

膜構造用フィルムの許容応力度と材料強度

膜構造用フィルムは、膜材料 A、B、C 種、テント倉庫用膜材料とは材料特性が大きく異なるため、設計での取り扱いが従来の膜材料と異なる部分が多い。ここでは、

- ・フィルムを用いた膜構造の位置づけ
- ・テンション方式とクッション方式
- ・ETFE フィルムの材料特性
- ・フィルムの許容応力度と材料強度

について、告示 666 号の規定の概略を示す。なお、許容応力度と材料強度は細かく分かれているため、積雪時と暴風時の荷重状態別の背景と考え方を 6～7 ページに示したうえで、膜構造用フィルム全体の許容応力度と材料強度を 8 ページに示す。

また、ETFE フィルムのクリープ、高温時・低温時、繰返引張時の材料特性も、従来の膜材料とは大きく異なる。フィルムの許容応力度および材料強度は、これらの材料特性が及ぼす影響を考慮して十分な安全性が確保できるように規定している。ただし、許容応力度を超える応力レベルや高温時、ポンディング発生時にはフィルムの伸びが大きくなることに留意が必要である。

目次

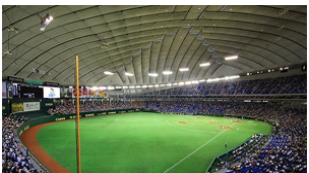
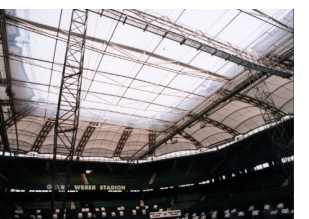
1 . 膜構造の種類と代表例.....	2
2 . テンション方式とクッション方式（エアクッション）の違い.....	3
3 . ETFE フィルムの SS 曲線（1 軸引張）	4
4 . 1 軸応力と 2 軸応力による違い.....	5
5 . 積雪時の許容応力度、材料強度の背景と考え方.....	6
6 . 暴風時および地震時の許容応力度と材料強度の背景と考え方.....	7
7 . 膜構造用フィルムの許容応力度と材料強度.....	8
8 . 相当応力による応力度の検定.....	10
9 . 降伏応力の依存性（ひずみ速度、温度、履歴）	11
（資料 1） クリープによる ETFE フィルムの伸び.....	12
（資料 2） 高温時、低温時の ETFE フィルムの SS 曲線.....	14
（資料 3） 繰返引張による ETFE フィルムの伸びと強度保持率.....	15
（資料 4） 繰返荷重を受けるエアクッション（ETFE フィルム）の挙動	16

1. 膜構造の種類と代表例

告示 666 号、667 号の改正により膜構造用フィルムが追加され、ETFE フィルムを膜構造に使うことが可能になった。

【告示 666 号におけるエアクッションの扱い】

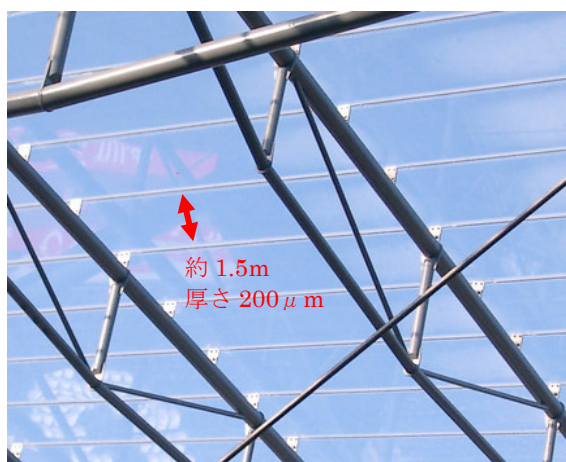
「第二 膜面の構造」に、「袋状にした膜構造用フィルムの内部の空気圧を高めることにより当該膜構造用フィルムに張力を導入して平面又は曲面の形状を保持することができるものを含む。」が追加され、エアクッションを骨組膜構造、サスペンション膜構造、可動式膜面に用いることが可能になった。これらは、従来の膜材料によるパネルをエアクッションに置き換えた状態であるため、空気膜構造ではなく骨組膜構造またはサスペンション膜構造として分類される。

名称	特徴	建築物の例	
骨組 膜構造	鉄骨造その他の構造の骨組に膜材料を張ることにより、屋根または外壁を形成する構造方法。		
サスペン ション 膜構造	膜材料を主材料として用い、基本形状を吊り構造（サスペンション構造）とした構造方法。曲率が大きく躍動感のある形態が特徴である。		
空気 膜構造	空気支持方式 膜材料を用いて形成された屋根および外壁の室内側の空間の内圧を高めて、膜材料を張力状態とし、荷重および外力に抵抗する構造方法。		
	空気膨張方式 円筒や袋状に加工した膜の内圧を高めて、膜材料を張力状態とし、荷重および外力に対して抵抗する構造方法。		
開閉式 膜構造 (可動式 膜面)	膜材料を折りたたむ、または骨組に膜材料を張ったパネルを移動することにより、必要に応じて屋根を開閉することができる構造方法。		

2. テンション方式とクッション方式(エアクッション)の違い

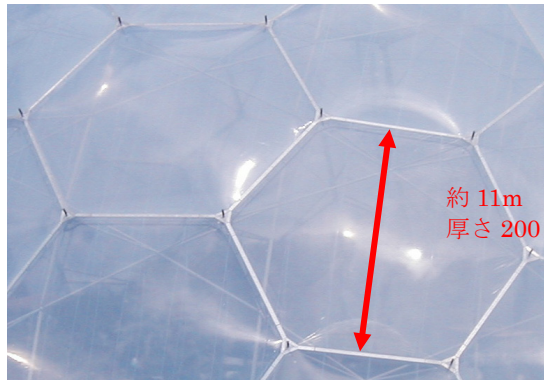
フィルムを用いた膜構造は、張力導入方法によりテンション方式とクッション方式に分けられる。クッション方式は、テンション方式に比べて外力に対する変形が小さいため、支点間距離を大きくすることができる。またクッション方式は、風荷重等の負荷時にフィルムの応力度が塑性域に達しても、除荷後は内圧により安定した張力状態が保たれる。クッション方式はフィルムの塑性化を許容した設計が一般に行われていることから、告示 666 号もこれを考慮した規定となっている。

テンション方式



AWD アリーナ (ドイツ・ハノーバー2005)

クッション方式 (エアクッション)



エデンプロジェクト (イギリス・コーンウォール 2001)

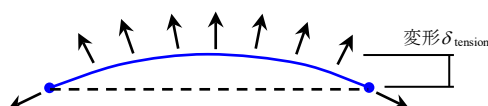
【初期】

【負荷時】

(フィルムが塑性化すると)

