静的曲げモーメント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応力と強度^{*1}

樋口 泉^{*2}

The Stress and Strength Evaluations of Single-lap Adhesive Joints of Bamboo Plate Adherends under Static Bending Moments^{*1}

Izumi HIGUCHI^{*2}

This paper deals with testing the stress distributions and strength in single-lap adhesive joints of bamboo plate adherends after being subjected to static bending moments. Stress and strain were calculated using an elastic and orthotropic finite-element method (FEM). In addition, the surface strain distributions of single-lap adhesive joints under static bending moments were measured using strain gauges. Reasonable correlation was found between the numerical and the experimental results. It was found that the maximum value of the maximum principal stress, σ_1 , appears at the interface between the adhesive layer and the adherend. The normal stress in the direction perpendicular to the fiber was greatest near the singular points. Bending strength tests were performed. In the case where the width of the joints and the lapped length were equal, it was found that the bending strength was maximal. Furthermore, the joint strength was predicted using two singularity parameters from the calculation results. Fairly good agreement was found between the predictions and the experimental results.

Keywords : single-lap adhesive joints, bending strength, FEM, bamboo, stress singularity.

木質材資源としてあまり有効に活用されていないタケを板材に加工し、接合方法の開発として単純重ね合わせ接着継手を作った。静的曲げモーメント作用させ継手の応力を有限要素法で計算した。継手表面のひずみに関する実験を行い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。接着剤層界面端部の応力値が大きくなることがわかった。応力成分は繊維方向の引張応力と繊維直角方向（法線方向）の引張応力が同じ程度の大きさとなりせん断応力は小さくなることが分かった。この位置から繊維直角方向（法線方向）への被着体の破壊も予想された。強度実験を行い、破壊は被着体と接着剤層の界面端部のはく離から始まることが観察された。破面より被着体のはく離も観察された。接着剤層界面における繊維直角方向引張応力の応力特異場の強さから強度予測を行い強度実験結果と比較したところ推定値は実験値とかなりよく一致した。

1. 緒 言

古来より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⁾。また成長も木材と比較して格段に早く3-5年

^{*1} Received May 28, 2013; accepted July 17, 2013. 本研究の一部は、日本機械学会精密学会共催山梨講演会2011（2011年10月，甲府市）および日本機械学会北陸信越支部第49期総会・講演会（2012年3月，石川県野々市市）において発表した。

^{*2} 釧路工業高等専門学校 Kushi National College of Technology, Kushi, 084-0916, Japan
Corresponding author: I. Higuchi (higuchi@kushi-ct.ac.jp)

で使用可能になる程度に成長する。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⁾の生物学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³⁻⁵⁾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。天田^{6,7)}は、タケの繊維を取り出し樹脂で固めその強度と将来性について提言している。藤井⁸⁾らは、タケから繊維を取り出し樹脂に混合することで樹脂の強さを大きくする報告を行っている。池上⁹⁾は複合材料のモデルの一つとしてタケや木をとりあげ、それらの形態や組織分布の合理性を力学的な観点から検討を行ない、これらの機能性を手本として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。Nugroho^ら¹⁰⁾は、丸タケを加熱圧縮して作った板を積層してその特性を調べた。高木^ら¹¹⁾は、生物分解プラスチック-竹粉複合ボードを試作し強度評価を行った。田中^ら¹²⁾は、木質構造材を接合するタケやタケ集成加工接合具の強度向上について研究報告している。Lugt^ら¹³⁾は、建築資材として竹の可能性についての研究を報告している。Flander^ら¹⁴⁾は、板状に積層化したタケでの建築物の可能性について述べている。池^ら¹⁵⁾は、天然系接着剤であるタンニンでタケ集成材を作り曲げ試験および圧縮試験を行い材料としての可能性について検討している。島川^ら¹⁶⁾は竹刀用の竹材の破壊特性について竹材の衝撃曲げ破壊特性におよぼす打撃方向、節の有無や含水率の関係を検討している。堀江¹⁷⁾は仮設構造物の部材として利用するために高含水率のモウソチクとマダケの丸竹について曲げ試験を行い構造設計手法に則った竹製仮物の可能性を示している。

