

外 95-45

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

既存構造物のシステム同定による
損傷検出法に関する研究

申 請 者

近 藤 一 平

I p p e i K o n d o

1995年 12月

構造物にはコンクリートの中性化や鉄の発錆による経年劣化とともに地震や暴風などの自然外力による構造的な損傷が生じる。構造健全性を維持するためには、耐用期間を通じてこのような損傷を検出し、補修や補強等の適切な維持管理を行う必要がある。損傷評価に用いられている在来非破壊試験法は、構造部位内部の損傷に関するミクロ的なデータ収集を目的としている。一方、対象を構造システム全体とする場合には、対象範囲が大きすぎて損傷を検出することが困難になる。構造システム全体を対象としたマクロ的な損傷状態の診断法として振動法があるが、診断結果として得られるのは損傷の有無や全体的な損傷度であり、損傷の位置やその損傷度などの損傷に関する局所的な情報は得られない。構造部材内部の損傷位置や損傷度を検出する方法は確立されていると言えるが、構造システム全体を対象として損傷位置や損傷度を推定する効率的な方法は確立されていない。この方法としてシステム同定が有効な手段と考えられる。システム同定を用いることにより構造システムに関する観測データを系統的に処理し、損傷状態の評価を具体的に数値として表示することが可能になる。そこで、本研究ではシステム同定を用いた建築構造物に適した損傷検出法を提案し、その有効性と適用限界をシミュレーション解析と実験により検討する。

第1章では、本研究の位置づけと目的を明確にし、既往の構造システムの損傷検出に関する研究を概観しながら提案する損傷検出手法の優位性について述べた。また、本論文の構成を示した。

第2章では、損傷指標として剛性や減衰などの力学特性の変化やモード特性の変化を利用できることの根拠付けを行い、本研究で提案するシステム同定を用いた二段階損傷検出法の概要を示した。まず、構造システムの振動計測を行い、固有振動数、減衰比、およびモード形を同定する。損傷前後でのモード特性の変化を評価して損傷の有無を判断し、さらに構造システム全体の損傷度を評価する。次に、構造システム全体からモード特性の変化を用いて損傷位置と局所的な損傷度を検出する。局所的な損傷指標として構造部材の剛性や減衰といった力学特性の変化に着目する。構造システムの状態方程式に基づき、感度を用いてモード特性の変化と構造部材の力学特性の変化を関係付け、その関係式から力学特性の変化を同定する。損傷検出を2段階で行うことにより、損傷の有無や構造システム全体の損傷度などの全体的な損傷情報と損傷位置や損傷部材の損傷度などの局所的な損傷情報の両方が得られる。続いて、各段階で用いるシステム同定法を既往の研究事例に基づき検討し、全体損傷検出法として多変量ARMAモデルを用いた同定法を、局所損傷検出法として逆摂動法を採用することを述べた。最後に、システム同定における観測データの不確実性の扱い方を最小二乗規範を例にとり示し、全体損傷検出では観測応答時系列データ、局所損傷検出ではモード特性が不確実性を考慮する対象であることを述べた。

第3章では、全体損傷検出法として多変量ARMAモデルを用いたモード特性の同定法の定式化を示した。さらに、同定に必要なパラメータの適切な設定方法を検討し、シミュレーション解析によりその妥当性を確認した。サンプリング間隔に関しては、精度が最も良くなる最適値が存在する。ARMA(2,1)モデルを用いた1質点系の固有振動数および減衰比の同定値の分散に関する理論的な検討によりサンプリング間隔の最適値が同定の対象とするモードの固有周期の $1/4 \sim 1/3$ 程度になることを考慮して設定する方法が有効であることを示した。モデル次数に関しては、多変量ARモデルの残差に着目し、残差が十分小さい値で収束する場合の多変量ARモデルの次数、および多質点振動系が多変量ARMA(2N, 2N-1)モデル(N:振動系の自由度数)に対応していることを考慮して設定する方法を示し、その妥当性を確認した。さらに、1変量ARMAモデルに対して、2変量ARMAモデルを用いることで複素モード振幅の同定精度を大幅に改善できることがわかった。続いて、入力特性、観測ノイズ、および構造システムの減衰レベルがモード特性の同定精度におよぼす影響をシミュレーション解析により検討した。減衰比と複素モード振幅の虚部は、他のモード特性に比べて大きな影響を受け、入力の非ホワイトノイズ性の増大、または観測ノイズ比の増加に伴い同定精度が大きく低下する。しかし、低次モードに限れば、非ホワイトノイズ性を表す指標 h_n が40%以上、ノイズ比SNRが10%以下の範囲で同定精度は比較的良好である。減衰レベルに関しては、同定精度が良くなる最適な減衰レベルの範囲が存在し、低次モードに限れば減衰比として $\eta=5\% \sim 10\%$ の範囲となる。最後に、観測応答時系列のばらつきを考慮して同定を行う方法として、長時間計測した観測応答時系列をセグメントに分割し、それぞれのセグメントからモード特性を同定し、同定値の標本平均と標本分散を求める方法を示した。また、真値が未知である場合、同定値の変動係数は真値との一致度を表す指標となりうることを示した。

