

京都大学防災研究所 正員 佐藤 忠信
 京都大学工学部 学生員 ○梶 啓介

1. 概説

構造物の耐震性能や震動制御について議論するとき、構造物の非線形動特性を把握することが重要な課題となる。しかし、非線形構造システムの同定の分野では、非線形復元力モデルを既知とした研究が数多く見られる。そこで本研究では、復元力モデルの情報が未知である構造物の非線形応答を、逐次型線形化法の概念を用いて再現する手法を提案する。さらに、比較的少数のパラメーターで多様な履歴形状を表現できる Versatile 型復元力モデルで表現される構造系の観測方程式を線形化することで、これまで困難とされていた累乗のパラメーターを含むすべての形状パラメーターについて同定を行う。

2. 適応型カルマンフィルター

本研究で用いる同定手法である適応型カルマンフィルターについて説明する。

- (1) 初期値を設定する。
- (2) 状態量の事前推定値 $\bar{x}_t$ と事前誤差共分散行列 M_t を求める。

$$\bar{x}_t = \Phi_{t-1} \hat{x}_{t-1}$$

$$M_t = \Phi_{t-1} P_{t-1} \Phi_{t-1}^T$$

- (3) 観測後の誤差共分散行列 P_t を求める。

$$P_t = (\lambda_t M_t^{-1} + H_t^T R_t^{-1} H_t)^{-1}$$

- (4) カルマンゲイン K_t を計算する。

$$K_t = P_t H_t^T R_t^{-1}$$

- (5) 状態量の最尤推定値 $\hat{x}_t$ を求める。

$$\hat{x}_t = \bar{x}_t + K_t (y_t - H_t \bar{x}_t)$$

- (6) 時刻を更新して(2)へ戻る。

ここで、 Φ_{t-1} は状態移行行列、 H_t は観測行列、 R_t は観測誤差共分散行列である。 λ_t は忘却係数と呼ばれ、値が小さいほど新しい観測値に依存した同定を行うことができる。また、 $\lambda=1.0$ とすると、通常のカルマンフィルターとなる。

3. 逐次型線形化法を用いた非線形構造システムの同定

本研究では非線形構造システムの応答を、時々刻々と粘性減衰定数と剛性が変化する線形構造システムの応答と考え、適応型カルマンフィルターを用いて応答の再現を行う。図1に示すように観測値を増分形で与えることで、復元力と変位(あるいは速度)の関係を示す履歴曲線における時刻 $t-1$ と時刻 t の点を結ぶ割線の傾きとして、剛性(あるいは粘性減衰定数)を同定する。この手法(逐次型線形化法)を用いることで非線形性の強い構造システムの応答も再現することができる。解析モデルとしては図2に示される非線形 2 自由度モデルを用いる。モデルの非線形復元力としては次式で示される Versatile 型復元力を用いる。

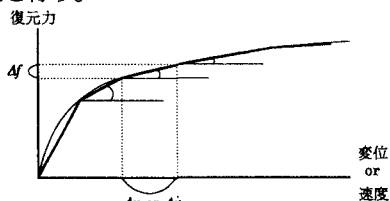


図1 逐次型線形化法の概念図

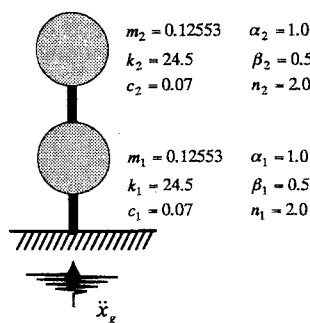


図2 解析モデル

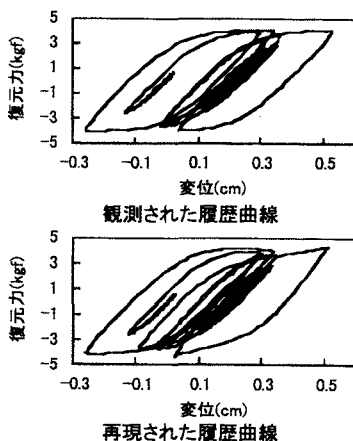


図3 履歴曲線の比較(質点1)

$$\dot{z}_i = k_i \dot{u}_i - \alpha_i |\dot{u}_i| |z_i|^{n_i-1} z_i - \beta_i \dot{u}_i |z_i|^{n_i}$$

ここで、 z_i は復元力、 k_i は初期剛性、 u_i は層間変位、 α_i 、 β_i 、 n_i は形状パラメータを示す。入力地震動としては El Centro 地震記録の最大値を 25gal に調整したものをを用いる。得られた応答値には、応答値の標準偏差の1%の標準偏差をもつホワイトノイズを付加し、それを観測値とする。増分形の加速度、速度、変位を観測値として与え、剛性マトリクス、粘性マトリクスの各要素を状態量として、適応型カルマンフィルターで同定する。忘却係数は $\lambda_i = 0.825$ とする。この同定された剛性マトリクスと粘性マトリクスを用いて再現した履歴曲線と観測された履歴曲線を比較したのが図3である。この図より、精度のよい再現が行われたことがわかる。

