交錯積層が単板積層材の面圧試験の破壊形態に与える影響[†]

村 田 功 二^{*} 小 薮 洋^{**} 中 野 隆 人^{*}

Effect of Interlocked Laminates on Fracture of Laminated Veneer Lumber in Dowel-Bearing Strength Test

by

Koji MURATA^{*}, Hiroshi KOYABU^{**} and Takato NAKANO^{*}

Using the longitudinal and flexural vibration method, the Young's modulus and shear modulus of the interlocked laminated veneer lumber (LVL) with symmetric angle-ply laminates were measured by tapping ; in addition, the connection strength was tested with a drift pin. The measured mechanical properties of the interlocked LVL were consistent with those predicted by the so-called classical lamination theory ; further, it was found that the properties change to a great extent with the interlock angle (orientation angle of veneer) but do not vary with small changes in the interlock angle. The connection strength of the interlocked LVL was determined by a dowel bearing strength test (embedment strength test). The dowel bearing strength tended to decrease to a small extent with an increase in the interlock angle. While the Young's modulus decreased to a great extent for changes in the interlock angle exceeding 10 degrees, the initial stiffness obtained from the embedment stress-displacement curve decreased to a small extent with the interlock angle. The analysis of the curve after the yield point revealed that the stress increased (strain hardening) when the interlock angle was greater than 10 degrees. The connection properties tested with a drift pin depend on not only the Young's modulus of the main member but also its shear modulus ; further, the angle-ply laminates prevent the member from cracking due to its expansion after yielding.

Key words : Interlocked LVL, Symmetric angle-ply laminates, Dowel bearing strength, Young's modulus, Shear modulus

1 緒 言

木質構造の設計では、木材は金属に比べて脆い材料であり、脆くない構造体を作るために接合部の変形が重要であるとされている。木材は材質の変動が大きいので、接合部の設計は木材側ではなく接合金具側で変形が生じるようにする場合が多い。しかしながら木材側の挙動も重要な要素であり、多くの研究がなされている。特に大規模木質構造でよく使用されるドリフトピン接合では、割裂とせん断の複合的な破壊が生じるため破壊現象が複雑である。平井ら¹⁾や小松ら²⁾はピン径と強度の関係を示し、近年では Stelmokas ら³⁾や増田ら^{4)~6)}によってドリフトピン周辺のひずみ分布計測による解析も行われている。また、Rammer と Winstorfer⁷⁾は面圧強度と木材の含水率の関係について調べ、滝内ら⁸⁾は木材腐朽と面圧強度の関係を調べている。

大規模木質構造では、製材品よりむしろ集成材などの再構成材料が使われる。原田らはドリフトピンを用いた集成材の面圧試験を行い、ラミナの積層方向と強度との関係を考察した。⁹⁾積層方向とドリフトピンの軸方向との関係については、強度に影響は見られなかったが、有効弾性床深さと接合金具直径の関係については、従来の設計基準とは差異が見られたとしている。構造用材としての

木材の欠点である材質のばらつきを小さくするためにさまざまな再構成材料が開発されており、単板積層材(LVL)もその一つである。節などの欠点を分散し、材質を安定にする一方で、構成要素である単板の裏割れのために割裂が生じやすい。この割裂破壊を防ぐために、数層の単板を直交に配する構成が取られている。しかし直交層を配した場合には、材料の異方性は小さくなるが、わずかながらヤング率の低減が予想される。^{10), 11)}木質構造の部材を考えたときには、部材のヤング率や強度も、接合部の強度同様に重要である。

一方で、熱帯材には交錯木理を持つものが多く、リボン杻として、独特の美しい光沢を生み出している。さらに交錯木理は物理的性質にも影響を及ぼしている。Hernández ら¹²⁾は、交錯木理を持つブラジル産材3樹種のせん断強度について調査し、2樹種については木理の交錯と公称せん断強度に正の相関を得た。またせん断破壊の破壊面は、交錯木理のパターンに従っていた。山内ら¹³⁾は、単板積層材の交錯積層とヤング率の関係を調べ、交錯角度が10度程度までは、ヤング率の低下はあまり見られないとした。山内らが行ったような交錯積層を有するLVLでも、同様にせん断特性に違いが見られると予想される。しかしながら、交錯積層がドリフトピンの接

[†] 原稿受理 平成19年6月29日 Received June 29, 2007 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

^{*} 正 会 員 京都大学大学院農学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町, Graduate School of Agriculture, Kyoto Univ., Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

