木造軸組真壁構造に用いる部材内蔵型金物の開発と力学特性

DEVELOPMENT AND STATIC CHARACTERISTICS OF EMBEDDED STIFFENERS FOR JOINTS OF A SHINKABE WOODEN FRAME

丸山純夫 — * 1 入江康隆 — * 2

Sumio MARUYAMA — * 1 Yasutaka IRIE — * 2

キーワード:

部材内蔵型金物, 金物の設置方法, 繰り返し加力試験, エネルギー吸収能

Keywords:

Embedded stiffener, Installation method of the stiffener, Repeated loading tests, Energy-absorbing capacity

We developed an embedded stiffener for joints of Shinkabe wooden frames. This paper describes functions, installation method of this stiffener and results of repeated loading tests. The main results of these experiments are as follows.

The energy-absorbing capacity and load-bearing capacity of joints using embedded stiffeners are large compared with joints using Hagoita bolts. It is expected the embedded stiffener make Shinkabe wooden frame high-function and high-strength.

1. はじめに

在来構法の補強金物には、Zマーク表示金物の部材どうしをとめるカスガイ、山形プレート、短冊金物と、部材を引き寄せる機能を併せ持つ羽子板ボルトと引き寄せ金物がある。これらの金物は接合部材の表面（側面）に取り付けるため、梁や柱を現す真壁構造に用いると金物が現れてしまう。金物が接合部材の表面にあると、仕上げ方法にもよるが、結露が生じやすく、かつ防火的ではない。また接合部材の側面に取り付けると、木部材に応力の偏心が起こる。これらの点を改良するために、部材に内蔵可能で、強度も靱性にも優れた金物（部材内蔵型金物と称する。以下同じ。）を開発した。この金物は梁と梁、梁と柱、土台と柱の接合部における引張り力の補強を目的としている。これと同様に引き寄せ機能があり引張り力を負担する在来構法の補強金物としては羽子板ボルトがある。そこで一般的な梁と柱の羽子板ボルトの接合部と部材内蔵型金物の接合部の機能と力学的特徴を比較する。その結果から、木造軸組真壁構造に用いる部材内蔵型金物の実用化の可能性を確かめる。

表 1 部材内蔵型金物と在来構法用金物との比較

	部材内蔵型金物	材種	在来構法用金物	材種
部品 (負担能力)	SH1230 (引張り)	SWCH45K	M12 羽子板ボルト (引張り)	Zマーク表示金物 4T ボルト 1 種 SPHC
	CW12 (めり込み)	S30C	M12 ボルト (曲げめり込み)	Zマーク表示金物 4T ボルト
	BN1275 (めり込み)	STKM13A	座金 (めり込み)	Zマーク表示金物 1 種 SPCC
引張材の取り付け	部材軸方向の部材心の穴		木部材の外表面	
引張力の導入方法	CW12 の移動		ナットの回転	

2. 部材内蔵型金物の仕組み

2.1 部材内蔵型金物の部品の応力機能と取付け状況

表 1 は、部材内蔵型金物と在来タイプ金物羽子板ボルトの、部品の応力機能と材種を示す。写真 1 に部材内蔵型金物と写真 2 に羽子板ボルトの取付け状況を示す。なお、写真 1.1 は部材内蔵型金物の取付けの途中を示している。

2.2 部材内蔵型金物の名称と仕様及びその内蔵方法

写真 1 梁柱の接合部に設置された部材内蔵型金物

写真 2 梁柱の接合部に設置された羽子板ボルト

写真 3 部材内蔵型金物

写真 4 部材内蔵型金物 3 部品の組合せ

表 1 の、部材内蔵型金物の部品の名称と仕様を、写真 3 と写真 4 で説明する。部品名はアルファベットで名称を示し、数字は寸法を示している。SH1230 の SH は軸を表す Shaft のことである。数字の 1230 は軸径 12mm 長さ 30cm を示し「金棒」と称する。この両端部は、写真 3 のようなオネジが加工されているオネジ端と、止金がついて

*1 ㈱ユー建築工房
(〒326-0337 栃木県足利市島田町 151-1)

*2 宇都宮大学 名誉教授・工博

*1 U-builders Workshop Co., Ltd.