【除荷時】

テンション方式

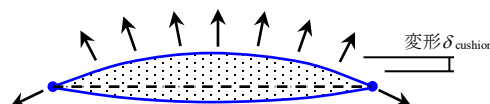


張力が失われ、残留変形を生じる

クッション方式



内圧



同一の荷重に対する変形

$$\delta_{tension} > \delta_{cushion}$$



ライズは少し増えるが、安定した張力状態を保つ

→ 塑性化を許容した設計が可能

3. ETFE フィルムの SS 曲線(1 軸引張)

図 1 は代表的な ETFE フィルムの 1 軸引張に対する応力度－ひずみ度曲線で、2つの降伏点がある。第 1 降伏点と第 2 降伏点の間は、ひずみの増加に対して安定的に応力が増加する特性（ひずみ硬化）がみられる。膜構造用フィルムでは材料の塑性化を考慮した設計を行うために、告示 666 号「第八 基準強度」において第一基準強度 F_1 と第二基準強度 F_2 の 2 つを定めている。

ETFE フィルムの降伏点は、ひずみ 2.5%および 10%の近傍にあることから、2.5%ひずみ時および 10%ひずみ時の引張応力を降伏点の指標とする。基準強度は、これらに材料のばらつきを考慮して定めることになる。

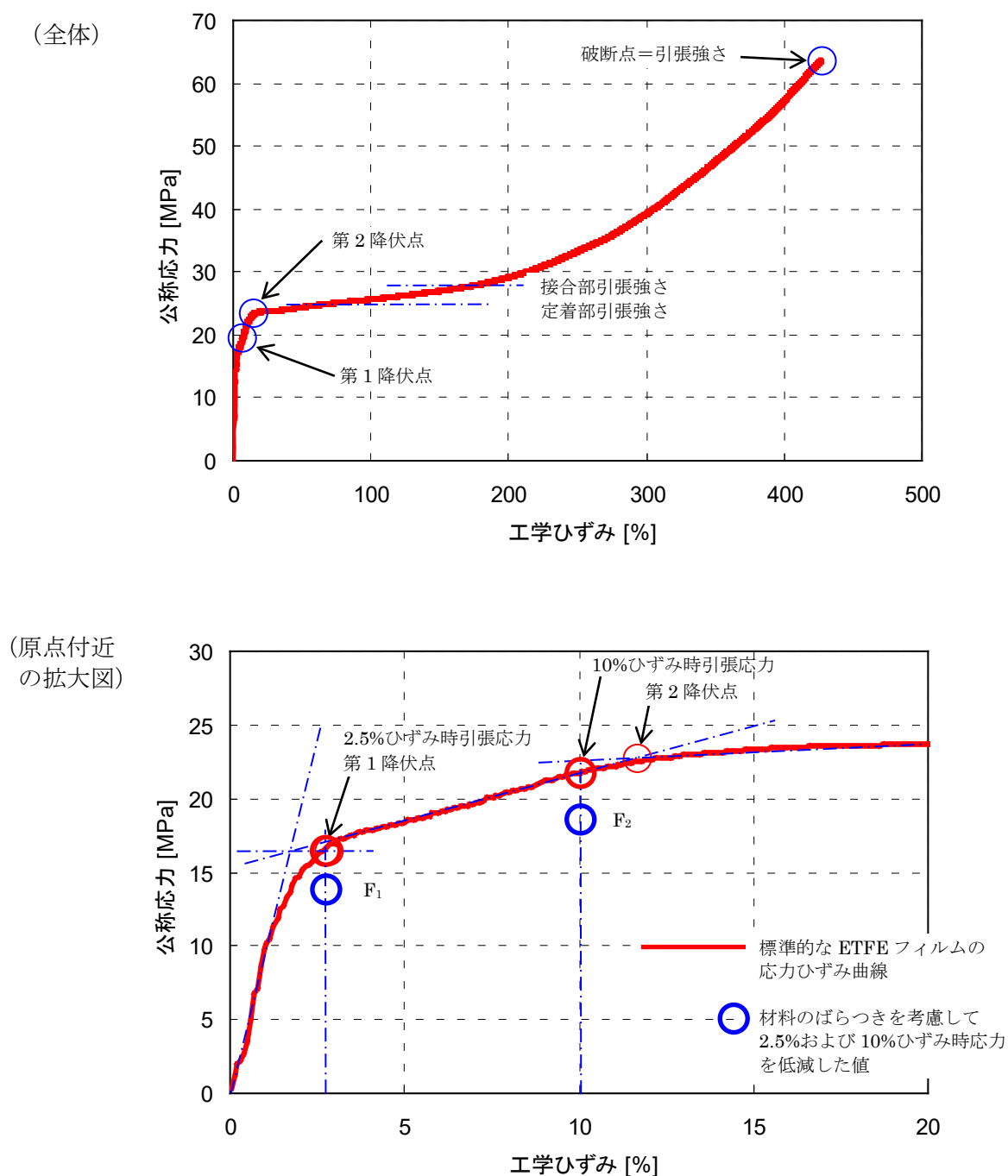


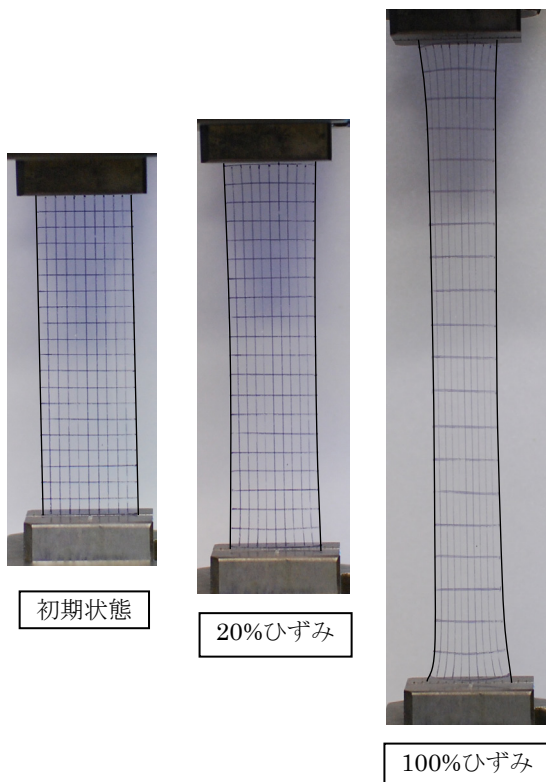
図 1 ETFE フィルムの SS 曲線（1 軸引張）

4. 1 軸応力と 2 軸応力による違い

フィルムの引張試験は試験機の一般性から 1 軸引張で行われるが、実際の構造物は 2 軸応力状態にある。以下は ETFE フィルムの 1 軸応力と 2 軸応力によるひずみの違いを示しており、2 軸引張時の伸びは 1 軸の概ね 1/2 程度になっている。一方、第 1 降伏点の応力度は応力比による違いがあまり見られない。