^{**} 京都大学農学部(現在 紀陽銀行) 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町, Faculty of Agriculture, Kyoto Univ., Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

合特性に与える影響を調べた例はない。そこで本研究では、交錯積層が接合性能、特に面圧強度に与える影響について考察した。

2 実験方法

2.1 供試材料の作成

ベイマツロータリーレース単板（約3mm厚）を用いて単板積層材を試作した。端を裂いて繊維方向をそろえ、所定の繊維傾斜角を持つ約400mm角の単板を切り出した。切り出した単板を裏表交互に積層接着し、交錯積層を有する単板積層材を試作した（Fig. 1）。設定した交錯角度は 0° 、 $\pm 3^\circ$ 、 $\pm 6^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 22.5^\circ$ であった。また比較のため合板（ $0^\circ/90^\circ$ ）も作成した。接着剤には水性ビニルウレタン樹脂（SUNBAKE 社 NF-2001）を使用し、パンクによる接着不良を防ぐため、5日間冷圧して積層接着した。作成した単板積層材は11plyで厚さが32mmであり、密度等はTable 1に示す。各交錯角度につき1枚の供試材料から所定の試験体に切り出した後、約1ヶ月間養生した。

2.2 動的弾性率の測定

タッピングによる動的弾性率の測定を行った。供試材料の中央付近から、長さ315mm（主軸）、幅20mmの試験体を切り出し、たわみ振動、縦振動試験用とした。また長さ122mm（主軸）、幅60mmの試験体も切り出し、縦振動による繊維直交方向の弾性率測定用試験体とした。縦振動試験には式(1)を用い、基本振動（ $n=1$ ）から動的ヤング率を求めた。

$$E = \frac{4l^2 \rho f_r^2}{n^2} \quad (1)$$

ここで E はヤング率、 l は試験体長さ、 ρ は密度、 f_r は縦振動の振動数、 n は振動モードである。たわみ振動試験

Fig. 1 Laminating veneers with interlock angle.

Table 1 Properties of interlocked LVLs for experiments.

Interlock angle ($^\circ$)	0	± 3	± 5	± 10	± 22.5	0/90
Density (kg/m^3)	370	370	360	400	360	370
Moisture content (%)	9.2	9.1	9.0	13.8	9.3	9.0

では、祖父江¹⁴⁾久保島¹⁵⁾が行ったTimoshenko-Goens-Hearmon法を用いた。曲げ変形のみによるたわみ振動からヤング率は、式(2)で求まる。

$$f = \frac{im^2}{2\pi^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

ここで $i = I/A$ 、 m は振動モードによって決まる値、 I は断面2次モーメント、 A は梁の断面積である。梁の曲げ理論のみから求まるヤング率を E_r 、せん断変形を考慮した場合のヤング率を E_g とすると、以下の関係式となる。

$$f_g = \frac{f_r}{\sqrt{T}} \\ T = 1 + \frac{l^2}{\rho^2} \{m^2 F^2(m) + 6mF(m)\} \\ + \frac{l^2 SE}{\rho^2 G} \{m^2 F^2(m) - 2mF(m)\} - \frac{4\pi^2 \rho l^2 f_g^2}{G} \quad (3)$$

ここで、 $F(m)$ もまた振動モードで決まる値であり、せん断たわみ係数は $S = 1.18$ とする。4次までのたわみ振動数を測定し、式(3)より動的せん断弾性率を求めた。

2.3 面圧強度の測定

ASTM-D5764に準じて、鋼棒による圧縮型面圧試験を行った。¹⁶⁾供試材料から長さ122mm（主軸）、幅60mmのブロックを6体切り出した。中央部に直径10.5mmの穴を開け、穴の中央を通るように2等分して計12体の圧縮型面圧試験体を作製した（Fig. 2）。試験体のピン穴に鋼棒（直径10mm）を置き、その上から銅板（厚さ8mm）を介して1mm/minの変位速度で圧縮した。圧縮はInstron材料試験機を用い、制御変位と出力される荷重を記録した。得られた荷重-変位曲線から比例限や最大荷重、降伏点を決定し、荷重をピン径（10mm）と試験体厚さで除して面圧応力として、比例限度力や面圧強度（めり込み強度）を求めた。

3 結果と考察

3.1 ヤング率およびせん断弾性率

タッピング試験によって得られた動的弾性率をTable 2に示す。やはり交錯角度 $\pm 22.5^\circ$ （単板相互の繊維走行角度 45° ）では、ヤング率が大きく低下し、せん断弾性率は大きく向上している。

Fig. 2 Specimen of dowel-bearing strength test.

