

(13) 構造物に適応した無線センサシステム 茨城県引田橋梁での長期実証試験

権島 勝¹・齋藤 修²・永田 伸二³

¹正会員 茨城大学 理工学研究科 情報・システム科学専攻
(〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)
E-mail: m-kabashima@keisokukensa.co.jp

²正会員 茨城大学特命教授 工学部 ICT グローカル教育研究センター副センター長
工学部附属教育研究センター (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)
E-mail: osamu.saitou.4117@vc.ibaraki.ac.jp

³非会員 計測検査(株) (〒811-0821 福岡県北九州市八幡西区陣原 1-8-3)
E-mail: s-nagata@keisokukensa.co.jp

大規模災害の直後に橋脚の健全度を遠隔で評価するためのシステムを設計・開発した。その特徴は、省電力性能に優れた MEMS 型アナログ出力加速度センサと低速であるが高分解能な $\Delta\Sigma$ 型 AD 変換器を用いて必要な分解能を得ていること、複数の加速度センサを並列に接続することによって暗ノイズレベルを低減していること、これらの高分解能と低ノイズレベルによって打撃に利用する通行車両の通過から十分に時間が経過した後の微小振動までの計測が可能になったこと、バッテリー駆動の同期型無線センサが 3 年以上の待機時間を有すること、1~2ms 以内の精度で時刻同期した複数の加速度センサを橋脚に設置することによって、固有振動数のみならず振動モードの測定も可能となっていることである。

Key Words: Structural Health Monitoring , wireless MEMS sensor, natural vibration mode waveform measurement synchronization

1. はじめに

橋梁において橋脚や支承や床板などの各部材でのモニタリングが様々な手法やシステムで行われている¹⁾。本研究では、地震や水害時などに被災した橋梁の状態を災害後に速やかに把握するために役立つことを目指して、橋脚の固有振動数と振動モードを遠隔で測定できるシステムを設計・開発する。

その全体像は図-1 に示される。遠隔地の事務所から遠隔で測定を行うため FOMA 回線を利用して、現地橋梁に設置された親機にあたるデータ収集装置を用いて各センサを制御する。加速度センサは、橋脚の鉛直方向に対し上部、中部、下部の 3 箇所を設置する。振動モードを測定するためにセンサ間の時刻同期を図った上で、通行車両による加振をトリガーセンサで検出して、各センサで測定される加速度波形を収集する。

通行車両による加振を前提としているため、加振直後の波形では車両の振動特性が支配的である。橋脚の自然振動は、車両が通過して十分に時間が経過したのちに現

れる。そのときの振動の振幅は微小になってしまうため、ノイズレベルが低く、分解能が高いセンサが必要になる。この要求を満たすため、省電力な MEMS 型の加速度センサを採用しつつ、暗ノイズレベルを低減し、高い分解能を有する加速度計測回路を設計した。

1 つの無線センサあたりの待機時の消費電流は 270 μ A である。これによってバッテリー駆動でも長期間の待機が可能になっている。

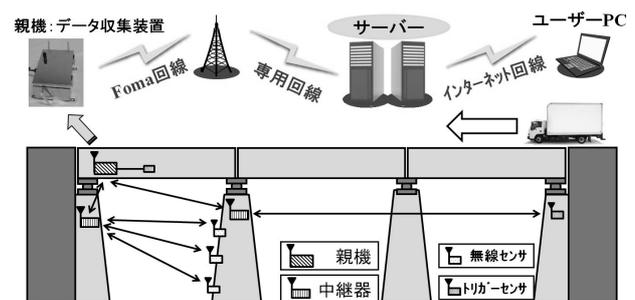


図-1 システム構成の例

2. 要求仕様と設計

(1) 対象と目的

橋脚を対象とし、大規模災害が起きた直後に、損傷の程度を遠隔で評価できる遠隔モニタリングを目的とする。大規模な水害や地震によって、橋梁は洗掘やひび割れなどの損傷を受けることがある。橋梁の損傷の程度を即座に評価することは、交通規制などの応急対策を迅速に指示するためにも、現地での本格的な確認作業を損傷の程度に応じて優先的・効率的に進めるためにも重要である。

