

# 十字型断面を持つ柱で構成された木造軸組みの 水平耐力特性について

鎌田 輝男\*

Horizontal Bearing Capacity of Timber Frames with Cross Shaped Columns

Teruo KAMADA

## ABSTRACT

The sectional area of columns of timber houses are normally squarely shaped. Wooden columns width of which is 105mm or 120mm are used in traditional Japanese wooden houses. If the the corners of this square section are properly cut, the cross sectional area is increased, namely, sectional area of hexagonal or octagonal shape section inscribed in a circle with same diameter is larger than that of squared one. It is also true that the cross cut square has larger sectional area than simple square section. Cross shaped columns has not only large sectional area but also sectional moment of second order. So, we can get stronger columns from the raw wood having same size of diameter. The corners of the cross shaped columns will be used to fasten structural panel with nails and they can resist horizontal force effectively, because the cross shaped columns constrain relative displacement between columns and panel board.

キーワード： 十字型断面柱、奴風柱、木造軸組、水平耐力特性、静的加力実験

Keywords: Cross shaped column, Yakko kite column, Timber Frames, Statical Loading Tests

## 1. はじめに

木造住宅で使用される柱断面は一般に正方形であり、3寸5分角(105mm角)あるいは4寸角(120mm角)が多く使用されている。これは、伝統工法による木造住宅用の製材の規格によるものであり、土台や横架材と組み合わせて軸組みを構成する上で、それなりの合理性を持ち合わせている。しかし、この正方形の四隅を切り欠いて十字型の断面とするならば、同一口径の原木から、より断面積が大きい柱を切り出すことが可能であり、また、この切り欠き部を壁下地材の打ち付け

部として利用すれば、胴縁や隅木を省略することができる。施工効率を向上させることができる。

このように十字型断面柱を採用することによって、同一の原木から、1サイズ上の規格に相当する柱が得られるとともに、構造用合板をこの内部に釘付けすることにより、柱側面の拘束効果によって、耐力壁としての剛性および強度を向上させることができる。

本報は、新たに考案された十字型断面を持つ柱で構成した木造軸組の繰返し水平加力実験に基づいて、その耐力特性を検討したものである。

\* 建築学科教授・工博

## 2. 十字型断面柱の断面性能

基本的に円形の原木から、正方形の柱を切り出すとすれば、少なくとも柱幅の $\sqrt{2}$ 倍の直径を持つ原木が必要である。また、柱の第一義的な機能は建築物の鉛直荷重を支えることであり、その断面積が大きいということは、より大きな荷重を支えることができることを意味する。同一の原木から単に断面積を大きくするのであれば、正方形断面よりも、正六角形や正八角形断面の方が、断面積が大きいことは明らかであるが、このような柱は、一般の住宅には使用しがたい。

そこで、図-1に示すように、直径Dの原木から正方形の四隅を辺長xの正方形に切り込んで十字型の断面とした場合、直径Dの円に内接する正方形に対する十字型断面柱の断面積は図-2に示すように変化する。すなわち、 $x/D=0$ であれば切り欠きがなく正方形断

面そのものであり、その比率は1である。また、 $x/D=0.5$ は、直径の1/2まで切り欠くので断面積は0になり、 $x/D$ の比率を適切に選択すれば、同一口径の原木から面積最大の十字型断面柱を得ることができ、 $x/D=0.16$ で面積は最大となる。これは、図-1に示す切り欠き部の正方形を見込む中心角 $\theta$ が、

$$\theta = \tan^{-1}(1/2) \doteq 26.5^\circ \quad (1)$$

の場合であり、正方形断面と比較して約25%の面積増加が得られる。

断面積の増加とともに、断面2次モーメントも増加するが、正方形断面に対する比率は図-3に示す通りであり、 $x/D=0.17$ 程度で約50%の増加が見られる。断面2次モーメントの増加は、曲げ変形に強い柱が得られることを意味する。

