(平成 9 年 3 月 12 日受理)

パワーネット布の二軸伸長特性予測へのリニアライジング法の応用

奈良女子大学 稲村綾子・丹羽雅子

Applications of the Linearizing Method to Biaxial Extension of Power-net Fabrics

Ayako Inamura and Masako Niwa

Department of Textile and Apparel Science, Nara Women's University, Nara, 630 Japan

Abstract : In the performance design of power-net fabric having high formative and vibration-proof effects, prediction of extension properties caused by clothing pressure is one of the most important problem. The method of linearizing non-linearity of a fabric assembly, proposed by S.Kawabata in 1986, has been applied to predict extension property of a power-net fabric having strong anisotropy and non-linearity along the wale and course directions. Optional strain parameters n_i ($i=1, 2$, 1 and 2 are the wale and course directions, respectively) are introduced to transform to stress-strain curves for a linear relation. It is shown that the linearization method is able to estimate stress-strain curves on optional deformation modes from biaxial extension to uniaxial one.

(Accepted March 12, 1997)

1. 緒 言

パワーネット布は、弾性糸をバック糸に用い、ナイロンやポリエステル製のフロント糸と共に編み立てる 2 または 3 枚おきの編み地が主たる構造の繊維集合体である。ウェール方向にネットを構成する弾性糸と、それに絡み付く非弾性糸で構成され、この構造体は伸縮性が高く、形態安定性も比較的良好いため、身体に密着して皮膚の伸縮に追従するようなファウンデーション、スポーツウェアなどに広く用いられている。パワーネット布の整形効果、防振効果、運動機能性は高く評価されているが、着用時に、布の伸長による身体への圧迫が問題となり、圧迫力をもたらす布の二軸伸長特性の予測が着用快適性に関わる性能設計の上で重要とされる。

布の構造が複雑なため、その二軸伸長特性を構造理論的に捉えることは困難であるが、現象理論的には、1986 年に開発されたリニアライジング法[1][2]で解析可能と考えられる。そこで、本研究ではこれを適用し、パワーネット布の一軸拘束二軸伸長特性から任意の二軸伸長特性を予測する方法について検討する。

川端によって提案された布状繊維集合体特有の非線形

性を線形化するリニアライジング法については、今までに広く織物、編み物に適用可能なことが報告されているが[3]、ウェールとコース方向では大きく異なる性質の糸を使った異方性と非線形性を示すパワーネット布におけるリニアライジング法の妥当性を確認するために、繊維素材、編み組織の異なるパワーネット布を試料として、実験による検証を行う。

2. リニアライジング法による二軸伸長特性の予測理論

2.1 二軸伸長特性の線形化

Fig.1 に示すような直交する 2 つの構造主軸方向での伸長変形において、直交する 2 つの軸方向にそれぞれ伸長ひずみ ϵ_1 , ϵ_2 を与え、その時の張力を F_1 , F_2 とする。

二軸伸長変形様式は二軸方向の各ひずみ ϵ_1 , ϵ_2 の比 k_1 , k_2 で表すこととする。

$$k_2 = \epsilon_2 / \epsilon_1 \quad (\epsilon_1 \geq \epsilon_2) \quad (1-1)$$

$$k_1 = \epsilon_1 / \epsilon_2 \quad (\epsilon_1 \leq \epsilon_2) \quad (1-2)$$

$k_1 = 1$ あるいは $k_2 = 1$ の時、 $\epsilon_1 = \epsilon_2$ の均等二軸伸長変形であり、 k_1 もしくは $k_2 = 0$ であれば、Fig.2 に示すような一軸を拘束し、他の軸方向へ伸長変形を与える 2 通りの変形様式を表わす (以後、一軸拘束二軸伸長変形と略す)。

Fig. 1 Biaxial deformation and the coordinate system ϵ : strain, F : tensile stress, suffix 1: wale direction, 2: course direction

Fig. 2 Strip biaxial deformation (a) along the wale direction under the constant strain for course direction, (b) along the course direction for wale direction.

