

可搬型非線形構造同定システムの開発 —5層モデルの振動台テストデータを用いた検証—

佐藤忠信¹・荻山和樹²

¹工博 京都大学 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²学生 京都大学大学院 工学研究科 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

The purpose of this paper is to develop a portable application system which can evaluate a structural system from its responses in site. To show applicability of the application, we analyze the data obtained by a shaking table experiment of a 5-story building model. Four Lead Rubber Bearings (LRB) are placed at the four corner of each story of the model building instead of columns to set a clear nonlinear behavior of the structure. Using the test data and the developed application, we identify the dynamic characteristics of 5-story building model.

Key Words : system identification, filtering, portable application, shaking table experiments, LRB

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では多くの構造物に被害がでた。これら構造物の多くは高度経済成長期の建設ラッシュで急増したビルや、交通網の拡大に伴って建設された高速道路や新幹線の高架橋、さらには一般橋梁などであった。こうした被害を未然に防ぐためには既存構造物の動特性や耐震性能ならびに経年劣化特性を事前に把握して、必要とされる耐震性能を確保しておくことが肝要である。

構造物の健全度を調査するための技術は構造ヘルスマモニタリングと呼ばれるが、これらには、部材の健全度を評価するためのミクロ的な手法としての超音波法、電磁波法、AE法などの非破壊検査が、またマクロ的な方法としての振動計測法がある。後者は構造系全体としての健全度を評価するための手法の一であり、構造物の振動計測結果を用いて構造物の動特性を同定し、建設直後の健全な状態での構造動特性との比較に基づいて、構造物の劣化状態や損傷状態を推定するものである。

平常時の構造物の維持管理では、構造物の劣化状態を評価したうえで、必要とされる処置を実施してきた例は数多くあるが、構造物の劣化状態に基づいてその耐震性能を評価し、耐震補強対策に活用してきた例はあまりない。

本研究では既存構造物の劣化状態を簡便に把握する目的で、常時微動計測や利用した簡便な構造同定システムを開発する。これまでに構造物の動的パラメタを推定する手法として様々なフィルタリング法¹⁾が開発されかつ適用されてきた。

そこで、本研究ではフィルタリング法を取りまとめ構造物の応答である観測値から構造システムの動

特性を評価するためのアプリケーションを作成する。そのアプリケーションを用いることで構造物の非線形特性や損傷の検出が可能であり、またノートパソコンにそのアプリケーションを入れ、簡単に場所を選ばず構造物の評価が可能なシステムを構築する。まず、アプリケーションで用いるフィルタリング理論を紹介し、構造物の動特性の同定法を説明する。次にアプリケーションについて簡単な数値解析を用いて説明した後、模型構造物の振動台実験の概要を説明し、実験結果を用いて開発したアプリケーションの有用性を検討する。

2. フィルタリング理論

システム自体に不確定性を有する構造システムでは、システムを構成するパラメタを確率変数として取り扱のが一般的である。この場合、構造システムの支配方程式は確率システム方程式となる。同定の対象となるのはシステムを構成するパラメタであるが、システムの状態量の中にシステムパラメタも含めると、状態量の時間的な遷移及び状態量と観測量の関係は、次式に示すような状態空間モデルで表現できる。

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{w}_{k-1}) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k, \mathbf{v}_k) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k$ はそれぞれ状態量、観測量であり、 $\mathbf{w}_k, \mathbf{v}_k$ はそれぞれシステムノイズ、観測ノイズであり、平均値0、共分散行列 $\mathbf{Q}_{k-1}, \mathbf{R}_k$ をもつホワイトノイズである。また、 $\mathbf{f}, \mathbf{h}$ は任意の関数である。

