

球形屋根を有する円筒形空気膜構造の必要内圧制御に関する研究

その2 大型疑似風洞装置による必要内圧の測定

丸田榮藏^{*1} 河端昌也^{*2}
山本 学^{*3} 揖斐 剛^{*4}

本研究では、これまで球形ドーム屋根を有する円筒空気膜構造の風外力に対する変形対応に必要な内圧制御に関して、薄膜構造の静力学に基づいた簡易算定法を誘導し、原形回復や座屈回避のための必要内圧ならびに最大張力の推定方法について提案した。本論では、実物による実験は困難なことから、実寸に近い性状を得るために巨大な球形空気膜構造ドームモデルを製作し、12基の送風機を組み合わせた大型の疑似風洞装置を製作することによって作り出された人工風の中で実験を試みた。

実験は、風速と必要内圧の関係を得るために、原始的ではあるが目視観測と言う簡便な計測方法によって座屈回避ならびに原形回復に必要な内圧を計測し、簡易算定法と比較を試み良好な関係を得た。

1. はじめに

本論では、前報^[1]で提案した球形ドーム屋根を有する円筒形空気膜の必要内圧に関する簡易算定法の妥当性を実験的に検証することが主たる目的である。

本研究の主眼とする原形回復や座屈回避のための必要内圧に関する計測を果すためには、従来方式のミニモデルを用いた風洞実験では、力学特性等の相似性を満たすモデルの製作ならびに小寸法からくる誤差の影響に関する信頼性の確保が甚だ難しい。そのことから、必然的に大型の空気膜モデルの作成とそれに見合った大型の風洞装置を必要とした。

しかしながら、人工的に均一で大きな寸法の領域の風速分布を作り出すことは特に難しい状況において、今回、3mに及ぶ空気膜モデルの挙動を把握する意味でも、敢えて巨大送風装置が求められた。以上の観点から、作成した風洞装置の入射風としての風速分布特性を明らかにするとともに実験としての有効性についても検討する必要がある。

大型空気膜モデルを用いた必要内圧の計測実験においては、多額の費用を要することから、試験体は、ライズ比 $f/D=0.5$ で円筒の高さ幅比 $h/D=0.5$ の形状に限定し、一体のみとしている。

2. 実験項目

本論では、大型の空気膜ドームモデルを製作するとともに、それに見合った大型疑似風洞装置を作製することにより、風速と必要内圧の関係を得るべく以下の項目について実施した。

- 1) ドーム試験体の背後底部に発生する座屈現象に着目し、座屈の発生と見做される下方への変位ひずみを解消するために必要な内圧 P_{0b} を風速の増大毎に計測する。

- 2) 同時に、風上側に発生している正の風圧による変形（膜体のへこみ）を元の形状に復帰させる際に必要な内圧 P_0 を計測する。

3. 実験方法

3.1 大型疑似風洞装置と空気膜モデル

大型疑似風洞装置は、Photo.1 に示されるように、切妻型の倉庫内に、12基の送風機（スイデン社製でSIF-600A-3、外形寸法 $920 \times 1,160 \times 690\text{mm}$ 、吹き出し直径 0.712m ）の横4基を3段に配置した疑似風洞である。個々の送風機の性能は、50Hz 帯で $58\text{m}^3/\text{min}$ 、直近の風速 15m/s 、7.5m 到達距離で 9m/s （拡散角約 10° ）である。また、個々の送風機出口には十字にスプリッター板を取り付け送風機による旋回流の影響を除去する工夫を施している。送風機12基の配列は、Fig.1 に示されるように、縦横方向共に中心間距離 1.55m 、地盤板上に高さ 0.9m とした。なお、地盤板は、風方向 8.8m 、直交方向 6.8m の平板とし、地上 0.35m で設置している。

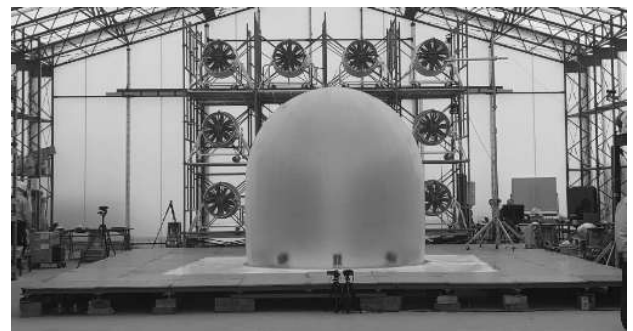


Photo.1 大型疑似風洞装置と空気膜モデル

^{*1} WIND & PHYSICS LLC, CEO, 工学博士 ^{*2} 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院 教授, 博士 (工学)

^{*3} 鹿島建設株式会社技術研究所 上席研究員, 博士 (工学)