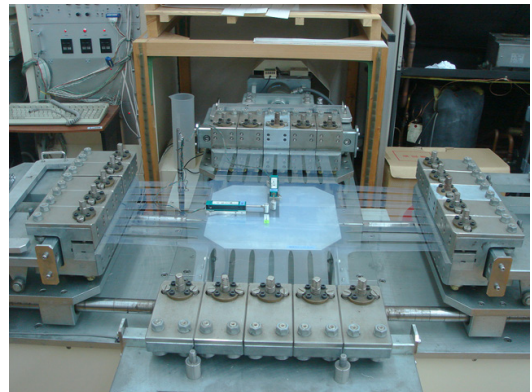
1 軸引張

- ・ 長辺方向引張
短辺方向フリー
- ・ 実構造物とは異なる状態

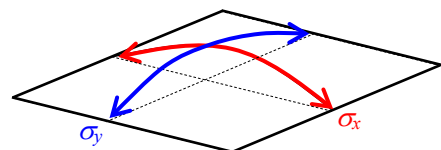


2 軸引張

- ・ 実構造物の応力状態

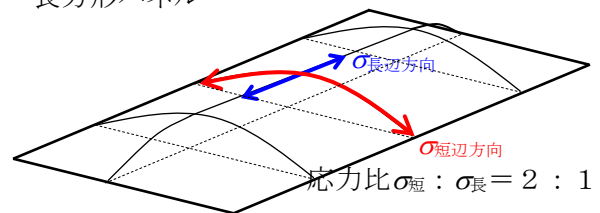


- ・ 正多角形、円形パネル

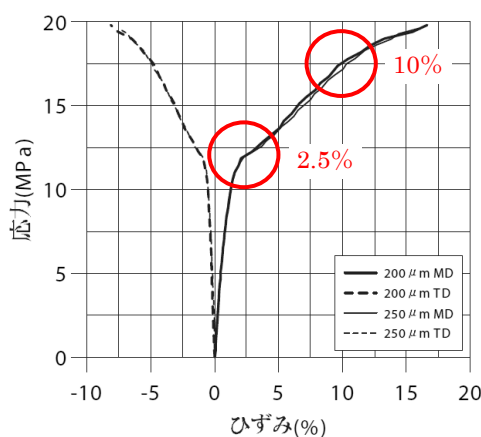


応力比 $\sigma_x : \sigma_y = 1 : 1$

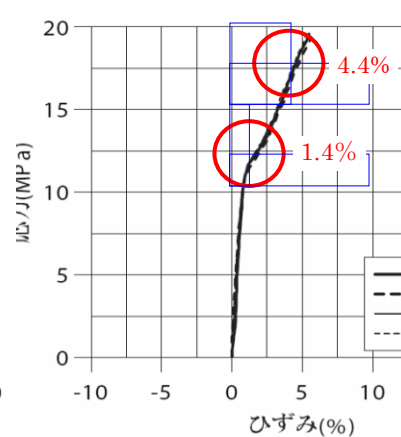
- ・ 長方形パネル



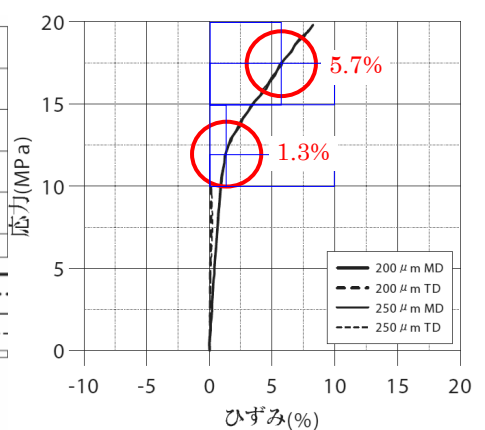
応力比 $\sigma_{短} : \sigma_{長} = 2 : 1$



(b) 応力比 (1 : 0)



(a) 応力比 (1 : 1)



(d) 応力比 (2 : 1)

図 2 ETFE フィルムの SS 曲線 (2 軸引張)

5. 積雪時の許容応力度、材料強度の背景と考え方

積雪時はフィルムが低温（0℃前後～氷点下）の状態で、荷重が数時間から数か月にわたって継続的に作用する。ETFE フィルムの継続荷重に対するクリープは資料 1（12 ページ）、低温時の SS 曲線は資料 2（14 ページ）に示すとおりである。フィルムのクリープは木材と類似した性質を持つことから、許容応力度について多雪区域では中長期、それ以外の区域では中短期の荷重状態として以下のように設定する。材料強度は再現期間 500 年の極めて稀な雪荷重に対しても、構造物が倒壊・崩壊に至らない（部分的にもメカニズム状態に至らない）応力レベルに設定する。なお低温状態（0℃）のフィルムの第 1 降伏点および第 2 降伏点の応力度は、各々常温時（20℃）の約 1.2 倍となるため、材料強度はこれを考慮した値としている。

ETFE フィルムの許容応力度と材料強度

	状態	応力範囲	応力度 (MPa)	各許容値の根拠
① 多雪区域の積雪に対する長期許容応力度	中長期	弾性	9.8	$F_1 \times 0.7$ 数ヶ月間継続する荷重に対してクリープの影響を受けにくい応力レベル
② ①以外の積雪に対する短期許容応力度	中短期	弾性	12.6	$F_1 \times 0.9$ 数日間継続する荷重に対してクリープの影響を受けにくい応力レベル
③ 材料強度	中短期	弾性 (0℃)	16.8	$F_1 \times 1.2$ 数日間継続する荷重に対して部分的にもメカニズム状態に至らない応力レベル

