木造接合部におけるほぞ差込み 栓の強度特性とその破壊性状に 関する実験研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE PERFORMANCE AND FAILURE MODE OF PEGGED, MORTISE AND TENON JOINT OF WOODEN CONNECTIONS

渋谷 泉 —*1 松留慎一郎 —*2
前川秀幸 —*3 藤田香織 —*4

Izumi SHIBUYA —*1 Shinichiro MATSUDOME —*2
Hideyuki MAEKAWA —*3 Kaori FUJITA —*4

キーワード：
木造接合部, ほぞ差込み栓, 破壊性状

Keywords:
Wooden connections, Pegged, Mortise and tenon joint, Failure mode

This paper focuses on the joints of failure mode in traditional timber structures. These joints have strong influence on the strength and performance of timber buildings. The purpose of this paper is clarify the strength and failure mode of pegged, mortise and tenon joint. Static shear loading test of the joint was operated. The combination of bending, shear and compressive failure of the peg within the joint was observed through the experiment. The deformation of all the members of each phase is documented in detail. The failure model of the joint was found to be similar to that of the bolt joint for double shear connections.

1. はじめに

現在木造建築の多くは水平耐力に応じた接合部の強度が要求される。通常の木造仕口では、十分な強度が確保できないとされ、補強金物を使用せざるを得ない場合が多い。また伝統的な木造建築物の修理工事においても伝統的な技法や構法を用いることが望ましいが、構造計算を行うと剛性や耐力が低く見積もられ、結果的に過大な補強を余儀なくされる現状がある。これは、接合部の強度特性の実験についてかなり古くから飯塚等による研究¹⁾がなされているものの、補強金物を使用しない、伝統的な継手・仕口の構造特性に関するデータの蓄積がまだ少ないことによるものと考えられる。本報告では木造仕口として、ほぞ差込み栓を使用した接合部に注目し、その強度特性の把握、破壊性状の把握を目的としている。

2. 試験体概要

長ほぞ差込み栓は横架材及び鉛直部材と込栓により構成される。今回はT字型仕口で柱と土台の仕口部を想定した接合部としている。またT字型仕口は破壊性状を把握するために、既往の報告²⁾にもあるように、ほぞと両ほぞ穴（以後主材、側材と記す）の3部材に分けモデル化している。試験体の概要を表1に、形状を図1に示す。試験体は、樹種には柱・土台ともにヒノキ材を用い断面寸法は木造軸組構法の基本的な断面寸法として主材幅 30mm とし側材との3部材断面寸法の総和が 105mm になるものとした。また込み栓は既に加工が行われているもので、部材への穴の加工は電動角のみを用いバリをのみで取る程度とした。開き止めボルト(標準試験体 12mm, 繰返し試験体 9mm)は材が接し摩擦が発生しない程度に締付けた。

表 1 試験体概要

		標準試験体	繰返し試験体	樹種
込み栓	寸法	18mm 角(6分)	15,18,21,24mm 角	ナラ
主材/側材	寸法	30/37.5 計 105mm		ヒノキ
試験体数		5体	性状各1体	各3体

注: 込み栓打込み位置 各試験体とも真打(真墨の位置)

	標準試験体			繰返し試験体		
	含水率%	比重	年輪間隔 mm	含水率%	比重	年輪間隔 mm
主材	12	0.52	6.0	12	0.52	6.0
側材	11	0.51	6.0	11	0.51	6.0
込栓	14	0.70	2.6	14	0.68	2.6

図 1 試験体概要

*1 職業能力開発総合大学校建築工学科 助手
(〒229-1196 相模原市橋本台4-1-1)

*2 職業能力開発総合大学校建築工学科 教授・工博

*3 職業能力開発総合大学校建築工学科 講師

*4 東京都立大学工学研究科 講師・工博

*1 Research Assoc., Dept. of Arch. Eng., The Polytechnic University

*2 Prof., Dept. of Arch. Eng., The Polytechnic University, Dr. Eng.

*3 Assist. Prof., Dept. of Arch. Eng., The Polytechnic University

*4 Assist. Prof., Faculty of Eng., Tokyo Metropolitan University, Dr. Eng.