しかしながら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。著者^ら¹⁸⁾は、ハイブリッド集成材の強度向上の一方策としてラミナとしてタケを用いることを提案し、ヒノキ板にタケ板を貼り合わせた接着板を製作した。曲げモーメントを作用させヒノキ単体と比較することで強度の向上について検討してきた。本研究は、その一環として集成材のラミナとしてタケを用いることを想定

し、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選んだ。静的曲げモーメントを作用させ、継手に発生する応力と強度について有限要素法による計算および実験の両面から調べ竹材有効活用の確立を目的とする。同時に強度に大きな影響をおよぼす、はく離の発生の起点となる接着端の応力特異場を近似的に表現する二つの応力特異場パラメータ¹⁹⁻²¹⁾を用いて強度評価を行い継手強度推定も行う。

2. ひずみに関する実験および 曲げ強度に関する実験

実験に使用したタケは、山梨県身延産3年物のモウソウチク (*Phyllostachys heterocycla*) の地上約3 m までの部分 (直径約150 mm, 節間長さ約250 mm, 肉厚約10 mm) を使用した。節間より長さ100 mm に切断後、1/2 に割り、定温乾燥炉で約70℃で質量に変化が認められなくなるまで乾燥した (気乾比重0.70)。乾燥後、断面の繊維密度が等しくなる位置を選び所要の厚さ $t_B = 4$ mm に切削加工した。面肌の粗さは繊維直角方向 (接線方向) で平均線中心粗さ $Ra = 5 \mu\text{m}$ が得られた。本研究では、繊維方向を y 方向および繊維直角方向 (法線方向) を z 方向とした。Fig. 1 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。試験体は、浸透性の小さい2液混合型エポキシ系構造用接着剤 (Scotch-Weld1838, 住友3M) でタケ板の繊維方向を一致させ接着した。両面から圧縮し48時間以上室温放置した後に、接着剤の反応をさらに進めひずみ除去の目的で60℃ 8時間の養生をさせた。重ね合わせ長さ $l_2 = 20, 25$ および30 mm の継手について実験した。条件を同じにした試験体をそれぞれ3個ず

Fig. 1. Schematic of the experimental setup for the strain measurements and the bending strength tests under static bending moments. The dimensions of the specimen used in the strain measurements and the positions of the strain gauges attached are included.

つ準備してひずみに関する実験を行った。いずれの場合も接着層の厚さ t_A は 0.1 mm とした。被着体の外面にひずみゲージを貼り 7 点にグリッド長さ 2 mm のひずみゲージ (KFG-2-120-C1-5, (株)共和電業) をひずみゲージのグリッドが繊維方向と平行 (y 方向) になるように貼り、負荷が作用した時の継手表面のひずみをひずみセンサインターフェイス (PCD-300A, (株)共和電業) でロードセルの出力と合わせて記録した。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。継手を反転させて実験することで曲げによって発生する圧縮ひずみおよび引張ひずみを測定した。強度実験では、材料試験機にロードセルおよびコの字型ジグを固定しクロスヘッドの速度は 1 mm/min とした。本構造の継手では中立軸が図心からずれ曲げ応力で曲げ強さを評価することが出来ないで、本研究では強度評価の一方法として破壊までの曲げモーメントの最大値 $M_{\max}$ で評価した。

3. 解析方法

3.1 有限要素法による応力計算

静的曲げモーメントが作用する継手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 (株)ホクトシステム) を使用した。Fig. 2a は有限要素法の計算に用いた解析モデルを示す。寸法、形状および材料定数は、実験の結果と比較する目的で、実験で使用した寸法および材料と同じにした。被着体は二次元直角異方性材料として取扱い、繊維方向を y 方向、繊維直角方向 (接線方向) を z 方向とする oyz デカルト座標として、原点を o とした。被着体 I (Adherend I) と被着体 II (Adherend II) を接着層 (Adhesive) を挟み重ね合わせ接合した。拘束条件は被着体 I の $y = -(l_1 - l_2)/2$, $z = -t_B$ の位置を y 方向に、被着体 II の $y = (l_1 + l_2)/2$, $z = +t_A$ の位置を y 方向および z 方向に拘束した。被着体の $x = +l_3/2$, $y = t_A + t_B$ および $x = -l_3/2$, $y = 0$ の位置に y 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。計算では $F = 50$ N の大きさの力を作用させた。この荷重は実験結果より得られた重ね合わせ長さ $l_2 = 25$ mm の破壊荷重の約 1/4 に相当する。Fig. 2b は、要素分割例を示す。拡大図中の $0 < z < t_A$ が接着層である。

