



# 列車走行時振動による構造物の健全度評価に関する研究

吉田, 幸司

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2006-03-25

(Date of Publication)

2012-06-08

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲3545

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003545>

※ 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。



【 2 9 6 】

氏 名・(本 籍)	吉田 幸司	( 静岡県 )
博士の専攻分野の名称	博士(工学)	
学 位 記 番 号	博い第394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18年3月25日	

【 学位論文題目 】

列車走行時振動による構造物の健全度評価に関する研究

審 査 委 員

主 査	教 授	川谷 充郎
	教 授	森川 英典
	教 授	谷 明勲

## 1. 研究の背景

鉄道や高速道路などの既存の社会資本施設は、その多くが今後も機能を維持向上しながら供用されていかなければならない重責を担っている。特に、1964年に開業し40年余経過した東海道新幹線の土木構造物は、我が国の経済活動の大動脈として重要な役割を果たし、今後も適正な健全度を維持しながら継続的に供用される必要がある。また、近年では、国内外を問わず環境負荷の小さい輸送機関として高速鉄道（新幹線鉄道）が見直されており、高速鉄道の先駆けである東海道新幹線土木構造物の要求性能の向上や維持管理への注目が高まるとともに、その重要性が増すことは想像に難くない。

構造物の健全度が何らかの要因によって損なわれた場合、ひび割れ、列車通過時の桁や梁のたわみの増加、構造物の振動や沿線地盤振動（鉄道振動）など、他の健全な構造物と異なる特異な現象が現れる。こうした構造物が発信する情報を把握し、診断することが維持管理上重要である。鉄筋コンクリート（RC）構造物の変状要因には劣化（中性化、塩害、凍害、疲労等）、欠陥（設計、材料、施工）、損傷（地震、火災等）があり、これら各種要因によって、ひび割れ、剥離・剥落、変形、沈下等の変状が生じる。このような変状を適切に把握するとともに、鉄道高架橋のような線状構造物の維持管理においては、他と比べ性能の劣る構造物を適切に見出し、弱点箇所を抽出（必要により事前対策）しておく必要がある。

一般に、鉄道高架橋の検査は、目視を主体とした全般検査（定期的な検査）が実施される。しかしながら、コンクリート表面に近接して確認しなければ視認が難しい微細なひび割れ等の変状や基礎等の地中部にあたる部位の変状の把握には、目視以外の検査・評価手法が必要である。このような検査手法の一つとして、東海道新幹線では1991年よりRCラーメン高架橋の固有振動数に着目した衝撃振動試験による健全度評価を導入している。この手法は特定の振動モードにおける固有振動数を測定し、その変化から部材剛性や基礎ばねの変化を捉え、健全度を評価するものである。しかし、本検査手法は、比較的労力を要する検査手法であり、今後の少子高齢化や技術継承への課題を踏まえ、膨大な構造物を少ない技術者でより効率的にメンテナンスしていくためには、新たな視点から構造物の発信する情報を把握し、適切に評価することが求められている。

一方、騒音振動といった環境への配慮も高まる要求性能の一つであり、鉄道振動についても維持管理上の重要な課題である。これまで、鉄道振動については、1976年に旧環境庁からの勧告「環境保全上緊急を要する新幹線鉄道振動対策について」により、地表の鉛直成分を対象に補正加速度レベル（振動レベルと同義）で指針値70dBを越える地域について緊急に対策を講ずることとされ、沿線地盤振動の継続的測定と測定結果が指針値を超える箇所の振動低減対策の開発ならびに実施がなされている。また、沿線地盤振動の鉄道振動は、車両構造・走行速度、構造物、基礎ならびに地盤のそれぞれの特性が相互に影響するため、鉄道振動の発生メカニズムおよびその対策について、一定の知見を得るに留まり、完全には解明されていないのが現状である。しかし、この鉄道振動を構造物の発する情報の一つと考え、健全度評価に活用できれば有益である。

