開き目シングル トリコット編布の二軸伸張特性に関する理論的研究

たて編布の二軸伸長特性に関する研究——第3報

京都工芸繊維大学	柳	川	良	樹 (会員)
京 都 大 学	川	端	季	雄 (会員)
京都工芸繊維大学	中	川	建	次
京都工芸繊維大学	当	山	清	徳
京 都 大 学	河	合	弘	廸 (会員)

Theoretical Study on the Biaxial Tensile Properties of Warp Knitted Fabric of Single Tricot Stitch with Open Lap

Yoshiki Yanagawa,* Sueo Kawabata,** Kenji Nakagawa,*
Kiyonori Tōyama* and Hiromichi Kawai**

* *Department of Textile Technology, Kyoto University of Industrial Arts and Textile Fibers, Kyoto*

** *Department of Polymer Chemistry, Kyoto University, Kyoto*

Abstract

The biaxial tensile properties of warp knitted fabrics of single tricot stitches with an open lap have been calculated theoretically by developing the analysing method used on the close lap structure. Tensile process is divided into two regions, i. e., the bending effective region and the stretching effective region. The border of these two regions is a critical stretch ratio. The properties in these regions are analyzed separately, and then, are composed.

In this analysis, the initial conditions for the calculation are fabric structure and properties of yarn, that is, the tensile and frictional properties.

Both experimental and theoretical researches using some of actual fabrics have been carried out for the purpose of comparison. Good agreement between experimental and theoretical values are obtained and the effect caused by frictional properties of yarn can be neglected in the bending effective region.

Differences between close lap and open lap structures in this biaxial tensile properties have been investigated by using the theories.

(Received June 6, 1970)

摘 要

目 的 開き目のシングル トリコット編をウエール方向とコース方向に二軸伸長したときの伸長特性を理論的に計算する式を誘導し、他方、実験によって理論の精度を確かめる。また開き目と閉じ目の力学的特性の相違を明らかにする。

成 果 著者らによって明らかにした閉じ目シングル トリコット編の二軸伸長理論の手法を適用して、編布構造と糸の力学的特性とから開き目の二軸伸長特性を理論的に誘導した。

二軸引張試験機を用いて編布の二軸伸長特性を実測し、理論計算値と実測値の間はかなりよい一致のあることを認め、本理論の妥当性を確認した。開き目に関する本理論と閉じ目の理論を用いて、開き目と閉じ目の力学的特性における2、3の相違を明らかにした。

(昭和45年6月6日 受理)

1. 緒 論

たて編布を大別すると、編目の下方で糸が交わる閉じ目と、交わらない開き目の2つの基本編目があり、両者の間には同じ組織でもその力学的特性、外観、風合いなどに大きな差のあることが知られている。しかし、これまでのたて編布に関する研究（大部分は無荷重時の編目幾何学に関するものであるが）の多くは閉じ目のみを取り扱っており、開き目については、ほとんどふれられていない。まして二軸伸長特性については全く未解決である。

別報^{1),2)}において、1枚おさを用いた閉じ目のシングルトリコット編の二軸伸長特性について理論的に解析し、その理論の妥当性を実験により確かめた。閉じ目と開き目とは共通のモデル設定で解析することは困難であり、改めて研究を必要とする。本報においては閉じ目の場合と同じ解析法を用いて開き目のシングルデンビー編の二軸伸長特性を理論的に解明する。そしてその理論精度を実験により確かめる。また本報において誘導した開き目に関する理論と、別報で述べた閉じ目の理論を用いて、両者の力学的性質の差異を比較して、それぞれの特徴を明らかにしたい。

2. 理 論

開き目のシングルトリコット編の場合も閉じ目の場合と同様に、まず単純化したモデルを設定する。そして伸長過程を、境界伸長比 λ_{c1} , λ_{c2} を境にして、糸の曲がりがまっすぐになる曲げ効果領域過程と、糸が伸びる伸長効果領域過程に分け、それぞれ独立に解析し、両者の結果を合成する川端の解析法³⁾を採用する。なお、本理論が、閉じ目の理論¹⁾と相違する主な点は

- 1) 曲げ効果領域において、ニードル ループの1部とシンカー ループとが1つの円弧を形成する第6図の新しい構造モデルを用いる。
 - 2) 曲げ効果領域から境界伸長状態に移る過程の構造変化が複雑なため、若干のブラックボックス的思考を加味して、曲げ領域の伸長特性を誘導する。
 - 3) 境界伸長比以後では、ニードル ループはその下方で交差しない第3図のモデルを用いる。したがって、この領域での閉じ目と開き目の相違は、ニードル ループの下方で糸が交差するか、しないかの相違のみとなり、糸の直径が小さくなると、両者の相違は少なくなる。
 - 4) 曲げ効果領域で、交差部分の糸相互間の摩擦を考慮する必要がある。
- などである。

