特 集

構造基本断面の空力特性 (その4)

Aerodynamic characteristics of fundamental structures

(Part 4)

10. 球状構造物の空力特性

木本 英爾*

Eiji KIMOTO

10.1 はじめに

球状構造物の風圧係数と風力係数などの空力特性についてまとめて記す。その際、公表されている既存の資料をもとに、模型の大きさ、風洞気流の性状、基準の風速と速度圧およびレイノルズ数などの実験条件を可能な限り明示している。

球状構造物は一般にドームと呼ばれるが、ここでは球面が大地に直接接するものを接地型ドーム、球面が壁面で支えられているものを壁付ドームと呼ぶことにする。また、ドームの平面直径Dに対するライズ高さRの比 R/D をライズ比、壁付ドームの壁高さH(軒高とも呼ぶ)の直径Dに対する比を細長比 H/D と呼ぶことにする。他に、その表面に小さな粒子をはりつけた風洞模型が用いられる場合には、ドーム直径に対する粒子直径の比を粗度率とし、さらに風洞断面に対する模型の見附面積の比を閉塞率とした。

なお、著者によって使用している記号はもちろん異なっている。出来るだけ原著者の記号をそのまま用いて敢えて統一していないが、適宜説明を加えて理解できるようにしたつもりである。

10.2 静的空力特性

ドームの静的な空力特性について、風洞実験結果を主に一部野外での実測結果を用いて記す。

10.2.1 風圧係数

接地型ドームの場合、接近流が一樣流あるいは乱流境界層であっても、風圧係数分布には顕著な差異が認められない^{1,2)}。ドームの等風圧係数曲線は風向方向に直交して平行な分布を示す^{5-8,11,13,14,16,17,21)}。

* 大阪市立大学工学部、講師
Lecturer, Osaka City University

壁付ドームの場合、ライズ比 R/D と細長比 H/D が大きくなると、接地型ドームと同様な等風圧係数分布を示す^{22,24,26)}。

ライズ比 R/D が大きくなると、ドーム頂部における最小風圧係数および側面の風圧係数の絶対値が大きくなる。また、風上側の風圧係数は負から正に変わり、等風圧係数曲線分布の勾配が急激になる。背面の風圧係数はライズ比の増加によって余り変化しないが、細長比 H/D の増加によってその絶対値はやや大きくなっている^{4,25)}。

図10-2-1 ドームの風圧係数〔注：模型の閉塞率5.4%(Max)〕

対象構造物	接地型ドーム			
出典	F.J.Maher: Wind Loads on Basic Dome Shapes, J.St.Div, ASCE, ST3, June, 1965, pp.219~228			
	実測		基準風速	境界層外側の自由流速
実験条件	○風洞実験 断面: 6×6ft ²	一様流 ○境界層流 乱流	基準速度圧	自由流での速度圧
			代表長さ	底面の直径 D=12,24 in
			Re 数	0.92×10 ⁶ (12 ft model) 1.84×10 ⁶ (24 ft model)

1 気流分布

2 形状

直径D (in)	ライズR (in)	ライズ比R/D	
24	12	0.50	Hemisphere
	4.08	0.17	閉塞率 4.4%
	2.33	0.10	
	1.8	0.07	
	1.28	0.05	
12	6	0.50	高さ 1ftの円柱
			閉塞率 1.1%

図10-2-2 接地型ドームの風圧係数 ①

3 空力特性

(a) $R/D=0.5$

(b) $R/D=0.17$

(c) $R/D=0.07$

図10-2-2 (つづき)

対象構造物	接地型ドーム			
出典	N.Toy, W.D.Moss, E.Savory: Wind Tunnel Studies on a Dome in Turblent Boundary Layers J.Wind Eng. and Indu. Aerodyn., 11(1983), 201~212			
	実測		基準風速	境界層外側での自由流速 10.3m/s
実験条件	○風洞実験 断面: $1.37 \times 1.06 \text{ m}^2$	一様流 ○境界層流 2種類 乱流	基準速度圧	境界層外側での速度圧
			代表長さ	底面の直径 225mm
			R e 数	1.6×10^5

