

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820200

研究課題名(和文)迅速・低コストに橋梁群の健全性を評価する車両応答分析技術の開発と検証

研究課題名(英文)Development and verification of vehicle response analysis for bridge health evaluation

研究代表者

山本 亨輔 (Yamamoto, Kyosuke)

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：80635392

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：走行車両にセンサを搭載し、車両振動を計測することで、通過した橋梁の健全性を評価する技術の有効性を検証した。本研究により、数値シミュレーション・模型実験・実橋梁実験のデータ分析を行い、センサを前輪と後輪に設置した二点計測により、橋梁損傷に感度の高い指標を見出すことに成功した。ただし、路面凹凸の影響が卓越するため、橋梁の劣化進展速度よりも早く舗装の劣化が進む場合は、本技術を適用することは困難であり、今後の課題といえる。

研究成果の概要(英文)：In this study, the efficiency of vehicle response analysis technology for bridge health evaluation was verified. An vibration index which is very sensitive to a bridge damage is discovered, by using two sensors on the vehicle. Its sensitivity is examined by using the data obtained in numerical simulations, laboratory experiences and a field experiment. A technical issue, however, exists, which is the low applicability to the situation in which the road profile changes faster than the bridge.

研究分野：構造工学

キーワード：橋梁スクリーニング 橋梁振動 車両振動

## 1. 研究開始当初の背景

増加する老朽化橋梁群に対し、迅速かつ低コストに実施可能な橋梁スクリーニング技術が求められている。そこで、車両振動を用いて橋梁損傷を検知する手法の開発が試みられている。既往の研究においては、車上に加速度センサを一つ設置する方法<sup>[1]</sup>が一般的であったが、ここでは、車上に複数のセンサを設置し、空間補正により橋梁のモード形状を推定する手法の開発と検証を行った。

振動特性の変化に着目した振動ベース診断技術を検証する場合、その実現性は損傷に対する感度によって理解することができる。すなわち、計測誤差による評価指標のばらつきよりも、損傷による変化のほうが大きければ、損傷を検知しやすいことが分かり、実現性が高い。計測誤差を数値シミュレーション上で考慮する場合、振動データに白色ノイズを加える場合が多い<sup>[2]</sup>。しかし、実際の計測環境によっては、さまざまな外乱要因が存在するため、必ずしも白色ノイズで計測誤差を再現できるとは限らない。したがって、実験的検証が必要不可欠であった。

一方で、車両-橋梁相互作用システムには、路面凹凸のようなランダムな関数が含まれているため、本手法の有効性を解析的に示すことは困難である。このような場合、有効性は統計的妥当性によって示すべきである。しかし、実橋梁実験で得られるデータの場合、走行回数が少なく、統計的に十分とは言えない。そこで、繰り返し回数を十分に確保できる模型実験も合わせて行う必要があると考えられた。

### (参考文献)

- [1] Yang, Y.-B., et al: J. of Sound and Vibration, Vol.272, pp.471-493, 2004.
- [2] 大島義信, 他: 構造工学論文集, Vol.57A, pp.646-654, 2011
- [3] Xiang, Z., et al: Advances Interaction & Multiscale Mechanics, pp.541-553, 2010.

## 2. 研究の目的

本研究では、実橋梁における部材損傷前後での車両振動データから橋梁モード形状を推定し、その感度を調べる。また、模型車両に繰り返し模型橋梁上を走行させる模型実験を実施し、統計的妥当性を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

### 3-① 実橋梁実験

実橋梁で得られた車両振動データから、橋梁モード形状を推定し、部材損傷導入前後での変化を調べる。走行速度を変化させて、複数回の走行試験を実施し、車両走行速度が結果に及ぼす影響を評価する。

