

伸張特性の異なる ETFE フィルムを用いた膜構造の構造挙動に関する考察

河端昌也*1
堀口雄矢*2
有賀広志*2

ETFE フィルムは透明性や耐候性に優れており、動植物園やスタジアム、建築物の屋根・外壁等に採用されるケースが多い。ETFE フィルムは織布を有する膜材料に比べると強度・剛性が低く、降伏点を超えると大きな塑性変形を生じる。また常温では降伏点の 1/2~2/3 以上の応力度でクリープやリラクセーションが顕著になるなど、フィルム特有の性質を設計で適切に考慮することが不可欠である。本論文では、伸張特性の異なる 2 種類の ETFE フィルムの機械的特性を比較したうえで、これらが膜構造の構造挙動に及ぼす影響について考察する。

1. はじめに

ETFE (エチレン・テトラフロロエチレン共重合樹脂) フィルムは透明性や耐候性に優れており、動植物園やスタジアム、建築物の屋根・外壁等に採用されるケースが多い。フィルムは織布を有する膜材料に比べると強度・剛性が低く、降伏点を超えると大きな塑性変形を生じる。また常温では降伏点の 1/2~2/3 以上の応力度でクリープやリラクセーションが顕著になるなど、フィルム特有の性質を設計で適切に考慮することが不可欠である。国内では 2014 年 10 月の国土交通省告示 1446 号改正により膜構造用フィルムが指定建築材料に追加され、2017 年 6 月には同告示 666 号、667 号改正により膜構造建築物およびテント倉庫建築物に適用できる膜構造用フィルムとして ETFE フィルムが追加された。ETFE フィルムをクッション方式で用いる場合の暴風時の短期許容応力度は、第一基準強度 (2.5%ひずみ時応力に基づく基準値でおおむね第 1 降伏点応力度に相当) の 1.2 倍となっている。これは降伏後の ETFE フィルムがひずみ硬化をともなう安定した挙動を示すこと、風圧力によってフィルムが伸びるとエアクッションのライズが増加する一方で曲率は減少するため、降伏後のフィルムの応力上昇が頭打ちになることが考慮されている。著者ら¹⁻⁴⁾はこれまでに ETFE フィルムの延伸効果と塑性化後の挙動について検討を行ってきた。また外力を受けるエアクッションについて、ボイル・シャルル則に関係する圧力・体積・空気量・温度をすべて考慮したエアクッションの基礎式を示し、空気を介した上下膜相互の応力伝達や、気圧、温度、空気量、体積の変化に起因する内圧の変化、フィルムの塑性化などが複合した構造挙動を明らかにしてきた。本論文では、伸張特性の異なる 2 種類の ETFE フィルムの機械的

性を比較したうえで、これらが膜構造の構造挙動に及ぼす影響について考察する。

2. 試験片の基本特性と 1 軸応力時の挙動

表 1 は本論文で検討対象とする 2 種類の ETFE フィルム試験片 (厚さ 250 μ m) の基本性能測定値を表したものである。引張強さは JIS K7127 (試験片タイプ 5, ダンベル形), 引裂強さは JIS K7128-3 (直角形引裂試験片), MIT 耐屈曲は ASTM D2176 (JIS P8115 と同形) の試験片形状で各 3 体の平均値を示している。また引張強さ, 引裂強さ, 加熱寸法変化は MD (ロール) 方向, TD (ロール直交) 方向ごとの数値を示している。TYPE-N は一般的に使用されている製品で, TYPE-X は ETFE 樹脂のポリマーシーケンスを変更することで, 高透明・高耐力となるように改質されたものである。図 1 は両者のヘイズ(曇り度)の違いを比べたもので, TYPE-X は TYPE-N よりも透明度が高くなっているのが分かる。図 2 は 1 軸引張 (JISK7127 試験片タイプ 5 ダンベル形, チャック間引張速度 200mm/min) に対する応力-ひずみ関係で, TYPE-X は TYPE-N よりも同一ひずみ時の応力 (耐力) が 15~50%程度高くなっている。ETFE フィルムには 2 つの降伏点があり, TYPE-N はこれらの降伏点で剛性が大きく変化する。降伏点の応力は, 応力-ひずみ曲線を包絡する 3 本の直線 (傾きは第 1 (初期) 勾配, 第 2 勾配, 第 3 勾配とする) の交点に対応する応力から求める。TYPE-X は第 1 降伏点の応力度が高く, 第 2 降伏点での剛性の変化は小さい。降伏時のひずみは両者ともほぼ同じで, 第 1 降伏点が 3%程度, 第 2 降伏点が 12%程度である。ETFE フィルムの 1 軸引張では, 同一のひずみに対する発生応力がひずみ速度に依存性する。これは

