

半円筒の端部に1/4球形をつけた空気膜構造の風力係数に関する基礎的研究
 - 風洞実験および数値流体解析より得られた風圧力特性 -

Basic Study on Wind Force Coefficients of Air-Supported Structures
 Consisting of Semi-Cylinder with Quarter Spheres Attached to Ends

-Wind Pressure Characteristics Obtained from Wind Tunnel Tests and Computational Fluid Dynamics Analysis-

○川崎翔太³, 宮里直也¹, 岡田章², 鴛海昂¹

*Shota Kawasaki³, Naoya Miyasato¹, Akira Okada², Akira Oshiumi¹

Abstract: In the design of air-supported structures, it is important to understand wind pressure characteristics and set internal pressure to ensure safety and stability under strong winds. Previous research has reported on wind pressure responses using both rigid and flexible models, but the majority of these studies have focused on dome shapes. Taking the above points into consideration, this report conducts wind tunnel experiments and CFD analysis on an air-supported structure consisting of a semi-cylinder with quarter spheres attached to both ends to understand the wind pressure characteristics. Furthermore, by comparing the results of both, the validity of the CFD analysis method is verified.

1. はじめに

空気支持式構造の設計においては、強風時の安全性と安定性を確保するために、風圧力特性の把握と強風時内圧の設定が重要である。既往研究では、一重空気膜構造^[1]やケーブル補強型空気膜構造^[2]、レンズ状二重空気膜^[3]等の風圧力特性や風荷重応答について報告されている。また、空気膜構造の場合は、比較的大きな変形を伴う可能性もあることから、変形を考慮した風荷重の評価も図られており、既往研究では変形形状を模擬したモデルを用いた検討^[4]や柔モデルを用いた検討^[1]が報告されている。しかしながら、これらの既往研究の大部分がドーム形状を対象としている。

以上の諸点を踏まえて、半円筒の両端に1/4球形をつけた空気支持構造を対象として、次のような研究課題を設定した。①CFD解析による風圧力の評価と妥当性の検証、②風荷重時の変形後形状の風圧力の評価(CFD解析)、③風荷重時における内部体積・内圧の変化を考慮した変形性状の評価。

本報では、この内①を対象として、風洞実験およびCFD解析を実施し、風圧力特性を把握すると共に、CFD解析手法の妥当性の検証を行う。なお、本報では風荷重の付加による形状変化は生じないものと仮定した。

2. 実験概要およびCFD解析概要

本報では、ライズ・スパン比0.5の正方形平面の円筒の両端に1/4球を追加した長辺(32m)×短辺(16m)×高さ(8m)の空気支持式膜構造を検討対象とした(Fig. 1)。

風洞実験概要をTable 1, CFD解析概要をTable 2とFig. 2, 測定点をFig. 3, 実験気流をFig. 4に示す。風洞実験およびCFD解析は縮尺率1/100の初期形状の模型

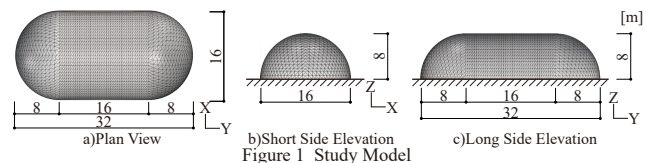


Figure 1 Study Model

Wind tunnel device	Eiffel type wind tunnel device (1.2m×0.9m)
Air flow	Boundary layer turbulence (Category of surface roughness III)
Wind velocity	6.00m/s at z=80mm
Velocity gradient α	$\alpha=0.2$
Sampling frequency / time	500Hz / 25.8sec
Model scale	model / full = 1 / 100

Turbulence model	LES[Smagorinsky model ($C_s=0.15$)]
Air flow	Boundary layer turbulence ($\alpha=0.2$)
Boundary condition	Ground・Model surface no - slip Upper・Side surface free - slip
Time step	2.1×10^{-5} sec

