

ETFE フィルムのひずみ速度依存性と構造的挙動について

河端昌也*
森山史朗**

梗概

一般に高分子材料の引張弾性率や降伏応力などにはひずみ速度依存性があるといわれている。本報ではひずみ速度の違いが ETFE フィルムの伸長特性におよぼす影響を単純引張と繰返引張の条件下で検討し、降伏応力の変化を明らかにしている。さらに、円形平面フィルムの面外圧力に対する変形の実験と FEM 解析を比較することにより、ひずみ速度の違いがフィルムの構造的挙動に及ぼす影響を明らかにしている。

1 はじめに

近年 ETFE フィルムをエアアクションの状態で建築物の屋根に用いる事例が増えているが、欧州では 20 年程度の実績を有するものも見られる。エアアクションは内圧を通常 200~250Pa 程度に保ち、ライズをスパン(フィルムの定着間距離)の 1/10 程度となるようにしているものが多い。大規模な事例ではスパンが 10m を超えるパネルをケーブル等による補強なしで行っている場合もあるが、クリープによる形状変化等は特に報告されていない¹⁾。ただし一般に高分子材料はクリープが生じやすいとされており、風や雪などの荷重条件が厳しく、夏期は高温になる日本やアジア地域での適用にあたっては、粘性による経時変化の考慮も必要であろう。既往の研究では Schwitter²⁾ は弾性定数や降伏応力などの基本物性を考慮したエアアクションの設計について示している。斎藤ら³⁾ はエアアクションの基本特性や適用性について検討している。Nielsen⁴⁾ は、高分子材料には非結晶領域の分子運動に基づく塑性変形や粘弾性的緩和現象により、引張弾性率や降伏応力、引張強さ、伸び率にひずみ速度依存性があることを指摘している。著者ら^{5)~8)} はこれまでに ETFE フィルムの弾塑性性状と変形挙動、進行性ボンディング、クリープ性状について検討し、同材料にもひずみ速度依存性があることを確認してきたが、その詳細な検討は行っていなかった。そこで本報は、ひずみ速度の違いが ETFE フィルムの伸長特性に及ぼす影響を静的および動的な観点から考察し、フィルム膜構造の設計における留意点を明らかにすることを目的とする。

2 1 軸伸長特性とひずみ速度の関係

図 1 はフィルムの 1 軸引張に対する伸長特性曲線(SS 曲線)を異なるひずみ速度について示している。試験は短冊形(幅

30mm, チャック間長さ 200mm, 厚さ 200 μ m)の ETFE フィルムに対して、雰囲気温度 23 \pm 2 $^{\circ}$ C 下で定速伸長形引張試験機を用いた単純引張とし、ひずみはチャック間距離の初期長さに対する変化量より求めている。SS 曲線はひずみ速度の増加に対して初期勾配と降伏点が大きくなる傾向が見られる一方、初期に直線性を示す比例限度付近のひずみは 1%程度であること、ひずみが 3%~12%の領域にも直線性があり、その勾配が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。そこで図 2 に示すように SS 曲線上の比例限度を A 点、ひずみ 3%, 12%の 2 点 BC を通る直線と初期勾配の直線との交点を D, D を通り x 軸に平行な直線と SS 曲線の交点を E, 原点と点 E を結ぶ直線と SS 曲線の交点を F とし、E を降伏点、そのときの応力を降伏応力、原点と点 A を結ぶ直線の勾配を接線弾性率、原点と点 E を結ぶ直線の勾配を割線弾性率と呼ぶことにする。図 3 はひずみ速度と降伏応力の関係である。図中の直線は次の近似式

$$\sigma_y = 1.576 \log \dot{\epsilon} + 13.0 \quad (1)$$

ただし σ_y は降伏応力、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度を表す。降伏応力とひずみ速度の関係をよく表している。図 4 はひずみ速度と引張弾性率の関係である。割線弾性率は 600N/mm² 前後でひずみ速度の影響は小さいのに対し、接線弾性率は 800~1000N/mm² の範囲にあり、ひずみ速度が大きくなると接線弾性率がやや高まる傾向にある。

次に、単純引張で確認された降伏点前後の応力をフィルムに繰返し加えることにより、降伏点付近での材料特性の変化とその動的性質を検討する。図 5 は同一の試験片に対して、ひずみ

* 横浜国立大学大学院工学府 社会空間システム学専攻 助教授 博士(工学)

