

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を模擬した応力・変形解析—

吉野 達矢*
瀬川 信哉*
藤原 淳*

梗概

膜材料のクリープ特性に関する研究はいくつか行われてきたが、その荷重レベルは初期張力レベルであり、それ以上の荷重レベルに関するクリープ特性についてはほとんど議論されていなかった。最近では、これらに注目した一軸応力下および二軸応力下のクリープ破断試験が行われ、特性が明らかにされてきた。

そこで、本研究では、粘弾塑性構成則を用いて、クリープ破断試験を模擬した FEM 解析を行い、クリープ破断時の応力分布の推定し、試験結果との比較を行う。

1. はじめに

最近の研究^{1,2)}により、膜材料に短期許容応力度を越えるような荷重を加えたクリープ試験が行われた。この結果から、引張破断強度の 50% 以下の荷重レベルにおいても膜材料が破断することが報告された。

これまでに、膜材料の粘性特性に関する研究はいくつか行われているが、その中でもクリープ試験は少ない。南・瀬川ら^{3,4)}は一軸・二軸応力下におけるクリープ試験を 1 週間かけて行っている。しかし、その荷重は最大 $6.6kN/m$ であり、それ以上の荷重レベルに関するクリープ特性については議論されていない。また、(社)日本膜構造協会試験法標準「膜材料の品質及び性能試験方法」⁵⁾の「耐引張クリープ性」として、膜材料の一般部と接合部のクリープ試験がある。荷重は引張基準強度の $1/4$ に相当と初期張力に比べ大きい、24 時間とクリープ時間が短い。このように、これまで行われてきたクリープ試験の条件では荷重レベルが低いか、または、時間が短い。

細澤ら¹⁾は一軸方向に載荷したクリープ試験（以下、一軸クリープ試験）を行い、膜材料の短期許容応力度を越えるような荷重を加え、時間経過により破断したり、破断しなかったりすることを報告している。

著者ら²⁾は二軸応力下におけるクリープ破断特性を確認することを目的に、円形境界を有する膜材料に水圧を加え保持するクリープ試験（以下、水圧式クリー

プ試験と呼ぶ）を実施した。この試験では、細澤ら¹⁾の結果と同様に、圧力レベルによっては、数日、数時間、そして、1 分弱で膜材料が破断することが確認できた。なお、載荷圧力を設定するために、膜材料の特性を二段階の弾性剛性で近似し、その定数を用いて FEM 解析を行った。この FEM 解析結果を水圧式クリープ試験の結果と比較すると、圧力・中央部変位の関係で差異が見られた。また、弾性解析であるため、クリープ破断時の応力分布、および、ひずみの状態を予測することができてない。ここで、クリープ破断時を分析するには、膜材料の粘性特性を考慮した FEM 解析による必要がある。

膜材料の粘性特性を考慮した構成則はいくつかあるが、その中でも、粘弾塑性特性を考慮した構成則として、加藤・吉野ら⁶⁻⁹⁾の織構造格子モデルがある。このモデルは、膜材料の粘弾塑性および破断特性を考慮した構成則であり、実験結果との比較からその妥当性を示している。

以上より、本報告では、PTFE コーテッドガラス繊維平織物を対象とした水圧式クリープ試験結果の分析をより詳細に行うことを目的に、(1) 試験対象の膜材料の二軸特性をより精度よく表現可能な構成則の諸定数を算出し、(2) 水圧式クリープ試験を模擬した解析を行い、破断時の応力分布を確認し、試験における破断個所との比較から、クリープ破断について分析を行う。なお、

* 太陽工業株式会社 空間技術研究所 博士（工学）

構成則には粘弾塑性特性を表現可能な織構造格子モデルを用いる。諸定数は文献⁹⁾の値を基本として用いるが、二軸引張特性が試験結果と差異があるため、修正して使用する。

2. 一軸・二軸クリープ試験結果の分析

2.1 一軸クリープ破断特性

細澤ら¹⁾により、PTFEコーテッドガラス繊維平織物を対象として、多雪地域の雪荷重を想定した一軸クリープ試験結果が報告されている。この報告では、引張破断強度の33%、40%、50%の荷重（以下、それぞれ、33%荷重、40%荷重、50%荷重と呼ぶ）を最大90日間作用させている。この結果から、報告で示されている通り、次のことがわかる。なお、詳細は当該論文を参照のこと。

- (1) クリープ破断時のひずみは一定でなく、破断時のひずみはクリープ時間が長いほど、かつ、載荷荷重が大きいほど大きい。
- (2) 試験体数がそれぞれ3体しかなく、各条件において、破断に至る時間のばらつきが大きい。

(1)の理由としては、50%荷重の場合、数時間のクリープで破断するため、40%荷重の場合に比べ載荷荷重が大きい、クリープ時間が短いため、破断時のひずみが小さい。これは、破断時のひずみは時間経過に伴うクリープひずみに依存するためと考えられる。

