

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

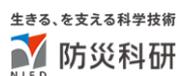
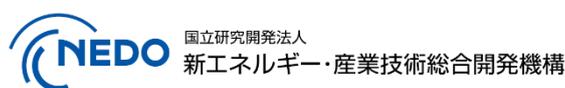
技術資料：

凍結融解履歴が杭の引抜抵抗に与える影響に関する

室内模型実験による検証

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引抜抵抗に与える影響に関する室内模型実験による検証

## 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り。また、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る。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、太陽光発電施設の建設に用いられる各種の杭の小型模型を作製し、室内において引抜試験を実施した。ここではまず、未凍結状態における地盤材料の含水状態の変化が杭の引抜抵抗に与える影響を解明することに取り組んだ。さらに、凍結融解を与えた状態で引抜試験を行い、凍結融解履歴が杭の引抜抵抗に与える影響を明らかにすることを試みた。

## 2. 実験概要

### 2.1 土試料の物理的性質

図 2-1 は本研究に用いた土試料の粒径加積曲線である。土試料は北海道網走郡美幌町の土取場で採取されたものであり、粗粒分・細粒分含有量および地質的背景から、砂質土に工学的に分類した。本研究にはこの土試料のうち、2 mm ふるい通過分を使用した。

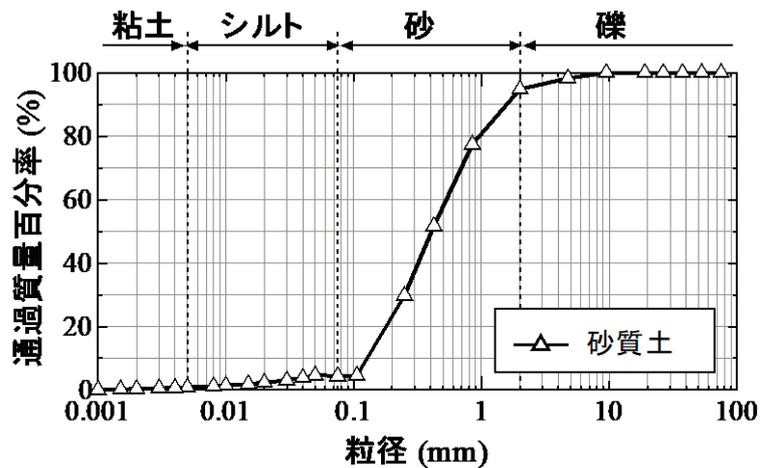


図 2-1 粒径加積曲線

図 2-2 は締固め試験から得られた締固め曲線である。最適含水比は  $w_{opt}=31.0\%$ 、最大乾燥密度は  $\rho_{dmax}=1.33 \text{ g/cm}^3$  であった。また、土粒子の密度は  $\rho_s=2.51 \text{ g/cm}^3$  であり、これを用いてゼロ空気間隙曲線を求めた。

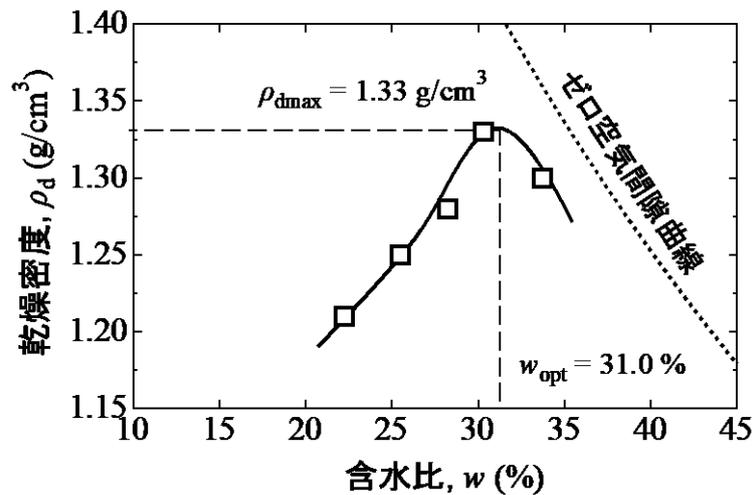


図 2-2 締固め曲線

図 2-3 は凍上試験結果である。試験から得られた凍上速度は  $0.379 \text{ mm/hour}$  であり、地盤工学会基準<sup>2)</sup>に基づいて凍上性判定を行うと「凍上性が高い」と判定される。なお、本研究では試験方法として「土の粒度試験 (JGS 0131-2009)」、「土粒子の密度試験 (JGS 0111-2009)」、「突固めによる土の締固め試験 (JGS 0711-2009)」の A-a 法、「凍上性判定のための土の凍上試験方法 (JGS 0172-2009)」を採用した。

