

傾斜地設置型/営農型/水上設置型

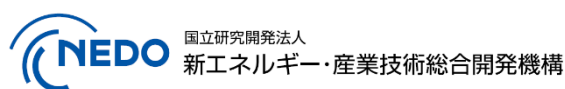
太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2023 年版

技術資料：

農地における杭の抵抗力試験結果の概要

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。

2023 年 4 月 28 日



構造耐力評価機構
Structural Performance Evaluation Institute



JPEA 太陽光発電協会
Japan Photovoltaic Energy Association

Deloitte.
デロイト トーマツ



生きる、を支える科学技術
NIED 防災科研

公立大学法人 大阪
University Public Corporation Osaka



農地における杭の抵抗力試験結果の概要

1. 概要

本資料では、営農設置型太陽光発電設備の杭基礎の抵抗力に営農設置特有の事象が発生する可能性とその実態を把握することを目的として、営農設置型太陽光発電設備の農地における杭の抵抗力について地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン 2019 年版¹⁾の技術資料 G1 と比較した内容について紹介する。

2. 農地調査内容

(1) 地盤調査

各農地で地盤調査（SWS試験）を行い、それらの地質（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、農地特有の地質および地盤の硬さがあるかを調査するために過去の実証実験の地盤調査と比較した結果を表 2-1 に示す。5ヶ所の農地、畑（千葉県千葉市）、畑（神奈川県小田原市）、水田（神奈川県小田原市）、みかん畑（神奈川県小田原市）、旧レンコン畑（広島県尾道市）で地盤調査を実施した。農地における深さ 2m 以下の浅層の地盤硬さは軟弱な（換算 N 値の低い）地盤に偏っている傾向であることが確認できた。

表 2-1 農地での地盤調査結果と過去の地盤調査結果との比較

土質	平均換算N値												
	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)										
			神奈川県小田原(田んぼ) (粘性土)										
			神奈川県小田原(畑) (粘性土)										
			千葉県千葉市(畑) (粘性土)										
			神奈川県小田原(みかん畑) (粘性土)										
砂質土			広島県尾道市(旧レンコン畑) (粘性土)										
			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)										

※農地の地盤調査：赤字で表記

農地での地盤調査特有の注意点としては、表層地盤が柔らかい作土層のため、作業時の足場の安全性を確保することや傾斜面の農地（主に果樹など）において地盤調査を行う際、水平面に対して鉛直に調査する必要があるため測定機器を水平に据え付ける必要があることや調査者が安定して作業ができるスペースを確保する必要があることが分かった（図 2-1 参

照)。また、地盤調査位置の選定においては、機材の搬入や作業時などで農作物やその根を傷つけないように留意する必要があることが分かった。また、地盤の傾斜角によっては、測定機器を水平に据え付けることが困難であることも分かった。



図 2-1 農地（傾斜）の地盤調査風景

(2) 試験場所

地盤調査を行った 5 ヶ所の農地の内、3 ヶ所の農地、すなわち畑（千葉県千葉市）、畑（神奈川県小田原市）、水田（神奈川県小田原市）で杭の載荷試験を実施した。畑（千葉県千葉市）については黒ボク土とロームであった。また、水田（神奈川県小田原市）については、水田の湛水による影響を検証するために乾燥状態と湛水状態での杭の載荷試験を実施した。

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ー杭を 2 種類使用した。

施工方法は、基本的に打撃貫入とし、スクリー杭は回転貫入とした。

杭の貫入深さは 2.2m とした。これは、農地の表層地盤は柔らかい作土層であり、水平方向の抵抗力の確保をするために基礎の貫入深さを深く設定した。

表 3-1 試験杭の種類

試験体		断面[mm]
鋼管杭	先端開放杭	φ=48.6 t=2.4
特殊杭	スクリー杭	φ=76 t=3.0 (羽径φ=96)
		φ=89 t=3.0 (羽径φ=176)

4. 杭の打設方法

本試験の農地での杭の打設では、重機重量による地盤の沈み込みを低減するために小型重機を使用した。今回検証した地盤では、重機重量により表土の大きな乱れは生じず施工できた。また、資材の搬入や作業時に隣接する農地や農作業者の利用に支障がないように注意して実施した（図 4-1、図 4-2 参照）。



