

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

Restoring Force Characteristics of Traditional Wooden Joints of Used and New Members

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立命館大学教授 グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Global Innovation Research Organization

²立命館大学研究員 グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Researcher, Ritsumeikan University, Global Innovation Research Organization

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 mechanical properties of aged or used members and their restoring force characteristics of joints should be estimated accurately for seismic evaluation and conservation of traditional wooden buildings. In some cases, demolished wooden members are applied to new or existing buildings as structural members. The authors carried out experiments of column tie-beam joints built up with used and new members. Then, the restoring force characteristics were verified by Elasto-plastic Pasternak Model simulation. These results will contribute the accumulation of structural databases of aged or used wood for the seismic evaluation and conservation of traditional wooden buildings.

Keywords : traditional wooden joints, experiment, restoring force characteristics, used member

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。近年、解体された古材が構造部材として再利用される場合も増えてきており、経年変化を含む古材の材料強度の評価ももう一つの重要な課題となってきた。古材の経年による材料力学的特性に関しては小原の一連の研究¹⁾、疋田²⁾、著者らの研究³⁾⁴⁾などがあるが、材料力学的な特性評価だけでなく、古材により再構成された仕口や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。しかし、古材で再構成された仕口の実験的検証や復元力特性に着目した研究は見られない。

本研究は、古民家(築後200年弱)の解体部材を入手した機会に、古材の材料試験と合わせて古材・新材により構成された仕口接合部試験体を用いて十字型通し貫仕口接合部実験を行い、完全弾塑性モデル置換特性値、および弾塑性パステルナーク・モデル(以後EPMと略す)シミュレーションにより、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ものである。

本研究の実験は限定されたものであるが、今後このような研究成果を蓄積し、古材の材料力学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、古材の再利用を促すだけでなく、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・継承に資するものと考えている。

2. 仕口接合部実験

(1) 試験体概要

古材を用いた仕口接合部実験を行うにあたって、実際の仕口には伝統木造特有の目違いや、雇い、込栓、楔など複雑な要因が入り込み、仕口の性能が十分解明できていない要因やパラメータが入ると比較が困難と想定される。実在する仕口接合部そのものを、劣化や経年変化を含め、あるがままの状態で行うことも重要な意義があると考えられるが、本研究ではすでに解体された部材を前提として実験を計画した。そこで、最も単純で古材の特性が直接発現しやすい通し貫仕口の十字型試験体とすることで、古材と新材の材料としての違いが仕口の復元力特性、特に変形性能に及ぼす影響を見ることに重点をおいた。したがって、表面劣化などによる影響は本実験では基本的に考慮しないこととし、ほぼ内部の健全な部分より採取して試験体を構成したが、一部には内部に虫食い（シバンムシ）が見られるものも含めた。

解体部材は埼玉県川越市の古民家（推定築後 190 年）と滋賀県湖南市の古民家（推定築後 170 年）から得たものである。主な柱は、川越民家は 105 角、湖南民家は 150 角であったため、表面劣化部分を削り成形すると柱寸法は最大 100 角が限度であった。多くの柱には土壁の小舞・貫のホゾ穴が残っていたが、貫のホゾ穴（27×120 程度）を試験体の貫用のホゾ穴（30×120）に活用し、小舞用の浅いホゾはそのままとした。貫は柱より 2 体、大きな差鴨居などからは複数体採取した。川越では、ケヤキ・アカマツで試験体の採取できる部材がなくすべてスギとなった。比較のための新材のスギ、アカマツは産地・仕様は特定せず、使用材料の材料特性として古材含めて、EPM シミュレーションに必要な材料定数を求めるために、貫の両端より採取した横圧縮試験体（30mm 角高さ 60mm 各 3 個）を用いて横圧縮試験を行った。仕口接合部試験体は比較のための新材を含めて表 1 の組み合わせの 5 シリーズ各 3 体合計 15 体、予備 2 体とし、その詳細を図 1 に示す。J1-3 が欠番となっているのは、予備実験に使用したからである。

