
Potential and Attractiveness of Film Membrane Structures

(フィルム膜構造の魅力とその可能性について)

河端 昌也*

1. はじめに

フィルムパネルを屋根や外壁などに用いた建築物は、欧州の高緯度地域では20年以上の実績を有し、昨今では中国のオリンピック施設にも採用されている。国内では農業分野の温室を中心に累計で1500万m²のETFEフィルムの利用実績があり、その優れた耐久性が実証されている。本構造は視認性の透明フィルムをベースに、着色や模様のプリント、複数の層で構成したパネル化などによって、光や色、視線、熱の出入りをコントロールできる。これにより機能的で、表現力豊かなフィルターを、軽量かつコンパクトに設計することが可能である。またETFEに代表されるフッ素樹脂フィルムは耐候性(耐紫外線性)と防火性(自己消火性)を有することから、今後さらに屋根や壁などへの適用事例が増えると予想される。

2. パネルの規模と設計荷重

欧州ではスパン6~10m程度の比較的大型のフィルムクッション(空気膜パネル)としている事例が多いが、台風が襲来する日本や東アジア地域の設計では、パネルの規模に関する制約が予想される。ただし風荷重は風速の増減を繰り返すため、瞬間的なピーク風圧力の継続時間はフィルムの伸びに要する時間に比べて短く、台風の直撃による暴風を受けても顕著なライズの変化が見られないことが実際に観測されている¹⁾。ガラスや留付け部材等の許容風圧力算定はピーク風圧力に対する強度で設計するのが一般的であるが、延性のフィルムパネルに対して非延性の材料と同様の設計手法を用いるのは実況にそぐわない面がある。延性材料では、長期応力や繰返し荷重に対する伸びの評価がむしろ重要な可能性もあると思われる。

これらを解明するためには、フィルムの伸びに対して支配的となる粘性特性を把握し、長期応力に対する伸びやパネルの動的変形に伴う伸びと応力状態を検討することが不可欠である。同時に実構造物等での計測例を増やして検証の精度を高めることも重要である。

既往の研究では高分子材料の粘性に関して、膜材料A種の粘弾性特性を四要素voigtモデルでモデル化²⁾したものや、粘性ダンパーの履歴特性に関する研究、エポキシ樹脂の粘塑性に関して背応力を用いた構成式による評価³⁾などあるが、いずれも線形粘弾性に基づく評価や構成則の定式化を目的としたものに限られている。

3. 結晶化度の低い高分子の粘弹性

ETFEフィルムのように結晶化度が低い高分子の内部構造は、図1のように鎖状高分子が凝集した状態で、原子間

* 横浜國立大學大學院工學研究科助教授 博士(工學)Associate Prof., Faculty of Engineering, Yokohama National Univ. Dr. Eng

の「化学結合」と鎖状高分子間の分子間引力や鎖のからみによる「物理的拘束」の両者が共存し、粘性挙動は結合力の弱い後者が時間とともに変化する流動現象に起因する。このためフィルムの引張降伏応力と弾性率はひずみ速度依存性があり、図2のようにひずみ速度が大きくなると見かけの降伏応力は大きくなる性質がある。

高分子材料の粘性は、一般に時間依存性と温度依存性をもつことが知られており、一般化Maxwell要素などによる粘性モデルが示されている。ETFEフィルムではこれらの依存性に加えて、3MPa以上の応力域に入ると応力依存性があることを既報⁴⁾で示した。

