

伝統木造仕口の主要なタイプとめり込みメカニズム

Major Mechanical Types of Traditional Wooden Joints and Embedment Mechanisms

棚橋 秀光¹・鈴木 祥之¹

Hideaki Tanahashi and Yoshiyuki Suzuki

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)

¹ Professor, Ritsumeikan University, Global Innovation Research Organization

Major seismic resisting elements of traditional wooden buildings are rotational resistances of column-tie beam joints, column rocking resistances and shear resistances of mud/wood walls. Among such elements, the column-tie beam joints play the most important role in large deformability of restoring force characteristics. However, there are many types of joints used in existing wooden buildings and some of them are complicate in details. In this paper, some major mechanical types of joints are analyzed and their embedment mechanisms are discussed.

Keywords : traditional wooden joints, embedment, mechanical model, Pasternak Model

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。

伝統木造建築物の耐震要素としては、太い柱の傾斜復元力、仕口の回転めり込み抵抗、土壁・板壁のせん断抵抗などがある。その中で、柱貫仕口（接合部）に代表される回転めり込み抵抗が最も変形性能に富む耐震要素で、その挙動はめり込みの弾塑性復元力特性に支配される。そのめり込みの力学的特性を解明するために、著者らは、木材相互の部分的な圧縮（めり込み）に対してパステルナーク・モデル（PM と略す）を適用し、直交異方性木材のめり込み変位の定式化を行った¹⁾²⁾。さらに木材の横圧縮特有の歪硬化現象に着目してめり込みの降伏メカニズムを解明し、PM を弾塑性パステルナーク・モデル（EPM と略す）に拡張し、剛性増大・低下を統一的に表す剛性関数を導入して、仕口の弾塑性復元力特性を簡潔な形で定式化した³⁾⁴⁾。

実際の伝統建築物に使用されている仕口は多様で、さまざまなタイプや詳細があり、メカニズムの違いもありうる。従って定式化を実際の仕口に適用し、それらの復元力特性を解明する課題は、貴重な文化財の耐震性能評価・耐震補強を検討する上で極めて重要である。

そこで、本論では仕口のめり込みの力学的メカニズムの観点から仕口の主なタイプを取り上げ、メカニズムを明らかにし、それらの特性を分析する。継手は基本的に機能が異なると考えて、別の機会に論ずる。

2. 仕口の解析的な扱いの特殊性

(1) 仕口とそのメカニズムの扱い方

仕口は、柱と横架材などの複数の部材が交差する接合部にあって、接触・かみ合わせにより外力に抵抗す

る剛性と強度を持つ構造要素である。構造力学の一般名称としては接合部であるが、力学的に特殊な扱いが必要となることから、伝統構法特有の名称をそのまま使用する。

外力に対応して仕口に発生する応力には、軸力・せん断力・モーメント（回転・ねじり含む）があるが、部材相互の交差角度（一般には直角が多い）が変化することにより発生する回転抵抗が最も重要な抵抗要素である。本論でもこの回転抵抗に焦点をあて、軸力・せん断力は必要に応じて言及する。

第一のステップは、仕口を構成する複数のブロックの挙動を的確に把握することである。仕口内のほぞやほぞ穴は外部からは見えないため、その挙動を直接観察することは困難であるが、実験や地震による履歴を経たブロックでは、多くの場合、仕口を解体して見出されるめり込みの痕跡が有力な手がかりとなる。その挙動の推察により外力に対応して、つり合いながら各ブロックの回転・移動がどのように起こり、その結果どのブロックのどの部分にめり込み反力や摩擦力が発生するかを明らかにすることができる。その際、各ブロックの繊維・年輪の方向を区別しためり込み易さ、すなわち、圧縮ヤング係数の基礎知識が不可欠である。

第二のステップは、各ブロックの挙動観察の結果を力学モデルとして整理し、つり合いからめり込み反力や摩擦力などの力学的諸量を定量的に評価することで、仕口の復元力特性の定式化が可能になる。

しかし、仕口の定式化の過程で多くの考慮すべき課題があり、解析上特有の困難も少なくない。そこで、はじめに、木材としての特殊性も含めて、いくつかの課題を以下に整理する。

(2) メカニズム説明と定式化にあたっての課題

a) 木材という材料の特殊性：天然材料からなるばらつきが多い材料であることは言うまでもない。針葉樹・広葉樹、樹種による個別の差異だけでなく、ひとつの部材の中でも年輪・密度、心材・辺材、春材・秋材（夏材）、節など部位による力学特性の差異があり、天然材料由来のばらつきであるため、材料特性の制御も難しい。また、環境（水・熱）・腐朽・劣化・経年などによる材料特性の変化要因も少なくない。特に、仕口付近の材料特性のばらつきが仕口の復元力特性にも大きく影響し、実験的検証の際にはこれらのばらつき要因が困難をもたらす。

b) 弾性定数・強度の顕著な異方性：木材の異方性を扱う際に、年輪と関連付けて、図1に示す3方向で材料特性の違いを表現することが一般的である。すなわち、年輪のカーブを近似的に平面と見なして、繊維方向 L 、年輪の半径方向 R 、接線方向 T の3次元の直交異方性弾性体として扱う。ヤング係数・せん断弾性係数・ポアソン比が各方向3個合計9個の独立した弾性定数で弾性特性は表現できる。異方性の程度としては、3方向のヤング係数の比をベイヒバの場合を例にとると、 $E_L : E_R : E_T = 12:0.9:0.7$ (GPa) 程度¹⁾で、剛性の差が極めて大きいことが特徴で、めり込みが基本的に横圧縮部材に発生する理論的背景となっている。せん断弾性係数、ポアソン比など含めて主な樹種の平均値は、データベース⁵⁾が参考になる。

