

一重空気膜構造のポンドイング不安定現象に関する基礎的研究
Basic Study on Ponding Instability Phenomenon of Air-Supported Structure

○松田章吾³, 宮里直也¹, 岡田章², 廣石秀造¹, 鴛海昂¹
*Shogo Matsuda³, Naoya Miyasato¹, Akira Okada², Shuzo Hiroishi¹, Akira Oshiumi¹

Abstract: Membrane structures provide space for sports and other activities in snow-covered areas during the winter months due to the excellent permeability of the membrane material. This study focuses on single-layer air-membrane structures. Cases have been reported in which roofs of single-layer air-membrane structures have collapsed due to the occurrence of ponding instability phenomena. However, the rise-to-span ratio and internal pressure at which the ponding instability phenomenon occurs have not yet been clarified. Therefore, this paper reports on the mechanical properties of the roof surface obtained by numerical analysis of a full-scale model and discusses the rise-span ratio and internal pressure at which ponding instability occurs.

1. はじめに

膜構造物の一種である空気膜構造は、一重空気膜に代表される「空気支持式」とビーム式に代表される「空気膨張式」に大別される。このうち、一重空気膜構造ではFig. 1に示すポンドイング不安定現象により、屋根が崩壊する事例も報告されている^[1]。ここでポンドイング不安定現象とは、雪だまり等の要因により、雨水の滞水が生じ、さらに滞水する体積が増えたと不安定状態に至り、内圧を上げてでもドーム形状の維持が不可能となり崩壊する現象である。ポンドイング不安定現象の対処方法には、融雪装置による屋根面の積雪量の低減、内圧増加による剛性の付加、等が挙げられる。一方、一重空気膜のポンドイング不安定現象に関する理論的研究は著者らの知る限りP. G. Glockner^[2]のみであり、内圧や形状をパラメータにした詳細な検討は行われていない。

以上より、本報では実規模の一重空気膜構造を対象にして数値解析を行い、ライズ・スパン比および内圧がポンドイング不安定現象に及ぼす影響について検討する。

2. 実規模モデルの数値解析による検討

2-1. 数値解析概要

数値解析概要をFig. 2に示す。解析モデルは、直径120mの円形平面のドームとし、使用材料はA種膜、厚さ1mmとした。メッシュはX・Y方向共にそれぞれ80分割とし、四角形メッシュとした。検討パラメータは、ライズ・スパン比(以下「h/L」と称す)と内圧とし、それぞれh/L=0.1~0.5(0.1間隔)の5ケース、25, 30, 35mmAqの3ケースを設定した。モデル形状は、形状解析を用いて算出した。具体的には平膜に対して所定の初期内圧を与え、得られた形状を初期形状として、再度内圧を与え、これら

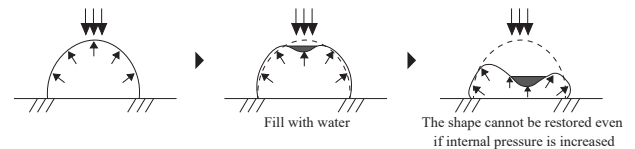


Figure 1. Ponding instability phenomenon

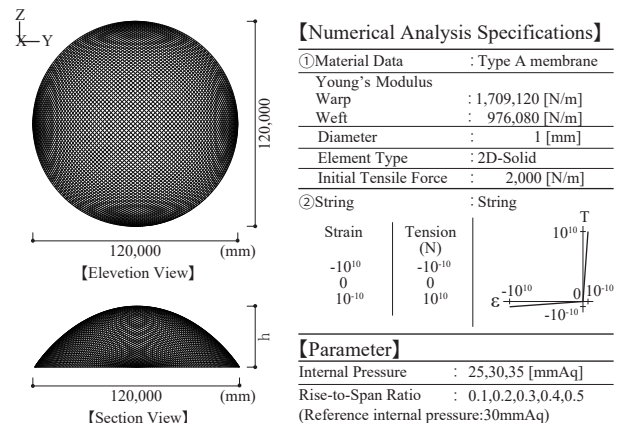


Figure 2. Outline of Numerical Analysis

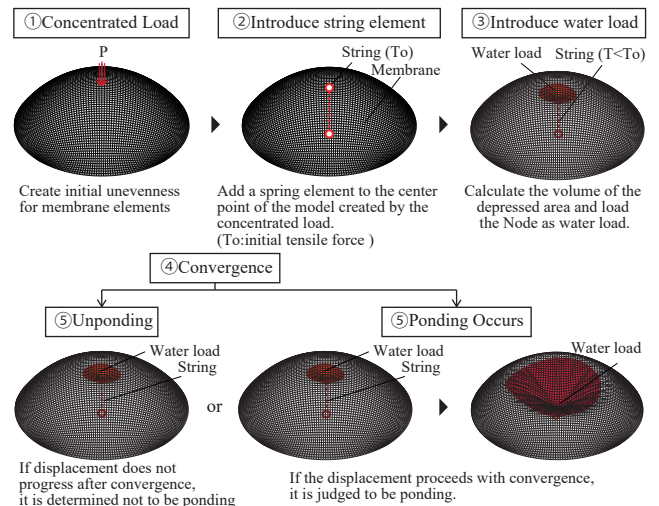


Figure 3. Numerical Analysis Flow

を繰り返し行うことで、形状を算出した。また、解析モデルの加圧にはダミーボックスを用いた。具体的には、ダミーボックスに空気を与えることで規定の内圧を得た。

2-2. 検討概要

(1) 検討手法

検討手法をFig. 3に示す。まず、想定した内圧下で、雪溜まり等を想定した荷重を、頂点部の節点(5点)に集中荷重として与え、滞水しうる体積を算出する。続いて、頂点部の節点と地面をつなぐ非抗圧のストリング(剛体ばね要素)を導入し、無張力状態で設置した後に集中荷重を取り除く。この時、ストリングには集中荷重に相当する初期張力(T_0)が導入される。次に、凹部分の体積分の水の重量を想定した荷重を、各節点に分割して集中荷重として与える。これらの手順を繰り返し行った。

