

円弧型独立上屋の構造骨組用風力係数に関する検討*

秋田工業高等専門学校 藤沢 優輝

秋田工業高等専門学校 丁 威

東北大学 植松 康

1. 研究の背景・目的

円弧型独立上屋はスポーツ施設や公園の休憩所など、公共空間で広く利用されている。一般に壁がなく軽量であるため風荷重が設計上重要となる。しかし、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」と呼ぶ) には設計用風力係数は示されていない。実務では円弧屋根を持つ閉鎖型建築物の外圧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、独立上屋には壁がなく上下面が風に曝されるため、屋根まわりの流れは複雑であり、その風力特性は閉鎖型とは大きく異なる。したがって、閉鎖型建築物の外圧係数に基づいて独立上屋の風力係数を評価することはできない。



写真1 円弧型独立上屋

本研究では、まず多点風圧測定用の模型を用いた風洞実験により屋根全体に作用する風圧・風力の特性を把握する。次に、標準的な構造モデルを設定し、荷重効果(フレームに作用する曲げモーメントや軸力)に基づき構造骨組用風力係数について検討する。具体的には、まず時刻歴解析によって最大荷重効果を与える風向を明らかにする。次に、その条件に対して Kasperski²⁾ が提案した LRC 法を用いて最大荷重効果を与える等価静的風力係数分布を求める。最後に、ガスト影響係数法の枠組みで設計用風荷重を評価するための構造骨組用風力係数を提案する。

2. 対象建築物と風洞実験概要

本研究では、スパン $B=15\text{m}$ 、桁行長さ $W=15\text{m}$ の円弧型の独立上屋を対象とする(図1参照)。ライズ・スパン比は代表的な値として $f/B=0.2$ とする。構造骨組は図2のように2つのアーチ型ラーメンで支えられているものとする。柱脚は固定と仮定する。骨組部材は通常の許容応力度設計を行って決定した。その結果、柱は角形鋼管: $300\times300\times30\times12$ 、梁はH形鋼: $H300\times200\times8\times12$ となった(いずれも部材はSN400)。



写真2 風洞実験の様子

* Discussion of wind force coefficients for the main wind force resisting system of a vaulted free roof
by Yuuki Fujisawa, Wei Ding, Yasushi Uematsu

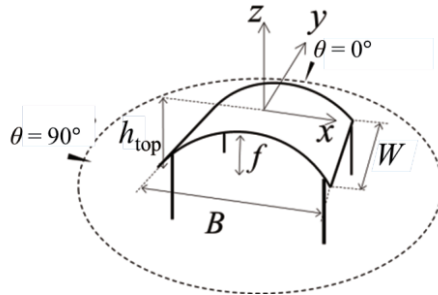


図 1 対象建築物と風向

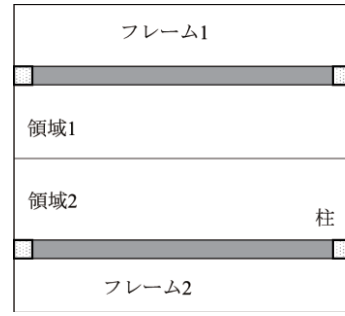


図 2 フレームの荷重負担領域

風洞実験は東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻所有のエッフェ型境界層風洞（写真2）を用いて行った。実験模型の幾何学的縮尺率は $\lambda_L = 1/100$ と設定する。風圧測定用の模型は3Dプリンタで作製した。スパン B および桁行長さ W はいずれも 150mm である。屋根のライズ・スパン比は $f/B = 0.2$ である。屋根の平均高さ H は 80mm ，厚さ t は 4mm である。図3に示すように，屋根には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（全部で50点）。風圧測定のサンプリング周波数は 500Hz とし，全点同時測定される。1回の測定時間は 19.1s （フルスケール換算で 600s ）であり，同一条件下で6回測定する。風向は図1に示すように定義し， 0° から 90° の範囲を 10° ピッチで変化させた10風向に 45° を加えた11風向である。模型の対称性を利用すれば，1つのフレームに対して風向 $-90^\circ \sim +90^\circ$ の範囲のデータを得ることができる。

