

伝統的木造建築の耐震性に関する調査研究（2）

坂本 功

ー建長寺仏殿と法堂の保有耐力についてー

キーワード：1) 伝統建築, 2) 木造, 3) 耐震性, 4) 建長寺, 5) 関東地震, 6) 仏殿, 7) 法堂, 8) 貫構造, 9) 保有耐力, 10) 柱貫接合

1. はじめに

1.1 序

現在、日本における木造建築の耐震設計では、通常、部材同士の接合部は回転に対して抵抗力を持たないピン接合と考え、水平力は耐力壁が主に負担するものとされている。

このように耐力壁によって建築を剛強化し水平力に対抗しようとする考え方が一般に普及したのは関東大震災以降のことである。しかし、このような考え方が定着する以前に建てられた建築が、今なお数多く残っている。これら伝統的木造建築の構造安全性は、経験的な理解にとどまったままである。

また、兵庫県南部地震を契機に、伝統的木造建築の耐震補強が大きな問題として浮上している今日、伝統的木造建築の力学的な挙動を正確に把握する必要性は益々高まっている。しかし、伝統的な木造建築の耐力・耐震性を評価するための、基礎的な実験や研究は少ない。

本論は、柱貫接合部の実験を実施してその強度特性を把握する。そして、その結果から、建長寺の2つの建物の保有水平耐力を推定することを目的としている。この事例解析を通じて、伝統的木造建築の水平耐力の評価法を提案する。

1.2 背景 ー伝統的木造建築の耐震要素ー

現在のような、筋かいや面材を用いた耐震壁によって建築を剛強化し水平力に対抗しようとする考え方は、それほど古くからあったわけではない。現在の建築基準法の考え方が普及する以前の日本の木造建築が、どのようにして地震力や風圧力などの水平力に対抗していたのかを概観する。

6世紀後半、仏教の伝来に伴って大陸から新しい建築様式がもたらされることにより、日本の建築も大きく変化を遂げた。例えば、礎石・組物・軒反り・瓦屋根・彩色などがこの時から用いられるようになった。

古代における木造建築（主に社寺を対象とすると）の水平抵抗要素の第1は柱である。柱の転倒復元力は、太くて短いほど大きくなることは、実験的に研究されている^{×1)}。古代建築の柱は太く、等間隔に配置されていた。

これらは、重い瓦屋根によって載荷され、貫も頭貫だけであったため断面欠損が小さかった。

その他の水平抵抗要素には、長押及び大曳・根太と柱との曲げ抵抗、釘のせん断力が挙げられる。この当時の長押は、近世のそれのような華奢な三角形断面の化粧長押とは違い、断面が矩形に近いものを柱の両側から挟み付け、釘止めしていた。また、大曳や根太も同様に柱の両側から挟みつけて釘打ちとしていた^{×2)}。また、柱間には土塗り壁が設けられることが多く、古代の土塗り壁は後世のものよりも厚く塗られていたことが指摘されている^{×3)}。

横架材として頭貫も用いられていたが、これは柱の上から落とし込む形のものであり、積み上げ材の一種といえる。加えて、当時の頭貫は後の時代のそれのごとく、引き抜けないように仕口を設けて隅で組んだり、柱に目違いを立ててずれを防止する、といった手法はとられていない。その代わりに、頭貫を通し柱に大釘打ちとしており、釘のせん断力、仕口引掛り部分の曲げ抵抗、接触面の摩擦などが若干は水平力に抵抗していたと考えられる^{×2)}。

このように、古代建築は、太い柱の安定復元力、柱と横架材の曲げ抵抗力、及び接合部の釘のせん断力、そして厚い土塗り壁の剛性を主要な水平力抵抗要素としていた。

鎌倉時代になると大陸から大仏様と禪宗様が伝わり、日本の社寺建築は、特に構造的に非常に大きく変化することになった。

大仏様では、柱が屋根裏まで通り、横架材は虹梁のほか、全て貫と通し肘木、差肘木で処理され、仕口は楔締めとされていた。禪宗様では従来の和様と比べて、柱は細くなり、横架材は腰貫・内法貫・頭貫が用いられ、それに飛貫が加わることもあった。壁は板壁を用い、いずれの様式も長押を用いず、軸部を固める材料は貫に頼っていた。貫を用いた構造は、後に従来の和様の中にも採り入れられるようになり、足固貫や内法貫で軸部を固めるようになった。

このように、柱と貫によって構成された骨組全体で水平力を負担できるようになったため、壁は薄い板壁や土壁、または開口部を施すことができるようになり、長押は次第にその役目を失い化粧材と化した。そして、細い

木割が実現できるようになった。細い木割は、古代において木材を濫伐したために大材が得難くなったこの時代において、経済的にも有利であった。

貫は、通常両端を小根ほぞとし、柱の内部で継手を設けるものが多い。これは、施工の点から、また、経済的にも合理的な手法であったといえる。貫継手は、ほとんど略鎌系の継手が用いられている。その最も早い例は、浄土寺浄土堂の足固め貫であるといわれ、水平垂直の接触面で構成されているが、時代が下るにつれて斜めの要素が取り入れられるようになる(図-1)。この斜めの要素の登場は、15世紀頃であると指摘されている⁴⁾。

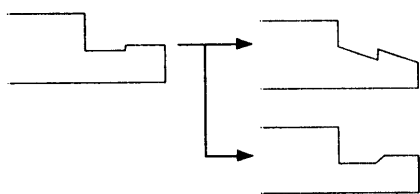


図-1 貫継手の変容

室町時代以降になると、縦引き鋸と大鉋の開発により薄い部材が作られるようになる。これによって、小屋組にあった筋かいは貫で置き換えられるようになった。軸組に設ける筋かいは、承久元年(1219)の法隆寺舍利殿や、治承3年(1179)の東寺文書などに記録があるが、それ以外ではあまり広く用いられることはなかった。唯一、多く用いられたのは、目に触れない小屋組の中であった。しかしそれも、木工具の開発により、小屋貫に置き換えられるようになった⁵⁾。

