

膜構造の定着部における応力伝達機構に関する研究

—溶着部およびクランプ定着部の伸長特性—

河端昌也*
金 熙均**
中村栄作***

梗 概

膜構造は初期張力の保持により構造的安定性を確保している。ゆえに施工時の張力導入および竣工後の張力管理が重要である。しかし膜材料は基布が織布構造であることやコーティング樹脂の粘性の影響等により、クリープやリラクセーション(応力緩和)を生じる。したがってこれらの性状を適切に把握し予測することは、張力管理上極めて重要である。さらに母材のみではなく、接合部や定着部も含めたトータルでバランスの取れた評価を行うことが望ましい。そこで本研究では定着部を含めた膜構造の応力状態と応力伝達機構を解明し膜構造の経時変化を把握するための端緒として、母材および溶着部の1軸引張試験とクランプ定着部の引張実験を行い、その伸長特性について検討している。

1 はじめに

膜構造は初期張力を保持することで構造的安定性を確保している。したがって張力を安定した状態に保つための張力導入および張力管理が重要である。一方、膜材料は基布が織布構造であることやコーティング樹脂の粘性の影響等により、クリープやリラクセーション(応力緩和)を生じる。ゆえにこれらの性状を適切に把握し予測することも、張力管理上極めて重要である。

膜材料の糸方向引張に対するクリープおよびリラクセーションについては、これまでに南¹⁾、石井²⁾、加藤³⁾、大森⁴⁾、大崎⁵⁾、斎藤⁶⁾らの研究によって定量的な評価が行われている。材料のばらつきなど評価の難しい問題もあるものの、精密な織布モデルによるシミュレーションも可能になっている。これに対して、膜材料を境界構造に固定するための定着部や接合部は検討が十分に行われているとはいえない部分である。定着部や接合部は母材に比べると小さい部分であり、膜面全体に及ぼす影響はほとんど無視しうるケースもあると思われる。ただし、膜材料のクリープやリラクセーションは施工時の張力導入直後から数日程度で生じる短期的な変化と、風または雪などの荷重によって高い応力レベルに達した後の残留ひずみに起因する長期的な変化があり、これらは分けて評価する必要がある。したがって膜構造の適切な張力管理を行うためには、母材、接合部および定着部について各々バランスの取れた評価を行うことが望ましい。

溶着は広い面積の膜面の形成や、立体裁断により3次元的な形態の膜面を形成する上で不可欠である。また、定着部における膜材料の折返し部でも溶着が行われる。さらに、発生応力が大きい部分に対して膜材料を2重にして補強するケースなどは溶着部が応力伝達上重要な部分であり、その剛性と応力状態の把握は重要である。

定着部には様々なディテールがあるが、PTFE 膜(四フッ化エチレン樹脂でコーティングされたガラス繊維織布で一般に膜材料 A 種と呼ばれている)では、膜材料の端部を折り返して溶着し、折返し部先端には合成繊維ロープなどを挿入するエッジ加工を行う場合が多い。これらを境界構造に固定する方法としてはエッジを金物でクランプする方法と、膜材料の折返し部分に一定間隔で孔をあけて金属プレートとボルトで固定する方法が一般的である。

本研究では定着部を含めた膜構造の応力状態と応力伝達機構を解明し膜構造の経時変化を把握するための端緒としてクランプ定着部の1軸伸長特性を、実験と簡単なモデルを用いた解析によって検討する。実際の膜構造における定着部の設計では、定着部付近の膜面張力が定着部の耐力に対して一定の安全率を満足するように設計されている。設計上はこのような簡便な手法が合理的であるが、その反面定着部の応力状態や耐力決定要因など構造的に明確でない部分もある。実験と解析の同定により定着部の応力伝達機構を解明することが可能となれば、より合理的な耐力の評価や設計、新しいディテールの開発等への応用が期待できる。

PTFE 膜のクランプ定着部は、膜材料の母材部分と溶着部分、エッジとクランプ金物の接触部分で構成される。はじめに母材試験体と全溶着試験体(2枚の膜材料の全面を熱板溶着したもの)の1軸引張を行い、応力-ひずみ曲線から母材および溶着部の引張剛性を算出する。次に2枚の膜材料の端部どうしを溶着した部分溶着試験体の1軸引張を行い、その荷重-伸び曲線と母材および溶着部の引張剛性との関係を調べる。最後に、定着部の1軸引張を行いその荷重-伸び曲線から、エッジとクランプ金物の接触部分等が伸長特性に及ぼす影響を検討する。

* 横浜国立大学大学院工学府 社会空間システム学専攻 助教授 博士(工学)

** 横浜国立大学大学院工学府 社会空間システム学専攻 大学院生

*** 横浜国立大学工学部 建設学科 学生

2 1軸引張実験

2.1 実験の概要

1軸引張実験は定速伸張形引張試験機を使用する。試験体の種類と形状等は表1および図1、図2に示すとおりである。表1の試験体長さはチャック間(定着部の場合は両端のクランプ間)の初期長さを表している。熱履歴試験体は熱板溶着と同様の温度および圧力を母材に与えたもので、これらが剛性に及ぼす影響を確認するために行う。定着部試験体は折り返し部先端にロープもしくは棒鋼を挿入した2通りのケースについて実験を行い、その違いを比較する。各部の材質としてクランプ金物はアルミ、ロープはポリエステル、棒鋼はS45C、その他の治具等はSS400の鋼材を使用している。

膜材料の1軸引張ではタテ糸とヨコ糸のクrimp交換や糸の緩みの影響により、荷重-伸び曲線が強い非線形性を示す。ここでは、設計上の許容応力度に近い荷重レベルである30N/mmを上限として、これを均等に分割した4段階の荷重を設定し、荷重ゼロから各段階まで載荷および除荷を3サイクルずつ繰返す(繰返加力)。所定の荷重値に達した時および荷重をゼロに戻した時点では、試験機のカロスヘッドを30秒間固定して一定のひずみ状態を保持する。なお母材2枚重ねと溶着フィルムを除く1軸引張試験体のうち1~3本は、0~30N/mmまでの荷重を連続的に加えて(単調加力)、繰返加力との比較を行う。この他、同一ロットから採取した試験片で2軸引張試験(中央部400mm、余長部180mm)の十字形試験体も別途行い、結果の比較を行う。

