薄膜のしわの解析モデルの検証について

A study on verification of Mathematical Model of Wrinkle of Thin Membrane

○屋宮拓海 (日大・院)

井上祥子 (日大・院)

宮崎康行 (日大)

Takumi Okumiya, Nihon University

Shoko Inoue, Nihon University

Yasuyuki Miyazaki, Nihon University

Key Words: <Thin-Membrane, Wrinkling>

論文要旨

This paper investigates Young's modulus and the stress-strain relation of a membrane with tensile test. A numerical study was carried out using the commercial finite element software ABAQUS to understand the effect of Young's modulus and the stress-strain relation on the deformation of a rectangular membrane under simple shear. The elastic region in the stress-strain curve is determined by comparing the tensile test result and the nonlinear finite element analysis result, which is applied to the simple shear problem and the effect of the plastic deformation is evaluated.

1. はじめに

人工衛星・探査機の開発において、高速通信や深宇宙探査などに有用である大型アンテナやソーラーセイルなどの大型宇宙構造物の研究・開発が盛んに行われている。このような大型宇宙構造物を実現するため、超軽量・高収納な展開構造物として、薄膜構造物、インフレータブル構造物などの柔軟構造物が注目されている。1996年のNASAインフレータブルアンテナ展開実験機Spartan-207 (Fig.1)の打上げや、2010年のISAS/JAXA小型ソーラーセイル実証機IKAROS (Fig.2)の打上げなど、実用化に向けて宇宙実証が進められている。実証に向けて設計段階で展開構造物の挙動や特性をあらかじめ予測することが必要であるが、柔軟構造物はその軽さ、柔軟さ故に地上実験では重力、空気抵抗の影響を大きく受けてしまい、それらの影響が非常に少ない宇宙空間での展開挙動、展開後形状やその特性を模擬することは困難となる。そこで、これらを数値計算により予測する事が必須である。

Fig.1 Spartan-207

Fig.2 IKAROS

薄膜構造物に発生するしわを予測する数値計算手法には大別して2つの有限要素法が用いられている。1つ目がシェル要素を用いたもので、しわの数や波長など詳細な形状を得てしわの詳細な形状の検証を行う事に用いるが、計算コストが大きく実用的な大きさ・複雑さの構造物の解析や動解析には現在までのところ、あまり用いられていない。2つ目は膜要素を用いたもので、曲げ応力を無視し平面応力場を仮定した要素である。このモデルは計算コストが低いので、IKAROS

の展開シミュレーション^[1]をはじめ、実用的な大きさ・複雑さの薄膜構造物の解析に用いられている。しかしこのモデルではしわの3次元形状を得ることができない。著者らはこれまで膜要素を用いた解析でしわの発生する領域・強さを表現できる手法を提案してきた^{[2][4]}。さらに膜面に強制変位を与えてしわ形状を計測する実験を行い、解析結果の妥当性評価を試みてきた。初期値しかし実験にて膜面にかかる荷重を計測したところ、数値計算結果よりも40%程度小さい値を示していることが分かった。解析と実験で荷重値が一致しない原因として以下の2つが考えられる。

- ① 実験にて膜面を治具に固定している部分の接着の問題で、完全に膜が固定されておらず荷重の減少を招いている。
- ② 解析では膜面モデルに完全な弾性理論を用いているが、実際には塑性変形を起こし解析よりも小さい荷重の値をとっている。

本研究は②の可能性を検証する事を目的としたものである。この検証を行うにあたり、膜材の引張試験を行い、膜材の物性値を得た。そして、この得られた物性値が妥当であるかどうかを確かめるために、構造解析に広く用いられている汎用非線形有限要素解析プログラムABAQUSを用い、引張試験と矩形膜のせん断実験のシミュレーションを行った。引張試験のシミュレーションでは、シミュレーションにより得られた応力-歪線図と、実験で得られた応力-歪線図とを比較し弾性限界値を調べた。そして、せん断実験で与えたせん断量が弾性域の範囲内であることを確認し、せん断実験のシミュレーションが実験に近い結果になることを示し、従来の膜面モデルの解析に用いてきた物性値と実際に計測した膜材の物性値との相違がシミュレーション結果にどの程度影響するのか調べた。

2. 引張試験

2-1 実験概要

本試験の目的は、研究に用いているポリイミド膜の引張試験を行い、ヤング率、弾性限界の値を得ることである。さらに、現在の解析モデルに用いている諸物性値が妥当であるか検証する。

2-2 実験装置及び手順

試験のモデルにはJIS K7127 試験片タイプ5のダンベル型、試験片の全長115mm、平衡部の長さ33mm、平衡部の幅6mm、標点間距離25mm、厚み12.5 μ mのポリイミド膜を使用

した。引張試験機は INSTRON 5582 を使い引張速度 50mm/min で試験を行った。データログ・マシン制御ソフトは Blue Hill3 を使用した。試料の平行部に 2 点の標点を打ち、ビデオ伸び計で歪を計測した。実験は常温の他に $\pm 80^{\circ}\text{C}$ でも行った。これは宇宙空間での温度を模擬した物性値を得ることが今後の解析に関する様々な研究に対して有用であると考えたためである。試験は各温度で 3 回ずつ、合計 9 回行った。

