繊維における繰返し一定伸び荷重に関する一研究*

(昭和35年5月17日受理) 会 員 山 口 章 三 郎**

大 柳 康

摘 要

研 究 目 的

本研究はビスコース レーヨンおよびナイロンを例にとりて、単繊維に一定の伸びを繰返してかける場合、一定の伸びを生ぜしめるに要する張力あるいは引張応力が、繰返し数によってどのように変化するか、またこのような荷重履歴をもった繊維の引張特性がどのような影響を与えられるかを実験的に明らかにする。

さらにまた静的な一定伸び荷重すなわち応力緩和とこの動的な繰返し一定伸び荷重との繊維に対する影響の相違をも実験的に比較し究明しようとする。

研 究 結 果

1) 繰返し速度が 6~30 r.p.m. の範囲では、繰返し一定伸び荷重をかけている経過時間が同じならば、繊維に対するこの速度の影響は少ない。

2) 一定伸びを生ぜしめるに要する張力は繰返し数すなわち荷重時間とともに減少する。この張力の減少の状態ならびに処理後の引張特性は、応力緩和におけるものとほぼ同じである。

3) 繰返し一定伸び荷重を受けた繊維の引張特性は、繰返し数 5~500 回の範囲では、繰返し数よりも与える伸び量によって著しく影響される。すなわち処理後の繊維の伸度 ϵ_m' は、もとの伸度を ϵ_m 、処理による塑性伸びを ϵ_p とすると、ほぼ次式であらわされる。

$$\epsilon_m' = \epsilon_m - \epsilon_p \dots\dots\dots (1)$$

4) 繰返し一定伸び荷重処理を受けると、一定伸び量の大きいものほど処理後の伸度は小さくなるが、引張強さはあまり影響されない。

5) この処理によって、弾性係数は増大し、降伏点は高くなり、降伏部の伸びは消失する。

1. 緒 言

繊維に繰返し一定伸び荷重を加えることは、Susich¹⁾によって詳しい実験研究がなされて以来メカニカルコンディショニング (mechanical conditioning: 機械的調質) と称せられている。²⁾

筆者は従来、繊維に一定の引張応力を加えて放置する Creep 現象と一定の伸びを与えて放置する応力緩和現象とは、同じ定数を用いて定量的に応力とひずみと時間との関係で数式化され、かつ幾何学的には『応力—ひずみ—時間・曲面』であらわされることを明らかにした。^{3) 4) 5)}

本研究はさらに進んで、ビスコース レーヨンおよびナイロンの単繊維を例にとりて、繰返し一定伸び荷重を

加えることによって、一定伸びを生ぜしめる張力と繰返し数またはその経過時間との間にどのような関係があるか、またこのような処理をうけた繊維の引張特性は処理前のものとどのように異なってくるかを実験的に明らかにし、さらに応力緩和におけるものとどのように関連するかを究明しようとする。

特に繰返し一定伸び荷重をかける場合の荷重速度、荷重回数または経過時間および与える一定伸びの量、上記の張力の減少状況および処理後の引張特性への影響との間にどのような関係があるかを明らかにしようとする。

2. 実験の方法

試料は 1954 年日本レイヨン総合研究所製 2.4d のビ

* The Effect of Repeated Constant Elongation upon the Tensile Mechanical Properties of Textile Fibers. 昭和32年5月、繊維連合講演発表会で「繊維の機械的調質に関する研究」として講演。

** Y. Yamaguchi, K. Oyanagi, Member. 工学院大学

スコース レーヨンと1955年東洋レーヨン製 (Type 200) の3dのナイロン6の各単繊維を用いたが、実験回数を少なくするために、ビスコースレーヨンは5本、ナイロンは2本の各単繊維をそれぞれ引揃えて試験した。試料の支持点間の原寸法をレーヨンでは6cm、ナイロンでは5cmとした。

実験装置は筆者考案の第1図に示す恒温恒湿そうに入れた『一定変形速度繊維引張試験機⁶⁾』を転用した『繊維の応力緩和装置^{6,4)}』を用い、繰返し一定伸び試験のときは第1図のモータMとプーリーPとの連絡を絶ち、プーリーP

