

太陽光発電施設を対象とした 凍上対策ガイドラインの策定

Development of Guidelines for Frost Heave Countermeasures for Solar Power Generation Facilities

中村 大*, 門田峰典*, 川口貴之*

1. はじめに

近年、温室効果ガスの排出量ゼロを目指す「脱炭素化」が世界的な潮流となっており、我が国も化石燃料から再生可能エネルギーへの転換を迫られている。我が国における太陽光発電の導入は、2012年に制定された固定価格買取制度（FIT）開始後に急拡大した。この流れを受けて、広大な土地を有する北海道においても、山間部や遊休農地などにおいて、大小様々な規模の太陽光発電施設が積極的に建設されている。しかしながら、凍上現象によるものと考えられる様々な被害が、道東地域で散見されるようになってきた。

図1は道東地域で発生した太陽光発電施設の凍上被害の一例である。図から、ソーラーパネルを支える支柱が大きくねじれている様子や、スパン間で段差が生じて、パネルが反り上が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、倒壊の恐れがあることから、筆者らは現地調査を行い、この原因が凍上現象であることを明らかにした¹⁾。このような被害は日本だけでなく、カナダなどの北米地域でも発生しており、その被害が報告されている²⁾。また、凍上被害は道東地域に限らず、今後も北海道内や、北海道同様に積雪寒冷な東北地方並びに北陸地方の山間部などにおいて発生し続ける可能性が極めて高い。さらに、我が国ではゲリラ豪雨や集中豪雨が多発しており、積雪寒冷地においても土砂崩れや土石流などの土砂災害は増加傾向にある。傾斜地に設置された太陽光発電施設において冬期に凍上現象が発生し、夏期に杭などの支持力が失われた状態で土砂災害が発生してしまうと、その被害は甚大なものになると懸念される。

凍上被害が発生する技術的な問題としては、凍上被害を回避することに主眼が置かれた設計ガイドラ

インが策定されてこなかったことや、積雪寒冷地での施工経験が無い北海道外の事業者が参入していることなどが挙げられる。このため、事業者によっては凍上現象の発生を予測できておらず、凍上による被害を回避する手段を持ち合わせていないものと考えられる。2019年に公開された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」³⁾では、積雪寒冷地特有の積雪荷重に関する対策については十分な議論がなされ、有効な設計指針が示されている。また、杭の施工方法についても丁寧に記載されており、温暖な地域を対象としたガイドラインとしては極めて有用である。ただし、委員会に地

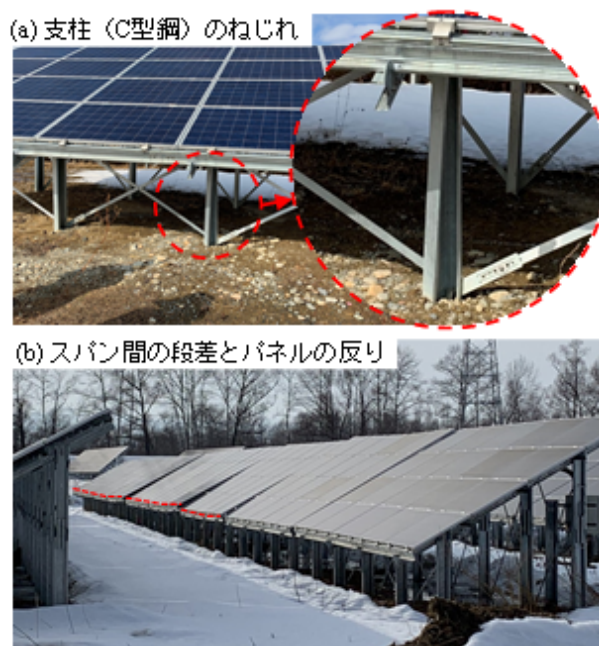


図1 太陽光発電施設の凍上被害¹⁾

* 国立大学法人北海道国立大学機構 北見工業大学

盤凍結分野の専門家がいなかったこともあり、凍上対策については記載が不十分であった。特に、布基礎については、ガイドラインで示された埋設深さでは、凍上対策として十分な効果が得られない可能性が高かった。

