 ノート

[木材学会誌 Vol. 54, No. 4, p. 199-207 (2008)]

仕口のモーメント抵抗性能を考慮した伝統構法壁体のせん断性能評価*1

杉本貴紀*2, 平嶋義彦*3, 佐々木康寿*3

Shear Properties of Traditional Timber Structures Considering Moment-Resisting Properties of Joints*1

Takanori SUGIMOTO*2, Yoshihiko HIRASHIMA*3 and Yasutoshi SASAKI*3

We investigated local wooden houses with traditional structures to contribute to the popularization of locally suitable wooden houses built with regional lumber. Based on the results of the investigation, racking tests of traditional wooden structures with sashigamoi, nuki, and koshigumi joints and their frames were conducted. Sashigamoi, nuki, and koshigumi structures did not fail up to a maximum shear deformation angle of 0.15 rad, and showed great toughness. The shear load factors of sashigamoi, nuki, and koshigumi specimens were 0.46, 1.31, and 0.96, respectively. These resulting factors are low in value, contrary to the great toughness of traditional wooden structures. Then, the rotational properties of sashigamoi, nuki, and koshigumi joints were analyzed with the results of racking test of traditional wooden structures and their frames, and ultimate moment and rotational stiffness values of sashigamoi, nuki, and koshigumi joints were obtained.

Keywords: racking test, sashigamoi structure, nuki structure, koshigumi structure, traditional joint.

本研究では、地域の気候・風土に適した地産地消による家づくりの普及を最終目的として、地域に根づいてきた伝統構法による木造住宅を調査した。その中で、調査建物にみられた差鴨居構造、貫構造、格子組構造についてせん断耐力試験を行った。3つの伝統木構造は、いずれも試験を行った0.15 radまで耐力を維持しながら大変形を呈した。標準的試験法に基づいて得られた壁倍率は、差鴨居構造試験体では0.46、貫構造試験体では1.31、格子組構造試験体では0.96となり、このような評価基準ではその性能が結果的に小さく見積もられることになると考えられた。そこで、伝統木構造の性能評価の一方法として、構造体とその枠組のみのせん断耐力試験結果から仕口1個あたりの平均的性能を評価し、終局モーメントは差鴨居仕口1.90 kNm、貫仕口1.46 kNm、格子組仕口4.40 kNmであった。

1. 緒 言

現在の本造建築は、昭和25年に初めて制定・公布された建築基準法に従って造ることが義務付けられている。基準法では、地震力に対する主要な構造要

素として筋違を使用するものとし、その量的基準を設けている。しかしながら、日本古来の伝統構法については規定に盛り込まれず、それらは存立基盤を失うこととなった。

筋違構造は、力を限られた部材や接合部に集中させること、木材の繊維直交方向の応力を引き起こすことなどの力学的な問題に加えて、設置部は開口をとれず必然的に壁構造になるなど、日本の気候風土に適った開放的な住まいを造るのが難しいという問題を内包している。このような問題に対応するものとして、従来顧みられることの少なかった伝統的な構法が関心を集めるようになってきた。また、平成12年の建築基準法改正で、限界耐力計算等で安全が

*1 Received February 28, 2007; accepted December 27, 2007.
本報告の一部は、日本建築学会2006年度大会（2006年9月、神奈川）で発表した。

*2 愛知県産業技術研究所 Aichi Industrial Technology Institute, Kariya 448-0013, Japan

*3 名古屋大学大学院生命農学研究科 Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan

確認されれば伝統構法による建設が可能になったことも、このような傾向を後押ししている。

伝統構法による木造住宅、構造体、あるいはその接合部に関しては、実験・理論の両面から研究が行われ、有益な成果が蓄積されている^{例えは1-9)}。しかしながら、それらの成果に基づいて一般的な設計手法が確立されるまでには到達しておらず、現状では伝統構法による木造住宅が広く市民権を得ているとはいいがたい。

また、我が国の木材生産量が低迷を続け、国産材の需要拡大が求められる今日において、木材の地産地消、いわゆる地域材による家作りが注目を集めている。その際に、地域の気候・風土に適した居住環境を実現するためには、地域に根づいてきた伝統構法を参考にすることが好ましいと考えられる。

