

境界層乱流中における空気膜ドームの風圧特性に関する研究

- その 1 強風時の構造安定に必要な内圧制御 -

日大生産工(院) ○加藤 優輝 日大生産工 丸田 榮藏

1. はじめに

わが国では空気膜構造の建設に向けて川村¹⁾、最上²⁾および G.Beger³⁾等による薄膜の柔模型を用いた風洞実験や中間試験体による実測が行われ、変形の性状や内圧制御法の基礎的な検討が試みられてきた。1970年には設計基準⁴⁾を設けて、空気膜構造の設計対応が図られてきた。しかし、これら設計基準の対象としている形状が半球、円筒形、ラドームにほぼ限定されており、その他の形状やライズの差異についてほとんど取り扱われていない。これらのことに対して本研究室では一様流下での風洞実験により最小曲面形態のライズの異なる角丸長方形平面を持つ空気膜構造に対する構造安定に必要な内圧について検討を行い、構造安定に必要な内圧と速度圧 q の関係を示してきた⁵⁾。これに続き本論文では、境界層乱流中において、同様の実験を行い、速度圧と必要内圧の関係を示すとともに、一様流との比較、検討を行うものである。

2. 実験方法

使用風洞は、ゲッチンゲン風洞を用い、実験気流は縮尺 1/250 の建築物荷重指針・同解説の示す地表面粗度区分IV($\alpha=0.27$)としている。図 1 に気流の鉛直分布、図 2 に風洞高さ 40[mm](実高さ 10[m]相当)の変動風速のパワースペクトルを示す。気流は風洞高さ 300[mm]まで気流の相似性が確認されており、実験模型高さの 2 倍以上の境界層乱流を再現できている。

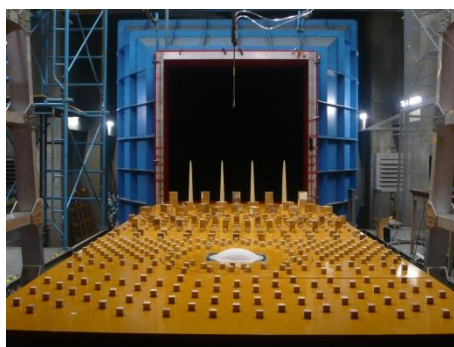


写真 1 使用風洞

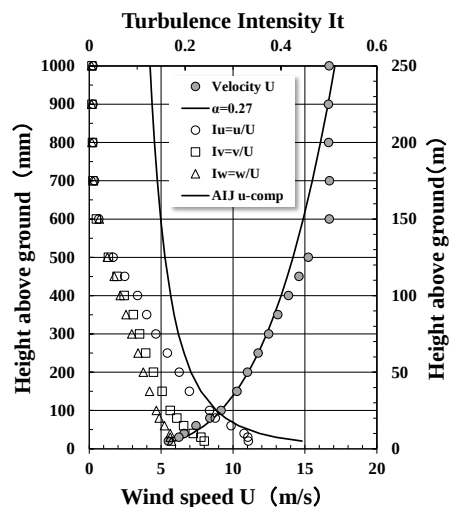


図 1 気流の鉛直分布

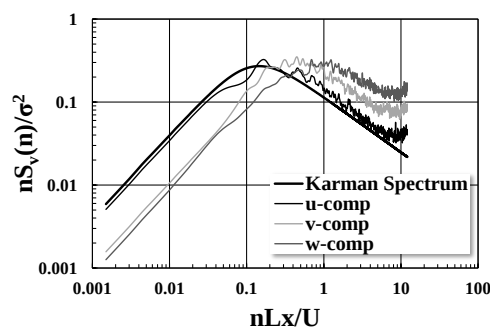


図 2 変動風速のパワースペクトル

模型は、ライズの異なる 3 種類のシリコン薄膜柔模型(膜厚 0.5[mm])としている(写真 2)。表 1 に模型の寸法と初期内圧を示す。実験時に空気漏れによる膜体の内圧損失は $H/D=0.5, 0.3, 0.15$ に対してそれぞれ 1 分間で約 1.5, 0.31, 0.05[N/m²]であり、最も内圧損失の大きい $H/D=0.5$ において変位の減少が 0.016[mm]であった。この漏れの量は、大変形時の最大変位に対し 1/100 以下の値であることから実験毎に内圧の調整を行うことにより、1 分間以内の計測では実験結果に影響ないと見なした。



