



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Effect of Member Thickness and Nail Length Projecting from Main Member on Shear Performance of Single Shear Nailed Joints
Author(s)	Sawata, Kei; 澤田, 圭; Honda, Kosuke et al.
Citation	木材学会誌, 56(5), 317-325 https://doi.org/10.2488/jwrs.56.317
Issue Date	2010-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/44635
Type	journal article
File Information	MG56-5_317-325.pdf



部材厚および釘の突き出し長さが1面せん断釘接合部の せん断性能に及ぼす影響*1

澤田 圭*2, 本田康輔*3, 平井卓郎*2, 小泉章夫*2, 佐々木義久*2

Effect of Member Thickness and Nail Length Projecting from Main Member on Shear Performance of Single Shear Nailed Joints*1

Kei SAWATA*2, Kosuke HONDA*3, Takuro HIRAI*2,
Akio KOIZUMI*2 and Yoshihisa SASAKI*2

Single shear tests were conducted on nailed timber joints with varying main member thickness, side member thickness and nail length projecting from the main member, and their effects on various shear performances of nailed joints were investigated. Initial stiffness and yield load of nailed joints were almost constant when the ratio of main member thickness to nail diameter (lm/d) was 7-14 and 10-14, respectively. Maximum load and energy capacity increased as main member thickness was greater and showed the highest values when lm/d was 13-17 and 13-15, respectively. Maximum load of nailed joints with lm/d of 9 was 36% lower than that of nailed joints with lm/d of 13-17. Energy capacity of nailed joints with lm/d of 9 was 58% lower than that of nailed joints with lm/d of 13-15. Regardless of nail length projecting from the main member (lnp), initial stiffness of nailed joints with lnp was close to that of nailed joints without lnp . When the ratio of the sum of lm and lnp to nail diameter ratio (lr/d) was 10-11, maximum load and energy capacity of nailed joints with lnp were close to those of nailed joints without lnp . When lr/d was 12-15, maximum load and energy capacity of nailed joints with lnp were lower than those of nailed joints without lnp . When nailed joints have a member thickness according to the standard for structural design of timber structures edited by Architectural Institute of Japan, initial stiffness and yield load are little affected by member thickness but maximum load and energy capacity are greatly affected by member thickness.

Keywords: member thickness, projecting nail, initial stiffness, shear strength, energy capacity.

主材と側材の厚さや主材からの釘の突き出し長さが1面せん断釘接合部のせん断性能に及ぼす影響を調べた。剛性係数は主材中の釘長さと釘径の比 (lm/d) が7~14のとき概ね一定の値を示し、その後 lm/d が大きくなるにつれ減少する傾向を示した。降伏荷重は lm/d が大きくなるにつれ増加し、 lm/d が10~14のときに一定、その後 lm/d が大きくなるにつれ減少する傾向を示した。最大荷重と吸収エネルギーは lm/d が大きくなるにつれ増加し、 lm/d が13~17のとき最大荷重が、 lm/d が13~15のとき吸収エネルギーが最も大きな値を示した。主材からの釘の突き出し長さにかかわらず剛性係数は概ね一定の値を示した。釘の突き出し長さが長い接合部の最大荷重と吸収エネルギーは突き出していない接合部より低い値となった。日本建築学会の木質構造設計規準・同解説に準じ、主材中の釘長さが釘径の9倍以上、側材厚が釘径の6倍以上であるとき、釘接合部の剛性係数と降伏荷重には大きな変化は見られないが、最大荷重と吸収エネルギーは部材の厚さによって大きな差が生じた。

*1 Received May 15, 2009; accepted February 25, 2010.

*2 北海道大学大学院農学研究院 Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060-8589, Japan

*3 福井県総務部 Department of General Affairs, The Fukui Prefectural Government, Fukui 910-8580, Japan

1. 緒 言

接合部の構造性能は壁体や床組みのような構造物構成要素の性能を大きく左右し、接合部の中でも釘接合は住宅等の木質構造物に最も一般的に用いられている接合法である。

釘接合部の抵抗メカニズムには大きく分けて引抜き抵抗とせん断抵抗がある。このうち、引抜きで抵抗する釘接合は、小変形で最大荷重に達した後急激に荷重が低下するため、地震力等に抵抗する主要構造部分には、比較的靱性の高いせん断型釘接合を用いることが推奨されている¹⁾。しかし、同じせん断型の釘接合でも、主材や側材の種類と厚さ、木材の繊維方向に対する加力方向、釘の形状や寸法、釘の打ち込み長さ、接合部の縁端距離などの接合条件によって、変形耐力特性、特に靱性に大きな幅が生じる。

これまで、樹種、釘の種類、端距離が製材-製材釘接合部の耐力に及ぼす影響²⁾、木材の圧縮強度と釘径を用いた釘接合部の短期許容耐力算定式の提案³⁾、合板-製材釘接合部の許容耐力の提案⁴⁾、部材の種類や寸法が釘接合部の最大荷重に及ぼす影響⁵⁾、釘接合部の降伏荷重とヨーロッパ型降伏理論値の適合性⁶⁾、部材密度や厚さ、釘の種類が合板-製材釘接合部のせん断性能に及ぼす影響⁷⁾、木質面材の縁端距離が釘接合部の降伏荷重、最大荷重、吸収エネルギーに与える影響⁸⁾等、多くの研究が行われてきた。

こうした研究の蓄積によって釘接合部に関する設計規準は改定を重ね、日本建築学会の2006年版木質構造設計規準・同解説¹⁾では構造物の使用性、安全性に大きく関わる降伏せん断耐力、終局耐力、剛性係数が規準内に示されている。材厚に関して、現行規準では側材厚は釘径の6倍以上、主材への打ち込み長さは釘径の9倍以上としているが、側材が厚いとき初期耐力は大きく、主材への釘の打ち込み長さが大きいと終局耐力に対して有効に働くこと⁹⁾は以前より指摘されている。しかし現状では、それら部材厚が使用性や安全性に関わる剛性係数、降伏荷重、最大荷重、吸収エネルギーに及ぼす影響についてきちんと整理されているとは言えない。

