

構造同定と最適化計算による構造解析モデルの精緻化に関する検討

長崎大学大学院 学生会員 ○清水誠人

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

既設橋梁の構造状態を構造解析で評価する場合、有限要素モデルの精緻化にはモデルパラメータの細かい調整が必要である。本研究では、最適化計算による FE モデル精緻化手法について、実応答から参照値を取得するプロセスと、モデルパラメータを最適化するプロセスについて、精度と合理性の観点で計算手法の妥当性を検討した。

2. FE モデル精緻化方法

FE モデル精緻化のフローチャートを図 1 に示す。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 $\mathbf{x}$ の最適化問題と定義し、式(1)の目的関数を最小化することでモデルを精緻化することとした。最適化アルゴリズムには、内点法および遺伝的アルゴリズム (以下: GA¹⁾) を用いた。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 は実測値である。MAC は Modal Assurance Criteria である。

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

3. 全体系の対象構造物

3.1 対象橋梁と計測概要

対象橋梁は、単純下路トラス形式の廃線鉄道橋 (支間長 69.2m) とした。計測対象は常時微動とし、片側トラス格点部に全体系の振動特性を推定するためにサーボ型加速度計を全 6 点配置した。

3.2 振動特性の推定方法および FE モデル概要

本研究では、精緻な振動特性の推定を行うために確率的部分空間法 (以下: SSI) を用いた。対象橋梁の FE モデルは、はり要素を用いて図 2 のように作成した。全体系の挙動を把握するために、部材の局所的な振動は無視し、格点間の要素分割は行っていない。実応答に対応する固有値解析 3 次、5 次、7 次との差を最小化するように FE モデルの精緻化を行う。

3.3 更新パラメータ

更新パラメータは、はり要素の各部材の断面積 19 種

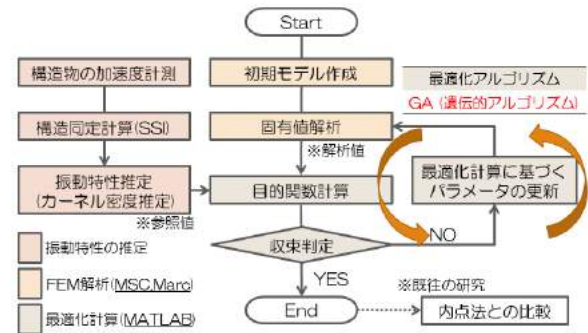


図 1 精緻化プロセス

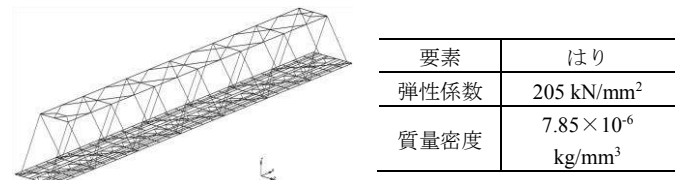


図 2 単純下路トラス橋の FE モデル諸元および振動特性

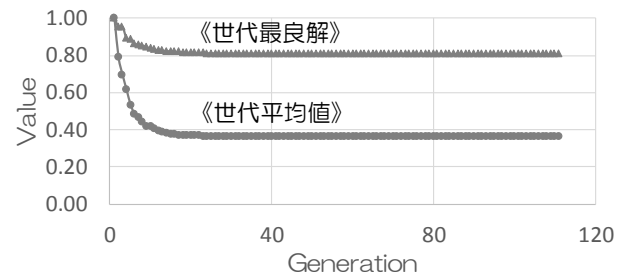


図 3 目的関数の推移

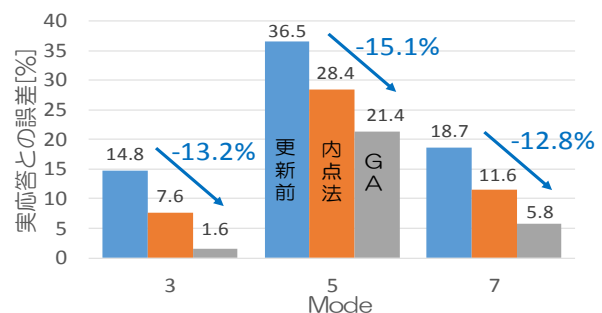


図 4 固有振動数の実応答との誤差

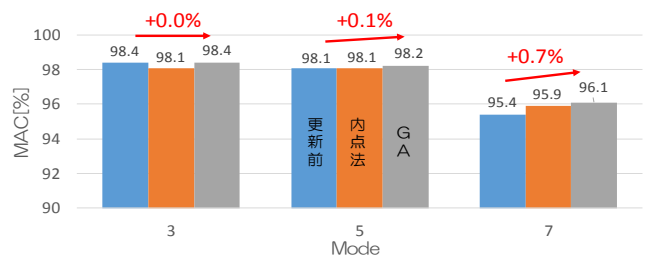


図 5 振動モードの推移

表 1 更新パラメータの推移 (断面積[mm²])

