ー研究（Original Article）ー

伝統的木造住宅の接合部の強度性能
その１　継手の引張性能

戸田　正彦

Performance of wooden joints in the Japanese traditional wooden house Part 1 Tensile strengths of straight joints

Masahiko TODA

To obtain the strength values for structural design, tensile tests were conducted for straight joints (the *koshikakekama-tsugi* joint, *kanawa-tsugi* joint, and *okkakedaisen-tsugi* joint), used in Japanese traditional wooden houses. It was found that the tensile strengths of the joints depended on the area of shared primary stress, and were especially affected by the height of the joint rather than the length of the joint. When compression stress mainly occurred, the strength estimated by the evaluation formula was almost the same as the observed strength. On the other hand, when shear stress mainly occurred, the estimated strength was higher than the observed strength because of stress concentration.

Key words: *koshikakekama-tsugi* joint，*kanawa-tsugi* joint，*okkakedaisen-tsugi* joint，dowel，stress concentration
腰掛け鎌継ぎ，金輪継ぎ，追掛け大栓継ぎ，込栓，応力集中

伝統的木造住宅を構造設計する際に必要となる接合部の強度データの収集を目的として，継手のうち腰掛け鎌継ぎ，金輪継ぎ，追掛け大栓継ぎを対象として引張試験を実施した。その結果，引張耐力は継手に発生する主要な応力を負担する面積の増加に伴い大きくなる傾向が認められたが，特に継手長さよりも継手高さに大きく影響を受けることが明らかとなった。また算定式を用いて引張耐力を推定した結果，主要な応力が圧縮の場合はおおむね実験結果と一致することが確認された。これに対して，せん断の場合は応力集中が発生するために算定値は過大な評価となることが示された。

1.　はじめに

伝統的木造住宅は，地域の気候・風土に根ざした地域材等の資源を活用していることから，CO_2 の吸収源対策としての森林整備に寄与するのみならず，木材使用量が一般的な木造住宅よりも多いため，炭素固定の観点からも地球環境保全に貢献しうる構造物といえよう。

一方，一般的な木造住宅が仕様規定を満たせば構造計算は省略可能であるのに対して，伝統的木造住宅を建てるためには許容応力度計算もしくは限界耐力計算に基づく構造設計が必要となるため，設計実務者に大きな負担を課すことになる。特に構造計算に必要な接合部などの耐力要素のデータは十分には整備されておらず，新たに実験を行なってデータを収集しなければならない場合もある。このため，国土交通省の事業によって，統一された仕様の伝統的接合部の試験体，及び試験方法に基づいた試験データの蓄積が，当試験場を含む全国の試験研究機関などの協力で進められている。

本研究では，伝統的木造住宅で用いられている接合部のうち，3 種類の継手の引張試験を行って強度性能データを収集した。また接合部の耐力発生メカニズムに基づく耐力推定方法に関して検討を行った。

なお本研究の一部は，2007 年度日本建築学会大会（九州）で発表した [1)]。

2.　継手の引張試験

2.1　試験体

試験体は，伝統的継手である腰掛け鎌継ぎ，金輪継ぎ，および追掛け大栓継ぎを用いた接合部であり，材幅は 120mm，材せいは 120 ～ 300mm，継手長さは 120 ～ 600mm とした。試験体に用いた主材はスギ製材（E70，JAS 1 級相当）であり，栓および込栓はカシである。継手の作製は，日常的に手加工を行っている大工によってなされている。

