

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 5 月 14 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06192

研究課題名(和文) 道路付属物を対象とした簡易・定量的な健全性評価手法の開発と実証試験

研究課題名(英文) Development of Structural Monitoring System for road signs

研究代表者

佐伯 昌之 (SAEKI, MASAYUKI)

東京理科大学・理工学部土木工学科・准教授

研究者番号：70385516

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：道路付属物を対象とした異常検知システムの開発を試みた。安価なMEMS加速度無線センサを開発し、キャンパス内に設置した道路標識に固定して、半年以上に渡るモニタリング実験を行った。実験の途中で、損傷に見立てて根元部分の肉厚を削ったところ、固有振動数の変化として異常を検出することができた。また、異常検知においてはノイズとなる日常的な変動の原因を特定するため、精密小型加振機を用いた強制加振実験を行い、周波数伝達関数を高精度に同定した。さらに、平均的な周波数伝達関数を説明する有限要素モデルを構築した。日常的な変動の原因については、現在も調査を継続している。

研究成果の概要(英文)：An anomaly detection system for road signs has been developed in this research. Two road signs were constructed in our campus and their acceleration responses were investigated. First, a wireless sensor equipped with an affordable MEMS accelerometer was fixed on the road sign and the acceleration responses had been observed over a half year. The eigenfrequency of the first mode was estimated as an anomaly index. In this experiment, small damage was given to the bottom part of road sign. The variation of eigenfrequency corresponds to the small damage was detected. Second, we conducted an active vibration test and developed a numerical model of road sign to study the reason for the daily variations. In this experiment, the accurate vibrator was used to observe the Green's functions. The parameters of a finite element model were estimated to explain the measured Green's functions. The reason of daily variation of eigenfrequency has been investigated.

研究分野：構造センシング

キーワード：構造モニタリング センシング 道路標識 MEMS加速度センサ 異常検知

1. 研究開始当初の背景

社会基盤構造物の維持管理は、現在、社会問題として広く認識されている。そのため、土木学会においても、検査技術・長寿命化技術など多くの研究がなされている。検査技術においては、特に、橋梁の健全性モニタリングの研究が多く、目視点検に代わる簡易・客観的・定量的な検査技術の開発が試みられている。

一方で、社会インフラには、道路標識や照明などの道路付属物と呼ばれるものがあるが、これ等を対象とした検査技術に関する研究はあまり見られない。道路付属物は、高所作業者をいれれば容易に目視点検でき、さらに、ボルトの締め直し等も行えることから、研究課題としてあまり注目されていないのかもしれない。しかしながら、これ等の付属物の数は非常に多く、そのすべてを今後も継続して目視点検することは、コスト高や車線規制の問題から好ましくないのは明らかである。さらに、道路標識の簡易な健全性診断が可能となれば、より複雑で診断が難しい橋梁の診断技術にも応用できるものと思われる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、構造形式が比較的簡単な道路標識や照明柱を対象として、それ等の健全性を簡易・定量的に把握するための検査技術を開発することである。

図1に、本研究で目指した健全性モニタリング手法の最終的なイメージを示す。対象構造物に固定されたMEMS加速度計・ジャイロセンサにより定期的に振動応答を計測し、センサ内で時系列データを解析して振動特性を表すパラメータを推定する。その推定結果のみを、定期的に無線センサネットワークで回収し、クラウド上で管理し、異常を検知した場合に警告するシステムとなっている。さらに、本研究室でこれまで開発を進めてきた精密小型加振機を使用すれば、より詳細に対象構造物の振動特性を把握することができる、というものである。

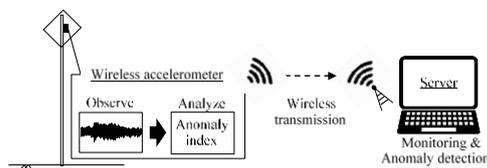


図1 無線加速度センサを用いた健全性モニタリング (Ozaki, et al. 2017, Fig.1)