第4章では、局所損傷検出法として構造システムの状態方程式に基づく逆摂動法を定式化し、モード特性の変化を既知数として構造部材の損傷による剛性低下率と減衰増加率を最小二乗法を適用して同定する方法を示した。既知数として与える各モード特性の局所損傷検出における重要度をシミュレーション解析に基づき考察し、複素固有値の虚部と複素モード振幅の実部の剛性情報は剛性低下率を同定するために重要度が高く、複素固有値の実部と複素モード振幅の減衰情報は減衰低下率を同定するために重要度が高いことを示した。また、モード形の重要度に関しても考察を加えた。固有振動数の損傷に対する感度が小さい場合に重要度が高くなり、局所損傷検出を精度良く行うために必要不可欠なものであることを示した。続いて、逆摂動法を効率的にかつより有効に適用するための各種手法を示し、その有効性と適用限界をシミュレーション解析により検討した。検討結果より得られた知見として、(1)モード特性の変化と力学特性の変化の非線形性が強くなり精度が低下する場

合、逐次線形化法を適用することにより精度を改善することができる。(2)既知数の数が未知数の数に対して極めて少なく、最小二乗法により十分な精度が得られない場合、未知数となる剛性低下率と減衰増加率に対して制約条件を与えて最適化手法を用いることにより精度を改善することができる。(3)逆摂動法における既知数として、モード形各成分の変化を用いるかわりにモード形の変化をMACを用いて1つの値として扱うことにより逐次線形化法における収束性を高め、精度を改善することができる。最後に、モード特性の同定値のばらつきを考慮して局所損傷検出を行う方法を示した。最尤推定法の定式化に基づき重み付き最小二乗法を誘導し、重みに各モード特性値の同定値の分散の逆数を用いることにより観測データのばらつきを考慮した同定が可能になることを示した。

5章では、局所損傷検出を行う前に、モード特性の変化を用いて損傷領域を推定し、損傷領域内の部材のみを対象として局所損傷検出を行う方法を示した。これにより構造システムを構成する部材数が多い場合でも未知数の数を減らすことができるので同定計算を効率的にかつ精度良く行うことができる。続いて、モード特性の変化を用いた損傷領域の推定法を提案し、固有振動数や減衰比の変化に着目する場合では、固有振動数のモード間での変化率分布と各部材のモード間での歪エネルギー分布のパターンマッチ、または、減衰比の変化率分布と減衰エネルギー分布のパターンマッチにより損傷領域の特定が可能であることを示した。モード形の変化に着目する場合では、損傷指標として運動エネルギー分布、モード形の曲率分布、複素振幅比の絶対値、および複素振幅比の位相角を用いた4つの方法を比較検討し、モード形の曲率分布の変化と複素振幅比の位相角の変化が損傷による局所的な変化をとらえやすく、損傷領域を特定するために有効であることを示した。

6章では、システム同定による2段階損傷検出法の有効性と適用限界を3部材立体トラス構造モデルと5層立体骨組構造モデルの加振実験より得られる応答時系列データを用いて検討した。全体損傷検出においては、両モデルともに減衰レベルが小さいため複素固有値の実部と複素モード形振幅の虚部を精度良く同定できなかった。そこで、局所損傷検出においては、複素固有値の虚部と複素モード形振幅の実部を既知数として各部材の剛性低下率のみを損傷検出の対象とした。その結果、損傷部材の特定と損傷度をほぼ設定したとおりに同定でき、2段階損傷検出手法の有効性を確認することができた。特に、5層立体骨組モデルの損傷検出においては、損傷領域の推定に基づく局所損傷検出法と観測データのばらつきを考慮した損傷検出法の有効性を示すことができた。

今後、モード特性のばらつきおよびモデル化誤差から生じる局所損傷検出法の適用限界をより明確に、かつ定量的に検討する必要がある。この適用限界を明確にすることができれば実用化への道が開かれると思われる。