

ETFE フィルムの延伸効果に関する実験及び解析的検討

丁 乙碩*
河端 昌也**

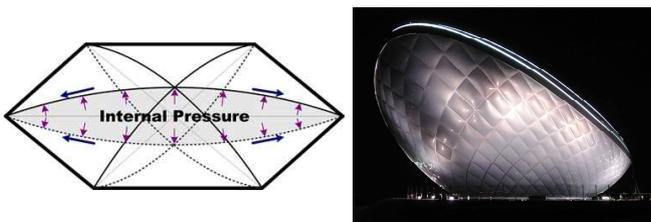
梗 概

ETFE フィルムを用いた構造形式のうち、テンション方式は内圧の維持装置の不要と力の流れにより形成される自然な曲面といった長所を持っている方式として、最近その事例が増え続けている。しかし、フィルムは弾性範囲での許容耐力が低いという問題を持っており、多様な建築物への使用をもっと広げるためにフィルムの高耐力化は重要になる。ETFE フィルムは既存の膜材料に比べ、顕著な伸び能力を持っているため、その長所を活かして塑性域まで延伸することも考えられる。

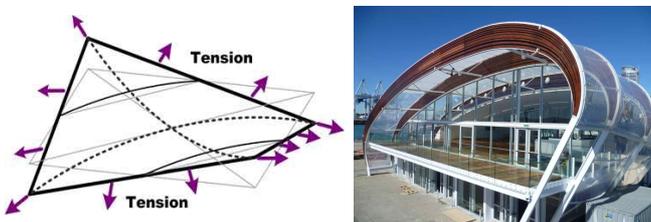
そこで、本報では、フィルム膜構造の耐力を高めるための方法として、パネル取付け時にフィルムを塑性域まで延伸することを提案し、その有効性を検討する。まず、延伸成形実験を通じてテンション方式への適用可能性を確認し、フィルムの延伸効果を確認するために外部荷重を想定した加圧実験を通じてその有効性を検討する。また、延伸成形実験を模擬した解析的検討を行い、粘性挙動を考慮した弾塑性解析の有効性を検討する。

1. はじめに

近年、大スパン建築の屋根や外壁に ETFE フィルムを用いた事例が増え続けている。ETFE フィルムは透明性、耐候性そして材料リサイクル性等に優れた材料として透明から遮蔽まで光線透過率の幅広いコントロール、紫外線や熱線など特定波長域の光線の選択的な遮蔽、そして複層化による断熱性確保等のような機能性及びデザインの可能性より、今後も多様な建築物への普及が期待される膜材料である。



(a) 構造形式 (b) The ARC(2012)
図1 ETFE フィルムを用いたクッションの事例



(a) 構造形式 (b) Queens Wharf Cloud(2011)
図2 ETFE フィルムを用いたテンション方式の事例

膜方式[図1]とテンションタイプ(張力膜方式)[図2]の2種類が最も効率的な方法として知られているが、現在までの施工された事例を見ると、テンションタイプに比べてクッションタイプの事例がほとんどである。その理由として、ETFE フィルムをテンションタイプに適用するためにはフィルムのクリープやリラクゼーションのような材料の粘性挙動を解決しなければならない問題点が挙げられる。

フィルム膜構造の設計法には、許容応力を第1降伏点までとする弾性設計と、フィルムの延性を考慮した塑性設計の2通りが考えられる[図3]。小規模なパネルを想定した「ETFE フィルムパネル設計・施工指針案^[1]」は前者の考え方を採用したもので、第1降伏点を許容応力としている。一方、ドーム・スタジアム等に使用される大型フィルムクッションは実質的に後者の考え方によるものもあり、第2降伏点の15%ひずみに対応する荷重を許容耐力としていると言われているが、先行事例の多い海外でも明確な設計手法が示されていないため、塑性範囲における許容可能な応力レベルや変形状態の明確化が望まれる。

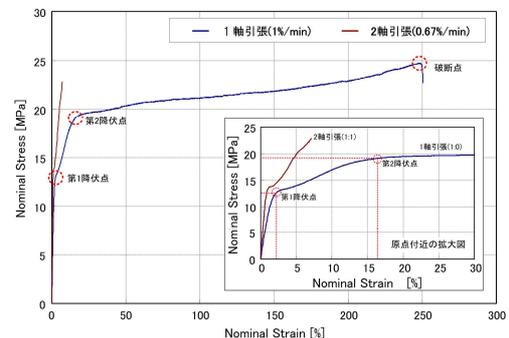


図3 フィルムの1軸及び2軸引張時の応力-ひずみ関係

ETFE フィルムを用いた構造形式には、クッションタイプ(空気

* 韓国 世明大学校 建築工学科 博士後研究員 博士(工学)