3. 試験概要

3.1 試験方法

試験は一方向加力の標準試験と繰返し加力試験（負に関しては試験機容量上変位 5mm まで）を、図 2 に示す試験機を用いて行った。加力スピードは概ね標準試験では 47N/sec、繰返し加力試験では 89N/sec 程度であった。

3.2 試験の種類

標準試験では、一方向加力による強度特性、破壊性状の把握をおこなった。破壊性状の把握にあたっては、標準試験をベースに荷重変位曲線から図 4 のように、6 つの破壊性状を設定し、各ポイントにおける込み栓及び主材・側材の状態の把握を行うことによって込み栓の破壊性状を再現した。また、変形は 30mm 以内でとどまっていることから、試験は破壊が生じるまでとした。³⁾繰返し加力試験は込み栓の寸法を 15, 18, 21, 24mm の 4 寸法で行い強度特性、寸法による影響、繰返し加力による影響の把握を行った。

4. 試験試験結果

4.1 標準試験結果

標準試験の荷重変位曲線を、図 3 に示す。

図 3 荷重変位曲線

図 4 荷重変位曲線 込栓破壊ポイント

図 4 では、6 箇所の破壊ポイントを設定している。

標準試験結果を元に図 4 に示す 6 ポイントで加力を止めそれぞれの試験体ごとに、込み栓を主材・側材からはずしている。試験体は同一ではなく 6 体としているために荷重変位曲線や亀裂は、ばらつきが見られるものの、ほぼ同じ傾向を示していることを述べておく。込み栓の破壊性状について、写真 1 及び 2 に示す。標準試験の算出結果を、表 2 に示す。結果の K , P_u , δ_v は「仕口、継手の評価方法」³⁾によって算出した。

図 2 試験機概要

写真 1 込み栓破壊性

写真 2 込み栓+主材③～⑥ 破壊性状

4.2 標準試験(標準試験, 破壊性状)結果の考察

図2の荷重変位曲線にみられるように, 長さ差込み栓は一旦耐力が低下するものの, 次第に耐力・変形ともに上昇し破壊することがわかる。降伏に至る破壊段階を写真1,2に示す。

一旦耐力が低下するのは, 込み栓の曲げ変形による亀裂であることが写真1③から, 変形・耐力の上昇は主側材と込み栓のめり込みによるものであることが写真1,2の破壊性状からわかる。

日本建築学会「木構造設計基準」⁶⁾では, 接合形式に対して4つの降伏モードを仮定している。写真1,2からこの試験体は仮定されたモードのうち栓の曲げ, せん断と主側材のめり込むモードの降伏性状に近い形となっている。込み栓の破壊はまず主材幅で栓がめり込み(写真1②), 次に主材中央部にあたる位置に曲げによる亀裂が入る(写真1③)。その後次第に変形が大きくなるにつれ, 込み栓のせん断が加わり母材にめり込んでいく(写真2⑥)。今回の寸法・樹種では主材, 側材の降伏は見られていない。

込み栓を用いた差鴨居の実験⁴⁾でも, ほぞのせん断での脆性的破壊をしない場合は, 込み栓は終局的に写真1⑥のような破壊状態をしている。モデル化したことによる破壊性状への影響はないものと考えられる。

5体の平均(標準偏差 1036.17)から長期許容耐力を誘導する⁵⁾と

$$13.76 \times 3/4 \times 1/2 \times 1.1/2 = 2.83 \text{ KN} \cdots (1) \text{ となる。}$$

以下に理論式として標準モデルの長期許容耐力計算を行い比較検討する。破壊としては以下の3パターンと④の理論式が考えられる。

(ヒノせん断許容応力度 0.77 N/mm^2 , ねり込み許容応力度 3.96 N/mm^2

材のせん断許容応力度 2.20 N/mm^2 : 施行令 89 条 2 項により 2 倍まで増加⁶⁾)

① ほぞのせん断耐力

$$30 \times 43.5 \times 2 \times 0.77 \text{ N/mm}^2 \approx 2.01 \text{ KN} \cdots (2)$$

(105 角 真打ちの場合 せん断面積 $105/2-18/2=43.5$)

