

施工手順を模擬した膜構造の粘弾塑性応力・変形解析 —曲率を有する形状の場合—

加藤史郎^{*1}

吉野達矢^{*2}

梗概

膜材料は粘弾塑性特性を有することから、張力を膜材料に導入する手順によって導入後の応力分布に違いが発生することを平面膜を対象とした既報において報告した。しかし、膜構造はその材料の特性から、大きく形を変えながら外力に抵抗する。平面膜に比べ曲率を有する膜構造はより小さい変形で外力に抵抗することが可能である。

そこで、本報では粘弾塑性を考慮し、HP曲面を解析対象とした施工シミュレーションを行う。まず、形状解析や応力・変形解析に8節点アイソパラメトリック曲面要素を用いるための裁断形状決定手法を提案し、裁断形状を決定する。次に、得られた裁断形状の膜を接合する手順を模擬したシミュレーションを行い、つづいて、境界形状に取り付ける施工シミュレーションを行う。これにより、接合時、施工時、そして、施工後の応力分布を予測を行う。

1. 序

膜構造の設計・施工において、膜材料の裁断形状を決定することは重要な問題の1つである。そこで、これまでに次に示すような膜の裁断形状決定に関する研究が行われてきた。

まず、曲面上の測地線を利用する方法^{1,2)}がある。測地線とは曲面上の2点を結ぶ最短曲線であり、この曲面が可展開曲面であれば、平面に展開したときに直線となる性質を有する。このことを利用して、測地線を中心に幅を持ったストリップを作成し、展開形状を決定している。曲面上の測地線を求める方法としては、石井^{1,3,5)}、安宅^{4,6)}、鈴木^{7,8)}などの研究がある。

坪田ら⁹⁾によれば、得られたストリップに対して初期張力による膜材料の伸び量を仮定し、その伸び量を差し引いて裁断形状を求める。したがって、非可展開曲面を平面展開するときの誤差、そして、伸び量の推定誤差などにより、実際に施工された膜構造物の張力分布および形状は仮定した釣り合い形状と一致する保証がないことを述べている。このことをもとに、平面に展開された膜を接合し、境界形状に取り付ける手法⁹⁾を示し、さらに、境界に取り付けた状態で仮定した釣り合い状態を精度よく実現するための手法¹⁰⁾を提案している。

八木・大森^{11,12)}は裁断形状と初期釣り合い状態を未知とし、初期釣り合い形状での膜応力と設計膜応力との差が最小となるような裁

断形状と初期釣り合い形状を同時に求めている。

大崎ら¹³⁾は可展条件を用い、釣り合い形状を指定し、釣り合い時に目標とする応力値からの偏差量が最小となるような裁断膜形状および応力を求めるための形状指定設計法を提案している。さらに、形状および応力の偏差量の重み付き和を最小とすることを目的とした応力・形状トレードオフ設計法を提案している。また、これを拡張し、外力作用時の仕事量を考慮し、可展条件を用いた2段階の応力・形状設計法を提案している¹⁴⁾。

上谷らは指定した形状に近くなるように応力比を決定し、さらに、静的外力に対する最大変位が上限値以下になるような応力レベルを求める手法を提案している^{15,16)}。さらに、境界形状を設計パラメータにし、応力分布ができる限り目標値に近いという条件下で骨組み膜構造の釣り合い形状と裁断形状を求める増分摂動型の手法を提案している¹⁷⁾。さらに、ケーブル境界の場合においても有効であることを示している¹⁸⁾。

これらの報告では膜材料を弾性体と仮定して、伸び量を推定したり、応力・変形解析を行っており、粘弾塑性特性を有する膜材料の挙動を反映しているとは言えない。

大崎らは膜材料の応力・ひずみ関係を3次曲線で仮定し、提案する手法で求めた釣り合い形状から初期応力を除去して裁断形状を求めている^{19,20)}。さらに、3要素Voigtモデルを採用し応力緩和の影響

*1 豊橋技術科学大学 建設工学系・教授, 工学博士

*2 太陽工業(株) 技術本部 大阪設計部, 博士(工学)

を考慮している²¹⁾。この手法により、膜材料の粘弾性特性を考慮した最適な初期張力と裁断形状が求まる。しかし、実際の施工時や外力の載荷時には膜面の至るところで応力の増減が生じることから、非弾性挙動を示す膜材料の挙動をより精度よく把握するには著者らが提案する織構造格子モデル^{22,23)}のような粘弾塑性挙動を表現可能な構成則が必要となる。膜構造物の応力緩和後およびクリープ後の応力やひずみの状態を多段線形近似法を用いた弾性解析で予測する手法を提案し、内圧を受ける平面正方形膜構造の実験を模擬した南らの研究^{24,25)}もある。

