

地上設置型

太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2024 年版

技術資料：

杭基礎支持力の実証試験

この成果物は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20015）「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の長期安定電源化技術開発」事業の結果として得られたものです。

2024年5月31日



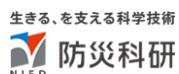
国立研究開発法人
新エネルギー・産業技術総合開発機構



太陽光発電協会
Japan Photovoltaic Energy Association



北海道科学大学
北海道科学大学短期大学部
+Professional



生きる、を支える科学技術
防災科研

公立大学法人 大阪
University Public Corporation Osaka



杭基礎支持力の実証試験

1. 杭基礎の特長

太陽光発電に用いられる杭基礎とは、基礎杭に架台を連結して、架台からの荷重を杭を介して地盤に伝える形式の基礎であり、一般的な建築工事のように鉄筋コンクリート基礎の補強として使用する杭とは異なる。また、使用される杭の断面寸法は約 100mm 程度で小さいものが多い。そして、ほとんどが杭の支持機構は支持層まで到達させない摩擦杭としており、貫入深さは 1~3m の浅い層に貫入されている。したがって、一般的な建築構造物の基礎杭とは異なっていることが大きな特長である。

ここでは、各種杭載荷試験の試験値と計算値と比較し、杭基礎の支持力の傾向について述べる。

2. 試験場所

試験場所を選定するために、全国で地盤調査（SWS 試験）を行い、各試験値の地質（砂質土、粘性土）及び地盤の硬さ（地盤深さごとの平均換算 N 値）を調べた。そして、地質および地盤の硬さに関して幅広く対応できることを考慮し、図 2-1 に示す全国 9ヶ所の試験地、伊賀市長田（三重県）、揖斐川（岐阜県）、むつ（青森県）、新庄（山形県）、磐梯熱海（福島県）、須賀川市（福島県）、串間（宮崎県）、座間（神奈川県）、葛城（奈良県）で杭の実証試験を実施した。ただし、串間（宮崎県）は火山灰土、座間（神奈川県）は関東ロームである。

土質	平均換算N値													備考
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13~	
粘性土			宮崎県串間 (粘性土)						福島県磐梯熱海 (礫混じり粘性土)					
			神奈川県座間 (粘性土)					山形県新庄 (粘性土+盛土)						
			奈良県葛城 (粘性土)											
砂質土				青森県むつ (粘性土混じりの砂質土)				福島県須賀川市 (砂質土)				三重県長田 (礫混じり砂質土)		
				岐阜県揖斐川 (砂質土)										

図 2-1 実証試験場所

3. 試験杭

本試験で使用した試験杭の種類を表 3-1 に示す。一般的な鋼管杭以外にも特殊な形状のスクリューエンジニアリング杭や軽量形鋼杭なども使用した。

施工方法は、基本的に打撃貫入とし、スクリューエンジニアリング杭は回転貫入とした。

表 3-1 試験杭

試験杭		断面 (mm)
鋼管杭	先端閉塞杭	$\phi = 114.3 \quad t = 3.5$
		$\phi = 89.1 \quad t = 3.2$
		$\phi = 60.5 \quad t = 3.2$
	先端開放杭	$\phi = 48.6 \quad t = 3.2$
特殊杭	軽量形鋼杭	$108 \times 100 \times 26$ $t = 4.5$
	スクリューエンジニアリング杭	$\phi 89.1$ (羽径 $\phi 139.1$)
		$\phi 76.3$ (羽径 $\phi 96.3$)

4. 試験方法

試験方法は地盤工学会基準である杭の鉛直載荷試験方法・同解説¹⁾と杭の水平載荷試験方法・同解説²⁾に準拠した。杭打設後、2週間以上養生し、杭載荷試験を実施した。

4.1. 鉛直載荷試験

引抜載荷時は、試験杭を反力装置（鋼製枠）で囲んで載荷し（写真4-1）、押込載荷時は反力が鋼製枠の上方に働くため枠の両側に重錘を載せて固定した（写真4-2）。

いずれも油圧シリンダーおよび油圧ポンプによって載荷し、載荷方法は連続載荷とした。載荷速度の設定は、安全管理および測定の確実性を考慮し、計画最大荷重／30（kN/min）とした。

終局条件は、試験体に取付けた変位計の変位が0.1D（D：杭径）を超えるように設定した。杭径は軽量形鋼杭では最大径の160mmとし、スクリュー杭では羽部を除く径とした。

