

## 木質構造の耐力壁に用いる復元力特性の設定に関する資料

木質構造の復元力特性モデルでは次の特徴<sup>1)</sup>を考慮できる必要がある。

- 繰り返り時のスリップ挙動の後、経験最大荷重の直前で急激に荷重が上昇する挙動を再現できること
- 最大荷重以後の劣化挙動を考慮できること
- 変位ゼロ点付近に特定点をもつこと

これらをほぼ模擬できるモデルとして Bi-linear モデルと Slip モデルを組み合わせたモデル (Bi-linear+Slip モデル, 図 1 に示す) が多く用いられている。ただし、ここで用いる Slip モデルは上記②の挙動を反映させることになるため、骨格曲線には 3 折れ線を、かつ第 3 剛性には負勾配を設定できる必要がある。

復元力特性のモデル化 (骨格曲線のモデル化) については、荷重-変形関係の包絡線から最大荷重  $P_{max}$  や降伏荷重  $P_y$  を決定していく方法が示されている (例えば<sup>2)</sup>) が、さらに五十田ら<sup>1)</sup>は各種耐力壁 (構造用合板, 筋かい, 石膏ボード, サイディング) の平均的特性を与えるものとして、壁倍率指標から Bi-linear+Slip モデルの各パラメータを得るための関係式を提案している。

本資料は、上記①～③を考慮できる Bi-linear+Slip モデルに用いることができる Slip モデルを開発したことに際し、五十田らの提案パラメータの概要、およびこれを用いたモデル設定と解析例を示すものである。ただし文献 1)によると、この提案パラメータによる応答解析結果はほぼ十分な精度であったもののサイディングでの精度がやや悪いことや、さらに提案式に一般性を持たすには今後の検討も必要とあるように、実際の適用では十分な理解が前提である。特に、提案パラメータの検証は 1/24 (rad.) までの載荷実験によったことより、適用範囲は 1/20～1/15 (rad.) 程度以下であることに注意を要する。

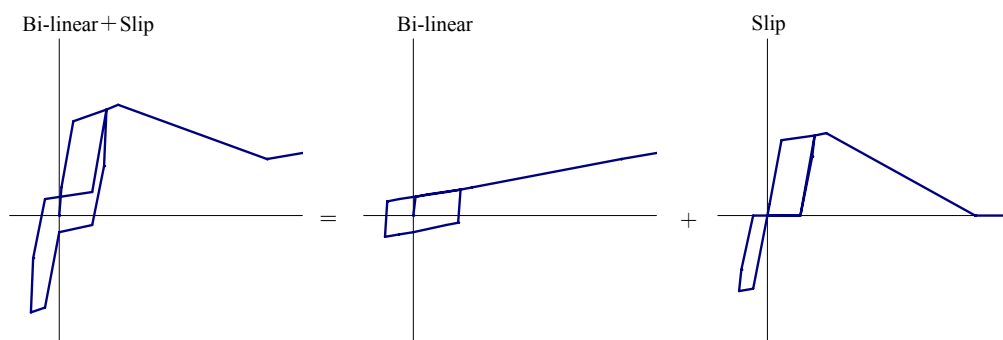


図 1 復元力特性のモデル化

### 1. 壁倍率指標を用いた復元力特性のパラメータ<sup>1)</sup>

まず、降伏荷重  $P_y$  を次式で定義する。

$$P_y = N \times 1.96 \quad (\text{kN}) \quad (N \text{ は壁倍率}) \quad (1)$$

次に、Bi-linear+Slip モデルの第 2 降伏点荷重  $p_2$  は  $P_y$  に一致するとし、同じく第 1 降伏点荷重  $p_1$  との関係を表す次式で表せるものとする。

$$p_2 = P_y, \quad p_1/P_y = 1/5 \quad (2)(3)$$

また第 1 折れ点における Bi-linear 成分の割合を表す次式で表し、さらに Bi-linear 成分の第 2 剛性の第 1 剛性に対する割合を表す次式とする。

