

膜構造独立上屋の支持形態と屋根変形が風力係数に及ぼす影響に関する研究

著者	武田 文義
号	58
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第004974号
URL	http://hdl.handle.net/10097/58905

ただ ふみよし

氏 名 武田 文義

授 与 学 位 博士 (工学)

学位授与年月日 平成26年3月26日

学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項

研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 都市・建築学 専攻

学 位 論 文 題 目 膜構造独立上屋の支持形態と屋根変形が風力係数に及ぼす影響に関する研究

指 導 教 員 東北大学教授 植松 康

論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 植松 康 東北大学教授 持田 灯
東北大学教授 五十子 幸樹

論文内容要旨

第1章 序論

近年, 膜構造独立上屋は, 公共の場所で日よけ・雨よけなどのために広く建設されており, その耐風安全性が強く求められている。耐風安全性を確保するには風荷重の適切な評価, すなわち風力係数を精度良く知ることが重要である。膜構造物は軽量であるため, 部材設計時に風荷重が支配的になるからである。風力係数は一般に剛模型を用いた風洞実験から求められる。閉鎖型構造物については多くのデータが蓄積されているが, 独立上屋に関するデータは少ない。しかも, 独立上屋の風力係数は, 屋根面がフレキシブルで変形しやすく, 支持形態も多種多様であるという膜構造特有の構造的特徴を考慮して定められたものではない。このような膜構造の特性は風荷重に影響を与えると考えられるが, その影響について系統的に検討した研究はこれまで全くなされていない。

本研究では, 先ず風力係数のデータが不足している HP (Hyperbolic Paraboloid) 型独立上屋を対象に, 剛模型を用いた風洞実験を行い, 風力係数データの蓄積を図るとともに屋根が剛とみなせる場合の設計用風力係数を荷重効果に基づき提案する。次に, 膜構造独立上屋としてしばしば用いられる片流れおよび HP 型屋根を対象とし, 屋根の支持形態と変形が荷重効果に及ぼす影響を明らかにし, 剛模型を用いた風洞実験に基づき提案された風力係数に対し, これらの影響を考慮するための修正方法を提案する。なお, ここでの設計用風力係数は, 風の動的効果を適切に評価した等価静的風荷重を評価するものである。

第2章 膜構造の概要

膜構造物の構造形式には, 骨組膜構造, サスペンション膜構造および空気膜構造の3種類がある。そのうち本研究で対象とするものは, 骨組膜構造とサスペンション膜構造である。屋根に使用される膜材料には, 風を通さないソリッド膜材と風を通すメッシュ膜材の2種類がある。本研究では, 片流れ屋根についてはソリッド膜とメッシュ膜を, HP 型屋根についてはソリッド膜を対象とする。風洞模型では, 実際のメッシュ膜を用いることはできないので, メッシュ膜と同等の圧力損失係数 K をもつ多孔板を用いて作製した。なお, 開孔率 p が約 0.2~0.5 の場合, K と p の関係は近似的に $K=0.52p^{-2.6}$ で与えられる。メッシュ膜屋根に対する数値流体計算 (以下, 「CFD 解析」と呼ぶ) を行う際にも K が必要になる。

第3章 独立上屋に作用する風力測定実験

対象とする片流れ独立上屋は、実寸で $15\text{m} \times 15\text{m}$ の正方形であり、屋根平均高さは 6m 、屋根勾配 β は $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ の5種類とする(図1)。HP型独立上屋は、水平面に投影した平面形状が $15\text{m} \times 15\text{m}$ の正方形であり、屋根平均高さは 8m 、ライズ・スパン比は $1/2, 1/3, 1/6$ の3種類である(図2)。風洞実験は、東北大学工学研究科都市・建築学専攻のエッフェル型境界層風洞($1.4\text{m}^W \times 1.0\text{m}^H \times 6.5\text{m}^L$)で行った。風洞模型としては、片流れ屋根には厚さ 0.5mm のジュラルミン板で作製したソリッド模型と多孔板模型を、HP型屋根にはナイロン樹脂を用い光造形法で作製したソリッド模型を使用した。模型の縮尺はいずれも $1/100$ である。風力(揚力と空力モーメント)の測定には、独自に設計・製作した分力測定装置を用いた。実験気流は、地表面粗度区分II~IIIに対応する「ベキ指数」 $\alpha \approx 0.18$ の境界層乱流である。高さ 100mm での乱れの強さ I_u およびスケール L_x は、それぞれ 0.17 および 0.16m である。屋根平均高さ H での平均風速 U_H は約 6m/s であり、 U_H および模型の代表幅(15cm)で定義されるレイノルズ数 Re は約 6×10^4 である。実験風向は、片流れ屋根については $\theta = 0 \sim 180^\circ$ の範囲を、HP型屋根については $\theta = 0 \sim 90^\circ$ の範囲を 15° ピッチで変化させた。測定には動歪計を用い、サンプリング周波数 200Hz で 32 秒間行った。この測定時間は実時間で約 10 分間に相当する。同一条件で 6 回計測し、風力係数等の統計量はすべて 6 回の結果のアンサンブル平均で評価する。なお、測定された揚力や空力モーメントの時刻歴データには様々なノイズと模型の共振成分が含まれるため、それらはローパスフィルターを用いて除去した。

