

# 網 糸 の 研 究 (IV)

糸の機械的性質に就いて(2)\*

増 崎 謙 二 ・ 深 沢 文 雄

Study on the Netting-Cords—IV  
On the Mechanical Properties of Strand—2

By

Kenji MASUZAKI and Fumio FUKAZAWA

Deducing from the previous results, we obtained the following formulation regarding to the outside diameter of strand,

$$D = 2r_2 + d_0 (n'' - 1) (1 - P'_2/P_S m\epsilon_S) \text{ for } 19 \geq n > 7,$$

$$D = 2r_3 + d_0 (n'' - 2) (1 - P'_3/P_S m\epsilon_S) \text{ for } 37 \geq n > 19,$$

where  $r$  = spiral radius of each fiber,

$P'$  = tension induced in each fiber,

$P_S$  = tension induced in the central fiber,

$n''$  = number of layers,

$m$  = Poisson's ratio of fiber,

and also obtained the following formulation for the total force of each fiber constructing the strand.

$$P = P_S + P_X \sin \alpha + P_Y \sin \beta, \quad \text{for } 19 \geq n > 7,$$

$$P = P_S + P_X \sin \alpha + P_Y \sin \beta + P_Z \sin \gamma, \text{ for } 37 \geq n > 19,$$

where  $P_X$  = total tension induced in  $n'_1$ — the fibers next to the center— ( $n'=1$ )

$P_Y$  = total tension induced in  $n'_2$ —the fibers next to  $n'_1$ — ( $n'=2$ )

$P_Z$  = total tension induced in  $n'_3$ —the fibers next to  $n'_2$ — ( $n'=3$ )

and,  $\alpha, \beta, \gamma$  denote the inclination of each fiber, number suffix of each letter shows the position of layers.

The right sides of these formulae are shown by the function of  $t$  and  $\epsilon_S$ . Therefore, substituting them with observed values, it was admitted that both the variations of real dead weight and diametral contraction calculated from observed quantities proved themselves nearly equalled to these observed directly, moreover, we could quantitatively estimate the influence of spaces between each fibers, comparing the calculated value with observed one (see Figs. 2, 5, 6, 7, Tables 1, 2).

## 緒 言

\* 水産講習所研究業績 第 52 号

本稿に於いては塩化ビニリデン（サラン）のストランド750d×9 ( $n=9$ ), 750d×12 ( $n=12$ ), 750d×15 ( $n=15$ ), 750d×18 ( $n=18$ ), 750d×21 ( $n=21$ ), 750d×24 ( $n=24$ ), の6種類に就いて第2報<sup>8)</sup>に於いて導き出した外径 $D$ の式に実験値を代入した結果, 第2報<sup>8)</sup>の推論が妥当である事を論じ, 更に荷重を加えた場合ストランドを構成する各繊維の描く螺旋線の半径の縮小に依る各繊維の傾斜角の変化を各列の繊維に就いて計算し, 此の傾きの影響と各繊維の伸びより, 各列の繊維の受持つ力を推定して之を加え合せて得たストランドの推定張力 $P$ と実際の荷重とを比較検討して見た。尚此の場合繊維と繊維の間に遊びがないと云う仮定の下に出発した前報の推論より導かれた $D$ 或は $P$ と測定値の喰い違いから, 繊維間の遊びが外力に依つてどのように変化するかも併せて考察して見た。

## 実験並に考察

### 1. 放置荷重に依るストランドの外径の縮小

トワインをほぐして取出した各 $n$ のストランドに繊維一本当りの初荷重が50g（繊維のヤング率を決める実験の際に繊維にかけた初荷重）になるように初荷重をかけてストランドの軸が大体直線状になるように保ち, 之に放置荷重 $W$ を加え約30cmの間隔に印した二点間の伸びをカセットメーター（精度 $1/50$  mm）に依つて各時間毎に測定して各荷重各時刻に於ける単位長さ当りの伸び $\epsilon_s$ を求め（第1図）,

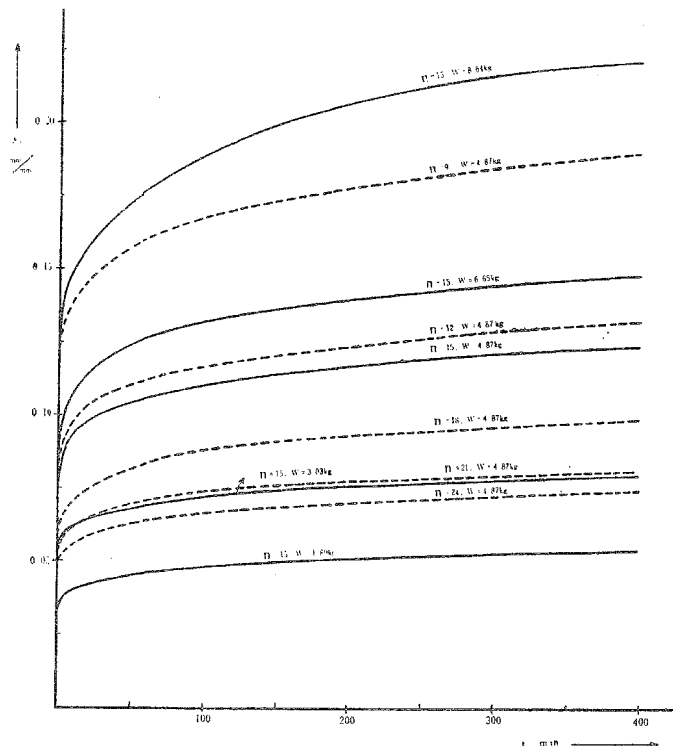


Fig. 1. Relation between  $\epsilon_s$  and  $t$  for each strand being observed by experiment.