図 4-1 農地での杭の打設風景



図 4-2 農地での杭の打設後の表土風景（左：打設後、右：整地後）

5. 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²⁾」と「杭の水平載荷試験方法・同解説³⁾」に準拠した。押込載荷試験については、試験杭が小径な摩擦杭であり、粘性土であることから先端支持力の影響は小さいと考え周面摩擦力のみでの評価を行うこととし、本試験では省略した。また、営農設置型太陽光発電設備特有の事象としては、アレイ面が高い位置に設置されるため、杭基礎の地表面近傍に作用する転倒モーメントが大きくなると考えた。そのため、本試験の水平載荷では、載荷点を地表面から 350mm と 2000mm の 2 種類の位置で実施しその水平抵抗力を比較した。

(3) 鉛直載荷試験

引拔載荷試験は、試験杭の反力装置として三脚を使用し、加力装置として油圧シリンダーおよび油圧ポンプを使用した（図 5-1 参照）。載荷方法は連続載荷とした。終局状態は、試験杭に取付けた変位計の変位が $0.1D$ (D : 杭径) を超える時とした。スクリー杭の杭径は羽部を除く直径とした。農地特有の表土が軟弱な場合は、反力体の足元に耐圧盤を設置する等で沈み込みを防止する対策をとる必要があることが分かった。