写真-1は、十字型断面に加工された柱の実際の形

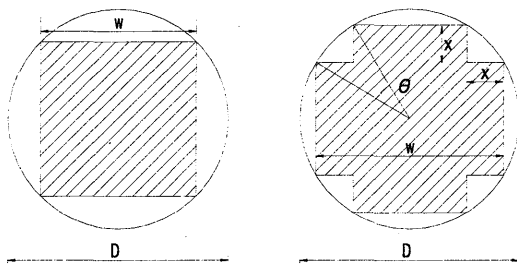


図-1 正方形断面と十字型断面

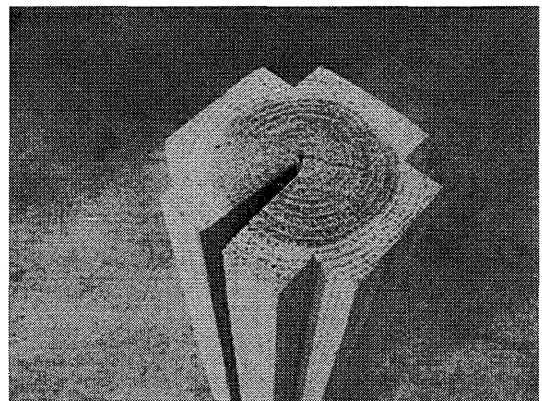


写真-1 十字型断面柱

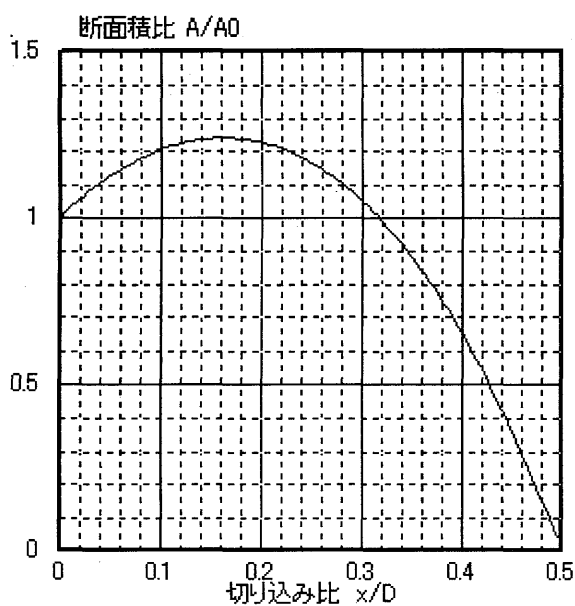


図-2 断面積比

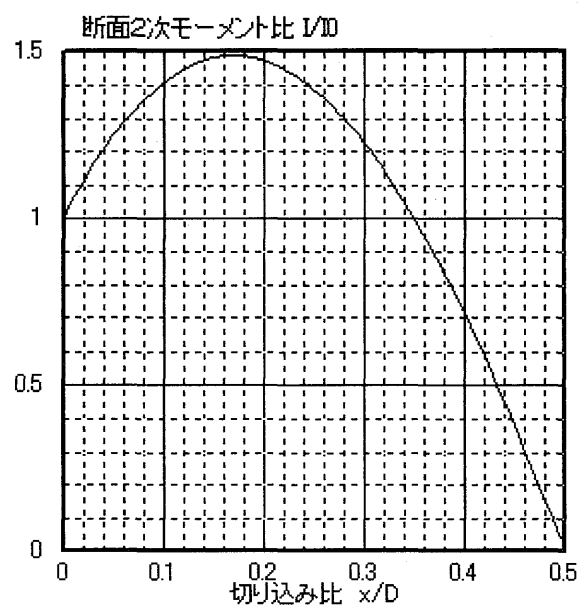


図-3 断面2次モーメント比

表-1 十字型断面柱の切り欠き比と断面性能

普通柱径	原木寸法	切り欠き	切り欠き比	中心角		柱幅	断面積		断面2次モーメント		
H	D	x	x/D	$\theta$		w1	w	A	比率	I	比率
cm	cm	cm	1	°		cm	cm	cm <sup>2</sup>	1	cm <sup>4</sup>	1
10.5	14.85	0.0	0.000	0.00		10.50	10.50	110.3	1.000	1013	1.000
		0.5	0.034	5.46		9.99	10.99	119.7	1.086	1187	1.172
		1.0	0.067	10.93		9.45	11.45	127.2	1.153	1324	1.307
		1.5	0.101	16.43		8.89	11.89	132.4	1.201	1422	1.404
		2.0	0.135	21.96		8.31	12.31	135.5	1.229	1482	1.463
		2.5	0.168	27.55		7.70	12.70	136.2	1.236	1504	1.484
		3.0	0.202	33.20		7.06	13.06	134.6	1.221	1488	1.469
		3.5	0.236	38.94		6.40	13.40	130.5	1.184	1436	1.418
		4.0	0.269	44.79		5.71	13.71	123.9	1.124	1349	1.332
		4.5	0.303	50.75		4.99	13.99	114.6	1.040	1230	1.214
5.0	0.337	56.87		4.23	14.23	102.6	0.930	1080	1.067		

W1は柱表面の幅を表す

状を示すものであるが、従来の標準的な柱である105mm角の柱を考えると原木の口径は少なくとも148.5mmを必要とするが、この材から、切り欠き部xを現実的な値に設定して得られる十字型断面柱の断面性能を表-1に示す。切り欠き部をx=25mmの正方形とすれば、 $x/D=0.168$ となり、柱としての幅は $w=127\text{mm}$ であるが、柱表面の幅は $w_1=77\text{mm}$ となる。