$$P_{b,1}/p_1 = 2/3, \quad k_{b,2}/k_{b,1} = 1/20 \quad (4)(5)$$

第 2 折れ点の変形  $d_2$  を次式で与えるものとする。

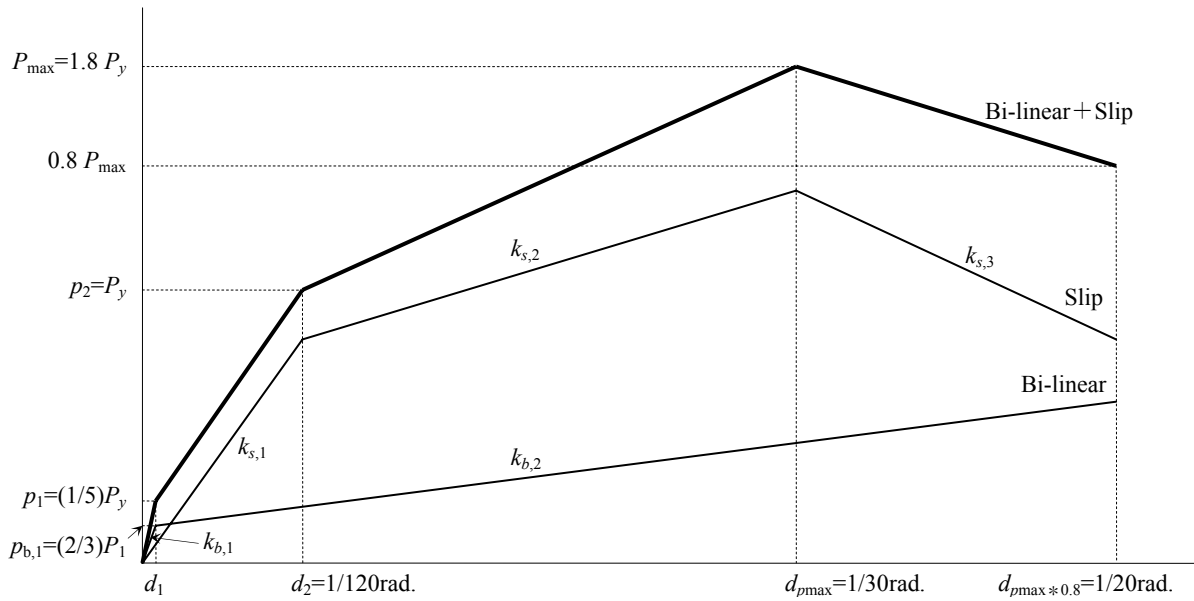


図2 復元力特性モデルのパラメータ（一部設定値を記入）

表1 Bi-linear+Slip モデルの提案パラメータ

|               |           |                          |                                       |
|---------------|-----------|--------------------------|---------------------------------------|
| Bi-linear モデル | 第1 剛性     | $k_{b,1} = 190.5(P_y/h)$ | $P_y = N \times 1.96$ (kN) , $N$ は壁倍率 |
|               | 第1 折れ点 荷重 | $p_{b,1} = 0.13P_y$      |                                       |
|               | 第2 剛性     | $k_{b,2} = 9.53(P_y/h)$  | $(k_{b,2} = 0.05k_{b,1})$             |
| Slip モデル      | 第1 剛性     | $k_{s,1} = 95.3(P_y/h)$  |                                       |
|               | 第1 折れ点 荷重 | $p_{s,1} = 0.79P_y$      |                                       |
|               | 第2 剛性     | $k_{s,2} = 22.5(P_y/h)$  | $(k_{s,2} = 0.24k_{s,1})$             |
|               | 第2 折れ点 荷重 | $p_{s,2} = 1.35P_y$      |                                       |
|               | 第3 剛性     | $k_{s,3} = -31.1(P_y/h)$ | $(k_{s,3} = -0.33k_{s,1})$            |

$$d_2 = (1/120)h \quad (h \text{ は階高}) \quad (6)$$

これらの関係から次式を得る。

$$k_{b,1} = 190.5(p_y/h) , \quad d_1 = 7.0 \times 10^{-4}h , \quad k_{b,2} = 9.53(p_y/h) , \quad k_{s,1} = 95.3(p_y/h) \quad (7)(8)(9)(10)$$

ここで Bi-linear+Slip モデルの骨格曲線が最大荷重点に折れ点を持ち、最大荷重以後、最大荷重×0.8 の点を通ると仮定し、また最大荷重点の変形  $d_{pmax}$  および最大荷重×0.8 まで荷重が低下した点の変形  $d_{pmax*0.8}$  を次式のように仮定する。

$$d_{pmax} = (1/30)h , \quad d_{pmax*0.8} = (1/20)h \quad (11)(12)$$

さらに降伏荷重  $P_y$  と最大荷重  $P_{max}$  の関係を次式とする。

$$P_{max} = 1.80P_y \quad (13)$$

これらの関係から次式を得る。

$$k_{s,2} = 22.5(P_y/h) , \quad k_{s,3} = -31.1(P_y/h) \quad (14)$$

以上より、壁倍率指標から得られる Bi-linear+Slip モデルの各提案パラメータは表1のようにまとまる。ただし各パラメータ設定についての補足事項や注意事項については文献1)を参照されたい。



図3 平面図と立面図<sup>2)</sup>

表2 建築概要<sup>2)</sup>

|       |  |
|-------|--|
| 用途    | 住居   |
| 階数    | 3階建て   |
| 延べ床面積 | 165.63m <sup>3</sup>   |
| 各階床面積 | 3階 53.00m <sup>3</sup> , 2階 53.00m <sup>3</sup> , 1階 59.63m <sup>3</sup> |
| 軒高さ   | 8.60m  |
| 最高高さ  | 10.07m   |
| 各階高   | 3階 2.60m, 2階 2.80m, 1階 2.90m   |
| 屋根仕様  | 彩色スレート葺  |
| 外壁仕様  | 防火サイディング   |
| 構造種別  | 木造軸組構造   |

表3 地震用各階重量<sup>2)</sup>

| 階 | 階重量<br>$W_i$ (kN) | $W_i$ (kN) |
|---|-------------------|------------|
| 3 | 82.24             | 82.24      |
| 2 | 152.03            | 234.27     |
| 1 | 169.53            | 403.80     |

