

温度変化が模型橋梁におけるベイズ異常検知に与える影響

京都大学 学生員 ○平手 佑季
 京都大学大学院 学生員 尾中 貴輝
 京都大学大学院 正会員 金 哲佑

1. 序論

橋梁維持管理の効率化を図り、振動特性の変化に着目する構造ヘルスマニタリングが検討されている。特に、長期にわたる振動特性の変化に着目する長期モニタリングも実践的橋梁ヘルスマニタリング方法として注目されている。ただし、長期モニタリングにおける気温の変化などの影響で振動特性に季節変動が起こることが報告されている¹⁾。本研究では、温度変化が橋梁の振動特性に及ぼす影響を検討するために、単純支持H型鋼桁の模型橋梁を用いて車両走行実験を行った。また、運動方程式のシステム行列を特徴量とし、ベイズ因子 (Bayes Factor: BF) を用いて異常検知を行うベイズ異常検知が報告されており²⁾、温度変化が BF に与える影響について検討する。

2. ベイズ異常検知法の概要

ベイズ統計においては統計的モデルのパラメータを確率分布として扱うため、パラメータ推定の不確かさを直接的に評価することが可能となる。この性質を利用し、橋梁が基準状態から変化がない場合と何らかの変化が生じている場合のそれぞれについてモデルパラメータの確率分布を仮定して、それぞれの分布に対応して尤度比である BF を算出することが可能となる²⁾。 BF は式(1)に示すように、観測値を得たうえでどちらの仮説が相対的に尤もらしいかを評価する指標であり、橋梁の健全性を評価する実用的な基準となりうる。

$$BF = \frac{p(D|H_1)}{p(D|H_0)} \quad (1)$$

ここで、 $p(\cdot | \cdot)$ は条件付き確率密度関数を表す。また、 D は特徴量の観測データ、 H_0 と H_1 はそれぞれ対象橋梁が健全である仮説と何らかの異常が生じている仮説を表す。

3. 模型橋梁車両実験および同定振動特性

本実験では、Fig.1に示す、橋長5600mm、支間長5400mm、有効幅員287mm、桁高66mmの単純支持H型鋼桁に対して車両走行実験を行った。支承部は、Ab1がピン支承、Ab2がローラ支承である。損傷シナリオは、桁中央部付近のフランジの3か所に高さの半分の亀裂を与えた場合をDMG1、桁端部付近のフランジを三角形に削り取った場合をDMG2、両損傷に補強鉄板を取り付けた場合をDMG0、DMG0から全ての補強鉄板を外した場合をDMG12とする。温度シナリオについては、ラバーヒーターを用いて桁の表面温度を上昇させ、約25°C、約35°C、約45°C、約55°C(それぞれT25、T35、T45、T55とする)の状態で行走実験を行った。また、車両重量約135N(質量13.77kg)、車両速度0.84m/s、サンプリング周波数200Hz、片道を1試行として、各シナリオ20試行の計測を行った。なお、Fig.1に示すように、ローラ支点での橋軸変位

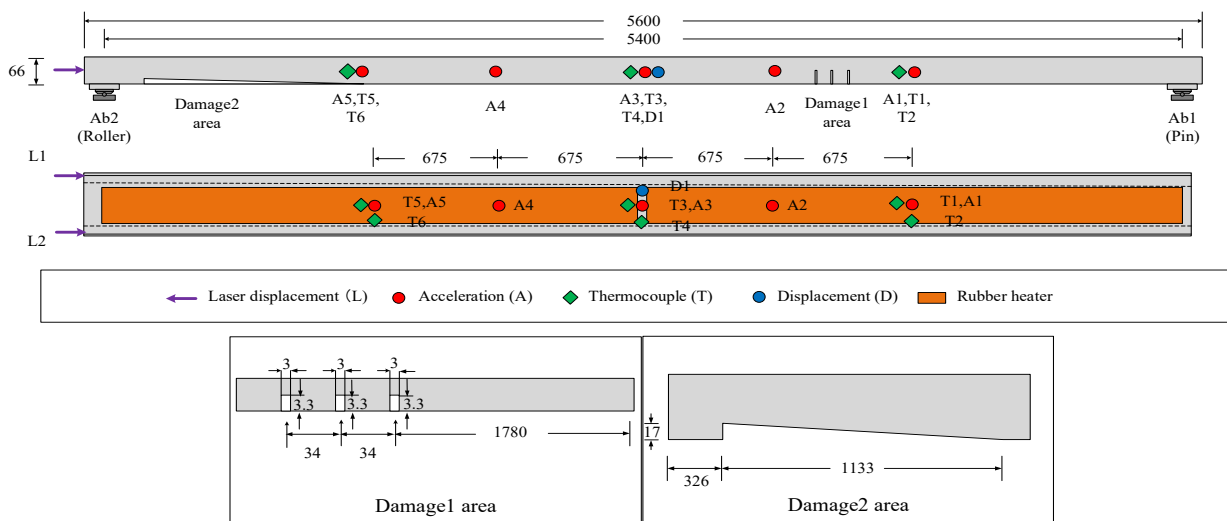


Fig. 1 Model bridge with sensor deployment and damage model [unit: mm].

