(昭和 31 年 2 月 7 日 受理)

繊維の振りクリープについて

繊維の振り弾性余効に関する研究 (第2報)

群馬大学工学部 大 沢 源 一 郎

ON THE TORSIONAL CREEP OF FIBRE
STUDIES OF THE TORSIONAL ELASTIC AFTER-EFFECTS IN FIBRE (II)

By Genichiro Ōsawa

(Faculty of Engineering, Gunma University, Kiryu, Japan)

The torsional angle of the fibre being twisted by the constant moment increases with the elapsed time (Torsional Creep), and decreases after removing the twisting moment as an elastic after-effect (Torsional Recovery). The torsional creep and recovery are measured with the filament of raw silk and drawn nylon. These phenomena show the typical curves similar to the tensile creep and recovery. The instantaneous, initial twist at constant moment is followed by the creep-twist. The maximum twist attained after creep has to be reduced to the set twist for equilibrium. Considering the torsional recovery the total twist is divided into three parts; the elastic twist, the twist of retarded elasticity and the plastic twist, from which the degree of torsional elasticity and plasticity etc. are estimated. The torsional recovery of drawn nylon by simple twisting is greater than that of raw silk. Generally the torsional plasticity of fibre increases with the given twist and saturates. The number of turns T per unit length as the function of elapsed time t is represented: $T = A_1 \pm B_1 \log t$, $T = A_1 \cdot t \pm b_1$ or $T = A_0 \pm B_0 \log(t + \alpha)$ etc. The coefficients depend upon a given twisting moment M the plus sign corresponding to the creep, minus to the recovery. A_1 and A_0 are dependent on the M - T relation of the specimen, $B_1 \propto M$ below a certain moment, and $b_1 \propto 1/M$ approximately. This study shows that the naturally stable twist of fibre changes with the time according to the above formula of the recovery of torsional deformation.

(Received 7. 2. 1956)

1. 緒 言

繊維における引張りのクリープは極く普通の現象として従来幾多の研究¹⁾がある。繊維を振る場合にも前報に述べた振りモーメント弛緩²⁾の逆現象として振りクリープの存在が考えられる。すなわち一定振りモーメントのもとでは繊維の有する粘弾性のため振り変形の時間的変化が起こり得る訳である。但し繊維においては振りクリープよりも振り弛緩の方が見掛け易い現象ではある。すなわち一定撚数なる糸における力学的変化はほとんど振り弛緩の問題に属している。³⁾そのためか Dillon 氏の言⁴⁾にもかかわらず繊維について上記意味の振りクリープを取扱った報告が見られない⁵⁾。後述のように一定モーメントの特別の場合として、振り変形の余効回復は糸の撚安定という実際問題に直接関係がある。繊維の力学的性質に関する基礎

の問題としても振りクリープは一度は取上げられねばならぬ現象であろう。本報では生糸及びナイロンについて振りクリープ及び回復の現象を系統的に明らかにしようと思う。

2. 振りクリープの意義及び測定方法

仮に第1図(a)のように半径 r_1 の丸棒の一端が固定され、他端に一定振りモーメント M_0 が掛かるとする。振りモーメント負荷の瞬間、丸棒は長さ a につき角 φ_0 だけ振られる。振り角は $\varphi = \varphi_0$ より引続き時間経過 dt につき $d\varphi$ 増加すると考えられ、この $\Sigma d\varphi \cdot t$ 関係が振りクリープとなる。(繊維のような物質に或る一定量の振りモーメントが継続的に掛かるということは現実の例として皆無であろう。それ故繊維の場合上記の振りクリープは仮想的なものと言える。) 振りにおいては勿論断面内応力分布 $\tau = f(r, t, \dots)$ がある。

Fig. 1 (a)

(b)

周辺近くの大なる応力は時間的に減少し軸芯近くの小応力はむしろ増大して全断面一様に近づくであろう。微視的にはこのような応力弛緩があるであろうが、巨視的意味で $M_0 = 2\pi \int_0^1 r \tau dr$ 一定における角 φ の時間的な変化が振りクリープであると考えられる。(断面形不規則な繊維においては更に複雑なものであろう。)

