

河川増水時の仮設橋梁橋脚のリアルタイムのベイズ異常検知

京都大学大学院 正会員 ○河邊 大剛
 京都大学大学院 正会員 金 哲佑
 熊本大学 正会員 松村 政秀

1. 序論

河川にかかる橋梁では増水時の流水の影響で橋脚の周辺地盤が洗堀されることがある。そのため増水時にはその状態を把握し、運用の意思決定を行う必要がある。通常、衝撃振動試験による固有振動数推定や水中の洗堀状態を潜水土が直接目視確認を行う等で橋脚の健全性を判定している。しかしながら、増水時には橋脚にアクセスできないためこのような方法を実施することができない。その結果、水位が十分低下するまでの運用停止を余儀なくされ、経済的損失が懸念される。

そこで橋脚天端にセンサを設置し、リアルタイムに固有振動数を推定する常時モニタリングが検討されてきた。増水時において橋脚の状態が高頻度に推定できる一方、微弱な信号に起因する固有振動数推定値のばらつきが大きく、確率的なアプローチを導入する必要がある¹⁾。本研究では以上の課題の改善を目的に、振動特性の変動を指し示すパラメータとして単変量自己回帰モデルの特性方程式の係数に着目する^{2,3)}。ベイズ仮説検定に基づくベイズ異常検知⁴⁾を、実際の増水時観測値に適用し、その利用可能性を評価する。

2. ベイズ異常検知

ベイズ異常検知手法は参照データ取得ステップと異常検知ステップに分けられる。本研究のような橋脚に設置される1軸の加速度に着目する場合、加速度時系列は単変量自己回帰モデルで近似できる³⁾。ベイズ推論に基づき、参照データが得られる際の回帰パラメータの事後分布を定式化し、主成分を抽出して特徴量とする⁵⁾。次に異常検知ステップで特徴量を算出し、尤度関数の比として定義されるベイズ因子(B)の自然対数 $2\ln B$ を用いて、それぞれの特徴量の違い、すなわち参照データと異なるエビデンスの強さを導出する⁴⁾。本研究では、 $2\ln B = 0$ を閾値とし、

ゼロ以上の値を異常ありとする。

3. 対象橋梁諸元

過去の洪水において上部工が流出し、杭基礎橋脚2基を新たに打設して運用を行っている仮設橋梁を対象とする。仮橋脚杭長は30.5mであり、仮橋脚2基(KP1, KP2)とコンクリート橋脚(P1)の天端部に無線式3軸加速度センサを設置した。対象橋脚の外観写真とセンサ設置状況をFig.1に示す。本研究では、橋脚の洗堀の検知を目的として、橋軸直角方向の計測値のみを用いて検討を行う。なお本橋梁には水位計が設置されている。

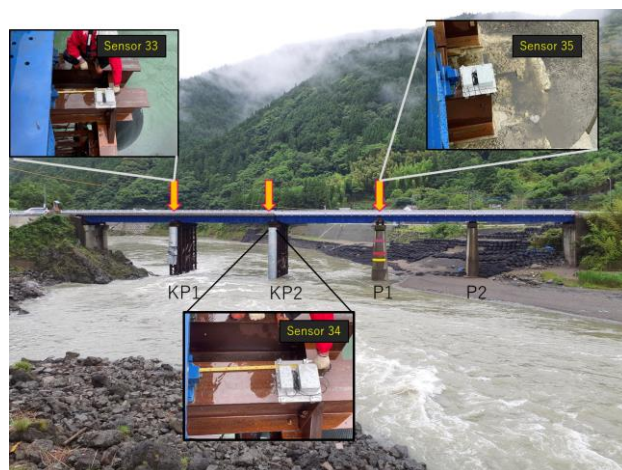


Fig.1 Observation bridge and deployed triaxial wireless accelerometers.



Fig.2 Bridge during normal river water and swollen river water.

キーワード 振動モニタリング, 橋脚, 異常検知, 洗堀, 固有振動数, ベイズ推論統計
 連絡先 〒606-8501 京都市左京区吉田本町総合研究14号館215号室 TEL 075-753-4813

4. 河川増水時の情報

平常時河川水位の写真と、2022 年 9 月 19 日の台風 14 号接近に伴う増水時の全景写真を Fig.2 にそれぞれ示す。増水によって河川水位が氾濫危険水位を超過したことがわかる。なお本増水の途中で水位計が故障したため、途中から河川水位が適切に取得できていない。

5. ベイズ異常検知適用結果

KP1 に設置した加速度センサ 33 番の観測値にベイズ異常検知を適用した結果の経時変化を Fig.3 上図に示す。青線が河川水位を表し、各破線は警戒水位を表す。前述の通り 9 月の増水時の途中で水位計が故障しており、以後適切なデータが取得できていない。赤線がベイズ異常検知の閾値を示す。7 月と 8 月には 4 回の河川増水が発生しており、水位上下降に従い異常検知指標も変動していることがわかる。一方で 9 月の台風接近による増水後は異常検知指標値が高い状態で推移していることがわかる。比較用として周波数領域システム同定手法を用いて同定された卓越振動数の経時変化を Fig.3 下図に示す。卓越振動数の低下と水位上昇に相関性があることが伺える。しかしながら、9 月の増水以後は卓越振動数値が大きく上昇した状態が続いていることがわかる。このことから、この増水によって橋脚に何らかの変状が生じた可能性が高い。

