

第 I 部門

再構築されたシステム行列による鋼桁橋の損傷前後の振動特性同定

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○三増 拓也

京都大学大学院工学研究科 正会員 金 哲佑

京都大学大学院工学研究科 学生員 五井 良直

1. はじめに

橋梁ヘルスマニタリングで用いる加速度センサとして無線センサの導入が期待されている¹⁾が、無線センサの電源の問題が長期的なヘルスマニタリングの運用にとって大きな課題である。既往の研究では、センサ間通信の省力化のために、構造同定におけるセンサ間の相関に基づき相関の強いセンサでグルーピングを行い、再構築されたシステム行列を用いる手法が提案されている²⁾。センサグルーピングにより同定される振動特性は、全てのセンサ情報を用いる既往の手法による同定振動特性に比べて少しの誤差はあるものの、橋梁の振動特性の把握には十分可能であると報告されている²⁾。一方で、橋梁ヘルスマニタリングの観点からは、このような誤差が損傷検知にどのように影響するかはまだ検討されていない。そこで、本研究ではセンサグルーピング手法を用いた実橋梁の損傷検知の可能性を検討する。特に、橋梁の振動特性の代表的なパラメータの1つである振動数に着目をして検討を行う。

2. システム行列の再構築

橋梁の運動方程式は式(1)のような多次元自己回帰 (MAR) モデルで表現することができる³⁾。 $\mathbf{y}(k)$ は離散時間の時刻 k における橋梁の加速度応答の観測値、 $\mathbf{A}_i$ は i 次の自己回帰 (AR) 係数行列、 $\mathbf{e}(k)$ は白色雑音、 p は次数をそれぞれ表す。AR 係数行列から振動特性の推定が可能となる。

$$\mathbf{y}(k) + \sum_{i=1}^p \mathbf{A}_i \mathbf{y}(k-i) = \mathbf{e}(k) \quad (1)$$

センサ間の相関を評価する指標として、式(2)で計算されるセンサグルーピング指標 (SGI) を用いる。 $\hat{\mathbf{y}}_k$ は MAR モデルによる加速度応答の推定値を表す。

$$SGI = \frac{1}{10 \log_{10} \frac{\sum_{n=1}^L \tilde{y}_n^2}{\sum_{n=1}^L |y_n - \tilde{y}_n|^2}} \quad (2)$$

センサ間の相関をセンサごとに1つずつ取り除いたときのSGIの変化により、MARモデルを用いた構造同定における各センサの重要度を定量的に評価することができる。SGIの値が高い、つまり、構造同定における重要度の高いセンサを用いてセンサグルーピングを行う。ただし、構造同定においてねじれモードのモード形状を正しく同定できるように、主桁間の相関を考慮するセンサグルーピングとする。センサグルーピングに基づいて再構築されるシステム行列は、センサグループ内のセンサ以外のセンサ（すなわち、センサグループのセンサとの相関が弱いセンサ）に該当するAR係数行列の要素が0となるスパース的な性質を持った行列となる。

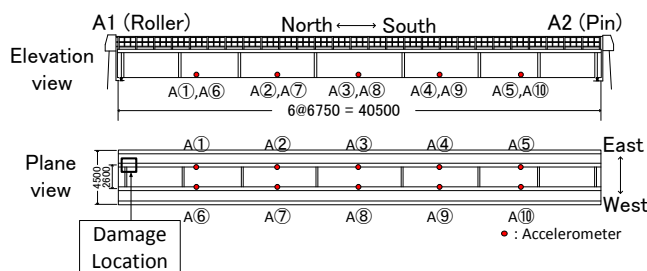
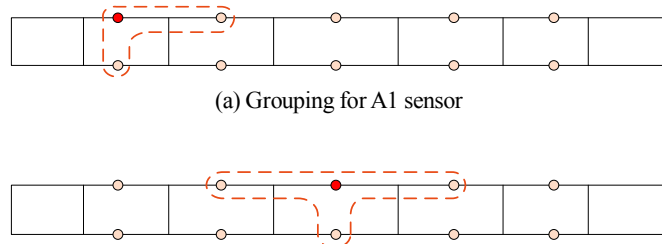


Fig. 1 Observation bridge and sensor deployment. (unit: mm)



(a) Grouping for A1 sensor

(b) Grouping for A3 sensor

Fig. 2 Example of considered sensor grouping.

3. 構造解析によるセンサグループピングの検討

対象橋梁は Fig. 1 に示す橋長 40.5m, 幅員 4.5m の 2 主桁橋梁である。対象橋梁の有限要素モデルとして格子モデルを構築する。節点と計測点でメッシュ分割を行い、境界条件は北側をローラー支点、南側をピン支点とする。モデルの詳細については紙面の都合上説明を省略させていただく。白色雑音を入力荷重として動的応答解析を行い、各計測点での振動データを得る。2 章で説明したセンサ間の相関を考慮したセンサグループピングの結果、Fig. 2 に示すセンサグループピングが候補として挙げられた。本研究ではこのセンサグループピングでの損傷検知の可能性を検討する。

