

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560560

研究課題名（和文）曲面構造のエアロダイナミクスに及ぼすレイノルズ数並びに空力減衰効果

研究課題名（英文）Effects of Reynolds number and aerodynamic damping on the aerodynamic behavior of curved structures

研究代表者

植松 康（UEMATSU YASUSHI）

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60151833

研究成果の概要：

円弧屋根を有する大空間構造（スポーツ施設等）とパイプハウスを対象とし、それらに作用する風力の特性に及ぼすレイノルズ数 Re の影響と屋根の振動に伴って発生する空力剛性（変位に比例する成分）および空力減衰（速度に比例する成分）の特性を風洞実験により明らかにした。 Re が概ね 5×10^4 以上では Re の影響が小さいこと、斜め方向から風が吹いた場合に動的荷重効果が最大になること、空力減衰や空力剛性は風速や振幅には大きな影響を受けず、振動数の影響が大きいことなどを示した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：曲面構造、エアロダイナミクス、風洞実験、レイノルズ数、空力減衰、空力剛性、園芸用パイプハウス、設計用風荷重

1. 研究開始当初の背景

(1) 曲面構造の耐風設計におけるレイノルズ数効果の重要性

曲面構造は、スポーツ施設等の大空間構造や園芸用ハウスなどの農業施設に広く利用されており、その設計においては風洞実験がしばしば利用される。曲面を有する場合、流れの剥離点位置がレイノルズ数 Re によって変化するため、その周りの流れや風圧分布はレイノルズ数によって大きく変化することが知られている。レイノルズ数は、実建築物

では $10^7 \sim 10^8$ であるのに対して、通常の風洞実験では $10^4 \sim 10^5$ と、3桁もの違いがあり、曲面構造物を対象とした風洞実験の妥当性が常に議論の的となっている。

最も基本的な曲面構造物である円柱については、高圧風洞を用いた高レイノルズ数での実験や煙突やクーリングタワー等を用いた実測も多く行われており、レイノルズ数の効果はある程度明らかになっている。しかし、通常の曲面構造では、そのような実験や実測を行うことはほとんど不可能である。また、

円柱では、表面粗度が大きくなると流れの遷移が促進されることが知られており、それとのアナロジーで、一般の曲面構造についても表面粗度をつけることで高レイノルズ数流れが再現できるとしている。しかし、実際にそれが正しいかどうかを検証できない。なぜならば、円筒形構造物と異なり、実測がまったく為されていないので、真の性状が分からないからである。実測や各種風洞実験を通してレイノルズ数の影響を明らかにすることは非常に重要である。

(2) 曲面構造の耐風設計における空力減衰効果の重要性

非定常空気力は、構造物の振動に伴って発生する付加的な空気力であり、空力剛性および空力減衰として評価される。大空間構造のように、軽くて柔らかい構造物の場合には、空力減衰効果が応答に大きな影響を及ぼすと考えられる。負減衰効果による空力不安定振動の発生も懸念されるが、逆に正減衰効果が作用するならば、振動は安定化する。既往の実験結果によれば、実際には正減衰をもたらす場合も多いと考えられる。従って、その効果を正しく評価し、応答解析や設計に取り込むことで、より合理的な耐風設計が可能となる。

2. 研究の目的

実構造物を用いた自然風中での実測や縮尺模型を用いた風洞実験に基づき、曲面構造に作用する定常・非定常空気力の特性や風力特性に及ぼすレイノルズ数の効果を明らかにする。これにより、曲面構造物に対する妥当な風洞実験法と非定常空気力の効果を考慮した、より合理的な風応答解析法を確立するための基礎的知見を得る。

3. 研究の方法

建築物等に利用される曲面構造の中で最も基本的な形状は円弧屋根である。この円弧屋根は、大規模なものとしてはスポーツ施設等の大空間構造に、小規模なものとしては園芸用パイプハウスによく利用される。本研究では、このように両極端の規模をもつ大空間構造とパイプハウスを対象とする。

