

伝統的構法の古材・新材の仕口接合部の比較実験

Loading Tests of Traditional Aged Wooden Joints Compared with New Ones

棚橋 秀光¹・大岡 優²・山崎真理子³・佐々木康寿⁴

Hideaki Tanahashi, Yu Ooka, Mariko Yamasaki and Yasutoshi Sasaki

¹立命館大学 衣笠総合研究機構 客員研究員 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Visiting Researcher, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

²立命館大学 総合科学技術研究機構/日本学術振興会特別研究員 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Research Fellow, Ritsumeikan University/JSPS, Research Organization of Science and Engineering

³名古屋大学准教授 大学院生命農学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

Associate Professor, Nagoya University, Graduate School of Bioagricultural Sciences

⁴名古屋大学教授 大学院生命農学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

Professor, Nagoya University, Graduate School of Bioagricultural Sciences

The restoring force characteristics of aged existing wooden joints should be estimated accurately for seismic evaluation and reuse of existing traditional wooden buildings. The authors carried out loading tests of column-beam joints in a built-up state removed from two demolishing buildings, comparing with the same joints with new members for the restoring force characteristics. Some aged joints showed very poor stiffness and resistance depending on the looseness of joints. These results will contribute accumulation of structural databases of aged wooden joints for the seismic evaluation, reuse and conservation of traditional wooden buildings.

Keywords : *traditional wooden joint, aged wooden joint, loading test, restoring force characteristics*

1. はじめに

わが国には貴重な文化財を含む伝統的な木造建築物が多く残っており、その維持・保存のための適切な耐震性能評価と耐震補強が求められている。古材の経年による材料力学的な特性評価とあわせて、実在する仕口の構造力学的特性の評価も重要な意義をもつ。

前年度は解体した古材・新材を用いて新たに加工した十字型仕口接合部の比較実験を行い一定のデータの蓄積を行った¹⁾が、現存する仕口接合部内部の経年劣化や緩みなどの要因は明らかにできなかった。

本報告は、築後 118 年と 60-70 年の建物が解体される機会に、仕口接合部を解体しないで切り出して実験室にそのまま持ち込んで試験体とし載荷実験を行うとともに、比較のために、同じ仕様の新材で構成した仕口接合部試験体を用いて同様な実験を行い、耐震性能の主要な指標である強度・剛性・変形性能などの復元力特性の比較検証結果をまとめたものである。そのなかで、古材仕口接合部は劣化や緩みなどの嵌合度が剛性・耐力に大きな影響をおよぼすことが明らかとなった。現存する古材の耐震性能評価や再利用に際しては、このような特性を十分考慮する必要がある。

本報告の実験は限定されたものであるが、今後このような成果を蓄積し、古材の材料力学的特性や古材の仕口の構造的な特性の解明を進めることは、古材を適切に再活用する道筋を拓くとともに、伝統的木造建築物の耐震性能評価および耐震補強、さらにはそれらの保存・継承に資するうえで重要と考えている。

2. 古材仕口接合部の実験

(1) 古材仕口接合部実験の概要

古材試験体は、長野市の寺院客殿（明治 27 年築、築後経過年数 118 年）から 4 体、福山市の民家（昭和 20 年代築、築後経過年数 60-70 年）から 7 体の合計 11 体、樹種は柱材がスギ（一部ヒノキ）、梁（桁）材がアカマツである。写真 1～4 に対象とした建物および部材の一部を示す。



写真 1 長野の寺院客殿の外観写真



写真 2 長野の寺院客殿の実験対象部分



写真 3 福山の民家の外観写真



写真 4 福山の民家から搬入した試験体

試験体形状は図 1 に示す T 型の形状で込栓はない。試験体名称と各部の寸法・詳細を表 1 に示す。長野の N、福山の F に古材の記号を U とした 11 体、そのうち新材は U を N に置き換えた 6 体である。古材と新材ではほぞやほぞ穴寸法は微妙に異なるが、丸めて示した。

いずれも写真 2 のように柱が上部の梁（桁）にほぞが差し込まれた形状で、現場にて T 型に切出し実験室に搬入し、逆 T 字型の試験体としたもので、古材実験セットアップを図 2 に示す。