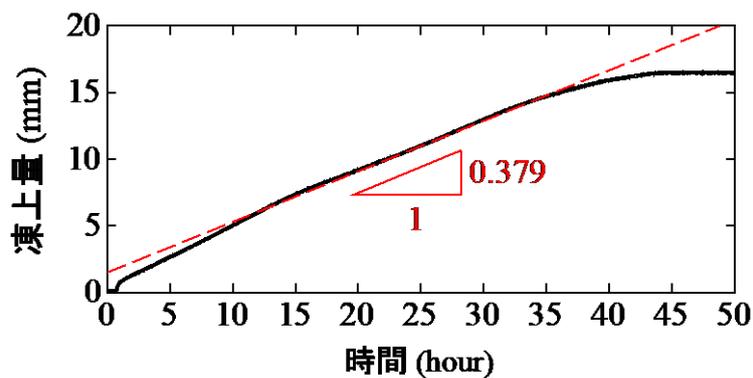


図 2-3 凍上試験結果

## 2.2 土供試体の作製と杭の設置

4種類の含水比 ( $w \doteq 31\%$ 、 $34\%$ 、 $36\%$ 、 $40\%$ ) に調整した砂質土を後述するアクリル容器に投入し、1層 40 mm、合計 5 層で、高さ 200 mm になるまで動的に締固めて土供試体を作製した。なお、締固め度  $D_c$  は 80% であり、土供試体の乾燥密度  $\rho_d$  は  $1.06 \text{ g/cm}^3$  で一定である。

図 2-4 は使用した杭の模式図である。Case 1 のスパイラル杭は羽根の幅が約 10 mm で大きく、Case 2 のスパイラル杭は羽根の幅が約 5 mm で小さい。また、Case 3 はストレート杭で羽根は無い。これらの羽根の有無や羽根の大きさが異なる 3 種類の杭を、インパクトドライバーを用いて、土供試体の地表面から深さ 80 mm まで回転貫入させた。

アクリル容器については、引抜きによって生じる地表面の変形範囲が土の含水比によって異なったため、大きさの異なるものを 2 種類 (内径  $\phi = 255 \text{ mm} \times$  高さ  $h = 400 \text{ mm}$  と内径  $\phi = 338 \text{ mm} \times$  高さ  $h = 450 \text{ mm}$ ) 用意し、使い分けた。ここでは、 $w \doteq 31\%$ 、 $34\%$  では  $\phi = 336 \text{ mm}$  の内径の大きなものを使用しており、供試体は大きい。一方で、 $w \doteq 34\%$ 、 $36\%$ 、 $40\%$  では  $\phi = 255 \text{ mm}$  の内径の小さなものを使用しており、供試体は小さい。ストレート杭については全て含水比において  $\phi = 255 \text{ mm}$  の内径の小さなものを用いた。

