

傾斜地設置型/営農型/水上設置型

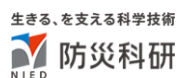
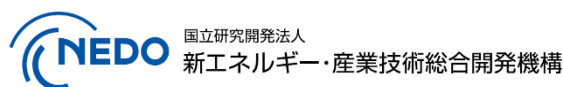
太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2025 年版

技術資料：

凍結融解履歴が杭の水平抵抗に与える影響

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。

2025 年 4 月 11 日



更新・修正履歴

・ 2025/04/11 公開：2025 年版

凍結融解履歴が杭の水平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等において太陽光発電設備が積極的に建設されているが、凍上現象による被害が散見されるようになってきた¹⁾。また、太陽光発電設備において冬期に凍上現象が発生し、杭の支持力や引抜抵抗、水平抵抗が失われた状態で夏期を迎えた場合、豪雨や突風で太陽光発電設備が倒壊する等の甚大な被害が発生することが懸念される。

そこで本研究では、実物大の杭を施工し、その凍上・融解沈下挙動を観察しつつ、未凍結の秋季と凍結融解後の春季に引倒し試験を2回実施して、凍結融解履歴が杭の水平抵抗に与える影響を明らかにすることを試みた。ここではスパイラル杭に着目し、羽根の有無、羽根の幅と数を変化させて、全4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

杭の実物大モデルは、凍上性の高い砂質土（地盤工学会基準の凍上試験¹⁾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	1.0	0.100	2.0	19
2	スパイラル杭	1.0	0.050	4.0	18
3	ストレート杭	1.0	0.000	0.0	16
4	スパイラル杭	1.0	0.025	5.5	17

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 2-1 は施工した杭を模式的に示したものである。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）と羽根のないストレート杭（Case 3）の2種類を用いた。埋設深さは全て 1.0 m とした。スパイラル杭の羽根の幅は 0.100 m（Case1）、0.050 m（Case 2）、0.025 m（Case 4）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。

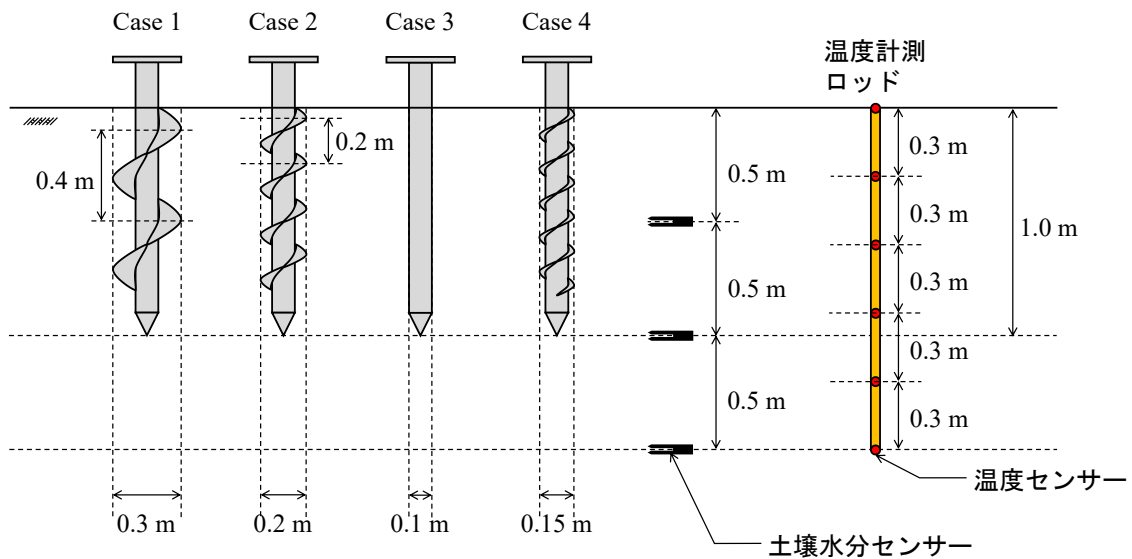


図 2-1 本研究で施工したスパイラル杭の模式図

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。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 杭の引倒し試験

写真 2-1 は本研究で実施した引倒し試験の様子である。引倒し試験はバックホーを用いて実施した。まず、アームに取り付け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、杭上部にメジャーを設置し、その後ゆっくりとアームを引くことで、杭を水平に引き倒した。



