スギ心持ち正角材の外層部接線方向横引張クリープおよび 内層部放射方向横圧縮クリープ[†]

藤 本 登 留* 立和名 一 城**
大 内 一 浩** 又 木 義 博**

Tension Creep of Surface Layer and Compression Creep of Inner Layer Perpendicular to the Grain in Sugi Boxed-Heart Square Timber

by

Noboru FUJIMOTO*, Kazuki TACHIWANA**, Kazuhiro OOUCHI** and Yoshihiro MATAKI**

Some creep tests were conducted to clarify the effect of temperature on the drying check of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) boxed-heart square timbers during kiln drying. The tensile creep behaviors of tangential direction at the outside layer parts of sugi boxed-heart square timbers and the compression creep behaviors of radial direction at the inner parts of them were investigated.

Creep strain and residual strain were larger at 80°C than at 40°C under constant moisture content.

Under drying condition, these mechano-sorptive creep strains at 80°C and 40°C were almost same. The creep strains increased approximately like a straight line as the moisture content reduced in the area of moisture content less than 30%. Its gradient can be considered that there is no effect of the temperature. But initial elastic deformation at 80°C was larger than at 40°C. As a result, the relative creep in the high temperature showed lower than in the low temperature. After all, it was supposed that the temperature dependence factor for the restraint of surface check of boxed-heart square timber of sugi was elastic characteristic and was not creep characteristic.

The value of creep compliance in compression for the radial direction at the part far from the pith showed relatively low during drying.

Key words : Sugi, Boxed-heart timber, Drying check, Tensile creep, Compression creep, Mechano-sorptive deformation

1 緒 言

心持ち角材の割れにつながる表面応力は、心持ち材が本来持ち合わせている横断面内収縮異方性にも因るが、乾燥による材内含水率傾斜に起因するものと考えられる。すなわち、熱風乾燥等の外部加熱による乾燥では、表層が先行して水分が減って収縮しようとするため乾燥初期に材面には引張応力、内層には圧縮応力が発生する。そして両応力が存在する状態で乾燥がさらに進むと、それぞれ引張セットならびに圧縮セットが発生するため、乾燥後期では材面の引張応力の減少、あるいは圧縮応力への逆転にもつながる。¹⁾ すなわち、これらの応力やドラインゲットの形成に対する乾燥条件の影響を解明することが、乾燥中、さらにはその後の温湿度環境変動下においても割れる心持ち材²⁾の、割れ抑制法の開発につながるものと考えられる。

また、このような乾燥応力やドラインゲットは、乾燥中の材の粘弾性的特性を有効に利用した乾燥条件の適用によりある程度の制御が可能であると判断できることから、乾燥過程におけるクリープやセットに対する温度の影響が調べられている。^{3)~6)} しかし、内外層の材質が

大きく違う心持ち材の部位別を対象とした報告例は見えない。

そこで本研究では、スギ心持ち材の割れ抑制に有効な乾燥方法およびその条件に関する基礎的知見を得ることを目的に、水分定常状態および水分非定常状態(乾燥過程)における心持ち正角材の表層の横引張クリープおよび内層部の横圧縮クリープ挙動について、温度や含水率の各種条件の影響を検討した。

2 実験方法

2・1 供試材

九州大学農学部附属福岡演習林産の30年生スギを玉切り、製材した11cm心持ち柱材(1本)の表層から引張クリープ試験片(水分定常状態、水分非定常状態)を、内層から圧縮クリープ試験片(水分定常状態)を採取した。水分非定常状態の圧縮クリープ試験片については、軸方向に隣接した丸太から木取って実験に供した。引張クリープ試験片の平均全乾比重は0.37であった。圧縮クリープ試験片の平均全乾比重は、水分定常状態の髓を含む試験片では0.31、水分非定常状態の試験片では髓に近い位置のものから順次、0.30、0.31、0.35であった。

† 原稿受理 平成12年7月3日 Received July 3, 2000

* 正 会 員 九州大学大学院農学研究院森林資源科学部門 〒812-8581 福岡市東区箱崎, Forest and Forest Products Sci., Fac. of Agr., Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581

