

質量のモデル化誤差が損傷度同定の精度に与える影響について

九州大学 正会員 古川 愛子
九州大学 フェロー 大塚 久哲
京都大学 正会員 清野 純史

1. はじめに

振動特性に基づく損傷同定に関する既往の多くの研究では、構造物の損傷を要素剛性の低下・減衰の増加であるとモデル化している。質量については、設計図面から正確な値が計算できており、かつ損傷前後において不変であるものとしている。しかしながら実際は、そのような保証はないので、質量変化も考慮に入れた手法に拡張することが望ましいと言える。また、損傷検出に用いられる振動データとしては、強制振動等によって求められる周波数応答関数(FRF)と、自由振動等から抽出される固有振動特性などが代表的である。本研究では、質量のモデル化誤差が両データを用いた同定手法の精度に与える影響について検討を行った。

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質量・減衰・剛性マトリクスは、各要素の質量・減衰・剛性マトリクスの総和として、 $[M]=\sum_{e=1}^n[M^e]$ 、 $[C]=\sum_{e=1}^n[C^e]$ 、 $[K]=\sum_{e=1}^n[K^e]$ の様に表される。ここで n は要素の総数、 $[M^e]$ 、 $[C^e]$ 、 $[K^e]$ はそれぞれ e 番目の要素の質量・減衰・剛性マトリクスである。本研究では、損傷によって質量・減衰および剛性が変化するとみなし、 e 番目の要素が損傷した場合、要素 e の質量・減衰・剛性マトリクスが一律に dm_e 、 dc_e 、 dk_e の割合で変化すると仮定する。これにより、全体マトリクスの変分は $[dM]=\sum_{e=1}^n dm_e[M^e]$ 、 $[dC]=\sum_{e=1}^n dc_e[C^e]$ 、 $[dK]=\sum_{e=1}^n dk_e[K^e]$ のように表される。損傷後の構造物に対する振動実験より得られた周波数応答関数・固有振動特性に一致するような dm_e 、 dc_e 、 dk_e を、逆解析手法により同定する。

3. 解析ケース

解析対象モデルは、橋長47.0mの単径間鋼トラス橋である(図-1)。減衰は1次と2次の減衰定数を2%とするレイリー減衰と仮定した。本研究では図-2に示す損傷モデルに示された剛性低下率・減衰系増加率を採用した。質量が変化する場合、同じく図-2の質量減少率を用いた。

起振データは、起振箇所、起振方向、計測箇所、計測方向の組合せ毎に異なるデータが得られる。本研究では、表-1に示す計測ケースを想定した。起振点において水平・鉛直2方向に起振し、応答を両方向計測することを仮定しているため、90個の周波数応答関数が得られることになる(計測点15は水平方向の応答のみ)。起振振動数は10Hzとした。固有振動特性に関しては、3次モードまでの値を採用することとした。

解析ケースを表-2に示す。ケースDは、剛性と減衰が変化する場合で、ケースE、Fは、損傷により質量・減衰・剛性がともに変化するものである。ケースEが減衰と剛性だけが変化すると誤った仮定をして同定を行うのに対し、ケースFは質量・減衰・剛性がともに変化すると正しい仮定をして同定を行うものである。計測ノイズは0.5,10%の3通りについて検討を行った。

4. 周波数応答関数を用いた損傷同定結果

本論文では、剛性低下率を損傷の指標とみなし、剛性の結果だけを示すこととする。ケースDでは、ノイ

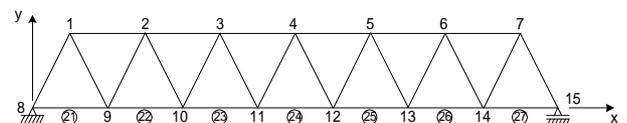


図-1 解析モデル

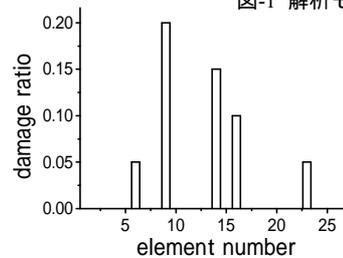


図-2 損傷モデル

表-1 計測ケース

起振点	計測点			
9	1	2	10	
10	2	3	9	11
11	3	4	10	12
12	4	5	11	13
13	5	6	12	14
14	6	7	13	15

表-2 解析ケース

ケース	減衰	損傷前後で変化するパラメータ	同定の対象とするパラメータ
D	減衰系	減衰 剛性	減衰 剛性
E	減衰系	質量 減衰 剛性	減衰 剛性
F	減衰系	質量 減衰 剛性	質量 減衰 剛性

連絡先 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 TEL 092-642-3268

ズのないケースではほぼ完全に、またノイズが 10%存在する状況であってもほぼ正確に評価出来ている(図-3(a))。ケース E のように、実際は質量が変化しているのにも関わらず、質量が不変であると誤った仮定をして同定を行うと、質量の変化による応答の差を減衰と剛性の変化で補おうとするため、大きな誤差が生じる(図-3(b))。数%の小さな損傷を評価したい場合に質量を損傷前後で不変と仮定することは適切でないと考えられる。質量も変化すると仮定するケース F は、ケース E に比べて、同定値の精度が向上している(図-3(c))。