写真 2-1 引倒し試験の様子

以上の引倒し試験を施工直後の2023年11月4日、凍結融解直後の2024年4月24日の合計2回行った。また、引倒し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を行った。

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。2023年度の冬期における最大凍結深さは0.45mであった。

まず、凍結期における杭の鉛直変位量に着目すると、杭の鉛直変位量から、Case 1以外の3種類の杭（Case 2, 3, 4）では凍上による持ち上がりが生じたことがわかる。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、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。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。

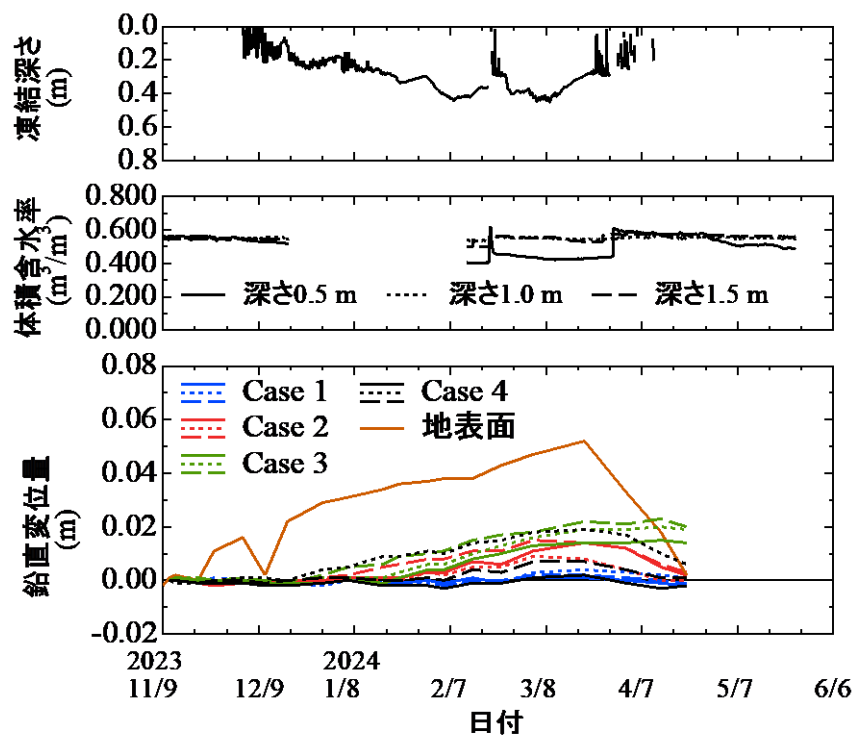


図3-1 杭周辺の凍結深さ、体積含水率、杭の鉛直変位量の経時変化

3.2 簡易動的コーン貫入試験結果による地盤性状の調査

図 3-2 に簡易動的コーン貫入試験結果を示す。簡易動的コーン貫入試験は試験結果にばらつきが見られたため、未凍結、凍結融解後ともに 3 回ずつ実施した。

まず、未凍結の施工直後では、深さ 0.1 m の N_d 値が 5 を超えているものがあることが確認できる。また、深さ 1.5 m 程度までの N_d 値は概ね 10 を超えていることがわかる。次に、凍結融解後では深さ 0.1 m の N_d 値が 5 を下回っていることが確認できる。また、深さ 1.5 m までの N_d 値については深さ 0.4 m まで 10 を下回っているものがあることがわかる。 N_d 値が 10 以下となった深さ 0.4 m は概ね最大凍結深さ (0.45 m) と一致しており、凍結融解直後に地盤表層の強度が低下したことが窺える。

