

モウソウチクを用いた木質構造物の強度

樋口 泉*

Strength of the wood structure with bamboo

Izumi HIGUCHI

Abstract — This report deals with testing the stress and strength of an adhesive composite plate containing bamboo and Hinoki wood and single-lap adhesive joints of bamboo plate adherends subjected to static bending moments. Stress and strain were calculated using FEM. Surface strain distributions were measured using strain gauges. In the case of composite plates, it was observed that the bending strength increased with an increase in the proportion of bamboo plate thickness. In the case of single-lap adhesive joints, the joint strength was predicted using two singularity parameters of the calculation results.

Key words : bamboo, composite plate, single-lap joints, bending strength, FEM

1.はじめに

古くからタケは構造材料として我々の生活に深くかかわっていた。しなやかで強靱な性質を生かし容器材料、造作材および建築材料などとして使用され、その用途は多岐にわたる。建築材料としては、室町時代の後期から桃山時代に発達した数寄屋建築で屋根構造としての垂木、タケすのこ天井、窓の格子、土壁の下地の構造部材として広く使われてきている¹⁾。しかし、近年合成樹脂系材料が氾濫する中でタケの材料としての需要は減少の一途をたどっている。このため、竹材の余剰や竹林の増殖による森林への被害、地下茎が住宅への被害や給排水管を破壊するなどの問題が深刻化している。タケの機械的性質、強さおよび利用に関する研究としては、Liese²⁾の生物的な特性も含めた材料としての利用について報告がある。太田³⁾は、竹材の引張、圧縮およびせん断強度や含水率および乾燥率など関係について詳細な報告を行っている。池上⁴⁾は複合材料のモデルの一つとしてタケや木をとりあげ材料設計のシミュレーションを行なうことの有用性を示唆している。しかしながらタケを構造部材として使うための合理的な設計指針が明らかにされていない。特に構造材として必要不可欠とされる接合方法および負荷下における挙動は明らかにされていない。本研究は、ハイブリッド集成材の強度向上の一方策としてモウソウチク (*Phyllostachys heterocycla*) を用いたタケ板ヒノキ

板に貼り合わせた接着板を作った。また、集成材のラミナとしてタケを用いる目的でその最小単位として板状に加工したタケを被着体とした単純重ね合わせ接着継手を提案した。それらに静的曲げモーメントを作用させ、その挙動をひずみに関する実験、有限要素法による計算および強度実験を行った結果を報告する。

2. 静的曲げを受けるタケ・ヒノキ接着板の強度

2.1. 実験方法

Fig.1は、接着板表面のひずみに関する実験および強度に関する実験の概要を示す。実験は接着板のひずみ測定および強度に関して行った。ヒノキ板は直径300mmのヒノキ丸棒を繊維方向に切り出した乾燥板を使用した。竹板は直径130mmのタケを板状に加工して使用した。接着板は、ヒノキの厚さを t_H 、タケの厚さを t_B として、 $(t_H, t_B) = (8\text{mm}, 0\text{mm}), (6\text{mm}, 2\text{mm})$ および $(4\text{mm}, 4\text{mm})$ の3種類を準備した。本研究では、ヒノキおよびタケともに、繊維方向をy方向および繊維直角方向(接線方法)をz方向とした。接着部は研磨脱脂後、構造用エポキシ接着剤SW1838(住友3M製)で接着した。接着後72時間以上室温に放置した後に実験に使用した。接着板の両端近傍を支点として万能材料試験機(UH300kNC, 株式会社島津製作所)でロードセルを介してジグに荷重を作用させ4点曲げモーメントを発生させた。 $t_H + t_B \cong 8.0(\text{mm})$ であるので、支点距離 $2l_1$ および荷重点距離 $2l_2$ は構造用木材の試験マニュアル⁵⁾で指定される寸法として $2l_1 = 144\text{mm}$ 、 $2l_2 = 48\text{mm}$ とし、接着板の幅は

* 釧路工業高等専門学校 機械工学科

$w=25\text{mm}$ とした。ひずみに関する実験は、接着板の両面中央より10mm毎6点にグリッド長さ2mmのひずみゲージ(KFG-2-120-C1-5, ㈱共和電業)を貼り、負荷が作用した時の接着板表面のひずみをひずみセンサインターフェイス(PCD-300A, ㈱共和電業)でロードセルの出力と合わせて記録した。なお、本報告では記号の末尾にA, HおよびBの文字を添え接着剤, ヒノキおよびタケのそれらとする。

