

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

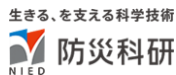
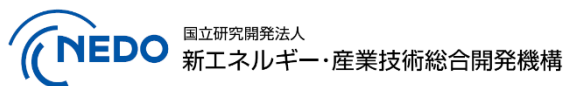
技術資料：

太陽光発電設備に用いられる杭および基礎の

凍上融解挙動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



太陽光発電設備に用いられる杭および基礎の凍上融解挙動の解明に関する研究

1. 研究背景

近年、北海道においても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。しかしながら、2019年に公開された「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」には、十分な凍上対策が盛り込まれていない。特に、ガイドラインで示された基礎の埋設深さでは凍上が発生してしまう可能性が高く、杭については具体的な凍上対策が明示されていなかった。以上を背景として、2021年から、太陽光発電設備の建設に使用されている杭と基礎の凍上挙動を明らかにすることに取り組んでいる。

本研究では、太陽光発電設備の建設に使用されている独立基礎と各種の杭について実物大模型実験を行い、その凍上挙動を明らかにすることに取り組んだ。本資料では、独立基礎と各種の杭の2022年冬期の凍上挙動について詳述する。

2. 実験概要

杭と基礎の実物大模型は、凍上性の高い砂質土（地盤工学会基準の凍上試験²⁾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	杭および基礎の種類	埋設深さ (m)	フーチング幅 (m)	質量 (kg)
1	スパイラル杭	2.0	-	29
2	スパイラル杭	1.5	-	23
3	スパイラル杭	0.7	-	14
4	H形鋼杭	2.0	-	35
5	H形鋼杭	0.7	-	14
6	独立基礎	0.7	0.25	380
7	独立基礎	1.2	0.25	570
8	独立基礎	1.2	0.10	460
9	独立基礎	1.2	0.00	300

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 は施工したスパイラル杭と H 形鋼杭、独立基礎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。実験は全 9 ケース実施している。まず、2 種類の杭と独立基礎には、北見市で想定される最大凍結深さ（ここでは 0.7 m に設定）と埋設深さを揃えたケース（スパイラル杭の Case 3、H 型鋼杭の Case 5、独立基礎の Case 6）と、最大凍結深さよりも深いケース（スパイラル杭の Case 1, 2、H 型鋼杭の Case 4、独立基礎の Case 7, 8, 9）がある。次に、独立基礎にはフーチングを設けたケース（Case 6, 7, 8）と、フーチングを設けないケ

ース (Case 9) がある。さらに、独立基礎にはフーチング幅が広いケース (Case 6, 7) とフーチング幅が狭いケース (Case 8) がある。本研究では埋設深さ 2.0 m のスパイラル杭 (Case 1) と全ての独立基礎 (Case 6~9) は地盤を開削した後に、埋め戻しで施工を行っている。なお、埋設深さ 0.7 m と 1.5 m のスパイラル杭 (Case 2, 3) は回転貫入で、埋設深さ 0.7 m と 2.0 m の H 形鋼杭 (Case 4, 5) は打設で施工した。

各種の計測機器のうち、温度計測ロッドは独立基礎および杭周辺の凍結深さを、土圧計は独立基礎のフーチング上面やスパイラル杭の羽根にかかる土圧を計測することを目的として埋設している。土中温度、土圧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、実物大模型周辺では計測期間中常に除雪を行った。