5. 周波数応答関数と固有振動特性の両方を用いた損傷同定

周波数応答関数(FRF)90 個だけを用いる場合と周波数応答関数に加えて 3 次までの固有振動特性を用いた場合の剛性低下率の同定結果を図-4 に示す。固有振動特性に関しては誤差を含まない正確な値が計測されると仮定しており、周波数応答関数については 10%の計測ノイズを与えた時の結果を示してある。ケース D では、固有振動数を用いることによって若干精度が良くなっているが、ほとんど差はみられない(図-4(a))。損傷前後で質量が変化しているのに質量変化はないと仮定するケース E では、固有振動数を考慮すると精度が悪くなっているのがわかる(図-4(b))。周波数応答関数を用いる場合は、低次の非共振振動数を選べば質量変化の影響を受けにくいいため、質量の変動があっても剛性を精度よく評価できるが、固有振動特性を用いる場合は質量変化の影響を受けやすいため、かえって精度が悪くなるためと考えられる。質量変化を考慮するケース F では、固有振動数を考慮することで若干精度が向上している。

6. まとめ

損傷前後で質量が変化している場合に質量は不変であると仮定して剛性と減衰の変化だけを推定しようとすると、質量変化に依存する応答の変化に一致するように剛性変化率と減衰変化率の推定値が追従するため、精度が悪化することがわかった。また、共振を避けて低い振動数で起振する場合、周波数応答関数は剛性の変化に最も感度が高いこと、そのため質量変化がある状況でも周波数応答関数を用いることで剛性に関しては比較的精度良い同定が可能となることわかった。一方、固有振動特性は質量の変化に影響されてしまうので、固有振動特性を用いると逆に剛性に関しては精度が悪化するという結果が得られた。

参考文献

1)A. Furukawa, J. Kiyono, Structural damage identification based on harmonic excitation force, Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Vol. 1, pp.5 35-542, A.A. BALKEMA PUBLISHERS, November, 2003 2) Hassiotis S, Jeong GD. Identification of stiffness reduction using natural frequencies. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* 121: 1106-1113. 1995.

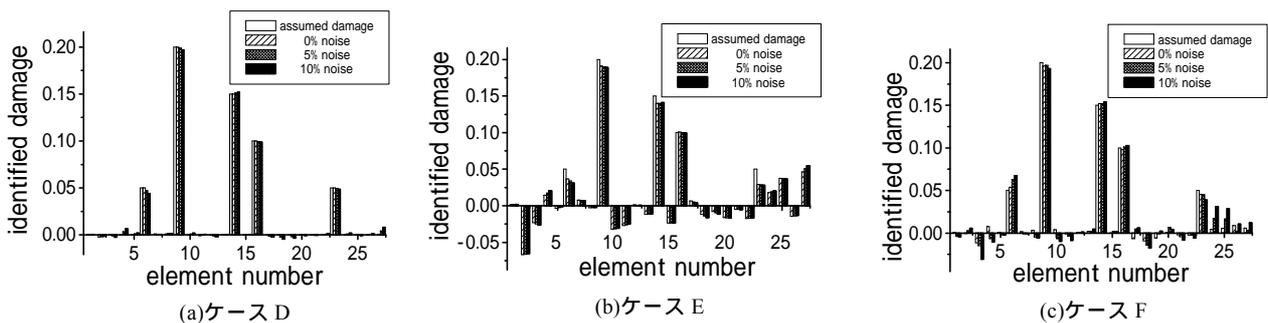


図-3 周波数応答関数 90 個だけを用いた場合の同定結果

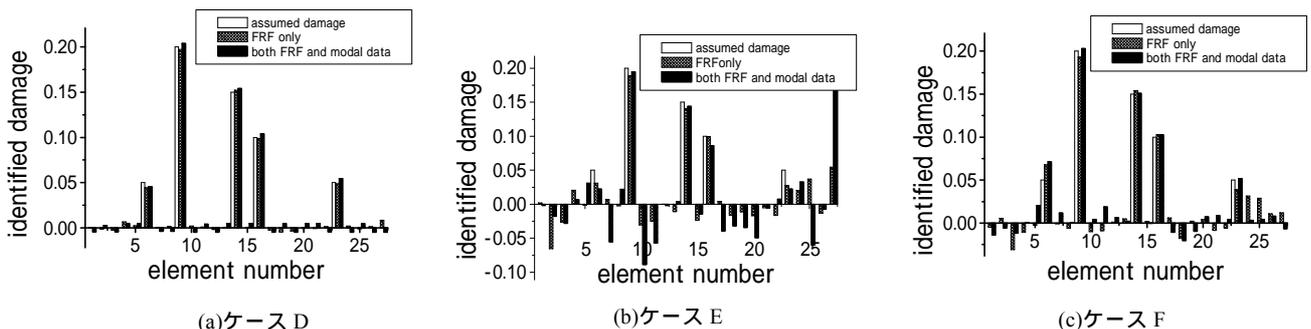


図-4 周波数応答関数 90 個と固有振動特性 3 個を用いた場合の同定結果