

構造用膜材料の荷重-歪特性と構造モデル

西川 薫 *1

石井 一夫 *2

達 富 浩 *3

梗 概

膜構造に用いられる膜材は、織布とコーティング樹脂の複合材料である。この織布構造をもつ膜材料の荷重-歪み特性を適正に捉え、数値解析する上でより実状に近い構造モデルを構築することが本研究の目的である。本報では、膜材料の一軸・二軸試験から膜材料の荷重-伸び特性を捉え、幾何学的モデルとの比較結果について報告する。

1. 本研究の目的

膜構造は、その、やわらかな光の入る空間特性から近年、テニスコート・スイミングプール等のスポーツ施設、ショッピングモール等の商業施設、或いはジャングル風呂等のレジャー施設から巨大な多目的スタジアムに至る迄、多様な用途の建築物に利用される様になった。これは、不燃性・耐久性に優れた新しい構造用膜材料の登場により、膜構造の恒久建築物としての性能が認められた事に一因があると云えよう。

この膜構造を構成する膜材料には、表裏面に樹脂をコーティングした織布が一般に用いられている。この為、本構造物の構造設計及び生産設計において、この膜材料としての諸特性、特に力学特性を的確に捉え、設計に反映することが、精度を高める上で重要な課題である。従来、これらを捉える目的で、一軸試験・二軸試験・及びせん断剛性試験を行い、これらの結果から、膜材料をフックの法則に従う直交異方性弾性体としてモデル化し解析を行っているが、織布としての構造組織からして必ずしも適正に表現できているとは云えない。更に、二軸引張試験は装置が大掛かりな上、

試験体も大きな物が必要とされ、又、応力状態を変化させるなどの手間も掛かる為、試験体数が限られ実用上問題がある。

そこで、従来の一軸・二軸引張試験を再考して、簡便で汎用性のある一軸引張試験を基に数値計算的に膜材料の二軸特性を捉え、より実状に近い構造モデルの構築をする事が本研究の目的である。

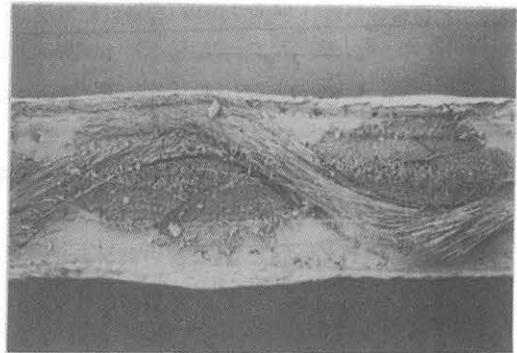


写真 ふっ素樹脂コーティングガラス繊維布の断面

* 1 大成建設(株) 技術開発部課長 横浜国立大学工学部建設学科博士課程

* 2 横浜国立大学工学部建設学科教授

* 3 横浜国立大学工学部建設学科修士課程

2. 膜材料

本研究では、各種膜材料の中で、恒久的な膜構造体に汎用されている四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布について、この力学特性を調べることにした。

2.1 四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布の概要

(1)構成 ・表裏面化粧材：四ふっ化エチレン樹脂
 ・基材：βヤーンガラスクロス
 平織

(2)ヤーン特性

・使用糸 たて：ECB 150 4/2 3.8S
 よこ：ECB 150 4/2 3.8S
 ・番手：271.2 Tex
 ・撚り：3.78 S/25mm
 ・引張り：18.0 kg/本

(3)クロス特性

・密度 たて：24.5±1本/25mm
 よこ：19.5±1本/25mm
 ・幅：MAX.5100mm
 ・厚さ：0.51±0.04mm
 ・質量：520.0g/m²
 ・引張り たて：300kg/25mm
 よこ：340kg/25mm

(4)膜特性・密度

たて：25⁺², 25⁻¹本/25mm
 よこ：19⁺², 19⁻¹本/25mm
 ・幅：4600mm
 ・質量：1300±130g/m²
 ・厚さ：0.8±0.1mm
 ・引張り たて：450kg/30mm以上
 よこ：360kg/30mm以上

2.2 製法上発生する初期歪み

ガラス繊維糸を織布にする過程に於いて、その製法上から出来上がった織布は、ヨコ糸が真っ直ぐで、タテ糸が蛇行した状態となっている。(図2.2-1)次に織布をコーティング材の液に浸し、それを乾燥させ、更に熱処理・焼成・除冷という一連の過程を数回繰り返して、コーティングが行われる。(図2.2-3)この一連の過程に於いて、織布は常にタテ糸方向に引張られる状態にある為に、最終的にタテ糸は真っ直ぐに伸び、ヨコ糸が撓む傾向になる。(図2.2-2)又、コーティング材硬化の為の熱処理によっても膜材は縮む事になる。これらの撓み・縮みは荷重を掛けた後に残る歪み(残留歪み)に大きく影響するものと思われる。この残留歪みは、織物の特性として最初からある歪みとみて、初期歪み(初期伸び)とも呼んでいる。

返して、コーティングが行われる。(図2.2-3)この一連の過程に於いて、織布は常にタテ糸方向に引張られる状態にある為に、最終的にタテ糸は真っ直ぐに伸び、ヨコ糸が撓む傾向になる。(図2.2-2)又、コーティング材硬化の為の熱処理によっても膜材は縮む事になる。これらの撓み・縮みは荷重を掛けた後に残る歪み(残留歪み)に大きく影響するものと思われる。この残留歪みは、織物の特性として最初からある歪みとみて、初期歪み(初期伸び)とも呼んでいる。



