伝統要素で構成された木造耐力壁の開発

DEVELOPMENT OF WOODEN SHEAR WALL USING JAPANESE TRADITIONAL ELEMENTS

藤田克則 — * 1 稲山正弘 — * 2
高橋賢二 — * 3

Katsunori FUJITA — * 1 Masahiro INAYAMA — * 2
Kenji TAKAHASHI — * 3

キーワード：
耐力壁，伝統木造，モーメント抵抗，厚貫，板壁，木ダボ，堅木

Keywords:
Shear wall, Traditional timber structure, Moment resisting performance, Thick wooden cross piece, Wood siding wall, Wooden dowel, Hard wood

In this study, vertical cross piece made from hard wood was contained, the wooden shear wall composed of Japanese traditional elements was designed and the in-plane shearing test was done. The presumption of the moment resisting performance of the wall was tried by existing Inayama's and Fukuyama's formula. The stiffness, the yield load and the calculation value had good coincidence with the result of the test in the $M-\theta$ relation of each part, and it made it possible to presume on the safety side in the entire wall for the initial stiffness. The possibility of the wooden wall with high ductility and rigidity was shown by this development even if it did not rely on the steel hardware.

1. はじめに

我が国の木造建築において、仕口を含む伝統的な耐力要素は個々には剛性や耐力の低い傾向があるが、節点数を増やし寸法仕様を工夫することで、粘り強さに加え、剛性や耐力の改善が可能であると考える。さらに、ダボや栓等の接合具以外に広葉樹を用い、任意の寸法における抵抗性能の推定ができれば、設計の自由度は拡大する。

金物に頼らない木造建築の可能性を示すべく、一般に十分な壁量確保の困難な社寺建築本堂への採用を前提に、伝統要素を用いた耐力壁の設計を行い面内せん断試験を実施した。設計に際し、既存のめり込み式¹⁾と木栓せん断式²⁾を用いてモーメント抵抗性能を推定し、算定値と試験結果の比較を行ったので併せて報告する。

2. 耐力壁の面内せん断試験

2.1 耐力壁と試験の概要

耐力壁の仕様と変位計設置位置を図1に示す。最終的な壁仕様は予備試験を行った上で決定した。具体的には150mm角のヒノキ柱に60×180mmの6段貫(ヒノキ)、その直交方向に30×120mmのたて貫(タモ)3本を通し、貫を含む横架材間にダボ(13mm角:ヒノキ)で補剛した厚30mmの板(ヒノキ)を挿入し、さらに回転拘束を図るため、貫/たて貫の交点をダブル込栓(φ24mm:カシ)打ちとしたものである。

変位計の1ch~4chでは水平・鉛直方向の絶対変位を、5~11chでは部材間の相対変位を測定した。面内せん断試験は柱脚固定式、試験体は3体、加力は制御変形角1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50radでは正負交番各3回、その後(荷重低下が見られなかったため)見かけの変形角1/7.5rad付近まで単調加力した。材料の物性値を表1に示す。繊維方向ヤング係数 E_0 は縦振動法で求めた。

2.2 試験結果

(1) 試験の状況や破壊性状など

表1 材料の物性値 (3体分の平均値±S.D.:加工前に測定)

部材(樹種)	断面[mm]	部材点数	密度[g/cm ³]	含水率[%]	E_0 [N/mm ²]
柱(ヒノキ)	150×150	6	0.488±0.012	24.14±4.69	12846±1584
土台(ヒノキ)	120×180	3	0.457±0.046	19.89±2.00	11957±1639
桁(ヒノキ)	150×180	3	0.493±0.025	42.16±18.78	10093±2865
貫(ヒノキ)	60×180	18	0.462±0.043	28.72±8.85	10630±1767
たて貫(タモ)	30×120	9	0.525±0.035	21.47±4.83	9920±1920
壁板(ヒノキ)	30×240	42	0.458±0.038	20.20±4.78	11930±1841

図1 耐力壁の仕様と変位計位置

写真1~3に試験時の変形等の状況を、写真4~5に耐力壁の主な破壊性状や試験終了後解体時の状況を、図2に壁全体の荷重 P と変位 δ (1ch-2ch)との関係を示す。試験体の挙動や破壊性状について、