以上より、中世の社寺建築においては、それ以前の建築の太い柱や厚い土塗り壁に代わって、柱に穴をあけて通した各種の貫(足固め貫、腰貫、内法貫、飛貫など)や大曳と柱の曲げ抵抗が水平力を負担する主たる要素になったと考えられる。

近世に入ると非常に様々な用途、様式を持つ建築が造られるようになった。また、この時代の1つの特色として、中世に発達した継手仕口の精巧化、部材寸法の均質化(むらが少ない)などが挙げられる。木割書の普及、木工具の改良などが遠因であろう。しかし、ここで1つ注目すべき点は、地震・風圧等の水平力に抗する要素としては太い柱・壁・柱と貫の接合部、という基本は変わっていないということである。横架材は、依然として柱に穴をあけて通す貫が主流であり、構造的に大きな変革は見られない。

明治時代に入り、外国人技術者によって、日本の木構造の耐震上の欠点が指摘された。例えば、斜材がない・土台がない・屋根重量の過大・和風小屋組の非合理性・障子の壁、などである。

日本で本格的に耐震構造の研究が始まったのは、濃尾地震の後であった。佐野利器による研究『家屋耐震構造論』以降、次第に木造建築の耐力評価が行われるようになった。

日本の木造建築の姿を大きく変えるきっかけになったのは、関東大震災である。震災被害調査の結果、筋かいの入った壁の耐震性の高いことが実証された。また、震災復興に助力した大工が地方に帰郷し新しい構法を伝えたため、一般住宅にコンクリート布基礎などが普及した。こうして定着した木造建築がいわゆる在来構法であると言える。そして、在来構法の普及に伴って、それ以前の建築は、伝統的建築と呼ばれるようになったと考えられる。

1.3 研究目的

上記のような背景を踏まえ、まず柱貫接合部の水平加力実験を行い、既往の研究結果との比較検討を行う。また、実例として、『伝統的木造建築の耐震性に関する調査研究 - 関東地震による鎌倉市内の被害調査』⁶⁾において、関東地震の際、立地条件、構造形式がほぼ同様であるのにも拘わらず、全く異なった被害を示したことが指摘されている建長寺の仏殿と法堂と取り上げる。本実験で得られた柱貫接合部の回転剛性を用いて、これら2つの建物の構造耐力の推定を行う。

以上のように、本論では伝統的木造建築の主要な水平力抵抗要素である、柱貫接合部、特に柱内部に継手を持つ貫の理論式を求め、更に、得られた結果を用いて、実際の伝統的木造建築の構造解析を行うことを目的としている。

2. 柱貫接合について

2.1 既往の研究

伝統構法の接合部、特に柱-貫接合についての既往の研究としては、昭和17年に坂静雄による社寺建築の柱貫接合の曲げについての実験的研究が最も早いものと思われる⁷⁾。その後、昭和61年には(財)日本住宅・木材技術センター(以後住木と記す)が、差鴨居構法と併せて木造軸組構法の構造設計方法開発を目的に実験的研究を行っている⁸⁾。最近では、稲山正弘によって、木材のめり込みや摩擦力を考慮した柱貫接合部の理論式が導かれている⁹⁾。

上記3つの研究は仮定の内容が互いに異なっているため、抽出された柱貫接合の回転剛性の理論式も相異なっている。まず、これらの研究の概要を比較する。

2.2 仮定の相違

(1) めり込み形状

図-2に示すように住木及び稲山は加圧面下のめり込

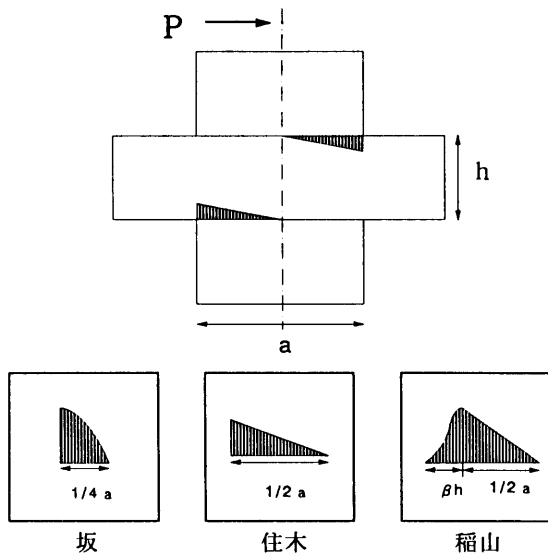


図-2 むり込み形状比較

み形状（変形）は中立軸からの距離に比例すると仮定しているのに対して、坂はベアリング（*筆者注：応力）の分布は放物線形、また、応力と変形は比例関係にあると仮定しているため、むり込み形状は放物線形になる。更に応力の合力は柱表面から柱太さの1/10の点にあると仮定しているため、むり込みは柱表面から柱太さの1/4の位置まで及ぶことになる。また、坂・住木が加圧面下の变形のみを対象としているのに対して、稲山は加圧面外側の余長部の变形も考慮し、その形状を正規分布と仮定し、凹み部分の長さは貫丈 h に比例するとしている。

(2) 応力とむり込みの関係

坂・住木は応力とむり込みを比例関係とし比例定数（むり込みばね定数 k とする）を実験から求めた。稲山は応力とむり込みの関係は完全弾塑性としているが、他の2つと異なって次のような仮定を設けた。「むり込みばね定数は、貫丈に反比例する」、「余長部の凹みによる応力の総和は加圧材端部に集中荷重として作用する」、「加圧鋼材は木材の表面を滑りながらむり込むため、動きと逆方向に向かって摩擦力が生じるが、その大きさはクーロンの法則通り鉛直力の総和に比例する」。

