# 応力緩和後およびクリープ後の膜の弾性応力解析に適合する応力－ひずみ曲線の測定法

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・ガラス繊維など膜材料は非線形粘弾性の特性を持つ。この膜材料の初期応力導入後に生じる応力緩和現象の後の応力、あるいはクリープ現象の後のひずみを弾性解析で予測しようとする場合、その弾性解析に適用できる２軸応力 - ひずみ曲線が必要である。その測定法を提案した。その測定法は、応力緩和後の２軸応力 - ひずみ曲線を測定する段階的応力緩和試験法、およびクリープ後の２軸応力 - ひずみ曲線を測定する段階的クリープ試験法である。これら試験法を見出すために、まず膜材料に多段線形粘弾性仮定をして理論的推論を行い、緩和後あるいはクリープ後の応力 - ひずみ関係式を推定した。そして次に、その応力 - ひずみ関係式に近似的に適合するように段階的試験法の実用的な手順を考えた。

## 1. はじめに

膜構造建築物の設計プロセスでは、与えられた境界条件と力学的条件（初期応力条件など）に適合するように膜の初期形状が数値解析で求められる。次に、膜材料のロール幅や糸方向などを考慮に入れて、その初期形状曲面が分割される。分割された曲面は平面に展開され、さらにこの平面形は、予め定められた縮小率がたて糸方向およびよこ糸方向に対応する寸法に掛けられ縮められる [1)]。この縮められた平面形は膜の裁断パタンと呼ばれるものである。

裁断パタンは接合され、建設現場でその接合された膜が境界構造体に定着される。この定着作業の間に、時間が費やされつつ膜が伸張される。この時の膜の伸長は、張力膜構造物の場合は膜周囲での機械的引張力により、空気膜構造の場合は膜面へ作用する内圧力によって生じる。膜は伸長されるので、定着の直後の膜には初期応力と初期ひずみが与えられる。建設現場での膜の定着作業は初期応力導入と呼ばれる。

さらに初期応力導入から時間が経過する（外力作用は考えない）と、膜は粘弾性体 [4)]であるので張力膜構造物の膜応力は減少する傾向を示す。同様に、空気膜構造物の膜のひずみは増大する傾向を示す。前者は応力緩和現象で、後者はクリープ現象である。なお、張力膜構造物の初期応力の存在は、周囲境界ケーブルや膜押さえケーブルで維持される場合が多い。それゆえ、実際の膜のそのような応力減少は完全な応力緩和現象として生じるのではなく、ひずみの増大を伴いつつの緩和現象として生じるであろう。つまり、張力膜構造物の場合は応力緩和とクリープの傾向を同時に示しながら応力の減少とひずみの増大が生じるであろう。

恒久膜構造建築物に使用されることが多い PTFE コーティング・ガラス繊維平織物（A 種膜材料）は、測定された２軸応力状態での応力緩和曲線（図 5）およびクリープ曲線（図 6）が示すように、粘弾性を顕著に示す膜材料である [4)]。この膜材料がまた顕著な非線形の応力 - ひずみ曲線 [2)]を示すことを考慮すると、その粘弾性は非線形粘弾性である筈である。

この膜材料に対して、設計での応力・ひずみ解析が従来から弾性解析として行われている。つまり膜を弾性体と仮定するのであるから、弾性解析に適合する２軸応力 - ひずみ曲線をどのような試験法で測定するのが適切かが問題となる。膜構造物が外力を受ける場合の応力解析に関しては、そのような適合する試験法の提示もすでに成されている [6)]。ここで、初期応力導入の直後の応力・ひずみ弾性解析を実施する場合を考えると、その適切な応力 - ひずみ曲線は、導入途上の応力の量的および時間的プロセスをよく模擬する２軸引張試験によれば良いであろう。

一方、初期応力導入後に十分に時間が経過して応力緩和現象やクリープ現象が生じなくなった状態（それぞれ応力緩和後およびクリ

*[1] 太陽工業（株） 空間技術研究所

ープ後の状態と呼ぶ）の膜の応力とひずみの解析を初期応力解析と同じ弾性解析法で行うことは容易ではない。その理由は、応力緩和後あるいはクリープ後の応力 - ひずみ曲線が明らかでないからである。この問題に対応して、加藤ら [3]は、初期応力導入の途上およびその後の応力 - ひずみ状態を一種の非線形粘弾性応力 - ひずみ応答の結果として解析する方法を開発した。その方法では、膜を連続体と仮定するのではなく、弾塑性線材と仮定する織糸とせん断･線形粘弾性モデルと仮定するコーティング材料とから構成された織格子モデルが解析に用いられている。一方本論では、膜を連続体と仮定して応力緩和後の応力あるいはクリープ後のひずみの弾性解析を可能にすることを目指すことにし、その弾性解析に適合する２軸応力 - ひずみ曲線の測定のための試験法を提案することを目的とした研究の報告を行う。

