

# 円弧型独立上屋の設計用風荷重に関する研究\*

秋田工業高等専門学校 丁 威  
 秋田工業高等専門学校 藤沢 優輝  
 東北大学 植松 康

## 1. 研究の背景・目的

円弧型独立上屋はイベント会場や公園の休憩所などに用いられている。円弧型独立上屋とは壁がなく、屋根と柱のみで形成されていて、屋根の形が円弧型の建物である（図1に参照）。このような建物は軽量であるため、風荷重が設計上重要な指標になる。しかし、建設省告示や日本建築学会「建築物荷重指針」<sup>1)</sup>には設計用風力係数は示されていない。閉鎖型の建物については様々な研究がされているのに対して、円弧型独立上屋は既往の研究が少ない。これは屋根の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極めて困難であるためと考えられる。



図1 円弧型独立上屋

そこで、本研究では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プリンタにより製作し、風洞実験を行い、屋根面に作用する平均風力の特性を明らかにする。最大の荷重効果を与える風向についてLRC法<sup>2)</sup>に基づき等価静的風力係数を求める。最後に従来のガス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

### 2.1 対象構造物

既往研究に基づき、本研究ではライズスパン比 $f/B=0.1, 0.2, 0.3$ のスパン $B=15\text{m}$ 、桁行長さ $W=15\text{m}$ の円弧型独立上屋を対象とする（図2に参照）。構造骨組は図3に示すような柱と梁のフレームであり、ラーメン構造とし、柱脚は固定と仮定する。使用した部材については柱・梁ともにSN400を用いる。断面については許容応力度の範囲に収まるように設定した。柱は角型鋼管 $300\times 300\times 30\times 12$ 、梁はH型鋼 $300\times 200\times 8\times 12$ を使用する。単位面積当たりの風荷重は速度圧 $(q_H=1/2\rho U_H^2)$ 、風洞実験で得られた平均風力係数 $C_f$ 、ガス影響係数 $G_f=2.5$ の積で求められる。

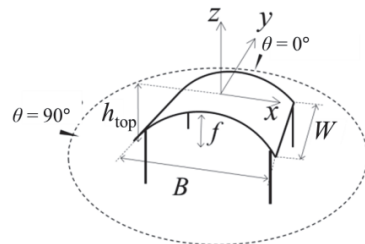


図2 対象建築物と風向



図3 フレームの荷重負担

\* Discussion of wind force on a vaulted free roof

## 2.2 風洞実験模型

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を用いて行った(図4に参照)。本研究では、図5のようにライズスパン比  $f/B = 0.1, 0.2, 0.3$  の風圧測定用の模型を3Dプリンタで作製した。屋根の平均高さは  $f/B$  によらず  $80\text{mm}$  である。設計風速を設定するにあたり、荷重指針における「基本風速」 $U_0$  を、特に風の強い地域を除けば日本全国をほぼカバーできる値として  $U_0 = 36\text{ m/s}$  とした。また、地表面粗度区分をIIIと仮定した。風圧のサンプリング周波数は  $500\text{Hz}$  とし、全点同時測定した。風向  $\theta$  は図2に示すように定義し、 $0^\circ \sim 90^\circ$  の範囲を  $10^\circ$  ごとに変化させ、更に  $\theta = 45^\circ$  を加えた 11 風向である。実験に関する詳細は、参考文献[3]に詳述されている。

