



## 木造建物における一自由度系地震応答解析のための 復元力特性モデルの提案

飯塚裕暁<sup>1)</sup>、境有紀<sup>2)</sup>

- 1) 学生会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科、大学院生  
e-mail : e0201231@edu.esys.tsukuba.ac.jp
- 2) 正会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科、准教授 工博  
e-mail : sakai@kz.tsukuba.ac.jp

### 要 約

木造建物の地震応答解析をより簡便に行うために、建物を一自由度系の単一ばねにモデル化する際の復元力特性モデルを提案した。具体的には、Takeda-Slipモデルに木造建物の挙動を表現できるよう修正を加えた。提案したモデルの妥当性を確認するため、地震応答解析を行って、既往の実大振動実験結果を再現できるかどうかを検証した。その結果、実験結果を概ね再現できることを確認した。そして、建物を構成する耐力壁の仕様より復元力特性モデルのパラメータを決定する方法について検討した。耐力壁ごとの復元力特性を重ね合わせることで、提案するモデルのパラメータを設定し、地震応答解析を行って実大振動実験結果と解析結果との比較を行った。解析結果は実験結果を概ね再現することができ、耐力壁の仕様がわかれば、提案するモデルのパラメータを設定して地震応答解析ができることになり、提案するモデルの有用性を確認できた。

キーワード： 木造建物、地震応答解析、一自由度系、Takeda-Slipモデル

### 1. はじめに

過去の大地震において多くの木造建物が大きな被害を受けてきた。例えば、1995年兵庫県南部地震では、10万棟以上の木造建物が全壊した<sup>1)</sup>とされている。木造建物を対象に地震被害想定、あるいは、地震直後の被害推定を行うことは、地震防災上重要であり、特に、地震直後に被害推定を行う際には、地震後の救援活動を迅速に行うために、建物をより単純にモデル化して解析に要する時間を短縮する必要がある。

木造建物の地震応答解析における復元力特性モデルに関する既往の研究には、建物を二質点系にモデル化したものとして、坂本・大橋<sup>2)</sup>、鈴木・山田・浅野<sup>3)</sup>によるもの、一質点系にモデル化したものとして、一反田・岩井<sup>4)</sup>、米澤・鈴木・浅野<sup>5)</sup>によるものなどがあるが、建物を一自由度系の単一ばねにモデル化したものはない。本研究では、木造建物の地震応答解析をより簡便に行うことを目的として、木造建物の復元力特性を単一ばねで表現できる復元力特性モデルを提案する。具体的には、Takeda-Slipモデル<sup>6)</sup>に着目し、木造建物の復元力特性を再現できるように、モデルに修正を加える。そして、復元力特性モデルのパラメータを実大振動実験結果を基に決定し、実験結果と解析結果を比較することで、提案す

るモデルが木造建物の復元力特性を表現できるかについて検証する。最後に、建物の耐力壁の復元力特性を重ね合わせることで建物全体の復元力を表現する方法<sup>7)</sup>に着目し、耐力壁の仕様から提案する復元力特性モデルのパラメタを設定する方法について検討する。

## 2. Takeda-Slipモデルとその修正

木造建物の復元力特性を表現できる既往のモデルとして、Takeda-Slipモデルに着目した。その概要を図1に示す。木造建物の復元力特性には、図2に示した実大振動実験結果<sup>8)</sup>のように低荷重時に剛性が低くなるスリップ性状を示すという特徴がある。Takeda-Slipモデルは、本来は鉄筋コンクリート造建物を対象として開発されたものだが、木造建物のスリップ性状を表現でき、履歴則は複雑だがその大半は条件分岐で計算時間は要しないのが特徴で、木造建物の復元力特性を単一ばねで表現するものとして適していると考えた。

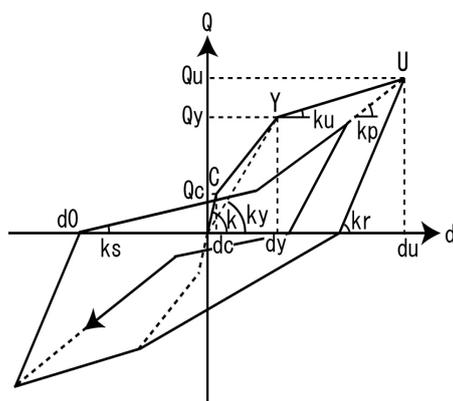


図1 Takeda-Slipモデル

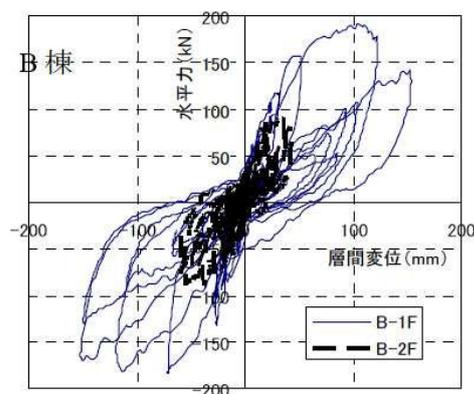


図2 木造建物の復元力特性例 (転載<sup>8)</sup>)

Takeda-Slipモデルのパラメタには、初期剛性 $k$ 、第一折点の耐力 $Q_c$ 、第二折点（降伏点）の耐力 $Q_y$ 、変位 $d_y$ 、降伏剛性低下率 $\alpha_y$ 、降伏後剛性低下係数 $\beta$ 、除荷剛性低下指数 $\alpha$ 、スリップ剛性低下指数 $\gamma$ 、スリップ剛性硬化係数 $\delta$ がある。また、図1における各剛性 $k_y$ 、 $k_u$ 、 $k_r$ 、 $k_s$ 、 $k_p$ は、式(1)から式(5)で表される。

$$k_y = k \times \alpha_y \quad (1)$$

$$k_u = \beta \times \frac{Q_y}{d_y} \quad (2)$$

$$k_r = \frac{Q_c + Q_y}{d_c + d_y} \left| \frac{d_u}{d_y} \right|^{-\alpha} \quad (3)$$

$$k_s = \frac{Q_u}{d_u - d_0} \left| \frac{d_u}{d_u - d_0} \right|^\gamma \quad (4)$$

$$k_p = \delta \times \frac{Q_u}{d_u} \quad (5)$$

ここで、振動実験の結果をよりよく再現できるよう、Takeda-Slipモデルに修正を加えた。式(3)で定められる除荷剛性 $k_r$ の最大値は、 $\alpha=0$ のとき、 $(Q_y+Q_c)/(d_y+d_c)$ となる。しかし、実際にはそれよりも大きな値を示す場合もあると考えられるため、式(3)を次式のように修正した。

$$k_r = \frac{Q_c}{d_c} \left| \frac{d_m}{d_y} \right|^{-\alpha} \quad (3)'$$

式(3)'における $k_r$ の最大値は初期剛性 $k$ と等しくなる。修正したTakeda-Slipモデルが木造建物の復元力特性を表現できるかを確認するために、実大振動実験結果を基に各パラメタを定めて地震応答解析を行い、実験結果と解析結果を比較する。

### 3. 実大振動実験結果との比較

#### 3.1 Takeda-Slipモデルのパラメタの決定

既往の実大振動実験結果を再現できるように、修正したTakeda-Slipモデルの各パラメタを決定する。対象とする実験結果は文献8)から12)の6つの実験のものを使用した。以下、各実験について、文献8)A棟及びB棟の実験を、それぞれ実験A、B、文献9)から12)の実験を、順に実験C～Fと呼称する。

パラメタの決定は次の2通りの方法で行った。

##### 【方法1】(図5(a))

- ① 建物の弾性周期から式(6)より初期剛性 $k$ を求める。建物の弾性周期は微動計測によって得られた値を用いる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (6)$$

