

走行車両の加速度応答に着目した橋梁の損傷検知

京都大学大学院 学生会員 長谷川 聡一朗
 京都大学大学院 学生会員 ○中畠 俊祐

京都大学大学院 正会員 金 哲佑
 京都大学大学院 正会員 張 凱淳
 東京都市大学 正会員 吉田 郁政

1. はじめに

高度経済成長期に建設された橋梁の多くは今後更新時期が集中すると予想されている。このように橋梁構造物の更新にかかる財政的な負担が飛躍的に増大することが懸念されており、道路橋の異常診断および現状把握手法の開発が喫緊の課題である。現在走行車両の振動に着目する移動車両橋梁点検手法^{1,2)}の開発が進められており、直接橋梁にセンサを取り付けることなく点検できることから、労力、予算的な観点で注目が高まっている。本研究では車両に取り付けた加速度計によって計測された走行中の鉛直方向加速度を使用した移動車両橋梁点検手法について検討する。

2. 模型車両走行実験

走行車両はFig.1に示すように1台のトラクターが2台のトレーラーを牽引する合計3台の連結車両を用いる。Fig.1に示す赤色マーカーの場所に加速度計を設置し、各トレーラーに関して、前後軸で計測された鉛直方向加速度の平均値を、トレーラー重心位置における鉛直方向加速度としてモデルアップデートに利用する。

トラクター、トレーラーを含む連結車両を使用するのは、トラクターに加振の役割を持たせ、トラクターの移動によって発生する振動をトレーラーに取り付けた加速度計によって計測するためである。また、橋梁振動成分が車両に含まれやすくするためには車両のチューニングが必要であり、チューニングが容易なトレーラーの利用は効果的だと考えられる。さらにエンジンを搭載しないトレーラーを使用することでエンジン振動の影響を無視することができる。

実験に使用する模型橋梁は支間長5.4mの単純桁橋であり、支間中央に付加質量を加えることによって振動特性を変化させ、損傷を模擬する。このようにして、Table 1に示すよう健全状態の橋梁と、3種類の損傷状態の橋梁を用意しそれぞれの橋梁において10回ずつ走行を行い、走行中のトレーラーの加速度を計測する。なお、Table 1に示す橋梁の固有振動数は自由振動実験によって得られた値である。

3. モデルアップデートによる異常検知手法

橋梁の異常検知を行うために粒子フィルタ³⁾を用いた車両・橋梁のモデルアップデートを行う。計測された加速度および路面形状を既知の入力とし、計測された加速度に適合するような車両・橋梁連成モ

デルをアップデートする。ただし、モデルアップデートにおける入力路面形状は未知の場合が多いが、すでに開発が進んでいる車両振動を用いる路面凹凸同定手法^{4,5)}により同定される路面形状の入力を想定している。

本研究における粒子フィルタによるモデルアップデートの大まかな流れをFig.2に示す。収束判定では、4ステップ連続で推定値の変化が更新前の値の0.5%以内となった時点でパラメータが収束したと判断し、リサンプリングをそれ以上行わないものとする。ただしこの操作は同定対象のパラメータごとに行うため、収束と判定されたパラメータはその時点で更新の終了した固定値となり、すべてのパラメータの収束が確認された時点でリサンプリングを中止する。

橋梁モデルは10個の要素に分割した有限要素モデルとして扱い、モデルアップデートの対象となるパラメータを、橋梁については曲げ剛性×10要素分、質量×10要素分、車両についてはばね剛性、ばね減衰、質量、慣性モーメント、さらに走行速度、計測加速度の切り取り位置の計26項目とする。