4.2. 水平載荷試験

載荷点は、地表面から340mmの位置とした。測定点の高さは各種杭とも同位置で、地表面部、載荷点、その中間とした（写真4-3）。鉛直載荷試験同様、油圧シリンダーおよび油圧ポンプによって載荷し、載荷方法は連続載荷とし、載荷速度も同様に設定した。

終局条件は、試験体に取付けた地表面の変位計の変位が0.1D（D：杭径）を超えるように設定した。鉛直載荷試験同様、杭径は軽量形鋼杭では最大径の160mmとし、スクリュー杭では羽部を除く径とした。



写真4-1 引抜載荷状況



写真4-2 押込載荷状況



写真4-3 水平載荷状況

5. 支持力計算値の算定式

算定式は、小規模建築物基礎設計指針³⁾、P.186 を参照したが、この式に使用される N 値は、標準貫入試験の N 値を用いる必要があり、SWS 試験結果の換算 N 値を用いて算出した値を設計値として扱うのは適切ではなく、ここでは、載荷試験結果と比較するために算出している。

この式に使用される砂質土の N 値や粘性土の粘着力は、SWS 試験に基づく式で算出したが、設計に用いる土質定数は基本的には室内試験や標準貫入試験を実施して求めることが望ましいとされている(小規模建築物基礎設計指針³⁾、P.179)。

5.1. 極限先端支持力

用いた式を以下に示す。

- 杭状地盤補強先端部の下部地盤が砂質土の場合

$$R_p = \alpha \times \bar{N} \times A_p \quad (\text{kN}) \quad (5.1)$$

- 杭状地盤補強先端部の下部地盤が粘性土の場合

$$R_p = 6 \times c \times A_p \quad (\text{kN}) \quad (5.2)$$

ここに、

α : 先端支持力係数、小口径杭の場合の埋込み杭と同様の $\alpha=200$ とした。

\bar{N} : 杭状地盤補強先端から下に 1D、上に 1D の範囲における N 値の平均値

D : 杭状地盤補強径 (m)

A_p : 杭状地盤補強断面積 (m^2)

c : 杭状地盤補強先端下部粘性土層の粘着力 (kN/m^2)

$$\text{SWS 試験より、 } c = \frac{1}{2} \times q_u = \frac{1}{2} (45 \times W_{sw} + 0.75 \times N_{sw}) \quad (\text{kN})$$

5.2. 極限周面摩擦力

用いた式を以下に示す。

$$R_f = D \times \sum(\tau_d \times L_i) \times \pi \quad (\text{kN}) \quad (5.3)$$

ここに、

D : 杭状地盤補強径 (m)

τ_d : 杭状地盤補強に作用する各層の極限周面摩擦力度 (kN/m^2)、

粘性土の場合 $\tau_d = c$ 、砂質土の場合 $\tau_d = \frac{10}{3}N$ とする。

L_i : 各層の層厚 (m)

5.3. 各種杭の支持力算出方法

各種杭の算出方法は、あくまで仮定としたもので、理論的検証に基づくものではない。

5.3.1. 先端閉塞杭

先端閉塞杭の支持力の算出については上記の式（5.1、5.2、5.3）を用いて算出した。なお、先端支持力算定用の A_p は杭の全断面積とし、極限周面摩擦力は杭の外周面のみを考慮した。



図 5-1 支持力算出の面積(先端閉塞杭)

5.3.2. 先端開放杭

先端開放杭の支持力の算出については先端閉塞杭と同様に上記の式（5.1、5.2、5.3）を用いて算出した。なお、先端支持力算定用の A_p は杭の全断面積とし、極限周面摩擦力は杭の外周面と内周面があるが、内周面は周面摩擦力の効果を得られないと判断し、外周面のみを考慮した。



図 5-2 支持力算出の面積(先端開放杭)

5.3.3. 形鋼杭

形鋼杭の支持力の算出については、先端閉塞杭と同様に上記の式（5.1、5.2、5.3）を用いて算出した。なお、先端支持力算定用の A_p は形鋼の四角部分の断面積とし、極限周面摩擦力についても先端開放杭と同様に、杭の外周面のみを考慮した。

