

技術資料

地中埋込み柱脚を使用した耐候性ハウスの開発

川口 智* 大下 薫* 上新 薫**

Development of a Weatherized Greenhouse Structure with Earth Embedding Method

Satoru Kawaguchi, Kaoru Ooshita, Kaoru Ueshin

Synopsis :

We have established a type of structural design for ZAM-steel pipe structure which requires no concrete foundations to transfer external loads into the ground. The structural design has been certified as a low-cost weatherized greenhouse, that bears with wind velocity up to 50m/s and snow load up to 490N/m², by Japan Greenhouse Horticulture Association.

Instead of foundations, this structure has columns driven into the ground to the depth of 80cm (increased from 70cm in our experiments to decrease deflection of columns) from ground level by using electric-powered rock drilling machine and anchors dug into the ground to conduct the loads from superstructures to the ground sufficiently.

Vertical position of rigid supporting point in the ground has been estimated by experiments using full scale structures under vertical and horizontal loads. Also soil resistances against column's bending moment have been specified through the horizontal pulling test on pipes embedded vertically in the ground and a formula of Japan Electric Association. These values enables us to calculate deflection of structure and to estimate existing stresses of structural members under specified loads, also to design the structural members properly.

1. 緒言

農林水産省は、近年の野菜輸入の急激な増加による農家の収益性低下を懸念し、国際競争にも耐え得る体質の強い国内産地体制（生産コストの低減）の確立を目指している。この方策として、低コスト耐候性ハウス導入促進に関する補助事業を平成13年度から推進している。

低コスト耐候性ハウスは、農林水産省では表1のように、コストは従来70%以下、耐久性は風速50m/s以上または積雪荷重490N/m²に耐えるという条件を満足した園芸用ハウスを定義している。この条件にパスし、現在販売されている低コスト耐候性ハウスは、すべて架構の力学的モデル化が明快なコンクリート基礎を使用した構造である。

Table 1 A low-cost weatherized greenhouse's recognition condition

表1 低コスト耐候性ハウスの認定条件

項目	要求内容
設置コスト	認定を受けるハウスと同規模・同強度のプラスチックハウスV類ハウスは本体工事70%程度のハウスであること
耐候性	園芸施設共済における型式区分のプラスチックハウスⅢ・Ⅳ類ハウスを改良・補強することにより、風対策用として耐風強度：風速50m/s また雪対策用として耐雪強度：積雪荷重490N/m ² を有し、かつプラスチックフィルムを被覆材とすること

現在低コスト耐候性ハウスは、約80産地 - 900000m² (平成15年度末時点) が施工されている程度で、伸び悩んでいる状況である。この要因の一つとして1棟／

*建材・加工事業本部 建材総合開発室 住宅鋼材総合開発チーム

**建材・加工事業本部 建材総合開発室 住宅鋼材総合開発チーム 上席専門部員

1000m²規模で約700万円という価格もあげられている。

このため、当社は、園芸ハウスメーカーの平林物産(株)と共同で更なる低コスト化の検討を行い、コンクリート基礎を必要としない業界初の埋込み柱脚方式による構造設計法を考案し、(社)日本施設園芸協会 構造診断指導委員会承認の低コスト耐候性ハウスを開発した。

以下、埋込み柱脚方式低コスト耐候性ハウスの開発で考案した構造設計法を中心に技術内容を説明する。

2. 埋込み柱脚方式による構造設計法の考え方

架構を構造設計する場合は、使用する部材を線形置換しモデル化を行うことが一般的であるが、構造体にコンクリート基礎がある場合と基礎がなく柱脚を地中に埋込んだ場合では、架構モデルの支点位置と外力に対する支点の抵抗力の2点に違いがある。

① 支点位置に関する技術的課題

コンクリート基礎がある建築の支点位置は、基礎と構造体の接合部をピン支点と仮定することが一般的な設計法となっている。しかし、本考案の埋込み柱脚方式ではコンクリート基礎を使用していないため、柱脚の支点位置を明確に判断できないという難しさがある。このことは構造設計に必要な架構モデルを完成できないことを意味し、架構全体の応力・変形計算に設計を進めることを困難にしている。

この点の解決方法としては、実大加力実験を土質の異なる地盤ごとに行い、荷重と試験体の変位との関係を理論値と比較することにより支点位置を設定した。

② 外力に対する支点の抵抗力に関する技術的課題

構造体に作用する力に対する地盤の抵抗は、コンクリート基礎の場合、基礎の底盤形状と地耐力より算定した地反力の合力という形で求められる。しかし、基礎なしで埋込み柱脚の場合は建築系の構造設計指針・規準などでも明確に示されている例はない。

そこで今回の埋込み柱脚方式では、構造体から地盤に伝わる力を柱脚モーメントの形で表し、それに対する抵抗として柱脚周りの地盤の抵抗モーメントを計算することとした。その抵抗モーメントの値は、地盤に打ち込んだパイプの水平加力試験結果より、電柱の支持強度計算に用いられる電気協会式を援用して設定した。

