

傾斜地設置型/営農型/水上設置型

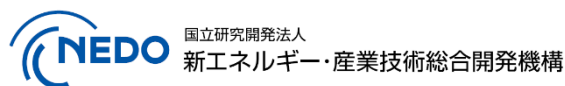
太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2023 年版

技術資料：

傾斜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」の結果として得られたものです。

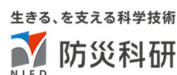
2023 年 4 月 28 日



構造耐力評価機構
Structural Performance Evaluation Institute



太陽光発電協会
Japan Photovoltaic Energy Association



公立大学法人 大阪
University Public Corporation Osaka



傾斜地における杭の抵抗力試験結果の概要

1. 概要

傾斜地に設置された太陽光発電設備の杭基礎の抵抗力に傾斜地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、傾斜地設置型太陽光発電設備の地盤の傾斜角度による抵抗力の影響を確認した内容について紹介する。

2. 試験地盤（傾斜地）

試験場所は、地盤の傾斜角度（15 度、30 度）の影響と平地との比較を確認することを目的としたため、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）が、均一になるように図 2-1 に示す幅 20m、奥行き 36m、高さ 3m の造成地盤を作成した。なお、平地での試験は造成地盤の天端で行った。

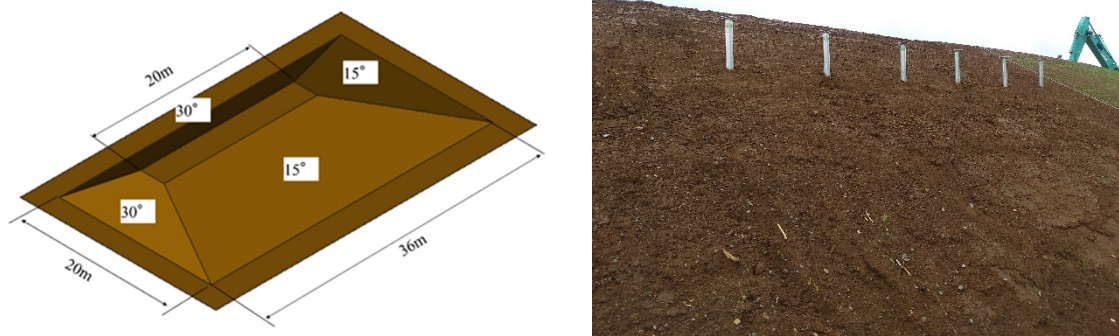


図 2-1 造成した傾斜地盤

造成地盤の地盤調査結果を以下に示す。地盤調査方法としては、スクリーウエイト貫入試験（SWS 試験）と簡易動的コーン貫入試験を実施した。地盤調査位置（図 2-2 参照）における各貫入試験の柱状図を図 2-3～図 2-8 に示す。造成地盤は、換算 N 値が 2～4 であることを確認した。

