

CS-8

振動モード特性の変化に基づく構造物の損傷同定

建設省九州地方建設局 正 員 田村 央
 東京大学工学系研究科 正 員 阿部 雅人
 同 上 フェロー 藤野 陽三

1. はじめに

既設構造物の安全性・使用性を確保するためには、効果的かつ経済的な損傷の発見と維持管理が重要である。そこで本研究では、容易に測定できる振動データを用いて、構造物全体の健全度評価を経済的かつ簡便に行える損傷同定法の枠組みの構築と、その際に用いる個々の手法を全体として整合性の取れた形で提案することを目的とする。具体的には、構造物に損傷があると剛性が変化し、振動モード特性が変化する¹⁾ことに着目することによって、要素剛性変化（損傷）の位置と大きさを、系統立てて同定する。その際には大規模構造物への適用を考えて、設置センサー数を少数化すること、計算時間を短縮することに留意して、定式化を行う。

2. 損傷同定手法

本研究では図1に示すように3段階からなる損傷同定法を提案する。以下各段階について説明する。

2.1. 最適なセンサー配置の決定法

限られた数のセンサーで振動を効率よく測定するために、モード形の腹にセンサーを設置することを試みる。その際には、複数個のセンサーを設置した質点のモード形振幅を、考慮している次数で最大化するという評価関数を用いる。この評価関数を最適化するにあたり、大規模構造物への適用や計算時間の短縮を実現するために、評価関数の微分を用いたNewton法に基づく最適化手法（DFP法²⁾）を使用する。しかし、離散系ではそのまま適用できないので、シグモイド関数を利用した連続かつ微分可能な関数で離散的なモード形を連続的なモード形に近似し、最適化を行った後、再びその解を離散系モデルの解に近似するという手順を踏んでいる。この点に本手法の大きな特徴があり、構造物を離散系でモデル化できるためFEMへも拡張でき実用性が高いと考えられる。

2.2. モード特性の同定法

先に決定した最適センサー配置のもとに、センサー設置箇所の構造物の時系列振動データを常時微動計測や衝撃振動試験によって測定することができる。その時系列データを、FFT解析を行うことによって振動数領域に変換し、パワースペクトルのピークから固有振動数を、フーリエスペクトルの振幅比から固有モード形を同定する³⁾。このとき得られる固有モード形は、一般にセンサー設置箇所が限られているので完全なものとはならず、センサー設置質点間における固有モード形の振幅比という不完全なモード形を同定することになる。

2.3. 要素剛性変化の位置と大きさの同定法

前節の手法で同定された、固有振動数と不完全なモード形という限られた情報からでも、要素剛性変化の位置と大きさを同定できる手法を本節で定式化する。ただし前提として損傷前の質量・剛性マトリクスは既知であるとし、損傷前後において質量は変化しないとする。まず損傷後の j 要素の剛性マトリクスの変化率を δ_j と定義する。 $\delta_j=0$ は j 要素に損傷がなく、 δ_j が-1に近づくにつれてが損傷が大きくなることを表している。これを用いると損傷後の全剛性 $\mathbf{K}^d$ は次式のようになる。

$$\mathbf{K}^d = \mathbf{K} + \sum_{j=1}^p \mathbf{k}_j \delta_j, \quad \delta_j (-1 \leq \delta_j \leq 0): \text{要素剛性変化率}, \quad \mathbf{k}_j: j \text{ 要素剛性マトリクス}$$

ここで $p(n)$ は損傷可能箇所の数である。また、損傷後の固有値 λ_i^d と固有モード形振幅比 $\phi_{ii}^d / \phi_{ir}^d$ は、 δ_j が小さいと

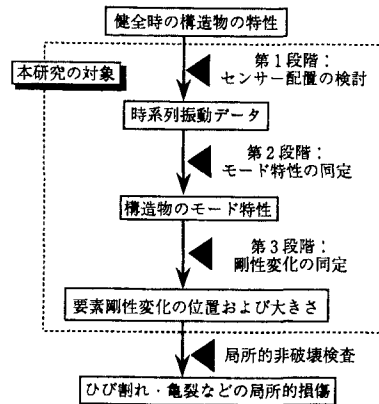


図1 本損傷同定法のフローチャート

き1次近似のテーラー展開を用いて、次式のように表される⁴⁾。

$$\lambda_i^d \approx \lambda_i + \sum_{j=1}^p \frac{\partial \lambda_i}{\partial \delta_j} \delta_j : \text{振動数の式},$$

$$\frac{\phi_{il}^d}{\phi_{ir}^d} \approx \frac{\phi_{il} + \sum_{j=1}^p \frac{\partial \phi_{il}}{\partial \delta_j} \delta_j}{\phi_{ir} + \sum_{j=1}^p \frac{\partial \phi_{ir}}{\partial \delta_j} \delta_j} : \text{モード形の式}$$