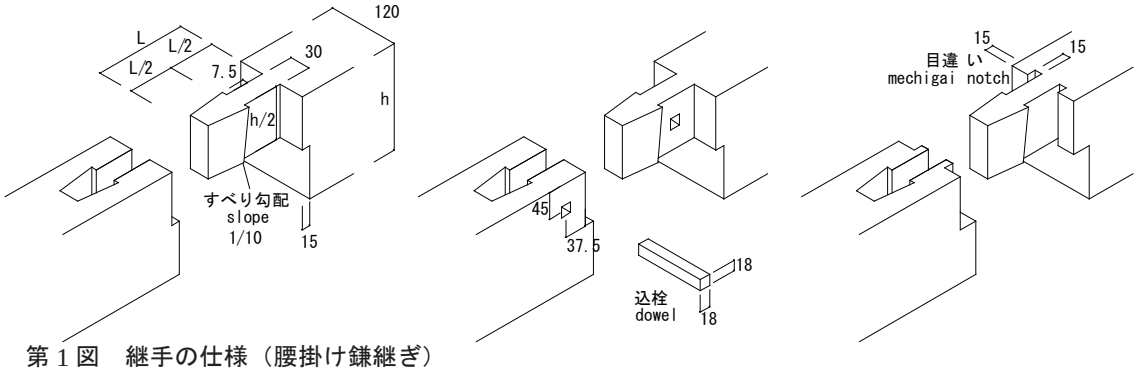
各継手の仕様を**第 1 ～ 3 図**および**第 1 表**に示す。

2.2　試験方法

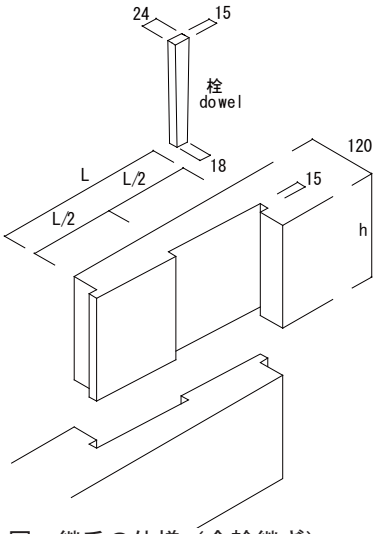
加力は繰り返し荷重試験機（(株）岩崎製）を用いて行い，荷重と変位はそれぞれロードセル（容量 200kN）およびひずみゲージ式変位計（最大ストローク 50mm）を用いて計測した。各条件とも試験体数は 7 体で，最初の 1 体を単調加力で，残り 6 体を

第 1 表　継手の仕様
Table 1. Specifications of joints.

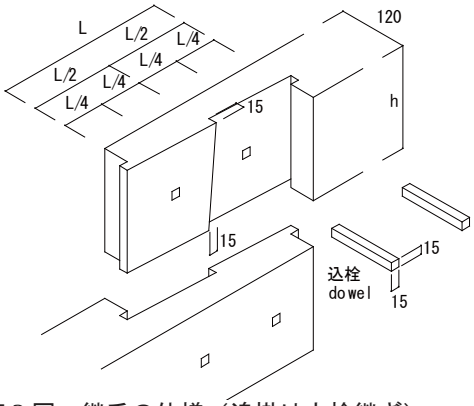
継手の形式 joint type	試験体番号 No.	材幅 width (mm)	材せい(h) height (mm)	継手長さ(L) length of joint (mm)	備考 notes
腰掛け鎌継ぎ koshikakekama-tsugi joint	KM-1212	120	120	120	
	KM-1215			150	
	KM-1812		180	120	
	KM-1815			150	
	KM-1815d				込栓 dowel
	KM-1815m				目違い mechigai
	KM-1818			180	
	KM-2412		240	120	
	KM-2415			150	
	KM-2418			180	
金輪継ぎ kanawa-tsugi joint	KN-1530	120	150	300	
	KN-1836		180	360	
	KN-1848			480	
	KN-2448		240		
	KN-3060		300	600	
追掛け大栓継ぎ okkakedaisen-tsugi joint	OD-1530	120	150	300	
	OD-1836		180	360	
	OD-1848			480	
	OD-2448		240		
	OD-3060		300	600	



第 1 図　継手の仕様（腰掛け鎌継ぎ）
Fig. 1. Specifications of *koshikakekama-tsugi* joint.



第 2 図　継手の仕様（金輪継ぎ）
Fig. 2. Specifications of *kanawa-tsugi* joint.

