

## センサグルーピングによる橋梁のシステム同定と異常検知

京都大学大学院 学生会員 ○三増 拓也  
 京都大学大学院 正会員 金 哲佑  
 京都大学大学院 正会員 五井 良直

## 1. はじめに

橋梁振動ヘルスマニタリングによる異常検知の技術が進んでいるなか、振動計測のための無線センサ活用が期待されている<sup>1)</sup>。無線センサにおいては長期間運用のためにセンサ間の通信省力化による消費電力の低減が必要とされる。既往の研究では、センサ間の通信省力化のためにセンサ間の相関に基づいたセンサグルーピングを行い、システム行列を簡素化する手法が提案されている<sup>2)</sup>。センサグルーピングにより部分的かつ逐次的に構築されるシステム行列による同定振動特性は、すべてのセンサ情報から同定される振動特性に比べて少しの誤差はあるものの、橋梁の振動特性把握には十分であると報告されている<sup>2)</sup>。しかし、橋梁の異常検知を行う上で、誤差がどのような影響を及ぼす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異常検知の可能性を橋梁の固有振動数とモード形状に着目して検討する。減衰については、ばらつきが大きく本研究では検討対象としない。

## 2. システム行列再構築手法

橋梁の運動方程式は式(1)に示す多次元自己回帰(MAR)モデルで表現でき、MARモデルのシステム行列から振動特性の同定が可能となる<sup>3)</sup>。

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

ここで、 $\mathbf{y}(k)$ 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。

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。 $\hat{\mathbf{y}}_k$ ,  $L$ はそれぞれ MAR モデルによる加速度応答の推定値、データ長を表す。

$$SGI = \frac{1}{10 \log_{10} \frac{\sum_{k=1}^L \hat{\mathbf{y}}_k^2}{\sum_{k=1}^L |\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k|^2}} \quad (2)$$

AR 係数行列内の各 AR 係数を 0 としたときの SGI の

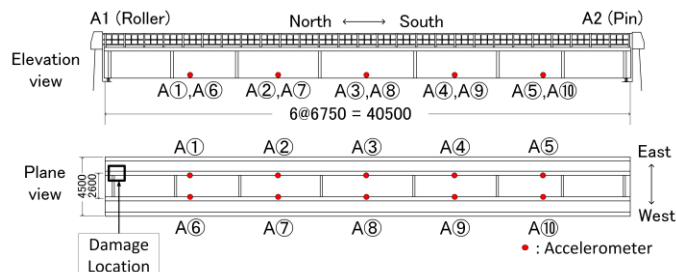


Fig. 1 Observation bridge and sensor deployment. (unit: mm)



Fig. 2 Sensor grouping examples for A1 and A3 sensors.



Fig. 3 Artificial damage of plate girder.

変化により、構造同定における各 AR 係数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 AR 係数に関連する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に対応するシステム行列の要素が 0 となるスパース的な性質を持った簡素化システム行列となる。

## 3. 構造解析によるセンサグルーピングの事前検討

対象橋梁は Fig. 1 に示す支間長 40m、有効幅員 4m の 2 主鋼板桁橋梁である。対象橋梁の有限要素モデルを格子モデルにより構築する。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。入力荷重として白色雑音を用いた振動応答解析を行い、各計測点での振

キーワード 振動ヘルスマニタリング, 異常検知, センサグルーピング, AR モデル, システム行列

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-183 TEL 81-75-383-3421

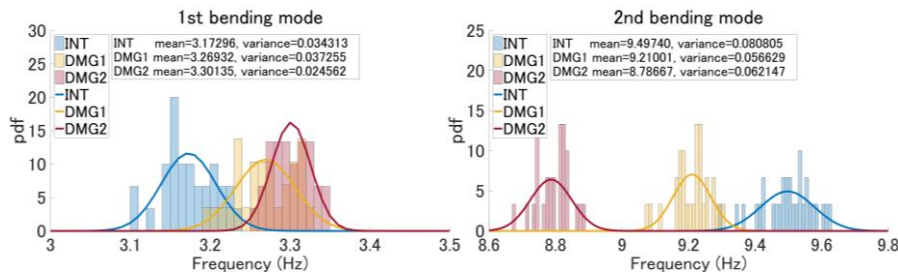


Fig. 4 Changes in frequencies identified from full system matrix due to damage.