** 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

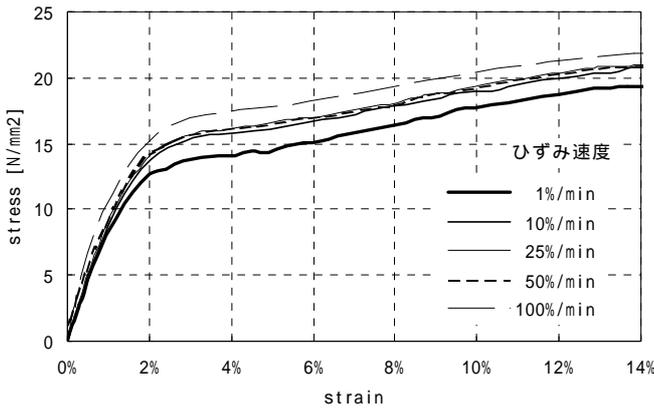


図1 1軸伸長特性曲線

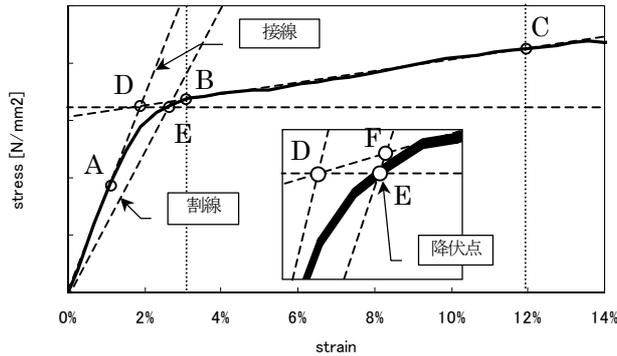


図2 引張弾性率と降伏応力

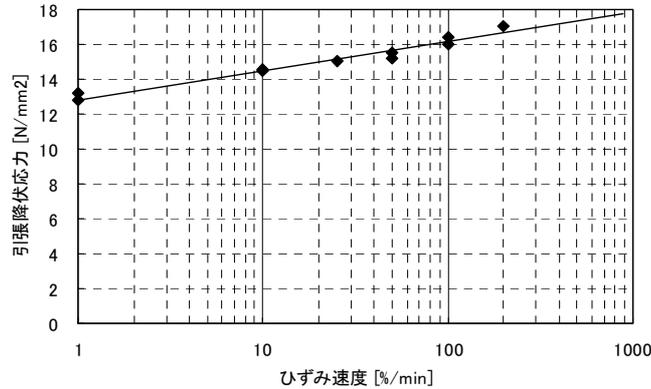


図3 ひずみ速度と引張降伏応力の関係

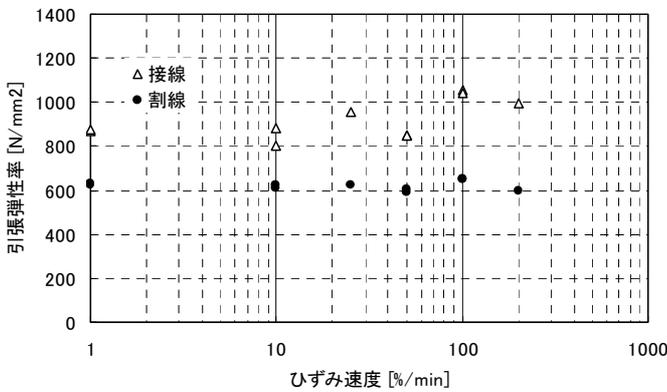


図4 ひずみ速度と引張弾性率の関係

速度 3%/min で繰返引張を 3 回ずつ 6 段階に分けて行った時の SS 曲線である。降伏応力は 13.5N/mm² 付近にあり、12N/mm² 以下では弾性挙動を示すのに対して、降伏応力を超えると塑性化して残留ひずみを生じるとともに粘性挙動も顕著になっている。さらに繰返引張におけるひずみ速度の影響を調べるために、表1の加力条件で試験を行う。試験方法等は単純引張の場合と同様である。表中の記号 E は降伏応力の 95%、P は降伏応力の 105%に相当する荷重を与えることを表し、数字はひずみ速度を示す。図 6 は降伏応力以下、図 7 は降伏応力以上の繰返しに対するひずみの変化を表している。降伏応力以下の繰返加力ではひずみの増加がわずかであるのに対して、降伏応力を超える領域に入るとひずみの蓄積が顕著である。E10、E50 はそれぞれ P01、P10 よりも最大応力大きい、繰返応力に対して弾性的な挙動を示している。これより降伏応力をひずみ速度の対数で近似した式(1)の評価は動的な繰返応力に対してもほぼ妥当といえる。表 2 は各回のひずみと周期である。P01 は残留ひずみが小さいが、約 2 時間の繰返加力後もひず

