

外周引込による ETFE フィルムの応力集中に関する検討

丁 乙碩*
岡村 卯吉**
河端 昌也***

梗概

ETFE フィルムは高い伸び能力を持つ材料であり、初期張力導入時にフィルムを塑性域まで延伸することで、より高耐力化が可能になる。著者らはこれまでにフィルムの延伸成形方法を提案し、テンションタイプへの有効性を確認してきた。一方、フィルムの延伸成形時には外周引込による初期張力導入が一般に行われるが、境界部の形状が周囲に比べて急激に変わる部分においては応力集中による引裂きの懸念がある。

そこで、本報では、フィルムの応力集中を回避するための切欠き形状やサイズについて検討することを目的として、フィルムの 1 軸引張実験を行い、切欠き形状による応力集中と亀裂発生との関係を検討する。さらに、実験モデルを対象として 1 軸引張実験を模擬した解析的検討を行い、クラックやノッチ先端部における応力集中や亀裂発生時の応力分布について把握する。

1. はじめに

ETFE フィルムは、耐候性に優れるフッ素樹脂のなかでも引張や引裂き、衝撃などの諸外力に対して強度と靱性のバランスの取れた材料である。強度は織布で補強された膜材料に及ぶべくもないが、空気圧を用いてクッション状にすれば発生応力を抑えつつ塑性領域の延性も活用できるため、エデン・プロジェクトや北京五輪の国家水泳中心のような大型パネル化が可能である。また透明から遮蔽まで光線透過率を幅広く調整可能で、紫外線や熱線など特定波長域の光線を選択的に遮蔽することやフィルム表面への印刷等の機能性付与にも優れている。その他、複層化による断熱性確保の容易さ、マテリアルリサイクル性など多くの特長を有する。

これまでのフィルムを用いた適用事例では、クッションタイプが多いが、これは雪や風のような外部荷重及びクリープ、リラクゼーションのようなフィルムの粘性挙動に対して有利なためである。ただし、維持管理の設備や形状に限られるといった問題点も持っている。著者らはこれまでにフィルムの耐力を高める方法として、施工時にフィルムを延伸する方法を提案し、テンションタイプへの有効性を確認してきた^{[1][2]}[図 1]。

実際に延伸成形方法を適用するためには、施工時に外周から引き込む方法が一般に行われるが、その時、孔や切欠きなどで力の流れが周囲に比べて急激に変わる部分^[3]、特に、コーナー部においては応力集中が生じやすくなり、引裂きに至る事も考えられる。その対策としては、コーナー部に円形の切欠きを施すことにより応力集中が回避できることを確認した[図 2]。

しかし、応力集中を回避するための切欠き形状やサイズについては、鋼材のような線形弾性的な材料に関する研究は多く報告されているが、フィルムのような塑性領域が広い非弾性材料に関する研究例はほとんど報告されていないのが現状である。

そこで、本報では、外周引込みによるテンション方式フィルム膜構造の技術的確立を目的として、フィルムを対象として引張実験を行い、切欠き形状による応力集中と亀裂発生との関係を検討する。さらに、実験モデルを対象として 1 軸引張実験を模擬した FEM 解析を行い、クラックやノッチ先端部における応力集中や亀裂発生時の応力分布について把握する。



図 1 延伸成形によるテンションタイプの適用事例



図 2 応力集中部のコーナー処理

* 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
** 鹿島建設株式会社 修士(工学)
*** 横浜国立大学大学院 建築都市文化専攻 准教授 博士(工学)

2. 切欠き形状と応力集中に関する実験的検討

2.1 実験概要

切欠き形状による応力集中及び亀裂発生時の特性を把握するために1軸引張試験を行った。試験片は、図3のような幅30mm、長さ60mm(チャック間30mm)、厚さ200 μ mのドットプリントされたフィルムを使用した。なお、切欠き形状や寸法による各モデルの分類を図4に示す。試験片の採取はMD方向とし、試験片の数は各モデルにおいて2本ずつ行った。また、試験条件は、ひずみ速度10%/minとし、雰囲気温度は22 $^{\circ}$ Cとした。なお、切欠きのない試験片(モデル[0])に対しても1軸引張試験を行い、比較検討した。

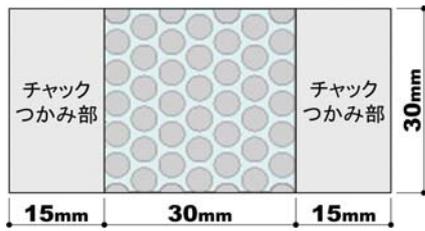


図3 試験片の寸法(モデル[0])