図2.2-1 織布時のクリンプ

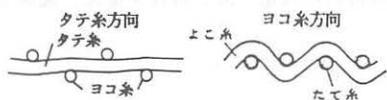


図2.2-2 コーティング後のクリンプ

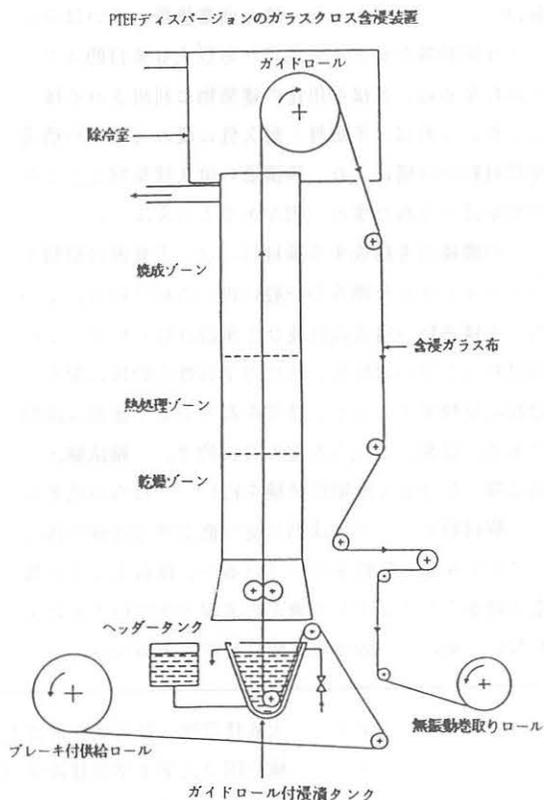


図2.2-3 コーティングの過程

3.3 残留歪みと引張弾性係数の算出

残留歪み (ε)

膜材料の荷重緩和後に生ずる歪量を残留歪みとする。

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad \begin{array}{l} \Delta l : \text{伸び量} \\ l : \text{元の長さ} \end{array}$$

本試験においては、各荷重レベルの3サイクル目の残留歪みを採用する。

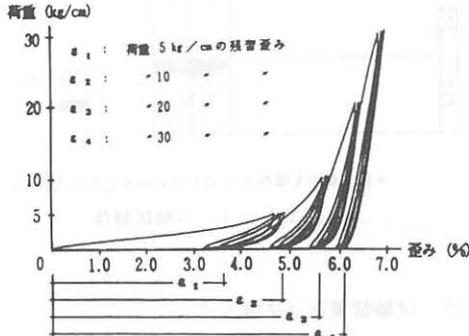


図3.3-1 一軸引張試験の荷重-歪み曲線と残留歪み

引張弾性係数 (Et)

膜材料の引張弾性係数 (Et (kg/cm)) は、

$$Et = \frac{\sigma_t}{\varepsilon} \quad \begin{array}{l} \sigma_t : \text{単位幅当りの荷重 (kg/cm)} \\ \varepsilon : \text{歪度} \end{array}$$

とする。この値は、荷重-歪み曲線の勾配に相当するものである。

本試験においては、各荷重レベルの3サイクル目の弾性係数を算出する。但し、10kg/cm以上の荷重レベルについては、線形化の為に、荷重が5kg/cm以上の部分から算出する。

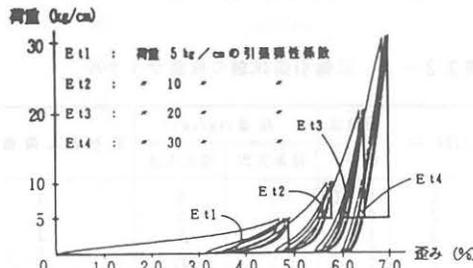


図3.3-2 荷重-歪み曲線と引張弾性係数

尚、膜材料の糸1本当りの引張弾性 (EA (kg)) は、先の引張弾性係数 (Et) より、

$$EA = \frac{Et \times 3}{N} \quad \begin{array}{l} Et : \text{引張弾性係数 (kg/cm)} \\ N : \text{糸の打ち込み本数 (本/3cm)} \end{array}$$

とする。

4. 試験結果

4.1 一軸試験結果

荷重 歪み曲線の例を図4.1 3 ~ 4.1 5 にあげる。

4.1.1 一軸試験に於ける残留歪み

タテ糸、ヨコ糸方向とも荷重レベルを大きくしていくに従い、残留歪み量 (初期伸び量) は増加する傾向を示すが、その増加量は漸減している。この傾向は荷重回数と残留歪み量の関係に於いても同様に見られ、値の収束性が認められる。又、ヨコ糸方向の残留歪み量はタテ糸方向に比べ著しく大きな値となっており、布に於いてヨコ糸に大きな緩みが存在していることが判る。

基布に於いても上記のコーティング布と同様の傾向が認められ、その量は全般的に小さいが、荷重の低いレベル (5kg/cm) に於いて、コーティングの影響と見られる膜材の剛性から、コーティング布の残留歪みがヨコ糸方向について、基布より小さな値を示している。一方、タテ糸方向についても同様であるが、値の差は非常に小さい。

