

電子スペックルパターン干渉法を用いた張力膜のリンクル計測

松田 浩 *1

下郡 康二 *2

山下 務 *3

阪上 直美 *4

便 概

電子スペックルパターン干渉(E S P I) 計測法は、可視光線下で非接触かつ全視野計測が可能である。本研究ではE S P I 計測法を用いて膜材の応力・ひずみ分布を計測し、力学物性値を調べ、張力膜のリンクル現象の発生過程について考察するとともに、膜材の計測法への力学特性の適用可能性を追及したものである。

1. はじめに

膜材は張力を導入することにより、構造系を形成することができる。しかし、過剰な張力の導入はリンクル(しわ)発生の原因となる。膜面に生じたリンクルは、膜構造の力学特性に大きく影響を与えるとともに、膜構造の美観にも影響する。そのため、主に宇宙構造物や建築構造物の分野において、膜構造のリンクル発生や制御問題に関する実験的および解析的な研究がこれまで多く行われている[1]。

張力膜のリンクル発生に関する実験的研究では、膜材の変形能が大きく非線形性が強いために通常のひずみゲージによる計測は困難である。そのため、川口らはレーザ変位計を用いてリンクル形状を計測[2]するとともに、圧電ポリマーを用いた膜構造のための低剛性センサーの開発[3]を行っている。

筆者らは、これまでに三次元形状計測装置を試作開発するとともに[4][5]、膜構造のリンクル計測に適用し、非接触全視野計測が可能であること、前述のレーザ変位計による計測[2]と同程度の精度で計測できること、計測時間が所望的に短縮されることなどを確認してきた[6]。しかしながら、リンクル発生後の膜面の変形形状は計測できても、三次元形状計測装置の計測感度ではリンクル発生前のひずみ・変形状態の変化を計測するには至らなかった。

一方、筆者らは、ここ数年来、曲りかつねじれた薄肉曲面を対象として、三次元計測を実施し、三次元計測により得られる三次元座標情報

を直接コンピュータに取り込み、汎用FEMソフトを用いて振動解析を行ってきた[7][8][9]。

このようにして得られる結果は、振動実験による固有振動数とホログラフィ干渉計測の時間平均法によって得られる固有振動モードとよく一致することを確認している。ホログラフィ干渉計測では、振動モードを明瞭に可視化できる。しかしながら、ホログラフィ干渉計測は、暗室での計測が必要であること、時間平均法では写真撮影が必要でリアルタイム計測が不可能であるなどの欠点がある。

本研究では、このようなホログラフィ干渉計測の欠点を克服する方法としてスペックル干渉法に注目した。スペックル干渉法はホログラフィ干渉法と類似の干渉縞による計測技術であるが、ホログラフィ干渉計測法より光学系が簡便(レーザ光とCCDカメラで構成される)で、通常の可視光線下で計測が可能であり、さらに、リアルタイム計測が可能という特長を有する[10][11]。

本研究では、スペックル干渉法のうちの電子スペックルパターン干渉(Electronic Speckle Pattern Interferometry: 以下E S P I) 計測法を用いて、それによる非接触全視野変位計測の使用性・適用性、および計測精度等の性能調査を実施した。さらに、E S P I計測法を、材料非線形性が大きい膜材に適用し、研究用張力膜のリンクル発生過程の応力・ひずみ状態の挙動について検討した。

*1 長崎大学工学部構造工学科 教授 工博

*2 長崎大学大学院生産科学研究科 大学院生(前期課程)

*3 長崎大学工学部構造工学科 技術職員

*4 長崎大学工学部構造工学科 助手

2. 電子スペックル干渉法を用いたリンクル計測

レーザ光を対象物の粗面に照射すると、粗面の各点で乱反射した光波は像面でランダムな位相関係で重ね合わさることによってスペックルパターンと呼ばれる独特の斑点模様が生じる。

