糸伸長特性の導入について

織布二軸伸長特性の有限要素解析 (第2報)

同志社大学 工学部 平 井 恒 夫 (会員)
 大阪市立大学 工学部 深 井 完 祐 ()
 同志社大学 大学院 仙 波 卓 弥

Yarn Tensile Property for Analysis. Finite Element Analysis on the Biaxial Tensile Properties of Woven Fabrics (Part 2).

Tsuneo Hirai*, Sadasuke Fukai** and Takuya Senba*,

*Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto.

**Faculty of Engineering, Osaka City University, Osaka.

Abstract

Along with the woven structure, the material property of the yarn that is intensified or weakened under the woven deformation will be a primary factor to govern the mechanical characteristics of fabrics. Out of these diversity the attempt to grasp the material non-linearity of the yarn, that is the three dimensional assemblies of filaments has been made actively. However, the experimental research to evaluate the heterogeneous characteristics of the yarn has not carried out popularly.

In the first part of this paper, the non-linear and non-homogeneous material properties of the yarn under the tensile and compressive deformation are cleared up by experiment. Secondly, for the purpose of introducing the optimum yarn property to designing system on woven fabrics, the effect of tensile and compressive properties of the yarn on the uniform biaxial tensile characteristics of plain weaves is cleared up by an analytical research.

It is made clear that the material property of the yarn against tensile deformation shows an essentially non-homogeneous and non-linear characteristics influenced by the specimen length. Subsequently, the unsymmetric shape deformation and heterogeneous distribution of filaments in the yarn cross section subjected to compressive displacement can be observed by a microscope. Also the non-linearity of compression ratio α , indicated in the previous paper can be measured. The influence of heterogeneous property of the yarn upon tensile deformation of plain weaves is cleared up by analyzing the uniform biaxial extension of plain weaves, especially in its large deformation area. And it is considered that the available guideline for the practical woven design can be given by taking into account of the average filament length of the yarn for the tensile rigidity of the constituent Rahmen element and using $1/4$ to $1/2$ value as compression ratio α .

(Received December 11, 1980)

摘 要

目的 織布解析法への適用が妥当であると考えられる糸特性の把握を目的として、糸の引張りならびに圧縮試験を行い、繊維集合体としての基本的な材料特性を明らかにする。また、数値実験により、物理的意味を損わず本解析法に適合する糸特性を見出す。

成果 (1)糸の伸長特性は、試料長に依存し、不均質な挙動を呈する。とくに、糸を構成する単繊維長前後の試料長を選択した場合には、上記の特性を顕著に見ることができた。

(2)圧縮変形下における糸横断面の形状変化や繊維密度の分布を顕微鏡観察した結果、非対称な形状の変化や、不均一な繊維の分布を観察することができた。

(3)平均単繊維長を考慮して糸の伸長特性を解析に導入すること、ならびに $1/4$ から $1/2$ の値を圧縮変形比として用いることにより、実用上有意義な織布設計指針が得られた。

(昭和55年12月11日受理)

1. 緒 言

織布を構成する糸は、単繊維のもつ機械的性質や隣接繊維間の摩擦変形などに起因して、みかけ上非線形な材料特性を示す。この糸特性を把握しようとする試みは、これまでも盛んになされている。

たとえば、野呂田ら^{1),2)}は紡績糸の繊維構造を明らかにするとともに、力学モデルを用いてその伸長変形挙動を理論解析している。また、G. A. Carnaby ら³⁾は弾性エネルギー法⁴⁾を用いて紡績糸の伸長変形挙動を解析し、伸長比と断面収縮率との関係を明らかにした。さらに、三浦⁵⁾は撚数や糸の張力状態の相違に依存して変化する糸の圧縮特性を実験により求め、圧縮変形抵抗や回復弾性率を誘導している。

本報では、織布解析法⁶⁾への効果的な糸特性の導入を目的として、伸長ならびに圧縮変形下における糸の挙動を実験により明らかにする。すなわち、強伸度に及ぼす試料長の影響を考察した鈴木ら⁷⁾と同様の観点から、糸の伸長特性に及ぼす試料長の影響を求める。また、圧縮変形下における糸横断面の形状変形や繊維の疎密を顕微鏡観察する。さらに、糸特性の解釈に大きな不都合をきたさず、前報⁶⁾で報告した織布解析法に適合する糸特性を把握する。

