

有機工業材料の寸法効果に関する研究

藤満達朗*・村上文男**・藤原和廣***・石居雅敏****

The Scale Effect on the High Polymer under the Tension

Tatsuro FUJIMITSU, Fumio MURAKAMI, Kazuhiro FUJIWARA and Masatoshi ISHIZUE

Abstract

There is more probability that the defects exist in the specimen and the tensile strength decreases, as the size of the specimen becomes larger. This is a phenomenon called 'scale effect', but generally this effect has been only experienced and discussed for the brittle materials.

The authors investigated this effect of the high polymer on the viscous fracture with a large deformation. It is supposed to be difficult to treat the brittle material and the viscous material in a similar way. We applied K. Fujino's statistical treatment method to our study.

Fujino's statistical treatment is based on the theory of probability that the probability of the existence of the weak defects increases as the length of thread becomes longer.

In this paper the scale effect has been investigated for the high polymer through the tension tests and the theory of probability has been applied successfully to the viscous fracture.

1. ま え が き

ここでいう寸法効果というのは、材料強度が、その材料で作られた物体の寸法が大きくなるほど、低下するという現象をいうのである。もともと一つの材料を考えた場合に、その材料はどの部分をとっても、すべて均質であることが理想であろうが、現実にはそのようなものはなく、材質的なむらが多く、それらのむらの部分の集合が一つの材料を構成しているとみてよいであろう。したがってわれわれが材料強度試験をする場合には、その材料中の最も弱い部分がまず破壊を起し、このときの強さをわれわれはその材料の強さの測定値としていることに注目しなければならない。

このように考えてくると、材料を大きく使えば、小さい材料に比して、より弱い部分が含まれるようになり、測定に当ってはそのより弱い部分の強さを測定するわけであるから、当然材料を大きくすれば弱くなる

ことになる。これが寸法効果の定性的な考え方の基礎をなすものである。

こういう考え方をさらに定量的に記述しようとするれば、統計学的な考え方を導入しなければならない。そのためには以下のように考えを進めればよいであろう。

材料の強さは全く同一条件下においても、つねに一定値を示すものではなく、ある程度のばらつきを示すものである。したがってわれわれは一つの材料の強さをきめるには、その測定値のばらつきの程度に応じた測定回数をきめ、得られた測定値の平均値をもって、その材料の強さとしている。つまり強さを論ずる場合には統計的な取扱いをする必要がある。すなわち強さは定数ではなく、確率変数である。そう考えてくれば当然強さは試験片の寸法に影響されることになり、この現象を寸法効果と呼んでいることになる。

この種の研究はぜい性破壊を取扱ったもの¹⁾²⁾³⁾が大部分で、試験片が大きくなるほど、材料中に含まれる欠陥の存在確率が増すという立場から、寸法効果を記述しようとしている。

有機工業材料は一般に大変形の後、粘性破壊をするが、このような材料については、上記のようなぜい性破壊と同等の取扱いをすることには無理があると思わ

* 機械工学科

** 帝塚山学院短期大学

*** 三菱自動車工業(株)

**** 日立造船(株)

れる。藤野⁴⁾は糸を対象として、糸は最も弱い部分から破壊するとし、より長い糸はより弱い部分を含む確率が大きいことから、優れた論文を、統計学がそれほど普及していない古い時代に発表しており、まさに賞賛すべき業績であるが、この取扱法が大いに参考になる。

本報は有機工業材料について、単軸引張試験によって寸法効果を実測し、粘性破壊への確率論の拡張を試みたものである。しかしそれは筆者らのみでなされたものではなく、山口大学在学中に卒業実験としてこの研究に参画された人々が他にもあるので、それらの人々の業績は引用の都度出所を明らかにし、いささかの謝意を表しておく。

なおこの実験に用いた引張試験機はすべて 10 ton アムストラ型引張試験機（東京衡機製）であるので、実験結果を提示する際に試験機についていちいち述べることはしないことをおことわりしておく。

2. 寸法効果の統計的考え方

考え方を簡単にするために、単軸引張試験においては、試験片の断面積は軸方向の平行部の長さに対して、比較的小さいのが一般であるから、試験片の平行部の断面積は一定とし、その軸方向長さについてのみ寸法効果を考えることから始める。

このような試験片が破壊する場合には、その最も弱い部分が破壊すると考えられ、この最も弱い部分における破壊強さを、われわれはその材料の強さの測定値としているわけである。

ここでは比較的短かい長さを試料の基準長にとり、その基準長の平行部をもつ試料の強さを確率変数と考えて f とおけば、その分布関数 y は

$$y = \varphi(f) \quad (1)$$

として表わされ、 $\varphi(f)$ は確率密度関数といわれるものである。

つぎに基準長の n 倍の長さの試験片を考え、これを基準長の試験片が直列に n 個接合されたものと考えれば、この試験片が強さ f で破壊する確率は、 n 個の中の 1 個が強さ f で破壊し、他の $(n-1)$ 個は f より小さくないという確率である。そこで n 個の中の 1 個が強さ f と $(f+df)$ の間にある確率は、 $n\varphi(f)df$ であり、残りの $(n-1)$ 個が f より小さくないという確率は $\left[\int_f^\infty \varphi(f)df\right]^{n-1}$ である。したがって n 倍の長さの試験片の強さの確率密度関数 y_n は

$$y_n = n\varphi(f) \left[\int_f^\infty \varphi(f)df \right]^{n-1} \quad (2)$$

で与えられる。

この式を具体的に表わすためには (1) 式の関数形を決定しなければならない。いまの場合はこの関数形として正規分布 $N(\bar{f}, \sigma^2)$ を適用するのが妥当であろう。すなわち \bar{f} を基準長における強さの平均値、 σ をそのときの標準偏差として

$$\varphi_1(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(f-\bar{f})^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3)$$

で表わされる。そしてその妥当性は後出の実験結果から得られた Fig. 6, 11, 19 でも実証される。

ここで基準長の n 倍の長さの試験片の強さ f_n の平均値を \bar{f}_n とおけば

$$\bar{f}_n = \int_0^\infty f y_n df \quad (4)$$

で示される。 f_n もまた確率変数であるが、その分布関数は (2) 式の $\varphi(f)$ に (3) 式の $\varphi_1(f)$ を代入すれば得られる。すなわち

$$y_n = \frac{n}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(f-\bar{f})^2}{2\sigma^2}\right\} \left[\int_f^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(f-\bar{f})^2}{2\sigma^2}\right\} df \right]^{n-1} \quad (5)$$

である。上式を直接計算することは得策ではないので、ここで変数変換を行ない

$$t = \frac{f-\bar{f}}{\sigma} \quad (6)$$

の新しい確率変数 t を導入し、その積分を

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_t^\infty \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt = \varepsilon \quad (7)$$

