

スマートセンサーを用いた3次元加速度計測による 人道用吊橋の振動特性同定

Structural vibration characteristics of a pedestrian suspension bridge from 3D acceleration sensing of smart sensors

北見工業大学 学生員 ○岡本 寛人 (Akito Okamoto)
北見工業大学 学生員 綿崎 良祐 (Ryosuke Watasaki)
北見工業大学 正会員 宮森 保紀 (Yasunori Miyamori)
(株) 豊水設計 加地 善則 (Yoshinori Kaji)
北見工業大学 正会員 三上 修一 (Shuichi Mikami)
北見工業大学 正会員 山崎 智之 (Tomoyuki Yamazaki)

1. はじめに

供用年数が50年を超える構造物が年々増加しており、莫大な維持管理費用が必要になる。しかしながら、目視による点検では結果に一貫性がないことを指摘されている¹⁾。そこで構造物のモニタリングデータに基づく健全性の実時間的な監視を行う「構造ヘルスモニタリング (Structural Health Monitoring, SHM)」への関心が高まっている。構造物の応答を的確に把握するためには、センサーを高密度で設置し、計測を行う必要がある。しかしながら、従来の有線型のセンサーシステムでは費用や測定時の手間がかかるため、多点での測定を長期間行うことは困難であり、より安価で効率的なセンサーシステムが必要である。

このような要求に対して、データ処理機能と無線通信機能を有するスマートセンサーが構造モニタリングにおいて効率的な測定を可能にすると考えられ、研究が進んでいる²⁾。スマートセンサーは半導体基板上にMEMS (微小電気機械システム) 技術を用いた小型の加速度計とこれに接続する信号増幅器、A/D変換器を集積したものであり、メモリやプロセッサ、無線通信チップなどを組み合わせることで、端末自体にデータ処理機能と無線通信機能を持たせることができる。このようなMEMSセンサーはスマートフォンなどにも内蔵され身近に利用されているが、橋の振動特性同定に用いる場合には測定ノード間の同期計測や、無線通信によるパケットロス対策などの技術が不可欠となり、技術開発が進んでいる³⁾。

しかしながら、このようなスマートセンサーを用いた実橋梁振動測定実験は例が少ない。このため、本研究ではスマートセンサーを用い振動特性同定を行った。対象橋梁として、低次の振動モードが卓越しフレキシブルで振動しやすい人道用吊橋とした。さらに測定対象橋梁の諸元に基づくFEMモデルを作成し、非減衰固有振動解析を行い、固有振動数、モード形状について実験値との比較を行った。本報告では、これらの結果について報告する。

2. スマートセンサー

本研究において使用するセンサーは図-1 に示す MEMSIC 社の Imote2 システムである。データを収集するセンサーボード、データ処理機能と無線通信機能を有するプロセッサボードそしてバッテリーボードが独立しており、これらを接続して使用する。センサーボードは