荷重速度は5mm/minを基本とするが、伸びが小さい全溶着試験体と伸びが大きい定着部試験体については荷重速度5mm/minによる引張実験も実施して比較したところ、ほとんど結果に差が生じないことが確認されたため、荷重速度をそれぞれ2mm/min、50mm/minとした。

表1 試験体の種類

	種類	試験体(膜部)形状 幅×長さ	試験体数 タテ/ヨコ	荷重速度
1 軸 引 張	母材	30mm×200mm	3 3	5mm/min
	全溶着	30mm×200mm	5 5	2mm/min
	部分溶着(75mm)	30mm×200mm	3 3	5mm/min
	母材(熱履歴)	30mm×200mm	2 2	5mm/min
	母材(2枚重ね)	30mm×200mm	1 1	5mm/min
	溶着フィルム	30mm×200mm	1	5mm/min
定 着 部	定着部 (ロープエッジ)	500mm×500mm	2 2	50mm/min
	定着部 (棒鋼エッジ)	500mm×500mm	2 2	50mm/min

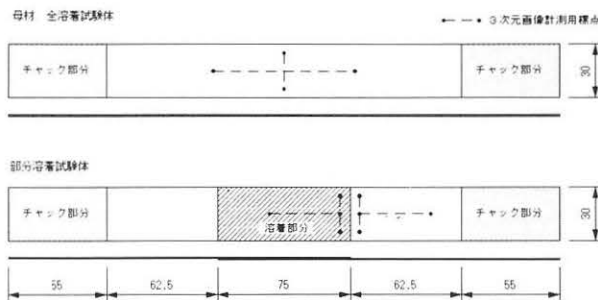


図1 1軸引張試験体の形状

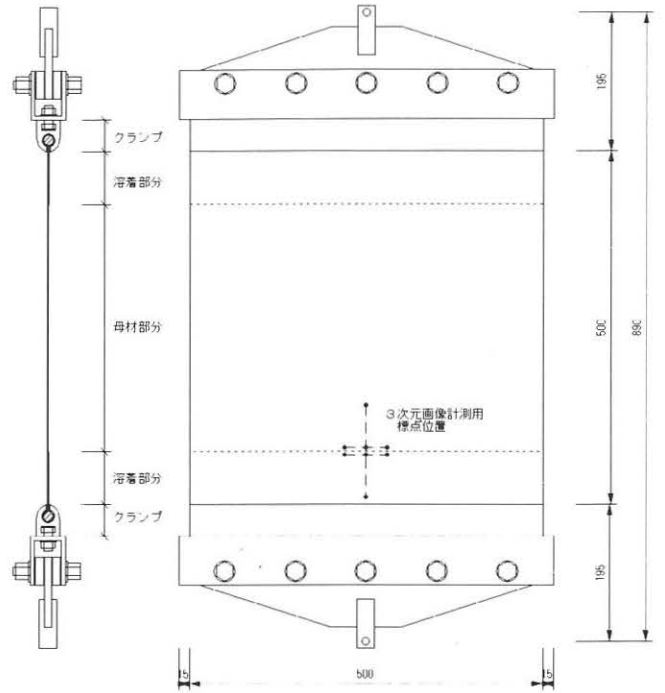


図2 定着部引張試験体の形状

2.2 母材の1軸伸長特性

図3は母材の繰返加力時の1軸伸長曲線である。横軸はチャック間の伸びを初期長さで除したひずみ、縦軸はロードセルで測定した端部荷重を試験体の初期幅で除した単位幅あたり引張力を表している。載荷および除荷を繰返すごとにひずみが増加しているが、これはコーティング樹脂の粘性の影響と、同一方向の加力を繰返すことによる織布内部の糸ズレなどが蓄積して残留ひずみが生じたと考えられる。

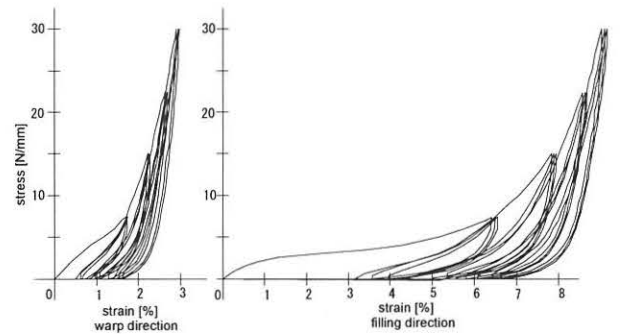


図3 母材の1軸伸長曲線
繰返加力の場合

次に、各荷重段階の第1~第2サイクル載荷までを抽出した曲線と単調加力による曲線を比較したものが図4である。単調加力による応力-ひずみ曲線は繰返加力による曲線をほぼ包絡している。また第2サイクル載荷時の曲線は次段階の第1サイクル載荷時の曲線とほぼ一致する傾向を示していることから、母材の1軸引張りによる残留ひずみは荷重レベルに依存して発生するが、第1サイクル載荷でほぼ確定し、こ

の後に同レベルの繰返加力を受けても残留ひずみはあまり増加しないといえる。

図5に全ての母材試験体の応力-ひずみ曲線を示す。比較として、2軸引張試験の応力比1:0(1軸引張タテ糸方向に相当)と0:1(同ヨコ糸方向)の結果もあわせて示す。繰返加力は各段階の第1サイクル載荷時曲線を繋いだものである。応力が高くなるにつれてひずみに差が生じているが、概ねばらつきも少なく良好に一致している。また、2軸引張試験とも近い結果になっている。