1 気流分布

2 形状

模型表面に砂で粗度をつける
粗度率 $e/D=0.001$ (e: 砂粒の直径)
閉塞率=1.36%

(c) 半球ドーム

図10-2-3 接地型ドームの風圧係数 ②

3 空力特性

(d) LINES OF EQUAL PRESSURE OVER A ROUGH HEMISPHERICAL DOME IN A SMOOTH BOUNDARY LAYER

(e) LINES OF EQUAL PRESSURE OVER A ROUGH HEMISPHERICAL DOME IN A ROUGH BOUNDARY LAYER

対象構造物	接地型ドーム			
出典	石井, 鈴木, 中山: 球型空気膜構造に関する風洞実験 風工学シンポジウム(1984)			
実験条件	実測 ○風洞実験 断面: 1.6×1.2m ²	○一様流 (0.5%) ○境界層流 d=0.29 ○乱流 (17%, Lx=9cm)	基準風速	模型頂部相当高さでの風速
			基準速度圧	同上での速度圧
			代表長さ	スパンS (図b参照)
			Re数	模型頂部風速とS

1 気流分布

2 形状

図10-2-4 接地型ドームの風圧係数 ③

3 空力特性

(c) 風圧係数分布

(d) 最小平均風圧係数とライズ/スパン比

図10-2-4 (つづき)

一方、野外のドームに関する実測例は数少ないがそれらの結果によると、細長比0.20程度でライズ比0.14程度の壁付ドームの風下側における平均風圧係数分布は風洞実験結果と比較的良好な性状を示しているが、風上側で少し異なっている^{9,10,19)}。ライズ比の大きな接地型ドームの背面における平均風圧係数は風洞実験結果との差異が大きい¹²⁾。一般に、実測結果は自然風の多様な性状を包含し、基準風と静圧など計測に伴う問題の他に測定風速も余り大きくはないことが多い。今後、これらの諸問題を克服して実測データを蓄積し実現象を把握する必要がある。

対象構造物	壁付ドーム				
出典	石崎，桂，能美，山本，伊藤，吉田：大スパンドームをもつ貯炭場の構造的検討－その3－風圧力に関する実験 日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和55年9月，pp.893～894（1980）				
実験条件	○実測	1980年2月12日 直径6m，高さ2.5m	基準風速	一様流 5～20m/s 乱流 15 m/s	
	○風洞実験 断面： 直径 1m	○一様流 境界層流 ○乱流 乱れの強さ15%	基準速度圧		
			代表長さ	底面直径 D=40cm	
			R e 数	(1～6)×10 ⁵	

2 形状

京大防災研究所湖岸風力実験所の敷地内

(a)：風洞模型
〔注：閉塞率2.6%〕

	縮尺	平面の直径	レイノルズ数
(1) 実物	1/1	120 m	4～24×10 ⁷
(2) 野外実験用	1/20	6	2～12×10 ⁴
(3) 風洞実験用	1/300	0.4	1～6×10 ⁵

ライズ比 $R/D \approx 0.14$
細長比 $H/D \approx 0.22$

図10-2-5 壁付ドームの風圧分布

3 空力特性

(b) 野外実験結果と風洞実験結果の比較
(ドーム中央断面の風圧分布)

ドーム壁面より5.8mの距離で、地上1.5m高さで
基準風速をとる。実験時の風速14m/s。

(c) 平均風圧係数分布 (一様流、風速 20m/s)

(e) 平均風圧係数分布 (乱流、風速 15m/s)

(d) 変動風圧係数分布 (一様流、20m/s)

(f) 変動風圧係数分布 (乱流、15m/s)

図10-2-5 (つづき)

対象構造物	接地型ドーム			
出 典	川村, 木本, 奥田, : 球状構造物の風圧性状に関する実験的研究 その2, 変動成分及び風洞実験と実測との比較 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和57年10月(1982)			
実験条件	○実 測		基準風速	実測: 試験体の北西7.5m高さ 2.5mの風速 風洞実験: 境界層 外側の一様流風速
	○風 洞 実 験	一様流 ○境界層流 乱流	基準速度圧	上記の速度圧
	断面: 1×1m ²		代表長さ	スパンD 実測: 5.0m 風洞実験: 0.18m
			R e 数	実測 2.0×10^6 風洞実験 2.2×10^5

1 気流分布

(a) 風洞気流の性状

2 形状

半球ドーム

(b) 模型

[注: 風洞模型 D=0.18m
中間供試体 D=5.0m]

3 空力特性

(c) 風圧係数〔風洞実験〕

図10-2-6 接地型ドームの風圧係数 ④

図10-2-6 (つづき)

