

伝統的木造軸組構法の仕口強度特性

—引き独鈷(どっこ)、寄せ蟻—

近畿職業能力開発大学校

田島 幹夫*

Joint Strength Properties of the Traditional Timber Frame Construction - Hikidokko and Yoseari -
Mikio TAJIMA

要約

現在、伝統的木造軸組構法における構造面などの安全性の検証において、十分なデータベース等が構築されていないこともあり、設計法も確立されていない。このような背景のもと、国ベースで設計法の構築及び性能検証を行う事業を始めた。本報告は、その一部である引き独鈷及び寄せ蟻という伝統的木造軸組構法に用いられる仕口の引張り試験を行なった結果を報告するものである。「引き独鈷」の仕口強度特性及び「寄せ蟻」においては杉-桧タイプが桧-桧タイプを上回る耐力があることが確認できた。なお本取組みは、応用課程の最終段階である応用課題実習の中で行ったもので、今後、伝統的木造軸組構法の耐震性能におけるデータベース構築にわずかでも寄与できれば幸いある。

I はじめに

日本における伝統的木造軸組構法は、まぎれもなく日本の文化・歴史・景観・環境の中心的な要素であり、日本の暮らしや精神性に大きな影響を与えていると言っても過言ではない。しかし、伝統的木造軸組構法における構造面の検証において、各要素のデータベースの構築が十分でないこともあり、設計法も確立されていない。本報告はデータベース構築の一部として「引き独鈷」及び「寄せ蟻」という伝統的木造軸組構法に用いられる仕口の引張り試験を行なった結果を報告するものである。

なお、試験体名称において T:引張り、S:杉、H:桧、K:ケヤキを表すものとする。また、男木材にあたる部材を主材、女木材(穴側材)を側材と呼ぶことにする。

含水率は、含水率計でも測定したが、基本的には仕口付近(図1)を切り出し105℃で24h乾燥炉に入れ重量測定を行い求めた。方法は、下記の式による。

$$\text{含水率} = \frac{(\text{乾燥前質量} - \text{全乾質量})}{\text{全乾質量}} \times 100(\%) \cdots (1)$$

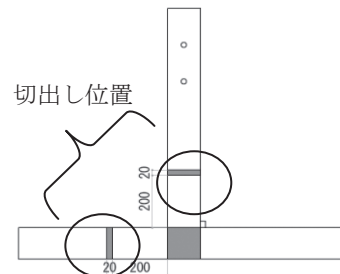


図1 切り出し位置

材料はすべて含水率20%以下、桧材はE110、寄せ蟻の込桧は檜材、楔は側材と同樹種(杉材、桧材)で行った。また、割れがある箇所は樹脂注入を行って

II 試験体仕様及び試験方法

1 試験体仕様

表1、2に試験体仕様を、図2、3、4に形状を示す。

る。

表1 引き独鉋仕様

種別	試験体名	材料仕様 ※主材(男木材)、側材(女木材)	ほぞ長	ほぞ厚	栓	試験体数
引き独鉋	引独-T-SK	主材:ケヤキ、側材:杉-120×120	120	30	-	6
	引独-T-HK	主材:ケヤキ、側材:桧-120×120	120	30	-	6

表2 寄せ蟻仕様

試験体名	材料仕様 ※主材(男木材)、側材(女木材)	ほぞ長	ほぞ厚	栓	試験体数
寄せ蟻-T-SS-栓無	主材:杉-120×120、側材:杉-120×120	120	30	-	6
寄せ蟻-T-SH-栓無	主材:杉-120×120、側材:桧-120×120	120	30	-	6
寄せ蟻-T-HH-栓無	主材:桧-120×120、側材:桧-120×120	120	30	-	6
寄せ蟻-T-SS-栓有	主材:杉-120×120、側材:杉-120×120	120	30	18角	6
寄せ蟻-T-SH-栓有	主材:杉-120×120、側材:桧-120×120	120	30	18角	6
寄せ蟻-T-HH-栓有	主材:桧-120×120、側材:桧-120×120	120	30	18角	6

