

# 橋梁振動モニタリングのための MEMS 要素技術を利用したセンサノード開発

建設構造研究室 石崎 覚史

指導教員 長井 正嗣

## 1. はじめに

近年、トラス橋の斜材に、腐食による破断が生じるなど、既設橋梁の維持管理は喫緊の課題となっている。現在、構造物にセンサを設置してモニタリングを行い、健全性を評価する構造ヘルスマニタリング<sup>1)</sup>が注目されている。この中で、構造物の劣化や損傷により生じる剛性や質量の変化が、動特性の変化に結びつくことから、振動モニタリングに関する研究<sup>2),3)</sup>が積極的に行われている。

劣化や損傷による動特性の変化を把握するためには、定期的に振動計測を行う必要がある。また、局所的な損傷を検出するためには、空間的に密な計測が求められる。しかし、現在、計測点当たり数十万程度のコストを要し、また、センサを有線で接続することから、高密度計測が難しい状況にある。

そこで、本研究では、近年の発展が目覚ましい MEMS 要素技術<sup>4)</sup>を利用し、空間的に高密度な振動計測を実現する無線センサノードの開発を行う。まずは、橋梁の振動モニタリングに適した MEMS 要素技術を選定し、センサノードの基板化を行う。そして、性能評価のために、有線タイプの高精度加速度計との比較を屋内とフィールドで行う。次に、実橋の多点振動計測に適用し、無線通信を利用した同期計測について検討する。最後に、撤去する橋梁に対して損傷を与えながら振動計測を行い、損傷と動特性の関係性を把握する。

## 2. 開発したセンサノードの概要

橋梁振動モニタリングを容易かつ空間的に高密度で実現するための無線加速度センサノードを開発した。

開発したセンサノードは、安価な MEMS 要素技術から構成されているにも関わらず、200Hz の高サンプリングレート、 $\pm 1\text{gal}$  以下の高分解能を有している。また、無線送信時のデータ欠損を防ぐため、MMC/SD カードに長時間記録することが可能である。既存の高精度加速度計と性能検証試験を行った結果、両者は同等の性能を保持していることを確認した。また、斜張橋ケーブルの張力計測にも適用可能であることを確認した。図 1 に開発したセンサノードを示す。



図 1 開発したセンサノード

## 3. 多点同期計測

開発したセンサノードを既設橋梁の多点振動計測に適用し、無線通信を利用した同期計測について検討した。振動計測データから固有振動数を同定し、3.85Hz 付近が対象橋梁の対称一次モードであることが確認された。そして、時刻歴波形に 3.85Hz 付近の狭帯域バンドパスフィルタを適用すると、図 2 のような加速度波形が得られる。しかし、時刻同期が完全に実現されていないため、各チャンネルの位相がずれており正確な振動モード形の同定を行うことができない。そこで、対称一次モードを、各センサにこの周波数の正弦波が共通信号として入力されたものとして考え、時刻同期を行った。ここでは、1ch を基準として時刻補正を行うこととした。

図 3 は、チャンネルごとに時刻補正をしてデータ修正を行った結果である。この時刻補正に基づいて、他の固有振動数に対しても、同様な波形処理を行い、振動モード形の同定を行った。その結果として得られた一例である対称一次モードを図 4 に示す。

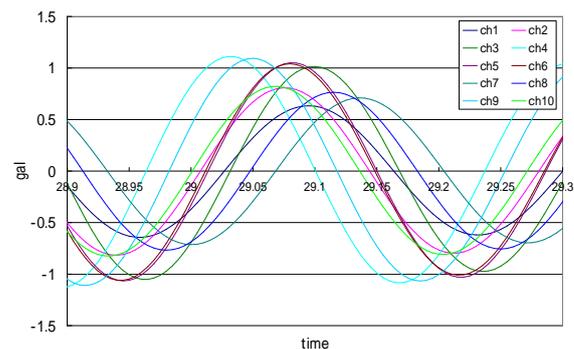


図 2 フィルタリング後の加速度波形(補正前 3.8Hz)

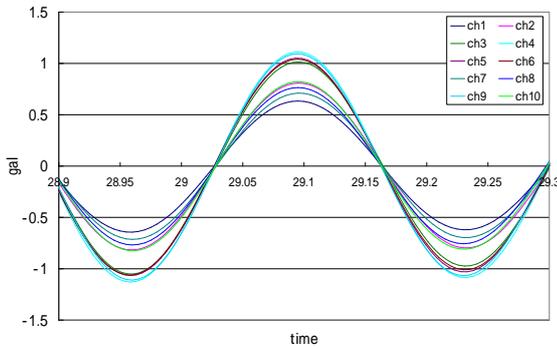


図3 フィルタリング後の加速度波形(補正後 3.8Hz)