ウェール方向を X_1 軸、その伸長比を λ_1 、コース方

向を X_2 軸、その伸長比を λ_2 とし、それぞれの方向の伸びひずみを ε_1 , ε_2 とすると

$$\lambda_1 = 1 + \varepsilon_1, \quad \lambda_2 = 1 + \varepsilon_2$$

となる。

変形様式を2方向のひずみの比 k で表わし、次のように定義する³⁾。

$$\left. \begin{aligned} k &\equiv k_1 = \varepsilon_1 / \varepsilon_2 = (\lambda_1 - 1) / (\lambda_2 - 1), & \varepsilon_1 < \varepsilon_2 & \text{のとき} \\ k &\equiv k_2 = \varepsilon_2 / \varepsilon_1 = (\lambda_2 - 1) / (\lambda_1 - 1), & \varepsilon_2 < \varepsilon_1 & \text{のとき} \\ k &\equiv k_1 = k_2 = 1 & \varepsilon_1 = \varepsilon_2 & \text{のとき} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

そして理論計算に必要な構造定数をつぎのように定める。

u : ウェール密度

v : コース密度

W : 単位面積当たりの布重量

D : 糸の直径

w : 単位長さ当たりの糸重量

(第1図) 編 布 構 造

とすると、第1図の変形前の単位構造のコース間隔 y_{01} 、ウェール間隔 y_{02} および1単位構造の長さ l は

$$\left. \begin{aligned} y_{01} &= 1/v \\ y_{02} &= 1/u \\ l &= W / (u \cdot v \cdot w) \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

により計算される。

2.1 境界伸長比 λ_{c1} , λ_{c2} の計算

糸が伸びずに、ただ曲がり形状が交差部分を除き、まっすぐな形状をとると仮定した伸長比、すなわち境界伸長比 λ_{c1} , λ_{c2} を求める式を誘導する。この境界伸長状態は、糸は完全にフレキシブルであると考え、かつ糸の交差点において摩擦なしに滑りながら、糸のたるみがなくなったときの状態で、これはあくまで仮想の状態である。

境界伸長状態における単位構造モデルを第2図のように設ける。第3図はこれを糸中心線により描いたもので、図のようにシンカー ループとニードル ループの糸

(第2図) 境界伸長状態

(第3図) 糸中心線で表わした境界伸長状態の単位構造モデル

中心線と X_2 軸となす角をそれぞれ φ_{c1} , φ_{c2} とし、直線部分の長さをそれぞれ L' , $2L''$ とする。

$$L = L' + 2L'' \quad \dots\dots(3)$$

L は1単位構造内の編目長 l より点線の長さを引いたもので

$$L = l - (1 + \pi)D \quad \dots\dots(4)$$

である。この状態におけるコース間隔、ウェール間隔をそれぞれ y_{1c} , y_{2c} とすると

$$y_{2c} = y_{2c}' + y_{2c}'' \quad \dots\dots(5)$$

ここでプライムはシンカー ループに関するもの、ダブル プライムはニードル ループに関するものであることを示す(以下同様である)。すると幾何学的につぎの(6)～(9)式が成立する。

$$L' = y_{1c} / (\sin \varphi_{c1} \cdot \cos \alpha_c) \quad \dots\dots(6)$$

$$L'' = y_{1c} / (\sin \varphi_{c2} \cdot \cos \alpha_c) \quad \dots\dots(7)$$

$$y_{2c}' = y_{1c} / (\tan \varphi_{c1} \cdot \cos \alpha_c) \quad \dots\dots(8)$$

$$y_{2c}'' = y_{1c} / (\tan \varphi_{c2} \cdot \cos \alpha_c) \quad \dots\dots(9)$$

ここで α_c は糸の太さのため、糸軸が編布の厚さ方向に傾斜する角度を表わし

$$\alpha_c = \tan^{-1}(D/y_{1c}) \quad \dots\dots(10)$$

である。

一方、この境界伸長状態においては、前述の定義によ

り、各ループの糸張力は等しい。これを T とし、 X_2 軸方向の力のつり合いから φ_{c1} , φ_{c2} の関係がつぎのように得られる。

$$T \cos \varphi_{c1} = 2T \cos \varphi_{c2}$$

$$\therefore \cos \varphi_{c1} = 2 \cos \varphi_{c2} \quad \dots\dots(11)$$

したがって(11)式を用いて(3), (6), (7)式を整理すると

$$\frac{L}{y_{1c}} = \frac{1}{\cos \alpha_c} \left(\frac{1}{\sin \varphi_{c1}} + \frac{4}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi_{c1}}} \right) \quad \dots\dots(12)$$

また(5), (8), (9), (11)式より

$$\frac{y_{2c}}{y_{1c}} = \frac{\cos \varphi_{c1}}{\cos \alpha_c} \left(\frac{1}{\sin \varphi_{c1}} + \frac{1}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi_{c1}}} \right) \quad \dots\dots(13)$$

が導かれる。

y_{1c} , y_{2c} , D を L で除して無次元化し

$$Y_{1c} = y_{1c} / L$$

$$Y_{2c} = y_{2c} / L$$

$$d = D / L$$

$$\left. \begin{aligned} Y_{1c} &= y_{1c} / L \\ Y_{2c} &= y_{2c} / L \\ d &= D / L \end{aligned} \right\} \dots\dots(14)$$

とおくと、(10), (12), (13)式に代わり、つぎの一般式が得られる。

$$\alpha_c = \tan^{-1}(d/Y_{1c}) \quad \dots\dots(15)$$

$$\frac{1}{Y_{1c}} = \frac{1}{\cos \alpha_c} \left(\frac{1}{\sin \varphi_{c1}} + \frac{4}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi_{c1}}} \right) \quad \dots\dots(16)$$

$$\frac{Y_{2c}}{Y_{1c}} = \frac{\cos \varphi_{c1}}{\cos \alpha_c} \left(\frac{1}{\sin \varphi_{c1}} + \frac{1}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi_{c1}}} \right) \quad \dots\dots(17)$$