¹⁾ 東京大学大学院農学生命科学研究科 博士課程
(〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1)
²⁾ 東京大学大学院農学生命科学研究科 准教授
³⁾ 榊中村建築研究所 代表取締役

¹⁾ Student, Grad. School of Agri. Life Sci., The Univ. of Tokyo, Ph. D., M. Agri.
²⁾ Assoc. Prof., Grad. School of Agri. Life Sci., The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.
³⁾ President, Nakamura Institute of Architecture

加力開始から 1/100rad までは目視確認できるような状況変化はなく、1/75rad ぐらいから、込栓穴の隙間や貫の柱からの抜け出しが見られるようになり、1/50rad になると板とたて貫の間の隙間や柱の曲げが目立つようになった。3 体とも 1/10rad を越える大変形領域においても荷重は上昇し続けたが、たて貫材の割裂や貫材の込栓穴からの割裂(写真 4)、ほぞ穴から端部へのせん断破壊(写真 3)等明らかな損傷が見られた。今回の試験結果から、耐力要素が多くそのほとんどがめり込みを主とした抵抗であるため、粘り強い挙動を示す耐力壁であると考えられる。

写真 1 全体変形 写真 2 回転とめり込み 写真 3 柱(せん断)/貫

写真 4 たて貫の割裂とめり込み(解体後) 写真 5 ダボの変形(同左)

図 2 耐力壁の $P-\delta$ 関係

(2) 耐力壁の特性値

試験で得られた耐力壁の特性値を表 2 に示す。3 体間の個体差はほとんどなく、短期基準せん断耐力 P_0 は 3 体とも特定変形時の耐力 P_{120} で決定した。なお補正係数 α は、直接風雨にさらされないという条件と ($\alpha_{1,2} = 0.95$)、施工性のバラツキが少ないこと ($\alpha_{3,4} = 0.95$) から 0.9 と判断され、短期許容せん断耐力 P_a は 25.47kN (倍率 7 相当) と決定した。

3. 各部抵抗要素の推定

各部の抵抗要素を図 3 に示す。ここでは軸組全体を剛体と仮定し、要素毎に回転剛性 K_θ や降伏モーメント M_y 、降伏変形角 θ_y を求め、並列バネとして加算し耐力壁全体の性能推定を行った。込栓のカシ材、ダボのヒノキ材は比重による回帰計算³⁾によって物性値を求めた。

表 2 実験結果 (耐力壁の特性値)

	P_y [kN]	$P_a \cdot 0.2\sqrt{2\mu-1}$ [kN]	$2/3P_{max}$ [kN]	P_{120} [kN]	P_u [kN]	δ_u [rad]	μ
試験体-1	54.8	38.9	64.0	26.3	83.9	0.133	3.19
試験体-2	50.4	41.9	60.0	30.7	79.4	0.133	3.98
試験体-3	57.3	44.4	65.9	32.5	87.6	0.133	3.71
平均値	54.2	41.7	63.3	29.8	83.6	0.133	3.63
標準偏差	3.49	2.75	3.01	3.19	4.11	0.00	0.40
C.V.	0.970	0.969	0.977	0.950	—	—	—
50%下限値	52.6	40.4	61.8	28.3	—	—	—

たて貫のタモ材の全面横圧縮ヤング係数 E_{90} は別途行った要素試験により $E_{90} = E_0/35^{(5)}$ 、ヒノキ材の E_{90} は既存のめり込み式同様に $E_0/50$ として⁴⁾、まためり込みに伴う材端部の摩擦係数 μ は 0.4、材中間部については $\mu = 0.7$ として、タモ材のめり込み基準強度 F_{cv} は平成 13 年国土交通省告示第 1024 号第 3 第一号表 1 における、くり、なら…相当として、タモ材の置換係数 $n = 7$ として算定した。算定に際しては文献¹⁾²⁾³⁾を参照した。以下に算定概要を示す。

図 3 要素(部位)別各抵抗要素詳細(部位: I ~ VII)