此の $\epsilon_s$ を第2報で導いたストランドの外径の式

$$n = 9 \text{ の場合, } D = 0.834 - 0.158 \epsilon_s - 0.081 K \epsilon_s^{3/2} E^{2/3}$$

$$\begin{aligned}
 n = 12 \text{ の場合, } D &= 0.959 - 0.173 \epsilon_S - 0.093 K \epsilon_S^{2/3} E^{2/3} \\
 n = 15 \text{ の場合, } D &= 1.084 - 0.204 \epsilon_S - 0.102 K \epsilon_S^{2/3} E^{2/3} \\
 n = 18 \text{ の場合, } D &= 1.209 - 0.228 \epsilon_S - 0.112 K \epsilon_S^{2/3} E^{2/3} \\
 n = 21 \text{ の場合, } D &= 1.306 - 0.243 \epsilon_S - 0.137 K \epsilon_S^{2/3} E^{2/3} \\
 n = 24 \text{ の場合, } D &= 1.389 - 0.261 \epsilon_S - 0.140 K \epsilon_S^{2/3} E^{2/3}
 \end{aligned}$$

但し、 $K$  は繊維の接触に依る繊維相互の近寄りの係数で繊維の直径が一定なる場合はヤング率に依つて変る常数である。第1項は繊維の直径より計算した無負荷の時の外径 $D$ 、第2項は繊維のポアソン比による依る外径の縮少、第3項は繊維相互の圧縮による外径の縮少を表わす。

の各々に代入して単位直径当りの外径の縮少率 $\epsilon_D = D_0 - D/D_0$ を計算した結果第2図に示す

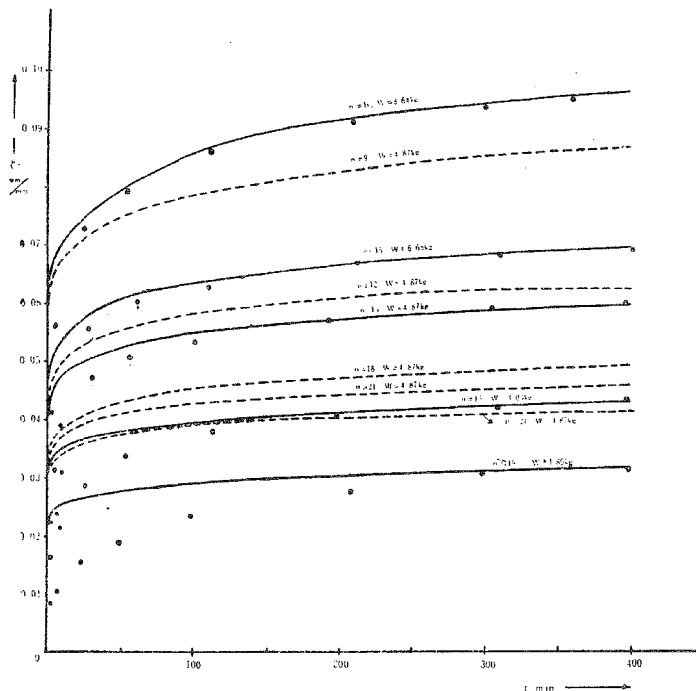


Fig. 2. Calculated values of  $\epsilon_D$  at each time under the various dead weights. (• observed value.)

ような結果を得た。図が煩雑になるので実測値としては $n=15$ の各荷重のもののみを入れているが他の $n$ のものに就いても同様な傾向が見られる。此所で $t$ が小さい間、とくに単位本数当りの荷重が小さいものに就いては計算値が実測値より大きく出ている傾向にあるが、之は次の項で述べる繊維相互の間に遊びがある為の影響と思われる。

## 2. ストランドの伸びより推定する外力 $P$ の計算

ストランドを引張つた場合之を構成する各繊維の伸びより各時間毎に繊維に生ずる張力を実験的に時間の函数として求めたヤング率から推定し、之等の張力のストランドの軸方向の分力を加え合せたものがストランドの推定張力 $P$ になると云う考えの下に第2報に於ける張力の式

$$11 \geq n > 7 \text{ の場合, } P = P_S + P_X \sin \alpha + P_Y \sin \beta,$$

$$37 \geq n > 19 \text{ の場合, } P = P_S + P_X \sin \alpha + P_Y \sin \beta + P_Z \sin \gamma$$