^{*4} 大嘉産業株式会社 開発部 部長

空気膜モデルは、直径 2.852m で高さ 1.426m の円筒部に高さ 1.426m の半球を持った総高 2.852m の球形ドームであり、膜厚 0.1 mm、ヤング率 50Mpa、重量密度 0.24 kg/m² のウレタン膜を用いて制作した。

そして、Fig.1 に示されるように、隣り合う送風機の送風の混合が十分達せられると想定し、空気膜モデルを送風機から 4m (中心に対しては 5.413m) に離して設置した。

3.2 計測装置

風速計測に用いた風速計は、基準点風速の風速変動も計測可能な 2 次元超音波風速計 (Gill 社) と試験体周辺の平均風速分布の計測として無指向性の熱線型アネモマスター (カノマックス社) を用いた。

空気膜モデルを膨張させるには、送風用のブロアーを用いた。内圧に対する計測は、U 字マノメータにより目視で測ると同時に圧力変換機によって計測し、Data Logger (HIOKI LR8431 10ms) を介して PC 内に記録した。

空気膜モデル背後の下部において座屈の発生が予想される位置に、原始的であるが目視計測用にマーカーと物差しを設置した (Fig.1 の立面図を参照)。

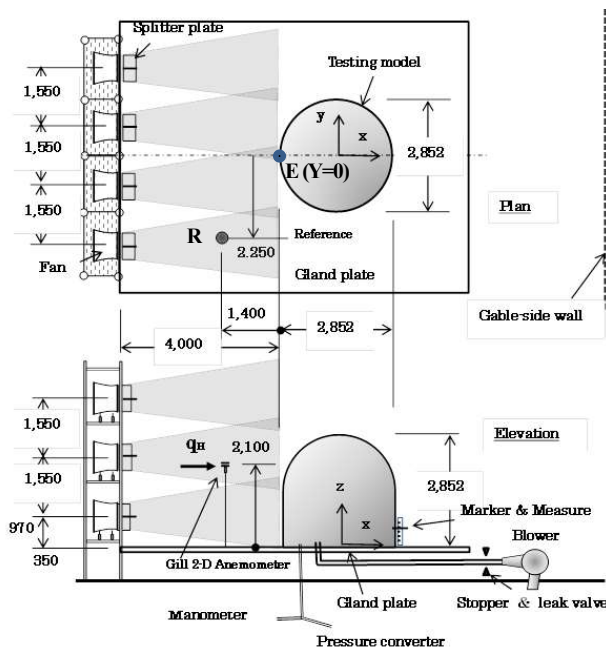


Fig.1 送風機の設置寸法と実験状況 (単位:mm)

3.3 基準風速および風速分布の測定点

基準風速は、空気膜モデルの風上側膜端から、X 方向に 1,400, Y 方向に膜端から 824 (中心から 2,250) そして高さ Z=2,100 の位置での風速とした (Fig.1 を参照)。なお、風の流れの中に空気膜モデルを設置した状態で基準風速を計測すると Blockage 効果に似た影響により風速を正しく測れないことから、モデルを取り除いた状態で計測している。

さらに、モデルを設置した場合には当然ながら基準点風速は影響されることから、影響が僅かと想定される十分離れた送風機近くの位置における風速を管理風速として計測し、試

験体なしの状態での対応関係の基に、管理風速との換算から基準風速を割り出す方式を採用している。

次に、Fig.2 に示すような空気膜モデルを取り除いた状態で、以下の 3 種類の測定 A, B, C によって送風装置の風速分布性状を把握した。

空気膜モデル前縁の分布として、 $X=-1,426$ での YZ 面に対する平均風速分布を各 12 台の Fan 中心軸位置 (△印) において計測した。

2) 測定 B・C

上記 1) の粗い測定点を補間するために、空気膜モデル直前の詳細な風速分布として、測定 B では高さ Z 方向に、そして測定 C では横 Y 方向に細かく測定点を設け計測した。

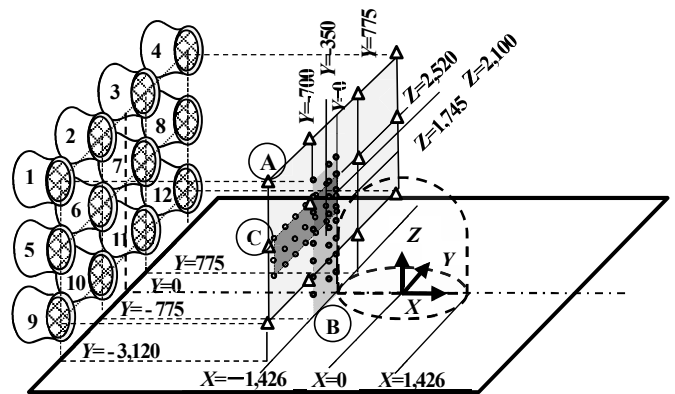


Fig.2 風速分布の測定点 (単位:mm)

