

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

北原 優¹・Matteo BROGGI²・Michael BEER³

¹ 学生会員 ライプニッツ大学ハノーファー 土木・測地学部 (Callinstr. 34 30167 Hannover, Germany)
E-mail: masaru.kitahara@irz.uni-hannover.de

² 非会員 ライプニッツ大学ハノーファー 土木・測地学部 (Callinstr. 34 30167 Hannover, Germany)
E-mail: broggi@irz.uni-hannover.de

³ 非会員 ライプニッツ大学ハノーファー教授 土木・測地学部 (Callinstr. 34 30167 Hannover, Germany)
E-mail: beer@irz.uni-hannover.de

免震支承の経年劣化や地震による損傷の進展は、橋梁全体系の耐震性能の低下につながる恐れもあり、大規模地震後の免震橋梁の残存耐震性能評価は、その後の運用方針を決めるうえで重要な判断材料となる。本研究では、免震橋梁の弾塑性解析モデルを対象に、残存耐震性能評価への地震応答観測データを用いたベイズモデル更新の適用性について検討した。近似ベイズ計算に基づく近似尤度関数を構築し、BUSと適応型クリギング代替モデルを組み合わせた事後分布推定手法を適用することで、計算効率を大幅に向上させつつ、免震支承の2次剛性を含めた構造パラメータの妥当な事後分布推定結果を得ることができた。その上で、更新されたモデルを用いた漸増動的解析を行い残存耐震性能評価の一例を示した。

Key Words: Bayesian model updating, approximate Bayesian computation, uncertainty quantification, surrogate model, residual seismic performance

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震における道路橋での多大な被害を契機に、我が国では耐震性能の向上を図った免震橋梁の普及が進んできた。しかしながら、近年、免震支承の経年劣化が顕在化してきており、ゴム支承の破損や鉛プラグの突出などが報告されている¹⁾。また、2011年の東北地方太平洋沖地震では複数の道路橋においてゴム支承の破断や亀裂が確認されており、多数回の余震によって損傷が進展したケースも報告されている²⁾。さらに、2016年の熊本地震でも複数の橋梁においてゴム支承の破断が発生したが³⁾、この地震では数日間のうちに震度7が2回、震度6弱以上が7回観測されるなど、非常に強い地震が複数回発生していることから、連続した強震動によって破断に至った可能性も考えられる。

こうしたゴム支承の経年劣化や強震による損傷の進展などは、橋梁全体系の耐震性能にも顕著な影響を及ぼすことが危惧される。そのため、大規模地震後の免震橋梁の残存耐震性能を把握することは、地震直後の供用継続可能性の検討や、耐震補強の実施における優先順位の検

討などにおいて非常に重要な判断材料となる。

既存橋梁の性能評価を解析的に行うためには、経年劣化や損傷による材料特性や力学的特性などの構造パラメータの変化を的確に捉え、再現性のある構造解析モデルを構築することが求められる。これには観測データに基づくベイズモデル更新が有効である。既存橋梁のモデル更新を試みた既往研究としては、鋼桁橋を対象に交通振動計測データを用いて有限要素（FE）モデル更新を実施した黒田ら⁴⁾や林ら⁵⁾などが挙げられる。しかしながら、これらの研究はいずれも観測量に固有振動数を用いた弾性解析モデルの更新であり、これまでに地震応答観測データを用いた弾塑性領域までの構造パラメータの更新を検討した例はほとんど存在していない。

そこで本研究では、免震橋梁を対象に地震応答観測データに基づくベイズモデル更新を適用することを目的として、まずは数値解析モデルによる適用性の検証を行った。具体的には、免震支承の経年劣化による力学的特性の変化を考慮した解析モデルを構築し、その弾塑性地震時刻歴応答に基いたベイズモデル更新を行うことで、構造パラメータに関して有意な事後分布を得ることができ

るかについて検討した。特に、弾塑性応答にも影響が大きいと考えられる免震支承の2次剛性の更新結果に着目した。その上で、更新されたモデルを用いた漸増動的解析による残存耐震性能評価の一例を示した。

なお、ベイズモデル更新による事後分布評価では尤度計算が重要となる。黒田ら⁴⁾や林ら⁵⁾の交通振動計測データのように比較的計測が容易である場合には、複数の計測データを用いた尤度関数の理論式に基づく評価が可能であるが、地震応答観測データのように複数回の計測が困難な場合には工夫が必要となる。そこで本研究では、近似ベイズ計算 (Approximate Bayesian Computation : ABC)⁶⁾の考え方にに基づき、簡易な近似尤度関数を適用することで効果的な尤度計算を可能にした。加えて、ベイズ更新アルゴリズムには近年提案された Bayesian updating with structural reliability methods (BUS)⁷⁾を適用した。これにより、適応型クリギング代替モデル⁸⁾に基づく事後分布評価を行い計算負荷の低減を図ることで、実務にも適用可能なモデル更新手法の構築を試みた。