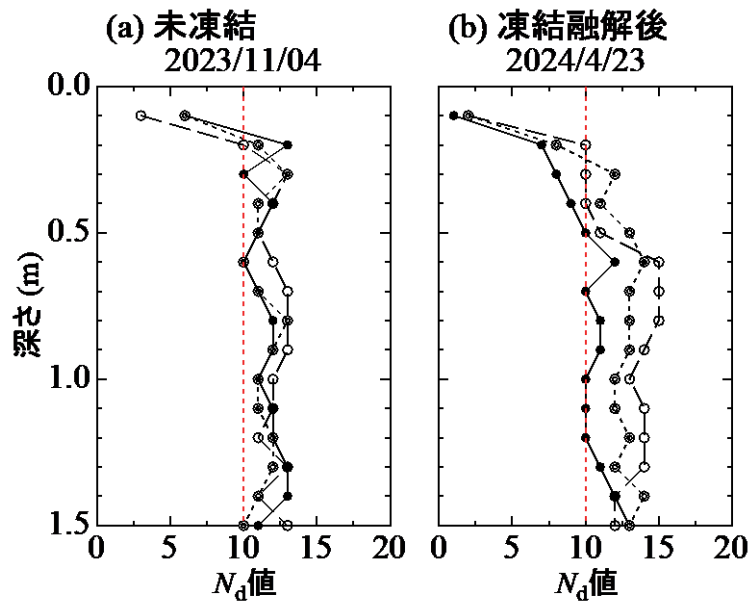


図 3-2 簡易動的コーン貫入試験結果

3.3 杭の水平抵抗

図 3-3 は凍結融解前後における杭の引倒し試験結果を表したものである。図から、実験結果にばらつきが認められるものの、全ての種類の杭において、凍結融解後に最大荷重が未凍結に比べて小さいものがあり、水平抵抗の低下が窺える。この傾向は冬期の凍上変位が大きいものほど顕著であった。特に、Case 3 の羽根のないストレート杭や Case 2 の羽根の小さいスパイラル杭では、水平抵抗が明らかに低下していることが確認できる。一方で、羽根が大きい Case 1 のスパイラル杭では冬期の凍上変位が小さいためか、水平抵抗の低下が極めて小さく見受けられる。