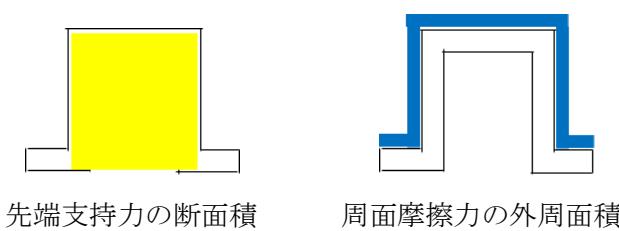


図 5-3 支持力算出の面積(形鋼杭)

5.3.4. スクリュー杭

スクリュー杭の支持力算出については、先端支持力は考慮せず周面摩擦力の式（5.3）を用いて算出した。従って、極限押込支持力と極限周面摩擦力は同じとした。なお、極限周面摩擦力の算定では、スクリュー杭の羽径の外周面を用いた。

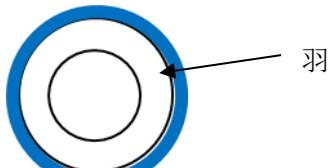


図 5-4 周面摩擦力算出の面積（スクリュー杭）

6. 試験結果

試験は表 3-1 に示す各種杭で行ったが、種類別での顕著な傾向は示さなかつたので、結果はすべてまとめて表示した。

6.1. 周面摩擦力

図 6-1、図 6-2 は、砂質土と粘性土の周面摩擦力の計算値と試験値との関係を示す。

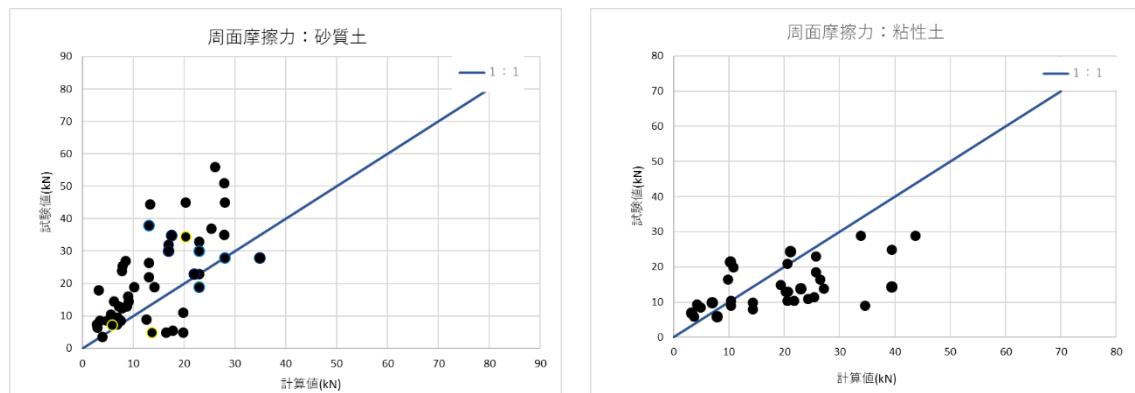


図 6-1 周面摩擦力の計算値と試験値の関係
(砂質土)

図 6-2 周面摩擦力の計算値と試験値の関係
(粘性土)

以上の結果より、周面摩擦力について以下のことが分かった。

- 砂質土、粘性土とともに、計算値が試験値よりも小さくなる傾向にある。特に、粘性土については今回の試験結果のほとんどの試験値が計算値より小さくなつた。
- 先端開放杭と形鋼杭の周面摩擦力の計算値は、杭の外周面積だけ考慮しているが、この結果から妥当だと判断した。

6.2. 押込支持力

図 6-3、図 6-4 は、砂質土と粘性土の押込支持力の計算値と試験値の関係を示す。

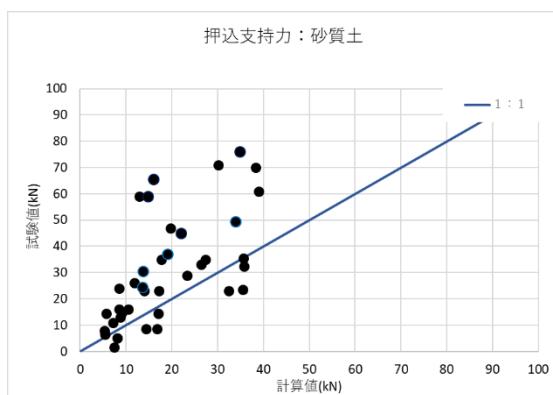


図 6-3 押込支持力の計算値と試験値の関係
(砂質土)

