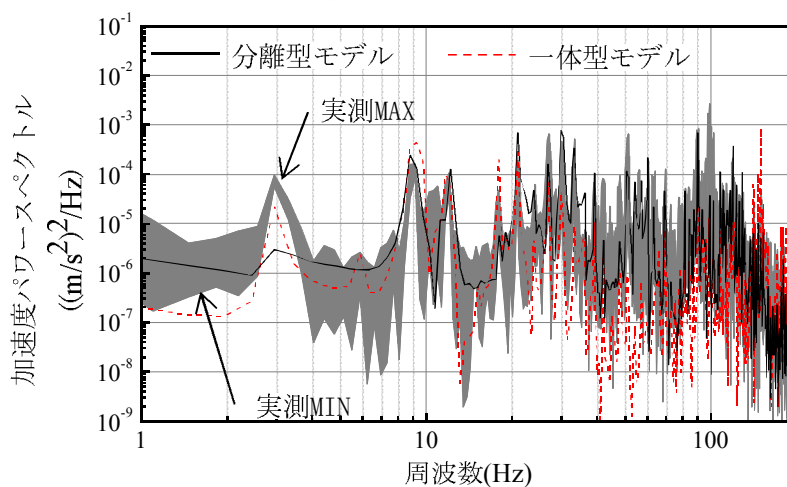
実測と解析を比較すると、各部材ともに解析は実測のばらつきの範囲内に概ね収まっていることがわかる。また、分離型モデルと一体型モデルを比較すると、長い波長成分の凹凸を新たに付加した効果により、概ね 20Hz～70Hz の帯域で分離型モデルは一体型モデルに比べて応答が増加した。

図 5-14 (c) に示すように、解析によって線路中心から 12.5m 地点で地上高さ 1.2m の沿線音圧レベルについても、解析は実測を概ね再現できているが、8Hz より低い周波数帯および 12.5Hz 付近の周波数帯、50Hz 付近の周波数帯において、解析と実測に乖離が見られる。これは、沿線騒音には、構造物音だけではなく、車両空力音や集電系音も含まれているためであると考えられる。このように、本解析手法に実測結果を併用して分析することにより、沿線騒音の全体音に占める構造物音の寄与度の分析を行うことも可能になると考えられる。

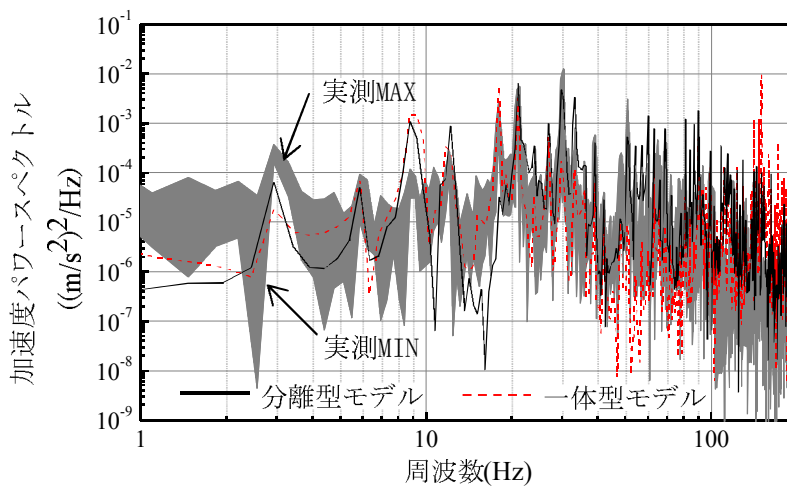
比較対象とした実測は列車速度 270km/h に対してのみであり、今後データの蓄積することにより、その他の速度についても再現性を検証しておく必要はあるが、前述の比較から、本解析手法のある程度の妥当性を確認することができたとして、以降で、各種パラメータの影響検討を行うこととする。



(a)-1 中間スラブ



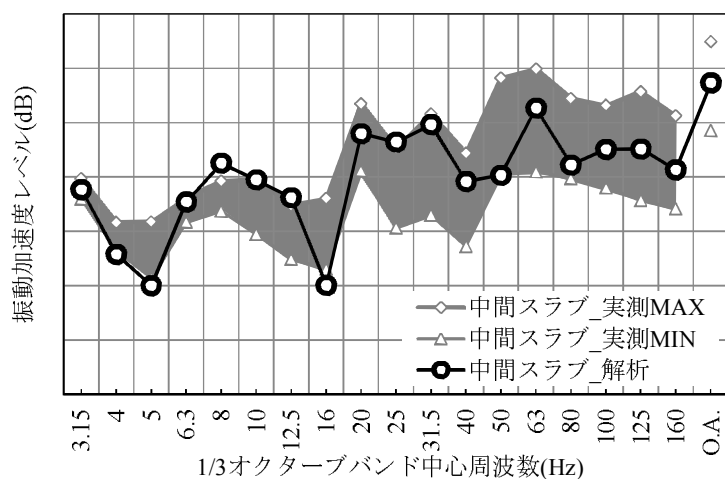
(a)-2 張出スラブ



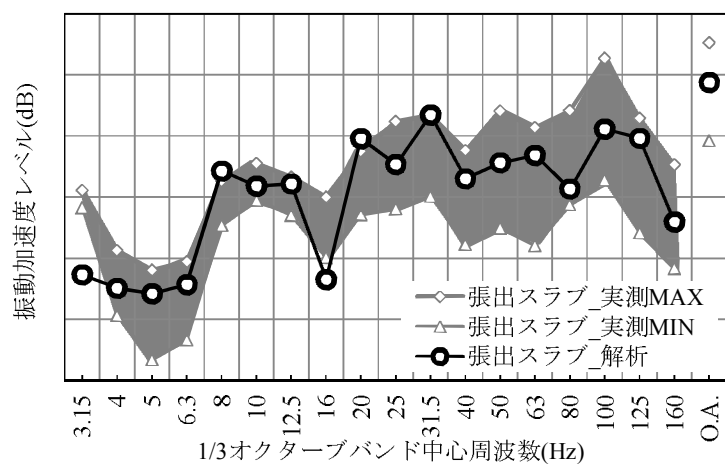
(a)-3 高欄

(a) 加速度パワースペクトルによる比較

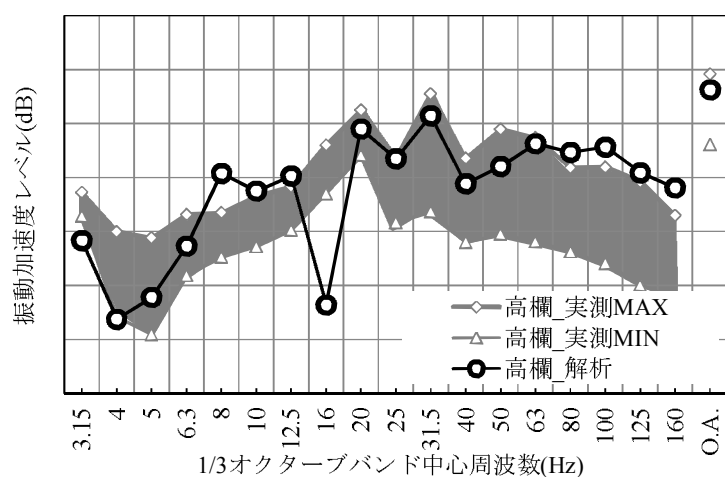
図 5-14 各部材の応答の周波数分析結果に関する実測と解析の比較 (速度 270km/h)



(b)-1 中間スラブ



(b)-2 張出スラブ

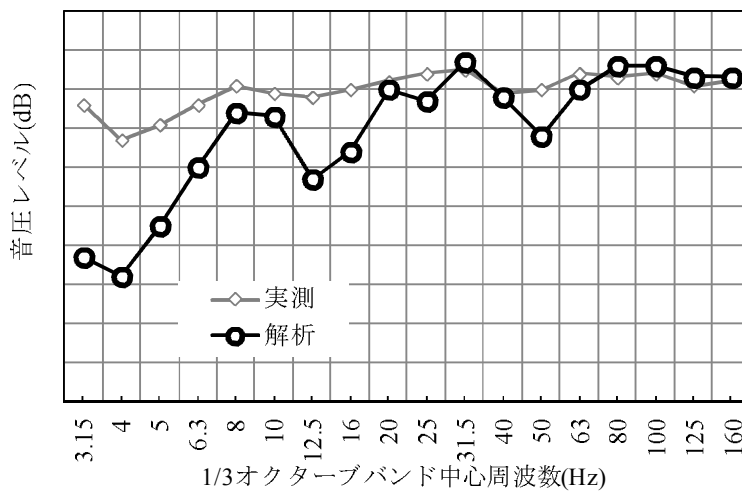


(b)-3 高欄

(b) 振動速度レベルによる比較

図 5-14 各部材の応答の周波数分析結果に関する実測と解析の比較 (速度 270km/h)

※1目盛りは10dB



(c) 離れ 12.5m, 地上高さ 1.2m 地点の音圧レベル

図 5-14 各部材の応答の周波数分析結果に関する実測と解析の比較 (速度 270km/h)

※1 目盛りは 10dB

5. 4 各種パラメータの影響に関する解析結果

列車走行に伴う応答のピークは、列車速度と車両長から決まる基本加振周波数の整数倍ごとに生じる。しかしながら、車両、軌道、構造物の様々なパラメータの影響により、周波数帯ごとにピーク値が異なる。個々のピークの要因についてそれぞれを詳細に検討していくことが必要であるが、本研究ではまずその基礎的な検討として、各パラメータについて with/without 分析を基本として、全体的なメカニズムを把握することとした。また、列車速度、周波数、加速度パワースペクトルによる 3D グラフによる解析結果の可視化を行い、各列車速度における構造物の応答ピークに関する構造物音発生メカニズムを定量的に明らかにすることとした。

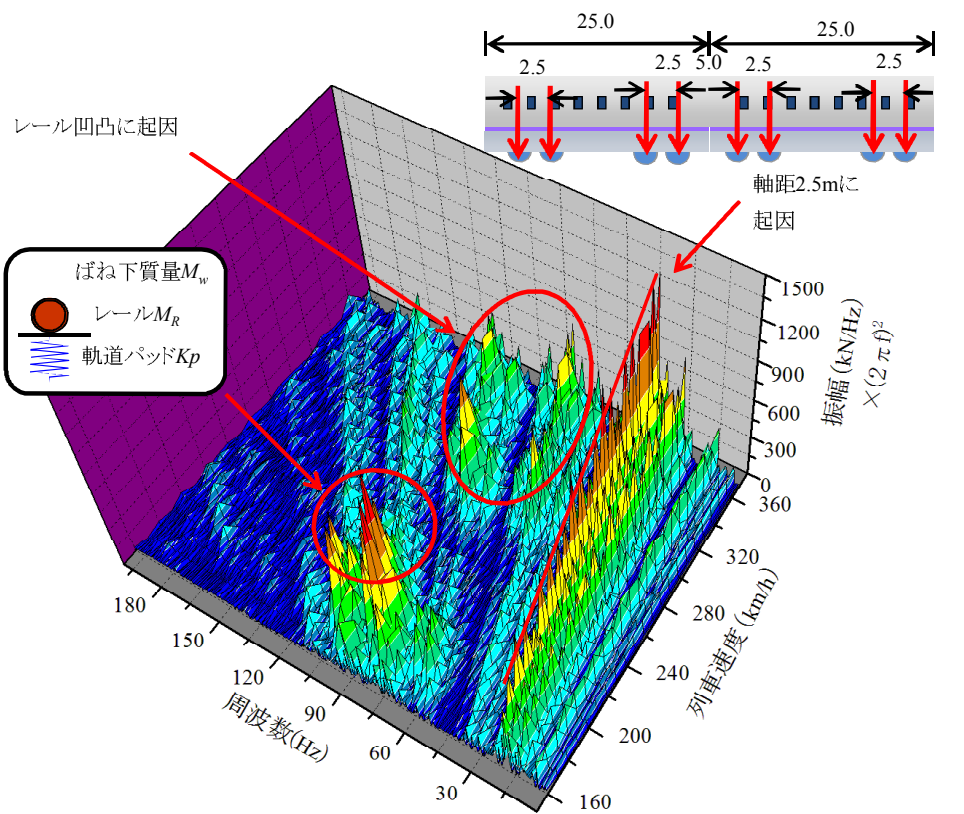
#### 5.4.1 基本ケース (CASE1) における列車速度の影響

##### (1) 加振力に及ぼす影響

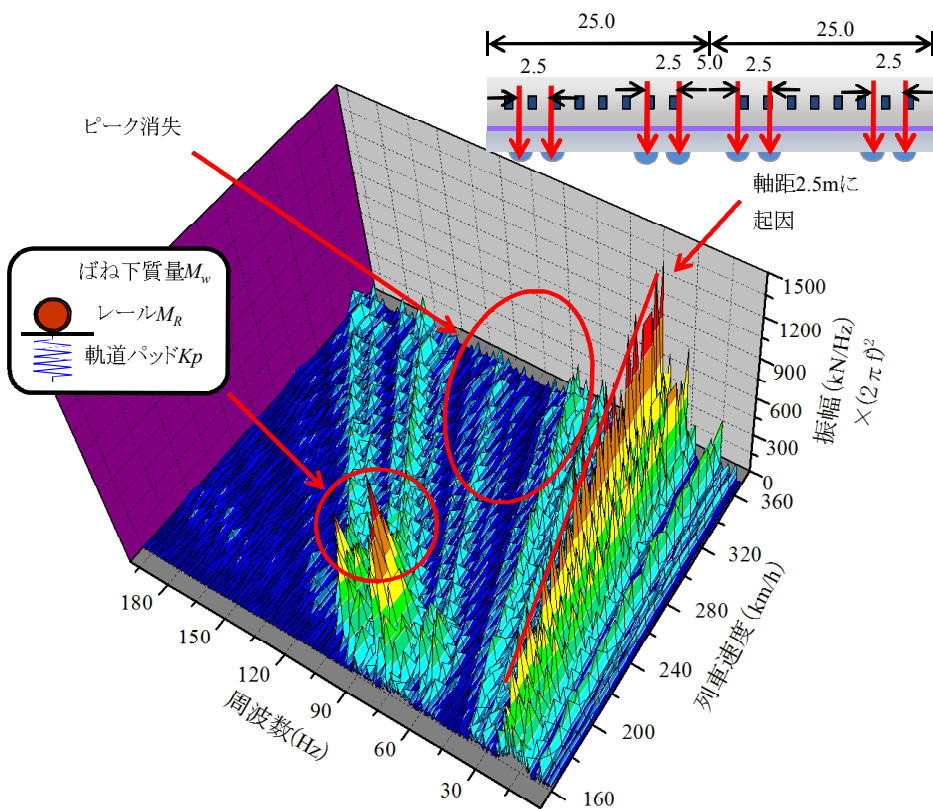
図 5-15 (a) に基本ケースにおける列車速度の違いが加振力に及ぼす影響を示す。なお、ここではピークを明確に表示するために、縦軸をリニアスケールとした。加振力は、線路方向に連続して配置されたばね要素において、モデル中央の 1 つの加振力を取り上げたものである。同図に示すように、軸距 2.5m に起因するピークなど、列車速度とともにピークがシフトすることがわかる。

一方で、列車速度とともにシフトしないピークも存在する。いくつか例をあげると、速度 190km/h 前後で 84Hz 付近のピークについては、ばね下およびレール質量と軌道パッドからな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 ごとに受ける反作用による加振周波数 ( $84.4\text{Hz}=(190/3.6)/0.625$ ) が概ね一致することによるピークであり、加振力の影響は小さいと考えられる。なお、この固有振動数は図 5-3 (a) で示した車両/軌道モデルを用いた固有値解析により求めた。また、速度 290km/h 前後で 64Hz, 96Hz 付近、速度 360km/h 前後で 80Hz, 120Hz 付近にもピークがあるが、こちらについては、図 5-15 (b) に示す CASE3-1 (レール凹凸なし) の結果と比較すると、レール凹凸に起因するピークであると考えられる。





(a) 基本ケース



(b) CASE3-1 (レール凹凸なし)

図 5-15 列車速度の違いによる加振力への影響

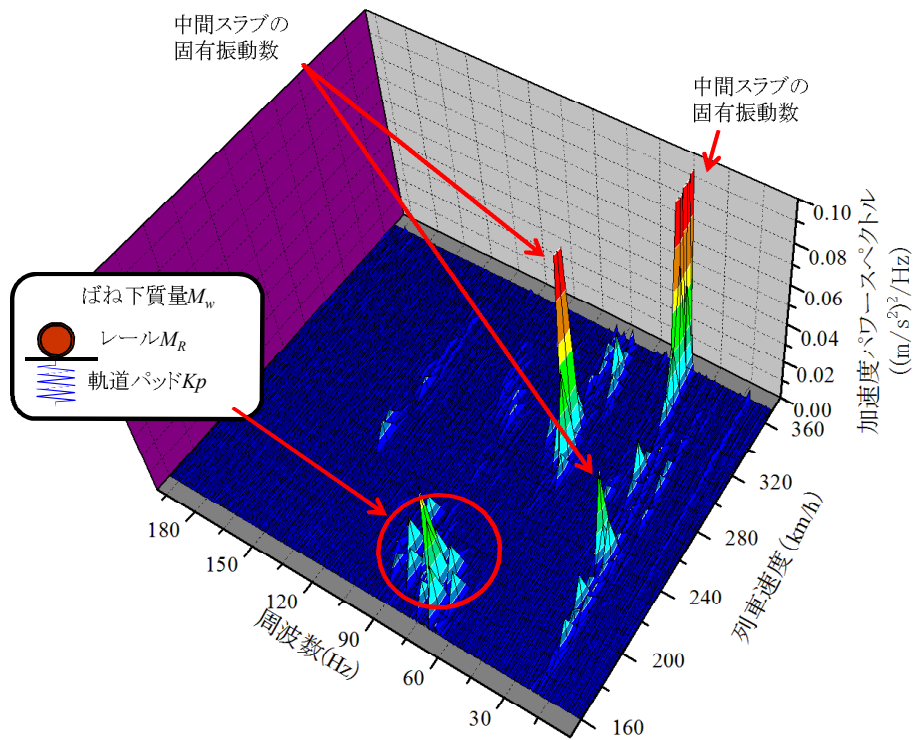
## (2) 部材の応答に及ぼす影響

図 5-16 に基本ケースについて列車速度の違いが中間スラブおよび張出スラブの応答に及ぼす影響を示す。なお、ここではピークを明確に表示するために、縦軸をリニアスケールとした。同図に示すように列車速度の違いによって鋭いピークが現れる周波数帯があることがわかる。

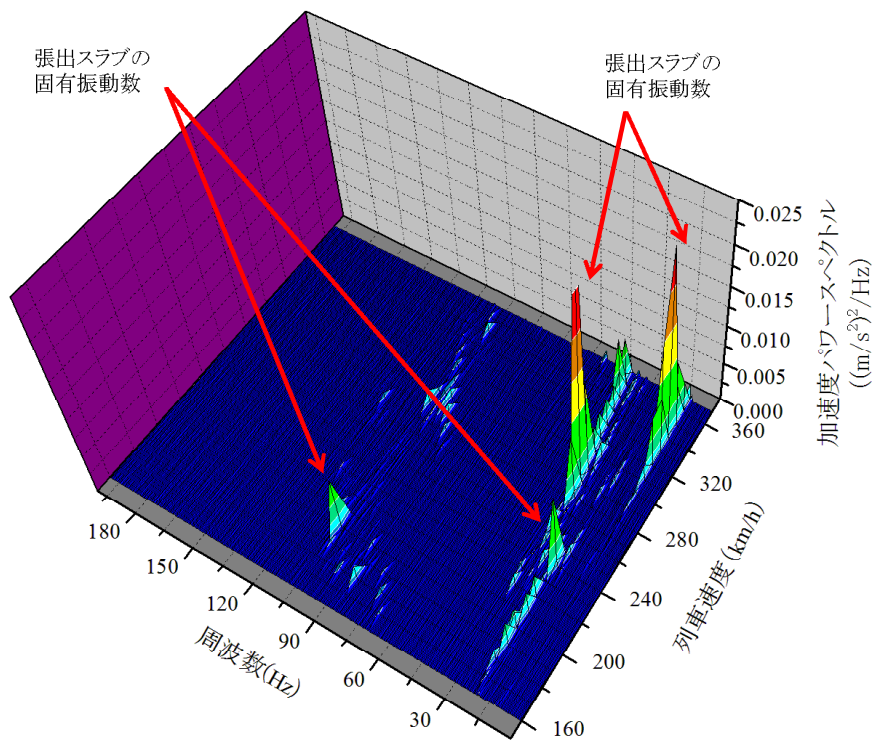
中間スラブについては、速度 240km/h で 26Hz、速度 290km/h で 64Hz、速度 360km/h 前後で 40Hz 付近に明瞭なピークがあることがわかる。これらのピークは、それぞれの列車速度と軸距 2.5m から決まる加振周波数（240km/h で 26.7Hz、290km/h で 32.2Hz、360km/h で 40.0Hz）の整数倍と中間スラブの固有振動数（図 5-10 (e), (g), (h)）が近接したために生じたものと考えられる。速度 190km/h で 84Hz 付近に現われるピークは、加振力でも生じていたピークであるが、ばね下およびレール質量と軌道パッドからな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 ごとに受ける反作用による加振周波数が概ね一致することによるピークであると考えられる。

張出スラブについては、速度 200km/h で 105Hz 付近、速度 240km/h で 21Hz 付近、速度 290km/h で 32Hz 付近、速度 330km/h 前後で 11Hz 付近に明瞭なピークがあることがわかる。

これらのピークは張出スラブ単独あるいは張出スラブと中間スラブが連成した張出スラブの固有モードの周波数帯（図 5-10 (c), (d), (g), (l)）で生じているが、中間スラブのケースと異なり、列車速度と軸距 2.5m から決まる加振周波数（200km/h で 22.2Hz、240km/h で 26.7Hz、290Hz で 32.2Hz、330km/h で 36.7Hz）と必ずしも近接していないものもある。これらのピークは張出スラブ単独あるいは張出スラブと中間スラブが連成した張出スラブの固有モードの周波数帯（図 5-10 (c), (d), (g), (l)）で生じているが、中間スラブのケースと異なり、列車速度と軸距 2.5m から決まる加振周波数（200km/h で 22.2Hz、240km/h で 26.7Hz、290Hz で 32.2Hz、330km/h で 36.7Hz）と必ずしも近接していないものもある。これらのピークは張出スラブ単独あるいは張出スラブと中間スラブが連成した張出スラブの固有モードの周波数帯（図 5-10 (c), (d), (g), (l)）で生じているが、中間スラブのケースと異なり、列車速度と軸距 2.5m から決まる加振周波数（200km/h で 22.2Hz、240km/h で 26.7Hz、290Hz で 32.2Hz、330km/h で 36.7Hz）と必ずしも近接していないものもある。速度 330km/h 前後で 11Hz 付近のピークは 330km/h において列車速度と車両長 25m から決まる加振周波数 3.7Hz の 3 倍が 11.1Hz であり、この加振によって励起された可能性も考えられる。張出スラブの振動モードは、中間スラブや高欄と連成し複雑な固有振動モードを有しているが、今後はその他のパラメータの影響も踏まえながら評価していきたい。



(a) 中間スラブ



(b) 張出スラブ

図 5-16 基本ケース (CASE1) における列車速度の違いによる部材の応答への影響

## 5.4.2 車両に関するパラメータの影響

### (1) 車両のモデル化 (CASE2-1)

図 5-17(a) に車両のモデル化の違いが中間スラブの応答加速度に及ぼす影響を示す。車両を図 5-4 で示した 31 自由度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（荷重間隔は車両の軸配置同等）として応答を求めた。同図に示すように、概ね 20Hz までの帯域では車両のモデル化の違いによる応答の差異は見られず、車両の質量のみで応答が決まることがわかる。一方、20Hz より高い周波領域では、荷重列による応答の方が小さく、車両の振動系の影響が表れていることがわかる。一般的に車体の固有振動数は数 Hz 程度であるので、当該周波数帯は車両の振動系のうち、ばね下質量の影響が大きいと考えられる。