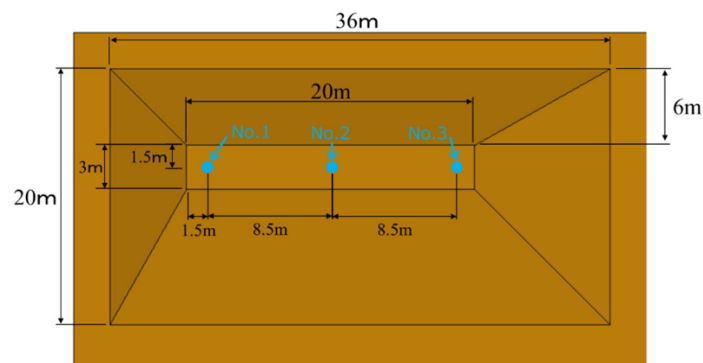


図 2-2 地盤調査位置

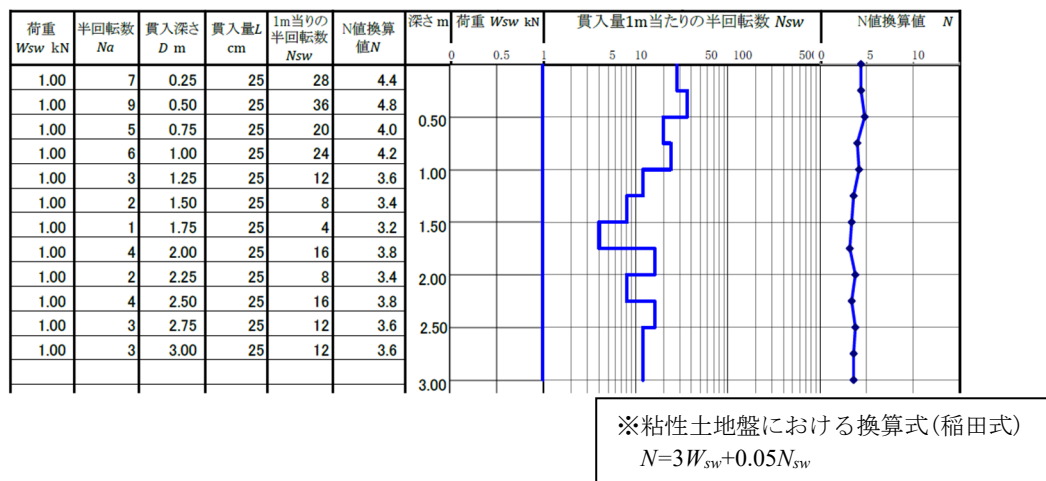


図 2-3 スクリューウェイト貫入試験 (SWS 試験) 結果 No. 1

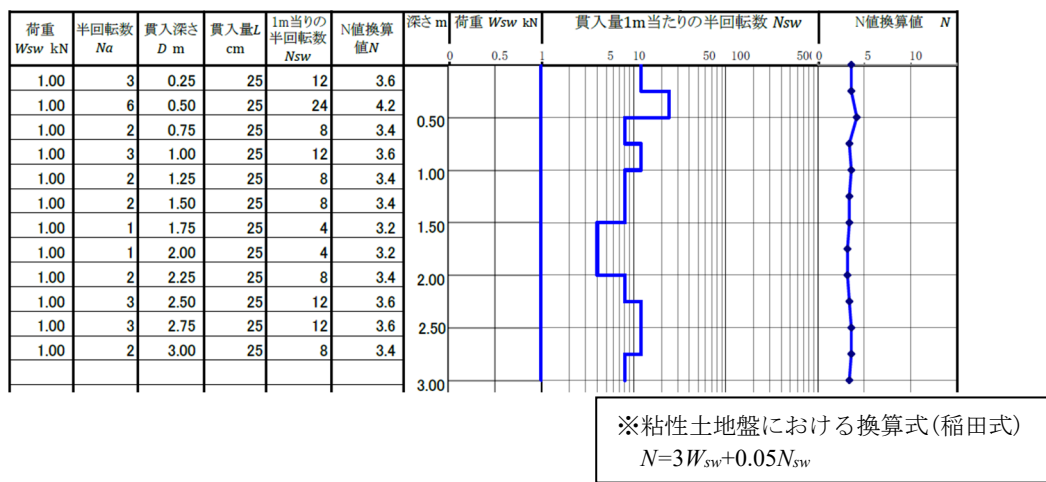


図 2-4 スクリューウェイト貫入試験 (SWS 試験) 結果 No. 2

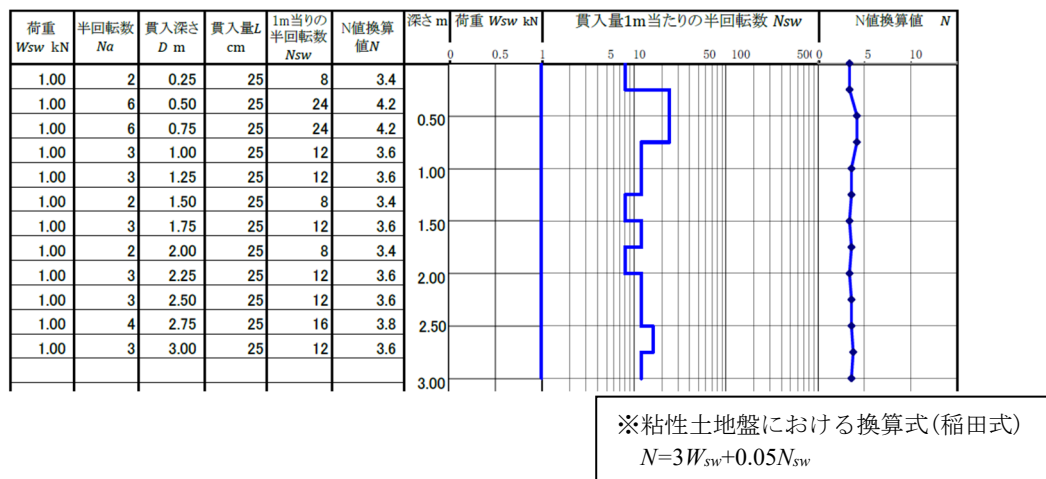


図 2-5 スクリューウェイト貫入試験 (SWS 試験) 結果 No. 3

深度 m	打撃回数 Nd	換算N値
0.0	-	
0.1	5	3.4
0.2	5	3.4
0.3	4	3.0
0.4	2	1.5
0.5	3	2.3
0.6	3	2.3
0.7	4	3.0
0.8	3	2.3
0.9	3	2.3
1.0	3	2.3
1.1	4	3.0
1.2	4	3.0
1.3	3	2.3
1.4	3	2.3
1.5	3	2.3
1.6	3	2.3
1.7	4	3.0
1.8	3	2.3
1.9	3	2.3
2.0	4	3.0
2.1	3	2.3
2.2	3	2.3
2.3	3	2.3
2.4	5	3.4
2.5	4	3.0
2.6	4	3.0
2.7	3	2.3
2.8	4	3.0
2.9	3	2.3
3.0	4	3.0

