

園芸用パイプハウスの耐風・耐雪性能と補強効果*

東北大学 植松 康・高橋和也

1. はじめに

我が国では、植物生産施設として、設置費用が安く施工も容易であることから、パイプハウスが広く用いられている。温室としての機能上多くの透過光量を必要とするため、骨組部材寸法と部材数が最小限に抑えられている上、作業性の観点から支柱等の補強はなされない。そのため、通常の建築物に比べて耐風・耐雪性に乏しく、台風等の強風や大雪による倒壊もしばしば発生している(図1, 2)。このような被害を低減するためには、パイプハウスの耐風・耐雪性能を正確に把握するとともに、効果的な補強方法を明らかにすることが重要である。



図1 強風被害例(長崎県提供)



図2 豪雪被害例(群馬県提供)

本研究においては、まず典型的なパイプハウスの二次元フレームモデルを対象とし、風荷重あるいは雪荷重が作用した際の崩壊過程を幾何学的並びに材料非線形を考慮した有限要素解析によ

り明らかにする。風荷重については、パイプハウスが比較的変形しやすいこと、変形に伴って作用する風圧分布が変化することを考慮し、数値流体解析(CFD)と構造計算を連成させた解析を行う。ただし、ここでは時間平均成分のみに着目する。また、雪荷重については、風の影響で偏分布になることを考慮し、雪荷重分布がハウスの最大耐力や崩壊性状に及ぼす影響についても検討する。次に、パイプハウスの設計で一般的に用いられる許容応力度(降伏応力度)あるいは許容限界変形に基づき、各種補強方法が耐風・耐雪性能に及ぼす影響を把握する。

2. 解析モデル

解析モデルを図3に示す。アーチパイプの特性は、外径 $\phi=22.2\text{mm}$ 、厚さ $t=1.2\text{mm}$ 、ヤング係数 $E=2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、降伏応力度 $\sigma_y=175 \text{ N/mm}^2$ であり、応力度-ひずみ度関係は(c)でモデル化されている¹⁾(第二勾配 $=E/420$)。柱脚は固定とする。複数のアーチパイプが45cm間隔で平行に配置され、棟および肩の位置において繋ぎ材(アーチパイプと同じ部

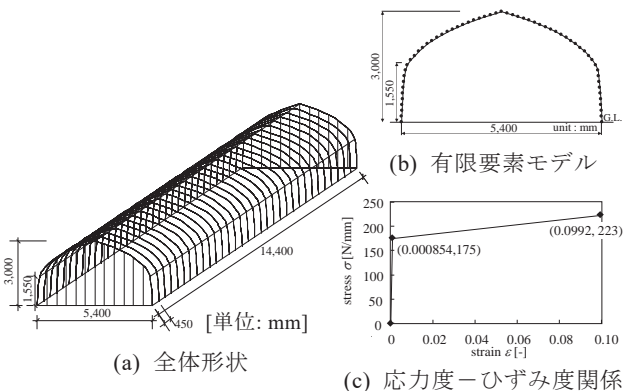


図3 解析モデル

*Collapse procedure under wind or snow loading and effect of reinforcement on the wind and snow resistance of pipe-framed greenhouses
by Yasushi Uematsu and Kazuya Takahashi

材)で連結されている(連結部は固定)。

本論文で検討した補強方法を図4に示す。補強部材はアーチパイプと同じとし、端部境界条件は「ピン」または「剛」とする。Case 5では、強風や大雪が予想されるとき、7フレームごとに鉛直支持部材を応急的に設置したものである。Case 6では斜めのアーチが面内に設置されている。

