

京都大学工学部 学生員 ○松尾 卓弥
 京都大学大学院工学研究科 正会員 古川 愛子
 京都大学大学院工学研究科 学生員 西川 晃司

1. 研究の背景と目的

高度経済成長期に建設された多くの土木構造物の老朽化が社会問題となっており、我が国でもトラス橋の斜材破断などの重大事故が発生しているが、その維持管理は目視に頼っているのが現状である。目視点検は、多くの時間と労力がかかる上に客観性に欠け見落としなどの問題もあるため、信頼性の高い損傷検出手法の開発が必要である。従来の損傷検出手法として、微動計測などの Hz レベルの振動数を用いるものは、小さな損傷の検出が困難で、超音波検査のような MHz レベルの振動数を用いるものは、一度に検査できる範囲が非常に狭く構造物全体を検査するのに時間がかかる。そこで本研究では、小さな損傷の検出と部材単位での効率的な損傷検出が可能な kHz レベルの振動特性を利用した損傷同定手法を提案する。圧電型アクチュエータでの調和外力の起振を想定し、損傷に伴う周波数応答関数の変化に着目する。同定に高振動数領域の解析に適したスペクトル要素法¹⁾を用いるのが特徴である。数値シミュレーションによって提案手法の有用性を検証する。

2. スペクトル要素法の概要

スペクトル要素法(SEM)は、有限要素法(FEM)と同様に、構造物を有限個の要素の集合体として捉え、各要素が節点で連結されていると仮定する。要素内の変位を節点変位で補間する際、FEM では多項式で補間するのに対し、SEM では振動数の関数で補間する。即ち SEM は節点変位と節点力の関係を表す動剛性行列を振動数毎に構築する周波数領域の解法である。例として、オイラー・ベルヌーイ梁の軸方向の動剛性行列を挙げる。

$$S_R(\omega) = \frac{E A k(\omega)}{l} \begin{bmatrix} \frac{1}{\tan k(\omega)} & -\frac{1}{\sin k(\omega)} \\ -\frac{1}{\sin k(\omega)} & \frac{1}{\tan k(\omega)} \end{bmatrix} \quad [1]$$

ここに、 l : 要素長、 E : ヤング率、 A : 断面積、 ρ : 密度、 ω : 角振動数、 $k(\omega) = \omega l \sqrt{\rho/E}$ であり、質量の影響は動剛性行列に含まれている。SEM では断面変化点を除いて要素を分割する必要がないため、FEM に比べて計算容量を節約でき、高振動数領域では特に有利である。次節で提案する起振振動数毎の周波数応答関数に着目する損傷同定手法は、 ω 毎に動剛性行列を作成する SEM と相性がよいと言える。

3. スペクトル要素法を用いた損傷同定手法

起振点 j で角振動数 ω の調和外力で起振し、計測点 i で周波数応答関数(FRF)を計測する。 i 点での応答と j 点での外力のフーリエ振幅を $X_i(\omega)$ 、 $F_j(\omega)$ とすると、FRF は次の式で表される。

$$H_{ij}(\omega) = X_i(\omega)/F_j(\omega) \quad [2]$$

構造物の損傷を断面積 A 及び断面 2 次モーメント I の減少としてモデル化し、損傷前後の FRF の変化を利用して損傷同定を行う。要素を n 分割し、要素 e における断面積と断面 2 次モーメントの低下率を ΔA_e 、 ΔI_e とすると、計測点 i における FRF の変化は次のように表される。

$$\Delta H_{ij}(\omega) = \sum_{e=1}^n \frac{\partial H_{ij}(\omega)}{\partial A_e} \Delta A_e + \sum_{e=1}^n \frac{\partial H_{ij}(\omega)}{\partial I_e} \Delta I_e \quad [3]$$

起振点を j 、起振振動数を ω に固定し、 m 個の計測点 $i = 1 \sim m$ で計測すると仮定すると、次の連立方程式が導かれる。なお ω は省略している。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial H_{1j}}{\partial A_1} & \dots & \frac{\partial H_{1j}}{\partial I_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial H_{mj}}{\partial A_1} & \dots & \frac{\partial H_{mj}}{\partial I_n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta A_1 \\ \vdots \\ \Delta A_n \\ \Delta I_1 \\ \vdots \\ \Delta I_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta H_{1j} \\ \vdots \\ \Delta H_{mj} \end{Bmatrix} \quad [4]$$

式[4]の右辺は計測データから得られ、左辺の行列は健全時の構造物のパラメータから SEM によって与えられる。式[4]を解くことにより、断面積と断面 2 次モーメントの低下を同定する。

4. 数値シミュレーションによる検証

4.1. 解析モデル

鋼トラス橋を対象とし、図 1 のように梁要素でモデル化した。左から 6 番目の斜材（斜材長 7.38m）を着目部材とし、下端から 58cm の位置に長さ 16cm、厚さ 3mm の腐食損傷を仮定した。損傷要素（要素番号 35）の断面積と断面 2 次モーメントの低下率はそれぞれ 0.09, 0.15 である。