3.1 貫/たて貫部(要素 I)

$$K_{\theta b1} = x_p^2 y_p E_{90} \left\{ \frac{x_p}{Z_0} \left(C_{xm} - \frac{1}{3} \right) + 0.5 \mu C_{xm} \right\} \quad [\text{Nmm/rad}] \quad \cdots [1]$$

$$M_{yb1} = \frac{K_{\theta b1} Z_0 F_m}{x_p E_{90} C_{xm} \sqrt{C_{ym}}} \quad [\text{Nmm}] \quad \cdots [2]$$

$$\theta_{yb1} = \frac{M_{yb1}}{K_{\theta b1}} \quad [\text{rad}] \quad \cdots [3]$$

※以下の係数等は部位別に求めるが、添え字は省略して進める。

$$C_{xm} = 1 + \frac{4Z_0}{3x_p}, \quad C_{ym} = 1 + \frac{4Z_0}{3ny_p} \quad \text{端, 縁距離効果係数}$$

$$C_x = 1 + \frac{2Z_0}{3x_p} \left\{ 2 - \exp\left(\frac{-3x_1}{2Z_0}\right) - \exp\left(\frac{-3x_2}{2Z_0}\right) \right\}$$

$$C_y = 1 + \frac{2Z_0}{3ny_p} \left\{ 2 - \exp\left(\frac{-3ny_1}{2Z_0}\right) - \exp\left(\frac{-3ny_2}{2Z_0}\right) \right\}$$

x_p : 繊維方向のめり込み長さ(回転中立軸位置) [mm]

y_p : 繊維直交方向のめり込み幅 [mm]

Z_0 : りめり込みを受ける部材のりめり込み方向の材厚 [mm]

l : ほぞ等の長さ [mm]

n : 繊維方向に対する繊維直交方向の置換係数

3.2 柱／貫部(要素Ⅱ)

$$\text{回転中立軸 } x_p = \frac{3I^2}{4Z_0 + 6l} \quad [\text{mm}] \quad \cdots [4]$$

$$K_{\theta b2} = \frac{\gamma_p E_{90}}{3Z_0} \{x_p^3 + 2x_p^2 Z_0 + (l - x_p)^3 + \frac{3}{2}(l - x_p)^2 \mu Z_0\} \quad [\text{Nmm/rad}]$$

$\cdots [5]$

$$\theta_{yb2} = \frac{Z_0 F_m}{x_p E_{90} C_{xm} \sqrt{C_{ym}}} \quad [\text{rad}] \quad \cdots [6]$$

$$M_{yb2} = K_{\theta b2} \theta_{yb2} \quad [\text{Nmm}] \quad \cdots [7]$$

3.3 柱／横架材(要素Ⅲ)、たて貫／横架材部(要素Ⅳ)

3.2と同様に算定

3.4 板木口／たて貫部(要素Ⅴ)

※ $x_p = H/3$ と仮定 H : 板幅=240mm

$$\theta_{yb5} = \frac{Z_0 F_m}{x_p E_{90} \sqrt{C_{xm} C_{ym}}} \quad [\text{rad}] \quad \cdots [8]$$

$$\Sigma M_{yb5} = \frac{x_p^3 \gamma_p C_y E_{90}}{Z_0} \left(\frac{1}{3} + \frac{2Z_0}{3x_p} \right) \theta_{yb5} \quad [\text{Nmm}] \quad \cdots [9]$$

$$K_{\theta b5} = \Sigma M_{yb5} / \theta_{yb5} \quad [\text{Nmm/rad}] \quad \cdots [10]$$

3.5 板／貫・横架材のダボ(要素Ⅵ)

