

# 木材の部分横圧縮のひずみ硬化のメカニズムとシミュレーション

Strain hardening mechanism of lateral partial compression of wood and its simulation

棚橋秀光<sup>1</sup>・鈴木祥之<sup>2</sup>

Hideaki Tanahashi and Yoshiyuki Suzuki

<sup>1</sup>立命館大学客員研究員 衣笠総合研究機構 (〒603-8341 京都市北区小松原北町 58)

Visiting Researcher, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

<sup>2</sup>立命館大学客員研究員・京都大学名誉教授 衣笠総合研究機構 (〒603-8341 京都市北区小松原北町 58)

Visiting Researcher, Ritsumeikan University and Prof. Emeritus of Kyoto University, Kinugasa Research Organization

This paper shows the mechanism of the strain hardening which is found in the behaviors of lateral compression in wood. The strain hardening behaviors have already been examined and formulated by some researchers. However, they were limited within full compression. Therefore, the authors study the mechanism of partial compression in details and try to formulate the stress-strain relation of the strain hardening behaviors in partial compression. Thus, Elasto-plastic Hardening Pasternak Model (EHPM) formulation is proposed on the basis of the Elasto-plastic Pasternak Model (EPM) which have already been proposed by the authors and the validity of the formulation is verified by the simulation.

**Keywords :** traditional wooden joint, lateral partial compression, strain hardening, mechanism, simulation

## 1. はじめに

伝統木造建築物の接合部の耐震性能評価において、部分横圧縮またはめり込み挙動が重要な役割を担っており、その適切な評価は重要な意義をもつ。その部分横圧縮挙動は、縦圧縮に比べ剛性は小さいが靱性に富み、大変形に至るまで圧縮に抵抗し続ける特性がある。その背景には、回転めり込みに伴うひずみ硬化挙動があり、大変形時でも安定した変形性能を示す主要な要因となっている。

このひずみ硬化挙動については、著者らはすでに既往研究<sup>1)2)3)</sup>で、均等部分横圧縮挙動の基本的な特性とメカニズムの説明の中で解明を行っている。ここで改めて整理すると、木材の均等部分横圧縮試験において、JIS Z 2101に規定されている木材の横圧縮試験の0.1~0.2のひずみを超えて荷重を増大させると、ひずみ0.4~0.5前後から応力度が次第に増加し始めた後に急増し、最大ひずみ0.7程度まで至って、それ以上ひずみがほとんど増大しなくなる挙動のことである<sup>3)</sup>。これを木材内部の繊維の挙動で見ると、圧縮により木材組織の細胞壁が座屈して空隙が狭くなって圧縮ひずみが増大し(降伏に相当)、座屈した細胞壁どうしが接触さらには密着して空隙が減少するとそれ以上の圧縮変位がほとんど生じなくなり、剛性・強度が急上昇する現象<sup>4)</sup>で、圧密化<sup>5)6)</sup>[注1]ということがある。横圧縮であれば、年輪傾角に関わらず起きる現象である<sup>3)</sup>。

著者らは、この挙動とそのメカニズムを活用して、接合部の回転めり込み挙動に弾塑性パステルナーキ・モデル(EPM)に基づく弾塑性解析を提案した<sup>3)7)</sup>。均等部分横圧縮試験の応力度—ひずみ度曲線(SSカーブ)は、次章で示すようにZ型のカーブを示すが、ひずみ硬化のシミュレーションについては、若干の検討を行った<sup>8)</sup>ものの、ひずみ0.3以上では精度よいシミュレーションには至らなかった。

そこで、本論文は、伝統木造建築物の接合部の均等部分横圧縮に見られるひずみ硬化挙動に焦点を絞り、その実験結果による挙動のメカニズムを改めて検討し、より精度よいシミュレーションを試みる。

## 2. 大変形に至る均等部分横圧縮試験の概要

### (1) 均等部分横圧縮試験の概要

樹種はひのきで、図1に示す幅  $B:30\text{mm}$ 、高さ  $H:30\text{mm}$ 、長さ  $2L:30、60、90、150\text{mm}$  の4種類、各1個を同一部材から採取して、均等部分横圧縮試験を行った。剛な基盤と試験体との接触条件は、鉛直下向き：固定、上向き：自由、水平変位：摩擦係数（0.4程度）以下は固定、それ以上は自由である。試験体符号は、短いものから順に **a**、**b**、**c**、**d** とする。載荷板は  $30 \times 42\text{mm}$  の鋼板を用いて載荷した。木口の年輪傾角は半径方向から45度程度回転した追柵の試験体で行った。試験体側面には5mm間隔のグリッドを記入し、変形状況が分かりやすいようにした。計測項目は、載荷装置のクロスヘッドの試験体の両側の2か所の変位量および載荷装置の荷重である。載荷は載荷速度毎分1mmで一方向圧縮載荷とし、変位20mmで荷重をゼロにもどして終了した。載荷中の変形状況をカメラ撮影を行い、めり込み変形、クラックなどの状況を観察した。材料定数は文献<sup>3)</sup>に準じ、全面横圧縮の試験体 **a** の圧縮応力度については圧縮荷重(N)/ $900(\text{mm}^2)$ 、圧縮ひずみは圧縮変位(mm)/ $30(\text{mm})$ を求め、そのグラフの初期の直線部分の勾配を横圧縮ヤング係数： $350\text{MPa}$ 、その直線と剛性が急減する降伏後の近似直線との交点のひずみを降伏ひずみ： $0.015$ 、その応力度を降伏応力度[注2]： $5.25\text{MPa}$ とした。含水率は高周波木材水分計により平均9.2%、密度は平均 $0.488\text{g/cm}^3$ であった。