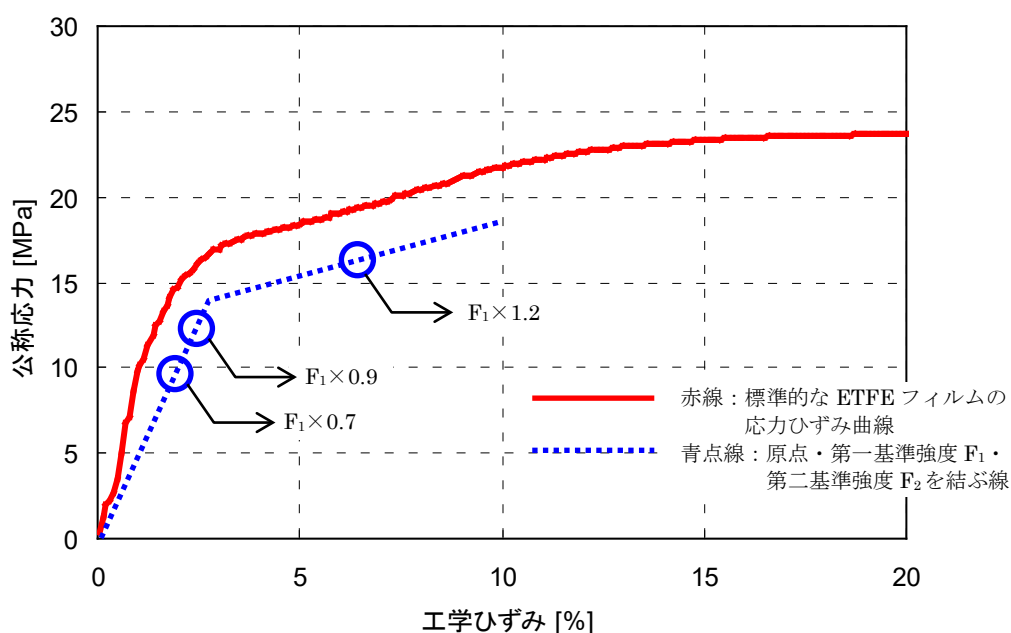


図 3 積雪時の ETFE フィルムの許容応力度と材料強度

6. 暴風時および地震時の許容応力度と材料強度の背景と考え方

暴風時は風圧力の変動によりフィルムには引張の繰返応力が生じる。ETFE フィルムの繰返引張に対する挙動は資料 3（15 ページ）、繰返荷重を受けるエアクッションの挙動は資料 4（16 ページ）に示すとおりである。クッション方式は、風荷重によりフィルムの応力度が塑性域に達すると延伸（加工硬化）により耐力が上昇し、除荷後は内圧により安定した張力状態が保たれる。ゆえに、クッション方式の短期許容応力度は繰返引張に対して安定した弾性的挙動を示すレベルの塑性化を許容した値としている。材料強度は、風圧力の継続時間内に進行性の変形を生じない応力レベルである基準強度 F_2 としている。

ETFE フィルムの許容応力度と材料強度

	状態	応力範囲	応力度 (MPa)	各許容値の根拠
① テンション方式の短期許容応力度	短期	弾性	14	F_1 第 1 降伏点に対応する応力レベル
② クッション方式の短期許容応力度	短期	7%程度ひずみ内	16.8	$F_1 \times 1.2$ 繰返引張に対してひずみが飽和した後に弾性的挙動を示す応力レベル(クッション方式の風に対する変形が許容範囲内である)
③ 材料強度	短期	10%ひずみ内	19	F_2 第 2 降伏点を超えない応力レベル（風圧力の継続時間内に進行性の変形を生じない範囲である）

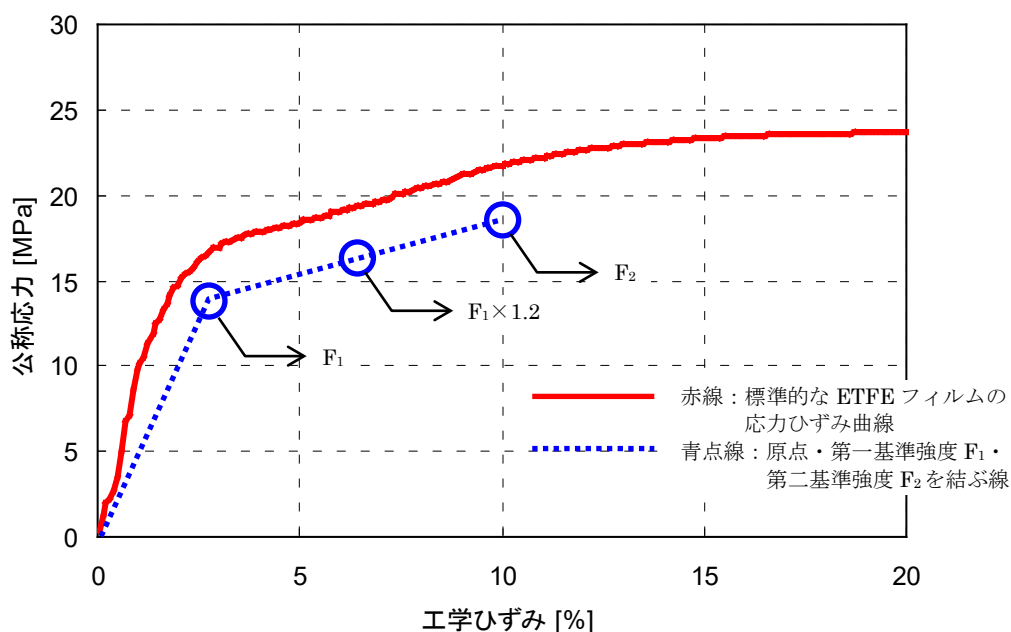


図 4 暴風時および地震時の ETFE フィルムの許容応力度と材料強度

7. 膜構造用フィルムの許容応力度と材料強度

膜構造用フィルムの許容応力度と材料強度（折りたたみが無い場合）

	状態	応力 範囲	応力度 (MPa)	各許容値の根拠
① 長期許容応力度	長期	弾性	7	$F_1 \times 0.5$ 長期間継続する荷重に対してクリープの影響を受けにくい応力レベル
② 積雪に対する 長期許容応力度	中長期	弾性	9.8	$F_1 \times 0.7$ 数ヶ月間継続する荷重に対してクリープの影響を受けにくい応力レベル
③ 積雪に対する 短期許容応力度	中短期	弾性	12.6	$F_1 \times 0.9$ 数日間継続する荷重に対してクリープの影響を受けにくい応力レベル
④ ③、⑤以外の 短期許容応力度	短期	弾性	14	$F_1 \cdots$ 第1基準強度 第1降伏点に対応する応力レベル
⑤ クッション方式の風に 対する短期許容応力度	短期	7%程度 ひずみ内	16.8	$F_1 \times 1.2 \cdots$ ④の1.2倍 繰返引張に対してひずみが飽和した後に弾性的挙動を示す応力レベル（クッション方式の風に対する変形が許容範囲内である）。
⑥ 積雪に対する材料強度	中短期	弾性 (0℃)		$F_1 \times 1.2 \cdots$ ④の1.2倍 数日間継続する荷重に対して部分的にもメカニズム状態に至らない応力レベル。
⑦ ⑥以外の材料強度	短期	10%ひずみ内	19	$F_2 \cdots$ 第2基準強度 第2降伏点を超えない応力レベル（風圧力の継続時間内に進行性的変形を生じない範囲である）