2. 織布解析法への糸材料特性の導入

伸長ならびに圧縮変形下における糸の挙動を実験により求める。また、糸特性の解析への導入を明らかにする。ただし、繊維集合体としての基本的な糸特性、たとえば材料不均質性や糸横断面の圧縮変形形状を把握するため、それらがより顕著に現われていると思われる太番手糸（綿糸1.5 s，単繊維長30±10 mm，撚数24.9 t/in）を実験の対象として使用した。

2.1 糸の伸長変形挙動

きわめて低速な負荷条件（名試料長に対応して10%/min）の下で糸の伸長実験を行うと、図1に示す荷重と伸びとの関係を得る。パラメータには試料長を用いた。同図に示した結果によれば、伸長荷重は試料長に依存し、試料長に短いものを選択するほど同一変位置に対する荷重は増大していることがわかる。

伸長荷重に及ぼす試料長の影響を明らかにするため、縦軸に伸長荷重、横軸に試料長をとり図1に示した結果を整理すると、図2に示す特性曲線を得る。パラメータには対数引張歪みを用いた。100 mm以上の試料長を用いた場合に得られている伸長荷重—歪み特性（伸長特性）は、試料長に依存せず均質体のそれと基本的には同じであることがわかる。一方、試料長が100 mm以下の場合に得られた糸特性は、試料長に依存し本質的に均質体と

図1 試料長を変化させた場合に得られる、糸の伸長荷重—変位特性

図2 糸の伸長特性に及ぼす試料長の影響

は異なった材料挙動を呈している。すなわち、同一歪みに対応する伸長荷重は必ずしも一定ではなく、試料長が短くなるにつれて減少する傾向にある。

上記の材料不均質性に影響を及ぼす要因の1つに、試料把持部での繊維の不整合を挙げることができる⁸⁾。そこで、不均質領域に属する試料長が50 mmの試料に10 mm 間隔の標点を設け、伸長変形下における標点移動の模様を実測した。

連続写真撮影により求めた、各標点の移動変位例を図3に白丸で示す。細線で付記した直線は、糸の内部変位を均質体と同様線形と仮定した場合の分布を示している。ただし、横軸原点は固定端、右端は移動端を意味する。同図に示した結果によれば、試料両端部における移動変位は理論値に比べわずかに低めであるため、把持による影響がいくぶん生じているものと思われる。しかしながら、試料中央部での内部変位に影響を及ぼすには到っていない。

したがって、試料長が100 mm以下の範囲においてみられる糸の材料不均質性は、試料長を短くすればするほど構成繊維の両端部を把持し、単繊維の相互移動を拘束する割合が増加することに起因すると思われる。この試

図3 50mmの試料長を用いて測定した糸の伸長変位分布

料長に依存し伸長特性が変化するという上記の挙動は、繊維集合体としての糸特有のものであると考えられる。

任意の変形下における糸の伸長荷重 P_t を、基準荷重 $(P_t)_{e_0}$ と荷重比 $P_t/(P_t)_{e_0}$ との積として定義すると、基本的には式(1)により図2に示した特性曲線を近似することができる。

$$P_t = P_t/(P_t)_{e_0} \cdot (P_t)_{e_0} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $(P_t)_{e_0}$ は一定歪み ϵ_0 の下で試料長に依存して変化する糸の伸長荷重を表す。いま、引張歪み ϵ_x が10%の場合に得られている非線形な荷重の変化を基準荷重にとり、荷重比特性を求めると、その挙動は図4に示

図4 荷重比 $P_t/(P_t)_{e_0}$ と引張歪みとの関係 ($\epsilon_0=10\%$)