** 元九州大学農学部 〒812-8581 福岡市東区箱崎, Fac. of Agr., Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581

2・1・1 引張クリープ試験

(1) 水分定常状態試験片

生材状態（含水率 100 ～ 120%）と室内放置による気乾状態（含水率 10 ～ 15%）で、5mm（R 方向）× 20mm（L 方向）× 105mm（T 方向）の接線方向引張クリープ試験片を木取り、その上下部の両幅面に補強用鉄板を貼り付け、また幅面の上下部に重錘吊り下げ用と試験材取り付け用の穴を設けて供試した（Fig. 1）。

(2) 水分非定常状態試験片

水分非定常状態の試験においては、所要の初期含水率にした後、木口面からの吸脱湿が容易に行われるようにひずみ測定部の幅（繊維方向寸法）が 6mm の接線方向引張クリープ試験片を供試した（Fig. 2）。初期（試験開始）の含水率を一定にするため、試験片は減圧注入により飽水状態（含水率 200 ～ 220%）にした後、温度 20℃（平衡含水率 17%）の条件で含水率を 160 ～ 180% にそろえて供試した。

2・1・2 圧縮クリープ試験

(1) 水分定常状態試験片

水分定常状態の試験には、髓が中心にある 30 × 40mm の木口面を持ち、繊維方向寸法 30mm の生材（含水率

Fig. 3. Specimen for compression creep test under constant moisture content.

70 ～ 90%）および気乾材（含水率 12% ～ 20%）を供試した（Fig. 3）。

(2) 水分非定常状態試験片

水分非定常状態の試験には、なるべく試験片全体に均一に含水率変動が生じるように、10mm（T 方向）× 10mm（L 方向）× 30mm（R 方向）の比較的小型の R 方向圧縮試験体を供試したが、実用の心持ち柱材や梁材を想定し、髓からの距離による材内部位別の 3 種類を供試した（Fig. 4）。これらの圧縮クリープ試験片についても、試験開始の初期含水率を一定にするため、前述の引張クリープ試験片と同様に、減圧注入により飽水状態（含水率 200 ～ 220%）にした後、温度 20℃（平衡含水率 17%）の条件で含水率を 160 ～ 180% にそろえて供試した。

2・2 水分定常状態のクリープ試験

(1) 引張クリープ試験

前記の生材および気乾材の 2 種類について試験片の表裏接線面の中央の相対する位置にそれぞれ 30mm のひずみゲージを貼付し（Fig. 1），そのリード線や吊り下げ用ワイヤを取り付けた後、試験片の含水率が変化しないようにポリエチレンのラップフィルムで包んだ状態で実験を行った。まず、試験片を取り付けた引張クリープ試験装置を内蔵した恒温槽の温度が設定値に達し、試験片に貼付されたゲージのひずみ基準値（0 点）が安定したのを確認してから、試験片に荷重を負荷した。そして、24 時間後に除荷した後、そのままの状態でも 24 時間にわたって、ひずみを連続的に記録測定した。温度はそれぞれ

Fig. 1. Specimen for tension creep test under constant moisture content.

Fig. 2. Specimen for tension creep test under drying condition.

Fig. 4. Specimens for compression creep test under drying condition.

40℃と80℃の2条件とした。材面応力測定で約0.4MPa以上になると材面割れが見られること⁷⁾またクリープひずみと負荷応力は比例的な関係がある⁸⁾ことなどから負荷応力は0.2MPaの一定レベルで行った。なお、以上の手順で各含水率、温度条件に対して3個の繰り返し実験を行った。

(2) 圧縮クリープ試験

生材状態および気乾材状態の試験片に30mmのひずみゲージを相対する接線面(長辺40mmの面)に貼付し、含水率が試験中に変化しないように、引張クリープ試験の場合と同じようにポリエチレンのラップフィルムで包んだ状態で死荷重を長辺方向(40mmの辺の方向)に負荷し、横圧縮クリープひずみを連続的に記録測定した。設定温度に達してひずみが安定した時点から継続的に一定応力を24時間負荷後に除荷して、さらに24時間ひずみを継続的に測定した。試験片は心持ち材で一定の大きさが必要なことから負荷面積が大きくなり、0.1MPaより大きな負荷応力を恒温恒湿槽内でかけることはできなかった。しかし、前述したように応力レベルが高すぎる(破壊応力40%以上)ことがない場合はクリープひずみと負荷応力は比例的な関係がある⁸⁾ことから、0.1MPa一定レベルの負荷応力のみで横圧縮クリープ試験を実施した。なお温度条件は40℃と80℃の2条件を設定し、各含水率、温度条件毎に3個の繰り返し実験を行った。