## 2. サンプルデータによるモデル設定例

文献 2)に記載の設計事例 (3 階建て軸組構造住宅, pp.201-230) をサンプルデータとし, 地震応答解析モデルを設定する。表 2 に建築概要を, 図 3 に平面図と立面図を示す。また, 表 3 に各階地震用重量を, 図 4 には耐力壁の壁倍率と各階の耐力壁有効長さを示す。表 1 に示した Bi-linear+Slip モデルの提案パラメータを用いると, 等価せん断型モデルによる振動解析モデルは, 表 4 のように設定できる。

## 3. サンプルデータによる応答解析例

前述のサンプルデータの振動解析モデルによる X 方向の応答解析例を示す。応答解析条件として, 内部粘性減衰係数は瞬間剛性比例型とし 1 次固有周期に対する減衰定数を 5%とした。入力地震動は BCJ-L1<sup>3)</sup>, BCJ-L2<sup>3)</sup>および JMA 神戸 NS<sup>4)</sup> (1995 年兵庫県南部地震, 神戸海洋気象台記録波形 NS 成分) の各々元波とした。これらの地震動では建設地の地盤特性について厳密ではないが, BCJ-L1 は損傷限界 (一次設計) レベル, BCJ-L2 は安全限界 (二次設計) レベル, JMA 神戸 NS は終局限界レベルに相当すると考えられる。図 5 より応答解析プログラム『SS21/DynamicPRO』による操作手順を, 図 9 より解析結果を示す。

