コーテッド平織物の観察と1軸伸張実験[†]

南 宏 和* 豊 田 宏* 呉

篤**

Microscopic Observation and Uniaxial Extension Testing on Coated Plain-weave Fabrics

by

Hirokazu MINAMI*, Hiroshi TOYODA** and Wu YING**

Coated plain-weave fabrics are used as a membrane material of membrane structures including architectural membrane structures such as clear span air-supported membrane structure, flexible containers and airships. Uni/biaxial extension properties of coated fabrics are very important for the design of membrane structures. In the present paper, the authors first presented SEM photographs of the surface and cut section to understand the structure of this material. Then unidirectional tensile tests were done up to failure. The stress-strain curves showed nonlinearity and anisotropy. Some discussion was done on these properties. Poisson's ratio showed extreme nonlinearity at the stress region up to 20% of the failure stress which is the design stress. Specimens used here were a PTFE-coated grass fiber fabric and a PVC-coated polyester fabric which are widely used in the field of architectural membrane structure.

Key words: Membrane structure, Coated fabric, Uniaxial extension

1 緒 言

基材の平織物に一般的には合成樹脂あるいは合成ゴムを種々の方式で塗工 (coating) した膜材料をここではコーテッド平織物と呼ぶ。ポリエステル平織物にPVC (塩化ビニール) を塗工したコーテッド平織物を用いる膜構造物の国内の例に粉粒体輸送用フレキシブルコンテナ、博覧会パビリオン用や倉庫用の膜構造建築物のほか、省エネルギー帆船の帆面がある。そのほか希少ではあるがエアビーム構造物もある。一方、非常に細いガラス繊維の平織物にPTFE (四フッ化エチレン) を塗工したコーテッド平織物の実用が、昭和63年の東京ドーム完成以来膜構造建築分野で急速に拡大している。この膜材料は建築基準法の不燃材料に認定され大型の恒久的膜構造物に主に使用されていることから工学的レベルの最も高いものである。以上のように膜構造物用膜材料に実用されているコーテッド平織物は一般にPVC-ポリエステル繊維布およびPTFE-ガラス繊維布であり、後者は設計上特に重要である。そのほか飛行船・気球の皮膜材料である特殊なコーテッド平織物もある。

上述の膜構造物の設計には従来コーテッド平織物の1軸引張強度・伸びのほか1軸応力-ひずみ曲線 (以下伸長曲線) が材料基礎データとして用いられてきた¹⁾。しかし著者らは昭和55年以後は2軸伸長曲線を測定し

これも設計に用いている。そして一般に近年の恒久化、大型化した膜構造建築物を始めとして膜構造物の設計では2軸伸長曲線を用いることが多くなっている。したがって1軸伸長のみならず2軸伸長の材料データも設計で有用な資料となっている。

コーテッド平織物は柔軟なコーティング材料 (PVCに対しPTFEは比較的硬質である) と3次元繊維構造を持つ平織布から成る複合材料で、その伸長曲線は顕著な異方性および試料によっては特有の強い非線形性を現し、これらの特性は繊維、糸、織の仕様、およびコーティング材料に依存する。したがって膜材料が異なりこれら影響因子が異なれば伸長特性も変化する。それゆえ後述のような過去の材料の報告や国外の報告の中に伸長曲線を示したものがあり参考になるが、現在国内で実用中の前述のコーテッド平織物につき材料データをまとめておくことは膜構造物設計に有効となる。そこで本報は前述のコーテッド平織物を試料とし、まず微視的外観を示す。これはコーテッド平織物が柔軟な複合材料であるのでまず材料構造を知る上で有効となる。さらに破断に到る1軸伸長時の応力-ひずみ曲線を示し破断面の外観も参考に示す。そして伸長曲線とこれから測定されるポアソン比の異方性および非線形性につき若干の考察を行う。なお2軸伸張の実験結果は第2報で報告する。

[†] 本報を「コーテッド平織物の伸長特性 (第1報)」(Extension Property of Coated Plain-weave Fabrics, I) とする。

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., Taiyo Kogyo Corp., Shodai, Hirakata, 573

Table I. Specimens.

