

ETFE フィルムの粘塑性構成式

—粘塑性定数の決定と1軸引張の負荷過程に関する検討—

丁 乙碩*
河端 昌也**

梗 概

ETFE フィルムは伸び能力が高い材料であるため、より高耐力化させるために延伸による方法が提案されてきた。このような延伸方法は引張力の除荷後、塑性域での残留ひずみと応力を予測することが重要となる。一方、ETFE フィルムはクリープ、リラクゼーションといった粘性が顕著で、その挙動にはひずみ速度依存性が見られる。特にひずみ速度に依存した降伏応力及び降伏後の応力-ひずみ関係を弾塑性構成式で表すためには、ひずみ速度に応じて材料定数を変えなければならないため、ETFE フィルムを用いた構造物の挙動を予測するうえで十分とは言えない。

そこで、本論文では、ETFE フィルムの粘塑性挙動を精度よく表現するために、移動硬化クリープ理論と非線形移動硬化理論を組合わせた粘塑性構成式を適用し、ひずみ速度依存性を表現できるように材料定数を決定する。なお、実験結果と解析結果の比較を通じて、ETFE フィルムに対する粘塑性構成式の妥当性を確認する。

1 はじめに

ETFEフィルムは、テトラフルオロエチレンとエチレンの共重合体を基本組成とする熱可塑性の高分子材料として、従来の膜材料に比べ高強度、耐候性、防炎性などの特徴を有し、可視光線透過性、紫外線反射性、リサイクル性などの特徴も併せ持つ新しい膜材料である。そのため、近年、多様な建築物に適用する事例も増え続けており、ETFEフィルムの構造的挙動を把握するための様々な研究も報告されてきている。一般にETFEフィルムを用いた構造形式には、クッションタイプ(空気膜方式)とテンションタイプ(張力膜方式)の2種類が最も効率的な方法として知られているが、施工された実例を見ると、クッションタイプの事例がほとんどである。その理由として、膜面の曲率を大きくしやすいクッションタイプの方が、風などの付加荷重時の応力を低く抑えることができ、ライズ増加でクリープひずみを吸収しやすいため、フィルムのような材料に対して合理的な方法であると考えられる。しかし、従来の弾性域での設計法はフィルムの許容耐力レベルが低いという問題点を持っていたため、より高耐力化させるために延伸による方法が提案された。このようなETFEフィルムに関する既往の研究としては、ミーゼスの降伏条件に基づいたフィルムの1軸・2軸引張特性の検討及び加圧試験を通じた弾塑性解析の有効性に対する研究^{[1][2]}、クリープ特性及びひずみ速度依存性の把握に従う粘弾性の挙動予測と解析手法の提案に関する研究^{[3][4][5]}などが挙げられる。しかし、高分子材料であるETFEフィルムは粘性挙動、すなわち、クリープ、リラクゼーション、ひずみ速度依存性などのような性質を有しているため、弾塑性解析を行う場合、この条件に応じて材料定数を変えなければならない問題を持っている。

また、既報^[6]では、初期張力を導入することで、取付時にフィルムを延伸させる方法を提案して、クッションタイプのみではなく、テンションタイプでも有効な方法であることを確認した。このような延伸は高分子材料を対象とした場合、引張力の除荷後の残留ひずみと応力を予測することが重要であり、粘弾性挙動よりも大きいひずみ領域まで考慮しなければならないため、精度良い粘塑性解析が必要となる。しかし、高分子材料の粘塑性挙動に関しては、ポリエチレン樹脂に対して背応力を用いた粘塑性構成式の妥当性の検討研究^{[7][8]}等が報告されているが、ETFEフィルムに対する粘塑性挙動の把握に関する研究は報告されてない。

したがって、本論文では、ETFEフィルムの粘塑性挙動を把握するために、移動硬化クリープ理論と非線形移動硬化理論を組合わせた粘塑性構成式を適用し、実験結果と解析結果の比較を通じてその妥当性を確認することを目的とする。

2 粘塑性構成式

簡単のために微小変形を仮定する。まず、高分子材料に生じる全ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}$ は、弾性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ と粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^v$ の和として次のように表す。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^v \quad (1)$$