ここで、 $T$ ：固有周期(s)、 $m$ ：質量(kg)、 $k$ ：剛性(N/m)である。

- ② 木造建物の降伏点を定義するのに一般的によく用いられる、降伏層間変形角  $1/120\text{rad}$  という値を用いて  $d_y$  を定め、実験結果の包絡線と修正した Takeda-Slip モデルの包絡線を、原点  $O$  から降伏変位  $d_y$  までを積分した面積が等しくなるように  $Q_y$  を決める。ここで、第一折点  $C$  は  $Q_c=0.3Q_y$  となる点とした。
- ③ 同様に、実験結果と Takeda-Slip モデルについて、降伏変位  $d_y$  から点  $U$  の変位までを積分した面積が等しくなるように、降伏後の剛性を調節してパラメタ  $\beta$  を決める。
- ④ 除荷時についても、点  $U$  の変位から横軸との交点までの変位について、両者の積分した面積が等しくなるように、除荷剛性を調節してパラメタ  $\alpha$  を決める。
- ⑤ 横軸との交点、縦軸との交点、原点で囲まれる面積が等しくなるように、スリップ剛性を調節してパラメタ  $\gamma$  を決める。

##### 【方法2】(図5(b))

- ① 建物の弾性周期から式(6)より初期剛性 $k$ を求める。建物の弾性周期は微動計測によって得られた値を用いる。
- ② 点  $U$  を実験結果の包絡線上にとり、実験結果と Takeda-Slip モデルについて、原点  $O$  から点  $U$  の変位までを積分した面積が等しくなるような降伏点  $Y$  の座標  $(d_y, Q_y)$ 、パラメタ  $\beta$ 、第一折点  $C$  (は  $Q_c=0.3Q_y$  とした) の組み合わせの中から、降伏点  $Y$  から実験結果の包絡線までの距離が最も短くなるものを選んで降伏点  $Y$ 、パラメタ  $\beta$  を決める。
- ③ 方法1の④、⑤と同様に、パラメタ  $\alpha$ 、 $\gamma$  の値を決める。

方法1、2それぞれについて、正負両側のパラメタを求めた。また、パラメタ  $\delta$  については、実験結果から求めるのが困難であったため、 $\delta=1.0$ とした。各実験について定めたパラメタの値を、方法1は表1に、方法2は表2に示す。

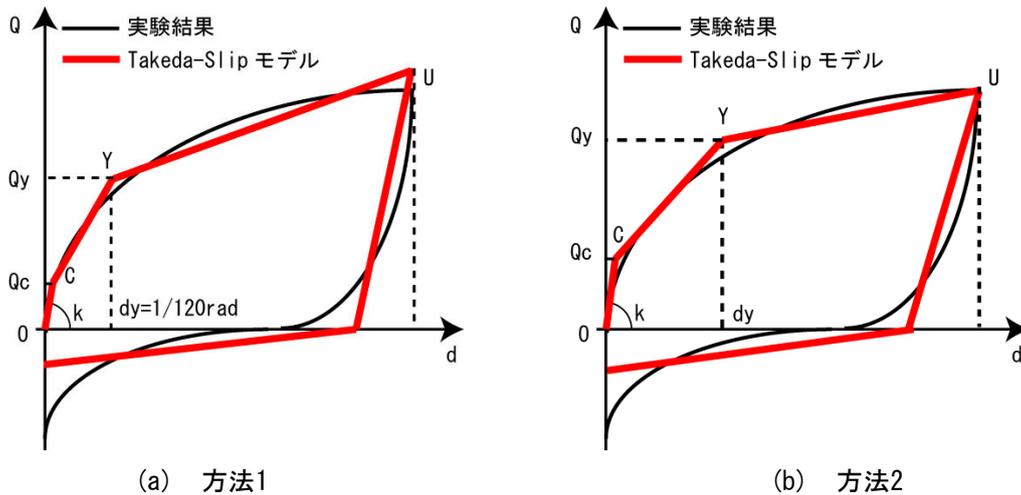


図5 パラメタの決定

表1 各パラメタの値 (方法1)

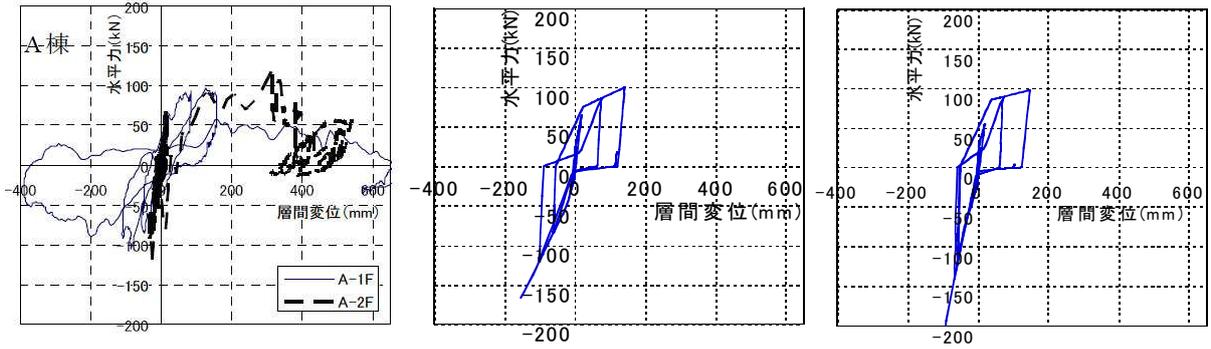
| 実験                  | A     |       | B     |       | C     |       | D     |       | E     |       | F     |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 正     | 負     | 正     | 負     | 正     | 負     | 正     | 負     | 正     | 負     | 正     | 負     |
| k (kN/mm)           | 21.1  |       | 17.9  |       | 10.1  |       | 20.9  |       | 3.87  |       | 26.1  |       |
| Q <sub>y</sub> (kN) | 75.3  | 51.4  | 128.1 | 129.0 | 95.0  | 81.3  | 149.8 | 223.0 | 63.6  | 48.6  | 220.7 | 256.6 |
| d <sub>y</sub> (mm) | 23.7  |       | 23.7  |       | 24.6  |       | 23.0  |       | 24.0  |       | 25.5  |       |
| α <sub>y</sub>      | 0.151 | 0.103 | 0.304 | 0.302 | 0.382 | 0.327 | 0.311 | 0.463 | 0.682 | 0.523 | 0.332 | 0.386 |
| α                   | 0.815 | 0.540 | 0.495 | 0.549 | 0.419 | 0.546 | 0.048 | 0.353 | 0.576 | 0.1   | 0.399 | 0.839 |
| β                   | 0.065 | 0.411 | 0.175 | 0.120 | 0.173 | 0.085 | 0.506 | 0.146 | 0.024 | 0.224 | 0.114 | 0.045 |
| γ                   | 1.471 | 2.834 | 3.106 | 1.445 | 3.908 | 3.940 | 4.001 | 2.567 | 3.140 | 1.747 | 2.468 | 2.320 |

表2 各パラメタの値 (方法2)

| 実験                  | A     |       | B     |       | C     |       | D     |       | E     |       | F     |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 正     | 負     | 正     | 負     | 正     | 負     | 正     | 負     | 正     | 負     | 正     | 負     |
| k (kN/mm)           | 21.1  |       | 17.9  |       | 10.1  |       | 20.9  |       | 3.87  |       | 26.1  |       |
| Q <sub>y</sub> (kN) | 86.1  | 76.6  | 159.4 | 173.4 | 141.5 | 107.8 | 396.3 | 278.1 | 59.1  | 60.5  | 207.5 | 276.7 |
| d <sub>y</sub> (mm) | 38.9  | 39.4  | 37.2  | 50.2  | 58.6  | 50.6  | 98.8  | 41.2  | 26.1  | 37.9  | 20.6  | 35.6  |
| α <sub>y</sub>      | 0.105 | 0.092 | 0.239 | 0.193 | 0.239 | 0.211 | 0.192 | 0.323 | 0.585 | 0.413 | 0.386 | 0.298 |
| α                   | 1.198 | 0.272 | 0.882 | 1.221 | 1.050 | 1.047 | 1.711 | 0.693 | 0.383 | 0.340 | 0.353 | 1.105 |
| β                   | 0.049 | 1.181 | 0.111 | 0.025 | 0.100 | 0.017 | 0.189 | 0.105 | 0.153 | 0.105 | 0.126 | 0.049 |
| γ                   | 1.288 | 2.688 | 2.967 | 1.053 | 3.747 | 3.574 | 3.662 | 2.485 | 3.358 | 1.819 | 2.536 | 2.386 |

