

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

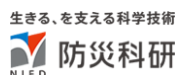
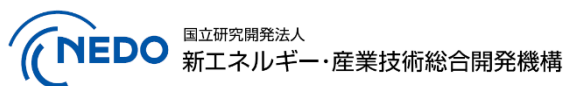
技術資料：

凍結融解履歴が杭の引抜き抵抗に与える影響の解明

に関する研究

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





# 凍結融解履歴が杭の引抜き抵抗に与える影響の解明に関する研究

## 1. 研究背景

近年、北海道の山間部や遊休農地などにおいても、太陽光発電設備が積極的に建設されている。しかしながら、凍上現象による被害が散見されるようになってきた。

写真 1-1 は太陽光発電設備の凍上被害の一例である。写真から、架台を支える杭が局所的に持ち上がり、パネルが大きく波打っている様子が確認できる。架台が変形し続けるとパネルの傾きや破損に繋がる恐れもある。さらに、我が国では豪雨や突風といった極端気象が増加傾向にあり、太陽光発電設備において冬期に凍上現象が発生し、杭の支持力や引抜き抵抗が失われた状態で夏期を迎えた場合、豪雨や突風によって太陽光発電設備の倒壊等の甚大な被害が発生することが懸念される。



写真 1-1 太陽光発電設備の架台の凍上被害の一例

そこで本研究では、太陽光発電設備の建設に使用されている杭を施工し、その凍上挙動を明らかにすることに取り組んだ。また、施工直後から夏期にかけて合計 3 回の引抜き試験を実施して、凍結融解履歴が杭の引抜き抵抗に与える影響を明らかにすることも試みた。ここではスパイラル杭に着目し、羽根の有無、羽根の幅と数、杭の埋設深さを変化させて、全 8 ケースの実験を実施した。

## 2. 実験概要

### 2.1 施工した杭および埋設した計測機器

杭の実物大模型は、凍上性の高い砂質土（地盤工学会基準の凍上試験<sup>1)</sup>で凍上速度 0.379 mm/hour) で造成した地盤に埋設した。なお、本研究ではソーラーパネルや架台といった上部構造は設置していない。

表 2-1 実験条件

Case	杭の種類	埋設深さ (m)	羽根の幅(m)	羽根の数(枚)	質量 (kg)
1	スパイラル杭	1.5	0.100	3.5	26
2	スパイラル杭	1.5	0.050	6.5	24
3	ストレート杭	1.5	0.000	0.0	21
4	スパイラル杭	1.5	0.025	9.0	23
5	スパイラル杭	1.0	0.100	2.0	19
6	スパイラル杭	1.0	0.050	4.0	18
7	ストレート杭	1.0	0.000	0.0	16
8	スパイラル杭	1.0	0.025	5.5	17

