

強風時における楕円平面空気膜構造物の内圧制御に関する研究

日大生産工(学部) ○加藤 優輝 生産工学部 丸田 榮藏

1. はじめに

近年、膜構造物はその優れた透光性、軽量性などから大規模空間の建築物で用いられるケースが仮設・常設ともに増えてきている。しかし、膜構造については他の一般的な構造物に比べ十分な研究がなされていない。

本研究では膜構造の空気膜構造について未だ研究が行われていないとされる膜構造の風荷重に関する基礎的研究として風洞実験を行い、これまでの基準値との比較・検討を行うものである。

2. 研究目的

本研究では平面が楕円形状を有する空気膜構造において風圧力による変形が強風時に生じないように内圧を加えるが、その必要内圧について検討するものである。さらに実験結果とこれまでの設計指針による推奨値を比較し考察を行う。

3. 研究の必要性と問題の所在

空気膜構造物は内圧をかけることにより構造物として変形しないように安定させる必要がある。これまでは、比較的簡単な図形に対しての内圧の決定方法が空気膜構造設計基準¹⁾に定められている（Table1・Fig.1）。

一方、指針がないものについては提示された指針に近い形状で類推が可能であるが、それ以外に関しては風洞実験などから内圧を求める必要がある。現在、空気膜構造に対しては各種形状について十分な風圧分布の資料がないことから、さらなる風洞実験等による研究調査が求められている。

Table.1 空気膜構造設計基準(一部抜粋)

形状	内圧
3/4 球形	$P=q$
3/4 球形(大変形を許容字しうるもの)	$P=0.8q$
半球形	$P=0.7q$
1/4 球形端部付き円筒形	$P=0.6q$

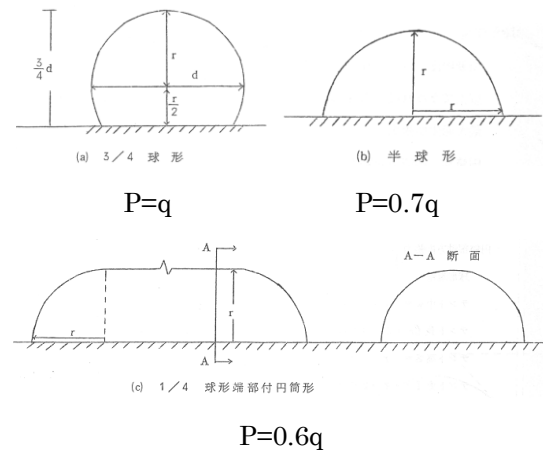


Fig.1 空気膜構造設計基準(一部抜粋)

4. 風洞実験

膜体に変形を生じないための必要内圧をゲッチンゲン風洞にて風洞実験を行い求める。今回の報告では、風速 15m/sec 時の模型の変形状態とその変形を生じさせないようにするための内圧の加圧量 (ΔP_i) と作用速度圧の関係について測定している。

4.1 対象模型

以下の基本平面形状を頂点の高さ(ライズ f) がそれぞれ 3cm、6cm、10cm の 3 種類とした模型をシリコンによって作成した。なお本実験では模型は剛性を持たない柔な膜体模型である。Fig.2 と Fig.3 に本実験で使用する模型の平面図と断面図を示す。

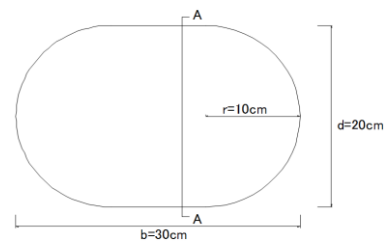


Fig.2 平面図

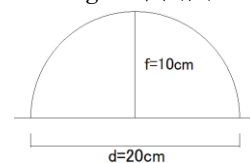


Fig.3 A—A 断面図(f=10cm)

本実験で使用する模型のライズ比は下表の通りである。

Table.2 各模型のライズ比

ライズ	f/b	f/d
f=3cm	0.1	0.15
f=6cm	0.2	0.3
f=10cm	0.33	0.5

1) 模型作成方法

模型を作成するに当たって、Photo.1 に示すように石鹼水によって空気膜を模擬することから始めた。石鹼膜は膜表面全体にかかる圧力が一定であり、膜体の形状が空気膜構造と近似していることによる。石鹼膜でイメージを形にした後、ホイヘンスの近似式を用いて中心から10度ごとの模型の円弧の長さを求め油粘土で雄型を作成し、それを基に石膏で雌型を作成した(Photo.2・3)。

