多段線形近似による膜の材料非線形解析のための
弾性パラメタ算定法

南　宏和*1
山本千秋*1
瀬川信哉*1
河野義裕*1

梗　概

PTFE コーティング・ガラス繊維膜材料は顕著な材料非線形特性を持つ。この膜材料が使用される膜構造建築物のより精密な応力解析のために、その非線形性を考慮する実用的方法を提案した。その方法は、多段線形近似法である。この膜材料が2軸伸長をするときには、たて糸方向の応力（T_x）とひずみ（ε_x）、よこ糸方向の応力（T_y）とひずみ（ε_y）の値はこの材料の特性として定まっているある曲面上の値として生じる。まず、この曲面の全領域を、多段に分割された応力範囲の一つの段の幅と、あらかじめ設定された応力比（T_x/T_y）の二つの値の区間で指定することができる小さな領域に分ける。次に、この小さな領域内では応力とひずみの関係は線形と仮定する。そして、この小さな領域でのみ使われる値として弾性パラメタを最小2乗法で算定する。膜の応力解析では、多くのこの小さな領域ごとで算定され記憶された弾性パラメタを用いて数値計算が進められる。一辺が40cmの正方形のPTFE-ガラス繊維膜の空気圧を受けるときの撓みの実験値と比較することによって、この多段線形近似法の妥当性を検証することができた。

1. はじめに

膜構造建築物の代表的な膜材料である PTFE コーテッド・ガラス繊維平織物（PTFE は polytetrafluoroethylene。以下ではこの膜材料を A 種膜[1]と呼ぶ）が特有の顕著な異方性と材料非線形性を持つことは今や周知のことといえよう。著者らは、たて糸方向応力とよこ糸方向応力の比（応力比と呼ぶ）を一定に維持しつつ2軸引張を与える試験法で2軸応力-ひずみ曲線（2軸伸長曲線と呼ぶ）を測定し、いろいろな応力比での2軸伸長曲線を示すことによってその顕著な異方性と材料非線形性の存在を報告してきた[2)3)]。最大応力がA種膜の1軸破断応力のおよそ20％の応力（29.4KN/m（30kgf/cm））に達するまで荷重を与える場合の初回の2軸引張の2軸伸長曲線をみると、異方性はもちろん、伸長曲線の応力の全域において非線形性が顕著であることがわかる。このうち非線形性は比較的低い応力の範囲（0～10KN/m）において特に顕著である。そして、その非線形性の様子は応力比に依存していることが容易に理解される。このような2軸伸長特性は、基布であるガラス繊維布の平織構造体（たて糸とよこ糸が3次元構造を成している）の2軸変形特性、およびガラス繊維とコーティング材料（PTFE 樹脂）の粘弾性変形特性が複合してあらわれるものであろうと考えられる。

A 種膜の非線形性のこのような顕著さが重視されて、膜構造応力解析にその材料非線形性を考慮する方法が研究されて来ており、国内でもいくつかの研究結果が報告されている。これらの研究のうちたとえば加藤ら[4)]、西川ら[6)]、南ら[7)]のものは、基本的にはコーティング材料と糸を線材に置き換えてモデル化した単位の平織構造の2軸変形で非線形2軸応力-ひずみ関係を近似的に表そうとする研究である。従って、材料パラメタは基本的には単位平織構造モデルの構成メンバーに関するものとなる。これに対し、たとえば南[3)]、日野ら[5)]の研究は、コーテッド平織物を単一の連続体膜とみなし、多段線形近似手法を適用して2軸応力-ひずみ関係を表そうとしたものであって、材料パラメタは普通の弾性理論で取り扱われる弾性パラメタと考えてよいものである。さらに、河野の研究[8)]も連続体膜に関するものであって、たて糸方向およびよこ糸方向の応力を、たて糸方向ひずみとよこ糸方向ひずみを加えた3次元空間での曲面としてとらえ、ひずみの4次多項式を用いると2軸引張試験結果と良好な対応を示すこ

*1 太陽工業（株）空間技術研究所

とを述べている。

膜材料についての材料非線形性の取扱いに関する現在までの研究の状況は以上のとおりであるが、我が国内に関する限り、工業上でその材料非線形性が何らかの方法により考慮されて膜構造応力解析が実施されることは未だ常態化していない。このような状況に対応して著者らは、現在工業上で日常的に実施されている膜構造の線形弾性応力解析の有限要素法プログラムに容易に組み込むことができる、かつ2軸伸長曲線に対する十分な近似ができる材料非線形性の取扱い法を追究してきた。本報告は、その追究の結果を述べるものであって、既報[3)]の弾性パラメタ算定法を改良した結果を述べるものである。そして、既報と同様に、A 種膜の平面矩形膜としての空気圧に対する撓みの実験を行い、提案する弾性パラメタ算定法を検証した結果を述べることにする。