### (2) 車両の質量 (CASE2-2)

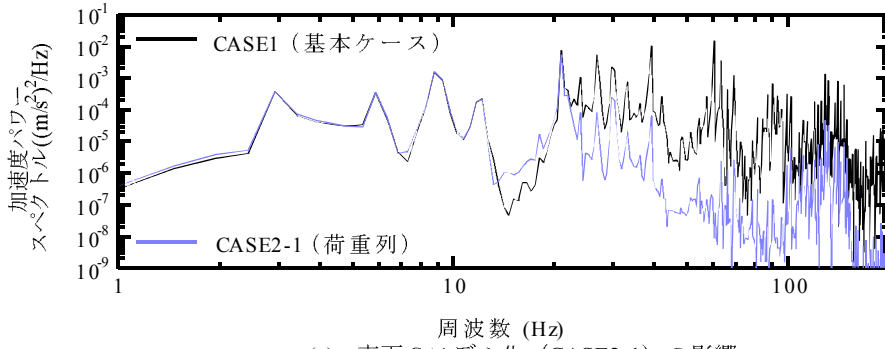
図 5-17(b) に車両の質量の違いが中間スラブの応答加速度に及ぼす影響を示す。車体、台車、輪軸の質量を基本ケースから一律 30% 減少させた。ばね定数はそのままとした。同図に示すように、概ね 100Hz より低い周波領域および 180Hz より高い周波領域で車両の質量を低減した影響が表れていることがわかる。振動系が線形であるので、周波数帯にもよるが、応答のピーク値を比較すると、低減の程度は概ね質量の低減率とほぼ同じで 30% 程度であった。

### (3) 軸配置 (軸距) (CASE2-3)

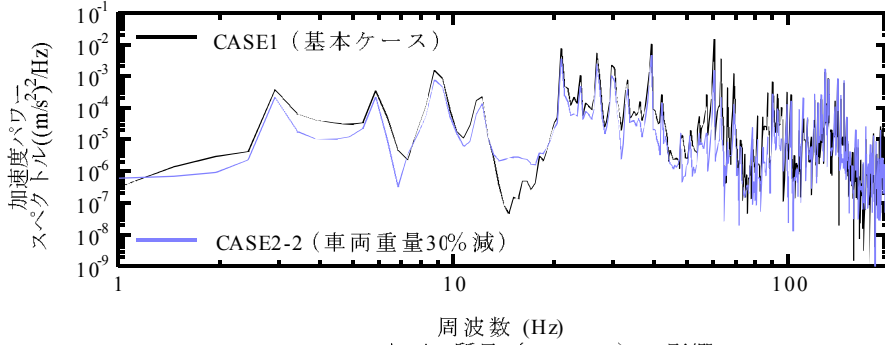
図 5-17(c) に車両の軸距の違いが中間スラブの応答加速度に及ぼす影響を示す。列車速度 270km/h において、軸距に起因する加振周波数が、基本ケースでは 30Hz であったものが、25Hz に変化する。同図に示すように、車両長は 25m のままであるので、列車速度 270km/h と車両長 25m から決まる基本加振周波数の整数倍にピークが現れることは基本ケースと同じである。図 5-5(a) に示した通り、車両の基本軸配置はすべて 2.5m の整数倍となっているので、軸距 2.5m、連結器を挟む 2 台車の後輪と前輪間距離 5.0m、台車間距離 17.5m、車両長 25m などに起因する加振周波数がすべて重畳する。一方、軸距を 3.0m としたことにより、図 5-5(b) に示した通りそれらの重畳が解消されるため、40、60、90Hz など一部の周波数帯で基本ケースに比べて応答の低減が見られると考えられる。

### (4) 軸配置 (車両長) (CASE2-4)

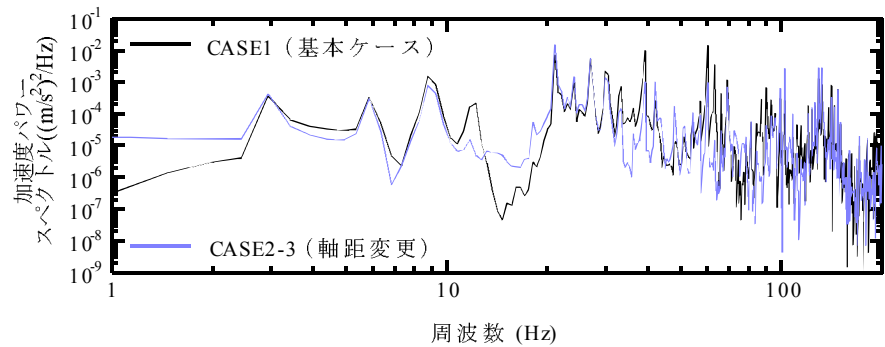
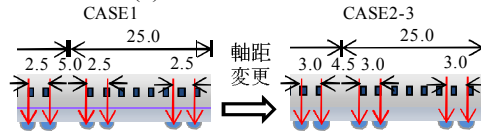
図 5-17(d) に車両長の違いが中間スラブの応答加速度に及ぼす影響を示す。車両長変更に伴う車両の質量調整などは一切行っていない。車両長が 25m から 23.75m に変わっているので、車両長に起因するピークが基本ケースの 3Hz から 3.2Hz ( $= (270/3.6)/23.75$ ) に変化したことがわかる。この影響により、3.2Hz の整数倍の周波数へ応答のピークがシフトしたことがわかる。



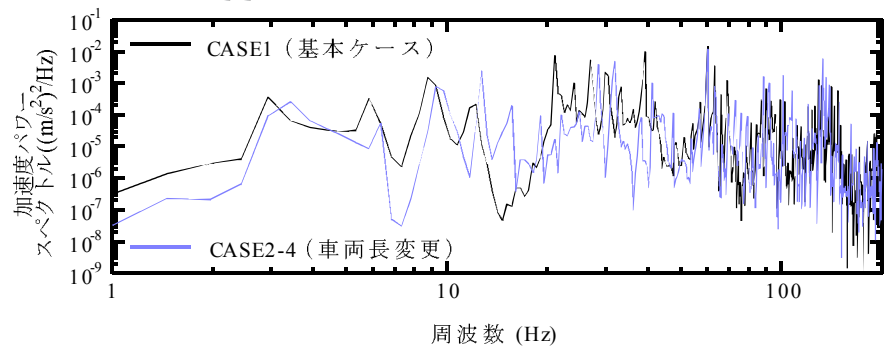
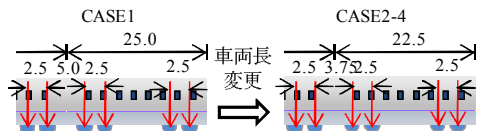
(a) 車両のモデル化 (CASE2-1) の影響



(b) 車両の質量 (CASE2-2) の影響



(c) 軸配置 (軸距) (CASE2-3) の影響



(d) 軸配置 (車両長) (CASE2-4) の影響

図5-17 車両に関するパラメータの影響 (速度 270km/h, 中間スラブ)

#### (5) 列車速度の影響

図 5-18 に列車速度 160～370km/h における車両に関するパラメータの影響の 1 例として、車両長を変更した CASE2-4 を取り上げて示した。基本ケース (図 5-15) と比較すると、基本ケースで生じていたいくつかのピークが消失したことがわかる。このことから、基本ケースにおける中間スラブの速度 240km/h で 26Hz、速度 290km/h で 64Hz におけるピーク、張出スラブの 4 つのピークは、列車速度と軸距 2.5m から決まる加振周波数の整数倍と部材の固有振動数が近接していたことが原因であるだけでなく、車両長 25m の影響も含まれるピークであったことがわかる。

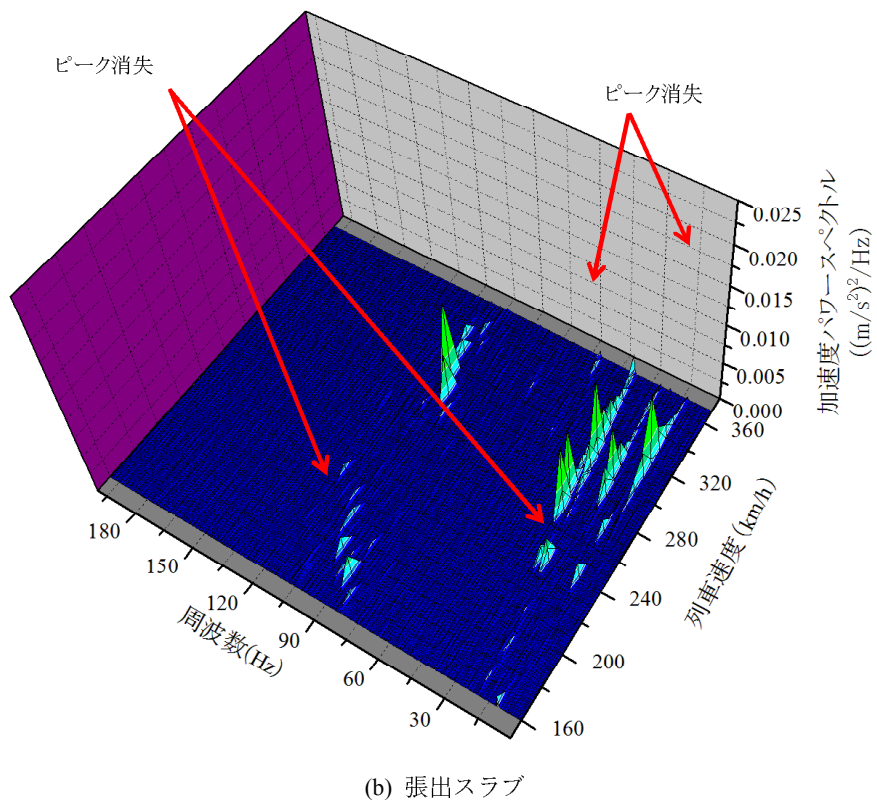
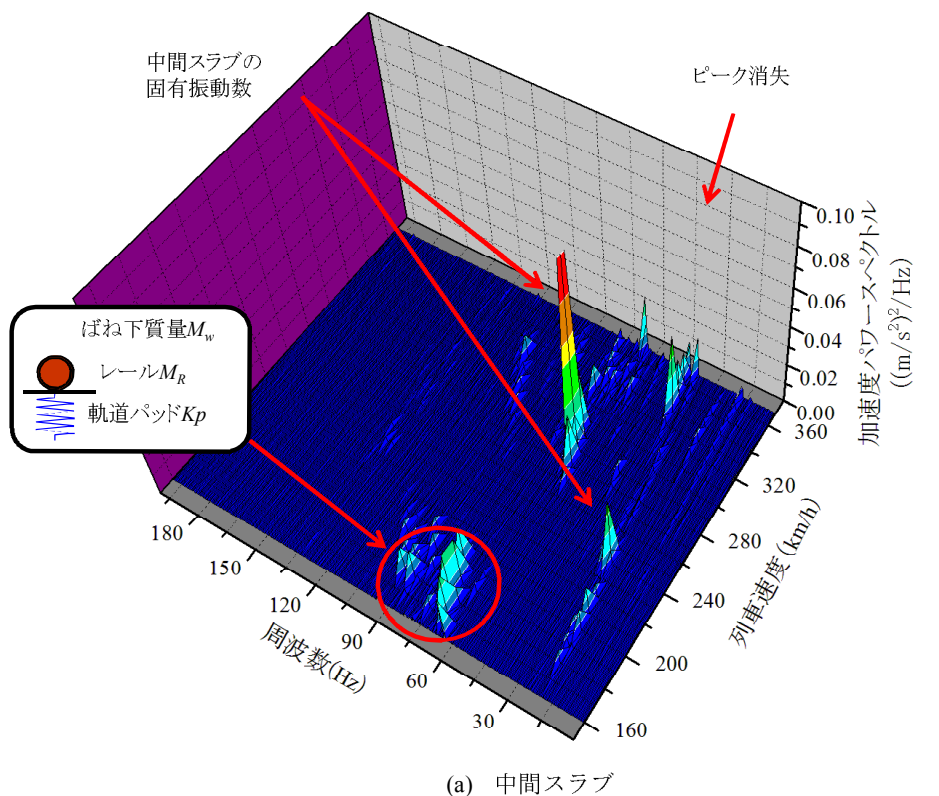


図 5-18 CASE2-4 (車両長変更) における列車速度 160~370km/h の部材の応答



### 5.4.3 軌道に関するパラメータの影響

#### (1) レール凹凸 (CASE3-1)

図 5-19 (a) にレール凹凸が中間スラブの応答加速度に及ぼす影響を示す。車両の走行面に図 5-6 で示したレール凹凸を設定せず、平滑な走行面を車両が走行した場合を設定した。同図に示すように、概ね 20Hz 以下の帯域ではレール凹凸の有無による応答の差異は見られないことがわかる。20Hz より高い周波領域では、レール凹凸を考慮しないケースでは、基本ケースに比べて応答が大幅に低減されていることがわかる。一方、100~140Hz 程度の周波数帯では、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。

#### (2) 軌道パッド (CASE3-2)

図 5-19 (b) に軌道パッドのばね定数の違いが中間スラブの応答加速度に及ぼす影響を示す。軌道パッドのばね定数を高速鉄道で通常用いられる 60MN/m の 1/2 とした場合、概ね 70Hz 以上の領域で基本ケースよりも応答が低減することがわかる。一方、70Hz より低い周波領域については、概ね 30Hz よりも低い領域では軌道パッドのばね定数の違いによる応答の差異は見られないが、30~70Hz の帯域では、両者の応答は同程度あるいは、低ばね化した方が応答が増加する領域もあった。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<sup>5-11)</sup>。

#### (3) レール締結間隔 (CASE3-3)

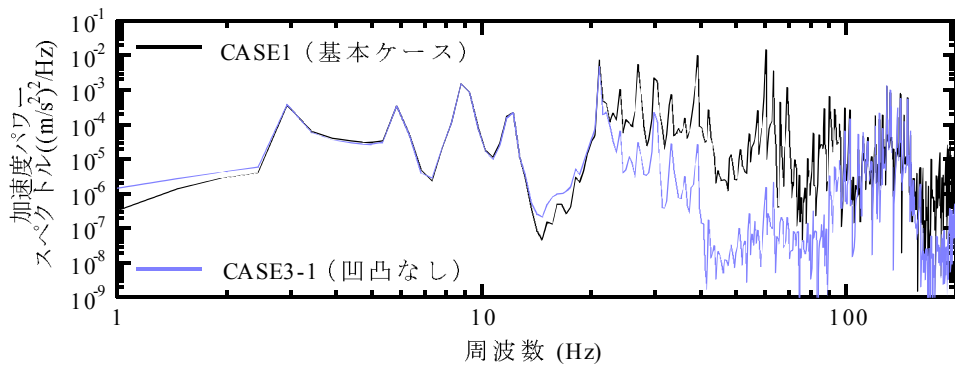
図 5-19 (c) にレール締結間隔の違いが中間スラブの応答加速度に及ぼす影響を示す。レールを連続支持とした場合、基本ケースに比べて、概ね 100~140Hz 付近の応答が低減することがわかる。これは前述の通り、列車速度 270km/h で走行するばね下質量がレール締結間隔 0.625m ごとに受ける反作用による加振周波数が 120Hz ( $= (270/3.6)/0.625$ ) であり、連続支持とすることで、ばね下質量が 0.625m の繰返しによる加振を受けなくなったためであると考えられる。

#### (4) 軌道支持ばね定数 (CASE3-4)

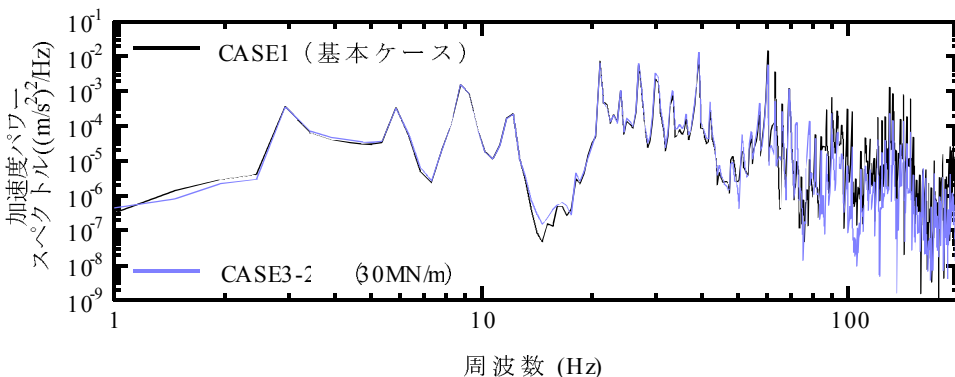
図 5-19 (d) に防振スラブ軌道が中間スラブの応答加速度に及ぼす影響を示す。軌道構造を軌道スラブ下に CA モルタルを充填した普通スラブ軌道を軌道スラブ下に弾性材を配置した防振スラブ軌道にした場合、概ね 60Hz 以上の周波数領域で基本ケースよりも応答が低減することがわかる。一方、60Hz より低い周波領域については、CASE3-2 の軌道パッドのケースと同様に概ね 30Hz よりも低い領域では軌道構造の違いによる応答の差異がみられないが、30~60Hz の帯域では、防振スラブ軌道の方が応答が増加する領域もあった。軌道パッドの低ばね化のケースと同様に低い周波数帯で低減効果が見られないのは、既往の振動計測結果と同じである<sup>5-7)</sup>。

このように、軌道パッドの低ばね化や防振軌道による軌道の支持ばね定数の低下は、軌道の上下系の固有振動数を低下させる。振動低減効果が得られる周波数帯は、上下 1 自由度の振動系に

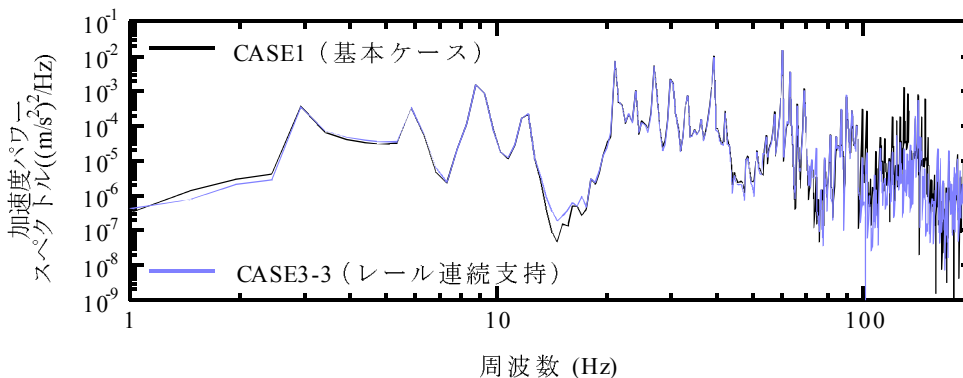




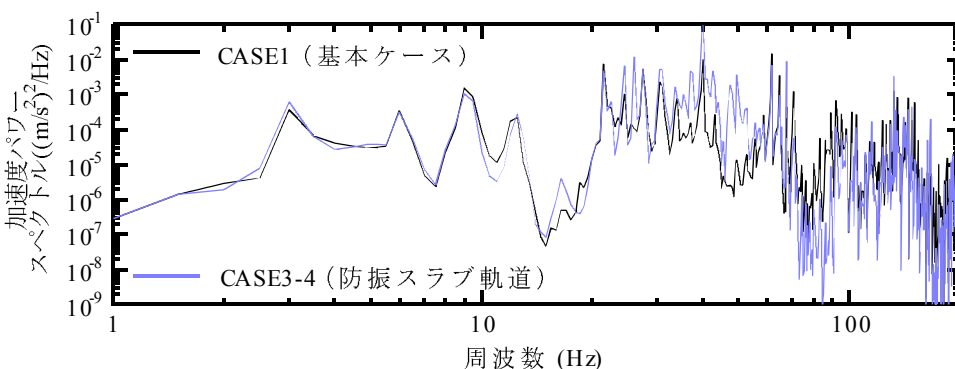
(a) レール凹凸 (CASE3-1) の影響



(b) 軌道パッドのばね定数 (CASE3-2) の影響



(c) レール締結間隔 (CASE3-3) の影響



(d) 防振軌道 (CASE3-4) の影響

図5-19 軌道に関するパラメータの影響 (速度270km/h, 中間スラブ)

おける振動伝達率の考え方と概ね一致すると考えられる。このことから、列車による加振振動数を  $f$ 、防振スラブ軌道の固有振動数を  $f_0$  とすると、次の①～③の状態となり、

①  $f \ll f_0$  では、振動伝達率がほぼ 1 となり、列車による加振力はそのまま構造物に伝達。

②  $f \approx f_0$  では、共振状態。

③  $f > \sqrt{2} \times f_0$  では、振動伝達率が 1 を下回る。

したがって、このような軌道の低支持ばね化により構造物音の対象となる周波数帯で低減効果を得るためには、③の状態を実現する必要がある。軌道の上下の固有振動数のさらなる低下が必要となると考えられる。軌道状態に特化した検討は第 6 章でさらに検討を深度化させることとする。

#### (4) 列車速度の影響

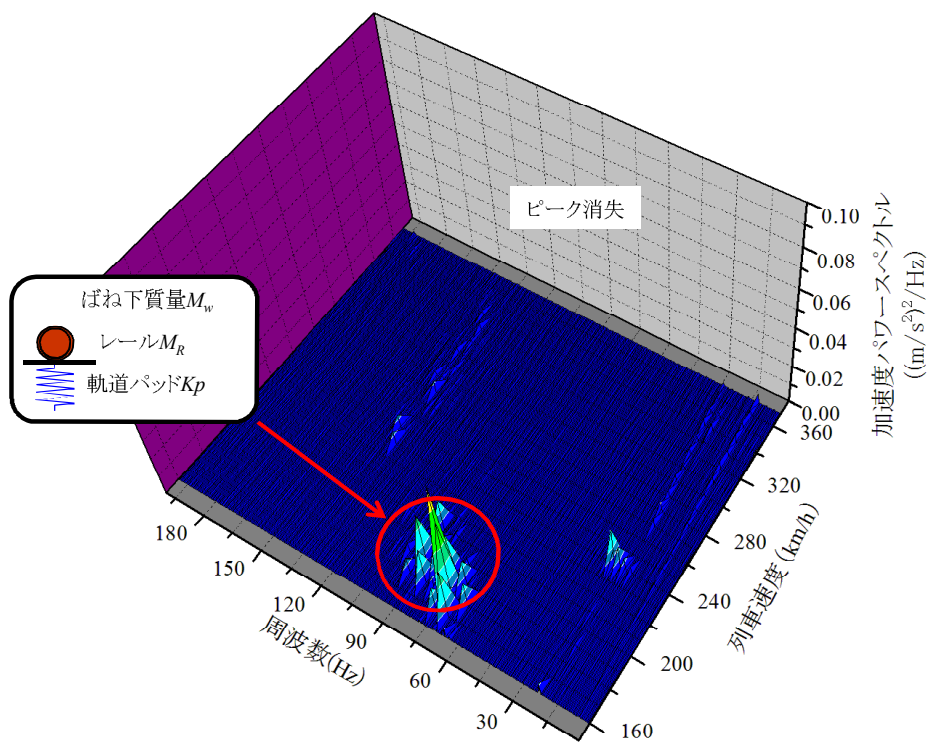
図 5-20 および図 5-21 に列車速度 160～370km/h における軌道に関するパラメータの影響として、レール凹凸なしの CASE3-1 およびレールを連続支持した CASE3-3 を取り上げて示した。図 5-15 に示した基本ケースと比較すると、基本ケースで生じていたいくつかのピークが消失したことがわかる。