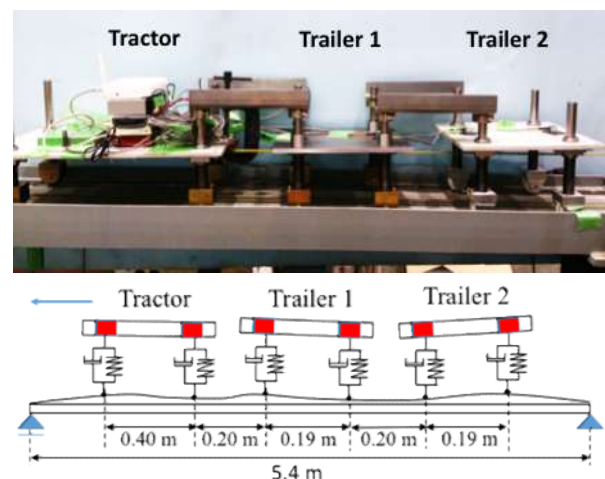


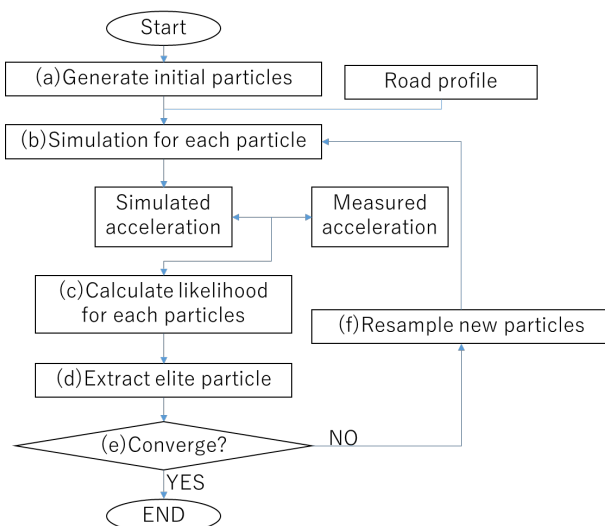
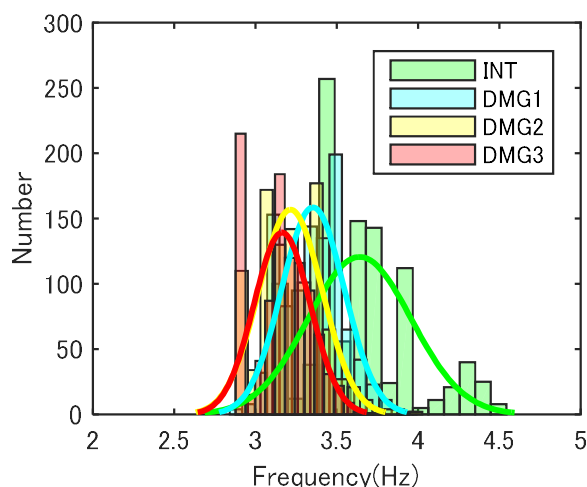
Fig.1 Vehicle model used in experiment.

Table 1 Natural frequency of the 1st bending mode of intact and damaged bridges.

Damage Scenario	Additional mass (kg)	Natural frequency (Hz)
Intact (INT)	0.0	3.64
Damage 1 (DMG1)	8.3	3.50
Damage 2 (DMG2)	12.8	3.47
Damage 3 (DMG3)	17.2	3.42

Table 2 Identified frequency for the 1st bending mode of the bridge.

	INT	DMG1	DMG2	DMG3
Identified	3.69	3.55	3.41	3.27
Error (%)	1.48	1.46	1.64	4.30

**Fig. 2** Flowchart of model updating utilizing merging particle filter.**Fig. 3** Distribution of identified frequency for the 1st bending mode of the bridge.

モデルアップデートによって得られた橋梁諸元から、固有値解析を行うことにより橋梁の固有振動数を算出する。このようにして **Table 1** に示される4つの実験シナリオそれぞれで固有振動数を導出し、10走行分の平均値を計算する。橋梁に損傷のある場合では、**Table 1** に示すように固有振動数が健全時と比べて低下することが判明しており、この傾向がモデルアップデートによる結果でも正しく表れるかを確認する。

4. 橋梁振動数同定結果

各シナリオで10回の走行によって同定された橋梁

の固有振動数の平均値を **Table 2** に示す。**Table 2** における Error(%)は **Table 1** に示した自由振動実験によって得られた固有振動数との誤差を表している。

また、各シナリオにおいて、モデルアップデートの最終ステップにおける各粒子(各橋梁モデル)に着目し、10回分の走行×100個の粒子=1000個分の橋梁モデルによって得られた同定橋梁固有振動数の分布をヒストグラムにして **Fig.3** に示す。**Fig.3** 内の曲線は、ヒストグラムを正規分布に近似したものを表している。同定される橋梁固有振動数について、ばらつきはあるものの、大まかな分布形は橋梁の損傷が大きくなるほど固有振動数の小さくなる方へ移行していることが確認され、車両加速度に着目したモデルアップデートによる損傷検知の可能性が確認できた。特に **Intact** や **Damage1** における橋梁固有振動数同定結果は、誤差 1.5%以内であり固有振動数同定に関しても精度が高いと言える。

5. 結論

本研究では、車両の走行中の加速度応答を利用した車両・橋梁連成系のモデルアップデート手法の検討を行った。模型実験によって車両・橋梁連成系のモデルアップデート結果を利用して橋梁固有振動数の推定を行ったところ、同定された橋梁固有振動数と、自由振動実験によって得られた真値との誤差が、損傷度合いの異なる4つのシナリオにおいて真値の5%以内に収まり、モデルアップデートによる橋梁固有振動数同定の可能性を示す結果となった。また、損傷度合いが大きくなるにつれて固有振動数が減少するという傾向も、モデルアップデートの結果から判別することができた。

今後の展望として、本研究の結果を統計的に確認づけるためにより走行回数を増やした実験を行う必要がある。

【参考文献】

- 1) Yang, Lin, and Yau: Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle. *J. of Sound and Vib.*, 272, 471–493, 2004.
- 2) Kim, Isemoto, McGetrick, Kawatani, and OBrien.: Drive-by bridge inspection from three different approaches, *Smart Struct. and Sys.*, 13(5): 775-796, 2014.
- 3) 吉田郁政, 佐藤忠信: 適応型モンテカルロフィルターを用いた損傷同定について, 土木学会論文集, 759, 259-269, 2004.
- 4) McGetrick, Kim, Gonzalez, and OBrien, Dynamic axle force and road profile identification using a moving vehicle, *Int. J. of Architecture, Eng. and Construction*, 2(1):1-16, 2013.
- 5) 長谷川聡一郎, 金哲佑・McGetrick・井上真一: 走行車両の加速度計測による路面形状の同定, 土木学会第71回年次学術講演会, 概要集 I-609, 2016.9.