3.4 疑似風洞装置の風速制御方法

12 基の送風機の風速制御は、全送風機を同時運転とし、回転数のみ変化させた。従って、発生風速と送風機回転数の関係を予め知る必要があり、試験体のない状態での風速を調べた。また、風速の計測は、送風機風下側の妻壁を閉鎖した状態と開放した状態の 2 通りで行った。

予備実験において、妻壁を閉鎖とした場合、妻壁で反射した逆流の発生によって外側の送風機の出力低下が発生したため、風速分布が均等に近づくよう内側の送風機の出力を調整した。降雪風が激しいときは妻壁を閉ざし、晴天時では妻壁は開放状態とし、送風機調整は閉鎖状態と同じとした。

Fig.3 は、Fig.1 に示される基準点(R)とする $X=-1,400$, $Y=-2,250$, $Z=2,100$ 付近での風速をクリモマスターと Gill 風速計によって計測した。参考として、試験体中心部の位置 (E 点、 $Y=0$, $Z=2,100$) でも計測を行った。

結果は、Fig.3 に示すように送風機の回転周波数 F に対して風速がほぼ線形的に増大し、その関係は (1) 式に示される。

$$V_H = 0.115F \quad (1)$$

しかしながら、 $Y=0$ の中心位置 (E 点) に対する風速は、3.7%ほど低下していた。この問題の取り扱いについては、3.5 節の以降の各節で詳細に検討している。

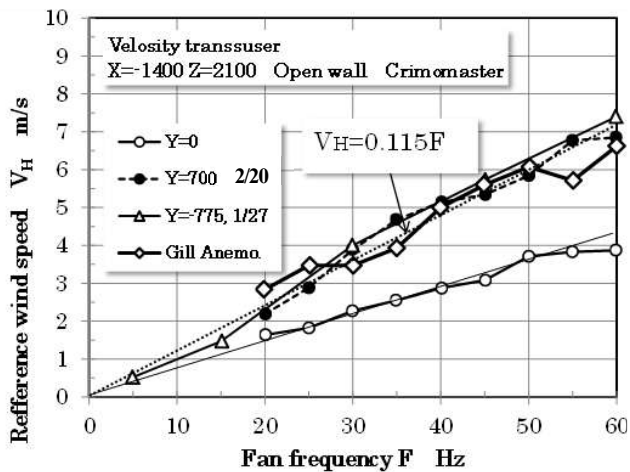


Fig.3 ファンの回転数と風速の関係

3.5 疑似風洞装置の乱れ度

Fig.4 は、Gill 風速計による基準点での風速変動記録である。風の強い $F=60\text{Hz}$ での基準点付近の風の乱れは、平均風速 $V_H=6.62\text{m/s}$ に対し乱れの強さ 36%の変動があり、一般的な市街地に相当する風に対応している。すなわち日本建築学会荷重指針²⁾という粗度区分IVの乱れ強さに近似していた。

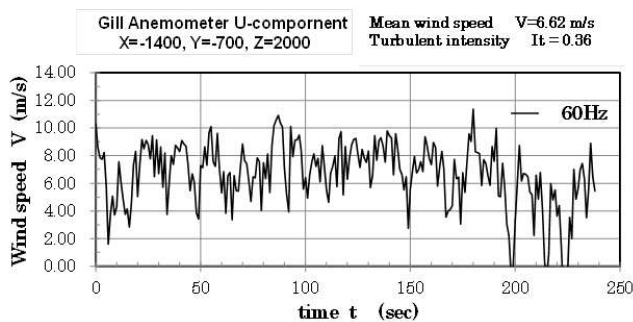


Fig.4 Gill 風速計による乱流計測

3.6 妻壁閉鎖による送風機出力への影響

3.4 節でも触れたように、送風機の風下に遮蔽壁となる妻壁の存在によって逆流効果が生じ、送風機出力に低下をもたらすことが分かった。

Fig.5 は試験体前面の $X=-1,426$ で、 $Y=700$ 、 $Y=-775$ の位置における高さ方向の風速をクリモマスターにより計測し、妻壁の開閉の違いによる風速分布の比較を行った。なお、送風機は $F=45\text{Hz}$ としている。

図から妻壁開閉の違いによる基準高さ相当での風速比率は、おおよそ (2) 式の割合であり、壁開放時の基準風速は壁閉鎖時に比べて 1.36 倍に増大するものと考えられた。

$$V_{\text{Open}}/V_{\text{Closed}} = \frac{(5.51+5.34)}{2} / 4.0 \cong 1.36 \quad (2)$$