Fig.3 試験モデル (JIS_K7127 試験片タイプ 5)

2-2 測定結果

測定によって得られた SS 線図を Fig. 4~6 に、破断後の試験片の外観を Fig.7 に、引張試験中の試験片の外観を Fig.8 に示す。

Fig.4 応力-歪線図(常温)

Fig.5 応力-歪線図(80°C)

Fig.6 応力-歪線図(-80°C)

Fig.7 破断後の試験片の外観

Fig.4~6 より、温度が高くなるほど柔らかく伸びやすい傾向が見られ、一般に予想される通り、温度が低くなるほど硬く伸びにくいという性質を確認した。また、Fig.3 と Fig.7 を比較するとポアソン効果が見られることが分かる。破断時の幅は平均して 3.8mm だったので、収縮率は 36% だった。

次に、Table.1 に Blue Hill3 によって計算された各サンプルにおけるヤング率を示す。

Table.1 各サンプルにおけるヤング率

温度[°C]	サンプル番号	ヤング率[Gpa]
80	1	3.15
	2	3.38
	3	3.65
常温	1	4.06
	2	4.44
	3	3.94
-80	1	4.19
	2	4.10
	3	4.00

2-3 節より、常温 2 回目の試験結果について、詳細な検討を述べる。

2-3 真応力-真歪線図

引張試験によって得られた公称応力-歪線図に表わされる物性を ABAQUS に反映させて解析を行うためには、真応力-塑性歪線図を求める必要がある。ここでは常温で最も平均的な値だった 2 回目の試験結果から計算した真応力-真塑性歪線図を Fig.8 に示す。ポアソン効果が見られたことから体積一定で変形しようとする性質があると考えたため、真応力の導出には以下の式を用いた。

$$\sigma_{true} = \sigma_{normal} (1 + \epsilon_{normal}) \quad (1)$$

ここで σ_{true} は真応力、 σ_{normal} は公称応力、 ϵ_{normal} は公称歪である。また、塑性歪を導出する。真全歪は、公称歪を以下のように表すことで求めることができる。

$$\epsilon_{normal} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (2)$$

式(2)の両辺に 1 を加え、両辺の自然対数をとることにより、真歪と公称歪の関係が得られる。

$$\epsilon' = \ln(1 + \epsilon_{normal}) \quad (3)$$

塑性歪は、全歪の値から弾性歪を引くことで求められる。なお、弾性歪は、真応力をヤング率で割ることで求められる。

$$\epsilon^{pl} = \epsilon' - \epsilon^{el} = \epsilon' - \sigma_{normal} / E \quad (4)$$

以上、式(2)~(4)より塑性歪が求められた。ここで、 ϵ^{pl} は真塑性歪、 ϵ^{el} は真弾性歪、 ϵ' は真全歪、 E はヤング率である。変形が大きくなるほど真応力の値は体積一定の条件だけでは正確な値から大きくずれていくと考えられるが、どれほどの変形までは式(1)のみの条件で再現できるのかを調べるために以下の手順で検証する。

1. 真応力-真塑性歪線図を用いた ABAQUS の計算モデルにて引張試験と同様の膜面形状と荷重条件で変形解析を行う。
2. 1 の結果より、実際の引張試験と同様の方法で公称応力-歪線図を得てこれを実際の引張試験結果の公称応力-歪

線図と比較する。

3. これらの線図が一致する領域までは真応力の導出の方法、即ち式(1)を用いた方法が適切であったと判断する。さらに、真応力-真歪と公称応力-歪線図が一致する領域を弾性域とする。

ただし、この弾性域が上記の手順で求める体積一定の条件のみで再現できる領域内に入っている事を次の3章にて述べる。

2-4 数値解析

ABAQUS での引張試験の解析方法を解説する。Fig.9 に、引張試験に使用した解析モデルを示す。

要素は四節点シェル要素 S4R5 を使い、要素数 2234 節点数 2366 とした。要素分割の都合上、一部 S3 要素を用いた。

Fig.8 応力-歪線図

Fig.9 引張試験モデル

引張試験を模擬した解析を行い、得られた応力-歪関係を Fig.10 に示す。2-3 節に示した手順にて体積一定の条件だけで再現できる真応力-真歪の領域を検証したところ、Fig.10 より歪 0.8%未満の領域ではABAQUSの解析結果と実験で得られた公称応力-歪線図が一致するので、歪 0.8%未満の領域までは式(1)が成り立つ弾性域と分かった。

Fig.10 応力-歪線図

3. 膜面のせん断実験

3-1 実験モデル

得られた物性値が妥当なものなのか検証するため、膜面のせん断実験結果と得られた物性値を用いたシミュレーション結果の検証を行った。

実験に用いた矩形せん断モデルの詳細及び、モデルパラメータを示す。膜面は2つの治具により固定され、Fig.11 の上方に設置されているXYステージにより片方の固定端を強制変位させることで、膜面にしわを発生させている。膜面に発生したしわは、CCD レーザ変位計により計測する。CCD レーザ変位計は、0.1[μm]の分解能で計測可能である。