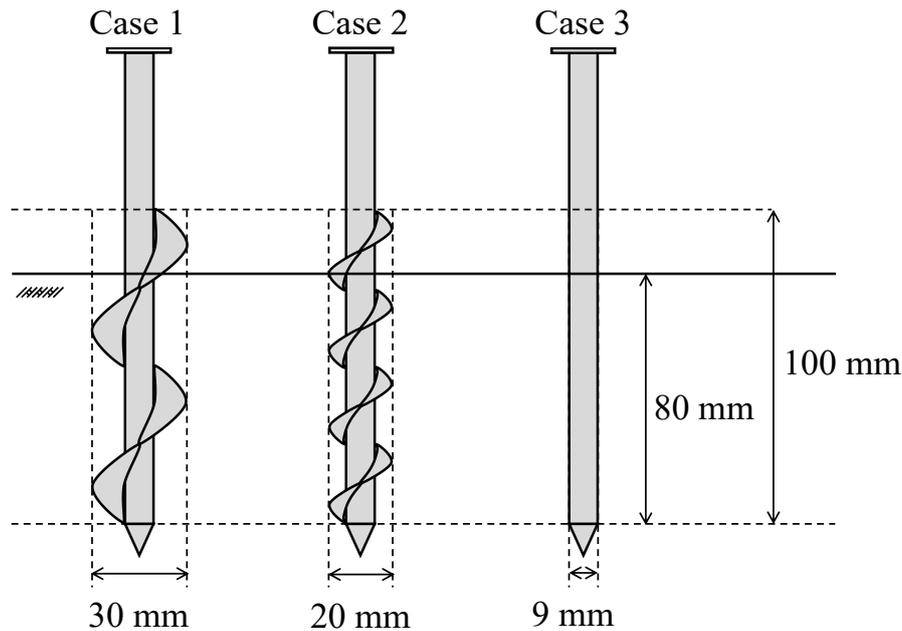


図 2-4 杭の模式図

### 2.3 引抜試験

図 2-5 は研究に用いた引抜試験装置である。引抜試験はメガトルク式中型三軸試験装置を流用して行った。杭を 3 mm/min の速度で 12 mm 引抜いた。なお、引抜試験時の荷重と鉛直変位は、杭の上方に設置した荷重計と変位計で 0.2 秒毎に計測している。

引抜試験後には写真測量 (SfM) を行って、土供試体表面の変形を観察した。ここでは、SfM ソフトウェア (Agisoft 社の Metashape) で 3 次元モデルの作成、DEM (数値標高モデル) の構築、点群データファイルの出力を行った。また、点群データファイルを地図作成ソフトウェア (Golden Software 社の Surfer12) に読み込み、断面図を作成した。なお、3 次元モデルの作成方法等については、鍛冶元ら<sup>3)</sup>の「3 次元モデルの作成」に倣い、これと同様とした。

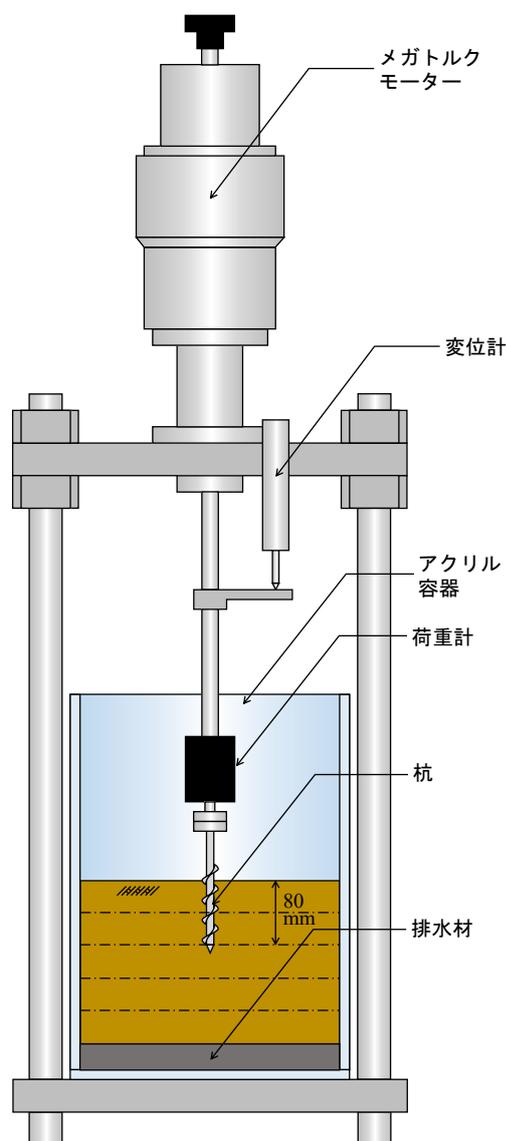


図 2-5 引抜試験装置の模式図

## 2.4 凍結融解

図 2-6 は研究に用いた凍結融解装置である。ここでは、土供試体の初期含水比は  $w \approx 34\%$  とした。また、スパイラル杭には羽根の幅が広い Case1 を用いた。容器底部には厚さ 30 mm の排水材を敷設しており、ここに給水することで凍上時における地下水の供給を再現している。実験はこの装置を  $+5^\circ\text{C}$  で制御した恒温室内に設置して行った。また、地表面からの一次元の凍結融解を再現するため、地表面には熱伝導性の高い銅製の冷却板を設置している。この冷却板の上面には地表面との密着性を高め、融解時の沈下をスムーズにすることを目的として、2 kg の重錘 2 個を載せた。

