

## はしご型フレームによる伝統木造建造物の耐震補強

Seismic reinforcement of traditional timber structures by ladder-type frames

棚橋 秀光<sup>1</sup> 鈴木 祥之<sup>2</sup>

Hideaki Tanahashi, Yoshiyuki Suzuki

<sup>1</sup> TASS デザイン研究室 主宰 (〒590-0138 堺市南区鴨谷台1-36-9)

Director, Tanahashi Structural Safety Design Institute

<sup>2</sup> 立命館大学グローバルイノベーション研究機構 教授 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

There are many traditional timber structures, such as temples, shrines and town houses in Japan. Their rational seismic evaluation is the most important in order to mitigate probable damages caused by great earthquakes in the near future. Therefore, the establishing the evaluation method and seismic reinforcement are urgently needed. Thus, we applied the Pasternak model to the elasto-plastic embedment behavior of wood joints considering the orthotropic properties and the strain hardening, and established the formulation of the seismic performances. Furthermore, we proposed wooden ladder-type frames for seismic reinforcement of traditional timber structures. Their joints are semi-rigid due to the embedment of contact interfaces inside the joints. In order to confirm their performances, full scale experiments were carried out. Based on their results, we suggest a calculation method of the ladder-type frames for seismic reinforcements.

**Key Words :** *traditional timber structure, seismic reinforcement, Pasternak model*

### 1. はじめに

日本には多くの伝統的な木造建築物が残っているが、来るべき大地震に備えてその耐震性評価と耐震補強が急がれている。しかし、伝統木造は現代の建築技術とは基本的に異なるメカニズムによって成り立っており、その解明は立ち遅れている。

伝統木造建造物の耐震要素としては、太い柱の回転復元力、土壁・板壁のせん断抵抗などもあるが、柱貫仕口に代表される回転抵抗が最も主要な位置を占める。その回転抵抗は、めり込みと摩擦が主な抵抗要素となり、その挙動はめり込みの弾塑性復元力特性に支配される。

木材の全面横圧縮では60%を超える歪レベルに至ると歪硬化現象が認められ、部分圧縮(めり込みと同義)では低い応力レベルからその歪硬化が接触面直下から局部的に始まり、次第に深部に拡大することにより粘り強い復元力が発揮される。

そこで、筆者らは、伝統木造建造物の耐震性評価と耐震補強を目的として、その弾塑性めり込みのメカニズムを、弾塑性パステルナーク・モデル<sup>1)~4)</sup>(EPMと略す)を用いて解明し、仕口の回転抵抗を簡潔な形で定式化し、めり込み実験により検証を行った。

さらに、その粘り強い特性を生かして、伝統木造建造物の耐震補強として効果的なはしご型フレームを提案し、実大実験によりその性能を確認した。

この報告では、EPMを用いた仕口の回転抵抗の定式化の概要とその実験的検証を紹介した上で、寺社建築や伝統的な町家のはしご型フレームによる耐震補強設計の基本的な考え方を紹介する。

## 2. 木材の弾塑性めり込みのメカニズム

### (1) パステルナーク・モデルによる直交異方性木材の弾性表面変位解

パステルナーク・モデル (PM と略す) はウインクラー・モデルの上にせん断層を乗せた力学モデルで、地盤上の基礎の沈下や部分圧縮の解析に有効な力学モデルで、パステルナーク, P.L.(1954)<sup>1)</sup> に由来する。

図 1 に示す剛な基盤上に、幅  $B$ 、高さ  $H$ 、長さ  $2L_0$ 、中央の剛な載荷板による載荷長さ  $2L$ 、載荷端から部材端までの端距離  $\Delta L = L_0 - L$  の部材の 2 次元平面応力解析を行う。下向きの鉛直均等分布荷重  $q$  による PM 表面弾性変位解を(1)式に示す。直交異方性木材の全面圧縮 ( $L = L_0$  の場合) の表面変位を基本圧縮変位  $S$  とすると、部分圧縮における周辺部の影響を考慮した変位は剛性増大率  $\zeta_p$  だけ低減される。周辺部の表面変位  $W_2$  は指数関数で表され、弾性定数に基づく特性値  $\gamma$  が変位の距離に伴う減少度合いを決めるパラメータで、 $L^{-1}$  の単位をもち、無次元特性値  $\gamma H$  はベイヒバの FEM と PM の表面変位解の比較により、2.3~3.0 程度の値が得られている<sup>2)3)</sup>。