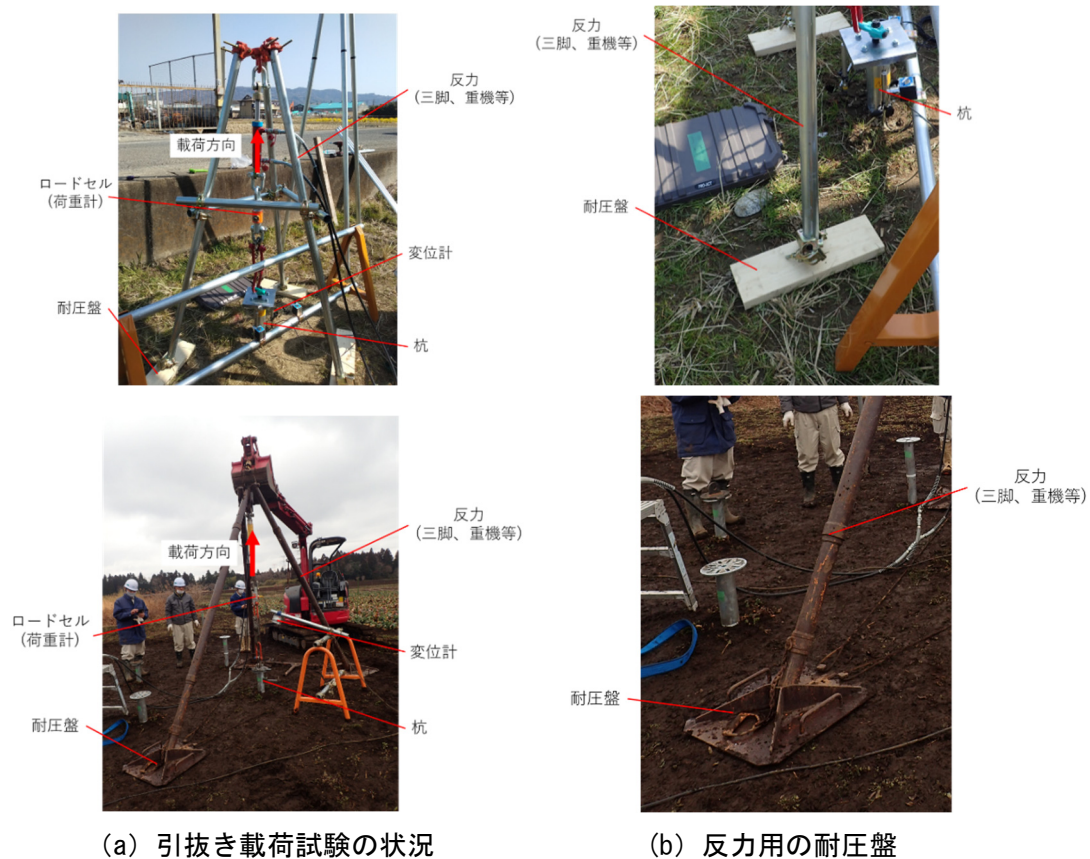


図 5-1 引抜载荷試験風景

(4) 水平载荷試験

载荷点として地表面から 350mm と 2000mm の 2 種類の位置を設定し水平载荷試験を実施した。変位測定点は、各種杭とも同位置で、地表面部、载荷点とした（図 5-2 参照）。鉛直载荷試験同様、反力装置として重機を使用し、レバーブロックによって载荷し、载荷方法は連続载荷とした。

終局状態は、試験杭に取付けた地表面の変位計の変位が $0.1D$ (D : 杭径) を超える時とした。鉛直载荷試験同様、スクリー杭の杭径は羽部を除く直径とした。

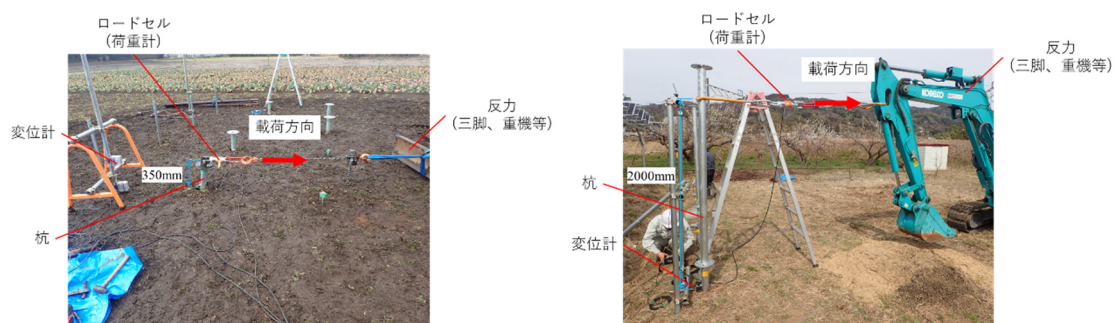


図 5-2 水平载荷試験（左：GL+350mm、右：GL+2000mm）

6. 支持力計算値の算定式

極限周面摩擦力の算定には、「小規模建築物基礎設計指針⁴⁾、日本建築学会、P.186」を参照した。その算定式を以下に示す。

$$R_f = D \times \sum(\tau_{di} \times L_i) \times \pi \text{ (kN)} \dots\dots\dots (6.1)$$

ここに、

D : 杭状地盤補強径 (m)

τ_{di} : 杭状地盤補強に作用する各層の極限周面摩擦力度 (kN/m²)、

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

c : 杭状地盤補強先端下部粘性土層の粘着力 (kN/m²)

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

L_i : 各層の層厚 (m)

7. 各種杭の支持力算出方法

(5) 先端開放杭

先端開放杭の極限周面摩擦力の算出については、上記の式 (6.1) を用いて算出した。なお、極限周面摩擦力は杭の外周面と内周面に作用するが、内周面は周面摩擦力の効果を得られないと判断し、ここでは極限周面摩擦力が作用する面は外周面のみとした。(図 7-1 参照)

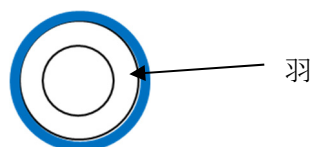


周面摩擦力の外周面積

図 7-1 支持力算出の面積(先端開放杭)

(6) スクリュー杭

スクリュー杭の支持力算出については、先端開放杭と同様に上記の式 (6.1) を用いて算出した。なお、極限周面摩擦力が作用する面は、スクリュー杭の羽径の外周とした。(図 7-2 参照)



周面摩擦力の外周面積

図 7-2 周面摩擦力算出の面積(スクリュー杭)

8. 試験結果

試験は、表 3-1 に示した各種杭で行ったが、種類別での顕著な傾向は示さなかったため、結果はすべてまとめて表示する。また、過去の平地での試験結果と同様の傾向を示したため、参考として地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン 2019 年版データもあわせて示す。