測定結果から、勾配が 5° 以上の片流れ屋根の揚力係数 C_L およびモーメント係数 C_{Mx}, C_{My} の最大・最小ピーク値は、風向 $\theta = 0^\circ$ あるいは 180° からほぼ $\pm 45^\circ$ 以内の風向で生じた。HP型屋根では、 C_L が風向 $\theta \approx 0^\circ$ で最大(上向き)、 $\theta \approx 90^\circ$ で最小(下向き)になった。 C_{Mx} の負のピーク値は $\theta \approx 90^\circ$ で最大となり、 C_{My} の正の最大ピーク値は $\theta \approx 0^\circ$ で発生した。風向 θ に伴う C_{Mx} の変化は、 C_{My} のそれとは正反対の挙動を示した。ガスト影響係数 G_f は、荷重効果(ここでは屋根を支える柱の軸力に着目)の最大ピーク値と平均値の比として定義した。いずれの屋根においても、設計上重要となるような大きな荷重効果については概ね 2.0 (ピークファクターは約 2.5) に収斂した。

以上の測定結果に基づき、屋根が剛と見做せる場合のHP型独立上屋の設計用風力係数を提案し、オーストラリア/ニュージーランド(AS/NZ)基準の風力係数と比較した。荷重効果で見れば、本研究での提案値はAS/NZ基準と概ね一致する結果を与えることを確認した。なお、本研究で提案した設計用風力係数は、AS/NZ基準より広いライズ・スパン比に対して与えられており、適用範囲が広く実用的である。