したがって(14)式の構造定数 d が定まれば(15)～(17)式より Y_{1c} と Y_{2c} の関係を計算することができる。第4図にコンピューターによって求めた d をパラメーターとすると Y_{1c} と Y_{2c} の関係を示す。

(第4図) Y_{1c} と Y_{2c} の関係

二軸変形様式 k_1 または k_2 と Y_{1c} , Y_{2c} の間には

$\varepsilon_1 \leq \varepsilon_2$ のとき

$$Y_{1c} = k_1 \frac{y_{01}}{y_{02}} (Y_{2c} - y_{02}/L) + y_{01}/L$$

$\varepsilon_2 \leq \varepsilon_1$ のとき

$$Y_{2c} = k_2 \frac{y_{02}}{y_{01}} (Y_{1c} - y_{01}/L) + y_{02}/L$$

$$\left. \begin{aligned} Y_{1c} &= k_1 \frac{y_{01}}{y_{02}} (Y_{2c} - y_{02}/L) + y_{01}/L \\ Y_{2c} &= k_2 \frac{y_{02}}{y_{01}} (Y_{1c} - y_{01}/L) + y_{02}/L \end{aligned} \right\} \dots\dots(18)$$

の関係がある³⁾から、 d が定まれば、第4図において(18)式の直線を引き、 $Y_{1c}-Y_{2c}$ の曲線の交点の座標 $[Y_{1c}]$ 、 $[Y_{2c}]$ から

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{c1} &= [Y_{1c}] \cdot L / y_{01} \\ \lambda_{c2} &= [Y_{2c}] \cdot L / y_{02} \end{aligned} \right\} \dots\dots(19)$$

により、 λ_{c1} 、 λ_{c2} を求めることができる。

2.2 糸伸長効果領域の計算

境界伸長比以後の $\lambda_1 > \lambda_{c1}$ 、 $\lambda_2 > \lambda_{c2}$ の伸長域での変形を糸の伸長に基づくものと考え、糸は完全にフレキシブルであるとする。また本領域では交差点において糸は摩擦のため固定され、滑らないものとする。

したがって単位構造の形状は境界伸長状態のそれと同じで、ただ糸伸びの影響だけが入ったものである。伸長比 λ_1 、 λ_2 における荷重 F_1 、 F_2 は糸の交差角の変化と力の平衡から計算することができる。

いま本領域に関するものに添字 s を付けて表わし、 $\lambda_{s1} = \lambda_1 / \lambda_{c1}$ 、 $\lambda_{s2} = \lambda_2 / \lambda_{c2}$ とし、 y_{s1} 、 y_{s2} を

$$\left. \begin{aligned} y_{s1} &= \lambda_{s1} \cdot y_{1c} \\ y_{s2} &= \lambda_{s2} \cdot y_{2c} = \lambda_{s2}' \cdot y_{2c}' + \lambda_{s2}'' \cdot y_{2c}'' \end{aligned} \right\} \dots\dots(20)$$

とする。また λ_{s1} 、 λ_{s2} における単位構造の長さを l_s とすると

$$l_s = (Ls' + 2Ls'') + (1 + \pi)D \quad \dots\dots(21)$$

また $\lambda = \lambda_c$ のときの長さ l_c は(4)式より

$$l = l_c = (Lc' + 2Lc'') + (1 + \pi)D \quad \dots\dots(22)$$

幾何学的形状より

$$\left. \begin{aligned} Ls' &= \sqrt{(ys_2')^2 + (ys_1')^2 + D^2} \\ Ls'' &= \sqrt{(ys_2'')^2 + (ys_1'')^2 + D^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(23)$$

$$\left. \begin{aligned} Lc' &= \sqrt{(y_{2c}')^2 + (y_{1c}')^2 + D^2} \\ Lc'' &= \sqrt{(y_{2c}'')^2 + (y_{1c}'')^2 + D^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(24)$$

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi_{s1} &= y_{s2}' / Ls' \\ \cos \varphi_{s2} &= y_{s2}'' / Ls'' \end{aligned} \right\} \dots\dots(25)$$

よって、単位構造が λ_{s1} 、 λ_{s2} に伸長されたときのシンカー ループ、ニードル ループそれぞれの糸の伸長比 λ_y' 、 λ_y'' は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_y' &= Ls' / Lc' \\ \lambda_y'' &= \{Ls'' + (1 + \pi)D/2\} / \{Lc'' + (1 + \pi)D/2\} \end{aligned} \right\} \dots\dots(26)$$

一方、糸の伸長比 λ_y の関数として、糸張力 T が与えられるものとする。するとシンカー ループ、ニードル ループそれぞれの糸張力 T' 、 T'' は

$$T' = f(\lambda_y'), \quad T'' = f(\lambda_y'') \quad \dots\dots(27)$$

となる。平衡状態において、糸を非線型の弾性体とした第5図の等価モデルからわかるように、 X_2 軸方向の分力 F_{s2}' と F_{s2}'' は等しいから

(第5図) 糸伸び効果領域における力のつり合い

$$\begin{aligned} F_{s2} &= F_{s2}' = f(\lambda_y') \cos \varphi_{s1} \\ &= F_{s2}'' = 2f(\lambda_y'') \cos \varphi_{s2} \quad \dots\dots(28) \end{aligned}$$