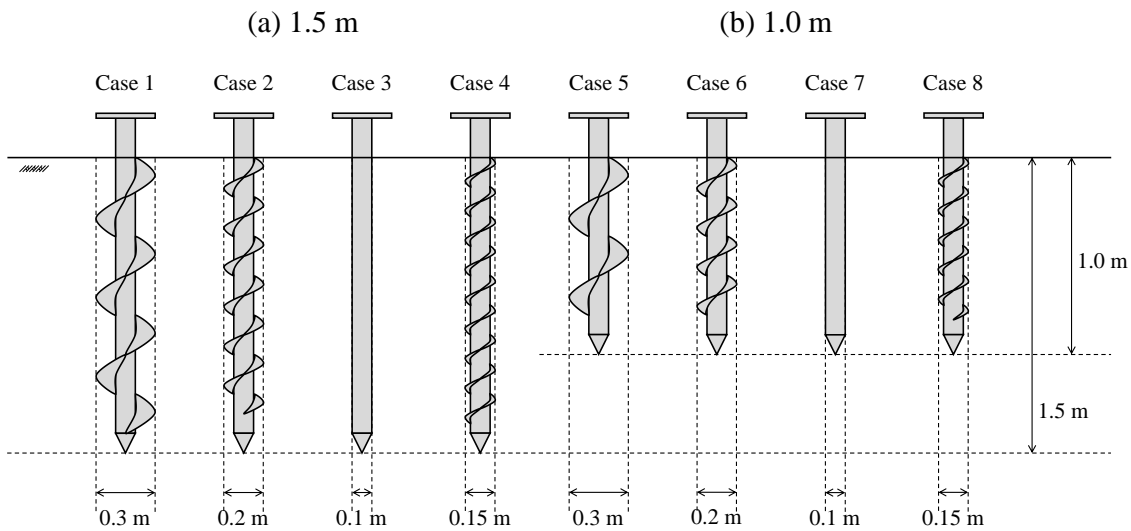


図 2-1 本研究で施工したスパイラル杭の模式図

表 2-1 は本研究の実験条件をまとめたものである。また、図-1 は施工した杭を模式的に示したものである。図中には各種の計測機器の配置についても併せて示した。杭は全て回転貫入で施工している。まず、杭には羽根のあるスパイラル杭 (Case1, 2, 4, 5, 6, 8) と羽根のないストレート杭 (Case 3, 7) の 2 種類を用いた。また、埋設深さも 1.5 m (Case 1~4) と 1.0 m (Case 5~8) の 2 種類とした。スパイラル杭の羽根の幅は 0.100 m (Case1, 5)、0.050 m (Case 2, 6)、0.025 m (Case 4, 8) の 3 種類とした。なお、羽根の数は羽根の幅が小さくなるほど、多くなっている。

計測機器については、温度計測ロッドと土壌水分センサーを埋設した。温度計測ロッドは杭周辺地盤の凍結深さを、土壌水分センサーは杭周辺の水分状況を把握することを目的として埋設している。土中温度並びに土壌水分は毎時自動計測した。各ケースの凍上量については、定期的 (概ね 1 から 2 週間に 1 度) に水準測量を行うことで観察している。なお、杭周辺では計測期間中常に除雪を行った。

## 2.2 杭の引抜試験

写真 2-1 は本研究で実施した引抜試験の様子である。引抜試験はバックホーを用いて実施した。まず、アームに吊り下げた引張型ロードセルと、杭上部の接続用治具とをワイヤーで連結する。次に、杭上部に変位計を設置し、その後ゆっくりとのアームを上昇させることで、杭を鉛直に引き抜いた。

以上の引抜試験を施工直後の 2022 年 11 月 18 日、凍結融解直後の 2023 年 4 月 24 日、夏期の 2023 年 9 月 1 日の合計 3 回行った。また、引抜試験の前後には地盤性状を把握する目的で、簡易動的コーン貫入試験と密度試験を行った。

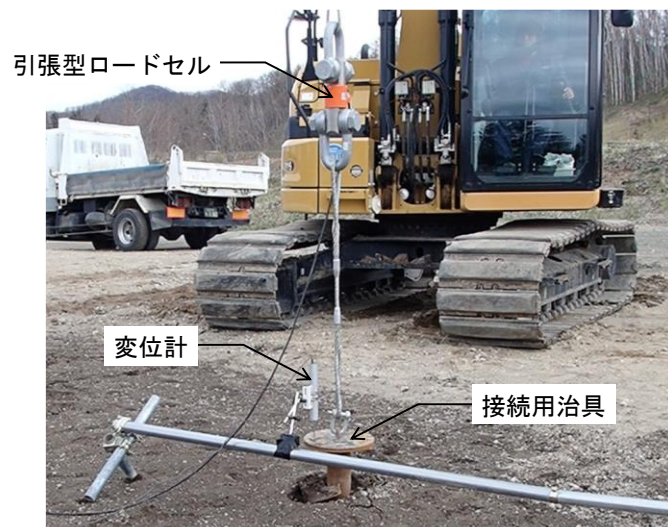


写真 2-1 引抜試験の様子

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 杭の凍上・融解沈下挙動

図 3-1 は杭周辺の凍結深さ、体積含水率、杭の鉛直変位量の経時変化を表したものである。

まず、凍結期における杭の鉛直変位量に着目すると、羽根の幅が同じものでは、埋設深さが大きいものの方が、凍上量が小さいことが確認できる。この傾向は、羽根の幅が大きいものほど顕著であった。次に、融解期における杭の鉛直変位量に着目すると、概ね全ての杭が沈下して元の位置に戻っているにもかかわらず、埋設深さが 1.5 m の羽根のないストレート杭 (Case 3) では沈下が発生せず、凍上による変位がそのまま残留していることが確認できる。このことから、埋設深さを大きくした場合、スパイラル杭の羽根は、土圧が作用することで融解期の沈下を助ける役割を果たしているものと推測される。