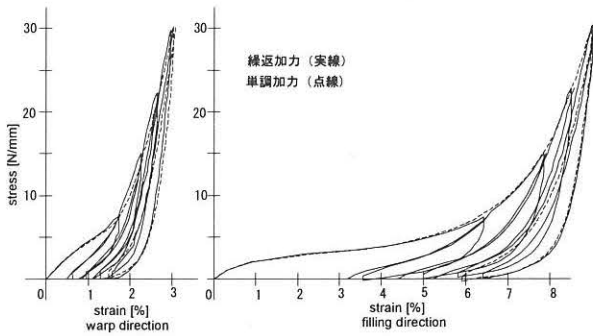


図4 母材の1軸伸長曲線
繰返加力と単調加力の比較

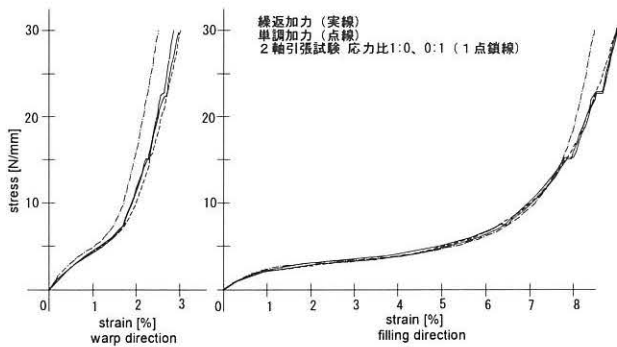


図5 母材の1軸伸長曲線
各試験体(繰返加力、単調加力、2軸引張試験)のばらつき

2.3 全溶着試験体の1軸伸長特性

図6は全面溶着試験体の1軸伸長曲線を繰返加力と単調加力について比較したものの一例である。母材と類似した傾向を示しているが、繰返加力に伴うひずみの増加が母材に比べて顕著になっている。

全ての全溶着試験体の1軸伸長曲線を図7に示す。比較のために母材、母材2枚重ね、熱履歴を加えた母材、フィルムの1軸伸長曲線も加えている。コーティング樹脂の剛性が卓越する低応力域では、タテ糸方向について全溶着の剛性は母材のほぼ2倍の剛性(母材2枚重ねに相当)になっているのに対して、ヨコ糸方向は母材の約3倍の剛性になっている。タテとヨコの相違は、タテ糸はヨコ糸に比べて初期緩みが小さいため、ひずみが小さい領域であっても繊維による剛性の方がコーティング樹脂の剛性よりも支配的になっているためと思われる。これに対して、ヨコ糸方向の剛性が母材2枚重ねよりも高くなっている要因としては、熱履歴とフィルムの影響が考えられる。熱履歴試験体の結

果からは、母材は熱や圧力を受けても硬化することはない、むしろひずみが増大する傾向にある。一般にPTFE膜は熱を受けると収縮する性質を有しており、熱履歴試験体は熱処理を行った時点で収縮して糸のクリンプが母材よりも強まっていた可能性が考えられる。一方、溶着に使用したフィルムは低応力域で母材の約半分程度の剛性を有している。ただしPTFE膜の表面に溶着したフィルムの剛性は確認することができないため、この部分が熱硬化を生じている可能性も考えられる。

次に、織布の剛性が卓越すると思われる高応力域では、ヨコ糸方向で母材2枚重ねよりも高い剛性を示しているのに対して、タテ糸方向の伸長曲線は母材とほぼ同じになっているものもある。全溶着の試験体は2枚の膜材料の糸方向が完全には揃っていないものもあり、加力方向に対する糸の斜行が実験結果に影響しているものと思われる。また、PTFE膜の熱板溶着は75mm幅程度の板を使用しており、今回用いた全溶着試験体もこの幅の溶着を繰返して製作していることばらつきに影響している可能性がある。限られた試験体数の範囲であるため、溶着部の剛性に関する一般的な性状に言及することは困難であるが、母材試験体の結果に比べると比較的ばらつきが生じやすく、糸方向により異なる性状を示すと言える。

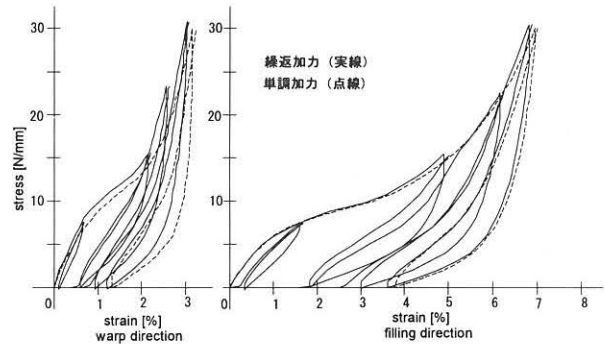


図6 全面溶着および母材の1軸伸長曲線
繰返加力と単調加力の比較

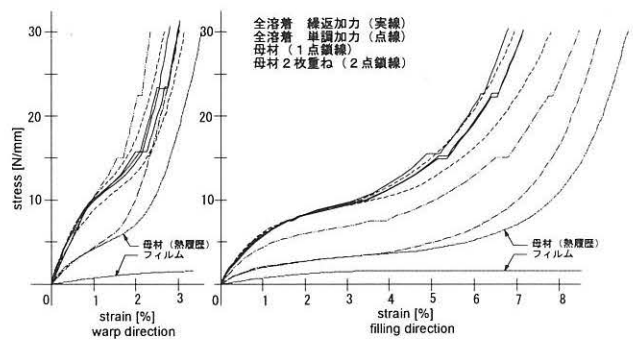


図7 全面溶着および母材の1軸伸長曲線
溶着に伴う剛性変化の比較

2.4 部分溶着試験体の1軸伸長特性

膜材料の端部どうしを75mm重ね合わせて溶着した部分溶着試験体の1軸伸長特性の一例を図8に示す。横軸のひずみは試験体のチ

ヤック間距離(初期200mm)の変位から求めているため、母材部分と溶着部分をあわせた伸びを表している。部分溶着試験体の結果も母材および溶着部と類似した傾向を示している。

部分溶着の全試験体の1軸伸長特性を図9に示す。タテ糸方向については母材とほぼ同じ剛性になっているのに対して、ヨコ糸方向は糸の剛性が卓越する低応力域で母材よりもやや高い剛性を示している。

