

日本大学理工学部 学生員 瀬尾高宏

日本大学理工学部 学生員 仲村成貴

日本大学理工学部 正会員 花田和史

日本大学理工学部 正会員 鈴村順一

1. はじめに アクティブ制御における低次元モデル化手法の一つに、可観測・不可観測性を利用するものがある。これまで、この方法を用いて模型実験またはシミュレーションにおいてモデル化を行った例^{1),2)}は幾つか有るが、実在構造物の実験値を用いた例は少ない。本研究は、実在する歩道橋の実験モード解析結果より低次元モデルを作成し、制御用数値モデルとしての妥当性を報告するものである。

2. 実験概要 対象とした歩道橋は、千葉県浦安市に建設されている橋長 64.13 m、幅員 4.00 m、高さ 4.50 m、鋼ワーレントラス形式の見明川歩道橋である。最大起振力 15.0 kgf の起振機を用いて 1.0~15.0 Hz の正弦波掃引加振実験を橋長中央で鉛直方向へ行い、増幅器後で 50.0 Hz のローパスフィルターに通し、サンプリング周波数 256.0 Hz でデジタル測定を行った。

3. 実験モード解析とモデルの低次元化 実験モード解析から得られた固有振動数とモード型を表 1 に、代表的なモード形状を図 1 に示す。また図中○印は測点 5、8 の観測値を示している。幅員中央にフィードバック用センサーの設置を定めると、表 1 の 2~4 次モードと 6~9 次モードが可観測・不可観測性から無視され、測点 5、8 に設置を定めると、この 2 測点は図 1 より実験モード解析の曲げ 3 次モードの振動の節であるため 9 次モードを無視することが可能である。また、9 次以上のモードは、ソフトウェアのフィルターを利用することで無視することが可能である。以上より、制御対象モードは曲げ 1 次、2 次モードであり、二質点系制御用数値モデルを作成すればよい。

4. 二質点系制御用数値モデルの作成 質量正規固有モードの算出式を式 (1) に示す。ここで実験モード解析より測点 1~12 の曲げ 1 次モード時の正規化振動モードを $\phi_{1,1} \cdots \phi_{12,1}$ とし、曲げ 2 次モードにおいても同様にして $\phi_{1,2} \cdots \phi_{12,2}$ とする。

$$\{\phi'_n\} = d_n \cdot \{\phi_n\} = d_n \cdot \begin{Bmatrix} \phi_{1,n} \\ \vdots \\ \phi_{12,n} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$\{\phi'_n\}$: n 次の質量正規固有モード、 d_n : 等価質量係数、

$\{\phi_n\}$: n 次の正規化振動モード、 $[m]$: 要素質量行列

d_n は、式 (2)、(3) から求められる。

$$d_n^2 \cdot \{\phi_n\}^T \cdot [m] \cdot \{\phi_n\} = 1 \quad (2)$$

$$d_n = 1 / \sqrt{\phi_{1,n}^2 \cdot m_1 + \cdots + \phi_{12,n}^2 \cdot m_{12}} \quad (3)$$

測点 5 および 8 の曲げモードのみを考えればよいことから、この測点の曲げ 1 次、2 次の質量正規固有モードをまとめて、質量正規固有モード行列 $[\Phi]$ として次のように示す。

表 1 振動特性

	固有振動数(Hz)	モード型
1 次	2.0	曲げ 1 次
2 次	2.7	橋軸 1 次
3 次	4.1	ねじれ 1 次
4 次	4.9	ねじれ 2 次
5 次	6.0	曲げ 2 次
6 次	6.8	ねじれ 3 次
7 次	7.6	ねじれ 4 次
8 次	9.4	ねじれ 5 次
9 次	11.1	曲げ 3 次

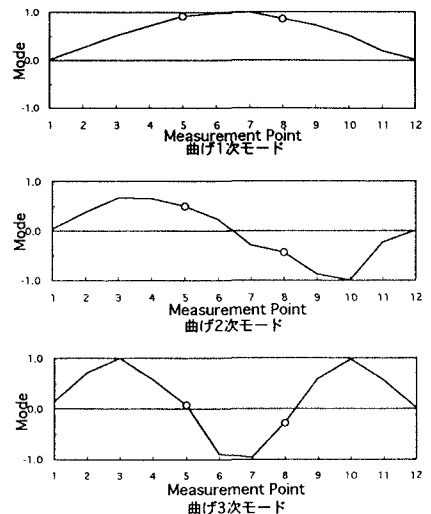


図 1 モード形状

KeyWord : 制御用数値モデル、低次元化、可観測・不可観測、実験モード解析

日本大学理工学部土木工学科 (〒101-8301 東京都千代田区神田駿河台1-8 TEL & FAX 03-3259-0689)

$$[\Phi'] = \begin{bmatrix} \phi'_{5,1} & \phi'_{8,1} \\ \phi'_{5,2} & \phi'_{8,2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式 (4) を用いたモード質量、モード剛性を式 (5)、(6) に示す。

$$[\Phi']^T \cdot [M] \cdot [\Phi'] = [I] \quad (5) \quad [\Phi']^T \cdot [K] \cdot [\Phi'] = [\Omega]^2 \quad (6)$$