3. 固定支点位置確認方法の検討

今回開発した園芸用パイプハウスは、園芸業界でいう

基礎のない地中押し込み式パイプハウスに類するものである。「地中押し込み式パイプハウス安全構造指針」¹⁾では、 $\phi 22.2 \times t1.2$ パイプの実大実験結果を用いて、図1に示すモデル化が規定されている。図1に示すとおり、普通土質地盤の場合と軟弱土質地盤の場合の2通りのモデルがあり、いずれも地盤面から30cm下がった位置(以下、GL-30cmという形で表す)に支点を仮定している。今回検討したハウスで使用するパイプは $\phi 48.6 \times t2.4$ であり断面性能などにおいて、指針の試験体と大きな差があるため、この規定が適用できるのか、また適用できない場合はどの位置に支点を仮定できるかを実験で評価した。

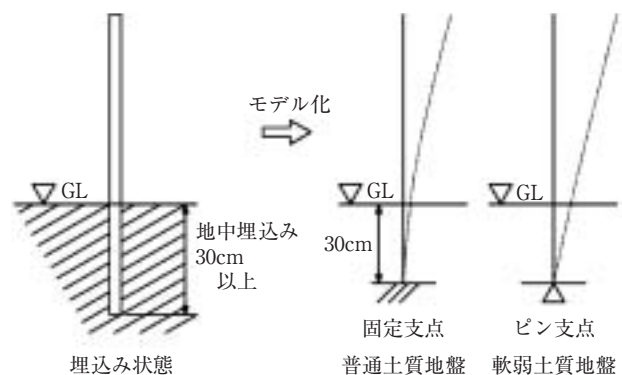


図1 埋込み部のモデル化

Fig.1 Structural model of supporting point.

3.1 実大実験による確認

図2に実大実験にもちいた試験体の模式図を示すが、試験体は加力中のねじれを防止するため、ストロングアーチ2体を1セットとし、その寸法は表2に示すとおり、間口7.2m、棟高さ3.8m、柱脚の埋込み深さ70cm、パイ

Table 2 Size of test structure

表2 試験体の寸法

間口	7.2m	
棟高さ	3.8m	
埋込み深さ	70cm	
使用パイプの形状	ストロングアーチ	$\phi 48.6 \times t2.4$
	水平材	$\phi 48.6 \times t2.4$
	斜材	$\phi 48.6 \times t2.4$

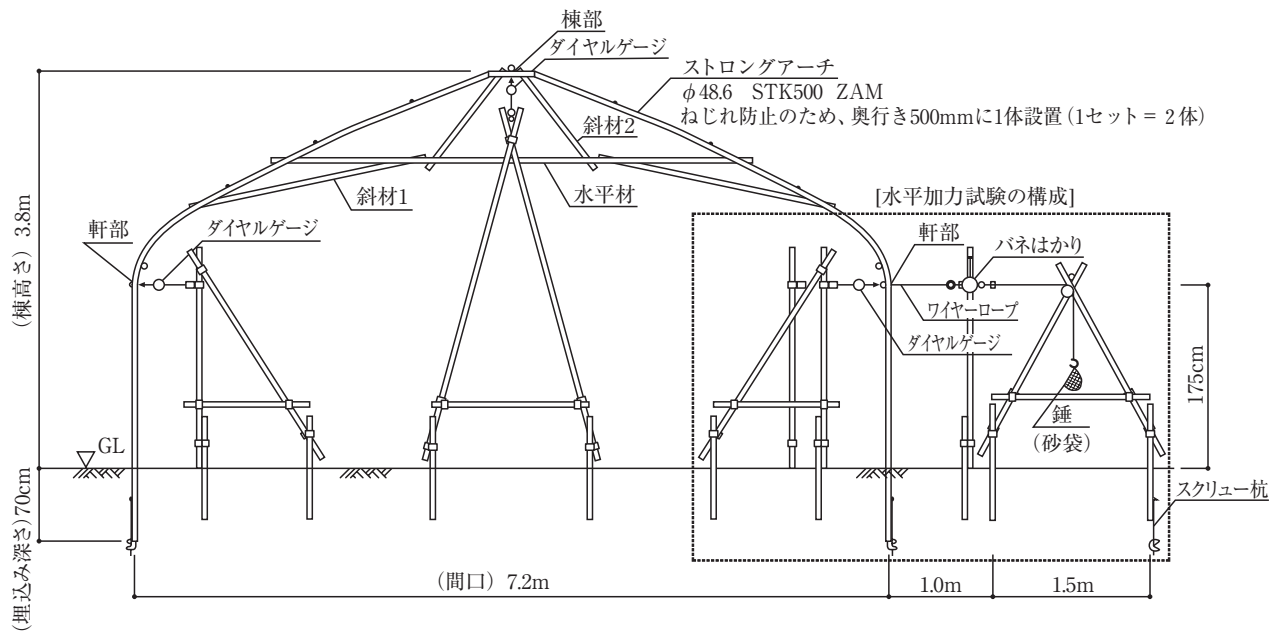


図2 実大実験の模式図
Fig. 2 Full scale pressing experiment.