図1にスペックル干渉法の光学系を示す。いま、対象物が面内方向に u だけ変形したとすると、変形前後で二つの光路を通る光の位相差 ϕ は、レーザ光の波長を λ 、照射光の入射角を θ とすれば、式(1)で表される。

$$\phi = \frac{4\pi u}{\lambda} \sin \theta \quad (1)$$

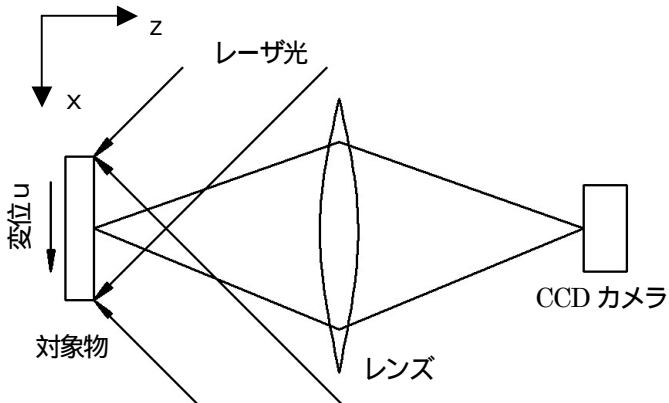


図1 スペックル干渉法の光学系

これにより、干渉計の位相差は粗面の各点により変化するので、像面には図2(a)に示すような様なスペックルパターンが生じる。物体の各点が変位すると光の位相差が生じ、対応するスペックルは明暗を変えることになる。しかし、図2(b)に示すように、肉眼で観察する限りにおいては、変形前後での明暗の変化は認めがたく、模様全体は同じように見える。ところが、この場合に位相差の変化量が波長の整数倍なら、スペックルの明暗は元にとどまる一方、変化量が波長の半整数倍の位置では反転する。CCDカメラと画像メモリーを用いて変形前のスペックル像と変形後のスペックル像の各点の光の強度を256階調に分解し、その差を2乗してモニターに表示すると、図2(c)に示すような変位量の等高線を表す縞模様を得ることができる。この縞模様がスペックル干渉縞である。図3は、この時の位相の分布を示しており、 $0 \sim 2\pi$ の位相値を8ビットのグレースケールで表したものである。縞は位相差 2π の間隔で形成されており、次式(2)により縞一本の形成に必要とされる変位 u を求めることができる。

$$u = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (2)$$

このとき観測される縞模様の分布は次式(3)で与えられ、右辺の第3項が干渉縞をつくり出す。すなわち、明暗の変化のない位置では暗く、変化した位置では明るい縞模様が見られる。この方法を電子スペックルパターン干渉法 (Electronic speckle pattern interferometry: ESPI) と呼ぶ。

$$V_S = [(I_{S1} - I_{S2})^2] \\ = (I_{S1})^2 + (I_{S2})^2 - 2(I_{S1}I_{S2}) \quad (3)$$

本研究では、干渉計に ETTEMEYER 社製 (独) のレーザストレイナナライザ 2D-ESPI (図4) を使用した。レーザ光には波長が 780nm (580mW $\times 2$) のダイオードレーザを用いており、計測レンズは 1~20 μm (それ以上は分割し、重ね合わせるにより計測) となる。スペックル干渉法による面内変位計測は、基本的にレーザ照射方向の変位分布のみしか求めることができない。そのため、本 ESPI 装置ではレーザを x 軸方向と y 軸方向のそれぞれ 2 方向から照射できるように配置してある。スペックルパターンを 2 方向個々に計測することにより面内変位分布の計測が可能となる。

ESPI 計測により、まず、図5に示すような 1 ピクセルごとの変位が求まる。各点の変位が求まると、変形する物体の一般的なひずみと変位の関係式により、図6に示すようなひずみ値 (ひずみ分布) を求めることができる。さらに、計測データはデジタルデータであるので、図5をもとに、図7に示すように等高線表示したり、応力状態をベクトル表示することも容易にできる。なお、応力値は計測対象物の弾性係数やポアソン比を入力することにより求められる。