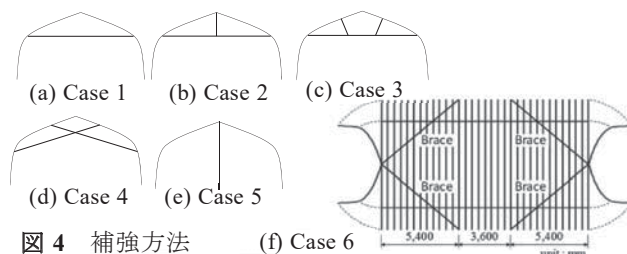


図4 補強方法

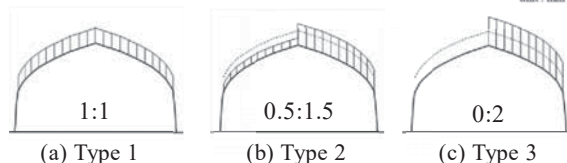


図5 雪荷重の载荷パターン

3. 解析方法

3.1 構造解析方法

構造解析には、汎用構造解析ソフト ABAQUS 6.13 を用いる。幾何学的非線形と材料非線形を考慮する(図3(c))。アーチパイプは、図3(b)に示すように58個の梁要素に分割されており、各節点に荷重負担面積に応じた荷重を集中荷重として作用させる。風荷重については、数値流体解析によりパイプハウスの変形を求め、その法線方向(内向き正)に作用させる。一方、雪荷重では、荷重の作用方向はアーチパイプの変形に拘らず常に鉛直下向きとする。雪荷重分布は図5に示す3パターンを想定する。Type 2, 3は風による雪粒子の移動に伴う不均等分布をモデル化したものであり、全積雪重量はいずれのパターンでも同じである。例えば、Type 2の場合、風上および風下屋根の積雪深は、それぞれ $0.5d_{ref}$ および $1.5d_{ref}$ となる(d_{ref} は基準値を表す)。

3.2 数値流体解析

アーチパイプが風圧によって変形すると外圧分布も変化するので、CFDと構造解析の連成計算を行う(図6)。すなわち、風速を徐々に増大させ(本解析では 0.1m/s ステップ)、変形に応じた平均外圧係数分布をCFDで求め、その結果を新たな荷重計算に用いる。解析にはオープンソースコード OpenFOAM (ver2.1.0)を用いる。乱流モデルは改良型 $k-\epsilon$ モデルである。内圧係数は0とする。

ここでは、妻面に平行な風向のみを対象とし、2次元解析を行う。図7に解析領域、図8にモデル近傍の解析メッシュ分割を示す。流入風は、既往の風洞実験²⁾の気流を模擬したものとする。解析の詳細については文献³⁾を参照されたい。

