



Analytical Approaches to Dynamic Issues Related to High-Speed Railway Bridge-Train Interaction System

何, 興文

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2007-03-25

(Date of Publication)

2009-07-13

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲3956

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003956>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 3 4 9 】

氏 名・（本 籍） 何 興 文 （ 中国 ）

博士の専攻分野の名称 博士（工学）

学 位 記 番 号 博い第440号

学位授与の 要 件 学位規則第5条第1項該当

学位授与の 日 付 平成19年3月25日

【 学位論文題目 】

Analytical Approaches to Dynamic Issues Related to High-Speed
Railway Bridge-Train Interaction System
(高速鉄道高架橋－列車連成系の動的問題に関する解析的研究)

審 査 委 員

主 査 教 授 川谷 充郎
教 授 高田 至郎
教 授 森川 英典
教 授 大須賀 公一

1. 研究の背景

高速鉄道は都市間輸送において大きな役割を果たしており、日本の陸上旅客輸送に欠かすことのできないものとなっている。鉄道高架橋等の構造物は、今後も機能を維持向上しながら供用される必要がある。一方で、鉄道高架橋は新幹線列車の高速走行により、過酷な振動状況に曝されている。その振動は、橋梁部材に疲労損傷等を与える虞れがあり、十分に配慮する必要がある。さらに必要に応じて、補強工法等による高架橋の振動低減対策を検討する必要がある。

そのために、まず列車走行時の高架橋の振動特性を明らかにする必要がある。列車走行時の振動特性を把握するために、実際の高速鉄道高架橋において実測が行われており、また鉄道車両走行による橋梁の動的応答に関する理論的な研究も1960年代後半から行われている。特に最近、吉田、関（構造工学論文集，Vol.50A, pp.403-412, 2004.3）は、新幹線高架橋振動の実測結果に基づく報告において、高架橋の三次元性による効果や列車と構造物の相互作用などの解明のために連成解析振動手法の開発の重要性を示唆している。つまり、列車通過時の高架橋振動問題について検討するためには、まず列車と高架橋との連成を考慮した列車走行時の高架橋の振動特性を精度よく再現する必要がある。

一方、都市部において、高速鉄道高架橋は周辺建物に隣接している場合が多い。近年、列車速度の更なる高速化や環境振動に対する意識の高まりにより、列車通過時の環境振動問題の重要性が増している。一部の区間においては、沿線の地盤振動対策を検討する必要がある。

列車走行時地盤振動の発生伝播メカニズムおよび振動軽減対策は完全には解明されていない。既往の研究内容の多くは、地盤振動実測データに基づく統計分析報告である。しかし、現状の実測値から新しい地盤振動軽減対策工法の導入効果および将来の列車速度向上に伴う地盤振動値を予測することは、精度上課題があった。このため、解析的に精度の高い予測手法の開発が必要であった。鉄道高架橋を対象とした車両と構造物の連成を扱った地盤振動に関する既往の研究は少ない。鉄道高架橋における列車走行時の地盤振動についての最近の研究では、原ら（土木学会論文集，No.766/I-68, pp.325-338, 2004.7）が実測と解析の両方から高架橋とその周辺の地盤振動特性の解明を試みている。しかし、車両と高架橋との連成を直接的に考慮できず、等価加振力を設定するために実測を必要とする点が課題である。

平成16年10月23日、新潟県中越地震で初めて高架橋を走行中の新幹線車両が脱線した。鉄道高架橋では耐震設計において列車荷重を考慮しているが、大規模地震時の列車の走行メカニズムが解明されていないことなどから、レベル2地震動に対して列車の走行性検討は行わなくてよいとしている。しかし、地震時の列車走行安全性検討および有効な対策の策定が非常に緊急な課題であることが今回の事故で明らかとなった。一方、兵庫県南部地

震や新潟県中越地震では鉄道等の重要施設も大きな被害を受け、とくに高架橋等の構造物の被害が深刻であった。そのため、今後発生の予想される南海・東南海地震や首都直下地震に備え、高速鉄道高架橋の耐震性能の明確化が重要な課題となり、安全性向上のために対策を講じることが急務である。