ここで、材料の弾性変形はフックの法則に従うとすれば、次のように書ける。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \dot{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{E} \dot{\sigma}_{kk} \delta_{ij} \quad (2)$$

ただし、 E は縦弾性係数、 ν はポアソン比を表す。

* 横浜国立大学大学院工学府 社会空間システム学専攻 大学院生

** 横浜国立大学大学院工学府 社会空間システム学専攻 准教授 博士(工学)

次に、Malinin-Khadjinskyの移動硬化クリープ理論⁹⁾を粘塑性変形に適用し、粘塑性ポテンシャル g を次のように与える。

$$g = \frac{1}{2} \xi_{ij} \xi_{ij} \quad (3)$$

ここで、 ξ_{ij} は有効応力と呼ばれ、偏差応力 s_{ij} 、そして、降伏曲面の中心の移動量である背応力 α_{ij} の偏差量 a_{ij} を用いて次のように定義される。

$$\xi_{ij} = s_{ij} - a_{ij} \quad (4)$$

したがって、 a_{ij} は偏差応力空間における粘塑性ポテンシャル面の中心の移動量を表す。

次に、この粘塑性ポテンシャル g を用いて、粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^v$ は次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^v = \Lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} = \Lambda \xi_{ij} \quad (5)$$

ここで、 Λ は応力 σ_{ij} と負荷履歴に依存する正值のスカラー係数である。

相当有効応力 $\bar{\xi}$ と相当粘塑性ひずみ速度 $\bar{\epsilon}^v$ を式(6)のように定義すれば、式(5)の粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^v$ は式(7)のように導かれる。

$$\bar{\xi} = \left(\frac{3}{2} \xi_{ij} \xi_{ij} \right)^{1/2}, \quad \bar{\epsilon}^v = \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^v \dot{\epsilon}_{ij}^v \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^v = \frac{3}{2} \frac{\bar{\epsilon}^v}{\bar{\xi}} \xi_{ij} \quad (7)$$

そして、相当有効応力 $\bar{\xi}$ と相当粘塑性ひずみ速度 $\bar{\epsilon}^v$ の関係は次のようなSoderbergの関係式¹⁰⁾に従うと仮定する。

$$\bar{\epsilon}^v = n \left\{ \exp \left(\frac{\bar{\xi}}{K} \right) - 1 \right\} \quad (8)$$

ここで、 n と K は材料定数である。

最後に、背応力の発展式を次のように、線形項 $\alpha_{ij}^{(1)}$ と非線形項 $\alpha_{ij}^{(2)}$ の和で表し、線形項に対しては、Prager則、非線形項に対しては、Armstrong-Frederick則¹¹⁾を足し合わせた移動硬化則を用いる。

$$\dot{\alpha}_{ij} = \dot{\alpha}_{ij}^{(1)} + \dot{\alpha}_{ij}^{(2)} \quad (9)$$

ただし、 $\dot{\alpha}_{ij}^{(1)} = A \dot{\epsilon}_{ij}^v$

$$\dot{\alpha}_{ij}^{(2)} = b \left(C \dot{\epsilon}_{ij}^v - \alpha_{ij}^{(2)} \bar{\epsilon}^v \right)$$

ここで、 A 、 b 、 C は材料定数である。

3 粘塑性定数の決定

上記の構成式で用いられる材料定数をETFEフィルムに対して調べてみる。まず、高密度ポリエチレン¹⁷⁾で提案された材料定数に基づいて、次のような定数を用い、各定数の変化による結果を比較する。この時、加力条件は1軸引張応力下においてのひずみ速度 5%/minで解析を行う。

$$\left\{ \begin{array}{l} E = 952 \text{ Mpa}, A = 17.0, b = 50.0 \\ C = 7.0 \text{ Mpa}, K = 1.8 \text{ Mpa}, n = 2.0 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1} \end{array} \right\} \quad (10)$$

図1から図4は各材料定数 A 、 b 、 C 、 K の変化による応力-ひずみ関係を示す。図から分かるように定数 A は塑性域で背応力の線形項の発展を、 K は降伏応力を、 b と C は背応力の非線形項の発展と関係があることがわかる。そして、種々のケースを検討した結果、 A と b は式(10)の値に近い結果となった。