このような背景から、本研究では、地域材だけで作られていた時代の民家に学ぶことで、伝統構法の長所を取り入れた地域材による部材の標準化とそれに対応した丸太・製材の生産システムを充実させ、地域材を用いた家づくりを普及させることを最終的な目的として、愛知県豊根村に現存し建築後100年程度経過していると推測される伝統構法による木造住宅を調査した。本報は、その調査対象となった建物から抽出した3種の伝統構造要素に関して、力学挙動分析のためにせん断耐力試験を行った結果につ

いて報告するものである。

2. 実験方法

2.1 試験体

今回調査した建物は、愛知県豊根村下黒川字柿の平に現存する2棟の木造住宅で、それらから抽出した構造要素はFig. 1に示す差鴨居構造、貫構造、格子組構造の3種類である。試験体は各構造につき3体を製作し（順に試験体記号を各々S1~S3, N1~N3, K1~K3とする）、さらにそれぞれの枠組のみの試験体（S4, N4, K4）も用意した。外形寸法はいずれも2340（長）×2750（高）mmで柱間距離は1820（格子組構造のみ1170）mmである。使用した木材の樹種は土台材がヒノキ、それ以外の構造材はスギである。これらの材は、地元の製材業者を通じて機械等級区分E70以上のものを購入し、その後、さらに縦振動法によるヤング率をもとに材を選別した。供試材の密度はヒノキ $550 \pm 20 \text{ kg/m}^3$ 、スギ $480 \pm 80 \text{ kg/m}^3$ （平均±標準偏差）であり、縦振動法によるヤング率はヒノキ $13.60 \pm 3.50 \text{ GPa}$ 、スギ $8.18 \pm 2.04 \text{ GPa}$ であった。

差鴨居構造試験体は、土台、桁、柱（2本）で枠組をつくり、上部に差鴨居、貫及び吊束を配して構成した（Fig. 1(d)）。土台、桁、及び柱はいずれも120 mm 正角材、差鴨居と貫の断面はそれぞれ120×

Fig. 1. Test specimens and details of traditional joints.

180 mm, 30×120 mm である。柱と土台、桁との接合（仕口）は長ほぞ（90×36×120 mm）とし、その木口には割楔 2 本を打ち込んで仕口の締め付けを行った。鴨居と柱の仕口は、鴨居にあご付きのほぞを造り、これを柱のほぞ穴に差し込んで、ほぞの木口に割楔を打ち込んで構成した（Fig. 1(a)）。貫は柱及び吊束を貫通しており、貫通部上部には楔を左右両方向から打ち込んで仕口の締め付けを行った。貫仕口の楔は、繰り返し荷重を受けると抜き出てくることが指摘されている⁹⁾。そこで本試験では、楔の抜け出し防止策として、楔の外側木口に接触するように貫に CN50 釘を打ち込んだ。楔及び割楔の樹種はケヤキであり、その平均密度は 710 kg/m³ であった。楔の形状は 145(長)×24(高) mm の直角三角形で、幅は 30 mm であった。割楔の寸法は、角度 10 度、長さ 60 mm, 幅 30 mm であった。貫構造試験体は、土台、桁、及び柱（3 本）で枠組を構成し、貫を 5 段設けた（Fig. 1(e)）。部材及び仕口は差鴨居構造試験体と同様である（Fig. 1(b)）。格子組構造試験体は、調査建物に用いられていた格子梁構造を模したもので、150 mm 正角材 4 本で渡腮仕口 4 箇所を構成し（Fig. 1(c)）、これに加力試験用土台及び桁を長ほぞにより差鴨居構造試験体と同じ方法で接合した（Fig. 1(f)）。

2.2 せん断耐力試験

伝統木構造のせん断耐力性能評価に関して標準的な試験法は制定されていないため、本試験では耐力壁の壁倍率を定めるための標準試験法¹⁰⁾を準用した。試験機及び試験方法の概略を Fig. 2 に示す。使用した試験機は、鋼製加力フレームを備えた構造物疲労試験機（島津製作所製、EHF-JB10-20L）である。試験体は、柱脚部を試験機加力フレームにホルダダウン金物（日本住宅・木材技術センター認定、SHD-10）を用いて固定し、桁をピン及びローラーを介し