を導き出した。此の中で $\alpha, \beta, \gamma$ は螺線の半径 $r$ の縮少に依つても又ストランドの伸び $\epsilon_S$ の

変化に依つても変化するものである。先づ  $r$  の荷重に依る時間的变化を求める為第2報に於いて導いた  $r$  の式

$$\begin{aligned}
 n = 9 \text{ の場合, } r_2 &= 0.396 - 0.075 \varepsilon_S - 0.041 K \varepsilon_S \frac{2}{3} E \frac{2}{3} \\
 r_1 &= 0.250 - 0.049 \varepsilon_S - 0.025 K \varepsilon_S \frac{2}{3} E \frac{2}{3} \\
 n = 12 \text{ の場合, } r_2 &= 0.427 - 0.081 \varepsilon_S - 0.047 K \varepsilon_S \frac{2}{3} E \frac{2}{3} \\
 r_1 &= 0.250 - 0.049 \varepsilon_S - 0.030 K \varepsilon_S \frac{2}{3} E \frac{2}{3} \\
 n = 15 \text{ の場合, } r_2 &= 0.458 - 0.087 \varepsilon_S - 0.051 K \varepsilon_S \frac{2}{3} E \frac{2}{3} \\
 r_1 &= 0.250 - 0.049 \varepsilon_S - 0.033 K \varepsilon_S \frac{2}{3} E \frac{2}{3} \\
 n = 18 \text{ の場合, } r_2 &= 0.490 - 0.093 \varepsilon_S - 0.056 K \varepsilon_S \frac{2}{3} E \frac{2}{3} \\
 r_1 &= 0.250 - 0.049 \varepsilon_S - 0.035 K \varepsilon_S \frac{2}{3} E \frac{2}{3} \\
 n = 21 \text{ の場合, } r_3 &= 0.639 - 0.119 \varepsilon_S - 0.069 K \varepsilon_S \frac{2}{3} E \frac{2}{3} \\
 r_2 &= 0.500 - 0.096 \varepsilon_S - 0.058 K \varepsilon_S \frac{2}{3} E \frac{2}{3} \\
 r_1 &= 0.250 - 0.049 \varepsilon_S - 0.036 K \varepsilon_S \frac{2}{3} E \frac{2}{3} \\
 n = 24 \text{ の場合, } r_3 &= 0.660 - 0.124 \varepsilon_S - 0.070 K \varepsilon_S \frac{2}{3} E \frac{2}{3} \\
 r_2 &= 0.500 - 0.096 \varepsilon_S - 0.058 K \varepsilon_S \frac{2}{3} E \frac{2}{3} \\
 r_1 &= 0.250 - 0.049 \varepsilon_S - 0.035 K \varepsilon_S \frac{2}{3} E \frac{2}{3}
 \end{aligned}$$

但し、 $D$ の式の場合と同様に第1項は無負荷の時の螺旋線の半径、第2項はポアソン比の影響、第3項は繊維相互の圧縮に依る影響を表わす。

に代入した結果、各種類のストランドの中の  $r$  の時間的变化として第3図に示すような結果を

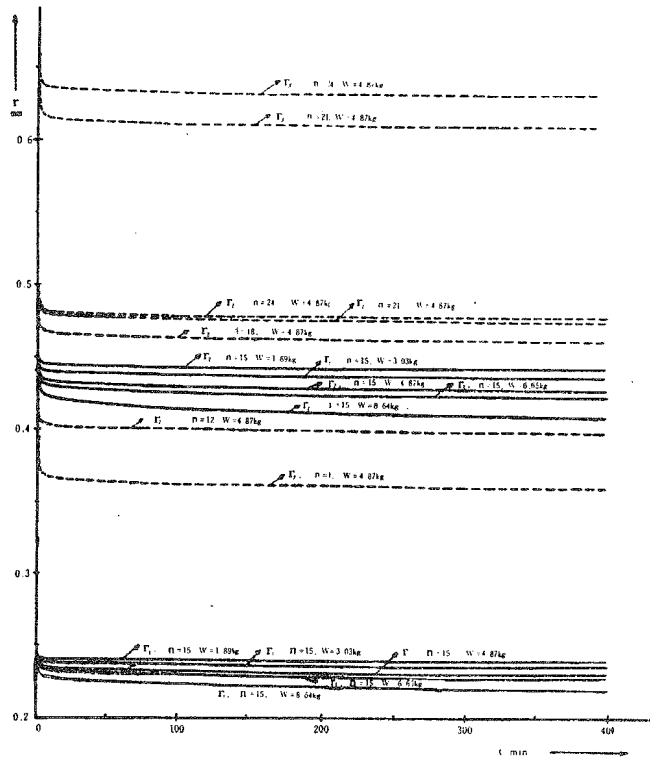


Fig. 3. Variation of spiral radius for each fiber situating at each layer.