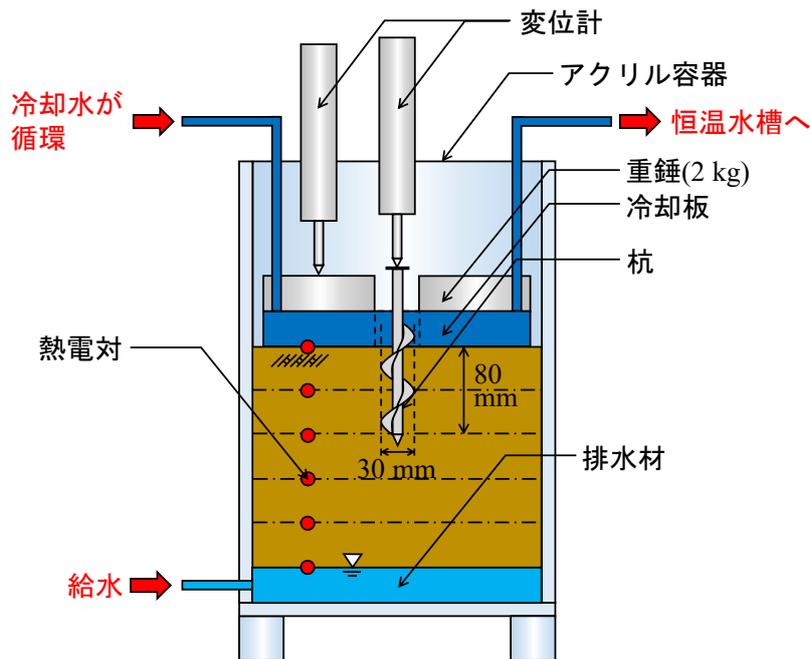


図 2-6 凍結融解装置の模式図

凍結融解は冷却板の温度を恒温水槽で制御して行った。まず、冷却板の温度を  $0^\circ\text{C}$  とし、48 時間かけて土試料全体の温度を  $0^\circ\text{C}$  付近まで下げて一定とする。次に、過冷却現象を防ぐ目的で、冷却板の温度を  $-10^\circ\text{C}$  まで急降下させ、 $-4^\circ\text{C}$  まで急上昇させるサーマルショックを与えた。その後、冷却板の温度を  $-0.15^\circ\text{C}/\text{hour}$  の冷却速度で、 $-11.5^\circ\text{C}$  までゆっくり降下させた。融解は冷却板の温度を  $+2^\circ\text{C}/\text{hour}$  で  $+25^\circ\text{C}$  まで上昇させ、土試料全体がプラスの温度になるまで行っている。上記のように冷却板の温度を制御すると、凍上が発生する位置は地表面から概ね 80 mm の深さになることを、事前の予備実験において確認した。

実験中は地表面の凍上量と杭の持ち上がり量およびそれぞれの融解沈下量を実験装置上部に設置した変位計で、土中温度を地表面から 40 mm 毎に配置した熱電対で、毎分 1 回の間隔で測定した。土中に埋設した熱電対の計測値からは、単純な比例配分で凍結深さ（凍上発生前の地表面から  $0^\circ\text{C}$  等温線までの距離）の算出も行っている。なお、以上の実験装置、方法については、中村ら<sup>4)</sup>の「実験装置と凍結融解方法」に倣い、これと同様とした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 未凍結状態における杭の引抜抵抗

図 3-1 に未凍結状態における各種の杭の引抜試験結果を示す。引抜試験は試験結果にばらつきが見られたため、2 回ずつ実施した。まず、杭の羽根の有無で比較すると、2 種類のスパイラル杭の荷重はストレート杭に比べて明らかに大きく、スパイラル杭の引抜抵抗が大きいことがわかる。これは、羽根の無いストレート杭では、引抜きに抵抗するのが杭の周面摩擦力のみであるためと考えられる。次に、スパイラル杭の羽根の大きさで比較すると、羽根の大きい Case 1 と羽根の小さい Case 2 とで、明確な違いは確認できなかった。さらに、含水比  $w$  で比較すると、いずれの杭においても荷重は  $w \doteq 34\%$  付近で最大となっており、 $w$  が増加するに従って低下していることが確認できる。これは、土供試体の  $w$  の増加に伴い、サクションが低減していくためと推察される。

