

熊本地震の余震応答計測を利用したゴム支承特性の同定

東京大学大学院 学生会員 ○Muge Kuleli
正会員 長山智則

1. はじめに

設計時に想定した構造特性を実構造物が有していることを確認することは、設計・施工における評価や、現有性能評価において重要である。耐震性能において重要なゴム支承の剛性・減衰については、常時微動下では特に水平方向応答レベルが小さくその剛性・減衰の評価が難しい。地震応答に基づいて支承の可動・固定を確認した事例があるが、地震応答モニタリングを実施している橋梁が稀であり、事例は一部の長大橋などに限られる。数値計算や振動台試験で支承性能を検討する事例は多くとも、実橋梁の応答から支承特性を評価する事例は少ない。

無線センサネットワークの高精度化、長寿命化が進み、簡易にかつ高精度に橋梁挙動を捉えられるようになったことから、長大橋にかぎらず地震応答を捉え、実挙動の評価をすることが現実のものとなってきた。2016年4月の熊本地震後に、無線センサネットワークを利用してゴム支承の橋梁の地震応答を計測する機会を得た。2週間に渡る計測期間で震度1から3の約60の地震動を捉え、これを用いて支承の実性能を評価した。加速度計測値から支承剛性・減衰を推定するにあたっては Uncented Kalman Filter (UKF) を利用し、そのプロセスノイズ、観測ノイズ共分散行列を適切に動的に推定することで剛性・減衰特性を同定した。

2. 現地観測

対象橋梁は熊本市内の橋長59mの鋼箱桁橋である。無線センサプロトタイプを2016年4月29日から16日間に渡り設置し、熊本地震余震による橋梁応答を計測した。無線センサは単1電池4本で駆動し、マルチホップ通信により互いに同期している。サンプリング周波数100Hzで3方向加速度をSDカード上に連続記録する。Epson社製加速度計M-A351を搭載しており、仕様上のノイズ密度は $0.5\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。シングルホップでの通信距離は実測で約20-30mである。乾電池による駆動で外部電源や通信ラインを必要としないスタンドアロン型システムであることから、熊本地震発生後間もない期間にも関わらず、計11ノードを利用して簡易な計測が実現した。無線ノードは橋台、桁端部、橋脚上、橋脚基部に図1に示すように設置した。

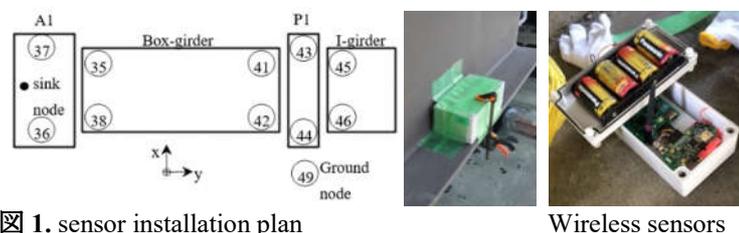


図1. sensor installation plan

Wireless sensors

3. 同定手法

UKFを利用して支承の剛性・減衰パラメータを同定した。UKFにより同定される剛性・減衰パラメータの精度はプロセスノイズや観測ノイズの共分散行列の設定に大きく依存する。これらの共分散行列が実現象と整合的でない場合、推定精度・ロバスト性が損なわれ、推定が発散することも有る。本計測データについても共分散行列を幾つかの値に設定して推定したものの、収束解を得ることができなかった。

そこで、本研究では Robbins-Monro 型アルゴリズムにより共分散行列を逐次推定することとした。プロセスノイズと観測ノイズの共分散行列は式(1)、(2)により推定する。

$$Q_k = (1 - \alpha)Q_{k-1} + \alpha K_k (y_k \quad Hx_k)(y_k \quad Hx_k)^T K_k^T \quad (1)$$

$$R_k = (1 - \alpha)R_{k-1} + \alpha (y_k \quad Hx_k)(y_k \quad Hx_k)^T \quad (2)$$

ここで、 Q_k は時間ステップ k におけるプロセスノイズ共分散行列、 R_k は観測ノイズ共分散行列、 K_k はカルマンゲイン、 x は状態量、 y は観測量、 H は観測行列である。 A は次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{c}{\alpha_{min} + k} \quad (3)$$

c および α_{min} は定数であり c は通常1である。 α_{min} は0.5とした。

キーワード たわみ、無線センサ、カルマンフィルタ、傾斜角、加速度

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

4. 数値シミュレーション

1 支承をモデル化した 1 自由度系に対して上記 UKF によるパラメータ推定を行った。地震計測におけるノード 41 (桁端部) , 43 (橋台天端) の計測データを想定している。重量は桁総重量の 25%を設定した。シミュレーションにおいてはノイズレベルはゼロ平均白色雑音で、時不変である。RMS 値の 5%に相当するノイズを導入している。観測されたある地震波をモデルへの入力として 1 自由度系の応答を作成し、UKF を適用した結果を図 2 に示す。剛性、減衰ともに真値に漸近している事が確認できる。また、状態変数として同定された変位、速度応答も真値に近いことが確認できる。

