ETFE フィルムのクリープ特性

- 遅延時間の分布関数による考察 -

森山 史朗^{*} 河端 昌也^{**}

梗 概

高分子材料の力学的性質を把握するために一般的に用いられている四要素モデルは、ETFE フィルムのクリープ試験の結果 を良好に再現させることが難しい。これは、実際の ETFE フィルムには多数個の遅延時間 が存在するためと考えられる。 本研究では、ETFE フィルムのクリープ特性を把握するために、四要素モデルによる検討と同時に、遅延時間の分布関数を 考慮した評価方法もあわせて検討し、その評価方法の妥当性について確認を行った。

1. はじめに

著者らはこれまでに、建築物の屋根・外装材に用いた場合 の ETFE フィルムの構造的挙動を把握することを目的とし て、インフレート実験^[1]、ポンディング実験^[2]等を実施して きた。これらの実験において、ETFE フィルムは伸びが大き い材料であることが確認され、実際に建築物に使用する場合 には、粘弾性の影響を十分考慮する必要性があることがわか った。そこで本研究では、ETFE フィルムの粘弾性性状を把 握するための端緒として、クリープ試験を実施した。

本報に先駆けて著者らは、文献[3]においてクリープ試験 を実施し、ETFE フィルムのクリープ特性について検討を行 っているが、この検討において ETFE フィルムの粘弾性定 数に、応力依存性の可能性が確認された。今回は、これを検 証するために試験体や試験方法等を改めて、再度試験を実施 し、新たに粘弾性定数の算定を行った。また、試験体の真応 力の変化による影響についても確認を行っている。

なお後述のように、今回算定した粘弾性定数を用いて四要 素モデルによる試験結果の再現を試みているが、試験結果と 計算結果を良好に一致させることが困難であることが判明 し、他の評価方法によるクリープ挙動の記述を行った。これ らの検討結果についても報告する。

2. クリープ試験

今回の試験では、図1に示すような幅20mm、長さ140mm、 厚さ200µmの短冊形の試験体を使用した。この試験体は、

- * 横浜国立大学大学院工学府社会空間システム学専攻
- ** 横浜国立大学大学院工学府社会空間システム学専攻

フィルムのMD(Machine Direction)方向から採取したものである。なお、フィルム製造時に生じる残留ひずみを除去するため、全ての試験体に対して試験前に70(8時間)のアニーリング(熱処理)を施している。



応力レベルは、3・6・9・12・15N/mm²の5つのレベルを設定した。ETFE フィルムは、ひずみ速度 1%/min の場合 3~12N/mm²が弾性域、13N/mm²から塑性域に入る^[1]。今回の試験では、弾性域と塑性域のクリープ挙動を把握するために、弾性域の3・6・9・12N/mm²と塑性域 15N/mm²を設定した。試験体の数は、5つの各応力レベルにおいて3片ずつ行なうため、合計 15 片を使用する。また、測定時間は72 時間、雰囲気温度は22 ±2の範囲とした。なお応力負荷に先立ち、全ての試験体に対し、クリープ試験機にひずみがほとんど検出されない応力(1.2N/mm²)を作用させて、フィルム表面のたるみを除去している。

本試験で応力 *o*(N/mm²) とひずみ *ɛ*(%) は、次式の公称応 力と工学ひずみを用いる。

大学院生 助教授 博士 (工学)

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{l_t - l_0}{l_0} \times 100 \tag{2}$$

ただし、Fは引張力(N) A_0 は試験体の初期断面積(mm²) l_t は試験中の所定の時間 tにおけるチャック間距離(mm) l_0 は初期チャック間距離(mm)である。

フィルムは伸びが大きいため、引張方向のクリープと同時 に刻々と試験体の中央がくびれて断面積が減少するため、フ ィルム中央の真応力が公称応力と異なることが予想される。 そこで、クリープ試験機に設置している試験体3片の内1片 に対してデジタルカメラで撮影を行い、その撮影した画像か ら、図1に示すようなマーキングした測定点を読み取り、実 際に生じているフィルム中央の真応力を算出して、その変化 の様子も調べることにした。真応力 σ_i(N/m²)の算定は、 下式に示す。