ダボ(13角: ヒノキ)の比重 $\rho=0.45$ と仮定し、物性値を回帰計算により求める。ダボ径 $d=13\text{mm}$

$$F_b = 8.1 + 136\rho$$

$$F_s = (-7.7 + 100\rho)d^{-0.4}$$

$$F_{cvf} = -8.2 + 35.4\rho$$

$$E = 2100 + 13700\rho \quad [\text{N/mm}^2] \quad \cdots [11]$$

耐力計算

$$\text{埋込み長さ: } L_1 = L_2, \quad \alpha = L_2 / L_1 \quad \beta = F_{Ecp2} / F_{Ecp1}$$

$$\text{複合面圧降伏応力: } F_{Ecp} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$\text{貫・板(母材1・2)ともヒノキ材のため、} F_{Ecp1} = F_{Ecp2} \quad \therefore \alpha = \beta = 1$$

$$F_{Ecp1} = \min. \{ F_{E1}, \alpha_F F_{cvf} \} \quad \cdots [12]$$

ここで、 α_F : りめり込み降伏応力増大係数

$$F_{cvf}: \text{ダボのりめり込み降伏応力} [\text{N/mm}^2]$$

$$\text{母材の面圧降伏応力 } F_E^{(3)}:$$

$$F_{E(0^\circ)} = f_{e0} = 0.082(1 - 0.01d)\rho \quad (\text{繊維方向加力の場合})$$

$$F_{E(90^\circ)} = f_{e90} = 0.5f_{e0} \quad (\text{繊維直交方向加力の場合}) \quad \cdots [13]$$

$$\text{ダボの曲げ降伏モーメント: } M_y = ZF_b = \frac{d^3}{6} F_b \quad \cdots [14]$$

$$\text{ダボの1面せん断の降伏耐力: } P_{yd1} = \min. \{ 1 \sim 7 \}$$

$$1) dL_1 F_{Ecp1}$$

$$2) dL_1 F_{Ecp1} \times \alpha\beta$$

$$3) dL_1 F_{Ecp1} \times \frac{\sqrt{\alpha^2 \beta^3 + (2\alpha^2 + 2\alpha + 2)\beta^2 + \beta - \beta(\alpha + 1)}}{1 + \beta}$$

$$4) dL_1 F_{Ecp1} \times \left[\sqrt{\frac{4\beta M_y}{dL_1^2 F_{Ecp1}(\beta + 2)} + \frac{2\beta(\beta + 1)}{(\beta + 2)^2}} - \frac{\beta}{\beta + 2} \right]$$

$$5) dL_1 F_{Ecp1} \times \left[\sqrt{\frac{4\beta M_y}{dL_1^2 F_{Ecp1}(2\beta + 1)} + \frac{2\alpha^2 \beta^2 (\beta + 1)}{(2\beta + 1)^2}} - \frac{\alpha\beta}{2\beta + 1} \right]$$

$$6) \sqrt{\frac{4d F_{Ecp1} M_y \beta}{1 + \beta}}$$

$$7) \frac{A \times F_s}{\kappa} (=P_{Qy}) \quad \cdots [15]$$

剛性計算 ※ E_{timber} : 母材の繊維方向曲げヤング率 $=E_0$

$$\text{母材(ヒノキ)の繊維方向面圧定数: } k_{E1} = \frac{E_{timber}}{31.6 + 10.9d} \quad [\text{N/mm}^3] \quad \cdots [16]$$

$$\text{ダボの補剛りめり込み剛性 } \alpha_k k_{cvf} \quad [\text{N/mm}^3] \quad \cdots [17]$$

$$\alpha_k: \text{りめり込み補剛効果係数}=1.5$$

$$k_{cvf}: \text{ダボのりめり込み剛性} = E_0 / 11d$$

$$\text{複合面圧定数 } k_{cp1} = k_{cp2} = \frac{k_E \times \alpha_k k_{cvf}}{k_E + \alpha_k k_{cvf}} \quad [\text{N/mm}^3] \quad \cdots [18]$$

せん断剛性 K (1せん断面,ダボ1本あたり)

$$K = \min. \left\{ \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} = \frac{K_1^2}{2K_1}, \quad d \left[\frac{1}{k_{cp1} L_1} + \frac{1}{k_{cp1} L_1} + \frac{3(L_1 + L_2)(L_1 + L_2 - 0.8d)}{k_{cp1} L_1^3 + k_{cp1} L_2^3} \right]^{-1} \right\} \quad [19]$$

