

第 I 部門

洗掘対策前後の鉄道橋橋脚の振動特性に関する考察

京都大学工学部 学生会員 ○吉留 一博
 京都大学大学院 正会員 金 哲佑
 富士電機 (株) 技術開発本部 篠田 正紀

京都大学大学院 学生会員 五井 良直
 富士電機 (株) 技術開発本部 北川 慎治
 西日本旅客鉄道株式会社 近藤 政弘

1. 序論

鉄道橋梁の劣化および経済成長期におけるダム開発による土砂供給量の減少や大雨によって、洗掘が起きやすい橋脚がふえている。洗掘によって、鉄道運行に支障が生じることや、最悪の場合、列車通過時に落橋による事故も考えられる¹⁾。そのため、洗掘の発生有無を判定するシステムの確立が喫緊の課題である。本研究では、洗掘対策(以下橋脚補強と称する)前後における鉄道橋脚の振動特性を比較することで、振動モニタリングによる洗掘検知の可能性を間接的に検討することを目的としている。

2. ベイズ推定に基づいたシステム同定

推定された振動特性の不確かさを直接的に評価することができるベイズ実動モード同定法(BAYOMA: Bayesian Operational Modal Analysis)を適用する。

$$\ddot{x}_j = \sum_{i=1}^m \phi_i \ddot{\eta}_i(t_j) + \epsilon_j$$

$$\ddot{\eta}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{\eta}_i(t) + \omega_i^2 \eta_i(t) = p_i(t)$$

ここに、 \ddot{x}_j :加速度、 ϕ_i :モード形状、 $\ddot{\eta}_i$:モード応答加速度、 ϵ_j :観測誤差、 ζ_i :モード減衰定数、 ω_i :固有角振動数、 p_i :モード外力。

本手法において観測される観測データを振動データの重ね合わせであると考え、次に観測された加速度のFFTから尤度 $p(D|\theta)$ を得る。事前分布を一様とみなし、ベイズの定理から事後分布 $p(\theta|D)$ を得る。パラメータ θ からモード外力と観測誤差のPSDも得られる²⁾。

3. 実橋梁振動モニタリングの概要

本研究の対象橋梁は兵庫県姫路市に位置する市川橋である。対象橋梁橋脚の補強前後の外観を図1で示す。橋脚は根入れの浅い直接基礎であり、洗掘災害の危険性が高い橋梁である。対象橋脚では2011年に衝撃振動試験が実施されており、補強前の橋脚の固有振動数は15.9Hzと推定されている。橋脚天端中心部に三軸方向加速度センサーが1基設置されている。サンプリング周波数は200Hzである。2017年に洗掘対策として橋脚補強を施している。



図1 対象橋脚外観 (左図:補強前, 右図:補強後)

4. システム同定

水位が上昇しているときの常時微動データを用い、橋脚の橋軸直角方向加速度のPSDを図2に示す。橋脚の補強前は5Hz近傍と15Hz近傍でパワーが大きいことがわかる。橋脚の補強後になると、5Hzおよび

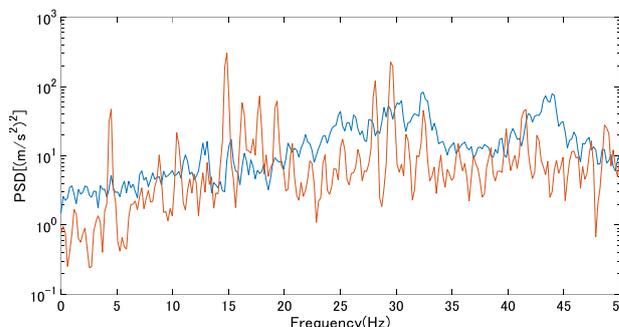


図2 対策前後の増水時の橋脚の橋軸直角方向加速度のPSD (赤線:補強前,青線:補強後)

15Hz 近傍のパワー(補強前の橋脚と桁の横揺れのパワー)が減少していることがわかる. 5Hz 近傍の関連振動モードを **図 3** に示す. この振動モードは橋桁水平モードである. 同様に 15Hz 近傍の関連振動モードを **図 4** に示す. この振動モードは橋脚橋軸直角モードである. このことから常時微動の加速度応答からも橋脚補強による振動特性の変化を確認することができる.

ベイズ推定に基づくシステム同定を常時微動データに適用する. データ長は 1 分である. 本研究では BAYOMA を適用する範囲として補強前の橋脚の固有振動数として推定された 15.9Hz 付近の振動数, すなわち 14~17Hz の範囲に絞り振動同定を行う. 平常時・増水時のそれぞれの同定振動数の推定結果の分布を **図 5**, **図 6** に示す. 平常時において, 橋脚の補強前は 16.4Hz 近傍と 14.5Hz 近傍で卓越していることがわかる. 補強後においては 16.4Hz 近傍での卓越はみられず 14.5Hz 近傍での卓越のみとなっている. 補強によって固有振動数(16Hz 近傍)に対応する橋脚橋軸直角方向のモードの揺れが抑えられたと考えられる. 増水時においては, 橋脚の補強前は増水前後で同定振動数の分布図が大きく変わっており, 増水により橋脚の 15.7Hz の振動が卓越になることがわかる. 一方, 橋脚の補強後は同定振動数の分布に大きな変化はなく, 増水による 15.7Hz の卓越振動数の出現は観測されず洗掘対策の効果が現れたと考える.