図 5-20 にレール凹凸なしのケースについて列車速度の違いが中間スラブおよび張出スラブの応答に及ぼす影響を示す。

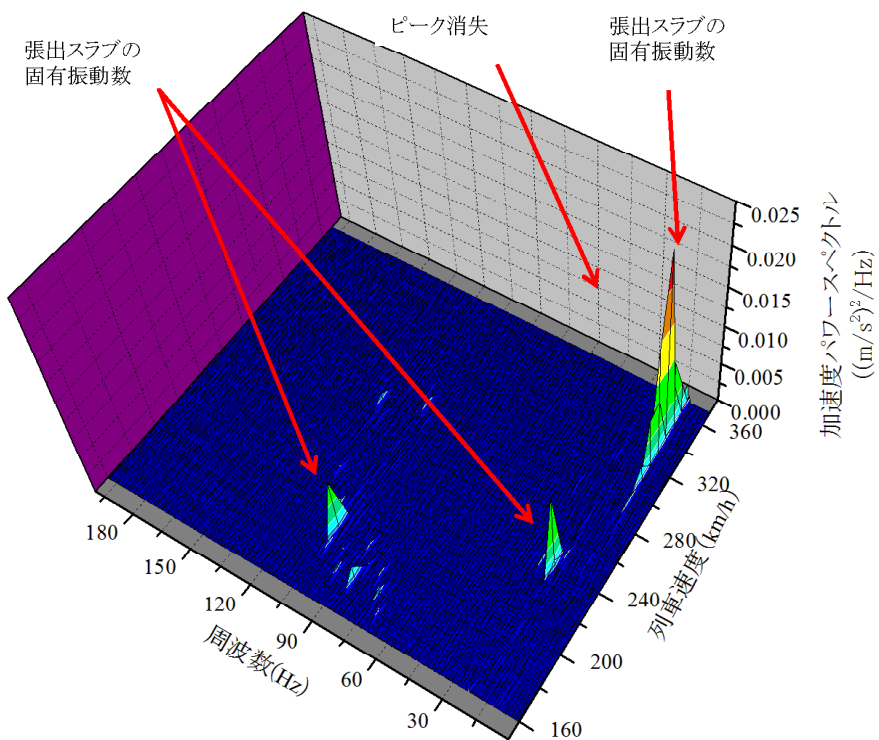
中間スラブについては、レール凹凸なしのケースにおいて中間スラブの固有振動モードに起因すると考えられる応答のピークが消失したことがわかる。一方で、速度 190km/h 前後で 84Hz 付近のピークについてはレール凹凸なしのケースにおいても基本ケース (図 5-16) と同じようにピークが存在することがわかる。図 5-15 に示した加振力においても当該の周波数帯は、レール凹凸の有無に関わらずピークを生じていた。

張出スラブについては、基本ケース (図 5-16) で生じていた速度 290km/h で 32Hz 付近の明瞭なピークは、レール凹凸なしのケースで消失した。一方で、その他のピークについては、基本ケースと変わらないことがわかる。速度 340km/h 前後で 11Hz 付近のピークについては、当該周波数帯がレール凹凸の影響を受けない周波数帯であるためと考えられる。その理由としては、部材の応答特性において、低い周波数帯ではレール凹凸の影響を受けない帯域が存在することが、図 5-19(a) に示した結果からも得られており、張出スラブの 11Hz 付近の帯域は、レール凹凸の影響を受けない帯域に該当すると考えられる。

図 5-21 にレールを連続支持したケースにおける列車速度の違いが中間スラブおよび張出スラブの応答に及ぼす影響を示す。同図に示すように、レール凹凸なしのケースでも消失しなかった中間スラブの速度 190km/h 前後で 84Hz 付近のピークが消失したことがわかる。これはレールを連続支持することにより、ばね下質量がレール締結間隔 0.625m ごとにおける反作用の加振を受けなくなったためであると考えられる。一方、中間スラブの固有振動数やレール凹凸に起因するピークは、レールを連続支持しても変化がないことがわかる。張出スラブの速度 200km/h で 105Hz 付近のピークは、レール連続支持により消失したことがわかる。このピークは、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と固有振動モードがその他のピークと比べてそれほど一致していないにもかかわらず、当該加振周波数によって励起されていたものであった。



(a) 中間スラブ



(b) 張出スラブ

図 5-20 CASE3-1 (レール凹凸なし) における列車速度 160~370km/h の部材の応答

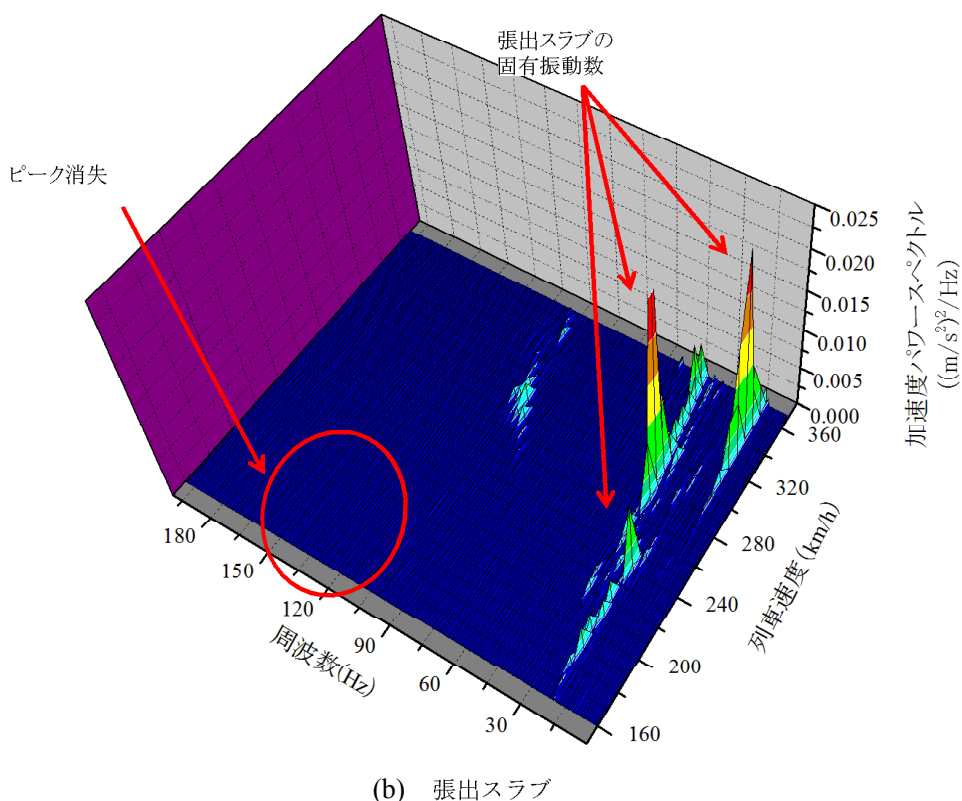
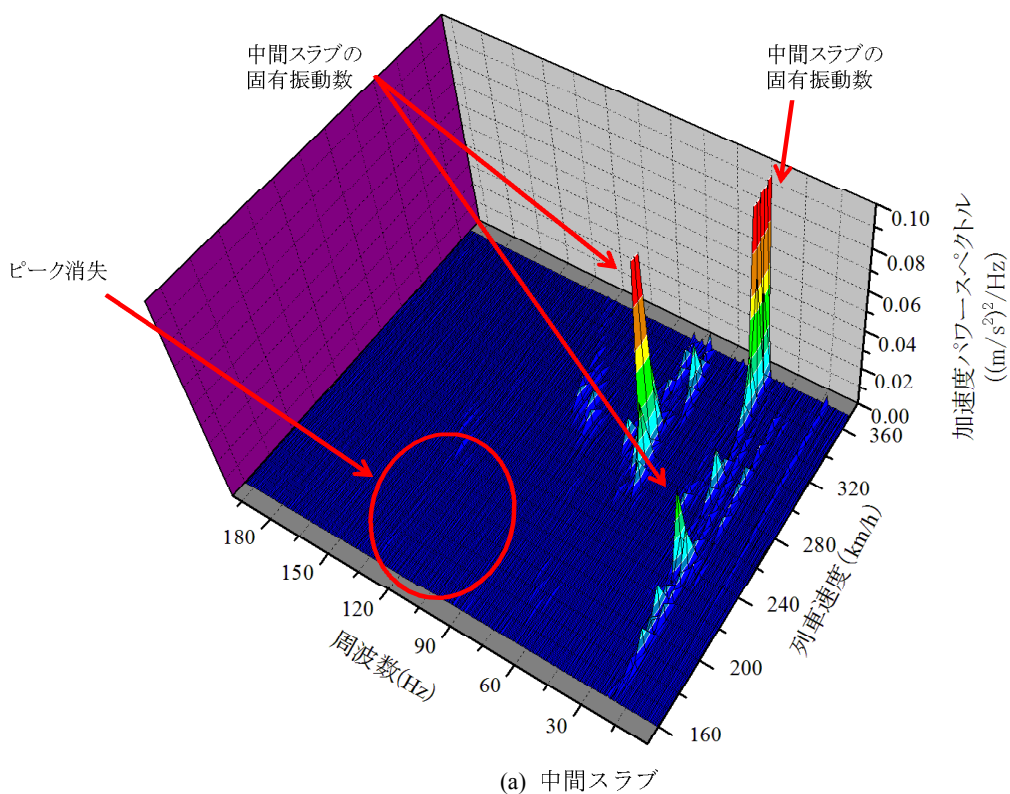


図 5-21 CASE3-3 (レール連続支持) における列車速度 160~370km/h の部材の応答

#### 5.4.4 構造物に関するパラメータの影響

##### (1) スラブの剛性 (CASE4-1)

図 5-22 (a) に中間スラブの剛性の違いが中間スラブの応答加速度に及ぼす影響を示す。同図に示すように、中間スラブの剛性を 5 倍にすることにより、概ね 60Hz より低い周波領域で、基本ケースに比べて応答が低減されることがわかる。中間スラブの剛性が増加したことにより固有振動数が変わり、例えば 80Hz や 180Hz 付近では、剛性増加が応答増加になり、逆効果になる周波数帯も存在することがわかる。

##### (2) 非構造部材および材料定数 (CASE4-2)

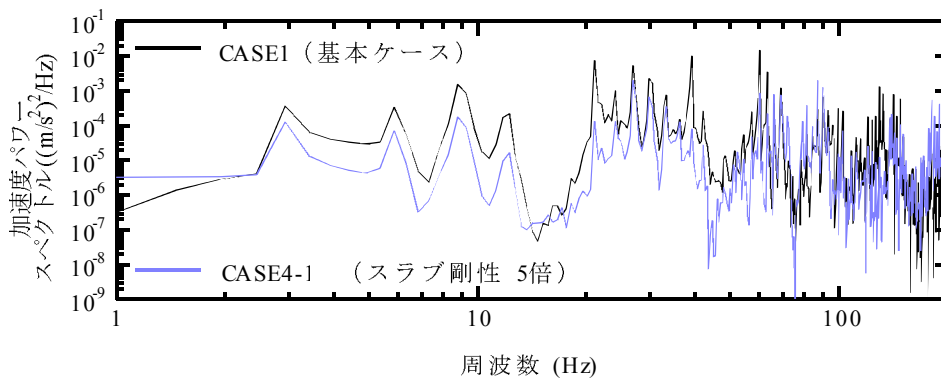
図 5-22 (b) に非構造部材および材料定数の違いが中間スラブの応答加速度に及ぼす影響を示す。これらはコンクリートのヤング係数を 3 倍にすることにより見かけの剛性増加を考慮している。同図に示すように、概ね 60Hz より低い周波領域で、基本ケースに比べて応答が低減されることがわかる。前述の中間スラブの剛性増加のケースと傾向は似ていることがわかる。

##### (3) 構造物の減衰定数 (CASE4-3)

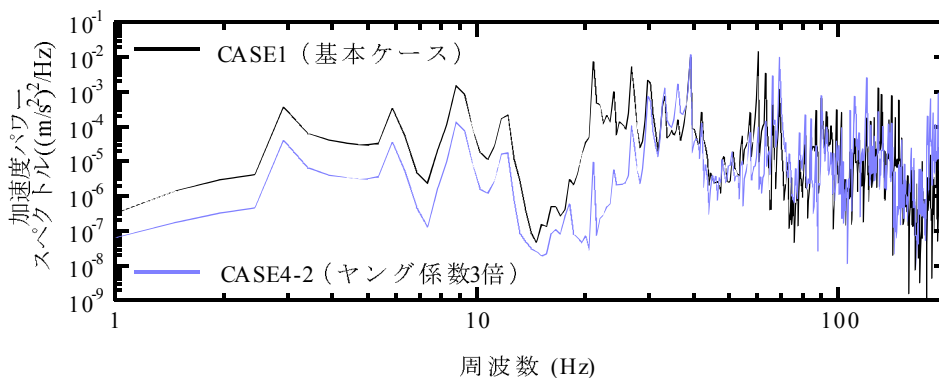
図 5-22 (c) に構造物の減衰定数の違いが中間スラブの応答加速度に及ぼす影響を示す。ここでは軌道/構造物系モデルにおける減衰定数を一律で 5% に変更した。加振力を算定する車両/軌道モデルでは 2% である。同図に示すように、構造物の減衰定数を 5% に変更しても、中間スラブの応答への影響はそれほど大きくないことがわかる。

##### (4) 列車速度の影響

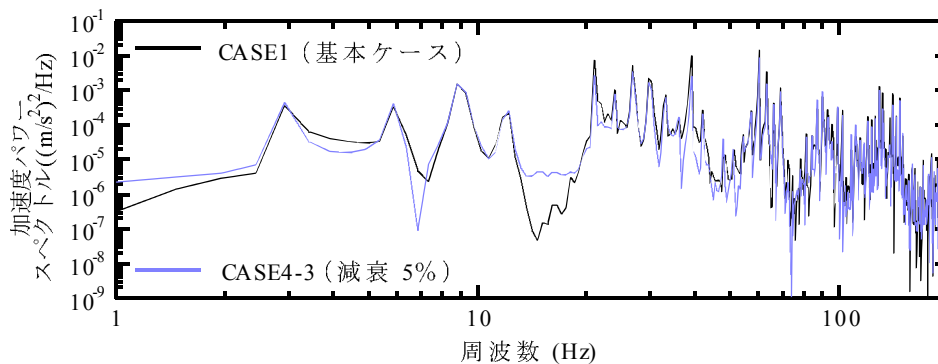
図 5-23 に列車速度 160~370km/h における構造物に関するパラメータの影響の 1 例として、非構造部材および材料のばらつきを考慮して、コンクリートのヤング係数を 3 倍にした CASE4-2 を取り上げて示した。中間スラブについては、速度 240km/h で 26Hz、速度 290km/h で 64Hz のピークが消失する一方で、速度 360km/h 前後で 40Hz 付近に明瞭なピークは消失しなかった。このピークについては、部材の固有振動数よりも、車両の軸配置などの影響が大きいピークであると考えられる。張出スラブについては、図 5-20 (b) に示したように、レール凹凸なしのケースにおいても消失しなかった速度 340km/h 前後で 11Hz 付近のピークが消失していることがわかる。速度 290km/h で 32Hz 付近のピークも同様に消失した。これらは剛性増加に伴う各部材の固有振動数の変化に伴うものであると考えられる。また 2 つの部材に共通して言えることであるが、列車速度と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におけるピークは、基本ケース (図 5-16) よりもピークが現れるようになった。これについては、剛性増加による部材の固有振動数の変化や、その他のパラメータの影響も考慮しながら今後評価していきたい。



(a) 中間スラブ剛性 (CASE4-1) の影響

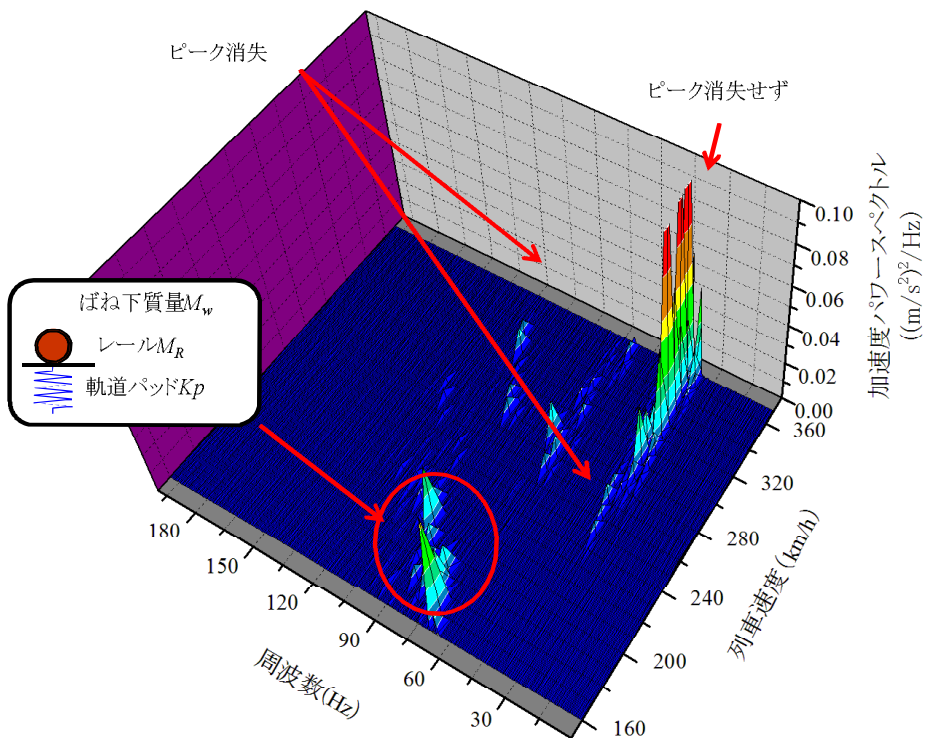


(b) 非構造部材および材料定数 (CASE4-2) の影響

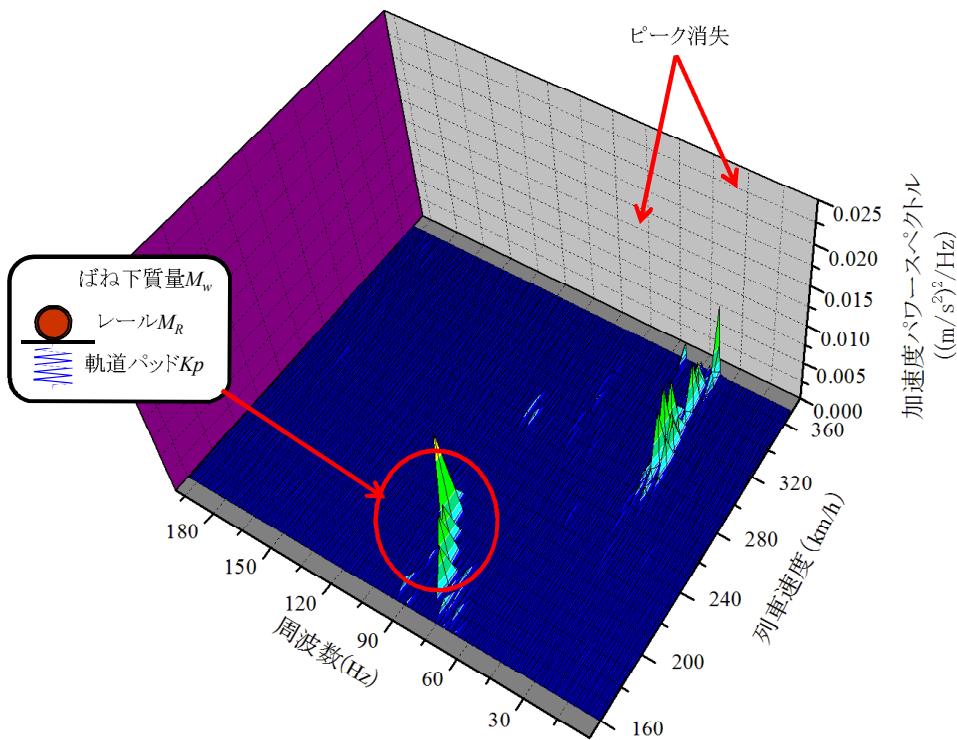


(c) 構造物の減衰定数 (CASE4-3) の影響

図5-22 構造物に関するパラメータの影響 (速度 270km/h, 中間スラブ)



(a) 中間スラブ



(b) 張出スラブ

図 5-23 CASE4-2 (非構造部材および材料定数の違いを考慮) における列車速度 160~370km/h の部材の応答



## 5. 5 本章の結論

本章では、本研究で対象する RC ラーメン高架橋の構造物音に関して、車両/軌道/構造物の各種パラメータの影響を考慮可能な汎用的な解析手法を構築し、RC 高架橋の部材振動特性を解明した。さらに、本解析手法を用いて with/without 分析により、車両/軌道/構造物の各種パラメータが部材の周波数応答特性に及ぼす影響を明らかにし、RC 高架橋の構造物音発生メカニズムの解明、並びに列車速度、周波数、加速度パワースペクトルによる 3D グラフの構築により解析結果の可視化を行った。本章で得られた知見をまとめると以下の通りとなる。

- (1) 車両/軌道/構造物の振動伝播系を、卓越周波数帯の違いに着目し、スケールの異なる車両/軌道系モデルおよび軌道/構造物系モデルの 2 つの系に分割し、構造物音の主な原因となる 200Hz 程度までの部材振動を効率的に解析する手法を新たに構築した。実測との比較の結果、本手法は実測のばらつき範囲内に概ね収まっており、手法の妥当性を実証した。

列車速度 270km/h における中間スラブの応答に着目した with/without 分析の結果を整理すると以下の通りになる。図 5-24 には、列車速度 270km/h における中間スラブの加速度応答に関する周波数ごとの支配的要因を示す。

- (2) 車両のパラメータについては、ばね下質量は 20Hz より高い周波領域、車両質量は 100Hz より低い周波および 180Hz より高い周波領域で影響が大きく、軸配置はピークの生じる周波数に影響を与えることがわかった。
- (3) 軌道のパラメータについては、軌道変位およびレール凹凸は 20Hz～100Hz および 150Hz より高い周波領域、軌道パッドの剛性は 30Hz より高い周波領域（30Hz～70Hz は同程度および若干増加、70Hz 以上で低減）、レール締結間隔は 100～140Hz の領域、防振軌道（軌道の支持ばね定数）は 30Hz より高い周波領域（30Hz～60Hz は同程度および若干増加、60Hz 以上で低減）で影響が大きいことがわかった。
- (4) 構造物のパラメータについては、中間スラブの剛性は 60Hz より低い周波領域、非構造部材の剛性およびコンクリートのヤング係数が設計値よりも大きくなる場合を考慮すると 30Hz より低い周波領域において剛性増加により応答が低減する単純な傾向が見られ、それより高い周波領域では応答の増減が見られること、構造物の減衰定数の影響は 2%を 5%に変更した範囲ではそれほど大きくないことがわかった。

さらに、列車速度を 160km/h～370km/h まで変化させ、列車速度、周波数および加速度パワースペクトルによる 3D グラフで解析結果の可視化を行った。車両、軌道および構造物の各種パラメータが構造物の部材振動に与える影響を検討した結果を整理すると以下の通りとなる。

- (5) 列車速度の変化に伴って特定の速度および周波数帯で、張出スラブや中間スラブの応答に著大なピークが生じる場合がある。これは、列車速度と軸距や車両長から決まる加振周波数と構造物の部材の固有振動数が近接したこと、レール凹凸の有無、ばね下およびレール質量と軌道パッドからな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 ごとに受ける反作用による加振周波数が近接することなどが、ピーク発生のが主な要因であると考えられる。



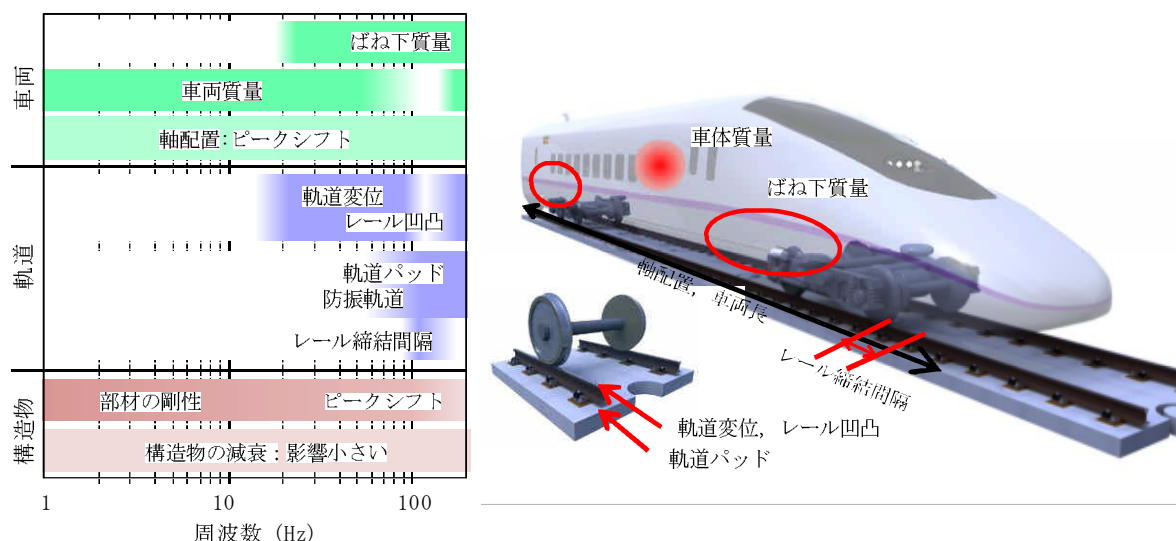


図 5-24 列車速度 270km/h における中間スラブの応答加速度に関する周波数ごとの支配的要因

参考文献

- 5-1) 長倉清：構造物音の特性と低減対策，JREA，Vol.50，No.12，pp.51-53，2007
- 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
- 5-3) 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
- 5-4) 涌井一，松本信之，松浦章夫，田辺誠：鉄道車両と線路構造物と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
- 5-5) 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
- 5-6) 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
- 5-7) 佐藤吉彦，大石不二夫，安藤勝敏，三浦重：防振 G 型スラブ軌道の開発実用化，日本鉄道施設協会誌，Vol.25，No.8，pp.33-35，1987.8
- 5-8) 白井貴之，笹倉亮太，渡辺勉，谷村幸裕：超高強度繊維補強コンクリートによる RC スラブの補強工法，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，2013
- 5-9) 半坂征則，杉本一郎，長倉清，間々田祥吾：鋼構造物騒音の部材ごとの寄与度解析および対策材料の検討，鉄道総研報告，Vol.21，No.2，pp.21-26，2007
- 5-10) 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
- 5-11) 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

