コーテッド平織物の2軸伸張実験†

南 宏 和* 瀬 川 信 哉**

Biaxial Extension Testings on Coated Plain-weave Fabrics

by

Hirokazu MINAMI* and Shinya SEGAWA**

The membrane materials are generally in various states of biaxial deformation in membrane structures, and also have visco-elasticity in addition to the peculiar nonlinearity. The biaxial extension curves, therefore, should be measured under the experimental conditions of iterative extension and various tensile speeds. In this paper, the authors selected PTFE coated plain-weave glass fiber and PVC coated plain-weave polyester fiber fabrics as the specimens, and measured the uni/biaxial extension curves up to the design stress (assumed to be 20% of the uniaxial breaking stress) under the experimental conditions of iterative extension and two different tensile speeds. The nonlinearity, the slope, and the iteration time up to convergence of the extension curves were studied. The dependences of these factors on tensile speed were also discussed. The main result of discussions was that the slope of extension curves depended upon tensile speed.

Key words: Membrane structure, Coated fabric, Biaxial extension

1 緒 言

一般に膜構造物はその膜面にあらかじめ初期引張応力が導入されており、外力(風、雪など)に対する安定した抵抗性能を具備している。初期応力状態にも外力作用状態にも、膜面を形成する膜材料は一般に2軸応力状態にある。現在は一般的に膜構造応力変形解析は線形弾性仮定に基づいており、弾性係数の決定や解析結果の検討に、この2軸応力状態での伸長特性の知識は欠かせない。そのほか初期応力に対応した膜材料の裁断図上の縮め率の設定や、膜構造施工時の初期応力導入の検討にも欠かせない。このような、設計施工上の基礎資料となり得る伸長特性の試験結果報告はBlum¹⁾ら、Rehm^{2),3)}らが行っているが、国内で使用されている膜材料についてはこれまでみられない。そこで第1報に引続き同試料の各種2軸伸長曲線を測定しその特性の考察結果をここにまとめる。これを設計施工の基礎資料とする。

コーテッド平織物の伸長曲線は異方性と特有の非線形性を現すと同時にクリープや応力緩和の粘弾性を示す。したがって伸長曲線の測定には異なる引張速度を与え、また繰返し伸長を与える必要がある。まず設計応力範囲でのクランプ間引張速度(以下単に速度)毎分4mmの2軸(1軸を含む)試験による伸長曲線を測定し、ばらつきおよび2軸変形下の応力-ひずみ

関係を調べる。つぎに毎分4および180mmに速度を変えてそれぞれ繰返し伸長を与えて同様に設計応力範囲での2軸伸長曲線を測定する。そして伸長曲線が示す非線形性、傾き、収れんまでの繰返し数、残留ひずみ、弾性余効果とこれらの引張速度依存性につき考察結果をまとめる。以上の試験時の温度は19~26°Cである。

コーテッド平織物の2軸伸長曲線を測定した報告をあげる。国外ではSebring⁶⁾らのほか、PVC-ポリエステル繊維膜材料の2軸伸長曲線を示したBlum¹⁾ら、Reinhardt⁵⁾、2軸繰返し伸長曲線の測定も行ったRehm²⁾ら、PTFE-ガラス繊維膜材料をさらに加えて実際膜面の初期応力レベルでのクリープと風荷重相当応力を含めた2軸繰返し伸長曲線の測定をしたRehm³⁾らの報告がある。国内では田中⁷⁾、西川¹⁴⁾らのPTFE-ガラス繊維膜材料の、および著者のさらにPVC-ポリエステル繊維膜材料を加えた2軸伸長の報告がある。

2 設計応力範囲での1軸、2軸引張試験

試料は現在国内で膜構造建築物に使用されているPTFEコーティングのガラス繊維平織物(試料A)およびPVCコーティングのポリエステル繊維平織物(試料B)で第1報に要目を示した。本報で用いる応力の定義と縦糸、緯糸方向の応力とひずみそれぞれ $[T_x, \epsilon_x]$, $[T_y, \epsilon_y]$ は第1報のFig. 8と同様に用いる。

† 本報を「コーテッド平織物の伸長特性(第2報)」(Extension Property of Coated Plain-weave Fabrics, II)とする。また、前報は材料41巻463号445-450頁(1992年)に掲載済である。

原稿受理 平成3年4月19日 Received Apr. 19, 1991

* 正 会 員 大阪市立大学工学部建築学科 〒558 大阪市住吉区杉本, Dept. of Arch. & Build., Osaka City Univ., Sumiyoshi-ku, Osaka, 558

** 太陽工業(株) 〒573 枚方市招提田近, R & D Dept., Taiyō Kogyō Corp., Shodai, Hirakata, 573

Fig. 1. Biaxial tensile tester.

