

●姿図・寸法

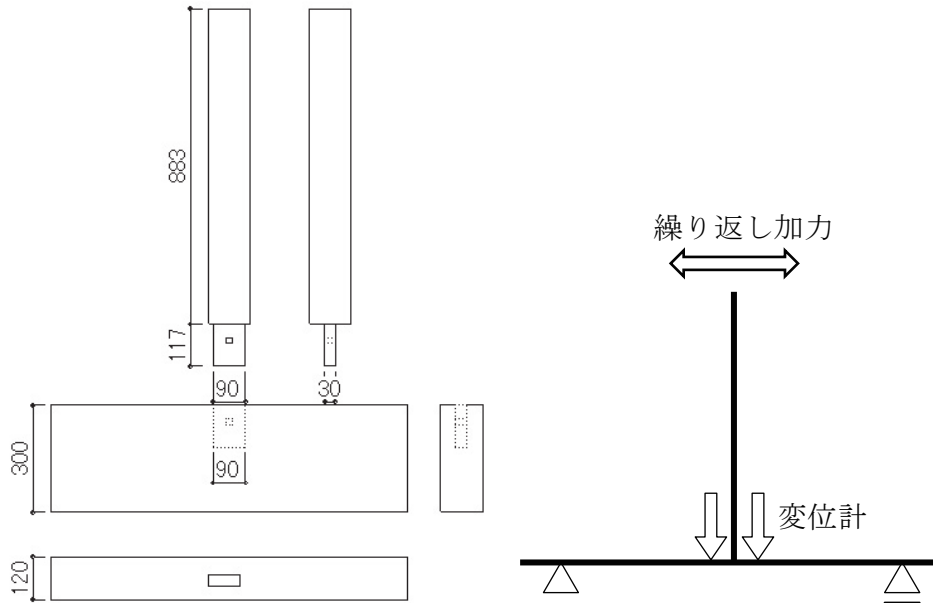


図 柱-梁接合部試験体 (左) と実験方法 (右)

【使用材料】

木材：スギ (柱・梁)、カシ (込栓)

断面寸法：柱 (120 × 120mm)、梁 (120 × 300mm)、栓 (15 × 15mm)、ほぞ (90 × 30 × 117mm)

●適用条件

柱材を梁材に長ほぞ差しし、込栓留めした柱梁接合部の設計に用いる。込栓、柱や梁には損傷が生じず、ほぞの曲げ破壊が生じる場合に適用できる。

●概要

柱-梁接合部の曲げ性能に関する静的加力試験である。試験体は4体とし、逆T字型曲げ試験とし、変位計を用いた計測を行い、試験体頂部の変位を柱高さで除した変形角を用いて加力を制御する。ただし、1体はほぞの割裂による破壊が生じたため、本データからは除いている。

●参照先

後藤正美、春山聡子、鈴木祥之：木造軸組におけるほぞ差し接合部の実験的検討及び解析モデルの提案、第12回日本地震工学シンポジウム、pp.810-813、2006.11

●理論式

計算方法については日本建築学会発行「木質構造接合部設計マニュアル」、日本建築学会発行「木質構造基礎理論」、「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験検討委員会平成24年度報告書」を参照し、下記に示す。また、材料特性値に関しては、日本建築学会発行「木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-」についても参照する。