## 6 章 鉄道 RC 桁式高架橋の構造物音発生メカニズムの解明とその低減対策

### 6. 1 本章の概要

第 6 章では、新幹線の沿線構造物の中で RC ラーメン高架橋について構成割合の大きい構造形式である RC 桁式高架橋について構造物音の発生メカニズムの解明および低減対策の検討を行う。基本的な研究手法は第 5 章と同じであるが、構造形式が異なる点において、実務的に有益な知見を得た。また、設計上の構造緒元は同一であるが、軌道パッドのばね定数が異なる 2 橋を解析対象としている点が特徴である。さらに、防振軌道に特化したパラメータ解析を合わせて実施し、防振軌道による構造物音の低減対策の実現可能性を示した。

列車走行による構造物音<sup>6-1)</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）高架橋およ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。

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 および 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が、本章では路線延長に占める割合が RC ラーメン高架橋について大きな RC 桁式高架橋についてさらに検討を行った。

構造物音の低減方法は、車輪およびレール表面の平滑化、車両の軽量化などによる変動作用力の低減、低ばね定数軌道パッドや防振軌道による振動伝播経路での振動遮断・低減などが有効である。本研究では第 5 章でも取り上げた観点で、軌道の状態に着目して検討を行い、RC 桁式高架橋の構造物音発生メカニズムを解明することとした。特に構造物音の有効な低減対策と考えられる防振軌道については、詳細に数値実験を行うこととした。

防振軌道については、大断面の軌道スラブと低支持ばね定数の弾性材により 10Hz 程度の固有振動数の防振軌道が 250km/h 程度の速度で列車が運行されている線区で用いられた例もある<sup>6-2)</sup>。また、支持ばね定数の低下は軌道の変形の増大による列車走行性の悪化を招くことが懸念されるが、第 3 章で検討したとおり、軌道スラブの連続化、軌道スラブ同士の継目の支持ばね定数の平準化などにより走行性を改善させることができる<sup>6-3)</sup>。また、第 4 章で示した通り、防振軌道の振動低減効果、重量級マス・スプリングシステムの定数は振動への低減効果は実証されている。

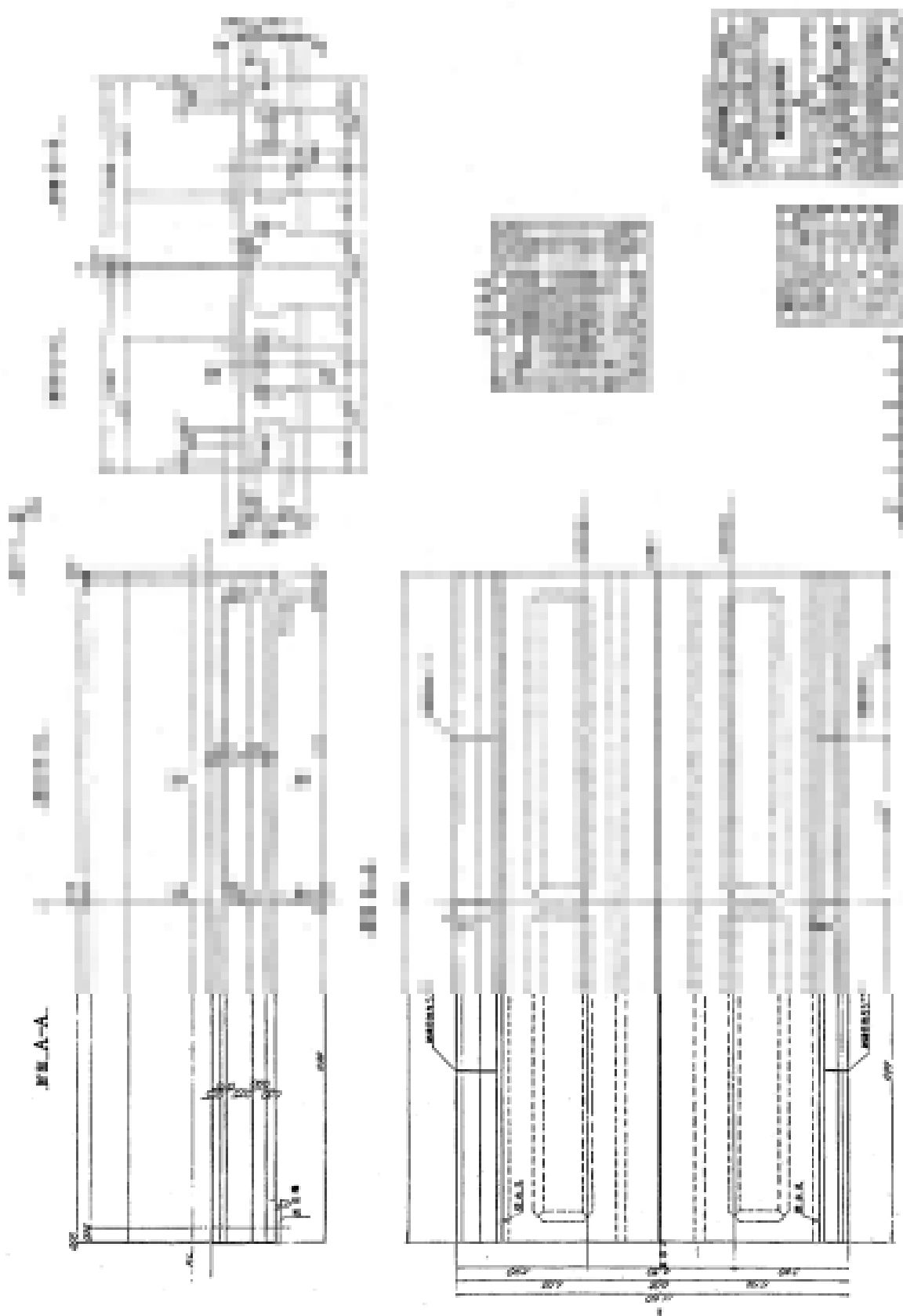
筆者らが第 5 章で開発した解析手法は、有限要素法による構造解析と境界要素法による音響解析のカップリング手法であり、今後さらなる精緻化が必要ではあるが、従来のような実測応答をベースとしない構造物音シミュレーションモデルである<sup>6-4)</sup>。本章でもこの研究手法を適用するこ

ととする。本章では以下の点に着目して検討を行った。

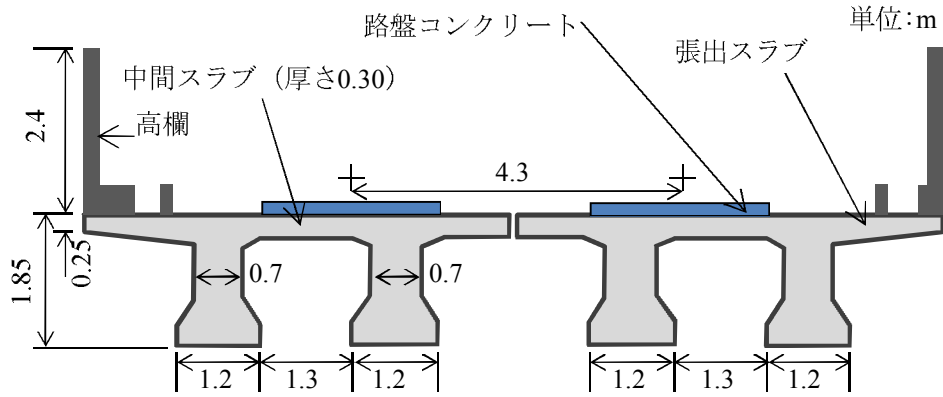
(1) 軌道パッドのばね定数のみが異なる同一形式の標準鉄道 RC 桁式高架橋 2 橋を対象とした数値解析モデルを構築し、200Hz までの振動を対象とした現象解明を行う。

(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、振動規制法などにあるように、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などから、本章でも振動速度ではなく振動加速度を中心に応答を評価することとした。

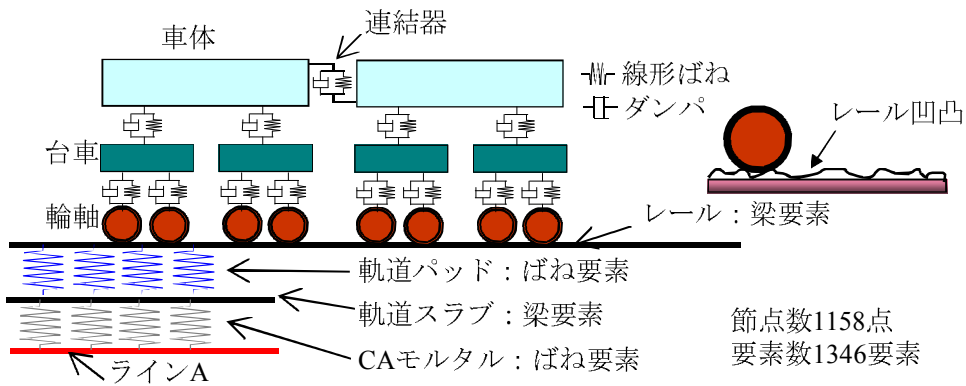


(a) 一般図

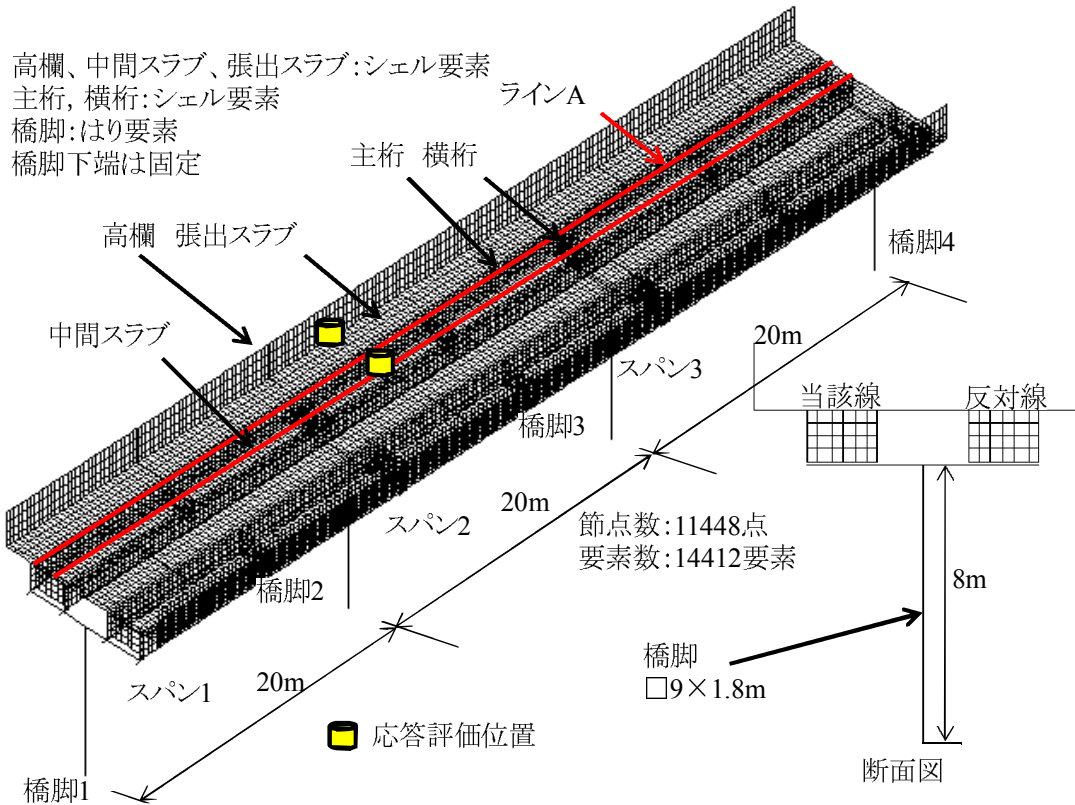


(b) 概略図

図 6-1 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 6-2 解析モデルの概要

## 6. 2 解析手法

### 6.2.1 解析手法の概要

図 6-1 に対象構造物を示す。表 6-1 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 製の普通スラブ軌道である。基礎は直接基礎である。

図 6-2 に解析モデルの概要を示す。本研究では、過去の知見を参考に、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>6-4)</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 および橋脚 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>6-5)</sup>。

ここで、第 5 章でも述べたように、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った。

### 6.2.2 車両の力学モデル

図 6-3 に車両の力学モデルを示す。図 6-4 に車両の軸配置の概要を示す。車体、台車およ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。

### 6.2.3 軌道および構造物の力学モデル

軌道およ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 6-2(a)に示すように、レールおよ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および軌道スラブ下の 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

表 6-1 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(%) (全てのモードで一律の値)		2%

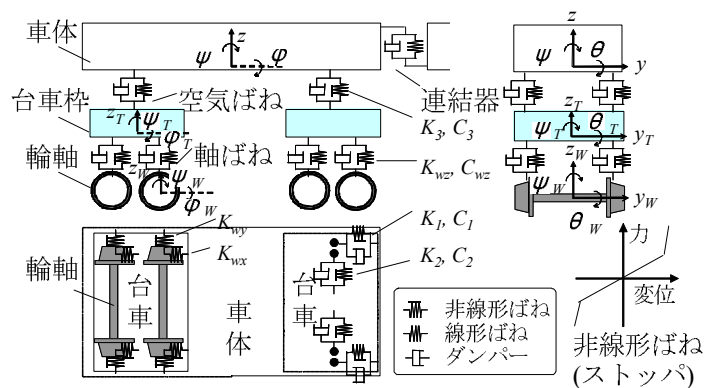


図 6-3 車両の力学モデル

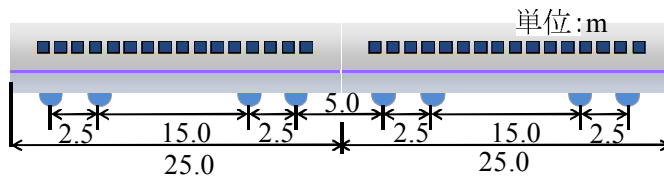


図 6-4 車両の軸配置の概要



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など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。なお、防振軌道をモデル化する場合には、このばね要素に弾性材相当のばね定数を与えた。

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>6-6)</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 6-2 (b) に示すように、高欄、張出スラブ、中間スラブ、主桁およ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。

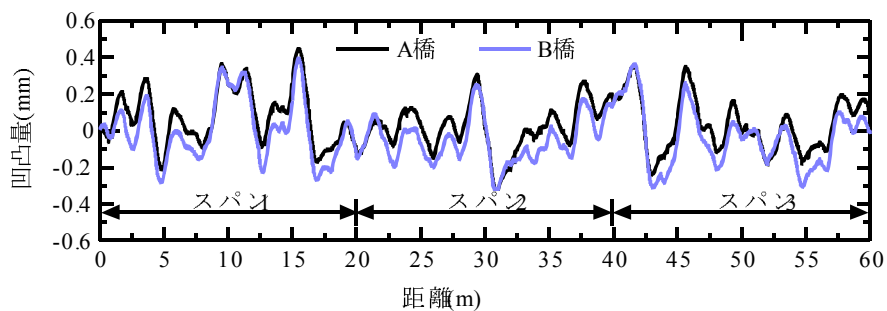
#### 6.2.4 車輪とレール間の力学モデル

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およ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。

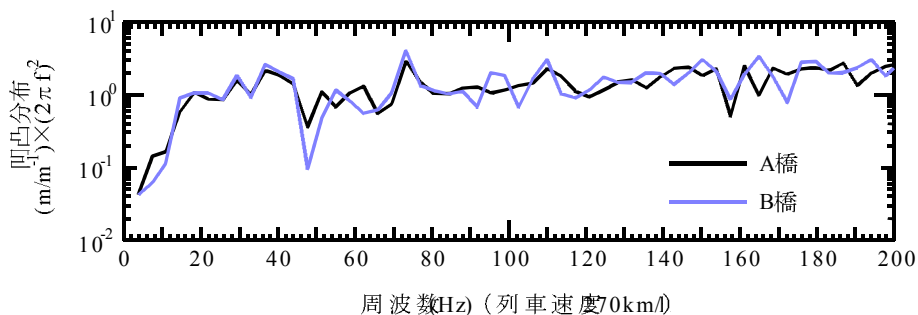
図 6-5 に解析に用いたレール凹凸および軌道変位を示す。列車走行に伴い車輪とレール間に発生する変動作用力が構造物の部材を振動させる加振源となるため、レール凹凸および軌道変位の設定が非常に重要となる。解析では、構造物 A 橋、B 橋それぞれで長さ 1m の測定器を用いて実際に測定したレール凹凸に、別途測定した 10m 分の軌道変位を足し合せたものを使用した。これは、過去の知見より 1m の測定器による短波長のレール凹凸のみでは 1~数 m 波長の軌道変位に起因する加振力を適切に再現できないことわかっているため、別途測定した中長波長の軌道変位を付加することとした。なお、測定波長に起因すると思われ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。

#### 6.2.5 数値解析法

効率的な数値解析を行うために、車両および構造物に関する運動方程式をモーダル変換する。得られる車両およ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>6-5)</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 6-1 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 6-5 解析に用いたレール凹凸および軌道変位

表 6-2 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	凹凸あり→凹凸なし
A-3.1	軌道パッドばね定数	60MN/m→30MN/m
A-3.2		60MN/m→20MN/m
	列車速度	160~370km/h(10km/h 刻み)
AE-1	弾性材のばね定数	防振 G 型スラブ軌道相当, 100×100×25mm 試験片で ばね定数 2.4MN/m を基本.
AE-2		AE-1 の 1/4 のばね定数
AE-3		AE-1 の 1/16 のばね定数
AS-1	軌道スラブの支持間隔	軌道スラブ支持間隔 1.25m
AS-2		軌道スラブ支持間隔 2.5m
AL-1	軌道スラブの線路方向長さ	軌道スラブ長さ 10m
AL-2		軌道スラブ長さ 60m

### 6.2.6 解析ケース

表 6-2 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 6-5 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 および 20MN/m に変更して解析を行った。また, 列車速度の影響を検討するために, 160~370km/h まで 10km/h 刻みで合わせて解析を行った。

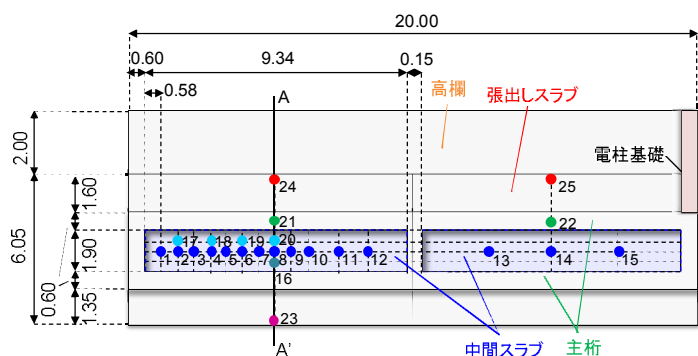
CASE AE, AS, AL は防振軌道を対象とした。防振スラブ軌道は防振 G 型スラブ軌道<sup>6,7)</sup>の諸元を参考にしたが, 本軌道に対する既往の測定結果より, 本研究で対象とする 200Hz 以下の帯域では明確な振動低減効果が得られていない。このような帯域で低減効果を得るためには, 軌道の固有振動数をさらに低下させる必要があると考えられる。固有振動数の低下は実際には軌道スラブの重量と弾性材のばね定数の組合せで得られるものであるが, 今回の数値実験では弾性材のばね定数のみで調整した。解析パラメータは, 弾性材のばね定数, 軌道スラブの支持間隔および軌道スラブの線路方向長さである。

### 6.2.7 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, 第 5 章と同様に解析モデルの妥当性の検証を行った。比較項目は, 列車通過時の応答加速度と各部材の振動モード形である。

図 6-6 に計測対象部材と計測点配置を示す。図 6-2 に示したように, 着目点は中間スラブ, 張出スラブである。加速度計は, 振動モードの腹と節になると想定される位置に配置した。加速度計の使用台数は 25 台であるが, 各部材の高次の振動モードをとらえること, 他の部材との連成の影響を判別することを目的として, 25 台の加速度計のうち 5 台程度は当該部材に隣接する部材に設置した。

列車通過時の応答加速度の計測に使用した加速度計は, 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 でプリアンプおよび AD ボードを介してノート PC に収録した。ただし, 1000Hz 以上の周波数成分はアンチエイリアシングフィルターにより除去した。また, 周波数分析は時刻歴波形の列車通過中の 2 秒間を切り出して FFT を行った。



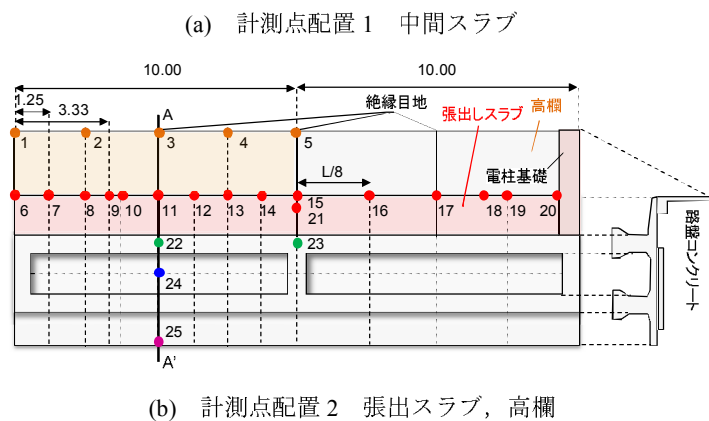


図 6-6 計測対象部材と計測点配置

## 6. 3 解析結果

### 6.3.1 基本ケース (CASE A, CASE B)

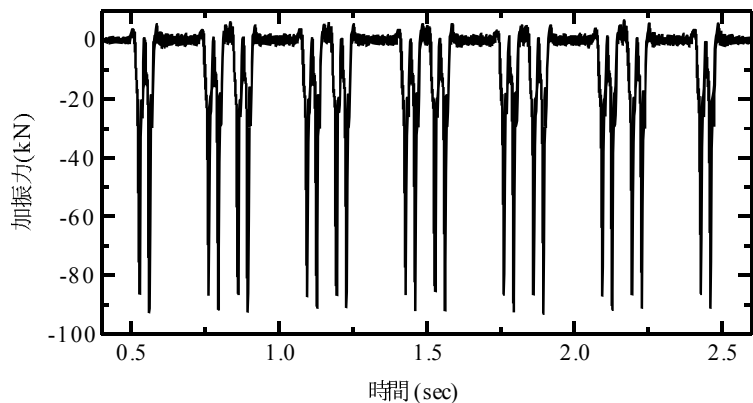
#### (1) 解析における加振力の時刻歴波形と周波数特性

図 6-7 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およ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。