*1 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院 教授・博士 (工学)

*2 AGC 株式会社

表1 試験片の基本特性測定値

ETFEフィルム, 厚さ250 μ m

項目	試験方法	TYPE-N	TYPE-X
特徴		一般	高透明・高耐力
引張強さ	JIS K7127	64/63MPa	69/61MPa
引裂強さ	JIS K7128-3	184/184N/mm	205/193N/mm
MIT耐屈曲	ASTM D2176	57万回で破断	23万回で破断
加熱寸法変化	JIS K7133	-1.3/-1.3%	-2.9/-2.4%
へイズ	JIS K7136	10%	2%
可視光透過率	ISO 9050	91.5%	93.2%
日射透過率		93.0%	94.4%



TYPE-N TYPE-X
図1 へイズ (曇り度) の比較

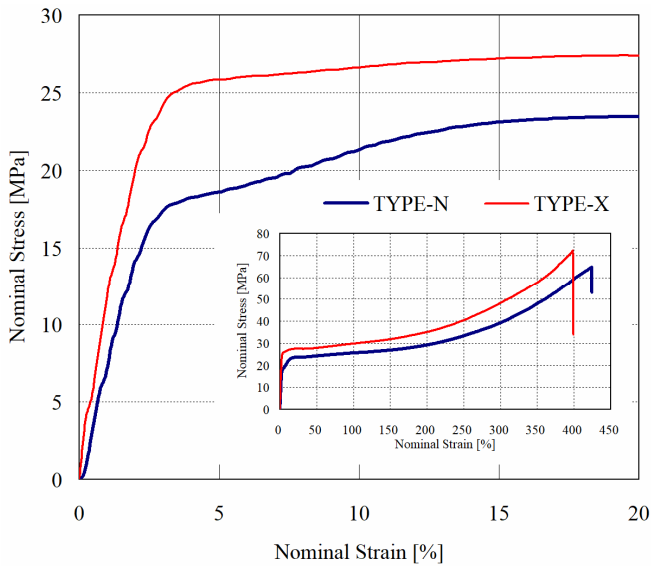


図2 1軸引張に対する応力-ひずみ関係

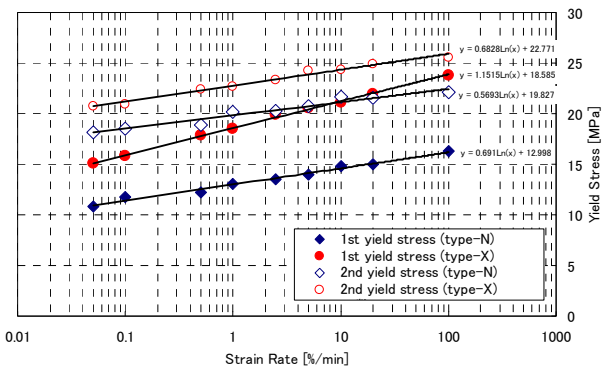


図3 第1・第2降伏点応力のひずみ速度依存性

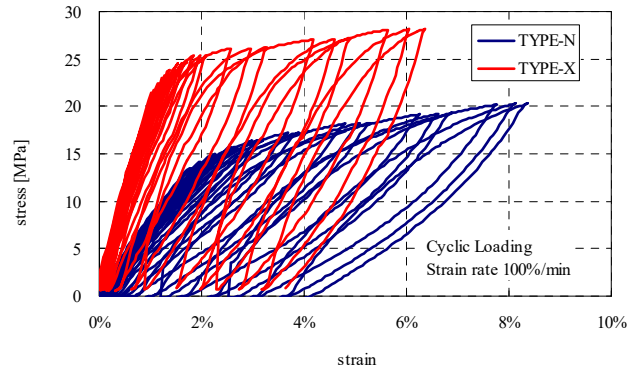


図4 漸増繰返1軸引張に対する応力-ひずみ関係

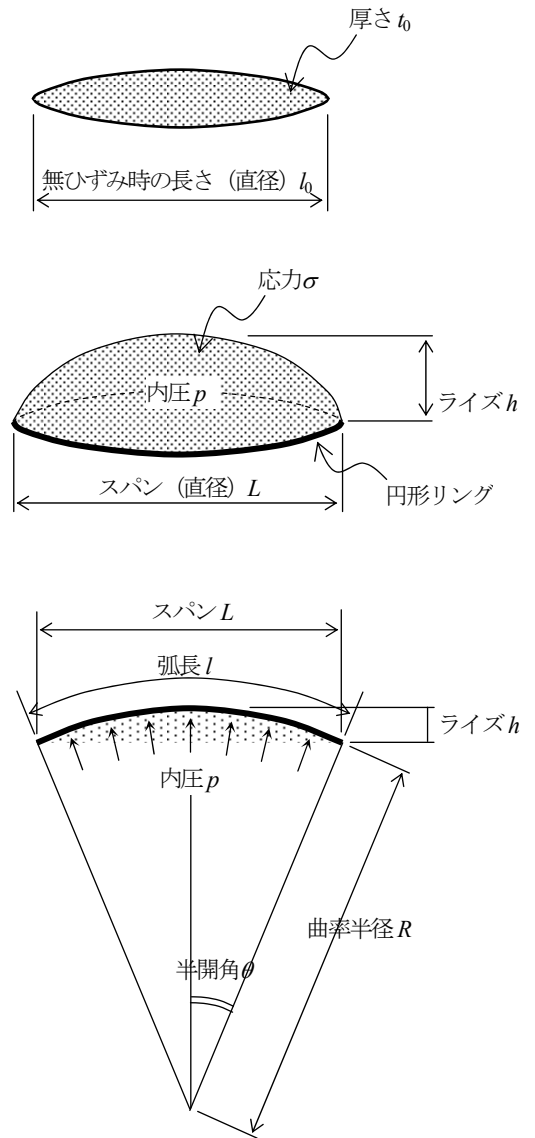


図5 円形フィルムの面外変形