膜構造用フィルムの許容応力度と材料強度（折りたたみがある場合）

	状態	応力 範囲	応力度 (MPa)	各許容値の根拠
① 長期許容応力度	長期	弾性	7	$F_1 \times 0.5 \cdots$ 折りたたみ無し①と同じ
② 積雪に対する 長期許容応力度	中長期	弾性	9.8	$F_1 \times 0.7 \cdots$ 折りたたみ無し②と同じ
③ 積雪に対する 短期許容応力度	中短期	弾性	10.0	$F_1 \times 0.72 \cdots$ 折りたたみ無し③の0.8倍
④ ③、⑤以外の 短期許容応力度	短期	弾性	11.2	$F_1 \times 0.8 \cdots$ 折りたたみ無し④の0.8倍
⑤ クッション方式の風に 対する短期許容応力度	短期	7%程度 ひずみ内		クッション方式の折りたたみは大臣認定
⑥ 積雪に対する材料強度	中短期	弾性 (0℃)	16.8	$F_1 \times 1.2 \cdots$ 折りたたみ無し⑥と同じ 大臣認定時に実況に応じて
⑦ ⑥以外の材料強度	短期	10%ひずみ内	19	$F_2 \cdots$ 折りたたみ無し⑦と同じ

$F_1 \cdots$ 第1基準強度、伸び率2.5%時の応力 -3σ （ σ ：標準偏差）、第1降伏点に対応する応力レベル
 $F_2 \cdots$ 第2基準強度、伸び率10%時の応力 -3σ （ σ ：標準偏差）、第2降伏点を超えない応力レベル
 上の表中の応力度は、 $F_1=14\text{MPa}$ 、 $F_2=19\text{MPa}$ の場合の参考値

フィルム定着部の許容応力度と終局耐力

	状態	応力 範囲	応力度 (MPa)	各許容値の根拠
① 長期許容応力度	長期	弾性		$F_j \times 1 / 3$
② 積雪に対する 長期許容応力度	中長期	弾性		$F_j \times 1.4 / 3$
③ 積雪に対する 短期許容応力度	中短期	弾性		$F_j \times 1.8 / 3$
④ ③、⑤以外の 短期許容応力度	短期	弾性		$F_j \times 2 / 3$
⑤ クッション方式の風に 対する短期許容応力度	短期	7%程度 ひずみ内		$F_j \times 2.4 / 3$
⑥ 終局耐力	短期	10%ひず み内		$F_j \times 2.5 / 3$

F_j ・・・膜構造用フィルムの膜面の定着部の実況に応じた引張試験によって求めた引張強さ（単位 N）

定着部の引張試験は膜体加工メーカー等で実施する。

8. 相当応力による応力度の検定

従来、膜構造の設計ではタテ糸・ヨコ糸の各方向の引張強さから許容応力度を算出し、各糸方向の発生応力が許容応力度を超えないことを確認している。これは膜材料の強度・剛性において、織糸が支配的なためであるが、フィルムの材料特性は織布膜材料と大きく異なるため、応力度の検定方法も異なる。

例えば、等方性弾性体が図 5 のような平面応力状態にある場合、応力-ひずみ関係式は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & 0 \\ E_{21} & E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$E_{11} = E_{22} = \frac{E}{1-\nu^2}, \quad E_{12} = E_{21} = \frac{\nu E}{1-\nu^2}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

E : ヤング係数 (N/mm²)、 G : せん断弾性係数 (N/mm²)
 ν : ポアソン比

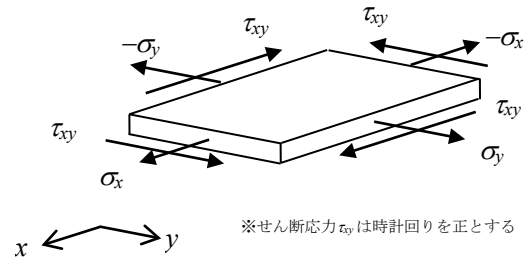


図 5 平面応力状態

式(1)に $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$ を代入すると、1 軸引張の関係式

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2)$$

が得られる。

式 (1) のように、引張応力やせん断応力が複合した場合の降伏を判定するための指標として、相当応力があり、鋼材の降伏（ミーゼスの降伏条件式）にも用いられている。ETFE フィルムの降伏条件にも、相当応力を適用することが可能で、図 5 のような平面応力の場合は次式で表される。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

例えば、1 軸引張 ($\sigma_y = \tau_{xy} = 0$)、等張力 ($\sigma_x = \sigma_y$, $\tau_{xy} = 0$) の場合の相当応力は一致する。つまり、1 軸引張や等張力の場合は、 σ_x のみで降伏判定してもよいが、それ以外の場合は上記の相当応力で判定する必要がある。

9. 降伏応力の依存性(ひずみ速度、温度、履歴)

ひずみ速度依存性

高分子材料である ETFE フィルムは粘性の影響により、第 1 次降伏点の応力がひずみ速度に依存する。図 6 は ETFE フィルムのひずみ速度と第 1 次降伏点応力の関係である。通常、フィルムの引張試験は引張速度 100%/min で行っている。

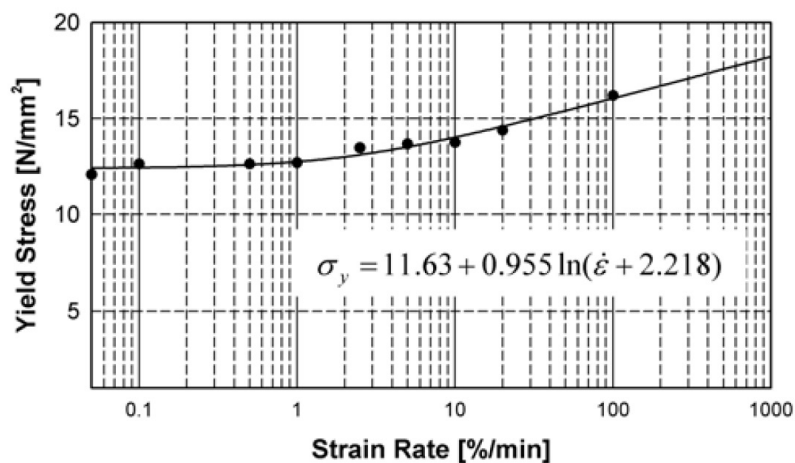


図 6 ETFE フィルムの第 1 降伏点応力のひずみ速度依存性

温度依存性

資料 2 (14 ページ) 参照

履歴依存性

資料 3、4 (15、16 ページ) 参照

(資料1) クリープによる ETFE フィルムの伸び

図 7 は、1 軸引張または 2 軸引張（応力比 1 : 1）によるクリープ試験の結果である。なお縦軸のひずみは弾性ひずみを含んでいる。1 軸応力ではクリープひずみの増加が長時間に及ぶのに対して、2 軸応力では数時間でひずみが飽和している。図 8 は、1 軸引張によるクリープを常温（23℃）と 0℃の場合で比較したものである。

