質量を含む構造パラメータ同定に関する基礎的研究

川田工業㈱　正会員　山本和也　　東電設計㈱　正会員　栗田哲史
東洋大学　正会員　新延泰生　　東京電機大学　フェロー会員　松井邦人

1. はじめに

構造評価の一手法として，パラメータ同定が考えられている．これは，同定した剛性などのパラメータの変化から損傷を推定しようとするものである．

著者らは既に，せん断多層モデルに地震動が作用した場合を想定し，GA とマルカート法を組み合わせたハイブリッド法[1]，繰返し計算を必要としない非繰返し型同定手法[2]を開発している．ただし，これらの手法は地震動に対するモデル各層の応答を用いたものであるため，同定できるパラメータは減衰係数と剛性に限られており，質量まで同定することは不可能である．構造パラメータ同定において，質量も含めて同定すると減衰係数，剛性も精度良く推定することが可能であると思われる．

そこで本研究では，質量も同定できるようなモデルを提案し，数値シミュレーションにより本提案手法の同定精度を検討することにした．なお，本提案手法は文献2)で開発した非繰返し型同定手法をベースに拡張したものである．

2. 質量を含む同定手法の提案

図－1 に示す付加構造物を含む 3 質点系モデルの各層の釣り合いから次式が得られる．

$$\begin{bmatrix} \ddot{y}_1+\ddot{z} & \dot{y}_1 & \dot{y}_1-\dot{y}_2 & y_1 & y_1-y_2 & \\ & \ddot{y}_2+\ddot{z} & -\dot{y}_1+\dot{y}_2 & \dot{y}_2-\dot{y}_3 & -y_1+y_2 & y_2-y_3 \\ & & \ddot{y}_3+\ddot{z} & -\dot{y}_2+\dot{y}_3 & & -y_2+y_3 \end{bmatrix} \mathbf{x} = -\begin{Bmatrix} m_{01}(\ddot{z}+\ddot{y}_1+\ddot{y}_{01}) \\ m_{02}(\ddot{z}+\ddot{y}_2+\ddot{y}_{02}) \\ m_{03}(\ddot{z}+\ddot{y}_3+\ddot{y}_{03}) \end{Bmatrix} \tag{1}$$

ここに，$\ddot{y},\dot{y},y$ は構造物の時間領域における加速度応答，速度応答，変位応答，$\ddot{y}_0$ は付加構造物の加速度応答，$\ddot{z}$ は地震加速度である．また，$\mathbf{x}$ は $\{m_1\ m_2\ m_3\ c_1\ c_2\ c_3\ k_1\ k_2\ k_3\}^T$ である．m,c,k および m_0,c_0,k_0 は，それぞれ構造物および付加構造物の質量，減衰係数，剛性である．式(1)をフーリエ変換すると

$$\begin{bmatrix} \ddot{Y}_1+\ddot{Z} & -\frac{1}{w}\ddot{Y}_1 i & -\frac{1}{w}(\ddot{Y}_1-\ddot{Y}_2)i & -\frac{1}{w^2}\ddot{Y}_1 & -\frac{1}{w^2}(\ddot{Y}_1-\ddot{Y}_2) \\ & \ddot{Y}_2+\ddot{Z} & -\frac{1}{w}(-\ddot{Y}_1+\ddot{Y}_2)i & -\frac{1}{w}(\ddot{Y}_2-\ddot{Y}_3)i & -\frac{1}{w^2}(-\ddot{Y}_1+\ddot{Y}_2) & -\frac{1}{w^2}(\ddot{Y}_2-\ddot{Y}_3) \\ & & \ddot{Y}_3+\ddot{Z} & -\frac{1}{w}(-\ddot{Y}_2+\ddot{Y}_3)i & & -\frac{1}{w^2}(-\ddot{Y}_2+\ddot{Y}_3) \end{bmatrix} \mathbf{x} = -\begin{Bmatrix} m_{01}(\ddot{Z}+\ddot{Y}_1+\ddot{Y}_{01}) \\ m_{02}(\ddot{Z}+\ddot{Y}_2+\ddot{Y}_{02}) \\ m_{03}(\ddot{Z}+\ddot{Y}_3+\ddot{Y}_{03}) \end{Bmatrix} \tag{2}$$

ここに，$\ddot{Y}$ および $\ddot{Y}_0$ はそれぞれ構造物および付加構造物の周波数領域における加速度応答，速度応答，変位応答，$\ddot{Z}$ は地震加速度である．また，w は円振動数，i は虚数単位$(=\sqrt{-1})$である．式(2)を書き改めると

$$\mathbf{A}(w)\mathbf{x} = \mathbf{b}(w) \tag{3}$$

時間領域においてデータ数 N_t，時間間隔 Δt の加速度応答は，フーリエ変換により振動数間隔 Δf ごとに N_f 個の周波数に分解されるため，式(3)を円振動数に関する離散化により次式のように書き改める．

$$\mathbf{A}(w_j)\mathbf{x} = \mathbf{b}(w_j) \qquad (j=1,\cdots,N_f) \tag{4}$$

ここに，$\Delta f = \dfrac{1}{N_t\cdot\Delta f}$, $N_f = \dfrac{N_t}{2}+1$ である．

式(4)を振動数ごとに縦に並べると

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}(w_1) \\ \mathbf{A}(w_2) \\ \vdots \\ \mathbf{A}(w_{N_f}) \end{bmatrix} \mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \mathbf{b}(w_1) \\ \mathbf{b}(w_2) \\ \vdots \\ \mathbf{b}(w_{N_f}) \end{Bmatrix} \tag{5}$$