すとおりとなる。したがって、糸の伸長荷重 P_t は引張歪み ϵ_x と試料長 l によって決定される連続な関数と

して式(2)のように求めることができる。

$$P_t(\epsilon_x, l) = f_1(\epsilon_x) \cdot f_2(l) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $f_1(\epsilon_x)$ ならびに $f_2(l)$ はそれぞれ荷重比特性曲線および基準荷重特性曲線の近似式を表す。また、それらは具体的には式(3)のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} f_1(\epsilon_x) &= \sum_{i=1}^n a_i (\epsilon_x)^i \\ f_2(l) &= \sum_{i=1}^m \{ a_i \ln(l+1) + a_2 \}^i \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式(3)による荷重比ならびに基準荷重特性曲線の近似例を図4および図5に示す。また、式(2)による糸伸長特性曲線の近似例を図6に示す。実線は実測値を、破線はその近似結果を示している。したがって、糸の引張り変形抵抗 $C_{xx}A$ は、接線剛性法を用いると式(4)により求めることができる。

$$C_{xx}A = f'_1(\epsilon_x) \cdot f_2(l) \quad \dots\dots\dots(4)$$

図5 基準荷重特性曲線と近似例 ($\epsilon_x=10\%$)

前報⁶⁾では l を250 mmとした。すなわち図2に示した結果からも明らかなように、均質領域にある糸特性を要素特性に導入した。一方、糸を構成する単繊維の長さは、一般に単位構造内の糸軸長さよりも長く、そのほとんどは隣接交錯糸部に連続しているものと思われる。また、たて・よこ糸の交錯部では摩擦力により糸の燃りや単繊維の伸長変形が局部的に拘束されていると推察される。したがって、織布変形下における織糸の伸長変形挙動は、均質領域にある糸のそれとは本質的に異なっていると考えられる。以上のような観点から、本報では要素の伸長特性として、不均質領域に属する糸特性を使用する。ただし、隣接交錯糸部を結ぶ糸の伸長変形

図6 糸伸長特性曲線と近似例

挙動が不均質領域のどの位置のものと対応するかは定かでない。そこで解析への導入に際し最も有効であると思われる糸特性を数値実験により把握する。

2.2 糸の圧縮変形挙動

定張力下の糸に所定の圧縮変位量を与え、同時に圧縮状態にある糸の変形形状を固定させることを目的として作製した糸圧縮固化装置の概略図を図7に示す。マイク

図7 糸圧縮固化装置の概略図 (①試験機本体, ②マイクロメータヘッド, ③鋼球保持具, ④鋼球, ⑤スプラインスライド, ⑥スプリング, ⑦加圧素子, ⑧糸押え, ⑨糸保持台, ⑩滑車, ⑪成型枠, ⑫ガラス板, ⑬重錘, ⑭水平調節ねじ)

ロメータヘッド(5μ精度)②により、スプラインスライド軸⑤を介して加圧素子(4×12mm)⑦に所定の圧縮変位量を与えたのち、成型枠⑪内の圧縮状態にある糸に不飽和ポリエステル樹脂を流しこみ、樹脂が繊維間に浸透した後固化させるようにした。ただし、樹脂の収縮による影響は、設定した加圧素子下端とガラス板⑫とのギャップから検定した。研磨による周縁部での変形を防ぐため、短冊型試験片①をさらに図8に示すように円形枠内に固定し、固化させたのち、パフ研磨して糸の横断面を顕微鏡観察した。糸の固化ならびに短冊型試料の固定に用いた樹脂と、その配合割合(体積%)は、表1に示すとおりである。

図8 短冊型試験片の固定概略図 (①試供糸, ②成型樹脂, ③固定樹脂, ④円筒枠, ⑤ガラス板)

糸圧縮固化装置を用いて測定した張力下での糸厚変化特性、ならびに、糸内部での繊維密度の変化をそれぞれ、図9および表2に示す。それらの結果によれば、糸張力が無張力状態から200gに変化する間に糸厚は急激に減少し、その後遅減している。一方、糸の繊維密度は、糸厚の減少に対応して密に充填した後はほとんど変化していない。このことは、糸中の繊維は密に充填したのち、糸軸方向に伸長変形され、さらに滑脱していることを意味するように思われる。