図2は筆者らが先行研究⁴⁾で実施した布基礎の模型実験の結果である。実験装置や実験方法の詳細については中村ら⁴⁾を参照していただきたい。ここでは、最大凍結深さをフーチングの底面とした場合(図2(a))と、最大凍結深さをフーチングの上面とした場合(図2(b))で実験を行った。実験結果から、最大凍結深さがフーチングの底面に達してしまうと、基礎は凍着凍上現象(周辺地盤と構造物が凍着して一体となって凍上する現象)によって持ち上がってしまうことが確認できる。この実験結果を踏まえると、2019年度版のガイドラインでは布基礎の埋設深さを基礎底版(フーチングの底面)が凍結深さまで達していることと定めており、誤った設計方法を事業者に対して周知してしまっている可能性が高い。

また、杭については凍結の影響に配慮して設計することと記載されているのみで、具体的な対策については全く明示されていない。これは、筆者らが調べた限り、他の構造物においても杭の凍上対策について明記したガイドラインやマニュアルが存在しない

ためと考えられる。

以上を背景として、筆者ら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)に対し、凍上対策のガイドラインを策定することを提案した。提案の結果、「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」で業務を受託し、杭や基礎の凍上対策についていくつかの実証実験を行ってきた。実証実験で得られた成果については、2023年に公開された「傾斜地設置型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン」⁵⁾と「営農型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン」⁶⁾に掲載されている。ここでは、杭と基礎の埋設深さに関する実証実験の結果について報告するとともに、上記のガイドラインに盛り込まれた凍上対策について紹介する。

2. 杭と基礎の埋設深さに関する実証実験

本稿で報告する実証実験の結果は、GEOMATE International Societyが主催する国際会議「13th International Conference on Geotechnique, Construction Materials & Environment」において、既に公表済みであり、その内容を日本語に翻訳したものである⁷⁾。

2.1 実証実験に用いた土試料の各種物性値

この実証実験では、凍上性の高い砂質土で造成した地盤に、杭と基礎の実物大模型を埋設した。なお、本実験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。

図3は実証実験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、砂質土に分類した。

図4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 $w_{opt}=29.0\%$ 、最大乾燥密度は $\rho_{dmax}=1.37\text{ g/cm}^3$ 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

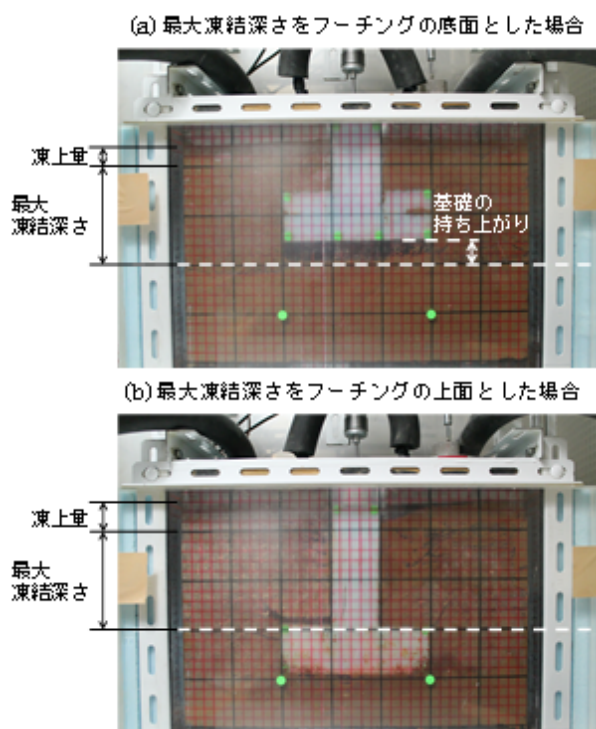


図2 布基礎の模型実験の結果(先行研究⁴⁾の実験結果を編集)

