

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：10106
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2013～2014
課題番号：25870025
研究課題名(和文)高密度スマートセンサレイとアクティブセンシングによる橋の健全度診断の実用化

研究課題名(英文)Structural health monitoring of bridges with high density smart sensor array

研究代表者
宮森 保紀(Miyamori, Yasunori)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00363383

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：橋のモニタリングデータに基づいて損傷の程度や位置を同定する構造ヘルスマニタリングについて、低コストで無線化された「スマートセンサー」によって振動形状の微小な変化を健全性診断に活用するシステムを構築した。

このシステムを用いて損傷した横断歩道橋の補修前後で測定実験を行い、振動特性の変化から損傷同定を行った。測定データから補修前後の振動モードを比較したところ、固有振動数に大きな変化は生じなかった。一方、モード振幅の変化については、損傷近傍のセンサーでのモード振幅変化が最大となり、3次元での振動特性同定により構造全体のモード形状の変化を捉えることができた。

研究成果の概要(英文)：A vibration based Structural Health Monitoring (SHM) is expected to be a key technique to improve structural safety. A smart sensor which is an electronic device using MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) has a potential to enable efficient vibration measurement because of its wireless communication function and on-board processing ability.

In this study, vibration measurement experiments on real bridges were performed to establish the working knowledge of smart sensor system and the damage identification method which was proposed in this study. The experiments were performed on a damaged pedestrian bridge. From experimental results, mode shapes slightly changed through repair work though its natural frequencies did not change. The largest value of a proposed damage index was obtained at the sensor near the damaged point.

研究分野：構造工学

キーワード：構造ヘルスマニタリング スマートセンサー

1. 研究開始当初の背景

近年の橋梁崩落事故や損傷事例は、社会基盤施設の機能低下が人々の命を脅かす現実の脅威であることを示した。社会資本投資の削減、高齢化橋梁の急増、熟練技術者の減少が同時に進行するわが国では、技術者の目視点検に過度に依存した維持管理では対応できなくなる。維持管理が十分に行われない場合、道路の一部閉鎖や通行車両の制限が行われ、国民生活の質が低下することが懸念される。このような背景に対して、センサで構造物の振動や内部応力の状態を把握して、損傷の位置や程度を同定する構造ヘルスマニタリング(Structural Health Monitoring)の開発に期待が持たれている。構造ヘルスマニタリングは、工学の諸分野でセンサ技術、診断技術などの研究や実用化が進められているが、橋に関しては航空機や自動車と比較して、規模が大きい、数十年間にわたり屋外で使用されつづける、メンテナンス費用が少ない、などの技術的難しさがある。

センサ技術については、従来の有線センサは技術的な確実性は高いが、配線・設置やシステムの保守に費用や手間がかかり、長期間の観測を多数のセンサで行うことは難しい。小型の半導体基板に測定・通信・計算などの機能を集積したスマートセンサはこれらの制約を解消することが期待できる。一方、スマートセンサを利用した橋の振動計測技術はまだ確立していない。半導体型加速度計自体はスマートフォンなどで身近な存在になったが、橋の振動計測では多点同時計測のためのセンサ間の同期やデータ欠損対策などが必要で、測定現場ではアンテナの指向や通信経路の設定、センサ個々の電力確保も有線センサにはない問題となる。申請者は、センサ自体や制御用プログラム(ミドルウェア)は、交流のある米国イリノイ大学などが開発したシステムを採用することで研究全体の効率化を図りながら、スマートセンサを実橋の測定実験に用いることで測定技術の高度化を進めている。

構造ヘルスマニタリング技術としては、1960年代以降に航空・宇宙分野を皮切りに精力的な研究がすすめられている。橋の分野でも1990年代後半から振動現象を損傷同定に役立てる橋梁振動モニタリングの概念が提起された。最近では、架け替え前の橋で実証実験を行う例も増えつつ今後の進展に期待が持たれている。損傷検出理論についても世界的に各種の提案がされているが、ノイズの少ない実験室レベルの実験に留まる場合や、ある特定のケースでしか有効でない場合が多く汎用的な手法は確立されていない。