また施工条件によっては主材厚と側材厚の和より釘長の方が長くなり釘先端部が主材を突き抜ける場合があるが、釘の突き出しと釘接合部のせん断性能との関係については十分なデータの蓄積がない。釘先端部が主材から突き抜ける場合と突き抜けない場合の変形耐力特性を比較することは、釘1面せん断

接合の次のような変形耐力特性を検証することであり、実用的評価に反映させる上でも有用である。(1)主材中の釘は、木材に支えられた梁としての曲げ抵抗と、釘胴部と木材の接触面に生じる摩擦力による引抜き抵抗¹⁰⁾によってせん断力を伝達する。このうち、梁としての釘を支える主材中の面圧力は、側材との境界に近い部分で大きく、釘先端に近い部分ではわずかである¹⁰⁾。この面圧応力分布特性から、釘先端側の支持条件がせん断剛性や降伏荷重に与える影響は相対的に少ない。このため、仮に釘先端部分が主材から突き出していたとしても、剛性係数や降伏荷重はさほど低下しないと推測される。(2)釘の主材からの引抜き抵抗は釘胴部と主材との有効接触長さに関係する。したがって、釘の先端部が主材から突き出し、有効接触長さが短くなると、釘接合部が引抜けで破壊する場合の最大荷重は低下すると推測される。(3)釘接合部が引抜けで破壊する場合、釘が主材から完全に抜けるまでのすべり変位は、釘長から側材厚を引いた残りの長さに依存する。したがって、釘先端側は剛性係数や降伏荷重にはほとんど寄与しないとしても、終局すべり変位を増大させる効果はあると考えられる。この場合、釘の引抜け挙動を考えると、釘先端側の一部が主材から突き出している場合、同様の効果が現れると推測される。

そこで本研究では、主材と側材に製材を用いた釘接合部1面せん断試験を行い、主材と側材の厚さや主材からの釘の突き出し長さが釘接合部の剛性係数、せん断耐力、吸収エネルギーに及ぼす影響を調べた。

2. 試験体および試験方法

2.1 試験体

釘接合部1面せん断試験体には主材、側材ともに長さ300 mm、幅90 mmのスプルース (*Picea abies*) 製材とCN90釘 (釘長88.9 mm、釘径 (d) 4.11 mm) を用いた。主材と側材は厚さ方向に隣接して採取し、鉋削仕上げをした。本研究では部材厚が釘接合部のせん断性能に与える影響を調べることを目的としているため、釘接合部の主材厚を $6d$ から $18d$ まで変化させ、主材厚と側材厚の和は釘の長さとはほぼ等しい88 mmと設定した。主材厚と側材厚の組み合わせを Table 1 に示す。釘先端部が突き出した試験体については主材厚を $9d$ とし、釘の突き出し長さは $1d$ から $6d$ まで変化させた。部材の厚さと釘の突き出し長さを Table 2 に示す。試験体数は各条件6体とし、木材は気乾密度の平均値と標準偏差が試験条件間で等しくなるように振り分けた。全試験体の気

Table 1. Results of single shear tests of nailed timber joints with varying main member thickness and side member thickness.

l/d	lm/d	K_s (kN/mm)	P_y (kN)	D_y (mm)	P_{max} (kN)	D_{max} (mm)	E (kNmm)
15.4	6	0.94(0.40)	0.72(0.09)	0.76(0.52)	1.29(0.15)	11.6(4.4)	20.3(6.0)
14.4	7	1.11(0.61)	0.69(0.13)	0.52(0.05)	1.48(0.18)	13.2(2.6)	27.2(4.9)
13.4	8	1.07(0.39)	0.74(0.07)	0.64(0.19)	1.70(0.22)	13.3(3.0)	34.5(6.9)
12.4	9	1.21(0.34)	0.70(0.16)	0.59(0.10)	1.53(0.24)	13.5(2.2)	32.3(5.7)
11.4	10	1.11(0.41)	0.84(0.10)	0.87(0.35)	2.03(0.43)	20.1(3.5)	61.2(17.9)
10.4	11	1.25(0.34)	0.82(0.07)	0.70(0.11)	2.02(0.25)	22.2(4.6)	65.4(10.1)
9.4	12	1.23(0.33)	0.81(0.08)	0.68(0.11)	2.09(0.25)	25.3(5.5)	72.3(8.4)
8.4	13	1.21(0.33)	0.87(0.06)	0.84(0.16)	2.34(0.27)	32.8(3.8)	79.3(8.1)
7.4	14	1.15(0.43)	0.86(0.08)	0.99(0.53)	2.35(0.38)	35.3(3.8)	75.9(7.1)
6.4	15	0.90(0.24)	0.82(0.10)	1.00(0.46)	2.32(0.43)	35.4(3.0)	76.2(10.7)
5.4	16	0.75(0.17)	0.79(0.08)	1.06(0.27)	2.35(0.31)	27.9(6.0)	76.6(9.9)
4.4	17	0.98(0.55)	0.82(0.15)	1.07(0.26)	2.49(0.56)	32.8(6.0)	76.8(12.8)
3.4	18	0.76(0.28)	0.75(0.07)	0.92(0.28)	2.15(0.26)	30.3(3.5)	68.0(6.6)

Numbers in parentheses show standard deviations

l , side member thickness; lm , main member thickness; d , nail diameter; K_s , initial stiffness; P_y , yield load; D_y , yield displacement; P_{max} , maximum load; D_{max} , displacement corresponding to maximum load; E , energy capacity

Table 2. Results of single shear tests of nailed timber joints with varying nail length projecting from main member.