一般に式(1)は状態方程式，式(2)は観測方程式と呼ばれる。

フィルタリングは大きく分けて2つのステップ，推定ステップ及び修正ステップに分けられる。それぞれのステップにおいて状態量の平均値及びその共分散を更新する。推定ステップでは状態方程式を用いて，修正ステップでは観測方程式を用いて更新を行う。この2つのステップをシステムへの入出力情報を用いて時間とともに逐次的に処理していくことでフィルタリングが構成される。図-1に時刻 $k-1$ から k への平均値及び共分散行列の遷移の模式図を示す。

システム同定を行う際，必要となるものはそのシステムの入出力情報とシステムに関する事前情報である。具体的には状態方程式及び観測方程式，システムノイズ及び観測ノイズの共分散行列，初期状態量，初期推定誤差共分散行列，観測値が必要となる。

3. 構造同定手法

例として対象とする構造モデルを1自由度線形構造系について構造同定手法を展開する。一般に運動方程式は次式のように表わされる。

$$\ddot{y} + 2h\omega\dot{y} + \omega^2 y = -\ddot{X}_g \quad (3)$$

ここで， h, ω はそれぞれ減衰常数，固有円振動数であり， y は構造システムの地盤に対する相対変位であり， $\ddot{X}_g$ は地震による地盤加速度を表わす。状態量を

$$\mathbf{x} = [y \quad \dot{y} \quad h \quad \omega]^T \quad (4)$$

とすることで状態方程式及び観測方程式は次式のように表わされる。

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} + \int_{k-1}^k \mathbf{g}(\mathbf{x}_{k-1}) dt + \mathbf{w}_{k-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (6)$$

ここで，関数 $\mathbf{g}$ の要素は

$$\mathbf{g} = \begin{Bmatrix} \dot{y} \\ -2h\omega\dot{y} - \omega^2 y - \ddot{X}_g \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

とし， $\mathbf{H}_k$ は観測行列である。このように状態遷移方程式及び観測方程式をおくことで構造物の動的パラメタの同定が可能となる。また，非線形構造の場合も同様で，状態量を非線形を構成するパラメタで構成すれば良い。

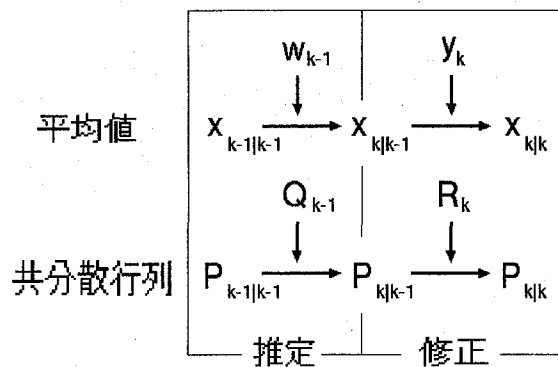


図-1 フィルタ

4. アプリケーション

2. で展開したフィルタリング理論を用いた構造同定手法を取りまとめてMATLABを用いてアプリケーションとする。また，構造同定手法はFortranでプログラムを組み，それをアプリケーションに組み込んでいる。構造系のシステムによるが，アプリケーションで利用可能な構造同定手法はカルマンフィルタ^{2),3)}， H_∞ フィルタ⁴⁾，ガウス・エルミートフィルタ⁵⁾，中央差分フィルタ⁵⁾である。

また，構造システムとしてはせん断質点系とし，線形モデル及び非線形モデルが適用可能である。非線形モデルにおける復元力特性として BoucとWenらが提唱したVersatile型⁶⁾とバイリニアモデルが選択できる。

構造システムが以上の非線形復元力に当てはまらない場合にはその時刻ごとに適切なパラメタを求めることが出来るように忘却係数¹⁾を設定することが可能である。

以下，簡単な数値解析を行い，アプリケーションについて説明する。対象とする構造系は1自由度線形系とする。観測値は絶対加速度とし，数値シミュレーションにより得たものとする。

