

Member Response of Photovoltaic Array Frame by Frost Heaving

Takanori KADOTA^{*1‡}
Kenichi HIRAIWA^{*4}

Dai NAKAMURA^{*2}
Kenta NAKAI^{*5}

Yoichi HINATA^{*3}
Yusaku FUJITA^{*5}

凍上による太陽光電池アレイ用鋼製架台の部材応答

門田 峰典^{*1‡}
平岩 健一^{*4}

中村 大^{*2}
中井 健太^{*5}

日向 洋一^{*3}
藤田 優作^{*5}

Abstract

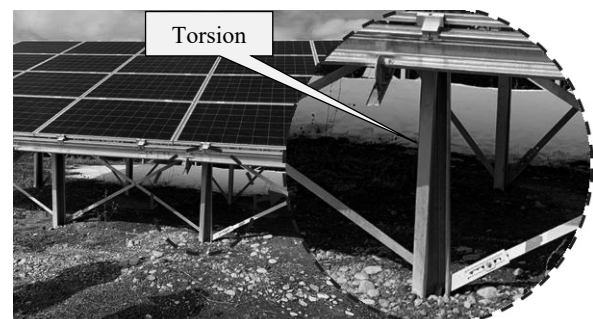
In recent years, photovoltaic array frames have been damaged in the eastern Hokkaido region that are believed to be caused by frost heaving. Decreasing the load carrying capacity due to torsion of column is worried in the long-term service. In this study, outdoor frost heaving test were conducted using full scale specimen to grasp relationship between amount of frost heaving and steel member response. Result of study, deformation behavior of each member was determined during frost heaving. It was also clarified which member needed to be reinforced to ensure adequate rigidity based on load transmission path.

Keywords: Photovoltaic array frame, Steel member response, Outdoor frost heaving test, Full scale test specimen
キーワード: 太陽光電池アレイ用鋼製架台, 部材応答, 屋外凍上実験, 実寸供試体

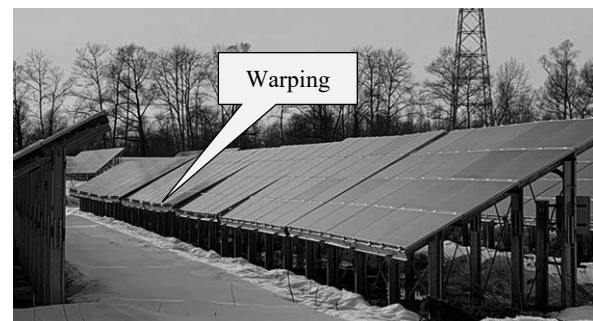
1. はじめに

近年、道東地域において、凍上現象に起因すると思われる太陽光発電施設の被害が相次いでいる。図1には、実際に発生した太陽電池アレイ用鋼製架台（以降、架台と呼称する）の被害例を示す。これから、太陽電池モジュール（以降、モジュールと呼称する）を支える支柱のねじり変形が確認でき、支柱や部材接合部での局所的な塑性化による荷重支持能力の低下が懸念される。また、支柱間の変形差によるモジュールの曲げ破損も懸念される。

このような現象に対し、著者らは、凍上対策として有効となりえる基礎形式および埋設深さの研究^{1,2)}を実施しており、この成果が設計・施工ガイドライン³⁾に反映され、現状、新設架台への凍上対策は十分なものとなっている。一方、数多く存在する既存架台に対し、基礎および杭の打ち直しを行うことは費用面から現実的ではなく、凍上が架台およびモジュールに及ぼす影響を定量的に把握し、適切なタイミングで対策を講じることが肝要となる。ただし、



a) Torsion of column



b) Panel warping

Fig.1 Example of the frost heaving

*1 Assistant Professor, Faculty of Engineering, Kitami Institute of Technology, 165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido 090-8507, Japan
‡e-mail: kadotaka@mail.kitami-it.ac.jp

*2 Professor, Faculty of Engineering, Kitami Institute of Technology

*3 Nihon Kasettsu Co., Ltd.