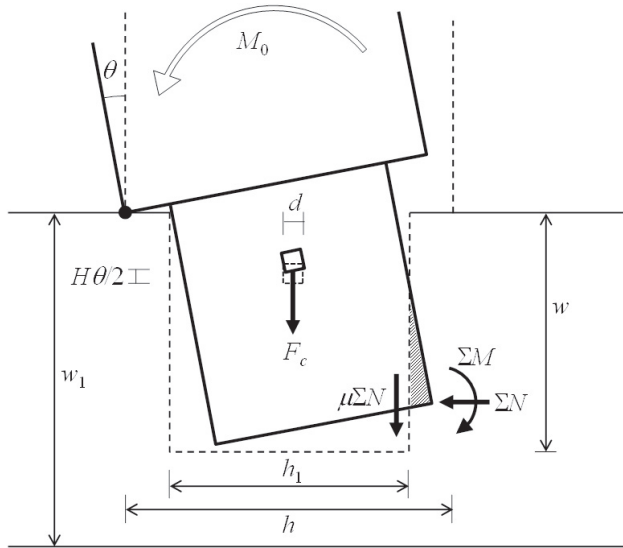


図1 力学モデル

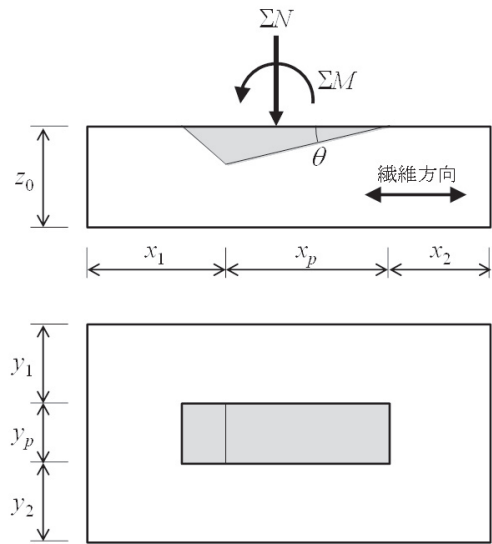


図2 三角形めり込み

ホゾのある方の部材を主材、ホゾ孔の側の部材を側材と呼ぶ。図1のようにモーメントの釣合いを考えると、次式が得られる。試験体寸法は図中に示す。

$$M_0 = K_c \left(\frac{h}{2} \right)^2 \theta + \Sigma N \cdot w + \mu \Sigma N \cdot \left(\frac{h + h_1}{2} \right) + \Sigma M \quad (1)$$

- $h \theta / 2$: 込栓によるめり込み量
- K_c : 込栓のほぞへのめりこみ剛性
- $\mu = 0.4$: 摩擦係数

(貫が柱を貫通している場合は $\mu = 0.6 \sim 0.8$ 、貫通していない場合は $\mu = 0.3 \sim 0.5$)

(1) 回転剛性の導出

図2のようにめり込みを仮定し、回転剛性は次式で求められる。

$$K_\theta = \frac{M_0}{\theta} = K_c \left(\frac{h}{2} \right)^2 + \frac{x_p^2 y_p C_y E_{90}}{Z_0} \left[\frac{1}{2} + \frac{2z_0}{3x_p} \left\{ 1 - \exp \left(\frac{-3x_1}{2z_0} \right) \right\} \right] \cdot w + \mu \frac{x_p^2 y_p C_y E_{90}}{Z_0} \left[\frac{1}{2} + \frac{2z_0}{3x_p} \left\{ 1 - \exp \left(\frac{-3x_1}{2z_0} \right) \right\} \right] \cdot \left(\frac{h + h_1}{2} \right) + \frac{x_p^3 y_p C_y E_{90}}{Z_0} \left[\frac{1}{2} + \frac{2z_0}{3x_p} \left\{ 1 - \exp \left(\frac{-3x_1}{2z_0} \right) \right\} \right] \quad (2)$$

- $z_0 = h_1$
- $x_p = w / 2$: ほぞの側材へのめり込み長さ
- y_p : ほぞの厚さ
- $x_1 = 0$
- $x_2 = \infty$
- $y_1 = y_2 = 0$
- $E_{90} = E_0 / 50$: 全面横圧縮ヤング係数
- E_0 : 基準弾性係数 (繊維方向圧縮)