*2 Prof. Emeritus, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

いる止金端からなる。CW12 の CW は Conceal Wedge で数字の 12 は軸径 12mm の SH1230 用であることを示す。この外形は円柱形で平面は丸く、くさびと同じ引寄せ機能を有するので「丸くさび」と称する。その側面には、SH1230 を引張るための傾斜面を持つ貫通穴がある。また、SH1230 が貫通穴から抜け出ないように押える六角穴付き止めネジが付属している。これをロックボルトと名づける。BN1275 の BN は棒 (Bou) 状のナット (Nut) 「棒ナット」を示す。数字の 12 は軸径 12mm の SH1230 用であることを示し、75 は長さが 75mm であることを示す。この側面にはメネジが加工されている。

部材内蔵型金物の梁、柱の部材加工と金物の内蔵方法を写真 1 と写真 3 を参照して説明する。まず、BN1275 と CW12 用の穴を梁、柱の材側面にあける。その穴と直交する SH1230 用の穴を、梁には柱脚付側面に、柱には柱脚端部から材軸方向に深穴をあける。梁側面の穴に BN1275 を挿入し、その側面の加工したメネジに SH1230 のオネジ端をねじ込む。SH1230 の止金端は、梁から突出した状態(写真 1. 1)になっている。CW12 は柱側面の穴から挿入して、柱内に納めておく。柱を梁から突出している SH1230 の止金端を、柱脚端部の深穴に差し入れて (写真 1. 1)、柱内にある CW12 の傾斜面を持つ貫通穴に挿入する。これで部材内蔵型金物の 3 部品は、写真 4 のような組合せで、梁と柱に内蔵されたことになる。

2.3 部材内蔵型金物への引張り力導入方法

写真 5 は梁柱接合部における柱側内部での、金棒 SH1230 と丸くさび CW12 の取り付けを示す。まず、写真 3 の SH1230 オネジ端を、梁内の BN1275 のメネジにねじ込んで固定 (写真 1. 1) しておく。一方の SH1230 止金端は CW12 貫通穴に貫通させる (写真 5)。次に SH1230 に引張り力を導入するときの部材内蔵型金物の状況を写真 6 と写真 7 に示す。写真 6 は引張り力導入前の写真であり、写真 7 は引張り力導入後の写真である。なお、写真 6 は止金 R 面 (半球面) と丸くさび傾斜面 (曲面) は点接触しているので止金が浮いているように見える。また、写真 6、写真 7 に示す A、B、C の説明をすると、A は SH1230 止金端が CW12 の傾斜面に掛かる時のロックボルトの CW12 からの寸法であり、B は CW12 の長さの 2 等分の寸法を、C は ロックボルトを A だけねじ込むと SH1230 が引かれる寸法である。これを踏まえて以下に引張り力の導入過程を説明する。ロックボルトをねじ込んで、SH1230 止金端の止金 R 面を、CW12 の丸くさび傾斜面に掛ける (写真 6)。さらにロックボルトを写真 7 の A だけねじ込むと、ロックボルトの先端は SH1230 の軸側面を押して (写真 7 矢印①)、CW12 は左に (写真 7 矢印②) 引き寄せられる。この CW12 の移動により、止金 R 面を持つ SH1230 は、丸くさび傾斜面の斜め上方に移動 (写真 6, 7 破線の矢印③) しようとする。しかし、SH1230 は柱長穴内に拘束されて、実際には移動できない。(そのため矢印③を破線にしている)これは丸くさび傾斜面の勾配の高さ分の写真 7 の C だけ、SH1230 を上方に引く (写真 7 矢印④) ことと同じである。この機構により、CW12 に付属するロックボルトを締めることで、SH1230 に引張り力が導入できる。なお、丸くさび傾斜面の勾配は、写真 5 が示すように $15\text{mm}/20\text{mm}=7.5/10$ であり、最大 15mm の引き代がある。また後締めは $15\text{mm}-6\text{mm}=9\text{mm}$ が可能であり、一般的な木の乾燥収縮に対して 3 回程度は後締めができる。また、本事例でロックボルトが CW12 にすべてねじ込まれる時に、(写真 7 の A) SH1230 軸心と CW12 の中心 (写真 7 の B) が一致する。本部材内蔵型金物は 1997 年に特

許出願をし、1999 年に特許第 2926329 号を得て、アメリカで Des. 422, 200、ドイツで第 49902686.1 号の意匠登録をしている。

写真 5 SH1230 を CW12 に挿入した時の取り付け

写真 6 SH1230 止金端が丸くさび傾斜面に掛かる状態

写真 7 SH1230 に引張り力を導入後の状態

2.4 部材内蔵型金物が持つ機能と特徴

真壁用に開発した部材内蔵型金物の特徴は次の通りである。

(1) 木部材内に内蔵可能

写真 1 は梁と柱を部材内蔵型金物で接続した取付け例である。部材内蔵型金物の穴を木栓で塞いでいないので、部材内蔵型金物が見える。この穴を木栓で塞げば外部からの熱橋による結露も防げる。

