

トポロジー最適化によるトラス橋モデルの損傷推定に関する数値実験

産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 正会員 竿本英貴
 明治大学 理工学部 機械工学科 非会員 齋藤 彰
 山梨大学 土木環境工学系 正会員 宮本 崇

1. はじめに

橋梁の老朽化に伴う損傷を精緻に同定することは保守の観点から重要であり、様々な手法が提案されてきた。既往手法は、少数の計測結果を説明するように別途用意した自由度が比較的小さい橋梁モデルの損傷有無・程度を推定する逆問題に帰着する場合が多い。本研究で用いるトポロジー最適化 (SIMP 法) に基づく損傷推定手法¹⁾⁻³⁾は、損傷の位置・程度が有限要素単位で設定できること、随伴変数法に基づく高速な感度解析を含むことから既往研究に比べて自由度が大きい有限要素モデルについて損傷推定を検討できる利点がある。現時点で部材スケールでの損傷推定事例は確認できるが、構造体スケールでの損傷推定事例はほとんどない。ここでは数値実験として、任意部材の剛性を低下させた有限要素トラス橋モデルについてトポロジー最適化に基づく損傷推定手法を適用し、損傷推定精度について検討した。

2. トラス橋モデルと問題設定

図-1 は用いる橋梁モデルであり、橋長 40m、橋高 5m、幅員 7m のプラットトラス橋⁴⁾である。モデルは 8 枚の床版と 74 本の梁から成る。ここでは健全率 (1.0 で健全, 0.0 で完全損傷) を部材のヤング率に乗じることで、損傷 (剛性低下) を表現する。モデル内の任意部材に損傷を設定 (健全率を 1.0 未満に設定) し、静荷重 (25 トン級クレーン車、前輪 68.1 N (1 輪あたり)、後輪 64.9 N (1 輪あたり)) を橋梁中央部に作用させて鉛直変位 (図-1 中の w_1-w_{14} の 14 箇所) を FEM で求めた後、得られた変位 (w_1-w_{14} , 計測変位と想定) のみを入力として損傷させた部材をトポロジー最適化を用いて探索する数値実験 (正解は既知) を実施した。ここでは健全率に対応する変数 $\theta(\mathbf{x})$ ($0 \leq \theta(\mathbf{x}) \leq 1$) を橋梁鋼材部上 (\mathbf{x} は鋼材部の任意位置) で定義する ($\theta = 1.0$ で健全, $\theta = 0.0$ で完全損傷)。すなわち、輪荷重を載荷したとき、計測された (と想定した) 14 点の鉛直変位が再現されるような $\theta(\mathbf{x})$ の分布 (損傷部で $\theta < 1$) を探索する最適化問題となる。ここでは問題簡単化のため、鋼材の単一部材のみが損傷しているケースを想定している。なお、鋼材のヤング率 $E(\mathbf{x})$ は θ と関連付けられる ($E(\mathbf{x}) = E_0\theta(\mathbf{x})$, E_0 は健全な場合の鋼材のヤング率)。目的関数の設定指針は、計測された鉛直変位 (w_1-w_{14}) とこれらに対応する FEM から得られた鉛直変位の差を最小化することである。本研究では、損傷部は鋼材全体の量に比べて十分小さいことを想定した正則化項を上記指針に加えた次の目的関数 J を用いる。

$$J := \frac{\alpha}{14} \sum_{i=1}^{14} \left(\frac{d_i - w_i}{w_i} \right)^2 + \beta \left(1 - \frac{\int_{\Omega} \theta d\Omega}{\int_{\Omega} d\Omega} \right) \quad (1)$$

ここで、 α, β は重み (試行錯誤により決定, $\alpha = 1.0$, $\beta = 1.0 \times 10^{-4}$)、 d_i は FEM から求まる鉛直変位、 w_i は計測された鉛直変位、 Ω は鋼材が占める領域をそれぞれ表す。以上で述べた損傷推定問題は、応力の平衡方程式 (偏微分方程式、有限要素解析により求解) を満たしつつ (拘束条件)、式 (1) を最小化する $\theta(\mathbf{x})$ を求める最適化問題に帰着する (FEM による変形解析と最適化問題の求解は、COMSOL Multiphysics[®] 上で実装)。

ここでは図-1 の 1/4 構面 (紙面手前側左半面) に存在する斜材・垂直材 (全 7 部材) について、健全率を 3 通り (0.1, 0.5, 0.9) 変化させた全 21 ケースについてトポロジー最適化による損傷推定解析を実施した。

3. 損傷推定結果

図-2 は、中央部 ($x = 0, y = 3.5$) たわみに対する各部材剛性の感度解析結果を示している。色が暖色になるほど感度が高く、上弦材の感度が高いことがわかる。一方、中央部付近の部材と端部近くの垂直材の感度は極めて小さい。

キーワード: 橋梁, 損傷, トポロジー最適化, 有限要素法

連絡先: 〒 305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7 Tel 029-849-1075