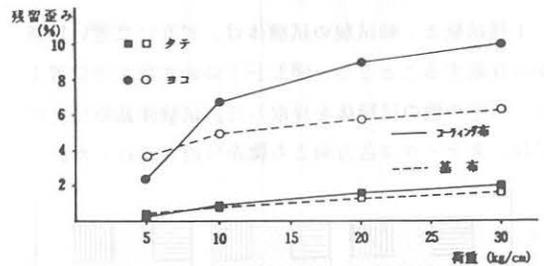


図4.1-1 一軸荷重レベルと残留歪み

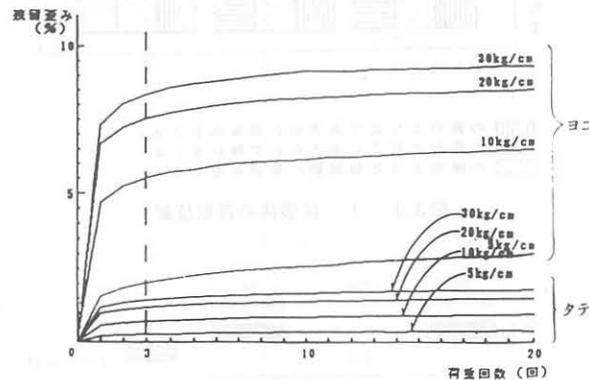


図4.1-2 コーティング布の一軸荷重回数と残留歪み

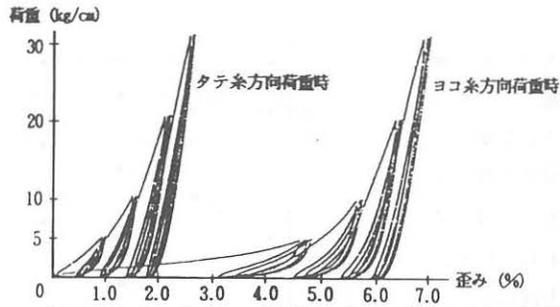


図 4.1-3 基布の一軸荷重-歪みの関係 (C2, F5, W5)

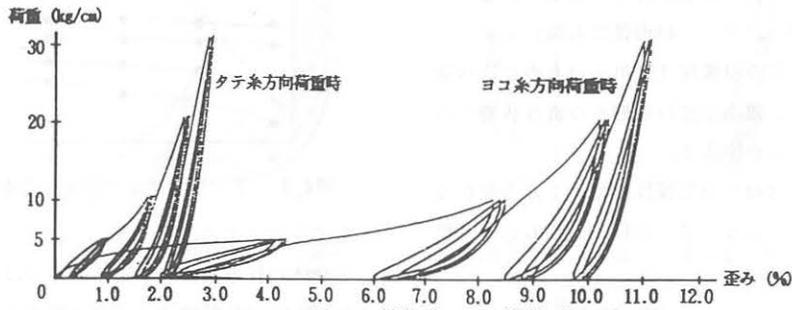


図 4.1-4 コーティング布の一軸荷重-歪み関係 (L1, F3, W3)

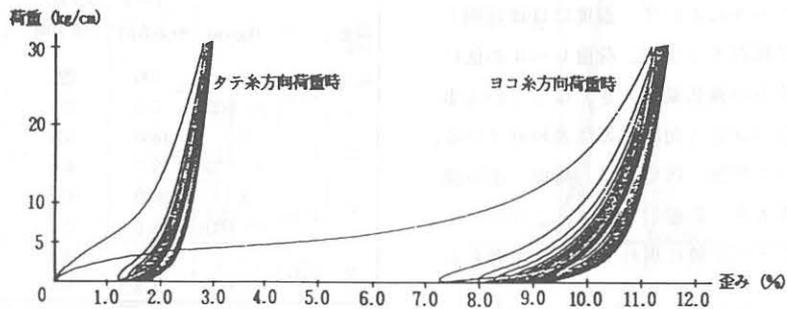
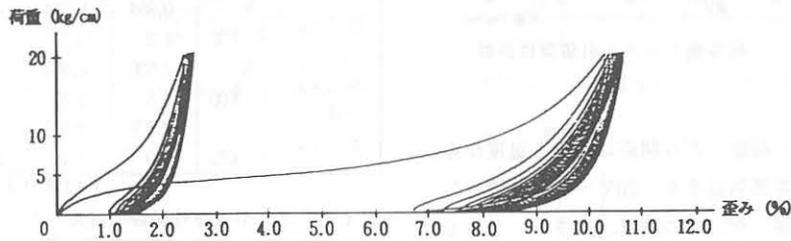
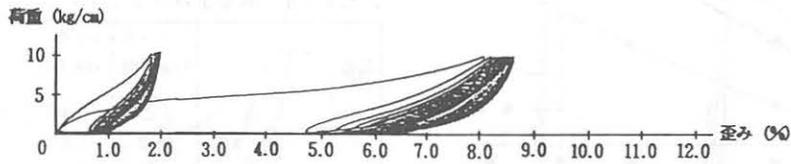
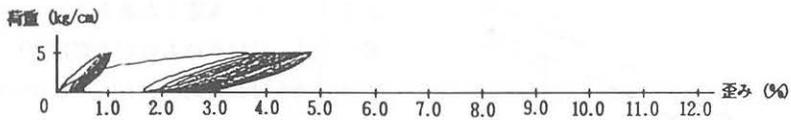


図 4.1-5 コーティング布に於ける繰返し一軸荷重時の荷重-歪み関係

4.1.2 一軸試験に於ける引張弾性

タテ糸方向の引張弾性は荷重に比例し大きくなる傾向を示すが、その増加量は荷重に対し、鈍くではあるが減少しつつあり、収束傾向を示している。しかし、ヨコ糸方向については本試験の荷重レベルでは収束傾向を認められない。これに対し、基布においては、タテ糸、ヨコ糸両方向について収束傾向を示している。