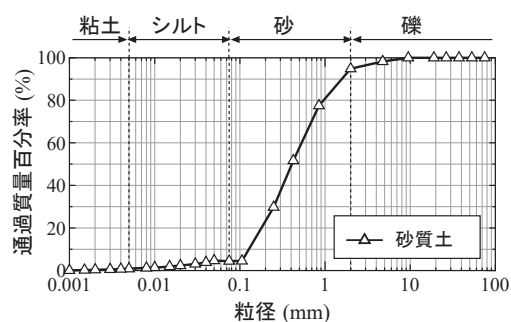


図3 粒径加積曲線

間隙曲線を求めた。

現地においてサンプラー（体積 100 cm^3 ）を使用して測定した乾燥密度は 1.22 g/cm^3 であり，締固め度 D_c は約 90% であった。

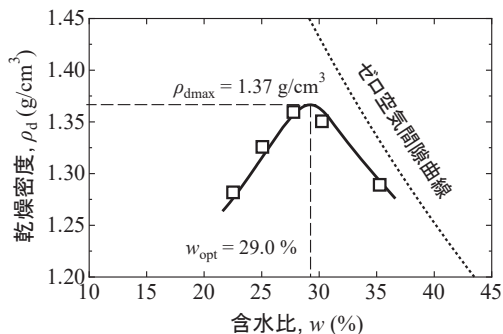


図4 締固め曲線

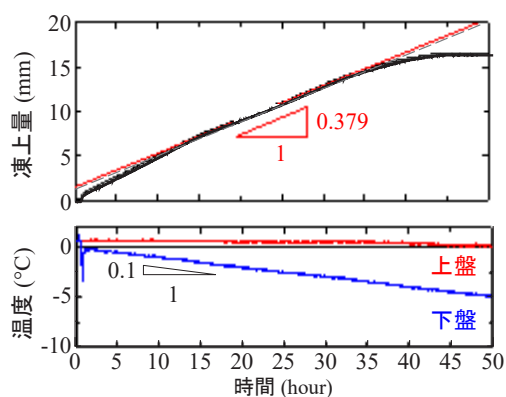


図5 凍上試験結果

図5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 mm/hour であり，地盤工学会基準⁸⁾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。