既往の研究においては、鉄道振動を健全度からのアプローチとして捉えたものは見られないが、構造物の特性と鉄道振動に関する知見として、マッシブでリジッドな構造ほど鉄道振動が小さくなる傾向があることが報告されている。この知見は構造物がひび割れ損傷等により健全度を損ない部材剛性が低下した場合には、鉄道振動が大きくなる可能性を示唆しており、構造物の健全度評価の新たな指標に鉄道振動を活用できる余地があると考えられる。また、列車走行に伴う鉄道振動は、通常の運行状態で測定しうるものであり、特別な加振装置を要しない強制加振試験と云え、列車走行時の構造物の動的応答特性（振動特性）を把握し、鉄道振動を健全度評価に活用できれば維持管理上有用であるとともに、より効率的なメンテナンスに繋がるものと考えられる。

## 2. 研究の目的

高速鉄道の担う重責ならびに効率的かつ適切な維持管理手法の必要性から、他の健全な構造物と異なる特異な現象として、構造物の発信する情報を適切に把握し、評価診断する手法を構築することが喫緊の課題である。また、膨大な構造物を少ない技術者でより効率的にメンテナンスしていくため、新たな視点からの健全度評価の一次抽出手法が求められている。そこで、本研究では、多くの既存鉄道高架橋の新たな健全度評価の指標として鉄道振動に着目し、鉄道高架橋に特有かつ多用されている構造形式であるRCラーメン高架橋を対象として、以下に挙げる各項目を明らかにし、列車走行時振動による構造物の健全度評価の観点から新たな維持管理手法を提案することを目的とする。

- ① 実高架橋における健全度評価と鉄道振動の測定に基づき、鉄道振動の増加の要因として、構造物の健全度低下の可能性を実証的に見極める。
- ② 鉄道振動の発生メカニズムと健全度との関係を把握するため、走行列車と高架橋の連成振動解析および地盤振動解析に基づき列車走行時振動を解析的にシミュレーションし、構造物の健全度をパラメータとした鉄道振動への各種要因の影響を明確にする。
- ③ 上記と同様な手法等に基づき、今後の構造物の機能向上に対して、構造物の振動特性や沿線地盤振動への影響・効果を把握する。

## 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、鉄道高架橋の維持管理ならびに鉄道振動に対する既往の知見を概観するとともに、目的および本論文の構成を示す。

【第2章】本論文で対象とするRCラーメン高架橋について東海道新幹線高架橋を中心にその特徴を整理するとともに、衝撃振動試験を中心としたこれまでの維持管理検査手法について整理し、本研究の位置付けを明確にする。

【第3章】鉄道高架橋の部材剛性に着目し、衝撃振動試験ならびに列車走行時の鉄道振動の測定を実施し、鉄道振動の増加の要因として、構造物の健全度低下の可能性を実証的に見極める。鉄道高架橋の耐震補強で実施した柱部材の鋼板巻き補強による剛性向上や、

(氏名：吉田 幸司 No.3)

変状により剛性低下した高架橋の実測に基づく検証により、構造物の部材剛性の変化が鉄道振動へ与える影響（剛性向上により振動レベル低減、剛性低下により振動レベル増の傾向）を確認した。また、近接する同形式の高架橋において、健全度評価を実施し、振動レベルが大きい場合には部材の剛性低下を確認した。これら実測に基づく検証から、振動レベルが他と著しく異なる場合や、同一高架橋における継続的な振動計測により異常値を示す場合には、当該構造物に変状が生じている可能性があることを提言する。