得た。但し、図が煩雑になるので、 $r_1$  は  $n=15$  のもののみを書き込んでいる。此の  $r$  の各時間、

各荷重に於ける数値と、同様な条件に於ける  $\epsilon_s$  より此の条件に於いて各繊維がストランドの軸に垂直な平面となす傾斜角を求めると、

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{a(1+\epsilon_s)}{2\pi r_1}, \quad \beta = \tan^{-1} \frac{a(1+\epsilon_s)}{2\pi r_2}, \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{a(1+\epsilon_s)}{2\pi r_3}$$

但し、 $a$ は螺線のピッチ

となり各繊維の各状態でストランド中でなす傾斜角は  $r$  と  $\epsilon_s$  より計算出来る。此の結果を第4図に示す。

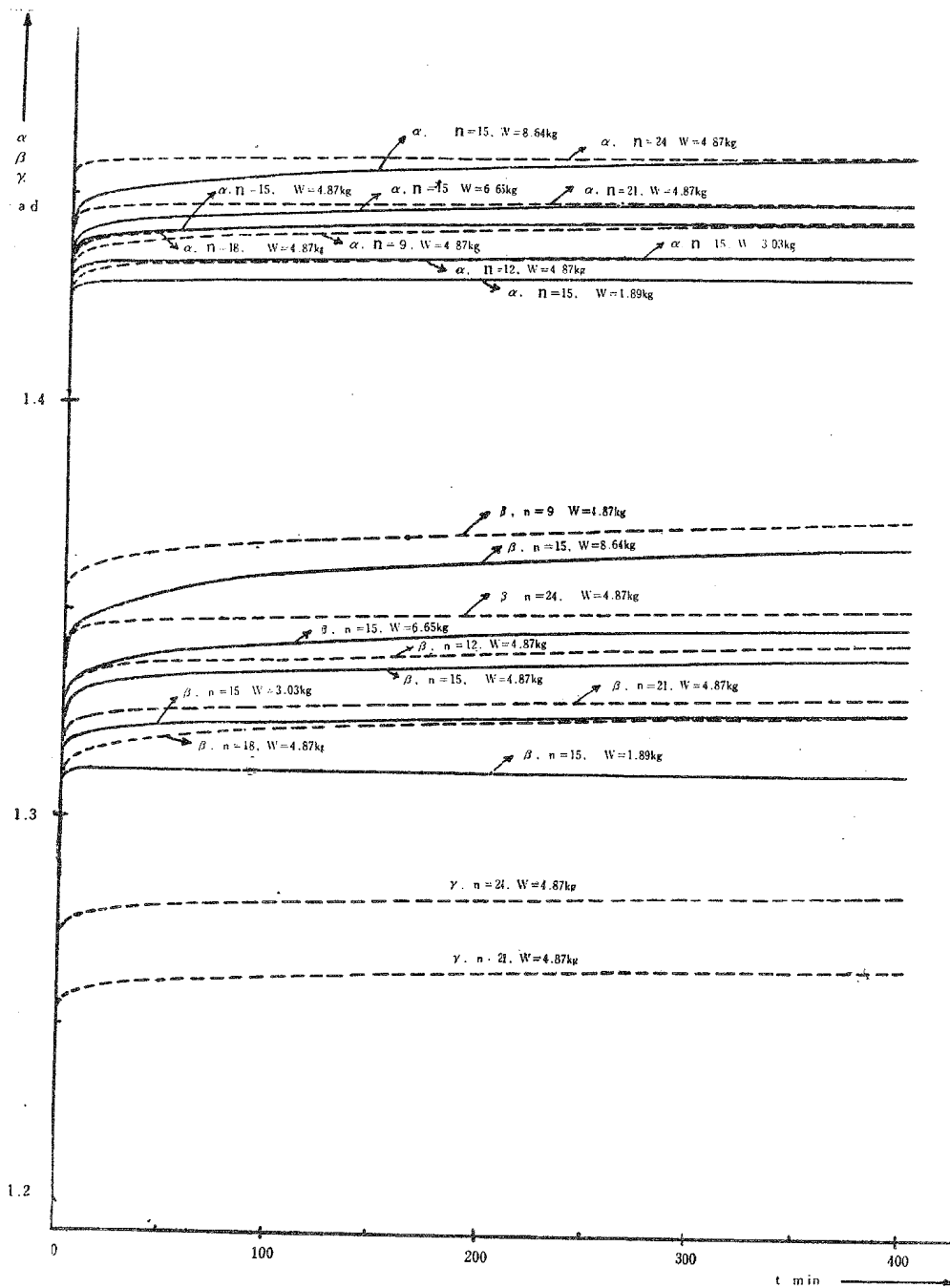


Fig. 4. Variation of  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , for each fiber situating at each layer.