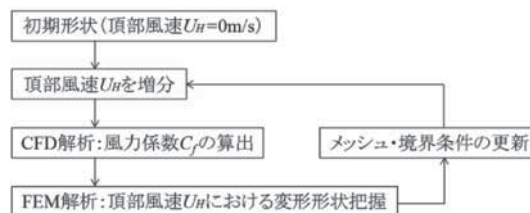


図6 風応答解析のフロー

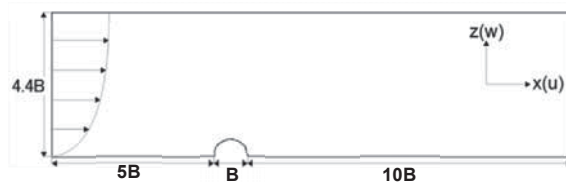


図7 解析領域

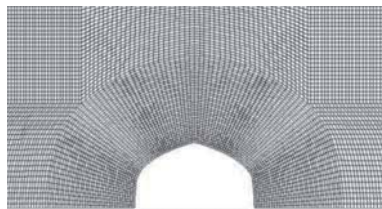


図8 モデル近傍のメッシュ分割

4. 崩壊過程に関する解析結果

4.1 風荷重の場合

ハウス初期形状に対する平均外圧係数分布について、CFDと風洞実験結果の比較を図9(展開図)に示す。 s は風上柱脚を原点とし、フレームに沿った座標であり、 s_{\max} は最大値(フレームの長さ)を表す。ここに、外圧係数 C_{pe} はハウス頂部高さ H での速度圧 $q_H (=1/2\rho U_H^2; \rho = \text{空気密度}, U_H = \text{高さ } H \text{ での平均風速})$ で定義されている。図9より、風下壁面での C_{pe} についてはCFDと風洞実験の結果の差はやや大きい、全体としてはよく一致しており、本解析方法は概ね妥当であると判断できる。次に、風速を徐々に増大させたとき、アーチパイプの一部が地面に接する(崩壊)までの変形の変化を図10に示す。図中の破線はハウスの肩部および頂点の軌跡を表している。風荷重が崩壊荷重に近づくと、風上側の壁面や屋根面が正圧によって押し倒されるように変形していく様子が見られ、図1に示したような典型的な崩壊状態をよく再現している。また、変形に伴う流れ場や風力分布の変化を図11(流線図)および図12(平均外圧係数分布)に示す。図11から分るように、初期形状では頂部で流れの剥離が生じているのに対し、変形が大きく進むと、風上側の側面が押し倒されることによって相対的に頂部より高い位置にきた風下側屋根面で剥離が生じている。変形に伴い、風上側の側面や屋根面では正圧領域が拡大し、崩壊を助長させていることが分る。現行の設計⁴⁾における許容応力度および許容変形限界を与える風速は、それぞれ、 $U_H=14.9$ および 15.1m/s であり、両者には大きな差は見られない。また、図10から分るように、許容応力度や許容変形限界に至るまでのアーチパイプの変形は小さい。したがって、通常的设计においてはハウスの変形に伴う風圧係数分布の変化は考慮する必要はない。しかし、それ以降の塑性域においては、変形を考慮した場合としない場合では結果に大きな差が見られた。変形に拘らず C_p 分布を不変とすると、図1や10に示すような崩壊形状は得られなかった。それは、初期形状に対する C_p 分布では負の領域が広いいためアーチパイプに引張力が作用しフレームが膨張するような変形が生じるためと考えられる。

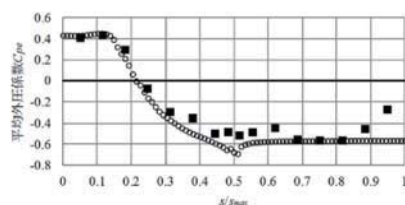


図9 平均外圧係数分布

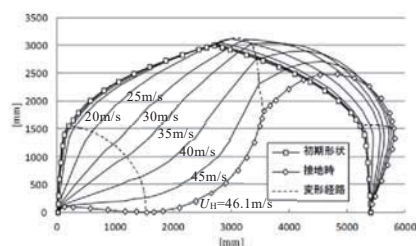
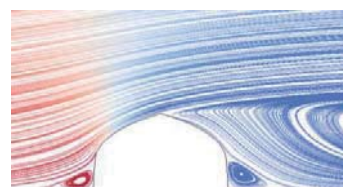
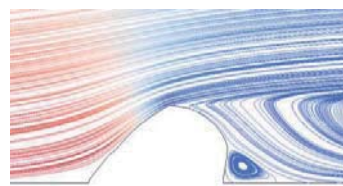


図10 風荷重による変形課程



(a) 初期形状



(b) 変形後 ($U_H = 30\text{m/s}$)



(c) 変形後 ($U_H = 40\text{m/s}$)