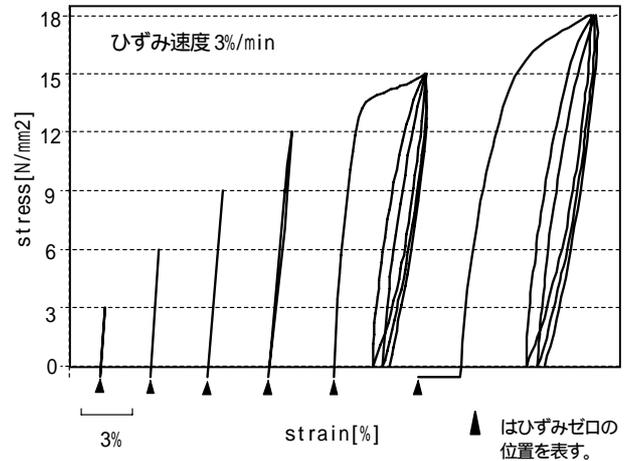


図5 繰返加力に対する1軸伸長特性曲線

表1 繰返加力の試験条件

CASE	E01	P01	E10	P10	E50	P50
ひずみ速度	1%/min		10%/min		50%/min	
降伏応力 [N/mm ²]	13.0		14.6		15.7	
最大応力 [N/mm ²]	12.4	13.7	13.8	15.3	14.9	16.5

表2 ひずみと周期

CASE	E01	P01	E10	P10	E50	P50	
ひずみ	初回	1.8%	2.3%	2.0%	5.5%	2.3%	4.5%
	2回目	2.0%	2.5%	2.1%	5.7%	2.3%	4.8%
	最終回	2.0%	3.9%	2.3%	6.4%	2.5%	6.8%
周期 [sec]	初回	218	260	26	57	9	14
	2回目	219	280	23	46	10	9
	最終回	209	270	22	29	6	6
繰返回数	8	26	79	39	33	101	