のように標準化すれば、この値はよく研究されており、詳細な数値表⁵⁾がもとの分布関数

$$\varphi_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} \quad (8)$$

とともに得られている。したがって y_n をこれらで表わせば、 $\bar{f}=0$ に設定して、

$$y_n = \frac{n}{\sigma} \varphi_1(t) \{\Phi(t)\}^{n-1} \quad (9)$$

となり、コンピュータの力を借りれば比較的容易に数値計算をすることができる。 σ は一つの単位として取扱うことができるから、 $\sigma=1$ とおいて (9) 式から y_n を計算した一例を Fig. 1 に示す。図から見られる

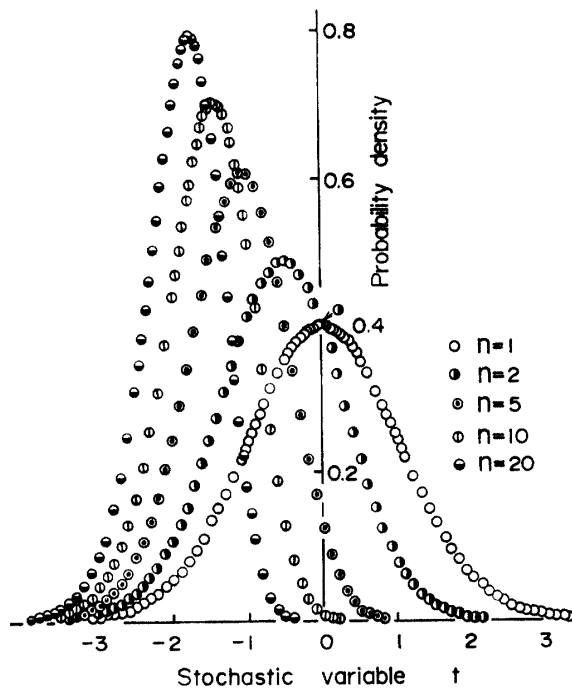


Fig. 1 Probability density function.

ように、 n が大きくなるにしたがい、分布の範囲が値の小さい方へ移っていき、その平均値が小さくなっていく状態が定性的によくわかる。それとともに $n=1$ では分布関数は中心軸に対称であり、平均値と中央値とは一致する。 n が大きくなるにしたがい、その非対称性が増してきて、両者は一致しなくなるが、図の $n=20$ の範囲ではその差は比較的小さいことが認められる。このことから前述の藤野⁴⁾ は平均値を中央値によって近似して、計算をきわめて容易なものにしていく。このことは当時としてはまことに賢明な方法であるが、 n がもっと大きくなる場合には問題がでてくる。

Fig. 1 に見られるもう一つの特徴は、 n が大きくなるに伴い、分布曲線の幅が小さくなり、その最頻値の部分にシャープな曲線形をなして確率密度の値が大きくなることである。このことは試長が長くなるにしたがい、強さのばらつきが小さくなることを定性的に示している。このことは予想されることではあるが、寸法効果のもつ大きな特徴といえる。

さて定性的には寸法効果の特徴は明らかとなったが、さらに具体的には (4) 式を解かなければならない。

(4) 式に (5) 式を代入すれば、

$$\bar{f}_n = \int_0^\infty \frac{n}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(f-\bar{f})^2}{2\sigma^2}\right\} \left[\int_f^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(f-\bar{f})^2}{2\sigma^2}\right\} df \right]^{n-1} f df \quad (10)$$

を得る。この式に (6) 式の変数を導入すれば

$$\bar{f}_n = \int_{-\bar{f}/\sigma}^\infty \frac{n}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} \left[\int_t^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt \right]^{n-1} (\bar{f} + \sigma t) dt \quad (11)$$

となる。前述のように上式の t に関する積分はよく研究されており、詳細な数値表が得られているから、コンピュータの力を借りれば解を得ることはさして困難ではない。しかし \bar{f} や σ は材料の種類や形状などにより、それぞれ異なる値をもつので、その度にコンピュータを必要とすることは実用的ではなく、また得られる情報も限られたものとなる。しかし (11) 式を解析的に解くことは困難である。

そこでもとの (3) 式を近似式でおきかえ、(11) 式を解析可能な関数にすることを考える。その近似式としては最近よく研究され、性質がよくわかっているワイブル (W. Weibull が材料の曲げ強さ、引張強さにはじめて解析例を取扱ったのでその名がある。) 分布が用いられると都合がよい。ワイブル分布は信頼性工学⁷⁾ に広く応用されており、ここでそれを適用してもなんら矛盾は感じられず、かえって正当性さえ望めるように思う。

(3) 式の累積分布関数は (6) 式で示されるが、ワイブル分布の累積分布関数では、

$$1 - F(t) = \exp\left\{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}\right\} \quad (12)$$

で示され、その確率密度関数 $\varphi_2(t)$ は上式を微分して、

$$\varphi_2(t) = \frac{m(t-\gamma)^{m-1}}{t_0} \exp\left\{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}\right\} \quad (13)$$

で与えられる。ここで γ と t_0 とは単に位置と尺度に関するパラメータであり、 m のみが本質的な曲線形状を与えるパラメータである。

いまの場合 t は $(t+4) \geq 0$ の領域においてのみ定義される変数とし、 $\gamma = -4$, $t_0 = 913$, $m = 4.569$ とおけば、 $\Phi(t) \doteq F(t)$ が成立し得る。Fig. 2 に両者の対応を示すが、その近似度はきわめて高いものである。

そこで (12), (13) 式を (7), (8) 式に代って、(11) 式に導入すれば、

$$\bar{f}_n = \int_{-\bar{f}/\sigma}^\infty \frac{nm(t+4)^{m-1}}{t_0} \exp\left\{-\frac{(t+4)^m}{t_0}\right\} \left[\exp\left\{-\frac{(t+4)^m}{t_0}\right\} \right]^{n-1} (\bar{f} + \sigma t) dt \quad (14)$$

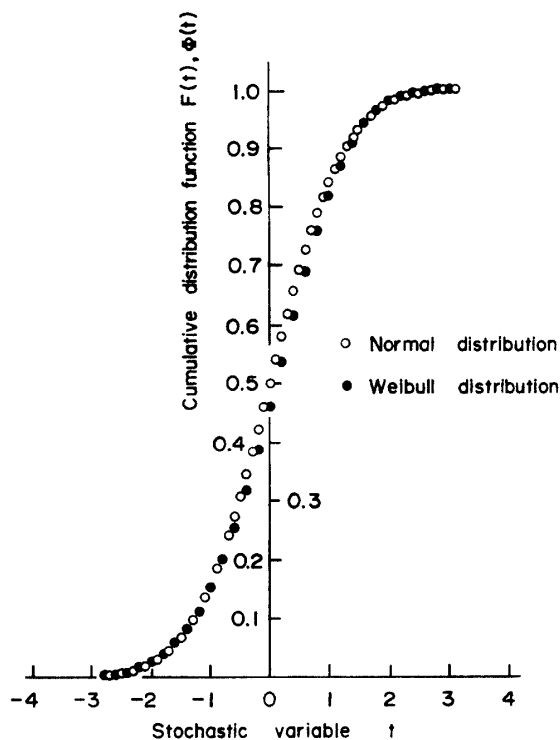


Fig. 2 Approximation of $F(t)$ and $\Phi(t)$.