### 3.2 実験結果と解析結果の比較

表1、表2に示したパラメタを用いて、修正したTakeda-Slipモデルによる地震応答解析を行い、実大振動実験から得られた復元力特性と比較した。減衰は瞬間剛性比例、減衰定数5%とした。入力地震動は実験で用いられたものと同じとし、実験A、BについてはJR鷹取波（NS成分）、実験C、Dについては神戸海洋気象台波（NS成分）、実験EについてはJR鷹取波（EW成分）を用いた。ただし、実験Eについては、実際には、振動台の可動最大振幅の関係から、各成分とも反時計回りに40°回転させて用いているため、同じ地震動を作成して入力した。実験Fについては神戸海洋気象台波（NS方向）を最大加速度が1000cm/s<sup>2</sup>になるよう拡大したものを用いた。各実験について、実大振動実験及び方法1、2で定めたパラメタを用いた地震応答解析より得られた復元力特性を図6から図11に示す。ただし、実験Aでは建物が倒壊したため、倒壊する時刻までの地震動を用いた。また、実験Dは3つの実験結果のうち水色で示されたものを比較の対象とした。

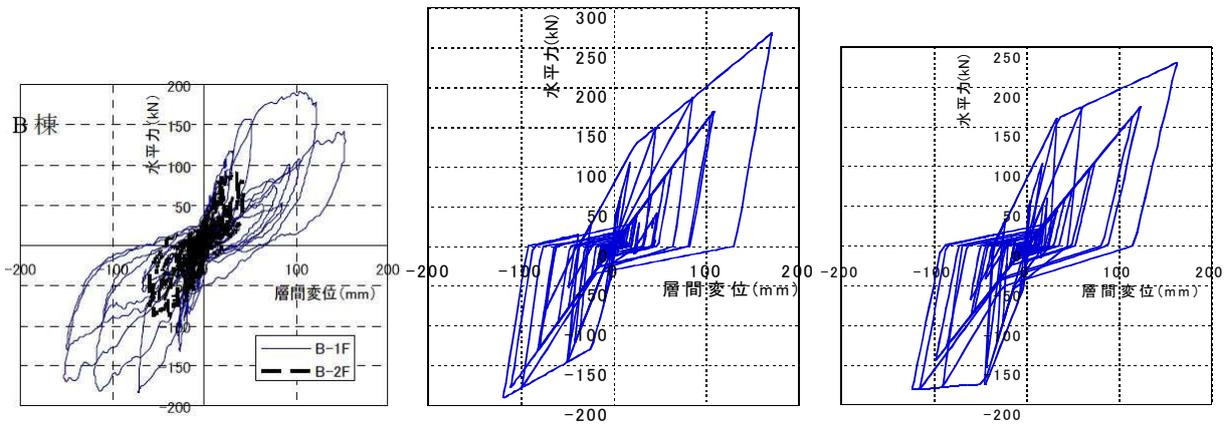


実験結果 (転載<sup>8)</sup>)

方法1

方法2

図6 実験結果と解析結果 (実験A)

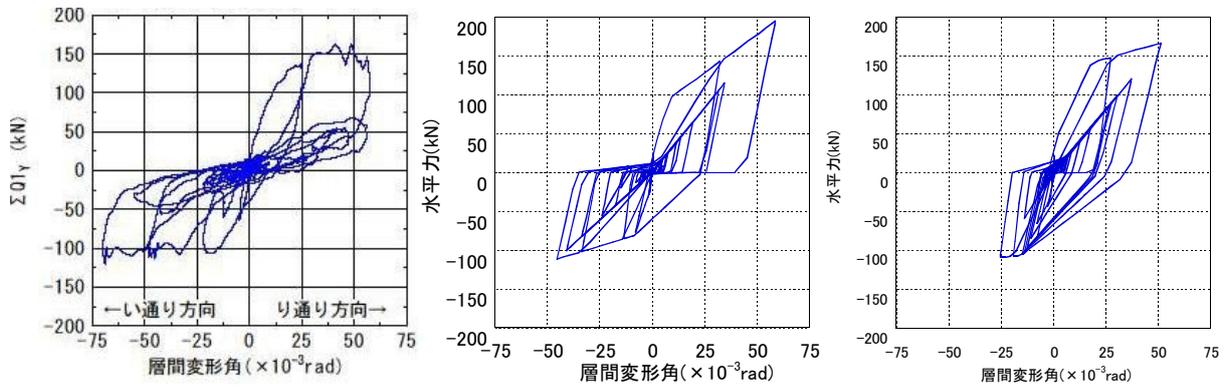


実験結果 (転載<sup>8)</sup>)

方法1

方法2

図7 実験結果と解析結果 (実験B)



実験結果 (転載<sup>9)</sup>)

方法1

方法2

図8 実験結果と解析結果 (実験C)

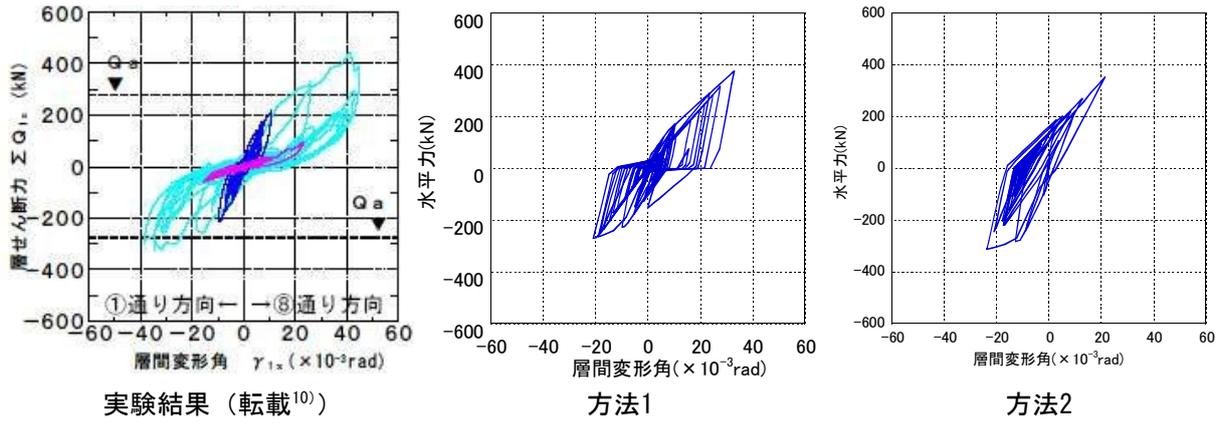


図9 実験結果と解析結果 (実験D)

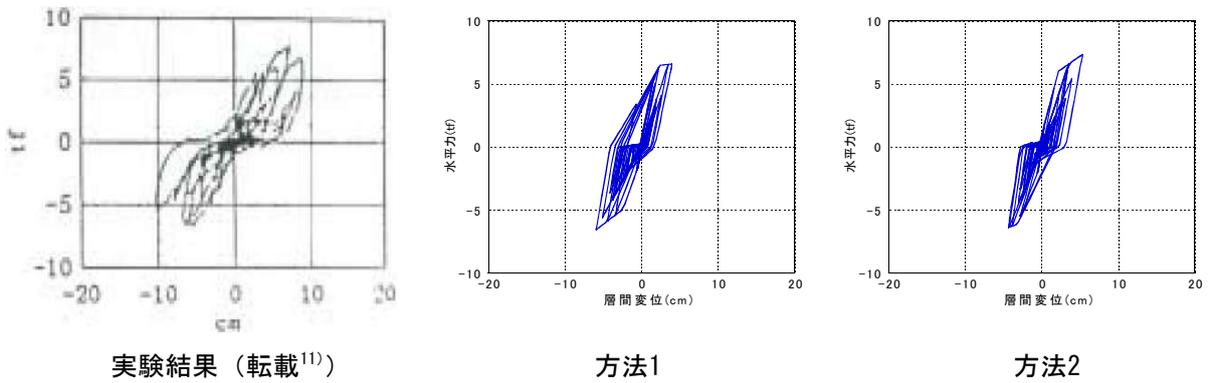


図10 実験結果と解析結果 (実験E)

