

加速度応答計測と非線形履歴特性パラメータ同定に基づく変位応答推定

東京大学 学生会員 ○石原佳奈 Yang Yaohua 正会員 長山智則 蘇迪

1. 研究背景

橋梁等構造物の地震後の健全性評価は、緊急車両の通行および避難経路の確保、交通規制による経済的影響を抑制するため迅速に行う必要がある。センサを利用して構造物の変位を計測できれば、図 1 のように変位や履歴特性を基準とした定量的かつ迅速な健全性評価ができると期待される。

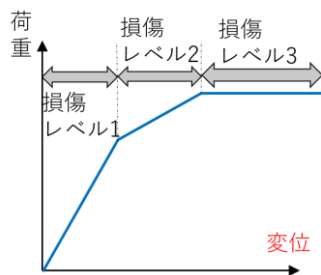


図 1 地震後の高架橋損傷判定例

変位の直接計測は、基準点を得られにくいために難しい。対して、計測加速度を二階積分して変位を推定する方法は、積分誤差が蓄積する。ハイパスフィルタの適用により積分値の発散は避けられるものの、残留変位等の低周波数成分を評価できない。残留変位を含む変位を簡易に推定する方法が必要とされている。

2. 研究目的

本研究の目的を以下のように設定する。

1. 地震動による構造物の応答加速度を観測量としたカルマンフィルタを非線形履歴特性モデルに適用し、最適化手法と組み合わせることで、残留変位成分を含めた変位を推定する手法を提案する。
2. カルマンフィルタで採用する非線形モデルと比べて、対象構造物の履歴特性モデルが複雑である場合における、提案手法の適用性を明らかにする。

3. 提案手法

本研究の提案アルゴリズムを簡潔に示したものが図 2 である。地動加速度および応答加速度を観測量とし、履歴特性モデルを仮定して非線形カルマンフィルタを適用することで、状態変数の 1 つとして応答変位を推定する。履歴特性モデルは対象構造物の履歴特性を正

確に表現するものではないが、非線形カルマンフィルタはモデル化誤差を含んだ定式化ができる。モデル化誤差はプロセスノイズ分散共分散行列として表すことができるため、その成分を最小化するように遺伝的アルゴリズムにより履歴特性モデルパラメータを決定するものである。

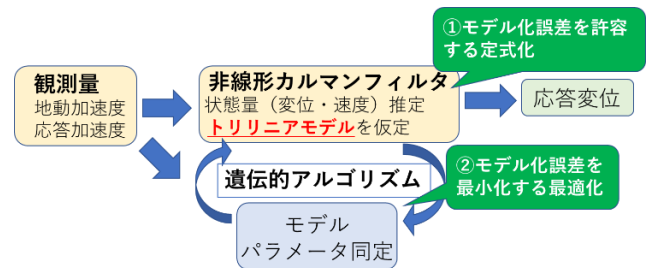


図 2 提案手法における変位推定アルゴリズム

実構造物の履歴特性は複雑であり、それを表現できる高度な履歴特性モデルを採用することも考えられるが、モデルパラメータが多い場合にはパラメータ同定が困難となることから、本研究ではパラメータ数の少ないトリリニアモデルを採用した。同定パラメータは初期剛性、二次剛性比、三次剛性比、一次降伏点、二次降伏点の 5 つである。なお、バイリニアモデルについても検討したが、ここではより一般性の高いトリリニアモデルを採用して検討した結果について述べる。

4. 対象構造物とモデルの履歴特性が同じ場合

対象構造物の履歴特性と、カルマンフィルタにおいて採用する履歴特性がともにトリリニアモデルで表される場合の推定結果を図 3 にて示す。つまり、パラメータを正確に推定すれば、履歴特性を正確に再現できるケースである。解析においては、5%の白色ノイズを加速度に付与し、入力地震波には鷹取波を使用した。

同じ解析を複数回繰り返したところ、遺伝的アルゴリズムのランダム性から推定精度にばらつきが確認された。さらに変位推定精度は観測ノイズの大きさにも依存することが確認された。そこで、変位推定精度を各々の同定パラメータの推定精度と比較したところ、初期剛性の同定精度との相関が高く、図 4 のように変