応力緩和後およびクリープ後の応力、ひずみの推定が可能となれば、初期応力導入の方法（たとえば繰り返し応力導入の回数あるいは導入応力値のレベル）についての検討や裁断パタンの縮小率についての検討をより効果的に行うことが出来るであろう。

膜材料の粘弾性特性に関する研究報告は多くなく、例えば南ら [4)5)]、加藤ら [3)]の報告がある。膜構造物の粘弾性を考慮した応力解析に関する研究報告は非常に少ないとみられ、著者等が知るのは加藤ら [3)]の論文のみである。

## 2. 応力緩和後およびクリープ後の膜の応力 - ひずみ構成方程式に関する考察

本節では、膜の１軸伸長モデルを用いて標記の考察を行う。そのために先ず初期応力導入の直後に、一定ひずみを維持する応力緩和が開始する場合を仮定する。そして緩和現象が実際上生じなくなるまでの時間を $t_{ar}$ と表わす。一方、初期応力導入の直後に、一定応力を維持するクリープが開始する場合を仮定する。そして、クリープ現象が実際上生じなくなるまでの時間を $t_{ac}$ と表わす。初期応力を $T_p$、その対応するひずみを $\varepsilon_p$、初期応力導入の所要時間を $t_p$ と書く。

### 2.1 線形粘弾性体仮定

膜は線形粘弾性体でボルツマンの重ね合わせ原理に従うと仮定する。

#### 2.1.1 応力緩和後の応力 - ひずみ構成方程式

初期応力導入によって、膜構造物の膜のある位置の応力が 0 から初期応力 $T_p$ まで増加した後に、一定ひずみ $\varepsilon_p$ の条件での応力緩和現象によって減少する理想化された応力時刻歴を想定する。そして、図 1 に示す応力時刻歴を持つ膜の１軸伸長モデルを取り上げて考察する。

ここで、時刻 t の時の応力を $T=T(t)$、ひずみを $\varepsilon=\varepsilon(t)$ と表わす。初期応力導入開始時刻を $t=0$ とする。この時に T と $\varepsilon$ は 0 とする。$t=t_p$ は初期応力導入の終了時刻で、この時の応力とひずみがそれぞれ $T_p$ と $\varepsilon_p$ である。また、時刻 $t_p$ から図 1 に示す応力緩和が始まって、時間 $t_{ar}$ が経過した時に応力緩和後の状態となると考える。そして、応力緩和後の弾性定数を $E_r$（relaxed modulus）と書き、応力緩和弾性定数を E(t)（stress-relaxation modulus）と書く。

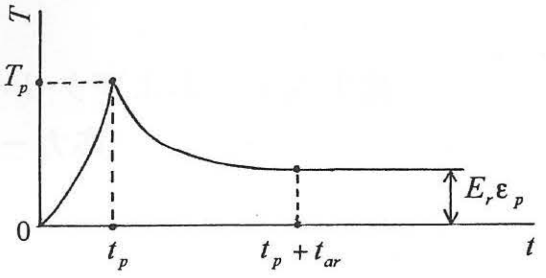


図１　１軸伸長膜の応力緩和応答

以上の線形粘弾性モデルの応力緩和応答はボルツマンの重ね合わせ原理によって

$$\begin{aligned} T(t) &= E_r\,\varepsilon_p + \int_0^t \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} E(t-\tau)\,d\tau \\ &= E_r\,\varepsilon_p + \int_0^{t_p} \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} E(t-\tau)\,d\tau + \int_{t_p}^{t} \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} E(t-\tau)\,d\tau \qquad (t_p < t) \end{aligned} \tag{1}$$

と表される。 $t_p$ より後ではひずみは一定（$\varepsilon_p$）であるから、上式の右辺第 3 項は 0 である。従って、上式は

$$T(t) = E_r\,\varepsilon_p + \int_0^{t_p} \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} E(t-\tau)\,d\tau \tag{2}$$

となる。ここで、$t=t_p+t_{ar}$ の時の緩和応力を $T_{pr}$ と書く。この応力は(2)式により、

$$T_{pr} = E_r\,\varepsilon_p + \int_0^{t_p} \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} E(t_p + t_{ar} - \tau)\,d\tau \tag{3}$$