このことからコーティング布のヨコ糸方向については、コーティングの存在が引張弾性に大きく影響を与えていることが判る。又、一軸引張にも関わらず、コーティング布、基布の引張弾性は単糸のものに比べ低い値を示しており、織糸が蛇行状態から直な状態への移行過程にあることが伺える。

タテ糸・ヨコ糸方向の引張弾性値はタテ糸方向の方が大きな値を示しており、又これは糸の打ち込み本数に比例している。

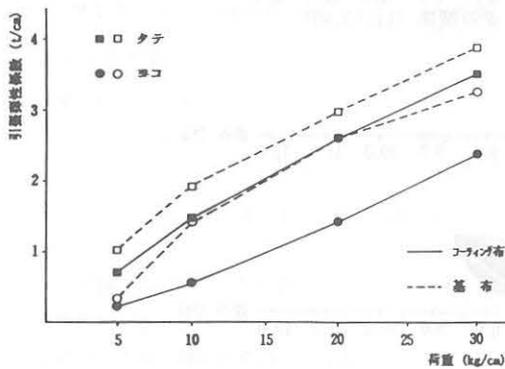


図 4.1-6 一軸荷重レベルと引張弾性係数

4.1.3 温度特性

コーティング布の荷重-歪み関係における温度依存性を調べるため、雰囲気温度を-20℃~60℃に置き乍ら、一軸荷重を実施した。その結果、タテ糸、ヨコ糸方向共に、各荷重レベルにおいて、温度にはほぼ比例して歪みが大きくなる傾向を示すが、荷重レベルの低い場合程温度による歪みの変化量は大きくなっている事が判る。この傾向はヨコ糸方向に顕著に表われている。

これは、荷重レベルの低い状態では、荷重-歪み関係にコーティングが大きく影響しており、このコーティングの熱によりクリープが値に現れている為と考えられる。

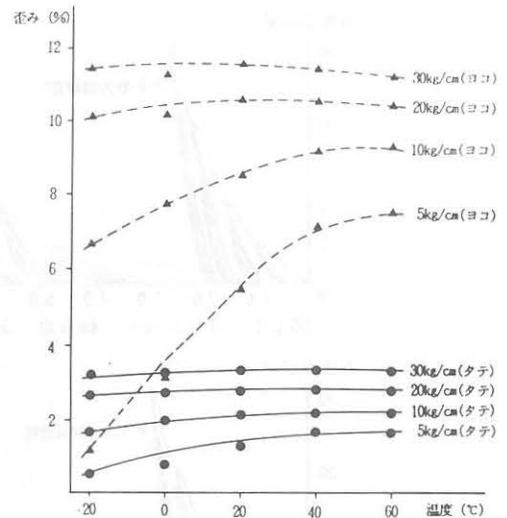


図 4.1-7 コーティング布の温度と歪みの関係

4.1.4 データのばらつき

試験体の採取位置によるデータのばらつきは低い荷重レベルでは比較的大きいが、荷重レベルが高くなると小さくなり、安定した値を示した。しかし、基布に於いては、材料そのものが不安定なため、試験体相互のばらつきは比較的大きなものとなった。

表 4.1-1 残留歪みのばらつき

荷重 kg/cm	ε	コーティング布		基布		
		タテ方向	ヨコ方向	タテ方向	ヨコ方向	
5	ε ₁	X	0.297	2.468	0.339	3.709
	σ/ X(%)	16.2	7.8	13.3	3.8	
10	ε ₂	X	0.959	6.724	0.825	4.938
	σ/ X(%)	4.8	3.2	8.8	3.0	
20	ε ₃	X	1.626	8.965	1.331	5.727
	σ/ X(%)	2.8	2.3	7.1	2.7	
30	ε ₄	X	2.078	9.977	1.673	6.255
	σ/ X(%)	1.0	2.1	5.7	2.4	

(X): 平均値 (σ): 標準偏差

表 4.1-2 引張弾性係数のばらつき

荷重 kg/cm	Et (kg/cm)	コーティング布		基布		
		タテ方向	ヨコ方向	タテ方向	ヨコ方向	
5	Et ₁	X	700	220	1041	339
	σ/ X(%)	6.3	3.5	6.6	4.2	
10	Et ₂	X	1460	539	1919	1432
	σ/ X(%)	9.6	4.6	5.0	3.3	
20	Et ₃	X	2610	1413	2987	2618
	σ/ X(%)	5.6	2.1	4.2	2.9	
30	Et ₄	X	3506	2382	3891	3267
	σ/ X(%)	4.8	1.7	4.7	3.7	

(X): 平均値 (σ): 標準偏差

4.2 二軸試験結果

荷重-歪み曲線の例を図4.2-1~4.2-6に掲げる。

図は、小さい荷重から大きい荷重へ、各種荷重比で記録した荷重-歪み曲線を荷重比毎にまとめた。

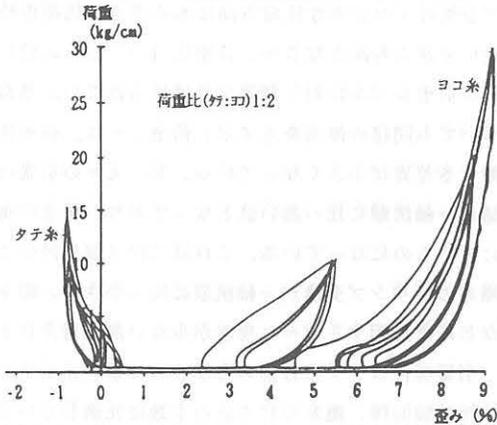


図4.2-1 コーティング布の二軸荷重-歪み関係 (T-3R)