図11 変形に伴う流れ場の変化

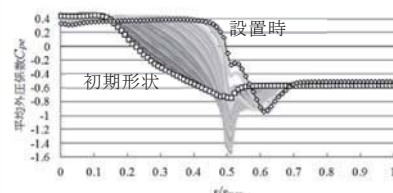


図12 変形に伴う C_{pe} 分布の変化

4.2 雪荷重の場合

荷重分布が Type 1 (均等分布) の場合について、崩壊に至るまで荷重を徐々に増大させたときのフレーム変形の変化を図 13 に示す。なお、荷重は単位積雪重量 $9.8\text{N/cm}\cdot\text{m}^2$ に積雪深 $d(\text{cm})$ を乗じて与えている。図 13 において○印のついた曲線は、フレームの一部が許容応力度 (降伏応力度) に達したときの変形である。前節に示した風荷重の場合と同様、この時点での変形は小さい。フレーム、荷重分布いずれも中心線に関して対象であるため、変形も対象となっている。この崩壊形状は図 2 に示した実被害状況によく一致している。なお、座屈解析を行ったところ、弾性座屈荷重はここで得られた崩壊荷重より大きいことが分った。次に、フレームに座屈モードに比例するわずかな初期不整 (最大変位 0.01ϕ) を与えたときの結果を図 14 に示す。この場合、変形は中心線に関して非対称になる。類似の性状は、図 15, 16 に示すように、非対称な荷重分布の場合にも見られる。実被害調査でも、このような非対称な崩壊形はしばしば見られる。

上記 4 ケーについて、降伏応力度および最大荷重 (崩壊荷重) を与える積雪深 $d_{\text{ref,a}}$ および $d_{\text{ref,u}}$ (cm) を表 1 に示す。これより以下に示す特徴が伺える。

- 1) $d_{\text{ref,a}}$ は荷重分布の影響を強く受け、不均等分布に対する値は均等分布に対する値に比べてかなり小さい。これは、不均等分布荷重がアーチパイプに大きな曲げモーメントを発生させることに起因している。一方、 $d_{\text{ref,u}}$ は $d_{\text{ref,a}}$ に比べて荷重分布に対して鈍感である。
- 2) $d_{\text{ref,u}}/d_{\text{ref,a}}$ の値は、均等分布荷重の場合 1.3 程度、不均等分布荷重の場合 1.5 程度である。したがって、降伏応力度を許容応力度として設計を行った場合、崩壊に至るまでの安全余裕度は一般の建築物に比べて低く、荷重分布に大きく依存する。

5. 補強効果

5.1 風荷重の場合

図 4 に示した各種補強方法について、許容応力度もしくは許容変形限界を与える風荷重を計算し、無補強時の値と比較することで補強効果を検討した。

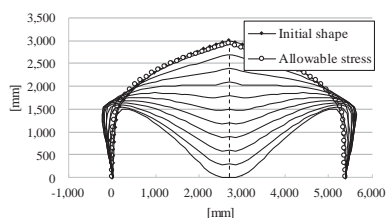


図 13 積雪荷重による崩壊過程 (完全系, Type 1)

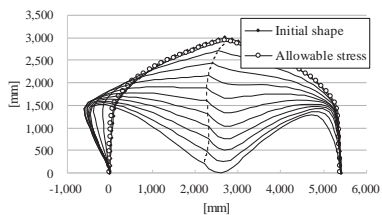


図 14 積雪荷重による崩壊過程 (初期不整あり, Type 1)

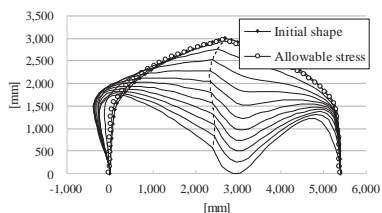


図 15 積雪荷重による崩壊過程 (完全系, Type 2)

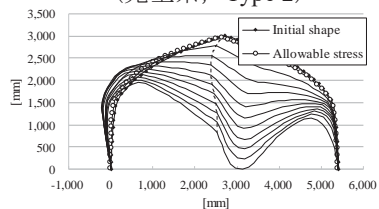


図 16 積雪荷重による崩壊過程 (完全系, Type 3)

表 1 許容応力度および崩壊荷重を与える積雪深

荷重	初期不整	積雪深 (cm)		
		$d_{\text{ref,a}}$	$d_{\text{ref,u}}$	$d_{\text{ref,u}}/d_{\text{ref,a}}$
Type 1	無	14.7	19.8	1.35
Type 1	有	14.7	19.7	1.33
Type 2	無	11.9	18.1	1.52
Type 3	無	10.1	15.0	1.48