次に、式(10)の定数を用いて、ひずみ速度依存性に対して調べてみる。まず、 C と K の値はひずみ速度 5%/min における応力-ひずみ関係を記述できるように、図3及び図4よりそれぞれ一つの値を選び、3つの異なるひずみ速度に対して解析を行う。解析結果と実験結果は図5のようになり、図の中で解析結果を記号で、実験結果を実線で示した。実験結果と比較した結果、解析上ではひずみ速度による応力レベルの変化を表現できるが、ETFEフィルムの1軸引張試験におけるの応力レベルとは差異があることが分かる。したがって、ひずみ速度依存性を精度よく表現するためには、定数 C と K の値を修正していく必要があると考えられる。

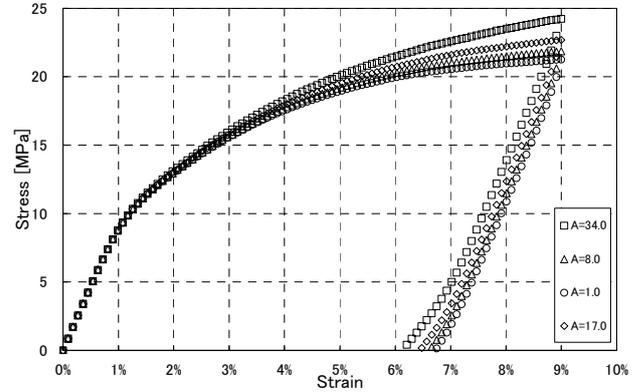


図1 定数Aの変化による応力-ひずみ関係

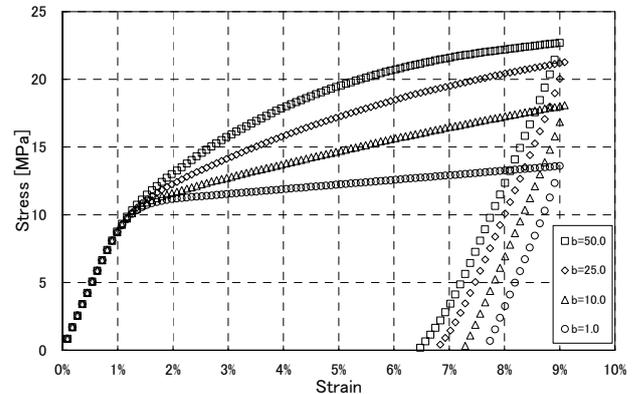


図2 定数bの変化による応力-ひずみ関係

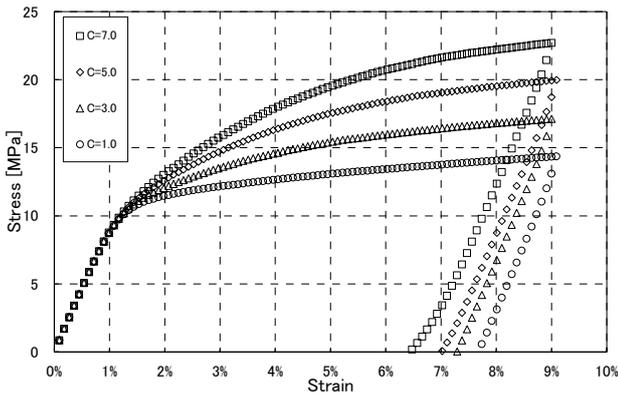


図 3 定数Cの変化による応力-ひずみ関係