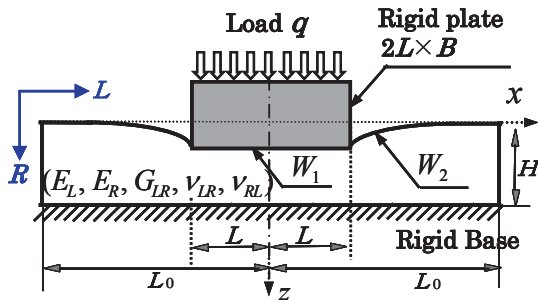


図 1 LR面内の剛な基盤上の有限長直交異方性木材

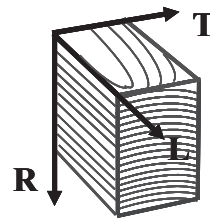


図 2 木材の3方向

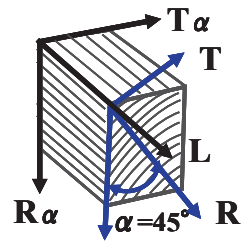


図 3 LTR 平面

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= \frac{S}{\zeta_p} & : & \quad |x| \leq L \\ W_2 &= \frac{S}{\zeta_p} e^{-\gamma|x-L|} & : & \quad L \leq |x| \leq L_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$S = \frac{(1 - \nu_{LR}\nu_{RL})qH}{E_R} : \text{基本圧縮変位}, \quad \zeta_p = 1 + \frac{1 - e^{-\gamma\Delta L}}{\gamma L} = 1 + \frac{1 - e^{-\gamma H\delta}}{\gamma H\lambda} : \text{剛性増大率}$$

$$\delta = \frac{\Delta L}{H} = \frac{L_0 - L}{H} : \text{端距離比}, \quad \lambda = \frac{L}{H} : \text{載荷長さ比}$$

### (2) 木材の横圧縮における歪硬化現象

木材の繊維直交方向の均等めり込み実験、回転めり込み実験において、塑性段階にはいると載荷板直下に歪んで硬化・安定した領域が形成される。木口の年輪の半径方向(LR)、接線方向(LT)および追桁(LTR)の主要 3 方向(図 2、3 参照)の木口をもつヒノキで高さ 30mm 幅 30mm 長さ 30、60、90、150 mm (順に a、b、c、d) の部材の中央に載荷長さ 30mm の鋼板を介して 60%以上の大歪まで載荷するめり込み実験を行い、名目歪 50~60%(真歪では 69~92%に相当するが、本報では名目歪で示す)付近から応力度が急増する応力度—歪曲線

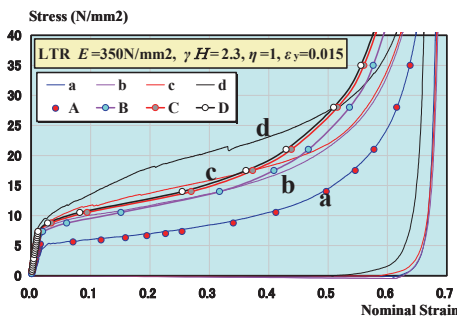


図 4 大歪めり込みの応力度—歪曲線

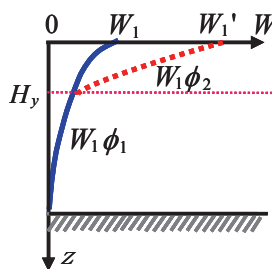


図 5 変位プロファイル

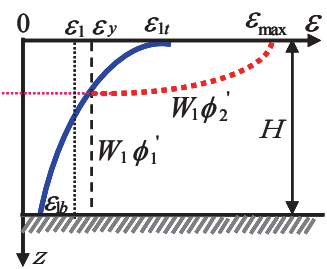


図 6 歪プロファイル

が得られている。図 4 にその追従シリーズの応力度－歪曲線を示す。全面横圧縮に限らず、部分横圧縮でも主要な年輪傾角においていずれも歪硬化が明瞭に現れることが確認できる。

### (3) 均等めり込みにおける弾塑性歪分布と EPM

PM では均等めり込み部直下の鉛直変位分布は図 5 の  $W_1\phi_1$  で、鉛直歪分布は図 6 の歪プロファイルの  $W_1\phi_1'$  で表され、塑性段階に入ると歪分布が  $H_y$  より上部で  $W_1\phi_2'$  に増大するメカニズムを考える。その歪分布を鉛直方向に積分することにより、弾塑性の変位分布  $W_1\phi_2$ 、表面変位  $W_1\phi_1'$  を得て、均等めり込みの弾塑性復元力特性を(2)式で表す。 $E$  は横圧縮ヤング係数である。

ここで、大歪全面圧縮の応力度－歪関係は、実験結果を用いて図 7 の  $\varepsilon_h(z)$  で表し、則元<sup>5)</sup>による定式化を参考にして行った。そのシミュレーション結果を図 4 に A - D とし重ねて示す。

