

膜材料の2軸引張破断試験の数値シミュレーション

吉野達矢^{*1}
加藤史郎^{*2}

梗概

膜材料の2軸引張破断強度は2軸引張試験から求めることは難しいことから、前報にて織構造格子モデルを拡張した構成則を用いた数値シミュレーションによって求めた。本報では、この構成則を有限要素法に導入し、2軸引張破断試験の破断強度を数値シミュレーションによって求めた。この結果より、2軸引張試験片の破断強度を推定できることを示すとともに、本報告で採用した試験片形状では、試験片端部に加えた荷重に対して中央部に発生している応力が応力集中により小さいことを示した。

1. 序

膜構造の限界状態を把握するためには、膜材料の破断特性が重要となる。特に、2軸方向に張力が導入された状態で使用されることが多いことから、2軸引張状態における膜材料の破断特性が重要となる。ここで、膜材料の2軸引張破断特性に関する研究には南¹⁾、西川ら²⁾、小松ら^{3,4,5)}、H. W. Reinhardt⁶⁾の研究がある。小松⁵⁾やH. W. Reinhardt⁶⁾の報告において、膜材料の2軸引張破断試験を実施した場合、応力集中が生じて真の2軸引張破断強度を得ることが難しいことが示されている。

そこで、著者らは前報⁷⁾にて、2軸引張状態における膜材料の破断強度の推定を行った。なお、構成則には膜材料の粘弾塑性特性を十分に表現可能な織構造格子モデル⁸⁾を用いている。この結果から、2軸引張破断強度(導入張力を張力導入前の幅で除した値)は1軸引張破断強度に対して、たて糸方向、よこ糸方向それぞれ95.8~100%、98.2~100%であることがわかった。これにより、織構造格子モデルは膜材料の2軸引張破断特性を推定可能な粘弾塑性構成則となった。しかしながら、この推定結果の検証には2軸引張試験が必要であり、真の2軸引張破断強度を得るための試験方法が必要となる。

本報では、2軸引張試験片の破断強度の推定を行い、試

験片2軸引張破断強度を推定し、特性を分析する。なお、本報告で対象とした膜材料はPTFEコーテッドガラス繊維平織物である。

2. 2軸引張破断強度と2軸引張破断応力

構成則には織構造格子モデル(図1)を用いる。この織構造格子モデルが膜材料(PTFEコーテッドガラス繊維平織物)の粘弾塑性特性を十分に表現できることは既報

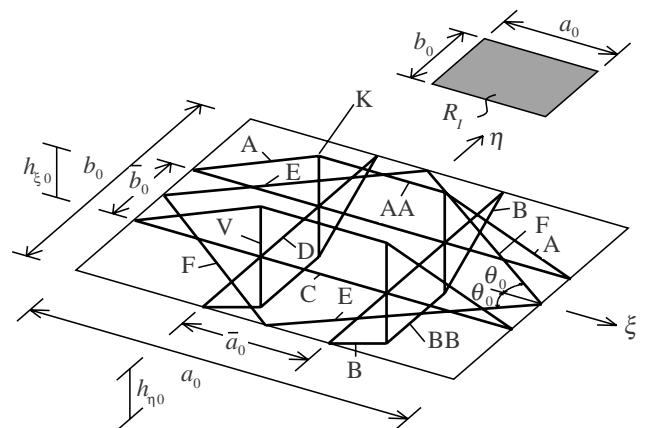


図1 織構造格子モデル

*1 太陽工業(株)空間技術研究所, 博士(工学)

*2 豊橋技術科学大学 建設工学系・教授, 工学博士

表1 織構造格子モデルに基づいた2軸引張破断荷重と2軸引張破断応力

応力比	破断強度 (N/cm)		破断ひずみ (%)		破断応力 (N/cm)	
	たて	よこ	たて	よこ	たて	よこ
1:0	1821 (100)	0	5.8	-3.9	1791 (100)	0
0:1	0	1597 (100)	-5.1	13.0	0	1489 (100)
1:1	1572 (88.1)	1572 (98.4)	3.2	11.8	1362 (76.0)	1362 (91.5)
1.11:1	1745 (95.8)	1568 (98.2)	3.8	11.7	1513 (84.5)	1352 (90.8)