現在までに、この ESPI 計測の構造部材に対する適用性の検討を行っている。図8は、アルミ合金を用いて引張り試験を行い、ESPI とひずみゲージの精度の比較を行った結果を示したものである。弾性域において ESPI によって得られた値はひずみゲージによって得られたそれとほぼ一致する結果となった。塑性域においては一部にひずみの値が異なる部分が見られる。しかし、その差はわずかであり、破壊に至るまでの荷重 - ひずみの関係はひずみゲージの値と概ね一致していると考えられる。

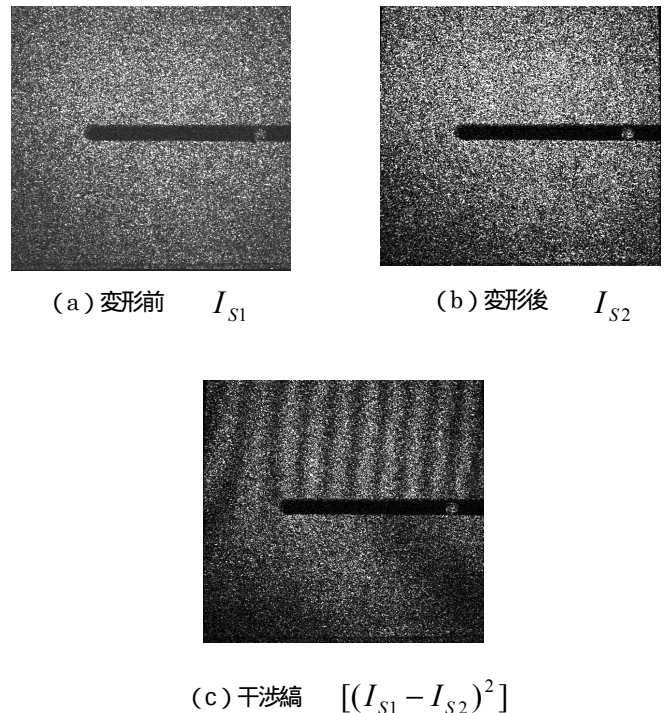


図2 干渉縞の形成

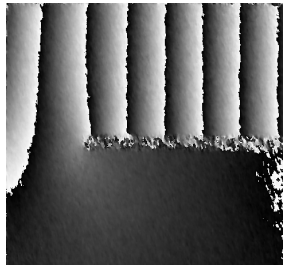


図3 位相分布図

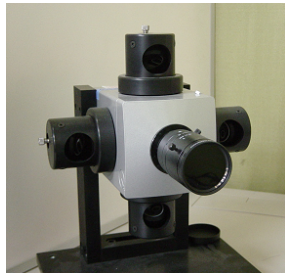


図4 スペックル干渉計

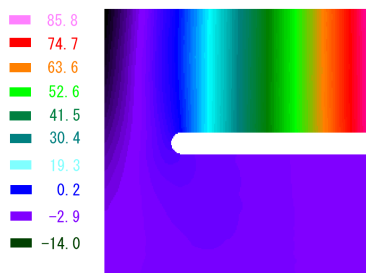


図5 y 方向変位分布 (μm)