また、木質構造接合部設計マニュアル「長ほぞ込栓」(pp.175-177)を用いると、せん断剛性 K_c や C_y は次式となる。

$$K_c = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}, \quad C_y = 1 + \frac{2z_0}{3ny_p} \left\{ 2 - \exp\left(\frac{-3ny_1}{2z_0}\right) - \exp\left(\frac{-3ny_2}{2z_0}\right) \right\} = 1 \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{1}{3} (Ed^7 k_{cp1}^3)^{\frac{1}{4}} \times \left(1 + 0.88 \times \eta \sqrt{\frac{k_{cp1} d}{E}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad K_2 = \frac{1}{3} (Ed^7 k_{cp2}^3)^{\frac{1}{4}} \times \left(1 + 0.88 \times \eta \sqrt{\frac{k_{cp2} d}{E}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

- K_1 : 主材での片側剛性
- K_2 : 側材での片側剛性
- E : 木ダボの繊維方向曲げヤング係数
- d : 栓の径
- n : 繊維方向に対する繊維直角方向の置換係数
接合部の設計に使う樹種グループが J1 (ベイマツなど) のとき $n = 7$
J2 (ヒノキなど) のとき $n = 6$
J3 (スギなど) のとき $n = 5$
- $\eta = 15$

主材とダボの複合面圧定数 k_{cp1} と側材とダボの複合面圧定数 k_{cp2} は次式のように求められる。

$$k_{cp1(2)} = \frac{k_E \times \alpha_k k_{cvf}}{k_E + \alpha_k k_{cvf}} \quad (5)$$

- k_{cvf} ($= E_0 / (11d)$) : 栓のめりこみ剛性
- α_k : めりこみ補剛効果係数 (主材では 1.5、側材では 1.0)

母材の面圧定数 k_E は次式で導出する。

$$k_E = \begin{cases} k_{E0} = \frac{E_0}{31.6 + 10.9d} & (\text{繊維方向}) \\ k_{E90} = \frac{k_{E0}}{3.4} & (\text{繊維直交方向}) \end{cases} \quad (6)$$

(2) 降伏変形角の導出

降伏変形角 θ_y はほぞの側材へのめり込み降伏による θ_{y1} と準用した木ダボ接合部の降伏による θ_{y2} 、ほぞのせん断破壊での降伏による θ_{y3} 、側材の割裂破壊での降伏による θ_{y4} のうち小さい方とする。

$$\theta_y = \min \{ \theta_{y1}, \theta_{y2}, \theta_{y3}, \theta_{y4} \} \quad (7)$$

① ほぞの柱へのめり込み降伏

$$\theta_{y1} = \frac{z_0 F_m}{x_p E_{90} \sqrt{C_x C_y C_{xm} C_{ym}}}, \quad C_{xm} = 1 + \frac{4z_0}{3x_p}, \quad C_{ym} = 1 + \frac{4z_0}{3ny_p} \quad (8)$$

- F_m : 縁端距離を無限大とした時のめり込み降伏応力度
(めり込み強度 F_{cv} に 0.8 を乗じたもの)

- $C_x = C_{xm}$ (柱が上方へ長い場合)

②木ダボ接合部の降伏

栓の対称な2面せん断の耐力計算式より、降伏耐力は次式で表せる。

$$F_{Ecp1} = \min\{F_{E1}, 1.5 \times F_{cvf}\} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{t}{y_p}, \quad \beta = \frac{F_{Ecp2}}{F_{Ecp1}} \quad (10)$$

$$P_{y2} = \begin{cases} dy_p F_{Ecp1} & \text{(破壊モード1)} \\ dy_p F_{Ecp1} \times 2\alpha\beta & \text{(破壊モード2)} \\ dy_p F_{Ecp1} \times \left[\sqrt{\frac{16\beta M_y}{dy_p^2 F_{Ecp1} (2\beta+1)} + \frac{8\alpha^2 \beta^2 (\beta+1)}{(2\beta+1)^2}} - \frac{2\alpha\beta}{2\beta+1} \right] & \text{(破壊モード3)} \\ \sqrt{\frac{16dF_{Ecp1}\beta M_y}{\beta+1}} & \text{(破壊モード4)} \\ \frac{2 \times A \times F_s}{\kappa} & \text{(破壊モード5)} \end{cases} \quad (11)$$

