綿繊維塊の圧縮クリープ挙動について

静岡大学工学部 野 飼

享 (会員)

" 鳴 海

裕 (会員)

静岡大学大学院 田 中

健*

A Study on the Compressive Creep Behaviour of Cotton Fiber Assemblies.

Tooru Nogai, Yutaka Narumi and Ken Tanaka,

Faculty of Engineering,

Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka Pref.

Abstract

As one step for establishment of a knowledge on the compressive rheological property of fiber assemblies, in this study, we investigated the compressive creep behaviour of cotton fiber assemblies, and the following conclusions were obtained:

(1) The compressive creep strain of cotton fiber assemblies increases with the increase of compressive load, and has the maximum value at the temperature 30~40°C.

(2) The compressive creep property of the cotton fiber assemblies agrees with the creep expression obtained from the Eyring's non-linear three elements model.

(Received December 7, 1974)

摘 要

目 的 塊状繊維集合体の圧縮粘弾性特性の解明の基礎的データを得るため、綿繊維塊を用いてその圧縮クリープ挙動を実験的に探求する。

成 果 (1) 綿繊維塊を種々の荷重で圧縮クリープさせるとき、任意経過時間での圧縮クリープひずみ(任意時刻における体積率から時刻 0 sec における体積率をひいた値)は、圧縮荷重の増加とともに増加する。

(2) 綿繊維塊の温度を変化させて圧縮クリープさせるとき、圧縮クリープひずみは温度が 30~40°C で極大となる。

(3) 綿繊維塊の圧縮クリープ曲線は、Eyring の非線形 3 要素モデルによるクリープの時間経過式と一致する。

(昭和49年12月7日受理)

1. ま え が き

繊維および繊維集合体の力学的挙動は、別報^{1),2)}に示されているように、繊維工学の分野においてきわめて重要な問題である。そのため繊維の力学的性質に関しては古くから多数の研究者たちによって探求され^{3),7)}、その結果繊維の力学的性質は非常に複雑な粘弾性挙動を示すことが明らかにされた。しかしこのような複雑な力学的挙動を示す繊維で構成されている繊維集合体に関しては、その構造上の複雑さに加えて取扱以上の困難さのために、かなり限定された材料や試験方法(たとえば糸、織

物⁸⁾、カーペット⁹⁾などのように形態が比較的安定している材料の引張、圧縮、ねじりなど)に研究が集中し、塊状繊維集合体の圧縮応力緩和や圧縮クリープに関する研究は 2, 3 の研究者^{2),4),5)} たちにとりあげられたにすぎず、十分な特性の解明はなされていない。

本研究では上述の観点より、従来あまり具体的にとりあげられていなかった綿繊維塊の圧縮クリープ特性を、荷重や温度を変化させた各種条件のもとで測定し、綿繊維塊の圧縮弾性特性を解明する基礎的データを得ることを目的とする。

2. 実 験

*現在、パブコック日立(株)勤務

2.1 実験試料およびその調整法

本研究で使用した繊維材料は前報^{1),2)}と同じ綿のカードあがりスライバ(平均繊維長 30mm, 繊維直径 2.2 d, 密度 1.54 g/cm³)である。これを従来と同様の方法¹⁾で開織し、プラスチック円筒(内径 80 mm)に一定量(本報では 5 g)をできるだけ一樣になるように詰める。つぎにその上に直径 78 mm, 重さ 7 g の金属円板と 500 g の重錘を載せ、常温で 30 min 放置する。そしてその後、重錘と円筒を抜き取ることによってできる円柱状繊維塊が本研究における実験試料となる。

本研究ではさらに、各実験試料の開織のばらつきを低減させ、それと同時に試料の温度を実験温度に近づけるために、つぎに述べる処理を行なう。

初めに前述の方法で調整された円柱状繊維塊を実験温度に保たれている恒温槽内の圧縮円板上に載せ(図 1 参照)、試験荷重で 5 min 圧縮し、つぎに荷重を除いて 5 min 回復させる。この圧縮-回復操作を 3 回繰返す。この処理が終了した後、次節に述べる方法にしたがって本測定を行なう。

2.2 実験装置

A₁: 荷重計測アンプ D₁, D₂: 圧縮円板
 R₁: 荷重記録計 V₁, V₂: 変圧器
 A₂: 変位計測アンプ G: クロス ヘッド駆動装置
 R₂: 変位記録計 B: 恒温槽
 H: クロス ヘッド S: 円柱状試料
 C: 自動負荷制御装置 L: ロードセル
 T: 差動トランス