著者らは膜材料の粘弾塑性挙動をより精度よく表現することを目的に織構造格子モデル^{22,23)}を用いた構成則を提案した。この構成則を8節点アイソパラメトリック曲面要素を用いた有限要素法に導入し、平面膜の施工手順を模擬した施工シミュレーション^{23,26)}を行った。この結果より、仮定した施工手順では張力導入後、そして、それから1週間経過した状態で張力分布は不均一になることを示した。

膜構造はその材料の特性から、大きく形を変えながら外力に抵抗する。平面膜に比べ曲率を有する膜構造はより小さい変形で外力に抵抗することが可能である。

そこで、本論文では、HP曲面を対象とし、以下の手順で裁断形状を決定し、施工シミュレーションを行い施工後の応力状態を予測する。

(1)8節点アイソパラメトリック曲面要素(以下曲面要素)で分割された曲面の形状解析を行う。次に、(2)裁断形状の決定を行う。ここでは、(2-1)曲面要素で構成され、かつ、形状解析で得られた曲面を三角形要素で分割する。(2-2)三角形要素で分割された曲面上に測地線を引く。(2-3)測地線で分割された領域を三角形要素で分割する。ただし、展開が可能となるように配置する。そして、平面に展開する。(2-4)三角形要素で構成される展開形状を曲面要素で再分割し、(2-5)仮定された縮小率で縮小することにより、曲面要素で構成される裁断形状を得る。最後に、(3)施工シミュレーションを行う。ここでは、(3-1)分割されている裁断形状をつなぎ合わせ、(3-2)境界に固定する。ただし、裁断形状の膜を接続する過程および境界形状に取り付ける過程は、施工時間を仮定し、粘弾塑性応力・変形解析を行う。

なお、本報では四フック化エチレン樹脂コーテッドガラス繊維平織物を対象とし、既報^{22,23)}で得られた諸定数を用いるものとする。また、膜材料では応力をkgf/cmで表わすことが慣用となっているのでここではそれに従った。

2. 粘弾塑性特性を表現する織構造格子モデル

膜材料の粘弾塑性特性を表現するために、図1に示す織構造格子モデルに基づいた構成則を用いる。またこのモデルの諸定数には表1、2に示す値を用いる。なお、このモデルの詳細およびこれらの諸定数の妥当性は既報^{22,23)}で確認済みである。

表1 織構造格子モデルの諸定数

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

要素	A_0 (cm^2)	ℓ_0 (cm)	E_1, E_1' (kgf/cm)	E_2, E_2' (kgf/cm)	E_3, E_3' (kgf/cm)	$\varepsilon_{y1}, \varepsilon_{y1}'$ (%)	$\varepsilon_{y2}, \varepsilon_{y2}'$ (%)	n	m_1	m_2
A	0.0016/2	0.0470	28550	28550	285500	0.00	0.30	-	-	-
AA	0.0016/2	0.0458	28550	28550	285500	0.00	0.30	-	-	-
B	0.0016/2	0.0371	28550	28550	285500	0.00	0.30	-	-	-
BB	0.0016/2	0.0333	28550	28550	285500	0.00	0.30	-	-	-
C	0.0020/2	0.1375	34000, 34000	13500, 9000	6800, 2000	0.30, -0.06	1.20, -1.20	0.00	0.07	0.50
D	0.0020/2	0.1000	31500, 31500	12500, 12500	4000, 4000	0.30, -0.35	0.70, -0.70	0.00	0.08	0.50
E, F	0.0014	0.1700	5100, 5100	0, 0	0, 0	0.20, -0.20	1.00, -1.00	0.00	0.00	0.00
V	0.0025/4	0.0175	32	32000	-	-19.00	-	-	-	-

要素	a_0 (cm)	b_0 (cm)	k_1 (kgf/cm)	k_2 (kgf/cm)	k_3 (kgf/cm)	γ_{y1} (%)	γ_{y2} (%)	n	m_1	m_2
R_f	0.1375	0.1000	65.0	31.0	14.5	1.66	3.50	-0.40	0.25	0.45