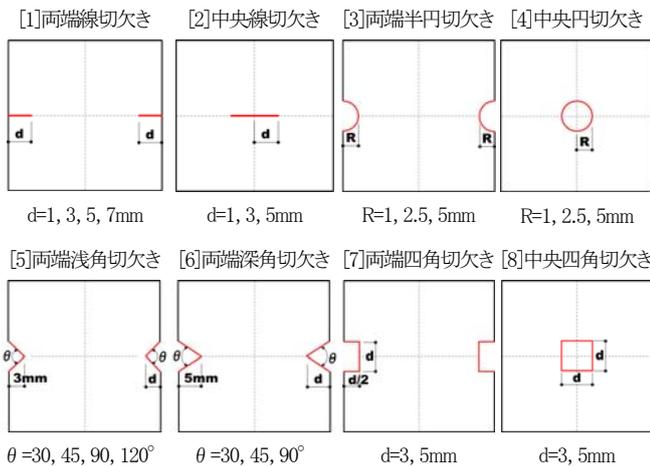


図4 試験片の分類

2.2 実験結果及び比較検討

各切欠き形状における1軸引張実験結果を示す。まず、両端線状[1]及び両端円形切欠き[3]における公称応力-ひずみ関係を図5に、中央線状[2]及び中央円形切欠き[4]における公称応力-ひずみ関係を図6に、三角切欠き[5]、[6]の公称応力-ひずみ関係を図7、8に、そして、四角切欠きの公称応力-ひずみ関係を図9に示す。ここで、公称応力は荷重を変形前の断面積で除したものである。

線状及び三角切欠きでは、フィルムの第二降伏点付近(ひずみ度15~20%)周辺で荷重ピークを迎えたのに対し、円形切欠きモデルでは、応力集中が緩やかで、ひずみ100%近くまで伸びて、図10(a)のような亀裂を生じて最大荷重に達する結果となった。なお、半径5mm両端部円形切欠きモデル([3]-5)では、このような亀裂を生じることなく、切欠きなしの結果と同様な性状を示した。また、三角切欠き[5]、[6]では、切欠き深さが同じである場

合、線状切欠きの結果と同様な傾向があったが、切欠き角度の変化による違いはほとんど見られなかった。

また、四角切欠きモデル([7]、[8])では、図10(c)のように四隅から亀裂進展するのではなく、二か所から亀裂が発生し、斜めに变形しながら破断するなど、亀裂発生及び進展においては、線状切欠きの結果と同様な傾向を示した。

