

局部破断を有する膜材料の織構造モデルによる 応力変形シミュレーション

小松 清*¹

梗概

膜構造建築物に用いられる膜材料の力学的性状は、幾何学的非線性、材料非線形性が強いことがよく知られており、またこの複雑な非線形性がどのような要因で生じるのかということを知り、説明するために古くから様々な形で研究が行われてきた。著者らは、今日までこの重要課題を説明するためにミクロ、マクロさらには静的、動的な観点から膜材料試験を行ってきた。

その結果、実際の膜材料の力学的性状に近い新しい膜材料の構造モデルを構築するに至った。本論文は、その構造モデルを用いてクラックを有する膜材料の応力変形解析を行って得られた結果と膜材料試験結果との比較検討を行ったものである。

1. はじめに

膜構造建築物の普及にともない、建設棟数の増加ばかりでなく、構造規模においても大規模化し、数万㎡のものもいくつか実現してきている。巨大空間創造の可能性が高まると同時に、膜構造にたずさわる技術者に対し、一般の人々から構造物の信頼性がどれくらい高いのかという問いが増してきている。そして、定性的でなく定量的な解答が強く望まれてきている。現在行われている膜構造の設計は許容応力度設計法により行われておりその許容応力度は、膜材料基準強度を短期4、長期8という数値で除した値が使用されている。この2つの数値は、「膜面(材料)が適切なる維持保全がなされ、構造安全性に影響を与えないようなクラック等のない状態が常に保たれている。」ということを前提としており、膜面になんらかの原因でクラックが入った場合のことは考慮していない。そのことから、膜構造の加工、施工過程において膜材料の折り曲げを含め欠損が生じないよう十分な品質管理が要求されている。なんらかの原因でクラックが生じ

た場合、膜材料の構造安全性をどう評価したらよいか、また、どのような部分で応力集中し、クラックが発生するのかという事柄の解明が膜構造の普及とともに要望されてきている。

膜材料の性能確認試験は、今日まで数多くなされてきているが、理論的に解析することはかなり困難な問題であった。その理由として膜材料が強い幾何学的非線形性および材料非線形性を示すことが挙げられる。フィルムのように均質で中実な平面膜でなくタテ、ヨコ方向の繊維が3次元的に波うち、その内部構造は張力状態により様々変化するため応力-歪関係が複雑となるためである。それにもかかわらず、今日まで多く研究者によって膜材料の力学的特性を解析的にとらえようと研究が行われてきた。その方法を大きく分類すると以下の3つになる。

- 1) 膜材料を材料非線形性、幾何学非線形の両者を考慮した膜要素の集合体と考える。
- 2) 膜材料の糸およびコーティング材を線材置換し、

*1 太陽工業(株) 膜構造研究室 工学博士

織構造をモデル化する。

3) 2)の内、コーティング材だけ平面な面要素で置換し、モデル化する。

本研究は、前記2)の方法に該当するもので膜材料断面の電子顕微鏡写真を利用した織構造の幾何学形状測定や静的、動的な観点に立脚した膜材料試験結果を基にコーティング材を2種類の線材要素で置換した新しい織構造モデルを考え出し、その織構造モデルの解析結果と試験結果との比較検討した結果について述べる。

2. 既往の研究

膜材料の織構造に関する研究を分類すると以下の2つになる。

I) 糸のみの織構造の幾何学的変形機構やコーティング材を含めた膜材料の応力・変形挙動を中心課題としたもの

II) クラックを有する膜材料の破壊性状および応力集中に関するもの

まず、I)に関する研究で最もよく知られているものは、1937年にF.T. Peirce(図-①)¹⁾によって発表されたものであろう。彼は、織構造を糸径、クリンプ糸間隔、糸の繊維中心線からの高さ等の幾何学的寸法で整理し、さらにカバーファクター、ヨリ係数、クリンプ交換、糸の圧縮、糸の弾性等についても様々な織布についての織布についての試験を行い織構造の定量化、定式化を行っている。

また、1967年W.D. Freestone Jr.³⁾はPeirceの織構造を基に糸の伸び、クリンプ交換についての研究発表をさらに1973年に川端ら(図-②)²⁾はコーティングされていない衣服の織布を直線材で置換し、糸の伸び、クリンプ交換等の膜材料の力学的特性についての研究を行っている。また、その織構造モデルにコーティング材を考慮した場合の研究が1978年 Testaら、さらに1979年、Stubbsら(図-③)によって発表された。

一方、織布ではないが、ガラス繊維マットおよびロービング布FRPの有効弾性係数を求めるために浜本らは(図-④)⁴⁾繊維補強材料についての単純モデル化を行っている。一方強化材の弾性係数は、植村・山脇の経験式により求め、ロービング布FRPについては、2次元有限要素法解析によりそのヤング率を求めて織の影響について検討を行っている。

1978年、B. Meffert は(図-⑤)⁵⁾、コーティング材

を線形弾性体とし、パネをタテ糸およびヨコ糸の各交点に入れ、低荷重時での膜材料の挙動を解析的に求めようと試みている。

1979年、N.C. Huangは(図-⑥)¹⁰⁾、織構造のタテ糸またはヨコ糸を含む平面構造を構成する糸を無応力状態では片持ちばりのエラスティカ(elastic)の形状の組み合わせから形成されたものとして解析した。また、糸のスリップの影響を考慮するためモーメントと曲率の関係を理想的なBauschinger効果をもつような折れ線として近似している。

1980年、平井らは(図-⑦)¹¹⁾、コーティング材のない衣服用の綿糸1.5S(英式綿番手)からなる織構造を糸を引張りおよび曲げ変形抵抗をもつ梁要素をたて糸ならびによこ糸間の接触圧を伝達する仮想ばね要素の結合構造としてモデル化している。その結果、接触圧による糸の圧縮変形比が10%未満での織り布変形挙動を十分追従することができたことを発表している。

1984年、K.Y. Tanらは、(図-⑧)¹³⁾のような川端、Testa、Stubbs、Hearleらの織構造と同様なものにそれを上下面からはさむように三角形膜要素で置換したコーティング材を加えたものの2軸引張における応力変形解析を行っている。

1989年、H.J. Schock は(図-⑨)¹⁰⁾台形トラスモデルを提案し、膜材料の低荷重でのコーティングおよび糸の変形性状を解析的に求めることを試みている。

1989年、西川らは(図-⑩)⁶⁾織糸が直線材のものと円弧のものとの2種類の織構造を考え、それぞれのタイプにおいて、直交するタテ糸ヨコ糸の交点を剛な連結材と線形弾性パネを入れたものについての力学的性状について研究し、さらに、複数の織糸を束ねてそれにより形成される格子の各交点を結んでできる三角形をコーティング材として置き換え、平面膜パネル、双曲放物面膜パネルの面内荷重および面外荷重における数値シュミレーションを行っている。

次にII)の糸も含めた織布の破壊性状や応力集中に関する既往の研究について簡単にふれてみる。

1921年、A.A. Griffithにより“ガラス繊維の糸径が細いほど強度が増す”という径と引張強度に関する有名な研究が線形破壊力学のもとといわれている“個体の破壊と流れ”というタイトルの論文の内で発表された。

1961年、J.M. Hedgepethは、クラックを有する平織物を平行に配置された繊維とコーティング材によるせ

ん断抵抗を考慮した微小変形弾性体と考えて応力集中係数を求めた。

1973年、N. J. Abbott らは¹⁹⁾ 引張強度 8kg/3cm程度
の低強度布の引裂伝播速度をマルチ・フラッシュ写
真測定により求め、試験片の引裂伝播速度が90~300m
/secを記録したことを述べている。

1978年、南は(図-11)¹⁰⁾ コーティング織物でクラ
ックを有する場合の破壊じん性値としてGriffith理論
より得られるエネルギー解放率を使用し、また破壊じん
性値の算式を得るために必要な解放ひずみエネルギ
ーをHedgepethの理論を応用し求めている。

さらに、数値シミュレーションでは、平行に配置され
た長方形要素でコーティング織物をモデル化して、有
限要素法によりクラックによる応力集中度を求めた。
また、解析に必要とされるコーティング織物剪断剛性
Gtは引張剛性Etの1/100未満であることも発表してい
る。

1985年、石井は(図-12)¹⁴⁾、膜材料をタテ方向、
ヨコ方向の糸要素とそれを上下からはさむコーティ
ング材剛性の比を50:1とした時の膜材中心部の1本と
3本が切れた時の応力集中係数を求めている。

1988年、小松らは(図-13)²²⁾、膜材料の破壊性状
に関する研究をレーザー光線を用いた高速度カメラや
高速度ビデオにより行っている。試験片としてクラ
ックの入ったもの、折り曲げられた膜材料等を選び引
裂伝播速度、クラック開口変位量、引張強度等の動的
破壊性状を把握するために必要な基礎データについて
発表している。

1989年、小松らは(図-14)²³⁾、膜材料の破壊性状
を電子顕微鏡を利用し、ミクロ的なレベルで確認し、
さらに応力集中度について膜材を直交異方性弾性体
としての三角形膜要素で解析している。

また、膜材料の応力分布、ひずみ、破壊形状につ
いて調べるために破壊モード別に分類を行いマクロ的
視野から膜材料の破壊機構について述べている。

1989年、橋本らは(図-15)²¹⁾ 四ふっ化エチレン樹
脂コーティングガラス繊維布の破断モードとその寿命
推定について報告している。

以上、膜材料の幾何学的モデル化による力学的性状
に関する研究、およびクラックを有する膜材料の破壊
性状および応力集中問題に関する研究についての概要
を紹介した。

本研究は、既往の研究の2つの分類I)、II)を別

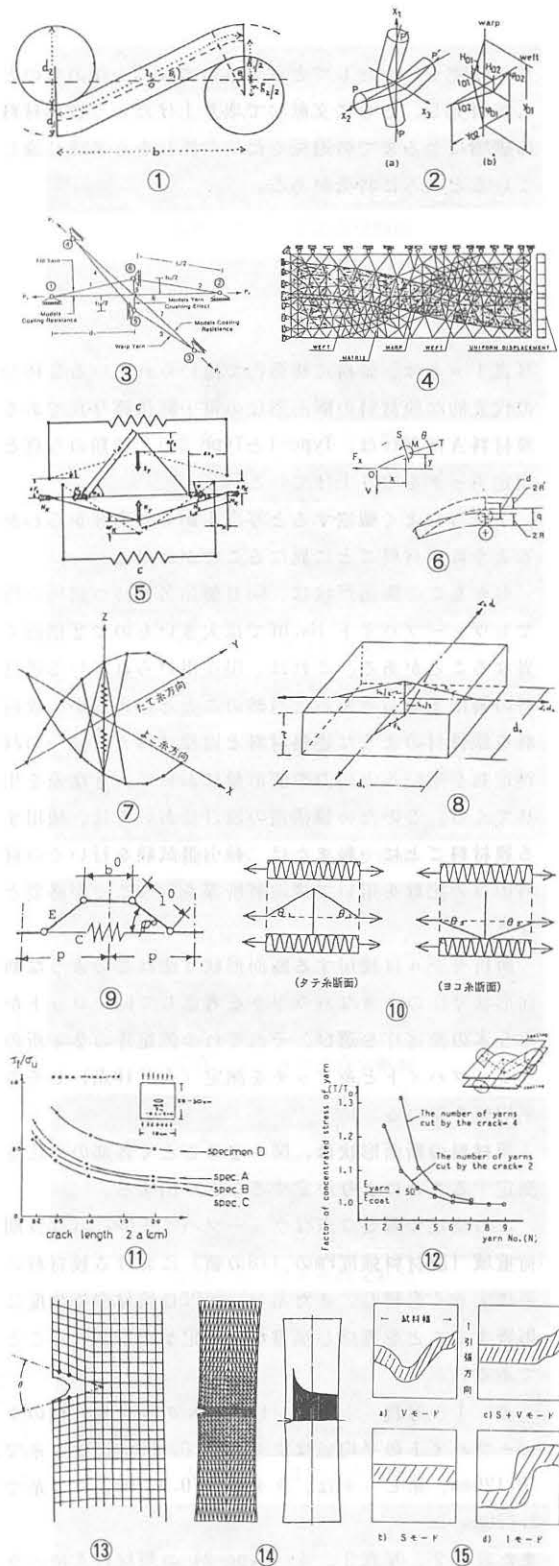


図1 膜材料等の織構造モデル解析と実験的研究

々の研究テーマとしてとらえるのではなく一体のものとして研究し、さらに文献2)で取り上げたように膜材料の破壊に至るまでの過程を動的な性状をも考慮し論じているところに特徴がある。

3. 膜材料の幾何形状

写真1～8は、膜構造建築物で用いられている3種類の代表的な膜材料の断面形状の電子顕微鏡写真である。膜材料A種だけは、Type-1とType-2の2種類の写真と測定データを取り上げている。

これらをよく観察すると写真1から写真8からわかるように膜材料ごとに異なることがわかる。

しかもこの断面形状は、同じ製品名を持つ同種の物でもウェーブハイト h_w, h_f では大きいもので2倍近く異なることがある。これは、現在用いられている膜材料の製法上から考えると当然のことといえるが、膜材料を鉄骨材のような建築材料と同様に考えて同一の材料定数を用いると応力や変形量において大きな差を生じてくる。このため膜構造の設計においては、使用する膜材料ごとに一軸または二軸引張試験を行いその材料固有の定数を用いて構造解析等を行うことが必要となる。

解析モデルに使用する断面形状寸法はこのような断面形状寸法の大きなバラツキを考慮して同一ロットから5本の測定片を選び、それぞれの測定片の2ヶ所のウェーブハイトと糸ピッチを測定(合計10点)しその平均値を用いる。

膜材料の断面形状は、図-2のごとく各部の寸法を測定することにより決定することが出来る。

この測定で重要な点はウェーブハイト h_w, h_f は長期荷重域(膜材料強度 F_m の $1/8$ の値)における膜材料の歪に大きく影響し、また糸ピッチ P_f は膜材引張強度に影響することを考慮し慎重なる測定が要求されることである。

表-1、写真-1, 2 (type-1) の膜材料A種のウェーブハイトの平均値はタテ糸で 0.100mm 、ヨコ糸で 0.129mm 、糸ピッチは、タテ糸で 0.921mm 、ヨコ糸で 1.138mm 。

また表-2、写真3, 4 (type-2) の膜材料A種のウェーブハイトの平均値はタテ糸で 0.132mm 、ヨコ糸で

0.163mm 、糸ピッチは、タテ糸で 0.883mm 、ヨコ糸で 1.214mm となっている。

この二つの膜材料を比較するとtype-2はtype-1に対しウェーブハイトでタテ 32%増、ヨコ 26%増、糸ピッチでタテ4%増、ヨコ6%減となっている。

このことから、type-2の膜材料はtype-1と比較し糸が大きく波打っていること、また糸本数で僅かであるがタテ糸が多くヨコ糸が少ないことがわかる。

次に、B種膜材料(表-3、写真-5, 6)で膜構造建築物で最も代表的なものの測定結果を検討する。

この膜材料のウェーブハイトの平均値はタテ糸で 0.074mm 、ヨコ糸で 0.081mm と小さくこの値をA種膜材料のその値と比較すると約 60%程度である。このことから、タテ糸、ヨコ糸のウェーブハイトは、小さいことがわかる。糸ピッチは、タテ糸ヨコ糸ともほぼ近い値で 0.700mm 、 0.858mm である。この測定結果から本膜材料の力学的特性について以下の事柄が推測できる。タテ糸とヨコ糸の低荷重域での歪は小さく、またタテ糸とヨコ糸方向の強度はそれぞれ同程度の値となる。

表-4、写真-7, 8の膜材料C種ウェーブハイトおよび糸ピッチは5つの測定片のそれぞれ1ヶ所測定値(合計5点)であるが、かなり特異な結果で、タテ糸のウェーブハイトがほとんどない。即ち、タテ糸がほぼ直線である。一方ヨコ糸は膜材料A種のtype-1に近く 0.134mm といくらか大きい値となっている。この結果から判断するとこの膜材料のタテ糸の低荷重域の歪はほぼゼロに近く、またヨコ糸は逆に大きい値となることが推測される。

次に膜材料断面寸法を膜材料構造解析用データとしてどのようにあつかうかについて述べる。

タテ糸、ヨコ糸の膜材料中心線からの高さ h_w, h_f は膜材料引張においては応力・ひずみ関係に大きく影響するため適切な値を解析に用いなければならない。タテ糸、又はヨコ糸が大きな力を受けて波打った曲線から直線に近くなろうとする時のタテ糸・ヨコ糸交点の間隔 h (図 4.4-2を参照のこと) は以下のように考えることができる。

$$\frac{h_w + h_f}{2} \leq h \leq h_f + h_w$$

本論文では、膜材料A種 (Type-1) のウェーブハイトは以下の数値を採用する。

$$\left. \begin{array}{l} h_w = 0.072\text{mm} \\ h_f = 0.129\text{mm} \end{array} \right\} h = h_w + h_f = 0.201$$

No.	糸方向	ウェーブハイト h_w, h_r (mm)		糸ピッチ p_w, p_r (mm)	
		測定点-1	測定点-2	測定点-1	測定点-2
1	タテ	0.129	0.078	0.889	0.956
2		0.100	0.100	0.933	0.956
3		0.122	0.100	0.933	0.933
4		0.100	0.111	0.922	0.889
5		0.089	0.067	0.878	0.922
平均			0.100		0.921
1	ヨコ	0.156	0.144	1.222	1.1
2		0.156	0.144	1.156	1.133
3		0.1	0.0	1.078	1.133
4		0.167	0.144	1.133	1.111
5		0.133	0.144	1.156	1.156
平均			0.129		1.138

表-1 膜材料A種断面諸寸法実測値 (Type-1)

No.	糸方向	ウェーブハイト h_w, h_r (mm)		糸ピッチ p_w, p_r (mm)	
		測定点-1	測定点-2	測定点-1	測定点-2
1	タテ	0.113	0.147	0.973	0.814
2		0.133	0.144	0.867	0.867
3		0.158	0.090	0.833	0.923
4		0.147	0.102	0.860	0.905
5		0.147	0.136	0.860	0.928
平均			0.132		0.883
1	ヨコ	0.191	0.135	1.233	1.188
2		0.180	0.158	1.216	1.239
3		0.158	0.158	1.239	1.194
4		0.167	0.156	1.20	1.178
5		0.169	0.158	1.261	1.194
平均			0.163		1.214

表-2 膜材料A種断面諸寸法実測値 (Type-2)

No.	糸方向	ウェーブハイト h_w, h_r (mm)		糸ピッチ p_w, p_r (mm)	
		測定点-1	測定点-2	測定点-1	測定点-2
1	タテ	0.034	0.078	0.695	0.706
2		0.044	0.044	0.667	0.733
3		0.067	0.112	0.751	0.695
4		0.090	0.100	0.650	0.740
5		0.111	0.056	0.667	0.700
平均			0.074		0.700
1	ヨコ	0.113	0.113	0.856	0.878
2		0.045	0.078	0.852	0.852
3		0.067	0.090	0.830	0.852
4		0.056	0.078	0.919	0.830
5		0.070	0.100	0.815	0.893
平均			0.081		0.858

