

招待論文

鋼板ウェブを持つ木材接合部の
剪断耐力に関する若干の考察SOME CONSIDERATIONS ON LATERAL RESISTANCE OF
MECHANICAL WOOD-JOINTS WITH METAL WEBS

平井 卓郎*

By Takuro HIRAI

Some considerations on the lateral resistance of mechanical wood-joints with metal fastenings and metal webs are presented. An empirical criterion for the cracking fracture of the joints is derived from the results of particular bolt-wood bearing tests, introducing a quantity, "fracture bearing displacement". The characteristic fracture behaviors of common type mechanical wood-joints are discussed considering both the above fracture criterion and the deflection curves of the fastenings in the joints. This fracture criterion is adopted in a tentative numerical analysis for the maximum lateral resistance of drift pin joints and bolt joints. A stepwise linear analysis based on the generalized theory of a beam on an elastic foundation is applied to calculate the load-slip relationship and the maximum lateral resistance of the joints, which are compared with the previous test results of them.

1. まえがき

一般に木質骨組構造で用いられる接合法は、在来の木造継手仕口、釘やボルトのような金属接合具を用いた接合法と接着剤を用いた接合法とに大別出来る。このうち、在来木造継手仕口は一般木造住宅程度の軽構造で用いられる場合がほとんどで、寺社建築等特殊な場合を除いて、集成材構造を主とする中・大規模木質骨組構造の接合法として用いられることは少ない。また、中・大規模木質骨組構造を対象とした接着接合法としては交差重ね合わせ継ぎ手 (cross-lapped glued timber joints)^{1,2)}が代表的で、特にニュージーランドでは既に多くの施工例が見られる。しかし、わが国では建築法規上の問題もあり、現在のところまだ一般的な工法として実用化されてはいない。接着接合法は特に接合部剛性の点から有効で、今後の実用的発展が期待されるところであるが、圧縮圧、接着剤硬化条件等工程管理の適否によって終局耐力が左右されやすいため、建設現場での施工に対する信頼感が薄く、工場内接着に限って認められているのが実状である。この点については、長大な部材や組み上がった骨組の道路輸送が困難であると言う、わが国の交通事情も大きく影響しているように思われる。このような事情から、わが国の現状における中・大規模木質骨組構造の接合法としては、現場施工管理が容易な、各種金属接合具を用いた接合法が中心となっていてと考えて良いものと思われる。また、骨組部材断面とのバランスから、ウェブ材、ガセット材には木材や合板より

* 農博 北海道大学助手 農学部林産学科 (〒060 札幌市北区北9条西9丁目)

も鋼板が用いられることが多いようである。現在普通に用いられている金属接合具には釘、ボルト、ドリフトピン、ラグスクリュー等があるが、これらを用いた接合部は、いずれも外力に対しある程度のすべりや回転を生じながら抵抗するいわゆる半剛節接合部 (semi-rigid joints) である。特に、これらの木材接合部は一般に非線形半剛節変形挙動を示し、それが骨組構造全体の变形、履歴特性を大きく支配する場合が多いため、木質骨組構造の弾塑性変形、動的応答特性等を考える際には非常に重要な要素となる。したがって、そのような接合工法を用いた木質骨組構造の設計を合理的に行うには、接合部の半剛節挙動を十分考慮に入れることが望まれるわけであるが、半剛節骨組の構造解析は現時点ではまだ研究段階にとどまっており実際の構造設計業務に反映されるまでには至っていない。

さて、木質半剛節骨組の構造解析は大きく次のようなふたつのステップに分けて考えることが出来る。初めのステップは接合部の基本構成要素である接合具1本あたりの変形・耐力性能の評価であり、2番目のステップはそれを基本要素とする半剛節骨組全体の弾塑性構造解析である。半剛節骨組の構造解析法については近年多くの研究成果³⁻¹⁵⁾が蓄積されて来ており、接合部のバネ定数の扱い方や境界条件の与え方等、まだいくつかの問題点が残されているが、おおむね実用に耐えるレベルに達しているように思われる。これに対して、接合部基本構成要素の変形・耐力性能評価は、主としてその荷重-すべり性能についてかなりの研究蓄積¹⁷⁻²⁵⁾が整いつつあるものの、依然として検討課題が多いように思われる。最も基本的な問題点は接合部の最大耐力評価法が確立されていないことである。現時点では残念ながら、正しい基礎データを得るための接合部耐力試験法の十分な検討も、接合部の耐力評価を行うための破壊条件の検討、すなわち接合部破壊メカニズムに関する議論も極めて不十分であるように思われる。そのため、かなりの部分本質的に共通した変形・破壊メカニズムを持つはずの各種金属接合具に対し、それぞれ全く別個の工学的判断に従って許容耐力が設定されているのが現状である²⁶⁾。このことは、現実の構造設計の立場から考えると、接合部の安全率に対する一貫した評価基準が全く整えられていないことを意味する。本研究では、実用的にも非常に重要なこの点に関して若干の基礎的な検討を試みることにしたい。

2. 各種金属接合具を用いた木材接合部の破壊形態と接合部の割裂型破壊に対する破壊条件

木材接合部の最大耐力及び許容耐力を考えるにあたっては、まず釘、ボルトその他各種の接合具を使用したときの破壊形態を整理しておく必要がある。Table 1は木構造計算規準²⁶⁾に記載されている4種類の金属接合具 (釘、ボルト、ドリフトピン、ラグスクリュー) について普通に起こり得ると考えられる接合部の破壊形態、または接合部が実用的耐力限界に達したときの状態をまとめたものである。現在、わが国の中・大

Table 1. Typical critical states of mechanical wood-joints at their practical maximum lateral resistance.