l/d	lm/d	lnp/d	K_s (kN/mm)	P_y (kN)	D_y (mm)	P_{max} (kN)	D_{max} (mm)	E (kNmm)
11.4	9	1	1.48(0.59)	0.81(0.09)	0.58(0.09)	1.81(0.20)	16.7(4.2)	52.1(9.2)
10.4	9	2	1.34(0.46)	0.80(0.09)	0.63(0.06)	1.96(0.37)	20.1(6.9)	60.5(18.0)
9.4	9	3	1.32(0.14)	0.67(0.33)	0.51(0.25)	1.86(0.14)	23.5(4.3)	63.5(9.0)
8.4	9	4	1.20(0.19)	0.82(0.06)	0.75(0.20)	2.02(0.26)	34.2(4.0)	70.1(5.4)
7.4	9	5	1.45(0.70)	0.81(0.10)	0.65(0.15)	2.02(0.15)	31.8(6.4)	70.5(5.3)
6.4	9	6	1.12(0.46)	0.77(0.10)	0.68(0.12)	1.89(0.09)	31.2(5.9)	66.1(4.5)

Numbers in parentheses show standard deviations

l , side member thickness; lm , main member thickness; lnp , nail length projecting from main member; d , nail diameter; K_s , initial stiffness; P_y , yield load; D_y , yield displacement; P_{max} , maximum load; D_{max} , displacement corresponding to maximum load; E , energy capacity

乾密度は平均395 kg/m³, 標準偏差37.1 kg/m³, 試験時の含水率は平均10.3%, 標準偏差0.752%であった。

側材に釘頭部がめり込むまで釘を打ち込むと側材は主材に強く押しつけられる。釘接合部がせん断力を受ける場合はこの打ち込みによって主材と側材間に大きな初期摩擦が生じるが¹¹⁾, この初期摩擦力は使用中の木材の収縮膨潤や応力緩和により失われることが知られている¹²⁾。そこで, ここでは釘頭を若干浮かせてCN90を釘打ちし, 主材と側材を手で軽く回転して, 釘頭部が側材中に打ち込まれることによって発生する摩擦が生じていないことを確認してから実験を行った。端距離は15d, 縁距離は約11dとした。試験体の概観をFig.1に示す。

2.2 試験方法

釘接合部1面せん断試験は主材と側材間の相対変位が1, 2, 3, 4, 5 mmとなるように正負1回繰り返して加力後, 一方向単調加力を与えた。試験は荷重が最大荷重を超えて低下した時点か所定変形時に到達した時点で終了することが一般的であり, 日本ツープイフォー建築協会の2002年枠組壁工法建築物構造計算指針¹³⁾では, 接合部の試験は荷重が最大荷重の80%まで低下した時点か, 変位が30 mm以上の任意の変位に達した時点で終了としており, ISO 6891¹⁴⁾では機械的接合具を用いた接合部の試験は終局荷重に達するか, 変位が15 mmに達した時点で終了としている。本研究では荷重が最大荷重の40%まで低下した時点, または主材と側材間の相対変位が40 mmを超えた時点で試験を終了した。

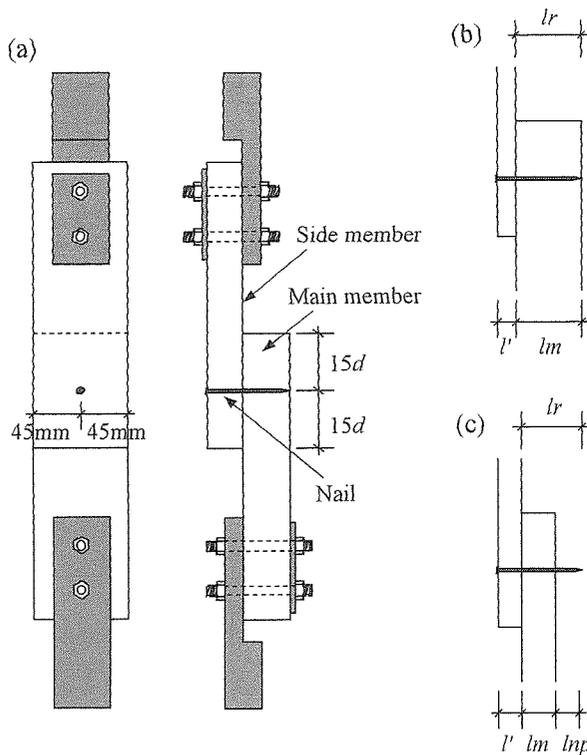


Fig. 1. Configuration of nailed joint tests.

Note: l_m : main member thickness, l' : side member thickness, l_{np} : nail length projecting from main member, l_r : the sum of l_m and l_{np} , d : nail diameter.

(a) Single shear test. (b) Nailed joint with varying member thickness. (c) Nailed joint with varying nail length projecting from main member.

3. 結果および考察

3.1 主材厚および側材厚が異なる釘接合部

3.1.1 荷重-すべり変位曲線

釘接合部のせん断性能には側材厚と主材に打ち込まれている釘の長さが重要となり, 本研究では主材中の釘長さとして主材厚 (l_m) は等しくしている。

釘接合部の破壊性状は $l_m = 6d \sim 10d$ のとき半数以上の試験体で主材から釘が完全に引抜けた。一方, $l_m = 11d \sim 15d$ のときは40 mm 変位で加力を打ち切った時点でも, 主材から釘が完全に引抜けることはなく, $l_m = 11d$ のときでは最大荷重の34.6~82.8%の荷重を維持しており, $l_m = 12d \sim 15d$ のときでは最大荷重の75.3~100%の荷重を維持していた。 $l_m = 16d \sim 18d$ のときはパンチングアウトや側材の割れが生じた。スプルース材をCN90で釘打ちした接合部では, 主材厚が10d 以下の場合には釘の引抜けが生じやすく, 側材厚が6d 以下の場合には側材に破壊が発生しやすい結果となった。