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \tag{3}$$

ただし、Fは引張力(N)である。ここで、フィルムの厚さ 方向と幅方向のひずみは同じと仮定して、断面積 $A(mm^2)$ は 以下の式で表す。

$$A = a \cdot b \tag{4}$$

$$a = a_0 (1 - \varepsilon_b) \tag{5}$$

aは試験体の厚さ、bは試験体の中央幅である。また a_0 は試験体の初期厚さ、 ε_b は試験体中央の幅のひずみである。

図2に72時間におけるクリープ試験の結果を示す。各応 カレベルにおいて、試験体3片の平均値を表している。また 図3に真応力の変化を示す。応力レベル3・6N/mm²は、変形 量が極めて小さく、デジタルカメラでは十分な測定精度の確 保が困難であったため、9・12・15 N/mm²の三つの応力レベ ルについての結果を示している。72時間後の真応力は、公 称応力9N/mm²は9.2N/mm²、12N/mm²は12.6N/mm²、15N/mm²は 16.5N/mm²と変化している。今回の弾性域における粘弾性定 数の算定では、公称応力を用いるが、厳密に算定を行う場合、 本来12N/mm²以降は真応力を考慮すべきと思われる。





3. 四要素モデルによる考察

高分子材料の力学的性質を把握する ために、一般的に図4に示すような四 要素モデルが用いられている^[4]。この モデルに対して、一定の公称応力 α (N/mm²)を加える時の初期ひずみは、 弾性率 γ (N/mm²)のバネで発生する。 その後の伸びは、粘性率 η (N·s/mm) のダッシュポットおよび並列につな がれているバネ γ_2 (N/mm²)そしてダ ッシュポット η_2 (N·s/mm)によって起 こる。よって、この四要素モデル全体 のクリープひずみは三つの部分の和 となる。すなわち、



図4 四要素モデル

$$\varepsilon = \sigma \left\{ \frac{1}{\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_2} \left(1 - e^{-t/\tau} \right) + \frac{t}{\eta_1} \right\}$$
(6)

ただし、tは時間(s) また tは次式で定義される遅延時間 (s)である。

$$\tau = \frac{\eta_2}{\gamma_2} \tag{7}$$

この遅延時間 *t* は、クリープの増大または減少の速度に関係 する係数を表す。

表1は、図2に示す72時間のクリープ曲線に対して、四 要素モデルを適用して算出した粘弾性定数である(ここでは、 弾性域の3・6・9・12 N/mm²について示す)。なお遅延時間 r は、 次式(8)で表されるクリープ曲線とその漸近線との差の自 然対数が、時間に対して比例する性質を利用して求める。

$$ln\left(\frac{\sigma}{\gamma_1} + \frac{\sigma}{\gamma_2} + \frac{\sigma}{\eta_1} \cdot t - \varepsilon\right) = ln\frac{\sigma}{\gamma_2} - \frac{t}{\tau}$$
(8)

そして粘性率 ndt (7)より導く。しかし実際には、図 5 に示すようにグラフが非線形となり時間依存性を有するため、遅延時間 rと粘性率 no の値は一つに定めることは出来ない。そこで、表 1 示すこれらの値は、便宜的に最小二乗法による線形近似の勾配より算出した。

表 1 を見てわかるように、各応力レベルの弾性率 加は、

ETFE フィルムの引張弾性率 565.2N/mm^{2[1]}と若干の違いは あるが、概ね近い値を示していると考えられる。しかし、そ の他の粘弾性定数については、応力レベルによって値が異な っている。また図5は、試験結果の72時間後における応力 - ひずみ関係を示したものであるが、応力に対して非線形性 を表している。粘弾性定数に応力依存性がなければ、式(6) で示したように、一定時間のひずみは応力に比例しなければ ならない。したがって、四要素モデルにおける弾性率⁷¹以外 の粘弾性定数は、応力依存性を有すると言える。