Joint types	Critical states at the maximum lateral resistance
Nail joints	Withdrawal, Punching, Tearing of nail head, Excessive slip, Cracking of wood-member.
Lag screw joints	Cracking of wood-member, Excessive slip, Tearing of screw head, Withdrawal.
Drift pin joints	Cracking of wood-member, Excessive slip, Withdrawal.
Bolt joints	Cracking of wood-member, Excessive slip, Tearing of bolt head.

規模木質骨組構造で最も一般的なボルト接合部はほとんどの場合、見かけの初期直線域（内容的には弾性域ではない）を経た後、非線形の荷重－すべり挙動を示しながら、終局的に木材が割裂破壊する。この変形・破壊挙動はボルトが全く曲がることなく木材中にめり込んで行くときの面圧挙動²⁷⁾から容易に類推し得るものである。ボルト接合部の荷重－すべり曲線はボルトの形状比（木材厚のボルト径に対する比）や荷重方向に大きく左右され、ボルトが短いときや木材の繊維に垂直方向に荷重が加わるときには相対的に脆性的な、またボルトが長いときや木材の繊維方向に荷重が加わるときには逆に初期直線域が短くねばりのある挙動を示す。また、ボルト接合に見られる割裂型の破壊は通常急激な荷重減少をともなうため非常に明白である。ただし、接合部の破壊挙動は実験方法の適否²⁸⁾に非常に影響され易いので、実際の接合部ではどのような境界条件（材端、材縁部の拘束状態）のもとに外力が加わっているかを十分考慮した上で実験方法を選択しないと、正しいデータを得ることは難しい。ボルト接合と似通ったドリフトピン接合も、特に細長いドリフトピンを使用しない限り、破壊形態はほぼ同様である。一方、あらゆる規模の木質構造で多用される釘接合で特に木材の繊維方向に荷重が加わる場合、割裂破壊は少なく、主材（木材）からの釘の引き抜け、パンチングと呼ばれる釘頭の貫通（ウェブ材、ガセット材として合板や木材を使用した場合）、釘頭の引きちぎれ（ウェブ材、ガセット材として鋼板を使用した場合）と言った破壊形態が見られる他、はっきりした破壊現象を示す前に接合部すべり変位が増大し、実際使用に耐えなくなってしまう場合も多い。これらの破壊挙動から類推されるように、釘接合部の荷重－すべり挙動は多くの場合ボルト接合部と比べより延性的である。また、ラグスクリュー接合はその接合形態から、これら両者の中間的な範疇に入り、接合具の形状比や木材の材質、形状寸法等によって様々な挙動を示すものと思われる。

それでは概観的に見て形状の類似した各種接合具と、同じ木材、ウェブ材から構成される接合部において、なぜこのような破壊挙動の差異が生じるのであろうか。この差異は結局、外力を受けたときの各接合具の撓み曲線の違い、すなわち面圧応力分布の違いと、そのような一様でない面圧応力下における木材の割裂抵抗の違いに起因しているように思われる。そこで、著者らはFig. 1に示されるような特殊な鋼製荷重ブロックを用いて、木材の繊維方向に圧縮型の部分面圧力^{28, 29)}を加えてみた。図に見られる2種類の荷重ブロックのうち、I-タイプは材中央部に面圧応力が集中するタイプの接合法（センターウェブ型接合法）を、O-タイプは材縁部に面圧応力が集中するタイプの接合法（サイドウェブ型接合法）を想定したものである。荷重ブロックの有効面圧長さ（ t_e ）は木材試験体の材厚（ t ）の20%から90%まで10%毎に8段階に変えて

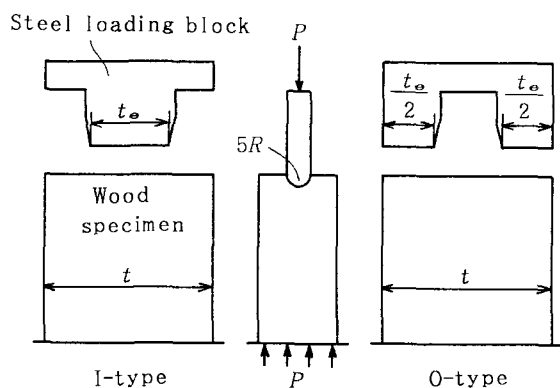


Fig.1. Bolt-wood bearing tests with particular loading blocks.

