ビニロンの匏匏現象と回復現象について*

(昭和 年 月 日受理) 会 員 山 口 章 三 郎**

→ 摘 要 ←

研 究 目 的

ビニロン単糸に連続的に引張荷重を掛けて生ずるいわゆる匏匏現象が、荷重時間、荷重量並びに関係湿度及び温度に如何に関係がありまた如何に影響されるか、また除重による回復現象がどのように起るかを実験的に究明しようとしたものである。

研 究 結 果

連続荷重による荷重以後一定時間までの伸び率 ε は次式で表わされる。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_r} (1 - e^{-t/\lambda}) + \frac{\sigma}{E_c} \cdot \log(t + \alpha) \quad \dots\dots\dots (1)$$

E_0 : 荷重の時の弾性係数 kg/mm^2 または g/den

σ : 引張応力 kg/mm^2 または g/den

E_r : 荷重のときの緩和(伸び)弾性係数 kg/mm^2 または g/den

t : 荷重時間 sec

λ : 緩和時間 sec

E_c : 荷重のときの匏匏(伸び)弾性係数 $(\text{kg/mm}^2) \cdot \log t$ または $(\text{g/den}) \cdot \log t$

$b = 1/E_c$: 匏匏常数, (1桁単位荷重時間, 1g/den 応力当りの伸び率 %)

α : 匏匏伸び開始遅れ時間 sec

(1)式において湿度が高くなる程 E_0 , E_r 及び E_c の値は小さくなり、温度が高くなる程 E_0 , E_r は小さくなるが E_c はあまり変わらない。また応力、湿度及び温度が増す程 λ が小さくなる。

除重による回復縮み ε' は次式で表わされる。

$$\varepsilon' = \frac{\sigma}{E'_0} + \frac{\sigma}{mE_r} (1 - e^{-mt/\lambda}) + \frac{\sigma}{nE_c} \log(t + \alpha') \quad \dots\dots\dots (2)$$

但し E'_0 : 除重のときの弾性係数 kg/mm^2 または g/den

$m = E'_r/E_r$: 緩和伸び回復比

$n = E'_c/E_c = b/b'$: 匏匏伸び回復比

E'_r : 除重のときの緩和弾性係数

E'_c : 除重のときの匏匏弾性係数

b' : 除重のときの匏匏回復常数

α' : 除重のときの匏匏縮み遅れ時間 sec (0.3~1 sec)

m 及び n の値は1より大きな値で荷重時間が長くなる程大きくなる。

1. 緒 言

繊維が連続引張荷重を受けて起る匏匏現象並びに除重による回復現象に関し、すでにビスコースレーヨンについて究明した¹⁾。本稿においては引続きビニロン単繊維について実験し、伸びと荷重時間、荷重量(引張応力)、温度並びに湿度との関係を明らかにし、また除荷重による回復現象について考察したものである。

2. 実験の装置及び方法

実験の装置として第1図のように筆者考案のオプティカルレバ式匏匏試験機を恒温恒湿槽内に入れ、荷重用重錘を槽の外部から槽を密閉したまま荷重、除重出来るようにしたものを用いた。オプティカルレバの倍率は調整

(第1図) 実験装置

A: 天秤 B₁, B₂: 試料掴み C: 皿 D: 重錘
E: 試料 F: 光源 G: 鏡 H: レバ J: 記録回転筒

* On the Creep and Recovery Properties of Vinyon Filaments.

** Y. Yamaguchi, Member. 工学院大学

によって6~60 倍の範囲を用いた。

試料は倉敷レイヨン株式会社製ビニロン単糸 4 den のものを用い、試片の引張支点距離を 6 cm とした。

実験の方法は一定状態で一定の荷重を連続 20 hr 掛け、次いで除重して 2 hr 放置しその間の伸び及び縮みを記録印画紙上に描かしめる方法と、荷重開始及び除重瞬間時の伸び及び縮みを精密に測定するために、記録印画紙の回転を速くして荷重及び除重後それぞれ 5 min までの実験とを併せ用いた。