ひずみは各回の最大応力時ひずみ、周期は各回の1サイクル(載荷～除荷)に要した時間を表す。

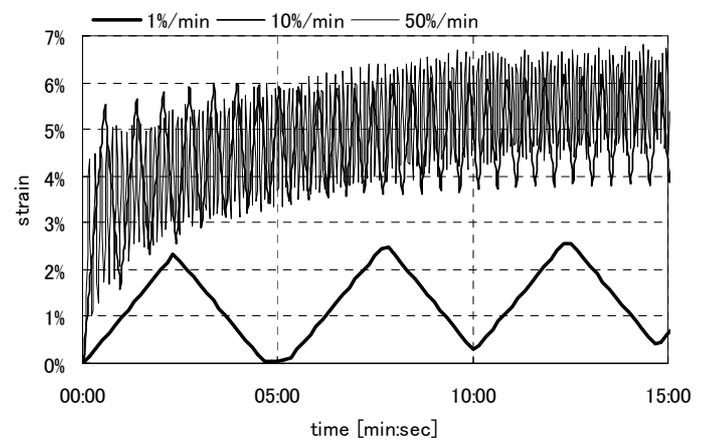
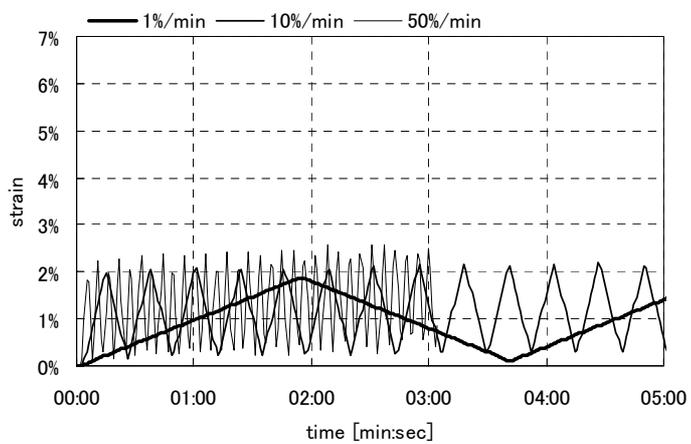
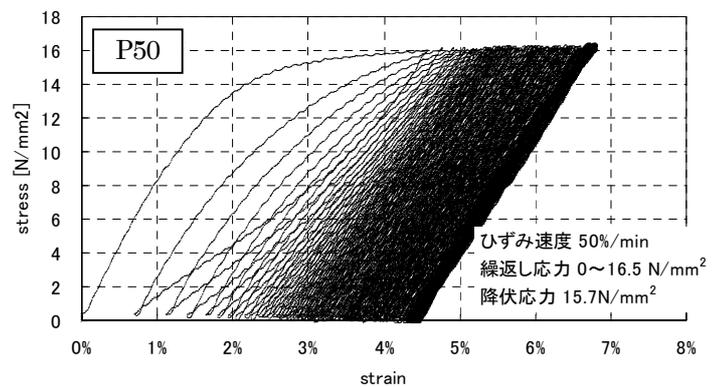
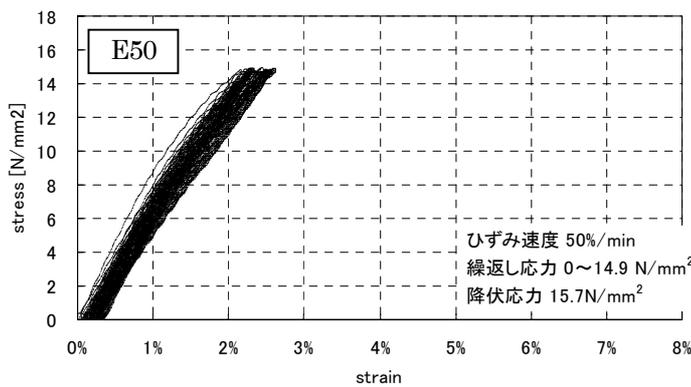
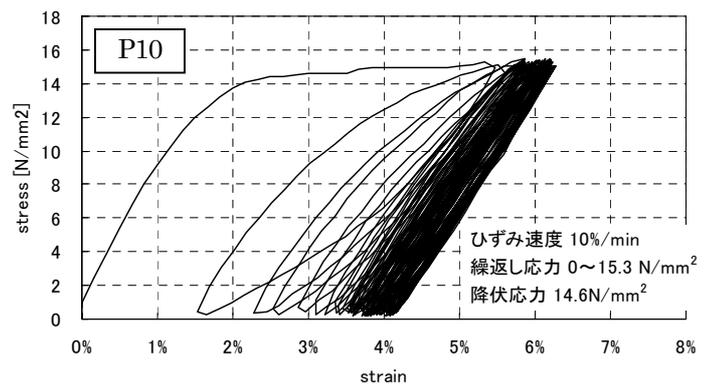
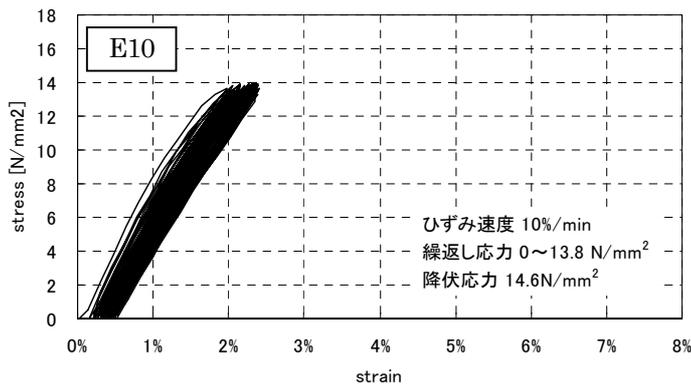
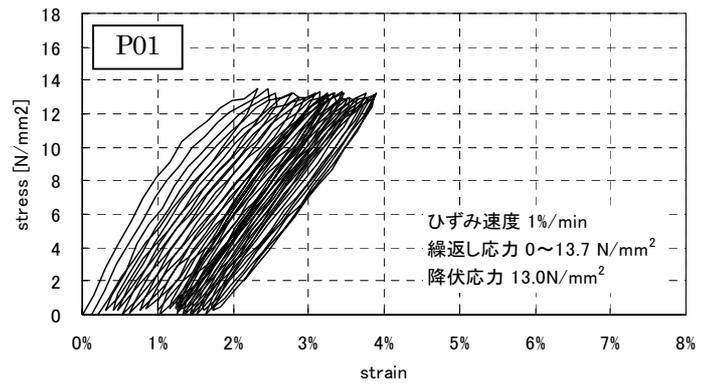
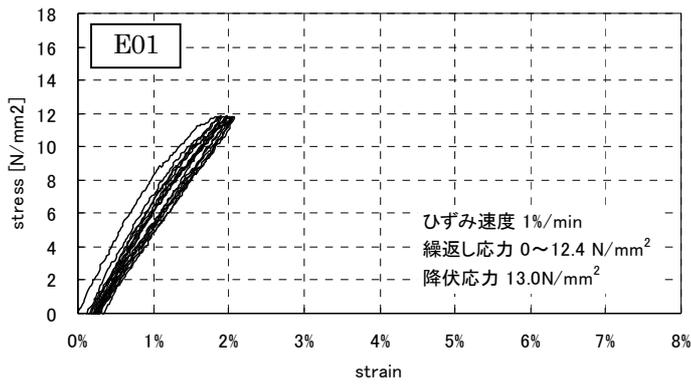