フィルムが伸びると同時に応力緩和を生じるため、ひずみ速度が遅くなるほど、測定される応力度は低くなる。図3は1軸引張時のひずみ速度を0.05~100%/minの範囲で変化させた場合の第1および第2降伏点応力の平均値を示したものである。図中には、対数近似曲線を併せて示す。近似曲線の傾向を比較すると、TYPE-Xの第1降伏点は他の2つの近似曲線に比べると傾きが大きい。TYPE-Xの第1降伏点はひずみ速度依存性がやや高いといえる。図4は漸増繰返1軸引張に対する応力-ひずみ関係を示したものである。TYPE-XはTYPE-Nに比べて剛性が高く、ひずみは小さくなっているが、繰返引張によるひずみの増加傾向は同様である。

3. 2軸応力時の挙動

図5のような無ひずみ時の長さ(直径) l_0 、厚さ t_0 の円形フィルムを均等に伸ばして直径 L ($L > l_0$)のリングに固定し、面外方向に圧力(内圧)をかけて膨らませる。内圧 p に対して、フィルムが曲率半径 R の球面で等張力状態にあると仮定すると、膜応力 σ は次式で表すことができる。

$$\sigma = \frac{pR}{2t} \quad (1)$$

ただし、 $R = (L^2 + 4h^2)/8h$ を表す。このとき、フィルムに生じるひずみを対数ひずみで表記すると、

$$\varepsilon = \int d\varepsilon = \log \frac{l}{l_0} \quad (2)$$

で表される。また幾何学的な関係より

$$\frac{l}{l_0} = \frac{2R\theta}{l_0} = 2 \frac{R}{l_0} \sin^{-1} \frac{L}{2R} \quad (3)$$

となる。式(1)~(3)を整理すると、次式のようになる。

$$\frac{2R}{L} \frac{L}{l_0} \sin^{-1} \frac{L}{2R} - e^\varepsilon = 0 \quad (4)$$