(第1図) 実験装置

荷重総時間 t

- t_g : 休止期
- t_t : 張力増加期
- t_m : 張力最大期
- t_d : 張力下降期
- t_c : 処理周期

(第2図) 繰返し一定伸び荷重における張力 (引張応力) と時間の関係曲線

にハンドルをつけて、手で回転および逆転を行ない、試料Aに所要の繰返し一定伸び荷重を与える。その張力はオプティカル レバによって回転記録円筒に巻きつけた印画紙の縦軸にあらわれ、第2図のような一定伸びに対する「応力-時間線図」が得られる。

実験の方法は第1図において、試料に張力がかかり始めるときから一定伸びに達するまでのプーリーPのハンド

ルの回転角度を定めて、その角度だけ定めた速さで手動の回転および逆転を行なう。その間、感光紙を巻いた記録円筒は、一定の速さでモータ M_2 によって回転され、第2図のような感光印画を得る。その内は常に 20°C 、60% R.H. の一定状態とし、同じ条件のものについて5~7回の実験を行なった。

比較考察のための応力緩和の実験方法は、別報のとおりであるが、本研究については所要の伸びに対してそれぞれ改めて再実験を行なった。

繰返し一定伸び試験および応力緩和処理後の引張特性を測定するためには、第1図に示す本試験機を用いて処理後15minにおいて $5 \times 10^{-4}/\text{sec}$ のひずみ速度による引張試験によって『応力-ひずみ曲線』を求めた。

3. 繰返し荷重速度の影響

ビスコースレーヨンにおいて、伸度 ϵ_m (16.2%) の25% すなわち $\epsilon_0/\epsilon_m = 0.25$ とする一定伸び ϵ_0 を6,20および30 r.p.m. の各繰返し速度でかけた場合、繊維の任意の繰返し回数 (n) における引張応力 σ と第1回目の伸びに対する引張応力 σ_0 との比と繰返し回数との関係を実験結果から求めて図示すると第3図になる。すなわち図の①、②および③の各曲線は繰返し速度6, 20および30 r.p.m. に対する σ/σ_0 と n との関係を示す。

またこれらの関係を σ/σ_0 と繰返し一定伸び荷重をかけている経過総時間 t との関係として図示すると、第4図になる。図の①、②および③の各曲線は繰返し速度6, 20および30 r.p.m. に対するもので、曲線Mはこれ

(第3図) ビスコースレーヨンの各繰返し速度による繰返し一定伸び荷重処理における σ/σ_0 と処理回数との関係線図 (ただし $\epsilon_0/\epsilon_m = 0.25$, 20°C , 60% R.H.)

(第4図) ビスコースレーヨンの各繰返し速度による、繰返し一定伸び荷重処理における σ/σ_0 と荷重時間 t との関係線図 (ただし $\varepsilon_0/\varepsilon_m=0.25$, 20°C , $60\% \text{ R.H.}$)

(第5図) ビスコースレーヨンの各繰返し速度で100回処理後の繊維の「応力-ひずみ曲線」 (ただし $\varepsilon_0/\varepsilon_m=0.25$, 20°C , $60\% \text{ R.H.}$)

(第1表)

100回の繰返し一定伸び (ε_0) 荷重後の引張特性値 (ただし $\varepsilon_0/\varepsilon_m=0.25$ ビスコースレーヨン)

No.	繰返し速度 (r.p.m.)	E_1 (g/d)	σ_y (g/d)	σ_m (g/d)	ε_m (%)
0	無処理	55	0.65	2.03	16.2
1	6	88	1.16	2.36	11.8
2	20	80	1.11	2.18	11.4
3	30	59	1.11	2.06	10.8

らの近似代表線と考えられるものである。

つぎに各繰返し速度で計100回の繰返し一定伸び ε_0 ($\varepsilon_0/\varepsilon_m=0.25$) をかけたものについて、引張試験による「応力-ひずみ曲線」を求めると第5図になる。