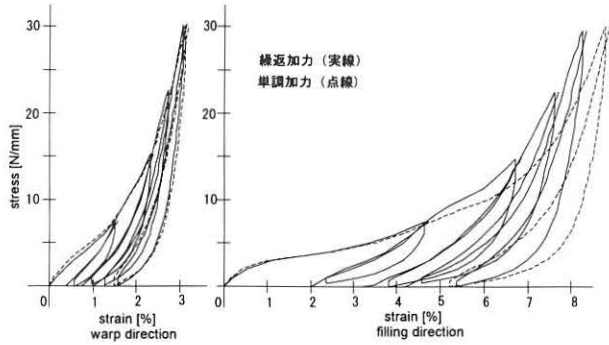


図8 部分溶着の1軸伸長曲線
繰返加力と単調加力の比較

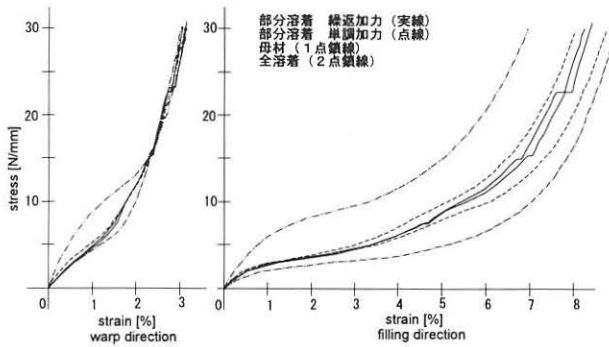


図9 部分溶着の1軸伸長曲線
母材および全溶着との剛性の比較

2.5 解析

母材および全溶着試験体の1軸伸長特性をもとにして、これらの膜材料の剛性を評価する。膜材料を直交異方性弾性体と仮定すると、応力-ひずみ関係は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \pi \end{bmatrix} = \frac{1}{1-\nu_1\nu_2} \begin{bmatrix} Et_1 & \nu_1 Et_2 & 0 \\ \nu_2 Et_1 & Et_2 & 0 \\ 0 & 0 & Gt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma \end{bmatrix}$$

$Et_1 / Et_2 = \nu_1 / \nu_2$ (相反の定理)

基布に合成繊維を用いたPVC膜などの場合には、この関係をほぼ満足する場合が多いが、基布にガラス繊維を用いたPTFE膜の挙動は上記の関係を満足しない場合がある。特にクリンプ交換が生じやすい1軸引張状態のもとでは加力直交方向の縮みが大きく、ポアソン比の値が1を越す場合もある。石井²⁾は膜材料の挙動にはクリンプ交換が含まれることの特長性を考慮して、見掛けポアソン比と呼んでいる。こ

れに関する本実験の測定値は後節に示す。

ここでは部分溶着試験体および定着部試験体の1軸応力状態における伸長特性を解析的に検討することに焦点を絞り、材料のモデル化を行う。上式より1軸引張状態($\sigma_2 = \tau = 0$)での応力-ひずみ関係は

$$\sigma_1 = Et_1 \varepsilon_1$$

となる。PTFE膜の剛性は応力状態に依存して変化することを考慮して、ここでは表2に示すように30N/mmまでを4段階に分けて各段階の剛性を設定する区分線形近似を行う。剛性の算出には、粘性や残留ひずみの影響が最も小さいと思われる単調加力時の応力-ひずみ関係を用いる。ばらつきが比較的大きい全溶着試験体ではサンプリングに任意性があるが、ここでは繰返加力のデータに近い傾向を示す試験体の結果を用いることにする。タテ糸方向とヨコ糸方向の引張剛性については各々異なる値を設定しており、両者には相関性がない。しかし、PTFE膜の剛性がタテ糸とヨコ糸のクリンプ状態に依存して変化すると仮定すれば、タテ糸方向およびヨコ糸方向それぞれに1軸引張を受けた後の剛性は相関性がないと考えるべきであろう。

表2 1軸引張状態におけるPTFE膜の剛性

応力レベル [N/mm]		0 ~ 7.4	7.4 ~ 14.7	14.7 ~ 22.1	22.1 ~ 29.4
引張剛性 [N/mm]	母材 (タテ)	423.8	1257.6	1911.0	2320.1
	母材 (ヨコ)	116.7	488.5	1106.6	1546.1
溶着部 [N/mm]	溶着部 (タテ)	939.8	497.4	1299.8	2274.9
	溶着部 (ヨコ)	462.1	215.8	607.2	998.7

