

E T F E フィルムの弾塑性挙動について

森山 史朗*
河端 昌也**
正木佳代子***

梗 概

日本では、E T F E フィルムを建築物の屋根材として適用した事例は少ないが、従来の膜材料にはない透明性を有することから、建材としての汎用が期待されている。本研究では、E T F E フィルムを建築物の屋根材に用いた場合の構造的挙動を把握するための実験を行い、この実験を通して、弾塑性の性状を持つフッ素樹脂フィルムの特性を確認することができた。本論は、E T F E フィルムの弾塑性挙動を中心に報告する。

1. はじめに

E T F E は、膜材料A種のガラス繊維織物にコーティングされている P T F E (ポリテトラフルオロエチレン) と同系のフッ素樹脂ポリマーで、化学式(1)に示すようにテトラフルオロエチレン(C₂F₄)とエチレン(C₂H₄)との共重合体である。



E T F E フィルムは、フッ素樹脂のC-F結合(炭素原子とフッ素原子の強固な結合)に起因する高強度、耐候性、防炎性などの特長を有し、可視光線透過性、紫外線反射性、リサイクル性などの特長も併せ持つ新しい膜材料である。ヨーロッパでは、E T F E フィルムを建築物に活用した事例が多く、近年では約30000 m²の大規模施設にも適用されるに至っている。現在、日本国内では建築物への事例は少なく、農業施設への適用がほとんどであるが、従来の膜材料にはない透明性には大きな魅力があるため、国内における建材としての汎用が期待されている。

また、フッ素樹脂フィルムにはE T F E 以外にも様々な種類があるが、建材としては現在のところコストや性能とのバランスからE T F E の適用性が高いと考えられている。

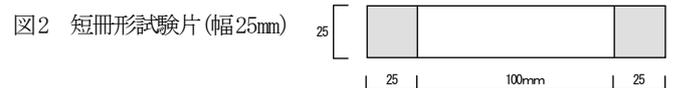
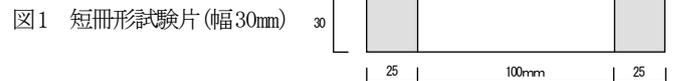
以上のようなことを踏まえ、本研究ではE T F E フィルムを建築物の屋根材に用いた場合の構造的挙動を把握することを目的とし、一軸引張試験およびインフレーション実験を実施した。これらの実験を通して、弾塑性の性状を持つフッ素樹脂フィルムの特性を確認した。

本論では特に、E T F E フィルムの弾塑性挙動を中心に報告する。

2. 単調加力による一軸引張試験

2.1 実験概要

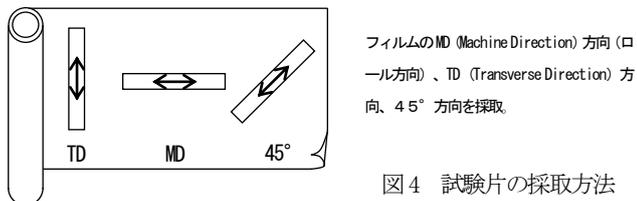
E T F E フィルムの引張強さおよび材料定数を測定するために、定伸張形試験機を用いた単調加力による一軸引張試験を実施した。試験片形状は、図1~3に示す短冊形およびダンベル形とした。試験結果より応力(公称応力)とひずみ(公称ひずみ)を求め、これらの最大値を引張強さおよび伸びとした。短冊形においては、チャック部分にゴムを挟み、チャックの拘束によってフィルムの幅方向に生じる応力の影響を軽減するように配慮した試験も行った。各試験片あたりのN数は、短冊形幅30mmでは2体、25mmでは3体、ダンベル形では3体とした。



* 横浜国立大学大学院工学府社会空間システム学専攻
** 横浜国立大学大学院工学府社会空間システム学専攻
*** 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 修士(工学)
助教授 博士(工学)
大学院生

試験では、厚さ(100、160、200、250 μm)、引張速度(10、50、200 mm/min)、フィルム方向(0° : MD (Machine Direction)、90° : TD (Transverse Direction)、45°) による影響を考慮して試験条件を設定した。図4に試験片の採取方法を示す。