$$\theta_{y2} = \frac{P_{y2}}{K_c \cdot (h/2)} \quad (12)$$

- t : 側材厚さからほぞ厚さを除いて2で割った値
- F_{cvf} : 栓のめり込み降伏応力
- F_{E1} : ほぞの面圧降伏応力
- A : 栓の断面積
- κ : せん断補正係数 (矩形断面: 3/2、円形断面: 4/3)
- F_s : 栓のせん断強さ

$$M_y = Z_c \times F_b \quad (13)$$

- Z_c : 栓の断面係数
- F_b : 栓の曲げ強度

③ほぞのせん断 (端抜け) 破壊

$$P_{us} = F_{s1} \times h / 2 \times D \times 2 \quad (14)$$

- F_{s1} : ほぞのせん断強度

$$\theta_{y3} = \frac{P_{us}}{K_c \cdot (h/2)} \quad (15)$$

④側材の割裂破壊

$$P_{uk} = \frac{2(h-D) \cdot C_r}{\sqrt{\frac{1}{h/2} - \frac{1}{h}}} \quad (16)$$

- C_r : J1 の場合は 12.0、J2 の場合は 10.0、J3 の場合は 8.0

$$\theta_{y4} = \frac{P_{uk}}{K_c \cdot (h/2)} \quad (17)$$

(3) ほぞの折損による降伏曲げモーメント

損傷がほぞの折損であることより、ほぞの曲げ抵抗のみが働くと仮定すると、接合部モーメントの最大値は次式で表せる。

$$M_{\max} = F_t Z_t \quad (18)$$

- F_t : 主材の引張強度
- Z_t : ほぞの断面係数

[諸定数]

用いた材料特性値を表1に示す。

表1 用いた材料特性値

■柱・横架材 (スギ)					
基準弾性係数 E_o (kN/mm ²)	摩擦係数 μ	置換係数 n	めり込み強度 F_{cv} (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)
繊維方向 7.0	0.4	5	6.0	13.5	78.4
■栓 (カシ)					
基準弾性係数 E_o (kN/mm ²)	めり込み強度 F_{cv} (N/mm ²)	全面圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強さ F_b	せん断強さ F_s	せん断補正 係数 κ
繊維方向 10.0	12	5.4	38.4	4.2	1.5

[ほぞのめり込みに関する抵抗力に関して]

ほぞのめり込み力と摩擦力に関して、回転剛性、降伏変形角、降伏モーメントは表2のように求められる。

表2 ほぞのめり込みに関連する諸定数

回転剛性 K_o (kNmrad)	降伏変形角 θ_{y1} (rad)	降伏モーメント M_{y1} (kNm)
20.138	0.01288	25.948×10^3

[栓の2面せん断・ホゾのせん断破壊・側材の割裂破壊に関する抵抗力について]

求めた破壊モードを表3、4に示す。計算上はモード5(栓のせん断破壊)が最も生じやすい。

表3 栓の2面せん断に関する破壊モード一覧

	モード1	モード2	モード3	モード4	モード5
降伏耐力 P_{y2} (N)	1944	5832	2808	3346	1260
降伏変形角 θ_{y2} (rad)	0.04211	0.12632	0.06082	0.07248	0.02729
降伏モーメント M_{y2} ($\times 10^{-3}$ kNm)	84.795	254.384	122.481	145.959	54.960

表4 ホゾの端抜けに関連する諸定数

	降伏耐力 P_{us}, P_{uk} (N)	降伏変形角 θ_y (rad)	降伏モーメント M_y (kNm)
ホゾのせん断破壊	282240	6.11328	12310.938×10^{-3}
側材の割裂破壊	15774	0.34167	688.059×10^{-3}

[ほぞの曲げ破壊について]