2.2 実物大模型の概要

表1は本研究の実験条件をまとめたものである。また，図6は本研究で施工した (a) スパイラル杭

表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

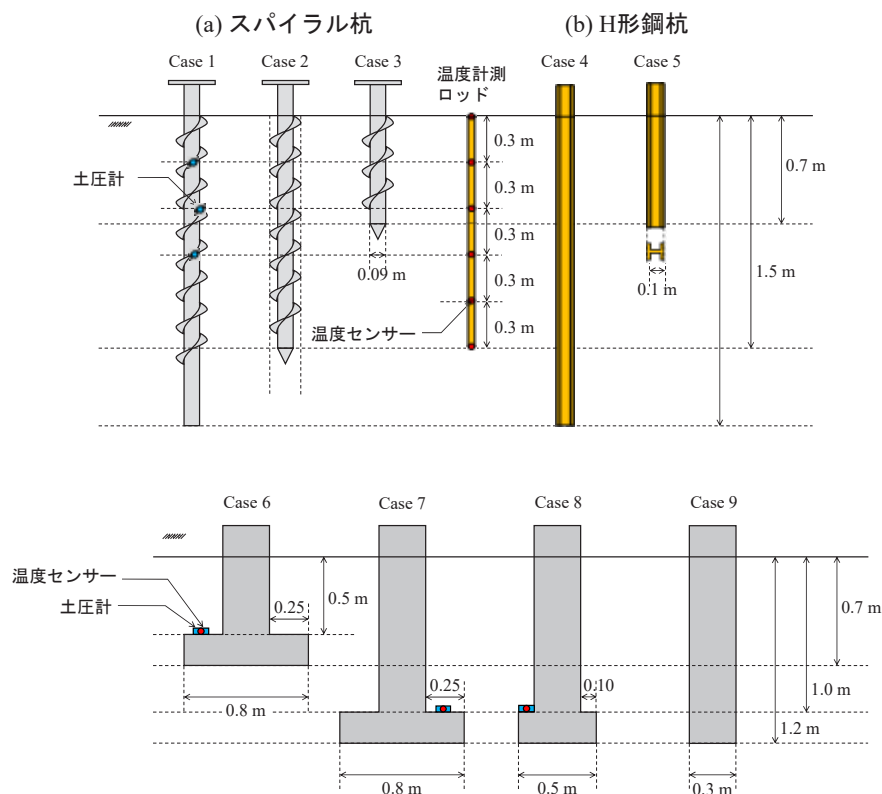


図6 本研究で施工した (a) スパイラル杭と (b) H 形鋼杭，(c) 独立基礎の模式図

と (b) H 形鋼杭, (c) 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 形鋼杭の 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 形鋼杭の 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。

2.3 実験結果

2.3.1 杭と基礎の凍上挙動および融解沈下挙動

2022 年の北見市は 12 月上旬から日平均気温が 0℃ を下回った。寒さのレベルを示す気象パラメータである凍結指数は 802℃・days であり, 比較的寒い冬であった。

図 7 はスパイラル杭と H 形鋼杭 (図 7(a)), 独立基礎 (図 7(b)) の凍結深さと鉛直変位量の経時変化を表している。ここでは, 凍上による上向きの鉛直変位量を凍上量, 融解による下向きの鉛直変位量を沈下量とする。

まず, 杭 (図 7(a)) の凍上挙動に着目すると, スパイラル杭, H 形鋼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。融解沈下挙動に着目すると, スパイラル杭は羽根に土圧を受けるためか, 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 7(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の位置に戻っていた。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

