

モデル化誤差と計測ノイズの影響を考慮した構造物の損傷同定手法について

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

筆者らは、小型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。しかしながら、実際の構造物にこの手法を適用するにあたっては、損傷前の構造物を正確に表す解析モデルの作成が難しいこと、計測データにはノイズが含まれていることなど、解決すべき数多くの問題がある。本研究では、近年統計科学の分野で脚光を浴びているブートストラップ法を援用し、モデル化誤差と計測ノイズの影響を考慮した損傷同定手法を提案する。

2. 解析手法

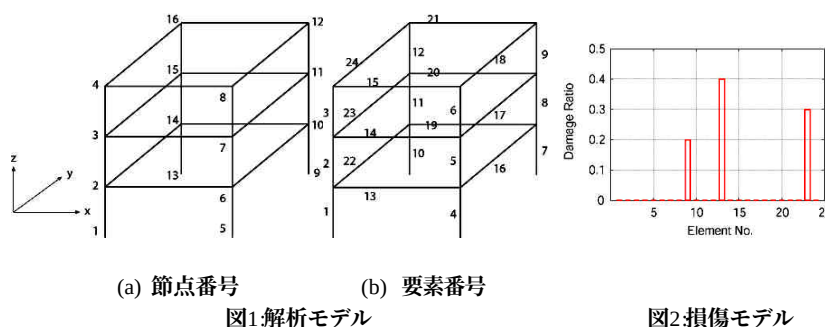
損傷前の構造物を表す解析モデルの全体剛性・減衰マトリクスは、各要素の剛性・減衰マトリクスの総和として、 $[K] = \sum_{e=1}^n [K^e]$, $[C] = \sum_{e=1}^n [C^e]$ の様に表される。ここで n は要素の総数、 $[K^e]$, $[C^e]$ はそれぞれ e 番目の要素の剛性・減衰マトリクスである。本研究では、損傷の発生を剛性の低下および減衰の増加とみなし、 e 番目の要素が損傷した場合、要素 e の剛性・減衰マトリクスが一律に dk_e^d , dc_e^d の割合で減少・増加すると仮定する。よって、全体マトリクスの変分は $[dK^d] = \sum_{e=1}^n dk_e^d [K^e]$, $[dC^d] = \sum_{e=1}^n dc_e^d [C^e]$ の様に表される。損傷前の解析モデルの誤差についても同様に表す。すなわち、 e 番目の要素の剛性・減衰のモデル化誤差を dk_e^i , dc_e^i の過大・過小評価と仮定し、全体マトリクスの変分を $[dK^i] = \sum_{e=1}^n dk_e^i [K^e]$, $[dC^i] = \sum_{e=1}^n dc_e^i [C^e]$ とする。損傷前後の構造物に対する起振実験結果と提案手法¹⁾により、 dk_e^d , dc_e^d , dk_e^i , dc_e^i を同定することができる。

3. ブートストラップ仮説検定

$dk_e^d > dk_e^i$ および $dc_e^d > dc_e^i$ の場合に、 e 番目の要素は損傷していると判断することができる。しかし、計測ノイズがある場合、小さな損傷が検出できなかったり、逆に誤って健全な部材に損傷が検出されたりすることが起こりうる。そこで、これらの影響を考慮するため、ブートストラップ法を用いた仮説検定を導入する。損傷による変化とモデル化誤差をそれぞれ $X(dk_e^d, dc_e^d)$, $Y(dk_e^i, dc_e^i)$ で表し、平均を m_x, m_y とする。今、 $H_0: m_x = m_y$ を帰無仮説、 $H_A: m_x > m_y$ を対立仮説とする。帰無仮説が棄却されれば、その要素は損傷していると判断される。本研究では、検定統計量 $T(X, Y) = (\bar{X} - \bar{Y}) / \sqrt{S_x^2/(n-1) + S_y^2/(n-1)}$ を用いる。ここで $\bar{X}, \bar{Y}$ は標本平均、 S_x^2, S_y^2 は標本分散である。検定統計量の実現値 t が大きいかどうかは p 値 $p = \Pr\{T \geq t | H_0\}$ で判断されるため、 $T(X, Y)$ の分布が必要となる。ブートストラップ法を用いると、正規分布に従うといった理想的な仮定をすることなく、計測データのリサンプリングにより計算機で自動的に $T(X, Y)$ の分布を生成することができる²⁾。有意水準を α とすると、帰無仮説は $p > \alpha$ のとき採択、 $p \leq \alpha$ のとき棄却される。

4. 解析モデル

解析モデルは図1に示す幅3m、奥行き5m、各層の高さは3.5mの3次元3層鉄骨フレームである。減衰は1次および2次モードの減衰定数を共に2%とするレイリー減衰を仮定した。損傷モデルは図2に示す通りである(損傷要素番号: 9, 13, 23)。横軸が要素番号、縦軸が剛性の低下率・減衰の増加率を表す。



キーワード 損傷同定、モデル化誤差、計測ノイズ、ブートストラップ法、仮説検定

連絡先 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL 075-753-5133

4. 数値解析による検証

ノード16においてx方向に起振振動数1Hzで起振し、全ての自由ノードで3方向の応答を計測すると仮定した。各要素の損傷は、損傷前後の剛性低下率と減衰増加率 $dk_e = (dk_e^d - dk_e^i) / (1 - dk_e^i)$, $dc_e = (dc_e^d - dc_e^i) / (1 + dc_e^i)$ を用いて表される。