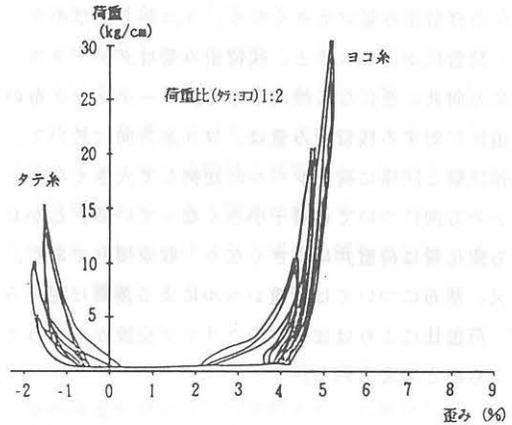


図4.2-4 基布の二軸荷重-歪み関係 (T-2R)

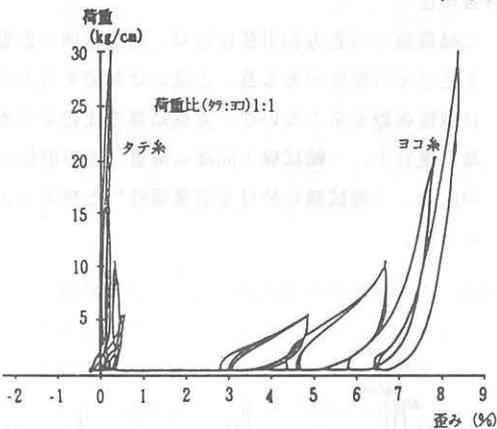


図4.2-2 コーティング布の二軸荷重-歪み関係 (T-3R)

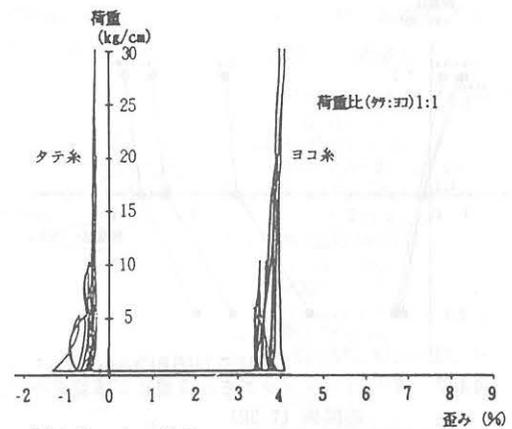


図4.2-5 基布の二軸荷重-歪み関係 (T-2R)

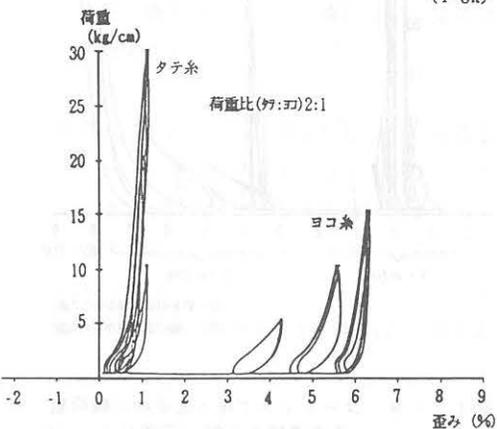


図4.2-2 コーティング布の二軸荷重-歪み関係 (T-3R)

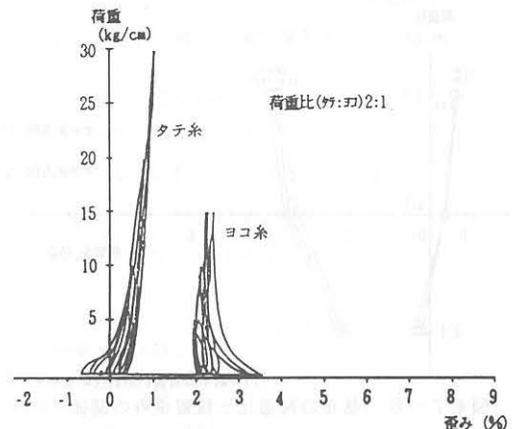


図4.2-6 基布の二軸荷重-歪み関係 (T-2R)

4.2.1 二軸試験における残留歪み

タテ糸とヨコ糸方向の荷重比により、残留歪み量は異なる値を示している。即ち、荷重比1:1を基準とした時、タテ糸方向荷重が大きな比率になるとタテ糸方向の残留歪み量は大きくなり、ヨコ糸方向は小さくなる。荷重比が逆になると、残留歪み量はタテ・ヨコ糸方向共に逆になる傾向がある。コーティング布の荷重比に対する残留歪み量は、ヨコ糸方向に於いて、一軸試験と同様に荷重レベルに比例して大きくなり、タテ糸方向については若干小さくなっている。しかし、これも変化量は荷重共に小さくなり、収束傾向である。