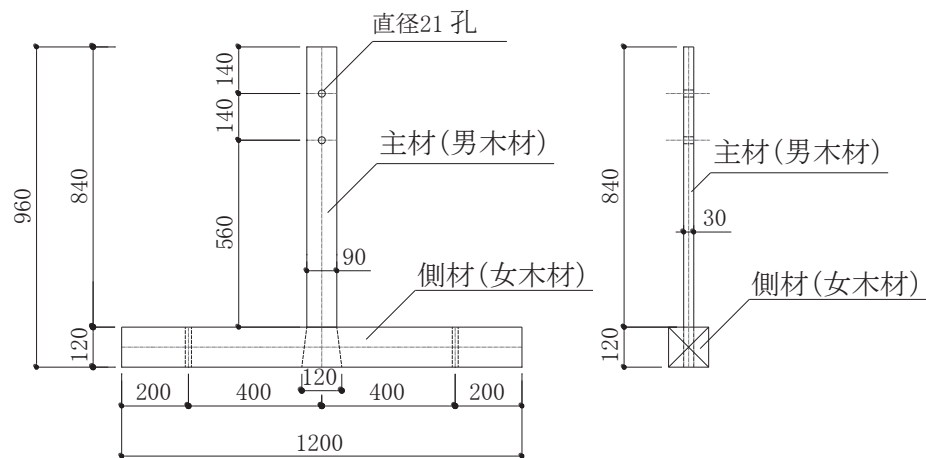


図2 引き独鉋試験体形状

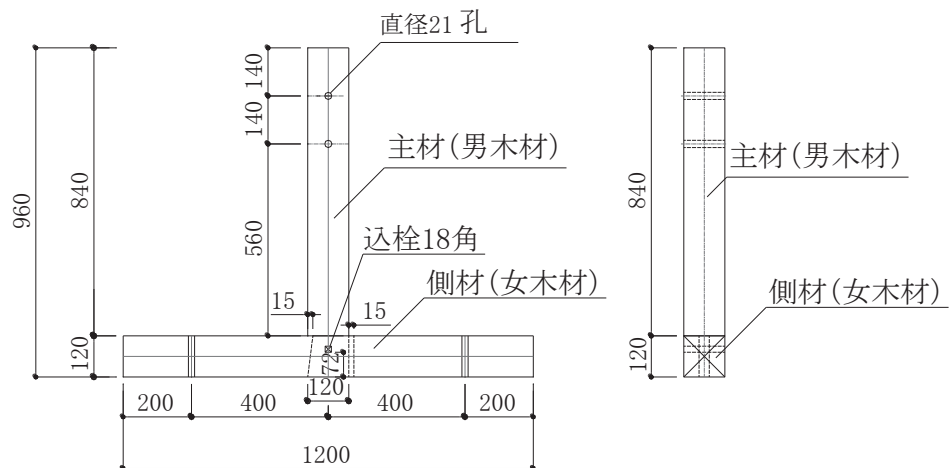


図3 寄せ蟻試験体形状

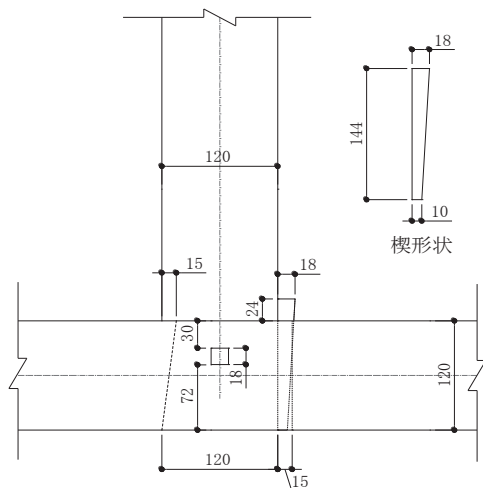


図4 寄せ蟻試験体形状詳細図

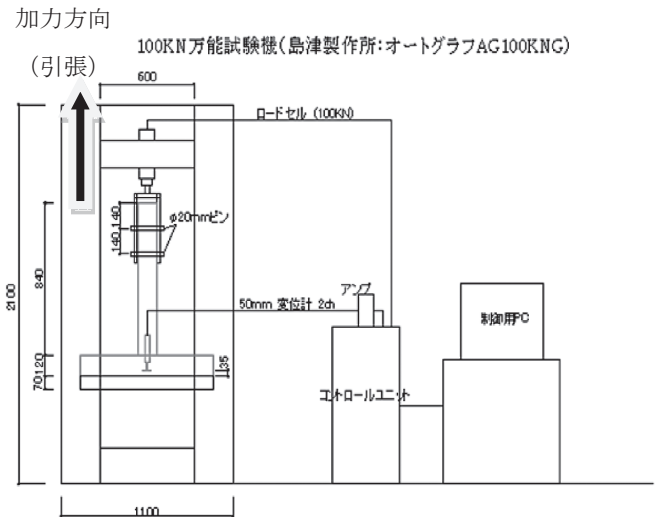


図5 システム構成図

2 試験方法

試験方法は、日本住宅・木材技術センター「耐力要素試験法指針（接合部用）」に従い実施した。

試験装置は、100kN 万能試験機（島津製作所：オートグラフ AG100KNG）を使用した。

据付状況を写真1、システム構成を図5に示す。加力方向は、上方向で引張とする。

加力は、6体中1体を単調加力試験で行い、それ得られた最大荷重（以下、 P_{max} と呼ぶ）時の変位 δ をもとに、1/10, 1/5, 3/10, 2/5, 1/2, 3/5, 7/10, 1 倍の 8 段階に分け設定した。繰り返し加力後は、単調加力により破壊に至らしめた。加力速度は、加力開始から破壊まで概ね 10 分程度となるよう調整し毎分 3mm 程度とした。

なお、側材の固定は両端より 200mm の位置に M16 ボルト、座金にて固定した。



写真1 試験体据付状況

III 試験結果及び考察

1 引き独鈷試験結果及び考察

引き独鈷については、圧縮、引張り、めり込み等に代表される材料の基準材料強度と同様に杉、桧と強くなるにつれて、 P_{max} 、降伏荷重（以下、 P_y と呼ぶ）ともに上がっている。本仕口は、主材の引抜きに対する引張りに対し、側材の内部めり込みで抵抗し、有効に作用するものである。側材の上部は割裂破壊を繰り返すが、危険な破壊モードとはならず、木材の特性を活かした接合方法と考えられる。（表3、写真2、3）

