ETFE フィルムの粘塑性構成式

ーアニーリング処理に従う1軸・2軸引張時においての応力ーひずみ関係の検討ー

丁 乙碩^{*} 河端 昌也^{**}

梗 概

ETFE フィルムを建築物に適用するうえで、ひずみ硬化とクリープ、リラクセションのような粘性挙動を把握することは重要な検討 課題となる。フィルムの構造的挙動を把握するための解析手法としては、弾塑性解析や動的粘弾性実験より求めた粘弾性物性を 用いた粘弾性解析が提案されてきた。著者らは、これまでにフィルムの施工時延伸を提案し、それに従い、解析範囲を塑性域まで 拡張した粘塑性解析法を適用してその有効性を確認した。しかし、製作時に生じた残留応力による影響が十分に解明できてなか った。

そこで、本報では、アニーリング処理を施した ETFE フィルムの1軸引張実験により、残留ひずみの影響を解明すると同時に、粘 塑性構成式に基づく解析をおこない、その妥当性を評価する。また、極低速のひずみ速度における挙動を調べ、降伏応力のひず み速度依存性の評価式の拡張もおこなう。

1 はじめに

近年、大スパン建築の屋根や外壁に ETFE(エチレン・テトラフ ルオロエチレン共重合体)フィルムを用いる事例が増えている。 ETFE は透明性、耐候性、リサイクル性に優れており、これを用 いたフィルム膜構造は、透明から遮光まで透過率の幅広いコン トロール、紫外線や熱線の遮断、複層化による断熱といった機 能性やデザインの可能性から、今後も様々な試みが期待される。 フィルムを屋根や壁に用いる場合は、複層化したフィルムを内 圧でレンズ状に膨らませるクッション方式がよく用いられるが、 境界部の張力導入によるテンション方式で内圧維持を不要とす ることも可能である。

フィルム膜構造の設計法には、許容応力を第1降伏点までと する弾性設計と、フィルムの延性を考慮した塑性設計の2通りが 考えられる。大規模な事例は塑性化を許容したものがほとんど であるが、フィルム膜構造の塑性設計については、先行事例の 多い海外でも明確な設計手法が示されていないため、塑性範 囲における許容可能な応力レベルや変形状態の明確化が望ま れる。

ETFE フィルムに関する既往の研究として、森山ら山は、フィルムの降伏挙動にミーゼスの降伏条件を適用可能なことを示した。 吉野ら¹⁰は加工硬化を考慮した弾塑性解析によりフィルムの1軸・2軸引張特性を表し、フィルムの加圧実験によりその有効性を検証した。河端ら¹⁰はフィルムの粘性が材料の伸長特性に及ぼす影響に関する実験を行って、降伏応力および降伏後の挙動にひずみ速度依存性があることを示し、フィルムの弾塑性解析では、ひずみ速度に応じた材料パラメータの変更が必要になることを明らかにした。また森山ら¹⁰はクリープ実験により、フィルムの粘性挙動に応力依存性があることを明らかにし、一般化 Maxwell モデルを用いた非線形粘弾性解析法 ^{ll}を提案した。 これにより降伏応力のひずみ速度依存性およびクリープの応力 依存性の考慮が可能となったが、大ひずみ領域への適用性に 課題を残していた。

著者らは、これまでにフィルムの耐力を高める方法として、施 工時にフィルムを延伸する方法を提案し、その有効性を確認し た^[6]。ETFE フィルムの延伸によって、二つの効果が期待される。 まず、巨視的な観点から見ると、延伸により弾性的な安定した応 力-ひずみ関係の範囲を拡張することができる。すなわち、塑性 域でのひずみ硬化により降伏点が高くなり、耐力を高めることが 可能になる。次に、微視的な観点から考えると、延伸により、フィ ルムの結晶化が進行し、材料性質が変化する。この結晶化はク リープコンプライアンス、クリープ速度及び応力緩和速度を低め、 応力緩和弾性率を高くする効果があるため、フィルムのクリープ または応力緩和を抑制することができる^[1]。