本研究では、上記のシステムを開発するために、さらに以下の4つの小目的に分割して研究を行った。

- a) 道路標識柱の数値モデルを構築し、モデルパラメータを高精度に推定するための精密小型加振機および加速度センサの最適な配置・制御方法を検討する。

- b) 日常的な温湿度変化が振動特性の推定結果にどのような影響を及ぼすかを調べる。
- c) センサ自身が電力を自給し、長期にわたり正常に機能するためのノウハウを蓄積する。
- d) 無線加速度センサを用いた常時微動計測により、多量のデータを取得し、ビッグデータの扱いにより振動特性パラメータの異常を検知する手法を検討する。

3. 研究の方法

キャンパス内に単柱型の道路標識を2本設置し、精密小型加振機とサーボ型加速度計を用いた周波数伝達関数の計測を行った。実験の様子を図2に示す。

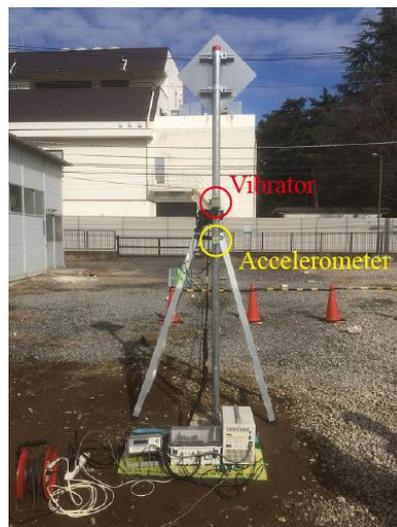


図2 精密小型加振機と加速度センサを用いた強制加振実験の様子 (Ozaki, et al. 2017, Fig.6)

この実験では、精密小型加振機により既知の外力を道路標識に与え、その加速度応答を時刻同期されたサーボ型加速度計で計測した。取得した観測データはARX法により解析し、道路標識の周波数伝達関数を高精度に推定している。これにより、1次と2次モードの固有振動数および減衰比を取得している。実験方法が確立してからは、この実験を2017年5月11日～7月19日の間で41回、2017年11月6日～12月20日の間で36×2回行っており、現在(2018年5月)も解析を継続している。

上記の強制加振実験で取得したデータを説明するための有限要素モデルを構築した。梁を300～1000の梁要素に分割し、道路標識板や加振機、加速度センサなどは該当する要素の質量を増加させることでモデル化した。また、境界条件として当初は固定端を仮定していたが、妥当な範囲のモデルパラメータでは、観測された周波数伝達関数を説明できないことから、スウェーロッキングモデルを導入した。現時点で、観測された周波数伝達関数をもっとも説明できるモデルの概念図を図3に示す。また、図4に観測された周波

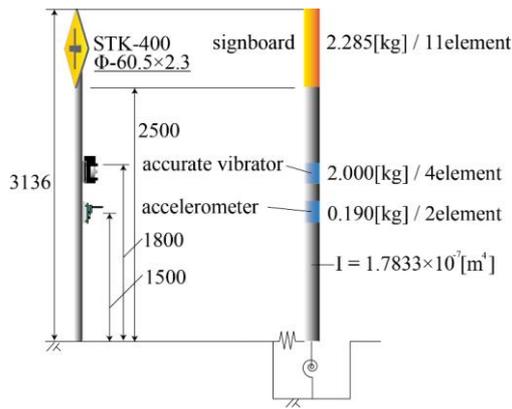


図 3 有限要素モデルのイメージ (Ozaki, et al. 2017, Fig.7)