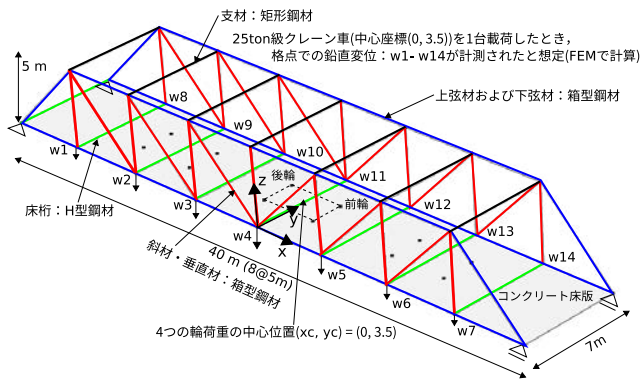


図-1 プラットラス橋モデル

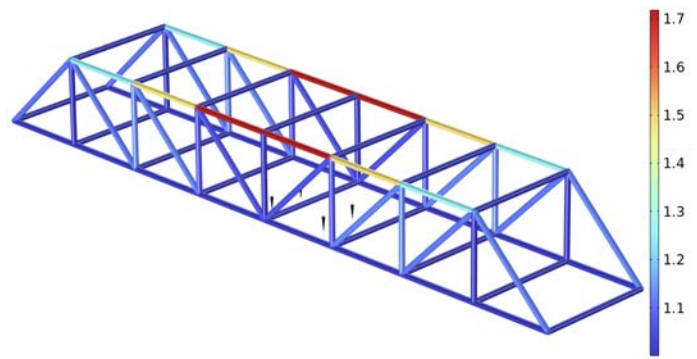


図-2 橋梁中央部 ($x = 0, y = 3.5$) のたわみに対する各部材剛性の感度 (暖色になるほど感度が高い)

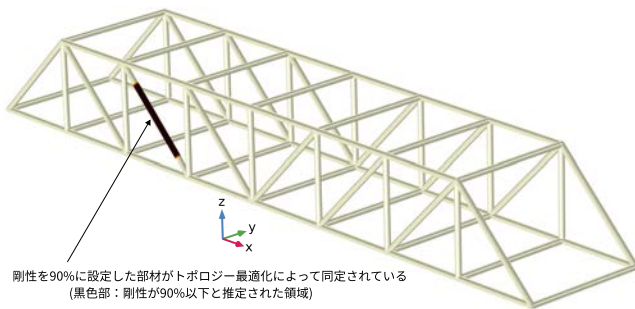


図-3 斜材が損傷している場合 (健全率 90%) の損傷推定結果 (同定成功)

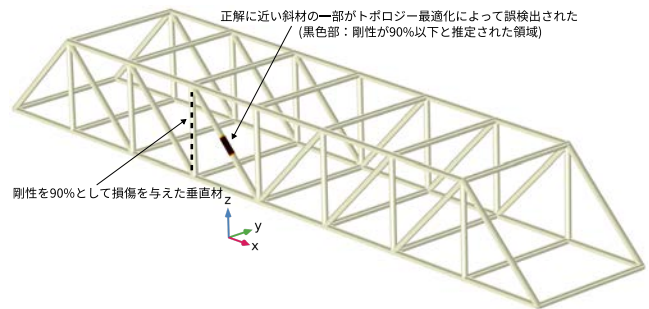


図-4 破線部の垂直材が損傷している場合 (健全率 90%) の損傷推定結果 (正解に近いが誤検出)

図-3 は、黒色部の部材剛性を 90%としたケースに対してトポロジー最適化により損傷推定を実施した結果を示している。最適化結果は損傷を与えた部材の推定に成功していることがわかる。なお、部材剛性の健全率を 50%や 10%とした場合においても、斜材については正しく損傷同定された。

図-4 は、破線部の垂直材の部材剛性を 90%としたケースに対してトポロジー最適化により損傷推定を実施した結果を示している。最適化解析の結果、破線近くの斜材の一部に損傷が発生していると推定された。損傷が発生しているゾーンとしては一定レベルの精度と考えられるが、損傷部材推定の観点からは高精度化する必要がある。部材剛性の健全率を 50%や 10%とした場合においても、垂直材が損傷している場合は、損傷している部材近くの斜材が損傷していると推定されるケースが多く確認された。以上の結果から、垂直材の損傷推定には課題が残る。なお、感度が極めて小さい橋梁中央部垂直材および端部近くの垂直材については、最適化解析は実行不能であった。損傷部材を含む損傷ゾーンの推定という観点では、提案手法は一定レベル以上の精度を有していると言える。また、本手法の汎用性は極めて高く、橋梁以外の問題にも原理的には適用可能であることを付記しておく。

4. まとめと課題

今回の問題設定では、損傷部材が (载荷条件に対して感度が高い) 斜材である場合、提案手法は高い精度で損傷部材を同定することができた。一方、垂直材が損傷している場合は損傷推定の精度は低い。垂直材の感度が高くなるような载荷条件を考慮するなど、高精度化のための工夫が必要となる。

参考文献

- 1) 西津ほか: トポロジー最適化と固有振動数解析に基づく非破壊検査での損傷同定手法, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.18, pp.73-80, 2013.
- 2) 竿本ほか: 位相最適化に基づく断層形状推定手法の開発, 土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4, pp.L21-L31, 2015.
- 3) Sugai, R., Saito, A., Saomoto, H.: Damage identification using static and dynamic responses based on topology optimization and Lasso regularization, International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, 2020.
- 4) 竿本, 宮本: 機械学習による橋梁の損傷推定を想定した教師データセットの生成, 土木学会論文集 A1, 印刷中.