これらの結果からクリープ破断が生じる条件を定量的に示すことは困難であり、構成則に反映させることも難しい。

2.2 二軸クリープ破断特性

著者ら²⁾は二軸応力下におけるクリープ破断特性を確認することを目的に、水圧式クリープ試験を実施した。文献2の概略は次の通りである。

- (1) 膜材料の二軸引張試験を実施し、応力・ひずみ関係を二段階の線形弾性剛性（以下、二段階剛性と呼ぶ）で近似する。
- (2) 二段階剛性を用いて、水圧式クリープ試験を模擬したFEM解析（以下、二段階剛性解析と呼ぶ）を行い、圧力と発生応力と中央部変位の関係を予測する。
- (3) 圧力と最大発生応力の関係から、載荷圧力を決定する。
- (4) 直径 $L = 500\text{mm}$ の円形境界を有する膜材料に水圧を作用させ、90日間圧力を保持する（図1）。このとき、圧力 p と中央部変位 h の関係を記録する。なお、載荷圧力は86, 126, 160, 216kPaの4通り（図中ではP86, P126, P160, P216と表示する）とする。また、加圧は水圧式であり、時間あたりの送水量が一定を条件としている。

水圧式クリープ試験および二段階剛性解析の結果を示す。図2に中央節点のZ方向変位（以下、中央部変位と呼ぶ）と時間の関係を、図3に圧力と時間の関係を、図4に圧力と中央部変位の関係を、表1に載荷圧力に達した直後（以下、載荷直後と呼ぶ）の中央部変位および二段階剛性解析による発生予想応力を示す。この結果より、次のことがわかった。

- (1) FEM解析の結果、発生応力の最大値はたて糸方向であった。
- (2) 細澤ら¹⁾の結果と同様に圧力レベルによっては、数日、数時間、そして、1分弱で膜材料が破断することがわかった。
- (3) 中央部変位は、試験結果と二段階剛性解析の結果との間に最大で16mmの差異があった。
- (4) 図2より、圧力の増加に伴い、中央部変位の時間あたりの増加量が一定であることが確認できる。
- (5) 図3より、圧力の増加速度は初期の2分間（圧力20kPaまでの範囲）は10kPa/minで、その後、140kPa/minで近似できる。
- (6) 図2, 3, 4より、4回の水圧式クリープ試験の載荷圧力は違うものの、載荷圧力に達するまでの圧力変化はほぼ同一であった。

なお、(3)の理由として、大きく2つ考えられる。1つ目は、構成則に二段階剛性を用いているため、十分に膜材料の二軸特性が表現できていないこと。2つ目は、図2からわかるように、試験においては、圧力の増加に2, 3分の時間を要しているのに対して、二段階剛性解析では時間変化が考慮できていないことである。

(4)の線形性が成立する理由は次の通りである。円形試験体の直径を L とすると、中央部変位 h と曲率半径 r の関係は式(1)である。また、容積 V は中央部変位 h に対して、式(2)で示す通り非線形である。しかしながら、ここで対象とする中央部変位 h は最大でも80mm程度であり、直径 $L = 500\text{mm}$ と合わせて考えると、 $(4/3)(h/L)^2 = (4/3)(80/500)^2 = 0.034 \ll 1$ となり、式(2)の第2項は無視できる。よって、容積 V と中央部変位 h の関係は線形とみなすことができる。

$$r = (h^2 + (L/2)^2) / 2h \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{3} \pi h^2 (3r - h) \\ = \frac{\pi L^2}{8} h \left(1 + \frac{4}{3} \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right) \quad (2)$$

したがって、単位時間あたりの送水量が一定、つまり、容積変化率は一定であることから、中央部変位の変化

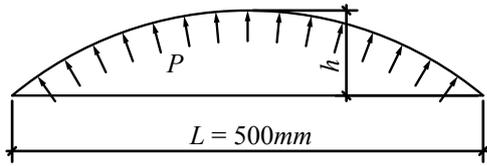


図1 水圧式クリープ試験の模式図

表1 载荷直後の载荷圧力，中央部変位と中央部のたて糸方向発生応力²⁾

载荷圧力 (kPa)	試験結果		解析結果 (二段階剛性)
	中央部変位 (mm)	中央部変位 (mm)	中央部たて糸方向発生応力 (kN/m)
86	55.9	48.1	44.5
126	61.4	51.2	60.3
160	65.3	53.6	72.8
216	73.0	57.0	91.8

表2 水圧式クリープ試験による各状態の中央部変位 (mm)²⁾

载荷圧力 (kPa)	クリープ後の状態	加圧直後	クリープ後	増分量
86	90日間破断なし	55.9	64.0	8.1
126	24日後破断	61.4	69.5	8.1
160	47分後破断	65.3	69.7	4.4
216	42秒後破断	73.0	76.8	3.8

率も一定となる。

(5) は、膜材料の二軸引張特性に非線形性があり、初期は低剛性で、クリップ交換後は高剛性となることと、送水量と中央部変位が比例することからわかる。

3. 粘弾塑性を考慮した構成則

水圧式クリープ試験を模擬したFEM解析を行うにあたり、膜材料の粘弾塑性特性を考慮した構成則が必要となる。そこで、構成則には、織構造格子モデル(図5)を採用する。なお、織構造格子モデルは加藤・吉野⁶⁻⁹⁾によって提案され、膜材料の二軸引張特性および粘性特性の試験結果との比較から妥当性が確認されている。

3.1 膜材料の二軸引張特性

水圧式クリープ試験に用いた膜材料と同一ロールから採取した膜材料の二軸引張特性を図6に示す。たて糸方向とよこ糸方向の応力の比(以下、応力比)は(1:0), (0:1), (1:1), (2:1), (1:2)の5種類とした。载荷と除荷を1サイクルとし、応力比ごとに応力比を保持したまま、3サイクル実施した。なお、最大応力は $59kN/m$ とした。