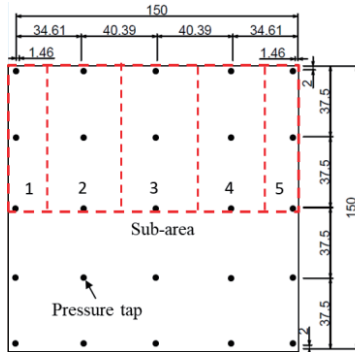


図 3 圧力測定孔の配置図

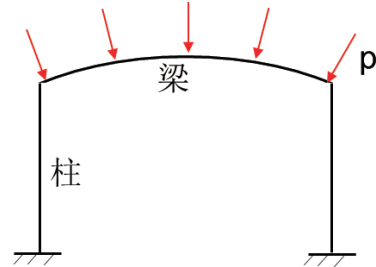


図 4 フレームにかかる風荷重

屋根面には上面と下面の風圧の差が風力として作用する。この風力を屋根平均高さ H での速度圧 $q_H (= 1/2 \rho U_H^2)$ で基準化し，風力係数 $C_f (= C_{pt} - C_{pb}$ ， C_{pt} および C_{pb} は屋根上下面の風圧係数) で表す。風力係数の符号は下向きが正となる。

3. LRC 法による風荷重評価

本研究では，風荷重評価に LRC 法を用いる。この LRC 法では，構造物の剛性が比較的高く変動風力による共振効果が無視できる場合，着目する荷重効果と風力との相関を考慮し，最大荷重効果を再現できる等価静的風力係数 C_{f_LRC} が次式で与えられる。

$$C_{f_LRC} = \bar{C}_f + g_r \cdot C'_f \cdot \rho_{rf} \quad (1)$$

ここに、 $\bar{C}_f$ = 平均風力係数、 C'_f = 風力係数の標準偏差、 g_r = 荷重効果のピークファクター、 ρ_{rf} = 風力と荷重効果の相関係数。

3.1 着目する荷重効果

LRC 法で荷重評価を行う場合、着目する荷重効果を適切に設定する必要がある。本研究で対象としているような比較的小規模で剛な低層構造物の場合、平均風力を作用させたとき構造上最もクリティカルとなる応力に着目すればよい（植松ら³⁾）。図 2 に示すように屋根は 2 つのフレームにより支えられており、屋根の 1/2 領域に作用する風力をそれぞれのフレームが負担するものとする。まず、風洞実験によって得られた平均風力係数分布を用いて計算される平均荷重を屋根に作用させて構造解析を行い、最も重要な荷重効果を選択した。風荷重は図 4 に示した風洞実験模型における桁行方向の圧力測定ラインに対応する 5 点に作用する集中荷重で与えた。風向 $-90^\circ \sim +90^\circ$ の範囲における解析結果より、風上柱脚曲げモーメント M と風下柱の軸力（引張力） N が構造設計上クリティカルであることが示された。そこで、本研究では荷重効果として M および N に着目する。

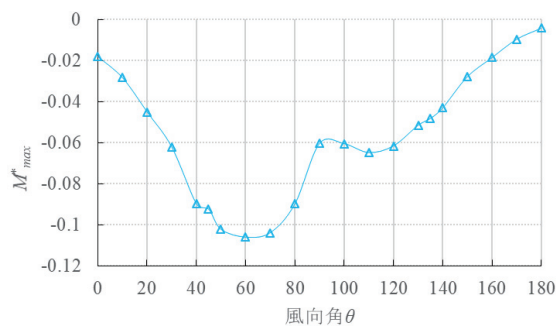
3.2 最大荷重効果をもたらす条件

M と N の時刻歴 $M(t)$, $N(t)$ は次式で与えられる。

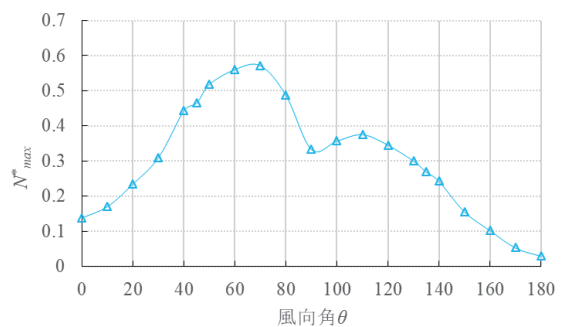
$$M(t) = q_H \sum_{j=1}^5 \alpha_j C_{fj}(t) A_j \quad N(t) = q_H \sum_{j=1}^5 \beta_j C_{fj}(t) A_j \quad (2)$$

ここに、 q_H は速度圧、 α_j および β_j は M および N に対する影響係数（点 j に単位の力をかけたときの M および N の値）、 $C_{fj}(t)$ は圧力測定点 j での風力係数の時刻歴、 A_j は荷重負担面積。 $M(t)$ および $N(t)$ は以下のように無次元化され、それぞれ $M^*(t)$ および $N^*(t)$ で表される。

$$M^*(t) = \frac{M(t)}{q_H \cdot B^2 \cdot L/2} \quad N^*(t) = \frac{N(t)}{q_H \cdot B \cdot L/2} \quad (3)$$