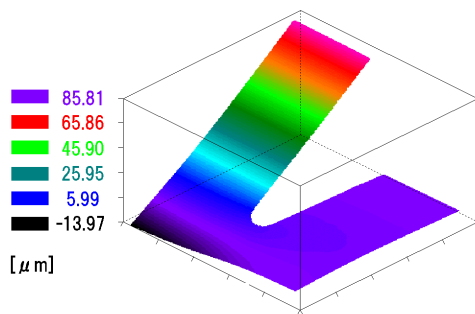


図6 等高線表示

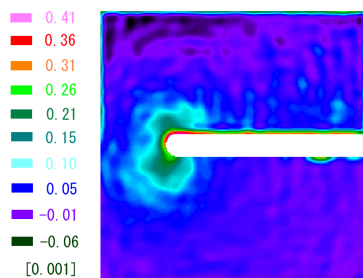


図7 最大主ひずみ分布

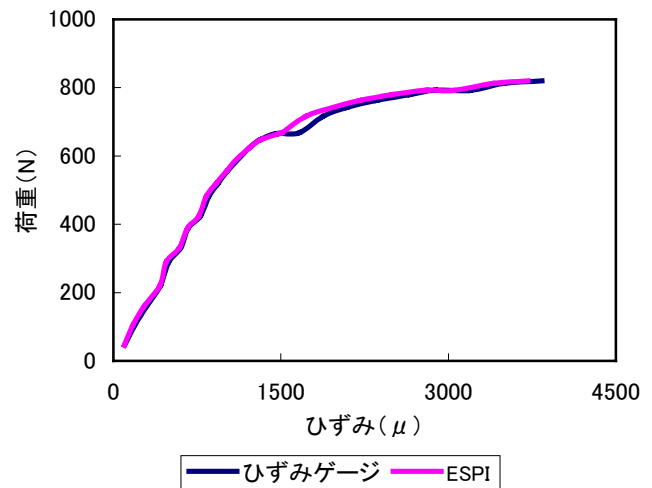


図8 荷重 - ひずみ曲線

3. 膜材に対するESPI計測の適用性の検討

3.1 実験概要

本実験ではESPI計測の膜材への適用性を確認するため、ひずみ値およびひずみ分布の照査を行った。試験片は厚さ $50\mu\text{m}$ のポリエステルフィルム(ルミラ-)を用いた。その材料特性は、弾性係数 4GPa 、ポアソン比 0.3 である。

実験方法としてはアスペクト比 $1:2$ ($150\text{mm} \times 300\text{mm}$)の試験片A、および図9に示すように小さい円孔を有する試験片Bを作製し、単軸引張り試験を行った。

ひずみ値の精度の確認を行うため、試験片Aは理論値と比較した。理論値は膜材の伸び量を用いて算出したひずみ値である。さらに、分布状態の精度を確認するため、試験片Bに対してはFEM解析を行い、その結果と比較している。

計測風景を図10に示す。ESPI計測は微小変形を計測できる反面、振動などの外乱の影響を受けやすい。そのため、試験片とCCDカメラの相対変位を除去するための特別な治具を使用した。また、対象物の計測範囲は平面である必要がある。そのために、膜材の表面にはレーザ光の乱反射を助長するように浸透探傷試験などに用いられる現像剤を塗布した。

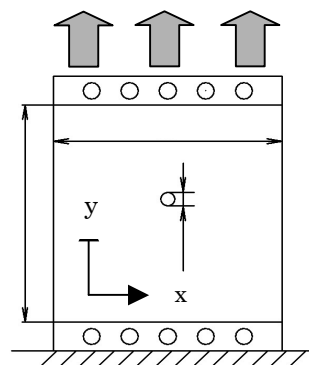


図9 試験片B (mm)

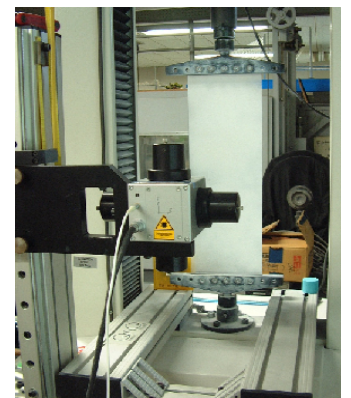


図10 計測風景

3.2 実験結果

膜材のひずみをESPI装置を用いて測定するにあたって実験値と理論値を比較することによりその有用性を確認する。図11に弾性域内の実験値と理論値の荷重 - ひずみ曲線を示す。図より多少の誤差はあるもののほぼ一致した結果が得られている。