更に  $A$  を繊維の断面積とすると

$$P_S = AE\varepsilon_S, \quad P_X = AE\varepsilon_S \frac{6 \sin^2 \alpha}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \alpha},$$

$$19 \geq n > 7 \text{ の場合, } P_Y = AE\varepsilon_S \frac{(n-7) \sin^2 \beta}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \beta},$$

$$37 \geq n > 19 \text{ の場合, } P_Y = AE\varepsilon_S \frac{12 \sin^2 \beta}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \beta},$$

$$P_Z = AE\varepsilon_S \frac{(n-19) \sin^2 \gamma}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \gamma},$$

となり、之等を張力  $P$  の式に代入すると、各  $n$  に対する  $P$  の式として次の各式を得る。

$$n = 9 \text{ の場合 } P = AE\varepsilon_S \left( 1 + \frac{6 \sin^3 \alpha}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \alpha} + \frac{2 \sin^3 \beta}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \beta} \right)$$

$$n = 12 \text{ の場合 } P = AE\varepsilon_S \left( 1 + \frac{6 \sin^3 \alpha}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \alpha} + \frac{5 \sin^3 \beta}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \beta} \right)$$

$$n = 15 \text{ の場合 } P = AE\varepsilon_S \left( 1 + \frac{6 \sin^3 \alpha}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \alpha} + \frac{8 \sin^3 \beta}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \beta} \right)$$

$$n = 18 \text{ の場合 } P = AE\varepsilon_S \left( 1 + \frac{6 \sin^3 \alpha}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \alpha} + \frac{11 \sin^3 \beta}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \beta} \right)$$

$$n = 21 \text{ の場合 } P = AE\varepsilon_S \left( 1 + \frac{6 \sin^3 \alpha}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \alpha} + \frac{12 \sin^3 \beta}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \beta} + \frac{2 \sin^3 \gamma}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \gamma} \right)$$

$$n = 24 \text{ の場合 } P = AE\varepsilon_S \left( 1 + \frac{6 \sin^3 \alpha}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \alpha} + \frac{12 \sin^3 \beta}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \beta} + \frac{5 \sin^3 \gamma}{1 + \varepsilon_S \cos^2 \gamma} \right)$$

之等の式に於いて  $\alpha, \beta, \gamma$  は  $\varepsilon_S$  の函数であり  $r$  は  $\varepsilon_S, t$  の函数であるからストランドの張力  $P$  は  $\varepsilon_S$  及び  $t$  の函数で表わされ、此の右辺に各荷重、各種類に就いての実測値  $\varepsilon_S$  及び  $t$  を代入すれば、第 2 報で述べたような理論的考察による張力の推定値  $P$  が計算される。各種類に就いての計算結果を第 1 表、各荷重についての計算結果を第 2 表に示す。

Table 1. Calculated values,  $P$  in kg of each species at each time, under the constant dead weight.

$t$ (min)	$n=9$ $W=4.87$ (kg)	$t$ (min)	$n=12$ $W=4.87$ (kg)	$t$ (min)	$n=15$ $W=4.87$ (kg)	$t$ (min)	$n=18$ $W=4.87$ (kg)	$t$ (min)	$n=21$ $W=4.87$ (kg)	$t$ (min)	$n=24$ $W=4.87$ (kg)
1.0	6.08			3.0	6.68	1.0	5.98	3.0	6.06	2.0	6.39
5.0	6.08	3.5	5.49	7.0	6.60	5.0	5.87	6.0	6.02	7.0	6.22
10.0	6.01	10.0	5.47	17.0	6.60	12.0	5.86	13.0	5.94	10.0	6.24
25.0	5.97	20.0	5.54	31.0	6.40	26.0	5.92	26.0	5.95	27.0	6.27
50.0	6.00	57.0	5.14	76.0	6.42	86.0	6.12	66.0	5.81	52.5	6.15
100.0	5.97	102.0	5.16	100.0	6.39	123.0	6.04	106.0	5.88	104.0	6.20
200.0	5.98	222.0	4.99	200.0	6.36	200.0	5.86	218.0	5.72	186.0	6.09
300.0	5.97	316.0	5.46	306.0	6.40	302.0	5.89	302.0	5.71	308.0	6.03
400.0	5.98			397.0	6.26	360.0	5.88	426.0	5.68	406.0	5.98

Table 2. Calculated values,  $P$  in kg of the species,  $n=15$  at each time, under the various dead weights.

$t$ (min)	$n=15$ $W=8.64$ (kg)	$t$ (min)	$n=15$ $W=6.65$ (kg)	$t$ (min)	$n=15$ $W=4.87$ (kg)	$t$ (min)	$n=15$ $W=3.03$ (kg)	$t$ (min)	$n=15$ $W=1.89$ (kg)
2.0	10.21	2.0	7.40	3.0	6.68	2.0	4.36	1.0	2.85
5.0	10.68	6.0	7.50	7.0	6.60	5.0	4.35	5.0	2.83
10.0	10.50	10.0	7.51	17.0	6.60	10.0	4.32	10.0	2.80
25.0	10.61	27.0	7.62	31.0	6.40	25.0	4.29	25.0	2.79
52.0	10.88	58.0	7.73	76.0	6.42	52.0	4.15	50.0	2.79
110.0	11.32	108.0	7.63	100.0	6.39	113.0	4.21	99.0	2.79
		149.0	7.66						
209.0	11.29	210.0	7.77	200.0	6.36	200.0	4.14	210.0	2.76
300.0	11.42	310.0	7.55	306.0	6.40	310.0	4.11	300.0	2.75
360.0	11.46	400.0	7.60	397.0	6.26	418.0	4.07	400.0	2.73

