

膜材料のクリープ破断特性に関する検討

— 円形膜材料の加圧によるクリープ試験 —

瀬川 信哉*
藤原 淳*
吉野 達矢*

梗 概

膜構造において膜材料のクリープ破断特性は耐久性などを考える上で重要な知識となる。しかしながら著者らの知る限り、膜材料の許容応力度を越える応力を発生させるような荷重によるクリープ破断特性については余り調べられていないのが現状である。また実際の膜構造ではたて糸方向、よこ糸方向に応力が発生しているが、一般的な膜材料のクリープ試験では一方向に載荷されるのが普通である。クリープ破断を起こすような高荷重を与える事ができ、たて糸方向、よこ糸方向の二軸方向に応力が発生するクリープ試験を実施したので、その結果について報告する。

1.はじめに

膜材料のクリープ試験は、これまで幾つか実施、報告されている^{1, 2)}。しかし一般には、クリープ破断を起こすほどの荷重(以下高荷重と呼ぶ)を与えて試験を行うことはない。また、建築構造用膜材料の耐引張クリープ性を確認する試験³⁾では、引張基準強度の 1/4 に相当する荷重を作用させ、伸びや破断の有無を計測する。この試験では、荷重の継続時間は最大で24時間と比較的短い。

しかし、積雪などが想定を超えて発生した場合は高荷重が長期に渡り継続している状態と言えるだろう。それらのことを考えると、冬季の期間を考慮した長期に渡る高荷重によるクリープ試験を実施する事に意義がある。一般的なクリープ試験は一軸方向への載荷で行われている。しかし通常膜構造において、膜材料はたて糸方向、よこ糸方向の二軸の方向に発生する応力で荷重に抵抗するので、二軸方向に応力が発生するようなクリープ試験についても意義がある。

膜構造建築物に多用されるPTFEコーテッドガラス繊維平織物(以下膜材料とする)に対する一軸方向のクリープ破断については細澤らの報告がある⁴⁾。この報告では、引張破断強度の50, 40, 33, 25%に相当する荷重を90日間継続載荷し、50, 40%に相当する荷重の継続載荷により破断が生じたと報告されている。

しかし著者らの知る限り、この種の膜材料に関する高荷重でかつ二軸方向の応力状態を考慮したクリープ破断特性については調べられていないようである。そこで、この膜材料に対して、高荷重による二軸応力状態でのクリープ試験を実施した。その結果について報告する。

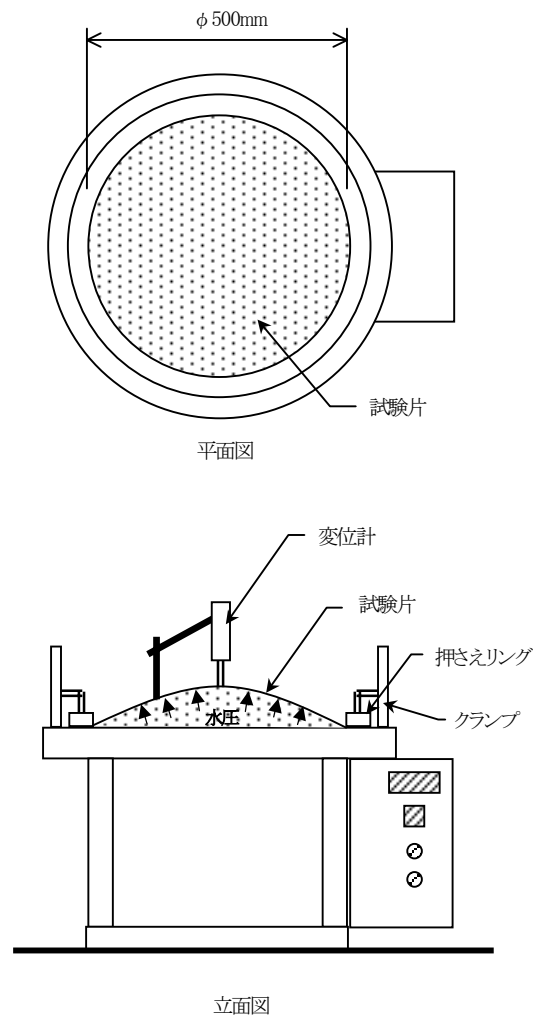


図 2.1 水圧式クリープ試験機概要図

* 太陽工業株式会社 空間技術研究所 博士(工学)