(2) 健全度の評価指標

損傷の程度あるいは健全度の評価は、災害前に測定した健全度指標を健全時データとしておき、災害後に測定した健全度指標と比較することによって行われる。健全度の指標として、以下の2つを採用する。

①固有振動数：振動加速度波形を周波数分析して得られる周波数スペクトルで最大値をとる固有振動数の値。健全時の固有振動数の値に比べて災害後に固有振動数がどの程度低下したかの度合いを見る²³⁾

②振動モード：振動加速度波形を2重積分して得られる変異波形の固有振動数での振幅を表す振動モード図。健全時のモード形状と比較して災害後にモード形状がどの程度変化したかの度合いを見る。モード形状から被災部位を推定することもできる²³⁾。

固有振動数、振動モードの変状の度合いは、被災時に橋梁が洗掘された状態や、ひび割れなどの異常の発生を判定する方法としてとして利用されている。この判定方法は、橋脚の健全度診断に関して阪神淡路大震災の際に被災した東海道新幹線橋脚の補強対策後の供用開始可否判定の際に運輸省（当時）から公認された方法である⁴⁾。

(3) 要求分析

大規模な災害では、被災した橋梁は広範囲に多数分布するので、健全度の評価は通信ネットワークを通じた遠隔操作によって行わざるを得ない。災害がいつ起きても即座に稼働できるように、遠隔モニタリングシステムは、長期に渡ってスタンバイしていなければならない。振動モード図を得るためには、1つの橋脚に複数の加速度センサを設置し、相互に同期した時刻で振動波形を測定しなければならない。本格的な測定における加振には重錘による打撃が用いられるが、遠隔で行うためには通行車両による加振を用いなければならない。

これらの要求を満たすように、システム全体は図-1に示される構成とする。橋台に親機を1つ置く。親機の電源はバッテリーバックアップされた商用電源とする。親機は、携帯電話ネットワークを通じて遠隔のPCと通信するとともに、無線中継器を通じてトリガーセンサ及

び無線センサと2.4GHz帯の通信プロトコルIEEE804.15.4で通信する。トリガーセンサは通行車両による加振のタイミングを検出するために用いられる。振動モード図を得るために、橋脚あたり3つの無線センサーを設置する。中継器、トリガーセンサ、無線センサは、橋脚に設置するためバッテリー駆動とする。これらは、省電力化のために、スリープ状態での待機を常態とし、10分間に1度だけウェイクアップして親機または中継器からの計測開始の指令が出ているかどうかを確認して再びスリープするように運用される。1ヶ月に1度の計測をする場合にバッテリーの交換なしで1年以上稼働することが求められる。計測時には、親機との通信によってセンサの時刻を同期する。以上の構成をとれば、性能に関する要求仕様は、バッテリー寿命に関わる省電力性能に限られる。

これとは別に、計測対象と計測目的によってセンサ性能への要求を検討しなければならない。固有振動数の測定には、構造物に特有な低周波で微小な振動の計測が要求される。構造物は、概ね振動周波数50Hz以下で揺れることが多いため、サンプリング周波数は200Hzで十分である。時刻同期の精度は1サンプル間隔が5msであるので、2.5ms以内とすれば十分であると考えられる。

他方、波形の振幅の計測精度については高い要求がある。通行車両による加振を前提としているため、加振直後の波形は、車両と橋梁を合成した系の振動を表しており、むしろ車両の振動特性が支配的である。橋脚の自然振動は、車両が通過して十分に時間が経過したのちに現れる。そのときの振動は1gal程度まで微小になってしまうため、ノイズレベルが低く、分解能が高いセンサが必要になる。目標値としては、ノイズレベル0.1gal-rms以下、分解能0.1gal以下となる。