$K_1 \cdot K_2$: 母材1・2での片側剛性,

$$K_1 = K_2 = \min. \left\{ \frac{1}{3} (Ed^7 k_{cp1}^3)^{\frac{1}{4}} \times (1 + 0.188 \times \eta \sqrt{\frac{k_{cp1} d}{E}})^{-\frac{1}{2}}, \right.$$

$$d k_{cp1} L_1 \} \quad \cdots [20]$$

$$\eta = E/G = 15 \quad G: \text{せん断弾性係数} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$\text{ダボ1本あたりの降伏変位 } \delta_{yd1} = \frac{P_{yd1}}{K} \quad [\text{mm}] \quad \cdots [21]$$

$$\text{上下1組のダボによる降伏変形角 } \theta_{yd1} = \frac{\delta_{yd1} \times 2}{H} \quad \cdots [22]$$

$$\text{同上降伏モーメント } M_{yd1} = P_{yd1} H \quad \cdots [23]$$

$$\text{同上回転剛性 } K_{\theta d1} = \frac{M_{yd1}}{\theta_{yd1}} \quad \cdots [24]$$

3.6 貫／たて貫部のダブル込栓(要素Ⅶ)

貫／たて貫交差部の対角線直交方向(込栓間距離 $D=108.17\text{mm}$)にせん断力が作用するとし、また面圧定数等の算出に各母材繊維方向との角度 θ を考慮し各定数を算定する。込栓($\phi 24=d$: カシ)の比重 $\rho=0.9$ と仮定し、物性値を回帰計算により求める。

耐力計算

$$\text{埋込み長さ: } L_1 = L_2, \quad \text{母材1(たて貫: タモ)の厚さ: } t_1 = 2L_1$$

$$\alpha = L_1 / 2L_1 \quad \beta = F_{Ecp2} / F_{Ecp1}$$

$$\text{複合面圧降伏応力: } F_{Ecp} \quad \text{※たて・横貫材各々について算定}$$

※以下添字1はたて貫材(タモ)、2は貫材(ヒノキ)の場合を示す。

$$F_{Ecp1} = \min. \{ F_{E1}, \alpha_F F_{cvf} \}, \quad F_{Ecp2} = \min. \{ F_{E2}, \alpha_F F_{cvf} \} \quad \cdots [25]$$

$$[13] \text{式より } F_{E(90^\circ)} = f_{e90} = 0.5f_{e0} \text{、ハンキンソン式を用いて}$$

$$F_{E1(\theta_1=56.31^\circ)} = \frac{F_{E1(0^\circ)}}{2 \sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1}$$

$$F_{E2(\theta_2=33.69^\circ)} = \frac{F_{E2(0^\circ)}}{2 \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_2} \quad \cdots [26]$$

$$\text{ダボの曲げ降伏モーメント: } M_y = ZF_b = \frac{\pi d^3}{32} F_b \quad \cdots [27]$$

$$\text{込栓1本あたりの2面せん断の降伏耐力: } P_{yd2}$$

$$P_{yd2} = \min. \{ 8), 9), 10), 11), 12) \}$$

$$\begin{aligned}
& 8) \quad dt_1 F_{Ecp1} \\
& 9) \quad dt_1 F_{Ecp1} \times 2\alpha\beta \\
& 10) \quad dt_1 F_{Ecp1} \times \left[\sqrt{\frac{16\beta M_y}{dt_1^2 F_{Ecp1}(2\beta+1)} + \frac{8\alpha^2 \beta^2 (\beta+1)}{(2\beta+1)^2}} - \frac{2\alpha\beta}{2\beta+1} \right] \\
& 11) \quad \sqrt{\frac{16d F_{Ecp1} M_y \beta}{1+\beta}} \\
& 12) \quad \frac{2 \times A \times F_s}{\kappa} (=P_{Qy}) \quad \dots [28]
\end{aligned}$$

剛性計算 ※ E_{timber} : 各母材の繊維方向曲げヤング率 $=E_0$

$$\text{母材繊維方向の面圧定数: } k_{E(0^\circ)} = \frac{E_{timber}}{31.6+10.9d} \quad [\text{N/mm}^3]$$

$$\text{母材繊維直交方向の面圧定数: } k_{E(90^\circ)} = \frac{1}{3.4} \times \frac{E_{timber}}{31.6+10.9d} \quad \dots [29]$$

$$\text{たて貫材の面圧定数: } k_{E1(\theta_1=56.31^\circ)} = \frac{k_{E1(0^\circ)}}{3.4 \sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1}$$

$$\text{貫材の面圧定数: } k_{E2(\theta_1=33.69^\circ)} = \frac{k_{E2(0^\circ)}}{3.4 \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_2} \quad \dots [30]$$

