実地震観測記録を用いた2棟の免震建物動特性の同定 SYSTEM IDENTIFICATION OF TWO BASE ISOLATED BUILDINGS USING SEISMIC RECORDS

古川 忠稔*, 伊藤 雅史**, 小野 聡子***, 橘 英三郎****

*Tadatoshi FURUKAWA, Masashi ITO, Satoko ONO
and Eizaburo TACHIBANA*

In this paper, the procedure of system identification by prediction error method, using nonlinear restoring force model, is presented, and several system identifications of two base-isolated structures using two-directional recorded seismic response are carried out. In the system identifications, the restoring force of the base isolation system is assumed to consist of several piecewise restoring force models, including multiple shear spring model. As results of using trilinear multiple shear spring models, both the estimated hysteresis shapes and the time histories show good agreement with those obtained directly from the observed data.

Keywords: Base Isolation, Seismic Record, System Identification, Nonlinear Dynamic Systems, Multiple Shear Spring Model, Hysteresis Models,
免震、地震記録、システム同定、非線形動的システム、MSS モデル、履歴モデル

1. はじめに

免震建物の地震時応答において支配的なのは、通常免震部材の復元力特性である。そこで、免震部材に用いられる積層ゴムアイソレータやダンパーを対象として、静的加力実験だけでなく、動的アクチュエータを用いた加振実験や振動台実験がこれまでも数多く実施され、地震波等の非定常波入力時の復元力特性についても様々な知見が得られている。さらに、これらの結果から各種のモデルも多く提案されている^{1)~10)}。しかし、動的アクチュエータによる加力実験では、軸力導入下での水平2方向同時入力が技術的にやや難しいことや、振動台実験では装置規模から縮小モデルを用いた実験となる等の制約が考えられる。

免震構造物の地震応答観測や振動実験記録を用いた研究成果も数多くあるが^{11)~14)}、設計クライテリアに近い領域での強震動時応答観測記録が数少ないことや、観測データのチャンネル数の制限などに起因する同定計算の難しさなどにより、応答観測記録から個々の免震部材や免震層全体の非線形復元力特性を推定する試みはこれまでそれほど多くない^{15)~18)}。すなわち、実際に建設された免震建物が、特に強震時に予想通りの挙動を示しているかについては、いまだ検証すべき余地が十分に残されていると考えられる。

本論文では免震建物の強震時応答観測記録を用い、免震層全体の

非線形復元力を具体的なパラメトリックモデルと仮定してシステム同定を行う。パラメトリックモデルとしては通常免震部材のモデル化に多く適用される区間線形モデルを用いることで、このモデルの適用性に関する検証を行う。観測記録としては兵庫県南部地震本震時に2棟の免震建物で得られた基礎上および建物応答記録を用いる。またシステム同定手法としては、非線形系同定のため著者らによって拡張された、状態空間モデルによる予測誤差法 (Prediction Error Method with State-Space model: 以下PEM-SSと略記) を用いる。あわせて、本研究では地震時には免震層が水平面内を複雑に振動していることに注目し、免震部材の非線形復元力特性と水平2方向移動の相互影響効果の両者に着目して同定計算を実施し、この影響を考察する。

2. 同定対象構造物

本論で扱う同定対象構造物は、いずれも兵庫県南部地震の震央から約30km北東の神戸市北区に位置する松村組技術研究所免震棟(以後、松村組免震建物と記す)と郵政省WESTビルの2棟である¹⁹⁾。同建物を写真1, 2に示す。また、観測記録の積分から得られた免震層の変形軌跡を図1に示す。図1より、両者とも概ねEW方向を主軸として振動したことがわかる。以下各建物の紹介を行う。

* 大阪大学大学院地球総合工学専攻 学内講師・工博

** 三菱重工(株) 工修

*** 有明工業高等専門学校建築学科 講師・工修

**** 大阪大学大学院建築工学専攻 教授・工博

Assistant Prof., Dept. of Global Architecture, Graduate School of Eng., Osaka Univ., Dr. Eng.

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., M. Eng.

Lecturer, Dept. of Architecture, Ariake National College of Technology, M. Eng.

Prof., Dept. of Architectural Eng., Graduate School of Eng., Osaka Univ., Dr. Eng.