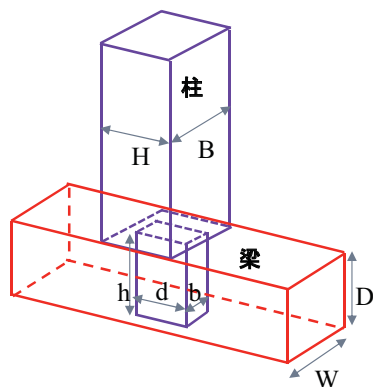


図 1 試験体形状

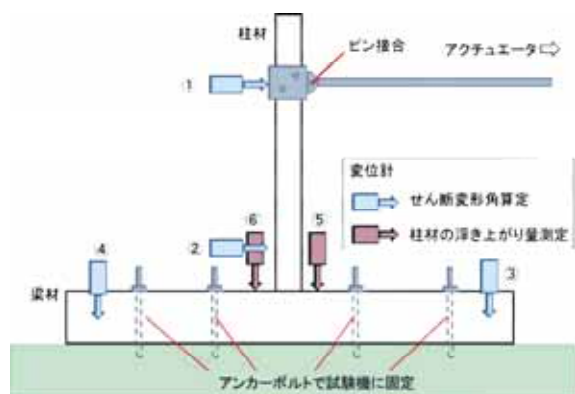


図 2 古材実験セットアップ

表1 仕口接合部試験体の詳細

	古材	新材	梁(スギ・ヒノキ)		柱(アカマツ)		ほ ぞ			備 考
			W	D	B	H	d	b	h	
長野	NU1	—	140	90	112	112	88	29	130	短ほぞ・ほぞ突出40
	NU2	NN2	140	190	120	120	100	30	200	長ほぞ・ほぞ突出10
	NU3	—	140	170	112	112	88	29	45	短ほぞ
	NU4	NN4	140	190	120	120	100	45	200	長ほぞ・ほぞ突出10
福山	FU3	FN3	150	200	120	120	70	30	215	長ほぞ・ほぞ突出15 古材梁ヒノキ
	FU4	FN4	150	200	105	105	70	30	76	短ほぞ
	FU5	—	150	203	110	110	72	30	75	短ほぞ
	FU6	FN6	150	200	120	120	70	30	215	長ほぞ・ほぞ突出15 古材梁ヒノキ
	FU7	FN7	150	200	105	105	70	30	68	短ほぞ
	FU8	—	232	228	110	110	72	29	70	短ほぞ
	FU9	—	198	203	113	104	71	30	78	短ほぞ

載荷は、変形角 1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50, 1/30, 1/10 rad の各ステップで正負交番 3 回繰返し、加力速度は 200mm/min とした。計測はロードセル(SFL-100kN、島津製作所、容量 100kN)により水平荷重、変位計①～④(DP-1000E、東京測器研究所、容量 1000 mm、精度 10×10^{-6} /mm)と CDP-50、東京測器研究所、容量 50 mm、精度 200×10^{-6} /mm)による回転角の測定、変位計⑤、⑥(CDP-100、東京測器研究所、容量 100 mm、精度 100×10^{-6} /mm)は柱材の浮き上がり量の測定に用いた。実験は名古屋大学大学院生命農学研究科木質構造実験室で行った。

