

無線センサによる多点同期振動計測と詳細な有限要素モデルを利用した構造性能評価法の開発

東京大学大学院工学系研究科 講師 長山智則

概要：

構造物の寿命・劣化度を推定し効率的に維持管理をするために、また、地震・台風などの大外力作用時の安全性を評価するために、現有性能把握が欠かせない。近年のセンシング技術の発展は目覚ましく、MEMS 技術を利用した無線センサにより構造物の挙動が詳細に把握できるようになりつつある。本研究では助成研究者らが開発している無線センサシステムを利用して橋梁の動的挙動を詳細に計測し、有限要素モデルと比較することで、構造特性を推定する方法を提案した。補強工事が行われる橋梁は構造が変化し、それによる動特性変化も想定されるため、耐震補強橋梁の工事前後でそれぞれ無線センサを使って詳細に多点同期計測を行なった。密なセンサ配置による同期計測を行なったため、固有振動数のみならず、詳細モード形状とそれらの変化が得られた。一方で、有限要素モデルを作成し、モデルと実橋梁の違いを、主にモード形状の観点から比較した。これらが互いに整合的となるようにモデル更新することで支承条件を推定した。

キーワード：無線センサネットワーク、橋梁振動計測、構造性能評価

1. 背景

スマートセンサは、構造物の合理的な維持管理に不可欠な現況把握に有効と期待されている。MEMS 型センサを利用した端末は安価で、また無線通信機能を有するため配線の必要もない。多点同期振動計測が安価で簡易に実現する。牛田ら¹⁾²⁾は高速マルチホップデータ通信アルゴリズムを提案・実装し、長大橋の交通振動を簡易にかつ詳細に把握できることを示した。しかし、実橋梁計測にあたっては桁片側のみを一時的に計測しているに過ぎず、橋梁全体の振動特性の把握や、多点計測に基づいたモデルアップデートには至っていない。実橋梁において無線多点振動計測のデモンストレーションが行えるようになったが、振動特性や構造特性の把握や分析に利用するには至っていない状況と言える。本研究では、無線同期振動計測システムのハードウェア、ソフトウェアにそれぞれ改良を加えた上で、耐震補強前後の橋梁を密に計測し、動特性変化を明らかにし、さらに構造特性を分析する事を目的とした³⁾。

2. 同期振動計測システムの概要

本研究で用いるスマートセンサは MEMSIC 社が販売している研究用無線センサ端末 Imote2(図 1)に基づくもので

ある。Imote2 の起動時作動周波数を 13MHz から 416MHz まで設定可能な CPU と 32MB の SDRAM を搭載している。無線通信には IEEE802. 15. 4 規格の CC2420 を利用している。

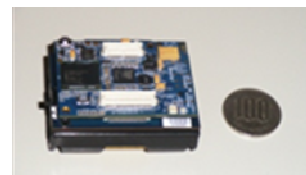


図 1 MEMSIC 社製 Imote2

助成研究者は、これらハードウェア上に、イリノイ大学が中心となり開発が進む計測用オープンソフトウェア ISHMP⁴⁾を組み込み、また独自に開発を進めているマルチホップ通信、データ収集プログラムを実装した。経路作成には AODV プロトコル、同期には FTSP プロトコルをそれぞれカスタマイズしている。3 成分加速度を計測後、基地局に高速マルチホップ転送する仕組みである。加速度計測には STMicroelectronics 社 LIS344 を搭載したセンサボードを使用しており、0. 2mg 程度の振動まで捉えられる性能である。

Imote2 自体は研究開発用端末であり、必ずしも屋外での使用を想定したハードウェアではない。そこでプラス

チックケース、アンテナ、アンテナ用延長同軸ケーブル、ソーラーパネル式充電池を利用して図2のような計測端末を用意した。無線センサではアンテナを端末に直接接続するケースが多いが、橋梁では多数の部材や車両などにより見通しの効かない場所に端末を設置することが多いと考えられる。そこで、同軸ケーブルを介してアンテナの設置位置に自由度を持たせる設計にしている。