既報で示す織構造格子モデルの諸定数の妥当性は示されているものの、本試験で使用した膜材料の二軸引

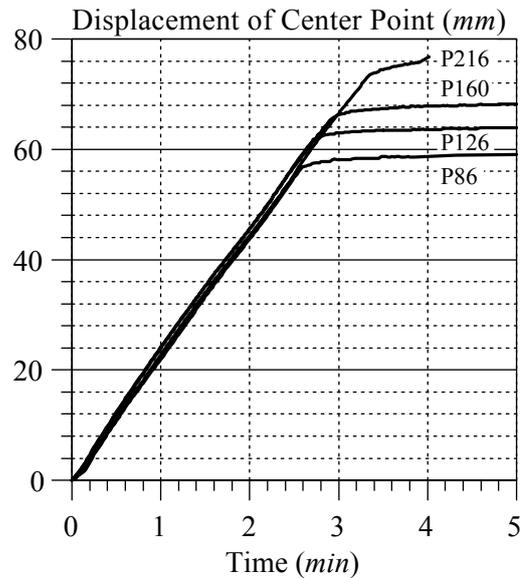


図2 中央部変位と時間の関係

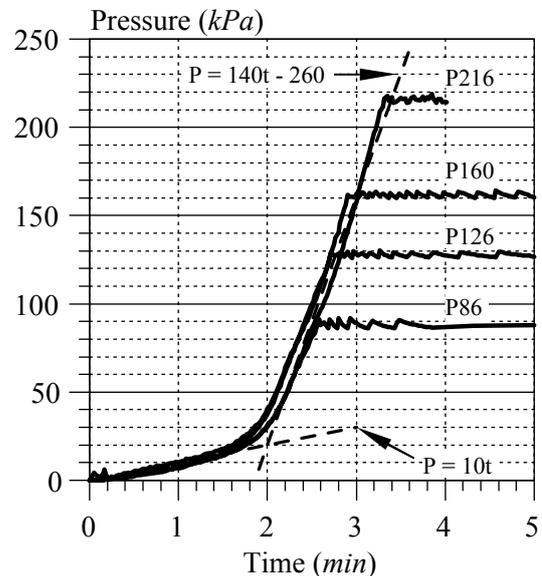


図3 圧力と時間の関係

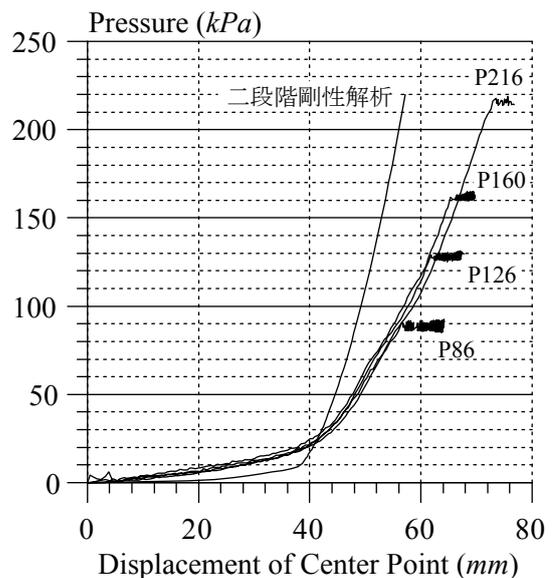


図4 圧力と中央部変位の関係

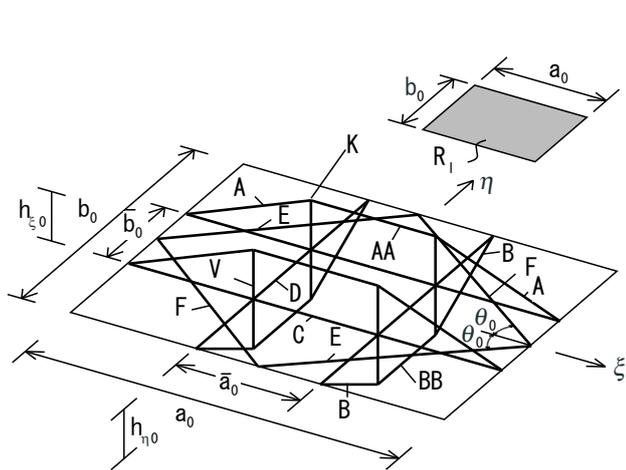
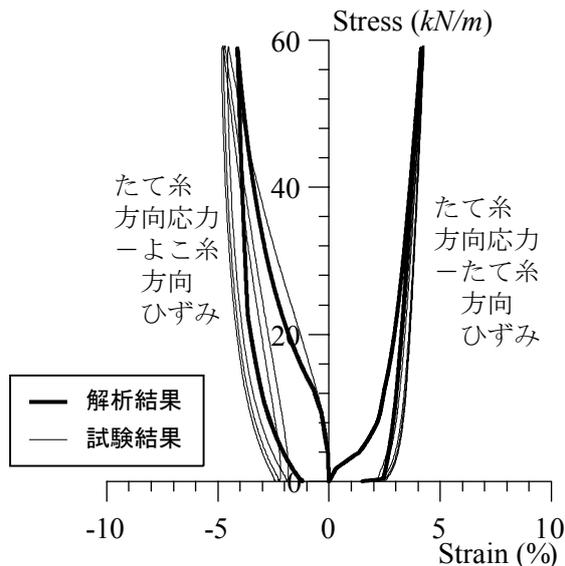
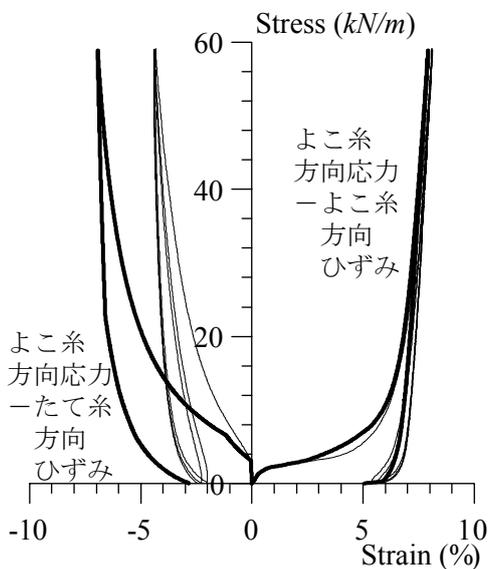