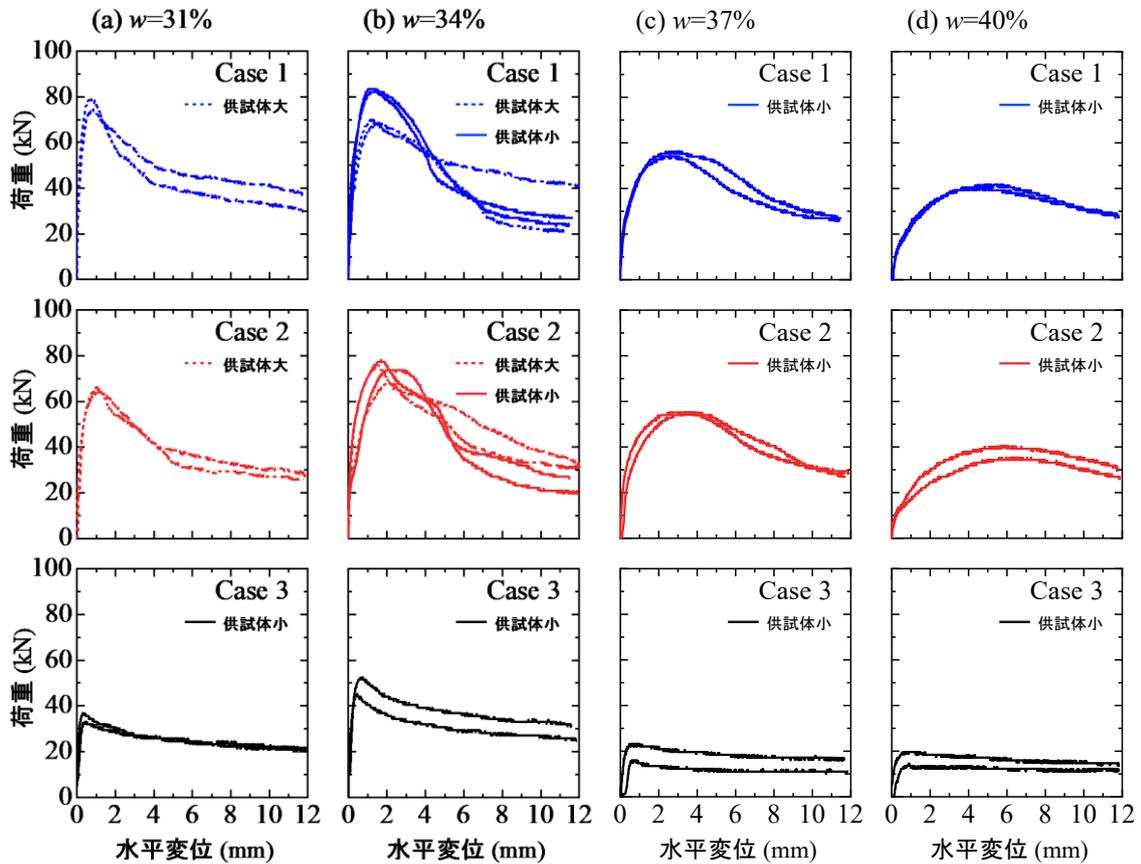


図 3-1 未凍結状態における各種の杭の引抜試験結果

### 3.2 引抜試験後における土供試体表面の変形状況

図 3-2 は引抜試験後における土供試体表面の変形状況である。ここでは、各ケースの代表例を示す。まず、杭の羽根の有無で比較すると、2 種類のスパイラル杭では土供試体表面に広範囲にわたって変形が生じているものの、ストレート杭では概ね変形が生じていないことが確認できる。このことから、スパイラル杭の引抜き時には、羽根によって杭周囲の土が杭とともに持ち上がるため、大きな引抜抵抗が生じていることがわかる。次に、含水比  $w$  で比較すると、スパイラル杭では  $w$  が増加するに従って、土供試体表面の変形範囲が狭まっていくことが確認できる。このことから、引抜き時に杭とともに持ち上がる土量は、 $w$  の増加に伴って減少するものと考えられる。