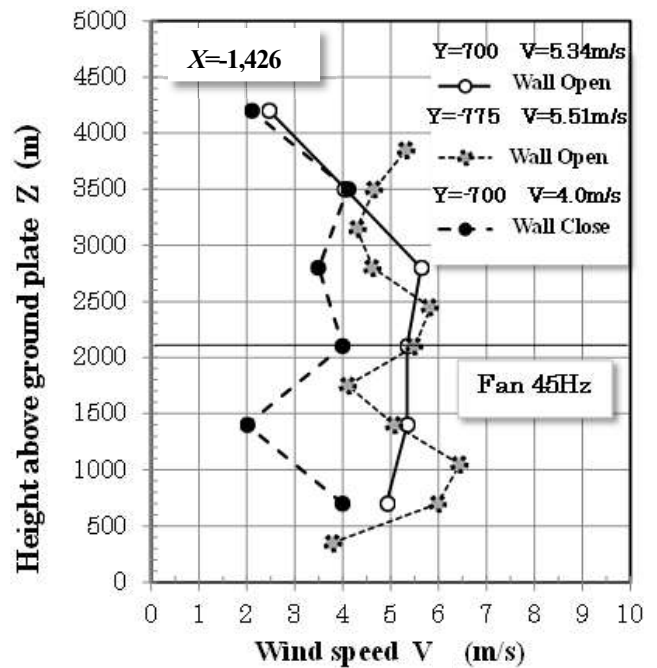


Fig.5 風下壁開閉による発生風速比較
(○ 壁開放、● 壁閉鎖)

3.7 試験体ドーム直前位置の風速分布性状

3.7.1 測定 A の分布

風速測定は、予め (1) 式によりファンの回転数に対して得られる 5 段階で測定した。測定結果は、Table 1 に示した。なお、送風機番号は、Fig. 2 中の各送風機に表示している。

結果として、中央部 4 基 (No.6, No.7, No.10, No.11) に対応する位置の風速については周囲 8 基に比べて高い値を示している。なお、妻壁は開放としている。

Table 1 測定 A (YZ 領域面) における測定点での風速値

Fan Number	Frequency F (Hz)				
	5	15	30	45	60
Mean wind speed $V_H(\text{m/s})$					
4	0.67	0.67	2.8	2.82	5.12
3	0.54	1.04	3.24	3.93	5.1
2	0.51	0.84	1.95	2.98	5.05
1	0.46	0.68	3.36	4.04	5.51
8	0.52	1.1	2.26	2.85	3.78
7	0.49	2.27	4.59	6.77	8.59
6	0.52	1.47	4	5.73	7.4
5	0.48	1.1	2.15	2.9	3.85
12	0.25	0.83	3.37	3.8	5.65
11	0.15	2.27	4.86	7.16	8.43
10	0.42	1.9	4.52	6.81	8.32
9	0.47	1.3	2.25	2.92	5.09

逆に、風速が極端に低い送風機は、中央高さ ($Z=2,520$) で両端の No.5 と No.8 の位置では、最高の風速を示した中央部に比べてほぼ半分以下の出力であった。

3.7.2 測定Bと測定Cの分布

測定Aでは、非常に荒っぽい測定点の選定であったことから、送風機と送風機の間の性状が不明であった。また、試験体中心線では周囲に比べて低い風速を示していた。そこで、測定Bと測定Cでは、送風機の回転数を最高の60Hzとし、試験体近傍のより詳細な分布性状の把握を試みたものである。

Fig.6には、水平距離を $Y=0$ 、 $Y=-350$ 、 $Y=-700$ の位置で高さ方向に変化させた測定Bと鉛直方向を $Z=1,754$ 、 $Z=2,100$ 、 $Z=2,520$ の位置で水平方向に変化させた測定Cによる風速分布を重ね合わせている。

測定Bの分布から、鉛直分布としては、試験体中心の $Y=0$ において風速 (●) は最も低く、水平距離 Y が中心から離れるにつれて風速が増大している。すなわち水平分布として中心部に溝が生じていることが分かる。この溝の割合は、基準高さで比べると63%弱である。また、その性状は凹凸が大きい、最上層と最下層を除けば概ね平均値が $Y=0$ を除き Fig.3 に示した基準高さの風速相当 ($F=60\text{Hz}$ 、 $V_F=7\text{m/s}$) になっていると見なされる。