Table 1 は、実験より得られたタケおよび接着剤に使用するエポキシ系構造用接着剤 (Scotch-weld1838, (株)住友 3M) の機械的性質を示す¹⁸⁾。継手の各部分の寸法は比較検討のために実験に用いたそれらと同じとした。なお、各記号の末尾に B および A をつけて、タケおよび接着剤のそれらとする。

Fig. 2. A model for FEM calculations and an example of mesh division.

Notes: (a) A model for FEM calculations for a single-lap adhesive joints of bamboo plate adherends subjected to static bending moments.

(b) An example of mesh division in a model for FEM.

Table 1. The material properties for bamboo and the adhesive used in this study.

	Young's modulus		Poisson's ratio	Shear modulus	Tensile strength	
	E_y	E_z	ν_{yz}	G_{yz}	$\sigma_{y \max}$	$\sigma_{z \max}$
Bamboo	11.2 GPa	2.03 GPa	0.38	1.20 GPa	120 MPa	14.0 MPa
Adhesive Scotch-Weld1839	3.63 GPa		0.314	1.28 GPa	3.04 MPa	

3.2 継手強度推定方法

本研究で取り扱う接着継手の接着端近傍は接着面で応力が無限大となる応力特異場域となっている。このような領域を有限要素法で計算すると、要素分割の粗密の程度により最大応力が異なり、したがってこの最大応力のみでは強度の評価ができない。ここでは、この応力特異場近傍の応力分布が近似的に

$$\sigma(r) = K/r^\lambda \quad (1)$$

$\sigma(r)$: 応力 (MPa)

K : 応力特異場の強さ

r : 特異点からの距離 (mm)

λ : 特異性の指数

で示されることに着目し、この K と λ によって接着面の強度評価をした。本報では、被着体の縦弾性係数および引張り強さの小さい z 方向 (接線方向) の応力 σ_z に関する特異場パラメータ K および λ を用いた¹⁹⁻²¹⁾。

4. 実験結果と計算結果

4.1 ひずみに関する実験と計算結果

Fig. 3 は、曲げモーメントが作用する継手表面 ($z = -t_B$ および $z = t_A + t_B$) のひずみ分布の実験結果と計算結果の比較を示す。重ね合わせ長を $l_2 = 20, 25$ および 30 mm と変化させた継手のひずみ実験結果と計算結果の比較を示す。静的曲げモーメント ($F = 100$ N, 最大曲げモーメント $M = 1500$ Nmm) を作用させた。一条件につき 3 個ずつ準備した試験体

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

Note: Exp.: Experimental results, Num.: Numerical results, $z=0$, $F/2=50$ N, $t_B=4$ mm, $t_A=0.1$ mm, $l_1=60$ mm, $l_3=120$ mm

からは同一の結果が得られた。ひずみ値の計算結果 ε_y は有限要素法による計算結果をポスト処理した接着板表面要素の y 方向の引張応力 σ_y を実験で求めた縦弾性係数 E_y で割った値とし、ひずみゲージの出力と比較した。縦軸は継手表面 ($z = -t_B$ および $z = t_A + t_B$) の繊維方向のひずみ ε_y を、横軸は接着板中心から繊維方向長さ y mm をあらわす。いずれも計算結果と実験結果はかなり良く一致した。

4.2 接着界面および接着層の応力分布

Fig. 4 は曲げモーメントが作用する接着継手 ($t_B = 4$ mm) の接着層と被着体の界面 ($0 < y < l_2$, $z=0$, $t_A/2$, t_A) 接着層側および接着層中央部 ($0 < y < l_2$, $z=t_A/2$) における最大主応力 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、横軸は重ね合わせ長さ l_2 で無次元化した。接着層界面端部 ($y=0$, $z=0$) で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。本研究では接着層界面端部 ($y=0$, $z=0$) 近傍の応力の状態が重要になるので、特に Fig. 4 図中には接着層界面端部近傍 ($0 < y/l < 0.02$) の応力分布を示す。Fig. 5 は被着体 I と接着層界面 ($0 < y < l_2$, $z=t_A/2$) 接着層側における応力成分の分布を示す。縦軸は最大主応力 σ_1 , 成分応力 σ_y , σ_z 接および τ_{yz} を着剤層界面 ($z=0$) における最大主応力 σ_1 の平均値 $\bar{\sigma}_1$ で、横軸は重ね合わせ長さ l_2 ($=25$ mm) で無次元化した。図中には接着層界面

Fig. 4. Stress distributions in the adhesive layer near the interface between the adhesive and the adherends under static bending moments.