写真1 松村組免震建物

写真2 郵政省WESTビル

(a) 松村組免震建物

(b) 郵政省WESTビル

図1 免震層の変形軌跡

2. 1 松村組免震建物

本構造物はRC造3建てで、免震部材として高減衰積層ゴムを8基備えており、上部構造は長辺方向(以後EW方向と呼ぶ)が壁構造、短辺方向(以後NS方向と呼ぶ)は純ラーメン構造となっている。地震計は基礎部でNS,EW,UD各方向1chの計3ch、1階床上とR階に各々7ch、建物合計で18ch設置されており、比較的高密度の地震観測がなされている。兵庫県南部地震本震時には、基礎部で最大水平加速度272[gal]の実測データが得られており、本観測データの解析から、兵庫県南部地震の建物応答では、上部構造のロッキング応答やねじれ応答は極めて小さかったことが伊澤ら²⁰⁾により報告されている。

2. 2 郵政省WESTビル²¹⁾

本構造物は、SRC造6階建て、建築面積8,563m²、延べ床面積46,823m²の比較的大きな免震建物である。免震部材には鉛プラグ入り積層ゴムを54基、天然ゴム系積層ゴムを66基、ループ状鋼棒ダンパーを44基備えている。地震計は基礎部、1階床上および6階床上にNS,EW,UD各方向1chづつ、合計9chが設置されており、兵庫県南部地震時は、基礎での最大水平加速度300[gal]の実測データが得られている。

3. 同定手法

3. 1 PEM-SSの概要

著者らは、線形多自由度モデルを表現するのに適した状態空間モデルを用いた予測誤差法を拡張し、非線形復元力を有する多入力多出力系の同定手法を提案している²²⁾。以下本手法の概略を示す。

(1)式の運動方程式で系が表されると仮定する。

$$M\ddot{x} + R(\theta, t) = F(t) \quad (1)$$

ここに、 M 、 $\ddot{x}$ 、 $R(\theta, t)$ 、と $F(t)$ はそれぞれ質量マトリクス、加速度、復元力、および入力である。復元力モデルは非線形であり、パラメータベクトル θ により規定されるものとする。この復元力が変位 x と速度 $\dot{x}$ に比例する二つの復元力成分およびその残余項 R^* に分割可能であると仮定し(2)式を得る。

$$M\ddot{x} + C(\theta, t)\dot{x} + K(\theta, t)x = F(t) - R^*(\theta, t) \quad (2)$$

(2)式はいわば(1)式の非線形系と等価な線形系の運動方程式であるが、減衰項と復元力項が時変形となる。この式は(3)式に示す線形時変状態空間モデルに変換できる。

$$\dot{x} = A_c x + B_c u \quad (3)$$

ここに、

$$x = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}, A_c = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K(\theta, t, \dots) & -M^{-1}C(\theta, t, \dots) \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M^{-1} & -M^{-1} \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} F(t) \\ R^*(\theta, t) \end{bmatrix}$$

たとえば観測方程式が(4)式で表されたとすると

$$y = C_c x \quad (4)$$

(3),(4)式の状態空間モデルについて、データサンプリング周期でモデルを離散化し、あわせて状態ノイズと観測ノイズの両者を考慮することで(5-1),(5-2)式で示す様な”イノベーション型”の離散型状態空間モデル²³⁾を得る。

$$x_{k+1} = A_d(\theta, t)x_k + B_d(\theta, t)u_k + \Gamma v_k \quad (5-1)$$

$$y_k = C_d x_k + v_k \quad (5-2)$$

ここで添え字 k は時刻を示す。(5-1)式と(5-2)式より、(6)式で示される観測量の一段階先予測値が得られる。

$$\hat{y}_{k+1} = C_d [A_d - \Gamma C_d] \hat{x}_k + \Gamma y_k + B_d u_k \quad (6)$$

(6)式を用いて、予測誤差ベクトル ε および予測誤差マトリクス E をそれぞれ(7)式のように定義する。

$$\varepsilon(k, \theta) = y_k - \hat{y}_k, E(\theta) = [\varepsilon(1, \theta), \varepsilon(2, \theta), \dots, \varepsilon(N, \theta)] \quad (7)$$

