

改良衝突体最適化 (ECBO) アルゴリズムを用いた平面トラス橋接合部の損傷検出

広島大学 学生会員 ○植永 智也
 広島大学 カジ ナセル
 広島大学 正会員 半井 健一郎

1. はじめに

2007年のアメリカのミネソタ州で起きたミネアポリス高速道路崩落事故によりトラス橋の接合部の劣化が橋全体の崩落につながるものが広く認知されたり。さらに、一般にトラス橋はその供用期間中に接合部において最大40%の損傷を経験することが報告されており²⁾、トラス橋の接合部における合理的な維持管理が求められている。これを受けて近年では、ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムといった損傷同定手法が数多く提案され、損傷同定のためのツールとして用いられている³⁾⁴⁾が、より精度が高く、収束の速い方法が要求されている。

そこで本研究では、改良衝突体最適化アルゴリズム⁵⁾(以下、ECBO アルゴリズム)を採用することで、トラス橋接合部の損傷検出を高精度かつ短時間で実現する方法の構築を目的とする。さらに、衝突体最適化アルゴリズム⁵⁾(以下、CBO アルゴリズム)に対するECBOアルゴリズムの優位性を明らかにする。

2. 解析概要

CBO アルゴリズム、ECBO アルゴリズムを用いた損傷同定手法について概説する。本研究では隣接する接合部の損傷割合に比例させて部材の剛性を減少させることによって接合部への損傷導入とする。まず、損傷しているトラス橋の各接合部にランダムに損傷を与える。その後、トラス橋の剛性マトリクスおよび質量マトリクスを作成し、式(1)の自由振動方程式を用いて固有振動数およびモード形状を導出する。

$$[K]\{\varphi\} - \omega^2[M]\{\varphi\} = \{0\} \quad (1)$$

ここに、 $[K]$ は損傷前あるいは損傷後の剛性マトリクス、 $[M]$ は質量マトリクス、 φ はモード形状、 ω は固有振動数を示す。

実際の損傷状況と与えた損傷割合の違いを評価するために式(2)の目的関数⁶⁾を使用した。

$$F(\alpha) = \sum_{i=1}^{NM} \left(\left(\frac{\delta\omega_i(\alpha)}{\omega_i} \right)_D - \left(\frac{\delta\omega_i}{\omega_i} \right)_E \right)^2 + \sum_{i=1}^{NM} \sum_{j=1}^{NP} \left((\delta\phi_{ij}(\alpha))_D - (\delta\phi_{ij})_E \right)^2 \quad (2)$$

ここに、 α は剛性低減係数、 $F(\alpha)$ は目的関数、 NM はモードの数、 $\delta\omega_i(\alpha)$ は i 番目のモードの健全な時の固有振動数と剛性低減係数が α の時の解析で得られた固有振動数の差、 ω_i は i 番目のモードの健全な時の固有振動数、 $\delta\omega_i$ は i 番目のモードの健全な時の固有振動数と損傷している時の想定したあるいは実験から得られた固有振動数の差、 NP は測定された節点変位の数で $\delta\phi_{ij}(\alpha)$ は i 番目のモードの剛性低減係数が α の時の構造物の解析で得られた節点 j の変位の変化、 $\delta\phi_{ij}$ は i 番目のモードの理論的にあるいは実験から得られた損傷した構造物の節点 j の変位の変化、下付き文字の D 、 E はそれぞれ解析の項、実験の項をそれぞれ表す。

目的関数に固有振動数とモード形状の両方を使用することによってより早い収束を可能にできる。

目的関数の評価後、衝突を模擬した損傷割合の変更が行われる。CBO アルゴリズム、ECBO アルゴリズムでは複数個の衝突体を用意して考え、それぞれの衝突体がランダムな目的関数値を持つ。この衝突体の個体群の目的関数値の小さい半数を静止体、目

キーワード 改良衝突体最適化 (ECBO) アルゴリズム, 損傷検出, トラス橋

連絡先 〒730-8511 広島県東広島市鏡山1丁目3-2 広島大学大学院先進理工系科学研究科先進理工系科学専攻社会基盤環境工学プログラム インフラマネジメント研究室