写真 2 実験模型

表 1 実験模型詳細

縦×横 [mm]	200×300		
ライズ [mm]	100	60	30
ライズ比 H/D ($D=200$ mm)	0.5	0.3	0.15
初期内圧 [N/m ²]	98.1	68.6	19.6

Study on Characteristics of Wind Pressure on Pneumatic Structures
in Turbulent Boundary Layer

- Part 1 Internal Pressure Control to Stabilize the Structure under Strong Wind -

Yuuki, KATOH and Eizo, MARUTA

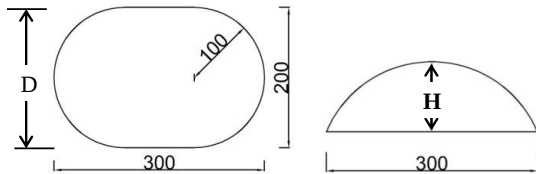


図3 実験模型平面図及び立面図

実験は、図4に示すLaserを組み込んだ方法により、変位の計測を行い、変形状の検討を行ったのち、膜体の必要内圧と速度圧との関係を求めた。膜内圧は図5に示す風圧計とコンプレッサーにより計測および調節を行っている。詳細については参考文献5)を参照されたい。なお、データ数16384、サンプリング間隔1[msec]、計測は風洞高さ40[mm](実高さ10[m]相当)において実験風速1~14[m/s]の範囲とした。また、実験風向は模型短手方向を0°、長手方向を90°とし計測を行っている。

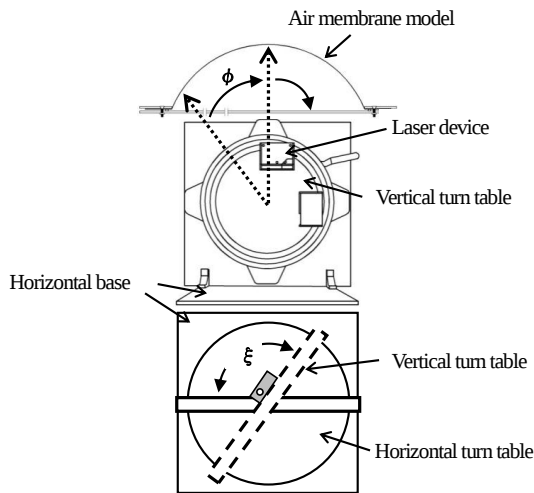


図4 膜体変位計測装置概要

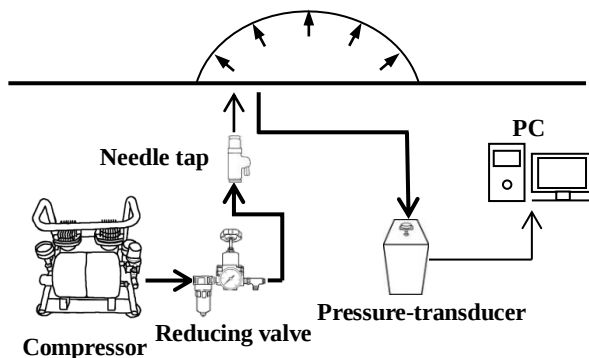


図5 膜内圧計測・調節装置概要

3.乱流中における膜体の変形状と限界風速

各実験風速時の風方向の模型中心線上における変位の計測を行い、変形状の検討を行った。構造安定限界の変形状態は一樣流の変形状態⁵⁾と同様に風上膜面に負の変形が生じる寸前の変

形状態としたが、平均の変位を用いた断面図から十分な変形が確認できなかった。旧来、乱流の渦のScaleが物体をすべて覆うほど大きい時、流れは瞬間的に一樣な流れと見做してきた。この考えに基づいて、計測データの瞬間最大変形を用いて風上部の断面図を作成し、一樣流下との比較を行った(図6)。結果から両者の断面図は類似するものであり、境界層乱流下中では瞬間最大変形により作成した断面図を用いて限界風速 V_s を求めた。表2に上記の方法により求めた限界風速 V_s を示す。

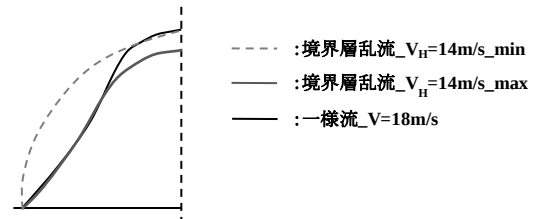


図6 一樣流下との断面図の比較

表2 風洞実験時の限界風速 V_s

H/D	風向	V_s (模型頂部)	V_s (風洞高さ40mm)
0.5	0°	11	8
	90°	10	7
0.3	0°	7	6.5
	90°	7	6.5
0.15	0°	4	5
	90°	4.5	5.5

