

氏名	樺島 勝
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	乙博理工 82 号
学位授与年月日	令和 4 年 3 月 2 3 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
学位論文題目	橋梁健全度の遠隔診断システムのための省電力・高精度無線センサの開発と 長期運用による性能検証
審査会	委員長 羽瀧 裕真 桑原 祐史 鎌田 賢 岡本 秀輔

## 論文内容の要旨

小規模な劣化を定期的な点検で発見して早期に修繕する予防保全によって橋梁を比較的低コストで長寿命化することが標準的になっている。これに加えて、大規模災害の直後には、二次災害防止および救難経路確保の観点から、迅速に橋脚の健全度を診断しなければならない。大規模災害では多くの橋梁が同時に被災する一方、橋梁点検者の人数は限られているので、無線通信を介して健全度の初期診断を行う遠隔診断システムが求められる。

橋脚の固有振動数と振動モードは、阪神大震災後の橋脚の健全度評価で実績のある健全度評価指標である。振動モードを測定するためには、各橋脚に時刻同期した複数の加速度センサを設置しなければならない。設置の自由度のためにセンサ間の通信には無線が有利である。このような加速度型無線センサは、いつ起きるか分からない災害に備えて、電池駆動で長期間待機可能な省電力性が求められる。橋梁を振動させる外力として本格的な加振機は常設できないため、通行車両による加振を用いることが現実的である。このとき、橋梁の振動は数 gal にも満たない微小振動となるため、加速度センサには高い精度が求められる。

本研究では、省電力性能に優れた MEMS 型アナログ出力加速度計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達成し、複数の加速度計を並列に接続することによって低ノイズレベルを達成する無線センサを開発した。この無線センサを 1~2ms 以内の精度で時刻同期させ、3 年以上の待機時間を有する電池を組み込んで、各橋脚に 3 台設置することによって、固有振動数と振動モードによる橋梁の健全度診断システムを構築した。長期間の待機後でも確実に稼働できるように、システムは使用可能温度範囲が  $-20^{\circ}\text{C} \sim 75^{\circ}\text{C}$  以上の電子部品で構成し、特に無線センサは長時間の水没にも耐えられるように密閉して耐久性を確保した。

本システムの耐久性と性能は、常陸大宮市の引田橋での 4 年間に渡る長期運用によって検証した。2014 年 6 月の設置後 4 年経過してもシステムが損傷せずに稼働することが確認された。実運用で想定される待機時間に比べて頻繁に試験測定を行なったため、電池は 1 年ごとに交換したが、電池の消耗度には問題がなかった。2014 年 9 月と 2018 年 6 月の測定において、橋脚の固有振動数と振動モードが安定的に測定できた。固有振動数は、加振の役割を担う通行車両の種類や数によらず、軽自動車による加振でも安定的に検出できた。橋脚の固有振動の振幅は、小さいながらも測定期間を通して継続的に存在するため、スペクトル解析の結果において他の周波数成分に埋もれずに現れていると考えられる。これを可能にしているのが、本研究で特に工夫した高分解能・低ノイズレベルの加速度計測回路である。

本システムは、大規模災害の直後に橋脚の健全度を遠隔で迅速に評価することを可能にするため、危険箇所の早期閉鎖、安全箇所の早期再開に役立ち、以って、災害からの復旧活動の効率化に貢献できる。さらに、本システムは、そのまま平時の定期点検でも利用可能であるので、点検作業の省力化に役立ち、また、橋梁の長寿命化のためのモニタリングにも応用可能である。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、橋梁の安全性を担保するために様々な研究が進められている橋梁の点検手法の研究分野に関する文献を適切に引用しながら、研究分野の歴史的発展経緯をまとめた上で、大規模災害の直後に多数の中小橋梁の橋脚の健全度を迅速に診断することを可能にする遠隔診断システムを新たな研究対象として取り上げ、その設計・実装・評価を示している。

このシステムの特徴は、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。新規性は、システム全体の設計、特に工夫を要した加速度センサの要素技術開発、4年間の長期運用での性能・耐久性の実証にある。

研究方法として、システム全体およびサブシステムの設計は、実用のための要件定義から要求仕様の分析を経て方式設計へと論理的に展開されており、実装および実験で用いた装置、測定条件、測定データは明示されている。測定データに基づく考察によって、本システムが大規模災害の直後に橋脚の健全度を遠隔で迅速に評価することを可能にすることを実証している。

本システムの社会的な効果が、大規模災害後の危険箇所の早期閉鎖ならびに安全箇所の早期再開に役立ち、以って災害からの復旧活動の効率化に貢献できること、さらに、そのまま平時の定期点検に利用した場合に点検作業の省力化に役立ち、橋梁の長寿命化のためのモニタリングにも応用可能であることが示されている。

本論文の主たる内容は、学術誌論文1編に発表されている。また、最終試験における口頭試問により、当該分野における十分な知識を有していることが認められた。以上を総合して、当審査委員会会は、本論文が博士学位論文の評価基準を満たしていると判断し、合格と判定した。

最終試験までの経緯としては、12月10日に開催したオンラインの公聴会に研究科外審査員を含む全審査員が出席し、結果に基づき各審査員が審査報告書を作成した。同日に各審査報告書に基づき審査会および最終試験を行った。