(2) 引張り力だけを補強

引張り力だけを補強する金物である。羽子板ボルトのように部材側面に取り付ける金物とは違い、部材断面内中心に取り付けるので応力の偏心が起こりにくい。なお、せん断力にはホゾ等に対応するが、加工穴による断面欠損のため負担応力が小さくなる。

(3) 部材に内蔵されても後締めできる金物

部材内蔵型金物は部材内に内蔵されても、ボルトとナットと同じように、部材の取り付け取り外しが容易にできる。ロックボルトのネジに締め代の余長を持たせることで、組み立て後の木の乾燥収縮や文献1)に示されるクリープによる接合部の緩みを、最大9mmまで後締めができ、直すことが可能である。

(4) 加工による断面欠損の極小化

写真8は真壁造の伝統構法の仕口である。柱に胴差が長ホゾ大入れシャチ栓止めになっている。中央の写真9は在来構法の短ホゾ大入れ全ネジボルト締めである。右の写真10は、開発した短ホゾ大入れ部材内蔵型金物締めである。3種とも継手の側面からは加工部は見えないが、写真8から写真10へ行くに従い、加工による断面欠損が小さくなっている。このように開発した部材内蔵型金物は、加工による断面欠損を小さくできる。

写真8 竿シャチ栓

写真9 全ねじボルト

写真10 部材内蔵型金物

(5) 一般的な在来構法と同じ加工

部材の加工は加工形状が円形のため、市販のドリルを用いる羽子板ボルトの穴加工と同じにできる。またプレカット工場でも加工が可能である。

3. 部材内蔵型金物を使用した接合部の各種試験とその結果

3.1 丸くさびCW12の設置位置が接合部強度に及ぼす影響

丸くさびCW12を埋め込む位置は、部材の耐力と破壊形式に影響を及ぼすと考えられる。また、ドリルの長さの制約による施工上の理由から、丸くさびCW12は材端からあまり遠い位置には設けられない。そこで丸くさびCW12の加工穴位置をパラメータにして、部材接合部の強度と加工穴位置との関連を求めた。材種は米松集成材、米松、ヒバ、スギの無等級材である。

(1) 試験方法

試験装置と試験体を図1に示す。試験体は長さ570mm断面115mm×115mmである。その両端から、試験体側面の60, 100, 120, 140, 160, 180, mmの位置(図1の ℓ)に、丸くさびCW12を差し入れる穴を1つずつあける。また金棒SH1230を差し込むための穴は、試験体両端面の中心に材軸方向の深穴をあける。試験体は各樹種とも $\ell=180, 160, 140, 120$ mmは各10体で $\ell=100, 60$ mmは各3体である。部材内蔵型金物の設置は、2.2節で説明した方法で行う。部材両端から突出させたSH1230を、100kNの万能試験機のチャックで挟む。加力方法は文献3)の試験方法に基づき、単調引張り载荷で最大荷重を超えたら最大荷重の80%までとした。計測量はSH1230の伸びと1対の丸くさびCW12の木のめり込みの合計の変位である。

(2) 試験結果

表2に文献2)から抜粋した丸くさび設置位置が $\ell=100$ mm 60 mmは除く10体の試験結果の平均値を示す。荷重変位曲線が最大荷重に達していないように見えるのは、文献2)で示された図がこのようになっていたためである。図2は表2のスギの丸くさび設置位置を材端から $\ell=160$ mmにした10体と、表2に示していない丸くさび設置位置が材端から $\ell=60$ mmの3体の試験結果によるP- δ 曲線の平均を示す。