ほぞの曲げによる最大モーメントは 54.675×10^3 kNm である。

●モデル化

接合部の回転剛性を等価な回転バネに置換する。

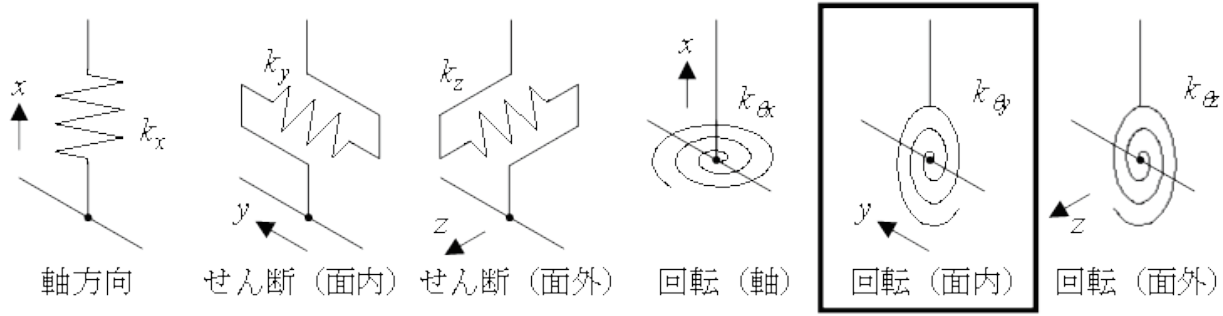


図3 バネ

●特性値

回転バネ (面内)	回転剛性 $k_{\theta x}$ (kNmrad)	降伏回転角 θ_{xy} (rad)	降伏モーメント $M_{\theta xy}$ (kNm)
理論値	20.138	0.02715	54.675×10^{-3}
実験値	84.91	0.011	91.7×10^{-3}

ホゾのめり込み抵抗力が先行する推定であるが、目視で確認できる範囲内では接合部の折損による破壊が確認された。接合部モーメント-接合部回転角関係の正側の骨格曲線 (正側) を比較したものを下図に示す。どの試験体についても初期剛性に大きな違いはみられない。また、これらに適切な特性値を上記に示すと共に、図4に併せて掲載する。とともに特定接合部回転角時のモーメントの値を表5に示している。

表5 接合部モーメント回転角関係まとめ

	No.1-1-1	No.1-1-2	No.1-1-3	Ave.
最大モーメント M_{max} [kNm]	1.403	1.632	1.493	1.509
降伏曲げモーメント M_y [kNm]	0.875	1.035	0.840	0.917
降伏回転角 θ_y [rad]	0.010	0.012	0.010	0.011
初期回転剛性 $K \theta$ [kNmrad]	85.70	85.70	83.33	84.91