前述のとおり著者らの一人は多段線形近似による膜構造の材料非線形解析のための弾性パラメタ算定法を既に報告している[3)]。この算定法は、代表的に選んだ有限個の応力比の下での2軸伸長曲線に対して多段線形近似を行い、その各段でどの応力比の伸長曲線にも共通の値として弾性パラメタを算定する方法であった。直交異方性弾性理論が適用できて弾性パラメタが膜のどこにおいても同じであれば、膜の任意の位置のたて糸方向（直角座標系の x 座標方向とする）の伸長応力（T_x）あるいはよこ糸方向（同 y 座標方向）の伸長応力（T_y）は、たて糸方向のひずみ（ε_x）とよこ糸方向のひずみ（ε_y）だけで定まる。そうすると、任意の2軸変形状態の［T_x、T_y、ε_x、ε_y］の成す関係は、二つの直角座標系 T_x-T_y-ε_x および T_x-T_y-ε_y それぞれの3次元空間に張られる曲面（以下これらの曲面を2軸伸長特性曲面と呼ぶ。A 種膜の顕著な非線形性を表すこの曲面は特有の曲がり方をしている）上の点として表し得ることになる、つまり、任意の応力比の下での2軸伸長曲線上の点の動きは、これら二つの2軸伸長特性曲面それぞれの上での点の動きとして解釈してもよい。これら特性曲面の上で、上述の代表的に選んだ有限個の応力比のうち隣合う値をもつ二つの応力比をとりあげ、これらが一定である境界線で囲まれた領域を考えることができる。さらにこの領域が、多段に分割した T_x あるいは T_y のある段の値と次の段の値とに対応する境界線で分割される小さな領域を考えることができる。この小領域は当然曲面であるが、これが適当に小さければ平面であると近似することもできる。本報告の弾性パラメタ算定法は、上述の二つの2軸伸長特性曲面上のこのような小領域を平面とみなし、この平面を近似するように最小2乗法を適用して弾性パラメタを算定する方法である。これに対し、既報[3)]の方法は、2軸伸長特性曲面上の、多段に分割した T_x あるいは T_y のある段と次の段の値に対応する境界で囲まれ、全応力比の伸長曲線を含む領域の曲面を平面に近似するように最小2乗法を適用して弾性パラメタを算定するものであった。つまり、本報告の弾性パラメタ算定法は、隣合う値の応力比で囲まれた2軸伸長特性曲面の限られた領域で多段線形近似をするものであって、既報のパラメタ算定法は全応力比を含む同曲面の領域で同様の近似を行う方法である。本報告のパラメタ算定法は、［T_x、T_y、ε_x、ε_y］が成す顕著な非線形関係を非常に狭い領域に限定して線形近似をしようとするもので、線形近似誤差をより小さくしようとする方法である。

2. A 種膜の2軸伸長特性

A 種膜の試料の2軸引張試験（室温 20℃）を実施して2軸伸長曲線を測定した結果を図1に示す。ここで縦軸の応力は変形前の単位幅あたりの力すなわち公称応力で、単位は [KN/m]（=[1.02kgf/cm]）である。また横軸のひずみは公称ひずみである。この試料は既報[3)]の A 種膜試料と同じ商品名のものであり、1軸引張破断時の応力とひずみ、および各糸方向の織糸密度は既報の Table 1 の値とほとんど同じである。また、試料の寸法および2軸引張試験の方法（定応力比2軸引張方式）も既報に説明したとおりである。採用した応力比

