

マイクロ起振器を用いた鋼トラス橋の損傷同定

九州大学大学院工学研究院
九州大学大学院工学研究院
九州大学大学院工学部

正会員 ○古川 愛子
フェロー 大塚 久哲
学生員 梅林 福太郎

1. 序論

筆者らは、マイクロ起振器による入力を想定した簡易な損傷同定手法を提案している¹⁾。これは、損傷後の構造物の調和起振応答と、損傷前の構造物を表す解析モデルとの比較から、損傷の箇所およびその程度を同定するものであり、数値解析を通してその有用性は検証済である。本研究では、筆者らが提案した損傷同定手法を、損傷前後の鋼トラス橋を対象にした振動実験から得られたデータに適用することにより、部材の損傷を同定できるかどうかの検討を行った。

2. 損傷同定手法

損傷前の構造物を表す解析モデルの全体剛性・減衰マトリクスは各要素の剛性・減衰マトリクスの総和として $[K] = \sum_{e=1}^n [K^e]$ $[C] = \sum_{e=1}^n [C^e]$ のように表される。ここで n は要素の総数、 $[K^e]$ 、 $[C^e]$ はそれぞれ e 番目の要素の剛性・減衰マトリクスである。本研究では、損傷の発生を剛性の低下および減衰の増加とみなし、 e 番目の要素が損傷した場合、要素 e の剛性・減衰マトリクスが dk_e 、 dc_e の割合で変化すると仮定する。このとき、全体マトリクスの変分は $[dK] = \sum_{e=1}^n dk_e [K^e]$ 、 $[dC] = \sum_{e=1}^n dc_e [C^e]$ のように表される。損傷後の構造物の運動方程式は次式で表される。

$$[M]\{\ddot{x}\} + \left([C] + \sum_{e=1}^n dc_e [C^e]\right)\{\dot{x}\} + \left([K] + \sum_{e=1}^n dk_e [K^e]\right)\{x\} = \{f\} \exp(-i\omega t) \quad (1)$$

式(1)において、 $[M]$ は質量マトリクス、 $\{x\}$ 、 $\{f\}$ はそれぞれ変位ベクトルおよび外力ベクトルである。ここで、外力として起振振動数 ω の調和外力を想定しており、自由度番号 j において起振力 F 、角振動数 ω で起振すると仮定する。自由度番号 i におけるフーリエ振幅は dk_e 、 dc_e の関数であり、 $\tilde{x}_i(dk_1, \dots, dk_n, dc_1, \dots, dc_n)$ とおくと、次式のように表せる。

$$\tilde{x}_i(dk_1, \dots, dk_n, dc_1, \dots, dc_n) = \left[-\omega^2 [M] + i\omega \left([C] + \sum_{e=1}^n dc_e [C^e] \right) + [K] + \sum_{e=1}^n dk_e [K^e] \right]_{ij}^{-1} F \quad (2)$$

$\tilde{x}_i(dk_1, \dots, dk_n, dc_1, \dots, dc_n)$ が起振実験によって得られた自由度番号 i でのフーリエ振幅と一致するような dk_e 、 dc_e を求めることで、各要素の剛性・減衰の変化率を求めることができる。

3. グループング法

グループング法とは、全要素を複数のグループに分け、同一のグループに属する要素は同じ損傷率を有すると仮定することにより、パラメータの数を減らすことと、段階的に損傷の可能性のないと判断された要素を解析の対象から排除することにより、効率的に解を求める手法である。そのアルゴリズムは以下の通りである。
(1) n 個の要素全てを損傷の可能性があると仮定する。(2) 要素を m 個のグループに分ける。(3) 同じグループ g に属する要素は全て同じ損傷率(dc_e と dk_e)を持つと仮定し、損傷同定式を再構築する。(4) 損傷同定方程式を解き、 dc_e と dk_e がともに予め設定した閾値よりも小さければ、グループ g に属する要素を、損傷の可能性がないとして損傷同定の候補から外す。候補から外す要素がなければ計算を打切る。(5)(3)に戻る。

4. 実験内容

本研究では、写真-1に示した熊本県に架かる車帰橋を対象構造物とした。この橋梁は昭和38年に架設された橋長47.0m、幅員4.8mの単径間鋼製トラス橋である。図-1の側面図に節点番号および要素番号を記す。また、起振する際には写真-2に示すマイクロ起振器を用いた。



写真-1 車帰橋

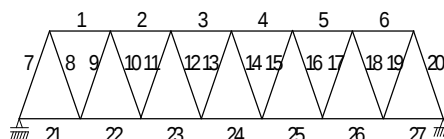


図-1 側面図

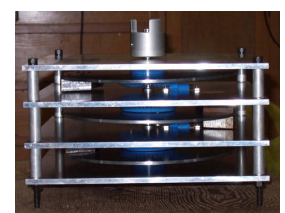


写真-2 マイクロ起振器

マイクロ起振器を用いてトラス橋を鉛直方向に加振し、加速度計で鉛直方向の振動を計測した。加速度計は計8台とその台数に制限があったため、図-2に示す2つの配置に対し計測を行った。節点4と11はどちらの配置においても計測している。図-2において○で囲まれた節点には加速度計を設置し、□で囲まれた節点には起振器を設置した。要素8に50%の断面欠損を部材長さ方向に10cm入れたモデルを健全モデルとみなした。損傷モデルは、要素8に50%の断面欠損を部材長さ方向に200cm入れ、要素15に50%の断面欠損を部材長さ方向に100cm入れたモデル(損傷モデル1)と、要素8に50%の断面欠損を部材長さ方向に300cm入れ、要素15に50%の断面欠損を部材長さ方向に300cm入れたモデル(損傷モデル2)とを考えた。これらを損傷部材の剛性低下率に換算すると表-1の通りである。剛性低下率は式(3)、(4)から算出した。

