

無線加速度センサーを用いた 橋梁モニタリングシステムの実証実験

野崎 正典 柳原 健太郎
福井 潔

近年、高度成長期以降に整備したインフラの急速な老朽化が社会的な課題となっている¹⁾。そのため、定期的な巡視や点検によるインフラの健全度を把握することに加え、予防保全や危機予測によるインフラの長寿命化が要望されている。橋梁やトンネルなどのインフラの従来の点検方法は、人手による目視や打音検査が主であったが、人員不足や検査精度の観点からセンサー技術や通信技術を活用したモニタリングシステムが注目されている。

そこでOKIは、以前より取り組んでいる920MHz帯無線を用いた電池駆動可能な無線マルチホップ技術²⁾³⁾と、センサー技術を組み合わせることで、構造物の振動データを収集し、その振動データから構造物の劣化状況を分析する無線モニタリングシステムを開発した⁴⁾。

本稿では、OKIが参加しているモニタリングシステム技術研究組合での活動内容について、輪荷重走行試験機を用いた室内実験や、実橋を用いたフィールド実験結果を報告する。

モニタリングシステム技術研究組合

モニタリングシステム技術研究組合RAIMS(Research Association for Infrastructure Monitoring System)は、道路・高速道路の管理者、ゼネコン、建設コンサルタント、電気・通信メーカー、センサー・設備メーカーなどの各分野の14団体が加盟し平成26年10月に設立された⁵⁾。RAIMSではインフラモニタリングシステムの早期実現に向けて、以下の取組みを平成26年から平成30年までの5ヵ年計画で実施している。

- (1) 管理者ニーズの把握によるモニタリングシステムの要求性能の明確化
- (2) 構造物の各劣化機構を踏まえたモニタリング技術の適用性検証
- (3) 計測技術、通信技術、データ分析、評価技術を組み合わせたモニタリングシステムの現場実証
- (4) モニタリングシステムの基準化・標準化に向けたガイドライン(案)の提案

RAIMSでは、いくつかのWG(Working Group)毎に活動しており、主に橋梁におけるモニタリングシステムの検討

を進めている。WG1では、道路管理者と建設コンサルが主体となって管理者ニーズを取りまとめ、WG2およびWG3では、ゼネコン、電気・通信メーカー、センサー・設備メーカーが主体となって、室内試験によるモニタリング技術の検証や、実橋を用いた現場実証実験などを行っている。WG1ではインフラの維持管理を「点検」「診断」「措置(補修・補強)」「記録」のステージに分類し、それぞれのステージに適したモニタリング機能を定義している。WG2の活動としては、山口大学で輪荷重走行試験機を用いた室内実験を、WG3の活動としては、富山県及び福島県の橋梁を用いた実証実験を行っている。

無線モニタリングシステム構成

インフラモニタリングシステムを構成する要素技術は、以下の3つの技術領域に分類することができる。

(1) センサー技術

例) 振動センサー、たわみ/変位計、画像センサー、光ファイバーセンサー、腐食センサー、AE(Acoustic Emission)センサー etc

(2) 伝送技術

例) 有線通信(光ファイバー、Ethernet,RS485 etc)、無線通信(路車間通信、マルチホップ通信、LTE/LPWA etc)

(3) データ分析技術

例) 短期的な集中診断、中長期的なモニタリング、異常時の警告発信 etc

振動センサーは、構造物の固有振動数や共振周波数の測定に、光ファイバーセンサーや画像センサーは、構造物表面のひび割れ量の測定に、腐食センサーは構造物内の塩分量の測定に用いられる。これらセンサーは床版や橋桁などに設置されることが多いが、通常それらの設置所には電源が敷設されていない。そのため導入コスト低減のためには、電源敷設工事を必要としない電池駆動可能なセンサーが要望されている。また、センサーデータの伝送も同様に、伝送ケーブルの敷設を必要としない無線通信が設置コストの観点で好ましい。これらの要件を踏まえて、今回我々が開発した無線モニタリングシステムの構成を