フィルムのMD (Machine Direction) 方向(ロール方向)、TD (Transverse Direction) 方向、45° 方向を採取

図4 試験片の採取方法

2.2 結果

単調増加試験を行った結果、応力に応じて剛性が2段階に変化することがわかった。また、フィルムの引張速度、方向による影響については顕著な違いは見られなかったため、試験片形状およびタイプ別に結果を示す。

表1は、試験片形状およびタイプ別の平均値を示し、図5は、表1で示した各タイプにおける代表的な試験片の応力とひずみの関係を示す。

ダンベル型試験片は、引張強さ・伸びが最も大きい。③と④を比較すると、④の光学式ひずみ計測によるもののほうが引張強さ・伸びが大きい。これは計測方法の違いによる影響であると思われる。①、②で示す短冊形くさび型チャックは、試験片の幅による引張強さおよび伸びの顕著な違いは見られないが、他の3タイプと比較すると引張強さも伸びも小さい。これはチャックの拘束によって、チャック際は加力直行方向にも引張応力が生じる応力集中となって破断に達したためと考えられる。このことからフィルムの特性は、③・④・⑤タイプで正しく評価されていると考えられ、引張強さは約60N/mm²、伸びは約400%である。

表1 単調増加加力試験結果

No.	形状	試験片幅	チャック型	ひずみ測定方法	第1降伏応力	ひずみ	第2降伏応力	ひずみ	引張強さ	伸び
①	短冊	30mm	くさび	(チ)	16.0	2.2%	20.0	14.0%	29.0	268.6%
②		25mm	くさび	(チ)	17.1	3.8%	23.2	17.5%	30.8	245.1%
③		25mm	ゴム	(チ)	13.5	2.4%	18.9	13.4%	56.7	477.6%
④		25mm	ゴム	(光)	12.8	-	18.6	8.7%	58.9	414.0%
⑤		ダンベル	くさび	(光)	7.0	-	16.0	12.2%	62.8	451.0%

応力の単位: N/mm²

ひずみ測定方法のうち(チ)はチャック間距離変化、(光)は光学式変位計による標線間距離変化により求めることを示す。

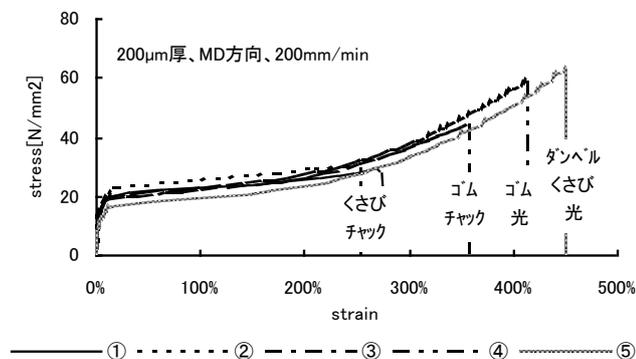


図5 試験結果の比較

3. 繰返漸増加力による一軸引張試験

3.1 実験概要

次に、E T F Eフィルムのヤング率、ポアソン比、弾性限度(応力-ひずみ関係における直線領域)、降伏点を検討することを目的として繰返漸増加力による一軸引張試験(引張速度: 3、10、50 mm/min)を行った。試験体は、図1に示す短冊形試験片 200 μm・MD方向を使用した。荷重レベルは6段階(4段階目がほぼ弾性限度~降伏点に相当する)に設定し、各レベルで加力-除荷を3サイクルずつ繰返した。また試験片の中央部には無応力時に幅20mm、長さ40mmの標線をマーキングしておき、3次元画像計測装置(2台の高解像度CCDカメラ画像の視差を利用した3次元座標解析)によりフィルムの長さ方向および幅方向の標線距離を測定した。

3.2 結果

漸増繰返加力による一軸引張試験の結果より、引張速度による違いがあまり見られなかったため、代表例として3mm/minの試験結果を示す。図6は応力-ひずみ関係を示したものである。この図より、降伏点を過ぎて塑性域まで延伸した場合に残留ひずみを生じているのが確認できる。金属などの等方性材料に一般的に見られる加工硬化と同様の現象である。繰返し加力の際に膨らみを持ちながら曲線を描いているが、これは粘性による影響と思われる。