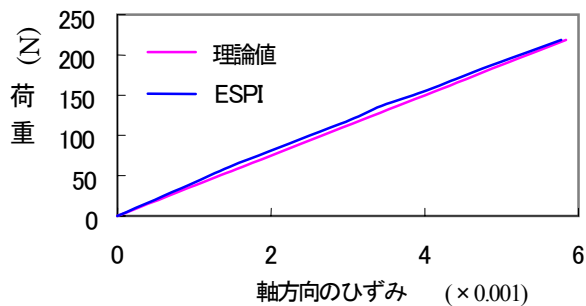


図11 荷重 - ひずみ曲線

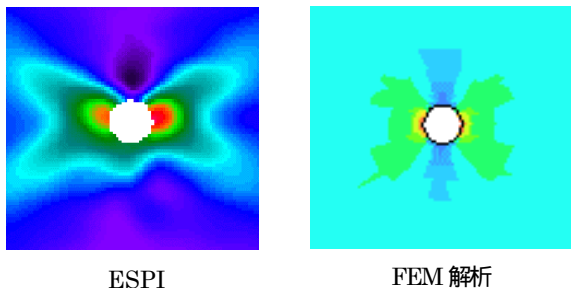


図12 最大主ひずみ分布図

図12に試験片Bの単軸引張り試験を行った際の最大主ひずみ分布図を示す。同図よりESPIもFEM解析において、円孔周辺に同様なひずみ集中の分布を見ることができた。

以上のことより、ESPI計測は膜材のような変形能の高い材料でも使用可能であると考えられる。

4. 張力膜のリンクル計測

4.1 実験概要

本実験では、膜面に発生するリンクル現象のひずみ、応力の挙動をESPIを用いて計測することを目的とし、膜材の単軸引張り試験を行った。

前節3.で用いた厚さ50 μ mのポリエステルフィルム(ルミラ-)をここでも使用し、アスペクト比の異なる試験片C、D、Eを作製した。表1にその概要を示す。試験片は図9に示すように、ボルトにより固定した。また、前節3.と同様に膜材にはESPI計測のために、現像剤を塗布した。なお、現像剤の有無によるリンクル現象に対する影響を検討するため、現像剤を塗布した試験片としない試験片で予備試験を行ったが、リンクル発生荷重の相違はほとんど見られなかった。

表1 試験片概要

試験片	アスペクト比	寸法 (mm)
C	1 : 2	150 × 300
D	1 : 3	150 × 450
E	1 : 1	150 × 150

4.2 実験結果

試験片Cに生じたリンクル現象を図13示す。計測範囲は、図14に示す150mm × 200mmの領域とした。計測により得られた荷重 - ひずみ曲線を図15に示す。なお、主ひずみ、せん断ひずみは、図14に示す斜線部の領域の平均値を用いた。

本実験において、試験片Cのリンクル現象を目視で発見できた荷重が約310Nであった。これを踏まえて図15を観察すると、荷重 - 最小主ひずみ図において約310N直前にひずみが急変している特異な現象を確認できる。そこで、最小主ひずみに注目して、試験片D、Eでも同様な荷重 - ひずみ曲線を図16に示した。また、表2に試験片C、D、Eのリンクル発生荷重およびリンクル発生を目視確認の有無を示す。



図13 リンクル現象

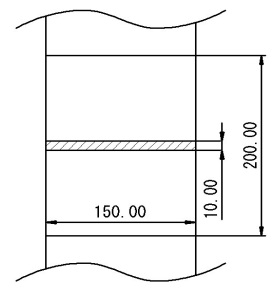


図14 試験片モデル (mm)