(4) 設計

システム全体は、既に図-1の構成として設計された。省電力なMEMS型の加速度センサを採用する。一般的なMEMS型の加速度センサは、5mm角程度の小ささで、基板に直接実装できるためセンサモジュール自体を小型・省電力にできる。また、無線モジュールと合わせて量産すれば安価に製作できる。MEMS型の加速度センサにはデジタルデータを直接出力するものが多い。16bitデータ出力では分解能が粗いため、微小な振動の検知に向かない。また、低ノイズや20bit出力のセンサもあるがコストが高く、アンチエイリアスフィルタをデジタル計算で行わなければならないため省電力化に反する。アナログ出力タイプのMEMS型加速度センサを採用することによって、自由なシグナルパスの設計が可能である。AD変換前にカットオフ周波数50Hz、カットオフ特性-24dB/octのアナログ・アンチエイリアスフィルタをかけて、エイリアシングの防止、不要な高周波成分の低減

を図る。AD変換には、低周波帯域で高い分解能を示す24bit $\Delta \Sigma$ 型AD変換器を採用する。

省電力性能に優れたMEMSセンサであるが、高価なセンサに比べて内部ノイズが多い傾向にある。この問題を解決するため、複数のセンサを並列に接続して出力信号を加算することによるSN比の向上を図った。N個のセンサを用いるとノイズレベルは $1/\sqrt{N}$ となる。今回はセンサを3個使用してノイズの低減を行った、ノイズは0.577倍に低減されることが期待できる。図-2は単一の加速度センサを用いた場合の暗振動波形であり、図-3は3個の加速度センサを並列接続した場合の暗振動波形である。振動がない環境で測定するのが理想だが、現実的に困難なため振動の少ない環境で行ったが、地盤や建物の振動を多少受けている。ノイズレベルは、ピーク値で0.25gal以上から0.15gal程度へ低減できた。表-4は、構造物において主な関心となる振動周波数でありデバイスの評価で用いられる0.1~10Hzの範囲で暗振動波形にバンドパスフィルターをかけて10分間の実効値を計算した結果で比較している⁵⁾。ノイズレベルが0.6倍程度に、絶対値としては0.1gal-rms程度に低減されていることがわかる。Z軸が他軸よりノイズが多い傾向にあるのはMEMSの構造的な仕様のためである。より多くのMEMSセンサを並列に接続すれば低減率の向上は期待できる。例として、4個で0.5倍、9個で0.333倍、16個で0.25倍に低減できるが、実装面積が大きくなるため小型化と省電力に反し、製造コストにも影響する。

センサのモジュールは、スリープ時にMEMSセンサやAD変換器などの電源を切っており、マイクロコントローラとRF通信モジュールは、合わせて100 μ A以下のスリープ時電流で待機している。10分間に1秒以下の断続的な時間内に100mA程度の消費電流でウェイクアップして計測指令があるかどうかを確認する。その消費電流を10分間に均すと170 μ A程度となる。これらを合わせた270 μ Aの平均消費電流で待機を続ければ、8500mAhのバッテリーで3.7年間待機できることになる。実際に災害が起きた直後に、振動波形の測定を行うときには、通行車両の通過を見張っていなければならないので多くの電力を消費する。

時刻同期の精度を検証するために、センサを取り付けた橋脚を打撃して測定された波形の時間ずれを評価したところ、1~2ms以内に収まっていた。図-5に各センサごとの加速度の波形の立ち上がりを示す。