さらに2軸応力比は $T_x : T_y$ と表し, x, y 方向の1軸伸長の応力比は便宜上それぞれ 1:0, 0:1 と表す。

1軸破断応力の約20%と仮定した設計応力を第1報 Fig. 9 に T_s で示した。この設計応力までの範囲で以下の実験を行った。2軸引張試験機を Fig. 1 に示す。本機の構造は基本的に既報の通りである。各糸方向のロードセルによる測定荷重を変形前の試験体幅で除して応力とし, ひずみはリニアポテンショメータに装着した直径0.49 mmの針を初期間隔約5 cmで試験体に差し込んで測定した。本機での1軸, 2軸引張試験を用いた試験体を Table I に示す。引張制御様式は次の通りで Table I にも示す。

1軸試験: 縦糸または緯糸方向の定速引張試験で, 定応力比(それぞれ 1:0, 0:1)試験である。速度毎分4, 180 mmの場合それぞれ CUL, CUH と略す。

2軸試験: より大きい応力を与える糸方向(応力比

Fig. 2. Uni/biaxial stress-strain curves measured by CUL and CBL testing on specimen A.

1:1の試験の場合は縦糸方向と定める)にのみ速度毎分4 mmの定速引張を与えつつ引張る定応力比2軸引張(CBLと略す), および各糸方向を同じ定速度で引張る変応力比2軸引張(同4, 180 mmの場合それぞれ VBL, VBHと略す)試験である。

2・1 速度毎分4 mmの定応力比1軸, 2軸試験

CUL(定応力比 1:0, 0:1)とCBL(1:1, 2:1, 1:2)の試験による試料A, Bの伸長曲線を Fig. 2, 3 に示す。ここでは一部を除き応力比ごとに試験体数を3として測定のばらつきを調べている。さらに試料

A, Bで, 最大応力に達した直後に速度毎分4 mmで除荷して再び引張りを繰り返して収れん後0応力で1時間放置し, 再び収れんまで同様に引張りを繰り返した場合の応力比1:1の伸長曲線をそれぞれ Fig. 4, 5 に示す。Fig. 2, 3 から各応力比で一つの伸長曲線を選び, その上の点を拾うことで2軸変形下の応力-ひずみ関係すなわち $T_x = T_x(\epsilon_x, \epsilon_y)$, $T_y = T_y(\epsilon_x, \epsilon_y)$ を作図できる。これを参考資料にそれぞれ Fig. 6, 7 に示す。なお Fig. 2, 3 は前述の測定方式(定応力比制御)に基づくことから, 維持する応力比を K とおけば $T_x = T_x(\epsilon_x, K)$ と $T_y = T_y(\epsilon_y, K)$ を同時に表している。

2・2 速度毎分4, 180 mmの繰返し1軸, 2軸試験

Fig. 8 に 0- T_{max} 試験の手順を示す。これは最大応力 T_{max} までの1軸引張(CULとCUH)または2軸引張(VBLとVBH)を収れんまで繰り返し, 0応

Table I. Characteristics of uni/biaxial tensile testings.

		Stress ratio	Strain ratio	Strain rate	Tensile speed between clamps (mm/min)	Code of testing
Low speed tensile testing	Biaxial	Const.	Variable	X axis Variable	4	CBL: Constant stress ratio biaxial low speed tensile
				Y axis Variable	Variable	
		Variable	Variable	X axis Variable	4	VBL: Variable stress ratio biaxial low speed tensile
				Y axis Variable	4	
High speed tensile testing	Biaxial	Const.	Variable	X axis Const.	4	CU: Constant stress ratio uniaxial low speed tensile
				Y axis Variable (No clamping)		
		Variable	Variable	X axis Variable	180	VBH: Variable stress ratio biaxial higher speed tensile
				Y axis Variable	180	
Biaxial tensile testing	Uniaxial	Const.	Variable	X axis Const.	180	CUH: Constant stress ratio uniaxial higher speed tensile
				Y axis Variable (No clamping)		
	Uniaxial tensile testing	Const.	Variable	X axis Const.	180	
				Y axis Variable (No clamping)		

Biaxial tensile testing

Uniaxial tensile testing

Fig. 3. Uni/biaxial stress-strain curves measured by CUL and CBL testing on specimen B.

