木材の圧密効果による圧縮特性の応力-ひずみ挙動の変化[†]

大谷 忠* 藤原 隆行** 松田 絹代**

Effect of Densification on Compressive Stress-Strain Behavior in Wood

by

Tadashi OHTANI* Takayuki FUJIWARA** and Kinuyo MATSUDA**

The properties of compression parallel to grain were examined by using the wood compressed perpendicular to the grain with various ratios, and the plastic stress-strain behavior in the compression properties was investigated. The results was summarized that the compression strength parallel to the grain increased with the larger compression ratio in the heat treated condition without dimensional recover. The change of the plastic behavior in the compression stress-strain curves was recognized in the boundary before and after reached to the maximum stress. The plastic behavior after reached to the maximum stress in the stress-strain diagram showed that the effect of the work-softened appeared remarkably with the larger compression ratio. The plastic region before reached to the maximum stress decreased with the larger compression ratio. From this result, it was concluded that distinguish of wooden porous tissue by densification affected to the plastic behavior with yielding in the compression stress-strain diagram.

Key words : Densification, Stress, Strain, Plastic behavior, Compression property

1 緒 言

木材に工具が接触することによってある形状に切削加工したり、熱を加えて曲げや圧縮変形を与えることによって成形加工したりする場合には、弾性変形の後、塑性的な変形を経て、切り屑を生成したり、ある形状に変形固定される。このような加工のプロセスを力学的に把握するためには、木材の応力-歪み曲線に現れる塑性的な挙動の物理的意味について考えることは重要な手がかりになる。

木材に変形を加えた場合、その応力-歪み曲線は、弾性的な挙動を示した後、塑性的な挙動が現れる。浅野は木材の梁の塑性曲げに働く圧縮の応力に注目し、その応力-ひずみ曲線における塑性挙動の取り扱いについて検討している。¹⁾吉原らは、圧縮の応力-歪みの関係に現れる塑性挙動を数理塑性的に解析し、木材にも塑性力学理論の適用が可能なことを明らかにしている。^{2), 3)}これらの研究では、木材の繊維方向の圧縮特性を取り上げ、その応力-歪み曲線に現れる塑性的な挙動を検討している。

一方では、則元や井上らによって、木材を繊維方向と垂直に圧縮した時の横圧縮変形の研究やその大変形を利用した圧縮木材に関する研究が行われている。^{4), 5)}このような横圧縮変形によって多孔質な組織を圧密する効果を利用して、材料の強度を高めることができる等の利点をもつ。以上のことから、木材の圧密効果を多孔質な組織を変化させ、密度を高めるという視点で捉えれば、その圧密の効果が繊維方向の圧縮特性にも何らかの影響を及ぼす可能性がある。

そこで、本研究では圧密の効果によって密度を意図的に変化することができる圧縮木材を用いて、繊維方向に

対する縦圧縮特性について調べた。さらに、圧密の効果が応力-歪み曲線における塑性挙動に及ぼす影響について検討した。

2 実験方法

2・1 材料

供試材には年輪が2～4mmの範囲内において比較的均一に分布したスギ(*Cryptomeria japonica* D. Don)の心材を用いた。その平均密度は0.35g/mm³であり、含水率は11.0%であった。供試材から25mm(接線方向)×250mm(繊維方向)で、高さが半径方向に21.4mm, 30mmおよび50mmの角材をそれぞれ加工した。

得られた角材を室温での含水率に維持した後、上下両面のホットプレス盤に接触させた状態で、10分間余熱を与え、プレス速度が0.16mm/sの条件で、最終寸法が15mmになるよう半径方向に圧縮した。圧縮における寸法固定の方法は、厚さ15mmの真鍮丸棒をプレス盤の間に挟み、常に丸棒の厚さまで材料を圧縮した状態で固定した。この時のプレス盤の熱処理温度は80, 130および180℃の条件とし、圧縮後熱処理による固定時間は5時間とした。この時の圧縮率CRは、プレス成形前における角材の高さと丸棒の厚さの差をプレス前の高さで除して求めた。