** 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 建築都市文化専攻 准教授 博士(工学)

一方、フィルムは弾性範囲での許容耐力が低いという問題を持っているが、既存の膜材料に比べ、顕著な伸び能力を持っているため、その長所を活かして塑性域まで延伸することも考えられる。フィルムの延伸によって、二つの効果が期待される。まず、巨視的な観点から見ると、延伸により弾性的な安定した応力-ひずみ関係の範囲を拡張することができる。すなわち、塑性域でのひずみ硬化により降伏点が高くなり、耐力を高めることが可能になる。次に、微視的な観点から考えると、延伸により、フィルムの結晶化が進行し、材料性質が変化する。この結晶化はクリープコンプライアンス、クリープ速度及び応力緩和速度を低め、応力緩和弾性率を高くする効果があるため、フィルムのクリープまたは応力緩和を抑制することができる^[2]。

また、フィルムの延伸による高耐力化(加工硬化)は他の製造分野では一般的に行われており、包装用ラップや PET フィルムはその代表例である。図 4 は1軸引張時の ETFE フィルムの工学ひずみと耐力比(A)、厚さ比(B)、およびこれらの積(C)を示している。耐力比は加工硬化後の応力を第1降伏点の応力で除したものである。厚さ比は体積一定(ポアソン比 0.5)と仮定して求めた1軸引張時の厚さを初期厚さで除したものである。ひずみ 300~400%の範囲は耐力が大きく上昇するため延伸効果が高いが、厚さ減少や引裂強度、耐衝撃性、耐磨耗性の低下を伴うため建築用途には適用しにくい。以上を考慮すると、1軸延伸では単位幅あたりの耐力(C)が極値となる 10~20%が効率的といえる。

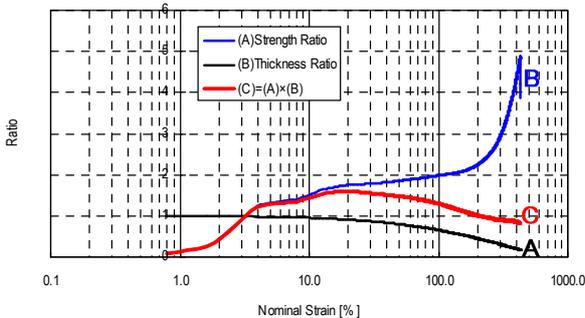


図 4 1軸延伸時のひずみと耐力比、厚さの関係

一方、延伸はパネル取付け時に行うことも可能であると考えられる。特に単純形状のパネルであれば、平面裁断でも取付け時の延伸やクッションの加圧延伸による曲面成形が可能で、低ライズで高耐力のパネルや、高ライズでも溶着線が少なく滑らかな曲面を製作することも可能である。しかし、このような取付け時の延伸成形の実例はほとんどない。その理由として、エアアクションは取付け時の初期張力導入を必要としないこと、延伸による局所的な変形と残留ひずみの懸念があること、2%以上のひずみ領域では複雑な粘塑性挙動を示し、精度良く評価する解析手法が未確立であることが挙げられる。

フィルムの延伸成形に関する研究として、森山ら^{[3],[4]}はクッション方式フィルム膜構造を対象として加熱加圧延伸による立体成形実験を行い、その有効性について検討した。なお、加圧による2軸延伸を容易に行うことが可能であり、クッション方式におい

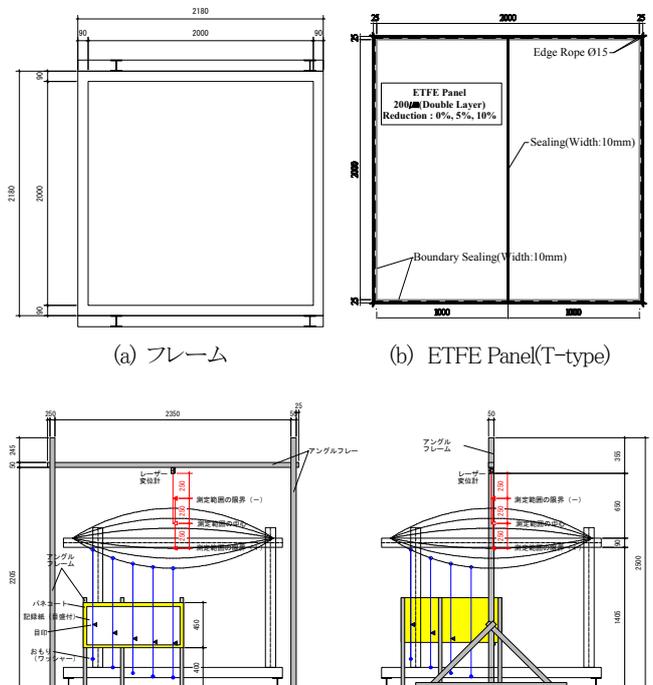
ての有効性について検討を行ったが、テンション方式を対象とした延伸成形の有効性検討が課題として残されている。