9)にて示した。また、膜材料の破断特性も表現可能なモデルに拡張し、前報⁷⁾にて、2軸引張破断強度の推定を行った。

前報⁷⁾において推定した2軸引張破断強度を図2、表1に示す。なお、織構造格子モデルに用いた諸定数は表2、3である。ここで、2軸引張破断強度は変形前の形状で増分ひずみエネルギーを評価した時に得られる応力である。また、この2軸引張破断強度と等価な2軸引張破断応力(変形後の形状でひずみエネルギーを評価した時に得られる応力)を図2に示す。破断応力が破断強度に対して小さい値を示している。これは、2軸の応力の比が1:1(以下、応力比(1:1))の場合、初期に比べ、破断時のひずみがたて系方向、よこ系方向それぞれ、3.2%、11.8%と伸びていることから明らかである。

3.2 2軸引張破断試験のシミュレーション

3.1 解析モデル

図3に示す2軸引張試験片の破断強度を有限要素法を用いて数値シミュレーションによって求める。なお、試験片形状は膜材料弾性定数試験方法⁹⁾に準拠した形状である。構成則には破断特性および粘弾塑性を表現可能な織構造格子モデル⁹⁾を採用する。また、応力・変形解析には8節点アイソパラメトリック要素を用いた有限要素法¹⁰⁾を用いる。なお、積分には2×2のGauss積分を用いる。

図4に図3の2軸引張試験片の解析モデルを示す。なお、対称性を利用し、4分の1モデルを採用する。

境界条件は2軸引張試験機による引張試験を十分に表現するように与える。まず、対称性およびスリットの特性を満足するように与える。また、隣り合う治具は加力方向に対して同一変位すること、そして、加力の直行方向には治具同士は独立して変位することを条件として与える。

荷重は先に示した境界条件の下で、指定する応力比を満足するように与える。

ここで、応力・変形解析において、解析モデルの全積

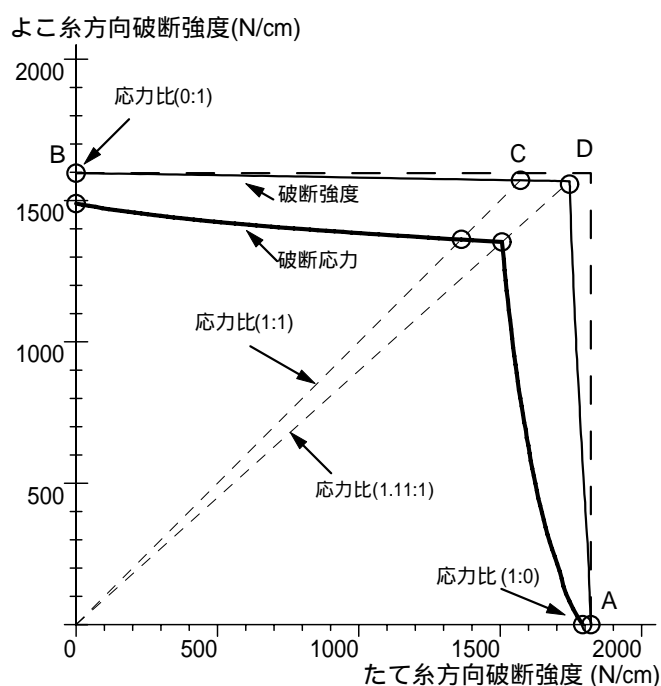


図2 2軸引張破断強度と2軸引張破断応力

分点の内、一つでも図3の破断応力に達した時点で、そこから破断が生じるものと仮定し、解析モデルの破断と定義する。

3.2 応力比(1:1)の結果

応力比(1:1)で破断状態の応力分布を図5に示す。また、端部に加えた荷重(以下、試験片破断荷重)と破断応力に達した積分点Iの応力、中央部の積分点Kの応力の値を表4に示す。なお、比較用に構成則で求めた破断強度、破断応力も示す。試験片破断荷重は1177N/cmであり、2軸引張破断荷重1572N/cmの74.9%であった。スリットにより、応力集中が緩和されていることがわかるものの、積分点I、J付近での応力集中が見られる。破断荷重時の中央部(積分点K)の発生張力はたて系方向、よ