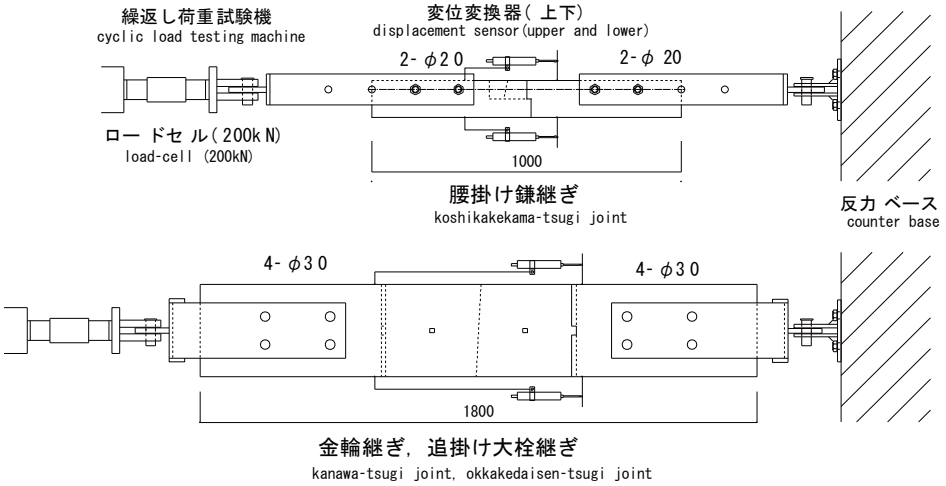


第 3 図　継手の仕様（追掛け大栓継ぎ）
Fig. 3. Specifications of *okkakedaisen-tsugi* joint.

一方向繰り返し加力（履歴は最初の 1 体で得られた降伏変位の 1/2，1，2，4，6，8，12，16 倍，各 1 回ずつ）として試験を行った。

なお加力軸は，腰掛け鎌継ぎの場合は鎌せいの中心に，その他の継手では材軸に一致させた。

試験方法を**第 4 図**に示す。



第 4 図　継手の引張試験方法
Fig. 4. Method for tensile strength tests of straight joints.

3.　試験結果

各継手の試験結果を**第 2 ～ 4 表**に，荷重と変形量の関係曲線（包絡処理後）の例を**第 5 図**に示す。

第 2 表　試験結果（腰掛け鎌継ぎ）
Table 2. Results of tensile tests (*koshikakekama-tsugi* joint).

No.		P_{max} (kN)	$2/3P_{max}$ (kN)	P_y (kN)	ρ (g/cm^3)	MC (%)
KM-1212	av.	12.6	8.4	6.9	0.41	17.4
	c.v.	0.24	0.24	0.20	0.13	0.79
KM-1215	av.	14.9	9.9	9.5	0.39	11.4
	c.v.	0.19	0.19	0.29	0.11	0.38
KM-1812	av.	14.0	9.4	8.2	0.45	47.3
	c.v.	0.15	0.15	0.23	0.17	0.42
KM-1815	av.	17.1	11.4	9.9	0.38	18.8
	c.v.	0.13	0.13	0.16	0.10	0.41
KM-1815d	av.	21.0	14.0	13.1	0.42	32.6
	c.v.	0.13	0.13	0.18	0.08	0.23
KM-1815m	av.	17.1	11.4	9.6	0.39	31.6
	c.v.	0.35	0.35	0.33	0.04	0.38
KM-1818	av.	18.4	12.3	10.4	0.42	35.0
	c.v.	0.21	0.21	0.27	0.08	0.35
KM-2412	av.	20.3	13.5	12.7	0.39	21.3
	c.v.	0.18	0.18	0.26	0.05	0.22
KM-2415	av.	21.9	14.6	13.0	0.37	21.3
	c.v.	0.16	0.16	0.18	0.04	0.29
KM-2418	av.	23.2	15.5	14.3	0.37	14.8
	c.v.	0.11	0.11	0.08	0.05	0.14