コース方向を拘束してウェール方向へ伸長する場合と、逆にウェール方向を拘束してコース方向へ伸長する2つの一軸拘束二軸伸長変形における張力とひずみを区別するために、コース方向への一軸拘束二軸伸長変形の張力とひずみには F_1' , ϵ_1' のようにプライム記号を付ける。添え字 1 はウェール方向、2 はコース方向を表す。

繊維集合体の張力-ひずみ関係は、線形関係を示さず、ほとんどの場合非線形関係を示す。しかし、これまでの研究で、ひずみの変換により張力-ひずみ曲線を直線化できることが経験的に知られている。この非線形性を線形化するリニアライジング法では、変換ひずみ e_i ($i=1,2$) は次式によって表される。

$$e_i = \epsilon_i^n \quad (i=1,2) \quad (2)$$

ここで、 n は定数で、布固有の値であり、これまでの多くの実験結果に基づき、すべての二軸伸長変形様式において一定であると仮定されている。

2.2 一軸拘束二軸伸長特性からの任意の二軸変形下での張力予測

このような方法で、張力 F_i と変換ひずみ e_i の線形関係を仮定すると、二次元面内の直交二軸伸長に対する線形理

論から導かれる次式の構成方程式が適用できる。

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 S_{ij} ($i, j=1,2$) は、変換ひずみにより定義された弾性定数である。材料特性である S_{ij} は、2つの一軸拘束二軸伸長変形下の実測値を張力-変換ひずみ直線に直し、次式で決定される。

$$S_{11} = 1 / \{C_1(1 - R_1R_2)\} \quad (4-1)$$

$$S_{22} = 1 / \{C_2(1 - R_1R_2)\} \quad (4-2)$$

$$S_{12} = -R_2S_{11} \quad (4-3)$$

$$S_{21} = -R_1S_{22} \quad (4-4)$$

Fig.2に示すようなウェール方向に添った、他の1つはコース方向に添ったこれらの2つの一軸拘束二軸伸長変形における張力-ひずみ曲線の実測値を張力-変換ひずみ直線に直し、実測値のひずみを変換することによって、 C_i と R_i ($i=1,2$) を次式のように得ている。

$$C_1 = F_1 / e_1 \quad (5-1)$$

$$C_2 = F_2' / e_2' \quad (5-2)$$

$$R_1 = F_2 / F_1 \quad (5-3)$$

$$R_2 = F_1' / F_2' \quad (5-4)$$

これらのパラメータを用いて、任意の二軸伸長変形下での張力 F と変換ひずみ e との関係は次式で計算される。

$$F_1 = S_{22}e_1 / (S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}) - S_{12}e_2 / (S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}) \quad (6-1)$$

$$F_2 = S_{11}e_2 / (S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}) - S_{21}e_1 / (S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}) \quad (6-2)$$

上式に式(4-1)～(4-4)を代入すると、

$$F_1 = C_1e_1 + R_2C_2e_2 \quad (7-1)$$

$$F_2 = R_1C_1e_1 + C_2e_2 \quad (7-2)$$

または、

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & R_2C_2 \\ R_1C_1 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

と表される。

式(7)または(8)によって、任意の e_1 , e_2 における F_1 , F_2 を計算することができる。ここで、変換ひずみ e_1 , e_2 は式(2)によってひずみ ϵ_1 , ϵ_2 に変換される。

3. 実験

3.1 一軸拘束二軸引張り試験

川端によって開発されたKES-G2一軸拘束二軸引張り試験機[4]を用いて、布の構造主軸にそって一軸を拘束した二軸伸長特性を測定する。荷重を検出する有効試料幅は、6.4cm×6.4cm(引張り測定幅×拘束測定幅)、ひずみを検出する有効試料幅は、7.5cm×7.5cmである。この測定機により一軸拘束二軸伸長過程における引張り方向と拘束方向の試料の張力-ひずみ曲線を同時に測定できる。

引張りひずみ速度0.02/secで、最大荷重250gf/cmを繰り返し3回与えた。繊維集合体の場合、厳密に断面積を見積もることができないため、張力は変形前の繊維集合体の単位長さあたりの荷重を張力として定義される。

3.2 二軸伸長特性

川端によって試作された二軸引張り試験機を用いて、布の構造主軸に沿って二軸伸長特性を測定する。変形様式は、 $k_2=0$, $k_1=0$, $k_1=1$ あるいは $k_2=1$, $k_1=0.5$ とした。一軸拘束二軸伸長特性と同じ実験条件で、引張りひずみ速度0.02/secで、最大荷重250gf/cmを繰り返し3回与えた。

3.3 一軸伸長特性

KES-G1引張り試験機[5]を用い、二軸伸長特性と同じ実験条件で、引張りひずみ速度0.02/secで、最大荷重250gf/cmを繰り返し3回与えた。クランプ部分の拘束をできるだけ少なくした一軸変形を与えるために試料幅1.3cm、試料長さ10cmとした。