これらの剛性を用いて解析を行った結果を図10~図12に示す。結果は良好に一致しており、部分溶着試験体の実験結果に対しても比較的妥当な解析結果が得られている。

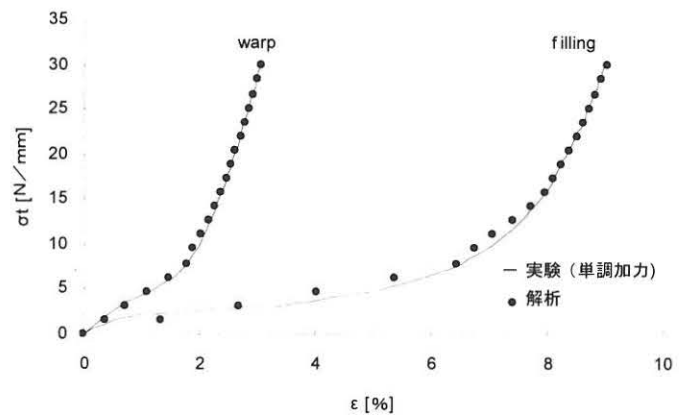


図10 母材の1軸伸長曲線
実験と解析の比較

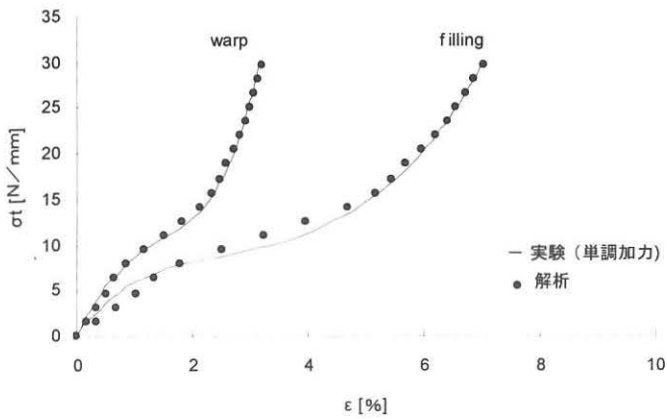


図 11 全溶着試験体の1軸伸長曲線
実験と解析の比較

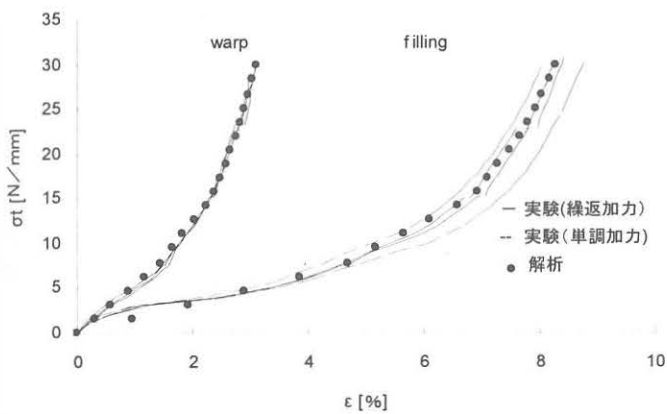


図 12 部分溶着試験体の1軸伸長曲線
実験と解析の比較

3 定着部引張実験

図 13 に定着部試験体(ロープエッジ)の1軸伸長曲線の1例を示す。縦軸は前節までと同様の単位幅あたり引張力を表している。横軸のひずみは試験機上端のクロスヘッド変位を試験体の初期長さ 500mm で除した数値を表している。よってひずみにはクランプとエッジが接触する部分の変形や治具のガタ等が含まれている。荷重 30N/mm に対する伸びが、母材の場合にはタテで約 3%、ヨコで約 9%、全溶着の場合にはタテで約 2.5~3%、ヨコで約 6.5~8%であったのに比べると、定着部を含めた試験体全体の伸びはやや大きくなっている。

図 14 に定着部試験体全ての1軸伸長曲線を示す。エッジに棒鋼を挿入した試験体の伸びがロープエッジに比べて大きくなっているケースがあるが、これは試験体を取付けてロードセルの値がわずかに振れる程度の張力を導入した時点初期状態としたため、初期のロープエッジの緩みが棒鋼エッジの場合よりも解消されているものと思われる。ヨコ糸方向のロープエッジ試験体で1体のみ同種の試験体と異なる挙動を示しているが、これは試験開始前に 3.75N/mm 程度の引張力で予備加力を数回行ったため膜材料の初期緩みが解消されていたことが影響していると思われる。

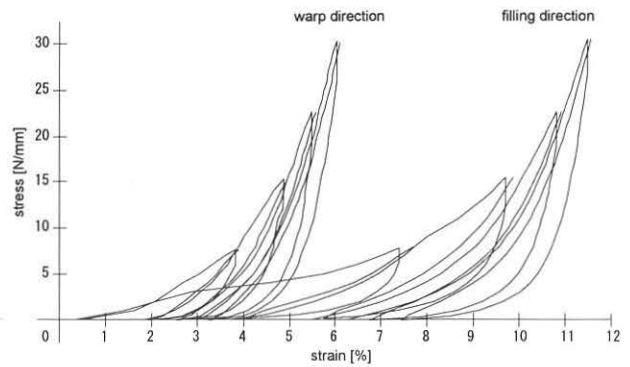


図 13 定着部試験体の1軸伸長曲線
ロープエッジの場合

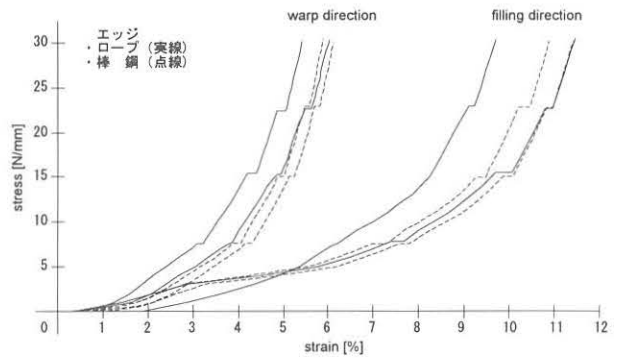


図 14 定着部試験体の1軸伸長曲線
各試験体のばらつき

図 15 は、上記のような試験体の初期状態の相違を考慮して各試験結果を張力 2N/mm(ヨコ糸方向の1体のみ 10N/mm)でひずみが一致するよう補正(平行移動)したものである。なお、ひずみは小さい側の試験体に揃えている。各試験結果はある程度のばらつきの範囲内で一致した挙動を示しているといえよう。

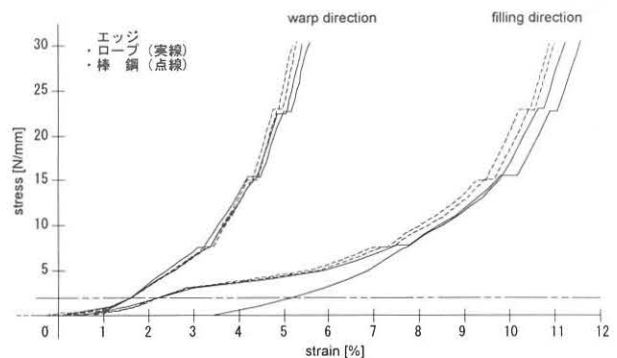


図 15 定着部試験体の1軸伸長曲線
各試験体のばらつき(補正後)

図 16 には、前節と同様の解析によって定着部試験体の膜部分(母材部分 350mm、溶着部分 150mm)の伸びを求めたものを中塗り丸印(●)で表し、実験結果から膜部分の伸びを除いたひずみの半分の値

(上下のクランプ部分で同じひずみが生じたと仮定)を白抜き丸印(○)で表している。一部に不連続なデータがあるが、これは実験データが繰返加力による残留ひずみを含んでいるためである。膜部分以外の伸びは、7.5N/mm以下の荷重レベルで約5mm(1%)程度生じているが、以後はほとんど生じておらず、定着部部分での伸びは非常に小さいといえる。