このような延伸による塑性域での材料挙動を精度よく表現する には、フィルムの粘性挙動が記述可能な粘塑性モデルによる非 弾性構成則が不可欠である。高分子材料の粘塑性挙動に関す る既往の研究として、佐野村ら^{[8]、[9]}は粘塑性構成式による非弾 性モデルを提案しエポキシやポリエステル樹脂に適用している。 著者らは、粘塑性構成則を ETFE フィルムに応用し、 Soderberg 関係式中の材料パラメータをひずみ速度に依存す る変数として扱うことにより、フィルムのひずみ速度依存性を表 現できることを示した^[10]。ただし、応力-ひずみ関係において、 第1降伏点を超えた後の応力に誤差が見られ、その原因は不明 なままであった。

一般に高分子材料の場合、製造時に残留ひずみ及び残留応 力が存在することが知られている。そこで、残留ひずみの影響

* 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)

を除去するために、材料を高温下で一定時間保持した後に除 冷するアニーリング(焼きなまし)処理が行われる。建築物では、 ETFE フィルムは通常アニーリング処理を行わないで使用され るが、クリープ、リラクセーションのような粘性挙動と応力-ひず み関係のような材料固有の挙動を精度よく把握するためには、 アニーリング処理を施した場合における応力-ひずみ関係も明 らかにしておく必要があると考えられる。また、ひずみ速度は風 のような動的荷重時と雪のような静的荷重時で大きく異なり、降 伏応力及び応力-ひずみ関係にも影響を及ぼす。このようなひ ずみ速度依存性を把握するために、前報では、ひずみ速度 1%/min 以上における応力-ひずみ関係に対する検討を行った が、内圧や雪荷重のような静的荷重を想定すると、ひずみ速度 1%/min 以下の極低速時に対しても検討する必要があると考え られる。さらに、フィルムを用いた構造形式を考慮すると、平面 形状や曲面形状となり、常に2軸応力状態に使われると考えら れ、それに対しても検討する必要があると考えられる。

そこで、本報では、アニーリング処理を施さないフィルムに対し、 1 軸引張時における低速のひずみ速度条件下においての粘塑 性構成則を適用し、その妥当性を検討した。また、アニーリング 処理を施さないフィルムに対し、2 軸引張時における応力-ひず み関係を検討することで、粘塑性構成式の妥当性を確認した。 最後に、アニーリング処理を施さない場合における第1降伏点 を超えた後の応力-ひずみ関係を明らかにするために、アニー リング処理を施した材料の1軸引張試験データを採取し、粘塑 性構成則によるカーブフィッティングを行った。そのうえで、アニ ーリング処理によるフィルムの構造挙動に及ぼす影響について 検討した。

2. 粘塑性構成式

簡単のために微小変形を仮定する。まず、全ひずみ速度 ϵ_{ij} は、弾性ひずみ速度 ϵ_{ij}^{e} と粘塑性ひずみ速度 ϵ_{ij}^{ij} の和として次のように表す。そして、数式の中で、i, jは座標系を表すインデックスとして総和規約に従うものとする。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}^e_{ij} + \dot{\varepsilon}^v_{ij} \tag{1}$$

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。

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

ただし、E は縦弾性係数、v はポアソン比、そして δ_{ij} はクロ ネッカーデルタを表す。

次に、Malinin-Khadjinsky の移動硬化クリープ理論^山を粘 塑性変形に適用し、粘塑性ポテンシャル g を次のように定義す る。

$$g = \frac{1}{2} \xi_{ij} \xi_{ij} \tag{3}$$

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。

$$\xi_{ij} = s_{ij} - a_{ij} \tag{4}$$

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 *ɛ̀¦i* は次式で与えられる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{\nu} = \Lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} = \Lambda \xi_{ij} \tag{5}$$

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

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

$$\overline{\xi} = \left(\frac{3}{2}\xi_{ij}\xi_{ij}\right)^{1/2}, \quad \overline{\dot{\varepsilon}}^{\nu} = \left(\frac{2}{3}\dot{\varepsilon}_{ij}^{\nu}\dot{\varepsilon}_{ij}^{\nu}\right)^{1/2} \tag{6}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{\nu} = \frac{3}{2} \frac{\overline{\dot{\varepsilon}}^{\nu}}{\overline{\xi}} \xi_{ij} \tag{7}$$

