

多次元自己回帰モデルを用いた橋梁の統計的損傷検知手法の開発

京都大学大学院 学生会員 ○五井 良直
京都大学大学院 正会員 金 哲佑

1. 序論

今後さらなる劣化・老朽化の進展が予想される我が国の橋梁構造物において、迅速かつ簡易な維持管理手法の開発は喫緊の課題である。橋梁の健全度の変化は固有振動数、減衰定数、モード形状などの振動特性の変化として現れることから、振動特性推定による損傷検知の有効性が報告されている¹⁾。特に、数多く供用されている橋梁の健全度を把握するための橋梁ヘルスマニタリング技術として、交通規制や大規模な起振装置を必要としない常時振動を用いたシステム同定手法による振動特性推定が有用であると期待される。

しかしながら、常時振動によるシステム同定においては、推定結果のばらつきが効果的な損傷検知の妨げとなる恐れがある。金ら²⁾は単次元の自己回帰モデルから直接的に構成される損傷に鋭敏なパラメータについて統計的な検討を行うことで、推定結果のばらつきを考慮した損傷検知手法を開発し、さらに実橋梁を用いた損傷実験によりこの手法の有効性を示した。ただし、この損傷検知手法では単次元の線形システムモデルを検討の対象としており、観測点間の振動データの空間的な相関に関する情報は失われてしまう。また、損傷の有無を判別するための閾値についても経験的な外れ値分析に基づいており、実用的な観点からは統計的な異常さの度合いをより定量的に評価する手法が望まれていた。

本研究では、観測データの空間的な相関に関する情報を上記先行研究より効率よく反映する多次元自己回帰 (Multivariate auto-regressive, MAR) モデルを用いての損傷検知手法の精度の改善を試みた。また、マハラノビス距離³⁾を用いて観測値の健全時と比較した際の統計的な異常さの度合いを直接評価する損傷指示パラメータ (Damage indicator, DI) を導入し、統計的仮説検定による損傷検知手法を開発した。さらに、実橋梁の部材を人工的に破断させたうえで車両走行実験を行い、提案手法の妥当性を検討した。

2. 損傷検知手法

本研究では橋梁に設置された加速度計により計測された常時振動データを基に、健全な状態の対象橋梁からあらかじめ得られた訓練データと健全度を評価するために新たに得られたテストデータとを比較し、振動特性の変化を検知するための教師なし変化検知手法³⁾を提案する。まず、観測した加速度データの時系列 $\mathbf{y}(k)$ から、次式で表されるような MAR モデルを推定する。

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

ここで、 $\mathbf{A}_i$ は MAR モデルの係数行列、 $\mathbf{e}(k)$ は観測誤差、 P はモデル次数である。

モデル化された構造物の振動特性と密接な関係がある線形システムの極は、MAR 係数行列 $\mathbf{A}_i$ から構成されるシステム行列の固有値で表される¹⁾。本研究ではこのシステム行列の固有多項式の係数ベクトルに対して線形主成分分析を行い、それらの主成分について次式のように定義される標準化されたマハラノビス距離を損傷指示パラメータ DI とする。

$$DI = \frac{1}{m} (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{X}})^T \text{cov}(\mathbf{X})^{-1} (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{X}}) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{X}$ は複数の訓練データから得られた主成分ベクトルの集合、 $\mathbf{y}$ は単一のテストデータから得られた主成分ベクトルであり、 m は対象とするベクトルの次元である。また $\bar{\mathbf{X}}$ および $\text{cov}(\mathbf{X})$ はそれぞれ $\mathbf{X}$ の標本平均および共分散行列である。

健全な橋梁から算出される DI は近似的に期待値が 1 となる確率分布に従う一方、損傷のある橋梁から算出される DI の期待値は 1 より大きくなることが予想される³⁾。このことから DI の期待値 $E[DI]$ について帰無

キーワード 橋梁ヘルスマニタリング, 損傷検知, 多次元自己回帰モデル, 仮説検定, 鋼トラス橋
連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 京都大学桂キャンパス TEL 075-383-3421

仮説「 $H_0: E[DI] = 1$ 」および対立仮説「 $H_1: E[DI] > 1$ 」とする片側検定が定式化される．提案手法においては，複数のテストデータから得られた DI の標本平均 $\overline{DI}$ を検定統計量として適当な有意水準を与えることで閾値を設定し，この閾値と $\overline{DI}$ の値を比較して損傷検知を行う．

