

# 論文 常時微動による道路橋床版の振動モードの推定と新設高架橋の初期値計測

李 亮\*1・松本 慎也\*2・大久保 孝昭\*3・米倉 亜州夫\*4

**要旨:** 社会インフラの劣化や損傷を的確に診断するための計測対象物性値の一つとして、構造物の振動性状が挙げられる。固有振動数の変化から劣化や損傷を評価できれば非常に明快な計測管理対象となるが、現時点では固有振動数のみで健全性を評価するのは困難と言わざるを得ない。本研究では、健全度を評価する基準値として、固有振動数とともに構造物の振動モードを評価値に加えることを検討している。本報では常時微動計測によって道路橋床版の固有振動モードを簡便に推定するための手法を提案し、この手法を建設中の道路高架橋床版に適用した結果を報告する。

**キーワード:** 無線振動計測システム, 振動数, 振動モード, バンドパスフィルター, FEM 解析, 新設高架橋

## 1. はじめに

高度経済成長期以来、道路ネットワークの確保の観点から建設された数多くの道橋構造物が都市生活の利便性に大きな役割を果たしている。その一方、近年大型化・高速化しつつある車両によって道橋構造物は常に過酷な振動状況にさらされており、振動による部材の劣化や疲労損傷等が懸念される。道橋構造物の老朽化が進む中、適正な健全度を維持しながら継続的に供用されるためにはこれらの構造物の健全度を定量的に明らかにする必要があるため、振動特性に注目した研究が精力的に行われている<sup>1),2),3)</sup>。

実際の構造物では全体損傷が軽微な場合が多く、固有振動数の変化のみを指標値として損傷程度の評価が困難である<sup>4)</sup>。しかし、小さな変状が床版コンクリートの剥落・抜け落ちや過大ひび割れに進展する事例が近年、多く報告されている<sup>5),6)</sup>。したがって、床版の過大ひび割れや剥離・剥落等の引き金となる老朽現象を早い段階で検知できる予防保全技術を確立することは重要な課題と言える。本研究は上記のような劣化現象に対する予防保全として無線振動計測システムを用いた点検技術を確立することを目的としており、本報ではその基礎的な検討結果を示した。診断(判定)は、前回の点検結果との相对比较が最も重要と考えている。したがって、建設初期値のデータ保管が重要であり、初期値として保管すべき情報として、周波数特性に加えて振動モードを保管し、経時的に相对比较する手法を検討した。

具体的には、フーリエ逆変換におけるバンドパスフィルターの幅を適切に設定して、加速度データを一定時間重ね合わせるにより、各固有振動モードを簡便に推

定する手法を提案した。本報はこの手法を新設道路高架橋床版の常時微動計測に適用した結果を示している。

## 2. 計測対象

計測対象は広島県内に建設された鋼5径間連続箱桁橋(非合成形式)であり、コンクリート床版工事は平成24年3月～平成24年12月28日に行われた。振動計測は2回に分けて行い、第1回目を11月7日に、第2回目を12月26日に実施した。写真-1にコンクリート床版打設工事後の状況、図-1に計測対象の道路高架橋の断面図、図-2に側面図を示す。道路の北側には幅広い片持型歩道が付けられている。



写真-1 高架橋床版打設工事中 (東側を臨む)

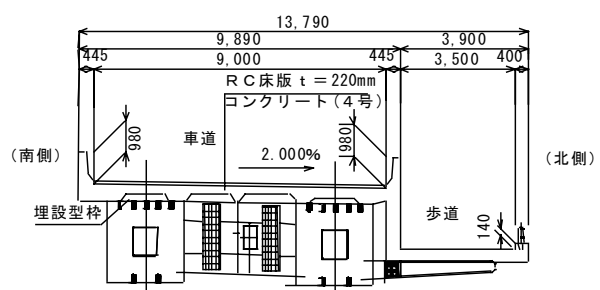


図-1 断面図

\*1 広島大学大学院 工学研究科建築学専攻博士課程後期 修士(工学) (学生会員)

\*2 近畿大学 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 広島大学大学院 工学研究科建築学専攻教授 工博 (正会員)

\*4 広島大学名誉教授 ((株)米倉社会インフラ技術研究所) 工博 (正会員)