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

$$\overline{\dot{\varepsilon}}^{\nu} = n \left\{ \exp\left(\frac{\overline{\xi}}{K}\right) - 1 \right\}$$
(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^[13]を足し合わせた移動硬 化則を用いる。

$$\dot{\alpha}_{ij} = \dot{\alpha}_{ij}^{(1)} + \dot{\alpha}_{ij}^{(2)}$$
(9)
ただし、 $\dot{\alpha}_{ij}^{(1)} = A\dot{\varepsilon}_{ij}^{\nu}, \ \dot{\alpha}_{ij}^{(2)} = b \Big(C \ \dot{\varepsilon}_{ij}^{\nu} - \alpha_{ij}^{(2)} \overline{\dot{\varepsilon}}^{\nu} \Big)$
ここで、A、b、C は材料定数である。

2.11軸引張状態に対する展開

1軸引張における相当有効応力 $\bar{\xi}$ 及び背応力 α_{ij} について展開する。ただし、比較対象がフィルムであることを考慮して平面応力の状態と取り扱う。まず、1軸引張時における応力 σ と粘塑性ひずみ ε^{ν} は次のように仮定する。

$$\sigma_{11} = \sigma \, , \, \varepsilon_{11}^{\nu} = \varepsilon^{\nu} \, , \, \varepsilon_{22}^{\nu} = \varepsilon_{33}^{\nu} = -\frac{1}{2}\varepsilon^{\nu} \tag{10}$$

次に、偏差応力 sij と背応力 aij の関係を考慮すると、有効応

$$S_{11} = \frac{2}{3}\sigma \, s_{22} = S_{33} = -\frac{1}{3}\sigma \tag{11}$$

$$a_{11} = \frac{2}{3}(\alpha_{11} - \alpha_{22})$$

$$a_{22} = a_{33} = -\frac{1}{3}(\alpha_{11} - \alpha_{22})$$
(12)

$$\xi_{11} = \frac{2}{3}(\sigma - \alpha_{11} + \alpha_{22})$$

$$\xi_{22} = \xi_{33} = -\frac{1}{3}(\sigma - \alpha_{11} + \alpha_{22})$$
(13)

次に、相当有効応力 $\overline{\xi}$ は式(14)のようになり、式(8)より求めた 相当粘塑性ひずみ速度 $\overline{\epsilon}^{\nu}$ を用いると、背応力の発展式は式 (15)のように表現できる。

$$\overline{\xi} = (\sigma - \alpha_{11} + \alpha_{22}) \tag{14}$$

$$\dot{\alpha}_{11} = A \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^{\nu} + b \left(C \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^{\nu} - \alpha_{11}^{(2)} \vec{\varepsilon}^{\nu} \right)$$
$$\dot{\alpha}_{22} = \dot{\alpha}_{33} = -\frac{1}{2} A \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^{\nu} + b \left(-\frac{1}{2} C \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^{\nu} - \alpha_{22}^{(2)} \vec{\varepsilon}^{\nu} \right)$$
(15)

2.22軸引張状態に対する展開

1軸引張時と同様に2軸引張時における相当有効応力 ξ 及び 背応力 α_{ij} について展開する。まず、2軸引張時における応力 σ と粘塑性ひずみ ε^{ν} は応力比が等張力であると仮定して次の よう示す。

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma \,, \, \varepsilon_{11}^{\nu} = \varepsilon_{22}^{\nu} = \varepsilon^{\nu} \,, \, \varepsilon_{33}^{\nu} = -2\varepsilon^{\nu} \tag{16}$$

次に、偏差応力 *s_{ij}* と背応力 *α_{ij}* の関係を考慮すると、有効応 力 *ξ_{ii}* は式(19)のように表すことができる。

$$S_{11} = S_{22} = \frac{1}{3}\sigma \, , \, S_{33} = -\frac{2}{3}\sigma \tag{17}$$

$$a_{11} = a_{22} = \frac{1}{3}(\alpha_{11} - \alpha_{33})$$

$$a_{33} = -\frac{2}{2}(\alpha_{11} - \alpha_{33})$$
(18)

$$\xi_{11} = \xi_{22} = \frac{1}{3}(\sigma - \alpha_{11} + \alpha_{33})$$

$$\xi_{33} = -\frac{2}{3}(\sigma - \alpha_{11} + \alpha_{33})$$
(19)