*4 Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.

*5 Graduate School of Engineering, Kitami Institute of Technology

Received: December 15 2024, Accepted: February 3 2025

*1 北見工業大学工学部 助教 (〒090-8507 北見市公園町 165)
‡e-mail: kadotaka@mail.kitami-it.ac.jp

*2 北見工業大学 教授

*3 日本仮設株式会社

*4 株式会社東京測器研究所

*5 北見工業大学大学院 工学研究科

原稿受付: 2024年12月15日, 受理日: 2025年2月3日

今のところ、このような研究事例は見当たらない。

そこで本研究では、凍上量と架台の部材応答の関係性を把握することを目的に、実物供試体を用いた冬季の屋外実験を実施した。具体的には、一部の柱下端の基礎を凍上しやすい条件とし、凍上に伴う架台のひずみや傾斜を連続的に計測した。

2. 対象構造

2.1 架台の部材諸元

架台の説明図を図2に、部材断面を表1にそれぞれ示す。なお、図中に示す数字は表1の部材番号を示す。部材剛性の違いによる応答性状を比較するため、本実験では設計荷重を変更した2種類の供試体を用いた。供試体1に対する設計荷重は、ガイドライン³⁾や設計指針⁴⁾に準じ、北海道北見市の地域条件で算出した。これに対し、供試体2は、架台を構成する部材の主な決定ケースとなる風圧荷重、

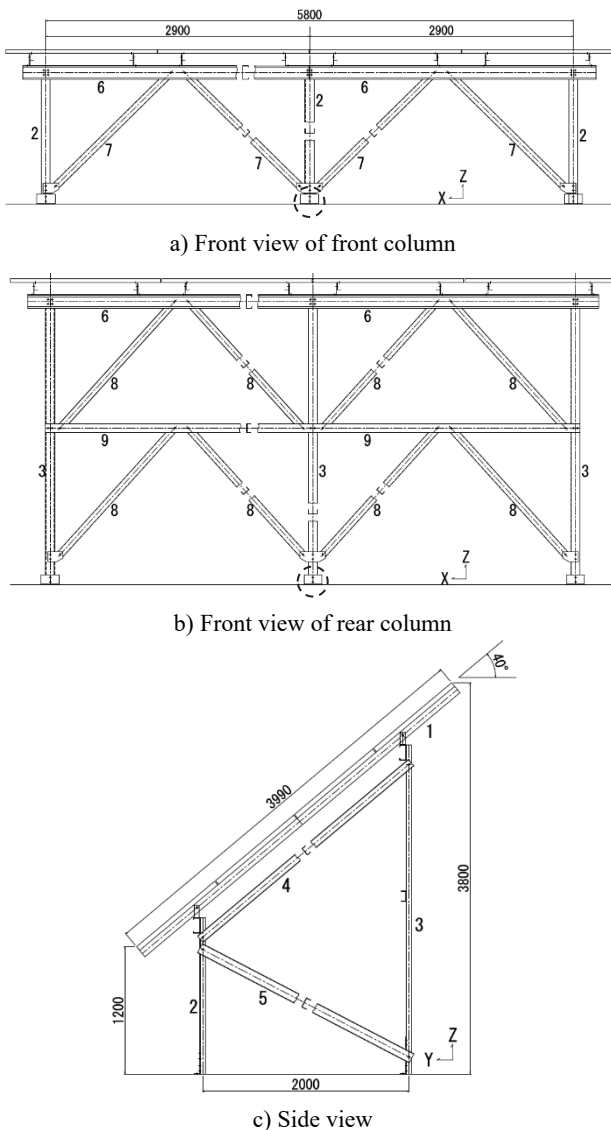


Fig.2 Structural diagram

積雪荷重、地震荷重を半減させた。具体的には、風速を30m/sから15m/sに変更、最深積雪量を100cmから50cmに変更、設計水平震度を0.3から0.15に変更した。この結果、桁梁では2ランク、小屋梁および桁ブレースを除く軽量溝形鋼では1ランクそれぞれ断面が小さくなった。なお、断面がそれほど小さくならなかった理由は、ボルトの収まりや、部材同士の取り合いの都合である。つまり、供試体2の部材断面は、検定比ではなく、ディテールで決定される最小断面として考えることができる。