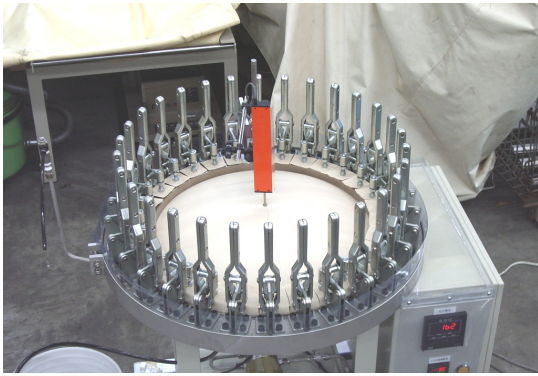


図 2.2 水圧式クリープ試験機

2. 試験方法

図 2.1, 2.2 に示す水圧式クリープ試験機を用いて試験を行った。膜材料に水圧を作用させ二軸方向に応力を発生させることでクリープ試験を行うことができる。試験片の圧力が作用する部分は図 2.1 に示す直径 500mm の円形部分である。積雪を考慮して、クリープ試験を行う期間は 3 ヶ月(90 日)とした。経過時間と中央部変位を測定し、クリープ試験期間中に試験片が破断した場合は、その破断までの時間を記録した。

試験片に発生するたて糸方向応力が目標値に一致するように、载荷圧力を解析によって求めた。目標値は、破断応力の 50, 40, 33, 25% の 4 種類とした。あらかじめ実施した一軸引張試験の結果から、たて糸方向破断応力は 176 kN/m であった。

3. 応力解析

クリープ試験を模擬した応力解析を行い、たて糸方向応力の最大値が目標値に一致するときの载荷圧力を求めた。

膜材料の応力-ひずみ関係には、顕著な非線形性がみられることが知られている⁵⁻⁷⁾。一般的な膜構造物の応力解析では、応力がある範囲内(例えば初期張力から引張基準強度の 1/4 の範囲)にあると仮定し、直交異方性線形弾性体の構成則が用いられる^{8, 9)}。しかし、本研究のクリープ試験では、無応力状態から破断応力の 50% までの広い範囲の応力を対象とする。よって、線形弾性体の構成則を用いた解析では、膜材料の挙動を正確に解析に反映することは困難であると考えられる。そこで、以下の 2 種類の応力域について線形弾性体の構成則を設定した。

SR1 たて糸方向応力とよこ糸方向応力がともに 5.0 kN/m より小さい範囲

SR2 たて糸方向応力とよこ糸方向応力のいずれかが 5.0 kN/m 以上の範囲

まず、膜材料の二軸引張試験を行った。たて糸方向とよこ糸方向の応力比(以下応力比と呼ぶ)は 1:1, 2:1, 1:2 の 3 種類、最大応力は 59 kN/m とした。試験結果を、図 3.1-3.3 に実線で示す。試験結果に基づいて、応力域 SR1 と SR2 での材料定数を求めた。また、せん断弾性係数は、応力域 SR1, SR2 で共通の値を用いた。膜材料の構成則、材料定数の算定および試験法の詳細は、文献 9, 10) による。試験片は全てクリープ試験と同一のロールから採取した。材料定数を表 3.1 にまとめる。

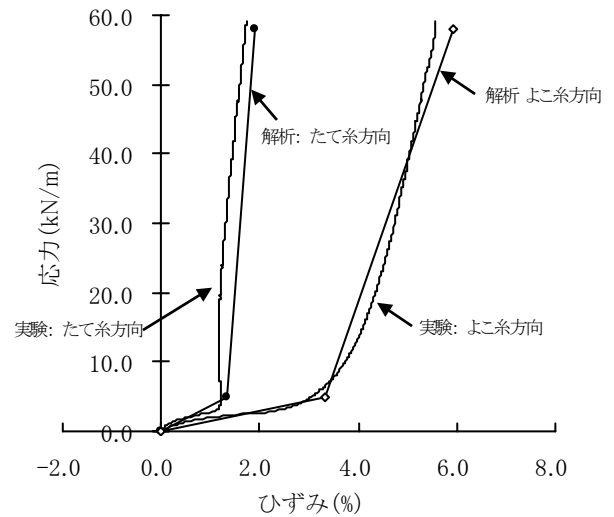


図 3.1 二軸引張試験結果(応力比 1 : 1)