Specimen	Coating material	Yarn	Yarn count (1/cm) (Warp/Fill)	Uniaxial tensile test*3 (Warp/Fill)		Thickness (mm)	Weight per unit area (N/m ²)
				Breaking stress (kN/m)	Breaking strain*4 (%)		
A	PTFE*1	Glass fiber (ECB 150 4/2)	10.0/7.3	163.7/131.3	4.3/7.8	0.84	12.96
B	PVC*2	Polyester fiber (1000 d)	6.7/7.0	55.9/53.9	16.9/23.5	0.84	9.37

*1 Polytetrafluoroethylene, *2 Polyvinyl chloride, *3 Mean value of 5 specimens, *4 Gauge length 50 mm.

国外の上述のコートド平織物の微視的外観の報告には Ansell らの紫外線などによる劣化の研究報告で表面, 断面, 繊維の詳細な報告があり, 国内の同材料については同様の表面劣化研究で本橋, 豊田ら, 破断した繊維の先端の考察をした小松らの報告がある. 上述の材料と異なるがハイパロン (合成ゴム)-ナイロン平織物の屋外暴露前後の表面および繊維を観察した Hearle らの報告もある. 1 軸伸長曲線を記載した文献は数多いがその特性のまとまった報告は少なく, 国内材料の PVC-合成繊維布についての研究を知るのみである.

2 試料と微視的観察

試料の要目を Table I に示す. 試料 A は前述の PTFE コーティングのガラス繊維平織物である. 試料 B は PVC コーティングのポリエステル繊維平織物で, 主に短期膜構造建築物に使われているが大型構

造体を除く他の膜構造物にも使用可能である.

試料 A の縦糸, 緯糸の中心線に沿う断面をそれぞれ Fig. 1, 2 に, 表面を Fig. 3 に示す. 試料 B の同様の断面を Fig. 4, 5 に, 表面を Fig. 6 に示す. マイクロメータで測定した試料 A の厚さは 0.84 mm であった. これに対して厚さが Fig. 1, 2 の上面で 8~29%, 下面で 12~24% の割合でコーティング材料は基材の平織物を覆っている. 表面に最も接近した繊維と表面の距離は約 70 μ m である. この距離は, コーティング材料が分担するコートド平織物の防水機能を維持し, 強度を分担する基材の繊維を外環境から保護するために適合したものでなければならない. 同様に厚さ 0.84 mm の試料 B もコーティング材料の厚さは Fig. 4, 5 の上面で 12~48%, 下面で 19~57% である. 試料 A, B ともコーティング材料は糸の外周繊維に十分密着しているように見える. この密着の強度はコー

Fig. 1. Section along the center of warp yarn and the enlargement of specimen A.

Fig. 2. Section along the center of fill yarn and the enlargement of specimen A.

ティング材料が繊維からはく離しないために十分でなければならず、コーティング材料の溶着によるコーテッド平織物どうしの接合部で特に重要である。試料

A のコーティング材料には直径が $10\text{ }\mu\text{m}$ 前後から $50\text{ }\mu\text{m}$ までのガラス球が混入されている。試料 A のガラス繊維直径は $3.8\text{ }\mu\text{m}$ 、試料 B のポリエステル繊維

Fig. 3. Surface and the enlargement of specimen A.

Fig. 5. Section along the center of fill yarn and the enlargement of specimen B.

Fig. 4. Section along the center of warp yarn and the enlargement of specimen B.

Fig. 6. Surface and the enlargement of specimen B.

Fig. 7. Definition of crimp ratio of yarn.

直径は約 $20 \mu\text{m}$ である。両試料とも糸の内部で繊維どうしは互いに密接しており、コーティング材料は糸内部までは浸入していない。試料 A の表面には鋭い端部を持つ幅が約 $25 \mu\text{m}$ までの細長い空けきが数多く現れている。このような表面の空けきの多小はコーティング材料およびコーティング加工の仕方に依存すると推察される。このような空けきの現れ方をみる限り、これが試料の伸長曲線の低応力域（後述の 1 軸破断応力の 20% までの範囲）でその形状に影響を及ぼす可能性が考えられる。試料 B の表面は平滑で空けきはみられない。しかし幅が $1 \mu\text{m}$ 以下の極めて細かい割れがわずかにみられる。この程度の割れが試料の伸長特性に影響することはないとみなせる。糸のクリンプすなわち平織りによる糸の曲りの程度を Hearle らに従い Fig. 7 に示したクリンプ比で表すと、試料 A の縦糸、緯糸はそれぞれ 2.7, 5.7%, 試料 B は同 0, 3.8% である。たとえば 1 軸伸張で、クリンプ比が伸張方向の糸で大きくその直交方向で小さい場合は伸張方向に非線形性がより強く現れる。逆の場合は伸張方向の非線形性は小さくなり、試料 B の縦糸方向のようにクリンプ比が 0% の場合は縦糸そのものの伸長特性が基礎となる。クリンプ比は 2 軸変形様式すなわち縦糸、緯糸方向応力の比に応じて現れる伸長曲線の異方性、非線形性の一つのパラメータと考えられる。

