

常時振動モニタリングによる鉄道橋橋脚の洗堀発生確率の検討

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

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。一般的には、衝撃振動試験によって橋脚の固有振動数を推定することで橋脚の健全性を判定しているが、増水時には橋脚にアクセスできないため試験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。

そこで橋脚にセンサを設置し、リアルタイムに状態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^{1,2)}。本研究では鉄道橋橋脚天端に無線加速度センサを設置し、橋脚の常時微動からリアルタイムに推定される固有振動数の確率頻度分布に着目した洗堀発生確率の検討を行う。確率分布から推定される洗堀発生確率を増水時の観測値に適用し、その妥当性を検討する。

2. 洗堀発生確率の推定

橋脚の固有振動数推定値を平常時に蓄積することで、固有振動数の頻度分布から確率密度関数 $g_X(f)$ が導出される。 $g_X(f)$ の平均値、洗堀閾値をそれぞれ f_m 、 f_{a1} とすると、洗堀発生確率 $P(\theta_S|f_m) = \int_{-\infty}^{f_{a1}} g_X(f)df$ 、 $P(\theta_S|f_{a1}) = 1$ にそれぞれ漸近するロジスティック曲線を検討する。 θ_S は洗堀状態を表す。ロジスティック曲線は確率 q 、線形予測子 z を用いて以下の式で表される。

$$q = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (1)$$

実橋梁において地盤土砂が侵食されているときの振動情報を事前に得ることは容易ではない。そこで平常時の確率密度関数 $g_X(f)$ の平均値のみ減少させ、

形状パラメータは不変とする $g'_X(f)$ を仮定する。 f'_m を平均値とすると、 $P(\theta_S|f'_m) = \int_{-\infty}^{f_{a1}} g'_X(f)df$ が得られる。線形予測子 z のパラメータ推定には最尤法を用いる。

3. 対象橋梁諸元

対象とする鉄道橋はスパン長 22.5m、桁質量約 30t の鋼桁橋であり、橋脚は杭長 3m を有する杭基礎橋脚である。橋脚高さは 9m であり対象橋脚の写真を Fig.1 に、導入した振動モニタリングシステムの概要図を Fig.2 に示す。橋脚の橋軸直角方向の固有振動数は衝撃試験により 9.0Hz と推定されている。本研究では 4 段階で構成される健全度判定区分³⁾のうち最も危険な状態と判定される A1(6.3Hz 以下)を洗堀の閾値として検討を行う。



Fig.1 Photo of target pier.

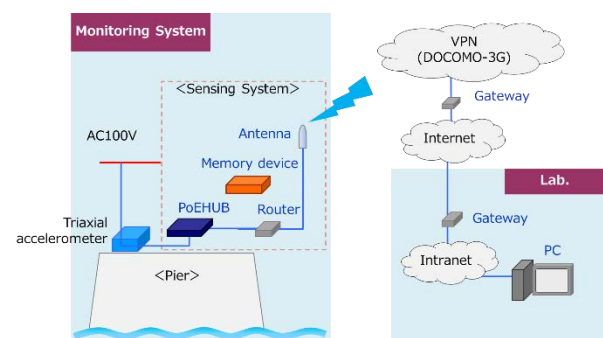


Fig.2 Scour monitoring system.

キーワード 振動モニタリング, 洗堀, 確率, 固有振動数, 鉄道橋, 安定分布

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-183 社会基盤創造工学分野研究室 TEL 075-383-3421

4. 増水時観測データへの適用

対象橋脚の平常時11日間の固有振動数の頻度分布を Fig.3 に示す. 最尤推定によって安定分布と正規分布パラメータを推定する際, 平均値はそれぞれ 9.21Hz, 9.3Hz である. また, このとき推定されるロジスティック曲線を Fig.4 に示す. 縦軸, 横軸はそれぞれ洗堀発生確率, 橋脚の固有振動数を表す. 固有振動数が徐々に低下し, 6.5Hz までは安定分布から推定されるロジスティック曲線のほうが洗堀発生確率を大きく推定する, すなわち安全側に推定されることがわかる.

