

## 木造軸組構法住宅の地震応答シミュレーション

- 履歴特性のモデル化と振動台実験による検証 -

## SEISMIC SIMULATION ANALYSES FOR WOODFRAME HOUSES

- Modeling of hysteretic characteristics and the verification with shaking-table test -

佐藤利昭\*, 井口道雄\*\*, 真崎雄一\*\*\*

Toshiaki SATO, Michio IGUCHI and Yuichi MASAKI

A method to construct nonlinear characteristics of woodframe houses on basis of hysteretic characteristics of beam-column and braces, which are extracted individually from pseudo dynamic tests is proposed in this paper. A proposed hysteresis model is expressed by combining two types of Bouc-Wen model; one is of spindle-shaped and the other is of strong slip behavior. The applicability of the proposed model is confirmed by a simulation analysis for the results conducted by shaking-table test. It is shown that the computed results with use of the proposed model agree satisfactorily well to the experimental results.

**Keywords:** Woodframe house, Summation rule, Nonlinear hysteresis model, Seismic response analyses

木造軸組構法住宅, 加算則, 非線形履歴モデル, 地震応答解析

## 1. はじめに

構造物の耐震安全性を地震応答解析によって評価する場合, 構造物を持つ非線形性を如何に精度良く表現するかは, 応答予測精度を向上させる上で極めて重要となる。木質構造の履歴特性は, 微小変形時から大変形時に至る広い範囲で, スリップ性状やピンチング挙動に代表される強い非線形性を示し, この影響が建物応答に与える影響は大きい。したがって, これらの非線形性を精度良く表現できる履歴モデルを構築する手法を確立することは, 仕様規定から性能規定へと転換し, 建物の耐震性能を適切に評価することが求められる現在, 早期に解決すべき課題となる。

木質構造の非線形性を表す履歴モデルとしては, 種々の提案がなされているが, それらは大きく二つに分類される。一つは履歴特性を直線群で近似するいわゆる Multi-linear モデルであり, もう一つは連続関数で表現する関数型モデルである。Multi-linear モデルとしては, Bi-linear と Slip 型 Bi-linear を組み合わせて表現する坂本ら<sup>1)</sup>, 河合・五十田<sup>2), 3)</sup> による提案の他, D-Tri モデル<sup>4), 5)</sup>, ピンチング挙動に対して最大荷重経過後の繰返し変形による劣化を考慮した, 最大点指向型の履歴特性を持つ Stewart による構造用合板モデル<sup>6)</sup>, 大橋モデル<sup>7)</sup>, 真柄らにより提案されたモデル<sup>8)</sup> などが代表的である。一方, 関数型モデルとしては, 面材と釘接合部の非線形性に着目し, 骨格曲線を指数関数で近似した, Folz らにより提案されたモデル<sup>9)</sup>, Baber らの研究で提案された履歴モデル<sup>10), 11)</sup> に,

多数のパラメータを導入することによって, 木質構造の非線形性を精度良く表現した Bouc-Wen-Baber-Noori モデル<sup>12)</sup> などがある。

このように, 様々な履歴モデルが提案され, 同時に振動台実験あるいは擬似動的実験に対するシミュレーション解析を通して, 履歴モデルの妥当性の検証も行われている<sup>例えば 13), 14)</sup>。しかし, 現在適用範囲が広く, 汎用性に富む履歴モデルが確立されるまでには至っておらず, 新たな履歴モデルの提案とそれに対する検証作業は, 今後も積み重ねてゆく必要がある。

このような観点から, 本研究では, 木造軸組構法住宅の復元力特性を, それを構成する要素の履歴特性から組み立てる一手法を提案すると共に, その適用性を実大架構の振動台実験のシミュレーション解析によって検証した結果について述べる。本論文で提示する復元力特性の組立法の特徴は, 木造軸組構法住宅の復元力特性を, その構成要素から組み立てる点, 木質構造特有のスリップ性状とピンチング挙動を一つの要素特性に集約して表現し, それ以外の特性と直列に結合する点にある。木質構造に特有のひずみ硬化を含む履歴特性を, 二つの要素の直列結合によって表現する考え方は, Baber と Noori<sup>11)</sup> も提示しているが, Baber と Noori はひずみ硬化の要素を SL (Slip-Lock) モデルとして表現していて, その特性は本論文と異なる。なお, 本研究で提案する履歴モデルは, 直列に結合する個々の要素特性を, Bouc-Wen モデルを用いて数式表現しており, 関数型モデルを基本とする。

\* (株) MASA 建築構造設計室 技術主任・工修

\*\* 東京理科大学理工学部 教授・工博

\*\*\* (株) MASA 建築構造設計室 代表取締役

Technological Chief, MASA Architectural Design Bureau, M. Eng.

Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.

Director, MASA Architectural Design Bureau

本論文は、以下のように構成されている。まず、2スパンの木造軸組架構と筋かい付き軸組架構に対して実施した擬似動的加振実験をもとに、軸組部分及び筋かい単体の履歴特性を抽出し、それを数式表現する。つぎにそれらを基に、振動台実験で用いた3スパンの筋かい付き軸組架構の復元力特性を組み立て、振動台実験に対するシミュレーション解析を通して、提案する履歴特性のモデル化と復元力特性の組立法の妥当性を検証する。

## 2. 実験に基づく履歴特性の抽出とモデル化

### 2.1 木造軸組架構及び筋かい付き軸組架構の擬似動的加振実験

実施した実験は、2スパンの実大試験体（1スパン長=910mm）に対する、擬似動的変位制御実験である。試験体は図1に示す2体で、軸組部分はいずれも柱と梁の仕口部に短ほぞ加工を施し、ホールダウン金物で固定している。試験体概要と試験体の名称、ならびに使用した部材の寸法と補強・接合金物の種類を図1に示す。

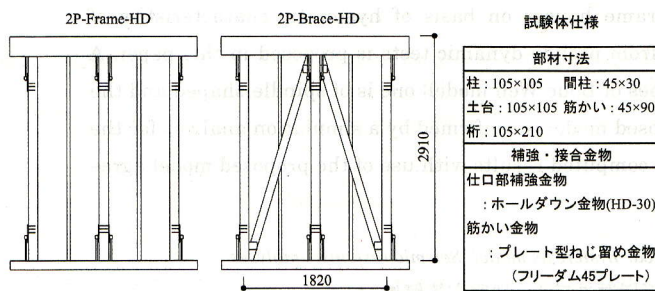


図1 擬似動的加振実験の試験体（基本履歴特性の抽出）

実験は、各試験体頂部の桁に高速アクチュエータを取り付け、振幅と振動数を変化させた正弦波を入力とする。表1に加振振幅と加振振動数の組合せを、図2に各フェーズの加振履歴をそれぞれ示す。なお、以下の検討では、処女載荷時における試験結果を各試験体の履歴特性と考え、同一加振振幅5サイクル中、履歴ループが安定する2~4サイクル目の計測結果を平均して用い、同じ変形量の繰り返しによって生じる、剛性劣化現象については考慮していない。

これらの試験中、試験体2P-Frame-HDでは、層間変形角1/60rad.以降の変形領域でホールダウン金物に緩みが生じた以外、目立つ損傷は認められなかった。一方、試験体2P-Brace-HDでは、層間変形角1/120rad.以降の変形領域で筋かいに座屈変形が生じ、層間変形角1/30rad.を超えた時点で、筋かいの1本が座屈破壊した。

