

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22686043

研究課題名(和文) 走行車両の応答のみを用いた橋梁のモード特性推定に関する研究

研究課題名(英文) Estimation of vibration modes of a bridge using the vehicle responses passing over the bridge

研究代表者

大島 義信(Oshima, Yoshinobu)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10362451

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円、(間接経費) 3,420,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、橋梁上を走行する車両の応答から、橋梁の状態を推定する理論を構築し、実験的および数値的に検証を行った。その結果、車両応答から橋梁のモードを推定する理論を構築し、数値シミュレーションにより妥当性を確認できた。一方、固有振動数の推定については、固有振動数が損傷に対して感度が低いことを勘案し、複数回走行を前提とした統計処理により推定精度を確保する手法を提案し、模型橋梁により検証した。その結果、振動数の推定値そのものよりも、その分散が変化することを見出した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the theory of estimating a bridge state by analyzing the responses of passing vehicles over the bridge has been proposed and was verified through experiments and numerical simulations. First, the algorithm to estimate mode shapes of a bridge was built and verified to be valid. With regard to natural frequency, considering the low sensitiveness of eigenfrequency to damage, the enhanced method to estimate the frequency by multiple measurements has been proposed and verified through the experiment using mode bridges. Finally, it was found that our theories are valid in some range.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：維持管理工学 橋梁振動 損傷同定 車両応答

1. 研究開始当初の背景

断続的に実施される橋梁点検の「空白」を補うため、広範囲で迅速なモニタリング手法が望まれている。簡易的な道路点検手法として、藤野らは1)、走行車両の振動に着目した路面性状の評価を行っており、ジョイント部の段差などの異常値を簡易的に検知することに成功している。また彼らは、鉄道列車の振動を利用した軌道異常の検知を行っており2)、車両振動から軌道のゆがみ検知が可能であることを確認している。しかしこれらの技術は、路面(軌道)性状に着目した技術であり、その下位構造である橋梁の健全性評価を行うものではない。

海外では、橋梁上を走行する車両の振動応答から、橋梁の固有振動数を推定する試みが行われており、一定の成果を得ている3)。しかしこの方法では、パワースペクトルに表れるピークのみで固有振動数を判断しており、加振点および観測点(車両)が移動する効果を考慮することができていない。さらに固有振動数は損傷に対して感度が低く、また環境要因により大きく変動するため、これのみを基本とする健全性の評価は難しい。そのため、減衰特性やモード形状など損傷に敏感で外乱に頑健な特性値を推定する必要がある。また正しい推定のためには、加振点や観測点が移動することを考慮した理論構築が必要である。

【参考文献】

- 1) 古川ら:巡回車の動的応答を利用した路面のリアルタイム簡易診断システム(VIMS),第61回土木学会全国大会,6-120,2006.
- 2) 石井ら:営業車両の走行時の車両振動を用いた軌道モニタリングシステム(TIMES)の開発,土木学会論文集F,Vol.64-1,44-47,2008.
- 3) Y.-B.Yang et al.: Extracting bridge frequency from the dynamic response of a passing vehicle, Journal of Sound and Vibration 272, 471-493, 2004.など

2. 研究の目的

本研究は、橋梁上を走行する車両の応答から橋梁の卓越振動数およびモード形状を推定する理論を構築し、数値シミュレーション、模型橋梁、実橋梁を用いて検証を行う。

(1) モード形状の推定

モード形状の推定では、単純桁構造の橋梁を1次元梁とみなし、モード解析法に基づき応答値をモード形状関数と時間関数に分離させ、主成分分析によりモード形状関数を推定する手法である。この理論を拡張し、橋梁の損傷検知を行う手法を確立する。また、検出可能な車両や橋梁の条件などを明確にする。

(2) 卓越振動数の推定

橋梁上を走行する車両の応答のスペクトル密度を評価することで、橋梁の卓越振動数を評価する手法を提案し、実験的および数値的

に検証する。ここでは、複数回走行を前提としたノイズ分離法などを検討する。

3. 研究の方法

本研究では、数値シミュレーション、模型橋梁による実験、実橋梁による実験の3つの検証方法を用いて実施する。

(1) 数値シミュレーション

数値シミュレーションでは、2自由度の梁要素を用いたFEM解析を基本とする。ただし、モード分解法を利用して、解の収束性を改善する。ここでは、パラメータの影響や計測不可能な出力の確認などを行い、提案理論の有効性を評価する。