6. 結論

単変量自己回帰モデルの係数を特徴量とし、河川増水時の橋脚のリアルタイムベイズ異常検知を試みた。その結果、河川増水によって仮設橋脚において明確な異常が示された。増水後卓越振動数が上昇していることから、橋脚に変状が生じている可能性があり、ベイズ異常検知がそれを検知したと考えられる。謝辞

本研究において国土交通省九州地方整備局八代復興事務所からデータ提供を頂いた。また、JST 未来社会創造事業、JPMJMI21I3 の支援を受けたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Kim, C.W., Kawabe, D., Kitagawa, S., Shinoda, M., Nakamura, T., Yao, H.: Remote vibration monitoring for scouring detection of a railway bridge, SMAR 2017.
- 2) Nair, K.K., Kiremidjian, A.S. and Law, K.H.: Time series-based damage detection and localization algorithm with application to the ASCE benchmark structure, *J. Sound Vib.*, Vol.291, pp.349-368, 2006.
- 3) 金哲佑, 伊勢本遼, 川谷充郎, 杉浦邦征: 模型桁車両走行実験における異常診断の可能性の検討, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol.14, pp.I_833-I_842, 2011.
- 4) 尾中貴輝, 金哲佑, 五井良直, 河邊大剛: EFL法により最適化したセンサ配置を用いた鋼桁橋のベイズ異常検知, 構造工学論文集, Vol. 69A, 2023.
- 5) 五井良直, 金哲佑: 多変量自己回帰モデルの特性方程式を用いた橋梁の統計的損傷検知, 土木学会論文集A2, Vol.78, No.1, pp.11-22, 2022.

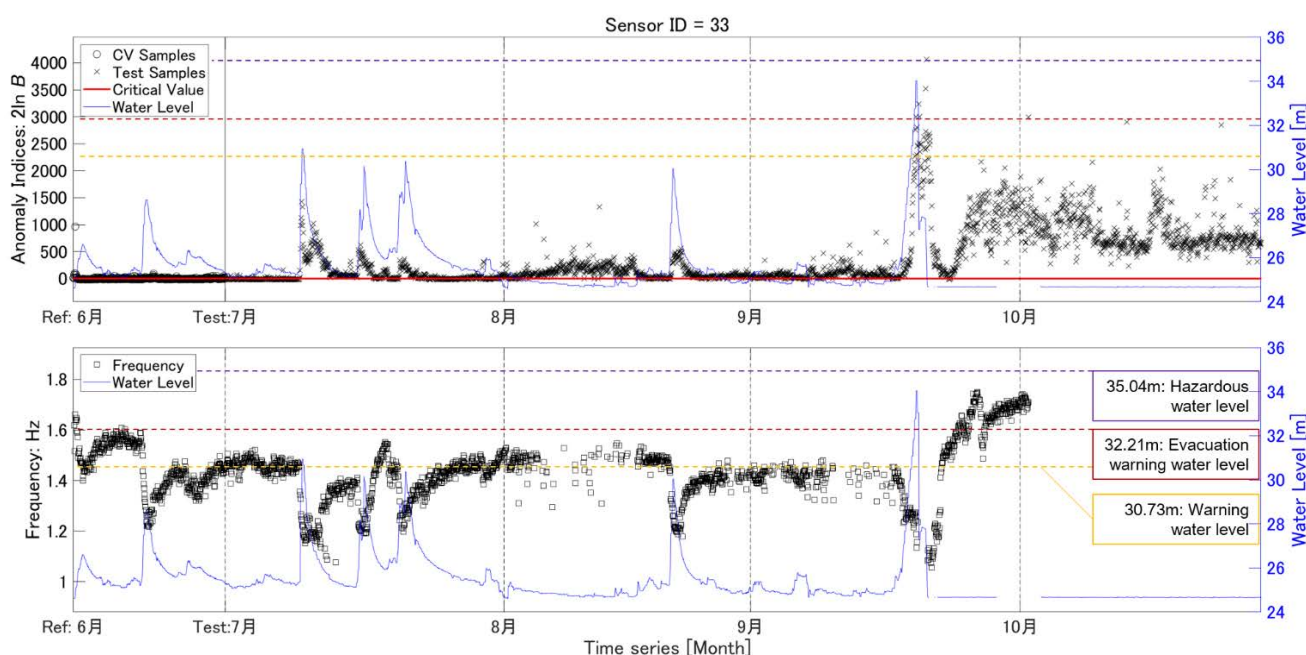


Fig.3 Time history of Bayes factor from accelerometer No. 33 at pier KP1 and the identified dominant frequency (The blue line indicates the water level).