② 栓のめり込み耐力

$$30 \times 18 \times 3.96 \text{ N/mm}^2 \approx 2.14 \text{ KN} \cdots (3)$$

③ 栓のせん断耐力

$$18 \times 18 \times 2 \times 2.20 \text{ N/mm}^2 \approx 1.42 \text{ KN} \cdots (4)$$

④ 日本建築学会「木構造設計基準」⁶⁾

せん断を受けるボルト接合部の許容耐力式^{注1)}

$$P_y = 1 \times 18 \times 30 \times 10.8 / 1000 \text{ N/mm}^2 \approx 5.83 \text{ KN} \cdots (5)$$

$$L P_y = 5.83 \times 1.1/3 \approx 2.14 \text{ KN} \cdots (6)$$

接合部の許容耐力は計算結果から最も低い③の栓のせん断で決まるものの, 5体の平均に比べかなり安全側となっている。また試験結果図5からも18mmで理論値(上式4)は実験値に対して1/3程度となっている。試験結果による破壊性状からも, 埋込まれている状態ではせん断のみが起きるのではなく実際は栓に曲げが発生すると同時に栓・母材共にめり込みが生じるので単純な栓のせん断破壊ではないことが伺える。

したがって, 今回の寸法・樹種の組み合わせでは, 曲げやめり込みが考慮されている④式での検討が行えると考えられる。また①ほぞのせん断で決まる場合については, 脆性的破壊であり別途検討をすることが望ましい。さらに計算式の適用にあたっては, 込み栓・母材のめり込みの把握に加え, 込み栓と母材の強度比の関係把握も必要であると考えられる。

表2 標準試験結果

	P_{max}	K	P_u	δv
18-1	14277	1725	10683	6.2
18-2	13890	1860	9914	5.3
18-3	11781	2308	9410	4.7
18-4	14789	2222	10603	4.8
18-5	14090	2304	11032	4.8
平均	13765	2084	10328	5.2

注: P_{max} : 最大荷重(N), K : 剛性(N/mm), P_u : 終局耐力(N), δv : 降伏点変位(mm)

図5 込栓寸法別荷重変位履歴曲線及び包絡線

表3 繰返し加力試験結果

込栓寸法	15mm				18mm				21mm				24mm			
	P_{max}	K	δv	μ	P_{max}	K	δv	μ	P_{max}	K	δv	μ	P_{max}	K	δv	μ
1	6295	1520	3.6	2.4	12578	2880	7.5	3.0	14923	2600	9.3	1.8	12289	2265	6.8	1.6
2	5869	1941	8.1	3.1	10560	2353	6.9	2.2	14534	1625	11.7	1.5	11349	2080	8.8	1.5
3	6408	2189	7.6	3.1	8151	2333	7.2	2.1	13167	2020	10.9	1.9	10408	1350	9.1	1.2
平均	6191	1883	6.4	2.9	10429	2522	7.2	2.4	14208	2082	10.7	1.7	11349	1898	8.2	1.4

注: P_{max} : 最大荷重 (N), K : 剛性(N/mm), δv : 降伏点変位(mm), μ : 塑性率 (0.8 P_{max} の包絡線上の変位/降伏点変位)

4.3 繰返し加力試験結果及び考察

表3に P_{max} と K , δv , μ の算出結果³⁾を, 図5に込栓寸法別荷重変位履歴曲線及び包絡線, 図6繰返し加力の包絡線に結果を示す。

(1)繰返し加力による影響

込栓寸法 18mm に関して表2, 図3の一方加力試験結果と比較すると繰返し加力による影響はみられていないが, 今後実際の仕口での検討が必要である。

(2)寸法による影響

込栓寸法を大きくしていくと断面積, 一辺の長さが大きくなるため単純に耐力や剛性があがると予想がされがちである。しかしながらこの試験においては, 15, 18, 21mm と最大荷重, 剛性, 降伏変位で向上している (21mm 剛性のみ低下) が, 24mm では最大荷重が低下する。15, 18, 21mm の込栓は栓の降伏で破壊したが, 24mm では母材 (今回の実験では側材) に亀裂が入った。既往の研究¹⁾にも 24mm では母材が破断する結果があり, 込栓寸法と母材寸法によっては, 栓が降伏せずに母材に亀裂が入り, 降伏する性状を示す。母材と込栓の寸法の関係が強度特性, 破壊性状に影響していると考えられる。また柱脚部に込栓を用いた耐力壁の水平加力試験⁷⁾においても栓が降伏せずに側材 (土台) が裂けるような傾向があり, 栓が降伏しない場合は母材が破壊し脆い破壊となる。今回使用した込栓ナラのせん断強度と母材ヒノキのめり込み強度の関係は, 概ね 1:0.84 であり, 込栓と母材との強度の関係によっても強度特性や破壊性状に影響があると思われる。