と表される。

図 5 は PTFE コーティング･ガラス繊維平織物の２軸応力状態での応力緩和試験の結果を示す。この緩和曲線を参考にし、実際の初期応力導入の場合を考慮すると、$t_p \ll t_{ar}$ とみなすことができるであろう。そうすると、応力緩和後の応力緩和弾性定数は 0 であるから、

$$E(t_p + t_{ar} - \tau) \approx E(t_p + t_{ar}) = 0 \tag{4}$$

となる。従って、(3)式は

$$T_{pr} = E_r\,\varepsilon_p \tag{5}$$

となる。この結果は $T_{pr}$ および $E_r$ の定義から考えて当然のものである。

(5)式は、線形粘弾性体の１軸伸長膜の応力緩和後の任意のひずみ $\varepsilon_p$ に対応する応力 $T_{pr}$ を与える構成方程式であると考えることができる。

### 2.1.2 クリープ後の応力 - ひずみ構成方程式

空気膜構造物は建設現場において空気圧によってインフレートされる。この作業の所要時間を図1に示した $t_p$ と考えることにする。つまり、本節では1軸伸長膜に時刻 $t_p$ の時に初期応力 $T_p$、初期ひずみ $\varepsilon_p$ が達成されるとする。そして、その後に一定応力 $T_p$ の条件でのクリープ現象によってひずみ $\varepsilon_p$ が増大する理想化された時刻歴を想定する（図2）。

ここで、初期応力導入開始時刻 t=0 で応力とひずみはともに0とする。また、時刻 $t_p$ からクリープが始まって、時間 $t_{ac}$ が経過した時にクリープ後の状態となると考える。即ち、 $t_p+t_{ac}$ より後は一定ひずみ･応力状態になると考える。瞬時弾性応答を与える弾性定数を $E_u$ と書き、クリープコンプライアンス関数を J(t)と書く。

以上の線形粘弾性モデルの1軸クリープ応答はボルツマンの重ね合わせ原理によれば

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= \frac{T_p}{E_u}+\int_0^t \frac{dT(\tau)}{d\tau}J(t-\tau)d\tau \\ &= \frac{T_p}{E_u}+\int_0^{t_p} \frac{dT(\tau)}{d\tau}J(t-\tau)d\tau+\int_{t_p}^{t} \frac{dT(\tau)}{d\tau}J(t-\tau)d\tau \qquad (t_p<t)\end{aligned} \tag{6}$$

と表される。 $t_p$ より後では応力は一定（$T_p$）であるから、上式の右辺第3項は0である。従って、(6)式は

$$\varepsilon(t) = \frac{T_p}{E_u}+\int_0^{t_p} \frac{dT(\tau)}{d\tau}J(t-\tau)d\tau \qquad (t_p<t) \tag{7}$$

となる。ここで、$t=t_p+t_{ac}$ の時のクリープひずみを $\varepsilon_{pc}$ と書く。このひずみは(7)式により、

$$\varepsilon_{pc} = \frac{T_p}{E_u}+\int_0^{t_p} \frac{dT(\tau)}{d\tau}J(t_p+t_{ac}-\tau)d\tau \tag{8}$$

と表される。

図6は図5と同じ膜材料の2軸応力状態でのクリープ試験の結果を示す。このクリープ曲線を参考にすると、この膜材料の $t_{ac}$ をどの程度と考えればよいかの考察ができる。本論では仮定として $t_p \ll t_{ac}$ が成立すると考えて進めることにする。そうすると、

$$J(t_p+t_{ac}-\tau)\approx J(\infty) \tag{9}$$

と表わすことが出来る。従って(8)式は

$$\varepsilon_{pc} = \left(\frac{1}{E_u}+J(\infty)\right)T_p \tag{10}$$

である。

(10)式は、線形粘弾性体の1軸伸長膜のクリープ後の任意の応力 $T_p$ に対応するひずみ $\varepsilon_{pc}$ を与える構成方程式であると考えることができる。