Note: $z=0$, $F/2=50$ N, $t_B=4$ mm, $t_A=0.1$ mm, $l_1=60$ mm, $l_2=25$ mm, $l_3=120$ mm

Fig. 5. Stress distributions in the adhesive layer near the interface between the adhesive and the adherend under static bending moments.

Note: $z=0$, $F/2=50$ N, $t_B=4$ mm, $t_A=0.1$ mm, $l_1=60$ mm, $l_2=25$ mm, $l_3=120$ mm

端部近傍 ($0 < y/l < 0.02$) の応力分布を示す。繊維方向の引張応力 σ_y とはく離方向引張応力 σ_z がかなり大きくなることが分かった。これらの結果より、静的曲げモーメントを受ける本形状の継手では接着層界面端部 ($y=0$, $z=0$) の位置で接着界面がはく離することで破壊が開始することが予測された。

Fig. 6 は、重ね合わせ長さ l_2 が応力分布におよぼす影響を示す。重ね合わせ長さ l_2 を 20, 25 および 30 mm と変化させた。評価応力は、縦弾性係数および引張強さの小さい被着体の法線方向応力 σ_z とした。縦軸は、引張応力 σ_z を重ね合わせ長さ $l_2=25$ mm の継手の接着層界面 ($z=0$) における応力 σ_z の平均値 $\overline{\sigma_{z,25}}$ で、横軸は重ね合わせ長さ $l_{2,25}$ ($=25$ mm) で無次元化した。図中には接着層界面端部近傍 ($0 < y/l < 0.1$) の応力分布を示す。重ね合わせ長さを変化させても応力の最大値は接着層界面端部 ($y=0$, $z=0$) に発生することがわかった。重ね合わせ長さ l_2 が 25 mm であるとき σ_z の最大値が最も小さくなることが分かった。被着体にタケ板を用いた本形状の接着継手では重ね合わせ長さ l_2 を 25 mm より大きくしても継手強度の向上に大きな影響をおよぼさないことが予測された。

4.3 強度実験結果

Fig. 7 は強度に関する実験結果を示す。継手の強度試験では一条件について 24 個の試験体を準備して行った結果を平均 (Mean), 標準偏差 (SD) で整

Fig. 6. The effects of changes in the lapped length l_2 on the stress σ_z distributions in the adhesive layer near the interface between the adhesive and the adherend under static bending moments.

Note: $z=0$, $F/2=50$ N, $t_B=4$ mm, $t_A=0.1$ mm, $l_1=60$ mm, $l_3=120$ mm

Fig. 7. Bending strength of the single-lap adhesive joints.

理した。縦軸は重ね合わせ長さ l_2 を横軸はそれぞれの破壊までの曲げモーメントの最大値 $M_{\max}$ の平均値 (Mean) および標準偏差 (SD) を示す。 $M_{\max}$ の平均値は、 $l_2=25$ mm の継手が最も大きくなることが分かった。この結果は、Fig. 6 に示した重ね合わせ長さ l_2 が応力分布におよぼす影響とかなりよく一致している。継手に曲げモーメントが作用すると継手は、たわみによる曲げのエネルギーを吸収す

