

応力緩和後およびクリープ後の膜の材料非線形弾性解析に適用する 2軸応力-ひずみ曲線の推定結果とその適合性

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・ガラス繊維織物などの膜材料が示す大きなクリープまたは応力緩和を考慮する解析に必要となる応力緩和後およびクリープ後の状態の2軸応力-ひずみ曲線を、段階的応力緩和試験及び段階的クリープ試験により推定する。段階的クリープ試験により得られた2軸応力-ひずみ曲線から2軸伸長特性曲面を構築し、多段線形近似法解析により長期一定内圧を受ける平面膜のクリープ後たわみを計算する。解析結果と実験結果はよく適合した。

1. はじめに

膜構造物の設計では、数値解析で求められた膜の初期形状曲面が分割され、それぞれの分割曲面は平面に展開される。この平面形は、たて糸方向およびよこ糸方向に定められた縮小率が掛けられ縮められて裁断パターンとなる。裁断パターンは接合され、その接合された膜が建設現場で境界構造体に定着される。この定着作業の間に膜が伸長される。つまり、初期応力導入がされて定着作業の直後の膜には所要の初期応力と初期ひずみが与えられる。

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、膜は粘弾性体であるので張力膜構造物の膜応力は応力緩和によって減少し、空気膜構造物の膜のひずみはクリープによって増大する傾向を示す。ただし、張力膜構造物の初期応力の存在は、周囲ケーブルや膜押えケーブルで維持される場合が多い。そのような膜の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、ひずみの変化（増大）を伴いつつ緩和現象として生じるであろう。

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、粘弾性を顕著に示す膜材料である¹⁾。この膜材料に対して、設計での応力解析は一般に連続体膜の弾性解析として行われている。そこでまず、初期応力導入直後の応力の弾性解析を実施する場合を考えると、用いる適切な応力-ひずみ曲線は、応力導入途上の時間的過程をよく模擬する2軸引張り試験により測定したものとすれば良いであろう。一方、初期応力導入後に十分に時間が経過して応力緩和やクリープの現象が生じ

なくなった状態（それぞれ応力緩和後およびクリープ後の状態と呼ぶ）の膜の応力解析を初期応力解析と同じ弾性解析で行うことは容易ではない。それは、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、著者らは前報²⁾でそのような弾性解析に適合する2軸応力-ひずみ曲線の推定のための実用的試験法を理論的推定の結果として提案した。その試験法は、応力緩和後の2軸応力-ひずみ曲線を推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-ひずみ曲線を推定する段階的クリープ試験法である。前報では、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、応力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。そしてその後に、それら応力-ひずみ関係式に近似的に適合する2軸応力-ひずみ曲線を推定するための段階的試験法の手順を考案した。

本報では、前報で提案した段階的応力緩和試験法および段階的クリープ試験法をPTFEコーティング・ガラス繊維平織物に適用し、各種応力比条件下での応力緩和後およびクリープ後の2軸応力-ひずみ曲線を推定した結果を示す。この結果を、段階的でなく連続的に伸長する通常の2軸引張り試験（以後これを連続的2軸引張り試験と呼ぶ）により測定した2軸応力-ひずみ曲線と比較する。さらに、行った段階的クリープ試験の結果、つまり推定したクリープ後の2軸応力-ひずみ曲線については、一定側圧を受ける一辺40cmの平面膜の撓みの材料非線形解析（多段線形近似法³⁾による）に用

*¹ 太陽工業（株） 空間技術研究所

いてその結果とそのクリープ実験の結果とを比較する。

最後に、以上の試験結果および解析・実験の結果にもとづいて、前報で提案した段階的応力緩和試験法および段階的クリープ試験法をそれぞれ応力緩和後およびクリープ後の状態での膜応力解析に実用することの適合性について述べる。

2. 段階的応力緩和試験による応力緩和後の状態の2軸応力-ひずみ曲線の推定

試験方法の詳細は前報²⁾に述べられている。試験方法のあらましは、試験体に応力比拘束条件下で通常の引張り速度で増分荷重を与え、一定時間 t_{ar} 放置する(両糸方向のひずみを固定する)プロセスを繰り返すものである。