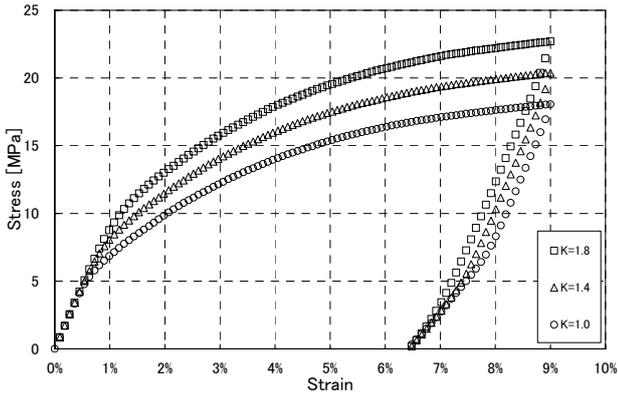


図 4 定数Kの変化による応力-ひずみ関係

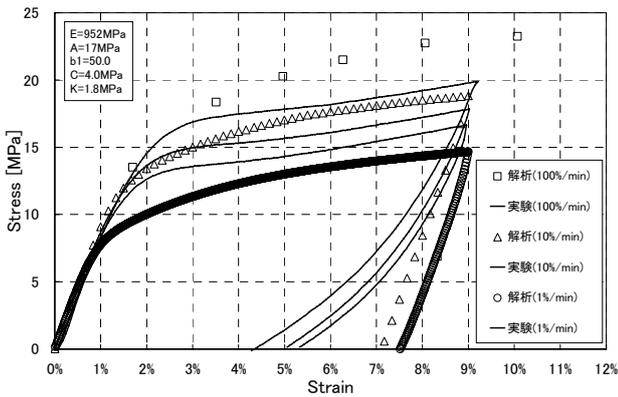


図 5 ひずみ速度の変化による応力-ひずみ関係

次に、適切な定数CとKの値を求めるために、ひずみ速度1%、2.5%、5%、10%、20%、100%/minでのCとK値の変化による応力レベルとの誤差を把握し、実験との誤差が最小となる値を求める。この時、誤差は最小自乗法を用いて求め、CとK値の範囲は実験結果に基づいて決定された。図6はCとK値の変化による誤差について実験結果を基準とした標準偏差値を示す。各ひずみ速度に対して検討した結果、C=2MPaと設定した場合における標準偏差が最も小さくなり、解析結果値の分布が実験結果値のまわりに密集していることがわかる。しかし、この時、K値はひずみ速度によって変化しているため、異なるひずみ速度で誤差を最小にするC及びKの値は同一にならないと考えられる。したがって、Soderbergの関係式に従って仮定したK値をひずみ速度に依存した変数として扱う必要があることが明らかとなった。

