

## 伝統構法木造仕口の復元力特性と摩擦の効果

Restoring Force Characteristics of Traditional Wooden Joints and Friction Effects

棚橋秀光<sup>1</sup>・吉富信太<sup>2</sup>・須田達<sup>3</sup>・大岡優<sup>4</sup>・岩本いづみ<sup>5</sup>・鈴木祥之<sup>6</sup>

Hideaki Tanahashi, Shinta Yoshitomi, Tatsuru Suda, Yu Ooka, Izumi Iwamoto  
and Yoshiyuki Suzuki

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

Visiting Researcher, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

<sup>2</sup>立命館大学教授 建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Architecture and Urban Design

<sup>3</sup>金沢工業大学准教授 建築学科 (〒924-0838 石川県白山市八束穂 3-1)

Associate Professor, Kanazawa Institute of Technology, Dept. of Architecture

<sup>4</sup>都城工業高等専門学校講師 建築学科 (〒885-0034 宮崎県都城市吉尾町 473-1)

Lecturer, National Institute of Technology, Miyakonojo College

<sup>5</sup>大阪府立大学工業高等専門学校准教授 総合工学システム学科 (〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町 26-12)

Associate Professor, Osaka Prefecture University College of Technology

<sup>6</sup>立命館大学教授 衣笠総合研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

The authors have researched the mechanisms and formulations of traditional wooden joints with wedges by applying the Elasto-plastic Pasternak model. However, restoring force characteristics of embedment of traditional wooden joints under cyclic loadings have not been clarified so far, although cyclic loadings have significant effects on their behaviors. Thus, the rotational embedment tests of traditional wooden joints with/without wedges and Teflon sheets under cyclic loadings were carried out and their restoring force characteristics were obtained. Especially, the effects of wedges and friction on their restoring force characteristics are discussed. The frictional resistances are obtained by examining the differences of the restoring force with and without Teflon sheets. As a result, the frictional resistances have large effects on the stiffness and strength of the restoring force characteristics of joints.

**Keywords** : traditional wooden joint, restoring force characteristics, rotational embedment, cyclic loading, friction

### 1. はじめに

伝統木造建築物の耐震性能評価にあたって、地震時における仕口（接合部）の回転抵抗による復元力の適切な評価が最も重要となる。著者らは柱貫接合部の復元力は主に回転めり込み抵抗に起因すると考え、十字型通し貫仕口の弾塑性にわたる復元力のメカニズムとその復元力特性の定式化を提案<sup>1)</sup>した。また、実際の仕口では接触部の密着度を向上させるために楔を用いることが多く、楔の果たす効果を含めた接合部性能の把握が耐震評価上の重要な課題となることから、楔の締固め効果や剛性増大効果、楔特有の拔出しや繰返し載荷による仕口の復元力の低下挙動などに関する解明を進めてきた<sup>2)</sup>。

また、仕口の復元力には摩擦抵抗が含まれ、テフロン・シート（ポリテトラフルオロエチレン：以下テフ

ロンと称する。厚さ0.8mm、公称摩擦係数0.1)を仕口のほぞと貫または楔の接触面に挿入することによる摩擦低減により摩擦抵抗モーメントが大きく減少することを検証し、摩擦が復元力特性に大きな効果を持つことを明らかにした<sup>1)2)</sup>。あわせて、楔の支圧力による摩擦抵抗が摩擦によるエネルギー吸収機構を持つことを確認した<sup>2)3)</sup>。しかし、地震時挙動に重要な意味をもつ繰り返しに伴う復元力特性やメカニズムはまだ解明途上にあり、検討課題となっていた<sup>3)</sup>。

繰り返し挙動に関する既往の研究としては、繰り返しの復元力特性に関する実験や解析モデルと定式化の提案は少なくない<sup>4)5)</sup>などが、そのほとんどは耐力壁・非耐力壁を含む構造要素や架構の静的・動的な実験に基づく提案<sup>4)5)</sup>であり、木造の伝統構法の仕口に焦点をあてた、繰り返しのメカニズムの解明とその定式化の提案は見られない。

著者らはすでに、先行研究で全面圧縮・部分圧縮(めり込みと同義)の繰り返し載荷実験(実験1、2)を行い、繰り返しに伴う圧縮の復元力特性を把握した<sup>6)7)</sup>。本研究は、その実験に引き続いて回転めり込みの繰り返し載荷実験(実験3、4)を行い、摩擦を含まない回転めり込みのみの繰り返し特性(実験3)と楔とテフロンの有無を含めた通し貫仕口の復元力の繰り返し特性(実験4)を比較検討してまとめたものである。その中で、摩擦力を低減する効果をもつテフロンの有無による復元力の変化より、摩擦抵抗の復元力の抽出を試み、摩擦の復元力に及ぼす特異な効果を明らかにし、繰り返しに伴う復元力特性や摩擦をふくめたメカニズムに関する有益な知見を得たので報告する。

## 2. 回転めり込みの繰り返し載荷実験の概要

実験は摩擦を伴わない回転めり込みのみの試験体(実験3)と摩擦を伴う十字型通し貫仕口の試験体(実験4)について行った。試験体一覧を表1に示し、以下にその概要を示す。