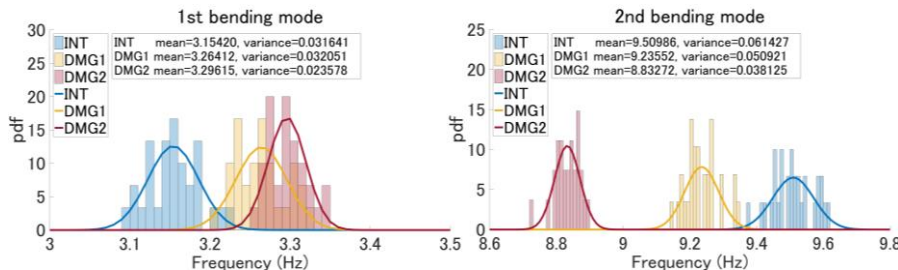


Fig.5 Changes in frequencies identified from reconstructed system matrix due to damage.

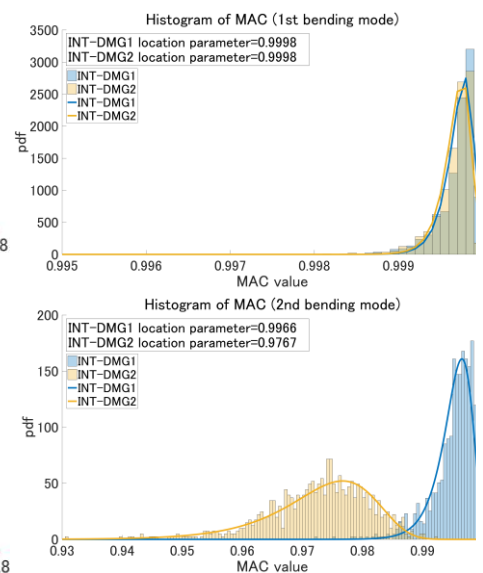


Fig. 6 Changes in MAC values between INT condition and DMG conditions.

動データを得て、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ピングを行う。結果として、Fig. 2に示すセンサグルーピングが候補として挙げられた。本研究では、事前検討で得られたセンサグルーピングによる損傷検知の可能性を検討する。

#### 4. 実橋梁振動データを用いた構造同定

鋼桁の下フランジおよびウェブに疲労亀裂を模擬した人工損傷を導入した(Fig. 3 参照)。下フランジまでの亀裂を DMG1、ウェブまでの亀裂を DMG2 とし、損傷導入前の状態を INT とする。Fig.1 に示す 10 個の加速度計から車両走行による橋梁の鉛直振動を計測する。各シナリオにおいて、サンプリング周波数 200 Hz で 15 秒間の振動データを 30 回計測した。INT の振動データを用いて、Fig. 2 のセンサグルーピングを用いた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とモード形状の変化を検討する。異常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。横軸に振動数、縦軸に確率密度関数 (PDF) を示す。センサグルー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、損傷による振動特性の変化を観測することができる。また、Fig. 6 に INT でのモード形状と各 DMG シナリオでのモード形状の MAC 値によるヒストグラムを示す。損傷による曲げ 1 次モードの MAC 値の変化はほとんどないが、曲げ 2 次モードについては MAC 値の変化を把握することができる。

#### 5. 結論

本研究ではセンサグルーピングに基づき再構築されるシステム行列による構造同定から得られる振動数とモード形状に着目し、異常検知の可能性を検討した。模擬損傷により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、損傷の段階に応じて振動数の変化が確認された。また、モード形状に着目した MAC 値による検討の結果、振動モードにより MAC 値の変動に違いが確認できるが、異常検知の特徴量としては感度が低いことが分かった。今後は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: 構造ヘルスマ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.