(3) 回転剛性

更に、回転剛性について、稲山は接合部のむり込みを対象としているのに対し、住木では貫の曲げ変形も回転剛性に取り入れている。また、坂の式では、接合部のむり込み変形、貫の曲げ変形に加えて、変形が加わった接合部を片持梁とし、接合部内のたわみ角とせん断たわみ角も考慮している。

2.3 理論式の比較

本論では、接合部の変形に着目しているため、坂、住木の理論式から、貫の曲げ変形に関する項を取り除いたものを比較する。記号を統一した回転剛性 (K) の式を

以下に記す。

坂式

$$K = \frac{1}{\frac{\beta(15L+12a)}{La^3w} + \frac{4a}{15EI} + \frac{15}{8Gawh}}$$

住木式

$$K = \frac{ka^3w}{12}$$

稲山式

$$K = \frac{E_L a^2 w}{4} \left\{ \left(\frac{5}{4} + \frac{a}{3h} \right) + \frac{\mu}{2} \left(1 + \frac{5h}{2a} \right) \right\}$$

K ：回転剛性

L ：貫長さ

a ：柱幅

w ：貫幅

h ：貫丈

E ：ヤング率

k ：むり込みばね定数

β ：1/むり込みばね定数

I ：断面二次モーメント

G ：0.385 E

μ ：動摩擦係数

以上のように、柱貫接合部の回転剛性の理論式は、互いに異なっていることが分かる。これら3つの理論式を、貫丈、柱幅、等をパラメーターとして変化させたときの値と実験結果を示したグラフを後掲する(図20~24参照)。

3. 実験

3.1 概要

柱貫接合部を持つ試験体にモーメントを加え、接合部の変形角を測定した。貫丈、柱幅をパラメーターにしたもの以外に、4種類の異なった継手を持つ貫、柱貫接合部にテフロンシートを挟み摩擦力を軽減したもの、を加えた計9種類の柱・貫接合について正負繰返し水平加力試験を行った。

3.2 試験体

今回採用した継手は、最も基本的な継手である、突付け(C1)、と略鎌系の継手のうち、材軸方向が水平なC2、C3、C4の3種類である(図-3)。

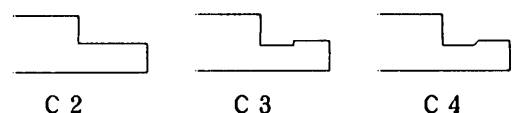


図-3 試験体略鎌継手

寸法は、表-1に示す建長寺法堂・仏殿で用いられている貫寸法を参考に、それらの1/2の大きさとした。材料はべいまつとし、試験体数は、9種類(図-5)3体ずつ計27体である。

	柱幅	貫幅	貫丈
仏殿	350	90	240
法堂	450	150	270

表-1 建長寺仏殿・法堂で最も多く用いられていた貫寸法。(単位mm)

3.3 測定方法

図-6のように、試験体(貫)を鋼材(柱に相当)の間に通し、鋼材の頂部に正負繰返し水平力を加えた。接合部が一定の回転角を示したときの荷重、試験体の曲げ変形、接合部のめり込み等を変位計で測定した。また、変形の分布及び形状を試験体の側面に塗布したメッシュ

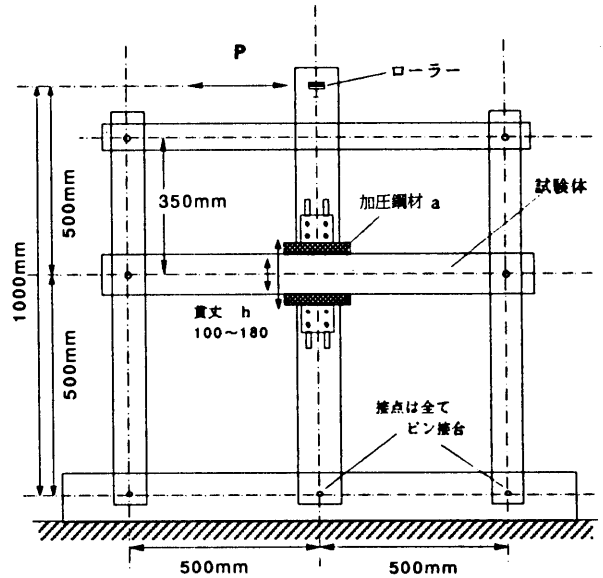
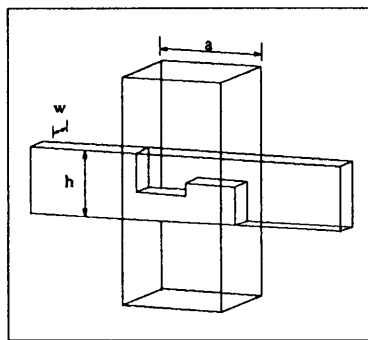


図-6 試験体治具



a : 柱幅 (加圧鋼材長さ)
w : 貫幅
h : 貫丈
単位 (cm)

図-4 各部寸法図

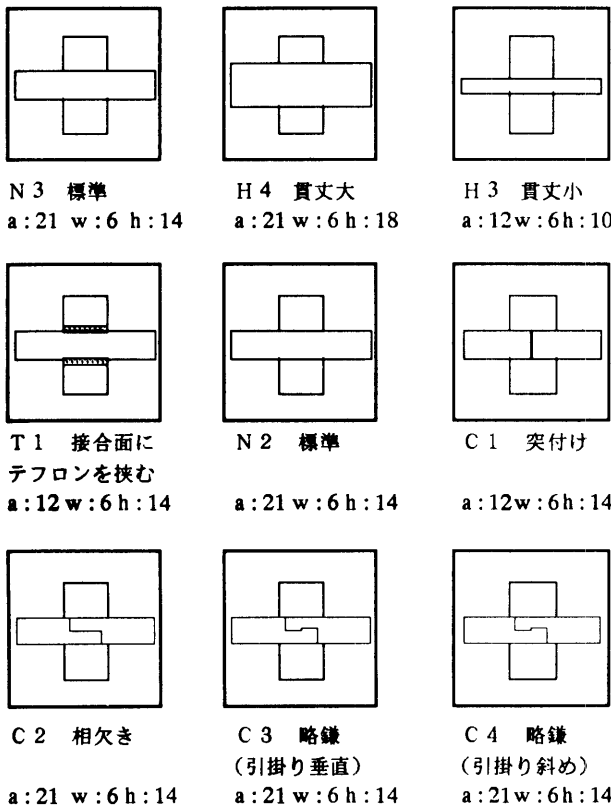


図-5 試験体種類

により観測した。

なお、繊維方向のめり込みは無視できるものとし、柱材は鋼材で代用した。また、試験体(貫)のめり込み形状を観察するために、柱に穴をあけて貫材を通すのではなく、試験体を上下2枚の鋼材で挟むようにした。