### 2.2 履歴特性の要素分解

図1に示す試験体2P-Brace-HDは、試験体2P-Frame-HDに2本の筋かいを組み込んだものであり、この試験体の履歴特性は、試

表1 加振振幅（目標層間変形角）と加振振動数

試験順	1	2	3	4	5
目標層間変形角 [rad.]	1/240	1/120	1/60	1/30	1/15
振動数 [Hz]	2.0	1.0	0.5	0.25	0.125

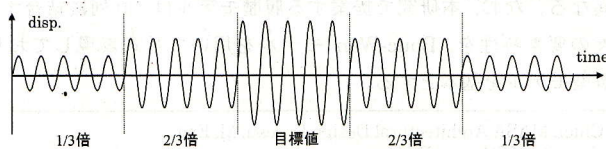


図2 加振履歴（目標層間変形角を中心とする5段階試験）

験体2P-Frame-HDの履歴特性（以下、軸組要素の特性と呼ぶ）に、筋かい単体の履歴特性（以下、筋かい要素の特性と呼ぶ）を単純に加えて表すことができると考える。

この履歴特性の加算則の成立については、既往研究（例えば15）、16）で検証されている他、著者らも別途詳細に検討しており、骨格曲線、エネルギー吸収量、履歴ループ特性について、層間変形角1/15rad.までの比較的大きな変形領域で、これらの加算則が成立することを確認している<sup>17)</sup>。図1の試験体に対する加算則を式表現すると、

$$(2P-Brace-HDの履歴特性) = (軸組要素の特性) + (筋かい要素の特性) \quad (1)$$

と表され、図1に示す2体の試験体の履歴特性から、筋かい要素の特性が分離抽出できる。また式(1)は、軸組要素と筋かい要素の特性を組み合わせることで、両者の並列型合成によって表現できることを示している。図3には、試験結果より分離抽出した軸組要素と筋かい要素の特性を示す。なお、図3に示す筋かい要素の特性は、筋かい2本分の履歴特性である。

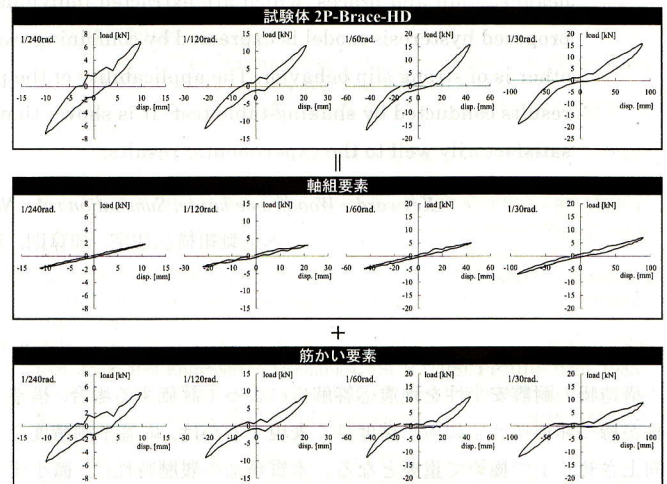


図3 分離した要素特性（軸組要素と筋かい要素の特性）

### 2.3 履歴モデルの数式表現

図3に示す各要素の特性から観察されるように、木質構造の復元力特性は、微小変形時に紡錘型の非線形性を示し、変形の増大に伴い、スリップ性状やピンチング挙動が顕著に現れる。このように分離抽出された軸組と筋かいの各要素の履歴特性を、図4に示す紡錘型要素（以下、Element-1）と硬化型ばね特性を持つ要素（以下、Element-2）を直列に結合した複合モデルで表現する。各要素の特性をこのような複合モデルで表現する特徴は、後述するように、Element-2のスリップ・ピンチング性状と損傷の程度を表す指標を結びつけて評価できる点にある。また、ピンチング挙動はスリップ性状に付随して発生するものであり、両者を1つの要素に集約して表現することは自然である。

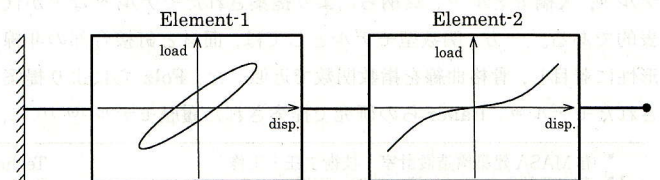


図4 直列型複合モデル

本論文では、Element-1, Element-2 の履歴特性を、Bouc-Wen モデル<sup>18)</sup>の連続関数で表現する。Bouc-Wen モデルは、荷重  $Z$ 、変位  $x$  として、一般に次式で表される。

$$\dot{Z} = A\dot{x} - \beta|\dot{x}|Z^{n-1} - \gamma\dot{x}|Z|^n \quad (2)$$

ここで、 $A, \beta, \gamma$  は履歴ループの形状を決定するパラメータである。式(2)をもとに、図4の Element-1, Element-2 の履歴特性をそれぞれ式(3), (4)の数式で表現する。なお、式(2)の次数  $n$  は  $n=1$  とした。

$$\text{Element-1} : \dot{Z} = A_1\dot{x} - \beta_1|\dot{x}|Z \quad (3)$$

$$\text{Element-2} : \dot{Z} = A_2\dot{x} - \gamma_2\dot{x}|Z| \quad (4)$$

#### 2.4 最適パラメータの同定

軸組要素と筋かい要素の履歴モデルを具体的に定める上で必要となる、式(3), (4)の4つのパラメータ  $A_1, \beta_1, A_2, \gamma_2$  の同定方法を以下に記す。本節以下では、図3の各要素の履歴ループ(1ループ分)を対象に議論を進める。

図4に示すように、直列型複合モデルを構成する要素のうち、Element-2 は履歴減衰を持たない要素である。このことから、Element-1 の1サイクル間の履歴吸収エネルギーと、実験結果より得られる図3の各要素が持つ履歴吸収エネルギーとが、各荷重レベルで対応するように、パラメータ  $A_1, \beta_1$  を決定すればよい。

まず、式(3)の微分方程式の解を求め、履歴ループと  $X$  軸の交点を  $(-X_p, 0), (X_p, 0)$  とすると、次式が得られる。

$$Z = \frac{A_1}{\beta_1} \left( 1 - e^{-\beta_1(x+X_p)} \right) \quad (\dot{x} \geq 0) \quad (5)$$

$$Z = \frac{A_1}{\beta_1} \left( e^{\beta_1(x-X_p)} - 1 \right) \quad (\dot{x} < 0) \quad (6)$$

式(5)は  $\dot{x} \geq 0$  における経路、式(6)は  $\dot{x} < 0$  における経路を表し、両式の  $x$  の値は異なる。式(5), (6)のそれぞれについて  $x$  を求め、両者の差を取ると、

$$\Delta x = \left| 2X_p + \frac{1}{\beta_1} \log \left( 1 - \frac{\beta_1^2 Z^2}{A_1^2} \right) \right| \quad (7)$$