### (1) 回転めり込みのみの実験(実験3)

同一の原木のヒノキの厚さ30mmの板材より図1に示すように、貫試験体を予備用を含め連続して木取りした。厚さ30mm、高さ100mmの断面で、長さ100mmのFR(楔なし)、FK(楔あり)、断面寸法が同じで長さ400mmのPR(楔なし)、PK(楔あり)の試験体各3体である。小試験体の縦圧縮試験体(LR、LKS)と横圧縮試験体(HR、HKS)は材料試験用である。未実施の予備試験体は表から除外してある。

表1 試験体一覧表

実験	試験体記号	樹種	テフロン・楔	個数	載荷ジグ	載荷法	実験場所
実験3	FR-1,2,3	ヒノキ	なし	3	回転めり込み	7ステップ3サイクル	立命館大
	PR-1,2,3	ヒノキ	なし	3	回転めり込み	同上	立命館大
	FK-1,2,3	ヒノキ	楔あり	3	回転めり込み	同上	立命館大
	PK-1,2,3	ヒノキ	楔あり	3	回転めり込み	同上	立命館大
実験4	J-1,J-2,J-3	ヒノキ	テフロンなし	3	十字型通し貫	8ステップ3サイクル	金沢工大
	JT-1,JT-2,JT-3	ヒノキ	テフロンあり	3	十字型通し貫	同上	金沢工大
	K-1,K-2,K-3	ヒノキ	テフロンなし楔あり	3	十字型通し貫	同上	金沢工大
	KT-1,KT-2,KT-3	ヒノキ	テフロンあり楔あり	3	十字型通し貫	同上	金沢工大

実験3では図2に示すように、島津製作所万能試験機に上下の鉛直方向載荷により回転めり込みが可能な治具を取り付けた載荷装置を用いて繰り返し載荷し、クロスヘッドの荷重と変位を求めた。この装置では接触長さ50mmの鋼製載荷板の回転めり込みのみが生じ、摩擦は原理的に生じない構造となっており、回転めり込みのみの繰り返しの復元力を求めることができる。圧縮載荷による反時計回りの回転を正、時計回りの回転を負として、クレビスが若干傾斜することによる水平成分の補正を行い(付録1参照)、回転めり込みモーメントを求めて、回転角(rad) - モーメント(kNm)の関係の復元力特性を求めた。最初は、正負交番繰り返しを行ったが、引き上げる載荷の変位の限度が想定より小さく、十分な載荷変位が取れなかったために、押しの載荷のみに切り替えて、引きの載荷の代わりに試験体を左右入れ替えて押しのみで載荷したため、正負交番載荷とはなっていない。載荷スケジュール(図3)は回転角で0.01、0.02、0.03、0.05、0.1、0.15、0.2radの7ステップ、各ステップ3サイクルで載荷速度は載荷変位当たりで0.0165mm/s-0.33mm/sである。

楔はケヤキで図1に示す形状とし、上下の荷板間隔を125mmに設定し、試験体をセットした状態で変位を固定して計測を開始した後、楔を2人で左右からハンマーで打ち込めるだけ打ち込んで、支圧力を導入した。ただし支圧力は実測できていない。実験は立命館大学セル実験室にて2016年9月～10月に、材料試験は都城工業高等専門学校の実験室にて2016年7月～10月に実施した。

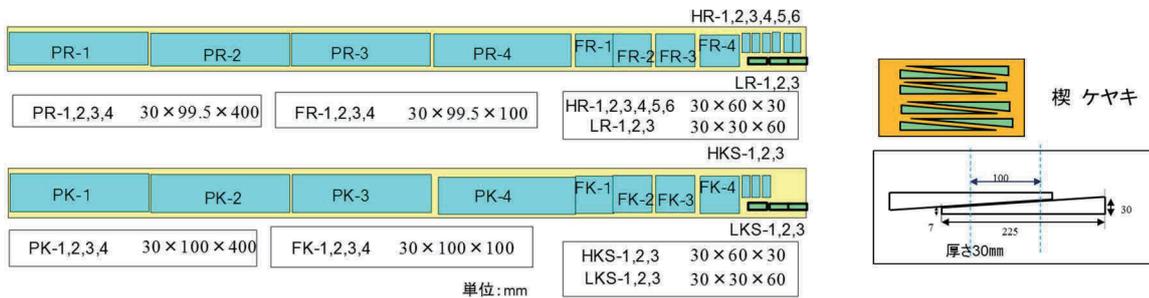


図1 実験3の試験体の形状・寸法（PR、PKシリーズと楔）と木取り要領

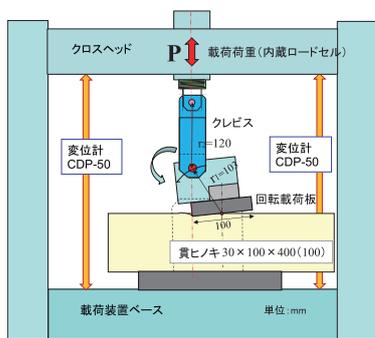


図2 回転めり込み実験の荷装置

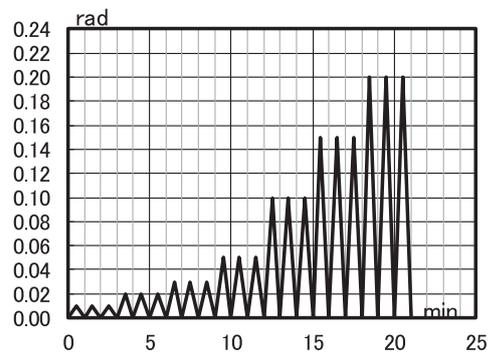


図3 荷スケジュール(実験3)