2・3 水分非定常状態のクリープ試験

(1) 引張クリープ試験

引張クリープ試験におけるひずみは含水率を調整した試験片の相対する両接線面に貼付した30mm長のひずみゲージで検出したが、負荷用の試験片と無負荷用の試験片を所要の温湿度条件を設定した恒温恒湿槽内に並列し、それぞれのクリープひずみを同時にハイブリッドレコーダで読み取り、パーソナルコンピュータで記憶して解析した。水分非定常状態のクリープは、無負荷状態の自由ひずみとの差で示し、これを負荷応力で除したクリープコンプライアンスによりクリープ挙動を定量的に比較検討した。負荷および無負荷の両試験片は、上述のように恒温恒湿槽内に近接して配置すると共に、同じ形状寸法の含水率測定用試験片も同一槽内に3本ずつ吊るして、槽外の電子天秤でその3本一括した重量を連続的に測定した。温度は、40℃と80℃の2条件、および湿度はいずれも平衡含水率10%に相当する60%RH(40℃)、74%RH(80℃)の2条件を設定した。

クリープ試験では、試験片を所要の温湿度が設定された恒温恒湿槽内に設置して、含水率が70～90%に達したときに負荷を開始した。そして12時間の負荷中、ひきつづき12時間の除荷中のひずみを連続して測定した。なお、負荷応力は全ての試験で一定とし、表層の割れを想定したクリープ破壊が起こる高い負荷応力を含めて0.3、0.6、0.9、1.2MPaの4レベルで行った。それぞれの応力レベルは、生材・気乾材の横引張比例限度応力(実測値10個体の予備試験平均値)1.5MPa、2.0MPaに対して、それぞれ20、40、59、79%および15、29、44、

59%であった。

なお、各温度、負荷応力条件に対して3個の繰り返しを行った。

(2) 圧縮クリープ試験

横圧縮(放射方向)クリープ試験においては、各試験片の相対する両半径面の放射方向に20mmのひずみゲージを貼付した。そして、横引張クリープ試験と同様の温湿度条件の装置内に、無負荷試験材とクリープ試験材を隣接して設置すると共に、それらと同じ形状寸法の含水率測定用試験材を装置上部の槽外に置いた電子天秤から槽内に吊して含水率変化を連続的に測定した。設定温湿度の状態で含水率が70～90%に達したときに負荷を開始し、12時間後に除荷、さらに12時間にわたってひずみを継続的に測定した。なお、乾燥過程のクリープにおける負荷応力の影響は、クリープコンプライアンスで比較する場合クリープの初期において一時的にでるものの、その後、差はなくなることが報告されている⁹⁾そこで、今回は横圧縮比例限度応力の約半分である0.6MPaの一定レベルで行った。ここで、今回用いた試片の生材・気乾材の横圧縮比例限度応力(実測値10個体の平均値)は1.2MPa、1.3MPaであり、0.6MPaの負荷応力はそれぞれの比例限度応力の51%、46%であった。

なお、各温度、木取り位置に対して3個の繰り返しを行った。

3 実験結果および考察

3・1 水分定常状態クリープ

横引張クリープ試験におけるクリープコンプライアンスの経時変化の典型的な例をFig. 5に示す。生材および気乾材ともにクリープの増加傾向が温度条件により大きく異なることが明らかになった。すなわち、40℃においては初期に急な増加が若干見られたものの、ほとんど緩やかな増加を示した。一方、80℃では初期の急激なひずみ変化とともに、その後の負荷期間を通して一定のひずみ増加が見られた。これらの結果は、この場合と同じような温度範囲において温度が高いほどクリープひずみが

Fig. 5. Creep curves for tensile test under constant moisture content.

