

大型輸入園芸用ハウスの引倒し実験と風荷重に対する耐用年数の検討

In-Situ Tests and Design Life Evaluation of a Large, Imported Steel-Framed Greenhouse against Wind Load

建築都市空間デザイン専攻 空間防災講座 建築構造工学研究室 福家悠太

Abstract

In-situ tests were conducted to examine the design service life of a steel-framed greenhouse composed of European components and situated in Sapporo city. Based on the measured force distribution, the allowable strength limit may be reached at a three-second gust speed of 24.5 m/s, which translates to a design life of 1.6 to 5.1 years, depending on the referenced design standard. The test bay deformed three times as much as prediction from elastic analysis. An analysis model that incorporated the flexibility of column bases and knee brace connections adequately reproduced the measured force distribution and deformation.

Keywords : Steel-framed greenhouse, Cold-formed steel, In-situ test, Wind load, Structural analysis

1. はじめに

園芸用ハウスは、人が常時滞在する一般建築物ほどの安全性を必要としないこと、作物栽培のために日光の透過性を必要とすることなどから、小断面の鉄骨部材で構成される場合が多い。このようなハウスは、設計で想定した以上の風や雪を受けた場合に、倒壊や部材の座屈などの被害を生じやすい¹⁾。ただ、日本施設園芸協会の基準^{2),3)}にしたがった設計では、頑丈な基礎構造や鉄骨部材を求められ、採算を取りにくい構造になりがちである。そこで、欧州で商用販売されている、経済的で大規模な園芸用ハウスについて、引倒し実験を実施して、どの程度の風荷重に耐えられるか、札幌における耐用年数がどれほどかを検証した。

2. 対象とする園芸用ハウス

検証対象は、札幌市郊外に設置された、イタリア Idromeccanica Lucchini 社の「MULTYATLANTIC EVOLUZIONE⁴⁾」による園芸用ハウスであった。図1に全体写真を、図2に立面図と平面図を示す。梁間方向に3スパンで合計長さ32mのトラス屋根付ラーメン棟が、桁行方向に2.5m間隔で配置された。構面①と②を引倒し実験に利用した。雪は被覆材を滑り、樋に溜っても融雪装置でほぼ融解する。躯体や被覆材の重量は小さく、雪荷重もほとんど受けないために、この園芸用ハウスの性能要求は、主として風荷重で決定される。

柱に角形鋼管 \square -80 \times 80 \times 3を、トラス屋根材や方杖材に大小の角形鋼管や円形鋼管を用いた。桁行



図1. 南西方向からの全体写真

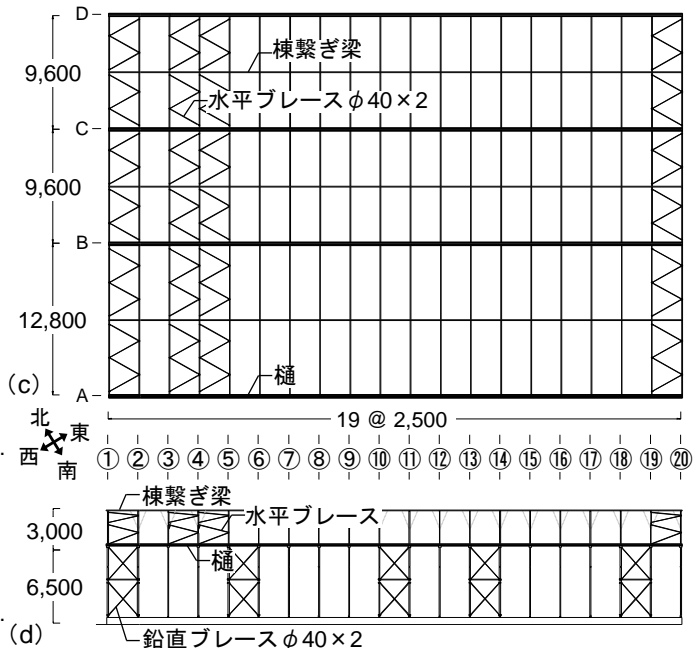
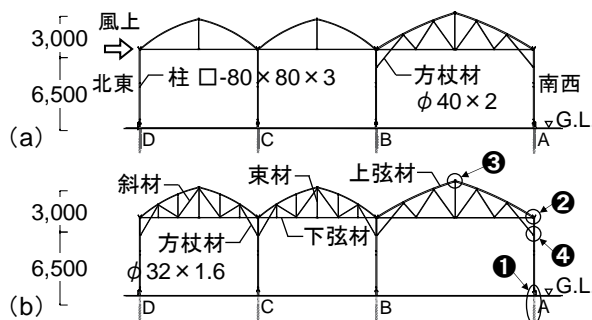