試験から得られた1条件6体の荷重-すべり変位曲線から, 所定すべり変形時における荷重の平均値と標準偏差を求めた。Fig. 2に荷重-すべり変位曲線の一例を示す。荷重-すべり変位曲線は2つのタイプに分けられ, 釘の引抜けが見られた試験体 ($l_m = 6d, 9d$) では第1折れ点以降すべり変位が増加しても荷重の増加量は大きくないが, その他の試験体 ($l_m = 12d, 15d, 18d$) では第1折れ点以降すべり変位の増加に伴い荷重が大きく増加する形状を示した。

破壊に至るまでの変形挙動は主材からの釘の引抜けと釘頭部の側材中へのめりこみの2つに分けられ, 各変形挙動に応じて釘接合部内では次のようなせん断抵抗機構が発現していると考えられる。釘の引抜けが少しずつ進行する場合, 引抜けによって釘胴部と木材の接触長さは減少するため, すべり変位の増大に伴い, 初期摩擦力に寄与する軸力成分は減少する。一方, 釘の曲げ変形によって面圧力が増加するため, これによって2次的に生じる摩擦力と釣り合う軸力成分は増大する。この初期摩擦力による軸力成分の減少と2次的な摩擦力による軸力成分の増大が相殺しあう方向に働くため, 釘の引き抜けは, それらの和である総軸力と, この総軸力に比例する主材-側材間の摩擦力に反映される。このため, 釘の引抜けが見られた接合部同士でも, 主材中の釘長さによって第1折れ点以降の荷重-すべり変位曲線に差が生じたと推論される。

釘の引抜けがほとんど生じることなく, 釘頭部の側材中へのめり込みが進行する場合, このめり込み変位と面圧力の関係は, 木材繊維に直交方向のめり込みにおいて一般的に見られる, 典型的なひずみ硬

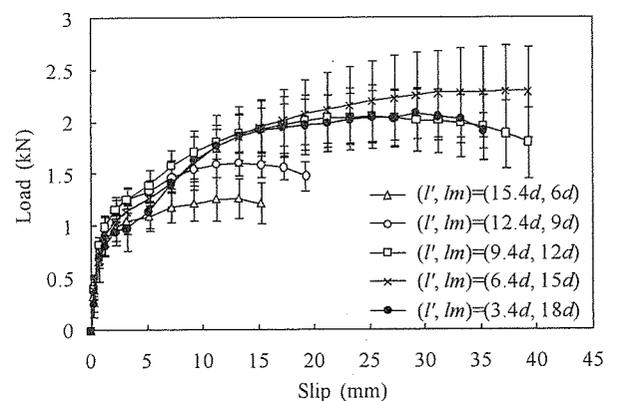


Fig. 2. Load-slip curves of nailed joints with varying member thickness.

Note: l_m , l' and d : see Fig. 1. Symbols and bars indicate mean value and standard deviation, respectively.

化型となる^{10, 15)}。軸力はこの面圧力と釣り合うので、主材-側材間の摩擦力と、それに比例する付加的なせん断荷重も増加することになる。一般に、釘接合やボルト接合の荷重-すべり変位曲線の第2勾配はほとんどが主材-側材間の摩擦力によるもので^{10, 16)}、釘接合の場合は釘頭部、ボルト接合の場合は座金が部材中にめり込むとき要するエネルギーがそれに付加される。釘頭部の側材へのめり込みが見られた接合部ではこのような発現機構によって、荷重-すべり変位曲線が第1折れ点以降もすべり変位の増加に伴い荷重が増加する形状を示したと推論される。

試験より得られた荷重-すべり変位包絡曲線から剛性係数、降伏荷重、最大荷重、破壊するまでに吸収したエネルギーを算出した。釘接合部は主材と側材の厚さ (Fig. 2) や種類¹⁷⁾、釘の種類²⁾、縁端距離⁸⁾によって荷重-すべり変位曲線の形状が大きく異なるため、剛性係数や降伏荷重の算出値は評価方法によって著しく変化する可能性がある。特に釘接合部では初期の直線域がほとんど見られず、原点と降伏点、あるいは変形制限や安全率などの各種判断基準に基づく許容耐力に相当する点を直線で結び算出される剛性係数^{1, 13)}は、抽出するデータ範囲に大きく左右される。本研究では第1折れ点以降すべり変位の増加に伴い、荷重の増加量が小さいもの、荷重が大きく増加するもの、荷重が一旦減少して後再び増加に転じるものなど、形状に変動のある荷重-すべり変位曲線に対して一定の定義で剛性係数を求めるため、原点と実測荷重-すべり変位曲線上の短期許容耐力 (0.80 kN¹⁾) に相当する点を直線で結び剛性係数を求めた。なおこの研究では、設計用の剛性係数を示すことが目的ではなく、仕様の違いによる耐力特性の比較を目的としているため、この定義に従って剛性係数を算出した。接合部の降伏荷重の算出法には耐力壁の許容耐力評価法を準用するもの¹³⁾と ASTM D5652¹⁸⁾ に準じて行うものの2つが現在一般的に用いられている。本研究では前者の方法では適切に評価できない場合があったため、後者の方法を採用した。具体的には、最大荷重の0.1倍と0.3倍の点を結んだ直線を第一直線とし、第一直線を釘径の5%平行移動した直線と荷重-すべり変位曲線との交点より降伏荷重を求めた。吸収エネルギーは荷重が最大荷重を超えて最大荷重の80%に達するまでに接合部が吸収したエネルギーとした。なお試験体78体中5体は、すべり変位が40 mmを超えても顕著な荷重低下を示さなかったため、ここでの最大荷重および吸収エネルギーは40 mm変位時までの値

である。

3.1.2 材厚が釘接合部のせん断性能に及ぼす影響

Table 1 に試験より得られたせん断性能値を、Fig. 3 に剛性係数と材厚の関係を、Fig. 4 に降伏荷重および最大荷重と材厚の関係を、Fig. 5 に吸収エネルギーと材厚の関係を示す。ここで Fig. 3~5 の下側横軸は主材厚・釘径比を上側横軸は側材厚・釘径比を示している。