### 3. 十字型断面柱の利点

十字型断面を持つ柱の利点として以下のような点が挙げられる。

#### (1) 柱断面性能の向上

2で述べたように、十字型断面とすることによって同一口径の原木から、断面積で約25%、断面2次モーメントで約50%大きい柱が得られる。断面積の増加は鉛直荷重の支持力が向上し、また、断面2次モーメントの増加は、柱の曲げ抵抗が増加することによって水平抵抗力が増加することを意味する。

#### (2) パネル壁としての施工性の向上

構造用合板を用いた耐力壁は、壁倍率として2.5が与えられ、木造住宅の耐震要素として、極めて、効果的であるが、十字型断面の切り欠き部を合板打ち付け面として使用することができるので、隅木などの取り付けを省略することができ、施工性が向上する。

写真-2は、十字型断面柱を用いた壁の施工例を示す模型であるが、十字型断面の切り欠き部に合板を張って耐力壁にしたり、断熱材の取り付け部としても利用できる。

#### (3) 耐力壁としての性能向上

構造用合板を用いた大壁式耐力壁の場合は、水平力を受けて軸組に傾斜角が生じると、合板と柱の間に大きな相対変形生じ、合板の周辺に打ち付けられた釘の破損によって耐力が規制されるが、十字型断面柱を使用した場合、真壁式となり、合板と柱は一体化し、水平力に対する剛性および耐力の向上が期待できる。

#### (4) 木材の有効利用

末口径14～18cmの柱適寸中目丸太から通常の正方形断面柱を切り出す場合、その余材はラス下地板や野地板などの板材として利用されるが、柱としての使用部分は少ない。十字型断面柱の場合、面積が大きくなるので、当然、柱としての使用率は高くなる。また、十字型切り欠き部は、斜めにカットして、コンクリート型枠工事に使用される角取り用面木を取ることができ、

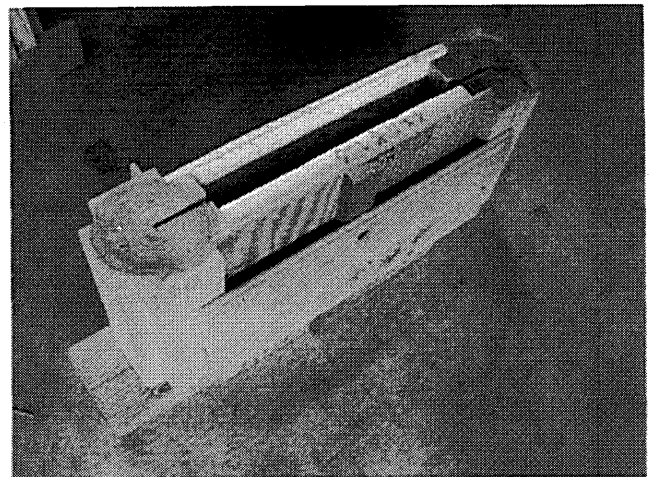


写真-2 十字型断面柱を用いた壁施工例

柱部分を含めて全体として八角形部分を利用することになり、木材の有効利用を図ることができる。

なお、面木には、普通、プラスチック材が用いられ、型枠撤去後の廃棄処分の際にいろいろと問題を生じるが、この十字型断面柱の余材から得られる面木を利用すれば、廃棄に伴う環境負荷を低減することができる。

#### (5) 通気性の確保

十字型断面の切り込みが25mmの場合、12mm合板を張った場合でも、外壁面との間に13mmの空間ができるので、この空間を通して、壁面内の通気性を図ることができる。

#### (6) 背割りを隠す

柱は乾燥による割れを防ぐために、背割りを入れるが、正方形断面の柱であれば、柱中央位置に入れるために、背割り面を表に出すことができなくなる。しかし、十字型柱の場合、背割りを切り欠き部から柱中心に向かって入れることができるので、柱の4面を自由に使用することができる。この場合、背割り深さは通常の柱よりも浅くなる。

## 4. 十字型断面柱軸組の水平耐力実験

### 4.1 軸組試験体

十字型断面柱を使用した木造軸組の水平耐力特性を実験的に検証するために、図-4に示す105mm角の普通柱を用いた普通断面柱軸組試験体(F-1, F-2, F-3)と、図-5に示す127mm角(切り欠き部25mm)の十字型断面柱を用いた十字型断面柱軸組試験体(J-1, J-2, J-3)の2種類の試験体を各3体ずつ製作した。

いずれも、柱、土台、はりなどにはスギ材を使用し、柱間隔を1mとした2間幅(2,000mm)で、高さは2,730mm(1間半)である。両端の柱と土台およびはりとの仕口部にはホールダウン金物を使用し、柱の抜けを防止している。柱中間には間柱(30×80mm)を入れ、高さ1,820mmの位置に胴縁(45×80mm)を入れた軸組に対して、90mm構造用合板を釘打ち(N50@150)したものである。合板は、普通柱断面軸組試験体では柱面に釘打ちした大壁式であり、十字型断面柱軸組試験体では切り欠き部に合板を釘打ちした真壁式となっている。