図2. 試験体図面: (a) 構面①北西側立面図; (b) 構面②北西側立面図; (c) 伏図; (d) 南西側立面図 [単位: mm]

In-Situ Tests and Design Life Evaluation of a Large, Imported Steel-Framed Greenhouse against Wind Load

Yuta FUKU

方向には、鉛直・水平ブレースと、柱やトラス材と比較して相対的に断面が大きな樋や棟繋ぎ梁が設置されたので、構造の一体性を期待できる。全ての鋼材に、欧州統一規格の S235 (SS400 に相当) が使用された。引張試験で測定した、柱と樋の降伏強度は、それぞれ 366、400 N/mm² であった。

図 3 に、柱脚の接合詳細を示す。杭ごとの頂部の高低差は、鋼管を突き合せた継手要素で解消された。この継手要素の上に柱が、下にスパイラル杭が接合された。

図 4(a) から (c) に、代表的な接合部の詳細を示す。柱と上・下弦材の接合 (図 4(a))、上・下弦材同士の中継手 (図 4(b)) は、接合要素を介して複数の中ボルトで固定された。トラスの束材や斜材、方杖材 (図 4(c)) は、帯板と 1 本の中ボルトで接合された。帯板は、柱や上・下弦材に、表裏合計 2 本のビスで接合された。方杖材の接合部については、単調引張実験を実施し、接合部の耐力がビス破断で決定されること、柱に巻かれた帯板が、方杖材の軸方向力によって曲げ変形し、方杖材の実効剛性を、1/30 程度に小さくすることを確認した。

3. 線形弾性解析

2 次元線形解析により、構面②の内力と変形を算定した。柱は梁要素で、その他の部材はトラス要素でモデル化し、柱脚を固定とした。「園芸用施設安全構造基準²⁾」が規定する、札幌の設計風速 34 m/s (再現期間 43 年) に基づいて、固定荷重 G + 風荷重 W と、内部装置荷重 P と作物荷重 V を考慮した $G + W + P + V$ を中心に検討した。雪荷重や地震荷重は、風荷重に対して十分に小さく、荷重条件から除外した。図 5 に、荷重組合せ $G + W$ で、桁面の見付幅を桁行方向の柱間隔 2.5 m と考え、風上を北東側とした場合の荷重分布を示す。

各部材について算定された部材力を、基準強度

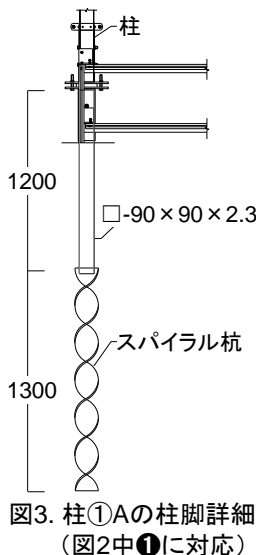


図3. 柱①Aの柱脚詳細 (図2中①に対応)

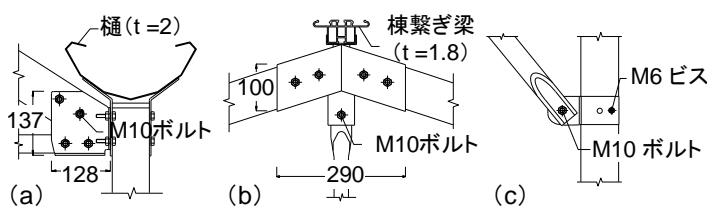


図4. 接合部詳細、場所はそれぞれ図2中に対応: (a) ②上・下弦材と柱; (b) ③上弦材と束材; (c) ④柱と方杖材D [単位: mm]