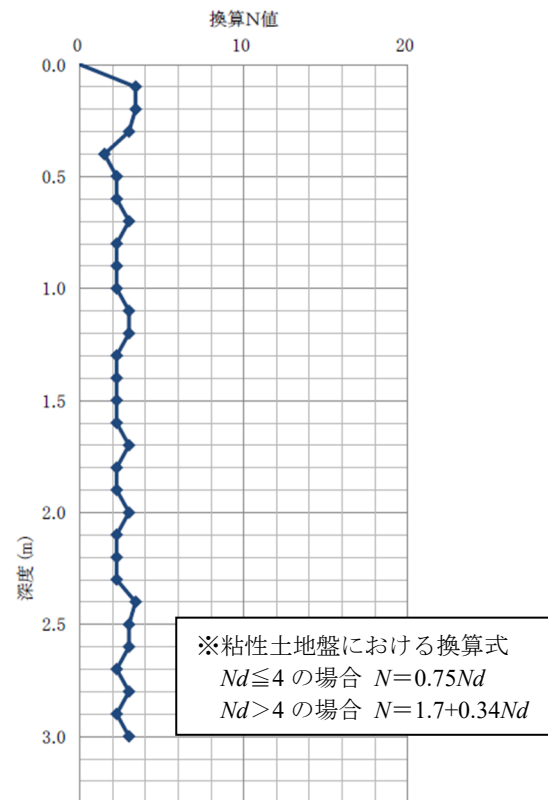


図 2-6 簡易動的コーン貫入試験結果 No. 1

深度 m	打撃回数 Nd	換算N値
0.0	-	
0.1	5	3.4
0.2	5	3.4
0.3	4	3.0
0.4	2	1.5
0.5	3	2.3
0.6	3	2.3
0.7	4	3.0
0.8	3	2.3
0.9	3	2.3
1.0	3	2.3
1.1	4	3.0
1.2	4	3.0
1.3	3	2.3
1.4	3	2.3
1.5	3	2.3
1.6	3	2.3
1.7	4	3.0
1.8	3	2.3
1.9	3	2.3
2.0	4	3.0
2.1	3	2.3
2.2	3	2.3
2.3	3	2.3
2.4	5	3.4
2.5	4	3.0
2.6	4	3.0
2.7	3	2.3
2.8	4	3.0
2.9	3	2.3
3.0	4	3.0