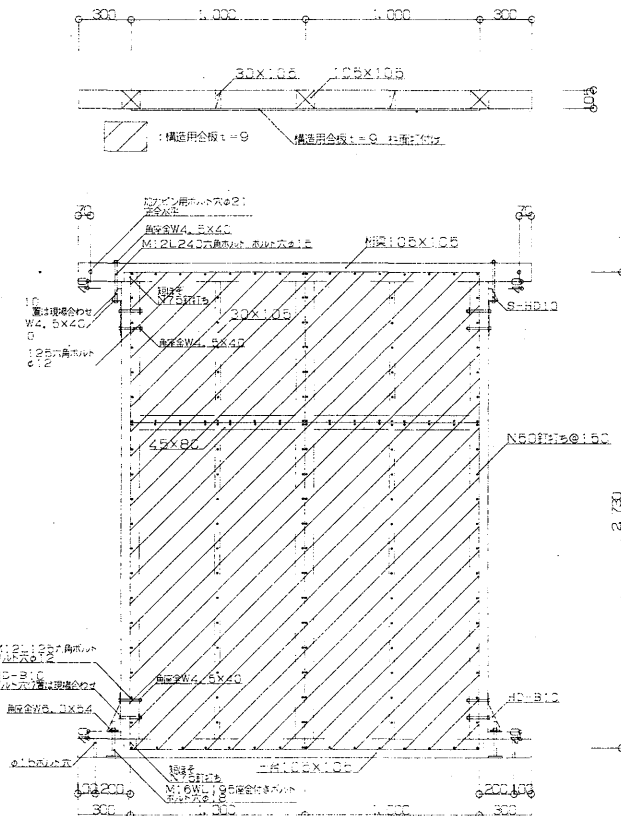


図-4 普通断面柱軸組試験体

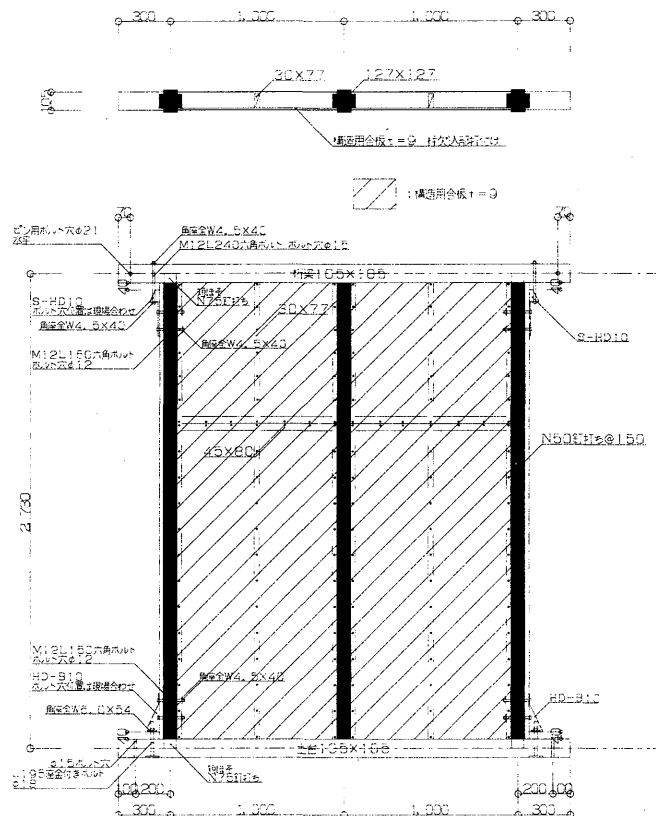


図-5 十字型断面柱軸組試験体

## 4.2 試験装置概要

図-6は、本学ハイテクリサーチセンターに設置されている木造軸組試験架台および加力装置の概要を示すものである。試験架台は、試験体を固定する支持架台とそれに沿って設けられた保持架構からなっている。支持架台は、2本のH型鋼を26mmの間隔を空けて平行に配置し、この隙間に、ボルトを通し、軸組試験体の土台と型鋼フランジを緊結するようになっており、その位置は自由に設定できる。また、保持架構上部には、試験体の移動を誘導し、孕みだしによる転倒を防ぐために、6個の振れ止め支持装置が設けられている。

本試験架台では、木造軸組あるいは壁体として、幅4m、高さ3mまでの試験体に対応することができる。これは、いわゆる2間幅試験体(4Pサイズと呼ばれる)に対応するだけでなく、伝統的な木造住宅の基準長さ(モジュール)が半間(91cm)であるのに対して、基準長さを1mとしたメーターモジュール試験体にも対応できるようになっている。

加力には、ストローク500mm、容量40kN(4t)のモートルシリンダを使用し、はり端部において、ロードセルを介した押し引きの繰り返し加力が可能である。加力は変位制御方式によるもので、秒当たり0.5mm、1mm、2mmのシリンダ移動速度を選択することができる。