剛性係数は $lm = 7d \sim 14d$ で概ね一定範囲内の値を示し、 $lm = 6d$ と $15d$ 以上の場合で低い値を示した。降伏荷重は $lm = 10d \sim 14d$ で概ね一定の値を示し、 $lm = 9d$ 以下と $15d$ 以上で低い値を示した。

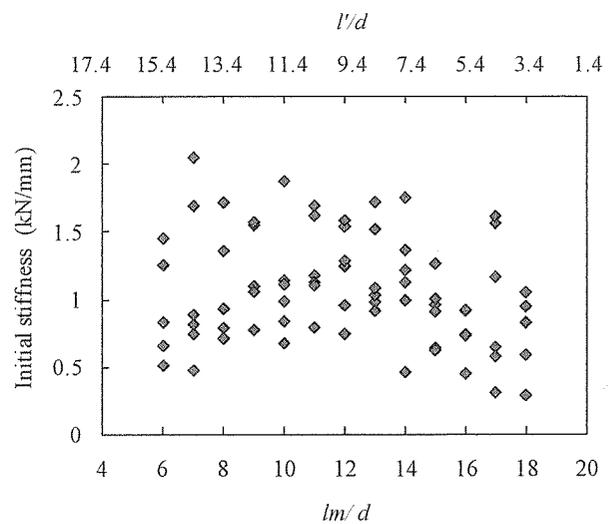


Fig. 3. Relations between initial stiffness of nailed joints and ratio of member thickness to nail diameter.

Note: lm , l and d : see Fig. 1.

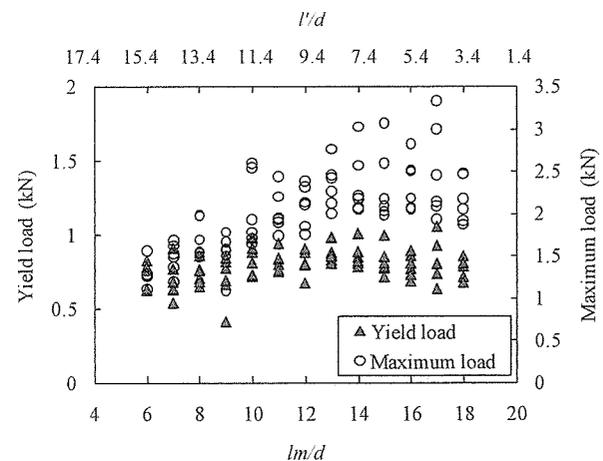


Fig. 4. Relations between shear strengths of nailed joints and ratio of member thickness to nail diameter.

Note: lm , l and d : see Fig. 1.

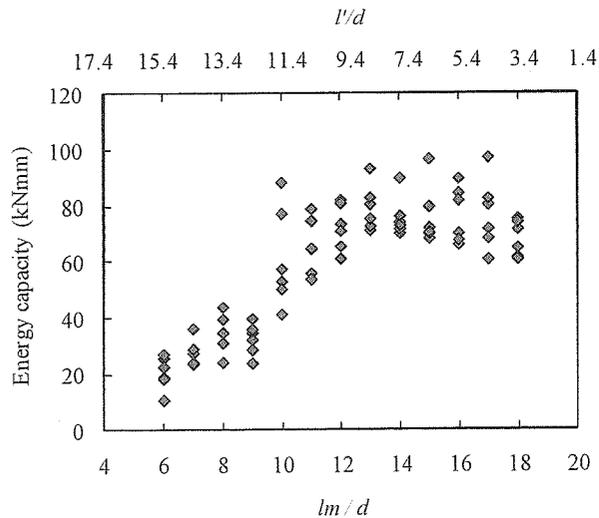


Fig. 5. Relations between energy capacity of nailed joints and ratio of member thickness to nail diameter.

Note: lm , l , lmp and d : see Fig. 1.

梁としての釘を支える木材に生じる面圧力は、主材と側材との境界付近で大きく、釘の頭部や先端部に近い部分では小さい¹⁹⁾。したがって、主材および側材が大きな面圧力を生じる範囲以上の厚さを確保していれば、それ以上厚さが増しても、剛性係数や降伏荷重はあまり増加しないと言える²⁰⁾。本試験結果より、ここで用いた釘接合部においては、主材中の釘長さが $10d$ 以上、側材厚が $7.4d$ 以上で、降伏時までの変形に対して主材および側材が適切に抵抗できることが示された。

最大荷重は主材厚が大きくなるにつれて増加していき、 $lm = 13d \sim 17d$ でほぼ一定、 $lm = 17d$ 以上で低い値を示した。吸収エネルギーも最大荷重の場合と同様に主材厚が大きくなるにつれて増加していき、 $lm = 13d \sim 15d$ でほぼ一定、 $lm = 15d$ 以上で低下する傾向を示した。木質構造設計規準¹⁾に示されている主材の必要最小寸法値 ($lm = 9d$) を持つ試験体について見ると、最大荷重は $lm = 13d \sim 17d$ の試験体と比べて36%低い値を示し、吸収エネルギーは $lm = 13d \sim 15d$ の試験体と比べて58%低い値を示した。最大荷重および吸収エネルギーは主材と側材の厚さによって値が大きく異なり、釘が主材から引抜けた接合部で特に低い値を示した。

主材への釘の打ち込み長さが十分な接合部にせん断力が作用する場合、接合部には釘の引抜き抵抗が存在することと、すべり変位の増加に伴い釘の曲げ変形が増大することから、釘には2次的に軸力が生じる。この2次的な軸力は主材と側材間の摩擦抵抗や釘頭部のめり込み抵抗などを生じさせて、接合部