図1に、無線加速度センサー装置の仕様諸元を表1に示す。

本システムの特徴は、加速度センサーを内蔵した無線モジュールを用いて電池駆動のマルチホップ通信環境を実現している点である。これにより一日に数回程度の加速度データの送信であれば、電池駆動で5年以上の連続動作を実現している。システム全体では、携帯電話回線を用いて遠隔からのデータ収集を可能とするゲートウェイと、センサーデータの保存や分析/解析するためのサーバーと、無線装置の設定やセンサー情報を地図上に表示する監視端末などから構成される。

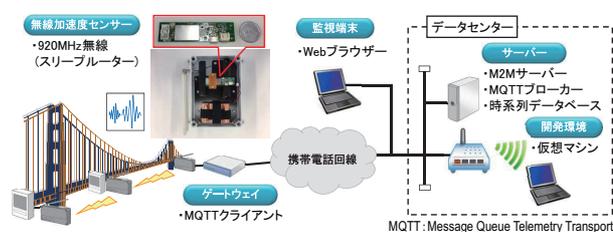


図1 無線モニタリングシステムの構成

表1 無線加速度センサー装置の仕様諸元

項目	仕様	備考
無線周波数	922.3~928.1MHz	ARIBSTD-T108準拠
PHY/MAC層	IEEE802.15.4g準拠	
NWK層	OKI独自方式(スリープルーター方式)	
送信出力	最大:20mW	
伝送レート	100kbps	
アンテナ	スリープアンテナorフィルムアンテナ	
サイズ	18mmx70mm(モジュールのみ)	
電源	円筒形二酸化マンガンリチウム電池(CR17450)2or4本	電池容量:2500mAh(3V)

床版劣化の室内実験

前述した無線モニタリングシステムを用いて、輪荷重走行試験機による床版の劣化加速実験を行った。輪荷重走行試験機とは、車輪により荷重を負荷する装置であり、本実験では89kN~100kNの静的荷重および移動荷重試験を行った。輪荷重走行試験機と床版裏に設置したセンサーを写真1に示す。本試験では、輪荷重走行試験機の試験スケジュールに合わせて、サーバーから起動コマンドを送信し、必要な時間帯のみ加速度データを収集した。これによりデータ送信量を削減し、電池消費量を抑えることが可能となる。



写真1 輪荷重走行試験機と無線加速度センサー

移動荷重試験の5往復時の加速度データの時系列波形の結果の一例を図2に示す。

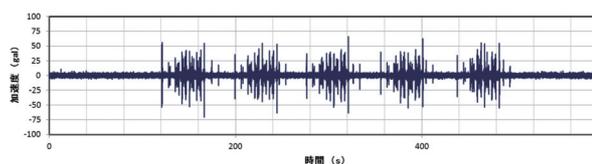


図2 移動荷重試験の加速度波形の一例

輪荷重走行試験機を用いた試験を約二ヵ月間にわたって実施し、最終的に床版表面の剥離や、床版端部の抜け落ちが発生するまで約4万回の荷重を行った。この時の様子を写真2に示す。



写真2 試験終了後の床版の様子

次に試験終了までに取得した振動データの周波数解析を行い、周波数スペクトルの時間変化を算出した。周波数解析には高速フーリエ変換と非定常スペクトル解析手法を用いた。非定常スペクトル解析の結果を図3に示す。図の横軸は振動周波数を縦軸は正規化したスペクトルを示している。上図では、いくつかのピーク周波数が見られ、実験開始時の7/8の時点では、1次モードが18Hz付近、2次モードが29Hz付近、3次モードが43Hz付近であった。その後、荷重試験が進むにつれてピーク周波数が低周波数域に変化しており、特に3次モードのピーク周波数は8/12(荷重延べ回数:3万回)の時点では30Hz付近までシフトしている。さらに下図では3次モードと2次モードが結合している様子が分かる。実際、この日を境に床版表面の剥離や抜け落ちの傾向が明瞭となっていた。