(2) 結果と考察

実験結果を接合部の復元力特性をモーメント(kNm)―回転角(rad)で表し、復元力特性の包絡線を図 3、4 に示す。正負で大きく異なる場合は(+)(-)で示す。

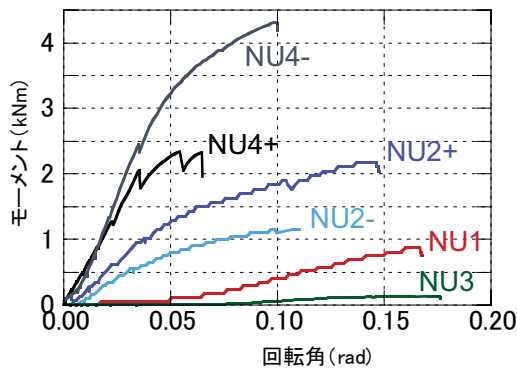


図3 NUの復元力特性の包絡線

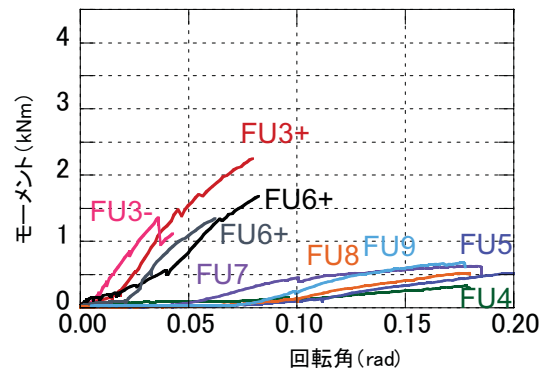


図4 FUの復元力特性の包絡線

復元力特性を図 5～9 に示す。図から読み取れる復元力特性の傾向により二つのタイプに区別できる。

長ほぞの試験体 (NU2, 4, FU3, 6) はモーメント抵抗性能が大きく、これらの試験体の抵抗性能は、既往の込栓のない新材ほぞ接合部の実験結果²⁾と比較しても劣ることはなかった。これらの接合部は古建築改修の際にも、十分な耐力要素として継続利用できると考えられる。しかし、これらの接合部試験体の抵抗性能は、写真 5 のようにほぞ根元の曲げ破壊または複合破壊により最大モーメントを示した後、急激に低下した。したがって、寸法・詳細によっては大きな変形性能が期待できない場合もあることを示した。

短ほぞの試験体 (NU1, 3, FU4, 5, 7, 8, 9) は試験前から簷合の緩さが目立った。簷合が緩いことは、加力前に柱材に手を掛けた際に容易に傾いたことから推測できた。載荷時には復元力の発現までに時間を要したこと、また発現後もその復元力は小さかったことがわかる。その要因としては、ほぞの形状 (長ほぞ、短ほ

ぞ)の違いと、嵌合の緩みが挙げられる。嵌合度に大きな影響がありうるほどとほぞ穴寸法を実験終了後に解体して実測したが、写真 6 に示すような载荷に伴うほぞのめり込み変形などもあって、当初の嵌合度の定量的な推定は困難であった。

