

エラスティカを利用した膜曲面形成手法の提案  
(その2) 複合材のエラスティカ現象について

Proposal of the Form Constitution Method for the Membrane using Elastica  
(Part 2) Elastica behaviour of the composite members

○櫻井陽子<sup>1</sup>, 黒木二三夫<sup>2</sup>, 中西三和<sup>3</sup>, 安達洋<sup>3</sup>, 北嶋圭二<sup>3</sup>

\*Youko Sakurai<sup>1</sup>, Fumio Kuroki<sup>2</sup>, Mitsukazu Nakanishi<sup>3</sup>, Hiromi Adachi<sup>3</sup>, Kitajima keiji<sup>3</sup>

Abstract: It is the 1st purpose to make a dome-like membrane form by tension introduction to the membrane using pre-bending by Elastica. It is the 2nd purpose to build the Ice dome made by water's spraying on this membrane and freezing it. The Elastica characteristics of the component which connected several members was verified. The soft rope made of rubber which introduced tension is inserted in the member. The result whose arch form by Elastica is almost the same in an experiment and analysis was obtained.

1.はじめに

膜構造建築に使用される膜材は剛性が低く、安定性の観点から張力導入が不可欠で、構造システムや建設方法の違いにより、種々の張力導入方法が採用されている。著者らは、昨年、単一材のエラスティカによるプリベンディングを利用した手法の妥当性に言及し、膜面への張力導入が可能であることを確認した<sup>1) 2)</sup>。本研究では、この張力導入方法を利用してドーム状の膜構造を形成することが第1の目的であり、更に、このドーム状膜形態を下地材あるいは構造材として、氷点下の環境で、この膜面上に水の噴霧あるいは雪を堆積させることにより凍らせて出来る、アイスドームを形成することが第2の目的である<sup>3)</sup>。

2.膜構造によるドーム形状の形成手法

膜面形成の容易さ、形状のシンプルさから半球状のドームを対象とした(Fig.1)。ドーム形状を実現するため、所定の位置に設置された曲げ材に軸圧縮力を作用させて、恣意的に湾曲するエラスティカ効果により、膜面に張力を導入することが可能となる。半球状のドームは、膜面製作時には中央支柱及び頂部円盤、膜材、曲げ材及び底面リングで構成される。膜体は、ドーム中央支柱頂部円盤円周部とリング状の底面周辺部に固定支持される。緊張状態に無い膜面内部の、平面上45°毎の8か所に、ドーム中央頂部から底面周辺に向かって順次曲げ材を緯線方向に配置する。曲げ材は、リング状の膜面底部との接合部でピン支持、ドーム頂部円盤の下面でローラー支持となるように直線配置され、上端部をスライドして所定の位置まで湾曲させることにより、張力が導入された膜面が形成される(Fig.2)。実構造物としては、直径10m規模のドームを想定しているため、曲げ材の材長は1/4円周部分の長さ(約8m)となるので、単一材では対応できなくなる。このため、

運搬性、施工性の良さを考慮して、部材長の短い曲げ材を連結して1本(以後、複合材と称する)とすることにした。

3.部材実験

3.1 実験及び試験体概要 本実験では、直径3mの半球ドームを設定し、曲げ材長(1/4円周部分の長さ)は約2mとした。ここでは、曲げ材としてアルミニウムパイプ(A6063TD: 9φ×1t)を使用した。材長40cmのアルミニウムパイプ(9φ)の片側に7φ×1tのサイズの小さな同質パイプ(材長6cm)の1/2部分を接合材として差込み、ポンチで叩いて一体化したものを1ユニットとした。ユニットを連結して一体化した部材を複合材と呼ぶ。接合部の連結性を保つために、パイプの中心空洞部分にショックコード(ゴムロープ)を挿入し、パイプ両端部で固定したものが完成品となる。このため、ショックコードに導入する(初期歪10%, 25%, 50%に相当する)プレストレス(以後、PS)の違いによる効果も検証した。アルミニウムの断面性能を確認するため、両端ピン支持の中央点集中載荷の部材実験を行った。試験体をFig.3, Table1に示す。

