一般報文

(平成元年11月20日受理)

高速引張におけるポリエステルフィラメント糸の
応力-ひずみ曲線

金沢大学工学部 喜成 年泰・放生 明廣・新宅 救徳・岩木 信男

STRESS-STRAIN CURVE IN POLYESTER FILAMENT YARN FOR
TENSILE DEFORMATION AT HIGH RATES

By Toshiyasu Kinari, Akihiro Hojo, Sukenori Shintaku, and Nobuo Iwaki

(Faculty of Technology Kanazawa University 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa, 920 Japan)

ABSTRACT: An impact tensile testing apparatus with cantilever type load cell was developed for obtaining stress-strain curves of polyester multi-filament yarn at various strain rates. The experimental results were compared with the numerical results derived from an over-stress theory. By using this apparatus, tensile tests of yarn at wide range of strain rate from 10^{-3} to 10^2s^{-1} could be performed in the same measuring system. The over-stress theory gave satisfactory interpretation of the stress-strain curves of polyester multi-filament yarn up to breaking point at low strain rate, and up to yielding point at high strain rate. The difference between the calculated curve and experimental results at high strain rate seemed due to the temperature rise of yarn during extension.

(Received November 20, 1989)

1. 緒 言

近年、繊維機械の高速化にともなって繊維の製造や加工工程中における糸の運動速度が大きくなり、糸が衝撃的な張力を受ける機会が増してきた。このため繊維材料や製品の動的挙動を明らかにすることが重要であり、繊維の衝撃試験を行い、応力-ひずみ関係におよぼすひずみ速度の影響を明らかにし、速度依存性を考慮した構成方程式を導く必要がある。

糸の衝撃試験¹⁾としては Meredith²⁾や Smith³⁻⁷⁾による一連の研究などがあり、その他応力-ひずみ曲線におよぼす温度とひずみ速度の影響なども測定されている⁸⁾が、その応力-ひずみ挙動を数式化する試みはなされていない。これらの実験には回転円盤あるいはレバーなどにより糸を直接高速で引っ張るもの^{2,3)}や糸の横衝撃実験から引張応力を推定するもの⁶⁾などがある。これらでは高速度写真を用いて測定された変位-時間曲線の微分から間接的に糸の荷重を求める場合が多い。直接荷重を測定するものとしては、圧電素子を利用した荷重計を用いるものもあるが、引張り速度が大きくなると荷重計と試料の取り付け方法などが問題となってくる。

そこで本研究では、試料の取り付けを容易にし、かつ検出感度を高めるために、小さな片持ちはりを利用したロードセルを用いて糸にかかる荷重を測定する衝撃試験装置を試作し、ポリエステルマルチフィラメント糸について種々の引張速度における荷重-伸び曲線を求めた。そして得られた応力-ひずみ関係におよぼすひずみ速度の影響について、過応力模型に基づく構成方程式により検討した。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

図1に試験装置の概要を、図2にその主要部の詳細を示す。試験装置は荷重を測定するための直径8mm、長さ20mmの片持ちはり(図2(a))、糸に引張り速度を与えるための外径18mm、長さ145mmの中をくり抜いたアルミ製入力棒(図2(b)：重量48gf)およびこれらを保持するためのベースから成っている。図2(d)に示すように糸試料の上下端にアルミ小片(図2(c)：重量0.35gf)をエポキシ樹脂で接着し、上端の小片が荷重測定用片持ちはりの上面に、下端の小片が入力棒の下面に接するように、それぞれのスリットを利用して取付ける。片持ち

Fig. 3. Schematic diagram of displacement measurement system.