を得る。ここで $n(t+4)^m/t_0 = Z$ とおけば、 $t = (t_0 Z/n)^{1/m} - 4$ で $dt = \{(t_0 Z/n)^{1/m} / (Zm)\} dz$ である。 $t = -4$ で $\varphi(t), F(t)$ とともに 0 となるから、 Z に関する積分範囲は $0 \rightarrow \infty$ となり、

$$\bar{f}_n = \int_0^\infty \frac{zm}{\left(\frac{t_0 z}{n}\right)^{\frac{1}{m}}} \exp\{-z\} \left[\bar{f} + \sigma \left\{ \left(\frac{t_0 z}{n}\right)^{\frac{1}{m}} - 4 \right\} \right] \frac{\left(\frac{t_0 z}{n}\right)^{\frac{1}{m}}}{zm} dz$$

$$= \bar{f} \int_0^\infty \exp\{-z\} dz + \left(\frac{t_0}{n}\right)^{\frac{1}{m}} \sigma \int_0^\infty \exp\{-z\} z^{\frac{1}{m}} dz - 4\sigma \int_0^\infty \exp\{-z\} dz$$

と変形されるが、上式の右辺第 2 項はガンマ関数で表わされ、

$$\bar{f}_n = \bar{f} + \left(\frac{t_0}{n}\right)^{\frac{1}{m}} \sigma \Gamma\left(\frac{m+1}{m}\right) - 4\sigma \quad (15)$$

となるが、 $n=1$ のとき $\bar{f}_n = \bar{f}$ であるから

$$\left(\frac{t_0}{n}\right)^{\frac{1}{m}} \sigma \Gamma\left(\frac{m+1}{m}\right) - 4\sigma = 0$$

から

$$\Gamma\left(\frac{m+1}{m}\right) = 4(t_0)^{-\frac{1}{m}} \quad (16)$$

となるから、これを (15) 式に代入すれば

$$\bar{f}_n = \bar{f} - 4\sigma(1 - n^{-\frac{1}{m}}) \quad (17)$$

の実用的な式が得られ、 $m=4.569$ であったから、

$$\bar{f}_n = \bar{f} - 4\sigma(1 - n^{-0.2189}) \quad (18)$$

の具体的な式が得られる。

(18) 式は (11) 式を近似的に解いたものであるが、(11) 式はまたコンピュータの力を借りれば、数値が得られる性質のものである。両者を比較して Fig. 3 に示す。(18) 式による計算結果を実線、(11) 式のコンピュータから得られる数値を○印で σ を単位にとって表わした。両者はよく一致していることが認められる。またこの図には前述した藤野⁴⁾ の式による計算結果(破線)をも併記した。この式は n が比較的小さいときはよく一致しているが、 n があまり大きく

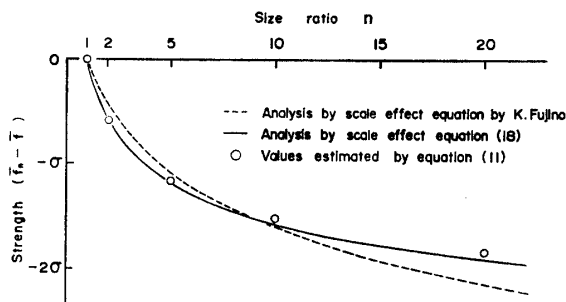


Fig. 3 Comparison between results estimated by scale effect equations and by equation (11).

なると問題があることを示している。

つぎにさきに指摘した寸法効果のもう一つの特徴、すなわち n が大きくなると強さの測定値のばらつきが小さくなるという事象について、話を具体的に示してみよう。このことは寸法効果と強さ測定値の分散および標準偏差の関係を明らかにすれば足りる。

そこで基準寸法における強さの分散を σ^2 とし、その n 倍の寸法における強さ f_n の分散を σ_n^2 とおけば、

$$\sigma_n^2 = E(f_n^2) - \bar{f}_n^2 \quad (19)$$

で示される。ただし $E(\)$ をもって () 内の確率変数の平均値を示すものとする。したがって

$$E(f_n^2) = \int_0^\infty f^2 n \varphi(f) \left[\int_f^\infty \varphi(f) df \right]^{n-1} df \quad (20)$$

を得る。この式を t に変数変換して (12), (13) 式を $\varphi(f)$ に代って適用すれば,

$$E(f_n^2) = \int_{-\bar{f}/\sigma}^{\infty} \frac{n m (t+4)^{m-1}}{t_0} \exp\left\{-\frac{(t+4)^m}{t_0}\right\} \left[\exp\left\{-\frac{(t+4)^m}{t_0}\right\}\right]^{n-1} (\bar{f} + \sigma t)^2 dt \quad (21)$$

が得られることは (14) 式に準ずるところである。さらに (14) 式から (15) 式への変換に用いた Z をそのまま準用すると

$$\begin{aligned} E(f_n^2) &= \bar{f}^2 \int_0^{\infty} \exp\{-z\} dz + 2\bar{f}\sigma \int_0^{\infty} \left\{\left(\frac{t_0 z}{n}\right)^{\frac{1}{m}} - 4\right\} \exp\{-z\} dz \\ &\quad + \sigma^2 \int_0^{\infty} \left\{\left(\frac{t_0 z}{n}\right)^{\frac{1}{m}} - 4\right\}^2 \exp\{-z\} dz \\ &= \bar{f}^2 - 8\sigma\bar{f} + 16\sigma^2 + \left(\frac{t_0}{n}\right)^{\frac{1}{m}} (2\bar{f}\sigma - 8\sigma^2) \Gamma\left(\frac{m+1}{m}\right) \\ &\quad + \sigma^2 \left(\frac{t_0}{n}\right)^{\frac{2}{m}} \Gamma\left(\frac{m+2}{m}\right) \quad (22) \end{aligned}$$

(19) 式に (15) 式と上式を代入して整理すれば,

$$\sigma_n^2 = \sigma^2 \left(\frac{t_0}{n}\right)^{\frac{2}{m}} \left\{ \Gamma\left(\frac{m+2}{m}\right) - \Gamma^2\left(\frac{m+1}{m}\right) \right\} \quad (23)$$