表2 織構造格子モデルの形状および弾塑性に関する諸定数

$$a_0 = 0.1375\text{cm}, b_0 = 0.1000\text{cm}, \bar{a}_0 = a_0/3, \bar{b}_0 = b_0/3, \theta_0 = 36.0^\circ, h_{\xi_0} = 0.0102\text{cm}, h_{\eta_0} = 0.0162\text{cm}$$

Element	A_0 (cm^2)	ℓ_0 (cm)	E_1, E_1' (kN/cm)	E_2, E_2' (kN/cm)	E_3, E_3' (kN/cm)	E_4, E_4' (kN/cm)	E_5, E_5' (kN/cm)	$\epsilon_{y1}, \epsilon_{y1}'$ (%)	$\epsilon_{y2}, \epsilon_{y2}'$ (%)	$\epsilon_{y3}, \epsilon_{y3}'$ (%)	$\epsilon_{y4}, \epsilon_{y4}'$ (%)	n	m_1	m_2
A, AA	0.0016/2	0.0470	0.01	279.8	2797.9	0.01	-3920.0	0.001	0.30	4.10	4.11	-	-	-
B, BB	0.0016/2	0.0371	0.01	279.8	2797.9	0.01	-2940.0	0.001	0.30	5.17	5.18	-	-	-
C	0.0040/2	0.1375	333.2	132.3	66.6	-2940.0	-	0.30	1.20	6.00	-	0.00	0.07	0.50
			333.2	88.2	19.6	-2940.0		-0.06	-1.20	-6.00				
D	0.0040/2	0.1000	308.7	122.5	39.2	-98.0	-	0.30	0.70	7.00	-	0.00	0.08	0.50
			308.7	122.5	39.2	-98.0		-0.35	-0.70	-7.00				
E, F	0.0014	0.1700	50.0	0.02	0.01	-98.0	-	0.20	1.00	2.00		0.00	0.00	0.00
			50.0	0.02	0.01	-98.0		-0.20	-1.00	2.00				
V	0.0025/4	0.0175	0.31	313.6	-	-	-	-19.00	-	-	-	-	-	-

Element	a_0 (cm)	b_0 (cm)	k_1 (kN/cm)	k_2 (kN/cm)	k_3 (kN/cm)	k_4 (kN/cm)	γ_{y1} (%)	γ_{y2} (%)	γ_{y3} (%)	n	m_1
R_l	0.1375	0.1000	0.637	0.304	0.142	-98.0	1.66	3.50	100.0	-0.40	0.25

こ糸方向それぞれ, 1032, 1032N/cmであり, 応力比は(1 : 1), 試験片破断荷重に対して 87.7%であった。

この結果から, ここで採用した試験片形状では, 2軸引張破断荷重に対して, 74.9%の荷重で積分点I付近から破断が生じることが推定できた。

3.3 応力比 (120 : 1) ~ (1 : 120) の結果

応力比 (120 : 1) ~ (1 : 120) まで変化させ, 各応力比における試験片破断荷重を求めた。その結果を図6に示す。ただし, 応力比 (120 : 1) ~ (120 : 10), (100 : 120) ~ (1 : 120) については, 変形に伴い隣り合う治具同士が重なる結果となった。実際の引張試験では隣り合う治具同士が重なることはなく, 治具は変位できずそこに留まることを考えると, さらに応力集中の度合いが大きくなるのが容易に予想できる。これによって, さ

表3 織構造格子モデルの粘弾性に関する諸定数

Element	T_g (min)	C_1 (cm^2/kN)	T_2 (min)	C_2 (cm^2/kN)	T_2 (min)
C	104000	0.000063	0.7	0.001990	350.1
D	57860	0.000534	3.7	0.002153	158.7
V	4252	0.014153	23.3	0.016867	1736.0