加えて、針葉樹では、図2に示すように、 $E_R : E_T$ の中間の年輪傾角の横圧縮ヤング係数 E_{45} は 0.2GPa 前後と小さいものが多く、スギでは 0.1GPa 以下も珍しくない⁶⁾。このように針葉樹では同じ横圧縮でも年輪傾角 α により数倍の差がある。木口の年輪傾角が 45 度付近の部材を伝統構法では追榫と称することがあるが、図1の木口の実例に示すように、実際の現場では頻繁に登場するだけに、めり込み問題では木口の年輪傾角に特に注意を払う必要がある。また、大きな部材となると芯持ち材が避けられず、ひとつの部材断面内で年輪傾角と曲率が連続的に変化するため、直交異方性では評価しきれない場合も少なくない。

c) めり込み解析用の横圧縮ヤング係数：めり込み変形を評価する場合の横圧縮ヤング係数は、一般の材料試験のひずみ計測または中間部変位計測から得られる横圧縮ヤング係数 E_c では過大なことが多い。圧縮試験で

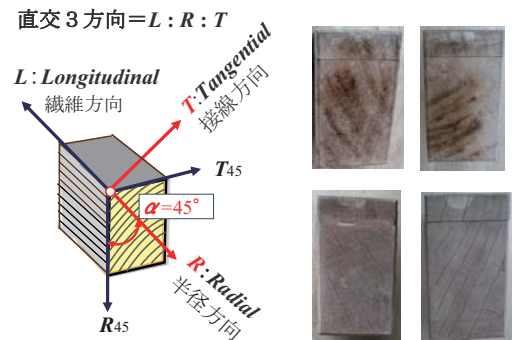


図1 木材の異方性の年輪方向と追榫木口の例

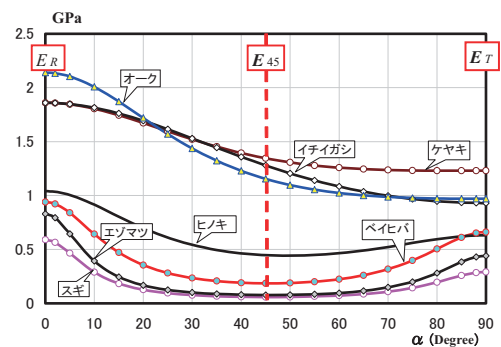


図2 年輪傾角 α と横圧縮ヤング係数 E の関係

はクロスヘッド間の変位から算定した横圧縮ヤング係数 E_a は、ヒノキの場合で E_c の 65~51%になる結果が実験的に得られており⁷⁾。著者らは、めり込み算定に用いる横圧縮ヤング係数としては、 E_a を用いることを提案した⁴⁾。この現象の背景には、载荷初期から载荷板に接触する局部のひずみ集中によることが分かっているが、正確なメカニズムはまだ明らかにはなっていない⁸⁾。

有限要素法 (FEM) でめり込み解析を行う際には、この端面のひずみ集中を何らかの形で考慮するか、適切な横圧縮ヤング係数を用いる必要がある。

d) **接触・離反・摩擦・クリープなどの非線形特性**：仕口内のブロック相互の接触面における力のやり取りは主に圧縮と摩擦によるせん断であるため、接触・離反は弾性解析であっても力学的には扱いが面倒になる。例えば FEM 解析では離反などの非線形に対応した機能が組み込まれたものでなければ、引張のヤング係数を極端に小さくして近似的に扱うとか、収斂計算で離反を考慮するなどの扱いが必要になる。

e) **めり込みの弾塑性特性と変形性能**：めり込み問題は、基本的に横圧縮が主な対象となり、横圧縮ヤング係数は相対的に小さいため仕口のめり込みによる回転剛性が小さく、また横圧縮の降伏強度も小さい。しかし、降伏後の強度増大傾向は大きく、塑性剛性はかなり期待でき、しかも変形性能も大きいことが分かっており、仕口の復元力特性をできるだけ精度よく評価して、耐震設計に生かすことが重要になる。図3にヒノキの横圧縮の70%の大ひずみに至る復元力特性の一例を示すが、全面圧縮、部分圧縮とも、降伏と大変形性能とひずみ硬化が横圧縮の弾塑性特性を考える上で重要な特質である。荷重増加の途中で载荷板エッジでのせん断破壊や繊維に沿って割裂破壊を伴う場合があり、その都度強度が若干低下するが、強度増大傾向は変わらず安定した挙動を示す。