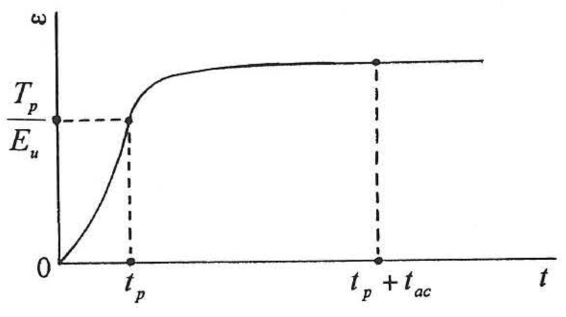


図2　1軸伸長膜のクリープ応答

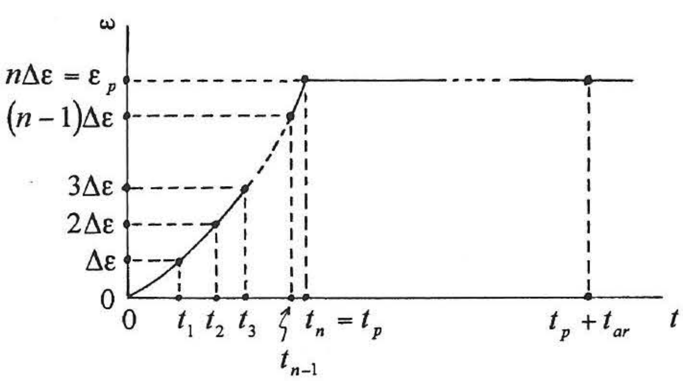


図3 段階的ひずみが与えられた1軸伸長膜のひずみ時刻歴

### 2.2 多段線形粘弾性仮定

以下では、膜は非線形粘弾性体であると仮定する。ただし、増加する応力あるいはひずみの段階的区間を定め、その各区間では前項に示した線形粘弾性体であると仮定する。

### 2.2.1 応力緩和後の応力 - ひずみ構成方程式

再び、図1に示した応力の時刻歴を持つ1軸伸長膜を取り上げて考察し、この膜が非線形粘弾性体である場合は(1)および(2)式がどのような形になるかを調べる。ここでは、0～$t_p$ の時間で与えられるひずみ $\varepsilon_p$ は n 等分されて段階的に与えられるものと考える（図3）。すなわち、

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon_p}{n} \tag{11}$$

とする。そして、それぞれの $\Delta\varepsilon$ づつの増分の区間でボルツマンの重ね合わせ原理が成立すると仮定する。

ここで、ひずみの最初から最後まで各増分区間での大きさに対応する緩和後の弾性定数をそれぞれ $E_{r1}, E_{r2}, \cdots, E_{rn}$ と書き、応力緩和弾性定数を $E_1(t), E_2(t), \cdots, E_n(t)$ と書く。すると、図3に示したひずみ履歴に対応する応力緩和応答は、(1)式を参考にすると

$$T(t)=\sum_{i=1}^{n}\left\{E_{ri}\Delta\varepsilon+\int_{t_{i-1}}^{t_i}\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}E_i(t-\tau)d\tau\right\}+\int_{t_p}^{t}\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}E_n(t-\tau)dt \quad (t_p<t,\ t_0=0) \tag{12}$$

と表されると考えられる。この式は、右辺の第2項がひずみ一定の条件から0であるので、(2)式と同様に

$$T(t)=\sum_{i=1}^{n}\left\{E_{ri}\Delta\varepsilon+\int_{t_{i-1}}^{t_i}\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}E_i(t-\tau)d\tau\right\} \quad (t_p<t) \tag{13}$$

となる。t が $t_p+t_{ar}$ のときの緩和応力 $T_{pr}$ は(13)式より

$$T_{pr}=\sum_{i=1}^{n}\left\{E_{ri}\Delta\varepsilon+\int_{t_{i-1}}^{t_i}\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}E_i(t_p+t_{ar}-\tau)d\tau\right\} \quad (t_p<t) \tag{14}$$

と表される。再び(4)式と(11)式を考慮すると、(14)式は

$$T_{pr}=\sum_{i=1}^{n}E_{ri}\Delta\varepsilon=\frac{\varepsilon_p}{n}\sum_{i=1}^{n}E_{ri} \tag{15}$$

となる。ここで、n→∞と考えると、

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}E_{ri}\ \overset{n=\infty}{\to}\ E_{rv}(\varepsilon_p) \tag{16}$$

と書くことができるであろう。そうすると、(15)式は、

$$T_{pr}=T_{pr}(\varepsilon_p)=E_{rv}(\varepsilon_p)\varepsilon_p \tag{17}$$

と表されることになる。

(17)式は、非線形粘弾性体の1軸伸長膜の応力緩和後の任意のひずみ $\varepsilon_p$ に対応する応力 $T_{pr}$ を与える応力 - ひずみ構成方程式と考えることができる。これは非線形方程式である。

2.2.2 クリープ後の応力 - ひずみ構成方程式

図2に示したひずみの時刻歴をもつ1軸伸長モデルを考察し、この伸長モデルが非線形粘弾性体である場合は(6)および(10)式がどのような形になるかを調べる。ここでは、0~$t_p$ の時間で与えられる応力 $T_p$ は n 等分されて段階的に与えられるものと考える（図4）。