ている。この実験から得られた平均面圧応力－変位曲線のうち、有効面圧長さ比（ t_e/t ）が30%、60%、90%の場合を比較するとFig. 2（I-タイプ）、Fig. 3（O-タイプ）のようになる。これらの実験結果を整理すると次のようになる。まず、面圧応力－変位曲線の初期傾きは有効面圧長さ比が変わってもほとんど変化しない。また最大面圧応力は有効面圧長さ比が小さい程高くなる傾向が認められるが、荷重ブロックの形状等試験方法の影響もあり²⁹⁾、本来のどの程度定量的な意味を持つか明かではない。さらに最も興味深いことは、見かけの初期直線域を越えてからの面圧応力－変位曲線が非常にはっきりと有効面圧長さ比の影響を受け、有効面圧長さ比が増す程脆性的な挙動を示すようになることである。これは、有効面圧長さ比

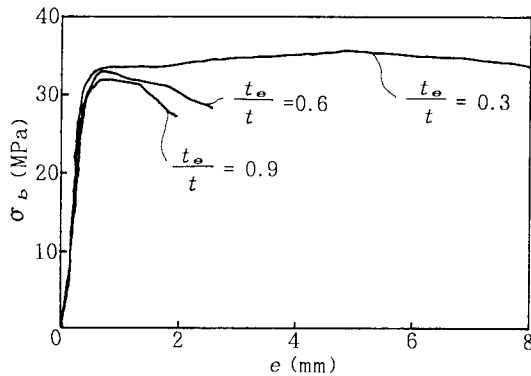


Fig.2. Bearing stress-displacement curves of I-type bearing specimens. Bearing stress σ_b is given by $P/d \cdot t_o$.

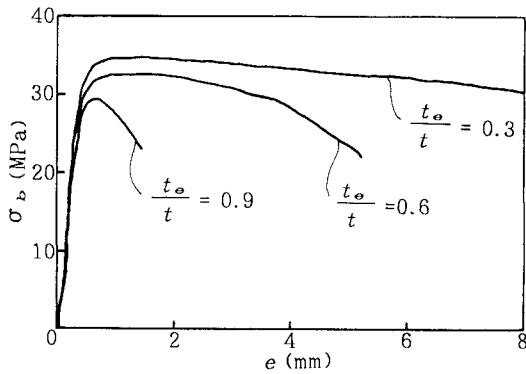


Fig.3. Bearing stress-displacement curves of O-type bearing specimens.

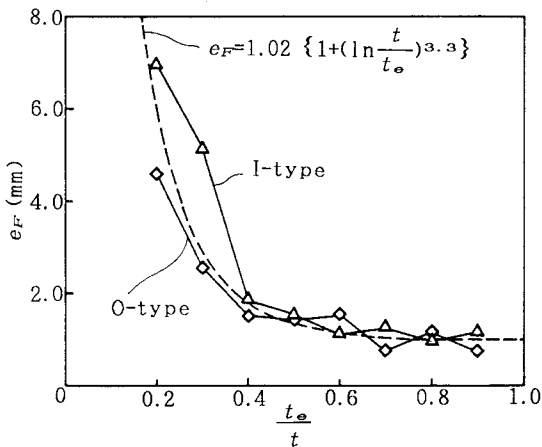


Fig.4. The relationship between t_o/t , the effective ratio of bearing length, and e_F , the bearing displacement at maximum bearing stress.

が小さいときには、荷重ブロックと接した木材試験体の一部に高い面圧応力が生じ、そこが部分的に割裂破壊を起こし得る条件に達したとしても、隣接するそれ以外の部分からの拘束作用により、それが即座に試験体全体の終局的な破壊には結び付かないのに対し、有効面圧長さが材厚に近づくと、破壊面圧応力に達した部分とそうでない部分とのバランスから、そのような拘束作用によって試験体全体が持ちこたえることが困難になることを意味しているように思われる。

この問題を定量的にとらえるのはなかなか難しいが、一つの現実的な判断基準として、最大面圧応力に対応する面圧変位 (e_F) の大きさと有効面圧長さ比 (t_o/t) との関係に注目すると、Fig. 4 のようになる。Fig. 1 の実験は圧縮型の面圧試験となっているため、本来破壊時に開いたり、ずれたりするはずの試験体底面（木口面）が拘束されてしまっている²⁸⁾。そのため、特に有効面圧長さ比の小さい試験体では、面圧応力-変位曲線から破壊を示す急激な荷重減少をはっきり検出することが困難である。しかし、木口面が自由境界となっている実際の接合部や引張型面圧試験体では、同じ最大面圧応力に対し、より明確な破壊挙動を示すはずである。したがって、Fig. 4 に示される面圧変位 (e_F) を破壊面圧変位と考えても大きな誤りはないものと思われる。ここで、I-タイプとO-タイプの実験結果に有意な差があるかないかについてはひとまず無視し、一括して実験曲線を当てはめると図中の破線のようになり、破壊面圧変位 (e_F) は有効面圧長さ比が1に近づくとある一定値（この実験の場合には1.02mm）に収束し、有効面圧長さが減少して0に近づくと無限大に発散して行くと言う傾向が認められる。この結果を金属接合具を用いた木材接合部の変形・破壊挙動にあてはめてみることにしよう。いま、Fig.5 に示されるように、荷重ブロックの有効面圧長さ ($t_o/2$) を、実際の接合部において面圧力を受ける木材微小部分の材縁部（最大集中面圧応力の生じる位置）からの距離に相当するものと考え、上述の破壊面圧変