2. 対象橋梁および解析条件

対象橋梁には、道路橋の耐震設計に関する資料⁹⁾に示されているI種地盤上における鉛プラグ入り積層ゴム支承 (LRB) を有する免震橋梁を用いた。表-1に対象橋梁の設計緒元を示す。解析モデルは図-1に示すような2質点系モデルとし、免震支承とRC橋脚には非線形水平バネを与え、橋脚基部は固定とした。免震支承の履歴復元力特性にはバイリニア型モデルを、RC橋脚の履歴復元力特性には完全弾塑性の骨格曲線を有するTakeda型モデル¹⁰⁾を適用した。これらの履歴曲線として、のちに示す入力地震動に対する応答結果を図-2(a)、図-2(b)にそれぞれ示す。また、各部材の減衰定数は免震支承で0%、RC橋脚で2%を与え、Rayleigh減衰を仮定した。

本研究では、免震支承の実環境下における経年劣化の影響を力学的特性の変化として考慮することとした。免震支承の経年劣化による力学的特性の変化として、例えば林ら¹¹⁾による設置後十数年が経過したLRBの残存性能確認試験では、ゴムの物性変化に伴う水平剛性の増加や破断ひずみの低下、鉛プラグが負担できるせん断力の減少に伴う切片荷重の低減などが報告されている。ここでは松崎ら¹²⁾に基づき、表-1に示す設計時の緒元に対して、水平剛性 K_{B1} 、 K_{B2} が2割増加するとともに、降伏荷重 Q_B が5割減少した状態を免震支承の経年劣化後の力学的特性とした。表-1の最終列に対象橋梁の経年劣化後の緒元を示す。なお、経年劣化による影響は免震支承に限らず上部構造やRC橋脚にも想定されるが、まずは提案手法の適用性検討の第一段階として、本研究ではこれらの

表-1 対象橋梁の設計緒元⁹⁾

		設計値	経年劣化後
上部構造	質量 M_S (ton)	604.0	604.0
免震支承	降伏荷重 Q_B (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 (ton)	346.2	346.2
	降伏荷重 Q_P (kN)	3374	3374
	降伏剛性 K_P (kN/m)	110100	110100
	降伏変位 d_y (m)	0.0306	0.0306
	終局変位 d_u (m)	0.251	0.251

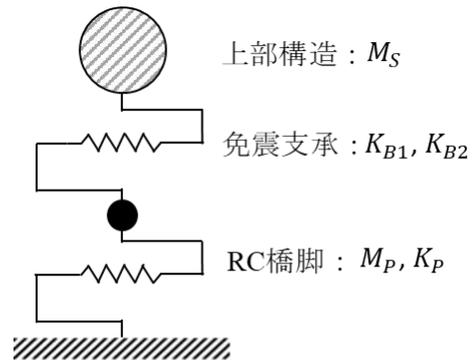


図-1 対象橋梁の2質点系モデル

影響は小さいと考えて無視することとした。

非線形時刻歴応答解析には、Newmark β 法 ($\gamma = 1/2$, $\beta = 1/4$)を用いて、時間刻みを0.001秒とした。入力地震動には、道路橋示方書¹³⁾に示されるI種地盤におけるレベル2タイプII地震動の標準波形であるII-I地震動を用いた。

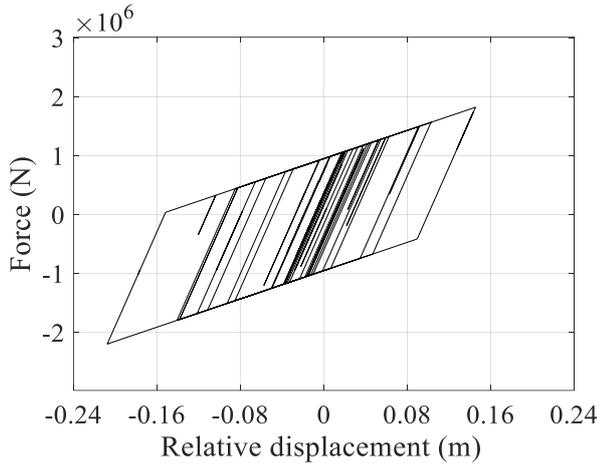
3. 近似ベイズ計算 (ABC)

ベイズモデル更新は式(1)のベイズの定理¹³⁾に基づく。

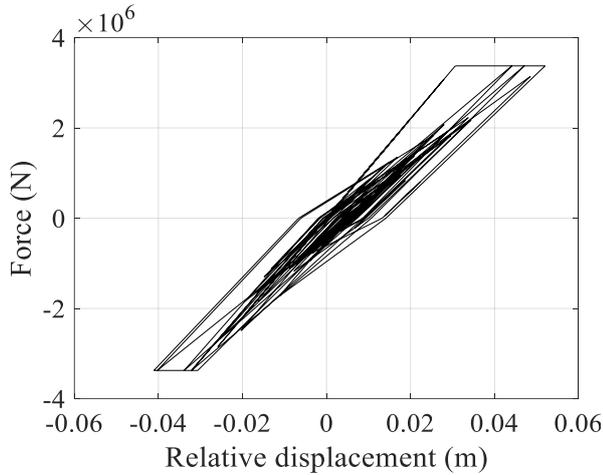
$$P(\mathbf{x}|\mathbf{Y}_{obs}) \propto P_L(\mathbf{Y}_{obs}|\mathbf{x})P(\mathbf{x}) \quad (1)$$