となる。このようにして、 $\Delta x$  は、荷重  $Z$  と未知パラメータ  $A_1, \beta_1, X_p$  を用いて表すことができる。以上から、Element-1 の最適パラメータの同定は、次式の評価関数  $f$  を最小とする問題に帰着する。

$$f(A_1, \beta_1, X_p) = \sum_{i=1}^n w_i (x_{2i} - x_{1i} - \Delta x_i)^2 \quad (8)$$

式(8)に示す  $x_{1i}, x_{2i}$  は、Element-1 の  $\Delta x_i$  と同じ荷重レベルにある実験より抽出した各要素の履歴ループ上の点を表し、図5に  $\Delta x_i$  と  $x_{1i}, x_{2i}$  の関係を示す。なお、同式の  $w_i$  は重み係数を表し、試行錯誤の結果式(9)を用いるものとした。

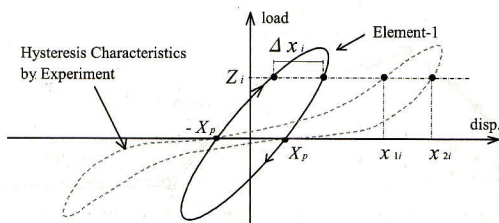


図5 実験結果の履歴ループと Element-1 の特性

$$w_i = \left| \frac{Z_{\max}}{Z_i} \right| \quad (w_i \leq 20) \quad (9)$$

評価関数  $f$  の数値計算には、複数の履歴ループに対して安定した解が得られた Simplex 法<sup>19)</sup>を採用した。以上の方法の妥当性を示すため、層間変形角  $1/30\text{rad}$  時の軸組要素、および層間変形角  $1/60\text{rad}$  時の筋かい要素の特性に対する計算結果を図6に示す。

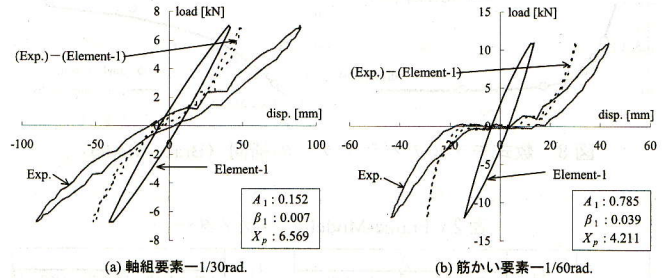


図6 履歴ループの分離

図6に示すように、Element-1 の履歴減衰を適切に評価することで、実験より得られた各要素の履歴ループから、Element-1 の履歴ループを差し引くことによって、Element-2 の特性が抽出評価できる。

このように抽出した履歴ループに対し、Element-2 のパラメータ  $A_2, \gamma_2$  を最小二乗法によって同定する<sup>20)</sup>。

$$J = \sum_{i=1}^n \left( Z_i - Z_0 - A_2 \cdot I_{1i} + \gamma_2 \cdot I_{2i} \right)^2 \quad (10)$$

$$I_{1i} = I_{1i-1} + (x_i - x_{i-1}) \quad (11)$$

$$I_{2i} = I_{2i-1} + \frac{1}{2} \cdot (|Z_i| + |Z_{i-1}|) \cdot (x_i - x_{i-1}) \quad (12)$$

式(10)において、 $Z_0$  は履歴ループの始点を表し、同式の  $J$  を最小とする条件により、各パラメータが同定できる。

#### 2.5 軸組要素と筋かい要素の数式モデル

軸組要素の数式モデル(以下、Frame-Model)と筋かい要素の数式モデル(以下、Brace-Model)の各パラメータを、2.4節の方法を用いて同定すると、これらの数値は、各変形レベルに応じて異なる。

数式モデルを任意の層間変位に対して適用可能とするため、層間変位を  $x$  として、数式モデルの各パラメータを次式で補間した。

$$p \cdot e^{qx} + r \quad (13)$$

式(13)の  $p, q, r$  は、数式モデル毎に決定される係数である。図7, 8に、数値解析によって同定した各数式モデルのパラメータと、式(13)による回帰結果を示す。また表2, 3には、これらの回帰に用いた式(13)の各係数をまとめて示す。

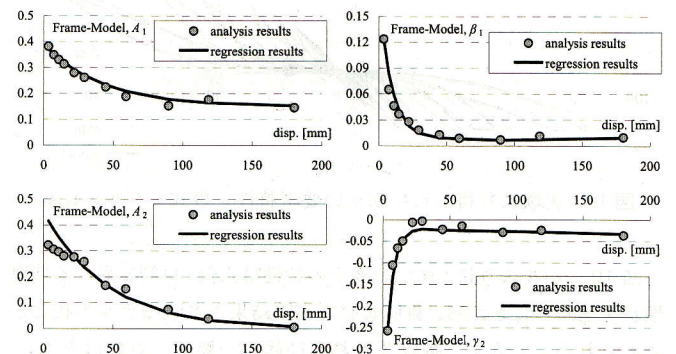


図7 数式モデルのパラメータの補間 (Frame-Model)

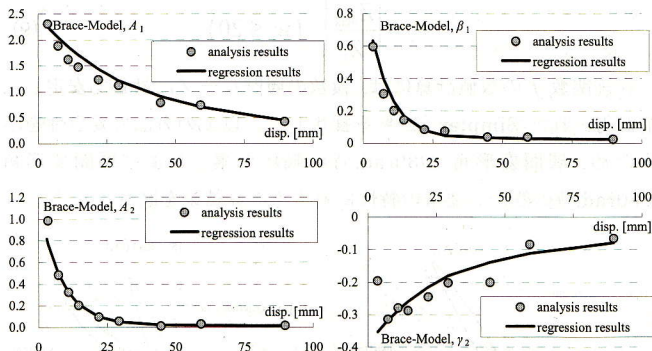


図8 数式モデルのパラメータの補間 (Brace-Model)

表2 Frame-Modelのパラメータ

	$A_1$	$\beta_1$		$A_2$	$\gamma_2$	
		$1/R < 1/30rad$	$1/R > 1/30rad$		$1/R < 1/60rad$	$1/R > 1/60rad$
$p$	0.240	0.170	0.003	0.450	-0.480	-0.010
$q$	-0.024	-0.110	0.005	-0.022	-0.200	0.004
$r$	0.150	0.005	0.002	0.000	-0.020	-0.012

表3 Brace-Modelのパラメータ

	$1/R < 1/90rad$				$1/R > 1/90rad$			
	$A_1$	$\beta_1$	$A_2$	$\gamma_2$	$A_1$	$\beta_1$	$A_2$	$\gamma_2$
$p$	2.200	0.960	1.150	-0.340	2.000	0.085	1.620	-0.270
$q$	-0.028	-0.130	-0.120	-0.033	-0.023	0.043	-0.125	-0.025
$r$	0.250	0.025	0.015	-0.050	0.190	0.022	0.015	-0.050

表2, 3に示すように, Frame-Modelのパラメータ $\beta_1, \gamma_2$ は層間変形角 $1/30rad$ と $1/60rad$ で, また Brace-Modelでは全パラメータが層間変形角 $1/90rad$ を境界にして, 式(13)の係数が異なる。