2.2.解析モデル

負荷下における接着板表面および内部の応力の状態を知る目的で、有限要素法による計算を行った。有限要素法解析プログラムは、FEMLEEG(㈱ホクトシステム)を使用した。Fig.2は有限要素法の計算に用いた解析モデルを示す。対称性を考慮して1/2部分を計算の対象とした。寸法、形状および材料定数は、実験で使用した寸法および材料と同じにした。実験より得たタケ板繊維方向の縦弾性係数 $E_{yB}=11.2\text{GPa}$ 繊維方向に直角な方向の縦弾性係数 $E_{zB}=2.03\text{GPa}$, ポアソン比 $\nu_B=0.38$ および横弾性係数 $G_B=1.20\text{GPa}$ とした。ヒノキのそれらは $E_{yH}=6.00\text{GPa}$, $E_{zH}=0.70\text{GPa}$, ポアソン比 $\nu_H=0.18$ およ $G_H=1.12\text{GPa}$ とした。接着剤層のそれらを $E_A=3.63\text{GPa}$, $\nu_A=0.314$ とした。二次元直角異方性材料とし、繊維方向を y 方向, 繊維直角方向(接線方法)を z 方向とする oyz デカルト座標として、原点を o とした。拘束条件は対称性を考慮した。荷重条件は、コの字型荷重ジグに作用させた力 F の1/2を $y=l_2=24\text{mm}, z=t_H+t_A+t_B$ の点に $-z$ 方向に作用させた。計算では $F/2=100\text{N}$ の大きさの力を作用させた。

2.3.実験結果及び計算結果

Fig.3は接着板の表面($z=0$ および $z=t_H+t_A+t_B$)のひずみ分布の実験結果と計算結果の比較を示す。

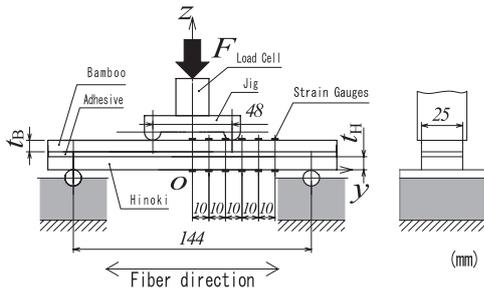


Fig.1 Schematic of the experimental setup.

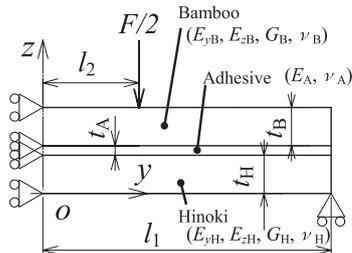


Fig.2 A model for FEM calculations.

接着板($t_H=4\text{mm}, t_B=4\text{mm}$)とヒノキ単体($t_H=8\text{mm}, t_B=0\text{mm}$)の比較を示す。静的曲げモーメント ($F/2=100\text{N}$, 最大曲げモーメント $M=4800\text{Nmm}$) を接着板表面タケ側が引張りを受けるように作用させた。実験結果と計算結果はかなりよく一致していた。計算結果から応力値は接着界面 ($z=t_H, z=t_H+t_A$) 近傍の接着剤層の要素の計算結果を用いた。ヒノキ板と接着剤層の接着界面接着剤層側($z=t_H$)の応力の成分は、接着板繊維方向の引張り応力 σ_{yA} が最も大きくなり、はく離方向の引張

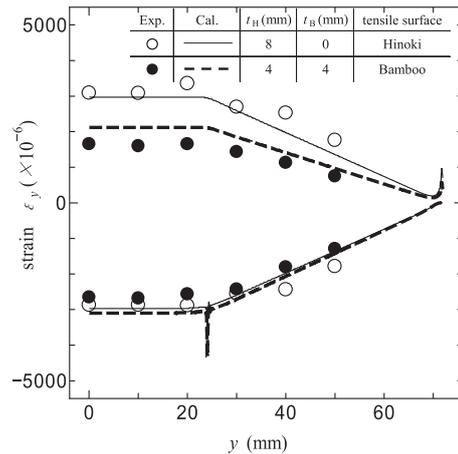


Fig.3 Comparisons between the numerical and experimental strain test results.