(2)(3)式の剛性関数  $\zeta_p(\varepsilon_1)$  は分子に(1)式の弾性段階の剛性増大率を含み、分母は降伏深さ比  $h_y$  と平均歪増大率  $m$  による塑性歪増大による剛性の低下を表すもので、実用近似式として(4)式による。 $\kappa$  は、検討しようとする歪の塑性領域への進入度(5)式で表され、降伏比と称する。特性値  $\gamma$  は前述のとおりである。このメカニズムの基となるモデルは、PM を基本にしてめり込みの弾塑性状態へ拡張したもので、弾塑性パステルナーク・モデル(EPM)<sup>4)</sup>と称する。

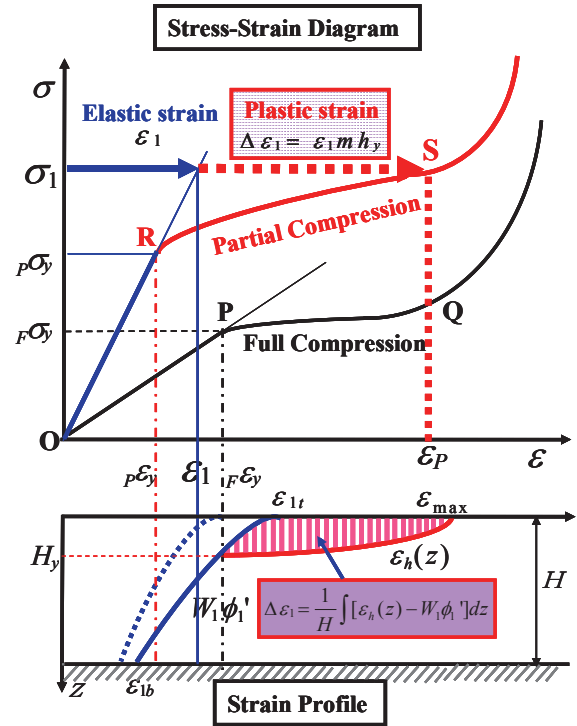


図 7 部分圧縮の降伏メカニズム

$$\text{応力度－歪関係： } \varepsilon_p = \frac{\sigma_1}{E \zeta_p(\varepsilon_1)} \quad (2)$$

$$\text{剛性関数： } \zeta_p(\varepsilon_1) = \frac{1 + \frac{1 - e^{-\gamma \Delta L}}{\gamma L}}{1 + m h_y} \quad (3)$$

$$\text{実用近似式： } \left\{ \begin{array}{l} \text{平均増大率： } m = C(1 - 1/\kappa) \\ \text{降伏深さ比： } h_y = \frac{H_y}{H} = \frac{1}{\eta} \ln \kappa : (0 \leq h_y \leq 1) \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$\text{ここで、} C: \text{定数, } \kappa = \frac{\varepsilon_1 \eta}{F \varepsilon_y} = \frac{\sigma_1}{p \sigma_y} : \text{降伏比} \quad (5)$$

$$\text{実用歪分布： } W_1\phi_1' = \varepsilon_1 \eta e^{-\eta \frac{z}{H}}, \quad p \varepsilon_y = \frac{F \varepsilon_y}{\eta} \quad (6)$$

## 3. 回転めり込みの定式化

### (1) EPM による T 型仕口の回転めり込みの定式化

以上のめり込みメカニズムを差鴨居・はしご型フレームを含む T 型回転めり込みに適用し、図 8 を参照して仕口のモーメント－回転角の関係を以下の 4 つの仮定に基づいて(7)(8)式のように定式化した。

- ① 仕口はめり込む以外の変形はしない（曲げ・せん断変形はない）ものとし、回転角  $\theta$  に伴い外力・反力の釣り合いから中心 O が座標(a, b)に移動した状態の幾何学的関係で接触長さ  $L$  とめり込み量が決まるが、簡略化のため弾性・塑性段階含めて、ここではその位置は移動しないとして扱う。従って、 $L$  は一定値（柱幅の 1/2 または弦材の高さの 1/2）とする。
- ② めり込みは繊維直交方向にのみ生ずる。
- ③ めり込み反力は接触長さ  $L$  とほぞ突出部の端距離  $\Delta L$  に応じ、有限長 EPM に従う。ちなみに、図 8 の上

部は $\Delta L \geq 5L$ で実質 $\Delta L = \infty$ 、下部は $\Delta L = 0$ である。

④ めり込み反力に伴う摩擦力はクーロン摩擦として、めり込み反力に摩擦係数 $\mu$ を掛けたものとする。

ここで、 $K_{R0}$ 、 $K_{F0}$ は接触面のみの基本回転剛性で、剛性関数 $\zeta_R(\theta)$ 、 $\zeta_F(\theta)$ との積により、回転抵抗モーメントを弾性・塑性段階を含めて統一的に表現した。また、 $\kappa$ は均等めり込みの場合と同じで、歪または回転角の降伏比である。

$$\theta_p = \frac{M}{\sum K_{R0} \zeta_R(\theta) + \sum \mu K_{F0} \zeta_F(\theta)} \quad (7)$$