て加力用アクチュエータに連結した。また、桁部分には試験体の面外移動を防ぐために振れ止めを設けた（Fig. 2(a)）。

加力は、定速変位制御による正負交番繰り返し载荷とし、加力の折り返し点は標準試験法の定める見かけのせん断変形角 1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50 rad の 7 段階に 1/15 rad を加えて計 8 段階とした。各変形角における繰り返し負荷回数は 3 回で、上記の繰り返し加力の所要時間は約 12 分であった。また、繰り返し加力終了後、アクチュエータの性能限度にあたる 400 mm の変位（変形角 1/6.6 rad に相当）を試験体に与えた。以上の加力スケジュールを Fig. 2(b) に示す。荷重をアクチュエータ先端のロードセル（容量 100 kN）で、柱の上下部 2 箇所での水平変位と試験体外側柱脚部 2 箇所の垂直変位をひずみゲージ式変位計で測定した。荷重及び変位はセンサーインターフェイス（共和電業製、PCD320A 及び 300A）を用いてサンプリング周波数 5 Hz にて同時に計測し、パーソナルコンピュータに記録した。

3. 結果と考察

3.1 履歴特性と変形性状

各構造のせん断耐力とせん断変形角の関係について、その代表例と枠組のみの結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 で用いたせん断変形角は、試験体の 2 箇所での測定した水平変位の差を変位計間距離 2410 mm で除した値、すなわち見かけのせん断ひずみである。いずれの構造試験体においても、標準試験法の変形角範囲内で耐力の低下は認められなかった。加えて、追加した 1/15 rad の変形角及びその後の 400 mm 変位（変形角 1/6.6 rad）の際にも大変形を呈しながら耐力はさらに増加した。加力の最終段階における試験体の変形状況については、Fig. 4 に示したように

Fig. 2. Method of racking test.

Fig. 3. Typical load-shear deformation angle curves.

Fig. 4. Deformation of traditional joints in the final loading stage of racking tests.

差鴨居仕口の抜け出し及びそれを締め付けている割楔の抜け出し、貫仕口における楔の貫へのめり込みなどがみられたが、いずれの試験体においても部材の折損や接合部の脱落などの明確な破壊は起きなかった。400 mmの変位を与えた際の最大耐力は、その30~50%程度を枠組が負担し、残りを差鴨居、貫、渡腮仕口などが負担した(Table 1)。既往の研究では、差鴨居を軸組試験体に入れることにより最大耐力が約2倍に増加すること⁴⁾、貫構造試験体の最大耐力

の約50%を軸組試験体が負担すること²⁾が報告されており、本研究においても同様の結果が得られた。

ここで、耐力壁の性能評価として一般的に用いられている標準試験法¹⁰⁾に従い、3つの伝統的な木構造の壁体としての性能評価を試みた。すなわち、Fig. 3のせん断耐力-せん断変形角関係の正加力側において包絡曲線を得て、手順に従って完全弾塑性モデルを当てはめ、Table 2, 3に示す諸数値を評価した。なお、標準的試験法では試験体の変形を1/15

Table 1. Maximum load obtained in the racking test.

Structure	No.	Max. load (kN)	Structure	No.	Max. load (kN)	Structure	No.	Max. load (kN)
Sashigamoi	S1	8.65	Nuki	N1	13.85	Koshigumi	K1	12.64
	S2	7.99		N2	12.74		K2	12.50
	S3	8.07		N3	14.16		K3	11.17
	(Ave.	8.24)		(Ave.	13.58)		(Ave.	12.10)
Sashigamoi frame	S4	4.02	Nuki frame	N4	3.61	Koshigumi frame	K4	3.90

Table 2. Results of racking tests in the range of shear deformation angles up to 1/15 rad.