ここで、 N はデータセット長である。

モデルの復元力を規定するパラメータ θ は、たとえば(8)式で規定される予測誤差最小化規範 J を満足する値として推定される。

$$J(N, \theta) = \det \left[\frac{1}{N} \{E(\theta)^T \times E(\theta)\} \right] \rightarrow \min. \quad (8)$$

以上よりPEM-SSは(8)式で示されるパラメータ最適化問題となる。

本研究では、非線形最小2乗法の1種であるガウスニュートン法²⁴⁾を適用し最適パラメータ推定をおこなう。

3. 2 免震層復元力モデルとしてのMSSモデルの適用

著者らはPEM-SS法を用いて、以前にもWESTビルの動特性同定を行っている²⁵⁾。その際、対象建物を1方向多層せん断型モデルと仮定し、上部構造を線形、免震層のみを区間線形モデルとして同定を実施した。その結果、免震層復元力を区間線形モデルとし、粘性減衰を考慮することで、応答の再現性の良い免震層復元力モデルが得られた。しかし、このモデルで建物水平2方向の復元力を個別に同定すると、同定された各次剛性等の推定パラメータ値が両方向で異なる結果となることがある。この原因として水平2方向移動の相互影響が考えられるため、本研究はこの水平2方向移動の相互影響を考慮できる非線形復元力モデルとしてMultiple Shear Spring(MSS)モデル²⁶⁾⁻²⁷⁾を採用する。MSSモデルは、水平面内に等価なせん断バネを等角度で配置し、その

図1 MSSモデル

合計としての性質が2方向の相互影響を考慮した形になる弾塑性モデルであり、免震部材としてのダンパーのモデル化にも用いられている。

MSSモデル内の各せん断バネ非線形履歴特性は、免震部材全体の骨格曲線と、各バネ負担力の配分および耐力の関係から定まる。たとえば免震部材全体の骨格曲線をトリリニア型と仮定すると、図1に示す一本のせん断バネの各次剛性、限界変位といったパラメータは、全体骨格曲線のパラメータに基づいて(9),(10)式で定まる。

$$k_1' = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \cos^2 \theta_i} k_1, \quad k_2' = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \cos^2 \theta_i} k_2, \quad k_3' = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \cos^2 \theta_i} k_3 \quad (9)$$

$$X_{y1}' = \frac{\sum_{i=1}^N \cos^2 \theta_i}{\sum_{i=1}^N |\cos \theta_i|} X_{y1}, \quad X_{y2}' = \frac{\sum_{i=1}^N \cos^2 \theta_i}{\sum_{i=1}^N |\cos \theta_i|} X_{y2} \quad (10)$$

$$\theta_i = \frac{\pi}{N}(i-1) \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (11)$$

ここで、 k_1' , k_2' , k_3' は一本バネの一次剛性、二次剛性、三次剛性であり、 X_{y1}' , X_{y2}' は一本バネの一次折れ点変位、二次折れ点変位である。同様に、 k_1 , k_2 , k_3 はそれぞれ全体骨格曲線の一次～三次剛性、 X_{y1} , X_{y2} は一次および二次折れ点変位、また(11)式の θ_i は図1に示した*i*番目のせん断バネとEW方向とのなす角である。

MSSモデルでは、ある時刻*t*におけるEW, NS方向の変位の増分がそれぞれ Δx_{ew} , Δx_{ns} となった場合、EW, NS方向の復元力増分は(11)式の θ_i を用いて、(12)式で求められる。

$$\begin{bmatrix} \Delta R_{ew} \\ \Delta R_{ns} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^N k(t) \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_i & \cos \theta_i \sin \theta_i \\ \cos \theta_i \sin \theta_i & \sin^2 \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{ew} \\ \Delta x_{ns} \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここに、 $k(t)(i=1,2,\dots,N)$ は*i*番目のバネの時刻*t*における剛性である。 k は骨格曲線からMasing則に基づいて求め、時刻*t*までの各バネ方向の変位及び速度履歴に依存して変化する。

図2 MSSトリリニアモデル骨格曲線

表1 同定モデル		
	1本バネ復元力： バイリニア	1本バネ復元力： トリリニア型
水平2軸 個別	バイリニア個別	—
水平2軸 独立	バイリニア独立	トリリニア独立
MSS モデル	バイリニアMSS	トリリニアMSS