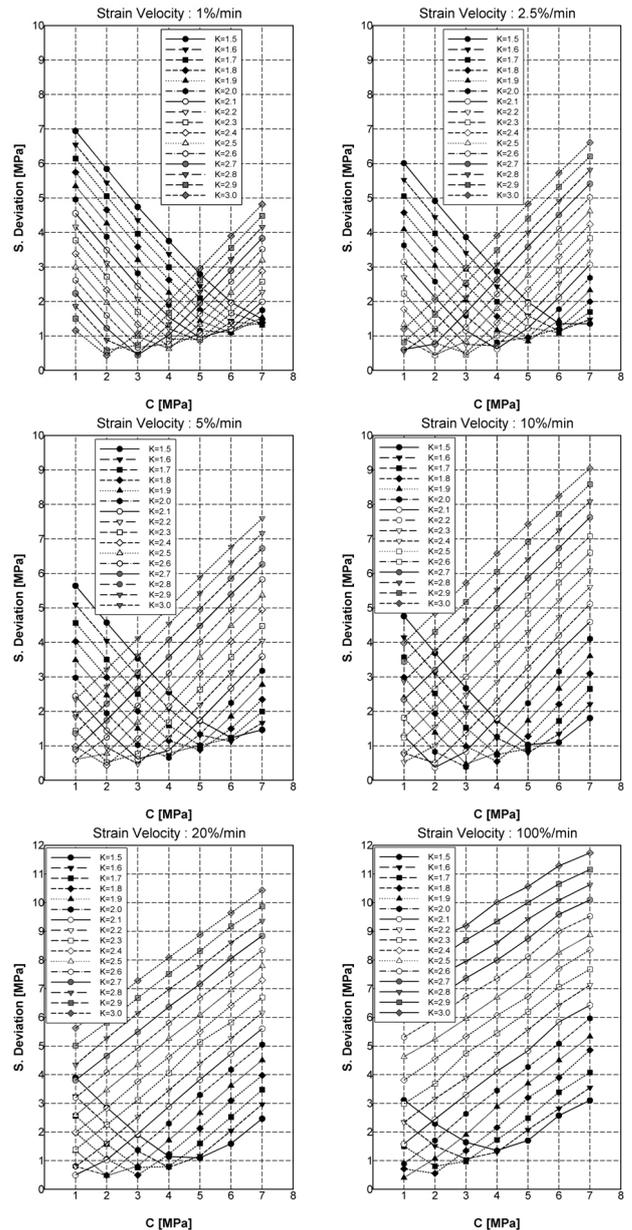


図 6 定数CとKの変化による相関関係

以上の考察に基づいて、C=2MPaの場合、各ひずみ速度における標準偏差値が最小となるK値を決定すると、K値とひずみ速度との関係は図7で表される。これは降伏応力とひずみ速度の関係と同様に、定数Kはひずみ速度に依存した近似式で表すことができ、ひずみ速度の対数に比例することが分かる。

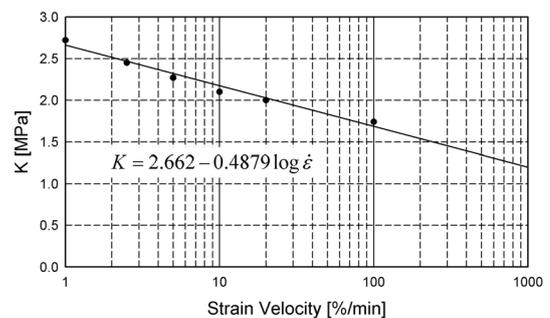


図 7 定数Kとひずみ速度との関係

4 実験結果と解析結果の比較

4.1 1軸引張応力下での結果比較

解析結果との比較のために、ETFE フィルムを対象として、1回の負荷-除荷の1軸引張の実験を行った。試験体については、幅 15mm、チャック間長さ 100mm、厚さ 200 μm の短冊形の試験体を使用した。この試験体はフィルムの MD(Machine Direction)方向から採取したものであり、試験体の数は各ひずみ速度において 3 本ずつ行った。なお、雰囲気温度は $22 \pm 2^\circ\text{C}$ の範囲とした。試験条件としては、ひずみ速度 1%、2.5%、5%、10%、20%、100%/min の 6 通りとし、荷重はひずみ 9%まで負荷した後にただちに除荷する。

次に、解析については、式(10)の材料定数に基づいて解析を行った。ただし、式(10)の中、K 値は図 7 に示したひずみ速度に応じた値を使用した。

図 8 から図 13 に ETFE フィルムの 1 軸引張試験結果と解析結果を示す。試験結果については、試験体 3 本の結果に対して平均値で表す。図の中で、記号と実線は、それぞれ実験結果と解析結果を示している。比較検討の結果、図 8-図 12 より分かるように、粘塑性構成式を用いた解析結果は ETFE フィルムの粘塑性挙動を精度よく表現していることがわかる。ただし、図 13 はひずみ速度 100%/min における結果を比較しているが、変化の様子をみると、解析結果は実験結果と少し差異が見られる。これは、応力及びひずみ増分値をひずみ速度に比例して設定しており、ひずみ速度が速くなるほど解析の増分値が大きくなることによる。

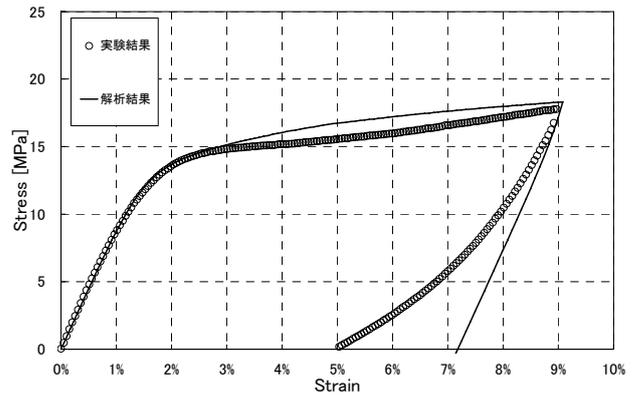


図 10 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 5%/min)