(2) 実験方法

図 2 に示す実験セットアップを用いて、各シリーズの記号 1 は 3 サイクル（所要時間 3 時間弱）、その他は 1 サイクル（同 1 時間弱）で、8 段階（層間変形角 1/240, 1/120, 1/60, 1/30, 1/20, 1/15, 1/10, 1/5）正負交番繰返し载荷とし、载荷速度は载荷点の変位制御で 5mm/min から順次 60mm/min まで変化させた。層間変形角 1/10 (0.1rad) で正負繰返し载荷後、仕口の変位計を取り外して载荷を続け、一部では正载荷で最大層間変形角 1/3 または 1/2.5 (400mm) まで载荷した。図 2 の左方向载荷を正（押し）、右方向载荷を負（引き）とする。

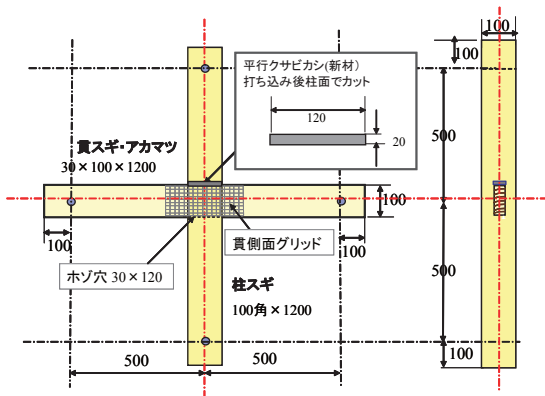


図 1 通し貫試験体詳細

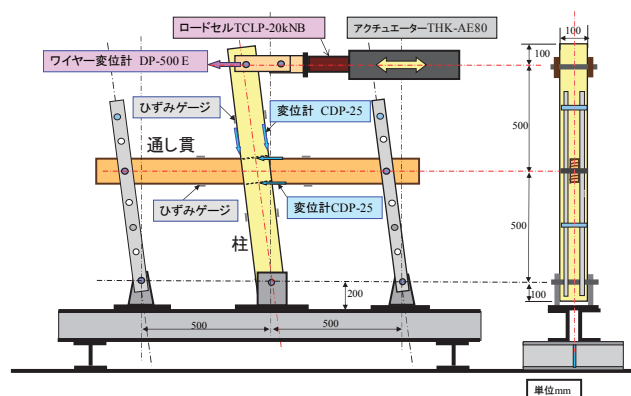


図 2 通し貫試験体セットアップ

(3) 実験結果と考察

実験状況を写真 1～4 に、シリーズごとの 3 体の試験体の復元力特性を重ねた図を図 3～7 に示す。なお、試験体の貫の気乾密度の平均値（変動係数%）はスギ 409kg/m³（8%）、アカマツ 516kg/m³（4%）、含水率は全平均値（電気抵抗式含水計による）14.6%（変動係数 22%）であった。

仕口の復元力特性は、仕口の回転角（貫・柱の変位計 2 点の計測値の差を変位計間隔で除した貫・柱の各々回転角の平均値）と仕口に作用するモーメント（载荷重 kN×高さ 1000mm）の関係で表し、最大回転角は

0.1rad までの復元力で、主要な解析・検討に用いる。なお、復元力のグラフで最大回転角が 0.1rad まで達していないのは、層間変形角で 0.1rad に達した場合の仕口の回転角は 0.1rad 未満となるためである。0.1rad まで正負荷完了後、変位計を取り外したため、0.1rad 以上の復元力特性は十字型フレームの層間変形角（載荷点変位/1000）とモーメントの関係のみで得られており、変形性能と繰り返しによる強度低下などの検証に用いることとした。

表 1 仕口試験体一覧表

シリーズ	由来	柱	貫	特記事項
J1-1		スギ柱105角より	スギ柱105角より	
J1-2	川越	スギ柱105角より	スギ柱105角より	虫食いあり
J1-4		鋼製柱	スギ柱105角より	楔なしの仕口
J2-1	湖南	スギ柱150角より	スギ柱N2より	N2: 200角 虫食いあり
J2-2		スギ柱150より	スギ柱N2より	N2: 200角
J2-3		スギ柱150角より	スギ柱N2より	N2: 200角
J3-1	湖南	スギ柱150角より	アカマツ差鴨居N1より	N1: 120×360
J3-2		スギ柱150角より	アカマツ差鴨居N1より	
J3-3		スギ柱150角より	アカマツ差鴨居N1より	
J4-1		スギ柱製材	スギ製材板材	
J4-2	新材	スギ柱製材	スギ製材板材	
J4-3		スギ柱製材	スギ製材板材	
J5-1	新材	スギ柱製材	アカマツ製材板材	
J5-2		スギ柱製材	アカマツ製材板材	
J5-3		スギ柱製材	アカマツ製材板材	