(7) 周面摩擦力

図 8-1 は、粘性土および火山灰土、関東ロームの周面摩擦力の設計計算値と試験値との関係を示す。なお、畑（千葉県千葉市）は黒ボク土であったため、火山灰土、関東ロームに分類した。

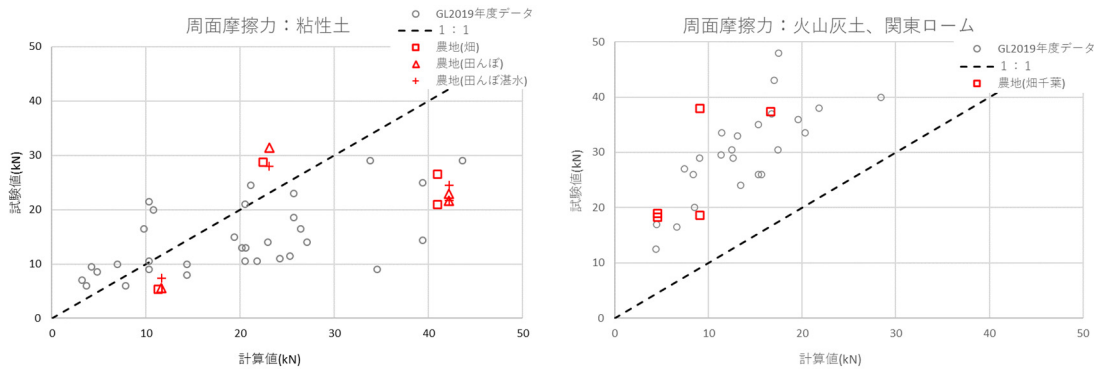


図 8-1 周面摩擦力の計算値と試験値の関係（左：粘性土、右：火山灰土、関東ローム）

以上の結果より、周面摩擦力について以下の事が分かった。

- ・ 地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン 2019 年版の結果と土質別での傾向は一致していた。
- ・ 農地の種別による顕著な違いは確認できなかった。
- ・ 田んぼにおける湛水の影響は一部の杭で少しの周面摩擦力の低下がみられたが、顕著な影響は確認できなかった。

(8) 水平抵抗力

水平抵抗力の計算値は、「建築基礎構造設計指針⁵⁾ 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、杭の地表面変位が 0.1D に達する時の荷重とした。従って、杭の地表面変位が 0.1D に達した時の試験結果と比較した。

$$k_{h0} = \alpha \cdot \xi \cdot E_0 \cdot \bar{B}^{-3/4} \dots\dots\dots (8.1)$$

$$k_h = 3.16 \times k_{h0} \dots\dots\dots (8.2)$$

比較に当たっては、水平方向地盤反力係数の低減を考慮した。低減は、建築基礎構造設計指針⁵⁾より図 8-2 に示すようであり、水平地盤反力係数を式 8.3 によって計算した。

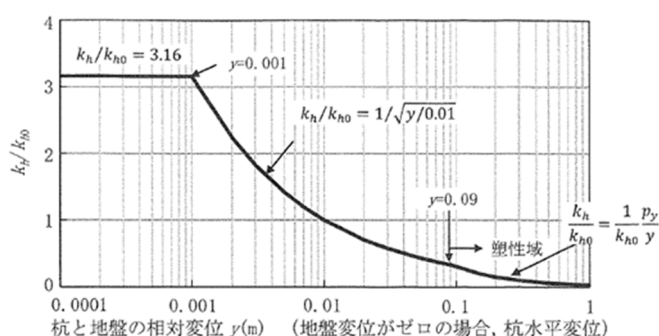


図 8-2 水平地盤反力係数と杭水平変位量の関係（塑性化変位 9cm の例）

$$k_h = 1/\sqrt{\bar{y}} \times k_{h0} \quad \dots\dots\dots (8.3)$$

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（kN/m²）

$\bar{B}$ ：無次元化杭径（各種杭直径を cm 単位にした）

$$y_0 = \frac{1+\beta h}{2EI\beta^3} H \quad \dots\dots\dots (8.4)$$

ここに、

y_0 ：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 8-3 に、各農地の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。地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン 2019 年版の結果と同様に、設計計算値が試験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ったため、火山灰土、関東ロームは、粘性土としてまとめた。