破壊に至るプロセスとしては、施工精度にもよるが、蟻部分が効き始めるまで初期剛性にばらつきが出やすいが、徐々に効き始め、側材の穴内部の部分圧縮（めり込み）が進み、側材上面の割裂破壊に至る（写真2、3）。割裂の進行とともに、木材の割れる音が発生し、荷重の上下の振幅が大きくなるような独特の $P-\delta$ 曲線を描く。（図6、7）

本実験の傾向として変位 20mm～30mm までは破壊を繰り返しつつ耐力は維持されている。側材の最大荷重では、杉材で 15kN を超え、桧材では 20kN を超える結果となった。

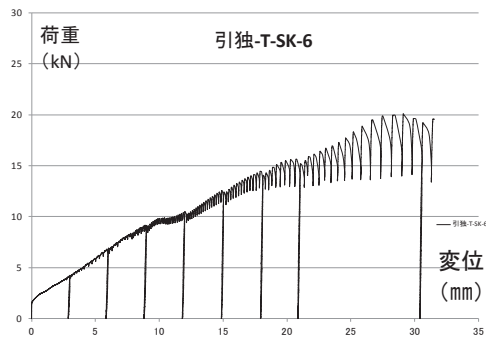


図6 引き独結 杉タイプ

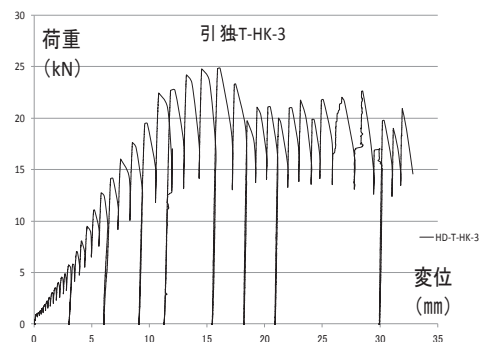


図7 引き独結 桧タイプ

表3 引き独結試験結果

種別	試験体名		最大荷重	2/3最大荷重	降伏荷重	主材(男木材)		側材(女木材)	
			(KN)	(KN)	(KN)	含水率(%)	比重	含水率(%)	比重
引き独結	引独-T-SK	平均	20.12	13.41	12.69	13.72	0.81	18.88	0.52
		変動係数	0.31	0.31	0.21	0.06	0.04	0.05	0.13
		下限値		3.79	※4.47				
	引独-T-HK	平均	25.87	17.25	17.59	11.83	0.81	15.34	0.59
		変動係数	0.21	0.21	0.34	0.04	0.06	0.17	0.05
		下限値		8.81	2.81				
原則6体より算出			下限値は75%信頼水準95%下限値						
※ 試験体6体中3体がPyの算定ができないが(N=3)の係数を用いた値						(参考値)			