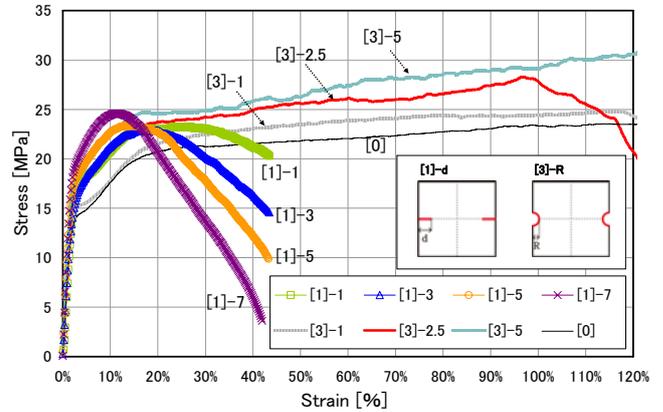


図5 両端線及び両端円形切欠きの応力-ひずみ関係

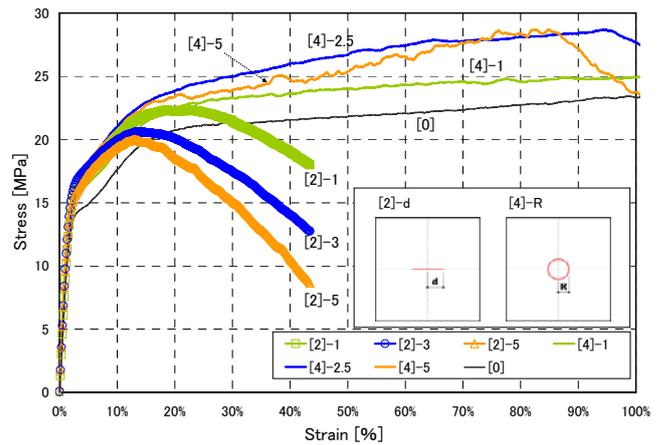


図6 中央線及び中央円形切欠きの応力-ひずみ関係

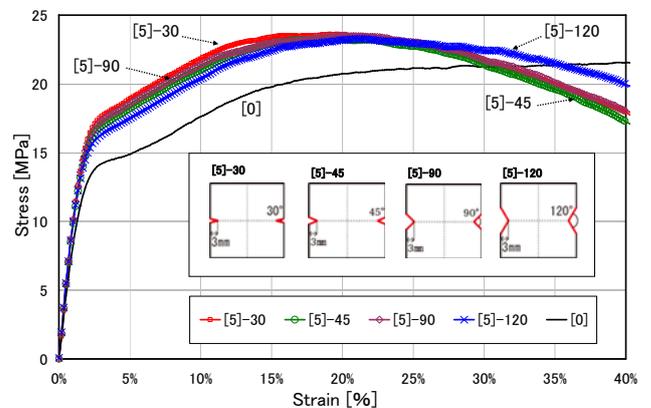


図7 両端浅角の切欠き角度による応力-ひずみ関係

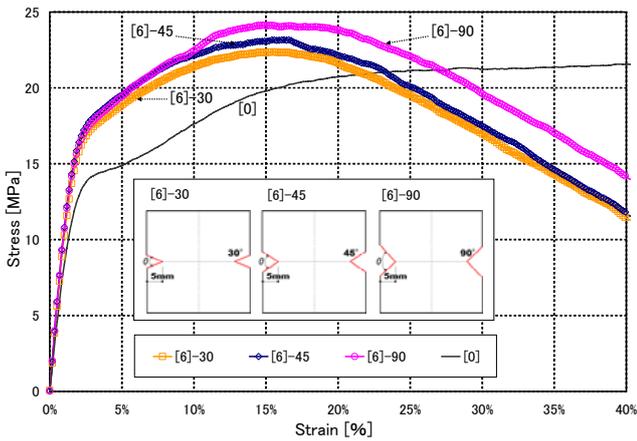


図8 両端深角の切欠き角度による応力-ひずみ関係

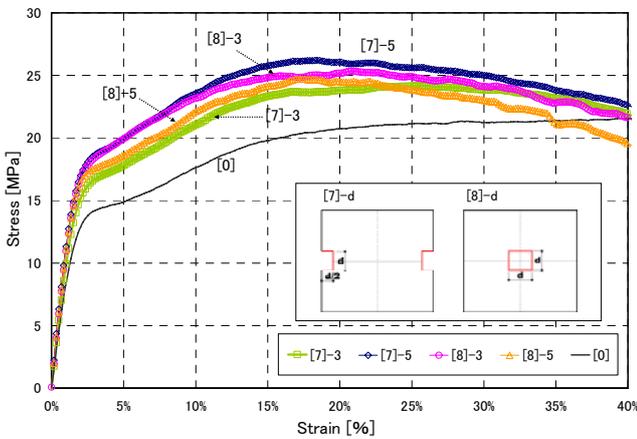


図9 四角切欠きの応力-ひずみ関係

次に、線状切欠き([1], [2])における公称応力-ひずみ関係を図11に示す。切欠き位置によって、中央部に切欠きのある試験片([2], [4], [8])では引張の際、切欠き周辺にしわ波状の座屈が生じ、面外方向にも変形した。特に、中央線切欠き([2])では、図10-(b)のように大きく面外変形する結果となった。その結果、中央線切欠き([2])では切欠き幅に依存して公称応力のピークが変化するかつ、両端線切欠き([1])と比べて公称応力が低くなる結果となった。