本研究では、同定用MSSモデルとして等価せん断バネが4本のモデルを用いる。このMSSモデルに対し、あるせん断バネ方向に変位を与えると、各せん断バネが順に剛性低下を起こすため、実際の骨格曲線は折れ点が多数現れ図2のようになる。

4. 同定手法および結果

4.1 同定手法および同定モデル

前述したように松村組免震建物はねじれ応答がほとんど生じておらず、WESTビルについては観測チャンネル数の制限によりねじれ応答が分離できない。そこで本検討では個々のアイソレーターやダンパーの復元力を推定するのではなく、免震層全体の復元力を1つの復元力モデルとして取り扱うこととし、松村組免震建物、WESTビルとも表1に示す計5つのモデルを用いてPEM-SSによるシステム同定を行う。なお表中個別モデルとはEW, NSの両方向の復元力パラメータをそれぞれ個別に同定するモデルである。いずれの場合も、上部構造はほぼ剛体的に挙動すると仮定し、パラメータ推定に用いる入力量には基礎絶対加速度記録を、観測量には絶対加速度応答記録を積分して求めた1階と基礎との相対速度応答記録および相対変位応答記録を用いる。またデータ長は5000個、サンプリング間隔は0.01secとする。なお、減衰はすべて免震層の履歴減衰のみと仮定し粘性減衰は無視している。

4.2 松村組免震建物の同定

(1) 水平2軸個別モデルによるパラメータ推定結果

パラメータの初期値と推定結果を表2に、パラメータ推定値から得られた骨格曲線を図3に示す。パラメータ推定値はEW, NS方向で

表2 パラメータ初期値および推定値(水平2軸個別モデル)

	初期剛性 [kN/cm]	2次剛性 [kN/cm]	折れ点変位 [cm]
初期値	686.0	343.0	1.0000
推定値	(EW-方向) 705.0 (NS-方向) 694.3	126.6 87.7	0.5632 0.8970

図3 推定骨格曲線(水平2軸個別モデル)

図4 履歴曲線推定結果(水平2軸個別モデル)

図5 相対変位応答時刻歴波形(水平2軸個別モデル)

異なるが、特に二次剛性、折れ点変位の違いにより図3の骨格曲線形状もかなり異なっている。次にパラメータ推定値を用いた応答計算より得られた復元力履歴曲線を図4に、応答計算結果の時刻歴と観測値積分から直接的に求めた相対変位応答時刻歴との比較を図5に示す。推定された履歴曲線も骨格曲線と同様、EW、NS方向でかなり異なる形状に推定された。時刻歴波形ではEW方向NS方向ともに6secあたりまでは振幅、位相ともに観測波形と一致しているが、水平二方向相互影響が強いと考えられる6secから10secあたりの主要動付近では、特にNS方向の波形の一致度が低い。

(2) その他モデルによる同定結果

個別モデル以外の同定計算における同定パラメータの初期値と推定値を表3に示す。推定された骨格曲線を図6に示す。

バイリニアモデル、トリリニアモデルともに変位が2.5cmを超える中変形領域と0.5cm以下の微小変形領域では全てのモデルで概ね同程度の剛性と推定されている。一方0.5cmから2.5cm付近の中小振幅領域ではバイリニアモデルとトリリニアモデルの骨格曲線形状は異なっている。例えば0.5cm変形時ではトリリニアモデルに比べバイリニアモデルの復元力はおよそ2倍に算定されており、動的解析でもこの振幅領域の時刻歴波形は異なってくると考えられる。なお、バイリニア、トリリニアとも独立モデルとMSSモデルの違いによる骨格曲線推定結

図6 推定骨格曲線(その他モデル)

表4 推定波形と観測波形との誤差の正規化RMS値

	EW方向		NS方向	
	変位	速度	変位	速度
バイリニア独立	5.916	7.867	10.690	12.880
バイリニアMSS	5.198	7.179	11.330	12.840
トリリニア独立	4.358	5.191	7.970	8.013
トリリニアMSS	4.990	5.441	8.824	8.384

RMS値/最大振幅×100[%]