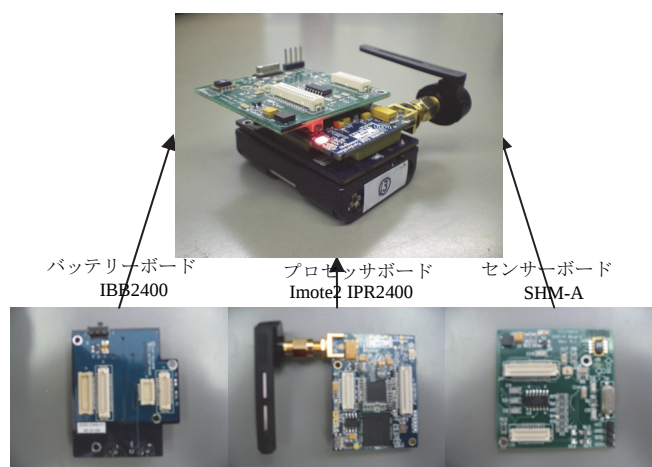


図-1 Imote2 スマートセンサー

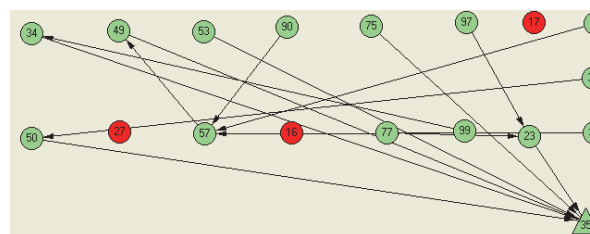


図-2 BHELMO マルチホップ経路の一例

イリノイ大学において開発された SHM-A および SHM-H センサーボードを使用している^{4),5),6)}。

SHM-A には MEMS 式 3 軸加速度計 (ST Microelectronics 社 LIS344ALH) や、光、温度、湿度計が搭載されている⁴⁾。AD 変換器 (Quickfilter Technologies 社 QF4A512) の最下位ビット (LSB) に対応する加速度は約 0.14gal である。また、AD 変換器ではサンプリング周波数とカットオフ周波数をユーザーが選択出来る。SHM-H は、z 軸方向に高感度の加速度計 (Silicon Designs 社 SD1221) を搭載したセンサーボードで、z 軸方向の加速度計測範囲を 0.8~1.2G と -0.2~0.2G で切り替え出来る。z 軸方向の LSB に対する加速度は 0.0145gal で、SHM-A と同じ加速度計を用いている x,y 軸の約 10 倍の感度である⁵⁾。

プロセッサボードは、データの計算処理や無線通信を

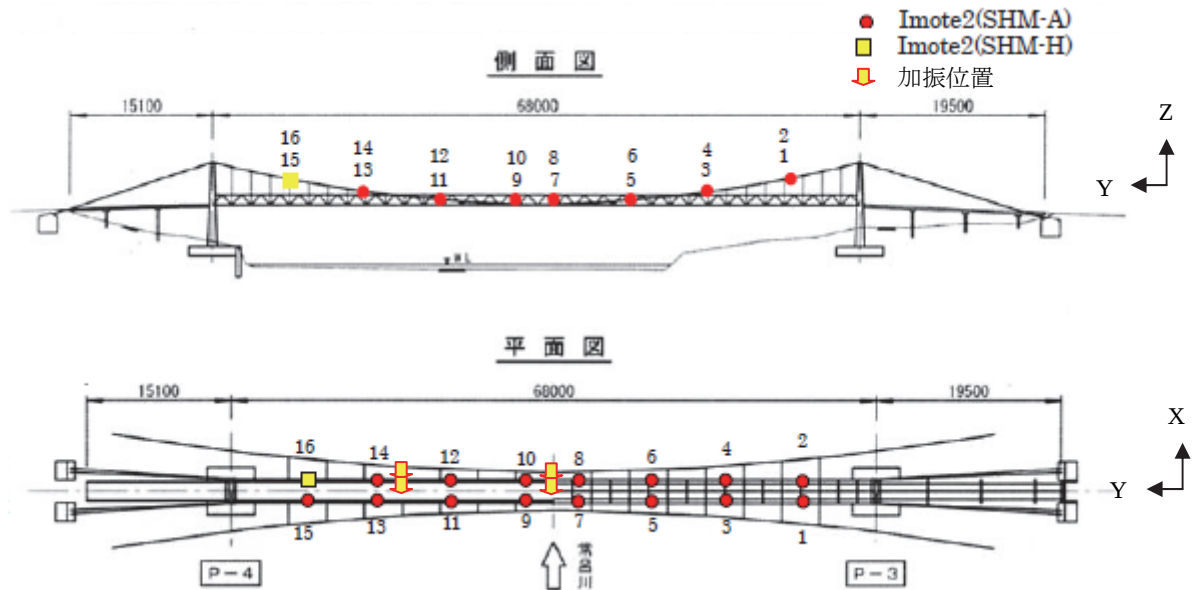


図-3 スマートセンサー設置位置

行うもので、CPUはMarvell PXA271を採用している。また、無線通信チップ(Texas Instruments 社 CC2420 IEEE802.15.4)を使用し、2.4GHz 帯で 16 チャンネル、250 kbps のデータレートに対応している⁶⁾。通信距離は予備実験では数 100m 程度まで通信可能であるが、遮蔽物や金属部材など周囲の環境で大きく異なる。

