

ベイズ推論による橋梁の異常検知とセンサ数の影響

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○尾中 貴輝

京都大学大学院工学研究科 正会員 五井 良直

京都大学大学院工学研究科 正会員 金 哲佑

1. 序論

現在、我が国において、高度経済成長期に架設された橋梁が約半分を占めており¹⁾、供用 50 年を越える橋梁が数多く存在する。そのため橋梁の維持管理が大きな課題である。橋梁の損傷検知手法の 1 つとしてベイズ因子 (Bayes factor: BF) を用いた仮説検定が提案されている²⁾。上記の先行研究では複数のセンサによる振動計測に基づいた異常検知が検討されているが、計測機器の導入に要するコストが実務上の課題となりうる。

本研究では、橋梁の損傷検知を効率良く行うために、損傷位置と損傷度合いを把握することができるセンサ数について検討する。

2. 損傷実験概要

本研究では鋼鉄 2 主桁橋梁において、損傷度合いや損傷位置の推定を行うためにベイズ仮説検定を用いた損傷検知の可能性について検討を行う。対象橋梁に人工的な損傷を与え、各損傷シナリオにおいて走行振動実験を行った³⁾。損傷シナリオについては、損傷導入以前の橋梁の状態を健全状態 (以下 INT) とみなす。次に、損傷対象箇所の下フランジ部に貫通き裂を模擬した損傷を導入し、この状態を DMG1 とする。さらに DMG1 に加えてウェブプレートにも貫通き裂を模擬した損傷を導入し、この損傷を DMG2 とする。それぞれの損傷シナリオを Fig.1 に示す。車両走行による振動実験において、各走行による試行数はそれぞれ、INT で 60 回、DMG1 で 32 回、DMG2 で 30 回である。各試行において、Fig.2 に示す 10 個の加速度センサを用いて計測し、ベイズ推定による仮説検定 (以

下、ベイズ仮説検定) を用いた損傷検知の指標である BF を算出する²⁾。また、現地実験において INT から DMG1 にかけて 5℃、DMG1 から DMG2 にかけて 10℃温度が上昇している。

3. ベイズ仮説検定

走行振動実験で得られた加速度データから多次元自己回帰 (Vector Auto Regressive: VAR) モデルを作成する。作成された VAR モデルから尤度関数を求め、ベイズの定理を用いて VAR モデル係数の事後分布を求める。仮説として二つの仮説、帰無仮説と対立仮説を定義する。帰無仮説 (H_0) として「観測値の従う統計的モデルが健全な状態の橋梁と同一である。」とする。対立仮説 (H_1) の事前分布をモデル化することは困難を伴うため、ここでは便宜的に「観測値の従う統計的モデルについて事前情報が不確かである。」とする。ベイズ仮説検定においては一般的な尤度比検定に用いられる尤度の代わりに周辺尤度の比と



DMG 1

DMG 2

Fig. 1 Damage scenario.

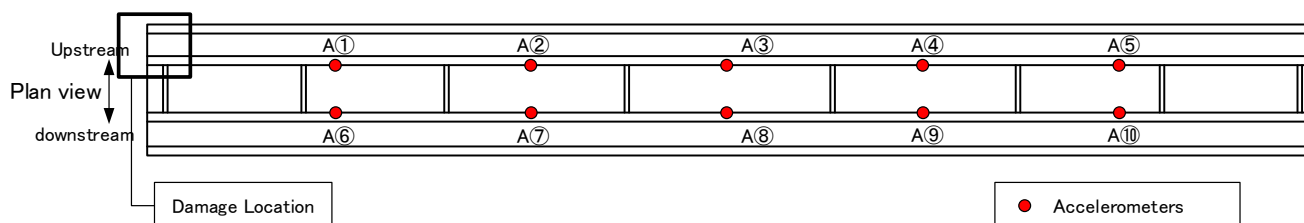


Fig. 2 Sensors arrangement.

キーワード ベイズ因子, 仮説検定, 異常検知, センサ数

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 京都大学工学研究科 社会基盤工学専攻 TEL : 075-383-3421

して定義される BF を用いる。損傷程度の判定は Kass と Raftery⁴⁾の報告に基づき、例えば $2\ln B > 10$ となる場合は帰無仮説 (H_0) を棄却する根拠が非常に強いとしている。

3. センサ数の減少による BF の変化の考察

本研究では、加速度センサ数 10 個を基準としてセンサ数を減らし、BF による損傷位置と損傷度合いの把握が可能なセンサ数について検討する。まず 10 個の加速度センサの計測結果から算出される BF を Fig.3 に示す。Fig.3 より損傷位置に最も近いセンサ A1 と A6 の BF が他のセンサの BF と比較して顕著に大きな値を示していることがわかる。したがって、損傷に近いセンサが損傷に敏感に反応することがわかり、各センサの BF の大小比較で損傷位置の推定が可能であることが推測される。