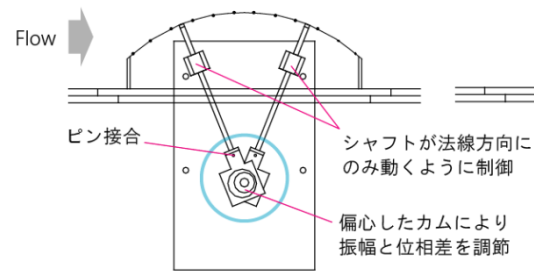
(1) 円弧屋根に作用する定常および非定常空気力の把握

円弧屋根を一定振幅、一定振動数の逆対称1次モードで振動させることのできる図1に示すような強制加振装置を独自に設計・製作した。スパンは400mm、ライズ・スパン比は、大規模な円弧屋根で一般的に用いられる値として0.2である。

この装置を用い、市街地風を模擬した境界層乱流中で屋根に作用する多点風圧と屋根変位の同時測定を行った。実験

パラメータは、加振振幅、加振振動数、風速である。加振振幅 x_0 (片振幅) は 1mm、2.5mm、4mm の 3 種類、加振振動数 f_m は、 $x_0=1\text{mm}$ および 2.5mm の場合には 5Hz~25Hz、 $x_0=4\text{mm}$ の場合には 5Hz~20Hz の範囲を 1Hz 刻みに変化させた。実験風速は屋根平均高さで $U_H=5\text{m/s}$ 、7m/s、10m/s の 3 種類とした。

測定データ(時刻暦)を用いて、非定常空気力の変位同相成分(空力剛性)と速度同相成分(空力減衰)を計算し、それらを無次元化して空力剛性係数 C_k および空力減衰係数 C_d を計算した。



(a) 強制振動装置のメカニズム



(b) 風洞内に設置された実験模型
図1 屋根強制加振装置と実験模型

(2) 園芸用パイプハウスの風力特性の把握と設計用風荷重の評価法の検討

図2に示す園芸用パイプハウスを秋田県立大学本荘キャンパスに建設し、自然風中での風圧の実測を行った。屋根部分のライズ・スパン比は約0.22であり、(1)で用いた模型の値とほぼ同じである。風圧測定孔は中央断面および妻面に近い断面にそれぞれ14点ずつ設けられており、風速と共に同時測定した。風向は主として桁行き面に概ね正対する方向(0°)である。

また、この実大モデルを縮尺率 1/40 で再現した縮尺模型を用いた風洞実験を行った。圧力測定孔は実測モデルの場合より密に配置されており、風向も 0°~90° の範囲で変化させた。なお、風洞実験は、同一模型を用い、(独)農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究所の大型風洞と東北大学の小型風洞で行った。結果の機関間比較を行うことで、風洞実験法の検証も併せて行った。



図 2 風圧の実測用に建設された園芸用パイプハウス（秋田県立大学本荘キャンパス）

4. 研究成果

(1) 円弧屋根に作用する定常および非定常空気力

1) 静止した屋根に作用する風圧の特性とレイノルズ数効果

① 平均および RMS 変動風圧係数

本実験の風速範囲では、これらの分布にほとんど変化がないことが確認された。本研究で対象としたライズ・スパン比 0.2 の円弧屋根の場合、風はほぼ屋根に沿って流れ、流れの剥離点は風下端に近い位置に生じる。この流れの剥離は強いものではないため、仮に剥離点位置がレイノルズ数によって多少変化するとしても、全体的な流れパターンに大きな変化をもたらすことはない。従って、風圧分布に及ぼすレイノルズ数効果は小さいと考えられる。