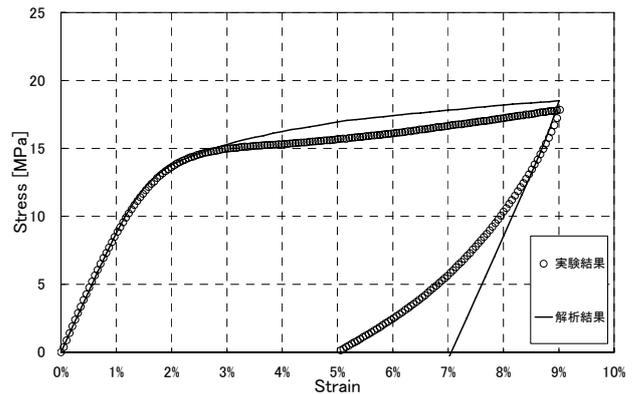


図 11 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 10%/min)

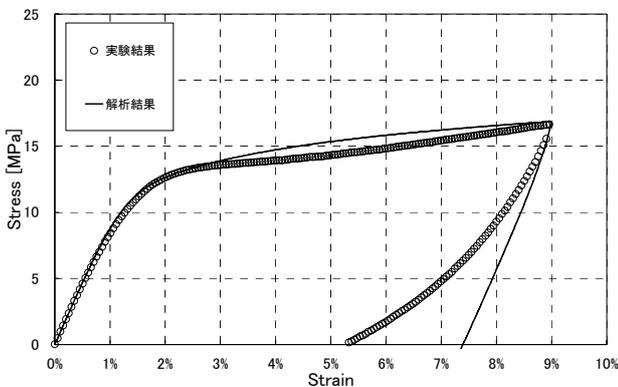


図 8 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 1%/min)

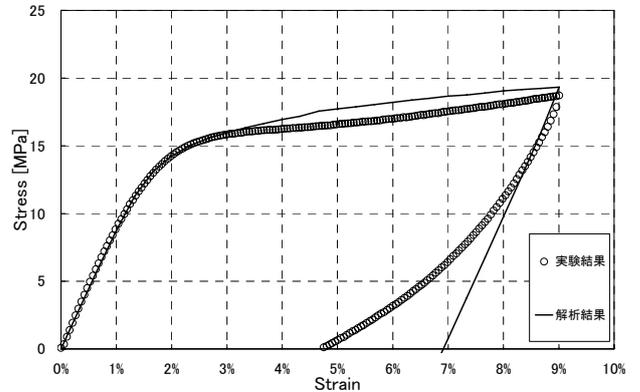


図 12 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 20%/min)

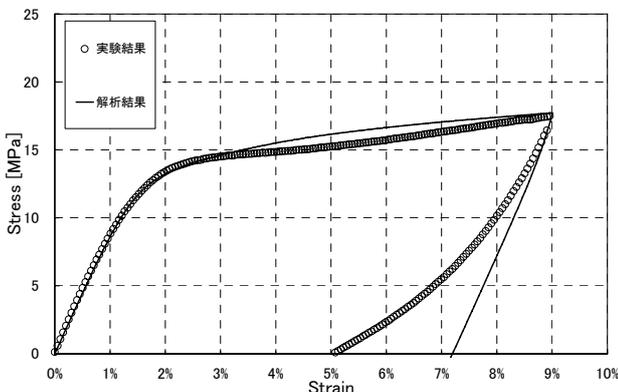


図 9 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 2.5%/min)

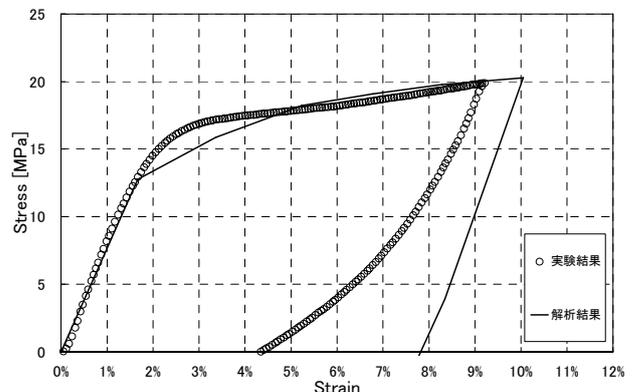


図 13 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 100%/min)