らに破断荷重は低くなるのが予想できる。また, 図6から明らかのように, 試験片破断荷重はすべて織構造格子モデルによって求めた2軸引張破断荷重より低い値となった。

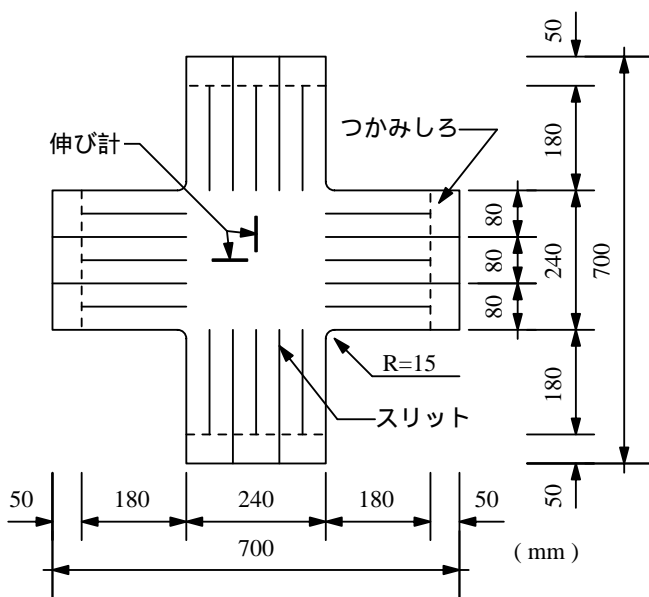


図3 2軸引張試験片

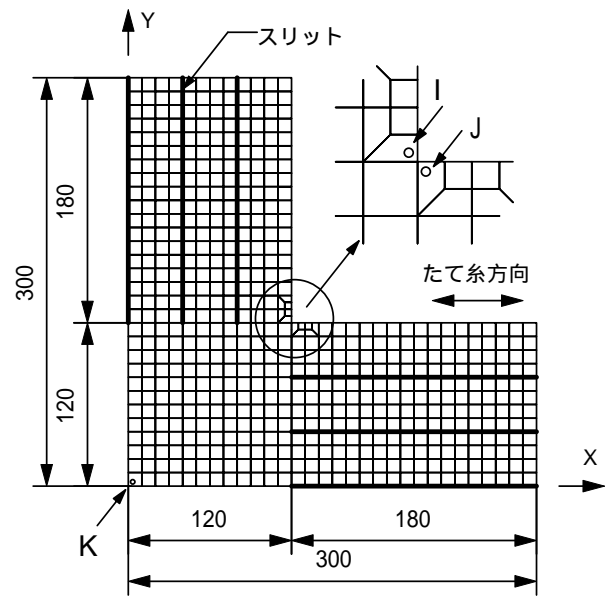
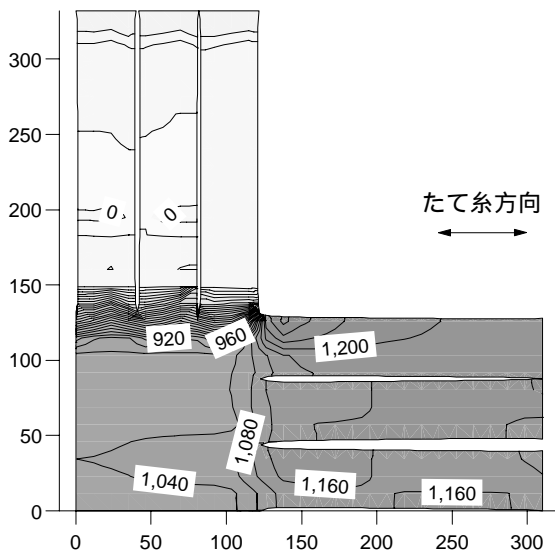
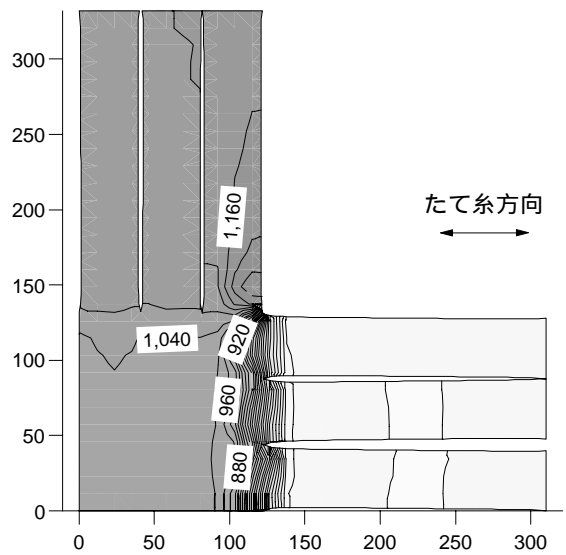