図 6 繰返し応力とひずみの関係(降伏応力以下)

図 7 繰返し応力とひずみの関係(降伏応力以上)

みが増加する流動傾向を示している。P10とP50は初回に生じる塑性ひずみの影響で残留ひずみが大きくなるが、次第に一定値に収束する傾向を示し、残留ひずみが3%を超えた領域では弾性的な挙動を顕著に示している。このような塑性後の挙動については、粘性の影響などさらに検討が必要であるが、ETFEフィルムは延伸後も安定的した弾性挙動を示す可能性があるといえよう。またP10とP50の残留ひずみのほとんどは初回の1サイクルで発生しており、その周期は57sec, 14secである。フィルムを屋根などに用いる場合には、一般に暴風時に繰返応力状態が発生すると考えてよい。降伏応力を上回るレベルの動的な風圧力を受ける場合に、その変動周期がフィルムの変形に要する時間よりも短いため、結果として図7のような大きな残留ひずみには至らないケースもあると考えられる。風圧力に対するひずみの蓄積については、変動風圧に対するフィルムパネルの振動性状とひずみ速度の検討が今後重要である。

3 ひずみ速度と構造挙動の関係

ひずみ速度に対するフィルムの材料特性の違いが構造的挙動におよぼす影響を明らかにするために、面外圧力を受けるフィルムの変形について考察する。ここでは応力状態が明瞭な円形(図9)を対象とする⁶⁾。フィルムは初期が厚さ100 μm の平面で、内径2mのリングで鋼製フレームに固定されている。実験では、加圧に対して約0.4%/minの等速でひずみが生じることをフィルム表面に取り付けたポテンシオメーターで確認している。一方、解析はフィルムの伸長特性を図8のように3種類にモデル化する。モデル(a)は比例限度のA点、SS曲線が割線と交わる点Fで分岐するTri-linear型、(b)は点Dで分岐するBi-linear型、(c)は点Fで分岐するBi-linear型の弾塑性モデルとする。(c)は降伏応力に達する間の粘性ひずみを第1勾配で考慮したモデル、(a)は粘性ひずみを除去したモデルとなっている。2軸応力状態での分岐点の判定は既報⁶⁾と同様に次のMisesの降伏条件式を用いる。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 + 3\tau^2} \quad (2)$$

ただし、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 σ_1, σ_2 は直交する2方向の引張応

力、 τ はせん断応力である。またひずみ速度による降伏応力の違いが構造的挙動におよぼす影響を検討するために、ひずみ速度1%/minと50%/minの1軸伸長特性をそれぞれモデル化し、表3に示す合計6ケースの解析を行う。図10は圧力とフィルム中央の変位の関係を示す。実験結果は弾性域の剛性が(b)と(c)の間にある。ETFEフィルムは弾性範囲の応力下でも若干のクリープを生じる⁸⁾ため、実験の変位は粘性ひずみを含んでいると考えられる。ただし全体の荷重-変位関係は(a)~(c)で大きな違いがないことから、SS曲線のモデル化はBi-linear型でも十分といえる。また同図中の降伏時圧力は、解析で降伏応力に達する直前の圧力を示している。降伏時圧力は降伏応力が高い50%/minの解析結果が1%/minのそれに比べて大きくなっている。1%/minで(a)(c)が(b)よりも降伏時圧力が高いのは、降伏前の引張弾性率が(b)に比べて低いことによる。ただし50%/minでは(a)~(c)に違いが見られないことから、降伏判定においてもモデル化の差はあまりないと判断できる。実験結果は1%/minの解析に近い挙動を示していることから、13N/mm²付近で降伏し引張弾性率が低下したと判断される。一方、ひずみ速度50%/minに相当する加圧実験は行っていないため、高速変形に対する構造的挙動については今後検証する必要がある。