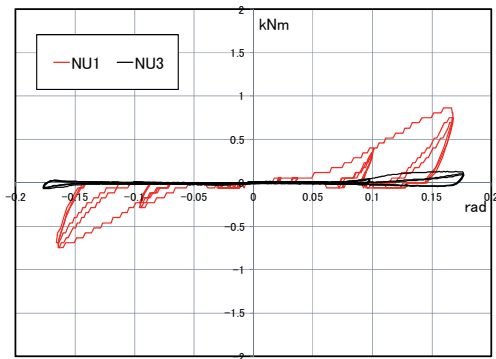


図 5 NU1、NU3 の復元力特性

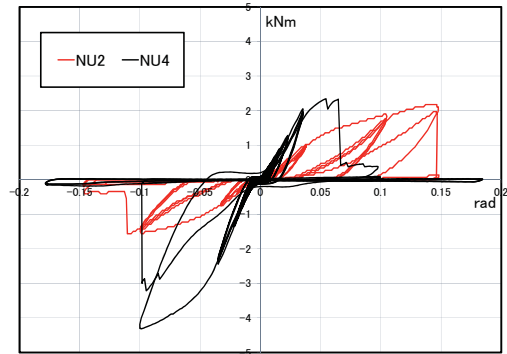


図 6 NU2、NU4 の復元力特性

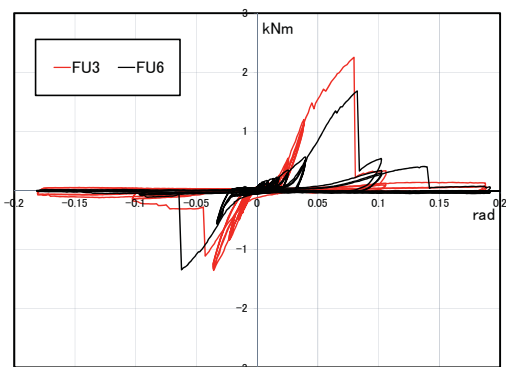


図 7 FU3、FU6 の復元力特性

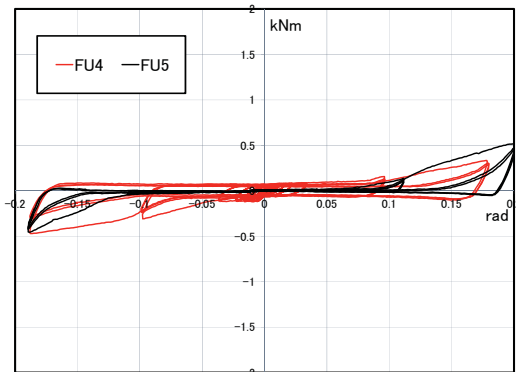


図 8 FU4、FU5 の復元力特性

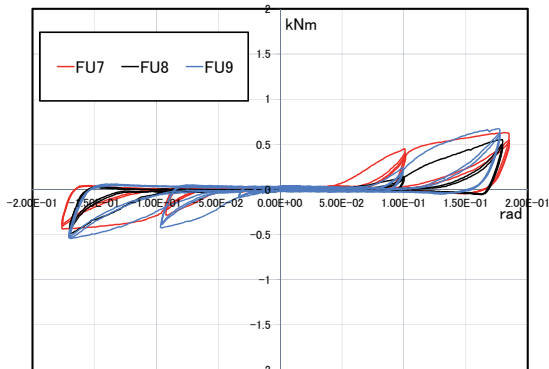


図 9 FU7、FU8、FU9 の復元力特性



写真 5 ほぞ根元での折損状況 (FU3)



写真 6 短ほぞの変形状態 (FU5)

3. 新材仕口接合部の実験

(1) 新材仕口接合部 実験の概要

11 試験体のうち長野 2 体、福山 4 体合計 6 体に対応する試験体を新材で加工・組立てて載荷実験を行った。試験体は古材仕口のほぞなどの寸法を確認の上、同じ樹種の新材で極力同じ寸法の仕口を再現するよう加工し組立てたが、嵌合度について特別な考慮はせず、一般的な精度で加工・組立てた。図 10 に試験体の詳細を示す。ほぞ寸法は対応する古材の実測値を丸めた数値となっている。福山の梁(桁)は、丸太で柱の取りつき面のみ平面に加工したもので、仕口部の梁の高さを同じとすることで新材では矩形断面材で代用した。

図 11 に T 字型を逆にした新材実験セットアップを示す。アクチュエータ(電動式 AE-80,THK インテック

ス社、容量 800 mm)で変位制御し、ロードセル(TCLM-20kNB、東京測器研究所、容量 20kN)で読み取った。変位計はワイヤ-式変位計 DP-1000E (東京測器研究所、容量 1000 mm)と接触型変位計 CDP-50M (東京測器研究所、容量 50 mm)による。载荷は 1/240,1/120,1/60,1/30,1/20,1/15,1/10,1/5 の 8 段階で各ステップで正負交番 3 回繰返しとし、载荷速度は 30mm/min から順次 90mm/min まで変化させた。実験は立命館大学びわこ・くさつキャンパス、セル実験室で実施した。実験室や設備が異なるために、古材の場合と試験要領は多少異なる。

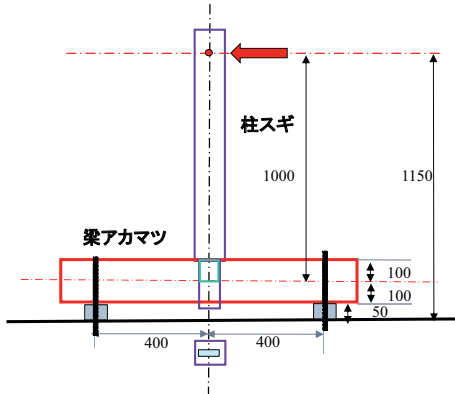


図 10 新材仕口接合部試験体詳細(単位mm)

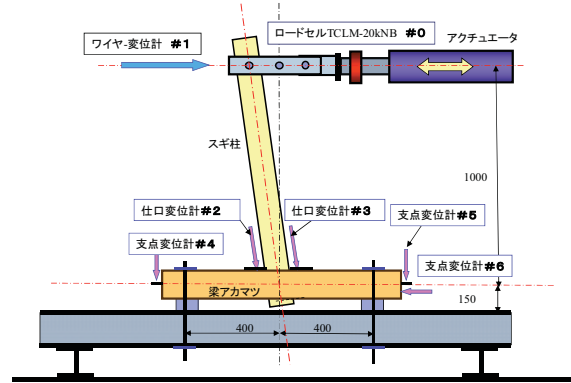


図 11 新材実験セットアップ

(2) 古材・新材実験結果の比較と考察

実験結果の復元力特性を古材・新材の対応する試験体ごとに重ねて示し、比較分析を行う。新材の载荷後のほぞの変形状況を写真 7 に示す。

なお、仕口のめり込みの基本的な材料特性として、柱材から採取して行った圧縮試験の横圧縮ヤング係数と降伏応力度、縦圧縮ヤング率係数、密度の古材・新材の比を図 12 に示し、比較分析の参考にする。FU3/FN3、FU6/FN6 の比率が特に大きいのは、スギと想定していた古材の樹種が解体したところヒノキと判明したためである。