Imote2 では OS やアプリケーションプログラムをインストールして使用する。本研究では OS には TinyOS、スマートセンサーを制御するミドルウェアおよびアプリケーションプログラム群には JIP テクノサイエンス社の橋梁モニタリングシステム BHELMO を用いる。BHELMO では GUI 化された振動測定プログラム以外に、電波状況やバッテリー電圧を測定できるほか、マルチホップによる経路探索を自動および手動で行うプログラムが含まれている。このプログラムにより作成されたマルチホップ経路の一例を図-2 に示す。このマルチホップを用いることにより、中継点を設置することで遮蔽物を避けることや、通信距離を延長することができる。

測定には複数の Imote2 を用いるが、測定を行う無線端末をリーフノードと呼び、データ受信・収録側としてパソコンと Imote2 を USB ケーブルでつないだものをゲートウェイノードと呼ぶ。

3. 人道用吊橋における振動測定実験

2 章で説明したスマートセンサーImote2 を用いて、実橋梁における振動測定実験を行い、振動特性同定を行った。

3.1. 実験対象橋梁と実験方法

測定対象は 1959 年に北見市内に架設された人道用吊橋とした⁷⁾。全長は 102.6m、中央支間長は 68m。幅員は 2.5m である。本橋梁は 2011 年 12 月より供用を終了し、側径間の一部が撤去されている。実験は 2012 年 8 月、11 月の計 2 回行った。

実験においてセンサーは図-3 のように上・下流各 8 基ずつ、計 16 基設置した。使用したノードのセンサー



図-4 センサー設置方法

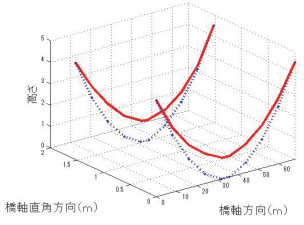
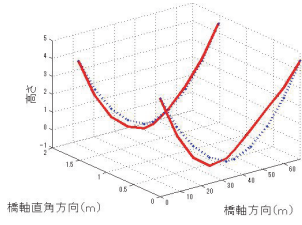
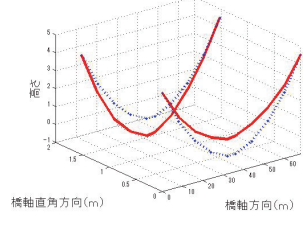
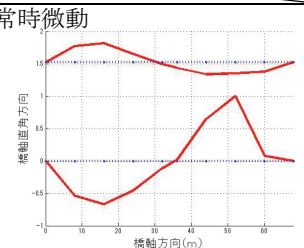
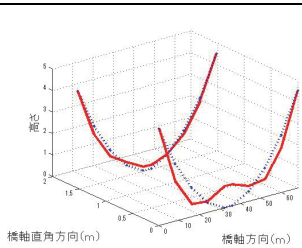
ボードとプロセッサボードの組み合わせは、センサーボードが SHM-A を 15 基、SHM-H を 1 基使用した。センサーは図-4 のように樹脂製の小型ケース内に入れ、主ケーブル上に両面テープと針金を用いて固定した。

実験では加振者が 1 回跳躍を行った後の振動を測定する減衰自由振動と、常時微動の 2 つを測定した。減衰自由振動については図-3 に示す加振位置で加振者が 60 秒の測定時間内で 30 秒毎に 1 回跳躍を行った時の振動を測定した。サンプリング周波数は 280Hz、データ点数は 16800 点とし、3 軸の加速度を測定した。

3.2. データ処理手法

測定した加速度データのうち、センサーの z 軸を全体系の鉛直方向、y 方向を橋軸方向、x 方向を橋軸直角方向とみなし、パワースペクトルのピーク値を抽出した。測定した 60 秒の加速度データを 30 秒毎に分割し、2 回分の測定データとした。1 回の実験において複数の測定データを得たため、ピークを得た振動数の平均を橋の固有振動数とした。減衰定数は測定した減衰自由振動波形に対してピーク振動数周辺の帯域を通過させるような楕円 IIR 型バンドパスフィルタによるフィルタリング処理を施し、抽出した波形から対数減衰率を算出し減衰定数を求めた。