	0 5 10	15	20	25 3	0 35
0					
2	+				
4	¥				
:	***	*			
6			×	* *	-
8					
10	+			•	
12					
	遅延時間 $T(s)$	3.7×10 ⁴	2.9×10 ⁴	2.4×10 ⁴	3.1 × 10 ⁴
	粘性率 ^{1/2} (N・s/mm)	1.5×10 ⁸	3.7 × 10 ⁷	1.4×10 ⁷	8.8×10 ⁶
		2.3 × 10	0.0 × 10	1.12	0.0 × 10
	粘性率 刃(N・s/mm)	2.0 × 10 ⁹	6.9 × 10 ⁸	4.4×10^8	5.5 × 10 ⁸
	弾性率 $\gamma_2(N/mm^2)$	4054.1	1267.6	585.0	279.2
	弾性率 γ_1 (N/mm ²)	830.8	634.4	585.0	606.7

図5 $-ln\left(-\varepsilon+\frac{p}{\gamma_1}+\frac{p}{\gamma_2}+\frac{p}{\eta_1}\cdot t\right)$ と時間の関係

10

12

14

 $1 \cdot \frac{d}{d} + \frac{d}{d} + \frac{d}{d} + \frac{d}{d} + 3 - 3$

7% 6% 5%

r5 4%

ే స 3%

2% 1% 0% 0



図7に、試験結果と四要素モデルによる計算結果を比較し たグラフを示す。四要素モデルによる計算結果は、表1の粘 弾性定数を使用して表したものである。どの応力レベルでも 曲線の後半部分では結果が一致するが、前半部分では差が生 じている。また、試験結果と計算結果のクリープ曲線の差違 は、遅延時間 τと粘性率 2の時間依存性を評価していない影 響と考えられる。

4. 遅延時間の分布関数による考察

前述の四要素モデルによる考察でも明らかになったよう に、実際の ETFE フィルムでは、多数個の遅延時間 r が存 在している。四要素モデルによる計算結果は、1個の遅延時 間によるものであるため、試験結果と良好に一致することが できなかった。試験結果と良く合うように、モデルを増やし て五要素、六要素にする手段も考えられるが、複雑なモデル を構成して粘弾性定数を算出していくことは困難であり、実 際上は不可能に近い。そこで、多くの遅延時間が連続的に分 布していると考え、その分布の有様を表す関数の形を決める ことにする。ここでは、遅延時間の分布関数を考慮したクリ ープひずみの評価方法を検討し、その妥当性を確認する。

遅延時間の分布関数 L(t) は、タイムスケール t の常用対数 に対してプロットしたクリープコンプライアンス J(t) の曲 線の勾配から、下式によって求めることができる[5]。

$$L(\tau) = \frac{1}{2.303} \frac{d[J(t)]}{d\log_{10} t}$$
(9)

$$J(t) = \frac{\varepsilon}{\sigma} \tag{10}$$

ここで、 σ は一定応力、 ε は t時間経過した時のクリープひ ずみである。また式(9)を log10t で不定積分を行うと、次 式のようになる。

$$J(t) = 2.303 \log_{10} t \cdot L(\tau) + C \tag{11}$$

上式(11)を式(10)代入し、クリープひずみ式として表現 すると、

$$\varepsilon = 2.303 \log_{10} t \cdot L(\tau) \cdot \sigma + C \tag{12}$$

となる。

3~15N/mm² におけるタイムスケール t の常用対数に対し てプロットしたクリープコンプライアンス J(t)を、図8 に示 す。前述したように、この曲線の勾配から遅延時間の分布関 数 L(r) を求めていくが、ここでは便宜的に 1秒(載荷時) 1 分~30 分、 30 分以降の 3 つの区間で線形近 ~60秒、 似を行い、その勾配から遅延時間の分布関数を算出する。 図9に1秒~60秒の間における分布関数、図10に1分~



4

30 分の間の分布関数、図 11 に 30 分以降の分布関数を示す。 30 分以降の分布関数は、一つの線形近似による数式で表す ことが可能である。しかし、30 分以前の分布関数は非線形 であり、同一の数式で表現することができない。特に 12N/mm² で不連続性が見られるが、これは塑性化による影響ではない かと考えられる。