を得る。同じように $n=1$ のとき $\sigma_n^2 = \sigma^2$ であるから,

$$t_0^{\frac{2}{m}} \left\{ \Gamma\left(\frac{m+2}{m}\right) - \Gamma^2\left(\frac{m+1}{m}\right) \right\} = 1$$

が得られ、上式を (23) 式に代入すれば

$$\sigma_n^2 = n^{-\frac{2}{m}} \sigma^2 \quad (24)$$

となり、標準偏差では

$$\sigma_n = n^{-\frac{1}{m}} \sigma = n^{-0.2189} \sigma \quad (25)$$

の関係が得られる。

一方 (20) 式に (3) 式の $\varphi_1(f)$ を適用し, (10)

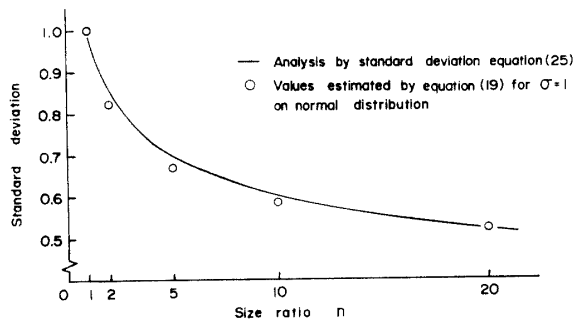


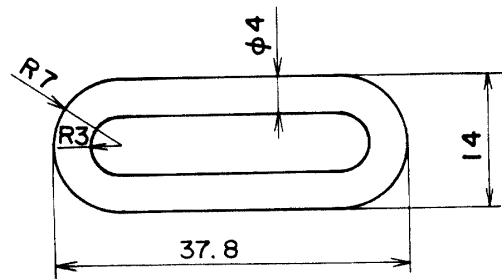
Fig. 4 Comparison in standard deviation between results estimated by equation (25) and by equation (19) for $\sigma=1$ on normal distribution.

式とともに (19) 式に代入すれば, 正規分布における σ_n と σ の関係が得られるが, これは解析の範囲を超えるものである。しかしコンピュータの力を借りれば数値は得られる。これを比較して Fig. 4 に示した。(25) 式の計算値を実線, コンピュータから得られた後者の数値を○印で示した。両者は満足すべき一致を得ていることがわかる。

3. 基礎的実験による照合⁷⁾

寸法効果の基礎的材料となり得るのは鎖であろう。鎖は環の連鎖であるから, ある長さの鎖を引張れば, 最弱の環が破壊し, その破壊強さをその鎖の強さとするわけである。したがって環の数が増せば, より弱い環の存在確率が増すわけで, 鎖の強さは減少する。すなわちいままで述べてきた理論の代表的モデルになり得るのである。

実験に用いた鎖の形状を Fig. 5 に示す。これを環数 1, 5, 10, 20個と変化させて, その強さを測定し



n	1	5	15	20
---	---	---	----	----

Fig. 5 Shape and dimension of chain and length ratios.

た。測定回数は各20回である。環が1個であるときの強さの測定値を累積度数率に換算して正規確率紙にプロットしたものを Fig. 6 に示した。各点はほぼ一直線上にそっているので, 正規分布に近い分布を示すことが認められる。

この鎖の長さに応ずる強さの実測値を Fig. 7 に○印のプロットで示すが, 同時にデータから得られた

$$\bar{f} = 77.37 \text{ (hN)}, \quad \sigma = 8.882 \text{ (hN)} \quad (26)$$

の値を (18) 式に代入して得た計算値を実線で示して比較した。両者はよく一致していることが認められる。

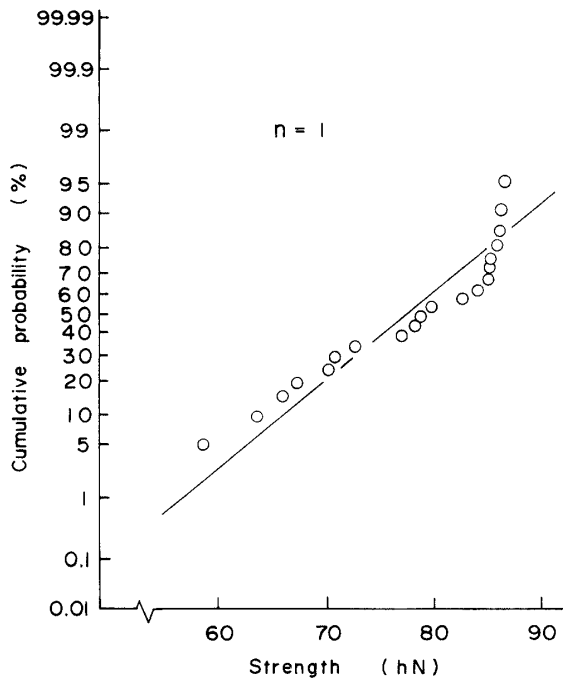


Fig. 6 Distribution of strength of chain represented on normal probability scale.

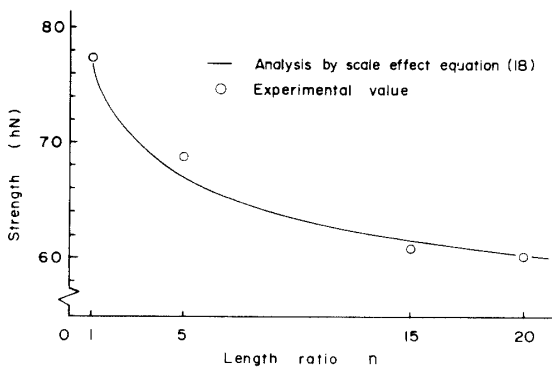


Fig. 7 Comparison between experimental data and result analyzed by equation (18) in scale effect of chain.

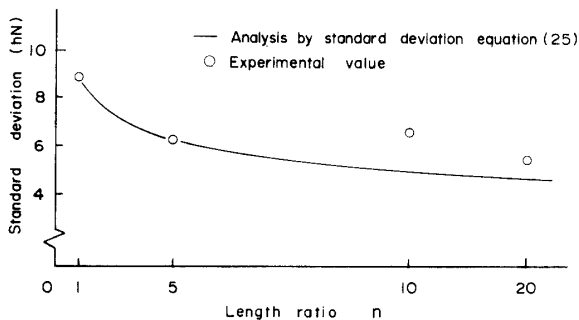


Fig. 8 Comparison between experimental data and result analyzed by equation (25) in standard deviation of chain.

さらに各鎖の長さに応ずる強さの標準偏差を実測値から計算して, Fig. 8 に○印でプロットして示した. また同時に (25) 式からの計算値を実線で示して比較した. データの性質上その一致の程度はやや劣るかにみえるが, その傾向を非常によく表現していることが認められる.