【第4章】鉄道振動の発生メカニズムと健全度との関係を把握するため、走行列車と高架橋の連成振動解析および地盤振動解析に基づき列車走行時振動を解析的にシミュレートし、構造物の健全度（柱・梁・杭部材の剛性等）をパラメータとした鉄道振動への各種要因の影響を明確にする。鉛直方向の振動特性に着目した9自由度車両モデルを用いた解析的シミュレーションの妥当性を検証するとともに、同手法による構造物の健全度をパラメータとした解析的検証を実施した。その結果、鉛直部材（柱・杭部材）の剛性変化は水平方向の振動モードに影響、水平部材（梁部材）の剛性変化は鉛直方向の振動モードに影響し、それぞれ剛性低下率に応じ固有振動数の低下を確認した。また、鉛直方向の加速度応答では、水平部材の梁剛性を低下させた場合に、低下率に応じた振動への影響を確認した。一方、鉛直部材（柱・杭）の剛性低下は、鉛直振動へ有意な影響は見られず、地盤振動に関しても同様の結果であった。このことは振動モードへの影響と同様と考えられ、鉛直部材の剛性低下の影響を検討するには、水平振動についても着目する必要があると考え、鉛直部材（柱・杭部材）について、水平方向の振動特性にも着目した15自由度車両モデルによる検討を実施し、水平方向の加速度応答等への影響を把握した。

【第5章】上記と同様な手法等に基づき、今後の構造物の機能向上に対して、構造物の振動特性や沿線地盤振動への影響・効果を把握する。はじめに、軌道剛性の向上による鉄道振動への効果を連成振動解析および地盤振動解析により確認し、些少の剛性向上で振動特性の改善効果を確認した。すなわち、梁部材を含めた水平方向部材の剛性向上が鉛直方向の振動特性の向上に繋がることを示した。また、沿線地盤振動対策として実施されている張出し端部補強についても同解析評価を実施し、高架橋の振動特性への影響を把握した。これらの両ケースについて列車速度の影響を検討し、今後の速度向上における影響ならびに対策ポイントを提案する。さらに、振動特性の観点から耐震強化対策についても解析検討し、鉄道振動への影響を把握した。

【第6章】第3章から第5章の検討を踏まえ、鉄道高架橋の健全度評価手法をとりまとめて提案する。現状実施している目視を主体とした全般検査、衝撃振動試験による健全度評価に加え、鉄道振動の大きな箇所の高架橋については、挙動に差異がある特異箇所（弱点箇所）として、特に水平部材（梁部材）の健全度に着目した詳細検査の実施箇所の一次診断手法（フィルタリング）を提案した。また、提案する健全度評価フローを踏まえた梁部材の詳細検査により、具体的な事例評価による提案手法の有効性を示した。

【第7章】各章で得られた結果を総括し、今後の課題を指摘して本研究の結論とする。

氏名	吉田 幸司		
論文題目	列車走行時振動による構造物の健全度評価に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	川谷 充郎
	副査	教授	森川 英典
	副査	教授	谷 明勲
	副査		

要旨

鉄道や高速道路などの既存の社会資本施設は、その多くが今後も機能を維持向上しながら供用されていかなければならない重責を担っている。本論文で検討されている東海道新幹線の高架橋についても同様であり、1964年の開業から40年余経過した今日においても、我が国の経済活動の大動脈として重要な役割を果たしており、今後も適正な健全度を維持しながら継続的に供用される必要がある。

構造物の健全度が何らかの要因によって損なわれた場合、ひび割れ、列車通過時の桁や梁のたわみの増加、構造物の振動や沿線地盤振動（鉄道振動）など、他の健全な構造物と異なる特異な現象が現れる。こうした構造物が発信する情報を把握し、診断することが維持管理上重要であることは言うまでもない。また、鉄道高架橋のような線状構造物の維持管理においては、他と比べ性能の劣る構造物を適切に見出し、弱点箇所を抽出（必要により事前対策）しておく必要もある。