表-1 実験による振動特性

実験月		1	2	3
2012.8	固有振動数	1.34Hz	1.82Hz	1.85Hz
	減衰定数	0.032	0.021	0.019
2012.11	固有振動数	1.28Hz	1.76Hz	1.85Hz
	減衰定数	0.019	0.020	0.025
モード形状			加振位置：1/4 	加振位置：1/2 
実験月		4	5	
	固有振動数	1.98Hz	3.52Hz	
2012.8	減衰定数		0.016	
	固有振動数	2.12Hz	3.52Hz	
2012.11	減衰定数		0.021	
モード形状		常時微動 		

3.2. 実験における振動特性同定

表-1 は実験により得られた 1 次から 3 次までの固有振動数と減衰定数、モード形状を表す。モード形状の振幅は最大値で無次元化している。11 月の実験では、一部のセンサーで測定ができなかったため、モード形状は 8 月の実験結果より作成した。モード形状は奥側が上流、手前側が下流で、実線がモード形状、破線が主ケーブルを表す。1 番目のモードは対称曲げ振動で、すべての加振ケース、すべての測点でパワースペクトルが最大となるため、最も振動しやすいモードであるといえる。1.8～2.0Hz では、加振位置により異なる振動形状が得られた。表-1 の 2 番目、3 番目に示すように、支間 1/4 の加振位置では逆対称曲げモード、支間 1/2 の加振位置では対称ねじれモードが現れた。また、常時微動の橋軸直角方向成分では、表-1 の 4 番目に示すようなモード形状が得られた。このため、このモードは鉛直方向の逆対称曲げ振動とねじれ振動および橋軸直角方向の逆対称ねじれ振動が連成していると考えられる。5 番目のモードでは腹が 3 つある対称曲げモードとなっている。

以上のように、本橋の 3 次元加速度計測では、近接した振動数範囲に複数のモードがあるケーブル構造特有の振動特性を確認できた。なお、橋軸方向では、パワースペクトルのピークは検出できず、モードは確認できなかった。

3. 固有振動解析

本研究の対象橋梁について 3 次元構造解析プログラム T-DAPⅢを用いて FEM モデルに対し、非減衰固有振動解析を行った。

4.1. モデルの作成

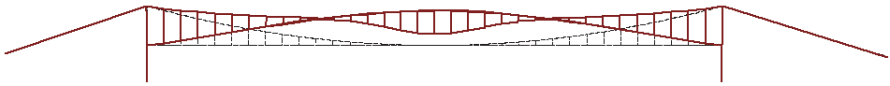
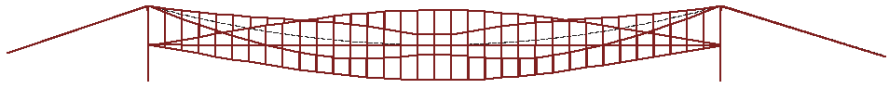
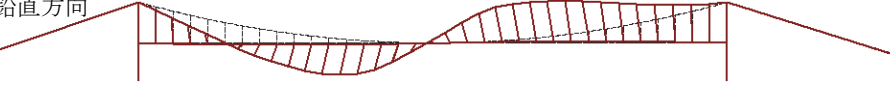
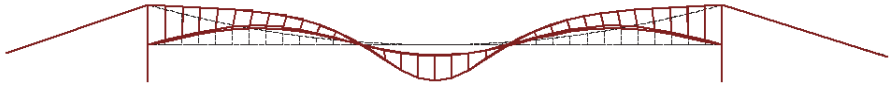
各要素については床版(縦桁含む)、横構、主塔、高欄をはり要素、主ケーブル、吊材、耐風索は張力を入力する弦要素で作成した。このうち、弦要素で作成した各部材における張力の実測値や設計値が不明であったため、小規模吊橋指針・同解説⁸⁾を参考に決定した。

4.2 固有振動解析結果と実測の比較

非減衰固有振動解析より得られたモード形状と実測結果のモード形状に近いものについて、固有振動数を比較した。固有振動数と対象とするモード形状を表-2 に示す。モード形状においては主塔および、主ケーブル、吊材、床版を描画している。