込栓(カシ)の補剛めり込み剛性:

$$\alpha_k k_{cvf} = 1.5 \times \frac{E_{timber}}{11d} \quad [\text{N/mm}^3] \quad \dots [31]$$

込栓と母材の複合面圧定数:

$$k_{cp1} = \frac{k_{E1} \times \alpha_k k_{cvf}}{k_{E1} + \alpha_k k_{cvf}} \quad k_{cp2} = \frac{k_{E2} \times \alpha_k k_{cvf}}{k_{E2} + \alpha_k k_{cvf}} \quad [\text{N/mm}^3] \quad \dots [32]$$

$$1 \text{ せん断面あたりのせん断剛性: } K_0 = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} \quad [\text{N/mm}]$$

$$K_1 = \min. \{ dk_{cp1} L_1,$$

$$\frac{1}{3} (Ed^7 k_{cp1}^3)^{\frac{1}{4}} \times (1 + 0.188 \times \eta \sqrt{\frac{k_{cp1} d}{E}})^{-\frac{1}{2}} \}$$

$$K_2 = \min. \{ dk_{cp2} L_2,$$

$$\frac{1}{3} (Ed^7 k_{cp2}^3)^{\frac{1}{4}} \times (1 + 0.188 \times \eta \sqrt{\frac{k_{cp2} d}{E}})^{-\frac{1}{2}} \} \quad \dots [33]$$

$$\text{込栓 1 本当たりのせん断剛性 } K = 2K_0 \quad [\text{N/mm}] \quad \dots [34]$$

$$\text{同上降伏変位 } \delta_y = \frac{P_{yd2}}{K} \quad [\text{mm}] \quad \dots [35]$$

$$\text{込栓 2 本セットでの降伏変形角 } \theta_{yd2} = \frac{\delta_{yd2} \times 2}{D} \quad \dots [36] \quad D: \text{込栓間距離}$$

$$\text{同上降伏モーメント } M_{yd2} = P_{yd2} D \quad \dots [37]$$

$$\text{同上回転剛性 } K_{\theta d2} = \frac{M_{yd2}}{\theta_{yd2}} \quad \dots [38]$$

3.7 タモ材の横圧縮(めり込み)試験⁵⁾

(1) 試験概要

予備試験に使用した 3 本のたて貫材(母材: たて貫 1~3)から、加

圧面に対する年輪傾角(0° , 90° , 45°)毎に各 3 体の $30 \times 30 \times 90$ (60: 全面用)mm の試験片を切り出し、JIS Z2101 を参照し全面横圧縮試験、部分圧縮試験(図 4)を実施した。両試験とも万能材料試験機により、加力速度 1mm/min.での単調加力、変位計は加力中心から点対称に配し、めり込み変位 δ はそれらの平均値とした。材料の物性値を表 3 に、年輪傾角を含む試験概要を図 4 に示す。

表 3 タモめり込み試験の材料物性 ※平均年輪幅[mm]

	密度[g/cm ³]	全乾密度	含水率[%]	E_0 [N/mm ²]	平均年輪幅
たて貫 1	0.655	0.576	10.25	10818	3.07
たて貫 2	0.641	0.571	9.75	10079	2.74
たて貫 3	0.651	0.566	10.33	16821	1.62
平均	0.649	0.571	10.11	12573	2.48

図 4 めり込み試験概要と加圧面に対する年輪傾角

(2) 全面圧縮試験の結果

母材の繊維方向ヤング係数を E_0 、全面圧縮試験における横圧縮ヤング係数を E_{90} として年輪傾角毎に E_{90}/E_0 を求めた。結果を図 5 に示す。傾角毎に平均すると、 0° では E_{90} は E_0 の 1/26、 90° では 1/29、 45° では 1/28、全体では 1/27.8 とばらつきの少ない結果となった。