はφ48.6のZAM製鋼管を使用した。また、試験設備は棟部の変位と軒部の変位を計測するためにダイヤルゲージを使用し、水平加力試験時には水平荷重を計測するためにバネはかりを使用した。

図3に鉛直加力試験の状況を、図4に水平加力試験の状況を示す。それぞれの試験では、普通土質と軟弱土質の地盤において、加力したときの棟部の変位と軒部の変

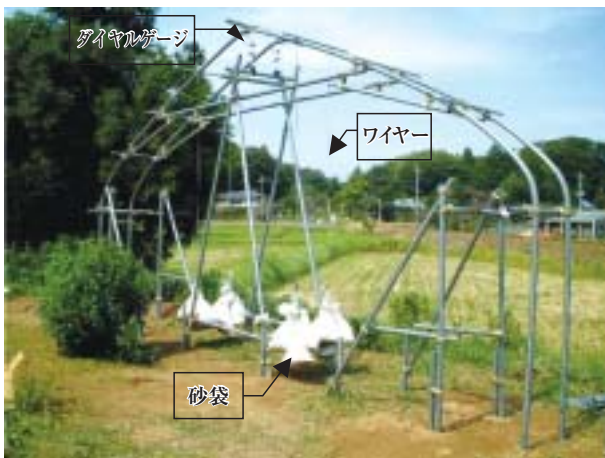


図3 鉛直加力試験状況
Fig. 3 Vertical pressing experiment.

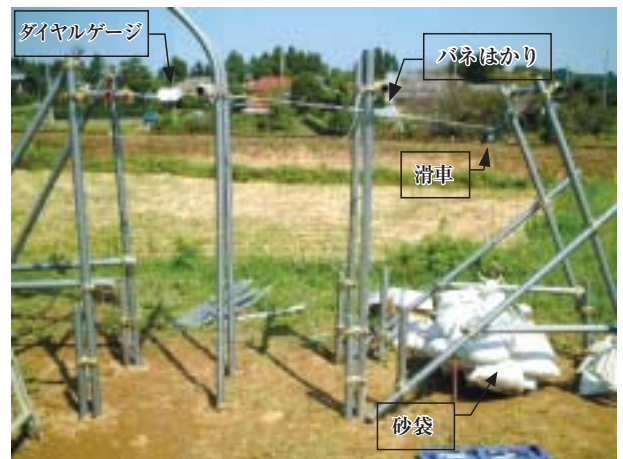


図4 水平加力試験状況
Fig. 4 Horizontal pressing experiment.

位を測定した。このときの加力方法は、1個約98Nの砂袋を用意し、鉛直加力試験では荷重が392N、785Nとなる数量分の砂袋を、また水平加力試験では392N、588N、785Nとなる数量分の砂袋をワイヤーロープで吊す方法を用いた。

3.2 実験結果

普通土質地盤での鉛直加力時の荷重と棟部の変位の関

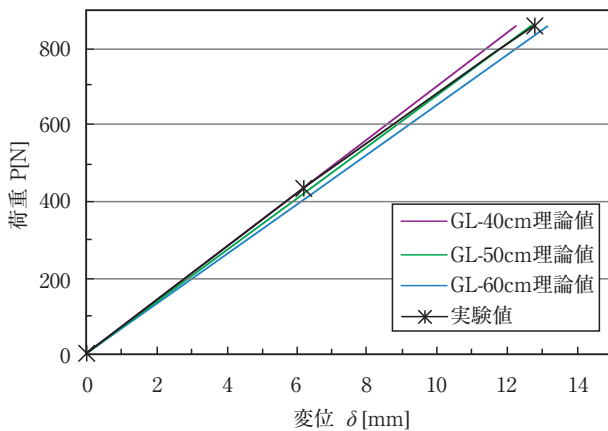


図5 鉛直加力時荷重と棟部変位 (普通土質地盤砂質土)
Fig. 5 Deflection of ridge in normal ground.

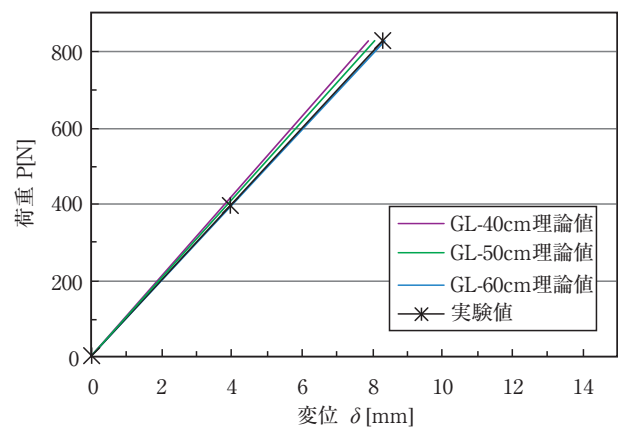


図7 鉛直加力時荷重と棟部変位 (軟弱土質地盤ローム質)
Fig. 7 Deflection of ridge in soft ground.