ただし、 $\frac{h}{L} = \frac{R}{L} - \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{1}{4}}$ を表す。任意のひずみ ε に対して式(4)を満足する形状パラメータ R/L および h/L を求めることにより、円形膜の変形を計算することができる。

立体裁断により製作された球形膜(実際には球面に近似した多面体)のように、無ひずみ時の形状が平面でない場合も同様に計算することができる。無ひずみ状態で曲率半径 R_0 、ライズ h_0 の球形膜が、図5と同様に内圧 p_1 を受けて曲率半径 R_1 、ライズ h_1 、応力 σ_1 の球面になるとする。各状態での物理量を表2に示す。膜は弾塑性材料とすると、弾性範囲での内圧と膜張力の釣合式は、

$$\sigma_i = \frac{p_i R_i}{2t_i} \quad (5)$$

膜の応力-ひずみ関係は、

$$\sigma_i = \frac{E}{1-\nu} \varepsilon_i \quad (6)$$

ひずみの適合条件式は、真ひずみ・真応力を用いると、

$$\varepsilon_i = \int d\varepsilon = \log \frac{l_i}{l_0} \quad (7)$$

$$\text{ただし、 } l_i = 2R_i \theta_i, \quad R_i = \frac{L^2 + 4h_i^2}{8h_i}, \quad \theta_i = \sin^{-1} \frac{L}{2R_i}$$

で表される。一方、公称ひずみ・公称応力は次式で表され、ひずみの小さい範囲では真ひずみ・真応力とほぼ一致する。

$$e_i = \frac{l_i - l_0}{l_0}, \quad s_i = \frac{p_i R_i}{2t_0} \quad (8)$$

図6は、ETFEフィルムの1軸引張に対する同一の応力・ひずみ関係を、公称応力・公称ひずみ、真応力・真ひずみの2通りで表したものである。第1降伏点は、真(12MPa, 1.5%)、公称(11.8MPa, 1.5%)でほぼ一致するが、第1降伏点以降は差異が大きくなり、第2降伏点は真(29.1MPa, 20.7%)、公称(23.7MPa, 23.0%)となる。真応力・真ひずみは公称応力・公称ひずみよりも応力は大きく、ひずみは小さな値になる。これは外力に対して変形した膜の釣合状態を有限要素解析などで求める場合に直接影響するので、第1降伏点以降の弾塑性挙動を精度良く評価するためには、真応力・真ひずみを用いる必要がある。

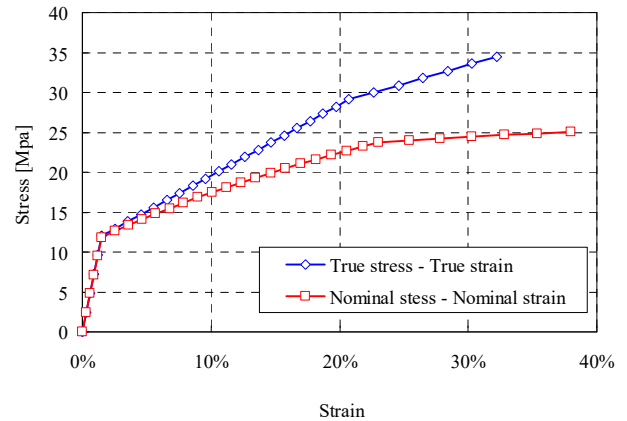


図6 1軸引張に対するETFEフィルムの応力・ひずみ関係
公称応力・公称ひずみ、真応力・真ひずみによる違い

表2 各状態における物理量

状態	半径	ライズ	厚さ	半開角	ひずみ	内圧	応力
無ひずみ	R_0	h_0	t_0	θ_0	0	0	0
初期	R_1	h_1	t_1	θ_1	e_1, ε_1	p_1	s_1, σ_1
変形	R_i	h_i	t_i	θ_i	e_i, ε_i	p_i	s_i, σ_i

ε : 真ひずみ, σ : 真応力(MPa), e : 公称ひずみ, s : 公称応力(MPa)

式(7)より、無ひずみ時の長さは次式で求められる。

$$l_0 = \frac{l_1}{e^{\varepsilon_i}} \quad (9)$$

また、式(4)と同様に变形後のライズ比 h_i/L が満足すべき関係式は次式で表される。

$$\frac{L}{l_0} \frac{2R_i}{L} \sin^{-1} \frac{L}{2R_i} - e^{\varepsilon_i} = 0 \quad (10)$$