すなわち、

$$\Delta T=\frac{T_p}{n} \tag{18}$$

そして、それぞれのΔTづつの贈分の区間でボルツマンの重ね合わせの原理が成り立つと仮定する。ここで、応力の最初の贈分区間から最後の贈分区間での各段階のその大きさに対応する瞬時弾性応答を与える弾性定数を $E_{u1}, E_{u2},\cdots,E_{un}$ と書き、クリープコンプライアンス関数を $J_1(t), J_2(t),\cdots,J_n(t)$ と書く。すると、図6に示した応力

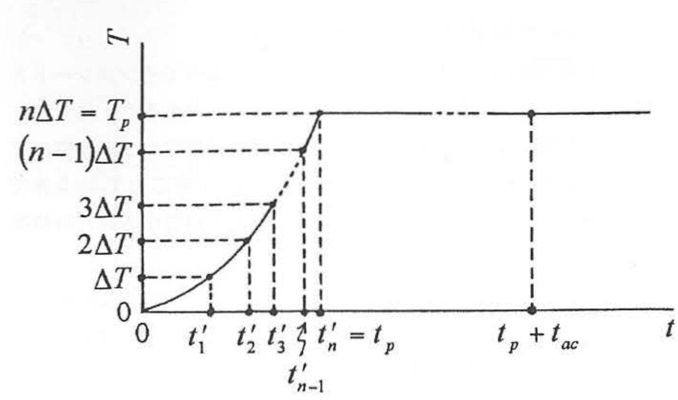


図4 段階的に応力が与えられた1軸伸長膜の応力時刻歴

履歴に対応するクリープ応答は、(6)式を参考にすると、

$$\varepsilon(t)=\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{\Delta T}{E_{ui}}+\int_{t'_{i-1}}^{t'_i}\frac{dT(\tau)}{d\tau}J_i(t-\tau)d\tau\right\}+\int_{t_p}^{t}\frac{dT(\tau)}{d\tau}J_n(t-\tau)d\tau \quad (t_p<t,\ t_0=0) \tag{19}$$

と表されると考えられる。この式は、右辺の第2項が応力一定の条件から0であるので、(17)式と同様に、

$$\varepsilon(t)=\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{\Delta T}{E_{ui}}+\int_{t'_{i-1}}^{t'_i}\frac{dT(\tau)}{d\tau}J_i(t-\tau)d\tau\right\} \quad (t_p<t) \tag{20}$$

となる。t が $t_p+t_{ac}$ の時のクリープひずみ $\varepsilon_{pc}$ は(20)式より、

$$\varepsilon_{pc}=\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{\Delta T}{E_{ui}}+\int_{t'_{i-1}}^{t'_i}\frac{dT(\tau)}{d\tau}J_i(t_p+t_{ac}-\tau)d\tau\right\} \tag{21}$$

と表される。再び(18)と(19)式を考慮すると

$$\varepsilon_{pc}=\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{1}{E_{ui}}+J_i(\infty)\right\}\Delta T=\frac{T_p}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{1}{E_{ui}}+J_i(\infty)\right\} \tag{22}$$

となる。ここで、n→∞と考えると、

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{1}{E_{ui}}+J_i(\infty)\right\}\ \overset{n=\infty}{\to}\ \frac{1}{E_u(T_p)} \tag{23}$$

と書くことができるであろう。そうすると、(22)式は、

$$\varepsilon_{pc}=\varepsilon_{pc}(T_p)=\frac{T_p}{E_u(T_p)} \tag{24}$$

と表されることになる。

(24)式は、非線形粘弾性体の1軸伸長膜のクリープ後の任意の応

力 Tp に対応するひずみ $\varepsilon_{pc}$ を与える応力 - ひずみ構成方程式と考えることができる。これもまた非線形方程式である。

## 3. 応力緩和後およびクリープ後の応力 - ひずみ曲線の測定

前節での考察によれば、1軸伸長をする非線形粘弾性膜の応力緩和後あるいはクリープ後の応力 - ひずみ構成方程式は、それぞれ(17)および(24)式で表されることが示された。膜構造物の初期応力導入直後の膜は一般に2軸応力状態にある。本節では、この膜がその後に応力緩和現象を起こすと仮定する場合は、緩和後の弾性解析のための応力 - ひずみ曲線をどう推定すればよいかについて述べる。また、この膜がその後にクリープ現象を起こすと仮定する場合は、クリープ後の弾性解析のための応力 - ひずみ曲線をどう推定すればよいかについて述べる。これらの応力 - ひずみ曲線が得られれば、それぞれを、応力緩和後の膜応力は初期応力に対してどの程度の大きさに減少するか、クリープ後のひずみは初期ひずみに対してどの程度の大きさに増大するかを推測する弾性解析に適用することができる。