このようにして表現された各数式モデルの履歴特性と, 各要素の特性とを比較した結果を図9, 10に示す。図10には, 大変形時に筋かいが座屈破壊したことから, 層間変形角 $1/30rad$ までの結果が比較してある。なお, 図10に示す筋かい要素の特性では, 履歴減衰以外のエネルギー吸収因子を粘性減衰として扱い, たすき掛けの筋かい(筋かい2本)を単位として, 減衰係数 $c = 0.05 \text{ kN/cm/sec}$ を与えることとし, 地震応答解析でもこの数値を用いる。

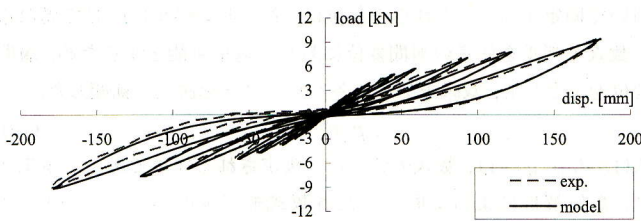


図9 実験より得られた軸組要素特性と数式モデルの比較

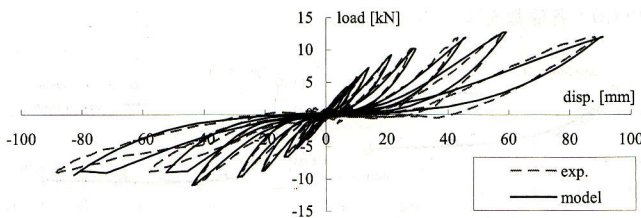


図10 実験より得られた筋かい要素特性と数式モデルの比較

図10に示すように, 筋かい要素の特性は正側・負側で異なる履歴性状を呈したことから, 負側履歴で実験結果と数式モデルの相違が認められる。しかし, 軸組要素および筋かい要素の特性はともに, 数式モデルの履歴特性と概ね良くフィッティングしている。

## 2.6 補強及び接合金物に関する補正

後述するように, 振動台実験の試験体に用いた仕口部補強金物と筋かい接合金物は, 擬似動の実験で用いた試験体の金物と異なる。したがって, 振動台実験の試験体の履歴特性を適切に表すためには, 両試験体における金物の差異の影響を捉え, それを復元力特性に反映させる必要がある。表4に, 擬似動の加振実験と振動台実験の各試験体で用いた金物をまとめて示す。

表4 数式モデルと振動台実験で使用した補強・接合金物

試験体	擬似動の加振実験 (2スパン試験体)	振動台実験
軸組の仕口部	ホールダウン金物 HD-30	ホソパイプ PP230
筋かい接合部	プレート型金物 (フリーダム45プレート)	ボックス型金物 (ニュー皿ビス筋かいbox)

補強及び接合金物の影響を実験によって明らかにするため, 図11に示す3体の1スパン試験体について, 改めて擬似動の加振実験を行った。図11に示す試験体のうち, HDと表記したものは図1の擬似動の実験を行った2スパン試験体と, PP230と表記したものは振動台実験の試験体と同一の仕口部補強金物を使用している。また, 試験体1P-Brace-HDおよび1P-Brace-PP230で用いた筋かい接合金物は, いずれも振動台実験の試験体と同一の金物である。

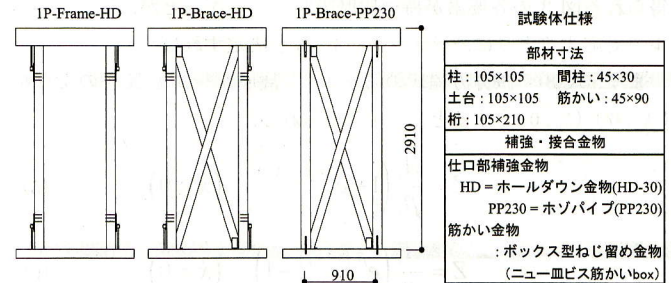


図11 1スパン試験体 (補強及び接合金物に関する補正)

これらの試験体に対し, 試験体1P-Brace-HDと1P-Brace-PP230の試験結果を比較することで, 仕口部補強金物の影響を知ることができる。また, 加算則の成立を前提に, 試験体1P-Brace-HDの履歴特性から, 1P-Frame-HDの履歴特性を差し引けば, 振動台実験と同一の金物を用いた筋かい単体の履歴特性(以下, ボックス金物筋かい要素)が抽出できる。さらに, それと2.2節で抽出した筋かい単体の履歴特性(以下, プレート金物筋かい要素)を比較すれば, 試験体に1スパンと2スパンの相違はあるものの, 筋かい接合金物の影響が評価できる。図12には, これら3試験体の荷重-変形曲線を示す。同図には, 参考として, 図1に示す試験体2P-Frame-HDの荷重-変形曲線も示してある。

図12より, 試験体1P-Brace-HDと1P-Brace-PP230の差は小さく, 仕口部補強金物の差異の影響が殆ど認められないことから, 軸組要素については, 金物の影響による補正は必要ないと判断した。

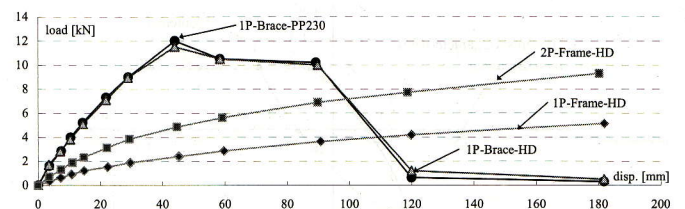


図12 1スパン試験体の荷重-変形曲線

そこで以下では、筋かい接合金物の差異の影響に着目する。図 13 には、実験より抽出したボックス金物筋かい要素とプレート金物筋かい要素の履歴ループ特性を比較した結果を示す。

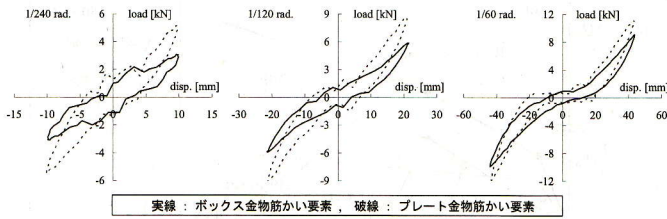


図 13 筋かい要素の履歴ループ特性の比較

図 13 に示すように、両者の履歴性状は類似しているものの、プレート金物筋かい要素の方が、ボックス金物筋かい要素に比して剛性が高い。これら両者の相違には、接合金物の差異による影響以外に、スパン数の影響が含まれているものと考えられるが、試験結果からこれらの影響を分離して評価することはできない。そこで、図 13 に示す筋かい要素の相違を異なる金物の影響と考え、補正係数  $s_b$  を導入して、両者の特性を次式のように関係付ける。

$$(\text{ボックス金物筋かい要素}) = s_b \cdot (\text{プレート金物筋かい要素}) \quad (14)$$

補正係数  $s_b$  は式(14)に基づき、各変形レベル毎の等価剛性の比率によって評価する。図 14 に補正係数  $s_b$  の計算結果を示す。図中に示す実線は、全変形領域を 3 区間に分けて直線回帰した結果である。振動台実験に対するシミュレーション解析では、これらの回帰曲線を用いて筋かい接合金物の差異を考慮している。