4.2. 解析内容

起振点は部材中央、起振・計測方向は部材軸方向とした。起振振動数 1Hz と 5000Hz で比較した。

まず、着目部材を 132 等分し、損傷によって各節点の FRF がどの程度変化するかを調べた。

次に、FRF の変化から損傷を検出できるか検証した。着目部材の下方 1/4 で計測することを仮定し、下方 1/4 を細かく分割した（計測節点 17~26）。着目部材の上方 3/4 は起振点に相当する部材中央で 2 分した。計測ノイズ 1% を考慮した。

4.3. 解析結果

(1) 損傷前後の FRF の比較

解析結果を図 2(a)(b)に示す。縦軸は FRF、横軸は計測点番号を表し、着目部材の上端が 1、下端が 133 である。1Hz では、トラス全体が振動し斜材の両端も移動するため確認が困難であるが、着目部材において 1 次モードが表れると考えられ、損傷による FRF の変化はほとんどない。一方、5000Hz ではトラス全体の振動は小さく、着目部材において高次モードが表れており、損傷前後の FRF の差は大きい。高振動数の方が損傷に対する感度が高いことが確認できる。

(2) 損傷同定

同定結果を図 3(a)(b)に示す。縦軸は断面積と断面 2 次モーメントの低下率の同定結果を表し、横軸は着目部材の要素番号（図 1 参照）である。1Hz では検出できなかった要素番号 35 の 9%の断面積低下を 5000Hz では検出することができた。断面積のみ同定されているのは軸方向に起振・計測したためである。図は省略するが、軸直角方向に起振・計測した場合は断面 2 次モーメントを同定できることを確認している。

5. 結論

- ・ スペクトル要素法に基づく高振動数領域の振動特性を利用した損傷同定手法を提案した。
- ・ 高振動数で起振したときの FRF のほうが損傷に対する感度が高いことがわかった。
- ・ 高振動数で起振することによって、部材単位の計測で小さな損傷を検出することができた。

参考文献 1)Usik Lee, Spectral element method in structural dynamics, John Wiley & Sons, 2009.

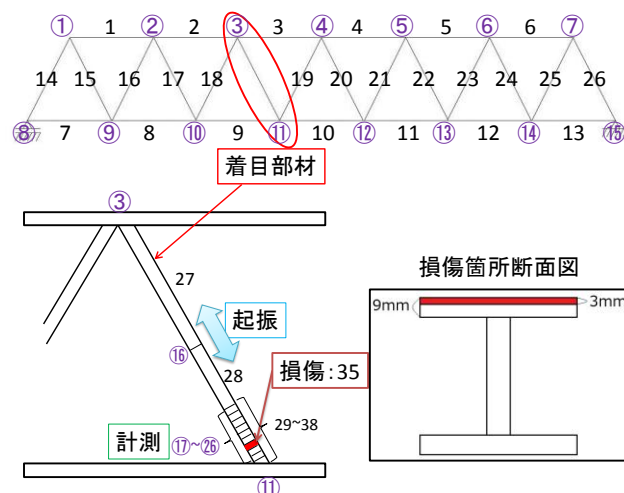


図 1 解析モデル

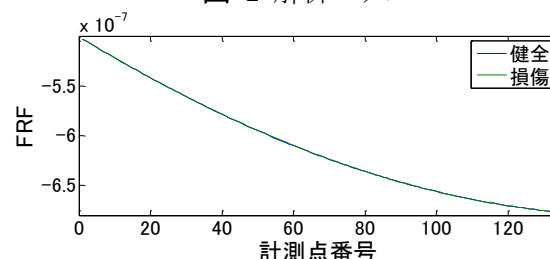


図 2(a) FRF : 1Hz

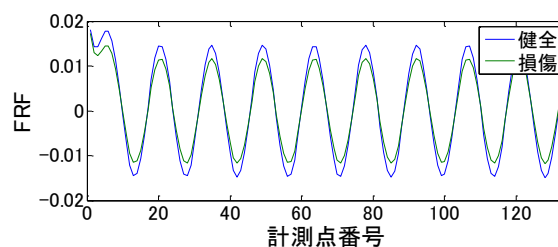


図 2(b) FRF : 5000Hz

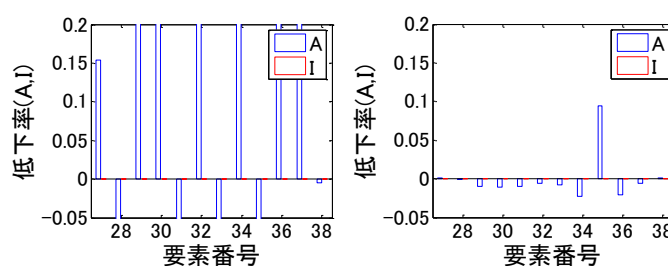


図 3(a)

同定結果 : 1Hz

図 3(b)

同定結果 : 5000Hz