ただし、 $\frac{R_i}{L} = \frac{1}{8} \frac{L}{h_i} \left\{ 1 + 2 \left(\frac{h_i}{L} \right)^2 \right\}$ を表す。ここで、 $x=L/2R_i$

とおくと、

$$f(x) = \frac{L}{l_0} \frac{1}{x} \sin^{-1} x - e^{\varepsilon_i} = 0 \quad (11)$$

となる。以上のように面外圧力を受ける円形フィルムは軸対称性を利用すると、フィルムの3次元的な变形挙動を1変数関数で扱うことが可能である。これは次節のようにフィルムの弾塑性挙動を検討する場合に便利である。

4. フィルムの弾塑性挙動

平面応力状態にあるフィルムの降伏がミーゼスの降伏条件式に従う場合、相当応力は次式で表される。

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{xx}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (12)$$

主応力 σ_1 , σ_2 を用いて表すと次式となる。

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (13)$$

フィルムが降伏した後の挙動についてひずみ増分理論を用いると、その構成式は次のプラントルーロイスの式を用いて次のように表される。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} d\varepsilon_{xx} \\ d\varepsilon_{yy} \\ d\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} &= \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ & 1 & -\nu \\ \text{sym.} & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\sigma_{xx} \\ d\sigma_{yy} \\ d\sigma_{zz} \end{bmatrix} \\ &+ \frac{d\lambda}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ & 2 & -1 \\ \text{sym.} & & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\sigma_{xx} \\ d\sigma_{yy} \\ d\sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} d\gamma_{yz} \\ d\gamma_{zx} \\ d\gamma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{G} \begin{bmatrix} d\tau_{yz} \\ d\tau_{zx} \\ d\tau_{xy} \end{bmatrix} + 2d\lambda \begin{bmatrix} d\tau_{yz} \\ d\tau_{zx} \\ d\tau_{xy} \end{bmatrix}$$

右辺の第1項は弾性ひずみ増分 $d\varepsilon_j^e$ である。第2項は塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_j^p$ で、

$$d\varepsilon_{ij}^p = s_{ij} d\lambda \quad (15)$$

ただし、 s_{ij} : 偏差応力、 $d\lambda$: 正のスカラー値の関係にあるとする。上式は、塑性ひずみ増分の方向は偏差応力の方向に一致するというロイスの仮定で、塑性体積一定条件

$$d\varepsilon_{xx}^p + d\varepsilon_{yy}^p + d\varepsilon_{zz}^p = (s_{xx} + s_{yy} + s_{zz}) d\lambda = 0 \quad (16)$$

を満足している。また相当塑性ひずみ増分は

$$d\varepsilon^p = \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ (d\varepsilon_{xx}^p)^2 + (d\varepsilon_{yy}^p)^2 + (d\varepsilon_{zz}^p)^2 \right\} + \frac{1}{3} \left\{ (d\gamma_{xy}^p)^2 + (d\gamma_{yz}^p)^2 + (d\gamma_{zx}^p)^2 \right\}} \quad (17)$$

で表される。このとき相当塑性ひずみ増分と増分応力の関係は、

$$d\varepsilon^p = \frac{d\sigma}{2H'} \quad (18)$$

ただし、 H' : 加工硬化係数で表される。したがって、塑性域でのひずみ増分はポアソン比を 0.5 として次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} d\varepsilon &= d\varepsilon^e + d\varepsilon^p = \left(\frac{1-\nu}{E} + \frac{1}{2H'} \right) d\sigma \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{2-\nu}{E} + \frac{1}{H'} \right) d\sigma \quad (19) \end{aligned}$$

相当塑性ひずみ増分と同様に、弾性ひずみについても次式の相当弾性ひずみ増分を定義する。

$$d\varepsilon^e = \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ (d\varepsilon_{xx}^e)^2 + (d\varepsilon_{yy}^e)^2 + (d\varepsilon_{zz}^e)^2 \right\} + \frac{1}{2} \left\{ (d\gamma_{xy}^e)^2 + (d\gamma_{yz}^e)^2 + (d\gamma_{zx}^e)^2 \right\}} \quad (20)$$

