テリレンの匍匐および回復特性について*

(昭和33年9月10日受理) 会 員 山 口 章 三 郎**

→ 摘 要 ←

研 究 目 的

本研究はビスコースレーヨン、ビニロン、ベンベルグ、羊毛、綿、アセテート、ナイロンなどの繊維に引続きテリレンの単繊維について、各種の引張応力、温度および湿度のもとにおける匍匐および除荷重による回復特性を実験的に究明しようとするものである。

研 究 結 果

テリレンにおいても従来の前記繊維における匍匐並びに回復関係式がほぼ妥当する。すなわち匍匐による伸びは、引張応力に比例し弾性係数に逆比例する「荷重瞬間の伸び」、Voigt's Model にほぼ相似的に生じ荷重伸び線図の降伏部伸びに相当する「緩和伸び」、および荷重時間の対数に比例的に生ずる「匍匐伸び」の三つの伸びからなる。

除重による回復縮みは、匍匐の場合とおおの相似的な「除重瞬間回復縮み」、「緩和回復縮み」および「匍匐回復縮み」からなる。

テリレンの特色は匍匐定数が綿とほぼ同じ程度でいちじるしく小さく、除重による回復の度合いが他の繊維に比べてもっとも高い。

温度には相当影響されるが、湿度の影響はいちじるしく少ない。

1. 緒 言

本研究はビスコースレーヨン、ビニロン、羊毛、ベンベルグ、綿、アセテート、ナイロンなどの繊維の研究に引続きテリレンの単繊維について匍匐並びに除重による回復特性を実験的に究明し、さらに各種温湿のもとにおける実験によって温湿度の匍匐および回復におよぼす影響をも明らかにするとともに、上記の他の繊維との比較考察をしようとするものである。

2. 実験の試料と方法

本実験に用いた試料は昭和32年英国の I. C. I. 社で作られたポリエステル系繊維テリレンの強力糸 F 型で、1本の糸 100 den, 20本の単繊維からなるもので、本実験にはその単繊維 5 den のものを支点間距離 6 cm として用いた。その引張試験による「荷重伸び線図」は第1図に、その断面顕微鏡写真と X 線回折像は第2, 3図に示す。なお詳しい引張特性値は別報において示すとおりである。

実験装置は従来のものと同じく筆者考案の「恒温恒湿

3) オプティカル レバ式匍匐試験装置」を用いた。

荷重および除重の方法は第4図に示すようで、実験の状態は 20°C, 60% R. H. のもとで引張応力が 0.4, 0.6, 1, 1.4, 1.75 および 2.4 g/den の 6 種、引張応力 1 g/den, 60% R. H. で温度を 10, 20, 30, 50°C の

(第1図) テリレンの各種温度に対する荷重伸び線図 (ただし 60% R. H.)

* Creep and Recovery Properties of Terylene Fibers. 昭和33年5月本学会年次大会で講演

** Y. Yamaguchi, Member. 工学院大学

(第2図) テリレンの断面写真 $\times 950$

(第3図) テリレンのX線回折像

(第4図) 匍匐および回復試験における荷重除重の方法

もの、および引張応力 1 g/den 、 20°C で湿度を 35, 60, 90 % R.H. におけるものである。

3. 実験の結果

上記の方法による匍匐並びに除重による回復の実験の結果をまとめて線図であらわすと第5~10図の匍匐線図および回復線図となる。

すなわち第5図は 20°C 、60 % R.H. における各種引張応力に対する各匍匐曲線、第6図は同じ状態における荷重時間 3 min および 20 hr における除重による各回復曲線をあらわす。

第7図は引張応力 1 g/den 、60 % R.H. で温度が10, 20, 30, 50°C における各匍匐曲線、第8図は同じ状態で荷重時間 3 min および 20 hr における各回復曲線である。

荷重時間 t (sec)(第5図) 各種引張応力に対する匍匐線図 (ただし 20°C 、60 % R.H.) 除重後の時間 t' (sec)(第6図) テリレンの除重前の各引張応力に対する回復線図 (ただし 20°C 、60 % R.H.) 荷重時間 t (sec)(第7図) 各温度における匍匐曲線 (ただし 1 g/den 、60 % R.H.)

