

円弧型独立上屋の外装材用ピーク風力係数に関する研究*

秋田工業高等専門学校 丁 威
東北大学 植松 康

1. 初めに

円弧型独立上屋はイベント会場や公園の休憩所(写真1)など、公共空間で広く利用されている。一般に軽量であるため風荷重が設計上重要となるが、建設省告示や日本建築学会「建築物荷重指針」¹⁾(以下、「荷重指針」)には設計用風力係数は示されていない。これまで円弧屋根を有する閉鎖型建築物の風荷重については、様々な研究がなされてお



写真1 円弧型独立上屋

り、設計用風力係数が建設省告示や荷重指針等に示されている。一方、円弧型独立上屋については、それらには設計用風力係数が記されていないため、実際の設計においては、閉鎖型建築物の風力係数を基に設計荷重を評価することが多いようである。しかし、壁の有無によって屋根まわりの流れが大きく異なるので、そのような評価方法は合理的ではない。風洞実験によって評価するのが望ましいが、屋根上下面の風圧を同時に測定する必要があること、壁がないため多くの導圧管を風洞床下まで導くことが困難であること等の理由により、風洞実験模型の製作は困難である。これまで風洞実験がほとんど試されていない理由はここにある。Nataliniら²⁾がライズ・スパン比0.2の模型を用いて平均風力係数分布を求めているが、動的荷重効果は検討していない。山村ら³⁾および文・植松⁴⁾は六分力計を用いて様々なライズ・スパン比を有する屋根の全体風力を測定した。風圧分布も測定しているが、屋根全体ではなく代表的な2ライン上での測定に限られており、屋根全体の分布は得られていない。動的荷重効果を考慮して設計荷重を設定するためには屋根全体の風力分布が必要である。

本研究では、円弧型独立上屋を対象とし、屋根全体に作用する風圧・風力の分布特性を把握するため、圧力測定孔を屋根全面にわたって多数配置した実験模型を3Dプリンタによって製作し風洞実験を行った。その結果に基づき円弧型独立上屋の屋根全体に作用する風圧・風力の特性を把握し、外装材用ピーク風力係数のモデルを提案する。

2. 風洞実験の概要

2.1. 実験模型と気流

風洞実験は、東北大学工学研究科都市・建築学専攻所有のエッフェル型境界層風洞(測定部 $1.4\text{m}^W \times 1.0\text{m}^H \times 6.5\text{m}^L$)を用いて行った(写真2)。本研究では、模型の幾何学的縮尺率を $\lambda_L = 1/100$ と設定する。写真3に示すように風圧測定用の基本模型は3Dプリンタを用いて屋根と柱を一体として作製した。図1に本研究で用いる座標系と記号を示す。屋根のライズ・スパン比 f/B

* Discussion of peak wind force coefficients for designing cladding/components of a vaulted free roof by Wei Ding, Yasushi Uematsu

は 0.1 と 0.2 の 2 種類である。スパン B および桁行長さ W はいずれも 150mm である。屋根の平均高さは 80mm である。屋根の厚さは 4mm, 柱は辺 6.5mm の正方体である。導圧管(銅パイプ)は屋根上下面の風圧測定孔から屋根および柱内部を通っており, 柱脚部においてビニールチューブに接続されている。図 2 は風圧測定点配置を示す。5 ラインに沿って圧力測定孔が上下面にそれぞれ 5 点ずつ設けられている。風圧測定点は全部で 50 である。屋根に作用する風力(屋根上下面の風圧の差)を測定するためには, 上下面同位置に圧力測定孔を設ける必要があるが, 屋根厚さ 4mm でそれを実現することは困難である。そこで, 下面における風圧の空間的変化が比較的小さいことを考慮し, 下面の圧力測定孔を図 2 に示した位置より 2mm ずれた位置(ライン上)に設けた。



