

全体系振動特性の推定値に基づく鋼トラス橋の FE モデル精緻化

長崎大学大学院 学生会員 ○田中敦海 長崎大学大学院 正会員 西川貴文
長崎大学大学院 正会員 中村聖三

1. はじめに

有限要素法を用いて実構造物の構造特性を精度良く解析で再現するためには、構造物の現状を考慮した精緻な FE モデルが必要となる。本研究では、実測振動応答から高精度に推定した振動特性を参照値として、FE モデルパラメータを自動更新することで FE モデルを精緻化する手法を構築し、鋼トラス橋を対象に手法を試行した。

2. FE モデルの精緻化手法の構築

2.1. FE モデルの精緻化方法

FE モデルの精緻化を、振動特性の解析値と実測値の差を最小化する FE モデルパラメータ $\mathbf{x}$ の最適化問題とし、最小化する目的関数を式(1)とした。

$$J(\mathbf{x}) = \sum_i^n \left(\frac{f_{ai}(\mathbf{x}) - f_{mi}}{f_{mi}} \right)^2 + \sum_i^n \left\{ 1 - \text{MAC}(\Phi_{ai}(\mathbf{x}), \Phi_{mi}) \right\} \quad (1)$$

ここに、 f は固有振動数、 Φ は固有モードベクトルであり、添字 i はモード次数、 a は解析値、 m は実測値、 MAC は Modal Assurance Criterion²⁾である。実測の固有振動数 f_m と振動モード形 Φ_m は、構造同定手法の 1 つである確率的部分空間法（以下、SSI）³⁾を用いて推定した。

2.2. 計算アルゴリズムの構築

FE モデル精緻化のフローチャートを図 1 に示す。設計値をモデルパラメータの初期値とし、固有値解析から得られる振動特性と SSI により実測振動応答から推定した振動特性を用いて目的関数の最小化計算を開始する。最適化ソルバーには、数値解析ソフトウェア MATLAB の内点法に基づく制約条件付き非線形最適化関数 `fmincon` を使い、モデルパラメータ $\mathbf{x}$ の入力に対して目的関数が返されるよう、モデルファイルの更新、解析実行、解析結果抽出を行う関数を作成した（図 2）。FEM 解析には汎用有限要素解析ソフトウェア MSC.Marc を用いた。

3. 手法の試行

3.1. 対象橋梁と振動特性の推定

対象橋梁は長崎県内に現存する単純下路トラス

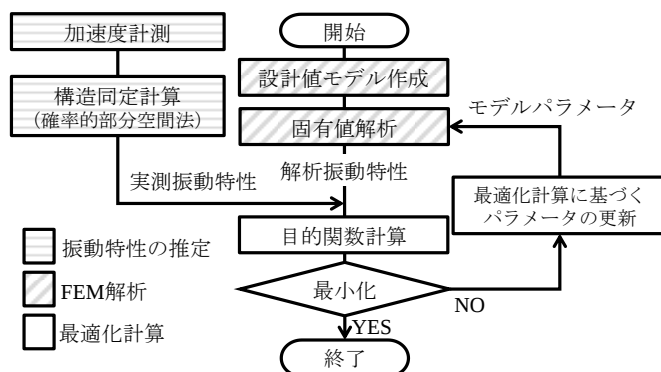


図 1 FE モデル精緻化の流れ

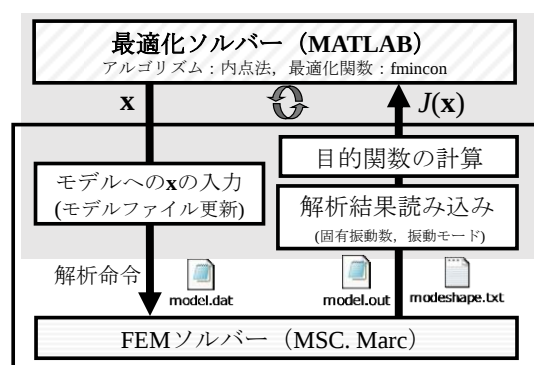


図 2 最適化ソルバーからの呼び出し

要素	はり
弾性係数	205 kN/mm ²
質量密度	7.85 × 10 ⁻⁶ kg/mm ³

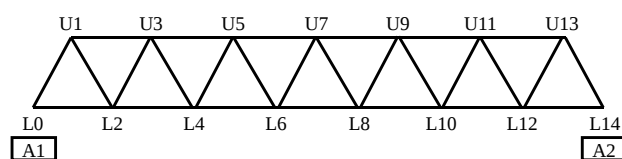
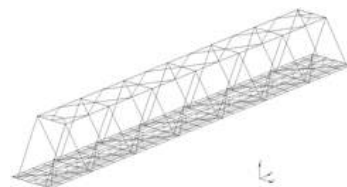


図 3 対象橋梁の解析モデル諸元と側面図

表 1 固有値解析結果と振動特性の推定結果

Mode	固有値解析		振動数（推定値）
	振動数 [Hz]	振動モード形	[Hz]
3 次	3.713	鉛直対称 1 次	3.271
5 次	6.232	ねじれ対称 1 次	4.677
7 次	9.212	鉛直逆対称 1 次	7.940