Structure	No.	$P_{\max}^{a)}$ (kN)	$P_u^{b)}$ (kN)	$P_y^{c)}$ (kN)	$D_s^{d)}$	$K^{e)}$ (kN/rad)	$0.2P_y/D_s$ (kN)	$2/3P_{\max}$ (kN)	$P_{1/120}^{f)}$ (kN)	Shear load factor
Sashigamoi	S1	6.35	5.45	3.00	0.60	156.48	1.83	4.23	1.62	0.46
	S2	6.04	5.30	3.30	0.54	179.53	1.98	4.02	1.87	
	S3	6.03	5.05	2.49	0.61	141.35	1.67	4.02	1.63	
	Ave.	6.14	5.27	2.93	0.58	159.12	1.83	4.09	1.71	
	COV	0.03	0.04	0.14	0.07	0.12	0.09	0.03	0.08	
Nuki	N1	11.72	9.70	5.54	0.38	574.77	5.10	7.82	5.33	1.31
	N2	11.86	10.02	5.73	0.43	484.31	4.67	7.90	5.24	
	N3	12.18	10.33	6.12	0.44	472.78	4.66	8.12	4.99	
	Ave.	11.92	10.02	5.79	0.42	510.62	4.81	7.95	5.19	
	COV	0.02	0.03	0.05	0.08	0.11	0.05	0.02	0.03	
Koshigumi	K1	10.61	9.00	4.51	0.61	250.48	2.95	7.07	2.47	0.96
	K2	10.09	8.55	4.69	0.58	253.36	2.93	6.73	2.68	
	K3	8.82	7.50	3.83	0.62	205.13	2.44	5.88	1.96	
	Ave.	9.84	8.35	4.35	0.60	236.32	2.77	6.56	2.37	
	COV	0.09	0.09	0.10	0.03	0.11	0.11	0.09	0.16	

^{a)}: Maximum load, ^{b)}: Ultimate load of bi-linear model for shear deformation angle curve, ^{c)}: Load at yield point,

^{d)}: Structural characteristic factor, ^{e)}: Initial stiffness, ^{f)}: Load corresponding to the shear deformation angle of 1/120 radian.

Table 3. Results of racking tests in the range of shear deformation angles up to 1/10 rad.

Structure	No.	$P_{\max}^{a)}$ (kN)	$P_u^{b)}$ (kN)	$P_y^{c)}$ (kN)	$D_s^{d)}$	$K^{e)}$ (kN/rad)	$0.2P_y/D_s$ (kN)	$2/3P_{\max}$ (kN)	$P_{1/120}^{f)}$ (kN)	Shear load factor
Sashigamoi	S1	7.48	6.39	3.70	0.54	142.80	2.38	4.99	1.62	0.46
	S2	7.02	6.02	3.81	0.48	160.76	2.50	4.68	1.87	
	S3	6.82	5.83	2.87	0.52	136.65	2.24	4.54	1.63	
	Ave.	7.11	6.08	3.46	0.51	146.74	2.37	4.74	1.71	
	COV	0.05	0.05	0.15	0.06	0.09	0.06	0.05	0.08	
Nuki	N1	11.83	10.45	5.61	0.34	559.35	6.23	7.88	5.33	1.43
	N2	12.13	10.86	5.87	0.37	475.00	5.87	8.09	5.24	
	N3	12.42	11.18	6.24	0.39	458.06	5.80	8.28	4.99	
	Ave.	12.13	10.83	5.91	0.36	497.47	5.97	8.08	5.19	
	COV	0.02	0.03	0.05	0.07	0.11	0.04	0.02	0.03	
Koshigumi	K1	11.52	10.21	5.02	0.52	242.97	3.93	7.68	2.47	0.96
	K2	11.18	9.77	5.17	0.50	242.18	3.88	7.45	2.68	
	K3	9.52	8.45	4.25	0.52	200.94	3.28	6.35	1.96	
	Ave.	10.74	9.48	4.82	0.51	228.70	3.70	7.16	2.37	
	COV	0.10	0.10	0.10	0.02	0.11	0.10	0.10	0.16	

^{a)}: Maximum load, ^{b)}: Ultimate load of bi-linear model for shear deformation angle curve, ^{c)}: Load at yield point,

^{d)}: Structural characteristic factor, ^{e)}: Initial stiffness, ^{f)}: Load corresponding to the shear deformation angle of 1/120 radian.

rad までとして評価することになっているが, Fig. 3 からも分かるように, 伝統木構造は耐力を発揮しながら大変形する。そこで本報では, 1/15 rad までを評価範囲とする標準試験法の場合と, 評価範囲を拡大して 1/10 rad までとする場合の 2 通りについて, 完全弾塑性モデルの適用を行った。また, これらの結果を元に壁倍率の算定¹¹⁾を行った。ここで, 低減係数は 1.0 とし, 試験体の壁長は差鴨居構造及び貫構造では 1820 mm, 格子組構造では 1170 mm であった。