繊維の振りクリープ測定は筆者の指針重力法⁹⁾によって次のような操作を行う。測定装置はモーメント弛緩測定⁹⁾の場合と同じであるから、第1図(b)に測定部分のみを示す。始め試料 a が一定振りモーメント $M = M_0$ に達するまで電動機で握み C を $n = n_0$ 回転すると振り数は $T = T_1$ となる。(但し一般に $\varphi = 2n\pi - \theta_0$, $T = n/a$, $M_0 = K \sin \theta_0$ とする。 K : 指針常数⁹⁾。この際 $dM/dt = \infty$ が原則であるが、実際上可能な限度は前報⁹⁾ 同様 dn/dt 一定, $a = 5\text{cm}$ として $dT/dt = 3\text{cm}^{-1}\text{sec}^{-1}$ であった。) ここでもし前報⁹⁾ のように $T = T_0$ 一定のままであればモーメント弛緩 $-\delta M$ が起こる。この場合はむしろ振りの弛緩とクリープの両現象が併起することになる。今度は振り弛緩を抑えて振りクリープのみを発生させればよい。モーメント変化 $-\delta M$ を始めの値 M_0 に戻すためには振り増加 $+\delta T$ を必要とする。かくて常に M_0 を保つように刻々 δT を増加させる。実際は手動でわずかず dn を増して $\theta = \theta_0$ 一定に保つことになる。これより一定 M_0 における振りクリープ $T-t$ 関係が得られる。

ある時間 (t_1) 振りクリープの後 ($n = n_1$, $T = T_1$), 瞬間的にモーメント M_0 を除く。すなわち $\theta_0 \rightarrow 0$ まで電動で握みを逆転する (速度は前同様) と $n_1 \rightarrow n_0'$ ($T_1 \rightarrow T_0'$) となり、以後振りの余効回復が続く。振り T_0' においてモーメント回復⁹⁾ $+\delta M$ が生ずる (厳密には振りのモーメント及び変形両回復の併起)。 $M = 0$ すなわち $\theta = 0$ なるためには $-\delta T (-\delta n)$ の減少を要し、常に $\theta = 0$ を追跡すると余効回復の $T-t$ 関係が得られる。この $M = 0$ 状態の振りの変化は糸の自然解弛に見られる現象である。(クリープと回復の初期は $|dT/dt|$ 大なるため連続的に $\theta = \theta_0$ または 0 を追跡せねばならないが、 $t = 1\text{min}$ 以後変化は緩慢になるか

ら、前測定時より $|\delta\theta|$ 相当の弛緩を許し、測定時毎に戻して θ_0 または 0 に合わせるようにした。握み回転 n は $1/100$ まで読み得る)。

試料として生糸 21 中 ($22.7 \pm 0.19d$) 及び延伸ナイロン (15d 単繊維) を選び、数種の定モーメントを媒介して振りクリープ及び回復を調べた。空気状態は $21 \pm 1^\circ\text{C}$, $59 \pm 2\%$ RH とする。振りモーメント測定用指針⁹⁾ は一定線密度 (4.33mg/cm) の長さを適当にとり、測定角 θ° はすべて安全で感度のよい 60° に選んだ。試料の張力は 0.5g (しば状屈曲を生ぜぬほぼ最低値) 一定に保った。(前報⁹⁾ と併せて余効現象のような振りの長期観測特にクリープの M 一定保持には指針重力法⁹⁾ の有効正確なことが認められる。)

3. 実験結果と振り変形の分類

以上の方法で測定した結果の振り変形 T と経過時間 t との関係として、生糸について第2図、ナイロンについて第3図が得られる。いずれも引張り¹¹⁾¹²⁾¹³⁾ の場合に似た典型的なクリープ及び回復の曲線を示す。(振り変化は永続するがクリープ、回復とも一応 30min で打切る。長期の振りクリープについては後報。) 各付記の数字は与えた一定の振りモーメントであり、回

Fig. 2

Fig. 3

復時は勿論すべて $M=0$ 状態の振り変化を示す。

第2, 3図を書換えて得られる振りモーメント M ・振り T 関係の等時曲線はそれぞれ第4図 (a), (b) となる。同図より回復の各 M - T 曲線はクリープのそれに相似な形を示すことがわかる。図 (a) の生糸の場合クリープと回復の余効域では M - T 曲線が大体重なるのに対して、図 (b) のナイロンでは回復の各 M - T 曲線はクリープ時のそれらの半分以下に出ている。回復時の振り変化は本来の M - T 線図上では第5図のように T 軸 ($M=0$) に沿って進行する訳であるが、第4図の回復等時曲線 (破線) は元のクリープ時の定モーメント M_0 との関係を示そうとするものである。