(3) 部分圧縮試験の結果

試験の結果、得られた各 σ - ε 曲線を弾塑性置換し、弾性域の剛性を E_1 、塑性域の勾配を E_2 として、2 直線の交点の座標を σ_y 、 ε_y として評価した。

図 5 年輪傾角毎の E_{90}/E_0 (横線は傾角毎の平均値)

(4) 特性値と既存式との対照

稲山による等変位めり込み式[39]¹⁾を $P=K\delta$ と置き換えた場合の剛性 K について、式による値と実験値との比較を行った。

$$P = \frac{x_p y_p c_x c_y E_{90}}{z_0} \delta \quad \dots [39]$$

横圧縮試験の結果と併せて表 4 に示す。 K_1 は実験値、 K_2 は等変位めり込み式における E_{90} の値を $E_0/28$ (: 全面圧縮試験結果)として、 K_3 は $E_0/50$ として求めた。算定では、繊維方向に対する繊維直交方向

表 4 年輪傾角別特性値[タモ] ※着色欄は計算値 下限値欄: σ_y は信頼水準 75%の 95%下限値, ε_y は最小値, その他は信頼水準 75%の 50%下限値

年輪傾角	E_0 [N/mm ²]	全面圧縮試験								部分圧縮試験					
		E_{90} [N/mm ²]	E_{90}/E_0 [N/mm ²]	E_1 [N/mm ²]	E_2 [N/mm ²]	E_2/E_1	σ_y [N/mm ²]	ε_y		σ_y (式) [N/mm ²]	ε_y (式) $E_{90}=E_0/35$	K_1 : 実験値 [N/mm]	K_2 (式) $E_{90}=E_0/28$	K_3 (式) $E_{90}=E_0/50$	K_1/K_2
0°	12573	514.2	1/26	974.6	113.5	1/9.3	11.43	0.0118		7.43	0.009	24133	25569	14318	0.94
90°	12573	442.1	1/29	765.0	94.95	1/8.4	16.29	0.0219		7.43	0.008	18741	25569	14318	0.73
45°	12573	462.0	1/28	904.4	95.64	1/9.6	11.83	0.0131		7.43	0.008	22428	25569	14318	0.88
平均	12573	472.8	1/28	881.3	101.4	1/9.1	13.18	0.0156		7.43	0.009	21768	25569	14318	0.85
下限値等		454.1	(1/28)	849.1	95.65		8.34	0.0109				20931			

の置換係数 $n=7$ 、 $E_m=0.8E_{cv}=8.64\text{N/mm}^2$ とした。全面横圧縮ヤング係数 $E_{90}=E_0/50$ とした計算値 K_3 は実験値 K_1 の 66% 程度とかなり安全側の結果となり、一方 E_{90} に実験値 ($E_0/28$) を用いた計算値 K_2 は実験値 K_1 の 117% であり、既存式に全面圧縮試験におけるヤング係数の値をそのまま用いることは危険側の評価となる。等変位めり込み式を基準に考えると、タモ材の見かけ上の E_{90} は、 $E_0/28 \times 0.85(K_1/K_2) \div E_0/35$ であり、 ε_y 比較では実験の最少値と計算値はほぼ符合した。また式 σ_y 計算値は実験値の 6 割程度であるが、95% 下限値との比較では 9 割程度まで近づく。以上から、針葉樹を前提とする既存式の適用範囲を広葉樹へ拡大するに当たっては、置換係数 n と E_{90} の評価を見直す必要があると思われる。

3.8 算定結果のまとめ

3.1～3.6 の式に数値を代入して求めた要素別特性値の算定結果を表 5 にまとめて示す。

表 5 要素別特性 (算定) 値

特性値等 要素(部位)	K_θ [kNm/rad]	θ_y [rad]	M_y [kNm]	箇所	ΣK_θ [kNm/rad]
I 貫/たて貫	206.4	0.0104	2.137	18	3714.6
II 柱/貫	60.54	0.0149	0.903	12	726.48
III 柱/横架材	94.01	0.0114	1.065	2	188.02
IV たて貫/横架材	115.8	0.0096	1.113	2	231.55
V 板木口/たて貫	50.80	0.0109	0.556	28	1422.3
VI 板/横間がき	45.47	0.0048	0.216	28	1273.2
VII 貫/たて貫込柱	28.68	0.0525	1.506	18	516.2
計					8072.3