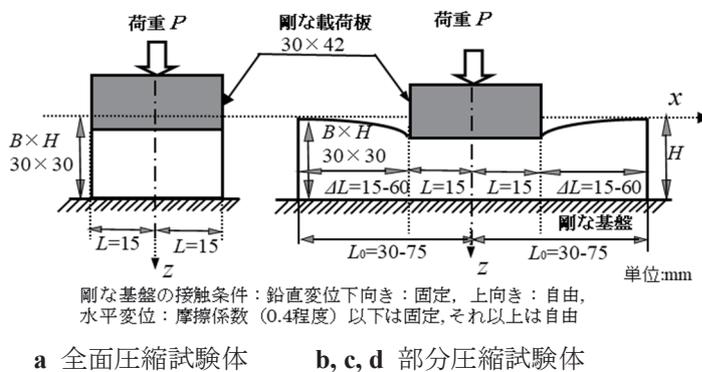


図1 大ひずみ圧縮試験体と載荷方法

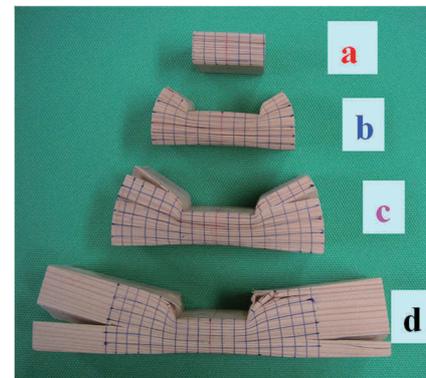


図2 試験体の載荷後の変形状況

### (2) 試験体の大変形横圧縮挙動と変形状況

試験体の載荷後の変形状況を図2に、試験結果の圧縮ひずみ  $\epsilon$  と載荷面積 ( $30 \times 30\text{mm}$ ) 当たりの圧縮応力度  $\sigma$  の関係、すなわち SS カーブをグラフに示したのが図3である。

降伏ひずみまで直線的に進んだ後、降伏が起こり剛性が低下する。いずれの試験体も、降伏後も荷重は上昇を続け、ひずみ 0.2–0.4 あたりから、グラフが下に凸になり、0.5 を超えるあたりから、急上昇を始め、グラフはほぼ垂直に近づいて最大ひずみ 0.7 近くに達して荷重ゼロに戻る。

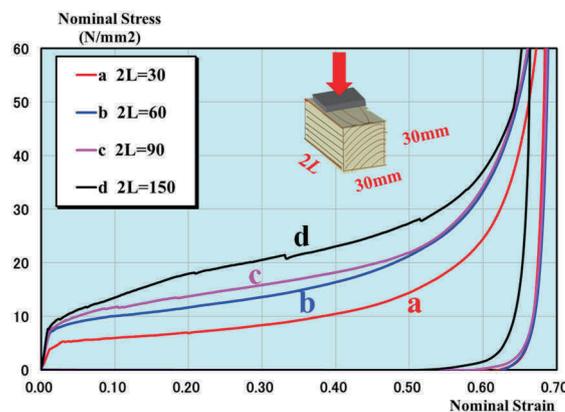


図3 大ひずみに至る実験結果の応力度—ひずみ関係

試験体の変形状況は、試験体 **a** は全面横圧縮であり、均等に圧縮され、載荷終了後には若干の変形量のも

どりがあり、図2のように圧縮されたままの状況となっている。すなわち残留変形が15mm程度見られ、正方形のグリッドの高さがほぼ半分の長方形となっており、試験体上部と下部との差異はほとんど見られない均一な圧縮となっている。

試験体 **b**、**c**、**d** はいずれも、部分横圧縮であり、荷重初期には荷重板直下部では上部にひずみが集中し、皺が見られるが、下部では目立った変形は見られなかった。しかし、荷重が増大して、変形が15mm程度になると、荷重板直下部ではほぼ均一な状態になった。直接荷重を受けない荷重板の外部（端部）は荷重板のめり込みに引きずられるような変形を示し、木口に割裂も生じ、一部繊維の破断も見られた。

### 3. 大変形に至る部分横圧縮のひずみ硬化のメカニズム

著者らはすでに、図4に示すEPM解析の部分横圧縮の降伏メカニズムの概念図を提案し<sup>1)2)3)</sup>、降伏から塑性ひずみが進行する過程を解明してきたが、ひずみ硬化のメカニズムは必ずしも十分解明できていなかった。