(a) 最大無次元曲げモーメント



(b) 最大無次元軸力

図 5 最大無次元曲げモーメントと軸力の風向による変化

各風向角に対して測定された各測定点での風力係数の時刻歴 $C_{fj}(t)$ を用いて、式(2)、(3)により $M^*(t)$ および $N^*(t)$ を計算し、10 分間における最大ピーク値 $M^*_{\max}$ および $N^*_{\max}$ を求めた。図 5 は $M^*_{\max}$ と $N^*_{\max}$ の風向 θ による変化を示す。いずれもおおよそ $\theta = 60^\circ$ で最大荷重効果が発生す

ることが分る。したがって、以下では $\theta = 60^\circ$ に着目する。

図6は風向 $\theta = 0^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ のときの平均風力係数分布を示す。 $\theta = 0^\circ$ のように桁行面に正対する風向の場合に比べて、斜め方向から風が吹く場合 ($\theta = 60^\circ$)、風下側屋根面端部に沿った領域で大きな負の値(上向き)を示している。これは流れの剥離によって屋根上面に円錐状の渦が形成され、その渦によって大きな負圧が作用するためである。この負圧によって大きな柱軸力(引張り)が作用するようになる。また、フレームの荷重負担領域における風力分布の非対称性が大きくなり、フレームの曲げモーメントが大きくなる。

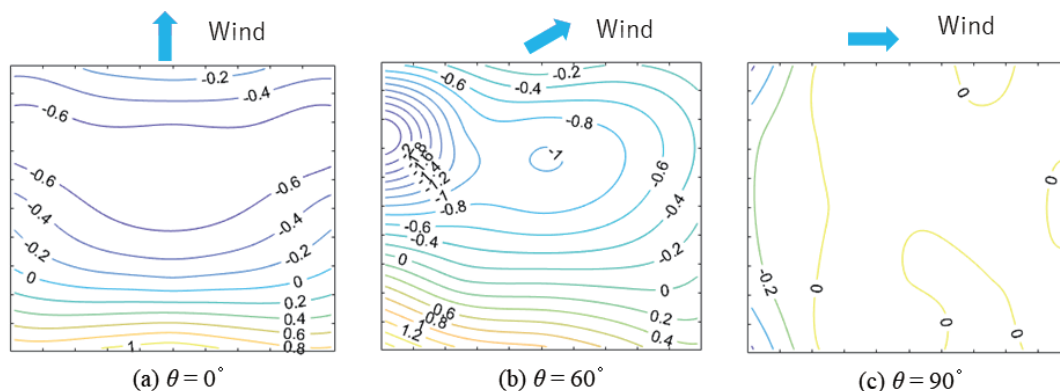


図6 平均風力係数分布

3.3 等価静的風力係数

最大荷重効果を与える風向 $\theta = 60^\circ$ に対し、LRC法による等価静的風力係数分布 (C_{f_LRC}) のほか、条件付きサンプリングによる最大荷重効果をもたらす瞬間の風力係数分布 (C_{f_cond})、更に平均風力係数 C_{f_mean} とガスト影響係数 G_f の積(ガスト影響係数法)で与えられる風力係数分布 (C_{f_gust}) を求めた。なお、 G_f は M および N の時刻歴に基づき設定した。3つの方法による風力係数分布を図7に示す。平均風力係数分布もあわせて示した。いずれの荷重効果についても、 C_{f_LRC} と C_{f_cond} の分布はよく一致している。これはLRC法が最大荷重効果をもたらす風力係数分布を推定する方法であり、条件付きサンプリングの結果の平均値に対応するからである。また、ガスト影響係数法による分布もそれらと概ね一致しており、本研究で対象とした $f/B=0.2$ の場合には簡便なガスト影響係数法が有効であるといえる。