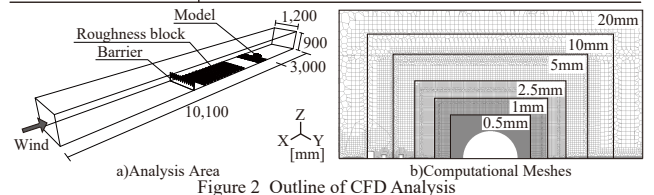


Figure 2 Outline of CFD Analysis

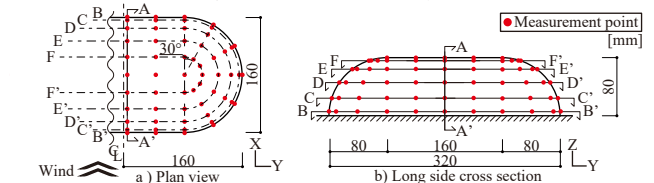


Figure 3 Outline of model and measurement point

を用いた境界層乱流による検討である。気流は地表面粗度区分Ⅲ相当の境界層乱流とし、風向はモデル長辺に直交する方向とした。基準速度圧は模型の影響を受けない高さ400mmの位置で測定し、風速の鉛直分布を考慮して模型頂点部($Z=80$ mm)での値に換算した。測定はサンプリング周波数500Hzとして約25.8秒間(フルスケール換算で約10分)とし、全点同時測定を行った。測定は実験では10回、CFD解析では1回とし、実験結果はアンサンブル平均処理を行った。測定点は、半円筒

1 : 日大理工・教員・建築 2 : 日大名誉教授 3 : 日大理工・院(前)・建築

部に55点, 球形部に25点ずつの計105点とした。

CFD解析の解析領域は, 幅1.2m×高さ0.9mとし, 長さを13.1mとした。解析にはscFLOW(Ver. v2024.2)を用い, 乱流モデルはLESのスマゴリンスキーモデルとした。支配方程式は, 非圧縮性のNavier-Stokes方程式および連続の式を用いた。格子系はポリヘドラルによる非構造格子とした。また, 離散化手法は有限体積法とし, 空間項の離散化にはブレンド型, 時間項には2次精度陰解法を用いた。境界条件は, 地表面およびモデル表面をno-slip境界とし, 上面および側面をfree-slip境界とした。流入条件は地表面粗度区分Ⅲ相当の境界層乱流とし, 流出条件は静圧=0とした。メッシュは八分木法を用いて6段階に細分化し, 最小格子サイズは0.5mmとした。また, 地表面に隣接するメッシュには7層, 検討モデルには15層の境界層メッシュを挿入している。総要素数は約3802万である。

Fig. 4より, 気流特性の風速, 乱れ強さは指針値^[5]と概ね一致しており, 乱れスケール, パワースペクトル密度は指針値とズレが生じているが, 本実験ではそれらの影響を考慮していない。

3. 実験および解析結果

風洞実験およびCFD解析より得られた平均風力係数および変動風力係数をFig. 5に示す。

モデル全体の i) 平均風力係数分布に着目すると, 風上側が正の値, その他が負の値となった。また, iii-a) AA' 断面の平均風力係数を見ると, 風上側から50°付近より正から負へと値が転じ, 頂点部において負の値が最大となることを確認した。また, 風下側は頂点部から負の値が小さくなり, 風下側より54°付近から0に近い値となる。加えて, 変動風力係数も頂点部付近の値は大きく, 風下側は風上側よりも小さな値となっている。したがって, Fig. 5 ii) に示すように風上側は内側に押され, 頂点部が上向きに押し上げられる風圧力特性となる。Fig. 5 iii-b~f) 水平断面BB'~FF' 断面より, 側面部は負の値を示し, 上部に行くにつれて負の値が大きくなった。

風洞実験とCFD解析の平均風力係数を比較すると, 長辺部中央のAA' 断面では風上側の風力係数は概ね一致しているが, 風下側から54°の範囲は僅かに解析値の方が大きな値を示している。また, 水平断面BB'~FF' の風下側で若干の差が生じている。これは, 格子解像度の影響による風の再付着の再現度が原因であると考えられる。ただし, その他の平均風力係数と変動風力係数は風洞実験とCFD解析で同様な値を示しているため, CFD解析の妥当性が検証されたと考える。