加力サイクルは、軸組全体の水平変位から換算した全体回転角で制御し、以下のとおりである。

0 → ±1/480 → ±1/340 → ±1/240 → ±1/170 → ±1/120 → ±1/85 → ±1/60 → ±1/42 → ±1/30 → ±1/21 → ±1/15 (rad.)

3.4 実験結果

回転角は接合部の回転角と全体の回転角2種類測定している(図-7参照)。

接合部回転角 (θ_j): 加圧鋼材端部直下のめり込み量から算出

全体の回転角 (θ_T): 貫両端の水平変位から算出

各試験体のモーメント-接合部回転角 ($M-\theta_j$) 曲線を図8~15に示す。

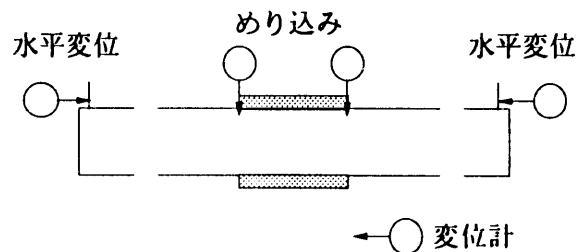


図-7 変位計設置位置図

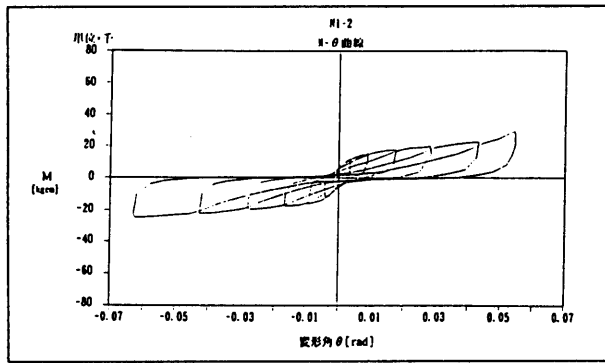


図-8 N1 標準

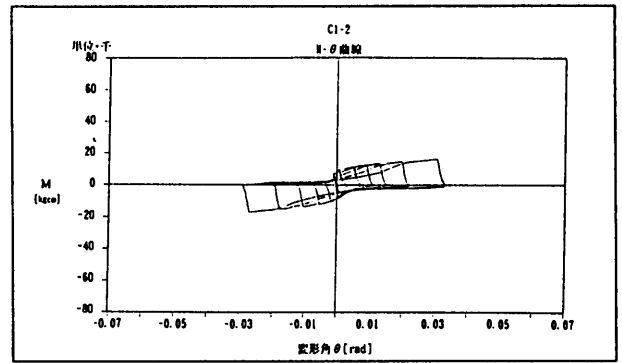


図-12 C1 突付け

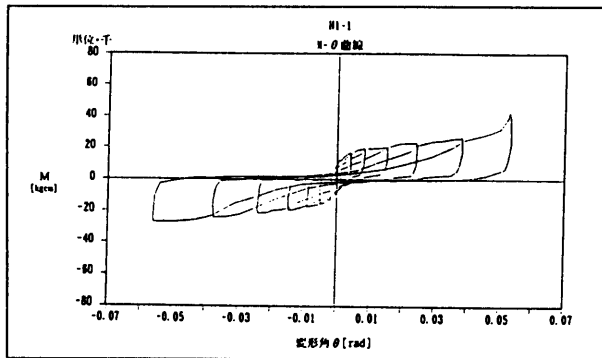


図-9 H1 貫丈大

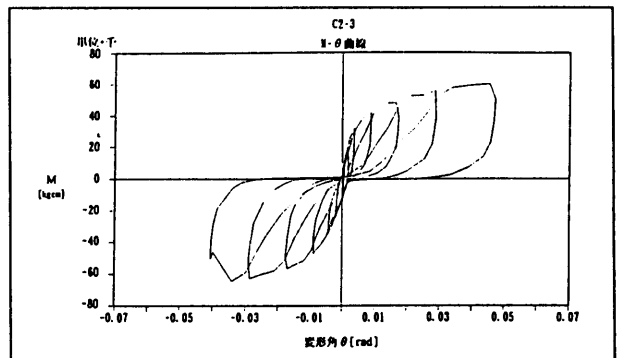


図-13 C2 略鎌 (相欠き)

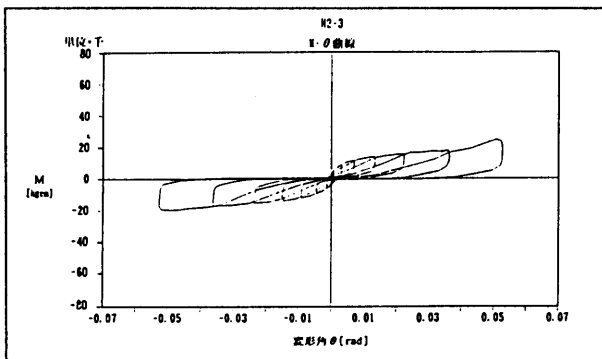


図-10 H2 貫丈小

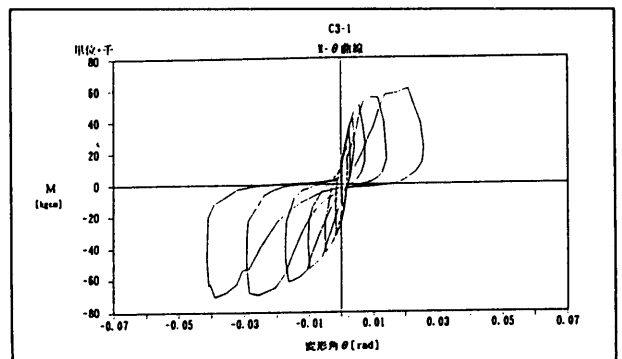


図-14 C3 略鎌 (引掛り垂直)