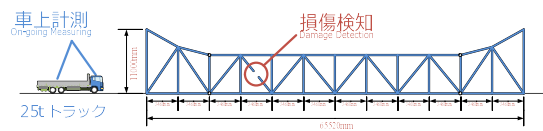


図1 鋼製トラス橋の斜材に人工的に損傷を導入する。その前後で、センサ類を搭載したトラックが走行し、橋梁通過時の加速度を計測する。



図2 実橋梁実験の様子。斜材破断側には作業スペースが有るため、逆車線側を車両は走行した。

### 3-② 模型実験

模型橋梁上を走行した時の模型車両の振動データを計測し、橋梁モード形状を推定する。走行速度を少しずつ変えながら、繰り返しデータを収集し、速度のばらつきを考慮した、計測データのばらつきを表現する。

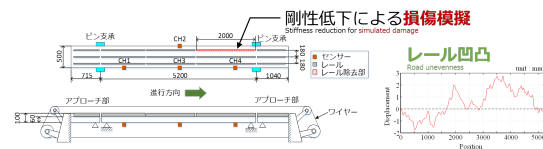


図3 模型橋梁の外観図。模型車両走行用のレールを3本用意し、車両が走行しない側の余り一本について、一部を除去することで損傷を再現した。レール上には実測データを参考に路面凹凸を導入している。

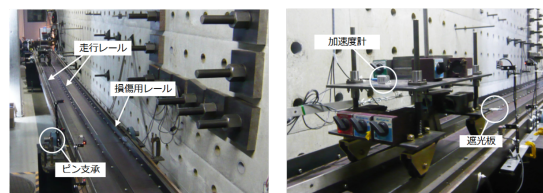


図4 模型橋梁および模型車両の様子。模型車両はバネを用いてサスペンションを再現してある。車両位置は、光電スイッチにより推定することとした。

## 4. 研究成果

### 4-① 実橋梁実験の分析結果

実橋梁実験で得られた車両振動データを空間補正し、特異値分解を適用することで橋梁モード形状推定値を得た。この結果を、空間特異モードと呼称することとし、振幅比の逆正接を取ったものを、SSMA (空間特異モード角: Spatial Singular Mode Angle) とした。

損傷前後で計算した SSMA を単位円周上にプロットすると、図 5 のようになることが分かった。

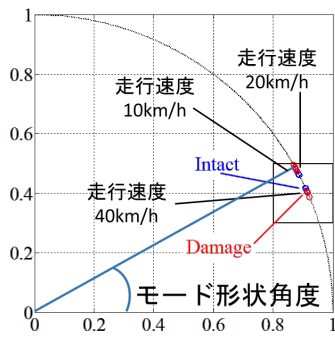


図 5 青色が健全時の、赤色が損傷時の SSMA を表す。計測毎のばらつきが小さく、損傷時に大きく変化することから、感度が高いと考えられる。

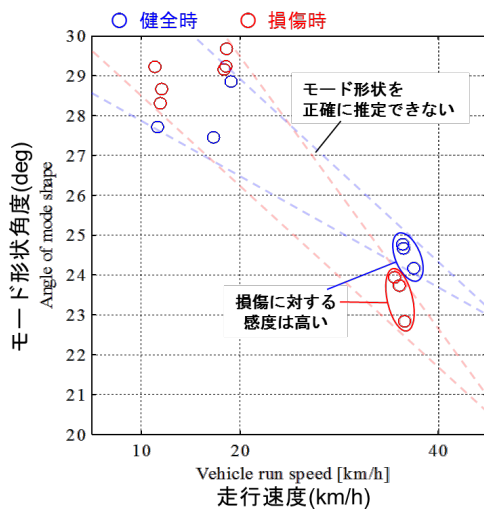


図 6 走行速度に応じて SSMA が変化していることが分かる。橋梁モード形状は橋梁システムのパラメータであり、走行速度と本来は無関係なので、SSMA はモード形状を精度良く推定していないと考えられる。一方で、条件を揃える（走行速度を一定とすると）、損傷前後で SSMA は明確に変化しており、感度が高いことが分かる。