ここに、 $P(\mathbf{x})$ は不確定性を考慮する構造パラメータ \mathbf{x} の事前確率分布であり、パラメータの確率分布やとり得る範囲に関する事前情報を表す。 $P(\mathbf{x}|\mathbf{Y}_{obs})$ は観測データに基づき更新された \mathbf{x} の事後確率分布であり、事前確率分布に観測データの尤度関数 $P_L(\mathbf{Y}_{obs}|\mathbf{x})$ を乗じることで求められる。

ベイズ更新による事後分布評価では、観測データの尤度計算が重要となる。式(1)の尤度関数は、ある構造パラメータ \mathbf{x} が与えられたときの観測量 \mathbf{Y}_{obs} の条件付き確率密度関数 (PDF) 値である。黒田ら⁴⁾や林ら⁵⁾のように、交通振動計測データに基づく固有振動数など比較的計測



(a) 免震支承の履歴曲線



(b) RC橋脚の履歴曲線

図2 対象橋梁の履歴復元力特性

が容易かつスカラー値の観測量を用いる場合には、複数の計測データを用いて観測量のPDFを得ることが可能である。一方、本研究で対象とする地震応答観測データのように、複数回の計測が困難でかつ時系列データを対象とする場合、尤度計算に工夫が必要となる。

これに対して本研究では、近年注目を集めている近似ベイズ計算 (ABC) ⁹⁾ を適用した。近似ベイズ計算では、任意の統計量を用いて構造パラメータ \mathbf{x} と観測量 \mathbf{Y}_{obs} の関係を記述する近似尤度関数を適用する。近似尤度関数の関数形としては、ガウス関数型や Epanechnikov 関数型をはじめとしていくつかの種類が提案されており ⁹⁾、ここでは式(2)で示されるガウス関数型の近似尤度関数を採用した。

$$P_L(\mathbf{Y}_{obs}|\mathbf{x}) \propto \exp\left\{-\frac{d(\mathbf{Y}(\mathbf{x}), \mathbf{Y}_{obs})}{\varepsilon^2}\right\} \quad (2)$$

ここに、 $d(\mathbf{Y}(\mathbf{x}), \mathbf{Y}_{obs})$ は \mathbf{x} に対応するモデル応答 $\mathbf{Y}(\mathbf{x})$ と観測量 \mathbf{Y}_{obs} の間の距離関数であり、本研究では式(3)で与えられるユークリッド距離を適用した。

$$d_E(\mathbf{Y}(\mathbf{x}), \mathbf{Y}_{obs}) = \sqrt{(\mathbf{Y}(\mathbf{x}) - \mathbf{Y}_{obs})(\mathbf{Y}(\mathbf{x}) - \mathbf{Y}_{obs})^T} \quad (3)$$

$d_E(\mathbf{Y}(\mathbf{x}), \mathbf{Y}_{obs})$ が小さい、すなわちモデル応答と観測量の誤差が小さいほど式(2)の近似尤度関数は大きな値をとる。また、 ε は事後分布の中心化係数であり、 ε が小さいほど事後分布はパラメータの真の値に収束して尖った分布となるが、計算負荷は高くなることが知られている。本研究では既往の研究 ¹⁴⁾ に従い $\varepsilon = 0.1$ とした。

ここで、統計量にユークリッド距離を用いたのは、地震応答観測データのような離散時系列データからでも容易に近似尤度を計算できるためである。このように、近似ベイズ計算では、対象とするモデルや観測量に応じた適切な統計量を使用することで、通常尤度関数の評価が困難な問題にも適用可能となる。

4. 代替モデルに基づくベイズ更新アルゴリズム

ベイズ更新による事後分布評価では、サンプリングによる方法を適用することが一般的である。例えば、黒田ら ⁴⁾ ではマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) ¹⁵⁾ が、林ら ⁵⁾ では Particle Filter (PF) ¹⁶⁾ がそれぞれ用いられている。ところが、これらのサンプリングによる方法では、数万回にもおよぶ各ステップで尤度計算が必要であり、本研究のような尤度計算に非線形時刻歴応答解析を伴う場合には、計算コストが非常に高くなり現実的には実施が困難になってしまう。