写真 2 風洞実験の様子

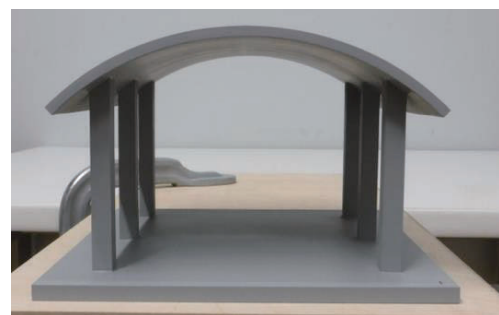


写真 3 風洞実験模型

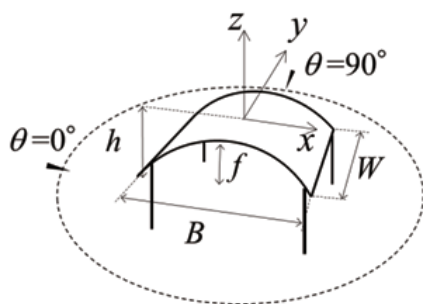


図 1 模型に対する座標系と記号

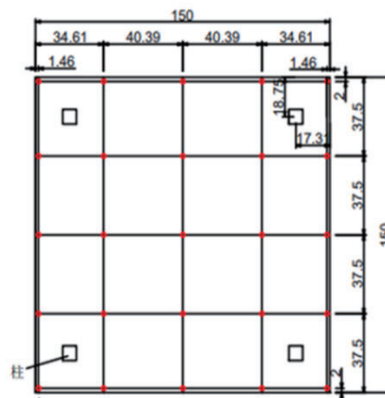


図 2 風圧測定点の配置

図 3 は模型設置位置における平均風速 U_z および乱れ強さ I_u のプロファイルを示す。平均風速のプロファイルを表す「べき指数」 α は約 0.27 (地表面粗度区分IVに相当), 風洞実験模型の屋根平均高さ ($H=80\text{mm}$) における乱れの強さ $I_{uH}=0.2$ (地表面粗度区分IIIに相当) である。

本研究対象は曲面を有するため, 実験ではレイノルズ数 Re の影響を適切に考慮する必要がある。山村ら³⁾は Re 数の効果について, 風洞実験で可能な範囲内で風圧分布に及ぼす Re 数の影響を検討し, $Re > 1.0 \times 10^5$ では風圧係数分布がほとんど変化しないことを示した。なお, Re

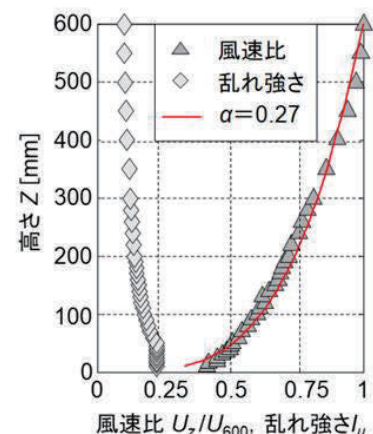


図 3 平均風速および乱れ強さのプロファイル

数を定義する際の代表長さとして屋根の曲率半径の2倍を用いた。そこで、本研究ではこの条件を満たすよう、屋根平均高さ H における風速 U_H を約 9 m/s と設定した。このとき、 Re 数は $f/B = 0.1, 0.2$ に対して、それぞれ約 $2.53 \times 10^5, 1.41 \times 10^5$ である。

2.2. 風圧測定方法

荷重指針における基本風速を $U_0 = 36$ m/s、地表面粗度区分をIIIと仮定すると、屋根平均高さ $H = 8$ mにおける設計風速は 28.6 m/s と計算される。従って、風速の縮尺率は $\lambda_V = 9/28.6 = 1/3.18$ となり、時間の縮尺率は $\lambda_T = \lambda_L/\lambda_V \approx 1/31.4$ となる。1セットの測定時間は $T = 600/31.4 = 19.1$ s (フルスケール換算で 600s) であり、同一条件下で 6 回測定した。風圧のサンプリング周波数は 500Hz とし、圧力測定中に含まれる高周波数のノイズをカットするため 300Hz のローパスフィルターをかけた。チュービングによる変動風圧の歪みは、予め測定されたチュービングシステムの周波数応答関数を用いて補正した。風向 θ は図 1 で示すように定義し、 $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で変化させた。模型の対称性を利用すれば各点において $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲の値を求めることができる。

2.3. 風圧・風力係数の定義

風圧係数は、屋根平均高さ H での速度圧 $q_H (=1/2\rho U_H^2)$ を用い、式(1)のように定義される。ここに、 p : 模型表面に作用する圧力、 p_s : 風洞内静圧である。便宜上、屋根上面に作用する風圧を「外圧」、下面に作用する風圧を「内圧」と呼び、それぞれに対応する風圧係数を外圧係数 C_{pt} 、内圧係数 C_{pb} と呼ぶ。風圧係数の符号は面を押す方向を正とする。屋根面には外圧と内圧の差が風力として作用する。式(2)に示されるように、この風力を q_H で基準化して風力係数 C_f とする。したがって、 C_f の符号は C_{pt} と同じである。風圧・風力係数の各種統計値は 10 回の測定結果のアンサンブル平均で評価する。

$$C_p = \frac{p - p_s}{q_H} \quad (1)$$

$$C_f = C_{pt} - C_{pb} \quad (2)$$

3. 平均風圧・風力係数分布

図 4 は、風向 $\theta = 0^\circ$ のときの平均風圧・風力係数分布 (コンター図) を示す。平均風力係数 $C_{f,mean}$ の分布に着目すると (図 4(c))、風上側端部では正であるが、それ以降のほとんどの領域で負となっており、絶対値が最大となるのは屋根頂部付近である。これは上面に沿う流れの増速効果によって上面に大きな負圧が作用するからである。