$$\zeta_R(\theta) = \frac{1 + \frac{3}{\gamma L} \left[ \left(1 + \frac{1}{\gamma L}\right) (1 - e^{-\gamma \Delta L}) - \frac{\Delta L}{L} e^{-\gamma \Delta L} \right]}{1 + m h_y} : \text{回転による剛性関数}$$

$$\zeta_F(\theta) = \frac{1 + \frac{2}{\gamma L} (1 - e^{-\gamma \Delta L})}{1 + m h_y} : \text{摩擦による剛性関数}$$

$$K_{R0} = \frac{2EBL^3}{3H} : \text{端距離ゼロの基本回転剛性}, \quad K_{F0} = \frac{EBL^2}{2} : \text{端距離ゼロの摩擦による基本回転剛性} :$$

$\mu$  : 摩擦係数,  $E$ : 横圧縮ヤング係数,  $B$ : 束厚さ,  $H$ : 束高さ,  $L$ : 接触長さ,  $\Delta L$ : 端距離

$$\text{実用近似式: } m = C(1 - 1/\kappa), \quad h_y = \frac{H_y}{H} = \frac{1}{\eta} \ln \kappa : (0 < h_y < 1) \quad (8)$$

$$\text{ここで, } \kappa = \frac{\theta \eta}{\theta_y} = \frac{\varepsilon \eta}{\varepsilon_y} : \text{降伏比}$$

## (2) T型仕口回転めりこみ実験の概要

はしご型フレームの仕口の回転めり込みの定式化を確認するために行ったT型仕口の実大実験の概要を示す。

図9の実験セットアップに示すように、試験体の束に相当する材のほぞは、高さ100mm×厚さ30mmのヒノキ材（木口はLT：接線方向めり込み）とし、弦材・柱に相当する部材は実際の仕口の木材相互のめり込みを再現するために、ヒノキの木ブロック（高さ100mm×長さ150mm×厚さ40mm）を繊維方向を水平に、鋼板を介して反力フレームに高力ボルト摩擦接合で固定した。試験パラメータは、図10のように、込み栓の有無、摩擦の低減の有無、突出ほぞと切り欠きを設けたもの8種類、各3体とした。材料による違いが出ないように極力同一材を用い、図10の矢印の加力方向で名称が変わる。左向き矢印T、TKは摩擦低減なし、右向き矢印のTF、TKFは摩擦低減シリーズで、Fの記号を付けて区別した。込み栓は15mm角のカシを用い、込み栓無試験体と同様に木ブロックの芯と同じ高さが回転中心となるよう設置し、歪ゲージ付支持鋼材で支持し、反力・移動位置を計測した。摩擦低減シリーズは、一方向加力を行った材にめり込みの生じていない残りの接触面にテフロンシート（厚さ0.8mm）を挟んで逆方向に加力する要領で行った。加力は、一方向単調载荷とし、最大変位は仕口の回転角で0.2radとしたが、込み栓有試験体の一部は一方向漸増繰返し加力とした。試験体の仕口部の表面にグリッドを記入し、めり込み変形、回転、移動を撮影・観察した。実験後、仕口の試験体から切り出した試験片で材料実験を行い、縦および横圧縮ヤング係数を求めた。試験体の平均含水率11.1%、平均密度は0.463g/cm<sup>3</sup>であった。

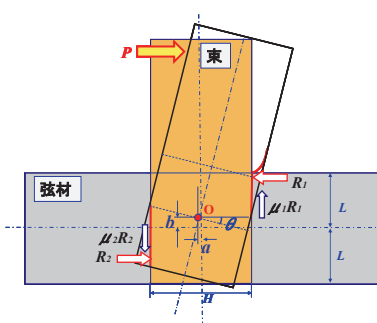


図8 T型仕口の回転めり込みメカニズム

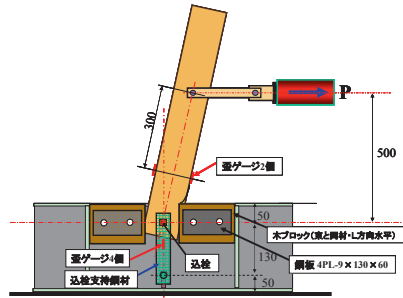


図9 T型仕口の実験セットアップ

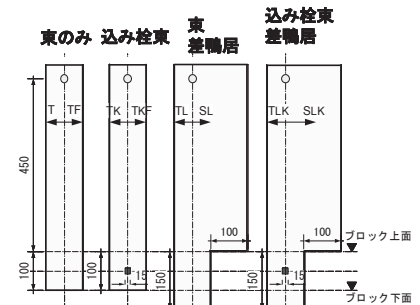


図10 T型仕口の試験体

### (3) 実験結果と提案式の検証

十字型貫を用いた既往のヒノキの回転めり込み実験では、PMの無次元特性値 $\gamma H$ については、有効高さ $H$ を貫の高さの75%で評価しベイヒバに倣い、LR、LTで $\gamma H=4$ 、LTRで $\gamma H=3$ とし、 $\eta=2$ 、めり込みの水平側面反力を含む摩擦係数 $\mu=0.5-0.7$ 、 $C=8$ 程度で実験値とよく合う結果を得ている<sup>4)</sup>。また、別途行っためり込み載荷面の摩擦実験より得た摩擦係数は、テフロンと木・鋼材0.1、木材相互のめり込みのみ0.4-0.5、めり込みによる水平側面反力は等価な摩擦係数で0.1-0.2程度を得た<sup>6)</sup>。