そして、測定Cの分布から、 $Y=0$ を除き $Y=-350\sim-2,100$ の範囲の風速は測定Bの間を補間する値を示していた。

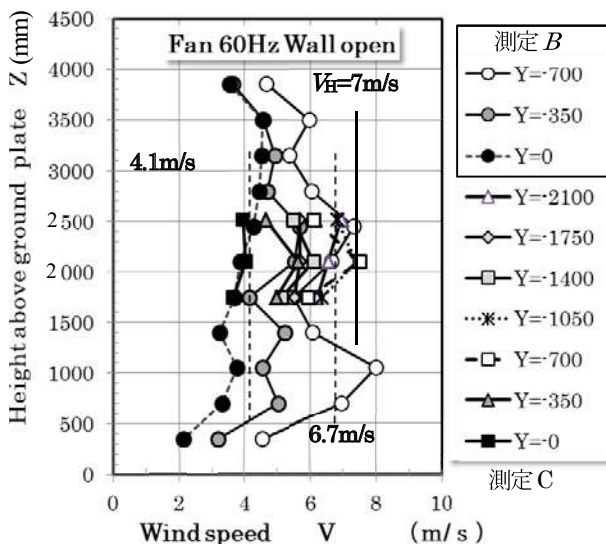


Fig.6 試験体前縁の鉛直分布

次に、Fig.7 は、Fig.6 を水平分布として見たものである。測定Cの水平分布は、鉛直方向に $Z=2,520$ 、 $2,100$ 、 1745 と変化させた場合であり、基準高さ $Z=2,100$ において最も高い風速 (●印) を示している。測定Bの結果は、地盤板近傍 (+印: $Z=350$) では低い風速を示すものの概ね測定Cの傾向と類似している。一方、全般的に、水平分布は、送風機と送風機の間位置では風速は低く、送風機の軸方向位置では風速は高い。これは、送風機から4mの距離では、均等分布的な観点からすれば発生させた送風の混合が十分ではないことを表している。言い換えると、真に様な風速分布を作り出すためには、12基の送風機で構成する送風装置では不十分であるか、ないしは送風機からの距離をさらに風下にする必要が

あると考えられた。

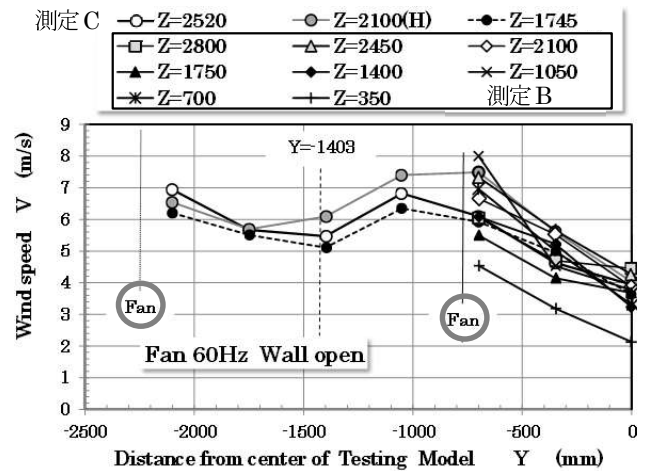


Fig.7 試験体前縁の水平分布

3.7.3 疑似風洞装置の実験風としての分析と評価

送風機1基当たりの性能としては、風量が $80\text{ m}^3/\text{min}$ であることから、4m離れた位置で12機を組み立てることで想定される風速は、(3)式のように平均約 3.7 m/s と試算される。なお、この試算においては、送風機の拡散角を概略 10° としたとき送風機から4mの位置では片側0.7m広がった約 26 m^2 の検査領域を通過するとしたものである。

$$V = \frac{480 \times 12}{60(1.5 \times 3 + 1.4)(1.5 \times 2 + 1.4)} \cong 3.69 \text{ (m/s)} \quad (3)$$

しかしながら、限られた測定点の範囲内では、風下妻壁開放の条件に対し、計測した風速は一部の測定点 (送風機 No.5 と No.8 に対応する位置) を除きほぼ最大出力60Hzにおいて 5m/s 以上の風速が期待された (Table 1 参照)。

Fig.8 は、測定A、測定B、測定Cの全ての結果を重ね合わせ、送風装置の分布性状を大まかに把握しようとしたものである。なお、送風機の回転数は、全ての測定において60Hzである。空気膜モデルをカバーする概略 $4\text{m} \times 4\text{m}$ の範囲において、中心軸 ($Y=0$) と地盤板近傍を除き、概ね $5\text{m/s} \sim 8\text{m/s}$ の風が作り出されている。従って、変動幅 1.5m/s の乱れ度を持つ風と見ることもできる。

一方、自然風は地表面粗度の摩擦効果により表面境界層が形成され、地上近傍では風速は著しく低下する。また、均一でない風速分布の入射風でもひとたび建築物等の遮蔽物が存在すると不均一な風速分布であっても物体前縁に接近した淀み領域においては作用風圧としてはさほど影響しない、すなわち遮蔽物によって風速分布が均されるとも考えられる。

他方、空気膜モデルを設置した場合、流れの遮蔽効果によって近傍の流れが偏向し基準点としての風速を設定することができないことから、3.3節で記述した方法により試験体が無いときの風速を代表風速とする必要がある。