TEL 080-6312-9726

的関数の大きい半数を動体と見なし、式(3)の運動量保存則に基づいて動体を静止体に衝突させ、それぞれの衝突体の持つ設計変数である各節点の損傷割合を変更させる。

$$m_s v_s + m_m v_m = m_s v'_s + m_m v'_m \quad (3)$$

ここに、 m_s 、 m_m は静止体および動体の質量、 v_s 、 v_m は衝突前の静止体と動体の速度、 v'_s 、 v'_m は衝突後の静止体の速度と動体の速度を示す。

衝突体は反復回数が設定した最大反復回数になるまで衝突を繰り返す。ここで、反発係数 ϵ は式(4)によって定義される。反発係数は反復回数(衝突回数)が最大反復回数に近づくにつれて0に近づいていく。一方で、質量は式(5)に依存し、目的関数値が大きければ衝突体の質量が小さくなるため、動きやすくなる値が変更されやすい一方で、目的関数値が小さければ衝突体の質量が大きくなるため、動きにくくなる値が変更されにくい。以上のように二つのパラメータを与えることによって最終的に目的関数値が0に近い値に収束させることができる。なお、本研究では最大反復回数を500回に設定した。

$$\epsilon = \frac{iter}{maxIt} \quad (4)$$

ここに、 $iter$ は反復回数、 $maxIt$ は最大反復回数を表す。

$$m = \frac{1}{F(\alpha)} \quad (5)$$

ここに、 m は衝突体の質量、 $F(\alpha)$ は目的関数値を表す。

ECBO アルゴリズムでは反復回数ごとにそれまでの反復回数で最も小さい目的関数値を持つ衝突体を保存し、次の反復回数で衝突体群に組み込むことによってCBO アルゴリズムと収束速さを変えることなく、さらにCBO アルゴリズムと比べてより高精度の損傷同定を可能にする。

3. 平面トラス橋の損傷同定

本研究では解析例として図1の7部材トラス橋⁷⁾と図2の37部材トラス橋⁵⁾の二つの平面トラス橋を用いた。最初に与える損傷割合による解析結果への影響を評価するため、解析を20回行った。また、それぞれのアルゴリズムの入力値として7部材トラス橋については最初の4つの固有振動数と7つの節点変位を使用し、37部材トラス橋については最初の10個の固有振動数と20個の節点変位を使用した。

7部材トラス橋については各節点のみが10%損傷している場合について検討を行った。節点4のみが10%損傷している時の平均損傷同定結果を図3に示す。節点1、節点2、節点3および節点5のみが損傷している場合の平均損傷同定結果についてはCBO アルゴリズム、ECBO アルゴリズムの両方で実際の損傷割合とそれぞれの損傷同定結果が概ね同等という結果になった。節点4のみ10%損傷している時の平均損傷同定結果においてECBO アルゴリズムは実際の損傷割合と同程度の結果を示し、損傷同定が可能であることが確認できた。しかしながら、CBO アルゴリズムについては節点4において実際の損傷割合と約2.4%の誤差を生じており、さらに実際には損傷のない節点2にも損傷を検出しており、部分的に損傷同定ができないという結果になった。