② 屋根変形の影響

屋根に逆対称 1 次モードの静的変形を与えたときの風圧分布を測定した。振幅・スパン比は最大 0.01 である。平均風圧係数は、風上側屋根面が凸に変形すると、風上側の負圧が大きくなり風下側の負圧が小さくなる。逆に、風上側屋根面が凹に変形すると、風上側の負圧が小さくなり、風下側の負圧が大きくなる。このような傾向は変形量が多いほど顕著である。RMS 変動風圧係数の場合も同様の傾向が見られ、また、他の実験風速においても同様の結果が得られた。これは屋根の変形に伴う流線の曲率の変化に起因しているものと考えられる。

③ 一般化平均変位と平均一般化風力の関係

両者はほぼ線形関係にあることが分った。この直線の勾配は、準定常理論から得られる空力剛性係数を意味し、加振振動数が小さい領域では空力剛性係数はこの値に漸近する。本実験でも、この性状が確認された。

2) 振動している屋根に作用する風圧の特性

① 変動風圧のパワースペクトル

一般に、強制振動数 f_m とその 2 倍の振動数において卓越したピークを有している。これらのピークは、屋根の振動により発生した付加的な空気力によるものであり、加振振幅 x_0

と加振振動数 f_m が增大すると、概ね定常状態に達する。

② 空力剛性係数 a_k および空力減衰係数 a_c

a_k および a_c の f_m による変化を求めた。また、静止気流中でも同様の強制加振実験を行い、屋根面の振動のみにより発生する付加空気力を求めた。それらより、以下の知見が得られた。

- ・静止気流中での非定常空気力 (a_{k0} , a_{c0}) は気流中での値に対して無視し得ない大きさを持っており、その大きさは振動の振幅と概ね比例関係にある。
- ・気流中で得られた非定常空気力 (a_k' および a_c') から①で求めた a_{k0} および a_{c0} を減じたものを屋根の振動と気流との相互作用による非定常空気力 (a_k , a_c) と捉え、屋根に作用する振動依存風力の性状を定量的に把握した。
- ・空力剛性係数の傾向としては、いずれの場合も $f_m < 10\text{Hz}$ 程度までは負の値をとり系の剛性を増加させるが、それよりも加振振動数が大きい範囲では正の値をとり、系の剛性を低下させる。また、 $f_m = 20\text{Hz}$ の付近で最大となり、それ以降は減少する。さらに、振幅によらず概ね一致することから振幅に比例することがわかる。
- ・空力減衰係数の分布の様子は、 $x_0 = 1\text{mm}$ と $x_0 = 2.5\text{mm}, 4\text{mm}$ で異なる。 $x_0 = 1\text{mm}$ の場合は、加振振動数が増すにつれて、空力減衰係数は単調に減少するが、 $x_0 = 2.5\text{mm}, 4\text{mm}$ の場合には $f_m = 17\text{Hz}$ 付近で極大値をとり、それ以降単調に減少する。また、いずれの振幅においても $f_m > 20\text{Hz}$ の範囲では正減衰効果をもたらす。 $x_0 = 1\text{mm}$ の場合には他の振幅の場合と異なった変化をするものの、 $x_0 = 2.5\text{mm}$ と $x_0 = 4\text{mm}$ の結果はほぼ一致し、ある程度の大きさの振幅では、振幅に比例する。

このような性状は、平らな大スパン屋根や半円形屋根を対象とした既往の研究結果と定性的には一致している。

(2) 園芸用パイプハウスの風力特性の把握と設計用風荷重の評価法

1) 風圧分布に及ぼすレイノルズ数の効果

風洞実験において、Tieleman が提案した乱れの強さとスケール、small scale turbulence に関する相似条件を満足すれば概ね実現現象を再現できることを、農村工学研究所と東北大での実験結果との比較により検証した。また、レイノルズ数が概ね 5×10^4 以上であれば、風圧分布はレイノルズ数に依存しないことを示した。この $Re = 5 \times 10^4$ は ASCE が示している模型実験におけるレイノルズ数の下限値に概ね一致するものである。なお、本研究で対象としたパイプハウスでは、頂部が尖っており、流れの剥離点がこの位置

