

TMCMC による免震橋梁の現有構造特性推定に与える観測ノイズの影響

関東学院大学大学院 学生会員 ○藤田玲於奈

関東学院大学 正会員 北原武嗣

関東学院大学 正会員 大谷友香

1. 序論

1996 年以降、耐震性能向上のためにゴム支承を採用した橋梁が普及した。しかし共用開始から 20 年前を超え、経年によるゴム支承の鉛の突出やゴムの亀裂が観察されており、耐震性能の低下が懸念される¹⁾。2011 年東北地方太平洋沖地震によるゴム支承の破断や損傷の原因としてゴム支承の経年劣化が影響していることも示唆されている²⁾。

既存橋梁の残存耐震性能を精度よく評価するため、このような損傷や経年劣化に関して不確定性も考慮した現有の構造パラメータを正確に推定する必要がある。本研究では、既存免震橋梁を対象に、地震応答データを観測データとして損傷や経年劣化による変化を捉えた現有構造パラメータをベイズ更新手法によって求め、地震応答データの観測ノイズが同定結果に与える影響について検討した。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

解析対象は、鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)を有する免震橋梁である(例えば³⁾)。図 1 に示すように、免震支承と RC 橋脚は非線形水平バネ、橋脚基部固定を固定とした 2 自由度系モデルとした。履歴復元力特性として免震支承にはバイリニア型モデルを、RC 橋脚には Takeda 型モデルを設定した。

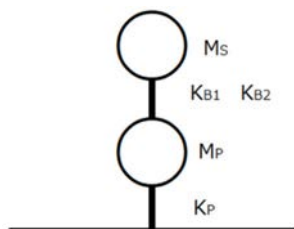


図 1 2 自由度系モデル

表 1 に示す上部構造の質量 M_s 、RC 橋脚の質量 M_p 、剛性 K_p 、および降伏荷重 Q_p 、免震支承の一次剛性 K_{B1} 、二次剛性 K_{B2} 、降伏荷重 Q_B の 7 つのパラメータを同定対象とした。

表 1 構造パラメータ

		設計値	劣化後
上部構造	質量 M_s (t)	604	604
免震支承	降伏荷重 Q_p (kN)	1118	559
	1 次剛性 K_{B1} (kN/m)	40000	48000
	2 次剛性 K_{B2} (kN/m)	6000	7200
RC 橋脚	質量 M_p (t)	346.2	346.2
	降伏荷重 Q_p (kN)	3374	3374
	降伏剛性 K_p (kN/m)	110100	110100

2.2 地震応答観測データ

ベイズ更新に用いる観測データとして、対象橋梁の地震応答計測データを想定した。ここでは実観測データは存在しないため、2016 年に熊本市西区春日で観測された熊本地震の地震波を図 1 のモデルに入力した際の上部構造の応答加速度波形を、仮想的に観測データとしてベイズ更新に用いた。観測データには測定誤差として種々のノイズが無視できないため、ここでは観測ノイズとして応答加速度波形にホワイトノイズを付加するものとした。このノイズがベイズ更新結果に与える影響を検討するため、RMS 値に対して 1, 3, 5, 10% のノイズを与えた。

2.3 ベイズ更新

事後分布評価において通常の尤度関数ではなく近似ベイズ計算(ABC)を適用した。ここでは、モデル応答と観測データの一致度としてユークリッド距離を用い、ガウス関数型の近似尤度を設定した⁴⁾。解析的にベイズ更新を行うことは困難なため、ここではサンプリング手法として遷移型マルコフ連鎖モンテカルロ法(TMCMC)を用いた。

7 つの推定パラメータの絶対値にはかなりの大小があるため、それぞれ当初の設計値に対する比としてベイズ更新を実施した。表 2 に劣化後の値を設計値で除した値(推定すべき正解値)を示す。それぞれのパラメータの事前分布は 0.3~1.5 の範囲の一様分布

とし、TMCMC のサンプルサイズは 500 個とした。推定のロバスト性を評価するために同条件で計 5 回データ更新を試行し、その 5 回の期待値（平均値）として推定結果を評価することとした。

表 2 各パラメータの正解値

M_s	M_p	K_p	Q_p	K_{B1}	K_{B2}	Q_B
1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	0.5