4.2 ETFE フィルムとプレートの比較

上記の実験結果と解析結果との比較検討より、降伏後、応力レベルの低下現象が見られており、このような現象が ETFE フィルムの特有の性質であるかについて把握するために、ETFE フィルムとプレートに対する 1 軸引張試験を通じて検討する。まず、ETFE フィルムの単調増加試験について記述する。試験体については、幅 15mm、チャック間長さ 100mm、厚さ 200 μ m の短冊形の試験体を使用した。次に、ETFE プレートの 1 軸引張試験については、ETFE 樹脂(旭硝子(株)、C-55A)プレスシートを使用し、最大ひずみ 20%までの単調加力試験を行った。試験体については、幅 10mm、チャック間長さ 66.7mm、厚さ 0.95、1.80、2.65mm の短冊形の試験体を使用した。そして、2 つの実験の共通条件としては、試験体の数は各ひずみ速度に対して 3 本ずつ行い、雰囲気温度は $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲とした。なお、ひずみ速度 1%、2.5%、5%、10%、20%、100%/min の 6 通りとした。

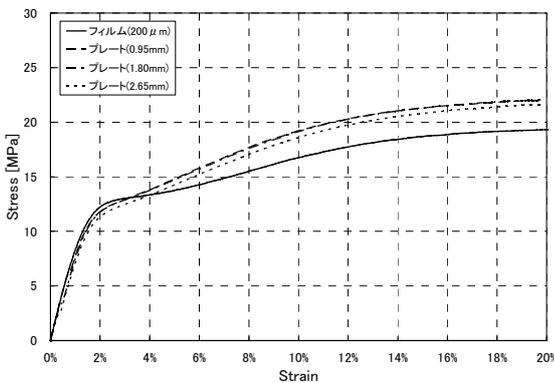


図 14 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 1%/min)

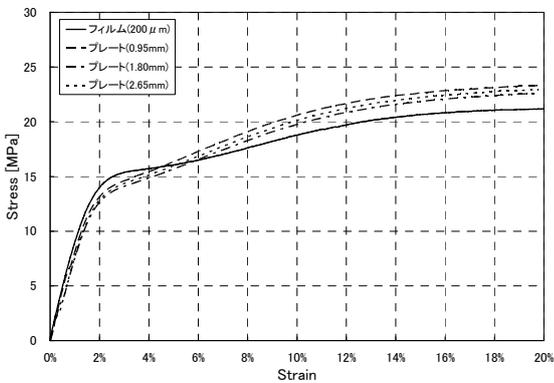


図 15 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 10%/min)

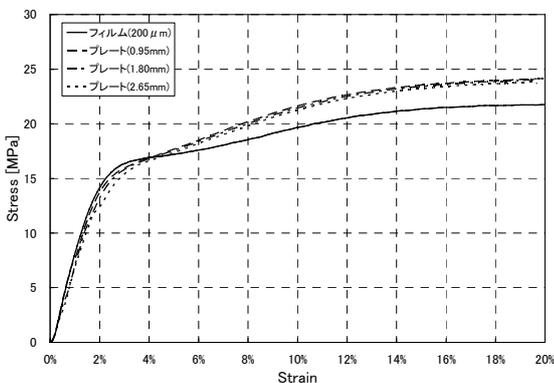


図 16 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 100%/min)

図 14 から図 16 に ETFE フィルムとプレートの 1 軸引張実験結果を表す。結果比較については、ひずみ速度の中、代表例として、1%、10%、100%/min のひずみ速度に対する結果のみを示し、同一ひずみ速度でのプレートの厚さによる結果を各々表す。この図より、ETFE フィルムを対象とした実験結果では、第 1 降伏点を超えて第 2 降伏点に至る前まで応力の低下現象が顕著に見られるのに対して、ETFE プレートの実験結果では、降伏点を超えてひずみ 20%の塑性域まで負荷しても応力の低下現象は生じていないのが確認できる。なお、ETFE プレートの厚さによる応力-ひずみ関係においても同一の結果となることが分かる。