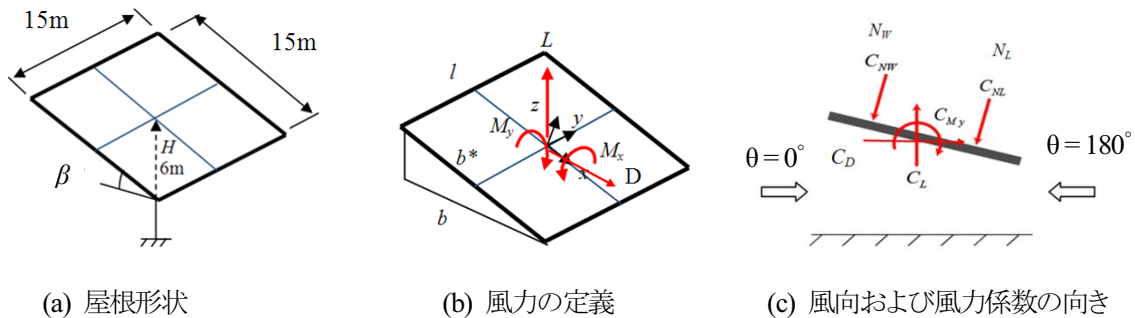


図1 片流れ独立上屋

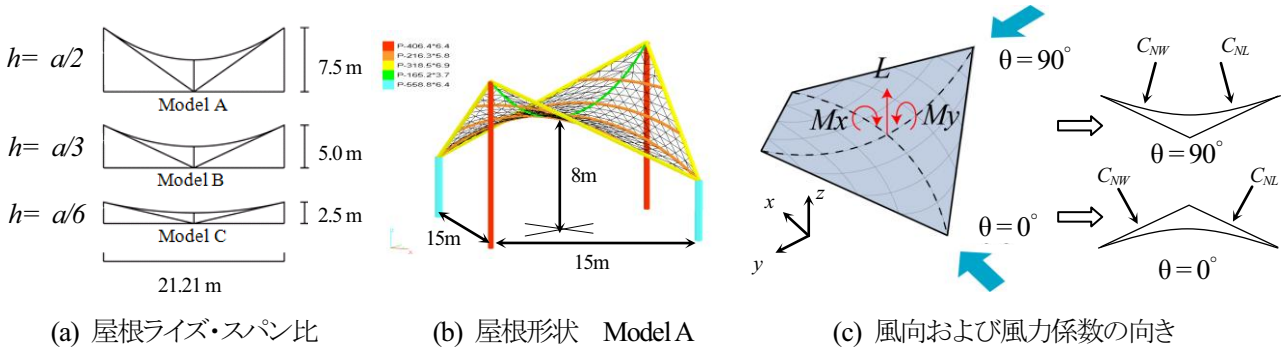


図2 HP型独立上屋

第4章 数値流体計算による風力の有効性

風洞実験をCFD解析で模擬し、解析値を実験値と比較することでCFD解析の有効性を示す。解析では、レイノルズ平均ナビエーストークス式に基づいた有限体積法を用い、平均揚力係数 C_L と平均空力モーメント係数 C_{Mx} 、 C_{My} を算定した。解析のために使用したソフトは、ソリッド膜屋根についてはオープンソースコードであるOpenFOAM(ver1.5)、メッシュ膜については市販ソフトのSTREAM(ver.7.0)である。いずれも乱流モデルにはRNG $k-\epsilon$ を採用した。解析は、ソリッド膜の片流れおよびHP型屋根については3次元解析を、メッシュ膜の片流れ屋根については2次元および3次元解析である。解析の結果、いずれのケースでも3次元解析による解析値は、実験値の傾向をほぼ捉えることができ、3次元CFD解析の有効性を確認した。

第5章 屋根支持形態が風力係数及ぼす影響

骨組膜構造モデルF1、F2およびサスペンション膜構造モデルS1(図3)を対象に、剛模型を用いた風洞実験に基づき提案された設計用風力係数の膜構造屋根への適用性を構造解析に基づき検討する。解析は、幾何学的非線形を考慮した有限要素法による。検討モデルは、片流れおよびHP型屋根とも支持形態が異なる3種類のモデルとする。解析に使用する風力係数は、各風向時の C_L-C_{My} 関係を表すリサージュを包括する近似6角形(図4)の各頂点に対応する6組の風力係数である。なお、その中には提案した2組の設計用風力係数が含まれている。

構造解析の結果、いずれのモデルにおいても、想定する荷重効果によっては2組の設計用風力係数以外の風力係数で、最大値を示すことが判明した。設計用風力係数から算定される荷重効果と時刻歴から得られる最大荷重効果の比は、検討した全ケースに対して最大約1.1であった。このような違いが生じる原因は、屋根面の部材配置が関係する「風圧分布の違い」と「膜面の変形状態が引き起す抗力の増大」であると考えられる。また、荷重効果としては曲げモーメントが支配的であった。

以上の検討結果より、剛模型に基づき提案された設計用風力係数は、フレキシブルな屋根を持つ膜構造物に適用できるように改良する必要があることが示された。

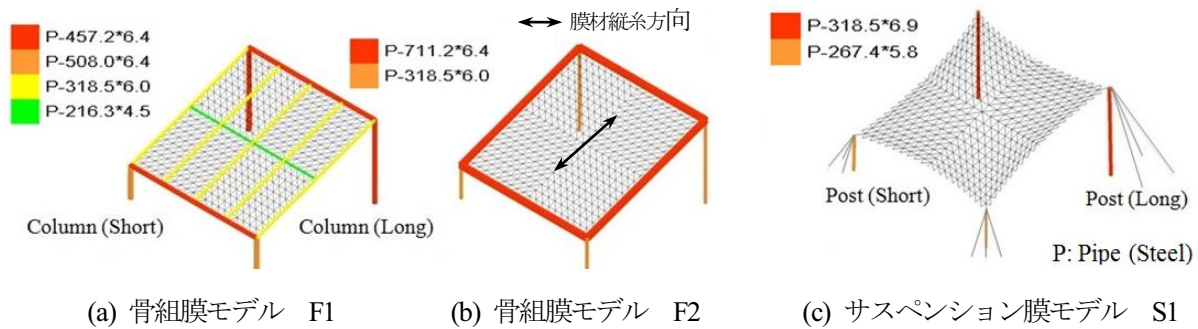


図3 構造解析用モデル(片流れ独立上屋)

第6章 屋根変形が風力係数に及ぼす影響

膜構造の屋根は、風荷重により屋根が大きく変形することがあり、必ずしも剛であるとは見做せない。よって、剛模型から提案された風力係数が、そのまま膜構造屋根にも適用できるかどうかは疑問である。そこで、第5章で検討した片流れおよびHP型屋根の骨組膜構造モデルF1、F2、およびサスペンション膜構造モデルS1を対象に、CFD解析と構造解析の繰返しによる独自の検討方法を提案し、屋根変形が風荷重に及ぼす影響について調査する。この繰返し解析では、まず初めに、初期張力状