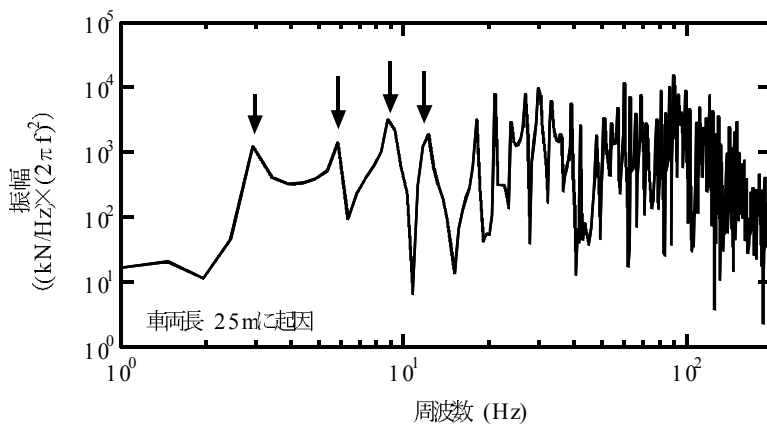
このような加振力が車両/軌道系モデルで計算され、軌道/構造物系モデルの対応する節点にそれらの加振力を与え、構造物の応答が計算される。

#### (2) たわみの時刻歴波形

図 6-8 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現象を概ね再現できていることがわかる。



(a) 時刻歴波形



(b) 周波数分析結果

図 6-7 加振力の時刻歴波形(270km/h)と周波数分析結果

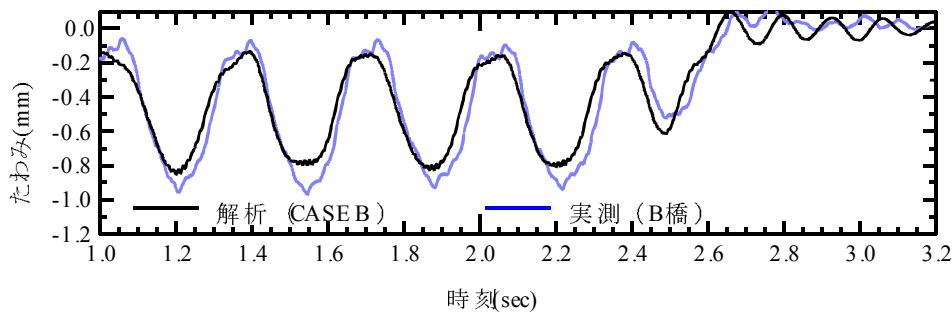


図 6-8 たわみに関する時刻歴波形 (270km/h)

## (3) 振動モード形

図6-9に固有値解析により求めた振動モード形を示す。図6-10および図6-11に対象構造物の中間スラブおよび張出スラブ、高欄の固有振動モードの実測結果をそれぞれ示す。計測点は図6-6に示した通りである。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および振動モード形を同定した<sup>6-8)</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。

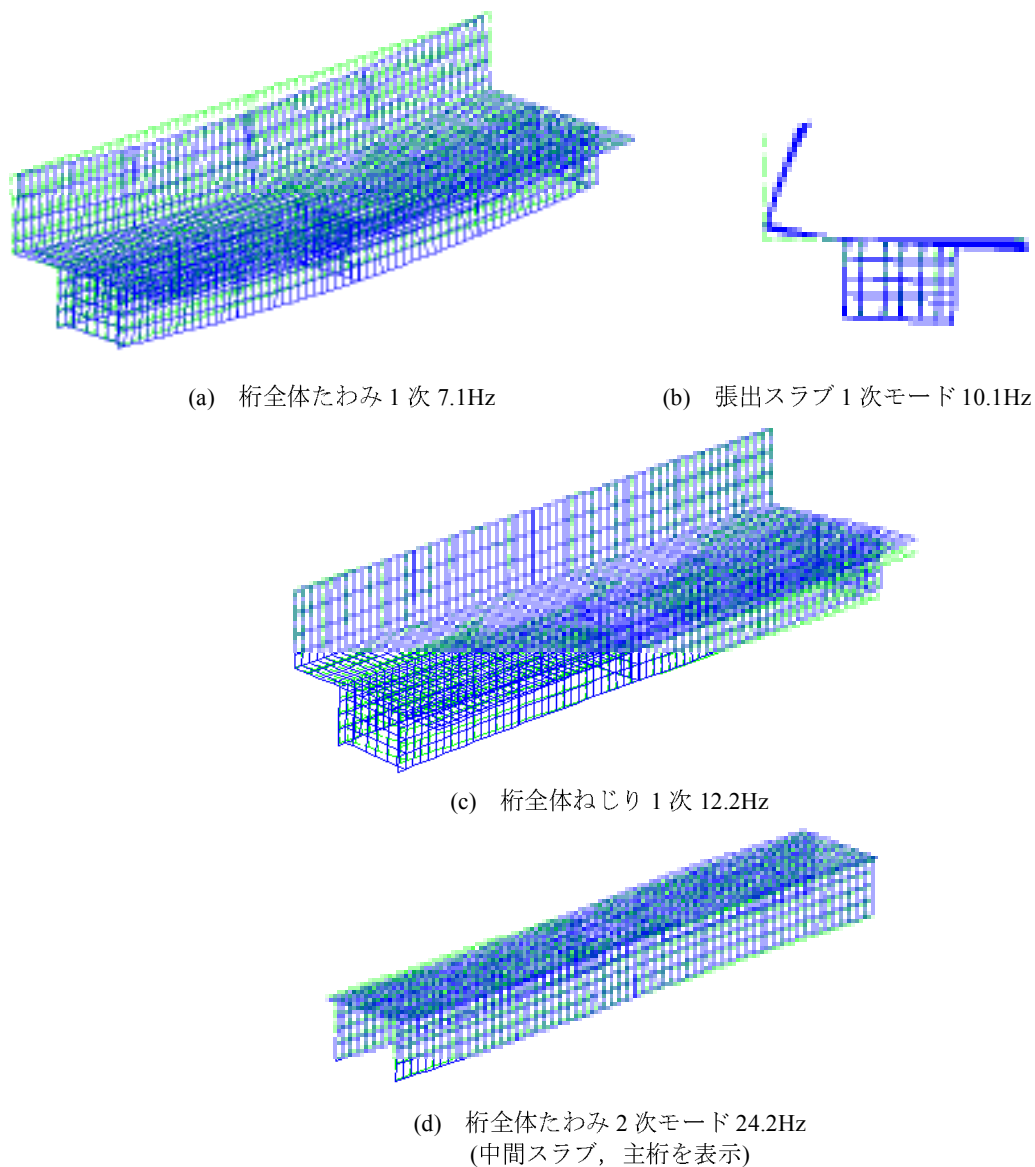
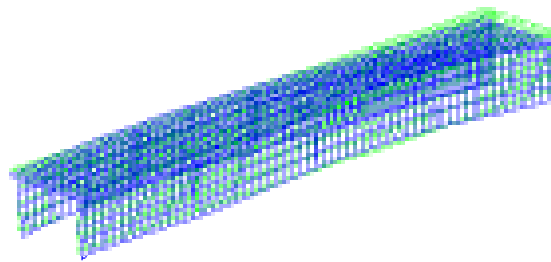
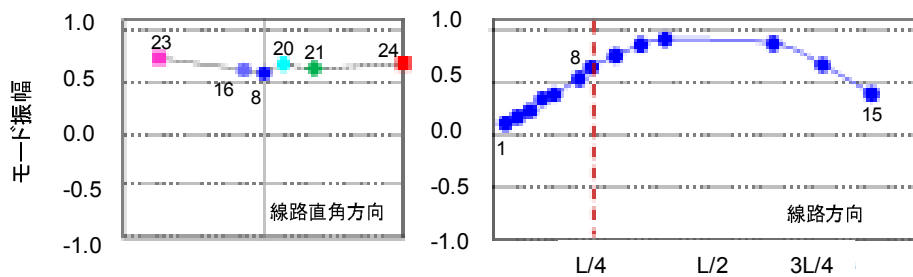


図6-9 固有値解析により求めた振動モード形

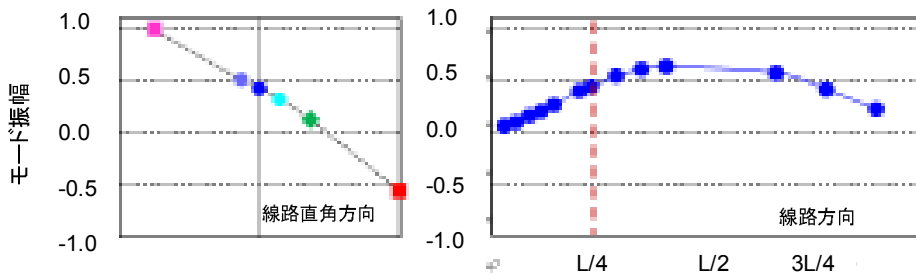


(e) 桁全体ねじり2次モード29.7Hz  
(中間スラブ, 主桁を表示)

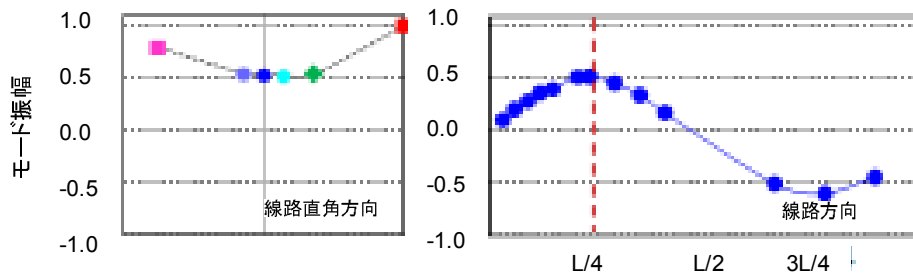
図6-9 固有値解析により求めた振動モード形



(a) 桁全体たわみ1次6.5Hz

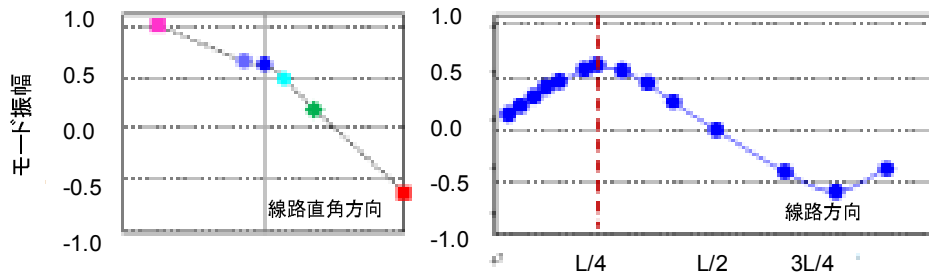


(b) 桁全体ねじり1次12.3Hz

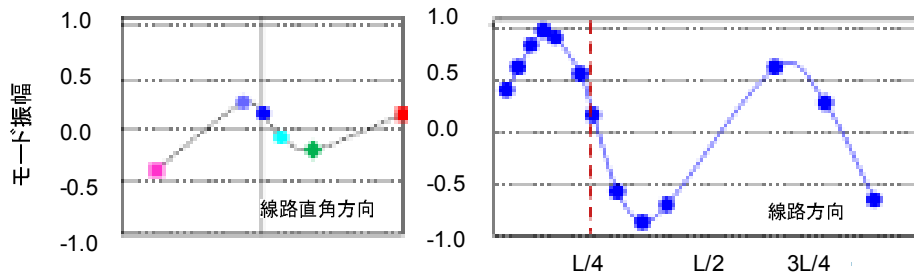


(c) 桁全体たわみ2次24.5Hz

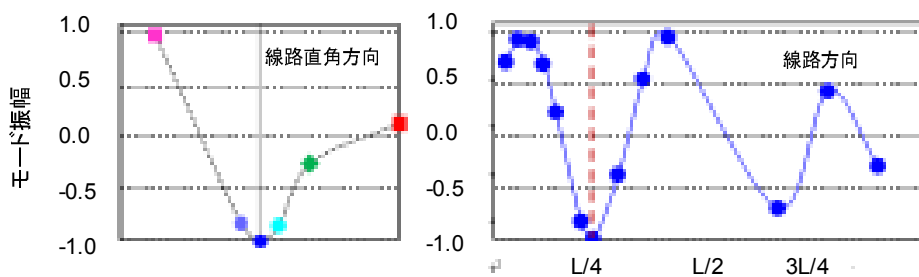
図6-10 対象構造物の中継スラブにおける固有振動モードの実測結果



(d) 桁全体ねじり 2次 30.1Hz

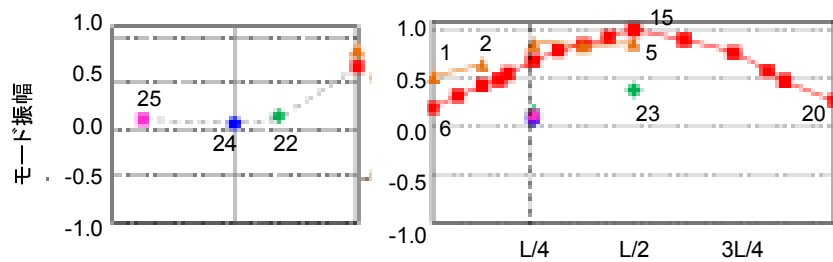


(e) 桁全体たわみ 4次 81.3Hz



(f) 中間スラブ 3次 131.5Hz

図 6-10 対象構造物の中韓スラブにおける固有振動モードの実測結果



(a) 張出スラブ 1次 9.7Hz

図 6-11 対象構造物の張出スラブ、高欄における固有振動モードの実測結果



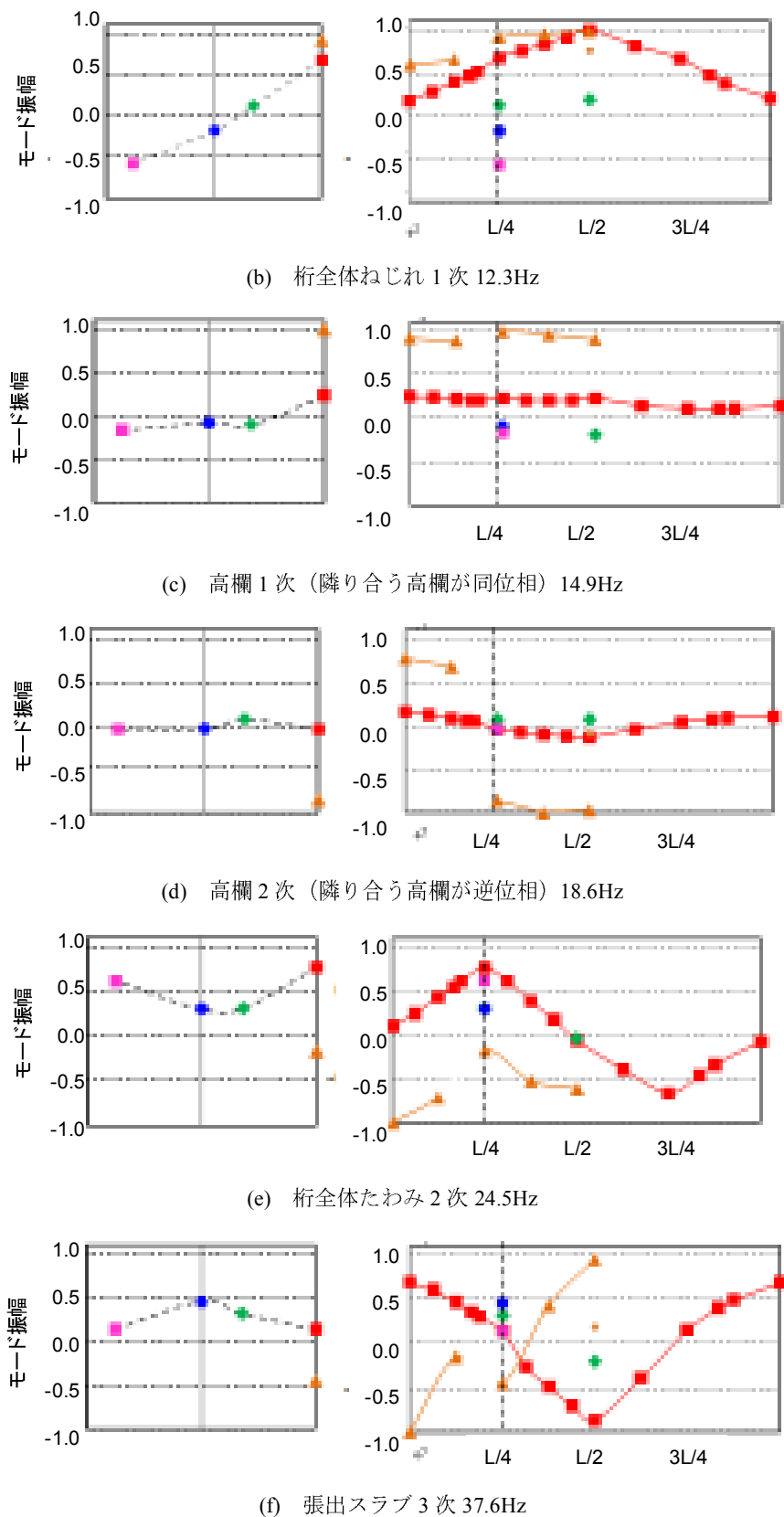


図 6-11 対象構造物の張出スラブ，高欄における固有振動モードの実測結果

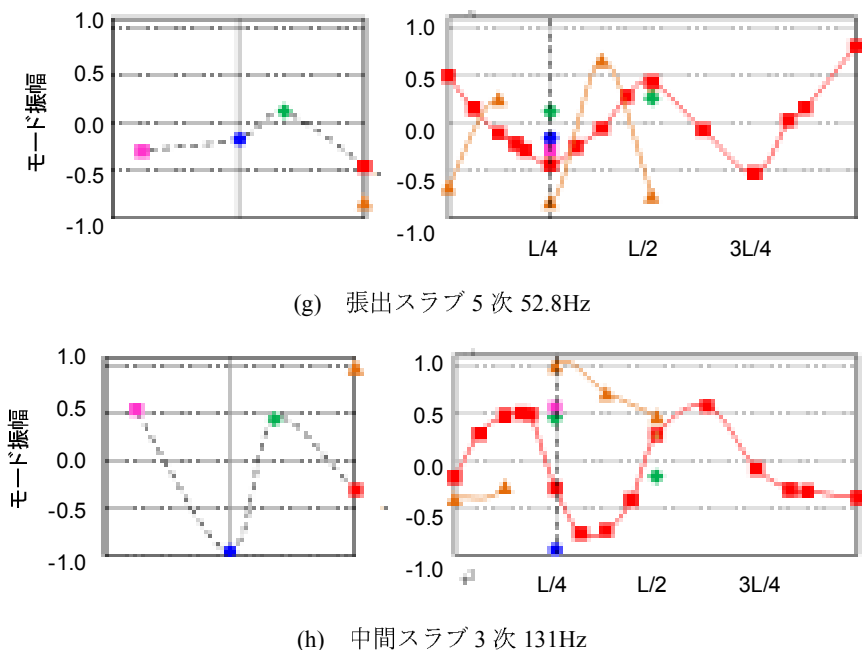


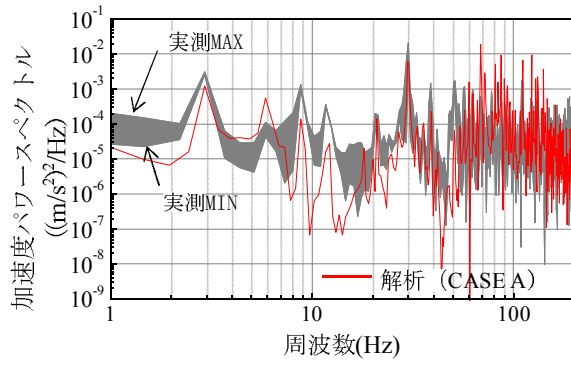
図 6-11 対象構造物の張出スラブ，高欄における固有振動モードの実測結果

(4) 応答加速度の周波数特性（速度 270km/h）

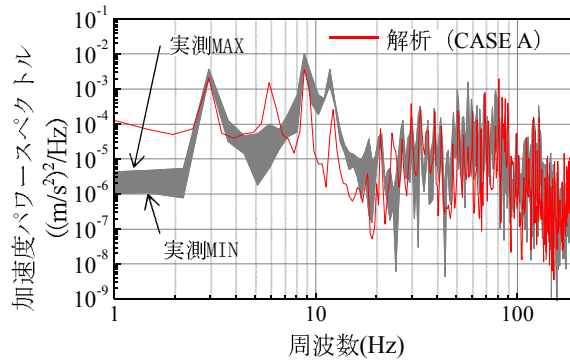
図 6-12 および図 6-13 に A 橋および B 橋の中間スラブおよび張出スラブにおける鉛直加速度に関する周波数応答特性を示す。応答評価位置は図 6-2 (b) に示す位置である。実測はある程度データがばらつくので、比較対象の実測データの本数は 5 本のうち最大値と最小値を帯で示した。同図に示すように、両橋ともねじりの 2 次モードに起因する 30Hz の応答のピークなど実現現象を概ね再現できていることがわかる。ただし、ねじりの 1 次モードに起因する 12Hz や張出スラブの 30~50Hz など、解析で過小評価となっている周波数帯がある。これらについては、地盤をモデル化の影響、1m 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 橋および B 橋の実測を比較すると、A 橋（60MN/m）に比べて軌道パッド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、軌道パッド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ですが、それより高い周波数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。

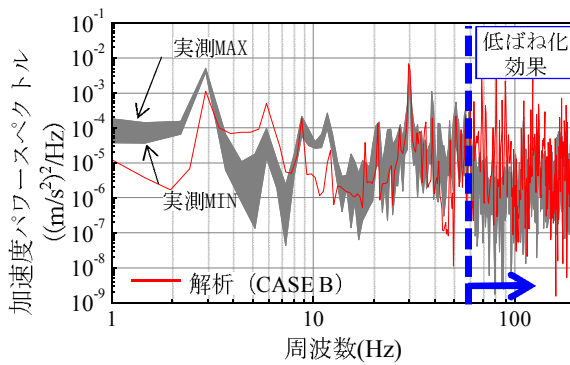


(a) 中間スラブ

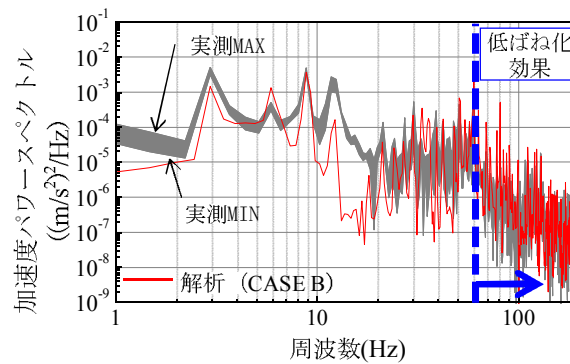


(b) 張出スラブ

図6-12 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)



(a) 中間スラブ



(b) 張出スラブ

図6-13 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)

## 6.3.2 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 6-14 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 までの帯域では、基本ケースとレール凹凸なしのケース (CASE A-2) で応答に違いが見られないが、20~100Hz の帯域および 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 6-15 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 橋および 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 6-5 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 6-11 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 6-16 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 および 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。レール凹凸なしのケース (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 6-9 および図 6-10 で示した実測の傾向と概ね同じ傾向である。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)9)</sup>。

## (4) 列車速度の影響

図 6-17 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), レール凹凸なし

(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 および軸距 2.5m に起因する

ピーク（それぞれ270km/hで3Hzおよび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より高い周波数域（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。

