長ほぞ込栓打接合部のめり込み 応力と摩擦せん断応力

COMPRESSIVE STRESS AND FRICTIONAL SHEAR STRESS AT THE MORTISE-TENON JOINT WITH WOODEN PIN

入江康隆——*1

老藤慎也——*2

Yasutaka IRIE——*1

Shinya OIFUJI——*2

キーワード:

長ほぞ込栓打, めり込み応力, 摩擦せん断応力, 解析モデル, 弾性範囲

Keywords:

Mortise-tenon joint with wooden pin, Compressive stress, Frictional shear stress, Analytical model, Elastic range

In order to estimate the compressive stress and frictional shear stress at the mortise-tenon joint with pin, we carried out the static horizontal loading tests. The main results obtained from these tests and analytical investigations are as follows. Within small deformation range the frictional shear stress accounts for about 60 percent, around yielding point it accounts for about 20 percent of all stresses. The analytical model shown in Fig.1 expresses the stiffness and bearing force within yielding point.

1. 目的

伝統工法建築において、長ほぞ込栓打柱脚部の回転剛性は、木材のめり込みに加え、木材同士の摩擦抵抗からなる。この接合部の抵抗機構について、弾性範囲における検討を行う。解析的には、変形状態に合わせた詳細な応力設定を行った接合部のモデル化を行い、接合部に生じるめり込み廻りの曲げモーメントを求める。モデル化の妥当性を検証するために、ほぞ穴の形状の異なる三種類の試験体について静加力実験を行い、回転剛性の中で摩擦抵抗の占める割合について、実験結果と解析結果を比較することにより検討する。

2. 接合部解析モデル

2.1 めり込みと摩擦による接合部内の抵抗要素

ほぞ差し接合部に関する既往の研究のうち、最近の研究¹⁾、²⁾、³⁾を例にとると、木材同士の接触部分に分布するめり込み垂直応力をバネに置き換えモデル化を行い、実験結果から、接合部の耐力は、ほぞの厚さ、幅、長さの影響を受けること、めり込みは大変形時に効果があることなどを報告している。

ここでは、接合部の応力をバネではなく、応力分布に基づき定めている。図1に示した①～⑨は、応力発生位置と応力の種類で分類した抵抗要素である。接合部の回転剛性となる抵抗要素は、木材同士の接触による応力伝達が元となり、木材のめり込みによる抵抗のみではなく、めり込み抵抗によって生じる摩擦抵抗からなっている。摩擦抵抗には、ほぞが回転することによる三角形変位めり込みにより生じる摩擦せん断力⑤～⑧と、ほぞ差し接合部作成時の土台側の締め付けによる等変位めり込み応力から生じる摩擦せん断力⑨とがある。

2.2 めり込み応力度分布と回転剛性

接合部内の接触面と応力度分布は、堅木の込栓が柱の引き抜きにより変形するまでは、接合部の回転の中心は込栓の中心と一致すると仮定する。回転剛性に関する式は、「めり込み

抵抗型モーメント抵抗接合部の算定法⁴⁾を用いる。接合部製作時の初期応力による摩擦せん断力(⑨)は、接合部の変形によるめり込み量の増加がないため、接合部の回転角 θ によらず一定とする。

- ①～④: 木材のめり込みによる垂直応力
- ⑤～⑦: ①～③によって板目面と木口面に生じる摩擦せん断力
- ⑧: ④によって、互いに直交する板目面に生じる摩擦せん断力
- ⑨: ほぞ差しを締め付けることで生じる摩擦せん断力

図1 接合部内の抵抗要素の分類

*1 宇都宮大学大学院学際先端システム学専攻 准教授・工博
(〒321-8585 宇都宮市陽東7-1-2)

*2 宇都宮大学大学院学際先端システム学専攻 大学院生

*1 Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Dept. of Advanced Interdisciplinary Sciences, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

*2 Graduate Student, Graduate School of Eng., Utsunomiya Univ.

3. 土台・柱接合部の検証実験

3.1 実験概要

試験体は、柱梁は杉で12cm角、込み栓はカシで18mm角。試験体、加力装置と変位計配置の様子を、図2に示す。柱頭治具は、文献1)を参考にして垂直荷重のかからないような工夫を施した。加力サイクルは、見かけのせん断変形角が1/100, 1/80, 1/60, 1/40, 1/30, 1/20, 1/16, 1/12, 1/10, 1/8相当の柱頭変位制御とし、正負交番3回繰り返して、ほぞの破壊により耐力が急激に低下するまで行った。試験体は、接合部の抵抗要素(図1の①～⑨)を部位ごとに検証するため、ほぞ穴形状を図3に示すa, b, cの3種類とし、各3体ずつとした。試験体形状aは図1に示した全ての抵抗要素を含み、形状bはほぞ穴の締め付けによる初期応力から生じる摩擦抵抗(⑨)を除いたもの、形状cはほぞ差し側面のめり込み(①②)および、それに伴って生じる摩擦抵抗(⑤⑥)を除いたものである。