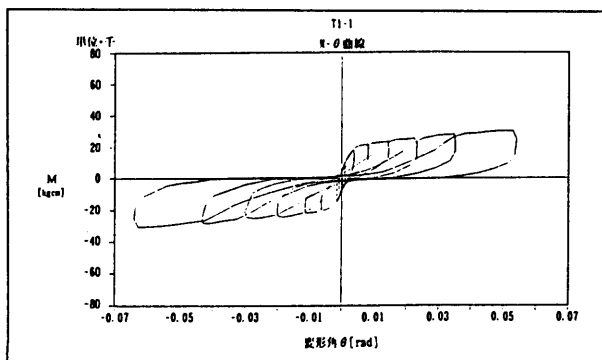


図-11 T1 テフロン付 (摩擦係数小)

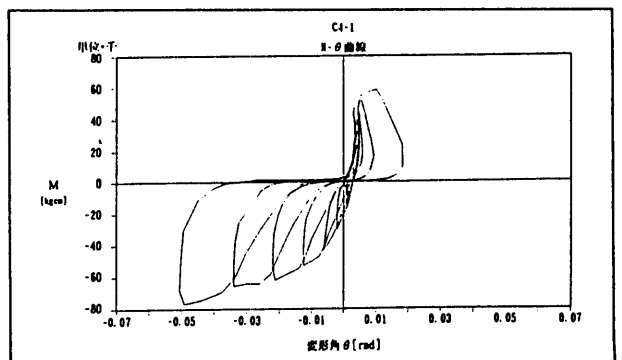


図-15 C4 略鎌 (引掛り斜め)

3.5 実験結果考察

(1) むり込み形状

試験体側面のメッシュの目視から、加圧鋼材(柱相当)の端からやや内側に入った点に合力が作用していることが観測された。

(2) 継手の影響

一般的には、C1型以外は継手がない場合と比較して接合部の回転剛性の低下は認められなかった。以下に、各継手形状の挙動の特色を述べる。

① C1型(突付け)

他の継手と比較しても、C1型(突付け)は極端に剛性が低い。モーメントを加えると、突付けた両側の貫が離れて別々に挙動していることが分かった。従って、差込み長さが半分の貫が2つあるのと同等と考えられる。むり込みによる回転剛性は、貫の差込み長さ(通し貫の場合は柱幅)の3乗に比例する。また、骨組全体の変形は、前述のむり込みによる変形角の増大に加えて、継手の両側が接合部内で不連続になっているため、更に変形量は大きくなる。

C1型の継手は、図-16のような差込み長さ半分の貫(大入れ)のモデルで置換することができる。

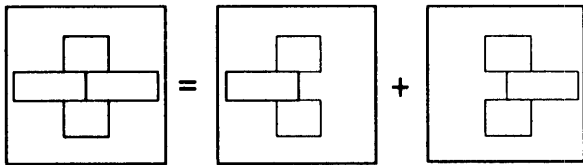


図-16 突付け略継手のモデル化

② C2型(相欠き), C3, C4型(引掛りのある継手)

これらの継手は、継手のない場合と比較して、接合部のむり込みから換算した回転剛性(K_j)の平均値は、弾性範囲においてはほとんど変わらなかった。すなわち、水平方向の継手は、塑性域においてはこの限りではないが、弾性範囲においては一体として挙動すると考えられる。

また、回転剛性(K_j)は、継手があると、モーメントをかける方向によって剛性が全く異なった値を示している。すなわち、引きの場合は押しの半分程度の剛性であった。引きの場合、図-17のように合力は継手両方とも端にかかることになるが、縁端距離が短いほど変形量は大きくなる。

しかしここで、貫の水平変位から換算した回転剛性(K_T)は、継手があると低くなる。特に、押しの方が低い。これは、継手の垂直方向の亀裂が材の上下で開くことによって全体の変形量が大きくなると思われる。

継手の引っ掛り部分の効果は、弾性域においてはあまり影響が認められなかった。しかし、C2型は変形が進むに

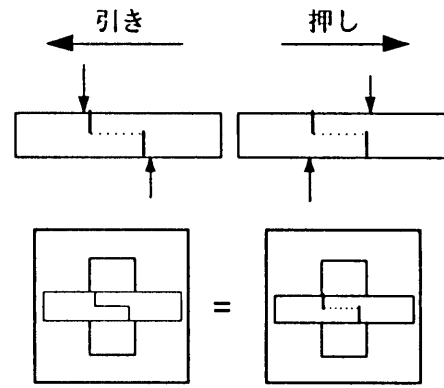


図-17 略継手のモデル化

つれて材軸方向の接触面のずれが観測されたことから、それを止めるには有効であったと思われる。

以上より、継手のある貫は、弾性範囲では垂直方向に亀裂が入った形状のモデルで捉えることができる。

(3) 貫丈の影響

全体の回転剛性(K_T)は、貫丈が大きいほど増大する。しかし、実験値からは、接合部のむり込みによる回転剛性(K_j)は貫丈に左右されないという結果が得られた。

但し、今回の実験では、対象とした貫丈の間隔が狭かったことや、試験体数も少ないため、一層の実験と検討が必要である。

(4) 摩擦の影響

加圧鋼材と、貫の接触面における摩擦の影響については稲山が言及している。実験では、加圧鋼材と貫材の間にテフロンシートを挟み、摩擦力を小さくしてその影響を観察した。接触面の摩擦係数が大きければ回転と反対方向に大きな摩擦力が生じ変形量は小さくなると考えられた。しかし、今回の実験では、むしろテフロンシートがある方が回転剛性が大きくなる、という結果になった。また、全体の回転剛性(K_T)でも変化は認められない。