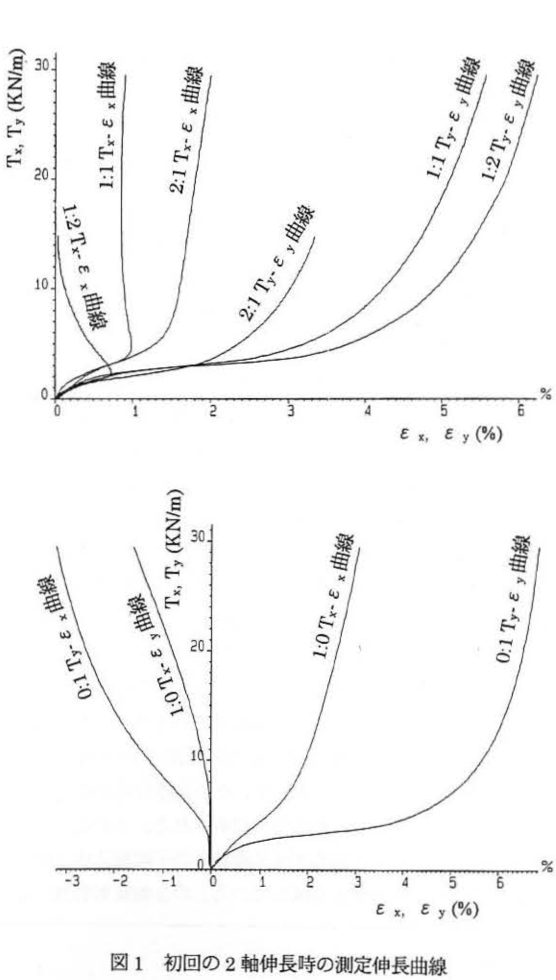
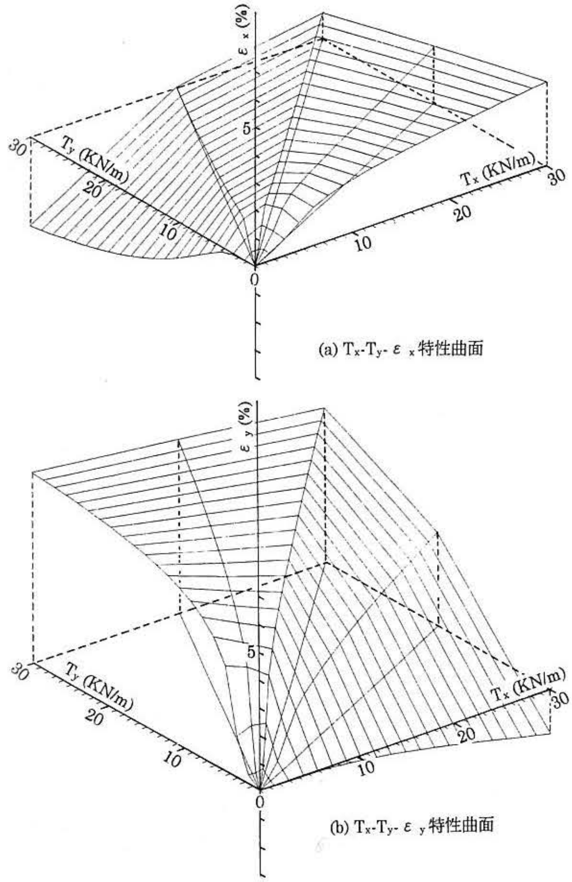


図1　初回の2軸伸長時の測定伸長曲線

条件は、$T_x : T_y$が1：1、2：1、1：2、1：0および0：1である（1：0と0：1は正しい表し方ではないが、便宜上それぞれたて糸方向、よこ糸方向1軸伸長を表すことにする）。なお、図1の2軸伸長曲線は初回の2軸引張をした時の結果である。この図の各応力比条件下の伸長曲線を見て、顕著な異方性と非線形性が改めて理解され、さらに後者についてはその様子は応力比に依存することが理解される。続いて2軸引張荷重をいったん0にもどし、再び同様の2軸引張をする。このことを繰り返すと、2軸伸長曲線は残留ひずみを残して収斂する。本報ではこの収斂した伸長曲線の図示を省くが、これは初回引張の伸長曲線に比べると、非線形性がかなり小さくなって直線的と見られるものである。しかし、低応力域（0～3KN/m）においては依然としてはっきりとした非線形性を残すものである[10]。

さて、このように顕著な非線形性をもつA種膜については、2軸変形が任意に進む場合、［T_x、T_y、ε_x、ε_y］はどのように変化してゆくものであるかを理解することは、図1の表現からでは難しい。そこで、図2のように、図1の各応力比条件下の伸長曲線上の測定データ（T_x、T_y、ε_x、ε_y）を、T_x-T_y-ε_x直角座標系とT_x-T_y-ε_y直角座標系でプロットし、プロットした点を結んで得られる曲面を表示した。こうすれば、この曲面上の位置によって任意の2軸変形状態で生じる［T_x、T_y、ε_x、ε_y］をグラフィックに表現することができる。この二つの座標系での曲面を前述のとおり2軸伸長特性曲面と呼ぶことにする。2軸引張試験では応力比が採用したいくつかの一定値に維持されるように進むが、T_x-T_y平面上ではその過程は原点を通る直線で示されることになる。図2ではその直線を各応力比について示している。



(a) T_x-T_y-ε_x特性曲面

(b) T_x-T_y-ε_y特性曲面

図2　初回の2軸伸長時の2軸伸長特性曲面

図2の二つの2軸伸長特性曲面は、本来この自然現象として著しい屈曲をもつこともあろうが、不自然に凸凹があってはおかしいものである。従って、図1の2軸伸長曲線のデータから作成したこの曲面が異常に凸凹したものであれば、まず第一に2軸引張試験結果の大きいばらつきがその原因になっている、第二に測定自体が正しく行われていないことが考えられる。その点、図2の2軸伸長特性曲面には特に異常な凸凹はなく、そのようなばらつきや測定の問題はないとみてよいと考えられる。