図 1 実験装置の模式図

実験装置はオートグラフの機構を利用し、その概略が図 1 に示されている。ここで L は荷重検出用ロードセル, A₁ は荷重計測アンプ, R₁ は荷重記録計, T は差動トランス, A₂ は変位計測アンプ, R₂ は変位記録計, C は自動負荷制御装置, H はクロス ヘッド, G はクロス ヘッド駆動装置, D₁ および D₂ は圧縮円板, B は恒温槽, V₁ および V₂ はヒータ調節用変圧器である。試料は圧縮円板 D₁ と D₂ の間 (S) に置かれる。

2.3 実験方法

綿繊維塊の圧縮クリープ測定はつぎの手順にしたがっ

て行なわれる。

初めにクロス ヘッド H に取り付けられた圧縮円板 D₂ を 10 mm/min の速度で降下させ、圧縮円板 D₁ 上の試料 S を試験荷重まで圧縮し、同時にその試験荷重を一定に保つように、自動負荷制御装置 C を作動させてクロス ヘッドの昇降を制御する。このクロス ヘッドの移動を差動トランス T で検出し、変位記録計 R₂ に連続的に記録させる。また荷重はロードセル L で検出され、荷重記録計 R₁ に記録される。

2.4 繊維塊における圧縮クリープの定義

クリープ実験の場合、一般の固体物質の引張クリープにおけるように、試料を瞬間的に負荷することが理想的である。しかし繊維塊の圧縮クリープのような場合には、各種の制約により瞬間的に負荷することが困難であるため、2.3 で述べた過程にしたがって圧縮クリープの測定を行なった。この場合、繊維塊のクリープ状態はかなりあいまいなものとなるが、本研究では圧縮クリープをつぎのように定義した。すなわち試料に加えられた荷重が試験荷重の 98 % に達した時刻を 0 sec とし、この瞬間に繊維塊はクリープ状態はいり、これ以後の変形をクリープ変形と規定する。

また繊維塊のひずみについても、一般の固体物質のように厳密な規定ができないため、本研究では一般に使用されるひずみ量のかわりに体積率(繊維塊の見掛けの体積に対する繊維の実体積の割合)を用いる。したがって前述の定義より、繊維塊の圧縮クリープひずみは次式で定義される:

$$\epsilon_t = \delta_t - \delta_0 \quad (1)$$

ここで ϵ_t は時刻 t sec における圧縮クリープひずみ, δ_t および δ_0 はそれぞれ時刻 t sec および 0 sec における繊維塊の体積率(本報では δ_0 を瞬時体積率と呼称する)である。なお本報で用いた実験試料の体積率は、綿の密度 1.54 g/cm³, 試料の重量が 5 g であるから、変位記録計から読みとられる試料の時刻 t sec における高さ h_t (cm) を次式に代入することによって得られる:

$$\delta_t = 6.46 \times 10^{-2} \times h_t^{-1} \quad (2)$$

したがって式(2)を式(1)に代入することによって、圧縮クリープひずみと高さの関係式が得られる:

$$\epsilon_t = 6.46 \times 10^{-2} \left(\frac{1}{h_t} - \frac{1}{h_0} \right) \quad (1')$$

ここで h_0 は時刻 0 sec における試料高さ (cm) である。

しかし繊維集合体の圧縮クリープをより詳しく検討するためには、任意時刻における圧縮クリープひずみの絶対量のみでなく、その時刻の圧縮クリープひずみと圧縮ひずみの比率を知る必要がある。そこで本報では、次式で定義される圧縮クリープひずみ率 R_t (%) を考える:

$$R_t = \frac{\epsilon_t}{\delta_0} \times 100 = \left(\frac{\delta_t}{\delta_0} - 1 \right) \times 100 \quad (3)$$

式(3)に式(2)を代入することによって次式が得られる:

$$R_t = \left(\frac{h_0}{h_t} - 1 \right) \times 100 \dots \dots \dots (3)'$$

3. 結果および考察

3.1 実験結果

図2 測定結果例 (温度: 20°C)

2で述べた実験方法にしたがって、綿繊維塊の圧縮クリープを各条件のもとで測定し、その結果の例を図2に示す。この図は温度 20°C の各圧縮荷重における測定結果を示している。ここでデータの読取は、記録計の精度 (ペン速度 25 cm/sec, 記録紙速度 8 mm/sec) を考慮すれば 0.2 sec より可能であるが、0 sec のマークははいるため、1 sec より始めた。

