小型起振器による入力を想定した構造物の損傷検出法について

京都大学大学院　学生員　○古川愛子
京都大学工学研究科　正会員　清野純史

1. はじめに

大地震に備えて一刻も早い耐震補修・補強の実施が叫ばれている現在、構造物の損傷の評価や、さらには使用限界までを含めた健全度を判定する技術が求められている。本研究では可搬型の小型起振器の利用を想定した簡便かつ的確な構造物の損傷検出法を提案する。提案手法は、起振点・計測点・起振振動数を変化させることによりデータの蓄積が容易であり、さらに入力情報を既知とした上で出力データを解析することができる為、自由振動や微動を利用した従来の耐震診断法よりも精度の高い同定が期待できる。提案手法の有用性は、片持ち梁を用いた数値シミュレーションによって立証することができた。

2. 解析手法

損傷前の構造物の全体剛性・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 $[K]=\sum_{e=1}^{n}[K^e]$、$[C]=\sum_{e=1}^{n}[C^e]$ の様に表される。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 番目の要素に損傷が発生した場合、要素 e の剛性マトリクス、および減衰マトリクスが一律に δk_e、δc_e の割合で変化すると仮定する。よって、全体剛性・減衰マトリクスの変分は $[\delta K]=\sum_{e=1}^{n}\delta k_e[K^e]$、$[\delta C]=\sum_{e=1}^{n}\delta c_e[C^e]$ の様に表される。

損傷前後における構造物の運動方程式はそれぞれ次式の通りである。

$$[M]\{\ddot{x}\}+[C]\{\dot{x}\}+[K]\{x\}=\{f\}\cos\omega t \tag{1}$$

$$[M](\{\ddot{x}\}+\{\ddot{\delta x}\})+([C]+[\delta C])(\{\dot{x}\}+\{\dot{\delta x}\})+([K]-[\delta K])(\{x\}+\{\delta x\})=\{f\}\cos\omega t \tag{2}$$

式 (1) において、$[M]$、$[C]$、$[K]$ はそれぞれ、損傷前の構造物の質量・減衰・剛性マトリクスであり、$\{x\}$ は変位応答ベクトル、$\{f\}$ は起振器による調和外力の振幅を表すベクトル、ω が起振振動数である。式 (2) において、$[\delta C]$、$[\delta K]$ は減衰・剛性マトリクスの変分であり、$\{\delta x\}$ は変位応答の増分ベクトルである。

提案手法で必要なデータは、(i) 損傷前の構造特性 ($[M]$、$[C]$、$[K]$) と (ii) 損傷後の応答 ($\{x\}+\{\delta x\}$) である。損傷前後の運動方程式 (式 (1) と (2)) を比較することにより、損傷同定方程式 $[X]\{\alpha\}=\{y\}$ が得られる。計測数を m、要素数を n とすると、$[X]$ は損傷前の構造特性から構成される $2m$ 行 $2n$ 列のマトリクス、$\{y\}$ は損傷前の構造特性および損傷後の応答から構成される $2m$ 列のベクトルとなり、これらはともに既知量である。$\{\alpha\}$ は各要素の減衰・剛性の変化率から構成される $2n$ 列のベクトル ($\{\alpha\}^T=\{\delta c_1,\ldots,\delta c_n,\delta k_1,\ldots,\delta k_n\}^T$) であり、同定の対象となる未知量である。損傷同定方程式を解くことにより、損傷箇所および損傷レベルを得ることが出来る。

3. 解析モデル

解析モデルは、図 1 に示す様な長さ 50.0cm、幅 2.0cm、厚さ 0.5cm の片持ち梁であり、ヤング率 7200kg/mm^2、ポアソン比 0.34、密度 2.7kg/m^3 のアルミニウム製と仮定する。片持ち梁は長さ方向に 20 分割され、要素番号および節点番号は図 1 の通りである。図 2 の損傷モデルは横軸が要素番号、縦軸が各要素の減衰・剛性の変化率 (δc_e、δk_e) を表す。

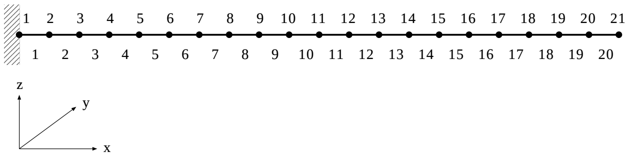
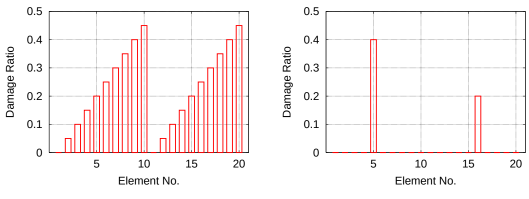


図 1: 解析モデル



(a) 損傷モデル 1　(b) 損傷モデル 2

図 2: 損傷モデル

キーワード：損傷同定、起振器、グルーピング法
連絡先：〒 606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL：075-753-5133 FAX：075-762-2005