が成り立つ。

したがって(20)式の λ_{s2}' 、 λ_{s2}'' が定まれば、任意の伸長比 λ_{s1} 、 λ_{s2} における F_{s2} を(20)~(28)式により計算できる。このためには、つぎの図式解法を用いるのが便利である。 λ_{s2}' を任意に定め、(20)式により λ_{s2}'' を求め、(20)~(28)式を用いて F_{s2}' 、 F_{s2}'' を別々に計算する。つぎに λ_{s1}' を変えて、同じ手順をくり返し、順次その計算結果を λ_{s2}' をよこ軸、 F_{s2}' 、 F_{s2}'' をたて軸とする図を作り、図中の交点より λ_{s2}' および F_{s2} を決定する。

X_1 軸方向の力 F_{s1} は、幾何学的形状より

$$\begin{aligned} F_{s1} &= F_{s2} (\tan \varphi_{s1} \cdot \cos \alpha_s + \tan \varphi_{s2} \cdot \cos \alpha_s) \\ &= F_{s2} (y_{s1}/y_{s2}' + y_{s1}/y_{s2}'') \quad \dots\dots(29) \end{aligned}$$

ここで $y_{s2}' = \lambda_{s2}' \cdot y_{2c}'$ 、 $y_{s2}'' = \lambda_{s2}'' \cdot y_{2c}''$

以上の計算をすべての λ_{s1} 、 λ_{s2} についてくり返すと、 λ_{s1} 、 λ_{s2} と F_{s1} 、 F_{s2} の関係が得られる。ついで

$$\lambda_1 = \lambda_{s1} \cdot \lambda_{c1}, \quad \lambda_2 = \lambda_{s2} \cdot \lambda_{c2}$$

によりもとの伸長比に戻すと、 λ_c を出発点とする F_{s1} 、 F_{s2} の2本の曲線が得られる。

2.3 糸の曲げ効果領域の計算

2.3.1 構造モデル

境界伸長比より前の領域、 $\lambda_1 < \lambda_{c1}$ 、 $\lambda_2 < \lambda_{c2}$ においては、糸は伸長せず、ただ曲げの効果による力のみが作用している領域と考えて解析を行なう。

(第6図) 曲げ効果領域のモデル

弛緩状態において、すべてのループは交差部分を除いて円弧の形態をとるという構造の近似等価変換を行ない⁸⁾、本領域の構造モデルを第6図のように定める。すなわち、開き目の場合、ニードル ループは編目の下方で交わらないため、シンカー ループとそれに続く編目の1本のニードル ループとは1つの円弧を形成するものとし、単位構造を2つの円弧からなるモデルで置換する。そして弛緩状態での交点 O の位置の決定は困難であるが、閉じ目の場合と同様に、つぎのような近似を行なう¹⁾。

(第7図) 弛緩状態の交点の定め方

境界伸長状態、第7図(a)からニードル ループとシンカー ループの X_2 軸方向の長さの比率 $y_{2c'}/y_{2c''}$ をそのままにして、 $\lambda=1$ 、すなわち変形前の大きさにまで単位構造を縮小すると、ループの交点 O_c は図(b)の O_{0c} 、すなわち $y_{2c0'} = y_{2c'}/\lambda_{c2}$ になる。また図(b)で交点 O_{0c} を右方に移動させると、2本の糸からなるニードル ループ長が増すため、 O_0 の位置で糸がまっすぐに張った状態になる。この状態におけるシンカー ループの X_2 軸上への投影長 $y_{002'}$ は

$$L = \sqrt{(y_{002'})^2 + y_{01}^2 + D^2} + 2\sqrt{(y_{02} - y_{002'})^2 + y_{01}^2 + D^2} \quad \dots\dots(30)$$

を満足する値として計算される。弛緩状態でのループの交点 O はこの2点 O_0 と O_{0c} の中点付近になることが予想される。そこで平均位置

$$y_{02'} = (y_{2c'}/\lambda_{c2} + y_{002'})/2 \quad \dots\dots(31)$$

を変形前のループ交点 O の位置とする。なお $y_{2c'}$ 、 λ_{c2} は二軸均等引張り ($k_1=k_2=1$) の場合の値を用いることにする。

編目が二軸伸長されると、ループ交点は $y_{02'}$ から境界伸長状態の位置 y_{2c} に向かって移動していくが、この動きは伸長ひずみ (λ_2-1) に正比例するものとする。

すなわち

$$y_{22'} = \lambda_2 \cdot y_{022'} = \lambda_2 \left\{ y_{02'} + (y_{2c'} - y_{02'}) \times \frac{(\lambda_2 - 1)}{(\lambda_{c2} - 1)} \right\} \quad \dots\dots(32)$$

$k_2 \leq 0$ のとき

$$y_{22'} = y_{022'} = y_{02'} + (y_{2c'} - y_{02'}) \frac{(\lambda_1 - 1)}{(\lambda_{c1} - 1)} \quad \dots\dots(33)$$

編目が二軸伸長を受けるとき、第6図に示した単位構造の変形は(32)または(33)式と次式により表わされる。

$$\left. \begin{aligned} y_{21} &= \lambda_1 \cdot y_{01} \\ y_{22} &= \lambda_2 \cdot y_{02} \end{aligned} \right\} \dots\dots(34)$$