(5) 弾性範囲

実験における弾性域は、押し引きの平均をとると、概ね $1/240$ rad以内である。貫の形状による影響はあまり認められない。但し、継手のある場合は、引きの弾性域が長い。これは、特に対称形ではない、C1型以外の継手についていえることである。

(6) まとめ

総じて接合部の回転剛性の実験結果は稲山の理論式と一致している。

しかし、摩擦力の影響に関しては異なる結果となった。稲山の理論式では、摩擦係数が大きいほど回転剛性は高くなるはずであるが、実験ではあまり影響が認められず、むしろ逆の傾向が認められた。また、坂の理論によると、貫の継手がある場合は耐力は甚だしく低下するものとされたが、実験では、継手による回転剛性の低下はさほど

認められなかった。

4. 柱貫接合部回転剛性の理論式

4.1 理論式の構築

実験結果と比較的よく一致した稲山の理論式²⁹⁾を参考に、継手を持つ貫の理論式を新しく構築する。なお、弾性域を対象とする。また、 K は回転剛性を示し、単位は (tm/rad) である。

K ：回転剛性

L ：貫長さ

a ：柱幅

w ：貫幅

h ：貫丈

E ：ヤング率

k ：めり込みばね定数

β ：1/めり込みばね定数

I ：断面二次モーメント

G ：0.385 E

μ ：動摩擦係数

① 通し貫

通し貫の回転剛性は稲山の理論式と同様である。

$$K_1 = \frac{a^2 w}{8} E_{\perp} \left\{ \frac{a}{h} \left(\frac{5h}{2a} + \frac{2}{3} \right) + \mu \left(\frac{5h}{2a} + 1 \right) \right\}$$

② 突付け型

突付けは、実験結果から、差込み長さ半分の貫のモデルで置換することができる。図-18のように、A、Bに力が加わった時の回転剛性の単純和とすると、

$$K_2 = \frac{a^2 w}{16} E_{\perp} \left\{ \frac{a}{h} \left(\frac{5h}{4a} + \frac{1}{2} \right) + \mu \left(\frac{5h}{a} + 2 \right) \right\}$$

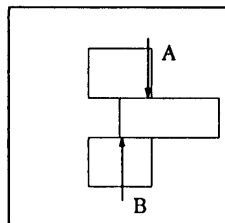


図-18 突付け型

③ 略鎌型

略鎌系の継手の場合モーメントが加わる方向によって変形量が大きく異なることが分かった。そこで、モーメントの加わる方向によって図-19のように2種類に分ける。

α 型 (亀裂に力が加わらない方向)

これは通し貫の場合と同じとする

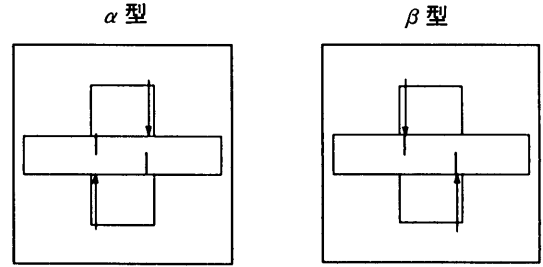


図-19 略鎌型

$$K_{3\alpha} = \frac{a^2 w}{8} E_{\perp} \left\{ \frac{a}{h} \left(\frac{5h}{2a} + \frac{2}{3} \right) + \mu \left(\frac{5h}{2a} + 1 \right) \right\}$$

β 型 (亀裂に力が加わる方向)

実験結果より、材軸方向の継手の接触面は一体として挙動すると考えられるが、材軸に垂直方向の接触面は無視できない。そこで、前述のように材軸と垂直方向に亀裂が入ったモデルで捉えることができる。亀裂による剛性の低下を定数 t で表せると仮定する。ここで、 t は略鎌系の継手では、継手形状によらないことが実験値から認められた。そこで、 t は略鎌系継手の回転剛性の平均 (亀裂に付加がかかるもの) と、通し貫の回転剛性の実験値の比から求めると、

$$t = 0.650$$

$$K_{3\beta} = t \frac{a^2 w}{8} E_{\perp} \left\{ \frac{a}{h} \left(\frac{5h}{2a} + \frac{2}{3} \right) + \mu \left(\frac{5h}{2a} + 1 \right) \right\}$$

4.2 理論式と実験結果の比較

次に、提案した理論式と、実験で得られた結果を比較する。また、参考のために前述した、柱貫接合部に関する既往の研究の理論式 (坂, 住木, 稲山) もグラフ化している (図20~24)。