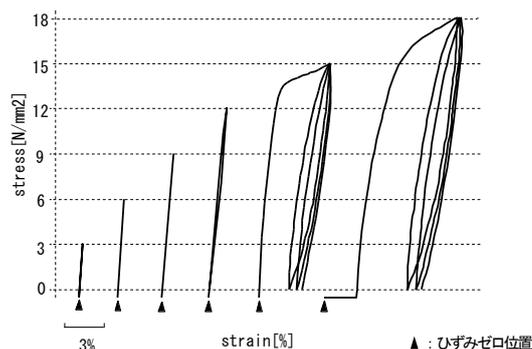


図6 応力-ひずみ関係

図7は、以上の一軸引張試験の結果をもとにした応力-ひずみ関係のモデル化である。E T F Eフィルムは、ひずみが20%程度に達する間に、ほぼ2つの直線領域を有する。そこで、一軸引張試験の結果を考察し、材料定数を表2のように設定した。また、材料の方向による伸張特性の違いはほとんど見られなかったため、E T F Eフィルムは等方性材料として扱う。

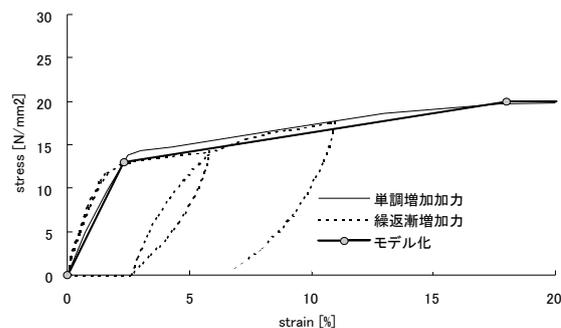


図7 応力-ひずみ関係のモデル化

表2 材料定数

	ひずみ%	応力 N/mm ²	引張弾性率 N/mm ²	ポアソン比
第1領域	0~2.3	0~13.0	565.2	0.44
第2領域	2.3~18.0	13~20.0	44.6	0.44

ポアソン比は、弾性範囲内の計測から算出し、第一領域の上限のひずみから求めた数値をMDとTDで平均化した。

4. インフレート実験

4.1 実験概要

ETFEフィルムの空気圧に対する構造的挙動を把握することを目的として、インフレート実験を実施した。試験体は、図8に示す円形タイプ（鉄骨との境界部分でφ2000mm）と長方形タイプ（同じく1000×3000mm）の2種類である。フィルムにはあらかじめ境界形状に合わせてマーキングしておき、無荷重時に平面状になるように取り付けて固定した。ただし、フィルムの自重や境界部分に挿入したゴムパッキンの変形などの影響により、完全な平面ではない。表3に試験条件を示す。

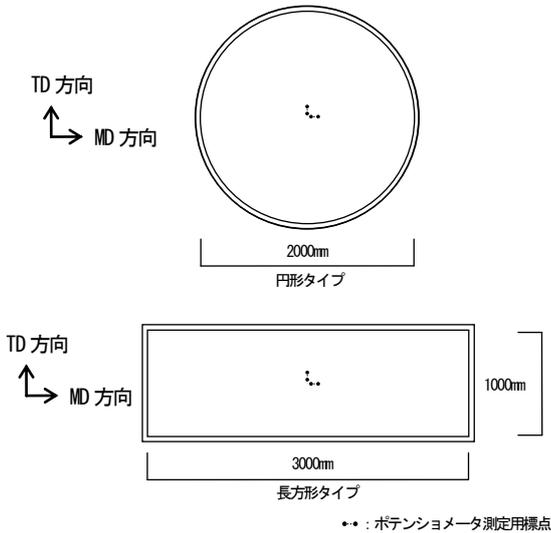


図8 試験体の平面形状

表3 試験条件

加力方法	単調増加						漸増繰返			
	円形		長方形				円形		長方形	
形状	円形		長方形				円形		長方形	
厚さ [μm]	100	200	100	150	200	250	100	200	50	100
N数	2	1	2	1	1	1	3	1	1	2

加圧にはコンプレッサーを使用し、圧力は電磁弁による自動制御とした。試験体中央にはレーザー式変位形を設置してフィルム中央部の鉛直方向変位を測定した。また、初期長さ75mmのポテンシオメータ2台を、図8に示すようにフィルムのMDとTDの各方向に中央から30~105mmの位置に取り付けて標線間距離変化を測定した。これらのデータは、いずれもデータロガーに自動収録した。実験の様子を図9、10に示す。