桧材では、Pmaxが30kNを超えるものが存在したが、穴内部(ほぼ中央)の蟻との接触面近くに節が存在し、大きく抵抗したためである。この仕口強度は、側材内部の木材強度や比重(材料密度)に大きく影響するものと考えられる。(写真4)

なお、写真2のように破壊性状は側材上部の割裂であるが、内部は写真3のように主材の蟻部が側材下部接触面より引き上げられ、木材繊維方向に対し直角に押しつぶすような挙動が確認できる。すなわち主材蟻部による側材底部からの部分圧縮(めり込み)の連鎖により側材上部の割裂が生じる。このため破壊性状は、脆性的な割裂破壊ではなく、木材の持つ粘り要素をうまく生かした仕口と考えられる。

今後耐力を検討する場合、蟻形状の検討、すなわち図8のような角度θ、蟻部凸部の影響面積についても影響を与える要素と考えられ、施工性も含め検討が必要であると考えられる。



写真2 側材の上部割裂破壊



写真3 側材(スギ)内部破壊性状

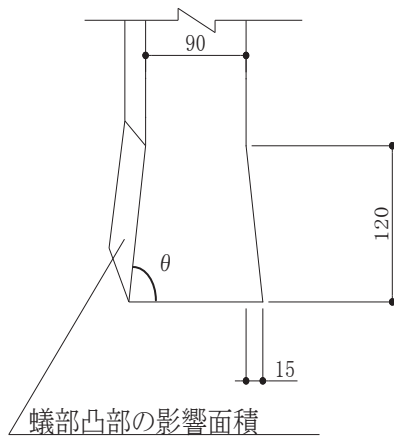


図8 蟻部凸部の影響面積

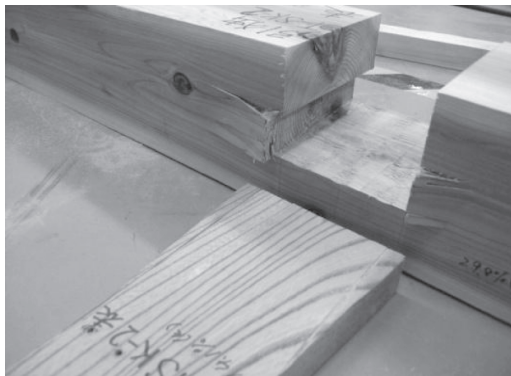


写真4 スギ材で30kNを超える(内部にふし)

2 寄せ蟻

寄せ蟻タイプは、大きく栓無タイプと栓有タイプの2つに分けられる。

共通する特徴としては、側材上面の割裂破壊により木材の割れる音が発生し、荷重の上下の振幅が大きくなるような独特のP- δ 曲線を描く。側材上面の割裂を繰り返す挙動に見られる傾向は、引き独鉗と類似している(図9,10)。

次に、寄せ蟻は栓有、栓無にかかわらず、杉-桧タイプが、桧-桧タイプをPmax、Pyともに上回った。めり込み等の材料強度から推察すれば、桧-桧タイプ

が上回ると予想されるが、逆転現象が見受けられる。

桧-桧タイプは、同じ材料特性のため、反発してお互いに割裂が促進する結果となった。逆に杉-桧タイプは、桧の強さを、杉の柔らかさが吸収し割裂を抑制できたものと考えられる(表4)。

破壊プロセスとしては、栓無しタイプは、初期段階において楔は抵抗するが、めり込みを受けながら徐々に滑り始める。ほとんどの試験体は楔とほぞが同じ挙動で引き抜かれてしまうためPmaxでも10kNに満たない(図9,11,12,13)。栓有りタイプでは、まず込栓が効き始めるため、高い初期剛性をもつ。変位が10mm程度でPmaxとなるが、蟻や楔の効果もあり急激な耐力の低下は見られない(図10,14,15,16)。

しかし、変位20mm前後で込栓上部水平ラインで側材側面に水平の割裂が発生する。変位30mm前後になるとその割裂は拡大し、込栓も曲げやせん断により破壊が進行し脆性的な破壊となる(写真5,6,7)。

本仕口は、楔の抵抗があつて片蟻が有効に働く仕組みをねらったものと考えられるが、今回の実験においては、約95%の楔が抜けてしまっている。また、約80%の楔は終局時において10mm以上の抜けが観察された。