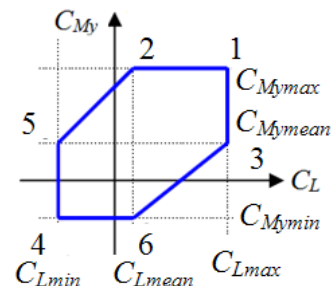
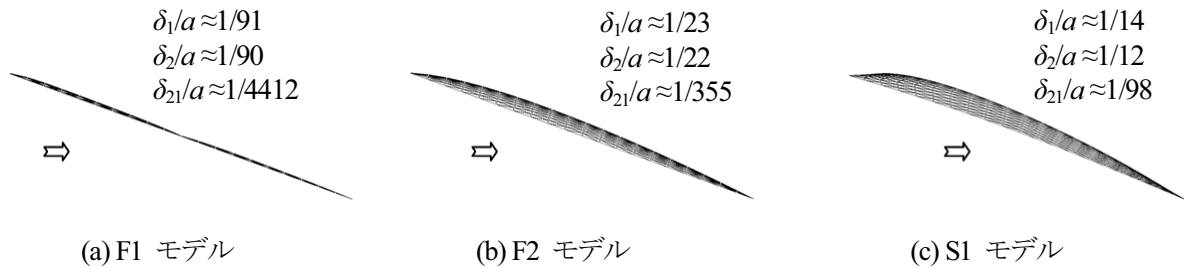


図4 C_L-C_{My} 関係リサージュ近似6角形

態の膜屋根に対して CFD 解析で平均風力係数を求め、次に得られた平均風力係数を用いて構造解析で屋根変形を計算する。さらに、得られた屋根変形形状(図 5)に対して再度 CFD 解析を行い、得られた風力係数を用いて、再度構造解析を行う。このような繰り返し計算を屋根の形状変化が微小になるまで繰り返す。そして、解析終了後に屋根変形前後の荷重効果を比較することで屋根変形が風力係数に及ぼす影響を明らかにする。

屋根の変形前後の荷重効果(応力比)の比較より、変形前の風力係数から得られた荷重効果に対する変形後の風力係数から得られた荷重効果の比は、最大で約 1.2 となった。したがって、剛模型を用いた風洞実験に基づいて提案された設計用風力係数は、屋根が膜構造物である場合にはそのまま適用することはできない。



a : スパン長さ 15 m, δ_1, δ_2 : 初回, 2 回目の解析結果の最大変位量
 δ_{21} : 初回, 2 回目の解析結果の最大変位量の差の絶対値

図 5 初回の構造解析から得られた屋根中央部の断面形状 (片流れ独立上屋)

第 7 章 膜構造用の等価静的設計用風力係数

剛模型を用いた風洞実験から提案した設計用風力係数の改良について 2 案述べる。改良案 1 は、提案設計用風力係数の式中に膜構造物用の補正係数 μ を導入して(1),(2)式のように表す方法である。改良案 2 は、設計用風力係数の基本値を膜構造用の基本値 C_{NW0m} , C_{NL0m} に設定する方法で、(3),(4)式のように表す。

$$C_{NW}^* = \frac{\gamma\mu C_{NW0}}{G_f}, \quad C_{NL}^* = \frac{\gamma\mu C_{NL0}}{G_f}, \quad C_{NW}^* = \frac{\gamma C_{NW0m}}{G_f}, \quad C_{NL}^* = \frac{\gamma C_{NL0m}}{G_f} \quad (1), (2), (3), (4)$$

ここで、 C_{NW}^* , C_{NL}^* は風上・風下 1/2 領域における膜構造用風力係数、 C_{NW0} , C_{NL0} は剛な屋根に対する風力係数 C_{NW} , C_{NL} の基本値、 G_f はガスト影響係数、 γ は風向に対する補正係数、 μ は膜構造物用の補正係数、 C_{NW0m} と C_{NL0m} は膜構造用風力係数 C_{NW} と C_{NL} の基本値である。改良案 1 と 2 を比較すると、剛な独立上屋に対する風力係数データの蓄積を考えれば、案 1 の方が応用性が高いと考えられる。その場合、(1),(2)式中の補正係数 μ は、屋根支持形態の影響に関する係数 μ_s と屋根変形の影響に関する係数 μ_d から、両係数に相関はないと考え、 $\mu = \mu_s \times \mu_d$ のように表わすことができると考えられる。本研究では、係数 μ_s は最大約 1.1、係数 μ_d は最大約 1.2 となり、これらの値を用いれば、少なくとも本研究で検討した形状と構造形式については、風荷重を安全側に評価する。今後、他の形状や構造形式に対する検討が必要である。