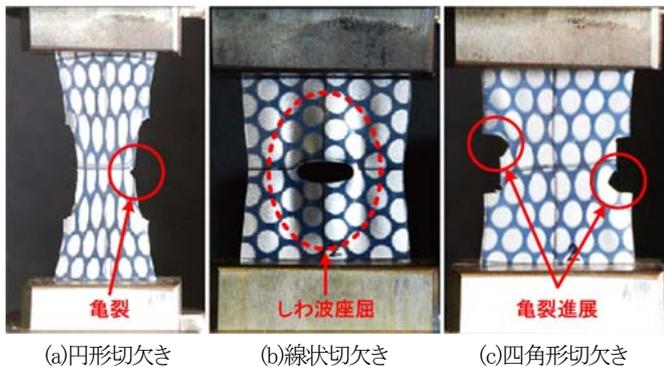


図10 亀裂発生時の様子

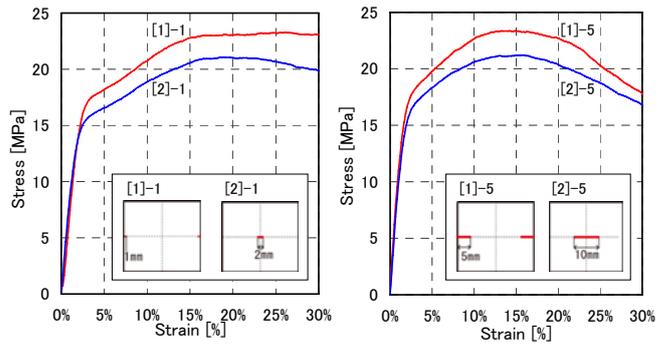
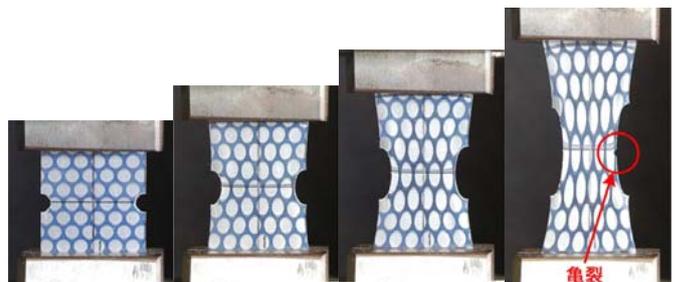


図11 線状切欠きにおける比較

2.3 亀裂発生時のひずみと真応力の検討

切欠き先端において亀裂発生時の応力状態を把握するために、画像データを用いて真応力を求めて、比較検討した。真応力については、図12に示すように変形後の試験片幅を計測し、その断面積で応力値を求めた。ただし、厚さは初期値のままとした。なお、ひずみ3.3%毎に計測を行い、亀裂発生始点や公称応力との関係からフィルムの破断が亀裂発生によるものかどうか検証した。



(a)ひずみ 0% (b)ひずみ 26.4% (c)ひずみ 49.5% (d)ひずみ 100%

図12 画像解析 試験片中央部幅の測定([3]-2.5)

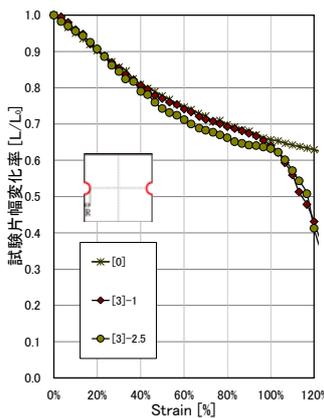


図13 幅変化率

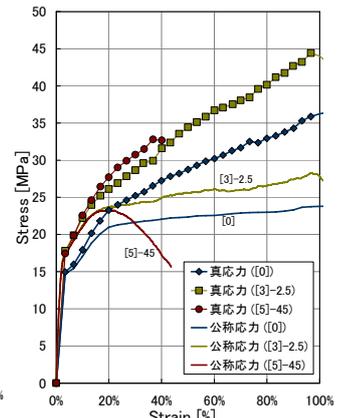


図14 真応力と公称応力の比較

円形切欠きにおける試験片幅変化率-ひずみ関係を図13に示す。切欠きなし([0])との比較結果、ひずみ100%付近で幅変化が大きくなり、亀裂が発生することが分かった。なお、その他の線状、三角切欠き([1], [2], [5], [6])においてはひずみ6-10%の間で亀裂が発生することが確認できた。また、真応力と公称応力の結果を図14に示す。荷重ピーク値より前に公称応力と真応

力の差が大きくなることから、亀裂発生と同時にフィルムの荷重ピークになるのではなく、亀裂が生じ、進展が進み暫くした後に公称応力が下降することが確認できた。以上の結果より、各モデルの亀裂発生始点を図 15 に示す。

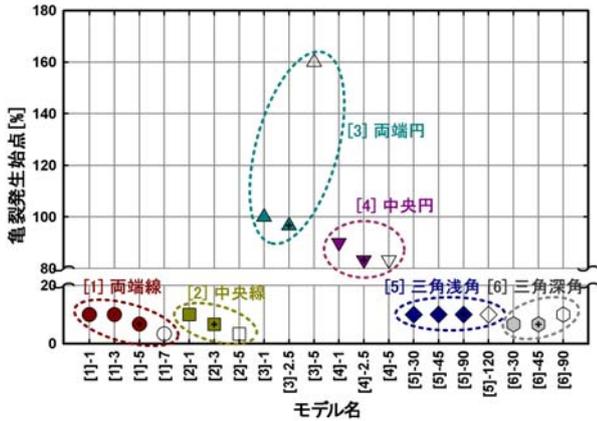
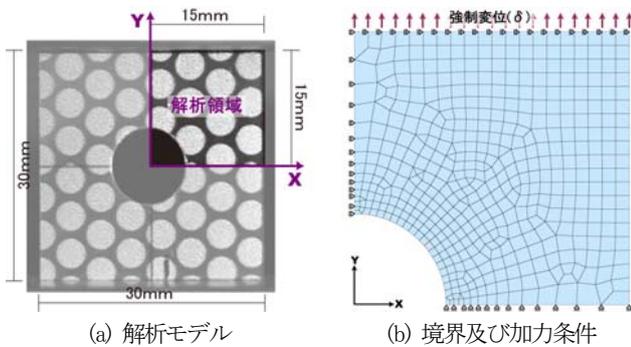