4. 有機工業材料による実験

4.1. ナイロン6 板材に関する実験⁸⁾

およそ寸法効果が問題になるのは, 比較的強さの測定値のばらつきが大きい場合である. それは前出の (18) 式においても, 強さの標準偏差 σ がある程度の大きさを持っていなければ, 顕著な現われ方をしないことが明らかとなっている.

たとえば JIS に規格された鋼のような材料では, 比較的安定な引張強さを示すので, このような材料によって, いま行なっているような単軸引張試験で寸法効果を求めることは容易ではないであろう. しかしこのような材料でも 動的荷重による疲れ限度の試験結果⁹⁾¹⁰⁾ では, 比較的大きなばらつきを示し, 機械学会からも Fig. 9¹¹⁾ のように寸法効果を図示し, 設計の安全率を考慮するよう推奨している.

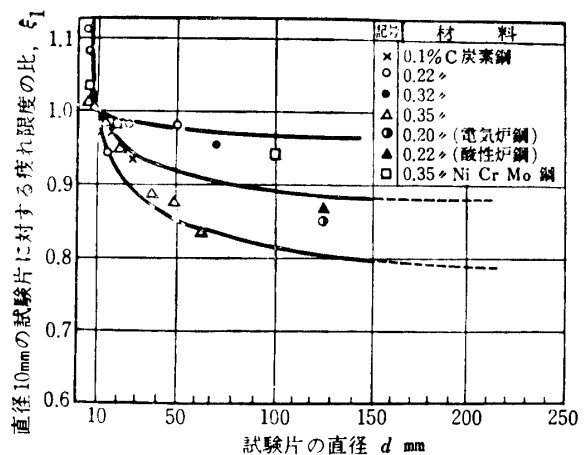
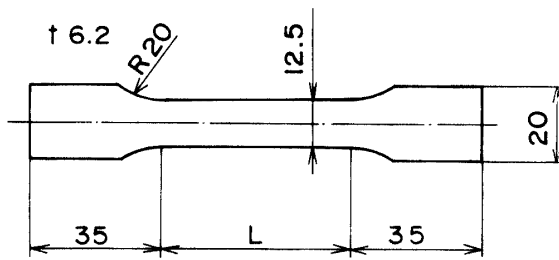


Fig. 9 An example of scale effects. (From the Japan Soc. Mech. Engrs.)¹¹⁾.

その点ナイロン6 板材のような材料は, 比較的引張強さばらつきを持っており, 単軸引張試験においても十分寸法効果を確認することができる. このことは逆に使用する立場では, 十分寸法効果に注意しなければならないことを示している.

この材料に対する試験片の形状を Fig. 10 に示す. 基準長を 5 mm とし, $n=20$ までの間を図の付表のように分割してとっている. 試験回数はそれぞれ33回で



n	1	2	4	10	16	20
L (mm)	5	10	20	50	80	100

Fig. 10 Shapes and dimensions of specimens of plate nylon 6 and length ratios.

ある。基準長 (5 mm) における強さの測定値から

$$\bar{f} = 49.85 \text{ (MPa)}, \quad \sigma = 3.253 \text{ (MPa)} \quad (27)$$

が得られた。またそれら測定値の累積度数率を正規確率紙にプロットして、Fig. 11 が得られた。プロットはほぼ直線をなし、しかも想定された回帰直線のたて軸 1σ に対するよこ軸の斜影が (27) 式の σ の値とほぼ一致するから、測定値は正規分布に近い分布をすることが認められる。

Fig. 12 に各試験片の長さ n に対する実験の各平均値 (○印) と (27) 式の値を用いた (18) 式の計算値

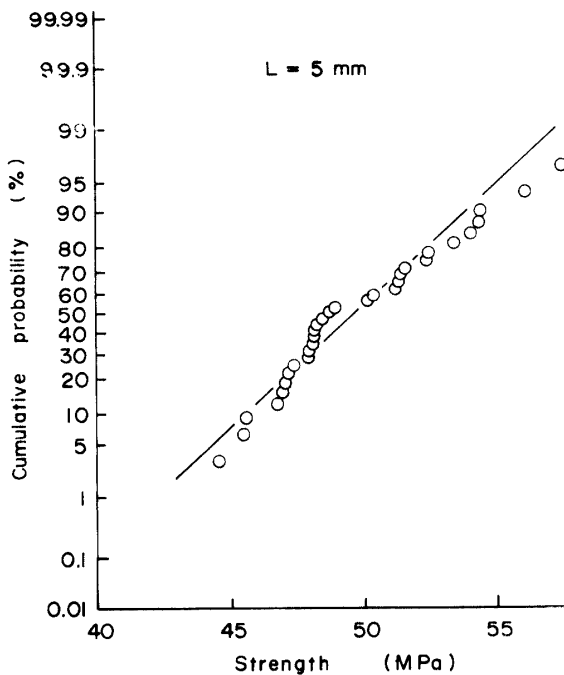


Fig. 11 Distribution of strength of plate nylon 6 represented on normal probability scale.

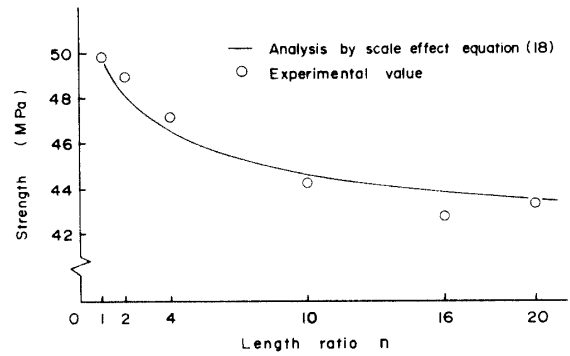


Fig. 12 Comparison between experimental data and result analyzed by equation (18) in scale effect of plate nylon 6.

(実線) を比較して示した。両者は非常によく一致しており、(18) 式の正当性を示している。さらに Fig. 13 は測定値の各 n に対する標準偏差 (○印) と (27) 式のデータから (25) 式による計算値 (実線) を比較して示した。この方も両者はよい一致を示している。

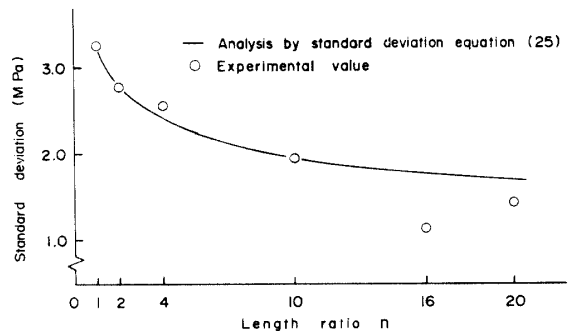


Fig. 13 Comparison between experimental data and result analyzed by equation (25) in standard deviation of plate nylon 6.