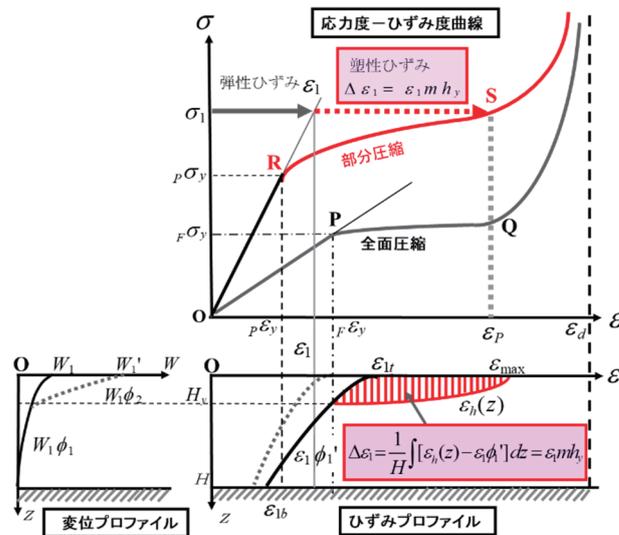


図4 EPM解析における部分横圧縮の降伏メカニズムの概念図

そこで、降伏後、ひずみ硬化に至る挙動を解明するために、最大ひずみに至る過程を、以下のように全面横圧縮と部分横圧縮の4ステップに分けて詳細に論ずる。

**全面横圧縮**：図は省くが、ひずみ分布は部材の上部から下部にわたり一様で、ひずみプロファイルは鉛直な直線となり、ひずみ度が降伏ひずみ $\epsilon_y$ に達すれば、完全弾塑性材料であれば原理的には一斉に降伏する。これは図4のP点に対応する。その応力度を全面横圧縮降伏応力度 $r\sigma_y$ とする。しかし、実際には細胞組織の様々なばらつきにより、降伏が必ずしも一斉とならないため、図3の **a** のように降伏点は一点の折れ線ではなく、なだらかに折れ曲がるカーブを描く。また、均一な完全弾塑性材料であれば降伏後のSSカーブは完全な水平線となるはずであるが、降伏後の微小な塑性剛性により緩い上昇が見られるとともに、Q点に達してグラフが急上昇する。ひずみ増加に伴い、柔らかい早材（1年間の年輪の成長において早い時期に形成される部分）から硬い晩材（同遅い時期に形成される部分）に細胞壁の座屈が順次おこり<sup>4)5)</sup>、さらに細胞壁どうしの接触・圧密がおこると、剛性が急増してグラフは見かけ上、垂直に近づくと考えられる。このことにより圧縮抵抗は維持され、破壊に至ることはない。これが木材の横圧縮挙動の安定した主要因となっている。なお、ひずみ硬化は全面横圧縮・部分横圧縮に関わらず、横圧縮の降伏後に起こる特有な材料特性と言える。

**ステップ1**：EPM解析では、部分横圧縮の部材内部のひずみ分布を示すひずみプロファイル（形状関数）を(1)式の $\phi_s$ で表し、平均ひずみ $\epsilon_1$ 、表面で最大ひずみ $\epsilon_{1t} = \epsilon_1 \eta$ 、底面で最小ひずみ $\epsilon_{1b} = \epsilon_1 \eta e^{-\eta}$ の上に凸なカーブの分布<sup>3)</sup>を仮定している。ここで $\eta$ はひずみの形状関数のパラメータで後掲の(10)式で表すが、均等部分横圧縮では1から1.5程度の値を取る<sup>3)</sup>。このひずみプロファイルは、弾塑性の全過程で変化しないものと仮定する。

$$\phi_s = \eta e^{-\eta \frac{\epsilon}{H}} \quad (1)$$

以下、図5、6の4ステップのひずみ分布の進行過程とSSカーブの概念図を参照しながら、各ステップのひずみ硬化の過程とメカニズムを分析する。

部分横圧縮の場合は、載荷版の外部（端部：図1の $\triangle L$ の範囲）のめり込みに伴う荷重負担により全面横圧縮の **a** より強度・剛性が増加し、弾性剛性は後掲の(4)式の剛性増大率<sup>3)</sup>に従い、弾性範囲では図4のORの直線をたどる。表面のひずみ  $\epsilon_{1t}$  が全面横圧縮降伏ひずみ  $F\epsilon_y$  を超えると降伏が始まると考える。降伏すると図5の  $\epsilon_1 \phi_1'$  を超える塑性ひずみ  $\Delta\epsilon_1 = (\text{赤線範囲の面積})/H$  が付加されてひずみが増大すると考えて、R点で剛性低下が始まる。これが部分横圧縮の場合の降伏現象であり、その時の応力度が部分横圧縮降伏応力度  $p\sigma_y$  である。

降伏後は、塑性ひずみ  $\Delta\epsilon_1$  の増加に応じて剛性低下が進み、若干の勾配をもって上昇はするが、上に凸な緩いSSカーブを描く。さらに進むとカーブが反転して下に凸なカーブに移行する。その反曲点をA点とし、この段階までをステップ1とする。部材内部では表面から降伏ひずみ  $F\epsilon_y$  を超える深さまで降伏が生ずると考え、その下限を  $H_y$  とすると、 $h_y = H_y/H$  を降伏深さ比と称し、荷重の増大に伴いこの  $h_y$  は次第に増加する。