## 4.3 軸組の耐力実験概要

写真-3は、木造軸組試験架台に十字型断面柱を持つ試験体を設置して実施された耐力実験の状況を示す

ものである。

軸組試験体の水平耐力特性を明らかにするには、軸組としての微小変形時の初期剛性、最大耐力に至るまでの変形状態ならびに破壊損傷状況、最大耐力に達した後の耐力低下状況を明らかにしなければならない。

そこで、ほぼ弾性的挙動を行うと考えられる水平変位量±30mmまでは5mmステップでシリンダ変位を増加させ、0.5mm/sの速さで押し引き3回ずつの繰り返し加力を行い、それ以上では、10mmステップでシリンダの変位を増加し、1mm/sの速さで1回の押し引き加力を連続的に行った。

ロードセルの出力および試験体に取り付けられたひずみゲージ型変位計の出力は、パソコンによって自動

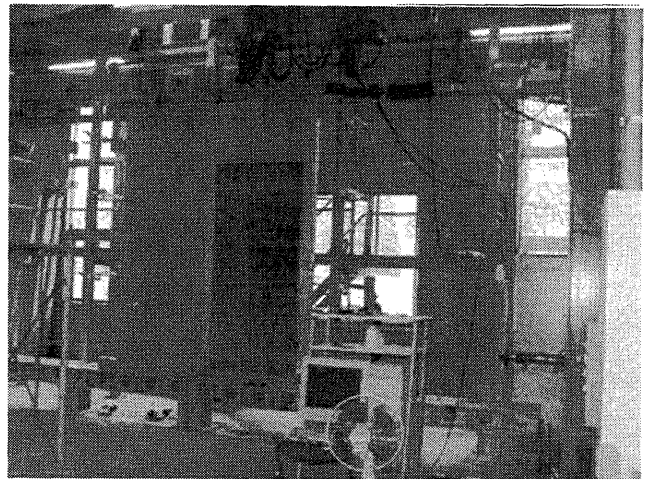


写真-3 木造軸組試験架台および加力装置

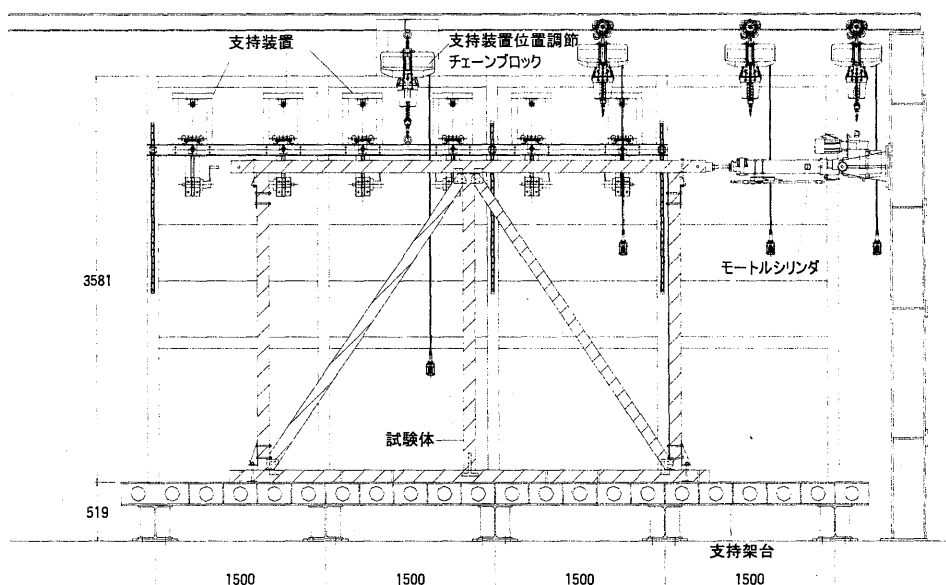


図-6 木造軸組試験架台および加力装置

的に収集され、加力および試験体変位量に換算され記録されるようになっている。

## 5. 十字型断面柱軸組の耐力特性

### 5.1 実験結果の概要

今回実験を行った2種類の木造軸組の復元力特性の1例を図-7および図-8に示す。横軸は、左右両端の柱の柱頭および柱脚部に設置されたひずみゲージ型変位計で測定された変位の差から求めた柱傾斜角によって表した軸組の見かけの変形角(2本の柱の平均傾斜角,ラジアン)を示し、縦軸には載荷された水平荷重の大きさ(kN)を表している。