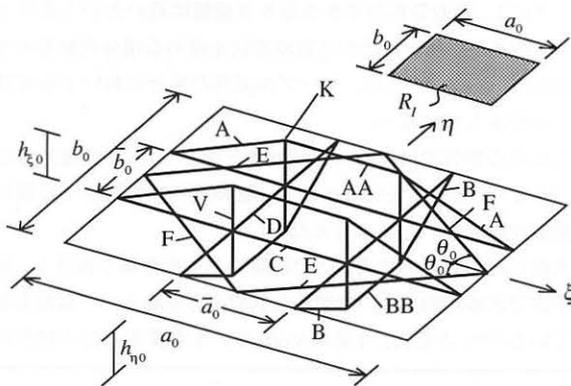


図1 織構造格子モデル

表2 粘弾性に関する諸定数

要素	T_{ξ} (min)	C_1 (cm^2/kgf)	T_2 (min)	C_2 (cm^2/kgf)	T_2 (min)
C	104000	0.00000062	0.7	0.0000195	350.1
D	57860	0.00000523	3.7	0.0000211	158.7
V	4252	0.00013870	23.3	0.0001653	1736.0

3. 施工シミュレーション

3.1 解析対象

本報では次式で表現される HP 曲面を解析対象とする (図 2)。境界はすべて固定支持とする。

$$Z = \frac{(X^2 - Y^2)}{A^2} \cdot H \quad (1)$$

ここで、 $H = 200.0\text{cm}$ 、 $A = 500.0\text{cm}$ とし、 X, Y の定義域は

$$|X| + |Y| \leq 500 \quad (2)$$

とする。なお、膜の平面展開までは式(2)で示す全領域にて行うものとし、施工シミュレーションはさらに、対称性を利用し、 $X \geq 0$ の領域で解析を行うものとする。

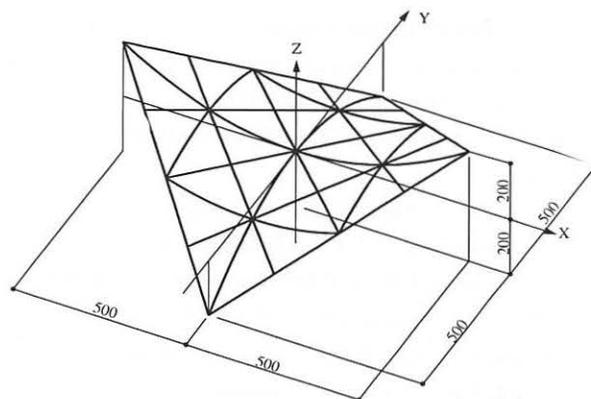


図 2 HP 曲面

3.2 形状解析

裁断形状を決定するにあたり、まず、8 節点アイソパラメトリック曲面要素を用いた有限要素法²⁷⁾によって等張力曲面の形状解析を行う。境界条件としては、外周の節点はすべて固定し、その他は自由とする。要素分割を図 3 に示す。初期形状には式(1)より求めた座標を用いる。また、初期張力は既報²³⁾で縮小率を決定するにあたり用いた 2kgf/cm として解析を行う。初期形状に式(1)を用いていることから、解析結果は初期形状より変化はなかった。

3.3 裁断形状の決定

形状解析によって得られた釣り合い曲面を平面展開する。そこで、次の手順で裁断形状を決定する。

(1) 三角形要素を用いた釣り合い曲面の表現

形状解析によって得られた曲面要素で表現される釣り合い曲面を形状関数を用いて三角形要素で分割を行う。曲面要素の 4 辺をそれぞれ 12 分割した結果を図 4 に示す。

(2) 測地線の探索

三角形要素で表される釣り合い曲面上に測地線を引く。測地線は平面に展開したときに直線となる性質を有する²⁾。この特性を利用して、隣合う 2 つの三角形要素上の測地線は三角形を平面にしたときに直線になる。これをもとに、図 4 の節点 α と α' 、 β と β' 、 γ

と γ' のそれぞれ 2 点間の測地線を三角形要素で構成される釣り合い曲面上に引く。

(3) 曲面の平面展開

測地線で分割された釣り合い曲面のそれぞれを図 5 に示すように、可展開となるように三角形要素で分割する。分割されたこの領域を平面 (図 6) に展開する。

(4) 裁断形状の決定

図 6 に示す平面に展開された三角形要素で構成される形状を曲面要素で分割する。ただし、ここでは対称性を利用して 2 分の 1 モデルで解析を行う。ここで、図 7 に示すように、膜材料のたて糸方向を X 軸と平行に仮定する。仮定した縮小率によって縮小し、図 7 に示す裁断形状を決定する。なお、縮小率は既報^{22,23)}で仮定したたて糸方向に 0.3%、よこ糸方向に 4.4% とする。