図1 試験装置と試験体

図2 スギ使用時部材内蔵金物の設置位置(上: 160mm, 下: 60mm)の荷重変位曲線の違い

表2 丸くさびCW12の設置位置の違いによる試験結果

樹種 等級 めり込み基準強度 平均密度 平均含水率	内蔵 金物の 加工 穴位置 ℓ (mm)	初期 剛性 k (kN/m ³)	降伏 耐力 Py (kN)	降伏 変位 δ_y (mm)	最大 荷重 Pmax (kN)	2/3Pmax	ばらつき係数	短期基 準耐力 To (kN)
米松集成材 E170-F495 9N/m ³ 0.52g/m ³ 15%	180	12.70	34.85	2.77	56.48	37.66	0.847	29.55
	160	13.16	35.93	2.80	58.06	38.71	0.842	30.26
	140	12.85	35.61	2.82	56.06	37.37	0.692	24.65
	120	14.52	25.87	1.93	43.22	28.81	0.607	15.78
米松 甲種1級 9N/m ³ 0.53g/m ³ 23%	180	11.99	33.80	3.17	55.40	36.94	0.767	25.93
	160	12.58	33.94	2.76	55.23	36.82	0.831	28.21
	140	11.69	34.51	2.92	54.98	36.65	1.000	34.51
	120	12.17	33.93	2.85	52.58	35.05	0.776	26.35
ヒバ 甲種1級 7.8N/m ³ 0.47g/m ³ 23%	180	10.24	37.05	3.73	52.83	35.22	0.756	26.63
	160	11.04	38.04	3.50	55.27	35.84	0.638	24.51
	140	12.67	34.51	2.92	50.27	33.57	0.488	16.39
	120	10.64	33.98	3.25	51.43	34.29	0.563	19.15
スギ 甲種1級 6N/m ³ 0.44g/m ³ 41%	180	8.60	26.12	3.43	44.54	29.69	0.801	20.93
	160	10.87	34.09	3.27	52.30	34.86	0.620	21.14
	140	9.53	28.58	3.29	46.59	31.06	0.530	15.17
	120	8.08	27.29	3.68	41.48	27.65	0.667	18.22

この表2から以下のことが分かった。

- ① 接合される木部材の樹種及び材端からの丸くさび設置位置により、短期基準耐力は異なる。
- ② 米松集成材の短期基準耐力は、スギ無等級材より5割程高い。
- ③ 短期基準耐力の最大値は、ヒバを除くと、丸くさびを材端から160mm離れた場合が最も大きい。
- ④ 多用するスギ材においては、丸くさびを材端部から160mmに設置した場合の短期基準耐力は21kNである。
- ⑤ 破壊形式は、樹種、丸くさび設置位置に関わらず、丸くさび穴から材端への繊維方向の割裂であった。

以上の結果から、材端から丸くさび設置位置は、耐力および施工上(ドリルの長さ)から140mm以上180mm以内とすれば、実用上支

障がないことが分かった。

3.2 仕口接合部試験体の試験方法及試験結果及びその考察

(1) 試験方法

部材内蔵型金物を使用した仕口（部材内蔵型金物仕口、以下同じ）接合部の試験装置と試験体を図3に示す。試験体数は6体と予備試験体1体の計7体であり、材種は無等級のスギ（平均密度0.47g/mm³、平均含水率24.2%）である。試験体の部材寸法は、柱が長さ600mm（短ホゾ長さ24mm×幅40mm×幅40mm）梁は長さ700mmである。断面は両方とも120mm×120mmである。なお、丸くさびCW12の設置位置は、3.1節の結果を参考にして、図3に示すように、柱の材端から丸くさびCW12までの端あき150mmと、BN1275の設置位置は梁上面から縁あき90mmの所である。試験体の設置は、柱を加力治具とボルトM16を8本でとめた。梁はPC鋼棒（φ17）で固定した鋼製土台にボルト2-M16座金t12×100[□]で取付けた。柱の上部は治具にPC鋼棒（φ17）を取り付けて、先端のナットとオイルジャッキの間に球座およびロードセルを配置した。計測は柱と梁の試験体に取り付けたアルミアングルに、変位計のスピンドルを接触させて行う。加力方法は100kNの試験機を用い、文献3)の方法に基づいて行った。

図3 試験装置と試験体

なお、予備試験は単調引張り荷重を行い、本試験は一方方向繰返し引張り荷重とした。一方方向繰返し引張り荷重は、予備試験体で得られた降伏耐力 P_y 時の変位 δ_y の、1/2, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16倍の変位を目標として、順に各1回の変位制御加力とした。なお、羽子板ボルト（表1のZマーク表示金物SB-F）を使用した在来構法タイプ仕口（羽子板ボルト仕口、以下同じ）の接合部試験体の力学特性と比較するため、文献4)に示された羽子板ボルト仕口の接合部試験体（断面寸法105mm×105mm）の試験結果を引用する。この試験結果も文献3)に基づく試験によるものである。しかし、試験体の寸法が異なるので、補正した復元力特性の傾向を比較する。

