

園芸用パイプハウスの設計用風荷重

東北大学大学院工学研究科 田中 賢嗣, 植松 康
農村工学研究所 森山 英樹, 佐瀬 勘紀

1. はじめに

わが国では、主として建設コストの観点より、パイプハウスが温室としてよく用いられる(農林水産省生産局生産流通振興課, 2009)。しかし、このパイプハウスは鉄骨ハウスに比べて耐風性に乏しく台風等の強風で被災することが多い。様々な被害が発生するが、被害は、構造骨組(アーチパイプ)の座屈や曲げ降伏(構造被害)と被覆材(フィルム)の剥離・飛散に大別される。被害原因の一つとして、設計用の風力係数が設定されていないことが挙げられる。パイプハウスの設計は日本施設園芸協会「園芸用施設安全構造基準」(1999)に基づいて為されることが多いが、この基準にはわが国で一般的なパイプハウス形状(側壁がやや傾斜し、肩部だけでなく屋根面にも曲率がある)の風力係数は与えられていない。切妻屋根や円弧屋根の風力係数を準用して設計される場合が多いと考えられるが、それらはアーチパイプの耐風設計において最も重要な荷重効果であるフレーム風上柱脚部の曲げモーメントを過小評価することが指摘されている[1]。また、外装材の設計についても、旧建築基準法(風荷重に関して2000年に大幅な改定が為されたが、その改定以前のもの)に基づいており、外装材の耐風設計に必要なピーク風力を適切に評価しているとは言い難い。そこで本研究では、わが国で広く用いられている図1に示すような形状のパイプハウスを対象とし、一連の風洞実験結果に基づき、単体モデルの構造骨組用外圧係数と外装材用ピーク外圧係数を提案する。また、数棟が隣接して設置されることも多いことを考慮して、複数棟モデルの風洞実験を併せて行い単体モデルの結果との比較を行った。なお、ここでは外圧係数のみを扱う。



図1 代表的なパイプハウス形状

2. 風洞実験

2.1 実験気流と模型

実験は独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所の大型風洞で行った。実験気流は日本建築学会「建築物荷重指針」(2004)が定める地表面粗度区分II(田園地帯に相当)に対応する境界層乱流である。

実験に使用した模型は、スパン $S=5.4\text{m}$ 、棟高さ $H=3.0\text{m}$ 、棟長さ $L=21.6\text{m}$ を有するプロトタイプモデルを幾何学的縮尺率 $\lambda_L=1/40$ で再現したものである(図2)。

* External wind pressure coefficients for designing pipe-framed greenhouses by Satoshi Tanaka, Yasushi Uematsu, Hideki Moriyama and Sadanori Sase

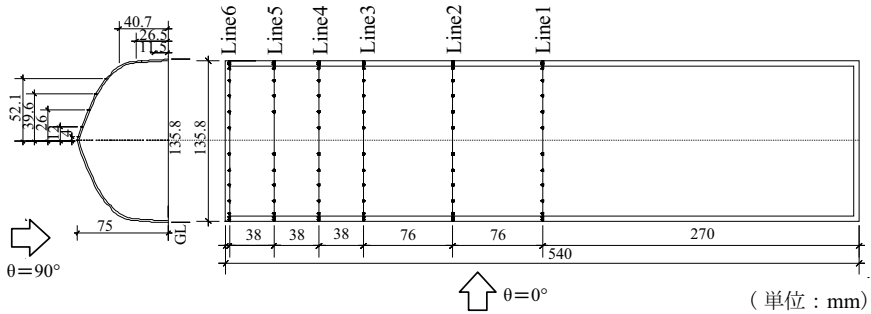


図2 風洞実験模型

模型には、図2に示す6ライン(Line1~6)上に、それぞれ14個の圧力測定孔(内径0.5mm)が設けられている。風向 θ は側壁に正対する方向を 0° とし、向きを図2に示すように定義する。実験では $\theta=0\sim 90^\circ$ の範囲を 15° ピッチで変化させる。