第5図の「各応力-ひずみ曲線」から処理を受けた繊維の弾性係数 E , 降伏点 σ_y , 引張強さ σ_m および伸度

ε_m を求めると第1表の数値となる。第4図から明らかに、繰返し速度が6~30 r.p.m.の範囲で変化しても、荷重総時間 t が同じならば、引張応力の減少の度合はほぼ同じである。

第5図および第1表から、同じ繰返し回数をかけたものは、繰返し速度の小なるもの、いかえれば荷重総時間が長いものほど、引張特性におよぼす影響度が大きい。

この2つの結果と「応力-ひずみ-時間・曲面」³⁾とをあわせ考えると、繰返し一定伸び荷重の処理が引張特性におよぼす影響度は、一定伸びに対しては、荷重総時間によって大きく、同じ荷重総時間においては、繰返し速度によっては小さいと推定される。

4. 繰返し一定伸び荷重と応力緩和との関係

ビスコースレーヨンにおいて20 r.p.m.の繰返し速度で、加える一定伸び率 ε_0 と伸度 ε_m との比 $\varepsilon_0/\varepsilon_m$ をそれぞれ3, 25 および62%として、繰返し一定伸び荷重を500回までかける経過時間 t (または繰返し数) と引張応力 σ と最初引張応力 σ_0 との比 σ/σ_0 との間の関

(第6図) ビスコースレーヨンの各伸びに対する繰返し荷重および応力緩和における σ/σ_0 と時間の関係線図

係は第6図の曲線 A, B および C であらわされる。またそれらとそれぞれ同じ一定ひずみを与えたときの応力緩和曲線は第6図の a, b および c 曲線であらわされ、これらの曲線は、筆者が匍匐関係式から誘導した(1)式の応力緩和関係式⁴⁾とはほぼ同じである。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{1}{1 + E_0 \cdot b \cdot \log\left(\frac{t}{\alpha} + 1\right)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし E_0 は弾性係数, b は匍匐定数, t は荷重時間, α は匍匐開始遅れ時間, σ_0 は最初引張応力とする。

同じように 31% の伸度 ϵ_m をもつナイロンに関して ϵ_0/ϵ_m を 3, 13 および 33% とする各伸び率 ϵ_0 をあたえる一定繰返し速度 (20 r.p.m.) による繰返し一定伸び荷重に対する引張応力と荷重時間 (または繰返し数) との関係係図は第 7 図の A, B および C 曲線である。また同じ伸びに対する応力緩和曲線は a, b および c 曲線となる。

第 6, 7 図において A, B, C と a, b, c の各曲線を比較すると、全般的に曲線の形は似ているが、荷重開始後 10 sec 程度までは、同じ荷重時間に対し σ の値が繰返し荷重の A, B, C 曲線の方が大きい。荷重時間がながくなると、ビスコース レーヨンもナイロンも A, B, C と a, b, c はそれぞれ曲線の傾向は似ており、特にビスコース レーヨンでは割合よく一致している。ナイロンでは A, B, C 曲線の方が a, b, c 曲線に比べて、同じ時間に対して σ の値が少しく大きい。すなわち繰返し荷重の方が応力減少の割合が小さい。

(第 7 図) ナイロンの各伸びに対する繰返し荷重および応力緩和における σ/σ_0 と時間の関係係図

以上の理由として、荷重時間が 1~10 sec すなわち繰返し数が 1~3 回程度では休止している時間の影響が大きくなって、繰返し荷重の方が連続的な応力緩和より応力の減少の割合が少ないと考えられ、またナイロンの方がビスコース レーヨンに比べて A, B, C 各曲線の方が上の方に位するのは、ナイロンがビスコース レーヨンより回復弾性が大いいために、伸びをもどごとに復元性が大きく影響して応力の減少度が連続荷重の a, b, c 曲線より小さくなるものと推定される。