写真 7 新材の载荷後の変形状況

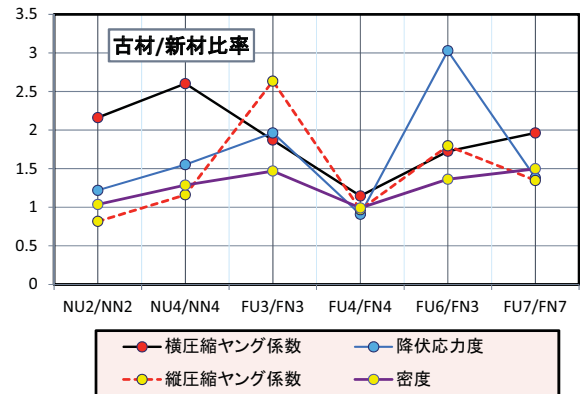


図 12 主な材料定数の古材の新材に対する比率

a) NN2 : NU2 (図 13)

弾性剛性はほぼ同じであるが、NN2 が 0.04rad からめり込みの降伏が始まるまたは摩擦が切れて剛性が低下するのに対し、NU2 では 0.045rad 付近から剛性低下が始まるが、その低下の程度は小さく、正载荷で 0.15rad、負载荷では 0.1rad に至って耐力が激減する。降伏の始まりの差異は NU2 の降伏応力度が NN2 のそれより 2 割ほど高いことと対応する。

NU2 の横圧縮ヤング係数は NN2 のそれより 2.2 倍と大きく、局部的なばらつきによるものか不明ではあるが、

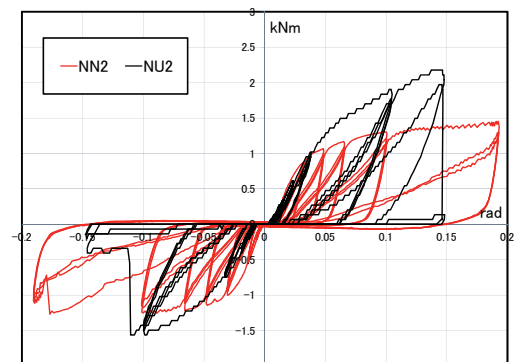


図 13 NN2、NU2 の復元力比較

それがそのまま弾性剛性に差異となって表れているとは考えられない。NU2 の降伏後の剛性の低下が少ない原因は不明であるが、他の古材試験体の傾向を含めて考えると、古材の降伏後の剛性は局所的にばらつく傾向があるようである。

全体に負方向荷重では初期のすべりを除いて NN2 と NU2 は比較的好くあっている

b) NN4:NU4 (図 14)

NN4 の弾性剛性は大きいこれは仕口組立時に打ち込みが硬かったことから 嵌合度が高かったことがあげられる。NN2 の復元力特性と傾向がよく似ており、NN4 も 0.04rad から降伏し始め剛性が低下し、0.07rad でほぞが破壊したのに対し、NU4 は負方向荷重で 0.1 rad で最大 $M_{max}=4.2\text{kNm}$ となるが、正方向荷重では 2.3kNm にとどまり、新材と同程度となり、0.07rad で耐力を喪失する。

NU4 の横圧縮ヤング係数は NN4 のそれより 2.6 倍と大きく、特性値も負荷荷重では差が大きい、正荷重では概ね古材と新材の差は小さい。古材では荷重方向でばらつく傾向は NN4:NU4 と共通している。

c) FN3:FU3 (図 15)

FU3 で初期のすべりが若干みられるが、弾性剛性は FN3 より大きい、FN3 が 0.03rad から降伏し始めるまたは摩擦が切れて剛性が低下し、正荷重で 0.12rad、負荷荷重で 0.05rad でほぞが破壊したのに対し、FU3 は正荷重 0.05 rad で降伏し、0.08rad で耐力が激減、負荷荷重では降伏することなく 0.04rad で激減する。FU3 の樹種は当初想定したスギではなくヒノキと判明し、横圧縮ヤング係数はスギ FN3 のそれより 1.8 倍と大きく、その差が復元力に表れているとも解釈できる。長ほぞで変形能力は全体に小さいことがわかる。古材は荷重方向で最大荷重の差異が大きい、局所的に材料強度がばらつくことによると推察される。

d) FN4:FU4 (図 16)