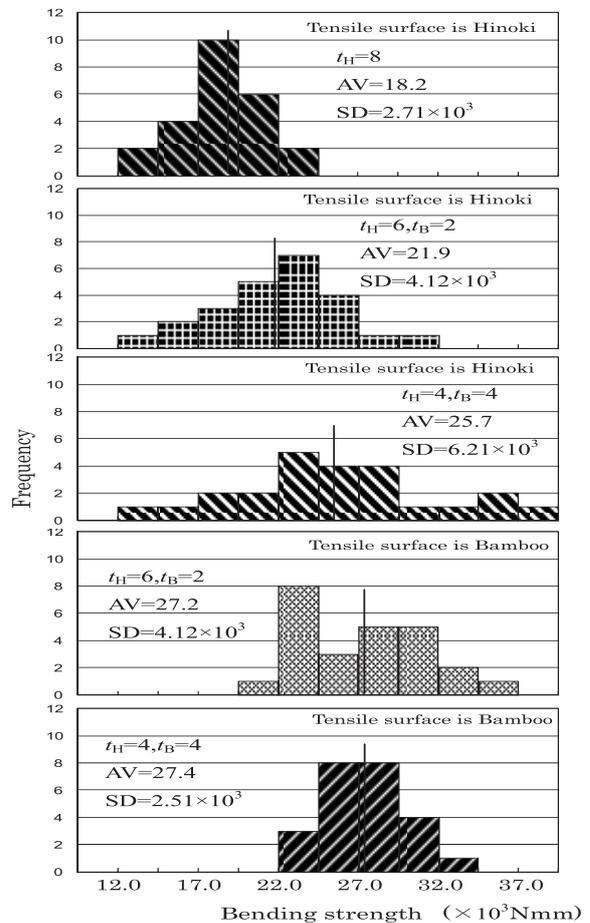


Fig.4 Histograms for the bending strength.

応力 σ_{zA} およびせん断応力 τ_{zA} の成分は小さいことが分かった。タケ板と接着剤層の接着界面接着剤層側($z = t_H + t_A$)の応力の成分分布も同様な傾向を示した。Fig.4は強度に関する実験結果の分布図を示す。 $(t_H, t_B) = (8\text{mm}, 0\text{mm})$, $(6\text{mm}, 2\text{mm})$ および $(4\text{mm}, 4\text{mm})$ の3種類の試験片にジグを介して曲げを作用させ破壊までの曲げモーメントの最大値 M_{\max} で評価した。接着板表面ヒノキ側が引張りを受ける場合と接着板表面タケ側が引張りを受ける場合の2つの負荷形態で行い、接着板の強度試験では1条件について24個の試験体を準備して行った結果を平均、標準偏差および分布で整理した。縦軸は頻度、横軸は破壊までの曲げモーメントの最大値 M_{\max} の階級を表す。各分布図中央部の縦線は、それぞれの平均値(AV)を示す。分布は、正規分布にかなりよく一致した。

3. 静的曲げを受ける被着体が竹板である単純重ね合わせ接着継手の強度と強度推定

3.1. ひずみに関する実験

Fig.5は実験に使用した単純重ね合わせ接着継手と実験装置の概要を示す。実験は、繊維方向長さ100mm 繊維直角方向長さ25mm ($=W$) の板材を重ね合わせ接着した。被着体の厚さ ($= t_B$) が4mmで重ね合わせ長さ $l_2=20, 25$ および30mmの継手について実験した。いずれの場合も接着剤層の厚さ t_A は0.1mmとした。被着体の外面にひずみゲージを貼り7点のひずみを測定した。継手中央部被着体の2点を支持し、コの字型ジグの中央に荷重を作用させ4点曲げモーメントを作用させた。

3.2. 解析方法

Fig.6は、有限要素解析に用いたモデルを示す。接着剤層界面端部を原点 o とする oyz 直角座標系を用いた。被着体の繊維方向を y 軸とした。被着体 I (Adherend I) と被着体 II (Adherend II) を接着剤層 (Adhesive) を挟み重ね合わせ接合した。被着体 I の $y = -(l_1 - l_2)/2$, $z = -t_B$ の位置を y 方向および z 方向に、被着体 II の $y = (l_1 + l_2)/2$, $z = +t_A$ の位置を y 方向に拘束した。被着体の $y = +(l_2 + l_3)/2$, $z = t_A + t_B$ および $y = -(l_3 - l_2)/2$, $z = 0$ の位置に z 方向の静的荷重 F を作用させ継手に4点曲げモーメントを作用させた。継手の各部分の寸法および材料定数は実験に用いたそれらと同じとした。