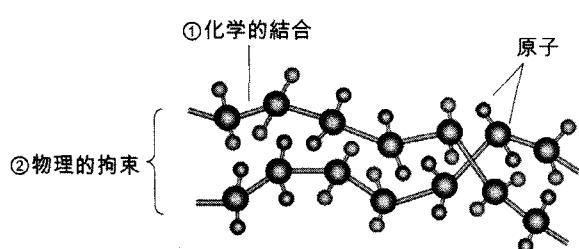


図1. 高分子材料の内部構造

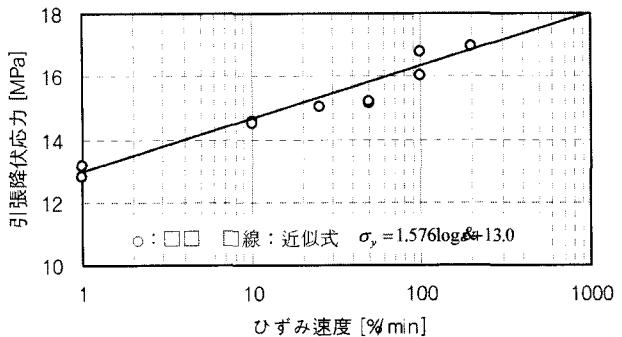


図2. ひずみ速度と引張降伏応力の関係

4. 静的風圧力とパネルのスパン

高さ10mの建築物を例にすると、告示1454号の設計用速度圧は地表面粗度区分により図3のようになる。いま図4のよ

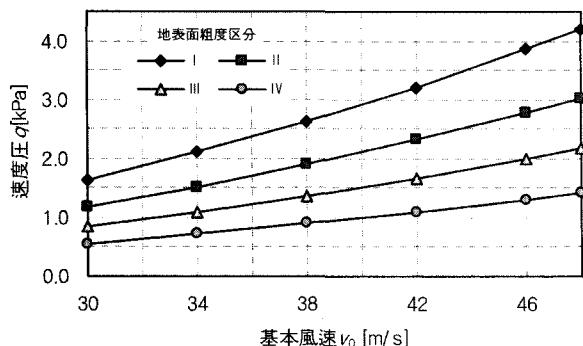
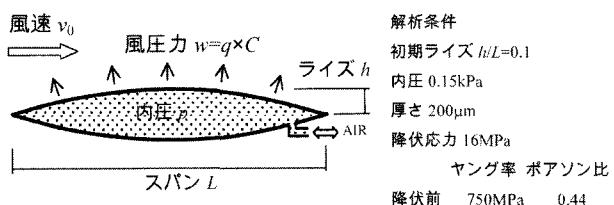
図3. 基本風速と設計用速度圧の関係
(建築物高さ 10mの場合)

図4. 解析条件

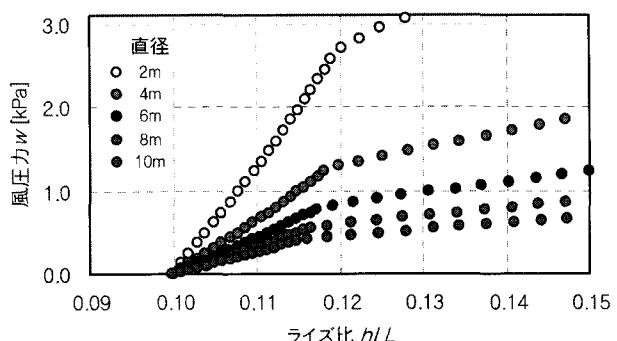


図5. 靜的風圧力に對するライズ変化

参考文献

- 1) 會田裕昌, 河端昌也, 塩津一興, 西川薰, 小竹達也 : ETFEフィルム空気膜パネルの振動性状に関する考察, 日本建築學會大會梗概集, pp.937~938, 2005.
- 2) 加藤史郎ほか : 織構造格子モデルによる膜構造の粘彈塑性解析、膜構造研究論文集1997, pp1~12
- 3) 佐野村幸夫、水野衛 : 高密度ポリスチレンの粘塑性構成式、日本强度學會誌、38-1、pp7~13、2004
- 4) 森山史朗、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) 森山史朗、河端昌也、會田裕昌 : ETFEフィルム空気膜構造における粘彈性挙動に関する研究一、膜構造研究論文集2005, pp1~8

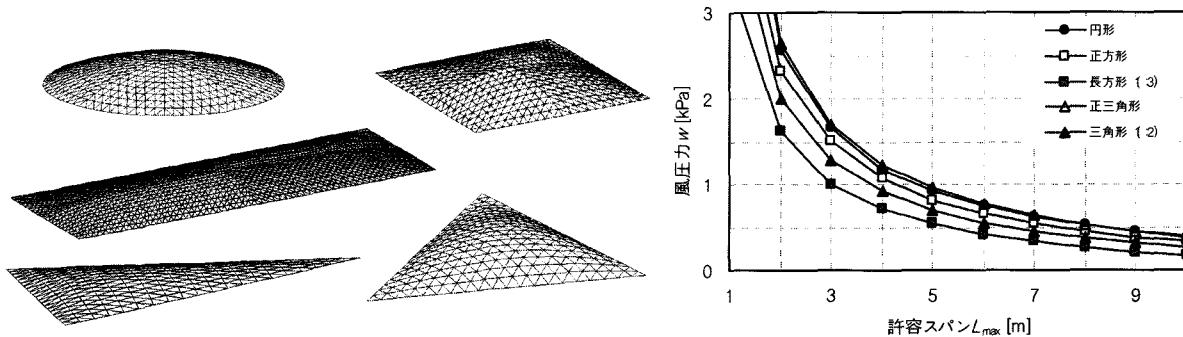


図 6. パネル形状による許容スパンの違い

(注) 解析条件は図 4 と同様とし、長方形のスパンは短辺長さ、正三角形 および三角形のスパンは内接円の直径で表している。

表 1. フィルムパネルの降伏時速度圧と換算風速

スパン L		2m	4m	6m	8m	10m	
降伏時風圧力		2.70	1.23	0.78	0.55	0.42	kPa
基本風速	C = -0.8	74.2	50.1	39.9	33.5	29.3	m/s
	C = -3.2	37.1	25.1	19.9	16.8	14.6	m/s

うなレンズ形(円形平面)のパネルに対して負圧が作用すると仮定(内圧は一定として、ボイル則は考慮しない)して、静的風圧力に対する変形を解析すると、図5のように降伏応力を超えた後はフィルムが伸びてライズが顕著に増加する計算になる。なお台風時のフィルムのひずみ速度が物的に高速側であることをふまえて、ここでは降伏応力を16MPaとしている。次にパネルの降伏時風圧力を、実際の建築物(高さ10m、地表面粗度区分II、円弧屋根面と想定)にあてはめて基本風速への換算を試みる。風力係数の1例としてC=−0.8(構造骨組用外圧係数)とC=−3.2(外装材用ピーク外圧係数)