図9に示した糸厚変化特性をもとにして、定張力下における糸の圧縮試験を行うと、表3に示す糸横断面の圧

図9 張力下での糸厚変化特性

表1 糸横断面の固化と、短冊型試験片の固定に用いた樹脂とその配合比

	不飽和ポリエステル	スチレン	ナフテン酸コバルト	D.D.M.
成型樹脂	48.5	48.5	1.5	1.5
固定樹脂	99.0	0.0	0.5	0.5

表2 張力下における糸横断面の糸厚変化と繊維密度の変化

Scale \ T[g]	0	20	400	1000
x 100 1 mm				
x 100 0.3 mm				

表3 圧縮変形下における糸横断面の形状変化

T[g] \ δ[mm]	0	0.2	0.4	0.6
5				
50				
1000				

縮変形状を得る。ただし、表中に示されている各断面写真の上方は、加圧変位端側を示す。表3に示した結果によれば、加圧変位端側と、ガラス板に接する側とでの糸断面形状は、必ずしも上下対称ではなく、特に、糸中の単繊維が疎な状態で分布する低張力微小圧縮変形時においては、糸中単繊維の移動は局部的に加圧変位端側に限られている状態がみられる。

次に、圧縮変形下における糸横断面の形状変化の模様を図10のように単純化し、圧縮変形後の糸断面中心点を、

図10 圧縮変形下における糸横断面の模式図

最大糸幅高さ h mm にガラス水平面に平行に引いた線と、左右の中心線との交点として定義すると、図11に示す加圧圧縮変位量 δ mm と糸断面中心点の圧縮変位量 δ_c mm との関係を得る。したがって、変形下における糸横断面の形状変形や、単繊維の移動に基づくと考えられる圧縮変形比 α (δ に対する δ_c の比) の非線形変化は、図11に示した曲線の傾きとして、式(5)により求めることができる。

$$\alpha = \delta_c / \delta = f_i'(\delta) \dots\dots\dots(5)$$

ここに、関数 $f_i(\delta)$ は、図11に示した特性曲線の近似式であり、具体的には、式(6)に示すとおりである。

$$f_i(\delta) = \sum_{i=1}^6 a_i \delta^i \dots\dots\dots(6)$$

前報⁶⁾では圧縮変形比 α の選択を数値実験に頼り、 α に1/4を用いた場合には定量的に実測値と良く一致する織布解析結果の得られることを示した。 α の値が1/6から1/2の簡冊で非線形に変化する。図11に示した結果から考察すると、前報で得られた結果は、たて・よこ糸の

図11 圧縮変位量 δ と、糸横断面中心点の変形量 δ_c との関係

交錯部における単繊維密度が、変形前の状態においてすでに密に変化していることを示唆しているように思われる。この、織布解析法への適用を目的とした、圧縮変位

量の修正の必要性については、川端ら⁹⁾によっても指摘されている。

3. 解析結果と実験結果との比較

平織布の二軸伸長特性に及ぼす、糸材特性の影響を数値実験により明らかにする。また、実測値との比較により、織布解析法への適用が有効であると考えられる糸特性を把握する。ただし、織布のモデル化に用いた梁ならびに仮想ばね要素の要素特性には、織る前の糸特性を使用した。また、糸の曲げ変形抵抗は、引張りあるいは圧縮変形抵抗と比較してきわめて微小であることから $0.0283 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$ 一定とした。

3.1 織布伸長特性に及ぼす糸伸長特性の影響

隣接錯糸部を結ぶ糸の伸長変形が、交錯糸部においては局部的に拘束されていると考え、糸の伸長変形挙動は図2に示した均質領域にある糸のそれとは本質的に異なっていると思われる。しかしながら、交錯糸部における糸の接触状態はきわめて複雑であり、織布変形下における糸の伸長変形挙動が不均質領域のどの位置のものと対応するかは定かでない。一方、図2に示した糸の材料不均質性は、単繊維の不連続性に強く依存しているものと考えられる。そこで、糸を構成する単繊維長を目安として不均質領域内で糸の伸長特性を変化させ、解析への導入に際し最も有効であると考えられる糸特性を数値実験により把握する。