まず、Case 1~4 について、2次元フレーム解析の結果を表 2 に示す。表中の値は、許容応力度および許容変形限界を与える風速 $U_{H,st}$ および $U_{H,df}$ (m/s) であり、4.1 節の結果に基づき、気流と構造物との相互作用は考慮していない。補強材の端部境界条件については、「ピン」より「剛」の方が一般に大きな風速値を与えるが、両者の差は小さい。これは、補強部材が細長い上、主として引張力が作用するためと考えられる。いずれのケースでも、補強によって $U_{H,st}$ および $U_{H,df}$ が増大するが、Case 4 が最も効果的である。非補強に対して、1.3~1.4 倍となっている。したがって、耐力は 1.7~2 倍となる。

Case 5, 6 の場合、基本的に 3次元解析が必要となる。ハウスに作用する風圧分布は桁行方向に変化するが、ここでは 2次元解析の結果を用い、桁行方向には一定と仮定する。 $U_{H,st}$ および $U_{H,df}$ に関する結果を表 3 に示す。Case 0 は非補強フレームに関する結果である。なお、桁行方向の繋ぎ材とアーチパイプとの接合部は「剛」と仮定した。非補強フレームの場合、三次元効果によって、 $U_{H,st}$ および $U_{H,df}$ は増大するが、増加の割合は 1 割程度である。Case 5 および 6 は、ハウスの耐力向上に効果は見られるが、上で検討した Case 1~4 の方が効果は大きい。

5.2 雪荷重の場合

Case 1~4 について、2次元フレーム解析の結果を表 4 に示す。表 1 と比べると、補強によって耐雪性は大幅に向上することが分る。特に、均等分布荷重 (Type 1) の場合、フレームをタイビームで繋いだ Case 1 および 2 で耐力の向上が著しい。これは、タイビームが雪荷重によるスラストに抵抗し、フレームに作用する曲げモーメントの増大を抑えるからである。しかし、不均等分布荷重 (Type 2, 3) に対する効果はかなり限定的である。タイビームを取り付けると、内部の作業性が悪くなってしまうので、その位置を上げたのが Case 3 であるが、Case 1 や 2 に比べると、耐力向上効果は小さい。Case 4 では、均等分布荷重に対して Case 1 や 2 のような大幅な耐力向上はないが、不均等分布荷重に対しても同等の効果が見込める。 $d_{ref,u}/d_{ref,a}$ の値は、いずれの補強ケース、荷重分布についても約 1.2 とほぼ同程度の値を示しており、非補強の場合に比べて小さい。

表 2 許容応力度および崩壊荷重を与える風速 (2次元フレーム解析)

Case	$U_{H,st}$ (m/s)	$U_{H,df}$ (m/s)
(a) 補強材端部が「剛」の場合		
1	19.2	19.5
2	19.6	20.1
3	18.0	18.1
4	21.3	24.6
(b) 補強材端部が「ピン」の場合		
1	18.5	18.1
2	18.8	18.6
3	17.6	17.4
4	19.8	21.0

表 3 許容応力度および崩壊荷重を与える風速 (3次元フレーム解析)

Case	$U_{H,st}$ (m/s)	$U_{H,df}$ (m/s)
0	16.2	16.2
(a) 補強材端部が「剛」の場合		
5	18.0	17.9
6	16.9	16.9
(b) 補強材端部が「ピン」の場合		
5	17.7	17.5
6	16.8	16.8

表 4 許容応力度および崩壊荷重を与える積雪深 (2次元フレーム解析)