の2通りで計算すると表1のようになる。ここで想定した外装材用の静的風圧力に対して6m～10mのパネルが設計可能な基本風速の条件は19m/s～14m/s以下となるが、これらは欧州の風速条件を考慮しても過小な数値である。また、荷重指針等に示されるピーク外圧係数の数値は、上記の想定よりさらに大きな数値の部位もある。図6はパネル形状による許容スパンの違いを示したもので、応力分布の方向性が少ない円形や正三角形に対して、長方形のパネルでは許容スパンが概ね2/3に短くなる。

しかし、建築物としての実績が20年を超える欧州の事例や国内の温室の事例では、風荷重によるフィルムの伸びは問題になっていない。したがって計算上の静的風圧力に対するフィルムの伸びと実際の動的な風荷重に対するフィルムの伸びの間には明らかな相違があると思われる。その要因にはフィルムの粘性効果と風の動的荷重効果という2つの侧面があると考えられる。

5. まとめ

静的風圧力に対するフィルムパネルの変形を検討し、外装材用ピーク外圧係数に対応する風圧力による伸びと、実構造物の挙動には差異がある可能性を示し、材料の粘性と風の動的特性を考慮した検討の必要性を指摘した。

2006年3月3日
社団法人 日本膜構造協会
フィルム膜パネル委員会

ETFEフィルムパネル設計・施工指針(案)

1. 総則

1.1 適用範囲

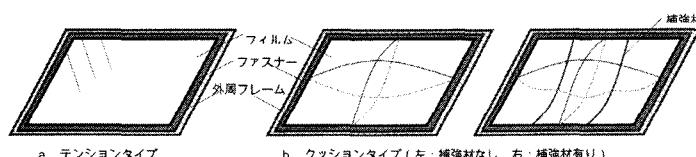
ETFEフィルムを建築物の屋根または外壁などにパネルとして使用する場合の設計・施工に適用する。

1.2 フィルム材料

- (1) ETFE フィルム(以下、フィルム)は、エチレン・テトラフルオロエチレン共重合樹脂を原料としたフィルムとし、外被材料として適格な性能を保持するものとする。
- (2) フィルムの厚さは、50μm以上のものとし、幅方向及び長さ方向とも公称厚さの±5%以下とする。
- (3) フィルムの質量は、厚さ60μmで105g/m²、厚さ100μmで175g/m²、厚さ250μmで438g/m²を標準とする。

表 1-2. 透明な建材の材料特性比較

	ETFEフィルム材	ポリカーボネート板	塩化ビニルフィルム	普通板ガラス
耐候性	良好	表面耐候処理が必要	良くない	極めて良好
光線透過率	95%	89%	95%	80%
熱膨張率	6×10^{-5}	7.0×10^{-5}	$5 \sim 10 \times 10^{-5}$	8.5×10^{-6}
引張破断強度 (N/mm ²)	40~60	56~70	45~63	30~90
伸び%	400	105	200	-
比重	1.75	1.2	1.4	2.5
厚み	50~250μm	2~15mm 但し 防火上は8mm以下	50~200μm	3~19mm
変形追従性	極めて良い	比較的良 サッシ込み代 が必要	良い	良くない サッシ・ファス ナーに工夫が必要
耐衝撃性	良好	極めて良好	良好	割れる
自己浄化性	良好	比較的汚れやすい	汚れやすい	比較的汚れやすい
耐熱性 (融点)	260~270°C	220~230°C	180°C	720~730°C (軟化点)
防火性	防炎	防炎	防炎	不燃
リユース	可能	不可	不可	可能



なし右：補強材有り)

図 1-2. フィルムパネルの構成

1.3 構成とタイプ

- (1) フィルムパネルは、フィルムとその外周を囲むフレーム(外周フレーム)、ファスナー注3)により構成し、フィルムの表面にはフィルムの変形を抑え、フィルムの材料強度を補うための補強材(線材あるいはメッシュ材)を必要に応じて配置する。
- (2) フィルムパネルには、テンションタイプとクッションタイプがあり、各フィルム面は、張力により安定した形状とする。
- (3) クッションタイプでは、中の空気圧をやや高めて安定させ、パネルとしての剛性を持たせる。

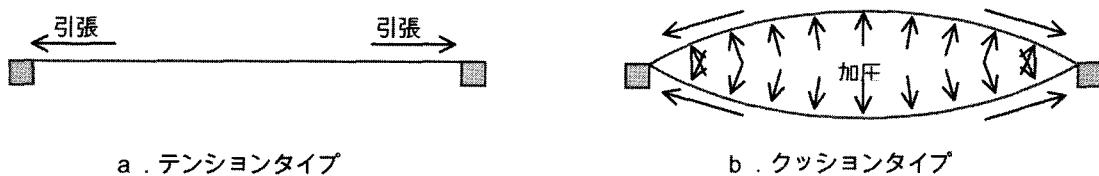


図 1-3. フィルムパネルタイプの概念図

2. フィルム材料の品質及び性能

2.1 フィルムの品質及び性能

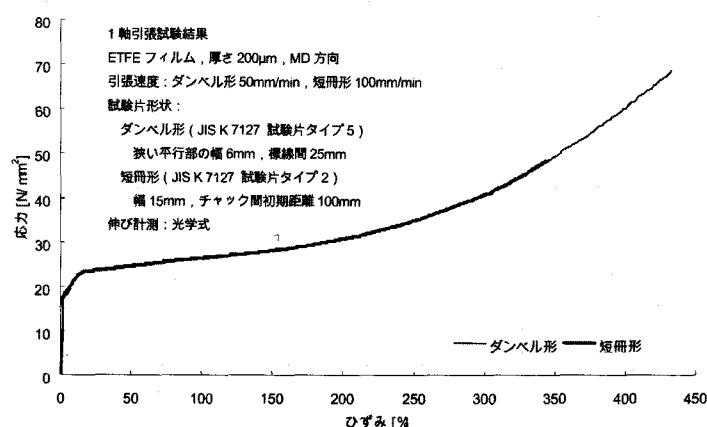
フィルムの品質及び性能は、以下の試験項目により所要の規格値に対し、適切な範囲内にあることが確認されたものとする。

- | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|----------|
| (1) 厚さ | (2) 引張強さ | (3) 引張降伏応力 | (4) 伸び率 | (5) 引裂強さ |
| (6) 耐繰返し折曲げ性 | (7) 耐候性 | (8) 難燃性 | (9) 光線透過率 | |

2.2 フィルム接合部の品質及び性能

フィルムの接合部の品質及び性能は、以下の試験項目により所要の規格値に対し、適格な範囲内にあることが確認されたものとする。

- (1) 外観
- (2) 接合部引張強さ

図 2-3. ETFE フィルムの応力-ひずみ関係²⁾

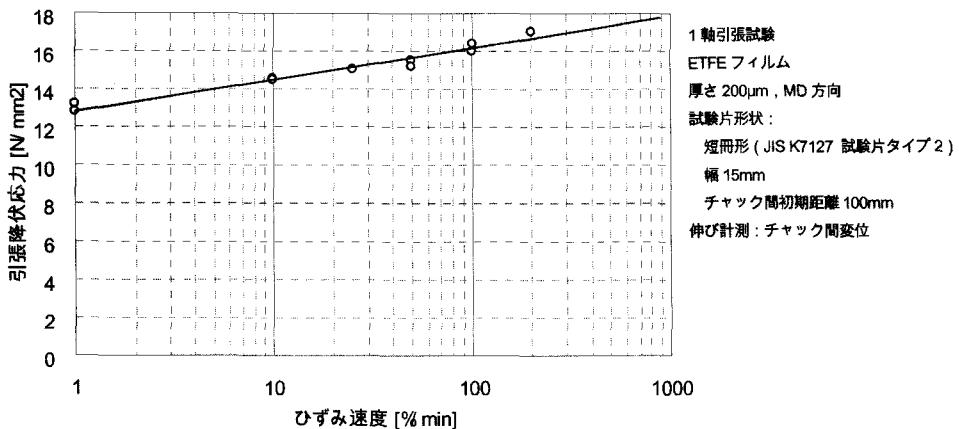


図 2-5. ETFEフィルムの引張降伏応力とひずみ速度の関係2)

3. 設計

3.1 荷重及び外力

フィルム面に作用する荷重及び外力として、固定荷重、積載荷重、積雪荷重、風圧力、初期張力、内圧(クッションタイプの場合)を採用する他、実況に応じた水圧、震動及び衝撃による外力を採用する。

- (1) 積雪荷重は、令第86条によること。
- (2) 風圧力は、令第87条並びに令第82条の5の規定に基づく平成12年建設省告示第1458号(屋根ふき材及び屋外に面する帳壁の風圧に対する構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算)によること。
- (3) 固定荷重及び積載荷重は実況に応じて計算すること。
- (4) フィルム面の初期張力及び内圧(クッションタイプの場合)は設計で用いた値とすること。

フィルム面に作用する荷重及び外力の組合せを以下に示す。

力の種類	荷重及び外力について想定する状態	一般の場合	多雪区域
長期に生ずる力	常時	G+P+Ti	G+P+Ti
	積雪時	G+P+Ti+S	G+P+Ti+S
短期に生ずる力	積雪時		G+P+Ti+0.35S+W
	暴風時	G+P+Ti+W	G+P+Ti+W

この表において、G,P,S,W及びTiは、それぞれ次の力を表すものとする。

- G 令第84条に規定する固定荷重によって生ずる力
 P 令第85条に規定する積載荷重によって生ずる力
 S 令第86条に規定する積雪荷重によって生ずる力
 W 令第82条の5に規定する風圧によって生ずる力
 Ti テンションタイプの場合には初期張力によって生ずる力、クッションタイプの場合には内圧によって生ずる力

3.2 形状と許容スパン

3.2.1 形状

フィルム面は初期張力または内圧(クッションタイプの場合)で安定した釣合い形状とすること。

3.2.2 許容応力

フィルムの長期に生ずる力に対する引張りの許容応力度は、引張降伏応力の1/2、または引張強さの1/6のいずれか小さい数値とし、短期に生ずる力に対する引張りの許容応力度は、長期に生ずる力に対する引張りの許容応力度の数値の2倍とする。