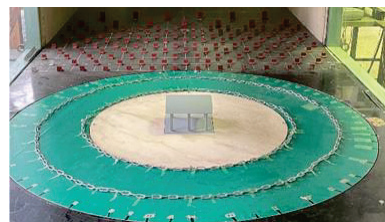


図4 風洞実験の様子

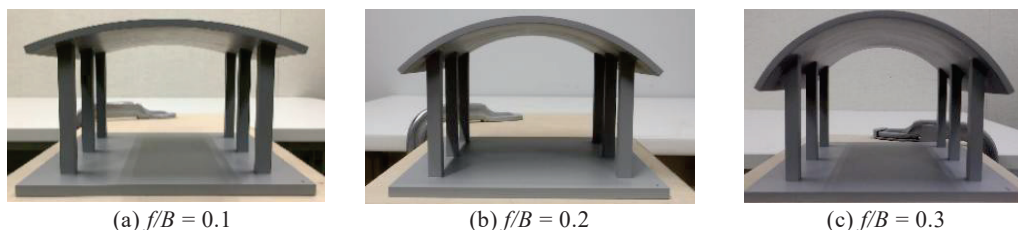


図5 風洞実験の模型

## 3. 平均風力係数分布

本研究では、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。ここで風圧係数  $C_P$  を  $C_P = \frac{p - p_s}{q_H}$  で定義する。 $q_H$  は屋根平均高さ  $H$  での速度圧、 $p$  は屋根面に作用する風圧、 $p_s$  は風洞内の静圧である。 $q_H (= 1/2 \rho U_H^2)$  で基準化した風力係数  $C_f$  は  $C_{pt} - C_{pb}$  で表される。 $C_{pt}$  および  $C_{pb}$  は屋根上下面の風圧係数を示す。風力係数の符号は屋根面を押し方向を正とする。

図6, 7, 8は、ライズ・スパン比  $f/B = 0.1, 0.2, 0.3$  の平均風力係数  $\bar{C}_f$  の分布をコンター図で示したものである。いずれの  $f/B$  でも、 $\bar{C}_f$  の分布は類似している。風向  $\theta = 0^\circ$  の時、風上側端部付近では負値を示すが、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負圧が相殺されるためと考えられる。風向  $\theta = 60^\circ$  のように斜め方向から風が吹く時、平均風力係数は風上角部領域で大きな正の値(下向き)を示している。一方、風下端部(けらば)領域で絶対値が大きな負の値(上向き)となる。これは屋根端部(けらば)での流れの剥離によって屋根上面に円錐渦が生成され屋根上面に大きな負圧が発生するためである。更に、 $f/B = 0.1$  の屋根の風上端部(けらば)領域における正の値と風下端部(けらば)領域での負の値の絶対値も  $f/B = 0.2$  および  $0.3$  の結果より小さいことが分かる。風向  $\theta = 90^\circ$  の時、平均風力係数は風上側端部にはが正の値(下向き)、それ以降のほとんどの領域には負の値(上向き)示している。屋根頂部付近で絶対値が最大の負の値となる。また、 $f/B = 0.1$  の風上側端部での正の値と屋根頂部付近

の負の値の絶対値は  $f/B = 0.2$  および  $0.3$  の結果より小さいことが確認される。

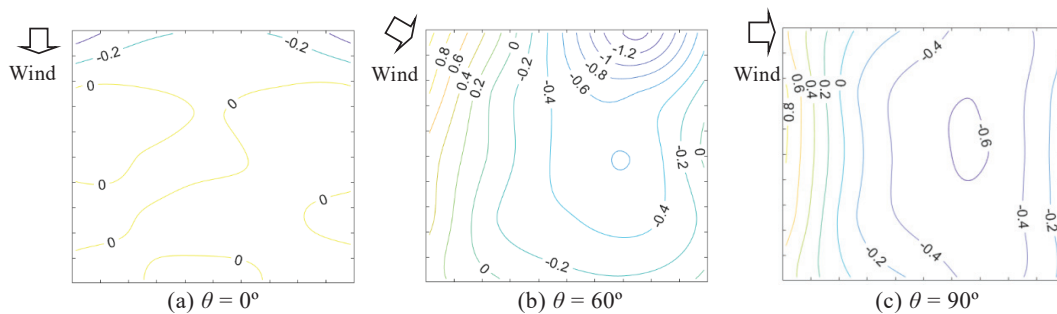


図 6 平均風力係数分布 ( $f/B = 0.1$ )