10.2.2 空気力

抗力係数 C_D は、ライズ比 R/H に余り関係しないで、 D/H の増加に伴ってやや減少している。

揚力係数 C_L は D/H の増加と共に漸減し、その絶対値はライズ比が小さいほど小さい。

転倒モーメント C_M はライズ比が大きい場合 D/H の増加と共に漸減するが、ライズ比が小さい場合 D/H の増加と共に漸増する^{22,24)}。

対象構造物	壁付ドーム			
出典	吉田, 本郷: 大スパンドーム屋根に作用する風圧力に関する風洞実験—建物に作用する空気力に関する実験的研究 (その5) 鹿島建設, 技研年報, 昭和61年6月, (1986)			
実験条件	実測		基準風速	各模型軒高風速 5.2~10.3m/s (Re数から逆算)
	○風洞実験 断面: 1.6×1.0m ²	一様流	基準速度圧	同上の速度圧
		○境界層流	代表長さ	スパンド 26.7 cm
		乱流	Re数	(0.92~1.83)×10 ⁵

1 気流分布

(a) 風速の鉛直分布

2 形状

$$\text{抗力係数 } C_D = \frac{D}{q \cdot A_H}$$

$$\text{揚力係数 } C_L = \frac{L}{q \cdot A_R}$$

$$\text{転倒モーメント係数 } C_M = \frac{M}{q \cdot A_H \cdot h}$$

ここに、 D : 抗力 L : 揚力

M : 転倒モーメント, A_H : 模型の見付面積

A_R : 模型屋根面の投影面積 ($= \frac{\pi}{4} d^2$)

q : 模型軒高での速度圧

図10-2-7 壁付ドームの空気力係数

Table 1 Characteristics of Models

MODEL	d (mm)	h (mm)	y (m)	y/d	d/h	A (cm ²)	A/S (%)
F-1	267	267			1	712.89	4.456
2	134	267			2	357.78	2.236
3	91	267			3	242.97	1.519
4	67.5	267			4	180.23	1.126
6	45	267	0	0	6	120.15	0.751
8	35	267	0	0	8	93.45	0.584
10	28	267	0	0	10	74.76	0.467
12	23	267	0	0	12	61.41	0.384
L-1	267	267			1	747.01	4.669
2	134	267			2	391.90	2.450
3	91	267			3	277.09	1.732
4	67.5	267	13.35	0.05	4	214.35	1.340
6	45	267	13.35	0.05	6	154.27	0.964
8	35	267	13.35	0.05	8	127.57	0.797
10	28	267	13.35	0.05	10	108.88	0.681
12	23	267	13.35	0.05	12	95.53	0.597
M-1	267	267			1	764.47	4.778
2	134	267			2	409.36	2.559
3	91	267			3	294.55	1.841
4	67.5	267	26.7	0.1	4	231.81	1.449
6	45	267	26.7	0.1	6	171.73	1.073
8	35	267	26.7	0.1	8	145.03	0.908
10	28	267	26.7	0.1	10	126.34	0.790
12	23	267	26.7	0.1	12	112.99	0.706
H-1	267	267			1	800.34	5.002
2	134	267			2	445.23	2.783
3	91	267			3	330.42	2.065
4	67.5	267	53.4	0.2	4	267.68	1.673
6	45	267	53.4	0.2	6	207.40	1.293
8	35	267	53.4	0.2	8	180.90	1.131
10	28	267	53.4	0.2	10	162.21	1.014
12	23	267	53.4	0.2	12	148.86	0.930

[注; A: 見付面積, A/S: 閉塞率]

(b) Variation of Drag Coefficient with d/h

(c) Variation of Lift Coefficient with d/h

(d) Variation of Overturning Moment Coefficient with d/h

(e) Pressure Distributions on Flat-Round Roofs ($y/d = 0$)

(f) Pressure Distributions on Low Rise Domes ($y/d = 0.05$)

(g) Pressure Distributions on Middle Rise Domes ($y/d = 0.1$)

(h) Pressure Distributions on High Rise Domes ($y/d = 0.2$)

10.2.3 流れ

ドーム頂部と同じ高さでは、平均風速、乱れの強さともにほとんど変化が見られない。下層になるに従って、その高さでのドーム半径よりもやや外側の位置で乱れの強さがピークをもち、さらに風下へ移動するとピークそのものも緩やかで幅広くなり、平均風速も回復してくる。ドーム中心を通る風向方向の鉛直面内では、ドームのすぐ近くで最下層部の平均風速に逆流が見られ、乱れの強さはドーム頂部よりやや下側でピークを持っている。風下になるに従って、鉛直方向における平均風速の勾配は緩やかになって風速がほぼ風上側での値に回復する位置は高くなる。乱れの強さがピークをもつ位置はやや下方に移動し、ピークそのものも緩やかなものになっている^{13,23)}。