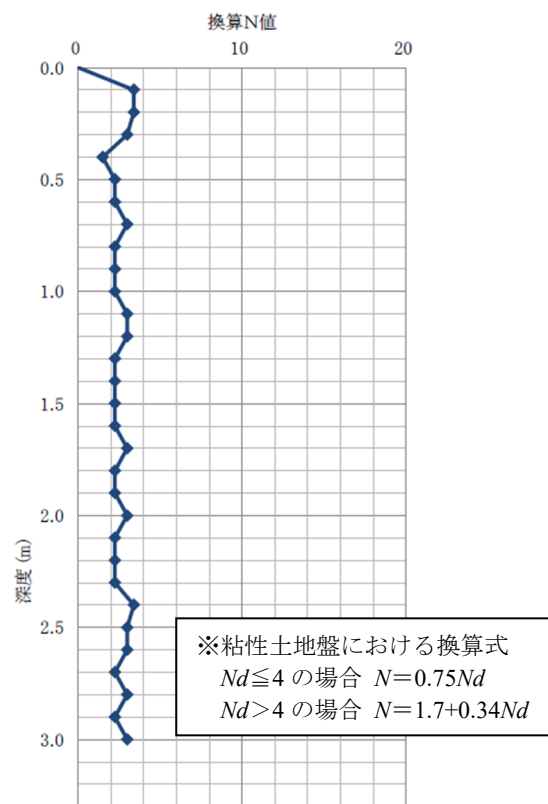


図 2-7 簡易動的コーン貫入試験結果 No. 2

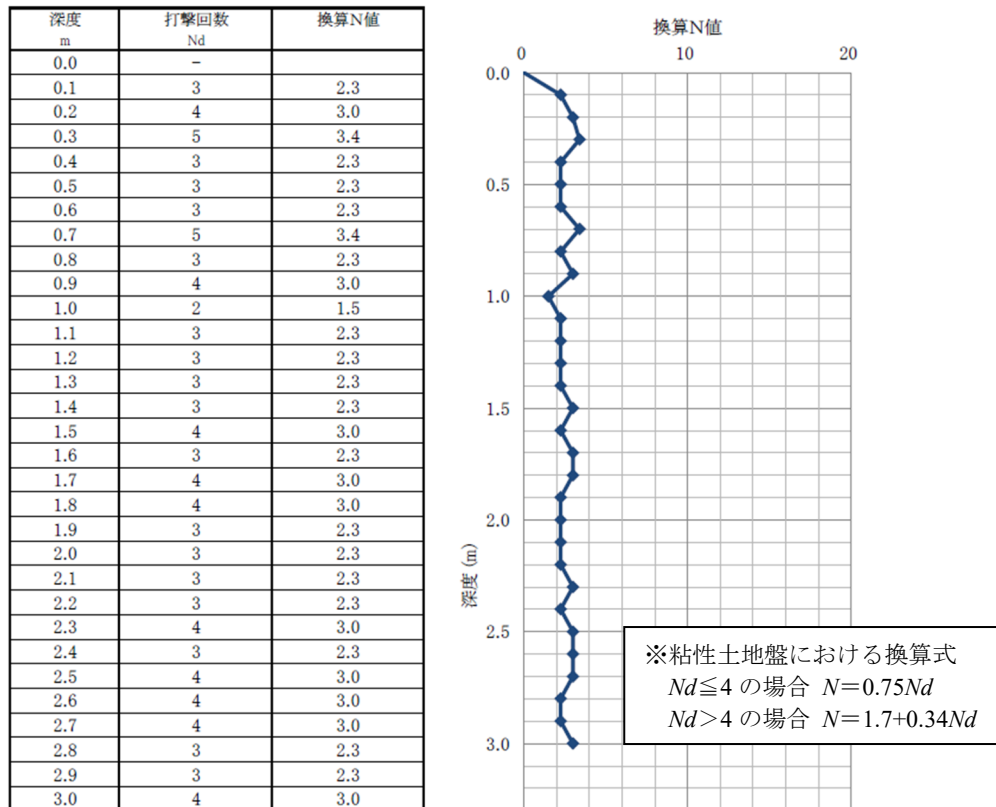


図 2-8 簡易動的コーン貫入試験結果 No. 3

造成地盤の地盤調査は、造成地盤の深さごとの地盤の硬さを確認することを目的としていたため、造成地盤天場の平面部分で調査を行ったが、傾斜地設置型太陽光発電設備では、傾斜地での地盤調査の必要性があるため、実際の傾斜面で検証を行った。実際の傾斜地での地盤調査特有の注意点としては、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 2-9 参照）。また、地盤の傾斜角度によっては、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 2-9 傾斜地の地盤調査風景

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や軽量形鋼杭も使用した。

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 1.5m とした。

表 3-1 試験杭の種類

試験杭		断面 (mm)
鋼管杭	先端開放杭	$\phi=48.6$ $t=2.4$
特殊杭	軽量形鋼杭	108×100×26 $t=3.2$
	スクリー杭	$\phi=76$ (羽径 $\Phi 96$)

4. 杭の打設方法

傾斜地での杭の打設方法について、平地での杭の打設方法との相違点や施工時の注意事項等の検証を行った。検証結果として、重機（バックホウ）で傾斜地に登坂しての作業は、重機の性能上は最大登坂角度 30 度程度であるが、施工時の安全性を考慮すると地盤の傾斜角度が 15 度程度までの傾斜地での実施が現実的である。地盤の傾斜角度が 15 度以上の傾斜地での重機作業は、安全を確保するために法尻又は法肩からの施工を行うことを前提に長大のり面のような地盤であれば適切な距離に小段を造成し、平地から行うことが望ましいと考える。ただし、そのようにできない場合は、適切な安全対策を施すことが必要である。傾斜地でのハンド工具による打設や補助作業は、平地より足場が不安定であるため足場（仮設足場、高所作業車など）の作業の安全性を考慮する必要があることが分かった（図 4-1～図 4-4 参照）。



図 4-1 傾斜角度 15 度重機による施工風景（形鋼杭）



図 4-2 傾斜角度 30 度 平地（法肩）からの重機による施工風景（スクリュー杭）



図 4-3 傾斜角度 30 度 足場安定（高所作業車）からの重機による施工風景（形鋼杭）



図 4-4 傾斜角度 30 度 足場不安定（傾斜地）からのハンド工具による施工風景（単管）

また、施工不良時の杭の支持力低下の検証を行った。施工不良を模擬する方法としては、スクリュー杭は所定の貫入深さまで施工した後に杭を空転させることで不良状態を模擬し、