4.2. ナイロンロープに関する実験¹²⁾

ナイロンロープとしては直径 6 mm のレジャー用ロープを用いた。その燃糸構成は 1300 D (145 tex) 単糸 36 本を下燃 (Z) し、さらにそれら 3 本を上燃 (S) したもので、総合番手は 190,000 D (21,000 tex) であった (燃縮率 35%)。145 tex × 36 × 3 と表現しておけばよいであろう。

この実験は実験以前の問題として、いかにして強さを正確に把握できるかという、試験片の作成に関する問題が大きな一つの課題であった。

試験片の作成に当たって、最初ワイヤロープ強度試験法に準じ、Fig. 14 (1)~(3) のようにワイヤクリップで固定する方法をとった。これらではロープが滑って、荷重がかからず、ついには固定部から抜け落ちた。ま

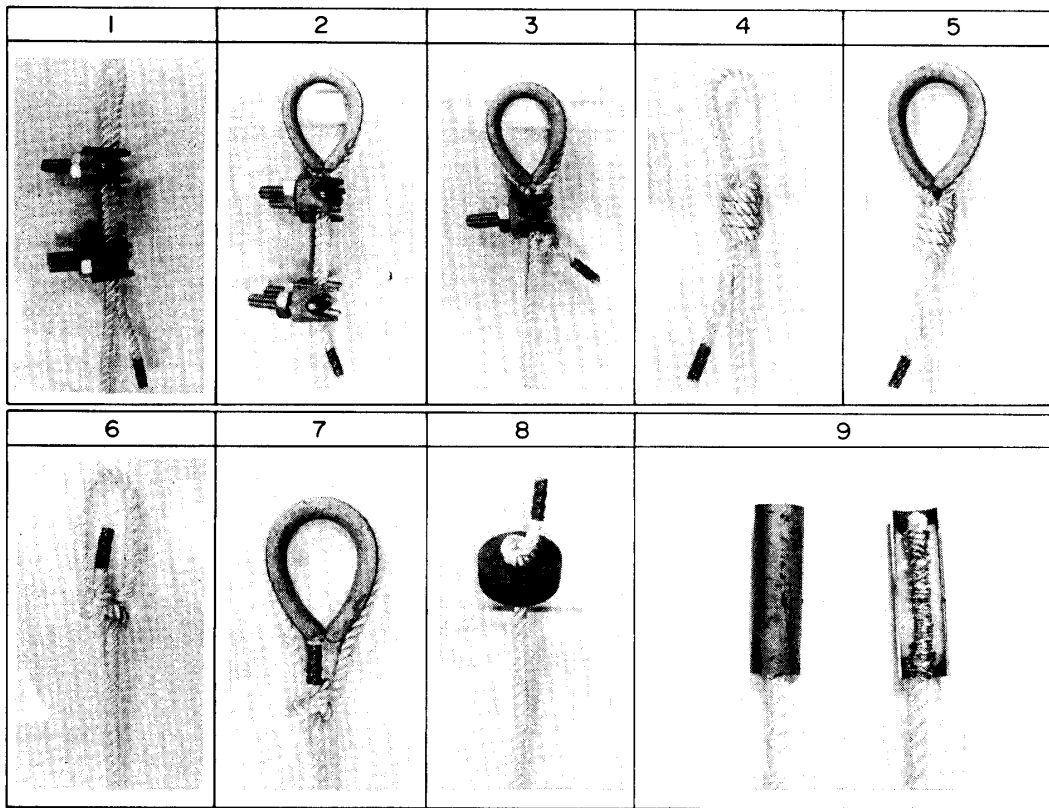


Fig. 14 Clamping methods of nylon rope.

た(9)のようにロープをパイプに埋めこむようにエポキシ系樹脂(以下これを単に樹脂と呼ぶ。)で固めたもの、また針金をロープとパイプに貫通させて樹脂で埋めこみ固めたものも共に前同様の結果となり、使用不能であった。

(4)~(7)は両端に輪を作ったもので、この輪をシャックルにかけて引張る方式であるが、このうち(6)はもやい結び、(4)はハンギングノットで、これらの固定輪を用いていないものは、結び目を樹脂で固めて補強し、結び目自体をチャックに固定した。これらは滑りは生じなかったが、チャック切れを起し、やはり正確な測定は望めなかった。その切断状況を Fig. 15 に示す。

結局 Fig. 16 に示すように、ロープの先端をほぐし、反転して逆方向に編みあげ、編みあげた個所を $\phi 1$ mm 長さ 1 m の針金を巻いて補強し、その部分を樹脂で固めて2日間放置して硬化させる。この方法が最も有効であり、この方法によって試験片を作成した。それでもなおチャック切れは避けることはできず、試

験値の40%程度だけが正常な実験値として採用し得たにすぎなかった。まことに労多い実験であった。

チャック部は十分締つける必要があり、Fig. 17 の6本のボルトとナットで締結し、Fig. 18 のような状態で試験機に仕掛けた。

基準長を 50 mm とし、 $n=4$ の 200 mm まで実験したが、それ以上は伸びが大きいため、この試験機では無理であった。試験回数は各33回である。

基準長 50 mm における測定値の正規確率紙へのプロットを Fig. 19 に示す。得られた回帰直線の 1σ 分のよこ軸に対する投影がこの測定値を計算して得られた値

$$\bar{f}=70.81 (hN), \quad \sigma=4.841 (hN) \quad (28)$$

の σ とほぼ一致していることは、前同様である。

(28) 式の値を (18) 式および (25) 式に代入して得られた計算値(実線)と実験値(○印)をともに Fig. 20 に比較して示した。いずれも前同様のよい一致を示すことが認められる。

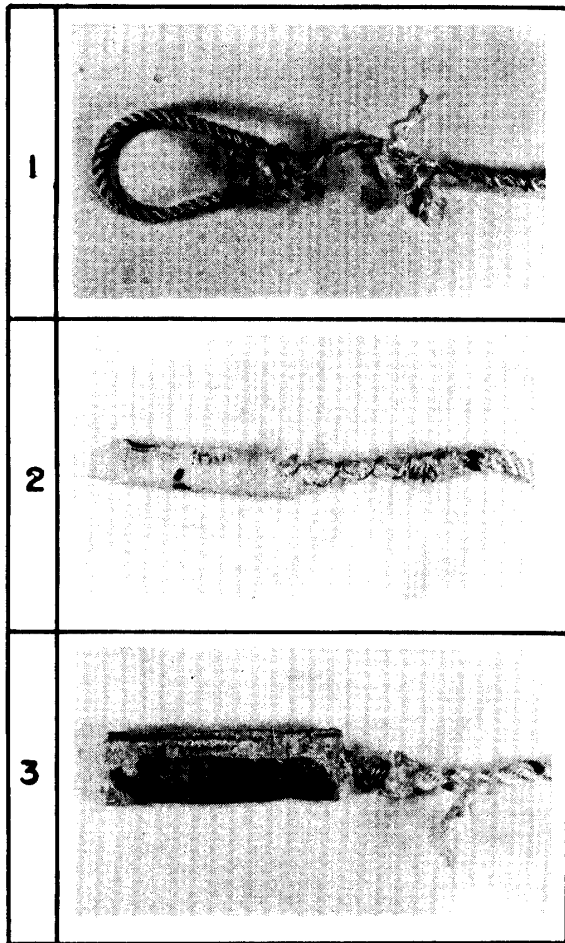


Fig. 15 Effect of clamping method on fracture mode of nylon rope.