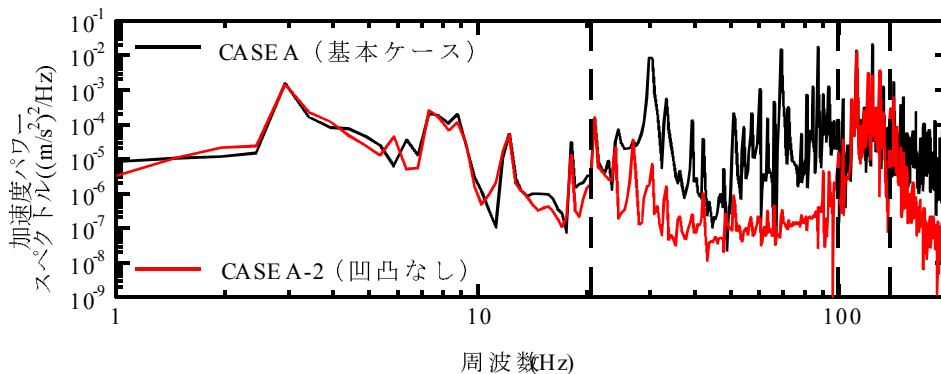


図 6-14 レール凹凸の有無による中間スラブの鉛直加速度応答への影響（270km/h）

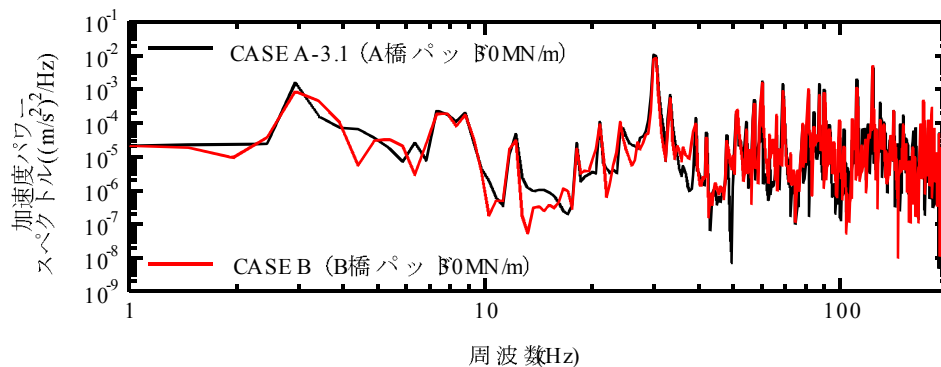


図 6-15 レール凹凸の違いによる中間スラブの鉛直加速度応答への影響（270km/h）

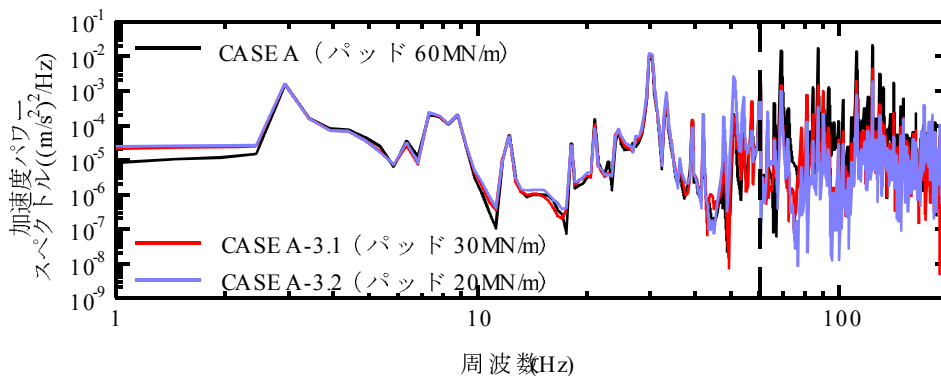
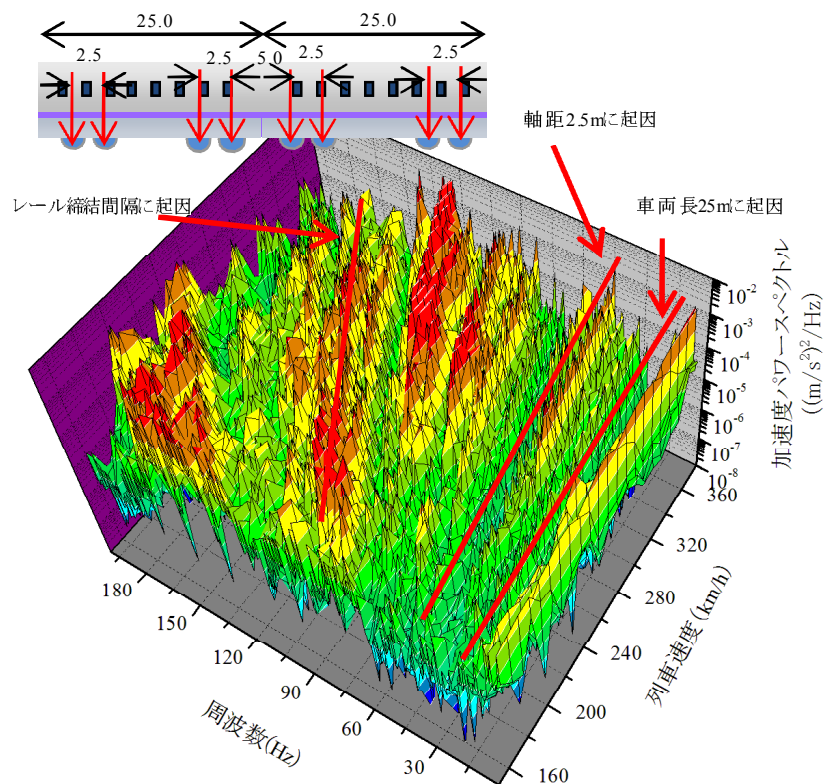
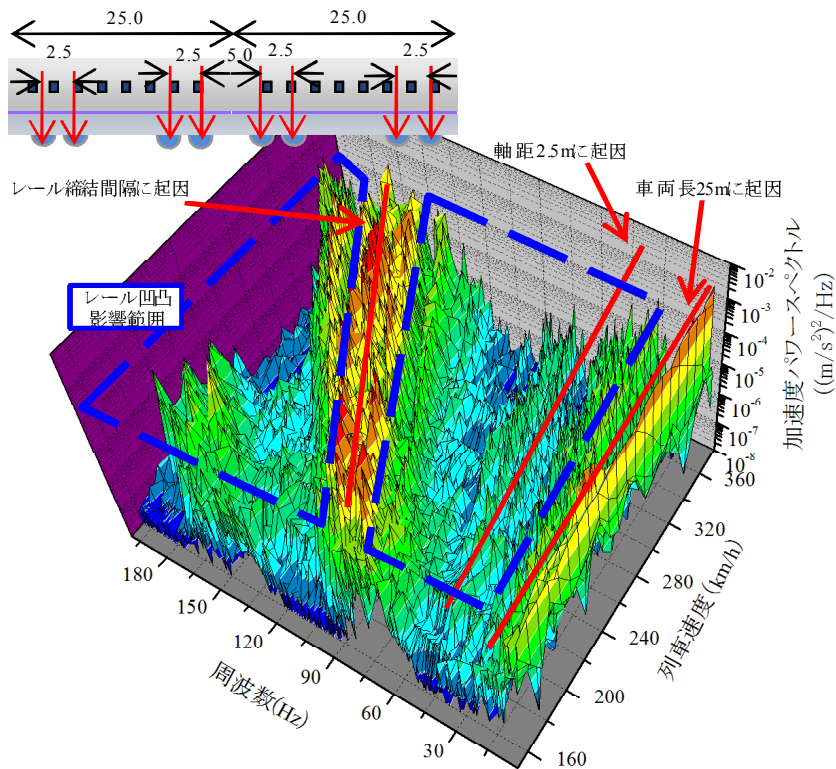


図 6-16 軌道パッドのばね定数の違いによる中間スラブの鉛直加速度応答への影響（270km/h）

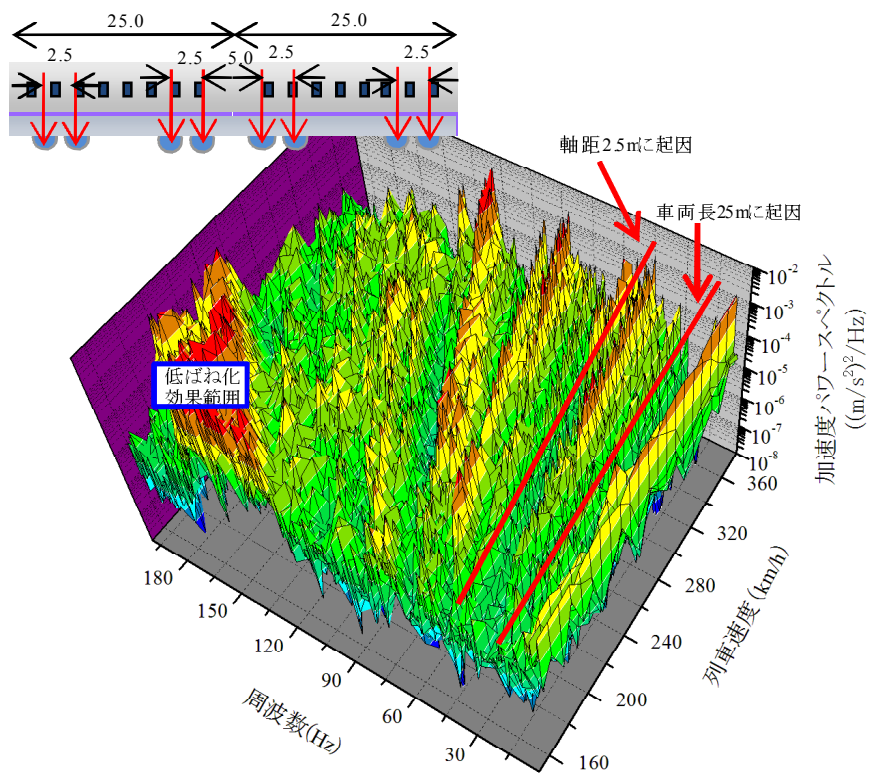


(a) CASE A(基本ケース)

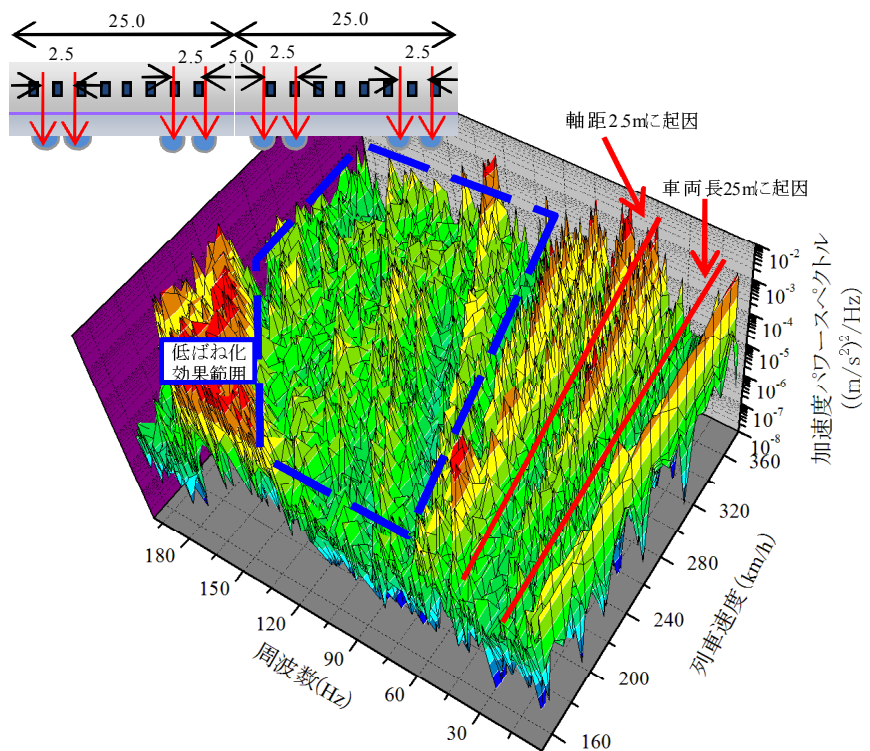


(b) CASE A-2(レール凹凸なし)

図 6-17 列車速度の違いによる影響



(c) CASE A-3.1(軌道パッド 30N/m)



(d) CASE A-3.2(軌道パッド 20N/m)

図 6-17 列車速度の違いによる影響

表 6-3 軌道の固有値解析結果

ケース	固有振動数 (Hz)	備考	
普通 スラブ軌道 A-1	650	基本ケース. 軌道スラブは, CA モルタルにより支持.	
防振 スラブ軌道	AE-1	57.8	防振 G 型スラブ軌道に相当
	AE-2	28.2	AE-1 の 1/4 の支持ばね定数
	AE-3	14.0	AE-1 の 1/16 の支持ばね定数
	AS-1	40.1	スラブ支持間隔 1.25m
	AS-2	26.8	スラブ支持間隔 2.5m
	AL-1	56.7	スラブ長さ 10m(ばね定数は AE-1 と同じ)
	AL-2	56.6	スラブ長さ 60m(ばね定数は AE-1 と同じ)

### 6.3.3 数値解析による防振スラブ軌道に関する影響評価(列車速度 270km/h)

#### (1) 軌道の固有値解析結果

表 6-3 に軌道の固有値解析結果を示す。車両/軌道系の加振力解析モデルにおいて、固有値解析を行い、軌道スラブ 1 枚の 1 次曲げの固有振動数を求めた。防振軌道は、CA モルタルで支持された普通スラブ軌道に比べて大幅に固有振動数が低下することがわかる。最も低い固有振動数で 14Hz である。同表より、弾性材のばね定数を  $1/n$  ( $n$  は自然数) とすると固有振動数は概ね  $(1/n)^{0.5}$  となること、支持間隔  $n$  倍すると固有振動数は概ね  $(1/n)^{0.5}$  となることがわかる。これは 1 質点系の固有振動数の理論と概ね一致する。また、スラブ長さを変更してもケース A1 と比較してケース AL-1, AL-2 の固有振動数はほとんど変化しない。これは、単位長さ当たりの質量およびばね定数が変化しないためであると考えられる。

#### (2) 加振力解析結果

図 6-18 に車両/軌道系の加振力解析モデルにより解析した加振力の周波数分析結果を示す。列車速度は 260km/h である。同図(a)を見ると、12Hz 程度までは各ケースにほとんど違いは見られない。12Hz 以上の帯域では、防振スラブ軌道の固有振動数付近で振幅が増大し、さらに高い帯域では、普通スラブ軌道より加振力の振幅が小さくなることがわかる。同図(b)を見ると、支持間隔が広くなればなるほど 1 つのばね要素が負担する力の割合が大きくなるため、特に 12Hz より低い帯域で加振力の振幅が増加した。同図(c)を見ると、スラブ長さによる違いはほとんど見られないことがわかる。これは、スラブの長さを変えても軌道の固有振動数が変化しておらず、加振力の周波数特性が変化していないためであると考えられる。

#### (3) 構造物振動解析結果

図 6-19 に各ケースにおける中間スラブの加速度応答の周波数分析結果を示す。列車速度は 260km/h である。同図(a)を見ると、軌道の固有振動数よりも低い周波数帯では応答にほとんど違いはなく、軌道の固有振動数付近では応答が増幅し、それよりも高い周波数帯においては応答低減効果があることがわかる。例えば、ケース AE-3 は 14Hz が軌道の固有振動数であり、概ね 30Hz 以上の帯域から低減効果が得られている。その他のパラメータについても傾向は同じであり、軌



道の固有振動数によって防振スラブ軌道の応答低減効果が得られる帯域が異なることがわかった。また、同図(c)を見ると、スラブ長さによる違いはほとんど見られないことがわかる。これは、スラブの長さを変えても軌道の固有振動数が変化しておらず、加振力の周波数特性が変化していないためであると考えられる。このことから、防振軌道による走行安全性の確保のために軌道スラブを連続化あるいは長大化する対策を行ったとしても、単位長さ当たりの質量と支持ばね定数が同じであれば、振動低減効果に影響は及ぼさないことがわかる。

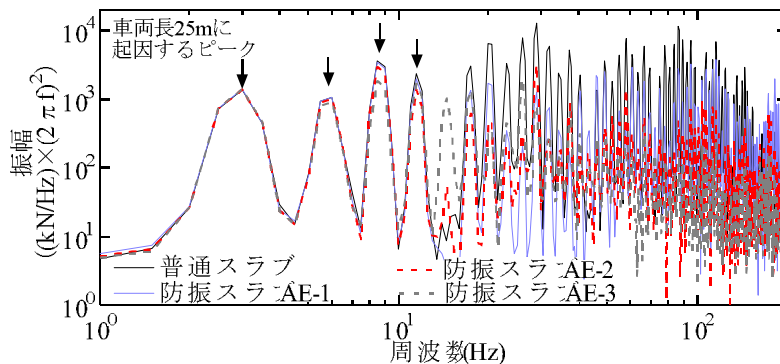
#### (4) 列車速度の影響

図 6-20 に列車速度の違いが中間スラブの応答に与える影響を示す。160~370km/h の速度域で検討した。防振スラブ軌道は軌道スラブの下に配置された弾性材のばね定数が異なる AE-1, AE-2, AE-3 を取り上げた。基本ケース (図 6-17) と図 6-20 を比較すると、応答が増幅および低減する周波数帯が異なることがわかる。

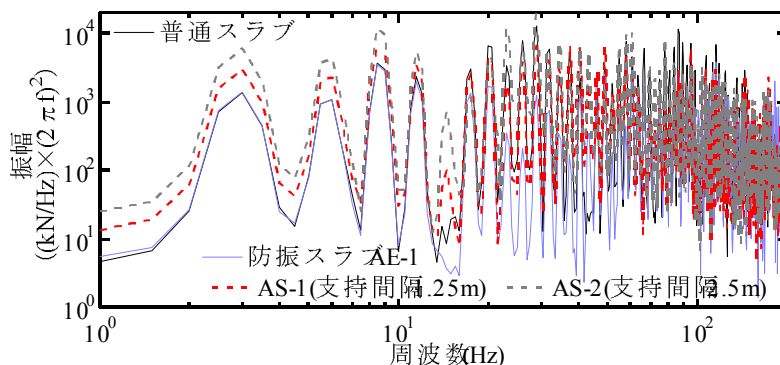
既往の防振スラブ軌道に相当する弾性材のばね定数を有する AE-1 では、車両長や軸距に起因するピークが卓越する概ね 30Hz 以下の帯域では応答に違いはなく、防振スラブ軌道 AE-1 の固有振動数 57.6 付近の概ね 30~60Hz 付近の帯域で応答が増幅し、60Hz 以上の帯域で、応答が低下していることがわかる。

既設の防振スラブ軌道に相当する弾性材の 1/4 のばね定数を有する AE-2 では、車両長に起因するピークが卓越する概ね 10Hz 以下の帯域では応答に違いはなく、防振スラブ軌道の固有振動数付近の概ね 10~50Hz の帯域で応答が増幅し、50Hz 以上の帯域で、応答が低下していることがわかる。

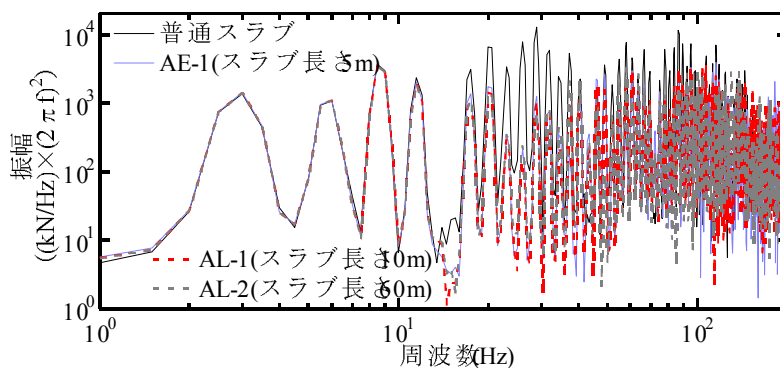
既設の防振スラブ軌道に相当する弾性材の 1/16 のばね定数を有する AE-3 では、車両長に起因するピークが卓越する概ね 10Hz 以下の帯域では応答に違いはなく、防振スラブ軌道の固有振動数付近の概ね 10~30Hz の帯域で応答が増幅し、30Hz 以上の帯域では応答が低下していることがわかる。



(a) 防振スラブのばね定数の影響

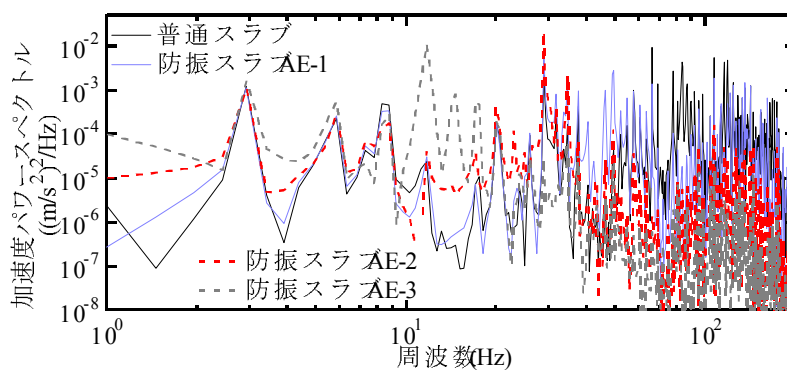


(b) スラブ支持間隔の影響

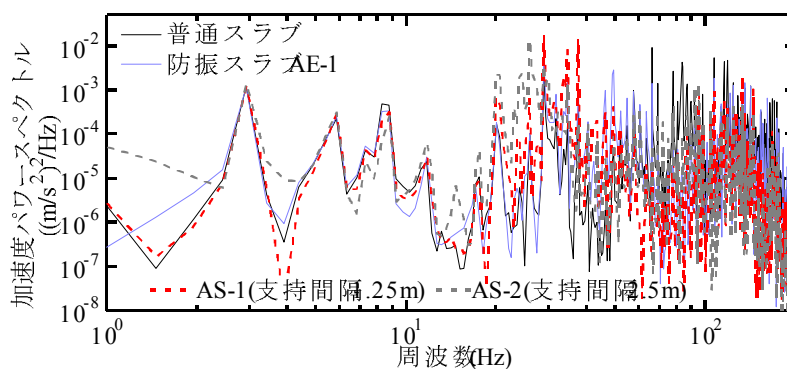


(c) スラブの線路方向長さの影響

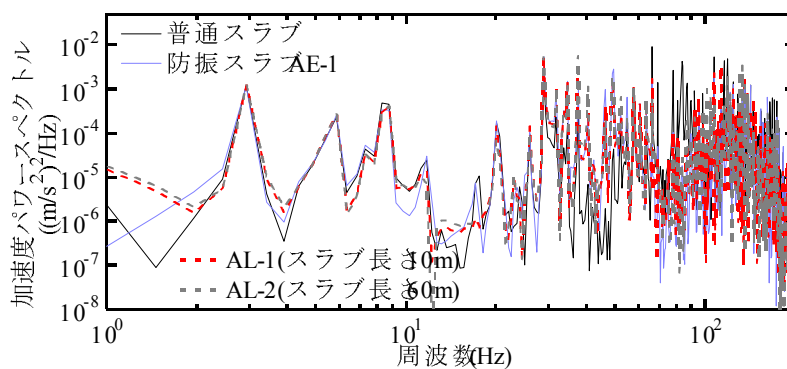
図 6-18 加振力の周波数分析結果(速度 260km/h)