Table 1に本実験で用いた圧縮木材の特性を示す。本実験で用いた圧縮木材の圧縮率は、CR = 30, 50および70%であり、熱処理温度Tが低い場合には、プレス成形後に寸法の回復が認められた。それらの平均回復率はT = 80℃では5～7%であり、T = 130℃では1～4%の範囲であった。得られた圧縮木材における密度は0.39～0.92g/mm³の範囲であり、含水率は5.7～10.0%の範囲であった。

[†] 原稿受理 平成18年7月3日 Received July 3, 2006 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 茨城大学教育学部技術教育講座 〒310-8512 水戸市文京, Dept. of Tec. Edu., Ibaraki Univ., Bunkyo, Mito, 310-8512

** 島根大学総合理工学部材料プロセス工学科 〒690-8504 松江市西川津町, Dept. of Natural Resources Process Eng., Shimane Univ., Nishikawatu-cho, Matsue, 690-8504

Table 1 Properties of compressed wood used for the experiment.

Heat treated Temperature: T [°C]	Compression ratio: CR [%] (): Recovery ratio [%]	Density [g/cm ³]	Moisture content [%]
80	30 (5)	0.39	9.7
	50 (7)	0.63	10.0
	70 (7)	0.84	9.2
130	30 (1)	0.42	7.3
	50 (1)	0.62	6.9
	70 (4)	0.80	8.5
180	30	0.41	5.8
	50	0.60	6.4
	70	0.92	5.7

2・2 圧縮試験

Table 1 に示すような圧縮木材を用いて、繊維方向を変形方向とする縦圧縮試験を行った。試験片は圧縮する断面の幅が 15mm（接線方向）で、長さが回復率を含む圧密した寸法（半径方向）とし、高さ 30mm（繊維方向）の試験片を各熱処理および圧縮率の条件において 10 体用いた。本実験に用いた試験片のほとんどは、回復率が 5% 以下のほぼ正方形の横断面をもつ柱体であったため、試験片の長さ方向はそのまま圧密した寸法とした。圧縮試験ではインストロン型の試験機（島津オートグラフ AG-5000A）を用いて、試験は室温が 20°C および相対湿度が 60% の雰囲気で行った。この時、クロスヘッドが 1mm/min の速度で圧縮し、クロスヘッドの移動量から歪みを求めた。

2・3 曲げ試験

圧縮試験において試験片端部の負荷が集中する部分では、摩擦や局部的なつぶれ等から偏心の負荷が生じる場合がある。このような局部的な負荷は、切削加工における工具先端の接触等にも想定される。これに対して、4 点曲げに発生する圧縮応力は、曲げの負荷が集中する部分とは異なるため、中立軸を境に圧縮と引張が試験片内に拘束された条件で加えることができる。そこで、本実験では縦圧縮試験における圧縮応力と曲げに作用する圧縮応力とを比較するため、4 点曲げ試験を行った。

Fig. 1 は 4 点曲げ試験の模式図を示す。曲げ試験片は、横断面の幅が 15mm で、高さが回復率を含む圧密した寸法とし、長さが 240mm の試験片を圧縮試験同様、各条件において 10 体用いた。4 点曲げ試験では、試験片中央の圧縮および引張が働く両表面に歪みゲージを貼り付け、歪みを測定した。歪みの測定には、東京測器

Fig. 1 Schematic illustration of the four-point bending test.

研究所製（FLA-2-11）による 5% 以上の歪み量を測定できるゲージを用いた。4 点曲げにおける荷重點は、有限要素法解析ソフトを用いて、内部の応力および歪み分布を平面応力状態で解析した。荷重點における集中荷重が歪み測定部に影響しない範囲を予測し、はり間の距離を 60mm にし、スパンを 210mm に設定した。

2・4 曲げに働く圧縮応力の予測

Fig. 2 に示すような梁の内部における圧縮側の応力 σ_c について予測するため、Nadai による曲げモーメントの式を用いると、 σ_c は次式のように表せる。⁹⁾

$$\sigma_c = \frac{\sigma_t \frac{d}{d\theta}(M\theta^2)}{bh^2\sigma_t\theta - \frac{d}{d\theta}(M\theta^2)} \quad (1)$$