十字型通し貫仕口の回転めり込みの復元力特性でも均等めり込みと同様、図4のように剛性は小さいが変形性能の優れた復元力特性を示し、これが伝統構法の仕口の変形性能が大きいこと的主要な要因となっている。もちろん全ての仕口がそのような特性を持つわけではないため、タイプにより個別に評価する必要がある。

f) **3次元連続体の変形解析の必要性**：仕口の解析では、従来の線材にモデル化した骨組解析ともシェル・膜などの連続体とも力学的な扱いが基本的に異なり、複数のブロックが3次的に接触・かみ合うものとして扱う必要がある。各ブロックの接触・離反・部分圧縮(めり込み)・摩擦がその主な挙動となる。もちろん3次元ブロックを2次元平面内のめり込みに簡略化して扱うことは可能で、著者らも多くの場合2次元で扱ってきたが、微小変形であっても部材は幅または高さのあるブロックとして扱う必要性を強調しておきたい。

また、連続体のめり込み解析は、それ自体一つの大きな解析的な課題である。半無限連続体表面に垂直な集中荷重の閉じた応力・変位解は、**Boussinesq** の解⁹⁾として有名であるが、有限層厚の異方性弾性連続体の応力・変位の閉じた精密解は得られていない。そのために著者らはパステルナーク・モデルによる部分圧縮の表面変位の閉じた近似解を活用してきた¹⁾²⁾が、パラメータの設定に困難が伴う。この点で新たな力学モデルを含む解析的な扱いは今後も研究の発展が期待されることである。

g) **外力に対応した内力・反力は連続分布**：複数のブロックからなる仕口の力のつり合いから外力と内力・反力を算定するには、何らかの境界条件の仮定が必要となる。架構解析などでは部材を線材に置換して固定支点・ピン支点・ローラー支点などの境界条件を仮定して行うのが一般的である。しかし、仕口では、対称条件などから決まる境界条件を除いて、ある意味では境界条件が事前には確定しにくい。ブロックがお互い拘束し合いつつ回転・接触・離反・めり込み・滑りなどが起こるが、一般的には位置の定まった支点は存在しない。弾性・塑性の段階でも異なる可能性がある。ひずみレベルも大きくなり大変形に至ると各ブロックがばらばらになって、崩壊する可能性も秘めた構造要素である。

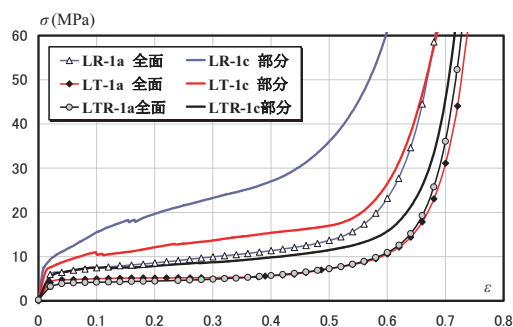


図3 ヒノキの全面・部分圧縮特性

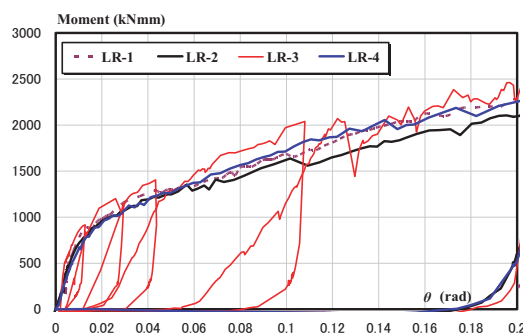


図4 ベイヒバ十字型仕口の復元力特性

したがって、回転めり込みを定量的に扱うには、回転中心を決め、回転角を変数にしてめり込み反力・モーメントなどの諸量を評価することが有効である。しかし、十字型の点対称条件を除いて、境界条件としては、集中反力はほとんどなく、多くは連続した分布反力となるため、つりあいから反力を求めることはかなりの煩雑さを伴う。また弾塑性段階では、回転中心も移動する可能性も否定できない。

3. 主要なタイプの仕口の力学的メカニズム

多様な仕口のなかで、回転めり込みの基本的なタイプを図5、8、9、10の4タイプに整理できる。これらのタイプでは、仕口内部の襟輪（えりわ）・目違い¹⁰⁾などの細かい詳細にはとらわれなくて、回転めり込みの発生が横架材か柱か、回転中心がどこに位置するかで分類した。仕口内で横架材のめり込み部分とその反力を赤色で、柱のめり込み部分は桃色で各々示し、反力の矢印はめり込みをもたらすブロックの木口面に垂直に、さしあたっては、近似的にめり込み反力の重心に当てる。厳密には反力分布を仮定して積分による。摩擦反力はめり込み反力に付随して発生するのでこの図では省く。込栓や車知栓も抵抗要素で各々茶色、緑色で示すが、本論では回転めり込みを中心に論ずるので分析対象からは除く。