そこで、本報では、フィルム膜構造の耐力を高めるための方法として、パネル取付け時にフィルムを塑性域まで延伸することを提案し、延伸によるフィルムの耐力上昇効果を確認するために外部荷重を想定した加圧実験を通じてその有効性を検討する。また、延伸成形実験を模擬した解析的検討を行い、フィルムの弾塑性解析の有効性検討を行う。

2. ETFE フィルムの延伸効果の実験的検討

2.1 実験概要

ETFE フィルムの延伸効果に対する有効性を検討するために延伸成形実験を行った。試験体の概要を図 5 に示す。試験体は 2m×2m の正方形フレーム、厚さ 200 μm のフィルム 2 枚を重ねて平面フィルムを製作し、縮小率、エッジケーブルの有無、载荷パターンをパラメータとして表 1 のように 8 種類とした。



(c) 変位計測位置

図 5 試験体の概要

表 1 試験体の種類

試験体名	エッジケーブル	縮小率	载荷パターン
T-00S	×	0%	単調増加加圧
T-00C	×	0%	繰返漸増加圧
T-05S	×	5%	単調増加加圧
T-05C	×	5%	繰返漸増加圧
T-10S	×	10%	単調増加加圧
T-10C	×	10%	繰返漸増加圧
TE-05C	○	5%	繰返漸増加圧
TE-10C	○	10%	繰返漸増加圧

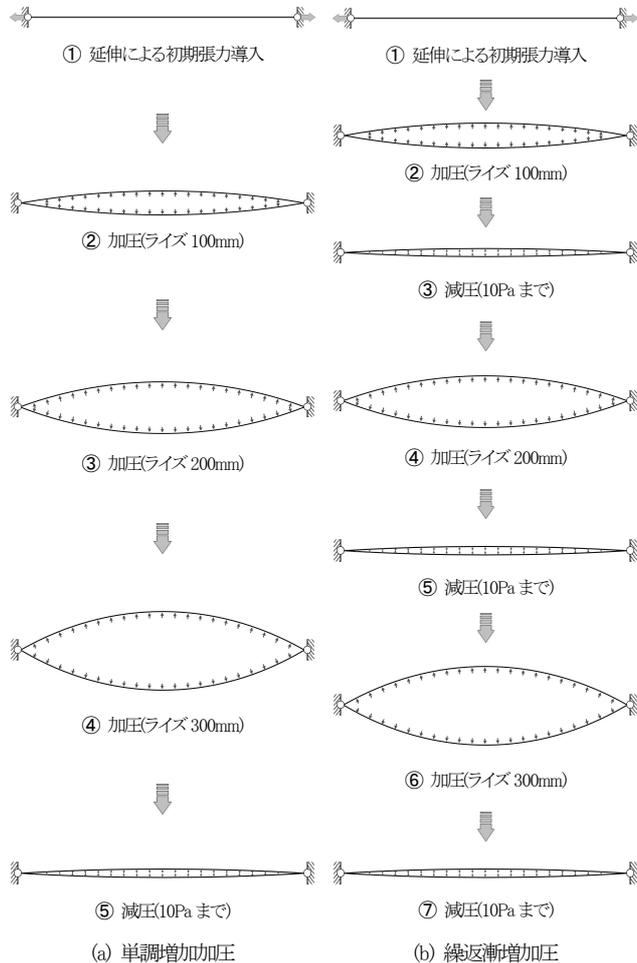
実験の様子を図6に示す。実験はフィルムをフレームに平張りした後、風荷重を想定して図7のように内圧による载荷実験を行った。延伸による変形を抑える効果を確認するために、取付後の2枚のフィルム間にコンプレッサーの空気を送り込み、圧力と変形を計測した。その時、中央部の鉛直変位はレーザー変位計を設置し、加圧によるライズ変化を測定した。また、加圧時にフィルムの変形形状は2枚のフィルムのうち、下面のフィルムに重り(ワッシャー)を貼付け、载荷中の変形形状を記録した。なお、フィルムにはあらかじめ格子線を描き、フィルムの取付け直後とフレームから取り外した後の変形及び残留ひずみを計測した。