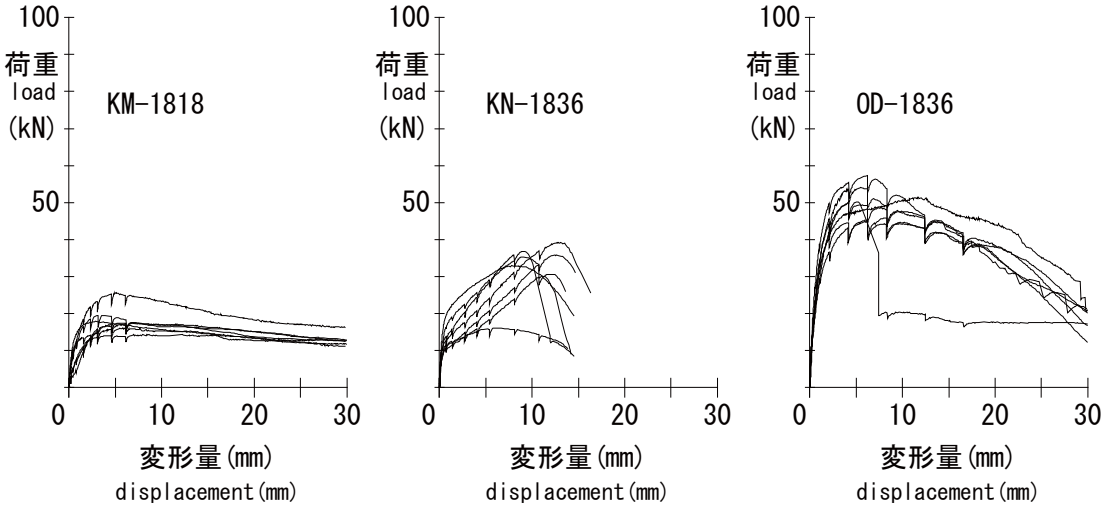
第 3 表　試験結果（金輪継ぎ）
Table 3. Results of tensile tests (*Kanawa-tsugi* joint).

No.		P_{max} (kN)	$2/3P_{max}$ (kN)	P_y (kN)	ρ (g/cm^3)	MC (%)
KN-1530	av.	30.3	20.2	14.2	0.30	18.6
	c.v.	0.14	0.14	0.12	0.07	0.51
KN-1836	av.	36.8	24.5	16.8	0.41	33.9
	c.v.	0.13	0.13	0.09	0.13	0.39
KN-1848	av.	32.3	21.5	14.9	0.43	42.7
	c.v.	0.26	0.26	0.18	0.26	0.68
KN-2448	av.	48.9	32.6	26.6	0.39	23.9
	c.v.	0.11	0.11	0.07	0.06	0.21
KN-3060	av.	55.6	37.1	30.9	0.36	21.6
	c.v.	0.11	0.11	0.23	0.07	0.33

第 4 表　試験結果（追掛け大栓継ぎ）
Table 4. Results of tensile tests (*okkakedaisen-tsugi* joint).

No.		P_{max} (kN)	$2/3P_{max}$ (kN)	P_y (kN)	ρ (g/cm^3)	MC (%)
OD-1530	av.	38.5	25.6	20.9	0.37	19.2
	c.v.	0.10	0.10	0.15	0.04	0.44
OD-1836	av.	49.0	32.7	28.1	0.39	32.5
	c.v.	0.05	0.05	0.04	0.05	0.29
OD-1848	av.	50.3	33.6	29.3	0.39	27.3
	c.v.	0.09	0.09	0.09	0.05	0.15
OD-2448	av.	77.2	51.4	44.6	0.38	17.3
	c.v.	0.10	0.10	0.14	0.07	0.33
OD-3060	av.	78.6	52.4	47.1	0.34	19.3
	c.v.	0.08	0.08	0.08	0.07	0.33

第 2-4 表 凡例）　av.：平均値，c.v.：変動係数，P_{max}：最大耐力，P_y：降伏耐力，ρ：密度，MC：含水率
Table 2-4. Legend）av.：average，c.v.：coefficient of variation，P_{max}：maximum strength，P_y：yield strength，ρ：density，MC：moisture content



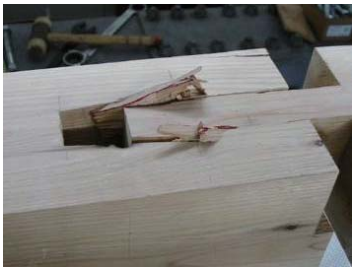
第５図　荷重と変形量の関係曲線の例
Fig. 5. Sample curves for relations between load and displacement.