み, 必要な処理を施した。

2.2 実験方法

引張速度は表 1 に示す 4 種類に設定した。条件番号

Table 1 Strain Rate

Term number	①	②	③	④
Tensile speed (m/s)	1.67×10^{-4}	1.67×10^{-3}	0.415	3.76
$\dot{\epsilon}$ (s^{-1})	3.33×10^{-3}	3.33×10^{-2}	8.30	75.2

①, ②の低速度での実験では定速引張試験機(東洋測器製テンシロン UTM III 型)を利用して入力棒を押し下げるにより試料を定速で引張した。また③, ④の高速度ではガイドを介して重りを落下させ, アルミ棒に衝撃速度を与え, 糸を引張した。

試料は繊維の標準状態(20°C, 65% RH)中に12時間以上放置し, その条件下で実験を行った。

なお, 本報では応力の単位として引張前の繊維で荷重を除いた公称応力(gf/den)を, ひずみの単位としては引張前の試料長で変形の長さを除いた公称ひずみをそれぞれ用いることにする。

2.3 糸試料

糸試料は, ポリエステル連続マルチフィラメント糸 100den/36fil を用いた。これは山本ら^{9,10)}の報告で A の原糸として用いられた糸に近いもの(繊維やフィラメント数は異なるが, 延伸時の熱処理温度が同じ)で, 一般的なポリエステル糸に比べて結晶化度が約40%, 配向性が約2%低いと考えられる糸である。

試料長は, 一定速度の引張試験では50mm, 応力緩和

試験では500mm とした。

3. ポリエステルフィラメント糸の構成方程式

3.1 過応力模型

ポリエステル糸の応力-ひずみ特性を予想するため, 過応力模型^{11,12)}を用いる。過応力論は北川らがポリエチレン¹³⁾およびポリプロピレン¹⁴⁾の棒材の圧縮やねじりの挙動を説明するために用い, 良好な結果を得ている。

過応力模型による構成関係の出発式は

$$K[*]\dot{\sigma} + \sigma = M[*]\dot{\epsilon} + g[\epsilon] \quad (3)$$

$$M[*]/K[*] = E \quad (4)$$

である。 σ は応力, ϵ はひずみ, $g[\epsilon]$ はひずみ ϵ において $\dot{\sigma}$ や $\dot{\epsilon}$ の影響がないときの応力であり, 平衡応力と呼ばれる。 K, M は係数である。また E は瞬間弾性係数であり, 本報のポリエステルマルチフィラメント糸の場合, 実験値より 80gf/den を用いた。そしてドットは時間に関する微分, $[*]$ は引数 $*$ の関数であることを示す。(3)式で K および M が応力やひずみに依存しない一定値を取る場合には, 線形粘弾性模型の一つである 3 要素模型に対応する式となる¹³⁾。式(3)を変形速度の形に書き換えると,

$$\dot{\epsilon} = \dot{\sigma}/E + (\sigma - g[\epsilon])/(EK[*]) \quad (5)$$

となる。右辺第 2 項に含まれる $\sigma - g[\epsilon]$ は平衡応力からのずれを表わし, 過応力と呼ばれる。Krempel¹²⁾は特に $K[*]$ を過応力のみの関数であるとの提案をしており, 前述の北川らの結果もこれを支持している。

3.2 g 関数の決定

式(5)を計算する上で $g[\epsilon]$ をできるだけ精度良く求める必要がある。 $g[\epsilon]$ を求めるため, ひずみ速度一定 ($\dot{\epsilon} = 3.3 \times 10^{-2} s^{-1}$) の引張によって所定のひずみに達した後, 応力緩和試験を行った。24時間経過後の $\dot{\sigma}$ と E の比は $10^{-9} s^{-1}$ と極めて小さな値となるためこの応力値を負荷ひずみに応じた緩和終了応力とみなし, $g[\epsilon]$ とした。

図 4 に $g[\epsilon]$ を示す。この曲線の形状は Krempel¹⁵⁾らが SUS304 ステンレス鋼について求めた応力-ひずみ曲線の形状に近いので, これに従って g 関数を定式化した。以下にその概略を記す。

曲線は原点付近の傾き E からゆるやかに, 考慮している最大ひずみでの接線の傾き E_t へと移っている。 ϵ^* は $d^2\sigma/d\epsilon^2$ の絶対値が最大値を示すときのひずみ, σ_c は E_t の σ 軸上での切片である。このような曲線を式で表わすために $x = \epsilon/\epsilon^*$ として次のように関数 $F(x)$ を定義する。