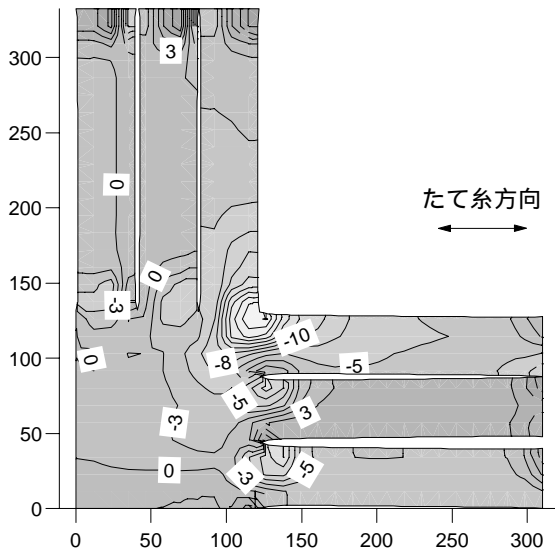
図4 解析モデル



a) たて糸方向応力分布 (N/cm)



b) よこ糸方向応力分布 (N/cm)



c) せん断応力分布 (N/cm)

図5 応力分布 (応力比 1 : 1)

区間ADはたて糸の破断による膜材料の破断を意味し、区間BCDはよこ糸が破断したことにより、膜材料が破断したと判断する。この破断した糸の方向が変化する応力比は、破断強度(破断応力)の場合、DおよびE点(1.11:1)であったが、試験片破断強度の場合、F点(1.07:1)であった。

応力比(2:1),(3:1),(1.11:1)の試験片破断荷重と破断応力に達した積分点(IまたはJ)の応力、中央部の積分点Kの応力の値を表4に示す。なお、比較用に破断強度、破断応力も示す。この結果から、端部に加えた荷重に対して中央部の積分点Kの応力の発生割合は小さいものの、発生応力の比は端部に加えた荷重と同等な荷重比となっていることがわかる。

4. まとめ

膜材料の破断特性を含む粘弾塑性特性を表現可能な織構造格子モデルを有限要素法に導入し、2軸引張破断試験の数値シミュレーションを実施した。その結果、ここ

表4 破断荷重, 破断応力

応力比	試験片破断強度						織構造格子モデル					
	破断強度 (N/cm)		破断に達した積分点の応力 (N/cm)			中央部の応力 (N/cm)			破断強度 (N/cm)		破断応力 (N/cm)	
	たて	よこ	たて	よこ	破断位置	たて	よこ	応力比	たて	よこ	たて	よこ
1:1	1177	1177	520	1453	I	1032	1032	1:1	1572	1572	1362	1362
2:1	1372	686	1439	373	J	1227	605	2.03:1	1774	887	1574	787
3:1	1451	484	1407	303	J	1318	429	3.07:1	1790	597	1616	539
1.11:1	1249	1124	1565	495	J	1096	984	1.11:1	1745	1568	1513	1352