果の違いは小さいため、水平2方向の相互影響が応答に及ぼす影響はそれほど大きくないと予想される。

推定されたパラメータを用いて応答計算をした結果と観測データの直接積分により得られた1階相対変位応答時刻歴波形を図7に示す。時刻歴波形の比較より、全てのモデルで主要動付近の応答再現性は良好であり、概ね精度のよいパラメータ推定が行われていると考えられる。しかし、詳細に時刻歴波形を比較すると、主要動以降の振幅の小さいあと揺れ部分ではバイリニアモデルよりトリリニアモデルの方が推定された応答波形と観測記録とが精度良く一致している。特にNS方向の相対変位応答時刻歴波形で15secあたりに見られる中振幅領域ではバイリニアモデルの一致度が低い。この理由はバイリニアモデルは折れ点の一つであるため、大振幅時と特性の異なる微小変形時及び中小振幅時の非線形復元力特性を表現できないが、トリリニアモデルは二つの折れ点を持つため、振幅の大きい領域に加えて振幅の小さい領域でも高い精度で復元力特性を推定できるためであると考えられる。

次に、応答計算により得られた応答時刻歴と観測データ直接積分から得られた時刻歴間誤差の正規化RMS値を表4に示す。正規化は個々の応答誤差RMSを最大振幅で除したものとし、これを%表示している。

表中の正規化RMS値で比較すると、まずMSS、独立にかかわらずバイリニア型モデルよりトリリニア型モデルの方が応答推定精度が良いことがわかる。これより、小振幅から大振幅の応答を精度良く推定するためには、バイリニア復元力よりトリリニア復元力モデルを用いたほうが良いと考えられる。また、変位、速度によらず、振動主軸であるEW方向の応答に比べ、NS方向の応答推定精度が低下している。このことは水平2方向の復元力特性が何らかの原因により異なっている

表3 パラメータ初期値および推定値(その他モデル)

		初期剛性[kN/cm]	2次剛性[kN/cm]	3次剛性[kN/cm]	1次折れ点変位[cm]	2次折れ点変位[cm]
初期値		686.000	343.000	—	1.000	—
推定値	バイリニア独立	703.900	125.000	—	0.528	—
	バイリニアMSS	702.100	127.400	—	0.594	—
初期値		686.000	548.800	137.200	0.500	2.000
推定値	トリリニア独立	826.600	201.500	113.000	0.223	2.950
	トリリニアMSS	875.400	197.500	133.300	0.216	3.366

図7 相対変位時刻歴推定結果

図8 履歴曲線推定結果

ことを示唆していると考えられる。しかし、同じトリリニア型においても、水平2方向相互影響を評価できるMSSモデルを用いた場合よりも、水平2方向独立とした場合の方が推定精度が若干良いことを考慮すると、この原因は免震部材の水平2方向変形の相互影響の影響であると断定することはできない。

次に、推定されたパラメータによる応答計算から求めた復元力履歴曲線を図8に示す。図中には、復元力曲線の目安として斎藤¹⁴⁾の手法により直接的に推定した履歴曲線(図中観測値と記入、以後観測値

と呼ぶ)をあわせて記入している。

図8においてバイリニア独立(a),(b)とバイリニアMSS(e),(f)を比較すると、EW,NSによらず独立モデルよりMSSモデルの方がより滑らかな履歴形状となっており、観測値と近い形状となっている。またトリリニアモデルとバイリニアモデルによる履歴曲線の比較によると、トリリニアモデルでは折れ点変位が一つ増えることにより、より滑らかな剛性の変化を表現できていることがわかる。

さらに、相対的に振幅が小さく相互影響がより大きく現れやすい

表5 パラメータ初期値および推定値(水平2軸個別モデル)

	初期剛性 [kN/cm]	2次剛性 [kN/cm]	折れ点変位 [cm]
初期値	19600.0	3920.0	1.0000
推定値	(EW-方向)	24417.0	4467.5
	(NS-方向)	24092.0	4294.7
			0.6151
			0.3730

図9 推定骨格曲線(水平2軸個別モデル)

と考えられるNS方向の履歴において、図(f)に見られるように、MSSモデルでは水平2方向相互影響による履歴形状の変化が生じている。表4に示した誤差のRMS値も、バイリニアモデルでは独立よりもMSSモデルの推定精度が高い。しかし、トリリニアモデルにおいては、独立とMSSを比較しても履歴形状の変化があまり見られないことや、本検討ではトリリニアMSSよりもトリリニア独立モデルのほうが推定精度が高かったことを考え合わせると、バイリニアMSSがバイリニア独立に比較して推定精度が高い理由は、MSSモデルが実際には多数の折れ点を持つことによる効果と結論付けられる。