風向 $\theta = 30^\circ \sim 45^\circ$ のような斜めから風が吹くと、風力係数は風上領域で大きな正の値(下向き)を示している (図 5(c))。これは上面の正圧に加え、流れの剥離によって屋根下面に大きな負圧が発生するためである。また、風下領域で大きな負の値(上向き)を示している (図 5(c))。これは屋根端部での流れの剥離によって屋根面上に円錐渦が生成され屋根上面に大きな負圧が発生したためと考えられる。更に、風下領域では下面に直接風が当たるため、比較的大きな正圧が下面に作用する。このように、上面に負圧、下面に正圧が作用するため両者の差で与えられる風力は、風下領域で大きな負の値を示す。

図6は、風向 $\theta = 90^\circ$ のときの平均風圧・風力係数分布を示す。平均風圧係数 C_{f_mean} の分布に着目すると(図6(c))、風上側端部付近傍では負値を示すが、それ以降の領域ではほぼゼロとなっている。これは、上面の風圧と下面の風圧が相殺されることによる。

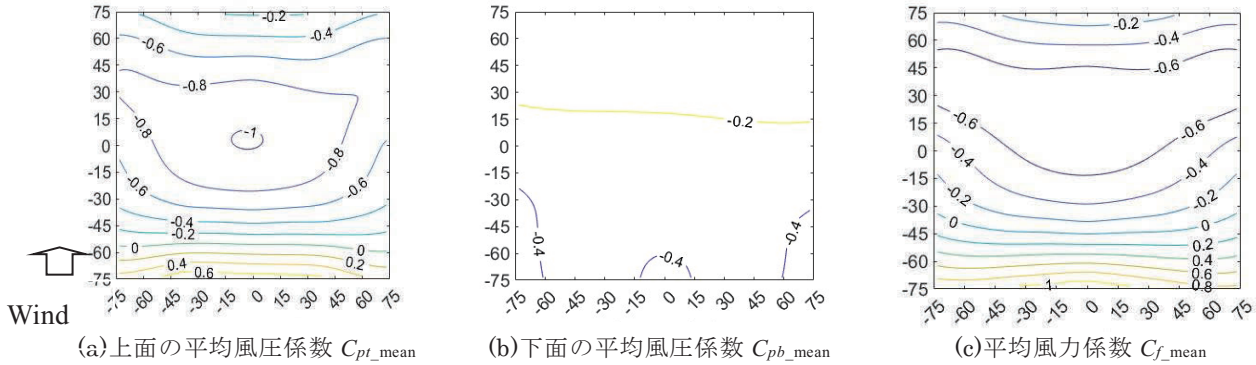


図4 平均風圧・風力係数分布 ($f/B=0.2, \theta=0^\circ$)

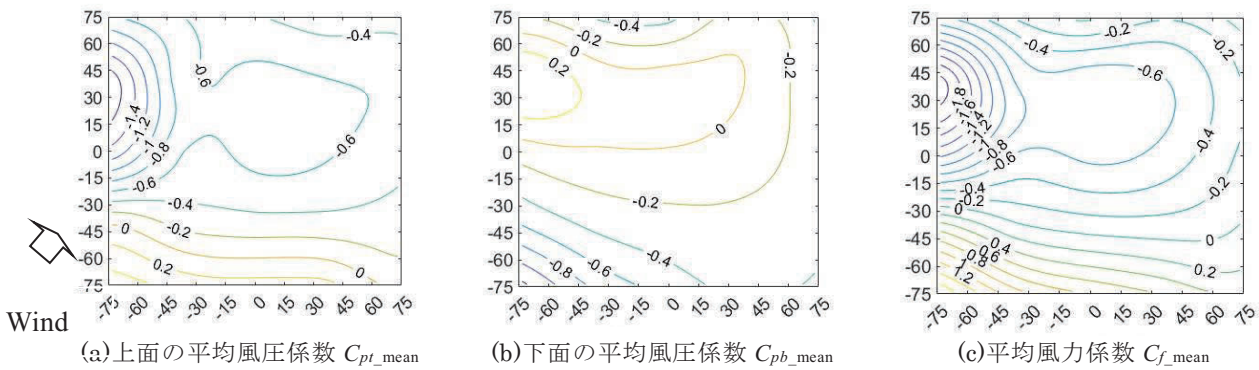


図5 平均風圧・風力係数分布 ($f/B=0.2, \theta=45^\circ$)