キーワード 変位推定, カルマンフィルタ, 遺伝的アルゴリズム

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学 TEL 03-5841-6097

位を精度よく推定可能である。つまり、中小地震記録などから事前に初期剛性を正確に推定すれば、高精度で変位を推定できることを示唆する。

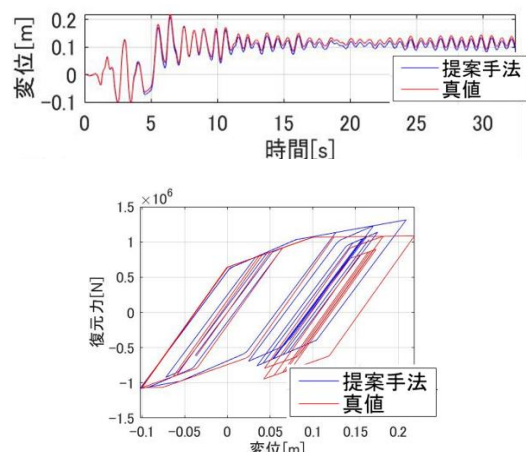


図 3 トリリニアモデルの変位及び履歴特性の推定

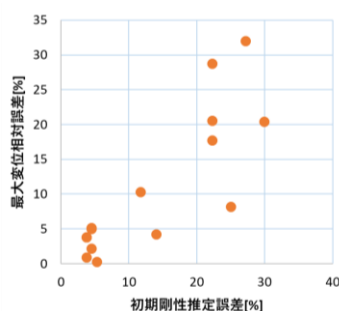


図 4 初期剛性の推定精度と変位の推定精度

5. 複雑な履歴特性を示す系への提案手法の適用

E-defense における橋脚振動台実験¹⁾を、鉄筋コンクリート非線形解析ソフトウェア COM3D によって模擬した結果 (図 5)²⁾に対して提案手法を適用する。

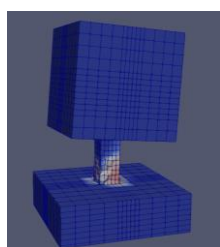


図 5 E-defense 橋脚振動台実験を模擬した解析¹⁾

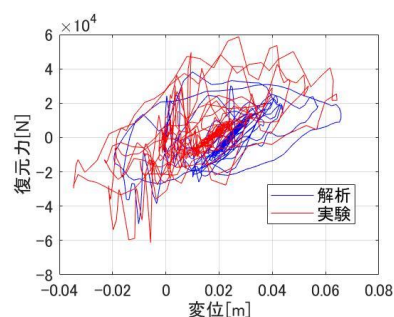


図 6 実験及び解析の履歴特性比較

COM3D による解析結果の履歴特性を図 6 にて示したが、実際の構造物同様に履歴特性が複雑である。

初期剛性は、中小地震を想定した鷹取波 30%加振時の加速度応答から推定した。なお、計測加速度に 1%の白色ノイズを付与している。

提案手法による変位の推定結果と、比較のための他手法 2 つの結果を図 7 に示す。1 つは、提案手法における非線形カルマンフィルタを順解析である変位応答シミュレーションに置き換えたものである。この手法では履歴特性モデルのモデル化誤差を考慮することが難しい。もう 1 つの手法は、状態量と履歴特性パラメータをアンセンテッドカルマンフィルタ (UKF) により同時推定するもの³⁾である。この手法では正確な履歴特性モデルが必要である。図 7 より提案手法は、残留成分まで含む変位を推定できていることが分かる。

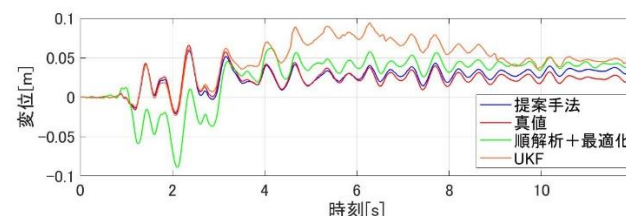


図 7 変位推定結果の比較

6. 本研究の成果

- ・非線形カルマンフィルタによる状態量推定と遺伝的アルゴリズムによる履歴特性パラメータ同定を組み合わせた手法により、加速度計測に基づいた変位推定手法を提案した。

- ・複雑な履歴特性を示す、鉄筋コンクリート非線形解析結果に対して、提案手法を適用し、変位を推定可能であることが明らかになった。

参考文献

1. 高橋良和: E-ディフェンスを用いた縮小 RC 柱 16 体一斉加振実験に基づく動的応答の定量的不確定性評価実験, 京都大学防災科学研究所 構造物破壊過程における振動台の運転・制御に関する研究, 2012
2. 中村俊敬: 材料・地震動の特性を考慮した橋梁応答の不確定性に関する研究, 第 75 回土木学会年次学術講演会概要集, 2020
3. A.W. Smyth, M. Wu: Application of the unscented Kalman filter for real-time nonlinear structural system identification, Structural control and health monitoring 2007, vol.14, 2006, pp.971-990