Note: Loading stress: 0.2MPa

増加することが認められた北原¹⁰⁾の結果と一致している。また、除荷後の残留ひずみも40℃ではほとんど見られないが、80℃では大きなひずみが見られる。含水率の影響についても、温度ほどの影響は無いものの、80℃では生材が気乾材より大きなひずみを生じ、40℃においても初期の弾性変形ひずみを除けば、生材が気乾材に比べ大きなクリープひずみを示した。

樹心部の横圧縮クリープ試験の結果も、横引張クリープと同じように初期の弾性変形を除けば含水率に比べ温度の影響が大きく、40℃より80℃で非常に大きいクリープひずみおよび残留ひずみが生じた (Fig. 6)。含水率の影響についても、やはり80℃、40℃共に、初期弾性変形を除けば生材が気乾材に比べ大きい傾向を示した。

3・2 水分非定常状態クリープ

水分非定常状態の圧縮クリープ試験および引張クリープ試験では、平衡含水率を同じにしても、温度により乾燥速度が異なる。しかし、乾燥速度の違いによる負荷時間の長短が乾燥過程のクリープにほとんど影響を及ぼさないことが既に久田の報告¹¹⁾によって確認されているので、ここでは含水率変動に伴うクリープ挙動の推移について主に検討した。

初期弾性変形を含めた横引張クリープ挙動を Fig. 7 に示す。クリープ量は含水率が40%以下になって急増し始め、さらに繊維飽和点以下では含水率減少に伴って直線的に増大した。このように水分非定常下でのクリープ量が繊維飽和点以下で大きくなるのは、細胞壁の非結晶領域の水素結合は吸脱湿過程で移動する水分子によって切断され再結合が起こるが、この際に応力が働くと応力の方向にOH-基の相互変位が起こり易い⁸⁾ためであると考察される。ここで、平均含水率が未だ繊維飽和点以上の時から既に大きなクリープが見られるのは、試験片に含水率分布が生じ、表層では既に繊維飽和点以下になっているためと考えられる。また、いずれの応力レベルでも乾燥温度により全クリープコンプライアンスは著しく異なる経過をたどる。これは、Table I に示されている

Fig. 6. Creep curves for compression test under constant moisture content.

Note: Loading stress: 0.1MPa

Fig. 7. Creep as a function of moisture content for tensile test under drying condition.

Legend: Loading stress: $\times 10^{-1}$ MPa
 ●: 3 ○: 6 ▲: 9 △: 12

ように初期弾性変形に因るところが大きく、その後のクリープは温度による違いは比較的小さいことがわかる (Table I)。この結果は、吸湿過程では温度が高いほどクリープが大きいが、脱湿過程では温度の影響がないとする徳本の報告¹²⁾とも一致する。しかし、久田は乾燥過程のクリープにおける温度の影響を指摘⁵⁾しており、両者の研究結果に食い違いが見られ、今後とも一層の追究を要する。

さらに、この実験では高温条件においては初期弾性ひずみが大きく、破壊する負荷応力すなわちクリープ限度が小さいことが確認され、ヤング係数やクリープ限度等の強度的性能に温度依存性がみられた。ヤング係数と温度との関係は一般に直線的ではないが、狭い温度範囲では両者は近似的に直線関係として取り扱われることが多く、渡辺⁸⁾や福山ら¹³⁾の報告では両者の関係を次式で表している。

$$E_2 = E_1 \{1 - \alpha (\theta_2 - \theta_1)\}$$

ここで、 E_1 、 E_2 はそれぞれ温度 θ_1 、 θ_2 におけるヤング係数、 α は温度係数である。それらの報告では、接線方向の横引張における α の値として、生材では0.010～0.014が得られている。本研究の温度別に行った横引張クリープ試験における初期弾性ひずみの結果を用いてこの温度係数 α を求めてみると、約0.013となり、類似した結果を得た。このヤング係数の逆数である初期弾性コンプライアンスに対する全クリープコンプライアンスの比、すなわち相対クリープで比べると、最後まで破壊せずに測定できた負荷応力0.3、0.6MPaでは、40℃の方が80℃の場合より大きいことがわかる (Table I)。この結果は、乾燥過程のクリープは高温ほど大きいが、それよりさらに初期弾性コンプライアンスが大きくなるため、相対クリープは高温ほど小さくなるとする久田⁵⁾の結果と一致した。

応力レベルの影響を見ると、それぞれの乾燥温度において、各応力レベルでのクリープコンプライアンスはほぼ同じ程度の値を示したことから、横引張クリープひず

Table I. Test results of tensile creep test during drying.