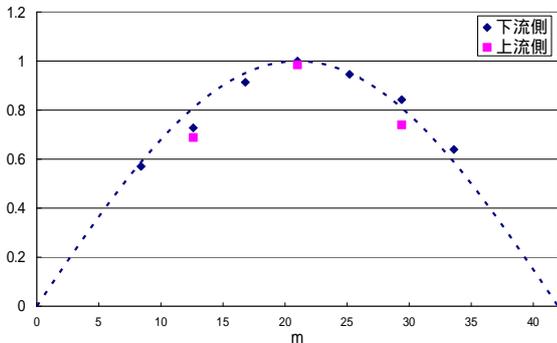


図4 対称一次モードの振動モード形

#### 4. 多点同期計測

橋梁に発生する損傷が動特性に与える影響は明確となっていない。そこで、撤去する橋梁に対して段階的に損傷を与えながら、開発したセンサノードで振動計測を行い、動特性の変化について調べた。

図5に、各損傷ケースに対する逆対称一次モードの固有振動数の推移を示す。損傷を与える度に固有振動数が低下し、最終的には約 0.8Hz の低下が見られた。なお、損傷を片側の下フランジのみに与えていることから、ねじれの無いモードでは、固有振動数は大きく低下していない。また、振動モード形に関しては、計測位置が床板上であることと、計測点数が少ないことから、損傷の有無による有意な変化は確認できなかった。

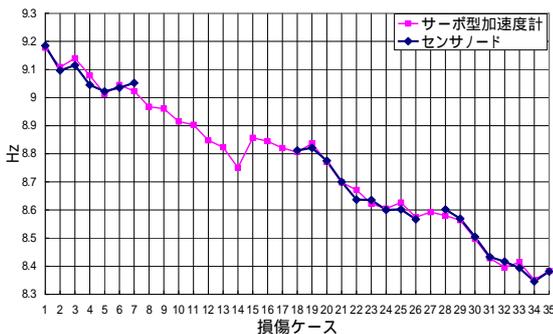


図5 逆対称一次モード固有振動数の損傷ケース変化

#### 5. まとめ

本研究では、橋梁振動モニタリングを容易かつ空間的に高密度で実現するための無線加速度センサノードの開発を行った。開発したセンサノードと既存の有線タイプの高精度加速度計の比較試験を行い、性能の検証を行った。そして、実橋の多点振動計測に適用し、無線通信を利用した同期計測について検討した。最後に、撤去する橋梁に対して損傷を与えながら振動計測を行い、損傷と動特性の関係性を把握した。得られた知見を以下に示す。

1. 開発した無線センサノードは、安価な MEMS 要素技術を用いたものであるにも関わらず、三軸加速度計のデータを 200Hz でサンプリングし、 $\pm 1\text{gal}$  以下の加速度データを MMC/SD カードに長時間記録することが可能である。
2. 無線センサノードと高精度加速度計との比較試験を屋内で実施し、両者は同等の性能を有していることを確認した。また、フィールドにて、センサノードが斜張橋ケーブルの張力計測に、適用可能であることを確認した。
3. 開発したセンサノードを実橋梁の多点同期計測に適用した。ここでは、ノード間の時刻同期が問題となったが、対称一次モードの周波数の正弦波を共通信号として時刻同期を行う方法を開発した。しかし、加速度振幅が小さく、また高次モードになるほど、ノード間に位相のずれがみられており、この修正に関しては今後の課題とする。
4. 開発したセンサノードを用いて段階的に損傷を与えた橋梁の振動計測を行い、損傷に応じた動特性の変化を検出した。その結果、固有振動数には、逆対称一次モードで大きな低下が見られ、振動モード形には損傷に対する形状の変化は見られなかった。このメカニズムの解明については今後の課題とする。

#### 参考文献

- 1) 飛田潤, 福和伸夫, 西沢崇雄: 光ファイバーセンサによる鋼構造試験体の静的・動的柱軸変形の計測, 構造工学論文集 B vol.55 pp577-582
- 2) 吉岡勉, 山口宏樹, 伊藤信, 原田政彦: 鋼トラス橋の振動特性の同定と斜材損傷が及ぼす減衰性能への影響, 構造工学論文集 A vol.55 pp295-208
- 3) 白田幸忠: 既設鋼橋の振動モニタリング手法に関する研究, 長岡技術科学大学修士論文, 2010.3
- 4) 後閑哲也: 基礎入門センサ活用の素, 株式会社技術評論社, 2009.6