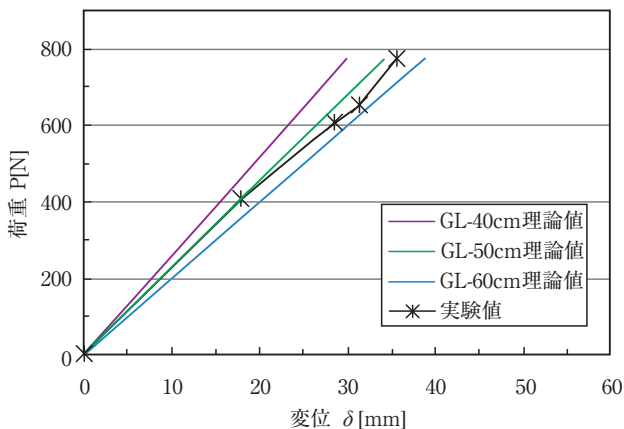


図6 水平加力時荷重と軒部変位 (普通土質地盤砂質土)
Fig. 6 Deflection of eaves in normal ground.

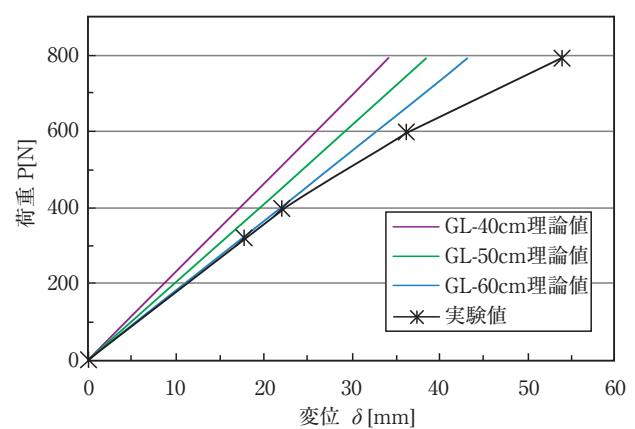


図8 水平加力時荷重と軒部変位 (軟弱土質地盤ローム質)
Fig. 8 Deflection of eaves in soft ground.

係を図5に、また水平加力時の荷重と軒部の変位の関係を図6に示す。同様に軟弱土質地盤での鉛直加力時と水平加力時の荷重と変位の関係を図7、図8に示す。それぞれの図では実験結果を*でプロットし、その上にあらかじめ試験体全体の架構モデルを仮定し、その支点位置をGL-40cm～GL-60cmで段階的に変えた加力シミュレーションにより計算される荷重と変位の関係を直線で重ねている。

図5から、普通土質地盤における実際の柱脚埋込み深さ70cmでの荷重-変位の関係は、固定支点をGL-40cmと仮定した荷重-変位曲線と同様の变化を示すことがわかった。また、図6からは水平加力時の固定支点位置はGL-50～60cmの間にあることがわかった。これらのことから、

普通土質地盤での固定支点位置はGL-40～60cmの間に存在することが明らかとなった。

一方、軟弱土質地盤では、図7と図8に示すとおり、固定支点位置はGL-60～85cmの間に存在することが明らかとなり、実際の柱脚の埋込み深さよりも深いところ、すなわち柱が存在しないところに支点位置を仮定せざるを得ないという結果になった。後述する地盤の抵抗モーメントと架構モデルの柱脚モーメントを比較して支点の安全性を検証するためには、支点位置は埋め込んだ柱の範囲内に存在することが望ましいため、支点位置を上昇させることが必要となった。図6と図8から、加力時の変形を小さくすれば支点位置は上昇することがわかる。変形を小さくするには架構全体の断面を大きくして曲げ

剛性を向上させる方法と地中に埋め込まれた部分のみの剛性を大きくする方法の2通りが考えられるが、低コスト化の条件があるため、コスト的にも施工的にも有利な後者の補強策を選択した。

3.3 柱脚部の支点位置の検討

柱脚部を補強するため、図9に示すようにストロングアーチに使用する鋼管と同径φ48.6の補助パイプを固定した。この補強方法による柱脚の支点位置を確認す

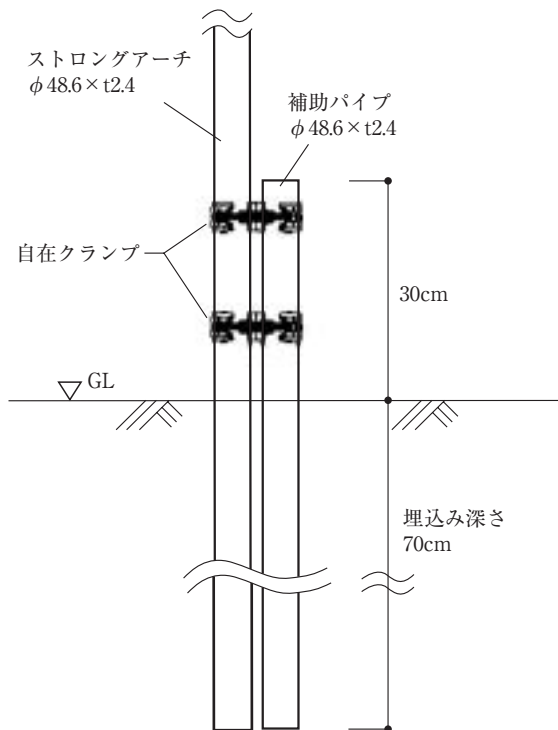


図9 柱脚の補強方法
Fig. 9 Reinforcement method.