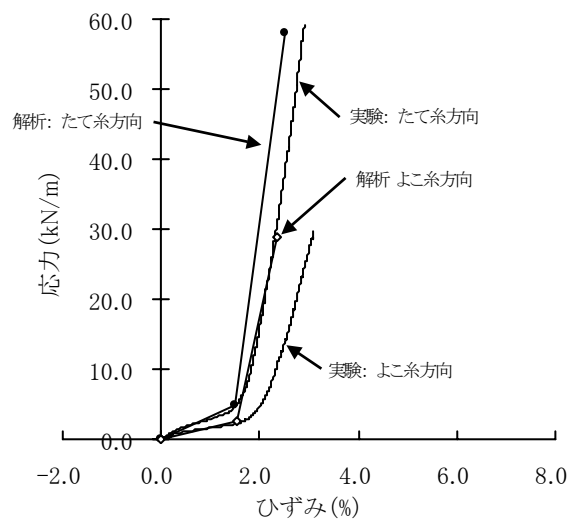


図 3.2 二軸引張試験結果(応力比 2 : 1)

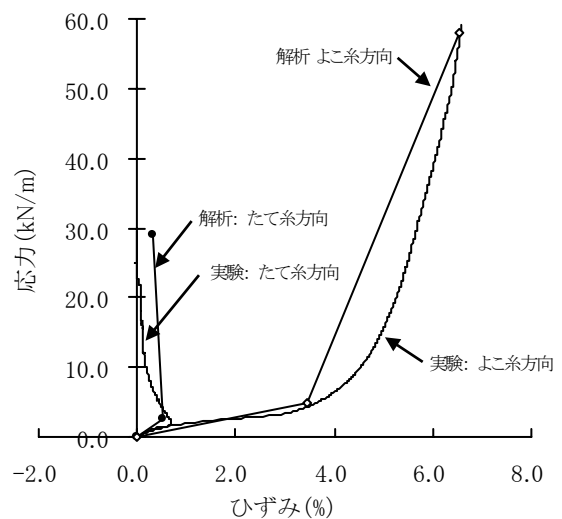


図 3.3 二軸引張試験結果(応力比 1 : 2)

表 3.1 材料定数

(a): 応力域 SR1

	引張剛性 (kN/m)	ポアソン比	せん断剛性 (kN/m)
たて糸方向	3099	0.176	64
よこ糸方向	139	0.079	

(b): 応力域 SR2

	引張剛性 (kN/m)	ポアソン比	せん断剛性 (kN/m)
たて糸方向	3486	0.624	64
よこ糸方向	1486	0.266	

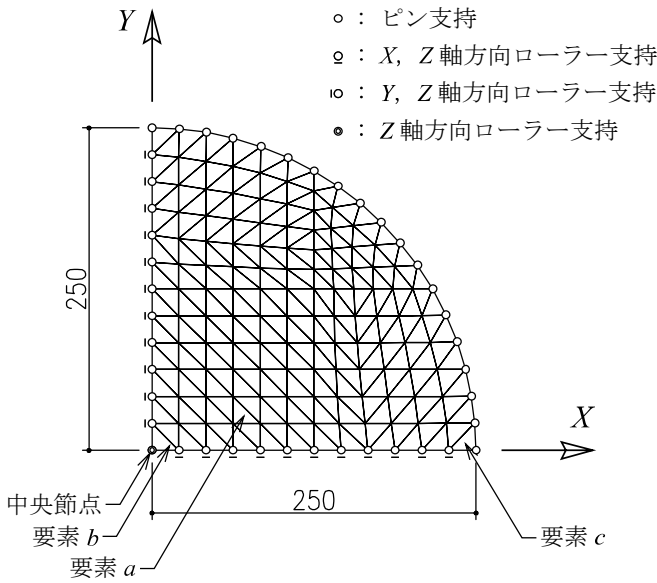


図 3.4 有限要素モデル

表 3.1(a)と(b)の材料定数を用いて、二軸引張試験と同じ応力比の応力増分を与えてひずみ増分を求め、応力-ひずみ関係を求めた。得られた、たて糸方向とよこ糸方向の応力-ひずみ関係を、図 3.1-3.3 にそれぞれ塗りつぶし丸付き直線と、白抜き四角付き直線で示す。図 3.1-3.3 から、応力比 2 : 1 のよこ糸方向で若干の誤差がみられるものの、二軸引張試験の応力-ひずみ関係を模擬できていることが分かる。

次に、クリープ試験を模擬した解析を行い、応力の最大値が目標値となるときに荷重圧力を求めた。解析は、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した有限要素法による。要素は、定ひずみ三角形有限要素を用いる。試験片の対称性を考慮して、全体の 1/4 の領域を解析の対象とする。解析に用いる有限要素モデルを、図 3.4 に示す。Z軸は X, Y 軸に直交する方向とする。