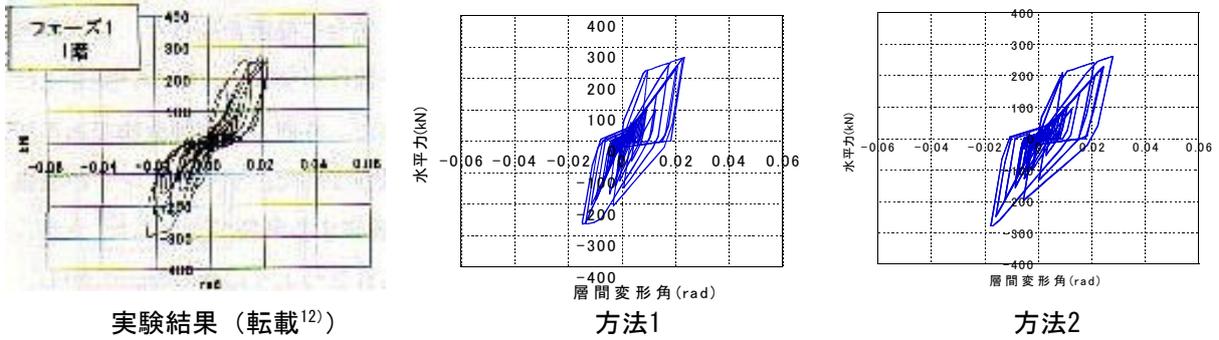


図11 実験結果と解析結果 (実験F)

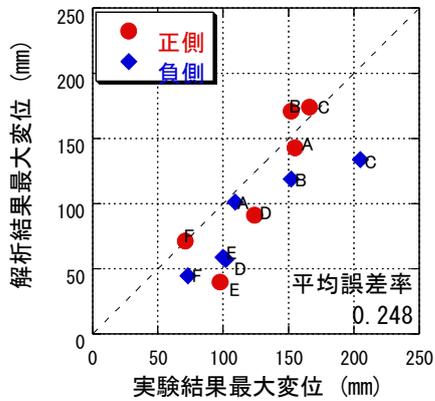


図12 実験と解析の最大変位の比較 (方法1)

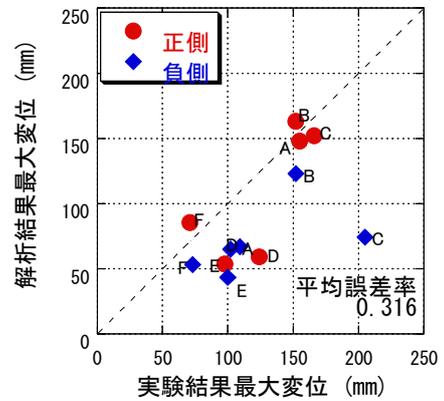


図13 実験と解析の最大変位の比較 (方法2)

実験結果と解析結果を比較すると、復元力特性の概形について、実験結果でスリップが起こる部分でも、解析結果ではスリップ性状を示さないといった違いがいくつか見られる。特に、実験 C、D、F でこの違いが顕著で、実験結果では第 4 象限にほとんど履歴が見られないのに対して、解析結果では、第 4 象限に大きく膨らんでいる。これは、Takeda-Slip モデルのスリップに関するルールが、木造建物の復元力特性に対応できていないためである。

各方法について、実験結果と解析結果の正側と負側それぞれの最大変位の絶対値を比較したものを図 12、図 13 に示す。図中の数値は解析結果と実験結果の最大変位の差を求め、その絶対値を実験結果で除して基準化した値の平均値（以下、平均誤差率）であり、平均誤差率が小さいほど解析による実験結果の再現性が高いことを表している。また、図中の記号は各実験名と対応している。図 12、図 13 より最大変位に関してはどちらの方法でも実験結果を概ね再現できているが、全体的に変位が小さくなっていて、方法 2 の実験 C の負側で顕著である。これは、上で述べたようにスリップが起こるべきところで起こらず、履歴が膨らんでいることが一因と考えられる。そこで、木造建物の復元力特性の再現性を向上させるため、Takeda-Slip モデルのスリップに関するルールに修正を加えた。

#### 4. Takeda-Slipモデルのスリップに関するルールの修正

##### 4.1 モデルの修正方法

Takeda-Slipモデル本来のスリップ時のルールは次の通りである。

- (a) 経験した最大変形が降伏点を超える場合、スリップを起こした後、最大変形点を指向する（図 14(a)）。
- (b) 経験した最大変形が降伏点を超えない場合、スリップを起こさず、降伏点を指向する（図 14(b)）。

しかし、3章に示した実験結果では、降伏以前の早い段階でスリップ性状が見られる。そこで、経験した最大変形点が降伏点を超えていない場合も、(a)のルールと同様、スリップを起こした後、最大変形点を指向するよう、修正を加えた（図15）。

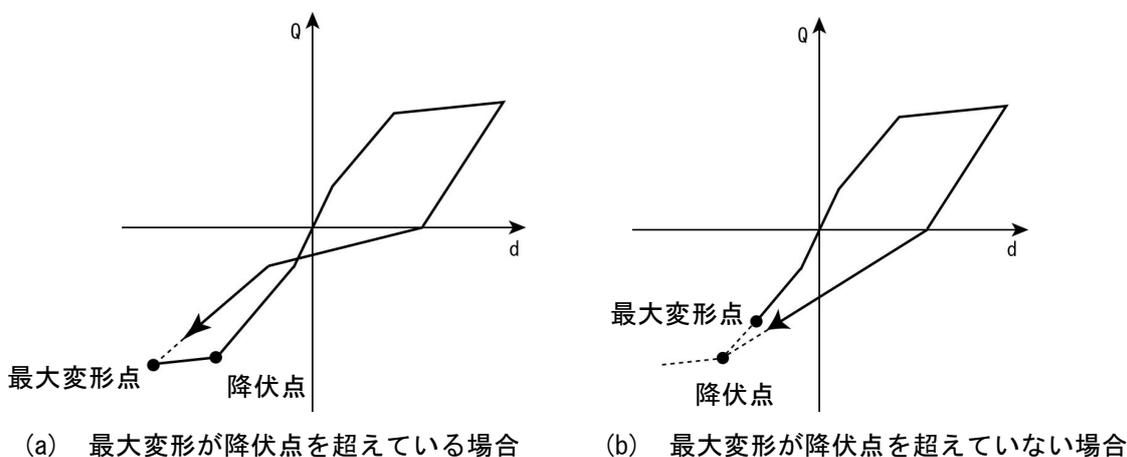


図 14 Takeda-Slip モデルのスリップに関するルール  
(最大変形からの除荷部分の履歴は省略)

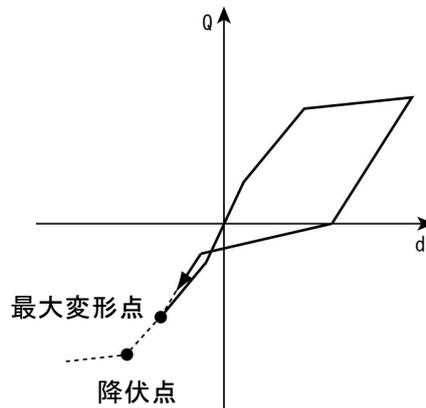
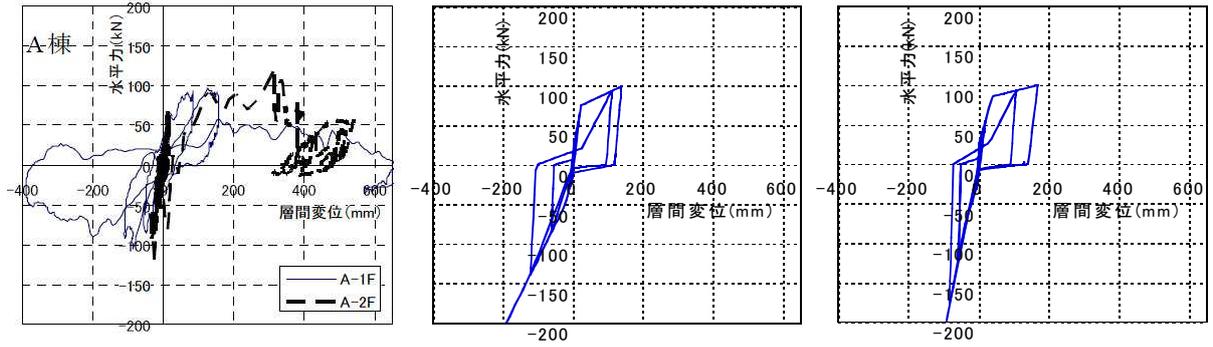