背応力の発展式は相当有効応力 $\bar{\xi}$ と相当粘塑性ひずみ速度 $\bar{\epsilon}^{\nu}$ の関係を用いると、式(21)のように表現できる。

$$\xi = (\sigma - \alpha_{11} + \alpha_{33}) \tag{20}$$

$$\dot{\alpha}_{11} = \dot{\alpha}_{22} = A \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^{\nu} + b \left(C \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^{\nu} - \alpha_{11}^{(2)} \overline{\dot{\varepsilon}}^{\nu} \right)$$

$$\dot{\alpha}_{33} = -2A \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^{\nu} + b \left(-2C \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^{\nu} - \alpha_{33}^{(2)} \overline{\dot{\varepsilon}}^{\nu} \right)$$
(21)

3. アニーリング処理無の場合における1軸引張の検討

3.1 ひずみ速度による定数Kの変化及び相関関係

既報^[10]では、アニーリング処理を施さないフィルムを対象とし、 粘塑性構成式を用いてひずみ速度1%、2.5%、5%、10%、20%、 100%/minにおいての解析を行い、実験結果との比較検討を行った。その結果、Soderbergの関係式における材料定数Kをひ ずみ速度の関数として扱う必要があることを指摘した。それに加 えて、本報ではひずみ速度0.05%、0.1%、0.5%/minのように 低速時に対して解析及び実験結果との比較検討を行う。まず、 粘塑性構成式で用いられる材料定数に関しては、既報で求め た表1の材料定数を用いる。

表1 アニーリング処理無における材料定数[10]

Ε	Α	С	b	п
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(-)	(sec^{-1})
952	17.0	2.0	50.0	2.0×10^{-6}

次に、定数 K を求めるために、ひずみ速度 0.05%、0.1%、 0.05%/min での K 値の変化による応力レベルとの誤差を把握 し、実験結果との誤差が最小となる値を求める。図1はK値の変 化による誤差に対して実験結果を基準とした標準偏差値を示す。 そして、その結果に基づいて、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2で表され、K はひずみ速度に依存した近似式で表すこ とができる。なお、既報の近似式をひずみ速度 0.05~1%/min の範囲まで拡張して表すと、図2の近似式となる。



3.2 実験結果と解析結果の比較

解析結果との比較のために、ETFE フィルムを対象として、1 軸引張の実験を行った。試験体については、幅 30mm、チャッ ク間長さ200mm、厚さ200 μ m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、雰囲気温度については22±2°Cの範囲とし、ひ ずみ速度が遅いため、長時間に渡って一定温度を維持できるよ うに写真1のような断熱材を用いたケース内で実験を行った。ま た、試験条件としては、ひずみ速度0.05%、0.1%、0.5%/minの 3通りとし、荷重はひずみ10%まで負荷する。次に、解析につい ては、表1の材料定数に基づいて粘塑性解析を行った。ただし、 定数K値は図2に示したひずみ速度に応じた値を使用した。

図3から図5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 均値で表し、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、ひずみ速度0.05%/min、 0.1%/min の場合、ひずみ 0%~2%の間で少し差異が見られる が、これは実験結果においての比例限度内でのばらつきによる 結果であると思われ、フィルムの引張弾性率^[14]が 800 ~ 1000MPa の範囲であることを考慮すると許容できる誤差である と考えられる。



写真11軸引張実験の様子





また、既報 ³では、ひずみ速度 1%/min 以上の結果における 降伏応力とひずみ速度との関係を示している。それにひずみ速 度 0.05%、0.1%、0.5%/min の結果を加えて拡張した関係を図 6に示す。なお、ひずみ速度と降伏応力の関係は同図中の近似 式で表すことができる。