この段階の降伏ひずみの分布形状  $\epsilon_h(z)$  は必ずしも明らかではないが、全面横圧縮のSSカーブ **a** と相似形の下に凸な曲線が想定される。表面で最大値  $\epsilon_{\max}$  をとるとすれば最大値  $\epsilon_{\max}$  は有限な範囲に留まることから、降伏後の塑性変形を安定させる重要な要因と考えられる。一般の構造物の接合部の弾塑性挙動はこの段階までの繰り返しに留まる。

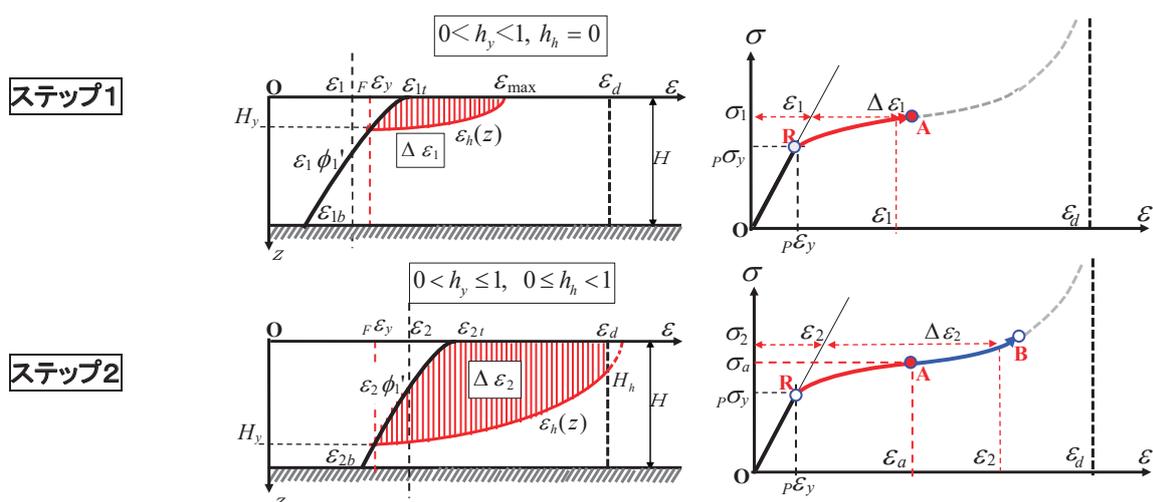


図5 降伏からひずみ硬化に至るステップ1, 2の塑性ひずみ分布とSSカーブの概念図

**ステップ2**：この段階では、最大ひずみ  $\epsilon_{\max}$  がどこまで増加しうるかということと底面のひずみが降伏に達するかどうか、ポイントとなる。木材の横圧縮の降伏現象が、上述のように部材の空隙が狭くなり始めることで変形が進行するとの説明ができるが、空隙は有限であるため、どこかで空隙がほぼなくなり、繊維どうしが接触してそれ以上は、繊維自体の横圧縮に移行する限界があることが推察される。この限界のひずみを劉・則元<sup>6)</sup>は圧密ひずみ  $\epsilon_d$  と定義しており、本論でもそれにならう。圧縮進行にともなう細胞壁の接触・重なりが、早材・晩材の差異、細胞のばらつきなどにより、最上部から順次圧密が進行し、圧密ひずみに達すると塑性ひずみ増加が頭打ちとなるため、剛性が増加しSSカーブは上昇を始める。この挙動をひずみ硬化と称する。このような挙動は、空隙の多い材料に特有のもので、一般的にCellular solid の特性である<sup>8)</sup>。圧密ひずみは樹種によるが、本実験のひのきでは0.7程度と考えられる。

圧縮の進行に伴い、最大ひずみ  $\epsilon_{\max}$  がどの段階でこの圧密ひずみに達するかということは、現段階では分かっていないが、表面から深さ  $H_h$  まで圧密ひずみに達し ( $h_h = H_h/H$  とすると  $h_h > 0$ )、塑性ひずみの増加傾向が鈍り、結果として下に凸なカーブが始まると考える。その開始点がA点に相当すると考えると、これがひとつのクリティカルポイントで反曲点のひずみが  $\epsilon_a$  である。このA点を越え塑性ひずみが底面に達するB点まで、 $H_y$ 、 $H_h$  が増大する段階をステップ2とする。ただし、全面横圧縮試験体 **a** に見られるSSカーブは、

ステップ1の過程を経ないでR点からステップ2に移行すると考える。

**ステップ3**：深さ方向にも降伏が進行し、降伏範囲が底面に達すると、 $h_y=1$ となり塑性ひずみ $\Delta\epsilon_1$ の範囲が底面までに限定され、ひずみ増加傾向がさらに鈍り、SSカーブの上昇傾向が強まる。その開始点をBとし、もうひとつのクリティカルポイントとなり、次のD点（ $h_h=1$ に対応する点）までをステップ3とする。SSカーブ上でA、B点を判別するのは必ずしも容易ではないが、後述するシミュレーション結果で見ると、A、Bの順に進行すると推定するが、順序の逆転がありうるかは今後の検討に待ちたい。