表3 引張弾性率と分岐点

	第1 勾配	第1 分岐点		第2 勾配	第2 分岐点		第3 勾配	
		ひずみ	応力		ひずみ	応力		
1 %/min	(a)	868	1.0	8.7	418	2.1	13.3	51
	(b)	868	1.5	13.0	51			
	(c)	632	2.1	13.3	51			
50 %/min	(a)	868	1.0	8.7	479	2.5	16.1	51
	(b)	868	1.8	15.7	51			
	(c)	632	2.5	16.1	51			
	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	

ポアソン比はすべて0.443とする。

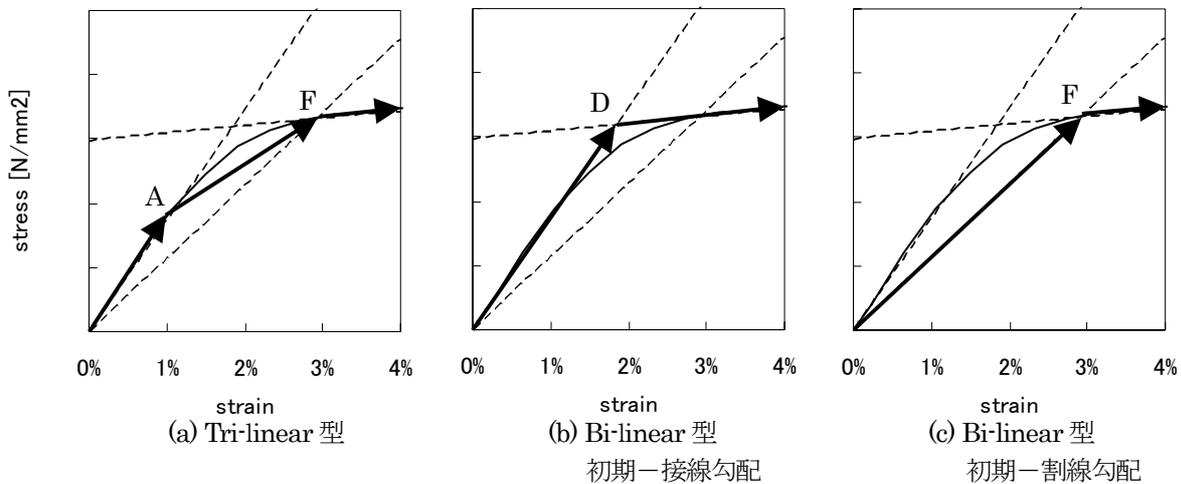


図8 伸長特性のモデル化

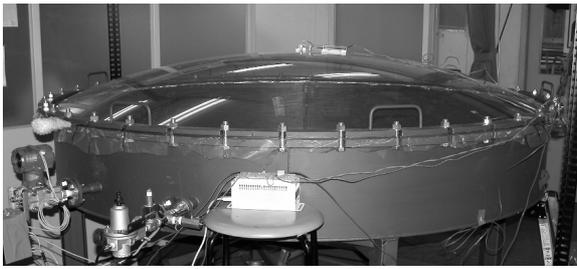


図 9 円形フィルム試験体

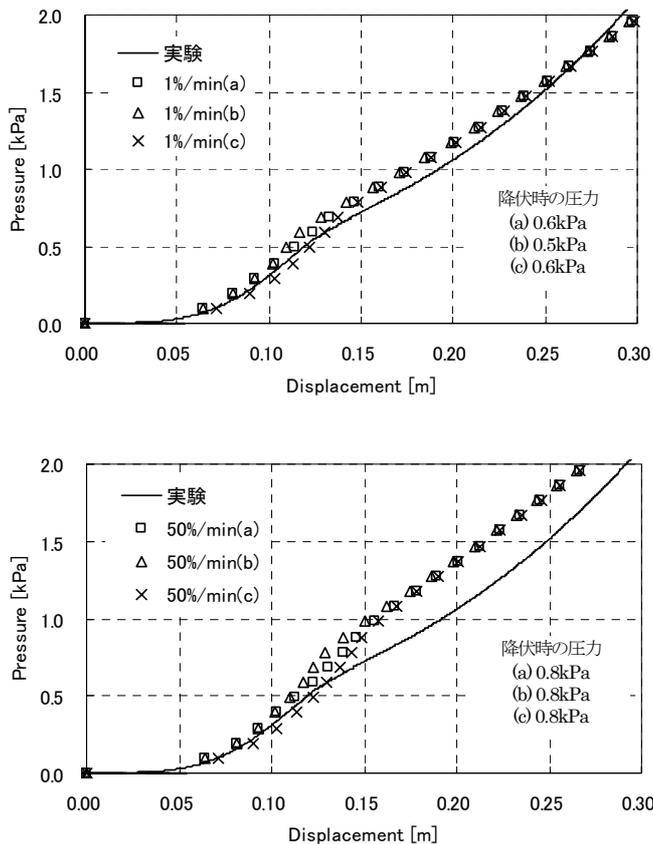


図 10 圧力と変位の関係

4 まとめ

一般に高分子材料の引張弾性率や降伏応力などにはひずみ速度依存性があるといわれている。本報ではひずみ速度の違いが ETFE フィルムの伸長特性と構造的挙動におよぼす影響について検討を行い、以下の知見を得た。

- ・降伏応力はひずみ速度依存性があり、ひずみ速度の対数にほぼ比例することが1軸の単純引張および繰返引張により確認された。
- ・塑性後は残留ひずみが大きく生じるが、3%程度まで延伸された状態では安定した弾性的挙動を示す可能性がある。
- ・フィルムを屋根などに用いる場合には、内圧時および積雪時と暴風時のひずみ速度の違いが構造的挙動に影響を及ぼす可能性があると思われる。

今後は、変動風圧に対するフィルムパネルの振動性状とひずみ速度の把握、粘性による影響の検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) A.C. Jones: Civil and Structural Design of the Eden Project, International Symposium on Widespan Enclosures (Bath, UK), pp. 53~63, 2000
- 2) Craig Schwitter: The Use of ETFE Foils in Lightweight Roof Constructions, Proceedings of the IASS-ASCE International Symposium '94, Atlanta, pp.622~631, 1994
- 3) 柳井麻里, 佐藤裕子, 斎藤公男, 岡田 章, 宮里直也: レンズ型二重空気膜構造の基本構造特性, (その1) 小規模模型実験による検討, (その2) 数値解析による適用性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.911~914, 2004