要素8：剛性低下率 = $1 - \frac{1/(1+\Delta l/l)}{1/(1+10(\text{cm})/l)}$ (3)

要素15：剛性低下率 = $1 - (1/(1+\Delta l/l))$ (4)

ここで、 Δl は損傷長さ(cm)、 l は部材長さ(cm)である。

5. 解析モデルのアップデーティング

本研究では、設計図から作成した解析モデルの起振振動数でのフーリエ振幅が実験から得られた起振振動数でのフーリエ振幅に近づく様に解析モデルのアップデーティングを行った。このとき、減衰定数は非常に小さかったため解析モデルは非減衰系と仮定し、各要素の質量と剛性を変え、図-3 解析モデルのアップデーティング

アップデーティングを行った。図-3に健全モデル、設計図から作成した解析モデル、アップデーティング後の解析モデルの起振振動数でのフーリエ振幅をそれぞれ示す。図-3では、横軸に計測した節点の番号(中央付近の縦線から左は配置a、右が配置b)で縦軸が起振振動数でのフーリエ振幅を表している。図-3から明らかなように、アップデーティング後には全体的に解析モデルの応答に近づいていることが分かる。

6. 損傷同定

グルーピング法を用いない場合の損傷同定結果を図-4に示す。実際には要素8、要素15の2部材しか損傷していないが、グルーピング法を用いない場合には、損傷箇所として、3部材が損傷しているという結果が得られた。要素1および要素24は損傷要素である要素8、要素15に隣接する要素であるため、損傷していると誤判断されたものと思われる。表-1に示した剛性変化率と比較してみると、図-4(a),(b)に示した値は要素8、15で大きめの値が得られた。この理由としては、実験において部材8、15に損傷を与えた時に、式(3)、(4)から算定した剛性変化率よりも大きな損傷が両部材に発生していた可能性が考えられる。

グルーピング法を用いた場合の損傷同定結果を図-5に示す。本研究では、最初のグループ数を4、6、8、10、12、14個の場合についてそれぞれ行った。その結果、どの場合にも、損傷箇所を2部材にまで絞ることができた。剛性低下率は、グルーピング法を用いない場合と同様にやや大きめの値が得られた。

7. 結論

本研究では、部材に損傷を与えた損傷モデルを作成し、マイクロ起振器を用いた振動実験を行った。得られた振動データに筆者らによって提案済みの損傷同定手法を適用し、損傷部材の特定および損傷レベルの推定が可能であることを検証した。さらに、グルーピング法を用いることで精度の向上を図ることができた。

参考文献

1) 古川愛子，清野純史，小型起振器の利用を想定した構造物の高精度損傷評価システムについて，JCOSSAR2003：617-624，2003。

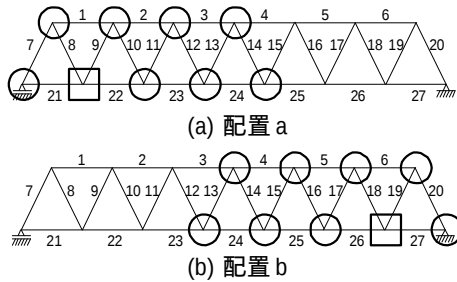


図-2 加速度計と起振器の設置位置

表-1 損傷部材の剛性低下率

	要素8	要素15
損傷モデル1	0.203	0.120
損傷モデル2	0.280	0.290

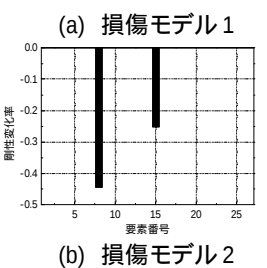
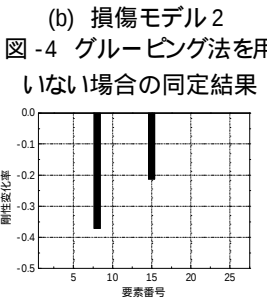
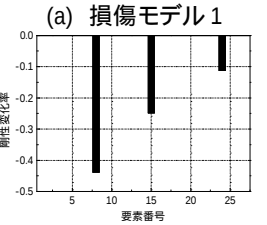
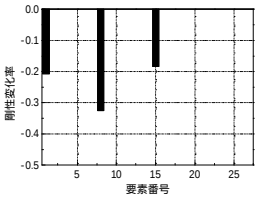
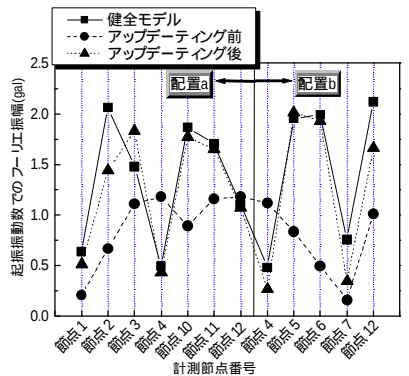


図-4 グルーピング法を用いない場合の同定結果