第4図 (b) の定モーメント位置 $aedbc$ において、最大振り $\overline{ac}$ に達したものが安定なるためには結局 $\overline{ae}$ に戻ってしまう。振りクリープ及び回復の全過程について振り変形を次のように分類できよう。第4図及び T - t , M - T 両関係を示す第5図において初期或いは瞬間振り: $\overline{ab}=T_0$ 、クリープ振りまたは簡偏振り: $\overline{bc}=T_m-T_0$ (究極値: $T_\infty-T_0$)

$t=t_m$ で $T=T_m$, $t \rightarrow \infty$ で $T \rightarrow T_\infty$ となる。 T_m は $0 \leq t \leq t_m$ 間の最大振り (全振り) である。

弾性 (回復) 振り: $\overline{cd}=T_m-T_0'$

遅れ弾性振りまたは余効回復振り: $\overline{de}=T_0'-T_m'$ (究極値: $T_0'-T_\infty'$)

Fig. 4

Fig. 5

回復過程 $t'=t_m'$ で $T=T_m'$, $t' \rightarrow \infty$ で $T \rightarrow T_\infty'$ となる。

塑性振りまたは固定振り: T_∞' ($\overline{ea}=T_m'$ の究極値)
振り加工のみで自然的に固定された安定な振り変形とみなされる。

こうえ更に熱余効的な振り回復の存在も考えられる。糸の場合は上記の各振り変形をそれぞれ弾性熱、遅れ弾性熱、塑性熱等と称してよいであろう。別に振り固定 (燃止め) を施せば T_∞' を T_m に近づけることもできよう。(第4図で M - T 関係に幅がある。第5図で近似三角形 OT_0T_∞ 相当のエネルギーがあると同時に $\Delta T_m T_0' T_\infty'$ 相当の余効のレジリエンス⁵⁾ があると考えられる。このことは振り弛緩からも言える²⁾。)

最大振り T_m との比率として回復域の各振りにつ

振り弾性度: $\eta_e = (T_m - T_0')/T_m \dots \dots \dots (1)$

振り遅れ弾性度: $\eta_a = (T_0' - T_\infty')/T_m \dots \dots \dots (2)$

振り塑性度 (撚止率): $\eta_p = T_\infty'/T_m \dots \dots \dots (3)$

振り全回復度: $\eta_r = \eta_e + \eta_a = (T_m - T_\infty')/T_m \dots \dots \dots (4)$

但し $\eta_e + \eta_a + \eta_p = 1 \dots \dots \dots (5)$

これらの値は M_0 , t_m 等の函数と考えられるが, 生糸及びナイロンの上記各比率と T_m の関係を求めれば第6図となる。($t_m = t_m' = 30\text{min}$ であり T_∞' に T_m' を代用するが傾向は十分にわかると思う。) 図によれば η_e 値につきナイロンは生糸よりも遙かに大で, η_a 値

Fig. 6

には大差ないが, 結局 η_r 値においてナイロンは生糸の約2倍となる。そのため生糸の η_p 値はナイロンのそれよりも大に出ている。(生糸ではセリシンの存在, ナイロンは延伸による塑性の消失等のため, 練絹と未延伸ナイロン⁹⁾ の場合はまた異なった結果を示すであろう。振り固定の施し易さまたはその堅牢度とは別問題である。) 引張りのクリープと回復からもこれとほぼ平行的な結果が示されている¹²⁾。

第6図で両試料とも M に伴う T_m の増大に従い η_e , η_r 両値は減小する。従って振り塑性 η_p は T_∞ とともに増大し飽和する傾向が見える。但し振り限度 (糸の場合いわゆる飽和撚) のため T_∞ にもおのずから限度がある。変化域では

$$\eta_p = \alpha \cdot T_m^\beta \dots \dots \dots (6)$$

と見れば, 図より生糸では $\beta < 1$, ナイロンでは $\beta \approx 1$ であるが, 計算によると第1表のような α , β 値が得られる。ここでも T_m 初期の振り塑性に関する α 値が生糸について大なる値を示している。

	$\alpha(\%)$	β
Raw Silk	21.6	0.353
Drawn Nylon	0.772	1.021

第 1 表

4. 振リクリープと回復の形式

前記 $T-t$ 関係をひとまず巨視的な取扱いにおいて整理してみよう。生糸, ナイロンとも $T_\infty \log t$ の関係がクリープと回復いずれの場合にも成立つ。第7