**ステップ4**：底面のひずみが降伏した後さらに荷重が増加し、底面のひずみ、最大部のひずみがすべて圧密ひずみ $\epsilon_d$ に達する、すなわち $h_h=1$ となり、降伏領域のひずみは全面的に圧密ひずみになる。この点をDとし、それ以降の段階をステップ4とする。このD点以降は若干の空隙が残りうるが細胞壁自体の圧縮<sup>45)</sup>となり、E点に向かう新たな圧密木材（または圧縮木材）の立ち上がりとなる。本実験ではその段階に至っているかどうかは明確ではないが、今後の実験的な検討課題となる。

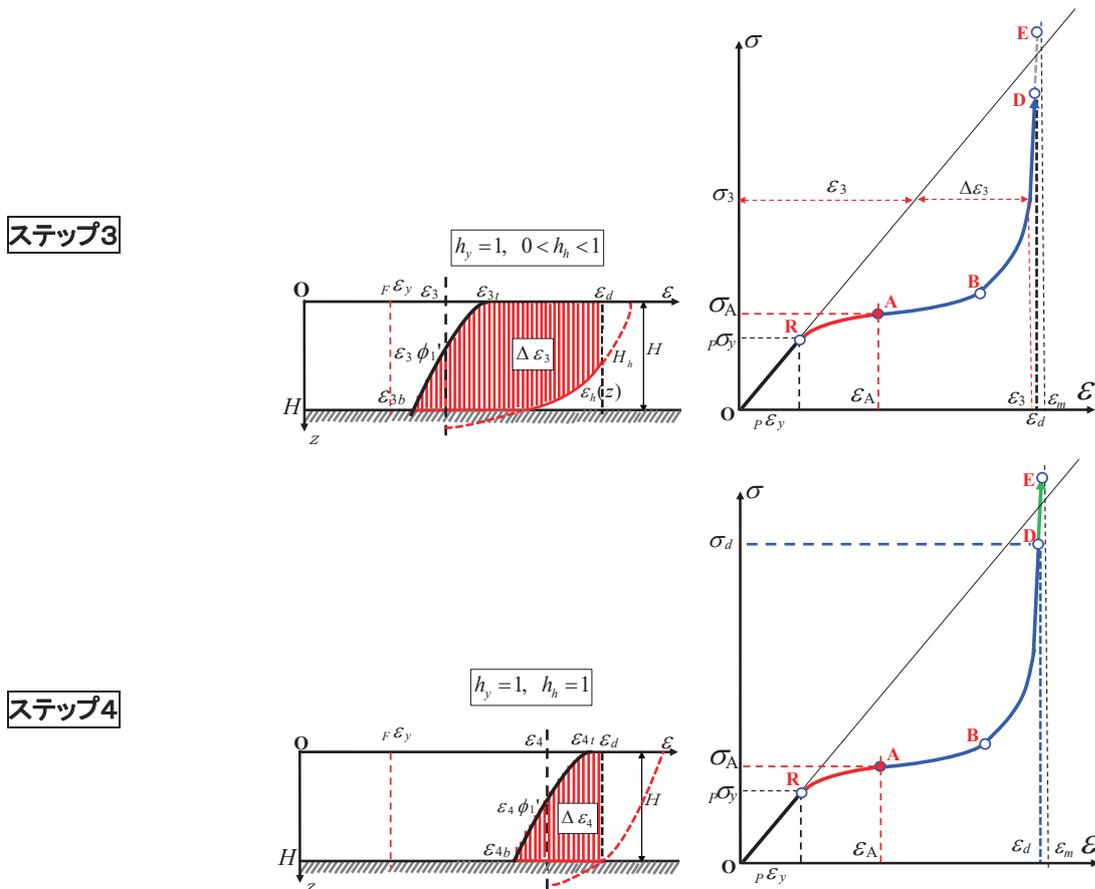


図6 降伏からひずみ硬化に至るステップ3、4の塑性ひずみ分布とSSカーブの概念図

このステップ3までのひずみ硬化現象は、全面横圧縮の場合には、則元ら<sup>46)</sup>によってすでに各種の広葉樹の半径方向圧縮の実験結果に基づいて解明されており、以下の定式化が提案されている。

$$\epsilon \leq \epsilon_y: \sigma = \epsilon E$$

$$\epsilon > \epsilon_y: \frac{\sigma}{\sigma_y} = 1 + C_N \left[ \frac{\epsilon_d}{\epsilon_d - (\epsilon - \sigma_y / E)} - 1 \right] \quad (2)$$

$C_N$ : 降伏後の応力の上昇を決めるパラメータ (原論文ではCであるが、(6)式のCと区別するために $C_N$ とした),  $\sigma_y$ : 降伏応力度,  $\epsilon_y$ : 降伏ひずみ,  $E$ : 横圧縮ヤング係数,

$$\epsilon_d = 1 - K \frac{\rho}{\rho_s}: \text{圧密ひずみ,}$$

$K$ : 大変形領域のポアソン比で  $0 < K \leq 1$ ,

$\rho$ : 木材比重,  $\rho_s$ : 細胞壁の比重.