(1) モデルの設定

アプリケーションを立ち上げると，図-2に示すように表示される。左列には設定項目が並べられており，クリックすることでその項目に関するものが表示される。ここでは，構造同定手法，構造系のシステム，自由度，各層の質量，観測値のタイムステップ及び得られる観測値を設定する。質量は「reference」のボタンをクリックしてファイルを選ぶことで読み込まれる。図-2に示すように設定を行い，左列にある「initial」をクリックすることで次の初期値の設定へ進む。

(2) 初期値の設定

図-3に示すように表示される。ここでは，観測誤差共分散，初期推定誤差共分散，初期状態量及び忘却係数を設定する。忘却係数とは観測値の重みを決

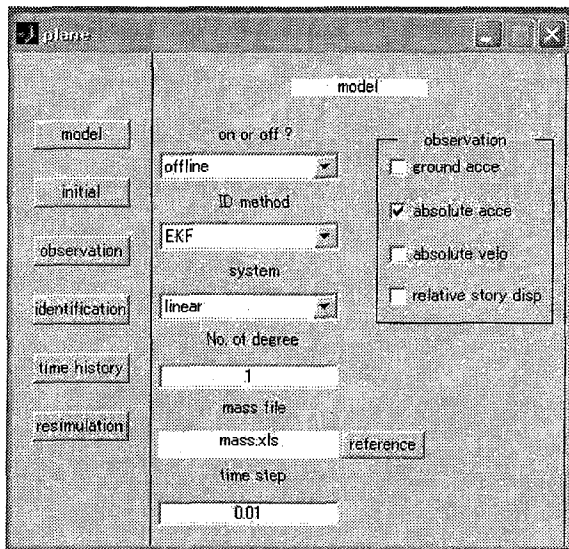


図-2 モデルの設定

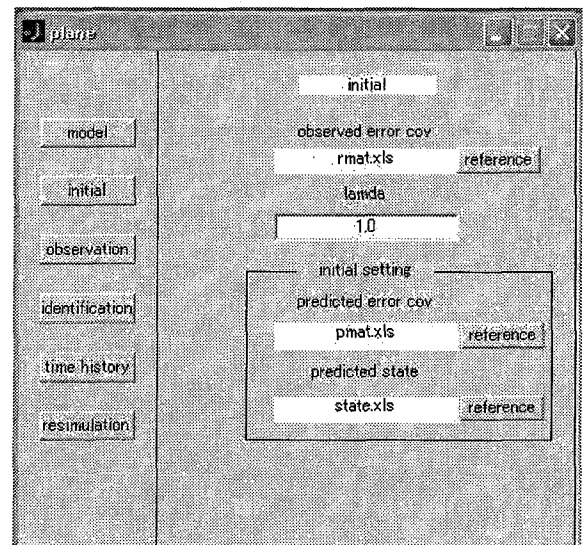


図-3 初期値の設定

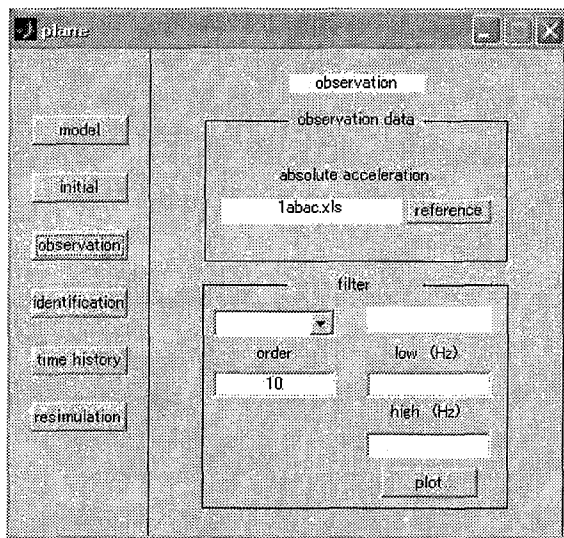


図-4 観測値の読み込み

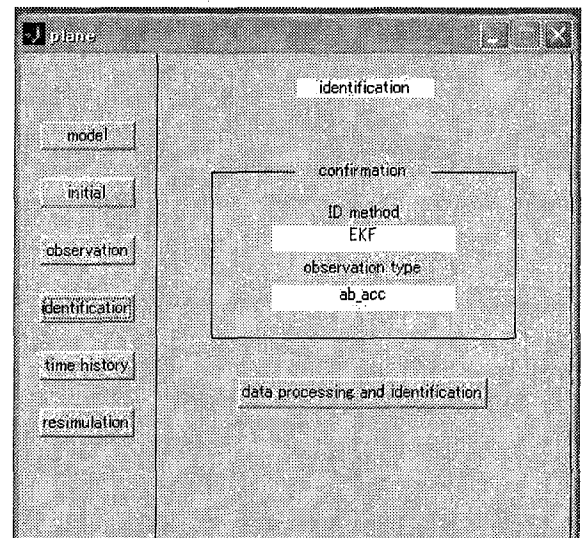


図-5 構造同定

めるもので、構造系のパラメタが時変の場合、過去のデータの重みを小さくする係数である。(1)の質量と同様にファイルから読み込むことで図-3に示すように設定する。「observation」をクリックすることで次の観測値の読み込みへ進む。

(3) 観測値の読み込み

図-4に示すように表示される。先程と同様にファイルを指定し観測データを読み込む。一般に観測データにはノイズが含まれる。ノイズを含んだまま観測データを微積分すると良いデータが得られない。そこで、本アプリケーションではローパス、バンドパス、ハイパスフィルタが適用可能で、デジタルフィルタの種類はButterworth, Chebyshev型フィルタが選択できる。フィルタは観測値及びそれを処理して得られたもの全てにかけられる。

本アプリケーションでは、観測データを微積分して構造同定手法に用いる相対速度と相対変位を求める。以下に観測データ毎にアプリケーションで行われるデータ処理を説明する。

- ・ 絶対加速度：Newmarkの β 法を用いて相対変位、と相対速度を得る。
- ・ 絶対速度：3次スプライン補間を用いて微積分を行い地盤加速度と相対変位を得る。
- ・ 層間変位：3次スプライン補間を用いて1次微分を求め相対速度とする。この場合は地盤加速度が別に必要となる。