延伸率 0%と延伸率 5%における繰返漸増加圧実験の風景を図8に示す。



(a) T-00C (b) TE-05C

図6 試験体の様子

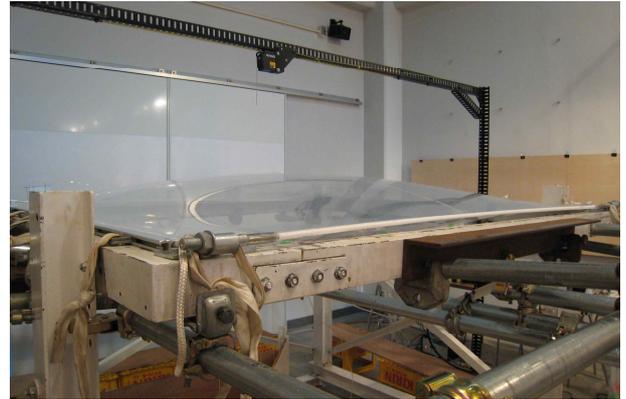


(a) 単調増加加圧 (b) 繰返漸増加加圧

図7 载荷実験の流れ



(a) T-00C(縮小率 : 0%、鉛直変位 : 287mm)



(b) TE-05C(縮小率 : 5%、鉛直変位 : 200mm)

図8 実験の風景

2.2 実験結果

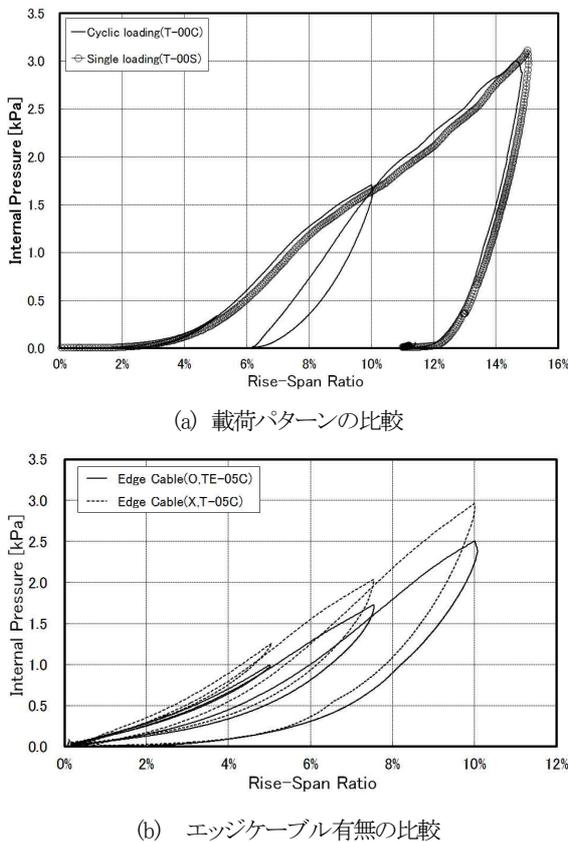
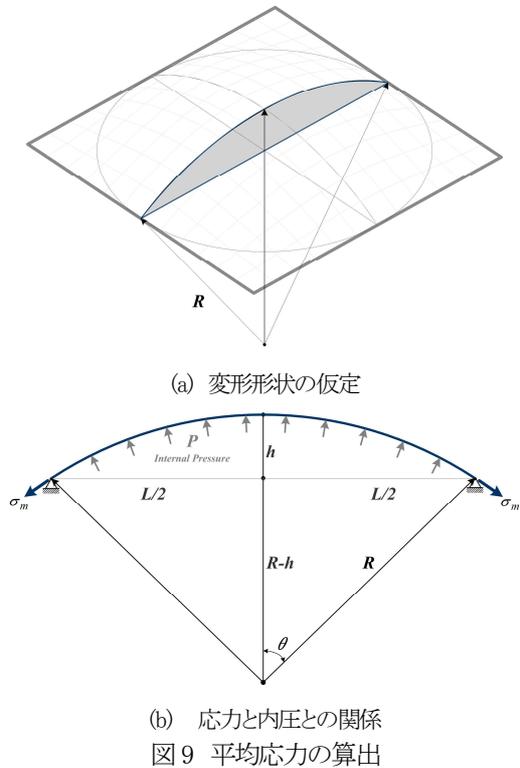
実験結果を以下に示す。実験では、フィルムの応力を直接測定できなかったため、フィルムの応力は図9のように変形形状が円弧となることを仮定し、試験体の中央部の鉛直変位から式(2)を用いて求めた平均応力とした。なお、フィルムの平均ひずみは式(3)を用いて、試験体の中央部の鉛直変位から同様な関係により求めた。