第 8 章 結論

本研究で得られた主な結論をまとめた。従来、設計用風力係数は剛模型を用いた風洞実験結果に基づいて設定されるが、膜構造独立上屋では様々な支持形式が用いられることに加えて屋根の変形が大きくなるため、本研究では、これらが荷重効果に及ぼす影響を非線形構造解析や数値流体計算を用いて検討した。その結果、従来の風力係数ではいくつかの荷重効果を過小評価する可能性があることを示し、それらを考慮した膜構造独立上屋用の風力係数を評価する方法を提案した。

論文審査結果の要旨

本研究は、耐風安全性が強く求められる膜構造独立上屋のより合理的な設計用風荷重評価の提案に向け、支持形態が多様であることや風による屋根の変形が大きくなるという膜構造の特徴を考慮し、屋根が剛と看做せる場合の設計用風力係数の改良案を示したものであり、全編8章よりなっている。

第1章は序論であり、本研究の目的と背景について述べている。

第2章では、膜構造独立上屋の概要が述べられている。膜構造形式には「骨組膜構造」、「サスペンション膜構造」および「空気膜構造」の3種類があり、それぞれの構造的特徴を整理した。なお、本研究では前2者を対象としている。また、屋根に用いられる膜材料には「ソリッド膜」と「メッシュ膜」の2種類があり、それぞれの特徴を述べた。メッシュ膜の場合、通気性があり、風洞実験模型の製作や数値流体計算(CFD)においては、圧力損失係数で考慮される。

第3章では、風力係数のデータ蓄積が不十分なHP(Hyperbolic Paraboloid)型独立上屋を対象に、剛模型を用いた風洞実験が実施された。屋根は剛であると仮定し、荷重効果として屋根を支持する柱に作用する軸力に着目し、等価静的風荷重を与える設計用風力係数を提案した。この風力係数を、オーストラリア/ニュージーランド(AS/NZ)基準の規定値と比較したところ、風力係数そのものには違いはあるものの、概ね同等の荷重効果を与えることが示された。ただし、提案された風力係数は、AS/NZ基準で規定されているライズ・スパン比の範囲を大きく超えるものであり、HP型独立上屋設計において極めて有益な情報を与える。

第4章では、第3章で実施された風洞実験を数値流体計算で模擬した。解析値と実験値の比較に基づき、設計用風力係数を検討する上で数値流体計算が有効であることが示された。なお、ここで実施された数値流体計算は、RANS式に基づいた有限体積法による定常解析である。

第5章では、対象とした各独立上屋に対し、屋根支持形態が異なる3種類のモデルを設定し、第3章で提案された風力係数を用いて様々な荷重効果(柱軸力だけでなく、膜張力やフレームの曲げモーメントなど)を計算し、屋根の支持形態が荷重効果に及ぼす影響を明らかにした。その結果、第3章で提案された風力係数は、いくつかの荷重効果を最大10%程度過小評価することが示され、支持形態を考慮した風力係数の補正の必要性が示された。

第6章では、屋根変形が風力係数に及ぼす影響を明らかにするため、数値流体計算と構造解析の繰返しによる独自の検討方法が提案され、実施された。屋根変形前後の荷重効果を比較することで、屋根変形の影響が明らかにされた。屋根変形により屋根に作用する風力分布が変化し、その結果として荷重効果も変化する。一般に、屋根変形は荷重効果を増大させる傾向にあるため、屋根を剛と仮定したときの風力係数は最大20%程度荷重効果を過小評価する可能性があることが示された。

第7章では、第5章および第6章で明らかにされた屋根の支持形態と変形が風力係数に及ぼす影響を考慮し、剛な屋根に対して提案された設計風力係数を改良する方法を提案した。最も簡便な方法として、それぞれの影響に対する補正係数が導入された。

第8章は結論であり、本研究で得られた主な結論をまとめた。

以上、要するに本論文は、膜構造独立上屋を対象とし、膜屋根の支持形態と屋根変形が風力係数、ひいては様々な荷重効果に及ぼす影響を明らかにし、剛な模型を用いた風洞実験結果に基づいて設定された風力係数が必ずしも適切ではないことを示し、さらに両方の効果を考慮した風力係数を提案したものであり、今後の膜構造建築物の耐風安全性に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。