図 9 は、1 軸引張に対する 72 時間後のクリープひずみ（常温と 0℃）および 2 軸引張に対する 24 時間後のクリープひずみ（常温）と負荷応力の関係を示している。常温の場合、1 軸では概ね 6MPa、2 軸では概ね 9MPa を超えるとクリープひずみが顕著に増加している。0℃の場合、1 軸引張に対するクリープひずみは常温に比べて小さい。2 軸引張に対するひずみは 1 軸引張の約半分で飽和することから、0℃で 14MPa の 2 軸引張による 24 時間後のひずみは約 2%（弾性ひずみ 1%+クリープひずみ 1%）程度と予想される。

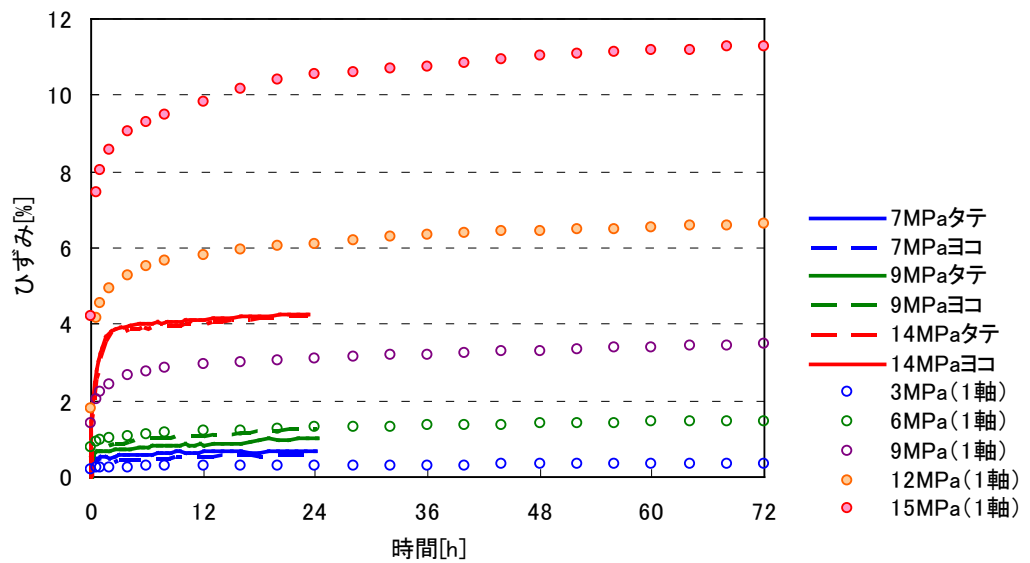


図 7 1 軸引張、2 軸引張（応力比 1 : 1）によるひずみ
縦軸：弾性ひずみ+クリープひずみ

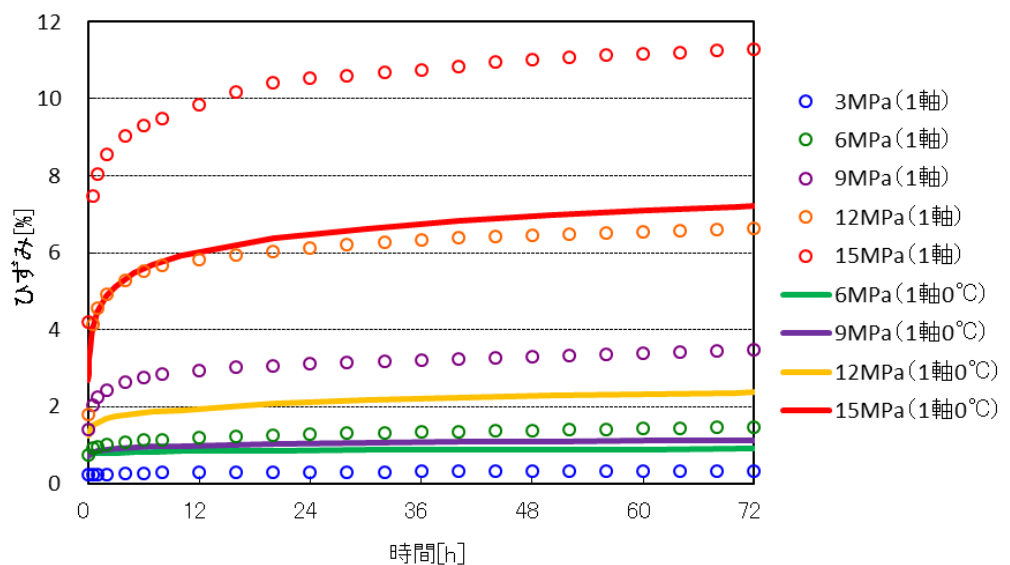


図 8 1 軸引張によるひずみ（常温と 0℃の比較）
縦軸：弾性ひずみ+クリープひずみ

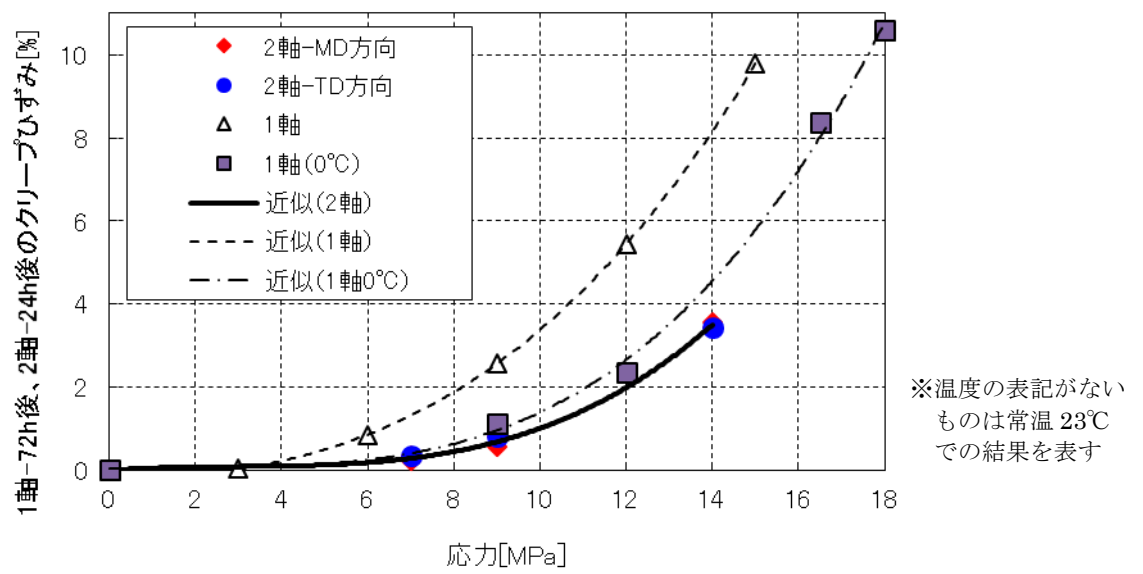


図 9 1 軸引張-72 時間後および 2 軸引張（応力比 1 : 1）-24 時間後のクリープひずみ

（資料2） 高温時、低温時の ETFE フィルムの SS 曲線