単板積層材のヤング率およびせん断弾性率を積層理論から導出する.¹¹⁾ 単板の繊維方向を X 軸, 繊維直交方向を Y 軸とすると応力とひずみの関係式は式 (4) となる.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \gamma_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$a_{11} = \frac{1}{E_L}, \quad a_{12} = a_{21} = -\frac{\mu_{LT}}{E_L}, \quad a_{22} = \frac{1}{E_T}, \quad a_{33} = \frac{1}{G_{LT}}$$

単板積層材の主軸を x 軸, その直交方向を y 軸, 繊維傾斜角度を θ とするとし, 材料軸を角度 θ 回転させたコンプライアンスマトリックスは式 (5) となる.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$b_{11} = a_{11} \cos^4 \theta + a_{22} \sin^4 \theta + (2a_{12} + a_{33}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta$$

$$b_{12} = b_{21} = a_{12} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) + (a_{11} + a_{22} - a_{33}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta$$

$$b_{13} = b_{31} = \{ 2a_{11} \cos^2 \theta - 2a_{22} \sin^2 \theta - (2a_{12} + a_{33}) (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \} \cos \theta \sin \theta$$

$$b_{22} = a_{11} \sin^4 \theta + a_{22} \cos^4 \theta + (2a_{12} + a_{33}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta$$

$$b_{23} = b_{32} = \{ 2a_{11} \sin^2 \theta - 2a_{22} \cos^2 \theta + (2a_{12} + a_{33}) (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \} \cos \theta \sin \theta$$

$$b_{33} = 4(a_{11} - 2a_{12} + a_{22}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + a_{33} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)^2$$

単板の繊維方向を交錯させて交互に積層した場合には, 単板が相互に力を及ぼし合う. 材料主軸 (x 軸) に応力 σ_x のみが作用した場合を考えると, その直交方向に応力は作用せず ($\sigma_y = 0$), せん断ひずみは打ち消し合う ($\gamma_{xy} = 0$). この関係より式 (6) が求まり, 交錯積層 LVL のヤング率 (E_x) が求められる.

$$\frac{1}{E_x} = \frac{\varepsilon_x}{\sigma_x} = b_{11} + \frac{b_{13}^2}{b_{33}} \quad (6)$$

また, 材料主軸方向にせん断応力 τ_{xy} のみが作用した場合を考える. 交錯積層した場合には垂直ひずみは相互に打ち消し合うことにより ($\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$), せん断弾性率 (G_{xy}) を求める式 (7) が得られる.

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{\gamma_{xy}}{\tau_{xy}} = \frac{2b_{12}b_{13}b_{23} - b_{13}^2b_{22} - b_{11}b_{23}^2 + b_{33}(b_{11}b_{22} - b_{12}^2)}{b_{11}b_{22} - b_{12}^2} \quad (7)$$

Table 2 に示した交錯角度の値より $E_L = 9.28 \text{ GPa}$, $E_T = 0.288 \text{ MPa}$, $G_{LT} = 0.505 \text{ GPa}$ を用いて, 式 (6), 式 (7) をもとに交錯積層角度とヤング率およびせん断弾性率の関係

を求めた. そして Table 2 の交錯積層 LVL の動的ヤング率, 動的せん断弾性率と積層理論から求めた値を Fig. 3, 4 で比較した. ここで実線は交互積層による拘束を考慮した場合 (multiple) であり, 点線は拘束を考慮しない場合 (single) であり, 点線は拘束を考慮しない場合, つまり繊維傾斜角を傾けた単板 (single) の値である. 山内らの報告にもあるように交錯角度が小さい場合には, ヤング率とせん断弾性率の両方で明確な変化は現れなかった. しかし 10 度をこえるとヤング率は減少し, またせん断弾性率は著しく向上した. また Fig. 5 において, 式 (6) や式 (7) の予測値 (実線) に対して, 試作した交錯積層 LVL の実測値 (●) は差が 5% 以内と良く一致しており, 上述の予測が有効であることが分かる. 交錯角度 22.5° の試験体に関しては 20% 程度の差が生じた. この原因として予測値では層間に働くせん断応力を考慮していないことが考えられる. 合板 (0/90) については, ヤング率は単板の繊維方向と繊維直交方向の値の中間的なものであり, せん断弾性率は単板単体の値に近いことも確認された. せん断弾性率の向上には交錯積層が適していることが確認できる.