図2に示される綿繊維塊の圧縮クリープ曲線より、綿繊維塊の一定負荷による体積率の時間変動は圧縮荷重の増加とともに大きくなる傾向を示す。また本研究における他の温度条件で測定された圧縮クリープ曲線も、図2に示される 20°C の場合と同様な特性を示している。

2.4 の定義にしたがって測定された瞬時体積率 δ_0 の

図3 瞬時体積率と圧縮荷重との関係 (温度 20°C)

例 (20°C) を図3に示す。この図より明らかなように、瞬時体積率は圧縮荷重の増加にしたがって C.M. Van Wyk¹⁰⁾, 若山¹¹⁾, あるいは前報¹⁾で得られているようなべき関数的に大きくなる。またこのことは、ほかの温度条件の場合にも同じように現われる。

図4 圧縮クリープひずみの各圧縮荷重における時間変動 (温度: 20°C)

図5 圧縮クリープひずみと圧縮荷重との関係

図6 圧縮クリープひずみと温度との関係

綿繊維塊の圧縮クリープの測定結果(体積率 δ_t)から瞬時体積率 δ_0 を差し引くことによって得られた綿繊維塊の圧縮クリープひずみ ϵ_t の計算例が図4～図6に示されている。ここで図4は20°Cにおける圧縮クリープひずみ ϵ_t の各圧縮荷重における時間変動を示し、図5は各時刻における圧縮クリープひずみと圧縮荷重との関係、図6は各時刻における圧縮クリープひずみと温度との関係を示している。

図5より明らかなように、綿繊維塊の圧縮クリープひずみは圧縮荷重の増加、すなわち瞬時体積率が高くなるほど大きくなっている。また図6に示されるように、いずれの時刻、荷重においても圧縮クリープひずみは温度の上昇とともに増加し、30～40°Cを越えると逆に減少している。この特性に関する物性的考察は本報の結果のみで進められないが、前報²⁾で示した圧縮応力緩和の温度依存性と比較すると、応力緩和が30～40°Cで最大になることから、繊維塊の圧縮における時間遅れ変形がこの温度近辺で起りやすいことが予想される。

前述の実験結果を式(3)に代入して得られた圧縮ク

図7 圧縮クリープひずみ率と荷重との関係

図8 圧縮クリープひずみ率と温度の関係

ープひずみ率 R_c の値を、図7および図8に示す。ここで図7は圧縮クリープひずみ率 R_c と圧縮荷重との関係、図8は圧縮クリープひずみ率と温度との関係を示している。

図7より明らかなように、圧縮クリープひずみ率 R_c は短時間側において、圧縮荷重の増加とともに直線的に大きくなる。これに対し長時間側においては、荷重10 kg以上の場合に短時間側と同じ傾向を有するが、10 kg以下では反対の傾向、すなわち荷重の減少とともに圧縮クリープひずみ率が大きくなる。また図8より、長時間側における圧縮クリープひずみ率の温度依存性は圧縮クリープひずみの場合と定性的に一致し、30～40°C前後に極大を持つ。しかし短時間側においては圧縮クリープひずみと異なり、圧縮クリープひずみ率は温度の上昇とともに低下している。

また荷重の相異による圧縮クリープひずみ率の温度変化のちがいは、圧縮クリープひずみの場合と比べて小さい。式(3)からもわかるように、圧縮クリープひずみ率は瞬時体積率に反比例し、圧縮クリープひずみに正比例するから、上述のことは両者の温度依存性が荷重の変化によって相殺されると考えられる。

3.2 考 察

繊維集合体の圧縮特性の解析は、その構造上の複雑さに加えて、変形機構を実験的に観察する手段がないため、非常に困難である。そのため従来、繊維集合体の構造をモデル化^{10)~13)}し、そのモデル要素が弾性変形すると仮定した方法で解析が進められた。しかしいずれの解析においても、力と変形の静的な関係を解明しているものであり、本報や前報²⁾に示している動的な関係、すなわち力あるいは変形の時間的変動にまでは解析を進めていない。そこで本報では、従来より圧縮特性の解析に使用されているC.M.Van Wykの弾性ばりモデルを用いて、綿繊維塊の圧縮クリープ特性を検討する。