以下に主な仕口タイプとその基本となるメカニズムを示して、若干の実験写真を紹介しつつ、それらの特性を述べる。

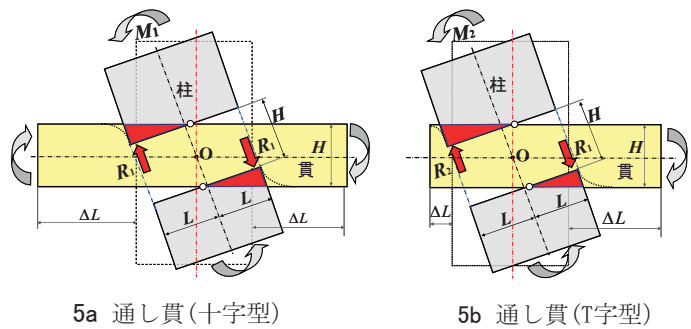


図5 通し貫タイプ

(1) 通し貫タイプ

このタイプは柱のほぞ穴を貫が貫通する通し貫タイプ。図5で、貫木口断面がそのまま貫通し、端距離 ΔL が十分長い場合を通し貫5aと称し、基本的な力学モデルのメカニズムを図解したのが図6である。点対称では回転中心はOであるが、貫には高さがあるため、Pを中心に回転のめり込みの接触長さ $L_\theta = PQ$ が回転角 θ により変化する。さらに、写真1、2に示すように、めり込んだ側面にくい込む挙動が見られ、その反力を側面水平反力と称し、摩擦力と合わせて復元力に一定程度貢献するので復元力算定に見込むことができる。その摩擦力と側面水平反力を把握するために、十字型仕口実験で、仕口内の接触面にテフロンシートを挟んで摩擦を低減し、側面水平反力はめり込み側面をカットすることにより、

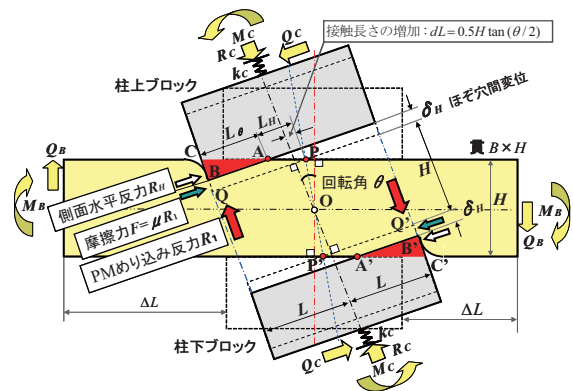


図6 通し貫モデルのメカニズム

摩擦係数 $\mu = 0.4 \sim 0.5$ 程度、水平くい込みは摩擦係数で $0.1 \sim 0.2$ 相当、全体で $\mu = 0.5 \sim 0.6$ に相当することを確認した¹¹⁾。そのEPMシミュレーション結果の一例を図7に示す。図中のEPM解析パラメーター γH （無次元特性値）、 η （ひずみの形状関数のパラメーター）、 C （塑性ひずみ倍率）、 μ （摩擦係数）の詳細は4章および文献⁴⁾を参照されたい。側面水平反力を含めて摩擦は全体の30%程度を占めることがわかる。

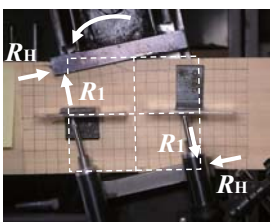


写真1 十字型通し貫仕口の回転めり込み

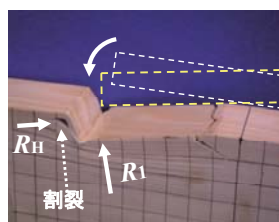


写真2 通し貫表面の回転めり込み状況

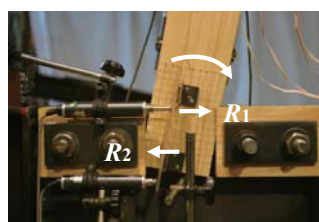


写真3 T字型仕口の貫の回転めり込み状況 ($\Delta L = 0$)

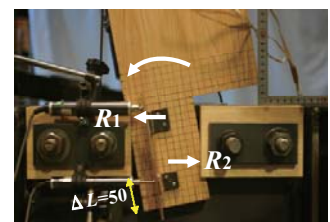


写真4 T字型仕口通し貫の回転めり込み状況 ($\Delta L = 50$)

図6のほぞ穴間変位 δ_H は元位置を基準に **O** より外向きに正とするが、通常の柱のほぞ穴の場合は、貫を挟む柱の上下のブロックはほとんど変形しないのでゼロとし、上下ブロックが有限な変形剛性 k_c で変形する場合は、接触長さ L_0 はPQからABとなりめり込み反力が減る。雇いほぞで左右の梁がつながった仕口のタイプでは柱と貫を入れかえて、このモデルで表現でき、図8の胴つきタイプの原型でもある。

通し貫でも5bのT字型タイプは、回転しつつ水平にくい込むよりエネルギーが少なく済むため、側面にくい込まず貫は回転しつつ抜け出し、復元力特性では降伏後の剛性が次第に低下する傾向がある。その状況の実験写真を写真3、4に示す。柱のほぞ穴に相当する固定したヒノキブロック2個に貫（ヒノキ）を挟みこんで立て、その貫上部を左右に水平載荷した状況である。写真3では端距離 $\Delta L = 0$ 、写真4では $\Delta L = 50\text{mm}$ の長ほぞの通し貫（貫高さよりほぞ高さが小さい小根ほぞで代用し、反時計回り回転の通し貫を想定した）の実験である。外力と反力のつりあいから、明らかに反力 $R_2 < R_1$ ゆえ、写真3で時計回り荷重の増加に伴い R_2 の摩擦が最初に切れて上に滑り、貫が抜け出す。荷重が戻り写真4のように反時計回りに荷重が進むと、抜け出した状態の左上の接触部 R_1 付近を中心に回転がおり、元位置より抜け出した状態が固定化される。繰返載荷でその抜け出しが累積すると復元力も低下する。瓶のコルク栓などをテコ作用で引き抜く操作はこのメカニズムを利用している。