5. 結論

橋脚の補強前後における PSD を比較すると 5Hz および 15Hz 近傍で橋脚の補強後のパワーが減少していることが分かる. このことは橋脚の補強前の橋脚と桁の横揺れが抑えられていることを意味しており, 補強の効果を間接的に示している. ベイズ推定に基づくシステム同定を行った結果から以下の結果が得られた. 橋脚の補強前においては平常時および増水時を比較すると振動特性が大きく変化している. しかし, 橋脚の補強後において平常時および増水時を比較してみると, 同定振動数の分布に大きな変化がみられず, 橋脚の補強後は増水による 15.7Hz の卓越振動数の出現はなく, 橋脚の補強効果を間接的に把握することができた. ただし, 補強前の増水時のみ観測された 15.7Hz の振動モードは地盤あるいは橋脚基部のモード変位と関係があると推定できるが, 橋脚基部の振動計測が行われなく確認できていない.

[参考文献]

- 1) 佐溝昌彦, 輿水聡, 森泰樹, 渡邊諭: 洗掘災害発生要因の分析と洗掘要注意橋りょう抽出手法, 鉄道総研報告, Vol.23, No.3, 2009.
- 2) 河邊大剛: 振動モニタリングによる鉄道橋脚の洗掘評価に関する研究, 京都大学修士論文, 2017. 2.

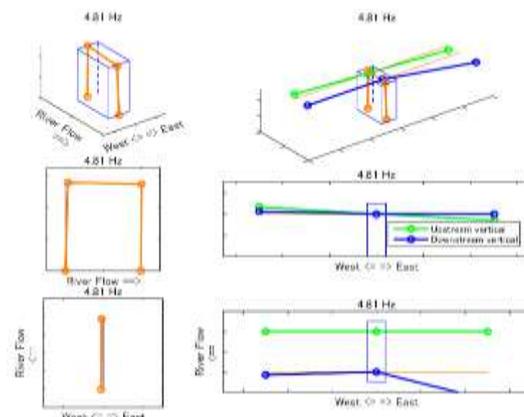


図 3 4.81Hz でのモード形状(補強前): 左上から順に橋脚鳥瞰図, 橋脚正面図, 橋脚平面図; 右上から順に橋梁鳥瞰図, 橋梁側面図, 橋梁平面図.

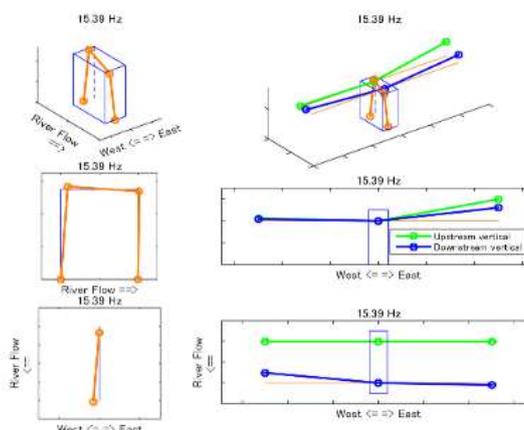


図 4 15.39Hz でのモード形状(補強前): 左上から順に橋脚鳥瞰図, 橋脚正面図, 橋脚平面図; 右上から順に橋梁鳥瞰図, 橋梁側面図, 橋梁平面図.

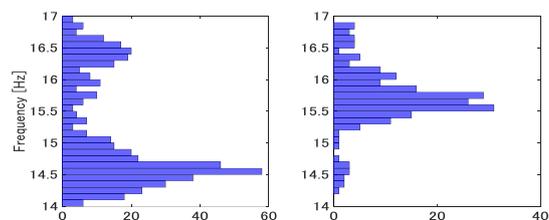


図 5 左側が平常時, 右側が増水時の 14~17Hz での同定振動数の分布図 (補強前 2016 年 8 月).

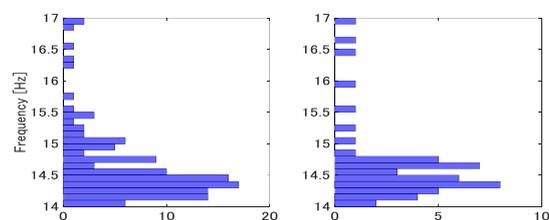


図 6 左側が平常時, 右側が増水時の 14~17Hz での同定振動数の分布図 (補強後 2017 年 8 月).