る。このとき、継手の曲げ剛性の小さい部分がより大きいたわむため、重ね合わせ長さ $l_2 = 25 \text{ mm}$ から $l_2 = 30 \text{ mm}$ となることで曲げ剛性の小さい部分 $-(l_1 + l_2)/2 < y < 0$ および $l_2 < y < (l_1 + 3l_2)/2$ が小さくなり、その結果、この部分が大きいたわむことが被着体と接着層の界面のはく離につながり $M_{\max}$ が小さくなったことが推察される。実験の観察より、作用する曲げモーメントが大きくなると被着体と接着層の界面端部 ($y=0, z=0$) にはく離が発生し、曲げモーメントが大きくなるにつれてはく離が進展し破壊に至ることが分かった。Fig. 4に示した結果とかなりよく一致した。破面の観察より、はく離が開始した部分 ($y=0, z=0$) の反対側端部 ($y=l_2, z=t_A$) 近傍に被着体のはく離の跡が認められた。このことより、継手の破壊過程は被着体 I と接着層の界面端部 ($y=0, z=0$) から始まりはく離が進展し接着層の破壊が起こり被着体 II 表面のはく離が起こり、継手が完全に破壊したことが推測される。

4.4 強度推定結果

Fig. 8(a)は実験結果と強度推定結果の比較を示す。重ね合わせ長さ $l_2 = 25 \text{ mm}$ の継手の強度実験結果と有限要素法による計算結果をもとに静的曲げモーメントが作用する重ね合わせ長さ $l_2 = 20 \text{ mm}$ および $l_2 = 30 \text{ mm}$ の継手の強度について推定した。本研究では、被着体であるタケの接線方向 (z 方向) 縦弾性係数 E_{zB} および引張強さ $\sigma_{z\max B}$ が繊維方向 (y 方向) のそれら E_{yB} および引張強さ $\sigma_{y\max B}$ に比べて、それぞれ $1/5.52$ および $1/8.57$ とかなり小さく、さらに強度実験後の破面にタケのはく離が観察されたことより、強度に対して強い支配因子となる接線方向 (z 方向) すなわちはく離方向引張応力 σ_z に関する応力特異場パラメータを用いて強度を推定した。Fig. 8(b)はFig. 4に示す計算結果からわかる応力の最も大きくなる位置 ($y=0, z=0$) における接着端の形状を示す。Fig. 8(b)に示す頂角は、それぞれ $\theta_1 = 90^\circ$ と $\theta_2 = 180^\circ$ とした。計算では角度の絶対値を用いた。特異性の指数 λ は接着端の形状とそれぞれの材料特性から求めた。計算に使ったタケおよび接着剤の縦弾性係数およびポアソン比を Table 1に示す。それぞれ $E_1 (= E_A) = 3.63 \text{ GPa}$, $\nu_1 (= \nu_A) = 0.314$ および $E_2 (= E_{zB}) = 2.03 \text{ GPa}$, $\nu_2 (= \nu_{zB}) = 0.38$ の接着モデルについて、特異性の指数 λ を求めた。この場合、自由面で応力が零、接着面での変位の適合、応力の釣合いなどの境界条件をもとで線形弾性論的に解析すると、応力の特異性の指数を決定する特異方程式が次のように求まった¹⁹⁻²¹⁾。

$$Q(\theta_1, \theta_2, \alpha, \beta; p) = A(\theta_1, \theta_2; p) \beta^2$$

Fig. 8. Comparisons between the numerical prediction and the experimental strength test results.

Notes: (a) Comparisons between the numerical prediction and the experimental strength test results.

(b) The shape of the adhesive layer end.

$$\begin{aligned} &+2B(\theta_1, \theta_2; p) \alpha \beta \\ &+C(\theta_1, \theta_2; p) \alpha^2 \\ &+2D(\theta_1, \theta_2; p) \beta \\ &+2E(\theta_1, \theta_2; p) \alpha \\ &+F(\theta_1, \theta_2; p) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで

$$G_i = E_i/2(1 + \nu_i) \quad (i=1, 2) \quad (3)$$

$$m_i = 4(1 - \nu_i); \text{ 平面ひずみ}$$

$$m_i = 4/(1 + \nu_i); \text{ 平面応力} \quad (4)$$

とすると

$$\alpha = (G_1 m_2 - G_2 m_2) / (G_1 m_2 + G_2 m_1) \quad (5)$$

$$\beta = \{G_1(m_2 - 2) - G_2(m_1 - 2)\} / (G_1 m_2 + G_2 m_1) \quad (6)$$

また、式(2)の A, B, C, D は、

$$H(p, \theta) = \sin^2(p\theta) - p^2 \sin^2(\theta) \quad (7)$$

を用いて

$$A(\theta_1, \theta_2; p) = 4H(p, \theta_1) \cdot H(p, \theta_2)$$

$$B(\theta_1, \theta_2; p)$$

$$\begin{aligned}
&= 2p^2 \cdot \sin^2(\theta_1) \cdot H(p, \theta_2) + 2p^2 \cdot \sin^2(\theta_2) \cdot H(p, \theta_1) \\
&\quad C(\theta_1, \theta_2; p) \\
&= 4p^2 \cdot (p^2 - 1) \cdot \sin^2(\theta_1) \cdot \sin^2(\theta_2) + H\{p, (\theta_2 - \theta_1)\} \\
&\quad D(\theta_1, \theta_2; p) \\
&= 2p^2 \cdot \{\sin^2(\theta_2) \cdot \sin^2(p\theta_1) - \sin^2(\theta_1) \cdot \sin^2(p\theta_2)\} \\
&\quad E(\theta_1, \theta_2; p) \\
&= -D(\theta_1, \theta_2; p) + H(p, \theta_1) - H(p, \theta_2) \\
&\quad F(\theta_1, \theta_2; p) = H\{p, (\theta_1 + \theta_2)\} \quad (8)
\end{aligned}$$

で示される。

特異性の指数 λ は、上記特性方程式の解となる固有値 p を用いて次式より求めた。

$$\lambda = 1 - p \quad (9)$$

接着端の形状および Table 1 に示す材料定数と Fig. 8(b) に示す継手端部の形状より特異性の指数 $\lambda = 0.460$ が求まった¹⁹⁻²¹⁾。

応力特異場の強さ K は、重ね合わせ長さ $l_2 = 25$ mm の継手の荷重条件を $M_{\max} = 5780$ Nmm ($F/2 = 193$ N) を作用させた計算から求めた接着層界面端部近傍 ($0 < y < 0.2$ mm) のはく離方向応力 σ_z の分布を特異性の指数 $\lambda = 0.460$ として式(1)にあてはめることによって求めた。応力特異場の強さが $K = 34.4$ となった¹⁹⁻²¹⁾。被着体の材料特性と接着端部の形状が同じであれば応力特異場の強さ $K = 34.4$ がこの値より大きくなると継手が破壊することが分かった。特異性の指数 λ を一定として重ね合わせ長さ $l_2 = 20$ mm および 30 mm の継手の接着層界面端部近傍 ($0 < y < 0.2$ mm) のはく離方向応力 σ_z の分布を式(1)にあてはめ応力特異場の強さ $K = 34.4$ となる荷重条件を求めた。この結果を、それぞれの $M_{\max}$ として強度の推定を行った。実験結果と推定結果はかなりよく一致した。推定結果が実験結果よりも少し小さく算出されているが、実験でモーメントが大きくなる過程で継手がたわんだためコの字型ジグが継手表面に対して荷重を垂直に負荷できていないことが原因と推察される。

5. 結 言

静的曲げモーメント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応力および強度に関して実験および有限要素法（有限要素コード FEMLEEG）による計算で調べたところ以下の結果が得られた。

1. 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。
2. 有限要素法の計算で継手の応力を調べたところ接着層界面端部 ($y = 0, z = 0$) 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。こ

の位置での応力成分は繊維方向の引張応力 σ_x と繊維方向に対して直角方向（法線方向）の引張応力 σ_z が同程度の大きさで、かなり大きくなることが観察された。被着体の材料特性を考慮すると、この位置から繊維方向に対して直角方向（接線方向）への被着体の破壊も予測された。

3. 重ね合わせ長さ l_2 を 20 mm, 25 mm および 30 mm と変化させた継手の曲げ強度試験の結果、継手の幅 ($= W$) と重ね合わせ長さ l_2 が等しい継手の強度がもっとも大きくなることが分かった。この結果は、重ね合わせ長さ l_2 を変化させた接着界面はく離方向引張応力 σ_z の計算結果によく一致した。
4. 継手の接着端の形状、材料定数および強度実験より得られた $l_2 = 25$ mm の継手の強度から応力特異場パラメータを求めた。この結果を $l_2 = 20$ mm, 30 mm の継手の有限要素法による計算結果に用いて得た推定値と強度実験結果を比較したところ、強度推定と実験結果はかなりよく一致した。静的曲げモーメントが作用する被着体が竹板である単純重ね合わせ接着継手の強度は、応力特異場の強さを考慮することで推定できることを示した。
5. 本研究で用いた単純重ね合わせ接着継手の $y < 0, z > t_A + t_B$ および $y > l_2, z < 0$ の部分に他の材料が接着されても、本研究で用いた手法から得られる推定強度よりも小さくなることは考えられず、曲げモーメントが作用するタケをラミナもしくはラミナの一部とする集成材の設計指針を示した。