しかし、仕口単独では貫が抜けだす場合でも架構に組み込まれた場合には、最終的には架構の中での貫が抜け出しうるかどうかの境界条件でめり込みが決まり、厳密には仕口単独での挙動と架構内の仕口の挙動とは異なる。

(2) 胴つきタイプ

8a は柱ブロックにほぞ穴はなくても、貫と柱が離れない拘束のもとでは、木口が柱面に回転しつつめり込むことで、成り立つ仕口で、単独では実在しないタイプであるが、写真5に示すように、一般にはほぞより幅の広い木口が胴つき（痕跡を矢印で示す）となる場合にこのメカニズムが働く。

8b の雇いほぞタイプは、柱を貫通する雇いほぞが柱両側のブロックをつなぐ機能を持つモデルで写真6に実例を示す。雇いほぞ自身も柱との接触状況によっては通し貫タイプのめり込みを受けて複合モデルとなることもあるが、この図では省いている。1スパンの実大に近い伝統軸組の丸柱の柱脚と雇いほぞ型仕口の足固めの右からの水平載荷時の変形状況を示すもので、雇いほぞが車知栓を介して組み込まれている。右側のブロックは白破線の四角のように柱にめり込んで水平となるべきところが、柱にめり込まず柱と一緒に回転している¹²⁾。通し貫タイプでは、柱のほぞ穴の上下間距離はめり込み前後でほぼ変化しないと考えられるのに対して、雇いほぞタイプの仕口では、雇いほぞ・込栓・車知栓などのめり込みとがたつきを含む左右の軸方向変形剛性と柱の横圧縮めり込み剛性に依存する弾塑性支持のめり込み条件となる。この場合はT字型であるが、十字型もある。写真6の雇いほぞは仕口内の上部（直交方向は下部）に配置され、左右の荷重方向により仕口の回転めり込み抵抗の差が大きいことと、雇いほぞを介するため通し貫に比べ回転めり込み抵抗が小さい傾向¹²⁾がある。

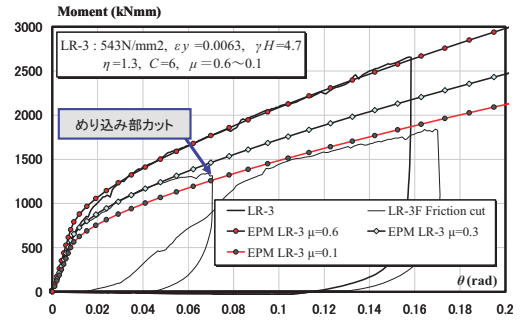


図7 ヒノキ十字型仕口の復元力特性

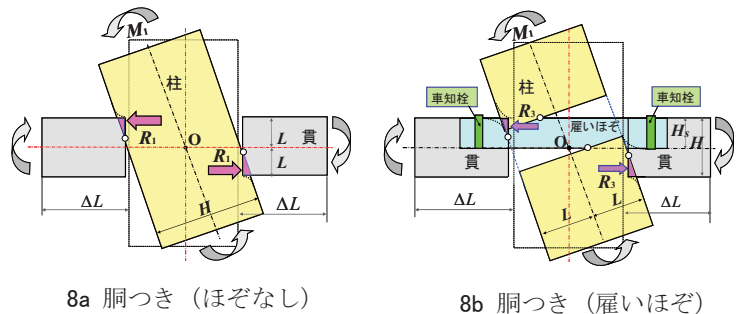


図8 胴つきタイプ



写真5 差鴨居による柱表面のめり込み痕跡

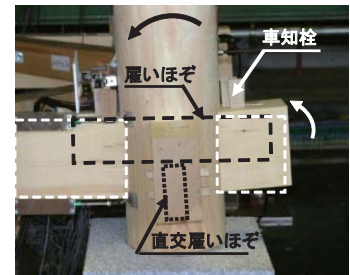
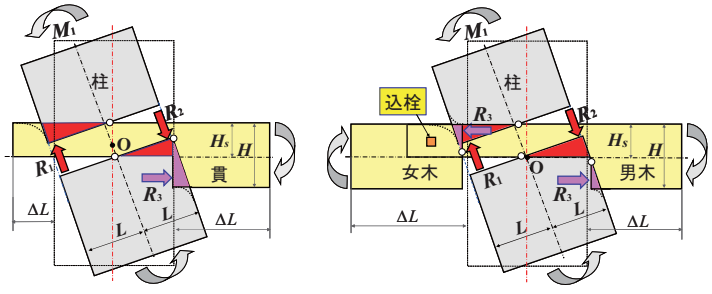


写真6 雇いほぞタイプの足固め仕口の変形状況

(3) 差鴨居タイプ

通し貫で同じレベルで直交するほぞのために、貫の高さの 1/2 の小根ほぞすると差鴨居タイプの原型 9a となり、写真 7 にその実験写真を示す。小根ほぞの差鴨居を時計回りに回転させた場合のめり込み状況を示す。柱に相当する右側のブロックに差鴨居の胴つき位置 R_3 点が支点のような働きをしてめり込みつつ回転し、込栓用の穴が 10 数 mm 上に移動している。めり込みがほぞ 2 箇所と柱の胴つき位置にも生じ、より複雑な挙動となるが、写真 4 の反時計周りへの载荷では胴つきが発生しない左右非対称の特性をもつ仕口である。