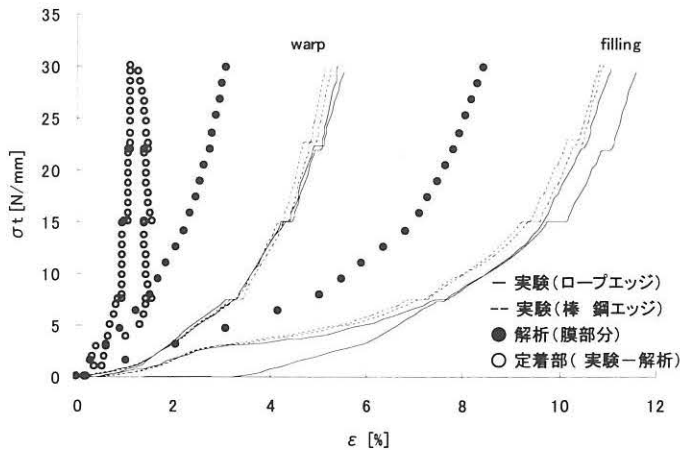


図16 定着部試験体の1軸伸長曲線
解析との比較

4. 3次元画像解析による変位の測定

CCDカメラを用いた3次元画像計測は、複数の画像の視差を利用して3次元座標を求めるもので、非接触で対象物の3次元座標値を求めること、および同時多点計測が可能なのが最大の特長である。反面、デジタルデータであるため測定精度がカメラの解像度と処理装置の容量に依存すること、離散的なデータであることが欠点である。膜構造は曲げ剛性が小さいため接触式の計測機器を用いにくいこと、ひずみまたは変位のオーダーが他の材料に比べて大きいこと、3次元形態となることが多いことを考慮すると、3次元画像計測の有効性は高いといえる。松田⁹⁾は膜構造の曲面にスポットレーザーを投光することによって3次元画像計測を用いた形状計測を行っているが、この手法では特定点の座標変化を追跡することは難しい。そこで本研究では試験片中央部の加力方向と加力直交方向にあらかじめ標点をマークしておき、CCD(1392×1040画素)を用いた3次元画像計測装置を用いて標点間の距離変化を測定し、膜面のひずみを算出する。測定は、繰返加力を行う試験体に対して一定のひずみを30秒間保持する間に、15秒経過時点で撮影を行う。各試験体の標点位置は図1および図2に示す。

近年はデジタルカメラ用を中心にCCDの解像度が飛躍的に向上している。今回使用したCCDは、画素数が140万画素で解像度の点では低いものである。しかし、ズームレンズを内蔵したカメラではレンズの球面収差やひずみ等の影響があるため、ここでは140万画素のカラーCCDと単焦点レンズを組合せたものを2台使用し、計測精度確保を試みた。画像解析は、標点の重心位置をサブピクセル処理(画像の濃淡情報に基づいて1画素を再分割し、重心位置を求める手法)により求めている。また同一のカメラで対象物の変形に応じて複数枚の撮影し画像データについて、標点を自動追跡する処理も行っている。これにより、画像の視野範囲にある多数の標点座標を同時連続的に把握することが可能で、立体の動きを可視化することも可能である。図17に測定

の様子を示す。

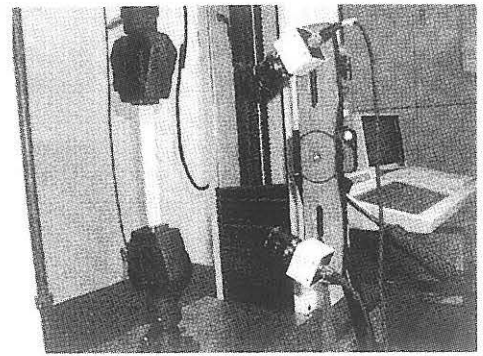


図17 3次元画像計測の様子

3次元座標解析のキャリブレーションには、1辺40mmの金属製立方体を使用する。複数の測定を実施した中で、キャリブレーション精度が最も良かった場合の結果を表3に示す。表中の空間誤差は、真の立方体に対する金属製立方体の中心から頂点までの距離の誤差を表しており、最大で0.043mmとなっている。よって立方体中心から頂点までの距離に対する誤差を求めると、 $0.043/20\sqrt{3}=0.12\%$ である。今回測定を行ったケースの中で空間誤差は最大でも0.89%となっており、計測精度のポテンシャルは非常に高いといえる。ただし実際の測定では、標点のマーキング形状の不整形や濃淡のばらつきなどが重心点の計算精度に大きく影響を与えるため、上記のポテンシャルどおりの結果を得ることは難しい。特にPTFEは撥水性が極めて高い材料のため、正確にマーキングすることが最も困難な材料と言える。したがって、計測結果の数値はこれらの要因による誤差を含んだ数値として捉える必要がある。

表3 3次元画像計測の誤差例

No	算出 X座標	算出 Y座標	算出 Z座標	X軸 誤差	Y軸 誤差	Z軸 誤差	空間誤差
ポイント1	-0.005	-0.02	39.997	-0.005	-0.02	-0.003	0.021
ポイント2	0.013	39.98	40.005	0.013	-0.02	0.005	0.025
ポイント3	-0.007	0.001	0.000	-0.007	0.001	0.000	0.007
ポイント4	0.001	40.038	0.004	0.001	0.038	0.004	0.039
ポイント5	40.013	0.023	39.989	0.013	0.023	-0.011	0.029
ポイント6	39.974	40.018	40.009	-0.026	0.018	0.009	0.033
ポイント7	39.996	-0.001	0.012	-0.004	-0.001	0.012	0.012
ポイント8	40.016	39.963	-0.016	0.016	-0.037	-0.016	0.043
誤差平均				0.013	0.024	0.009	0.029

表4は3次元画像計測による標点の変位から求めた見かけの引張剛性とポアソン比である。ヨコ糸方向の部分溶着試験体のうち1体はデータを収集することが出来なかった。ヨコ糸方向の定着部1体目の試験体は前述のように3.75N/mm程度の引張力で予備加力を数回行ったため他と異なる結果となっている。また、ポアソン比がマイナスの数値を示しているものは、変位量が非常に小さく測定が正確に行えなかったことが主な原因と思われるが、膜材料の内部で加力方向に糸が伸ばされることによってクランプ高さが減少し、これがコーティングの厚さ方

向に圧縮応力を生じさせ、直交方向の糸も伸ばす結果になった可能性も考えられる。

母材の引張剛性の値は表 2 で設定した引張剛性の値と比較的に近い数値になっている。一方、ポアソン比は応力が高まって糸相互のクリンプ交換が大きくなるにつれて非常に大きな値となっている。試験体によってはポアソン比が異常に高い数値を示しているものもあるが、この場合には引張剛性も非常に高くなっている。これはタテ糸とヨコ糸どうしのクリンプ状態に依存する性質で、加力方向の糸の伸びに対して直交方向の糸の絡みが強く作用していることを示していると思われる。部分溶着試験体は溶着部分において加力直交方向の縮に対する拘束効果が予想されるが、タテのポアソン比は母材とほぼ同じ傾向を示している。定着部(母材側)の引張剛性は母材と比較的に近い数値を示している場合が多いことから、試験体のアスペクト比の違いによる加力直交方向の拘束効果の影響はあまり顕著ではないといえる。これは図 5 で、1 軸引張試験体(幅 30mm 長さ 200mm)と 2 軸試験体(幅 400mm、長さ 400mm、余長部 180mm×2)の応力比1:0、0:1の結果が類似する傾向と一致している。