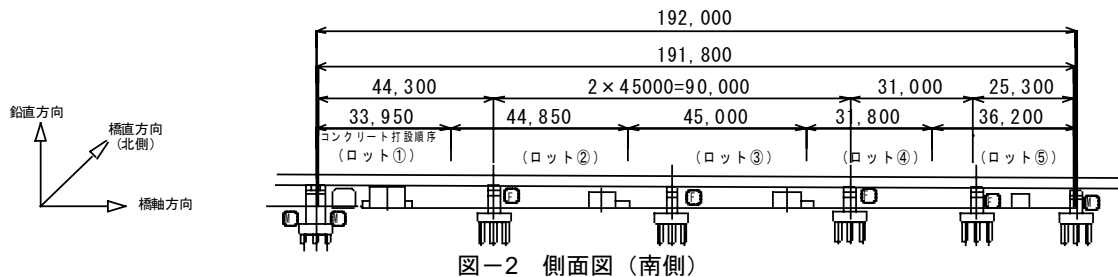


図-2 側面図 (南側)

### 3. 計測方法

#### 3.1 計測システムの概要

本計測システムで使用したセンサの外観を写真-2 に示す。これらのセンサのスペックおよび計測条件を以下に示す。

- ◆ 加速度センサ： MEMS サーボ式
- ◆ 加速度検出範囲：  $\pm 3G(\pm 29.4m/s^2, \pm 2940gal)$
- ◆ ノイズレベル：  $300 ng_{rms}/\sqrt{Hz}$
- ◆ 無線通信方式： Bluetooth (無線通信距離 100 m)
- ◆ 使用センサ数：計 7 台(×3 成分の計 21 チャンネル)
- ◆ サンプル周波数： 100Hz
- ◆ 計測時間： 300 sec. (5 minutes)



写真-2 無線加速度センサ(MEMS サーボ式)

#### 3.2 計測概要

図-2 の側面図に示すように、対象高架橋の車道床版の打設ロットは 5 区間である。常時微動計測範囲において、第 1 回目では、ロット①～③まで、第 2 回目はロット①～ロット⑤まで全区間の測定を行った。表-1 に計測時の床版コンクリートの材齢を示す。

表-1 振動計測時のコンクリート材齢

部 位	ロット	コンクリート材齢 (日)	
		第 1 回計測時	第 2 回計測時
車道床版	①	9 日	58 日
	②	5 日	54 日
	③	1 日	50 日
	④	—	46 日
	⑤	—	42 日
歩道床版	—	—	81 日

第 1 回目の計測時において、ロット①は材齢 9 日、ロット②は材齢 5 日、ロット③は材齢 1 日であり、高さ 980mm の道路側面壁のコンクリートは未打設の状態であった。第 2 回目計測は第 1 回目計測から 7 週間後に計測を行った。このとき、ロット①は材齢 58 日、ロット②は材齢 54 日、ロット③は材齢 50 日、ロット④は材齢 46 日、ロット⑤は材齢 42 日であり、また、道路側面壁のコンクリートは打設済みの状態であった。写真-3 に振動計測の様子を示す。



写真-3 振動計測の様子

高架橋の振動特性を把握するため、センサは複数の異なる計測パターンを設定して計測を実施した。計測サンプリング周波数は 100Hz、加速度入力タイプはダイレクト・カレント (DC) とした。以下に示す振動波形の解析におけるフーリエスペクトルは、300 秒間の計測データから 2048 データを複数 (14 セット) 抽出し、それらの単純平均を取ったものである。

### 4. 振動モードの簡易推定法の提案

#### 4.1 提案手法について

固有振動数により定量的に橋梁全体の損傷を評価できるが、軽微な損傷や局部損傷などを固有振動数のみから判断するのは困難である。そこで橋梁の損傷状況に応じて変化する多様な振動モードを精度良く把握することが重要であると考えた。特に、各次振動数のピークが近接した場合にも応用できるモード抽出手法が必要であると考えた。川原らは 3 次元可視化技術を利用し、橋梁の振動モード同定手法の研究を行っている<sup>6)</sup>。本研究では、振動計測から得られたデータより FFT 解析を行い、各振動数ピーク値において、バンドパスフィルターを掛けて振動モードの抽出を行った。バンドパスフィルターを使用しモード分析を行うのは建築分野でも研究が行われて

