

ホルン型張力膜構造の応力集中に関する基礎的研究
 -突き上げ部のリング径が膜材の破断荷重に及ぼす影響-

Basic Study on Stress Concentration in Horn-Shaped Tension Membrane Structures
 - Effect of Ring Diameter of Protruding Part on Breaking Load of Membrane -

○大森望由³, 宮里直也¹, 鴛海昂¹, 岡田章²
 *Miyu Omori³, Naoya Miyasato¹, Akira Oshiumi¹, Akira Okada²

Abstract: With the revision of the technical standards on June 28, 2024, the construction of large-scale membrane structures has become possible. Among these, horn-shaped tension membrane structures have relatively complex double-curved shapes. This structure has a unique property in that stress concentration occurs at the protruding parts not only when an applied load is applied but also when the shape is formed. This study clarifies the mechanism of stress concentration in horn-shaped structures through nonlinear analysis and uplift experiments using small-scale model.

1. はじめに

令和6年6月28日に施行された告示改正により、膜構造建築物に関する技術的基準が見直され、大規模張力膜構造の設計が可能となった。その中でもホルン型張力膜構造 (Fig.1) は、二方向に曲率を有する比較的複雑な形状を有しており、これまでに風力係数や風荷重評価に関する検討^[1]や応力弛緩の性状^[2]などに関する研究が報告されている。その一方で、ホルン型張力膜構造は、付加荷重時だけでなく、形状形成時にも突き上げ部に応力集中が生じるという独特の性状を有している。このため、当該部の応力集中を原因とする損傷や破損事故が報告されており、モントリオール五輪スタジアムのホルン型張力膜構造は代表例である^[3]。しかし、ホルン型張力膜構造の応力集中に関する既往研究は、ほとんど報告されていないのが現状である。

以上より、本報ではホルン型張力膜構造における応力集中の発生メカニズムを明らかにすることを目的として、縮小模型を用いた突き上げ実験および数値解析を用いて検討を行う。

2. 突き上げ実験

突き上げ部のリング径の大きさが破壊性状や応力分布に与える影響を把握するため、小規模模型を用いた突き上げ実験を行った。試験体詳細を Fig.2 に示す。試験体は、厚さ 0.1mm、幅 1000×1000mm の農業用ビニールの平膜とし、リング径はφ100, 150, 200mm の3 ケースとした。膜材端部にはエッジロープを配置し、ゴムシートを介して4辺をC型鋼とL字アングルで挟み込んだ (Fig.2(c))。载荷は、ロードセルを介した突き上げにて行い、治具に固定した全ネジの先端に3Dプリンターで作成した突き上げプレートを取り付け、全ネジをまわすことで突き上げた (Fig.2(d))。測定は鉛直変位と突き上げ荷重として、変位は巻き込み式



Figure 1 Typical Horn-Shaped Membrane Structure

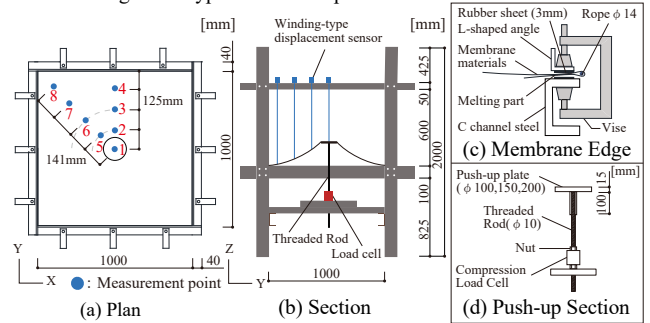


Figure 2 Test Specimen Details

変位計を用いて、Fig.2(a) に示す8点を測定した。また、膜材の破壊性状を把握するために水平方向と鉛直方向よりカメラを用いて記録した。

3. 突き上げ実験結果

突き上げ実験の破壊直前の形状をFig.3、荷重—鉛直変位関係をFig.4に示す。Fig.3より、リング径によらず、突き上げ変位が大きくなると頂部付近で膜材が塑性化し、その後リング周辺で破断する性状を示した。

Fig.4より、最大荷重および鉛直変位は、リング径が大きいほど大きいことを確認した。また、同一円周上の測定点はほぼ同様の鉛直変位を示すことを確認した。

ここで、実験結果の膜材の破断時の状況から、当該時点の膜応力を推定する。突き上げ軸力から応力への変換式^[4]をFig.5に示す。Fig.3より、破断直前のリング付近の膜材の傾斜角はほぼ垂直であることから、 $\theta = 90^\circ$ と設定した。リング径毎の算出結果をTable 1に示す。Table 1より、破断時の応力はリング径により多少のばらつき

1 : 日大理工・教員・建築 2 : 日大名誉教授 3 : 日大理工・院 (前) ・建築

は見られるが、その差は1割程度であり、概ね同値であることを把握した。φ200の応力が小さいのは、最大変位まで突き上げた時のリング付近の膜面の角度が90°よりも若干緩やかであるためと考えられる(Fig.3)。また、φ100とφ200を比較すると、φ200の方が最大荷重(突き上げ力)は約2倍、最大変位は約1.5倍大きいことから、突き上げプレートを拡大することによる耐力の増加効果が確認された。

4. 幾何学的非線形解析概要

突き上げによる応力分布を把握するため、大変形を考慮した幾何学的非線形解析を行う。解析モデルをFig.6, 解析概要をTable 2に示す。モデルは実験と同様、厚さ0.1mmの農業用ビニール1000×1000mmであり、4辺を固定支持とした。膜材は2D-Solidによる弾性材料であり、材料諸元は既報^[5]を参考に設定した。また、解析においては実験の突き上げプレートに代わり、膜中央部に突き上げ用のリング(Beam要素)を配置し、リングに強制変位を与えることで実験を模擬した。