謝 辞

この研究は、独立行政法人日本学術振興会平成23年度科学研究費助成事業科学研究費補助金（奨励研究）の補助を受けて行った。研究で使ったモウソウは身延竹炭企業組合（代表理事 片田義光氏）よりご提供いただいた。

文 献

- 1) 安藤邦廣：“民家造”，学芸出版社，京都，2009，pp. 68-75.
- 2) Liese, W.: Research on bamboo. *Wood Sci. Technol.* **21**, 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 No 18, 37-58 (1950).
- 4) 太田 基：竹林の性質に関する研究（第9

- 報)：竹林の圧縮強度と含水率との関係. 九州大学演習林報告論文 No 22, 87-108 (1953).
- 5) 太田 基：竹材の性質に関する研究 (第15報)：強度的性質, 比重及び壁厚相互間の関係. 九州大学演習林報告論文 No 29, 1-34 (1957).
- 6) 天田重庚：天然の傾斜機能材料に基づく竹の力学的構造-第1報 外形の力学特性. *Bamboo Journal* No 15, 23-30 (1998).
- 7) 天田重庚：天然の傾斜機能材料に基づく竹の力学的構造-第2報 基本的な力学特性. *Bamboo Journal* No 15, 31-39 (1998).
- 8) 藤井 透, 大窪和也：木・竹利用技術の最先端竹繊維強化複合材料の開発と応用. 農林水産技術研究ジャーナル 28(10), 30-35 (2005).
- 9) 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), 108-114 (1985).
- 10) Nugroho, N., Ando, N. : Development of structural composite products made from bamboo II: fundamental properties of laminated bamboo lumber. *J. Wood Sci.* 47, 237-242 (2001).
- 11) 高木 均, 田倉隆輝：爆砕法により取り出した竹繊維の引張強度特性. 材料 52(4), 357-361 (2003).
- 12) 田中 圭, 石谷 淳, 井上雅文, 井上正文：圧密加工技術を用いた木質構造用竹製接合具の強度性能向上. 日本建築学会構造系論文集 73(632), 1805-1812 (2008).
- 13) Lugt, P., Dobbelsteen, A. A. J. F., Janssen, J. J. A.: An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. *Const. Build. Mat.* 20(9), 648-656 (2006).
- 14) Flander, K., Rovers, R. : One laminated bamboo-frame house per hectare per year. *Const. Build. Mat.* 23(1), 210-218 (2009).
- 15) 池 智大, 依田浩敏, 福田展淳, 平松謙一：タンニンを接着剤に用いた竹による集成材製造に関する研究. 日本建築学会九州支部研究報告 No 44, 1011-1012 (2005).
- 16) 島川孝敏, 澤田 豊, 藤井義久, 奥村正悟：竹刀用の竹材の破壊特性. 第63回日本木材学会大会研究発表要旨集, 盛岡, 2013, D27-08-1500.
- 17) 堀江秀夫：仮設構造部材としての青竹強度性能. 第63回日本木材学会大会研究発表要旨集, 盛岡, 2013, D27-08-1515.
- 18) 土屋善裕, 樋口 泉：静的曲げモーメントを受けるタケ・ヒノキ接着板の応力と強度. 木材学会誌 59(3), 128-137 (2013).
- 19) 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), 597-603 (1988).
- 20) 服部敏雄：応力特異場パラメータを用いた接着継手の強度評価. 日本機械学会論文集 (A編) 56(3), 618-623 (1990).
- 21) 服部敏雄, 渡辺 孝：応力特異場パラメータを用いた汎用的強度評価基準の検討. 日本機械学会論文集 (A編) 67(9), 1486-1492 (2001).