表-3 膜材料B種断面諸寸法実測値

No.	糸方向	ウェーブハイト h_w, h_r (mm)		糸ピッチ p_w, p_r (mm)	
		測定点-1	測定点-2	測定点-1	測定点-2
1	タテ	0.0		1.378	
2		0.0		1.563	
3		0.0		1.390	
4		0.0		1.435	
5		0.0		1.390	
平均			0.0		1.431
1	ヨコ	0.146		1.509	
2		0.145		1.540	
3		0.150		1.478	
4		0.117		1.578	
5		0.111		1.578	
平均			0.134		1.537

表-4 膜材料C種断面諸寸法実測値

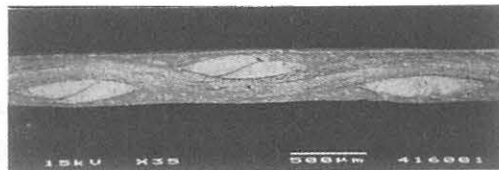


写真-1 ヨコ糸直交断面

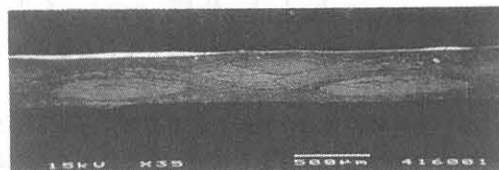


写真-2 タテ糸直交断面



写真-3 ヨコ糸直交断面

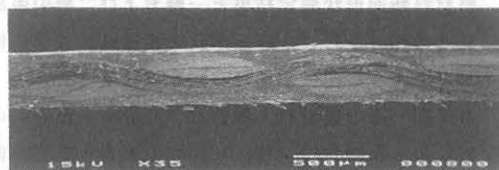


写真-4 タテ糸直交断面

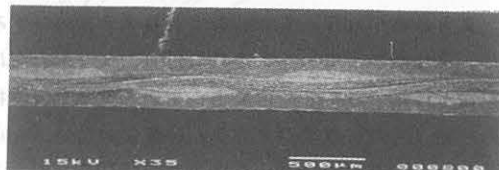


写真-5 ヨコ糸直交断面



写真-6 タテ糸直交断面

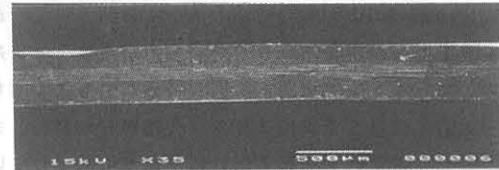


写真-7 ヨコ糸直交断面

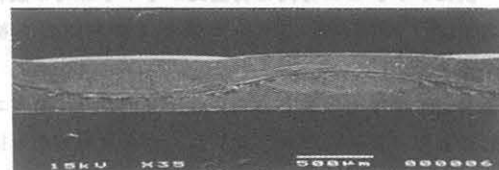


写真-8 タテ糸直交断面

4. 膜材料の変形メカニズム

膜材料の三次元構造は、一般的に図-2,3のような形状をしている。そして、その構造は、以下の①、②、③の3つから構成されている。

① タテ糸、ヨコ糸

② タテ糸、ヨコ糸の空隙に埋まっているコーティング材

③ 膜材料の表面、裏面の表層部のコーティング材膜材料を3つの部分から構成されていると見る考え方は、既往の研究においては無いものである。多くは②と③は力学的には同じものとみなしている。しかし、膜材料の材料試験の平面、断面の変形性状等の研究の結果、②と③とは力学的には別々の働きをするもので同一のものと考えれば膜材料の力学性状を論ずるのに無理が生じる(図-7)。

膜材料断面形状測定結果と一軸および二軸引張試験結果との比較を行い、断面形状と膜材料の力学的性状とがどのように関係しているかを検討する。

まず図-4の膜材料A種(Type-1)のタテ糸方向のみを引っ張った場合(T 1:0, Y 1:0)の応力・ひずみ曲線(①)に注目してみる。

タテ糸を引っ張っていることからタテ糸のひずみ率は、常に増加していく。それに対し、ヨコ糸方向は幅が徐々に減少していくのであるが、タテ糸方向膜材が約1.6% (A点)ひずむまでなんの変化がない(B点)。これは、A点まではコーティング表層部分(図-1)が引張力に抵抗し、また同時にタテ糸とヨコ糸のクリンプ交換が行なわれ、タテ糸は徐々に直線に近くなる。その後、タテ糸は、ヨコ糸を各交点で膜面外に押し始めるため、膜材料のヨコ糸方向の幅が徐々に減少していくと考えられる。

この膜材内部の動きは、ヨコ糸方向のみを引っ張った場合(T 0:1, Y 0:1)の応力・ひずみ曲線(②)からも見る事が出来る。ヨコ糸引張の場合は、ヨコ糸方向のコーティング表層部が約3.2%変形するまで即ち図-4 B点に達するまでクリンプ交換が行なわれ、ヨコ糸方向に対し、タテ糸方向の幅が徐々に減少していく。

次にタテ、ヨコ方向の荷重比が1:1の時の膜材料の変形メカニズムについて図-4を利用して検討する。

荷重比1:1の等張力の場合は、タテ方向にもヨコ方向にも引っ張られ即ち、タテ糸、ヨコ糸両方から接近

し押し合うため、引張力を最初に負担するコーティング材表層が1軸引張時のひずみ(B点)の約1/2のひずみ(C点)でクリンプ交換が終了し、その後、糸は直線とならずある角度をもってタテ、ヨコ糸が互いに押し合い(図-9(a), (b))糸の引張剛性に大きく依存し変形していく。

前述で約1/2のひずみと表現したが正確にはたて糸およびヨコ糸のウェーブハイトや糸ピッチに関係しその割合が決まり、1/2となるのはタテ糸、ヨコ糸のウェーブハイトが等しい場合となる。

この間は、タテ糸のウェーブハイトが少し減少し同時にタテ糸とヨコ糸との間の糸交点要素(図-9(a))が圧縮変形しちぢむ、また、ヨコ糸方向のコーティング材は圧縮力に対し抵抗する。

図-6は、膜材料C種の一軸および二軸引張試験の結果を示したものである。

この膜材料は、写真-7からわかるようにタテ糸が直線でクリンプは0で、ヨコ糸はそのタテ糸間を波うってはしている。このような膜材料の試験結果からクリンプの度合の大小が膜材料の非線形性にどのように影響を与えるか知ることができる。図中のほぼ直線のタテ糸のみを引張った場合(T 1:0, Y 1:0)はタテ糸のウェーブハイトがないことからタテ糸ヨコ糸のクリンプ交換は起らずそのためヨコ糸を膜面外に押し出そうとする力が生じないためにヨコ糸方向の膜材料のちぢみは発生しない。従って応力ひずみ曲線は、ひずみ0の縦軸上にのったものとなる。

一方、クリンプしているヨコ糸のみを引張った場合(T 0:1, Y 0:1)は、ヨコ糸が直線になろうとしてタテ糸を膜面外に押し出すため結果としてタテ糸方向の膜材料の幅がちぢむことになる。また、ヨコ方向引張力は、図-6 A点までタテ糸を押し出すほどのクリンプ交換は生じない。

A点からB点まではヨコ糸のクリンプが徐々に減少し、それと同時にタテ糸は徐々に膜面外に押し出される。

B点からはタテ糸・ヨコ糸のクリンプ交換はほとんど行われず直交する両糸の幾何学形状は安定した状態で応力、ひずみが増加してゆく。

荷重比がタテ・ヨコ方向とも同じ場合図-6のT 1:1, Y 1:1の場合は、膜材料のタテ糸方向はクリンプが0(ゼロ)であるからほとんどひずまずに応力のみ増加してゆく、一方、ヨコ方向はヨコ糸のクリンプの

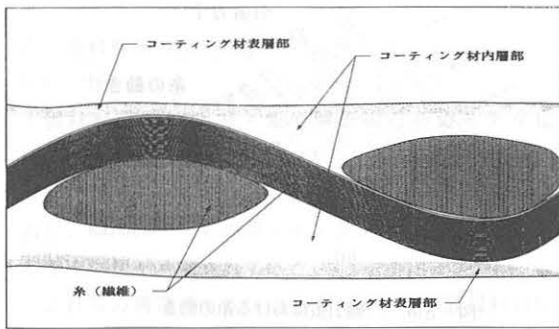
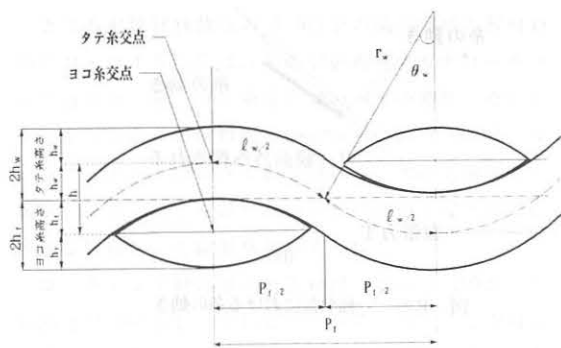


図-2 膜材料断面概要図



h : タテ糸・ヨコ糸交点間隔(mm)
 h_t : ヨコ糸高さ(mm)
 h_w : タテ糸高さ(mm)
 P_1 : ヨコ糸ピッチ(mm)
 r_w : タテ糸曲率半径(mm)

図-3 円弧近似モデルによる膜材料断面図

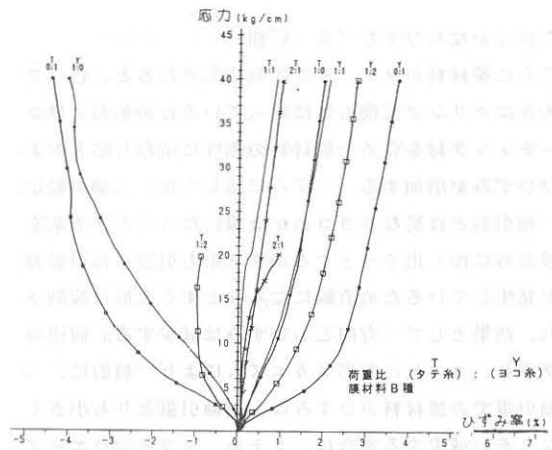


図-5 膜材料B種の応力・ひずみ曲線

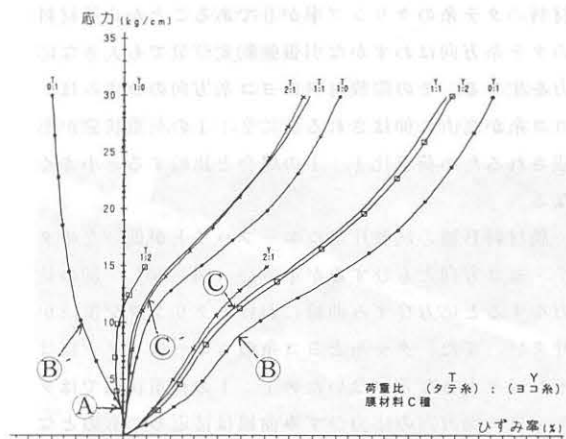


図-6 膜材料C種の応力・ひずみ曲線

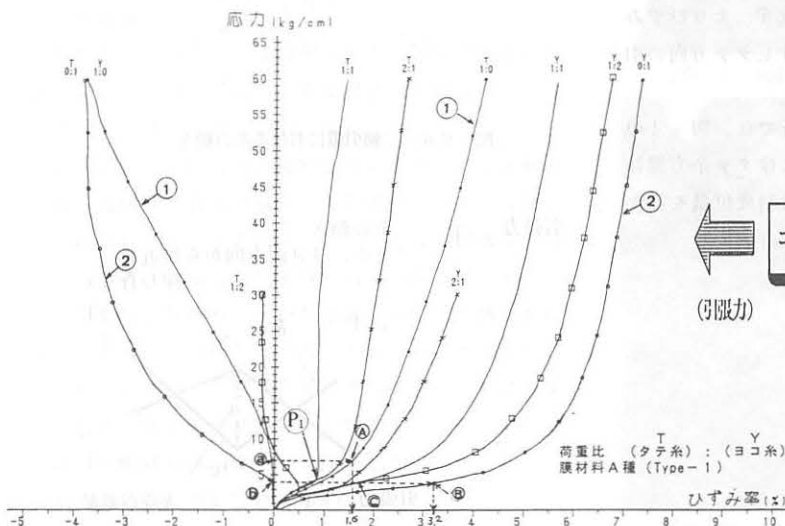


図-4 膜材料A種の応力・ひずみ曲線 (荷重比例)

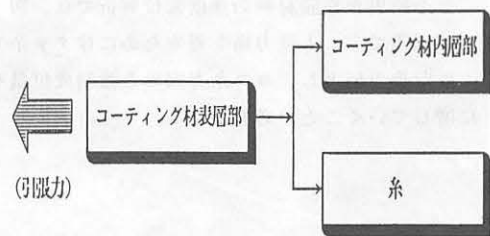


図-7 膜材料の力の伝達機構図

ためにかなりひずむ (0-C間)。

さらに膜材料がタテ、ヨコ強制変形されると、C点で大きなクリンプ交換もほぼ終わっているため糸およびコーティング材を含めた膜材料の剛性に依存し応力およびひずみが増加する。ひずみに関しては、二軸引張は、一軸引張とは異なりヨコ糸が直線になろうとタテ糸を膜面外に押し出そうとするがタテ糸も引張られ引張力が発生しているため直線になろうとする変形は抑制され、結果として二方向ともひずみは減少する。前述のタテ糸、ヨコ糸の変形メカニズムにより一般的に、二軸引張での膜材料のひずみは、一軸引張よりも小さくなりその減少する割合は、タテ糸、ヨコ糸のウェーブハイトの大きさ (または、クリンプ率) に関係する。

タテ・ヨコ方向の荷重比が2:1の場合は、この膜材料のタテ糸のクリンプ率が0であることから膜材料のタテ糸方向はわずかな引張強制変位量でも大きな応力を生じる。その際膜材料のヨコ糸方向のひずみは、ヨコ糸が真直に伸ばされる前に2:1の荷重状態が形成されるため荷重比1:1の場合と比較すると小さくなる。

膜材料B種の試験片はウェーブハイトが低いためタテ・ヨコ方向ともひずみが小さい (図-5)。別の見方をすると応力ひずみ曲線におけるクリンプ交換域がせまい。また、タテ糸とヨコ糸のウェーブハイトにはそれほど大きな差がないため1:1の荷重状態ではタテ・ヨコ両方向の応力ひずみ曲線は接近したものとなっている (図-5)。

図-4において膜材料A種 (Type-1) のタテ・ヨコ1:1の荷重比でタテ方向の応力が点P₁よりひずみを伴わずに急激に増加しており見かけ上タテ方向の引張剛性がほぼ無限大となっている。

この結果から膜材料の強度変位解析では、図-4の点C以降で1:1張力場を得るためにはタテ糸方向は1%前後の値とし、ヨコ糸方向のみ強制変位量を徐々に増していくことが必要となる。

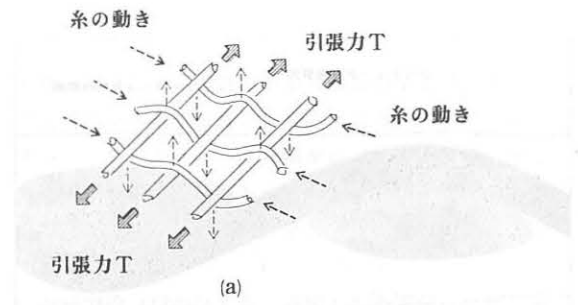


図-8(a) 一軸引張における糸の動き

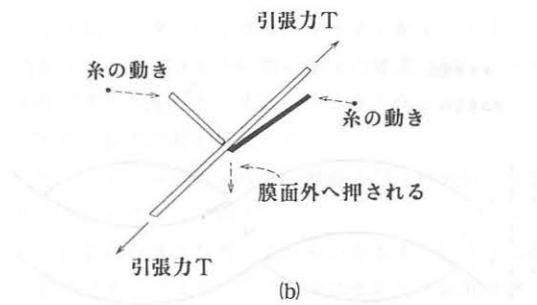


図-8(b) 一軸引張における糸の動き

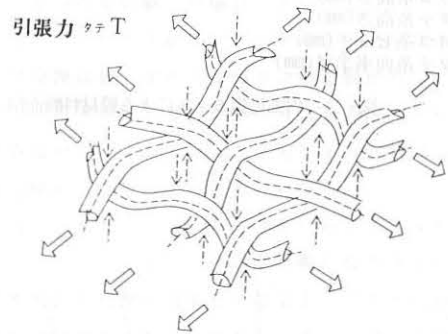


図-9(a) 二軸引張における糸の動き

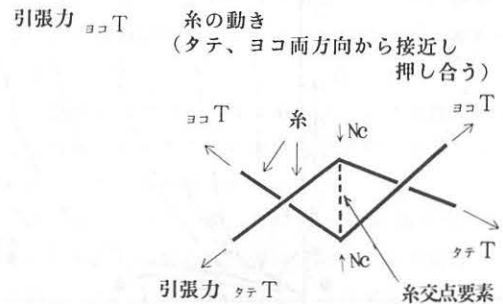


図-9(b) 二軸引張における糸の動き

5. 膜材料構造解析モデルの提案

5.1 序

膜材料構造の応力・変形解析のためのモデル化は、今日まで川端²⁾、Meffert⁵⁾、Testa⁹⁾、Stubbs、Hearle¹²⁾らのもの、Blum²⁶⁾らの曲がり梁によるもの、石井、Barnes¹³⁾らのコーティング材を面要素と考えるもの等様々考案されてきた。

これらの構造モデルはどちらかという膜材料の応力・ひずみ曲線の形状に近くなるように糸による織構造を中心に考え、コーティング材は糸要素に機械的に付加し組み立てた構造モデルである。

ところが膜材料強度の1/8以下の低荷重域の膜材料の応力・ひずみ関係は、糸の引張剛性よりもコーティング材やタテ糸-ヨコ糸交点間のバネの剛性、そしてタテ糸ヨコ糸の膜材料断面中心からの高さ h_w 、 h_t (ウェーブハイト) に大きく影響されることを考慮すると織構造のみに重きを置いた膜材料構造のモデル化では複雑な膜材料の非線形挙動は表しにくい。

コーティング材の厚みが膜材料の厚みの20%から多い部分で50%をしめていることからコーティング材の構造モデル化も重要な意味をもってくるのである。今日までコーティング構造をあまり重要視しないで織構造を中心に考えてきたのは、コーティング材の剛性が糸と比較し小さいことからあまり応力・ひずみ関係に影響を与えないであろうという考えに基づいている。たしかに、膜材料の強度の1/2以上の荷重における膜材料の応力・ひずみ関係は糸剛性と糸交点間の剛性の大小で決まると見なした織構造中心の構造モデル化も考えられる。

しかし、このモデルは荷重が大きい領域で実際の膜材料の応力・ひずみ関係を表現できても低荷重域では実際とはかけはなれたものとなる。

既往の研究で膜材料の破断までの応力・ひずみ解析^{丁(張力)}を行った例は、著者の調査した範囲では見あたらない。この理由はいくつか考えられるが、主なものは破断荷重レベルの高い応力やひずみに耐えられる構造モデルでないため、解析モデルが部分的に崩壊(転倒)が起き、結果として解析不能となってしまうことである。