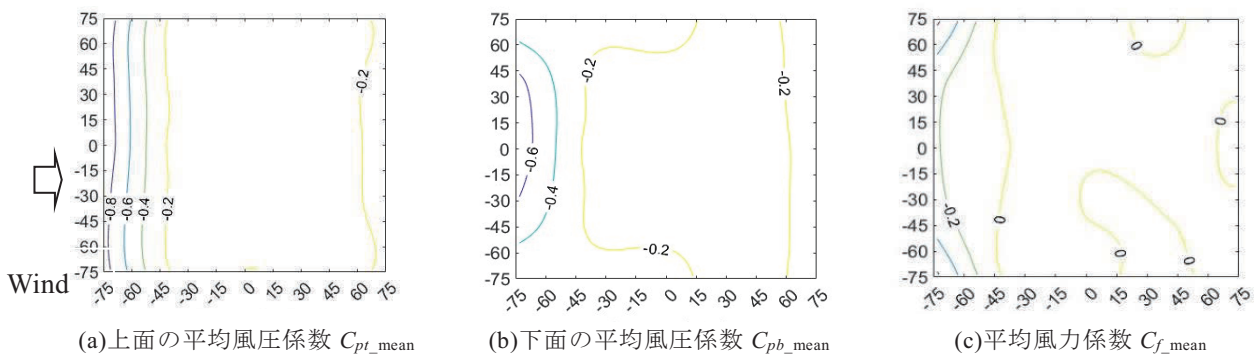


図6 平均風圧・風力係数分布 ($f/B=0.2, \theta=90^\circ$)

4. 全風向中の最大・最小ピーク風力係数

外装材用ピーク風力係数は全風向中の最大・最小ピーク風力係数に基づいて設定されるため、屋根のピーク風力係数の分布を把握する必要がある。本研究では、ピーク風力係数を評価するにあたり、屋根外装材の荷重負担面積を荷重指針に基づき 1m^2 と想定し、平均化時間を TVL 法に基づいて算出した。TVL 法での時間と代表長さの関係式は次の式(3)で表される。

$$T_c = \frac{kL}{U_H} \quad (3)$$

ここで、 T_c は平均化時間、 k はディケイファクター(=4.5)、 L は代表長さ(=1m)、 U_H は実スケールでの屋根平均高さ H における設計風速(28.6m/s と仮定)を表す。この場合、平均化時間 T_c は約 0.16 秒となる。

図 7 と図 8 は $f/B = 0.1$ と 0.2 について全方向($\theta = 0^\circ \sim 360^\circ$)中の最大・最小ピーク風力係数分布を示す。模型の対称性を考慮し 1/4 領域のみ表している。図 7 の分布に着目すると、いずれの f/B においても屋根の角部で正のピーク風力係数 $\hat{C}_{f, pos}$ が大きな値を示している。これは屋根の下面に大きなピーク負圧が作用するためと考えられる。図 8 の分布に着目すると、いずれの f/B の場合も $\check{C}_{f, neg}$ の絶対値は端部(けらば)に沿った領域で大きな値を示す。これは風が斜めから吹くと屋根端部での流れの剥離によって屋根面上に円錐渦が生成され屋根上面に大きな負圧が発生したためと考えられる。

図 7, 8 の結果に基づき、荷重指針に与えられている閉鎖型円弧屋根のピーク外圧係数の規定に倣って屋根面を図 9 のように R_a , R_b , R_c の 3 領域に分割し、領域ごとに絶対値が最大となる正・負ピーク風力係数を求め、外装材用ピーク風力係数を表 1, 2 のように提案する。