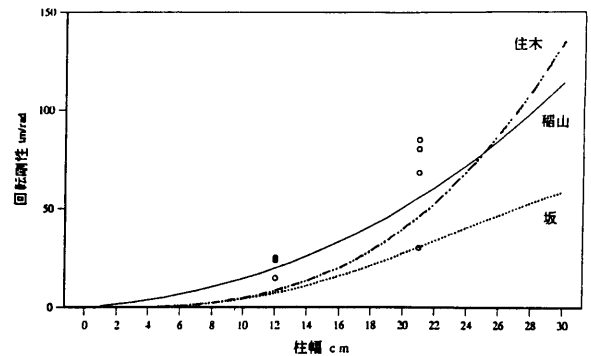


図-20 柱幅比較

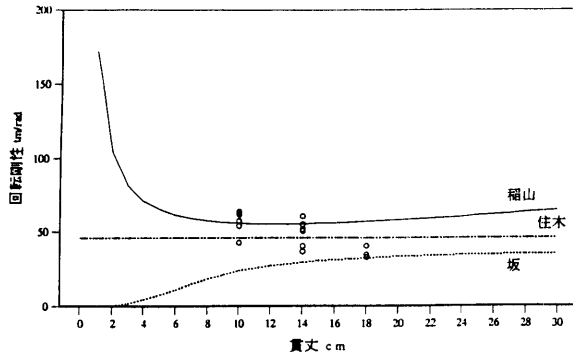


図-21 貫丈比較

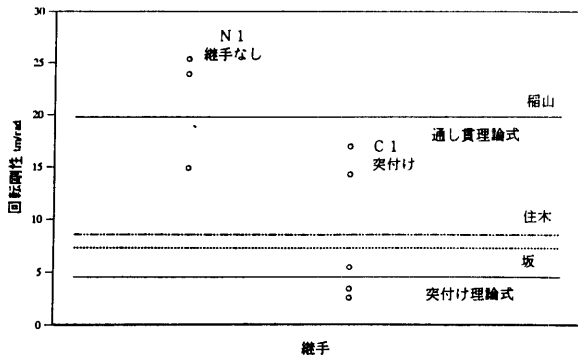


図-22 突付け継手

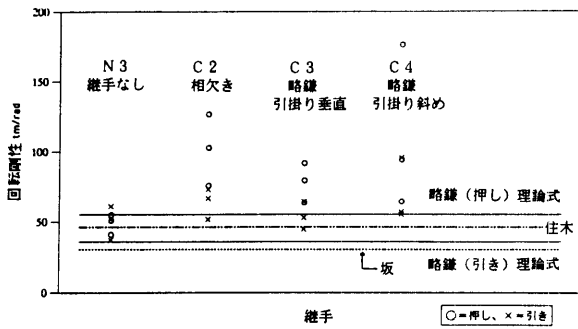


図-23 略鎌継手

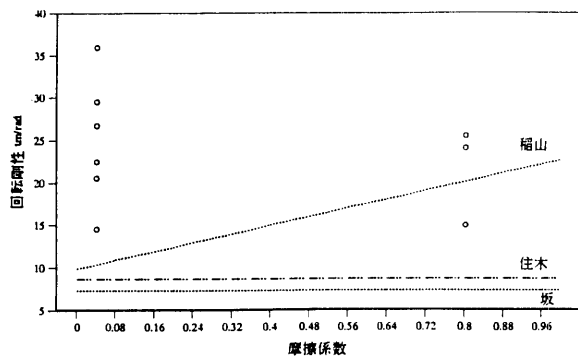


図-24 摩擦比較

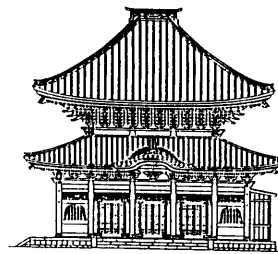
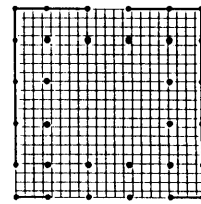
5. 建長寺の構造解析

5.1 背景

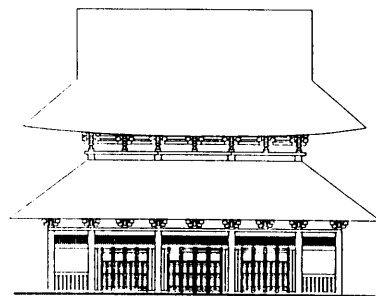
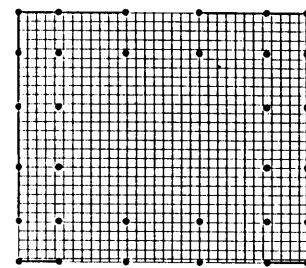
『伝統的木造建築の耐震性に関する調査研究 - 関東地震による鎌倉市内の被害調査 -』によると⁶⁾、建長寺の仏殿と法堂は立地条件・形式ともに類似しているのにも拘わらず、仏殿は倒壊し、法堂は被害軽微にとどまったことが指摘されている。そこで本研究で得られた柱貫接合部の回転剛性を用いて、建長寺の仏殿及び法堂の保有水平耐力を求める。

5.2 仏殿・法堂略歴

仏殿：現在の建長寺仏殿は、寛永5年（1628）に建てられた芝崇源院御霊屋を正保4年（1647）に建長寺法堂



仏殿



法堂

図-25 建長寺仏殿・法堂

(現仏殿)として移建したものである。しかし、この時の位置はほぼ現法堂の位置であった。文化8年(1811)に現法堂を建立するため、現仏殿を現在の位置に引家した。そして、関東地震で倒壊し、その後修理され現在に至っている^(注)。

法堂：現在の建長寺法堂は文化8年に移建した仏殿の場所に、文化11年(1814)に上棟、文政8年(1825)に完成した。

5.3 荷重

荷重計算は、実測調査によって作成した図面を基に各部材の材積を求め、更に比重をかけることにより算出する。但し、材質は全て檜材とし、その気乾比重を0.69とした。また、建物を次のような部分に分けて計算を行った。

5.4 軸方向力

鉛直荷重を以下のように仮定し、各柱の軸方向力を求めた。

- ① 軒廻り、葺材の荷重は軒面に均一に加わるものとする。
- ② その他の材の荷重は、斗^{ときょう}拱の出より内側の軒面に均一に加わるものとする。
- ③ 裳^{もこし}階は、虹梁より上の部分(裳階屋根、裳階軒廻り)の荷重が、裳階の軒面に均一に加わるものとする。
- ④ 裳階その他の荷重は、その半分が裳階の柱の柱頭に加わるものとする。
- ⑤ 柱の自重は、その1/2が柱頭に加わるものとする。