3・2 圧縮型面圧試験

鋼棒による圧縮型面圧試験の応力と変位の関係の一例を Fig. 5 に示す. 実験開始直後の鋼棒の滑りが大きく, 初期には線形域の判断が難しかった. そこで曲線の最大値を $P_{\max}$ とし, $0.4P_{\max}$ と $0.6P_{\max}$ を結んだ直線を初期剛性とした. この直線から応力が 3% 小さくなった点を比例限度 P_{pl} とした. また ASTM では初期剛性を示す直線を鋼棒径の 5% 分平行移動し, 応力-変位曲線との交点を降伏点 P_{yield} とする 5% offset 法を用いているが, 本実

Fig. 3 Young's modulus of interlocked LVL.

Fig. 4 Shear modulus of interlocked LVL.

Table 2 Mechanical properties of interlocked LVL.

Intelocked angle (deg.)	Longitudinal vibration	Flexural vibration	
	Young's modulus (GPa)	Young's modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)
0	9.28	8.66	0.505
±3	9.62	9.42	0.397
±5	9.47	8.55	0.495
±10	8.38	7.74	0.666
±22.5	4.31	3.64	1.87
0/90	5.38	4.33	0.331
0 (transverse)	0.288

Fig. 5 Applied load - displacement curve of dowel bearing strength test (interlock angle $\theta = 0^\circ$).

験では比較的早い段階で降伏点が現れていたもので、鋼棒径の3%分平行移動して求まる交点を降伏点 P_{yield} とした。ここでは3%offset法とする。それらの点から求めた面圧強度をFig. 6に示す。交錯角度 22.5° と合板 ($0/90$) では、応力が僅かながらも増加し続け最大値が確認できないものがあった。この場合は試験を終了した時点（変位：3～4mm）の応力を最大値とした。比例限度力 (P_{pl})、降伏応力 (P_{yield})、最大応力 (P_{max}) はすべて同様の傾向を示し、交錯角度が増すにつれて徐々に減少する傾向にあった。中田らの報告¹⁰⁾では、圧縮型面圧試験ではクロス層での割合に関わらず最大面圧応力が一定であったが、今回の試験ではクロス層のタイプ ($\theta = 0/90$) でも、最大応力は低下していた。中田の実験は樹脂含浸した単板によるものであり、構成単板自体の特性の影響が考えられる。

交錯積層することにより、比例限度力や降伏応力の向上は確認されなかったが、初期剛性や降伏後の応力変化には特徴的な傾向がみられた。Fig. 5で示す弾性変形から初期剛性を求める。また3%offset法によって求めた降伏点から、10%offset法で求められる時点までの応力変化を降伏後の硬化係数とする (Fig. 7)。10%offsetは応力の変化が一定となり、安定した値が得られる時点として選択した。これら初期剛性 (k_e) および硬化係数 (k_{3-10}) は以下の式から決定する。

$$k_e = P_{pl} / (D_{pl} - D_0) \quad (8)$$

$$k_{3-10} = (P_{10} - P_3) / (D_{10} - D_3) \quad (9)$$

Fig. 6 Relationship between dowel-bearing strength and interlock angle.

Fig. 7 Initial stiffness, k_e , and softening/hardening modulus after yielding (k_{3-10}).

ここで、(D_{pl} , P_{pl})、(D_3 , P_3)、(D_{10} , P_{10}) はそれぞれ比例限、3%offset時、10%offset時の変位と応力である。 D_0 は弾性域の直線を延長し、応力がないとしたときの変位である（ここでは $D_0 = 0\text{mm}$ ）。また $P_3 = P_{yield}$ でもある。