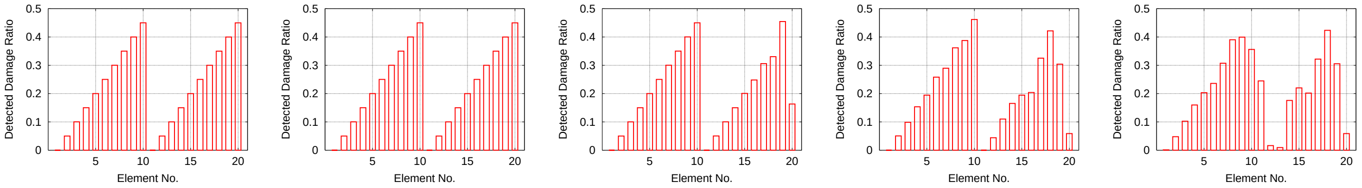
4. 提案手法の検証

表 1 に示した異なる 5 種類の計測パターンに対して提案手法を適用した。いずれのケースも計測数が要素数に等しくなる様に設定してある。非減衰でノイズの無い理想的な状況を仮定した。

図 2(a) の損傷モデルに対する各ケースの同定結果を図 3 に示す。ケース 1 およびケース 2 より、全ノードで起振または計測を行えば非常に高精度な同定結果が期待できることがわかった。また各ケースの結果の比較から、出来るだけ多くのノードで起振 (計測) を行うのが良いこと、全てのノードで起振 (計測) 出来ない場合はそれを補う手法として振動数を変えるよりも計測 (起振) 点を変える方が良いことがわかった。

表 1: 解析条件

ケース	起振点	計測点	起振振動数
1	No.21	No.2〜21	1Hz
2	No.2〜21	No.21	1Hz
3	No.2〜21	起振点と同じ点	1Hz
4	No.11,21	No.3〜21 の奇数点	1Hz
5	No.21	No.3〜21 の奇数点	1Hz,5Hz



(a) ケース 1　(b) ケース 2　(c) ケース 3　(d) ケース 4　(e) ケース 5

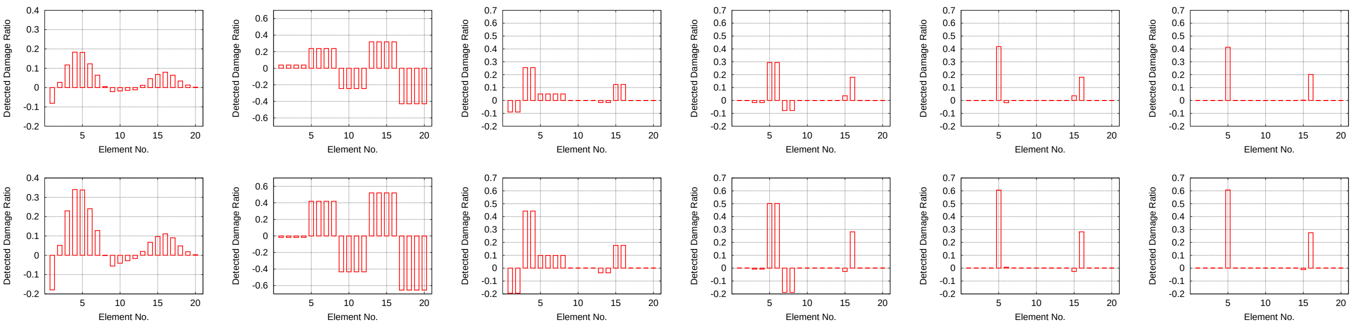
図 3: 各ケースの同定結果

5. グルーピング法の適用

計測数が少ない場合、損傷同定方程式を満たす解は複数存在し一意に定まらない。本研究ではこの様な状況でも安定した同定結果を得る為の手法としてグルーピング法を提案する。グルーピング法は、要素を同一の損傷率を持つ複数のグループに分けることで同定パラメータの数を減らし、同定値が閾値を下回る要素を損傷候補から順次外していくことで、段階的に損傷候補を絞り込む手法である。

次にグルーピング法の有用性を検証する。ここでは減衰系でノイズの無い状況を仮定し、起振点をノード 21、計測点をノード 5,9,13,17,21 の 5 箇所、起振振動数を 1Hz とした。計測データが 5 つあるので、初期段階では 4 要素ずつの 5 グループに分けた。減衰マトリクスの決定にあたっては 1 次と 2 次の減衰定数を 2%とする Raylie 減衰を採用した。

図 2(b) の損傷モデルに対するグルーピング法による同定結果を図 4(b)〜(f) に示す。5 段階に及ぶ計算の末、実際に損傷している 2 要素に絞り込まれており、損傷率に関しても非常に精度良い同定値が得られている。比較の為、Moore Penrose の一般化逆行列による同定結果を同図の (a) に示す。(a) と (f) の比較よりグルーピング法の有用性は明らかである。



(a)Moore Penrose　(b)1nd step　(c)2rd step　(d)3th step　(e)4th step　(f)5th step

図 4: グルーピング法と Moore Penrose の一般化逆行列による同定結果の比較 (上：剛性の減少率, 下：減衰の増加率)

6. 結論

本研究では小型起振器による調和外力の入力を想定した構造物の損傷検出法を提案した。片持ち梁による数値シミュレーションを通して、適切な起振器・計測器の配置の下、十分な数の計測を行えば、非常に高精度で損傷箇所および損傷レベルの同定が可能となることを示せた。また、十分な数の計測が行えない場合の効率的な解法としてグルーピング法を提案し、数値実験により有用性を検証した。

参考文献

Usik Lee, Jinho Shin：A frequency response function-based structural damage identification method, Computers and Structures, Vol.80, pp.117-132, 2002