その結果、ひずみ速度 1%/min 以上では、降伏応力はひず み速度の対数に比例していくのに対し、ひずみ速度 1%/min 以 下では、ほぼ一定値になっている。



4. アニーリング処理無の場合における2軸引張の検討 粘塑性構成式の妥当性を検討するために、3節ではアニーリ ング処理を施さないフィルムを対象として1軸引張時に対して検 討を行ったが、本節では粘塑性構成式を2軸引張時に拡張し、 実験結果と解析結果の比較を行った。実験結果については、文 献2)に報告されている2軸引張結果によるものとしており、その 中、フィルムが等方性材料であることを考慮して応力比1:1にお ける MD 方向の結果と比較を行った。その時、ひずみ速度は 0.67%/minである。解析については、表1の材料定数に基づい て粘塑性解析を行っており、定数Kは図2のKとひずみ速度と の関係式から求めた値を使用した。

解析結果と実験結果を図7に示しており、1軸引張結果と同様 に2軸引張状態へ拡張した場合に対しても精度よく応力-ひず み関係が表現できることが分かる。ただし、フィルムが降伏した 後、ひずみ1%~5%範囲では実験結果と解析結果との差異が 見られるが、これは1軸引張時と同様にフィルムに残されている 残留応力の影響とひずみ軟化現象によるものと考えられる。



5. アニーリング処理有の場合における1軸引張の検討

5.1 アニーリング処理の概要

高分子材料の製造工程を図 8 に示す。製造工程でキャスティ ング処理後、巻き取るロール状に起こりやすい巻ズレやフレアと 呼ばれる現象を防ぐために延伸処理(巻取張力の導入)が行わ れており、その影響により残留ひずみ及び残留応力が生じると 知られている。そして、高分子材料を用いた2次加工時、その残 留ひずみ及び残留応力を取り除くために、アニーリング処理が 一般に行われる。その効果としては、成形品の寸法安定性及び 引張強度のような機械的性質が向上されると知られている。しか し、アニーリング処理については材料の種類によってそれぞれ の温度や時間が異なるため、標準化された基準がなく、材料の 技術資料などを参考に使用目的に応じたデータの取得が一般 に行われている。すなわち、種々の温度条件下で、サンプリン グを通じて適切な基準温度を決定する必要がある。

本報において、アニーリング処理を施すうえで、アニーリング 温度設定の流れを図 9 に示す。なお、サンプリングの時、オー ブンの温度設定については 60、70、80、90、100℃の5通りとし、 冷却温度は24℃とした。図10にアニーリング処理後の収縮率と 温度の関係を表す。その結果、設定温度の 60~80℃の場合、 MD 方向の収縮率が TD 方向より大きい結果となっており、 90℃と 100℃の場合、TD 方向の収縮率が MD 方向より大きい 結果となった。フィルムの製造時、ロールを巻き取る方向が MD 方向となっていることとフィルムの熱変形温度^{注□}がおよそ104℃ 程度であることを考慮すると、90℃と100℃の場合、熱変形の懸 念があると判断され、試験体の製作には適切ではないと考えら れる。以上の結果より、設定温度の70℃と80℃時の結果が安定 していると判断し、本実験では、80℃温度の条件下でアニーリ ング処理を行う。さらに、試験体の均一な状態を維持するために、 1軸引張実験用の試験体についてはオーブンの中に放置する 時間を2時間にする。



図8 高分子材料の製造工程[15]

 (a) フィルムを 12 cm×12 cm サイズの正方形で切り 取り(中に 10 cm×10 cm の正方形を描く) 	
(b) ガラスで挟んだ状態でオ ーブンに入れ、設定温 度下で1時間放置	
(c) オーブンからサンプルを 取り出し、常温で1時間 放置	
 (d) サンプルの 10 cm×10 cmの正方形の変形率を 測定、測定データよりア ニーリング温度決定 	