3. 解析結果

ベイズ更新の一例として、ノイズ 10% 推定時 M_p の事後分布を図 2 に示す。更新された事後分布における最頻値（図中の赤線）を推定値として用いた。

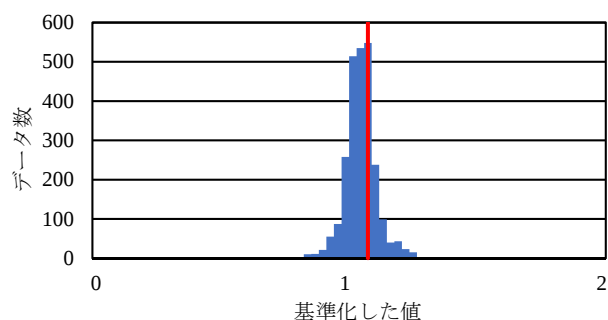


図 2 M_p の事後分布の一例

図 3 に 5 回試行の期待値と観測ノイズの関係を示す。上部構造と橋脚の質量 M_s , M_p および橋脚剛性 K_p は 0.9~1.1 の範囲で推定されており正解値 1.0 に近い。支承の 2 次剛性と降伏荷重はそれぞれ 1.2, 0.5 とノイズの大きさに関わらず精度良く推定出来ている。一方、支承の 1 次剛性は 1.1~1.3 程度と正解値より若干大きめに推定されており、橋脚の降伏荷重はノイズ大小による変動が他のパラメータより若干大きいことがわかる。しかしながら、7 つのパラメータ全体として概ね良く推定出来ていると判断できる。

つぎに、図 4 に事後分布の変動係数（5 回試行の期待値）とノイズの関係を示す。事後分布の変動係数はそれぞれの推定結果の確信度（信頼度）を表しているといえ、この変動係数が小さいほど確信度が高い。図 4 より、支承の 2 次剛性以外のパラメータはノイズが小さいほど確信度が高くなる傾向にある。パラメータ間でみると、支承 2 次剛性の確信度が最も高く支承 1 次剛性の確信度が一番小さいことがわかる。

4. 結論

本研究では免震橋梁を対象に、地震応答データを観測データとして経年劣化を考慮した構造パラメータのベイズ更新を検討した。ここで用いた更新手法

は、非線形応答を示す複数のパラメータを精度よく推定できることが確認できた。また、ここで考慮した観測ノイズの大きさであれば推定された最頻値には大きな影響がないこと、一方、ノイズが大きいほど、最頻値の推定確信度は低くなることがわかった。

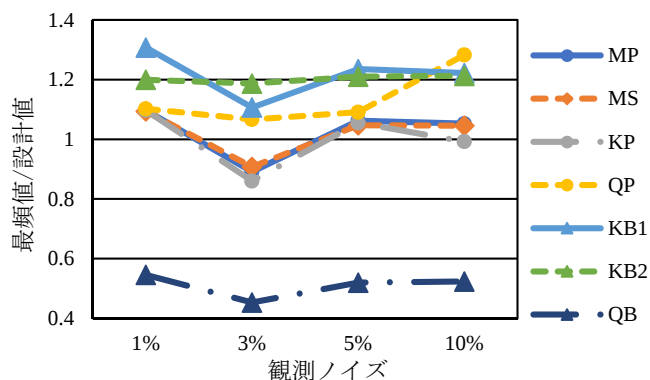


図 3 推定結果の最頻値（5 回試行の期待値）

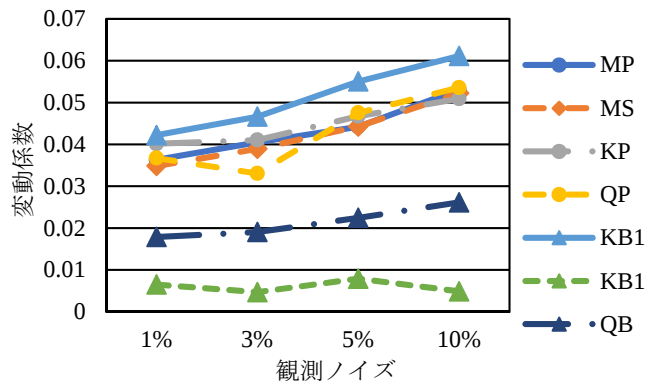


図 4 推定最頻値の変動係数（5 回試行の期待値）

参考文献

- 1) 党紀, 東出知大, 五十嵐晃, 足立幸郎, 林訓裕: ゴム支承(LRB)の経年劣化が橋梁構造の耐震性能に及ぼす影響に関する解析的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.4, pp.I_713-I_724, 2015.
- 2) 増田信雄, 山田金喜, 木水隆夫, 広瀬剛, 鈴木基行: 東日本太平洋沖地震により破断した積層ゴム支承の性能試験, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.516-526, 2013.
- 3) 松崎裕, 小野寺周, 津村拓都, 鈴木基行: 免震支承の経年劣化が免震支承—RC 橋脚系の地震時損傷モードに及ぼす影響に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.397-410, 2017.
- 4) 北原優, M. Broggi, M. Beer: 近似ベイズ計算 (ABC) を用いたモデル更新による免震橋梁の残存耐震性能評価の検討, 土木学会論文集, Vol.77, No.4, pp.I_61-70, 2021.