3. 実証試験と分析結果

2014年から茨城県管轄の引田橋を対象として長期モニタリングの実証試験を開始した。橋梁の全景を図-6

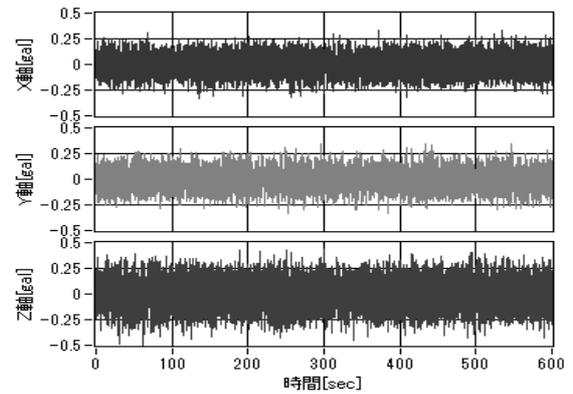


図-2 MEMSセンサ単一でのノイズ波形

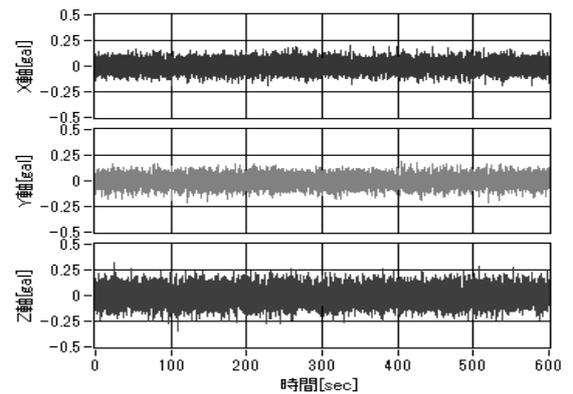


図-3 MEMSセンサ3個でのノイズ波形

表-4 各軸波形の実効値と低減率の結果

軸	1個の実効値 [gal-rms]	3個の実効値 [gal-rms]	低減率
X軸	0.0859	0.0498	0.580
Y軸	0.0857	0.0488	0.569
Z軸	0.119	0.0732	0.614

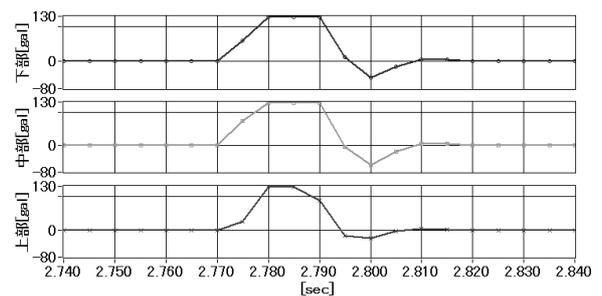


図-5 各センサ同期波形



図-6 茨城県管轄 引田橋梁 全景

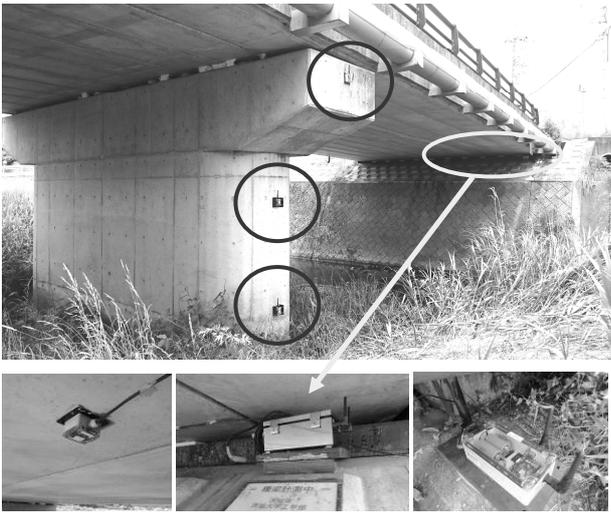


図-7 橋脚に無線センサを3台設置(上)
トリガーセンサ(左下), 親機(下中央), 中継器(右下)

に示す。この橋梁は、2004年度竣工の2径間中空床板橋である。橋脚の下流側に3台の加速度センサ、橋台側に親機と中継器、橋台近くの床板にトリガーセンサを設置した。機器の構成を図-7に示す。大型車両が橋梁に接近して通行が開始されると加振の大きさをトリガーセンサで検出して、親機に当たるデータ収集装置から中継器を通じて各センサでの測定を同時に開始させる。複数回の測定データを重ね合わせた波形を解析して得られた橋軸直角方向の周波数スペクトルを図-8に示す。図-8よりピークに対応する固有振動数は、12.7Hz(2014年9月)と12.5Hz(2018年6月)でほぼ変わらないことがわかる。図-9は、固有振動数付近の周波数成分だけをバンドパスフィルタで抽出したのち、2重積分を行って得た変位波形における自由振動時の振動モード図である。振動モード図は、逆ハの字で立っている状態に近く大きく折れてはいない。これらより、橋脚において実証試験開始時点と2018年6月時点では、大きな変化はないことが分かる。