(a) 防振スラブのばね定数の影響

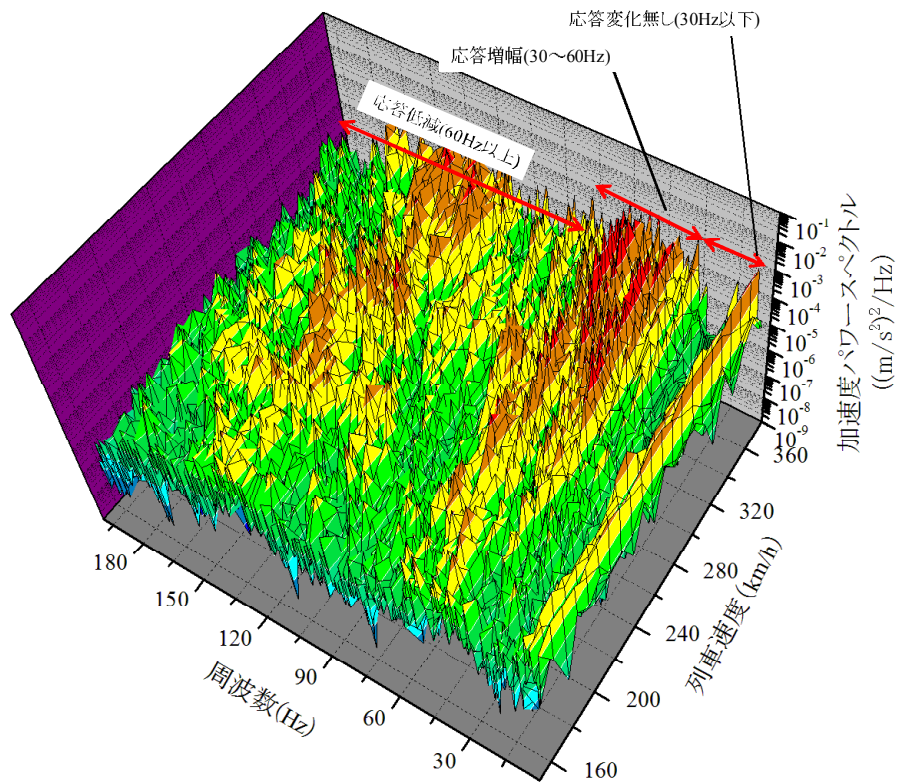


(b) スラブ支持間隔の影響

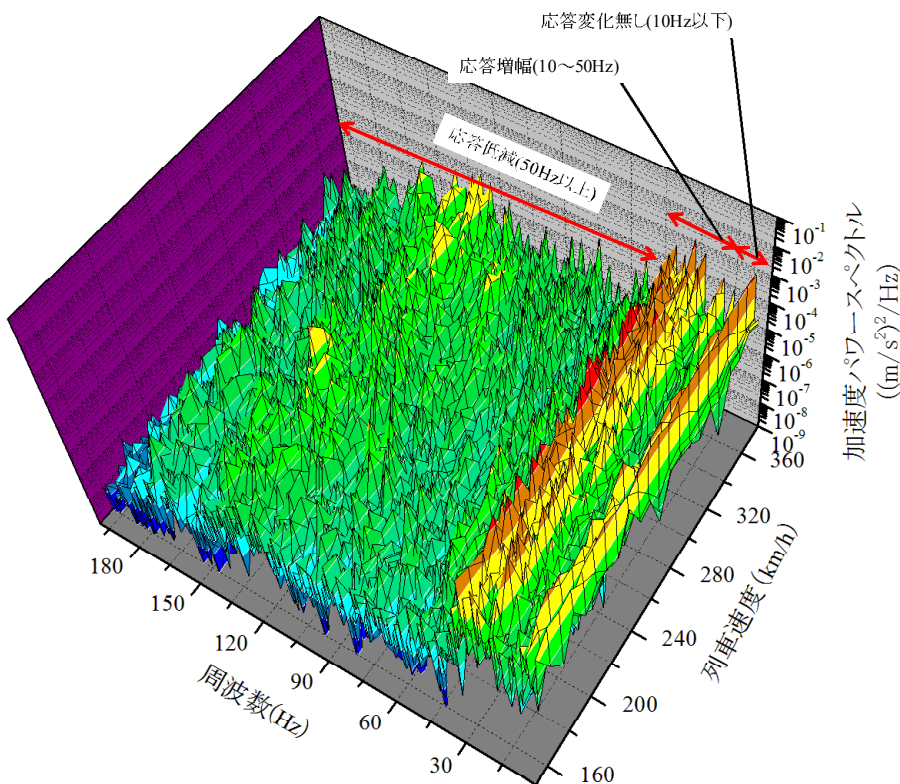


(c) スラブの線路方向長さの影響

図 6-19 中間スラブの加速度応答の周波数分析結果(速度 260km/h)

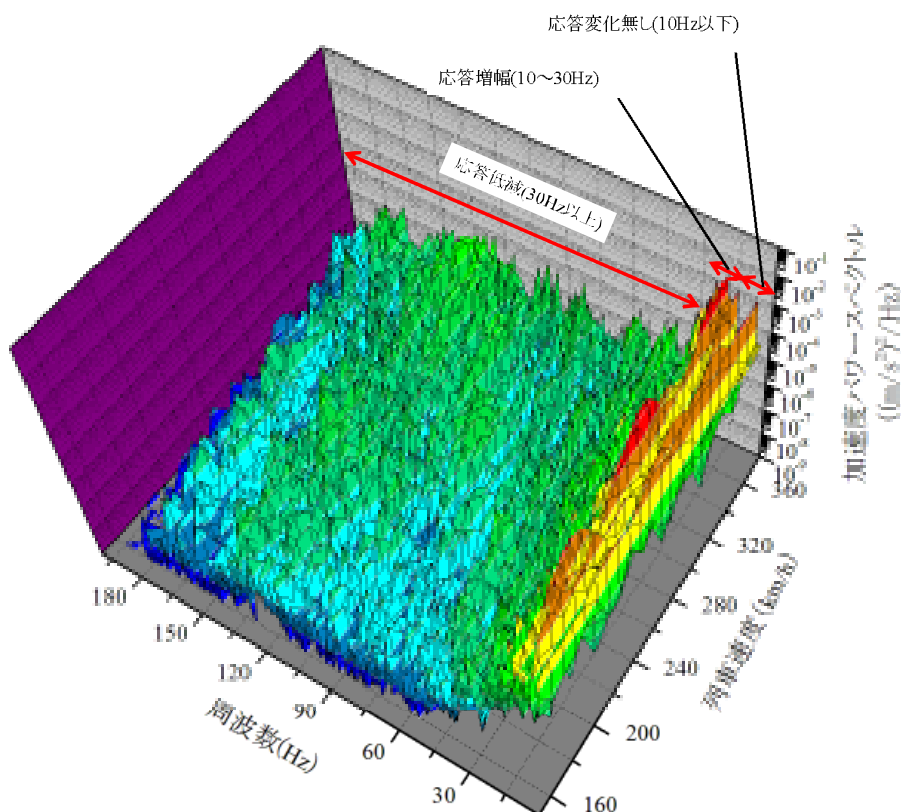


(a) 防振スラブ軌道(ケース AE-1)



(b) 防振スラブ軌道(ケース AE-2)

図 6-20 列車速度の違いが中間スラブの応答に与える影響



(c) 防振スラブ軌道(ケース AE-3)

図 6-20 列車速度の違いが中間スラブの応答に与える影響

#### 6. 4 本章の結論

本章では、新幹線の沿線構造物の中で RC ラーメン高架橋について構成割合の大きい構造形式である RC 桁式高架橋について構造物音の発生メカニズムの解明および低減対策の検討を行った。また、防振軌道に特化したパラメータ解析を実施した。本章で得られた知見を整理すると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、振動モード形およ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。本研究で構築した解析手法は第 5 章で示した RC ラーメン高架橋、本章の RC 桁式高架橋と異なる構造形式においても実現象を再現可能であることが実証された。本解析手法の汎用性の高さが示された。
- (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およ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が、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) 軌道パットを低ばね定数化すると、車両長 25m および軸距 2.5m に起因するピーク（それぞれ 270km/h で 3Hz および 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 より高い周波数域（270km/h では 60Hz）において軌道パット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。

また、防振スラブ軌道に着目して検討した結果、以下のことが明らかとなった。

(5) 車両/軌道系モデルによる固有値解析の結果、防振スラブ軌道の弾性材のばね定数を  $1/n$  ( $n$  は自然数) とすると固有振動数は概ね  $(1/n)^{0.5}$ 、支持間隔  $n$  倍すると固有振動数は概ね  $(1/n)^{0.5}$  となり、1 質点の固有振動数の理論と概ね一致した。

(6) 単位長さ当たりの軌道の質量と支持ばね定数が同じであれば、スラブ長さによる応答への影響はほとんどないことがわかった。これは、スラブの長さを変えても軌道の固有振動数が変化しておらず、加振力の周波数特性が変化していないためであると考えられる。このことから、防振軌道による走行安全性の確保のために軌道スラブを連続化あるいは長大化する対策を行ったとしても、単位長さ当たりの質量と支持ばね定数が同じであれば、振動低減効果に影響は及ぼさないことがわかった。

(7) 軌道の固有振動数によって防振スラブ軌道の応答低減効果が得られる帯域が異なることがわかった。軌道の固有振動数よりも低い帯域では応答にほとんど違いはなく、軌道の固有振動数付近では応答が増幅し、それよりも高い帯域においては応答低減効果がある。例えば、防振スラブ軌道の固有振動数が 14Hz の場合、列車速度によらず概ね 30Hz 以上の帯域から応答低減効果が得られることがわかった。

(8) 防振軌道で構造物音に対する低減効果を得る場合は、1 例として取り上げた既往の防振スラブ軌道よりも固有振動数を低下させる必要があることがわかった。ただし、防振軌道による走行安全性の確保のために軌道スラブを連続化あるいは長大化する対策を行ったとしても、単位長さ当たりの質量と支持ばね定数が同じであれば、振動低減効果に影響は及ぼさないことがわかった。

なお、本章で検討した防振スラブ軌道に関するパラメータの各諸元は数値実験に留まるものであり、実際の軌道に対しては、弾性材の強度や耐久性、列車走行安全性、施工性などの複合的な観点からさらなる検討が必要である。また、数 Hz~数十 Hz の応答増幅は地盤振動への影響が懸念されるため、現在の解析モデルを拡張して、地盤振動の評価を引き続き行う必要があると考えられる。この点については今後の課題として、第 7 章にまとめることにした。

## 参考文献

- 6-1) 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
- 6-2) Viktor Enoekl, Udo Lenz : First Mass-Spring System in a high-speed railway line, Eisenbahntechnische Rundschau, Vol.9, pp527-538, 2003.
- 6-3) 渡辺勉，曾我部正道，山崎貴之，奥田広之，涌井一：各種フローティング軌道の高速鉄道への適用性に関する研究，構造工学論文集，Vol.53A，pp.77-86，2007.

- 6-4) 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
- 6-5) 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
- 6-6) 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
- 6-7) 佐藤吉彦, 大石不二夫, 渡辺偕年, 安藤勝敏, 三浦重, 安部成博, 御船直人, 新堀和徳: 防振 G 型スラブ軌道の開発実用化, 鉄道技術研究報告, No.1357, 1987.3
- 6-8) 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
- 6-9) 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

## 7章 結論

### 7.1 本章の概要

本論文では、鉄道沿線騒音のうち近年の列車の高速化により新たな課題として認識されてきた鉄道 RC 高架橋の構造物音を対象として、数値解析を用いてその発生メカニズムの解明および低減対策に関する研究を進めてきた。

本論文では、まず列車走行に伴う鉄道沿線騒音の概要および本研究に係る既往の知見を整理した。合わせて、高速鉄道における防振軌道の成立性を数値実験により確認するとともに、防振軌道の防振効果の実用性を実物大構造物・軌道模型により確認した。これらの成果を前提条件として、標準 RC ラーメン高架橋および標準 RC 桁式高架橋の構造物音発生メカニズムの解明とその低減対策に関する検討を実施した。本章では各章の結論を整理するとともに、今後の展望と課題を述べ本論文の結論とする。

### 7.2 各章の結論

#### 7.2.1 第2章「列車走行に伴う鉄道沿線騒音の概要」における結論

第2章では、列車走行に伴って発生する鉄道沿線騒音の概要および本研究に係る既往の知見を整理した。第2章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 東海道新幹線が1964年に開業した直後、無道床鋼橋の騒音が社会問題化した。その後、鉄道においては、無道床鋼橋は用いられなくなり、コンクリート橋や鋼・複合橋が鉄道橋の主流となっている。
- (2) 新幹線の沿線騒音において、各種音源別の対策が行われた結果、突出して寄与の大きな音源がなくなった。このような状況下においては、新幹線開業当時は寄与度が小さかったコンクリート橋の構造物音については、条件によっては相対的に沿線騒音に対する寄与度が大きくなる可能性がある。
- (3) コンクリート橋の構造物音は、近年の速度向上により、新たな課題として認識されてきた現象であり、現象解明や低減対策の検討は限定的な内容に留まっているのが実状である。したがって、現象解明そのものが不十分なコンクリート橋の構造物音については、実測および数値解析を用いて、周波数ごとの主要な要因の抽出、各種パラメータの詳細な感度分析および対策工の検討などを行うことが求められている。
- (4) 構造物音の対策は、加振力低減、防振、制振、遮音・吸音、剛性増加などの観点から検討することができる。このうち、軌道支持ばね定数の低下を伴う防振については、列車の走行安全性の低下が懸念されるため、新幹線では導入実績が無いのが実状である。しかしながら、今後の列車の速度向上に伴う騒音振動に対する環境性能の実現のためには、防振軌道による対策についてもその実現性を検討しておく必要があると考える。
- (5) 現在の在来線および新幹線における騒音の予測手法は実測データをベースに構築された手法である。数値解析による試みも見られるようになってきたが、輪重、車軸配置、列車速度、



車両の振動系などの車両に関する各種パラメータ、軌道支持剛性、レール締結間隔、レール凹凸、軌道変位などの軌道に関する各種パラメータ、部材の剛性、非構造部材、減衰などの構造物に関する各種パラメータが、構造物の部材振動および構造物音における周波数帯ごとに寄与する影響度について、詳細に分析するには至っていない。

### 7.2.2 第3章「構造物低減軌道の高速度への適用性」における結論

第3章では、構造物音の効果的な対策と考えられている防振軌道について、数値解析を用いて高速度への適用性を検討した。数値実験には、車両と構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARS II を用いた。防振軌道5種類を対象とした。以下に第3章で得られた知見を示す。

- (1) 防振軌道は一般に軌道支持ばね定数が小さく、固有振動数は、 $1/2 \sim 1/10$  となっている。しかしながらレールの最大変位については、顕著な共振が認められず、防振軌道は共振に対して安全であると考えられる。
- (2) 防振軌道上を走行する車両の走行安全性は、ユニット継目、隣接軌道構造との境界部の影響を受ける。前者については適切にユニット継目の軌道支持ばね定数を設定することにより、列車速度  $360\text{m/h}$  程度までは輪重減少率を  $5\%$  以内に抑えることが可能であり、平滑な走行を確保できると考えられる。後者については、隣接軌道構造との遷移区間を調整することにより、走行安全性の確保を図っていくのがよいと考える。
- (3) 防振軌道を走行する車両の車体加速度は、最大でも  $0.1\text{m/s}^2$  ( $0.01\text{g}$ ) 程度と極めて良好である。このため防振軌道の適用性を検討する場合には、乗り心地は全く問題にならないと考える。

### 7.2.3 第4章「鋼鉄道橋の構造物音の低減対策」における結論

第4章では、構造物音の効果的な対策と考えられている防振軌道について、より騒音が問題になりやすい鋼鉄道橋を対象として、その防振効果を実証した。フローティング・ラダー軌道と弾性支持コンクリート床版を用いた新しい構造形式のダブルフローティング型鋼鉄道橋を開発し、実物大の構造物・軌道模型による走行試験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 実物大模型桁のインパルス加振試験により、剛支持構造と比較してダブルフローティング構造では、主桁ウェブの固有振動数にあたるアクセラランスのピーク値を低減できることがわかった。また、およそ  $100\text{Hz}$  以上ではフローティング・ラダー軌道、 $50\text{Hz} \sim 100\text{Hz}$  ではフローティング床版の低減効果が得られ、ダブルフローティング構造ではそれらを包含する形で低減効果が得られることがわかった。このように、重量級のマス・スプリングシステムにより、より低い周波数領域で低減効果を得られることがわかった。
- (2) 実物大模型桁のインパルス加振試験により、アクセラランスが最も大きくなる部材は、主桁ウェブであることを確認した。また、主桁ウェブの卓越周波数はおよそ  $50\text{Hz}$  であり、これはアレ配置した加速度計を用いたモード分析によりウェブの一次の固有振動数であることがわかった。
- (3) 実物大模型桁の列車走行試験により、構造物音と密接な関係にある主桁ウェブの振動速度レベルの低減効果を定量的に評価した。剛支持構造に対して、フローティング・ラダー軌道では  $7.5\text{dB(A)}$ 、フローティング床版では  $6.1\text{dB(A)}$ 、ダブルフローティング構造では  $10.1\text{dB(A)}$  の振動

速度レベルの低減効果を確認した（列車速度約40km/h）。

- (4) 騒音予測手法と上記列車走行試験結果に基づき、軌道中心から12.5m地点におけるピーク騒音レベルおよび等価騒音レベルを予測した。剛支持構造に対して、ダブルフローティング構造では、ピーク騒音レベルで10.5dB(A)、等価騒音レベルで10.4dB(A)の低減効果が得られると推定した（列車速度70km/h換算）。

#### 7.2.4 第5章「鉄道 RC ラーメン高架橋の構造物音発生メカニズムの解明とその低減対策」における結論

第5章では、本研究で対象とする RC ラーメン高架橋の構造物音に関して、図 7-1 に示すような車両/軌道/構造物の各種パラメータの影響を考慮可能な汎用的な解析手法を構築し、RC 高架橋の部材振動特性を解明した。さらに、本解析手法を用いて with/without 分析により、車両/軌道/構造物の各種パラメータが部材の周波数応答特性に及ぼす影響を明らかにし、RC 高架橋の構造物音発生メカニズムの解明、並びに列車速度、周波数、加速度パワースペクトルによる 3D グラフの構築により解析結果の可視化を行った。第5章で得られた知見をまとめると以下の通りとなる。

- (1) 車両/軌道/構造物の振動伝播系を、モード寄与率の観点からスケールの異なる車両/軌道系モデルおよび軌道/構造物系モデルの2つの系に分割し、構造物音の主な原因となる 200Hz 程度までの部材振動を効率的に解析する手法を新たに構築した。実測との比較の結果、本手法は実測のばらつきの範囲内に概ね収まっており、手法の妥当性を実証した。

列車速度 270km/h における中間スラブの応答に着目した with/without 分析の結果を整理すると以下の通りになる。図 7-2 には、列車速度 270km/h における中間スラブの加速度応答に関する周波数ごとの支配的要因を示す。

- (2) 車両のパラメータについては、ばね下質量は 20Hz より高周波領域、車両質量は 100Hz より低周波および 180Hz より高周波領域で影響が大きく、軸配置はピークの生じる周波数に影響を与えることがわかった。
- (3) 軌道のパラメータについては、軌道変位およびレール凹凸は 20Hz～100Hz および 150Hz より高周波領域、軌道パッドの剛性は 30Hz より高周波領域（30Hz～70Hz は同程度および若干増加、70Hz 以上で低減）、レール締結間隔は 100～140Hz の領域、防振軌道（軌道の支持ばね定数）は 30Hz より高周波領域（30Hz～60Hz は同程度および若干増加、60Hz 以上で低減）で影響が大きいことがわかった。
- (4) 構造物のパラメータについては、中間スラブの剛性は 60Hz より低周波領域、非構造部材の剛性およびコンクリートのヤング係数が設計値よりも大きくなる場合を考慮すると 30Hz より低周波領域において剛性増加により応答が低減する単純な傾向が見られ、それより高周波領域では応答の増減が見られること、構造物の減衰定数の影響は 2%を 5%に変更した範囲ではそれほど大きくないことがわかった。

さらに、列車速度を 160km/h～370km/h まで変化させ、列車速度、周波数および加速度パワースペクトルによる 3D グラフで解析結果の可視化を行った。図 7-3 に 3D グラフの一例を示す。車両、軌道および構造物の各種パラメータが構造物の部材振動に与える影響を検討した結果を整理すると以下の通りとなる。

(5) 列車速度の変化に伴って特定の速度および周波数帯で、張出スラブや中間スラブの応答に著大なピークが生じる場合がある。これは、列車速度と軸距や車両長から決まる加振周波数と構造物の部材の固有振動数が近接したこと、レール凹凸の有無、ばね下およびレール質量と軌道パッドからな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 ごとに受ける反作用による加振周波数が近接することなどが、ピーク発生のが主な要因であると考えられる。

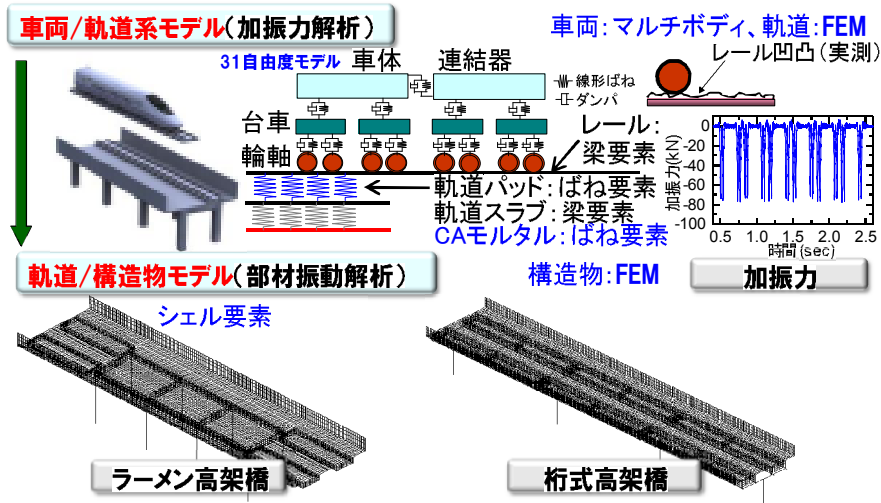


図 7-1 本研究で構築した解析手法の概要

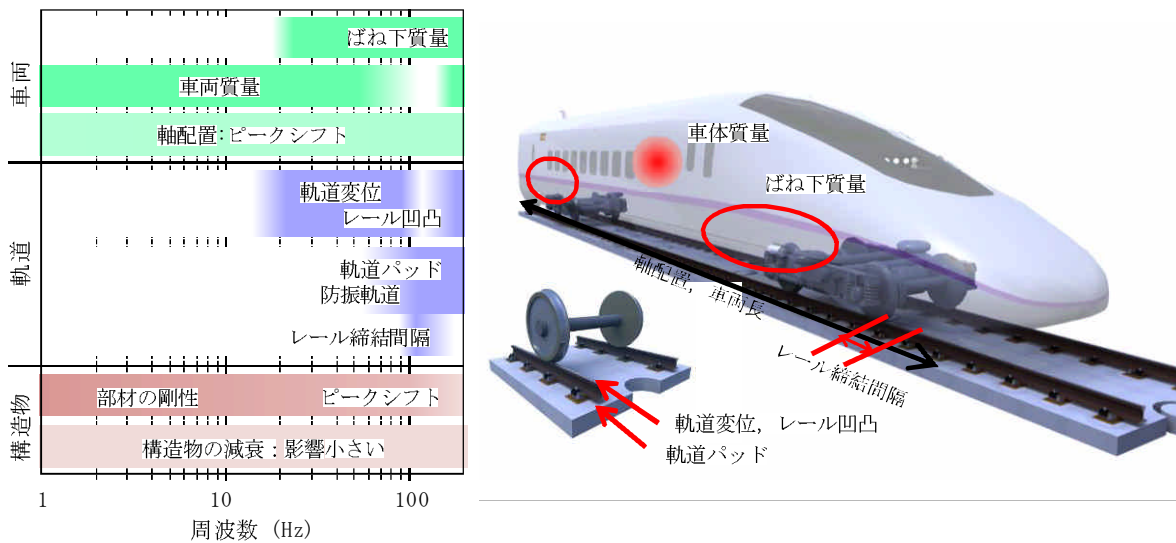


図 7-2 列車速度 270km/h における中間スラブの応答加速度に関する周波数ごとの支配的要因

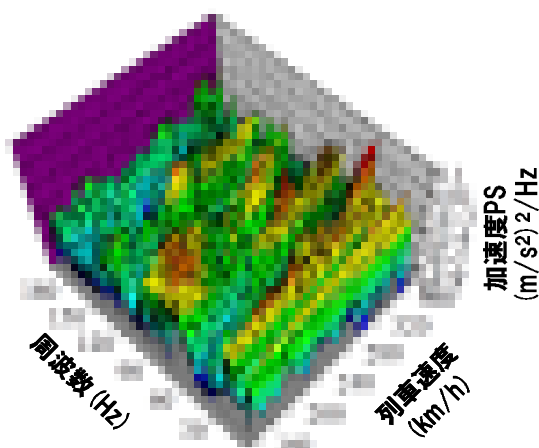


図 7-3 列車速度-周波数-加速度パワースペクトルの 3D グラフの例

#### 7.2.4 第 6 章「鉄道 RC 桁式高架橋の構造物音発生メカニズムの解明とその低減対策」における結論

第 6 章では，新幹線の沿線構造物の中で RC ラーメン高架橋について構成割合の大きい構造形式である RC 桁式高架橋について構造物音の発生メカニズムの解明および低減対策の検討を行った。また，防振軌道に特化したパラメータ解析を実施した。第 6 章で得られた知見を整理すると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，振動モード形および応答加速度における実測と解析との整合性から実現現象を概ね再現できることを確認した。本研究で構築した解析手法は第 5 章で示した RC ラーメン高架橋，本章の RC 桁式高架橋と異なる構造形式においても実現現象を再現可能であることが実証された。本解析手法の汎用性の高さが示された。
- (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およ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 および軸距 2.5m に起因するピーク（それぞれ 270km/h で 3Hz および 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。

