

ニューラルネットワークを用いた Modal Flexibility Method による梁の複数欠損同定

信州大学大学院 学生会員 ○瀬瀬恭敏
信州大学工学部 正会員 小山 茂

1. はじめに

近年、構造物に対して長寿命化対策が求められている。維持管理の手法として、土木分野では AI の導入が進んでおり、その一つに画像処理によるひび割れ検出技術がある¹⁾。しかし、この技術は高い精度で外部の損傷を発見できるものの、内部損傷の発見は困難である。そこで、内外部を問わない欠損同定手法の確立を目指し、AI に振動特性を学習させた。その結果、振動モードと振動数から一定の精度で欠損レベルの予測が可能であることが判明した²⁾。

しかし、先に述べた研究では、高次の振動モードを学習データとして利用しており、実際の構造物から高次モードを誤差なく正確に得ることは難しい。

そこで本研究では、Pandy と Biswas によって提案された手法である Modal Flexibility Method(MF 法)に修正を加え、低次モードを用いた正確な複数欠損同定を試みる³⁾。ここでは、欠損によって剛性の低下した梁を対象に、修正版 MF 法を用いた損傷指標を使って、ニューラルネットワークを構築し、欠損箇所とその欠損レベルを予測し精度について確認した。

2. ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークは人間の脳機能を模した学習アルゴリズムであり、大きく分けて、入力層、中間層、出力層の 3 つの層から構成される。なお、中間層は必ずしも単層ではなく複数であっても構わない。各層にノードが存在し、隣接層の全てのノードと結合している。ここで用いられるデータは大きく分けて特徴量データと教師データの 2 種類がある。特徴量データは、ニューラルネットワークへの入力として使う測定可能な特性を示す説明変数であり、教師データは出力の正解を示す目的変数となる。入力された特徴量データは、重み付きで次の層へと伝搬され、最終的に出力層から予測値として出力される。ニューラルネットワークにおける学習は、この出力値と教師データとの誤差を最小にするように重みを決定することである。

3. 解析対象と振動特性

本研究では、図 1 に示すような片持ち梁を対象として、梁を 10 の要素に等分割したときの各要素の欠損段階を固有ベクトルと固有振動数を利用した損傷指標を用いて同定する。欠損していない要素のヤング率を $2.1 \times 10^{11} [\text{Pa}]$ とし、欠損レベルは表 1 のように欠損していない正常なヤング率からの低下率ごとに 3 段階にレベル分けを行った。今回は、断面二次モーメントの値は固定し、ヤング率のみを変化させ剛性値の低下を表した。まず、FEM モデルの固有値解析によりある要素の剛性が低下している場合の固有ベクトルと固有振動数を求めた。本研究では、発生している欠損の箇所は複数でもよいとした。また各要素の剛性値は正常値 1 種類と欠損値 2 種類の 3 種類とした。よって 1 つの固有値解析パターンにおいて、10 要素にそれぞれ 3 通りの剛性値が割り当てられるので、 3^{10} 通りの欠損パターンが存在する。また、欠損している場合の 2 種類の剛性値の決定方法は、欠損レベル 1 と 2 でそれぞれ 3 種類用意し、合計 6 種類のヤング率から 2 種類を選ぶことで欠損剛性値を割り当てた。よって総データ数としては、 $3^{10} \times 6 \times 2 = 885735$ 個のデータを用意し学習データとした。テストデータは、学習データに用いた 6 種類とは別に未学習のものを複数用意し、検証を行った。

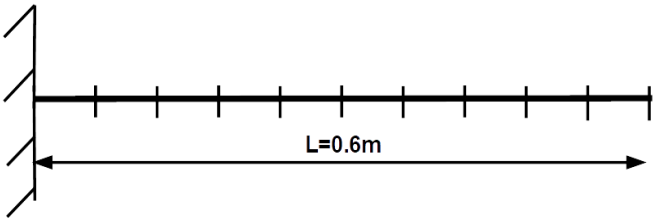


図 1 解析対象

表 1 欠損レベルの基準

欠損レベル	正常値からの低下率
レベル 0	5%未満
レベル 1	5%以上, 20%未満
レベル 2	20%以上

4. Modal Flexibility Method (MF 法)

本研究では、固有値解析により求めた、固有ベクトルと固有振動数に MF 法を適用し特徴量として利用する。Modal Flexibility Method は精度、適用の容易さなどから多くの損傷検出で利用されている。MF 法は以下のように表すことができる。

$$F = \sum_{i=1}^n (1/\omega_i^2) \phi_i \phi_i^T \quad (1)$$

$$\Delta F = F_D - F_H \quad (2)$$

式(1)において、 F を Flexibility Matrix と呼ぶ。 i は振動モードの次数、 ω は固有振動数となる。また、 ϕ_i は質量行列を介した内積が単位行列になるような固有ベクトルで、正規化モードと呼ばれる。MF 法の大きな特徴としては、固有振動数の二乗で行列を除算することによって、高次モードの影響を小さくした状態で、欠損の同定が可能となる。