## (2) 十字型通し貫仕口による回転めり込み実験(実験4)

実験4は、摩擦低減のためのテフロンの有無、楔の有無の組み合わせにより表1に示す4シリーズの通し貫試験体を用意して、図5に示す十字型通し貫仕口を想定した実験装置で、柱は鋼材で側面からヒノキの貫をはめ込んで鋼製荷板で挟み込み、柱上部を水平荷荷することにより回転めり込みを発生させた。計測機器は、荷荷点のワイヤ変位計とロードセル、仕口の回転を計る2個の変位計、楔の抜け出しを計る2個の変位計である。

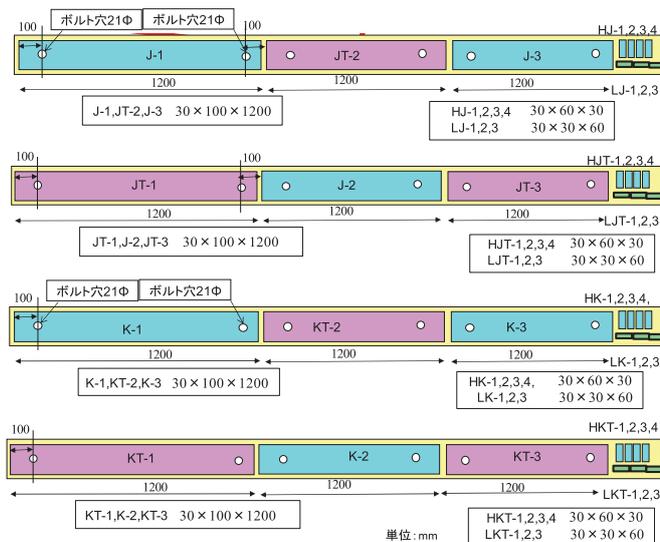


図4 実験4の試験体形状と木取り要領

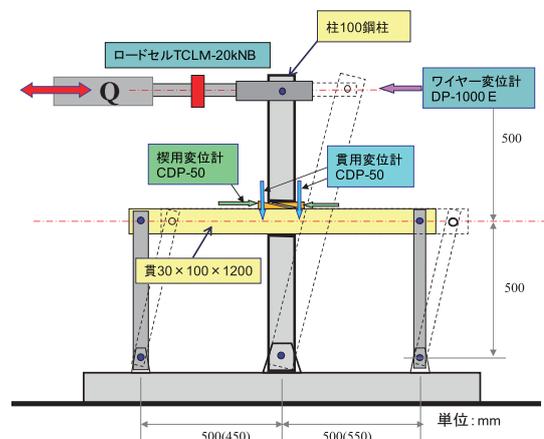


図5 十字型通し貫仕口実験の荷装置

試験体の貫は厚さ 30mm、高さ 100mm、長さ 1200mm で支点間隔は 1000mm で、J、JT シリーズの試験体、楔付の K、KT シリーズの木取り図を図 4 に示す。楔は実験 3 と同じ形状のものを用いた。HJ、LJ などの小試験体は材料試験用である。試験体は、実験 3 とは異なる板材から採取したが、小節が多いため節が載荷板付近に来ないように、仕口を貫の中央から左右に 50mm 移動したのものもある。楔を用いるときは載荷板間隔は 125mm にセットとして計測を開始した後、楔を両側からハンマーで打ち込めるだけ打ち込んで、支圧力を発生させたが、導入された支圧力は不明である。載荷スケジュールは載荷点水平変位で 5mm(変形角で 0.005rad：以下同様)、10mm(0.01)、20mm(0.02)、30mm(0.03)、50mm(0.05)、100mm(0.1)、150mm(0.15)、200mm(0.2)の 8 ステップ正負交番 3 回くり返し載荷で、載荷速度は 20mm までは 0.75mm/s、30mm から 50mm までは 1.5mm/s、それ以降は 3.0mm/s とした。実験は金沢工業大学地域防災環境科学研究所実験室で 2016 年 9 月に実施した。材料試験は実験 3 と同じ都城工業高等専門学校でまとめて実施した。

### 3. 実験結果の概要と分析

#### (1) 材料定数

材料試験結果で求めた主な材料特性を表 2 に示す。含水率は小試験体は全乾法による。貫試験体の密度は実験 3:平均 0.47g/cm<sup>3</sup> (変動係数 0.02)、含水率は電気式含水率計により平均 14.3% (変動係数 0.16)、実験 4:平均 0.52g/cm<sup>3</sup> (変動係数 0.04)、含水率は電気式含水率計により平均 19.1% (変動係数 0.18) である。材料試験と貫試験体の含水率の差は、試験法と試験環境、材料のばらつき等によるものであるが、材料特性に大きな影響はない範囲の差であると考えられる。