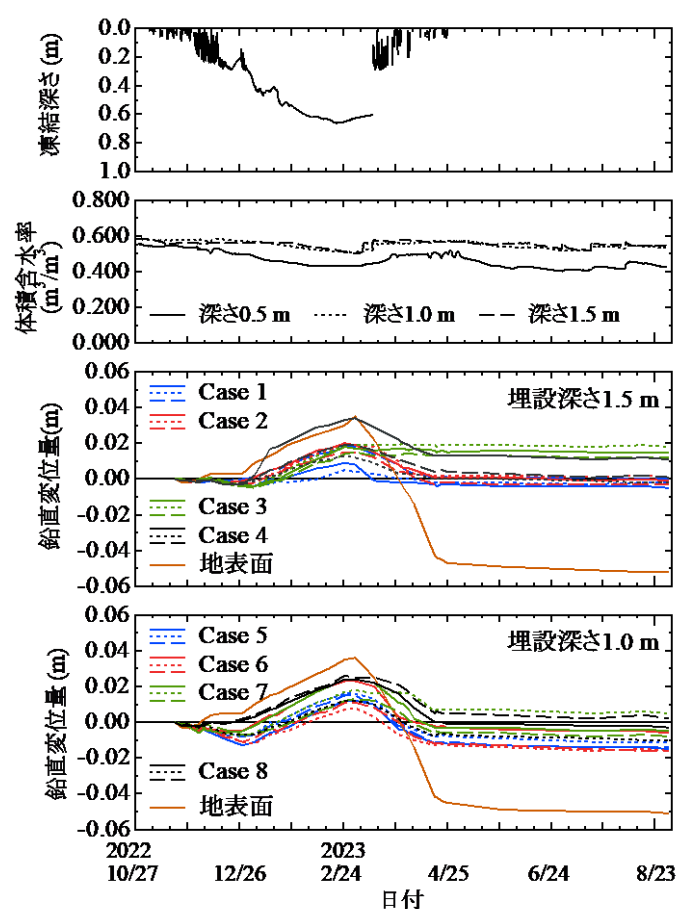


図 3-1 杭周辺の凍結深さ、体積含水率、杭の鉛直変位量の経時変化

### 3.2 杭の引抜抵抗

図 3-2 は凍結融解前後における杭の引抜試験結果を表したものである。未凍結時における引抜試験では全てのスパイラル杭において、土の破壊が生じる前に杭の回転が発生して引き抜けた。これに対し、凍結融解直後と夏期では全ての杭で回転は発生しなかった。

まず、未凍結の施工直後と凍結融解直後で比較すると、実験結果にばらつきがあるものの、概ね凍結融解後には荷重が減少しており、引抜抵抗が低下していることが窺える。ただし、羽根の幅が 0.050m で埋設深さ 1.5m のスパイラル杭 (Case 2) では荷重の減少が小さく見受けられる。このことから、ある程度羽根の幅があり、凍結深さ以上の羽根の数が多いスパイラル杭では、凍結融解履歴の影響が小さいものと考えられる。