- 4) L.E. Nielsen (小野木重治訳): 高分子と複合材料の力学的性質, 化学同人, pp163, 1967
- 5) 正木佳代子, 河端昌也, 森山史朗: ETFE フィルムの機械的特性と構造挙動に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1), pp..941~942, 2003
- 6) 森山史朗, 河端昌也, 正木佳代子: ETFE フィルムの弾塑性挙動について, 膜構造研究論文集 2003, No.17, pp.21~26, 2003
- 7) 河端昌也, 森山史朗, 薛 学楨: ETFE フィルムを用いた四角形パネルの進行性ボンディング, 膜構造研究論文集 2003, No.17, pp.27~33, 2003
- 8) 森山史朗, 河端昌也: ETFE フィルムのクリープ特性について, 日本建築学会大会梗概集(B-1), pp.879~898, 2004

Study on Strain Velocity Dependency and Structural Characteristics of ETFE films

Masaya Kawabata ^{*)}

Fumio Moriyama ^{**)}

SYNOPSIS

Young's Modulus and yield stress of macromolecular materials are generally dependent on strain velocity. The effects of these characteristics on the tensile properties of ETFE films are clarified through the single and cyclic tensile experiments, and the differences of yield stress are verified against several strain velocity conditions. The effects of those properties on structural characteristics of ETFE film structures are examined by the comparison of the experiment with FEM analysis of pressurized ETFE file fixed on round boundary.

^{*)} Dr.-Eng. Associate Prof., Faculty of Engineering, Yokohama National University

^{**)} Graduate Student, Graduate School of Engineering, Yokohama National University