

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

# 博士論文 審査報告書

## 論 文 題 目

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

申 請 者

渡辺	勉
Tsutomu	WATANABE

2015 年 7 月

渡辺勉氏の論文に関し慎重に審査を行い、まず建設工学専攻の論文博士としての要件である、本論文の関連で土木学会論文集などに採択されて掲載されたことを確認し、研究業績が十分あがっていることを認めた。また本論文を口頭発表と質疑応答から研究内容に独創性があり論文として完成度が高いことを確認した。併せて学識確認課題に対して十分に学識がある事を確認するとともに、研究倫理に関して所定の講義を受け合格していることを確認した。以下に本論文の内容について審査した状況について述べる。

渡辺勉氏は論文の冒頭に本研究で対象としている鉄道施設について述べている。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ことを説明している。

コンクリート構造物から発生する構造物音は、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等から、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、とりわけ今後、300km/h 以上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要因となることを指摘している。

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ことを説明し、主たる課題として次の3項目を指摘している。

第一項目は、理論的な計算手法の構築である。車両の走行から音の伝搬までを、解析する場合、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を考慮するが重要で、両者は、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、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ことを述べている。

第二項目として、RC 高架橋の部材振動特性の解明である。構造物音の音源となるのは、部材振動モードであるが、従来の計測技術が稚拙であったこと等に起因して、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と述べている。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ことを指摘している。

第三項目としては、RC 高架橋の構造物音発生メカニズムの解明である。RC 高架橋の構造物音の発生メカニズムに影響する要因として、車両、軌道、構造物があると述べている。これらの多数の要因が部材の周波数応答特性に及ぼす影響は未解明であることを指摘している。

本研究では以下のような独創的な研究を実施している。まず、車両/軌道/構造物の各種要因を精緻に考慮可能な解析手法の構築、次に、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，さらに，各種要因が周波数ごとの部材応答特性に及ぼす影響の解明が本論文の骨格になっている。

本論文は7章で構成されている。以下にその概要と特徴をまとめる。

「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，従来の研究との関連を示している。

「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及び本研究に関係する既往の知見を整理したもので，車輪とレール間音，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ている。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ている。

「第3章 構造物音低減軌道の高速鉄道への適用性」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ている。安全かつ平滑に鉄道車両が走行することは，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有効性を，この章で明らかにしている。

我が国の高速鉄道では，ばね値の小さな軌道支持ばねの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，乗り心地等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この防振構造の妥当性を論じた点に特徴がある。

「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。

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している。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等の特徴を有している。さら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ている。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ている。

「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指摘している。

本研究では、列車走行、車輪とレールの接触、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ている。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、計算効率を従来の10倍に向上させている。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ており、実務に十分使用できるレベルに達しており工学的に非常に価値ある成果となっている。

また、本章では、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マッピング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ている。これまでの数値解析では、3次元マッピングの解像度を上げることにより、メカニズムの実像を明確にしている。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、各速度段階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。

「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第5章と同様に検討している。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。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ている。

「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ている。

以上を要約するに、本論文は、RC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鉄道を現場計測と数値解析により明らかにし、本研究で開発した数値計算法が実用レベルまでに達していることを示している。特に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3次元マッピング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ている。本論文で得られた成果は、構造工学と鉄道工学に有用な情報を与えるだけでなく、構造工学の発展と新幹線技術の騒音での環境面の向上に大いに寄与するものであり高く評価できる。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2015年7月

審査員	主査	早稲田大学教授	工学博士(東京工業大学)	清宮 理
		早稲田大学教授	工学博士(早稲田大学)	依田照彦
		早稲田大学教授	工学博士(早稲田大学)	小泉 淳
		早稲田大学教授	博士(工学)(東北大学)	秋山充良