まず、実験結果より、加圧方法とケーブル有無に対する内圧とライズ比の結果を図10に示す。比較結果、加圧方法に対する実験結果では図10(a)のようにほぼ一致する結果となり、加圧方法による差異は見られなかった。また、ケーブル有無に対する結果では図10(b)のように圧力レベルの違いが確認できたが、これは材料挙動の違いよりケーブルの移動による結果と考えられる。

$$R = \frac{L^2 + 4h^2}{8h} \quad (1)$$

$$\sigma_m = \frac{PR}{2t} \quad (2)$$

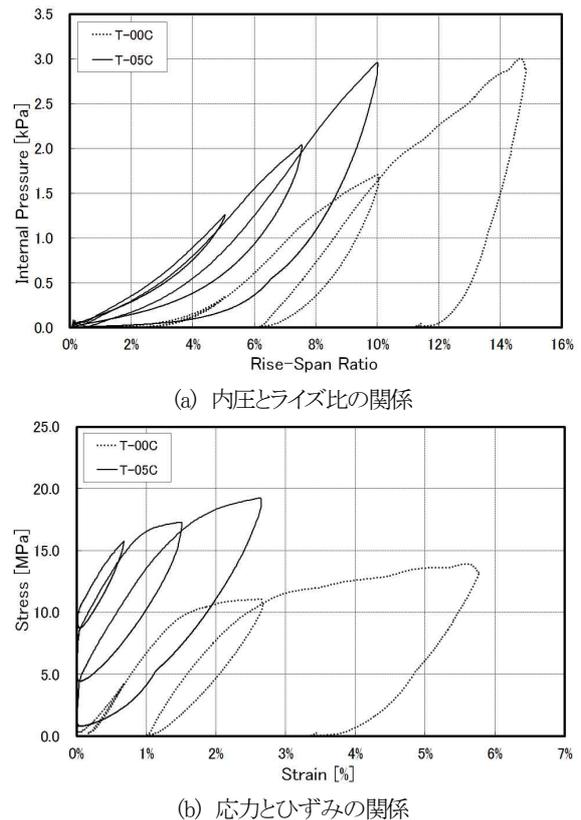
$$\varepsilon_m = \frac{2R\theta - L}{L} \quad (3)$$



次に、表1の8つの試験体のうち、加圧方法とケーブル有無に対して同一な結果を表す試験体を除外し、試験体 T-00C(延伸率0%)とT-05C(延伸率5%)の実験結果に対して検討を行う。

まず、T-00C の場合、繰返漸増加圧における圧力とライズ比の関係を図 11(a)に、応力とひずみの関係を図 11(b)に示す。図 11(a)を見ると、圧力 1kPa 時はライズ比 7%、圧力 2kPa 時はライズ比 11%、圧力 3kPa 時はライズ比 14%の結果となった。延伸率が無い場合は初期剛性が極めて小さいため変形が大きく、ライズ 7.5%、圧力 1.2kPa 付近でフィルムが降伏応力に達し、剛性が低下している。また、図 11(b)の応力-ひずみ関係より、除荷後の残留変形を見ると、弾性範囲では除荷した後、ほとんど残留変形が残らずに元に戻るが、塑性域を超えてからは除荷時点から弾性域とほぼ同じ勾配で除荷され、加圧レベルが上がるにつれて残留変形も大きく生じる結果となった。

次に、T-05C の場合、繰返漸増加圧における圧力とライズ比の関係を図 11(a)に、応力とひずみの関係を図 11(b)に示す。圧力とライズ比の結果では圧力 1kPa 時にライズ比 4.5%、圧力 2kPa 時にライズ比 7.5%、圧力 3kPa 時にライズ比 10%の結果となっており、T-00C と比べ、延伸による外圧に対する変形量が小さく抑えられることが確認できた。また、除荷後の残留変形をみると、図 11(b)のようにライズ比 5%、7.5%、10%の変形後も除荷した後はほぼライズ比 0%に戻り、残留変形を生じてないことが確認できた。また、図 11(a)では、加圧レベルを上げるにつれて剛性が増やしているのに対して、図 11(b)では降伏応力を超えて「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と同様の現象が見られるが、荷重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対する剛性(幾何剛性)の上昇が見られる。



一方、延伸成形の実験時、試験体のうち、T-05S(延伸率 5%)とTE-10C(延伸率 10%)は試験体のコーナー部分でフィルムの引裂きが生じることが確認されたため、施工時にあまり高い延伸率を設定することは困難であると考えられる[図 12]。

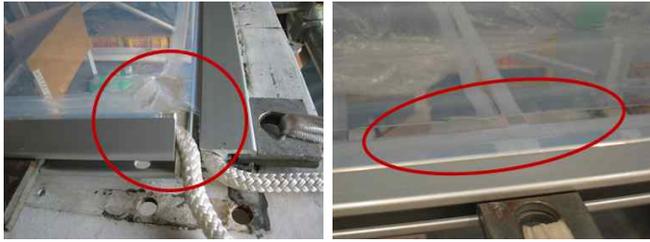


図 12 フィルムの引裂きの様子

3. 延伸成形実験の解析的検討

3.1 解析概要

延伸によるフィルムの応力分布や内圧による構造挙動を検討するために、実験を模擬した解析を行った。フィルムの応力解析には汎用プログラムANSYSを用いた。解析モデルを図 13 に示す。材料モデルは、フィルムの弾塑性挙動を現すために、Von-Mises 降伏条件を用いたマルチリニア弾塑性モデルを採用し、フィルムの材料定数を図 14 に示す。解析条件は、延伸成形を想定して外周部に強制変位を与えた後、実験時の加圧条件に合わせて内圧条件を設定した。ただし、実験時は負荷と除荷の始点をライズ比を基準としているのに対し、解析時は内圧(1kPa → 10Pa → 2kPa → 10Pa → 3kPa → 10Pa)を基準とした。