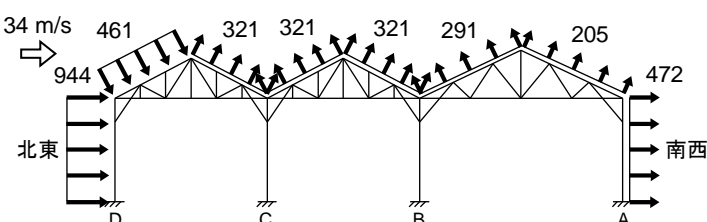


図5. 「園芸基準²⁾」の荷重組合せ $G+W$ [単位: N/m]

を $F = 235 \text{ N/mm}^2$ として求めたトラスや方杖材、接合部、柱の許容耐力に対して検定した。荷重組合せ $G + W$ で、風上を北東側とした場合に対して、部材力と許容耐力の比とした検定比が最も大きな部材は、柱 D の柱脚で、検定比が 1.51 であった。柱の頂部の相対変位は 154 mm、柱の倒れ角は 0.0237 rad で、基準²⁾による変形制限 $6500/60 = 108 \text{ mm}$ を上まわった。なお、荷重組合せ $G + W + P + V$ で、同じく風上を北東側とした場合、柱 D 下端が最も危険で検定比は 1.57 であった。

引倒し実験の条件は、柱 A の頂部に、水平荷重が作用した場合に相当する。図 5 の風荷重の水平成分と等価な集中荷重は、10.6 kN と算定される。荷重組合せ $G + W$ で、風荷重を集中荷重に置換した場合、柱 A 下端が検定比 1.51 で最も危険で、頂部の相対変位は 204 mm、柱の倒れ角は 0.0313 rad と算定された。風荷重が分布的に作用する場合と比較して、変形は大きいですが、検定比はほぼ同じで、図 5 の荷重効果を適切に模擬できると考えた。

4. 実験計画

構面①と②を、柱 A の柱頭で南西方向に引張載荷する引倒し実験を 2 回実施し、ハウスの梁間方向の構造特性を検証した。2 構面は、鉛直ブレースと水平ブレースで一体化されているので、振れや構面外変形を生じにくいと考えた。2020 年 6 月に、樋と棟繋ぎ梁をつけたままで、第 1 回実験を実施した。2020 年 8 月に、樋と棟繋ぎ梁の接合ボルトを外し、構面①および②を構面③以降とほぼ独立させた条件で、第 2 回実験を実施した。

構面①と②をワイヤーロープで並列に重機と繋ぎ、載荷と除荷を 3 回ずつ繰り返した。ワイヤーロープに設置したロードセルで荷重を測定した。柱 A の頂部と柱脚に変位計を設置し、頂部と柱脚の回転角と水平変位を計測した。構面②の柱

A から D に、それぞれ 2 断面に 2 枚ずつの歪ゲージを貼付し、柱の内力を測定した。構面②の方杖材 A と D に 2 枚ずつの歪ゲージを貼付し、方杖材の軸力を測定した。A 通りの樋に、構面①と②の間、構面②と③の間で、2 断面に 2 枚ずつの歪ゲージを貼付し、せん断力を測定した。

5. 実験結果

荷重の測定値が安定

した後のステップを有効データとして抽出した。最も大きな荷重をかけた、3 回目の載荷だけを取り出して、結果を述べる。

図 6 に、第 1 回実験の測定結果を示す。グラフは、引張荷重 P 、構面②の層せん断力 P_2 、A 通りの樋が構面②と③の間で伝達したせん断力 P_{DA} のそれぞれと、構面②の柱 A の倒れ角 θ の関係を示す。構面②の層せん断力は、引張荷重の 5% と非常に小さかったが、1 本の樋が、構面②の層せん断力の 2 倍以上の力を負担したので、荷重のほとんどが、樋と棟繋ぎ梁によって、構面②から構面③に伝達されたと考えられる。梁間方向の風荷重が、樋と棟繋ぎ梁によって棟と棟に等分配され、ハウスが一体的に抵抗するだろうことが示された。