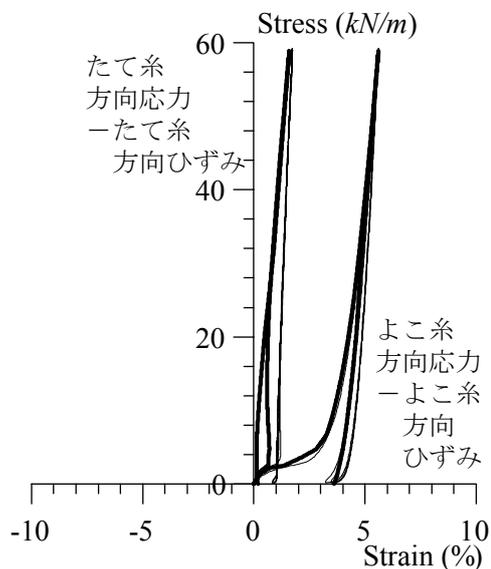
図5 織構造格子モデル



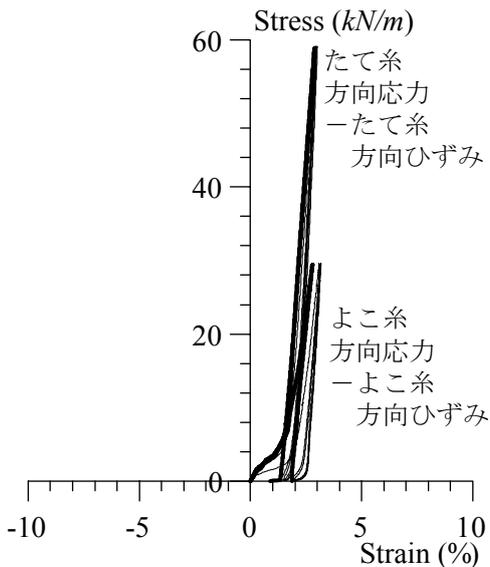
(a) 応力比 (1:0)



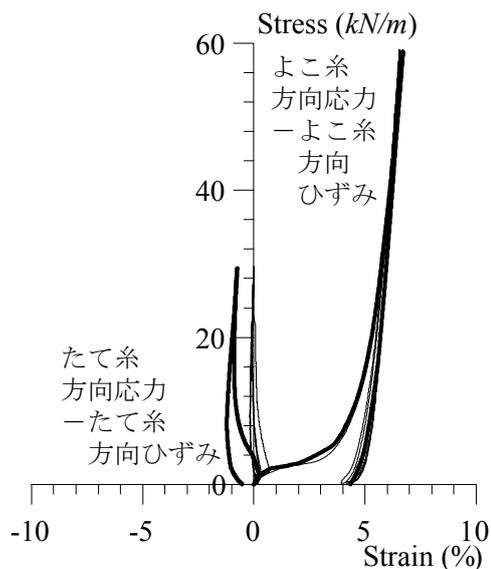
(b) 応力比 (0:1)



(c) 応力比 (1:1)



(d) 応力比 (2:1)



(e) 応力比 (1:2)

図6 二軸引張特性の実験と解析の比較

表3 織構造格子モデルの形状および弾塑性に関する諸定数

$$a_0 = 1.45\text{mm}, \quad b_0 = 1.30\text{mm}, \quad \bar{a}_0 = a_0/3, \quad \bar{b}_0 = b_0/3, \quad h_{\xi_0} = 0.141\text{mm}, \quad h_{\eta_0} = 0.197\text{mm}$$

Element	A_0 (mm^2)	ℓ (mm)	E_1, E_1' (kN/mm)	E_2, E_2' (kN/mm)	E_3, E_3' (kN/mm)	E_4, E_4' (kN/mm)	E_5 (kN/mm)	$\varepsilon_1, \varepsilon_1'$ (%)	$\varepsilon_2, \varepsilon_2'$ (%)	$\varepsilon_3, \varepsilon_3'$ (%)	ε_4 (%)	n	m_1	m_2
A, AA	0.16/2	0.483	0.001	126.0	348.4	0.001	-392.0	0.001	0.30	4.43	4.44	-	-	-
B, BB	0.16/2	0.433	0.001	98.0	446.4	0.001	-294.0	0.001	0.30	3.47	3.48	-	-	-
C	0.40/2	1.450	33.32	13.23	6.66	-294.0	-	0.30	1.20	7.30	-	0.00	0.07	0.50
			33.32	8.82	1.96	-294.0		-0.06	-1.20	-10.30				
D	0.40/2	1.300	30.87	12.25	3.92	-294.0	-	0.30	0.70	10.40	-	0.00	0.08	0.50
			30.87	12.25	3.92	-294.0		-0.35	-0.70	-10.30				
E, F	0.14	1.947	5.00	0.002	0.001	-9.80	-	0.20	1.00	2.00	-	0.00	0.00	0.00
			5.00	0.002	0.001	-9.80		-0.20	-1.00	-2.00				
V	0.25/4	0.339	0.03	0.94	31.36	-	-	-11.0	-17.0	-	-	-	-	-