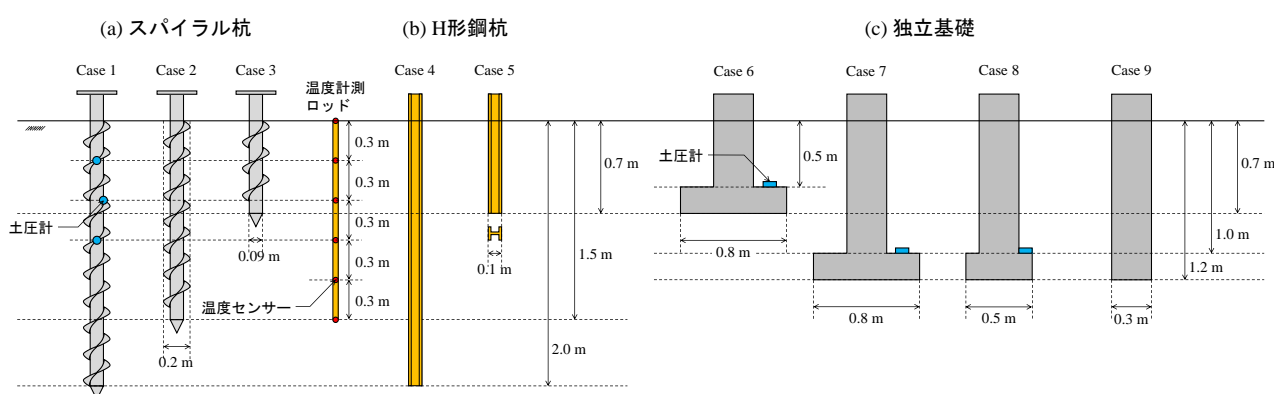


図 2-1 本研究で施工したスパイラル杭と H 形鋼杭、独立基礎の模式図

3. 実験結果および考察

3.1 杭と基礎の凍上・融解沈下挙動

図 3-1 はスパイラル杭と H 形鋼杭 (図 3-1(a))、独立基礎 (図 3-1(b)) の凍結深さ、鉛直変位量の経時変化を表している。

まず、杭 (図 3-1(a)) の凍上挙動に着目すると、H 形鋼杭、スパイラル杭ともに埋設深さが浅い杭 (Case 3, 5) で、凍上量が大きいことが確認できる。また、埋設深さが深い杭では、スパイラル杭 (Case 1, 2) と H 形鋼杭 (Case 4) とともに凍上量は小さかった。融解挙動に着目すると、スパイラル杭は羽根に土圧を受けるため、H 形鋼杭に比べて短時間での沈下量が大きかった。

次に、独立基礎 (図 3-1(b)) の凍上挙動に着目すると、フーチングが無いもの (Case 9) から凍上し始め、フーチング幅が小さいもの (Case 8)、幅が大きいもの (Case 7) の順に、遅れて凍上し始めていることが確認できる。また、フーチング幅が大きいものでも、凍結深さが地盤内に進行するに従って、埋設深さが浅いもの (Case 6) から先に凍上し始めていることがわかる。融解挙動に着目すると、質量が大きいこともあり、杭に比べて速やかに元に位置に戻っていた。ただし、フーチングの無いもの (Case 9) については、融解後も元の位置に戻らず、凍上による変位が残留した。