加振方法が、重錘による加振でなく車両通行による加振であるため、橋梁上での車両通行方向や台数、走行条件に左右されることがあるが、自由振動のデータであれば1つのデータでも十分に分析は可能であった。

4. 結論

大規模災害の直後に橋脚の健全度を遠隔で評価することを目的とするシステムとして、以下の特徴をもつシステムを設計・開発した。省電力性能に優れたMEMS型アナログ出力加速度センサと低速であるが高分解能な $\Delta\Sigma$ 型

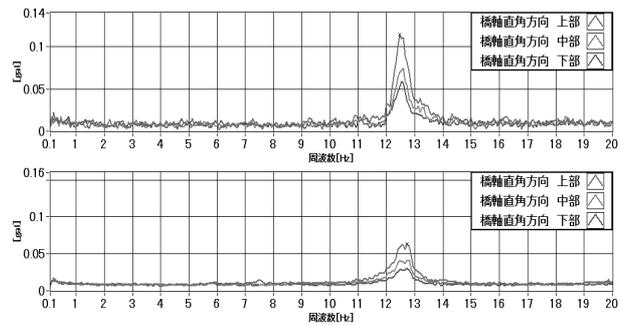


図-8 スペクトル波形 2014年9月(上), 2018年6月(下)

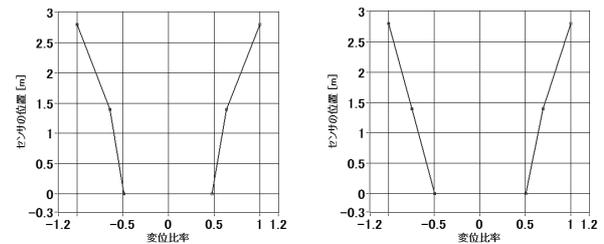


図-9 振動モード図 2014年9月(左), 2018年6月(右)

AD変換器を用いて必要な分解能を達成した。複数の加速度センサを並列に接続することによって暗ノイズレベルを低減している。これらの高分解能と低ノイズレベルによって打撃に利用する通行車両の通過から十分に時間が経過した後の微小振動の計測が可能になった。バッテリー駆動の無線センサは3年以上の待機時間を有する。1~2ms以内の精度で時刻同期した複数の加速度センサを橋脚に設置することによって、固有振動数のみならず振動モードの測定も可能となっている。茨城県常陸大宮市の玉川にかかる引田橋に設置した実証サイトで実験を継続中である。

参考文献

- 1) 西村正三, 木本啓介, 松岡のどか, 大谷仁志, 緒方宇大, 松田浩: 橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価, 応用測量論文集, JAST Vol.24, pp.52-61, 2013.
- 2) 関雅樹, 西村昭彦, 丸山泉, 中野聡: ラーメン高架橋の健全度評価の一手法, 地震工学研究発表会講演論文集, 24巻, pp.373-367, 1997.4.
- 3) 関雅樹, 田中宏昌, 堤要二, 山下和敏, 中野聡, 西村昭彦: 鉄道橋の固有振動数に着目した洪水時の安全管理システム, 土木学会論文集, No. 686/VI-52, pp.79-89, 2001.9.
- 4) 丸山泉: 橋梁モニタリングシステムの実橋試験, 日本工業出版 計測技術, 第42巻第1号, pp.31-38, 2014.1.
- 5) アナログ・デバイセズ著(電子回路技術研究会訳): CQ出版 OPアンプ大全 OPアンプの歴史と回路技術の基礎知識, 第1巻, pp.191-206, 2002.