4.構造安定に必要な内圧

空気膜構造設計基準⁴⁾では、暴風時において発生する大変形に対し、膜構造の強度を維持するために必要な内圧をかけることを規定している。本研究では、この規定値の内圧を図7に表現したように、構造安定へ復帰させるに必要な内圧の増分 ΔP_{is} を以下の定義により求めた。

$$\Delta P_{is} = P_{is} - P_i' \quad (1)$$

ここに、 P_i' は風速変化による発生平均内圧、 P_{is} は膜体に負の変形が生じないよう安定状態の変形に復帰させる必要な平均内圧である。

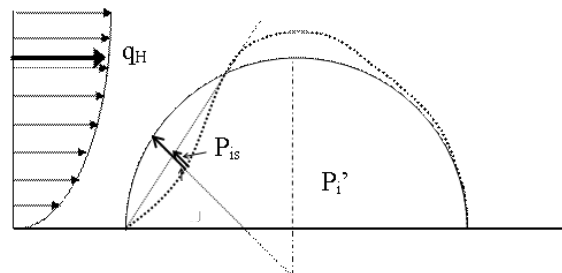


図7 内圧の定義

図8に内圧 P_i' 、 P_{is} の計測結果を示す。結果は一樣流下の実験と同様の傾向を示し、内圧 P_i' は、

いずれのライズにおいても風速の増大とともに一時的に低下し、その後再び増加に転じる傾向にある。 P_{is} はライズが高いほど大きな値を必要としている。これらは先の一様流下で行った実験結果と同様の傾向を示している。

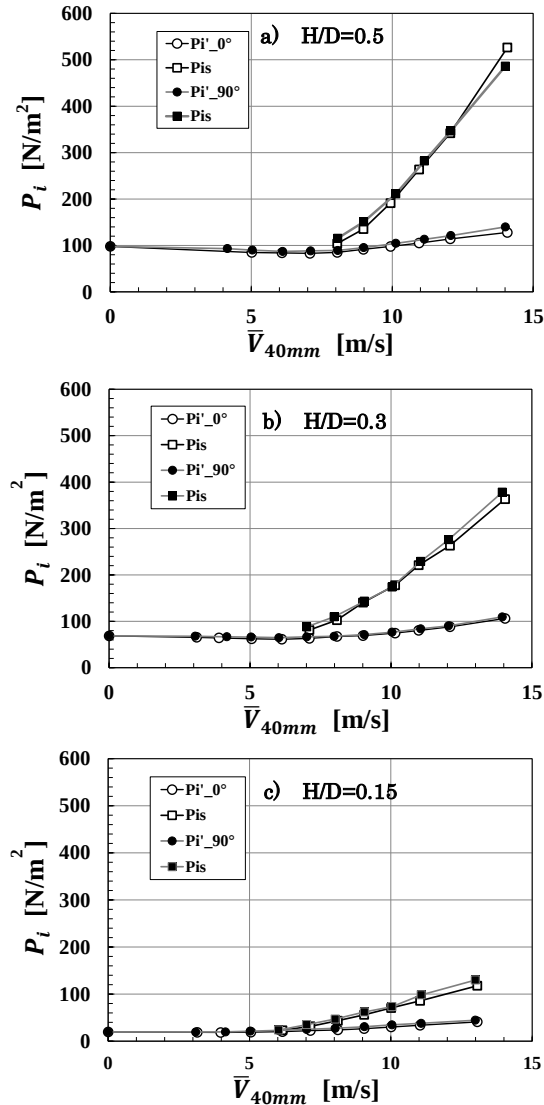


図8 Pi' , Pis 実験結果

図9に平均速度圧 $\bar{q}_{40mm}$ (実高さ10[m]相当)に対する ΔP_{is} を示す。図10は図9の横軸に風洞高さ40[mm]相当の突風率 G_V を乗ずることによって求めた瞬間速度圧 $\hat{q}_{40mm}$ に対する ΔP_{is} である。なお、結果は一般性を持たせるため実高さ10[m]相当の速度圧を用いている。結果から、構造安定に必要な内圧は速度圧と表3に示す係数 C_i の関係で与えることができる(図11)。限界風速は $\Delta P_{is}=0$ と回帰直線の交点速度圧から求めた。 $\bar{q}_{40mm}$ に対する C_i は約1.0~3.7の大きな値を示し、 $\hat{q}_{40mm}$ に対する C_i は一様流の結果に類似する値を示した。