図 10 は、各雰囲気温度における 1 軸引張時のフィルムの SS 曲線である。温度が上昇すると弾性率および第 1 降伏点、第 2 降伏点の応力度が低下する。設計用の弾性率および各種応力度は常温 23℃における値である。積雪時は 0℃前後から氷点下の温度になるため、2.5%ひずみ時および 10%ひずみ時の応力は常温よりも高く安全側にある。一方、暴風時は 23℃以上の温度になる場合も多いが、風速が最大になるときの天候は雨天または曇天であるためフィルムが著しく高温になることはない。ただし、台風通過後は吹き戻しにより気温が上昇しつつ、比較的強い風が吹くことがあるため注意が必要である。

一方、0℃の低温状態ではフィルムの第 1 降伏点および第 2 降伏点の応力度が、常温 (20℃) に比べて約 1.25 倍に上昇する。

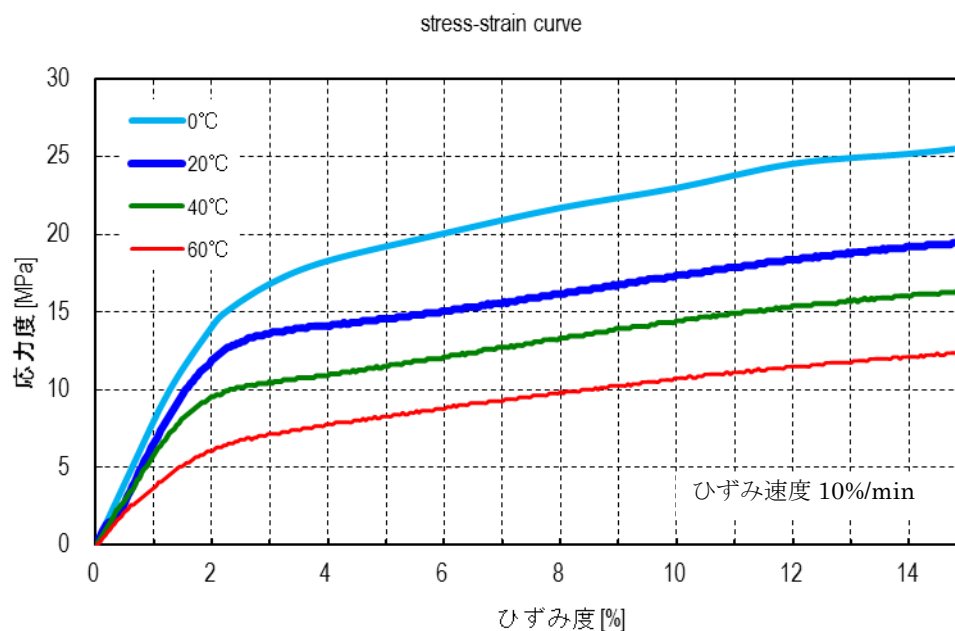


図 10 ETFE フィルムの SS 曲線 (1 軸引張)

(資料3) 繰返引張による ETFE フィルムの伸びと強度保持率

図 11 は 1 軸の繰返引張に対するフィルムのひずみの変化を示したものである。最大応力が第 1 降伏点以下の場合、クリープによるひずみの増加がみられるが、その量はわずかである。一方、最大応力が第 1 降伏点を越えと、1 回目の加力で塑性変形を生じ、2 回目以降は徐々にひずみが増加した後にひずみが飽和する。飽和後は、初期の弾性率と同じ勾配で弾性挙動を示す。

図 12 は 1 軸の繰返引張を 30 万回行った時の回数とひずみの関係で、約 1000 回でひずみが飽和している。表 1 は 30 万回繰返引張後の強度保持率で、材料の疲労はほとんど生じていない。