Fig. 4. Stress-strain curve of equilibrium stress. The solid curve denotes function $g[\varepsilon]$ calculated from eq. (8). The solid circles are the experimental data. E is the slope at $\varepsilon \rightarrow 0$ and E_t is the slope at $\varepsilon = 25\%$.

$$-\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon^2} = F(x) = Ax^{2n-1} \cdot \exp\{-(ax^2 + b/x^2)\} \quad (6)$$

応力-ひずみ関係は式(6)の2階積分から得られる。

$$\sigma = E\varepsilon - \int_0^\varepsilon \int_0^\xi F\left(\frac{\eta}{\varepsilon^*}\right) d\eta d\xi \quad (7)$$

または

$$\sigma = [E - \varepsilon^* \int_0^{\varepsilon/\varepsilon^*} F(\xi) d\xi] \varepsilon + \varepsilon^{*2} \int_0^{\varepsilon/\varepsilon^*} \xi F(\xi) d\xi \quad (8)$$

図4より十分大きい ε に対しては

$$\sigma = \sigma_s + E_t \varepsilon \quad (9)$$

よって

$$\int_0^\infty F(\eta) d\eta = \frac{E - E_t}{\varepsilon^*} = \alpha \quad (10)$$

$$\int_0^\infty \eta F(\eta) d\eta = \frac{\sigma_s}{\varepsilon^{*2}} = \beta \quad (11)$$

式(10)および式(11)を式(6)に代入することによって

$$A \cdot (b/a)^n \cdot K_n(2ab) = \alpha \quad (12)$$

$$A \cdot (b/a)^{n+1/2} \cdot K_{n+1/2}(2ab) = \beta \quad (13)$$

を得る。 K_m は m 次の変形ベッセル関数^{16, 17)}である。

また, x の定義より,

$$a^2 - b^2 + 1/2 = n \quad (14)$$

Kremple¹⁵⁾は $n=0$ として定数 A , a , b を定め, 式(8)を評価している。本報でもこれに従い, 図4に●で示した24時間後の応力緩和試験結果より各定数を定めた。

3.3 K関数の決定

K関数は前述の応力緩和試験によって決定した。図5に過応力($\sigma - g[\varepsilon]$)と緩和時間の関係を示す。緩和による応力は初め, 緩和試験に先立つ定速引張のひずみ速度の影響により急激な減少(この部分の過応力は定速引張時のひずみ速度によって異なる。)を示し, その後緩和時間の対数に対し, 直線的に減少する。

Fig. 5. Relation between over-stress and relaxation time.

Fig. 6. K plotted against over-stress at different strains.

応力緩和試験では式(3)は

$$\dot{\sigma} = -(\sigma - g[\varepsilon])/K[*] \quad (15)$$

と書き直され, 各々のひずみレベルでの過応力-時間曲線から $K[*]$ がわかる。これより求めた $K[*]$ と過応力の関係を図6に示す。 $K[*]$ は(1)過応力の減少関数であり, かつ(2)ひずみの増加関数となるため,

$$K = K_0 \exp\{-K_1[\varepsilon](\sigma - g[\varepsilon])\} \quad (16)$$

$$K_1 = P_0 + P_1/\varepsilon \quad (17)$$

と近似した。 g 関数は24時間後の緩和応力値であるから, 式(16)において $K_0 = 86,400s^{-1}$ とし, 片対数軸上での緩和曲線の傾きから K_1 を定めた。応力緩和試験の結果より得られた各定数は, $\varepsilon^* = 0.006$, $A = 6,690gf/den$, $a = 0.1198$, $b = 0.7172$, $P_0 = 5.22den/gf$, $P_1 = 0.101den/gf$ であった。

以上より, 式(5)を評価するための全ての関数形および定数が定まったので, ルンゲ・クッタ法により, 実験

Fig. 7. Typical results as a function of time at strain rate of 80 s^{-1} . (a) Experimental data of tensile force and E_0 . (b) Tension and displacement after operations by personal computer. Solid line is curve of tension, and dash-dotted line is curve of displacement.