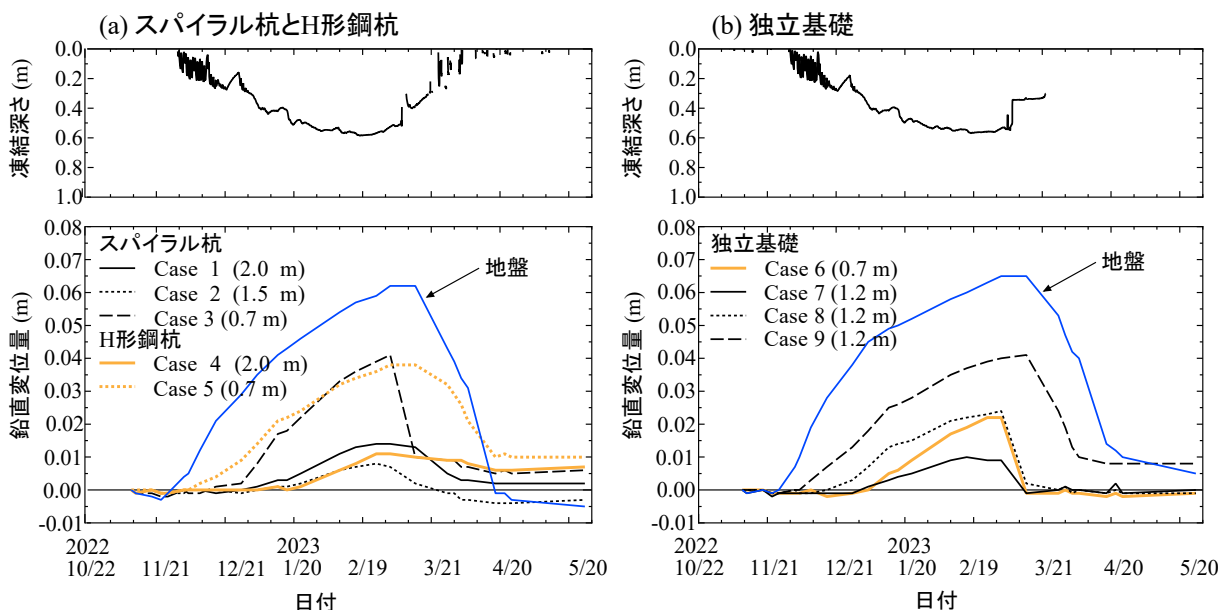


図 7 (a) スパイラル杭の羽根と H 型鋼杭, (b) 独立基礎の凍結深さ, 鉛直変位量の経時変化

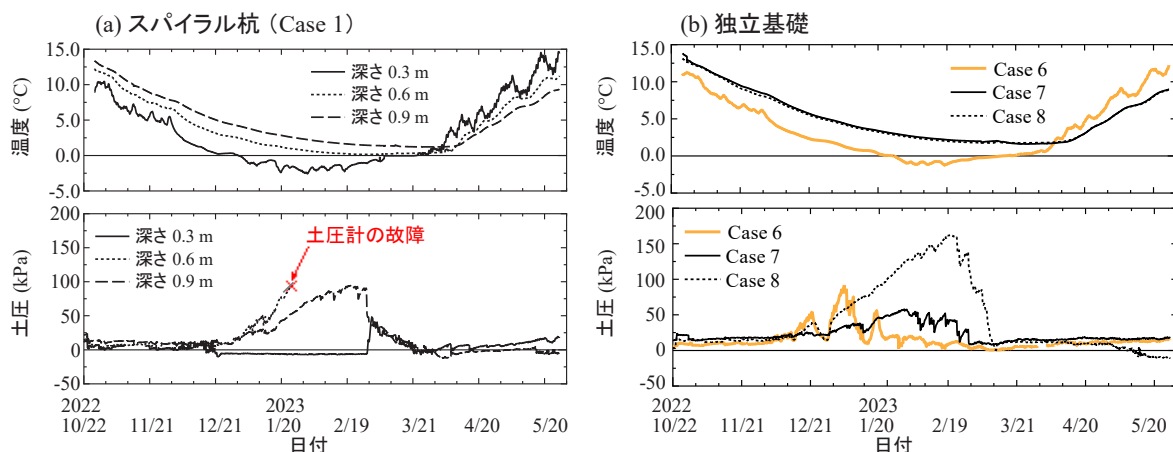


図8 (a)スパイラル杭の羽根と (b)独立基礎のフーチング上面に作用する土圧とその温度の経時変化

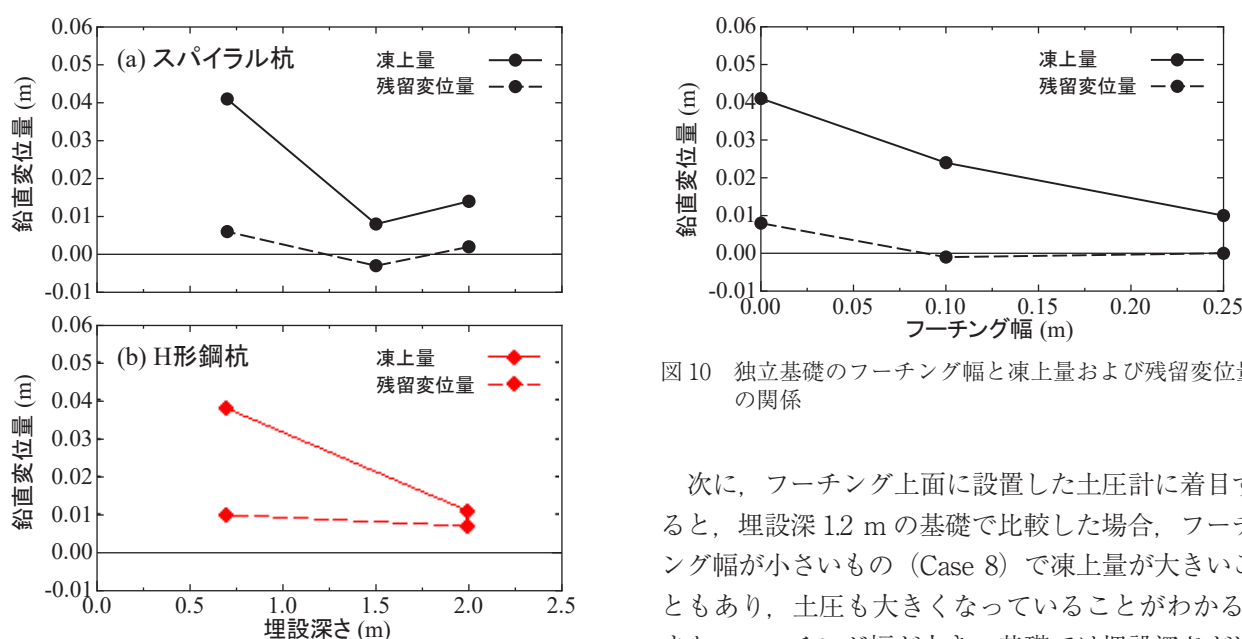


図9 杭の埋設深さと凍上量および残留変位量の関係

による変位が残留した。

図8はスパイラル杭の羽根（図8(a)）と、独立基礎のフーチング上面（図8(b)）に作用する土圧とその温度の経時変化を表している。

まず、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 では凍結深さが土圧計の埋設深さに到達した時点で値がマイナスとなっているが、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、これは凍上量の増加に伴って羽根に土圧が作用することに加え、羽根に凍上圧も作用するためと考えられる。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。

図10 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

次に、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）で凍上量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。

2.3.2 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9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形鋼杭ともに、埋設深さが最大凍結深さ（図7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10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