力にて1時間放置後再び同様の繰り返しを行う試験で、伸長曲線の他に初回伸長の $T_{\max}$ に対応するひずみ ϵ_i 、初めの収れんまでの伸長繰返し回数 l_m 、初めの収れん伸長での $T_{\max}$ に対応するひずみ ϵ_f とその除荷後の残留ひずみ ϵ_r 、およびその後0応力での1時間放置後のひずみ ϵ_a を測定する。なお $T_{\max}$ を前述の設計応力 T_s とする。

速度毎分4、180 mmでの1軸、2軸の0- $T_{\max}$ 試験による伸長曲線を試料AについてのみそれぞれFig. 9、10に示す。このような伸長曲線から得たひずみ値と収れんまでの繰返し数を試料A、BにつきTable IIに示した。同表で応力比1:0と0:1の欄は1軸引張(CULとCUH)によるそれぞれ縦糸、緯糸方向の測定結果を表し、応力比Variableの欄は2軸引張

(VBLとVBH)による測定結果を示す。さらに伸長曲線の傾きの引張速度依存性を調べるため、初回伸長曲線と初めの収れん伸長曲線に関して0応力から基準応力 T_{sc} (1軸破断応力の10%とし、試料A、Bでそれぞれ14.7、5.4 kN/m)の応力区間に対応するひずみ ϵ_{sc} を読みとり、割線係数 ($E_s = T_{sc}/\epsilon_{sc}$) を求めた結果を試料A、BにつきFig. 11に示す。

3 考察結果

3・1 速度毎分4 mmでの伸長特性(非線形性と収れん性)

設計応力範囲での各応力比の2軸伸長曲線(Fig. 2、3)を測定した。試料Aでは縦糸方向で応力比の相違により非線形性が変化する、すなわち非線形性の応力比依存性が認められる。各応力比とも伸長曲線は全体的には糸方向によらず同じ方向に曲っている。これに対し試料Bでは非線形性は応力比依存性をほとんど示さず、糸方向によって曲りの方向は逆である。試料Aの非線形性は1軸破断応力の5%までの低応力域で非常に強い。試料Bの非線形性は測定応力域ではほぼ一様である。繰返し伸長では試料A(Fig. 4)は縦糸方向はわずか2~3回で収れんし、緯糸方向は8~10回で収れんした。試料B(Fig. 5)は各糸方向とも収れんに10回を要した。

3・2 速度毎分4 mmと180 mmの伸長特性の比較

伸長曲線の非線形性: 引張速度に依存して変化することはない。試料A、Bとも初回伸長曲線に現れた特有の非線形性は、繰返し伸長回数とともに全体形状からみて弱くなる。しかし低応力部で非線形性は残留し、初回伸長曲線に比べると応力 = $C(\text{ひずみ})^n$ の近似の適合度がより高い性状となる。

伸長曲線の傾き (E_s の考察結果): 1軸破断応力の

Fig. 4. Biaxial stress-strain curves (stress ratio 1:1) measured by iterative CBL testing on specimen A.

Fig. 5. Biaxial stress-strain curves (stress ratio 1:1) measured by iterative CBL testing on specimen B.

Fig. 6. Stresses T_x (left) and T_y (right) as function of strains ϵ_x and ϵ_y : Specimen A. Fig. 7. Stresses T_x (left) and T_y (right) as function of strains ϵ_x and ϵ_y : Specimen B.

Fig. 8. Procedure of $0-T_{\max}$ testing: Iteration up to convergence of extension curve by CUL, CUH, VBL or VBH testing and the further iteration after 1 hour elastic aftereffect with 0 stress.

10% を基準応力にして割線係数 E_s を毎分 4, 180 mm の速度での $0-T_{\max}$ 試験時の伸長曲線から求め、傾きの速度依存性を調べた (Fig. 11). これは試料 A では 1 軸, 2 軸引張りともに初回伸長では認められないが収れん伸長では認められ, E_s は速度毎分 180 mm の場合の方が 4 mm の場合に比較して約 15% 小さい結果を示した. 試料 B では縦糸方向の 1 軸と 2 軸引張りの初回伸長のみにこの依存性が認められ, E_s は速度毎分 180 mm の場合の方が 4 mm の場合に比較して約 17% 大きい結果を示した. この結果から大まかに, 両試料とも伸長曲線の傾きには特に強くはないが引張速度依存性があり, その大きさは材料による引張回数や変形様式に依存すると言える.