図9 円形タイプの実験の様子

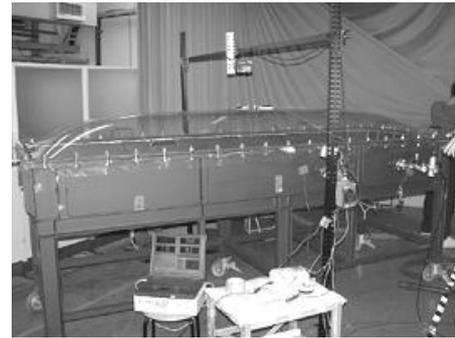


図10 長方形タイプの実験の様子

4.2 解析モデル

FEM解析は定ひずみ三角形要素（要素内は応力一定と仮定）を用いて、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮している。また、圧力は三角形の面の法線方向に作用する荷重として扱い、変形に追従した荷重方向変化も考慮している。ひずみおよび応力には、公称ひずみと公称応力の定義を用いて定式化している。

前述した一軸引張試験の結果では、材料の方向による伸張特性の違いはほとんど見られなかったため、今回の実験に使用するETFEフィルムは等方性材料として扱う。また材料定数は表2の数値を用い、第1領域における降伏点の判定には、多軸応力を単軸応力に換算するミーゼスの降伏応力（相当応力）を採用する。その判定式を下式(2)に示す。

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

ここで、

- F : ミーゼスの降伏応力（相当応力）
- σ_1 : MD方向の応力
- σ_2 : TD方向の応力
- τ : 45°方向の応力

この式は鋼材で使用されているが、ひずみが小さい範囲（約2.0%）での降伏判定を行なうため、ETFEフィルムにおいても適用可能と考え採用した。

なお、本研究における解析は、粘性は考慮していない。

4.3 円形タイプ実験結果

表3の試験条件に示すように、本研究では様々な条件で試験を実施したが、厚さによる傾向の違いは見られなかったため、本論では代表的な結果として、厚さ100 μm の実験結果を示し考察を行なう。

まず、円形タイプの単調増加加力実験の結果を示す。図11は内圧と試験体中央部変位の関係、図12は応力とひずみの関係を表す。実験では、フィルムの応力を直接測定できないため、図12の縦軸に示す応力は、等張力の球の膜応力 $PR/2t$ (P :内圧、 R :曲率半径、 t :フィルム厚)を用いた見かけの応力で示す。この見かけの応力は、多軸応力を単純応力に置き換えたものであるため、相当応力として考える。ここで曲率半径 R は、中央部鉛直変位 h と短辺長さ l から、 $R=(l^2+4h^2)/8h$ で求めている。なお、図12は比較のために、解析で最大応力を生じた中央部要素の応力(相当応力)もあわせて示す。

図11をみると、実験と解析は、第2領域の前半まではほぼ同じ挙動を表しているのがわかる。後半の差は、解析に公称ひずみと公称応力を用いていることによるものと思われる。また、材料線形解析との比較より、応力が降伏点を過ぎて塑性域に達すると、剛性が低下して伸びが生じやすくなっていることがわかる。図12をみると、実験での見かけの応力は約10N/mm²(内圧500Pa付近)で降伏しているのがわかる。図13に示すように、外周を固定された円形フィルムの応力は、中央部で最大となり、見かけの応力で仮定するような等張力状態とは異なる。したがって、球面と仮定して略算により膜応力を求める場合には、降伏応力を10N/mm²程度に下げて検討しないと応力評価が危険側になる恐れがあると言える。中央部要素の応力は、約13N/mm²で降伏しており、表2に示す材料定数とほぼ一致している。

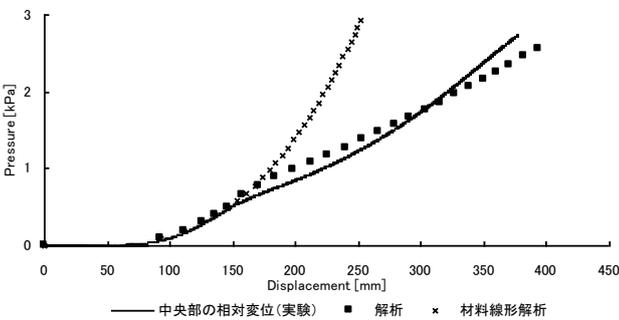


図11 内圧と変位の関係(円形100 μm 、単調増加)