単管については杭自体を左右に振りながら施工をすることで不良状態を模擬し、形鋼杭についてはオーガで掘削をしたのちに施工をすることで不良状態を模擬した。

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¹⁾」と「杭の水平載荷試験方法・同解説²⁾」に準拠した。本試験では足場の悪い傾斜地での試験実施が円滑に可能かの検証を行うため、より簡便にできる方法についても検討した。また、押込載荷試験については、試験杭が小径な摩擦杭であることや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。

(1) 鉛直載荷試験

引拔載荷試験は、試験杭の反力装置として重機を使用し、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。載荷方法は連続載荷とした（図 5-1 参照）。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。軽量形鋼杭の杭径は最大幅の 152mm とし、スクリュー杭の杭径は羽部を除く直径とした。

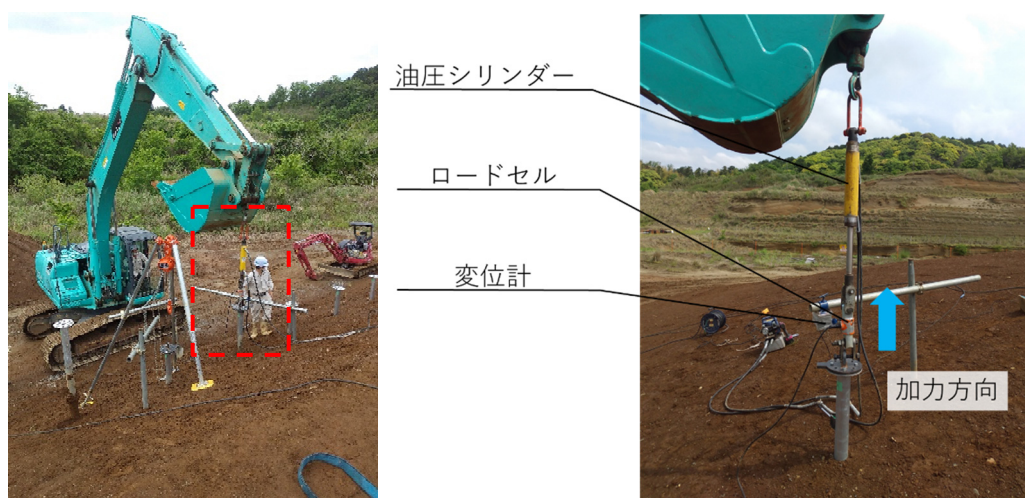
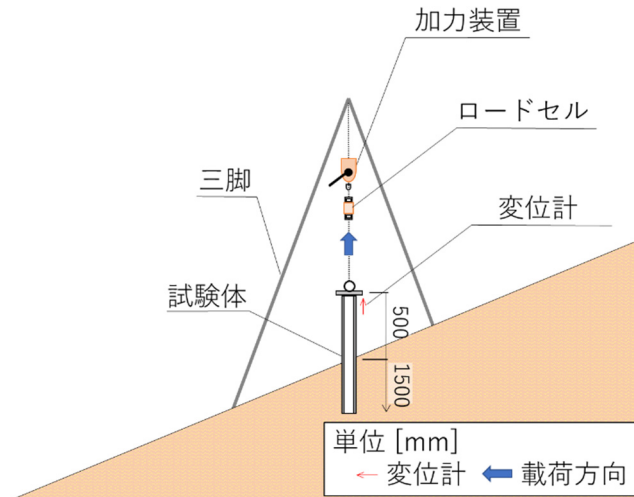
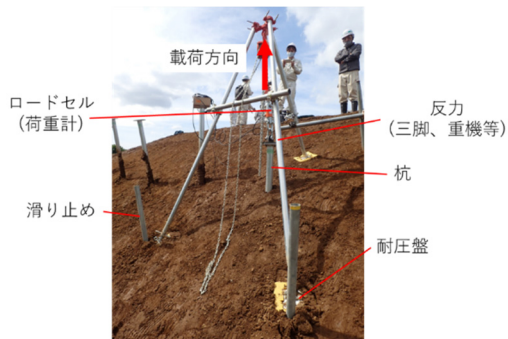


図 5-1 引拔載荷試験風景（反力装置：重機）

また、一部の試験杭において傾斜地で重機を使用した試験が困難な場合を想定した人力での運搬及び試験が可能な試験方法を試みた。その引拔載荷試験は、試験杭の反力装置として三脚を使用し、加力装置としてチェンブロックを使用した。他の試験条件（ロードセル、変位計）については重機を使用した試験と同様である（図 5-2 参照）。