(2) 試験結果

部材内蔵型金物仕口の接合部試験体6体の荷重変位曲線と羽子板ボルト仕口の接合部試験体3体（文献4）の平均荷重変位曲線を図4に示す。図4の部材内蔵金物の荷重変位曲線は、試験体6体の各々の平均を示し、それに示す試験体番号は表2の試験体番号と同じものである。またNo.1～No.6の6種の平均の荷重変位曲線を破線で示す。部材内蔵型金物仕口と羽子板ボルト仕口の試験体は、柱と梁の断面寸法が異なり、そのままでは比較できないため、部材の断面寸法を補正して同じにした。羽子板ボルト仕口の接合部の耐力は文献5)p30式（6.4）降伏せん断耐力と比例するとして、降伏せん断耐力が最大となる破壊形式による接合形式係数 $C=1$ とすれば、取付けボルトが柱の穴内に接する長さ l に比例する。それは柱幅の比120mm/105mm=1.14倍にした値になる。図4の荷重変位曲線の最下位の柱幅

図4 部材内蔵型金物仕口の接合部試験体と羽子板ボルト仕口の接合部試験体の荷重変位曲線

表3 部材内蔵型金物仕口の接合部試験体の試験結果

試験体番号		予備	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Py	(kN)	18.9	18.2	18.9	19.3	24.1	19.4	23.6
Py ave.	(kN)			20.6				
変動係数				0.126				
ばらつき係数 (V)				0.709				
Py ave. × V	(kN)			14.6				
2/3Pmax	(kN)	24.7	24.2	28.5	26.2	27.4	27.1	29.6
2/3Pmax ave.	(kN)			27.2				
変動係数				0.069				
ばらつき係数 (V)				0.839				
2/3Pmax ave. × V	(kN)			22.8				
短期基準耐力 (T0)	(kN)			14.6				
Pmax	(kN)	37.1	36.2	42.7	39.3	41.2	40.6	44.3
k	(kN/mm)	17.5	18.8	8.2	9.7	9.5	11.1	11.9
δ y	(mm)	1.1	1	2.3	2	2.5	1.7	2
δ max	(mm)	22.2	19.3	30	30	27.2	30	30
破壊形式	A: 柱の割裂 B: 梁の引き裂け	A	A	A, B	A, B	B	B	A, B
割裂状況	S: 1面割裂 W: 2面割裂	S	S	S	S	—	—	W

105mmの在来のグラフを1.14倍にしたものが、下から2番目の1.14在来のグラフである。なお、図4から得た部材内蔵型金物仕口の耐力と変形性能を表3に示す。この表からばらつき係数を考慮した部材内蔵金物仕口の短期基準耐力は14.6kNであり、羽子板ボルト仕口

は文献 4) から 7.5kN である。この図から、各試験体は変位 1~2mm で降伏し、その後荷重は漸増していることが分かる。漸増している荷重変位関係が、どのように生じていくかを考察したのが、図 4 の上 (部材内蔵型金物仕口によるもの) と下 (羽子板ボルト仕口によるもの) に示す応力度分布の模式図である。図 4 上下の図についての考察は、この後の (3) 考察で詳述する。また、これらの応力度が、両仕口に使用されている金物により、どのような機構で生じたものかを示したのが図 5 である。部材内蔵型仕口においては、図 5 左に示すように CW12 と BN1275 の木部へのめり込みと SH1230 の引張りで外力に抵抗する (文献 6)。羽子板ボルト仕口は、取り付けボルト M12 の木部へのめり込み、羽子板ボルトの座金の木部へのめり込みと羽子板ボルトの引張りで外力に抵抗する (文献 7)。