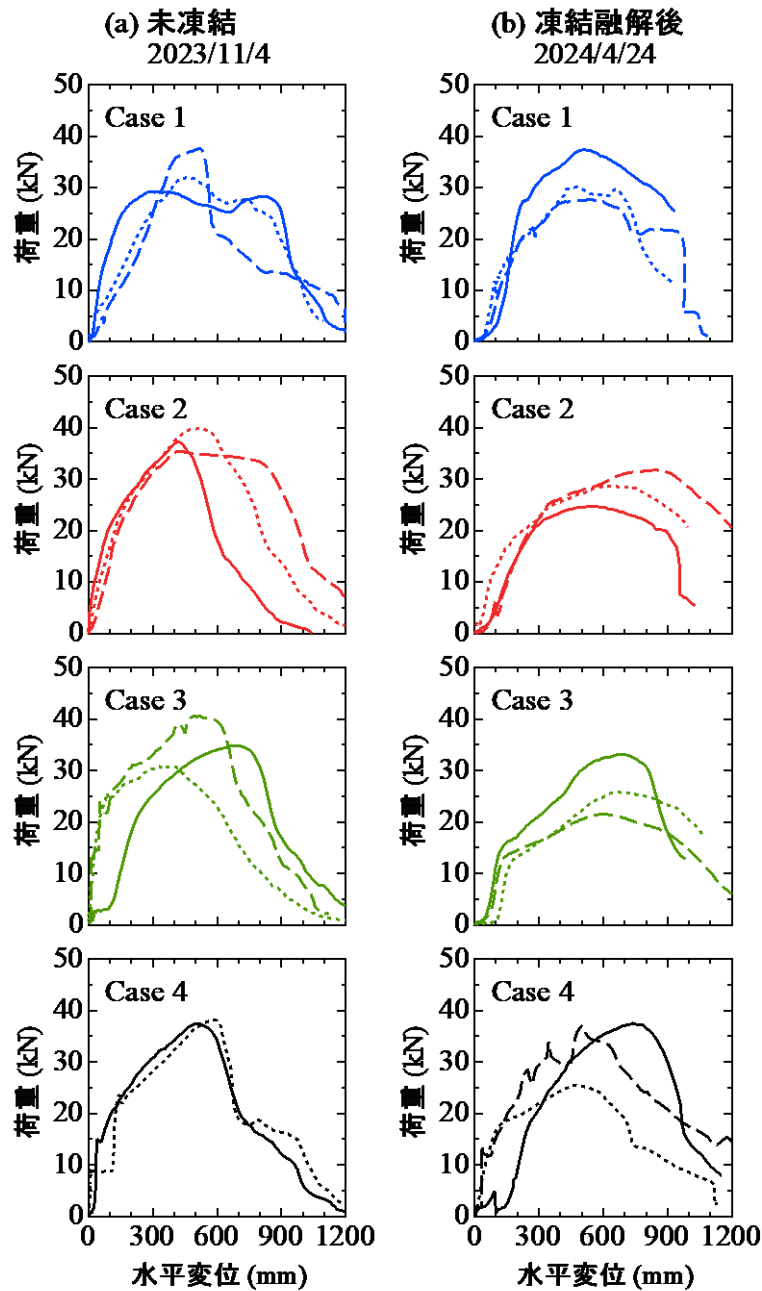


図 3-3 引倒し試験結果

図 3-4 は図 3-3 の引倒し試験結果のうち、水平変位 300 mm までのものを示したものである。凍結融解後は全ての種類の杭において、水平変位 100 mm 程度までに計測された荷重が、未凍結時のそれに比べて、明らかに小さいことが確認できる。このことから、地盤が凍結融解することによって、特に小変形領域において、杭の水平抵抗が大きく低下することが明らかとなった。これは、凍結融解によって地盤表層の強度の低下したためと推察される。

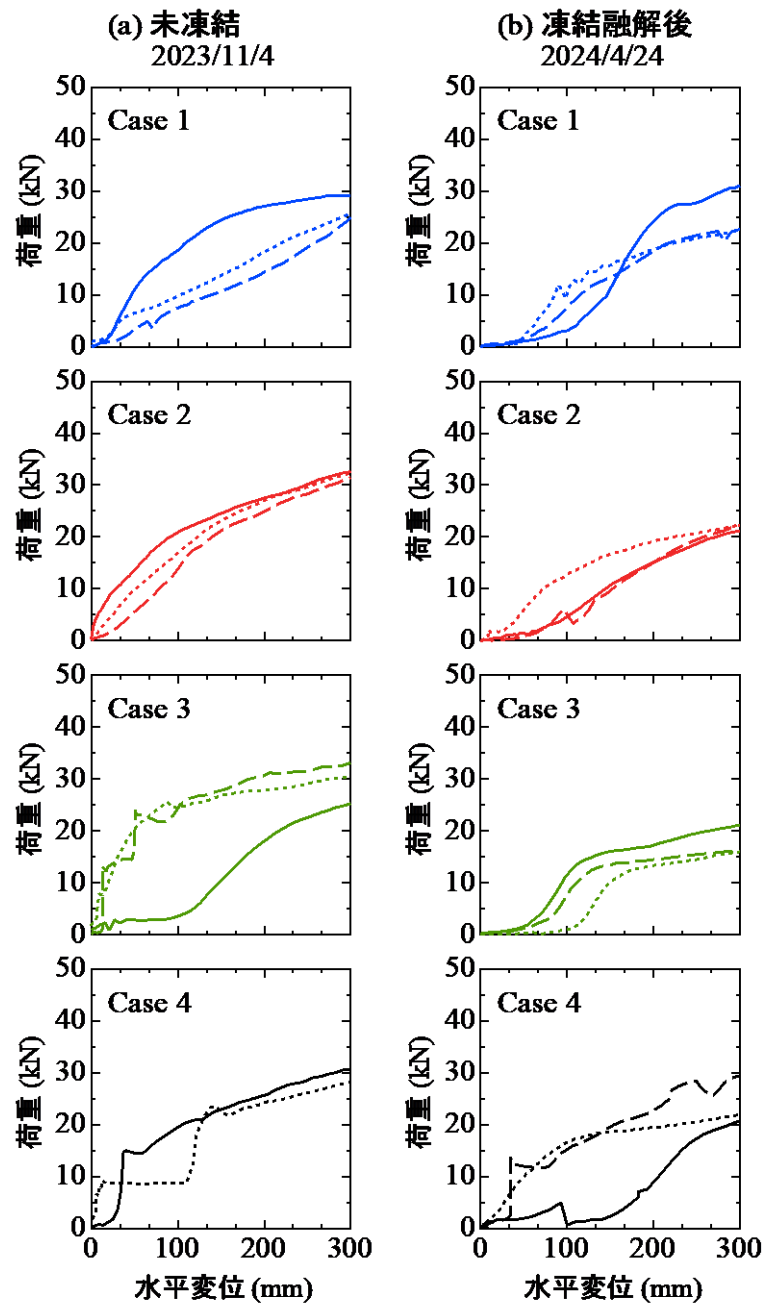


図 3-4 水平変位 300 mm までの引倒し試験結果

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、杭の水平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、杭の水平抵抗は凍結融解履歴を受けた春期に低下していることが明らかとなった。このことから、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) 本田佳広, 中村 大: ソーラーパネル架台の凍上被害発生メカニズムの解明, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.78, 2021.
- 2) 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。