以上の結果より、SSMA の有効性が示されたが、その妥当性については検討の余地が残されている。

そこで、鋼トラス橋を有限要素法によりモデル化した数値シミュレーションを実施し、同様の傾向が見られることを確認した。これらのことを総合すると、次のようなことが分かる。まず、SSMA そのものはモード形状を正確に推定していないので、その変化から損傷位置や規模などを正確に推定することは困難であろうということが挙げられる。SSMA の変化率と損傷規模に明確な相関は見られなかった。第二に、SSMA は局所損傷に対する感度が高く、その性質から損傷有無を判定するには適していると考えられる。

また、SSMA が反応するメカニズムを正確に把握することは、課題として残った。SSMA を車両-橋梁相互作用システムの支配方程式から解析的に導くと、主成分には橋梁の基

準座標だけでなく、路面凹凸や車体そのものの振動成分が含まれた形で影響が残る。したがって、個々の成分が推定精度にどのような影響を与えているのかを明らかにすることで SSMA の反応メカニズムを明らかにすることが出来ると思われる。ただし、路面凹凸などランダム性の強い成分が含まれているので、それらの解析的成果がどの程度、現実問題と一致するかは分からない。

#### 4-② 模型実験の分析結果

走行速度を変化させながら繰り返し模型実験を実施した。SSMA と走行速度の関係を以下に示す。

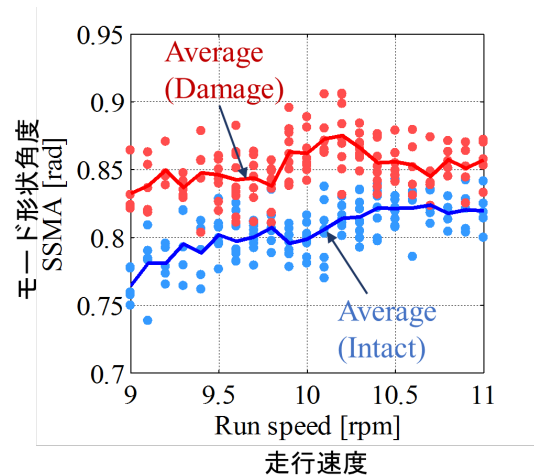


図 7 走行速度に応じて SSMA が変化していることが分かる。損傷前後で SSMA は統計的に判別可能なレベルで変化しており、実橋梁実験の結果と一致することが分かった。

以上の結果より、損傷に対して SSMA が変化することの統計的妥当性が確認された。橋梁構造の損傷に対する反応メカニズムは不明だが、工学的使用には耐えうるものと考えられる。ただし、あくまでこれらの結果は、数値シミュレーションや実橋梁実験、模型実験で確認された範囲のことである。SSMA が損傷規模に対して相関性を持たない以上、「SSMA は変化していなくとも、損傷が発生している可能性は残る」ことも同時に明らかになった。

#### 4-③ まとめ

SSMA の統計的妥当性が、実橋梁実験、模型実験および数値シミュレーションにより明らかとなった。SSMA は、損傷に対して感度良く反応し、スクリーニング技術への適用性が高いことが分かった。ただし、SSMA のモード形状推定精度そのものは低いため、損傷の位置や規模、種類を特定することは出来ない。したがって、SSMA の反応メカニズムを解析的に明らかにすることが、今後の課題となるだろう。

#### 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 3件)

- [1] Kyosuke Yamamoto, Mikio Ishikawa: Numerical Verification of Bridge Screening Technology based on Vehicle Vibration, Proc. of The 2016 International Conference of Mechanical Engineering, UK, 2016. (査読有り)
- [2] 石川幹生, 山本亨輔: トラス橋部材破断が SSMA 分析結果に及ぼす影響の数値的検討, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.204-211, 2016. (査読有り)
- [3] 石川幹生, 山本亨輔: 車両応答分析によるトラス橋部材破断検知手法の数値的検討, 鋼構造年次論文報告集, Vol.23, pp.160-167, 2015. (査読有り)

〔学会発表〕(計 17件)