両供試体の共通事項として、部材の材質はSGMH400、部材同士の接続にはM12の普通ボルトを用い、材質はSS400である。柱とブレースの接続部には3.2mmのガセットプレートを介しているが、その他は直接部材同士を接続させている。

2.2 太陽電池モジュールの諸元

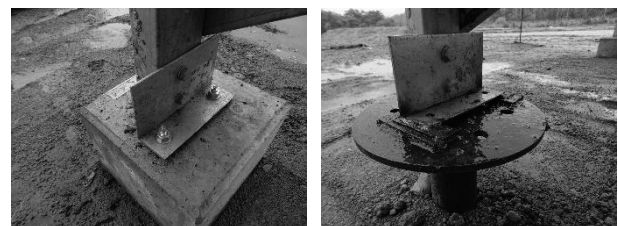
モジュールは、ガラス、太陽電池素子、耐候フィルム、充填材で層をなしているが、荷重にはガラスと周囲のフレームで抵抗する。ガラスは半強化ガラスであり、厚みは3mmである。フレームはアルミ製であり、高さ46mm、板厚は2mmである。また、モジュール1枚のサイズは幅990mm、高さ1662mmであり、重さは21kgである。なお、モジュールの機械的荷重は2.4kPaとなる。

2.3 基礎条件

供試体に対し、図2の丸印で示す中央の柱（前支柱、後支柱）のみを凍上させるよう、先行研究¹⁾において2022年度の冬季に計測された最大凍結深度0.6mを踏まえた基礎条件を設定した（図3）。RC基礎の埋設深さは、フーチング上面が地表面から1.8mとなるように設定し、凍上によって持ち上がりが発生しないよう、最大凍結深度に対して十分深くした。まず、実工事の手順を踏襲し、基礎底

Table 1 Cross section of members

Num	Member	Specimen No. 1	Specimen No. 2
1	Rafter	[-80×40×2.3	[-60×30×2.3
2	Front column	[-100×50×2.3	[-80×40×2.3
3	Rear column	[-100×50×2.3	[-80×40×2.3
4	Roof beam	[-80×40×2.3	
5	Axial brace	[-100×50×3.2	[-80×40×2.3
6	Girder beam	C-150×65×20×3.2	C-100×50×20×3.2
7,8	Brace	[-80×40×2.3	
9	Middle beam	[-100×50×2.3	[-80×40×2.3



a) RC foundation b) Spiral pile foundation

Fig.3 Foundation conditions

面まで掘削した後、凍上性の高い砂質土（地盤工学会基準の凍上試験で凍上速度 0.379 mm/hour ）で埋め戻した。続いて、供試体設置範囲に対して掘削を行い、凍上させない4隅の柱直下に碎石を敷設した。この際、基礎範囲はフーチング直下に $1\text{m} \times 1\text{m}$ の範囲とし、厚さは 0.2m である。その後、プレキャスト製のコンクリート基礎をすえ付け、粘性土で埋め戻した。最後に、凍上させる柱直下の杭として、スパイラル杭を 1m 打ち込んだ。スパイラル杭の径は 89.1mm 、長さは 1.2m である。なお、本研究と同様の地盤条件で実施された先行研究 1) において、2022 年度の冬季に計測された杭や基礎の最大凍上量は 40mm である。

計測期間中の状況として、常に供試体周辺の除雪を行った。2023 年度の冬季に計測された最大凍結深度は約 50cm であり、冬季の凍結指数は $769^\circ\text{C} \cdot \text{day}$ となった。

3. 冬季の屋外実験に向けた実験計画

3.1 はじめに

本実験では、2023 年 11 月から 2024 年 4 月までの期間において、部材のひずみ、傾斜、凍上量、部材温度を計測することとした。本章では、各計測の目的および位置、使用機器などについて説明する。

