

ベイズ推定による既存橋梁の有限要素モデル妥当性評価に関する基礎検討

横浜国立大学 正会員 ○西尾真由子
 東京大学大学院 非会員 Juliette Marin
 東京大学 フェロー会員 藤野 陽三

1. 研究背景と目的

耐用年数に近づく既存橋梁が増加する中、それらの補修補強策定、構造モニタリングなどのため、適切な数値モデルの構築が求められる。しかし実環境に晒された構造物は経年劣化により、材料定数・境界条件（支承部）で設計時の諸元を用いることが適切ではないことがある。本論文では、これら不確定パラメータに対し、計測データを用いたベイズ事後分布推定を行い、その結果からキャリブレーションを行うことで妥当な数値モデルを得ることを提案し、実橋梁の有限要素動解析モデルへ適用した結果を示す。実験室供試体での適用結果は、既往研究に示されているが[1][2]、実環境に数十年晒された実橋梁への適用を通して、既存構造物のモデル妥当性評価法に関する基礎検討を行うことを目的とした。

2. 対象橋梁からのデータ取得

対象橋梁は大宮橋（千葉県、1977 年竣工）、スパン 18m 幅員 8m の単純桁橋で、三体の鋼桁とコンクリート床版からなる。本研究では動解析モデルを検証の対象としたことから、打撃振動試験からモード特性（固有周波数とモード形）を導出し、計測データとして事後分布推定に用いることとした。各桁に鉛直方向の加速度計を設置し、計測データを確率変数で取り扱うため、可能な限り同じ状態（打撃位置、強さ、気温など）で 44 回のデータ取得を行った。モード特性の導出には、加速度応答のみで導出を行う ERA 法を採用した。図 1 に対象橋梁の概要、表 1 に得られた第 1 次～5 次モードの固有周波数を示す。

3. 有限要素モデル構築と不確定パラメータの設定

対象橋梁の有限要素モデル構築には、ABAQUS-6.9 を用いた。コンクリート床版、鋼桁、その他の鋼部材、全てにおいてソリッド要素を適用し、支承部のみ線形・回転バネにてその挙動をモデル化した。

Picture of the deck:



Picture of the girders:



図 1 大宮橋の概要

表 1 振動試験で得られた固有振動数

Mode #	Type of mode	Mean (Hz)	Coefficient of variation
1	1 st Bending	7.10	2.8 %
2	1 st Torsion	8.69	1.2 %
3	2 nd Bending	19.22	2.2 %
4	2 nd Torsion	19.99	0.7 %
5	3 rd Torsion	23.27	1.4 %

構築した有限要素モデルを図 2 に示す。要素タイプとメッシュサイズの収束を調べた上で[2]、分散分析 (Analysis of variance: ANOVA)によって、出力であるモード解析結果に感度が高い不確定パラメータの抽出を行った。候補となるパラメータには、コンクリートと鋼の材料定数(ヤング率, 密度, ポアソン比), および支承部の水平・回転バネ定数をあげた。