図9~11に示す数式を、表2にまとめる。式(12)に表2 の遅延時間の分布関数を代入して計算すると、3~15N/mm² の応力レベル内においてクリープ曲線を描くことができる (この時、式(11)の定数 cの部分には、log₁₀t=0 の時すな わちt=1のひずみを代入する)。その計算結果を図12に示す が、ほぼ試験結果と同じ挙動を示している。図12では、四 要素モデルによる計算結果も併せて表示しているが、遅延時 間の分布関数を考慮した計算結果は、曲線の前半部分に大き な差がない。また、四要素モデルによる計算結果に比べて、 試験結果に近い結果を示している。







図9 1秒~60秒間における遅延時間の分布関数



図101分~30分間における遅延時間の分布関数



図11 30 分以降の遅延時間の分布関数

表2 遅延時間の分布関数

	1秒~60秒	1分~30分	30 分以降	
$3 \sim 6 \text{N/mm}^2$	2.6 × 10 ⁻⁶ • −7.0 × 10 ⁻⁶	1.9×10 ⁻⁵ • -4.9×10 ⁻⁵		
6~9N/mm ²	2.5 × 10 ⁻⁶ ⋅ -6.1 × 10 ⁻⁶	4.1 × 10 ⁻⁵ • −1.8 × 10 ⁻⁴	- 3.7×10⁵• -3.3×10⁵	
9~12N/mm²	1.3×10 ⁻⁵ • -1.1×10 ⁻⁴	1.1 × 10 ⁻⁴ • -8.2 × 10 ⁻⁴		
12~15N/mm ²	1.4×10 ⁻⁶ +3.9×10 ⁻⁵	2.9 × 10 ⁻⁵ +1.7 × 10 ⁻⁴		



図12 試験結果および四要素モデルとの比較

5. まとめ

- 本研究で得られた知見を以下にまとめる。
- ① 四要素モデルにおける弾性率n以外の粘弾性定数は、応力依存性を有する。また、遅延時間 てと粘性率nは時間依存性も併せ持つ。
- ② 3~15N/mm²の応力レベルにおいて、遅延時間の分布関数 より求めた計算結果は、試験結果とほぼ同じクリープ挙動 を示すことができる。

今回得られた遅延時間の分布関数を用いて、今後FEM解 析に応用していく。これにより、構造物にETFEフィルムを使用 した場合のクリープ挙動を、事前に把握することが可能となる。 また、この分布関数はリラクゼーション(応力緩和)への応用も 考えられ、ETFEフィルムの粘弾性性状を詳細に調べていく上 での足がかりとなる。

参考文献

[1] 森山史観 河端昌也、正木佳代子: ETFE フィルムの弾塑性挙動について、膜帯詰論文集2003、p21-26、 2003 年 [2] 河端昌也、森山史観 薛学禎: ETFE フィルムを用いた四角形(ネルの)街 デオンディング、 腰帯詰論文集2003、p27-33、2003 年 [3] 森山史観、河端昌也: ETFE フィルムのクリープ特性について、 日本連算学会大会学術講典理題集、 pp897-888、2004 年 [4] 中川龍太郎、神戸博太郎: レオロジー、み すず書房、1959 年 [5] L-E-NIELSEN: 高分子と複合材料の力学的性質、(株)化学同人、1976 年 謝辞

本研究をまとめるに際し、旭硝子(株)小田様の御協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

Creep characteristic of ETFE film

-Examination by distribution function of retardation time-

Fumio Moriyama ^{*)} Masaya Kawabata ^{**)}

SYNOPSIS

Four-element model is generally used to understand dynamics character of high-polymer materials. However, it is difficult for this model to reproduce the Creep experiment result of ETFE film excellently. The cause is thought to be a lot of Retardation-time τ in the actual ETFE film. In this research, to understand the Creep characteristic of ETFE film, an examination using "Distribution function of Retardation-time" is conducted besides the examination by Four-element model. At the same time, the validity of the examination method by "Distribution function of Retardation-time" is confirmed.

*) Graduate Student, Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Yokohama National University
**) Dr.-Eng. Associate Prof., Department of Architecture and Building Science, Faculty of Engineering, Yokohama National University