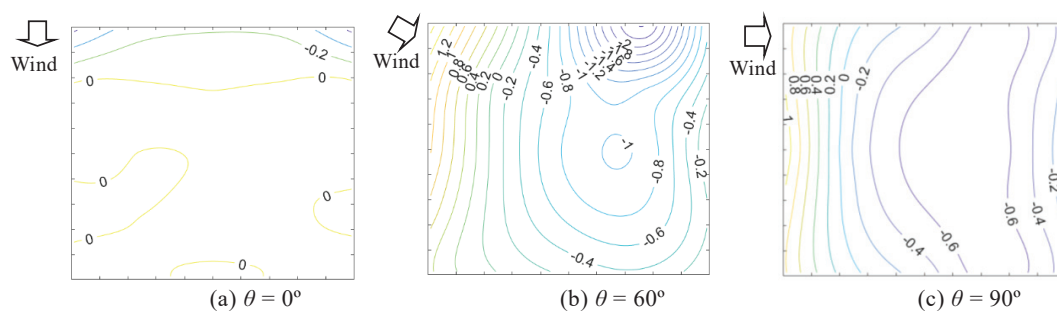


図 7 平均風力係数分布 ( $f/B = 0.2$ )

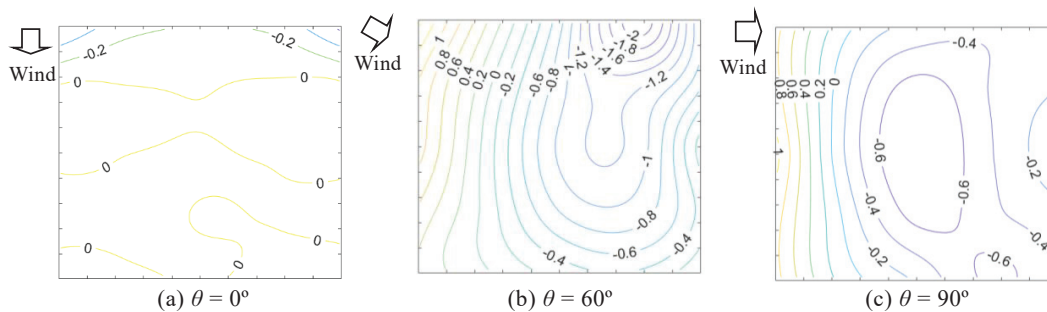


図 8 平均風力係数分布 ( $f/B = 0.3$ )

## 4. 構造骨組用風力係数

### 4.1 着目する荷重効果

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建造物の場合、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<sup>4)</sup>)。図3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  $0^\circ \sim 180^\circ$  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。

#### 4.2 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、 $\alpha_j$  および  $\beta_j$  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。図 10 は  $M^*_{\max}$  と  $N^*_{\max}$  の風向  $\theta$  による変化を示す。風向斜めの方向 ( $\theta = 60^\circ, 70^\circ$ ) から風が吹く場合に最大荷重効果が発生することが分かる。

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

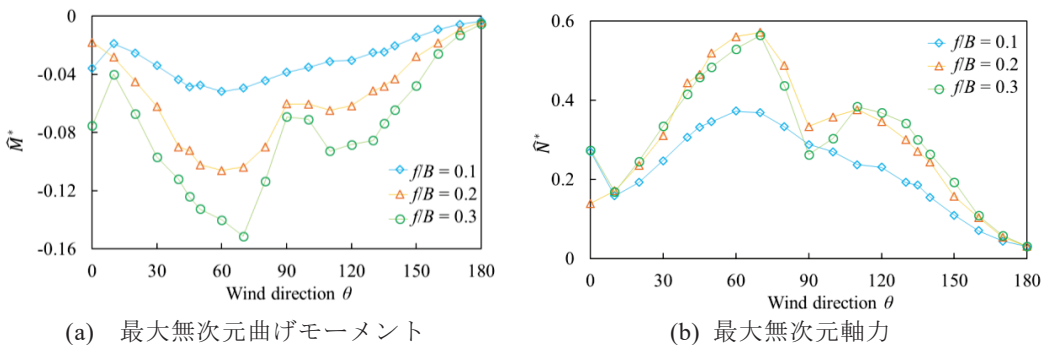


図 10 最大無次元曲げモーメントと軸力の風向による変化

#### 4.3 等価静的風力係数

本研究では、風荷重評価に Kasperski<sup>2)</sup> が提案した LRC 法を用いる。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、 $\rho_{rf}$  = 風力と荷重効果の相関係数。