に固定していることが確認されている。

2) 構造骨組用風荷重評価方法

先ず、平均風圧分布をフレームに作用させたときの応答解析に基づき、構造設計上最もクリティカルとなる荷重効果はフレームの風上柱脚における曲げモーメントであることを示した。次に、多点風圧の同時測定データを用いて、Kasperski が提案した LRC (Load Response Correlation) 法および時刻暦応答解析に基づき、荷重効果が最大となるときの風圧分布を計算した。様々な風向と断面に対する解析結果より、最大荷重効果は、風向が桁行面に正対する方向から約 30° 傾いた場合に、妻面からいくらか内側に入った位置に生じるが分った。また、LRC 法および時刻暦応答解析の結果との比較により、LRC 法は最大荷重効果を与える風圧分布を概ね妥当に評価できることが示された。

3) 構造骨組用外圧係数の提案

我が国で一般に用いられているパイプハウス形状に対しては、基規準で風圧係数や風力係数分布が与えられていないため、従来、パイプハウスを設計する際には、似た形状である切妻屋根や円弧屋根の値がしばしば用いられる。しかし、そのような分布は、本研究で得られた風圧分布とは大きく異なるものであり、荷重効果(風上側柱脚部の曲げモーメント)を過小評価することが明らかになった。

そこで、本研究では、荷重効果が基も大きくなる条件下での等価静的外圧係数(基本的には LRC 法による)に基づき、設計用外圧係数のモデルを提案した。そして、このモデルを用いて計算される荷重効果は、時刻暦応答解析から直接評価される最大荷重効果を妥当に評価するものであることを確認した。

4) 風荷重に及ぼす側面開口の影響

本研究の当初目的には含まれないが、パイプハウス側面に適当な開口を設けることで、荷重の低減を図ることを提案し、その妥当性を風洞実験により検証した。開口率を 0~100% の範囲で様々に変化させたときの最大荷重効果を計算した結果、両側面の開口部の開口率を 30~50% とすることで、閉鎖型(開口率 0%) の場合に比べて、最大荷重効果が 20% 程度低減することを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 植松 康、中原浩一、森山英樹、佐瀬勘紀、園芸用パイプハウスの構造骨組用風荷重に関する研究—側壁面の開口が荷重効果に及ぼす影響について—、農業施設、40(2)、2009 (印刷中)、査読有

- ② 植松 康、中原浩一、森山英樹、佐瀬勘紀、園芸用パイプハウスの構造骨組用風荷重に関する研究—閉鎖型構造の外圧係数について—、農業施設、39(2)、35-46、2008、査読有

- ③ 森山秀樹、佐瀬勘紀、植松 康、山口智治、パイプハウスの風圧係数と妻面開口部の影響に関する風洞実験、農業施設、38(4)、1-12、2008、査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① 植松 康、園芸用パイプハウスの風応答・風荷重に及ぼす側面開口の影響、日本建築学会大会、2009 年 8 月 28 日、仙台

- ② 田中 賢嗣、植松 康、園芸用パイプハウスにおける構造骨組設計用外圧係数の提案、日本建築学会大会、2009 年 8 月 28 日、仙台

- ③ 濱井美希、植松 康、田中賢嗣、大スパン円弧屋根に作用する非定常空気力に関する基礎的研究、日本建築学会大会、2009 年 8 月 28 日、仙台

- ④ 植松 康、小幡昭彦、園芸用パイプハウスの構造骨組用風荷重に関する検討、日本建築学会大会、2008 年 9 月 20 日、広島

- ⑤ 小幡昭彦、植松 康、中原浩一、松本真一、実代スケールを用いた園芸用パイプハウスに作用する風圧の実測 その 1 : 実測の概要と平均風圧係数分布、日本建築学会大会、2007 年 8 月 30 日、福岡

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

植松 康 (UEMATSU YASUSHI)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60151833

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

小幡 昭彦 (OBATA AKIHIKO)
秋田県立大学・システム科学技術学部・助教
研究者番号：30433147