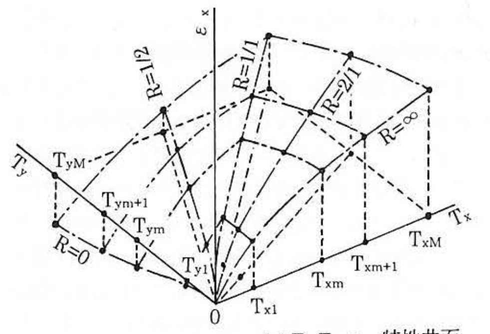
3. 多段線形近似による弾性パラメタ算定法

T_x-T_y-ε_xおよびT_x-T_y-ε_y座標系での2軸伸長特性曲面の模式図（図3）をみながら、多段線形近似による弾性パラメタ算定法を次に説明する。

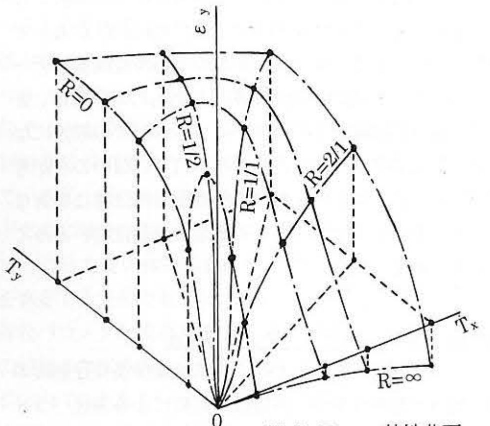
2軸伸長特性曲面の最大のT_x、T_yをそれぞれT_{xM}、T_{yM}とかく。図2の特性曲面の場合は、たて糸方向、よこ糸方向ともに同じ最大応力までの2軸引張試験結果に基づいているから、$T_{xM}=T_{yM}$である。そして、各応力比条件での2軸伸長曲線の応力とひずみの全区間を、たて糸方向とよこ糸方向についてそれぞれM段に分割する。その分割点の応力とひずみの値をそれぞれ、たて糸方向について$0, T_{x1}, T_{x2}, \cdots, T_{xm} \cdots$、および$0, \varepsilon_{x1}, \varepsilon_{x2}, \cdots, \varepsilon_{xm}, \cdots$とかき、よこ糸方向について$0, T_{y1}, T_{y2}, \cdots, T_{ym} \cdots$、および$0, \varepsilon_{y1}, \varepsilon_{y2}, \cdots, \varepsilon_{ym}, \cdots$とかく。

応力比の値を$R=T_x/T_y$で定義する。2軸引張試験に採用した各応力比条件のRについて、これが一定となる2軸伸長特性曲面上の線を図3に示している。

こうして、2軸伸長特性曲線上で、Rが一定の線で挟まれる領域、およびその中の応力あるいはひずみの多段の分割区間に対応するさらに小さな領域を指定することができることになる。その小領域を線形近似区域と呼ぶことにし、図4に示した特性曲面上のACDBで示す。図4は、T_x-T_y-ε_xあるいはT_x-T_y-ε_y座標系の2軸伸長特性曲面について示すもので、同図(a)は応力比が$1 \leqq R$に属する特性曲面上の線形近似区域を、同図(b)は$0 \leqq R < 1$に属する特性曲面上の線形近似区域を示す。$1 \leqq R$に属する線形近似区域を囲む応力比一定境界線に対応する応力比の値のうち小さい方をR_i（図4(a)のAからBに到る曲線に対応）、大きい方をR_{i+1}（図4(a)