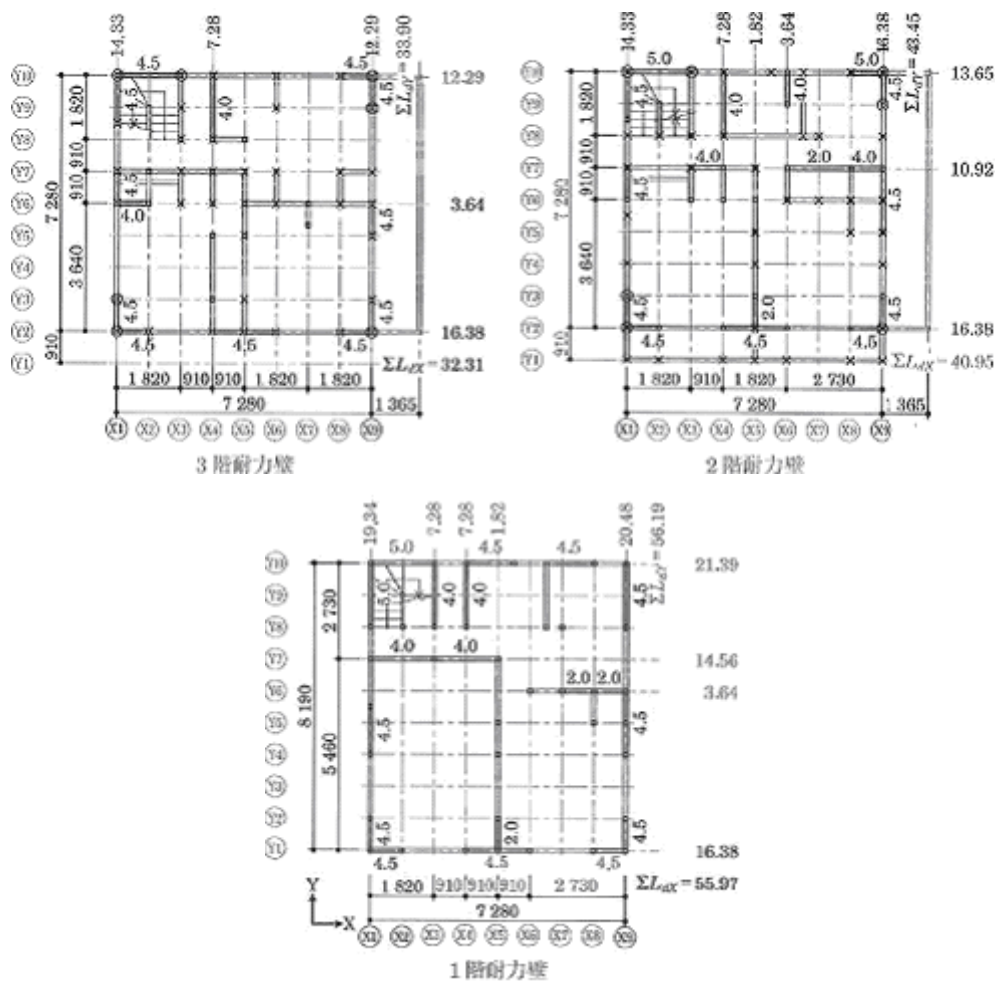


図4 耐力壁の壁倍率と各階の耐力壁有効長さ<sup>2)</sup>

表4 サンプルデータの振動解析モデル

| 方向 | 階 | 階高<br>$H_i$<br>(m) | 層重量<br>$W_i$<br>(kN) | 耐力壁<br>有効長さ<br>$L$<br>(m) | 降伏耐力<br>$Q_y$<br>(kN) | モデル       | 初期剛性<br>$k_1$<br>(kN/cm) | 折点荷重-1<br>$Q_1$<br>(kN) | 剛性<br>低下率-1<br>$k_2/k_1$ | 折点荷重-2<br>$Q_2$<br>(kN) | 剛性<br>低下率-2<br>$k_3/k_1$ |
|----|---|--------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------|-----------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| X  | 3 | 2.60               | 82.24                | 32.31                     | 63.33                 | Bi-linear | 46.40                    | 8.23                    | 0.05                     | —                       | —                        |
|    |   |                    |                      |                           |                       | Slip      | 23.21                    | 50.03                   | 0.24                     | 85.49                   | -0.33                    |
|    | 2 | 2.80               | 152.03               | 40.95                     | 80.26                 | Bi-linear | 54.61                    | 10.43                   | 0.05                     | —                       | —                        |
|    |   |                    |                      |                           |                       | Slip      | 27.32                    | 63.41                   | 0.24                     | 108.35                  | -0.33                    |
|    | 1 | 2.90               | 169.53               | 55.97                     | 109.70                | Bi-linear | 72.06                    | 14.26                   | 0.05                     | —                       | —                        |
|    |   |                    |                      |                           |                       | Slip      | 36.05                    | 86.66                   | 0.24                     | 148.10                  | -0.33                    |
| Y  | 3 | 2.60               | 82.24                | 33.90                     | 66.44                 | Bi-linear | 48.68                    | 8.64                    | 0.05                     | —                       | —                        |
|    |   |                    |                      |                           |                       | Slip      | 24.35                    | 52.49                   | 0.24                     | 89.70                   | -0.33                    |
|    | 2 | 2.80               | 152.03               | 43.45                     | 85.16                 | Bi-linear | 57.94                    | 11.07                   | 0.05                     | —                       | —                        |
|    |   |                    |                      |                           |                       | Slip      | 28.99                    | 67.28                   | 0.24                     | 114.97                  | -0.33                    |
|    | 1 | 2.90               | 169.53               | 56.19                     | 110.13                | Bi-linear | 72.35                    | 14.32                   | 0.05                     | —                       | —                        |
|    |   |                    |                      |                           |                       | Slip      | 36.19                    | 87.00                   | 0.24                     | 148.68                  | -0.33                    |

応答解析結果を概観（ここでは示していない数値結果も合わせて確認）すると以下のことがいえる。損傷限界レベルの BCJ-L1 での応答は、各階のせん断力は降伏せん断力  $Q_y$  以下にとどまっております、履歴ループもほぼ弾性挙動を示している。このときの塑性率は各階 1.0 未満で最大層間変形角は 1 階の 1/124 であった。