Fig. 5 に包絡曲線の一例と完全弾塑性モデルの適用例を示す。また, 変形角 1/15, 1/10 rad までの評価範囲に完全弾塑性モデルを当てはめて得られた諸数値と壁倍率の算定結果をそれぞれ Table 2, 3 に示す。1/15, 1/10 rad までの評価範囲において, いずれの試験体の包絡線にも荷重低下は見られなかったため, 完全弾塑性モデルに当てはめる際の最大耐力 P_{max} はそれぞれ 1/15, 1/10 rad での値となり, 終局変形角 γ_u はそれぞれ 1/15, 1/10 rad となった。差鴨居構造では壁倍率の算定に用いられる短期基準せん断耐力は, どちらの評価範囲においても 1/120 rad における耐力となり, 算出された壁倍率は, Table 2, 3 に示したように 0.46 であった。また, 貫構造試験体では, 短期基準せん断耐力は 1/15 rad までの評価では終局耐力 P_u に $(0.2/D_s)$ を乗じた値, 1/10 rad までの評価では 1/120 rad における耐力となり, 壁倍率はそれぞれ 1.31, 1.43 であった。格子組構造試験体の短期基準せん断耐力は, どちらの評価範囲においても 1/120 rad における耐力となり, 壁倍率は 0.96 であった。本研究結果と同様に, 差鴨居構造試験体では 1 スパンあたりの有効壁長が $0.7 m^8)$, 貫構造試験体の壁倍率が $0.31^{2)}$ という報告がある。これらのことから, 伝統構法構造体は耐力を維持しながら大変形する能力を有するものの, 壁倍率という評価基準ではその性能が結果的に小さく見積られることになると考えられる。また, その大変形能力を考慮し

て評価範囲を変形角 1/10 rad まで拡大したが, 上述のように壁倍率の算定に対して特に有利となることはなかった。

3.2 構造体のせん断耐力試験結果に基づく仕口の性能評価

上述したように, 標準試験法に基づいた壁倍率評価では, 伝統木構造の特性が結果的に低く評価されることとなる。そこで, 伝統構法による壁体のせん断耐力試験から, 壁体を構成する各仕口接合部の平均的な性能を評価することを検討した。まず, 3.1 節で得たそれぞれの構造試験体とその枠組のみのモーメント-変形角関係について, 正加力側の包絡線を用いて各構造試験体のモーメントから枠組のモーメントを差し引いた包絡線を得た。これにより, ホールダウン金物によって加力フレームに緊結された枠組のモーメントを除いた, 各構造が有する特有の仕口全体の復元力特性を得ることができる。次に, 得られた包絡線に対して完全弾塑性モデルを当てはめ, 諸特性値を得た。それらの値をそれぞれの構造が有する仕口の数で除して, 仕口 1 個あたりの平均的な性能を評価した。

3.2.1 仕口の特性

Fig. 6 に示すのは, 各構造試験体のモーメントから枠組のモーメントを差し引いた包絡線とそれらの平均包絡線である。差鴨居構造試験体には差鴨居と貫 1 段が含まれるため (Fig. 1(d)), 貫 1 段分の耐力も併せて差し引いた純差鴨居構造の包絡線を示してある。貫 1 段分の復元力特性は, 貫構造 (貫 5 段分) の復元力特性 (Fig. 6) においてモーメントを 1/5 とすることによって得た。Fig. 6 によると, 純差鴨居構造ではせん断変形角の増大とともにせん断耐力が増加し, 0.05 rad 付近から耐力の増加が一度停滞した後, 再び緩やかに増加に転ずる傾向を示した。一方, 貫構造, 格子組構造では, 変形角の増加とともに耐力の増加が次第に緩やかになり, 約 0.06 rad 以降はある一定以上の耐力を維持しながら変形角が

Fig. 5. Typical envelopes of the load-shear deformation angle curve, and the bi-linear models.

Fig. 6. Envelopes of the moment-shear deformation angle curve without frame moment.