解析では、荷重圧力を漸増させ、荷重圧力を漸増させるごとに応力と変位を求める。応力解析では、解析前の要素応力が属する応力域に応じた材料定数を用いて、要素の弾性マトリクスを求める。漸増荷重は、たて糸方向応力の最大値が 100 kN/m を超えるまで行った。解析手順を以下にまとめる。

- i) たて糸方向とよこ糸方向の初期張力をともに 0.0 kN/m とし、荷重圧力 $P = 0.0$ kPa とする。
- ii) 膜の自重 12.75 N/m^2 (Z軸負方向) と荷重圧力 P のもとで応力形状解析を行い、応力と変位を求める。
- iii) ii) で得られたたて糸方向応力の最大値が 100 kN/m を超えていけば、計算を終了する。そうでない場合は iv) に進む。
- iv) 応力が応力域 SR1 にある要素は表 3.1(a) の材料定数に、応力域 SR2 にある要素は表 3.1(b) の材料定数に変更する。
- v) 荷重圧力 $P \leftarrow P + \delta P$ として iii) に戻る。ここで、 δP は以下のように定める。

$$\delta P = \begin{cases} 1.0 & (0.0 \leq P < 20.0) \\ 2.0 & (20.0 \leq P < 40.0) \\ 5.0 & (40.0 \leq P < 90.0) \\ 10.0 & (90.0 \leq P) \end{cases} \text{ kPa}$$

得られた、中央節点(図 3.4 参照)の Z 軸方向変位(以下中央部変位とする)と荷重圧力の関係と、たて糸、よこ糸方向応力の最大値と荷重圧力の関係を、それぞれ図 3.5, 3.6 に示す。図 3.6 から、たて糸方向応力の最大値がよこ糸方向応力の最大値の約 2 倍となっていることが分かる。

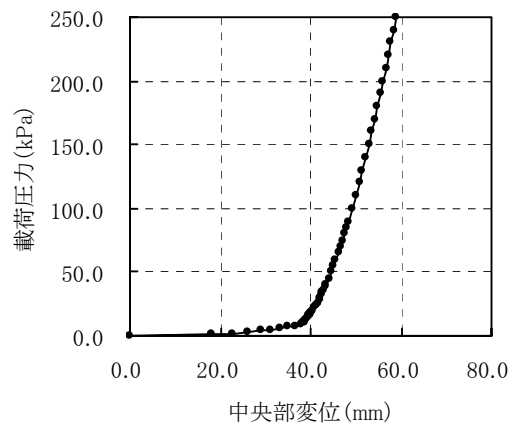


図 3.5 中央部変位-荷重圧力の関係

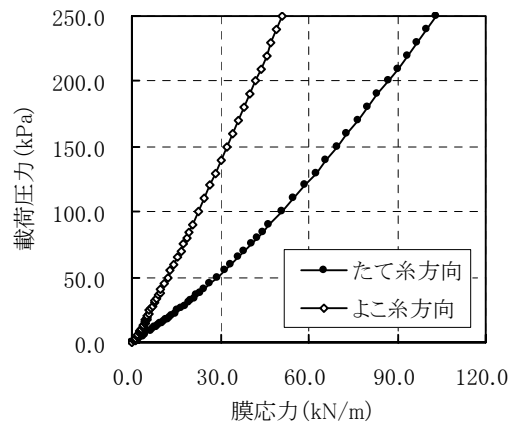


図 3.6 最大応力-荷重圧力の関係

表 3.2 目標応力時の載荷圧力と応答値

載荷圧力 (kPa)	最大応力 (kN/m)		中央部変位 (mm)
	たて糸方向	よこ糸方向	
203	88.0	42.5	56.3
152	70.7	32.9	53.1
120	58.7	26.8	50.8
84	44.0	19.3	47.9

たて糸方向応力が目標値(破断応力の 50, 40, 33, 25%)に一致したときの載荷圧力, よこ糸方向応力, 中央部変位を, 表 3.2 に示す。解析の手順から, 載荷圧力 P の下でのたて糸方向の最大応力は, 必ずしも目標値に一致しない。ここでは, 線形補間によって載荷圧力と各応答値を求めた。

4. 試験結果

実際の試験時の載荷圧力は, 水圧式クリープ試験機の都合上, 216, 160, 126, 86kPa とした。各載荷圧力での, 載荷開始から 5 分間の圧力の推移を図 4.1 に示す。図 4.1 から, いずれの載荷圧力でも 2~3 分程度で圧力が載荷圧力に達していることが分かる。