本稿は、前述の問題点を解決すべく膜材料の破断までの変形性状や断面構造の変形性状等のデータをもとに新しい膜材料構造モデルを開発した。

以下その内容について述べる。

5.2 膜材料構造解析モデル

(1) モデル化の前提条件

膜材料の構造モデル化でまず考えなければならないのは“何を結果として得ようとしているのか”である。膜材料構造を強制的に引張ったら、膜材料の内部にどのようなことが生じるかを写真-9、10を参考に整理すると以下ようになる。

- ① タテ糸とヨコ糸のうねりの変化(クリンプ交換)
- ② タテ糸とヨコ糸の交角が変化する
- ③ 糸の曲げ
- ④ 膜厚の増減
- ⑤ 糸の伸び
- ⑥ タテ糸、ヨコ糸間の摩擦
- ⑦ 糸の隆起
- ⑧ コーティング材の伸び
- ⑨ コーティング材の隆起

以上の①~⑨の内、コーティングしていない衣服の織構造の構造解析では考慮している糸の曲げ剛性は膜

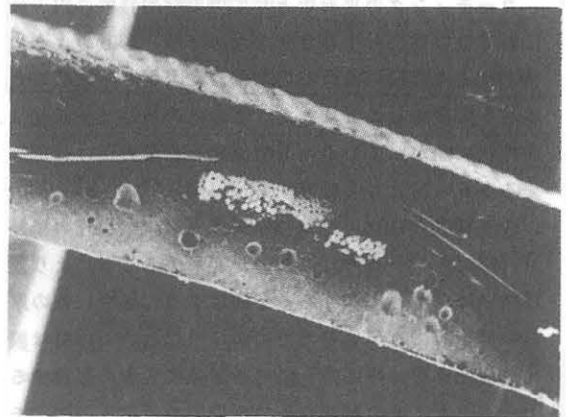


写真-9 無張力状態の膜材料断面写真(文献²⁵⁾より)

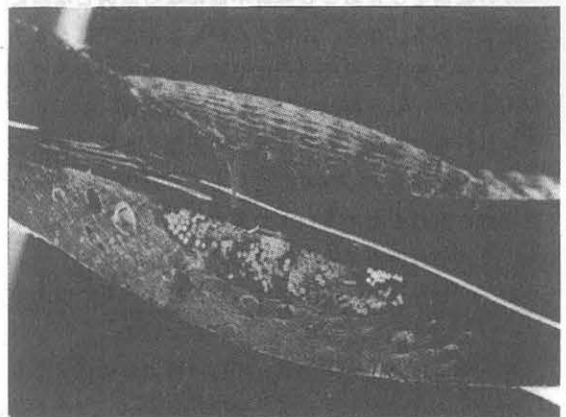


写真-10 1軸引張状態の膜材料断面写真(文献²⁵⁾より)

構造建築物用膜材料では、糸やコーティングの剛性と比較するとあまりにも小さいので考慮しない。また、⑥タテ糸、ヨコ糸間の摩擦力についても上記の理由により考慮しない。従って本稿で提案する構造モデル化に際し、前述の③と⑥を除いた膜材料の応力・変形形状が表現できる構造であることをモデル化の前提条件とする。

(2) 構造モデル化の考え方

本論文の構造モデル化は図-10に示すように大きく①②③の3つの部分に注目し行う。

①のコーティングは(A)部を(B)部の2つに分けて考える。コーティング構造モデルの引張状態の挙動は、まず図-10の部材①が伸び、次に部材①と②が合成された部分が引張力に抵抗する。また、一軸引張に見られる引張方向と直交する方向のコーティングには、圧縮力が加わる(図-11(a), (b))。

膜材料のコーティングはこの三角形断面の凹凸なコーティング材平面に広がっている(図-13(a))。

コーティングの平面版としての力学的特性の内、せん断剛性の効果も生じさせるために図-13(b)のように格子状とその四隅の点を対角にむすぶブレース状の直線材を配置することにした。②の糸の構造モデル化は、曲線状に曲がっている糸を直線状の引張力だけに抵抗するトラス材として置換する。(図-12(a), (b))。

図-10③の糸交点材は、タテ糸とヨコ糸相互の接触力(圧力)でそれぞれの断面が変形することにより膜材料の伸びがわずかであるが増加することや、糸の厚みを構造的に表現するために必要となる。この材は膜材料構造モデルの応力・ひずみ関係に大きく影響すること、また、その剛性や長さの設定を誤ると構造モデルの転倒をひきおこし解析不能になる原因となるため重要である。なお、この交点材を本論文ではシュリンクパネと呼ぶ。図 5-2-5は前述の(2)の①から③で示したコーティング材、糸、そして糸交点材(シュリンクパネ)を直線材(トラス材)で置換した膜材料断面の構造モデルを表したものである。また、それぞれの置換材を剛性を有するパネで表すと図-15のようになる。それぞれのパネの力学特性は以下となる。

・糸 → 引張にのみ抵抗するものでその剛性を EA_{YARN} と表す。

・コーティング → 引張、圧縮の両方に抵抗するものでその剛性を EA_{GRID} (タテ糸、ヨコ糸に平行な格子状のもの)、

EA_{GROS} (格子対角のブレース)、 EA_{TIE} (コーティング表面)と表す。

・糸交点材 → 引張、圧縮の両方に抵抗するも(シュリンクパネ)のでその剛性を EA_{SHR} と表す。

(3) 構造モデルの力学的挙動

本稿で提案する膜材料構造モデルの力学的挙動をまとめたのが図-16(b)である。

本モデルの変形形状は、図に示すように①~⑤の5つのパターンに大きく分類される。

変形形状①は、非常に小さい引張力が加わった状態。

変形形状②は、コーティング表面部が引張力のために完全に伸び、コーティング内部のコーティング材まで引張応力が生じつつある状態。

変形形状③は、コーティング材が伸び、さらに糸が伸ばされそのために糸交点材(シュリンクパネ)により交差する糸を面外に押し出そうとする状態でこの段階ではタテ糸、ヨコ糸には引張が生じる。

一軸引張ではこの変形はさらに続いて起るが、二軸引張ではこの段階でタテ糸とヨコ糸の応力平衡状態となり、面外への変形は進まず面内の伸び変形に移行する。

変形形状④は、一軸引張がさらに進み、引張られている糸は直線に近くなる。この状態がクリンプ交換である。この段階までは、引張られている糸と交差する糸にはほとんど応力は生じずに面外へ変形(剛体変形)するだけである。

変形形状⑤は、一軸引張が進み引張られている糸には大きな引張が生じ、それと同時に交差する糸方向の膜材料は縮みはじめる。この変形形状が進むにつれて膜材料の厚みが減少し、ついには引張られている糸は破断する。この図-16(b)からわかるように膜材料の破断に至る一軸引張と二軸引張の変形メカニズムは同一ではない。二軸引張での膜材料の破断は変形形状③で生じるためタテ糸方向、またはヨコ糸方向の伸びは一軸引張より少ない状態で起る。

この膜材料の変形メカニズムを図-4の引張試験結果の応力・ひずみ曲線で説明する。

一軸引張でのクリンプ交換が完了するのが図のタテ糸方向引張であれば④および⑤点で、ヨコ糸方向引張であれば③および④点である。この応力・ひずみ曲線からもわかるように引張られている糸と交差する糸方向の膜材料は面外の変形が支配的であるため平面的な

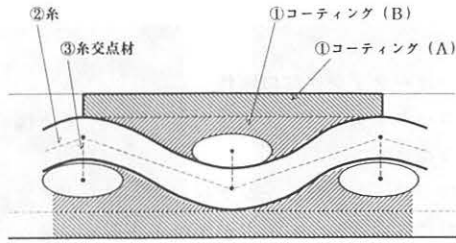


図-10

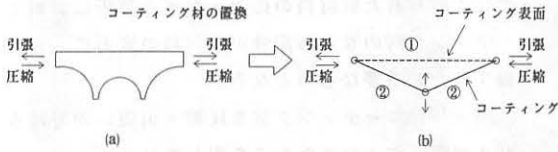


図-11 コーティング材の構造モデル化

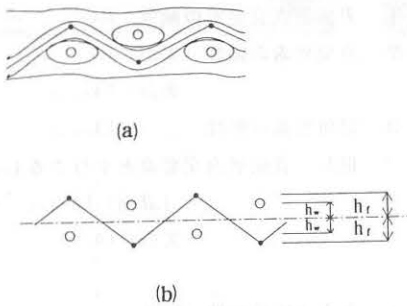


図-12 糸の構造モデル化

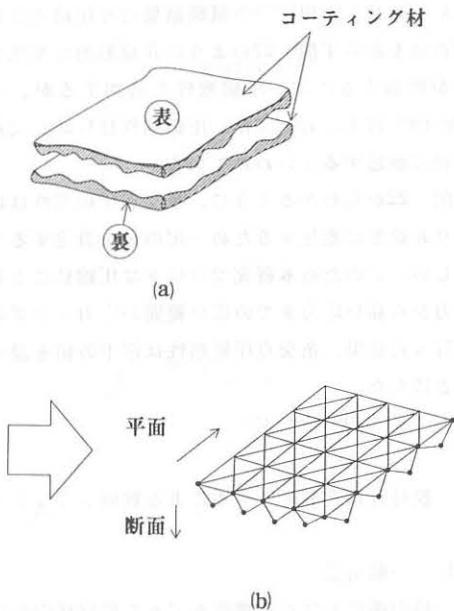


図-13 コーティング材の構造モデル化

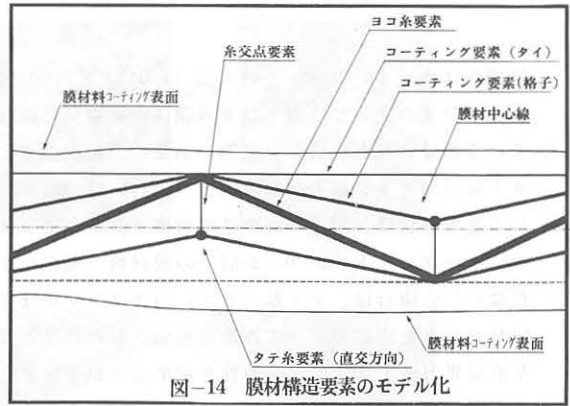


図-14 膜材構造要素のモデル化

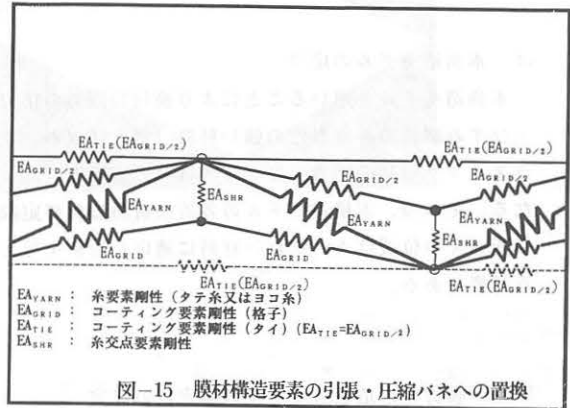


図-15 膜材構造要素の引張・圧縮バネへの置換

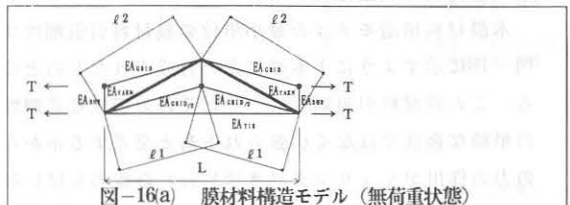


図-16(a) 膜材料構造モデル (無荷重状態)

変形形状	図	条件
変形形状 - 1		→ T
変形形状 - 2		→ T
変形形状 - 3		→ T
変形形状 - 4		→ T
変形形状 - 5		→ T

一軸引張状態

→ T, σ = T/D

又は

→ T=0, σ = T=0

図-16(b) 1軸引張における膜材料構造モデルの変形

ひずみは生じていない。一軸引張 (T 0:1, Y 0:1) の応力・ひずみ曲線で応力・ひずみ関係が直線的になっている部分は変形形状⑤の状態である。二軸引張で、タテ糸方向とヨコ糸方向が等張力 (T 1:1, Y 1:1) となる変形形状は、図-16(b)の③で特にタテ糸とヨコ糸のウェーブハイト (h_w, h_r) が同一の膜材料 (現在はまだない) の場合は、タテ糸とヨコ糸のクリンプがほぼ同じとなるため応力・ひずみ曲線も類似した形状となり直交異方性でなく直交等方性を示すことが予想される。図-17に二軸引張用の膜材料構造モデルを示す。

(4) 本構造モデルの応用

本構造モデルを用いることにより膜材料以外の応力・ひずみ関係の非線形性の強い材料 (例えばゴム、プラスチック等) の応力・ひずみ解析での応用も可能となる。その際、本構造モデルの各置換材料の材料定数や断面での位置はそれぞれの材料に適応した値を与える必要がある。

5.3 膜材料構造解析モデルの諸定数の決定

(1) 膜材料の引張剛性

本膜材料構造モデルの最小単位の膜材料引張剛性は、図-18に示すように1本の要素の合成されたものとなる。この膜材料引張剛性は、それぞれの構成要素剛性の単純な合成ではなく引張られる糸と交差する糸からの力の作用がシュリンクバネ (EA_{SHR}) の変形も伴いながら影響するためかなり複雑なものとなる。このため膜材料の剛性は、一軸引張と二軸引張とではシュリンクバネ (EA_{SHR}) によるタテ糸、ヨコ糸のクリンプが異なるため引張強度の約10%以下の低い応力域では同じ値をとらない。

しかし、クリンプ交換が完了し純粋に膜材料の平面的に伸びが進展する高い応力状態では一軸引張と二軸引張での膜材料の剛性はほぼ近い値となる。

(2) 糸引張剛性

糸の引張剛性は、タテ、ヨコ方向とも同じ紡糸 (EB C150 4/2 3.8S) であることから同一の値を設定する。

1本の糸の引張剛性は西川¹⁶⁾の引張試験結果により荷重-伸び関係は直線的で、荷重24kgで破断、その伸び率は4.07%であることが知られており、この時の糸1本の引張剛性 (EA_{YARN}) は前述の荷重-伸び率より590kgとなる。本構造モデルもこの値を用いる。

(3) コーティング材の剛性

コーティング材の構成を大きく分類すると図-21のようになる。

図-21(a)のコーティング材 (表面層直交要素) は膜材料に強制変位や強制力が作用するとまず最初に抵抗、次に(b)の直交要素、対角要素 (ブレース) が抵抗する。特に対角要素の剛性評価は硬い材質のコーティング材で仕上げられた膜材料の応力・ひずみ解析においてコーティング材のせん断剛性が膜材料の変形に大きく影響するため重要なものとなる。

図-19はコーティング材を圧縮・引張の両方にきくバネ要素におきかえたものを表している。

本構造モデルではコーティング材の剛性は以下の値を設定した。

- ① 表面層直交要素の剛性 $EA_{TIE} = 4.0 \text{ kg/本}$
- ② 直交要素の剛性 (表面) $EA_{GRIDU} = 8.0 \text{ kg/本}^{(*)}$
(裏面) $EA_{GRIDL} = 8.0 \text{ kg/本}^{(*)}$

- ③ 対角要素の剛性 $EA_{CROS} = 8.0 \text{ kg/本}$
- ^(*) 但し、表面層直交要素と平行するものの剛性は、
(表面) $EA_{GRIDU} = 4.0 \text{ kg/本}^{(*)}$
(裏面) $EA_{GRIDL} = 4.0 \text{ kg/本}^{(*)}$

(4) 糸交点圧縮剛性 (EA_{SHR})

コーティングしていない織布の糸交点の圧縮剛性 (EA_{SHR}) は、西川¹⁶⁾の試験結果より圧縮力に対し一定の値を取らず図-22のように非線形的に変化し圧縮力が増加するに従い圧縮剛性も増加するが、圧縮力30g/cm²以上においては、圧縮剛性は1.2kg/交点前後の値に漸近するといわれている。

図-22からわかるように、糸交点圧縮剛性は応力により非線形に変化するため一定の値を設定することは難しい。このため本研究では様々な圧縮値による低い応力から高い応力までの広い範囲の応力・ひずみ解析を行った結果、糸交点圧縮剛性は以下の値を設定することにした。

$$EA_{SHR} = 0.08 \text{ kg/本}$$

6. 膜材料構造解析モデルによる数値シミュレーション

6.1 一軸引張

一軸引張における本構造モデルを膜材料引張試験結果との比較を行うために次の数値シミュレーションを行った。図-24は本構造モデルによるタテ糸およびヨ

コ糸の伸び・引張力曲線を表したものである。

本図から低い応力状態での膜材料の非線形性、そして高応力状態での直線的な伸び-引張力の関係を十分表していることがわかる。

(ア) ウェーブハイトの膜材料の力学的特性に与える影響

次に、糸の膜材料断面中心からの高さ h_w および h_r (ウェーブハイト) を変化させた場合のシミュレーション結果を図-25、26に示す。この2つの結果から糸のウェーブハイト(h_w , h_r)膜材料の伸び・引張力関係にどのような影響をおよぼすかをまとめると以下のようになる。

- ① 糸のウェーブハイトの増減は低い応力状態での膜材料の伸びの増減に大きく影響する。
- ② 糸のウェーブハイトの増減量の比率が同じであれば高い応力状態の膜材料の伸び・引張力曲線も同じ比率で水平に移行する。
- ③ 糸のウェーブハイトの増減は高い応力状態では膜材料の剛性には影響しない(曲線の勾配は変わらない)

(イ) コーティング材の剛性が膜材料の力学的特性に与える影響

次にコーティング材の剛性を変化させた場合について述べる。図-27に示すようにコーティング材の剛性の増減により引張力・伸びに以下の影響をおよぼす。

- ① コーティング材の剛性の増加は特に低応力域の膜材料の剛性に大きく影響を与え、伸び・引張力曲線の勾配が大きくなる。
- ② コーティング材の剛性が糸の剛性と比較し小さい場合は、高応力域での伸び・引張力曲線の勾配にはあまり影響しない。また、その反対にコーティング材剛性が糸剛性に近づくと高応力域の伸び・引張力曲線の勾配も大きくなる。

(ウ) 糸剛性が膜材料の力学的特性に与える影響

糸剛性の増減が膜材料剛性に与える影響についてまとめると以下となる。(図-28)

- ① 糸剛性の増減は、膜材料剛性の増減に大きく影響する。
- ② 膜材料に同じ量の強制変位 δ を与えた場合、その膜材料の引張力はほぼ糸剛性の増加率と同じ程度となる。

(エ) 一軸引張における膜材料構造モデルと引張試験結果との比較

図-29は一軸引張における膜材料構造モデルと引張試験結果で得られた伸び・引張力曲線を表したもので

ある。この図からわかるように両曲線はタテ糸方向、ヨコ糸方向とも全体的にみてほぼ同様の伸び・引張力関係である。

6.2 二軸引張

二軸引張における膜材料構造モデルと試験材料No.①(膜材料A種)との引張試験結果との比較を行う。(図-30)