以上によって、曲面要素で構成する裁断形状が決定した。

3.4 施工シミュレーション

次の手順で裁断された膜を接合し、境界に取り付ける解析を行う。ここで、以下に示す接合および施工に必要な時間はそれぞれ著者が仮定した値である。また、膜の自重は無視する。

(1) 平行移動

図 7 に示す 4 つに裁断された膜を図 8 に示すように、B と B'、C と C'、そして、D と D' のそれぞれの節点間距離をゼロように平行

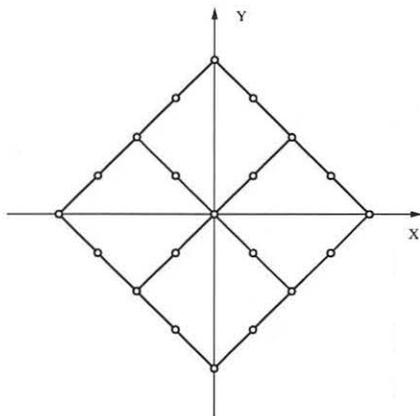


図 3 形状解析用に曲面要素で分割した曲面

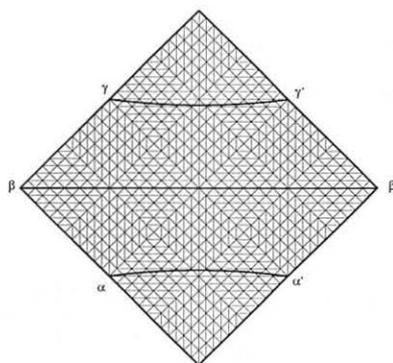


図 4 三角形要素で分割された HP 曲面と測地線

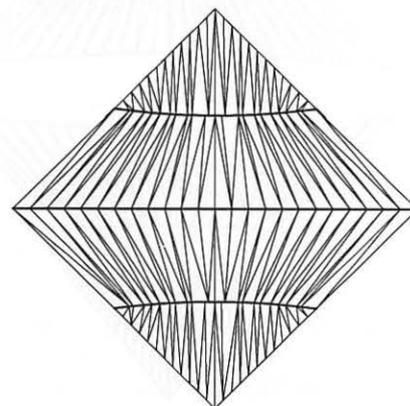


図 5 平面展開用に三角形要素で分割した曲面

移動する。数値解析は全節点のZ方向を固定し、目的の座標まで強制変位を与えて行う。ここでは、平行移動しただけであり、応力は発生していない。なお、一度節点間距離をゼロにした2つの節点はその後の解析においても常に節点間距離はゼロである。

(2) 膜の接合

図8の状態から、辺BHと辺BH'上、そして、辺DFと辺DF'上の節点間距離をゼロになるように強制変位を与える。この接合は180分で行うものとする。境界条件は全節点Z方向固定とし、対称軸上の節点はX方向も固定する。変形後の形状と応力分布を図9に示す。たて糸方向、よこ糸方向ともに、節点H、F付近で最大応力となり、それぞれ、2.8kgf/cm、2.3kgf/cmであった。

さらに、辺CGと辺CG'上の節点間距離をゼロにする。この接合も180分で行うものとする。変形後の形状と応力分布を図10に示す。たて糸方向応力は節点CとGの間で高くなっており、最大6.0kgf/cmであった。よこ糸方向は節点FからHの間で応力が大きくなっており、最大3.0kgf/cmであった。また、両方向において、応力がゼロ以下、つまり、圧縮応力が働いている領域(図中の白色の部分)も生じた。この応力発生理由は、本報で問題を簡単にするために、面外変形を拘束していることによるものである。面外に対しても変形可能とすることにより、この応力の発生は防ぐことが可能であろう。なお、平行移動の時と同様に一度節点間距離をゼロにした2つの節点はその後の解析においても常に節点間距離はゼロである。

(3) 接合後の18時間の放置

接合が終了してから18時間放置する。放置後の形状と応力分布を図11に示す。接合終了時と比べ、応力は粘性特性により応力が減少しているのがわかる。最大応力はたて糸方向、よこ糸方向それぞれ、5.7kgf/cm、2.4kgf/cmであった。この状態でも圧縮応力が生じている領域があるが、先と同様な理由によるものである。