いる<sup>8)</sup>。提案手法の概要を計測データの一部である図-3～図-5を用いて以下に示す。

- (1) フーリエスペクトル解析の各極値を中心としてバンドパスフィルターの幅(Hz)を設定する。図-3にバンドパスフィルターを設定前後のフーリエスペクトルを示す。すなわちバンドパスフィルターの設定による単ピークの振動領域を抽出する。
- (2) 設定した幅のバンドパスフィルターでフーリエ逆変換し、極値近辺の周波数域のみの加速度値を求める。例として図-4に実際の計測波形におけるフーリエ逆変換前後の加速度波形を示す。
- (3) 上記で求めた各計測点(各座標)の各加速度を直線で結んで、一定時間の線の重ね合わせより振動モードを推定する。この手法により図-5に各計測点(各座標)座標の加速度を線で結んで振動モードを可視化した結果を示す。なお、この図では X は橋軸、Y は橋軸直角、Z は鉛直方向の 1.28 秒間の応答加速度の相対変動を示している。

上記に示した提案において、(1),(2)は一般的に行われている手法であるが、(3)の振動状態の可視化手法が新規な提案と考えている。

#### 4.2 バンドパスフィルター幅の考察

本研究では、バンドパスフィルターの幅を着目し検討を行い、振動モードの簡易推定手法を提案した。また、提案手法の妥当性を検証するため、高架橋の設計資料に基づいて FEM 解析を行った。ただし、詳細な資料および橋脚固定度が不明であったので、端部および中央支点をピン支承と仮定した。これは鉛直方向の低次振動モードにおいて、高架橋の自重が大きく固定度変化の影響が小さいため、計測結果の参考データとして十分と考えた。表-2にFEM解析の条件を示す。本報では、一例として図-6に示すように、高架橋橋軸方向に沿って全体の振動モードを抽出するためのバンドパスフィルター幅に関する検討を行った。表-3にフーリエ振幅が極値となった振動数を示す。

表-2 FEM 解析条件

項目	内容
解析タイプ	線形静的解析
使用要素	床版：シェル要素 桁：はり要素
ヤング係数	コンクリート： $2.1 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 鋼材： $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$
ポアソン比	コンクリート：0.2 鋼材：0.3
支承条件	ピン支持

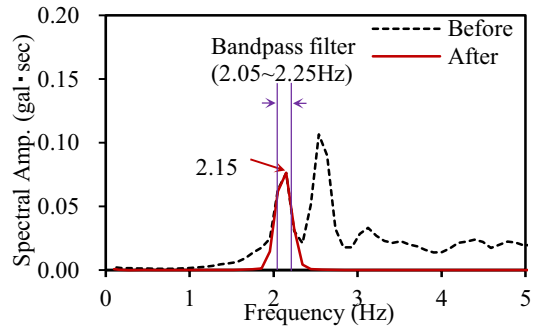


図-3 バンドパスフィルター設定前後の FFT 図

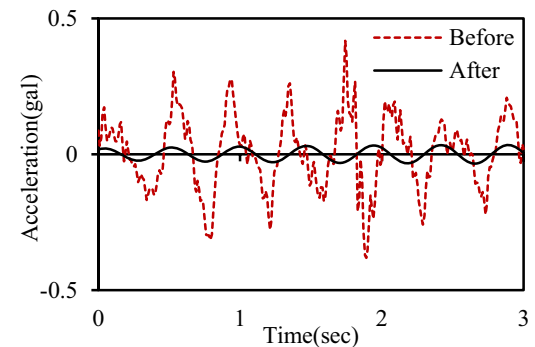


図-4 バンドパスフィルター設定前後の加速度波形

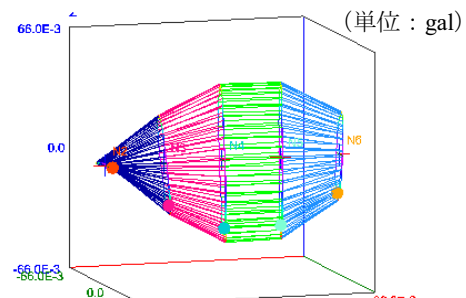


図-5 振動モード(加速度)