次式のように相当弾性ひずみ増分と相当塑性ひずみ増分を負荷経路に沿って積分した値を、相当ひずみとして新たに定義する。

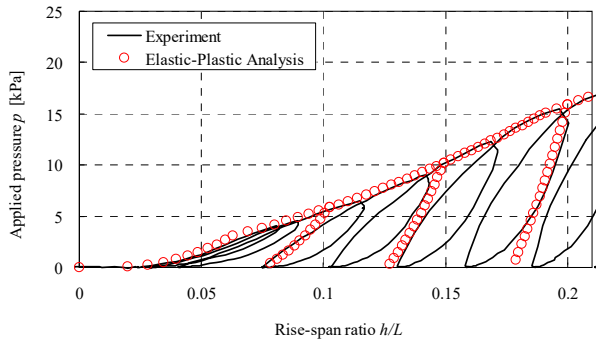
$$\bar{\varepsilon} = \int_{\phi} (d\varepsilon^e + d\varepsilon^p) \quad (21)$$

一方、トータル機械ひずみと呼ばれる次式のような指標もしばしば用いられる。

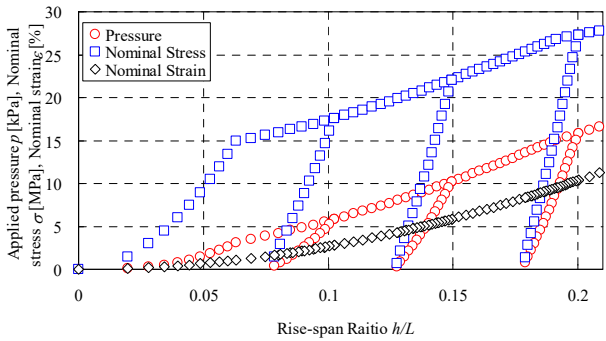
$$\bar{\varepsilon}_{total} = \sqrt{\frac{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}{\sqrt{2}(1+\nu')}} \quad (22)$$

ただし、 ν' : 有効ポアソン比を表す。

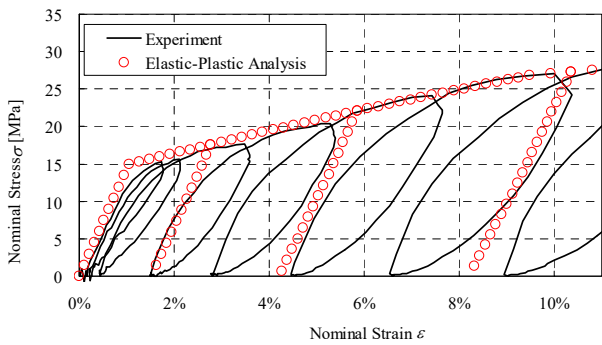
上記のモデルを用いた弾塑性解析の妥当性を検証するために、円形平面膜の加圧実験との比較を行う。実験は図9のような直径1m(内法長さ0.95m)の円形リングに250 μ mのETFEフィルムを取り付け、面外方向の加圧・減圧を漸増的に行って、中央の鉛直変位を測定する。变形後の膜面を球形と仮定し、变形後の応力とひずみを求める。ひずみと応力の定義は対数ひずみと真応力を用いる。解析諸元を表3に示す。第1および第2降伏点に対応する1軸引張時のひずみと応力度はそれぞれTYPE-Nの場合(1.875%, 15MPa), (15.875%, 29MPa) TYPE-Xの場合(2.0%, 23MPa), (13.66%, 30MPa)となる。これらはETFEフィルムの1軸引張試験で得られる公称ひず



