

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K14504

研究課題名（和文）釘接合部の試験方法の違いが評価結果に及ぼす影響 - 実験的検証とメカニズムの解明 -

研究課題名（英文）Influence of testing method on evaluated result of lateral properties of nailed joints

研究代表者

小川 敬多 (Ogawa, Keita)

静岡大学・農学部・助教

研究者番号：10805021

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では供試材の物性の影響を極力取り除いた試験計画を立てることで、木材と合板の釘接合部のせん断において、試験方法が評価結果に及ぼす影響を議論できるデータを収集した。例えば、ASTM式はJAS式と比較して負荷初期の範囲でのばらつきが大きいことや、面材釘は他よりも比較的小さい変位で終局に至ることを定量的に示した。

加えて、ASTM式とJAS式においては、ばらつきが現れる原因についてシミュレーションを用いて明らかにした。乱数を用いたプログラムを構築することで、釘を複数使用することによる同一試験体の中での相殺として説明できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

木材と合板との釘接合は、木質構造における重要な接合部であり、そのせん断性能の把握は大きな関心事である。様々な利点を背景に、現在では多くのせん断試験の評価試験方法が存在しているが、試験方法の違いが評価結果に及ぼす影響を明らかにすることが重要である。これまでの長年の木質構造の研究の中で、釘接合部のせん断性能について多くのデータが蓄積されているが、今後はこれらのデータの活用さらなる関心が集まることが予想される。本研究で得られた知見は、これら既存のデータの有効活用に資することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, research plans that removed the influence of the physical properties of the specimens as much as possible was designed, in order to collect the data that allowed discussion of the influence of the test method on the evaluation results lateral properties of nailed joints between wood and plywood. For example, it was quantitatively shown that the ASTM method showed more variation in the initial loading range than the JAS method, and that the panel type specimen reached failure with relatively smaller displacements than the others.

In addition, the reason for occurring the variation between the methods of ASTM and JAS were clarified using simulations. By constructing a program using random numbers, it was shown that the variation can be explained as a counterbalancing effect of the use of multiple nails in the same specimen.

研究分野：木質構造学

キーワード：木質構造 木材 合板 釘接合 せん断

## 1. 研究開始当初の背景

木質構造物、特に木造住宅の精緻な耐力性能推定のためには、構造物を構成する木質建築部材や木質接合部の力学的性能の把握が不可欠であり、この把握にあたって、実際の接合部を単純化した要素実験で得られる結果の検証は重要である。現代の木造住宅において多用されている接合方法の一つに部材同士を釘で固定する方法(釘接合)がある。木造住宅の軸組フレームに合板などの面材を張り付ける場合がその例であり、構造物に外力が作用した際には、軸組フレーム材と面材との間に生じるスリップ変形を、釘接合部がせん断抵抗することによって抑制している。すなわち、釘接合部のせん断は、木造住宅の外力への抵抗における主要な耐力発現機構と推察され、これまでに、釘接合部のせん断性能の要素実験結果を基にした耐力壁やガセット接合部などの力学解析がなされてきた。