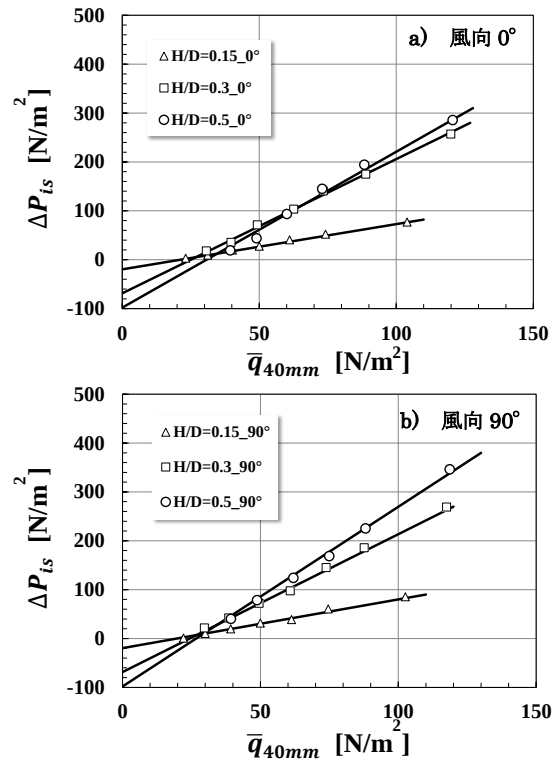


図9 平均速度圧に対する ΔP_{is}

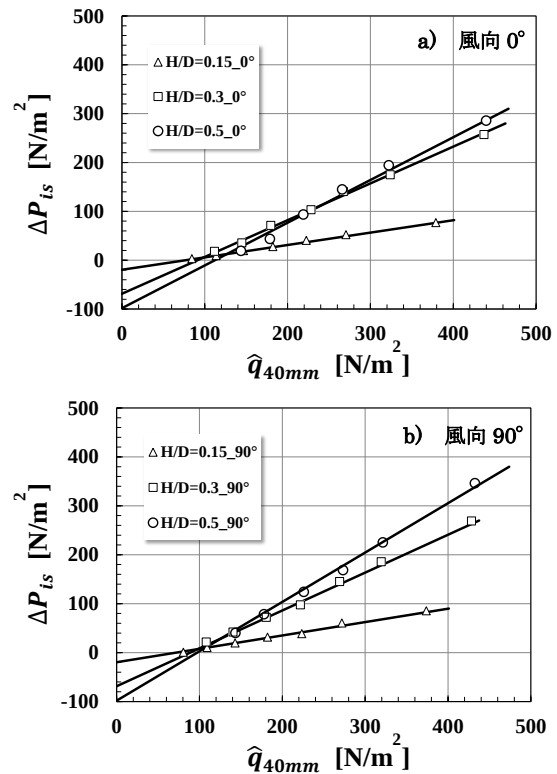


図10 瞬間速度圧に対する ΔP_{is}

表 3 C_i および V_s

H/D	風向	C_i		V_s [m/s]	Uniform	
		$\bar{q}_{40mm}$	$\hat{q}_{40mm}$		C_i	V_s [m/s]
0.5	0°	3.19 $\bar{q}_{40mm}$	0.87 $\hat{q}_{40mm}$	7.11	0.60 q	14.8
	90°	3.68	1.00	6.64	0.73	12.0
0.3	0°	2.75	0.75	6.41	0.52	11.8
	90°	2.82	0.77	6.35	0.55	10.6
0.15	0°	0.92	0.25	5.90	0.27	7.6
	90°	1.00	0.27	5.69	0.20	8.8

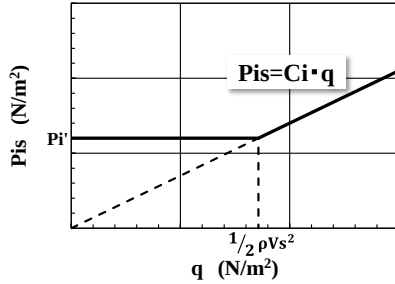


図 11 P_{is} , C_i , q の関係

5. 一様流との比較

乱流下で得られた結果を第 3 章で記述した考えに基づいて等価な一様流に置き換え一様流との比較を行った。具体的には模型に作用する速度圧を等価な一定風力 $\bar{q}_{H'}$ に置き換え(図 12)、表 4 に示す高さ H' の G_v^2 を用いて等価な一様流の瞬間速度圧 $\hat{q}_{H'}$ を求め、一様流の実験結果と比較した。