FN4 の横圧縮ヤング係数は FU4 のそれと概ね同等であるが、FU4 はがたつきか劣化のため、初期剛性が小さく、0.1rad からかみ合いが強まり、その剛性は FN4 よりかなり小さい。FN4 が 0.035rad から摩擦が切れてギザギザしたグラフとなり、変形は持続する。短ほぞとして、耐力は小さいが変形能力は大きい。

FN4、FU4 は材料特性の差異は少なく、概ね同等の材料と見られるので古材の抵抗が小さいのは嵌合度が緩いためとみられる。

e) FN6:FU6 (図 17)

FU6 はがたつきか劣化のため、初期剛性が小さいが、0.05rad から嵌合度が強まり、その剛性は FN6 とよく似ており、FN6 が 0.035rad から破壊が起きて耐力が減少したのに対し、FU6 は 0.08rad まで増大した後、破壊した。

FU6 はヒノキで、横圧縮ヤング係数は FN6 より 1.7 倍と

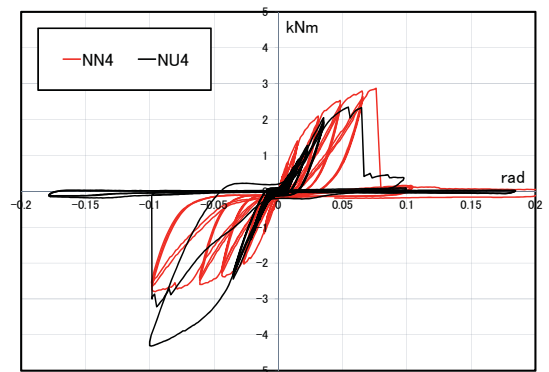


図 14 NN4、NU4 の復元力特性比較

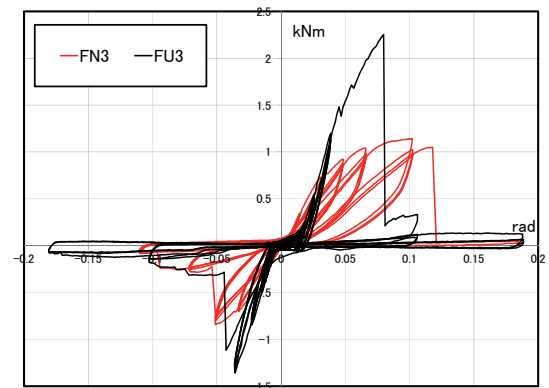


図 15 FN3、FU3 の復元力特性比較

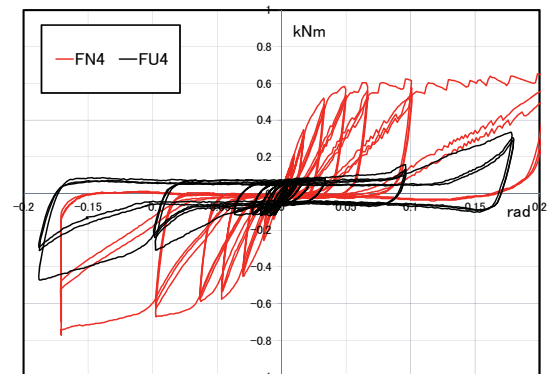


図 16 FN4、FU4 の復元力特性比較

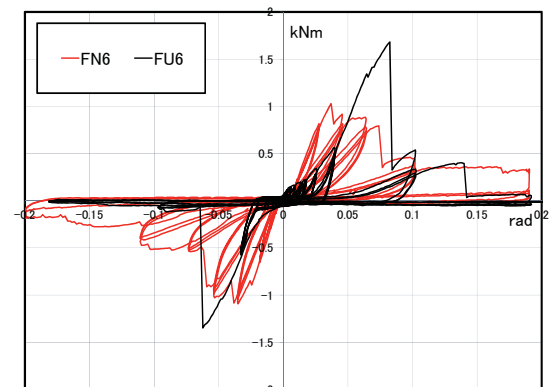


図 17 FN6、FU6 の復元力特性比較

大きく、その差が復元力に表れているとも解釈できる。FU6の降伏応力度はヒノキであるとしてもFN6と比べ異常に大きく、その原因は不明であるが、復元力特性の降伏点には現れるには至っていない。

f) FN7:FU7 (図18)