式 (1) における引張側の応力 σ_t について考えると、一般に、木材の引張特性における塑性領域は非常に少ないことが知られている。¹⁾ そこで、式 (1) における引張側の応力 σ_t の範囲では、フックの法則が適用できると仮定すると、 σ_t は次式により求めることができる。

$$\sigma_t = E_t \varepsilon_t \quad (2)$$

ここで、 E_t は引張による弾性係数であり、 ε_t は引張側の歪みである。次に、式 (1) の曲げモーメント M は、中立軸が梁の中央部にあると仮定すると、 ε_t を求めることができれば、次のように表される。

$$M = \frac{Eb h^2 \varepsilon_t}{6} \quad (3)$$

式 (3) の b (幅) および h (高さ) は梁の断面形状のパラメータである。また、梁に貼り付けたゲージ部では、

Fig. 2 Stress of the compression and tension in bending.

Fig. 2 に示すような、中立軸に発生するひずみを $\widehat{GH}$ とすると、その範囲は非常に小さいことが予想される。そこで、 $\widehat{GH}$ を λ と近似すると、式 (1) の θ は次式のように表される。

$$\theta = \frac{2\lambda\epsilon_t}{h} \quad (4)$$

以上の式 (2)~(4) における σ_t 、 M および θ が得られれば、式 (1) を用いて、圧縮応力 σ_c を求めることができる。

3 結果および考察

3・1 圧縮木材における縦圧縮特性

Fig. 3 は圧縮率が $CR = 70\%$ で圧縮したスギを用いて、繊維方向に縦圧縮試験を行った時の応力 σ -歪み ϵ 曲線を示す。本実験に用いた圧縮木材は、コントロール材 ($CR = 0\%$) のスギに比べて、 σ - ϵ 曲線における σ の値も大きく、熱処理温度が高いほどその傾向が著しい。そこで、本実験で用いた圧縮木材の熱処理の影響について詳しく調べるため、Fig. 4 は σ - ϵ 曲線における最大応力 $\sigma_{\max}$ と圧縮率 CR との関係について整理した結果である。実験は各条件において 10 体の試験片に対して行い、Fig. 4 はその平均値と標準偏差を求めた結果である。いずれの熱処理温度においても、 $CR = 50\%$ までは、 CR の増加に伴って、 $\sigma_{\max}$ の値は大きくなっている。ところが、 $CR = 50\%$ 以上では、熱処理温度が $T = 80^\circ\text{C}$ や 130°C の条件において、 $\sigma_{\max}$ の値は同程度を示すのに対して、 $T = 180^\circ\text{C}$ の場合には指数関数的に増加している。すなわち、圧縮木材における繊維方向の圧縮強度は、熱処理の影響を受け、寸法の回復が起こらない熱処理温度では、圧密するほど強度が増すことがわかる。

以上の寸法の回復が起こらない圧縮試験の結果は、井上らが圧縮木材の圧縮量 (オフセット量) と曲げ強度との関係について報告している結果と同様の傾向にある。⁷⁾ そこで、本圧縮試験の結果を基に、曲げに作用する応力について考えると、曲げには中立軸を境にして、圧縮と

Fig. 3 Relationship between the compression stress σ and the strain ϵ in the compressed wood with different heat treatment.

Fig. 4 Relationship between the maximum stress $\sigma_{\max}$ and the compression ratio CR in the compressed wood with different heat treatment.

引張の応力が作用している。したがって、細胞を圧密するほど曲げ強度が増加する傾向は、内部の圧縮強度の増加に起因しているものと思われる。

3・2 圧縮特性における応力-歪みの塑性挙動

Fig. 5 は 180°C の熱処理温度で圧縮したスギを用いて、繊維方向に縦圧縮試験を行った時の応力 σ -歪み ϵ 曲線を示す。圧縮率が異なるスギにおける σ - ϵ 曲線は、コントロール材では応力が直線的に増加した後、非線形に極大に至り、その後応力が緩やかに低下する。これに対して、圧縮木材では圧縮率 CR が増加するほど、直線領域 (弾性領域) から極大に至るまでの非線形領域が少なくなり、極大に至った後、応力が急激に低下する傾向にある。すなわち、応力-歪み曲線における塑性挙動は、圧密の効果によって、応力が極大に至る前後を境に変化が現れる可能性がある。そこで、以下では応力が極大に至るまでの塑性挙動については、次節の曲げにはたらく圧縮応力との関係から議論することにし、本節では極大に至った後の塑性挙動について詳しく調べることにする。