4. まとめ

本報では, 半円筒の端部に1/4球をつけた空気膜構

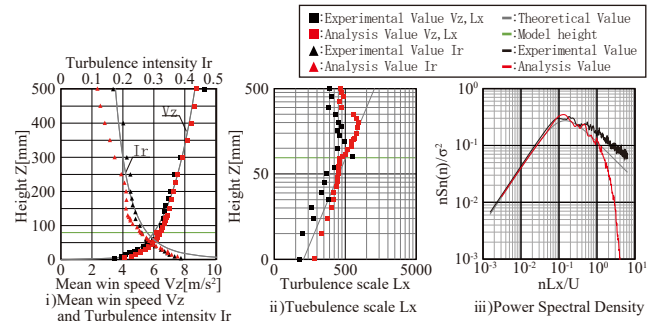


Figure 4 Wind flow conditions in the wind tunnel tests and CFD analysis

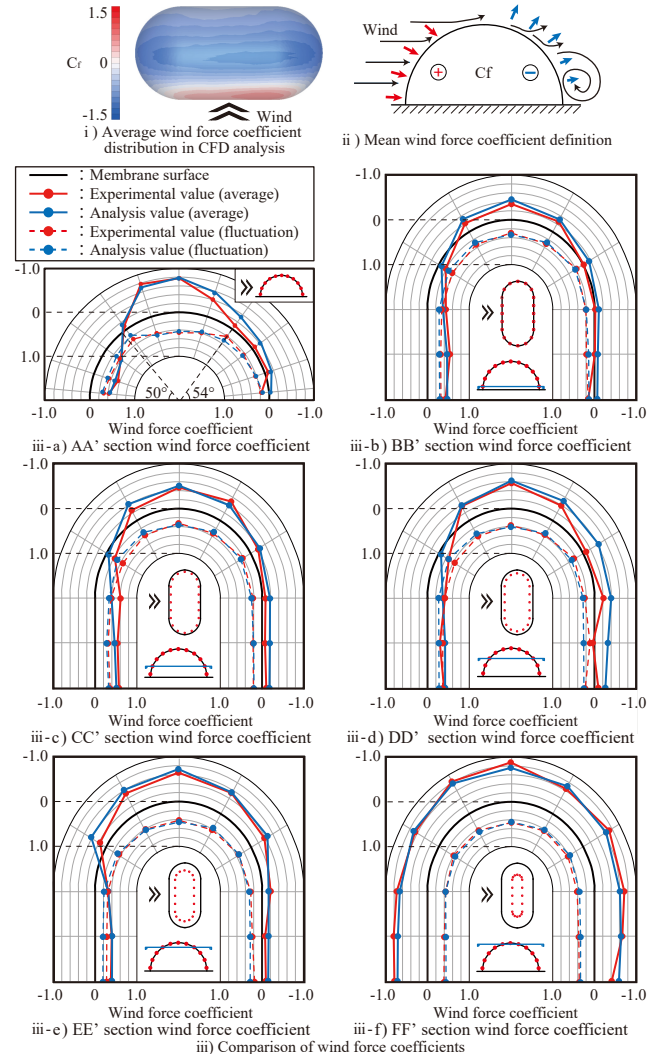


Figure 5 Wind force coefficient for each cross section

造の風力係数分布について, 風洞実験とCFD解析の両結果を比較することで, CFD解析の妥当性について論じた。今後, CFD解析とFEM応力変形解析を用いた収斂計算により, 風荷重時の変形を考慮した風力係数について検討を行う予定である。

【参考文献】

- [1] 加藤優輝他: 「空気膜構造の作用風圧と構造強度に必要な内圧制御に関する基礎的研究」, 膜構造協会論文集, 2011. 1
- [2] 岩佐義輝他: 「低ライズケーブル補強空気膜構造の構造特性と耐風設計」, 日本風工学会誌, pp. 33-47, 1985
- [3] 吉野誠一他: 「レンズ型二重空気膜構造の強風時の応答性状の把握と内圧設定手法の提案」, 日本建築学会構造論文集, 第82巻, 第742号, 1905-1913, 2017. 12
- [4] 黒木雅代他: 「大変形を考慮した膜構造の適正な風荷重評価について」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp. 959-960, 2003
- [5] 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説2015年版, 2015. 2