写真1 通し貫試験体載荷状況 (0.1rad)



写真2 通し貫試験体載荷状況 (0.4rad)



写真3 仕口と楔の変形状況



写真4 鋼製柱と貫のめり込み状況 (0.4rad)

古材・新材とも層間変形角 0.1rad に相当する範囲までは、対応する仕口回転角では 0.05~0.09rad にばらつくが、モーメント増加が続き、繰り返しによる強度低下もわずかであるが、0.1rad を超えると、押し側でやや強度が頭打ちになり、繰り返しによる強度低下も若干見られたが、引き側では頭打ち傾向はほとんど見られなかった。これは楔が最初に貫にめり込んだ位置に留まり、回転傾斜に伴い柱からは見かけ上載荷と逆方向に抜け出す挙動（写真 1~3）が見られ、貫と柱のホゾ穴との接触長さが減少するためモーメントが頭

打ちになるものと推察された。引き側では逆に楔が若干突出した状態が維持されるため、頭打ち傾向が現れないことでも裏付けられた。一部頭打ちと同時にジグザグ状のグラフも観測され、柱ホゾと楔の上面の接触面での摩擦の滑りに伴う振動現象 (stick-slip 現象) によるものと推察された。そこで J1-4 のみスギ柱を鋼製柱に代えて楔の影響のない仕口 (写真 4) で載荷すると、頭打ちの傾向はなくなって第 1, 3 象限の正負のグラフはほぼ点対称となり、楔が仕口の挙動に少なくない影響を及ぼすことが確認できた。