糸を構成する単繊維長のばらつきを考慮して、 l (式(4))を20 mmならびに40 mmとし、二軸均等な伸長変形下における平織布の変形挙動を解析すると図12に示す結果を得る。縦軸は織布の単位長さあたりに作用する伸長荷重、横軸は伸長比を表す。ただし、前報⁶⁾で示した結果との比較のため、圧縮変形比 α には $1/4$ を使用した。図6に示した実験結果からも明らかのように、試料長 l を40 mmとした場合に得られる糸の伸長特性は l を20 mmとした場合のそれと比較して剛な特性をもつ。特に引張歪みが大きくなるにつれてその差は明らかとなる。同様の傾向は、図12に示した織布の伸長特性にも見ることができる。一方、織布伸長比が10%未満の比較的小さな領域における特性の相違は、糸特性のそれほど明確でない。これはクリンプのある糸の形状変形が主に上記の変形領域においてなされているためであろう。したがって、平織布の伸長特性に及ぼす糸伸長特性の影響は、織布の大変形領域において顕著であると考察される。

試料長 l として糸を構成する単繊維の平均長さ30 mmを選択すると、図13に示す荷重と伸長比との関係を得る。比較のため実測値を破線で付記している。また、解析により得られる変形モードを図14に示した。織布伸長比が

図12 平織布の伸長特性に及ぼす糸伸長特性の影響

図13 解析結果と実測値との比較 ($l=30 \text{ mm}$, $\alpha=1/4$)

10%以上の大変形領域においては、伸長比の増加とともに徐々に高めの評価をする傾向の見られた従来の結果(付図1)と比較すると、同領域においても良い近似の得られていることがわかる。このことは、織布変形下における糸の伸長変形挙動が、不均質領域、特に平均単繊維長前後の試料長を用いた場合に得られる糸の挙動と巨視的に類似したものであるということを示唆している。

図14 解析により得られる平織布の変形モード

付図1 圧縮変形比 α に $1/4$ を用いた場合に得られる荷重—伸長比特性と実測値との比較

表5 糸伸長特性曲線の近似係数

内		挿		係		数	
$f_1(\varepsilon_t)$				$f_2(l)$			
a_1	0.771	変形段階	1	a_1	0.240×10^3	変形段階	1
a_2	0.541×10^2			a_2	0.0		
a_3	0.259×10^3		2	a_1	0.105×10^4		2
a_4	0.183×10^5			a_2	-0.170×10^4		
a_5	-0.114×10^5		3	a_1	0.132×10^4		3
a_6	-0.525×10^6			a_2	-0.254×10^4		
a_7	0.177×10^8		4	a_1	0.109×10^4		4
a_8	0.483×10^9			a_2	-0.160×10^4		
a_9	-0.295×10^{10}		5	a_1	0.633×10^3		5
				a_2	0.386×10^3		

したがって、織布解析法への糸特性の導入に際しては、不均質領域にある糸の伸長特性を選択する必要があると考察される。また、それにより大変形領域における織布の変形挙動を追従することが可能となるように思われる。試料長 l として、平均単繊維長を用いることの妥当性については次報でも考察を試みる。ここで解析に使用した織構造定数は表4に示すとおりである。また、糸伸長特性ならびに圧縮特性曲線の近似係数をそれぞれ表5、表6に示す。

3.2 織布伸長特性に及ぼす糸圧縮特性の影響

たて・よこ糸の交錯部に生じる接触圧が、織布の変形挙動を支配する最も大きな要因であると考えられるという点に関しては前報⁶⁾でも考察を試みた。本報では、図11に示した圧縮変形比 α の非線形性を考慮して数値実験を行う。この場合、 α の非線形変化を考慮しない図13に示した結果との比較のため、試料長 l には平均単繊維長

表4 解析に使用した平織布の構造定数

P_i (mm)		θ_i (deg)		D (mm)	$2L_i$ (mm)		ZH_i (mm)		C_i	
P_1	P_2	θ_1	θ_2	D	L_1	L_2	ZH_1	ZH_2	C_1	C_2
0.790	0.845	37.5	33.5	0.793	0.910	0.952	0.403	0.390	1.152	1.126