最大荷重効果を与える風向に対し、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 11, 12 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 $f/B = 0.1, 0.2, 0.3$ 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。

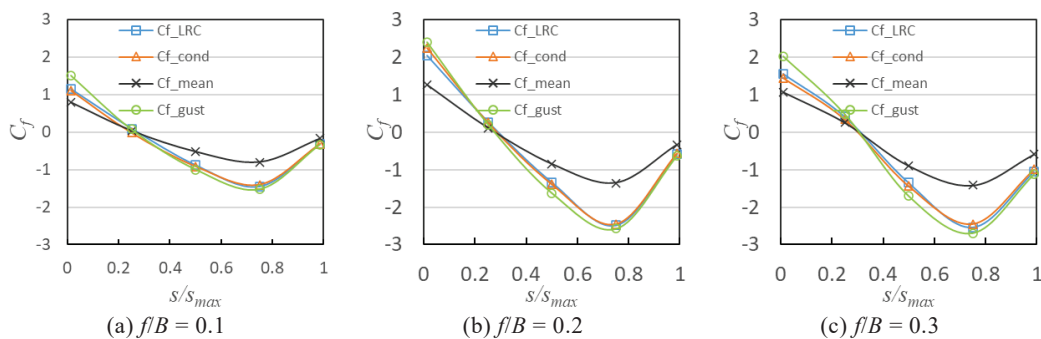


図 11 等価静的風力係数分布 (曲げモーメントに着目)

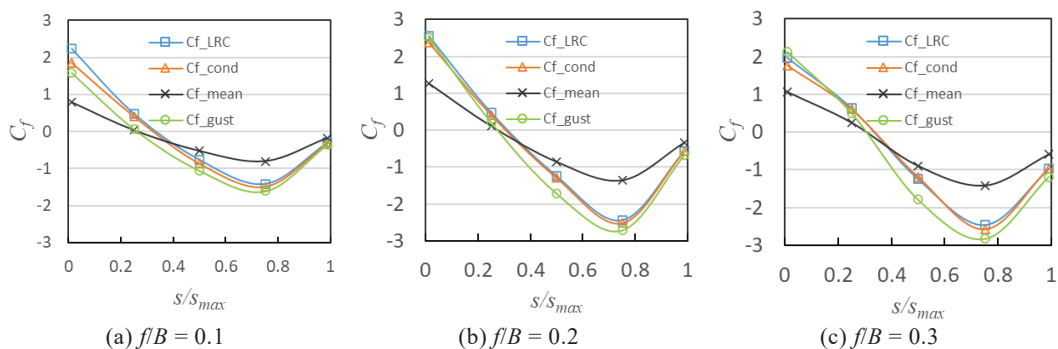


図 12 等価静的風力係数分布 (柱軸力に着目)

#### 4.4 構造骨組用風力係数

図 12 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、基標準と同様、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 13 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 $C_{f\_LRC}$  の面平均値を求める。これらには乱れの効果が含まれているため、基標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( $C_{f\_LU}^*$ ,  $C_{f\_LM}^*$ ,  $C_{f\_LL}^*$ )として提案する。結果を表 1 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

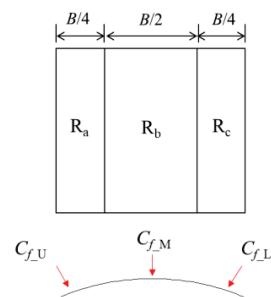


図 13 平均風力係数の領域分け

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  $M$  に着目した値を用いればよい。

表 1 構造骨組用風力係数の提案

荷重効果	$f/B$	$C_{f,U}^*$	$C_{f,M}^*$	$C_{f,L}^*$
$M$	0.1	0.94	-0.46	-0.43
	0.2	1.13	-0.77	-0.75
	0.3	1.00	-0.86	-0.95
$N$	0.1	0.49	-0.84	-0.47
	0.2	0.94	-0.86	-0.81
	0.3	0.83	-0.97	-1.06

## 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。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。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) 藤沢 優輝, 丁 威, 植松 康: 円弧型独立上屋の構造骨組用風力係数に関する検討, 東北地域災害科学研究, Vol.61, pp. 117-122, 2025
- 4) 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.