複数棟モデルにおいて検討する模型配置は図3に示す4ケースである。黒色のモデルは風圧測定用模型、白色のモデルはダミー模型(形状は同一であるが風圧測定孔を設けていない模型)を表わしている。ケース1は単体モデル、ケース2および3は2棟モデル、ケース4は3棟モデルである。ケース4の場合、風上のハウスはケース2、風下のハウスはケース3の場合とほぼ同様であると考えられるので、中央のモデルのみ測定する。隣棟間隔 d は、実際の設置状況を考慮し、実スケールで $0.75\sim 3\text{m}$ ($d/H=0.25\sim 1.0$)とする。

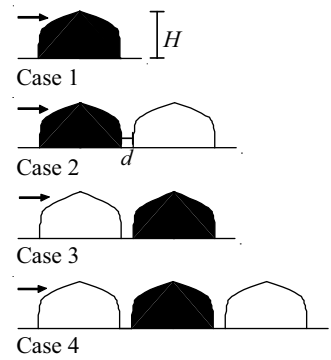


図3 模型配置の概略図(黒塗りは風圧測定模型)

3. 構造骨組用外圧係数

既往の研究[1]から、構造骨組を設計する際に最も重要な荷重効果として風上柱脚部の曲げモーメントを選択した。荷重効果が最もクリティカルとなる外圧係数分布(等価静的外圧係数)を基に、設計用外圧係数のモデル化を行う。

3.1 等価静的外圧係数分布

各ライン上の圧力測定点(14点)に作用する風圧の時刻歴データにLRC(Load Response Correlation)法[2]を適用し、最大荷重効果に対応する「等価静的外圧係数(C_{pe}^*)」の分布を求めた(図4)。図は展開図である。 s は風上柱脚部を原点とし屋根面に沿った座標であり、

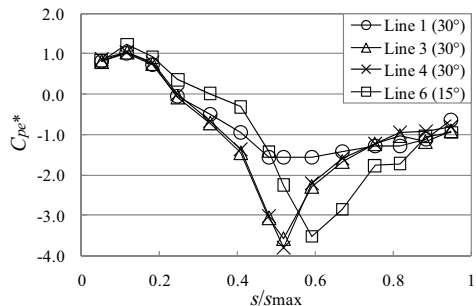


図4 等価静的外圧係数分布

全長 s_{max} で基準化されている。凡例に示す括弧内の角度は、測定ライン上にフレームがあると仮定して曲げモーメントの分布を計算し、それぞれのフレームにおいて最大荷重効果を与えるときの風向である。図より、いずれのフレームでも風向 $\theta=15\sim 30^\circ$ で荷重効果が最大となることが分かる。ライン3, 4, 6では、頂部近傍で局所的に大きな負圧が発生している。これは、風上屋根面での流速の上昇と、模型頂部および風上側妻面における流れの剥離に起因していると考えられる。

図の各ラインの等価静的外圧係数がフレームに作用したときの曲げモーメント分布を計算したところ、ライン4、風向 $\theta=30^\circ$ のときに風上柱脚部の曲げモーメントが最大となった。そこで、このときの等価静的外圧係数分布に基づき、設計用外圧係数のモデルを提案する。

3.2 設計用外圧係数のモデル化

モデル化の方法は、ライン4、風向 $\theta=30^\circ$ のときの等価静的外圧係数分布(図5中の×印)を風上の壁面と屋根、風下の壁面と屋根の4領域に対して空間平均する。さらに、設計上重要な荷重効果である風上柱脚部の曲げモーメントと柱脚部にはたらく引き抜き力について、最大応答を再現するよう設計用外圧係数の値を調整すると図5中の実線のようになる。この分布を用いて計算したフレームの曲げモーメント分布は、風圧の時刻暦を用いて計算した最大ピーク応答時(風上柱脚部の曲げモーメントが最大ピーク値になる時)の曲げモーメントをよく再現していることが確認された。