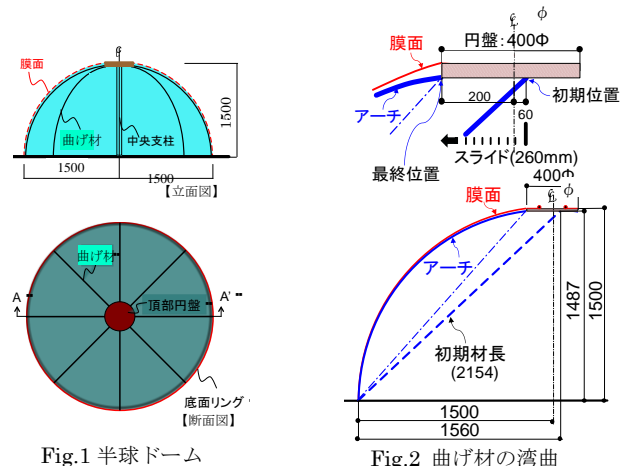


Fig.1 半球ドーム

Fig.2 曲げ材の湾曲

**3.2.実験結果** Fig.4 に P-δ 関係を示す. 結果から得られた弾性係数を Table1 に示す.

どの試験体もアルミニウムの公称値に近い弾性係数であったが, PS は, アルミパイプへの圧縮力として作用するため, 剛性は低下することが確認された.

**4. エラスティカ現象について**

**4.1 実験及び試験体概要** 試験体 1, 2m の単一材と材長 40cm を 5 本連結した複合材(ショックコードの PS は 25%歪とした)を対象として, エラスティカ性状を比較した. 半球ドーム(直径 3m)の 1/4 円周部分の円弧形状と弦の関係から算定した場合, スパン 2m の 1 割(20cm)の水平変位を生じさせた時の釣合い形状を目標とするエラスティカ形状とした. 実験装置を Fig.5, Photo1 に示す. 単純支持式のローラー端に接続したケーブルを介して水平加力し, ばね秤により荷重の値を, またメジャーにより水平・垂直変位を測定した.

**4.2 数値解析** エラスティカ性状を実験と比較するため, 幾何学的非線形解析による数値解析を行った. 解析モデルは Fig.6 に示す対称モデルを用いた. なお,  $Z=Z_0 \cdot \sin(\pi x/L)$  で表される初期不整を与えた. (但し,  $Z_0=0.1\text{mm}$  とした)部材の構造諸元を Table2 に示す.

**4.3 実験と解析の比較** 水平荷重とローラー支点の水平変位の関係を, Fig.7 に示す. 解析では, 35N に達した時, 水平変位が僅か 0.43mm で, 中央点が 25mm へと一気に増加し, 以後少しの荷重増分で大きく撓むことが分かる. 実験値は, 剛性の高い単一材(SP0)が荷重 40N 以降で大変形へと移行しているが, 解析結果と同様な変形状を示している. 複合材のケースでは, CP0 は SP0 より若干低めの性状を示しているが, 接合部での座屈が確認された(Photo2). 25%歪相当の PS を導入した CP25 では座屈は確認されず, PS の効果が確認された.

**5. まとめ**

アルミニウムパイプによる単一材と複合材(ショックコードの有り・無し, 及び PS の違い)を用いた, エラスティカ実験及び解析により, 膜構造への張力導入の可能性が確認できた. 今後は, 実際に曲げ材を膜面へ挿入したモックアップにより, 膜曲面の形成及びアイスドームの建設を行う予定である.