交錯角度と供試材料のヤング率 (E) および初期剛性 (k_e) の関係をFig. 8に示す。ヤング率は交錯角度 10° を越えると急激に低下するのに対して、面圧応力の初期剛性はあまり減少していないことが分かる。積層角度 θ とせん断弾性率の関係 (Fig. 4) を合わせて考えると、面圧応力の初期剛性はヤング率だけでなくせん断弾性率も寄与していると考えられる。またせん断弾性率が小さい合板 ($0/90$) でも、初期剛性は7割程度となっており、中田らの報告とほぼ同じ傾向を示した。このことから直交方向のヤング率の影響も考えられる。そこで、初期剛性が軸方向とその直交方向のヤング率やせん断弾性率の線形結合で決定されると仮定する。実測した初期剛性 (Fig. 8: $\circ$) と式 (6) や式 (7) から求まるヤング率やせん断弾性率を使って1次回帰により式 (10) を得た。合板 ($0/90$) のヤング率は、交錯積層角がない場合 ($\theta = 0$) の軸方向と直交方向の平均値 (4.784GPa) とし、せん断弾性率もそのときの値 (0.505GPa) とした。

$$k_e = 4.03E_L + 1.11E_T + 13.3G \quad (10)$$

ここで E_L , E_T は軸方向と直交方向のヤング率であり、交錯角度を θ とすると、式 (6) において θ , $90-\theta$ とした場合のヤング率 E_x である。式 (10) によって示される初期剛性と交錯角度の関係をFig. 9に示す。初期剛性（めり込み剛性）は、ヤング率と接合具の直径から求まる式が提案されており^{1), 2)} 木質構造設計規準¹⁷⁾ に採用されている。原田ら⁹⁾ の指摘のように集成材でも加力方向によって

Fig. 8 Comparison with Young's modulus, E , (●, solid line) and initial stiffness, k_e , (○).

Fig. 9 Estimated line of initial stiffness, k_e , and experimental value (○).

は木構造設計規準の式と差が見られる場合があるが、本実験のような交錯角度を大きな部材では、ヤング率と接合具直径からの初期剛性の推定は難しいといえる。

交錯角度と硬化係数 (k_{3-10}) の関係を Fig. 10 に示す。また面圧試験の基準化荷重と変位の関係を Fig. 11 に示す。ここでの基準化荷重とは、荷重を降伏荷重で除した値である。交錯角度 10° を越えるとひずみ硬化傾向になることが分かる。Awaludin ら¹⁸⁾は、*Shorea obtusa* の木理角度を変えた面圧試験を行い、降伏後のひずみ硬化係数 (final stiffness) は木繊維の変形形態で決まるとしている。今回の実験では、交錯角度が 10 度程度でもひずみ硬化係数が向上しているの、木繊維の座屈現象だけでは説明できない。川添ら¹¹⁾のクロス単板を有する LVL の引張型面圧試験では、めり込み変形によりクロス単板の繊維が内部で引きちぎられて破壊していた。今回の面圧試験の破壊形態の一例を Fig. 12 に示す。圧縮型の試験であるため、繊維が引きちぎられた形態はなかった。交錯角度 0° (Fig. 12 上) では、割裂破壊が確認され、鋼棒が接触した底部に連続した亀裂が現れている。しかし、交錯角度 22.5° の場合には連続した亀裂ではなく、鋼棒が接触した溝の側部に 1 層毎に現れる亀裂が観察された。Hernández らの試験は、交錯木理のせん断破壊は木理の沿って生じることを確認している。¹²⁾ またドリフトピンのめり込み試験では、一般的にはせん断破壊と割裂破壊が生じると言われている。¹⁹⁾ 繊維走向の交互積層により、せん断破壊や割裂破壊に至る実質的な断面積を増加させる。

Fig. 10 Effect of interlock angle on strain softening/hardening modulus after yielding (k_{3-10}).

Fig. 11 Relationships between displacement and normalized load (load/yield load) in dowel-bearing strength test.

それと同時に、鋼棒の接触部にみられた亀裂が連続していないことから亀裂進展の抑制効果が生じていると考えられる。これらの要因により、交錯積層は降伏後の破壊吸収エネルギーの向上に寄与すると予想される。

4 結 論

交錯積層した単板積層材 (LVL) のヤング率およびせん断弾性率と、ドリフトピン接合の強度特性について考察した。交錯積層角度とヤング率およびせん断弾性率は、積層理論から導かれた値と一致しており、交錯積層角が小さいときには弾性率の変化はあまり見られなかった。圧縮型面圧試験によるドリフトピンの面圧強度 (めり込み強度) 試験を行った結果、交錯積層角度が増加すると面圧強度 (降伏応力) はわずかに減少した。また面圧試験による応力と変形の関係から求めた初期剛性は、ヤング率が減少するほどには低下せず、直交方向のヤング率やせん断弾性率の影響を受けていた。さらに降伏点以降の挙動を調べた結果、交錯積層角 10° 以降では硬化挙動を示した。ドリフトピンの強度特性は、材料主軸のヤング率だけで決まるのではなく、せん断挙動も影響していると考えられ、交錯積層によって亀裂の進展を抑制されていることが影響していると考えられる。

Fig. 12 Examples of fracture pattern in dowel-bearing strength test.