此の第1表及び第2表でわかるように理論的に計算した $P$ の値が一般に実際の荷重より何れの荷重の場合も又何れの本数の場合も約1Kg位大きく出ているが、此の理由は実験に使用したストランドが、熱処理或は加工等の試料差に依る影響をなくする為に、既成のトワインを解きほぐして得たものである。故に相当の初荷重をかけても、ストランド軸の最初の状態が一直線状になる事が出来ず幾分螺旋状をなしている。故に荷重に依つて此の螺旋が伸びる影響が $\epsilon_s$ には入つて居り略々同一量だけ伸び過ぎる為であり、その伸び過ぎの影響が約1kg位の張力の形で現れて来ているものと思われる。此の影響は荷重が小さい場合は最後迄残り得るから荷重が軽い程幾分小さく荷重が重い程幾分大きく現われる傾向がある。此の約1kgの張力は例えば $n=15$ ,  $W=3.03\text{kg}$ の時に就いて云えば $\epsilon_s$ に換算して $t=10$ 分位の時0.02mm位、 $t=400$ 分位の時0.03mm位に相当し荷重が大きくなる程幾分増加する。

更に又第1表では一般に $t$ が小さい所で $P$ が大きく出ている傾向にあり、 $t$ が大きくなる程次第に $P$ が小さくなり或程度時間が過ぎると $P$ が略々一定値になつて居り、而も $n$ の数が多い程 $P$ が一定になる個所が $t$ の大きい方にづれている傾向があるが、之は繊維と繊維の間の遊びの影響であると思われる。即ち $t$ が小さい程、又 $n$ が大きくなつて繊維一本当たりの荷重が小さくなる程此の遊びの影響は大きいと考えられるから、実験結果に伸びの形で現われて来た遊びの影響が僅かの荷重の形で表現される為と思われる。故に或程度荷重時間がたつて大体繊維間の遊びがなくなればそれ以後に於いては $P$ が一定となつて居るのであらう。同様の遊びの影響は第2表でも同様の傾向で表われており、 $W=8.64\text{kg}$ ,  $W=6.65\text{kg}$ では殆んど遊び

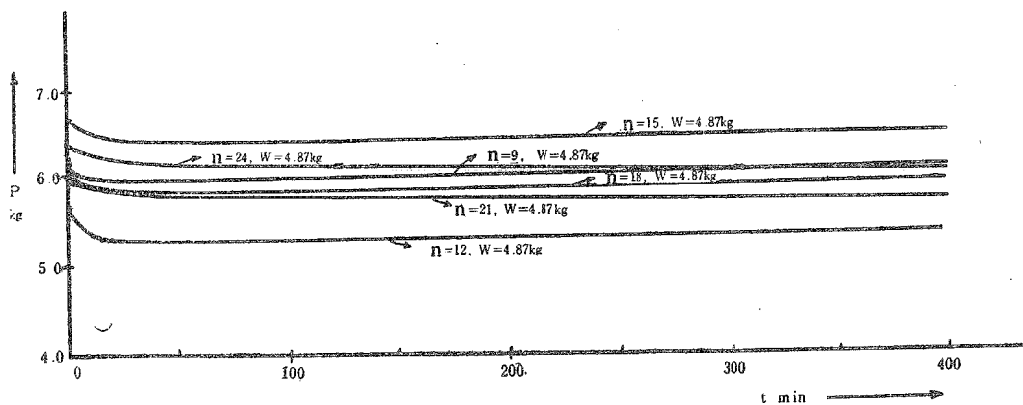


Fig. 5. Tendency of calculated values,  $P$  for the various species under the constant dead weight.

の影響は認められないが  $W=4.87\text{kg}$  では 20 分位迄,  $W=3.03\text{kg}$  では 70 分位迄,  $W=1.89\text{kg}$  では 250 分位迄遊びの影響が残っているものと思われる。而も此の遊びの影響は第 2 報で報告した, ストランドを構成する繊維と繊維の接触に依る近寄りの係数  $K$  を計算する時に現われた遊びの影響と時間的に略々同一個所に現われている。此の様な遊びの影響を直観的に観察出来るように第 5 図に各  $n$ , 各  $W$  に就いての時間  $t$  と計算に依る推定張力  $P$  との関係を示す。更に此の関係を明白にする為に第 2 報で報告した各  $n$  に対する  $K$  と  $t$  の関係第 6 図を再び