Element	k_1 (kN/mm)	k_2 (kN/mm)	k_3 (kN/mm)	k_4 (kN/mm)	γ_1 (%)	γ_2 (%)	γ_3 (%)	n	m_1
R ₁	0.0637	0.0304	0.0142	-98.0	1.66	3.50	100.0	-0.40	0.25

表4 織構造格子モデルの粘性に関する諸定数⁸⁾

Element	T_g (sec)	C_1 (mm^2/kN)	T_1 (sec)	C_2 (mm^2/kN)	T_2 (sec)
C	6240000	0.0063	42	0.1990	21006
D	3471600	0.0534	220	0.2156	9522
V	255120	1.4153	1400	1.6867	104160

表5 载荷圧力に達するまでに要した時間

载荷圧力 (kPa)	载荷圧力に達するまでに 要した時間 (min)
86	2.55
126	2.76
160	3.00
216	3.40

張特性とは差異が見られた。そこで、二軸特性に関する諸定数を既報⁷⁾に基づいて再設定する。得られた諸定数を表3に、応力・ひずみ関係を図6に示す。応力比(0:1)のよこ糸方向のひずみに大きな差異が見られるが、その他については試験結果をよく表していると言える。

3.2 膜材料の粘性特性

二軸引張特性が既報⁸⁾との間で差異があることから、粘性特性についても差異があると思われる。しかしながら、同一ロールの粘性特性の確認は行っていないため、既報⁸⁾にて検証した諸定数(表4)を採用する。なお、検証に用いた試験結果は、応力 5kN/m 以下、かつ、1週間の応力緩和特性である。

4. 水圧式クリープ試験を模擬したFEM解析

4.1 解析条件

粘弾塑性を考慮した構成則を用いて、水圧式クリープ試験を模擬したFEM解析を行う。

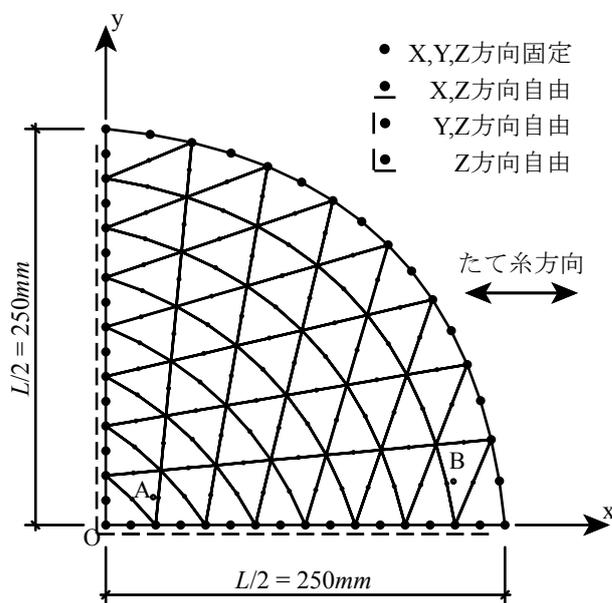


図7 解析モデル

解析モデルを図7に示す。水圧式クリープ試験の対称性を考慮し、4分の1領域で解析を行う。要素は6節点アイソパラメトリック要素を用いる。境界条件は外周は固定とし、対称面上の節点は面内自由とし、面外方向固定とする。

構成則は織構造格子モデルを用いて、粘弾塑性を考慮する。ただし、諸定数は表3,4の値を使用する。

载荷圧力は各要素のZ方向正側の面外方向に対して一様に作用させる。また、自重として 12.8N/m^2 をZ方向負側に作用させる。なお、試験結果から、载荷圧力に達するまでに要する時間を表5に示す値とした。また、この载荷圧力に達するまでに要した時間を無視した解析と考慮した解析を行う。

4.2 解析結果

荷重圧力に達するまでに要した時間を無視した解析結果、および、考慮した結果を、試験結果と二段階剛性解析結果と比較する。図8に圧力と中央部変位の関係を、図9,10に積分点A, Bの応力・ひずみ関係を、図11,12に86kPa 荷重直後および86kPa 荷重直後から90日後のたて糸方向とよこ糸方向の応力分布とZ方向変位分布を、表6に荷重直後の中央部変位と積分点Aのたて糸方向応力を、表7にクリープ後の中央部変位を示す。なお、積分点A, Bは図7を参照のこと。この結果より、次のことがわかった。