3.2.3 フィルム相互の接合部

フィルム相互の接合部は接合幅を10mm以上とし、フィルムの応力を伝達してパネルを安定した形状に保つのに十分な耐力を有する方法によること

3.2.4 ファスナーの定着耐力

ファスナーはフィルムの存在応力を外周フレームや他の構造部材に伝えるのに十分な定着耐力を有する方式によること。

3.3 ポンディング対策

フィルムパネルは、雨水によるポンディングの満水状態を想定した荷重に対して、長期に生ずる力に対する引張りの許容応力度をこえないこと。

3.4 高温時の挙動に関する配慮

フィルムの高温時の挙動に対して適切に配慮すること。

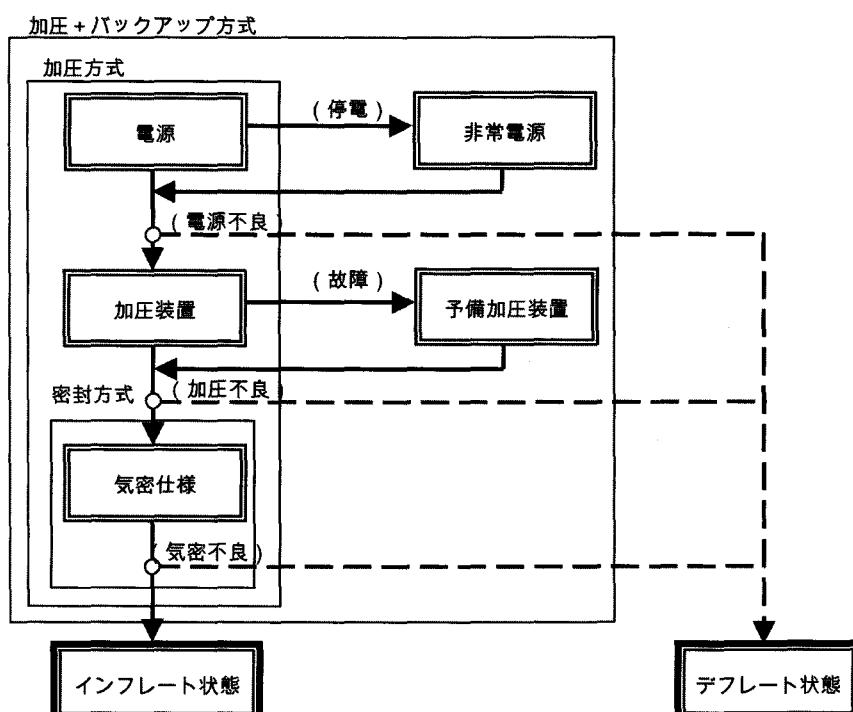


図 3-4. クッションタイプの圧力維持方法とデフレート原因

3.5 変形に對する配慮

フィルム面は変形により構造上及び機能上の支障を生じないようにすること。

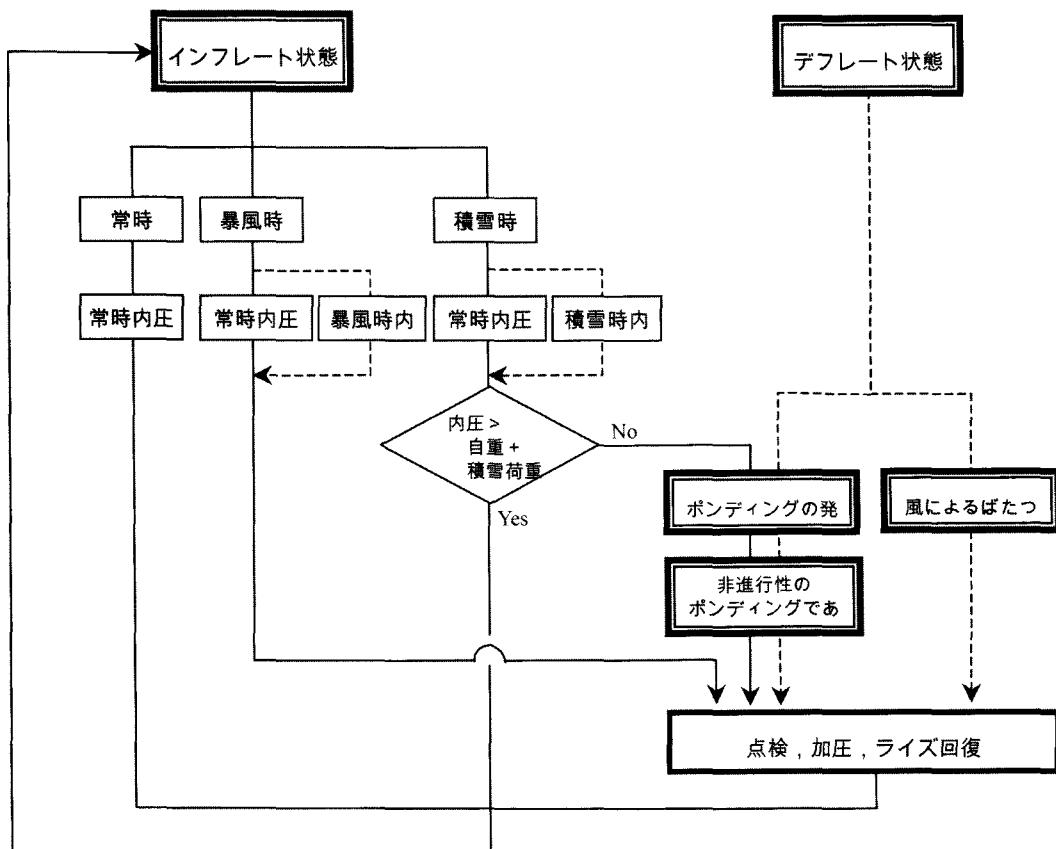


図 3-5. クッションタイプの各荷重時の状態

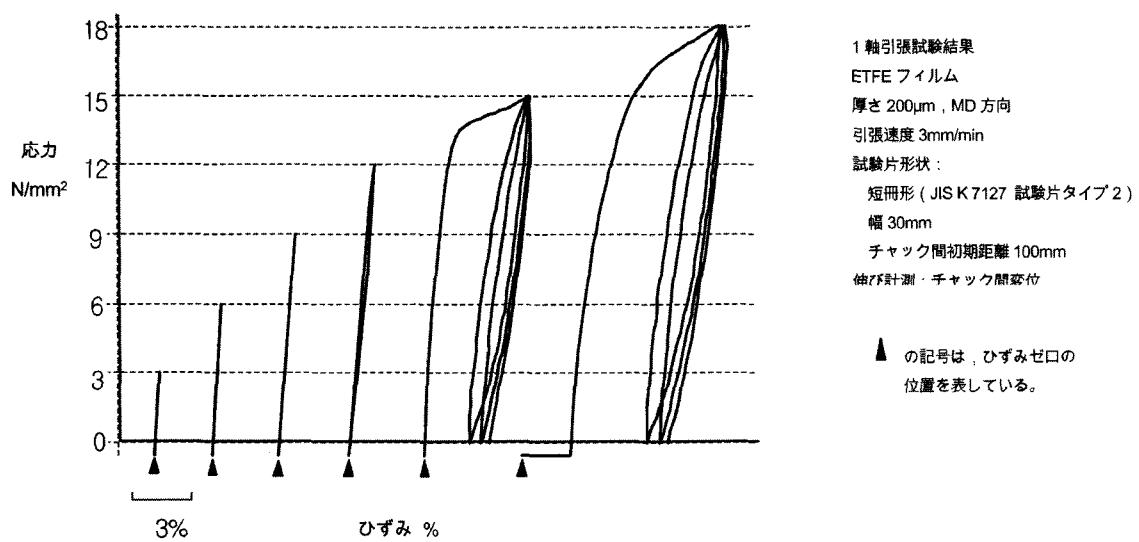


図 3-6. ETEFフィルムの応力一ひずみ関係(漸増繰り返し引張)⁹⁾

4. ディテール

4.1 フィルム外周部ディテール

