

第 1 部門 マイクロ起振器を用いた不完全な計測データからの損傷同定手法について

九州大学大学院 学生員 梅林福太郎 九州大学大学院 正会員 古川愛子
九州大学大学院 フェロー 大塚久哲 京都大学工学研究科 正会員 清野純史

1. 序論

構造物の老朽化は避けることが出来ない現象であり、出来る限り早急に何らかの対処を行い、地震などの災害に備える必要がある。また、近年わが国の経済状況から、構造物を建て替えるより維持管理を促進し、必要あらば補修・補強を行うことで、構造物の長寿化を図っていくことが望まれる。補修・補強を行うためには損傷箇所の検出が不可避となるが、その検出手法として、著者らはこれまでにマイクロ起振器を用いた簡便な損傷検出手法を提案している¹⁾。今回は、この手法の更なる改善を目的とし、不完全な計測データから損傷を同定する手法を提案する。

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 i での応答のフーリエ変換 x_i と一致すればよいので、以下の最適化問題を解けば、各要素の剛性・減衰の変化率が求まることとなる。

$$J = \sum_i (\tilde{x}_i(dk_1, \dots, dk_n, dc_1, \dots, dc_n) - x_i)^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

未知パラメータ $(dk_1, \dots, dk_n, dc_1, \dots, dc_n)$ の数より多くの計測データが得られれば、式(3)から唯一の解が定まるが、未知数より計測データの数が少ないと解は無数存在することになる。やむを得ず、従来の手法では、式(3)を次式のような最適化問題に置き換えて唯一の解を求めていた。

$$J = \sum_e (dk_e^2 + dc_e^2)^2 \rightarrow \min \quad \text{subject to} \quad \sum_i (\tilde{x}_i(dk_1, \dots, dk_n, dc_1, \dots, dc_n) - x_i)^2 = 0 \quad (4)$$

しかしながら、数値解析により手法を検討したところ、式(4)の手法では、損傷している要素の周辺にある無損傷の要素も損傷しているという結果が得られ、実際に損傷している要素の損傷率は過小評価となることがわかった。計測データの不足を式(4)のような目的関数で補ったことが原因であると考えられる。

3. 少量の計測データからの損傷同定手法

損傷した要素数を 1 個、その要素番号を s と仮定すると、式(3)は以下のように置き換えられる。

$$J = \sum_i (\tilde{x}_i(0, \dots, 0, dk_s, 0, \dots, 0, 0, \dots, 0, dc_s, 0, \dots, 0) - x_i)^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

計測データの数 1 つ以上あれば、式(5)から唯一の解が得られることになる。損傷している要素の数が計測データより少ないと、このように損傷要素の数を仮定し損傷要素の組み合わせを様々に変えることにより、式(4)のような目的関数の仮定を必要とせず、計測データだけからの同定が可能となる。様々な同定結果が得られることになるが、これらの

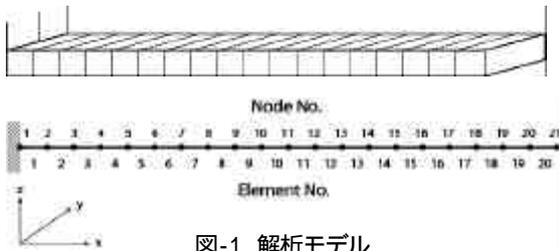


図-1 解析モデル

表-1 解析条件

	同定に用いる計測データ数	計測条件		
		起振節点	計測節点	起振振動数
ケース1	20	21	No.2 ~ 21	5Hz
ケース2	10		No.2 ~ 21の偶数節点	
ケース3	5		No.4,8,12,16,20	

うち式(3)の目的関数を最小にするものを最適解として選ばばよいこととなる。

4. 解析モデル

解析モデルは、図-1 に示すような長さ 50cm , 幅 2.0cm , 厚さ 0.5cm の片持ち梁であり , ヤング係数 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 . 非減衰系でノイズのない理想的な状況を仮定している . 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 に示す通りである . また , 各要素の損傷率(剛性の変化率)として図-2 に示した損傷モデル 1 と 2 を採用した .

5. 数値解析による検証

提案手法の有用性を検証するために , 表-1 に示す解析条件に対して , 従来の手法と提案手法を用いて数値解析を行った . ケース 1 , 2 , 3 はそれぞれ 20 個 , 10 個 , 5 個の計測データを用いて 20 要素の剛性変化率を同定するというものである .