2. 研究の目的

橋のモニタリングデータに基づいて損傷や劣化の程度や位置を同定する構造ヘルスマニタリングについて、低コストで無線化された「スマートセンサ」を高密度に配置し、振

動形状の微小な変化を検出することで健全性診断に活用するシステムを構築する。従来の振動測定では、橋の全体的な振動特性などを取得することができたが、センサにコストや設置の手間がかかるため多数のセンサによって部分的な損傷を検出することは困難であった。そこで本研究では申請者らが研究を行ってきた損傷同定アルゴリズムとスマートセンサ技術を組み合わせることによりこれらの制約を解消して、橋のヘルスマニタリング技術を実用化に向けた技術開発を促進する。

3. 研究の方法

(1) スマートセンサ

本研究で使用するセンサは、MEMSIC社のImote2システムである。データを収集するセンサボード、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、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センサボードを使用している。センサボードにはMEMS式3軸加速度計や、光、温度、湿度計が搭載されている。プロセッサボードは、データの計算処理や無線通信を行うもので、また、無線通信チップを使用し、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。

Imote2では、センサ端末に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を用いた。BHELMOは、イリノイ大学で開発されたISHMP Services Toolsuiteを用いてGUI化された振動計測プログラム以外に、電波状況やバッテリー電圧を計測できる他、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。

計測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接続した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に示す定電圧回路を用いて単3充電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を用いた。このような無線センサネットワークでは、リーフノード間の時刻同期誤差が測定結果に悪影響を与えることが知られている。本システムではノード間の時刻同期手法としてFlooding Time Synchronization Protocol (FTSP)を適用し、さらに測定データに対してリサンプリング処理を行っている。この方法による時刻同期誤差は、数十マイクロ秒程度である。

(2)対象橋梁と計測条件の例

測定対象の例として、図 - 2a)の北海道北見市に位置する横断歩道橋で測定した。本橋には、図 - 2b)に示すように片側の主桁に変形とき裂が生じている。変形は実測で 160mm 程度、主桁面外方向に変形している。また、き裂は垂直補剛材が取り付け位置に沿って生じており、主桁下フランジから上フランジに向かって 200mm 程度のき裂長である。この損傷は比較的最近、車両の衝突によって発生したものと推測されるが、損傷時の状況の詳細は不明である。これらの損傷は、局所の疲労き裂や腐食などに比べて、主桁剛性に影響を与える比較的大きな実損傷であると言える。そこで、損傷による耐荷力への影響を把握するため、3次元 FEM モデルを作成し、補修前後で群衆荷重載荷時の発生応力を比較した。その結果、支間中央断面に生じる応力は補修前後で変化はなく、損傷部位では応力集中により応力が增加するが許容応力度内に留まっていることから、鋼構造物の耐荷力に影響を与える損傷の程度としては軽微であると考えた。また本橋は、過去にも同様の損傷を受け補修した形跡や、塗膜の劣化、路面の舗装の劣化などが見受けられるが、構造全体への影響は軽微なものと考えられる。

本研究では、補修前の振動特性の把握を目的として 2014 年 7 月に振動計測を実施した。また、2014 年 8 月には損傷部に対する溶接補修(図 - 2b)が実施され、補修後の振動特性を把握するため、2014 年 9 月に振動計測を実施した。なお、損傷部の補修は変形とき裂の生じた部分を切断して、同じ断面を有する材片を切断部分に溶接する方法で行われた。この損傷部の交換以外には階段部分の塗装の一部塗り替えが行われたが、構造物の振動特性に影響を与えるものではないと考えられる。

本橋におけるセンサ配置及び加振位置を図 - 3 に示す。全測点にて 3 軸加速度成分を計測するため、総チャンネル数は 42ch となった。センサは、鋼板に両面テープで固定したプラスチックケース内に格納し、床版上に設置した。加振方法は人力加振とし、人間 1 名が跳躍後の減衰自由振動波形を用いてモード特性の同定を行った。加振者の体重は 70kg、測定時のサンプリング周波数は 280Hz である。加振位置は、曲げ 1 次・2 次モード及びねじれ 1 次・2 次モードを励起するため ×印の位置で行った。

上記の計測実験を本橋の補修前後で繰返し行った 2 回の実験時における気温差は 6 であった。

(3)データ処理

本研究では減衰自由振動実験によって得られた加速度データをフーリエ変換することでパワースペクトルを算出し、パワースペクトルのピーク値を固有振動数とした。フーリエ変換する際には、加振者が接地したあとの減衰自由振動部分のデータのみを対象としている。スペクトルの周波数分解能は