図 5 部材内蔵型金物仕口 (左) と羽子板ボルト仕口 (右) の作用応力模式図

(3) 考察

図 5 に示した接合部が引張られた場合、鋼材 (図 5 左: SH1230、図 5 右: 羽子板ボルト) への引張りと共に、木部内の金物による木部へのめり込みが生じる。図 4 に示した荷重変位曲線は、これらの接合金物の木部へのめり込み応力度の推移 (図 4 の上下に示した模式図) により特徴付けられると考えられる。すなわち、荷重変位曲線の変曲点位置を境にして、図 4 上下に示すように I (弾性域) と II (弾塑性域) III (塑性域) IV (亀裂・割裂域) に分けられる (文献 8) と考えられる。その時の部材のめり込み応力度 (加力方向だけの成分) の状態で、めり込み途中の応力度を三角形で示し、降伏応力度は台形で、完全に降伏したときのめり込み応力度は矩形の模式図として表す。また、文献 7) 文献 8) により、木部材のめり込み応力度は金物が直に接するめり込み応力度と、金物周辺のめり込み応力度からなるとし、図 5 の作用応力の模式図のように、木部材の繊維方向と金物の接触状態 (縦圧縮か横圧縮か) により、金物周辺のめり込み応力度の可否、あるいは木部材の許容するめり込み降伏応力度は異なる。文献 8) によれば、スギ材の、部材内蔵型金物 CW12 と羽子板ボルトの取り付けボルトは、繊維方向と接触する部分圧縮 (縦圧縮) であり、その圧縮基準強度は $F_{Cv}=17.7\text{N/mm}^2$ である。この縦圧縮は、金物直によるめり込み応力度だけと考えられる。しかし、部材内蔵型金物 CW12 の断面は太い円形 (30φ) のため、文献 6) に示される図 5 左のような放射状のめり込み応力度になり、試験の観察からも金物周辺のめり込み応力度と塑性に伴うひずみ硬化も生じると推定する。しかし羽子板ボルトの取り付けボルトは、軸径 (M12) が細いため、金物が直に接するめり込み応力度だけで、金物周辺のめり込み応力度の影響は少ないと考える。また、部材内蔵型金物 BN1275 と羽子板ボルトの座金は、繊維直交方向の材中間部の部分圧縮 (横

圧縮) になり、その基準材料強度は $F_{Cv}=6.0\text{N/mm}^2$ である。なお、各金物と木部材との接触面積は、部材内蔵型金物では、金物外形面積から金棒 SH1230 の穴 (径 21φ) の面積を差し引いて算定すると、CW12 は $2178=(30\times 90)-(10.5\times 10.5\times 3.14+11.6\times 11.6+5.5\times 5.5\times 3.14)\text{mm}^2$ になり、BN1275 では $1903=(30\times 75)-(10.5\times 10.5\times 3.14)\text{mm}^2$ になる。また、羽子板ボルトでは、取り付けボルトは $1440=(12\times 120)\text{mm}^2$ 座金は $1600=(40\times 40)\text{mm}^2$ である。

a) 部材内蔵型金物仕口の場合

I (弾性域) では金物と木部材は緩みなく接触しているため、図 4 の荷重変位曲線の変位と耐力は零から始まっている。I (弾性域) のめり込み応力度は文献 6) によると、図 5 左のような木部材のめり込み応力度が生じて、図 4 の上部に示す部材内蔵型金物 BN1275 と、CW12 の金物が直に接するめり込み応力度 ${}_{BN}\sigma_1$ 、 ${}_{CW}\sigma_1$ と、金物の周辺部分のめり込み応力度 ${}_{BN}\sigma_2$ 、 ${}_{CW}\sigma_2$ と表せる。II (弾塑性域) では、BN1275 は部材の基準材料強度と金物接触面積が CW12 より小さいため、BN1275 の金物に直のめり込み応力 ${}_{BN}\sigma_1$ は先にめり込み降伏応力 ${}_{BN}\sigma_{1y}$ に至る。さらに加力が進むと、CW12 が直に接する部分のめり込み応力 ${}_{CW}\sigma_1$ が増大し、めり込み降伏応力 ${}_{CW}\sigma_{1y}$ を示す。この時が I (弾性域) と II (弾塑性域) の境界のめり込み応力度である。これは表 3 における降伏耐力 $P_y=20.6\text{kN}$ であり、算定した平均の変位 $\delta y=1.9\text{mm}$ である。III (塑性域) では、文献 8) が示すように、CW12 のめり込み降伏応力 ${}_{CW}\sigma_{1y}$ にひずみ硬化による応力 σ_3 が加わる。IV (亀裂・割裂域) では、ひずみ硬化は最大応力 $\max \sigma_3$ になり、試験の観察から変位 $\delta=18\text{mm}$ 前後で亀裂が発生し始める。その後は木部材が破壊するまで変位 (亀裂) は進展して行く。