るため、図10の試験方法の模式図に示すような水平加力試験から荷重とその変位の関係を求めることとした。この試験の加力方法は図10に示すとおり錘として1個約98Nの砂袋を、1個ずつ加えながら、ワイヤーロープで吊す方法を用い、そのときの荷重と柱のたおれを測定した。

試験体は比較ができるように柱に補助パイプを付けた場合と補助パイプを付けない単管のみの場合の2種類とし、試験地は、地盤による影響を受けるかの確認を含めて、前項の試験地に地盤が異なる1ヶ所（普通土質地盤の粘質土）を追加し、普通土質地盤の砂質土と粘質土および軟弱土質地盤のローム質の合計3ヶ所と

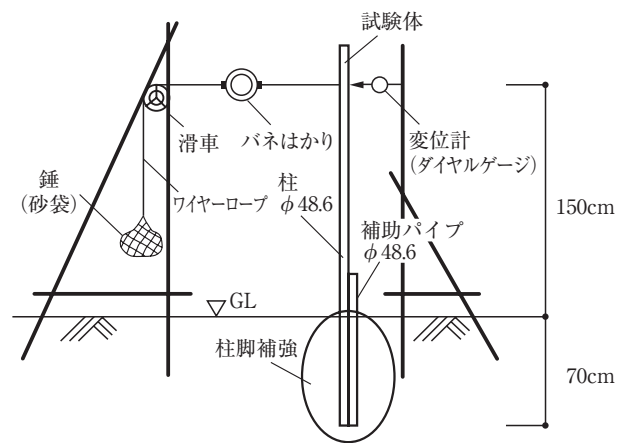


図10 部分実験の模式図
Fig.10 Column pressing experiment.

した。図11に実験状況を、図12に補助パイプによる補強方法を示した。補助パイプは柱と同様に地中70cmの



図11 水平加力試験状況
Fig.11 Horizontal pressing method.



図12 補助パイプによる補強
Fig.12 Column reinforced by additional pipe.

深さまで埋め込んでいます。

支点位置は下記の式(1)の片持ち梁のたわみ公式の変形式を用いることにより変位 δ およびその時の荷重 P を実験により求めることで固定支点位置 Δh が計算できる。この計算モデルを図13に示す。

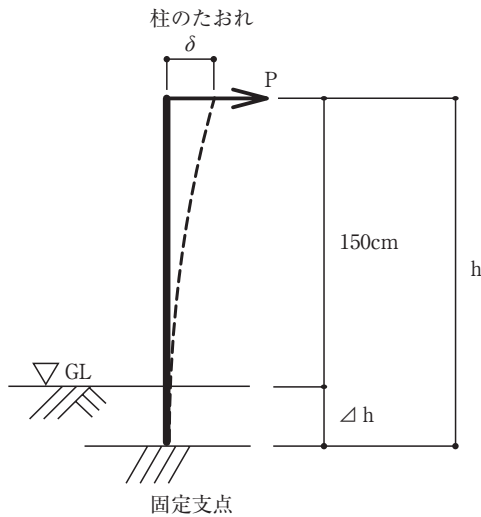


図13 計算モデル
Fig.13 Modeling.

片持ち梁のたわみ公式： $\delta = (Ph^3)/(3EI)$
 $h = 150 + \Delta h [\text{cm}]$, $I = 9.319 [\text{cm}^4]$, $E = 2.05 \times 10^7 [\text{N/cm}^2]$
 $\therefore \Delta h = \{(\delta \times 3EI) / P\}^{1/3} - 150 \dots\dots\dots (1)$

図14～図16に実験の結果を土質別の荷重－変位曲線で示し、補助パイプ付の場合の荷重－変位曲線の2次回帰式を図中に記した。 Δh を仮定し、変形制限規定

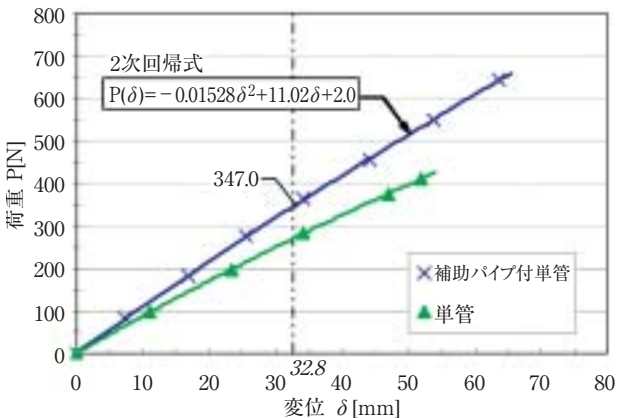


図14 水平加力時荷重と変位 (普通土質地盤砂質土)
Fig.14 Load-deflection curve in normal sandy soil.