図15 修正した Takeda-Slip モデルのスリップに関するルール  
(最大変形が降伏点を越えていない場合、最大変形からの除荷部分の履歴は省略)

#### 4.2 実験結果と解析結果の比較

スリップに関するルールに修正を加えた Takeda-Slip モデル (以下、修正 Takeda-Slip モデル) を用いて、3.2 節と同様の解析を行う。モデルのパラメタは実験結果から決定するため、修正 Takeda-Slip モデルについても表1、表2に示した値となる。各実験について、実大振動実験、及び、方法1、2の解析結果を3.2 節と同様に図16から図21に示す。実験結果と解析結果を比較すると、全体を通して、方法1、2どちらを用いても実験結果を概ね再現できている。修正前のモデルで実験結果と解析結果の形に大きな違いが見られた実験C、D、Fでは、第4象限の履歴の膨らみがなくなり、修正後のモデルを用いた方が実験結果をよく再現できている。

各方法について、実験結果と解析結果の正側と負側それぞれの最大変位の絶対値を比較したものを3.2 節と同様に図22、図23に示す。モデルの修正前 (図12、図13) に比べ、方法1では、平均誤差率はほとんど変わらないが、モデルの修正前では全体的に過小評価であったことが是正されている。また、方法2については、平均誤差率が小さくなっており、モデルを修正したことで、実験結果の再現性が向上した。これらのことから、木造建物の復元力特性を修正 Takeda-Slip モデルで表現することが可能だと考えられる。ただし、今回の検証は、あくまで実大振動実験が行われた6つのケースの結果であり、破壊性状としては、主として下層階が損傷を受けたものが多いことから、これ以外の、例えば、上層階が損傷を受ける場合などの適用性には注意する必要がある。

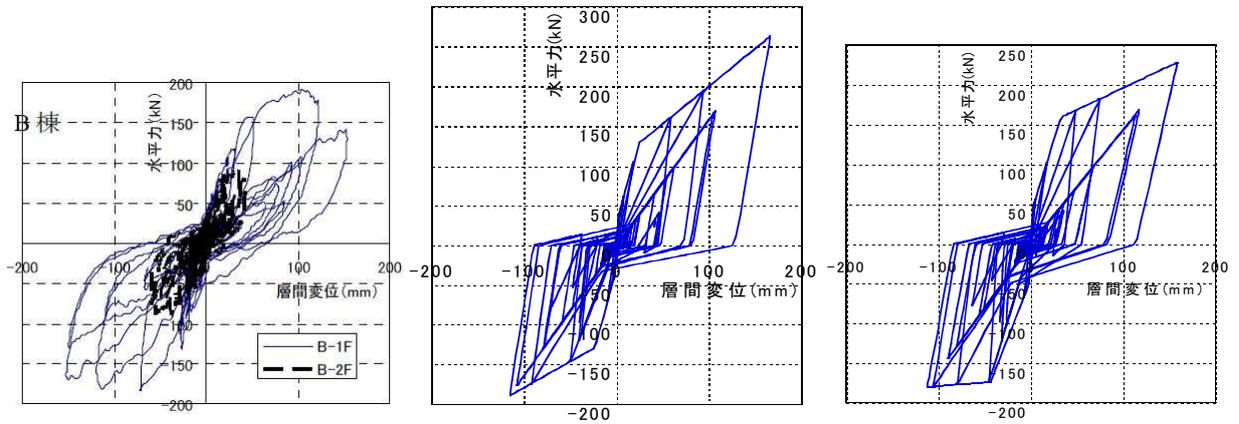


実験結果 (転載<sup>8)</sup>)

方法1

方法2

図16 実験結果と解析結果 (実験A)

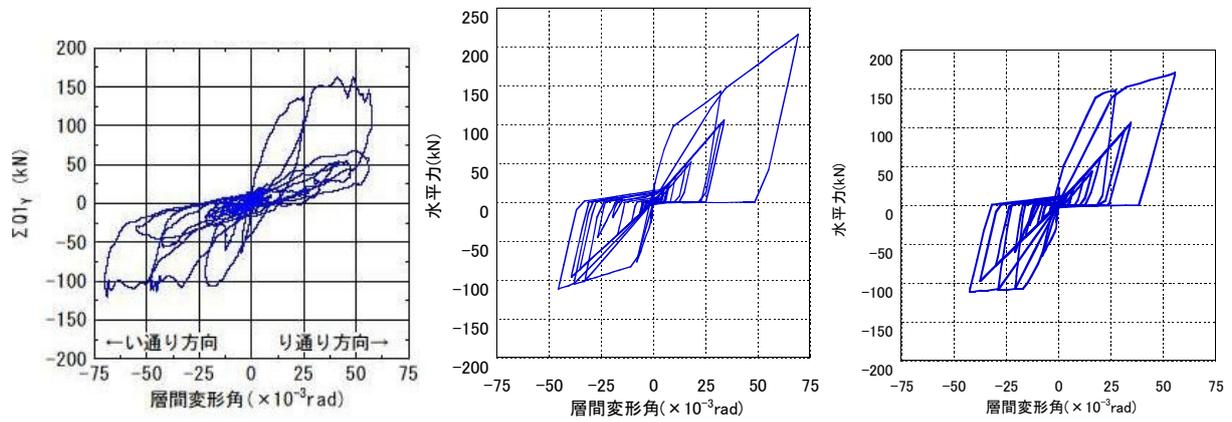


実験結果 (転載<sup>8)</sup>)

方法1

方法2

図17 実験結果と解析結果 (実験B)



実験結果 (転載<sup>9)</sup>)

方法1

方法2

図18 実験結果と解析結果 (実験C)

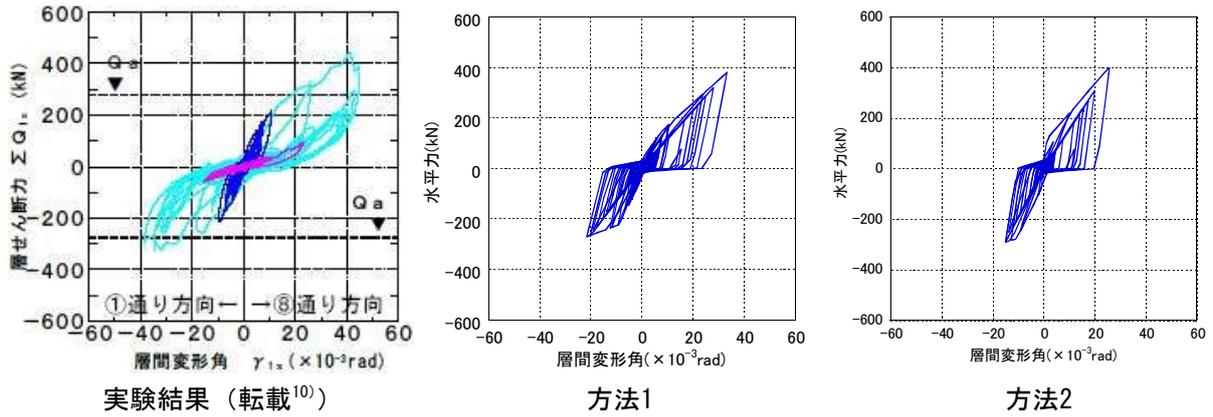


図19 実験結果と解析結果 (実験D)