3.2 ひずみ計測

中央の前支柱および後支柱が凍上すると、支柱には軸圧縮力が生じるため、全体座屈もしくは局部座屈の発生が想定された。また、図-2c) に示す“部材 5”は、前後の支柱を接続するブレースとなるが、片側のフランジ面に設置されており、左右非対称となることで支柱にねじりが発生すると考えた。このことを踏まえ、図 4 に示す位置にひずみゲージを設置した。計測対象部材は、凍上が生じる前支柱および後支柱、支柱の変形に追従するブレース（後左側）および中間梁（後左側）の 4 つとし、計測方向は各部材軸方向とした。また、着目断面は、応力集中の影響を避けた各部材の固定点の中間とした。ねじり変形や座屈に伴う板曲げの影響を把握するため、板表裏にゲージを設置した。ただし、チャンネル数に制限があったため、片側のフランジに着目した。

計測機器には、消費電力が少なく、低温下でも計測が可能となる東京測器研究所の静ひずみ計（TDS150）を用いた。データの収録は 1 時間に 1 回とし、CF カードに保存した。

3.3 傾斜計測

支柱の全体座屈とブレースおよび中間梁のねじりを把握するため、各部材の傾斜を計測した。変形は部材接続部で顕著に生じると考え、図 4 中の ■ で示す位置を計測対象とした。前後支柱はガセットプレート上端から 100mm のウェブ、ブレース（後左側）は後支柱の傾斜計と同じ高さとなるウェブ位置とした。また、中間梁（後左側）は、ブレースが接続される位置のフランジ上面とした。部材との接続は、L 形の治具を用いてボルトで固定した。後支柱お

よびブレースへの設置状況と、各計測方向を図 5 に示す。

計測機器には、日本仮設の傾斜角モニタリングシステム（ZANGETSU）を用いた。本システムは、無線通信を介してクラウド上にデータを保存することが可能であり、計測地点から 6.5km 離れた大学にて、傾斜角をモニタリングした。なお、データのサンプリングは 10 分間毎とした。