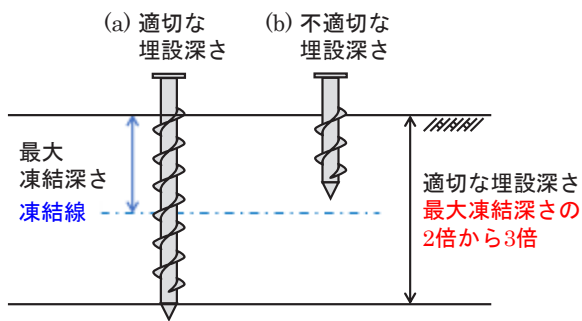


図11 スパイラル杭の適切な埋設方法

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。

以上の結果から、杭、独立基礎ともに埋設深さを深くすることで、凍上量を低減できることが明らかとなった。独立基礎についてはフーチング幅を大きくすることで、凍上量を低減することも明らかとなった。また、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。

3. 実証実験から得られた知見をもとにした杭および基礎の凍上対策

実証実験により、太陽光発電施設の基礎として、スパイラル杭や独立基礎、布基礎を用いることは凍上対策として有効であることが確認できた。これは、スパイラル杭の羽根や独立基礎、布基礎のフーチング上面に土圧が作用して、凍上による上向きの鉛直変位を抑制することができるためである。ただし、フーチングの上面に凍結線が達した時点で凍上が発生してしまうため、フーチングの上面が最大凍結深さよりも深い位置となるように埋設する必要がある。また、フーチング幅は土圧が作用するように、十分に広くする必要もある。

図11はスパイラル杭の適切な埋設方法を示したものである。実証実験の結果から、スパイラル杭を最大凍結深さの2倍から3倍程度深く埋設することで、凍上対策として高い効果が得られることが明らかとなっている。また、図11(b)のように埋設深さが最大凍結深さよりも浅い場合には、たとえスパイラル杭であっても凍上対策としての効果が得られない。なお、羽根の無い円筒形の杭やH形鋼の杭、羽根の小さなスクリュウ杭などでも、埋設深さが適切であれば、凍上による変位を低減することができる。