今回、応力比 1:1、2:1、1:2、1:0、0:1 (たて糸方向応力 : よこ糸方向応力) の結果を図1から図5に示す(応力比 1:1の結果は前報²⁾の図7と同じものである)。各ケースとも最大応力 10kgf/cm まで10ステップとし、各ステップでの放置時間 t_{ar} は24時間である。また、各図において、 t_{ar} 経過後の点を結んだ包絡線と通常の連続的2軸引張り試験の結果を併せて示している。

すべての応力比において、各ステップでの応力緩和により連続的2軸引張り試験曲線と段階的応力緩和試験包絡線は大きく異なることがわかる。

3. 段階的クリープ試験によるクリープ後の状態の2軸応力-ひずみ曲線の推定

試験方法の詳細は前報²⁾に述べられている。試験方法のあらましは、試験体に応力比拘束条件下で通常の引張り速度で増分荷重を与え、一定時間 t_{ac} 放置する(両糸方向の応力を固定する)プロセスを繰り返すものである。

今回、応力比 1:1、2:1、1:2、1:0、0:1の結果を図6から図10に示す(応力比 1:1の結果は前報²⁾の図8と同じものである)。各ケースとも最大応力 10kgf/cm まで20ステップとし、各ステップでの t_{ac} は2時間である。また、各図において、 t_{ac} 経過後の点を結んだ包絡線と通常の連続的2軸引張り試験の結果を併せて示している。

段階的応力緩和試験と同様に、すべての応力比において、各ステップでのクリープにより連続的2軸引張り試験曲線と段階的クリープ試験包絡線は大きく異なることがわかる。

4. 2軸伸長特性曲面

各種応力比の段階的応力緩和試験包絡線または段階的クリープ試験包絡線を用いて2つの3次元2軸伸長特性曲面 ($T_x-T_y-\epsilon_x$ 曲面と $T_x-T_y-\epsilon_y$ 曲面)³⁾ が構築される。これらの曲面を用いて膜材料の非線形応力-ひずみ関係を考慮する弾性解析法が著者らによって提案されている³⁾。

今回の段階的応力緩和試験包絡線より得られた2軸伸長特性曲面を図11、段階的クリープ試験包絡線より得られた2軸伸長特性曲面を図12、また比較のため連続的2軸引張り試験曲線より得られる2軸伸長特性曲面を図13にそれぞれ示す。

5. 側圧をうける平面膜のクリープ後の状態の解析と実験

前報^{3) 4)}と同様に全周辺部を固定した一辺40cmの平面正方形膜

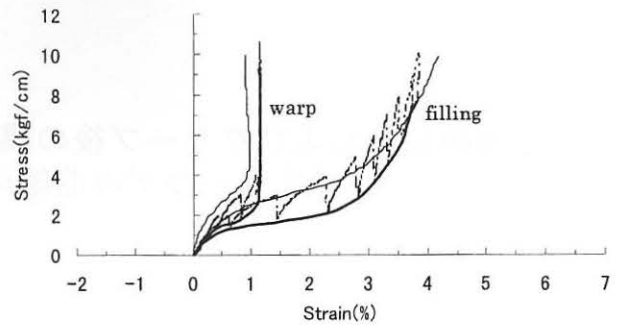


図1 段階的応力緩和試験-応力比 1:1 (PTFE-ガラス繊維平織物膜、点線: 応力緩和試験、太実線: 応力緩和試験包絡線、細実線: 連続的2軸引張り試験、warp: たて糸方向ひずみ-たて糸方向応力関係、filling: よこ糸方向ひずみ-よこ糸方向応力関係、室温 11-23°C)

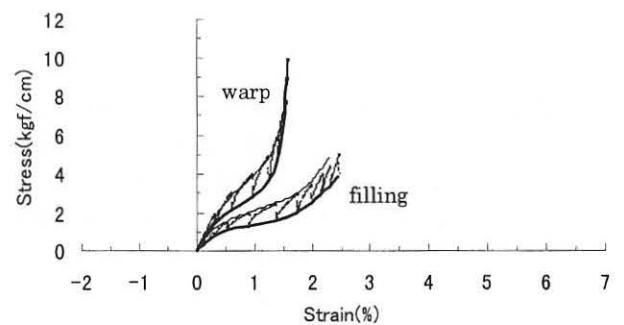


図2 段階的応力緩和試験-応力比 2:1 (室温 21-26°C)