位 (e_F) は材縁部から材中央部に向かって降伏が進行し、この位置の面圧応力が破壊面圧応力に達した後、接合部を構成する木材が終局的に破壊するときの限界面圧変位と考えることが出来よう。この考察に基づき、接合具の任意の位置における面圧変位がその位置の破壊面圧変位に達したときに木材が終局的に割裂破壊すると言う仮定を用いると、接合部が割裂型の破壊形態をとるときに接合具撓み曲線の状態は、例えば Fig. 6(a) のようになるものと思われる。これに対し、もし接合具が例えば Fig. 6(b) のように大きく曲げ変形すると、接合具撓み曲線が図中に破線で示される破壊面圧変位曲線と接することなく、したがって木材が割裂破壊することなく、接合具が木材から引き抜けたり、あるいはその他の実用的耐力限界に達することになる。このような接合具の撓み挙動は釘接合では一般的に見られ²⁰⁾、ことに釘が木材を貫通していない場合には実際の有効面圧長さ比が更に小さくなるため、割裂破壊以外の破壊形態をとることが多くなるものと思われる。したがって、この場合には設計用の基礎資料として用いるべき破壊条件は釘の引き抜け、許容接合部すべり、釘頭の破断耐力その他実際に起こると考えられる条件を想定して選択するのが合理的だと言うことになる。また、適切な許容接合部すべり量の設定が難しい場合には、Johansen、Larsen らによって展開されて来た降伏理論¹⁷⁾に基づく耐力限界条件の適用も実用的には有効かも知れない。

以上のような考察に従い、上述の割裂破壊に対する破壊条件と、引き抜け、過剰接合部すべりその他、実際に起こり得る破壊形態に対応する何らかの合理的な破壊条件とを適宜組み合わせることによって、木材接合部の最大耐力を定量的に評価出来るようになれば、接合具の種類によらず共通の統一的な設計思想に基づいて、木材接合部の許容設計耐力を与えることが可能になるものと思われる。木材接合部の最大耐力を解析的に求めるために必要となる接合具の撓み曲線は、弾性床上の梁理論を用いた非線形解析によって与えられるが、接合部の荷重—すべり曲線はこの計算の仮定で必然的に得られるので、接合部の変形性能及び最大耐力がひとつの解析手順に従って連続的に計算されることになる。

接合部の割裂型破壊に関する上述の破壊条件は言うまでもなく現象論的な考察によるもので、破壊のメカニズムを正確に記述しているわけではない。この問題は結局、接合具と木材の接触部分近傍に生じた微小な初期クラックが徐々に3次的に広がった後、終局的に試験体の破壊を導くに至る条件をどのように求めるかと言う点に帰着するものと思われるが、木材の破壊力学に関する現在の基礎データ蓄積状況を考えると、その定量的な検討には今後とも多少の時間を要するようになると思われる。

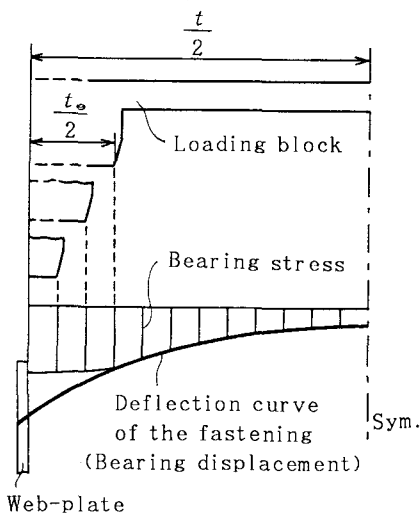


Fig. 5. Actual bearing stress distribution under a fastening.

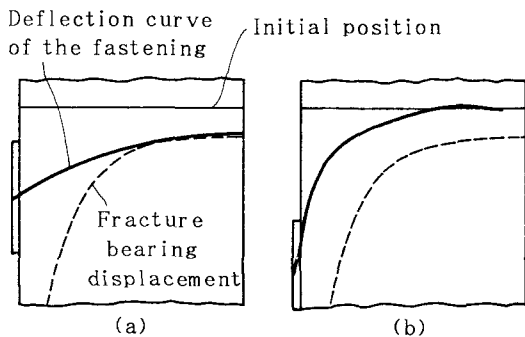


Fig. 6. Two typical deflection curves of a fastening at the maximum lateral resistance : (a) Deflection curve for a cracking fracture ; and (b) Deflection curve at the other practical critical states.