Fig. 6 は σ - ϵ 曲線における応力が極大に至った後の低下率 $((\sigma_{\max} - \sigma_{\max+1}) / \sigma_{\max})$ と圧縮率 CR との関係に整理した結果である。Fig. 6 における低下率は、応力が極大に至った後、歪みが 1% 増加した時の減少の割合 $((\sigma_{\max} - \sigma_{\max+1}) / \sigma_{\max})$ を求めた結果である。 $((\sigma_{\max} - \sigma_{\max+1}) / \sigma_{\max})$ の値は、 CR が増加するほど大きくなっており、 $CR = 50\%$ および 70% ではその傾向が著しい。すなわち、圧密の効果によって、最大応力に達した後の塑性領域では急激な加工軟化の挙動が現れることがわかる。

Fig. 7(a)-(c) は実験に供した圧縮木材における細胞組織の圧密の程度を調べるため、早晚材における木口断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した結果である。応力の低下が著しかった圧縮率が $CR = 50\%$ および 70% では、Fig. 7(b)-E および (c)-E のように、早材の細

Fig. 5 Relationship between the stress σ and the strain ε in the compressed wood with the heat treatment of $T=180^\circ\text{C}$.

Fig. 6 Relationship between the decreased ratio of plastic strain $((\sigma_{\max} - \sigma_{\max+1\%}) / \sigma_{\max})$ and the compression ratio CR after reached to the maximum stress.

胞壁はコントロール材 (Fig. 7(a)-E) に比べて著しく圧密され、互いに壁同士が接触している様子が観察できる。さらに、圧縮率が高い $CR=70\%$ においては、Fig. 7(c)-L のように、早材のみならず、晩材の細胞壁も圧縮変形し、細胞内腔が小さくなっている。

以上の SEM 観察の結果から、圧縮率が高い条件では、細胞壁が圧密されることによって、繊維方向に対して板状に細胞壁が形状変化し、層状に重なりあった構造になることが観察できる。したがって、繊維方向の圧縮変形は、最大応力に至るまで、細胞壁が層状に重なりあい座屈が生じにくくなるのに対して、最大応力に至った後、

Fig. 7 Scanning Electron Microscope of the axial section in the control and compressed wood. (a)–(c) are in the compression ratio of $CR=0, 50$ and 70% , and E and L are the early and late woods, respectively.

急激に大変形を伴う座屈が生じるため、加工軟化の挙動が顕著に現れたものと思われる。

3・3 曲げにはたらく圧縮応力との比較

Fig. 8 は 4 点曲げ試験を行った時の圧縮側に作用する応力 σ_c を式 (1)–(4) をもとに予測し、その応力 σ_c 歪み ε_c 曲線を求めた結果である。式 (3) における弾性係数 E は、本圧縮試験の結果と著者らの既往の引張試験の結果⁸⁾ から、 $E = E_t = E_c$ (圧縮による弾性係数) と仮定できるので、ここでは圧縮による弾性係数を用いた。Fig. 8 の結果において、コントロール材に比べて圧縮木材は、 σ_c – ε_c 曲線における直線部分の傾きは大きく、圧縮率 CR が増加するほど、その傾向は著しい。また、コントロール材および圧縮木材ともに、直線領域から極大に至るまでの非線形領域が少ない傾向にある。そこで、曲げ試験における σ_c – ε_c 曲線の結果から、塑性歪みの割合に注目し、縦圧縮試験および曲げ試験の結果を比較した。

Fig. 9 は圧縮および曲げ試験で得られた圧縮の応力–歪み曲線をもとに塑性歪みの割合を求め、その割合 $(\varepsilon_p / (\varepsilon_p + \varepsilon_c))$ と圧縮率 CR との関係について整理した結果である。圧縮試験から得られた σ_c – ε_c 曲線における塑性歪みの割合は、 CR が低いほど、曲げ試験から求めた圧縮の塑性歪みの割合に比べて大きい。ところが、圧縮試験における塑性歪みの割合は、 CR が増加するほど減少しており、曲げ試験の結果に近づいている。すなわち、圧縮木材では圧密の効果によって、圧縮試験の応力–歪み挙動に現れる塑性領域が少なくなることがわかる。

曲げに作用する圧縮応力については、浅野が報告しているように、曲げには理想的な圧縮応力が作用しやすく、

Fig. 8 Relationship between the stress σ_c and the strain ε_c in the compression element estimated by bending test.