図 15 切欠き形状による亀裂発生始点

3. 切欠き形状による応力集中の解析的検討

3.1 解析概要

切欠き先端部における応力集中及び亀裂発生時の応力分布について把握するために、1 軸引張実験を模擬した解析を行った。解析には汎用プログラム MidasNFX を用いた。解析対象は図 4 の試験片のうち、[1]から[6]までとした。解析モデルの1例を図 16 に示す。解析領域は、対称性を考慮して全体の 1/4 とする。フィルムの弾塑性挙動のモデル化には Von-Mises 降伏条件を採用した。材料定数を図 17 に示す。



(a) 解析モデル (b) 境界及び加力条件

図 16 解析モデル及び解析条件

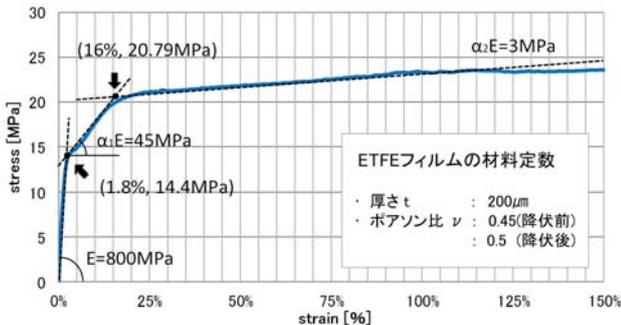


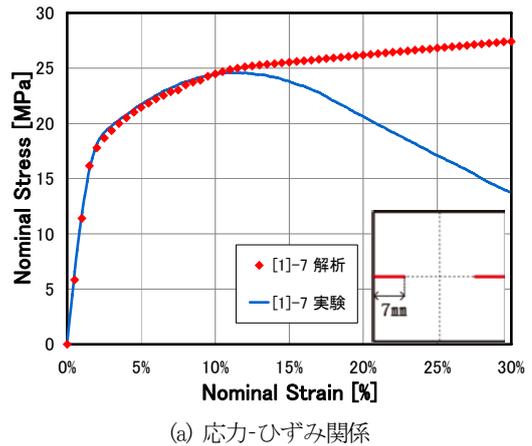
図 17 フィルムの応力-ひずみ関係(ひずみ速度 10%/min)

3.2 解析結果

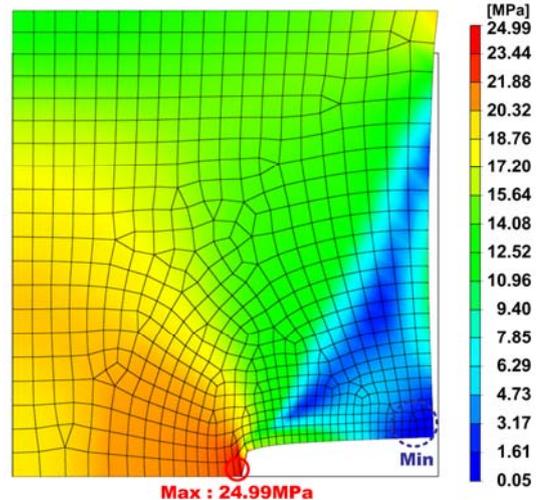
モデル[1]-7の解析結果を図 18 に示す。図 18-(a)の線状切欠きの公称応力-ひずみ関係ではひずみ 10%まで応力値は一致しているが、その後は異なる結果となった。その原因として、実験では亀裂進展により有効幅が減少するのに対して、解析では亀裂を考慮していないためである。図 18-(b)にひずみ 10%時の相当応力分布を示す。線状切欠きでは、切欠き先端で最大応力値が現れるかつ、先端部周辺で高い応力が分布する結果となった。次に、円形切欠きモデル[3]-2.5の解析結果を図 19 に示す。円形切欠きの場合、図 19-(a)の公称応力-ひずみ関係はひずみ 30%まで実験結果とほぼ同じカーブになることが確認できた。なお、図 19-(b)にひずみ 30%時の相当応力分布を示す。円形切欠きの場合、線状切欠きと比べて局所的な応力集中は見られず、全体的に応力レベルが上がる結果となった。