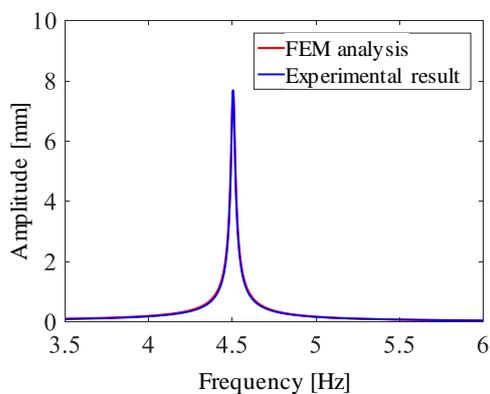


図 4 観測された周波数伝達関数と、有限要素法により計算された周波数伝達関数の比較 (Ozaki, et al. 2017, Fig.8)

数伝達関数と、有限要素モデルを用いて計算された周波数伝達関数を示す。この図から、両者はよく一致していることが分かる。

図 4 の周波数伝達関数は、多数の実験データから得られた平均的な周波数伝達関数と、それを説明する有限要素モデルを用いて計算した結果である。しかし、実際には固有振動数や減衰比は観測ノイズよりも大きく変動しており、その日々の変動を説明するモデルパラメータの特定や、変動の原因となっている物理現象の考察は未だできておらず、現在も研究を継続して進めているところである。

以上の精密小型加振機を用いた強制加振実験とは別に、安価な MEMS 無線加速度センサを用いた常時モニタリングを継続している。この実験では、まず、本研究で開発した MEMS 無線加速度センサを道路標識に固定し、屋外環境で放置して連続動作し続けることを確認した。当初、気温が低い季節では問題なく動作していたが、気温が上昇するとともに、動作が不安定になり、夏場は度々停止する問題に遭遇した。この原因を調べたところ、充電用コントローラの IC が充電を始めると温度上昇し、40℃に到達すると安全上の理由

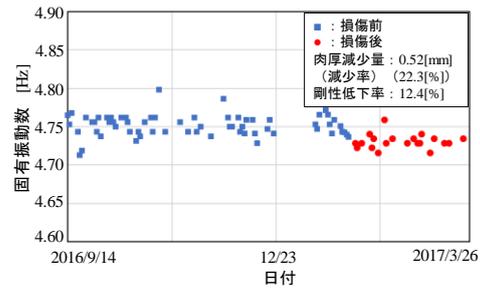


図 5 損傷実験(12.4%)前後の固有振動数の常時モニタリング結果 (灰原ら 2018, 図 2)

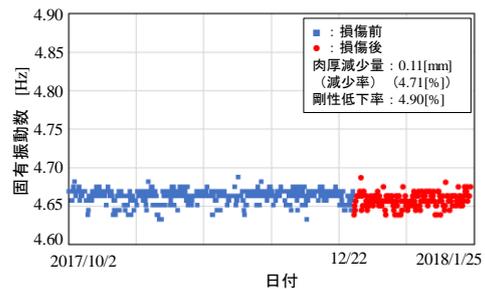


図 6 損傷実験(4.90%)前後の固有振動数の常時モニタリング結果 (灰原ら 2018, 図 2)

から充電を停止するようになっていた。また、回路の不具合から、一度バッテリーが空になると、再充電ができないようになっていた。温度による充電停止は回避不可であるが、再充電ができない問題は電子回路を修正して再充電ができるように変更した。夏場を除いては、継続して充電できることを確認しており、2018 年度の夏場に継続してデータ取得できるかを検証する予定である。

また、連続して取得したデータを解析し、道路標識の 1 次モードの固有振動数をモニタリングした。その結果を図 5 と図 6 に示す。図 5 は道路標識の根元の肉厚を 0.52mm 削った実験における、その前後の固有振動数の変化をプロットしたものである。2016 年 9 月 14 日から 2017 年 3 月 26 日までのモニタリング結果である。図を見ると、損傷実験前後で固有振動数が低下している様子を見ることが出来る。この様に、時系列にデータを並べることによって、データにバラつきがある場合でも異常を検知できる可能性がある。図 6 は、さらに小さな損傷として、肉厚を 0.11mm 削除した場合の結果である。バラつきに比べ、固有振動数の変化が小さいため、異常を検知するのは難しいように思われる。今後、固有振動数以外の指標も検討し、小さな断面欠損でも異常として検知できるような方法を探る予定である。