表6 糸圧縮特性曲線の近似係数

内		挿		係		数	
$f_1(F_c)$				$f_2(T)$		$f_3(F_c)$	
a_1	0.173×10^{-3}	変形段階	1	a_1	49.3	変形段階	1
a_2	-0.240×10^{-5}			a_2	0.0		
a_3	0.146×10^{-7}		2	a_1	20.1		2
a_4	0.166×10^{-10}			a_2	1.39		
a_5	-0.161×10^{-12}		3	a_1	17.7		3
a_6	0.225×10^{-15}			a_2	1.91		

表7 圧縮変化比 α の近似係数

内挿係数	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
$f_4(\delta)$	0.513×10^{-1}	0.186×10	-0.543×10	0.635×10	0.122×10^2	-0.359×10^2	0.230×10^2

30 mm を使用した。

圧縮変形下における糸横断面の形状変化や、繊維の移動に起因すると思われる α の非線形性を考慮して、平織布の二軸均等な伸長変形挙動を解析すると図15に示す荷重と伸長比との関係を得る。 α に線形な定数を用いた場

図15 圧縮変形比 α の非線形変化を考慮した場合に得られる解析結果と、実測値との比較 ($l=30\text{mm}$)

合に得られた図13の結果と比較すると、伸長比が15%以上の大変形領域においても良い近似の得られていることがわかる。したがって、現実の衣服材料の設計に際しても、 α の非線形性を考慮することにより有意義な指針を得られるものと考察される。

しかしながら、糸を構成する繊維本数の少ない現実の細番手糸に対し、図11に示したような糸横断面中心点の圧縮変形特性を求めることはきわめて困難である。また、仮りに厳密に測定しそれを織布解析法に適用したとしても、 α に線形な定数を用いた場合と比較して有意な差は生じないものと考えられる。

したがって、糸伸長特性の材料不均質性を考慮するこ

と、ならびに、1/4から1/2の値を圧縮変形比として用いることにより実用上有効な設計指針を得ることができるものと考えられる。ここで解析に使用した織構造定数と材料定数は、前節のものと同じである。また、式(6)で定義した圧縮特性曲線の近似係数は表7に示すとおりである。

4. 結 言

(1)伸長変形下における糸特性は、本質的に均質体とは異なり、試料長に依存し不均質な材料挙動を呈することを実験により明らかにした。

(2)糸横断面の圧縮変形形状や繊維分布を顕微鏡観察することにより、前報で指摘した圧縮変形比 α の非線形性を確認した。

(3)数値実験により、織布解析法への導入に際し最も有効であると考えられる糸特性を把握した。すなわち、不均質領域に属する糸の伸長特性を用いること、ならびに1/4から1/3の値を圧縮変形比として使用することにより有意義な設計指針の得られることがわかった。

一方、衣服材料や工業用材料として織布が多用されている現状を考慮すると、静的な場合だけでなく、準静的な変形下における織布の変形挙動をも把握することが可能な織布解析法を確立することは実用上重要である。また、織構造や繊維の異なる現実の織布設計に際し、本解析法の適用が有効であるか否かという点に関しては、検討を試みる必要がある。

参考文献

- 1) 野呂田, 川端, 河合; 繊維機械学会論文集, **22**, T168(1969-7)
- 2) 野呂田, 川端, 河合; 繊維機械学会論文集, **22**, T177(1969-7)
- 3) G. A. Carnaby, P. Grosberg; J. Text. Inst., **9**, P299(1976)
- 4) L. R. G. Treloar, G. Riding; J. Text. Inst., **54**, T156(1963)
- 5) 三浦; 繊維機械学会誌, **10**, p.487(1975-6)
- 6) 平井, 仙波; 繊維機械学会論文集, **33**, T139(1980-11)
- 7) 鈴木, 宮下, 金井; 繊維機械学会誌, **9**, p.18(1956-9)
- 8) 鈴木; 繊維機械学会誌, **8**, p.6(1957-4)
- 9) S. Kawabata, M. Niwa and H. Kawai; J. Text. Inst., **64**, P21(1973-2)