図8(c),(d)および(g),(h)より、トリリニアモデルを用いて推定された復元力履歴曲線は、観測値の履歴曲線と良く一致していることがわかる。EW方向で3.5cmを超える大変形時の一致度が低い理由は、トリリニアモデルでは二つ目の折れ点が3.5cm付近でありそれ以上の変形での剛性の変化を表すことができなかったためと考える。さらに大きな変位に折れ点を持つ数学モデルを用いることにより大変形時の復元力特性もさらに精度良く推定できると予想される。

4.3 WESTビルの同定

(1) 水平2軸個別モデルによるパラメータ推定結果

パラメータの初期値および推定値を表5に示す。また、推定されたパラメータにより決まる骨格曲線を図9に示す。

推定パラメータのうち剛性に関しては、一次剛性、二次剛性ともにEW方向NS方向とでほぼ同じ値に推定されたが、折れ点変位はEW方向よりNS方向が小さく推定された。その結果、WESTビルにおいては、大振幅領域では振動レベルの大きなEW方向の復元力が、振動レベルが小さなNS方向より大きくなる様に同定されている。これは松村組免震建物とは逆の傾向であり、水平2方向の相互影響のメカニズムが異なることが予想される。

図10 推定骨格曲線(その他モデル)

表6 推定波形と観測波形との誤差の正規化RMS値

	EW方向		NS方向	
	変位	速度	変位	速度
バイリニア独立	4.369	3.848	8.110	6.865
バイリニアMSS	3.712	3.516	8.807	6.711
トリリニア独立	2.236	2.065	6.600	4.123
トリリニアMSS	2.111	1.700	6.927	2.928

RMS値/最大振幅×100[%]

(2) その他モデルによる同定結果

個別モデル以外の同定計算における同定パラメータの初期値と推定値を表5に、推定された骨格曲線を図10に示す。

図10より推定骨格曲線は、全ての同定モデルで大変形領域ではほぼ同じ傾きであることがわかる。しかし、変形がおよそ2.0cm以下の範囲では、剛性、折れ点変位ともにばらついており、その結果全体的に骨格曲線が全てのモデルで異なっているように見える。特に骨格曲線と横軸で囲まれる面積は各モデルにより異なり、各モデルにより表現することのできる減衰性能には、かなりばらつきがあると考えられる。

推定されたパラメータを用いて応答計算をした結果と観測データの直接積分により得られた1階相対変位応答記録を図11に示す。推定波形と観測波形の誤差正規化RMS値を表6に示す。推定パラメータを用いて計算した相対変位応答時刻歴波形は、観測波形と良く一致している。これより全ての場合でパラメータ推定は、高い精度で行われたと考えられる。表6に示したRMS値の比較によると、トリリニアMSSモデルが最も波形の一致度が高いことがわかる。さらにバイリニアモデルの場合においても、独立よりMSSモデルの方が誤差の正規化RMS値が減少していることから、本建物においては水平2方向独立モデルよりもMSSモデルを用いる方が同定モデルとして適切であると考えられる。

次に、応答計算から求めた復元力履歴曲線と前述の手法により観測記録から直接的に求めた履歴曲線（図中観測値と記入）を図12に示す。推定されたパラメータを用いた応答計算により描いた履歴曲

表5 パラメータ初期値および推定値(その他モデル)

		初期剛性[kN/cm]	2次剛性[kN/cm]	3次剛性[kN/cm]	1次折れ点変位[cm]	2次折れ点変位[cm]
初期値		19600.0	3920.0	—	1.00000	—
推定値	バイリニア独立	23982.0	4465.5	—	0.54491	—
	バイリニアMSS	24860.0	4261.9	—	0.68571	—
初期値		19600.0	15680.0	1960	0.50000	2.0000
推定値	トリリニア独立	41505.0	9515.4	3428.3	0.17088	2.2946
	トリリニアMSS	52984.0	12223.0	3593.1	0.12649	1.7897