タテ糸の応力はひずみ率が0.4~0.5%(点(a))まではあまり上昇せず大きくても1.5kg/cm~2.0kg/cm程度である。一方、試験結果では、タテ糸方向の応力は、ひずみ率が0.8~0.9%(点(c))まではあまり上昇せず大きくても3.5~4.0kg/cm程度である。コンピュータを用いた膜材料構造モデルによる数値解析の大きな意義は、二軸引張試験では試験方法や試験片形状が原因で応力集中し、膜材料の本来の引張強度の測定が困難であったものでも膜材料の引張強度とその時のひずみを数値シミュレーションにより推定することができることである。図-30の点(b)は、膜材料の全幅に対し糸1本あたり負担できる引張力(約17kg/本)となる二軸引張(タテ:ヨコ引張力比 1:1)解析値をプロットしたもので、およそ100kg/cm(300kg/3cm)、その時のタテ糸方向のひずみは2.25%、またヨコ糸方向では6.15%前後の値となることが推定できる。この二軸引張におけるタテ糸方向およびヨコ糸方向引張強度は、一軸引張のタテ糸方向の引張強度が約150~170 kg/cmであるのに対し約58~66%で約100kg/cmと低く、またひずみ率では一軸引張の場合はタテ糸方向で約9%、ヨコ糸方向で約13%であるのに対し二軸引張ではタテ糸方向で約2.25%(一軸引張の25%)、ヨコ糸方向で約6.15%(一軸引張の47%)と低い値となっている。

この原因は、第4章の図-26と図-27で論じたように二軸引張状態では、膜材料がタテ糸およびヨコ糸の両方向から引張られるためそれぞれが接近する方向に動くため一軸引張の時より少ないひずみでクリンプ交換が完了し、タテ糸とヨコ糸の力学的釣合い状態となるためである。タテ糸方向の膜応力は、ひずみ率が0.8~0.9%(点(c))を超えるとひずみが増加せずに応力だけが急激に増加するため引張剛性があたかも(見かけ上)無限大近くなる(点(c)-点(d)間)。応力が約35kg/cm前後(点(d))まではその状態が続きそれ以後(点(d)-点(e)間)は、タテ糸のみの引張剛性に近づく。

現在、広く用いられているタテ・ヨコ方向独立引張

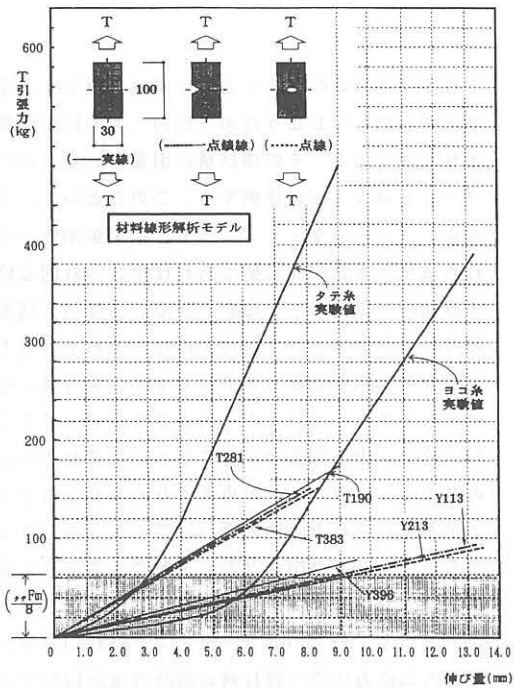


図-23 材料線形理論に基づく応力-変位解析に用いられる膜材料の伸び-引張力図(長期荷重設計用)

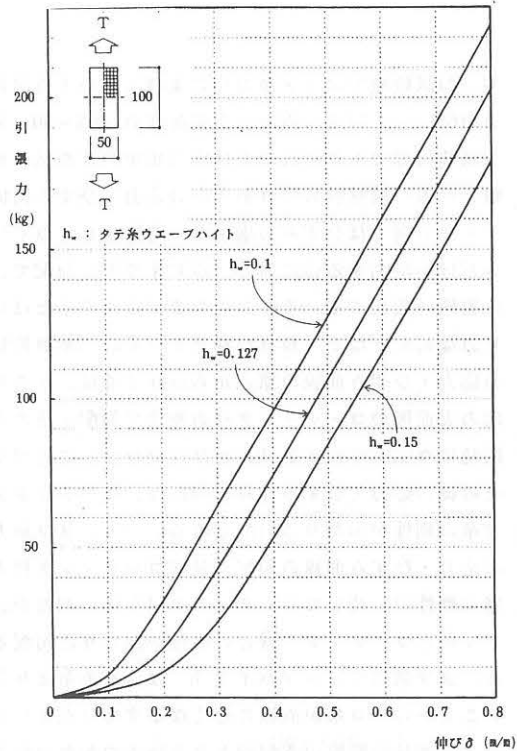
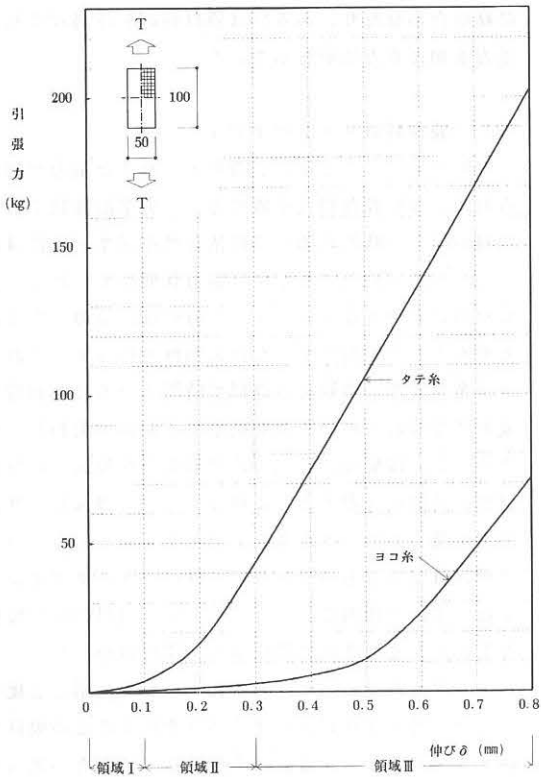


図-25 タテ糸のウェーブハイトを変化させた場合



注: () 内はフルモデルの場合

図-24 膜材料タテ方向、ヨコ方向伸び-引張力曲線

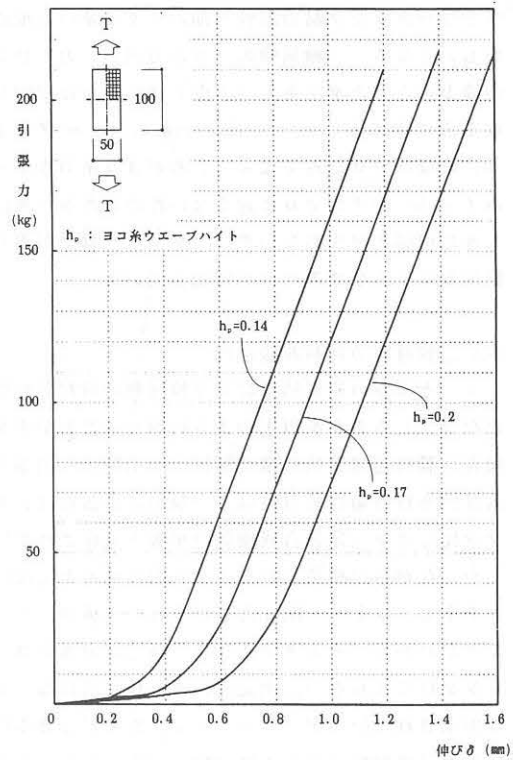


図-26 ヨコ糸のウェーブハイトを変化させた場合

型二軸試験機ではタテ糸方向およびヨコいと方向の応力が60kg/cm程度(点(e)、引張強度の40%~50%)までが試験限界でありそれ以上は応力集中のため試験が困難となる。膜材料のヨコ糸方向の応力・ひずみ関係は、タテ糸方向ではひずみの増加が一時停止し(点(c))応力だけが増加するのに対し、点(g)まで低い勾配でほぼ直線的に変化する。そして点(h)まではタテ糸とほぼ同じ急な勾配となる。膜材料構造モデルの二軸解析結果の応力・ひずみ曲線の原点から点(a)までは、タテ糸方向の表面層のコーティング材の剛性で勾配が決まる。同時にウェーブハイト h_w がほぼゼロ(0)に近づく。その後の応力・ひずみ曲線の勾配は、コーティング材と糸の剛性が加わり急勾配となる。一方、ヨコ糸方向の応力・ひずみ曲線の勾配は最初コーティング材表面層の剛性が、続いてコーティング材全体の剛性が、そして糸とコーティング材との剛性が加わり急勾配となる。ヨコ糸のウェーブハイト h_f は、タテ糸より大きいことからヨコ糸が直線に近くなるまで(点(g))コーティング材の剛性が支配的となりゆるやかな勾配となる。そしてさらに引張られることにより勾配は糸の剛性とコーティング材の剛性が加わりタテ糸の勾配に近いものとなる。二軸試験のヨコ糸方向の応力・ひずみ曲線上の点(f)とタテ糸方向の点(c)は応力がほぼ同じになる点であるが、点(c)ではタテ糸のウェーブハイト h_w がほぼゼロに近くなっているがヨコ糸のウェーブハイト h_f がまだゼロに近くないためまだヨコ糸には大きな引張力は生じないでコーティング材が引張りに抵抗しながらひずみだけが增加していく。

6.3 膜材料の材料非線形性

4. と本章の研究結果により膜材料の材料非線形性がなぜ生じるのかを以下のように論じることが出来る。現在、膜構造建築物の構造解析や施工時の初期張力導入計画を行う場合膜材料は、一般的に引張剛性、ポアソン比などが一定の合成樹脂の平板と見なされている。しかしながら膜構造材料をミクロ的に見ると実際にはタテ糸とヨコ糸が三次元的に織られた立体構造であることがわかる。そのタテ、ヨコ糸構造は表裏のコーティング材によりその三次元幾何学形状が崩れないように拘束されているが、コーティングを変形させるに十分な力(膜材料の破断強度の約1/50~1/20)が加えられることによりタテ糸ヨコ糸は大きく変形し直線になろうとする。この変形量は、一軸引張状態では引張

られる糸は直線になろうとしてそれと直交する糸を外に押し出してしまうため二軸の二方向拘束状態の時より大きくなる。その伸び量は引張られる糸のウェーブハイトの大きさに比例する。このことから、タテ糸およびヨコ糸のウェーブハイト、糸引張剛性、そして打ち込み糸本数が同じ値であればそれぞれ同じ応力・歪み曲線が得られることがわかる。二軸引張状態での膜材料のタテ糸、ヨコ糸の歪みは、それぞれの方向の引張力によって異なるが等張力である場合は、それぞれの糸のウェーブハイトの大きさで決まってくる膜材料の応力・歪み関係が線形になるのはそれぞれの方向の糸のウェーブハイトが小さくなり直交するタテヨコの糸がそれぞれ力学的釣合い状態になったときである。第5章図-25及び図-26から理解できるように膜材料の力学的特性は、低応力状態ではタテ糸とヨコ糸のウェーブハイトの大小とコーティング材料引張剛性によりまた高応力状態(膜材料の破断強度の1/4)では糸引張剛性に支配されていると見ることが出来る。材料非線形性の小さい膜材料を得るためにはタテ糸とヨコ糸を織らずに直交させるだけにし、交点がズレないように結び合わせたり、あるいは膜材料の製造過程で初期張力を加える方法が有効である。

6.4 膜材料のリラクゼーション

6.3 で述べたことは、製造加工されまだ張力が加えられていない膜材料(平織り等)の力学的性状である。膜材料は、一時的に強い時間依存性を示すが後にほぼ安定した力学的性状を示す。張力状態におかれている膜材料においてはコーティング材料は、糸の三次元的変形をある時間拘束するだけの剛性を持っているが、タテ糸ヨコ糸の直線化の過程で時間とともに強制的に変形させられ、糸の変形を拘束する剛性が失われてしまう。この現象は、施工され初期張力が導入された膜材料が時間の経過とともに伸びてしまい導入した初期張力が低下してしまうリラクゼーション(応力緩和)と呼ばれているものである。膜材料のリラクゼーションは、上記の理由によりコーティング材料の時間に依存した塑性変形性状に関係する。膜材料がPVCコーティングされたものと四ふっ化エチレン樹脂とを比較すると前者のほうがより速く塑性変形するため膜材料のリラクゼーションは、速く生じる。このため膜面の張力再導入の時期は膜材料のコーティングの材質により異なること考慮し施工計画を立てる必要がある。

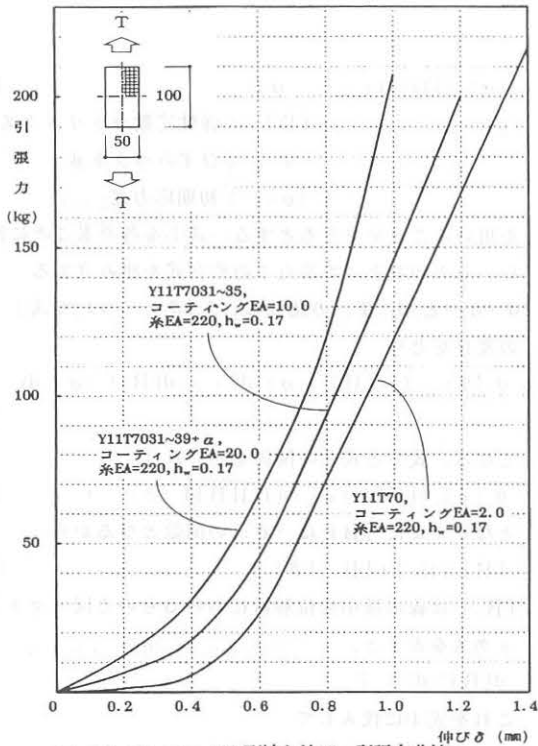


図-27 コーティング剛性と伸び-引張力曲線

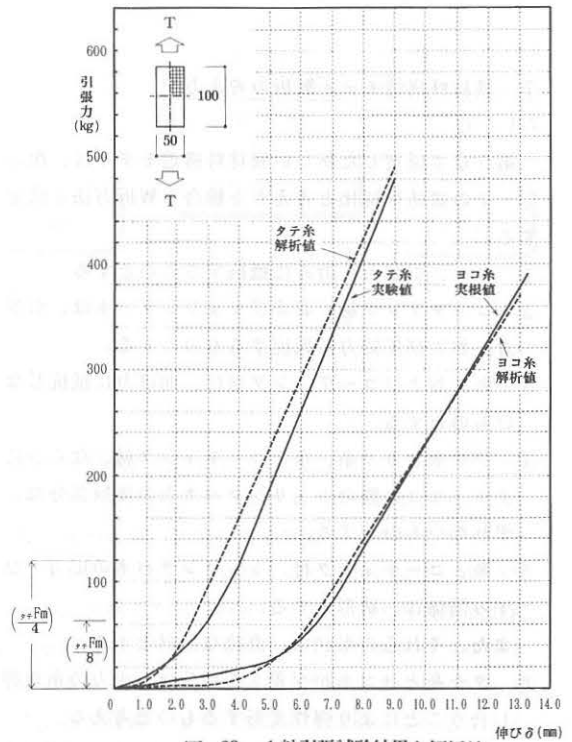


図-29 1軸引張試験結果と解析値

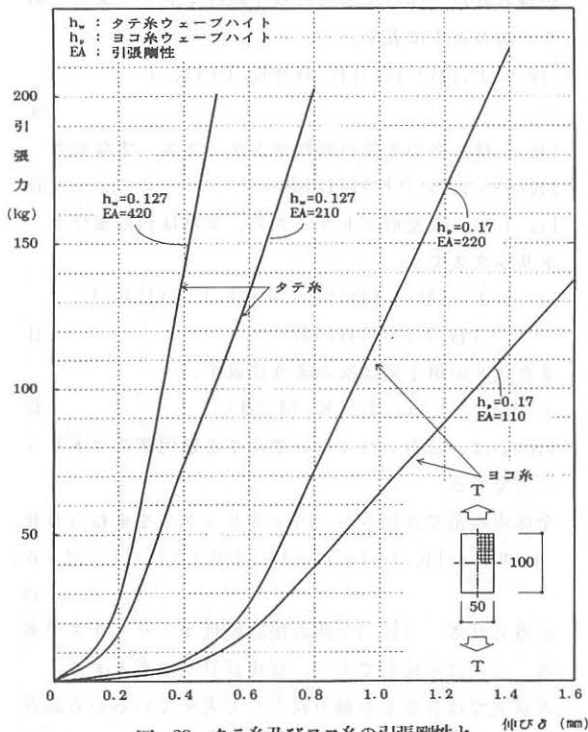


図-28 タテ糸及びヨコ糸の引張剛性と
伸び-引張力曲線

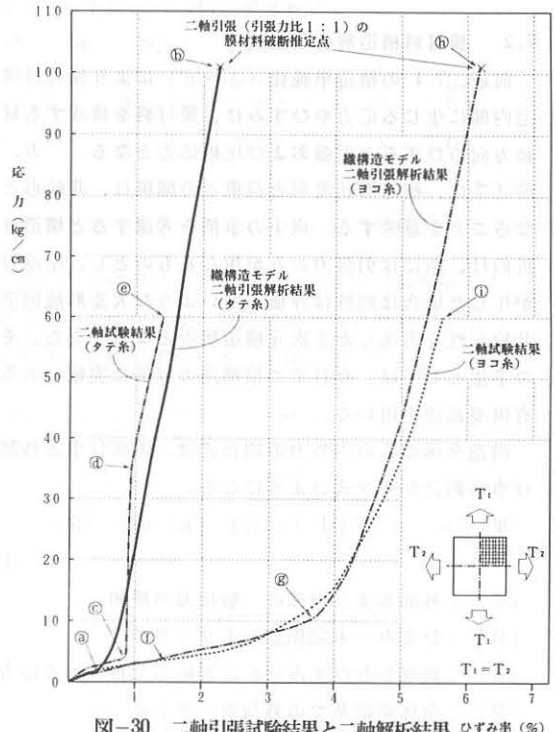


図-30 二軸引張試験結果と二軸解析結果
タテ : ヨコ引張の比 (1 : 1)

7. 膜材料構造モデル解析の考え方

7.1 序

第5章で提案した新しい膜材料構造モデルは、次の①～⑦の構造単純化と考え方を総合し解析方法を決定する。

- ① 糸は、引張力にのみに抵抗するものとする。
- ② コーティング材、およびシュリンクパネは、引張力、および圧縮力に抵抗するものとする。
- ③ 糸、およびコーティング材は、曲げ力に抵抗しないものとする。
- ④ タテ糸とヨコ糸、糸とコーティング材、ならびにタテ・ヨコ糸間のシュリンクパネとの接触部分は、ずれないものとする。
- ⑤ 糸、コーティング材、シュリンクパネの応力・ひずみ関係は、線形とする。
また、それらの形状は、直線な部材とする。
- ⑥ タテ糸とヨコ糸が交差する部分は、両方の糸が押し合うことにより弾性変形するものとする。
- ⑦ 膜材料構造モデルに加わる荷重は、大きな形状変形に追従できるよう解析上考慮する。