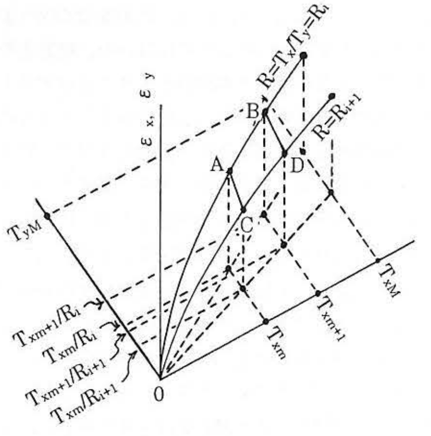


(a) T_x-T_y-ε_x 特性曲面

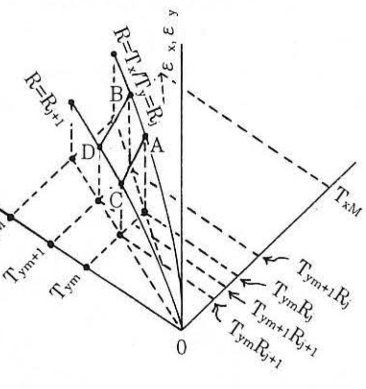


(b) T_x-T_y-ε_y 特性曲面

図３　２軸伸長特性曲面（模式図）



(a) 応力比が $1 \leqq R$（$=T_x/T_y$）の特性曲面上の線形近似区域



(b) 応力比が $0 \leqq R < 1$ の特性曲面上の線形近似区域

図４　２軸伸長特性曲面上の１区画（模式図）

でＣからＤに到る曲線に対応）と表す。また、$0 \leqq R < 1$ に属する線形近似区域を囲む応力比一定境界線に対応する応力比は大きい方を R_j（図4(b)のＡからＢに到る曲線に対応）、小さい方を R_{j+1}（図4(b)でＣからＤに到る曲線に対応）と表す。

以上のように線形近似区域を決める応力、ひずみ、多段分割の段数および応力比の記号を定めると、図4(a)あるいは(b)に示した位置Ａ～Ｄの応力とひずみ［T_x、T_y、ε_x、ε_y］は、

［$1 \leqq R$ の場合］

$$\left.\begin{array}{l} A\ (T_{xm},\ T_{xm}/R_i,\ \varepsilon_{xm},\ \varepsilon_{ym}) \\ B\ (T_{xm+1},\ T_{xm+1}/R_i,\ \varepsilon_{xm+1},\ \varepsilon_{ym+1}) \end{array}\right\} R=R_i$$
$$\left.\begin{array}{l} C\ (T_{xm},\ T_{xm}/R_{i+1},\ \varepsilon_{xm},\ \varepsilon_{ym}) \\ D\ (T_{xm+1},\ T_{xm+1}/R_{i+1},\ \varepsilon_{xm+1},\ \varepsilon_{ym+1}) \end{array}\right\} R=R_{i+1} \qquad (1)$$

［$0 \leqq R < 1$ の場合］

$$\left.\begin{array}{l} A\ (R_jT_{ym},\ T_{ym},\ \varepsilon_{xm},\ \varepsilon_{ym}) \\ B\ (R_jT_{ym+1},\ T_{ym+1},\ \varepsilon_{xm+1},\ \varepsilon_{ym+1}) \end{array}\right\} R=R_j$$
$$\left.\begin{array}{l} C\ (R_{j+1}T_{ym},\ T_{ym},\ \varepsilon_{xm},\ \varepsilon_{ym}) \\ D\ (R_{j+1}T_{ym+1},\ T_{ym+1},\ \varepsilon_{xm+1},\ \varepsilon_{ym+1}) \end{array}\right\} R=R_{j+1} \qquad (2)$$

と表せることになる。そして、これら(1)および(2)の応力とひずみは定応力比条件での２軸引張試験による２軸伸長曲線（図１）上の m および m+1 段分割点の値として得られる。ここで、線形近似区域の２軸伸長曲面（図４のＡ、Ｂ、Ｃ、Ｄを頂点とする曲面）を近似として平面とみなす。そして、この平面内の任意の位置の応力とひずみ［T_x、T_y、ε_x、ε_y］が

$$\begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{xx} & E_{xy} \\ E_{xy} & E_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \end{Bmatrix} \qquad (3)$$

なる線形関係式を満たすと考える。すなわち、この式を線形近似区域で適用する線形応力-ひずみ構成方程式とする。

(3)式は、前述のように平面近似をした線形近似区域で成立する式である。つまり、この方程式は(1)あるいは(2)に示したＡ、Ｂ、Ｃ、Ｄ点での応力とひずみでも近似的に満たされる。すると、弾性パラメタ E_{xx}、E_{yy}、E_{xy}、e_x、e_y を、Ａ、Ｂ、 C、D 点におけるその応力とひずみを代入した(3)式の右辺と左辺の間の差の2乗の合計が最小になるように決定することができる。そのような最小2乗誤差の合計をSとかくとこれは、A、B、C、D 点のことをそれぞれ k=1、2、3、4 で表すことにして

$$S=\sum_{i=1}^{4}\left[\left(T_x-E_{xx}\varepsilon_x-E_{xy}\varepsilon_y-e_x\right)^2+\left(T_y-E_{xy}\varepsilon_x-E_{yy}\varepsilon_y-e_y\right)^2\right]_i \qquad (4)$$

