

審査の結果の要旨

氏名 蘇 迪

鉄道橋梁などの土木構造物は、都市機能やそのネットワークを担う重要な社会資本である。特に、東海道新幹線をはじめとする新幹線は、日本の経済活動の大動脈として重要な役割を果たしてきた。世界の高速度鉄道技術のベンチマークともされる新幹線であるが、その橋梁の多くは建設から40年以上経過しており、最近では、これらのコンクリート橋や鋼橋の老朽化が進んでいる。健全な橋梁も多いが、今後も適正な健全性を維持しながら継続的に供用される必要がある。列車の走行により橋梁や高架橋に生じる動的応答は、一般に列車の高速化に伴い大きくなる傾向にある。列車の走行速度が増加して加振振動数が橋梁の固有振動数に近づけば、共振が発生し、構造物への動的負荷が増大し、蓄積疲労やその他の損傷につながる恐れもある。鉄道橋の動的挙動の計測と予測を徹底的に行うことは、列車の高速運転への対応を考える際に極めて重要である。

本論文は、固有振動数や動的応答が測定されたコンクリート高架橋と鋼橋に着目し、高速列車との動的相互作用を考慮した橋梁振動解析手法を、汎用有限要素解析ソフトウェアを利用して構築し、このシステムの有効性を、実測との比較により検証した上で、新幹線橋梁の三次元的な挙動や列車と構造物の動的応答などを解明しようとしたものである。

論文は六章から構成されている。第一章では、鉄道橋の走行列車による動的応答に関する予測手法と実測例の既往の調査研究を述べ、さらに本研究の目的を記述している。

第二章では、速度計と加速度計を用いたコンクリート高架橋実橋計測を説明し、6つの隣接している高架橋の振動を比較している。高架橋の振動が、1)ほとんど同一の振幅で、三方向に励起されていること、2)その振動数は、列車の軸重が桁に対して周期的に加える強制振動の周波数と一致していること、3)列車速度に依存して、速度に比例して増加すること、4)卓越する高い周波数のピークは等間隔に並んでおり、この間隔は、基本周波数の整数倍となっていること。もっとも興味深いこととして、6)振動のRMS応答を異なる高架橋の間で比較したところ、大きな個体差が存在することなどを示した。同一の電車が通過した場合でも、各々の高架橋の応答レベルは、非常に異なっており、バンドパスフィルターを適用し低時モードのみを抽出しても振動レベルの違いが変わらないことを示している。そして、このことは、高架橋の基本的な違いに起因することを意味しており、軌道の狂い、境界条件や地盤条件の違いは、観測された振動レベルの違いを生じうるとして注目に値する。

第三章では、汎用有限要素分析ソフトウェアを利用して列車と橋梁との連成を考慮した動的応答解析手法を構築している。具体的には、走行列車モデルについて、解析精度及び解析の効率化の両面を満たす車両モデルを提案し、鉄道橋梁部分を三次元有限要素でモデル化し、橋梁動的応答評価の解析結果を精緻で再現性のあるものへと改善するものである。離散化のために、列車運動方程式はニューマークの有限差分スキーマ

ムを使用している. 解析は従来の有限要素法を使用して解決することができる, すなわち, 有限要素ソフトウェア ABAQUS と数値ソフトウェア MATLAB を使用しているため., このアプローチは既往の研究に比較してより広く使用することができる. 簡単な例題を通じて, 高い精度で計算が出来ることを示している (補遺A)

提案された解析スキームの能力と信頼性は, コンクリート高架橋(第四章)と鋼橋(第五章)の動的応答の予測において示されている.

第四章では, 詳細な RC 高架橋の数値シミュレーションモデルが構築され, 時刻歴応答と振動数特性において計測結果を比較すると一致していることが確認された. シミュレーション結果は, 構造振動の RMS 値が電車速度の増大に伴い増加することを明らかにした. 高架橋振動の大部分は, 低い周波数レンジにある. 次に, 様々な構造応答に影響を与える要因を分析し, 1) 軌道の狂いは, 橋軸直角方向の応答に大きな影響を及ぼすこと. 2) 連続レールは, 特に縦方向では, 隣接している高架橋の間で相互作用に大きな影響を及ぼすこと. 3) 地盤・基礎状況の違いが, 測定において観察される振動レベルの違いを引き起こす主要な原因として推定され, 上述の 2 つの要因よりも大きな影響を及ぼすことなどが明らかされた.

第五章では, ある鉄道鋼箱桁橋において発生した主桁ウェブの垂直補剛材下端溶接部付近の変状の原因を明らかにすることを目的として, 精密な解析モデルにより列車走行時の振動現象を説明し, 局部振動に対する高速運転の影響を予測した. その結果, 1) 変状の発生した垂直補剛材下端と主桁ウェブとの溶接部に局部応力を発生させる要因は, 主桁下フランジの局部振動であること, 2) T 型材で主桁下フランジと垂直補剛材を連結する現行の補強方法により, 振動モードが変化し, 変状を発生させた局部応力は著しく小さくなること, 3) また, その解析モデルを用いて, 局部振動に対する将来の高速化の影響を推測し, 列車速度を向上させた場合, 主桁下フランジパネルの振動は列車速度に比例して大きくなるのではなく, 局部振動固有周波数が列車通過周波数の整数倍に近づいたときに大きくなること, 4) 速度効果による衝撃係数については, 高速の場合は, 現行の設計基準との相違が大きくなっており, 設計基準による 1 次近似は, 共振に至らないピークの裾野の領域を簡易に表すための手法であり, 共振ピークを表す手法としては必ずしも適していないこと, 5) 今後高いモードの影響を設計で考慮しなければならないことなどが示唆された.

以上のように本論文では, 列車・橋梁の相互作用を考慮した汎用的な動的解析システムを構築し, 実際の鉄道橋での実測を行い, 両者との比較により, システムの妥当性と有効性を実証した. 本アプローチは高速鉄道の走行時における橋梁振動にとって正確なシミュレーションツールを提供するのみならず, 鉄道構造の設計や補強等においても有用な情報を提供している. 工学上多大な知見を提示していると判断される. よって, 博士 (工学) の学位請求論文として合格と認める.