これらの解析結果を設計に反映させるうえで、要素実験による釘接合部のせん断性能の把握が重要となるが、このせん断性能を求める既往の研究例を見ると、標準的な試験方法が複数存在する。既往の研究に見られる試験例を Fig. 1 に挙げる。図中(a)は、ASTM で定められているセットアップである。一对の主材と側材を1本の釘で接合し、荷重を与えることでせん断力を作用させている。釘1本あたりのせん断性能を評価するうえで、シンプルなセットアップである。しかしながら、図の上下に示された荷重を見ると、両者の作用線は一致しておらず、これにより、主材・側材や釘にせん断力以外の力(例えば回転力)が生じる可能性がある。これを抑制するために偏向矯正ローラーを添える必要がある。また、(b)で示されるセットアップは、例えば日本農林規格(JAS)で示されている方法であり、主材の両側面を側材で挟み込むように、4本の釘で接合して試験体を作製する。主材に鉛直下向きの荷重を与えることで、主材と側材の間に一面せん断力を作用させ、試験により得られた荷重値を釘本数で除することで、釘1本あたりのせん断抵抗力を得る。このセットアップは試験体が自立するため特別な治具を必要とせず、一般的な万能材料試験機で実施することができ、その手軽さから多く採用されている。ただし、ここで得られる力学挙動(荷重-スリップ変位関係)は釘4本が一体として得られるものであるため、釘1本で評価したものと一致しない。この理由として、1)4本の釘の中で、特に高い(あるいは低い)性能を持つ釘の挙動が支配的に現れる可能性、2)4本の釘の中で性能の高低が互いに相殺することで、本来のばらつきが現れにくくなる可能性が考えられる。さらに、同図(c)の方法は「木造軸組工法住宅の許容応力度設計」に示されており、ほぼ実大スケールの壁体試験体を正負交番繰返し載荷して釘1本あたりのせん断性能を逆算するかたちで評価する方法である。他の試験方法と比較してみると、試験体の寸法や釘の使用本数が大きく異なっており、上述の可能性から評価結果に差異が生じると予想される。

このように、これまでの研究により様々な仕様での釘接合部に関するせん断性能データの蓄積はされてきたものの、“試験方法の違いがせん断性能の評価結果にどのような差異を生じさせるか”という問いに対して、明確な見解は未だに無い。

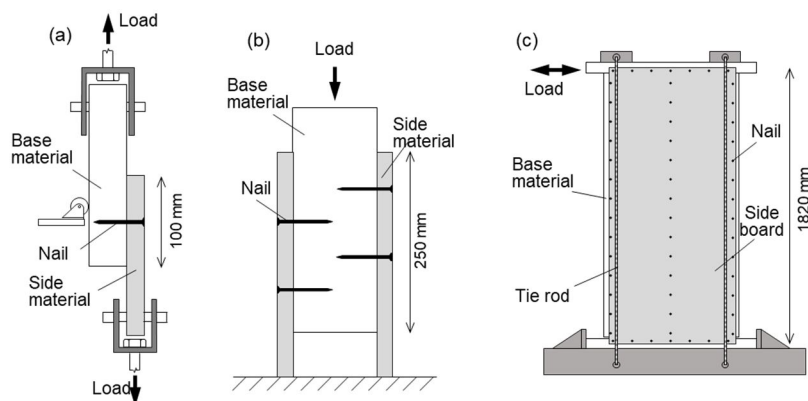


Fig. 1 Testing methods for evaluating the lateral properties of nailed joints

## 2. 研究の目的

釘接合部のせん断性能評価は重要であるが、標準的な試験方法(セットアップ)は複数存在する。本研究は、これらの既存データの解釈を深め、有効に活用するために“試験方法の違いが評価結果に及ぼす影響をどのように考慮すればよいか”を明らかにすることを目的とする。これまで試験方法の影響が不明瞭であり、「試験方法が異なる場合は結果の補正が必要か」「公表されたデータは試験方法が違って同列に扱えるのか」等の問題があったために、データの引用や比較等が断念されることが多かった。本研究の成果により、既往データの活用が活発になり、釘接合部の耐力性能の解明が進むと考えられる。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 ASTM 式と JAS 式の比較