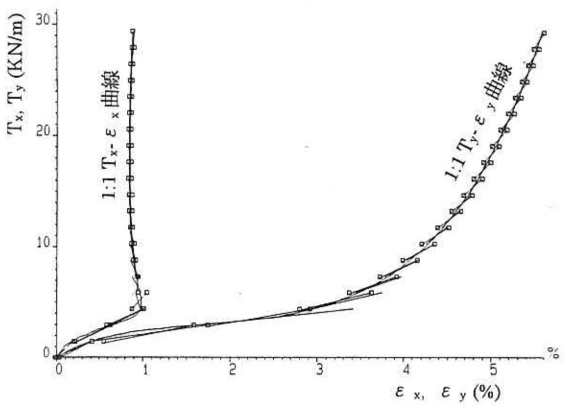
である。ここで[ ]は、この項の［T_x、T_y、ε_x、ε_y］として、たとえば i=1 であれば(1)の A（T_{xm}、T_{xm}/R_i、ε_{xm}、ε_{ym}）を用いることを意味する。この S を最小にしているのであるから、近似の弾性パラメタは方程式

$$\frac{\partial S}{\partial E_{xx}}=\frac{\partial S}{\partial E_{yy}}=\frac{\partial S}{\partial E_{xy}}=\frac{\partial S}{\partial e_x}=\frac{\partial S}{\partial e_y}=0 \qquad (5)$$

を満たす。すなわち、(5)式を解いて近似弾性パラメタが算定される。

4. A 種膜への多段線形近似と弾性パラメタ

実は図 2 の 2 軸伸長特性曲面は、各応力比の伸長曲線に M=20 すなわち 20 段線形近似をして線形近似区域を作りこれをメッシュとして作図したものである。各メッシュ（線形近似区域）について(5)式より弾性パラメタを算定し、それらを用いて(3)式が表す伸長曲線を、測定した伸長曲線（図 1）