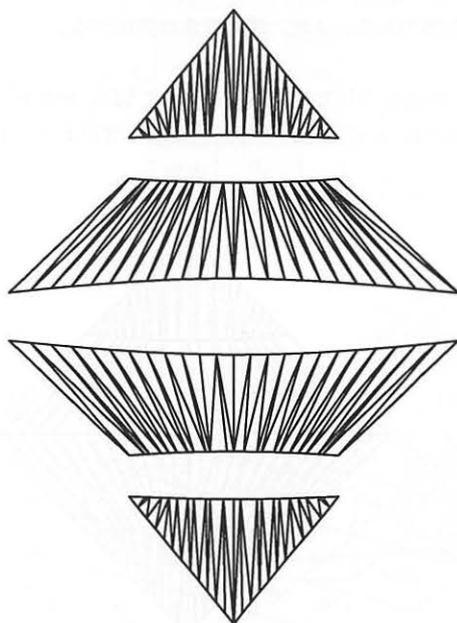


図6 平面展開した膜

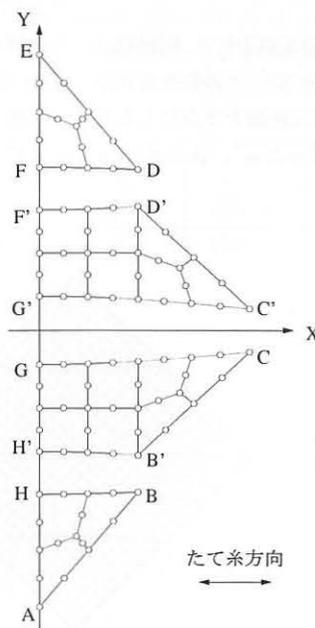


図7 施工シミュレーション用要素分割

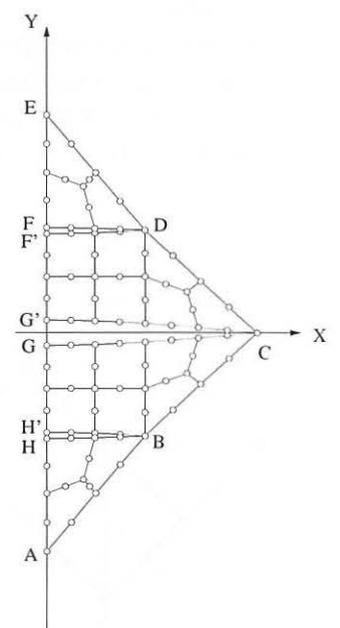


図8 平行移動した状態

(4) 外周への固定

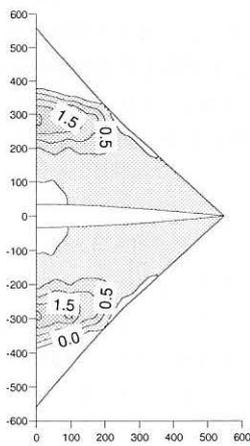
本報では問題を簡単にするために外周の節点を同時に境界形状に向けて移動させる。このとき、外周の各節点は目標とする境界線に対する垂線方向へ強制変位を与える。ただし、節点A、C、Eを除いた辺ABCDE上の節点は境界線の方に自由とするため、増分ごとに垂線を求めて増分量を決定する。境界形状に固定した後の形状と応力分布を図12に示す。たて糸方向は接合した節点と境界に固定した節点近傍で応力が高くなっているのに対して、よこ糸方向は節点A、Eの近傍を除いてほぼ均一な応力が発生している。たて糸方向、よこ糸方向ともに最大応力は節点A、E近傍でそれぞれ6.1kgf/cm、8.1kgf/cmであった。節点GのZ座標は-12.0cmであった。

(5) 外周への固定後の1週間の放置

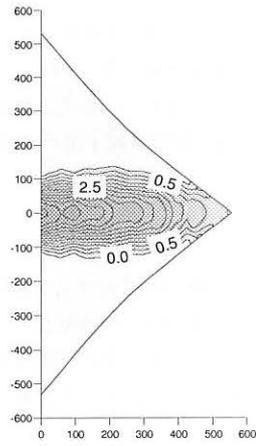
外周を固定した後に1週間放置した結果を図13に示す。たて糸方向の最大応力は節点C近傍で3.8kgf/cm、よこ糸方向は節点A、E近傍で5.0kgf/cmであり、全体的に粘性の影響により、応力が減少した。最大応力はたて糸方向、よこ糸方向ともに約63%減少した。最小応力はたて糸方向で0.8kgf/cm、よこ糸方向で1.8kgf/cmであった。既報で縮小率を決定するにあたり用いた初期張力2kgf/cmに対して、たて糸方向では40~190%、よこ糸方向では90~250%であった。節点GのZ座標は-12.3cmであり、1週間の放置による変位の増分量は鉛直下向きに0.3cmであった。