これらの結果を総合して、水平側面反力を含む等価な摩擦係数を0.5として、回転角—モーメント関係の実験結果とEPM解析との比較を、最も標準的なT型仕口の例で図11に示す。十字型に比べ降伏後の耐力増加は少ない傾向があるが、回転しながら抜け出す現象と関連していると見られる。回転めり込みのEPM解析用パラメータは、 $\gamma H=4$ （追衤のみ3）、 $\eta=2$ とすると実験結果とよく合っており、メカニズムと定式化の妥当性を示すものと考えるが、十字型に比べ $C=24-30$ と比較的大きい。

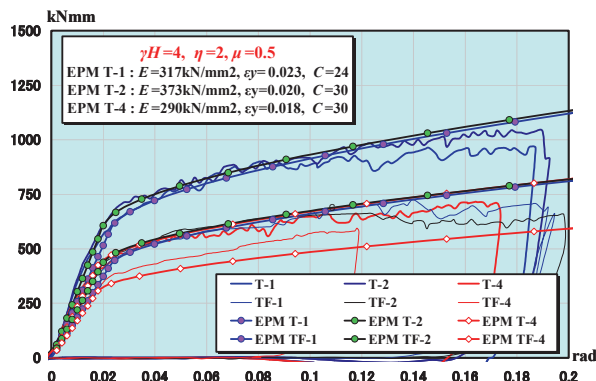


図11 T型仕口T・TFの比較

## 4. はしご型フレーム耐震補強

### (1) はしご型フレームの復元力特性

靱性の高いバイリニア的な復元力特性をもつ回転めり込み抵抗を効果的に活用し、伝統木造建築物への有効な耐震補強要素として、住宅用（図12）と社寺用（図13）のはしご型フレームを提案した<sup>7)</sup>。その復元力特性を確認するために、図14のように、2本の鉄骨柱（高さ $H_s$ ）に組み込み、柱頭に静的な水平載荷による実験的検証を行った。

はしご型フレームの試験体を2本の鉄骨柱に組み込んだため、層間変形には束のT型仕口の回転めり込みによる変形に部材の曲げ変形が付加される。その変形を考慮するために図15の束本数 $n=3$ 、束の間隔を $2b$ （簡略化のために均等間隔とする）、束高さ $2h$ のはしご型フレームの上弦が柱頭から $H_1$ の高さ

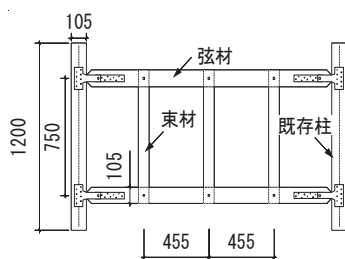


図12 住宅用試験体

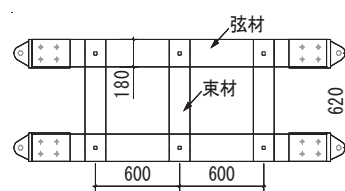


図13 社寺用試験体

表1 対象試験体 一覧

No.	試験体名	束の間隔	束の断面	束弦材接合	弦材	樹種
1	住宅_標準	455mm	60mm×75mm	12mm角栓留め	105mm×105mm	ヒノキ
2	住宅_束幅60		60mm×60mm			
3	住宅_束幅90		60mm×90mm			
4	住宅_束厚75		75mm×75mm			
5	社寺_標準	600mm	90mm×150mm	20mm角栓留め	180mm×180mm	ヒノキ