図-1 スマートセンサシステム



a) 対象橋梁



b) 損傷・補修状況

図 - 2 対象橋梁と損傷箇所

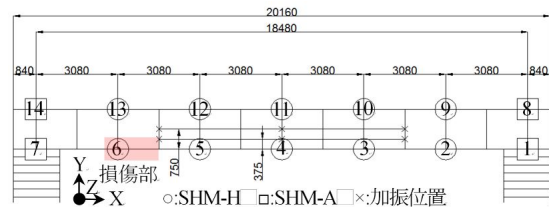


図 - 3 センサ配置と加振位置

0.042Hz である。パワースペクトルのピーク値は測定サンプルによってばらつきがあり得るが、本実験では同一条件で測定した波形のピークは周波数分解能程度のばらつきに留まることを確認した。モード形状はこのフィルタリング処理した波形から、測定チャンネル間の相対変位を求め、最大値を 1 として正規化した。減衰定数はフィルタリング後の波形の対数減衰率から求めた。減衰定数はフィルタリング後の波形の対数減衰率から求めた。

4. 研究成果

(1)固有振動特性の変化

表 - 1 に実験より得られた 1 次から 6 次までのモード形状、固有振動数を示す。図中の赤線が補修後、緑線が補修前のモード形状である。また、図中のプロットは計測点の位置を示す。数字はセンサ番号である。モード形

状は3軸すべての最大値で無次元化し、計測点の位置にモード振幅を足し合わせて3次元のモード形状として表示した。

各モードの主な卓越方向は、1次モードが橋軸方向、3次モードが橋軸直角方向、それ以外の2, 4, 5, 6次モードが鉛直方向であり、基本的な振動形状は補修後と補修前で違いは見られなかった。モード全体において、固有振動数に大きな変化はない。本橋の損傷は主桁の変形および亀裂であり、構造全体の剛性を低下させるものではないため固有振動数の変化が見られなかったと考えられる。減衰定数は低次モードに健全時と損傷時を比較した場合、健全時が高い。モード形状は橋軸直角方向において振幅の変化が多く見られた。振幅差が見られた測点は損傷付近である測点6や損傷から離れた測点3, 12などであり、モード形状を比較しただけでは損傷位置を特定することは困難である。よって、モード振幅の変化を定量的に把握するため、モード振幅の差分や the Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC) 法を用いた損傷検出を行う。

(2) 損傷指標による損傷位置同定

COMAC 法は、計測点に対するモード形状の相関性を把握するための指標であり、式(1)で与えられる。相関性は、0から1の値で示され、1に近ければ相関性が強いことを表す。

$$COMAC(j) = \frac{\sum_{i=1}^N \{ \varphi_o \}_i \{ \varphi_D \}_i^2}{\sum_{i=1}^N \{ \varphi_o \}_i^2 \sum_{i=1}^N \{ \varphi_D \}_i^2} \quad (1)$$

ここで、 j は計測点、 N は考慮するモード数、 $\{ \varphi_o \}_i$ は補修後における i 次モード形状、 $\{ \varphi_D \}_i$ は補修前における i 次モード形状を示す。考慮するモード数は、1次から6次の実測で同定した全ての振動モードを対象とし、 $N=6$ とした。予備的な検討では、採用するモードによって結果が異なることを確認しているが、損傷の位置や形状が未知な場合に適用することも考慮して、本研究では同定した全ての振動モードを用いた。計測点は全14箇所を対象とし、 $j=14$ とした。

図-4a)~c)には各軸方向のCOMAC値を、図-4d)には、3軸のCOMAC値を掛け合わせた値を示す。青色のプロットが計測点1~7を、オレンジ色のプロットが計測点8~14を示す。また、損傷近傍となる計測点6には、赤色で強調した。

橋軸方向成分では各計測点のCOMAC値は概ね0.994となり、他の方向と比べても全体的に高い値である。損傷位置の計測点6は0.996と損傷側となる主桁の他の計測点よりも大きな値となっているが、橋軸直角方向及び鉛

表1 実験結果

	鳥瞰図	x-y平面
1次		
固有振動数 健全：4.2Hz 損傷：4.3Hz		
2次		
固有振動数 健全：4.9Hz 損傷：4.9Hz		
3次		
固有振動数 健全：7.9Hz 損傷：8.1Hz		
4次		
固有振動数 健全：9.8Hz 損傷：9.8Hz		
5次		
固有振動数 健全：15.7Hz 損傷：15.6Hz		
6次		
固有振動数 健全：20.9Hz 損傷：20.9Hz		