4. 結語

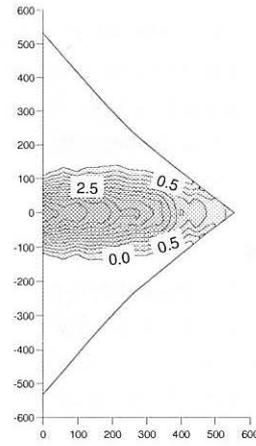
本報では形状解析や応力・変形解析に8節点アイソパラメトリック曲面要素を用いるための裁断形状決定手法を提案した。得られた裁断形状の膜を接合する手順を模擬したシミュレーションを行い、つづいて、境界形状に取り付ける施工シミュレーションを行った。シミュレーションの結果、施工が終了してから1週間後の状態で縮小率を決定するにあたり定めた初期張力2kgf/cmに対して、40~



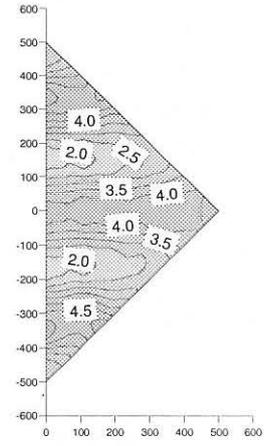
(a) たて糸方向 (kgf/cm)



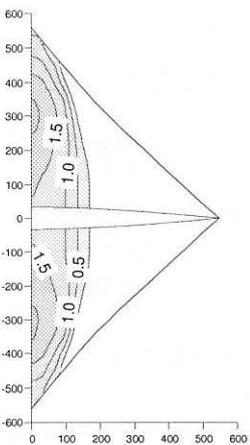
(a) たて糸方向 (kgf/cm)



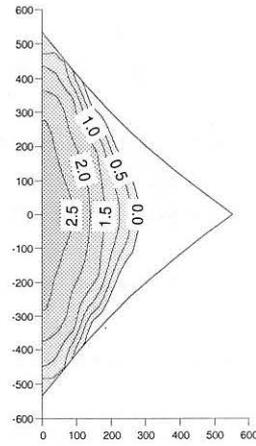
(a) たて糸方向 (kgf/cm)



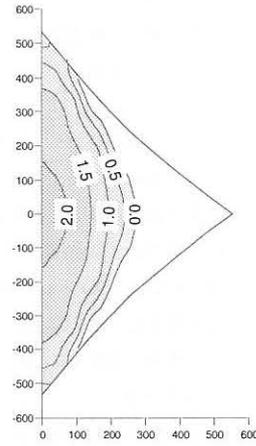
(a) たて糸方向 (kgf/cm)



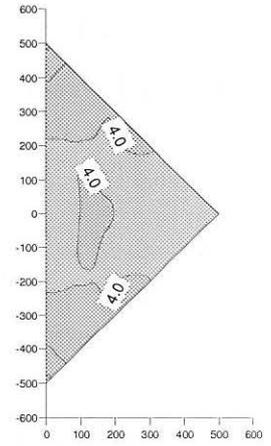
(b) よこ糸方向 (kgf/cm)



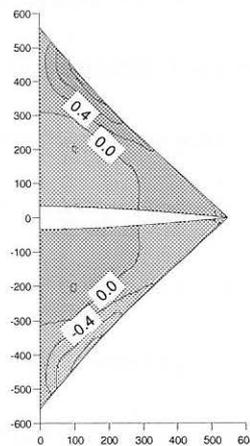
(b) よこ糸方向 (kgf/cm)



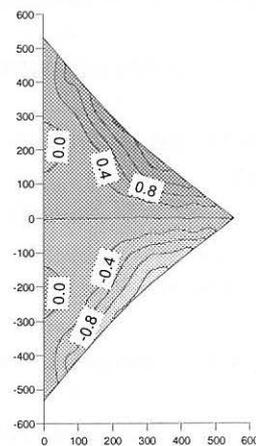
(b) よこ糸方向 (kgf/cm)



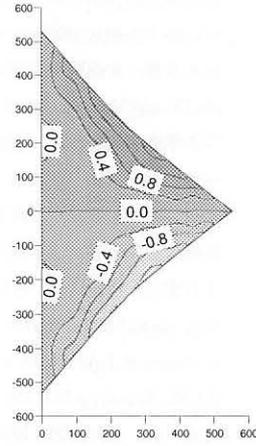
(b) よこ糸方向 (kgf/cm)



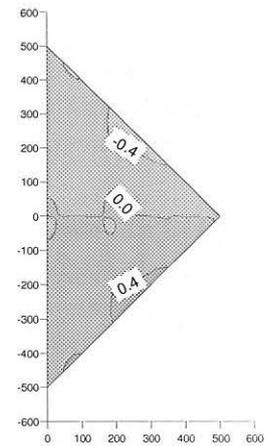
(c) せん断 (kgf/cm)