この定式化は全面横圧縮で述べたひずみ硬化現象を、R点を起点とし $\varepsilon=\varepsilon_d+\varepsilon_p$ の縦軸に漸近する双曲線で定式化したものであり、D点以降についての記述はない。試験体 **a** にあてはめてみると、 $C_N=0.78$ ,  $\varepsilon_d=0.71$  でよく適合することが分かった。しかし、部分横圧縮の定式化はまだ示されていない。また、針葉樹や異なる年輪傾角の場合にも適合するかの問題も残る。しかし、図3のように部分横圧縮の載荷板直下の変形状況は **a** と同様な挙動を示すことから、上記のメカニズムに基づいて、図3の実験結果と比較しながら、部分横圧縮のひずみ硬化の定式化を試みる。

#### 4. 部分横圧縮のひずみ硬化の定式化とシミュレーション

ひずみ硬化が始まっていないA点までは弾塑性パステルナーク・モデル(EPM)<sup>3)</sup>による定式化を用い、A点以降は、3章で示したひずみ硬化のメカニズムに基づいて、塑性ひずみの増大・減少によりSSカーブが圧密ひずみに移行する関係を新たに双曲線を用いて、応力度 $\sigma$ の時の弾性ひずみ $\varepsilon$ に対する弾塑性ひずみ度 $\varepsilon_p$ で表現する。本来なら、上記メカニズムに対応した一貫した定式化をEPMに取り入れることが望ましいが、現段階ではできていないため、このような定式化とした。

$$\sigma \leq \sigma_a : \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E \zeta_p(\varepsilon)} = \frac{\sigma(1+m h_y)}{E \zeta_p} \quad (3)$$

$$\text{剛性増大率} : \zeta_p = 1 + \frac{1 - e^{-\gamma \Delta L}}{\gamma L} = 1 + \frac{1 - e^{-\gamma H \delta}}{\gamma H \lambda} \quad (4)$$

無次元特性値 :  $\gamma H$ , 端距離 :  $\Delta L$ , 部材高さ :  $H$ , 載荷長 :  $2L$   
端距離比 :  $\delta = \Delta L / H$ , 載荷長比 :  $\lambda = L / H$

$$\text{剛性関数} : \zeta_p(\varepsilon) = \frac{\zeta_p}{1+m h_y} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{平均ひずみ増大率} : m = C(1-1/\kappa) \\ \text{降伏深さ比} : h_y = \frac{H_y}{H} = \frac{1}{\eta} \ln \kappa : (0 \leq h_y \leq 1) \end{array} \right\} \quad (6)$$

C: 定数,  $H_y$ :降伏深さ

$$\text{降伏比} : \kappa = \frac{\varepsilon}{p \varepsilon_y} = \frac{\varepsilon \eta}{F \varepsilon_y} \quad (7)$$

$$\text{実用ひずみ分布} : \varepsilon \phi_1' = \varepsilon \eta e^{-\eta \frac{\varepsilon}{H}} = \varepsilon \phi_s \quad (8)$$

表面変位 :  $W$ , その平均ひずみ :  $\varepsilon$

$$\text{ひずみの形状関数} : \phi_s = \eta e^{-\eta \frac{\varepsilon}{H}} \quad (9)$$

$$\text{パラメータ} : \eta = \frac{F \varepsilon_y}{p \varepsilon_y} \quad (10)$$

全面横圧縮降伏ひずみ :  $F \varepsilon_y$ , 部分横圧縮降伏ひずみ :  $p \varepsilon_y$

$$\sigma_a < \sigma \leq \sigma_d : \varepsilon_p = \varepsilon_m - \frac{A}{\sigma - \sigma_b} \quad (11)$$

ここで、 $\varepsilon_m$ : $\varepsilon_d$ よりやや大きな、双曲線が漸近するひずみ度、 $A$ :双曲線のパラメータ、 $\varepsilon_a$ ,  $\sigma_a$ :A点のひずみ度と応力度、 $\sigma_b$ :双曲線が漸近する応力度。

この定式化を弾塑性ひずみ硬化パステルナーク・モデル (Elasto-plastic Hardening Pasternak Model ; 略してEHPM) 解析と称する。A点までは、既往のEPM解析による定式化<sup>3)</sup>であり、例えば、ある応力度 $\sigma_1$ の時の弾性ひずみ $\varepsilon_1$ に塑性ひずみ $\Delta \varepsilon_1$ を付加することにより対応する弾塑性ひずみ $\varepsilon_{p1}$ を求める。したがって、付加するひずみは降伏ひずみ面積が算定できれば容易に求まるが、降伏ひずみ分布を決める $\varepsilon_h(z)$ が確定できていないため、近似的に(6)式で $h m_y$ を算定することとしており、実績的にはシミュレーションにより、実験結果のSSカーブをよくトレースできることが分かっている<sup>3)</sup>。A点以降も各ステップの降伏ひずみ $\Delta \varepsilon$ を求めることが原理的には可能であるが、現段階ではその定式化はできていない。代わりに則元らの双曲線でSSカーブが