また、モデル[3]と[4]のような円形切欠きの場合、30%以上の大ひずみ領域では切欠き先端部が内側に反転し、有意な解が得られなかった。

以上の結果より、本報では、応力集中の検討にあたり、解析の適用範囲としては、線状や三角切欠きの場合、ひずみ 10~15%以内に、円形切欠きの場合、ひずみ 30%以内と判断する。

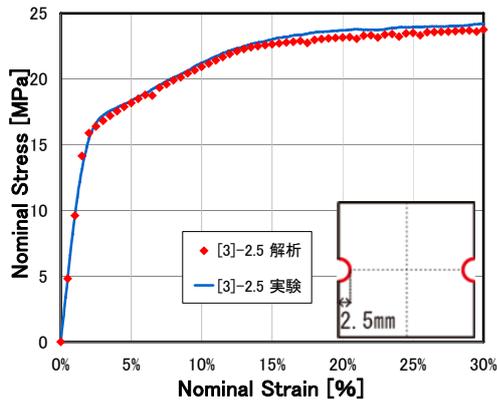


(a) 応力-ひずみ関係

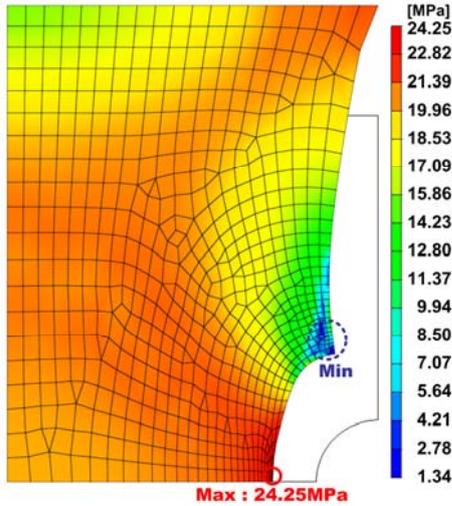


(b) 相当応力分布図(ひずみ 10%時)

図 18 モデル[1]-7の解析結果



(a) 応力-ひずみ関係



(b) 相当応力分布図(ひずみ 30%時)

図 19 モデル[3]-2.5 の解析結果

3.3 切欠き形状と応力集中係数

各切欠き形状による応力集中部の検討を行う。各増分段階ごとに切欠き先端部の要素応力と公称応力との関係より応力集中係数($\alpha = \text{亀裂先端部応力}(\sigma_{\max}) / \text{公称応力}(\sigma_n)$)亀裂先端部応力/公称応力)を求め[3]、各切欠き形状による増分解析時の応力集中係数の変化を図 20 に示す。

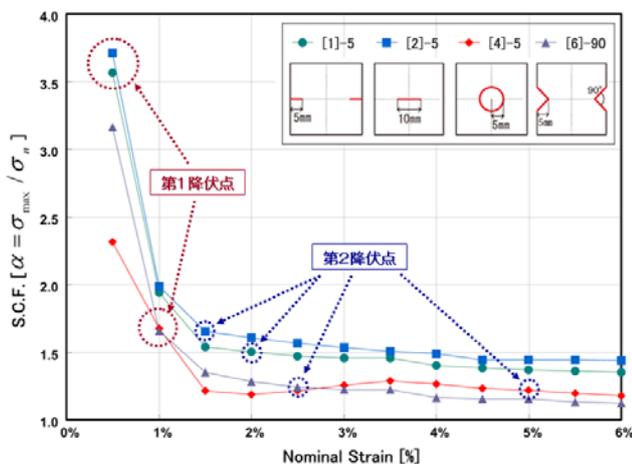
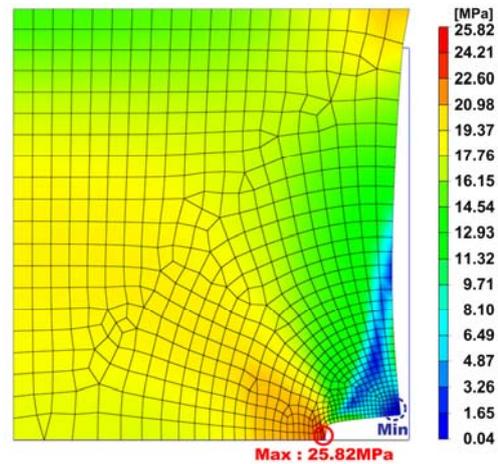