これに対して本研究で着目したのが、近年提案された Bayesian updating with structural reliability methods (BUS) ⁷⁾ である。この手法では、ベイズ更新問題を信頼性解析問題に置き換えることで、既存の構造信頼性解析手法を用いた定式化を可能にしている。本章では、BUSの考え方を簡単にまとめたうえで、適応型クリギング代替モデル ⁸⁾ に基づく BUS の解法を示し、計算負荷を大幅に低減した実務にも適用可能なモデル更新手法の構築を試みた。

BUS では、同時確率密度関数 $P(\mathbf{x})I(0 \leq u \leq 1)$ に従う構造パラメータ \mathbf{x} と標準正規乱数 u に対する信頼性解析問題を考える。ここに、 I はインジゲーター関数であり、 $0 \leq u \leq 1$ を満たす場合には $I = 1$ 、それ以外の場合には $I = 0$ となる。この信頼性解析問題に対応する限界状態関数は式(4)で表わすことができる。

$$G = u - cP_L(\mathbf{Y}_{obs}|\mathbf{x}) \quad (4)$$

ここに、 c は尤度係数であり $cP_L(\mathbf{Y}_{obs}|\mathbf{x}) \leq 1$ を満たす。このとき、破壊領域 $F = \{G \leq 0\}$ に入るサンプル (\mathbf{x}', u') の PDF を考えると、式(1)の事後分布 $P(\mathbf{x}|\mathbf{Y}_{obs})$ と一致することが示せるため、既存の構造信頼性解析手法に基づく破壊領域 F からのサンプリングによって事後分布を推定することが可能となる。

BUSにおける限界状態関数には、尤度計算のために計算負荷の高い数値解析を伴うことが一般的である。この計算負荷を大幅に低減する手法として、適応的に選択した限られたサンプル点での実現値に基づき、限界状態関数をガウス過程として確率的に表現されたモデルで置き換える、適応型クリギング代替モデル⁷⁾の適用が有効であると考えられる。

本研究では、適応型クリギングモデルの構築アルゴリズムとしてAK-MCMC法¹⁾を適用した。AK-MCMC法では、構造パラメータ \mathbf{x} と標準正規乱数 u の同時確率密度関数 $P(\mathbf{x})I(0 \leq u \leq 1)$ に従いモンテカルロシミュレーション(MCS)で発生させたサンプルから、破壊領域に近いサンプルを適応的に選択して限界状態関数の値を算出し、クリギングモデルを構築・更新する。その後、構築したクリギングモデルを用いてMCMCに基づき破壊領域へと段階的にサンプルを近づけていき、随時クリギングモデルの構築と更新を行う。これを繰り返して、最終的に破壊領域から十分な数のサンプリングを行い、これを構造パラメータの事後分布として採用する。

適応型クリギング代替モデルに基づくBUSの計算では、クリギングモデルを構築するために使用する限られたサンプル点でのみ式(4)に示す尤度計算を伴う限界状態関数の評価を行うため、一般的なサンプリングによる方法と比べて、事後分布の推定に必要な尤度計算の回数を大幅に低減することが可能となる。

5. 対象橋梁のベイズモデル更新と残存耐震性能評価

本研究では、大規模地震を受けた対象橋梁の残存耐震性能評価を想定して、地震応答観測データを用いたベイズモデル更新によって、対象橋梁の既存状態を考慮した再現性のある解析モデルの構築を試みた。その上で、更新されたモデルを用いた漸増動的解析を行い残存耐震性能評価の一例を示した。

(1) 構造パラメータ事前分布の設定

ベイズモデル更新では、対象橋梁の構造パラメータのうち、経年劣化による変化が想定されるパラメータについて、そのとり得る範囲を事前分布として設定する。2章に示した通り、本研究の対象橋梁では、経年劣化の影響を免震支承の構造パラメータに限定し、上部構造とRC橋脚のパラメータは変化しないものとしている。一方、実際にモデル更新を行う場合には、どのパラメータが変化しているか事前には分からないことも少なくない。そのため、ここでは表-1に示す対象橋梁の構造パラメータのうち、免震支承の1次・2次剛性 K_{B1} 、 K_{B2} および降

伏荷重 Q_B に、上部構造質量 M_S とRC橋脚の質量 M_P 、降伏剛性 K_P を加えた計6つのパラメータについて事前分布を設定した。なお、これら以外のパラメータはすべて確定値とし、いずれも表-1に示す設計値を与えた。

事前分布は一様分布を仮定し、各パラメータの値を表-1に示す設計値で除して無次元化した上で一律に上下限値を与えた。上限値は、経年劣化による免震支承の水平剛性の増加率を考慮して1.5とした。同様に、下限値は免震支承の降伏荷重の低減率を考慮して0.2とした。すなわち、経年劣化や損傷によって構造パラメータが設計値の20%から150%の範囲で変化している可能性を事前分布として考慮している。