4. 試験結果と算定値の比較

図 6 に、耐力壁全体のモーメント M と真のせん断変形角 γ_0 関係の試験結果と算定値を示す。モーメントの実験値は $M=2.73P$ として、算定値は要素 I～VII のうち、降伏したものから順次回転剛性を初期の 1/8 に低減して³⁾求めた。図 6 より、初期剛性と降伏モーメントに関して、安全側の推定ができたといえるが、より正確なモーメント抵抗性能の推定には、塑性域における(より正確な)摩擦係数や回転剛性の評価や、今回はかなり高かったと思われる施工精度による 2 次剛性への影響の勘案が必要であると思われる。

図 7-1～7-3 に変位計を設置した部位のモーメントと回転角の関係を示す。柱と貫の相対回転角は 5ch と 6ch、たて貫と貫の回転は 7ch と 8ch、板とたて貫の回転は 9ch と 10ch(図 1 参照)それぞれの計測結果を用いて求めた。各部モーメントの実験値は、表 5 に示す各要素または各部位 1 か所あたりの回転剛性と壁全体の回転剛性の比に応じ分配して算出した。

図 6 全体の $M-\gamma_0$ 関係(実験値と計算値) 図 7-1 部位別 $M-\theta$ 関係

図 7-2 部位別 $M-\theta$ 関係

図 7-3 部位別 $M-\theta$ 関係

二つの要素の足し合わせで求めた貫/たて貫部については、初期剛性、トリリニア的な挙動の推定とも算定値は実験結果とよく符合した。柱/貫部については初期剛性、降伏モーメントを概ね推定できた。一方板木口/たて貫部では、初期剛性に関し安全側の推定ができたが、降伏モーメントについては算定値が実験値を下回った。理由として、算定では見込まなかった板と横貫間における繊維直交方向(同士)の摩擦やめり込みの影響があるのではないかとと思われる。

5. まとめ

- ・伝統要素によりながらも、節点数を増やし寸法仕様を工夫することで、粘り強く剛性や耐力の高い壁を実現できる可能性を示した。具体的な改善・工夫点は、ほぞを厚くし接触面積を増やすことでモーメント抵抗性能を高める。貫端部にテーパを設け柱仕口との遊びをなくし剛性の増大を図る。接合具材以外にも広葉樹材を利用してめり込み性能の向上を図る。複数のダボによる回転拘束に期待するなどである。
- ・既存のめり込み式と木栓せん断式を用いて、耐力要素のモーメント抵抗性能について概ね推定できることが示された。また、広葉樹材へのめり込み式適用の可能性を示したが、広葉樹材における置換係数 n と全面横圧縮ヤング係数 E_{90} の値を決定するために更なるデータの蓄積が必要である。
- ・今後、より正確な壁全体のモーメント抵抗性能の推定と、実際の設計に広葉樹材を、接合具以外のより大きな部材として用いる際の評価法についての考察が必要と考える。

謝辞

最後に今回の耐力壁の開発に当たりご尽力された関係各位に、ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 稲山正弘：木材のめり込み理論とその応用 靱性に期待した木質ラーメン 接合部の耐震設計法に関する研究，東京大学学位論文，1991
- 2) 福山弘：木質接合具によるせん断接合の設計式とその応用，東京大学学位論文，2008
- 3) 日本建築学会 編著：木質構造接合部設計マニュアル，日本建築学会，pp. 94-112, 160-178, 225-238, 252-264, 275-277，2009
- 4) 藤田克則，小林良洋，稲山正弘：ヒノキ材の横圧縮性能 -伝統的な接合部性能評価のための要素試験-，日本木材学会研究発表要旨集，60，2010
- 5) 藤田克則，小林良洋，稲山正弘：タモ材の横圧縮性能 -伝統的な接合部性能評価のための要素試験-，日本木材学会研究発表要旨集，61，2011

[2011 年 6 月 1 日原稿受理 2011 年 9 月 20 日採用決定]