全体に本実験の範囲では、材料のばらつきに比べ、強度・剛性・変形性能に関して、古材と新材の差異は見られなかった。

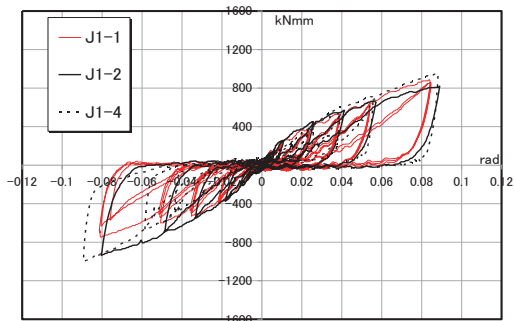


図 3 J1 シリーズ復元力特性

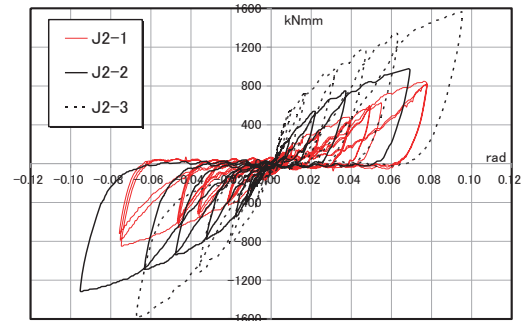


図 4 J2 シリーズ復元力特性

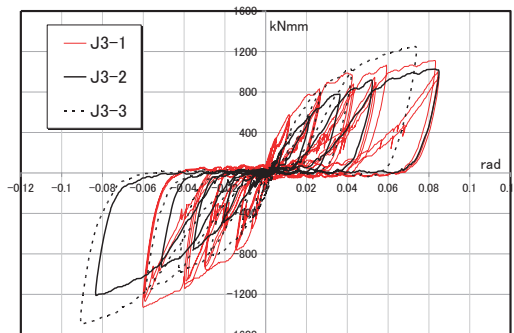


図 5 J3 シリーズ復元力特性

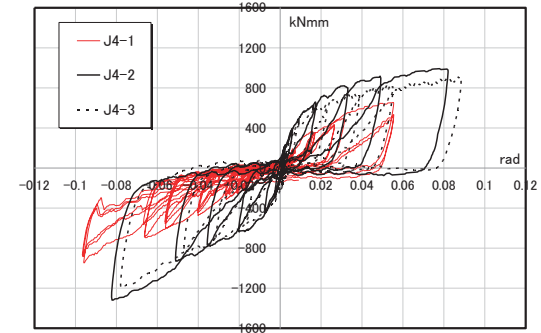


図 6 J4 シリーズ復元力特性

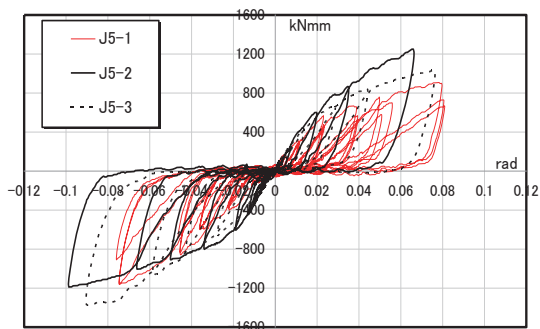


図 7 J5 シリーズ復元力特性



写真 5 J2-1 の虫食いスギ貫のめり込み変形

写真 5 の J2-1 に見られるように貫にかなりの虫食いが見られたが、図 8 の復元力特性を示し、モーメントは仕口回転角 0.07rad で 800kNmm 、層間変形角 0.2rad で 1200kNmm 程度で、J1-1 と同等であった。J4-1 は横圧縮ヤング係数の小さいことと、楔の密着具合のゆるさで剛性・強度が最も小さかったものと見られる。

伝統的な仕口の重要な特性である大変形の特性に関しては、いくつかの試験体で当初計画の最大変位 0.2rad に達した後、 $0.33\sim 0.4\text{rad}$ まで押し側で載荷したが、 0.4rad 近くでめり込みと複合した貫の破壊 (写真 4) が見られたが、貫の曲げ破壊が新材 J5-2 で 0.17rad にて発生したほかは 0.2rad 以下では破壊は無く、崩壊

も全く無かった。

図 8-12 に 3 回繰り返し载荷の最大荷重までの復元力特性を後述する EPM シミュレーション結果と重ねて示す。それによれば、0.1rad までは繰り返しによっても、どのシリーズも復元力低下はほとんど見られず、古材・新材の差異も見られない。0.1rad を超えると J1-1, J2-1, J5-1 では 0.2rad までは復元力低下はみられないが、J3-1, J4-1 で復元力の若干の低下とグラフの乱れが激しくなっている。これは、貫のめり込み変形によるがたつきとそれに伴う貫の左右移動、楔の挙動と関連すると推察され、少なくとも貫の破壊によるものではないと判断される。初期の剛性や大変形段階の挙動は楔の密着具合に大きく依存し、楔の挙動が仕口の復元力を左右する可能性が高い。

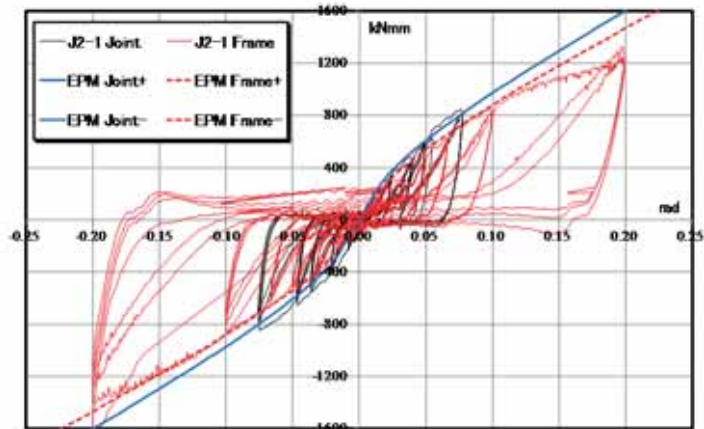


図 8 J2-1 復元力特性と EPM 解析 (Joint:仕口のみ、Frame : フレーム変形を含む、+は第 1 象限,-は第 3 象限を示す)