増加する傾向が見受けられた。貫及び格子組構造では、変形角が大きくなると、主に仕口部の木材のめり込み (Fig. 4(b), (c)) によって粘りながら耐力を発現するのに対して、差鴨居構造では、正加力方向側に位置する仕口でのめり込みと、負の加力方向側に位置する仕口の抜け出し (Fig. 4(a)) などが複雑に影響し合い、貫及び格子組構造のように大変形域で耐力が一定値に達するのではなく、漸増したのではないかと考えられる。

このようにして得られた、構造体に含まれる仕口全体の平均包絡線を用いて、標準試験法¹⁰⁾を参考にして諸特性値を評価した。仕口の抵抗となる木材のめり込みは完全弾塑性で仮定される¹²⁾ことから、ここでの標準試験法を用いた評価は妥当であると考えられる。また、3.1節と同様に、伝統仕口の大変形能力を考慮して変形角 1/10 rad までの包絡線に対して完全弾塑性モデルをあてはめた。このようにして得られた諸特性値を Table 4 に示す。Table 4

には、復元力特性の概略の形をみる際に必要となる特定変形角に対応するモーメントも載せてある。構造特性係数をみると、貫構造が最も小さな値を示した。従って、1/10 rad までの評価範囲では、本報で取り上げた3構造のうち、5段設けた貫構造が最も粘る構造であると言える。しかしながら、Table 4 に示した数値は評価範囲を 1/10 rad までとした場合のものであり、Fig. 6 から分かるように、いずれの構造もせん断変形角が 1/10 rad を超えてなお、抵抗モーメントを維持あるいは漸増させながらさらに変形を続けた。

上述したように、構造特性係数を除く Table 4 の諸数値をそれぞれの構造がもつ仕口の数で除せば、仕口1個あたりの平均的性能を得ることができる。仕口数は差鴨居構造試験体2、貫構造試験体15、格子組構造試験体4である。そこで、構造特性係数を除く Table 4 の値をそれぞれの仕口数で除して、仕口1個あたりの平均的性能として Table 4 の括弧内

Table 4. Properties of sashigamoi, nuki, and koshigumi structures without frame moment.

Structure	Joint	No.	$M_u^{a)}$ (kN m)	$M_y^{b)}$ (kN m)	$M^c)$ (kN m)				$K^{d)}$ (kN m/rad)	$D_s^{e)}$
					1/120	1/60	1/30	1/10		
Sashigamoi	2	S1	4.72 (2.36)	2.74 (1.37)	1.09 (0.55)	2.09 (1.04)	3.08 (1.54)	6.28 (3.14)	101.97 (50.99)	0.55
		S2	3.53 (1.76)	2.93 (1.47)	1.58 (0.79)	2.72 (1.36)	3.28 (1.64)	4.74 (2.37)	151.28 (75.64)	0.36
		S3	3.66 (1.83)	2.17 (1.08)	0.35 (0.17)	0.72 (0.36)	1.88 (0.94)	4.77 (2.38)	57.76 (28.88)	0.68
		Smean	3.80 (1.90)	2.28 (1.14)	0.97 (0.49)	1.80 (0.90)	2.65 (1.33)	5.21 (2.60)	95.31 (47.66)	0.50
Nuki	15	N1	21.24 (1.42)	11.75 (0.78)	11.98 (0.80)	14.89 (0.99)	19.14 (1.28)	23.65 (1.58)	1535.20 (102.34)	0.27
		N2	21.79 (1.45)	12.06 (0.80)	11.63 (0.78)	14.43 (0.96)	19.03 (1.27)	23.45 (1.56)	1279.90 (85.33)	0.29
		N3	23.07 (1.54)	13.22 (0.88)	11.05 (0.74)	14.69 (0.98)	20.05 (1.34)	25.07 (1.67)	1046.47 (69.76)	0.35
		Nmean	21.92 (1.46)	12.09 (0.81)	11.43 (0.76)	14.51 (0.97)	19.34 (1.29)	24.13 (1.61)	1224.80 (81.65)	0.31
Koshigumi	4	K1	19.57 (4.89)	9.04 (2.26)	3.96 (0.99)	7.41 (1.85)	13.32 (3.33)	21.30 (5.33)	433.70 (108.42)	0.54
		K2	18.30 (4.57)	9.26 (2.32)	4.59 (1.15)	7.72 (1.93)	12.69 (3.17)	20.42 (5.11)	436.48 (109.12)	0.50
		K3	14.87 (3.72)	6.70 (1.68)	2.67 (0.67)	5.43 (1.36)	10.09 (2.52)	15.94 (3.99)	327.36 (81.84)	0.54
		Kmean	17.61 (4.40)	8.47 (2.12)	3.65 (0.91)	6.76 (1.69)	12.01 (3.00)	19.22 (4.81)	392.23 (98.06)	0.54

Values in parentheses show the properties of a joint. ^{a)}: Ultimate moment of bi-linear model for shear deformation angle curve, ^{b)}: Moment at yield point, ^{c)}: Moment corresponding to respective shear deformation angle, ^{d)}: Rotational stiffness, ^{e)}: Structural characteristic factor.