$[M]$: 質量行列、 $[K]$: 剛性行列、 $[I]$: 単位行列、 $[\Omega]$: 固有角振動数行列

式 (5)、(6) を、 $[M]$ 、 $[K]$ について解くと、

$$[M] = ([\Phi']^T)^{-1} \cdot [\Phi']^T = ([\Phi'] \cdot [\Phi']^T)^{-1} \quad (7) \quad [K] = ([\Phi']^T)^{-1} \cdot [\Omega]^2 \cdot [\Phi']^{-1} \quad (8)$$

となり、 $[M]$ 、 $[K]$ とともに算出される。しかし、 $[M]$ は集中質量系なので対角化しなければならないが、非対角項にも誤差分が入り込む。

ここで土井¹⁾の方法を用いて感度解析法を行い $[\Phi']$ の補正を行った。 $[M]$ の非対角成分を誤差関数 ε として式(9)に示した。

$$\phi'_{5,1} \cdot \phi'_{5,2} + \phi'_{8,1} \cdot \phi'_{8,2} = \varepsilon \quad (9)$$

式 (9) に感度解析法を用いると、式 (10) で示される。

$$\left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial \phi} \right] \{ \delta \phi \} = \{ -\varepsilon \} \quad (10)$$

$\left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial \phi} \right]$: 誤差感度行列、 $\{ \delta \phi \}$: 修正ベクトル

式 (10) に基づいて、最小ノルム法によって算出される $\{ \delta \phi \}$ を $[\Phi']$ に繰り返し加えることで ε を 0 に収束させ、 $[\Phi']$ の補正を行った。

5. 制御用数値モデルと実験モード解析の比較 $[\Phi']$ から算出される $[M]$ 、 $[K]$ より、制御用数値モデルは、図 2 のように求まった。この制御用数値モデルと実験モード解析から得られた伝達関数を図 3、図 4 に示した。図 3、図 4 より制御用数値モデルは実験モード解析に大概一致し、曲げ 1 次、2 次モード以外を無視していることが確認できた。

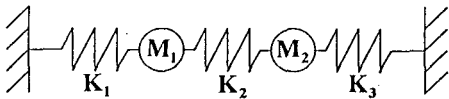


図 2 制御用数値モデル

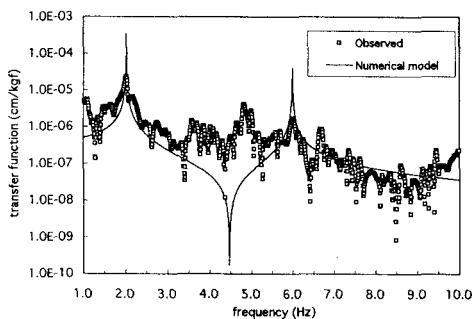


図 3 質点 M_1 と測点 5 の伝達関数比較

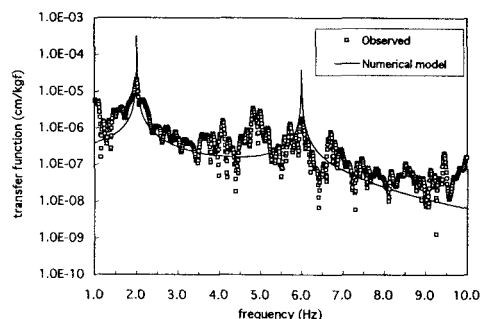


図 4 質点 M_2 と測点 8 の伝達関数比較

6. まとめ 制御用数値モデルを実験モード解析から得られる振動特性を利用して作成することは可能である。対象構造物へのフィードバック用センサーの位置も定まるため、振動制御を容易に考えられるようになった。今後は有限要素法から制御用数値モデルを作成し、今回作成したものと比較を行う。また、実橋振動制御実験を行いモデルと実験の制御則を比較検討するつもりである。

[参考文献] 1) 土井文夫: 長大連絡橋主塔構造物の多モード振動制御に関する研究, 日本大学学位論文, 1998.5, pp.19 - 38、

2) 江連勝彦: 柔構造物の多自由度系モデルによる振動制御に関する研究, 日本大学学位論文, 1997.9, pp.28 - 44