### 3.1 緩和後の2軸応力 - ひずみ曲線の測定法

(15)式の第2辺の意味を考えると、2軸応力状態にある膜の緩和後の応力 - ひずみ曲線は、次のような段階的応力緩和試験の実施により近似的に得ることができると考えられる。

まず、2軸引張試験体に通常の引張速度[6]（たとえばクランプ間速度 4mm/min.[2]）でたて糸方向に $\Delta T_x$、よこ糸方向に $\Delta T_y$ の応力を与える。ここで、$\Delta T_x$、$\Delta T_y$ は、試験条件として初期に定める2軸応力比（たて糸方向応力：よこ糸方向応力）に従って与えるたて糸方向最大応力を $T_{xm}$、よこ糸方向最大応力を $T_{ym}$ として、それぞれ $T_{xm}/n$、$T_{ym}/n$ とする。次に、$\Delta T_x$、$\Delta T_y$ を与えた直後に両糸方向のひずみを固定する。そして、応力の十分な緩和が達成されるまでの時間 $t_{ar}$ だけ応力緩和状態に放置する。そして以後、試験体を新しいものに取り替えて、$\Delta T_x$、$\Delta T_y$ を与えて後に $t_{ar}$ 時間の応力緩和状態に放置するそのような操作を、$T_{xm}$、$T_{ym}$ での応力緩和が十分に達成される段階まで繰り返す。このような n 段階の応力緩和試験によって、各段階の $t_{ar}$ 時間の経過後の応力 - ひずみの点を連続的に結ぶ曲線を得る。この曲線が、(17)式に対応する、ある応力比条件下の応力緩和後の応力 - ひずみ曲線である。

以上の試験法で実用上の問題となるのは、各段階ごとに試験体を新しく取り替えることである。つまり、段階の数（n）だけ試験体を用意しなければならない。この問題の対策として、どの段階にも共通に一つの試験体を用いるようにする方法が考えられる。しかし、この対策は、(15)式第2辺の意味からみて妥当とはいえない。従って、便宜的に一つの試験体を用いた段階的応力緩和試験による緩和後の応力 - ひずみ曲線は新たな近似誤差を生む測定法による曲線であって、これが設計での解析に適用可能かどうかは何らかの方法で検証する必用がある。

### 3.2 クリープ後の2軸応力 - ひずみ曲線の測定法

(22)式の第2辺の意味を考えると、2軸応力状態にある膜のクリープ後の応力 - ひずみ曲線は、次のような段階的クリープ試験の実施により近似的に得ることができると考えられる。

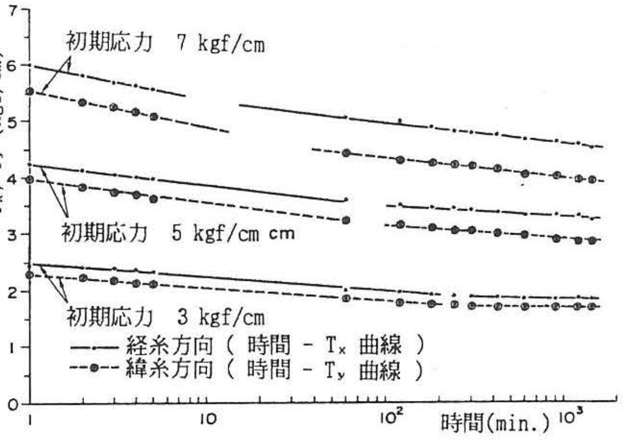


図5 2軸応力緩和曲線（初期応力比 1:1、室温 21℃）[4]

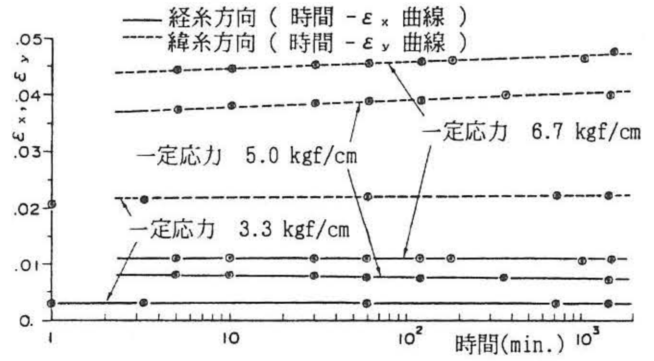


図6 2軸クリープ曲線（応力比 1:1、室温 21℃）[4]