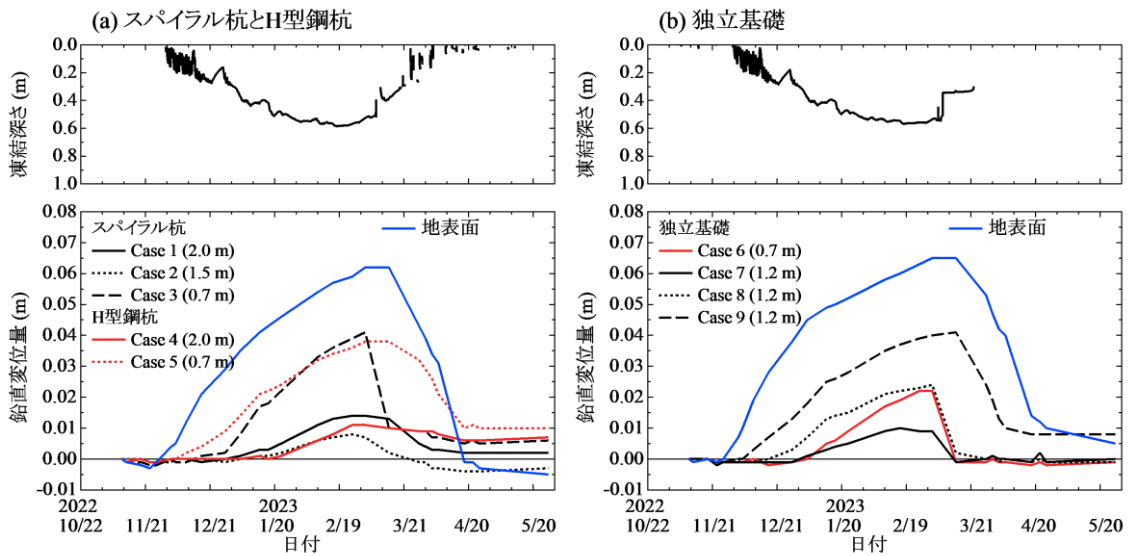


図 3-1 スパイラル杭と H 形鋼杭、独立基礎の凍結深さ、鉛直変位量、土圧の経時変化

3.2 スパイラル杭の羽根と独立基礎のフーチングに作用する土圧の変化

図 3-2 はスパイラル杭の羽根（図 3-2(a)）と、独立基礎のフーチング（図 3-1(b)）に作用する土圧とその温度の経時変化を表している。

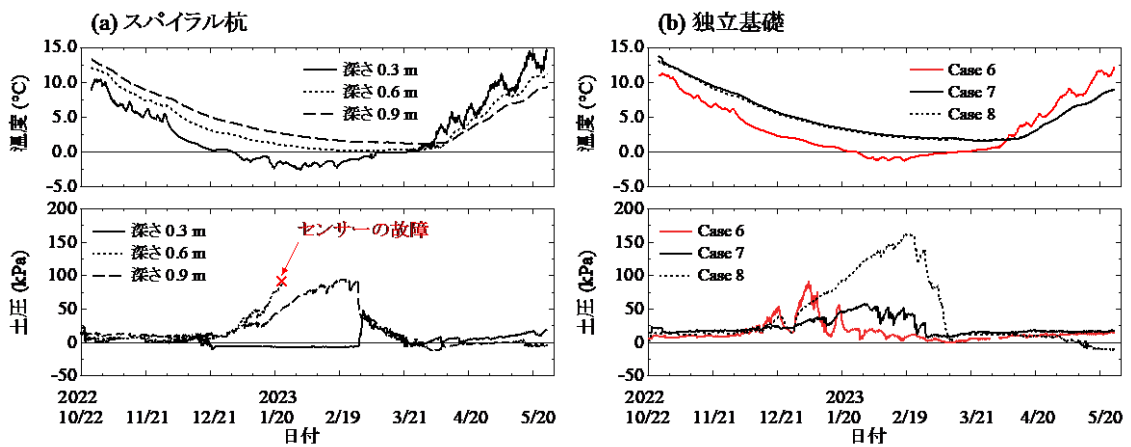


図 3-2 スパイラル杭の羽根と独立基礎のフーチングに作用する土圧とその温度の経時変化

埋設深さ 2.0 m のスパイラル杭（Case 1）の羽根に設置した土圧計に着目すると、深さ 0.3 m では温度が 0 °C に到達した時点で値がマイナスとなっている。一方、深さ 0.6 m、0.9 m の土圧計では凍結深さが大きくなるに従って土圧が上昇し続けていることが確認できる。また、深さ 0.6 m の土圧計は 0.9 m に比べて大きな値となっているが、これは杭の凍上による変位に伴って羽根に土圧が作用したことに加え、羽根に凍上圧が作用したためと考えられる。なお、深さ 0.6 m の土圧計は故障のため、1 月下旬から計測不能となっている。

フーチング上面に設置した土圧計に着目すると、埋設深 1.2 m の基礎で比較した場合、フーチング幅が小さいもの (Case 8) で凍上変位が大きいこともあり、土圧も大きくなっていることがわかる。また、フーチング幅が大きい基礎では埋設深さが浅いもの (Case 6) で土圧が大きく上昇しているが、凍結深さがフーチング上面 (0.5 m) に達した時点で、土圧が大きく減少していることも確認できる。

