

改良衝突体最適化 (ECBO) アルゴリズムを用いた平面フレーム構造の損傷同定

大成建設株式会社 (元広島大学工学部第四類) 正会員 ○牧野 朋之

広島大学 大学院先進理工系科学研究科 准教授 Naser Khaji

1. 背景・目的

フレーム構造は、構造物の柱と梁の接合部を剛結して構造物を一体化する構造であり、高い強度を誇る。しかし、接合部の剛結により、回転モーメントが発生するため、荷重による損傷や、経年劣化による損傷の可能性がある。一方で、構造物接合部の損傷率を求める方法として改良衝突体最適化 (以下、ECBO) アルゴリズム⁽¹⁾が注目されている。ECBO アルゴリズムは二物体間の衝突に着想を得て開発されたアルゴリズムである。先行研究ではトラス構造の損傷同定に用いられており、有用性が示されている。本研究では予め接合部に損傷を仮定したフレーム構造を対象に、ECBO アルゴリズムを用いて損傷同定を行った。接合部のモデル化は半剛結接続としてモデル化した。

さらに、実際の構造物の振動特性にはノイズが含まれているため、ノイズの影響も併せて検討を行った。

2. 解析方法の概要

本研究では、有限要素法を用いて解析を行う。構造物の剛性マトリクス $[K]$ と質量マトリクス $[M]$ を求め、式(1)の自由振動方程式から損傷前後の構造物の固有振動数 ω とモード形状 φ を求める。

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

ECBO アルゴリズムの損傷検出では、構造物の損傷前後の固有振動数とモード形状を入力値とした Miguel ら(2013)⁽³⁾の式(2)の目的関数を使用する。この目的関数を最小化することによって出力値として実際の損傷率に近い最適な値 α ($0 < \alpha < 1$)を導く。

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

NM : モードの数, NP : 節点変位の数, D : 解析の項,

E : 損傷を仮定した項, $\delta\omega_i(\alpha)$, $\delta\omega_i$: i 番目のモードの

解析及び損傷仮定から得た損傷前後の固有振動数の変化, ω_i : i 番目のモードの健全時の固有振動数, $\delta\varphi_{ij}(\alpha)$, $\delta\varphi_{ij}$: i 番目のモードの解析及び損傷仮定から得た損傷前後の節点 j のモード形状の変化

ECBO アルゴリズムでは複数個の衝突体を用いて最適化を行う。各衝突体は速度と質量を持った物体であり、それぞれの衝突体がランダムな目的関数を有する。衝突体の質量 m は目的関数値 $F(\alpha)$ に依存するため式(3)で表される。

$$m = \frac{1}{F(\alpha)} \quad (3)$$

衝突体群の中で目的関数値の小さい値を持つ半数を静止体、大きい値を持つ半数を動体と見なし、運動量保存則、エネルギー保存則に基づいて仮想上の空間で衝突を行い、位置を更新する。衝突によるエネルギー損失は式(4)で定義される反発係数 ε に依存する。

$$\varepsilon = 1 - \frac{iter}{iter_{max}} \quad (4)$$

ここで、 $iter$ は反復回数、 $iter_{max}$ は最大反復回数である。衝突は反復回数が最大反復回数になるまで行う。

3. 半剛結接続・ノイズの導入

損傷を仮定した接合部を半剛結接続としてモデル化するために、Fig.1 のように梁要素の端にある長さ 0 の回転ばねで表す⁽⁴⁾。半剛結接続の損傷程度は接合部固定係数の減少率として定義される。(0 ≤ 固定係数 ≤ 1, 0: 接合部はピン結合, 1: 剛結を表す。)



Fig.1 Semi-rigid beam-to-column connection⁽³⁾

また、ノイズの導入については、本研究では損傷同定の目的関数に損傷前後の固有振動数とモード形状を用いており、既往の研究⁽⁴⁾に沿って損傷後の固有振動数に 1% のノイズを導入する。

キーワード ECBO アルゴリズム, 有限要素法, 損傷同定

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿一丁目 25 番 1 号 新宿センタービル 大成建設(株)本社

TEL:03-3348-1111

4. 数値解析例・結果

本研究では二カ所の接合部に損傷を仮定し、それぞれ損傷パターンにおいてノイズを含む場合と含まない場合について損傷同定を行った。

3部材フレーム構造の損傷同定結果ではすべての条件下でほとんど誤差がなく、高い精度の解析が可能であった。一方で、Fig.2に示す6部材フレーム構造について、節点2及び4の二カ所に損傷を仮定したケースにおいては誤差が発生した。ノイズを含まない場合は、誤差はわずかであったが、ノイズを含む場合には約1.7%の誤差が発生した。Fig.3に示すように、損傷を仮定していない節点で損傷が検出されてしまった。しかし、既往の研究⁽⁴⁾より、これらの誤差は許容される誤差と考えられる。