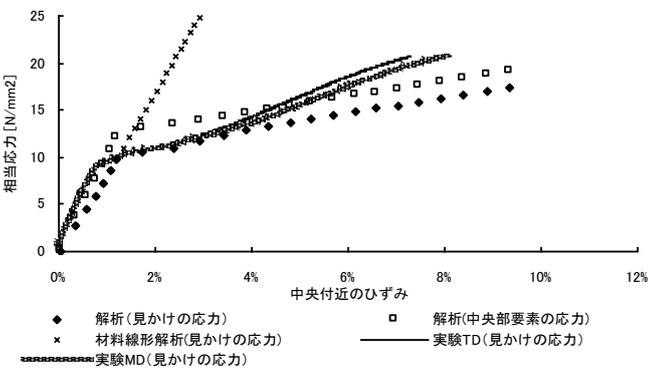


図12 応力とひずみの関係(円形100 μm 、単調増加)

次に、図14、15に円形タイプの繰返漸増加力実験の結果を示す。この実験では、前述の単調増加力実験においてフィルムの方向によるひずみの違いにあまり差が見られなかったため、MD方向におけるフィルム中央部と外周部(端から30~105mmの位置)で、ひずみの測定を行なっている。

図14では、加圧レベルを上げるにつれて剛性が増しているのに対して、図15では降伏応力をこえて塑性域に達した後も応力の極大点と極小点を結ぶ直線の勾配は、弾性範囲の勾配とほぼ同じになっている。つまり、材料の応力-ひずみ関係には加工硬化の現象が見られるが、載荷除荷に引張弾性率は弾性時とほぼ同じであり、フィルムの面外変形には幾何剛性の影響による剛性の上昇がみられる。以上をふまえて、図14には弾性範囲の引張弾性率を用いた減圧仮定の解析結果を示すが、実験とほぼ同じ傾向を表しているのがわかる。実験における繰返加力時の曲線の膨らみは、減圧仮定の解析との比較より粘性による影響と考えられる。また図15より、繰返漸増加力においても実験での見かけの応力は約10N/mm²(内圧500Pa付近)で降伏しているのがわかる。

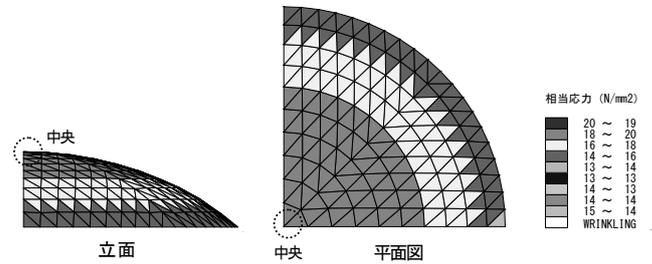


図13 応力分布図 1/4部分(円形100 μm 、2.4kPa)

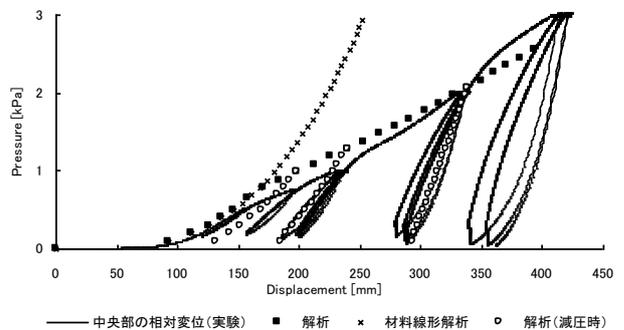


図14 内圧と変位の関係(円形100 μm 、繰返漸増)

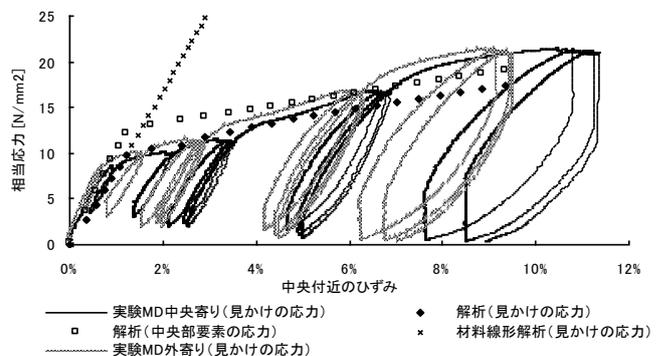


図15 応力とひずみの関係(円形100 μm 、繰返漸増)