図 7 に、第 2 回実験の測定結果を示す。図 7(a) は、 P 、 P_2 、 P_{DA} のそれぞれと、 θ の関係を示す。樋が、柱やトラスに対して徐々にずれ、荷重 10 kN の時点で外れるまで、引張荷重が増減したが、樋が外れたあとの応答はほぼ線形であった。最大応答値を見ると、構面②の層せん断力 7.13 kN は、引張荷重 14.5 kN の半分であった。その時点で、A 通りの樋が負担したせん断力 0.10 kN は、引張荷重の 0.88% と極めて小さかった。

図 7(b) に、第 2 回実験で測定した、構面②の各柱のせん断力と、 θ の関係を示す。載荷過程を通して、上端に 2 つの方杖材がついた柱 B と C の方が、上端に 1 つだけ方杖材がついた柱 A と D より大きなせん断力を負担した。

図 8(a) に、最大荷重が作用したときに測定された、構面②の内力分布を示す。この内力分布を、各部材の許容耐力に対して検定した結果、柱 B 上端が最も危険で、検定比が 1.25 と算定された。したがって、構面②は、荷重組合せ $G+W$ に対して、 $7.13/1.25 = 5.70$ kN で許容限界に達すると考えられる。荷重組合せ $G+W+P+V$ に対しては、3 章で述べた解析結果の単純比較によって、さらに $1.57/1.51 = 1.04$ 倍だけ危険と考えられることから、構面②は 5.48 kN、つまり、前述の設計風荷重 10.6

kN の 0.52 倍で許容限界に達すると考えられる。この風荷重は、「園芸用施設安全構造基準²⁾」の風圧力の算定式に基づく、最大瞬間風速 24.5 m/s に相当する。

図 7 の載荷曲線を見る限り、実験範囲内で、ハウスは弾性挙動を示した。また、図 8(a) の内力分布が、降伏強度の実測値に基づく柱の全塑性モーメント 9.77 kN・m を、どの部位でも超えなかったことに示されるように、本実験は、ハウスの耐力限界を検証するものでなかった。したがって、梁間方向の風荷重を、桁行方向に等分配する構造であること、柱が降伏した後の内力再分布を期待できることと相俟って、ハウスは上記の風荷重 5.48 kN に対して、かなりの余裕があると思われる。

第 2 回実験では、柱の頂部相対変位 369 mm、柱の倒れ角 0.0639 rad を測定した。図 9(a) に示すように、柱は複曲率曲げ変形を生じ、図 9(b) と (c) に示すように、柱脚が回転するとともに水平移動した。構面②の柱 A について、実験で測定した回転剛性は 55 kN・m/rad、水平剛性は 115 N/mm と求められた。また、図 9(d) と (e) に示すように、方杖材の接合部は、帯板が回転し、圧縮力を受けた帯板が押し潰された。

構面①の柱 A について、実験前後の測定値の差から求めた、頂部の残留水平変位は 129 mm (残留倒れ角 0.0198 rad) であった。倒れ角の最大値と残留値は、基準²⁾による制限値の 3.42 倍と 1.19 倍であったが、ハウスの構造被害は軽微であった。

6. 解析モデルの校正

図 8(b) に、事前解析モデルに、構面②で測定した最大せん断力 7.13 kN を作用させた場合の内力分布を示す。解析値は、柱の頂部相対変位が測定値の 0.38 倍にすぎなかった。この主な原因は、解析が柱脚の支持条件 (固定でなかった) と方杖材の実効剛性 (接合部の変形によって低減した) を反映しなかったことだと考えられる。