又、基布については荷重レベルによる差異は認められず、荷重比によりほぼ一定のクリンプ交換がなされているものと考えられる。

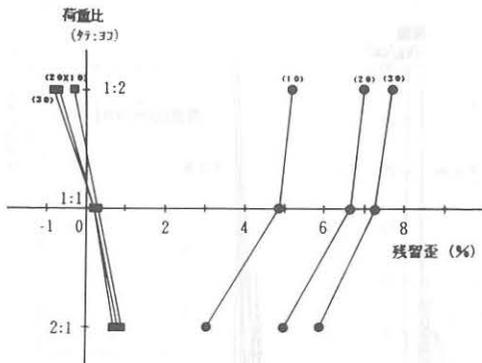


図4.2-7 コーティング布の荷重比と残留歪みの関係 (T-3R)

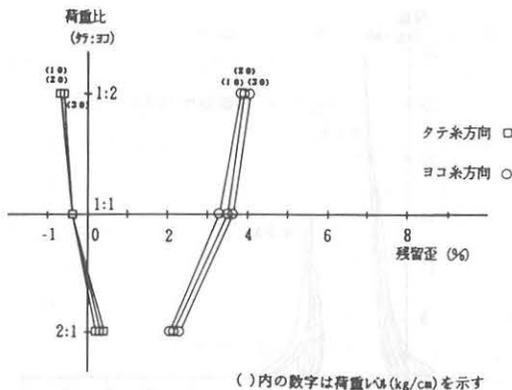


図4.2-8 基布の荷重比と残留歪みの関係 (T-2R)

4.2.2 二軸試験に於ける引張弾性*

コーティング布のヨコ糸方向に於いて、一軸試験と同様、荷重に比例して引張弾性*が大きくなる傾向を示している。タテ糸方向は、荷重比1:2に於いてクリンプ交換により歪みが圧縮方向にある場合、低荷重時に於いて逆の勾配となるが、荷重比1:1、2:1に於いては、荷重レベルに対し顕著な差は見られない。基布についても同様の傾向を示すが、荷重レベル、荷重比に対する差異は小さくなっている。又、夫々の引張弾性*値は一軸試験に比べ高い値となっており、単糸の弾性に近いものになっている。これは二軸試験に於いては、織糸のクリンプ交換が一軸試験に比べ小さく、織糸のなじみに起因するすべり現象が少ない為と考えられる。

引張弾性*はタテ糸方向の方が大きな値を示しており、一軸試験同様、織糸の打ち込み本数に比例している。

引張弾性*

二軸荷重下の各方向引張弾性は、直交方向の影響を受ける可能性がある為、正確には勾配そのものは弾性係数を示さないが、実験結果の比較をする為、便宜上、一軸試験と同様に荷重-歪み関係の勾配を、二軸試験に於ける引張弾性*と呼ぶことにした。

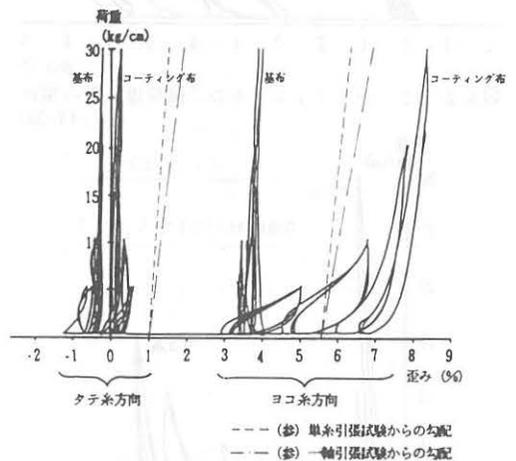


図4.2-9 コーティング布と基布の二軸荷重-歪み曲線の比較 (荷重比1:1)

4.3 膜材料の構造特性

- i) 膜材はその製法上、タテ糸に対しヨコ糸が大きな緩みを保有することになり、これが荷重-歪み関係における残留歪みの原因となる。
- ii) 膜材の荷重-歪み性状はすべりを含む、ハードニングタイプの弾性性状を示すが、これは膜材製作時に生ずる各方向織糸の緩みと、粘弾性体であるフッ素樹脂コーティング材の複合効果による。
- iii) 荷重の低い状態では、コーティング樹脂の粘弾性性状が膜材の引張弾性、残留歪みに影響を及ぼす。特に織布の緩みの大きいヨコ糸方向について、この傾向は顕著である。
- iv) 荷重が高くなるとコーティングの影響は小さくなり、主に織糸のクリンプ交換における織糸のなじみにより、矢張り、すべりを含むハードニングタイプの弾性性状を示している。これはクリンプ交換の大きいほど、即ち、織糸の蛇行状態が直行状態へ移向する量が大きいほど大きい。
- v) 二軸荷重下、膜材の各方向の残留歪みは、低荷重時において、クリンプ交換過程にコーティングの影響を受け、荷重レベルにより差異が見られる。しかし、各荷重比に対する残留歪み値は、収束傾向にあり、コーティング材の粘弾性性状を考え合わせると、織糸のクリンプ平衡に従い一定の値を示すと考えられる。
- vi) 二軸荷重下、各方向の引張弾性は、特に低荷重時にクリンプ交換に伴い、主にコーティングの影響により差異が見られ、ヨコ糸方向に顕著であるが、何れも値は収束傾向を示し、単糸の引張弾性* (* 参考文献 2) に近い値となっている。又、糸打ち込み本数の多いタテ糸方向の弾性が、若干高い値を示している。