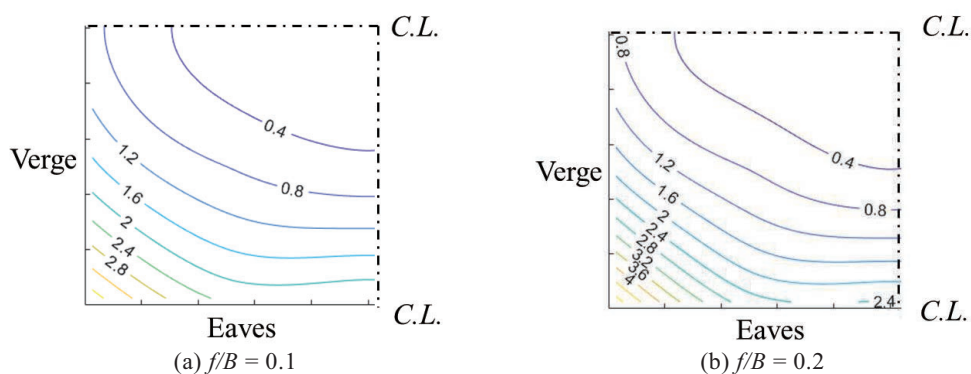


図 7 最大ピーク風力係数(正のピーク風力係数 $\hat{C}_{f, pos}$)分布

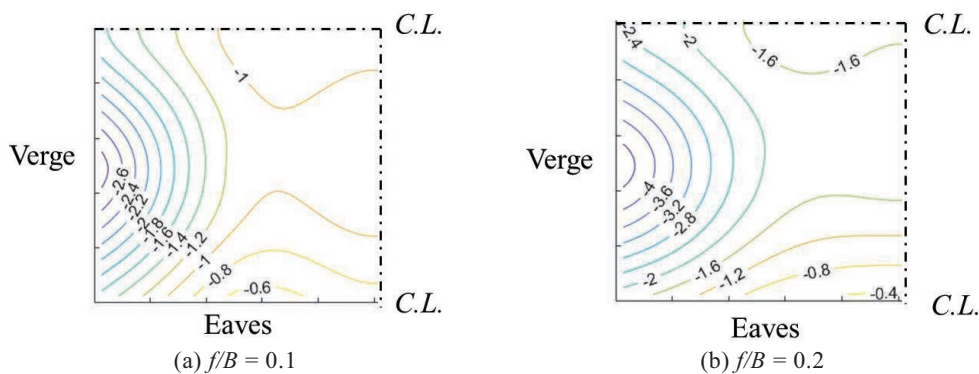


図 8 最小ピーク風力係数(正のピーク風力係数 $\check{C}_{f, neg}$)分布

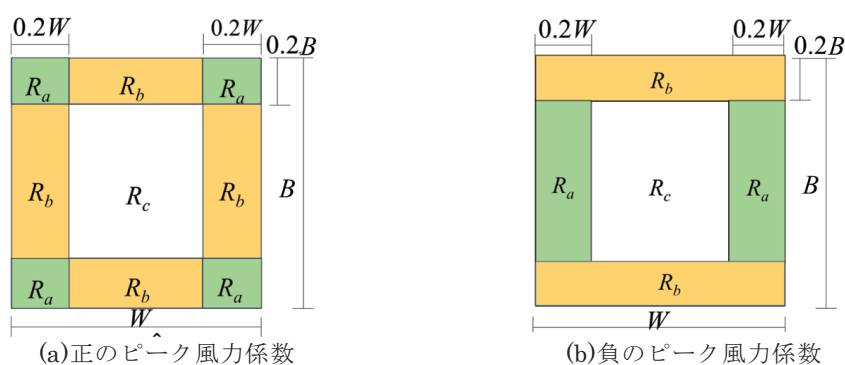


図 9 正・負のピーク風力係数に対する領域分け

表 1 外装材用正のピーク風力係数 \hat{C}_{f_pos} の提案値

区域 f/B	R_a	R_b	R_c
0.1	3.8	2.4	0.9
0.2	5.0	2.6	0.9

表 2 外装材用負のピーク風力係数 \check{C}_{f_neg} の提案値

区域 f/B	R_a	R_b	R_c
0.1	-4.6	-1.9	-2.1
0.2	-2.9	-1.6	-1.2

5. おわりに

本研究では、風洞実験の結果により、屋根全体面の平均風圧・風力係数分布に基づき円弧型独立上屋の風圧・風力特性を把握した。屋根面の全風向中の最大・最小ピーク風力係数分布に基づき、屋根を3領域に分割し、それぞれの領域に対して外装材用ピーク風力係数のモデルを提案した。これらの結果は構造設計者に設計根拠を提供することが期待される。

謝辞

本研究は能村膜構造技術振興財団の令和3年度助成金によるものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015
- 2) Natalini M.B., Morel C., Natalini B., Mean loads on vaulted canopy roofs, Journal of Wind Engineering, and Industrial Aerodynamics, 119, 102–113, 2013.
- 3) 山村朗丸，高館祐貴，植松康：曲面屋根を有する独立上屋の設計用風荷重に関する研究：その1 円弧屋根の場合，膜構造論文集，第31号，pp. 11-24, 2017.
- 4) 文礼志，植松康：円弧型独立上屋に作用する風圧の時間的・空間的変動特性に関する研究，膜構造研究論文集，第33号，pp. 39-52, 2019号，pp. 11-24, 2017.