- (1) フィルム外周部は、ファスナーと外周フレーム(またはファスナーのみ)により、構造部材に脱落または浮き上がりを起こさないように確実に取り付ける。
- (2) フィルムとファスナーが接触する部分は、ファスナーの角部を削る等の処置を施し、フィルムとの接触面を平滑に仕上げる。
- (3) フィルムのクリープによる伸びを考慮したディテールあるいは、施工方法とする。

4.2 ファスナーの性能

- (1) 耐久性、耐候性に優れた材料を使用する。
- (2) 簡易に取り付け、取り外しのできるディテールとする。
- (3) 水密性、気密性(クッションタイプのみ)に優れたディテールとする。

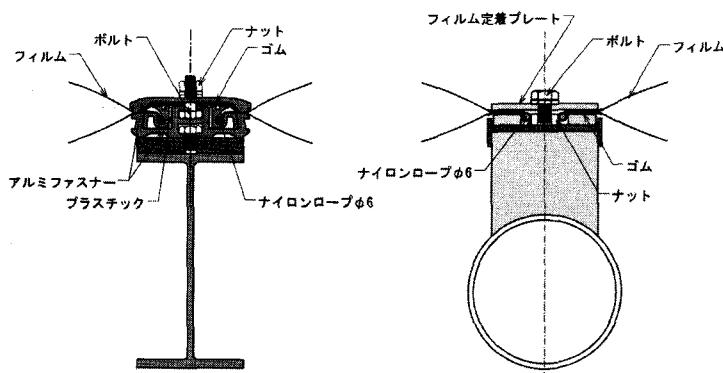


図 4-2. ボルトによる押えこみ例

4.3 外周フレームの性能

外周フレームはファスナーからの応力を構造部材に適切に伝えるディテールとする。

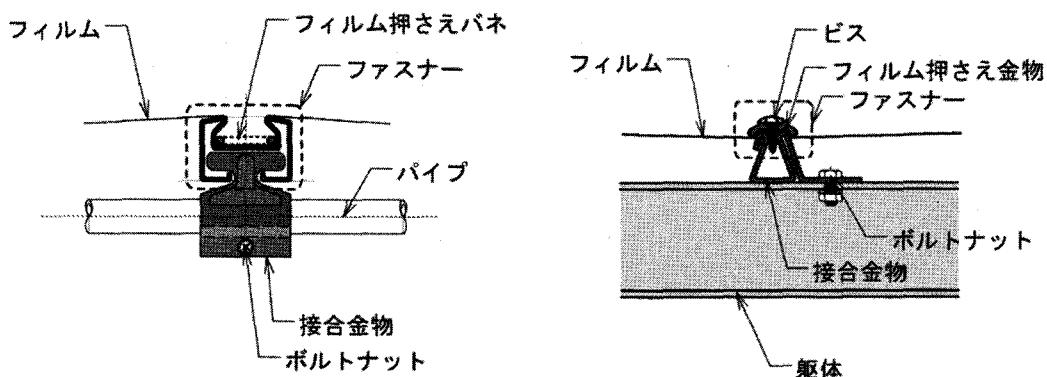


図4-3 バネによる押えこみ例

図 4-4 ネジによる押えこみ例

4.4 その他のディテール

- (1) ファスナー部以外で、フィルムがフィルム以外の部材と當時接触する場合は、ファスナー部と同様にフィルムを傷めないような処置を行う。
- (2) クッションタイプで、内部結露が生ずる可能性がある場合は、結露水を排出できるシステムを考慮する。