		Loading stress(MPa)			
		0.3	0.6	0.9	1.2
Instantaneous elastic compliance (GPa^{-1})	40 °C	3.19	3.24	2.87	3.43
	80 °C	4.56	5.14	5.80	—
Creep compliance at 11%mc (GPa^{-1})	40 °C	4.35	4.48	4.94	—
	80 °C	5.00	4.63	—	—
dJ / du of 25-15%mc ($\text{GPa}^{-1} / \% \text{mc}$)	40 °C	0.145	0.118	0.151	—
	80 °C	0.148	0.103	—	—
Permanent set compliance (GPa^{-1})	40 °C	4.08	4.71	4.84	—
	80 °C	7.27	7.32	—	—
Relative creep at 11%mc	40 °C	2.36	2.38	2.44	—
	80 °C	2.10	1.90	—	—
Free shrinkage at 11%mc (%)	40 °C	0.855			—
	80 °C	0.578			—

Notes: Creep compliances do not include initial elastic compliances.
dJ / du is creep compliance change per 1%mc.

みは比例限内の負荷応力に対して比例的であるといえる。これは、小澤¹⁴⁾が報告した含水率変化過程における無欠点スギ材の曲げクリープ挙動の結果と類似するものである。ただし、クリープの初期において一時的に低レベルの負荷応力で低いクリープを示しており、これは久田¹⁵⁾のヒノキによるクリープ試験と類似した結果である。

乾燥過程の含水率 25% ~ 15% の範囲で含水率低減に対してほぼ直線的にクリープ変形が増大し、その勾配には温度による差異は見られなかった (Table I)。

また、除荷後のクリープコンプライアンスの非回復成分 Jr (ドラインゲット) は、高温条件で大きいことが明らかとなった (Table I)。全コンプライアンスから初期弾性コンプライアンスを除いたクリープコンプライアンスは温度による差異が前述のように比較的小さく、それぞれこのクリープ変形量以上が除荷後も非回復成分として残っている (Table I)。

負荷がかかっていない自由収縮率は 1% 以内であったが、最後まで破壊しないものの中で、これを相殺する程のクリープは見られなかった (Table I)。

乾燥過程における横圧縮クリープ挙動を Fig. 8 に示す。各乾燥温度において髄から離れた部位からの材ほどクリープコンプライアンスは低い値をたどる。このように、横断面内の位置により弾性ばかりではなく粘性も含めたレオロジー的性質が異なることが認められた。

いずれの部位からの材も高温条件で全クリープコンプライアンスは大きな値をたどる。しかし、初期弾性コンプライアンスを除いたクリープコンプライアンスは温度の違いによる大きな差異は見られなかった (Table II)。初期弾性コンプライアンスに対する全クリープコンプライアンスの比、すなわち相対クリープで比べると高温条件ほど小さく、横引張クリープの場合と同じ傾向であった (Table II)。

含水率 25% ~ 14% の乾燥過程で含水率低減に対してほぼ直線的にクリープ変形が増大した。その勾配は引張ク

Fig. 8. Creep as a function of moisture content for compression test under drying condition.

Note: Loading stress: 0.6MPa

Legend:

	Distance from pith (Radial direction : mm)		
40°C	● : 5~35	◆ : 40~70	▲ : 75~105
80°C	○ : 5~35	◇ : 40~70	△ : 75~105

Table II. Test results of compression creep test during drying.