まず 損傷要素数が 1 個である損傷モデル 1 の同定結果を図-3 に示す . 十分な計測データを用いるケース 1 については , 両手法ともほぼ正解に近い値が得られたが , 計測データが十分でないケース 2 , ケース 3 の従来の手法では , 損傷していない要素まで損傷している結果が得られた . 実際に損傷している要素 4 の剛性変化率が過小評価されており , どの要素が損傷しているのか , この図からは判断できない . 一方 , 提案手法では , ケース 2 , ケース 3 とともに , ケース 1 と同様の精度の良い結果が得られた . このことから , 提案手法では , 少量の計測データからでも , 損傷同定が可能であることが検証できた . 次に , 損傷要素数が 2 である損傷モデル 2 の同定結果を図-4 に示す . 損傷モデル 1 と同様の傾向を示しており , 少量の計測データしか得られない場合の同定精度の向上が可能であることがわかる . しかし , 図-3 と図-4 の提案手法を比較すると , ケース 3 において , 損傷箇所の増加に伴い , 設定した損傷率に対して過小評価となる傾向が見られた .

6. 結論

本研究では , 何らかの制約条件のために十分な数の計測データを得ることができない場合を想定し , 不完全な計測データから損傷を同定する手法を提案した . 片持ち梁による数値解析を行い , 提案手法を用いることで同定精度を向上できる可能性があることを示した .

参考文献 1)Furukawa , A. and Kiyono , J. : Structural damage identification based on harmonic excitation force , Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure , Vol.1 , pp.535-542 , 2003 .

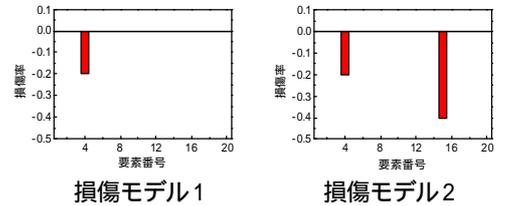


図-2 損傷モデル

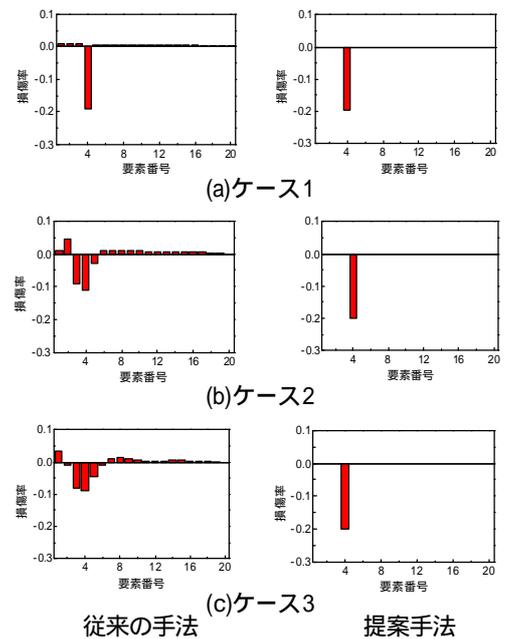


図-3 解析結果 (損傷モデル1)

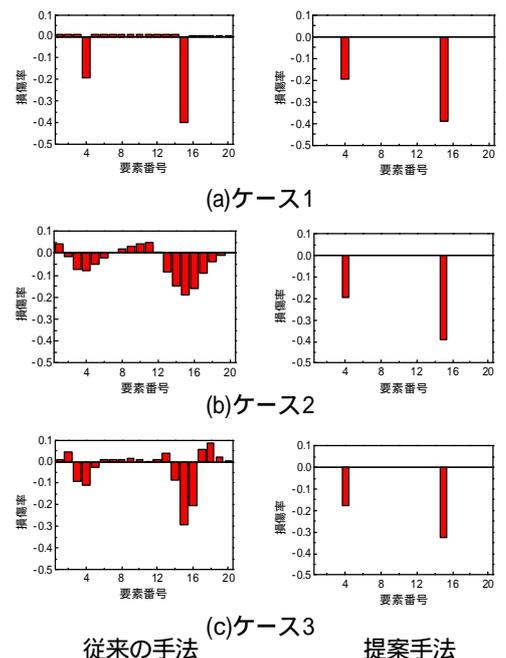


図-4 解析結果 (損傷モデル2)