図11 相対変位時刻歴推定結果

図12 履歴曲線推定結果

線の面積は、各モデルにより大きく異なる。

図12に示すEW方向復元力履歴の比較から、トリリニアモデルではバイリニアモデルに比べ履歴曲線の幅が広く減衰特性を大きく評価していることがわかる。トリリニアモデルによる応答計算での正規化RMS値がバイリニアモデルに比べ小さいことから、対象構造物が持つ減衰特性はトリリニアモデルを用いたものに近いと言える。また、独立モデルとMSSモデルの比較をおこなうと、特にNS方向の履歴曲線において、MSSモデルが独立モデルに比較してより観測値

の形状に類似していることや、もつとも相互影響が出やすいと考えられる最大振幅時近辺の履歴形状がより近いことから、MSSモデルの採用により水平2方向の相互影響を考慮することが、同定精度の向上に寄与していると考えられる。ただし、MSSモデルのもつ特徴である多数の折れ点の出現により、結果的に滑らになった履歴曲線形状が同定精度の向上に寄与している可能性もあるため、この問題については今後更なる検討が必要であると考えられる。

5. まとめ

松村組技術研究所、WESTビルとも、上部構造を剛体と仮定し、表1に示す計5つの同定モデルを用いて免震層の動特性を同定した。その結果、水平2軸個別モデル以外の各モデルでは、いずれのモデルを用いた場合も、時刻歴応答、復元力履歴曲線とも概ね良い再現性をもっており、結果は妥当であると考えられる。また、推定された時刻歴応答と観測データ直接積分の結果を比較すると、免震層の復元力特性としては、バイリニアモデルよりもトリリニアモデルを用いることにより、大振幅領域から小振幅領域までの応答再現性を高めることができると考えられる。さらに、同定モデルの応答計算から得られた履歴曲線と、直接的に推定された履歴曲線の形状比較より、トリリニア型復元力モデルの場合の方がより再現性が優れていると考えられる。また、MSSモデルの採用による水平2方向の相互影響の効果は、ここで検討された2棟の免震建物のうち、WESTビルでは同定精度の向上に寄与しているが、松村組免震建物では精度向上に寄与しなかった。ただし、本検討で用いた2棟の免震建物は、いずれも振動の主軸が概ねEW方向に平行であり、相互影響がそれほど顕著に表れにくい観測記録であることも考えられ、相互影響の詳細な考察には、今後さらなる観測データの蓄積が必要であると考えられる。ただし、トリリニアMSSモデルがトリリニア独立モデルと比較して同定精度が低下した松村組免震建物においても、その精度低下は些少であり、免震層全体のモデルとしては、トリリニアMSSモデルの採用により、その微小変形領域と中変形領域での剛性の低下を精度良く表すことができると考えられる。