A: 柱の 1 面割 A: 柱の 2 面割 B: 梁の引き裂け
写真 11 部材内蔵型金物仕口の接合部試験体の破壊

破壊形式は写真 11 のように木部材の繊維方向の A: 柱の割裂あるいは B: 梁の引き裂けである。破壊形式が A, B の一方に偏らず生じているのは、図 5 左の部材内蔵型金物仕口が示すように、CW12 穴の柱の端あき 150mm と BN1275 穴の梁の縁あき 90mm の寸法が適正であったと考える。表 3 に示す柱の割裂状況は、写真 11 の矢印のように S: 1 面割裂と W: 2 面割裂があり、2 面割裂時の耐力と最終破壊までの変形量が 1 面割裂時のそれらよりも大きい。なお、金物と木部材との接触面積は、繊維方向で部材内蔵型金物 CW12 の方が、羽子板ボルトの取り付けボルトより 50%ほど大きく、繊維直交方向は、部材内蔵型金物 BN1275 が、羽子板ボルトの座金よりも 20%ほど大きい。部材内蔵型金物は、この接触面積の大きさを有して、木部材のめり込みを生かしていると言える。

b) 羽子板ボルト仕口の場合

文献 8) を参考にすれば、取り付けボルトの軸径 (12mm) が小さく、また座金の板厚 ($t=4.5\text{mm}$) が薄いので、金物周辺のめり込み応力度の影響は少ないと考える。そのため、めり込み応力の状態を示す、図

4 下の模式図に金物周辺部の応力度は描いていない。そこで、図 5 右の取り付けボルト軸の柱穴内面の作用応力は、繊維方向のめり込み応力度 σ_1 と、羽子板ボルトの座金の梁繊維直交方向の接触面のめり込み応力度 σ_1 は、図 4 下の模式図ように表せる。Ⅰ（弾性域）では、まず、外力の引張りにより、柱の側面にボルトで取り付けられる羽子板ボルトと柱心の偏心により、羽子板と柱側面の摩擦力が生じる。その反作用の応力は、梁の羽子板ボルトの座金のめり込み応力度 σ_1 である。Ⅱ（弾塑性域）では、図 5 右のような取り付けボルト軸の曲げからロープ効果への挙動は、柱穴内面の繊維方向の部分圧縮の三角形めり込み応力度 σ_1 が生じ、さらに加力が進むと、めり込み降伏応力度 σ_{1y} になる。これは図 4 の荷重変位曲線の降伏耐力 $P_y=7\text{kN}$ 、変位 $\delta_y=1\text{mm}$ 付近で折れ曲がる点である。Ⅲ（塑性域）では座金のめり込み応力度 σ_1 が増加した最大値の降伏めり込み応力度 σ_{1y} を示す。Ⅳ（亀裂・割裂域）では金物の接触部でひずみ硬化 σ_3 が生じて破壊に至ると考える。破壊形式は文献 9) によれば、取り付けボルトによる柱の繊維方向の割裂、あるいは羽子板の切断である。羽子板ボルト仕口は、木部材の接触面積である取り付けボルト軸側面積と座金の面積が、部材内蔵型金物仕口の木部材と金物の接触面積よりも小さいために、部材内蔵型金物仕口よりも負担できるめり込みの働きも小さい。

c) 部材内蔵型金物仕口及び羽子板ボルト仕口の接合部の比較

表 4 に部材内蔵型金物仕口の接合部試験体と羽子板ボルト仕口の接合部試験体の特徴を比較して示す。表 4 の部材内蔵型金物仕口と羽子板ボルト仕口の全試験体を通した、破壊前の、塑性域内 20mm 変位時までのエネルギー吸収を、図 4 の荷重変位曲線より概算した。部材内蔵型金物仕口の接合部の試験体は 570kN・mm であり、羽子板ボルト仕口の接合部試験体は 291kN・mm である。部材内蔵型金物仕口部のエネルギー吸収は、羽子板ボルト仕口の接合部試験体の約 2

表 4 部材内蔵型金物仕口の接合部試験体と羽子板ボルト仕口の接合部試験体の特徴の比較

	羽子板ボルト仕口	部材内蔵型金物仕口
接合部位	柱+梁	柱+梁
金物の部位	部材の表面	部材内部
応力負担部品と負担応力	座金のめり込み	丸くさび CW12 のめり込み
	羽子板の引張り	金棒 SH1248 の引張り
	取付けボルトのめり込み	棒ナット BN1275 のめり込み
	せん断力は柱のホゾによる	せん断力は柱のホゾによる
短期基準耐力	7.5kN	14.6kN
エネルギー吸収	5mm 変位時	42kN・mm
	20mm 変位時	291kN・mm
破壊性状	羽子板の切断・柱の割裂	柱の割裂・梁の引き裂け
弾性域での金物の効果	金物周辺のめり込み応力小	金物周辺のめり込み応力大
塑性域での金物の効果	ひずみ硬化小さい	ひずみ硬化大きい
破壊までの耐力	耐力が維持できる。	耐力が高く維持される。