また，防振スラブ軌道に着目して検討した結果，以下のことが明らかとなった。

- (5) 車両/軌道系モデルによる固有値解析の結果，防振スラブ軌道の弾性材のばね定数を  $1/n$ （ $n$  は自然数）とすると固有振動数は概ね  $(1/n)^{0.5}$ ，支持間隔  $n$  倍すると固有振動数は概ね  $(1/n)^{0.5}$  となり，1 質点の固有振動数の理論と概ね一致した。
- (6) 単位長さ当たりの軌道の質量と支持ばね定数が同じであれば，スラブ長さによる応答への影響

はほとんどないことがわかった。これは、スラブの長さを変えても軌道の固有振動数が変化しておらず、加振力の周波数特性が変化していないためであると考えられる。このことから、防振軌道による走行安全性の確保のために軌道スラブを連続化あるいは長大化する対策を行ったとしても、単位長さ当たりの質量と支持ばね定数が同じであれば、振動低減効果に影響は及ぼさないことがわかった。

- (7) 軌道の固有振動数によって防振スラブ軌道の応答低減効果が得られる帯域が異なることがわかった。軌道の固有振動数よりも低い帯域では応答にほとんど違いはなく、軌道の固有振動数付近では応答が増幅し、それよりも高い帯域においては応答低減効果がある。例えば、防振スラブ軌道の固有振動数が 14Hz の場合、列車速度によらず概ね 30Hz 以上の帯域から応答低減効果が得られることがわかった。
- (8) 防振軌道で構造物音に対する低減効果を得る場合は、1 例として取り上げた既往の防振スラブ軌道よりも固有振動数を低下させる必要があることがわかった。ただし、防振軌道による走行安全性の確保のために軌道スラブを連続化あるいは長大化する対策を行ったとしても、単位長さ当たりの質量と支持ばね定数が同じであれば、振動低減効果に影響は及ぼさないことがわかった。

### 7. 3 今後の展望と課題

本論文では、数値解析を用いて鉄道 RC 高架橋における構造物音の発生メカニズムの解明および低減対策に関する研究を進めてきた。ここで得られた各種成果の今後の展望を整理すると以下のようなになる。

- (1) 新幹線の 360km/h 走行実現のために車両、軌道、構造物における構造物音の各種低減対策手法の開発検討および性能評価を行う。
- (2) 例えば、防音壁嵩上げなどにより重量増を伴うような既存の高架橋の改修における部材共振に対する安全性の評価を行う。
- (3) 1 スパン 10m を超えるような前例のない新形式のラーメン高架橋の共振および構造物音に対する検証を行う。
- (4) 本研究で構築した解析手法の考え方を地盤振動解析へ展開（車両/軌道系モデルと薄層要素法をカップリング）する。
- (5) 数値シミュレーションベースの構造物音予測手法の精緻化への貢献する。

また、今後の課題を整理すると以下のようなになる。

- (6) 第 6 章では防振スラブ軌道を用いた構造物音低減対策の実現可能性を示したが、本結果はあくまで数値実験に留まるものであり、実際の軌道に対しては、弾性材の強度や耐久性、列車走行安全性、施工性などの複合的な観点からさらなる検討が必要である。
- (7) (6)と同様に、数 Hz～数十 Hz の応答増幅は地盤振動への影響が懸念されるため、現在の解析モデルを拡張して、地盤振動の評価を引き続き行う必要がある。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご指導、ご助言ならびにご協力をいただきました。まずここに深く感謝の意を表します。

本学位論文を取りまとめるにあたり、論文審査の主査を務めていただきました早稲田大学 清宮理 教授には、論文作成における心構え、論文の内容と構成など細部にわたり懇切丁寧にご指導、ご助言を賜りました。そのおかげで論文のテーマを構造物音に絞ることができ、方向性が一貫した論文を仕上げることができました。筆者は清宮研究室の卒業生ですが、卒業時にこのような形で論文を取りまとめることができるとは心にも思っていませんでした。論文を取りまとめる機会を与えてくださり、心より御礼申し上げます。また、論文審査の副査を務めていただきました早稲田大学 小泉 淳 教授、早稲田大学 依田 照彦 教授、早稲田大学 秋山 充良 教授には、論文の細部にわたり審査いただきました。特に予備審査時においては、長時間にわたり議論をさせていただき、貴重なご教示をいただきました。厚く御礼申し上げます。専攻主任の早稲田大学 中川 義英 教授には、論文全体に関して貴重なご意見をいただきました。厚く御礼申し上げます。筆者が早稲田大学在学中から実験および解析に関して様々なご指導をいただいていた早稲田大学 安 同祥 博士には、筆者が本学位論文の作成を始める前の段階からご相談に乗っていただき、貴重なご助言をいただきました。筆者が論文を取りまとめるモチベーションを高めるきっかけとなりました。改めて御礼申し上げます。

本学位論文は、筆者が 2005 年に鉄道総合技術研究所に入所以来取り組んできた研究成果を取りまとめたものです。入社当時より、研究者として経験がほとんどなく未熟な筆者に、研究の構想や方向性、それらを進める上で必要な数値解析や現地計測の基礎知識、基礎技術の修得などについて、懇切丁寧に一貫してご指導、ご助言をいただいた鉄道総研 曾我部 正道 博士には、ここに改めて深甚の謝意を表します。曾我部博士なくして、筆者の研究業績そのものが存在しないと言っても過言ではありません。本当にありがとうございました。

本研究は、鉄道沿線騒音のうち近年の列車の高速化により新たな課題として認識されてきた鉄道 RC 高架橋の構造物音を対象として、鉄道高架橋の構造物音の発生メカニズムと低減対策に関する内容となっておりますが、研究を進めるにあたり、多くの数値解析と現地計測を実施いたしました。

数値解析においては、世界トップレベルの車両と構造物の動的相互作用解析プログラムである DIASTARS, DIARIST を用いました。神奈川工科大学 田辺 誠 教授、計算力学研究所 田辺 泰子 社長には、数値解析の基礎から実際の動的相互作用解析に至るまで、多岐にわたるご指導、ご助言を賜りました。心より御礼申し上げます。また、鉄道総研 涌井 一 博士には、筆者が鉄道総研に入社以来、研究成果を取りまとめた論文や報告書などに対して査読をいただき、貴重なご意見、ご指導を賜りました。厚く御礼申し上げます。(株) レールテック (前 鉄道総研) 奥田 広之 博士には、数値解析におけるモデル作成、結果の評価方法について懇切丁寧にご指導いただきました。3 章の走行性の数値解析においては奥田博士のご指導により、様々な数値解析に挑むこと

ができました。厚く御礼申し上げます。

現地計測は、4章では鋼鉄道橋、5章では新幹線標準ラーメン高架橋、6章では新幹線桁式高架橋において実施いたしました。計測においては、多くの方々のご指導、ご協力を賜りました。(株)ビーエムシー 杉崎 光一 氏、ビーエムシー 石井 秀和 氏、大阪大学 准教授 (前ビーエムシー) 貝戸 清之 博士には、現地計測の機器の仮設のノウハウからデータ分析方法まで様々な技術的アドバイスをいただきました。厚く御礼申し上げます。また、5章、6章の構造物音の発生メカニズムの解明においては、東日本旅客鉄道株式会社 栗田 健 博士、東日本旅客鉄道株式会社 若林 雄介 博士、東日本旅客鉄道株式会社 (現鉄道総研) 宇田 東樹 博士にフィールドのご提供、研究成果に関するディスカッションをいただきました。厚く御礼申し上げます。さらに、鉄道総研 長倉 清 博士、半坂 征則 博士、北川 敏樹 博士、村田 香 主任研究員、川口 二俊 研究員をはじめとする鉄道騒音をご専門とされる皆様に、多くのご指導、ご助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究に限らず、日々の様々な業務においてアドバイスをいただいた鉄道総研 構造力学研究室の関係各位にも改めて感謝を申し上げます。構造力学研究室長 上半 文昭 博士には、筆者が論文を取りまとめるにあたり、常日頃から温かい励ましの言葉、また技術的なアドバイスを頂戴しました。また、(株)テス (前構造力学室長) 浅沼 潔 部長、PC まくらぎ研究所 井上 寛美 博士には、公私にわたり、筆者の心の支えになっていただきました。また、コンクリート構造研究室 仁平 達也 博士には、筆者に最も身近な先輩として、研究に取り組む基本姿勢からお手本にさせていただきました。常に仁平博士の背を追いかけてきた気がします。また、研究室の後輩である構造力学研究室 後藤 恵一 副主任研究員、徳永 宗正 研究員、箕浦 慎太郎 研究員、松岡 弘大 博士には、筆者の研究に様々な場面でご協力いただくとともに、筆者も良い刺激を受けることができました。(株)テス 高木 秀典 氏には、CG および動画作成において多大なるご協力をいただきました。筆者の研究成果のプレゼンテーションのビジュアル化に大きく貢献していただきました。(株)テス 村井 佐和子 氏には、数値解析や現地計測におけるデータ整理で絶大なるご支援ご協力をいただくとともに、筆者の心の支えとなっていただきました。

以上の方々をはじめ、個々にお名前を挙げるのでできなかった数多くの方々にもご助言やご協力、ならびに多くの励ましの言葉を頂戴いたしました。皆様に心より感謝申し上げます。

本論文により、鉄道高架橋の構造物音の発生メカニズムと低減対策についてある一定の成果が得られたものと自負しておりますが、今後は、具体的な構造物において、列車の速度向上を実現するための対策工の提案や予測手法の精度向上に向けて、さらに本研究を発展させたいと考えております。また、本論文には掲載しなかった地盤振動についても、筆者に課せられた今後の課題と認識しております。今後もこれまで以上に努力を惜しまず、研究に邁進していく所存でございますので、引き続き厳しくご指導いただければ幸いです。

最後に、筆者にこのような機会を与え、応援してくれた先輩博士の妻 玲子、いつも明るい笑顔で迎えてくれる娘 望美、息子 優太に心から感謝し、本論文の結びとします。

# 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 渡辺 勉 印

(2015年4月 現在)

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
①論文	
○1) 査読	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鉄道 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, pp.775-780, 2014.7
○2) 査読	白井貴之,仁平達也,渡辺勉: 超高強度繊維補強コンクリートによる RC スラブの補強工法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, pp.107-114, 2014.7
○3) 査読	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, I 821-I 832, 2013.8
○4) 査読	渡辺勉,曾我部正道,徳永宗正: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.943-948, 2013.7
○5) 査読	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 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.3 545-564, 2011
○6) 査読	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, 土木学会 鉄道力学論文集, No.14, pp136-143, 2010.7
○7) 査読	貝戸清之,松岡弘大,渡辺勉,曾我部正道,藤野陽三: 走行列車荷重下における鉄道橋桁の動的応答の特性とその利用, 土木学会論文集 F , Vol.66, No.3, pp.382-401, 2010.7
○8) 査読	Tsutomu Watanabe, Masamichi Sogabe, Kiyoshi Asanuma, Hajime Wakui : Development of Silent Steel Railway Bridge Equipped with Floating Ladder Track and Floating Reinforced Concrete Deck, 10th International Workshop on Railway Noise, Sec.4, pp203-210, 2010.6
○9) 査読	Tsutomu Watanabe, Masamichi Sogabe, Kiyoshi Asanuma, Hajime Wakui : Estimation of Structure-Borne Noise Reduction Effect of Steel Railway Bridge Equipped with Floating Ladder Track and Floating Reinforced-Concrete Deck , 日本機械学会 Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol.3, No.1, pp83-91, 2010
○10) 査読	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開床式高架橋の振動特性の同定と高速化に関する一考察, 土木学会 応用力学論文集, Vol.13, pp.997-1008, 2010.8
○11) 査読	渡辺勉,曾我部正道,原田和洋: 鉄道 RC ラーメン高架橋の動的応答性状に関する研究, 土木学会 鉄道力学論文集, No.12, pp77-84, 2009.7
○12) 査読	渡辺勉,曾我部正道,原田和洋: 鉄道 RC ラーメン高架橋の衝撃係数に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp25-30, 2009
○13) 査読	松岡弘大,貝戸清之,杉崎光一,渡辺勉: 列車走行時の加速度応答を用いた開床式橋梁の振動特性の同定, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2 pp.949-954, 2009
○14) 査読	松岡弘大,貝戸清之,杉崎光一,渡辺勉,曾我部正道: 走行列車荷重を利用した振動モニタリングによる開床式高架橋の振動特性の把握, 土木学会 応用力学論文集, Vol.12, 2009.8
○15) 査読	松本光矢,曾我部正道,谷村幸裕,渡辺勉: 開床式鉄道高架橋の動的特性と高速鉄道への適用性に関する検討, 鉄道力学論文集, pp.70-76, 2009.7
○16) 査読	渡辺勉,曾我部正道,浅沼潔,涌井一: ダブルフローティング型鋼鉄道橋を用いた構造物騒音低減効果の推定, 鉄道力学論文集, No.12, pp.19-24, 2008.7
○17) 査読	Tsutomu Watanabe, Masamichi Sogabe : A Study of Running Safety and Ride Comfort of Floating Tracks for High-Speed Train 日本機械学会 J. of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol.1, No.1, pp.22-30, 2008
○18) 査読	渡辺勉,曾我部正道,山崎貴之,浅沼潔,涌井一: 各種フローティング軌道の高速度鉄道への適用性に関する研究, 構造工学論文集 Vol.53A, pp77-86, 2007.3
○19) 査読	渡辺勉,曾我部正道,徳永宗正: RC 鉄道高架橋の構造物音の発生原因の分析, 日本鉄道施設協会誌, Vol.52, No.8, pp.607-610, 2014.8
②総説	
○1) 査読	渡辺勉,杉本一朗: 鉄道総研の「防振性能を向上させた鋼鉄道橋」RRR, Vol.71, No.6, pp.33, 2014.6
○2) 査読	



## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
○3)	渡辺勉,曾我部正道,浅沼潔:特集「鉄道施設における環境への取り組み」(沿線環境保全 騒音振動対策 橋りょう・高架橋),日本鉄道施設協会 日本鉄道施設協会誌, Vol.46, No.7, 2008.7
③講演	横山秀史,伊積康彦,渡辺勉:3次元振動解析による鉄道振動の予測シミュレーション,騒音制御工学会平成26(2014)年秋季研究発表会,2014.9
○1)	渡辺勉,後藤恵一,松岡弘大,曾我部正道:軌道構造の違いがRC構造物の部材振動に及ぼす影響,鉄道技術連合シンポジウム講演論文集J-RAIL2014,2014.12
○2)	伊積康彦,横山秀史,渡辺勉:高速鉄道の3次元振動解析に関する研究 その2 新幹線の3次元振動解析,日本建築学会大会,2014.9.12
○3)	渡辺勉,曾我部正道,徳永宗正:軌道状態の違いが鉄道RC桁式高架橋の部材振動に及ぼす影響,土木学会第70回年次学術講演会,I-504,2014.9
○4)	Tsutomu Watanabe, Masamichi Sogabe, Munemasa Tokunaga: Analytical Study on Structure Member Vibration Characteristics of Reinforced Concrete Rigid Frame Viaduct, EURODYN 2014 9th International Conference on Structural Dynamics, pp1289-1296, 2014.6
○5)	Masamichi Sogabe, Tsutomu Watanabe, Keiichi Goto, Munemasa Tokunaga: Performance Verification for Railway Extradosed Bridges by Dynamic Interaction Analysis, EURODYN 2014, 2014.6
○6)	Tsutomu Watanabe, Masamichi Sogabe, Munemasa Tokunaga: The Influence on Structure Member Vibration of Railway RC Rigid Frame Viaduct by the Different Various Parameter, JSST2013 International Conference on Simulation Technology, 2013.9
○7)	渡辺勉,曾我部正道,徳永宗正: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,土木学会第68回年次学術講演会,V-141,2013.9
○8)	渡辺勉,曾我部正道,徳永宗正:鉄道構造物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,機械学会 J-RAIL2012, Vol.79, No.12, pp613-616, 2012.12
○9)	渡辺勉,曾我部正道,後藤恵一,浅沼潔:鉄道RCラーメン高架橋の構造物音評価に関する数値解析による検討,土木学会第65回年次学術講演会,VII-137, pp273-274, 2010.9
○10)	渡辺勉,曾我部正道,原田和洋:3径間鉄道RCラーメン高架橋の衝撃係数に関する研究,土木学会第64回年次学術講演会,V-145, pp287-288, 2009.9
○11)	渡辺勉,浅沼潔,曾我部正道,杉本一郎:軌道と床版をフローティング構造にしたサイレント鋼鉄道橋の開発,第228回 鉄道総研 月例発表会 大阪,2009.1
○12)	渡辺勉,曾我部正道,浅沼潔:軌道と床版にフローティング構造を有する鋼鉄道橋の騒音低減効果,土木学会第63回年次学術講演会,VII-126, pp251-252, 2008.9
○13)	渡辺勉,曾我部正道,奥田広之,浅沼潔,半坂征則:フローティング・ラダー軌道を用いた鋼鉄道橋の防振性能向上に関する研究,電気学会J-RAIL2007, S3-1-4, pp507-510, 2007.12
○14)	渡辺勉,曾我部正道,山崎貴之:各種フローティング軌道の高速度走行時における列車走行性に関する検討,機械学会 J-RAIL2006, pp421-424, 2006.12
○15)	渡辺勉,曾我部正道,奥田広之,浅沼潔:フローティング・ラダー軌道の高速度鉄道への適用性に関する検討,土木学会第61回年次学術講演会 I-484, pp965-966, 2006.9
○16)	渡辺勉,曾我部正道,徳永宗正,川口二俊:RCラーメン高架橋の部材振動特性に関する解析的検討,鉄道総研報告, Vol.27, No.10, 2013.10, pp.47-52
④研究紀要	
○1)	渡辺勉,曾我部正道:RCラーメン高架橋の衝撃係数に関する解析的検討,鉄道総研報告, Vol.24, No.4, 2010.4, pp11-16
○2)	渡辺勉,杉本一郎:鋼鉄道橋の低騒音化,RRR, 2009.8, pp14-17
○3)	渡辺勉,原田和洋:構造物の部材振動特性評価技術,RRR, 2009.6, pp22-25
○4)	渡辺勉,曾我部正道,浅沼潔:軌道と床版をフローティング構造にした低騒音鋼鉄道橋の開発,鉄道総研報告, Vol.23, No.2, 2009.2, pp39-44
○5)	Tsutomu Watanabe, Masamichi Sogabe, Munemasa Tokunaga: Analytical Study of Structural Member Vibration Characteristics of Reinforced Concrete Rigid Frame Viaduct, QR, Vol. 55, No. 3, pp.176-183, 2014.8
⑤その他	
1)	
研究紀要	

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
2) 論文	<u>渡辺勉</u> ,曾我部正道,横山秀史,米澤豊司:高速鉄道トンネル上の地盤振動に関する解析的検討,土木学会 鉄道工学論文集, Vol.18, pp.107-114, 2014.7
3) 講演	<u>渡辺勉</u> ,曾我部正道,浅沼潔,井上寛美: JIS 規格 PC まくらぎの入線可能輪重に関する検討, 電気学会 J-RAIL2013, S7-6-5, 2013.12
4) 総説	<u>渡辺勉</u> ,曾我部正道:ラダーマクラギ, 日本鉄道電気技術協会, 鉄道と電気技術, Vol.24, No.1, 2013.1
5) 講演	<u>渡辺勉</u> ,鈴木裕隆,渡部太一郎:高密度 RC 柱の途中継手構造に関する実験的検討, 土木学会 第66回年次学術講演会, pp931-932, V-466, 2011.9
6) 講演	<u>Tsutomu Watanabe</u> , Masamichi Sogabe, Hidehumi Yokoyama, Toyoji Yonezawa, Sanshiro Kiyota: Ground Vibration on High-Speed Railway Tunnel, 10th International Workshop on Railway Noise, Sec.6, pp297-304, 2010.6
7) 講演	<u>渡辺勉</u> ,曾我部正道,横山秀史,芦谷公稔:高速鉄道トンネル上の地盤振動解析, 機械学会 J-RAIL2009, Vol.65, No.12, pp371-374, 2009.12
8) 研究紀要	<u>渡辺勉</u> ,横山秀史,武居泰:鉄道トンネル上の地盤振動解析, RRR, pp22-25, 2008.10
9) 研究紀要	<u>渡辺勉</u> ,曾我部正道,奥田広之,浅沼潔,庄司正弘,島袋ホルヘ:バラスト・ラダー軌道の地盤振動特性に関する研究, 構造計画研究所 解析雑誌, Vol.20, pp.40-45, 2008.6
10) 論文	<u>渡辺勉</u> ,曾我部正道,長谷川淳史,金森真:免震技術の鉄道橋りょうへの適用性とその効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp1111-1116, 2008
11) 研究紀要	<u>渡辺勉</u> ,曾我部正道,奥田広之,庄司正弘,島袋ホルヘ:高速列車走行時のバラスト・ラダー軌道の地盤振動特性解析, 鉄道総研報告, Vol.21, No.12, pp23-28, 2007.12
12) 講演	<u>渡辺勉</u> ,曾我部正道,横山秀史,山崎貴之,庄司正弘,島袋ホルヘ:鉄道トンネルにおける振動対策軌道に関する研究, 土木学会 第62回年次学術講演会, V-168, pp335-336, 2007.9
13) 論文	<u>渡辺勉</u> ,曾我部正道,奥田広之,浅沼潔,庄司正弘,島袋ホルヘ:バラスト・ラダー軌道の地盤振動特性に関する研究, 土木学会 鉄道力学論文集 No.11, pp1-6, 2007.7
14) 研究紀要	<u>渡辺勉</u> ,曾我部正道,涌井一,奥田広之:高速列車走行時のバラスト・ラダー軌道の地盤振動特性解析, 鉄道総研報告, Vol.21, No.12, 2007.12
15) 論文	曾我部正道, <u>渡辺勉</u> ,井上寛美,浅沼潔: JIS 規格 PC まくらぎの入線可能輪重の算定, コンクリート工学年次大会 2014, Vol.36, pp.343-348, 2014.7
16) 論文	曾我部正道,徳永宗正,後藤恵一, <u>渡辺勉</u> ,松岡弘大:各種対策工が地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線に及ぼす影響, 鉄道工学シンポジウム, Vol.18, 2013
17) 論文	徳永宗正,曾我部正道, <u>渡辺勉</u> ,山東徹生,玉井真一:鉄道構造物上防音壁の地震時応答の基本特性, 鉄道力学論文集, Vol.17, pp.49-56, 2013
18) 論文	曾我部正道, <u>渡辺勉</u> ,徳永宗正:ラーメン高架橋の疲労振幅及び等価繰返し回数に関する解析的検討, コンクリート工学年次大会 2013, Vol.35, pp.691-696, 2013.7
19) 論文	徳永宗正, <u>渡辺勉</u> ,曾我部正道:鉄道 RC 高架橋相互の線路直角方向の衝突現象の評価, コンクリート工学年次大会 2013, Vol.35, pp.955-960, 2013.7
20) 論文	曾我部正道,後藤恵一,徳永宗正, <u>渡辺勉</u> :地震動の違いが地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線に及ぼす影響, 鉄道力学論文集, pp.133-140, 2012.7
21) 論文	浅沼潔,関根悦夫,片岡宏夫,曾我部正道, <u>渡辺勉</u> ,後藤恵一:バラスト軌道の地震時変形挙動に関する解析的検討, 鉄道力学論文集, Vol.14, pp.21-28, 2010
22) 論文	曾我部正道,後藤恵一,川西智浩,室野剛隆, <u>渡辺勉</u> ,谷村幸裕:地盤応答解析に基づく地震時車両走行性評価, 鉄道力学論文集, Vol.14, pp.106-113, 2010.7
23) 研究紀要	Kiyoshi Asanuma, Masamichi Sogabe, <u>Tsutomu Watanabe</u> , Keiichi Goto: DEVELOPMENT OF BALLASTED LADDER TRACK EQUIPPED WITH A VEHICLE GUIDE DEVICE, QR, Vol.50 No.4, 2009
24) 論文	曾我部正道,浅沼潔, <u>渡辺勉</u> :逸脱防止機能を有するバラスト・ラダー軌道の開発, 鉄道力学論文集, No.12, 2008
	その他 39 件