3 1 軸伸張破断実験

幅 3 cm のストリップ状試料を糸方向に沿い切り出しクランプ間距離 20 cm で破断まで 1 軸伸張実験を行った。引張速度は毎分 20 cm である。測定した試料 A, B の縦糸、緯糸方向の応力-ひずみ曲線を Fig. 9 に示す。ここで、縦糸、緯糸方向の応力それぞれ T_x , T_y は変形前の試料の単位幅あたりの力（単位 kN/m ）と定義し、ひずみ ϵ_x , ϵ_y とともに直交座標系を用い Fig. 8 のように用いる。ここでひずみ計測はクランプ部内での試料の滑りによる誤差を避けるため

Fig. 8. Coordinate system, and stresses and strains.

試料中央部標線間 5 cm の光方式を用いた。参考に破断断面の状況を拡大して Fig. 10 に示す。

Fig. 9 の伸長曲線は各試料ともに顕著な異方性を現している。膜構造物の設計許容応力を一般的値としてここでは 1 軸引張破断応力（Table I）の約 20% と仮定し T_s で表して Fig. 9 に示している。試料 A の伸長曲線は、この設計応力までの範囲で特に緯糸方向で強い非線形性を現し、この範囲と引続いてガラス繊維の持つ高い引張剛性が現れる範囲の 2 領域に分けられる。これに対し試料 B の伸長曲線は、設計応力までの範囲とこれより 1 軸破断応力の約 40% までの範囲および引続く破断までの範囲の 3 領域に分けられる。両試料の設計応力までの範囲に現れた非線形性は主に平織

Fig. 9. Uniaxis stress-strain curves up to the breaking of specimen A (upper) and B (lower).

Fig. 10. Broken coating material and fibers in warp yarn. Upper : Specimen A. Lower : Specimen B.

物の3次元織構造の変形に基づき、コーティング材料の影響を受けつつ現れたものと考えられる。平織構造の変形は、クリンプを持ち交差する縦糸、緯糸に張力が作用して一方の糸のクリンプが小さくあるいは大きくなる時、他方の糸のクリンプは大きくあるいは小さくなるいわゆるクリンプ交換の結果として現れる。こうして現れる平織物の非線形特性は主に縦糸、緯糸の伸長特性とクリンプ比、糸密度および2軸応力状態に依存する。設計応力以上の領域は主に繊維そのものの持つ伸長特性を現すと考えられる。

内部織構造を持つコーテッド平織物のポアソン比は変形途上で当然ながら変化し特有の非線形性を現す。これを設計応力までの範囲で Fig. 11 に示す。ここにポアソン比は $T_y=0$ (縦糸方向1軸伸長) で $\epsilon_y = -\nu_{yx}\epsilon_x$, $T_x=0$ (緯糸方向1軸伸長) で $\epsilon_x = -\nu_{xy}\epsilon_y$ と定義している。 ϵ_x , ϵ_y はクランプ間速度毎分4mmの1軸引張試験で幅40cm、長さ76cmの試料に針付きの直線型ポテンシオメータを初期間隔約5cmで差し込んで測定した。両試料ともにポアソン比はひずみに依存し大きく変化する。特に試料Aのポアソン比は初期のひずみ域で0を維持した後急激に増大する。このようにポアソン比が不連続に変化するメカニズムは不明であるが、前節で観察したPTFE樹脂の変形特性がその主因と推測される。

Fig. 11. Poisson's ratio in the stress region up to 20% of the uniaxial breaking stress.