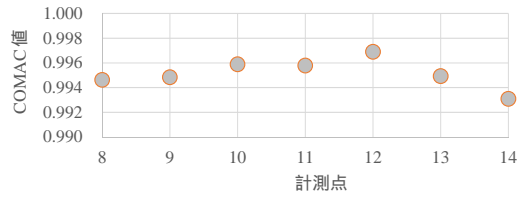
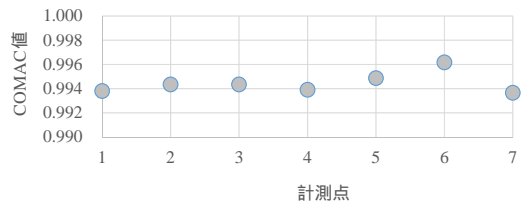
直方向の成分に比べて微小であるため、際立った変化ではないと言える。計測から同定できたモードの内、橋軸方向の振幅を有するモードは1次のみであるため、橋軸方向の成分から損傷によるモードの変化を確認することは難しいと考えられる。

橋軸直角方向では、損傷近傍となる計測点6のCOMAC値が相対的に小さく、損傷による影響と考えられる。一方で、損傷の反対側の桁では、計測点12のCOMAC値が低く計測点6のみを損傷位置として抽出することは難しい。

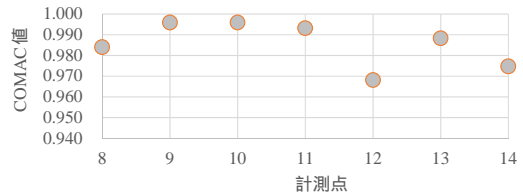
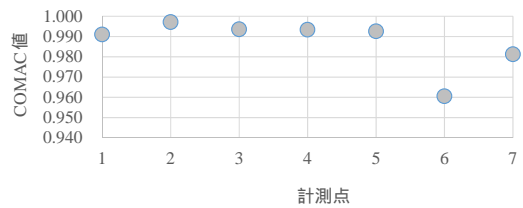
鉛直方向では、損傷の逆側の橋脚上である計測点 8, 14 で変化が見られるが、損傷近傍となる計測点 6 では COMAC 値があまり変化していない。これまでの一般的な振動計測では、鉛直方向の振動を計測して振動特性を求めることが多かったが、本橋では鉛直方向のみの振動計測では有意な結果を得られないことを示唆している。3 軸の振動応答を関連させて計測点ごとの特徴を考察するため、以上の 3 方向の COMAC 値を掛け合わせた結果が図 - 4d) である。橋軸直角方向と同様、損傷近傍となる計測点 6 でもっとも COMAC 値が低い。計測点 12 でも COMAC 値が低いため、この指標だけから損傷位置を一意に同定することはできないが、3 軸で加速度計測を行うことで、構造全体のモード形状の変化を検出することができたと考えられる。なお、この 3 軸を掛け合わせた図 - 4d) の結果は、図 - 4b) の橋軸直角方向の結果と相似しているが、これは 1 次モードの寄与が大きく、橋軸方向の水平モードによって桁断面には軸力が生じ、損傷断面では腹板が面外変形を起こすことで、橋軸直角方向の COMAC 値が際立っているものと考えられる。

以上から、3 方向の振動計測結果に対して、モード形状の変化を COMAC 値により求めることで、損傷近傍となる計測点 6 の変化を確認することができ、損傷検出への適用性を確認することができた。

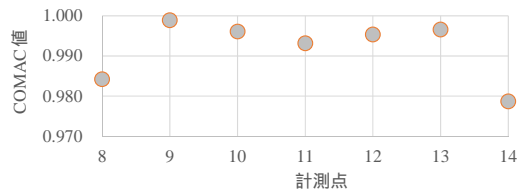
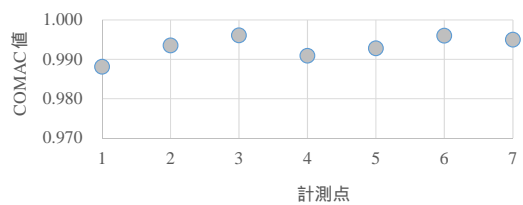
以上より本研究では、近年研究が進められている無線センサシステムを用いた 3 次元多点振動計測によって、補修前後の詳細な振動モードを把握することで、損傷によるモード振幅の変化を検討した。さらに補修によるモード形状の変化について、定量的な考察を行うためにモード振幅差や COMAC 法を用いて損傷位置近傍のモード形状の変化の程度を確認した。今後の課題としては、損傷逆側の桁では、変化が大きい計測点も見られたため、精度の高い損傷検出に向け、数値解析的なアプローチも含めて引き続き検討が必要である。また、上述のような減衰定数を含めた固有振動特性の変化の原因をより詳細に把握することに加え、一般的な道路橋などでも検討する必要がある。