キーワード ベイズ因子 仮説検定 異常検知 温度変化 振動特性

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

計測のためにレーザー変位計を2点、模型橋梁の鉛直加速度計測のために加速度計を5点、模型橋梁表面の温度計測のために熱電対を6点、支間中央の鉛直変位計測のために接触型変位計を1点設置した。

走行振動実験の各シナリオで得られた加速度に対して、確率部分空間法³⁾を用いて、橋梁の卓越振動数を同定する。温度25°Cでの曲げ1次から3次までの同定振動数をTable 1に示す。紙面の制約で示していないが、他の温度シナリオでも損傷シナリオに対する同定振動数変化の傾向はTable 1と同様であった。特記すべき点は、DMG0状態からDMG1の損傷状態に変化することによって、曲げ1次モードの振動数が上昇する結果となった。温度変化によって梁の境界条件が変化することで、損傷による剛性低下でも振動数が増加⁴⁾することは考えられる。しかし、Table 1は同じ温度条件であり、境界条件が変化も考え難い。Fig.2に示すように、曲げ1次モードの固有振動数帯のPSDに複数のピークがあり、損傷によるPSDのパワーの変化はあるものの、近傍の異なる振動モードを抽出したことで、曲げ1次モードの振動数が上昇したと考えられる。関連して、DMG0状態からDMG1の損傷状態に変化することによって、鉛直変位計から算出した曲げ剛性の増加は確認できなかった。

このように、振動モードによって卓越振動数の変化の仕方に違いが生じるため、ある損傷に対してどの振動モードに着目すべきかをあらかじめ決めるのは容易ではない。以上の理由で、運動方程式のシステム行列を特徴量とし、参照状態(健全状態)の特徴量の確率分布と点検時の特徴量の確率分布を比較し異常検知を行う。

4. ベイズ異常検知

温度や橋梁損傷状態を変化させたときの特徴量の尤度比であるBFの変化について考察する。本研究では、式(1)の両辺の自然対数を取り2倍したものを異常検知指標として用いる。損傷有無を決める閾値を0とし、 $2\ln BF > 0$ は、「橋梁が健全な状態である」という仮説を棄却する根拠が「統計的に非常に強い」と判断する。

参照データをT25でのDMG0データとし、求めた異常検知指標($2\ln BF$)をFig.3に、全ての温度下のDMG0データを用いたときの異常検知指標をFig.4に示す。これらの結果から、損傷に比べ温度変化がBFに与える影響は相対的に小さかった。また、温度変化の情報を参照データに加えた方が損傷に敏感に反応することがわかる。

5. 結論

本研究では、振動数等の振動特性の変化を基に損傷検知を行う際には、着目する振動モードをあらかじめ恣意的に決定することが必要であるため、現実的ではないこ

とが分かった。一方で、運動方程式のシステム行列を特徴量とし、BFを指標とした損傷検知では、恣意的な決定を伴わないため橋梁の異常検知に有効であると考えられる。また、温度変化の情報を参照データに加えることで、損傷がある橋梁のBFがより敏感に反応することが分かった。ただし、今回の検討は模型橋梁に限ったものであるため、今後はさまざまな条件下での温度変化とBFとの関係を検討する予定である。

Table 1 Identified frequency under T25scenario

	DMG0	DMG1	DMG2	DMG12
1 st bending mode (Hz)	3.5	3.7	3.5	3.4
2 nd bending mode (Hz)	9.7	9.5	9.6	9.4
3 rd bending mode (Hz)	23.2	22.8	22.6	22.5

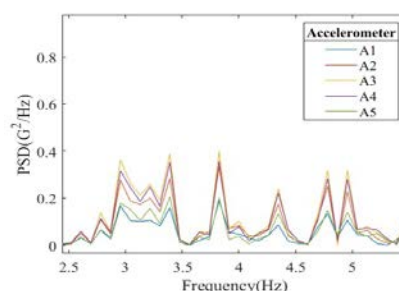


Fig. 2 PSD of Acceleration under DMG0 and T25 Scenarios.

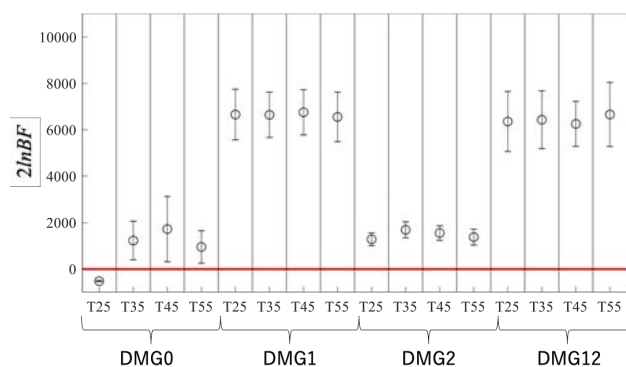


Fig.3 BF considering DMG0 and T25 as a reference.

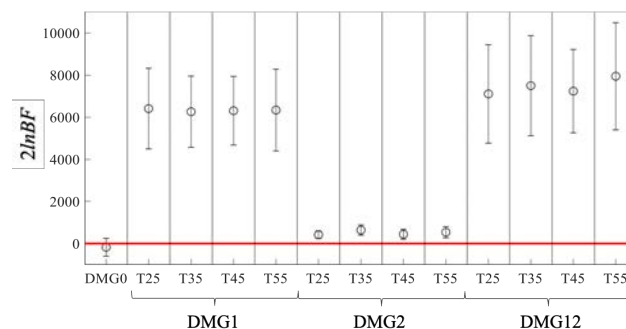


Fig. 4 BF considering DMG0 and all temperatures as a reference.

参考文献

- 1) 金ら: 温度および通行車両の影響を考慮した長期橋梁振動ヘルスマonitoringのためのベイズ的アプローチ, 土木学会論文集A2, Vol.70, No.2, p.I_73-I_80, 2014. 2) Goi & Kim: Bayesian outlier detection for health monitoring of bridges, Procedia Engineering, Vo.199, pp. 2120–125, 2017. 3) Van Overschee & De Moor.: Subspace identification for Linear Systems. Kluwer Academic Publishers, 1996. 4) 金哲佑: 橋梁点検と構造ヘルスマonitoring, 橋梁と基礎, Vol.54, pp.46-51, 2020.1.