(a) 圧力とライズ比の関係

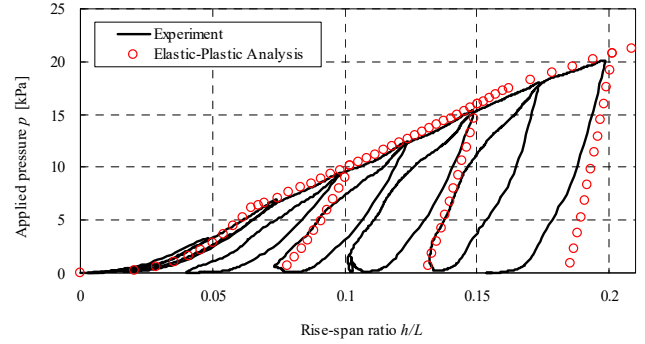


(b) 圧力, 応力, ひずみとライズ比の関係

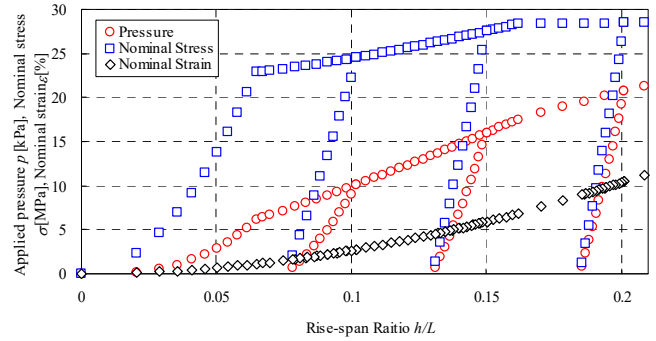


(c) 公称応力と公称ひずみの関係

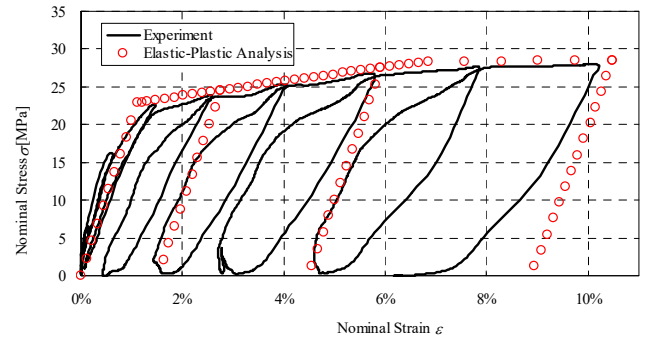
図7 面外圧力を受ける円形平面フィルムの状態変化
TYPE-N の場合



(a) 圧力とライズ比の関係



(b) 圧力, 応力, ひずみとライズ比の関係



(c) 公称応力と公称ひずみの関係

図8 面外圧力を受ける円形平面フィルムの状態変化
TYPE-X の場合

表3 解析諸元

		TYPE-N	TYPE-X	
スパン	L	950		[mm]
厚さ	t	0.25		[mm]
ヤング率	E	800	1150	[N/mm ²]
ポアソン比	ν	0.44	0.44	
降伏応力 (第1次)	Y_1	15	23	[N/mm ²]
加工硬化係数 (第1次)	H'_1	100	60	[N/mm ²]
降伏応力 (第2次)	Y_2	29	30	[N/mm ²]
加工硬化係数 (第2次)	H'_2	50	15	[N/mm ²]

