

階層ベイズ更新による既存橋梁の耐震性能評価モデルの構築

東京大学 北原優*

階層ベイズモデル	モデル更新	不確定性定量化
既存橋梁	免震支承	地震応答

研究の目的

著者らはこれまでに、連続免震橋の 1 径間部分を模した質点系モデルを対象に、地震時の加速度応答データを用いたベイズモデル更新の検討を行い、ゴム支承の経年による物性値の変化を定量的に評価できることを示した¹⁾。しかし、実橋においては製造誤差や環境条件による劣化の進行度のばらつきにより径間毎に部材の物性値が異なるため、橋梁システム全体を対象としたモデル更新の検討が不可欠である。本研究では、上記の連続免震橋の 2 次元有限要素モデルを構築し、各径間のゴム支承の相対応答を用いて復元力特性パラメータの推定を行う。このとき、各パラメータを独立に推定する一般的なベイズモデル更新に加えて、ゴム支承の初期剛性と降伏後剛性に相関を仮定し、コピュラモデルで事前分布を階層化した階層ベイズモデル更新を検討し、パラメータの推定精度や構築したモデルによる地震応答の予測精度を評価する。

研究の内容

1. 対象橋梁および解析条件

土木学会「橋の動的耐震設計」に記載の鉛プラグ入り積層ゴム支承を有する 5 径間連続の RC 免震橋を対象に、2 次元有限要素モデルを構築した。橋脚は 5 節点の線形梁でモデル化し、橋脚下端とフーチング上端を結ぶ非線形回転ばねを与えた。桁は 11 節点の線形梁とし、ゴム支承は桁と橋脚天端を結ぶ非線形水平ばねで与えた。フーチング下端は水平・回転ばねを与えて地盤との相互作用を考慮した。一方、橋台はゴム支承を非線形水平ばねで与えて下端は固定とした。復元力特性は、ゴム支承の水平ばねにバイリニア型モデルを、橋脚基部の回転ばねに完全弾塑性 Takeda 型モデルを適用した。

ゴム支承のパラメータのばらつきは正規分布でモデル化した。初期剛性 k_{b1} と降伏後剛性 k_{b2} には相関を仮定し、相関係数は 0.7 とした。一方、実橋から取得した経年後のゴム支承の載荷試験では、ゴムの硬化による水平剛性の増加や鉛プラグの突出による降伏荷重の低下が報告されており、本研究でも経年時の平均値は初期剛性 k_{b1} と降伏後剛性 k_{b2} が健全時の 1.2 倍、降伏荷重 Q_y が健全時の 0.5 倍となることを仮定した。また、標準偏差は健全時と比べて変動係数が一律に 1.2 倍となることを仮定した。

本研究では、対象橋梁の非線形地震応答に対して支配的なゴム支承のパラメータ (12 個) が未知であるとし、地震応答を用いたモデル更新を検討した。応答解析には Newmark β 法 ($\beta = 1/4$) を、入力地震動には道路橋示方書の I 種地盤上におけるレベル 2 タイプ II 地震動の II-I-1 地震動を用いた。時間刻みは 0.001 秒とし、主要動の 20 秒間を解析対象とした。計測データは、各径間のゴム支承の相対応答を評価するため、水平ばね上下端の 8 か所における加速度応答時刻歴を採用した。

2. モデル更新の定式化

ベイズモデル更新では、前段 12 個のパラメータ x_i ($i = 1, \dots, 12$) の事後分布を推定する。添え字は 1 から 4 が各径間の初期剛性 k_{b1} 、5 から 8 が降伏後剛性 k_{b2} 、9 から 12 が降伏荷重 Q_y に対応する。事前分布は、一律に設計値比で範囲が $[0, 2]$ の一様分布を仮定した。尤度関数は、各自由度・各時間ステップにおける加速度が独立である仮定し、各自由度に計測データの標本分散を与えた正規分布でモデル化した。

事後分布の推定には、逐次モンテカルロ法の一つである Transitional Markov chain Monte Carlo (TMCMC) を用いた。TMCMC は、事前分布空間と事後分布空間に対して入れ子関係にある中間分布空間での MCMC を繰り返し、サンプルを段階的に事前分布から事後分布へと押し進めていく。事後分布から直接サンプリングを行う MCMC と比べて、高次元におけるサンプリングや複雑な分布形状のサンプリングにも適していることが知られている。

上記のベイズモデル更新では、各パラメータ x_i は独立に生成されることを仮定している。しかし、実際にはゴム支承の初期剛性と降伏後剛性はおおよそ一定の関係にあることが知られている。このようなパラメータの制約を階層的な事前分布を仮定することで考慮する方法を階層ベイズモデル更新と呼び、パラメータ x がハイパーパラメータ θ で決まる確率分布に従って生成されるとき、 x と θ の同時事後分布を推定する。

本研究では、各径間におけるゴム支承の初期剛性と降伏後剛性の間に正規コピュラモデルを仮定し、その相関係数をハイパーパラメータ θ とした。 θ の事前分布は範囲が $[-1, 1]$ の一様分布を仮定した。