図9 アニーリング温度の設定



5.2 アニーリング処理前・後における応力-ひずみ関係の比較 アニーリング処理を施した試験体を対象として1軸引張実験を 行い、アニーリング処理を施さない試験体の実験結果と比較検 討する。9通りのひずみ速度条件下で1軸引張実験を行い、そ のうち、ひずみ速度 0.05%,1%,10%,100%/min の結果を図 11 から図14に示す。図から分かるように、アニーリング処理をする ことで、降伏応力のレベルは下がり、降伏した後の応力-ひずみ 曲線における曲率の反転、つまり、ひずみ軟化現象がなくなる ことがわかる。一般に高分子材料の分野では、材料が引張られ て降伏点を超えると、局部的なせん断帯が形成され、それにより 無結晶分子は再配向される。そして、その影響でネッキング現 象が起きると知られている[17]。しかし、本実験の結果において はネッキングは発生したものの、ひずみ軟化現象は見られなか った。これは、製作時に生じた残留ひずみ及び残留応力を除去 するためのアニーリング処理により、無結晶分子の再配向による 結果であると考えられる。なお、応力・ひずみ関係をみると、ひ ずみ 0%からおよそ 6%~8%付近までは一致せず、異なるカー ブを示しているが、ひずみ8%以後のカーブは一致していく傾 向が見られた。

一般に、建築材料として使われる場合、アニーリング処理を施 さないため、アニーリング処理を施したものよりも降伏応力の高 いものを用いることになる。











5.3 粘塑性定数の決定

アニーリング処理を施したフィルムの応力-ひずみ曲線に対して、粘塑性構成則によるカーブフィッティングを行い、本手法の 適用性を検討する。既報¹⁰⁰では、表1の材料定数に基づいて、 各材料定数 A、b、C、K の変化による応力-ひずみ関係を比較 しており、その結果より定数 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。なお、フィルムの塑性域での応力-ひず み関係を見ると、その勾配はひずみ速度によらずほぼ一定であ るという共通点が見られるため、ひずみ速度依存性の表現に係 わる K 値を除いた各定数はすべてのひずみ速度に対しても同 じ値が使えると考えられる。材料定数を求めるうえで、実験及び 解析条件は1軸引張応力下においてのひずみ速度5%/minに した。まず、実験結果に基づいて、降伏応力を記述できる K 値 を設定し、種々のケースを検討した。その結果、弾性係数 E は ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案)¹⁶に提案されている 範囲内の 800MPa と、定数 A はbとCに比べると影響が小さい ため、表1と同一の値を用いる。次に、定数bとCの値を求める ために、実験との誤差が最小となるように最小自乗法を用いて 求めた。図 15 に b と C 値の変化による標準偏差を示す。以上 の検討より、求めた材料定数を表2に表す。



図15 定数bとCの相関関係





図16 ひずみ速度によるKの変化

次に、パラメータ K による標準偏差の違いを図 16 に示す。これ より、誤差が最小となる K 値を各ひずみ速度ごとに求めたもの が図 17 である。K 値はひずみ速度によって異なる値を持った め、これを *c* の近似式で表すと同図中の式のようになる。



表2 アニーリング処理有における材料定数

5.4 実験結果と解析結果の比較

解析結果との比較のために、3.2 節と同様な条件で1軸引張実 験を行った。ただし、ひずみ速度は0.05%/minから100%/min までの9通りとした。その結果を図18から図26に示す。比較検 討の結果、粘塑性構成式を用いた解析結果はひずみ速度 0.05%/minから20%/minまでの実験結果に対して、フィルムの 応力-ひずみ曲線を精度よく表現していることがわかる。ただし、 図18のひずみ速度0.05%/minの結果においては、実験結果 の比例限度内でのばらつきにより解析結果との誤差が見られる。 また、図26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 値が大きいことによる。





図 27 は降伏応力とひずみ速度の関係で、ひずみ速度 1%/min 以上では、降伏応力がひずみ速度の対数に比例して いくのに対し、ひずみ速度 1%/min 以下では、ほぼ一定値であ ると言える。



6. まとめ

本報では、ETFE フィルムを対象として、ひずみ速度の低速 時においての粘塑性解析を行い、応力-ひずみ関係を検討した。 また、アニーリング処理を施したフィルムに対して粘塑性構成式 を適用した解析結果と実験結果の比較を通じてその妥当性を確 認し、以下の知見を得た。