表 2 試験体の材料定数一覧表 ( ) は変動係数

樹種	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	縦圧縮ヤング係数 (GPa)	縦圧縮強度 (MPa)	横圧縮ヤング係数 (MPa)	横圧縮降伏応力度 (MPa)	含水率 (%)
ヒノキPR,FRシリーズ	0.48 (0.01)	12.4 (0.20)	42.8 (0.05)	663 (0.01)	6.1 (0.01)	14.1 (0.02)
ヒノキPK,FKシリーズ	0.48 (0.00)	13.2 (0.04)	44.5 (0.04)	516 (0.03)	5.0 (0.01)	14.1 (0.02)
ヒノキJシリーズ	0.50 (0.01)	13.1 (0.03)	46.6 (0.00)	185 (0.03)	3.2 (0.02)	14.8 (0.00)
ヒノキJTシリーズ	0.51 (0.00)	11.9 (0.05)	45.9(0.02)	393 (0.02)	5.5 (0.02)	14.9 (0.01)
ヒノキKシリーズ	0.50 (0.01)	8.3 (0.13)	39.1(0.01)	236 (0.06)	3.9 (0.00)	14.8 (0.02)
ヒノキKTシリーズ	0.52 (0.01)	8.7 (0.04)	41.0 (0.02)	230(0.03)	4.2 (0.02)	14.4 (0.01)
ケヤキ楔	0.69 (0.02)	11.6 (0.09)	65.6 (0.05)	1128 (0.03)	14.8 (0.06)	8.2 (0.04)

#### (2) 実験 3 の繰り返し回転めり込み実験結果とその特徴

先述のようにクロスヘッドの変位から回転角(rad)を、載荷荷重からモーメント求め、付録 1 に示す補正による復元力特性の結果を、楔なしシリーズで全面回転めり込み(貫長さ 100mm)の FR-3\_Am、部分回転めり込み(貫長さ 400mm)の PR-3\_Amを重ねて図 6 に示す。同様に楔ありシリーズの FK-1\_Bm と PK-2\_Bm を示す。いずれも A は下向き載荷、B は試験体を左右入れ替えて下向き載荷で、m は補正済を意味する。

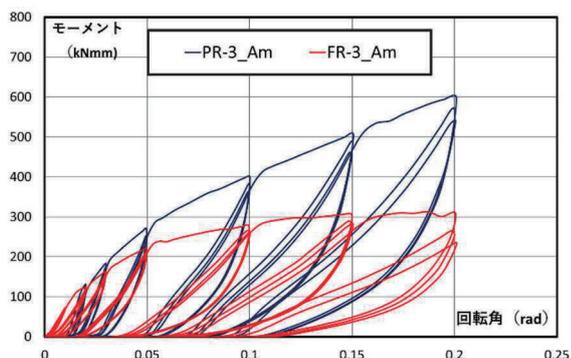


図 6 FR-3\_Am と PR-3\_Am の復元力特性 (楔なし)

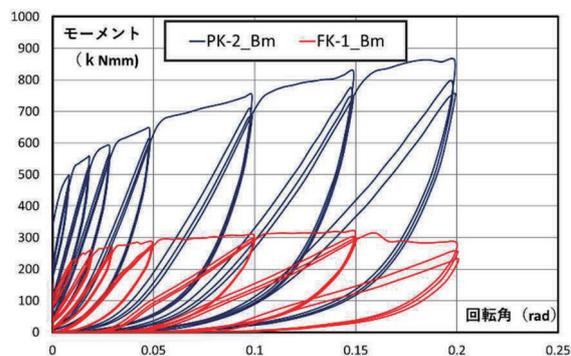


図 7 FK-1\_Bm と PK-2\_Bm の復元力特性 (楔あり)

全面回転めり込みモーメントは最大 300kNmm で降伏後はほぼ剛性ゼロの塑性剛性を示すが、楔ありでは回転角 0 でも、楔の支圧力による効果でモーメントが 100~300kNmm あり、部分回転めり込みでは最大モーメントは楔の支圧力による効果で 4 割程度増大した。

繰り返しのループは、図 8 に示す概念図に基づき、(1) 式のループ関数  $\Phi_r$  により以下の要領で定量化する。すなわち、往復のループの膨らみを表す载荷・除荷のパラメータ  $\eta_u$ 、 $\eta_d$  と残留回転角比  $\alpha$  を、図 9 のループ解析用テンプレートを実験結果のループに重ねる要領で求めた。各ステップ 3 回の繰り返しでループが 3 本あるが、ほぼ重なることから、最初のループで求めている。結果を平均値で図示すると、図 10 のように载荷時は  $\eta_u=1.5\sim 2$ 、除荷時は  $\eta_d=3\sim 6$  程度であった。これは圧縮またはめり込みの場合と同程度<sup>6)</sup>である。

$$\text{ループ関数} : \Phi_r(\theta) = \frac{\sinh(\eta \theta / \Delta\theta_i)}{\sinh \eta} M_i \quad (1)$$