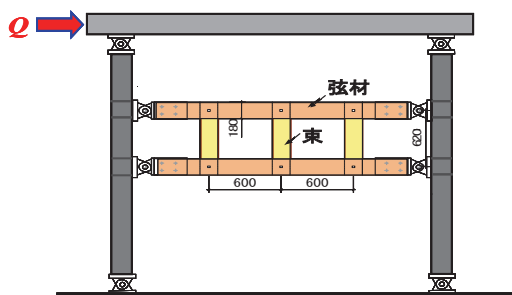


図14 柱付のはしご型フレームの実験セットアップ

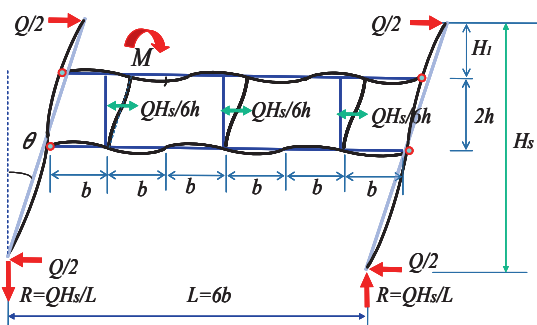


図15 柱付のはしご型フレームの解析モデル

に取り付く解析モデルを考え、柱頭の静的水平加力 $Q$ （仕口1個あたりのモーメント $M=QH_s/6$ ）と層間変形 $\theta$ の関係で復元力を整理する。

その層間変形角は仕口のめり込みによる回転角 $\theta_p$ 、束の曲げ変形による回転角 $\theta_t$ 、梁（弦材）の曲げ変形による回転角 $\theta_b$ 、柱の曲げ変形による回転角 $\theta_c$ の合計となり、軸変形・仕口のシヤーパネルも含むせん断変形は無視している。その関係を(9)–(14)式に示す。

$I_b E_b, I_t E_t, I_c E_c$ は梁、束、柱の曲げ剛性である。部材の曲げ剛性が十分大きい場合は、めり込み以外の回転角は無視できて、(9)式はめり込みによる回転角 $\theta_p$ のみとなる。(14)式の $\beta$ は補強材の取り付く高さにより柱の曲げ変形の変化を表すパラメータで、高さ中央の場合が $\beta=1$ で柱の曲げ変形・曲げモーメントが最小値をとり、最上部に取り付く場合が $\beta=4$ で最大となる。

水平力 $Q$ –層間変形角 $\theta$ ：

$$\theta = \theta_p + \theta_b + \theta_t + \theta_c \quad (9)$$

$$\theta_p = \frac{QH_s}{2n[\sum K_{R0}\zeta_R(\theta) + \sum \mu K_{F0}\zeta_F(\theta)]} : \text{めり込みによる回転角} \quad (10)$$

$$\theta_b = \frac{QH_s b}{12nE_b I_b} : \text{梁の曲げ変形による回転角} \quad (11)$$

$$\theta_t = \frac{QH_s h}{6nE_t I_t} : \text{束の曲げ変形による回転角} \quad (12)$$

$$\theta_c = \frac{QH_s^2}{24E_c I_c} \beta \left(1 - \frac{2h}{H_s}\right)^2 : \text{柱の曲げ変形による回転角} \quad (13)$$

$$\text{ここで } \beta = \frac{3}{(H_s - 2h)^2} (2H_1 - H_s + 2h)^2 + 1 \quad (14)$$

$$H_1 = 0 \text{ および } H_1 = H_s - 2h \text{ の場合: } \beta = 4, \quad H_1 = H_s / 2 - h \text{ の場合: } \beta = 1$$

## (2) はしご型フレームの実験概要

EPM での評価と実験結果を比較するために、フレームを含む水平力 $Q$ –層間変形角 $\theta$ の実験結果(EXP)と合わせて図16、17に示す。破線はフレームの変形を無視しためり込み変形のみの場合を示し、実線は前述したフレームの変形(弾性変形のみ)を考慮した $Q$ – $\theta$ 関係である。

はしご型フレームは層間変形角0.025–0.035rad付近で降伏後、0.15rad程度までは、抵抗力が増大し続ける特徴をもち、補強材としては効果的であることが確認できた。ただし、木材のめり込み塑性変形は一般に復元せず、繰り返しの際にはがたつきとなる特性があり、履歴エネルギーの吸収能力を含めて適切に評価する必要がある。なお、このはしご型フレームに粘性ダンパーを装備することで履歴エネルギーの吸収能力を高め、より効果的な補強が可能になることを確認している<sup>8)</sup>。

全体として、パラメータを適切に設定することで、めり込みによる仕口の回転のみでなくフレームとしての変形を考慮することで初期剛性、塑性変形後の履歴曲線の骨格曲線に相当する形で良く対応した結果が得られたと判断している。