(c) せん断 (kgf/cm)



(c) せん断 (kgf/cm)



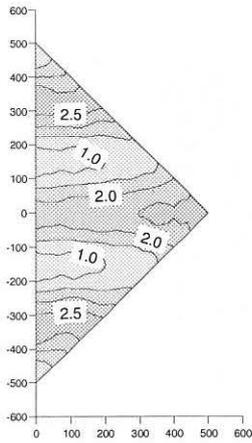
(c) せん断 (kgf/cm)

図9 2列の接合が終了した時の
応力分布

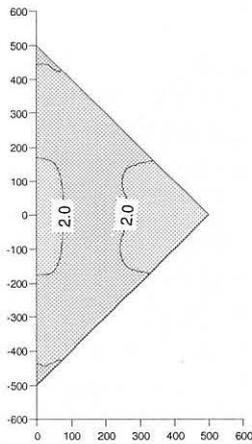
図10 全て接合が終了した時の
応力分布

図11 接合後18時間経過後の
応力分布

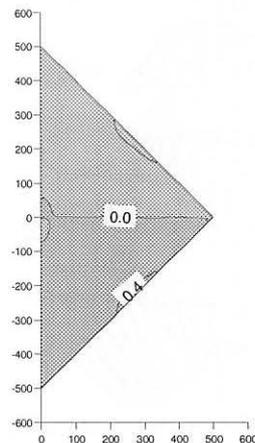
図12 外周固定後の応力分布



(a) たて糸方向 (kgf/cm)



(b) よこ糸方向 (kgf/cm)



(c) せん断 (kgf/cm)

図 12 1週間経過後の応力分布

190%, よこ糸方向では90~250%となり、既報と同様に、応力がばらつく結果を示した。問題を簡単にするため、自重を無視し、接合時に面外方向への変形を拘束した。そのために、一部大きな張力が発生し、最終的な応力分布に影響を与えたと考えられるが、その一方で、本報告で採用した裁断形状決定法では施工後の応力分布が不均一になることは明らかである。今後は自重を考慮し、面外方向への変形を許容した解析を行い、施工シミュレーション結果を踏まえた縮小率および裁断形状の決定方法の提案を行う必要があると言える。

謝辞

研究の遂行にあたり貴重な示唆を頂いた横浜国立大学名誉教授石井一夫博士に感謝いたします。

本研究は、平成9年度能村膜構造技術振興財団の研究助成(代表者:加藤史郎)を受けて実施された成果であり、かつ、豊橋技術科学大学プロジェクト研究:「構造用膜材料の弾塑性・クリープ特性に関する構成則ならびに構成則の骨組み膜構造への応用」として実施された成果である。ここに能村膜構造技術振興財団に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石井一夫: 曲面の平面への近似展開-膜構造曲面のカッティング図について-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.783-784, 昭和47年10月
- 2) 石井一夫: 空気膜構造-設計と応用-, 1977年7月
- 3) 石井一夫: 膜構造の形状解析(形状決定問題)概要, 膜構造研究論文集'89, No.3, pp.83~108, 1989年12月
- 4) 安宅信行, 小塚裕一: 離散的データで与えられた任意曲面の測地線とCUTTING PATTERNの決定法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1171-1172, 昭和60年10月
- 5) 石井一夫: 膜曲面上の測地線ケーブルネットについて, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.637-638, 昭和48年10月
- 6) 安宅信行, 小塚裕一: 膜構造における膜曲面上の測地線の決定法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.2603-2604, 昭和59年10月
- 7) 鈴木俊男: 曲面上の測地線を求める有限要素法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.1387-1388, 1993年9月
- 8) T. Suzuki: An analytical method of geodesic line in membrane structure, IASS Int. Symp., Milano, Italia, Vol.2, pp.915-922, 1995
- 9) 坪田張二, 吉田 新, 黒川泰嗣: 裁断図をもとにした膜構造物の実初期つり合い状態の解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第373号, pp.101-110, 昭和62年3月
- 10) 坪田張二, 吉田 新: 最適化手法を用いた膜構造物の裁断図解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第395号, pp.101-110, 昭和64年1月
- 11) 八木孝憲, 大森博司: 膜構造物の釣合形状と裁断形状の同時解析手法に関する研究, 膜構造研究論文集'97, No.11, pp.39~46, 1997年12月
- 12) 八木孝憲, 萩原信幸, 大森博司, 松井徹哉: 膜構造物の釣合形状と裁断形状の同時解析手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第508号, pp.71-78, 1998年6月
- 13) 大崎 純, 上谷宏二, 高谷真次: 逆問題型手法による膜構造物の目的形状・応力トレードオフ設計法, 日本建築学会構造系論文報告集, 第488号, pp.107-115, 1998年6月
- 14) 上谷宏二, 藤井英二, 大崎 純: 骨組膜構造物の初期張力場決定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.827-828, 1997年9月
- 15) K. Uetani, E. Fujii and M. Ohsaki: Initial stress field determination of membranes using optimization technique, Proc. ICCSS, Taipei, pp.301-306, 1997.1
- 16) 大崎 純, 山川 誠: 膜構造物の静的載荷時の剛性を考慮した初期応力・裁断膜形状最適化, 膜構造研究論文集'97, No.11, pp.31~38, 1997年12月
- 17) 満田衛資, 上谷宏二, 大崎 純: 設計パラメータに関する増分型摂動による骨組み膜構造物の形状設計, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.1051-1052, 1999年9月
- 18) 上谷宏二, 大崎 純, 久保田英之: 境界ケーブルを有する膜構造物の裁断設計法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.1079-1080, 2000年9月
- 19) 大崎 純, 藤原 淳: 膜材料の非線形性と異方性を考慮した膜構造物の応力・形状最適化, 膜構造研究論文