3. 金属接合具を用いた木材接合部への弾性床上の梁理論の適用

木材接合部の変形解析では、木材を弾塑性床、接合具をそれに支えられた弾塑性梁と仮定するのが便利である^{18, 19, 21-25}。ドリフトピンや多くの釘のように比較的引き抜き抵抗の低い接合具では、接合具に加わる軸力の影響は実用的に無視出来るものと思われるが、ボルトやラグスクリュー、また一部の釘では軸力が最大耐力にかなり大きな影響を及ぼす場合がある。この軸力は単に施工時の締め付けによって与えられるだけではなく、以下に述べるように接合部の変形にともなう2次的な力としても生じる。すなわち、接合部に外力が加わりこれらの接合具が曲げ変形すると、接合具の初めの軸方向の投影長さは当然最初の長さより短くなるはずである。このとき、接合具が木材から引き抜けなければ、この軸方向の長さ減少は、座金やウェブ材の木材中へのめり込み変位となって現れるはずである²⁵。したがって、接合具は座金やウェブ材が木材中にめり込むのに要する面圧力と釣り合うだけの軸引張力を受けることになる。この軸力は接合具に対し、外力による曲げモーメントとは逆向きの曲げモーメントとして、またボルト頭部の回転を拘束する反力モーメントとして働く。更に、接合具撓み曲線に対するこれらの直接的な効果に加え、この軸力はウェブ材と木材との間に大きな摩擦抵抗を生じさせ、接合部の最大耐力を増大させる場合がある³⁰。

以上の点を考慮すると、木材中に置かれた接合具の撓み曲線に関する、最も一般的な形の基礎線形微分方程式は次の(1)式のように与えられる^{25, 31}。ただし、(1)式においてX-軸は接合具の初めの軸方向、Y-軸はそれと直交方向である。

$$\frac{d^4 y_I}{dx_I^4} - \frac{N_I}{E_s I_{sI}} \cdot \frac{d^2 y_I}{dx_I^2} + 4\mu_I^4 y_I = 0 \quad (1)$$

ここで、 N_I = 軸力、 $E_s I_{sI}$ = 接合具の曲げ剛性、 $\mu_I = \sqrt[4]{\frac{k_{oI} d_I}{4 E_s I_{sI}}}$ 、
 k_{oI} = 面圧定数^{20-23, 27}、 d_I = 接合具径

ドリフトピンや多くの釘のように、軸力影響が無視できる接合法に対しては、(1)式は次のように簡単になる^{22, 23, 25}。

$$\frac{d^4 y_I}{dx_I^4} + 4\mu_I^4 y_I = 0 \quad (2)$$

(1)式はまた、接合具の一部が木材上にない場合、あるいは初めは木材に支えられていても、変形の過程で木材から浮き上がってしまったような場合にたいしては(3)式のように、同様の条件に対し(2)式は(4)式のようなになる^{23, 25}。

$$\frac{d^4 y_I}{dx_I^4} - \frac{N_I}{E_s I_{sI}} \cdot \frac{d^2 y_I}{dx_I^2} = 0 \quad (3)$$

$$E_s I_{sI} \frac{d^4 y_I}{dx_I^4} = 0 \quad (4)$$

各種の金属接合具を用いた木材接合部の非線形荷重-すべり曲線と、その過程における接合具の撓み曲線は、以上の線形微分方程式をそれぞれの接合法に応じた境界条件のもとに適宜組み合わせ、段階的線形解析を行うことによって与えられる^{22, 23, 25}。また、著者自身はこれらの基礎微分方程式から直接数値解を求めているが、同じ方程式を用いて弾性床上の梁の剛性マトリックスを誘導し、有限要素法によって非線形解析を行っても結果は同様である^{21, 24}。

4. 木材のボルト及びドリフトピン接合部の剪断耐力計算例

ここでは、破壊面圧変位に注目した割裂破壊条件と、弾性床上の梁理論に基づく段階的線形解析法を、試みに既往のボルト及びドリフトピン接合部剪断耐力試験結果³⁰⁾に適用してみることにしたい。試験体の種類、形状はFig. 7に示される通りで、センターウェブ型ドリフトピン接合(DC)、センターウェブ型ボルト接合(BC)、サイドウェブ型ボルト接合(BS)の3種類である。ドリフトピン及びボルトの径(d)は10mm形状比(t/d)は4、6、8、10の4種類で、試験開始時点ではナットは座金またはウェブ鋼板に軽く触れる程度とし、初期軸力を発生させるような締め付けは行っていない。段階的線形解析による荷重—すべり曲線の計算と最大荷重の予測には、以下のような仮定と基礎定数を用いた。ここではBASIC言語を用いてマイクロコンピュータで数値解析を行っているため、計算時間を短縮出来るようにいくつかの簡略化を行っている。

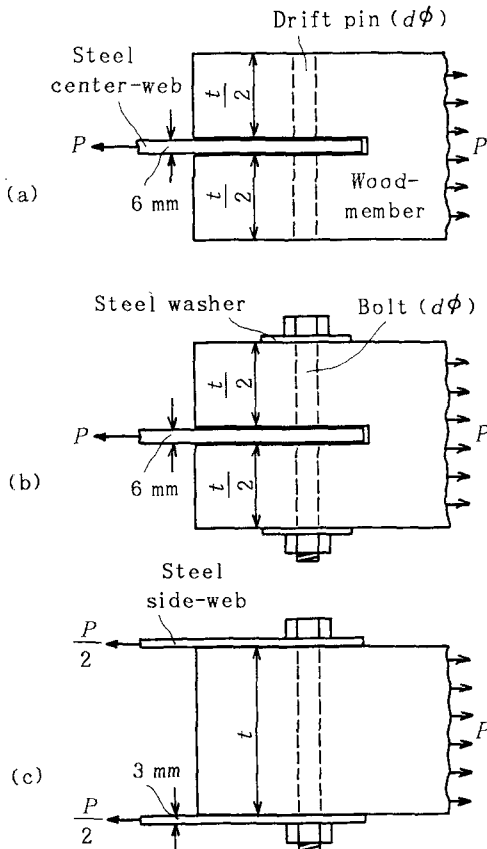


Fig.7. Joint tests. (a) Drift pin joints ; (b) Bolt joints with a center-web ; and (c) Bolt joints with side-webs. In each joint type, fastening diameter $d = 10\text{mm}$ and thickness of wood-member $t = 4d, 6d, 8d$ and $10d$.