4. Versatile 型復元力モデルの同定

本研究では果乗のパラメータ n_i を含むすべての形状パラメータを同定するために、次式で表される多次元 Versatile 型復元力モデルを提案する。

$$\dot{z}_i = k_i \dot{u}_i - \sum_{j=1}^m \left(\alpha_{ij} |\dot{u}_i| |z_i|^{j-1} z_i + \beta_{ij} \dot{u}_i |z_i|^j \right)$$

ここで、 α_{ij} 、 β_{ij} は $n = j$ に対応する形状パラメータを示す。したがって、多次元 Versatile 型復元力モデルには $n=1 \sim m$ に対応した m 個の α_i 、 β_i が存在する。カルマンフィルターを用いて同定すると、真値の n_i に対応する α_{ij} 、 β_{ij} のみ値を持ち、それ以外の n_i に対応する α_{ij} 、 β_{ij} がほぼ 0.0 に収束することで、形状パラメータ n_i を同定することができる。解析モデルとしては図2と同様なモデルを用い、入力地震動、ノイズに関しても先ほどと同じとする。多次元 Versatile 型復元力モデルにおいて $m=5$ とし、 k_i 、 α_{ij} 、 β_{ij} を状態量としてカルマンフィルターで同定する。図4に地盤と質点1間のパラメータ α_{2j} の同定時刻歴を示す。図4から解るように1回の同定では複数の α_{ij} 、 β_{ij} が値を持ち、 n_i を同定することができない。そこで、同定された $|\alpha_{ij}|$ 、 $|\beta_{ij}|$ の最大値の30%以下である項を削除した多次元 Versatile 型復元力モデルを用いて同定を繰り返すことにする。表1に同定されたパラメータの値を示す。この表より、4回同定を繰り返すことで真値である $n_i = 2.0$ に対応した項だけが残る、 k_i 、 α_i 、 β_i も真値に収束しており、すべての形状パラメータが同定されていることがわかる。

5. 結論

復元力モデルに関する情報が未知である場合でも、逐次型線形化法を用いることで、非線形構造システムの応答を線形構造システムで再現することができた。また、多次元 Versatile 型復元力モデルを用いて繰り返し同定することにより、Versatile 型復元力モデルの果乗パラメータを含めたすべての形状パラメータを同定することができた。

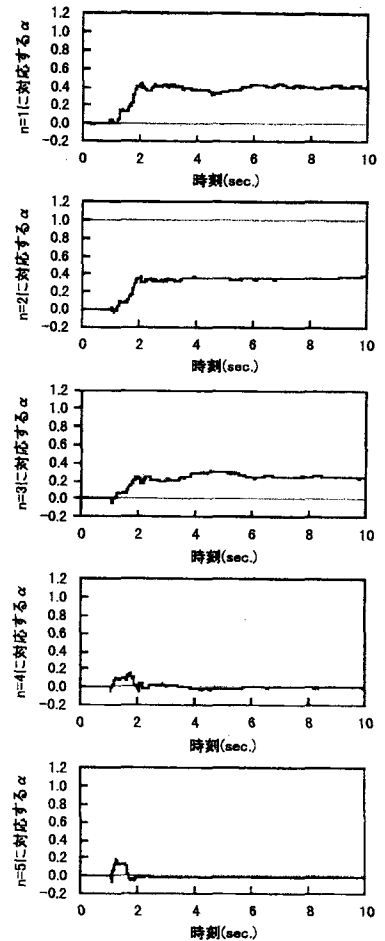


図4 パラメータ α の同定時刻歴 (地盤と質点1間)

表1 同定されたパラメータの値

パラメータ	同定回数	1	2	3	4	真値
α_1	1	0.4145	-0.0926			
	2	0.3636	1.1083	1.0044	1.0055	1.0000
	3	0.2465	-0.0206			
	4	0.0011				
	5	-0.0004				
	削除基準値	0.1243	0.3325			
α_2	1	0.3318	0.1802			
	2	0.4982	0.9280	1.0201	1.0200	1.0000
	3	0.3445	0.0038			
	4	-0.1057				
	5	0.0114				
	削除基準値	0.1489	0.2778			
β_1	1	0.1350	0.2271	0.0033		
	2	0.2296	0.2273	0.4784	0.5048	0.5000
	3	0.2306	0.0862	0.0068		
	4	-0.0951	-0.0063			
	5	0.0141				
	削除基準値	0.0891	0.0882	0.1435		
β_2	1	0.1418	0.1518	-0.0498		
	2	0.1872	0.2806	0.4785	0.4620	0.5000
	3	0.1132	0.0087			
	4	-0.0023				
	5	-0.0028				
	削除基準値	0.0581	0.0782	0.1430		
k_1		24.5472	24.5871	24.5398	24.5638	24.5000
k_2		24.4046	24.4342	24.3995	24.4221	24.5000

は削除された項を示す