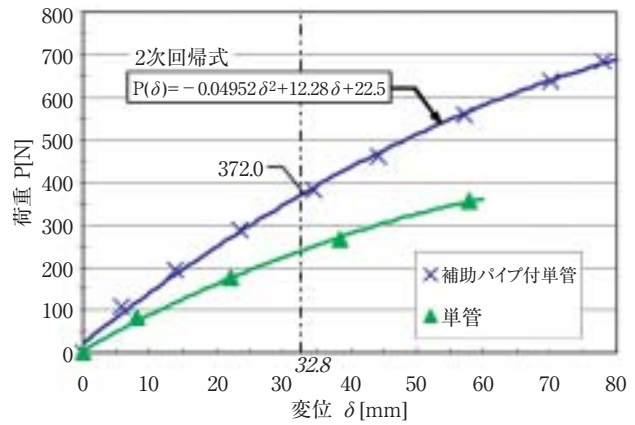


図15 水平加力時荷重と変位 (普通土質地盤粘質土)
Fig.15 Load-deflection curve in normal cohesive soil.

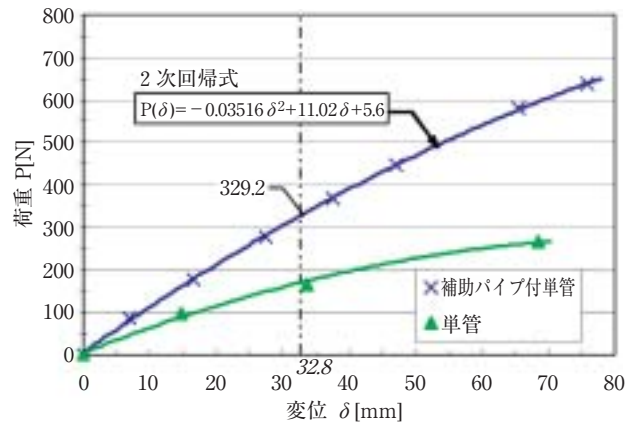


図16 水平加力時荷重と変位 (軟弱土質地盤ローム質)
Fig.16 Load-deflection curve in soft loamy soil.

$\delta = h/60 = (150 + \Delta h) / 60$ を実験で得られた2次回帰式に代入すると荷重 P が求められる。これを式(1)に用いると計算値の Δh が算出されるが P の値に求める Δh が含まれているため Δh の仮定値と計算値は異なる可能性がある。そこで表3に示すとおり、表計算を用いて Δh の仮定値を変動させて仮定した Δh と計算値の Δh の差が最小となる Δh を固定支点位置として採用した。表4に土質ごとの固定支点位置を示した。すべての土質で固定支点位置は安全側の値としてGL-30cmに設定し、構造モデルの作成を可能とした。