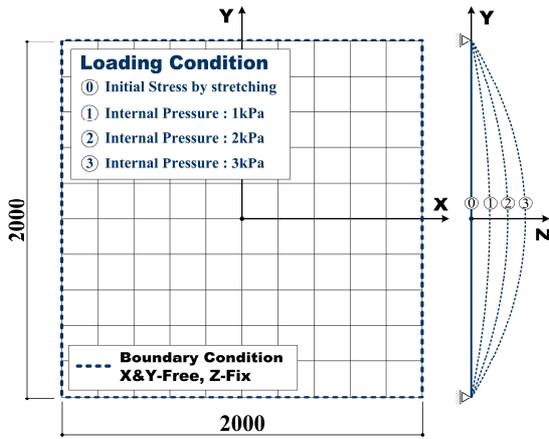


図 13 解析モデル

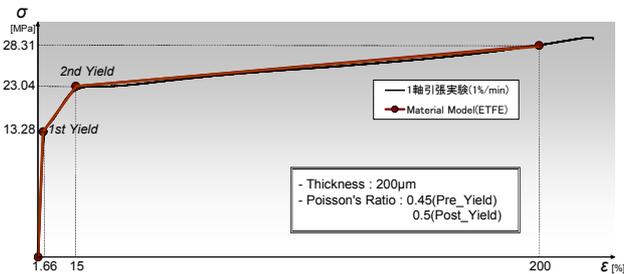
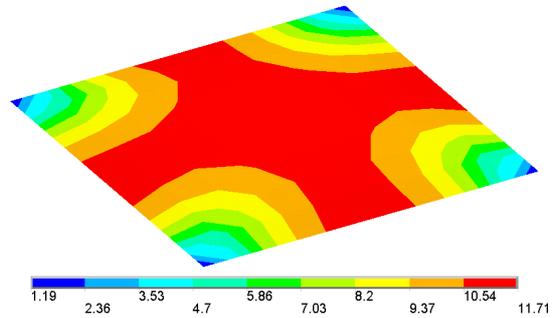


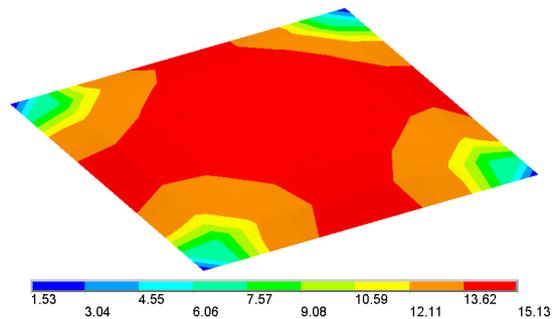
図 14 フィルムの材料モデル

3.2 解析結果

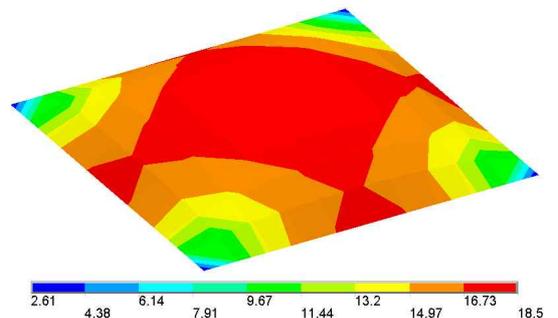
外周延伸及び内圧に対する T-00C(延伸率 0%)の相当応力分布を図 15 に、T-05C(延伸率 5%)の相当応力分布を図 16 に示す。T-00C の場合、加圧時の相当応力分布は正方形試験体の中央部で円弧方向に沿って最大応力が分布し、内圧 1kPa の負荷時は第 1 降伏点(13MPa)を超えずに弾性範囲内の応力分布を示している。内圧 2kPa と 3kPa の負荷時は第 1 降伏点(13MPa)を超えて塑性域へ入っているが、第 2 降伏点(23MPa)には至っていない。一方、T-05C の場合は、T-00C に比べて塑性域が大きく広がり、内圧 1kPa の負荷時の最大応力は第 1 降伏点を超えている。また、内圧 2kPa と 3kPa の負荷時の最大応力は第 2 降伏点(23MPa)に達している。