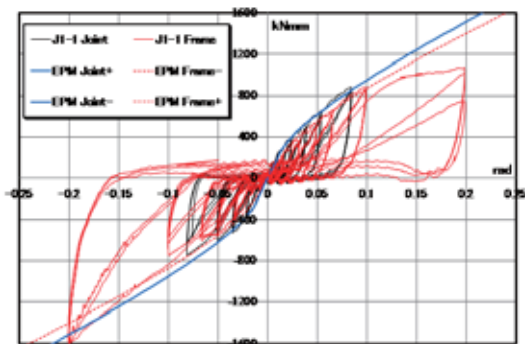


図 9 J1-1 復元力特性と EPM 解析

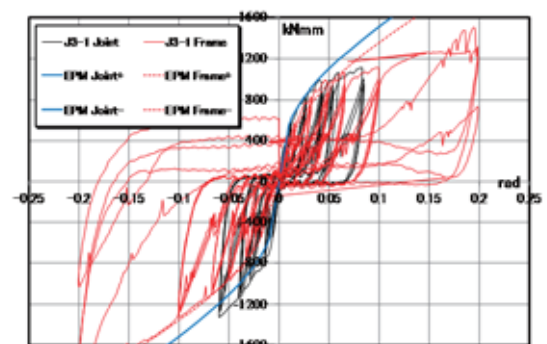


図 10 J3-1 復元力特性と EPM 解析

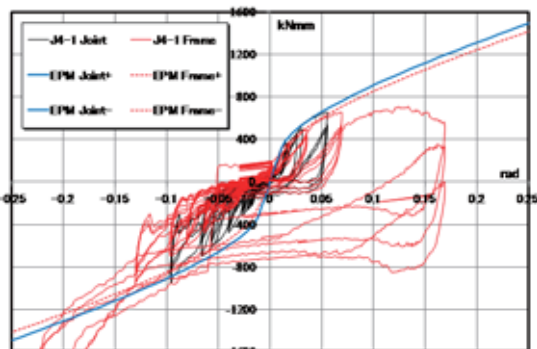


図 11 J4-1 復元力特性と EPM 解析

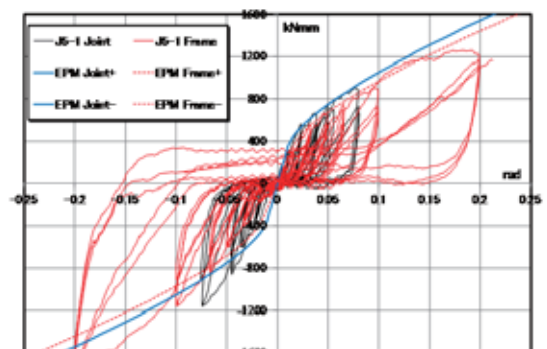


図 12 J5-1 復元力特性と EPM 解析

3. 完全弾塑性モデル置換特性値

耐震要素の復元力特性の評価法に、完全弾塑性モデルに置換した場合の特性値で評価する方法がある⁵⁾。ここでは、既往の実験データもその手法により求めている場合が多いので、それに準じて求めた。今回の実験では、楔の挙動により第1象限の復元力特性の最大値が全体に第3象限より小さめとなったことから、第1象限の0.1radまでの仕口回転角とモーメント関係のグラフより求め、図13に主な特性値：最大耐力 M_{max} 、終局耐力 M_u 、降伏耐力 M_y の比較グラフを示す。

これより、今回の限定された実験範囲では、材料のばらつきが大きいこともあり、古材・新材の比較は難しいが、少なくともモーメント抵抗・復元力特性は新材より劣ることはなさそうである。