7.2 膜材料構造解析理論

前述、7.1の構造単純化(①～⑥)により膜材料構造内部に生じる応力やひずみは、膜材料を構成する材軸方向のひずみと引張および圧縮応力となる。一方、前述⑦は、構造形状変形と荷重との関係は、非線形となることを意味する。以上の事柄を考慮すると構造解析的は、糸には引張力のみが生じるものとし、圧縮力が生じた場合は剛性は評価しないような大変形幾何学非線形性を考慮した3次元構造解析となる。また、その手法としては、今日まで膜構造の解析に実績のある有限要素法を用いる。

構造全体の系の内外力の釣合式は、内部仕事と外部仕事の釣合から次のようになる。

$$\{\Psi(\{\delta\})\} = [T]^T \int_s [B]^T \{n\} dS - \{R\} \quad (1)$$

$\{\Psi\}$: 外部および内部の一般化力の総和
 $[B]$: ひずみ-未定係数マトリックス
 $\{n\}$: 到達したひずみレベルに対応して得られる応力
 $\{R\}$: 全体座標系での外荷重ベクトル

ここでひずみの変分が次のように表されるとする。

$$d\{\varepsilon\} = [B] d\{\delta\} \quad (2)$$

また、ひずみが十分に小さいときは、一般的な弾性関係として、

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} + \{\sigma_0\} \quad (3)$$

$[D]$: 弾性定数マトリックス

$\{\varepsilon\}$: ひずみベクトル

$\{\sigma_0\}$: 初期応力度

を用いることができるとする。式(1)を各要素ごとに行い、その和をとって節点での釣合式を組み立てる。

$d\{\delta\}$ と $d\{\Psi\}$ の関係は、 $d\{\delta\}$ について式(1)の変分をとり

$$d\{\Psi\} = \int_v d[B]^T \{\sigma\} dV + \int_v d[B]^T \{\sigma\} dV \quad (4)$$

となる。式(2)と式(3)の関係を用いれば

$$d\{\delta\} = [D] d\{\varepsilon\} = [D][B] d\{\delta\} \quad (5)$$

となり、また $[B]$ は $\{\delta\}$ の関数となるから

$$[B] = [B_0] + [B_L] \{\delta\} \quad (6)$$

$[B_0]$ は線形微小変位解析におけるものと同一マトリックスを表すと、

$$d[B]^T = d[B_L]^T \quad (7)$$

これを式(4)に代入して

$$d\{\Psi\} = \int_v d[B_L]^T \{\sigma\} dV + [K_E] d\{\delta\} \quad (8)$$

が得られる。 $[K_E]$ は要素の弾性剛性マトリックスであり、次のように表す。

$$[K_E] = \int_v [B]^T [D] [B] dV = [K_0] + [K_L] \quad (9)$$

$[K_0]$ は、微小変位の剛性マトリックス、すなわち

$$[K_0] = \int_v [B_0]^T [D] [B_0] dV \quad (10)$$

$[K_L]$ は、大変形マトリックス、または初期変位マトリックスで、

$$[K_L] = \int_v ([B_0]^T [D] [B_L] + [B_L]^T [D] [B_0]) + [B_L]^T [D] [B_L] dV \quad (11)$$

また式(8)の第1項は次のように表す。

$$\int_v d[B_L]^T \{\sigma\} dV = [K_0] d\{\delta\} \quad (12)$$

$[K_0]$ は、応力レベルにいそんする幾何剛性マトリックスである。

全体座標系で評価された各マトリックスを重ね合わせ、

$$d\{\Psi\} = ([K_0] + [K_L] + [K_0]) d\{\delta\} = [K_T] d\{\delta\} \quad (13)$$

が得られる。 $[K_T]$ 全体の接線剛性マトリックスである。これは非線形であり、反復計算を必要とする。

本研究では各要素を軸力材として考えているから節点荷重ベクトル $\{P\}$ と、変位ベクトル $\{\delta\}$ 、弾性剛性マトリックス $[K_E]$ 及び幾何剛性マトリックス $[K_0]$ との関係は具体的に次のように表される。

$$\{P\} = \Sigma \{EA/C_{ij}\} \{K_1\} + \{N^0_{ij}/C_{ij}\} \{K_2\} \quad \{d\} \quad (14)$$

C_{ij} : 無張力状態での部材長

C_{ij}^0 : 初期部材長

N^0_{ij} : 無張力状態での部材長

$E A$: 部材剛性

次に式(14)をNewton Raphson法を適用するために変形し、書き直すと、

$$A_x = \Sigma EA(1/C_{ij} - 1/L_{ij})(x_{ij} + u_{ij}) + \Sigma((x_{ij} + u_{ij})/C_{ij}) N^0_{ij} + P_x = 0$$

$$A_y = \Sigma EA(1/C_{ij} - 1/L_{ij})(y_{ij} + v_{ij}) + \Sigma((y_{ij} + v_{ij})/C_{ij}) N^0_{ij} + P_y = 0$$

$$A_z = \Sigma EA(1/C_{ij} - 1/L_{ij})(z_{ij} + w_{ij}) + \Sigma((z_{ij} + w_{ij})/C_{ij}) N^0_{ij} + P_z = 0$$

(15)

$$L_{ij} = \sqrt{(X_{ij} + u_{ij})^2 + (Y_{ij} + v_{ij})^2 + (Z_{ij} + w_{ij})^2}$$

$$C_{ij} = \sqrt{X_{ij}^2 + Y_{ij}^2 + Z_{ij}^2}$$

ここでNewton Raphson法を適用し、マトリックス表示すると次のようになる。

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial A_x}{\partial u_{ij}} & \frac{\partial A_x}{\partial v_{ij}} & \frac{\partial A_x}{\partial w_{ij}} \\ \frac{\partial A_y}{\partial u_{ij}} & \frac{\partial A_y}{\partial v_{ij}} & \frac{\partial A_y}{\partial w_{ij}} \\ \frac{\partial A_z}{\partial u_{ij}} & \frac{\partial A_z}{\partial v_{ij}} & \frac{\partial A_z}{\partial w_{ij}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} (A_x)_k \\ (A_y)_k \\ (A_z)_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

ここに近似的に u_k, v_k, w_k を出発値として使い

第1近似値は、

$$u_1 = u_k + \Delta u$$

$$v_1 = v_k + \Delta v$$

$$w_1 = w_k + \Delta w \quad (17)$$

となる。次に式(17)より求めた u_1, v_1, w_1 を2回目の計算のための出発値とし、これを繰り返すことにより収れんさせる。

7.3 膜材料構造解析システム

膜材料の織布構造を軸力要素(引張力、又は圧縮力)としてモデル化し、有限要素法による非線形解析をする場合は、節点が非常に多くなること、要素のつながりによってはバンド巾が大きくなるなどの理由でコンピューターの記憶容量や演算スピードを考慮した構造解析プログラムの開発が不可欠となる。著者は、図-31に示すコンピュータープログラムとそれを演算処理する為のシステムを開発したのでその概略を述べる。

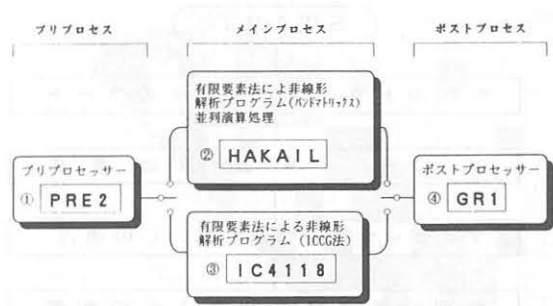


図-31 膜材料非線形解析システム図

7.4 並列演算処理の考え方

トランスペューター 8 台による並列演算処理により CPU が 1 つの時の約 6 ~ 8 倍の演算処理能力をパーソナルコンピューターで発揮することが出来る(図-32)。

本膜材料構造を理論解析する場合、大規模連立方程式の解法とその演算スピード向上のための研究が重要な意味をもってくる。本稿は、数値演算法について述べることを目的としていないので詳細にふれることをさげ概略だけを述べる。

(1) マトリックスの分散配置

連立一次方程式(18)の様に表される。

$$A * X = B$$

$$\left. \begin{matrix} a_{11} X_1 + a_{12} X_2 + \dots + a_{1n} X_n = b_1 \\ a_{21} X_1 + a_{22} X_2 + \dots + a_{2n} X_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1} X_1 + a_{n2} X_2 + \dots + a_{nn} X_n = b_n \end{matrix} \right\} \quad (18)$$

本マトリックスソルバーでは、この係数行列を下記の様に T S C 内のトランスペューターに分散配置した。対象行列の場合には、対角要素を含んで右上半分のみメモリー上に配置される(下図、図-33)。

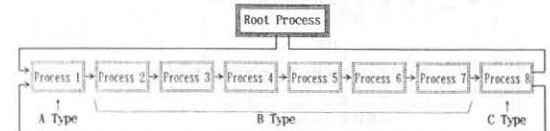
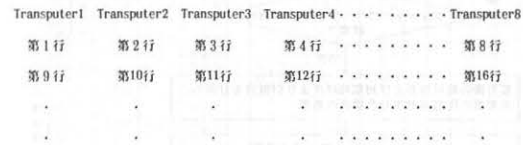


図-32 並列演算プロセッサーリングトポロジー



図-33 並列演算処理マクロフロー

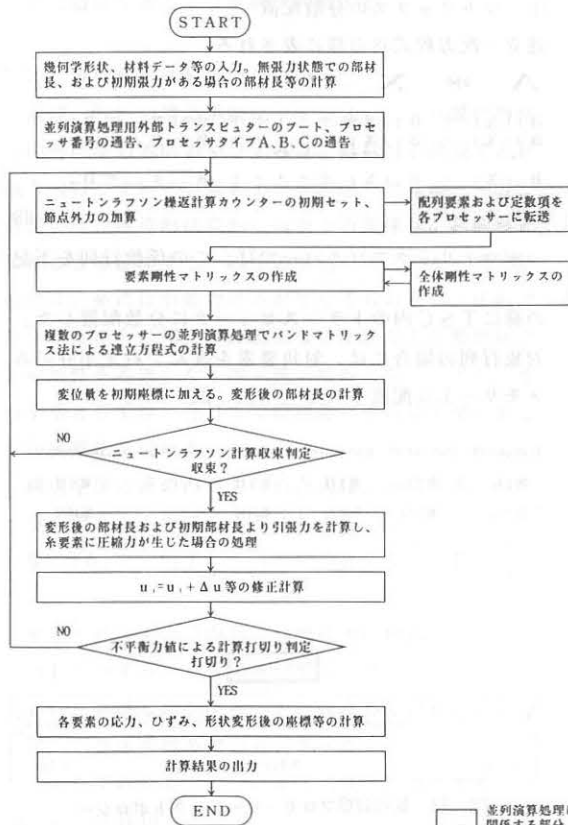
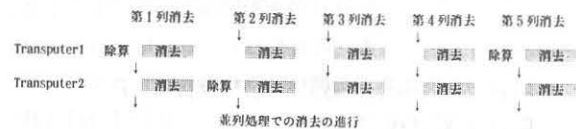


図-34 並列演算処理による膜材料構造解析プログラムフロー

(2) 並列処理のアルゴリズム

係数行列が複数のプロセッサ上に分散配置されている。前進消去においては、除算を行った後の行ベクトルが他のトランスピュータに送られ同時に消去が実行される。その前進の状況を以下に示す。下図中、矢印でしめしているのが除算後のベクトルの転送である。

一方、後退代入においては第 n 行を所有しているトランスピュータにおいてまず X_n が求められ、次いでそれが他のトランスピュータに転送され Σ の計算が同時に行われる。転送と計算を繰り返す中で X_{n-1} 、 $X_{n-2} \cdots X_2$ 、 X_1 と求められる。



7.5 ICCG+Newton Raphson 法

図-31、③の膜材料構造モデル解析プログラム IC41 18は、非線形連立方程式をニュートンラフソン法の各繰返し計算の段階で作られる連立方程式をICCG法により解くものである。

図-35は、タテ糸3本、ヨコ糸3本の膜材料構造モデルの最小モデルである。

これは、節点数18 (自由度数54)、要素数83で構成されており、その全体剛性マトリックスは図 6.4-8に示すようになる。この全体剛性マトリックスの空白部分には0が入っておりそれ以外の黒く塗られた部分にはノンゼロ要素が入っている。これを見るとマトリックスの対角軸から最もはなれている要素は38番目にある。このことからバンドマトリックス法で解く際にはその巾のマトリックスを記録する必要があり構造モデルの大きさに比較しかなり多くのメモリーを必要とする。それに対し、ICCG法では図-37の全体剛性マトリックスではなく図-38の0以外の黒く塗られた(数の字の入った)部分(全マトリックス要素の4%)のみを一次配列に記憶すればよい。従って必要とするメモリーは非常に小さくてすむため複雑かつ大規模な構造モデルの数値解析には優れた方法である。なお、本膜材料構造モデルをバンドマトリックス法で解析する場合は全マトリックス要素数の44%の要素を記憶する必要がある。

本膜材料構造では、ICCG法はバンドマトリックス法の1/7~1/11の記憶容量で解析可能であった。図-36にICCG法の連立方程式解法フローを示す。

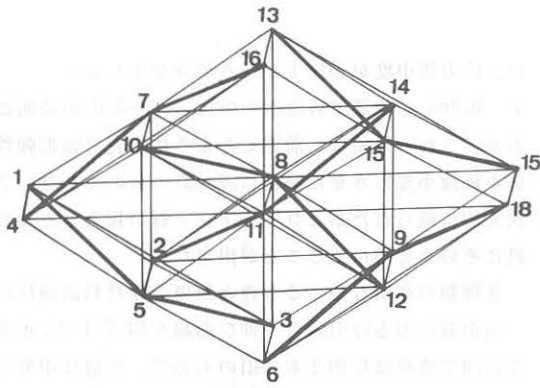


図-35 タテ糸3本、ヨコ糸3本の膜材料構造モデル

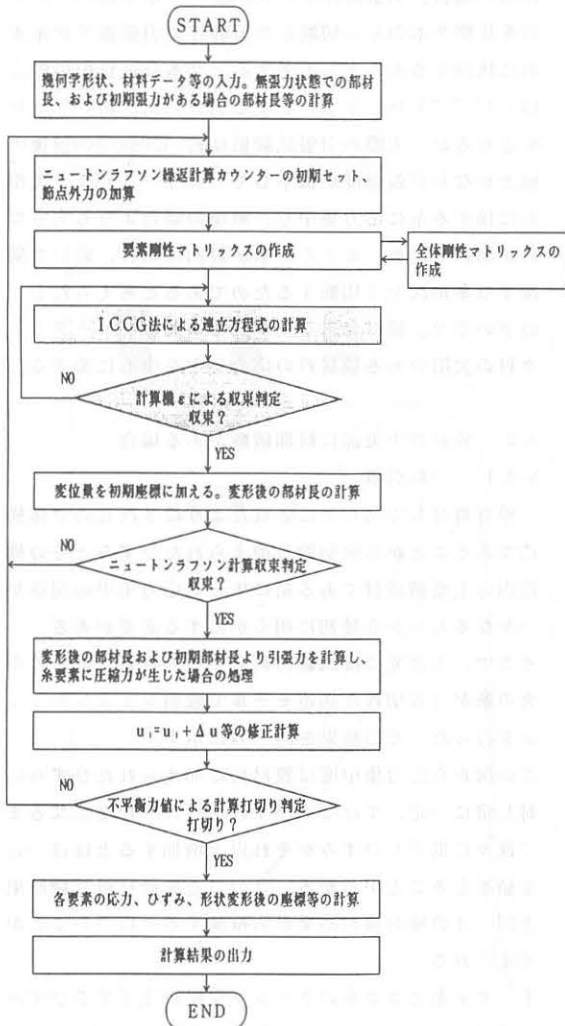


図-36 ニュートンラフソン法+ICCG法による膜材料構造解析プログラムフロー

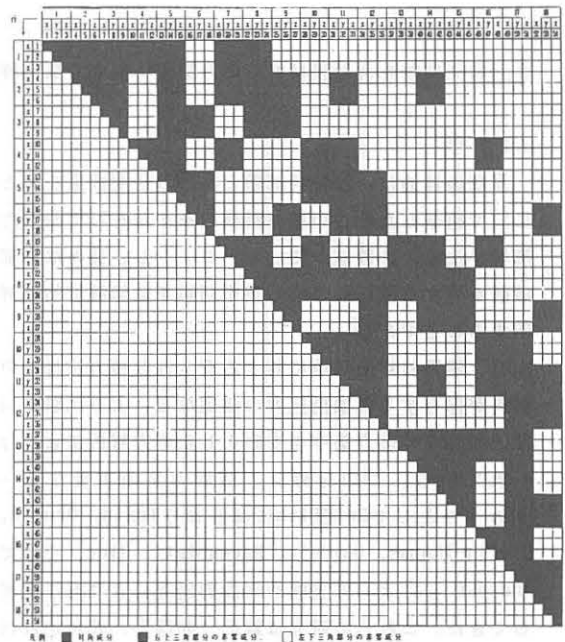


図-37 構造モデル(図-35)の全体剛性マトリックス
非零成分 (□部分)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図-38 ICCG法で記憶される要素 (□部分)

8. 局部破断を含む膜材料の応力集中に関する数値解析

8.1 序

本章の目的は、膜材料試験と3,4の研究成果をもとに5で構築した新しい膜材料構造モデルを7で論じた解析手法により数値シミュレーションし、様々な局部破断を有する膜材料の応力集中問題を数値解析的に説明することである。

現在、建築材料の破壊に対する安全性評価方法はその材料が保有する破壊抵抗力の測定などによる試験や局部破断部分の応力集中を主眼とした応力解析により行われている。この分野は、破壊力学の主要なテーマの一つとしてGriffithにはじまりIrwin, Orowan, Rivlin-Thomas, Dugdale, Barenblatt, Rice、そしてAndrewsらによって実験や理論的研究により進歩発展してきた。これらの研究は線形、非線形、非可逆性材料の様々なものが対象とされてきたが、対象とする材料を均質なものと仮定したものであり膜材料のような糸が3次元的に織られたような複合材料にはそのまま適用できない。膜材料の応力集中に関する研究は、Hedgepethによるものが古くから知られている。