(2) 模型橋梁

ここでは、5m規模の模型橋梁を作成する。また2自由度の車両模型と牽引車を作成し、ワイヤ牽引により橋梁上を走行させる。その応答値を利用して、提案理論により模型橋梁の振動特性が推定可能かを検証する。ここでは、提案理論の妥当性、適用範囲、ノイズの影響について評価を行う。

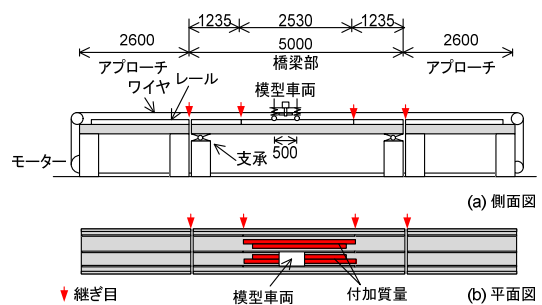


図1 模型橋梁

(3) 実橋梁による検証

撤去予定の橋梁において、部材を破断させることで橋梁状態を変化させ、その上で橋梁上を走行する車両の応答から状態の差異を見出せるかを検証する。

最後に、以上の結果をとりまとめ、提案手法の妥当性を評価するとともに、提案手法による橋梁の健全性評価への可能性を検討する。

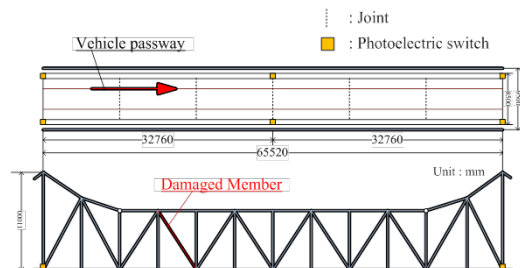


図2 損傷を導入した実橋梁

4. 研究成果

(1) モード推定

直接的にモード形状を推定する理論については、数値シミュレーションによる検討を行い、以下の知見が得られた。

・最終的なモード形状の推定精度に影響を与えると考えられる、変換行列の悪条件性、基底関数によるモード形状関数の近似精度、および基準座標の無相関性について検討した。その結果、悪条件性に基づく最適な車両台数は3台であることがわかった。また、モード形状の種類によって近似精度が異なること、さらにモード形状や路面凹凸によって相関性が変化することが明らかとなった。

・移動計測点から固定計測点への変換精度に着目した場合、変換精度がモード形状に依存するほか、橋梁中央への変換精度が高いこと、また計測誤差の増加にともない変換精度が低下することなどが確認された。

・最終的なモード形状の推定精度を検討した結果、いずれの場合でも1次モード形状が精度良く推定できることが明らかとなった。一方で、高次のモード形状の推定精度は低くなる傾向が得られた。これは、高次モードの応答量自体が小さいため、推定そのものが困難となっているためと考えられる。

一方、モード形状の推定理論を拡張し、モード形状比を指標として状態量を推定する理論を構築し、数値シミュレーションおよび実橋梁において検証を行った。

・数値シミュレーションの結果、橋梁振動成分の自己相関性の変化がモード形状の推定精度に影響を与えることを確認した。すなわち、健全な状態を前提とする推定値からの誤差を基準とすることで、状態の差異を確認できる可能性を見出した。

ただし、実用化にあたっての課題として、路面凹凸の変化に対する感度が高いことも挙げられる。したがって、本提案手法の適用により、モード形状推定値が変化したとしても、その変化は橋梁損傷よりも路面の劣化による可能性の方が高いと言える。

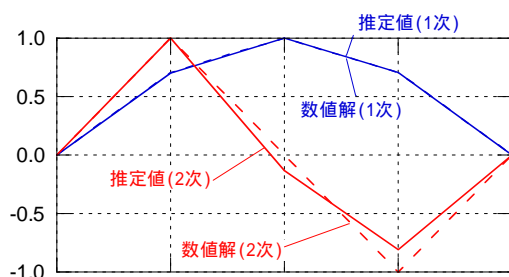


図3 推定したモード形状の一例

(2) 卓越振動数

次に、橋梁上を走行する車両の応答に着目し、その卓越振動数の発生頻度を評価することで、橋梁の状態変化を見出せるかを検討した。ここでは、損傷状態として固有振動数が大きく変化する支承の固定化、および固有振動数の変化が小さい軽微な損傷を想定し、車両走行時の振動特性の差異を検証した。また、