段階的試験法の手順は前項の試験法の場合と同様である。ただし、各段階において $\Delta T_x$、$\Delta T_y$ を与えた後はクリープが達成されるまでの十分な時間 $t_{ac}$ だけクリープ状態に置く。このような n 段階のクリープ試験によって、各段階の $t_{ac}$ 時間の経過後の応力 - ひずみの点を連続的に結ぶ曲線を得る。この曲線が、(24)式に近似的に対応する、ある応力比条件下のクリープ後の2軸応力 - ひずみ曲線である。

この段階的クリープ試験に関しても、どの段階にも共通に一つの試験体を用いることが実用にかなっている。そして、その場合に得られる応力 - ひずみ曲線の適合性は、前項と同じ理由により検証される必用がある。

## 4. 段階的応力緩和試験および段階的クリープ試験の実施について

まず、段階的応力緩和試験について述べる。図5に示した測定曲線はある PTFE-ガラス繊維平織物膜の室温 21℃における1日（1440分）間の2軸応力緩和特性を示す。この図の初期応力（前述の $T_{xm}$、$T_{ym}$）がたて糸、よく糸方向ともに 5kgf/cm の場合（すなわち初期応力比 1:1）の緩和曲線を外挿して考察すると、$t_{ar}$ としてかなりの日数をみる必要のあることがわかる。ここでは、同種の膜材料[2]の緩和後の応力 - ひずみ曲線の極めて大まかな推定の例として、$t_{ar}$ を2日と定めた場合の、一つの試験体を用いる段階的応力緩和試験の結果を図7に示す。比較のために通常の2軸引張試験による応力 -

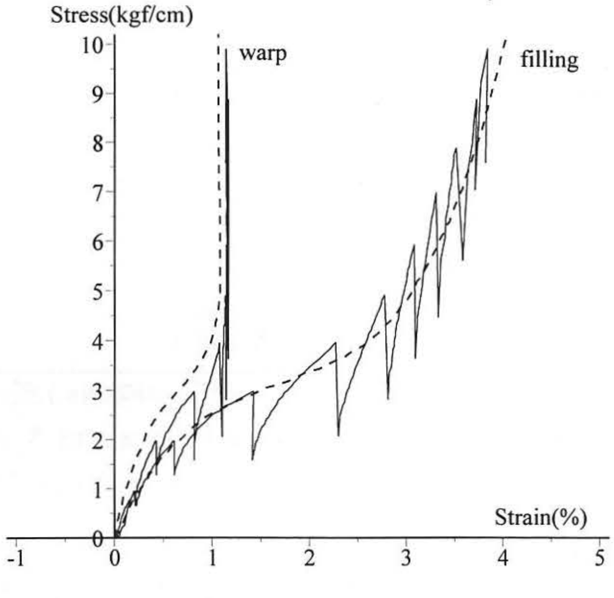


図7　PTFE-ガラス繊維平織物膜[2)]の一つの試験体を用いる段階的応力緩和試験による2軸応力 - ひずみ関係（初期応力比 1:1、室温 11～23℃、点線は通常の2軸引張試験）

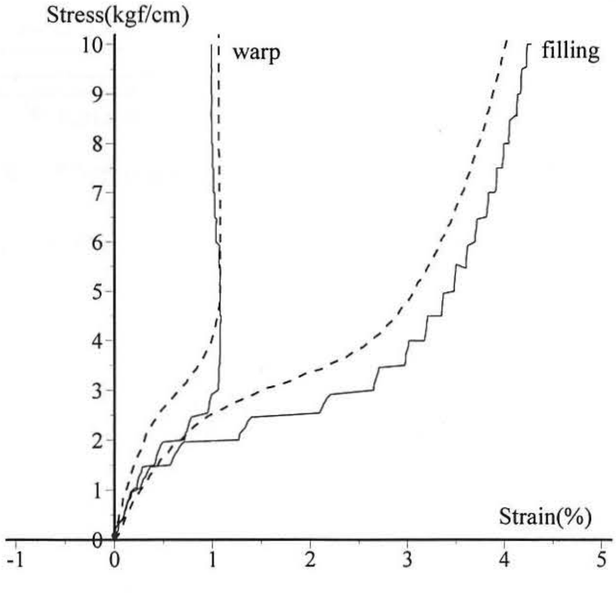


図8　PTFE-ガラス繊維平織物膜[2)]の一つの試験体を用いる段階的クリープ試験による2軸応力 - ひずみ関係（応力比 1:1、室温 17～25℃、点線は通常の2軸引張試験）