(a) 引抜き载荷試験の構成一例



(b) 引抜き载荷試験の状況



(c) 反力用の滑り止め

図 5-2 引抜载荷試験風景（反力装置：三脚）

傾斜地での試験の留意点としては、反力体の足場が下り勾配方向へ滑るため、その防止策を検討する必要がある。また、急傾斜では作業の安全性を考慮して必要であれば足場を設置する。

(2) 水平载荷試験

载荷点は、地表面から 300mm 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、载荷点とした（図 5-3 参照）。鉛直载荷試験同様、反力装置として重機を使用し、油圧シリンダーおよび油圧ポンプによって载荷し、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、軽量形鋼杭の杭径は最大幅の 152mm とし、スクリー杭の杭径は羽部を除く直径とした。

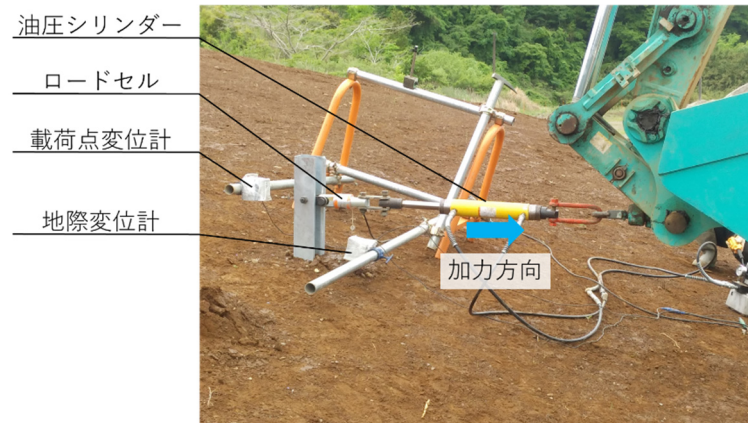


図 5-3 水平載荷試験風景（反力装置：重機）

なお、載荷方向としては、基本的に下り勾配方向とした。これは、杭の水平抵抗力が下り勾配方向のほうが低くなると考えたためである。一部の試験杭では、その検証のために図 5-4 に示す下り勾配方向と上り勾配方向の水平載荷試験を行った。

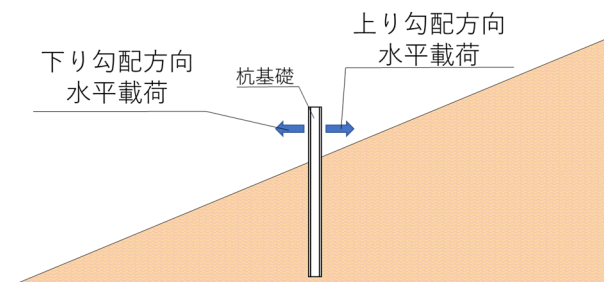


図 5-4 水平載荷試験の載荷方向

また、一部の試験杭において、鉛直載荷試験同様、重機を使用しない人力での試験方法の検討を行った（図 5-5 参照）。

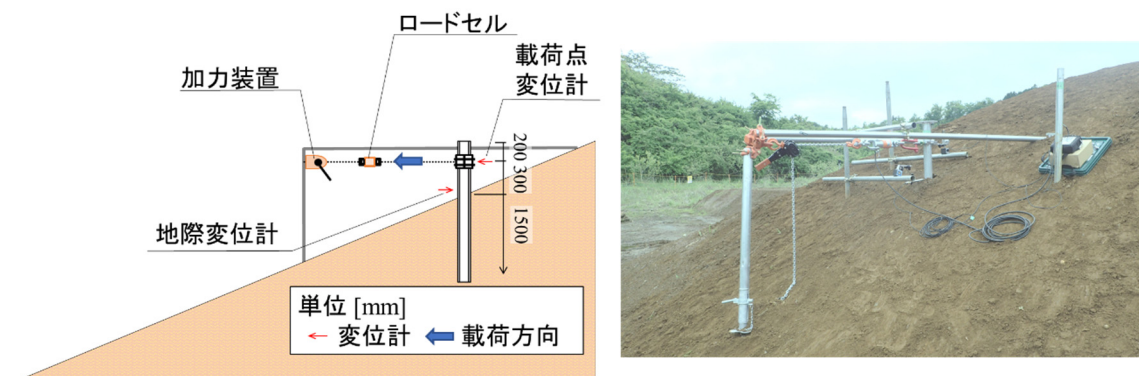


図 5-5 水平載荷試験風景（反力装置：三脚）

傾斜地での試験の留意点としては、急傾斜では作業の安全性を考慮して必要であれば足場等を設置することである。

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³⁾、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