差鴨居の発展タイプとして、9b の男木(おぎ)と女木(めぎ)の組み合わせのタイプを写真 5 に示す。写真 7 の差鴨居と似た形状であるが、柱を挟んで男木の小根ほぞが女木と込栓または車知栓で接合され、通し貫と胴つきの双方のめり込み反力が発生し、雇いほぞ型と通し貫型との中間の複合形式と考えられ、復原力は各部の寸法と樹種・材料定数、部材の密着度などに依存する。このタイプは中柱の十字型にも対応可能な仕口で、横架材の継手を兼ねる機能もある。



9a 差鴨居 (小根ほぞ)

9b 差鴨居 (男木・女木)

図9 差鴨居タイプ

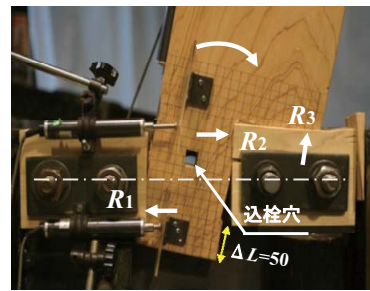


写真7 T字型仕口の差鴨居の回転めり込み状況 ($\Delta L=50$)

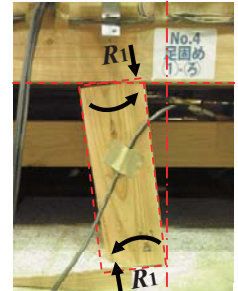


写真8 束の回転めり込みの変形状況

(4) 束タイプ

図 10 は、上下 2 本の水平な弦材と数本の鉛直の束が T 型仕口で構成されたはしご型フレームの一部を取り出した束タイプ 10 で、木口が弦材に胴つきとなることで、束が回転しつつ上下弦材を押し上げる挙動のみを示すために、ほぞは除いたモデルである。図を 90 度回転させて弦材を柱に、束を貫に入れ替えると胴つき 8a の外側のブロックのないタイプになる。弦材中心間距離 $UU' = H_T + H_B$ が変化しないように束のめり込み回転を起こすには十分大きな変形剛性 k_B と強制力 R_B による拘束が必要となる。一般にはそのような拘束は難しく、 k_B に応じて弦材間隔が変位 δ_H (外向きに正とする) だけ拡がり、接触長さ L_0 が PQ から AB に減り、反力 R_B も減少する。回転が極端に進むと束が弦材から外れることもありうる。

耐震補強として提案したはしご形フレーム¹³⁾は胴つき面がないほぞをもつ仕口で T 字型の通し貫タイプ 5b に属し、弦材を押し上げる原動力は側面水平反力であり、挙動は似ているがメカニズムは異なる。束のほぞ幅が薄く胴つき面を持つ束の場合のみ、通し貫タイプ 5b と組み合わせられた複合タイプとなる。

この実例として石場建て伝統木造建物の実大振動実験で図 10 の束の 1/4 に相当する ODBC の束が O 点で礎石にのり、回転しつつ足固めにめり込んで押し上げた状況を写真 8 に示す。束には足固めに差し込まれた平ほぞの破損した後の状況である。柱の傾斜復原力では上部の重量は変化しないが、このモデルではめり込み反力は上下で挟む弦材の剛性 k_B に依存し、はしご型フレームでは弦材の曲げたわみ剛性がそれに相当する。束を繊維方向を縦に配置した板壁に置き換えれば、板壁のめり込みにも応用できるが、繊維方向を横に配置した板壁や組物の斗(ます)は、横圧縮どうしのめり込みとなるので、モデルはやや異なる。

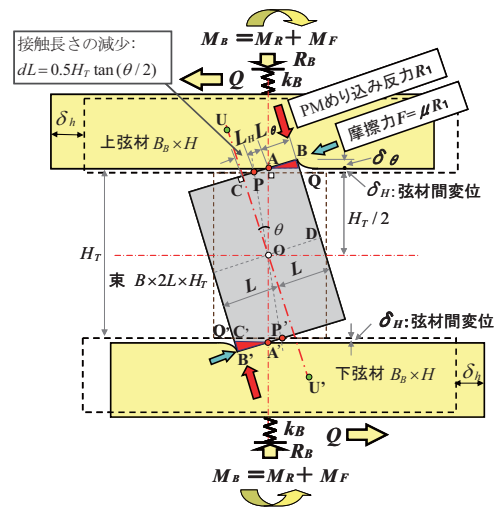


図10 束タイプ10とメカニズム

4. 回転めり込みの定式化

図11に示す力のつり合いにより、EPM解析による回転めり込みによる応力と回転角の弾性範囲での関係を、最も基本となる通し貫と束の場合について(1)~(10)式に示す。通し貫と束では L_0, dL および δ_H の取り方が異なる他は全く同じ式で扱える。これらの式の基本的な考え方といくつかの特徴を示す。ここでは弾性段階に限り、弾塑性段階は文献³⁾⁴⁾を参照されたい。