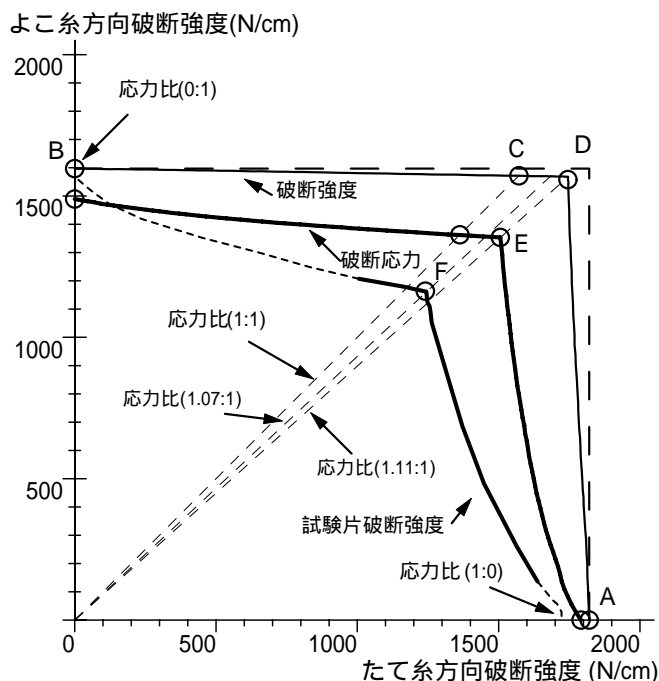


図6 試験片2軸引張破断強度

で採用した試験片形状では応力集中が発生し2軸引張破断荷重より小さい荷重で破断が生じ、かつ、試験片中央部には試験片破断荷重と同程度の応力を発生させることができていないことを定量的に示した。

真の2軸引張破断強度を求めるための試験方法を提案し、2軸引張破断試験により破断強度を求め、破断強度曲線の妥当性を確認することが、今後の課題である。

参考文献

1) 南 宏和：クラックを有するコーティング織物の強

度, 日本複合材料学会誌, 第4巻, 第2号, pp.81-87, 1978

2) 西川 薫, 渡辺典之: 傷を有する膜材料の引張強度に関する数値解析, 膜構造研究論文集 '87, No.1, pp.47 ~ 56, 1987年12月

3) 小松 清: 膜構造建築物の信頼性に関する研究(その1)(膜材料の破壊性状の研究), 膜構造研究論文集 '88, No.2, pp.51 ~ 64, 1988年12月

4) 小松 清, 石井一夫: 膜構造建築物の信頼性に関する研究(その2)(膜材料の破壊力学的考察), 膜構造研究論文集 '89, No.3, pp.57 ~ 67, 1989年12月

5) 小松 清: 局部破断を有する膜材料の織構造モデルによる応力変形シミュレーション, 膜構造研究論文集 '92, No.6, pp.45 ~ 78, 1992年12月

6) H. W. Reinhardt: On the Biaxial Testing and Strength of Coated Fabrics, EXPERIMENTAL MECHANICS, Vol. 16, No. 2, pp.71-74, February, 1976

7) 吉野達矢, 加藤史郎: 2軸引張状態における膜材料の破断強度の推定, 膜構造研究論文集 2002, No.16, pp.1 ~ 6, 2002年12月

8) 加藤史郎, 吉野達矢, 南 宏和, 瀬川信哉: 施工手順を模擬した膜構造の粘弾塑性応力・変形解析 - 織構造格子モデルによる定式化と解析 -, 膜構造研究論文集 '98, No.12, pp.11 ~ 25, 1998年12月

9) (社)日本膜構造協会: 膜材料弾性定数試験方法 (MSAJ/M-02-1995), 1995年

10) 加藤史郎, 吉野達矢, 小野智子, 南 宏和, 瀬川信哉: 織構造格子モデルによる膜構造の粘弾塑性解析 - 実験と解析との比較 -, 膜構造研究論文集 '97, No.11, pp.1 ~ 12, 1997年12月

NUMERICAL SYMURATION OF THE BIAXIAL TENSION TEST FOR STRENGTH OF MEMBRANE MATERIALS

Tatsuya Yoshino*1

Shiro Kato*2

SYNOPSIS

The present paper discusses a analytical estimation for strength of test piece on the membrane materials under biaxial tension. In the analysis, FEM based on the 8-node isoparametric element are utilized. In the constitutive equations, the fabric lattice model previously proposed by author which can express the visco-elasto-plastic characteristics and fracture characteristics, are utilized. From the analytical results, the fracture strength of test piece under biaxial tension was low compared with fracture strength based on the constitutive equations, because of the stress concentrations.

As future researches, the proposal of the examination method which stress concentration cannot produce easily is required. And experiments for verification of the fracture strength curve are required to be compared with the fabric lattice model.

*1 Advanced Structures R&D Department, Taiyo Kogyo Corporation, Dr. Eng.

*2 Prof., Department of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology, Dr. Eng.