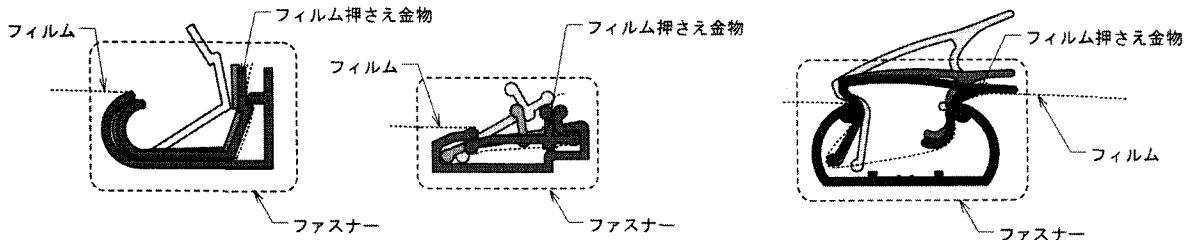


図 4-5 くさび効果による押えこみ例

5. 加圧装置

5.1 加圧装置の構成

クッションタイプにおいて、加圧装置は、所定の圧力を常に維持できる信頼性の高いものとする。

5.2 送風機

送風機は加圧部分の規模及び必要内圧に対し、十分な静圧、風量、送風性能を有したものとする。

5.3 ダクト

- (1) 送風ダクトは送風抵抗をなるべく少なくするよう取り付ける。
- (2) 送風ダクトの材質は容易に劣化する恐れのないものとする。

5.4 壓力調整装置等

常に設定された内圧を保持する圧力調整装置を有するものとする。

5.5 その他の留意事項

- (1) 加圧部分に送り込む空気は、フィルターを設け、ゴミや埃が入り込まないようにする。
- (2) 加圧装置は、その加圧性能に支障を生じないように、必要に応じて有効な開いを設ける等の安全上の措置を講ずる。

6. 製作、施工

6.1 材料・製品の受入及び保管・運搬

- (1) フィルムパネルの製作においては、フィルム及び製品は本指針で定める品質について確認されたものを用いる。
- (2) フィルムパネル製作工場におけるこれらの材料及び製品の保管、運搬は、品質保護のための適切な方法により行う。

6.2 フィルムパネルの製作(製作精度、製作上の留意点)

フィルムパネルは製作工場で適切な方法により製作されるものとし、以下の点を留意する。

- (1) 本指針に定める接合強度を確保できる接合方法とすること。
- (2) フィルムの溶着部に剥がれ、著しい変色、収縮等異常がないこと。
- (3) フィルムパネルの製作にあたっては、寸法精度を定めその精度を確保すること。

6.3 フィルムパネルの梱包・輸送

フィルムパネルの梱包・輸送においてはフィルムパネルの品質低下をきたさないよう適切に行う。

- (1) フィルムパネルが損傷しないように、十分な養生及び梱包をすること。
- (2) 建て方手順を考慮し、梱包時にはその方向の表示を行うこと。
- (3) 輸送時は突起物のない所に置き、荷崩れ等に注意し、フィルムパネルに損傷を発生させないこと。

6.4 フィルムパネルの施工

フィルムパネルの施工は、フィルムパネルに損傷を与えないよう適切な取り付けを行い、フィルムパネルからの張力が端部取り付け金物に十分に伝達されるように行う。

- (1) フィルムパネルの施工時の取り扱いに十分注意を払い、フィルムパネルに損傷を与えないこと。
- (2) フィルムパネルは、主要な箇所を仮止めし順次バランス良く固定すること。
- (3) 強風時及び雨天時の施工は状況を見極め、特に注意しなければならない。
- (4) クッションタイプのフィルムパネルにおいて、インフレート時に突起物による損傷が発生しやすいので十分注意すること。
- (5) 施工後に汚れを確認し、必要である場合にはクリーニング作業を行うこと。