模型車両が模型橋梁上を定速で300回走行することで得られたデータに対し、卓越振動数の発生頻度を評価し、3つの状態の差異を評価した。

橋梁上で計測されたデータにより得られた卓越振動数の発生頻度を評価した結果、発生頻度の頻度分布に差が生じた。特に、支承の固定化を行った場合、車両との相互作用が発生しうる振動帯域において分布形状が変化した。そのため、発生頻度のばらつき、すなわち分散を評価することで、状態変化を識別できる可能性がある。

また、車両上で計測されたデータを評価した結果、橋梁の状態に応じて卓越振動数の発生頻度が変化することを確認した。特に、卓越振動数によっては分布の平均だけでなく、分散も変化するもので、分散を評価することによっても差異が見出せる可能性がある。ただし、車両上で確認された卓越振動数の差異は、橋梁上で確認された変化とは異なり、重りを付加して固有振動数を変化させた場合には、橋梁上での差異は小さいが、車両上での差異が大きくなった。この点については、今後の検討とする。

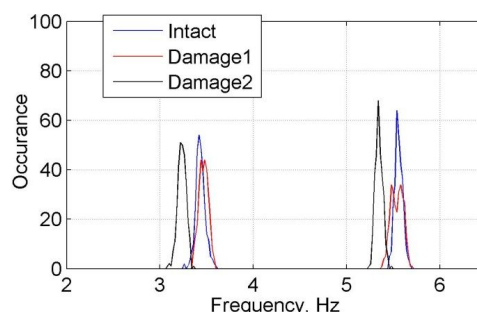


図4 車両応答から推定した橋梁卓越振動数分布の一例

(3) まとめ

橋梁上を走行する車両の応答から、橋梁の状態を推定する手法について検討を行った結果、モード形状そのものではなく、その推定誤差を利用することで橋梁の状態量を推定できる可能性を見出せた。また、固有振動数の推定については、複数回の走行により推定値の分散を評価することで、状態量の差異を見出せる可能性を示した。

しかし、これらの検討はある条件の下で実施され確認された内容であるので、成果の適用範囲については限定的となる。そのため、提案手法を利用した維持管理の方法に適した橋梁の選別など、マネジメントの視点からの整理が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計15件)

1. 大島義信, 山本亨輔, 杉浦邦征: 車両応答から推定した橋梁変位に基づく橋梁の損傷同定法, 構造工学論文集, Vol.57A, 646-654, 2011. (査読有)

2. 山本亨輔, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征: 車両応答の時間周波数解析に基づく橋梁の損傷検知法, 構造工学論文集, Vol.57A, 637-645, 2011. (査読有)

3. 山本亨輔, 大島義信, 杉浦邦征, 河野広隆: 車両応答に基づく橋梁のモード形状推定法, 土木学会論文集 A1, Vol.67 No.2, 242-257, 2011. (査読有)

4. 服部洋, 大島義信, 塚本成昭: 車両通過音を活用した道路橋伸縮装置の異常検知に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2, Vol.67, No.2, I_865-I_873, 2011. (査読有)

5. 山本亨輔, 利波立秋, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征, 川谷充郎: 車両応答の統計分析に基づく橋梁損傷検知法, 土木学会論文集 A2, Vol.67, No.2, I_855-I_864, 2011. (査読有)

6. 金哲佑, 榊原稔基, 伊勢本遼, Heng Salpisoth, 大島義信, 杉浦邦征: 長期振動モニタリングによる中小スパン橋梁の異常検知の試み, JCROSSAR2011 論文集, 日本学術会議, 365-370, 2011. (査読有)

7. 山本亨輔, 伊勢本遼, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征: 鋼トラス橋の部材破断が橋梁および走行車両の加速度応答に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.58A, 180-193, 2012. (査読有)

8. 大島義信, 小林義和, 山口隆司, 杉浦邦征: 走行車両と橋梁の振動伝達に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A1, Vol.68 No.2, 384-397, 2012. (査読有)