また曲げ効果領域でのモデルにおける2つの円弧長の和 L_a は、第6図からわかるように $L_a = l - \pi D$ 、変形前の $\overline{OM}$ 、 $\overline{ON}$ の長さをそれぞれ L_a' 、 L_a'' 、その両端間隔 $\overline{OM}$ 、 $\overline{ON}$ を d_0' 、 d_0'' 、任意の伸長比における $\overline{OM}$ 、 $\overline{ON}$ を d_i' 、 d_i'' とすると

$$L_a = L_a' + L_a'' \quad \dots\dots(35)$$

$$\left. \begin{aligned} d_0' &= \sqrt{(2y_{01})^2 + (y_{02})^2 + D^2} \\ d_i' &= \sqrt{(2y_{i1})^2 + (y_{i2})^2 + D^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(36)$$

$$\left. \begin{aligned} d_0'' &= \sqrt{(y_{01})^2 + (y_{02})^2 + D^2} \\ d_i'' &= \sqrt{(y_{i1})^2 + (y_{i2})^2 + D^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(37)$$

が、その幾何学的形状より導かれる。

この曲げ領域におけるモデルでは、糸が直線形状をとるとき、すなわち境界伸長状態では前述の境界伸長状態のモデルと構造が異なり、また $L_a \neq L$ であるため、前述の境界伸長比 λ_{c1} 、 λ_{c2} と、曲げ効果領域のモデルから導かれる境界伸長比 $[\lambda_{c1}]$ 、 $[\lambda_{c2}]$ とは異なる値となる。このため、つぎのようにブラック ボックス 的思考を加味して、 L_a の修正を行なう。

$\lambda_{c1} = [\lambda_{c1}]$ 、 $\lambda_{c2} = [\lambda_{c2}]$ となるように L_a を定めるほうが近似度は高いであろう。すなわち

$$\left. \begin{aligned} L_a(\lambda_c) &= \sqrt{(2y_{1c})^2 + (y_{2c})^2 + D^2} \\ &\quad + \sqrt{(y_{1c})^2 + (y_{2c'})^2 + D^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(38)$$

として $\lambda=1$ から $\lambda=\lambda_c$ の間で L_a は $L_{a0} = (l - \pi D)$ から $L_a(\lambda_c)$ まで λ に比例して変化するとみなして

$$L_a(\lambda) = L_{a0} - (L_{a0} - L_a(\lambda_c))(\lambda - 1)/(\lambda_c - 1) \quad \dots\dots(39)$$

ここで円弧は第6図のように2つの部分があるから、それぞれを $L_a'(\lambda)$ 、 $L_a''(\lambda)$ とし、(35)式に代わり次式を用いる。

$$L_a(\lambda) = L_a'(\lambda) + L_a''(\lambda) \quad \dots\dots(40)$$

ここで λ は k_1 のとき λ_2 、 k_2 のとき λ_1 を用いるものとする。

2.3.2 曲げ効果領域の二軸伸長理論

曲げ効果領域の伸長挙動は各ループを、第8図に示すように最初円弧状の細棒を θ_0 が一定のまま、両端間隔 d_i を広げる変形挙動で等価置換させる⁸⁾、この場合、伸

(第8図) 両端固定円弧棒の伸長変形

長比 λ と両端間隔 d_λ 、円弧の長さ $[L_a]$ の間にはつぎの関係がある³⁾。

$$\left. \begin{aligned} d_\lambda &= \lambda \cdot d_0 \\ [L_a] &= \lambda c \cdot d_0 \\ \lambda c &= \theta_0 / \sin \theta_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots(41)$$

$$d_\lambda / [L_a] = J(K, \theta_0) / H(K, \theta_0) \quad \dots\dots(42)$$

ただし

$$H(k, \theta_0) = \int_0^{\theta_0} \frac{d\theta}{\sqrt{1/K + \sin^2(\theta/2)}}$$

$$J(K, \theta_0) = \int_0^{\theta_0} \frac{\cos \theta d\theta}{\sqrt{1/K + \sin^2(\theta/2)}}$$

(40), (41)式より K を求めて、次式に代入すると任意の伸長比 ($\leq \lambda c$) における外力 P が求まる。

$$\left. \begin{aligned} P &= \left\{ \frac{H(K, \theta_0)}{[L_a]} \right\}^2 B \\ \text{または} \\ P &= \left\{ \frac{J(K, \theta_0)}{d_\lambda} \right\} \cdot B \end{aligned} \right\} \dots\dots(43)$$

ただし B は糸の曲げ剛性である。

したがって、 $L_a'(\lambda)$ と $L_a''(\lambda)$ の関係がわかれば(41)~(43)式に(36)~(40)式により計算された値を代入すると、それぞれの円弧の両端に加えるに必要な外力 P' 、 P'' が算出される。

一方、二軸伸長に伴い、第6図に示した単位構造内で、 ON の糸は OM のループへ交点 O を滑って移動していく。交点 O の位置を(32), (33)式により定めると、 P' と P'' の間には摩擦係数を μ として、次式が成り立つと仮定する。

(第9図) 接触角と円弧の伸長力 P との関係

$$P' = P'' e^{\mu \phi} \quad \dots\dots(44)$$

ここで ϕ は接触角で、第9図に示すように

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = \tan^{-1}(2y_{\lambda 1}/y_{\lambda 2}) + \tan^{-1}(y_{\lambda 1}/y_{\lambda 2}) \dots\dots(45)$$