3.1　腰掛け鎌継ぎ

主な破壊形態は鎌男木のせん断（第６図）であったが，鎌寸法が大きくなるに従って部分的せん断と鎌あごの圧縮破壊（第７図）を伴う場合が見られた。また込栓を併用することによって最大荷重，靭性とも向上したのに対して，目違いによる効果は認められなかった。いずれも降伏耐力は $2/3P_{max}$ よりも小さく，その比は平均 0.89 であった。

3.2　金輪継ぎ

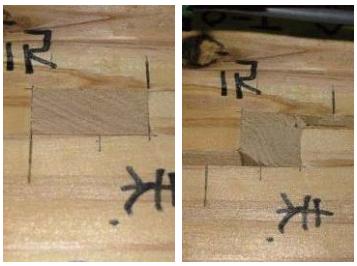
材せいが小さい場合はせん断破壊（第８図）が多く見られたが，材せいが大きくなるにしたがって，栓の横圧縮破壊（第９図）やせん断破壊（第 10 図）が認められるようになった。第５図をみると最大荷重時の変位は 10mm に達しており，他の継手に比べると大きな値を示しているが，これは栓の横圧縮変形が大きく生じたためである。同じ材せいで継手長さを変化させた KN-1836 と KN-1848 とを比べると，継手長さが長くなっても耐力は向上していなかった。これに対して，同じ継手長さで材せいが異なる KN-1848 と KN-2448 とを比べると，材せいが大きくなることによって耐力は向上している。降伏耐力の $2/3P_{max}$ に対する比は平均 0.74 であった。



第６図　鎌男木のせん断破壊
Fig. 6. Shear failure from *kama-ogi* (*koshikakekama-tsugi* joint).

第７図　鎌の圧縮破壊
Fig. 7. Compression failure of *kama-ago* (*koshikakekama-tsugi* joint).

第８図　せん断破壊
Fig. 8. Shear failure of beam (*kanawa-tsugi* joint).



第９図　栓の圧縮変形壊（左：加力前，右：加力後）
Fig. 9. Compression failure of dowel (left: before, right: after loading) (*kanawa-tsugi* joint).

第 10 図　栓のせん断破壊
Fig. 10. Shear failure of dowel (*kanawa-tsugi* joint).

3.3　追掛け大栓継ぎ

金輪継ぎ同様，材せいが小さい場合はせん断破壊（第 11 図）が多くみられたのに対し，材せいが大きくなるにしたがって掛かり面での繊維方向の圧縮破壊（第 12 図）が多く発生した。また材せいの大きい一部の試験体では偏心による目違い部からの割裂破壊（第 13 図）が生じた。また，材せい及び継手長さによる影響は金輪継ぎと同様であった。降伏耐力の $2/3P_{max}$ に対する比は平均 0.86 であった。