5. 幾何学的モデルによる計算

5.1 直交異方性弾性体によるモデル化の問題

従来、構造解析には、膜材を直交異方性弾性体としてモデル化した荷重-歪み特性を適用している。即ち、二軸試験結果から、各種荷重比に対応する荷重-歪み曲線を線型化し、このデータを基に、タテ糸方向剛性 E_{1t} 、同ポアソン比 ν_{11} 、ヨコ糸方向剛性 E_{2t} 、同ポアソン比 ν_{22} を導いている。しかし、このモデル化では、荷重比により異なる膜材の残留歪み（初期歪み）の特性が表現出来ない為、膜面に発生するタテ糸・ヨコ糸方向の応力比が一律でない場合の解析に於いては、特に適用に問題がある。

5.2 織布特性を考慮した荷重-歪みモデル

織布構造を簡単な幾何学的モデルに置換して、荷重-歪み関係を導く。膜材の荷重-歪み関係に於いて、低荷重レベルでは、コーティング材の影響が認められるが、今回のモデルでは、便宜上、考慮していない。

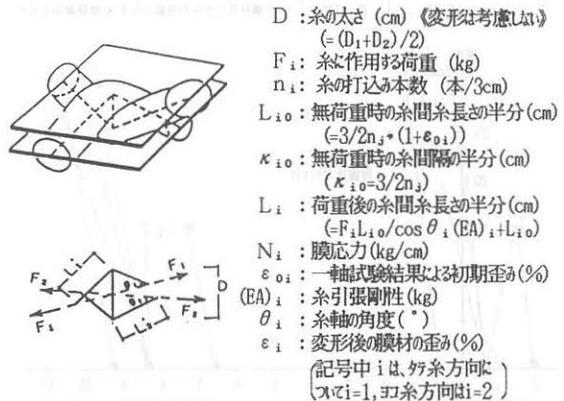


図 5.2 - 1 織布の幾何学的モデル化

織布としての連続条件から

$$L_2 \sin \theta_2 + L_1 \sin \theta_1 = D \quad (1)$$

糸交点での、糸軸に直角方向の力の釣り合い条件から

$$F_2 \tan \theta_2 = F_1 \tan \theta_1 \quad (2)$$

(1)式に各糸の荷重-歪み関係を代入して

$$\left[\frac{F_2 \cdot L_{20}}{\cos \theta_2 \cdot (EA)_2} + L_{20} \right] \sin \theta_2 + \left[\frac{F_1 \cdot L_{10}}{\cos \theta_1 \cdot (EA)_1} + L_{10} \right] \sin \theta_1 = D \quad (3)$$

(2), (3)式から θ_1, θ_2 が計算され、 L_1, L_2 が求め

られる。以上から織布の歪み ε_i は次式により導くことができる。

$$\varepsilon_i = (L_i \cdot \cos \theta_i - \kappa_{i0}) / \kappa_{i0}$$

計算においては、糸の太さ、糸の打ち込み本数、一軸試験結果及び糸の引張剛性を、各種計測及び一軸試験値から定数として代入し、荷重-歪み関係を求めた。

5.3 計算結果

(計算データ) コーティング布 (T-3R)

	タテ糸方向	ヨコ糸方向
糸太さ	0.0249 cm	0.0231 cm
剛性 EA	349 kg	314 kg
初期歪み	2.036 %	9.875 %
打込本数	31(本/3cm)	23(本/3cm)

(直交異方性弾性体としての諸係数)

	Et (kg/cm)	ポアソン比
タテ	1030	0.57
ヨコ	900	0.66

(注) 荷重-歪み関係に於ける初期値は、便宜上、幾何学モデルの荷重比1:1の初期歪みとした

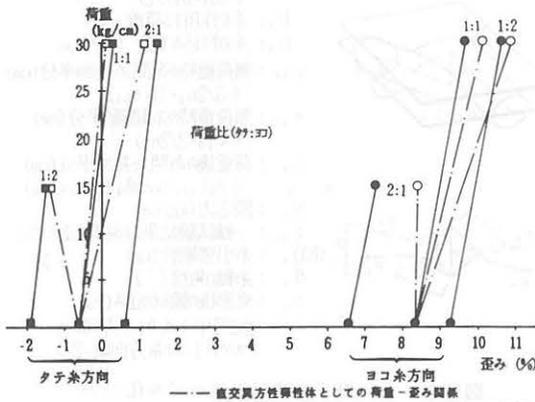


図5.3-1 幾何学的モデルによる二軸荷重-歪み関係

5.4 実験値との比較

二軸試験結果と幾何学的モデルによる計算結果を比較すると、各荷重比に於いて、歪みの大きいヨコ糸方向については計算値が大きめに、歪みの小さいタテ糸方向については、逆に実験値が大きめの値となっており、計算値が実験値を包含する形になっている。これは、今回のモデルがコーティング材を考慮していないのに対し、実験結果はコーティングの粘弾性効果によって、織糸がまだクリンプ交換過程にあるためと考え

られる。しかし、各荷重比に対する歪挙動の傾向には、十分な近似が見られる。又、引張弾性については、一軸試験結果から計算したものが実験値に対し低い値を示しているの 비해、単糸の引張弾性から計算した方が、より近似した傾向を示している。

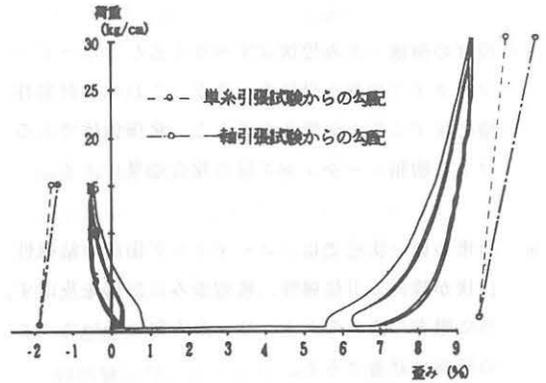


図5.4-1 計算値と実験値の比較 (荷重比1:2)