以上の結果より、床版に設置した加速度データを収集し、そのスペクトルの形状変化を観測することで床版の損傷状態を検出可能なことが分かった。

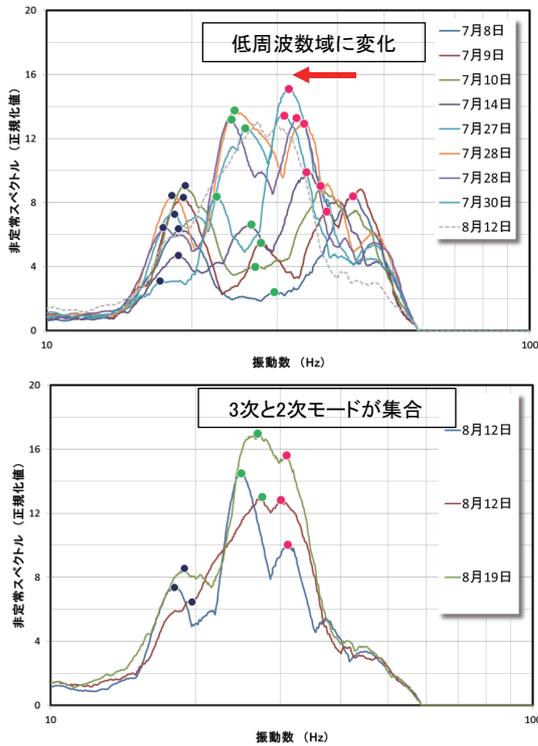


図3 周波数解析の結果

実橋での床版モニタリング実験

次に走行車両による振動データの収集や設置場所の違い、環境変化に対するセンサーの耐久性評価などを目的として、実橋での実証実験を行った。橋梁の外観と床版への設置の様子を図4に示す。

橋梁名	東北自動車道 大森川橋(福島市内)
構造形式	鋼合成単純鈹桁橋
竣工年	昭和50年(供用41年)
橋長	36.30m
幅員	10.75m
床版形式	RC床版



図4 大森川橋の外観とセンサー設置の様子

センサーは床版2カ所、主桁2カ所の合計4カ所に、ゲートウェイは検査路の外側手すりに設置した。なお、床版とは車両が走行するコンクリートの床板であり、主桁とは橋の荷重を支える水平方向に渡した桁である。

センサーの設定は、サンプリング周波数を100Hzとし、夜間、早朝、日中と測定する時間帯を変えて、センサーあたり120分/日の加速度データを収集した。収集したデータの時間毎の周波数解析結果を図5に示す。データは2016年11月に取得した全データの平均から算出しており、夜間の1:00~2:00にかけての振幅スペクトルが大きいことが分かる。これは振動の発生源である走行車両の車両重量が重いことを示しており、日中と比べて夜間の方がトラックなどの大型車両の比率が高いものと思われる。

また一か月間のデータの平均から固有振動数を算出すると、1次モード:3.91Hz、2次モード:10.16Hz、3次モード:15.63Hzと各時間帯においても同じ値となることが分かった。さらに、その後のデータ分析の結果では、各モードの固有振動数に変化は見られなかったため、床版の異常が発生していないものと思われる。

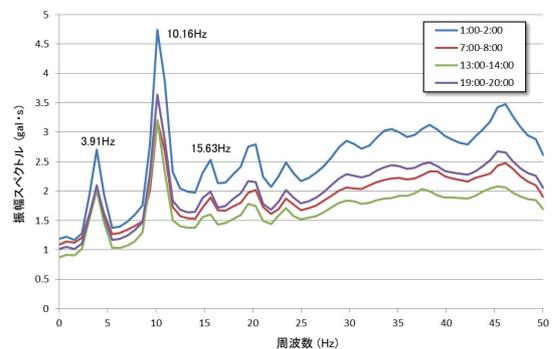


図5 周波数解析の結果

実橋での主桁モニタリング実験

次に老朽化した主桁の振動特性の測定や、劣化したコンクリートへのセンサー機器の設置方法の検討などを目的として、実橋での実証実験を行った。橋梁の外観と主桁への設置の様子を図6に示す。

橋梁名	五福4号橋(富山市内)
構造形式	RCT桁橋
竣工年	昭和2年(供用89年)
橋長	12.7m
幅員	6.1m
備考	平成28年9月に架け替えのため撤去済