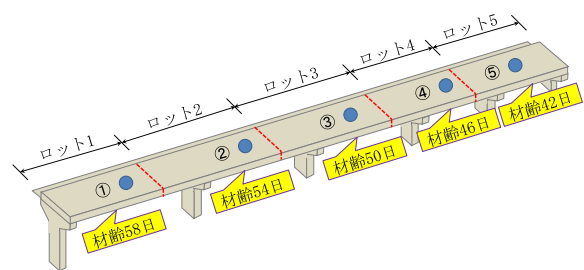


図-6 高架橋橋軸方向全体測定位置

表-3 固有振動数

モード	第1回目計測	第2回目計測
橋直1次	2.83Hz	2.83Hz
鉛直1次	2.15Hz	2.54Hz
鉛直2次	2.25Hz	2.73Hz

同表に示すように、鉛直方向について、第1回目と第2回目の計測に振動数の変化が見られた。これは、道路側面壁のコンクリート打設による質量増加、剛性増加の効果およびコンクリート床版の材齢の変化が影響したものと考えられる。

振動モードを抽出するため使用した振動数については、表-3に示す第2回目計測の橋直方向の2.83Hz、鉛直方向の2.54Hz、2.73Hzとした。先の図-6に示した計測位置について、バンドパスフィルター幅を卓越振動数ピーク値を基準として1.0Hz、0.6Hz、0.2Hzと変化させて、振動モードを抽出した。表-4に橋直方向(2.83Hz)、鉛直方向1次(2.54Hz)、鉛直方向2次(2.73Hz)の振動モードおよびFEM解析結果を示す。

振動モード図によると、橋直方向の振幅はバンドパスフィルター幅が1.0Hzのときがもっとも大きく、0.6Hz、0.2Hzの順に小さくなっている傾向が認められる。FEM解析結果と比較すると、バンドパスフィルターの幅が0.2Hzを採用した時に振動モードにおける腹と節の位置が解析結果と最も近似していることが分かった。ただし、鉛直2次モードにおいて、計測点数が少ないため、振動の節は全部が確認できなかった。

さらにバンドパスフィルターの設定幅の妥当性を検証するため、鉛直1次振動モードにおいて、バンドパス

フィルター幅が1.0Hz、0.6Hz、0.2Hz時の応答スペクトルについて、FEM解析結果との比較を図-7に示す。

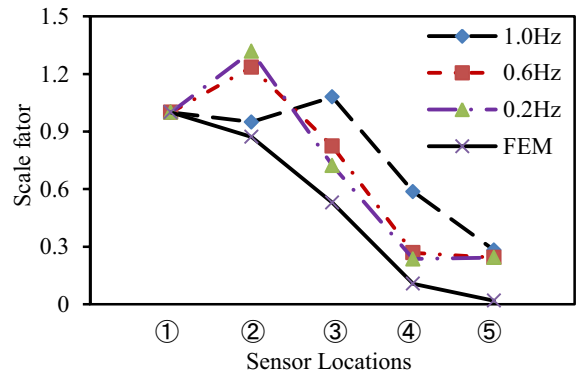


図-7 応答スペクトルの比較

これは橋軸方向ロット1の床版中央に設置されたセンサ①を基準点とし、②から⑤の計測データの任意20秒間の加速度スペクトルとの倍率を算出したものである。図-7によると、②の位置にバラツキが見られたが、バンドパスフィルター幅として0.2Hzと0.6Hzを採用した時の加速度スペクトルの変化曲線はFEM解析結果と近い傾向が認められた。

一般的には、ピーク振動数に相当するスペクトル値が

表-4 振動モード図の比較 (図-6を対象)

モード	振動計測結果 バンドパスフィルター幅 (Hz)			FEM 解析
	1.0Hz(±0.5Hz)	0.6Hz(±0.3Hz)	0.2Hz(±0.1Hz)	
橋直1次				
鉛直1次				
鉛直2次				



ら 1/10 以下になる範囲をフィルター領域とし振動モードを抽出することが示されている<sup>9)</sup>。本報では、表-4 および図-7 の結果から、各振動数ピークに相当するスペクトルにバンドパスフィルター幅を 0.2Hz (±0.1Hz) として振動モードを抽出するのが妥当と判断した (表-4 の太枠)。