3.4 試料

繊維素材、編み組織の異なるパワーネット布を試料として、リニアライジング法の妥当性を検証するために、Table 1(a)に示すように、従来から使用されているポリウレタンとナイロン糸からなる試料U1, U2と、弾性糸として最近開発されたポリエーテルエステル系弾性糸と非弾性糸としてポリエステルフィラメント糸からなる試料T2を選び、また、Table 1(b)に示すような同じ糸使いで、一般的に用いられている編組織の異なった試料を3種選定した。

Table 1 Details of Samples

(a)						
Sample No.	Structure	Yarn *	Density (cm ⁻²)		Weight (g/m ²)	Thickness (mm)
U1	TR satin	Ny50d x U70 d x U40d	21	80	221	0.595
U2	Raschel	Ny50d x U280d	15	69	177	0.516
T2	Silfit satin	V50d x R70d x R40d	21	72	207	0.575
(b)						
Sample No.	Structure	Yarn *	Density (cm ⁻²)		Weight (g/m ²)	Thickness (mm)
W1	Half net	Ny30d x U280d	22	56	201	0.617
W2	Trico net	Ny30d x U280d	14	61	165	0.556
W3	2way raschel	Ny30d x U280d	22	76	251	0.541

* V: Cation dyeable PET Ny: Nylon d: Denier
R: Polyether/polyester elastic yarn U: Polyurethanes

4. 結果および考察

4.1 一軸拘束二軸伸長特性の線形化

一軸拘束二軸引張り試験機を用いて測定した一軸拘束二軸伸長特性の1例をFig.3に示す。従来のリニアライジング法では、二軸伸長変形下において、コース方向を拘束してウェール方向へ伸長する場合 $\log F_i - \log \epsilon_i$ およびウェール方向を拘束してコース方向へ伸長する場合

Fig. 3 Stress-strain relations under the strip biaxial extensions along the wale (solid lines) and course (broken lines) directions, under the conditions shown in Fig.2, respectively. (Sample No. U2)

Fig. 4 The logs F - e plot of the stress-strain relations under the strip biaxial extensions along the wale (solid lines) and course (broken lines) directions, respectively. (Sample No. U2)

$\log F_i' - \log \epsilon_i' (i=1, 2)$ 曲線の勾配から得られる n がどのような二軸変形様式においても一定であると仮定されているが、ガードル用パワーネットでは、Fig.4に示すようにウェール方向引張りとコース方向引張りでは、直線の勾配は明らかに異なっている。パワーネットは2成分系でその特有の構造のため、変形様式によって伸長挙動を大きく異にするため、パワーネット布においてウェール方向もしくはコース方向引張りでは、異なる n をとると仮定する。すなわち、

$$\epsilon_1 = \epsilon_1^{n_1} \quad (9-1)$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_2^{n_2} \quad (9-2)$$

添字 1 はウェール方向引張り、2 はコース方向引張り、 $\epsilon_i (i=1, 2)$ は変換ひずみを表す。

Table 2 Values of mechanical parameters for calculating "biaxial-extension properties"

(Sample; U1)		n_1	y_1	y_2	n_2	y_2'	y_1'	C_1	C_2	R_1	R_2
Forward	Initial Stage	0.991	-	-	1.490	-	-	334.9	1116.3	0.1505	0.0531
	Second Stage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Backward	Initial Stage	1.003	0.536	0.523	2.205	-	-	237.3	1561.6	0.1166	0.0425
	Second Stage	1.870	-	-	-	-	-	379.9	-	0.1389	-

(Sample; T2)		n_1	y_1	y_2	n_2	y_2'	y_1'	C_1	C_2	R_1	R_2
Forward	Initial Stage	1.079	-	-	1.328	-	-	474.4	715.1	0.2387	0.0664
	Second Stage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Backward	Initial Stage	1.291	0.403	0.430	1.748	0.378	0.378	250.9	520.9	0.3072	0.0285
	Second Stage	2.789	-	-	3.875	-	-	1013.9	4089.3	0.2534	0.0593

*means the extension properties in two main axes under the constant strain on one deformation mode.