図6 五福4号橋の外観とセンサー設置の様子

センサーは主桁の3カ所に設置し、ゲートウェイは橋梁付近に仮設したプレハブ小屋に設置した。主桁の表面は、コンクリートの剥離が見られたため、ポリマーセメントモルタルを表面に塗布し、硬化後にアンカーボルトで主桁に固定した。本橋梁は高速道路と異なり交通量が少ないため、一般走行車両ではなく重量車両を持ち込んで、静的載荷、車両走行、衝撃加振などの試験を行った。車両走行試験は、10tトラックに砕石10tを積載した試験車両を一定速度（30km/h）で走行させて主桁の振動特性を測定した。測定結果を図7に示す。

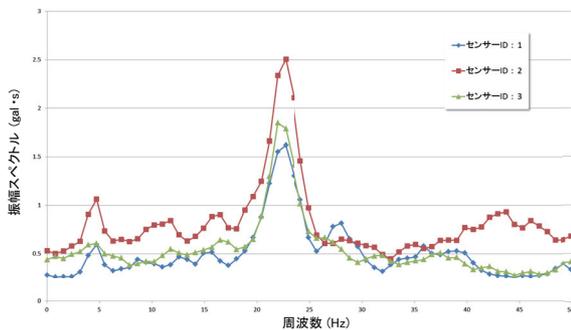


図7 走行車両試験時の周波数分析結果

それぞれのセンサーにおいて、22Hz付近で周波数ピークが見られた。他試験でも試行回数が少ない場合は、ピーク周波数にばらつきが見られたが、全振動データの平均値からピーク周波数を求めることで、固有振動数を算出することが可能であった。次に主桁内部の主鉄筋を切断していき、約7tの錘を加振することで、腐食による鉄筋破断を模擬する試験を行った。鉄筋切断前と鉄筋切断後のピーク周波数の出現率を比較した結果を図8に示す。図より鉄筋切断後はピーク周波数のばらつきが大きくなっており、特に高周波領域に出現する傾向があることが分かる。これは鉄筋切断により橋梁の剛性や構造が変化しているためだと思われる。以上の結果より、主桁の振動データをモニタリングすることで、主桁の異常検出が可能になったことが分かった。

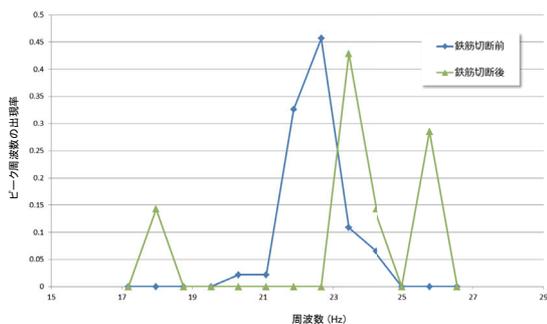


図8 鉄筋切断前後の比較

まとめ

無線加速度センサーを用いたモニタリングシステムを開発し、RAIMSでの実証実験結果から橋梁モニタリングにおける有効性について述べた。

今後もRAIMSでの活動を通じて、様々な橋梁での実証実験を継続し、自治体や道路管理者のニーズを反映したより実用的なシステム開発を目指す。

謝辞

本研究の一部は、内閣府のSIP/インフラ維持管理・更新・マネジメント技術の一環として国土交通省が実施する「社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発」委託事業研究の成果です。◆◆

参考文献

- 1) 国土交通省：インフラ長寿命化基本計画、2013年11月
- 2) 久保、中嶋、野崎：バッテリー駆動無線センサネットワークにおける低遅延省電力マルチホップ技術、OKIテクニカルレビュー No218、2011年10月
- 3) SmartHop SRシリーズ <https://www.oki.com/jp/920M/sr/>
- 4) 野崎、久保、西川、福井：無線マルチホップ通信技術を用いた社会インフラモニタリングシステム、OKIテクニカルレビュー No226、2015年12月
- 5) RAIMS <http://www.raims.or.jp/>

筆者紹介

野崎正典：Masanori Nozaki. 情報・技術本部 研究開発センター スマートネットワーク技術研究開発部

柳原健太郎：Kentarō Ynagihara. 情報・技術本部 研究開発センター スマートネットワーク技術研究開発部

福井潔：Kiyoshi Fukui. 情報・技術本部 研究開発センター スマートネットワーク技術研究開発部