**【参考文献】**

- 1) 櫻井他:エラスティカを利用した膜曲面形成手法の提案 (その 1)単一材のエラスティカ現象について  
平成 24 年度日本大学理工学部学術講演梗概集
- 2) 櫻井他:エラスティカを利用した膜面への張力導入法の提案  
平成 24 年度日本建築学会大会学術講演梗概集
- 3) 櫻井他:膜構造を利用したアイスドームの制作に関する実験的研究  
平成 24 年度日本建築学会大会学術講演梗概集
- 4) チモシェンコ・ギアー共著:「弾性安定の理論」, プレイン図書出版, 1974
- 5) 木村喜代治:「路線の平面線形へのエラスティカ曲線の応用」, 土木学会論文報告集, 第 330 号, 1983

Table1 試験体概要

部材構成	試験体記号	PS [初期歪%]	弾性係数 $\times 10^7$ [N/mm <sup>2</sup> ]
単一材(S)	SP0	0	7.853
複合材(C)	CP0	0	7.171
	CP10	10	6.716
	CP25	25	6.278
	CP50	50	5.718
ショックコード	断面:3φ		8.253[N/mm <sup>2</sup> ]

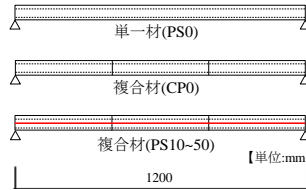


Fig.3 部材実験試験体

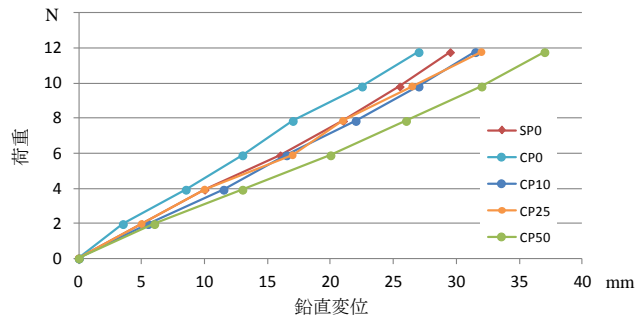


Fig.4 部材実験結果

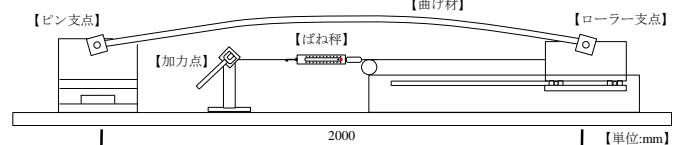


Fig.5 エラスティカ実験装置

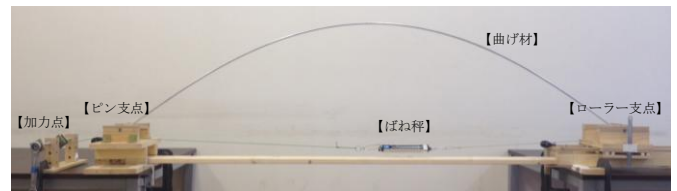


Photo.1 エラスティカ実験装置

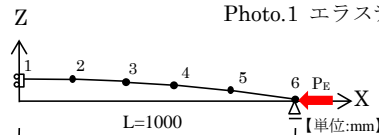


Fig.6 解析モデル

Table2 部材の構造諸元

A6063TD	断面積 A[mm <sup>2</sup> ]	断面2次モーメント I <sub>y</sub> =I <sub>z</sub> [mm <sup>4</sup> ]	断面2次モーメント J[mm <sup>4</sup> ]	弾性係数E $\times 10^7$ [N/mm <sup>2</sup> ]
9Φ × 1t d [mm]	25.1	204.1	408.2	7.171

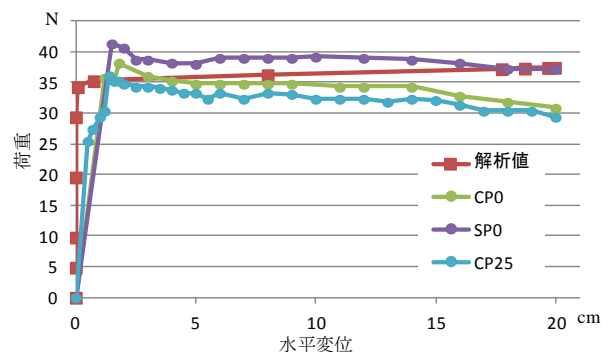


Fig.7 エラスティカ実験及び解析結果



Photo.2 CP0試験体(除荷後の形状)