しかし、 P' 、 P'' を計算する(42), (43)式は非線型であるので、(44)式を満足させる解析解を求めることは困難である。このためつぎの図式解法を用いる。

$L_a'(\lambda)$ 、または $L_a''(\lambda)$ を順次変えて、(36)~(43)式により P' および $P'' e^{\mu \phi}$ を計算し、 $L_a'(\lambda)$ または $L_a''(\lambda)$ をよこ軸、 P' と $P'' e^{\mu \phi}$ をたて軸とする図の交点より P' および $L_a'(\lambda)$ 、 $L_a''(\lambda)$ を決定する。

単位構造の X_2 軸方向の荷重 F_2 は、第1図の編目構造よりわかるように、第6図の O 点において右方に引っ張られる力は P' の X_2 軸方向の分力だけであるから

$$F_2 = P' \cos \varphi_1 = P' \cdot y_{\lambda 2} / d_\lambda' \quad \dots\dots(46)$$

X_1 軸方向の力 F_1 は、 P' と P'' の X_1 軸方向の分力の合力であるから

$$F_1 = P' \sin \varphi_{\lambda 1} \cos \alpha_{\lambda 1} + P'' \cdot \sin \varphi_{\lambda 2} \cdot \cos \alpha_{\lambda 2} \quad \dots\dots(47)$$

ここで

$$\sin \varphi_{\lambda 1} = \sqrt{(2y_{\lambda 1})^2 + D^2} / d_\lambda'$$

$$\cos \alpha_{\lambda 1} = 2y_{\lambda 1} / \sqrt{(2y_{\lambda 1})^2 + D^2}$$

$$\sin \varphi_{\lambda 2} = \sqrt{(y_{\lambda 1})^2 + D^2} / d_\lambda'$$

$$\cos \alpha_{\lambda 2} = y_{\lambda 1} / \sqrt{(y_{\lambda 1})^2 + D^2}$$

2.4 2領域の特性の合成

境界伸長比を境にして、引張荷重が0から無限大に変化し、主に低伸長域を支配する曲げ効果領域の特性と、境界伸長比を出発点として急激に立ち上がり、現実の特性に漸近していく糸伸長効果領域の特性が求められたが、これらは本来分離して存在するものではない。このため第10図に示す方法により合成を行なう。曲げ効果領域曲線の任意の点 P を QQ' に等しく λ の増加方向へ移動させ、新しい点 P' をとる。曲げ効果領域曲線の各点に対す P' 点の描く軌跡を合成曲線とする。

(第10図) 2領域の合成法

3. 実 験

3.1 実験試料および装置

上述の理論の精度を検討するため、ナイロン フィラメント糸, 30, 100 デニール, ポリエステル フィラメント糸50デニールを用いて, 3 種の“開き目” シングルトリコット編 (デンビー編) 布を編成し, その二軸伸長特性を実測した. また顕微鏡写真によりその構造変化を調

(第11図) 糸の伸長特性

(第1表) 実験に用いた試料

	No. 1	No. 2	No. 3
使 用 糸	ナイロン 30d <i>fil.</i>	ナイロン 100d, 24 <i>fil.</i>	ポリエス テル 50d 18 <i>fil.</i>
糸の EI , $g \cdot mm^2$	0.0247	0.0631	0.0596
編 目 長 l , mm	1.627	2.005	2.0500
ウェール間隔, mm	0.5882	0.6250	0.8000
コース間隔, mm	0.1539	0.2041	0.2174
糸の摩擦係数, μ	0.1686	0.2201	0.1780
糸の直径 D , mm	0.0598	0.1108	0.0711
D / L	0.043	0.072	0.041
糸の撚数 / m	7	10	15

また第1表にこれら編布の構造定数を示す. なお表中, 糸の直径は“閉じ目”の場合と同様に糸伸び効果領域の値が実測値に最も良く合う最密充てん糸の短径を用いることとする. 糸の曲げ剛性 EI は単繊維の曲げ剛性に構成繊維本数を乗じたもので, その単繊維の弾性係数 E は荷重-伸長曲線の比較的伸長初期で, かつ直線的な立ち上がり特性より求め, 断面二次モーメント I は単繊維断面を円に近似し, 次式により計算した.

(a) $\lambda_1=1.15$, $\lambda_2=1$

(c) $\lambda_1=1.65$, $\lambda_2=1$

(b) $\lambda_1=1.40$, $\lambda_2=1$

(d) $\lambda_1=1.90$, $\lambda_2=1$

(第12図) 編布の構造変化 (ポリエステル 50den 編布 $k_2=0$)

$$I = \pi d'^4 / 64$$

ここで d' : 単繊維直径

摩擦係数は糸を直交させ、接触角 90° で測定し次式により算出した。

$$T_1 / T_2 = e^{\mu \phi}$$

なお表の μ 値は T_2 を 10, 20, 30, 50g とした場合の平均値である。

実験装置および実験方法は別報²⁾ の“閉じ目”の場合と同じで、坂口、川端らによって試作された平板試料の二軸引張試験機⁴⁾ を用い、試料の大きさ 11.3cm×11.3cm, チャック間隔 9.5cm, 有効試料幅 7.5cm, 引張速度 20mm/min とし、試料周辺部を軟質接着剤(ソニーボンドタフ)で補強して周辺部のランやほつれを防いだ。