3. 適用事例

提案手法の妥当性について検討するため，**図-1**に示す単径間鋼トラス橋において一般の交通を規制したうえで鉛直トラス部材を人工的に破断し，乗用車1台が通過する際の振動を計測した．振動データは**図-2**の丸印が示す位置に鉛直方向に設置された8個の一軸加速度計により計測された．損傷は**図-2**の破線で示されるように支間中央およびその隣の鉛直部材にそれぞれ導入された．支間中央部材については，部材の半分を破断する場合と全てを破断する場合の2通りについて振動実験を行ったのち，溶接により修復した．**表-1**に損傷シナリオの概略を示す．計測は $DMG1$ を除いたそれぞれの損傷シナリオについて10回ずつ行われ， $DMG1$ については12回の計測が行われた．

図-3に車両の通過時の振動を対象として算出された DI および仮説検定のための検定統計量の結果を示す．ただし， $DMG1$ および $DMG2$ については INT において計測された振動データを， $DMG3$ については RCV において計測されたデータをそれぞれ訓練データとした．なお，帰無仮説の妥当性を検証するため INT および RCV のそれぞれについて一個抜き交差検証法によって得られた DI を**図-3**中の丸印で示している． $DMG1$ ， $DMG2$ および $DMG3$ の振動データから得られた DI は**図-3**中のバツ印で示した．それぞれの損傷シナリオについて DI の標本平均と，それらに対応する有意水準 1%の閾値が破線および実線でそれぞれ示されている．この図から3種類の損傷ケースのいずれについても DI の標本平均が閾値を超過している一方， INT および RCV の交差検証データについては閾値を超過していないことが分かる．これらの結果により，提案手法を用いて3種類の損傷が効果的に検知されたことが示された．

4. 結論

本研究では効果的な橋梁ヘルスマニタリング技術の開発を目的として，多次元自己回帰モデルおよび統計的仮説検定を用いた損傷検知手法を提案した．また，実橋梁を用いた損傷実験の結果に提案手法を適用し，対象とした3種類の損傷ケースのいずれについても提案手法による損傷検知の有効性が示された．

今後の研究においては，既往の単次元の損傷検知手法による結果と本研究との比較検討を行う予定である．

参考文献

- 1) Kim, C.W., Kawatani, M. and Hao, J.: Modal parameter identification of short span bridges under a moving vehicle by means of multivariate AR model, Structure and Infra-structure Engineering 8(5), 459-472, 2012.
- 2) 金哲佑, 北内壮太郎, 杉浦邦征, 川谷充郎, 甲斐正義: 多径間連続鋼トラス橋の交通振動を用いた損傷検知手法, 土木学会論文集 A1 69(3), 557-571, 2013.
- 3) 井手剛, 杉山将: 異常検知と変化検知, 講談社, 2015.



図-1 対象橋梁の写真

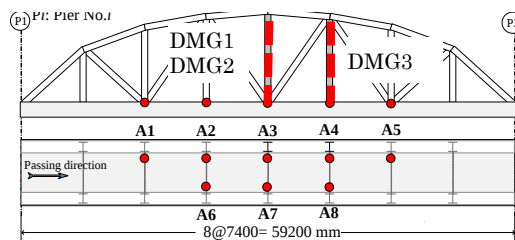


図-2 加速度計設置位置および損傷導入位置

表-1 損傷シナリオの概略

Scenario	Description
INT	健全（初期状態）
DMG1	支間中央部材を半分破断
DMG2	支間中央部材を全て破断
RCV	支間中央部材を修復
DMG3	支間 5/8 位置の部材を全て破断

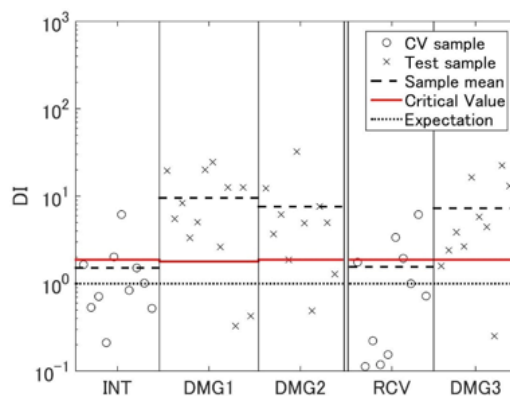


図-3 DI および検定統計量