したがって、ETFE フィルムでのみ、この現象が見られるのは ETFE プレートに比べ、フィルムの厚さが薄いため、厚さ方向より幅方向への応力集中が生じやすく、応力集中によるくびれ発生とひずみ軟化の進行による影響と考えられる。

5 まとめ

本論文では、ETFE フィルムの粘塑性挙動を把握するため、移動硬化クリープ理論と非線形移動硬化理論を組合わせた粘塑性構成式を適用し、その妥当性を検討し、以下の知見を得た。

- 粘塑性構成式内の材料定数 K 値をひずみ速度に依存した変数として扱うことによって、ETFE フィルムに対し、ひずみ速度依存性を表現できることが確認された。
- 移動硬化クリープ理論と非線形移動硬化理論を組合わせた粘塑性構成式を用いた結果、負荷履歴については粘塑性挙動を精度よく表現でき、ETFE フィルムにも適用可能であることが分かった。
- ETFE フィルムは降伏点を超えていくと、くびれの発生とひずみ軟化の進行による応力レベルの低下現象が顕著に見られることが確認された。

今回、粘塑性構成式を用いた解析結果では、ETFE フィルムの負荷履歴については精度よい結果が得られたが、除荷に対しては表現できなかったため、今後は除荷時のひずみ回復が表現できる粘塑性挙動についても検討を行っていく予定である。なお、降伏後の応力低下現象を把握し、この現象を表現できるように、ひずみ硬化則に対しても検討していく予定である。

謝辞

ETFE プレートの 1 軸引張実験を実施するにあたり、旭硝子(株) 樋口様と下井様のご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 森山史郎、河端昌也、正木佳代子: ETFE フィルムの弾塑性挙動、膜構造研究論文集 2003、No.17、pp21-26、2003
- 吉野達矢、瀬川信哉、小田憲史: ETFE フィルムの 2 軸引張特性と弾塑性応力・変形解析、膜構造研究論文集 2004、No.18、pp31-39、2004
- 河端昌也、森山史郎: ETFE フィルムのひずみ速度依存性と構造挙動について、膜構造研究論文集 2004、pp41-46、2005
- 森山史郎、河端昌也: 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、膜構造研究論文集 2004、pp47-51、2005
- [5] 河端昌也、森山史郎、會田裕昌:ETFE フィルムの粘塑性挙動について、膜構造研究論文集 2005、pp1-8、2006
- [6] 河端昌也、丁乙碩:ETFE フィルムの延伸立体成形に関する研究-(その 1) 延伸立体成形の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp931-932、2008
- [7] 佐野村幸夫、水野衛:高密度ポリエチレンの粘塑性構成式、日本強度学会誌、Vol.38、No.1、pp7-13、2004
- [8] 水野衛、佐野村幸夫:高分子材料の負荷反転時の非弾性挙動を表す粘塑性構成式、日本強度学会誌、Vol.54、No.4、pp414-419、2005
- [9] N. N. Malinin and G. M. Khadjinsky, Int. J. Mech. Sci., 14, 234, 1972
- [10] 日本材料学会編、固体力学の基礎、日刊工業新聞社、pp.152、pp.176, 1981
- [11] P. J. Armstrong and C. O. Frederick, CEGB Rep., No.RD/B/N731, 1966
-

Visco-plastic Constitutive Equation of ETFE film

- Study on the determination of viscoplastic constant and the loading path under uniaxial tensile -

Eulseok JEONG ^{*)}
Masaya Kawabata ^{**)}

SYNOPSIS

ETFE film is the material which has a large elongation under tensile stress, and it has been proposed by stretching to make higher strength. After unloading the tensile stress, it is important to predict the residual strain and stress in the plastic region. ETFE film has a viscous property such as creep and relaxation, and it is depended on strain rate. Especially, to show the yield stress depended on strain rate and the stress-strain relationships on the elasto-plastic constitutive equation, the material constant must be changed according to the strain rate. In this reason, visco-plastic constitutive equation is needed. In this paper, visco-plastic constitutive equation is formulated by combining the kinematic hardening creep theory and the nonlinear kinematic hardening theory to investigate the visco-plastic behavior of ETFE film. And, the material constant is determined by the strain velocity dependence. Also, the validity of the visco-plastic constitutive equation is

^{*)} 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