

# 橋梁維持管理のための振動遠隔モニタリングシステムの開発 および実橋梁への適用

長崎大学工学部 社会開発工学科  
奥松 俊博

構造物の健全度を評価するための技術の一つに、振動モニタリングがある。固有振動数や減衰定数、また固有振動モードの形状から、剛性低下や損傷発生場所を最終的に同定することを目的としたものである。しかし、損傷発生に伴い生じる振動特性の変化は一般的に微小であり、維持管理技術として実用化するためには、構造同定理論に裏付けられた振動特性の高精度推定が保証されなければならない。

本研究は、橋梁の常時微動を用いて、固有振動数、減衰定数を同定する手法を確立するとともに、実構造物(鋼ランガートラス橋)を対象としてモニタリングするための自動計測を実現することを目的としたものである。まず、提案するアルゴリズムの有効性を検証するために数値シミュレーションおよび室内実験を実施した。その際、構造同定モデルとして AR モデルを採用した。常時微動を用いて AR モデルで振動特性を推定する場合、車両や風などの外乱成分が計測信号の中に混在することにより、同定効果にばらつきが生じることが考えられる。それに対して構造物の振動特性のみを自動抽出するための対策を講じた。さらに、開発したシステムを実橋計測に適用し、その有効性について検証した。研究期間内に損傷が発生する確率は小さいが、損傷以外の要因により固有振動数の変化が生じることも考えられる。そのため、ここでは季節変動に注目して、温度と固有振動数の変化について検討した。また、計測の効率化を図るため、遠隔モニタリングシステムを現場と事務所の間に構築した。計測技術と IT 技術を用いて、振動特性の高精度推定と自動計測システムを融合し、効率的な橋梁振動遠隔モニタリングシステムの実用化を試みた。

本研究により、得られた結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) 構造物の振動数のみを抽出する物理的特性法を提案し、アーチ橋モデルの常時微動シミュレーションに適用した。その結果、本手法が変動係数 1%未満での振動数推定が可能であることを示した。
- 2) 5 層骨組構造物を用いた模型実験より、高精度振動数検出システムによる損傷検出精度の検証を行った。その結果、損傷に伴う 1~5%程度の僅かな固有振動数の変化の検出を実現した。また健全度診断を定量化するための損傷発生指標を提案した。
- 3) 推定精度のさらなる向上を目的とし、曲線適合および ARMA モデルによる 2 段階推定法を提案した。アーチ橋モデルおよび実橋常時微動記録による数値解析を行った結果、固有振動数と減衰定数の推定精度を向上させることが可能であることを示した。
- 4) 振動遠隔モニタリングシステムによる実橋の長期計測を実施した。年間の気温変化に対して橋梁振動数が変化することを確認した。

本論文は6章より構成される。以下にその概要を示す。

第1章では、社会資本施設の維持管理に関する背景について、その荒廃が顕著に起こった米国の事例を中心に述べ、維持管理の概要および重要性についてまとめた。また、振動特性の変化に着目した健全度診断に関する既往の研究と、常時微動に着目した振動特性推定法の概要をまとめ、研究の目的を明らかにした。

第2章では、本論文の骨格となる、構造物の振動数を高精度自動推定する方法を提案した。構造物の常時微動データより構造物の動的モデルをARMAモデルで構築し、これを近似的にARモデルで表現した。このARモデルの極(固有値)より、構造物の振動特性、特に振動数の高精度推定を行う方法を提案した。さらに、振動特性が既知のアーチ橋の桁に、白色雑音外力を作用させた常時微動シミュレーションを行い、本手法による振動数の推定精度を確認することにより、提案した手法の有効性を検証した。

第3章では、人為的に損傷を加えることのできる5層骨組構造物を対象として、数値シミュレーションを実施するとともに、対応する構造系を模擬したモデルによる実験を行った。解析と実験を通して、提案した高精度振動数推定システムにより、損傷検出の可能性を検証した。実験では、各層間のブレースをばねで表現した5層骨組構造物を用いて、そのばねを瞬時に破断することにより、損傷を表現したモデルとした。実験に用いたモデルは、予め構造物に取り付けたブレースを切断することにより1~5%程度の固有振動数の変化を生じるように設計した。この操作によって引き起こされる微小な振動数変化の検出性能を検証した。

第4章では、ARモデルによる構造振動特性の高精度自動推定について、さらなる精度向上を目的とする検討を実施した。ARモデルではARMAモデルの外力項の影響を受けることになり、減衰定数の推定に課題が残った。そこで、構造物の固有振動数をさらに高精度に推定し、同時に減衰定数を推定できる構造同定アルゴリズムの開発を行った。まず、ARモデルより振動特性を推定することを1段階推定とし、高精度に得られた各次数の固有振動数を用いて、自動的にバンドパスフィルタを設定し、各次数に対応する応答波形を自動抽出した。さらに各次数に対し、自己相関関数曲線適合およびARMAモデルを適用することで、構造系の振動特性をさらに高精度に推定し、2段階推定とした。1段階推定および2段階推定でそれぞれ求めた各次数の固有振動数および減衰定数を、平均値、標準偏差、変動係数を指標として示すことにより、振動特性の推定精度について検証した。さらに、本手法による実橋梁の常時微動記録に基づく振動特性推定を行い、本手法の現場計測への適用可能性を確認した。

第5章では、まず、実際に長期モニタリングするために必要な計測装置および遠隔モニタリングのための実測定システム、また、携帯電話機能による遠隔モニタリング技術などのIT技術を導入したシステムについて示した。さらに、環境要因が橋梁の振動数の変化に及ぼす影響について明確にするため、本システムによる長期モニタリングを実施し、気温変化に対して、橋梁の振動数が変化することを確認した。

第6章では、本研究で得られた知見を総括し、今後の課題についてまとめた。