(1) 図8より、荷重圧力に達するまでに要した時間を考慮した解析においても、二段階剛性解析と同様に、

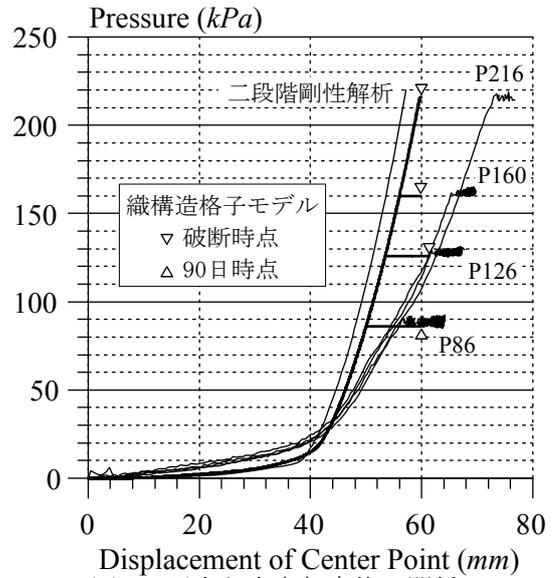


図8 圧力と中央部変位の関係

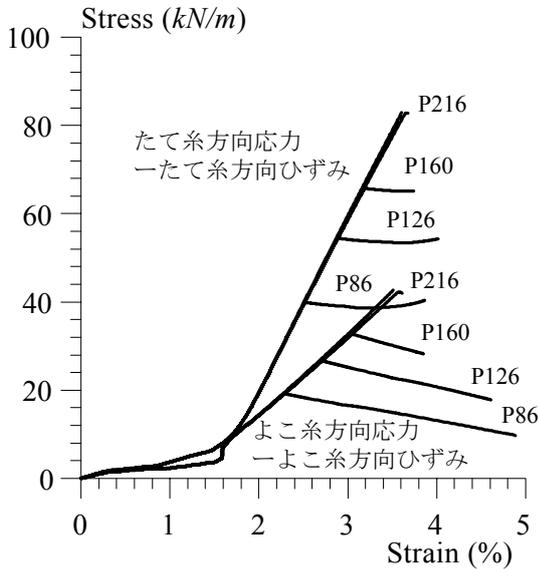


図9 積分点Aの応力・ひずみ関係

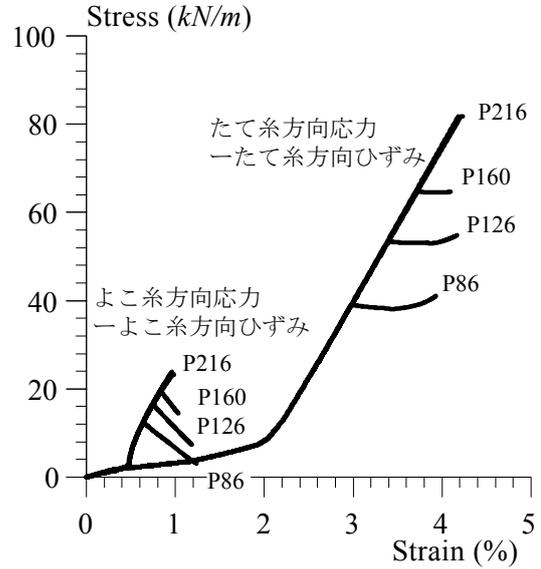


図10 積分点Bの応力・ひずみ関係

表6 荷重圧力、荷重直後の中央部変位と中央付近のたて糸方向発生応力²⁾

荷重圧力 (kPa)	試験結果	解析結果 (粘弾塑性考慮)		解析結果 (二段階剛性)	
	中央部変位 (mm)	中央部変位 (mm)	積分点Aのたて糸方向発生応力 (kN/m)	中央部変位 (mm)	中央部たて糸方向発生応力 (kN/m)
86	55.9	50.0	40.7 (23%)	48.1	44.5 (25%)
126	61.4	53.5	55.5 (32%)	51.2	60.3 (34%)
160	65.3	56.1	67.1 (38%)	53.6	72.8 (41%)
216	73.0	59.8	84.5 (48%)	57.0	91.8 (52%)

()内はたて糸方向の引張破断強度 176kN/m に対する割合

表7 荷重直後とクリープ破断時の中央部変位 (mm)²⁾

荷重圧力 (kPa)	クリープ後の状態	試験結果			解析結果 (粘弾塑性考慮)		
		荷重直後	クリープ後	増分量	荷重直後	クリープ後	増分量
86	90日間破断なし	55.9	64.0	8.1	50.0	60.0	10.0
126	24日後破断	61.4	69.5	8.1	53.5	61.4	7.9
160	47分後破断	65.3	69.7	4.4	56.1	59.9	3.8
216	42秒後破断	73.0	76.8	3.8	59.8	60.0	0.2