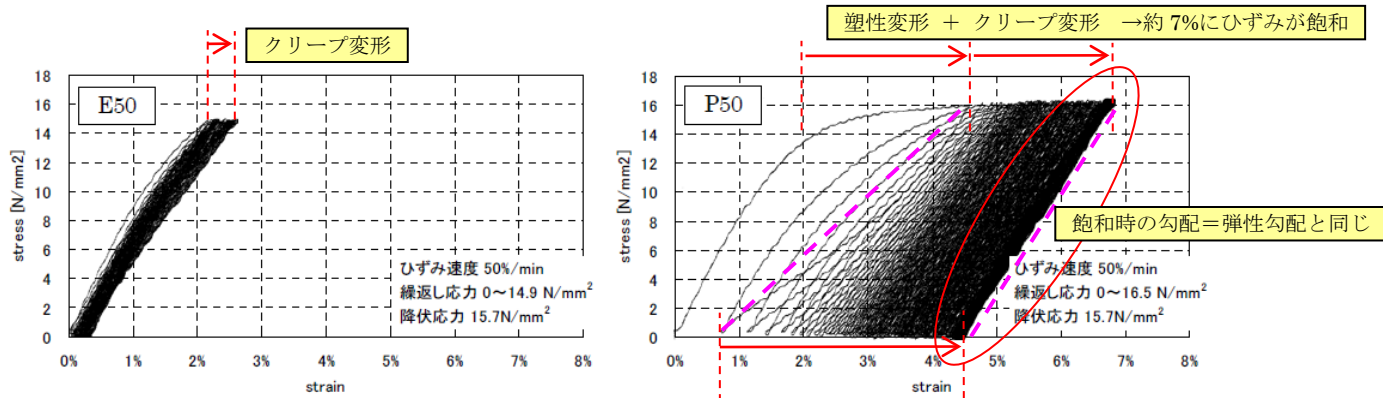


図 11 繰返引張（応力制御、1 軸引張）によるひずみの変化

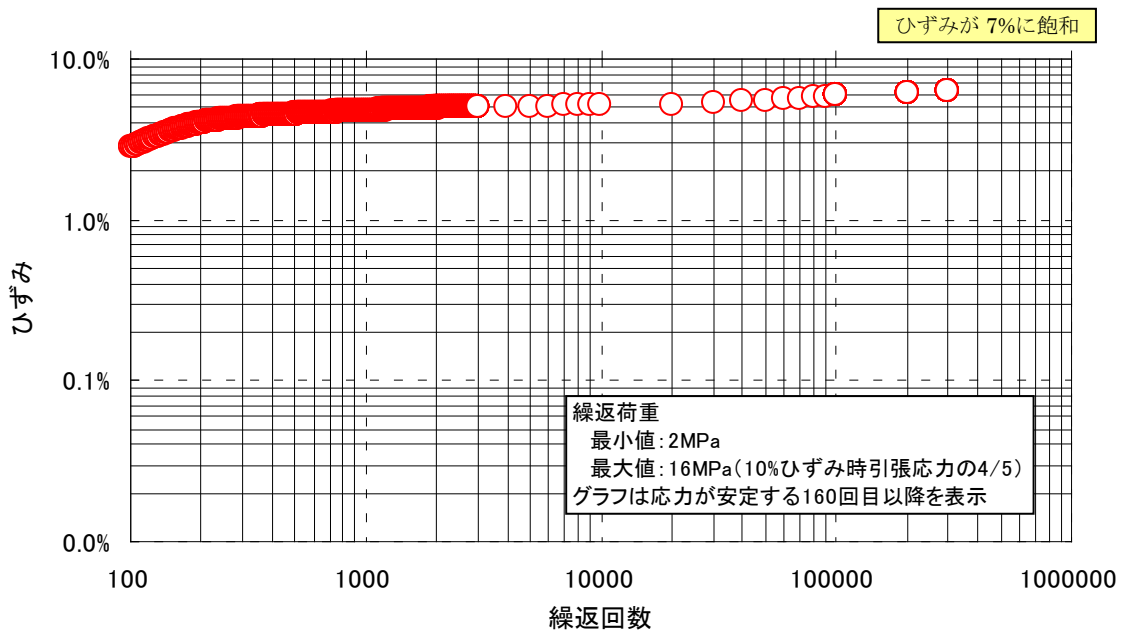


図 12 30 万回繰返引張に対するひずみ

表 1 30 万回繰返引張後の強度保持率

		透明			片面ナシ地		白色
厚さ	μ m	100	200	300	200	300	200
強度 保持率	最大	95%	97%	97%	107%	104%	102%
	最小	78%	90%	87%	91%	87%	89%
	平均	86%	94%	92%	100%	92%	97%

繰返引張に対する強度低下（疲労）はほとんど生じない

(資料4) 繰返荷重を受けるエアクッション(ETFE フィルム)の挙動

図 13 は、円形平面フィルムに作用する内圧（面外圧力）と変形の関係を示している。第 1 降伏点を越える繰返引張を受けた ETFE フィルムは、延伸により降伏点（飽和応力）が上昇し、安定した剛性を示す。

エアクッションは、材料の伸びを内圧で吸収する機構を有した構造となっている。

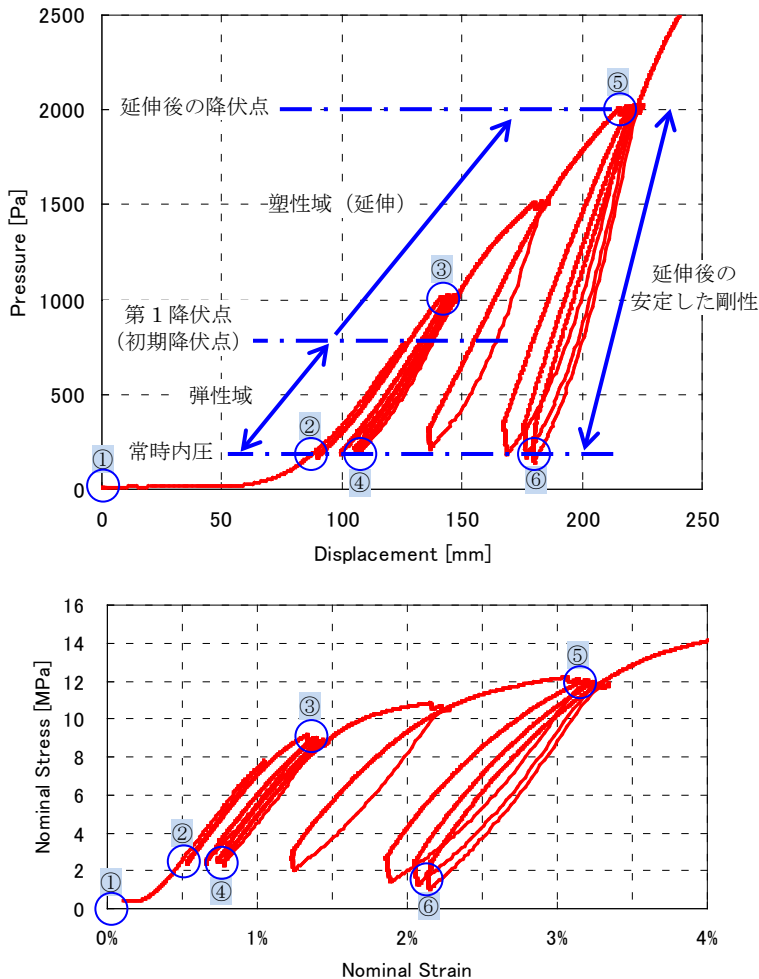


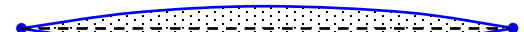
図 13 圧力と変位、応力とひずみの関係
(直径 2m、フィルム thickness 200 μ m の場合)

① 無応力時



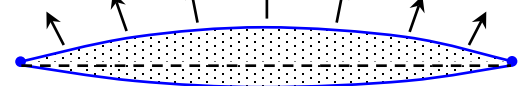
② 常時内圧 200Pa

$h_2=90\text{mm}$
(ライズ比 4.5%)



③ 負荷時 (内圧 200Pa+外力 800Pa)

$h_3=140\text{mm}$
(ライズ比 7%)



④ 除荷時 (内圧 200Pa)

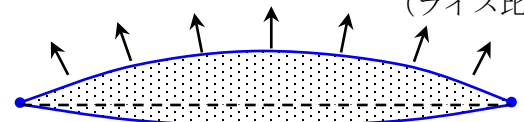
$h_4=110\text{mm}$
(ライズ比 5.5%)



クリープにより除荷後のライズがわずかに増加する

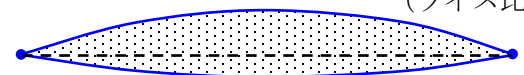
⑤ 負荷時 (内圧 200Pa+外力 1800Pa)

$h_5=210\text{mm}$
(ライズ比 10.5%)



⑥ 除荷時 (内圧 200Pa)

$h_6=180\text{mm}$
(ライズ比 9%)



塑性化+クリープのため、初期状態②に比べてライズが増加するが、構造的には安定した状態になる。