形式の鉄道橋とした。支間長は 69.8m、主構間隔は 5.4m、起点側から A1（可動支承）、A2（固定支承）である。モデルははり要素を用いて図 3 のように作

表 2 更新前後のモデルパラメータ (断面積 [mm²])

対象	上弦材	下弦材	中間横桁	主桁 (L2~L12)	主桁横構	下横構 (L0~L4)	下横構 (L4~L14)	上横構	上横構 (横方向)	斜材 (L2~U1)
更新前	17840	16280	31600	23100	1900	5516	2529	5200	5200	12266
更新後	17428	16982	31642	23264	1973	5561	2708	5720	5261	11991
変化率 [%]	-2.31	+4.31	+0.13	+0.71	+3.82	+0.82	+7.06	+10.00	+1.17	-2.24

対象	斜材 (L2~U3) (L12~U11)	斜材 (L4~U3) (L10~U11)	斜材 (L4~U5) (L10~U9)	斜材 (L6~U5) (L8~U9)	斜材 (L6~U7) (L8~U7)	歩道縦桁 A	歩道縦桁 B	歩道縦桁 C	歩道縦桁 D	歩道横桁 (中間部)
更新前	15600	8680	10440	7128	9900	6146	6146	6146	6146	1900
更新後	15657	8933	10464	7024	9650	6462	6610	6588	6349	2090
変化率 [%]	+0.36	+2.91	+0.23	-1.46	-2.53	+5.14	+7.55	+7.19	+3.30	+10.00

成し、材料特性は鋼材の値を適用した。本橋には床版および舗装がなく、グレーチングが敷設されている。グレーチングは剛性を無視し、質量のみをトラス格点部に作用させた。対象橋梁の固有振動数と振動モード形を推定するために、片側トラス格点部にサーボ型加速度計を 6 点設置し、鉛直方向加速度の計測を行った。設計値モデルの固有値解析結果と SSI で推定した実測振動特性を比較し、表 1 に示す解析 3 次、5 次、7 次と対応する各実測振動特性との差を最小化することとした。

3.2. 精緻化の対象

精緻化するモデルパラメータは、はり要素の各部材の断面性能として断面積および断面 2 次モーメント (局所座標系 x 軸, y 軸まわり) 各 28 種類、弾性係数、質量密度とした。断面性能については固有振動数に対する感度分析を行い、解析 3 次、5 次、7 次モードに対する感度が高い 20 種類の断面積のみを選択し、表 2 に示すとおりとした。また、精緻化計算におけるモデルパラメータの制約条件は初期値±10%とした。

3.3. FE モデル精緻化計算の結果

精緻化の過程におけるパラメータの更新回数と目的関数の値を図 4 に示す。目的関数の値は収束判定を満たし、計算は終了した。また、更新前後の断面性能を表 2 に示す。更新前後のモデルと実橋の固

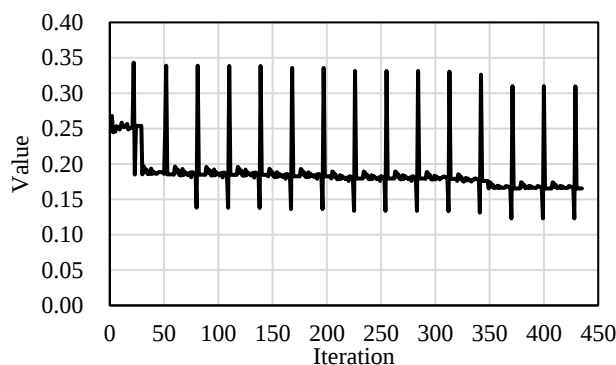


図 4 精緻化に伴う目的関数値の推移

表 3 更新前後のモデルの振動特性

Mode	固有振動数 [Hz]			MAC	
	更新前	更新後	変化率 [%]	実測	
3	3.713	3.507	-5.57	3.271	0.985
5	6.232	5.891	-5.48	4.677	0.981
7	9.212	8.725	-5.28	7.940	0.943

有振動数を比較した結果と MAC²⁾により振動モード形を比較した結果を表 3 に示す。表 3 より、すべてのモードについて実測振動特性に近づく方向にモデルが更新されていることが確認された。

4. まとめ

本研究で構築した手法を実橋で試行した結果、モデルの振動特性が実測値に近づくようにモデルが更新された。今後、更新後のモデルの精度検証を試みる。

参考文献

- 1) Tshilidzi Marwala.: Finite-element-model updating using computational intelligence techniques: Applications to structural dynamics, Springer, London, UK., 2010
- 2) Allemang RJ, Brown DL.: A Correlation coefficient for modal vector analysis., Proc of the 1st int modal anal conf : 01-08
- 3) Overschee, P.V., and Moor, B.D.: Subspace identification for linear systems: Theory -Implementation- Applications, Kluwer, Dordrecht, Netherlands., 1996