また荷重後 5 sec で除重して 1 min 後、また 20 sec 荷重し更に除重後 1 min で 1 min 荷重し、更に除重後 1 min で 3 min 荷重し、更に除重後 3 min で 1 hr 荷重し、更に除重後 3 min で 4 hr 荷重し、更に除重後 3 min で 15 hr 荷重して、その積算荷重時間における伸

び並びに各荷重時間後の回復を測定した。

実験を行った範囲は 20°C, 60 % R.H. において荷重量 0.5, 1, 2, 3 及び 4 g の 5 種、荷重 2 g (0.5 g/den), 20°C で関係湿度 38, 60 及び 85 % の 3 種及び荷重 2 g, 60 % R.H. で温度 10, 20, 30 及び 50°C の 4 種、即ち引張応力は 0.125~1 g/den, 湿度は 38~85 %, 温度は 10~50°C であった。以上 10 種の同一温湿度、一定荷重の各状態で 3~5 回の実験を行った。

3. 実験の結果

印画紙から得た実験結果を総合すると第 1, 2 表となる。第 1 表は荷重瞬間から 20 hr までの伸び率(%)を表わし、第 2 表は 5 min 間荷重して除重瞬間から 4 min までの縮み率(%)を表わしたものである。

(第 1 表) 各状態、荷重について各経過時間における伸び率 (%)

荷重 経過 時間 (sec)	状態 σ, h, τ	20°C, 60%					0.5 g/den, 20°C			0.5 g/den, 60 % R.H.			
		引張応力 (g/den)					湿度 (% R.H.)			温 度 (°C)			
		0.125	0.25	0.5	0.75	1.0	38	60	85	10	20	30	50
約 0.1		0.77	1.68	3.85	6.55	14.30	2.95	3.85	5.90	3.26	3.85	4.55	7.97
0.5		0.816	1.90	4.15	7.23	15.27	3.21	4.15	6.50	3.47	4.15	5.06	8.43
1		0.930	1.98	4.32	7.86	15.97	3.39	4.32	7.00	3.60	4.32	5.40	9.20
2		0.965	2.07	4.42	8.60	16.80	3.47	4.42	7.76	3.71	4.42	5.60	9.50
5		1.060	2.18	4.70	9.85	17.85	3.64	4.70	9.35	3.86	4.70	6.25	10.02
25		1.515	2.60	5.24	12.60	19.50	4.15	5.24	11.30	4.31	5.24	8.20	12.30
85		1.650	2.85	5.92	14.30	20.85	4.65	5.92	12.20	4.60	5.92	9.27	12.90
245		1.780	3.00	6.62	14.90	21.64	5.19	6.62	12.70	5.34	6.62	11.00	13.50
3 600		2.010	3.32	9.50	16.20	—	5.89	9.50	14.20	6.40	9.50	12.40	14.18
18 000		2.340	3.64	11.02	17.10	—	6.49	11.02	15.00	7.01	11.02	13.10	14.80
72 000		2.560	3.85	11.70	17.70	—	7.04	11.70	15.50	8.17	11.70	13.80	15.30

(第 2 表) 除重による回復縮み率 (%) (但し荷重時間 5 min)

除重 後時 の間 (sec)	状態 σ, h, τ	20°C, 60% R.H.					0.5 g/den, 20°C			0.5 g/den, 60% R.H.		
		引張応力 (g/den)					湿度 (% R.H.)			温 度 (°C)		
		0.125	0.25	0.50	0.75	1.0	38	60	85	10	20	50
約 0.1		0.519	0.571	1.299	2.30	3.56	0.815	1.299	2.45	0.934	1.299	1.31
0.5		0.594	0.654	1.50	2.76	4.15	0.971	1.50	2.79	1.035	1.50	1.52
1		0.641	0.703	1.64	3.00	4.47	1.055	1.64	2.98	1.115	1.64	1.66
2		0.690	0.763	1.75	3.22	4.74	1.12	1.75	3.20	1.215	1.75	1.80
5		0.751	0.850	1.90	3.45	5.16	1.215	1.90	3.46	1.37	1.90	2.04
10		0.79	0.931	2.01	3.70	5.47	1.32	2.01	3.85	1.52	2.01	2.20
20		0.83	1.01	2.13	4.02	5.77	1.395	2.13	4.01	1.665	2.13	2.36
30		0.853	1.069	2.21	4.16	5.85	1.48	2.21	4.14	1.76	2.21	2.51
60		0.886	1.28	2.33	4.37	6.02	1.57	2.33	4.32	1.86	2.33	2.77
120		0.936	1.185	2.41	4.61	6.27	1.72	2.41	4.66	2.03	2.41	2.93
180		0.958	1.248	2.42	4.74	6.38	1.775	2.42	4.76	2.09	2.42	2.96
240		0.975	1.27	2.53	4.80	6.47	1.81	2.53	4.83	2.15	2.53	3.09