3.3. 実験結果および計算結果

Fig.7は継手の形状が $t_B = 4\text{mm}$, $l_2 = 20, 25$ および30mmのひずみ実験結果と計算結果の比較を示す。縦軸は被着体表面 ($z = -t_B$ および $z = t_A + t_B$) の y 方向ひずみ ϵ_y を横軸は原点 o からの距離 y を示す。いずれも実験結果と計算結果はかなりよく一致した。有限要素法による計算の結果から継手内部の応力の大きさを調べたところ、被

着体 I と接着剤層との界面端部($y = 0, z = 0$)の応力値が最も大きくなることが分かった。Fig.8は接着剤層界面 ($0 < y < l_2, z = 0, t_A/2, t_A$)の最大主応力 σ_1 の分布を示す。縦軸は最大主応力 σ_1 を接着剤層界面($z = 0$)における最大主応力 σ_1 の平均値 $\bar{\sigma}_1$ で、横軸は接着長さ l_2 で無次元化した。接着剤層界面端部($y = 0, z = 0$)で応力の特異性が見られた。Fig.9は接着剤層界面($0 < y < l_2, z = 0$)における応力成分の分布を示す。繊維方向の引張応力 σ_y がとほく離方向引張応力 σ_z がかなり大きくなることが分かった。

3.4. 強度実験および強度推定

有限要素法で本研究のような応力の計算を行うと、接着剤層界面端部近傍で応力特異場となり計算結果が実際よりもかなり大きくなり、計算結果のみでは強度の評価が出来ない。そこで、本報告では服部ら⁹⁾が提案した応力特異場パラメータを用いて強度評価を行った。評価応力をはく離方向引張応力 σ_z として、接着端近傍の応力分布を近似的に $\sigma_z = K/r^{\lambda}$ (r は端部よりの距離)とし $l_2=25\text{mm}$ の継手の強度実験より応力特異場の強さ $K=34.3$ が得られた。材料特性値より $\lambda=0.460$ が算出された。Fig.8は、この結果を $l_2=20\text{mm}, 30\text{mm}$ の継手の強度に適用させて得た推定値と強度実験値(試験体数24)の比較を示す。強度推定結果と実験結果はかなりよく一致した。

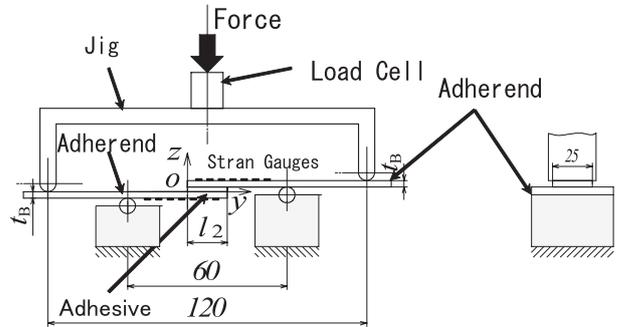


Fig.5 Schematic of the experimental setup.

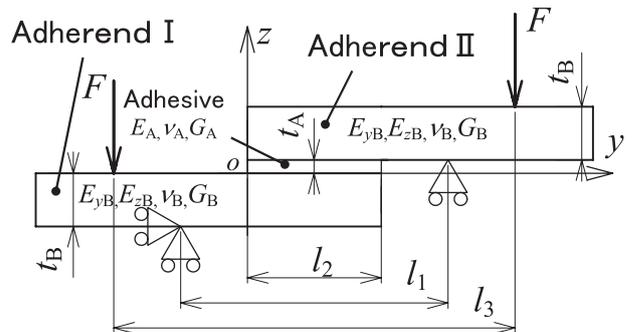


Fig.6 A model for FEM calculations.

4. 結言

静的曲げが作用するタケ板およびヒノキ板で作られた接着構造物の応力と強度について有限要素法による計算、ひずみ実験および強度実験で検討した結果、以下のことが分かった。

4.1. 接着板表面のひずみに関する実験と有限要素法による計算結果はかなりよく一致した。強度に関する実験結果から接着層でのせん断応力による層間はく離を避けられることが分った。接着板はヒノキ単体に比べて最大約50%、最小約20%の強度が向上することを示した。

4.2. タケ板を被着体とする単純重ね合わせ接着継手の応力に関してひずみに関する実験結果と有限要素法による計算結果はかなりよく一致した。継手に発生する応力を調べたところ接着剤層界面端部($y=0, z=0$)に応力の特異性が見られ、応力値が大きくなることが分かった。強度実験より得られた $l_2=25\text{mm}$ の継手の強度から、応力特異場の強さを求め、この結果を $l_2=20\text{mm}$, 30mm の継手の強度に適用させて得た推定値と強度実験値を比較したところ、強度推定結果と実験結果はか