表-2 の結果と実測を比較すると、1 番目の曲げ対称モードについては実測結果とほぼ同じモード形状、固有振動数を得ている。固有振動解析結果より、このモードは床版の振動に主ケーブルが連動していると考えられる。表-2 の 2 番目のねじれモードは、実測結果ではやや固有振動数が高いものの、同様のモード形状となっている。表-2 の 3 番目の曲げ逆対称モードでは、鉛直方向の他に橋軸直角方向にもモード振幅がある。表-1 の実測結果においても 2 番目と 4 番目で同様のモード形状を確認

表-2 FEM 解析による振動特性

	固有振動数	モード形状
1	1.32Hz	
2	1.69Hz	
3	1.83Hz	鉛直方向 
	1.83Hz	橋軸直角方向 
4	3.55Hz	

できる。常時微動から得られた表-1 の 4 番目のモードは 2 番目より固有振動数がやや高い。表-2 の 4 番目の曲げ対称モードも実測とほぼ同じモード形状、固有振動数が得られている。このモードも 1 番目と同様に床版と主ケーブルが連動して振動していると考えられる。以上の結果より、スマートセンサーによる 3 次元多点計測を行うことで、本吊橋の低次モードの振動特性を同定することができた。

4. まとめと今後の課題

本研究はスマートセンサーの実橋梁振動測定への適用を目的として、実橋梁においてスマートセンサーでの多点計測および固有振動解析との比較を行った。その結果から、人道用吊橋における低次の固有振動数と振動モードを同定することができた。

今後の課題として、このようなスマートセンサーによる振動特性の同定結果を構造ヘルスマニタリングにどのように活用するかが挙げられる。本研究では、夏季と冬季で計測を行ったが、同定結果では固有振動数がわずかに異なるモードがある。この差異がどのような原因によるものかを明確にすることが SHM の前提となる。また、3 次元計測では、加振力を発生させにくい方向への振動の励起方法を検討することも同定精度の向上のために不可欠である。

さらに、現在のスマートセンサーではサンプリング周波数が低く、固有振動数が高くなる構造への適用は難しい。スマートセンサーの一般的な土木構造物への適用には高周波数で加速度測定を行えるセンサーが必要となるとともに、より広いダイナミックレンジを持つセンサーの開発も期待される。

以上のような課題はあるものの、スマートセンサーは容易に多点多軸計測が可能で、構造モニタリングに有用であることから、今後の技術開発により、土木構造物の振動測定への適用が進み、将来においては SHM にも適用されることが期待される。

謝辞

本研究の一部は、平成 24 年度ノーステック財団「研究開発助成事業 (talent 補助金)」ならびに北海道土木技術会 鋼道路橋研究委員会の研究支援を受けて行われました。吊橋での測定実験に関しては、北見市役所ならびに北見工業大学地震防災工学研究室の学生諸氏の協力を得ました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 松尾卓弥、古川愛子、西川晃司：スペクトル要素法を用いた高振動数起振による鋼トラス橋の局所損傷同定、土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集、I-270, pp.539-540, 2011.
- 2) Tomonori Nagayama and Billie F. Spencer, Jr.: Structural Health Monitoring using Smart Sensors, NSEL Report #1, <https://www.ideals.illinois.edu/>, 2007.
- 3) 長山智則、Spencer, Jr., B. F., 藤野陽三：スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのミドルウェア開発、土木学会論文集、65(2) pp.523-535, 2009.
- 4) ISHMP: SHM-A Sensor Board Advanced User's Guide, <http://shm.cs.uiuc.edu>, 2010.
- 5) ISHMP, SHM-H Board High-Sensitivity Accelerometer Sensor Board Datasheet and User's Guide, <http://shm.cs.uiuc.edu/>, 2009.
- 6) Crossbow: Imote2 High-performance wireless sensor network node, <http://www.xbow.com>, 2007.
- 7) 宮森保紀、坂和平、大島俊之、三上修一、山崎智之：人道吊橋の振動計測におけるスマートセンサーの適用と耐低温測定システムの開発、構造工学論文集, Vol.58A, pp.216-225, 2011.
- 8) 社団法人日本道路協会：「小規模吊橋指針・同解説」153pp, 1985.