彼の理論は糸をある引張剛性を有する直線材とし、コーティング材は剪断剛性を有する平板として材料を単純化し応力集中度を欠損した糸の本数だけで求める式を提案したもので、膜材料を構成する各材料の3次元的な力の伝達機構や構造変形を考慮したものでないため実際とはかなりの差が生じることが推測される。本研究が膜材料の構造をできるだけ忠実に3次元の構造モデル化を行って欠損部分の応力解析を行い膜材料試験結果やHedgepethの応力集中計算式による値、さらに、現在広く用いられている三角形膜要素による有限要素法解析結果との比較もあわせ総合的に応力集中問題を論じる。膜材料を均質な線形弾性体と仮定できれば切欠部の応力集中は、極微小変形の範囲内では図-39で示す値となるのが線形破壊力学の考え方により求められる。図-39の曲線は、式(1・a)と(1・b)の切欠部が曲率半径が ρ (mm)で切欠き長さが a (mm)の楕円形状の場合、そして式(2・a)と(2・b)は、切欠部先端が尖ったもの($\rho=0$)の場合の $0'$ 点から x 軸上各点の応力集中度を表したものである。なお、(1・a)、(2・a)は、引張方向の(1・b)、(2・b)は引張方向と直交する方向の応力集中度を表している。

欠切先端 $0'$ から x 軸上の距離で0.2mm以下の範囲で

は、応力集中度が5以上となる部分が生じる。

$r=0.2\text{mm}$ の位置での応力集中は1.4~3.0の範囲にあり、これらの値は、前述したように均質な線形弾性体を極微小変形させた場合に成り立つものであり、3次元的に織られた糸とコーティング材の複合した膜材料にそのまま適用することが出来ない。

2種類の糸切れのあるものと無傷の膜材料試験片の一軸引張における引張力・伸び曲線を図7・1-2に示す。この図で破線は片側2本欠損のもので、実線は中央部3本の糸切れがあるものの引張力・伸び曲線を表す。一軸引張試験片の糸欠損位置の違いによる引張強度の低下についてこの図を用いて論じる。

無傷の場合、引張強度が約500kg/3cm(糸本数29)のものを片側2本の糸を切断した試験片の引張強度が糸本数に比例するものとして考えると2本分の負担引張力($2 \times 17.7=35.4\text{kg}/2$ 本)を差し引いた値、約465kg/3cmとなるが、実際の引張試験値は約390kg/3cm前後の値とかなり引張強度が低下してしまう。これは、欠損部に接する糸に応力集中し、無傷の場合よりも大きな力が加わるため、まずその糸が最初に切れ、続いて隣接する糸が次々に切断するためであると考えられる。以下の章で、膜材料構造モデルで糸およびコーティング材の欠損のある膜材料の応力集中を中心に論ずる。

8.2 膜材料中央部に局部破断がある場合

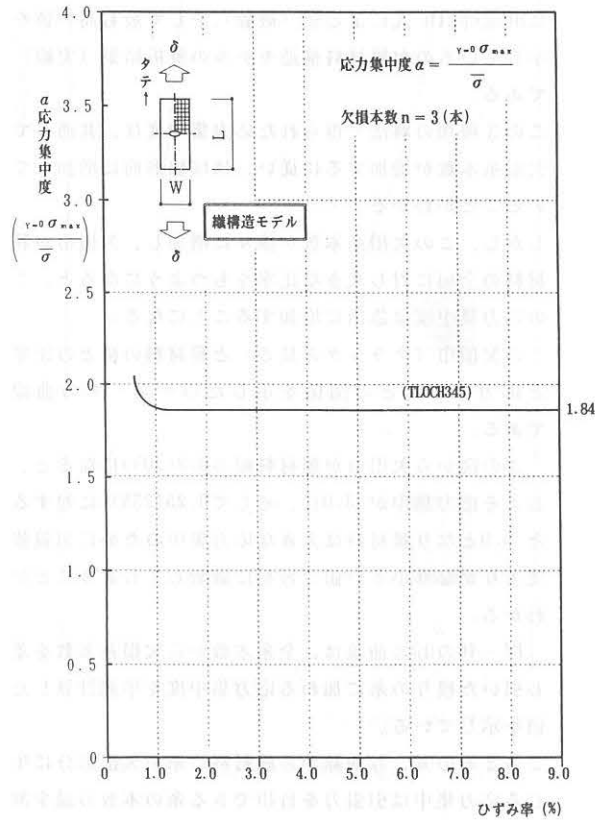
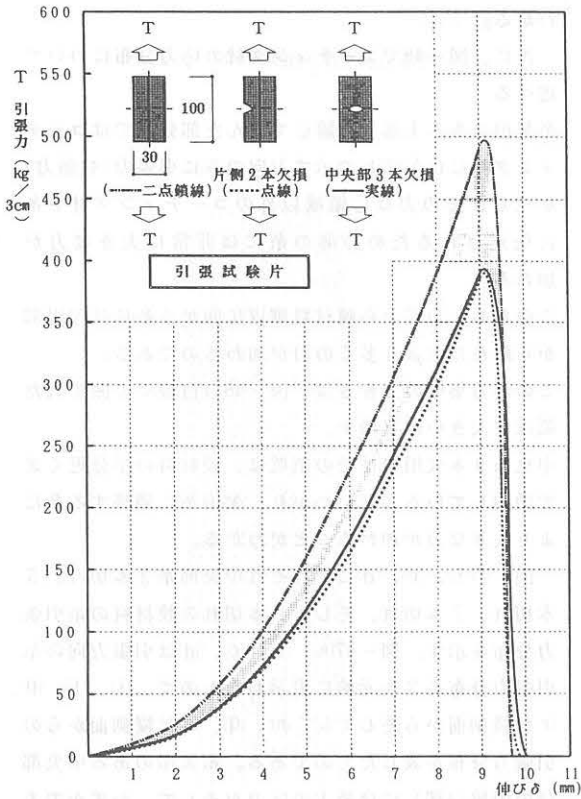
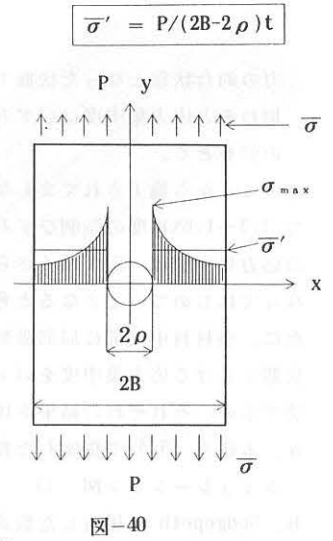
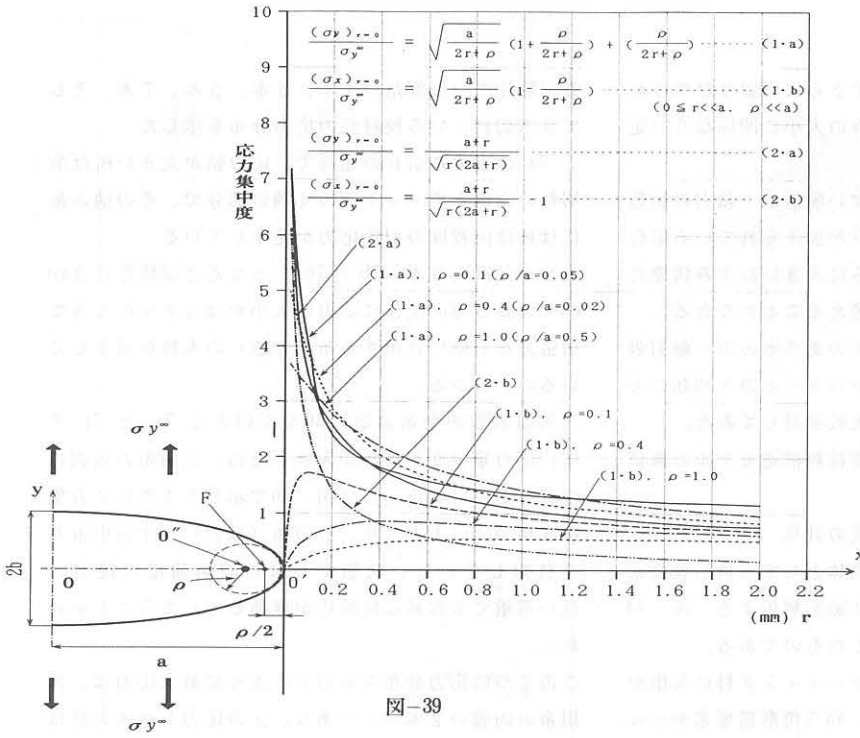
8.2.1 一軸引張

膜材料は4で明らかにされたように3次元の立体構造であることから強制的に加えられたひずみとその構造内の主要構成材である糸に生じる応力集中の関係がいかなるものかを最初に明らかにする必要がある。

そこで、本研究では試験材料No.1(膜材料A種)の中央の糸が3本切れた構造モデルで数値シミュレーションを行った。その結果を図-42に示す。

この図から応力集中度は膜材料に加えられたひずみに対し常に一定、ではなくひずみが約1.3%程度になるまで徐々に低下しひずみがそれ以上増加するとほぼ一定を値をとることがわかる。このことを膜材料試験結果と図-4の検討検討結果から推測すると以下のことが考えられる。

- ① タテ糸とヨコ糸のクリンプ交換が完了するひずみ率まで(図-4では約1.6%)は応力集中度は非線形に変化する。
- ② 膜材料のタテ糸とヨコ糸のクリンプ交換が完了し



力の釣合状態となった状態でさらに引張りひずみが加わると応力集中度はひずみの大小に関係なく一定の値をとる。

このことから施工されてまもない膜面が一軸引張状態で1.3~1.6%程度の強制ひずみがかえられている場合の応力集中度は一定でなくさらに大きいひずみ状態になってはじめて一定となると考えることができる。

次に、膜材料中央部に局部破断のあるものの一軸引張状態における応力集中度を以下のa~cの3種類の方法で求め、それぞれの結果を比較検討してみた。

a. 本研究(5.)で提案した膜材料構造モデルの数値シミュレーション図-45

b. Hedgepeth が提案した数式の計算

c. 膜材料を異方性の線形弾性体として三角形膜要素で分割し有限要素法により非線形解析する。図-44 図-43がその結果をグラフ化したものである。

試験片の中央部に糸およびコーティング材の欠損がある場合の応力集中度は、図-43三角形膜要素モデルで(図-43の一点鎖線)解析した値が最も小さく、次にHedgepeth 式による値(破線)、そして最も高い値を示しているのが膜材料構造モデルの解析結果(実線)である。

この3種類の解法で得られた応力集中度は、共通して欠損糸本数が増加するに従い、ほぼ線形的に増加していることがわかる。

しかし、この欠損糸本数が徐々に増加し、欠損巾が膜材料の全幅に対し大きな比率をもつようになると、この応力集中度は急激に増加することになる。

この欠損巾(クラックの長さ)と膜材料の幅との比率と応力集中度との関係を示したのが図-46の曲線である。

この図から欠損巾が膜材料幅の0.2(20%)になると、およそ応力集中が3.0に、そして0.25(25%)に対すると5.0となり膜材料は大きな応力集中のために引張強度よりかなり小さい値で容易に破断してしまうことがわかる。

図-46の(b)の曲線は、全糸本数から欠損糸本数を差し引いた残りの糸に加わる応力集中度を単純計算した値を示している。

この2本の(a)、(b)曲線から膜材料の糸の欠損部分に生じる応力集中は引張力を負担できる糸の本数の減少割合よりも、さらに大きな値となることがわかる。

図-47(a)~(s)には試験材料No.①(表-1)の一軸引

張試験片で中央部糸が1本、3本、5本、7本、そして9本切れている膜材料の応力分布を示した。

7aは1本糸切れの場合で、応力値が大きい所は糸切れの両側とチャック部の4隅の部分で、その他の糸にはほぼ同程度の引張応力が発生している。

これが欠損糸3本(7b, 7c)となると試験片長さ100mmの長さ方向全体に応力の大小がはっきり出てきて引張力を有効に負担する糸(赤色)の本数が減少しているのがわかる。

欠損本数が全糸本数の20%を超えた7eと7fでは、応力集中度が非常に大きいため、欠損糸の両側の位置する糸(赤色)には図-46で示したように応力集中度が3.5以上となり、他の糸(緑色)が十分引張力を負担していない状態でも糸の破断強度に達し、低い荷重でも容易に試験片が破断してしまうことがわかる。

この2つの応力分布でもわかるように最大応力は、欠損糸の両脇の2本(B)であり、次の応力レベルの所はその隣接する糸とチャック部の四隅(A)であることがわかる。

次に、図-48でコーティング材の応力分布について述べる。

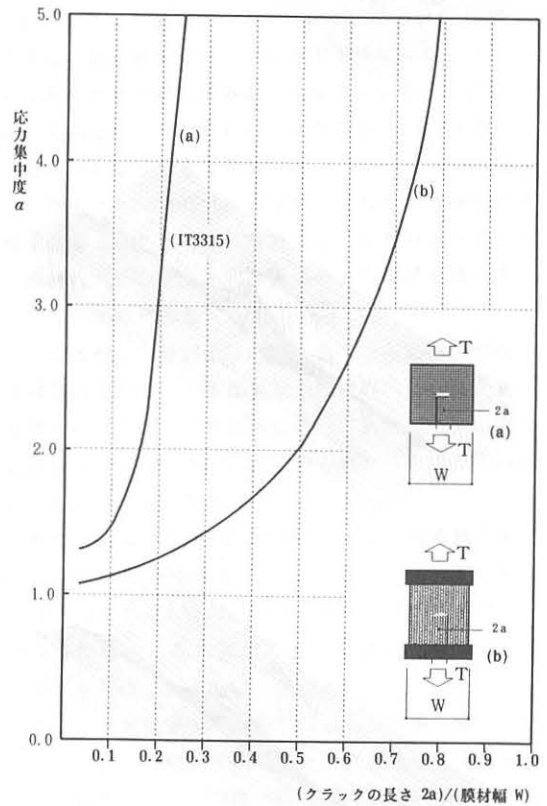
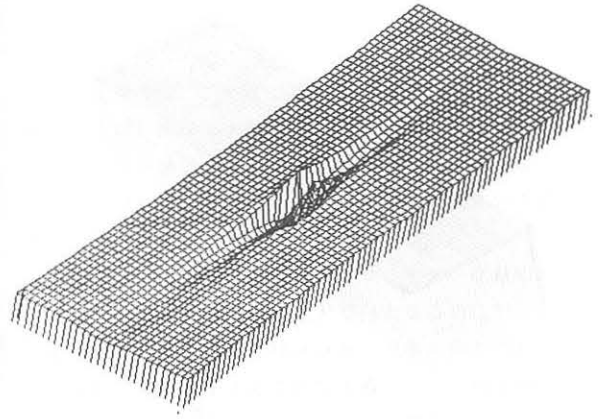
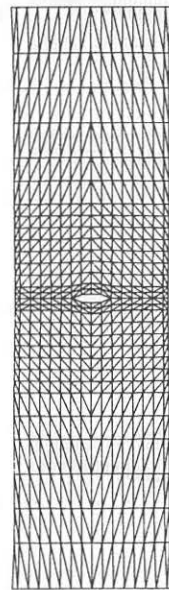
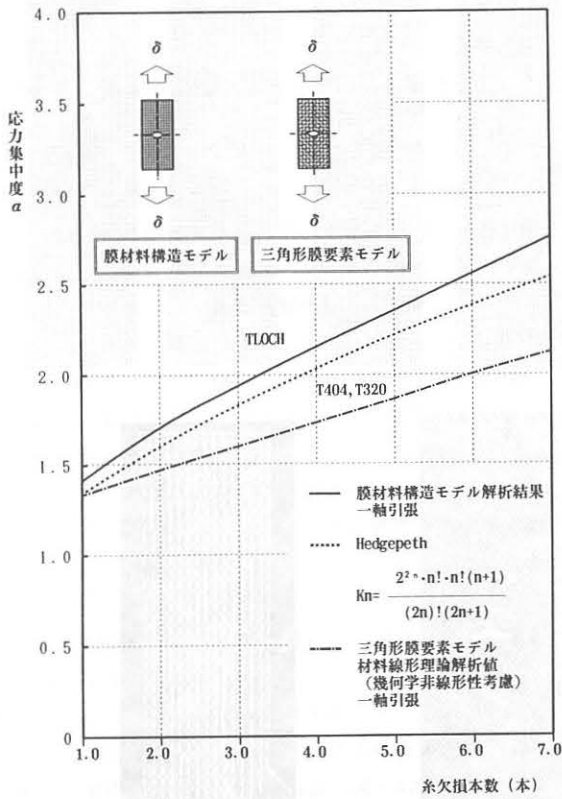
糸欠損のある上部(白線Cで囲んだ部分)ではコーティング材には矢印(b)で示す方向のみに引張力(剪断力)が生じ、その力はC領域以外のコーティング材や糸に伝達されるためD部の糸には非常に大きな力が加わる。

このため、D部から膜材料側辺に向かう糸には欠損部から離れた糸より多くの力が加わるのである。

この応力集中の大きさは、図-48の白線(c)で囲まれた領域が大きいほど増す。

中央糸9本欠損ではその領域は、膜材料の半分近くまで増加していることがわかり、欠損糸に隣接する糸により大きな力が加わるということがわかる。

図-47(b)、(c)、(d)にそれぞれ中央部糸3本切れ、5本切れ、7本切れ、そして9本切れの膜材料の糸引張力分布を示す。図-47(a)、(b)、(c)、(d)は引張方向の糸引張力分布を3次的に表示したもので、(j)、(l)、(p)、(r)は横側面からそして(k)、(m)、(q)、(s)は縦側面からの引張力分布を表したものである。糸欠損のある中央部分の両脇(A部)には最大の応力がそして、わずかであるが図(b)、a部も応力が高くなっていることが分かる。(k)の縦側面の応力分布は、応力集中部Aから膜材料側