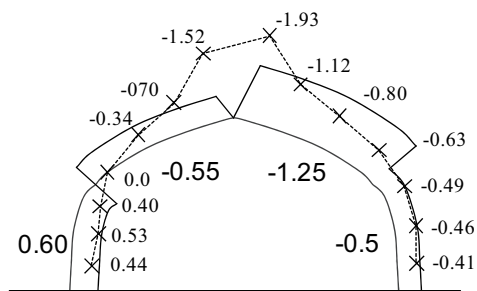


図5 単体モデルの設計用外圧係数分布

3.3 複数棟の場合

前節では、パイプハウスが単体として建設された場合を想定し、構造骨組設計用外圧係数について考察した。しかし、現実には複数棟が並列して設置されることも多い。そこで複数棟モデルについても同様の実験を行い、各ケースの最大応答を単体モデルの結果と比較した(図6、 d は実スケールで表示)。図より、ケース3、 $d=3m$ のとき単体モデルの値を僅かに上回っているが、設計上問題ではないと考えられる。これより、複数棟が並列して設置される場合にも単体モデルに提案した構造骨組設計用外圧係数を適用することが可能であると考えられる。

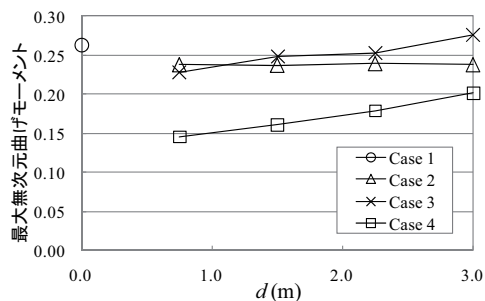


図6 最大応答に対する隣棟間隔の影響 (○印は単体モデルの値を示す)

4. 外装材用ピーク外圧係数

パイプハウスは一般に図 7 のように構成されている。ここで検討する「外装材用ピーク外圧係数」は、フィルムだけでなくその固定部分や抑えひもおよびその固定部分の設計用に用いられる。設計において重要となるのは、

①断面全体(領域Ⅰ～Ⅳ)に作用する風圧の面平均値(鉛直成分)

②屋根(図 7 領域ⅡおよびⅢ)および側壁(領域ⅠあるいはⅣ)およびのそれぞれに作用する風圧の面平均値

の二種類である。本研究では、これら面平均風圧に着目し、外装材設計用ピーク外圧係数について考察、提案する。

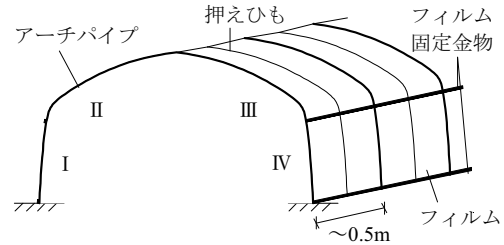


図 7 パイプハウスの一般的な構成

4.1 局所揚力係数と屋根面に作用する力

ハウス屋根部分(図 7 の領域ⅡおよびⅢ)のフィルム並びに抑えひもにもたらされる力は屋根部分に作用する揚力(鉛直方向の風力)と強い相関をもつ。従って、それらの設計においてはハウス断面に作用する揚力が重要となる。すなわち、局所揚力(桁行方向単位長さ当たりの揚力)が最大ピーク値となるときの外圧分布に基づいて外装材設計用ピーク外圧係数を設定するのが適切であると考えられる。

そこで先ず初めに、各ラインに対して局所揚力 L_f を風向ごとに計算し、局所揚力係数 C_{L_f} ($=L_f/q_H S$, q_H : 基準高さ H での速度圧, S : スパン) で表した。 C_{L_f} の最大ピーク値に関する結果を図 8 に示す。図の横軸はハウス中央断面からの距離 x を桁行長さ L で基準化したものである。図より、 C_{L_f} は $\theta=75^\circ$ のとき妻壁に最も近いライン 6 で最大ピーク値を示す。このような結果に基づき、風向 $\theta=75^\circ$ のときライン 6 について、局所揚力係数の最大ピーク値に対応する等価外圧係数分布を LRC 法に基づいて算定した。すなわち、荷重効果として局所揚力係数 C_{L_f} に着目し、その最大ピーク値に対応する瞬間的な外圧の分布を求めた。結果を図 9 に示す(図中の×印)。屋根部分のフィルムや抑えひもの取付部の設計においては、この分布を直接用いることもできるが、さらに荷重算定を容易にするため、各領域に対して面平均値を算定すると、図中の実線のようなのである。