4 結 論

微視的観察の結果、PTFEコーティングのガラス繊維平織物の試料Aではコーティング材料は均一でなく表面や内部に微小空けが散在する。そして繊維を保護して必要な耐候性、耐摩耗性を現すコーティング材料の厚さは最小70 μm と薄い。PVCコーティングのポリエステル繊維平織物の試料Bのコーティング材料の表面は平滑で内部に空洞はほとんどみられない。両試料ともコーティング材料は糸内部の繊維に浸透していないが、糸周囲の繊維との密着度は観察の上では良好である。破断に到る1軸伸長曲線は顕著な異方性、非線形性を示し、膜構造応力変形解析で対象とする設計応力までの応力範囲で特に試料Aは強い非線形性を持つ。この応力範囲で同様にポアソン比もひずみの大きさに応じて大きく変化する特有の非線形性を持つ。伸長曲線、ポアソン比のこのような特性からみて膜構造解析で線形弾性仮定をおくことは無理である。しかしながら一般には工業上は便宜的にその仮定の下で解析が成されている現状にある。上述の特性からみて設計応力範囲で2軸伸長特性を詳細に調査することが次に必要であり、その報告は第2報にまとめる。膜構造物で現れるコーテッド平織物の実際の変形は多様な2軸応力状態下にある。

参 考 文 献

- 1) 南 宏和, 中原義雄, 材料, 30, 784 (1981).

- 2) M. P. Ansell, J. Text. Inst., 5, 263 (1983).
- 3) M. P. Ansell, C. A. S. Hill and C. Allgood, Text. Research Journal, p. 692 (1983).
- 4) 本橋健司, 豊田 宏, 建築学会大会講演梗概集, p. 437 (1986).
- 5) 小松 清, 石井一夫, 膜構造研究論文集 (日本膜構造協会), p. 57 (1989).
- 6) J. W. S. Hearle, B. Lomas, W. D. Cooke and I. J. Duerden, "Fibre Failure and Wear of Materials", p. 386 (1989) Ellis Horwood Series in Polymer Science and Technology, England
- 7) S. Shimamura and O. Takeuchi, Proc. 1971 Pacific Symp. IASS Part II, Tokyo and Kyoto, p. 493.
- 8) 堀川 明ほか, 繊維機械学会誌 (繊維工学), 30, 255 (1977).
- 9) J. W. S. Hearle and P. Grosberg, "Structural Mechanics of Fibers, Yarns, and Fabrics", p. 324 (1969) Wiley-Interscience

書 評

“ゲ ル”

——ソフトマテリアルの基礎と応用——

荻野 一善, 長田 義仁 (共著)
伏見 隆夫, 山内 愛造

(1991年, 産業図書発行, A 5 判, 218ページ, 3400円)

はしがきによると, 本書は「高分子ゲル」をできるだけ広い視野から眺め, 理解する目的で書かれているという。実際, ゲルの種類に関しても性質に関しても多様な面が記述されており, 内容的なまとまりも適当である。章ごとの内容は次のとおりである。括弧内は紹介者の内容説明である。

1. ゲルとは (定義, 分類など)
2. 生体・天然高分子ゲルの構造と性質 (多糖類, 蛋白質のゲル)
3. 合成高分子ゲル (作成法, 性質, 機能性ゲル)
4. ゲルの物理化学 (熱力学, 粘弾性)
5. ゲルの機能 (生体・医用材料として, ケモメカニカルな性質, 分離機能)
6. 合成高分子ゲルの応用

高分子ゲルは, 応用面からも基礎研究の面からも, 最近伸び盛りの流行の分野である。評者はゲルの専門家ではないので, ちょうど全体を眺めるのに好都合と考えて目を通そうとしたのであるが, 全体を真っ向から読もうとすると, 時々難しい式や引用文献の多すぎるところがあり, 若干難航した。分野自体に, 本質的に理論的に考えなければならない部分があるためかもしれないが, 複数の著者が書いたために, 移り変わりが滑らかでないのかもしれない。評者の専門に近い粘弾性 (第4章) の記述から判断すると, 多様なゲルに最適の記述法が確立されていない節もあり, もしかしたら第4章の内容はこの程度のスペースで述べるのが無理なのかもしれない。

逆に, ゲルの多様な構造, 性質, 応用などの記述の割り振りにについては, 共著であるという特徴がうまく活用されており, 本書の目的は満たされているといえよう。全体を通じて, 説明のための漫画がうまく活用されている。特に, 本書のほぼ半分を占める第5, 6章については, いろいろな機能や応用が平易に説明されており, 好きなどをパラパラめくって読んでも十分なので, 楽しい。テレビの宣伝でおなじみの紙おむつの仕掛けから, 電気粘性流体を用いた自動車のダンパーの原理まで, 他人より少しよけいに知っておくためには, ちょうど良い読み物であろう。

(京都大学化学研究所 尾崎 邦宏)