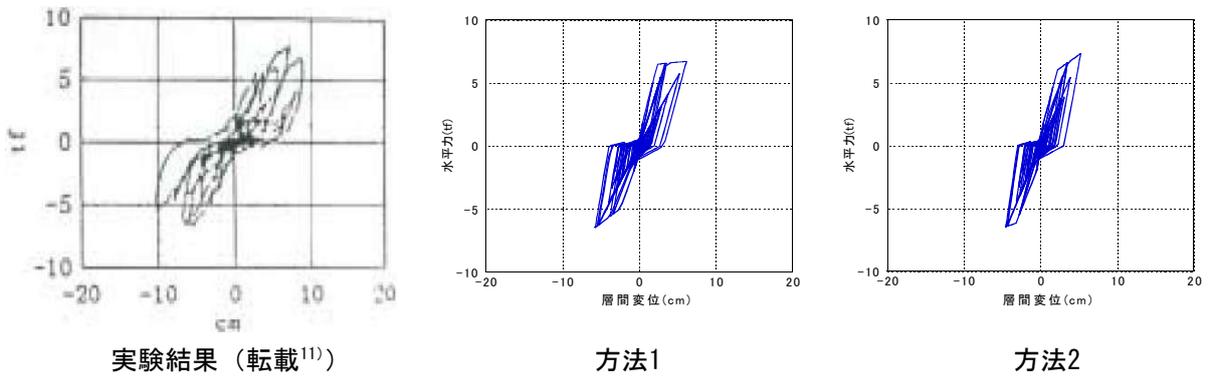


図20 実験結果と解析結果 (実験E)

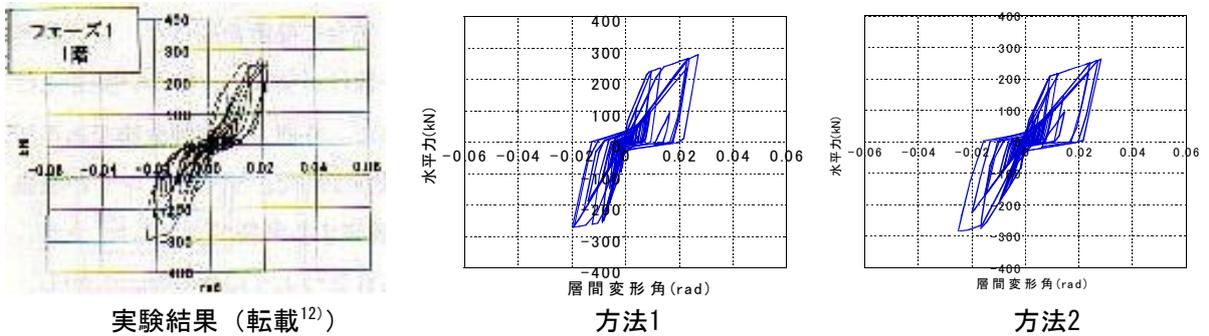


図21 実験結果と解析結果 (実験F)

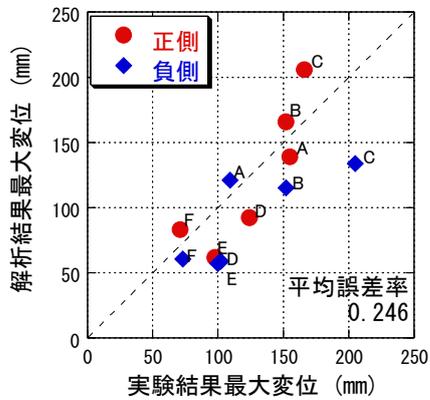


図22 実験と解析の最大変位の比較 (方法1)

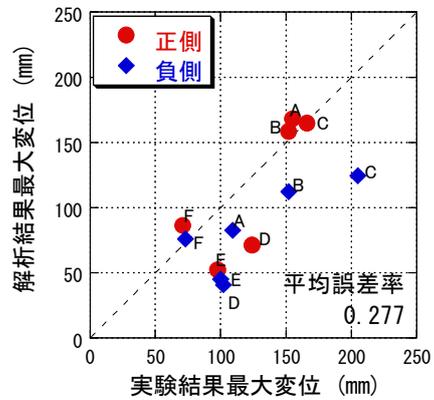


図23 実験と解析の最大変位の比較 (方法2)

## 5. 建物の構造からの復元力特性の推定

### 5.1 復元力特性モデルのパラメタの提案

前章までの解析では、木造建物の実大振動実験結果を基に修正Takeda-Slipモデルのパラメタを定めた。しかし、現実には振動実験を行うことができないため、地震応答解析を行うには、修正Takeda-Slipモデルのパラメタを建物の構造性能から決定する方法を策定する必要がある。本章では、建物を構築する耐力壁の仕様を基に、復元力特性モデルのパラメタを決定する方法を検討する。

木造建物の耐力要素は一般的に壁であり、耐力壁の復元力特性の重ね合わせから、建物全体の挙動を表現することができると考えられる。荒木ら<sup>7)</sup>は、様々な仕様の耐力壁実験のデータを収集し、その復元力特性を Bilinear + Slip モデル (図 24) で表現する際のパラメタを、壁の仕様ごとに提案している。本研究では、この検討結果を基にして、提案された Bilinear + Slip モデルを、修正 Takeda-Slip モデルに置き換えることで、仕様ごとに耐力壁の復元力特性を修正 Takeda-Slip モデルで表す際のパラメタを提案する。

Bilinear + Slip モデルから修正 Takeda-Slip モデルへ置き換える際には、それぞれのモデルが描くループの面積が等しくなるように、以下の方法で修正 Takeda-Slip モデルの各パラメタを設定する (図 25)。まず、第 1 折点の変形を、荒木らに従い 2mrad とし、原点から点 U までの面積が等しくなるように、降伏点と  $\beta$  を定める。Bilinear + Slip モデルの折点は、修正 Takeda-Slip モデルよりも 1 つ多い 3 つであるが、第 3 折点以降の剛性を 0 としている。そこで、第 3 折点まで変形したときの面積に着目した。これによって、原点から点 U までの軌跡は、両モデルで等しくなる。次に、点 U から横軸との交点までの面積が等しくなるように  $\alpha$  を、そこから縦軸までの面積が等しくなるように  $\gamma$  をそれぞれ定める。 $\delta$  は、壁の仕様にかかわらず  $\delta = 1.0$  とした。

求めた各仕様の壁のパラメタを表3に示す。壁は幅が半間 (=910mm) のものを一単位 (以下、1P) としており、初期剛性の値は壁の幅で基準化してある。

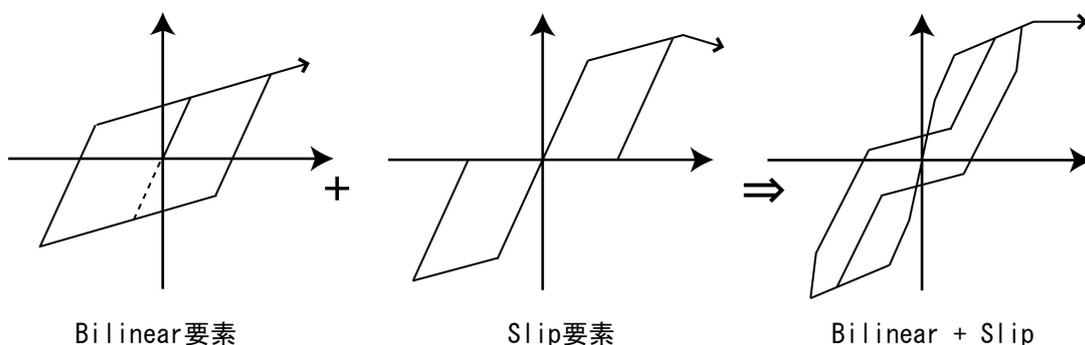


図24 Bilinear + Slipモデル

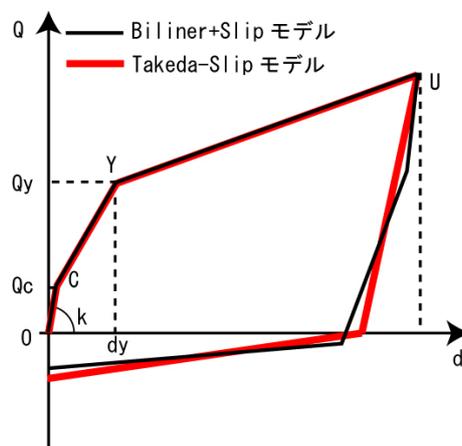


図25 Bilinear + SlipモデルからTakeda-Slipモデルへの置き換え

表3 各壁の仕様及び修正Takeda-Slipモデルのパラメタ

|                             | 筋交仕様 | HD 金物 | k<br>(kN/mrad/m) | $\alpha_y$ | $d_y$<br>(mrad) | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ |
|-----------------------------|------|-------|------------------|------------|-----------------|----------|---------|----------|
| 軸組(筋交)+<br>片面石膏ボード          | 片筋交  | 有     | 1.4              | 0.758      | 5.5             | 0.292    | 0.132   | 4.348    |
|                             | 両筋交  | 有     | 1.6              | 0.743      | 7.5             | 0.219    | 0.202   | 5.354    |
| 軸組(筋交)+<br>石膏ボード+<br>サイディング | 片筋交  | 有     | 2.0              | 0.809      | 5.5             | 0.101    | 0.124   | 3.980    |
|                             | 両筋交  | 有     | 2.1              | 0.800      | 6               | 0.069    | 0.188   | 2.136    |
| 片面石膏ボード+<br>片面サイディング        | 無    | 有     | 1.4              | 0.892      | 5               | 0.025    | 0.034   | 3.653    |