逆に、36体中1体は「寄せ蟻-T-SS-栓無-2」楔が抜けなかった。また、同試験体No.3, No.4は2mm以内の抜けであった。いずれも、抜けてしまっているものと比べ、Pmaxも平均5.96kNに比べ8kNを超え、高い値となっている。

栓無しタイプについては、楔の抜けの状況と、Pmaxとは相関関係がみられる。しかし、栓有りタイプは、込栓の影響が強いため、楔は有効に作用せず、抜けの程度とPmaxとの相関関係は見受けられない。

以上より、寄せ蟻の栓無タイプにおいては、楔による摩擦抵抗を大きくし、引抜きを抑制することが課題となる(写真8)。一方、寄せ蟻の栓有りタイプにおいては、楔の抜けの程度とPmaxとの相関関係は確認できないことから、込栓の破壊とのバランスを考慮に入れた検討が必要と考えられる。

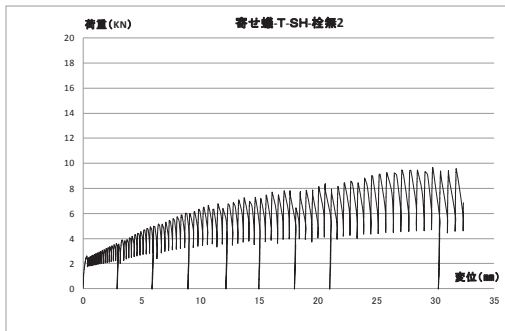


図9 寄せ蟻 S-H 栓無 タイプ

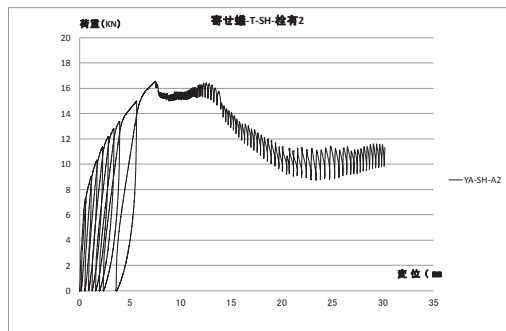


図10 寄せ蟻 S-H 栓有タイプ

表4 寄せ蟻 試験結果

種別	試験体名		最大荷重	2/3最大荷重	降伏荷重	柱		横架材	
			(KN)	(KN)	(KN)	含水率(%)	比重	含水率(%)	比重
寄せ蟻	寄せ蟻-T-SS-栓無	平均	5.97	3.92	3.17	15.57	0.45	14.56	0.50
		変動係数	0.27	0.27	0.29	0.03	0.12	0.03	0.13
		下限値		1.45	0.91				
	寄せ蟻-T-SH-栓無	平均	7.61	5.07	4.45	17.98	0.50	14.46	0.64
		変動係数	0.18	0.18	0.21	0.12	0.10	0.05	0.08
		下限値		2.97	2.13				
	寄せ蟻-T-HH-栓無	平均	7.30	4.87	4.39	17.25	0.60	15.34	0.61
		変動係数	0.22	0.22	0.32	0.05	0.08	0.08	0.04
		下限値		2.31	1.15				
	寄せ蟻-T-SS-栓有	平均	14.33	9.55	8.68	17.08	0.40	16.98	0.51
		変動係数	0.09	0.09	0.11	0.03	0.05	0.05	0.11
		下限値		7.49	6.49				
寄せ蟻-T-SH-栓有	平均	15.59	10.39	10.74	21.66	0.47	17.14	0.61	
	変動係数	0.09	0.09	0.11	0.04	0.08	0.04	0.06	
	下限値		8.12	7.81					
寄せ蟻-T-HH-栓有	平均	14.86	9.91	9.31	19.53	0.60	19.08	0.60	
	変動係数	0.13	0.13	0.17	0.04	0.02	0.05	0.09	
	下限値		6.95	5.63					