が降伏した後もせん断力を増加させることから¹⁰⁾、釘接合部の最大荷重には釘の2次的な軸力の影響が大きいことが指摘されている¹⁾。主材への釘の打ち込み長さが釘の引抜き抵抗に影響し、引抜き抵抗が接合部の最大荷重（純粋なせん断力と2次的な軸力による付加的荷重の和）に影響する。また、主材への釘の打ち込み量の大きさは釘が主材から引抜けるときの終局すべり変位にも影響する。終局荷重および終局すべり変位が釘の打ち込み長さによって異なるため、主材および側材の厚さによって最大荷重や吸収エネルギーは大きく変化したと考えられる。

以上の実験結果から、主材、側材厚が一定以上確保されていれば、それ以上厚さが増しても、また主材厚と側材厚の比が変わっても、釘接合部の剛性係数や降伏荷重はほとんど変わらないことが確認された。この点は、弾性床上の梁理論²¹⁾や降伏理論²²⁾などに基づく既往研究の示唆する通りである。一方、釘接合部の終局破壊形態が釘の主材からの引抜けや側材のパンチングアウト、側材の割れであることから、降伏後、終局破壊に至るまでの荷重-すべり変位特性は主材、側材厚に大きく左右される。

3.2 釘の突き出し長さの影響

3.2.1 荷重-すべり変位曲線

釘の突き出し長さが $0d \sim 1d$ （主材厚と釘の突き出し長さの和 (lr) = $9d \sim 10d$) のとき、半数以上の試験体で主材からの釘の引抜けが見られた。釘の突き出し長さが $2d \sim 6d$ ($lr = 11d \sim 15d$) の多くの試験体では40 mm 変形時まで釘が完全に引抜けることはなく、釘の突き出し長さが $5d \sim 6d$ ($lr = 14d \sim 15d$) のときは、一部の試験体に側材厚の不足に起因すると思われるパンチングアウトや側材の割れが見られた。

Fig. 6に釘先端部が主材から突き出している試験体と突き出していない試験体の荷重-すべり変位包絡曲線の一例を示す。この実験の範囲では、側材厚が等しい場合、釘の突き出し長さが短い試験体 ((側材厚 (l), 主材厚 (lm), 釘の突き出し長さ (lmp)) = ($11.4d, 9d, 1d$)) の荷重-すべり変位曲線のほとんどが、突き出していない試験体 ((l, lm, lmp) = ($11.4d, 10d, 0d$)) の荷重-すべり変位曲線のばらつきの範囲内に収まっている。しかし釘の突き出し長さが長い試験体 ((l, lm, lmp) = ($6.4d, 9d, 6d$)) については、突き出していない試験体 (l, lm, lmp) = ($6.4d, 15d, 0d$) よりも第1折れ点以降の荷重増加が少ない傾向が見られた。なお、いずれの場合も、降伏時の荷重には差が見られない。主材厚が等しい場合、釘の突き出しが長い試験体 (l ,

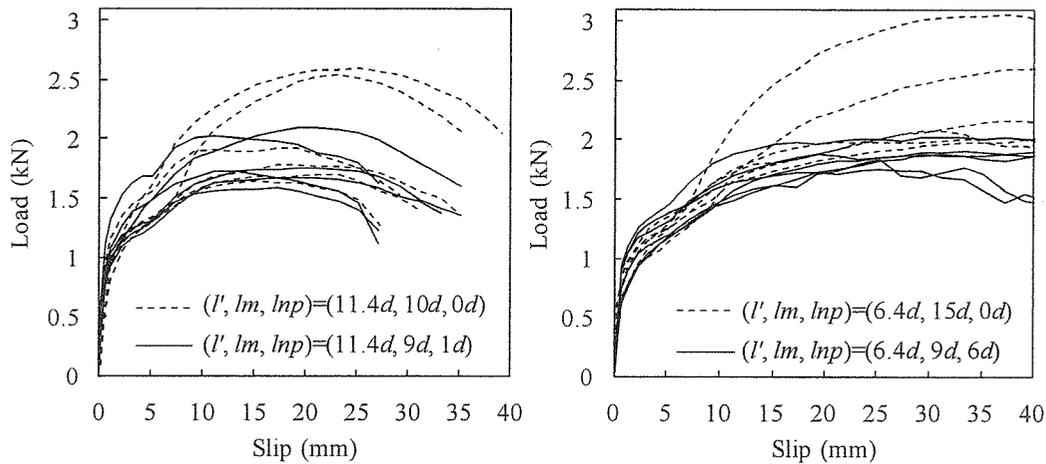


Fig. 6. Load-slip curves of nailed joints with varying nail length projecting from main member.

Note: l_m , l' , l_{np} and d : see Fig. 1.

l_m , l_{np}) = (6.4d, 9d, 6d) は40 mm 変位まで大きな荷重低下が見られず、釘の突き出しが短い試験体 (l' , l_m , l_{np}) = (11.4d, 9d, 1d) よりも大きな靱性を示した。

この実験結果は次のように整理出来る。釘先端部が多少主材から突き出す程度では、主材中の釘のたわみ曲線にはほとんど変化がなく、荷重-すべり変位曲線にも差が生じない。しかし、釘の突き出し長さが大きくなると、釘のたわみ曲線や引抜きに抵抗する釘と木材の接触長さに差が生じるため、降伏後の荷重増加に影響してくる。また、釘接合部が引抜けて破壊する場合の最大変形能は、主材厚そのものよりも、釘長と側材厚の差に依存する部分が多い。ただし、釘の形状寸法、特に釘長さとの比によってたわみ曲線性状が異なるので、釘の種類によって釘の突き出しの影響には定量的な幅があると推察できる。

試験より得られた荷重-すべり変位包絡曲線から、剛性係数、最大荷重、破壊するまでに吸収したエネルギーを算出した。本節の試験体36体中3体は、すべり変位が40 mm を超えても顕著な荷重低下は示さなかった。そのため、ここで求めた最大荷重および吸収エネルギーは40 mm 変位時までの値となる。