このように、事前分布の設定にあたっては、経年劣化や損傷による構造パラメータの変化に関する既往研究で得られた知見を活用することが可能である。なお、上部構造とRC橋脚のパラメータについても、経年劣化や損傷の影響に関する知見に基づき個別に事前分布を設定することが望ましいが、本研究では実際にはこれらのパラメータは経年劣化の影響を考慮していないことから、簡単のため免震支承のパラメータと同じ事前分布を与えることとした。

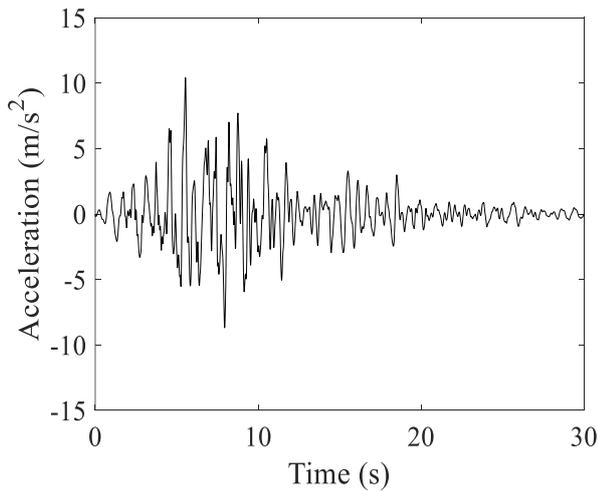
(2) 疑似地震応答観測データ

ベイズモデル更新に用いる観測データとして、大規模地震時の対象橋梁の上部構造での地震応答計測を想定している。実際の観測データは存在しないため、2章で構築した対象橋梁の解析モデルから疑似地震応答観測データを算出して、ベイズ更新に用いた。

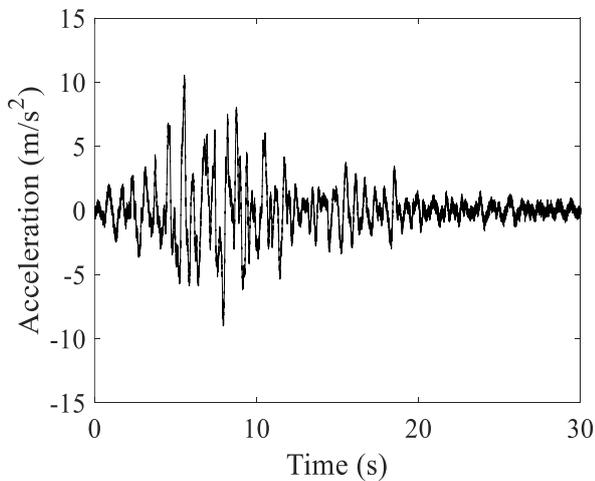
図-3(a)に、2章に示した入力地震動II-I-1地震動に対する上部構造質点における加速度応答の時刻歴波形を示す。これに対して、実際の加速度センサによる地震応答観測では計測誤差の影響が無視できないと考えられるため、本研究でもこの影響を考慮して、図-3(a)の加速度応答波形にホワイトガウスノイズを加えた波形を作成し、これをベイズモデル更新のための疑似地震応答観測データとして使用した。作成した疑似地震応答観測データを図-3(b)に示す。

(3) ベイズモデル更新結果

ここでは、提案手法に基づくベイズモデル更新結果についてまとめる。AK-MCMC法では、構造パラメータ事前分布からMCSおよびMCMCで生成されたサンプル計316点での尤度計算結果に基づき、式(4)に示す限界状態関数を近似するクリギングモデルを構築した。構築したクリギングモデルを用いて、破壊領域からサンプリングした構造パラメータの事後分布を図4に示す。対角線上に位置する図は、各構造パラメータの事後分布として採用された計500サンプルのヒストグラムを、残りの図は