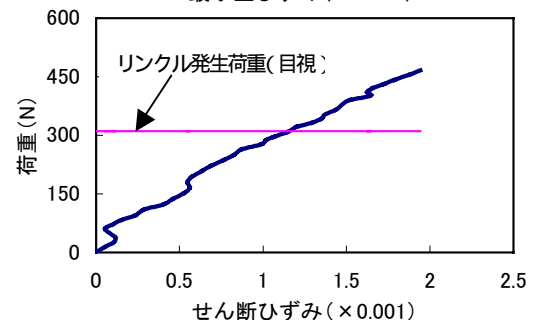
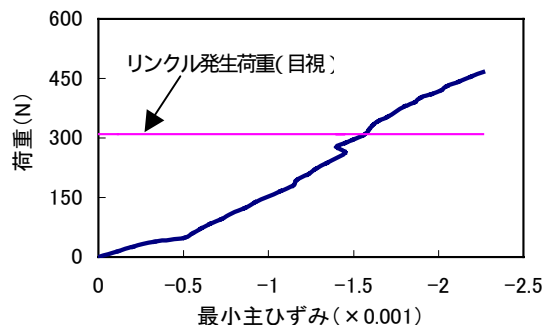
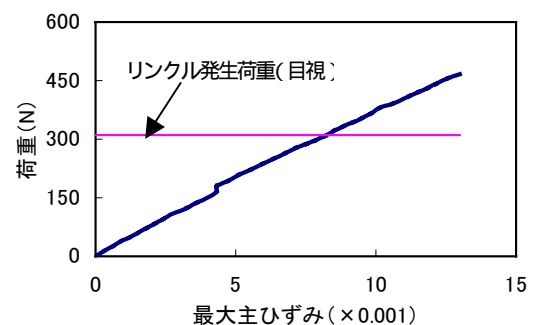
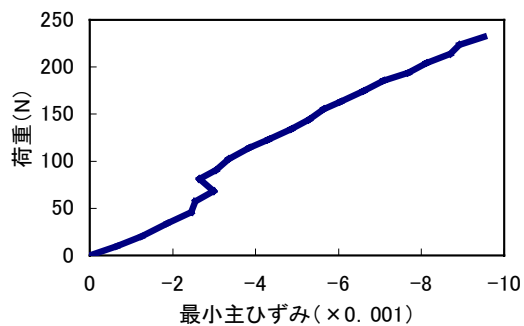


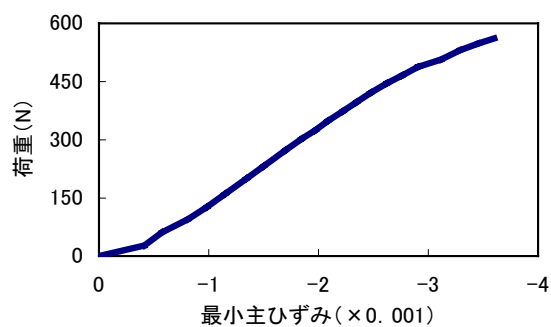
図15 荷重 - ひずみ曲線

表2 リンクル発生状態

試験片	リンクル発生荷重	リンクル発生
C	約310N	○
D	約130N	○
E	-	×



(i) 試験片D



() 試験片E

図16 荷重 - 最小主ひずみ曲線

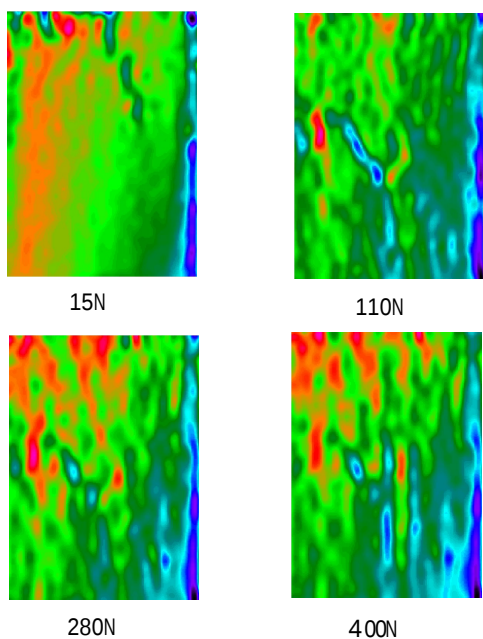


図17 最小主ひずみ分布 (試験片C)

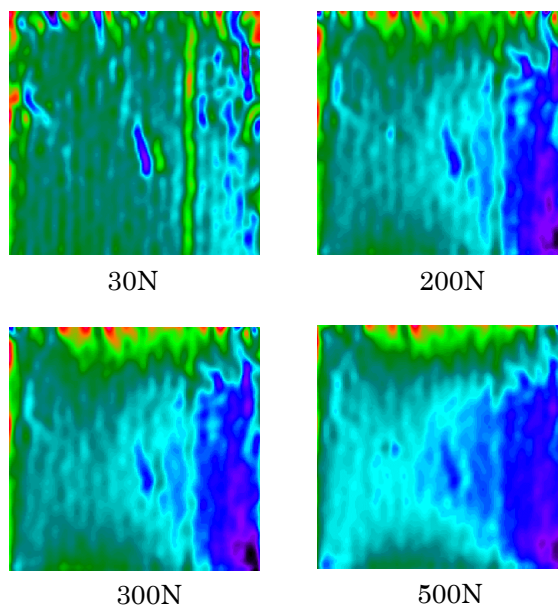


図18 最小主ひずみ分布 (試験片E)