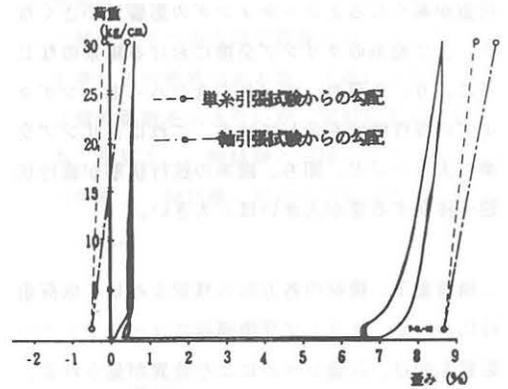


図5.4-2 計算値と実験値の比較 (荷重比1:1)

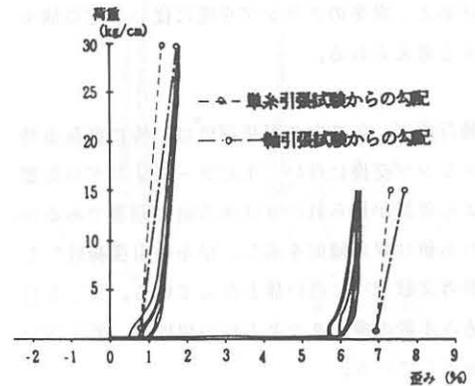


図5.4-3 計算値と実験値の比較 (荷重比2:1)

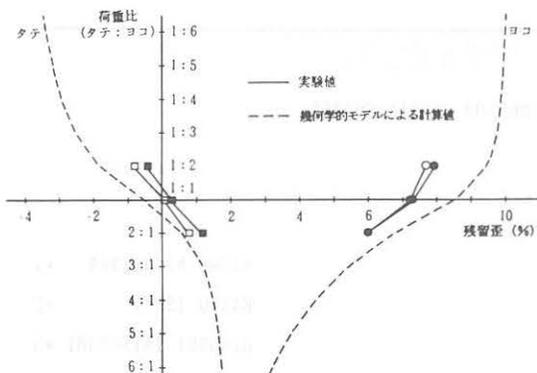


図 5.4-4 残留歪み（初期歪み）に関する計算値と実験値の比較

6. 結論

構造用膜材として使われるフッ素樹脂コーティングガラス繊維布の、一軸及び二軸荷重時の荷重-歪み関係は、すべりを含むハードニングタイプの弾性性状を示す。これは、膜材の製作時に生じたタテ・ヨコ方向織糸の緩みが、荷重によりクリンプ平衡に至る迄の過程で、主にコーティング樹脂の粘弾性が影響を与えている為と考えられる。このコーティング材の荷重-歪み関係への影響は、低荷重時及び歪変化量の大きい時程大きい為、荷重が高くなるに従い小さくなる傾向を示している。この事から、高い荷重時を対象に、コーティング材の粘弾性影響を無視した織布モデルを考え、織糸の幾何学的な形状を基礎にした数値モデルを作成した。本モデルによる計算値は、実験値にまだコーティング材の影響が残存していた為、一致するには至らなかったが、各荷重比に於ける実験値を包含する形になり、傾向は十分に表現できることが判った。この方法による荷重比に応じた初期歪みを持つ弾性体モデルによれば、従来の、二軸引張試験結果を用いた直交異方性弾性体モデルの荷重-歪み関係の矛盾を解決出来ると共に、より簡便な一軸試験結果をデータにモデル化が可能となす為、信頼性の高いモデルを作成する事も可能となる。

今後、本モデルの精度をより高める為に、幾何形状（織糸形状、織糸断面）の定量化、及びコーティング材のモデル化等の検討を加えたいと考えている。

最後に、本研究に於いて、膜材の提供を戴いた中興化成工業㈱及び、二軸引張試験を実施して戴いた小川テント㈱に深く感謝致します。

（参考文献）

- 1) 「織物特性を考慮した、膜構造物の生産設計」
西川 薫 建築学会大会論文 1987
- 2) 「傷を有する膜材料の引張強度に関する数値解析」
西川 薫・渡辺典之 膜構造協会論文集 1987

STUDY ON THE LOAD-EXTENSION BEHAVIOR OF RESIN-COATED
FABRIC FOR MEMBRANE STRUCTURE AND
THE STRUCTURAL MODEL

KAORU NISHIKAWA *1
KAZUO ISHII *2
HIROSHI TATSUTOMI *3

SYNOPSIS

The material used for membrane structure is made of a resin-coated fabric. The main purpose of this study is to accurately understand the load-extension behavior of a fabric membrane material so that a structural model which is very similar to an actual behavior can be constructed for the purpose of numerical analysis. This report explains the load-extension behavior of the fabric based on the uniaxial and biaxial loading tests and outlines the results obtained from comparing with a structural model considering geometry.

-
- *1 Chief Engineer, Technology Development Department, Taisei Corporation
 - *2 Professor, Department of Architecture, Faculty of Engineering, Yokohama National University
 - *3 Student of master course, Department of Architecture, Faculty of Engineering, Yokohama National University