原則6体より算出

下限値は75%信頼水準95%下限値

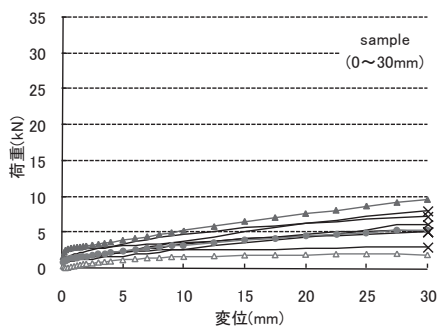


図11 寄せ蟻 S-S 栓無タイプ

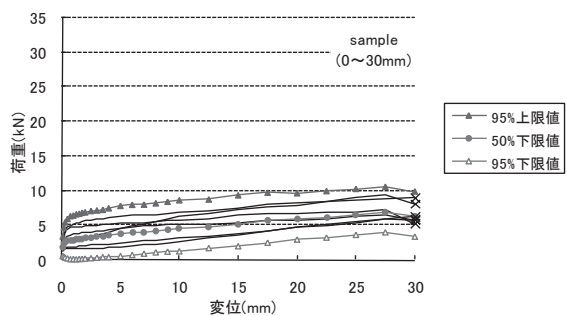


図12 寄せ蟻 S-H 栓無タイプ

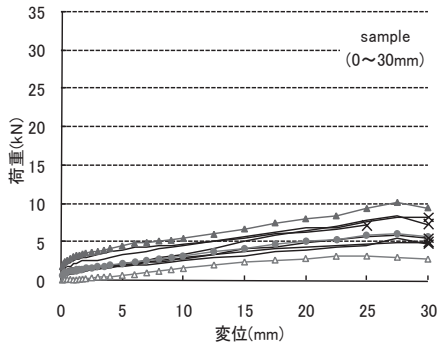


図 13 寄せ蟻 H-H 栓無タイプ

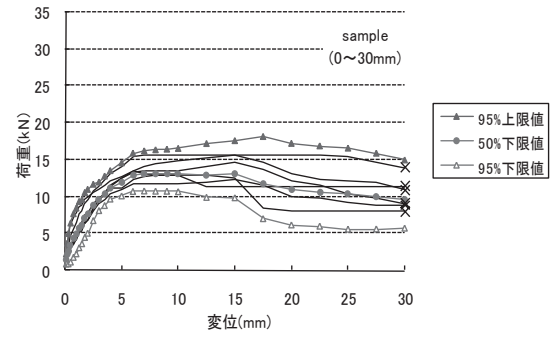


図 14 寄せ蟻 S-S 栓有タイプ

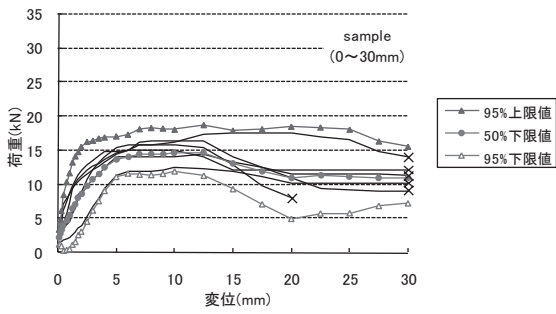


図 15 寄せ蟻 S-H 栓有タイプ

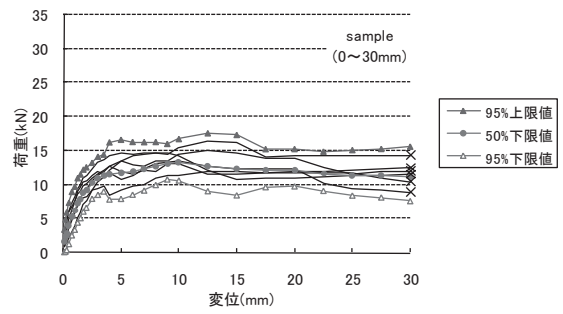


図 16 寄せ蟻 H-H 栓有タイプ



写真 5 寄せ蟻 栓有 栓上部破壊

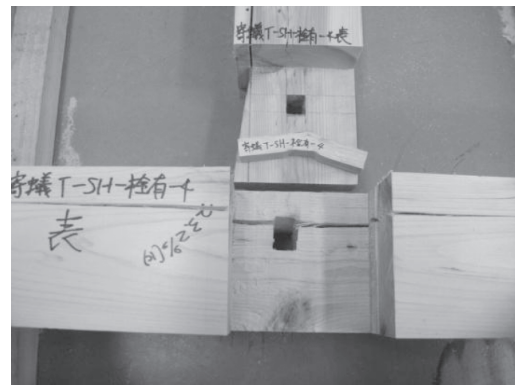


写真 6 寄せ蟻側材破壊



写真 7 込栓・楔・ほぞ破壊状況

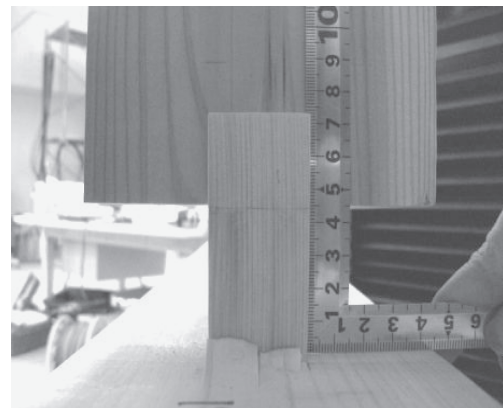


写真 8 楔の抜け(45mm)

3 寄せ蟻耐力の検討

ここでは、込栓の有、無の2タイプの耐力を検討する。単純な加算則が成立するか否かは検証が必要であるが、成立するものと仮定して検討する。

A : 「栓無タイプの耐力」 = 「蟻部分のめり込み、摩擦抵抗」 + 「楔のめり込み、摩擦抵抗」

B : 「栓有タイプの耐力」 = 「栓無タイプの耐力」 + 「込み栓の耐力」

A の栓無タイプについては、楔の抜けが多く見受けられ、本来の抵抗要素である蟻部分が有効に働かなかったことから、楔のめり込み、摩擦抵抗を含め、今後の検討課題とする。

B の栓有タイプについては、まず込栓の耐力を理論より検証し、差引いた耐力と栓無タイプとの関係を検討することとする。込栓に関する破壊モードとして下記が考えられる。

①ほぞのせん断で決まる場合

杉 : $30 \times 72 \times 2 \times 1.8 / 1000 = 7.8 \text{ kN}$

桧 : $30 \times 72 \times 2 \times 2.1 / 1000 = 9.1 \text{ kN}$

②栓のめり込みで決まる場合

栓 : $30 \times 18 \times 12 / 1000 = 6.5 \text{ kN}$