3.3 杭の埋設深さと独立基礎のフーチング幅が凍上量と残留変位量に与える影響

図 3-3 に 2 種類の杭の埋設深さと凍上量および残留変位量の関係を示す。図から、杭の種類にかかわらず、埋設深さが増大するに従って、凍上量、残留変位量はともに減少していることがわかる。また、スパイラル杭、H 型鋼杭ともに、埋設深さが最大凍結深さ (図 3-1 から、2022 年冬期は約 0.6 m) の 2 倍以上になると、凍上量が極めて小さく抑えられていることが確認できる。さらに、スパイラル杭については融解時において羽根に土圧が作用するため、残留変位量も小さい。

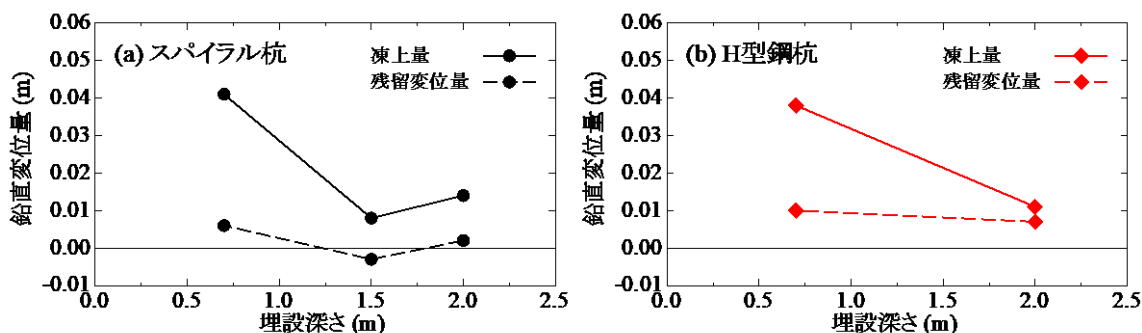


図 3-3 2 種類の杭の埋設深さと凍上量および残留変位量の関係

図 3-4 に独立基礎のフーチング幅と凍上量および残留変位量の関係を示す。図から、独立基礎のフーチング幅が大きくなるに従って、凍上量、残留変位量はともに減少していることがわかる。

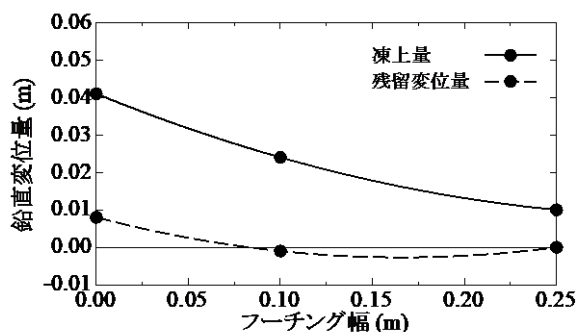


図 3-4 独立基礎のフーチング幅と凍上量および残留変位量の関係

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や基礎の実大模型実験を実施し、凍上・融解挙動を明らかにすることに取り組んだ。

実験結果から、2種類の杭（スパイラル杭とH形鋼杭）と独立基礎の凍上挙動を観察することができた。また、杭、独立基礎ともに埋設深さを深くすることで、独立基礎についてはフーチング幅を大きくすることで、凍上量を低減できることが明らかとなった。さらに、フーチングが無い独立基礎では大きな凍上量が発生することや、フーチング幅の小さい独立基礎では凍上量を低減する効果が小さいことも確認できた。

今後は、本研究で得られた知見を活かし、経済的かつ効果的な杭や基礎の凍上対策の設計手法について検討していきたい。

参考文献

- 1) 太陽光発電システムの安全設計に関する検討委員会：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) 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。