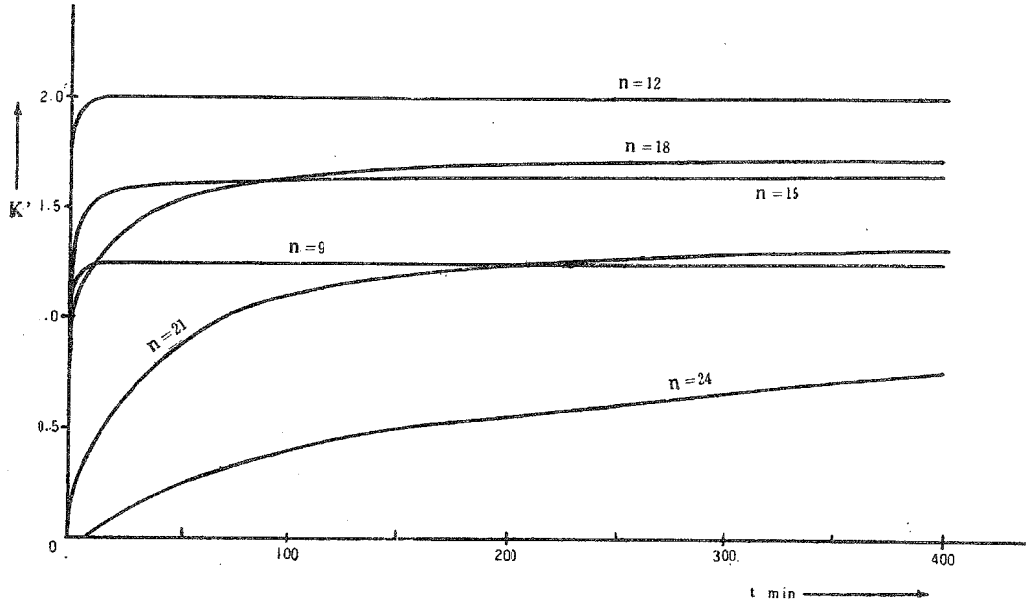


Fig. 6. Calculated from the result of experiment about various species. (Values  $K'$ ).

掲げて同一種類の試料に同一荷重を加えた場合は  $P$  の場合も  $K'$  の場合も略々同一時刻で一定値に達する事を示しておく。

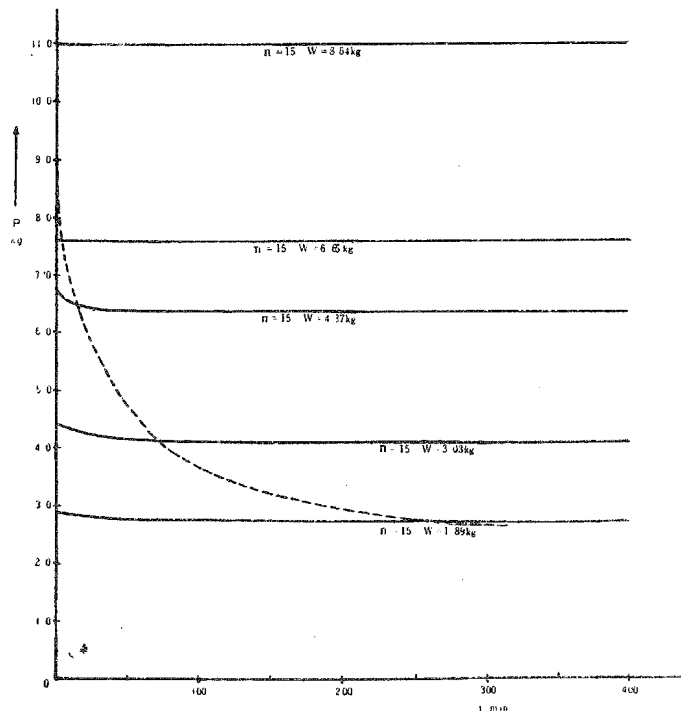


Fig. 7. Full lines show the tendency of calculated value,  $P$  for the species,  $n=15$ , under the various dead weights, and dotted line shows the limit which spaces remain between fibers.



第7図は同一種類 ( $n=15$ ) で異なる荷重についての  $t$  と  $P$  の関係で、大体  $P$  が一定になつていられる限界の点を各荷重について結んで行くと破線で示すような遊びの影響が残る限界線が想像され、此の破線より左下は遊びが残つている状態、破線より右上は遊びのなくなつた状態を表わしていると思われる。

## 要 結

以上の計算はストランドを構成する繊維が正しい螺旋状をなし而も之等の螺旋が中心に心線を考へてその周囲に数列の繊維が同一撚り数の下に密着していると仮定して行つたものであるが、実際に長繊維を数本取り揃えて之に徐々に撚りをかけて行く場合、周囲に位置する繊維は先づ中心に位置する繊維に巻きつき乍ら撚られるので此の場合必然的にそのコイルの軸は縮少し、此の為最初中心に位置していた繊維は周囲の繊維に依つて軸方向の圧縮力を受けてわずかの撚りでも撚りの挫屈を起し、更に撚りをかけると最初中心に位置した繊維に対してお互いに巻きつくような状態となる。故に此のようにお互いにお互いの繊維に挫屈を起させ乍ら撚られて行つて出来上つたストランドの中の繊維は何れも略々同じ形の複雑な空間曲線をなしていると考えられる。均一な同じ大きさの繊維で出来たストランドの理論的な破断力等を考える場合には、此の繊維の形づくる曲線を基にして計算を進めなければならないと思われるが、使用限界の荷重に就いての  $P - \epsilon_s - t$  の関係或は  $\epsilon_D - \epsilon_s - t$  の関係を推論する場合には、ストランドの各断面の繊維の配列の状況が中心に心線が存在しその周囲に数本の繊維が取りまいていような形になつているから、本報告の考え方に依る計算で十分満足されるものと思われる。尙此の様な計算に依つて求めた  $P$  と  $\epsilon_s$  の  $n=15$  の場合の関係を第8図に示すと時間がたつて