(第2図) 各引張応力に対する匍匐曲線
(但し $\tau=20^{\circ}\text{C}$, R.H.=60%)

(第3図) 各温度における匍匐曲線
(但し $\sigma=0.5\text{ g/den}$, $\tau=20^{\circ}\text{C}$)

(第4図) 各温度における匍匐曲線
($\sigma=0.5\text{ g/den}$, R.H.=60%)

(第5図) 各応力に対する回復曲線
(20°C , 60% R.H.)

(第6図) 各湿度に対する回復曲線
(0.5 g/den , 20°C)

(第7図) 各温度に対する回復曲線
(0.5 g/den , 60% R.H.)

更にこれを線図で表わすと第2～7図となる。即ち第2図は 20°C , 60% R.H. で荷重量が 0.5, 1, 2, 3 及び 4 g (引張応力 0.125, 0.25, 0.25, 0.5, 0.7 及び 1 g/den) のときの匍匐曲線を示し、第5図は第2表から得た各引張応力に対する回復曲線である。同様に第3, 6図は引張応力 0.5 g/den, 20°C で 38, 60 及び 85% R.H. における匍匐曲線と回復曲線を示し、第4, 7図は 0.5 g/den, 60% R.H. で 10, 20, 30 及び 50°C に対する匍匐曲線と回復曲線を表わしている。

4. 匍匐並びに回復現象の一般的特性

(第8図) 匍匐曲線と回復曲線

以上の実験の結果を総合考察すると、第8図のような一般特性曲線が得られる。即ち荷重によるある経過時間までの伸び ε は荷重瞬間の伸び ε_b と、ある限界の伸び以上において Voigt's model に相似的に伸びる緩和（こり）伸び ε_r と、荷重時間 t の対数 $\log t$ に比例して伸びる（対数）匍匐伸び ε_c とから成る。

また除重による回復縮み ε' は、除重瞬間に回復する瞬間（回復）縮み ε'_0 と、緩和伸びに相似的に回復する緩和（回復）縮み ε'_r と、匍匐伸びに相似的に回復する匍匐縮み ε'_c とから成る。即ち

$$\varepsilon = \varepsilon_b + \varepsilon_r + \varepsilon_c \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon'_0 + \varepsilon'_r + \varepsilon'_c \quad \cdots \cdots (2)$$

5. 荷重瞬間の伸び ε_b について

荷重瞬間（約 $\frac{1}{10}$ sec）における伸び率は第1表の最上段の数字で示され、これを線図で表わすと第9～11図になる。

（第9図）瞬間伸びまたは縮みと引張応力との関係（20°C，60% R.H.）

（第10図）瞬間伸び及び縮みと湿度との関係線図（0.5 g/den，20°C）

（第11図）瞬間伸び及び縮みと温度との関係線図（0.5 g/den，60% R.H.）

即ち第9図の OEA 曲線は 20°C，60% R.H. における各引張応力に対する瞬間伸び率 ε_b を線図としたもので、OE までは ε_b は引張応力に正比例して増加するが、E 点以上の応力ではその増加の割合が著しく大となる。OE 間の伸び ε_b がフックの法則に従う伸びとして弾性係数を求めると 179 kg/mm² となる。