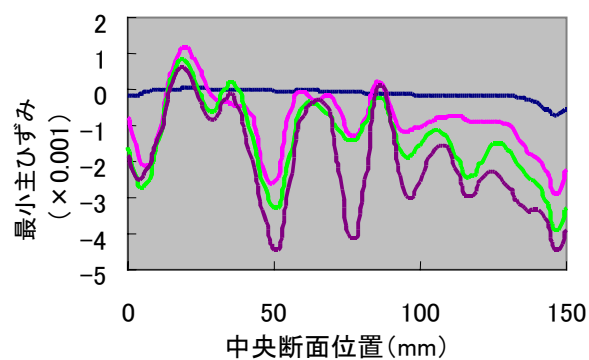


図19 中央断面におけるひずみ分布 (試験片C)

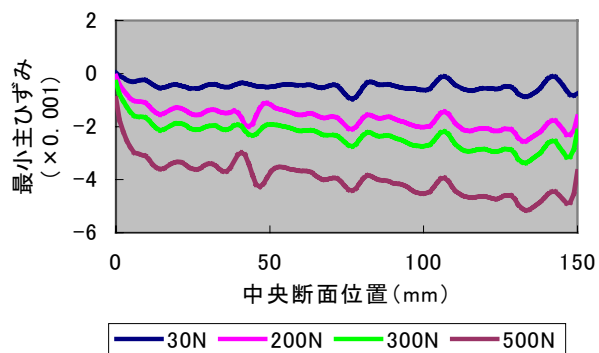


図20 中央断面におけるひずみ分布 (試験片E)

試験片Dは試験片Cと同様に目視により得られたリンクル発生荷重より前にひずみの緩和が発生していた。また、試験片Eでは、最小主ひずみのひずみ緩和は発生せず、それにより目視でもリンクル発生を確認することができなかった。

これより、以上のような初期条件での矩形張力膜の単軸引張り試験において、最小主ひずみがもたらすひずみの緩和はリンクル発生に依存するものと考えられる。また、この条件下でのリンクル現象と最小主ひずみの関係性を確認できたため、次にリンクル発生過程における膜面全体のひずみの挙動を把握するため、リンクルが発生した試験片Cと発生しなかった試験片Eの最小主ひずみ分布を図17および図18に示す。

さらに、試験片C、試験片Dのリンクル発生過程における中央断面での最小主ひずみの分布図を図19および図20に示す。

図17より、試験片Cでは荷重が増加するにつれて、リンクルが発生していた箇所にひずみが局在化していることがわかる。リンクルが目視により確認できた約310N以前でも、リンクル発生の兆候を観察することができ、図19でもそのことを確認することができる。

また、リンクルの発生しなかった試験片Eでは試験片Cとは異なり、荷重が増加しても大きな変化はみられなかった。図20でも、全体的にひずみが増加していくものの、試験片Cのようにある一点においてひずみが集中しているような箇所は確認できなかった。

これらの結果より、本研究で用いた条件下において、最小主ひずみ分布はリンクル発生箇所予測の可能性があるものと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 矩形張力膜のリンクル計測では、E S P I計測による荷重 - 最小主ひずみ曲線におけるひずみ緩和点をリンクル発生荷重として捉えることができる。
- 2) E S P I計測による全視野最小主ひずみ分布図より、リンクル発生箇所の予測が可能である。

6. あとがき

今後の予定として、E S P I計測と非接触三次元形状計測を併用し、様々な膜構造のリンクル現象の実験を行なうとともに、非線形FEMを用いて張力場理論や分岐理論などの解析的な面からも検討する予定である。