参 考 文 献

- 1) T. Hirai and M. Sawada, "Lateral resistance of bolted wood-joints with wood side members loaded parallel to the grain", *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.28, No.11, pp.695-698 (1982).
- 2) K. Komatsu, N. Mameda and K. Horie, "Analysis of glulam frame-structures considering nonlinear characteristics of fasteners II", *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.35, No.3, pp.201-211 (1989).
- 3) J. W. Stelmokas, A. G. Zink and J. R. Loferski, "Image correlation analysis of multiple-bolt wood connections", *Wood and Fiber Science*, Vol.29, No.3, pp.210-227 (1997).
- 4) M. Masuda, M. Ohtani and K. Murata, "Fracture analysis of bolted joints using digital image correlation method", *Proceedings of Pacific Timber Engineering Conference, Rotorua, NewZealand*, Vol.2, pp.333-340 (1999) *Forest Research Bulletin*.
- 5) M. Masuda and K. Tabata, "Analyses of fracture of wood in pinned joints using the finite small area fracture criterion and image correlation method", *Proceedings of World Conference on Timber Engineering 2000*, Whistler, British Columbia, Canada, pp.2.5.2-1-8 (2000).
- 6) S. Ukyo and M. Masuda, "Fracture analysis of wood in moment-resisting joints with four drift-Pins using digital image correlation method (DIC)", *Journal of the Society of Material Science, Japan*, Vol.51, No.4, pp.367-372 (2002).
- 7) D. R. Rammer and S. G. Winistorfer, "Effect of moisture content on dowel-bearing strength", *Wood and Fiber Science*, Vol.33, No.1, pp.126-139 (2001).
- 8) H. Takiuchi, K. Sawada, T. Sasaki, Y. Okazaki, S. Doi and Y. Iijima, "Embedding strength of wood exposed to decay fungi", *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.53, No.1, pp.46-51 (2007).
- 9) M. Harada, T. Hayashi, M. Karube, H. Tsuchida, T. Zushi and K. Komatsu, "Bearing tests of glued laminated timbers with drift-pins", *Journal of the Society of Material Science, Japan*, Vol.49, No.4, pp.368-372 (2000).
- 10) K. Nakata, H. Sugimoto, M. Inoue and S. Kawai, "Development of compressed wood fasteners for Timber Construction III. Bearing characteristics of compressed LVL plate with a drift pin", *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.46, No.1, pp.37-46 (2000).
- 11) M. Kawazoe, Y. Tuchiya, T. Mori and K. Komatsu, "Effect of crossbanded laminates on the bearing properties of mechanical joints of laminated veneer lumber with a drift pin", *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.52, No.4, pp.221-227 (2006).
- 12) R. E. Hernández and G. Almeida, "Effects of wood density and interlocked grain on the shear strength of three Amazonian tropical hardwoods", *Wood and Fiber Science*, Vol.35, No.2, pp.154-166 (2003).
- 13) H. Yamauchi, S. Shoho, Y. Ping, S. Kawai and H. Sasaki, "Manufacture of cylindrical LVL by spiral-winding method I. effect of interlocked-plyes on the tensile Young's modulus", *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.43, No.9, pp.747-753 (1997).
- 14) N. Sobue, "Instantaneous measurement of elastic constants by analysis of the tap tone of wood. application to flexural vibration of beams", *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.32, No.4, pp.274-279 (1986).
- 15) Y. Kubojima, H. Yoshihara, M. Ohta and T. Okano, "Examination of the method measuring the shear modulus of wood based on the Timoshenko theory of bending", *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.42, No.12, pp.1170-1176 (1996).
- 16) "Annual book of ASTM standards", Volume 04.10 Wood, pp.644-648 (2001) ASTM International.
- 17) "Standard for structural design of timber structures", p.233 (2006) Architectural Institute of Japan.
- 18) A. Awaludin, W. Smittakorn and T. Hirai, "Bearing properties of Shorea obutusa beneath a laterally loaded bolt", *Journal of Wood Science*, Vol.53, No.3, pp.204-210 (2007).
- 19) M. Harada, T. Hayashi and M. Karube, "Effect of deformation rate on bearing properties of mechanical joints of LVL with a drift pin", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.46, No.3, pp.213-218 (2000).