変形様式は $k_1=0, 0.5, k_2=0, 0.5$ および $k_1=k_2=1$ の 5 種類を用い、それぞれについて実測および理論計算を行なった。

3.2 編布の構造変化

本報において設定した構造モデルの妥当性を確かめるため、二軸伸長における編布の構造変化を顕微鏡写真により観察した。第12図にその 1 例 ($k_2=0$ の場合) を示す。

変形初期(図(a), (b))においては、曲げ効果領域において設けたモデルは実際の編布の構造変化に非常に忠実であることがわかる。

大きな伸長域(図(d))では、構造が閉じ目より簡単なため、伸び効果領域のモデルが妥当であることが明確にみとめられる。また糸伸び効果領域では、糸は滑らず、シンカー、ニードル ループ間の糸の移動はないという仮定を設けているが、写真観測によると比較的大伸長域(図(d)のような形状をとる領域)での糸の移動はごくわずかで、その仮定の妥当なことが明らかとなった。

3.3 実測値と理論値の比較

(第13図) 2 領域の合成例 (ナイロン 30den 編布)

編布の二軸伸長特性の理論値は、前述のように、低伸長域を主に支配する曲げ効果領域と、高伸長域を支配する糸伸び効果領域とを境界伸長比を中心にして合成したものであるが、第13図にナイロン30デニールを用いた編布の場合の各領域の理論曲線と、それを合成した理論曲線の 1 例を実測値とともに示す。

また第14図にポリエステル50デニール編布、第15図に

(第14図) 理論値と実測値の比較 (ポリエステル 50 den 編布)

ナイロン 100 デニール編布について理論曲線と実測曲線を比較した数例を示す。またこれらにおいて $\mu=0$ として計算した理論曲線もあわせて示す。

3.3.1 糸間の摩擦について

第14～15図において、一点鎖線に示したものは、曲げ効果領域において摩擦係数 $\mu=0$ として計算したものである。摩擦を考慮した点線の理論値と比較すると、ウェール方向の荷重 F_1 においてはほとんど差はなく、コーン方向の荷重 F_2 においては $\mu=0$ のほうがいくぶん小さいが、その差は大きいものではない。したがって、糸間の摩擦が理論値に及ぼす影響はかなり小さいものであることがわかる。また理論値と実測値を比較すると $\mu=0$ の理論値のほうが実測値に近い値を示すことが多い。これは曲げ効果領域で計算に用いた接触角 ϕ を第16図の点線で示したように円弧の弦が形成する接触角で近似したが、実際は第16図の実線で示したように、それより

(第15図) 理論値と実測値の比較 (ナイロン 100 den 編布)

(第16図) 接 触 角

かなり小さいため、したがって糸間の摩擦は無視できるぐらい小さいものであることを示すものと思われる。

本報においては力のつり合いを考えるうえで、糸間の摩擦の影響を考慮したが、糸の拘束点が1つ多い閉じ目の場合でも、曲げ領域でその摩擦の影響を無視して十分な精度が得られたのであるから、この開き目においても、上述の結果を考慮すれば、曲げ効果領域における糸間の摩擦は無視してよいと思われる。

なお、実線の実測値は $\mu=0$ の一点鎖線と摩擦を考慮した点線の間にあるはずであるが、かならずしもそうでないのは、編布が伸びやすく、不安定なため生じた測定誤差であろう。

3.3.2 各種変形様式の場合について

いずれの変形様式においても、理論値と実測値はかな

りの良い一致が見られる。特にその伸長特性の傾向は非常に良く似ている。したがって、本理論は複雑な構造をもつ、この開き目シングルトリコット編のあらゆる変形様式の特性計算を高い精度で行なえることがわかる。

なおナイロン100デニール編布の $k_1=k_2=1$ と $k_1=0.5$ の場合、実測値と理論値の差が少し大きい。この編布は密で、 D/L が大きい。このため均等引張りに近くなるほど、 L の値に大きく支配される境界伸長比の計算に対して L の測定誤差が厳しく影響していることが考えられる。

3.3.3 糸の曲げ剛性について

糸の曲げ剛性 EI として、単繊維の曲げ剛性を計算し、それをフィラメント本数倍して用いたが、前第12図(a), (b), (c)でわかるように、このような撚数の少ないフィラメント糸ではこの方法の正しいことがわかる。おそらく低伸長域では各フィラメントが独立して挙動するのであると思われる。糸が最密充てん状態に接近する高伸長時では、上記の仮定は正しくないが、この領域での引張特性は糸伸び効果領域に主に支配されるため、たとえば繊維相互間の摩擦などが糸の曲げ剛性を変化させても、曲げ効果がほとんど無視できるので理論値の誤差は少ない。

3.3.4 糸のつぶれ効果について

糸のつぶれ(扁平化)は写真観測によるといくぶんみとめられるが、閉じ目より構造が単純なためか、閉じ目の場合ほど明確にその影響が現われず、フィラメント糸を用いた場合は糸のつぶれの影響は無視してよいと思われる。