要素剛性変化の位置と大きさを同定するには、1次方程式である振動数の式とモード形の式を連立させて解くことによって、 δ_j を求めればよい。この際の解が一意に定まるための必要条件は、損傷可能箇所数が、モード特性同定次数と設置センサー数の積よりも小さいことである。

3. 数値シミュレーション結果⁵⁾

数値シミュレーションにより本損傷同定法の検証を行った。対象モデルは基本的な検証を行うために等しい質量と剛性をもつ10自由度系とし、モデルⅠにはバネ2に40%の剛性低下を、モデルⅡにはバネ1と7にそれぞれ20%の剛性低下を与えた。入力としては基底部に同じスペクトル強度をもつホワイトノイズを加速度として5波シミュレートして、変位応答をFFTを用いて振動数領域に変換し、そこで5つの出力を平均化した。

まず2.1節の手法で最適なセンサー配置を求めると、質点2,5,7,10(図2)となり、低い次数のモード形の節からはずれており妥当な結果だと考えられる。次にこの4つのセンサー設置質点について、2.2節の手法でモード特性を同定すると、両モデルの固有振動数と固有モード形振幅比とも、低次の1次から4次までは精度よく同定できた。これを用いて2.3節の手法で剛性変化の位置と大きさの同定を試みた結果を図3示す。いま損傷可能箇所数10が、モード特性同定次数4と設置センサー数4の積16よりも小さいので、前述の連立1次方程式の解は一意に定まる。そして図3より損傷が複数の時も、剛性変化の位置と大きさのある程度の精度で同定できることがわかる。

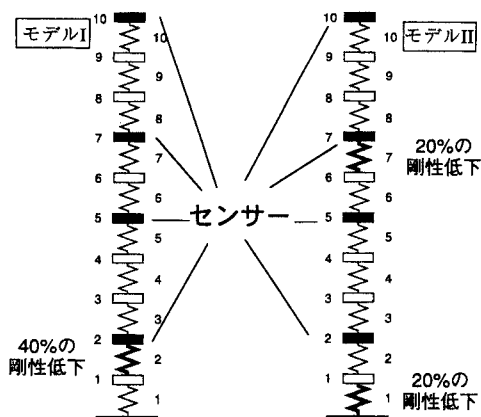


図2 10自由度系モデルとセンサー配置

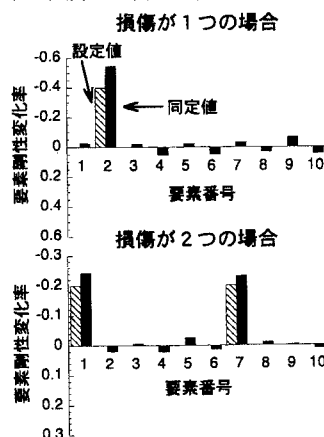


図3 損傷同定結果（上段：モデルⅠ，下段：モデルⅡ）

4. むすび

本研究では大規模構造物に適用するため、振動データを用い、設置センサー数を少数化した損傷同定法を構築した。それを数値シミュレーションで検討した結果、離散系において、センサー配置を短時間で最適化し、モード形の腹に設置することができた。また、固有モード形の部分的な情報を取り入れることで、低次モード特性同定値から、剛性変化の位置と大きさを、損傷が複数の時も、ある程度の精度で同定できた。今後は、実構造物を対象とした数値シミュレーションや、実験・実測を取り入れて、本手法の有効性を検討する必要がある。

参考文献： 1)西村, (1990) “ラーメン高架橋の健全度評価の研究,” 鉄道総研報告, 4(9), 2)Rao, (1984) *Optimization : theory and application (2nd edition)*, Wiley Eastern Limited, New Delhi , 3)長松, (1985) “モード解析,” 培風館, 4)Fox and Kapoor, (1968) “Rate of Change of Eigenvalues and Eigenvectors,” *AIAA Journal*, 6, 2426-2429, 5)田村, (1996) “振動モード特性の変化に基づく構造物の損傷同定,” 東京大学工学系研究科修士論文