4. 地盤耐力の確認方法

通常の地中埋込み式パイプハウスはコンクリート基礎がないため、基礎の安全性の評価で一般に用いられる地

† 変形制限規定：日本施設園芸協会が園芸用施設安全構造基準で規定している変形の許容値

Table 3 Calculation of vertical position
表 3 固定支点位置Δhの算定

大多喜1 $P(\delta) = -0.01528 \delta^2 + 11.02 \delta + 2.0$						大多喜2 $P(\delta) = -0.04952 \delta^2 + 12.28 \delta + 22.5$						富里 $P(\delta) = -0.03516 \delta^2 + 11.02 \delta + 5.6$					
Δh 仮定	h(cm)= 150+Δh	δ(mm)= h/60	h/60時 のP(N)	Δh 計算値	Δh仮定 -計算値	Δh 仮定	h(cm)= 150+Δh	δ(mm)= h/60	h/60時 のP(N)	Δh 計算値	Δh仮定 -計算値	Δh 仮定	h(cm)= 150+Δh	δ(mm)= h/60	h/60時 のP(N)	Δh 計算値	Δh仮定 -計算値
40	190	31.7	335.6	25.5	14.5	40	190	31.7	361.7	21.2	18.8	40	190	31.7	319.3	28.5	11.5
39	189	31.5	334.0	25.5	13.5	39	189	31.5	360.2	21.1	17.9	39	189	31.5	317.8	28.4	10.6
38	188	31.3	332.3	25.5	12.5	38	188	31.3	358.7	21.1	16.9	38	188	31.3	316.4	28.4	9.6
37	187	31.2	330.6	25.5	11.5	37	187	31.2	357.1	21.0	16.0	37	187	31.2	314.9	28.3	8.7
36	186	31.0	328.9	25.5	10.5	36	186	31.0	355.6	21.0	15.0	36	186	31.0	313.4	28.3	7.7
35	185	30.8	327.3	25.4	9.6	35	185	30.8	354.1	20.9	14.1	35	185	30.8	312.0	28.3	6.7
34	184	30.7	325.6	25.4	8.6	34	184	30.7	352.5	20.8	13.2	34	184	30.7	310.5	28.2	5.8
33	183	30.5	323.9	25.4	7.6	33	183	30.5	351.0	20.8	12.2	33	183	30.5	309.0	28.2	4.8
32	182	30.3	322.2	25.4	6.6	32	182	30.3	349.4	20.7	11.3	32	182	30.3	307.5	28.1	3.9
31	181	30.2	320.5	25.4	5.6	31	181	30.2	347.9	20.7	10.3	31	181	30.2	306.0	28.1	2.9
30	180	30.0	318.8	25.4	4.6	30	180	30.0	346.3	20.6	9.4	30	180	30.0	304.6	28.1	1.9
29	179	29.8	317.2	25.3	3.7	29	179	29.8	344.8	20.5	8.5	29	179	29.8	303.1	28.0	1.0
28	178	29.7	315.5	25.3	2.7	28	178	29.7	343.2	20.5	7.5	28	178	29.7	301.6	28.0	0.0
27	177	29.5	313.8	25.3	1.7	27	177	29.5	341.7	20.4	6.6	27	177	29.5	300.1	27.9	-0.9
26	176	29.3	312.1	25.3	0.7	26	176	29.3	340.1	20.3	5.7	26	176	29.3	298.6	27.9	-1.9
25	175	29.2	310.4	25.3	-0.3	25	175	29.2	338.5	20.3	4.7	25	175	29.2	297.1	27.9	-2.9
24	174	29.0	308.7	25.3	-1.3	24	174	29.0	337.0	20.2	3.8	24	174	29.0	295.6	27.8	-3.8
23	173	28.8	307.0	25.2	-2.2	23	173	28.8	335.4	20.2	2.8	23	173	28.8	294.1	27.8	-4.8
22	172	28.7	305.3	25.2	-3.2	22	172	28.7	333.8	20.1	1.9	22	172	28.7	292.6	27.7	-5.7
21	171	28.5	303.7	25.2	-4.2	21	171	28.5	332.3	20.0	1.0	21	171	28.5	291.1	27.7	-6.7
20	170	28.3	302.0	25.2	-5.2	20	170	28.3	330.7	20.0	0.0	20	170	28.3	289.6	27.7	-7.7
19	169	28.2	300.3	25.2	-6.2	19	169	28.2	329.1	19.9	-0.9	19	169	28.2	288.1	27.6	-8.6
18	168	28.0	298.6	25.2	-7.2	18	168	28.0	327.5	19.8	-1.8	18	168	28.0	286.6	27.6	-9.6

Table 4 Vertical position of supporting point
表 4 補助パイプ仕様の支点位置

土 質	固定支点位置の 計算値：Δh	設計用 固定支点位置
普通土質地盤 砂質土	GL-25.3cm	GL-30cm
普通土質地盤 粘質土	GL-20.0cm	
軟弱土質地盤 ローム質	GL-28.0cm	

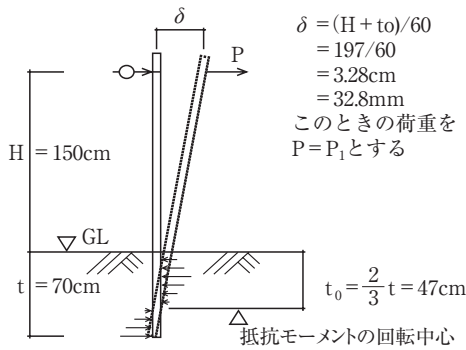
耐力からは柱脚耐力を算定できない。そこで、同様にコンクリート基礎のない電柱の支持強度を計算する場合に用いられる式(2)の電気協会式²⁾を援用して、埋込み柱脚の地盤支持強度を抵抗モーメントの形で算定した。

$$Mr = (1/36) \times D_0 K S t^4 \text{ (N}\cdot\text{m)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで D_0 ：地際の柱径 (m)
 K ：土質係数 (N/m⁴)
 t ：根入れ深さ (m)
 S ：変形角

抵抗モーメントMrの式は土の水平方向の抵抗力が埋め込まれた柱の水平移動量と地表面からの深さに比例するという仮定のもとに導かれている。抵抗モーメントを算定するには電気協会が独自に定めた土質係数K値が必要となる。

前述の制限規定より、柱の最大変形角1/60の場合について部分実験の結果を用いて外力(水平荷重)による柱脚の曲げモーメントMpと電気協会式による地盤の抵抗モーメントMrとのつり合いから土質係数Kを算出する方法を図17に示す。



$$\begin{aligned} \delta &= (H+t_0)/60 \\ &= 197/60 \\ &= 3.28\text{cm} \\ &= 32.8\text{mm} \\ &\text{このときの荷重を} \\ &P=P_1\text{とする} \end{aligned}$$