次に、凍結融解直後と夏期とで比較すると、夏期には荷重が増大しており、引抜抵抗が増大していることがわかる。

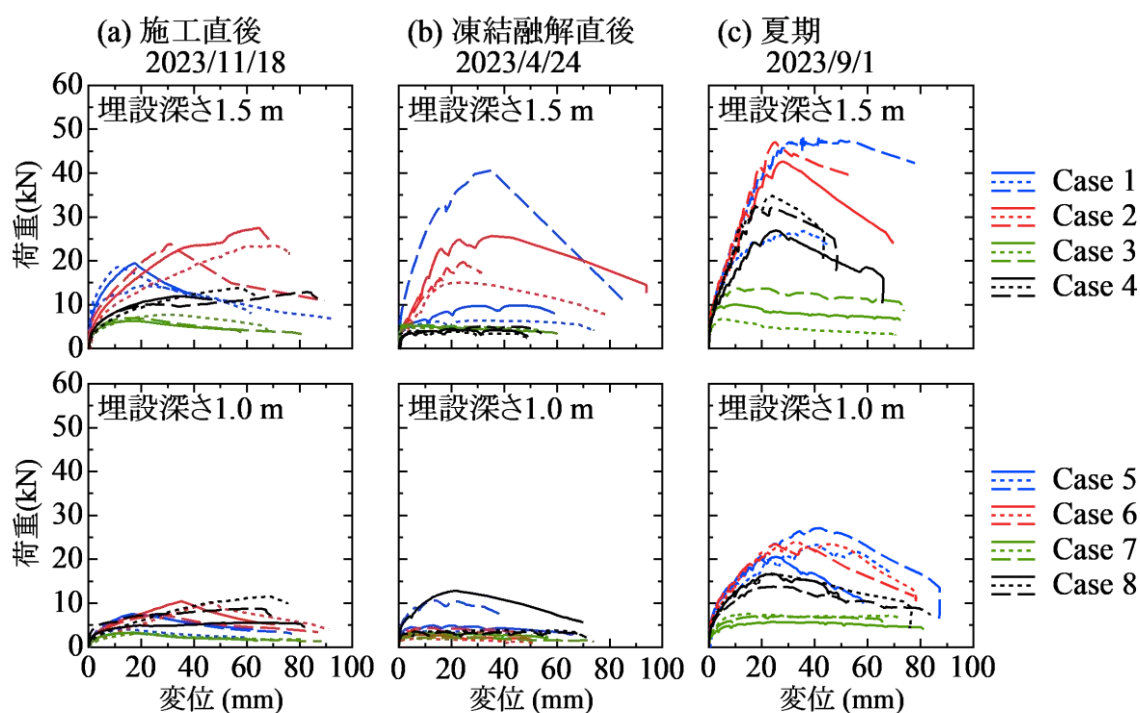


図 3-2 引抜試験結果

### 3.3 簡易動的コーン貫入試験結果による地盤性状の調査

図 3-3 に簡易動的コーン貫入試験結果を、表 3-1 に密度試験結果を示す。まず、施工直後では深さ 1.5m 程度まで  $N_d$  値は 10 以下であり、締固め度  $D_c$  も 90% と小さく、地盤の強度が低いことがわかる。次に、凍結融解直後では深さ 0.7m まで  $N_d$  値は 10 以下であるものの、それ以深では概ね 10 程度であることがわかる。 $N_d$  値が 10 以下となった深度は概ね最大凍結深さと一致しており、凍結融解直後に引抜抵抗が低下した原因は地盤表層の強度が低下していたためと考えられる。最後に、夏期では全ての深度において  $N_d$  値が概ね 10 を超え、 $D_c$  も 96% であったことから、融解後に地盤が締固まり、強度が増加したものと考えられる。

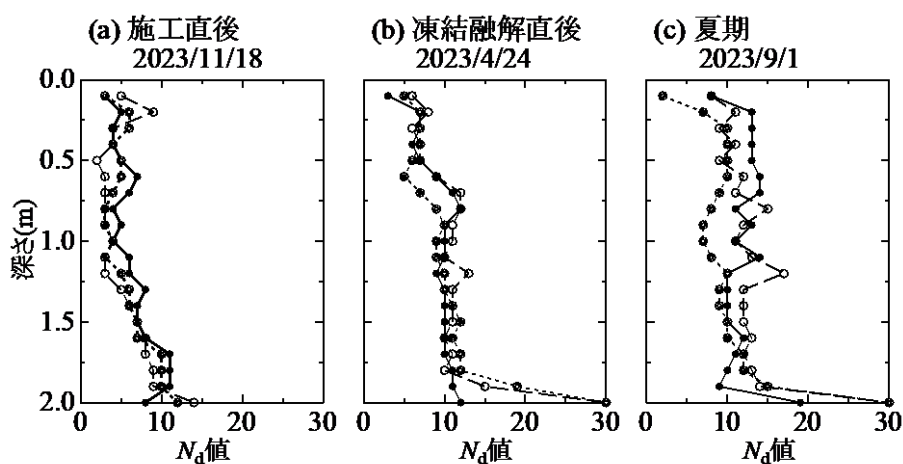


図 3-3 簡易動的コーン貫入試験結果

表 3-1 密度試験結果

凍結前 (2022 年 11 月 8 日採取)

凍結融解後 (2023 年 11 月 6 日採取)

採取深さ (m)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 (%)	締固め度 $D_c$ (%)
0.5	1.67	1.22	37.3	90
1.0	1.67	1.22	37.3	89
1.5	1.69	1.23	37.2	90
平均値	1.68	1.22	37.3	

採取深さ (m)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 (%)	締固め度 $D_c$ (%)
0.2	1.74	1.31	32.6	96
0.3	1.72	1.32	30.4	96
平均値	1.73	1.32	31.5	96



#### 4. まとめ

本研究では、太陽光発電設備の建設に用いられる杭の凍上挙動を把握するとともに、杭の引抜抵抗に与える凍結融解履歴の影響を明らかにすることに取り組んだ。

実験結果から、杭の引抜抵抗は施工直後に小さく、凍結融解履歴を受けた春期にはさらに低下していることが明らかとなった。このことから、施工直後や凍結融解直後の春期には、強風による太陽光施設の倒壊リスクが高いものと推察される。

#### 参考文献

- 1) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説 JGS 0172-2009 凍上性判定のための土の凍上試験方法, pp.230-234, 2009.

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。