(a) 内圧 1kPa 加圧時

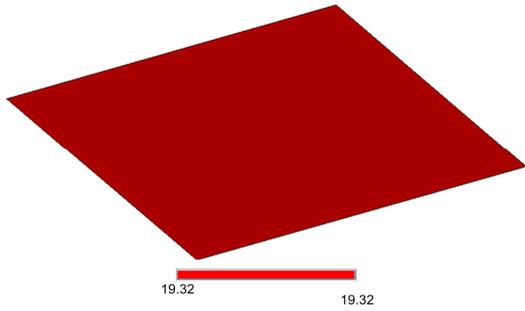


(b) 内圧 2kPa 加圧時

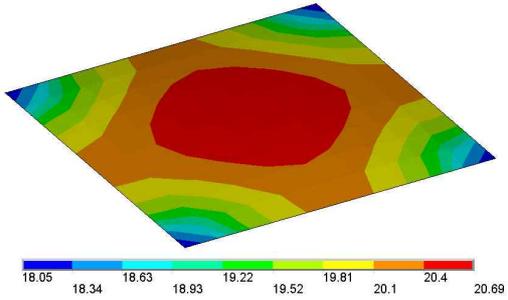


(c) 内圧 3kPa 加圧時

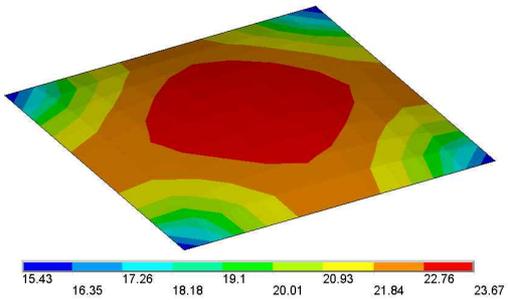
図 15 応力分布(T-00C)



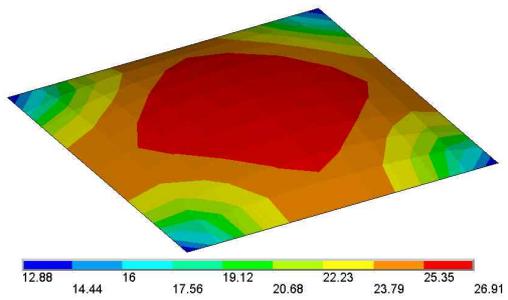
(a) 初期張力導入



(b) 内圧 1kPa 加圧時



(c) 内圧 2kPa 加圧時

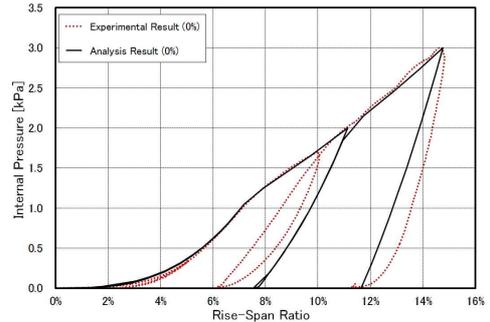


(d) 内圧 3kPa 加圧時

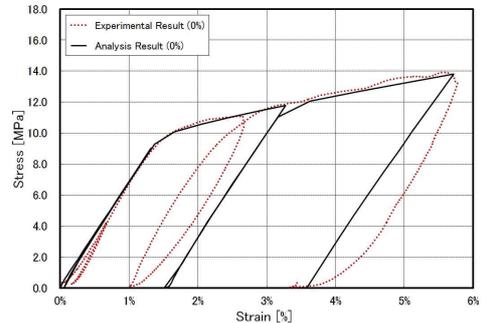
図 16 応力分布(T-05C)

次に、繰返漸増加圧時における実験と解析結果の比較を行う。T-00C に対する圧力とライズ比の関係を図 17(a)に、応力とひずみの関係を図 17(b)に示す。また、T-05C に対する圧力とライズ比の関係を図 18(a)に、応力とひずみの関係を図 18(b)に示す。解析結果に関しては、図 17 と図 18 に示している相当応力値は円弧仮定より求めた実験値とは異なるため、2.2 節と同様に解析時の中央部の鉛直変位との関係から求めた平均応力と平均ひ

ずみとした。実験と解析の比較結果、圧力とライズ比の関係、応力とひずみの関係について、解析結果と実験結果とほぼ一致し、加圧によるフィルムの挙動が再現できた。なお、実験における繰返漸増加力時の曲線の膨らみは、ETFE フィルム特有の粘性によるひずみ回復による影響と考えられる。