そこで、先に述べた、要素実験や引倒し実験で

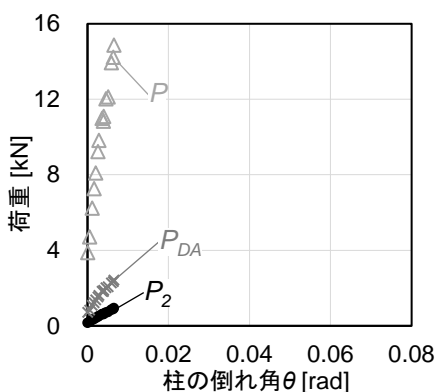


図6. 第1回実験の測定結果

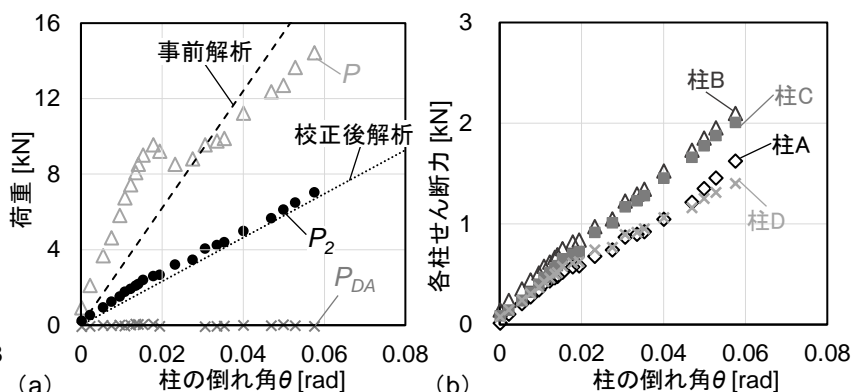


図7. 第2回実験の測定結果: (a) P 、 P_2 、 P_{DA} ; (b) 構面②の各柱のせん断力

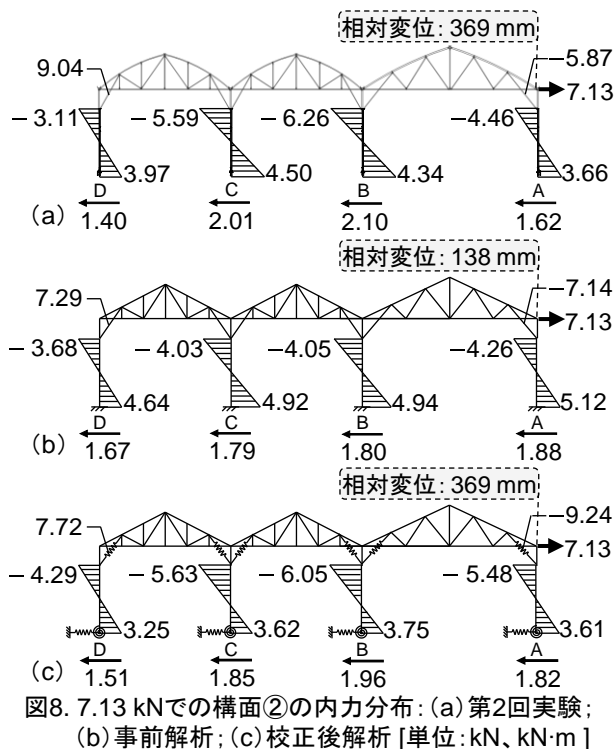
の測定結果に基づいて、解析モデルを校正した。校正後モデルでは、柱脚の回転・水平剛性をそれぞれ $55 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ と $120 \text{ N}/\text{mm}$ とし、方杖材の軸方向剛性を $1/30$ に変更した。図 8(c)に、校正後モデルに、荷重 7.13 kN を作用させた場合の解析結果を示す。頂部相対変位は 369 mm と算定され、実験値にほぼ一致した。柱の内力分布をみると、上端に2つの方杖材がついた柱 B と C の方が、1つだけ方杖材がついた柱 A と D より大きなせん断力を生じたこと、方杖材の接合点の方が、柱脚より曲げモーメントが大きな傾向があることで、実験結果と整合した。したがって、校正後モデルは、実験結果をよく再現できており、このハウスの挙動が、柱脚の剛性と、方杖材の接合部の軸方向剛性の影響を大きく受けることを確認できた。

