

## 論文の要旨

### 題目：無線 MEMS 加速度センサを活用した既存構造物の診断技術の確立に関する研究 (Study on Establishment of the Diagnostic Technology for Existing Structures Using Wireless MEMS Acceleration Sensor)

氏名 李 亮

本研究では、MEMS 技術による無線加速度センサを活用した建築物の耐震補強および道路橋床版の健全性を簡便に計測・モニタリングする「耐久性診断・評価システム」の基盤を開発することを目的として実施した。

本論文は、第 1 章から第 6 章で構成され、各章の研究内容は以下のとおりである。

第 1 章では、序論として本研究の背景である自然災害の多発および既存構造物の劣化状況を示すとともに、本研究の目的と概要を示している。

第 2 章では、既往の研究について示している。建築分野において、耐震診断・耐震補強方法、耐震補強効果の検証手法を紹介し、主に日本国内の現行耐震診断・手法を用いて耐震性評価方法を説明している。土木分野について、床版損傷・劣化検査手法の現状を述べている。

第 3 章では、本無線計測システムの概要を示している。使用している加速度センサ、開発した無線ユニット、計測・解析ソフトを紹介している。次に、使用している加速度センサおよび本計測システムの精度およびセンサの取り付け方法を確認するため、実験室レベルおよび既存構造物の現地において、検証実験を行った結果を示している。最後に、本無線システムの主なメリットである「省力化」を説明するため、実際に行った計測実験の実施人数および時間をまとめ、一例として建築物に行った計測実験の結果を示している。

第 4 章では、本無線計測システムを用いて 9 棟の既存建築物を対象とし、常時微動計測を行い、耐震補強前後の計測実験結果を示している。耐震補強効果の検証手法を確立するため、定性的評価と定量的評価手法から考察した。定性的評価手法とは、1 次固有周期、固有振動リサージュなどの基本振動性状の変化により簡便に耐震補強効果を判断する方法である。その中、固有周期を評価指標とするのは一般的な手法であり、本研究では固有振動リサージュの変化を評価方法として提案している。定量的評価手法では、常時微動計測により得られたデータをもとに、フィルター処理を行い、提案している解析方法により層剛性を推定し、耐震補強の強度増大効果を検証している。また、定量評価手法の妥当性を確認するため、他の剛性推定手法の結果も示している。

定性的評価手法および定量的評価手法を用いて検討に得られた主要な成果を以下に示す。

1) 定性的評価手法の 1 質点系の固有周期について、強度増大型耐震補強工事が施された対象建物の周期の減少を確認した。また、入力階-上部階振動系を用いて抽出した振動周期の変化について、1 質点系の検討とほぼ同様な結果を示すことを確認した。しかし、常時微動レベルの計測で上部階の振動周期の同定が困難であり、得られた結果の誤差が生じている可能性が高いと考えている。

2) 提案した 1 次固有振動リサージュに着目する方法では、耐震補強前後の振動環境や計測途中のノイズの処理が重要である。本論では、測定区間を全体的に把握したうえで、「安定区間」を工学的に判断した結果を示している。得られた 1 次固有振動リサージュを見ると、強度補強に伴い耐震補強後の応答レベルの減少を明らかに確認した。本手法は、目視で振動性状の変化を簡単に判断でき、耐震補強効果の検証方法としての簡便性および有効性を示している。

3) 層剛性を評価指標として常時微動計測により得られた推定剛性と耐震診断・改修設計の設計剛性の比較結果を示している。推定剛性の算定結果は「1 質点系法」と阿部・守ら提案された「卓越周期法」と比較した。本研究で提案した「応答-変形法」を含め、どの手法でも推定剛性の真値と設計剛性のバラ

ツキが大きいことが確認された。その原因は、設計時のモデル化の問題であり、常時微動計測・解析手法の誤差なども考えられる。

4) 「卓越周期法」により推定した各階の層剛性変化率と設計剛性の変化率では、一部の相関が認められ、大きいバラツキも認められた。この原因は診断時・改修時の解析手法の誤差であり、定性的評価手法と同様に常時微動レベルの「卓越周期法」は、上部階の振動周期を特定する時に誤差が生じやすいと考えられる。本研究で提案した「応答-変形」法では、常時微動計測により得られた応答加速度と変換した応答変形の相関により割線剛性を推定する方法である。本手法により求めた層剛性と設計剛性の相関が確認されているが、同様に誤差が大きいことも示している。

第5章では、本無線計測システムを用いて土木構造物への適用を行った実験を示している。まず、適用性を確認するため、新設高架橋および老朽橋梁の2橋を対象とし、振動特性の計測結果を示している。新設高架橋は常時微動計測、老朽橋梁は常時微動と実験用大型バスによる交通振動計測を使用している。同定した固有振動数や振動モードの有効性は固有値解析結果により確認できた。計測実験結果と固有値解析結果を比較し、計測システムの適用性と有効性を確認し、計測実験により本振動計測システムを用いて振動モードの抽出手法を構築している。最終的に、社会ニーズであるインフラの劣化診断の背景から、本無線計測システムを用いて土木構造物への適用の有効性を確認したうえで、道路橋床版の劣化に着目し、床版劣化検査手法を提案している。具体的には、振動モード、応答加速変化曲線、応答加速度-応答変位関係などの評価指標により床版損傷位置を検知する手法である。以上の検討内容について以下の知見が得られた。

1) 老朽橋梁と新設高架橋床版の適用実験において、常時微動計測結果と固有値解析結果を比較し、振動計測により得られた固有振動数、振動モードと固有値解析結果がほぼ同様である。また、実験用バス通過時の変位モード、通過時間の逆算により本システムを用いた振動計測結果は確実に橋梁の振動性状を反映できることを確認した。

2) 本システムの特徴であり、振動モードの可視化機能により振動モードを精度良く同定することができる。また、振動モードを同定した結果によると、対象道路橋についてはバンドパスフィルターの幅0.2Hzを採用する時の精度が一番良いと判断している。ただし、バンドパスフィルター0.2Hz幅の汎用性について、多くの研究事例を考察するのが必要である。

3) 床版上部から計測する場合、交通遮断やセンサの設置場所の制約などの問題点がある。よって、本論では、床版下部の点検通路などを利用して計測方法を提案している。また、実験結果により2段階計測レベルの研究手法を提案している。第1段階計測レベルは床版全体の計測、目的は損傷区間を特定することである。第2段階は特定した区間において詳細的な調査方法である。また、具体的な判断手法では、一般に使われている固有振動数に加えて応答加速度曲線評価法、割線剛性法を提案している。本論の研究対象において、第1段階と第2段階計測レベルを使用し検討した結果、目視で損傷が見られた区間の応答加速度変化曲線の変化（傾き）が大きいことを示している。応答-変形関係図によると、損傷が発生している区間のグループ（割線剛性）が相対的に小さくなっていることを確認した。

以上、第5章の研究成果は、既存道路橋床版の劣化・損傷検知手法の開発を実現するために役立つものと考えられる。今後、長期モニタリングや本システムを用いて定期点検を行い、現行劣化判断方法との整合により定量評価の開発が重要である。また、本システムを用いて損傷検知する場合、検知できる損傷程度を明らかにするのが重要である。

第6章では、本論文で得られた成果を取りまとめ、今後の課題も併せて示している。