いずれのタイプの軸組も押しと引きに対して、ほぼ同等の特性を持っており、最大耐力は十字型断面柱軸組の方が大きいことが分かる。しかし、初期剛性については、合板に対する十字型断面柱の拘束効果によって、十字型断面柱軸組の方が剛性が上がるものと予想されていたのに反して、普通断面柱軸組の場合よりも低くなっている。これは、軸組の変形によってせん断剛性の大きい合板が回転し、普通断面柱軸組では合板に打たれた釘が抵抗するのに対し、十字型断面柱軸組では合板の土台およびはりへのめりこみによって抵抗するため、木材としては柔らかいスギのめりこみに対する抵抗力が小さいためである。

同様のことは、最大耐力に達した後の復元力特性についても見られる。すなわち、軸組の最終破壊状況は、

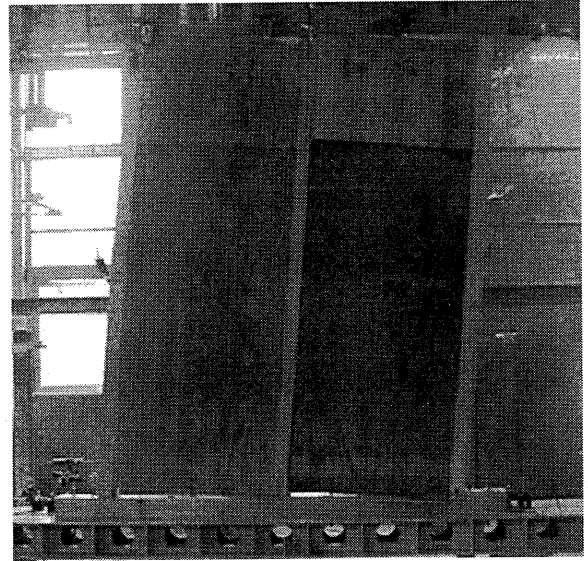


写真-4 十字型断面柱軸組破壊状況

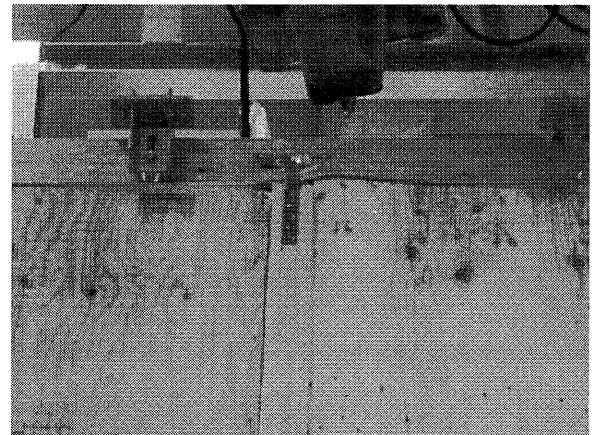


写真-5 合板のはりへのめりこみ破壊状況

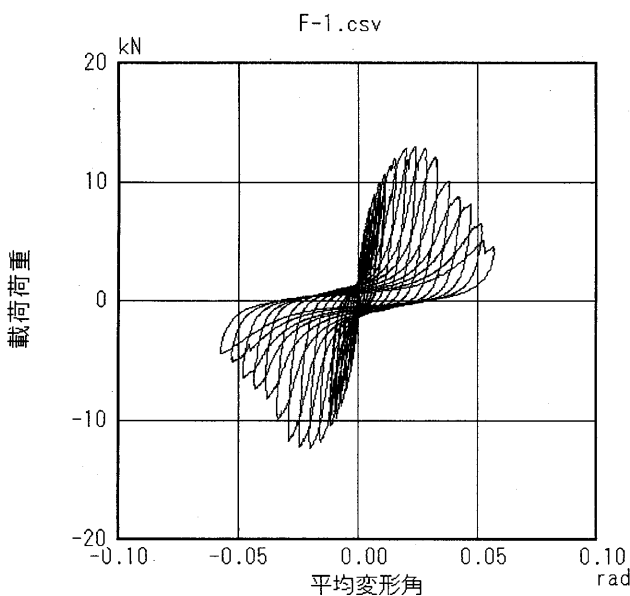


図-7 普通断面柱軸組復元力特性

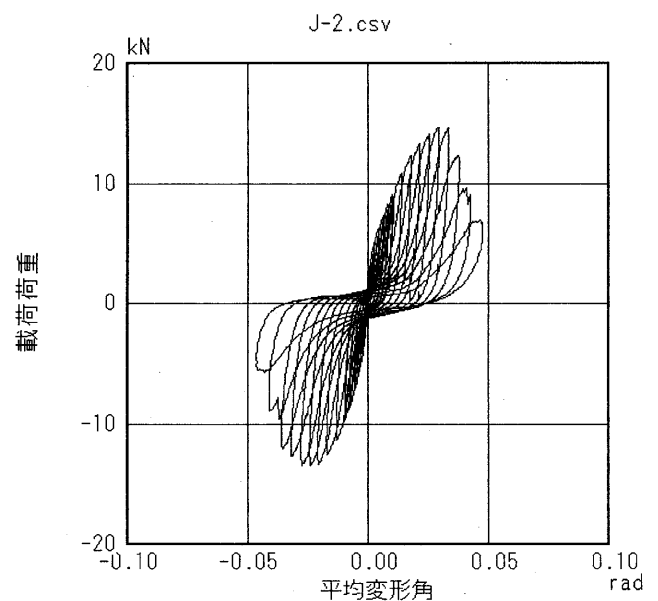


図-8 十字型断面柱軸組復元力特性

普通断面柱軸組では合板に打たれた釘が破断し、合板が軸組からはがれるが、十字型断面柱軸組では、写真-4および写真-5に示されるように、はりあるいは土台に合板が大きくめり込んで耐力低下をきたすとともに、合板は柱から離れて土台の外側に孕みだしてしまふ。

十字型断面柱軸組で合板は、柱、間柱および胴縁に接する部分では釘打ちを行っているが、はりおよび土台に接する部分の釘打ちは省略して行っていない。これは、十字型断面の特性を生かして合板を使用する場合、はりおよび土台に接するところの釘打ちを省略できるのではないかと考えたためであるが、実際には、合板のめりこみによって、軸組の剛性および耐力が規制されることが判明したことから、はりおよび土台などの横架材には、めりこみ強度の大きい堅い材質の木材を使用すべきことと、合板がはりおよび土台と接する部分には隅木を用いて合板を釘打ちすることが重要であることが判明した。

## 5.2 十字型断面柱軸組の耐力特性

表-2に、各試験体に対して得られた耐力特性を一覧として示す。

耐力特性を表す記号は次の意味である。

Pmax	載荷した最大荷重（最大耐力）
P(1/120)	変形角 1/120 に対する載荷荷重
2/3 Pmax	最大耐力の 2/3
P(1/2 γ)	耐力が 85% 低下した変形角の 1/2 の変形角に相当する載荷荷重

押し(-)および引き(+)に対するものとその平均値を示しているが、試験条件によっては、引き側のみしか評価されていないものもある。

軸組としての耐力は壁倍率として評価されるが、旧基準では、上に示した諸量のうち、最初のものを除いた3個の値の最小値から（ただしkgで表される）壁倍率が決定される。従って、実験結果から得られた最小の値は、普通断面柱軸組では8.24kNであり、十字型断面柱軸組では8.38kNであって、必ずしも十字型断面柱軸組の壁倍率が十字型断面柱軸組に対して特に大きいという結果を得ることはできなかった。