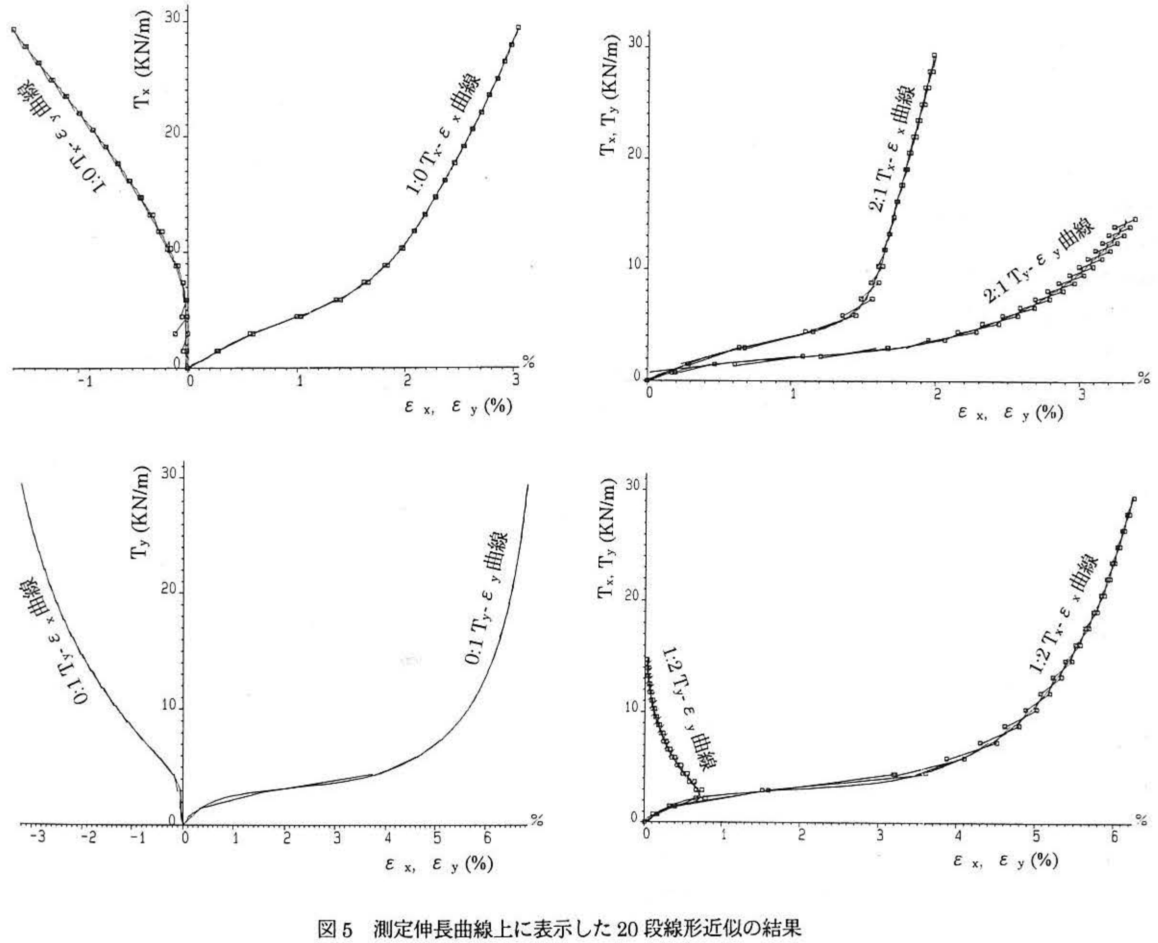


図 5　測定伸長曲線上に表示した 20 段線形近似の結果

と比較できるように示したのが図5である。この図において、実線の連続曲線は図1の2軸伸長曲線で、各段で引いた短い直線のうち □ 印の付いたものはその測定2軸伸長曲線に対して応力比の大きい領域側につながる線形近似区域の弾性パラメタによることを表し、□ 印の付かないものは同様に応力比の小さい領域側にある線形近似区域の弾性パラメタによることを表している。各段でのこれらの短い応力-ひずみ直線をみると、同じ段でも隣合う線形近似区域の間ではその傾きにかなりの差のあることがわかる。もし2軸伸長特性曲面がもともと平面であれば、この応力-ひずみ直線の傾きの差は理論的にはないはずである。このような傾きの大きな差は、その伸長曲線の近傍では2軸伸長特性曲面の曲がり方が小さくないことによる。しかし、この傾きの差の存在による線形近似誤差の問題は、応力比条件と段数をより多くとることによってある程度小さくできる。その意味では、図5の応力比条件の数と20段程度による多段線形近似であれば、直観的には実用上は妥当な線形近似が可能と思われる。

5. 弾性パラメタ算定法の平面膜解析への応用

図5に示した多段（20段）線形近似による各線形近似区域で算定された弾性パラメタを用いて、一辺40cmの正方形平面A種膜（図1の2軸引張試験に用いたものと同じA種膜である。たて糸、よこ糸は正方形の辺に平行である）の空気圧（p）による中央点の変位（w_c）を有限要素法（FEM）プログラム[9]で計算した。このプログラムの解析理論は、updated Lagrangian法に基づいて荷重増分法を適用するもので、定ひずみ三角形要素を用いるものである。空気圧力は増分ステップごとに膜面の法線方向に作用する。この圧力増分は2mmAqとした。変形の対称性を考慮して、平面膜の1／4部分を解析の対象とした。その要素分割数は128である。数値解の収斂結果がこの分割数で十分であることは、別途確認した。

このプログラムでは、荷重増分ステップごとに、各三角形要素において一回前のステップで計算された応力の大きさと応力比から2軸伸長特性曲面上の位置を定めて線形近似区域を特定するようになっている。線形近似区域が定まると、その弾性パラメタが記憶されているので新しい増分ステップでの計算をすることができる。なお、せん断応力とせん断ひずみの関係は線形と仮定し、せん断弾性係数は49KN/mと定めた。

このような解析結果を実験（写真1）の結果とともに図6に示す。実験は図1の2軸引張試験と同様に室温20℃で実施し、800mmAqまでの空気圧による初回の変形時の中央変位をダイヤルゲージで測定した。20段線形近似による中央変位の解析値は実験値によく一致していると言える。なお、参考に図6の空気圧が2000mmAqのときの解析の応力値は、膜中央でたて糸、よこ糸方向にそれぞれ10.4KN/m、4.9KN/mであった。