一般に、鉄道高架橋の検査は、目視を主体とした定期的な検査が実施されている。しかし、近接せねば視認が難しい微細なひび割れ等の変状や、基礎等の地中部にあたる部位の変状の把握においては、目視以外の検査・評価手法が必要である。このような検査手法の一つとして、東海道新幹線では高架橋の固有振動数に着目した衝撃振動試験による健全度評価が導入されている。この検査手法は、特定の振動モードにおける固有振動数の測定を行い、その変化から部材剛性や基礎ばねの変化を捉えて、健全度評価を実施するものである。しかし、今後の少子高齢化や技術継承への課題から、膨大な構造物を少ない技術者でより効率的にメンテナンスする新たな視点からの健全度評価指標が求められている。

一方、騒音振動といった環境への配慮も鉄道施設には求められる観点であり、鉄道振動についても維持管理上の重要な課題と位置付けられよう。これまで、鉄道振動については、1976年の旧環境庁からの勧告「環境保全上緊急を要する新幹線鉄道振動対策について」に基づき、地表の鉛直成分を対象に補正加速度レベル（振動レベルと同義）で指針値70dBを越える地域について緊急に対策を講ずることとされ、沿線地盤振動の継続的測定と指針値を超える測定箇所の振動低減対策の開発ならびに実施がなされている。

沿線地盤振動の鉄道振動は、車両構造・走行速度、構造物、基礎ならびに地盤のそれぞれの特性が相互に影響するが、鉄道振動の発生メカニズムおよびその対策について、一定の知見を得るに留まり、完全には解明されていないのが現状である。しかし、既往の研究においては、鉄道振動を健全度からのアプローチとして捉えたものは見られず、構造物の特性と鉄道振動に関する知見としては、マッシュペリジッドな構造ほど鉄道振動が小さくなる傾向があるとの報告程度である。また、列車走行に伴う鉄道振動は、通常の運行状態で測定しうるものであり、特別な加振装置を要しない強制加振試験と云え、列車走行時の構造物の動的応答特性（振動特性）を把握し、鉄道振動を健全度評価に活用できれば維持管理上有用であるとともに、より効率的なメンテナンスに繋がるものと考えられる。

このような背景を踏まえ、本論文では、新たな健全度評価の指標として鉄道振動に着目し、鉄道高架橋に特有关多用されている構造形式であるRCラーメン高架橋を対象として、①～③に挙げる各項目を明らかにし、列車走行時振動による構造物の健全度評価の観点から新たな維持管理手法の提案を目的とした研究である。

- ① 実高架橋における健全度評価と鉄道振動の測定に基づき、鉄道振動の増加の要因として、構造物の健全度低下（部材剛性低下）の可能性を実証的に見極める。
- ② 鉄道振動の発生メカニズムと健全度との関係を把握するため、走行列車と高架橋の連成振動解析および地盤振動解析に基づき列車走行時振動を解析的にシミュレーションし、構造物の健全度をパラメータとした鉄道振動への各種要因の影響を明確にする。
- ③ 上記と同様な手法等に基づき、今後の構造物の機能向上（速度向上や対策工等）に対して、構造物の振動特性や沿線地盤振動への影響・効果を把握する。

氏名 吉田 幸司

第1章では、序論として、本研究の背景、鉄道高架橋の維持管理ならびに鉄道振動に対する既往の知見を概観するとともに、目的および本論文の構成を示している。

第2章では本論文で対象とするRCラーメン高架橋について東海道新幹線高架橋と他の新幹線高架橋と比較等からその特徴を整理するとともに、品川駅建設で不要となる実高架橋による水平交番載荷試験による人工損傷程度と衝撃振動試験による固有振動数の測定を実施し、損傷程度と固有振動数の変化を示し、これまでの維持管理検査手法について整理している。