高速列車が高架橋を走行中に地震が発生する場合、列車の脱線や転覆、高架橋の崩壊といった災害の軽減対策を講じるために、その現象の解明が前提となる。しかし、走行車両と橋梁との連成系が地震荷重を受ける際の挙動は非常に複雑であり、模擬実験による現象の解明は現段階では不可能である。またそのメカニズムの難しさにより、国内外において交通荷重を考慮した橋梁の耐震性能評価に関する理論的研究は乏しく、あるとしてもまだ初期の段階に過ぎない。

2. 研究の目的

前述の高速鉄道高架橋―列車連成系に関わる動的事項：交通振動、地盤振動および地震安全性等は、高速鉄道システムが安全に運行する上で極めて重要かつ緊急な解決策を要する問題である。そのために、これらの現象の解明が前提となる。これらの問題の共通点としては、すべて橋梁と列車さらに地盤との連成系の動的相互作用に関わる。本研究では、これら高速鉄道高架橋―列車連成系に関わる動的問題を解明するための理論解析手法の開発を主な目的とする。さらに解析結果に基づき、これら問題の動的特性および軽減対策についても検討する。

- 三次元走行列車と橋梁の連成振動をシミュレーションするプログラムを構築し、高速鉄道高架橋の一般的な構造であるラーメン高架橋の列車走行時の振動特性を明らかにすること、さらに高架橋の振動低減対策を考案し、その効果を解析的に検証することを目的とする。
- 三次元走行列車モデルと橋梁との連成振動解析により求めた列車通過時の橋脚下端部の地盤反力を加振外力とし、基礎構造物と地盤との相互作用を考慮できる汎用地盤振動解析プログラムを用いて高速鉄道高架橋周辺地盤振動をシミュレーションする。さらにその地盤振動の特性を解明し、振動軽減対策の効果を確認する。
- 本研究でまずレベル1 (L1)地震動に対し、橋梁―走行車両―地震連成系をシミュレーションする解析的手法を確立し、高架橋の耐震性能と車両の走行安全性の評価を行う。さらに、レベル2 (L2)地震動に対応する構造物の非線形も考慮できる連成解析手法の開発に努める。

3. 本論文の構成および研究概要

本論文の構成および研究概要を以下に示す。

【第1章】序論として、本研究の背景、研究目的さらに高速鉄道高架橋—列車連成系に関わる動的事項：交通振動、地盤振動および地震安全性等に関する既往の研究および現状について紹介するとともに、本論文の構成を示す。

【第2章】本研究において開発した理論解析手法：動的構造解析、連成振動解析および地盤解析の基礎理論、モデル化および定式化について示す。

【第3章】研究内容として、(1) まず列車と橋梁の連成による相互作用を解明すべく、三次元新幹線列車モデルを開発し、高架橋との連成振動解析手法を確立し、その妥当性と有効性を確認する。(2) 高速鉄道ラーメン高架橋の張り出し構造部分において最も振動が卓越する現象を解析結果により解明し、卓越振動箇所について補強による振動軽減対策の効果を確認する。(3) 高架橋周辺の地盤振動問題を検討する場合、地盤への外力として橋脚下端動的反力を正確に求める必要がある。本研究では反力影響値マトリックスを用いて列車通過時の橋脚下端部の地盤反力を精度よくシミュレーションし、その振動特性を解明する。

【第4章】本研究では、まず橋梁交通振動解析において開発した三次元 9 自由度系走行列車モデルと橋梁との連成を考慮した振動解析により求めた列車通過時の橋脚下端部の地盤反力を加振外力とし、薄層要素法に基づく構造物と地盤との相互作用を考慮できる汎用地盤振動解析プログラムを用いて、列車走行による高速鉄道高架橋周辺地盤振動解析を実施し、主に鉛直方向の地盤振動特性を明らかにする。そして高架橋の卓越振動を軽減する補強工法等による地盤振動低減効果を確認した。さらに列車の水平振動も適切に表現できる 15 自由度系列車モデルを構築し、列車走行による高架橋周辺地盤の水平方向の振動を評価する手法を開発する。本地盤振動解析手法を用いて、列車速度向上に伴う高架橋周辺地盤振動問題の予測や地盤振動対策の効果の事前検討を行うことができる。