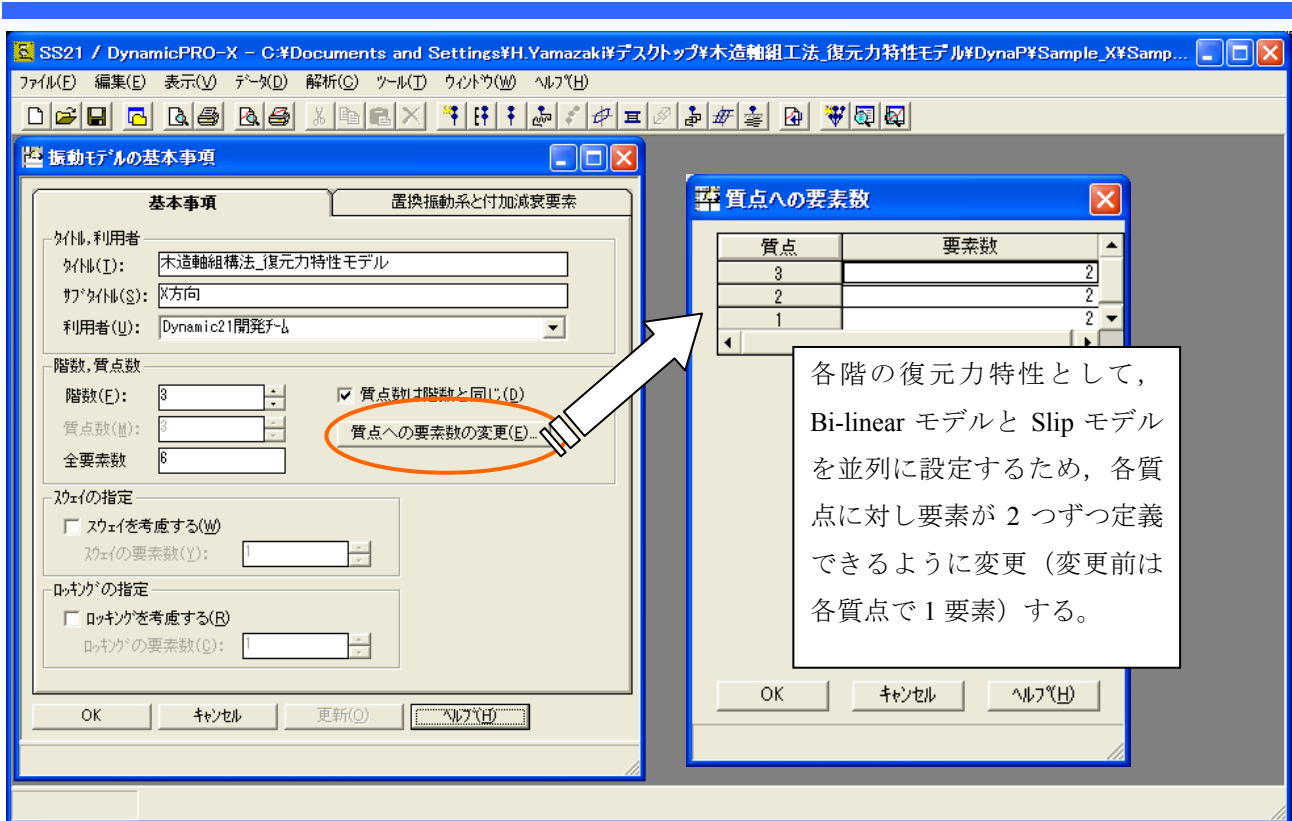


図5 振動モデルの基本事項

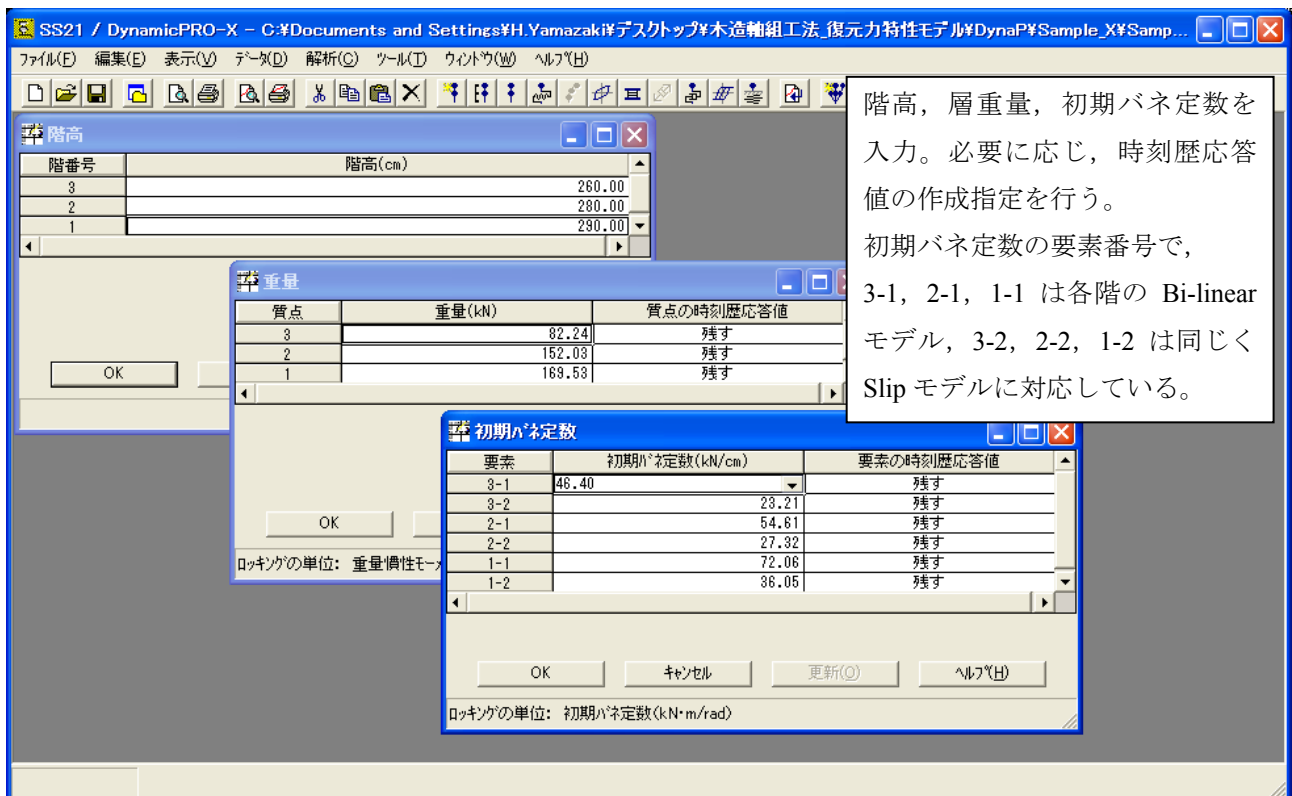


図6 階高，層重量，初期バネ定数

安全限界レベルのBCJ-L2での応答は、1階、2階で $Q_y$ を超え、塑性率が2.6（1階）および3.4（2階）を示したが、最大層間変形角は2階で1/35と、最大荷重点（ $Q=Q_{max}$ ）における層間変形角1/30を超えるレベルではなかった。履歴ループはスリップ挙動を示しながら応答していることがわかる。