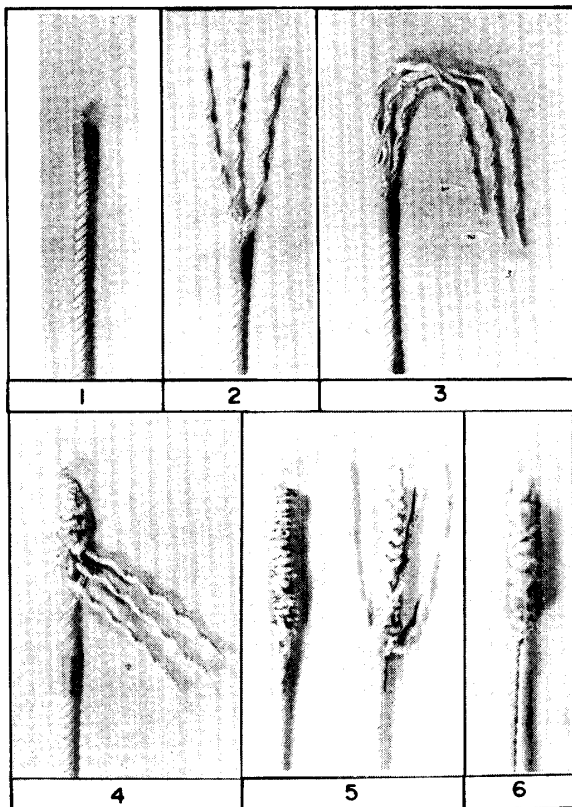


Fig. 16 Method for twisting nylon rope.

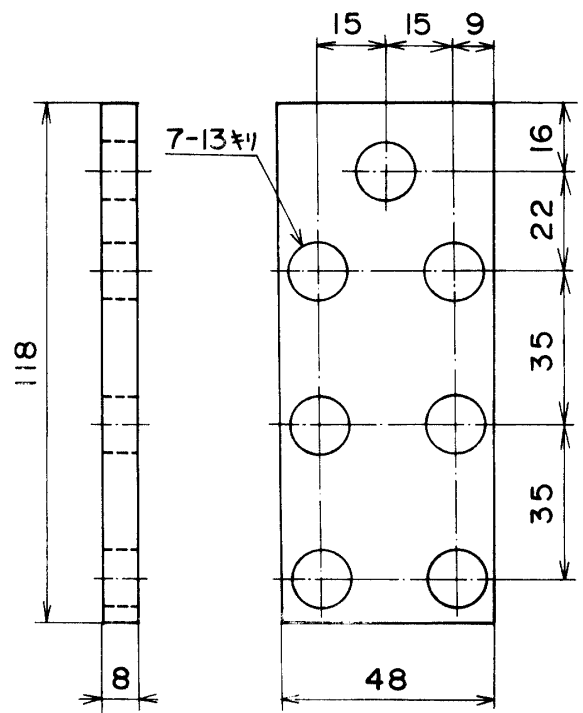


Fig. 17 Plate for clamping rope.

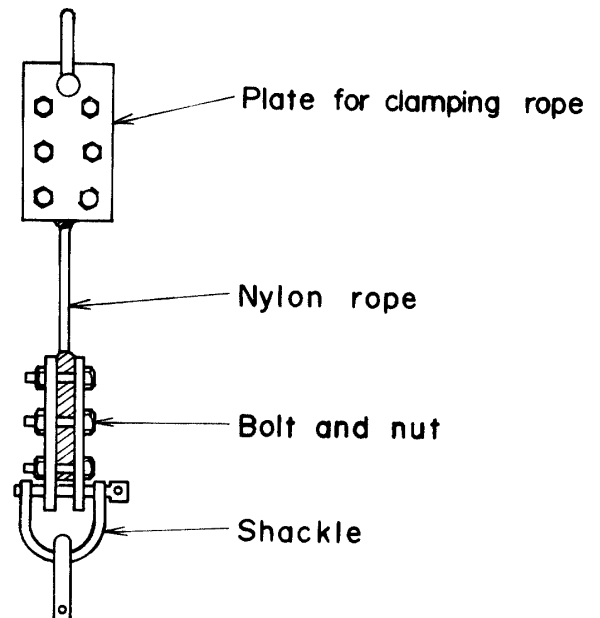


Fig. 18 Apparatus for tension test of nylon rope.

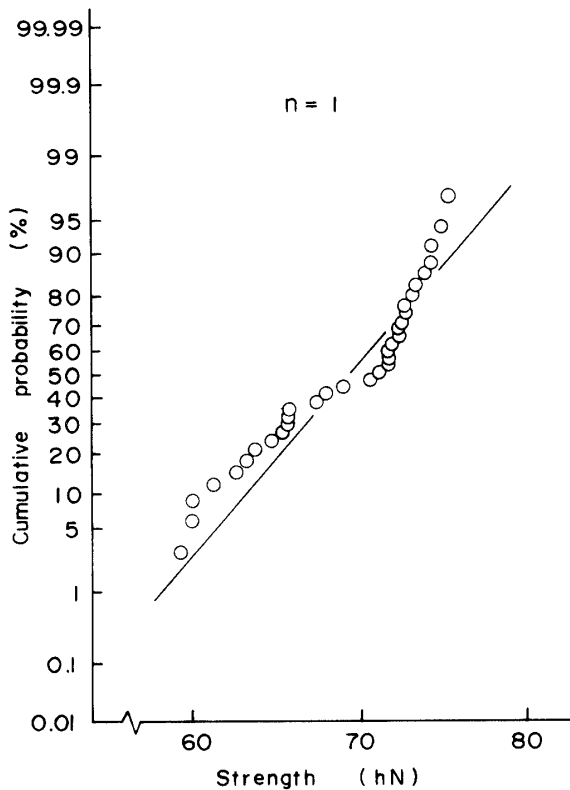


Fig. 19 Distribution of strength of nylon rope represented on normal probability scale.