外力によるモーメント：Mp

$$M_p = P_1 \times (H+t_0) = P_1 \times (1.5+0.47) = 1.97P_1 \text{ (N}\cdot\text{m)} \dots\dots\dots ①$$

電気協会式による地盤の抵抗モーメント：Mr

$$M_r = (1/36) \times D_0 \times K \times t^4 = (D_0 \times K \times t^4 / 36) \times S \dots\dots\dots ②$$

ここでD₀：地際の柱径 = 0.0486 × 2 = 0.097m(補助パイプ付)

K：土質係数(N/m⁴)

t：根入れ深さ = 0.7m

S：変形角 = δ / (t₀+H) = 1/60

$$\therefore M_r = (0.097 \times K \times 0.7^4 / 36) \times (1/60) = 1.078K \times 10^{-5} \text{ (N}\cdot\text{m)} \dots\dots\dots ③$$

水平力Pが作用している柱がつり合い状態にあるときには
Mp = Mrが成り立つため

$$① = ③ \text{ より } 1.97P_1 = 1.078K \times 10^{-5}$$

$$\therefore \text{土質係数} K = (1.97/1.078)P_1 \times 10^5 = 1.827P_1 \times 10^5 \text{ (N/m}^4) \dots\dots\dots ④$$

図17 土質係数計算式の誘導

Fig.17 Induction of soil coefficient formula.

Table 5 Design of soil coefficient

表5 土質係数の設定

土質	補強方法	P ₁ の値 [N]	M _p [N・m]	K値算定結果 ×10 ⁷ N/m ⁴	安全率を2とした場合のK値	設計用K値 ×10 ⁷ N/m ⁴	土質区分の判定
普通土質地盤 砂質土	補助パイプ 仕様	347.0	683.6	6.34	3.17	2.9	普通土質B ¹⁾
普通土質地盤 粘質土	補助パイプ 仕様	372.0	732.8	6.80	3.40	2.9	
軟弱土質地盤 ローム質	補助パイプ 仕様	329.2	648.5	6.01	3.00	2.0	軟弱土質C ²⁾

1) 普通土質B：固まっている土または砂、多数の砂利、石塊まじりの土などで軟らかい土の部類に属するもの。

2) 軟弱土質C：流砂(土がまじらないもの)

外力による柱脚の曲げモーメントMpは、外力と地盤の抵抗モーメントの回転中心からの距離 (H+t₀) との積から求められ式①となる。外力P₁は柱のたおれδがH+t₀の1/60となるときの荷重とする。

電気協会式による地盤の抵抗モーメントMrは、式②で表される。

式②に、地際の柱径としてφ48.6パイプ2本分の径=0.097mを、根入れ深さに0.7m、変形角に1/60を代入すると式③となる。

MpとMrがつり合い状態にあるとき、式①と式③は等しくなり、土質係数Kを式で表すと式④となる。

4.1 土質係数の設定

部分実験の結果より図17の式④を用いて求めた土質係

数の計算値を表5に示す。実際の構造計算では、短期安全率を2として設計用の土質係数K値を設定した。

4.2 地盤の抵抗モーメントの算定

式(2)より求まる地盤の抵抗モーメントは柱の変形角Sに比例する。

暴風時および積雪時のそれぞれの柱の変形角は、前述の変形制限規定より1/60以下に抑えるように設計しているので、地盤の抵抗モーメントの最大値Mrは式(2)においてS=1/60において計算できる。地際の柱径D₀を柱と補助パイプの直径の合計の0.097mとし、根入れ深さtを0.7m、土質係数Kを2.9×10⁷N/m⁴とした場合の地盤の抵抗モーメントMrは、これらの値を式(2)に代入して313N・mと計算される。また、根入れ深さあ

るいは補助パイプの本数を変更した場合は、 t と D_0 の値を変更することにより上記同様に式(2)で抵抗モーメントを計算できる。

なお、上記の実験では埋込み深さを0.7mで実施したが、今回の認定物件では暴風時の柱脚モーメントに対し、地盤耐力が不足していたため、埋込み深さを0.8mとして電気協会式により再計算して認定を受けた。

5. 結 言

農林水産省規定の低コスト耐候性ハウスの開発をとおして、地中埋込み柱脚方式における支点位置の設定方法、その補強方法および地盤の抵抗モーメントの算定方法を確立することができた。また、(社)日本施設園芸協会 構造診断指導委員会でこれらの評価方法が承認され、基礎なしのハウスとしては初めて低コスト耐候性ハウスの認定を(社)日本施設園芸協会から取得することができた。

また、コンクリート基礎を用いない地中埋込み柱脚方式を活用した園芸以外のハウス開発に際しても、本報告で用いた設計方法が有効に活用できると考える。

参考文献

- 1) 地中押し込み式パイプハウス安全構造指針, 日本施設園芸協会編, (1999), 15.
- 2) 配電規定, 配電専門部会編, (2000), 661.