(1) 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)

(2) 形鋼杭

形鋼杭の極限周面摩擦力の算出については、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、先端開放杭と同様に外周面のみとした。(図 7-2 参照)

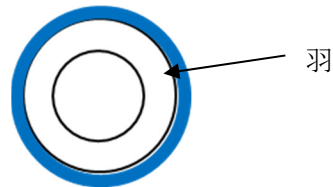


周面摩擦力の外周面積

図 7-2 支持力算出の面積 (形鋼杭)

(3) 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 7-3 参照）



周面摩擦力の外周面積

図 7-3 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 に示す各種杭で行ったが、種類別での顕著な傾向は示さなかったので、結果は平地と傾斜角度の比較をした。

(1) 周面摩擦力

図 8-1 は、周面摩擦力の設計計算値と試験値との関係を示す。平地に比べて傾斜角度があるほうが、試験値が低くなる傾向であった。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。

- 平地での試験結果より傾斜面の試験結果のほうが小さくなる傾向にある。

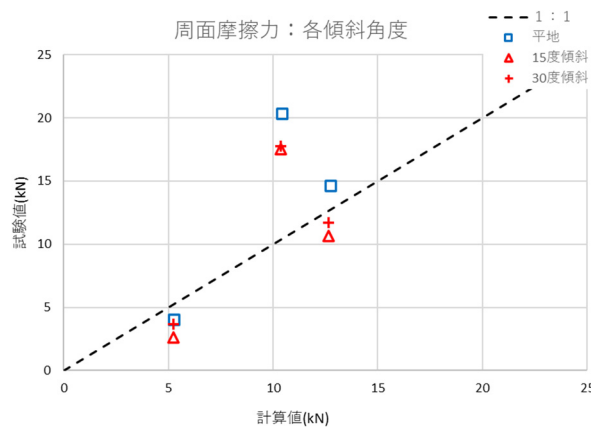


図 8-1 各傾斜角度の周面摩擦力の計算値と試験値の関係

(2) 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。

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

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

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⁴⁾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。

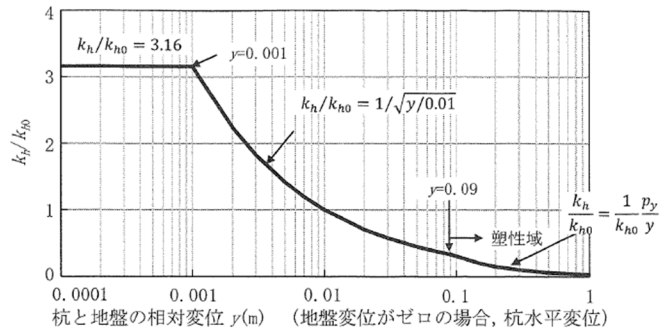


図 8-2 水平地盤反力係数と杭水平変位量の関係
(塑性化変位 9cm の例)

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

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)

また、「建築基礎構造設計指針⁴⁾ 第6章杭基礎」に掲載されている傾斜地盤近傍の杭の水平抵抗について、法肩までの距離が0m時の基準水平地盤反力係数の低減係数 ρ (図8-3)を考慮した計算値と試験値を比較した。(傾斜角度15度： $\rho=0.7$ 、傾斜角度30度： $\rho=0.4$)

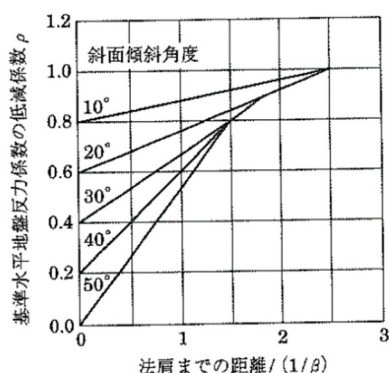


図 8-3 傾斜地盤近傍杭の基準水平地盤反力係数の低減係数 ρ

図 8-4 に、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。

傾斜角度が大きいほど水平抵抗力が低下していることが試験結果より確認できた。また、傾斜地盤近傍杭の基準水平地盤反力係数の低減係数を考慮すると、計算値と試験値が近似した。ただし、本試験では試験杭数が少ないため本低減係数が適正であるかは今後の課題である。