図 20 応力集中係数

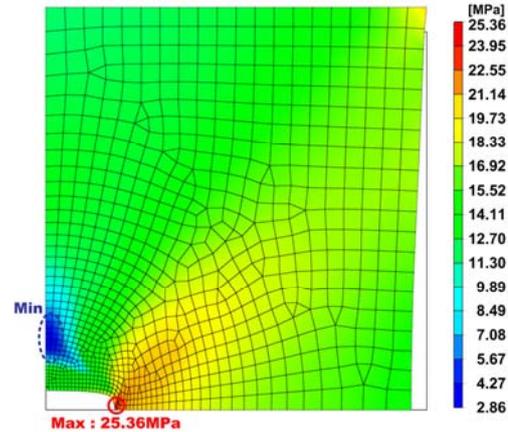
その結果、弾性範囲における応力集中係数は線状及び三角切欠きの場合は 3 以上であるのに対し、円形の場合は 3 以下となっているが、塑性範囲に入ると全てのケースで応力集中係数は下がり、ほぼ一定値となる傾向がみられた。また、三角及び円形切欠きの場合、応力集中係数は線状切欠きケースより小さくなる傾向が見られ、線状切欠きに比べて亀裂先端部で応力集中しにくい形状であると考えられる。なお、三角切欠きの場合、切欠き角度による差異はあまり見られなかった。

3.4 亀裂発生時の応力分布

画像解析結果に基づいて各切欠きケース別に亀裂発生始点を検討対象とし、その時の亀裂先端部の応力値を比較する。検討モデルのうち、モデル[1]-3 とモデル[2]-3 の相当応力分布を図 21 に、モデル[5]-45 とモデル[6]-45 の相当応力分布を図 22 に示す。



(a) [1]-3 モデル(ひずみ 10.0%時)

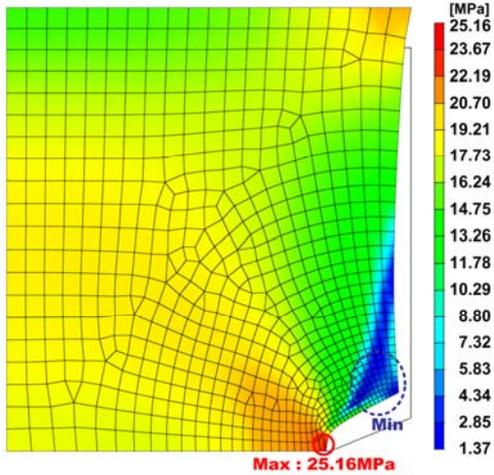


(b) [2]-3 モデル(ひずみ 6.7%時)

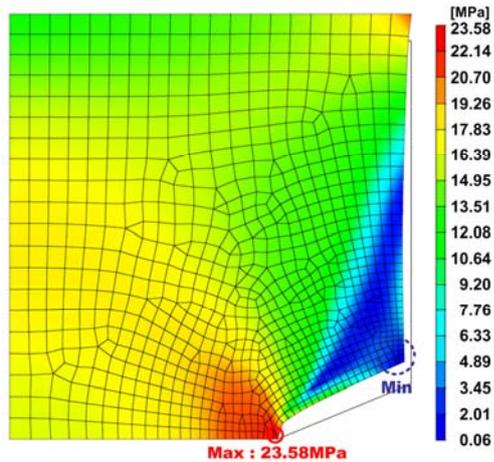
図 21 亀裂発生時の相当応力分布(線状切欠き)

各モデルにおける試験結果より得られた公称ひずみと公称応力の関係を図 23 に、亀裂発生開始時の公称ひずみと相当応力(公称)の関係を図 24 に示す。線状及び三角切欠き(モデル[1]、[2]、[5]、[6])の場合、公称応力は約 20~30MPa となっており、切欠き長さが長いほど亀裂発生始点は早く、応力値は小さくなる傾向が見られた。また、中央線切欠きより両端線切欠きの方が

高い応力値を示しており、三角切欠きにおいては切欠き角度が大きいほど応力値は下がる結果となった。一方、円形切欠きモデル([3]、[4])の場合、フィルムに破断までを模擬した解析結果は得られなかったが、実験結果から公称応力-ひずみ関係や画像解析結果を見ると、図23より公称応力は凡そ24〜33MPa程度となることが確認されており、それに応力集中係数を考慮すると亀裂先端部は引張強さとはほぼ同じ応力に達して破断に至ると考えられる。



(a) [5]-45 モデル(ひずみ 10.0%時)



(b) [6]-45 モデル(ひずみ 6.7%時)

図22 亀裂発生時の相当応力分布(三角切欠き)