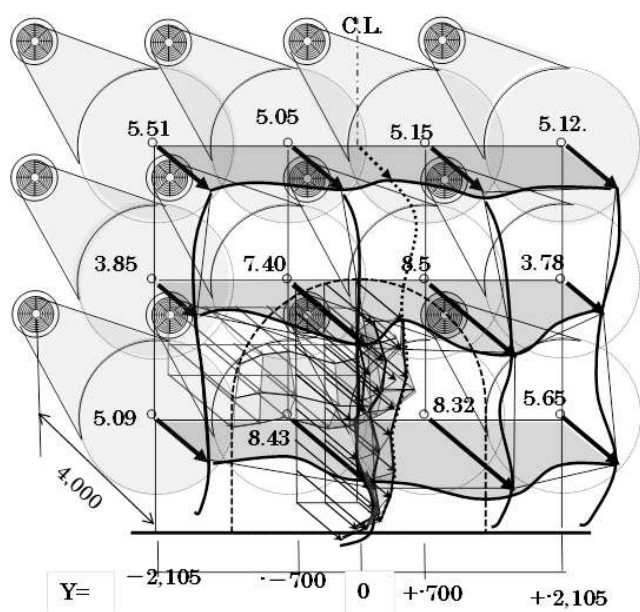


Fig.8 試験体前縁の分布性状

以上の観点から、風速分布的には凹凸があるものの送風機の最大出力 60Hz を考えたとき試験体の外郭範囲（図中の破線）内には平均的に 7m/s 以上の風が吹いていることから送風装置としては十分な機能を持つものと評価した。また、基準風速に関しても、基準点での風速が 7.0m/s を示していたことから、送風機の回転数によって十分制御できるものとした。

4. 風速と必要内圧に関する測定

4.1 実験概要

座屈現象の発生有無については、空気膜ドームモデル背後に設けたメジャーとドーム自身に印されたマーカーの変位差、しわの発生、膜面の上下振動（ブレ）の発現をビデオ画像に映された画像を目視によって判定した（Fig.9 参照）。すなわち、上記の現象の発生はドーム空気膜モデル背後の張力が抜けた（初期内圧で形成された初期の膜形状における張力を消失するとの仮定によって座屈発生限界と見なしている。従って、必要内圧は上記現象を無くするまで上昇させた内圧 P_t において座屈回避に必要な内圧 P_{0b} の計測では $P_t = P_{0b} + 10$ Pa とした。

次に、座屈を解消した状態においても風上淀み点付近の膜面では、作用風圧によるへこみ変形が発生しており、さらに原形回復（厳密には凹みが無くなる）に必要な内圧 P_0 の計測では $P_t = P_0 + 10$ Pa に達するまで内圧を上昇させた。

なお、実験は、以下の 3 つの状況で行っている。

- 1) 2 月 16 日の計測では、風雪が激しかったことから、風下の妻壁を閉鎖の状態で行っている。実験は、送風機の回転数を段階的に増大させ必要内圧を計測した。なお、この時の基準風速は、実験後 (1) 式によって換算したものである。

- 2) 2 月 17 日の計測では、暴風雪が治まったため、風下の妻壁を開放した状態で実験した。この時の基準風速は、(2) 式により壁開放による影響を補正した。
- 3) 2 月 17 日に 2) の実験が終了した段階で、送風装置の作り出す最大風速を期待して、風下壁を開放した状態でかつ送風機調整を外し、12 基の全ての送風機を最大 60Hz に揃え、回転数の変化のみで実験を行った。なお、空気膜モデルが設置されている状態においては基準点風速の計測が不可能であったため、後日空気膜モデルを取り除いた状態で計測を試み、別途、周波数と風速の関係により基準風速を求めた（Fig.1 を参照）。

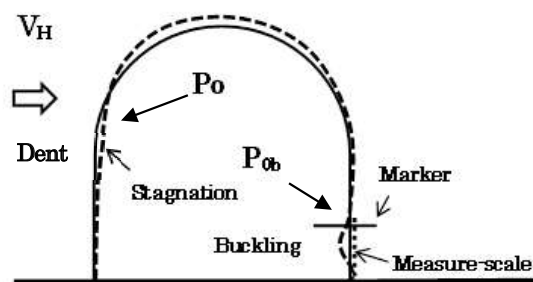


Fig.9 測定対象

4.2 結果と考察

風速に対する座屈回避のための必要内圧 P_{0b} に関する P_t ならびに原形回復のための必要内圧 P_0 に関する内圧 P_t の測定結果を Table.2～Table 4 に示す。

基準風速 V_H は、前項の条件において記述したように、実験 1) では壁を閉じたとき、実験 2) では送風機の 1) の条件と同じとし壁を開放したとき、そして実験 3) では実験 1) の調整を解除したときの基準点での風速である。送風は全て操作盤の回転数で行っている。