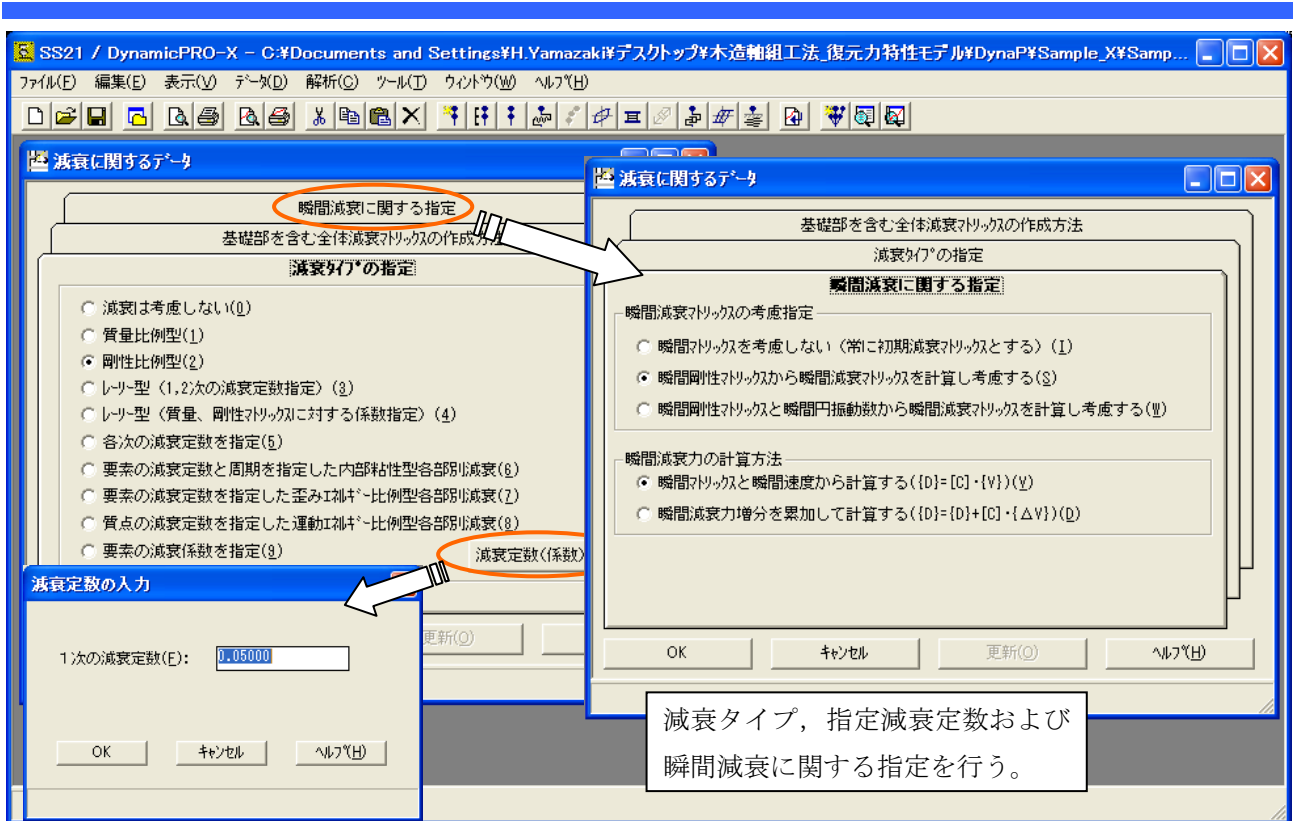


図 7 階高, 層重量, 初期バネ定数

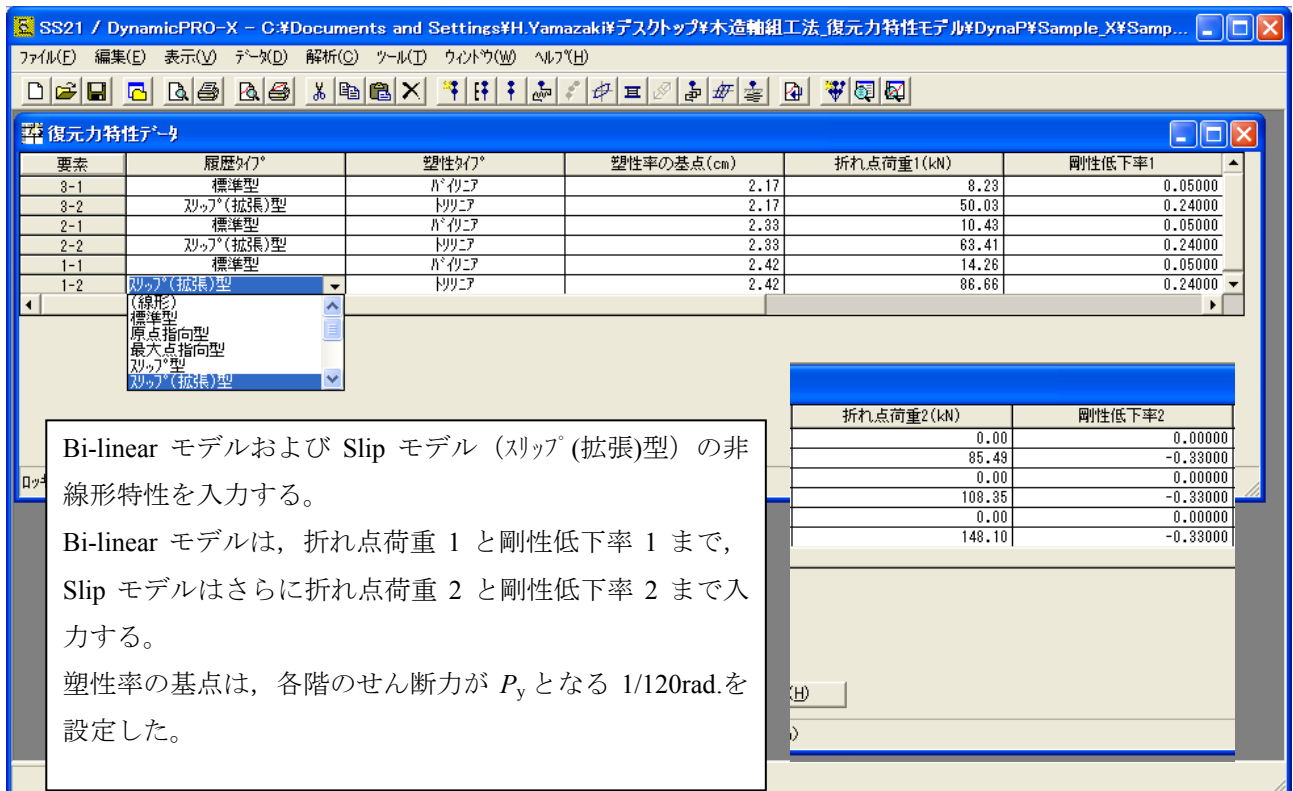
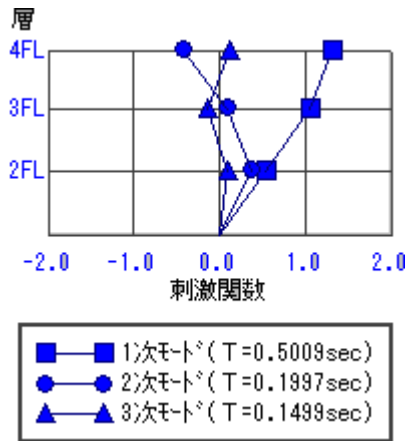