第10図は引張応力 0.5 g/den，20°C において、各湿度に対する瞬間伸び ε_b を表わし、曲線のように ε_b は湿度の増加に伴い二次曲線的に増大する。

第11図は 0.5 g/den，60% R.H. において、温度と瞬間伸び ε_b との関係を表わし、 ε_b は σ 及び b が一定の場合温度の上昇とともに増大する。

6. 緩和伸び率 ε_r について

第12図のような Voigt's model において荷重 P を加えて t 時間後の伸び ε_r は次式で表わされる。

$$\varepsilon_r = \frac{P}{G} \cdot (1 - e^{-Gt/\eta}) \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで $P/A = \sigma$ (kg/mm² or g/den)， $G/A = E_r$ (kg/mm² or g/den)， $\eta/G = \lambda$ (sec) とすると

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma}{E_r} \cdot (1 - e^{-t/\lambda}) \quad \cdots \cdots (4)$$

但し P = 引張力， G = スプリング常数， η = 粘性係数， A = 断面積， λ = 緩和時間， E_r = 緩和弾性係数， ε_r = 緩和総伸び率
また $\sigma/E_r = \varepsilon_K$ とすると

（第12図）Voigt's Model

$\epsilon_r = \epsilon_R \cdot (1 - e^{-t/\lambda}) \dots\dots\dots (5)$

(第 13 図)

Voigts Model における ϵ と t と λ との関係線図

(4) 或は (5) 式の ϵ_r または ϵ_R と t 及び λ との関係を線図で表わすと第 13 図になる。図から緩和伸び(緩和伸びが完了したときまでの緩和伸び) ϵ_R の λ だけ伸びるに要する時間を $t \lambda$ sec とすると、緩和時間 λ は次式で表わされる。

$\lambda = \frac{\log e}{\log 2} = 1.44 t_\lambda \dots\dots\dots (6)$

第 13 図の曲線は第 2~4 及び 8 図の荷重初期の曲線のな伸びに相似しているの、これが Voigt's model に従う緩和伸びと考え、 ϵ_R 及び λ を (6) 式を用いて求めると第 3 表になり、これを線図で表わすと第 14, 15, 16 図になる。

(第 15 図) ϵ_R-h (温度) 線図 (0.5 g/den, 20°C)

(第 16 図) $\epsilon_R-\tau$ (温度) 関係線図 (0.5 g/den, 60 % R.H.)

(第 3 表) 緩和伸び率 ϵ_R と緩和時間

状態 σ, h, τ	20°C, 60 % R.H.				0.5 g/den, 20°C			0.5 g/den, 60 % R.H.			
	σ (g/den)				h (%)			τ (°C)			
	0.25	0.5	0.75	1.0	38	60	85	10	20	30	50
ϵ_R %	—	2.8	4.8	5.2	—	2.8	4.2	—	2.8	3.4	4.2
λ sec	—	1 050	8	3	—	1 050	6.3	—	1 050	2.5	8.4
ϵ'_R %	—	—	1.2	1.5	—	—	1.2	—	—	—	0.65
λ' sec	—	—	2.2	1	—	—	4.5	—	—	—	3
α sec	—	3	0.65	—	—	3	1.0	—	3	—	0.5

(第 14 図) $\epsilon_R-\sigma$ (応力) 線図 (20°C, 60 % R.H.)

(第 17 図) ビニロン単糸 (4 den) 荷重伸び曲線 (17°C, 75 % R.H.)

なおビニロンの単繊維を筆者考案の等歪速度強伸度試験機で破壊までの荷重時間 3 min で測定した荷重伸び曲線は第 17 図である。

即ち第 14 図は緩和総伸び率 ϵ_R と引張応力 σ , 第 15 図は ϵ_R と湿度 h , 第 16 図は ϵ_R と温度 τ とのそれぞれの関係を表わす。以上の図から、一定状態における緩和伸び ϵ_r は σ が小さい範囲では殆んど表われないが、ある限界以上になると著しく表われ、また σ が相当大きくなるとその割合には大きくなる。