4. 実橋梁データによる構造同定

疲労亀裂を模擬した損傷を鋼桁の下フランジおよびウェブに Fig. 3 のように導入した。下フランジまでの亀裂を DMG1、ウェブまでの亀裂を DMG2 とする。また、亀裂導入前の状態を INT とする。Fig. 1 に示す 10 個の加速度センサから車両走行による橋梁の鉛直振動を計測する。サンプリング周波数 200 Hz, データ長 15 秒の振動データを INT, DMG1, DMG2 それぞれの状態での 30 セットずつ計測した。INT の振動データを用いて、Fig. 2 のセンサグループピングに従い構造同定を行った結果、構造同定が可能であることが確認できた。そのため、Fig. 2 のセンサグループピングを最適センサグループであるとし、模擬損傷による振動数の変化を検討する。損傷検知のための着目固有モードを曲げ 1 次モードと曲げ 2 次モードとして検討を行う。全てのセンサ情報による損傷前後における同定振動数のヒストグラムを Fig. 4 に、センサグループピングによる同定振動数のヒストグラムを Fig. 5 に示す。横軸が振動数であり、ビンの幅は 0.01 Hz である。縦軸は確率密度関数 (PDF) を示す。センサグループピングにより再構築されたシステム行列を用いた構造同定の結果、全てのセンサ情報を用いる手法と同様に振動数の変化を確認することができる。曲げ 1 次は損傷により振動数が上昇しているが、曲げ 2 次は損傷により振動数が低下しており、亀裂による振動特性の変化を観測することができる。

5. 結論

本研究ではセンサ間の相関により再構築されるシステム行列での構造同定から得られる振動数に着目し、損傷検知の可能性を検討した結果、損傷による振動数が振動モードによって上昇または低下しており、現象解明に向けた詳細な検討が必要であるものの、検討損傷のレベルに応じて振動数の変化が確認された。実際に無線センサを用いた実験を行うことで、本手法によるセンサ間の通信の省力化について検討を行う計画である。

【参考文献】

- 1) 川谷充郎, その他 6 人: 橋梁振動モニタリングのための MEMS 無線センサノード開発と実橋適用性検討, 応用力学論文集 Vol.13, pp.1009-1016, 2010.
- 2) 三増拓也, その他 2 人: 構造ヘルスモニタリング用センサの効率的活用に向けたシステム行列の再構築, 第 20 回応用力学シンポジウム, 概要集 pp.271-272, 2017.
- 3) 岡林隆敏, その他 3 人: 多次元 AR モデルを用いた常時微動による橋梁振動特性推定法と推定精度の検討, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, pp.474-487, 2008.

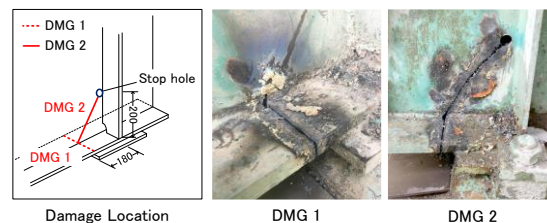


Fig. 3 Artificial damage of plate girder.

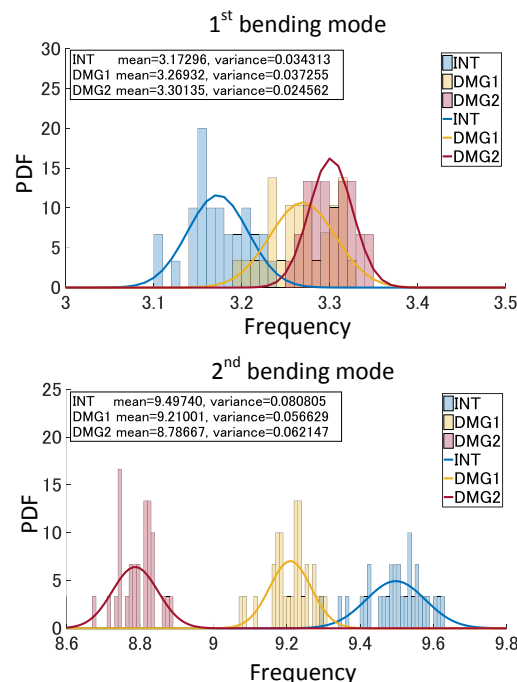


Fig. 4 Changes in histogram of frequencies due to damage identified from full system matrix.

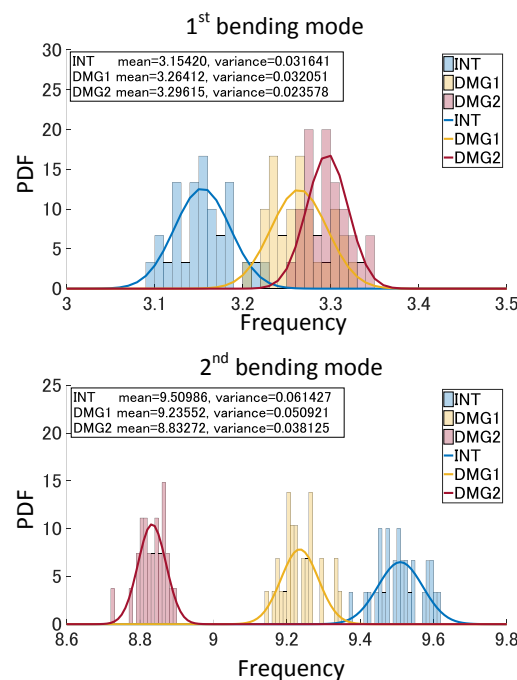


Fig. 5 Changes in histogram of frequencies due to damage identified from reconstructed system matrix.