図2 Imote2 設置状況

3. 対象橋梁と計測

岩手県内国道 45 号線に架かる逆ランガー橋の槇木沢橋(図3)において耐震補強として、アーチリブや垂直材、下横構に当て板補強がなされた。本耐震補強の前後において、路面とアーチリブ上に計48個のimote2を設置し、交通振動を詳細に計測し(図4)、モード振動数、モード形など動特性の観点から耐震補強前後の変化を調べた。サンプリング周波数は50Hz、1回あたり計測時間は6分である。計測日にはそれぞれセンサ設置に1時間余り、計測に4時間程、撤去に1時間弱を要している。なお、Imote2の計測加速度と比較する目的で、有線サーボ型加速度計(東京測振 CV373)を計6台橋面上に設置している。



図3 槇木沢橋外観

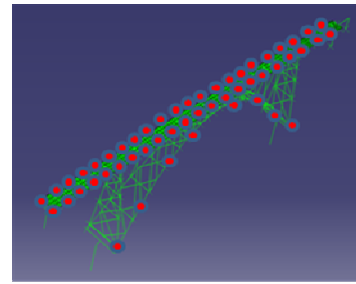


図4 センサ設置位置

4. 計測振動特性

まず、計測精度を分解能の観点から有線加速度計と比較し評価した。振動レベルが小さい場合は計測信号がノイズに埋もれるが、車両走行時の5mg程度の加速度応答は有線センサと無線センサの計測値がほぼ一致する事が確認された(図5)。図6に示すようにパワースペクトルを比較すると卓越周波数の近傍では有線・無線加速度計の値が互いに一致している事がわかる。鉛直方向は6次モードまで、橋軸直角方向では5次モードまでの振動モードが推定できた。有線加速度計はimote2設置位置に合わせて計6台設置しているが、これら6点の計測結果から求めたモード形は、無線計測のモード形に一致している。

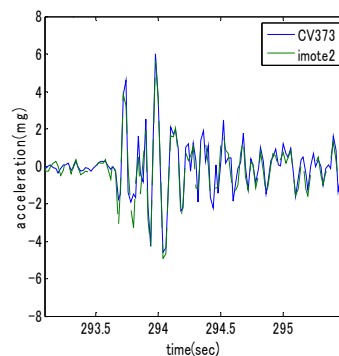


図5 鉛直方向加速度時刻歴

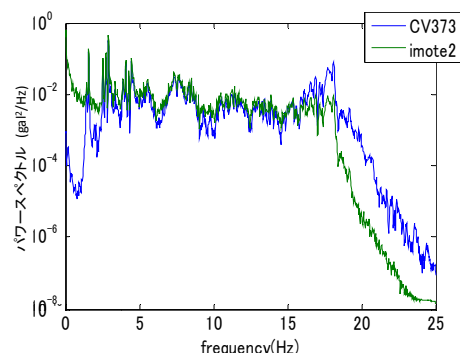


図6 鉛直方向加速度パワースペクトル

実計測による補強前後での比較では、橋軸直角方向の固有振動数の増加、鉛直方向では固有振動数の減少が確認出来た(表1)。前者は耐震補強による剛性の増加、後者

は、重量増加に起因していると推測される。また、橋軸直角方向・鉛直方向それぞれでモード形状を比較したところ、推定誤差もあるものの有意な変化を確認出来た(図 7)。

表 1 FEM と計測から推定された固有振動数 (Hz)

	FEM			実測		
	補強前	補強後	変化(%)	補強前	補強後	変化(%)
鉛直 1 次	1.459	1.385	-5.07	1.44	1.44	0
鉛直 2 次	1.566	1.448	-7.53	1.57	1.51	-3.82
橋直 1 次	0.923	1.026	11.2	0.93	1.03	10.8
橋直 2 次	1.616	1.669	3.3	1.58	1.66	5.1