作成した雌型にシリコンを薄く塗り、上から順にアルミ板、薄いシリコン、実験模型、エンビ版、薄いシリコン、アクリル板を組み合わせボルト止めとし、また実験模型とアルミ板の隙間にシリコンを塗ることで空気漏れのない実験模型を作成した。



Photo.1 石鹼膜による空気膜の模擬



Photo.2 油粘土による雄型模型



Photo.3 石膏による雌型作成



Photo.4 雌型模型の作成(f=10cm)



Photo.5,6 実験空気膜模型(f=10cm)

2) 模型の内圧損失量について

本実験使用する模型では完全密閉を目標としていたが、模型と取り付けアクリル板間の隙間からの内圧の損失が生じた。Fig.4 は各模型の無風時の時間経過による圧力損失である。

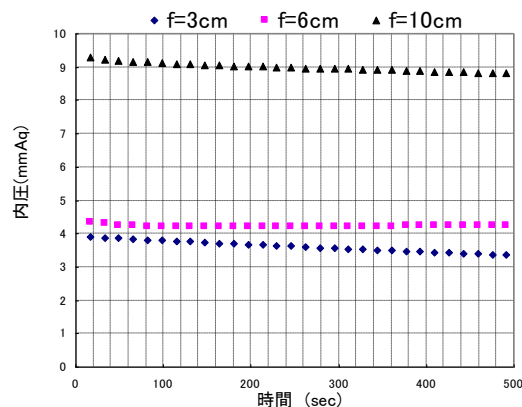


Fig.4 時間経過による圧力損失

本来であれば時間経過による圧力損失を補正すべきであるが、本実験では1回の計測に要する時間が1分未満であることと、また Fig.4 から認められるように圧力損失がこの計測時間内では微量であることから圧力損失分の補正は必要ないものとした。

3) 使用風洞および風洞実験気流

本実験において用いた風洞は、日本大学生産工学部のゲッチングン型回流単帰風洞である。風洞気流は、一様流とした。しかし、Fig.5 から分かるように地盤板による内部境界層が生じ

A scatter plot showing the relationship between measured precipitation (測定値) and estimated precipitation (推定値). The x-axis is labeled '風速 (m/s)' (Wind Speed) and ranges from 0 to 12. The y-axis is labeled '測定雨量 (mm)' (Measured Rainfall) and ranges from 0 to 1200. A legend indicates that blue squares represent '測定値' (Measured values) and a magenta line represents '推定値' (Estimated values). The data points show that for wind speeds below approximately 10.5 m/s, the measured precipitation is mostly zero. Above this threshold, the measured values increase sharply, reaching up to 1000 mm. The estimated values (magenta line) follow a similar trend, starting to rise around 8 m/s and reaching approximately 250 mm at 10.5 m/s.

4) 実験方法

変形の測定には、レーザー変位計を用い、変形が最も大きくなると判断した箇所にレーザー光が当たるように配置した。

1)内圧をコンプレッサーで加えた後、内圧と変位をクローネ風圧計とレーザー変位計を用い、大気圧と釣り合う状態における内圧と変位を初期内圧(以下 P_i)及び初期変位とした。

以上の手順を 3 回繰り返し行い平均値とした。
なお、実験風速は 5~15m/sec において 1m/sec
刻みとし、長辺方向を 0° 、短辺方向を 90° と
した風向によって実験を行った。

型番	AC-500 型
最高圧力	0.49MPa
空気排出量	29L
モーター回転数	1500

型番	RP-0.2-2
圧力設定範囲	0~0.02MPa

型番	LB-1200
基準距離	300mm
波長	780nm（不可視）
測定範囲	±100mm
スポット径	1.2×2.5mm
分解能（白紙で基準 距離にて）	50 μ m

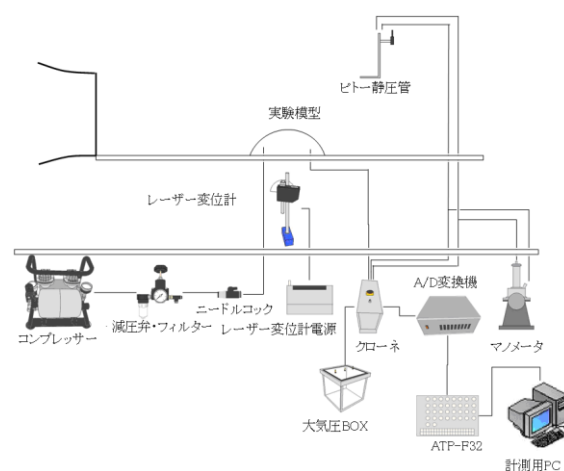


Fig.6 実験概要図

5.1 内圧制御による ΔP_i の性状

各模型の実験風速ごとのデータの平均値をとり、求められた Pi_2 と Pi の差から風速変化に対する模型に変形を生じさせないために加圧する内圧(以下 ΔPi)を求めグラフ化した。