ひずみ曲線[2)]を合わせて示した。これらの測定は、室温 20℃で、初期のすなわち緩和開始時の応力比が 1:1 の条件での試験による。

次に、段階的クリープ試験について述べる。図6に示した測定曲線は図5と同じ膜材料と条件での2軸クリープ特性を示す。この図の一定応力（前述の $T_{xm}$、$T_{ym}$）がたて糸、よこ糸方向ともに 5kgf/cm の場合のクリープ曲線を考察すると、$t_{ac}$として2時間程度を採用すればよいと考えられる。図8に、$t_{ac}$を2時間として測定した同種の膜材料[2)]の一つの試験体を用いた段階的クリープ試験の結果を示す。比較のために、通常の2軸引張試験による応力 - ひずみ曲線[2)]を合わせて示した。これらの測定時の室温、応力比の条件は図7と同様である。

## 5. 結論

膜構造建築物の応力緩和後およびクリープ後の膜応力･ひずみ状態を弾性解析で予測する場合に適合する2軸応力 - ひずみ曲線を得るためには、どのような2軸引張試験を行ってそれを測定すればよいかを知るために、線形粘弾性理論を適用して推論を行った。そして、応力緩和後の応力 - ひずみ関係を表わす式として(4)式の仮定の下に(17)式を、またクリープ後の応力 - ひずみ関係を表わす式として(9)式の仮定の下に(24)式を知った。

次に、実際には非線形粘弾性体とみなすべき膜材料の上述の応力 - ひずみ関係式に適合する2軸応力 - ひずみ曲線を測定する方法を検討した。そして、応力緩和後の弾性解析のための2軸応力 - ひずみ曲線の実用的測定のためには、一つの試験体を用いて応力増分と十分とみなせる応力緩和時間（$t_{ar}$）を段階的に与える試験法を提案した。また、クリープ後の弾性解析のための2軸応力 - ひずみ曲線の実用的測定のためには、同様に一つの試験体を用いて応力増分と十分とみなせるクリープ時間（$t_{ac}$）を段階的に与える試験法を提案した。これら試験法は、実用上の便宜を考慮して一つの試験体を用いる方法であるが、この点は上述の理論的推論の結果にかなうものではない。従って、これら試験法の実用上の適合度を検証することが残された課題である。

これら段階的応力緩和試験あるいは段階的クリープ試験法により2軸応力 - ひずみ曲線を得て、その曲線を用いて応力弾性解析を実施することで、応力緩和後の応力あるいはクリープ後のひずみを計算することができる。その計算結果が初期応力導入時の応力あるいはひずみとどれほど異なるものかの考察から、本論のはじめに述べたような設計･施工での種々の検討をより効果的に進めることができよう。

参考文献


1) 武田文義：大型サスペンション膜構造の膜パネル施工報告、膜構造研究論文集'90（日本膜構造協会）、No.4、1990、pp.107-111.
2) 南宏和、山本千秋、瀬川信哉、河野義裕：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、膜構造研究論文集'96（日本膜構造協会）、No.10、1996、pp.45-51.
3) S.Kato, H.Minami, T.Yoshino and T.Namita：Analysis of Membrane Structures Based on Fabric Latice Model Considering Viscous Characteristics, Proc. IASS Int. Symp., Syngapore, Vol.2, 1997, pp.411-420.
4) 南宏和、豊田宏、瀬川信哉：膜構造物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、第 408 号、1990、pp.1-9.
5) 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'91（日本膜構造協会）、No.5、1991、pp.61-70.
6) 膜材料弾性定数試験法、日本膜構造協会、1995.

# A METHOD FOR MEASUREMENT OF STRESS-STRAIN CURVES FOR ELASTIC ANALYSIS ON MEMBRANE ON THE STATE AFTER STRESS RELAXATION OR CREEP

Hirokazu Minami*1
Chiaki Yamamoto*1
Sinya Segawa*1
Yoshihiro Kono*1

SYNOPSIS

Membrane materials (e.g. PTFE coated glass fiber fabrics) generally show nonlinear visco-elastisity. It will be useful to estimate the stresses or strains of the fabrics which are on the state after stress relaxation or creep, by means of elastic stress analysis. This, however, requires specific stress-strain relationship measurements. The authors presented a practical method for such measurement in this paper. The measurements are based on multi-step bi-axial stress relaxation and creep testing. Firstly, theoretical considerations are demonstrated using multi-step linear visco-elastisity assumptions. Then, a practical method for the measurements which provide approximate stress-strain relationships for the elastic stress analysis are proposed.

---

*1 Center for Space Structures Research, Taiyo Kogyo Corporation