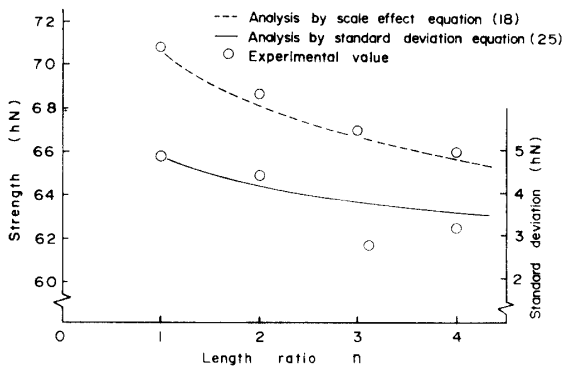


Fig. 20 Comparison in strength and standard deviation between experimental data and results analyzed by equations (18) and (25) in nylon rope.

5. 考察

5.1. 寸法効果による許容応力の目安

設計に用いられる許容応力は強さの下限値を基準に決定される。いまの場合長さ比 n の強さの下限値 $f_{min}^{(n)}$ は

$$\begin{aligned} f_{min}^{(n)} &= \bar{f}_n - 3\sigma_n \\ &= \bar{f} - 4\sigma(1 - n^{-0.2189}) - 3\sigma n^{-0.2189} \\ &= \bar{f} - \sigma(4 - n^{-0.2189}) \end{aligned} \tag{29}$$

によって与えられる。

したがって n が非常に大きい場合には

$$f_{min}^{(n)} = \bar{f} - 4\sigma \tag{30}$$

を基にして、設計強度の許容値をきめる必要がある。

したがって第3節に示した鎖を例にとれば、(26)式のデータから、この鎖は1環が約4cmで、もし40mにわたって使用するとすれば、 $n=1000$ であって(29)式の()内第2項は約20%程度は残るが、(30)式に近いものとなり、(26)式の77.37(hN)という強さは約42(hN)と半分に近い強さしか期待できないことになる。

また第4節(1)のナイロン6板材については、(30)式が適用される程度まで大きくすると、(27)式のデータからみて、残存強さは約37(MPa)となり、かなり大きなものを作っても、もとの強さの約25%程度の減少を考慮しておけばよいということになる。

5.2. レジャーロープの安全性

このロープはレジャーロープとしては最もサイズの細いもので、これを登山用ロープとして用いるかどうか知るところではないが、それにしても(28)式のデータでは $\bar{f}=70.8$ hN (約700kgfの力に耐える。)という大きい強さを持っているかに見える。したがって登山用ロープとして用いられても不思議はないように思える。

ところがこの基準長は50mmであるから、50mの長さで使うとすると $n=1000$ となり、やはり(30)式を適用すべきものとなり、 $f_{min}^{(1000)}$ の値は約51hNまで落ちてしまう。したがって登山装備をいれて70kgfの人体を考えると安全率はほぼ7倍で、衝撃的荷重を考えるとやや不足するように考えられる。しかもそれだけではない。このロープを構成する3本の下燃糸をほぐして並べてみると、Fig.21のようになり、36本のうち8本が明らかに短い。これは短い8本が芯に入って、その周囲を他の糸がつる巻線をなして燃られるいるものと考えられる。

望ましい燃糸はすべての糸が平均的な直径をもった円筒にそって、つる巻線を構成していて、それをほぐすときはすべての構成糸が同じ長さを持っているものである。

したがってこのロープはその点変則な燃になってお

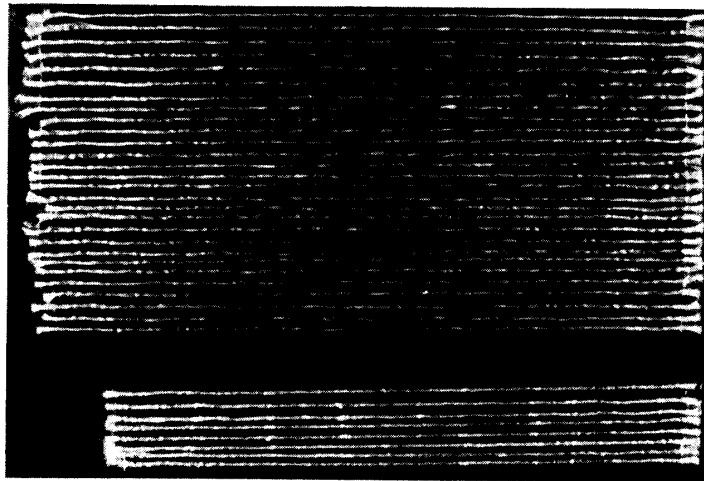


Fig. 21 Each length of thread which twisted in nylon rope.

り、衝撃的な荷重には分担荷重が不均衡となり、それだけ強さを割り引いて考える必要がある。とくに試験片の作成に当って、チャック切れ防止のために特別なチャック部の保護を考えだす必要があり、しかもなお破壊試験では成功率が40%程度と留まった事実を考えると、これらのロープ類は横圧が加わることによって、強さが相当程度減少することが認められ、岩の突出部において横圧が加わることが予想されるロックライミングのような用途に、このロープを使用することは危険であり、もう少し太いものが望ましいといえる。

6. ま と め

大変形の後、粘性破壊を起すナイロン6製の板材とロープを用いて単軸引張試験を行ない、寸法効果を確認することができ、確率論から近似的に解いた式

$$\bar{f}_n = \bar{f} - 4\sigma(1 - n^{-0.2189})$$

と実験値とは比較的良好に一致しており、この式で長さに関する寸法効果を十分に表わすことができる。

このことから確率論が粘性破壊をするものにも適用

できると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 日本金属学会：金属材料の強度と破壊、丸善(1974)
- 2) 横堀武夫：材料強度学、技報堂(1969)
- 3) O.J. ダン、V.A. クラーク：応用統計学(1974)
- 4) 藤野清久：京大機械工学会大会論文集第1号(1932)
- 5) たとえば森田繁一：初等数理統計学、培風館(1974)
- 6) たとえば日科技連：信頼性データの解析、日科技連出版社(1967)
- 7) 藤原和廣：山口大学修士論文機械工学専攻(1978)
- 8) 村上、藤満、中村、河村：繊維機械学会第29回年次大会論文集 藤満、村上、藤原：日本機械学会講演論文集 No. 780-13 藤満、村上、石居、藤原：日本機械学会講演論文集 No. 807-1
- 9) 石橋正：金属の疲労と破壊の防止、養賢堂(1954)
- 10) 河本実：金属の疲れと設計、コロナ社(1973)
- 11) 日本機械学会：金属材料疲れ強さ設計資料 I、日本機械学会(1936)
- 12) 石本、成清：山口大学機械工学科卒業論文(1979)

(昭和56年4月15日 受理)