5. 幾何学的非線形解析結果

各リング径において、変位量200mmまで強制変位させた時の荷重—鉛直変位関係をFig.7に示す。Fig.7より、各リング径ともに変位量100mmまでは実験値とほぼよく一致しているが、変位量100mmを超えると、解析結果の荷重値の方が大きくなっている。このことから、実験では変位量100mmあたりから膜材が塑性化していると考えられる。

次に、変位量100mmの時の最大主応力図をFig.8に示す。Fig.8より、リング径によらず応力は突き上げ部に集中している。また、弾性範囲である100mm時にはほとんど応力差は生じていないが、リング径が大きいほど、応力は大きくなる傾向を示した。これは、φ200のモデルは膜材の境界部からリングまでのスパンが短いため、突き上げ力が大きくなり、膜材の応力が大きくなるのが原因であると考えられる。

6. まとめ

本報では突き上げ実験と数値解析より、ホルン型張力膜構造の力学性状を把握した。結果より、突き上げ部の径が大きいほど、膜材の破断時の突き上げ力が大きくなる性状が把握された。今後、膜材の材料非線形を考慮しながら応力集中を評価し、本構造の設計資料の整備を行う予定である。

[参考文献]

[1]永井佑季他:独立したホルン型張力膜構造の風応答性状に関する研究,日本建築学会構造系論文集,77巻,672号,pp.211-219,2012
 [2]中島肇他:膜材の応力—ひずみ曲線のモデル化に関する研究:張力膜構造の応力弛緩に関する基礎的研究(その1),日本建築学会構造系論文集,579号,pp.63-70,2004-05
 [3]岡田功:五輪レガシーの再生の試み—モントリオールとシドニーの五輪スタジアムを事例に—,経済地理学年報,第66巻,pp.73-89,2020
 [4]畔見徳真他:ETFEフィルムを用いたホルン型張力膜構造の延伸成形に関する研究,日本建築学会大会学術講演梗概集,構造I,pp.1095-1096,2018.9
 [5]中川梨菜他:ETFEフィルムを用いたばねストラット式張力膜構造の強風時の構造挙動に関する研究,日本建築学会関東支部研究報告集,pp.405-408,2015.3



Figure 3 Destructive properties (○:Fracture location)

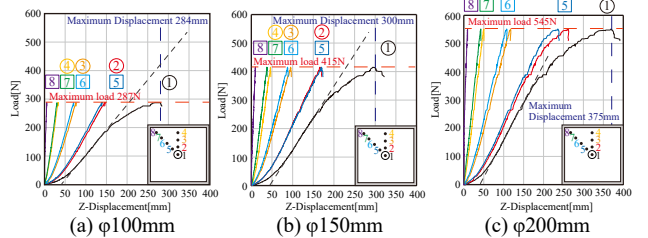


Figure 4 Load-displacement relationship

$$F = \sigma \cdot t \cdot \pi B \cdot \sin \theta \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{F}{t \cdot \pi B \cdot \sin \theta} \quad (2)$$

F : Upward thrust [N]
 σ : Stress [N/mm²]
 t : Film thickness [mm]
 B : Ring diameter [mm]
 θ : Angle between ring and film [rad]

Figure 5 Stress conversion formula

Table 1 Comparison of membrane stress

	Maximum load [N]	Circumference length [mm]	Membrane stress [N/mm ²]
φ 100	287	314	9.14
φ 150	415	471	8.81
φ 200	545	628	8.68

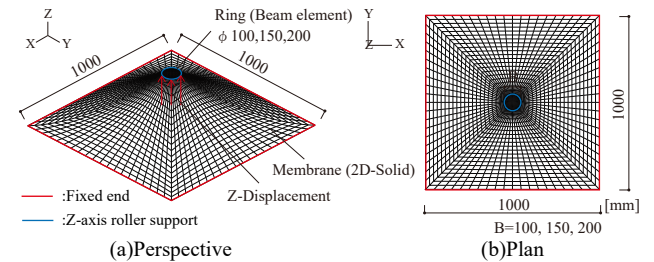


Figure 6 Analytical model

Table 2 Analysis Overview

■ Structural Specification
Dimensions : 1000mm × 1000mm
■ Material Type
□ Membrane Material : Agricultural plastic film (2D-solid)
Film Thickness : 0.1 [mm]
Tensile Stiffness : 7540 [N/m]
Poisson's Ratio : 0.4
Shear Stiffness : 2693 [N/m]
□ Ring : Steel (Beam Element)
Elastic Constants : 2.1 × 10 ¹¹ [N/m ²]
Poisson's Ratio : 0.3
Cross Section : b=10 [mm], t=15 [mm]

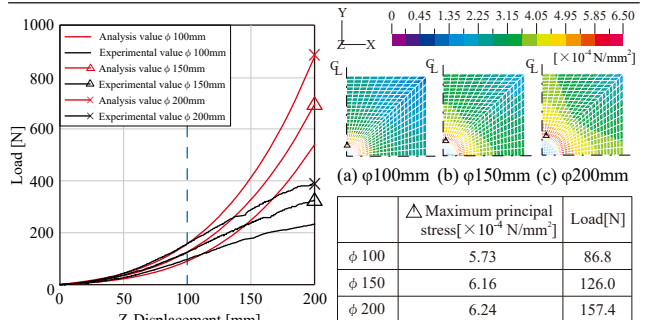


Figure 7 Comparison of load-displacement relationship

Figure 8 Stress diagram (Displacement: 100 mm)

	Δ Maximum principal stress [× 10 ⁴ N/mm ²]	Load [N]
φ 100	5.73	86.8
φ 150	6.16	126.0
φ 200	6.24	157.4