(第8図) 各温度における回復曲線
(1 g/den, 60% R.H.)

(第9図) 各湿度における creep 曲線
(ただし 1 g/den, 20°C)

(第10図) 各湿度における回復曲線
(1 g/den, 20°C)

第9図は引張応力 1 g/den, 20°C で湿度が 35, 60, 90% R.H. に対する各 creep 曲線, 第10図は同じく荷重時間 3 min および 20 hr における除重による各回復曲線である。

4. 一般的考察

第5, 7, 9図の各 creep 曲線図から, テリレンにおいても前記の他の繊維と同じような第5図の 1.4 g/den の creep 曲線で例示したような荷重瞬間の伸び ε_b と, 降伏点近く以上の応力に対していちじるしく生ずる Voigt's model にやや相似的な緩和伸び ε_r , および荷重時間の対数に比例的に生ずる creep 伸び ε_c の3種の伸びがあることが明らかである。すなわち伸び ε は

$$\varepsilon = \varepsilon_b + \varepsilon_r + \varepsilon_c \dots\dots\dots (1)$$

同様に第6, 8, 10図の各回復曲線図から, 除重による回復縮み ε' は第6図の 1.4 g/den 応力で例示するように, 除重瞬間の回復縮み ε'_b , 緩和伸びに相似的な緩和回復縮み ε'_r および除重後の時間の対数に比例的に生ずる creep 伸びに相似的な creep 回復縮み ε'_c からなっている。すなわち

$$\varepsilon' = \varepsilon'_b + \varepsilon'_r + \varepsilon'_c \dots\dots\dots (2)$$

以下これらの各伸びと回復縮みについて詳述する。

5. 瞬間伸び ε_b と瞬間回復縮み ε'_b

(第11図) 瞬間伸び (ε_b) または瞬間回復縮み (ε'_b) と引張応力との関係 (20°C, 60% R.H.)

第5図から荷重直後約 0.1 sec における瞬間伸び ε_b と引張応力との関係を線図にすると第11図の ε_b 線となる。この線の変曲点を A とすると、この A 点は荷重伸び線図の降伏点にはほぼ一致する。この A 点までの応力では $\sigma/\varepsilon_b = \text{const} = E_0$ となり

$$\therefore \varepsilon_b = \sigma/E_0 \dots\dots\dots (3)$$

しかし応力が A 点（この点の応力を σ_y とする）以上になると (3) 式による値より ε_b の値が大きくなる。すなわちいま (3) 式であらわされる Hooke の法則にしたがう伸びを第1次弾性伸び ε_0 とし、 AB 間の ε_0 以上の伸びを第2次弾性伸び ε_s とすると

$$\varepsilon_b = \varepsilon_0 + \varepsilon_s \dots\dots\dots (4)$$

いま OA 部の第1次弾性係数を E_0 、 AB 部の第2次弾性係数を E_2 とすると ε_b は (5) 式であらわされる。

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma}{E_0} + (\sigma - \sigma_y) \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_0} \right) \dots\dots\dots (5)$$

または

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_y}{E_0} + \frac{\sigma - \sigma_y}{E_2} \dots\dots\dots (5)'$$

匍匐実験による E_0 および E_2 の値はそれぞれ 98 g/den、および 30 g/den で、引張試験によって求めた各値とはほぼ等しい。

次に除重による瞬間回復縮み ε'_b と引張応力との関係を第5図から求めると、第11図において荷重時間 3 min のものは ε'_{b1} 曲線、荷重時間 20 hr のものは ε'_{b2} 曲線となる。テリレンにおいては ε'_b 線が他の繊維と異なり曲線となり、特に ε'_{b1} 曲線がいちじるしい。いま ε'_b の直線部分を延長した線を ε'_0 線として点線であらわす。したがって任意の引張応力 σ_n における瞬間回復縮み ε'_{b1} または ε'_{b2} の中 ε'_{01} または ε'_{02} (ほぼ一致して図では区別しにくい) が第1次弾性伸び ε_0 に対する回復縮みで、 ε'_b と ε'_0 との差である ε'_{s1} または ε'_{s2} が ε_s に対する回復縮みと考えられる。すなわち

$$\varepsilon'_b = \varepsilon'_0 + \varepsilon'_s \dots\dots\dots (6)$$

いま

$$\varepsilon_0/\varepsilon'_0 = l, \quad \varepsilon_s/\varepsilon'_s = k$$

とすると

$$\varepsilon'_b = \frac{\sigma}{l \cdot E_0} + \frac{(\sigma - \sigma_y)}{k} \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_0} \right) \dots\dots\dots (7)$$