## 5. 実験結果

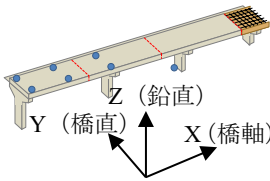
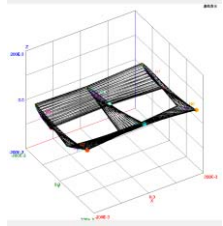
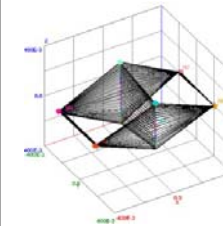
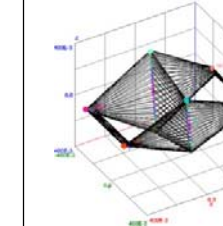
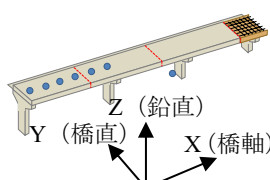
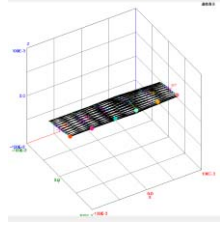
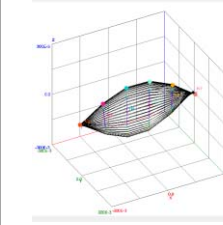
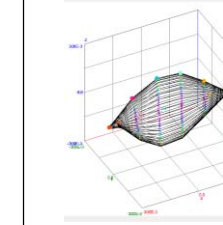
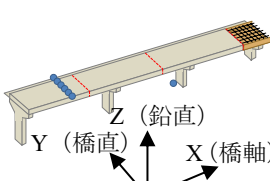
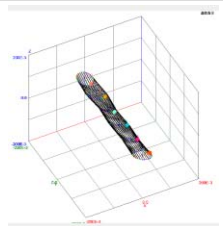
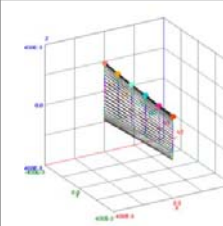
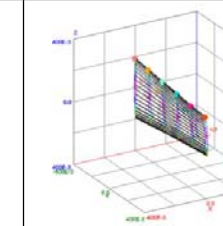
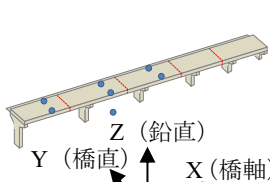
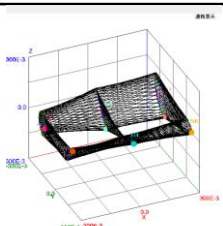
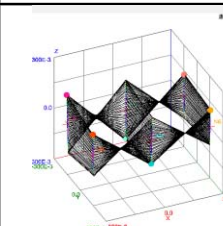
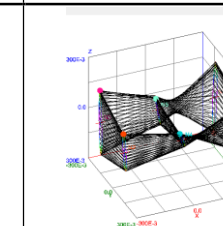
前節に提案した振動モードの抽出手法を用いて、バンドパスフィルター幅を 0.2Hz とした場合の特徴的な振動モードを表-5 に示す。この表より下記を推定できる。

①CASE-3 に示した振動モード図より、高架橋の鉛直振動 1 次・2 次モードは、2.15Hz および 2.25Hz を周期とする同位相の鉛直方向の単振動モードであり、歩道が片持ち梁形式でついている北側の振幅が南側に比べ大きい。

②CASE-4 より、3.72Hz を固有周波数とする床版のねじれモードが確認される。③水平方向の振動については、橋軸方向の振動が小さいため、鉛直方向と橋直方向の連成振動の影響により、抽出することができなかった。橋直方向において、水平振動以外、鉛直振動成分も多少が見られた。

上記の①に関し、先に示した表-4 の太枠で示した 0.2Hz の幅でフィルターを掛けた場合の鉛直 1 次および 2 次のモードから、ロット②部分スパンでは 2.73Hz の周波数域の振動モードは、構造物全体で見たときに節となっている振動モードであることが考えられる。すなわち、本道路橋床版の鉛直方向の振動モードは、図-8 に示すような 1 次モードと 2 次モードが存在することが推定された。