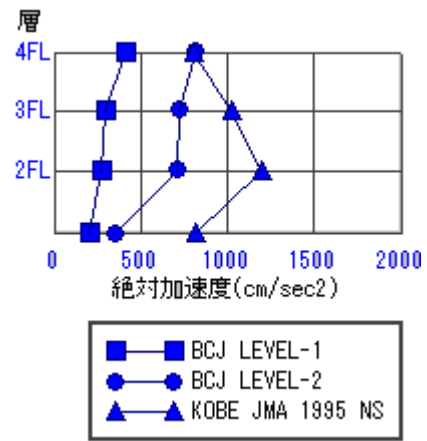
図 8 復元力特性

終局限界レベルの JMA 神戸 NS での応答は, 1 階, 2 階で変形が大きく進行し, 塑性率は 10.9 (1 階) および 14.2 (2 階), 最大層間変形角は 2 階で 1/8 となり, 履歴ループからは最大荷重点を超え, Slip モデルの耐力が完全に劣化したレベルに至っている。ただし, この変形は提案パラメータの適用範囲を超えるものであり, 例えば, 非構造部材を新たに考慮したり, 減衰条件を再検討したりすることも必要であろう。

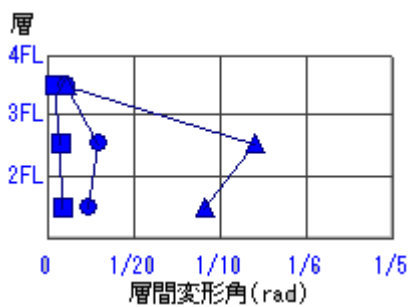




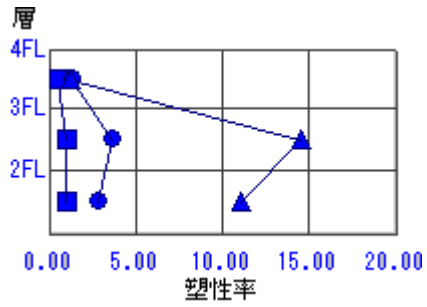
(1) 刺激関数



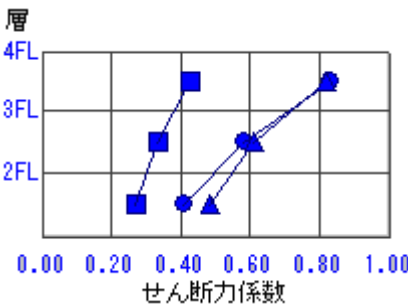
(2) 最大絶対加速度



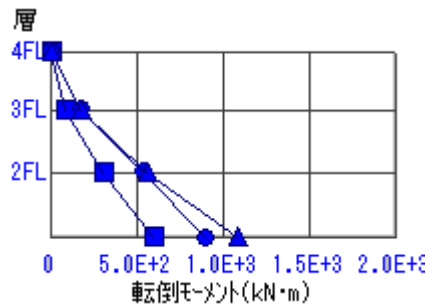
(3) 最大層間変形角



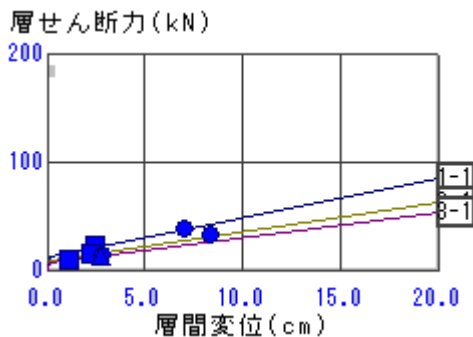
(4) 最大塑性率



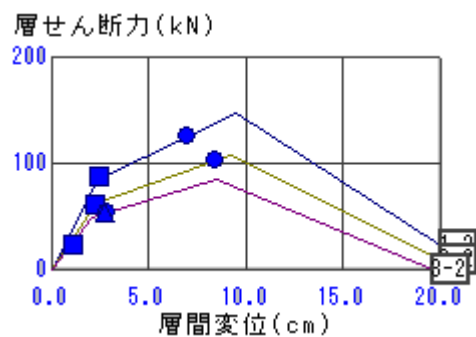
(5) 最大せん断力係数



(6) 最大転倒モーメント

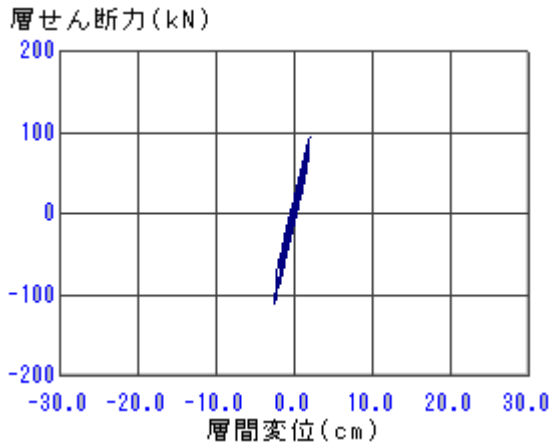


(7) Bi-linear モデル部分の復元力特性と応答値

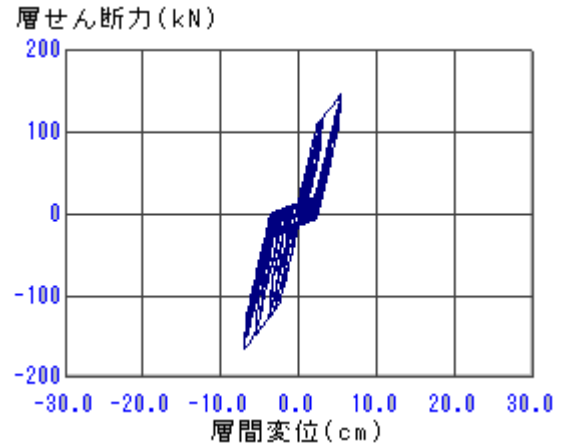


(8) Slip モデル部分の復元力特性と応答値

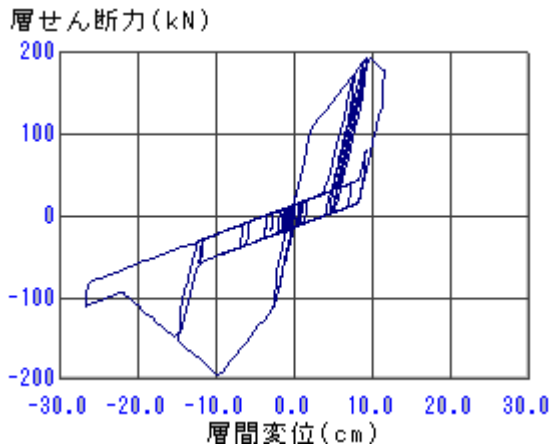