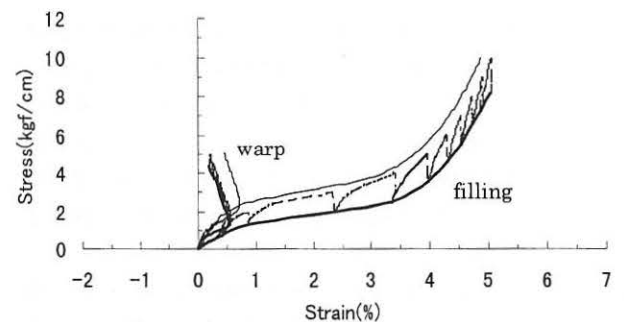


図3 段階的応力緩和試験-応力比 1:2 (室温 22-31°C)

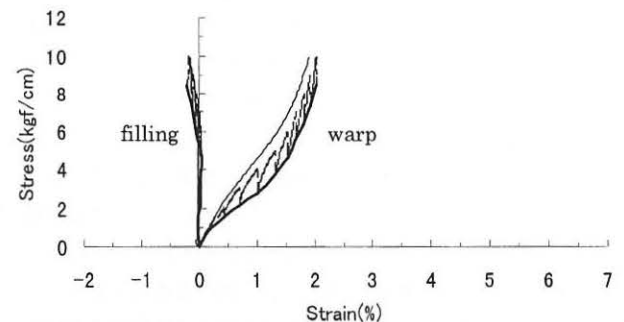


図4 段階的応力緩和試験-応力比 1:0 (warp: たて糸方向ひずみ-たて糸方向応力関係、filling: よこ糸方向ひずみ-たて糸方向応力関係、室温 23-28°C)

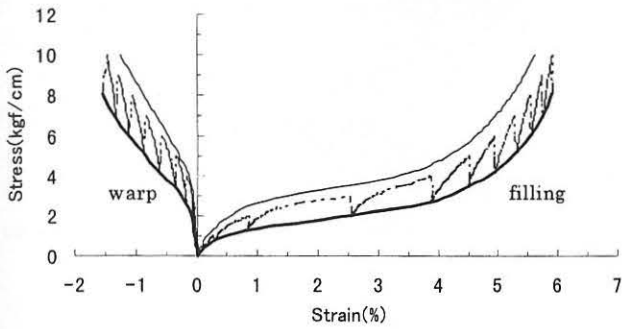


図5 段階的応力緩和試験—応力比 0:1 (warp: たて糸方向ひずみ—よこ糸方向応力関係、filling: よこ糸方向ひずみ—よこ糸方向応力関係、室温 22—27°C)

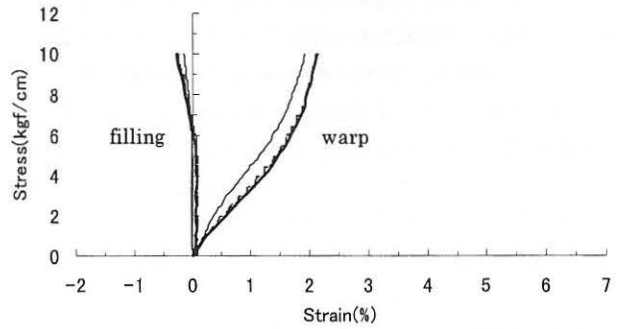


図9 段階的クリープ試験—応力比 1:0 (室温 18—25°C)

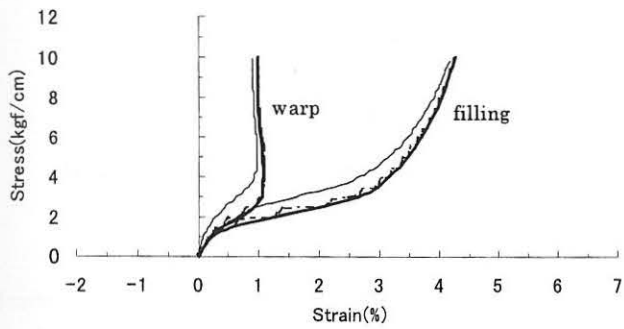


図6 段階的クリープ試験—応力比 1:1 (室温 17—25°C)