まず、誤差・ノイズが共にならない理想的な状況における、従来の提案手法¹⁾による解析結果を図3に示す。理想的な状況では非常に高い精度で損傷が同定できていることがわかる。次に、モデル化誤差を表す為に各要素の剛性・減衰マトリクスに5%の誤差を与え、また計測ノイズを表す為に応答にS/N比5%のホワイトノイズを加えた。従来の提案手法¹⁾による解析結果を図4に示す。損傷している3要素に大きな損傷が検出できているものの、損傷していない要素に損傷が検出されている。次に、ブートストラップ法を適用した結果を図5に示す。これらは帰無仮説が棄却された dk_e, dc_e の平均値のブートストラップ推定量を求めたものである。計算に用いたデータ数は30、ブートストラップ反復回数は1000、有意水準は95%である。モデル化誤差も計測ノイズも含まない図3に比べると精度は劣るものの、ブートストラップ法の導入により、検出誤りが減少し、同定の精度も向上していることがわかる。

5. 繰返し法

要素数に対して計測数が少ない場合、解は一意に定まらない。繰返し法は、損傷の可能性がないと判定された要素を損傷候補から順次排除していくことで、段階的に損傷候補を絞り込む手法である¹⁾。従来は、排除する際の判定基準として、同定値が閾値を下回る要素を排除したが、本研究ではこれについてもブートストラップ仮説検定を導入する。即ち、帰無仮説が採択された要素を、損傷候補から順次排除しようというものである。

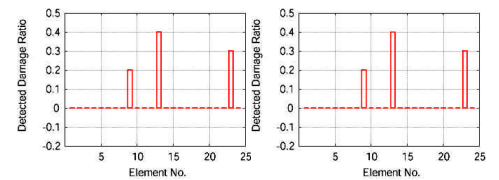
次に手法の有用性を検証する。4.と同じ3層フレームに対し、ノード16をx方向に1Hzで起振し、計測点をノード4,6,12,14の4箇所とした。それ以外の条件は4.と同様に設定した。図6に同定結果を示す。わずか2段階の繰返し計算で、実際に損傷している3要素に絞り込まれており、損傷率に関しても非常に精度良い同定値が得られている。比較の為、従来の判定基準(閾値0.02)により4段階に及ぶ計算の末得られた結果を図7に示す。図6と7の比較により、排除の判定基準に関してもブートストラップ法を導入することで早い段階でより精度の高い解が得られること、4.のケースの様に全てのノードでの計測データがなくとも、正解に到達できることが示せた。

6. 結論

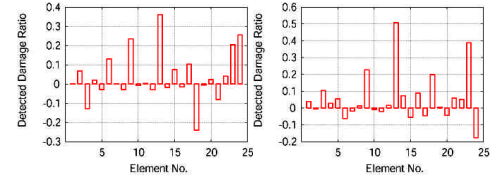
本研究では、モデル化誤差と計測ノイズの影響を考慮したブートストラップ仮説検定に基づく損傷同定手法を提案した。また、十分な数の計測が行えない場合の繰返し計算においても、ブートストラップ法を用いる方法を提案した。3次元3層フレーム構造物を対象とした数値解析を通して提案手法の有用性を検証した。

参考文献

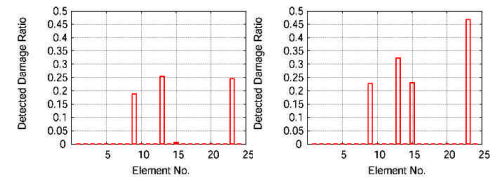
- 1) A. Furukawa and J. Kiyono: Structural damage identification based on harmonic excitation force, Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Vol. 1, pp.535-542, A.A. BALKEMA PUBLISHERS, November, 2003.
- 2) 汪金芳・田栗正章・手塚集・樺島祥介・上田修功: 計算統計 I, 岩波書店, 2003.



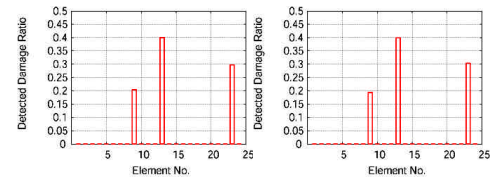
(a) 剛性の低下率 (b) 減衰の増加率
図3: 同定結果(モデル化誤差無・計測ノイズ無)



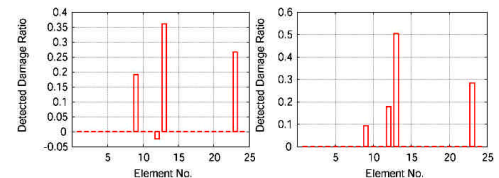
(a) 剛性の低下率 (b) 減衰の増加率
図4: 同定結果(モデル化誤差 5%・計測ノイズ 5%)



(a) 剛性の低下率 (b) 減衰の増加率
図5: ブートストラップ仮説検定による同定結果(モデル化誤差5%・計測ノイズ5%)



(a) 剛性の低下率 (b) 減衰の増加率
図6: ブートストラップ法を用いた繰返し法(2nd step)



(a) 剛性の低下率 (b) 減衰の増加率
図7: 閾値を0.02とした繰返し法(4th step)