溶着部分の剛性は、全溶着、部分溶着(溶着側)、定着部(溶着側)ともに比較的近い結果となっている。ポアソン比は小さくなっていることから、溶着により加力直交方向の縮みに対する剛性が高くなっていることが伺える。

5 まとめ

本研究では定着部を含めた膜構造の応力状態と応力伝達機構を解明し、膜構造の経時変化を把握するための端緒として母材および溶着部の 1 軸引張試験とクランプ定着部の引張実験を行った。

全溶着試験体の 1 軸伸長特性は、母材に比べてばらつきが生じやすく、糸方向により異なる性状を示している。実際の膜構造では母材に対する溶着部分の比率は一般に小さいため、溶着部の剛性の影響は無視できる場合が多い。ただし溶着が集中する部分や、膜材料を重ねて補強を行う部分などはその剛性の影響が大きいと思われる。溶着部において相互の材料の糸方向にわずかな斜行がある試験体の剛性は、糸方向が完全に揃った 2 枚重ねの剛性に比べて大きく異なる場合が見られ、特にタテ糸方向は 2 枚重ねに比べて極端に剛性が低くなる場合があった。したがって、糸方向が異なる膜材料どうしの溶着では、双方が均等に応力を負担していない可能性も考えられるため、注意が必要であろう。

母材および全溶着試験体の 1 軸伸長特性から多段線形近似により引張剛性を求めて、部分溶着試験体の伸びを求めた結果は、実験結果と良好に一致した。

母材の 1 軸引張による残留ひずみは荷重レベルに依存して発生するが、第 1 サイクル目の载荷でほぼ確定し、同レベルの繰返加力を受けても残留ひずみはあまり増加しない。一方、クランプ定着試験体の引張実験より、膜部分以外の伸びは非常に小さいことが明らかになった。

謝辞

実験の実施にあたっては太陽工業(株) 齊藤嘉仁氏にご協力と貴重なご助言を頂きました。また 3 次元画像計測は平成 13 年度科学研究費補助金(奨励研究(A))の研究助成を受けて実施しました。ここに深く感謝を表します。

表 4 見かけの引張剛性とポアソン比(3 次元画像計測)

タテ糸方向

種類	第 1 段階		第 2 段階		第 3 段階		第 4 段階	
	引張剛性 [N/mm]	ポアソン比	引張剛性 [N/mm]	ポアソン比	引張剛性 [N/mm]	ポアソン比	引張剛性 [N/mm]	ポアソン比
母材	376.2	-0.1	1370.1	0.9	1656.0	1.4	3534.1	3.1
	422.9	0.0	1329.6	0.9	1902.4	1.3	2482.1	1.9
母材側	331.0	0.1	1981.0	1.2	1233.4	1.0	3428.3	2.7
	299.6	0.0	1096.9	1.3	1541.1	0.4	7478.8	4.3
	345.4	-0.2	920.8	0.3	2372.6	0.7	2131.2	0.9
	477.9	-0.1	1015.1	0.1	1669.3	-0.1	1997.3	0.1
全溶着	1463.3	0.0	467.7	0.2	1538.9	0.6	2040.9	0.9
	1141.9	0.1	447.3	0.1	1276.4	0.3	2463.0	1.6
溶着側	1043.9	0.0	480.6	0.4	2121.5	0.4	2437.9	0.7
	1185.8	-0.5	518.1	0.4	1216.1	0.0	2949.7	1.6
	1331.7	0.0	660.7	-0.1	1073.6	0.1	2011.3	0.5
	1966.2	-0.6	1525.9	0.4	859.0	0.0	1644.5	-0.1

ヨコ糸方向

種類	第 1 段階		第 2 段階		第 3 段階		第 4 段階	
	引張剛性 [N/mm]	ポアソン比	引張剛性 [N/mm]	ポアソン比	引張剛性 [N/mm]	ポアソン比	引張剛性 [N/mm]	ポアソン比
母材	107.8	0.2	493.4	1.1	1233.6	1.3	4452.0	3.8
	117.5	0.1	466.0	1.0	1635.5	2.1	2251.1	1.6
母材側	112.7	0.1	172.3	0.3	452.0	0.6	913.6	0.4
	-150.4	0.0	860.3	1.2	74.2	0.1	1143.8	0.5
	85.2	0.0	506.7	0.5	1653.4	1.7	2199.9	1.6
全溶着	465.1	0.0	208.3	0.2	661.4	0.7	1328.4	1.6
	495.3	-0.2	190.8	0.2	590.2	0.3	938.6	0.7
溶着側	201.1	0.0	209.2	0.1	1957.7	1.2	1533.7	1.1
	342.7	-0.1	211.1	0.2	804.3	0.8	948.5	0.4
	372.7	0.0	220.5	0.2	690.1	0.5	2637.5	1.4