次により自由度の大きい構造物である37部材トラス橋について節点10のみが10%損傷している時の平均損傷同定結果を図4に示す。

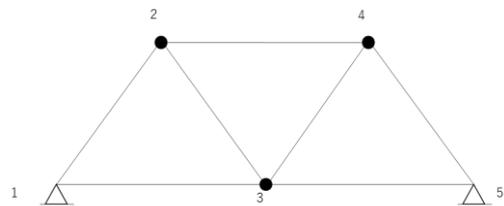


図1 7部材トラス橋⁷⁾

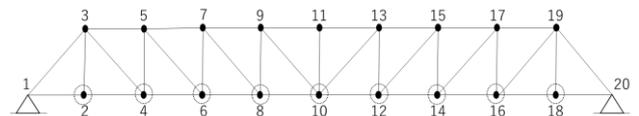


図2 37部材トラス橋⁵⁾

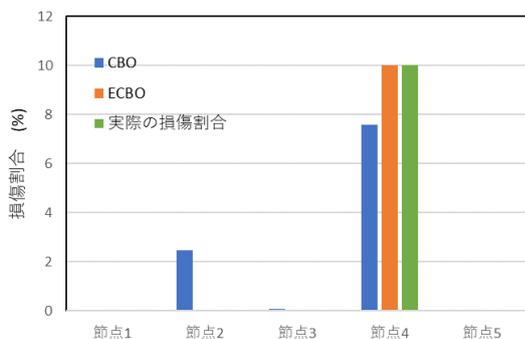


図3 節点4のみ損傷時の平均損傷同定結果

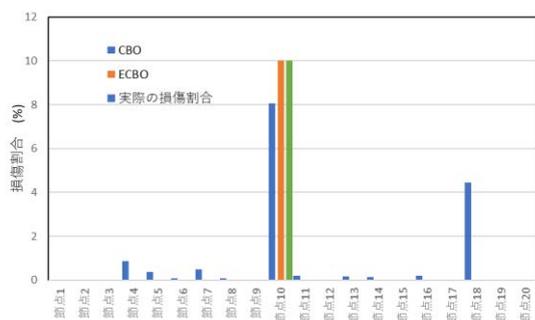


図4 節点10のみ損傷時の平均損傷同定結果

37 部材トラス橋のような自由度 37 という大きい構造物に関しても ECBO アルゴリズムが安定して実際の損傷割合と同等の結果を示しており、損傷同定できた一方で、CBO アルゴリズムは節点 10 について実際の損傷割合と 2%程度の誤差が生じており、損傷のない節点 10 以外の節点にも損傷を検出しており、損傷同定できなかった。

4. まとめと今後の課題

本研究では、7 部材トラス橋と 37 部材トラス橋を用いて 2 つの最適化同定手法の比較を行った。トラス橋接合部を対象とした損傷検出において CBO アルゴリズムは実際には損傷のない場所に損傷を検出したり、損傷のある場所についても 2%前後の誤差を生じたりと安定して損傷同定ができなかった。一方で、ECBO アルゴリズムはニューラルネットワークでは部分的に損傷同定しなければならないような自由度の大きいトラス橋についても実際の損傷割合と同程度の結果を示すことができた。したがって、ECBO アルゴリズムの方が CBO アルゴリズムに比べてトラス橋接合部の損傷同定において合理的手法であることが確認できた。今後の課題としては実構造物や 3 次元トラス構造物への適用性の検討が挙げられる。

参考文献

- 1) Roberts, C. C. Jr, (2005).Minneapolis bridge collapse
- 2) Z.X. Li et al, “Fatigue analysis and life prediction of bridges with structural health monitoring data — Part I: methodology and strategy,” International Journal of Fatigue, 23 (1), pp. 45-53, 2001
- 3) M. A. Rao, J. Srinivas, B. S. N. Murthy, “Damage detection in vibrating bodies using genetic algorithm”, Computers & Structures, Volume 82, Issues 11-12, Pages 963-968,2004
- 4) X.Wu, J Ghaboussi, J. H. Garrett, Jr, “Use of neural networks in detection of structural damage”, Computers & Structures, Vol 42, No.4 Pages 649-659,1992
- 5) A. Kaveh et al, “Damage Identification of Truss Structures using CBO and ECBO Algorithm”, Asian Journal of Civil Engineering (BHRC), Vol.17, No.1, pp. 75-89, 2016.
- 6) Leandro Fleck Fadel Migue et al, “A hybrid approach for damage detection of structures under operational conditions,” Journal of Sound and Vibration 332 4241–4260, 2013.
- 7) M. Mehrjoo, N. Khaji, H. Moharrami, A. Bahreininejad, “Damage detection of truss bridge joints using Artificial,” Expert Systems with Applications, Volume 35, Issue Pages 122-133,2008