4. “閉じ目”と“開き目”の相違

第17図は100デニールナイロン糸を用いて、ほぼ同じ条件で編成した閉じ目、開き目それぞれのシングルトリコット編布の外観である。これからわかるように編成条件は同じでも、閉じ目と開き目は編目の下方でニードルループが交わるか、交わらないかの相違にすぎないが、一般に閉じ目のほうが密度が小で、外観が良く、安定した構造を有する。しかし構造定数その他の条件が同じである両方の編布を編成し、実験的に両者を比較することは困難である。このためここでは、前述の開き目に関する理論と、すでに別報において発表した閉じ目に関する理論とを用いて、両者を比較し、その力学的特性にみられる2, 3の相違を明らかにする。

4.1 境界伸長比および糸伸び領域

前述のように境界伸長状態における伸長比 λ_{c1} , λ_{c2} は糸材質が同じ場合は編布の伸びやすさを比較するのに用いることができる。

第18図は閉じ目と開き目それぞれの境界伸長比と D/L

(a) 開き目

(b) 閉じ目

(第17図) シングル デンビー編布外観 (ナイロン 100 den 編布)

(第18図) D/L と境界伸長比の関係
($y_{01}/L=0.2$, $y_{02}/L=0.2$) (第19図) 変形様式と境界伸長比の関係
($D/L=0.06$, $y_{01}/L=0.2$, $y_{02}/L=0.2$)

の関係を示す 1 例である。この場合は構造定数はいずれも $y_{01}/L=0.2$, $y_{02}/L=0.2$ である。編目長に比べて糸直径が極端に小さい場合、すなわち $D/L < 0.2$ ぐらいでは、両者にほとんど差はない。しかし D/L が大きくなるにしたがい、閉じ目の境界伸長比の減少ははだいに大きくなり、開き目のそれとの差が広がっていく。また第19図は $D/L=0.6$, $y_{01}/L=0.2$, $y_{02}/L=0.2$ のときの変形様式と境界伸長比の関係である。 D/L が同じなら両者の境界伸長比の差は変形様式によってあまり変化しないことがわかる。

一方、境界伸長比以後の糸伸び効果領域の両者の計算例を第20図に示す。境界伸長比が異なっても、糸伸び領

(第20図) 糸伸び効果領域の特性と D/L

域の特性は D/L によってあまり変わらないことがわかる。この特性は比較的大きい伸長域を支配するものであるから、境界伸長比と合わせ考えると、構造定数、糸材質が同じなら高荷重に対する編布の伸びは、 D/L が小さいときは閉じ目と開き目の差はほとんどないが、 D/L が大きいときは開き目のほうが大きくなり、また弛緩状態において糸の曲がり量も多いといえる。

4.2 伸 長 特 性

閉じ目と開き目の理論曲線の比較を第21, 22図に示

(第21図) 変形様式を変えた計算例

す。いずれも構造定数を等しくとり、 $y_{01}=0.2$, $y_{02}=0.4$, $D/L=0.01$, $EI=0.01\text{g}\cdot\text{mm}^2$ とし、また曲げ効果領域の摩擦係数 $\mu=0$ として計算したもので、第21図は変形様式を変えた場合、第22図は L を変えた場合である。これらの理論曲線は、 $D/L=0.01$ であるから境界伸長比および糸伸び効果領域は、閉じ目も開き目も同じとみなせる。よって閉じ目と開き目の理論曲線の相違は曲げ効果領域の相違にもとづくもので、いずれの場合も開き目のほうが低伸長比において低い値を示す。すなわち開き目は閉じ目より低荷重でよく伸びる。さらに、 D/L が大きい場合は、開き目のほうが境界伸長比が大となるから、全体としても開き目の伸長特性は閉じ目より低いことがわかる。

開き目は編目下方でニードル ループが交わらず、糸の拘束点が少ないことも考え合わせると、開き目の編布は閉じ目よりかなり不安定な、変形しやすい編布であることが推定される。

(第22図) L を変えた計算例 ($k_1=k_2=1$)

5. 結 語

開き目のシングル トリコット編布をウエール方向とコース方向にそれぞれ任意の伸長比で二軸伸長したときの、伸長比と伸長荷重の関係を、すでに報告した閉じ目の場合の手法を適用して、理論的に計算する式を編布構造と糸の伸長特性、摩擦特性とから誘導した。

さらに3種のフィラメント糸を用いたシングル トリコット編布の二軸伸長特性を実測し、理論値と比較した。その結果、二軸伸長のすべての変形様式における特性を容易に計算でき、フィラメント糸の編布の場合、本理論が高い精度を持ち、また曲げ効果領域では糸間の摩擦を無視できることがわかった。

最後に本報で誘導した開き目の編布の二軸伸長理論と、別報で確立した閉じ目の理論を用いて、閉じ目と開き目の二軸伸長特性における2, 3の相違を明らかにした。

終わりに本研究に試料を御提供いただいた大阪府立織維工業指導所大阪分室ならびに東洋紡績に感謝の意を表わし、あわせて本研究に対し討論いただいた京都大学高

分子化学教室内繊維集合体力学研究会の諸氏に感謝の意を表わす。

文 献

- 1) 柳川, 川端, 河合; 繊維誌, **23**, T36 (1970)
- 2) 柳川, 川端, 中川, 当山, 河合; 繊維誌, **23**, T48 (1970)
- 3) 川端; 繊維誌, **23**, T30 (1970)
- 4) 坂口, 川端, 河合, 裕; 材料, **17**, 365 (1968)