同様に σ が 0.5 g/den で湿度または温度が変わる場合低い湿度、温度では ϵ_r は生じないが、高くなると ϵ_r が生じ且つその大きさは温度・湿度が高くなる程大となる。

第 13 図で明らかなように緩和時間 λ (sec) は緩和伸びが生じる時期の遅速並びに緩和伸びが生じつつある時間の長短を意味する。 λ と引張応力、湿度及び温度との関係は第 18 図になる。

一般に ϵ_R が大きい程 λ は小さい。即ち同一状態では σ が大きい程 ϵ_R は大きく λ は小さく同一荷重では湿度、温度が低い程 λ は小さい。

(第 18 図)

緩和時間 (λ) と応力、温度及び湿度との関係

緩和伸びと第 17 図の「荷重伸び曲線」とを比較考察すると、第 17 図の 0 ABC 曲線の中 AB なる部分は荷重を特に増さなくとも伸びが進行し、この AB 部分の伸び率は約 5% で、荷重始めからの伸び率が 6%、荷重が 2.3 g 辺りで生じている点は、上記各緩和総伸び ϵ_R の

最大値が 5.2% であり、緩和伸び開始の時の伸び率が約 5%、荷重が約 2 g などから緩和伸びは AB 部のいわゆる迂り伸びに関連があるものと推定される。なおこの点の詳しい説明は他の機会に述べる予定である。

即ち緩和伸びは一定荷重、一定状態においては、荷重後の伸びが一定量以上に達したときに Voigt's model に相似的に始まり、一定の伸びに達して完了し、その伸びの総量 ϵ_R は一定範囲までは σ , h 及び τ の値が大きい程大きくなる。緩和時間 λ は σ , h 及び τ が大きい程少くなる。

7. 匍匐伸び率 ϵ_c について

第 2, 3, 4 図から明らかなようにいずれの匍匐曲線も荷重時間 t の対数目盛即ち $\log t$ に比例して伸びる第 8 図で示した ϵ_c なる伸びがある。この伸びを狭義の匍匐伸びと称し次式で表わされる。

$$\epsilon_c = a \log t \quad \dots\dots\dots (7)$$

但し a は常数。

(7) 式を t で微分すると

$$\frac{d\epsilon_c}{dt} = \frac{a_1}{t} \quad \dots\dots\dots (8)$$

即ち (8) 式から「匍匐伸びの速度は荷重時間に逆比例する」ということが出来る。

但し t が 2 sec 程度以下になると ϵ_c の値は (7) 式の値から外れる。これは惰性による匍匐伸び開始の遅れと考えられるから、この匍匐遅れ時間を α sec とすると (7) 式は次のようになる。

$$\epsilon_c = a \cdot \log(t + \alpha) \quad \dots\dots\dots (9)$$

本実験の範囲では α は第 3 表のように 0.5~3 sec 程度で荷重量が大きくなる程小さな値となる。荷重時間が 10 sec 以上になると殆んど無視し得る値であるから実際には (7) 式で十分である。

8. 匍匐常数 b 及び匍匐弾性係数 E_c について

第 2 図の匍匐曲線の中、直線部の傾斜の度合即ち (7), (9) 式における比例常数 a を 1 桁単位荷重時間 (1~10, 10~100 sec 又は 1~10 hr 等) 当りの伸び率 (%) で求めると、各引張応力に対し第 4 表になる。またこの関係を線図にすると第 19 図になる。

(第 4 表) σ — a 関係表 (但 20°C, 60%)

σ (g/den)	0.125	0.25	0.5	0.75	1.00
a	0.24	0.375	0.95	1.18	1.60

a : 1 桁単位荷重時間当りの伸び率 (%)

第 19 図で明らかなように常数 a は σ が相当大きくなる点 A までは応力 σ に比例する。即ちこの範囲では次

1 桁単位時間当りの伸び率と応力関係線図
(20°C, 60%)