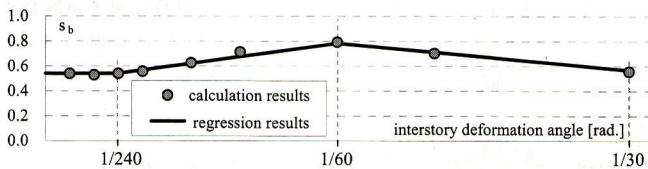


図 14 筋かい要素の補正係数

### 3. 損傷の程度を表す指標

軸組要素と筋かい要素の特性を、前述の直列型複合モデルで表現することによって、スリップ・ピンチング性状が定量的に評価できる。この履歴性状は、架構の塑性化の原因となる滑りに関係することから、損傷の程度を表す指標となることが考えられる。

これを具体化するために、直列型複合モデルを構成する Element-1 と Element-2 の最大変位を利用し、各変形レベルにおいて、スリップ・ピンチング性状が寄与する量と、各要素の損傷の程度を定量的に評価する。すなわち、Element-1 の最大変位を  $X_{m1}$ 、Element-2 の最大変位を  $X_{m2}$  として、次式により損傷の程度を表す指標を定義し、これをスリップ率  $R_{slip}$  と呼ぶことにする。

$$R_{slip} = \frac{X_{m2}}{X_{m1}} \quad (15)$$

式(15)より算出した、軸組要素と筋かい要素のスリップ率  $R_{slip}$  と層間変形角の関係を図 15 に示す。また同図には、試験時の目視から推察した損傷の程度と、スリップ率  $R_{slip}$  の関係を併せて示す。

図 15 に示すように、スリップ率  $R_{slip}$  は 1.0 以下で「損傷なし」、1.0 以上 2.0 未満でスリップ挙動が発現する「軽微な損傷」、2.0 以上は

脆性的な破壊を伴う状態で「大きな損傷」を表す。スリップ率  $R_{slip}$  と損傷の程度との関係については、今後の検討が必要となる。

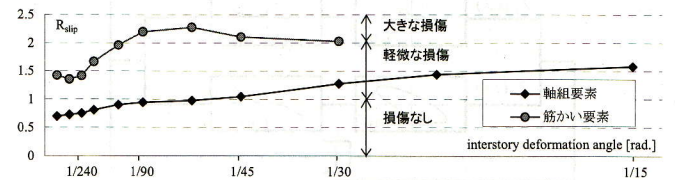


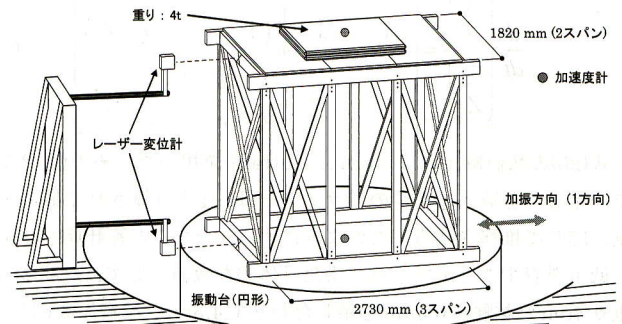
図 15 層間変形角と軸組要素及び筋かい要素のスリップ率の関係

## 4. 振動台実験シミュレーション

### 4.1 実験概要

復元力特性の組立法と数式モデルの妥当性を、振動台実験<sup>21)</sup>のシミュレーション解析を通して検証する。実験は一軸方向入力で、実験の概要を図 16 に示す。制作した試験体は、2 スパン×3 スパンの 1 層軸組架構で、加振方向に半割のたすき筋かいを合計 4 スパン分組み込み、試験体上部には 2 階建て住宅の 2 階部分の荷重を想定した 4ton の鉄板を載せている。また、図 16 に破線で示した梁間方向の筋かいは、振動時のねじれ止めとして設置したものである。なお、地震波加振前に実施した正弦波スイープ試験によれば、試験体の弾性時における固有振動数は 3.35Hz であった。

計測は、図 16 に示す加速度計・変位計に加えて、部材の軸歪みや接合部の引き抜きなど多点での計測を行ったが、以下の分析では主に、試験体頂部および土台梁の加速度・変位記録を用いる。振動台には、JMA-KOBE NS 成分波形 (1995 年兵庫県南部地震・神戸海洋気象台波、最大加速度 818gal) を 25kine, 50kine に基準化して入力した。図 17 には、50kine 入力試験時の加速度波形を示す。



木材寸法		補強・接合金物	
角材	面材	補強・接合金物	
柱: 120×120	軒桁: 120×240	基礎: t = 15 mm	仕口: ホゾバインド PP230
土台: 120×120	筋かい: 45×90	1階床: t = 24 mm	筋かい: ニュー皿ビス筋かいbox
根太: 120×120			

図 16 振動台実験及び試験体の概要



図 17 JMA-KOBE NS 成分 (最大速度 50kine 基準化波形)

### 4.2 復元力特性の組立法と応答解析

振動台実験で用いた試験体に対する復元力特性の組立法と、シミュレーション解析の方法を以下に記す。架構全体の復元力特性として、各要素の数式モデルの並列結合に、構造減衰  $c$  を含めて組み立てると、図 18 に示す振動モデルが得られる。

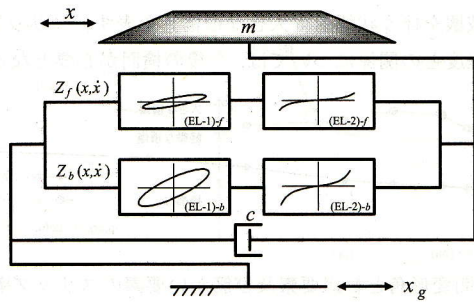


図 18 1 質点系振動モデル

図 18 の質点における振動方程式は、次式で表すことができる。

$$\ddot{x} + \frac{c}{m} \dot{x} + \frac{\sum Z_i(x, \dot{x})}{m} = -\ddot{x}_g \quad (16)$$

ここで、 $Z_i$  は  $i=f, b$  とし、それぞれ Frame-Model と Brace-Model を表す。これらの復元力は、式(3),(4)に示す Element-1, Element-2 の定義式をもとに、次式で表現する。

$$K_{1i} = \frac{dZ}{dx_1} = A_{1i} - \beta_{1i} \frac{|\dot{x}_1|}{x_1} Z_i \quad (17)$$

$$K_{2i} = \frac{dZ}{dx_2} = A_{2i} - \gamma_{2i} |Z_i| \quad (18)$$

$$\dot{Z}_i = K_i \cdot \dot{x} = \frac{K_{1i} \cdot K_{2i}}{K_{1i} + K_{2i}} \cdot \dot{x} \quad (19)$$

これらに、2.6 節で定めた補正係数  $s_b$  と、架構に含まれる要素の個数  $n_i$  (実際の計算には、 $s_b =$  図 14 の補正係数、 $n_f = 2.0$ ,  $n_b = 4.0$  を用いる) を加えてまとめると、次の非線形状態方程式が得られる。

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \\ Z_f \\ Z_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ -\ddot{x}_g - \frac{c}{m} \dot{x} - \frac{1}{m} (n_f \cdot Z_f + s_b \cdot n_b \cdot Z_b) \\ K_f \cdot \dot{x} \\ K_b \cdot \dot{x} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