地震動の継続時間が短いことから、地震エネルギーの大きな D5-95 区間を地震波について算出したところ、7.18 秒であった。7.18 秒後は剛性・減衰の推定値が大きく変化していないことが確認できる。

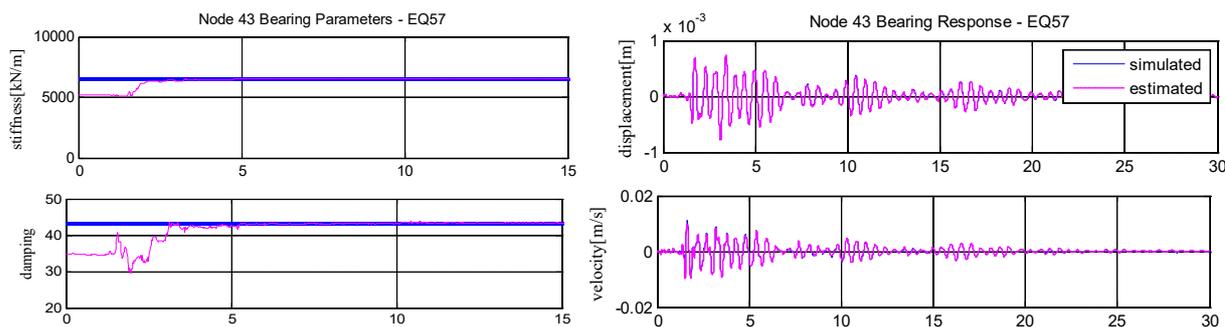


図 2. Comparison of estimation and simulation results

5. 観測データへの適用

全観測データの中から、応答レベルの比較的大きい 3 波形について上述の同定アルゴリズムを適用した。プロセスノイズ・観測ノイズ共分散行列を更新することで図 3 および表 1 に示すように剛性・減衰を同定する事ができた。3 波形による剛性推定結果はいずれも、約 10 秒後にはほぼ同一の値に収束している。ばらつきも小さい。設計値と比べると小さい値となっているが、設計時に想定している振幅と比べると小さな振幅での剛性推定値である。一方で、減衰の推定値はばらつきが大きい。

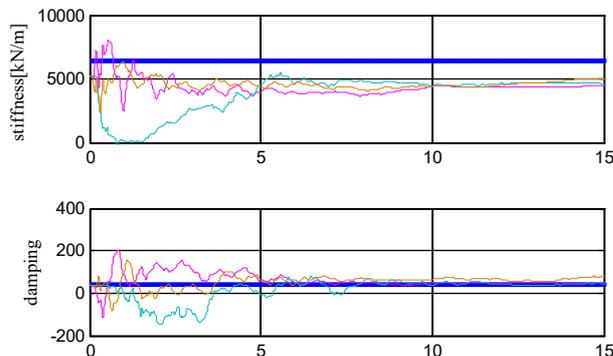


Figure 3. Node 43 (EQ57: magenta, EQ9: green, EQ58: orange)

表 1. Relative error of $TF(\omega)_{acc}$.

Input	PGA [gal]	D5-95	Stiffness kN-m	Damping
EQ57	25.4	7.18	4439	46.5
EQ58	34.8	7.51	4399	63.8
EQ9	18.6	6.12	4507	37.1
Design*	-	-	6500	43.27

*Design values for stiffness, damping ratio (cr) and mass were obtained from design calculations. Damping ratio is 4% for one bearing. Damping coefficient is assumed mass and stiffness proportional.

5. 結論

熊本地震余震の応答計測データを Uncented Kalman Filter (UKF) により処理することでゴム支承の剛性・減衰値を推定した。剛性の推定値は設計値より若干小さいが同定のばらつきは小さい。一方で減衰値については同定のばらつきが大きい。Robbins-Monro 型アルゴリズムにより共分散行列を逐次算出しながら UKF を適用することで構造特性を推定することができた。

謝辞：本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：JST) によって実施されました。熊本河川国道事務所の森田所長，古賀維持管理所長，熊本大学葛西准教授，横浜国立大学藤野教授，西尾准教授には貴重なご助言を賜りました。ここに深く謝意を示します。

参考文献 Muge Kuleli : Seismic responses of road bridges captured by densely deployed wireless sensors, 第 7 回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム, 2016 年 12 月.