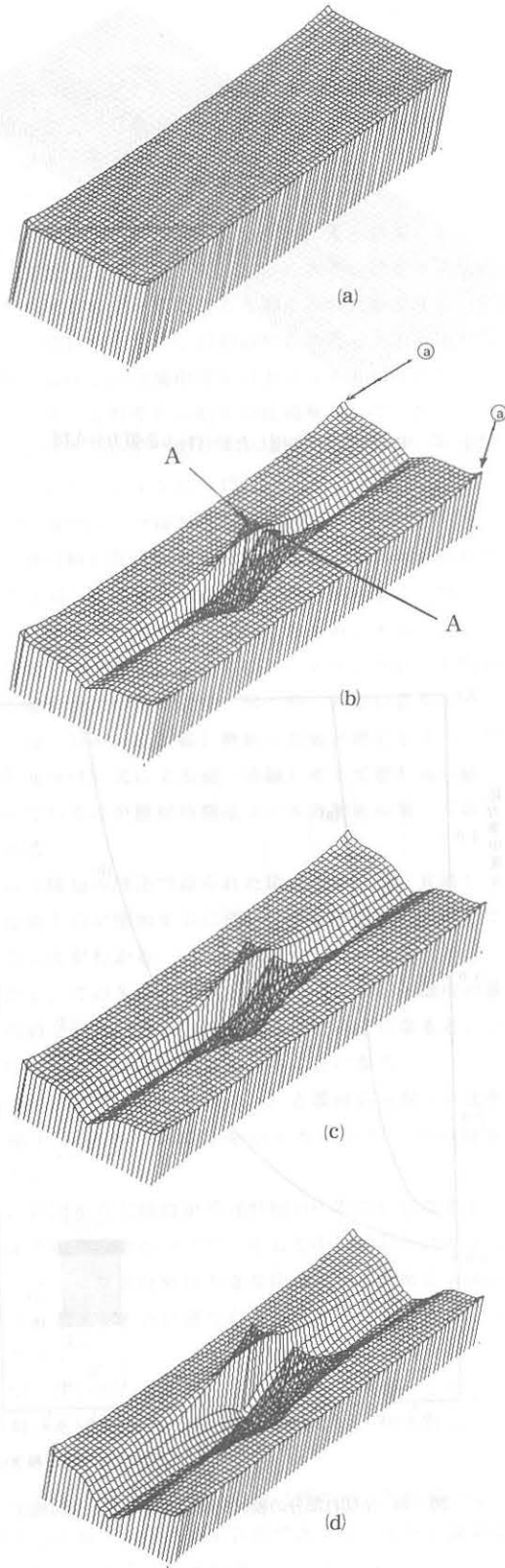


図-47 中央糸欠損した膜材料の応力分布

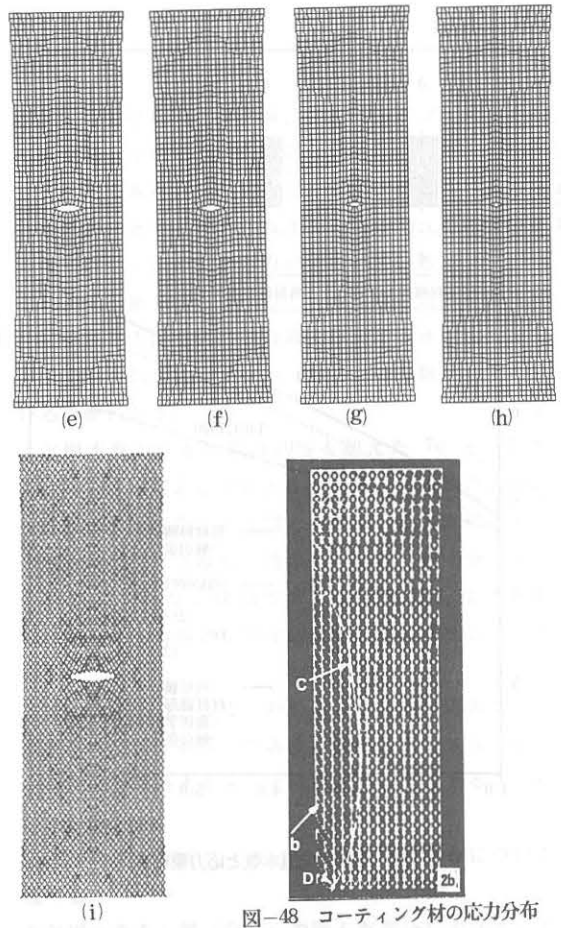
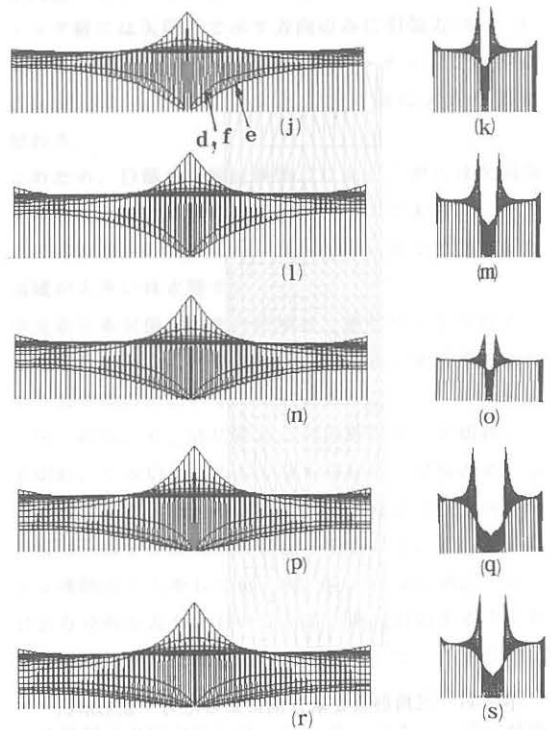


図-48 コーティング材の応力分布



辺方向に急激に変化する応力分布曲線を見ることが出来る。

8.2.2 二軸引張

8.2.1 では中央部に糸欠損のある膜材料の一軸引張での応力集中について論じたが、本節では二軸引張での応力集中についての数値解析結果を示す。

解析ではタテ糸及びヨコ糸方向にそれぞれ $\delta_{たて}0.36$ 87(mm)、 $\delta_{よこ}1.3373$ (mm)の強制変位を与える。

この強制変位量は、糸切れがない場合は膜材料が等張力状態である。

従って本解析は、等張力状態にある膜材料の糸が1本、3本、・・・、27本と切れた場合の膜応力集中がどのようになるかを数値シミュレーションを行った場合とも考えられる。

図-49に前節の図-42で示したと同様のひずみ率と応力集中度の関係を示す。

この図は、ヨコ糸方向のひずみ率を一定(4.53%)とし、タテ糸方向のひずみ率を変化させた場合のひずみ・応力集中度曲線で、一軸引張(図-42)とはかなり異なる性状を示している。

二軸引張状態ではヨコ糸方向のひずみ率に対し、タテ糸方向のひずみが小さい場合すなわち一軸引張状態に近い場合は、応力集中度は大きい値を示しているが、タテ糸方向のひずみ率が増加するに従い、応力集中度は低下し、タテ糸方向ひずみ率が約1.2%以上になると応力集中度は、一定の値を示す。

この理由としては、タテ糸方向ひずみ率が約1.2%程度になるとヨコ糸とタテ糸のクリンプ交換が完了し、安定した力の釣合状態となり応力集中度も一定の値となると考える。

図-50は、以下の4種類のケースの糸欠損本数と応力集中度との関係をまとめて表したものである。

- ① 一軸引張(2点鎖線)
- ② 二軸引張(1点鎖線)
- ③ Hedgepeth式(実線)
- ④ 剛体(破線)

まず、一軸引張と二軸引張における応力集中度について述べる。

一軸引張の糸欠損本数と応力集中度の関係は、前節の図-46で示したように糸欠損幅と膜材料の幅との比率が増加するに従い、応力集中も急激に増加する。

これに対し、二軸引張では糸欠損幅と膜材料幅との比

率が20%の時に応力集中度は約3.0で一軸引張の約4.0に対し約75%とわずかに低い値を示している。この2つの曲線は糸欠損幅が膜材料幅の約20%を超えると一軸引張と二軸引張との応力集中度は大きい差が生じる。

その原因は、一軸引張状態の糸やコーティング材の動きは、中央欠損部の開口の拡大方向となるのに対し、二軸引張ではタテ糸またはヨコ糸のどちらかが開口拡大を抑制する働きをするためである。この二軸引張の開口部の糸およびコーティング材の挙動が一軸引張と大きく異なることは、図-53より明らかである。

図-50の破線は糸のみでコーティング材がない剛体を想定し、糸欠損本数に対応して残りの糸の引張力を増加させた場合の応力集中度を示したもので欠損糸上部のコーティング材からの引張力が付加されていない分だけ小さい値を示している。

図-50において糸欠損本数が全体の糸本数の約7.7%(図では5本)前後ではHedgepeth式と膜材料構造モデルの数値解析で得られた応力集中度にはほとんど差はみられないが糸欠損本数の全糸本数の割合(以後、糸欠損率という)がそれ以上になるとHedgepeth式による値がかなり大きくなる。

この理由は、Hedgepeth式は微小変形および線形材料を前提としたもので膜材料の糸欠損部の大きな変形や膜材料内部の3次元的な構造の変形なども他考慮していないためである。

このことから二軸引張における糸欠損の応力集中度は膜構造の欠損部の大きな変形や膜材料内部の3次元的な構造の変形などを考慮した膜材料構造モデルによる数値シミュレーションにより得られた値がより実際に近いものであると判断できる。

またこの結果からHedgepeth式で求められる値が場合によっては応力集中度の過大評価につながるため、本式を利用するにはGriffithの式をAndrewsらが行ったような修正項を付加する形で膜材料の糸欠損部の大変形を考慮した式を導く必要がある。

次に、糸欠損率と応力集中度に関して論じる。

図-50の一点鎖線で示す二軸引張の数値シミュレーション結果の応力集中度・糸欠損本数曲線では一軸引張と同様に糸欠損率の増加による応力集中度の増加率が約35%(図では23本)を超えると非線形的に増加する。この糸欠損率の増大による応力集中度の急激なる増加は、一軸引張(図-50の2点鎖線)では糸欠損率が

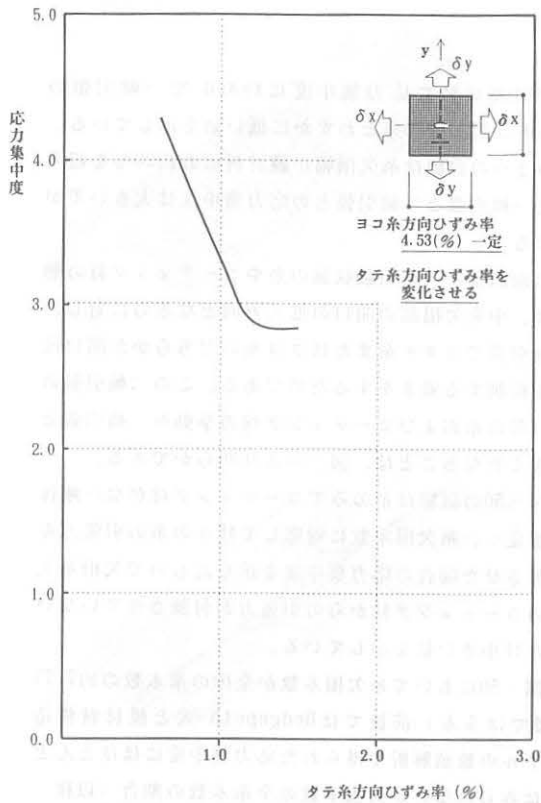


図-49 二軸引張における応力集中度
(タテ糸方向ひずみ率を変化させた場合)

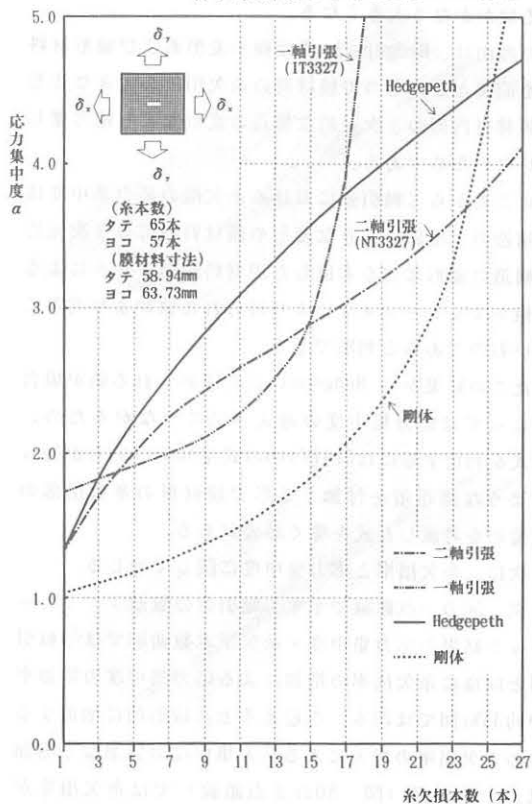


図-50 糸欠損本数と応力集中度

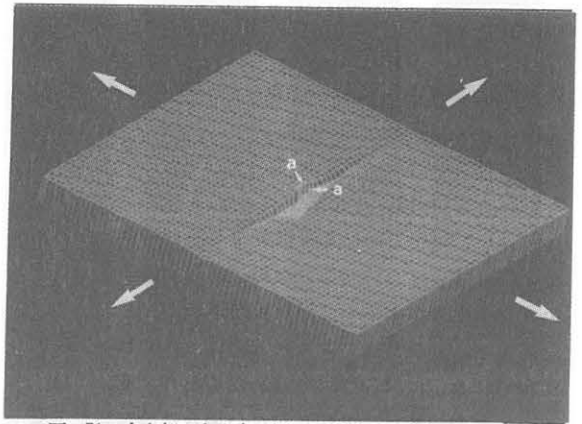


図-51 中央部の糸1本が切れた膜材料の応力分布図

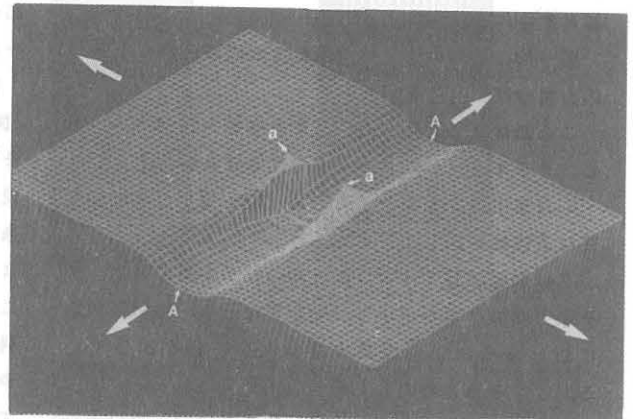


図-52 中央部の糸9本が切れた膜材料の応力分布図

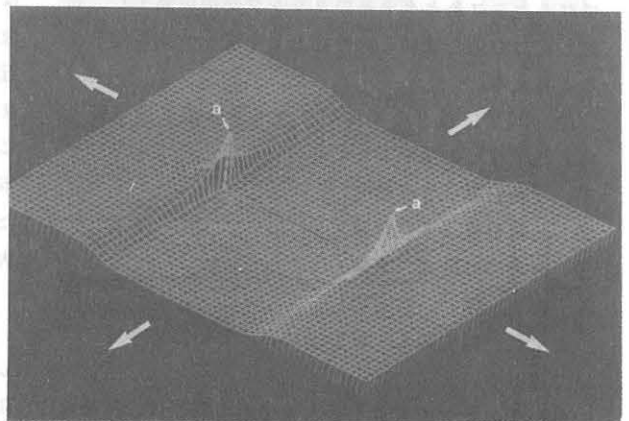


図-53 中央部の糸27本が切れた膜材料の応力分布図

約14%(図では9本欠損) ぐらいからはじまるのに対し約2.5倍ほど二軸引張状態の場合の方が糸欠損率に対し、安定していることがわかる。

Hedgepeth式は、直線の弾性糸が無限に近く平行して並んでいるものと考え、糸欠損率(ρ)が非常に小さい場合を仮定しており図-50の欠損率が1%(欠損糸本数/全本数)を超えた場合の応力集中度の比較検討には適正ではないことを考慮する必要がある。

すなわち、Hedgepeth式が使用できるのは1軸引張状態で欠損率が1%以下の場合である。

図-50からわかるように二軸引張状態で糸欠損率4.6%(図では3本欠損)以下の場合にHedgepeth式がかなり有用であり、膜面にしわが発生している一軸引張状態での応力集中評価には不適当であることがわかる。

図-51、図-52、図-53に中央部の糸欠損が1本(欠損率1.5%)、9本(欠損率13.8%)、27本(欠損率41.5%)の場合の糸とコーティング材の応力分布を示した。

図-51の糸欠損率1.5%(糸1本欠損)の状態では糸欠損部の応力分布の乱れはそれほど大きくなく膜材料の開口変位や側面変形による応力集中度の増大はほとんどない。

この状態は、Hedgepeth式の仮定に近いため、二軸引張での膜材料構造モデルの解析結果に近い値となる。

この糸欠損による応力分布の乱れは、欠損率が13.8%(図-52)となると大きくなり、欠損率が1.5%では見られなかったタテ糸およびヨコ糸の応力集中が発生する。

また、コーティング材の糸欠損周囲部分の応力分布にも乱れが生じる。図-53(糸欠損率41.5%)では、糸の欠損率13.8%(図-52)とは少し異なりヨコ糸方向の応力集中が低下し、それに対しコーティング材の糸欠損部周囲部分の応力分布の乱れが大きくなる。

8.3 膜材料片側に局部破断がある場合

8.3.1 一軸引張

本節においては、膜材料の片側に生じた局部破断部の応力状態がどのようになりその時の応力集中度はどれくらいの値になるかを解明するとともに、前節での中央部の局部破断での結果との比較により局部破断位置による応力状態や応力集中変化について論じる。

膜材料の片側に局部破断があるケースは、膜面端部や既に破れた膜面の破断ラインに対し直交する破断が

生じている場合に該当する。

図-54に前節の図-55と同様のひずみ率と応力集中度の関係を示す。

この図から明らかなように、膜材料のひずみ率が約1.8%以上になると(但し、試験材料No.①)応力集中度は一定の値を示す。この1.8%という値は膜材料A種(試験材料No.①)では主にコーティング材料が引張力を負担している状態で、タテ糸やヨコ糸のクリンプ交換が完了していない状態であるため糸にはほとんど引張力負担能力がない。

一般に、建設時に導入する初期張力は2~5 kg/cmでありその時の膜材料のひずみ率が0.5%以下であることからその時に生じる糸欠損部の応力集中度は安定した値をとらない。

図-54で示すようにひずみ率が1.0%以下では応力集中度は、2.0以上の大きな値をとる。

このことにより特に膜面取付時での膜面引込作業ではボルト孔などの欠損部での応力集中を留意する必要がある。この膜材料片側に局部破断を有する一軸引張における糸欠損率と応力集中度との関係を図-55の(b)に示す。このグラフから糸欠損率が0.14の時の応力集中度は1.8、また糸欠損率が0.41の時の応力集中度は5.0と大きな値になる。

局部破断が片側にある場合(b)の曲線と中央部にある場合(a)曲線との応力集中度の比較を行う。

中央欠損の場合、糸欠損率が約0.15を超えると応力集中度は急激に増大し糸欠損率が0.24の時の応力集中度は5.0となり、この値は片側欠損の約60%弱の糸欠損率で応力集中度が同程度となる。

すなわち、糸欠損率が同じ場合、局部破断位置が膜材料の中央部にある方が片側にあるより少ない糸欠損率でより大きな応力集中が起こる。

図-56(a)は、片側の7本が切れた場合の膜材料の変形形状(a)と糸の糸引張分布(b)を表したものである。糸引張力の最も大きい部分は、矢印のa部である。

局部破断部の応力集中度は、局部破断上部の切断された糸引張力の大小により概略であるが確認出来る。

図-57のd、e、fの糸引張線と同じ本数(3本)破断している図-47(j)のd、e、fの糸引張力線の形状(曲線のふくらみ)を比較することによりどちらの方が応力集中しているかわかる。