なりよく一致した。本継手の強度は、応力特異場の強さを考慮することで推定出来ることを示した。

なお、本研究に使用したタケは身延竹炭企業組合、ヒノキは南部町森林組合よりご提供いただいた。

文献

- 1) 安藤邦廣：民家造, pp.68-75, 学芸出版社(2009)
- 2) Liese, W. : Research on Bamboo. *Wood Sci. Technol.*21,pp.189-209(1987)
- 3) 太田 基：竹林の性質に関する研究(第3報): マダケ・モウソウチク及びハチクの竹稈型. 九州大学演習林報告論文No18,pp.37-58(1950)
- 4) 池上皓三：複合材料による竹と木の構造シミュレーション. 日本複合材料学会誌11(3), pp.108-114 (1985)
- 5) 飯島康男：“構造用木材の試験マニュアル”, (財)日本住宅・木材技術センター, 2011
- 6) 服部敏雄, 坂田荘司, 初田俊雄, 村上 元：応力特異場パラメータを用いた接着界面強度評価. 日本機械学会論文集 (A編) 54(3), pp.597-603(1988)

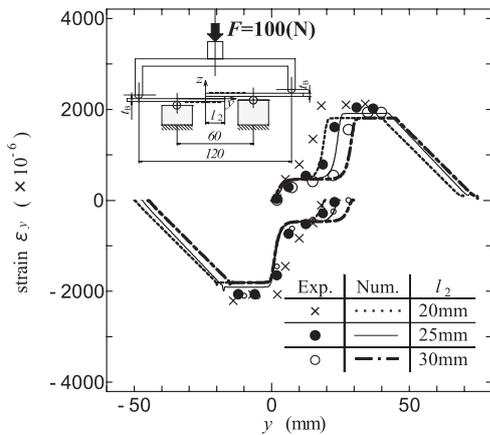


Fig.7 Comparisons of the strains between the calculated and experimental results.

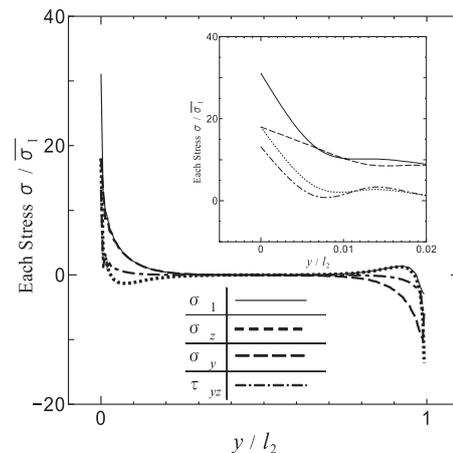


Fig.9 Distributions of the stress components at the interface ($z=0$).

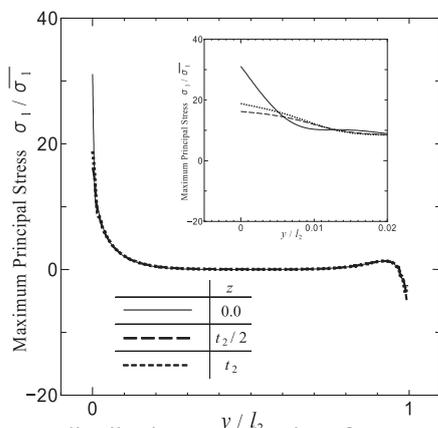


Fig.8 Stress distributions at the interfaces and middle plane in the adhesive layer.

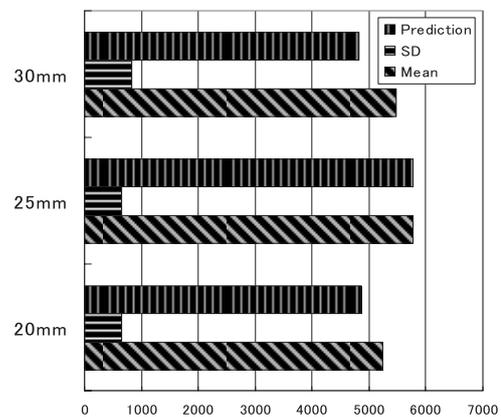


Fig.10 The strength of joint and strength prediction.