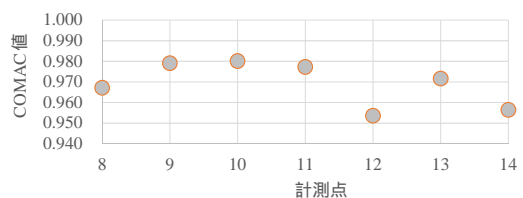
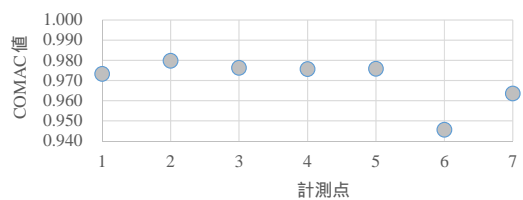
a) 橋軸方向成分



b) 橋軸直角方向成分



c) 鉛直方向成分



d) 3 軸の掛け合わせ

図 - 4 COMAC 値

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) 門田峰典, 宮森保紀, 綿崎良祐, 三上修一, 齊藤剛彦: 実損傷を有する横断歩道橋の補修によるモード形状の変化, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.143-152, 2015.
- 2) 門田峰典, 宮森保紀, 岡本覚人, 綿崎良祐, 三上修一, 齊藤剛彦: スマートセンサを用いた3次元加速度計測による横断歩道橋の振動特性同定とFEMモデル構築に関する一検討, 土木学会論文集 A2(応用力学). Vol.70, No.2, pp.1_887-1_897, 2014.
- 3) Toshiyuki Oshima, Yasunori Miyamori, Shuichi Mikami, Tomoyuki Yamazaki, Sherif Beskhyroun, Maria Fabijanska Kopacz: Small damage detection of real steel bridge by using local excitation method, Journal of Civil Structural Health Monitoring, Vol.3, Issue.4, pp.307-315, 2013.
- 4) Sherif Beskhyroun, Toshiyuki Oshima, Shuichi Mikami, Yasunori Miyamori: Assessment of vibration-based damage identification techniques using localized excitation source, Journal of Civil Structural Health Monitoring, Vol.3, Issue.3, pp.207-223, 2013.

〔学会発表〕(計 8 件)

- 1) 宮森保紀, 綿崎良祐, 門田峰典: 構造健全度診断のための実損傷橋梁の数値解析モデル構築, 土木学会北海道支部平成 26 年度年次技術研究発表会, 2015 年 2 月
- 2) 高祖伸幸, 宮森保紀, 山崎智之, 齊藤剛彦, 三上修一, 大島俊之: モード形状の変化を用いた振動実験による鋼供試体の損傷位置同定, 土木学会北海道支部平成 25 年度年次技術研究発表会, 2014 年 2 月
- 3) 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 年度年次技術研究発表会, 2014 年 2 月
- 4) 綿崎良祐, 岡本覚人, 潘凱凱, 宮森保紀, 齊藤剛彦, 三上修一: スマートセンサーを用いた実橋梁の固有振動特性同定と気温の影響, 土木学会北海道支部平成 25 年度年次技術研究発表会, 2014 年 2 月
- 5) 岡本覚人, 西山勝隆, 宮森保紀, 齊藤剛彦, 三上修一, 山崎智之: 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, 土木学会北海道支部平成 25 年度年次技術研究発表会, 2014 年 2 月
- 6) 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, 2013 年 9 月

- 7) 高祖伸幸, 宮森保紀, 山崎智之, 三上修一, 大島俊之: モード振幅の変化を利用した鋼橋の損傷位置同定に関する基礎的検討, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 2013 年 9 月
- 8) 岡本覚人, 綿崎良祐, 潘凱凱, 宮森保紀, 三上修一, 山崎智之: スマートセンサーを用いた PC 高架橋での振動特性同定土木学会第 68 回年次学術講演会, 2013 年 9 月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮森 保紀 (MIYAMORI, Yasunori)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 00363383