キーワード 既存構造物, 有限要素モデル, ベイズ推定, 不確定性定量化, モデル妥当性

連絡先 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 TEL 045-339-4255

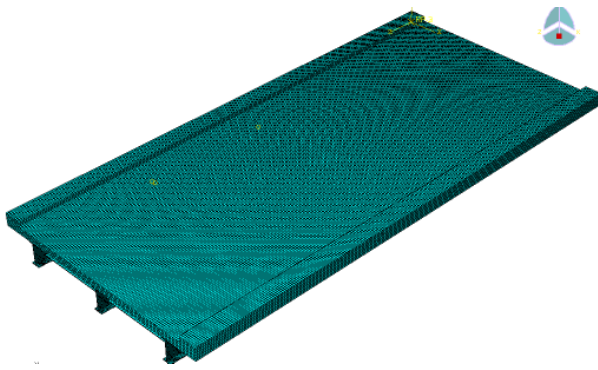


図2 大宮橋有限要素モデル

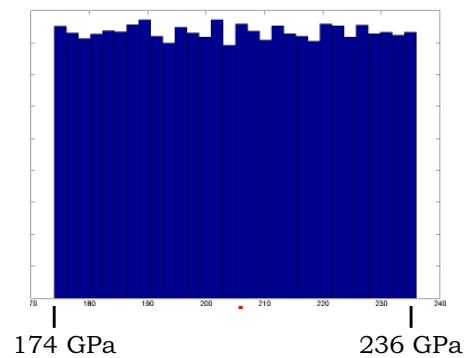
いずれも経年によって設計値からの変化が想定されるが、定量値を把握することが難しいパラメータである。分散分析の結果、モード特性に特に影響度が高い不確定パラメータは、コンクリート・鋼のヤング率と密度、支承部の水平方向バネ定数であり、これら5つを次のベイズ推定に適用することとした。

4. 不確定パラメータの事後分布推定

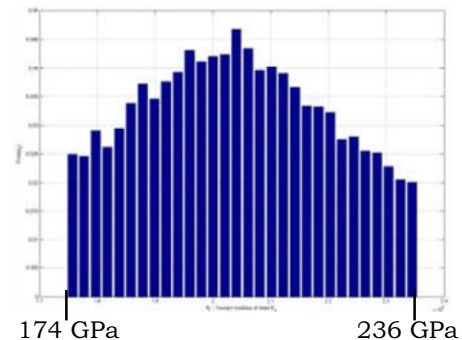
ベイズ推定は、不確定な原因事象の事前分布に、計測データという証拠を適用し、それに基づく事後分布を推定する。ここでは、原因事象として取り扱う不確定パラメータ（材料定数と水平バネ定数）について、もっとも不確定であることを表す、ある範囲での一様分布を事前分布として設定し、計測実験で得たモード特性値を証拠データとして、事後分布を推定した。なお計算コードには、解の探索にマルコフ連鎖モンテカルロ法を活用するものを用いた[3]。図3に結果の一つとして、鋼のヤング率 E_s の事前・事後分布を示す。計測データの情報を加えることで、一様分布からピークを持つ事後分布が得られており、不確定性が小さくなったといえる。全体的には、特にコンクリートおよび鋼の材料定数に対して、明確なピークを持つ事後分布が推定される、という結果となった。このような事後分布が得られれば、ピーク値をモデルキャリブレーションに用いることで、実際の構造物応答に基づく妥当性が保障された数値モデルが得られる。一方、境界条件のバネ定数については、ピークを持つ事後分布は得られず、これに対して、事前分布の設定法に関する考察など、いくつかの今後の課題を見出した。

5. まとめ

本研究は、既存橋梁の妥当な有限要素モデルの構築に、ベイズ推定により実構造応答に基づいて導出



(a) 事前分布



(b) 事後分布

図3 鋼ヤング率の事前分布と事後分布

される事後分布からキャリブレーションを行うことを提案し、実橋梁の動解析モデルへの適用を示した。その結果、特に桁と床版の材料定数について明確なピークを持つ事後分布が得られたが、境界条件には有意な分布が得られず、既存構造物のモデル妥当性を検討する有効な手法としていくための、今後の課題を挙げることができた。

参考文献

- [1] Van Buren K., Mollineaux M., Hemez F., “Simulating the dynamics of wind turbine blades: Part II, Model validation and uncertainty quantification,” Proc. 13th AIAA Non-deterministic Approaches Conference, 2011.
- [2] Marin J., Nishio M., Fujino Y., “Uncertainty quantification and validation of finite element models of bridge structures” The 8th International Workshop on Structural Health Monitoring, 2011.
- [3] Higdon D., Gattiker J., Williams B., Rightley M., “Computer Model Calibration Using High-Dimensional Output,” Journal of the American Statistical Association, Vol. 103, Issue 482, 2008.