以上のことから、 a', b', c' 曲線をあらわす応力緩和関係式 (1) 式に、「繰返し荷重開始時の補正值」 β と、「繰返し荷重換算係数」 γ を次の (2) 式のように導入することによって、 a', b', c' 曲線をさらに繰返し荷重の A, B, C 曲線に近似せしめることができる。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{1}{1 + E_0 \cdot b \cdot \log \left(\frac{t}{a + \beta} \gamma + 1 \right)} \dots \dots \dots (2)$$

(2) 式における β と γ などの値を第 2 表のように定めると、(1) 式をあらわす第 6 図の a', b' および c' の曲線を A, B, C 曲線に近似的に一致せしめられる。

(第 2 表) 応力緩和および繰返し荷重に対する (2) 式の定数

繊維名	ϵ_0/ϵ_m (%)	$E_0 \cdot b$	α (sec)	β (sec)	γ
ビス コース レーヨン	3	0.5	2	0.5	1
	25	0.3	2	0.5	0.9
	62	0.2	2	0.5	1
ナイロン	3	0.075	0.3	0	0.7
	13	0.058	0.3	0	0.7
	33	0.048	0.3	0	0.7

なお $E_0 \cdot b$ は注 4) 参照

したがって繰返し一定伸び荷重の場合における引張応力と荷重時間 (または繰返し数) との関係は応力緩和関係式の補正式によってあらわすことができる。

次に一定時間応力緩和を行なった試料と、これとほぼ同じ時間繰返し一定伸び荷重を与えた試料とについて、処理後 15 min 経過したところで引張試験を行ないそれらの「応力-ひずみ曲線」を示すと第 8, 9, 10 図になる。

第 8 図はビスコース レーヨンにおいて 20 r.p.m. の繰返し速度で 100 回すなわち 5 min 間各伸びに対する繰返し一定荷重をかけた後の「応力-ひずみ曲線」 A, B, C

(第 8 図) ビスコース レーヨンの各伸びに対する繰返し荷重 100 回 (荷重総時間 $t = 5$ min) と応力緩和 5 min の処理をした繊維の「応力-ひずみ曲線」(ただし 20°C, 60% R/H.)

(第9図) ビスコース レーヨンの各伸びに対する繰返し荷重500回(荷重総時間 $t=25$ min)と応力緩和30 minの処理をした繊維の「応力一ひずみ曲線」(ただし 20°C , 60% R.H.)

(第10図) ナイロンの $\epsilon_0/\epsilon_m=0.33$ の伸びに対する繰返し一定伸び荷重の各回数処理後および応力緩和処理後の繊維の「応力一ひずみ曲線」

と各伸びに対し5 min間応力緩和を行なったものの「応力一ひずみ曲線」 a, b, c ならびに処理前の「応力一ひずみ曲線」 O をあらわす。

第9図は同様に、ビスコースレーヨンの500回(25

min)繰返し一定ひずみ荷重をかけたものと30 min応力緩和処理を行なったものの各「応力一ひずみ曲線」 A, B, C および a, b, c を示す。

第10図はナイロンの ϵ_0/ϵ_m を33%とした場合、繰返し速度20 r.p.m.で繰返し数5, 20および100回後における「応力一ひずみ曲線」 A, B および C と同じ伸びを与えて5 min間応力緩和を行なったものの「応力一ひずみ曲線」 a, b および c を示す。

第8~10図から、繰返し一定伸び荷重と応力緩和の2種の処理法によって、処理後の引張特性におよぼす影響を考察すると、 A, B, C の各「応力一ひずみ曲線」はそれぞれ a, b, c の各曲線にほぼ近似している。すなわちこの2種の処理は与える伸びが同じで、荷重時間が同じならば処理後の引張特性もほぼ同じであるということになる。したがって、同じ一定伸びを与える「応力緩和」と「繰返し一定伸び荷重」の各処理は荷重経過時間が等しければ、一定伸びに対する引張応力の減少度合も、処理後の引張特性もほぼ同じで、繊維に同じような効果を与えるものと考えられる。