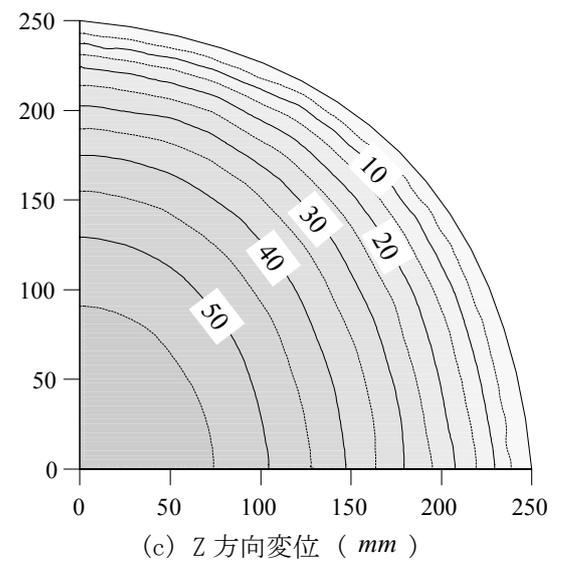
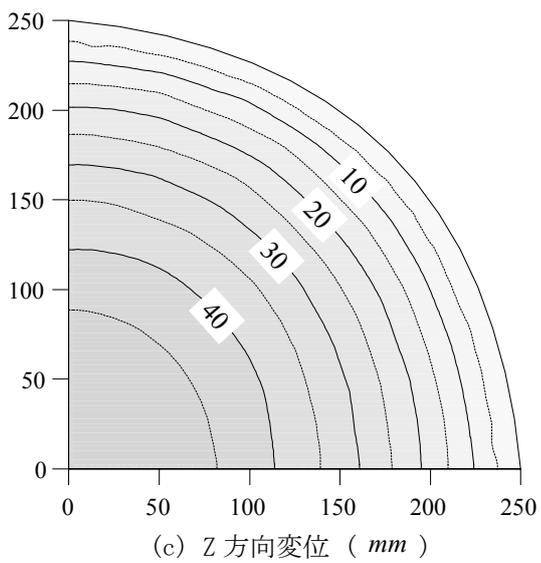
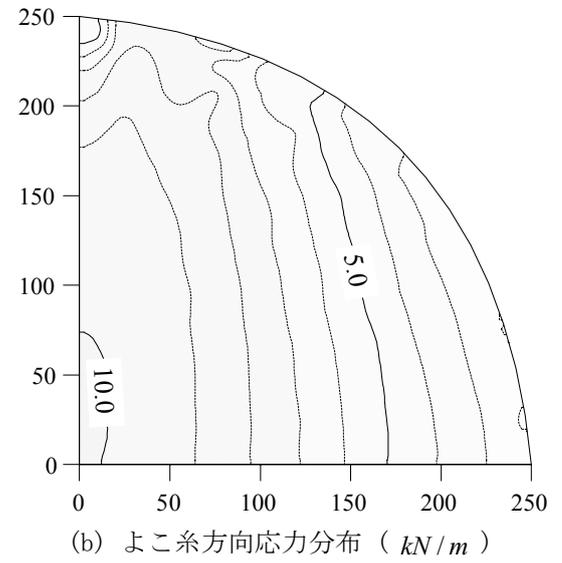
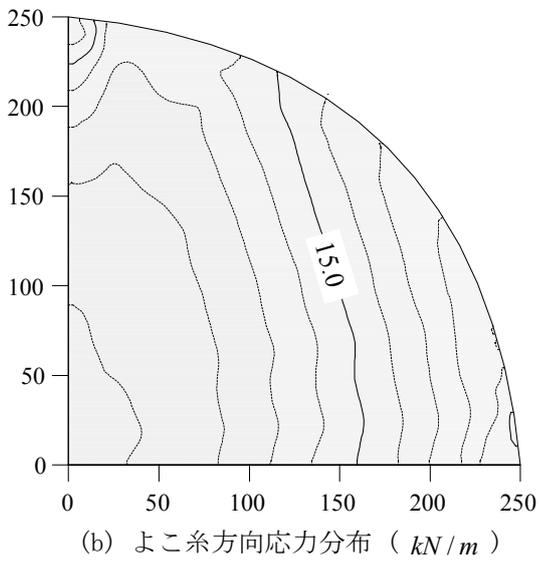
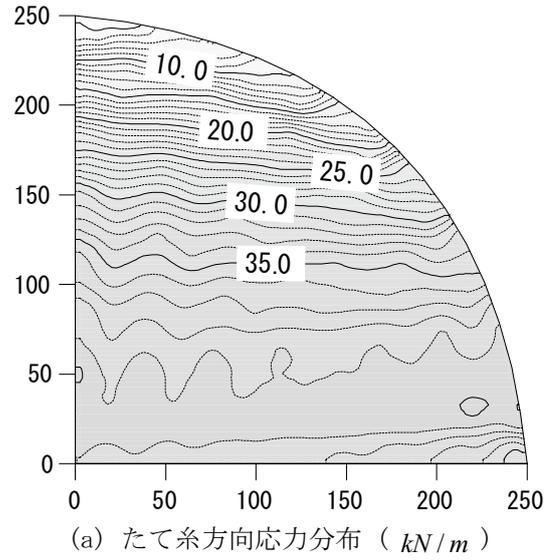
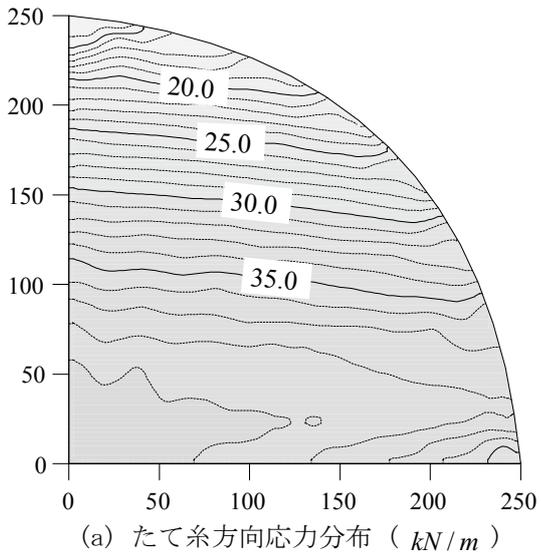