載荷圧力 216, 160, 126kPa の試験では, 設定したクリープ試験期間の 90 日に達する前に試験片が破断した。試験結果を, 表 4.1 にまとめる。破断は 3 試験片とも図 4.2 に示す破断箇所付近のたて糸方向で発生した。載荷圧力 160kPa の破断状況を, 図 4.3 に示す。図 4.3 は試験機から取り外した状態である。載荷圧力 86kPa は 90 日間破断することなく終了した。

載荷圧力でのたて糸方向応力と中央部変位の解析結果を表 4.2 に示す(要素 a, b, c の位置は図 3.4 を参照)。試験片の破断は押さえリング際のたて糸で発生しており, 要素 c に概ね対応する。しかし表 4.2 から, 要素 c の応力は最大値とはなっていない。押さえリング際には試験機の構造上, 試験片が屈曲しているため膜材料の傷みなどが影響して破断した可能性もある。

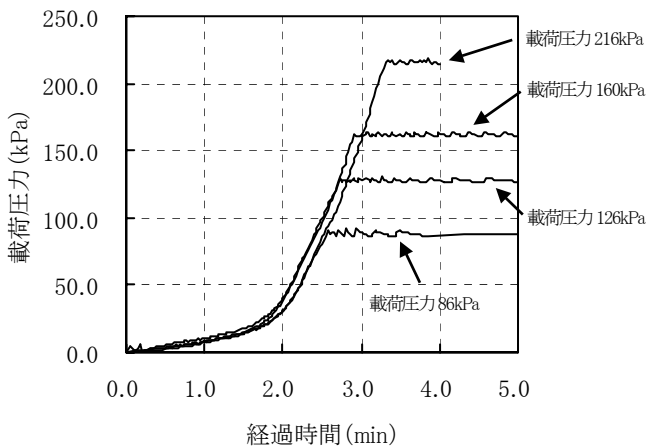


図 4.1 圧力と時間の関係

表 4.1 試験結果のまとめ

載荷圧力 (kPa)	破断状況
216	42 秒後に押さえリング部のたて糸が破断
160	47 分後に押さえリング部のたて糸が破断
126	24 日後に押さえリング部のたて糸が破断
86	90 日間破断なし

表 4.2 試験時の載荷圧力に対する解析結果

載荷圧力 (kPa)	たて糸方向応力 (kN/m)			中央部変位 (mm)
	要素 a	要素 b	要素 c	
216	92.1	91.8	90.3	57.0
160	73.2	72.8	71.3	53.6
126	60.8	60.3	58.9	51.2
86	45.0	44.5	43.2	48.1

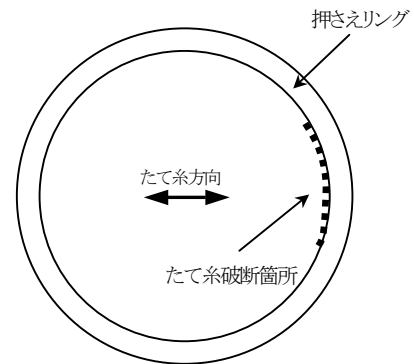


図 4.2 破断箇所



図 4.3 載荷圧力 160kPa の破断状況

表 4.3, 図 4.4 に中央部変位の解析値と試験値の比較を示す。試験値は載荷圧力到達時の値とクリープ試験により増加した値とを併せて示す。全ての試験片において中央部変位は解析より大きく出ている。原因としては理想化されたモデルでの解析条件と実際の試験条件との差が考えられる。

表 4.3 中央部変位の比較

荷重圧力 (kPa)	解析値 (mm)	試験値 荷重直後 (mm)	試験値 クリープ後 (mm)
216	57.0	73.0	76.8
160	53.6	65.3	69.7
126	51.2	61.4	69.5
86	48.1	55.9	64.0