B : 貫(束)幅, H : 貫(弦材)高さ, $2L$: 柱(束)幅, ΔL : 端距離(無限大),

E : 貫(束)の横圧縮ヤング係数, γH : 無次元特性値, μ : 摩擦係数,

$k = E/H$: 圧縮剛性, $\rho = (L - L_0)/L_0$,

$\left\{ \begin{array}{l} L_0 = L + dL - L_H : L_H = \delta_H / \tan \theta, dL = 0.5H \tan(\theta/2) : \text{通し貫} \\ L_0 = L - dL - L_H : L_H = \delta_H / \sin \theta, dL = 0.5H \tan(\theta/2) : \text{束} \end{array} \right\}$ の関係を用いて,

$$\text{PMによるめり込み変位: } W = \begin{cases} \theta(x - L_H) & : L_H \leq x \leq L_0 + L_H \\ L_0 \theta e^{-\gamma(x - L_0 - L_H)} & : x \geq L_0 + L_H \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{鉛直力: } R_1 = \int_{L_H}^{\infty} kWB dx = \frac{EBL_0^2}{2H} \left(1 + \frac{2}{\gamma L_0}\right) \theta = \frac{EBL_0^2}{2H} \zeta_N \theta = K_{N0} \zeta_N \theta \quad (2)$$

$$\text{めり込みモーメント: } M_R = 2 \int_{L_H}^{\infty} kWBx dx = \frac{2EBL_0^3}{3H} \left[1 + 1.5\rho + \frac{3}{\gamma L_0} \left(1 + \rho + \frac{1}{\gamma L_0}\right)\right] \theta = \frac{2EBL_0^3}{3H} \zeta_R \theta = K_{R0} \zeta_R \theta \quad (3)$$

$$\text{摩擦のモーメント: } M_F = \mu R_1 (H + 2\delta_H) = \mu \frac{EBL_0^2}{2H} (H + 2\delta_H) \zeta_N \theta = \mu K_{F0} \zeta_F \left(1 + \frac{2\delta_H}{H}\right) \theta \quad (4)$$

$$K_{N0} = \frac{EBL_0^2}{2H} = EA_0 : \text{圧縮に関する基本剛性, } A_0 = \frac{BL_0^2}{2H} : \text{等価圧縮断面積} \quad (5)$$

$$\zeta_N = 1 + \frac{2}{\gamma L_0} : \text{圧縮に関する剛性増大率} \quad (6)$$

$$K_{R0} = \frac{2EBL_0^3}{3H} = EZ_0 : \text{回転めり込みによる基本剛性, } Z_0 = \frac{2BL_0^3}{3H} : \text{回転めり込み等価断面係数} \quad (7)$$

$$\zeta_R = 1 + 1.5\rho + \frac{3}{\gamma L_0} \left[1 + \rho + \frac{1}{\gamma L_0}\right] : \text{回転めり込みに関する剛性増大率} \quad (8)$$

$$K_{F0} = \frac{EBL_0^2}{2} = EF_0 : \text{回転めり込みの摩擦に関する基本剛性, } F_0 = \frac{BL_0^2}{2} : \text{等価摩擦断面係数} \quad (9)$$

$$\zeta_F = 1 + \frac{2}{\gamma L_0} : \text{回転めり込みの摩擦に関する剛性増大率} \quad (10)$$

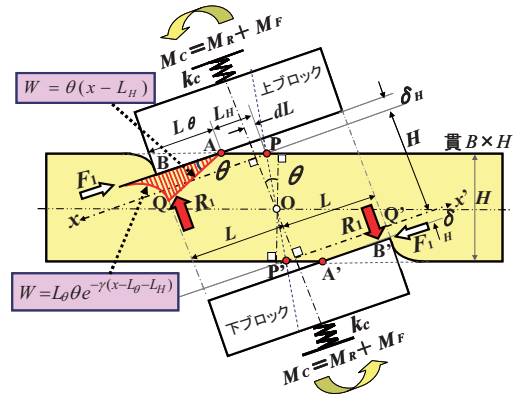


図11 通し貫モデルの力のつりあい

1) 基本剛性と剛性増大率: 回転めり込みによる垂直力 R_1 、めり込みのみのモーメント M_R 、摩擦によるモーメント M_F は、基本剛性 K と剛性増大率 ζ と回転角 θ の積で表す。ここで基本剛性は、縁端距離 $\Delta L = 0$ の全面圧縮の場合のめり込み剛性で、図6、10の赤い三角形のみに相当するめり込み剛性であり、周辺部が存在してめり込み剛性を増大させることによる剛性増大効果を剛性増大率 ζ で表現する。端距離 ΔL が有限な場合は、(2)~(4)の積分範囲が $L_0 + L_H$ から $L_0 + L_H + \Delta L$ までの有限範囲となり、剛性増大率がやや複雑になる。

2) 等価圧縮断面積・等価断面係数: 等価圧縮断面積 A_0 、等価断面係数 Z_0, F_0 は接触長さ L_0 に対応した回転めり込みによる垂直力、モーメントの算定の基礎となる断面積と断面係数であり、接触長さ L_0 を含む幾何学的寸法とヤング係数との積でめり込み鉛直力とめり込み・摩擦のモーメントの基本剛性となる。