7. 維持管理

7.1 維持管理の内容

フィルムパネル及びそれに伴う設備は供用期間中適正な状態(性能、機能)を維持するよう管理を行う。

7.2 補修

フィルムパネルに損傷、異常が発見されたときは、速やかに修理または補修を行い健全な状態に戻すものとする。

7.3 その他

フィルムパネルに人、動物が損傷を加えないように対策を施すこと。



1



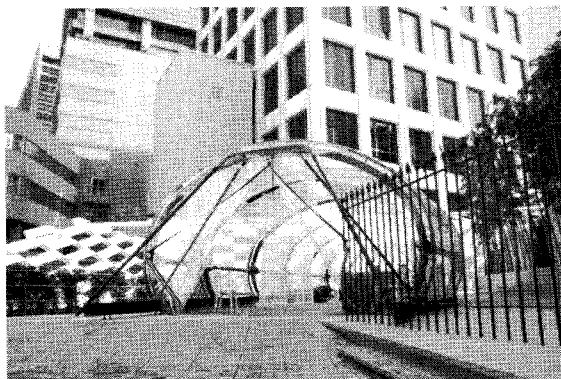
2



3



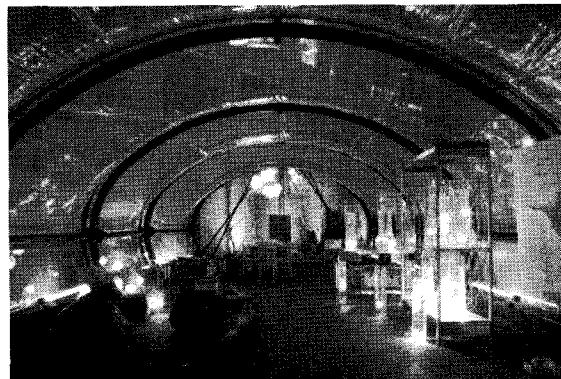
4



5



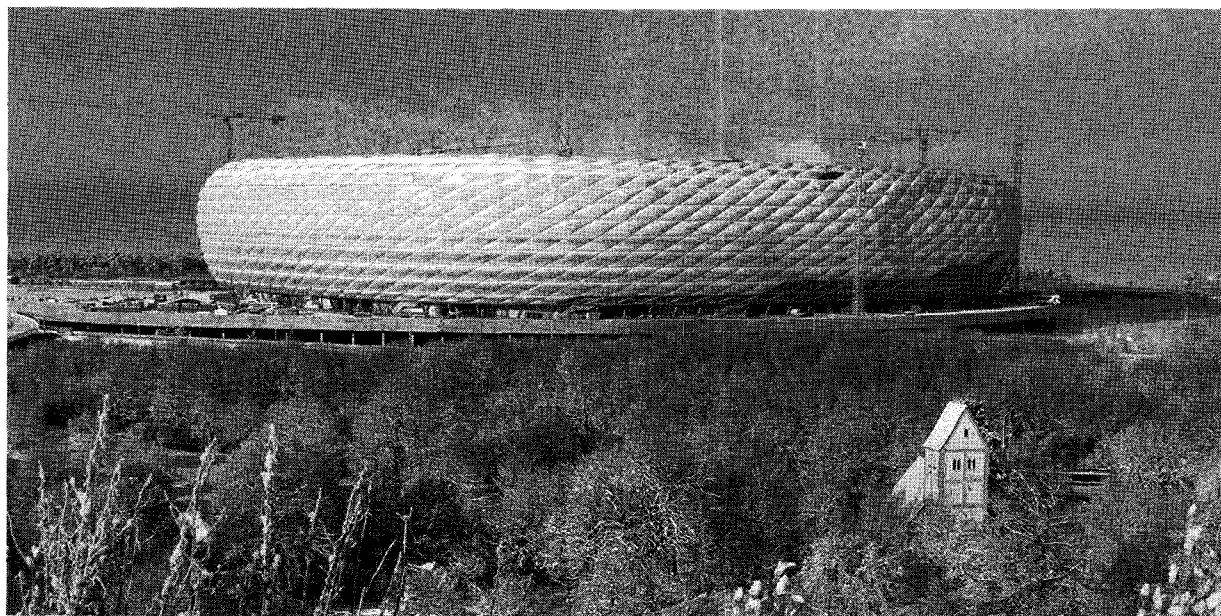
6



7

1-3. Nansei Yacht Club House, Kiyonori Kikutake Architects, Japan

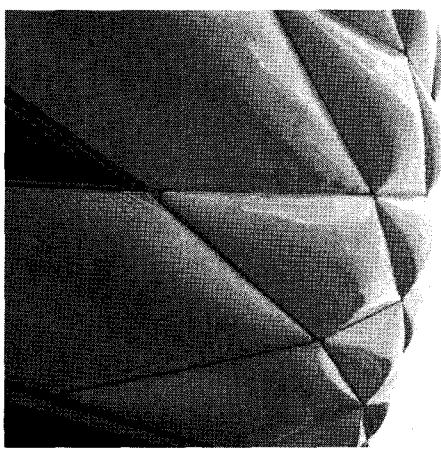
4-7. Air Cabin Great Brits 2005, British Council, Koji Takematsu +E.P.A1, Japan



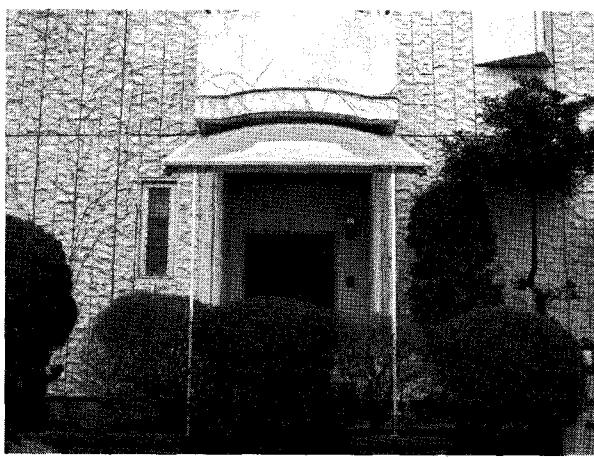
8



9



10



11

8-10. Allianz Arena, Herzog & De Meuron,
Munich

11. N House Canopy, Kaoru Nishikawa, Japan