Fig. 7

Fig. 8

図は生糸、第8図はナイロンの各 $T\text{-}\log t$ 線図である。(時間の広域では曲線または折線となろう。生糸では $t=1\text{min}$ 前後で異なる傾向も見られる。) $A_1, B_1=f(M)$ として

$$T=A_1 \pm B_1 \log t \dots\dots\dots (7)$$

正はクリープ、負は余効回復に適用する。 $A_1=T(t=1)$ は第4図に示され、 $A_1=f(M)$ の形は試料の $M\text{-}T$ 関係に従う。

A_1 値についてクリープ時の A_c と余効回復時の A_r とを比較すると、第4図より生糸では $A_c \approx A_r$ の傾向が見られる。ナイロンの場合は $A_r \approx A_c/2$ で、 M の始めにはやや $A_r < A_c/2$ と出る。

両試料について $\log T \propto \log t$ 関係も部分的に成立つことは第9図の生糸、第10図のナイロンの各 $\log T\text{-}\log t$ 線図の通りである。

$$T=A_1 t^{\pm b_1} \dots\dots\dots (8)$$

(正はクリープ、負は回復として)。

係数 B_1 及び指数 b_1 と M (測定時には各一定値 M_0) との関係をとってみると、それぞれ第11図(a), (b)となる。図(a)の $B_1\text{-}M$ 線図を見るとクリープの場合は両試料とも極大点が出る傾向がある。ナイロンのクリープでは極大後再び極小が現われるが、生糸のクリープについても同様に見える。余効回復では両

Fig. 9

Fig. 10

試料とも B_1 値は M 値に対して直線的増加後はば一定値を保つようであるが、回復ではクリープの場合ほど大きな変化がないだけとも言えようか。(おもに繊維度の差より試料の21中生糸は15d ナイロンよりも振り剛さが大きい。第4図における各クリープの $t=1$

Fig. 11

曲線について、変曲点付近の傾き dM/dT をとると、生糸 $0.425\text{mg cm}\cdot\text{cm}$ 、ナイロン $0.238\text{mg cm}\cdot\text{cm}$ となる。第11図(a)クリープの、回復とも生糸はナイロンよりも極大点位置が大きく出ているゆえんである。第11図より極大点までの範囲では回復はもちろん、クリープについても

$$B_1 \approx kM \quad \dots\dots\dots (9)$$

係数 k については第2表が得られる。

	係数 k ($\text{mg}^{-1}\text{cm}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$)	
	creep	recovery
Raw Silk	1.97	0.487
Drawn Nylon	1.57	1.25

第 2 表

第11図(b)において $b_1 \cdot M$ 曲線をおよそ直角双曲線の一部とみなせば

$$b_1 \approx k'/M \quad \dots\dots\dots (10)$$

係数 k' は第3表のようになる。

	係数 k' ($\text{mg}\cdot\text{cm}$)	
	creep	recovery
Raw Silk	0.971	0.554
Drawn Nylon	0.263	3.53

第 3 表

従って

$$T \approx A_1(M) \pm kM \log t \quad \dots\dots\dots (11)$$

或いは

$$T \approx A_1(M) \cdot t \pm k'/M \quad \dots\dots\dots (12)$$

試料に軸張力ある場合は $A_1(M)$ は単調な形になる²⁾。同試料においても B_1 及び b_1 値或いは k 、 k' 値はクリープと回復とで異なった値を示す。生糸回復の k 値小なること(第2表)及びナイロン回復の k' 値大なること(第3表)が目立つ。なお時間の広

Fig. 12

範囲には次の式形がよく適合する。

$$T = A_0 \pm B_0 \log(t + \alpha_0) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$T = A' \pm B' \log t + C' t \quad \dots\dots\dots (14)$$

(13) で普通 $\alpha_0 = 1$ とするが最適値がある。(14) で C' は正または負となる。(詳細は略す。)

生糸の引張りクリープ¹⁰⁾と本報の振りクリープとをおのおの $t=1\text{min}$ の変形 λ_1 、 T_1 に対する変形比で比較すると第12図が得られる。前報の弛緩²⁾の場合と同様に繊維の非等方性³⁾のためか両クリープ(各回復とも)は傾向が一致しない(図は比較的よく合致する場合)。ナイロンについても同様な比較ができよう。ただ $\log t$ に対する直線関係はいずれも部分的には成立つ。すなわち振り及び引張り両クリープは微視的には異なるメカニズムであろうが、巨視的には同型の現象とみてよいであろう。