なお、本研究は文部科学省科学研究補助金、基盤研究(B)(2)(課

題番号:14350246、研究代表者:松田浩)及び萌芽研究(課題番号:16656138、研究代表者:松田浩)の補助により行なわれたことを付記し、ここに謝意を表します。

[参 考 文 献]

- [1] 岩佐貴史, 名取通弘, 樋口健: リンクル解析における分岐座屈理論と張力場理論の比較検討, 構造工学論文集, Vol.49B, 2003
- [2] 呂品琦, 川口健一: 平面矩形張力膜のしわ発生に関する実験的研究, 膜構造研究論文集, No.13, pp.49-55, 1999
- [3] 榎本信隆, 川口健一: 圧電ポリマーを用いた膜構造のための低剛性センサーの開発に関する基礎的研究, 生産研究, 第52巻4号, pp.19-22, 2000
- [4] 杉原太郎, 森山雅雄, 松田浩: 小規模三次元計測システムの開発, 日本写真測量学会平成11年度年次講演会発表論文集 pp.59-62, 1998
- [5] 和田眞禎, 森山雅雄, 松田浩, 杉原太郎: レーザ光を用いた三次元画像計測システムの開発, 日本写真測量学会平成11年度年次講演会発表論文集, pp.297-298, 1999
- [6] 松田浩, 仲村政彦, 山本晃, 和田眞禎, 川口健一, 呂品琦: 非接触型3D計測装置を用いた膜形状の計測, 膜構造研究論文集'2000, No.14, pp.47-56, 2000年12月
- [7] 松田浩, 小嶋悟, 和田眞禎, 古賀掲維, 仲村政彦ほか: 膜・シェル構造解析のための3D計測+FEM解析システムの開発, 鋼構造年次論文集, Vol.8, pp.595-602, 2000
- [8] 松田浩, 大石裕介, 神原天鳴: ホログラフィ干渉計測及び三次元計測に基づくFEM解析に薄肉板の振動解析 日本実験力学会講演論文集, No.2, pp.217-222, 2002
- [9] 松田浩, 大石裕介, 神原天鳴, 仲村政彦, 崎山毅: ホログラフィ干渉計測および3次元計測およびによる薄肉構造部材の非破壊検査に関する研究 応用力学論文集, Vol.5, pp.847-854, 2002
- [10] 松田浩, 神原天鳴, 才本明秀, 阪上直美, 山下務, 崎山毅: スペックル干渉による非接触全視野ひずみ計測法, 応用力学論文集, Vol.6, pp.1081-1088, 土木学会, 2003
- [11] 松田浩, 神原天鳴, 下郡康二, 崎山毅, 阪上直美: スペックル干渉法による鋼部材の非接触全視野ひずみ計測, 鋼構造年次論文報告集, Vol.11, pp.519-524, (社)日本鋼構造協会, 2003

Wrinkling measurement of a rectangular tensioned membrane using electronic speckle pattern interferometry

Hiroshi Matsuda *1
Koji Shimogoori *2
Tsutomu Yamashita *3
Naomi Sakaue *4

SYNOPSIS

Tensioned membrane structures have so small flexural stiffness that they can not transmit compression stress. The wrinkling of membrane becomes a common problem. The increasing demand for better characterization of materials and components in many cases requires whole- field information for the analysis of the mechanical behavior in wrinkling generation process. Electronic speckle pattern interferometry (ESPI) offers the possibility of whole-field and non contact measurement of displacements and strains. In this paper, ESPI is applied to observe a wrinkling generation process of tensile tests of the rectangular membrane structures. It is found from the experimental test results that a wrinkling occurs at an inflection point of the load - minimum principal strain.

-
- *1 Dr.-Eng Professor, Department of Structural Engineering, Nagasaki University
 - *2 Graduate Student, Nagasaki University
 - *3 Technical Staff, Department of Structural Engineering, Nagasaki University
 - *4 Research Associate, Department of Structural Engineering, Nagasaki University