ここで l は第1次弾性伸び回復比、 k は第2次弾性伸び回復比とする。

本実験における荷重時間 3 min および 20 hr における第1次弾性伸び回復比 l_1 および l_2 は 1.04 および 1.08 である。また同様に k_1 および k_2 の値は 3 と 15 で

あり、荷重時間が長くなると第2次弾性伸び回復比が大きくなり、回復率はいちじるしく減少する。しかしこのような第2次弾性伸び回復縮み ε'_s はテリレンとナイロンにおいてみられ、弾性度の高いことを示しているといえよう。

6. 緩和伸び ε_r と緩和回復縮み ε'_r

(第12図) 緩和総伸びおよび縮み ε_r , ε'_r , 緩和時間 λ と引張応力との関係 (20°C, 60% R. H.)

第5, 7, 9 図の 1 g/den 以上の引張応力に対する匍匐曲線においては、いずれも Voigt's model に相似的でしたがって緩和時間であらわされる次式のような緩和伸びが生じている。

$$\varepsilon_r = \varepsilon_R (1 - e^{-t/\lambda}) \dots\dots\dots (8)$$

ここに ε_R は緩和総伸び率で、この ε_R を匍匐曲線から求めて、引張応力との関係をあらわすと第12図の ε_R 線となる。本実験の範囲だけでは実験応力個所が少なくてやや不確定であるが、他の繊維の傾向から推察して点線のような関係になると考えられる。引張応力 σ が 1.5 g/den 以上になると緩和総伸び量は余り変化なく飽和すると考えられその量は 2.3% 程度である。この値は荷重伸び曲線における降伏部伸び ε_y と大体同じ位の数値であるので、テリレンにおいても降伏部伸びに相当する緩和伸びが生ずるといえよう。

なお引張応力が 1.5 g/den 以下では ε_R は σ に正比例するからその比例常数を $1/E_r$ とし E_r は緩和弾性率とすると ε_r は次式であらわされる。

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma}{E_r} (1 - e^{-t/\lambda}) \dots\dots\dots (9)$$

実験値から $E_r = \sigma/\varepsilon_r$ なる式によって E_r を求めると 20°C, 60% で 70 g/den になる。

緩和時間 λ を匍匐曲線から求めて、引張応力との関係をあらわすと第12図の λ 線となる。すなわち引張応力

が大きくなると緩和時間はいちじるしく小さくなり次のような関係になる。

$$\lambda = Ae^{-\sigma} \dots\dots\dots (10)$$

ただし A は定数

除重による回復のときの緩和回復縮み ϵ_r' は緩和伸びを生じたものだけに生じ、緩和回復総縮み率 ϵ_R' と除重前の応力との関係は第 12 図の ϵ_R' 線であらわされ、ほぼ ϵ_R と相似した関係をもっている。いま $\epsilon_R/\epsilon_R' = m$ とし、 m を緩和伸び回復指数とすると、本実験において荷重時間 20 hr に対するこの m の値は 2.5~4 である。

緩和回復縮みのときの緩和時間 λ' は Voigt's model における理論式 $\lambda' = \lambda/m$ の関係には厳密に一致しないが第 12 図の λ' 線のようになる。応力の大きい程 λ' が小さいことは λ の場合と同様であるがその減少の割合が少ない。したがって除重後 t' における緩和回復縮み ϵ_r' は次式であらわされる。

$$\epsilon_r' = \frac{\epsilon_R}{m} (1 - e^{-t'/\lambda'}) \dots\dots\dots (11)$$

7. 匍匐伸び ϵ_c と匍匐回復縮み ϵ_c'