両図の比較から局部破断が膜材料中央部にあるほうが、

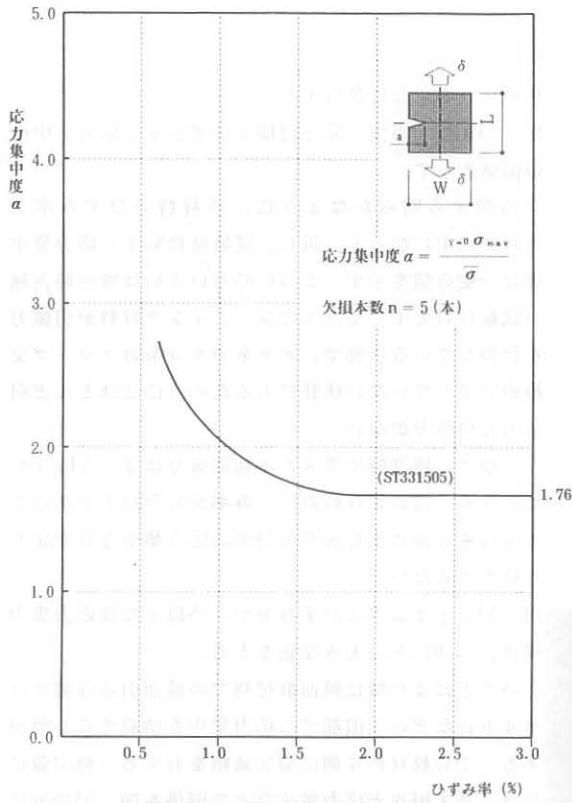


図-54 ひずみ率と応力集中度
(一軸引張、片側クラック)

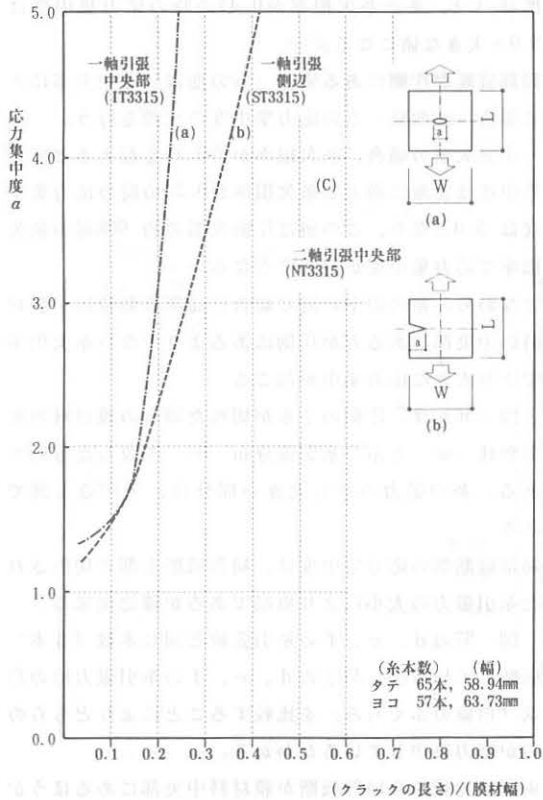


図-55 糸欠損率と応力集中度

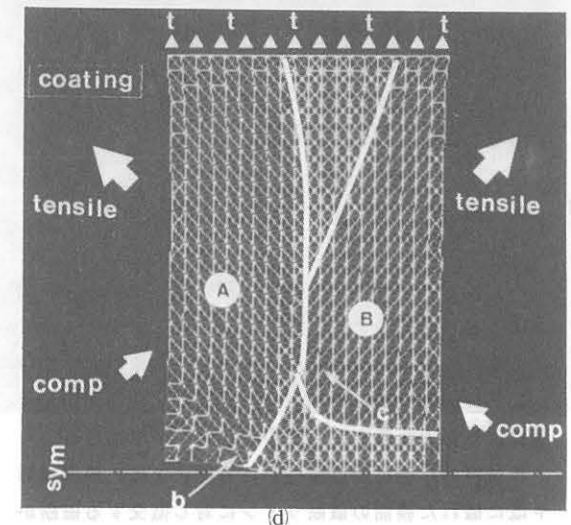
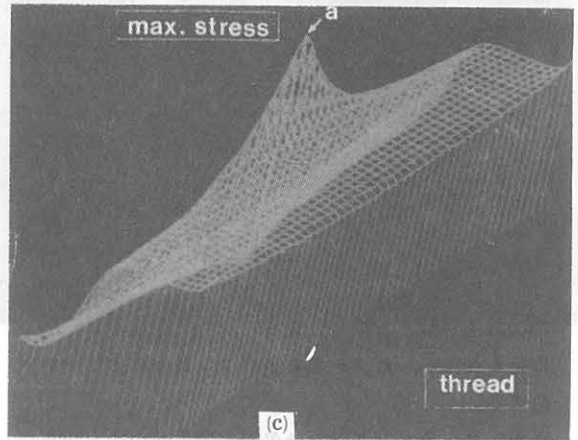
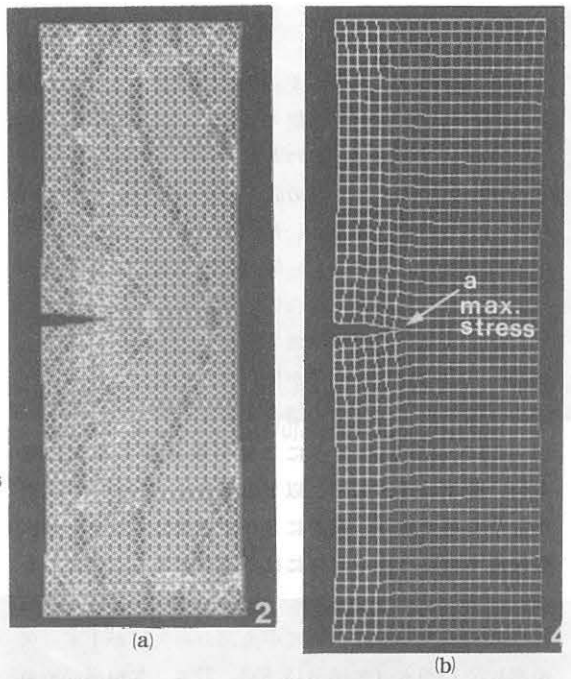


図-56 片側の糸7本が切れた膜材料の応力分布図

端部にあるより明らかに応力集中度が大きいことがわかる。

図-56、(d)の片側の糸7本が切れた膜材料(欠損率0.33)のコーティングの応力状態は全く異なったものとなる。局部破断上部の領域(A)では右下がり、そして領域(B)では左下がり、いずれも局部破断先端方向に引張応力が生じている。

図-56、(d)の片側の糸7本が切れた膜材料(欠損率0.33)のコーティングの応力状態は、局部破断上部の領域(A)では右下がり、そして領域(B)では左下がり、いずれも局部破断先端方向に引張応力が生じている。

このコーティング材の応力状態から図の矢印(tensile)られ、それに対し矢印(comp)方向に圧縮力が作用していることがわかる。

8.3.2 二軸引張

糸欠損率が約14%以下であれば応力集中度は欠損部位置や一軸、二軸引張に限らず約1.7以下である。これを実際の構造設計を考慮し、より概略的に表現すると糸欠損率が0.15以下の場合応力集中度は、2.0以下であるということもできる。

図-58は、二軸引張状態における膜材の周囲の一边の糸が9本破断している場合の応力集中状態を表したものである。

図-58(9本糸切れ)の1は糸張力を三次元表示し、高さで表したものでaの部分に糸に最大の張力が発生しており、最も応力が集中していることがわかる。

二軸引張状態では、一軸引張状態と比較し局部破断部周辺の応力集中領域が狭いことが図-58と図-56(c)との比較でわかる。

これは、局部破断面がタテ糸またはヨコ糸のいずれかの方向に引っ張られ、開口部を開こうとする力が作用するが引張方向と直交する方向の糸によりその作用が拘束されるためである。

この結果から二軸引張状態(特に、張力比1対1)は、応力集中や局部破断からの引裂伝播に対し一軸引張状態より安定しているとみることが出来る。

特に、膜面を一軸方向のみを仮止め固定した状態で長時間放置することはなるべく避け、二軸引張状態になるよう施工計画を立てる必要がある。

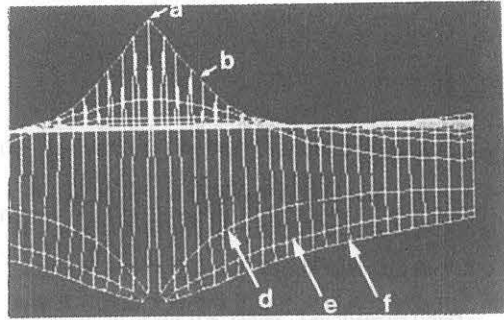


図-57 片側の糸3本が切れた膜材料の糸引張力図

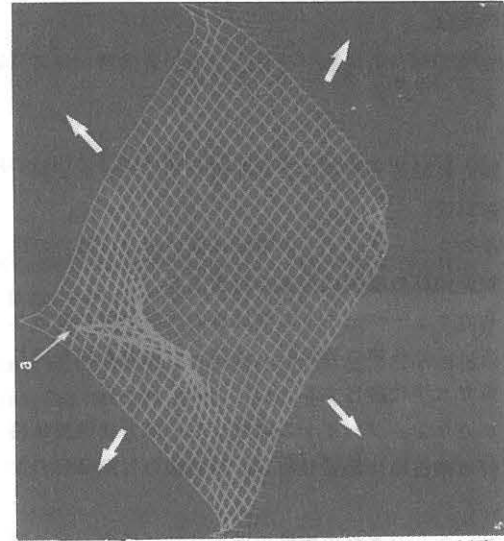


図-58 片側の糸9本が切れた膜材料の応力分布図

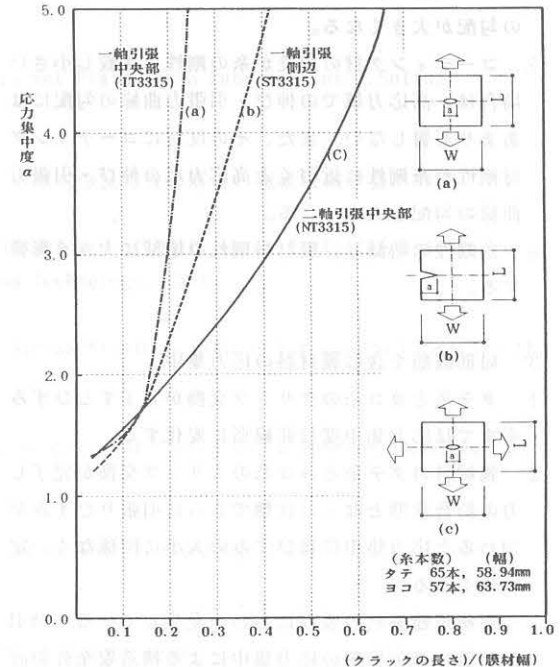


図-59 糸欠損率と応力集中度

9. 結 論

(1) 膜材料の構造

タテ糸、ヨコ糸の膜材料中心線からの高さ h_w 、 h_f は膜材料引張においては応力・ひずみに関係に大きく影響するため適切な値を解析用としなければならない。タテ糸、又はヨコ糸が大きな力を受けて波打った曲線から直線に近くなろうとする時のタテ糸・ヨコ糸交点の間隔 h は、

$$\frac{h_w + h_f}{2} \leq h \leq h_f + h_w \text{ となる。}$$

(2) 膜材料構造モデルによる数値シミュレーション (一軸引張)

- ① 糸のウェーブハイトの増減は低い応力状態での膜材料の伸びの増減に大きく影響する。
- ② 糸のウェーブハイトの増減量の比率が同じであれば高い応力状態の膜材料の伸び・引張力曲線も同じ比率で水平に移行する。
- ③ 糸のウェーブハイトの増減は高い応力状態では膜材料の剛性には影響しない。(曲線の勾配は変わらない。)
- ④ コーティング材の剛性の増加は特に低応力域の膜材料の剛性に大きく影響を与え、伸び・引張力曲線の勾配が大きくなる。
- ⑤ コーティング材の剛性が糸の剛性と比較的小さい場合は、高応力域での伸び・引張力曲線の勾配にはあまり影響しない。また、その反対にコーティング材剛性が糸剛性に近づくと高応力域の伸び・引張力曲線の勾配も大きくなる。
- ⑥ 糸剛性の増減は、膜材料剛性の増減に大きく影響する。

(3) 局部破断を含む膜材料の応力集中

- ① タテ糸とヨコ糸のクリンプ交換が完了するひずみ率までは応力集中度は非線形に変化する。
- ② 膜材料のタテ糸とヨコ糸のクリンプ交換が完了し力の釣合状態となった状態でさらに引張りひずみが増えると応力集中度はひずみの大小に関係なく一定の値をとる。
- ③ 膜構造建築物の膜面にしわの発生している一軸引張状態での欠損部の応力集中による構造安全性の評価を Hedgepeth式や二軸引張状態で生じる応力集中

度の結果をもとに行うことは場合によっては、非常に危険となる。膜構造の幅、または膜面支持間隔に対し、欠損部の幅がその25%を超えた場合は、一軸引張における応力集中度は二軸引張に対し数倍の値となるからである。

- ④ 膜材料の幅が同じである試験片における局部破断部の位置により応力集中度が異なる。膜材料の中央部に局部破断がある方が片側にあるものより大きな応力集中を生じる。
- ⑤ 一軸引張状態と二軸引張状態とでは膜材料構造を構成する糸やコーティング材の挙動が大きく異なる。一軸引張による開口部拡大は、強制ひずみの増大により進展する方向となるが、二軸引張では開口部拡大を抑制する力が破断ラインにそって加わる。その結果、応力集中は二軸引張状態にある膜材料の方が一軸引張状態にあるものより小さい。
- ⑥ 糸欠損本数が全体の糸本数の約 7.7%前後では Hedgepeth 式と膜材料構造モデルの数値解析で得られた応力集中度にはほとんど差はみられないが欠損本数の全糸本数の割合(以後、糸欠損率という)がそれ以上になると Hedgepeth式による値がかなり大きくなる。
- ⑦ 糸欠損率の増大による応力集中度の急激なる増加は、一軸引張では糸欠損率が約14%ぐらいからはじまることと比較すると約 2.5倍ほど二軸引張状態の場合の方が糸欠損率に対し、安定していることがわかる。Hedgepeth式は、直線の弾性糸が無限に近く平行して並んでいるものと考え、糸欠損率(ρ)が非常に小さい状態を仮定しており、欠損率が1%を超えた場合の応力集中度の比較検討には適当ではない。
- ⑧ 膜材料のひずみ率が約1.8%以上になると(但し、試験材料No①)応力集中度は一定の値をとる。
- ⑨ 糸欠損部分が膜材料の中央にあるか片側の辺にあるかで応力集中度が糸欠損率13~14%程度を境にして大きく異なる。
- ⑩ 一軸引張での応力集中は糸欠損部分が中央にある方が片側にある場合より大きい。

参考文献

- 1) F.T.Peirce : The Geometry of Cloth Structure, The Journal of the Textile Institute, 1937
- 2) S.Kawabata, M.Niwaほか : The Finite-Deformation Theory of Plain-Weave Fabrics Part I : The Biaxial-Deformation Theory, Journal of the Textile Institute, 1973
- 3) W.D.Freeston Jr., M.M.Platt ほか : Stress-Strain Response of Fabrics Under Two-Dimensional Loading, Technical Report AFML-TR-67-44, 1967
- 4) 浜本 章, 金原 勲ほか : マットおよびロービング布FRPの有効弾性係数, 日科技連複合材料研究会, 1974
- 5) B.Meffert : Festigkeits-und Weiterreißfestigkeitsprobleme bei Beschichteten Geweben, SFB'64, 1979
- 6) G.Menges, B.Meffert ほか : Spannungs-Deformations- und Versagensverhalten PVC-Beschichteter Polyestergewebe Unter Einachsiger und Biaxialer Beanspruchung, SFB'64, 1976
- 7) N.Dimitrov, H.J.Schock : Study on The Load-Extension Behavior of Coated Fabrics, With Special Reference to PTFE-Coated Glass-Fiber Fabric, Using The Meffert Model, LAS' 86, 1986
- 8) W.R.Spillers, R.B.Testa ほか : Analysis of Fabric Structures, Journal of the Franklin Institute Pergamon Press Ltd., 1978
- 9) R.B.Testa, N.Stubbs ほか : Bilinear Model for Coated Square Fabrics, Journal of the Engineering Mechanics Division, 1978
- 10) N.C.Huang : Finite Biaxial Extension of Partially Set Plain Woven Fabrics, Int.J.Solids Structures, 1979
- 11) 平井恒夫, 仙波卓弥 : 糸の不均質圧縮変形を考慮した平織布伸長特性の解析, 繊維機械学会, 1980
- 12) J.W.S.Hearle, C.M.Leach ほか : Ballistic Impact Resistance of Multi-Layer Textile Fabrics, University of Manchester Institute of Science and Technology, 1981
- 13) K.Y.Tan, M.Barnes : Numerical Representation of Stress/Strain Relations for Coated Fabrics, City University, 1984
- 14) K. Ishii : Stress Strain Equations for Non-Linear Behavior of Coated Woven Fabrics IASS Symp., Osaka/Japan, 1986
- 15) J.H.Byun, T.W.Chou : Modelling and Characterization of Textile Structural Com-Posites a Reblew, Journal of Strain Analysis, 1989
- 16) 西川 薫 : 織布特性を考慮した膜構造の非線形解析に関する研究, 1989
- 17) A.A.Griffith, M.Eng ほか : The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Material and Physical Sciences, 1921

- 18) J.M.Hedgpeth : Stress Concentrations in Filamentary Structures, National Aeronautics and Space Administration Washington, 1961
- 19) J.Skelton, N.J.Abbott : Crack Propagation in Woven Fabrics, Coated Fabrics Technology, 1973
- 20) 南 宏和 : クラックを有するコーティング織物の強度, 日本複合材料学会, 1978
- 21) 豊田 宏, 鳥居 壯ほか : テフロン膜材の破断モードとその寿命推定に関する考察, 信頼性, 安全性シンポジウム発表報文集, 1989
- 22) 小松 清 : 膜構造建築物の信頼性に関する研究(その1) 膜材料の破壊性状の研究, (株)日本膜構造協会 "膜構造研究論文集 '88", 1988
- 23) 小松 清 : 膜構造建築物の信頼性に関する研究(その2) 膜材料の破壊力学的考察, (株)日本膜構造協会 "膜構造研究論文集 '89", 1989
- 24) 小松 清, 松田 豊ほか : 膜材料の引裂伝播について, 日本建築学会学術講演梗概集, 1989
- 25) M.Ansell : Microanalysis of Airhouse Membranes, The design of air-supported structures, Bristol, 1984

Simulation of stress deformation of membrane materials
having cracks using a woven structure model

Kiyosi Komatsu *1
Kazuo Ishii *2

It is well known that the dynamic properties of membrane materials used for membrane structures are of strong geometrical non-linearity and strong material non-linearity, and studies have been made in various forms since the olden days in order to elucidate the factors for occurrence of such complicated non-linearity. The authors have been conducting testing of membrane materials from microscopic, macroscopic, static and dynamic viewpoints in order to elucidate this important subject.

The authors constructed a new structure model of membrane materials having properties close to the dynamic properties of actual membrane materials as a result. This paper describes comparative examination of the results obtained by conducting stress deformation analysis of membrane materials having cracks using this structure model with the results of conducted with actual membrane materials.

*1 Dr. Eng. Taiyo Kogyo Corporation

*2 Professor, Department of Architecture, Faculty of Engineering, Yokohama National University