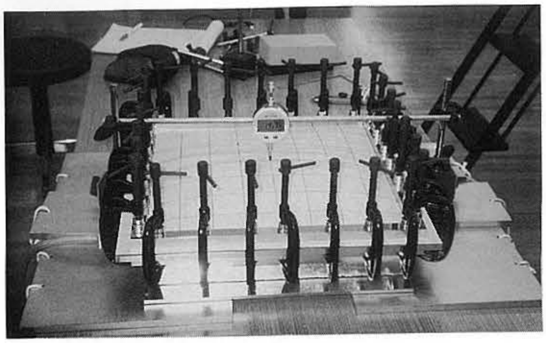


写真1　平面膜撓み実験

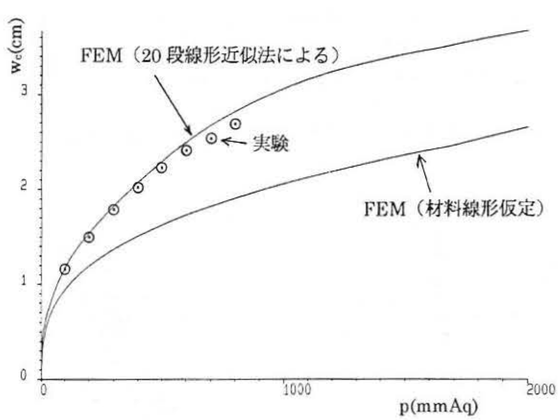


図6　正方形平面膜の中央変位（w_c）と圧力（p）の関係

図6には参考として材料線形を仮定した場合の解析値の一例を示しておく。この場合の弾性パラメタは、図1の各伸長曲線上で応力が0と最大応力（29.4KN/mあるいは14.7KN/m）の点を結んだ割線に対して、最小2乗法を用いる既報[2]の方法で算定したものである。言うまでもなく、図1のように顕著な非線形性をもつと線形仮定の弾性パラメタの算定結果は割線の採り方つまり主観に大きく依存するので、この解析結果を実験や20段線形近似の結果と比較することにはあまり意味がない。

6. 結論

本論に提示した多段線形近似による弾性パラメタ算定法は、小さな寸法の平面膜という単純な形態の膜の変形実験の結果（これには、単純な膜といっても試験体は接合部や皺をもたず初期撓みを正確に0に設定できるものであるので、膜材料自体の変形特性だけによる精密な結果として測定され得る特長がある）との比較によってではあるが、顕著な材料非線形性をもつA種膜を用いた膜構造の材料非線形応力解析に適用可能であると判断できる。

本弾性パラメタ算定法の適用途として、一般的には、A 種膜を始めとして顕著な非線形性を有する膜材料を用いる膜構造の外力に対する応力解析が考えられる。他に適用途として、膜構造物の適正な裁断パタンの算定のために初期膜応力の設定値を考慮して行う変形解析が考えられる。この解析への適用は、A 種膜では初期応力の一般的な大きさまでの応力範囲での材料非線形性は図 1 から明らかなように特に顕著であるから、非常に有効であろうと考えられる。

謝辞

K.K.Choong 博士（太陽工業委託研究員）には FEM 有限変形解析に関する貴重な討論の機会を得たので感謝する。

参考文献

1) 日本膜構造協会：特定膜構造建築物技術基準、1987

2) 南宏和：膜構造物に使用されるコーティング平織物の二軸変形特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、1984、pp.303-304

3) 南 宏和：PTFE コーテッド・ガラス繊維布（膜材料 A 種）の非線形伸長曲線への多段線形近似とその応用、日本建築学会構造系論文報告集、第 436 号、1992、pp.13-19

4) 加藤史郎、Pongpo Petch：材料非線形性を考慮した膜構造解析－織構造格子モデルによる構成方程式の適用－、膜構造研究論文集（日本膜構造協会）、No.8、1994、pp.27-33

5) 日野吉彦、石井一夫：膜構造解析における材料非線形性の評価、膜構造研究論文集、No.8、1994,pp.35-49

6) 西川 薫、石井一夫、小竹達也：織布特性を考慮した膜構造の応力•変形解析法、膜構造研究論文集、1989、pp.41-55

7). 南 宏和、中原義雄：有限要素法を応用したコーティング平織物解析法、材料（日本材料学会）、Vol.29、1980、pp.916-921

8) 河野義裕：データ選定法による膜構造の非線形弾性解析、膜構造研究論文集、No.8、1994、pp.51-54

9) 瀬川信哉、三井康司、笹川 明：膜材の応力－ひずみ曲線からクリープを分離した材料定数評価に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.41B、1995、pp.259-269

10) 南 宏和： PTFE コーテッド・ガラス繊維布（膜材料 A 種）の種々の力学的特性とその評価、膜構造研究論文集、No.5、1991、pp.61-70

A Method of the Determination of Elastic Constants for Membrane Material Nonlinear Stress Analysis Using a Multi-step Linear Approximation

Hirokazu Minami *1

Chiaki Yamamoto *1

Sinya Segawa *1

Yoshihiro Kono *1

SYNOPSIS

PTFE coated glass fiber fabric exhibit considerable material non-linear behaviors. A feasible method which incorporates one of major static non-linear effects is presented, and makes it possible to analyze more accurately these membrane structures. The method employs multi-step linealized approximation. The orthogonal stresses(T_x,T_y) and strains(ε_x, ε_y) of the coated fabric forms surfaces on the way of the biaxial deformation. Firstly, the whole surfaces are divided into a large number of small quadrilaterals which are specified by two higher and lower stress levels and two stress ratios(T_x/T_y). Secondly, linearized stress-strain relationships are given by a method of least squares for the respective quadrilaterals. The elastic parameters determined in this way are stored and used in the stress analysis of membrane structures. The feasibility of this approximation method is shown by an experiment that the central deflection of a 40cm by 40cm square PTFE coated fabric under uniform air pressure is measured.

*1 Center for Space Structures Research, Taiyo Kogyo Corporation