第 5, 7, 9 図の各匍匐曲線とも荷重時間 t の対数に比例して生ずる、すなわち $\epsilon_c = a \log\left(\frac{t}{\alpha} + 1\right)$ なる関係をもつ匍匐伸び ϵ_c が明らかに認められる。 α は匍匐伸び開始遅れ時間で、第 6 図においては 0.1~0.5 sec 程度である。上式における匍匐係数 a と引張応力との関係は第 5 図から求めて図示すると第 13 図の a 線になる。

(第 13 図) 匍匐係数 (a) および匍匐回復係数 (a') と引張応力 (σ) との関係 (ただし 20°C, 60% R.H.)

すなわち σ が降伏点 1 g/den とほぼ同程度の 1.1 g/den なる応力(この応力を匍匐飽和応力という) σ_e までは $a = b\sigma$ なる関係となり、それ以上では a の値はほぼ一定となる。

したがって σ_e まででは ϵ_c は

$$\epsilon_c = b \cdot \sigma_e \cdot \log\left(\frac{t}{\alpha} + 1\right) \dots\dots\dots (12)$$

σ_e 以上の応力に対しては

$$\epsilon_c = b \cdot \sigma_e \cdot \log\left(\frac{t}{\alpha} + 1\right) \dots\dots\dots (13)$$

この比例定数 b は従来とも 1 g/den 応力当り、 $\log_{10} t$ 当りの伸び率をあらわす匍匐定数と称しているものである。第 12 図から求めた b の値は綿と同じ位の 0.16 $\left(\frac{\%}{\text{g/den} \cdot \log_{10} t}\right)$ で従来の繊維中もっとも小さい値に属する。

除重によって除重後の時間 t' の対数に比例して生ずる、すなわち $\epsilon_c' = a' \cdot \log\left(\frac{t'}{\alpha'} + 1\right)$ なる関係を有する匍匐回復縮み ϵ_c' は第 6, 8 図において明らかに認められる。いまこの匍匐回復係数 a' の荷重時間 3 min および 20 hr に対するものをそれぞれ a_1' , a_2' とし、第 6 図から求めて、除重前の応力との関係を図示すると第 13 図の a_1' , a_2' 線となる。一般に従来の繊維では $a/a' = n$ とし n を匍匐伸び回復指数と称し、ほぼ一定の値を示したが、テリレンでは n の値は応力によって幾分変化する。すなわち引張応力が低い部分では n は 1 より大きく匍匐伸び速度より匍匐伸び回復速度が低い、応力が大きくなると n の値が 1 より小さくなり匍匐回復速度が大きくなる。なお荷重時間 3 min, および 20 hr に対する匍匐伸び回復指数を n_1, n_2 とすると、 n_2 の方が n_1 より小さい。これは第 11 図における第 2 次瞬間弾性伸び ϵ_s' が除重によって、余効果的に漸次回復するものと考えられる。

本実験においては n_1 は 0.7~1.5, n_2 は 0.5~1.5 の範囲である。

したがって匍匐回復縮み ϵ_c' は次式であらわされる

$$\epsilon_c' = \frac{b}{n} \cdot \sigma_e \cdot \log\left(\frac{t'}{\alpha'} + 1\right) \dots\dots\dots (13)$$

8. 温度の影響

第 7, 8 図における各温度における匍匐曲線および回復曲線から、瞬間伸び ϵ_b , 瞬間回復縮み ϵ_{b1}' (3 min 荷重), ϵ_{b2}' (20 hr 荷重) と温度との関係を線図で示すと第 14 図になる。

すなわち温度が高くなる程、同じ引張応力でも ϵ_b は大きくなる。すなわち (5) または (5)' 式から温度が高くなる程弾性係数 E_0, E_2 が小さくなる。このことは第 1 図の荷重伸び線図および別報からも明らかである。しかるに ϵ_{b1}' の量は温度が高くなるにつれて ϵ_b のようには増加の程度が大きくない。また ϵ_{b2}' は温度が高くなるとかえってその量が減じている。

(第14図) ϵ_b ϵ'_b および緩和時間 (λ) と温度との関係 (ただし $\sigma=1\text{g/den}$, $60\% \text{RH}$)