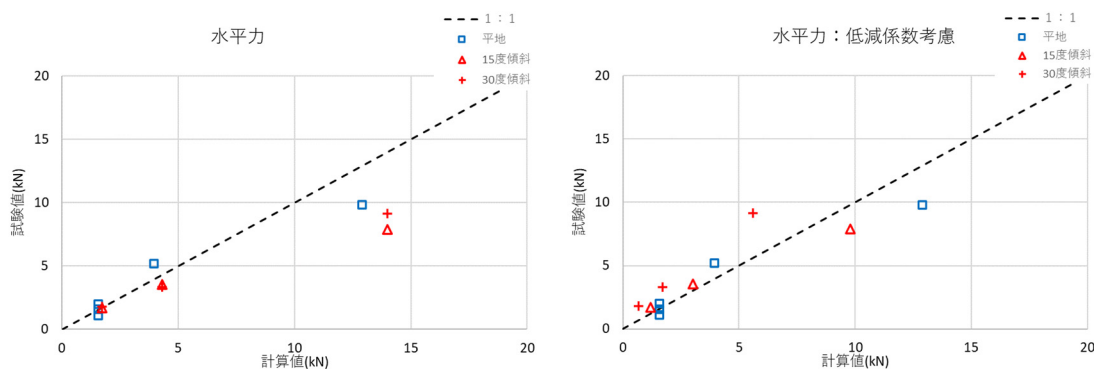


図 8-4 水平抵抗力の計算値と試験値の関係（粘性土）

（左：低減係数考慮無、右：低減係数考慮有）

また、荷重方向（下り勾配方向と上り勾配方向）の影響についても検証した。杭種はスクリー杭で、地盤の傾斜角度は30度にて水平荷重試験を行った。下り勾配方向の水平抵抗力は平地での水平抵抗力の60%に低下し、上り勾配方向は平地での水平抵抗力の120%に増加した。これは、下り勾配方向では、平地より杭基礎に対する地盤影響範囲が小さくなり、上り勾配方向では、杭基礎に対する地盤影響範囲が大きくなるためと考えられる（図8-5参照）。

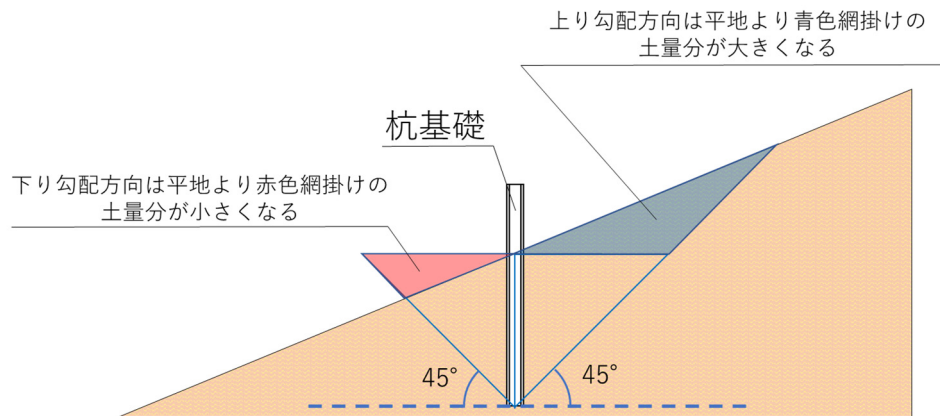


図 8-5 下り勾配方向と上り勾配方向の水平抵抗力

以上の結果より、水平抵抗力について以下のことが分かった。

- ・ 傾斜角度が大きくなるほど下り勾配方向の水平抵抗力は低下する。
- ・ 設計計算値が、試験値より小さくなる傾向にある。
- ・ 水平抵抗力は傾斜地の下り勾配方向は小さくなるため、設計荷重と載荷方向を考慮して安全性を確認する必要がある。

(3) その他検証結果

施工不良を模擬した杭の支持力低下の検証を行った。結果としては、施工不良を模擬した杭の周面摩擦力と通常施工の周面摩擦力の比は、0.6～0.8 であった。これは、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⁵⁾の技術資料 G2 に示されている周面摩擦力の低減率の範囲内にあり妥当な結果と考えられる。

なお、杭の施工不良による周面摩擦力への影響の詳細については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⁵⁾の技術資料 G2 を参照されたい。

また、一部の試験杭において傾斜地で重機を使用した試験が困難な場合を想定した人力での運搬及び試験が可能な試験方法の検討を行ったが、周面摩擦力と水平抵抗力は、重機を使用した試験結果と顕著な違いはなかった。

9. まとめ

試験結果は以下のようにまとめられる。

- ・ 鉛直支持力と水平抵抗力ともに平地より低下する傾向にある。
- ・ 杭の支持力の試験値が、設計計算値よりも小さくなる傾向にあるのは、太陽光発電架台の杭基礎の特徴である小径で浅層に貫入することが影響していると考えられる。
- ・ 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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 一般社団法人日本建築学会：建築基礎構造設計指針、2019.
- 5) 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.

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。