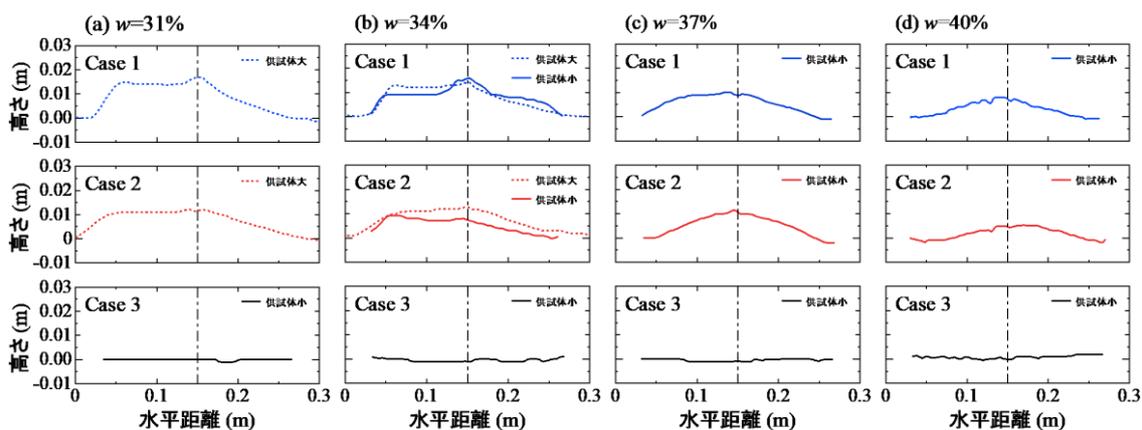


図 3-2 引抜試験後における土供試体表面の変形状況

### 3.3 杭の凍結・融解沈下挙動

図 3-3 は凍結深さ、スパイラル杭および地表面の鉛直変位量の経時変化である。凍結融解後の引抜試験は 2 回実施したが、ここでは杭の凍上変位の大きかった一例を示す。

凍結時に着目すると、地表面は凍結開始直後（実験開始から 48 時間後）から凍上し始めているのに対し、スパイラル杭はこれから 5 時間遅れて持ち上がり始めていることが確認できる。この杭の持ち上がりの遅れは、凍着凍上現象が土と杭とが凍着した後に発生するためである。なお、地表面には冷却板との間に霜柱が発生しており、計測された凍上量にはこの霜柱の厚さも含まれている。