|           | 面材数 | 釘間隔(mm)   |           | HD<br>金物 | k<br>(kN/mrad/m) | $\alpha_y$ | $d_y$<br>(mrad) | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ |
|-----------|-----|-----------|-----------|----------|------------------|------------|-----------------|----------|---------|----------|
|           |     | 外周<br>(縦) | 中枠<br>(横) |          |                  |            |                 |          |         |          |
| 構造用<br>合板 | 片面  | 100       | 100       | 有        | 2.2              | 0.777      | 5.5             | 0.021    | 0.064   | 1.703    |
|           | 片面  | 100       | 200       | 有        | 2.5              | 0.777      | 5.5             | 0.050    | 0.129   | 1.760    |
|           | 両面  | 75        | 75        | 有        | 2.7              | 0.777      | 5.5             | 0.049    | 0.129   | 2.039    |
|           | 片面  | 50        | 50        | 有        | 2.9              | 0.777      | 5.5             | 0.049    | 0.129   | 2.039    |
| 石膏<br>ボード | 片面  | 100       | 200       | 無        | 0.9              | 0.767      | 6.0             | 0.049    | 0.104   | 2.287    |
|           |     | 100       | 150       | 有        | 1.0              | 0.850      | 3.5             | 0.007    | 0.094   | 2.287    |
|           |     | 150       | 150       | 有        | 0.9              | 0.850      | 3.5             | 0.007    | 0.094   | 1.913    |
|           |     | 100       | 200       | 有        | 1.1              | 0.850      | 3.5             | 0.007    | 0.094   | 1.913    |
|           | 両面  | 100       | 150       | 有        | 2.0              | 0.893      | 3.5             | 0        | 0.056   | 2.043    |
|           |     | 150       | 150       | 有        | 1.8              | 0.893      | 3.5             | 0.007    | 0.056   | 1.913    |
|           |     | 100       | 200       | 有        | 2.1              | 0.893      | 3.5             | 0.007    | 0.056   | 2.059    |

|    | 筋交仕様 | 筋交端部  | HD 金物 | k<br>(kN/mrad/m) | $\alpha_y$ | $d_y$<br>(mrad) | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ |
|----|------|-------|-------|------------------|------------|-----------------|----------|---------|----------|
| 筋交 | 片筋交  | 筋交 PL | 有     | 0.8              | 0.785      | 7.0             | 0.007    | 0.064   | 2.059    |
|    | 両筋交  | 筋交 PL | 有     | 1.4              | 0.771      | 8.5             | 0.182    | 0.195   | 5.112    |

## 5.2 壁要素の復元力特性モデルの重ね合わせ

表3に示したパラメタを用いて、建物を構成する1P壁の復元力特性モデル（以下、1Pモデル）を作り、それらを重ね合わせることで実大建物の復元力特性モデル（以下、重ね合わせモデル）を推定する。重ね合わせた後に、その面積を変えることなく、修正Takeda-Slipモデルに置き換えて、重ね合わせモデルのパラメタを決定する。重ね合わせモデルの $d_y$ は、重ね合わせる壁要素の数だけ考えられるため、今回は、全ての壁要素の平均値を用いた。

ここで、例題として、実際に1Pモデルの重ね合わせから重ね合わせモデルを推定し、実大実験結果との比較を行う。対象とする実験は、3章で用いた実験CのY方向のものとする。まず、試験体の壁の仕様をもとに表3から同仕様のパラメタを選び、各1Pモデルを作成する。試験体の外壁には構造用合板と石膏ボードを組み合わせた壁が用いられているが、そのような仕様は表3にないため、ここでは構造用合板のパラメタを用いる。また、構造用合板や内壁に用いられている石膏ボードの釘間隔は明らかでないため、ここでは、構造用合板は縦100mm、横200mm、石膏ボードについては縦100mm、横150mmとした場合のパラメタを用いた。よって、試験体Y方向の耐力壁は片筋交+片面石膏ボードが3枚、構造用合板が6枚、両面石膏ボードが3枚となる。表3のパラメタを用いて作成した各1Pモデルを図26に示す。

次に、図15の各仕様の1Pモデルを、壁の数だけ重ね合わせ（図27実線）、重ね合わせた1Pモデルの囲む面積が変わらないよう修正Takeda-Slipモデルに置き換えて、重ね合わせモデルを作成する。重ね

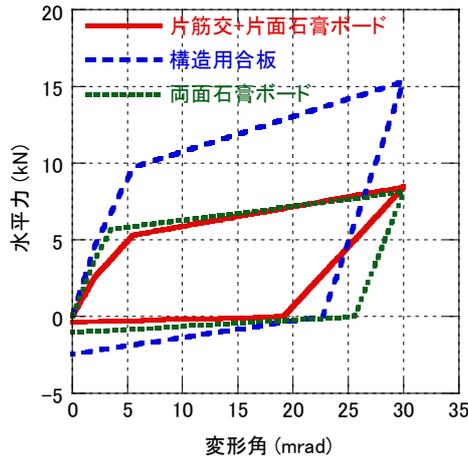


図26 各壁要素の1Pモデル

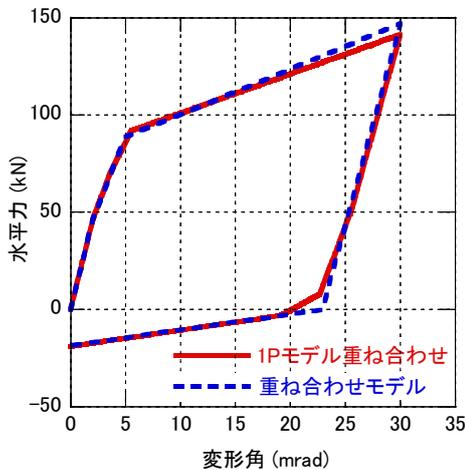


図27 1Pモデルを重ね合わせたものと重ね合わせモデル

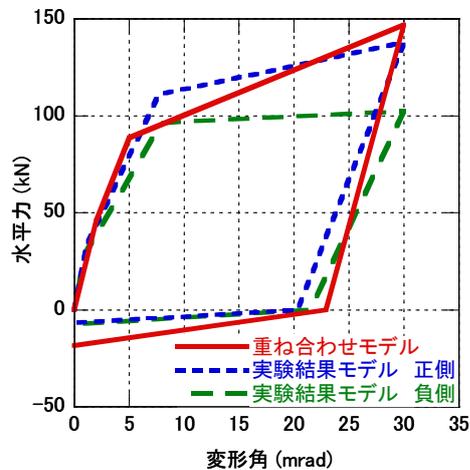


図28 重ね合わせモデルと実験結果モデルの比較

合わせモデルの  $d_y$  は全壁要素の平均より 5.0mrad となる。原点から降伏点までの面積より  $\alpha_y$  を、降伏後の面積より  $\beta$  を、除荷部分の面積より  $\alpha$  を、スリップ部分の面積より  $\gamma$  をそれぞれ求める。1Pモデルを重ね合わせたものと、重ね合わせモデルを図27に破線で示す。また、3章でモデルのパラメタを実大実験結果から方法2で求めたモデル（以下、実験結果モデル）と、本章の重ね合わせモデルを比較したものを図28に、それぞれのモデルのパラメタを表4に示す。重ね合わせモデルは実験結果モデルに比べ、降伏変形が小さいため、降伏後の剛性が大きくなっている。また、重ね合わせモデルは正側の実験結果モデルと比較的似た形を示しているが、負側の実験結果モデルとは大きな差が見られる。これは、壁の仕様のみから復元力特性を求めるため、復元力特性の正負非対称性を考慮できないためである。