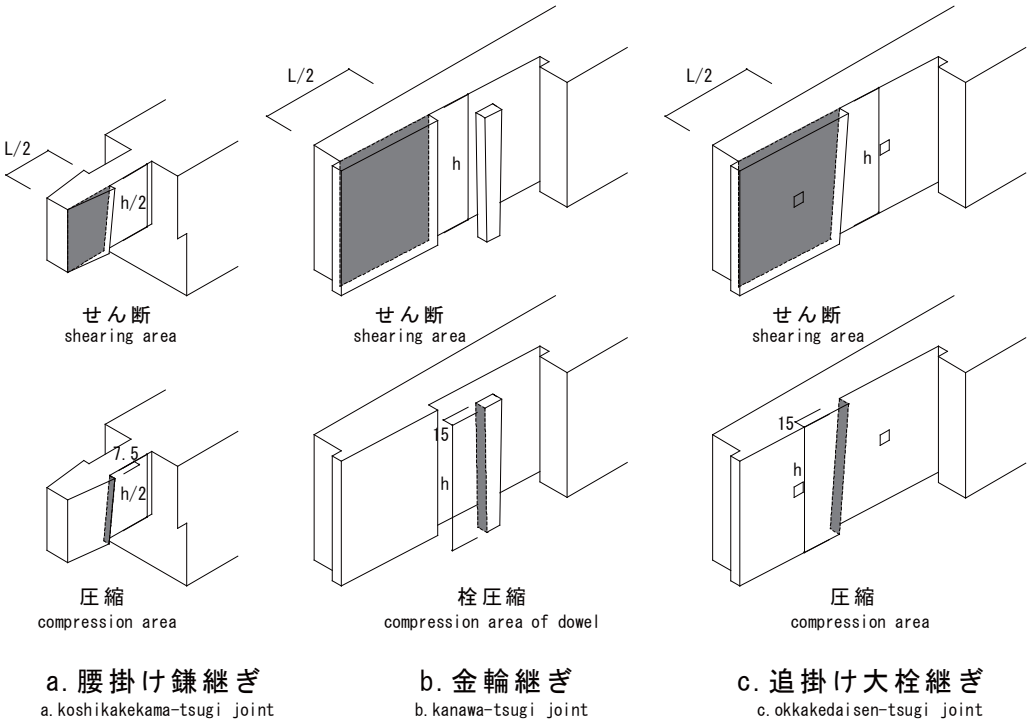
第 11 図　せん断破壊
Fig. 11. Shear failure of beam (*okkakedaisen-tsugi* joint).

第 12 図　あご面の圧縮破壊
Fig. 12. Compression failure of ago-face (*okkakedaisen-tsugi* joint).

第 13 図　目違い部からの割裂破壊
Fig. 13. Spliting failure at notch (*okkakedaisen-tsugi* joint).

4.　考察

各継手について，破壊形態ごとの最大耐力を第 14 図に示す応力負担範囲を用いて推定し，実験値との比較を行った。



第 14 図　耐力試算における各応力負担範囲
Fig. 14. Area of shared stress for calculation of strength.

4.1　腰掛け鎌継ぎ

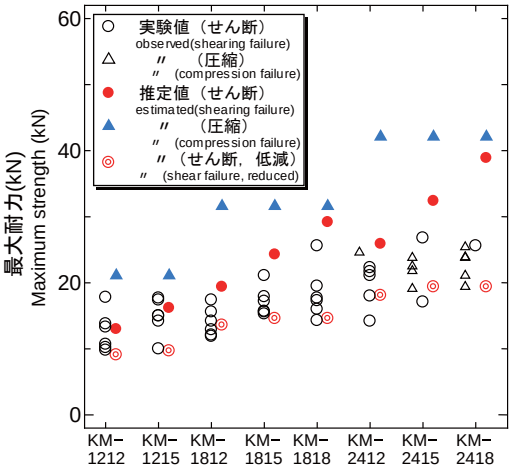
主な破壊形態は鎌頭のせん断破壊と，鎌あごの圧縮破壊であり，それぞれせん断力または圧縮力を負担する面積を用いて，以下の式から耐力を試算した。

せん断：$P=(L/2)\times(h/2)\times 2$ 面 $\times Fs$

圧縮：$P=d\times(h/2)\times 2$ 面 $\times Fc$

ここで P：最大耐力（kN），L：鎌長さ（第 1 図参照，mm），h：材せい（mm），d：鎌あご幅（7.5mm），Fs：せん断基準強度（スギの場合 1.8N/mm^2），Fc：圧縮基準強度（スギ E70 の場合 23.4N/mm^2）