に示す。差鴨居仕口と貫仕口を比較すると、終局モーメントは差鴨居仕口の方が大きく、回転剛性は貫仕口の方が大きかった。このことから、本報で調べた差鴨居構造試験体は、純差鴨居構造に貫を1段設けることによって、構造体としての初期剛性を補うことができたのではないかと考えられる。また、貫構造試験体は、貫を多段設けることによって（本報では5段）、十分な耐力を発揮できたと推察される。格子組仕口については、終局モーメントは他の2つの仕口に比べて非常に大きかった。2.1節で述べたように、格子組構造試験体は調査建物に用いられていた格子梁構造を模したものであることから、格子組仕口は、伝統構法による建物の床を固めるのに重要な役割を果たしたと考えられる。また、本稿では示していないものの、Fig. 6に示した平均包絡線のモーメントをそれぞれの仕口の数で除算すれば1仕口あたりの平均的なモーメント-変形角関係が得られる。

本節で述べた方法では、伝統構法による構造体の水平加力試験結果から、構造体の一部としての挙動を反映した平均的な1仕口あたりの性能を評価した。この方法は、仕口単体の性能を正確に評価するには不向きであるが、仕口が構造体に組み込まれた場合の全体的な挙動を考慮している。従って、構造体の性能評価に用いるための平均的な仕口性能を得る方法としては有用であると考えられる。これらの数値が得られると、貫の段数の変更などによって構造体の有する仕口の数が増えられた場合に、構造体の回転剛性や終局モーメントを簡易に算出することができる。また、ある建物が張間あるいは桁方向に有する仕口の種類と数を把握すれば、1仕口あたりのモーメント-変形角関係を用いて重ね合わせにより簡便に建物の復元力特性を推定することができる。これにより、建物全体の性能を検討することも可能になり得ると考えられ、伝統構法を取り入れた家造りの普及に少なからず貢献することが期待される。

3.2.2 仕口性能の設計式に関する検討

Table 4に示した1仕口あたりの性能に関して、貫仕口については後藤¹²⁾、稲山¹³⁾や北守ら⁶⁾による設計式が提案されている。後藤、稲山による設計式は、楔の打ち込みによる初期嵌合を考慮したものではなく、その影響を考慮したものが北守らによる理論式である。Table 4に示した貫仕口の性能を設計式と比較検討する場合、北守らによる理論式を用いるのが妥当であると考えられるが、本実験では楔の打ち込み量などに関して規定を設けなかったために

彼らの式を適用することができない。そこで、今回は稲山による設計式との比較検討を試みた。これは木材のめり込みによる仕口の強度発現機構について理論的考察を試みたもので、これに基づいて導出された通し貫の回転剛性、降伏モーメントは(1)式で与えられる。

$$\begin{aligned} K_R &= x_p^2 y_p E_{\perp} \left\{ \frac{x_p}{z_0} \left(C_{xm} - \frac{1}{3} \right) + 0.5 C_{xm} \right\}, \\ M_y &= \frac{K_R z_0 F_m}{x_p E_{\perp} C_{xm} \sqrt{C_{ym}}} \\ C_{xm} &= 1 + \frac{4z_0}{3x_p}, \quad C_{ym} = 1 + \frac{4z_0}{3ny_p} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 K_R は回転剛性、 M_y は降伏モーメント、 x_p は柱幅の1/2、 y_p は貫の厚さ、 z_0 は貫のせい、 C_{xm} は端距離効果係数、 C_{ym} は縁距離効果係数、 $E_{\perp}$ は全面横圧縮ヤング率、 F_m はめり込み降伏応力度である。全面横圧縮ヤング率 $E_{\perp}$ は繊維方向ヤング率の1/50として算出し¹³⁾、繊維方向ヤング率としてスギの基準弾性係数 $E_0 = 7.0$ GPaを用いた¹¹⁾。また、めり込み降伏応力度 F_m は長期許容めり込み応力度の2.4倍として算出した¹³⁾。長期許容めり込み応力度には、スギの材中間部での部分圧縮における基準許容応力度2.0 MPaに割増し係数1.36を乗じた値を用いた¹¹⁾。