- 集'98, No.12, pp.1～9, 1998年12月
- 20) 藤原 淳, 大崎 純, 北折智規: 1次固有振動数を剛性の指標とした膜構造物の初期応力・形状設計法, 膜構造研究論文集'99, No.13, pp.15～22, 1999年12月
- 21) 藤原 淳, 大崎 純, 上谷宏二: 材料の粘弾性特性を考慮した膜構造物の初期応力決定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.1089-1090, 2000年9月
- 22) 加藤史郎, 吉野達矢, 武田文義, 小野智子: 織構造格子モデルの構成則の検証—日本膜構造協会の試験法による実験結果との比較—, 膜構造研究論文集'96, No.10, pp.1～16, 1996年12月
- 23) 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
- 24) 南 宏和, 山本千秋, 瀬川信哉, 河野義裕: 応力緩和後およびクリープ後の膜の弾性応力解析に適合する応力—ひずみ曲線の測定法, 膜構造研究論文集'97, No.11, pp.23～29, 1997年12月
- 25) 南 宏和, 山本千秋, 瀬川信哉, 河野義裕: 応力緩和後およびクリープ後の膜の材料非線形弾性解析に適用する2軸応力—ひずみ曲線の推定結果とその適合性, 膜構造研究論文集'98, No.12, pp.27～31, 1998年12月
- 26) 加藤史郎, 吉野達矢, 南 宏和: 膜の粘弾塑性を考慮した裁断形状決定, 膜構造研究論文集'99, No.13, pp.7～14, 1999年12月
- 27) 加藤史郎, 吉野達矢, 松本恵美, 武田文義: アイソパラメトリック曲面要素を用いた膜構造解析, 膜構造研究論文集'95, No.9, pp.9～21, 1995年12月

VISCO-ELASTO-PLASTIC STRESS-DISPLACEMENT ANALYSIS OF MEMBRANE STRUCTURES FOR SIMULATING CONSTRUCTION PROCESS

- Curved membrane structure -

Shiro Kato^{*1}
Tatsuya Yoshino^{*2}

SYNOPSIS

The present paper discusses a numerical analysis to be applied to simulation for introducing tensions on sites into curved membrane structures. The analysis considers, first, the process for cutting pattern depending geodesic lines, which is most important to cut the membrane fabrics at factory with a small reduction in length. This process includes two main problems; (1) developing a curved surface into many flat segments and (2) a careful consideration of a small reduction in length for the compensation of elongation by tensioning at sites. The present paper discusses this process by focusing FEM eight nodes isoparametric elements to be compatibly applied to such development and also the effects of creep and relaxation of the membranes at construction. Second, the process for sewing many membrane segments into a whole structure is analyzed based on FEM, followed by a study of the process for tensioning the finished membranes into a curved surface for connecting to outer frames. For the third process, the authors propose a new analytical method that can evaluate the visco-elasto-plastic behavior of membrane fabrics, since the elongation of fabric membranes due to creep and stress relaxation play an important role for a precise reduction ratio for cutting.

*1 Prof., Dept. of Arch. and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech., Dr. Eng.

*2 Engineering Div., Taiyo Kogyo Corporation, Dr. Eng.