スマートセンサーを用いた3次元加速度計測による横断歩道橋の振動特性同定

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

北見工業大学大学院社会環境工学専攻　○学生員　岡本 覚人 (Akito Okamoto)
北見工業大学社会環境工学科　西山 勝隆 (Masataka Nishiyama)
北見工業大学社会環境工学科　正　員　宮森 保紀 (Yasunori Miyamori)
北見工業大学社会環境工学科　正　員　齊藤 剛彦 (Takehiko Saito)
北見工業大学社会環境工学科　正　員　三上 修一 (Shuichi Mikami)
北見工業大学社会環境工学科　正　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、近年維持管理の重要性が社会的に認識されつつある。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が指摘されている[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ー、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。橋梁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)]。

SHM の技術開発では実橋梁に損傷を故意に加えることで構造を変化させ、振動特性の変化を確認することがある。しかしながら、供用中の実橋梁においては同様のことを行うことはできない。それに対し、本研究では現在損傷しており今後補修予定の横断歩道橋を測定対象橋梁とし、スマートセンサーを用いた3次元による振動特性同定を行った。本実験は対象橋梁がまだ補修されていないため損傷状態での基礎情報を得るための実験である。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測値との比較を行った。本報告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ー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)]。

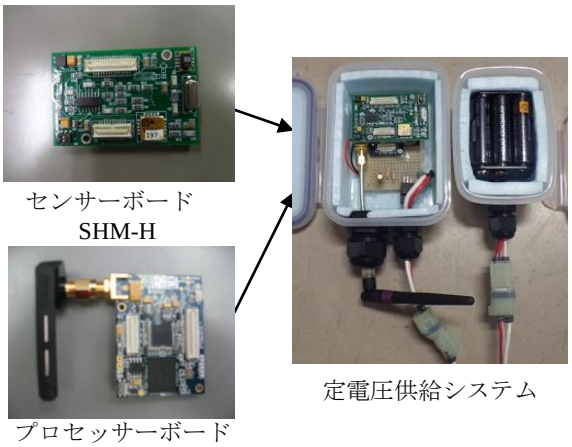


図-1 Imote2 スマートセンサー

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できる。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 で切り替えできる。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)]。

プロセッサーボードは、データの計算処理や無線通信を行うもので、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)]。通信距離は最大で 70m 程度まで通信可能であるが[7)]、遮蔽物や金属部材など周囲の環境で大きく異なる。

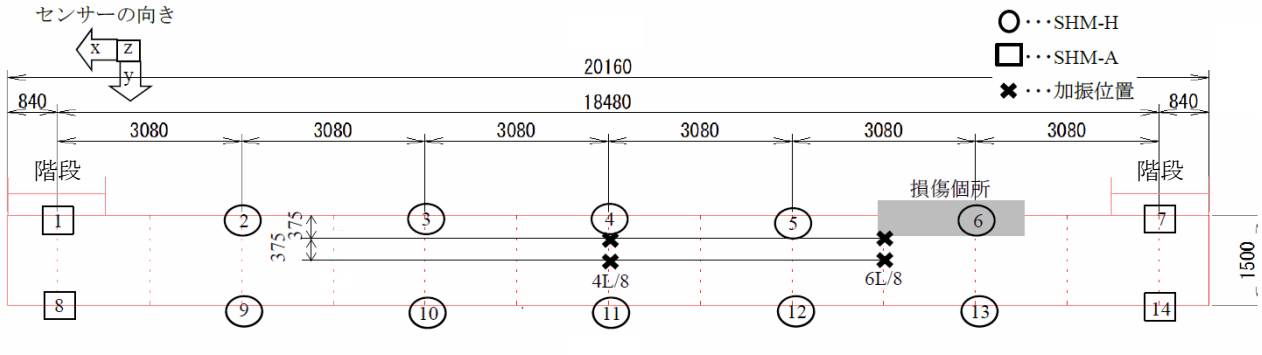


図-2 センサー設置位置および損傷箇所

図-3 損傷状態

図-4 センサー設置方法

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、個々のノード間でデータ通信経路を作成し、データの中継を行うマルチホップ通信でのルート作成プログラムが含まれている。このマルチホップ通信を用いることにより、遮蔽物を避けることや通信距離を延長することが可能である。