また塑性率 μ においては込栓寸法が大きくなるにつれ低下し, 側材に亀裂が入る 24mm では, 15mm の 1/2 程度となっている。今回の樹種の組み合わせで, ほぼ幅 30mm, 母材 105mm 角においては, 18mm, 21mm の 2 種類の寸法が適しているといえる。

5. まとめ

長ほ差込栓を使用した接合部についてその強度特性及び, 破壊性状の把握をおこなった。込栓を用いた接合部は, 母材・込栓は互いに変形しめり込むことで, ボルト接合(a)の降伏モード⁶⁾における木材のめり込みとボルトの曲げにより降伏に至る仮定に近い破壊性状を示している。部材が 105mm 角, ほぼ幅 30mm の仕口の場合は, 18mm 角または 21mm 角の込栓が適していると考えられる。ただし込栓寸法, 母材寸法及び, 樹種の組み合わせが強度特性, 破壊性状に影響を及ぼすと考えられ更に検討が必要である。

破壊性状から, 長ほ差込栓の許容耐力を誘導するにあたっては, 込栓と主材のめり込み及び, せん断を考慮した「せん断を受けるボルト接合部の許容耐力式」⁶⁾ (EYT 式) の理論式が適用できると考えられる。

図6 繰返し加力試験包絡線

注1) せん断を受けるボルト接合部の許容耐力式は以下の式による

$$P_y = c \times F_e \times d \times l \quad c = \min(c_1, c_2, c_3, c_4)$$

$$c_1 = 2\alpha\beta = 1.805$$

$$c_2 = 1$$

$$c_3 = \sqrt{\frac{8\alpha^2\beta^2(1+\beta)}{(2\beta+1)^2} + \frac{K\beta\gamma\left(\frac{d}{l}\right)^2}{2\beta+1}}$$

$$c_4 = \frac{d}{l} \sqrt{\frac{8\beta\gamma}{3(1+\beta)}} = 1.28$$

α : 側材厚/主材厚 = 1/1
 β : 側材と主材引張強度の比 = F_e/Fe
 γ : 栓の曲げ強度 Fb のと主材の引張強度の比 = Fb/Fe
 $Fe = 10.8 \text{ N/mm}^2$ ナラめり込み材料強度
 $Fe' = 7.8 \text{ N/mm}^2$ ヒノキめり込み材料強度
 $Fb = 29.4 \text{ N/mm}^2$ ナラ曲げ材料強度
 $d = \text{ファスター径} = \text{込栓寸法} = 18 \text{ mm}$
 $l = \text{ほぼ幅} = 30 \text{ mm}, l' = 37.5 \text{ mm}$
 $K = 4$ (正方形断面の栓の場合)
 本式はボルト断面が円形の場合の式である。
 また支圧強度は木材のめり込み材料強度を用いている。⁹⁾

参考文献

- 飯塚五郎蔵・石井卓郎: 和風仕口の引張耐力試験 建築学会大会要覧集, 1977.10
- 住宅部材安全性能向上事業報告書 (集成材の接合強度評価), (財)日本住宅・木材技術センター, 平成11年3月
- 木造軸組工法住宅の許容応力度設計, (財)日本住宅・木材技術センター
- 藤原裕子他3名: 民家の構造耐力性能に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術要覧集, pp.235~236, 2002
- 継手仕口の種類・性能と適切な配置を知る, 地震に強い「木造住宅」パーフェクトマニュアル, エクスナレッジ, pp.96~106, 2003.1.17
- 木質構造設計基準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法—, 日本建築学会, 2002.10
- 特別企画 耐力壁を創造する②, 建築知識, pp.239~246, エクスナレッジ, 2002.2

[2003年4月17日原稿受理 2003年7月29日採用決定]