第3章では、鉄道高架橋の部材剛性に着目し、鉄道振動の増加の要因に構造物の健全度低下(部材剛性低下)が影響している可能性について実証的に見極めることを目的として、衝撃振動試験ならびに列車走行時の鉄道振動の測定を実施している。実測による検討から、鉄道高架橋の耐震補強で実施した柱部材の鋼板巻き補強による剛性向上や、変状により剛性低下した高架橋の実測に基づく検証により、構造物の部材剛性の変化が鉄道振動へ与える影響(剛性向上により振動レベル低減、剛性低下により振動レベル増の傾向)を確認している。また、近接する同形式の高架橋において、健全度評価を実施し、振動レベルが大きい場合には部材の剛性低下を確認している。これら実測に基づく検証から、振動レベルが他と著しく異なる場合や、同一高架橋における継続的な振動計測により異常値を示す場合には、当該構造物に変状が生じている可能性があることを提言している。

第4章では、鉄道振動の発生メカニズムと健全度との関係を把握するため、構造物の健全度(柱・梁・杭部材の剛性等)をパラメータとした鉄道振動への各種要因の影響を明確にすることを目的に、走行列車と高架橋の連成振動解析および地盤振動解析に基づき列車走行時振動を解析的に検討している。解析検討にあたって、鉛直方向の振動特性に着目した9自由度車両モデルを用いた解析的シミュレーションの妥当性を検証するとともに、同手法による構造物の健全度をパラメータとした解析的検証を実施している。その結果、鉛直部材(柱・杭部材)の剛性変化は水平方向の振動モードに影響、水平部材(梁部材)の剛性変化は鉛直方向の振動モードに影響し、それぞれ剛性低下率に応じ固有振動数の低下を確認している。また、鉛直方向の加速度応答では、水平部材の梁剛性を低下させた場合に、低下率に応じた振動への影響を確認している。さらに、鉛直部材(柱・杭)の剛性低下について、鉛直方向の振動へは有意な影響は見られないことから、水平方向の振動についても着目した15自由度車両モデルによる検討も実施している。これらの解析的検討から、鉄道振動へ影響する構造物の健全度低下(部材剛性等の低下)の着目点として、梁部材の健全度、杭基礎の中間支持状態などを提言している。

第5章では、4章の解析手法等に基づき、今後の構造物の機能向上(速度向上や対策工等)に対して、構造物の振動特性や沿線地盤振動への影響・効果を把握するため、軌道の剛性向上、沿線地盤振動対策として開発された張出し端部の補強工、柱部材の鋼板巻き補強について解析的検討を実施している。

軌道の剛性向上による鉄道振動への効果を連成振動解析および地盤振動解析により確認し、些少の剛性向上で振動特性の改善効果を示している。この結果より、梁部材を含めた水平方向部材の剛性向上が鉛直方向の振動特性の向上に繋がることを提案している。また、張出し端部補強の実測事例の解析評価を実施し、本論文に用いている解析手法の有効性を別ケースにより示すとともに、対策効果を解析的に示している。さらに、振動特性の観点から耐震強化対策についても解析検討し、東海道新幹線高架橋において過半数以上の柱部材に施工が計画されている鋼板巻き補強が鉄道振動への悪影響を与えない点を示している。

第6章では、前章までの検討を踏まえ、現状実施している目視を主体とした全般検査、衝撃振動試験による健全度評価に加え、鉄道振動に着目した鉄道高架橋の健全度評価手法を提案している。鉄道振動の大きな箇所の高架橋については、挙動に差異がある特異箇所(弱点箇所)として抽出し、特に水平部材(梁部材)の健全度、杭基礎の中間支持状態に着目することを提案しており、同提案手法の観点から、具体的な梁部材の健全度評価事例を示し、提案手法の有効性を示している。

第7章では、これら各章で得られた結果を総括し、今後の課題を指摘して結んでいる。

本研究は、列車走行時の鉄道振動に着目し、実測ならびに解析的手法による検討により鉄道振動と構造物の健全度の関連性について研究したものであり、土木構造物の健全度評価の一次診断手法(フィルタリング)に鉄道振動を導入した点に特徴および新規性があるとともに、鉄道振動について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、学位申請者の吉田幸司は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。