表4に示した重ね合わせモデルのパラメタを用いて、修正 Takeda-Slip モデルで地震応答解析を行った。入力地震動は実験と同様に、神戸海洋気象台波（NS 成分）を用いた。重ね合わせモデルによる解析結果を図29に示す。図29を見ると、実験結果（図18）を概ね再現できており、実験結果を基にした解析結果（図18）と比較しても、最大変形に大きな差はない。しかし、前述の通り、降伏点の位置、降伏後の剛性、正負の非対称性などにより、復元力特性の形に違いが見られる。また、この方法は、筋交、金物の有無、釘間隔といった、外見からは判断の難しい情報が必要であり、一般に現存する建物に対して用いることが難しいといった問題点がある。しかし、壁の仕様がわかれば、修正 Takeda-Slip モデルを用いて、任意の建物の復元力特性をある程度推定することができると考えられ、同モデルの有用性を示唆する結果が得られたといえる。

表4 重ね合わせモデルと実験結果モデルのパラメータ

|              | 重ね合わせ<br>モデル | 実験結果モデル |       |
|--------------|--------------|---------|-------|
|              |              | 正側      | 負側    |
| k (kN/mrad)  | 22.93        | 29.14   |       |
| $\alpha_y$   | 0.775        | 0.495   | 0.417 |
| $d_y$ (mrad) | 5.0          | 7.69    | 7.94  |
| $\alpha$     | 0.058        | 0.525   | 0.664 |
| $\beta$      | 0.131        | 0.084   | 0.023 |
| $\gamma$     | 2.176        | 3.783   | 3.592 |

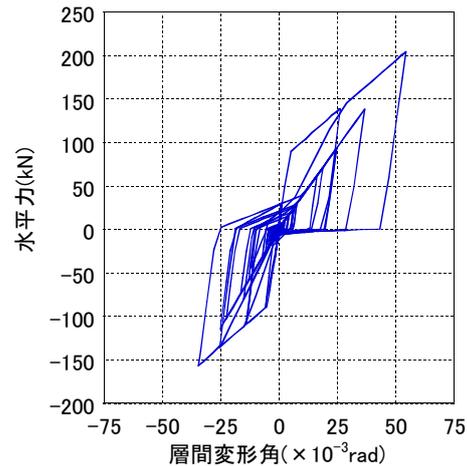


図29 重ね合わせモデルによる解析結果

## 5. まとめ

木造建物の単一ばね一自由度系による地震応答解析を行うために、Takeda-Slipモデルを木造建物の復元力特性を表現できるように修正し、木造建物の復元力特性を単一ばねで表現できる復元力特性モデルを提案した。一自由度系の地震応答解析を行って、6つという限られたものではあるが、実大木造建物の振動実験による復元力特性を再現できるかどうかを検証し、実験結果を概ね再現できることを確認した。また、建物を構築する壁要素の復元力特性の重ね合わせから、建物全体の修正Takeda-Slipモデルのパラメータを設定する方法について検討し、実大振動実験結果をほぼ再現できることを確認した。この方法は、壁要素の仕様について細かな情報が必要であることや、復元力特性の正負非対称性を考慮できないといった問題はあがあるが、修正Takeda-Slipモデルの有用性は確認できた。

## 謝 辞

解析に用いた地震動は、鉄道総合研究所<sup>13)</sup>、気象庁より提供して頂きました。データ解析、地震応答解析、図表の作成などで筑波大学第三学群工学システム学類鈴木達矢氏の大きな協力を得ました。Takeda-Slipモデルのサブルーチンプログラムは、元東京大学小谷俊介先生が開発された一自由度系地震応答解析プログラムSDF<sup>14)</sup>用に東京大学塩原等先生がコーディングされたものに修正を加えて使用させていただきました。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告、建築編4、1998年2月
- 2) 坂本功、大橋好光：木造建物の地震応答解析 - 標準的な在来工法住宅のモデルに関して -、日本建築学会学術講演梗概集、構造系、1984年10月、pp.2651-2652.
- 3) 鈴木三四郎、山田明、浅野幸一郎：軸組住宅の地震応答解析（その1）、日本建築学会学術講演梗概集、C-1、2001年9月、pp.205-206.
- 4) 一反田康啓、岩井哲：木造建物の動的特性に関するデータベース構築と応答解析用復元力履歴モデル、日本建築学会学術講演梗概集、C-1、2000年9月、pp.199-200.
- 5) 米澤和治、鈴木三四郎、浅野幸一郎：木造建物のハードニングを考慮した復元力モデルの考察、日本建築学会学術講演梗概集、C-1、2002年8月、pp.301-302.
- 6) 江戸宏彰、武田寿一：鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答フレーム解析、日本建築学会学術講演梗概集、構造系、1977年10月、pp.1877-1878.
- 7) 荒木康裕、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、No.579、2004年5月、pp.79-86.
- 8) 槌本敬大、坂本功、箕輪親宏、河合直人、五十田博、三宅辰哉、杉本健一、腰原幹雄：実大三次元震

動台を活用した既存木造住宅の耐震性向上に関する研究（その1）、第12回日本地震工学シンポジウム論文集、2006年11月、pp.1086-1089.

9) 室星啓和、村西大介、橋本敏男、村松学、守屋嘉晃、宮澤健二、岩田徹：実大木造住宅の振動大実験手法に関する研究（その5）、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、2005年9月、pp.10-11.

10) 伊藤嘉則、大野義明、大橋好光、大泉慶太、橋本敏男、赤城立也、大橋大祐、清水健次：実大木造住宅の振動大実験手法に関する研究（その8）、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、2005年9月、pp.15-16.

11) 田中裕樹、大橋好光、木村正彦、坂本功：JR鷹取波加振による軸組構法木造住宅の実大実験（その3）、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、1997年9月、pp.157-158.

12) 綿引誠、町田健一、大橋好光、坂本功：実物大建物振動台実験に基づく木造軸組構法住宅の耐震性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.599、2006年1月、pp.103-110.

13) 中村豊、上半文明、井上英司：1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析（II）、JR地震情報、No.23d、1996年3月

14) Shunsuke Otani : Hysteresis Models of Reinforced Concrete for Earthquake Response Analysis, Journal (B), The Faculty of Engineering, University of Tokyo, Vol. XXXVI, No.2, 1981, pp.125-159.

(受理: 2008年3月28日)

(掲載決定: 2009年1月16日)

## **Proposal of Hysteresis Characteristics Model in Seismic Response Analysis using Single-Degree-of-Freedom System for Wooden House**

IIZUKA Hiroaki <sup>1)</sup>, SAKAI Yuki <sup>2)</sup>

1) Student Member, Graduate Student, Graduate Sch. of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba

2) Member, Assoc. Professor, Graduate Sch. of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.

### **ABSTRACT**

We proposed a hysteresis characteristics model for a single-degree-of-freedom wooden house with a single spring to perform earthquake response analyses. We modified ‘Takeda-Slip model’ to represent performance of wooden houses. We decided model’s parameters based on the results of shaking table tests and investigated whether seismic response analyses using the proposed model could reproduce the experimental results. We found that the seismic response analyses could reproduce the experimental results. We also investigated the method of deciding model’s parameters based on characteristics of bearing walls composing a wooden house. We made hysteresis characteristics of a whole structure from combining hysteresis characteristics of each bearing wall, and compared them with the experimental and analytical results using hysteresis characteristics model based on the result of a shaking table test. We got similar results, so we found proposed ‘modified Takeda-Slip model’ was useful for seismic response analyses of wooden houses.

*Key Words: Wooden House, Seismic Response Analysis, Single-Degree-of-Freedom System, Takeda-Slip Model*