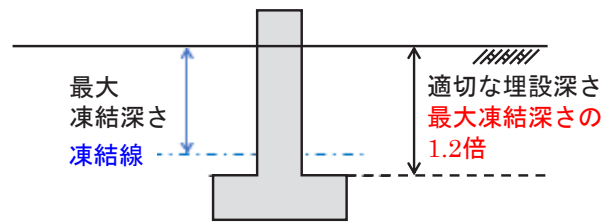


図12 独立基礎および布基礎の適切な埋設方法

図12は独立基礎および布基礎の適切な埋設方法を示したものである。独立基礎および布基礎の埋設深さは、地表面からフーチング上面までの深さを予測される最大凍結深さの1.2倍程度の深さで設計することで凍上を防ぐことができる。なお、べた基礎については耐凍上性を有していないため、積雪寒冷地で使用する基礎としては不適切である。また、フーチングを有さない独立基礎についても、埋設深さを深くしても凍上してしまうことが実証実験で明らかとなっているため、これを積雪寒冷地で用いるのは不適切である。

以上に加えて、当該箇所の土質が極めて高い凍上性を有している場合や、上部構造が凍上変位を許容できない場合には、断熱工法や置換工法などを併用した凍上対策についても、検討することが望ましい。

4. おわりに

2023年に公開された「傾斜地設置型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン」⁵⁾と「営農型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン」⁶⁾では、本稿で紹介した凍上対策に加えて、土の凍上性の判定方法や最大凍結深さの予測手法などについても、詳細に説明している。

筆者らが実証実験の結果をもとに立案した凍上対策が、積雪寒冷地で発生している太陽光発電施設の凍上被害を防止する一助となれば幸いである。

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令和3年度論文報告集, 78, (2022年1月), C-02, 北海道 札幌市。
- 2) P. P. Levasseur, M. L. J. Maher and J. P. Dittrich, A Case Study of Frost Action on Lightly Loaded Piles at Ontario Solar Farms, Proceedings of GeoQuebec (Sep. 2015), Quebec Canada.

- 3) 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)．
- 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，日本雪工学会論文集，33 (3)，34-33，(2021)．
- 5) 特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のためのガイドライン策定委員会，傾斜地設置型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン (2023)．
- 6) 特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のためのガイドライン策定委員会，営農型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン (2023)．
- 7) K. Nakai, D. Nakamura, M. Kajimoto, Y. Minabe, S. Kawajiri, T. Kadota and T. Kawaguchi, Basic study on Frost Heave and Thaw Behavior of Piles and Foundations Used in Photovoltaic Power Generation Facilities, Proceedings of 13th Int. Conference on Geotechnique, Construction Materials & Environment (Nov. 2023), Mie, Japan.
- 8) 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，230-234 (2019)．

著者略歴



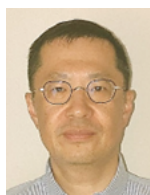
中村 大 (なかむら だい)

1998 年 3 月，北見工業大学土木開発工学科卒業．同年 4 月に同大学教務職員に採用．助教，准教授を経て，2022 年 4 月より北見工業大学社会環境系・教授に就任．土と岩石の凍上現象に関する研究に従事．長年の研究成果をもとに，岩石の凍上性判定手法を開発した．



門田 峰典 (かどた たかのり)

2008 年 3 月，北見工業大学大学院博士前期課程を修了．同年 4 月から株式会社オリエンタルコンサルタンツへ入社し，鋼道路橋の計画・設計・保全・基準改定の業務を経験．2017 年 9 月には社会人ドクターとして北見工業大学大学院博士後期課程を修了．2022 年 5 月より現職．鋼構造物の耐荷性能評価や維持管理手法の研究等に従事．



川口 貴之 (かわぐち たかゆき)

1998 年 3 月，北海道大学大学院工学研究科土木工学専攻修了．同年 4 月から函館工業高等専門学校に採用．助教，准教授を経て，2011 年 4 月より北見工業大学社会環境工学科准教授に着任．2019 年 4 月から同大学教授，2022 年 4 月から副学長に就任．専門は地盤工学であり，ジオシンセティックスを用いた地盤補強技術について研究している．