式(20)の数値解析には、Runge-Kutta 法を用いた。その他、2.5 節で決定した各数式モデルのパラメータは、逐次計算される最大変形量に応じて推移させる。このようにすることで、応答計算中に剛性の低下を表すことができる。また具体的な数値として、質量  $m$  は、重り 4ton と試験体 0.5ton を足し合わせて 4.5ton、減衰係数  $c$  は、2.5 節で筋かい 2 本あたり 0.05kN/cm/sec としたこと、8 本分を合わせて 0.2kN/cm/sec とした。

振動台実験のシミュレーション解析では、これら提案モデルの応答解析に加え、現在広く利用されている Bi-linear + Slip モデルを用いた応答解析も同時に行い、両者の計算結果を比較する。Bi-linear + Slip モデルのパラメータの定め方に関しては、これまでに様々な検討が行われているが、ここでは壁倍率から算定する<sup>22)</sup>。

この方法では、振動台実験の試験体が、たすき筋かい 4 スパン分で構成されることから、図 19 中の降伏荷重を  $Q_{y0} =$  壁倍率 4 倍 ×

0.91m × 4 個 × 1.96kN = 28.53kN と算定し、各パラメータを決定する。なお、Bi-linear + Slip モデルの数値計算には Newmark-β 法 ( $\beta = 1/4$ ) を用い、減衰定数は瞬間剛性比例型で  $h=0.03$  とした<sup>23)</sup>。

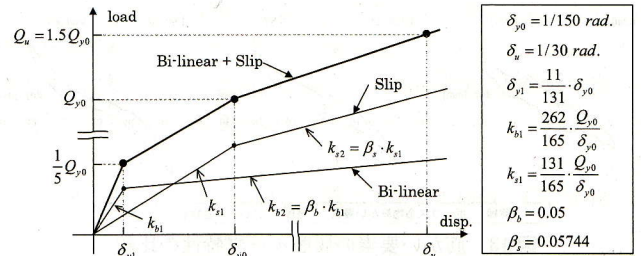


図 19 Bi-linear + Slip モデルの説明図

### 4.3 応答予測精度の検証

#### 4.3.1 時刻歴応答の比較

本項では、提案モデルと Bi-linear + Slip モデルの応答計算結果を比較し、応答予測精度の検証を行う。まず図 20, 21 に、25kine 入力試験時の試験結果と両履歴モデルの計算結果を比較した結果を、図 22 にこれらの復元力特性を比較した結果を示す。なお図 20, 21 は、主要動部分として全時刻のうち 10~30 sec 部分を取り出したもので、上図に加速度応答波形、下図に変位応答波形が示してある。

図 20, 21 に示すように、両履歴モデルの最大応答は、概ね同等である。一方、図 22 に示す試験結果、提案モデル、Bi-linear + Slip モデルの各復元力特性から観察されるように、最大変形を更新する毎に剛性が低下する試験結果の履歴特性に対し、提案モデルがほぼ同様の傾向を示していることが分かる。

つぎに、50kine 入力試験時の両履歴モデルの計算結果と試験結果を比較したものを図 23, 24 に示す。図 23, 24 より、両履歴モデルの計算結果はほぼ同一であるが、試験結果とは相違している。これは、

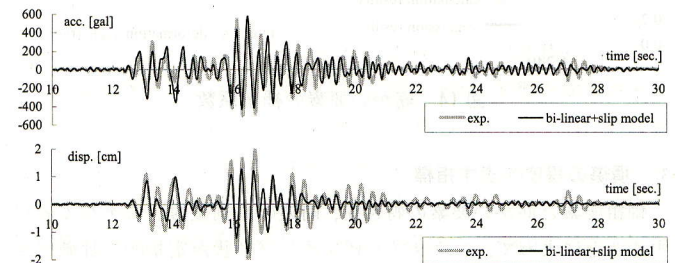


図 20 25kine 入力のシミュレーション解析 (Bi-linear + Slip モデル)

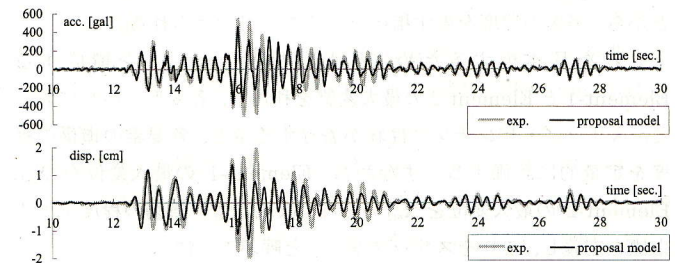


図 21 25kine 入力のシミュレーション解析 (提案モデル)

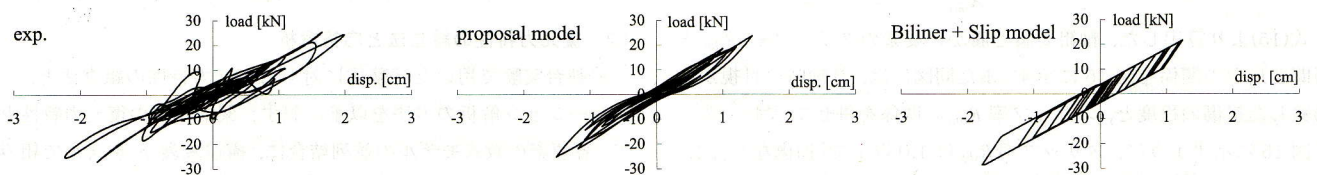


図 22 試験結果と両履歴モデルの復元力特性の比較 (25kine 入力試験時)

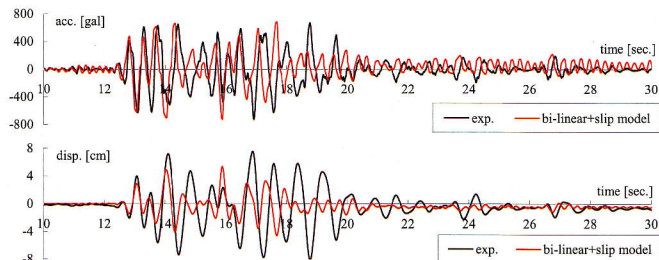


図 23 50kine 入力のシミュレーション解析 (Bi-linear + Slip モデル)

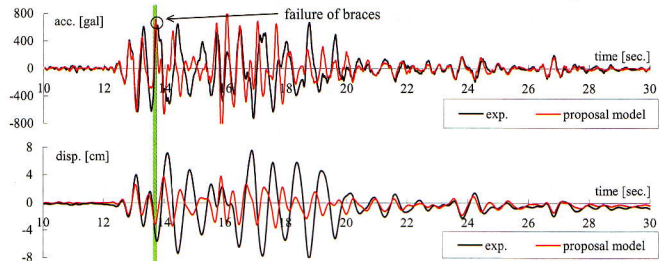


図 24 50kine 入力のシミュレーション解析 (提案モデル)

試験中に生じた筋かい 2 本の座屈破壊が影響したものと考えられ、両履歴モデルとも計算では、脆性的な破壊を考慮していないことが主な原因と推察される。現存する木造住宅の多くは、内・外装材が筋かいの座屈補剛の役割を果たすため、実構造物の応答予測としては、これらの結果が妥当とも考えられる。しかし、ここでは試験結果のシミュレーションとして、提案モデルに座屈破壊を考慮することにし、若干の修正を加える。