【第5章】研究の内容として、(1) 新幹線列車の水平振動も適切に表現できる三次元 15 自由度系車両モデルを構築し、L1 地震動下の走行列車—高架橋連成系の線形地震応答解析手法を確立する。解析手法の妥当性について、車両モデルは車両通行時の高架橋動的応答の実測値と、橋梁の地震応答は振動系車両無しでの汎用プログラムによる高架橋の地震応答解析値とそれぞれ比較して確認する。(2) 開発した地震応答解析手法を用いて、示方書に示した設計地震波および K-net による実測地震波に対し、高架橋と列車連成系の地震応答解析を実施した。まず、静止状態において車両をそれぞれ付加質量と振動系として考慮する場合の高架橋応答を解析し、車両は振動系であり、橋梁の振動特性との関係でダンパーとして機能する可能性を確認する。また、異なる特性を持つ地震波による地震応答の差異、列車速度の地震応答への影響等確認する。さらに脱線係数を用いた列車走行安全性の検討を行う。(3) 新幹線列車が地震を察知し、ブレーキをかける間の車両の応答をシミュレ

ーションし、列車の走行安全性を確認する。(4) 線形地震応答解析において、橋梁部材の降伏を想定していないが、入力地震波の特性によって、橋梁の地震応答が非常に大きいケースがある。この場合、橋梁部材の断面力、特に柱の基部および天端の曲げモーメント・せん断力は部材の最大耐荷力を超えているかどうかを照査する。

また本研究では、これまで橋梁—走行車両連成系の交通振動解析や線形地震応答解析から蓄積してきたノウハウを活かし、レベル2地震動に対する橋梁—三次元走行車両—地震連成系の非線形振動解析手法の確立に努める。レベル2地震動を受ける橋梁—走行車両連成系の挙動は非線形であり、線形動的応答解析において適用したモーダル解析はもはや適応できない。本研究で、まず非線形挙動による橋梁と車両との相互作用を適切に表現できるように、直接積分法を用いて地震応答を求める。

【第6章】各章で得られた結果を結論として総括し、さらに今後の課題について示す。

氏名	何 興文		
論文 題目	Analytical Approaches to Dynamic Issues Related to High-Speed Railway Bridge-Train Interaction System (高速鉄道高架橋－列車連成系の動的問題に関する解析的研究)		
審 査 委 員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	川谷 充郎
	副 査	教 授	高田 至郎
	副 査	教 授	森川 英典
	副 査	教 授	大須賀 公一

要 旨

高速鉄道高架橋等の構造物は、今後も機能を維持向上しながら供用される必要がある。一方で、鉄道高架橋は新幹線列車の高速走行により、過酷な振動状況に曝されている。その振動は、橋梁部材に疲労損傷等を与える虞れがあり、十分に配慮する必要がある。さらに必要に応じて、補強工法等による高架橋の振動低減対策を検討する必要がある。そのために、まず列車走行時の高架橋の振動特性を明らかにする必要がある。既往の研究からも明らかのように、列車通過時の高架橋振動問題について検討するためには、まず列車と高架橋との連成を考慮した列車走行時の高架橋の振動特性を精度よく再現する必要がある。