FU7はがたつきか劣化のため、初期剛性が小さく、0.05rad程度から嵌合度が強まり、その剛性はFN7と同等であるが、0.1radで降伏が起り、変形は0.18radまで維持された。降伏後の塑性剛性はFN7より大きい。それに対して、FN7は0.04radで降伏し、塑性勾配はほぼ水平で変形は0.19radまで増大する。

FU7の横圧縮ヤング係数はFN7のそれより2.0倍、降伏応力度は1.4倍と大きい、その差がそのまま、復元力に表れているとは限らない。

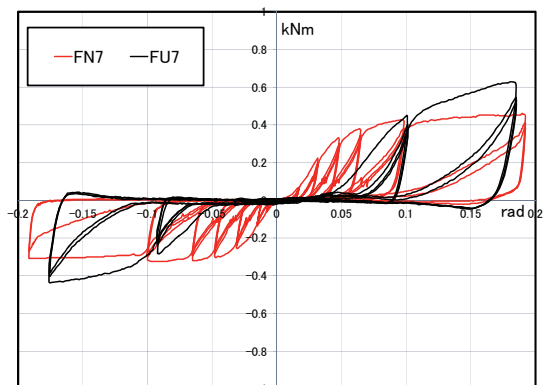


図18 FN7、FU7の復元力特性比較

(3) 古材・新材の復元力特性比較のまとめ

復元力特性の比較の全体のまとめとして、新材・古材に拘わらず、短ほぞは耐力は小さいが、変形能力は大きい。それに対し長ほぞは耐力は大きい、ほぞの破壊により耐力が決まり、変形能力は小さいことが言える。これらは主にほぞの形状寸法によるもので、新材・古材で共通した傾向と言える。

また、古材ががたつきまたは劣化により嵌合度が低くなるものが少なくないが、かみ合いが始まれば剛性は新材より大きい傾向が見られた。これは材料の差異か、古材の剛性が増大したためかは今回の実験結果からは判明しない。全体に嵌合度が復元力特性に大きな影響を与えることが明らかとなり、現存する古材の仕口接合部の評価には重要な要素となる。あわせて、古材はやや硬いが脆いという特徴とともに局所的にばらつきが大きいことが明らかとなった。

4. 古材・新材の完全弾塑性モデル置換特性値による評価

復元力特性の一般的な評価法である完全弾塑性モデル特性値を求め、新材・古材の比較として、完全弾塑性特性値の一覧を表2に、その主な特性値として、最大耐力、終局耐力、降伏耐力の分布を図19に示す。

古材仕口接合部試験体のいくつかは、完全弾塑性モデルになじまない復元力特性となったため、特性値が得られていないものとする。また古材の仕口接合部実験にあるように、正負で耐力・特性がかなり異なるものは、ここで正載荷(+)、負載荷(-)も併記している。

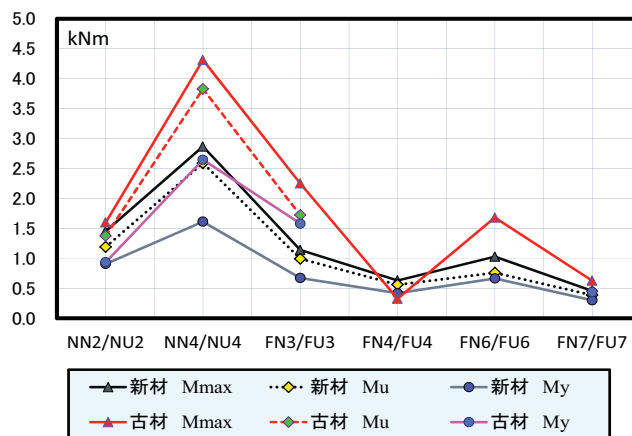


図19 完全弾塑性モデルによる主な特性値比較

5. まとめ

築後118年と60-70年の建物が解体される機会に、仕口接合部を解体しないで切り出して実験室にそのまま持ち込んで逆T字型の試験体とし、荷重実験を行った。比較のために、同じ仕様の新材で構成した仕口接合部試験体を用いて同様な実験を行い、耐震性能の主要な指標である強度・剛性・変形性能などの復元力特性の比較検証を行った。今回実施できた実験は限られたタイプの仕口接合部で数量も少ないが、ほぞ接合部の復元力特性は、ほぞの寸法・形状と嵌合の程度に大きな影響を受けることが判明した。また、長ほぞと短ほ