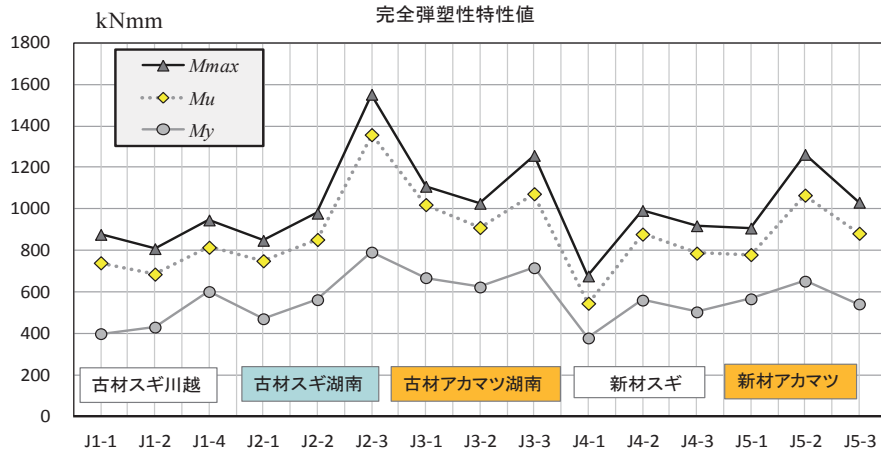


図13 完全弾塑性モデルの特性値の分布

4. 弾塑性パステルナーク・モデルによる検討

(1) 弾塑性パステルナーク・モデルのパラメータ

前項の完全弾塑性モデル置換は降伏後の剛性低下や、破壊が生ずる場合を含めた木質耐震要素の汎用性のある評価法と考えるが、伝統構法の仕口で降伏後も強度が増加し続ける復元力特性をより精度よく評価する手法として弾塑性パステルナーク・モデル (EPM) によるシミュレーションがある⁶⁾。この手法は、めり込み(部分圧縮) 周辺部の表面変位分布を指数関数で近似してめりこみによる剛性増大効果を評価するとともに、木材の横圧縮におけるひずみ分布とひずみ硬化現象に着目して、めり込み下部のひずみ分布を表す形状関数と剛性関数の導入によりめり込みの弾塑性剛性の増大・減少過程を統一的に表現し、回転めり込みの弾塑性復元力特性を弾性・塑性段階を一貫した形で定式化を行ったものである。解析用パラメータを適切に設定することにより、伝統的構法の仕口の復元力特性を弾塑性段階全体にわたり、精度よくシミュレーションできる特徴がある。厳密な定式化は既往の文献⁶⁾によるとして、ここでは簡潔に要点のみを示す。

横圧縮ヤング係数 E の通し貫の幅 B 、高さ H 、柱幅 $2L$ の仕口における回転角 θ のときの弾性回転抵抗モーメント M は (1) 式のように、回転めり込みの第1項と摩擦の第2項からなる。

$$M = \frac{2BL^3}{3H} E \zeta_R \theta + \frac{BL^2}{2H} E \zeta_F \mu \theta \quad (1)$$

ここで、回転めり込み剛性増大率 $\zeta_R = 1 + \frac{3}{\gamma H \lambda} (1 + \frac{1}{\gamma H \lambda})$ $(\lambda = \frac{L}{H}$: 載荷長比で本実験では0.5)

摩擦に関する剛性増大率 $\zeta_F = 1 + \frac{2}{\gamma H \lambda}$

この手法には2次元解析では材料定数である横圧縮ヤング係数 E 、横圧縮降伏応力度 σ_y (または降伏ひずみ ϵ_y) の他に EPM 独自のパラメータとして以下の合計4個のパラメータが必要となり、そのうち弾塑性段階の特性を決めるパラメータは η と C である。

γH : PM の無次元特性値(H :貫高さ)でめり込み変位の距離減衰を決めると共に剛性増大率を決めるパラメータ。 η : めり込み内部のひずみ分布の形状関数を決めるパラメータで全面圧縮降伏ひずみ $F\varepsilon_y$ と部分圧縮降伏ひずみ $p\varepsilon_y$ の比で求められ、回転めり込みの降伏開始を決めるパラメータである。 C : 弾性ひずみに対する塑性ひずみの倍率で、仕口の場合は回転角の塑性増大率に相当する。 μ : 摩擦係数。通し貫では一般に 0.6 を採用できるが、本実験では楔が抜けやすいことから 0.5 とする。