精度よく表現できることを参考にして、A点からD点に達する(11)式的双曲線で表すこととしたものである。(11)式のパラメータAは双曲線のカーブを決め、パラメータ $\sigma_b$ はA点でカーブの連続性を確保するための漸近する水平線の応力度である。今後、圧密ひずみ分布の $\varepsilon_h(z)$ を仮定し、上限と底面の制約で頭打ちになる降伏ひずみ $\Delta\varepsilon$ が算定できれば、EPMと一貫した定式化が原理的に可能になる。

なお、ステップ4以降のD点から現れる圧密ひずみの上限を超えた、完全圧密後の横圧縮特性については若干の報告<sup>5)</sup>があるが、まだ系統的な実験データはなく、新たな局面として、圧密木材(または圧縮木材)の弾塑性特性の検討が期待される。ちなみに、この段階で弾性的な性質を示すとすれば、圧密木材の横圧縮ヤング係数は繊維自体の横圧縮ヤング係数であり、縦圧縮ヤング係数と同程度のオーダーの数値が想定される。その横圧縮ヤング係数を $E_d$ 、端部の荷重負担を含めた剛性増大率を $\zeta_d$ とすると、圧密木材の部分横圧縮剛性は $E_d \zeta_d$ となる。圧密木材のレベルの材料特性の実験的・解析的な検討は今後の課題となる。

この解析を用いて実験結果のカーブに極力整合するようにパラメータを決めた。図7~10にa~dの4試験体につき、EHPMによるシミュレーション結果と実験結果を重ねて示す。その際に用いたパラメータの一覧を表1に示す。シミュレーションのSSカーブ上の赤丸はEPMからEHPMに移行する反曲点A(そのひずみ $\varepsilon_a$ )を示す。

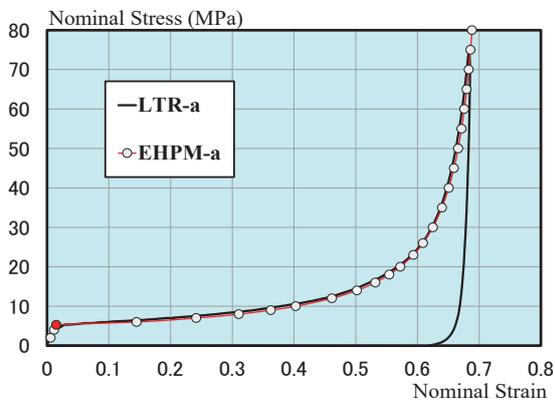


図7 aの(2)式によるシミュレーション結果

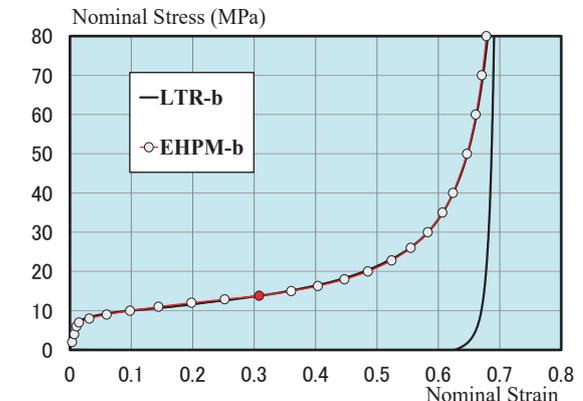


図8 bのEHPMによるシミュレーション結果

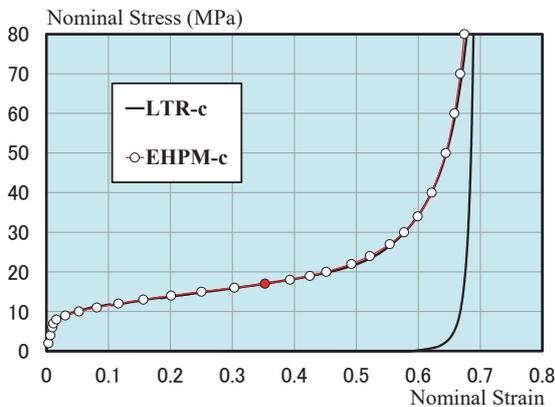


図9 cのEHPMによるシミュレーション結果

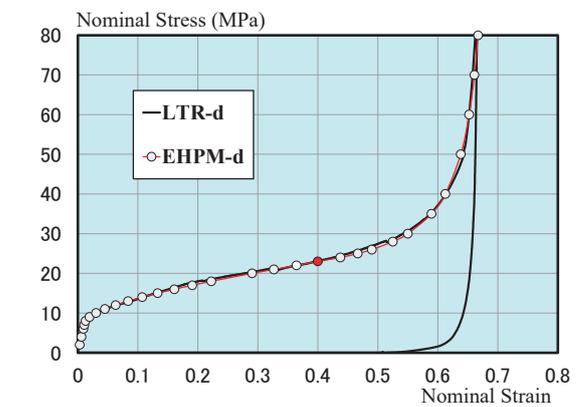


図10 dのEHPMによるシミュレーション結果

表1 シミュレーションにおけるパラメータ

試験体	$\Delta L$ (mm)	$E$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\gamma H$	$\eta$	$C$	$A$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	$\varepsilon_m$	$\varepsilon_a$
a	0	350	5.25	—	—	—	3.0	1.0	0.725	0.015
b	15	350	5.25	2.3	1.3	37	3.5	5.4	0.725	0.31
c	30	350	5.25	2.3	1.3	32	2.9	9.0	0.715	0.35
d	60	350	5.25	2.3	1.3	18	2.1	16.0	0.700	0.40