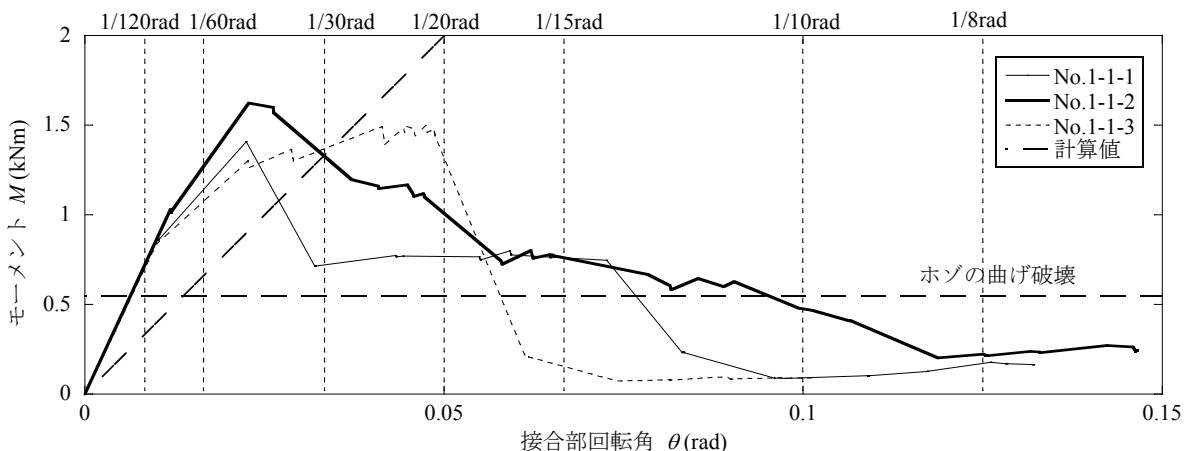


図4 モーメント-接合部回転角関係

頂部水平荷重－柱傾斜角関係：(例) 試験体 No.1-1-2

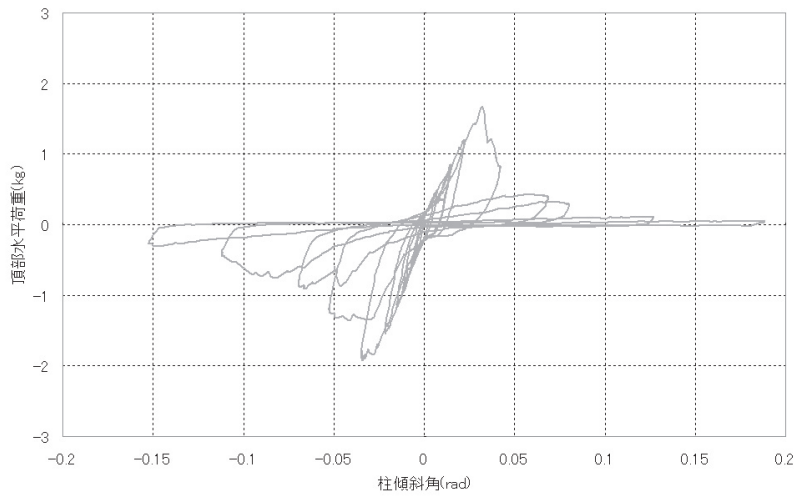


図5 (例) 試験体 No.1-1-2

接合部モーメント－接合部回転角関係：(例) 試験体 No.1-1-2

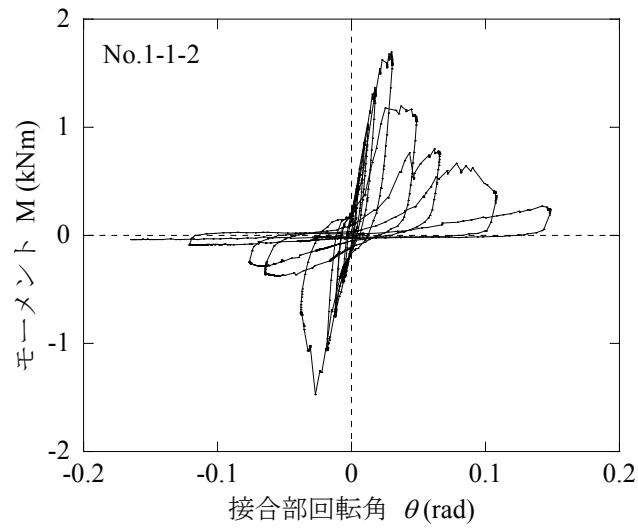
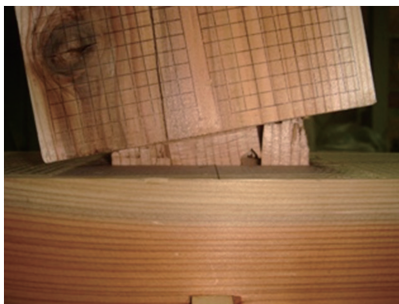


図6 (例) 試験体 No.1-1-2

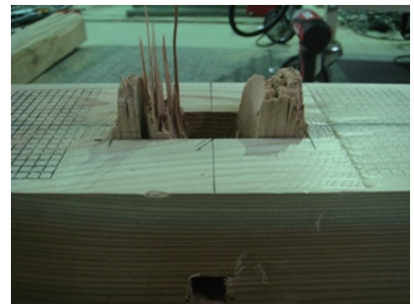
●破壊性状



(a) 1/7rad



(b) 柱



(c) 土台

図7 試験体 No.1-1-2 の損傷写真