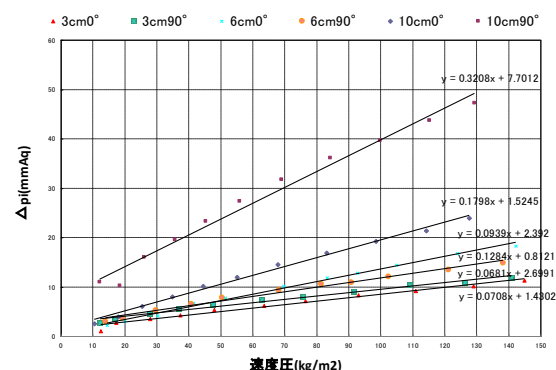


Fig.7 内圧制御実験結果

ここで、空気膜構造設計指針と比較する。今、膜体が変形を生じない状態は膜体外側からかか

る速度圧 q と内圧が釣り合っている状態である
とすると、

$$q = P_i + \Delta P_i \quad (1)$$

$$P_i = q - \Delta P_i \quad (2)$$

という式が成り立つ。

この(2)式から各模型の必要内圧は

$f=3\text{cm}$ の場合：

$$\begin{aligned} \text{風向 } 0^\circ : P_i &= q - 0.0708q \\ &= 0.9292q \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{風向 } 90^\circ : P_i &= q - 0.0681q \\ &= 0.9319q \end{aligned}$$

$f=6\text{cm}$ の場合：

$$\begin{aligned} \text{風向 } 0^\circ : P_i &= q - 0.1284q \\ &= 0.8716q \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{風向 } 90^\circ : P_i &= q - 0.0939q \\ &= 0.9061q \end{aligned}$$

$f=10\text{cm}$ の場合：

$$\begin{aligned} \text{風向 } 0^\circ : P_i &= q - 0.3208q \\ &= 0.6792q \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{風向 } 90^\circ : P_i &= q - 0.1798q \\ &= 0.8202q \end{aligned}$$

5.2 膜体の変形性状

次に風速 15m/sec 時の模型の変形を求め、変形図を作成した。右に実験風速 15m/sec 時の変形図を記す。なお左手側を風上とする。

6. 考察

本実験から求められた P_i を指針と比べてみると見付面積が円形に近いまたは同等である $f=10\text{cm}$ では指針と似通った値を得る事が出来た。 $f=3, 6\text{cm}$ では ΔP_i の傾きが小さいため突風などにより風速が急に高まったとしても膜体の安定性が損なわれにくいと思われる。

本実験では長辺方向より、短辺方向の模型の必要内圧が大きくなると予想していたが、実験結果では高さが 10cm のもの以外では逆の結果となった。これは模型のライズ比のみならず長辺と短辺の比も関係しているのではないかと考えられる。

使用した模型は、完全密閉を目標に作成したものであり膜の厚さ、不均一性等課題があり模型の精度は良くなく、膜材に関してもシリコンは弾性を持つ素材であるため本来の膜材とでは必要内圧に変化が見られると考えられる。

今回の実験は模型高さでの気流が地表面粗度区分 I に相当した風が作用したものであったが、境界層が実情のものより著しく低いことから、実情での粗度区分とは言いがたい。

本実験では模型の素材や精度、実験方法など改善すべき箇所が多々ある。これらを改善していくことでより正確な内圧を推定する事が可能となると思われる。



Photo.7 $f=3\text{cm}$ 風向 0° 変形写真



Photo.8 $f=3$ 風向 90° 変形写真



Photo.9 $f=6\text{cm}$ 風向 0° 変形写真



Photo.10 $f=6\text{cm}$ 風向 90° 変形写真



Photo.11 $f=10\text{cm}$ 風向 0° 変形写真



Photo.12 $f=10\text{cm}$ 風向 90° 変形写真

7. 参考文献

- 1) 空気膜構造協会、ニューマチック構造設計基準・同解説、空気膜構造協会、昭和 45 年度版
- 2) 日本建築学会、建築物荷重指針・同解説、日本建築学会、2004 年、