ただし、 $0 \leq \theta \leq \Delta\theta_i$

ここで、 $\Delta\theta_i = \theta_i - S_i = \theta_i(1 - \alpha_i)$  : ループの水平幅、 $\alpha_i = S_i / \theta_i$  : 残留回転角比、 $M_i$  : そのサイクルの最大モーメントで、ループの高さ。

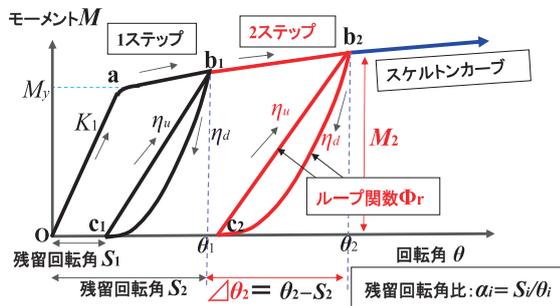


図 8 繰り返し载荷ループの概念図

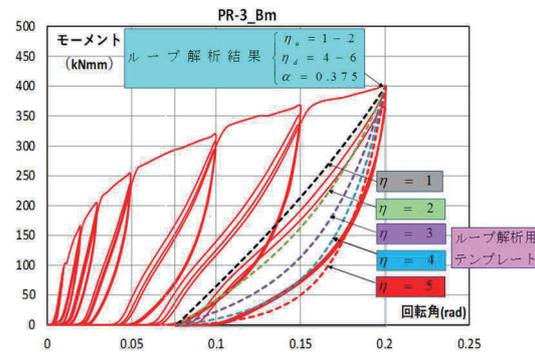


図 9 テンプレートによるループ解析の要領

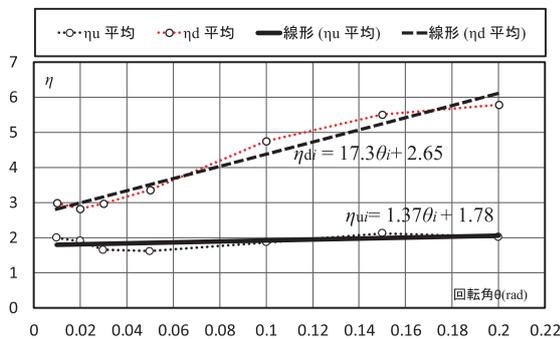


図 10 载荷・除荷のパラメータ  $\eta_u$ 、 $\eta_d$  の近似曲線

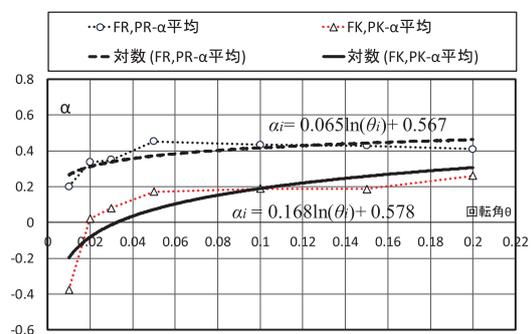


図 11 残留回転角比  $\alpha$  の近似曲線

残留回転角比は、各ケースのループ解析結果から図 11 が得られた。楔ありでは全体に残留回転角比  $\alpha$  が楔ありより小さいことが特徴であり、支圧力による拘束の効果と考えられる。図 10、図 11 より各パラメータの近似曲線を求めて(2)~(4)式に示す。

$$\eta_{ui} = 1.37\theta_i + 1.78 \quad (2)$$

$$\eta_{di} = 17.3\theta_i + 2.65 \quad (3)$$

$$\alpha_i = \begin{cases} 0.065 \ln(\theta_i) + 0.567 : \text{楔なし} \\ 0.168 \ln(\theta_i) + 0.578 : \text{楔あり} \end{cases} \quad (4)$$

これらの数値は数少ない実験結果によるもので、今後データの蓄積により見直しの可能性がある。

### (3) 実験 4 の繰り返し回転めり込み実験結果とその特徴

実験結果は水平力と水平変位から本来はモーメント—回転角で表現するのが適切であるが、仕口の回転角では一部、適切に復元力特性が求められなかったため、復元力特性の全体については、モーメント—変形角

関係に換算して図 12、13 に示す。その際に柱上部の重量がモーメントを増加させる効果があるので、その補正（付録 2）を行っている。テフロンによる摩擦低減効果に焦点をあてて、同じ板材から切り出した試験体でテフロン有無の復元力特性の差異について、楔なしを図 12 に、楔ありを図 13 に示す。楔の効果は実験 3 で見られたように、原点付近のループの膨らみに現れるが、今回は楔打ち込みによる支圧力の導入が不十分で、あまり明瞭には現れてはいない。ばらつきはあるが全体にテフロンによるモーメント低減効果は明確に現れている。既往の研究 1) では、摩擦抵抗は全体の 30% 程度を占めており、テフロンで摩擦係数で 0.5 が 0.1 まで低減されることを考慮すると、24% 程度低減が occur と思われるが、それに近い結果となっている。