倍になっている。また、弾塑性域内 5mm 変位時の、部材内蔵型金物仕口の接合部による仕口の耐力は、20.6 kN であり、エネルギー吸収は 91kN・mm(=1/2×20.6×1.9+1/2×(20.6+25.5)×(5-1.9))である。羽子板ボルト仕口の接合部の耐力は 12kN であり、エネルギー吸収は 42kN・mm(=1/2×2.1×0.6+1/2×(12+6.6)×(5-0.6))である。これも、部材内蔵型金物仕口の接合部によるエネルギー吸収が 2 倍ほど上まっている。このことから部材内蔵型金物による金物周辺のめり込み応力と塑性ひずみのひずみ硬化の特性は、エネルギー吸収が大きく、

羽子板ボルトと同系の粘り強い復元力特性を示している。

4. まとめ

(1) 部材内蔵型金物の特徴

本金物は羽子板ボルトと同様に、柱-梁仕口、梁-梁仕口、梁-梁継手など幅広い接合部に使用でき、在来の羽子板ボルトにはない以下のような特徴がある。

- 1) 接合部材の応力の偏心が起こりにくい。
- 2) 部材に内蔵されるため、結露や熱橋が起こりにくい。
- 3) 乾燥収縮やクリープによる部材の隙間を直すことができる。
- 4) 部材加工は市販のドリルで加工ができて断面欠損も少ない。

(2) 部材内蔵型金物仕口接合部の力学的特性

梁柱接合部試験体について行った実験結果について以下にまとめる。ただし、試験体寸法が羽子板ボルト仕口と部材内蔵型金物仕口で異なるため、そのままでは比較できない。従って両仕口接合部の力学特性の比較は、主として荷重変位曲線の形で行った。耐力を比較する時は後者の仕口寸法を前者のそれと合わせ補正を行っている。

- 1) 部材内蔵型金物仕口の荷重変位曲線は、原点0から始まる。それは部材内蔵型金物が木部材と緩みなく接触しているためである。
- 2) 降伏前は部材内蔵型仕口の剛性が羽子板ボルト仕口よりも高い。
- 3) 短期基準耐力は、部材内蔵型仕口の場合には14.6kNであり、羽子板ボルト仕口の場合には7.5kNである。
- 4) 降伏後は部材内蔵型金物仕口の場合の変位は大きく増大し、耐力もそれに伴い漸増する。これは部材内蔵型金物周辺のめり込み応力と、塑性に伴うひずみ硬化特性の影響と考えられる。

これから部材内蔵型金物は、木造軸組真壁構造の補強金物として、実用性が高いことが確認できた。

謝辞

本開発にあたり、性能実験を行った（財）日本建築総合試験所、数々の開発実験を行って頂いた、関東職業能力開発大学校・岩田純明研究室に感謝いたします。

参考文献

1) 佐道健：木のメカニズム、養賢堂、p.77、p.78、1995.7
2) 岩田純明・宇都宮直樹：木質在来工法用接合金物、日本建築学会、大会学術講演梗概集（東海）、22008、2003.9
3) （財）日本住宅・木材技術センター、木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2008年版）、p.72、p.579、p.580、p.582、2008
4) 建築技術、pp.126（図6）～127、1995.11
5) 日本建築学会、木質構造設計基準・同解説（許容応力度・許容耐力設計法）、pp.26～33、2009.3
6) 杉山英男編著：木質構造第4版、共立出版、pp.255～262、2012.3.15
7) 日本建築学会、木質構造基礎理論 p.41、pp.86～103、2010.12
8) 棚橋秀光・大岡優・伊津野和行・鈴木祥之：木材のめり込み降伏メカニズムと均等めり込み弾塑性変位の定式化、日本建築学会、構造系論文集第76巻第662号、pp.811～819、2011年4月
9) 後藤一雄：羽子板ボルト接合耐力の実験報告、日本建築学会、大会学術講演梗概集（近畿）、2764、1980.9

[2015年6月3日原稿受理 2015年7月21日採用決定]