2021年7月3日の増水時の固有振動数の推定値と桁下水位の推移を Fig.5 に示す. なおこの増水によって洗堀は生じていないことが目視で確認されている. 本研究の対象期間を最も水位の高い22時から23時の1時間として, 1分間おきに推定される固有振動数を, ロジスティック曲線に適用した結果を Fig.6 に示す. 洗堀発生確率は安定分布を推定した際には約 10^{-5} で推移するのに対し, 正規分布を推定した際には常に 10^{-10} を下回り, 異なる結果となる. これは Fig.3 に示す通り, 正規分布は安定分布よりも裾部の一致精度が低いことが影響していると考えられる.

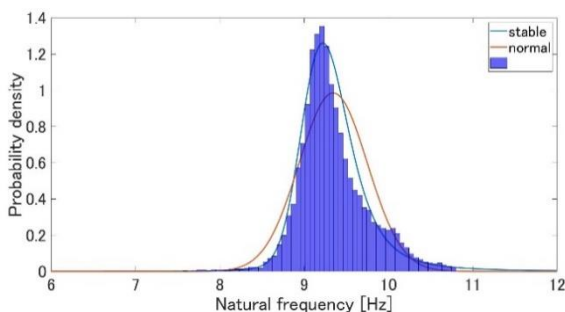


Fig.3 Histogram of target frequency during 11 days of normal river water period.

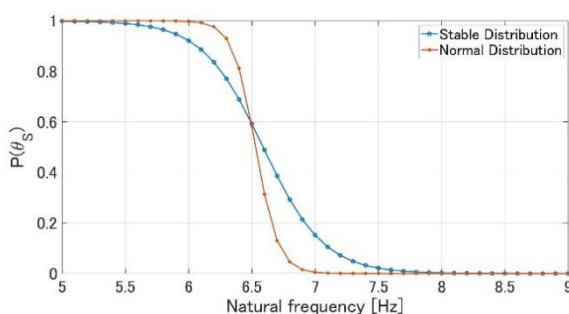


Fig.4 Logistic curve under assumption of stable and normal distributions.

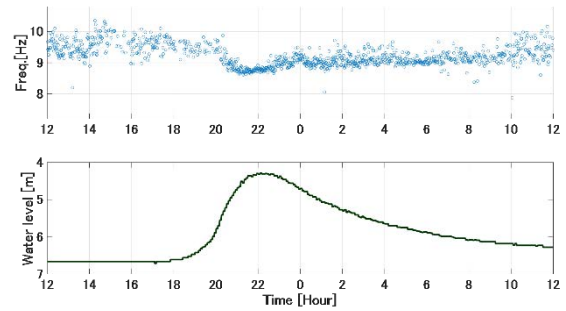


Fig.5 Observed frequency and water level during swollen river water period.

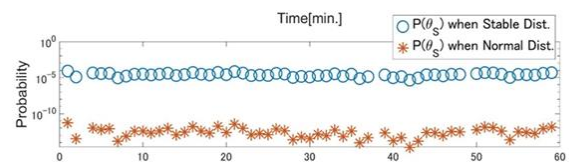


Fig.6 Probability of scour.

5. 結論

本研究では鉄道橋橋脚における振動モニタリングを用いた増水時の洗堀発生確率について検討を行った. リアルタイムに推定される橋脚の固有振動数の推定値にはばらつきが伴うことから, 平常時に蓄積される固有振動数の頻度分布から最尤推定によって安定分布と正規分布を推定し, 固有振動数と洗堀発生確率を示すロジスティック曲線をそれぞれ推定した. 増水時のリアルタイムに取得される固有振動数推定値にロジスティック曲線を適用した結果, 正規分布から推定される確率は常に 10^{-10} を下回り, 安定分布での推定確率と比較して異なる数値となった. これは頻度分布の裾部の一致度が低いためと考えられ, 安定分布から推定される確率での検討が有用であると考える.

参考文献

- 1) C.W. Kim, D. Kawabe, S. Kitagawa, M. Shinoda, T. Nakamura, H. Yao: Remote vibration monitoring for scouring detection of a railway bridge, SMAR 2017.
- 2) C.W. Kim, J. Qi, S. Kitagawa, Y. Hamada: Probabilistic scour evaluation of railway bridge pier based on vibration monitoring, ICOSAR 2021.
- 3) 国土交通省鉄道局監修: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編), 2007