3.2.2 釘の突き出し長さが釘接合部のせん断性能に及ぼす影響

Table 2 に試験より得られたせん断性能値を、Fig. 7 に主材厚および釘の突き出し長さが異なる釘接合部の剛性係数を示す。釘の突き出し長さにかかわらず釘が突き出した試験体は突き出していない試験体と概ね近い剛性係数を示した。この結果は、初期変形時の釘接合部のせん断抵抗には主材と側材の境界

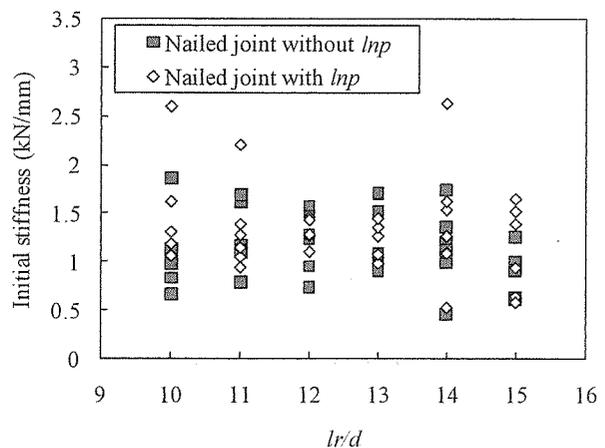


Fig. 7. Initial stiffness of nailed joints with varying nail length projecting from main member.

Note: l_r , l_{np} and d : see Fig. 1.

近傍における部材のめり込み抵抗が大きく影響するため^{19, 20)}、主材厚および側材厚が一定の範囲を越えて増加しても剛性係数にはほとんど寄与しないという3.1.2の結果に対する考察を検証するものとなっている。

主材厚および釘の突き出し長さが異なる釘接合部の最大荷重を Fig. 8 に、吸収エネルギーを Fig. 9 に示す。最大荷重の場合、釘が突き出していない試験体は突き出している試験体の平均値に対して、 $l_r=10d \sim 12d$ のとき0.89~1.43倍の値を示し、 $l_r=13d \sim 15d$ のとき0.99~1.62倍の値を示した。吸収エネルギーの場合、釘が突き出していない試験体は突き出している試験体の平均値に対して、 $l_r=10d \sim 12d$ のとき0.79~1.70倍の値を示し、 $l_r=13d \sim 15d$ のとき1.00~1.46倍の値を示した。釘の突き出し長さが4d (l_r

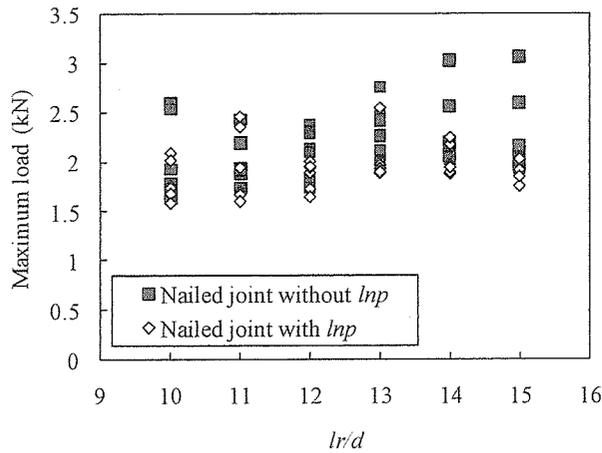


Fig. 8. Maximum load of nailed joints with varying nail length projecting from main member.

Note: lr , l_{np} and d : see Fig. 1.

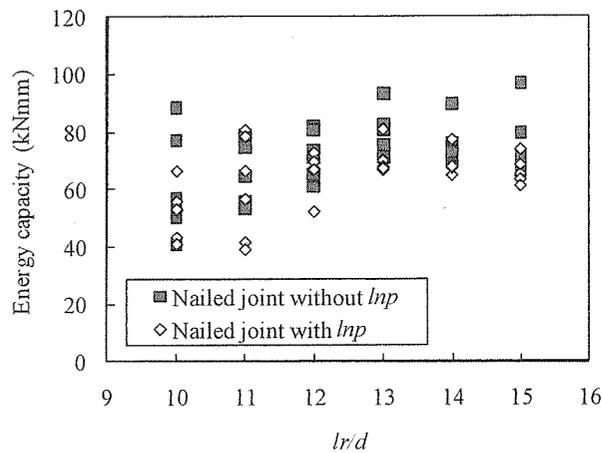


Fig. 9. Energy capacity of nailed joints with varying nail length projecting from main member.

Note: lr , l_{np} and d : see Fig. 1.

= $13d$) 以上のとき, 釘の突き出しの有無によって最大荷重および吸収エネルギーに差が生じ, 釘が突き出していない接合部は突き出ている接合部より大きい値を示す傾向が見られた。

主材中の釘長さが十分な釘接合部では, 釘の引抜き抵抗や釘の曲げ変形の増大によって釘には2次的に軸力が発生するが, 釘の打ち込み長さによって引抜き抵抗は異なるため, 釘の突き出しの有無で降伏後の付加荷重に影響する釘の2次的な軸力に差が生じる。また釘の曲げ変形が進むと, 釘先端側の一部が主材中で接合部のすべり変位とは反対方向に跳ね上がるように変形し, 降伏荷重範囲内ではほとんどせん断力に寄与していなかった部分の木材がこの跳ね上がりを抑え込むように働く^{23, 24)}。しかし釘の一部が主材を突き抜けている場合は突き出た部分が変

形拘束されないため, 降伏後は釘の突き出しの有無によって, 釘長に添って生じる木材の面圧応力分布に差が生じる。釘の突き出し長さが $4d$ 以上の接合部ではこれらが相乗的に影響し, 釘の突き出しの有る試験体と無い試験体で最大荷重に差が生じている。また, Fig. 6に見られたように釘の突き出しの有無に関わらず終局すべり変位にはほとんど差が無いため, 降伏以降の最大荷重の差がそのまま吸収エネルギーに反映されて, 釘の突き出しの有無で吸収エネルギーに差が生じたと考えられる。