(a) 上部構造質点での加速度応答時刻歴



(b) ホワイトガウスノイズを加えた疑似観測データ

図-3 対象橋梁の地震時刻歴応答

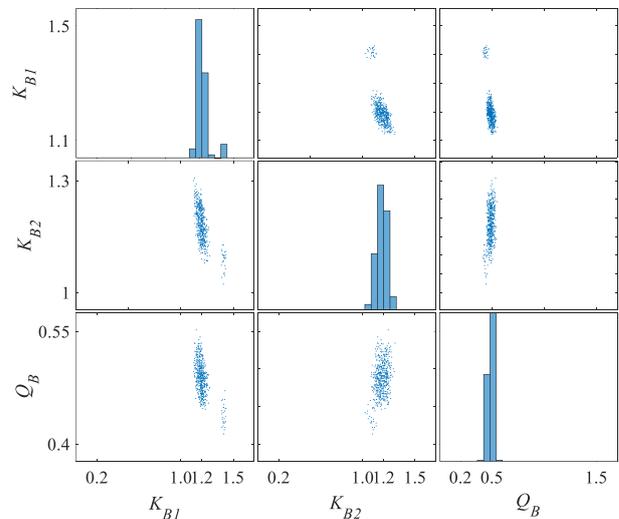
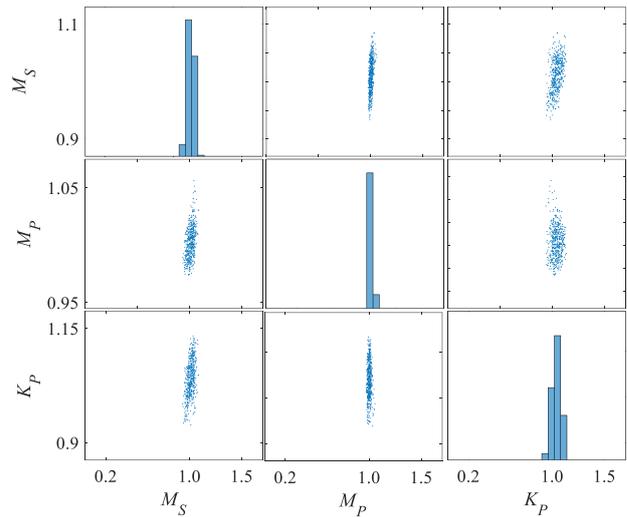


図-4 構造パラメータの事後分布推定結果

表-2 ベイズモデル更新結果

構造パラメータ	正解値	更新値	推定誤差
M_S	1.0	1.011	1.1%
K_{B1}	1.2	1.203	0.25%
K_{B2}	1.2	1.181	1.6%
Q_B	0.5	0.487	2.6%
M_P	1.0	1.003	0.3%
K_P	1.0	1.041	4.1%

任意の二つのパラメータの間の散布図を示している。なお、図の横軸の幅は事前一様分布の上下限值に対応している。

図4より、すべてのパラメータについて、その事後分布は真の値、すなわち対象橋梁の経年劣化後のパラメータ値に十分収束していることが分かる。特に本研究では、大規模地震時の地震応答観測を想定した、ノイズを含む疑似地震応答観測データを用いることで、弾塑性応答にも影響が大きいと考えられる免震支承の2次剛性についても、経年劣化による変化を適切にとらえた有意な事後分布に更新することができた。

表-2にベイズ更新結果をまとめる。ここで、正解値とは対象橋梁の経年劣化後のパラメータ値を基準化した値を、更新値はベイズ更新で得られた事後分布の平均値をそれぞれ示している。更新値の推定誤差はすべてのパラメータで5%以下であり、提案手法によるベイズモデル更新の精度は十分であることを示すことができた。

表-2にベイズ更新結果をまとめる。ここで、正解値とは対象橋梁の解析モデルのパラメータ値を、更新値はベイズ更新で得られた事後分布の平均値をそれぞれ示している。更新値の推定誤差はすべてのパラメータで5%以下であり、提案手法によるベイズモデル更新の精度は十分であることを示すことができた。

図5には、表-2に示す構造パラメータの更新値を与えた更新後モデルについて、入力地震動 II-I 地震動に対する上部構造質点の加速度応答の時刻歴波形を示す。ま

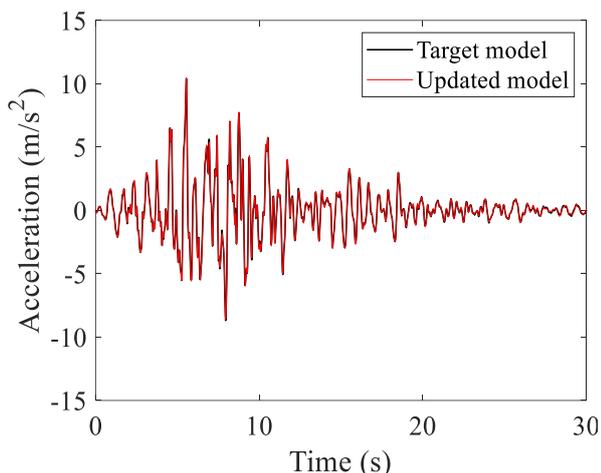


図5 更新後モデルの地震時刻歴応答

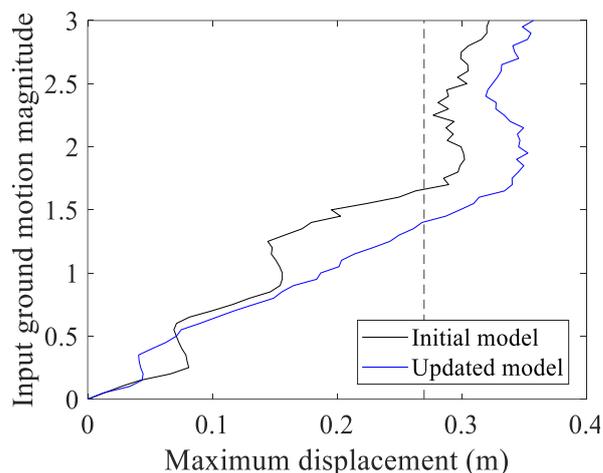
た、図-3(a)に示した経年劣化後の対象橋梁モデルによる加速度応答時刻歴も併せて示した。両者の時刻歴波形はよく一致しており、最大値も経年劣化後の対象橋梁モデルで 10.47 m/s^2 であるのに対して、更新後モデルで 10.4 m/s^2 であり、その推定誤差は1%未満であることから、対象橋梁の既存状態を考慮した再現性のある解析モデルを構築することができた。