の関係が成立つ。

$$a = b \cdot \sigma \dots\dots\dots(10)$$

従って (9) 式に代入して

$$\varepsilon_e = b \cdot \sigma \cdot \log(t + \alpha) \dots\dots\dots(11)$$

ここで b は常数であり、匍匐伸びに関係があるから匍匐常数と称すると、単位引張応力 (1 g/den または 1 kg/mm²)、1 桁単位荷重時間 {(log t_2 - log t_1) = 1, (即ち 1~10, 10~100 sec 等)} 当りの伸び率 (%) で表わすことが出来る。

なお弾性係数と相似の考えで $\frac{(\text{応力} \times \text{対数荷重時間})}{\sigma}$ が一定、即ち

$$\frac{\sigma \log t}{\varepsilon_e} = E_e \dots\dots\dots(12)$$

上式の常数 E_e を匍匐弾性係数と称すると次の関係がある。

$$b = 1/E_e \dots\dots\dots(13)$$

$$\sigma : \text{kg/mm}^2 \text{ とすると } E_e : (\text{kg/mm}^2) \cdot \log t$$

9. 匍匐常数に対する湿度の影響

第 3 図から引張応力 0.5 g/den, 20°C における各湿度に対する匍匐常数 b_h を求めると第 5 表になり、この関係を線図にすると第 20 図になる。

(第 5 表) $h-b_h$ 関係表 (但し 20°C)

h (%R.H.)	35	60	85
$b_h \left(\frac{\%}{\text{g/den} \log t} \right)$	1.375	1.80	2.4

これを数式で表わすと

$$b_h = 0.55 + 0.0215 h \dots\dots\dots(14)$$

但し h : 関係湿度 %

即ち匍匐常数 b_h は湿度の上昇とともに大きくなる。

匍匐常数と湿度との関係線図 (0.5 g/den, 20°C)

10. 匍匐常数に対する温度の影響

第 4 図から引張応力 6.5 g/den, 60% R.H. における各温度に対する匍匐常数 b_τ を求めると第 6 表になり、これを線図で表わすと第 21 図になる。

(第 6 表) $\tau-b_\tau$ 関係表 (但し 60% R.H.)

τ (°C)	10	20	30	50
$b_\tau \left(\frac{\%}{\text{g/den} \log t} \right)$	1.8	1.8	2.0	1.65

匍匐常数と温度との関係線図 (0.5 g/den, 60% R.H.)

即ち一定荷重、一定湿度では匍匐常数に対する温度の著しい影響はない。

従って匍匐伸び ε_e は荷重時間の対数に比例し、換言すると匍匐伸び速度は荷重時間に逆比例し、且つ ε_e は荷重量のある限度までは荷重量 (或は引張応力) に比例する。この比例常数は一定荷重、湿度の下では温度の影響は少いが、一定荷重、温度では湿度の増加に伴い大きくなる。その数値は 10°~50°C, 35~85% R.H. の範囲では 1 桁荷重時間, 1 g/den 応力当り 1.37~2.4% である。従って E_e は 980~555 kg/mm² · log t である。

従って荷重開始後 t までの伸び ε はそれぞれ σ の適用範囲において次式で表わされる。

$$\varepsilon = \varepsilon_h + \varepsilon_R(1 - e^{-t/\lambda}) + b \cdot \sigma \cdot \log(t + \alpha) \dots\dots\dots(15)$$

または

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_r}(1 - e^{-t/\lambda}) + \frac{\sigma}{E_e} \cdot \log(t + \alpha) \dots\dots\dots(16)$$

11. 回復現象について

5 min 荷重後、除重したときの回復縮み率は第2表及び第5, 6, 7図に示したようで、その一般的な特性曲線は第8図で表わされる。即ち回復縮み率 ε' は次のようになる。

$$\varepsilon' = \varepsilon'_0 + \varepsilon'_r + \varepsilon'_c \quad \dots\dots\dots (17)$$