すべりによる破壊の少ない真の応力状態に近い値が得られることが明らかにされている。¹⁾このことから、Fig. 9の結果において、曲げ試験から求めた圧縮の塑性歪みの割合が少ない傾向は、真の応力状態に近い値が得られているためと推察できる。これに対して、圧縮試験の結果では、曲げ試験に比べて、圧縮率が低いほど塑性歪みの割合が大きい。圧縮試験では端面の摩擦や局部的なつぶれ等によって、繊維方向に対する偏心の負荷の影響を受けやすい。そのため、圧密の効果が少ない条件では、繊維にすべりを生じるような座屈が起こりやすく、そのような圧縮変形の挙動が降伏時における応力-歪み曲線の

Fig. 9 Relationship between the ratio of plastic strain ($\varepsilon_p / (\varepsilon_p + \varepsilon_e)$) and the compression ratio CR before reached to the maximum stress.

塑性的な挙動に現れているものと思われる。また、Fig. 9の曲げ試験の結果において、高い圧縮率の塑性歪みの割合がさらに小さいのは、圧密の効果によって、圧縮側に座屈が生じにくくなった結果、引張側では熱処理の影響により、最大応力に達しない段階で破壊に至ったことも関係しているものと思われる。

以上の結果から、木材を圧密することによって、圧縮変形に伴う塑性領域が少なくなる効果があり、木材の多孔質な組織の消失は、応力-歪み曲線に現れる降伏時の塑性挙動に影響していることがわかる。

4 結 論

圧縮木材における繊維方向の縦圧縮特性について調べ、圧密の効果がその応力-歪み曲線における塑性挙動に及ぼす影響について検討し、以下の結論を得た。

(1) 圧縮木材における縦圧縮強度は、熱処理の影響を受け、寸法の回復が起こらない熱処理の温度では、圧密するほど強度が増加した。

(2) 縦圧縮変形における応力-歪み曲線の塑性挙動は、圧密の効果によって、応力が極大に至る前後を境に変化が現れた。

(3) 応力が極大に達した後の塑性領域では、木材を圧密するほど、急激な加工軟化の挙動が現れることがわかった。

(4) 応力が極大に至る前の塑性領域は圧密するほど減少することから、木材の多孔質な組織の消失は、応力-歪み曲線に現れる降伏時の塑性挙動に影響していることがわかった。

参 考 文 献

- 1) I. Asano, "On the compressive fiber stress in the plastic bending of wood beams", Mokuzaigakkaishi, Vol.12, No.4, pp.155-160 (1966).
- 2) H. Yoshihara and M. Ohta, "Stress-Strain Relationship of wood in the plastic region I", Mokuzaigakkaishi, Vol.38, No.8, pp.759-763 (1992).
- 3) H. Yoshihara and M. Ohta, "Stress-Strain Relationship of wood in the plastic region II", Mokuzaigakkaishi, Vol.40, No.3, pp.263-267 (1994).
- 4) Y. Liu, M. Norimoto and T. Moroka, "The larger compressive deformation of wood in the transverse direction I", Mokuzaigakkaishi, Vol.39, No.10, pp.1140-1145 (1993).
- 5) M. Norimoto, "Larger compressive deformation in wood", Mokuzaigakkaishi, Vol.39, No.8, pp.867-874 (1993).
- 6) A. Nadai, "Theory of flow bridge and fracture of solids", p.358 (1950) McGraw-Hill.
- 7) M. Inoue, M. Norimoto, Y. Otsuka and T. Yamada, "Surface compression of coniferous wood lumber I", Mokuzaigakkaishi, Vol.37, No.3, pp.227-233 (1991).
- 8) T. Ohtani, Y. Kubojima and K. Matsushita, "Fracture Morphology and effect of compression volume on tensile strength of compressed wood", Mokuzaigakkaishi, Vol.51, No.3, pp.189-195 (2005).