破壊形態ごとの実験値と推定値を**第 15 図**に示す。圧縮破壊よりもせん断破壊のほうが低い耐力となり，実験結果と一致している。また，推定値ではせん断面積に比例して耐力は増大するが，実験値では特に継手高さ，すなわち材せいに大きく影響を受ける傾向が認められた。例えば，同じ材せいである KM-1815 と KM-1818，および KM-1818 と KM-2418 は継手長さの比が 1.5 倍であるのに対して，最大耐力の比は 1.1 倍程度であった。また材せい 180mm の KM-1818 は材せい 240mm の KM-2412 よりもせん断面積は大きいが，耐力は逆に小さくなっていた。これはせん断応力がせん断面積全体に均等には発生せず，鎌首周辺へ応力が集中していることが原因として考えられる[2)]。既往の研究では，構造設計用の許容耐力を定めるに当たり，応力集中を考慮した低減係数として藤野[3)]は 0.13，大橋[4)]は 0.151 という値を用いて，実験値から短期許容耐力を直接的に算定する方法を提案している。いっぽう中尾[5)]は，継手長さに応じた低減係数 α を求める式として，$\alpha=1.1-1/300\times L$ を導いている。例えば，L=120mm の場合は 0.7，150mm では 0.6，180mm では 0.5 となり，継手長さが大きいほど低減係数は小さくなる。この式を用いて求めた推定値は，第 15 図に示すように実験値とよく一致した。



第 15 図　腰掛け鎌継ぎの最大耐力
Fig. 15. Strength of *koshikakekama-tsugi* joint.

4.2　金輪継ぎ

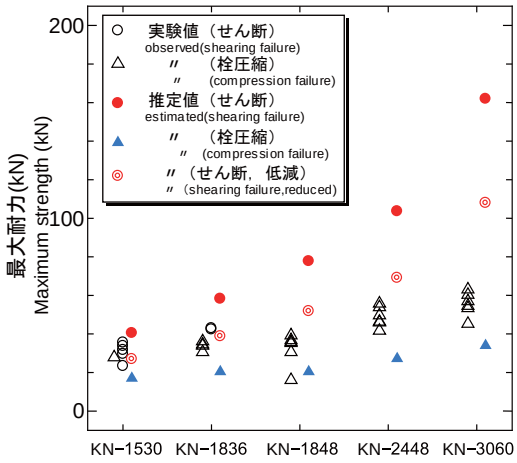
主な破壊形態はせん断破壊と栓の横圧縮破壊であり，それぞれ以下の式から耐力を計算した。

せん断：$P=(L/2)\times h\times Fs$

栓圧縮：$P=b'\times h\times F'_{c90}$

ここで b'：栓の幅（15mm），F'_{c90}：栓の横圧縮基準強度（カシの場合 5.4N/mm^2）

試算の結果を**第 16 図**に示す。材せいが 180mm 以上の場合の破壊形態は栓の横圧縮であり，推定値は実験値より小さいが，同様な傾向を示していたことから，今回のような継手の寸法であれば，金輪継ぎの引張耐力は継手長さにはよらず，栓の長さ，すなわち材せいで決定すると考えられる。しかし，材せいが小さい場合にはせん断破壊が生じており，試算したせん断耐力は過大であったことから，せん断耐力を推定するには腰掛け鎌継ぎ同様に低減係数を乗じる必要があると考えられる。有限要素解析によると，腰掛け鎌継ぎ同様にせん断応力の分布は一様ではなく三角形に近い分布で，L/2 が 150mm の場合，見かけのせん断長さの 2/3 でゼロと見なせる結果が得られている[6)]。そこで，低減係数を 2/3 として継手長さに乗じて有効せん断面積を算出し，得られたせん断耐力を第 16 図に併せて示す。実際にせん断破壊した試験データと比較した結果，おおむね一致する結果が得られている。



第 16 図　金輪継ぎの最大耐力
Fig. 16. Strength of *kanawa-tsugi* joint.