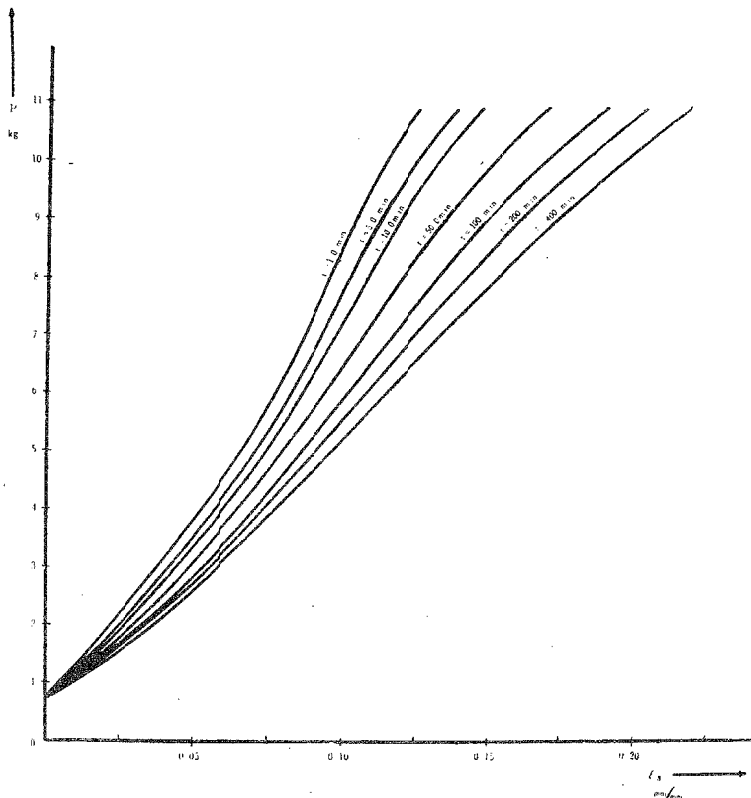


Fig. 8. Relation between  $P$  and  $\epsilon_s$  for each time.

繊維の傾斜角  $\alpha, \beta, \gamma$  が  $\pi/2$  に近づくとつれて、ストランドは繊維の性質（第1報参照）に似かよつて来て、直線に近くなつてくる事を示しておく。

此のようなストランドを三子撚り合せて作ったトワインに就いても、これを引張した場合1本のストランドに生ずる張力  $P$  と上述の  $D$  の式に依り計算されるストランドの径の縮小と、ストランドの接触に依るストランドの中心軸の近寄りも考慮すれば、本報告と略々同様の過程を繰り返す事に依つてトワインの外径  $D$  とトワインの伸び  $\varepsilon$  との時間的關係、並びに張力  $P$  と  $\varepsilon$  の時間的關係も理論的に誘導され、 $D$  の式として

$$D = D_0 (1 - \varepsilon) - 2/\sqrt{3} K'' D_0^{-2/3} E^{2/3} \left( \frac{P \sin \theta}{\sqrt{3} R} \right)^{2/3}$$

但し、 $D_0$  は無負荷に於けるトワインの外径、 $\theta$  はストランドの軸とトワイン軸に垂直な平面とのなす角度、 $K''$  はストランドとストランドの接触に依るストランドの中心軸の近寄りの係数である。

ストランドの描く螺線の半径  $R$  の式として

$$R = D/2 - D/2$$

トワインの推定張力として

$$P = 3P \sin \theta$$

但し、 $b$  をストランドの描く螺線のピッチとした場合には

$$\theta = \tan^{-1} [b(1 + \varepsilon) / 2\pi R]$$

の各式が導びかれる。

## 文 献

- 1) 石橋 正：撚線ばねに就いて（未刊）。
- 2) 田内森三郎：1949. 水産物理学，東京。
- 3) TIMOSENKO, S.: Strength of Material, part II, 556~559.
- 4) TIMOSENKO, S.; 井坂富士雄・江崎伸市・森徹共訳：1945. 弾性体の力学，292~304，東京。
- 5) PRESCOTT, J. : 1924. Applied Elasticity, 630~640, London.
- 6) TIMOSENKO, S : 1936. 瀧川馨一・久田俊彦共訳：1940. 撓屈理論，107~116，東京。
- 7) 深沢文雄・増崎謙二：1953. 網糸の研究—I 絨維に就いて— (1), 日本水産学会誌, 18 (10), 472~477,
- 8) 増崎謙二・深沢文雄：1953. 網糸の研究—II 糸に就いて (1), 日本水産学会誌, (印刷中)。