式(5)に示す連立方程式を解くことにより構造パラメータベクトル $\mathbf{x}$ を求めることができる．

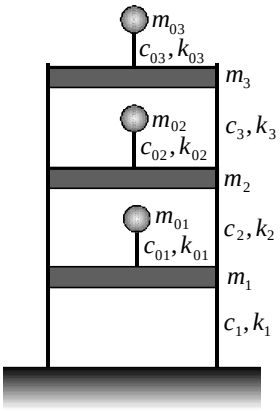
Key Words　：非繰返し型同定手法，付加質量，パラメータ同定，フーリエ変換
連絡先　　：〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11 川田工業㈱　TEL.03-3915-4321

3. 数値シミュレーションで用いるモデル

図―1 に示すモデルは，付加構造物の質量，すなわち“付加質量”の値が重要であると思われる．そこで本研究では，“付加質量”の値が異なる 7 種のモデルについて数値シミュレーションを行う．各モデルの“付加質量”は“質量”の 100，50，10，5，1，0.5，0.1[%]の値としている．また，付加構造物の剛性は，付加構造物の固有振動数が，付加構造物が設置されていない構造物の 1 次固有振動数とほぼ一致するように決定した．表―1 に，構造物および付加構造物の構造パラメータを示す．なお，モデル各層の質量，減衰係数，剛性は均一とする．

表―1　数値シミュレーションで用いる構造パラメータ

付加質量 [%]	構造物			付加構造物		
	m [kg]	c [N-s/m]	k [N/m]	m_0 [kg]	c_0 [N-s/m]	k_0 [N/m]
100	3.0	5.0	12000	3.0	5.0	12000
50	3.0	5.0	12000	1.5	2.5	6000
10	3.0	5.0	12000	0.3	0.5	240
5	3.0	5.0	12000	0.15	0.25	120
1	3.0	5.0	12000	0.03	0.05	24
0.5	3.0	5.0	12000	0.015	0.025	12
0.1	3.0	5.0	12000	0.003	0.005	2.4



図―1　付加構造物を含む 3 質点系モデル

4. 数値シミュレーションによる同定結果

本提案手法の精度を数値シミュレーションにより確認する．初めに，周波数領域で加速度応答を求める．次に，この加速度応答を用いて本提案手法によりパラメータ同定を行う．付加構造物がないモデルにおいて，周波数領域で求めた加速度応答を用いる場合，全周波数に対応する方程式を用いても完全に真値と一致する [2]．

表―2 に，式(5)において全周波数に対応する方程式を用いたパラメータ同定結果を示す．全てのパラメータが完全には真値と一致していないことが分かる．この原因は，求めるパラメータの数が 9 個であり，多いためだと考えられる．質量については“付加質量”が“質量”の 100[%]，および 50[%]のとき，完全に真値と一致している．しかし，“付加質量”が小さくなるに従い，真値との差異が増加していくことが分かる．剛性についても，ほぼ同様の傾向が見られる．減衰係数については，“付加質量”の値によらずほぼゼロとなっている．これは，本数値シミュレーションで用いた減衰係数の値が非常に小さいためだと考えられる．

実務に本提案手法を適用しようとする場合，付加質量が小さい程経済的となる．求めるパラメータや，構造物の重要度によっても異なるが，本モデルにおいて“質量”を求めることに限定すれば，最低でも“付加質量”は“質量”の 5[%]以上とする必要がある．

表―2　数値シミュレーションによる構造パラメータ同定結果

付加質量 [%]	m_1 [kg]	m_2 [kg]	m_3 [kg]	c_1 [N-s/m]	c_2 [N-s/m]	c_3 [N-s/m]	k_1 [N/m]	k_2 [N/m]	k_3 [N/m]
100	3.0	3.0	3.0	0.0	0.2	0.1	11967	11964	11971
50	3.0	3.0	3.0	0.0	0.0	0.0	11899	11897	11904
10	2.9	2.9	2.9	0.0	0.0	0.0	11725	11720	11710
5	2.8	2.9	2.9	0.0	0.0	0.0	11410	11416	11422
1	2.4	2.4	2.4	0.0	0.0	0.0	9745	9747	9753
0.5	2.1	2.1	2.1	0.0	0.0	0.0	8261	8260	8261
0.1	0.9	0.9	0.9	0.0	0.0	0.0	3755	3751	3744
真値	3.0	3.0	3.0	5.0	5.0	5.0	12000	12000	12000

5. おわりに

本検討は数値シミュレーションによるものである．したがって，今後実験を行い，実測データを用いて結果の妥当性を検討することが望ましい．またここでは，式(4)において全周波数に対応する方程式を用いた場合についてのみ検討を行ったが，付加構造物がないモデルにおいて時刻歴データを用いてパラメータ同定を行う場合，固有振動数近傍に対応する方程式のみを用いると，安定して解を得ることができることが明らかになっている [2]．したがって，本提案手法についても，今後このような検討を行うことが望ましい．

【参考文献】

1) 栗田哲史,松井邦人,新延泰生:模型振動実験データを用いたせん断多層モデルの構造パラメータ同定,応用力学論文集,Vol.1,pp.75-82,1998 年 8 月.

2) 松井邦人,栗田哲史,新延泰生,山本和也:非繰返し型同定手法の適用性に関する検討,応用力学論文集,Vol.2,pp.45-53,1999 年 8 月.