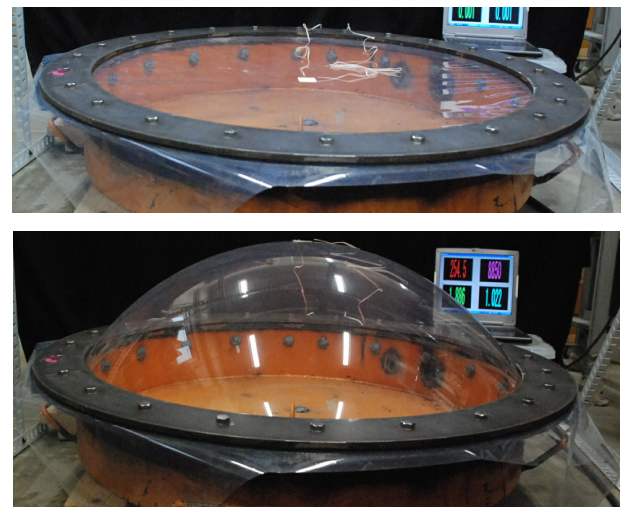


図9 円形平面フィルムの加圧実験

み・公称応力を対数ひずみ・真応力に変換したものである。加減圧時のひずみ速度は5~30%/minの範囲である。図7にTYPE-Nの場合の圧力と変位、公称応力、公称ひずみの関係を示す。同様にTYPE-Xの場合を図8に示す。変位は膜面中央の鉛直変位と直径の比をライズ比 h/L として表す。解析は負荷側（加圧時）とライズ比 $h/L=0.10, 0.15, 0.20$ からの除荷側（減圧時）曲線をあわせて示す。同図(c)に示すように、実験の応力-ひずみ曲線は負荷側の降伏点前後、負荷側から除荷側への反転時、除荷側の応力が反転時応力の1/2以下になる領域で大きくカーブし、解析との差異が大きくなっている。これらはETFEフィルムの粘性による影響で、樹脂を構成する高分子鎖の絡みあい状態の変化が主な原因と考えられる。本解析では粘性を考慮していないため材料モデルの精度に課題が残るものの、解析は実験の荷重-変位関係を良好な精度で包絡し、各状態での剛性を適切に評価できている。したがってETFEフィルムを弾塑性体としてモデル化し、膜面を球形と仮定した本解析手法は円形フィルムの大変形挙動の予測に有効といえる。

TYPE-NとTYPE-Xの材料特性の違いは、主に第1降伏点の応力度で、TYPE-XはTYPE-Nの約1.5倍である。第1降伏点に達するときの圧力を比較すると、TYPE-Nが約4kPaであるのに対して、TYPE-Xは約6kPaである。したがって、エアクッションのような曲面構造の場合にも、TYPE-XはTYPE-Nの1.5倍程度の耐力を発揮することが可能である。

5. まとめ

本論文では、伸張特性の異なる2種類のETFEフィルムの機械的特性を比較し、これらが膜構造の構造挙動に及ぼす影響について考察した。ETFE樹脂のポリマーシーケンスの変更により改質されたTYPE-Xは、TYPE-Nに比べて透明度が高く、同一ひずみ時の応力度（耐力）が15~50%程度高い。特に、第1降伏点前後の応力度は約1.5倍になっており、エアクッションのような曲面構造が風圧力などの外力を受ける場合にも、約1.5倍の耐力を発揮することが可能である。

参考文献

- 1) 丁乙碩,河端昌也:ETFE フィルムの延伸効果に関する実験及び解析的検討,膜構造研究論文集'14,(社)日本膜構造協会,No.28,pp.9~15,2015.
- 2) 角田啓輔,石田瑛涼,河端昌也:ボイル・シャルル法則を考慮した円形エアクッションの挙動に関する研究その1:静的挙動およびFEM解析,日本建築学会大会学術講演梗概集B-1,pp.875-876,2019.9
- 3) 石田瑛涼,角田啓輔,河端昌也:ボイル・シャルル法則を考慮した円形エアクッションの挙動に関する研究その2:動的挙動および軸対称1次モードの振動モデル,日本建築学会大会学術講演梗概集B-1,pp.877-878,2019.9
- 4) 河端昌也,角田啓輔:ボイル・シャルル法則とフィルムの弾塑性性を考慮した円形エアクッションの静的挙動,日本建築学会構造系論文集,Vol.86,No.784,pp934-944,2021.6

CONSIDERATION ON THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF THE FILM STRUCTURE USING ETFE FILMS WITH DIFFERENT ELONGATION CHARACTERISTICS

Masaya Kawabata^{*1}
Yuya Horiguchi^{*2}
Hiroshi Aruga^{*3}

Summary

ETFE film has excellent transparency and weather resistance, and is increasingly being used for the roofs and outer walls of flora and fauna, stadiums, and buildings. ETFE film has lower strength and rigidity than film materials with woven fabric, and when stress exceeds the yield point, large plastic deformation occurs. In addition, it is indispensable to properly consider the properties peculiar to the film in the design, such as creep and relaxation becoming remarkable at a stress degree of 1/2 to 2/3 or more of the yield point at room temperature. In this paper, we compare the mechanical properties of two types of ETFE films with different elongation properties, and then consider their effects on the structural behavior of the film structure. TYPE-X modified by changing the composition of ETFE polymer has higher transparency than TYPE-N, and the stress level (proof stress) at the same strain is about 15 to 50% higher. In particular, the stress level before and after the first yield point is about 1.5 times, and even when a curved structure such as an air cushion receives an external force such as wind pressure, it is possible to exert about 1.5 times the proof stress.

^{*1}Professor, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Yokohama National University, Dr. Eng.

^{*2}AGC Inc.