まず、筋かいが座屈破壊した時刻を推定するため、図 23 下図に示す提案モデルの応答変位波形から **Frame-Model** と **Brace-Model** それぞれについて、スリップ率  $R_{slip}$  を算出する。算出したスリップ率  $R_{slip}$  の時刻歴変化を図 25 に示す。

図 25 より **Frame-Model**、すなわち軸組部分に大きな損傷はないことが推測される。また図中の着色部分①～③は、**Brace-Model** のスリップ率  $R_{slip}$  が 2.0 を超えた部分を表し、先に述べた損傷評価では、「大きな損傷」の領域に相当する。このうち②の部分に着目すると、この時刻 (図 24 の着色部分) において、図 24 の上図に示す加速度応答が 500gal を超える大きな値となり、これに対応して図 24 の下図に示す試験結果の変位応答が急激に増大し、応答計算結果と乖離したように思われる。

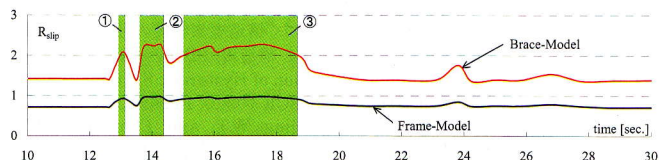


図 25 スリップ率の推移 (50kine 入力試験時)

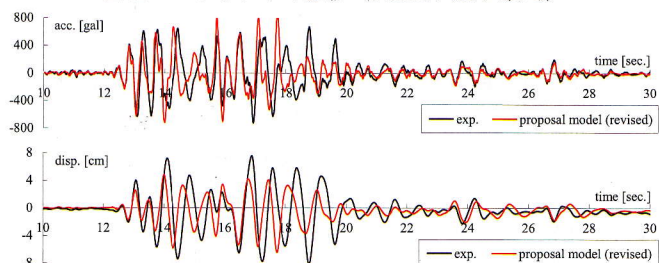


図 26 50kine 入力のシミュレーション解析 (修正提案モデル)

このような考察をもとに、本論文では筋かいの座屈破壊が 500gal を超える加速度応答によって生じるものと判断し、この条件に達した時点で、試験結果にあわせた修正 (全 8 本中、2 本の筋かいが座屈破壊したことから、**Brace-Model** の剛性を 3/4 倍に低減する) を行った。修正モデルの計算結果を図 26 に示す。

図 24, 26 に示す修正前後の計算結果を対比して見れば、座屈破壊を考慮したことによる応答計算の精度の向上が認められる。図 26 の 16 sec.以降の応答変位は、修正モデルに対しても試験結果の方が大きい、この部分は図 25 の着色部分③と対応することから、筋かい部分の損傷がさらに進んだものと推察される。

#### 4.3.2 ピーク振動数の時間変化に関する比較

実験観測波形及び応答計算波形について、ピーク振動数の経時変化に着目した分析を行う。ピーク振動数の経時変化は、強震時における構造物の振動特性の変化を表し、建物の耐震性を評価する上で、極めて重要である。ここでは、提案モデルと **Bi-linear + Slip** モデルの解析結果として得られた加速度応答波形に対し、ガウス窓を用いたランニングスペクトルを計算し、両履歴モデルの振動数変化を観察する。窓フーリエ変換は、一般に次式で表される。

$$F(b, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot w(t-b) \cdot e^{-i\omega t} dt \quad (21)$$

式(21)に示す  $b$  は、窓関数  $w(t)$  の時間軸上の平行移動を表す。またガウス窓は、次式のものを採用した。

$$w(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-t^2/2\sigma^2} \quad (22)$$

本研究では、式(22)の  $\sigma=0.7$  (時間窓は  $\pm 2.0$ sec.) とし、窓関数の移動時間刻みは 0.5sec とした。図 27, 28 に、25kine, 50kine 入力試験時の観測波形に対して分析したランニングスペクトルのコンター濃度図が示してある。なお、濃度図は、各図の右側に示す相対的な尺度で表わされていて、暖色系はピーク振動数の卓越状態を表す。これらの図には、両履歴モデルに対する応答計算波形についてのランニングスペクトルを求め、ピーク (尾根部分) を結んで描いたピーク振動数の時刻歴変化も同時に示してある。

図 27, 28 より、各入力レベルとも **Bi-Linear + Slip** モデルの応答計算結果に比して、提案モデルの方が試験結果のピーク振動数の時間変化との対応が良く、振動特性を適切に評価できることが分かる。

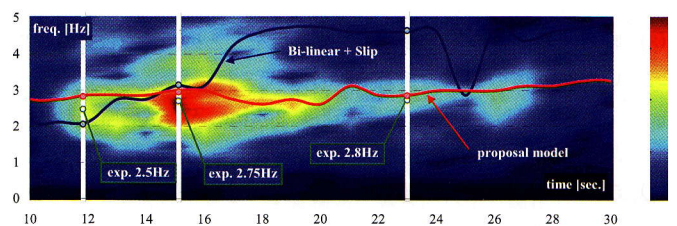


図 27 実験と履歴モデルに対する振動数の経時変化 (25kine 入力)

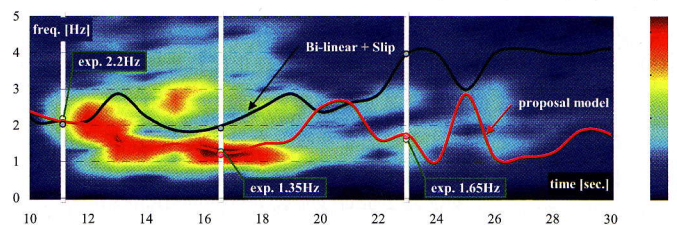


図 28 実験と履歴モデルに対する振動数の経時変化 (50kine 入力)

### 4.3.3 入力エネルギーに関する比較

本項では、入力エネルギーに着目した分析を行う。ここでいう入力エネルギーとは、エネルギーの釣合いに基づいて評価されるものである<sup>24), 25)</sup>。ここでは、両履歴モデルの応答計算結果をもとに、次式の右边に示す入力エネルギーを計算し、両者の結果を比較する。

$$\int_0^t \{m\ddot{x} + f(x, \dot{x})\} \cdot \dot{x} dt = - \int_0^t m\ddot{z} \cdot \dot{x} dt \quad (23)$$

図 29, 30 に、算出した入力エネルギーの時刻歴変化を示す。図 29, 30 より、提案モデルの応答計算結果は、各入力レベルとも、試験結果と良く対応しており、総エネルギー入力量についても適切に評価できていると判断される。

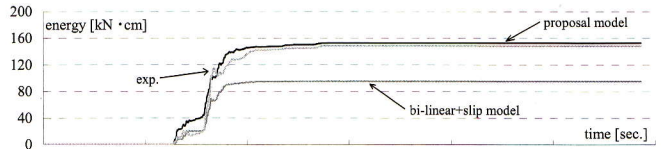


図 29 実験と履歴モデルに対する累積入力エネルギー (25kine 入力)

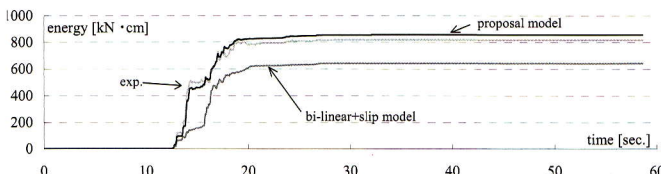


図 30 実験と履歴モデルに対する累積入力エネルギー (50kine 入力)