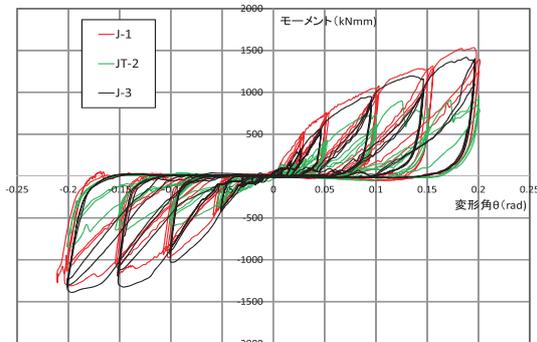


図 12 J-1、JT-2、J-3 の復元力特性の比較

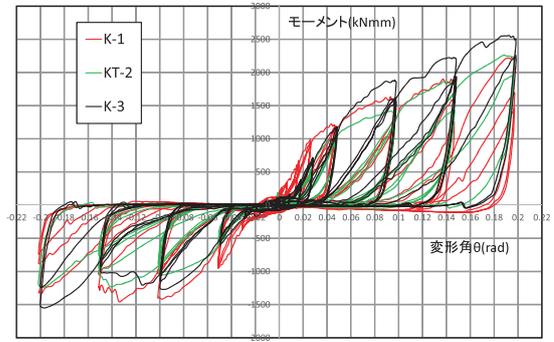


図 13 K-1、KT-2、K-3 の復元力特性の比較

実験 3 と同様に、実験 4 のループ解析結果を図 14、15 に示す。載荷時  $\eta_u = 1 \sim 2$  で直線又はやや弓型に反ったカーブで上昇し、除荷にはテフロンなしでは  $\eta_d = 6 \sim 12$ 、テフロンありでは 6 程度である。テフロンありは摩擦を大方カットした場合を意味し、実験 3 の回転めり込みのみの  $\eta_d = 3 \sim 6$  の結果（図 10）と整合する。残留回転角比  $\alpha$  は図 15 に示す特性を示し、0.03rad 以下の変形レベルでは明確な傾向は得られなかったが、それを超えるレベルでは、図 11 の 0.05rad 以上の傾向と同様な曲線を示し、対数関数による近似式を推定した。

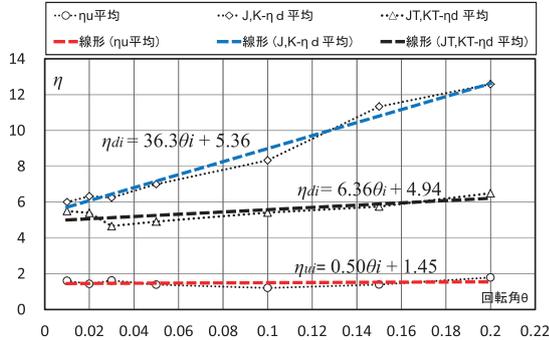


図 14 載荷・除荷のパラメータ  $\eta_u$ 、 $\eta_d$  の近似式

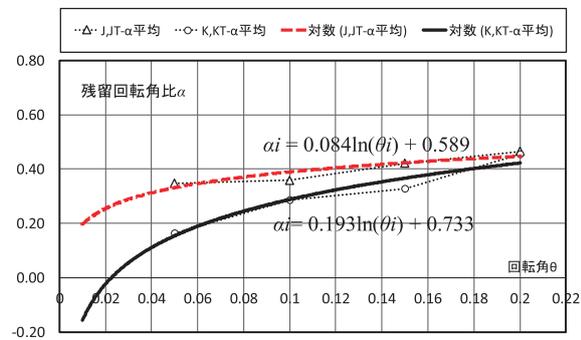


図 15 残留回転角比  $\alpha$  の推定近似式

$$\eta_{ui} = 0.50\theta_i + 1.45 \quad (5)$$

$$\eta_{di} = \begin{cases} 36.3\theta_i + 5.36 : \text{テフロンなし} \\ 6.36\theta_i + 4.94 : \text{テフロンあり} \end{cases} \quad (6)$$

$$\alpha_i = \begin{cases} 0.084 \ln(\theta_i) + 0.589 : \text{楔なし} \\ 0.193 \ln(\theta_i) + 0.733 : \text{楔あり} \end{cases} \quad (7)$$

#### 4. 摩擦抵抗の抽出と繰り返し復元力特性のシミュレーション

本実験の目的の一つに、摩擦抵抗を抽出することがある。そのために、テフロンなしの復元力からテフロンありの復元力を差し引くことで摩擦成分を抽出できると考えて、各ステップごとに例えば、6 ステップの 3 サイクルにおいて、J-1 と JT-2 を重ねて表したものが図 16 である。ただし、ループのモーメントを差し引きするために、ループ分解プログラムを用いて、繰り返しのループを分解してとりだし、横軸の座標がそろえるように、横座標を細かく刻んで再構成する手法を用いた。また、各ステップのピークを揃えるために、モ