5.5 柱の復元力

柱の復元力については、坂静雄^(文1)、河合直人^(文10)らの研究がある。これらの研究を参考に、円柱の水平移動と復元力の関係を以下のように考える。

$$Y = H_0 \left(1 - \delta/b + 0.99625e^{-7.5675\delta/b} - \frac{1.9963}{25\delta/b + 1} \right)$$

y : 復元力

δ : 水平変位

b : 柱の径

H_0 : 剛体復元力 = $P \cdot b/h$

P : 鉛直荷重

h : 柱の長さ

最大復元力は H_0 の80%で、これによる水平移動は剛体幅の0.088倍である。

5.6 貫の回転剛性

今回の実験の結果に基づく推定式を代入する。継手の

方向は実測調査の結果から推定した。但し、継手形状は略鎌と仮定する。

5.7 仏殿・法堂の水平耐力

以上のような方法で、仏殿と法堂の水平耐力を算定した。ただし、建物全体の保有水平耐力は柱の復元力と貫の水平耐力の単純和とした(表-2, 図-26)。

この結果からは、むしろ倒壊した仏殿の方が強いという結果になった。

表-2 変形角1/120rad.時の建長寺仏殿・法堂の保有水平耐力

	重量 (t)	柱+貫 (t)	P/W
仏殿 梁間	120	14.72	0.12
仏殿 桁行		12.85	0.11
法堂 梁間	300	27.79	0.09
法堂 桁行		23.44	0.08

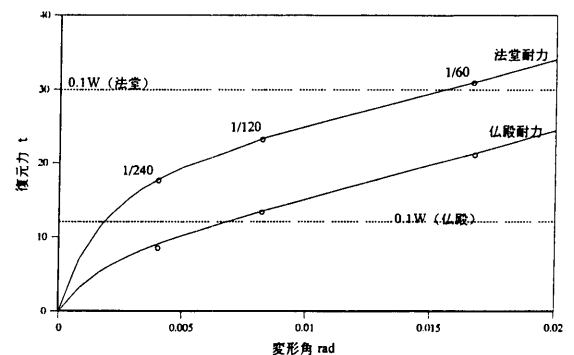


図-26 建長寺仏殿・法堂の保有水平耐力

6. まとめ

柱貫接合部の実験より次の各点が明らかになった。

- ① むり込み形状から加圧鋼材(柱)の端からやや内側に入った点に合力が作用していると思われる。
- ② 突付け継手は継手同士が別々に挙動するため、挿込長さ半分の貫(大入れ)が2つあるのと同様であり、剛性は低い。
- ③ 突付け以外の継手の、接合部のむり込みによる回転剛性は、継手がない場合と大差なく、材軸方向の継手接触面は一体として挙動していると思われる。しかし、軸組全体では、上下の貫相互の接触面が開くため、変形角は大きい。
- ④ 継手がある場合には、継手同士の垂直方向の接触面が加圧材の端部に近くなり、モーメントの加わる方向によって回転剛性が大きく変わる。
- ⑤ 継手に引掛りがある場合とない場合は弾性域にお

いては剛性は変わらない。

⑥ 弾性範囲は概ね1/240以内である。

総じて接合部回転剛性の実験結果は、稲山の理論式と一致している。しかし、摩擦力の影響に関しては異なる結果になるなど、適合しない場合が見られた。

これらより、継手がある貫の柱貫接合部回転剛性の推定式を提案した。

次に、これらを基に、建長寺仏殿・法堂の水平耐力を推定した。解析の結果から、変形角1/120rad.時の保有水平耐力は、建物の重量との比で、仏殿は0.11~0.12、法堂は0.08~0.09であった。これは、倒壊した仏殿の方がむしろ強いという結果である。しかし、総体的にはいずれの建物も保有水平耐力は小さいと言える。従って更に大きな地震力が作用した場合には、接合部の靱性によって破壊の順序は決まるものと考えられる。また、ほぞの差込み長さや経年変化による仕口の弛み^{ゆる}などが重要と考えられる。この点については解体調査が必要で、今後の研究課題である。

<注>

前身建物については、日光東照宮、久能山東照宮、駿府崇源院御霊屋等の説もある。大正11年に現仏殿を国宝建造物に指定するときの説明では、駿府崇源院御霊屋の説になっている。

<参考文献>

- 1) 坂静雄：金堂構造の安定度判定に関する研究 第3報 社寺骨組の力学的研究(第1部 柱の安定復元力)，1941年
- 2) 勸文化財建造物保存技術協会：文化財建造物伝統技法集成 継手及び仕口，1986.3
- 3) 関野克：文化財と建築史，鹿島研究所出版会，1969.11
- 4) 源愛日見：継手仕口に於ける基本形とその合成の変遷に関する研究—中世遺構の例を中心に—，東京大学学位論文，1982
- 5) 太田博太郎：日本建築の特質 日本建築史論集1，岩波書店，1983.7.29
- 6) 坂本功：伝統的木造建築の耐震性に関する調査研究—関東地震による鎌倉市内の被害調査，住宅総合研究財団研究年報 No.20，1993
- 7) 坂静雄：金堂構造の安定度判定に関する研究 第4報 社寺骨組の力学的研究(第2部 貫の耐力)，1942
- 8) 勸日本住宅・木材技術センター：木造軸組構法等の開発業務報告書 貫構造・差鴨居構造の設計方法の開発，1986
- 9) 稲山正弘：木材のめりこみ理論とその応用 靱性に期待した木質ラーメン接合部の耐震設計法に関する研究，1991
- 10) 河合直人：古代木造建築の柱傾斜復元力と耐力壁の効果に関する実大実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，1993.9

<研究組織>

主査	坂本 功	東京大学工学系研究科教授
委員	大橋 好光	東京大学工学系研究科助手
	〃 河合 直人	建設省建築研究所主任研究員
	〃 後藤 治	文化庁文化財保護部建造物課
	〃 渡辺 一正	建設省建築研究所防火調整官
協力	山田 文男	東京大学工学系研究科技術官
	〃 藤田 香織	東京大学大学院博士課程
	〃 岩永 和之	東京大学工学部建築学科(当時)
	〃 外山 哲也	東京大学工学部建築学科