

## 審査の結果の要旨

氏名 クレリ ミュゲ

橋梁の耐震性能は復元力特性によって特徴づけられる。設計においては剛性や非線形復元力特性に基づいて耐震性能を評価するものの、実構造物の復元力特性を、地震応答を利用して評価できれば、設計へのフィードバックや、補修・補強・復旧を効率的で効果的なものにすると考えられる。中小地震の応答計測から剛性を推定できれば施工不良や設計・維持管理上の問題に起因する低剛性の構造物の判定に有効であるし、大地震の応答計測から実際に生じた復元力特性や履歴特性を評価できれば、地震による被害の定量的な評価とそれに基づく事後対応に有効と考えられる。

しかし、地震応答計測に基づく実構造物の復元力特性の評価はほとんどなされていない。周波数領域で同定したモード特性に基づいて構造特性を推定する方法は、モード特性から構造特性への変換が一般に難しい。非線形挙動を示す構造物の場合には、線形性を仮定するモード特性同定法は厳密には適用できない。一方で時間領域同定法の1つであるカルマンフィルタ等のデータ同化手法は、構造パラメータを直接的に推定することができるし、アンセンテッドカルマンフィルタ(UKF)のように非線形系へ適用できる手法もある。しかし、システム誤差共分散行列や、観測誤差共分散行列といったパラメータを予め正しく推定する必要がある。実構造物でこれらを正しく推定することは困難で、UKFを実地震応答に適用し復元力特性を求めた事例はない。加えて、一部の重要橋梁を除いて地震応答モニタリングを実施している橋梁は稀であり、このような手法を適用するデータがほとんどないという問題がある。

そこで本研究は、実構造物の復元力特性推定に適用可能な応答計測データを用意した上で、UKFを利用した復元力特性の同定精度およびロバスト性を向上させるため、Robbins-Monro アルゴリズムを用いること(UKF-RM)を提案し、シミュレーションおよび計測データを用いてその効果を評価した。

まず、復元力特性推定の対象とする、RC橋脚の大規模振動台試験および、地震応答現地計測試験の詳細をまとめた。振動台試験はE-Defenseにおいて実施され、様々な加振レベルでの試験が行われている。供試体には加速度計、変位

計、ロードセルなどが設置され、系への入出力および、同定結果の妥当性を評価するための動画や損傷の記録などが利用可能である。一方の現地計測試験は、電池駆動無線加速度計ノードを利用して実現したものであり、2016年の熊本地震後に約2週間に渡り余震計測を行い計61波形の地震応答を観測している。支間60mの鋼箱桁橋の4つのゴム支承の上下に無線ノードを設置しており、ゴム支承に支持される構造系の入出力を全て記録するものである。

次にUKF-RM法による構造特性同定を定式化し、その同定性能を数値シミュレーションにより明らかにした。誤差共分散行列の初期値、システム誤差共分散行列、観測誤差共分散行列、初期状態ベクトル、観測誤差などのパラメータに対する剛性同定の感度が低く、ロバストな推定手法であることが明らかになった。さらにUKF-RMのパラメータである $\alpha$ 値に対する感度も小さい事が明らかになった。剛性パラメータの収束が早いことが確認され、大地震動により剛性が変化する場合にもその変化に追従できることを示した。

次いで、振動台試験および現地計測試験データに本手法を適用した。振動台試験では剛性値を同定し、変位計等から推定される剛性値と整合的であることを示した。収束が早いこと、非線形応答時の剛性変化に追従した同定値を得られることが確認された。地震応答現地計測試験データに適用した所、橋脚側、橋台側それぞれのゴム支承剛性が推定され、その剛性値はゴム支承の出荷時試験と整合的であることを確認された。

最後にUKF-RMを履歴特性の推定に適用した。非線形特性としてBouc-Wenモデルを導入し、このモデルパラメータおよびその履歴特性を、加速度応答計測のUKF-RMによる分析により求めた。加速度の2回積分とハイパスフィルタにより求めた変位情報を利用しているため、残留変位による成分は同定できないものの、Bouc-Wenモデルパラメータおよび残留変位を除いた履歴特性をよく再現できることが分かった。さらに本手法を振動台試験データに適用し、履歴特性を再現できることを示した。

本論文は、データ同化手法の1つであるアンセンテッドカルマンフィルタにRobbins-Monroアルゴリズムを組み合わせることで、地震加速度応答計測に基づいて構造特性を同定する手法を提案している。従来手法では推定結果が誤差共分散行列等の設定に大きく依存するなどの問題があり、同定は現実的でなかった。計測技術の進捗とともに今後は地震応答観測データが得られやすくなると考えられる中で、提案手法はそれを活用して、耐震工学上重要であるが同定の難しい、実構造物の復元力特性を推定するものである。本論文の学術上、工学上の貢献は大きい。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。