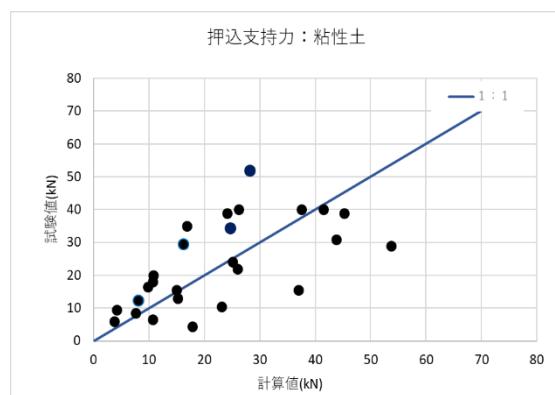


図 6-4 押込支持力の計算値と試験値の関係
(粘性土)

以上の結果より、押込支持力について以下のことが分かった。

- 砂質土について、試験値が計算値よりも小さくなる傾向にあるが、周面摩擦力ほどは小さくはない。粘性土についても周面摩擦力ほど小さくなっていない。
- 計算値の先端支持力は、先端開放杭と形鋼杭について、全断面積を考慮して求めた方法は結果より妥当であると言える。ただし、スクリュー杭の先端支持力は考慮していないため、先端支持力を考慮すると過大評価になる可能性がある。

6.3. 周面摩擦力と押込支持力（火山灰土、関東ローム）

火山灰土、関東ロームの周面摩擦力と押込支持力の結果について、図 6-5 は周面摩擦力の計算値と試験値との関係を、図 6-6 は押込支持力の計算値と試験値との関係を示す。

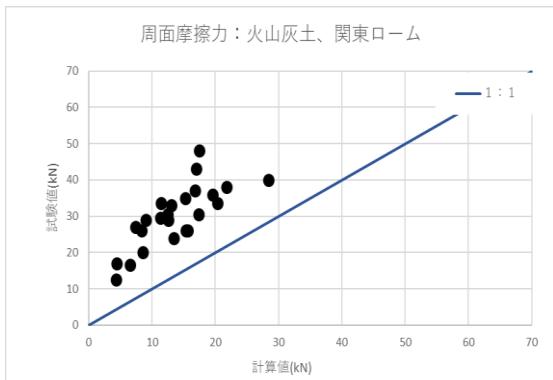


図 6-5 周面摩擦力の計算値と試験値の関係
(火山灰土、関東ローム)

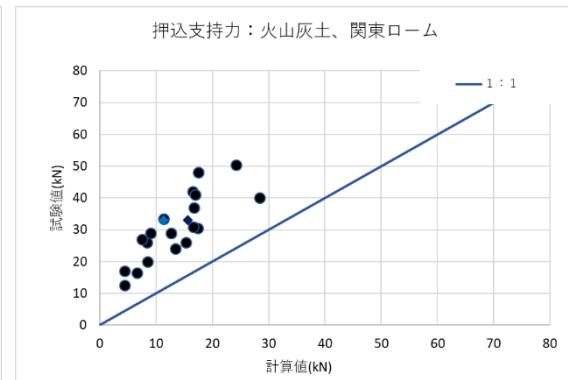


図 6-6 押込支持力の計算値と試験値の関係
(火山灰土、関東ローム)

この火山灰土、関東ロームについては、砂質土、粘性土の結果と違って、全て試験値が計算値よりも大きくなっている。

6.4. 水平抵抗力

図 6-8、図 6-9 に、砂質土と粘性土における水平抵抗力の計算値と試験値の関係を示す。ここで、水平抵抗力の計算値（以下、 H と表記する。）は、建築基礎構造設計指針⁴⁾ 第 6 章杭基礎に掲載されている以下の式を用いて計算し、杭の地表面変位（以下、 y_0 と表記する。）が 0.1D に達する時の荷重とした。したがって、杭の地表面変位が 0.1D に達した時の試験結果と計算値を比較した。

$$k_{h0} = \alpha \cdot \xi \cdot E_0 \cdot \bar{B}^{-3/4} \quad (6.1)$$

水平方向地盤反力係数の低減を考慮して、計算値と試験値を比較することとした。低減は、建築基礎構造設計指針⁴⁾より図 6-7 に示すようであり、水平地盤反力係数を式 6.3 によって計算した。