に用いた各ひずみ速度について数値計算を行った。その結果を図8～11に実線で示す。

4. 実験結果および考察

本研究で試作した装置により得られた荷重-時間、および伸び-時間曲線の一例として条件④の中の1データを図7に示す。図7(a)はデジタルメモリに記録された動ひずみ計(上段)および光電センサ列(下段)からの出力電圧である。図2(a)に示した片持はりを $\phi 8$ の均一な円形断面と仮定すれば、その横振動の1次の固有振動数¹⁸⁾は $1.43 \times 10^4 \text{ Hz}$ となり、図7(a)上段の高周波成分がこれに相当する。この高周波成分の振幅は、同図に示すように小さいので、各測定点に対して前後10点(各点のサンプリング間隔は $5 \mu\text{s}$)の移動平均を行ってこの高周波成分を取り除いた。得られた荷重-時間曲線を図7(b)に実線で示す。一方、光電センサ列から得られた図7(a)下段の出力電圧は(2)式の処理によって、同図(b)の一点鎖線に示す伸び-時間曲線となる。

各引張速度において図7(b)のような10本の曲線を数値平均し、時間パラメータを消去して横軸を伸びにすると、図11の破線に示す応力-ひずみ曲線が得られる。なお図7(b)から図11を得る過程において、初荷重(試料

Fig. 8. Experimental (dotted) and theoretical (solid) stress-strain curves of polyester yarn at $\dot{\epsilon} = 3.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Fig. 9. Experimental (dotted) and theoretical (solid) stress-strain curves of polyester yarn at $\dot{\epsilon} = 3.33 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

を保持するためのアルミ棒の重量48gf)を考慮し、曲線を原点における接線方向に48gf分だけ延長した。

図8～11に各ひずみ速度における数値計算結果と実験結果をそれぞれ実線および破線で示す。図8および9を見ると低速での引張試験では数値計算結果と実験結果はほぼ全ひずみ域で一致し、過応力模型が有効であることが確認される。

一方図10および11では、数値計算結果は降伏点付近までは実験結果とほぼ一致しており、各ひずみ速度におけ

Fig. 10. Experimental (dotted) and theoretical (solid) stress-strain curves of polyester yarn at $\dot{\epsilon} = 8.3 \text{ s}^{-1}$.

Fig. 11. Experimental (dotted) and theoretical (solid) stress-strain curves of polyester yarn at $\dot{\epsilon} = 75 \text{ s}^{-1}$.

る弾性的な挙動や弾性限界などを予測するためにはこのモデルが有効であることが確認された。しかしそれ以上のひずみでは、実験結果は数値計算結果よりも低い応力値を示し、その傾向はひずみ値が大きくなるほど、またひずみ速度が大きくなるほど顕著であった。このことは式(8)では考慮していなかった温度の影響がひずみ速度の増加にともなってあらわれてきたためと考えられる。すなわちひずみ速度が大きい場合、変形により発生したエネルギーが移動する時間がないため断熱変形となり、フィラメント内部で局所的に温度が上昇する。そしてこの

フィラメント内での温度上昇により、あるひずみにおける応力が計算された値よりも小さくなる。Hall¹⁹⁾は5種類の合成繊維についてこのような繊維内部での温度上昇を概算し、PET 繊維について 3 s^{-1} 以上のひずみ速度において12%のひずみレベルで25°Cの温度上昇があると見積っている。

さらにこのような局所的な温度上昇の極端な例として、井谷ら^{20,21)}はひずみ速度が増加するとフィラメントの破断面が溶融状態を示すことを報告している。このことを確認するため各引張速度における引張試験後の糸からフィラメントを抜き取り、その破断面を走査型電子顕微鏡(以下SEM)によって観察した。そのSEM写真の一例を図12および13に示す。図12は本実験での最低のひずみ速度である①の条件のものであるが、破断面付近は引張により扁平になって切断されており、井谷らの言う延性～ぜい性の破断面を示している。一方、最大のひずみ速度④である図13では、破断面は大きく膨らんでおり、井谷らの言う溶融状破壊を示している。