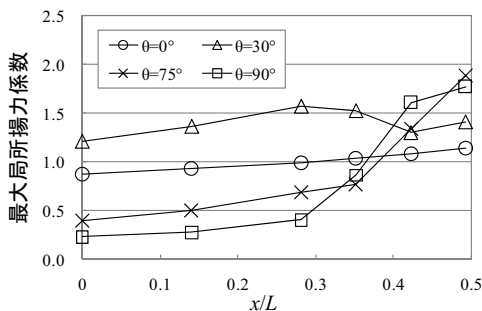


図 8 断面全体の局所揚力係数の最大ピーク値

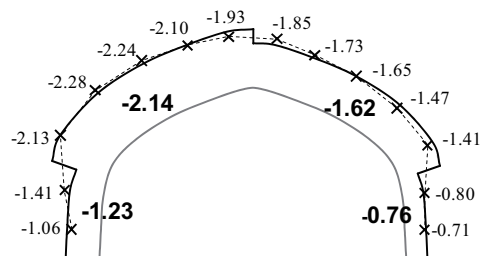


図 9 最大応答に対する隣棟間隔の影響 (×印は単体モデルの値を示す)

4.2 壁面の面平均ピーク外圧係数

風上および風下側の側壁(地面から肩までの範囲)には各ラインに沿って2点の圧力測定孔が設けられている。それらの荷重負担長さを考慮して壁面の面平均外圧係数を計算し、それらの最大および最小ピーク値を求めた。図10は、風上側壁について、様々な風向に対する最大および最小ピーク値の桁行方向分布を示す。最大ピーク値は $\theta=30\sim 45^\circ$ のとき、最小ピーク値は $\theta=75\sim 90^\circ$ のとき、いずれも妻面に最も近いライン6に生じている。風下側壁の最小ピーク値に関する同様の結果を図11に示す。最小ピーク値は $\theta=90^\circ$ のとき妻面に最も近いライン6に生じ、その値は風上側壁に対する値(図10(b))とほぼ同じである。

以上の結果より、最大および最小面平均ピーク外圧係数は、いずれも風上側壁の妻面に近い位置に生じ、その値は以下のようである。

最大ピーク値：1.7，最小ピーク値：-2.7

4.3 複数棟の場合

図12は、各ケースにおける局所揚力係数の最大ピーク値に関する結果である。横軸は隣棟間隔 d であり、ケース1(単体モデル)の結果は縦軸上にプロットされている。いずれのケースでも全体的にケース1の結果より大きな値を示している。特に隣棟間隔が狭い場合に増加率が大きく、 $d=0.75\text{m}$ の場合、最大15%程度大きくなっている。そのため、隣棟間隔に応じた割増が必要であり、その割増係数は図の結果を参考にして決定することができる。