4.3　追掛け大栓継ぎ

主な破壊形態はせん断破壊と圧縮破壊であり，それぞれ以下の式から耐力を計算した。なお，込栓の効果はそれほど大きくないという報告[3)]があるため，ここでは栓を考慮せずに検討を進めた。

せん断：$P=(L/2)\times h\times Fs$

圧縮：$P=e\times h\times Fc$

ここで，e：かかり部分の幅（15mm）

なお，目違い部からの割裂は最大耐力を決定する破壊形態ではなかったが，切り欠きを有する曲げ材のせん断応力に基づいた算定式[7]に基づき，以下の式から割裂耐力を算定した。

$$P=\frac{2\cdot F_s\cdot L\cdot A_e}{3\left(\frac{e}{2}+\frac{t}{4}\right)}$$

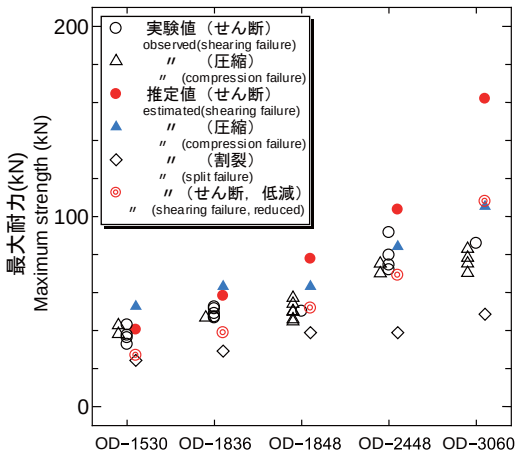
ここで，t：材幅（mm），e：かかり幅（mm），Ae：有効せん断面積で，以下の式から計算される。

$$A_e=\frac{\left(\frac{t}{2}-f\right)^2}{t}\cdot h$$

ここで，f：目違い幅（15mm）

試算の結果を実験値と併せて**第 17 図**に示す。

追掛け大栓継ぎでも，金輪継ぎと同様に低減係数 2/3 を乗じたせん断耐力を併せて示す。材せいが大きくなるに従って破壊形態がせん断から圧縮に移行していく傾向が推定値と一致している。なお，目違い部からの割裂による耐力は，せん断耐力や圧縮耐力に比べると小さく，過小な評価となる可能性がある。



第 17 図　追掛け大栓継ぎの最大耐力

Fig. 17. Strength of *okkakedaisen-tsugi* joint.

5.　おわりに

伝統的木造住宅で用いられている継手接合部を対象に引張試験を実施し，引張性能を把握するとともに耐力の試算を試みた。その結果，耐力は継手に発生する主要な応力を負担する面積に比例して大きくなる傾向が確認できた。また算定式を用いて耐力を推定した結果，破壊形態はおおむね実験結果と一致することが確認されたが，せん断破壊の場合は応力集中によって有効なせん断面積が減少するために過大な耐力評価となることが示された。許容耐力を適切に設定するためには低減係数を乗じる必要があるが，その値は継手の形状や寸法，樹種によって異なると考えら，引き続き実験データの蓄積が望まれる。

なお，本研究で強度試験を実施した継手については，この試験結果をもとに許容耐力が決定されるとともに，住木センターが公開している「木造住宅耐力要素データベース」（http://wdb.howtec.or.jp/）に登録されており，建築設計実務者によって活用されるシステムが整備されている。

参考文献

1）戸田正彦，飯島敏夫：日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），福岡市，2007，pp.135-136.

2）右京斉一郎，林知行，原田真樹，軽部正彦：木材学会誌，53 (2)，90-98 (2007).

3）藤野栄一，大橋好光，佐藤俊平：日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），金沢市，2002，pp.99-100.

4）大橋好光：“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，東京，2003，P.316.

5）中尾方人：建築技術，No.731，150-151 (2010).

6）野口昌宏：“木造住宅に係る建築基準の整備検討業務報告書”，（財）日本住宅･木材技術センター，東京，2008，pp.101-113.

7）日本建築学会：“木質構造接合部設計マニュアル”，日本建築学会，東京，2009，pp.164-166.

ー性能部　耐久・構造グループー

（原稿受理：11.12.21）