はじめに、釘接合部の要素試験として多く採用されている ASTM 式と JAS 式のせん断性能を実験により調べた。

試験体の主材にはスギ気乾材、側材には構造用スギ合板（JAS 特類 2 級、厚さ 12mm、4 プレイ）を供した。釘は CN50（長さ 50.8 mm、胴部径 2.87 mm）を用いた。一般的に、釘接合部のせん断性能は材料の密度に影響されることを考慮して、試験体シリーズ間で密度が同等になるように材料を選んだ。供試材を準備するにあたって、大量のスギ材を用意し、その中から密度がほぼ同等のものを選別した。ASTM 式の試験は ASTM D1761-12 に準拠して実施した。主材は 51×51×300 mm、側材は 51×300×12 mm とした。Fig. 1(a)のように、両材が 100 mm 重なる状態で釘 1 本を用いて接合した。偏向矯正ローラーを添えた状態で Fig. 1(a)のように主材と側材に上下方向に力を作用させ、接合部にせん断力を作用させた。主材に変位計、側材にターゲットを取り付け、両材間のすべり量を測定した。JAS 式の試験は構造用パネルの日本農林規格に準拠して実施した。主材は 38×89×300 mm、側材は 100×300×12 mm とした。Fig. 1(b)のように、主材の両側から 2 枚の側材で挟み込むように 4 本の釘を用いて接合した。剛な定盤上に試験体を設置し、主材上端を鉛直下向きに加力することで、接合部にせん断力を作用させた。主材に変位計、側材にターゲットを取り付け、両材間のすべり量を測定した。両シリーズとも、試験体数を 17 体とした。また、試験体の作製において、主材と側材の間にテフロンシートを挿入することで、試験結果における両材間の摩擦の影響を無視した。

試験により得られた荷重 - すべり量関係を Fig. 2 に示す。なお、JAS（赤線）の荷重はロードセルの読み取り値を釘本数で除した値、すなわち、釘 1 本あたりの荷重を示す。これによれば、すべり量の増大にともなって荷重が対数的に増大している傾向が見て取れた。この荷重 - すべり量関係を基にして力学的特性値を求めた。ここでは、ASTM に準じて変位 0.38 mm 時の耐力  $P_{0.38}$  と最大荷重  $P_{max}$ 、枠組壁工法建築物構造計算指針に準じて降伏耐力  $P_y$  と初期剛性  $K$  の 4 つの特性値を求めた。その結果を Table 1 に示す。ASTM と JAS でそれぞれの特性値を比較すると、平均値はほぼ同等の値を示した。変動係数をみると、 $P_{0.38}$ 、 $P_y$ 、 $K$  で JAS の方が小さくなっている。これは JAS の方が釘の本数が多いことによるもので、同一試験体の中でのバラツキが存在し、互いに相殺し合うことで変動係数が小さくなったと考えられる。分散および平均値について同一性の検定（F 検定および Student t, Welch t 検定：有意水準 0.05）を行ったところ、 $P_{0.38}$  と  $K$  で分散に有意差が認められた。一方で、平均値はいずれの特性値でも有意差が認められなかった。

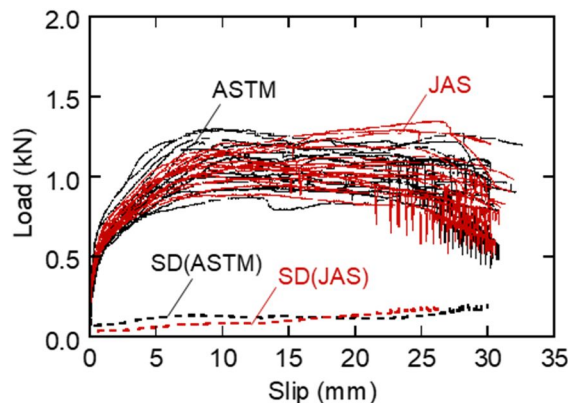


Fig. 2 Relationships of load and slip of ASTM and JAS specimens

Table 1. Characteristic values of each series obtained by the experiments

Series		$P_{0.38}$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$P_y$ (kN)	$K$ (kN/mm)
ASTM	Average	0.44	1.12	0.58	0.71
	SD	0.07	0.06	0.06	0.24
	COV (%)	16.4	9.6	9.6	33.4
JAS	Average	0.46	1.10	0.57	0.74
	SD	0.03	0.12	0.05	0.13
	COV (%)	7.3	11.3	8.8	17.3

$P_{0.38}$ : Load at slip of 0.38 mm;  $P_{max}$ : Maximum load;  $P_y$ : Yield load;  $K$ : Initial stiffness