Fig.11 矩形せん断モデル

Table.2 矩形せん断モデルパラメータ

膜幅	L	300[mm]	変位量(せん断)	δu	3[mm]
膜高さ	H	100[mm]	変位量(圧縮)	δv	0.1[mm]
膜厚	t	12.5[μm]	ポアソン比	ν	0.3

3-2 せん断量と弾性域

せん断量が弾性域の中に入っているか調べる。Fig.12 のような矩形膜の角度 θ の線 AB が δ だけ、せん断変形し、変形後には Fig.13 の AB' になったとする。このとき、この線の伸び歪は次の様になる。

$$\begin{aligned}\epsilon &= \frac{\sqrt{H^2 + (H/\tan\theta + \delta)^2} - (H/\sin\theta)}{H/\sin\theta} \\ &= \sqrt{1 + \frac{2\sin\theta\cos\theta}{H}\delta} - 1 \\ &\approx \frac{\delta}{H}\sin\theta\cos\theta\end{aligned}\quad (5)$$

Fig.12 せん断変形前

Fig.13 せん断変形後

式(5)において、 θ と H を定める事により伸び歪 ϵ とせん断変位量 δ の関係が得られる。本研究に用いている膜面の形状モデルについて、2-3 節で求められた弾性限界の歪の 0.8%の時の δ は 1.6mm となる。従って 1.6mm 未満のせん断変形は弾性変形であると言える。但し θ は 45° としている。

3-3 数値解析

弾性変形内の膜面のせん断変位の実験の解析を ABAQUS で行った。要素は四節点シェル要素 S4R5 を用い、要素数 7500、節点数 7701 とした。解析は、最初に $-\delta v$ 方向に 0.1[mm] たるませて、そこから $-\delta u$ 方向に 1[mm] せん断した。重力を考慮した。ヤング率は、引張試験で得られた 4.15[GPa] を使用した。

3-4 解析結果

Fig.12 に ABAQUS でしの解析結果を示す。

Fig.13 ABAQUS の解析結果

青色の部分が Z 軸の負の方向の変位であり、赤色の部分が Z 軸に正の方向の変位である。左上と右下の部分がたるんでおり、一番自由端に近い所にできるしわの変位が大きいことがわかる。

Fig.14 に実験結果と ABAQUS による解析結果の中央断面でのしわ形状の比較したものを示す。

Fig.14 中央断面のしわ波形

Fig.14 を定性的にみると、自由端に近づくにつれ、しわの高さが小さく傾向が解析できている。

Fig.13 と 14 より、解析におけるしわの発生状況が、実験におけるしわの発生状況の傾向に、よく一致していることがわかる。

次に、物性値の違いが、膜面のせん断実験に与える影響について調べるために、従来用いていたヤング率と実験から得られたヤング率を用いた弾性解析と、実験から得られた塑性を考慮した弾塑性解析を行った。そして、3-2 節で確かめたせん断変形の領域が弾性域なのかを確かめた。

Fig.15 中央断面のしわ波形

Fig.15 より弾性解析と弾塑性解析では、ほぼ一致したしわの断面形状となっていることから、せん断量 1[mm] は塑性変形の入っていない領域である事が確認された。1 章に示した本研究の目的に対して、実験にて得られた荷重が解析より得られた荷重より小さい値をとる原因として塑性変形の可能性を除去する事ができるという結論が得られた。

4. おわりに

本研究では、膜材の引張試験結果をそれに対応した非線形有限要素解析結果から公称応力-公称歪関係における弾性領域を判定する方法を示した。そして、これを膜面のせん断実験に適用することで、塑性変形の影響を評価した。これまで、実験と FEM とで膜面にかかる荷重が大きく異なる原因の 1 つとして塑性変形の影響を考えていたが、今回の解析の結果、その影響はないとの結論を得た。今後は、時間が経つと応力が減少する現象も含め、固定方法の影響について調べ、膜面の固定方法の改善を行っていきたい。

なお、本研究の一部は文科省科研費・基盤研究(B)22360357 の支援によるものである。

- [1] Miyazaki, Y., et. al., "Conserving Finite Element Dynamics of Gossamer Structure and Its Application to Spinning Solar Sail "IKAROS"", 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA-2011-2181, 2011, 1-17, Denver, CO.
- [2] Iwasa, T., Natori, M.C., and Higuchi, K., "Evaluation of Tension Field Theory for Wrinkling Analysis With Respect to the Post-Buckling Study", Journal of Applied Mechanics, Vol.71, 2004, pp.532-540.
- [3] Miyazaki, Y., "Wrinkle/slack model and finite element dynamics of membrane", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.66, No.7, May 2006, pp.1179-1209.
- [4] Miyazaki, Y. and Arita, K., "Simplified Model of Membrane for Wrinkle Analysis of Gossamer Structure", 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA2008-2134, 7-10 April 2008. Schaumburg, IL.