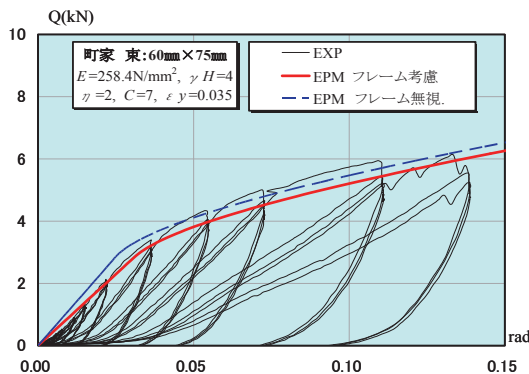


図16 住宅\_東60×75mm試験体

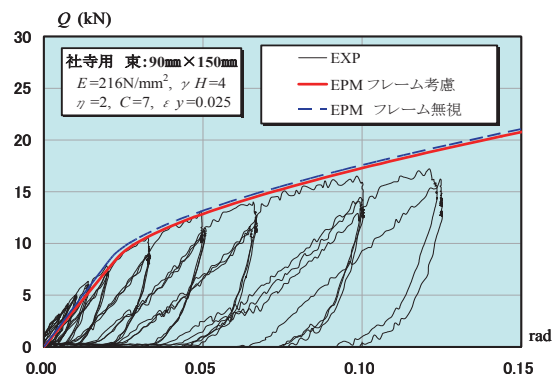


図17 社寺\_標準試験体(東90×150mm)

### (3) はしご型フレームの耐震設計の基本的な考え方

はしご型フレームの設計にあたっては、前述のように、仕口の回転復元力特性を定式化しているの、それを架構解析の接合部に非線形回転ばね剛性を取り入れて解析を行うことができる。必要に応じて、降伏後の弦材・束・柱の破壊のチェックも行い、崩壊や不安定な挙動を避けることが必要である。

柱とはしご型フレームの接合は、柱に付加モーメントを発生させないために、原則としてピン接合とする。その詳細は図 12, 13 が参考になる。

住宅などの耐震補強設計では限界耐力計算による簡易な設計を基本とする。

住宅用の補強材はスパン・階高・柱の寸法などは比較的限定されるので、標準的な部材の復元力特性の 1 例を図 18 に示す。

参考に、はしご型フレームの実験値と形状が似た土壁の小壁付きの門型フレームの復元力特性<sup>9)</sup>を併せて示す。\*印は小壁付きの門型フレームの変形限界 1/15 を示す。それと比較して、はしご型フレームの弾性剛性は小さいが耐力が増大し続ける特徴がある。

この補強材の復元力特性を、伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル<sup>9)</sup>に従って他の耐震要素と同様に重ね合わせて計算すればよい。

図 18 の実験値との差は主に、階高・弾性定数・フレームの取り付け位置によるフレーム変形による。(14)式によれば、補強材の取り付け高さがゼロすなわち補強材が最上部または最下部に位置したときの柱の曲げ変形が最大となり、実験のように中央部に取り付く場合の 4 倍になる。柱の剛性が十分大きい場合は無視できるが、町家用の場合は、無視できない場合もあるので、その考慮が必要である。

横圧縮ヤング係数に関しては、束の木口が追桎の場合を含めて暫定的に縦圧縮ヤング係数の 1/50 としているが、パラメータ含めて、見直しの可能性がある。

階高が図 18 と異なる場合は、水平力を近似的に階高に逆比例するように微調整を行う。また、弦材・束・柱の応力度のチェックのために弦材・束・柱の最大曲げモーメント  $M_b, M_t, M_c$  などを図 19 に示すので参考にされたい。