また、これらの実験から得られた軸組の復元力特性を架構の設計用復元力特性に置換するために、等価な完全弾塑性特性として表したものが表の下段に示されている。完全弾塑性特性は、初期剛性、降伏耐力、降

表-2 普通断面柱軸組および十字型断面柱軸組の耐力特性

軸組		最大耐力 Pmax (kN)			P(1/120) (kN)			2/3Pmax (kN)			P(1/2 γ) (kN)		
		+	-	平均	+	-	平均	+	-	平均	+	-	平均
普通断面柱軸組	F-1	12.98	12.35	12.67	9.50	9.43	9.47	8.65	8.23	8.44	10.73	9.90	10.32
	F-2	12.11	12.18	12.15	10.28	10.24	10.26	8.07	8.12	8.10	10.30	10.34	10.32
	F-3	12.39	12.14	12.27	9.20	9.51	9.36	8.26	8.09	8.18	10.13	10.30	10.22
	平均			12.36			9.69			8.24			10.28
十字型断面柱軸組	J-1	15.82		15.82	8.91		8.91	10.55		10.55	13.03		13.03
	J-2	14.69	13.47	14.08	8.12	9.07	8.60	9.79	8.98	9.39	11.65	11.02	11.34
	J-3	12.78	11.93	12.36	7.64	7.65	7.65	8.52	7.95	8.24	10.15	10.22	10.19
	平均			14.09			8.38			9.39			11.52
	JS-1	21.97		21.97	11.78		11.78	14.65		14.65	17.80		17.80

軸組		初期剛性 (kN/rad)			降伏耐力 (kN)			降伏変形角 (1/1000)			終局変形角 (1/1000)		
		+	-	平均	+	-	平均	+	-	平均	+	-	平均
普通断面柱軸組	F-1	2256	2615	2436	11.39	9.17	10.28	5.00	3.50	4.25	33.5	33.2	33.4
	F-2	3466	3016	3241	10.60	8.64	9.62	3.10	2.90	3.00	30.1	26.1	28.1
	F-3	1966	3110	2538	10.90	8.91	9.91	5.50	2.90	4.20	32.4	33.3	32.9
	平均			2738			9.94			3.82			31.4
十字型断面柱軸組	J-1	1694		1694	13.39		13.39	7.90		7.90	42.4		42.4
	J-2	1342	1741	1542	10.71	10.29	10.50	8.00	5.90	6.95	37.9	35.4	36.7
	J-3	1400	1389	1395	7.80	6.90	7.35	7.80	6.90	7.35	45.1	48.0	46.6
	平均			1543			10.41			7.40			41.9
	JS-1	1835		1835	18.74		18.74	10.20		10.20	41.9		41.9