具体的には、図 8 に J2-1 のシミュレーションの例を示す。

J2-1 の貫は写真 5 のように虫食いがかなり見られるが、横圧縮ヤング係数と横圧縮ひずみ・降伏応力度は横圧縮試験結果より $E=108\text{MPa}$, $\varepsilon_y=0.022$, $\sigma_y=2.4\text{MPa}$ がえられており、実験結果の Joint+ (仕口変形のみ) の正載荷) のグラフを包括するようにパラメータを求めると $\gamma H=2.7$, $\eta=3.4$, $C=3$ となった。これには貫のせん断弾性係数として $G \cong E_L/15=330\text{MPa}$ と仮定した仕口のシアパネルとしてのせん断変形を含むが、EPM Frame+ (フレーム変形を含む正載荷) のグラフはフレームの柱・貫の曲げ変形を追加した復元力特性で、フレームの変形が 15%程度占める。なお、EPM のグラフでは、0.12rad を超えるあたりから見られる楔抜け出しによるモーメント頭打ち傾向はシミュレーションできておらず、今後の検討課題としたい。

J2 シリーズの貫は 3 本とも、同じ 200 角のスギ柱から採取したもので、参考に材料試験の縦圧縮ヤング係数の平均値は $E_L=5.5\text{GPa}$ 、J2-1 は横圧縮ヤング係数に大きなばらつきのあるうちの 3 体の中の最小値のもので、虫食いの影響も考えられるが、J4 シリーズの新材スギと比較しても特に劣る傾向はみられない。

表 2 弾塑性パステルナーク・モデルのパラメータ

	横圧縮 ヤング係数	横圧縮 降伏ひずみ	降伏回転角	無次元特性値	形状関数の パラメータ	塑性ひずみ 倍率	摩擦係数	横圧縮 降伏応力度
	E (MPa)	ε_y	θ_y	γH	η	C	μ	σ_y (MPa)
J1-1	172	0.017	0.034	3.6	3	4	0.5	2.9
J1-2	140	0.019	0.038	2.3	3.5	10	0.5	2.7
J1-4	132	0.023	0.046	3.2	1.9	3.5	0.5	3.0
J2-1	108	0.022	0.044	2.6	3.4	3	0.5	2.4
J2-2	172	0.017	0.034	2.5	2.4	5	0.5	2.9
J2-3	344	0.011	0.022	2.4	2.4	7	0.5	3.8
J3-1	697	0.009	0.018	3.6	3.2	20	0.5	6.3
J3-2	580	0.009	0.018	10	1.2	8	0.5	5.2
J3-3	322	0.014	0.028	3.0	2.1	9	0.5	4.5
J4-1	167	0.016	0.032	2.2	3.5	14	0.5	2.7
J4-2	346	0.016	0.032	2.0	5.5	40	0.5	5.7
J4-3	399	0.013	0.026	2.6	4	50	0.5	5.2
J5-1	431	0.011	0.022	5.0	2.8	11	0.5	4.7
J5-2	461	0.009	0.018	4.5	2	4	0.5	4.1
J5-3	332	0.012	0.024	3.0	3.4	9	0.5	4.0

(2) 既往データとの比較検討

既往のデータとの比較では、同じ仕口形状の古材の仕口実験データは見当たらないため、新材との比較となるが、ここでは EPM パラメータによる既往のデータとして、鋼製柱に新材のヒノキ・ベイヒバの貫を用いた仕口接合部実験の EPM 解析結果⁶⁾を用いて比較を行う。

図 14 に EPM パラメータのうち、剛性増大率に関わる無次元特性値 γH の古材・新材の分布を示す。ここで、既往のヒノキ・ベイヒバの貫の仕口接合部実験の EPM 解析結果より同じ無次元特性値 γH の分布と以下の(2)式の近似直線を重ねて示す。全体に古材・新材とも同様な横圧縮ヤング係数と γH との線形関係が認められ、剛性増大の程度は、古材・新材で差異が少ないことを意味する。

$$\gamma H = 0.003E + 2.4 \quad (E: \text{横圧縮ヤング係数}) \quad (2)$$

また、図 15 には剛性増大率と横圧縮ヤング係数の積で、回転めり込みによる剛性増大後の見かけの横圧縮ヤング係数 $E\zeta_R$ の実験結果の分布を EPM 理論式とともに示す。