4.4 長方形タイプ実験結果

長方形タイプの単調増加加力実験の結果を、図16、17に示す。図17における縦軸の応力は、円筒の周方向 (TD 方向) 膜応力 PR_{θ} をもとに算出した見かけの応力を表す。この見かけの応力は、周方向膜応力と、周方向膜応力の1/2とする長辺方向 (MD 方向) 応力を式(2)に代入し計算した相当応力である。円形では中央部の応力比が1:1であるのに対して、長方形では中央の応力比が短辺方向:長辺方向=2:1となる。またフィルムのポアソン比が0.5に近いため、中央の長辺方向はほとんどひずみを生じずに2:1のつりあい応力状態になることができる。図18の応力分布図においても、2:1のつりあい応力状態になっていることがわかる。このような理由より、図17における縦軸の応力は、上述の算定方法による相当応力とした。また図17では、比較のために解析で中央部要素に発生した応力(相当応力)の結果もあわせて示している。なおMD方向(長辺方向)のひずみは、ほぼゼロであったためグラフを省略している。

図16では、円形タイプの場合と同様の傾向が見られ、実験と解析は第2領域の前半までほぼ同じ挙動を表しているのがわかる。また図17に示すように、実験での見かけの応力は約13N/mm²(内圧1.3kPa付近)で降伏しており、中央部要素の解析結果の降伏点とほぼ同じとなっている。また、見かけの応力を表した解析結果と中央部要素の解析結果は、円形の場合に比べ結果に差が少なく同じ傾向を示している。これは図18で示すように、中央側短辺部分の応力状態がほぼ均一になっているためと思われる。また中央部要素の解析結果では、円形タイプの場合と同じ約13 N/mm²で降伏をしており、表2の材料定数とほぼ一致している。

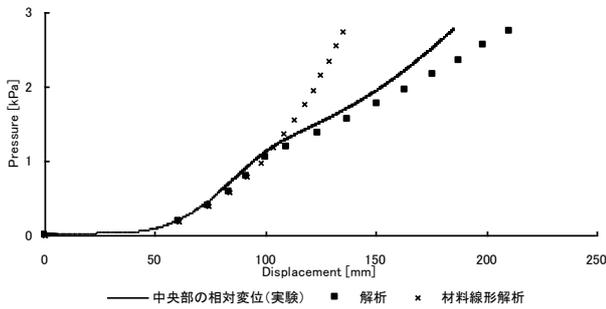


図16 内圧と変位の関係(長方形 100 μm、単調増加)

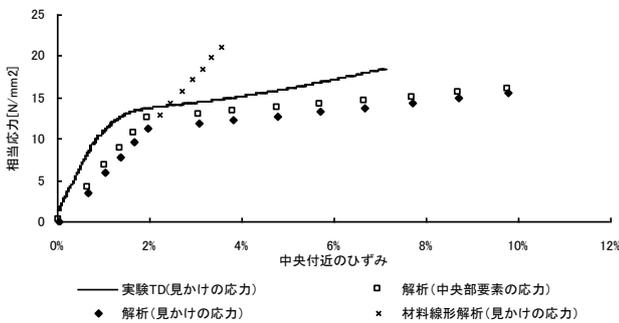


図17 応力とひずみの関係(長方形 100 μm、単調増加)

次に、長方形タイプの繰返漸増加力実験の結果を図19、20に示す。ここでも延伸による加工硬化の現象が見られ、図19では加圧レ

ベルを上げる毎に剛性が増していることが確認できる。また図20では単調増加加力実験と同様、実験での見かけの応力は約13N/mm²(1.3kPa付近)で降伏しているのがわかる。長方形タイプにおいても、円形タイプの繰返漸増加力実験の結果と類似した傾向が確認された。