なお、提案手法では事後分布の推定に必要な尤度計算の回数が、クリギングモデル構築のための316回のみであり、一般に数万回にもおよび尤度計算を必要とするMCMCなどの既存のベイズ更新アルゴリズムと比べて計算負荷を大幅に低減することができた。Intel Core i7-8650 U CPU, 1.90 GHz の計算機環境での事後分布推定に要した計算時間はおよそ12分であり、提案手法の実務への適用可能性を示すことができたと考えている。

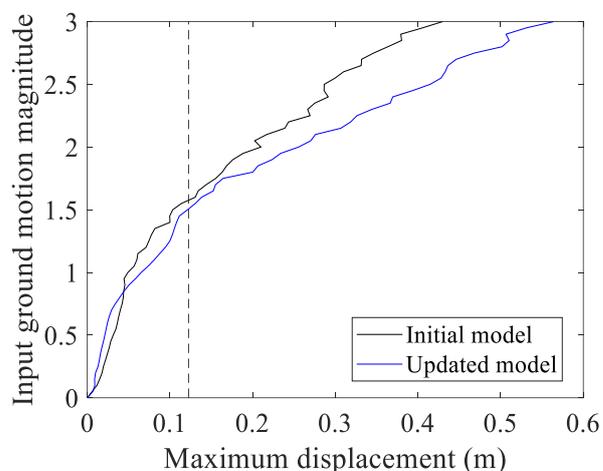
(4) 漸増動的解析による残存耐震性能評価

最後に、対象橋梁の既存状態を考慮した更新後モデルを用いて、漸増動的解析 (Incremental dynamic analysis: IDA)¹⁸⁾による残存耐震性能評価の一例を示す。IDAとは、入力地震動の振幅倍率を漸増させて非線形時刻歴応答解析を繰り返すことで、対象橋梁の耐震性能について解析的に検討する手法である。ここでは、一例として入力地震動II-II-1地震動について、その振幅倍率を0.05刻みで調整した漸増動的解析を実施した。

図6に構造パラメータの設計値を与えた初期モデルおよび、経年劣化の影響を考慮した更新後モデルの漸増動的解析結果を示す。図-6(a)は各振幅倍率の入力地震動に対する免震支承の最大変位を、図-6(b)は同じくRC橋脚の最大変位を示している。また、図中の点線は、道路橋示方書¹³⁾において耐震性能2として規定される免震支承の許容せん断ひずみおよびRC橋脚の許容塑性率に対応



(a) 免震支承



(b) RC橋脚

図6 対象橋梁の漸増動的解析曲線

する変位を示している。

これより、免震支承の経年劣化の影響を再現した更新後モデルでは、免震支承とRC橋脚のいずれにおいても同一振幅の入力地震動に対する応答変位が増加しており、耐震性能が低下していることが分かる。特に、免震支承の許容せん断ひずみに対する余裕度が低下しており、次に設計地震動を超えるような強震動に見舞われる際には、許容せん断ひずみを超過する変位が生じる可能性が高くなっていることが示唆される。

このように、ベイズモデル更新結果に基づき構築した、対象橋梁の既存状態を考慮した解析モデルを用いて耐震性能評価を行うことで、経年劣化や地震時の損傷の進展によって耐震性能がどの程度低下しているかを解析的に検討することが可能であり、本研究ではその一例を示すことができた。

6. 結論

本研究では、免震橋梁の弾塑性解析モデルを対象に、地震応答観測データに基づくベイズモデル更新の適用性について検討を行った。近似ベイズ計算に基づき効果的な近似尤度関数を構築し、BUSと適応型クリギング代替モデルを組み合わせることで、計算効率を大幅に向上させつつ、妥当な事後分布推定結果を得ることができた。その上で、更新されたモデルを用いた漸増動的解析を行い残存耐震性能評価の一例を示した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 近似ベイズ計算の考え方に従いユークリッド距離を用いた近似尤度関数を構築することで、地震応答観測データのような複数回の計測が困難でかつ時系列データを対象とする場合にも適用可能なベイズモデル更新の方法を示すことができた。
- 2) 近年提案されたベイズ更新アルゴリズムであるBUSを適応型クリギング代替モデルと組み合わせることで、事後分布の推定に必要な尤度計算の回数を大幅に低減することができ、提案手法の実務への適用性を示せたと考える。
- 3) 地震応答計測を想定した疑似地震応答観測データを使用した検討により、免震支承の2次剛性を含めた弾塑性解析モデルの構造パラメータを、経年劣化による変化を適切にとらえた妥当な事後分布へと更新することができた。
- 4) 事後分布推定結果に基づく更新後モデルの活用例として、漸増動的解析による残存耐震性能評価の一例を示した。