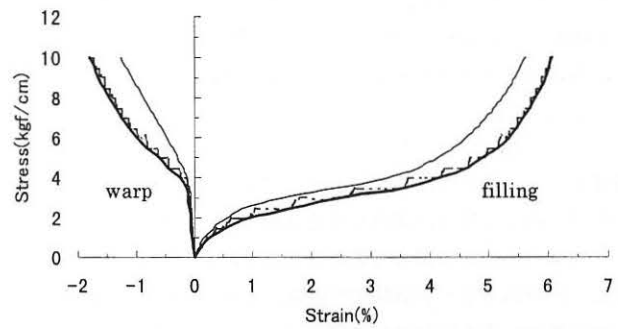


図10 段階的クリープ試験—応力比 0:1 (室温 15—24°C)

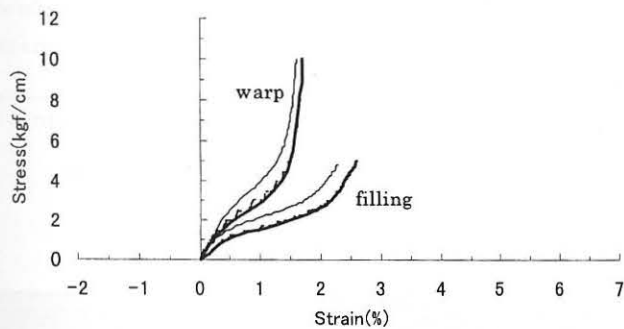


図7 段階的クリープ試験—応力比 2:1 (室温 17—25°C)

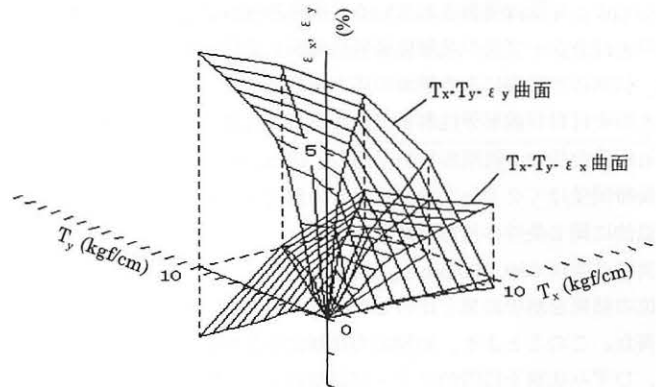


図11 段階的応力緩和試験による2軸伸長特性曲面

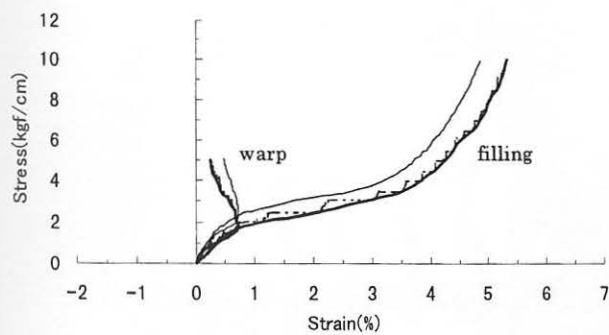


図8 段階的クリープ試験—応力比 1:2 (室温 19—24°C)