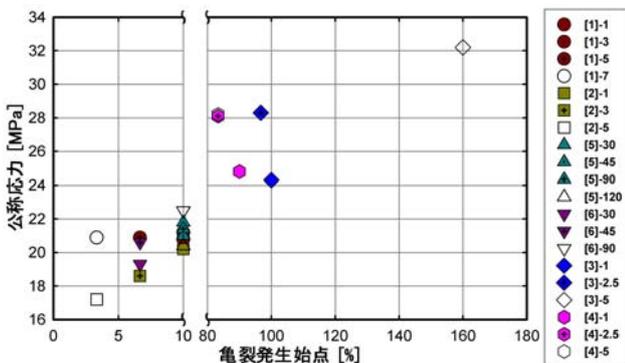


図23 亀裂発生時のひずみと公称応力分布(実験結果)

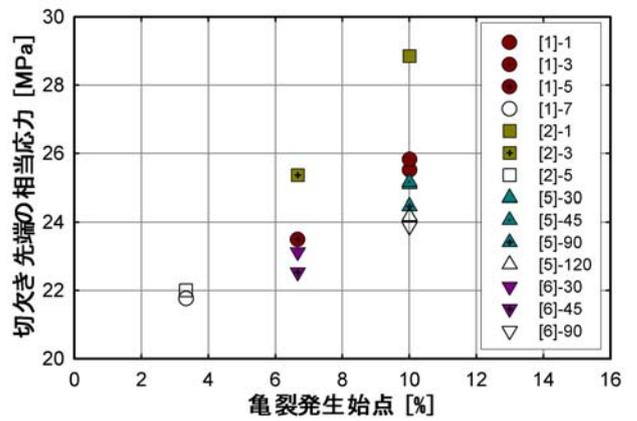


図24 亀裂発生時のひずみと相当応力分布(解析結果)

4. まとめ

本報では、ETFEフィルムを対象として、切欠き形状の異なる試験片の1軸引張実験及びそれを模擬した解析的検討を行い、亀裂先端部の応力集中や亀裂発生時の応力分布について比較検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) 1軸引張実験の結果、亀裂発生と同時に公称応力が下降するのではなく、亀裂進展した後に下降することが確認できた。なお、円形切欠きでは、応力集中による亀裂は生じにくく、約80%以上の伸び能力を保持することが確認された。三角形切欠きでは、切欠き先端角度による違いはわずかであった。
- 2) 円形切欠きの応力集中係数が他の切欠き形状に比べて小さく、亀裂発生時のひずみは90〜100%と顕著な延性を示すことが明らかとなった。
- 3) 解析結果より、切欠き形状による亀裂先端での最大応力はそれぞれ差があるが、応力分布を見ると、線状、三角形そして四角形切欠きでは、亀裂先端で応力分布が集中しているのに対し、円形切欠きでは局部的な応力集中は見られず、全体的に応力レベルが上がるのが分かった。
- 4) 亀裂先端角度の小さい切欠きでは、小さなひずみで亀裂を生じることには注意する必要がある。

謝辞

ETFEフィルムの1軸引張実験を実施するにあたり、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] 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
- [2] 丁乙碩、河端昌也:ETFEフィルムの粘塑性構成式-粘塑性定数の決定と1軸引張の負荷過程に関する検討、膜構造研究論文集2009、No.23、pp9-14、2010
- [3] 吉田総仁、弾塑性力学の基礎、共立出版株式会社、pp.69、pp.107、1997

Study on The Stress Concentration of ETFE Film by Stretching Boundaries

Eul-Seok JEONG ^{*)}

Ukichi OKAMURA ^{**)}

Masaya KAWABATA ^{***)}

SYNOPSIS

ETFE film is a material which has a large elongation under tensile stress and it is possible to make higher strength by stretching a film in construction. In previous work, we have proposed a stretching method on film and verified a effectiveness of tension type. In general, we introduce the initial stress by stretching boundaries in construction but have a problem which occur a crack by stress concentration in where a shape of boundary compared to the surroundings is rapidly changed.

In this paper, we investigated a shape and a size of notch in order to avoid a stress concentration on film. First, we examined a uniaxial tensile test of ETFE film to study the relation between stress concentration and crack propagation by changing a shape of crack. And then, we carried out FEM analysis on a experimental model simulated a uniaxial tensile test. Finally, we investigated a stress concentration on crack and notch tip and a stress contribution when crack tip yielding occurs.

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

^{**)} M. Eng., Kajima Corporation

^{***)} Dr.-Eng., Associate Prof., Department of Architecture and Building Science, Faculty of Engineering, Yokohama National University