この一連の実験から、倉庫の妻壁を開放し、かつ風速分布を均一化の調整を外した方が基準風速は増大することが分かった。

まず、実験 1) に関しては、座屈限界に対する内圧の計測のみで、実験 2) に関しては、最大風速の状態で原形回復のための内圧についても測定できた。次いで、実験 3) においては、送風機の回転数が 50Hz 以上になると膜全体の振動が

Table 2 実験 1) の壁閉鎖時の必要内圧 P_{0b} の測定

Date 2021/2/16 16:00～		
Weather Gail with snow		
Fan (Hz)	V_H (m/s)	P_{0b} : Wall close (Pa)
0	0	0
25	1.9	0
30	<u>2.3</u>	0.5
35	2.8	3
40	3.3	5
45	3.7	9
50	4.2	12
60	4.7	18

Table 3 実験 2)の壁開放時の必要内圧 P_{0b}, P_0 の測定

Date 2021/2/17 10:50 ~12:10		
Weather Fine Snow-cover Moderaqte wind		
V^*_{H} (m/s)	P_{0b} : Wall open (Pa)	P_0 : Wall open (Pa)
0	0	—
2.584	-1	—
3.128	1	—
3.808	3.5	—
4.488	5	—
5.032	10	—
5.712	15	—
6.392	22	36

V^*_{H} : modified by eq.(2)

Table 4 実験 3)の壁開放時の必要内圧 P_{0b}, P_0 の測定

Date 2021/2/17			
Weather Fine Snow-cover Moderte wind			
Fan (Hz)	V^{**}_{H} (m/s)	P_{0b} : Wall-open (Pa)	P_0 : Wall open (Pa)
0	0	0	—
20	2.3	0	—
25	2.88	2	—
30	3.45	6	—
35	4.03	10	—
40	4.6	13	—
45	5.18	15	—
50	5.75	—	35
55	6.33	—	60
60	6.9	—	75

V^{**}_{H} : Calculated by eq.(1)

激しくなり、内部設置の変位計測機器等に影響を与える危険性があったので、急遽内圧を上昇させ P_0 のみの計測とした。

以上の結果を基に、風速に対する空気膜ドームモデルの座屈回避に必要な内圧 P_{0b} および原形回復に必要な内圧 P_0 の関係を Fig.10 と Fig.11 に示し、合わせて前報⁴⁾において提案した必要内圧に関する下式の簡易算定式から算定した結果と比較している。

(1)座屈回避に必要な内圧

$$P_i = P_{0b} + P_{0i} = 0.881 \cdot q_H + P_{0i} \quad (3)$$

(2)原形回復に必要な内圧

$$P_i = P_0 + P_{0i} = 1.597 \cdot q_H + P_{0i} \quad (4)$$

ここに、 q_H は基準風速、そして P_{0i} は本実験における初期内圧であり、 $P_{0i} = 10\text{Pa}$ に設定した。

Fig.10 は、風下妻壁の閉鎖（実験 1）と開放（実験 2）における必要内圧の比較を示している。壁閉鎖時と開放時の座屈回避のための必要内圧 P_{0b} の差は、風速の増大に連れて拡大しているものの上記の簡易算定法の曲線に近似

していた。また、原形回復に必要な内圧 P_0 に関しては、1 回の結果であるが、簡易算定式と比較的近似している。

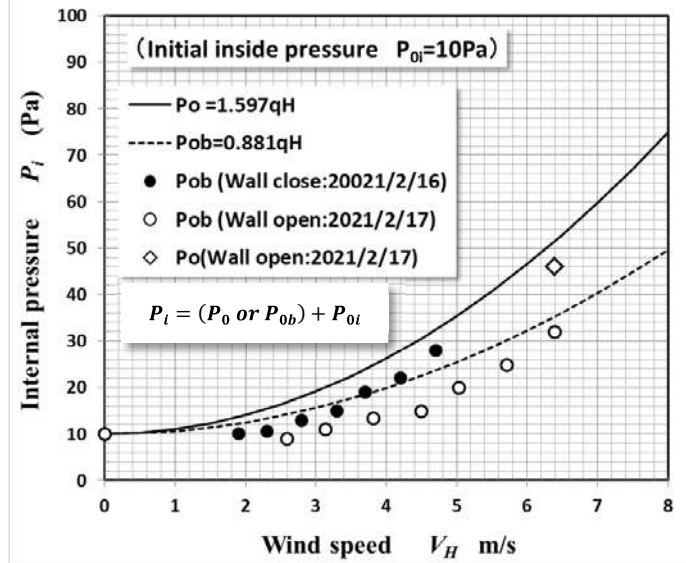


Fig.10 必要内圧の実験と推定式の比較 (実験 1、実験 2)