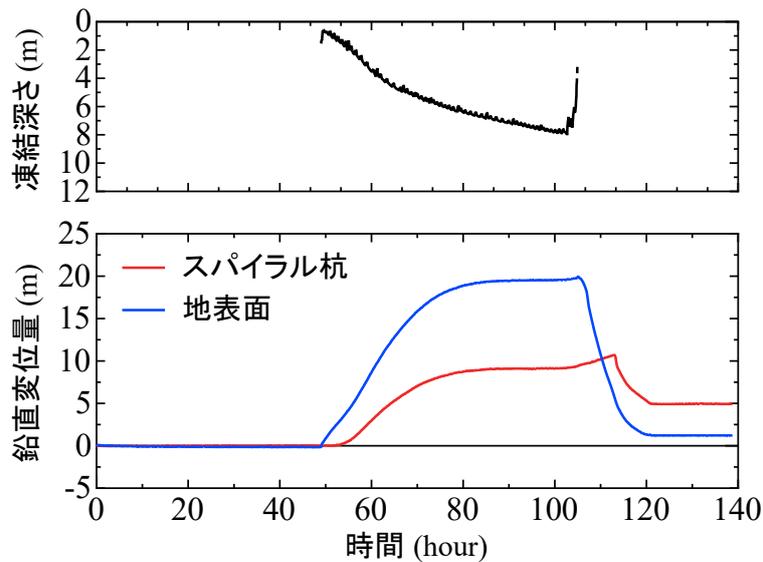


図 3-3 スパイラル杭の凍結・融解沈下挙動

融解時に着目すると、地表面は 105 時間後から融解し始めていることが確認できる。この時、地表面の凍上量はピークを迎えており、最大凍上量は 19.8 mm であった。一方、スパイラル杭は、地表面が融解して沈下し始めた後も、持ち上がり続けていることが確認できる。スパイラル杭の凍上量は 113 時間後にピークを迎えており、最大凍上量は 10.6 mm であった。その後、融解が進むと、スパイラル杭と土との凍着が切れ、地表面の沈下に追従して、杭も沈下し始めていることが確認できる。融解時に生じた杭の沈下量は 5.6 mm であった。しかしながら、実験終了時、スパイラル杭は元の位置には戻っておらず、最終的に残留した凍上変位は 5.0 mm であった。なお、地表面に残留した凍上変位は 1.2 mm であり、概ね元の位置に戻っている。

### 3.4 凍結融解を与えた状態における杭の引抜抵抗

図 3-4 に凍結融解履歴を与えた状態における羽根の幅が広い Case1 のスパイラル杭の引抜試験結果を示す。ここでは比較対象として、未凍結状態における Case1 のスパイラル杭の  $w \approx 34\%$  の引抜試験結果を示す。なお、凍結融解履歴を与えた土供試体の初期含水比は  $w \approx 34\%$  であるが、融解後には杭周囲の土の含水比が  $w \approx 45 \sim 48\%$  まで大きく上昇していた。これは、凍結時に地表面に形成された霜柱や、凍上によって土中に形成されたアイスレンズが融解したためである。

小さな供試体で比較すると、凍結融解履歴を与えた状態の荷重は未凍結状態より明らかに小さく、最大荷重はおよそ未凍結状態の 1/2 程度まで低下していることが確認できる。このことから、スパイラル杭の引抜抵抗は、凍結融解履歴を受けることで大幅に低減することが明らかとなった。なお、スパイラル杭の引抜抵抗の低減は、杭が凍結融解によって引抜けることや杭周囲の土の含水比が大幅に上昇することが一因であると考えられる。

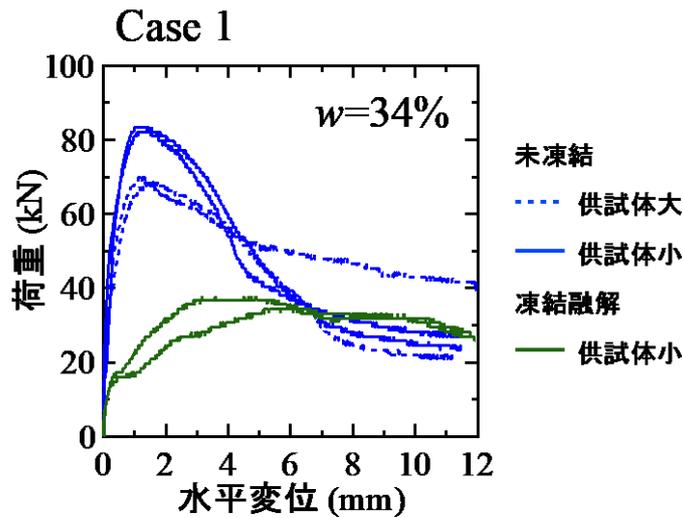


図 3-4 凍結融解履歴を与えた状態におけるスパイラル杭の引抜試験結果

図 3-5 は引抜試験後における土供試体表面の変形状況である。ここでは、各ケースの代表例を示す。また、比較対象として、未凍結状態の Case1 のスパイラル杭の  $w=34\%$  における引抜試験時に発生した土供試体表面の変形状況を示す。凍結融解履歴の有無で比較すると、凍結融解履歴を受けた状態の土供試体表面の変形範囲は、未凍結状態よりも大幅に狭まっていることが確認できる。このことから、スパイラル杭を引抜く際に持ち上がる杭周囲の土量は大きく減少していると推察される。この点も、スパイラル杭の引抜抵抗が大きく低下した一因だと考えられる。