全体に、古材アカマツのばらつきが大きい、J3-2 の無次元特性値 $\gamma H = 10$ を除いてその分布と傾向は EPM 理論式に比較的沿っている。

表 2 に示すように、 η の平均値 (変動係数%) は、古材で 2.57 (30%)、新材で 3.53 (33%)、新材ヒノキ・ベイヒバの平均 2.43(20)、 C の平均値 (変動係数%) は、古材で 7.72 (68%)、新材で 21.3 (89%)、新材ヒノキ・ベイヒバの平均 15.5 (34%) となった。古材スギの η は新材ヒノキ・ベイヒバに近く、新材スギはばらつきが大きい。古材の C は新材ヒノキ・ベイヒバに比べ小さく、降伏後の剛性低下が少ないことを意味し、新材スギは大きな値をとり、剛性低下が大きいことを意味する。

以上の結果から、本実験の限定した範囲ではあるが、古材の仕口の復元力特性は新材と比べ、特に劣る傾向は見られなかった。

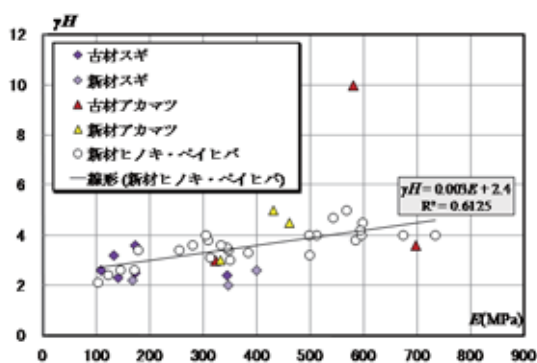


図 14 無次元特性値 γH の分布

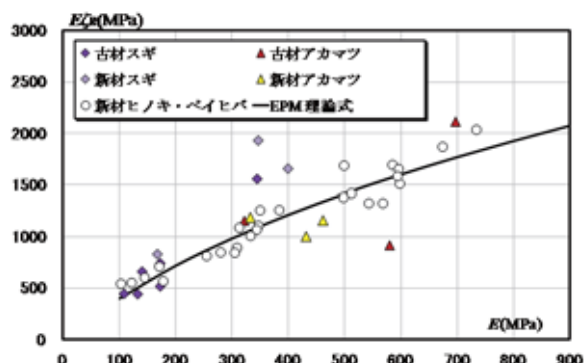


図 15 見かけの剛性 $E\zeta_R$ の分布

5. まとめ

古民家の解体部材と新材を用いた十字型通し貫仕口接合部実験を行い、古材の仕口の強度・剛性・変形性能について実験的な確認を行った。また、実験から得られた復元力特性を対象に、完全弾塑性モデル置換特性値および弾塑性パステルマーク・モデル(EPM)シミュレーションにより、耐震性能評価の最も主要な指標である、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。その結果、本実験に用いた古材の通し貫仕口に関しては、強度・剛性・変形性能に関しては新材に劣る傾向は見られなかった。

このような研究成果が伝統的木造建築物の耐震性能評価および伝統的木造建築物の保存・継承に資するものと考えており、今後も引き続きデータの蓄積を行って行きたい。

謝辞：本研究は平成23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) 小原二郎：古材の劣化に関する研究（第1報）法隆寺建築古材の機械的性質、西京大学学術研究報告、農学、No.2, pp.116-131,1952 ほか。
- 2) 疋田洋子：解体材の再利用一循環型社会をめざしてー、木材保存、Vol.26-1, pp.4-16, 2000。
- 3) 山崎真理子・平嶋義彦・佐々木康寿：建築解体木材の強度特性、日本建築学会構造系論文集、No.588, pp.127-132, 2005.2。
- 4) 大岡優・棚橋秀光・伊津野和行・鈴木祥之・土岐憲三：伝統的木造建築物で用いられた古材の強度・めり込み特性、日本建築学会構造工学論文集、Vol.57B, pp.335-442, 2011.4。
- 5) (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、1988。
- 6) 棚橋秀光・鈴木祥之：伝統木造仕口の回転めり込み弾塑性特性と十字型通し貫仕口の定式化、日本建築学会構造系論文集、Vol.76, No.667, pp.1675-1684, 2011.9。