(7)式から通し貫のめり込み剛性は柱幅の3乗に比例し、貫の高さに反比例することが分かる。したがって、太い柱で幅が広く高さの低い貫ほど剛性・耐力が大きいこととなる。この点で、一般に高さが大きいほど曲げ剛性・曲げ耐力が大きい梁との違いがある。小根ほぞは貫高さの半分以下となるが、めり込み性能としては高さを減らすことにより逆に剛性が增大する特徴がありメリットであり、決してデメリットではない。ただし、めり込みによる仕口のモーメントは梁端部の曲げモーメントでもあり、曲げモーメントで架構の耐力

が決まる場合があるので、適切なバランスで設計することが重要となる。

3) 見かけの横圧縮ヤング係数：図11の k_c は雇いほぞまたは男木・女木と車知栓・込栓などの継手を含む伸び剛性で、いくつかのブロックの複合した剛性であるため、強度・破壊を含めた評価法は現段階では確立できていない。参考に写真6の場合のヒノキの柱(294mmφ)、足固め(幅128mm高さ220mm)の雇いほぞ仕口の復原力特性¹²⁾は、柱めり込みと見なして見かけの横圧縮ヤング係数で評価すると80~90N/mm²、写真5のスギの差鴨居(幅120mm高さ300mm、柱150mm角)の男木・女木のタイプの場合で、ほぞのめり込みは考慮しないで図12のように80N/mm²程度となった。いずれも本来の柱の横圧縮ヤング係数より1/3~1/4程度となっている。

4) 摩擦の扱い：摩擦力の摩擦係数をくい込み挙動とメカニズムに応じて0.4~0.6を見込む。

5. まとめ

実際の伝統建築物に使用されている仕口は多様で、さまざまなタイプや詳細があり、メカニズムの違いもありうることから、本論では、仕口のめり込みの力学的メカニズムの観点から、仕口の主なタイプを取り上げ、メカニズムの違いと共通点を明らかにした上でそれらの特性を分析した。定式化に関しては点対称の弾性範囲に限り、降伏・弾塑性・破壊などの特性には触れる余裕はなかった。これらに含まれないタイプもありうるが、本論が複雑な仕口の詳細の解明に有効な手がかりになれば幸いである。

謝辞

本研究の一部は立命館大学グローバル COE『歴史都市を守る「文化遺産防災学」推進拠点』(代表：大窪健之) および科学研究費補助金基盤研究(S)(課題番号19106010、研究代表者：鈴木祥之)による。

参考文献

- 1) 棚橋秀光・清水秀丸・鈴木祥之：パステルナーク・モデルに基づく直交異方性木材の部分圧縮による弾性表面変位，日本建築学会構造系論文集，No.609，pp.129-136，2006.11.
- 2) 棚橋秀光・清水秀丸・堀江秀夫・楊 萍・鈴木祥之：パステルナーク・モデルに基づく有限長直交異方性木材の弾性めり込み変位，日本建築学会構造系論文集，Vol.73，No.625，pp.417-424，2008.3.
- 3) Tanahashi, H., Okamura, M. and Suzuki, Y.: Simple formulation of elasto-plastic embedment behavior of orthotropic wood considering densification, *Proc. 10th World Conference on Timber Engineering*, Miyazaki, Japan, 2008.6.
- 4) 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，Vol.76，No.662，pp.811-819，2011.4.
- 5) 森林総合研究所監修：木材工業ハンドブック，2004.3.
- 6) 棚橋秀光・鈴木祥之：木材のめり込み剛性・強度の年輪傾角依存性，日本木材学会大会要旨集，2007.8.
- 7) 廣川貴則・棚橋秀光・鈴木祥之：伝統構法仕口の横圧縮特性(その1 横圧縮ヤング係数と降伏応力度)，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，構造III，pp.7-8，2009.8.
- 8) 棚橋秀光・廣川貴則・鈴木祥之：伝統構法仕口の横圧縮特性(その2 降伏メカニズムと形状関数)，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，構造III，pp.9-10，2009.8.
- 9) Boussinesq, J.: *Application des Potentiels a l'Etude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastique*, Paris, 1885.
- 10) 深谷基弘・鈴木紘子：図解・木造建築伝統技法事典，彰国社，2001.
- 11) 棚橋秀光・岡村雅克：弾塑性パステルナーク・モデルによる貫の回転めり込みの定式化の試み，日本地震工学会大会2007 梗概集，pp.282-283，2007.11.
- 12) 棚橋秀光・須田達・鈴木祥之：スケールの異なる伝統木造軸組の静的・動的実験シミュレーション，第13回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.2132-2139，2010.11.
- 13) 棚橋秀光・鈴木祥之：はしご型フレームによる伝統木造建造物の耐震補強，歴史都市防災論文集 Vol.2，pp.171-178，2008.10.

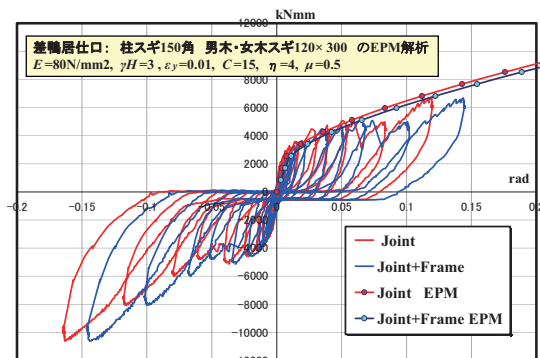


図12 差鴨居T字型仕口の復元力特性