1) ボルトに加わる軸力は、本来各計算ステップにおいて必要な繰返し収束計算を行わず、近似的に前ステップまでの撓み曲線を用いて計算することにした²⁵⁾。

2) ボルト接合部に生じる軸力は上述のようにボルト頭部の回転もある程度拘束するが、これを考慮すると計算の各ステップでやはり繰返し収束計算が必要になる。この計算を省略するため、ボルト頭部は回転自由と仮定した²⁵⁾。この仮定は接合部剛性をやや低めに与えることになるはずであるが、計算される数値そのものにはそれほど大きな差はないものと思われる。なぜなら、この仮定はボルトの撓み曲線形状にある程度影響を与えはするものの、頭部回転拘束効果を無視することによって撓みが過大に見積もられる分だけ、逆に軸力そのものは多少大きめに計算されることになり、誤差のかなりの部分は相殺され得るものと思われるからである。

3) 木材の基礎面圧性能は既報²⁷⁾で与えられた実験式に、試験材料の比重とボルト径を代入して計算した。

4) 最大荷重の判定に必要な破壊面圧変位曲線は上述の実験結果から(5)式で与えられるものとし、(5)式中の基準破壊面圧変位(e_{Fo})は上述の実験式²⁷⁾から計算して代入するものとした。ここで言う基準破壊面圧変位は木材が材厚全長にわたって面圧荷重を受ける場合、すなわち有効面圧長さ比100%の場合の破壊面圧変位である。破壊条件の判定は、計算の各ステップで、接合具の軸方向の各位置においてめり込み変位を計算し、いずれかの値がその位置の破壊面圧変位に達したときに接合部の割裂破壊が起こるもの

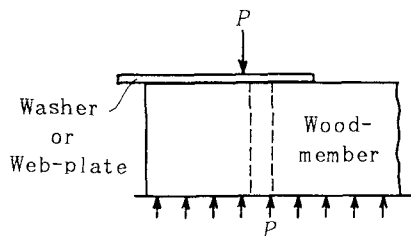


Fig. 8. Washer(Web-plate)-wood bearing test.

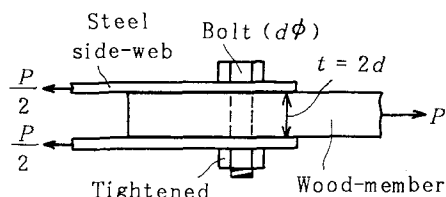


Fig. 9. Joint test for the evaluation of the effect of frictional resistance on lateral resistance.

とし、そのときの荷重を最大荷重とした。

$$e_F = e_{FO} \left\{ 1 + \left\{ \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \right\}^{3.3} \right\} \quad (5)$$

ここで、 e_{FO} = 基準破壊面圧変位

5) 接合具の弾塑性曲げ性能は、鋼材が降伏後一定歪硬化するものと仮定し、既報^{21, 22)}で求めた定数値（ヤング係数 = 200 GPa, 降伏応力 = 316 MPa, 歪硬化率/ヤング係数 = 0.105）を用いて計算した。なお試算の結果から、既報でもう一つの仮定として用いた完全塑性仮定は荷重及び変位が小さいときには有効であるが、今回のように接合部が破壊するまでの挙動を追求しようとする場合には、計算値が途中から大きく安全側に偏り過ぎて、適用がなかなか難しいことがわかった。

6) ボルトに働く軸力計算に必要な、座金またはウェブ鋼板が木材中にめり込むときの荷重—めり込み変位曲線は、Fig. 7の接合部試験用に用意した座金、鋼板の残り試験後の木材試験体の非破壊部分とを用いて、Fig. 8のような実験（著者：未発表）を行って求めた。

7) 軸力によってウェブ鋼板と木材との間に生じる摩擦抵抗が最大耐力に及ぼす影響は、Fig. 9のような2面剪断試験の結果²⁹⁾から計算した。この実験ではボルトがほとんど曲げ変形を生じない材厚の薄い試験体に、特別にキャリブレイトしたトルクレンチでナットを締め付けて軸力を加え、軸力の大きさと最大耐力との関係を求めている。