但し ε' = 除重後ある時間までの総縮み率

ε'_0 = 除重瞬間の縮み率

ε'_r = 緩和伸びに相似的に回復する緩和縮み率

ε'_c = 匍匐伸びに相似的に回復する匍匐縮み率

ε'_0 は瞬間弾性による回復でフックの法則に厳密に従う弾性と考えると次式で表わされる。

$$\varepsilon'_0 = \frac{\sigma}{E'_0} \quad \dots\dots\dots (18)$$

σ = 引張応力 kg/mm²

E'_0 = 除重時の弾性係数 kg/mm²

一定状態でも弾性係数 E'_0 は荷重時間に影響される。³⁾
20°C, 60% R.H. で荷重後 5 sec 及び 20 hr の弾性係数は第9図に示したようにそれぞれ320及び 670 kg/mm² となる。このことに関する詳細は拙著⁴⁾で述べた。

緩和縮み率 ε'_r は第5, 6, 7, 8図から明らかなように緩和伸びを生じたものは、除重によりそれと相似的に Voigt's model に従って縮むものに該当し次のように表わされる。

$$\varepsilon'_r = \frac{\varepsilon_R}{m} \cdot (1 - e^{-t/\lambda'}) \quad \dots\dots\dots (19)$$

但し $m = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon'_R}$ 緩和伸び回復比

ε'_R = 緩和総縮み率

λ' = 除重による回復のときの緩和時間

また ε'_r は次式でも表わされる。

$$\varepsilon'_r = \frac{\sigma}{E'_r} \cdot (1 - e^{-t/\lambda'}) \quad \dots\dots\dots (20)$$

但し E'_r : 除重時の緩和弾性係数

$$\text{また } \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon'_R} = \frac{\sigma/E_r}{\sigma/E'_r} = \frac{E'_r}{E_r} = m \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\text{また } \frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{\eta/G}{\eta/G'} = \frac{\eta/E_r A}{\eta/E'_r A} = \frac{E'_r}{E_r} = m \quad \dots\dots\dots (22)$$

もし厳密に Voigt's model に従い、粘性係数 η が荷重時間により変化しないとすると (21), (22) 式が成立する。このことは緩和伸び回復比 m は除重のときの緩和弾性係数と荷重のときの緩和弾性係数との比に等しくなる。本実験では $\varepsilon_R/\varepsilon'_R$ なる m の値は荷重 5 min で 3.5~3.8, 荷重 1 hr 及び 20 hr ではそれぞれ6及び9

程度の値を示した。 λ/λ' なる m の値は第3表及び第14, 15, 16図で示すように荷重 5 min で 1.4~3.6の値を示した。従って両方の m の値がほぼ等しいと考えられるから ε'_r は次式でも表わされる。

$$\varepsilon'_r = \frac{\sigma}{m E_r} (1 - e^{-mt/\lambda}) \quad \dots\dots\dots (23)$$

同様に対数時間に正比例して回復する匍匐回復縮み ε_c は次式で表わされる。

$$\varepsilon'_c = \frac{b \cdot \sigma}{n} \log(t + \alpha') \quad \dots\dots\dots (24)$$

但し $n = \frac{b}{b'} = \frac{E'_c}{E_c}$ 匍匐伸び回復比

b' : 回復匍匐常数, E'_c : 除重のときの匍匐弾性係数

α' は匍匐回復遅れ時間で α より小さな値である。匍匐伸び回復比 n は第2~7図及び第21, 22図から測定すると荷重時間 5 min で 2.4~2.5, 20 hr で 4.5程度となる。即ち m 及び n とも荷重時間が長くなるとその値は大きくなる。

従って除重による回復縮み率 ε' は次式で表わされる。

$$\varepsilon' = \frac{\sigma}{E'_0} + \frac{\varepsilon_R}{m} (1 - e^{-t/\lambda'}) + \frac{b \sigma}{n} \log(t + \alpha') \quad \dots\dots\dots (25)$$

または

$$\varepsilon' = \frac{\sigma}{E'_0} + \frac{\sigma}{m E_r} (1 - e^{-mt/\lambda}) + \frac{\sigma}{n E_c} \log(t + \alpha') \quad \dots\dots\dots (26)$$

12. 回復現象と荷重時間との関係

20°C, 60% R.H. で 0.5 g/den の引張応力で荷重した場合の匍匐曲線及び荷重後 5 sec, 3 min, 1 hr 及び 20 hr において除重した場合の回復縮み曲線を表わすと第22図のそれぞれ ε , ε'_1 , ε'_2 , ε'_3 及び ε'_4 曲線となる。