以上により、既存橋梁の残存耐震性能評価へのベイズモデル更新の適用可能性を示すことができたと考えられる。ただし、本研究はあくまで数値解析モデルを用いた基礎的な検討であり、実際の構造物への適用のためには本研究で検討した計測誤差のほかにも、モデル化誤差の影響など考慮しなければならない課題が存在しており、実橋梁での計測実験での検証も実施していくことが必要であると考えている。

参考文献

- 1) 林訓裕, 足立幸郎, 甲元克明, 八ツ元仁, 五十嵐晃, 党紀, 東出知大: 経年劣化した鉛プラグ入り積層ゴム支承の残存性能に関する実験的検証, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.4 (地震工学論文集第33巻), pp.I_1032-I_1042, 2014.
- 2) 曾田信雄, 山田金喜, 木水隆夫, 広瀬剛, 鈴木基行: 東北地方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) 国土交通省国土技術政策総合研究所, (独) 土木研究所: 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震土木施設被害調査報告, 国土技術政策総合研究所資料第 967 号/土木研究所資料第 4359 号, 2017.
- 4) 黒田璃紗, 西尾真由子: 既存鋼鉄桁橋のモデルパラメータ事後分布を用いた信頼性評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.3, pp.380-392, 2016.
- 5) 林巖, 金哲佑, 三増拓也, 五井良直, 吉田郁政, 杉浦邦征: Particle Filter を用いた既設鋼版 2 主桁橋の FE モデルアップデート, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.74, No.2 (応用力学論文集 Vol.21), pp. I_705-I_714, 2018.
- 6) Safia, C., Sargsyan, K., Najm, H. N., Chowdhary, K., Debusschere, B., Swiler, L. P. and Eldred, M. S.: Probabilistic methods for sensitivity analysis and calibration in the NASA challenge problem. *Journal of Aerospace Information Systems*, Vol.12, No.1, pp.170-188, 2015.
- 7) Straub, D. and Papaioannou, I.: Bayesian updating with structural reliability methods. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.141, No.3, 04014134, 2015.
- 8) Sudret, B.: Meta-models for structural reliability and uncertainty quantification, *Proceedings of 5th Asia-Pacific symposium on structural reliability and its applications*, Singapore, pp.53-76, 2012.
- 9) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 丸善, 1997.
- 10) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N.: Reinforced concrete response to simulated earthquakes, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.96, No.12, pp.2557-2573, 1970.
- 11) 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.
- 12) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善, 2017.
- 13) Beck, J. L. and Ktafygiotis, L. S.: Updating models and their uncertainties, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.124, No.4, pp.455-461, 1998.
- 14) Patelli, E., Govers, Y., Broggi, M., Gomes, H. M., Link, K. and Mottershead, J. E.: Sensitivity or Bayesian model updating: comparison of techniques using the DLR AIRMOD test data, *Archive of Applied Mechanics*, Vol.87, pp.905-925, 2017.
- 15) 吉田郁政, 佐藤忠信: MCMC を用いた損傷確率の効率的算定法, 土木学会論文集, No.794/I-72, pp.43-53, 2005.
- 16) Kitagawa, G.: Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian nonlinear state space models, *Journal of Computational Graphical Statistics*, Vol.5, pp.1-25, 1996.
- 17) Wei, P., Tang, C. and Yang, Y.: Structural reliability and reliability sensitivity analysis of extremely rare failure events by combining sampling and surrogate model methods, *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, Vol.233, No.6, pp.943-957, 2019.
- 18) Vamvatsikos, D. and Cornell, C. A.: Incremental dynamic analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.31, No.3, pp.491-514, 2002.

APPROXIMATE BAYESIAN COMPUTATION MODEL UPDATING OF SEISMIC-ISOLATED BRIDGES FOR RESIDUAL SEISMIC PERFORMANCE ESTIMATION

Masaru KITAHARA, Matteo BROGGI and Michael BEER

The deterioration of seismic-isolation bearings and the progress of their damage under earthquakes may lead to the degradation of the seismic performance of the whole bridge system, so that the evaluation of the residual seismic performance of seismic-isolated bridges after a large earthquake is important for deciding their management policy. This study investigated the applicability of Bayesian model updating based on seismic response data to the residual seismic performance evaluation by using an elasto-plastic analytical model of a seismic-isolated bridge. An approximate likelihood function is constructed based on the approximate Bayesian computation method. Moreover, BUS is combined with the adaptive Kriging surrogate model to obtain reasonable posterior distributions of structural parameters, including post-yield stiffness of the bearing, with the significantly reduced computational burden. Finally, an example of the residual seismic performance evaluation was presented by incremental dynamic analysis using the updated model.