この他に、ほぞ形状の影響を見るために、ほぞ幅90mmの試験体についても実験を行ったが、ここでは、図3に示すほぞ幅120mmの試験体についてのみ結果を示す。

3.2 実験結果

土台側のほぞ穴形状の違いによるM-θ関係を図4に示す。図中のa, b, cは、図3に示したほぞ穴形状に対応する。aとbを比較すると、剛性、耐力共にaのほうが大きい。破壊は、ほぞ差し側面上部のめり込み破断と込み栓によるほぞの端抜け破断であった。剛性の違いの原因は締め付けによる摩擦抵抗(⑨)の有無だけでなく、ほぞ穴幅によるめり込み応力の低下(③, ⑦)が大きく影響したと考えられる。cでは柱の引き抜きがa, bの場合よりも大きくなり、めり込み③がほとんど生じなかった。なお、最大耐力のばらつきは、試験体の加工精度が原因と考えられる。

3.3 摩擦係数

接合部に生じる曲げモーメントを求めるには、摩擦せん断力、すなわち摩擦係数を知る必要がある。木材間の摩擦係数については、樹種だけでなく、接触面の加工精度、加力形式、接触面の種類(板目と木口、板目と板目)などに左右され、多くの実験的研究がある。対象試験体においては、図1で示した⑤, ⑥, ⑦, ⑧が板目面と木口面の摩擦であり、⑧, ⑨が板目面と板目面との摩擦である。前者についての研究としては、貫構造に関するものが大部分で、例えば文献5)では、水平加力実験から、1/16.7radより大きな部材角において、摩擦係数は、0.88～0.99であったとしている。ここでは、後者のうちの、ほぞ差しを締め付けることによって生じる摩擦せん断力⑨について考察する。

図4において、ほぞ穴形状cの場合の接合部回転角θが0のときの回転モーメントは、ほぞ差し側面と土台上部に生じる抵抗は発生しないため、ほぞ差し回転面の摩擦せん断力(⑨)のみによるものである。この場合の込み栓廻りのほぞ面に生じる摩擦力は、図5に示すように生じ、それによる曲げモーメントMは、文献4)を参考にして導いた(1)式から求まる。

$$M = \frac{5\mu \cdot \delta \cdot E_{\perp}}{6y_p} \left\{ 2\theta \cdot \frac{Z_0^3}{8} + (\pi - 2\theta) \cdot x_{p1}^3 \right\} \quad (1)$$

図2 試験体、加力装置と変位計の配置

図3 ほぞ穴の形状

図4 M-θ関係(実験値)

図5 ほぞ面に生じるせん断力

ここに、 $E_{\perp}$: 全面横圧縮ヤング係数(縦ヤング係数公称値の1/50)
 δ : 試験体作成時に生じる弾性めり込み量
 μ : 摩擦係数
 x_{p1} : ほぞ下端から込み栓中央までの距離
 y_p : ほぞ厚, Z_0 : ほぞ幅

この式において、曲げモーメントとめり込み量は実験より得られるので、この式を μ について解き、摩擦係数 μ を求める。その結果、加工精度のばらつきは大きい、ほぞ穴形状bタイプ3体の平均値として $\mu = 0.14$ （標準偏差：0.03）を得た。

板目面と小口面の摩擦係数については、貫構造についての実験結果^{5), 6)}はあるが、長ほぞ込み栓打ち接合部についてはない。せん断力⑤～⑧の摩擦係数は、ほぞ面に生じるせん断力⑨の摩擦係数0.14よりも大きいと予想されるが、実験資料がないこと、また、摩擦せん断力はめり込み応力に較べるとかなり小さく、摩擦係数の違いによる差異は顕著に現れないことを考慮し、せん断力⑤～⑧でも $\mu = 0.14$ が適用できると仮定して、それぞれの抵抗要素の曲げモーメントを求める。

4. 解析結果と検証実験結果との比較

4.1 解析結果

抵抗要素ごとの降伏曲げモーメントまでの $M - \theta$ 関係を図6に示す。摩擦せん断力によって生じる曲げモーメントを求める際に必要となる摩擦係数は、前節の(1)式により求めている。この図より、めり込み応力によるモーメント(①②③)に比べて摩擦せん断力によるモーメント(④～⑨)は小さいこと、ほぞ差しの付け根付近でのめり込み抵抗(②③)の影響が大きいことが分かる。込栓によるめり込み抵抗(④)は非常に小さい。これは、柱の引き抜きを抑えて土台上部のめり込み(③)を発生させるために必要な抵抗である。この図において、めり込みによるもの(①～④)の和、摩擦によるもの(⑤～⑨)の和、その両者の和を示したのが図7である。この図から、全応力に占める摩擦による応力の割合は、降伏応力付近で約24%($0.317/1.347=0.24$)であることが分かる。

4.2 解析結果と検証実験結果との比較

図7に示した解析値と図4に示した形状aの実験値とを合わせ、図8に示す。降伏点以降については、実験値と勾配を一致させて破線を引いている。初期剛性の勾配が 65.08 kNm/rad. 、降伏後の勾配が 15.22 kNm/rad. なので、剛性は約1/4.3に低下している。降伏点までについては、剛性、耐力共に、ほぼ近似できていることが分かる。