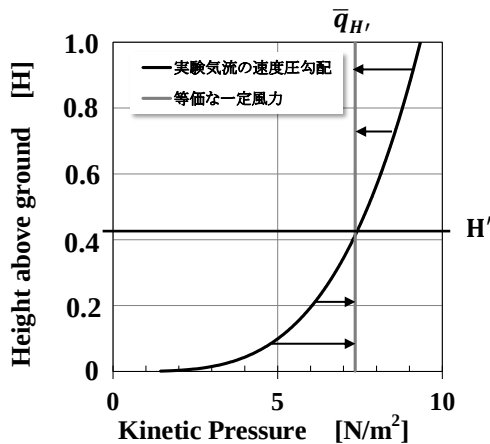


図 12 等価な一定風力への置き換え

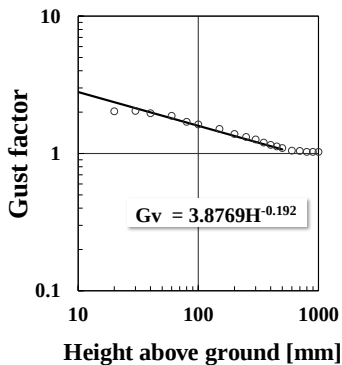


図 13 風洞高さに対する G_v

表 4 H' および G_v^2

H/D	H' [mm]	G_v^2
0.5	41.4	3.61
0.3	24.9	4.37
0.15	12.5	5.71

G_v : 変動風速の

ガストファクター

図 14 に G_v^2 を用いて求めた一様流相当の瞬間速度圧 $\hat{q}_{H'}$ に対する ΔP_{is} および一様流の結果を示す。結果はほぼ一致するものであり、このことから一様流下の実験より得られた C_i によって乱流中の構造安定に必要な内圧への適用が可能であることが見出された。

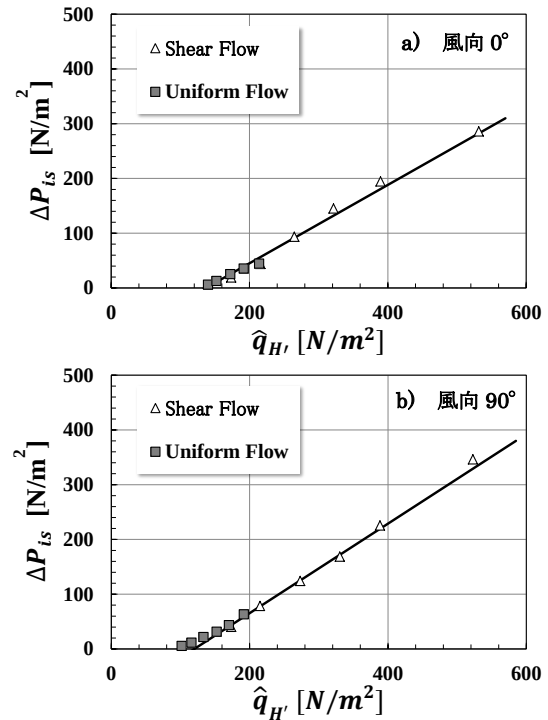


図 13 一様流実験結果との比較 ($H/D=0.5$)

6. まとめ

結果は以下のように要約される。

- 1) 境界層乱流下の膜体の瞬間最大変形は一様流下の膜体変形と類似する。
- 2) 空気膜構造の構造安定に必要な内圧は、係数 C_i と速度圧によって求まる。
- 3) 一様流下の実験より得られた C_i で乱流境界層中の構造安定に必要な内圧への適用が可能である。

参考文献

- 1) 川村純夫, 木本英爾, 木内龍彦, 「円筒状及び半球状空気膜構造の風による挙動」, 第 6 回風工学シンポジウム, 1980
- 2) 最上公彦, 「空気膜構造の風圧力に関する二・三の実験的研究」, 東北大学修士論文, 昭和 44 年 2 月 15 日
- 3) 旭岡和安, 「ニューマチック・ストラクチャーの風洞実験」, ドイツ郵政省ラジオ・テレビ技術局: G.Beger, 太陽工業, 1967.9
- 4) 日本建築センター・空気膜構造協会, 「ニューマチック構造設計基準・同解説」, 昭和 45 年
- 5) 加藤優輝, 丸田榮蔵, 「空気膜構造の作用風圧と構造強度に必要な内圧制御に関する基礎的研究」, 膜構造研究論文集, 2011, 12