Table 3 Values of mechanical parameters for calculating biaxial-extension properties

(Sample; U2)		n_1	y_1	y_2	n_2	y_2'	y_1'	C_1	C_2	R_1	R_2
Forward	Initial Stage	0.920	-	-	1.431	-	-	303.6	1657.6	0.2000	0.0879

また, Fig.4からわかるように, 2つの異なった傾きを持つ領域がある。二直線による近似を行った場合は, 初期の勾配と後期の勾配とを区別する。この2つの直線が交差する点は二軸伸長変形における布の力学挙動の変化点と考えられる。Table 1の試料布に対して求めた n および弾性定数をTable 2, 3に示す。 n は, $n>1$ なら上に凸の張力-ひずみ曲線を示し, $n=1$ なら弾性体に近い挙動を示す。また, $n<1$ なら下に凸の非線形の性質を示す。試料U1は, ウェール方向引張り時, 初期段階ではほぼ1の値をとり, パワーネット布の伸びやすい弾性体に近い性質を示しているのに対して, ウェール方向引張り時の n_1 に比べ, コース方向引張り時の n_2 の方が大きく, これは全般にコース方向引張りの方が, 伸びにくいことを示している。このように, n に伸長特性の特性差が示される。

4.2 一軸拘束二軸伸長特性からの弾性定数の決定

Fig.5に $n_i(i=1, 2)$ を用いて線形化した張力-ひずみ曲線の1例を示す。実線はウェール方向引張り, 点線はコース方向引張り特性を表す。図の F_i-e_i の直線の勾配より, 弾性定数を決めるパラメーター C_i , R_i が決定される。すなわち, C_1 は, F_1-e_1 直線の勾配, C_2 は, $F_2'-e_2'$ 直線の勾配, R_1 は, C_1 と F_2-e_1 直線の勾配との比, R_2 は, C_2 と $F_1'-e_2'$ 直線の勾配との比である。以上のように布方向別の n_1 , n_2 を用いてリニアライジング法におけるパラメーターを決定した。これらのパラメーターによると $C_1 \ll C_2$ の関係から, パワーネット布はウェール方向引張りに対し, コース方向引張りが特に伸びにくい性質を持つことがわかる。

Fig. 5 The linearization of the relation for the strain increasing process. (Sample No. U2)

4.3 実測値と計算値の比較

4.3.1 一軸拘束二軸伸長特性

実測の張力-ひずみ曲線と, リニアライジング法により得られた予測計算曲線をFig.6, Fig.7に示している。 $e_i(i=1, 2)$ を $\epsilon_i(i=1, 2)$ に変換することにより, 予測計算による $F_i-e_i(i=1, 2)$ の関係が得られる。Fig.6は, 従来から使用されているポリウレタンを用いたU1, Fig.7は, 最近開発されたポリエーテルエステル系弾性糸を用いたT2の例である。本論文で定義したウェール方向引張り, コース方向引張りの2つの n_1 , n_2 で計算した場合と, 従来の仮定通り, すべての変形様式で n が一定であるとして n_1

Fig. 6 Solid lines: the stress-strain relations observed for sample U1 under the strip biaxial extensions along the wale ($k_2=0$) and course ($k_1=0$) directions, respectively. Broken lines: lines calculated by the linearizing method. (a) n_i ($i=1,2$), (b) n (mean of n_i ($i=1,2$)).

Fig. 7 Solid lines: the stress-strain relationships observed for sample T2 under the strip biaxial extensions along the wale ($k_2=0$) and course ($k_1=0$) directions, respectively. Broken lines: lines calculated by the linearizing method using n_i ($i=1,2$).

n_2 を平均した値を用いて計算した場合をFig.6に示している。Fig.6からウェール、コース方向別の n_1 、 n_2 を用いることで、ウェール、コース方向で大きく伸長特性が異なる異方性の特徴をよく記述することができ、良好な一致が確認される。また、二直線近似を行った場合は、初期およびそれに続く後期の段階それぞれの範囲において張力-ひずみ関係を別々に計算し、それぞれの段階の曲線をなめらかにつなぐことによって、変曲点を含めた張力-ひずみ曲線を精度良く計算できることがわかる。加えて、戻りの曲線すなわち、伸長回復曲線についても同様の手順で予測計算を行うことによって図のように実測曲線と予測曲線との間に良好な一致が得られた。伸長からの回復曲線については、 n および弾性定数が、伸長過程と異なり回復過程のそれを一軸拘束二軸伸長特性から求めておく必要がある。

また、同じ太さのポリウレタン糸とナイロン糸からなり、編み組織のみ異なるTable 1の試料の二軸伸長特性を記述するパラメーターについてもTable 4に示す。同じ糸使用であってもその伸長挙動は大きく異なり、特にコース方向において編み組織の影響が大きく見られる。身体の外周方向に使用され、良く伸ばされるウェール方向引張り時の実測値と計算値を比較した結果をFig.8に示す。

Fig. 8 Solid lines: the stress-strain relations observed for samples W1, W2, W3 with different structures under the strip biaxial extensions along the wale direction. Broken lines: lines calculated by the linearizing method using n_i ($i=1,2$).