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。リーフノードの電源には図-1 に示す本研究室で作成した定電圧回路を用いて単 3 充電池から一定の電圧を安定して供給する定電圧供給システム [8]を用いている。

3. 横断歩道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 対象橋梁と実験方法

測定対象は北見市内に架設された横断歩道橋である。全長 20.16m、支間長 18.48m、幅員は 1.5m である。本橋は図-2 の網掛け部に図-3 のような損傷がある。損傷による使用上に影響はないため現在も供用されているが、補修されることが決定している。本実験は補修前である 2013 年 11 月に行った。

実験においてセンサーは図-2 のように 14 基を設置した。その内 1,7,8,14ch は橋脚上に設置した。使用したセンサーは橋脚上の 1,7,8,14ch には SHM-A、それ以外には SHM-H を使用した。3 軸で加速度を測定するため総チャンネル数は 42ch となる。センサーは図-4 に示すように鋼板上に両面テープで固定し、床版上に設置した。

実験では加振者が 1 回跳躍を行った後の減衰自由振動を測定した。サンプリング周波数は 280Hz、1 サンプル 60 秒間で測定した。加振は図-2 に示す加振位置で 60 秒の測定時間内で 30 秒毎に 1 回跳躍を行った振動を測定した。

本実験のセンサー設置時間は 15 分ほどであり有線型センサーに比べ迅速に行える。無線の経路探索およびデータ回収などに 1 サンプルごとに数分かかるため測定時間については有線に劣るが、実験全体にかかる時間を短縮することができる。

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 x 軸を全体系の橋軸方向、y 方向を橋軸直角方向、z 方向を鉛直方向とみなし、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対象橋梁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。

3.3 実験における振動特性同定結果

図-5 に実験より得られた 1 次から 7 次までの固有振動数と減衰定数、モード形状を示す。丸印がセンサー位置、実線がモード形状、破線が主桁の元の位置を示す。モード形状は 3 軸すべてを最大値で無次元化し、3 次元のモード形状として表示してある。1 次から 7 次のうちそれぞれのモードで卓越している方向は 1 次が橋軸方向、

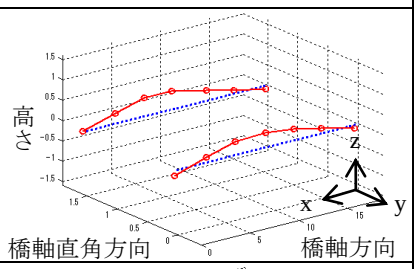
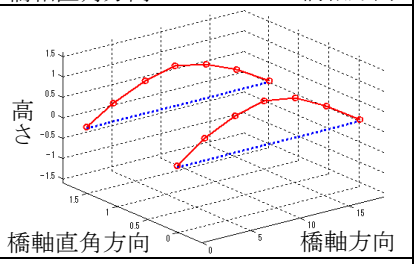
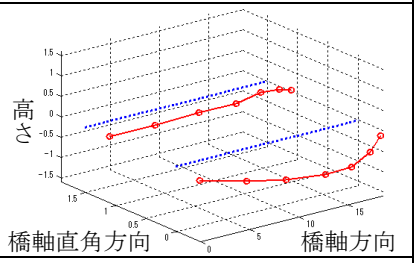
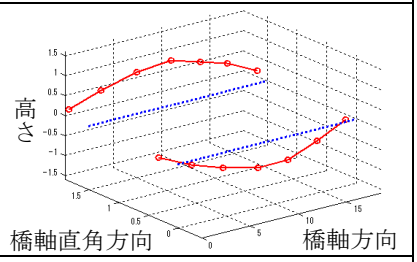
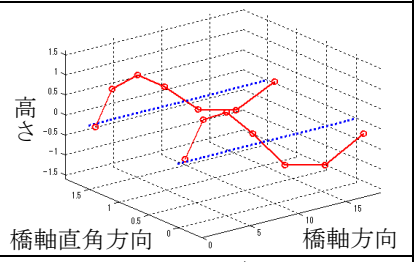
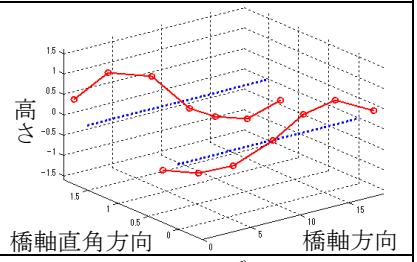
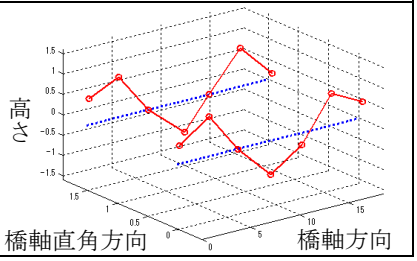
		モード形状
1 次	固有振動数 4.234Hz	
	減衰定数 0.0060	
2 次	固有振動数 4.894Hz	
	減衰定数 0.0058	
3 次	固有振動数 7.773Hz	
	減衰定数 0.0036	
4 次	固有振動数 9.782Hz	
	減衰定数 0.0018	
5 次	固有振動数 15.547Hz	
	減衰定数 0.0019	
6 次	固有振動数 20.942Hz	
	減衰定数 0.0015	
7 次	固有振動数 28.858Hz	
	減衰定数 0.0013	