9. 大島義信・福田翔平・Heng Salpisoth・服部洋・塚本成昭: 車両通過音を用いた道路橋伸縮装置の異常検知における高精度化に関する検討, 土木学会論文集 A2, Vol.68, No.2, I_751-I_759, 2012. (査読有)

10. Heng Salpisoth, 大島義信, 河野広隆: 実測データに基づくカンボジア道路舗装の IRI 予測法に関する検討, 土木学会論文集 E1, Vol.68, No.3, I_139-I_146, 2012. (査読有)

11. 山本亨輔, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征: 車両応答データの特異値分解による橋梁損傷検知技術の提案と検討, 構造工学論文集, Vol.59A, 320-331, 2013. (査読有)

12. Heng Salpisoth, 大島義信, 河野広隆: 打撃音および打撃力に基づくアスファルト舗装の構造評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E1, Vol.69, No.3, I_159-I_166, 2013. (査読有)

13. 大島義信, 長山智則, Heng Salpisoth, 河野広隆: オートバイの応答を利用した舗装路面の簡易評価システムの開発, 構造工学論文集, Vol.60A, 475-483, 2014. (査読有)

14. 大島義信, 船水洋輔, 山本亨輔, 杉浦邦征: 橋梁の損傷検知を目的とした車両振動の統計的分析, 構造工学論文集, Vol.60A,

175-183, 2014. (査読有)

15. 金哲佑, 北内壮太郎, 張凱淳, 大島義信, 杉浦邦征: 単径間鋼トラス橋における振動特性の同定とその変化に及ぼす損傷の影響, 構造工学論文集, Vol.60A, 184-193, 2014. (査読有)

[学会発表](計 11 件)

1. K.Yamamoto, R.Isemoto, Y.Oshima, C.W. Kim, M. Kawatani and K. Sugiura: Field Experiment on Vibrations of a Steel Cantilever Truss Bridge before and after Applying Damage, Proc. of ASEM'11, 4315-4326, 2011.

2. Y.Oshima, K. Yamamoto, C.W. Kim, M. Kawatani and K. Sugiura: Damage detection of a road bridge based on the statistical analysis of the vehicle's responses, Proc. of ASEM'11, 4327-4338, 2011.

3. K.Yamamoto, R.Isemoto, Y.Oshima, C.W. Kim, and K. Sugiura: Modal Parameter Changes of a Steel Truss Bridge due to Member Fracture, Proc. of the 24th KKCNN Symposium on Civil Eng., 185-188, 2011.

4. Y.Oshima, S. Fukuda, H. Hattori and S. Tsukamoto: Damage Detection of Bridge Joints Based on the Impact Sound Recorded by a Passing Vehicle, Proc. of the 24th KKCNN Symposium on Civil Eng., 189-192, 2011.

5. Y.Oshima, and M. Kado: Long-term Monitoring of Composite Girders using Optical Fiber sensors, Proc. of the 24th KKCNN Symposium on Civil Eng., 209-212, 2011.

6. S.Heng, Y.Oshima and H.Kawano: One Year Monitoring of Bridge Frequency and Traffic Load on a Road Bridge, Proc. of the 24th KKCNN Symposium on Civil Eng., 233-236, 2011.

7. Y.Oshima, S. Heng and H. Kawano: One year monitoring of bridge eigenfrequency and vehicle weight for SHM, Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics, IABMAS2012, 462-468, 2012.

8. Y.Oshima and M.Kado: Long-term monitoring of composite girders using optical fiber sensor, Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics, IABMAS2012, 777-781, 2012.

9. Y.Oshima, K.Yamamoto and H. Kawano: Mode shape estimation of a bridge using the responses of passing vehicles, Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics, IABMAS2012, 3597-3601, 2012.

10. Y. Oshima, H. Hattori, H. Salpisoth, S. Fukuda and S. Tsukamoto : Damage detection of Bridge Joints Based on the Impact Sound Recorded by a Passing Vehicle, Proc. of 11th international conference on structural safety and reliability (ICOSSAR), -, 2013.

11. Y. Oshima, J.Y. Kim, K. Sugiura: Damage evaluation of a railway bridge based on vibration monitoring, 7th International Symposium on Steel Structures, 58-59, 2013.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大島義信 (OSHIMA Yoshinobu)

京都大学 ・ 工学研究科 ・ 准教授

研究者番号：10362451