4.3 小変形領域でほぞ面が負担する摩擦力の割合

図4において、ほぞ穴形状cの場合の接合部回転角 θ が0のときの回転モーメントは、ほぞ差し側面と土台上部に生じる抵抗は発生しないため、ほぞ差し回転面の摩擦せん断力(⑨)のみによるものであることは、すでに述べた。

θ が0でない場合には、ほぞ穴形状cにおいて、ほぞ差し回転面の摩擦せん断力以外に、めり込み力③とせん断力⑦が生じる。これが、図4においては、 θ の上昇に伴う M の漸増として現れている。次に、この大きさについて考察する。図9は、ほぞ穴形状a、すなわち全てのめり込み、摩擦応力を含んだ $M - \theta$ 関係であるが、この図で曲げ耐力が上昇し始めてから降伏点に至る区間の包絡線を $1/300 \sim 1/120 \text{ rad.}$ において直線近似して、図中に太い実線で示してある。ほぞ穴形状bの場合については、図10の中に同様に太い実線で示す。同種試験体3体の実験の平均値を、形状aの場合を太実線、形状bの場合を太破線として示したのが、図11である。図中には、

図6 抵抗要素ごとの $M - \theta$ 関係の解析値 図7 めり込みと摩擦による $M - \theta$ 関係の解析値

図8 実験値と解析値との比較

図9 ほぞ形状aの場合の $M - \theta$ 関係

図10 ほぞ形状bの場合の $M - \theta$ 関係

ほぞ穴形状bの場合の実験値に、ほぞ面の摩擦力⑨（解析値）のみを加えたもの（b + ⑨）を細い実線で示してある。従って、この細い実線は、ほぞ穴形状bがaよりもほぞ穴幅が広いことによる③、⑦の応力が生じる面積の減少に伴う応力減少分を考慮していない。それにもかかわらず、図11中の細い実線（b + ⑨）が、全ての応力を含む太い実線（実験値）とほぼ一致している。これは、ほぞ穴幅が広がったことによる応力③、⑦の減少は実験ではほとんど認められず実質的にはほぞ穴形状bの試験体で生じる応力は、ほぞ面の摩擦力のみを取り除いたものとはほぼ等しいということを示している。図11から、摩擦による抵抗（図中太破線）が、全抵抗（太実線）に占める割合は、40～60％である。

図11 ほぞ形状の違いによるM-θ関係の違い

5. まとめ

長ほぞ込栓打接合部において回転剛性を支配する木材のめり込み抵抗と摩擦抵抗についての性状を把握するために、3種類のほぞ穴形状を持つ試験体を作成し静加力実験を行った。実験結果に解析的な考察を加味して検討した結果、以下のようなことが分かった。

○変形の小さい段階では、摩擦抵抗の占める割合は大きい、大変形領域においては、めり込み抵抗が支配的となる。

○降伏点までの小さな変形領域（1/300～1/120rad.）においては、摩擦抵抗の寄与は、ほぞ面に生じるものが支配的で、40～60％である。

○降伏点附近における全摩擦抵抗の、めり込みと摩擦を加えた全抵抗に対する割合は20％程度である。

○図1に示した解析モデルで降伏点までの剛性と耐力とをほぼ表すことができる。

変形が大きくなるとほぞの引き抜けが起きるため、土台へのめり込みは柱脚端部のみに生じることになる（写真1, 2）。このため、接合部の応力分布、特に図1の③、⑦は、非線形になる。このような、大変形領域の問題については、今後の課題である。

その他にも、木材間の摩擦は、樹種、接触面の加工精度、加力形式、接触面の種類（板目と木口、板目と板目）などに左右されるので、これらの影響についての検討も今後の課題である。

写真1 柱の引き抜けと柱脚端部のめり込み

写真2 込み栓穴周囲の破断とほぞ付け根のめり込み

参考文献

- 1) 春山聡子, 小杉早希子, 後藤正美, 鈴木祥之: ほぞ差し接合部における木材めり込み特性の実験的研究 (その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 309-312, 2005
- 2) 後藤正美, 春山聡子, 鈴木祥之: 木造軸組におけるほぞ差し接合部の実験的検討及び解析モデルの提案, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp. 810-813, 2006. 11
- 3) 春山聡子, 後藤正美, 西村督, 鈴木祥之: 木造軸組におけるほぞ差し接合部の実験的検討及び解析モデルの提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 141-142, 2007. 8
- 4) (財) 日本住宅木造技術センター: 木造軸組住宅の許容応力度設計, pp. 56-58, 2001
- 5) 岩本いづみ, 清水秀丸, 鈴木祥之: 木造軸組接合部の基本モデルによる回転めり込みと摩擦, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp. 786-789, 2006. 11
- 6) 北守顕久, 加藤泰世, 片岡靖夫, 小松幸平: 伝統木造における貫接合部の耐力発言モデルの提案と実験的検証, 木材学会誌, Vol. 49, No. 3, pp. 179-186, 2003

[2007年10月19日原稿受理 2008年1月9日採用決定]