本研究における実験試料の圧縮特性は瞬時体積率 δ_0 を荷重に対してプロットした曲線(たとえば図3)と等価である。したがって図3からも明らかなように、瞬時体積率は荷重の1/3乗にほぼ比例するから、本研究の綿繊維塊の圧縮特性は弾性ばりモデルによる理論式を満足すると考えられる。それゆえ本研究の実験試料の構造モデルとして、C.M.Van Wykモデル(以後モデル要素と呼ぶ)を採用しても差支えないと考えられる。

モデル要素に ΔF の大きさの力が働いたとき、モデル要素の弾性変形量を Δy_E とし、また ΔF が加えられた後 t secだけ時間が経過したときのモデル要素のクリープ変形量を Δy_{ct} とすると、モデル要素の全変形 Δy_t^* は
$$\Delta y_t^* = \Delta y_E + \Delta y_{ct} \quad (4)$$
で与えられる。 ΔF が一定であるとすれば、 Δy_E は一定で、 Δy_{ct} は時刻によって決まり、これらは互いに独立

である。それゆえこれら要素の変形の総和であると考えられる繊維塊の全変形 y_t^* は、弾性変形成分 Δy_E とクリープ変形成分 Δy_{ct} のそれぞれの総和 y_E および y_{ct} の和であると考えられる：

$$y_t^* = y_E + y_{ct} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで上式の右辺第1項は時刻に無関係であるから、繊維塊の圧縮クリープ変形は構成繊維のクリープ変形のみ依存する。

一般に各種単繊維のクリープ変形挙動は各種の力学モデルや表示式で表わされているが、綿繊維についての測定例はほとんど見出されない。そこでわれわれが以前に測定した綿繊維のクリープ¹⁴⁾を参考にすると、綿繊維のクリープは他のいくつかの繊維と同様に、いずれの試験荷重あるいは温度においても、 $10 \sim 10^4$ sec の時間領域ではば時間の対数に比例すると考えられる。したがってこのようなクリープ挙動は Eyring 粘性を示すダッシュポットを含む非線形3要素モデルで表わされると考えられる。それゆえ任意時刻 t における単繊維の変形を γ_t とすれば、単繊維のクリープ挙動は

$$\gamma_t = \gamma_0 + Y \ln(ut+1) \quad \dots\dots\dots (6)$$

で表わされる。ここで γ_0 は初期変形、 t は時刻 (sec)、 Y および u は応力などによって決まる定数である。また上式の各項は式(4)の各項に対応する。

したがって繊維の圧縮クリープ変形は式(6)にしたがう弾性ばりモデル要素のクリープ変形の総和であると考えられる。このモデル要素のクリープ変形によって、綿繊維は一定荷重を保持するように圧縮される。そして式(2)より、繊維塊の高さは一意的に体積率と対応するから、式(6)における γ_t は体積率 δ_t に対応すると考えられる。それゆえ式(6)より、綿繊維塊の圧縮クリープは次式で表わされると考えられる：

$$\delta_t = \delta_0 + Y_0 \ln(vt+1) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで Y_0 および v は定数である。上式を式(1)に代入すると、綿繊維塊の圧縮クリープひずみ ϵ_t は

$$\epsilon_t = Y_0 \ln(vt+1) \quad \dots\dots\dots (8)$$

で表わされる。

3.1 の測定結果から式(8)の係数 Y_0 および v を求め、式(8)に代入して計算した曲線を実験値とともに図9に示す。ここで図中の実線は式(8)による計算曲線、点線は実験曲線である。ただし Y_0 および v の値は、 $t=10^3$ および 10^4 における ϵ_t を式(8)に代入し、得られた2つの方程式を連立させて解くことによって求められた。

図9より明らかなように、短時間側において若干の相違は見られるが、いずれの荷重あるいは温度においても計算曲線と実験曲線はほぼ一致していると考えられる。

したがって前述のように、本研究で用いた綿繊維塊の圧縮クリープ変形は、それを構成する単繊維のクリープ変

図9 圧縮クリープひずみの実測値とモデルによる計算値との比較

形にはば依存し、その挙動は非線形3要素モデルで表わされると推定される。

図9における実験値と計算値の相違について考察すると、この原因として測定装置の精度の問題、圧縮クリープひずみの定義、および構成繊維のクリープ以外の変形機構の存在などが考えられる。