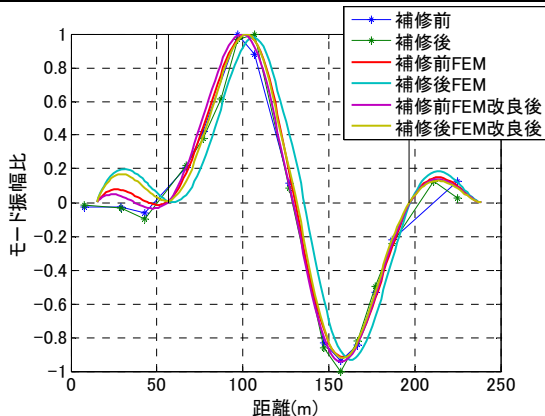


図 7 鉛直 1 次モード形 (計測値と FEM 解析値)

5. FEM と計測データの比較

設計図面を元に対象橋梁を耐震補強前後で有限要素解析し、モード特性の観点から計測値と比較した。図 4 は有限要素モデル上に計測ノードの位置を示したものである。橋軸直角方向は振動数とモード形状およびそれらの変化が実測データとほぼ整合的であることを確認した。一方で、鉛直方向では重量増加により実測同様、FEM においても固有振動数が低下したが、FEM において振動数低下がより顕著であった(表 1)。また、モード形の変化では実測と FEM で定量的に一致する変化と一致しないものが確認できた。例えば、鉛直 1 次モードは、左端(宮古側)からの距離 70-100m 付近のモード形が耐震補強後に右側(久慈側)に移動しているが、FEM でもこの移動が確認された。一方で、130-170m 付近のモード形の移動は FEM でのみ確認された。なお、これらモード形の変化は密に計測を行ったために観測ができた変化と言える。仮に計測点数が数点の場合は、モード形ピークの橋軸方向への移動と鉛直方向の変化を明確に区別できない、とい

ったことが考えられる。

6. FEM アップデート

実測に比べ補強後 FEM の鉛直振動数が低いことから実構造物の剛性が高いと考えられる。ここでは FEM と実橋梁の違いを、支承における境界条件の違いに起因するものと考え、様々な境界条件のもとで再解析した。特に、モード形の変化が、実計測と FEM とで整合的であるように、境界条件を分析した。その結果、宮古側脚下部の支承の回転のみ固定として場合に、固有振動数は計測値に近づき(表 2)、モード形状の詳細変化も一部再現できた(図 4)。

表 2 モデル更新後の固有振動数

補強後	FEM 改良前	FEM 改良後	実測
鉛直 1 次	1.385	1.402	1.44
鉛直 2 次	1.448	1.5326	1.51

7. まとめ

スマートセンサを利用して、実橋梁を耐震補強前後で密に振動計測し、振動挙動を詳細に把握した。さらに、計測値と FEM と比較することで違いを明らかにし、振動数に加えて詳細モード形も基準としてモデルアップデートを試みた。FEM のより詳細な検討と計測誤差の分析が必要であるものの、密な計測を利用することで、構造物のより精緻なモデル化ができることを示した。

謝辞 本計測は、東北地方整備局・三陸国道事務所のご厚意により実施することができました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 牛田満士: スマートセンサを用いた多点同期振動計測のためのマルチホップ通信システムの開発と橋梁での実測, 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻修士論文, (2009.3)
- 2) Nagayama, T. and Spencer, Jr., B. E.: Structural health monitoring using smart sensors. Newmark Structural Engineering Laboratory Report Series 001 <http://hdl.handle.net/2142/3521>, 2007
- 漆島亮彦, 長山智則, 藤野陽三, 宮下剛, 吉岡勉, 家入正隆: スマートセンサによる橋梁振動の多点計測と詳細分析～耐震補強前後の比較を通して～, 第 66 回土木学会年次学術講演会講演集, 2011
- 3) Illinois Structural Health Monitoring Project <http://shm.cs.uiuc.edu/>