以上の仮定と基礎定数を用いて試算された各接合法の荷重—撓み曲線を、形状比 (t/d) が8の場合について、実験結果とともにFig. 10～12に、また最大荷重の試算値を同じく実験値とともにTable 2に示す。これらの比較結果を見ると、弾性床上の梁理論に基づく接合部の非線形変形解析と、破壊面圧変位に着目して実験的に求めた破壊条件を組み合わせることにより、割裂型の破壊形態を示す木材接合部の変形・破壊挙動を、初期剛性から最大耐力まで一貫した流れでとらえ得ることが示されているように思われる。もちろん、ここで提案された破壊条件は、限られた実験結果のみから導かれたもので、理論的な裏付けも甚だ不十分である。(5)式がどの程度の範囲で有効であるか、今後当然検討して行かなければならないが、特に重要な基本的問題点は、破壊面圧変位と言う考え方を、接合具径や荷重方向、材料の強度特性が異なった場合にも、(5)式のようなかたちで一般的に定式化し得るかどうかであろう。ともあれ、この試算結果は少なくとも、各接合法に対し何らかの合理的な破壊条件が与えられさえすれば、木材接合部の剪断耐力性能を統一的な視点から評価することが十分可能であることを暗示しているように思われる。

Table 2. Maximum lateral resistance.

Joint types	$\frac{t}{d}$	P_{me} (kN)	P_{mc} (kN)	$\frac{P_{me}}{P_{mc}}$
Drift pin joints	4	12.06	12.07	1.00
	6	18.86	19.11	0.99
	8	20.87	21.94	0.95
	10	23.40	22.86	1.02
Bolt joints with a center-web	4	12.25	12.72	0.96
	6	18.05	19.20	0.94
	8	22.89	21.64	1.06
	10	24.79	23.31	1.06
Bolt joints with side-webs	4	12.78	12.91	0.99
	6	19.05	20.78	0.92
	8	28.78	25.97	1.11
	10	30.26	26.67	1.13

P_{me} : Experimental maximum load;
 P_{mc} : Calculated maximum load.

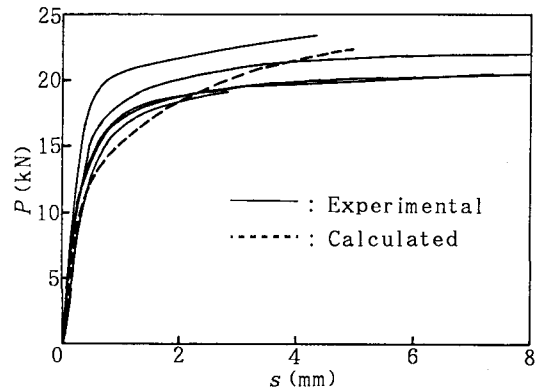


Fig.10. Experimental and calculated load-slip curves of drift pin joints.

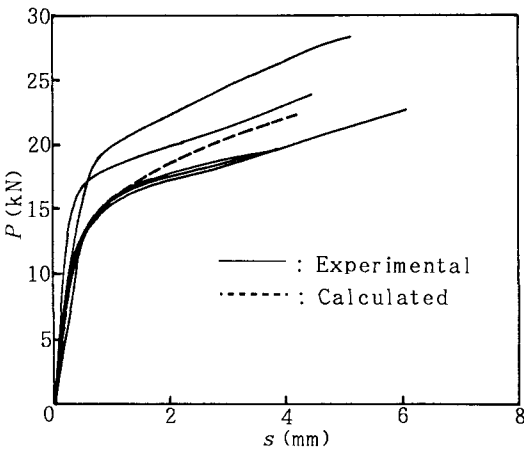


Fig.11. Experimental and calculated load-slip curves of bolt joints with a center-web.

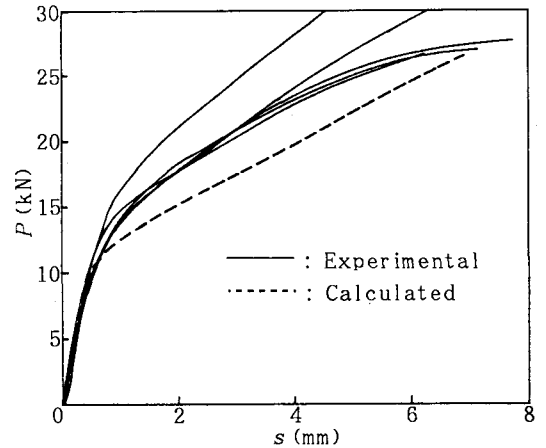


Fig.12. Experimental and calculated load-slip curves of bolt joints with side-webs.

5. 結論

この論文では、金属接合具を用いた木材接合部剪断耐力について若干の検討が加えられた。まず、特殊な荷重ブロックを用いた部分面圧試験結果から、割裂型の破壊形態を示す木材接合部の最大耐力に対し、破壊面圧変位に注目した実験的な破壊条件が示された。続いて、弾性床上の梁理論に基づく段階的線形解析法

を、ドリフトピン接合とボルト接合に関する既往の剪断耐力試験結果に適用し、この破壊条件を用いて最大耐力を試算してみた。その結果、弾性床上の梁理論と接合法に応じた適当な破壊条件を組み合わせることによって、木材接合部の剪断耐力性能を一貫した考え方に従って計算評価出来ることが示された。