補強	荷重	$d_{ref,a}$ (cm)	$d_{ref,u}$ (cm)	$d_{ref,u}/d_{ref,a}$
Case 1	Type 1	47.1	58.7	1.25
	Type 2	29.5	35.4	1.20
	Type 3	19.4	24.1	1.24
Case 2	Type 1	56.5	65.1	1.16
	Type 2	34.3	41.2	1.20
	Type 3	21.4	29.1	1.36
Case 3	Type 1	28.5	33.7	1.18
	Type 2	21.0	24.0	1.15
	Type 3	16.1	18.9	1.18
Case 4	Type 1	28.1	35.8	1.27
	Type 2	28.7	35.1	1.22
	Type 3	27.8	34.2	1.23

次に、非補強およびすべての補強ケースについて、3次元フレーム解析の結果を表5に示す。ここでも、桁行方向の繋ぎ材とアーチパイプとの接合部は「剛」と仮定している。非補強フレーム(Case 0)に対する結果は、4.2節で示した2次元フレーム解析の結果とほとんど変わらない。このことは、妻面による拘束効果はほとんど期待できないことを意味している。また、 $d_{ref,a}$ は補強ケースや荷重分布に強く影響されるが、 $d_{ref,u}$ はそれらの要因に対して比較的鈍感である。Case 5の場合のように、3次元フレーム解析による $d_{ref,a}$ の値が2次元フレーム解析結果より小さいこともある。これは、3次元モデルにおいて、アーチフレームより先に繋ぎ材が許容応力度に達することによる。

表5 許容応力度および崩壊荷重を与える積雪深(3次元フレーム解析)

補強	荷重	$d_{ref,a}$ (cm)	$d_{ref,u}$ (cm)	$d_{ref,u}/d_{ref,a}$
Case 0	Type 1	14.6	20.4	1.40
	Type 2	11.8	18.9	1.60
	Type 3	10.0	15.4	1.54
Case 1	Type 1	45.3	58.9	1.30
	Type 2	29.5	35.7	1.21
	Type 3	19.4	24.2	1.25
Case 2	Type 1	55.2	65.5	1.19
	Type 2	33.3	41.5	1.25
	Type 3	22.5	29.3	1.30
Case 3	Type 1	28.1	33.8	1.20
	Type 2	20.9	24.5	1.17
	Type 3	14.8	19.4	1.31
Case 4	Type 1	27.0	36.1	1.34
	Type 2	27.6	35.6	1.29
	Type 3	25.8	34.9	1.35
Case 5	Type 1	12.5	39.7	3.17
	Type 2	12.3	28.4	2.32
	Type 3	12.1	19.8	1.63
Case 6	Type 1	15.2	22.1	1.45
	Type 2	13.2	20.1	1.51
	Type 3	11.4	16.3	1.44

6. おわりに

本研究では、わが国で一般的に用いられているパイプハウスを対象として、その耐風性並びに耐雪性を、幾何学的並びに材料非線形を考慮した有限要素解析によって検討した。まず、2次元フレームを対象とし、荷重を徐々に増大させ、崩壊に至るまでの過程を詳細に解析した。得られた結果は実被害状況によく対応している。許容応力度(降伏応力度)あるいは許容変形限界を与える荷重は、荷重分布や補強方法によって大きく変化するが、崩壊荷重はこれらの要因に対して比較的感度が鈍い。したがって、降伏応力度ではなく、最大耐力に基づいて許容耐力を設定する方が合理的である。次に、現行の許容応力度あるいは許容変形限界に基づき、各種補強方法の効果を検討した。その結果、本論文で検討した中では、図4に示すCase 4の補強方法が、様々な荷重条件に対して効果的であることが分った。

参考文献

- 1) 豊田裕道・森山英樹・瀬能誠之・前川孝昭(1998)：園芸用プラスチックハウス等の風害発生事例とその特徴，農業施設，29(1)，21-30
- 2) 植松 康・中原浩一・森山英樹・佐瀬勘紀(2008)：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
- 3) 高橋和也・植松 康(2016)：園芸用パイプハウスの風荷重および雪荷重による崩壊過程，農業施設，47(1)，1-8
- 4) 日本施設園芸協会(1997)：園芸用施設安全構造基準(暫定基準)-平成9年版-