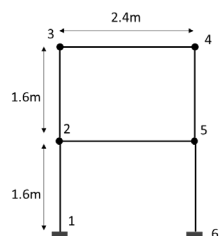


Fig.2 6-bar frame structure

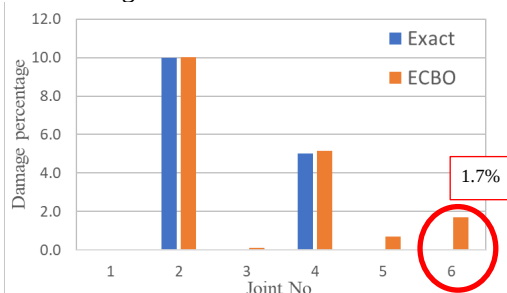


Fig.3 Joint 2,4 are damaged by 10%,5% with noise

Fig.4の10部材フレーム構造に対して節点3, 8にそれぞれ20%の損傷を仮定し、ノイズの有無を考慮した損傷同定の結果をそれぞれFig.5, Fig.6に示す。結果は、ノイズなしの場合、損傷を仮定していない節点に3.2%の誤差を生じた。しかし、ノイズを有する場合、6.6%と大きな誤差が生じた。この原因として、10部材フレーム構造では損傷前後の固有振動数の差が小さく、1%のノイズによる影響が大きいため、解析が低い精度になったと考えられる。

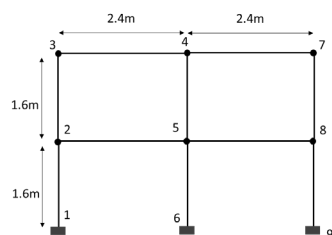
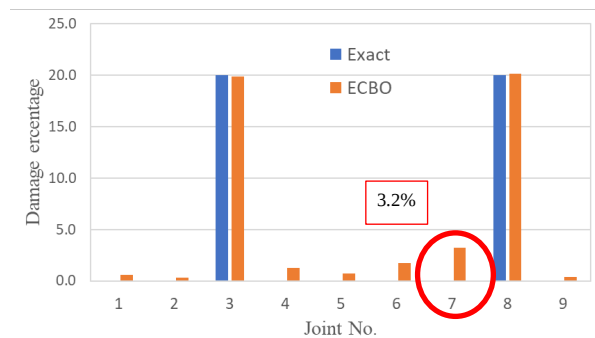
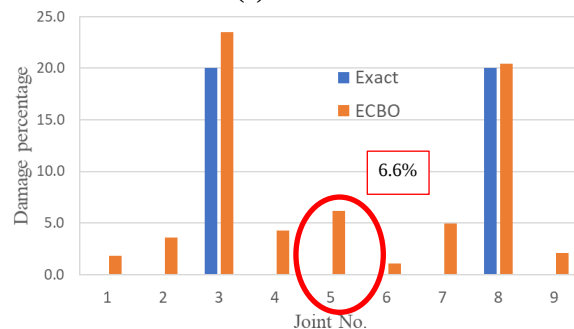


Fig.4 10-bar frame structure



(a) no noise



(b) with noise

Fig.5 Joint 3,8 are damaged by 20%

5. 結論・今後の課題

ECBO アルゴリズムを用いた解析では、損傷位置の特定には有効であると示された。しかし、ノイズを含む場合は許容できない誤差が発生した。原因として、ノイズを損傷後の固有振動数に導入したことで目的関数の収束値が大きくなり、正確な損傷同定が出来なかったと考えられる。より精度の高い損傷同定を行うためには、反復回数を増やす、あるいは入力値の固有振動数とモード形状を増やすなどの手段を検討していく必要がある。

参考文献

- (1) A. Kaveh, V. R. Mahdavi: Damage identification of truss structures using CBO and ECBO algorithm, Asian Journal of Civil Engineering (BHRC) vol.17, No.1, pp. 75-89 (2016).
- (2) 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)
- (3) S. M. Seyedpoor and M. H. Nopour : A two-step method for damage identification in moment frame connections using support vector machine and differential evolution algorithm, Applied Soft Computing, vol.88, p.106008 (2020)