対象	上弦材	下弦材	上横構	上横構 (横方向)	斜材 (L2~U1) (L12~U13)	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)	中間横桁
更新前	17840	16280	5200	5200	12266	15600	8680	10440	7128	9900	31600
更新後	17422	17886	5658	5527	11234	16780	9122	11189	6900	10485	34302
変化率[%]	-2.34	+9.86	+8.81	+6.29	-8.41	+7.56	+5.09	+7.18	-3.20	+5.91	+8.55

対象	下横構 (L4~L14)	主桁 (L2~L12)	主桁横構	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)	弾性係数 [N/mm ²]	質量密度 [kg/mm ³]
更新前	2529	23100	1900	6146	6146	6146	6146	1900	205000	7.85×10 ⁻⁶
更新後	2373	25215	1781	6673	6540	6760	6543	1949	185141	8.64×10 ⁻⁶
変化率[%]	-6.16	+9.16	-6.24	+8.57	+6.41	+9.99	+6.46	+2.59	-9.69	+10.06

類, 弾性係数および質量密度とした. また, パラメータの制約条件は, 初期値±10%とした.

3.4 最適化計算の検討

FE モデル精緻化過程における目的関数の推移を図 3 に示す. 世代が繰り返されるごとに一定の値に収束していることが確認できる. 図 4-5 に示す振動特性の変化より, GA の方が内点法より効果的に FE モデルが更新されていることが認められる. また, 更新パラメータの推移を表 1 に示す. 弾性係数が 10%近く減少しており, 制約条件の見直しが課題として挙げられる.

4. 部材系の対象構造物への最適化計算の適用

4.1 FE モデル精緻化の概要

最適化計算手法の適用として部材系の構造物においても同様な検討を行った. ただし, 部材系では目的関数に固有振動数のみを用いた. また, 統計分析手法でありノンパラメトリックな経験的確率分布を表現するカーネル密度推定によって SSI の推定結果から対象のモードパラメータの抽出を行い, 有意な推定結果を得ることとした. FE モデル諸元を図 6 に示す.

4.2 最適化計算の検討

精緻化過程における各結果を図 7-8 および表 2 に示す. GA を用いると内点法では無変化であった軸力およびばね剛性が更新された. しかし, 更新パラメータが全て上限±10%まで達している. また, 固有振動数は 2th および 4th が内点法と GA では無変化であった.

5. まとめ

本研究では, SSI にカーネル密度関数を援用して推定した振動特性を参照値として GA を用いて FE モデルの精緻化を行った. その結果, GA の方が内点法より解析値の振動特性が実応答に近づくように更新された. 今後, 更新パラメータおよび制約条件に加え, 初期モデルの再検討を試みる.

【参考文献】 1) J.H. Holland : Adaptation in Nature and Artificial Systems, The University of Michigan Press, Michigan, 1975

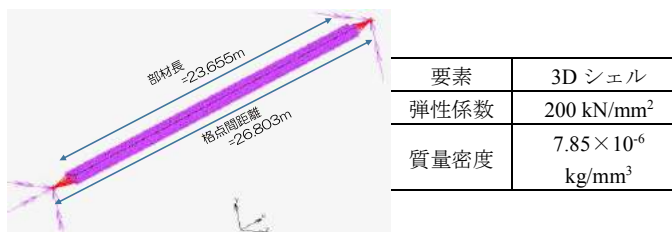


図 6 部材の FE モデル諸元

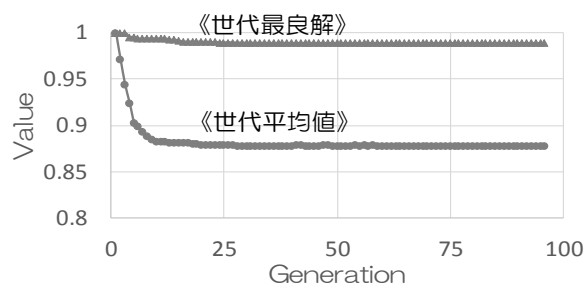


図 7 目的関数の推移

表 2 更新パラメータの推移 (斜材)

対象	軸力 [KN]	ばね剛性 [N*m/rad]	ばね剛性 [N*m/rad]	フランジ [mm]	ウェブ [mm]
更新前	1945	2.0×10 ⁸	2.0×10 ⁸	25	12
更新後	1751	2.2×10 ⁸	2.2×10 ⁸	27	13
変化率[%]	-10	10	10	10	10

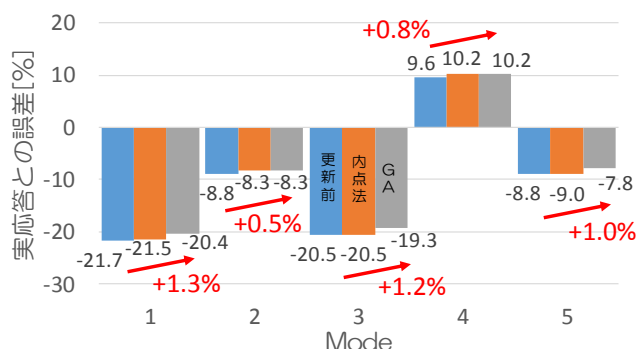


図 8 固有振動数の実応答との差