図-5 実験による振動特性

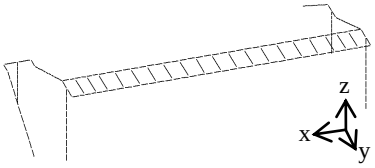
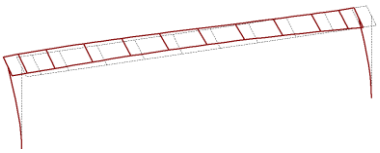
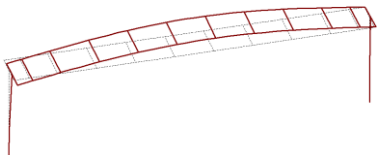
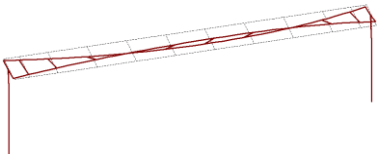
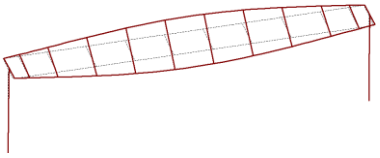
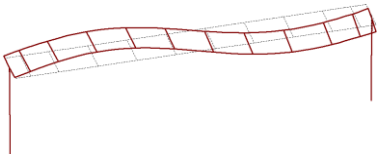
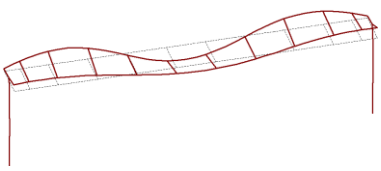
横断歩道橋全体図		
	固有振動数 (実測との差)	モード形状
1 次	3.948Hz (-6.75%)	
2 次	5.261Hz (+7.50%)	
3 次	8.483Hz (+9.13%)	
4 次	9.061Hz (-7.37%)	
5 次	17.469Hz (+12.36%)	
6 次		
7 次	36.637Hz (+26.02%)	

図-6 FEM 解析による振動特性

3 次が橋軸直角方向、それ以外の 2,4,5,6,7 次が鉛直方向となっている。1 次はすべての測点が橋軸方向の同じ方向に振動しているのと同時に鉛直方向にも対称曲げ振動が得られている。2 次は鉛直方向に対称曲げ振動が得られている。3 次は橋軸直角方向に対称曲げ振動と鉛直方向に図奥側の振幅が大きい対称ねじれ振動が得られている。この奥側と手前側の振幅の差は奥側に階段が取り付けてあり、階段の有無による振動特性の差であると考えられる。4 次では鉛直方向に対称ねじれ振動となっている。5 次は鉛直方向に逆対称振動と橋軸直角方向に橋脚上のみ負の値を示す対称曲げ振動が得られている。6 次は鉛直方向に逆対称ねじれ振動と橋軸直角方向に主桁中央を軸として斜めに移動しているモードが得られてい