続いて、加速度センサ数を減らしたときの BF が受ける影響を検討する。10 個の加速度センサの BF の結果をもとに、損傷に近いセンサを減らす場合の BF の変化を検討する。損傷に近いセンサから 6 個、つまり、A1,A2,A3,A6,A7,A8 を減らしたときの BF を Fig.4 に示す。Fig.4 より残ったセンサで最も損傷に近いセンサ A4,A9 の BF が他のセンサの BF と比較して顕著に大きな値を示すことがわかる。次の検討ではどの程度センサ数を減らしでも損傷検知を行うことができるのか確認するためにセンサ数 1 個のときの BF を観察する。

Fig.5 に示すように、センサ数が 1 個であっても、DMG2 のときの BF の値が閾値を大きく上回ることがわかった。紙面の制約で橋梁の真ん中にある加速度センサ A8 を例としてあげたが、他のセンサでも同様の結果であることを確認している。

検討の結果、センサ数が 1 個であっても BF の値によって損傷の有無を把握することはできた。しかし、センサ数 1 個では損傷の位置の推定をすることができないため、損傷位置の推定までを含んだ異常検知のためには、損傷位置を推測できる最小センサ数を検討する必要がある。

4. 結論

BF を用いて損傷検知を行った結果、センサ数が 1 個でも損傷の有無の把握が可能であることがわかった。しかし、損傷位置の推定や損傷度合いを確認するためには少なくともセンサ数が 2 個以上必要であることがわかった。

今後、橋梁の損傷検知における最適なセンサ数を検討するにあたって、本検討をふまえて損傷位置を変更した際の BF の変化を観察し、最終的にセンサ配置も等間隔ではなく、損傷検知を行うことができる最適なセンサ配置

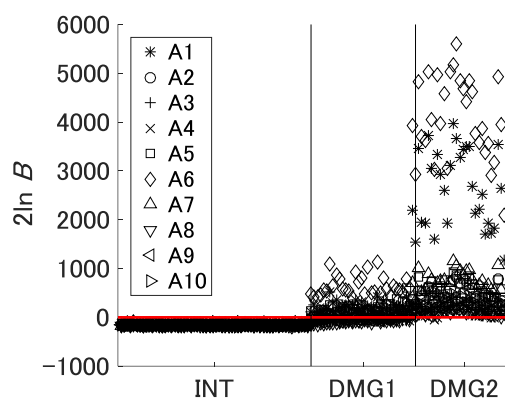


Fig. 3 Bayes factor of 10 sensors.

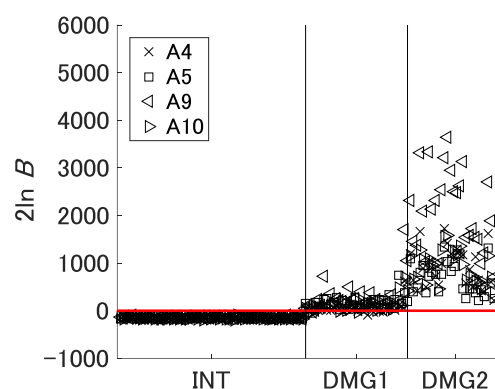


Fig. 4 Bayes factor of 4 sensors (without A1, A2, A3, A6, A7, A8).

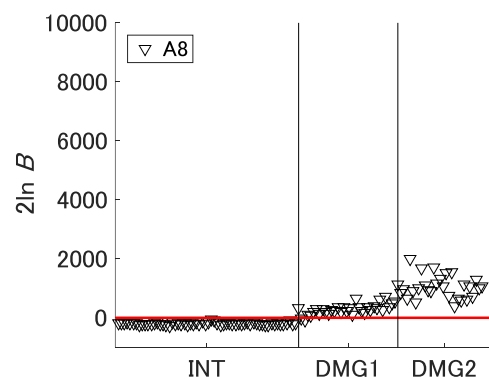


Fig. 5 Bayes factor of 1 sensor (only A8).

の検討を行う必要がある。また、損傷シナリオの推移に伴って温度変化が顕著なため、BF の値の変化が損傷によるものか確認するために温度変化の小さい他の橋梁での検討も進める。

【参考文献】 1) 国土交通省：道路メンテナンス年報，2018；2) 五井良直，金哲佑：ベイズ推論を用いた橋梁の振動特性推定に伴う不確実性の定量化手法の提案，土木学会論文集 A2(応用力学)75(2),1_647-1_657,2019；3) 三増拓也：橋梁振動ヘルスマニタリングにおける FE モデルアップデートおよび同定システムの簡素化，京都大学工学研究科 修士論文，2019；4) Kass & Raftery: Bayes factors, J. American Statistical Assoc., Vol.90, No.410, pp.773-795, 1995.