またこの比較結果は, 釘先端が主材から突き出していない釘接合部の剛性, 降伏荷重, 最大荷重, 終局変位が主材および側材中で生じる力の分布にそれぞれどのように関係し, 主材および側材厚が荷重-すべり変位特性にどのように影響しているかを良く示している。

これまで木材接合部の耐力評価は許容耐力(損傷限界)を基本とし, 終局耐力(安全限界)に対しては, 仕様規定や安全率を定めることにより, 付加的な安全余裕を確保するという考え方に立って来た。このため, 上記のような釘接合部の降伏後の荷重-すべり変位特性と, それに及ぼす主材厚, 側材厚, 釘の突き出しの影響については, 必ずしも十分な検討が行われて来なかった。

しかし, 釘接合部の部材構成が仕様規定で詳細に定められていたものから施工条件に応じて多様化が進んでいることを考えると, 主材厚および側材厚の様々な組み合わせに対して, 降伏後の荷重-すべり変位特性とその発現機構を体系的に理解しておくことが重要になって来ると考えられる。本試験で用いた釘接合部は限定的な仕様であるが, ここで得られた結果は, 主材と側材の組み合わせによる釘接合部の耐力発現機構を整理し, 釘接合部の耐力評価に資するものとする。

4. 結 論

釘接合部の1面せん断試験を行い, 主材中の釘長さ, 側材厚, 主材からの釘の突き出し長さが釘接合部のせん断性能に及ぼす影響を調べ, 以下の結論を得た。

1. 本試験に用いた釘接合部において, 主材中の釘長さが釘径の10倍以上, 側材厚が釘径の7.4倍以上で, 剛性係数および降伏荷重は概ね一定の値を示した。主材中の釘長さや側材厚はこの範囲内であれば, 降伏時までの変形に対してほとんど寄与しないことが示された。
2. 最大荷重および吸収エネルギーは主材中の釘長

さが長くなるにつれて増加していき、主材中の釘長さが最大荷重の場合は釘径の17倍、吸収エネルギーの場合は15倍を超えて、側材厚が不足するようになると減少していく。日本建築学会の木質構造設計規準・同解説では主材中の釘長さは釘径の9倍以上、側材厚は釘径の6倍以上としているが、この範囲内にあるときでも最大荷重や吸収エネルギーには大きな差が生じることに留意する必要がある。

3. 主材中の釘長さおよび側材厚が木質構造設計規準値を満たす場合、主材からの釘の突き出しは剛性係数へほとんど影響しないことが確認された。釘の突き出し長さが大きい接合部の最大荷重は、突き出してない接合部よりも低い値となったことから、大きな釘の突き出しは降伏後の荷重増加に影響することが示された。しかし、釘の突き出しが大きい接合部と突き出してない接合部間で終局すべり変位にはほとんど差が見られなかったため、釘の突き出しの有無が吸収エネルギーに与える影響は最大荷重ほど大きくないことが示された。

文 献

- 1) 日本建築学会：“木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－”，日本建築学会編，丸善，東京，2006，pp. 266-278, 367-376.
- 2) 長沼 重：建築学会論文集 18, 84-93 (1940).
- 3) 辻井静二，後藤一雄：日本建築学会論文報告集 60, 465-468 (1958).
- 4) 神谷文夫，鴛海四郎：木材学会誌 35, 313-319 (1989).
- 5) 平井卓郎，安藤康光，上田恒司：木材学会誌 37, 1157-1166 (1991).
- 6) 岡部 実，河合直人，安村 基：日本建築学会大会学術講演梗概集，関東，1997，pp. 37-38.
- 7) 園田里見，神谷文夫，鴛海四郎，中谷 浩，若島嘉朗：日本建築学会大会学術講演梗概集，北陸，2002，pp. 45-46.
- 8) 矢永国良，持田立男，佐々木義久，平井卓郎：木材学会誌 50, 30-36 (2004).
- 9) 日本建築学会：“木構造設計規準・同解説”，日本建築学会編，丸善，東京，1961，pp. 166-175.
- 10) Hirai, T., Wakashima, Y.: *Mokuzai Gakkaishi* 42, 1195-1201 (1996).
- 11) 平井卓郎：北海道大学農学部演習林研究報告 44(4), 1307-1328 (1987).
- 12) 神谷文夫，平嶋義彦，畑山義男：木材学会誌 29, 925-929 (1983).
- 13) (社)日本ツーバイフォー建築協会：“2002年枠組壁工法建築物構造計算指針”，枠組壁工法建築物設計の手引・構造計算指針編集委員会編，工業調査会，東京，2002，p. 235.
- 14) ISO：“ISO 6891: Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics”，1983.
- 15) Hirai, T., Tsujino, T., Sasaki, Y.: Proc. 9th World Conference on Timber Engineering, Portland, USA, 2006, 2.8.3 (CD-ROM).
- 16) Hirai, T., Qingjun, M., Sawata, K., Sasaki, Y., Koizumi, A., Uematsu, T.: Proc. 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, Japan, 2008, 4-451 (CD-ROM).
- 17) 三井信宏，神谷文夫，杉本健一，青井秀樹：構造工学論文集 50B, 309-314 (2004).
- 18) Annual Book of ASTM Standards: ASTM D5652 (1995).
- 19) 若島嘉朗，平井卓郎：木材学会誌 39, 1377-1385 (1993).
- 20) 平井卓郎：木材学会誌 37, 303-308 (1991).
- 21) 沢田 稔：北海道大学農学部演習林研究報告 33(1), 139-166 (1976).
- 22) Johansen, K. W.: Publication 9, International Association of Bridge and Structural Engineering, 249-262 (1949).
- 23) 日本木材学会木材強度・木質構造研究会：木質構造研究の現状と今後の課題 Part- II, 68-102 (1994).
- 24) 中谷 浩，沢田 稔：北海道大学農学部演習林研究報告 37(3), 687-719 (1980).