- Soderbergの関係式のK値はひずみ速度に依存した変数として扱うことによって、フィルムの応力-ひずみ曲線を適切に表現でき、1軸引張時における材料定数をそのまま用いて2軸引張時へ拡張できることが分かった。また、アニーリング処理を施したフィルムに対する1軸引張時においても同様に粘塑性構成式を適用できることが確認された。
- 2) アニーリング処理を施さなかった場合の降伏応力とひずみ 速度の関係については、ひずみ速度0.05~0.5%/minの試験 データを追加して、修正した近似式で表現することができた。 なお、ひずみ速度 1%/min 以上では降伏応力とひずみ速度 の関係は比例していくのに対し、ひずみ速度 1%/min 以下で はほぼ一定値となることが確認された。
- 3) 粘塑性解析の結果、粘塑性構成式はアニーリング処理を施 さなかった場合よりもアニーリング処理を施した場合の実験結 果に対してより精度良く表現できることが分かった。
- 4)アニーリング処理の有無による影響を検討した結果、製作過程において主にMD方向の巻取によってフィルムが延伸され、残留ひずみ及び残留応力が生じていると考えられる。これにより降伏応力が増加し、降伏以後の応力・ひずみ関係にも影響を及ぼしていることが確認された。

謝辞

ETFE フィルムのアニーリング処理及び1軸引張実験を実施するにあたり、旭硝子(株)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

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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、No.18、 pp41-46、2005
- [4] 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、 No.18、pp47-51、2005
- [5] 河端昌也、森山史郎、會田裕昌: ETFE フィルムの粘弾性挙 動について、膜構造研究論文集 2005、No.19、pp1-8、2006
- [8] 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
- [9] 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
- [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
- [10] 丁乙碩、河端昌也: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、膜構造 研究論文集 2009、No.23、pp9-14、2010
- [11] N. N. Malinin and G. M. Khadjinsky, Int. J. Mech. Sci., 14, 234, 1972
- [12] 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
- [13] P. J. Armstrong and C. O. Frederick, CEGB Rep., No.RD/B/N731, 1966
- [14] ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案)、(社)日本膜構 造協会、2006
- [15] PET フィルムの製造工程、(株)帝人デュポンフィルム、 http://www.teijindupontfilms.jp/product/process.html
- [16] テナックの試験方法の概略、旭化成ケミカル&プラスチッ ク情報サイト, http://www.akchem.com/emt/emt_top.html
- [17] J.Roesler, H.Handers and M.Baeker : Mechanical Behavior of Engeering Materials–Metals, Ceramics, Polymers and Composites, Springer, 2007

注

主1) 熱変形温度(HDT):樹脂の試験片に4.6 または18.6kgf/ cmの荷重をかけ、2℃/分で加熱して行く時、試験片が一定 量変形する温度を測定する。ETFE フィルムの場合、 4.6kgf/cmの荷重については104℃、18.6kgf/cmの荷重 については74℃と報告されている。なお、高分子材料で は熱変形温度より10℃低い温度を短期使用の上限温度と するのが一般的であると知られている。

Visco-plastic Constitutive Equation of ETFE film

- Study on the stress-strain relationships of uniaxial and biaxial tensile test by annealing-

Eul-Seok JEONG^{*)} Masaya KAWABATA^{**)}

SYNOPSIS

To use ETFE films in the architecture, it is important to investigate the viscous behavior of ETFE films such as strain rate dependence, creep and stress relaxation. And, analytic methods that describe a structural behavior of ETFE films are proposed as the elastio-plastic analysis and the visco-elastic analytic method which use the visco-elastic material parameters determined in the dynamic visco-elastic experiment. In previous work, we have proposed a stretching method of film in construction, and applied the visco-plastic analytic method that has extended to plastic region. But an influence of the residual stress and strain generated in production has not been sufficiently investigated. In this paper, we investigated an influence of the residual stress and strain in a uniaxial tensile experiment of annealed ETFE film, and we calculated the stress-strain curve based on the visco-plastic constitutive equation and evaluated a validity of that. Moreover, we described a structural behaviour in tensile tests of the low strain rate and also enlarged an estimative equation for relationship between yield stress and strain rate dependence.

^{*)} 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