風上側壁および風下側壁の面平均外圧係数の最大・最小ピーク値(全風向、全ラ

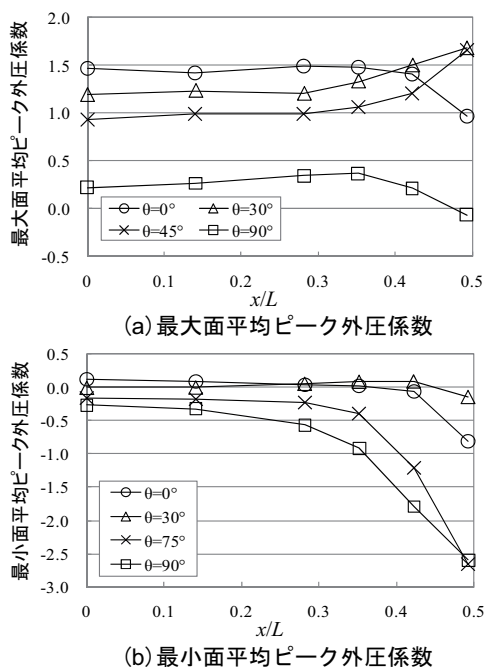


図10 風上側壁の最大および最小面平均ピーク外圧係数の分布

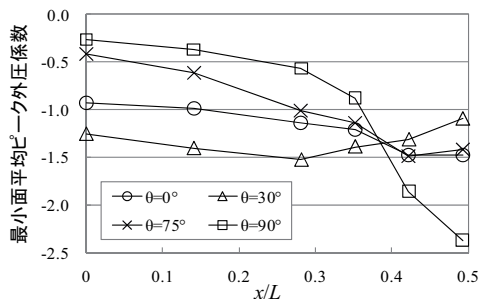


図11 風下側壁の最小面平均ピーク外圧係数の分布

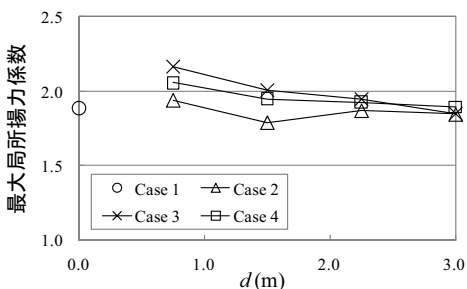


図12 各ケースにおける局所揚力係数の最大ピーク値

インにおける最大・最小値)に関する結果を図 13 に示す。最大・最小ピーク値とも隣接構造物の影響を強く受け、最大ピーク値は 10%程度、最小ピーク値は 35%程度絶対値が大きくなっている。これらの結果より側壁の外装材用ピーク外圧係数として、正+1.9、負-3.7程度の値を用いる必要がある。

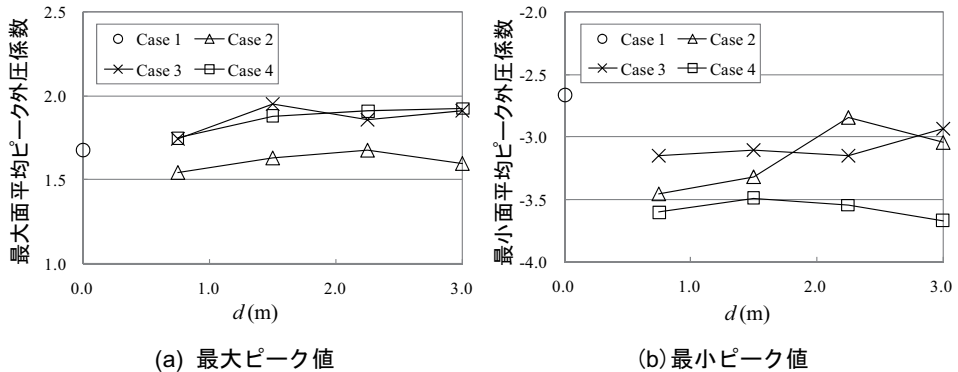


図 13 各ケースにおける側壁の面平均外圧係数の最大・最小ピーク値

5. 結論

わが国で一般的に用いられている園芸用パイプハウスを対象とし、一連の風洞実験により、閉鎖型の場合の外圧の分布を詳細に把握し、構造骨組設計用外圧係数と外装材設計用ピーク外圧係数について考察・提案した。

構造骨組については、荷重効果として風上柱脚部の曲げモーメントに着目し、等価静的外圧係数分布を基に提案モデルの作成を行い、提案モデルが時刻歴応答の最大値をカバーしていることを確認した。また外装材については、側壁のフィルム、屋根面のフィルムおよびその取り付け部、抑えひもおよびその取付部を設計するための局所揚力係数の最大ピーク値と面平均ピーク外圧係数を与えた。

最後に、同一形状のパイプハウスが 2 ないし 3 棟並列配置された場合について、棟数や隣棟間隔が及ぼす影響を検討した。構造骨組については単体モデルに対して提案したものが適用できることを確認した。外装材については単体モデルの結果を大きく上回るものがあったので、割増係数を示した。

参考文献

1. 植松 康ほか: 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), 2008.
2. Kasperski, M.: Extreme wind load distributions for linear and non-linear design, Engineering Structures, 14(1), 1992.