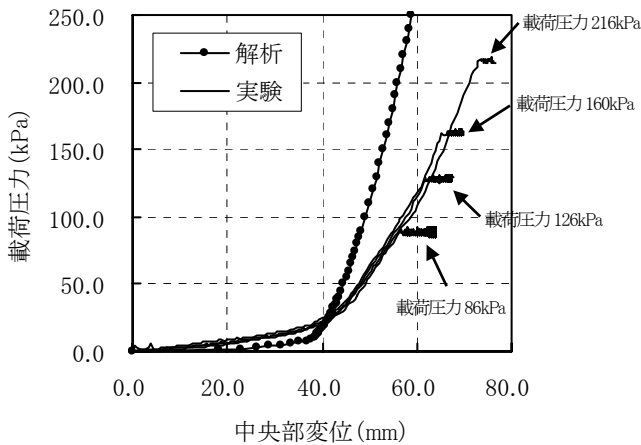


図 4.4 中央部変位の比較

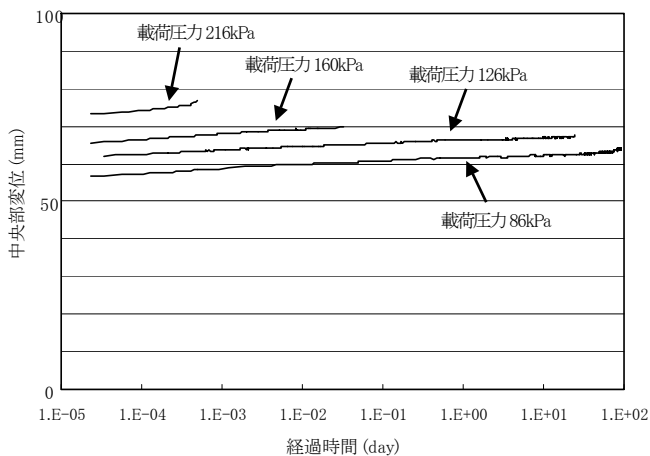


図 4.5 中央部変位と経過時間の関係

各試験片の中央部変位と経過時間の関係を、図 4.5 に示す。図 4.4, 4.5 および表 4.3 が示すように、クリープ試験中は中央部変位の増加が見られた。

5. まとめ

膜材料に対する高荷重によるたて糸方向、よこ糸方向の二軸方向を考慮したクリープ試験を実施した。荷重として水圧を作用させた。荷重圧力は設定した応力が試験片に発生する圧力値を解析により求めて決定した。

膜材料のたて糸方向破断応力の 50, 40, 33%に相当する応力が発生する圧力を与えた試験では試験片が破断した。破断は押さえリング際のたて糸で発生した。

たて糸方向破断応力の 25%に相当する応力が発生する圧力では目標とした 90 日間で破断することはなかった。

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, pp.1~9, 1990 年 2 月
- 2) 瀬川 信哉, 豊田 宏, 南 宏和 : 膜材料 A 種の異なる雰囲気温度での二軸応力緩和及び二軸クリープ試験結果, 膜構造研究論文集'99, No. 13, pp.69~73, 1999 年 12 月
- 3) (社)日本膜構造協会 : 膜材料の品質及び性能試験方法 (MSAJ/M-03-2003), 2003 年
- 4) 細澤 治, 小竹 達也, 斉藤 嘉仁, 瀬川 信哉 : A 種膜材における長期クリープ破断, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.807~808, 2006 年
- 5) 南 宏和, 豊田 宏, 呉 鶯 : コーテッド平織物の観察と 1 軸伸張実験, 材料 第 41 卷 第 463 号, pp.445~450, 1992 年
- 6) 南 宏和, 瀬川 信哉 : コーテッド平織物の 2 軸伸張実験, 材料 第 41 卷 第 463 号, pp.451~457, 1992 年
- 7) 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, 膜構造論文集, pp.45~51, 1996 年
- 8) 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 1152, pp.303~304, 1984 年
- 9) (社)日本膜構造協会試験法標準 膜材料弾性定数試験方法(MSAJ/M-02-1995), (社)日本膜構造協会, 1995 年
- 10) (社)日本膜構造協会試験法標準 膜材料面内剪断剛性試験方法(MSAJ/M-01-1993), (社)日本膜構造協会, 1993 年

A REPORT FOR CREEP-RUPTURE PROPERTIES OF PTFE-COATED MEMBRANE MATERIAL

A water-pressed creep test for circular Specimen

Shinya Segawa*, Jun Fujiwara*, Tatsuya Yoshino*

SYNOPSIS

Creep property is important for evaluation of durability of membrane structures. In winter, snow load is generated on membrane structures. In the case of unexpected heavy snow falling, it seems that creep property of membrane material under heavy loading is important in particular. And stresses usually are generated bi-axial direction, warp and filling direction, of membrane material. The authors made a water-pressed creep tester. The tester is considered heavy loading and tensioning to bi-axial directions. The authors carried out the test and report the results.

* Advanced Structures R&D Department, Taiyo Kogyo Corporation, Dr. Eng.