表-5 各配置ケースの振動モード

CASE	センサの配置位置	代表的な振動モード		
1				
	支間床版平面一枚	橋直 1 次 (2.83Hz)	鉛直 1 次 (2.15Hz)	鉛直 2 次 (2.25Hz)
2				
	支間橋軸方向	橋直 1 次 (2.83Hz)	鉛直 1 次 (2.15Hz)	鉛直 2 次 (2.25Hz)
3				
	支間橋直方向	橋直 1 次 (2.83Hz)	鉛直 1 次 (2.15Hz)	鉛直 2 次 (2.25Hz)
4				
	床版中央平面配置	ねじれ (3.72Hz)	鉛直 1 次 (2.15Hz)	鉛直 2 次 (2.25Hz)

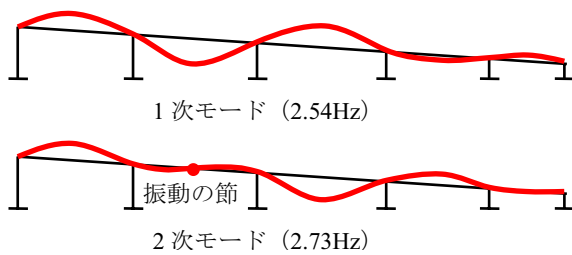


図-8 構造物全体の鉛直振動モード

## 6. まとめ

本研究は無線振動計測システムを用いた点検技術を確立することを目的としている。点検による診断(判定)は、前回の点検結果との相対比較が最も重要と考えており、初期値として保管すべき情報として、周波数特性に加えて振動モードを保管することを提案した。本報はこの手法を新設道路高架橋床版の常時微動計測に適用した一例を示しているが、この橋梁の床版に関しては、道路管理者は一般的に保管されているデータに加えて、各振動モードと固有周波数を保管することとした。今後は定期点検において、これらの値やモードの変化が老朽化の判定資料として活用できるか否かを検討することが必要である。本報で対象とした橋梁床版については以下の知見が得られた。

- 1) 本計測システムによって、鋼5径間連続箱桁橋の床版の振動特性を推定することができた。
- 2) 計測対象の構造物は鉛直方向および橋直方向の振動性状が支配的であり、道路の片側にとりついている歩道は振幅に影響を与える。
- 3) 本対象の床版では計測データより得られたピーク振動数に相当するスペクトル値に幅0.2Hz(±0.1Hz)のバンドパスフィルターが妥当であった。この値については他の橋梁床版でも検討しデータを蓄積することが重要である。

## 謝辞

本研究における計測は国土交通省中国地方整備局道

路部の関係各位に多くの協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 吉田幸司, 関雅樹, 田川謙一, 八代和幸, LDVを用いた鉄道高架橋の振動特性評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1949-1954, 2006.6
- 2) 吉田幸司, 関雅樹, 固有振動特性に着目した鉄道高架橋の健全度評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1935-1940, 2004.6
- 3) 隈部佳, 原田悟, 岩田道敏, 大久保孝昭, 高橋脚を有する橋梁の新幹線走行に伴う振動について, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.919-925, 2012.6
- 4) 岡林隆敏, 中忠資, 奥松俊博, 郝婕馨, 多次元ARモデルを用いた常時微動による橋梁振動特性推定法と推定精度の検討, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, pp.474-487, 2008.6
- 5) 床版の損傷事例, 国土交通省 (2015.3.27 確認), [http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3\\_1\\_4.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_4.pdf)
- 6) コンクリートの抜落ち, 国土交通省 (2015.3.27 確認), <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0748pdf/ks074814.pdf>
- 7) 川原正人, 中畑和之, 大賀水田生, 多点同時計測による橋梁床版の動的挙動の3次元可視化と歩道橋における実験の検証, 構造工学論文集, Vol.59A, No.2, pp.1170-1178, 2013.3
- 8) Safak, E. and Cakti, E.: Simple techniques to analyze vibration records from buildings, 7<sup>th</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring, France, pp.2153-2158, Jul.2014
- 9) 土木学会構造工学委員会, 橋梁振動モニタリング小委員会編: 構造工学シリーズ 10 橋梁振動モニタリングのガイドライン, 土木学会, 2000