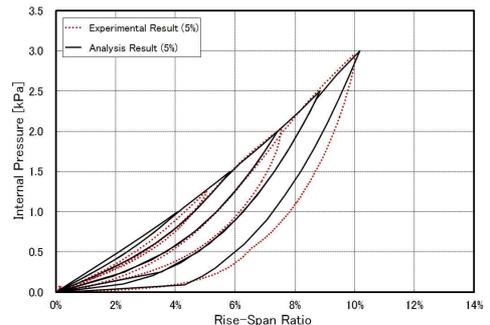


(a) 内圧とライズ比の関係

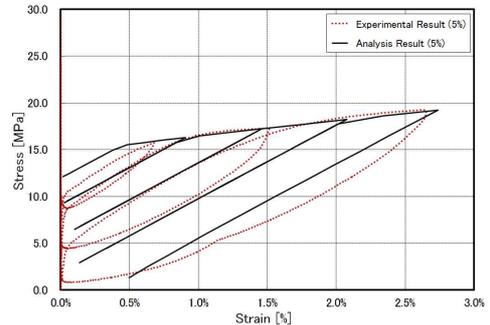


(b) 応力とひずみの関係

図 17 実験と解析結果の比較(T-00C)



(a) 内圧とライズ比の関係



(b) 応力とひずみの関係

図 18 実験と解析結果の比較(T-05C)

4. まとめ

本報では、ETFE フィルムの施工時延伸により、降伏応力の上昇効果の確認と、テンション方式のフィルム構造への適用性を検討することを目的として、モックアップ実験を実施した結果、得られた知見を以下に示す。

- 1) フィルムの施工時延伸により、降伏応力が上がって耐力の上昇効果が得られ、外力による変形後にも緩みを生じにくくなることが確認された。
- 2) フィルムの延伸範囲については、1軸延伸では10～20%の延伸が効率的であることが確認されたが、実験時の2軸延伸では、T-05S(延伸率5%)とTE-10C(延伸率10%)の試験体のコーナー部分で引裂きを生じることが確認されたため、施工時に5%以上の延伸率を設定することは困難であると考えられる。
- 3) ETFE フィルムの弾塑性モデルを適用して解析的検討を行った結果、実験結果とほぼ一致し、加圧によるフィルムの挙動を弾塑性解析を通じて再現できることが分かった。

謝辞

ETFE フィルムの延伸成形実験を実施するにあたり、太陽工業(株)、旭硝子(株)のご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案)、(社)日本膜構造協会、2006
- [2] 日本材料学会編、固体力学の基礎、日刊工業新聞社、pp.152, pp.176, 1981
- [3] Setsu Gakutei、河端昌也、西川薫、小竹達矢、山内優、森山史郎: ETFE フィルムパネルの加熱加圧成形に関する研究(その1)加熱時の挙動と材料定数、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp929-930、2005
- [4] 森山史郎、河端昌也、西川薫、小竹達矢、山内優、Setsu Gakutei: ETFE フィルムパネルの加熱加圧成形に関する研究(その2)加熱加圧成形における挙動の考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp931-932、2005
- [5] 河端昌也、丁乙碩: ETFE フィルムの延伸立体成形に関する研究-(その1) 延伸立体成形の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp931-932、2008
- [6] 吉野達矢、瀬川信哉、小田憲史: ETFE フィルムの2軸引張特性と弾塑性応力・変形解析、膜構造研究論文集2004、No.18、pp31-39、2004
- [7] 河端昌也、森山史郎: ETFE フィルムのひずみ速度依存性と構造挙動について、膜構造研究論文集2004、No.18、pp41-46、2005
- [8] 河端昌也、森山史郎、會田裕昌: ETFE フィルムの粘弾性挙動について、膜構造研究論文集2005、No.19、pp1-8、2006

An Experimental and Analytical Study on Stretching Effect of ETFE film

EulSeok JEONG^{*)}

Masaya KAWABATA^{**)}

SYNOPSIS

A tension type (tensile membrane structures) using ETFE film is pulled outward from the exterior to introduce tensile stresses. And such structures offer the advantage of a natural shape formed by tensile stress and eliminate the need for blast air. Recently, the number of tension type structures is increasing. But, there is problem of lower allowable strength under elastic range of ETFE film. A high strength of the film is important to spread more use in a variety of buildings. ETFE film has a remarkable stretching capacity compared to existing membrane material. It is contemplated that stretching to plastic region by taking advantage of their strengths.

In this paper, we proposes stretching the film to its plastic region during panel installation as a method of increasing the yield strength of the film membrane structure, and confirms the effectiveness of this approach. First, to investigate the possibility of application on tensile membrane structures, a stretch-fabrication test is carried out, and it is verified that it is possible to increase the yield strength of the film membrane structures. An analytic investigation is also carried out by simulating the experiment, and the effectiveness of the elasto-plastic analysis considering the viscous behavior of the film is investigated.

^{*)} Dr. Eng., Postdoctoral Research Associate, Department of Architectural Engineering, Semyung University, Korea

^{**)} Dr. Eng., Associate Prof., Department of Architecture and Urban Culture, Faculty of Urban Innovation, Yokohama National University