#### 4. 研究成果

以下に、研究成果をまとめる。

##### 1) 精密小型加振機を用いて強制加振実験を

- 多数回行い、周波数伝達関数を精度よく推定した。
- 2) 平均的な周波数伝達関数を説明するような有限要素モデルのパラメータを同定した。(周波数伝達関数の変動部分については、継続して検討している。)
  - 3) 常時モニタリングのための MEMS 加速度無線センサを開発し、実環境下においても電力を自給しつつ連続して動作させ続けるためのノウハウを蓄積した。
  - 4) 実際に常時モニタリング実験を行い、秋から春までの固有振動数をモニタリングした。その際、途中で道路標識の根元の肉厚を削減し、固有振動数の異常として検知できることを確認した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- 1) D. OZAKI, T. TSUJI and M. SAEKI: Basic Study on anomaly detection of road signs using MEMS accelerometers, Proc. of ICCBEI2017, p.147-p.150, Taipei, 2017. 査読無し
- 2) T. OKUMURA, T. OHTANI, M. TSUKAHARA and M. SAEKI: Development of Accurate Small Vibrator and Wireless Accelerometers, Proc. of IABSE Conference Nara 2015, in CD-ROM, Nara (Japan), 2017, 査読無し
- 3) T. OTANI, T. OKUMURA, M. TSUKAHARA, K. ISHII and M. SAEKI: Preliminary Experiments of Structural Health Monitoring Method with an Accurately Controlled Small Vibrator and Wireless Sensor Networks, Proc. of IABSE Conference Nara 2015, in CD-ROM, Nara (Japan), 2015. 査読なし
- 4) M. SAEKI, T. Kurihara, M. TSUKAHARA and T. OTANI: Laboratory experiment of the structural sensing method using the accurate artificial vibrator, Advanced Engineering Informatics, 29, p. 859-866, 2015, 査読あり。(DOI: 10.1016/j.aei.2015.03.008.)

[学会発表] (計 7 件)

- 1) 辻貴洋・佐伯昌之：道路標識振動応答解析のための数値モデルの構築，土木学会第 72 回年次学術講演会，福岡，2017。
- 2) 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，土木学会第 72 回年次学術講演会，福岡，2017。
- 3) 榊原賢・佐伯昌之：部材破壊音に着目した構造物の損傷判定指標の開発，土木学会第 72 回年次学術講演会，福岡，2017。
- 4) 北林和良・辻貴洋・佐伯昌之：道路標識

- 振動解析モデルのパラメータ推定における目的関数の検討，土木学会第 72 回年次学術講演会，福岡，2017。
- 5) 辻貴洋・佐伯昌之：精密小型加振機を用いた道路標識の損傷同定手法の検討，土木学会第 71 回年次学術講演会，仙台，2016。
  - 6) 三村真代・佐伯昌之：MEMS 加速度・ジャイロセンサを用いた層間変形角計測の試み，土木学会第 71 回年次学術講演会，仙台，2016。
  - 7) 奥村昂史・佐伯昌之：精密小型加振機を用いた損傷有無判定における基礎的検討，土木学会第 70 回年次学術講演会，岡山，2015。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等  
東京理科大学理工学部土木工学科佐伯研究室 HP  
[http://www.rs.noda.tus.ac.jp/~saeki/research.htm#research\\_2](http://www.rs.noda.tus.ac.jp/~saeki/research.htm#research_2)

#### 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
佐伯昌之 (SAEKI, Masayuki)  
東京理科大学・理工学部土木工学科・准教授  
研究者番号：70385516
- (2) 研究分担者  
なし
- (3) 連携研究者  
なし
- (4) 研究協力者  
なし