一方、都市部において、高速鉄道高架橋は周辺建物に隣接している場合が多い。近年、列車速度の更なる高速化や環境振動に対する意識の高まりにより、列車通過時の環境振動問題の重要性が増している。一部の区間においては、沿線の地盤振動対策を検討する必要がある。列車走行時地盤振動の発生伝播メカニズムおよび振動軽減対策は完全には解明されていない。既往の研究内容の多くは、地盤振動実測データに基づく統計分析報告である。しかし、現状の実測値から新しい地盤振動軽減対策工法の導入効果および将来の列車速度向上に伴う地盤振動値を予測することは、精度上課題があった。このため、解析的な精度の高い予測手法の開発が必要であった。

平成16年の新潟県中越地震で初めて高架橋を走行中の新幹線車両が脱線した。鉄道高架橋では耐震設計において列車荷重を考慮しているが、大規模地震時の列車の走行メカニズムが解明されていないことなどから、レベル2地震動に対して列車の走行性検討は行わなくてよいとしている。しかし、地震時の列車走行安全性検討および有効な対策の策定が非常に緊急な課題であることが今回の事故で明らかとなった。一方、兵庫県南部地震や新潟県中越地震では鉄道高架橋等の構造物の被害が深刻であった。今後発生予想される南海・東南海地震や首都直下地震に備え、高速鉄道高架橋の耐震性能の明確化が重要な課題となり、安全性向上のために対策を講じることが急務である。そのため、高速列車が高架橋を走行中に地震が発生する場合、列車の脱線や転覆、高架橋の崩壊といった現象の解明が前提となる。しかし、走行車両と橋梁との連成系が地震荷重を受ける際の挙動は非常に複雑であり、国内外において交通荷重を考慮した橋梁の耐震性能評価に関する理論的研究は乏しく、あるとしてもまだ初期の段階に過ぎない。

上述の高速鉄道高架橋－列車連成系に関わる動的事項：交通振動、地盤振動および地震安全性は、高速鉄道システムが快適・安全に運行する上で極めて重要かつ緊急な解決策を要する問題である。これらの問題の共通点としては、すべて橋梁と列車さらに地盤との連成系の動的相互作用に関わる。本論文では、これら高速鉄道高架橋－列車連成系に関わる動的問題を解明するための理論解析手法の開発を主な目的としており、さらに解析結果に基づき、これら問題の動的特性および軽減対策についても検討を行っている。

a) 三次元走行列車と橋梁の連成振動をシミュレーションするプログラムを構築し、高速鉄道高架橋の一般的な構造であるラーメン高架橋の列車走行時の振動特性を明らかにした上で、さらに高架橋の振動低減対策を考案し、その効果を解析的に検証している。

b) 三次元走行列車モデルと橋梁との連成振動解析により求めた列車通過時の橋脚下端部の地盤反力を加振外力とし、基礎構造物と地盤との相互作用を考慮できる汎用地盤振動解析プログラムを用いて高速鉄道高架橋周辺地盤振動をシミュレーションする。さらにその地盤振動の特性を解明し、振動軽減対策の効果を確認する。

c) レベル1地震動に対し、橋梁－走行車両－地震連成系をシミュレーションする解析的手法を確立し、高架橋の耐震性能と車両の走行安全性の評価を行う。さらに、レベル2(L2)地震動に対応する構造物の非線形も考慮できる連成解析手法の開発に努めると共に、耐震対策を提案することを目的としている。

氏名	何 興文
第1章では、序論として、本研究の背景、研究目的さらに高速鉄道高架橋－列車連成系に関わる動的事項：列車走行による橋梁振動、高架橋周辺地盤振動および橋梁－列車連成系の地震安全性に関する既往の研究および現状について紹介するとともに、本論文の構成を示している。	
第2章では、本研究において開発した理論解析手法：動的構造解析、列車と橋梁との連成振動解析および地震解析の基礎理論、モデル化および定式化について示している。	

第3章では、以下の各項目についてその研究成果を示す。(1) まず列車と橋梁の連成による相互作用を解明すべく、三次元新幹線列車モデルを開発し、高架橋との連成振動解析手法を確立し、その妥当性と有効性を確認する。(2) 高速鉄道ラーメン高架橋の張り出し構造部分において最も振動が卓越する現象を解析結果により解明し、卓越振動箇所について補強による振動軽減対策の効果を確認する。(3) 高架橋周辺の地盤振動問題を検討する場合、地盤への外力として橋脚下端部の反力を正確に求める必要がある。本論文では反力影響値マトリックスを用いて列車通過時の橋脚下端部の地盤反力を精度よくシミュレーションし、その振動特性を解明している。