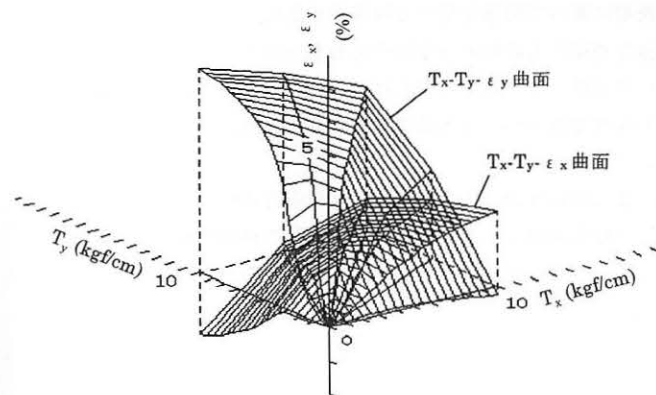


図12 段階的クリープ試験による2軸伸長特性曲面

(膜材は前報及び本報の2軸試験、本実験を通して同じPTFE-ガラス繊維平織物を用いている)に空気内圧を与え、その中央部鉛直変位を非接触型変位計により測定した(写真1)。今回、クリープ変形をみるために、2種類の一定内圧500mmAq(正確には485-565mmAqの間の変動があり、平均値は510mmAq)と800mmAq(同773-840mmAq、平均801mmAq)をそれぞれ1週間持続させた。

図14に载荷時間と中央部変位の関係を示す。1週間で内圧500mmAqでは4.8mm、800mmAqでは3.94mmの変位増加が測定された。

図15に内圧-変位関係を示す。ここでは、前報⁴⁾の通常の(放置時間はほぼ0とみなされる)载荷実験と解析結果、及び本実験の1週間経過後の測定値とクリープを考慮した解析結果を比較のため併せて示している。クリープを考慮した解析は図12のクリープ後の状態の2軸伸長特性曲面を用いた文献³⁾の手法を指す。ただし、解析モデルは対称性から1/4部分に3節点三角形要素128分割とし、便宜上0.1kgf/cmの初期張力を用いている(実験では初期張力は0である)。本図は解析値と実験値の非常によく対応を示している。

6. 結論

膜構造建築物の応力緩和後およびクリープ後の応力やひずみ状態を弾性解析で予測する場合に適用しうる2軸応力-ひずみ曲線を、それぞれ5種類の応力比に関して著者らの提案による段階的応力緩和試験および段階的クリープ試験より得た。また、それらの2軸応力-ひずみ曲線から応力緩和後およびクリープ後の2軸伸長特性曲面を求めた。

著者らによって既に発表されている多段線形近似法を、この応力緩和後およびクリープ後の2軸伸長特性曲面に適用すれば、膜構造建築物の初期応力状態にある膜面の応力緩和後およびクリープ後の応力や変形を材料非線形弾性解析で求める事が可能となる。この多段線形近似法を用い、初期形状が平面の、40cm角の大きさの膜が、側圧を長時間受けてクリープをする場合の解析を行った。また、解析と近似的に同じ条件の検証実験も実施した。

検証実験は共に500, 800mmAqの各側圧条件の下で行い、膜中央部の変位の結果を解析結果と比較したところ、これらの非常に良い一致を得た。このことより、初期応力状態にある膜面のクリープ後の応力、ひずみ状態を段階的クリープ試験による2軸伸長特性曲面を用いて弾性解析することの妥当性が実証された。空気膜構造物のように長期に渡って荷重を受ける膜構造建築物の、施工後十分に時間が経った初期応力状態、変形や応力を検討する場合には、段階的クリープ試験による測定で得られる2軸伸長特性曲面を用いる材料非線形弾性解析(例えば本論で行った多段線形近似法)が、有効であると言える。

なお次報では、膜面の応力緩和後の初期応力状態予測に対する、段階的応力緩和試験による2軸伸長特性曲面の材料非線形弾性解析への適用の妥当性を検証し、その結果を報告する予定である。