図9 刺激関数と最大応答値 (最大応答値の凡例は絶対加速度に依う)



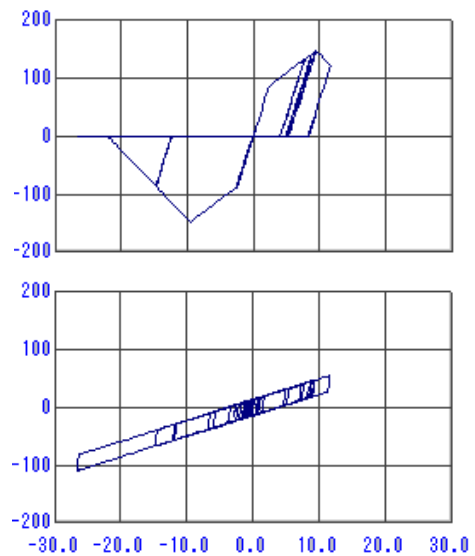
(1) BCJ-L1 での 1 階の応答履歴ループ



(2) BCJ-L2 での 1 階の応答履歴ループ



(3) JMA 神戸 NS での 1 階の応答履歴ループ



(4) 左図 (JMA 神戸 NS での 1 階) の Slip 部分, Bi-linear 部分の応答履歴ループ

図 10 応答履歴ループ

#### 4. まとめ

木質構造の復元力特性モデルを、五十田らの提案パラメータを用いた Bi-linear+Slip モデルとして設定し、地震応答解析の実施例を示した。新築や既存に関わらず、多くの人が居住する木造住宅の耐震安全性の向上はわが国にとって非常に重要なテーマである。地震応答解析は耐震性の評価や居住者への説明手段としての利用効果が大きく、さらに評価結果に応じて耐震補強、免震化、制震化を施した場合の比較検討も簡単に行える。本資料が木造住宅の耐震性向上をめざした取り組みに少しでも参考となれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 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 —木造建物の地震時挙動に関する研究—, 日本建築学会構造系論文集 第 616 号, 2007.6
- 2) 社)日本建築構造技術者協会: 木造建築構造の設計, オーム社, 2006.5
- 3) 建設省建築研究所, 財)日本建築センター: 設計用入力地震動作成手法技術指針 (案), 1992.3
- 4) 財) 日本気象協会: 気象庁 87 型電磁式強震計波形提供リスト