なお、建築構造における強度上の安全性の観点から通常問題となる、応答最大値再現性の観点で考えると、本検討では個別モデル以外のいずれのモデルにおいてもそれほど差異はないことや、通常様々な復元力特性を有する個々の免震部材で構成される免震層全体をトリリニア程度の区間線形で十分モデル化可能であることから、通常の免震建物の設計において、免震部材をバイリニア系でモデル化することや、水平2軸を独立として解析することは概ね妥当であると結論づけることができる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針，日本建築学会，1993
- 2) 藤田隆史，鈴木重信，藤田 聡：建物免震用の高減衰積層ゴムに関する研究（第1報，履歴復元力の基本特性と解析モデル），日本機械学会論文（C編），56巻523号，pp.658-665，1990.3
- 3) 菊地 優，田村和夫，前林和彦，金子美香：高減衰積層ゴムの復元力特性に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），B構造I，pp.659-660，1990.10
- 4) 李傑，向井洋一，橋英三郎，井上 豊：高減衰積層ゴムを用いた免震支承の復元力特性が建物の応答に及ぼす影響について（DOUBLE-TARGETモデルとそのSENSITIVITY），日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），B構造I，pp.777-778，1994.9
- 5) 大島靖樹，石田勝彦：高減衰積層ゴムの最大経緯ひずみ依存性が免震構造物の地震時応答に与える影響に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第472号，pp.75-84，1995.6
- 6) 柴田耕一，高橋 勤，笹川考義，一ノ瀬博明：免震用積層ゴムの振動特性に関する研究 履歴復元力特性のモデル化と非線形振動特性，日本建築学会構造系論文集，第475号，pp.515-516，1997.9
- 7) 菊地 優：鉛プラグ入り積層ゴムの復元力モデルに関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），B構造I，pp.659-660，1990.10
- 8) 多田英之，竹内 徹，長谷川久巳，早川邦夫：大容量免震ダンパーの基本性状に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），B構造I，pp.673-674，1990.10
- 9) 森田慶子，高山峰夫，安藤勝利：U型鉛ダンパーの降伏耐力に関する考察（その1）変位・速度依存性について，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），B-2構造II，pp.729-730，1996.9
- 10) 高山峰夫，森田慶子，安藤勝利：U型鉛ダンパーの降伏耐力に関する考察（その2）降伏耐力と直径の関係について，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），B-2構造II，pp.731-732，1996.9
- 11) 三輪晋也，木村正彦，小嶋英治，林田敏弘：高減衰積層ゴムを使用した実免震建物のシステム同定例，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），B構造I，pp.633-634，1990.10
- 12) 久保田宗穂，中山晋吾，和田 章：免震構造物（郵政省WESTビル）の兵庫県南部地震における吸収エネルギー算定方法についての考察，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），B-2構造II，pp.795-796，1996.9
- 13) 中村 充，竹脇 出，安井 謙，榊井 健，金子正孝，上谷宏次：京都市内に位置する免震建物における地震観測，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），B-2構造II，pp.565-566，1997.9
- 14) 斎藤芳人，森下真行，藤波健剛，龍神弘明：免震建屋における地震観測結果とその解析的検討（その2，免震装置の復元力特性），日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），B-2構造II，pp.603-604，1999.9
- 15) Stewart, J. P., Conte, J. P., Aiken, I. D. "Observed Behavior of Seismically Isolated Buildings", *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 125(9), pp.955-964, 1999.9
- 16) Sano, N., Matsushita, T., Furukawa, T., Inoue, Y. "System Identification of Base Isolated Structure by Extended Kalman Filter using Recorded Seismic Response Data from Hyogoken Nanbu Earthquake", *Proc. of the Second World Conf. on Struct. Control*, Wiley, Vol.(3), pp.2159-2166, 1999.7
- 17) Nagarajaiah, S., Xiaohong, S. "Response of Base-Isolated USC Hospital Building in Northridge Earthquake", *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 126(10), pp.1177-1186, 2000.10
- 18) Chaudhary, M. T. A., Abe, M., Fujino, Y., Yoshida, J. "System Identification of Two Base Isolated Bridges Using Seismic Records", *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 126(10), pp.1187-1195, 2000.10
- 19) (財)日本建築センター：免震構造建築物-その技術開発と地震観測結果PART2-，(財)日本建築センター，1995.7
- 20) 伊澤清治，大西良広，橋英三郎，井上 豊：兵庫県南部地震における免震建物の観測記録と応答解析の比較，第10回日本地震工学シンポジウム，Vol.3，pp.2895-2900，1998.11
- 21) 建築技術編：制震・免震マルチガイド，建築技術，pp.30-31，1997
- 22) 古川忠稔，橋英三郎，井上 豊：予測誤差法による構造物の動的非線形特性の推定-バイリニア多層系せん断モデルの同定-，構造工学論文集Vol.44B，pp.375-384，1998.3
- 23) Ljung, L. "System Identification Theory for the users", *Prentice Hall*, 87-88., 1987
- 24) 中川 徹，小柳義夫：最小二乗法による実験データ解析，東京大学出版会，1995
- 25) Furukawa, T., Ito, M., Inoue, Y. "System Identification of Base Isolated Structure By Prediction Error Method Using Recorded Seismic Response Data Under Hyogoken-Nanbu Earthquake", *Proc. 12th World Conf. on Earthquake Engrg.*, Auckland, New Zealand, No.432, CD-ROM, 2000.1
- 26) 和田 章，木下雅彦：MSSモデルを用いた柱降伏型の建物の立体振動解析（その1），（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，B構造I，pp.313-316，1985
- 27) 和田 章，広瀬景一：2方向地振動を受ける無限均等ラメン構造の弾塑性応答性状，日本建築学会構造系論文集，第399号，pp.37-48，1989.5

(2002年3月10日原稿受理，2002年5月9日採用決定)