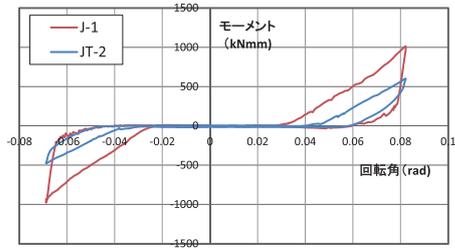


図 16 J-1、JT-2 の 6 ステップの復元力特性

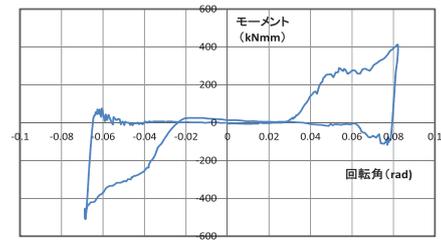


図 17 J-1 の 6 ステップの摩擦のみの復元力特性

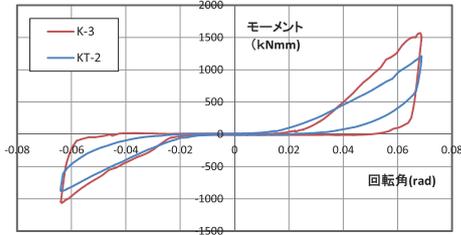


図 18 K-3、KT-2 の 6 ステップの復元力特性

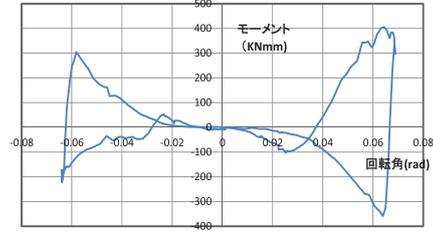


図 19 K-3 の 6 ステップの摩擦のみの復元力特性

ーメントゼロの範囲でループを水平移動してピークを揃える操作を行っている。

図 17 に J-1 から JT-1 を差し引きを行った結果の復元力特性を示す。これが摩擦力のみの復元力特性であり、除荷時の特性に着目すると、除荷になると負領域に入る特性が明確に示された。ただし、本実験では異なる部材間で差し引きを行っており、モーメントの数値そのものは実際とやや異なるものになるが、傾向は変わらないと考える。また、テフロンによる摩擦係数は 0.1 程度で、摩擦は完全にはカットされないので、低減前の摩擦係数を 0.5 とすれば、この 20%増が実際の摩擦抵抗と推定する。同様に楔ありの場合、図 18、19 に K-3 と KT-2 の場合を示す。除荷の際に 400kNm から一気に 600~700kNm 程度減少して負領域に至り、その後ゼロに戻る特異な摩擦抵抗の挙動が明らかとなった。除荷の際してモーメントが急減する剛性 (図 20 の fgh に相当) は、摩擦によるシアパネルのせん断弾性変形の剛性によると推察される<sup>3)</sup>が、现阶段では実証はできていない。

以上の結果を総合すると、図20の概念図に示すように、全モーメントの復元力は回転めり込みモーメントと摩擦抵抗モーメントの成分の和からなり、先行研究で想定した概念図<sup>3)</sup>が実験的に検証できたものといえる。全モーメントの復元力のグラフの任意の点  $b_a$  (回転角  $\theta_i$ ) において除荷に転ずると、モーメントは急速に減少して、弓型のカーブを描いて横軸に接する形でモーメントゼロの原点  $O$  に戻る。再载荷に転ずると、 $c_a$  (図15に示す  $a$  に対応) に至るまでスリップした後、立ち上がりが起こり、ほぼ直線または緩いカーブの  $\eta_u = 1.5 \sim 2$  で、経験した最大点  $b_a$  を志向して上昇する。

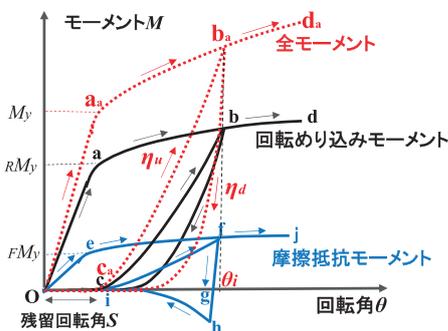


図 20 回転めり込みと摩擦の復元力特性の概念図

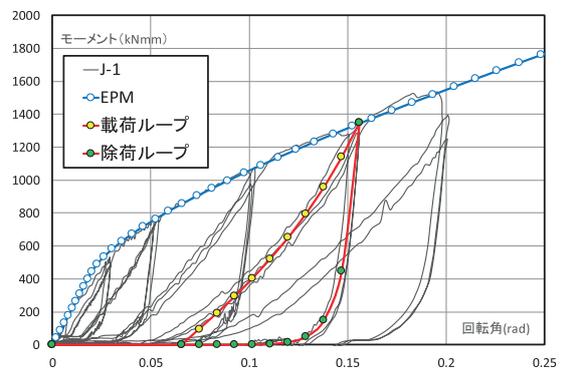


図 21 J-1 のループ解析のシミュレーション

下降のカーブは緩やかに戻るか一気に横軸に近づくか、その程度は摩擦に依存し、摩擦があると  $\eta_d = 6 \sim 14$ 、摩擦がないと  $\eta_d = 5 \sim 6$  となる。(5)~(7)式の実験式は今後のデータ蓄積で数値の精度を上げる必要がある。同じレベルでの繰り返しでは、最大点はやや低下する傾向はみられるが、概ね同じループを描く。これ