MF 法では、式(2)のように損傷時の Matrix である F_D から健全時の Matrix である F_H を引いたものを利用する。このようにして得た ΔF の各列の最大値を抽出したものを損傷指標(DI)とする。なお、固有ベクトルとして各節点のたわみとたわみ角が求められるため、 ΔF は解析モデルの節点数 $\times 2$ の正方行列となる。また、従来の手法では、振動モードのみを使用しているが、高い精度で複数欠損を同定するために、各振動モードのたわみ角も使用する。よって、1 節点につき、たわみとたわみ角の二つの損傷指標を利用する点が従来の MF 法と異なる点となる。

5. 解析結果

本研究では、固有値解析により取得した 3 次までの固有ベクトルと 3 次までの固有振動数をそのまま特徴量として用いる手法を直接法とし、同じく 3 次までの固有ベクトルと固有振動数に対して MF 法を使って損傷指標としたものを MFDI 法とする。直接法のニューラルネットワークにおいて、入力層のノードは、11 節点の 3 次までの固有ベクトルと、たわみとたわみ角を用いるため 66 個、中間層のノードは 3 層で各 700 個、出力層は 10 要素に対してそれぞれ 3 段階の欠損レベルで出力するため 30 個となる。MFDI 法では、入力層のノード数は計算により

取得した、各節点の振動モードの損傷指標とそのたわみ角の損傷指標を用いるため 22 個となる。なお中間層、出力層に関しては、直接法と同様とする。

直接法と MFDI 法の要素ごとのテストデータの精度比較を行った結果を図 2 に示す。縦軸が精度で、横軸が要素番号となる。直接法の結果を見ると、固定端から最も遠い要素である 10 要素の精度が大きく下がっている。これは低次モードにおいて、損傷時の 10 節点、11 節点の固有ベクトルの値が健全時のものと比べても、大きく変わらないため、予測が困難であると考えられる。対して MFDI 法の結果を見ると、直接法で精度が落ちていた第 10 要素も高精度で予測が可能となっている。令和 2 年度土木学会全国大会で発表した結果では、複数欠損に対して、6 次モードまで利用する方法であれば高精度な予測が可能であったが、MFDI 法を使えば低次モードであっても高精度な予測が可能であるため、複数欠損に対しても非常に有用であると考えられる。

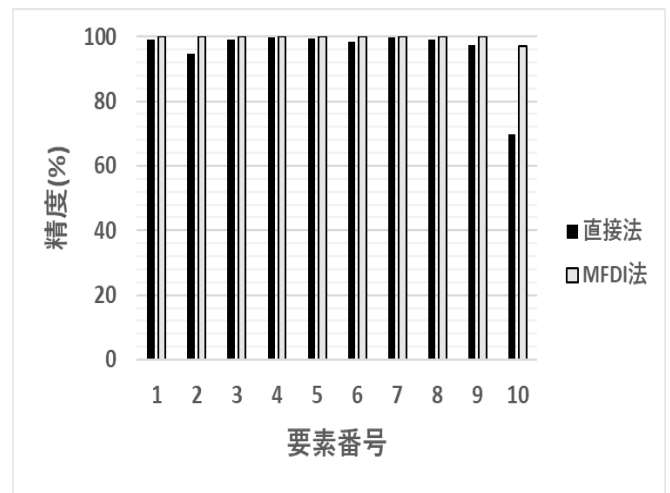


図 2 直接法と MFDI 法の精度比較

参考文献

- 1) 藤田悠介・中村秀明・浜本義彦：画像処理によるコンクリート構造物の高精度なひび割れ自動抽出, 土木学会論文 集 F, Vol. 66, No. 3, 459-470, 2010.9
- 2) 額額恭敏, 小山茂: ニューラルネットワークを用いた逆解析による梁のレベル別欠損同定, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, CS15-14
- 3) A.K. Pandey, M. Biswas, Experimental verification of flexibility difference method for locating damage in structures, J. Sound Vib. 184 (1995) 311-32