		Distance from pith (mm)		
		5-35	40-70	75-105
Instantaneous elastic compliance (GPa^{-1})	40 °C	2.42	2.06	1.88
	80 °C	3.89	3.21	3.18
Creep compliance at 11%mc (GPa^{-1})	40 °C	5.45	3.57	2.98
	80 °C	4.65	3.60	3.19
dJ / du of 25-14%mc ($\text{GPa}^{-1} / \% \text{mc}$)	40 °C	0.191	0.097	0.112
	80 °C	0.147	0.096	0.095
Permanent set compliance (GPa^{-1})	40 °C	5.23	3.51	3.25
	80 °C	6.63	4.84	4.46
Relative creep at 11%mc	40 °C	3.25	2.73	2.59
	80 °C	2.20	2.12	2.00
Free shrinkage at 11%mc (%)	40 °C	0.528	0.430	0.723
	80 °C	0.403	0.620	0.955

Notes: Creep compliances do not include initial elastic compliances.
dJ / du is creep compliance change per 1%mc.

リープの場合と同様に温度による差異は見られなかった。また、各乾燥温度において髄に近い部位からの材ほどその勾配は大きいことが認められた。

除荷後の非回復成分は、高温条件で大きいことが明らかであるが、横引張クリープと同様、その原因が弾性コンプライアンスの温度特性に起因しているものと考えられる (Table II)。

4 結 言

スギ心持ち柱材の材面割れの原因となる材面応力の大きさに関与すると考えられる材外層部の接線方向横引張クリープと材内層部の放射方向横圧縮クリープの特性について検討した。

まず、含水率が一定状態、すなわち水分定常状態においてはいずれのクリープひずみも高温ほど大きく、除荷後の残留ひずみも高温ほど大きかった。

一方、乾燥過程すなわち水分非定常状態における横引張ならびに横圧縮の両クリープ挙動は次のような類似した特性を示した。

(1) 初期弾性ひずみは、いずれも高温ほど大きく、弾性的性質に温度依存性が見られた。

(2) 初期弾性コンプライアンスを除いたクリープコンプライアンスの温度依存性はほとんど見られない。つまり、含水率低下に伴うクリープの増加（メカノソープティブ変形）は温度の影響を受けない。これは、久田が報告⁵⁾した乾燥過程におけるヒノキ等の引張クリープ試験結果と類似している。その結果、相対クリープで比べると、高温条件の方が小さな値を示した。

(3) 乾燥過程の含水率 30% 以下の領域では含水率低減に伴いほぼ直線的にクリープ変形が増大した。その勾配は温度によりほとんど影響を受けないことが明らかになった。

(4) 除荷後のクリープコンプライアンスの非回復成分は高温条件で大きいことが明らかとなったが、その要因としては、温度によるクリープ変形の差ではなく弾性的性質の影響であることが推察された。

さらに、乾燥過程の放射方向横圧縮クリープでは、いずれの乾燥温度においても、髄から離れた部位からの材ほどクリープコンプライアンスは低い値をたどることが分かった。

参 考 文 献

- 1) 寺沢 真, 筒本卓造, “木材の人工乾燥”, p.39 (1988) 日本木材加工技術協会.
- 2) 藤本登留, 有田秀三, 又木義博, 材料, **46**, 390 (1997).
- 3) Tom J. Moren, S. Margot and B. Sehlstedt-Persson, Forest Prod. J., **43**, 58 (1993).
- 4) 藤田晋輔, 木材学会誌, **21**, 357 (1975).
- 5) 久田卓興, 木材学会誌, **27**, 381 (1981).
- 6) 久田卓興, 木材学会誌, **27**, 390 (1981).
- 7) 藤本登留, 藤本知也, 河辺純一, 又木義博, 木材学会誌, **40**, 758 (1994).
- 8) 渡辺治人, “木材理学総論”, p.498, p.514, p.589 (1978) 農林出版.
- 9) 徳本守彦, 木材学会誌, **35**, 392 (1989).
- 10) 北原覚一, 岡部 登, 木材学会誌, **5**, 12 (1959).
- 11) 久田卓興, 木材学会誌, **25**, 688 (1979).
- 12) 徳本守彦, 木材学会誌, **40**, 1157 (1994).
- 13) 福山万次郎, 竹村富夫, 木材学会誌, **8**, 185 (1962).
- 14) 小澤雅之, 伏谷賢美, 佐藤敬一, 久保隆文, 木材学会誌, **41**, 281 (1995).
- 15) 久田卓興, 木材学会誌, **25**, 697 (1979).