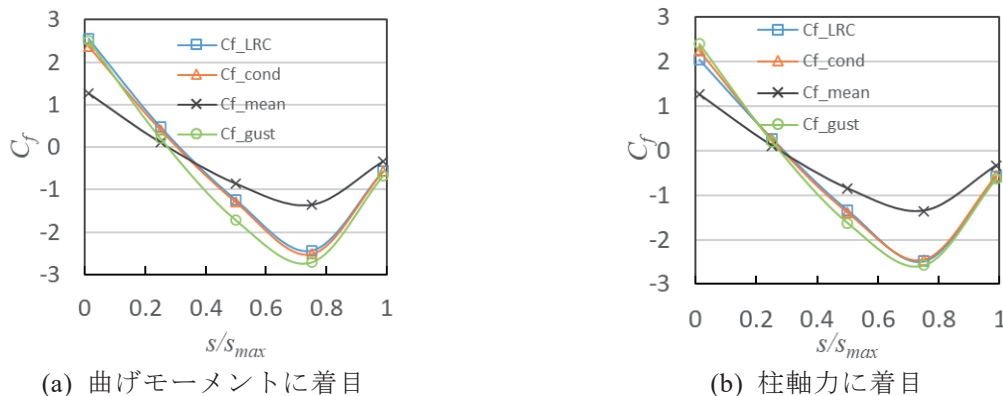


図7 等価静的風力係数分布

4. 構造骨組用風力係数

図 7 に示した C_{f_LRC} 分布をそのまま設計で用いることは困難である。そこで、基規準と同様、屋根をいくつかの領域を分けて、領域ごとに一定値を与える方法で構造骨組用風力係数を提案する。建設省告示や荷重指針に示されている円弧屋根をもつ閉鎖型建築物の外圧係数の規定を参考に、図 8 に示すように屋根を R_a (風上側)、 R_b (中央部)、 R_c (風下部) の 3 領域に分割した。各領域に対して C_{f_LRC} の面平均値 (C_{f_U} , C_{f_M} , C_{f_L}) を求めた結果を表 1 に示す。これらには乱れの効果が含まれている。そこで、基規準でのガスト影響係数法の枠組みで設計用風荷重を評価できるように、これらの値をガスト影響係数で除した値を構造骨組用風力係数 ($C_{f_U}^*$, $C_{f_M}^*$, $C_{f_L}^*$) として提案する。結果を表 2 に示す。基礎の設計の場合には風下側柱軸力(引張力) N に着目した構造骨組用風力係数を、フレームの応力を検討する場合には風上側曲げモーメント M に着目した構造骨組用風力係数の値を用いればよい。

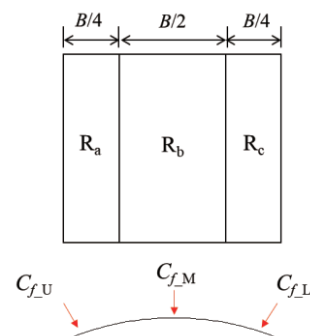


図 8 平均風力係数の領域分け

表 1 最大荷重効果を与える等価静的風力係数
(各領域の面平均値)

荷重効果	C_{f_U}	C_{f_M}	C_{f_L}
N	1.78	-1.63	-1.54
M	2.27	-1.54	-1.50

表 2 構造骨組用風力係数の提案

荷重効果	$C_{f_U}^*$	$C_{f_M}^*$	$C_{f_L}^*$
N	0.94	-0.86	-0.81
M	2.27	-1.54	-1.50

5. まとめ

本研究では、円弧型独立上屋を対象とし、風洞実験により屋根に作用する風力分布を測定した。屋根は 2 つのアーチ型ラーメンによって支持されると仮定し、設計上最も重要な荷重効果として風上柱脚曲げモーメント M と風下柱の軸力(引張力) N に着目した。風力係数の時刻歴を用いて最大荷重効果を与える等価静的風力係数分布を LRC 法により求めた。また、時刻歴解析を用いた条件付きのサンプリングも行い、最大荷重効果が発生する瞬間の風力分布を求め、両者がよく一致することを示した。さらに、それらが平均風力係数分布にも似ていることから、従来のガスト影響係数法で評価できるような構造骨組用風力係数を提案した。すなわち、屋根を風上、中間、風下の 3 領域に分割し、各領域に対して LRC 法による等価風力係数を面平均した一定値として与えた。これらの提案値は構造設計者に設計根拠を提供すると期待される。

謝辞

本研究の一部は(財)能村膜構造技術振興財団の令和6年度助成金によるものである。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015
- 2) M. Kasperski,: Extreme wind load distributions for linear and non-linear design, Engineering Structures, Vol.14, No.1, pp. 27-34, 1992.
- 3) 植松 康，織茂俊泰，渡部俊一郎，北村周治，岩谷 賢：翼型に似た断面形状を持つ鉄骨ハウスの設計用風荷重，第18回風工学シンポジウム論文集，pp.347-352，2004.