伏変形角，終局変形角の諸量で表すことができる。それぞれの軸組を見た場合，降伏耐力はわずかに十字型断面柱軸組の方が大きい，初期剛性は普通型断面柱軸組の方が大きく，予想とは異なったものとなっている。これは，十字型断面柱軸組の破壊状況が示すように，合板のせん断剛性は極めて大きく，十字型断面柱軸組では，軸組と合板が一体となって抵抗するために，合板が土台およびはりにめり込もうとするが，スギは木材としては柔らかく，めりこみ強度が低いために，軸組としての剛性と強度が予想よりも低くなった原因と考えられる。

そこで，木造住宅において一般的に使用される材料として，はりをマツとし，土台にはアピトンと呼ばれる材を使用した試験体(JS-1)を製作し，同じように加力実験を行った。アピトンは別名クルインとも呼ばれる熱帯産の広葉樹で，強度と耐久性に富むので，枕木やトラックの車体などに使用されており，中国地方では土台に使用されることも多い。

図-9は，JS-1試験体の復元力特性を示すもので，本試験体の耐力特性については，表-2にまとめて示されている。モートルシリンダが不調であったため，押し側の荷重が十分ではなかったが，引き側での最大耐力は21.9kNであり，横架材にスギを使用したものに対して5割増しの耐力が得られ，合板の回転を硬質の土台およびはりをを用いて拘束することによって，耐力の向上が図られることが示された。

## 6. まとめ

十字型断面柱は，同一口径の原木から，より断面積の大きい柱を得ることができ，木材の有効利用にかなうものである。また，断面2次モーメントも増大し，柱材としての剛性と強度を向上させることができる。また，この十字型の切り込み部を合板釘打ち面として利用することにより，合板を用いた真壁式耐力壁を構成する場合に，隅木を省略した施工が可能となり，柱側面からの合板の拘束効果によって，壁として剛性と強度の向上をともに図ることができる。

これを確認するために，普通断面柱軸組と十字型断面柱軸組の耐力実験を実施したが，予想に反して，十字型断面柱軸組の剛性と強度は期待したほどの成果を

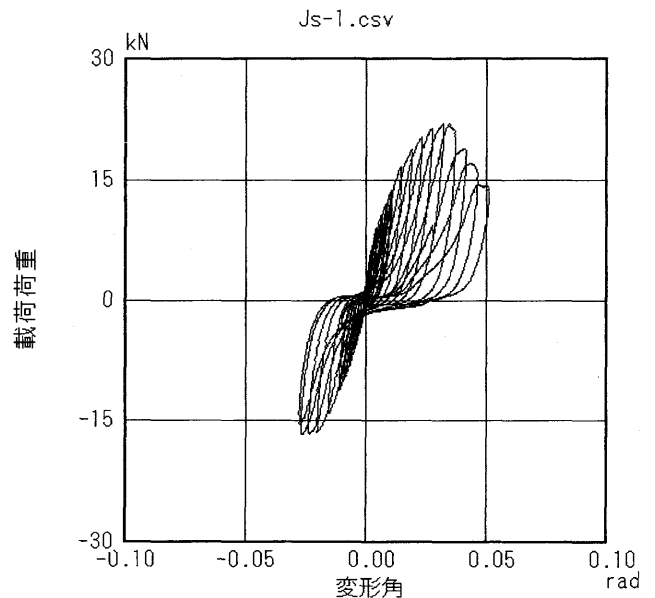


図-9 十字型断面柱軸組の復元力特性  
はり：マツ，土台：アピトン

得ることができなかった。これは，合板の柱へのめりこみに対して土台およびはりに使用したスギ材が有効に抵抗できなかったためである。しかし，このことは，逆に，土台およびはりにめりこみ抵抗に強い材を使用すれば剛性や強度を上げることができることを示しており，実際に，アピトンを土台に使用した試験体では十分な耐力を得ることができた。このことから，スギ材を土台に使用するような場合に，合板のめりこみを防ぐような施工法を開発することが今後の課題であることが判明した。

終わりに当たって，十字型断面柱を考案するとともに，十字型断面柱軸組試験体を提供していただいた(株)蔵王工務店代表取締役水田信行氏に深甚なる感謝の意を表したい。また，耐力実験を担当してもらった本学大学院生占部順也君ほか鎌田研究室4年次卒業研究ゼミの学生諸君に篤く感謝したい。

## 参考文献

- (1)日本建築学会：木質構造設計基準・同解説，日本建築学会，1996
- (2)鎌田輝男：筋違い入り木造軸組の耐力特性について(その3)，日本建築学会中国支部研究報告集第25巻，pp113-116,2002.3