③側材の割裂で決まる場合

割裂破壊荷重理論式 $P_v = 2Crb \sqrt{\frac{he}{1-\frac{he}{h}}} \dots (2)$

Cr:杉 8.0 桧 10.0

b : 120-30=90mm

he: 30+9=39mm h:120mm

杉: $2 \times 8 \times 90 \times 7.6 / 1000 = 10.9 \text{ kN}$

桧: $2 \times 10 \times 90 \times 7.6 / 1000 = 13.7 \text{ kN}$

④栓のせん断降伏理論で決まる場合 (日本建築学会: 木質構造接合部マニュアル 2009年11月) により導く(図17)。

杉: せん断基準強度 1.8 N/mm^2

桧: せん断基準強度 2.1 N/mm^2

楔: めり込み強度 12.0 N/mm^2

楔: せん断基準強度 4.2 N/mm^2

ただし、図17式の5)モードにおいては栓のせん断強さ(繊維方向直角)のデータはナラ材より推測し 9.2 N/mm^2 とし、更に栓はクリアランスなく挿入されていることを加味し、めり込み降伏応力増大係数 1.5 を乗じて導いた。

以上をまとめたものを表5に示す。桧-桧タイプ、杉-桧タイプは、④の5モード(栓のせん断降伏)で決まる。一方、杉-杉タイプは④の3モード(栓の曲げ降伏)で決まる。いずれも④栓のせん断降伏理論の込栓の破壊により決まると考えられる。その後、込栓上部側材の脆性的割裂破壊が生じる。

$$\min. \begin{cases} 1) dt_1 F_{Ecp1} \\ 2) dt_1 F_{Ecp1} \times 2\alpha\beta \\ 3) dt_1 F_{Ecp1} \times \left[\sqrt{\frac{16\beta M_y}{dt_1^2 F_{Ecp1} (2\beta+1)} + \frac{8\alpha^2 \beta^2 (\beta+1)}{(2\beta+1)^2}} - \frac{2\alpha\beta}{2\beta+1} \right] \\ 4) \sqrt{\frac{16dF_{Ecp1} M_y \beta}{1+\beta}} \\ 5) \frac{2 \times A \times F_s}{\kappa} (= P_{Qy}) \end{cases}$$

図17 栓のせん断降伏理論(詳細は参考文献(3)参照)