上記のように、ASTM と JAS の  $P_{0.38}$  では平均値は一致したものの分散は異なっており、これは同一試験体の中での相殺によるものと推察される。この推察の妥当性を検証するために、シミ

シミュレーションを試みた。ここで、“複数の釘からなる試験体のせん断耐力は、釘1本の耐力を本数分足し合わせることで表現できる”という前提のもと、乱数を用いたシミュレーションにより、ASTMの試験結果に基づいてJASの累積頻度曲線を再現できるかを検証した。シミュレーション方法をFig. 3に示す。始めにASTM試験結果の累積頻度曲線を用意する。[0, 1]の乱数を発生させ、この累積頻度曲線に縦軸側から照射し、対応する横軸値をASTMの疑似 $P_{0.38}$ とする。今回は疑似 $P_{0.38}$ を5000個作成した。5000個の疑似 $P_{0.38}$ からランダムに4つ選び出し、その和をJASの疑似 $P_{0.38}$ とした。この作業を繰り返し、今回は3000体分のJASの疑似 $P_{0.38}$ を作成した。ただし、JASの疑似 $P_{0.38}$ もFig. 2と同様に釘本数で除し、実質的には、選ばれた4つの値の平均値をJASの疑似 $P_{0.38}$ とした。この疑似 $P_{0.38}$ の累積頻度曲線を求め、JASの試験結果と比較した。このシミュレーションにおいて、基となったASTMの試験結果、JASのシミュレーション結果、加えて、JASの試験結果の累積頻度曲線をFig. 4に示す。シミュレーション結果はJASの試験結果と概ね一致した。また、分散はともに $0.0011 \text{ kN}^2$ となり(変動係数は7.52%と7.25%)、同等であった。これにより、ASTMとJASの試験結果における分散の違いの原因は、釘を複数使用することによる同一試験体の中での相殺として説明できることが、数値解析的に示された。

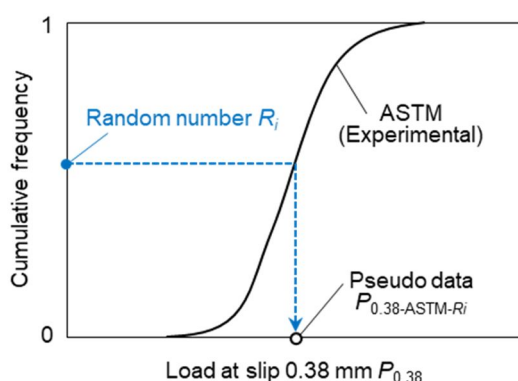


Fig. 3 Simulation method for obtaining the pseudo data

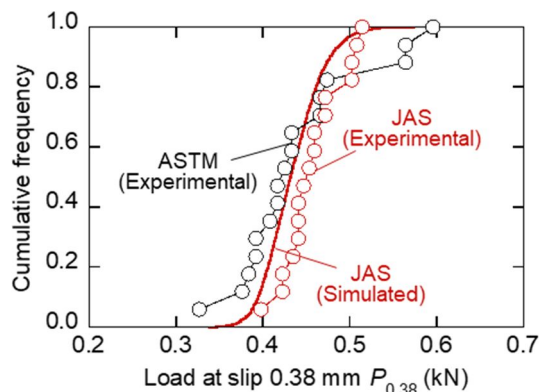


Fig. 4 Simulated results

### 3.2 面材釘の試験結果との比較

合板と木材との釘接合部のせん断性能評価を行ううえで、Fig. 1(c)に示すような面材釘試験体を用いて実施する方法がある。そこでここでは、面材釘の試験で得られるせん断挙動と、前節の試験方法で得られる挙動を比較した。