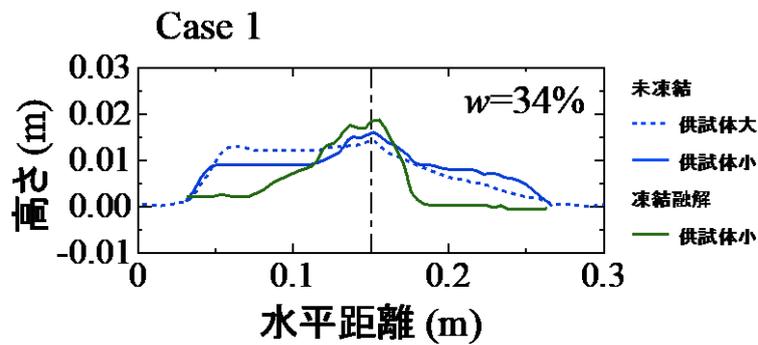


図 3-5 引抜試験後における土供試体表面の変形状況

### 3.5 引抜試験時の最大荷重と含水比の関係

図 3-6 は引抜試験時の最大荷重と含水比の関係をまとめたものである。図から、未凍結状態では、最大荷重はいずれの杭においても  $w \approx 34\%$  付近で最も大きいことが確認できる。また、凍結融解履歴を与えた状態では、スパイラル杭周囲の土の  $w$  が大幅に増加し、最大荷重が著しく低下することも確認できる。

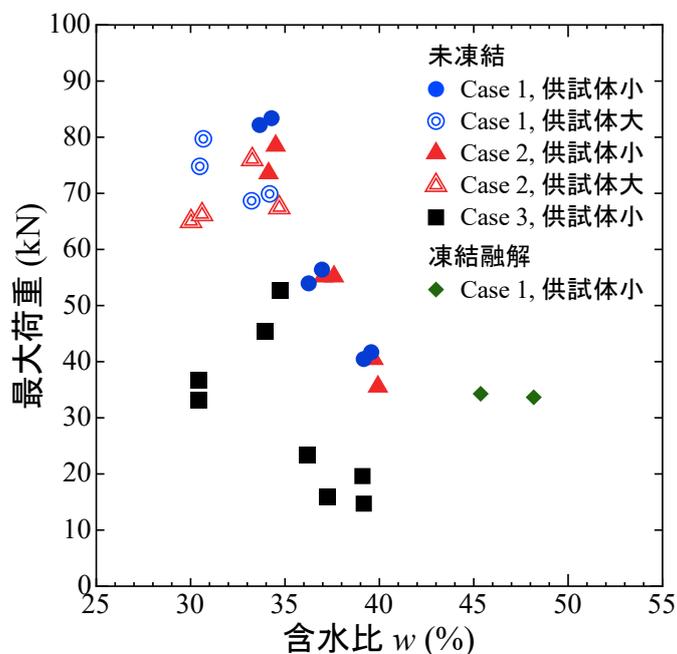


図 3-6 引抜試験時の最大荷重と含水比の関係

## 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各種の杭の小型模型を作製し、室内において引抜試験を実施した。ここでは、未凍結状態における地盤材料の含水状態の変化が杭の引抜抵抗に与える影響を解明することに取り組んだ。また、凍結融解を与えた状態で引抜試験を行い、凍結融解履歴が杭の引抜抵抗に与える影響を明らかにすることも試みた。

実験結果から、スパイラル杭の引抜抵抗はストレート杭に比べて明らかに大きいことがわかった。また、引抜抵抗はいずれの杭においても最適含水比より若干湿潤側で最も大きくなったが、含水比がこれを超えると、急激に低下する傾向が確認できた。さらに、凍結融解履歴を与えた状態では、スパイラル杭周囲の土の含水比が大幅に増加し、引抜抵抗が著しく低下することも確認できた。

以上のことから、夏期の豪雨時や春期の凍結融解直後には杭の引抜抵抗が大幅に低下し、強風による太陽光発電設備の倒壊リスクが高まっていると推察される。

## 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.
- 3) 鍛冶元雅史, 中村 大, 川口貴之, 川尻峻三, 宗岡寿美: SfM (Structure from Motion) 写真測量を活用した侵食試験方法の開発, 日本緑化工学会誌, Vol.48, pp.27-32, 2022.
- 4) 中村 大, 谷口友秀, 川口貴之, 川尻峻三, 渡邊達也: 室内模型実験を用いた構造物の凍着凍上挙動に関する基礎的研究, 日本雪工学会誌, Vol.37, No.3, pp.59-69, 2021.

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。