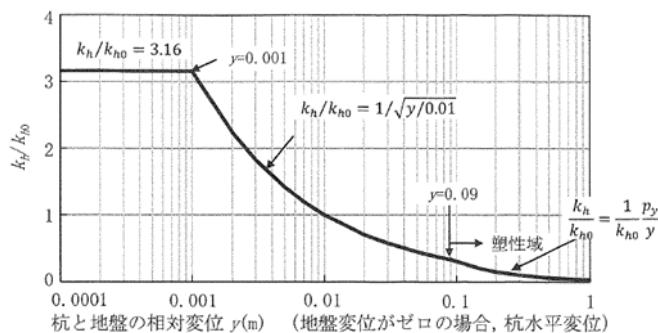


図 6-7 水平地盤反力係数と杭水平変位量の関係（塑性化変位 9cm の例）

$$k_h = 1/\sqrt{\bar{y}} \times k_{h0} \quad (6.3)$$

ここに、

\bar{y} ：無次元化水平変位(各種杭直径の 10%変位(0.1D)を cm 単位にした)

k_{h0} ：基準水平地盤反力係数 (kN/m³)

k_h ：水平地盤反力係数 (kN/m³)

α ：評価法によって決まる定数、砂質土 $\alpha=80$ 、粘性土 $\alpha=60$ (1/m)

ξ ：群杭の影響を考慮した係数で、単杭の場合は 1

E_0 ：変形係数 700N とした、N は換算 N 値 (kN/m²)

\bar{B} ：無次元化杭径

$$y_0 = \frac{1+\beta h}{2EI\beta^3} H \quad (6.4)$$

ここに、

y_0 ：杭の地表面変位 (m)

$\beta = [k_h \cdot B / (4EI)]^{1/4}$ (1/m)

h ：杭の突出長 (m)

E ：杭のヤング率 (kN/m²)

I ：杭の断面 2 次モーメント (m⁴)

H ：水平荷重 (kN)

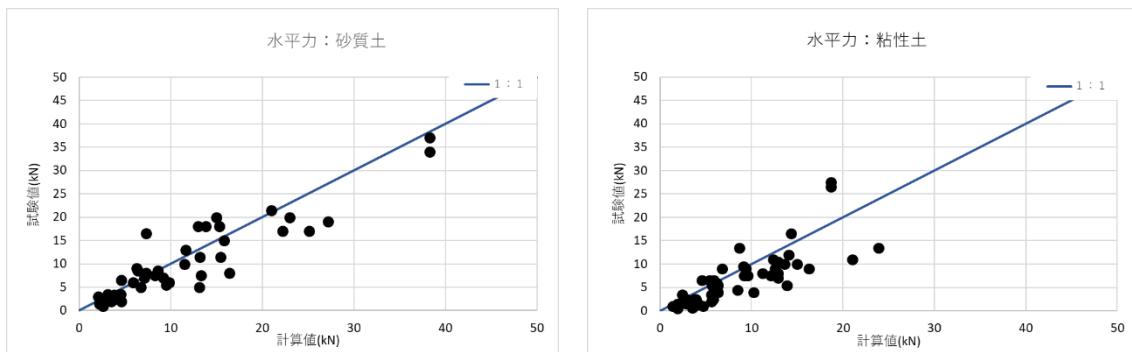


図 6-8 水平抵抗力の計算値と試験値の関係
(砂質土)

図 6-9 水平抵抗力の計算値と試験値の関係
(粘性土)

以上の結果より、水平抵抗力について以下の事が分かった。

- 試験値が計算値より、ほとんどの杭種で小さくなる傾向にある。これは火山灰土、関東ロームにおいても同様である。火山灰土、関東ロームは、粘性土に分類した。
- 上記の理由は、杭が小径で浅層に打設しているためだと思われる。
- 水平抵抗力を計算値では大きく評価するということは、架台が風圧を受けると計算値以上に杭が水平に変位することになり、場合によっては、架台の耐力に影響を与えることが考えられる。

7.まとめ

試験結果から、以下のようにまとめる。

- 杭の支持力の試験値が計算値よりも小さくなる傾向にあるのは、太陽光発電架台の基礎の特徴である小径の杭で浅層に貫入することが影響していると考える。
- 杭の支持力を設計するには、現地試験で確認することが望ましいと考える。

参考文献

- 1) 地盤工学会: 杭の鉛直載荷試験方法・同解説、2002.
- 2) 地盤工学会: 杭の水平載荷試験方法・同解説、2010.
- 3) 日本建築学会: 小規模建築物基礎設計指針、2008.
- 4) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針、2019.

この成果物は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20015）「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の長期安定電源化技術開発」事業の結果として得られたものです。