図10-2-8 接地型ドームの後流での風速分布〔注：出典は図10-2-3に同じ〕

図10-2-8 (つづき)

10.2.4 Re効果

ドームの底面直径と頂部高さでの風速によるレイノルズ数が $(1\sim6) \times 10^4$ 程度の場合、風圧係数分布がレイノルズ数に依存する割合は大きい。このような場合、接近流に風速勾配と乱れを与えたり、模型の表面に底面直径に対する比が $10^{-3}\sim 10^{-2}$ 程度の粒子を取り付けるなどの工夫を行って、風圧係数の風速依存性を少なくしている場合もある。しかし、設計時に問題となる実現象における風圧係数などの空力特性が完全に説明されていない現状では、模型表面の粗度をどの程度に設定するかは今後の説明を必要とする課題である。

一方、壁付ドームの場合流れは軒高で剥離し、さらにライズ比が比較的小さい場合にはドーム屋根の全面がこの剥離流で覆われることなどから、屋根面の平均風圧係数が風速に依存する度合は少なくなる。また、接地型ドームの場合、ライズ比が比較的小さい場合には接近流が例え一樣流であっても風洞底板で発達した乱流境界層に覆われていることが多い。

10.2.5 乱流効果

ドームの頂部における風圧係数の絶対値および抗力係数と揚力係数は模型直径の境界層厚さに対する比に比例して漸増している。接近流の乱れによっては、この比の値が0.5~1.0を境にして揚力係数と頂部における風圧係数の絶対値は急増する傾向を示す¹¹⁾。このように、頂部での負圧の絶対値と揚力係数は接近流の乱れと境界層厚さに依存する。

数少ない実測データによると、風向、風速ともに実測結果は乱流境界層での風洞実験結果と比較的良好に対応するが、一部一樣流での風洞実験結果と良好に対応している例もある。

対象構造物	接地型ドーム			
出典	S.Taniguchi, H.Sakamoto: Time Averaged Aerodynamic Force Acting on a Hemisphere Immersed in a Turbulent Boundary J.Wind Eng. and Indu. Aerody. 9(1982), 257~273			
実験条件	実測		基準風速	
	○風洞実験 断面:	一様流	基準速度圧	
		○境界層流 乱流	代表長さ	
			Re数	$(2.6 \sim 5.8) \times 10^4$

1 気流分布

(a) 模型と気流

$$u/u_r = 5.75 \log(u_r y / \nu) + 5.1$$

u_r : せん断流速

ν : 動粘性係数

図10-2-9 接地型ドームの空気力特性と気流の性状

3 空力特性

(b) 頂部での風圧係数と境界層厚比 d/δ の関係

(c) 揚力係数 C_L と境界層厚比 d/δ の関係

(d) 抗力係数 C_D と境界層厚比 d/δ の関係

10.2.6 風洞実験法

前項までに述べた事柄と一部重複するが、ここでは球状構造物の風洞実験法についてまとめる。

〔閉塞率〕 模型の閉塞率が10%程度になると、風圧分布の性状がかなり異なる。厳密には1%以下の閉塞率が望ましいとの考えもあるが、計測精度などの問題を考慮すると現実的には3～5%程度は許容されるようである。

〔レイノルズ数〕 ドーム底面直径と頂部高さの風速（壁付ドームの場合は軒高さの風速）で定義したレイノルズ数が 10^5 以上になると、風圧係数などの風速依存性の度合いが少なくなる。

〔乱れ〕 現地における自然風の性状に対応した乱れの強さを風洞で再現する。さらには、乱れのスケールに関する相似をも満たすことが望ましい。

〔境界層厚さ〕 境界層厚さに対する模型高さの比によっては、風圧係数分布など空力特性が変化する。従って、実物におけるこの比を風洞でも再現できるように、風洞内の境界層厚さと模型の規模を調節することが望ましい。

以上、この種の構造物に関する風洞実験法について、目標値のようなものを列記してきた。全ての相似条件を満たすことは不可能なこともよく知られた事実である。従って、扱う現象によって重要度を考慮して相似条件を選択するなどの工夫が大切である。

10.3 動的空力特性

球状構造物の動的空力特性については、資料が非常に数少ないので、ここでは変動風圧に限定して記す。

10.3.1 非定常圧力

ライズ比の小さな壁付ドームの風洞実験によると、変動風圧係数は風上側では0.30～0.35程度で、風下になるに従って急激に減少して大部分の屋根面で0.05程度の値になっている^{9,18)}。このような性状は接近流が一様流、乱流あるいは乱流境界層のいずれであっても大きな差は認められないようである。