「木造軸組工法住宅の許容応力度設計」に記されている「面材釘等1本あたりの一面せん断特性を算定するための試験」に準拠してFig. 1(c)のように試験体を作製した。梁・柱・土台からなるフレーム(スギ)に面材(構造用スギ合板)を、釘(CN50)を用いて接合した。釘間隔は、フレームでは100 mm、間柱では200 mmとし、フレームと面材が接する面にはシリコンプレーを散布した。試験体数は繰り返し加力で4体、単調加力で5体とした。Fig. 1(c)のように試験体上部(梁材)にアクチュエータを接続し、単調加力では加力速度0.2 mm/minで、繰り返し加力では加力速度0.5~1.0 mm/minで加力し、最大荷重到達後、その80%に到達するまで加力した。フレームのみの試験においても同条件で試験を行った。面材釘の試験を終えた後、供試材料の物性等の影響をなくすため、面材釘試験体の破壊が見られない個所から部材を切り出し、Fig. 1(a)(b)に示すASTMおよびJAS式の試験も実施した。

各試験結果を釘1本あたりの荷重-変位関係に変換し、それをFig. 5に示す。JAS試験体の結果は、試験で得られた荷重を釘本数の4本で除した。面材釘試験体では一般的に釘1本あたりの荷重-変位関係を得られないが、神谷(日本建築学会論文報告集, 309:86-94, 1981)を参考に、従来は接合部試験結果から壁体の荷重-変形角関係を推定するものを、壁体の試験結果から接合部の試験結果を推定した。具体的には、当該論文で、接合部の荷重-変位関係の縦軸および横軸に乗じられる値の逆数を、壁体の荷重-変形角関係の縦軸および横軸に乗じることによって釘1本あたりの荷重-変位関係を得た。Fig. 5の縦軸は荷重、横軸は変位であり、黒線がASTM試験体、赤線がJAS試験体、濃い青線が面材釘試験体のうち単調加力したもの、薄い青線が面材釘試験体のうち繰り返し加力した結果である。いずれの試験体においても、荷重およそ0.6 kN周辺で降伏し、1.0~1.2 kNで最大荷重に至った後に、荷重が横ばいになる傾向を示した。試験方法で比較すると、JAS試験体に比べて、ASTM試験体ではその挙動にばらつきがみられた。また、試験終了時の変位に注目すると、ASTM・JAS試験体に比べて面材釘試験体はすべての試験体の変位25 mmに到達する前に試験を終了した。これらの試験結果から荷重変形曲線の特徴点抽出自動化ツール「Pickpoint3292」を用いて特性値を算出し、平均値と標準偏差をTable 2に示す。各特性値の標準偏差に注目すると、ASTMが最も大きく、面材釘(単調)が最も小さくなった。また、面材釘試験体では試験終了時の変位が他より小さいことを記したが、このことは表中の終局変位 $\delta_u$ に現れている。ASTM, JASではそれぞれ25.8, 28.8 mmであったのに対し、面材釘ではそれぞれ19.7と17.0 mmと小さかった。これは試験後半における主材と面材の離間が原