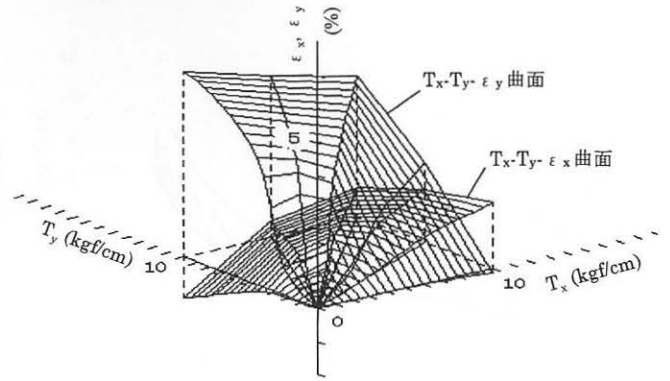


図13 連続的2軸引張り試験による2軸伸長特性曲面

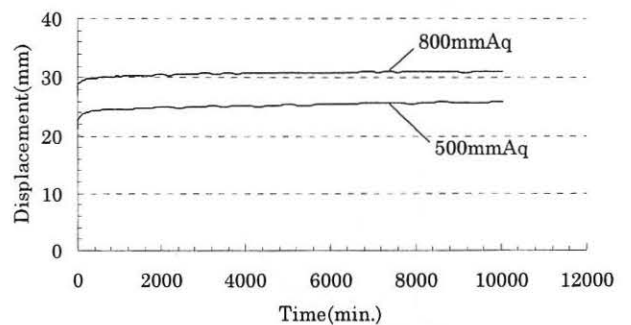


図14 時間-中央部鉛直変位関係(室温9-24℃)

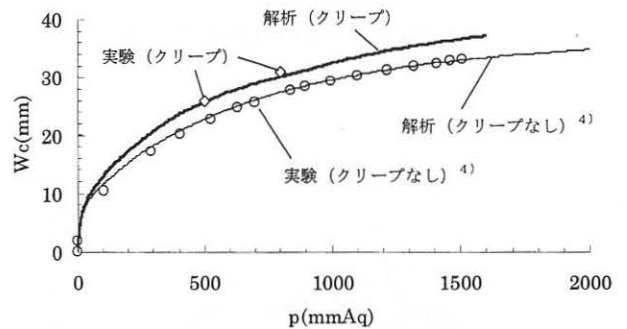


図15 平面正方形膜の内圧p-中央部鉛直変位Wc関係

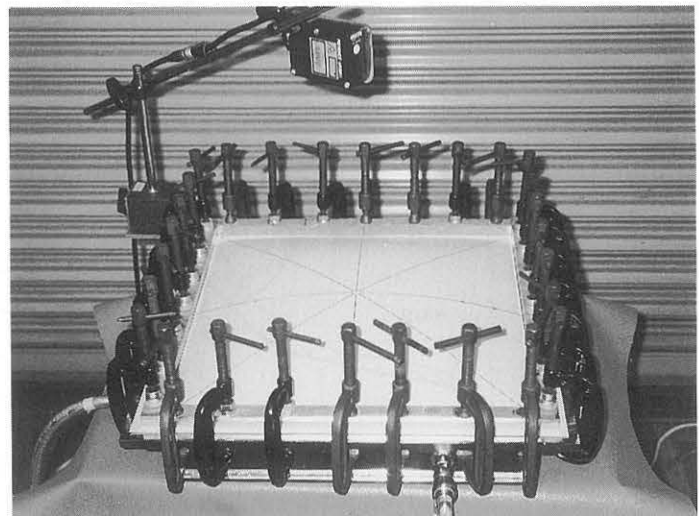


写真1 内圧による平面正方形膜たわみ実験

参考文献

- 1)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.
- 2)南宏和、山本千秋、瀬川信哉、河野義裕：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、膜構造研究論文集'97（日本膜構造協会）、No.11、1997、pp.23-29.
- 3)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ータ算定法、膜構造研究論文集'96（日本膜構造協会）、No.10、1996、pp.45-51.
- 4)H. Minami, C. Yamamoto, S. Segawa, and Y. Kono : A method for membrane material nonlinear stress analysis using a multi-step linear approximation, IASS Symp., Singapore, 1997, pp.595-602.

BI-AXIAL STRESS-STRAIN CURVES FOR NONLINEAR ANALYSIS OF MEMBRANE
WITH THE EFFECT OF 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 clear stress relaxation or creep. The analysis which estimates the effects of these requires bi-axial stress-strain curves of the material where stress-relaxation or creep effects should be included. The curves are estimated by stepwise stress relaxation and creep testings which have been carried out under various values of stress ratio constraints. Using the estimated curves, a multi-step linear approximation method of analysis computes the deflection of a square membrane continually subjected to constant internal pressure during a week. The computed deflection was very close to measured, experimental one.

*¹ Center for Space Structures Research, Taiyo Kogyo Corporation