5. 繰返し一定伸び荷重が引張特性に与える影響について

5.1 伸び量の影響

第8, 9図のビスコースレーヨンにおける ϵ_0/ϵ_m が3, 25および62%になる各伸び率 ϵ_0 に対して、20 r.p.m.の速度で100回および500回繰返し一定伸び荷重をかけた後の引張試験による『応力一ひずみ曲線』 A, B, C から各種引張特性値すなわち弾性係数 E_0 , 降伏点 σ_y , 第2次弾性係数 E_2 , 降伏部伸び ϵ_y , 伸度 ϵ_m および引張強さ σ_m を求めて表示すると第3表になる。

すなわち同じ回数でも与える伸び量が多いほど処理後の引張特性値は著しく変化する。すなわち E_1 は少しく増大し、 σ_y は著しく高くなり、 E_2 も著しく大きくなり、 ϵ_y は少なくなつて、ほとんどなくなり、 ϵ_m は減少

(第3表) ビスコースレーヨンの繰返し荷重処理後の引張特性値

繰返し回数	ϵ_0/ϵ_m (%)	E_1 (g/d)	σ_y (g/d)	E_2 (g/d)	ϵ_y (%)	ϵ_m (%)	σ_m (g/d)
0	0	60	0.64	11.9	2.1	16.2	2.03
100 ($t=5$ min)	3	60	0.79	14.8	1.6	13.3	2.06
	25	74	1.25	13.7	0	11.48	1.81
	60	79	1.60	32.5	0	8.42	2.07
500 ($t=25$ min)	3	71	0.69	17.5	1.2	13.0	2.08
	25	72	1.27	14	0	10.59	1.81
	60	76	1.92	46	0	7.1	2.07

(第4表) 各繰返し回数後の引張特性値 (ただし繰返し速度 20 r.p.m.)

織 維 名	ϵ_0/ϵ_m (%)	繰返し数	E_1 (g/d)	σ_y (g/d)	ϵ_m (%)	σ_m (g/d)
ビスコース レーヨン	0	0	60	0.64	16.2	2.03
		5	58	1.10	12.5	2.03
		20	65.9	1.17	12.5	2.23
		100	74	1.25	11.4	2.18
		500	76	1.27	10.59	1.81
	62	5	59.5	1.57	7.92	2.07
		20	71	1.59	7.82	1.78
		100	63	1.60	7.42	1.77
		500	71	1.92	7.1	2.07
ナイロン	0	0	314 (124~374)	0.43 (4.75)	30.5	5.03
	33	5	296 (191~528)	1.1 (4.4)	28.5	5.0
		20	392 (246~622)	1.13 (4.9)	25	5.25
		100	408 (247~630)	1.4 (5.6)	22	6.0

() 内は第2次降伏点

するが、 σ_m はあまり変らない。

5・2 繰返し回数または荷重時間による影響

ϵ_0/ϵ_m の値をビスコース レーヨンでは 25 および 62% ナイロンでは 33% とする各一定伸び率の繰返し荷重に対し、繰返し速度を 20 r.p.m. で 5, 20, 100 および 500 回荷重をかけた後の引張試験による「応力-ひずみ曲線」の一例は第 8~10 図の *A, B, C* 曲線であらわされる。これらの曲線から各種引張特性値を求めると第 4 表になる。

第 4 表から明らかなように、やや結果のばらつきはあるが、同じ伸び量で 5~500 回の範囲では繰返し数が増

(第11図) ビスコースレーヨンの $\epsilon_0/\epsilon_m=0.62$ の伸びに対する繰返し荷重における処理回数と弾性伸び (ϵ_e) と塑性伸び (ϵ_p) の関係

加するほど弾性係数は増加し、降伏点は著しく高くなり、伸度は減少し、引張強さはビスコース レーヨンではあまり変りないが、ナイロンでは少しく増大する。

次に繰り返し荷重をかけながら、その間繊維に張力がかからなくなったときに回復する伸びを測定するのに、印画紙にはあらわれる第 2 図のような曲線をまとめて 1 つの線図にすると第 11 図のようになる。第 11 図はビスコースレーヨンの ϵ_0/ϵ_m を 62% とし 20 r.p.m. の繰返し速度で繰返し荷重中の回復伸びの状態を示す。