(2) 本報におけるポンディング評価

上記の数値解析を行うと、以下に示す現象が段階的に得られる。

①ストリングの初期張力時に生じた凹部に水が注入された初期には、ストリングの張力は増加する。これは、凹部形状の変化によるものである。

②凹部の体積が増加するにつれて、ストリングの張力が減少し、最終的に消失する。消失後は、次に示す③の2ケースのいずれかに到達する。

③(i)凹部に水が満たされた状態で変位の進行が留まる状態。この場合、流入する水は直ちに排水される。

(ii)凹部に流入した水の重量で変形が進行し、さらなる水の流入が促される。この場合、変形進行の抑制が不可能で、最終的に崩壊に至る。

ポンディングに対しては、本来は状態③の評価が必要であるが、本報ではポンディング現象の基本的検討を目的として、状態②を対象として検討を行う。すなわち、状態②においてストリングの張力が消失した場合は、当該水量以上の荷重を支持できないと見なし、「ポンディング不安定現象の発生」と判断し、当該荷重を「ポンディング荷重」と定義することにした。

3. 数値解析結果および考察

3-1. ポンディング荷重

ポンディング荷重と中央変位の関係をFig. 4に示す。ここで中央変位は頂点部節点の変位であり、初期形状時を0とした。なお、ここで示す変位量は、初期ライズに対する比率(δ/h)を表している。

Fig. 4より、 h/L が大きいほどポンディング荷重は小さくなり、ポンディング現象が生じやすいことが把握された。一方、各 h/L の内圧で比較をすると、内圧を上昇させる効果が得られている。また、 h/L が小さいほど、内圧がポンディ

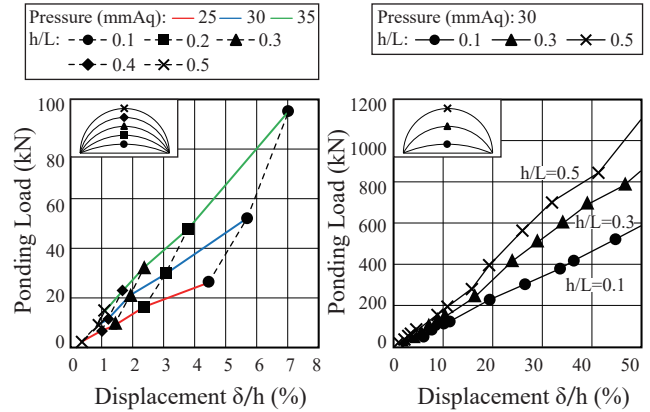


Figure 4. Relationship between Pondering Load and Displacement

ング現象に与える影響が大きくなる性状が得られた。

3-2. h/L の違いがポンディング後の挙動に与える影響

$h/L=0.1, 0.3, 0.5$ (30mmAq)におけるポンディング現象進行中の荷重-中央変位関係をFig. 5に示す。なお、変位は初期ライズの50%までとした。また、各内圧におけるポンディング性状の傾向が類似していたため、30mmAq時の $h/L=0.1, 0.3, 0.5$ に絞って考察する。

Fig. 5より、 h/L が小さいほどポンディング荷重は大きくなる一方、変位50%時の荷重は小さくなった。これは、ポンディング進行中に1%分を変形させるために必要な荷重が、 h/L が高いほど大きいためと考えられる。

4. まとめ

本報では、一重空気膜構造においてライズ・スパン比および内圧の違いがポンディング不安定現象に与える影響の把握を目的として、数値解析的検討を行った。 h/L が小さいほどポンディング不安定現象は生じにくく、さらに h/L が小さいほど内圧を上昇させることで、ポンディング不安定現象が発生しにくくなることが把握された。なお、本報ではストリングを用いた簡易的なモデルを対象として、ストリングの張力消失時の荷重をポンディング荷重と見なし、基本的な検討を行った。今後、ストリング張力の消失後の挙動について検討を行い、ポンディング現象の詳細な把握を行う予定である。

参考文献

[1]丹野吉雄：「恒久膜構造の黎明 二つの空気膜構造建築」, 日本膜構造協会総会講演, pp. 79-82, 2016. 6
 [2]P.G. Glockner他：「On the stability of cylindrical pneumatics subjected to symmetric line and liquid loading」, Int. J. silids Structures Vol. 22, No11 pp. 1307-1323, 1986. 9
 [3]岡田章他：「低ライズケーブル補強空気膜構造の力学性状に関する実験的研究」, 日本建築学会大会学術講演会, 構造 I, pp. 2637-2638, 1984. 9