表2 完全弾塑性モデル特性値比較表

	最大耐力	最大耐力 時変形角	1/120 耐力	2/3 最大耐力	降伏耐力	降伏 変形角	終局耐力	終局 変形角	弾塑性 変形角	剛性	塑性率	構造特性 係数
	M_{max} (kNm)	θ_m (rad)	M_{120} (kNm)	$2/3M_{max}$ (kNm)	M_y (kNm)	θ_y (rad)	M_u (kNm)	θ_u (rad)	θ_v (rad)	K (kNm/rad)	μ	D_s
NN2	1.45	0.190	0.098	0.97	0.907	0.034	1.19	0.125	0.044	26.7	2.75	0.47
NU2+	1.60	0.137	0.100	1.07	0.936	0.045	1.37	0.148	0.073	18.7	2.01	0.57
NU2-	1.15	0.097	0.049	0.77	0.650	0.037	1.01	0.110	0.062	16.2	1.77	0.63
NN4	2.87	0.076	0.894	1.91	1.614	0.020	2.59	0.100	0.032	81.5	3.73	0.39
NU4+	2.34	0.054	0.471	1.56	-	-	-	-	-	-	-	-
NU4-	4.31	0.099	0.328	2.88	2.647	0.037	3.83	0.100	0.057	67.7	1.77	0.63
FN3	1.14	0.101	0.160	0.76	0.673	0.027	0.99	0.125	0.040	24.7	3.10	0.44
FU3+	2.25	0.080	0.109	1.50	1.581	0.048	1.72	0.080	0.056	30.9	1.43	0.73
FU3-	1.36	0.036	0.214	0.91	-	-	-	-	-	-	-	-
FN4	0.63	0.196	0.213	0.42	0.418	0.023	0.56	0.125	0.031	18.3	4.05	0.38
FU4	0.33	0.178	0.064	0.22	-	-	-	-	-	-	-	-
FN6	1.03	0.039	0.088	0.69	0.664	0.025	0.76	0.100	0.028	26.8	3.54	0.41
FU6+	1.68	0.082	0.163	1.12	-	-	-	-	-	-	-	-
FU6-	1.35	0.062	0.047	0.90	-	-	-	-	-	-	-	-
FN7	0.46	0.189	0.018	0.31	0.300	0.043	0.39	0.125	0.055	7.03	2.27	0.53
FU7	0.63	0.180	0.011	0.42	0.438	0.097	0.45	0.185	0.102	4.45	1.82	0.62

どの違いは、それらの復元力特性に大きな違いをもたらした。

長ほぞを持つ古材の接合部は変形性能は劣るが、剛性・強度は大きく、既往の（新材を用いた）研究例と比較しても遜色はなかった。この傾向は新材でも同じであった。一方、短ほぞを持つ古材試験体の剛性・強度は新材に比べて極めて低かった。これについては施工当初より緩く加工していたものか、経年・劣化によるものかは判断できなかったが、仕口内部の劣化や箆合の程度が復元力特性に大きく影響し、古材仕口接合部の耐力や耐震性能評価では劣化を含む箆合度が重要な意味を持つことが明らかとなった。現存する古材の耐震性能評価や再利用に際しては、このような特性を十分考慮する必要があることが明らかとなった。

現段階では建物の解体前の状態でほぞの形状・寸法とともに箆合度を知る手段はないが、構造物の耐震性能評価や改修・点検を実施するうえで、何らかの手法によりそのような情報を得ることは非常に重要であり、非破壊的な調査手法の開発が望まれる。

本報告の実験は限定されたものであるが、今後このような成果をさらに蓄積し、古材の材料力学的特性や古材の仕口接合部の構造的な特性の解明を進めることは、古材を適切に再活用する道筋を拓くとともに、伝統的木造建築物の耐震性能評価および耐震補強、さらにはそれらの保存・継承に資するうえで重要と考えており、引き続き研究を進める。

謝辞：本報告は平成24年度国交省「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験」検討委員会（委員長：鈴木祥之立命館大学教授）の古材に関する調査研究の一環として行ったものであり、ご協力いただいた委員各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 棚橋 秀光・大岡 優・山崎真理子・佐々木康寿：古材・新材を用いた伝統的構法の仕口接合部の復元力特性，歴史都市防災論文集、Vol.6, pp.45-52, 2012.
- 2) 坂田弘安、山崎義弘、宇田川洋隆、大橋好光：曲げせん断を受ける長ほぞ差し込釘打ち接合部の力学的挙動に関する研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.671, pp.45-54, 2012.