(1)式を用いて算出した貫仕口の回転剛性、降伏モーメントをTable 4に示す実験値と比較したのがFig. 7である。回転剛性の実験値は計算値 $Ncal$ に比べて30~90%大きかった。これは、楔の打ち込みによる効果であると考えられる。本実験では、上述のように楔の打ち込みに関して基準を設けなかったために仕口によって初期嵌合度が異なったことは十分に考えられるが、実験の際には大工の指導の下に試験体を組み上げた。そこで、仮に本実験における貫構造試験体の組み立てが一般的なものであったとすると、Fig. 7の結果から、本実験における貫構造試験体にケヤキの楔を用いた場合には、(1)式によって算出される仕口の初期剛性に対して少なくとも3割程度の向上が見込まれるといえよう。一方、降伏モーメントの計算値は実験値とほぼ同じ値が得られた。これは、楔に用いたケヤキが貫材のスギに比べて硬く、降伏モーメント程度まででは主にスギのみがめり込んだためではないかと推察される。

4. 結 論

愛知県豊根村に現存し建築後100年程度経過したと推測される伝統構法による木造住宅から抽出した3種の伝統構造要素（差鴨居構造、貫構造、格子組

Fig. 7. Comparison of the rotational properties of nuki joints between the experimental value (N1, N2, N3, and Nmean) and the theoretical one (Ncal)¹³⁾.

Note: the value on the top of each bar is the ratio to the theoretical value.

構造)についてせん断耐力試験を行った結果、本実験範囲内で以下のような結論が得られた。

- 1) 3つの伝統木構造は、いずれも耐力を維持しながら大変形することが明らかになった。
- 2) 標準的試験法に基づいて得られた壁倍率は、差鴨居構造試験体では0.46、貫構造試験体では1.31、格子組構造試験体では0.96であった。
- 3) 構造体のせん断耐力試験結果から仕口1個あたりの平均的性能を評価し、終局モーメントは差鴨居仕口1.90 kNm、貫仕口1.46 kNm、格子組(渡腮)仕口4.40 kNmであった。

謝 辞

本研究の実施に際し、機会を与えられたあいちの木で家を作る会、(財)日本住宅・木材技術センターに、また実験に対する助力を受けた名古屋大学大学院生命農学研究科生物材料工学研究分野の2005年度在籍の学生諸子に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 藤田香織, 坂本 功, 大橋好光: 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, 近畿, 1996, pp. 103-104.
- 2) 星野志保, 若島嘉朗, 鈴木 有, 飯島泰男: 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, 中国, 1999, pp. 139-140.
- 3) 原田規行, 前野将輝, 後藤正美, 鈴木祥之: 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, 関東, 2002, pp. 231-232.
- 4) 大西功人, 山田真澄, 岩本いづみ, 後藤正美, 鈴木祥之: 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, 東海, 2003, pp. 121-122.
- 5) 加藤泰世, 小松幸平, 北守顕久: 木材学会誌 **49**(2), 84-91 (2003).
- 6) 北守顕久, 加藤泰世, 片岡靖夫, 小松幸平: 木材学会誌 **49**(3), 179-186 (2003).
- 7) 佐藤弘美, 松田昌洋, 藤田香織, 腰原幹雄, 坂本功: 日本建築学会構造系論文集 **602**, 187-194 (2006).
- 8) 貫構造・差鴨居構造設計方法の開発委員会: “木造軸組構法等の開発業務報告書-貫構造・差鴨居構造設計方法の開発-”, (財)日本住宅・木材技術センター, 東京, 1985, pp. 40-127.
- 9) 貫構造・差鴨居構造設計方法の開発委員会: “木造軸組構法等の開発業務報告書-貫構造・差鴨居構造設計方法の開発-”, (財)日本住宅・木材技術センター, 東京, 1986, pp. 2-224.
- 10) 日本建築センター: ビルディングレター **443**号, 27-32 (2003).
- 11) “木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-”, 日本建築学会, 東京, 2002, pp. 104-105.
- 12) 後藤一雄: “木質構造設計ノート”, 日本建築学会, 東京, 1995, pp. 225-228.
- 13) 稲山正弘: “木材のめり込み理論とその応用-靱性に期待した木質ラーメン接合部の設計法に関する研究-”, 東京大学 学位論文, 1991, pp. 121-246.