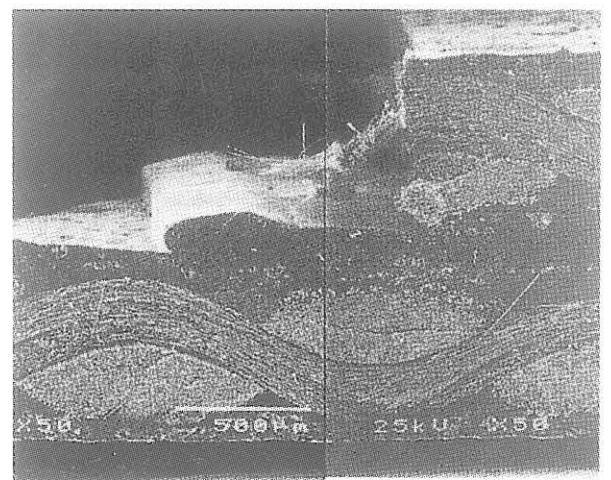
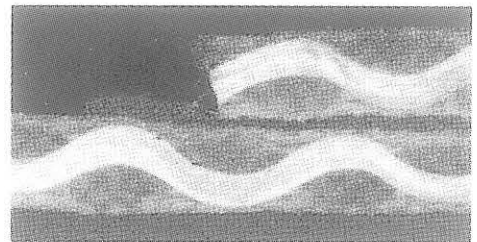
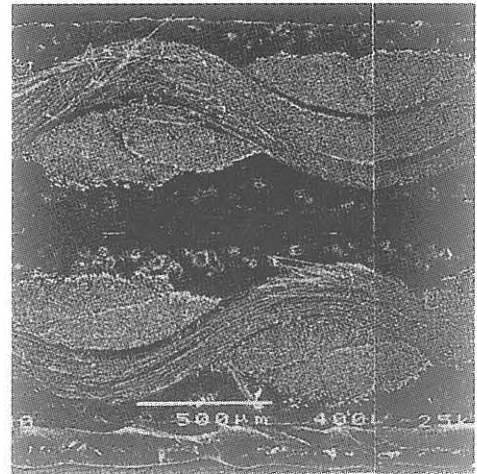
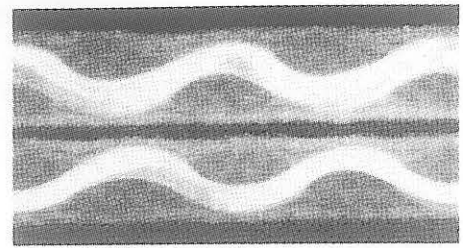
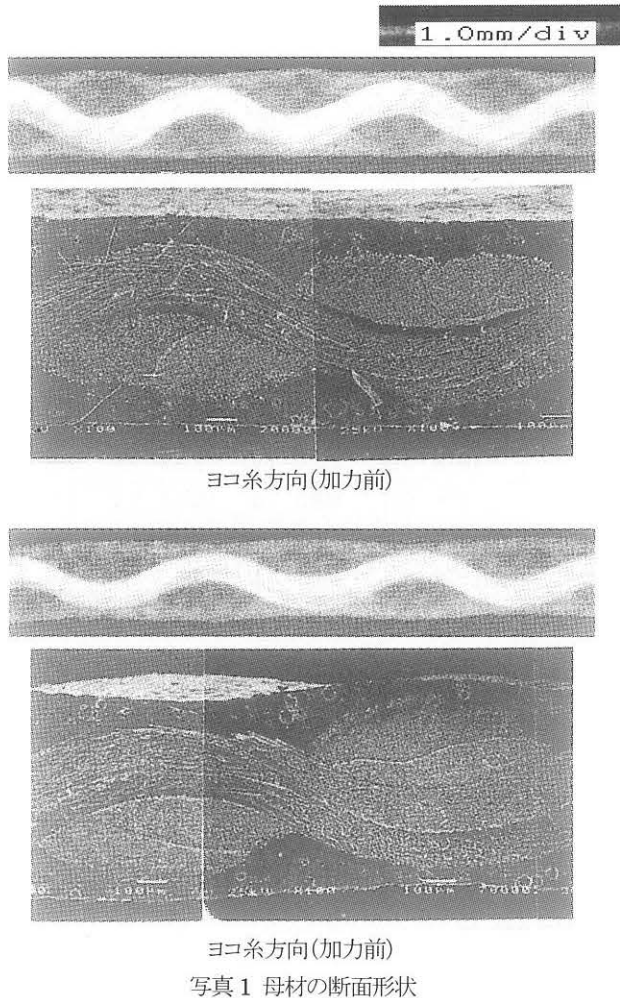
参考文献

- 1) 南宏和、豊田宏、瀬川信哉: 膜構造用膜材料であるコーテッド平織物の 1 軸・2 軸応力状態での応力緩和とクリープの特性、日本建築学会構造系論文報告集、No.408、pp.1~9、1990 年 2 月
- 2) 石井一夫: 膜構造用膜材料概説、膜構造研究論文集 92、pp.91~119、1992
- 3) 加藤史朗、南宏和、吉野達矢、並田忠政: 粘性特性を考慮した織構造格子モデルによる構成方程式、膜構造研究論文集 96、pp.29~43、1996
- 4) 山本剛司、市川和宏、大森博司: 膜材料の粘弾性特性の把握とその設計への応用に関する基礎的研究、日本建築学会学術講演梗概集(東北)、pp.267~268、2000
- 5) 藤原淳、大崎純、上谷宏二: 材料の粘弾性特性を考慮した膜構造物の初期応力決定法、日本建築学会学術講演梗概集(東北)、pp.1089~1090、2000

- 6) 中島肇、齋藤公男:張力膜の応力-ひずみ曲線のモデル化に関する提案 - 載荷・除荷後の応力弛緩と張力再導入、日本建築学会学術講演梗概集(東北)、pp.1087~1088、2000
- 7) 松田浩、仲村政彦、山本 晃、和田眞禎、川口健一、呂 品琦:非接触型 3D 計測装置を用いた膜形状の計測、膜構造研究論文集 2000、pp.47~56、2000

付

参考として試験体の断面形状を顕微鏡で撮影した写真を次に示す。加力前後の写真は必ずしも同じ部位ではないが、加力に伴う糸の伸びとコーティング表面のうねりが残留変形となっていることが伺える。



Study on stress transition mechanism of cramping part of membrane structures

- uniaxial tensile characteristics of welded part and crumping part -

Masaya Kawabata *)

Heekyun Kim **)

Eisaku Nakamura ***)

SYNOPSIS

Structural stability of membrane structures are retained by geometrical stiffness due to pretension on membrane material. Therefore introduction of prestress during construction and maintenance after completion are important. Though membrane materials consist of woven fabric and plastic coating tend to occur creep and stress relaxation. Clarifying mechanical characteristics and state of stress transfer of welded part and crumping part as well as membrane materials is necessary to accomplish balanced design and maintenance of membrane structures. Uniaxial tensile experiment and analysis considering material nonlinearity of membrane material, welded part and crumping part are executed on this paper.

*) Dr. Eng. Associate Prof., Faculty of Engineering, Yokohama National University

***) Graduate Student, Graduate School of Engineering, Yokohama National University

****) Student, Department of Architecture and Building Science, Yokohama National University