表 5 破壊モード結果

モード	寄せ蟻栓有	桧-桧(KN)	杉-桧(KN)	杉-杉(KN)
④	1(ほぞ材めり込み)	9.72	9.72	9.56
④	2(側材めり込み)	12.54	12.54	9.72
④	3(栓曲げ降伏)	6.34	6.61	5.52
④	4(栓曲げ降伏)	7.63	7.63	6.94
④	5(栓せん断降伏) × 1.5	5.96	5.96	5.96
③	割裂	13.70	13.70	10.90
②	栓のめり込み	6.50	6.50	6.50
①	ほぞのせん断	9.10	7.80	7.80
	上記の最小値	5.96	5.96	5.52

表 6 比較表

試験体名	A)最大荷重(KN)	B)込栓降伏耐力(KN)	C) A-B(KN)	試験体名	D)最大荷重(KN)	C/D比較
	(実験値平均)	(理論値)			(実験値平均)	
寄せ蟻-T-SS-栓有	14.33	5.96	8.81	寄せ蟻-T-SS-栓無	5.97	1.48
寄せ蟻-T-SH-栓有	15.59	5.96	9.63	寄せ蟻-T-SH-栓無	7.61	1.27
寄せ蟻-T-HH-栓有	14.86	5.52	8.90	寄せ蟻-T-HH-栓無	7.30	1.22

以上より、側材が桧の場合、込栓が約6kNで降伏し、側材が杉の場合、約5.5kNで降伏に至るものと考えられる。寄せ蟻栓有タイプのPmaxの平均と表5における込栓のせん断降伏理論による耐力との差を寄せ蟻栓無タイプのPmaxの平均と比較する(表6)。

ある程度の整合性は確認できるが、いずれも栓無しタイプの実験値の平均は、栓有りタイプから込栓の理論値を差引いた値より小さいことがわかる。これは、込栓の影響により楔が、有効に働いたためと考えられるが、更なる検討が必要である。

IV 教育訓練的視点

本稿は、応用課程の最終課題である応用課題(12単位)の取組みとして行ったものを取りまとめたものである。応用課題は、グループで取り組む開発課題に比べ、個々の学生テーマとして取り組むものとして設定している。

本課題は、社会的ニーズ、社会貢献を兼ねた取り組みであり、伝統的木造軸組構法に興味のある学生にと

って適切な題材でもあった。

48体(8種類×6体)の試験体に対して、組立、設置、実験、観察、実験後の解体、含水率測定のための切出し、含水率測定、写真記録、データ解析、データ整理、まとめ、考察までを約1ヶ月で行った。

応用課程で養成する能力の一つである、計画を立てて、計画通りに達成まで行うマネジメント力や、実践力が養成できたものと考えられる。

また、習得される技術的要素としては、桧、杉等の特性、仕口強度の実験方法、評価方法、6体のデータばらつき処理、含水率の測定方法、含水率と強度の関係、込栓の役割と破壊メカニズム等が挙げられる。

最後に、職業人に必要な基礎能力として5S(整理、整頓、清掃、清潔、躰)に加え、更なる5SとしてSmart(服装、身だしなみ)、Smile(笑顔)、Speed(迅速)、Special(専門知識)、Sincerity(誠実)を身につけた社会人となることを切に願うものである。

この10Sについては、我々教官も学生とともに、職業能力開発を推進する上で忘れてはならないと考える。

V おわりに

本実験は、伝統的木造軸組構法のためのデータベース構築を目的に、木を活かす建築推進協議会が窓口となり研究費の一部を使用し実験を行った。この一連の実験については、異なる試験体を東京、四国、九州の職業能力開発大学校で同時に行っている。

最後に、応用課題として熱心に取り組んでくれた中野君、坂井君、野網君ならびに関係各位に対し深く感謝の意を表したい。

[参考文献]

- (1) 渋谷泉他、「木造接合部におけるほぞ差込み栓の耐力評価法に関する実験研究」、日本建築学会構造系論文集：第 601 号、2006 年 3 月、pp.99-104
- (2) 雇用能力開発機構・大学校指導部、「応用課程の考え方」、2009 年 2 月 6 日
- (3) 日本建築学会、「木質構造接合部設計マニュアル」、2009 年 11 月
- (4) 日本建築学会、「木質構造設計基準・同解説」、2006 年 12 月、pp.36-37
- (5) 田島幹夫、「伝統的構法による木造住宅の性能検証」、雑誌：建築技術、2010 年 12 月、pp.156-160