参考文献

- 1) 日本建築学会風荷重小委員会：建築物の耐風設計資料，昭和62年12月
- 2) 日本鋼構造協会：空気力学的諸係数に関するデータシート，昭和61年3月
- 3) 亀井：曲面屋根建物風力係数の実験，日本建築学会論文報告集，第63号，昭和34年10月245～247
- 4) 亀井、木村、秋野：球面構造物の風圧分布風洞実験，日本建築学会論文報告集，第69号，昭和36年10月
- 5) F. J. Maher：Wind Loads on Basic Dome Shapes, J. St. Div., ASCE, ST3, June, 1965, 219～228
- 6) J. Blessmann：Pressure on Domes with Several Wind Profiles, Intern. Conf. on Wind Eng. on Build. and Structure, 1971, Tokyo
- 7) J. Wiancki and J. Drivere：AERODYNAMIQUE DU BATIMENT ET DES OUVRAGES D'ART, ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, N298, OCT 1972
- 8) C. W. Newberry and K. J. Eaton：Wind Loading, Handbook, BRE Report, 1974

- 9) 石崎, 桂, 能美, 山本, 伊藤, 吉田: 大スパンドームをもつ貯炭場の構造的検討-風圧力に関する実験-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和55年9月, 893~894
- 10) 石崎, 桂: 自然風中の模型ドームに作用する風圧について, 京都大学防災研究所年報, 第25号B-1 昭和57年4月, 221~231
- 11) S. Taniguchi and H. Sakamoto: Time Averaged Aerodynamic Force acting on a Hemisphere immersed in a Turbulent Boundary, J. Wind Eng. and Indu. Aerodyn., 9(1982), 257~273
- 12) 川村, 木本, 奥田: 球状構造物の風圧性状に関する実験的研究-その2, 変動成分および風洞実験と実測との比較-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和57年10月
- 13) N. Toy, W. D. Moss and E. Savory: Wind Tunnel Studies on a Dome in Turbulent Boundary Layers, J. Wind Eng. and Indu. Aerodyn., 11(1983), 201~212
- 14) 石井, 鈴木, 中山: 球型空気膜構造に関する風洞実験, 風工学シンポジウム(1984)
- 15) 深尾, 岩佐, 又木, 岡田: 低ライズケーブル補強空気膜構造の力学的性状に関する実験的研究-風圧力の性状と風荷重時の静力学特性について-風工学シンポジウム(1984), 137~144
- 16) 川村, 木本, 木内, 田代: 大スパン構造物の屋根面に加わる風圧力の機構に関する考察, 風工学シンポジウム(1984), 153~158
- 17) B. G. Newman and U. Ganguli: Flow over Spherical Inflated Buildings, J. Wind Eng. and Indu. Aerodyn., 17(1984), 305~327
- 18) 林田, 岩佐, 又木, 深尾: 低ライズケーブル補強空気膜構造屋根面の風圧分布について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和60年10月
- 19) 杉崎, 金子, 藤井: 空気膜構造(エアースポートドーム)の実大模型実験(その4)-風洞実験による風圧係数の検討-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和60年10月, 1191~1192
- 20) 金子, 藤井, 杉崎: 空気膜構造(エアースポートドーム)の実大模型実験(その3)-風圧力の測定-日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和60年10月, 1189~1190
- 21) 川村, 木本, 木内, 中井, 谷口: ニューマチックの耐風性に関する研究(その10, 剛模型による風洞実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和60年10月
- 22) 吉田, 本郷: 大スパンドーム屋根に作用する風圧力に関する風洞実験-建物に作用する空気力に関する実験的研究(その5), 鹿島建設技研年報, 昭和61年6月
- 23) E. Savory and N. Toy: Hemispheres and Hemisphere-Cylinders in Turbulent Boundary Layers, J. Wind Eng. and Indu. Aerodyn., 23(1986), 345~364
- 24) 本郷, 吉田: 平屋根およびドーム屋根をもつ円形構造物に作用する空気力について-建物に作用する空気力に関する実験的研究(その6)-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和62年10月, 1451~1452
- 25) 本間, 川口, 岡田: 裁断半球ドームに作用する風圧力に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和62年10月, 1453~1454
- 26) F. J. Maher: Wind Loads on Dome-Cylinder and Dome-Cone Shapes, J. St. Div., ASCE, ST5, Oct. 1966, 79~96