5. 総 括

繊維における振り変形のクリープ及び余効回復の現象を生糸及び延伸ナイロンの試料について研究した。振り変形 T は始め一定振りモーメント $M=M_0$ において次第に増大し(振りクリープ)、次に戻して $M=0$ に保つと減小する(振り余効回復)。振りモーメントを媒介して両状態における振りの時間的変化を調べた。特に振り回復の面から糸の燃安定に関する2~3の知見が得られる。これより生糸及びナイロンの振り回復の問題を比較検討した。

(1) 単位長振り数 T と経過時間 t との関係は典型的なクリープ及び回復曲線を示す。各係数及び指数は $f(M)$ 、正はクリープ、負は回復として

$$T = A_1 \pm B_1 \log t, \quad T = A_1 \cdot t \pm b_1$$

或いは

$$T = A_0 \pm B_0 \log(t + \alpha_0), \quad T = A' \pm B' \log t + C' t$$

(2) A_1 、 A_0 は試料の M - T 関係に従う。 M 値の小範囲ならば概略 $B_1 \propto M$ 、 $b_1 \propto M^{-1}$ 。

(3) A_1 値につきクリープを A_c 、余効回復を A_r とすると、生糸では $A_r \approx A_c$ 、ナイロンでは $A_r \approx A_c/2$ と出る。

(4) 繊維の振り変形(糸の場合は燃)は次の3部分より成る。

弾性振り(〜燃)、遅れ弾性振り(〜燃)、塑性振り(固定燃)。

(5) 従って振りの弾性度、遅れ弾性度、塑性度等を定量し得る。繊維の振り塑性度は振りとともに増大し飽

和する傾向がある。

(6) 単純振りでは延伸ナイロンの振り弾性及び全回復度は生糸のそれよりも大なる値を示す。

この内容は本会昭和29年秋期研究発表会で講演した。実験は群馬大学繊維工業研究所で行った。東京工大の白樫教授；京大の西原教授等；群馬大の淵野教授、村松君等に感謝する。

文 献

- 1) 例えば H. Leaderman; Elastic & Creep Properties of Filamentous Materials & Other High Polymers (1943)
- 2) 筆者；本誌，11, 72 (昭30-2)
- 3) W. G. Hammerle, D. J. Montgomery; *Text. Res. J.*, 23, 595 (1953)
- 4) F. T. Peirce; *J. Text. Inst.*, 14, T 390 (1923)
- 5) 筆者；本誌，10, 352 (昭29-8)
- 6) W. E. Morton, F. Permyer; *J. Text. Inst.*, 38, T 54 (1947)
- 7) J. H. Dillon; Fatigue Phenomena in High Polymers (Advances in Colloid Science III), 286 (1950)
- 8) 金属の振りクリープに関しては次の報告がある。
西原，平，田中；機学論集，21, 553 (昭30-7)
J. Mann, J. H. Faupel, L. W. Hu; *Proc. A. S. T. M.*, 50 (1950)
- 9) 筆者；本誌，9, 36 (昭28-1)
- 10) 白樫；織工学誌，8, 443 (昭17-7)
- 11) N. J. Abbott; *Text. Res. J.*, 21, 227 (1951)
- 12) 角替，鈴木，成田；織工試報，10 (昭14)
- 13) 筆者；本誌，9, 173 (昭28-4)

正 会 員 増 大 に つ い て の お 願 い

本学会におきましては前々から会員の増大運動を行っており、正会員、学生会員、維持会員、賛助会員を益々増大して機関誌の充実、事業の活潑な運営をはかりたいと存じます。お蔭様で各会員共逐次増大はいたしておりますが本年は特に正会員の皆様にお願して正会員の倍大をはかりたいと存じます。つきましては正会員各位が必ず1名ずつ新会員を御紹介下さいますよう御努力をお願い申し上げます。

技術報文原稿募集について

技術報文は工場現場における技術上の新しい工夫、考案、改良等を内容とするもので会員相互の知識交流に役立つことを目的とするものであります。従って会員各位におかれてはこの主旨に沿って気軽に御投稿下さるようお願いします。

応 募 要 項

- (1) 投稿規定は本学会の報文投稿規定に準拠する。但し英文抄録を添付する必要はない。又図面中の説明は邦語でよい。
- (2) 頁数は組上り3頁以内を原則とする。(本学会所定の原稿用紙で表、図面等を含み13枚以内)
- (3) 内容、体裁等については本学会編集委員会において多少の加筆、訂正をする場合がある。