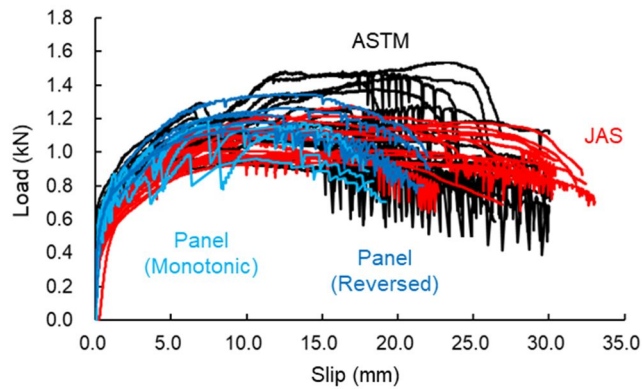


Fig. 5 Mechanical behaviors from four testing methods

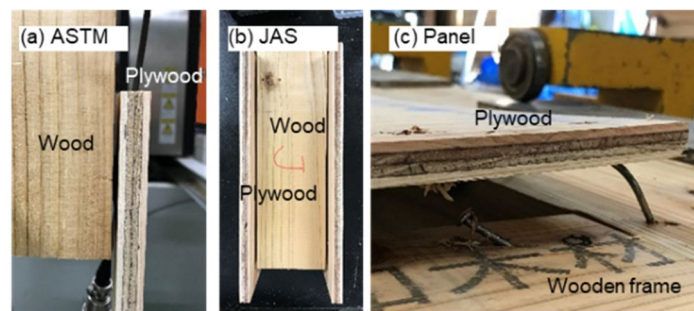


Fig. 6 Separations of plywood from wood

Table 2 Average value obtained form four testing methods

	$P_{\max}$ (kN)	$\delta_{\max}$ (mm)	$P_y$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\delta_u$ (mm)	$K$ (kN/mm)
ASTM	1.21	14.11	0.70	0.93	1.12	25.8	1.44
JAS	1.09	13.88	0.57	0.88	1.00	28.8	0.73
Panel (Monotonic)	1.23	10.92	0.64	0.69	1.09	19.7	0.96
Panel (Reversed)	1.13	8.59	0.69	0.87	1.01	17.0	0.81

$P_{\max}$ : Maximum load;  $\delta_{\max}$ : Slip at maximum load;  $P_y$ : Yield load;  $\delta_y$ : Slip at yielding;  $P_u$ : Ultimate load;  $\delta_u$ : Slip at the ultimate load;  $K$ : Initial stiffness

因と考えられる。Fig. 6 に各試験体の試験後の様子を示す。Fig. 6 のように、面材釘試験体が ASTM、JAS 試験体に比べて試験後半で主材と合板が大きく離間しており、面材が十分に荷重を負担できなくなったため、早期に荷重が低下し、終局変位  $\delta_u$  が小さくなったと考える。

#### 4. 研究成果

木材と合板との釘接合は、木質構造における重要な接合部であり、そのせん断性能の把握は大きな関心事である。様々な利点を背景に、現在では多くのせん断試験の評価試験方法が存在しているが、試験方法の違いが評価結果に及ぼす影響を明らかにすることが重要であった。

本研究では試験方法が及ぼす評価結果の違いを定量的に示すことができた。供試材の物性の影響を極力取り除いた試験計画を実行することで、評価結果の違いを議論できるデータを収集した。例えば、ASTM 式は JAS 式と比較して負荷初期の範囲でのばらつきが大きいことや、面材釘は他よりも比較的小さい変位で終局に至ることを定量的に示した。

加えて、ASTM 式と JAS 式においては、ばらつきが現れる原因についてシミュレーションを用いて明らかにした。乱数を用いたプログラムを構築することで、釘を複数使用することによる同一試験体の中での相殺として説明できることを示した。

これまでの長年の木質構造の研究の中で、釘接合部のせん断性能について多くのデータが蓄積されてきた。今後はこれらのデータの活用さらなる関心が集まるなか、本研究で得られた知見は、これら既存のデータの有効活用に資することが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ogawa Keita	4. 巻 54
2. 論文標題 Comparison of evaluation results of nailed joints in shear properties obtained from two methods	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Wood and Fiber Science	6. 最初と最後の頁 441-447
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 渡邊直希, 小川敬多, 小林研治
2. 発表標題 試験方法の違いが釘接合部のせん断挙動に与える影響
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会（千葉）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川敬多
2. 発表標題 釘接合部のせん断性能評価における試験方法の違いの影響
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会（北陸）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川敬多
2. 発表標題 異なる試験方法による釘接合部のせん断挙動の比較
3. 学会等名 2019年度日本木材学会中部支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊直希, 小川敬多, 小林研治
2. 発表標題 面材張り耐力壁の面内せん断試験における加力方法の違いによる影響
3. 学会等名 第70回日本木材学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川敬多
2. 発表標題 異なる試験方法による釘接合部のせん断性能評価結果の比較
3. 学会等名 第69回日本木材学会大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関