残留ひずみ (ϵ_r) と弾性余効果 ($\epsilon_r - \epsilon_d$): $0-T_{\max}$ 試験

の最初の収れん伸長の除荷後の残留ひずみは, 試料 A では糸方向によらず引張速度依存性を示さない. 試料 B では糸方向で異なり, 縦糸方向ではほとんど引張速度依存性を示さないが, 緯糸方向では引張速度が大きいほど残留ひずみは小さくなる. 同様に, 弾性余効果による 1 時間のひずみ回復量は, 残留ひずみに対して試料 A では 6~14% で, これは引張速度依存性を示さない. 試料 B では同 20~50% で引張速度が大きいほど大きくなる.

さて本論で採用した速度毎分 4 mm を標準とした 2 軸試験法は定応力比制御の容易性からも実用的である. しかしこの速度は非常に低速で, 膜構造物の外力として一般的な風荷重の速さからみると实际的でない. そこで速度毎分 180 mm に対応した試験時の応力の立ち上り時間が風荷重作用時の実際膜応力のものに符合すれば, これら二つの引張速度の下での伸長曲線の比較考察結果は基礎資料として特に意味を持つ. 石崎らの突風立ち上り時間^{11), 12)}, 川村, 木本らによる風と膜変位の立ち上り時間の測定値をみると, 速度毎秒 20~60 m の風による実際膜応力の立ち上り時間は大雑把に 0.5~5 秒と考えられる. これより, この風速に対応する設計許容応力を 1 軸破断応力の 20% ($T_{\max}$) とみて実際膜応力の $0-T_{\max}$ の立ち上り時間の一つの推定値は 0.5~5 秒となる. 本報の $0-T_{\max}$ 試験の速度毎分 180 mm での 1 回の伸長の所要時間を測定したところ, 試料 A で 4~8 秒, 試料 B で 9~11 秒であった. このことからこの引張速度での伸長試験時の応力の立ち上り時間と膜構造物での時間には特に大きな相違はないと考えられる.

4 結 論

二つの引張速度の下での 1 軸および 2 軸引張りを繰り返して伸長曲線を 2 種のコーテッド平織物につき測

Fig. 9. Uniaxial stress-strain curves measured by $0-T_{\max}$ testings with CUL (left) and CUH (right) extension on specimen A.

Fig. 10. Biaxial stress-strain curves measured by 0- $T_{\max}$ testings with VBL (left) and VBH (right) extension on specimen A.

Table II. Strains and cycles up to convergence of iterative stress-strain curve by 0- $T_{\max}$ testing.

Stress ratio	Yarn direction	ε_t (%)			ε_f (%)			ε_r (%)			$\varepsilon_r - \varepsilon_r$ (%)			Cycles up to convergence (l_m)				
		low sp./higher sp.			low sp./higher sp.			low sp./higher sp.			low sp./higher sp.			low sp./higher sp.				
Specimen A : $T_{\max}=29.4$ kN/m																		
1 : 0	Warp	2.65 2.66 2.69	*1 2.67 2.69	2.65 2.73 2.71	*1 2.70 2.70	2.71 2.74 2.74	2.92 2.94 2.93	2.93	1.56 1.59 1.47	1.60 1.65 1.49	1.58	0.11 0.15 0.12	0.14 0.17 0.14	0.15	6 6 7	9 6 7	7	
0 : 1	Fill	6.56 7.22 6.63	6.80 7.08 6.50	6.86	6.56 7.23 6.63	6.81 7.20 6.65	6.97	4.81 5.38 4.95	5.05 5.07 5.01	4.86	0.12 0.34 0.24	0.29 0.43 0.41	0.45	8 8 10	8 10 9	13 10 9	11	
Variable (Biaxial)	Warp	2.02 2.48 2.38	2.29	2.22 2.32 2.12	2.22	2.02 2.50 2.38	2.30 2.35 2.45	2.33	0.95 1.33 1.24	1.12 1.24 1.00	1.12	0.10 0.14 0.09	0.11 0.14 0.18	0.14	5 5 5	5 8 9	8	
	Fill	0.96 1.04 0.90	*2 0.97	1.10 1.07 1.23	*2 1.13	0.96 1.04 0.83	*2 0.94	0.97 0.96 1.05	*2 0.99	0.63 0.74 0.60	0.69 0.61 0.68	0.66	0.07 0.06 0.14	0.08 0.04 0.08	0.07	5 4 4	6 8 8	7
	Specimen B : $T_{\max}=11.6$ kN/m																	
	1 : 0	Warp	4.96	3.86	5.24	4.84	2.46	2.46	0.49	1.23	10	14						
0 : 1	Fill	9.34	8.34	9.79	9.11	5.30	3.86	1.07	1.45	6	10							
Variable (Biaxial)	Warp	4.43	3.54	4.71	4.50	1.97	1.87	0.59	0.78	8	21							
	Fill	*2 3.80	*2 3.17	*2 4.02	*2 3.58	1.58	1.25	0.35	0.53	8	8							