第4章では、まず橋梁交通振動解析において開発した三次元9自由度系走行列車モデルと橋梁との連成を考慮した振動解析により求めた列車通過時の橋脚下端部の地盤反力を加振外力とし、薄層要素法に基づく構造物と地盤との相互作用を考慮できる汎用地盤振動解析プログラムを用いて、列車走行による高速鉄道高架橋周辺地盤振動解析を実施し、主に鉛直方向の地盤振動特性を明らかにしている。そして高架橋の卓越振動を軽減する補強工法による地盤振動低減効果を確認する。さらに列車の水平振動も適切に表現できる15自由度系列車モデルを構築し、列車走行による高架橋周辺地盤の水平方向の振動を評価する手法を開発する。本地盤振動解析手法を用いて、列車速度向上に伴う高架橋周辺地盤振動問題の予測や地盤振動対策の効果の事前検討を行うことができる。

第5章では、以下の各項目についてその研究成果を示す。(1) 新幹線列車の水平振動も適切に表現できる三次元15自由度系車両モデルを構築し、L1地震動下の走行列車－高架橋連成系の線形地震応答解析手法を確立する。解析手法の妥当性について、車両モデルは車両通行時の高架橋動的応答の実測値と、橋梁の地震応答は振動系車両無しでの汎用プログラムによる高架橋の地震応答解析値とそれぞれ比較して確認している。(2) 開発した地震応答解析手法を用いて、示方書に示した設計地震波およびK-netによる実測地震波に対し、高架橋と列車連成系の地震応答解析を実施する。まず、静止状態において車両をそれぞれ付加質量と振動系として考慮する場合の高架橋応答を解析し、車両を振動系とすることにより、橋梁の振動特性との関係でダンパーとして機能する可能性を確認している。また、異なる特性を持つ地震波による地震応答の差異、列車速度の地震応答への影響を確認している。さらに脱線係数を用いた列車走行安全性の検討を行っている。(3) 新幹線列車が地震を察知し、ブレーキをかける間の車両の応答をシミュレーションし、列車の走行安全性を確認している。(4) 線形地震応答解析において、橋梁部材の降伏を想定していないが、入力地震波の特性によって、橋梁の地震応答が非常に大きいケースがあるとして、この場合、橋梁部材の断面力、特に柱の基部の曲げモーメントおよびせん断力は部材の最大耐荷力を超えているかどうかを照査している。

また本研究において、これまで橋梁－走行車両連成系の交通振動解析や線形地震応答解析から蓄積してきたノウハウを活かし、レベル2地震動に対する橋梁－三次元走行車両－地震連成系の非線形振動解析手法の確立に努めている。レベル2地震動を受ける橋梁－走行車両連成系の挙動は非線形であり、線形動的応答解析において適用したモーダル解析はもはや適応できないことから、本研究では、直接積分法を用いて地震応答を求める解析プログラムを開発している。

第6章では、各章で得られた結果を結論として総括し、さらに今後の課題について示している。

本研究は、高速鉄道高架橋－列車連成系に関わる動的事項に着目し、列車走行による橋梁振動、鉄道高架橋周辺地盤振動および橋梁－列車連成系の地震応答に関する解析手法を開発したものであり、これらの問題において、三次元列車と構造物モデルを構築する上でその連成振動を比較的に厳密な再現を成し遂げた点について新規性がある。これらの手法をさらに発展し、高速鉄道高架橋－列車連成系の動的問題を正確に評価した上で有効な対策を講じることが期待できる点について意義がある。また、本研究での解析結果およびその評価など、高架橋－列車連成系の動的問題における重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の何興文は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。