7. 耐用年数の考察

図 10 に、二重指数確率紙上に、基準^{2),3)}が規定する、札幌での設計風速と再現期間の関係と 1980～1999 年の 20 年間に、札幌の気象官署(地上 10 m)で測定された年最大瞬間風速と年最大風速⁵⁾の関係を示す。それぞれが Gumbel 分布にしたがうと仮定すると、風速 24.5 m/s に対応する再現期間は、それぞれ 1.59 年と 5.13 年と計算された。

8. まとめ

欧州で商用販売されている、経済的で大規模な園芸用ハウスについて、引倒し実験を実施して、札幌における構造安全性と耐用年数を検証した。



得られた結論は以下のとおりである。

1. この園芸用ハウスの梁間構面は、最大瞬間風速 24.5 m/s で、許容限界に達すると考えられる。この園芸用ハウスの札幌における耐用年数は、「園芸用施設安全構造基準²⁾」に基づく 1.59 年、「園芸用施設設計施工標準仕様書³⁾」に基づく 5.13 年と推定される。
2. 引倒し実験では、構造被害をほとんど生じず、ハウスの倒壊までは、相当の余裕度があった。
3. 引倒し実験で観察した、柱脚の回転と、方杖材の接合部の変形を反映しない限り、ハウスの内力分布や変形を正しく算定できない。

【謝辞】

本実験は、(株)ホッコウ、(株)アドワンファームと共同で実施した。宮本有也、木下雅弘、間瀬博明、村上仁司、山口敏樹諸氏の協力に謝意を表す。

参考文献

- 1) 森山英樹他：台風 0221 による千葉県・茨城県下の園芸施設構造の被災状況と考察，農業施設，34 巻 3 号，pp. 199～212，2003.12
- 2) 日本施設園芸協会：園芸用施設安全構造基準 ー平成 28 年度版ー，2016
- 3) 日本施設園芸協会：園芸用施設設計施工標準仕様書，2019
- 4) Idromeccanica Lucchini : Lucchini_Greenhouses_Catalog (オンライン)，入手先<https://www.lucchiniidromeccanica.it/img/pdf_documents/Lucchini_Greenhouses_Catalog.pdf>，(参照 2021.12.20)
- 5) 気象庁：過去の気象データ検索，「札幌 年ごとの値 詳細 (風)」(オンライン) をもとに作成，入手先<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/annually_s.php?prec_no=14&block_no=47412&year=&month=&day=&view=a3>，(参照 2021.8.10)

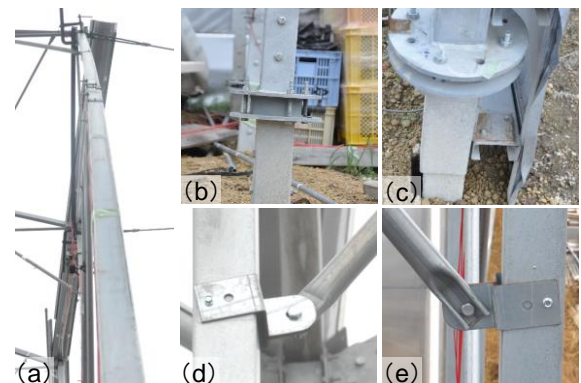


図9. 実験中の局所変形: (a)柱Aの複曲率曲げ; (b)柱Cの柱脚回転; (c)柱Aの水平移動; (d)方杖材Dの接合部の回転; (e)方杖材Aの接合部の押し込み変形

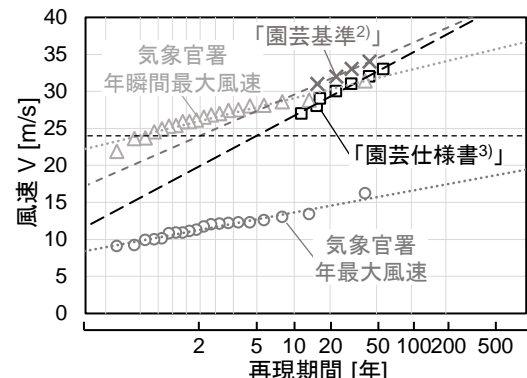


図10. Gumbel分布にあてた風速と再現期間