### 5. まとめ

本研究は、木造軸組構法住宅の応答予測精度の向上を目的に、履歴特性のモデル化とこれを用いた復元力特性の組立法を提案し、振動台実験に対するシミュレーション解析を通して、それらの妥当性を検証した。得られた成果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 柱・梁の軸組と筋かいを含む軸組試験体について擬似的加振実験を行い、その結果をもとに、軸組単体および接合部の影響を含む筋かい単体の履歴特性を抽出し、それらを Bonc-Wen の数式モデルで表現する方法を示した。
- (2) 軸組および筋かい単体の復元力特性を、紡錘型と硬化ばね特性の直列結合によって表現した数式モデルの特性は、実験結果とよく対応することを示した。
- (3) 軸組と筋かいの各要素の数式モデルをもとに、振動台実験で用いた試験体の復元力特性を組み立てて行ったシミュレーション解析結果は、振動台の最大速度 25kine 入力試験時の試験結果とほぼ調和的であった。
- (4) 50kine 入力試験時では、試験体の筋かいが座屈破壊したため、その影響を考慮せずに行った応答計算結果と実験結果の間には乖離が生じたが、座屈発生以降の筋かい剛性を低減して行った応答計算結果は、その実験結果とよく整合した。
- (5) 各単体要素の履歴特性を、紡錘型と硬化ばね特性に分離して求める各最大変位の比をスリップ率と定義し、このスリップ率が損傷の程度と関連することを示唆した。すなわち、この指標は損傷の程度を表現する簡易指標となる可能性がある。
- (6) 損傷の程度を表す指標の有効性の検証、および繰り返し載荷に伴う剛性劣化現象のモデル化については、今後の課題とする。

### 謝辞

本研究は、木造住宅用制振装置 GVA の開発研究の一環として実施された実験を基にまとめたものである。実験に際し (株) カナイ、(株) 住友スリーエム、(株) アイ・エム・エー、(株) 原田木材には多大な協力を戴きました。また、(株) 住宅構造研究所、電源開発 (株) 茅ヶ崎研究所には、実験機器および計測機器の使用にあたり、多くの便宜を戴きました。さらに、信州大学工学部 五十田博准教授には、論文の内容に関して、貴重なご意見と参考資料を戴きました。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 坂本功, 大橋好光: 木造住宅の地震応答解析—標準的な在来構法住宅のモデルに関して—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), C 構造Ⅲ, PP2651~2652, 1984.10
- 2) 河合直人: 工学的基盤の加速度応答スペクトルを用いた建築物の耐震性能評価 (その 12) —木造耐力壁構造に対する適用—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), C-1 構造Ⅲ, PP1147~1148, 1999.9
- 3) Isoda, H. and Kawai, N.: Blind Prediction of Seismic Response of a Two Story Wood Frame House, Structural Systems Research Project No. SSRP-2001/15, Univ. of California, 2001.
- 4) 尾内俊夫, 太田外氣晴, 諸星史雄, 原康之: 兵庫県南部地震で被害を受けた枠組壁工法住宅の耐震性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 510 号, PP131~138, 1998.8
- 5) 尾内俊夫, 太田外氣晴, 諸星史雄, 原康之: 兵庫県南部地震の強震動による枠組壁工法住宅の振動特性と耐震性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 517 号, PP107~114, 1999.3
- 6) Stewart, W.G.: The Seismic Design of Plywood Sheathed Shear Walls, Ph.D. Thesis, Univ. of Canterbury, New Zealand, 1987.
- 7) 大橋好光: 非耐力部分を考慮した在来木造住宅の耐震性に関する研究, 東京大学学位論文, 1984.
- 8) 真柄琢哉, 三宅辰哉, 五十田博, 田守伸一郎, 笹川明: 枠組壁工法建築物の地震時最大応答変位に関する考察 エネルギー入力率に基づく 1 質点系の最大応答予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 506 号, PP75~82, 1998.4
- 9) Folz, B. and Filiatrault, A.: A Cycle Analysis of Wood Shear Walls, Journal of Structural Engineering, ASCE 127(4), PP433~441, 2001.
- 10) Baber, T.T. and Wen, Y.K.: Random Vibration of Hysteretic, Degrading System, Journal of Engineering Mechanics, ASCE 107(EM6), PP1069~1087, 1981.
- 11) Baber, T.T. and Noori, M.N.: Random Vibration of Degrading, Pinching System, Journal of Engineering Mechanics, ASCE 111(8), PP1010~1026, 1985.
- 12) Foliente, G.C.: Hysteresis Modeling of Wood Joints and Structural Systems, Journal of Structural Engineering, ASCE 121(6), PP1013~1022, 1995.
- 13) 五十田博, アンドレ フィリアトロ, ブライアン フォルツ: カリフォルニア地域の建物を対象とした木造住宅の振動解析モデルの一事例—木造建物の地震時挙動に対する解析的研究—, 日本建築学会構造系論文集, 第 563 号, PP115~121, 2003.1
- 14) 五十田博, 河合直人: 木造軸組構法住宅に用いる壁の復元力特性モデル—木造建物の地震挙動に関する研究—, 日本建築学会構造系論文集, 第 616 号, PP157~163, 2007.6
- 15) 荒木康弘, 腰原幹雄, 大橋好光, 坂本功: 木造住宅の地震応答解析のための復元力モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 579 号, PP79~85, 2004.5
- 16) 町田健一, 綿引誠, 大橋好光: 木造軸組工法耐力壁の動的性状の加算則検証と地震応答解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 605 号, PP135~141, 2006.7
- 17) 佐藤利昭, 小川英記, 真崎雄一, 小室達也, 井口道雄: 木造軸組構法における制振構造の研究—実大試験結果に基づく構造要素特性の抽出—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), C-1 構造Ⅲ, PP307~308, 2006.9
- 18) Wen, Y.K.: Method for Random Vibration of Hysteretic Systems, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE 102(2), PP249~263, 1976.
- 19) Press, W.H., Teukosky S.A., Vetterling W.T. and Flannery B.P.: Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing, 1990.
- 20) Sues, R.H., Mau, S.T., and Wen, Y.K.: System Identification of Degrading Hysteretic Restoring Forces, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE 114(5), PP833~846, 1998.
- 21) 佐藤利昭, 真崎雄一, 井口道雄: 振動台実験に基づく木造軸組構法用制振装置の性能評価, 日本建築学会技術報告集, 第 26 号, PP545~550, 2007.12
- 22) 社団法人 日本建築構造技術者協会編: 復元力特性と解析モデル, 木造 建築構造の設計, オーム社, PP69~76, 2004.8
- 23) 五十田博: 時刻歴応答解析による耐震設計法, 日本建築学会「木質構造の新しい耐震設計の考え方」シンポジウム資料, PP273~278, 2001.
- 24) 日本建築センター: エネルギーの釣り合いに基づく耐震設計法の技術基準解説及び計算例とその解説, 2005.10
- 25) 五十田博: エネルギーの授与に基づく耐震性能評価法の木質構造への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), C-1 構造Ⅲ, PP401~402, 2002.8

(2007年12月10日原稿受理, 2008年5月28日採用決定)