る。7 次は腹が 3 つの対称曲げ振動が得られている。以上のように 1 次、3 次、5 次、6 次では卓越方向以外にもモード振幅の成分を有していることが 3 次元計測から把握できた。卓越方向以外の振幅はモードによって異なるが、鉛直方向に比べ橋軸方向で約 10%、橋軸直角方向で約 30%となっている。また、1 次、3 次の損傷箇所の振幅が他より若干異なっている。これは損傷による変化ではないかと考えられる。

以上のように本橋の 3 次元加速度計測で複数の固有振動数とモード形状、卓越方向以外にもモード振幅成分を有しているモード形状が得られた。

4.　固有振動解析

4.1　モデルの作成

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を用いて図-6 の横断歩道全体図に示すような FEM モデルを作成し、非減衰固有振動解析を行った。主桁と横桁、橋脚、階段といったすべての要素をはり要素で作成し、高欄や床版等は質量として入力している。モデルは損傷を考慮せず図面通りに作成している。

4.2　実測結果と固有振動解析結果の比較

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が近いものを同一のモードとし、固有振動数を比較した。対象とするモード形状と固有振動数を図-6 に示す。モード形状は主桁と橋脚のみを描画し、実線がモード形状、破線が元の位置を示す。

図-5 の実測結果と図-6 の固有振動解析結果を比較すると 1 次から 5 次モードは実測と同様のモード形状が得られている。3 次は卓越している橋軸直角方向のモード形状については実測と同様だが、鉛直方向の図奥側と手前側の振幅に大きな差は見られなかった。また、1 次、5 次については実測時と同様に FEM モデルについても鉛直方向と橋軸直角方向の両方にモード形状が見られている。これらの固有振動数は実測と 6%～12%の差であるため同定できているといえる。実測の 6 次は FEM モデルでは得ることができなかった。7 次のモード形状は実測とほぼ同様のものが得られている。しかしながら、固有振動数の差が 26%ある。

以上の結果より、本解析で複数のモードの振動特性を 3 次元計測と比較して同定することができた。

5.　まとめと今後の課題

本研究ではスマートセンサーを用いた損傷している実橋梁での 3 次元による損傷時の振動特性の記録を目的に、多点計測および固有振動解析との比較を行った。その結果から損傷している横断歩道橋における固有振動数と振動モードを 3 次元で同定することができた。3 次元で測定を行うことにより、各方向に卓越する固有振動以外の方向でモード振幅の成分を有していることを確認することができ、1 軸のみで比較するより精度の高い測定ができた。損傷箇所において他の箇所に比べ振幅が変化するモードを得られた。この振幅の変化については補修後の実測結果と比較して損傷によるものなのかを確認する必要がある。また、多点計測におけるスマートセンサーの優位性も確認することができた。

今後の課題として多点計測で得られた大量のデータをどのように保存、活用していくかが挙げられる。SHM では過去と現在のデータを比較することで損傷を発見する。そのため、同一の構造物を長期間比較し続ける必要がある。しかしながら、多数存在する中小構造物に対してこの作業を個々に行うのは効率的ではない。そこで様々な中小構造物の計測データを比較することにより、損傷の位置や程度による変化や温度による変化といった基準となる変化の傾向を把握できる。その基準を用いることで少ないサンプル数でも損傷同定が可能になると考える。そのためには多数の構造物より得られたデータを一括して保存し、共有するデータレポジトリシステムを構築する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（若手研究（B）、課題番号：25870025）ならびに、北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会の研究助成による支援を受けて行われました。横断歩道橋での測定実験に関しては、北海道開発局網走開発建設部北見道路事務所ならびに北見工業大学社会環境工学科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) 大島俊之、三上修一、山崎智之、丹波郁恵：橋梁健全度評価に用いる評価方法の検討と影響要因の解析、土木学会論文集、No.675/I-55、pp.201-217、2001.
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) 潘凱凱、綿崎良祐、宮森保紀、三上修一：スマートセンサーの土木構造物への適用における一検討、土木学会北海道支部平成 25 年度論文報告集、第 70 号、2014(投稿中).
8) 綿崎良祐、岡本覚人、潘凱凱、宮森保紀、三上修一、山崎智之：橋梁振動測定のための Imote2 スマートセンサーシステムにおける電源システムの改良、土木学会第 68 回年次学術講演会、CS6-008、2013.