*1 Mean value of 3 specimens.

*2 Strains at the instant of working of $T_{\max}$ in warp.

定した。その結果から以下の一般的事実が抽出できた。

(1) 伸長曲線は繰返し伸長により大きな残留ひずみを生じて収れんする。

(2) 平織構造に起因する異方性、非線形性が明確に現れる。初回伸長曲線に現れた非線形性は繰返し伸長によって弱くなるものの明らかに残留し、その性状はひずみを底とする指数関数による近似も可能なものとなる。

(3) PTFE コーティング・ガラス繊維平織物の伸長曲線の低応力域に現れる非線形性は特に強く、応力

比依存性を示す。

(4) 実用的 2 軸試験の引張速度と風荷重下の膜構造物での引張速度の範囲で、伸長曲線の傾きは特に大きくはないが明らかに引張速度依存性をもつ。

膜材料の伸長特性は、コーティング材料およびこれと平織物との相互作用の力学的特性にも基づくと考えられるが、主に基材である平織物の糸が構成する 3 次元織構造の非線形変形特性に基づいている。この基本的で重要な平織物の伸長特性はすでに川端、丹羽¹³⁾により詳細に研究されており、その報告が参考になる。

Fig. 11. Secant modulus E_s on initial and converged stress-strain curve by 0- T_{max} testing with 4 or 180 mm/min tensile speed.

コーテッド平織物が材料内部に持つ構造および材料すなわち織構造寸法，糸，繊維，コーティング材料が異なれば伸長特性も異なる。本報の考察結果はここに取り上げた試料に関するものである。

本研究でご指導を賜った京都大学高分子化学教室教授の川端季雄博士，風荷重作用につき討論と資料を賜った大阪市立大学建築学科教授の川村純夫博士およ

び同助教授の故木本英爾博士に心より感謝いたします。
(平成元年 8 月 17 日 第 18 回繊維工学研究討論会にて講演)

参 考 文 献

- 1) R. Blum *et al.*, Materialprüf. 15 Nr. 8 (1973).
- 2) G. Rehm and R. Münsch, 2 Int. Symp. Weitgespannte Flächentragwerke, Stuttgart (1979).
- 3) G. Rehm *et al.*, SFB64 Weitgespannte Flächentragwerke, Univ. Stuttgart, Mitteilungen 60/1981.
- 4) 南 宏和, 豊田 宏, 瀬川信哉, 建築学会論文報告集, 408, 1 (1990).
- 5) H. W. Reinhardt, Experimental Mechanics, 16, 71 (1976).
- 6) R. E. Sebring *et al.*, U. S. Army Natick Lab., Tech. Rep. 69-75-GP (1969).
- 7) K. Tanaka *et al.*, Proc. IASS-MSU Int. Symp., Istanbul, p. 611 (1988).
- 8) 南 宏和, 建築学会大会梗概集, p. 303 (1984).
- 9) 南 宏和, 中原義雄, 材料, 30, 784 (1981).
- 10) 石崎澄雄, 柱 順治, 京都大学防災研究所年報, 25 B-1 (1981).
- 11) 川村純夫ほか, “高ライズ円筒状膜構造耐風設計指針”, 大スパン空気膜構造耐風研究会報告 (1982).
- 12) E. Kimoto and S. Kawamura, J. of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics, p. 13 (1983).
- 13) S. Kawabata, M. Niwa and H. Kawai, J. of Textile Inst., 64, 21 (1973).
- 14) 西川 薫, 石井一夫, 達富 浩, 建築学会大会梗概集, p. 2668, (1988).
- 15) 南 宏和, 材料, 41, 34 (1992).