第 2 図の *DA* 部分は張力の増加期 t_e , *AB* は張力の最大期 t_u , *BC* は張力の下降期 t_v , *CD* は無張力期 t_s となる。第 11 図のように繰り返し数が増加するほど *DA* の傾斜が立ってきて、回復弾性伸び ϵ_e が小さくなり、

(第12図) ビスコースレーヨンの繰返し荷重および応力緩和処理後の伸度 (ϵ_m') と荷重時間との関係

塑性伸び ε_p の部分が大きくなり、無張力期 t_s が大きくなる。

最初の伸度を ε_m 、一定伸び率を ε_0 とし、残余伸び ε_r を次式であらわすと

$$\varepsilon_r = \varepsilon_m - \varepsilon_0 \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

または

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_p + \varepsilon_e \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

繰返し荷重処理後の伸度を ε_m' とし、第4表および第11図から各繰返し回数に対して、 ε_m' と ε_p を求めて表示すると第5表になる。

(第5表)

ビスコース レーヨンにおける ε_m' , ε_p と繰返し数
(ただし $\varepsilon_0/\varepsilon_p = 60\%$, 20 r.p.m.)

繰 し 返 数	$\varepsilon_m'(\%)$	$\varepsilon_p(\%)$	$(\varepsilon_m' + \varepsilon_p)$ (%)	$\varepsilon_m(\%)$
5	7.92	6.8	14.72	16.2
10	7.82	7.2	15.0	16.2
100	7.42	8.0	15.42	16.2
500	7.1	8.5	15.5	16.2

またビスコース レーヨンの上記の繰返し荷重処理によるものと、応力緩和処理をしたものの伸度 ε_m' と荷重時間または繰返し数との関係を線図であらわすと、第12図になる。

第5表から $(\varepsilon_m' + \varepsilon_p)$ はほぼ ε_m に等しいと考えられるから

$$\varepsilon_m' = \bar{\varepsilon}_m - \varepsilon_p \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

または

$$\varepsilon_m' = \varepsilon_m - (\varepsilon_0 - \varepsilon_e) \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

6. 結 論

以上のことを総合すると、ビスコース レーヨンおよびナイロンを例とする繊維において、繰返し一定伸び荷

重と応力緩和の両処理が繊維の引張特性に与える影響について次のように結論が得られる。

(1) 繰返し回数 5~500, 繰返し速度 6~30 r.p.m. の範囲においては、繰返し一定伸び荷重をかけている経過時間が同じならば、一定伸びに必要な張力および処理後の引張特性は、繰返し速度に影響されること少なく、ほぼ等しい。

(2) 繰返し一定伸び荷重における繰返し回数すなわち荷重経過時間と引張応力との関係は、応力緩和における荷重時間と応力との関係に相似しており、応力緩和関係式を少し補正することによって、匍匐または応力緩和における定数を用いる実験式であらわされる。

(3) 繰返し一定伸び荷重または応力緩和の処理を受けた繊維の引張特性は、与えた伸びが同じならば、これに対応する引張応力の減少度が同じところでは、ほぼ等しい。

(4) 繰返し一定伸び荷重がその繊維の引張特性に与える影響の度合は、繰返し回数よりも伸び量の大小によるものが著しい。

(5) 繰返し一定伸び荷重を受けた繊維の引張特性は伸度は減少し、弾性係数は増大し、降伏点は高くなり、降伏部伸びは漸次消失し、引張強さは、ビスコース レーヨンではある繰返し回数まではやや増すが、それ以上ではあまり変らないか、やや減ずるが、ナイロンにおいては本実験の範囲では繰返し回数とともに少し増大する。

注

- 1) Susich: Text. Res. J., 23, 545 (1953)
- 2) 真後, 田中: 本誌, 10, 46 (1957-1)
- 3) たとえば山口: 本誌, 12, 97 (1959-2)
- 4) 山口, 吉田: 高分子化学, 14, 144, 184 (1957)
- 5) 山口: 本誌, 10, 786 (1957-10)
- 6) 山口: 工学院大学研究報告, 3, 12, (1956)