図-4に示すようにファイルを指定して観測値を読み込み、左列の「identification」をクリックし次に進む。

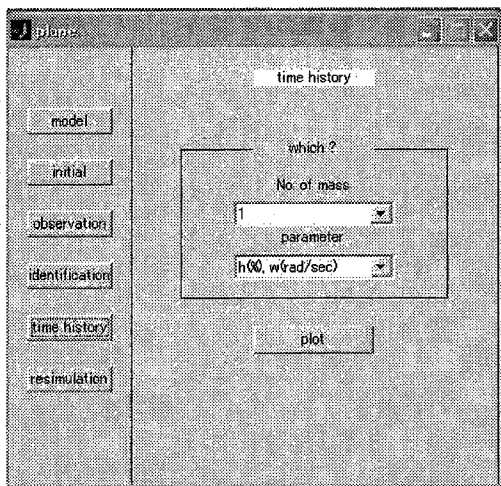


図-6 同定結果

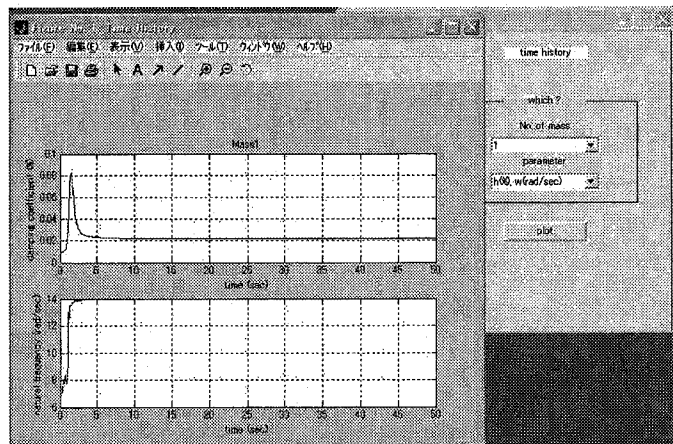


図-7 同定時刻暦表示

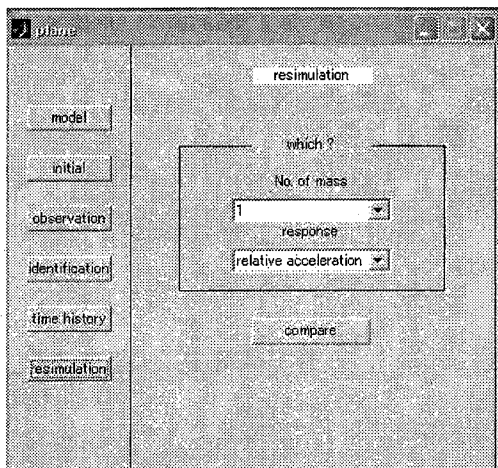


図-8 再現

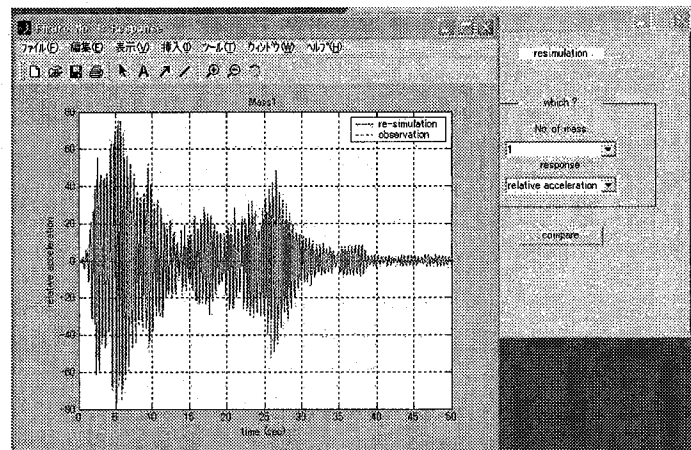


図-9 再現のグラフ化

(4) 構造同定

図-5に示すように表示される。構造同定手法及び観測値のタイプが表記されているので、確認をし変更する必要がなければ「data processing and identification」のボタンをクリックすると観測データの処理及び同定が開始される。同定が終了すると次の「time history」に進む。

(5) 同定結果のグラフ化

左列の「time history」をクリックすると図-6に示すように表記される。同定時刻暦を見たい質点及びそのパラメタを設定し、「plot」をクリックすると図-7に示すように同定時刻暦がグラフ化される。

(6) 再現の実行とグラフ化

左列の「re-simulation」をクリックすることで図-8に示すように表示される。先程と同様に再現を見たい質点及びその応答を設定し、「compare」をクリックすると図-9に示すように観測値と再現の比