- [1] Kyosuke Yamamoto, Mikio Ishikawa: Numerical Verification of Bridge Screening Technology based on Vehicle Vibration, Proc. of The 2016 International Conference of Mechanical Engineering, London, UK, 30/June-01/July/2016. (査読有り)
- [2] 森川みどり, 山本亨輔: 道路舗装の予防保全に向けた SSMA の適用可能性検討, 第 19 回応用力学シンポジウム, 北海道大学, 札幌, 2016 年 5 月 21 日~22 日.
- [3] 石川幹生, 山本亨輔: 車両応答分析によるトラス橋部材損傷に対する感度の数値的検討, 土木学会第 43 回関東支部技術研究発表会, I-70, 東京都市大学世田谷キャンパス, 東京都世田谷区, 2016 年 3 月 14 日~16 日.
- [4] 浅川一樹, 山本亨輔, 森川みどり: 橋梁の健全評価手法としての短時間 SVD 法の適用性に関する数値的検討, 土木学会第 43 回関東支部技術研究発表会, I-69, 東京都市大学世田谷キャンパス, 東京都世田谷区, 2016 年 4 月 14 日~15 日.
- [5] Kyosuke Yamamoto, Midori Morikawa, Kazuki Asakawa: Numerical verification on application of SVD to SHM for bridge structure, The 28th KKHTCNN Symposium on Civil Eng., Bangkok, Thailand, 16-18/November/2015.
- [6] Kyosuke Yamamoto, Kosuke Mori and Mikio Ishikawa: Numerical verification on Wavelet-based Vehicle Response Analysis method for bridge damage detection, The 28th KKHTCNN Symposium on Civil Eng., Bangkok, Thailand, 16-18/November/2015.
- [7] Kyosuke Yamamoto and Mikio Ishikawa: Examination of SSMA by 3D model numerical simulation, Proc. of TGSW 2015, p.92, EPOCHAL TSUKUBA / International Congress Center, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 28-30/September/2015.

- [8] 石川幹生, 山本亨輔: トラス橋の斜材破断が走行車両の振動特性におよぼす影響の数値的検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会, pp.649-650, 岡山大学津島キャンパス, 岡山県岡山市北区, 2015 年 09 月 16 日~18 日.
- [9] 浅川一樹, 山本亨輔, 石川幹生: FDD 法および SVD 法の交通振動への適用性に関する基礎的検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会, pp.29-30, 岡山大学津島キャンパス, 岡山県岡山市北区, 2015 年 09 月 16 日~18 日.
- [10] Kyosuke Yamamoto and Kazuki Asakawa: Applicability of FDD method to Traffic-induced vibrations, the 27th KKHTCNN Symposium on Civil Eng., Shanghai, China, 9-12/November/2014.
- [11] Kyosuke Yamamoto and Mikio Ishikawa: Relationship between SSMA and vehicle run speed, the 27th KKHTCNN Symposium on Civil Eng., Shanghai, China, 9-12/November/2014.
- [12] Yuta Takahashi, Kyosuke Yamamoto and Yuki Sakai: Investigate on automation of earthquake damage estimation system, the 27th KKHTCNN Symposium on Civil Eng., Shanghai, China, 9-12/November/2014.
- [13] Kyosuke Yamamoto, Yoshinobu Oshima and Kunitomo Sugiura: Damage influence on vibration indices of a passing vehicle, the 26th KKHTCNN Symposium on Civil Eng., Singapore, 18-20/November/2013.
- [14] Kyosuke Yamamoto and Yuta Nakagama: Errors on bridge vibration data measured by a passing vehicle, the 26th KKHTCNN Symposium on Civil Eng., Singapore, 18-20/November/2013.

〔その他〕

ホームページ:

[http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~yamamoto\\_k/index.html](http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~yamamoto_k/index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 亨輔 ( YAMAMOTO, Kyosuke )  
筑波大学・システム情報系・助教  
研究者番号: 80635392