## 5. シミュレーション結果とその評価

シミュレーション結果によれば、EPMのパラメータである $\gamma H$ 、 $\eta$ は**b~d**とも同じ値で、双曲線のパラメータである $C$ は18~37、 $A$ は2.1~3.5(MPa)、 $\sigma_b$ は1.0~16.0(MPa)となっている。 $\sigma_b$ の値がばらつくのは、端部長さ $4L$ に応じて応力度が増大するためである。圧密ひずみ $\varepsilon_d$ は確定できていないが、 $\varepsilon_m$ よりやや小さく、0.70前後の数値と推察される。**a**では降伏点から双曲線が始まるため、 $\varepsilon_a$ は降伏ひずみ0.015となることは当然であるが、**b~d**では0.31~0.40となっており、A点から、 $\varepsilon_{max}$ が圧密ひずみ $\varepsilon_d$ に達して、ひずみ硬化が始まったことが推察される。そのひずみレベルの時の降伏深さは、解析上、 $h_y=0.59\sim 0.86$ となっており、ステップ1の段階ではまだ底面までは降伏が進展していないことが確認できる。

引き続きデータの蓄積により、本定式化の適用を検証していきたい。全体としては、シミュレーションは実験結果のSSカーブを精度よくトレースできており、部分横圧縮での定式化が可能となったと判断する。ただし、パラメータを前もって決めるにはややデータ数が不足しており、SSカーブを予測することは今後の課題となる。

## 6. まとめ

伝統木造の木材の均等部分横圧縮に見られるひずみ硬化特性について、その実験結果による挙動のメカニズムを全面横圧縮および部分横圧縮の4ステップにわたり詳細に分析し、すでに確立した弾塑性パステルナーク・モデル(EPM)による解析と圧密ひずみに収れんする双曲線をもちいて、弾塑性ひずみ硬化パステルナーク・モデル(EHPM)解析の定式化を提案した。その定式化を用いてシミュレーションを試みた。その結果、精度良いシミュレーションが可能になり、定式化は妥当なものと考えられる。

また、回転めり込みのひずみ硬化に関しては、ひずみ分布はより複雑になり、更なる検討を要する。

なお、本研究では則元らの定式化を参考に、ひずみ硬化の簡潔な定式化を提案したが、図5、6で分析したメカニズムを塑性ひずみの増大と減少を主要な定量値として、ひずみ硬化に至るまで一貫した形で定式化することは、今後の検討課題としたい。

## 参考文献

- 1) Tanahashi, H., Okamura, M. and Suzuki, Y.: Simple formulation of elasto-plastic embedment behavior of orthotropic wood considering densification, 10<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering (WCTE2008), paper 217 (CD-ROM), Miyazaki, Japan, 2008.6.
- 2) 棚橋秀光・鈴木祥之: はしご型フレームによる伝統木造建造物の耐震補強, 歴史都市防災論文集, Vol.2, pp.171-178, 2008.10.
- 3) 棚橋秀光・大岡 優・伊津野和行・鈴木祥之: 木材のめり込みメカニズムとめり込み弾塑性変位の定式化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.662, pp.811-819, 2011.4.
- 4) 則元 京: 木材の圧縮大変形, 木材学会誌, Vol.39, No.8, pp.867-874, 1993.
- 5) 北守顕久・鄭 基浩・森 拓郎・小松幸平: 圧縮木材の力学的性質の圧縮率依存性, 木材学会誌, Vol.56, No.2, pp.67-78, 2010.
- 6) 劉 一星・則元 京・師岡敦郎: 木材の横圧縮大変形(第1報) 応力—歪図と比重, 木材学会誌, Vol.39, No.10, pp.1140-1145, 1993.
- 7) 棚橋秀光・鈴木祥之: 伝統木造仕口の回転めり込み弾塑性特性と十字型通し貫仕口の定式化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No. 667, pp.1675-1684, 2011.9.
- 8) Gibson, L.J. and Ashby, M.F.: Cellular solids-Structure and properties, Second edition, Cambridge University Press, 1997.

注1: 圧密の用語は、土質力学の分野では、飽和粘土が圧縮力を受けて、時間とともに徐々に間隙水が抜け出ること、圧縮量がゆっくり増加し、密な粘土に変化する現象に用いられる。木材の分野では、圧縮により細胞壁の間の空隙が無くなり、密な組織に変化する現象であり、用語は同じであるが、内容は異なることに注意されたい。

注2: めり込み解析に用いるひずみは、めり込み表面の変位を含むクロスヘッド間の変形を用いることとしており、一般の材料試験で JIS Z 2101 による試験体中間部の変位またはひずみゲージ等より求めたひずみとは異なることは文献3) に示している。