Table 4 Values of mechanical parameters for calculating biaxial-extension properties

Sample	n_1	n_2	C_1	C_2	R_1	R_2
W1	0.743	1.345	289.5	526.7	0.137	0.0854
W2	1.239	1.168	494.7	2412.8	0.473	0.0962
W3	0.779	1.254	364.1	572.1	0.0929	0.0590

First cycle, Forward

以上より、編み組織が異なっても実測曲線と計算曲線の間に良好な一致が確認された。

4.3.2 二軸伸長特性

二軸伸長特性の代表的な変形様式として、式(1)で定義した二軸伸長変形様式 $k_1=1$ あるいは $k_2=1$ の二軸均等伸長変形様式の場合、すなわち、ウェールとコース方向に同時に等しい伸長ひずみを与えたとき、また、 $k_1=0.5$ の二軸伸長変形様式の場合の各方向の張力の実測曲線と予測計算曲線とを比較した結果、Fig.9に示すいずれの変形様式においても実測値と計算値との間に良好な一致がみられる。以上より任意の変形様式においてリニアライジング法による二軸伸長変形時の張力予測の妥当性が確認された。

4.3.3 一軸伸長特性

一軸拘束二軸伸長特性から求めたりニアライジング法において、拘束力を零とおいて一軸方向にのみ伸長変形を与える一軸伸長特性を計算した。Fig.10に示す実測曲線と計算曲線は、クランプ部が完全な一軸伸長変形を与えていないため、やや実測曲線の方が計算曲線より伸びに

Fig. 9 Broken lines: lines calculated by the linearizing method for $k_2=0, k_1=0, k=1$ (equal-biaxial) and $k_1=0.5$ for sample U2. Solid lines: lines are the experimental curves observed.

Fig.10 Broken lines: lines calculated by the linearizing method for sample U2 under the uniaxial extensions along the wale and course directions. Solid lines: lines are the experimental curves observed.

く傾向がみられるものの、両曲線間にはウェール、コース方向共に良い一致が認められる。以上より、パワーネットのような複雑な繊維集合構造をもつ布においても、既に開発されたリニアライジング法を多少修正して用いることによって、構造主軸方向へのあらゆる変形様式の伸長特性を予測計算できることがわかった。

5. 結 語

パワーネット布において、構造主軸方向への任意の二軸伸長ひずみを与えたときの各軸方向の張力を予測するためのリニアライジング法において、ウェール、コース方向別に張力-ひずみ曲線を線形関係に変換するための $n_i (i=1, 2)$ を用いることにより、二軸均等伸長変形から一軸伸長変形までの広範囲の任意の変形様式に対応する張力-ひずみ曲線を予測計算できることを明らかにした。

大変形領域において、非線形を線形に変換するための対数変換を行った張力-ひずみ曲線が、一直線で近似できない場合は、二直線で近似を行い、複合する形で実測値と良好な一致が見られた。

複雑な編み組織や繊維の種類の異なるパワーネット布についても、従来のリニアライジング法を方向別の変換ひずみ $n_i (i=1, 2)$ を用いることによって、わずかな修正で二軸伸長変形時の張力予測の妥当性が示された。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、二軸引張り試験機を使わせていただき、御懇切な御指導をいただきました京都大学名誉教授、現滋賀県立大学川端季雄教授に謝意を表します。また、試料の提供および種々のご助言を頂きました帝人株式会社、株式会社ワコール人間科学研究所に謝意を表します。

文 献

1. 川端季雄, 繊維機械学会誌, **39**(11), 169(1986).
2. S. Kawabata, "Textile Structural Composites", Chapter 3 Nonlinear Mechanics of Woven and Knitted Materials, ELSEVIER, 84(1989).
3. Mari Kageyama, S. Kawabata and Masako Niwa, *J. Text. Inst.*, **79**(4), 543(1988).
4. 川端季雄, 第14回繊維工学研究討論会, 日本繊維機械学会, 1(1985).
5. S. Kawabata, "Proceeding of the 4th Japan-U. S. Conference on Composite Materials at Washington D.C., 1988", A Thechnomic Publishing Company Inc., Lancaster, Penn. U.S.A., 253(1989).