この考え方をもとに、実務的な適用に向けて、はしご型フレームの設計要領の充実をはかる予定である。

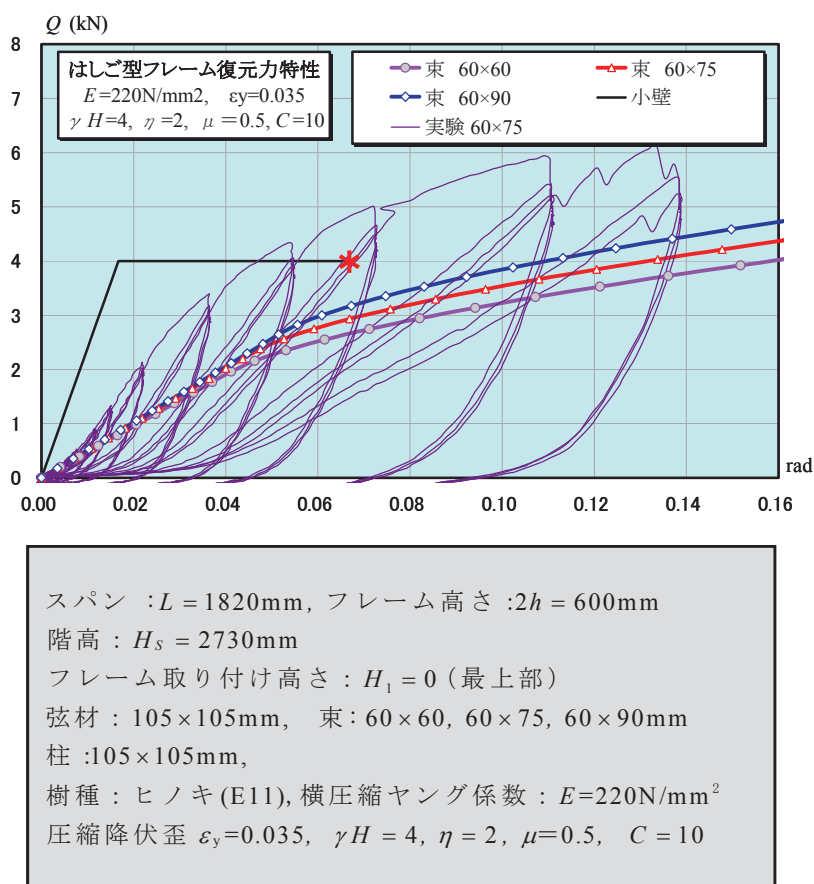


図 18 柱付のはしご型フレームの復元力特性

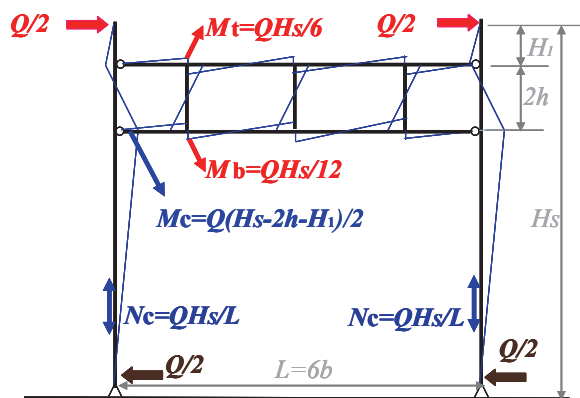


図 19 柱付のはしご型フレームの応力図

## 5. まとめ

本研究の主な結論は以下のようまとめられる。

- ① 歪硬化を考慮した弾塑性パステルナーク・モデルを用いて、直交異方性木材の弾塑性めり込みメカニズムを解明した。
- ② 均等めり込みおよび回転めり込みの弾塑性めり込み復元力特性を、剛性関数を導入して統一的に簡潔な形で定式化した。
- ③ 伝統構法に特有の仕口（接合部）の回転めり込み実験を行い、その結果を弾塑性回転モーメント提案式と比較検証を行うことで、十字型・T 型貫接合部の仕口のめり込みメカニズムと剛性・耐力評価の定式化の妥当性を確認した。
- ④ 回転めり込みの特性を生かした伝統構法用の耐震補強材として、はしご型フレームを提案し、その定式化と実験的検証によりその有効性を示すとともに、実用化のための設計手法の基本的な考え方を示した。

なお、本研究では静的な復元力特性の骨格曲線の定式化に重点があり、がたつき、繰り返し履歴を含めた動的解析のための履歴ルールの検討も必要であり、パラメータの設定法、はしご型フレームの設計手法の提案などを含めて、引き続き伝統木造構造物の耐震性能評価・耐震補強・保存のための研究を進める予定である。

**謝辞：**本研究の一部は京大生存圏研究所・木質材料実験棟平成 19 年度共同利用研究（研究代表者：棚橋秀光）、および科学研究費補助金基盤研究(S)（課題番号：19106010、研究代表者：鈴木祥之）による。ご協力いただいた関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Pasternak P. L.: On a new method of analysis of an elastic foundation by means of two foundation constants, Gosudarstvennoe Izdatelstvo Literatury po Stroitelstvu i Arkhitekture, Moscow, 1954 (in Russian).
- 2) 棚橋秀光・清水秀丸・鈴木祥之：パステルナーク・モデルに基づく直交異方性木材の部分圧縮による弾性表面変位，日本建築学会構造系論文集，No.609, pp.129-136, 2006.11.
- 3) 棚橋秀光・清水秀丸・堀江秀夫・楊 萍・鈴木祥之：パステルナーク・モデルに基づく有限長直交異方性木材の弾性めり込み変位，日本建築学会構造系論文集，Vol.73, No.625, pp.417-424, 2008.3.
- 4) Tanahashi H., Okamura, M., and Suzuki Y.: Simple formulation of elasto-plastic embedment behavior of orthotropic wood considering densification, Proceedings of the World Conference of Timber Engineering 2008, paper.217(CD-ROM), Miyazaki, Japan, 2008.6.
- 5) 則元 京：木材の圧縮大変形，木材学会誌，Vol.39, No.8, pp.867-874, 1993.
- 6) 和泉智也・岡村雅克・棚橋秀光・鈴木祥之：伝統木造仕口の回転めり込みにおける摩擦係数，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ, pp.375-376, 2008.9.
- 7) 白山敦子・鈴木祥之・佐々木孝史：伝統木造軸組の梯子状梁による耐震補強，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，No.0241, pp.1070-1073, 2006.11.
- 8) 白山敦子・鈴木祥之：高減衰粘弾性ダンパーを用いた梯子状梁による耐震補強効果，日本建築学会技術報告集，第14巻，第27号，pp.55-59, 2008.6.
- 9) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアルー限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法，学芸出版社，2004.