損傷にともなう振動特性変化の検知手法の検討

東京理科大　学生員　○灰原　尚正
東京理科大　正会員　　佐伯　昌之

1.研究の背景と目的

我が国の社会基盤は高度経済成長期に集中的に整備されており，今後，それらの多くが耐用年数を迎える．現状，作業員が現場に赴き目視点検を実施しており，多くのコストがかかっている．そのため，限られたコストで維持管理を行えるようなシステムの開発が必要であると考えられる．そこで，著者らの研究室では，道路付属物を対象として，MEMS 加速度センサにより振動応答を計測し，異常を検知するシステムの開発を行ってきた[1)]．これまで，道路付属物の異常を検知するための異常検知指標として，1 次モードの固有振動数やパワースペクトル面積比について検討を行ってきた[2)]．しかし，剛性低下率約 5[%]程度の損傷を検知できていない．そこで，道路標識の損傷を敏感に表現する指標と，指標の変化を捉える手法について検討することとした．

2.単柱型道路標識の常時微動計測と損傷実験

著者らは，基礎的研究として，図-1 に示す単柱型の道路標識を対象としている．2016 年 12 月から 2017 年 3 月まで，MEMS 加速度センサを用いて手動で振動応答を計測した[1)]．尚，2017 年 1 月 23 日から 27 日の間に，単柱の根元部分に剛性低下率約 12[%]に相当する損傷を与えている．また，2017 年 6 月から 2018 年 1 月まで，上記とは別の無線加速度センサを用いて 4 時間おきに加速度 3 成分を自動で取得した[2)]．尚，2017 年 12 月 22 日に，剛性低下率約 5[%]に相当する損傷を与えている．これらのデータを基に 1 次モードの固有振動数やパワースペクトル面積比を解析し，損傷による指標の変化を検知することを試みてきた．しかし，剛性低下率約 5[%]に相当する損傷については，指標の低下に対してばらつきが大きいため，損傷検知には至っていない．本研究においては，同じデータを用いて，別の指標の解析を行う．

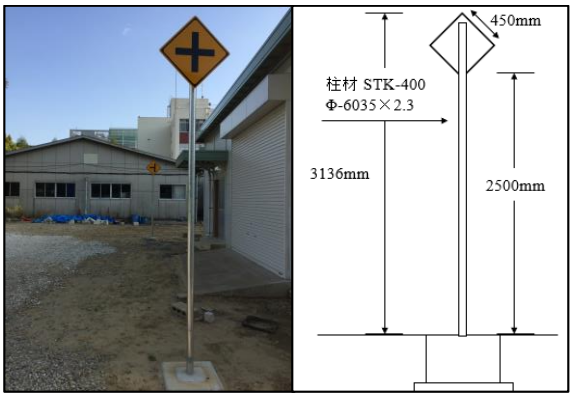

図-1 対象とする道路標識

3.異常検知指標についての検討

これまで，異常検知指標として 1 次モードの固有振動数について調べてきた．実際に構造物の健全度を診断するためには，複数の異常検知指標を解析し，総合的に判断することが望ましいと考えられる．そこで，著者らがこれまでにモニタリングしてきた固有振動数とパワースペクトル面積比に加え，加速度のフーリエスペクトルから得られる SN 比についても検討した．SN 比については，ピーク値の帯域±0.5Hz をシグナル域，それ以外の周波数帯をノイズ域として比をとることで算出した．図-2 および図-3 の左部に，損傷実験前後での各指標の変化の様子と変化率を示す．剛性低下率約 12[%]に相当する損傷に関しては，どの指標も損傷による指標の変化を確認できる．一方で，剛性低下率約 5[%]に相当する損傷に関しては，損傷による指標の低下は，ばらつきの中に埋もれてしまった．移動平均をとることで，多少トレンドを捉えやすくなるものの，損傷の検知は困難であると考えられる．

4.密度比直接推定による変化点検知

そこで，移動平均以外で変化点を検知する方法について検討した．異常値・変化点検知の一手法として Kawahara (et al.) によって提案された密度比直接推定

キーワード：構造ヘルスモニタリング，固有振動数，密度比推定，道路標識
連絡先：〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 東京理科大学理工学部土木工学科 TEL：04-7124-1501