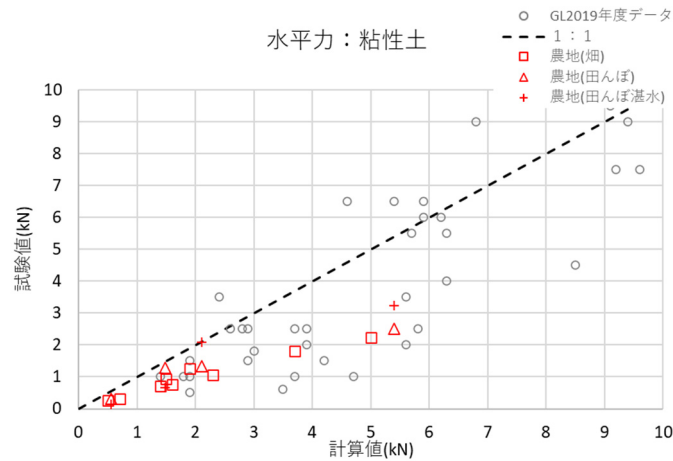


図 8-3 各農地の水平抵抗力の計算値と試験値の関係（粘性土）

また、図 8-4 に、載荷点の高さの違いによる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。載荷点が高いほど、杭の地表面近傍に作用するモーメントが大きいため水平抵抗力の計算値と試験値が低くなる傾向であった。

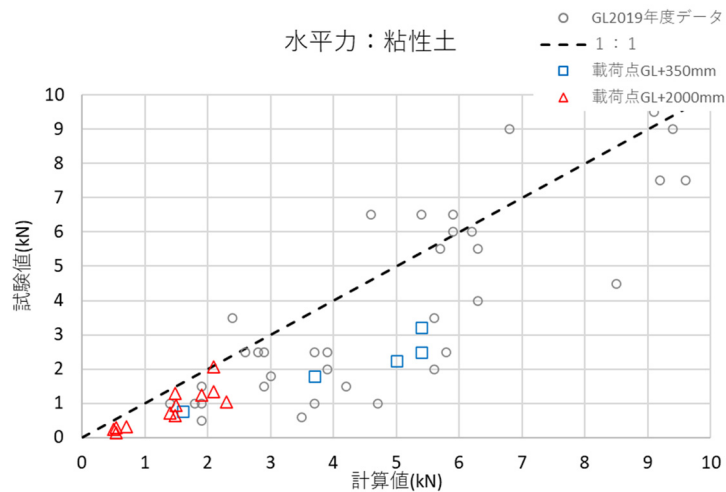


図 8-4 各載荷高さに対する水平抵抗力の計算値と試験値の関係（粘性土）

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。

- ・ 地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン 2019 年版の結果と傾向は一致していた。
- ・ 各農地の種別による顕著な違いは確認できなかった。
- ・ 営農設置型太陽光発電設備は、アレイ面の位置（荷重の作用位置）が高いことが多く、その場合は杭に作用する水平力と転倒モーメントのバランスを考慮して、適切な高さ位置での載荷を行うことが必要である。

9. まとめ

試験結果は以下のようにまとめられる。

- ・ 農地での試験は表層が柔らかい作土層であるため、反力体の沈み込み防止をする対策を施して試験を実施する必要がある。
- ・ 水平載荷試験は、設置状況を把握して水平荷重の作用位置を考慮した試験をすることが望ましい。
- ・ 杭の支持力を設計するには、周面摩擦力や水平抵抗力の試験結値が計算値よりも小さくなる傾向にあるので、現地試験で確認することが望ましい。

参考文献

- 1) 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、株式会社奥地建産：地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン 2019 年版、2019.
- 2) 公益社団法人地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説、2002.
- 3) 公益社団法人地盤工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説、2010.
- 4) 一般社団法人日本建築学会：小規模建築物基礎設計指針、2008.
- 5) 一般社団法人日本建築学会：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。