このことは (7)' 式の $\epsilon'_b = \frac{\sigma}{l \cdot E_0} + \frac{(\sigma - \sigma_y)}{k} \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_0} \right)$ において瞬間伸び回復指数 l および k の値が温度が高くなる程大きくなるため、温度が高くなると回復弾性が減しることを意味する。

また第7図から緩和伸び ϵ_r を考察するに一定引張応力においては温度が高くなると、一定状態で応力が増加すると同じような影響を与える。すなわち 1g/den 程度の応力では温度が高くなる程緩和総伸び ϵ_R は増加し、緩和時間はいちしるしく少なくなる。いまその中で緩和時間と温度との関係を第6図から求めて図示すると、第14図の λ 線となり、第12図の「 λ -応力線」と同じような関係がある。

匍匐伸びに対しては温度の影響はいちしるしくは見られないが、匍匐伸び回復に対しては第8図に見られるように荷重 3min では温度の影響は見られないが、荷重 20hr になると温度が高くなる程伸びる速度に対する回復の速度はやや減じるのか見られる。

9 湿度の影響

⁶⁾ 別報におけるテリレンの各種湿度における「荷重伸び線図」におけるように、また第15図のテリレンの含水率

(第15図) テリレンの含水率と湿度との関係線図 (I C C 社資料)

と湿度との関係線図に見られるように、テリレン繊維の含水率は湿度の高低にかかわらず他の繊維に比べていしるしく少なく、したかつて湿度がその強伸度曲線におよぼす影響も少ない。元来匍匐線図も荷重伸び線図も「応力ひすみ時間曲面」から考えれば本質は同じものであるから、第9, 10図に示すように各湿度に対する匍匐伸びに回復曲線も、温度のような大きな影響はなく、湿度が高くなるとわずかに伸びやすくなり、曲線の位置が上方に位することとなる。

以上を総合すると次の関係式であらわされる。

匍匐に対しては

降伏点までの引張応力では

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_r} (1 - e^{-t/\lambda}) + b \cdot \sigma \cdot \log \left(\frac{t}{\alpha} + 1 \right) \dots \dots \dots (14)$$

降伏点以上の引張応力では

$$\epsilon = \frac{\sigma_y}{E_0} + \frac{\sigma - \sigma_y}{E_2} + \epsilon_R (1 - e^{-t/\lambda}) + b \cdot \sigma_e \cdot \log \left(\frac{t}{\alpha} + 1 \right) \dots \dots \dots (15)$$

回復に対しては

降伏点までの応力では

$$\epsilon' = \frac{\sigma}{l E_0} + \frac{\sigma}{m \cdot E_r} (1 - e^{-t'/\lambda'}) + \frac{b}{n} \cdot \sigma \cdot \log \left(\frac{t'}{\alpha'} + 1 \right) \dots \dots \dots (16)$$

降伏点以上の引張応力では

$$\epsilon' = \frac{\sigma}{l E_0} + \frac{\sigma - \sigma_y}{k} \cdot \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right) + \frac{\epsilon_R}{m} (1 - e^{-t'/\lambda'}) + \frac{b}{n} \cdot \sigma_e \cdot \log \left(\frac{t'}{\alpha'} + 1 \right) \dots \dots \dots (17)$$

なお上式におけるテリレンの各定数および羊毛、ヒスコースレーヨン、アセテート、ヒニロン、ナイロンなどの繊維における定数を表にして示すと第1表になる。

9. 結 論

以上の考察を総合要約すると次のような結論となる。

- 1) テリレンの匍匐すなわち一定引張応力による全伸び率は、他の繊維におけると同しように、引張応力に比例し弾性係数に反比例する「荷重瞬間の伸び」 ϵ_b 、Voigt's Model と相似的な力学的挙動をもち緩和時間であらわされ「荷重伸び線図」における降伏部の伸びに相当する「緩和伸び」 ϵ_r および荷重時間の対数に正比例し降伏点の応力に近い応力までは引張応力に比例して生ずる「匍匐伸び」 ϵ_e の3種の伸びからなる。