© Japan Society of Civil Engineers

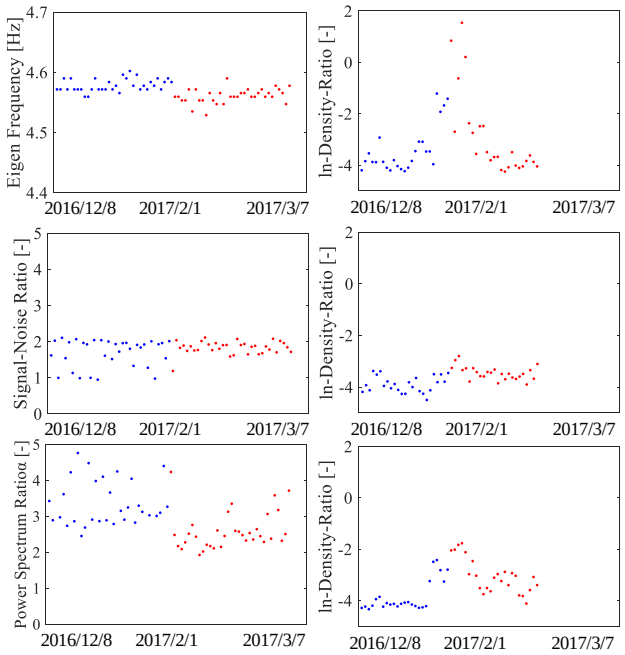

図-2　第 1 回損傷実験前後の指標及び密度比の変化

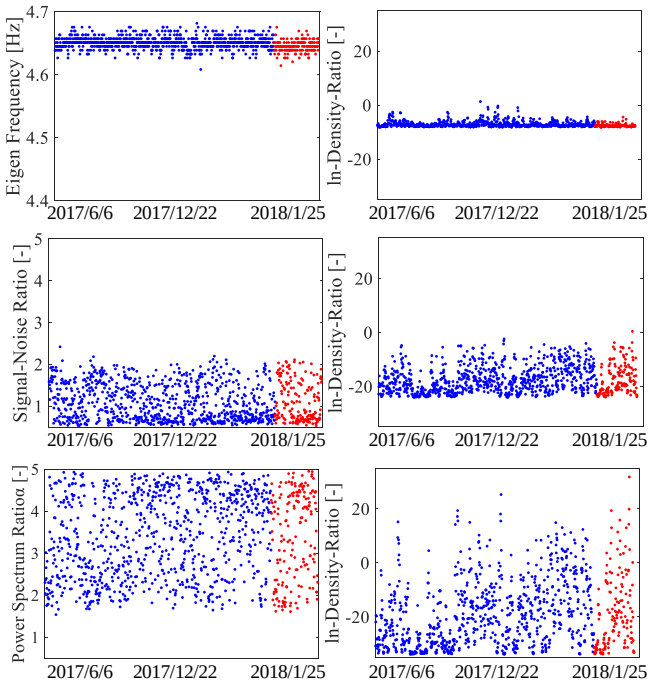

図-3　第 2 回損傷実験前後の指標及び密度比の変化

法がある [3]．正常時と異常時のデータそれぞれが従う確率密度関数の比$\hat{w}(Y)$を直接推定することで，時系列データの中から異常値・変化点を検出するものである．まず，正常時のデータ（Y_{rf} ：reference samples）を定め，それ以降に得られるデータ（Y_{te} ：test samples）が正常値か否かを式(1)に示す Kernel モデルにより推定する．尚，式(1)に含まれるK_σは，Y_{rf}を基に求めた Kernel 関数である．ただし，α_lは重みパラメータで，σ は尤度交差確認によって決定される．

$$\hat{w}(Y) = \sum_{l=1}^{n_{te}} \alpha_l K_\sigma\left(Y_{rf}, Y_{te}(l)\right) \tag{1}$$

$$K_\sigma(Y_{rf}, Y_{te}) = exp\left(-\frac{\left\|Y_{rf} - Y_{te}\right\|^2}{2\sigma^2}\right) \tag{2}$$

ここでは，損傷実験前のデータのうち，10 個をY_{rf}として Kernel 関数を求めた．それ以外のデータをY_{te}として密度比を推定した結果を図-2 および図-3 の右部に示す. 剛性低下率約 12[%]に相当する損傷については，損傷実験前後で各指標に有意な差があることが確認できる．一方で，剛性低下率約 5[%]に相当する損傷に対しては，損傷検知に至るほどの差を確認することはできなかった．

5.まとめ

MEMS 無線加速度センサを用いて道路標識の常時微振動を計測し，固有振動数の日変動をモニタリングした. また, 道路標識の根元部分を削る損傷実験を行い，損傷による応答の変化を検知することを試みた. 複数の異常検知指標と, その指標の変化を捉える手法について検討した. 今後は, 道路標識の異常を敏感に表現する指標の検討と，その指標の変化を捉える方法について引き続き検討を行う. また, 長期モニタリングに耐えうるセンサの開発を行い，モニタリングシステムの開発を目指す.

参考文献

1)尾崎大地，石黒広倫，佐伯昌之：道路標識の固有振動数モニタリングによる異常検知の検証，平成 29 年度土木学会全国大会 第 72 回年次学術講演会，福岡・九州大学伊都キャンパス，2017 年

2) 灰原尚正，尾崎大地，佐伯昌之：MEMS 加速度センサを用いた道路標識の振動実験，平成 30 年度土木学会全国大会第 73 回年次学術講演会，北海道・北海道大学札幌キャンパス，2018 年

3)Yoshinobu Kawahara, Masashi Sugiyama: Sequential Change-Point Detection Based on Direct Density-Ratio Estimation, Statistical Analysis and Data Mining, vol.5, no.2, pp.114-127, 2012.

© Japan Society of Civil Engineers