より、ループ解析のシミュレーションをJ-1の  $\theta=0.156\text{rad}$  のレベルで試みたものを図21に示す。ここで、ループ解析のパラメータは(5)～(7)式より決まる  $\eta_u=1.5$ 、 $\eta_d=11$ 、 $\alpha=0.42$ を用いた。なお、図21のEPMは復元力特性のスケルトンカーブの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結果<sup>1)</sup>である。

このようにして、スケルトンカーブの EPM のシミュレーションとループ解析のシミュレーションを組み合わせることにより、繰り返しの復元力特性のシミュレーションが原理的に可能になる。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、楔、テフロンの有無を含めた十字型通し貫仕口の復元力特性の繰り返しによる復元力特性の解明を主な目的として、新たに基礎的な実験として、実験3と実験4の2つのシリーズの回転めり込みの繰り返し載荷実験を行い、繰り返し載荷による復元力特性のループの主な特徴をループ解析による実験式により定量的に明らかにした。また、復元力特性のループにおいて、回転めり込みと摩擦抵抗を分離、抽出を行い、通し貫仕口の復元力特性における摩擦の効果を明らかにした。これにより、地震応答解析等に適用できる繰り返しによる復元力特性の定式化に向けた基本的な道筋を示した。引き続き定式化の検討を行うとともに、ループ解析のパラメータを今後さらに充実させるためにデータの蓄積を図りたい。

**謝辞：**本研究は東本願寺耐震調査研究委員会（委員長：鈴木祥之）における接合部の実験として実施した。実験にあたって立命館大学吉富研究室、金沢工業大学須田研究室の皆さんの協力を得た。記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 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，第76巻 第667号，pp.1675-1684, 2011.9.
- 2) 棚橋秀光・大岡優・伊津野和行・鈴木祥之：伝統的構法の楔をもつ仕口のめり込みメカニズム，歴史都市防災論文集，Vol.7, pp.97-104, 2013.7.
- 3) 棚橋秀光・大岡優・鈴木祥之：伝統的構法の楔の復元力特性に及ぼす効果，日本地震工学会論文集 第16巻 第1号(特集号)，pp.170-183, 2016.1.
- 4) 佐藤利昭ほか：木造軸組構法住宅の地震応答シミュレーション履歴特性のモデル化と振動台実験による検証一，日本建築学会構造系論文集 第73巻 第631号，pp.1573-1576, 2008.9.
- 5) 五十田博：大変形と繰り返しによる劣化を考慮した木造壁の復元力特性モデルの精度検証一木造建物の地震時挙動に関する研究 その3一，日本建築学会構造系論文集 第76巻 第659号，pp.113-120, 2011.1.
- 6) 棚橋秀光・大岡優・白井悠吾・岩本いづみ・鈴木祥之：伝統的構法通し貫仕口のめり込みの繰り返し復元力特性，歴史都市防災論文集，Vol.10, pp.20, L1-pp.21, L17, 2016.7.
- 7) 大岡優・棚橋秀光・鈴木祥之：伝統木造仕口の繰り返しめり込みの復元力特性，日本建築学会大会学術講演会梗概集，構造III，pp.265-266, 2016.8.

付録1：圧縮ジグの圧縮変位と荷重からモーメントを求める。鉛直圧縮変位  $AA_1$  のとき、 $AA_1 = BC = y = 50\theta$ ，鉛直荷重  $P$  に対し、水平荷重成分が付加されて載荷板の回転角  $\theta$  とモーメント  $M$  の関係を求める。

$$BB_1 = 2r_1 \sin(\theta/2), \quad \gamma = \frac{\pi - \theta}{2}, \quad \lambda = \arctan(50/90) = 0.507\text{rad},$$

$$B_1C = y \tan \delta, \quad \delta = \gamma - \lambda = \pi/2 - \theta/2 - 0.507,$$

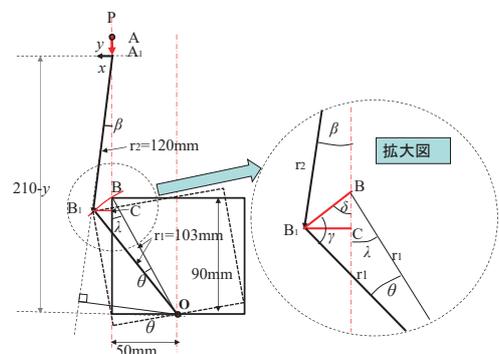
$$\sin \beta = \frac{B_1C}{A_1B_1} = \frac{y \tan \delta}{r_2} = \frac{50\theta \tan(\pi/2 - \theta/2 - 0.507)}{r_2},$$

$$\therefore M = P\{50 + (210 - y) \sin \beta\}$$

なお、引張の場合は同様に以下の式が得られる。

$$M = P\{50 - (210 + y) \sin \beta\}$$

$$\text{ただし、} \sin \beta = \frac{50\theta \tan(\pi/2 + \theta/2 - 0.507)}{r_2}$$



付録2：実験の実測荷重  $F$  と変位  $x$  より、載荷点の試験体にかかる質量を  $m$  とすると、補正後の荷重  $F'$  は

$$F' = F - mgx/H \text{ により得られる。ここで、} m = 32.5\text{kg、重力の加速度：} g = 9.8\text{m/s}^2, H = 1000\text{mm} \text{ である。}$$