研究の成果、新知見

計測データについて、桁上の4自由度における加速度応答時刻歴と、橋脚天端の4自由度における加速度応答時刻歴をそれぞれ重ねて示すと、桁の異なる箇所における加速度応答にはほとんど差異がなく、橋軸方向には桁がほぼ剛体として運動しているのに対して、各径間におけるゴム支承の復元力特性のばらつきによって、各橋脚天端における加速度応答は振幅と位相に差が生じていることが確認された。

ベイズモデル更新の事後分布から TCMCMC で抽出した 1000 サンプルのヒストグラムでは、12 個すべてのパラメータが事前分布と比べて大幅に更新されている。特に、降伏荷重 Q_y はすべての径間で事後分布が正解値に収束しており、事後平均値と正解値の誤差は 10 %以下であることから、経年による降伏荷重の低下量のばらつきを地震応答の計測によって適切に評価可能であることが示唆された。一方、初期剛性 k_{b1} も P4 径間を除き精度良く推定することができたのに対し、降伏後剛性 k_{b2} は正解値と比べて大幅な乖離が認められた。また、 k_{b1} と k_{b2} の事後推定値には相関が認められず、ベイズモデル更新はゴム支承の復元力特性を適切に評価するには不十分であることが明らかになった。

同様に、階層ベイズモデルの事後分布から TCMCMC で抽出した 1000 サンプルのヒストグラムでも、12 個すべてのパラメータが事前分布と比べて大幅に更新されている。特に、P4 径間を除き降伏荷重 Q_y のみでなく初期剛性 k_{b1} と降伏後剛性 k_{b2} も事後分布は正解値に収束している。また、 k_{b1} と k_{b2} の相関係数 θ の事後分布は正の相関を適切に推定しており、結果として k_{b2} の推定精度が大幅に向上したものと考えられる。事後平均値と正解値の誤差は最大でも 15 %以下であり、すべてのパラメータで一般的なベイズモデル更新と比べて誤差が大幅に低減されていることが確認された。

P1 径間の橋脚天端における変位応答時刻歴について、パラメータの事前分布に基づくモデル予測と各パラメータの正解値を用いた場合の応答解析結果を比較した。なお、モデル予測は推定の期待値にくわえて 99.7%信頼区間も考慮した。更新前のモデル予測は実際の応答と乖離が認められ、予測の不確実性も大きいのに対して、事後分布に基づくモデル予測は、階層化の有無によらず不確実性が大幅に低減された。また、ベイズモデル更新では降伏後剛性の推定誤差の影響で残留変位を過小評価しているのに対して、階層ベイズモデル更新では残留変位を含めて変位応答を精度良く推定できており、信頼区間は実際の応答を適切に包含していることが確認された。

最後に、モデル更新前後におけるモデル予測の期待値と実際の変位応答について、二乗平方根誤差 (RMSE) および最大値の相対誤差を比較した。モデル更新前はすべての径間で相対誤差は 15 %以上であるのに対して、モデル更新後は 10 %以下まで相対誤差が低減された。P4 径間を除き、ベイズモデル更新と比べて階層ベイズモデル更新はより相対誤差の低減効果が高く、階層ベイズ更新後の相対誤差はすべての径間で 5 %以下であった。同様の傾向は RMSE についても確認され、モデル更新前、ベイズモデル更新後、階層ベイズモデル更新後の順に RMSE は低減され、階層ベイズモデル更新後はすべての径間で RMSE は 0.001 と非常に小さい値であった。

結論と今後の予定

本研究では、経年した既存橋梁の現有耐震性能を定量的に評価することを目的に、5 径間連続 RC 免震橋を対象に地震応答加速度の計測による 2 次元有限要素モデル更新を実施し、径間毎にばらつきを示すゴム支承の復元力特性に関する不確実性の定量化を検討した。一般的なベイズモデル更新にくわえて、コピュラモデルで事前分布を階層化した階層ベイズモデル更新を定式化し、同一計測データに対して階層化の有無の影響を検討した。

モデル更新の結果、支承の相対加速度応答を計測することで、階層化の有無によらず復元力特性パラメータを事前分布から大幅に更新することができた。ただし、一般的なベイズモデル更新では地震応答の予測不確実性は適切に低減されるものの、剛性比の関係が考慮されていないため、特に降伏後剛性の推定精度が低くなることが明らかになった。一方、階層ベイズモデル更新では剛性比の関係をコピュラモデルの相関係数により考慮することで、計測データから初期剛性と降伏後剛性に正の相関があることを推定し、結果として降伏後剛性を含めてゴム支承の復元力特性パラメータを高精度に推定することが可能であった。

以上より、各径間における相対地震応答データを用いた橋梁全体系の階層ベイズモデル更新によって、径間毎に劣化の進行度が異なるゴム支承の復元力特性の変化を適切に評価可能であることを示すことができたものと考ええる。今後の実構造物への展開においては、本研究では検討の対象外とした減衰特性や入力地震動の不確実性が更新結果に与える影響についても検討していく必要がある。これにより、ゴム支承の劣化に伴う減衰特性を含めた免震性能の低下を地震後早期に検出し、必要な補修・交換に関する意思決定の支援につなげることが可能になると期待される。