(第22図) 匍匐曲線と各荷重時間後の回復曲線
(但し 20°C, 60% R.H., 0.5 g/den)

同図から明らかなように荷重時間の長いもの程除重瞬間の瞬間縮み率 ϵ'_0 は少くなる。

荷重曲線において緩和伸びの緩和時間は約 100 sec と推定出来る。荷重後 5 sec では未だ緩和伸びが生じていないから、荷重 5 sec における除重による回復曲線は $\log t$ に比例した直線のみとなり緩和縮みは含んでいない。3 min 以上の荷重になると緩和伸びが生ずるからその回復曲線も緩和縮みと匍匐縮みとの合成された曲線になる。しかしその回復の割合 $1/m$ 及び $1/n$ の値は荷重時間の経過とともに小さくなる。

13. 結 論

(1) 一定状態で一定荷重を掛けた場合 t 時間後までの総伸び ϵ は(1)瞬間伸び ϵ_b と、(2)(Voigt's model)に相似的に伸びる緩和伸び ϵ_r と、(3)伸び速度が荷重時間に逆比例する。即ち対数時間 $\log t$ に比例して伸びる匍匐伸び ϵ_c の三つから成る。

(2) 瞬間伸び ϵ_b は一定荷重までは荷重量に比例するが、その限界以上では荷重量に比して著しく増大する。一定荷重量でも温度及び湿度の上昇に伴い ϵ_b は大きくなり、比例限界荷重點は低くなる。

(3) 緩和伸び ϵ_r は「荷重伸び曲線」の変曲点に相当する状態近くになったときに生じ始め、ある限界までは荷重量に比例し、同じ荷重量に対しては温度及び湿度が高くなる程早期に起り且つその量も大きくなる。緩和時間は荷重量が大きい程また温度、湿度が高い程小さな値となる。

(4) 匍匐伸びはある限界荷重までは荷重量と荷重時間の対数に比例する。この比例常数即ち匍匐常数(1桁

単位荷重時間, 1 g/den 応力当りの伸び率 %)は本実験の範囲では 1.3~2.4 程度で、一定温度では湿度が高い程大きくなり、一定湿度では温度の影響は少い。

(5) 回復現象は匍匐現象と相似的に起る。即ち除重後一定時間までの回復縮み ϵ' は、除重瞬間の縮み ϵ'_0 と緩和伸びと相似的に回復する緩和縮み ϵ'_r と、匍匐伸びと相似的に回復する匍匐回復縮み ϵ'_c との三つから成る。

(6) 瞬間縮み ϵ'_0 はフックの法則に従う瞬間弾性による回復とすると、除重するときの弾性係数によって定まる。荷重時間が永くなる程弾性係数は大きな値となるから従って ϵ'_0 は荷重時間の経過に伴い小さくなる。

(7) 緩和総伸び率 ϵ_R と緩和総縮み率 ϵ'_R との比即ち緩和伸び回復比 m 、並びに匍匐常数と匍匐回復常数との比即ち匍匐回復比 n は、いずれも荷重時間が長くなる程大きくなり、荷重時間 5 min ではそれぞれ 3.4~3.7 及び 2.4~2.5 で、荷重時間 20 hr でそれぞれ 9 及び 5 程度である。

本研究は昭和28年度文部省科学研究助成補助を受けたもので、研究に当たりたびたび御教示賜った厚木勝基博士、試料を提供下された倉敷レーヨン株式会社、図面作成などに御援助下さった大柳康君並びに種々便宜を与えられた工学院大学関係の方々に厚く感謝の意を表する。

注

- 1) 山口, 大柳: 繊維機械誌(第1報) 6, 6(昭28-6)
山口, 五十嵐: 繊維機械学会で講演発表(第2, 3報) (昭28-10)
- 2) 同 上
- 3), 4) 山口章三郎: 工学院大学研究報告, 1号 (昭29-4)