以上のことから高ひずみ速度の高ひずみ域まで適用できる構成式に対しては温度の影響を考慮する必要があると考えられ、この問題に関しては今後さらに検討が必要である。

5. 結 言

本研究では片持はりを利用したロードセルで荷重を測定する糸の衝撃引張試験装置を試作し、ポリエステルマルチフィラメント糸の衝撃引張試験を行い、試験装置の妥当性を確かめた。そしてポリエステルフィラメント糸の構成方程式として過応力模型の適用を試みた。得られた結果は以下の通りである。

- ① 本装置を用いれば、 $10^{-3} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 程度のひずみ速度における糸の引張試験を同一の測定系で行うことができた。
- ② 過応力模型を用いた構成方程式により、低ひずみ速度の引張試験結果は破断までのほぼ全域にわたり、高ひずみ速度の引張試験結果は降伏点付近までを予想することができた。

- ③ 高ひずみ速度における計算値と実験値の差は、引張により発生する熱が原因となっていると考えられた。

なお、本研究は1988年繊維学会秋期研究発表会および1989年繊維学会秋期研究発表会で発表したものである。また本報をまとめるにあたり、有益なご助言をいただきました福井大学工学部 小形信男先生、金沢大学工学部 茶谷明義先生、北川正義先生ならびに石川県工業試験場 山本 孝氏に謝意を表わします。さらに実験にご協力いただいた石川県工業試験場に感謝します。

Fig. 12. SEM photomicrograph of the point of rupture tested at $\dot{\epsilon} = 3.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Fig. 13. SEM photomicrograph of the point of rupture tested at $\dot{\epsilon} = 75 \text{ s}^{-1}$.

文 献

- 1) W. J. Lyons, "Impact Phenomena in Textile", M. I. T. Press, Cambridge, (1963)
- 2) R. Meredith, *J. Text. Inst.*, **45**, T30 (1954)
- 3) W. K. Stone, H. F. Schifer, and G. Fox, *Text. Res. J.*, **25**, 520 (1955)
- 4) F. L. MaCrackin, H. F. Schifer, J. C. Smith, and W. K. Stone, *Text. Res. J.*, **25**, 529 (1955)
- 5) J. C. Smith, F. L. MaCrackin, and H. F. Schifer, *Text. Res. J.*, **25**, 701 (1955)
- 6) J. C. Smith, F. L. MaCrackin, H. F. Schifer, and W. K. Stone, K. M. Towne, *Text. Res. J.*, **26**, 821 (1956)
- 7) J. C. Smith, P. J. Shouse, J. M. Blandford, and K. M. Towne, *Text. Res. J.*, **31**, 721 (1961)
- 8) I. H. Hall, *J. Polym. Sci.*, **54**, 505 (1961)
- 9) 山本 孝, 土定育英, 松本義隆, 新宅救徳, 織学誌, **43**, 320 (1987)
- 10) 山本 孝, 新宅救徳, 喜成年泰, 織学誌, **45**, 42 (1989)
- 11) E. P. Cernocky and E. Krempel, *Int. J. Non-Linear Mech.*, **14**, 183 (1979)
- 12) M. C. Liu and E. Krempel, *J. Mech. Phys. Solids*, **27**, 377 (1979)
- 13) 北川正義, 松谷智彦, 材料, **37**, 1391 (1988)
- 14) M. Kitagawa and T. Matsutani, *J. Soc. Materials Sci.*, **23**, 4085 (1988)
- 15) M. C. Liu, E. Krempel, and D. C. Nairn, *Trans. ASME Ser. H*, **98**, 322 (1976)
- 16) 山内二郎, 宇野利雄, 一松 信編, 「電子計算機のための数値計算法Ⅲ」, 培風館, p. 251 (1972)
- 17) 森口繁一, 宇田川銑久, 一松 信, 「数学公式Ⅲ」, 岩波書店, p. 172 (1960)
- 18) 小堀与一, 「実用振動計算法」, 工学図書, p. 197 (1978)
- 19) I. H. Hall, *J. Appl. Polym. Sci.*, **12**, 739 (1968)
- 20) 井谷和十郎, 和田富成, 浅田 薫, 清水保昭; 織学誌, **24**, 43 (1968)
- 21) 井谷和十郎, 和田富成, 浅田 薫, 清水保昭; 織学誌, **24**, 48 (1968)