次に、Fig.11 は、疑似風洞装置の送風機調整を行わず、12 基が同じ出力周波数とし、かつ妻壁を開放した条件下での実験結果と簡易算定式との比較を示している。

座屈回避に必要な内圧 P_{0b} に関しては、比較的近似しているものの原形回復に必要な内圧 P_0 に関しては、高風速で実験値が大きな乖離を示している。この乖離は、送風機の高回転時は中央部の風速が実質的に高くなり大きな風圧が作用していたものと思われた。そのため、送風機が 50Hz を超えた風速時には空気膜モデルの激しい変形と振動が生じ、 P_0 に関する計測のみとした。

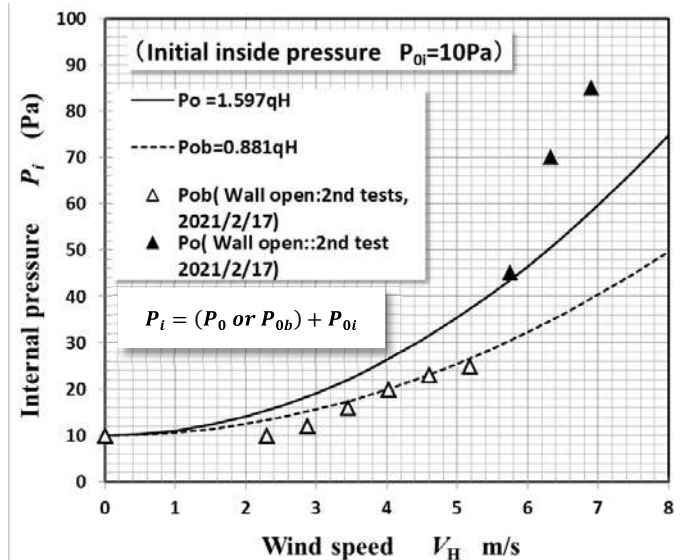


Fig.11 必要内圧の実験と推定式の比較 (実験 3)

5. 結論

結論として、以下にまとめることができる。

12 基の送風機で組み立てた大型疑似風洞装置は、送風機同士の十分な混合状態になく、送風機から 4 m 先の空気膜モデルの位置には均一な風速分布を得るまでには至らなかった。しかしながら、風速分布が大きな凹凸を示すにもかかわらず、測定に与える影響は結果を左右するほど大きくなかったと考えられたことで、実験として十分使用可能な装置と判断できた。

目視観測という原始的手法にも拘らず、本実験による座屈回避ならびに原形回復の必要内圧に関する測定結果は、前報¹⁾で提案した簡易算定式との比較において、比較的良好な対応関係にあるものと見做すことができた。

謝辞

本論をまとめるにあたり、大型疑似風洞の作成から空気膜ドーム模型の製作、また測定データ取得および整理において、大嘉産業の関係者各位、鹿島建設技術研究所の関係者各位ならびに横浜国立大学河端研究室の学生各位に多大なるご支援を戴いたことに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 丸田榮藏、河端昌也、揖斐剛：「球形屋根を有する円筒形空気膜構造の必要内圧制御に関する研究—その 1 簡易算定式の誘導」膜構造ジャーナル 2024
- 2) 建築物荷重指針・同解説、日本建築学会、2015

Research on the Required Internal Pressure Control of Cylinder- shaped

Pneumatic Membrane Structures with Spherical Roofs

Part 2 : Measurement of the Required Internal Pressure Using a large-scale pseudo wind tunnel apparatus

Eizo Maruta ^{*1}

Masaya Kawabata ^{*2}

Manabu Yamamoto ^{*3}

Takeshi Ibi ^{*4}

Summary

In this study, a simplified calculation method based on the statics of the thin film structures was introduced regarding the internal pressure control necessary for deformation response to wind loads on cylindrical air membrane structures with spherical dome roofs. Additionally, a method for estimating the required internal pressure for original shape recovery and buckling avoidance, as well as the maximum tension, was proposed. Due to the difficulty of conducting experiments with actual objects, a large-scale pseudo wind tunnel apparatus was created by constructing a huge spherical pneumatic membrane structure dome model to obtain characteristics close to actual size and combining 12 blowers, and experiments were attempted in artificial wind created within it.

To obtain the relationship between wind speed and required internal pressure, experiments were conducted using a simple measurement method called visual observation, which, although primitive method, enabled measurement of the internal pressure necessary for original shape recovery and buckling avoidance. The experiments showed a good correlation when compared with the simplified calculation method.

^{*1} CEO,WIND & PHYSICS, LLC, Dr. Eng.

^{*2} Professor, Institute of Urban Innovation, Yokohama National University, Dr. Eng.

^{*3} Chief Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.

^{*4} Development Div. DAIKA Industrial Co. Ltd.