参 考 文 献

- 1) Komatsu, K. : Application of fracture mechanics to the strength of crossed-lapped glued timber joints, FRI Bulletin No.61, Forest research institute, New zealand forest service, 1984.
- 2) Komatsu, K. : Effect of member thickness and number of gluelines on the strength and design of crossed-lapped glued timber joints, FRI Bulletin No.62, Forest research institute, New zealand forest service, 1984.
- 3) Readon, G. F. : A Structural Analysis of Frames Semi-rigid Joints. Div. Forest Products Tech. Pa. No.59, CSIRO, 1971.
- 4) Foschi, R. O. : Analysis of Wood Diaphragms and Trusses Part I. Diaphragms, *Canadian J. Civ. Eng.*, Vol.14, No.3, pp.345-352, 1977.
- 5) Foschi, R. O. : Analysis of Wood Diaphragms and Trusses Part II. Truss-Plate Connections, *ibid.*, Vol.14, No.3, pp.353-362, 1977.
- 6) 秦 正徳, 小松幸平, 佐々木 光 : 半剛節骨組としての木製棚の構造解析., 木材学会誌, Vol.23, No.9, pp.434-439, 1977.
- 7) Maraghechi, K. and Itani, R.,Y. : Influence of Truss Plate Connectors on the Analysis of Light Frame Structures, *Wood and Fiber Sci.*, Vol.16, No.3, pp.306-322, 1984.
- 8) 平井 卓郎 : 半剛節接合部を持つ木造フレームの変形挙動, 北大演研報, Vol.44, No.1, pp.297-326, 1987.
- 9) 平井 卓郎 : 釘打ち合板ガセット接合部の変形性能, 木材学会誌, Vol.33, No.4, pp.281-285, 1987.
- 10) 平井 卓郎 : 釘打ち合板ガセット接合法による木造門形ラーメンの変形性能, 同上, Vol.33, No.4, pp.286-290, 1987.
- 11) 平井 卓郎 : 釘打ち合板ガセット接合法による木造山形ラーメンの変形性能, 同上, Vol.33, No.9, pp.689-693, 1987.
- 12) Hunt, R. : Rep. No.393, Dept. Civ. Eng., Univ. of Auckland, 1987
- 13) 辻野哲司 : 釘着合板ガセット接合部を有する木造フレームの変形解析, 木材学会誌, Vol.34, No.5, pp.395-400, 1988.
- 14) 小松幸平 : 接合具の非線形特性を考慮に入れた集成材骨組構造の解析 (第1報) 解析法の誘導, 同上, Vol.34, No.7, pp.581-589, 1989.
- 15) 小松幸平, 前田典昭, 堀江和美 : 接合具の非線形特性を考慮に入れた集成材骨組構造の解析 (第2報) 実験による検証, 同上, Vol.35, No.3, pp.201-211, 1989.
- 16) Wilkinson, T. L. : Theoretical lateral resistance of nailed joints, *J. Structural Div.*, ASCE 97(ST5) Proc. Pap. 8/21, pp.1381-1398, 1971.
- 17) Larsen, H. J. : Proc. IUFRO-5, pp.646-654, Pretoria, 1973.
- 18) Foschi, R. O. : Load-Slip Characteristics of Nails, *Wood Sci.*, Vol.7, No.1, pp.69-76, 1974.
- 19) Foschi, R. O. : Load-Slip Characteristics of Connections with Common Nails, *ibid.*,

Vol.9, No.3, pp.113-123, 1977.

- 20) 中谷 浩, 沢田 稔 : 釘着材の剪断性能, 北大演研報, Vol.37, No.3, pp.687-720, 1980.
- 21) 辻野哲司, 平井 卓郎 : 鋼板側材を用いたボルト接合部の非線形荷重-すべり関係 (第1報), 木材学会誌, Vol.29, No.12, pp.833-838, 1983.
- 22) Hirai, T. : Nonlinear Load-Slip Relationship of Bolted Wood-Joints with Steel Side-Members II, *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.29, No.12, pp.833-838, 1983.
- 23) Hirai, T. : Nonlinear Load-Slip Relationship of Bolted Wood-Joints with Steel Side-Members III, *ibid.*, Vol.31, No.3, pp.165-170, 1985.
- 24) Komatsu, K. : Behaviour of Nailed Timber Joints with Steel Side Plates, Proc. 2nd PTEC, pp.89-94, Auckland, 1989.
- 25) 平井 卓郎 : 鋼板ウェブを持つ木材接合部の荷重-すべり性能, 北大演研報, Vol.47, No.1, pp.215-248, 1990.
- 26) 日本建築学会編 : 木構造計算規準・同解説, 1988.
- 27) 平井 卓郎 : 木材接合部の基礎性能 2.木材のボルト面圧性能, 同上, Vol.46, No.4, pp.967-988, 1989.
- 28) 平井 卓郎 : 木材-ボルト接合部の基礎耐力試験法比較, 同上, Vol.46, No.4, pp.959-966, 1989.
- 29) 高橋 礼 : 構造用材のボルト接合耐力に関する基礎試験, 卒業論文, 北海道大学農学部林産学科, 1990.
- 30) 平井 卓郎 : 木材のボルト及びドリフトピン接合部の剪断耐力, 木材学会誌, 印刷中.
- 31) 横山幸満 : くい構造物の計算法と計算例, 山海堂, 1977.

(1991年1月18日受付)