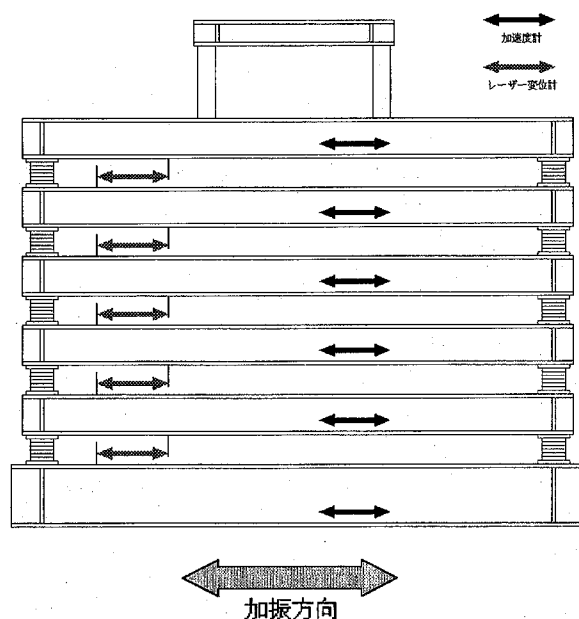


図-10 5層フレーム

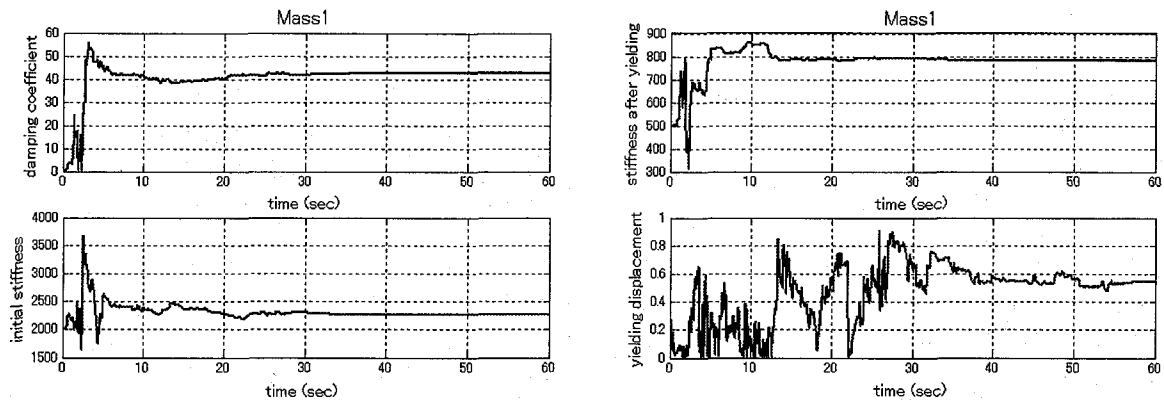


図-11 質点1の同定時刻暦（左：粘性減衰係数，初期剛性，右：降伏後剛性，降伏変位）

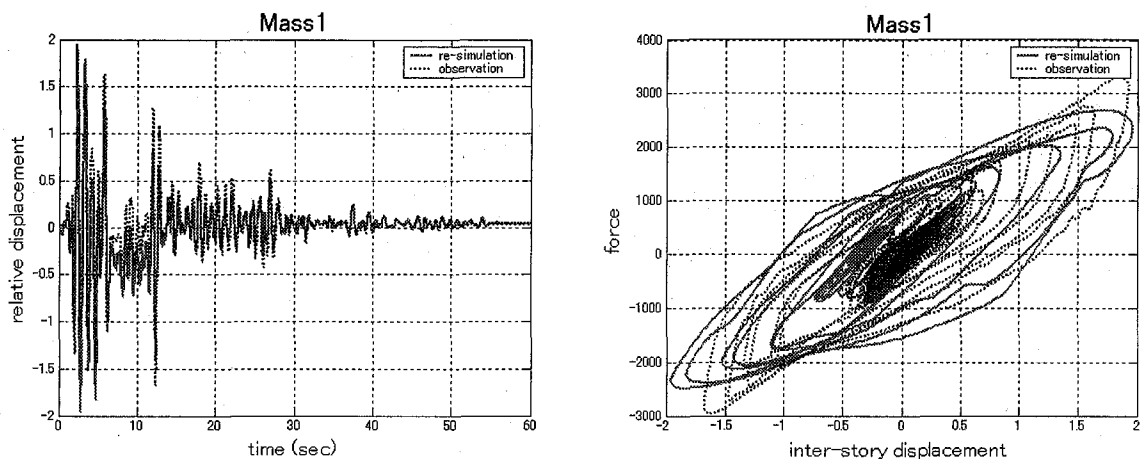


図-12 質点1の観測値の再現（左：相対変位，右：履歴曲線）

較がグラフ化される。また，再現に用いられる構造系の動的パラメタは同定時刻暦の最終値としている。

このように同定結果から構造系の動的パラメタを設定し，再現を観測値と比較することで同定値の検証を行う。

5. 振動台試験結果に基づく構造同定

(1) 実験概要

図-10に示す5層フレーム構造を用いて振動台試験を行った。構造物の動特性として非線形性を持たせるために各層の柱の代わりに鉛入り積層ゴムを設置した。また，図-1に示すようにモデルの表と裏に点対称に加速度計及びレーザ変位計を各層に設置し，500Hzでデータを取得した。