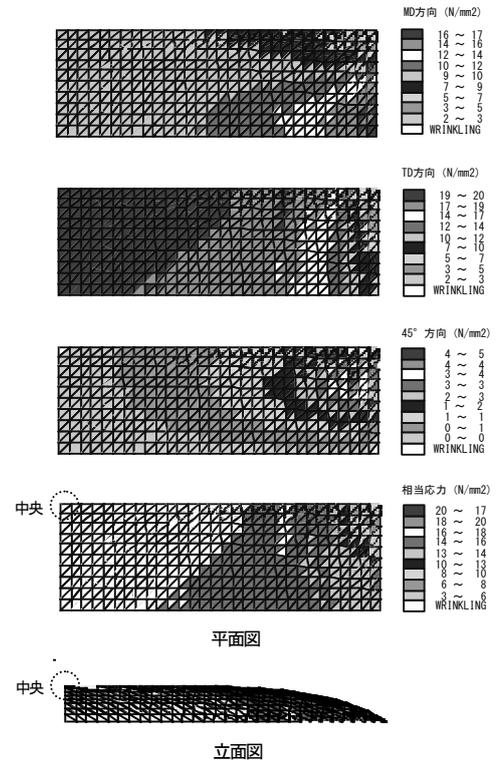


図18 応力分布図 1/4部分(長方形 100 μm、2.4kPa)

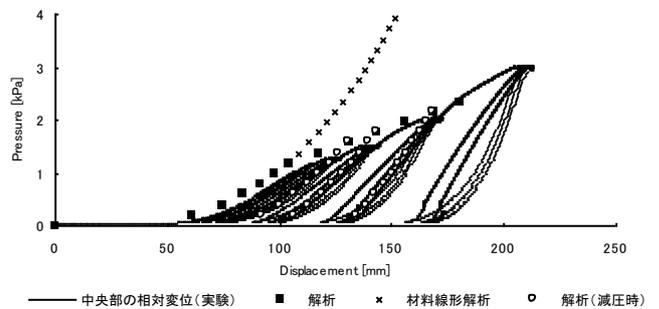


図19 内圧と変位の関係(長方形 100 μm、繰返漸増)

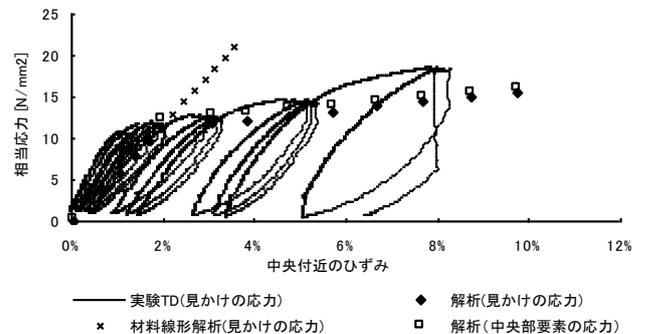


図20 応力とひずみの関係(長方形 100 μm、繰返漸増)

5. まとめ

今回の研究により得られた知見を以下に示す。

一軸引張試験より、ETFEフィルムの応力-ひずみ関係は、ひずみが20%に達する間にはほぼ2つの直線領域を有することがわかった。また、等方性材料に一般的に見られる加工硬化の現象が確認できた。

円形タイプおよび長方形タイプのインフレート実験結果と解析結果との比較より、ETFEフィルムは降伏点を超え塑性域に達すると剛性が低下して伸びが生じやすくなることがわかった。

円形タイプのような膜面の応力状態が均一でない形状は、実際の中央部要素の応力は $PR/2t$ よりも高いことがわかった。

インフレート実験において、塑性域まで一度延伸させ減圧した後、再び加圧を行なった場合、フィルムの面外変形に対しては、加圧レベルを上げる毎に剛性が増すことがわかった。

参考文献

- [1] Craig Schwitter: The Use of ETFE Foils in Lightweight Roof Constructions, IASS 1944
- [2] 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基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp941-942、2003年

謝辞

大成建設 (株) 西川薫博士ならびに旭硝子 (株) 有賀広志様をはじめとする関係者各位には、実験にあたりご支援ご協力を頂きました。ここに深く感謝を表します。

Elasto-plastic characteristic of ETFE film

Fumio Moriyama ^{*)}

Masaya Kawabata ^{**)}

Kayoko Masaki ^{***)}

SYNOPSIS

In Japan, it is quite rare that ETFE film is used for architectural roof. However, general purpose as a building material is expected because ETFE film has transparency character, which usual membrane material does not have. In this research, we investigated structural characteristic of ETFE film for architectural roof, and confirmed elasto-plastic characteristic of ETFE film. This thesis specifically describes elasto-plastic characteristic of ETFE film.

^{*)} M.-Eng. 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

^{***)} Graduate Student, Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Yokohama National University