図 11 86kPa 載荷直後

図 12 86kPa 載荷直後から 90 日経過後

試験結果の中央部変位との間に差異が見られる。圧力 $10kPa$ 以下においては、解析結果の変位が大きく、それ以上の圧力においては、試験結果の変位が大きい。

(2) 図8より、織構造格子モデルを用いて、載荷圧力に達するまでに要した時間を考慮した場合としない場合について解析を行ったが、差異が見られなかった。なお、図中では重なって見える。

(3) 表6にて載荷直後から破断までの変位の増分量に注目すると、 $216kPa$ 載荷直後の42秒間のクリープ特性は表現できていないが、その他の圧力の場合の数十分以上のクリープ特性は十分に表現できている。

(4) 表5より、二段階剛性解析と織構造格子モデルを用いた解析の差異は中央部変位で2～3mmと小さい。二段階剛性解析の方が変位が小さくなっている。

(5) 図9,10より、載荷直後の時間の経過とともに、粘性特性によりひずみが増加しているのがわかる。ここで、よこ糸方向応力の減少が大きいものに対して、たて糸方向応力の変動は小さい。

(6) 図7より、圧力と中央部の変位の関係に注目すると、圧力が $70kPa$ 付近に変曲点が見られる。

(7) 図11,12の比較から、たて糸方向の応力の高い部分が時間経過に伴い、中央部から積分点Bへ移行したことがわかる。その他の載荷圧力の場合も同様な傾向を示した。破断時に応力が高い部分と破断位置が一致していることがわかった。

ここで、(2)、(3)の理由は、文献8において、粘性特性に関する諸定数の設定にあたり、1週間全体にわたっては応力緩和特性をおおよそ表現できることを目標として設定しているため、数分間の特性を十分に表現できていないためである。

(4)の理由は、二段階剛性の応力比(2:1)の応力・ひずみ関係が $5kN/m$ 以上の応力レベルにおいて、任意の応力に対するひずみが小さくなるように設定しているためである。図6(d)より、織構造格子モデルにおいても同様にひずみが小さくなっているが、二段階剛性の応力・ひずみ関係と比べると二軸引張試験の結果に近いため、中央部変位が大きい結果が得られている。

(5)の理由は次の通りである。積分点AおよびB点付近はたて糸方向の応力はよこ糸方向の応力の2倍以上であり、たて糸方向が主となって応力を負担している。また、クリープ試験を行うとたて糸方向に比べ、よこ糸方向のクリープひずみは大きい。したがって、積分点A、B付近では、クリープひずみによって、X軸周りの曲率半径が大きくなり、たて糸方向のみで応力を負担する方向に変形するためである。なお、この現象は

図11,12のZ方向変位の等高線が円から楕円に移行していることから確認できる。

5. まとめ

PTFEコーテッドガラス繊維平織物を対象とした水圧式クリープ試験結果の分析を行った。具体的には、(1)試験対象の膜材料の二軸引張特性をより精度よく表現可能な構成則の諸定数を算出し、(2)水圧式クリープ試験を模擬した解析を行った。(3)載荷圧力に達するまでの圧力と中央部変位の関係は織構造格子モデルに基づく構成則を用いたFEM解析でも十分に表現することができなかった。(4)FEM解析により破断時の応力分布を求めた結果、たて糸方向の応力が高い部分に関するFEM解析結果と水圧式クリープ試験における破断位置が一致していることを確認できた。(5)織構造格子モデルに用いた既存の粘性特性に関する諸定数は数分間のクリープ特性を十分に表現できていないが、数十分以上の時間範囲では十分に特性を表現できていることがわかった。

参考文献

- 1) 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9月
- 2) 瀬川信哉, 藤原 淳, 吉野達矢: 膜材料の二軸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—, 膜構造研究論文集2006, No.20, 2006年12月(投稿中)
- 3) 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, pp1-9, 1990年2月
- 4) 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
- 5) (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
- 6) 加藤史郎, Pongpo Petch, 武田文義, 吉野達矢, 松本恵美: Schockモデルに基づいて膜材料の構成方程式を誘導する方法について—連続体としての増分型構成式の提案—, 膜構造研究論文集'94, No.8, pp.11-26, 1994年12月
- 7) 加藤史郎, 吉野達矢, 武田文義: 織構造格子モデルに基づいた膜材料の構成方程式に関する研究—繰り返し載荷に対する応力・ひずみ関係の実験と解析との比較—, 構造工学論文集, Vol.43B, pp.17-29, 1997年3月
- 8) 加藤史郎, 吉野達矢, 南 宏和, 瀬川信哉: 施工手

順を模擬した膜構造の粘弾塑性応力・変形解析－織
構造格子モデルによる定式化と解析－，膜構造研究
論文集 '98, No. 12, pp. 11～25, 1998年12月

- 9) 吉野達矢，加藤史郎：2軸引張状態における膜材
料の破断強度の推定，膜構造研究論文集 2002,
No. 16, pp. 1-6, 2002年12月

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

Stress-displacement analysis of circular specimen for simulating a water-pressed creep test

Tatsuya Yoshino*, Shinya Segawa*, Jun Fujiwara*

SYNOPSIS

This paper was discussed to compare between experimental and simulated results by a water-pressed creep test, using by circular specimen of membrane materials. A condition of the analysis for the simulation was shown as below;

- (1) Visco-Elast-Plastic characteristics
- (2) Six-Node isoparametric curved elements

From the numerical results, the stresses distribution under creep-rupture is obtained. As for comparison with experimental and simulated results, it was the same tendency. However, at the view point of detail, there was the difference in the result. It found that performing the experiments and identifying the parameter of constitutive equations is required.

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