振動台への入力加速度はEl Centro地震観測記録NS成分を最大加速度350galに調整したものを用いた。

(2) 試験結果のデータ処理

得られた層間変位から基盤に対する相対変位を求め，3次スプライン補間を用いて相対速度を求めた。入力として，基盤の絶対加速度を用いる。また，得られた観測データに30Hzのローパスフィルタをかける。

従って構造同定を行う際に用いたのは構造物の相対変位及び相対速度応答と基盤の入力加速度である。

(3) 構造同定

鉛入り積層ゴムの非線形復元力特性をバイリニアモデルと仮定して5層フレーム構造の動特性の同定を試みた。従って，状態量は次式で表わせる。

$$\mathbf{x} = [\dots y_i \dot{y}_i c_i k_i^{(1)} k_i^{(2)} \delta_i \dots]^T \quad (8)$$

ここで， $c_i, k_i^{(1)}, k_i^{(2)}, \delta_i$ はそれぞれ粘性減衰係数，初期剛性，降伏後剛性，降伏変位である。また，添え字の i は質点を表わす。アプリケーションを用いて5層フレームの動特性の同定を行った。同定手法としては中央差分フィルタを用いた。図-11に質点1における動的パラメタの同定時刻暦を示す。左側に

は、上図に粘性減衰係数、下図に初期剛性を示す。右側には、上図に降伏後剛性、下図に降伏変位を示す。

同定結果の検証を行うために、同定結果から動的パラメタを設定し同じ入力をもちいて観測値である相対変位及び履歴曲線の再現を行った。動的パラメタは同定時刻歴の最終値とした。履歴曲線は構造システムをせん断系と仮定し、観測値である各質点の絶対加速度、層間変位及び5層フレームの各質点の質量を用いて求めた。図-12にその比較を示す。左側に相対変位の、右側に履歴曲線の比較を示す。実線は再現を、点線は観測値から求めたものを示す。相対変位はある程度一致している。また、履歴曲線については構造物の非線形性のある程度検出できた。

6. おわりに

本研究では、構造同定を行えるアプリケーションを作成した。そのアプリケーションを用いて、非線形動特性をもつ5層フレームの同定を行った。アプリケーションでは、非線形動特性をバイリニアモデルと仮定し、中央差分フィルタを用いて構造同定を行った。その同定結果より構造物の動的パラメタを設定し、観測値の再現を行った結果、相対変位に関

してはある程度の一致を得た。しかし、履歴曲線については非線形性を検出できる程度であった。

謝辞：振動台試験を手伝って頂いた慶応大学の三田研究室の皆さん、京都工芸繊維大学の防振研の皆さん、技官の市川さん、また同じ研究室の田中さん、鄭さんに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) L.Ljung: *System Identification Theory for the Users*, 2nd ed., PRT Prentice Hall, 1987.
- 2) 片山徹：応用カルマンフィルタ，朝倉書店，2000.
- 3) 加藤寛一郎：最適制御入門，東京大学出版会，1987.
- 4) Sato, T., Qi, K.: Adaptive H^∞ Filter: Its Application to Structural Identification, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.124, pp. 1233-1240, 1998.
- 5) Ito, K., Xiong, K.: Gaussian Filters for Nonlinear Filtering Problems, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol.45, pp. 910-927, 2000.
- 6) Y. -K, Wen: Method for random vibration of hysteretic systems, *J. Engrg. Mech, ASCE*, Vol.102, pp. 249-263, 1976.