ここで測定装置の精度について考えてみる。図9よりいずれの圧縮荷重においても実験値と計算値の差は同程度であるから、誤差が生ずるとすれば、荷重検出部ではなく変位検出部であると思われる。本研究で使用した差動トランスの感度は10 (mv/mm) であるが、精度はフルスケールの1%であるから、正確に読みとれる変位の最小目盛は0.01 (mm) である。しかし実験データによると、10 (sec) 以上では試料の厚さの変化はほぼ0.1 (mm) 以上 (ただし測定条件により多少の変動はある) であるから、10 (sec) 以上のデータは十分信頼できる。したがって図9における実験曲線と計算曲線の相違は測定装置の精度によるものではないと考えられる。

つぎに綿繊維塊の圧縮クリープひずみの定義について検討する。この定義は2.4に述べられたように、一般的な瞬間負荷ではなく、必要荷重に到達するまでにある程度の時間が経過している。したがって式(6)のようなモデル解とは条件的に異っている。またクリープ域における圧縮の進行が試料を通したフィードバック制御であるため、測定されているクロスヘッドの移動にその制御特性の影響があると考えられる。それゆえ本研究における圧縮クリープひずみの定義および測定方法が、図9の相違を生ずる一つの原因ではないかと考えられる。

綿繊維塊の圧縮クリープが、構成繊維のクリープ変形以外の変形機構にも依存するかどうかについては、本報のデータのみで断定することはできない。ただし図7お

よび図8に示される圧縮クリープひずみ率の荷重依存性および温度依存性によれば、圧縮クリープひずみ率は低荷重域(圧縮荷重1 kg以下)と高荷重域(10 kg以上)で、その挙動が異なっていると考えられる。とくに1 000 sec以上においてその相違が著しい。したがって、もし構成繊維のクリープ変形以外の因子があるとすれば、量的にはそれほど大きくはないが、低荷重域ではかなりの大きさを占めるような機構である。この機構について断言することはできないが、低荷重で生ずることから、繊維と繊維の接触点のすべり、すなわち繊維集合体の繊維の空間的配置の時間遅れ変化ではないかと予想される。しかしこの機構は図9における挙動は説明できない。

以上のことから、図9の実験値と計算値の相違は、本研究における圧縮クリープひずみの定義によるものであり、変形機構に関する結論は得られない。

しかし綿繊維塊の圧縮クリープ挙動は、上述のように非線形3要素モデルによる計算値と若干の相違はあるが、全体的な傾向として非線形3要素モデルによるクリープ表示式で表わし得ると考えられる。

4. ま と め

綿繊維塊の圧縮クリープを各種条件のもとで測定した結果、つぎの事項が明らかになった。

(1) 綿繊維塊を種々の荷重で圧縮クリープさせるとき、任意経過時間での圧縮クリープひずみは、圧縮荷重の増加とともに増加する。

(2) 綿繊維塊の温度を変化させて圧縮クリープさせ

るとき、圧縮クリープひずみは温度が30℃～40℃で極大値をとる。

(3) 綿繊維塊の圧縮クリープ曲線は Eyring 粘性ダッシュポットを含む3要素モデルによるクリープの時間経過式に一致する。

なお本研究の一部は日本繊維機械学会第27回年次大会(昭和49年6月11日)で発表した。

参考文献

- 1) 野飼, 鳴海; 繊維誌, **25**, T180 (1972)
- 2) 野飼, 鳴海, 田中; 繊維誌, **27**, T177 (1974)
- 3) 1)および2)の参考文献
- 4) 松尾; 繊維誌, **18**, 474, 544, 551 (1962)
- 5) P.C.de Macarty, J.H.Dusenbury; Text.Res.J., **25**, 875 (1955)
- 6) たとえば繊維学会編; 繊維物理学, 399, 404 (丸善)
- 7) たとえば日本繊維機械学会編; 基礎繊維工学〔I〕, 53
- 8) 堀野, 三浦, 仲井; 繊維学会第27回年次大会講演論文集, 93 (1974)
- 9) H.Bogatyほか3名; Text.Res.J., **23**, 108 (1953)
- 10) C.M.Van Wyk; J.Text.Inst., **37**, T285 (1946)
- 11) 若山, 服部; 繊維誌, **11**, 167 (1958)
- 12) 樋口, 清水; 繊維誌, **13**, 850 (1960)
- 13) 松島, 松尾; 繊維誌, **16**, 105 (1960)
- 14) 野飼, 鳴海; 未発表