3.4 凍上量

水準測量によって、各基礎の天端および地盤の高さを計測し、凍上量とした。不動点は隣接する電柱とした。また、計測は 1 週間に 1 度程度実施し、時刻は正午とした。

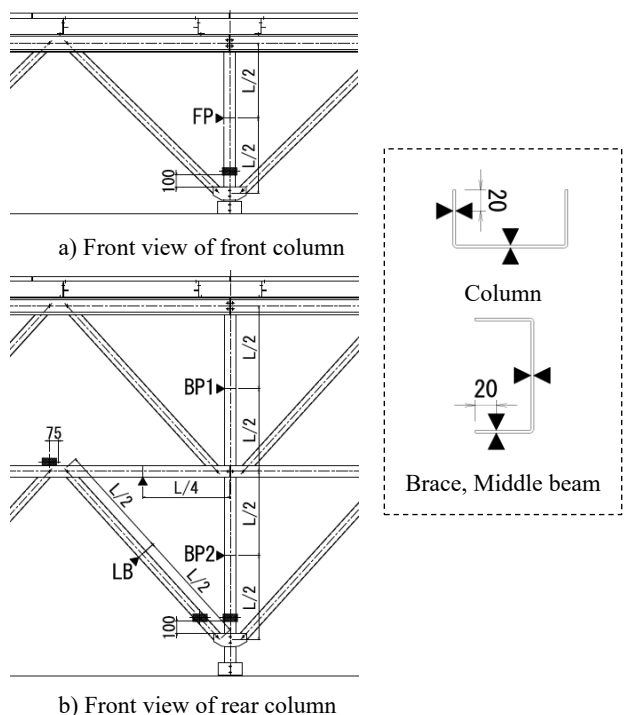


Fig.4 Measurement points

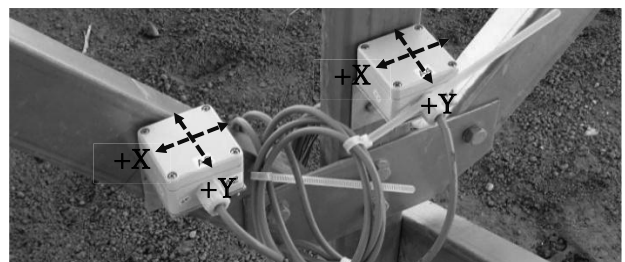


Fig.5 Inclinator installation status



Fig.6 Measurement status

3.5 電源

両計測機器とも、電源にはバッテリーおよび太陽光発電を併用した。なお、供試体自体で発電は行っておらず、小型の太陽光パネルを設置した。冬季の計測に対応できるよう、断熱材を施した計測ボックス内にそれぞれを格納するとともに、積雪でボックスが埋もれないよう、地面から1.5mの位置に単管で固定した(図6)。

4. 計測結果の整理と部材応答の考察

4.1 共通事項

以降では、ひずみと凍上量の関係および傾斜角と凍上量の関係を示す。なお、計測値は凍上量の測定と整合させ、正午の値を抽出している。グラフ中の“F-F”、“W-B”などの添え字は、ハイフン(-)の左側がフランジ(F)およびウェブ(W)を、右側が前面(F)および裏面(B)を示す。また、凍上量は鉛直上向きを負の値として図中に示している。

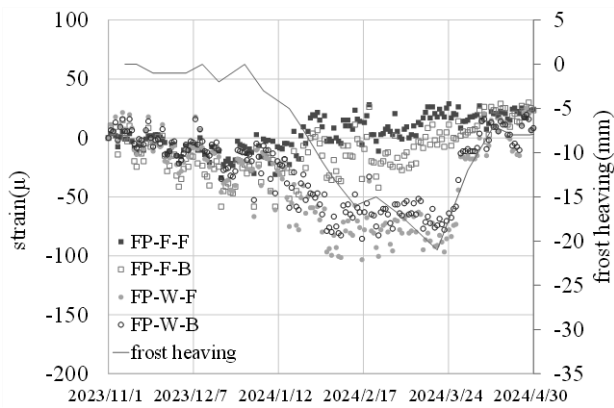
4.2 前支柱のひずみ-凍上量関係

前支柱のひずみ-凍上量関係を図7に示す。最大凍上量は、供試体1で-21mm、供試体2で-11mmとなった。前述するように、凍上させるための基礎の条件は供試体間で同様としているが、2倍の凍上差が生じた。

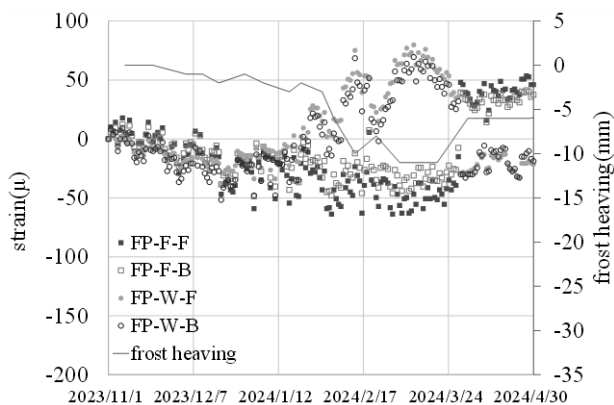
まず、供試体1のウェブでは、凍上量の増加とともに圧

縮ひずみが増加し、表面のひずみは裏面に対して若干マイナス側にシフトするものの、差としては小さい。最大凍上時の最大ひずみは-97 μ となり、フランジに比べて大きくなる。一方、フランジでは、裏面ではばらつきが大きい、凍上量の増加とともに引張側に転じる傾向がみられる。このことから、正面奥側に凸となる曲げ変形の発生が考えられる。支柱上下端は、他の部材と接続されるウェブ面から力が伝達するため、断面中立軸からの偏心が要因と考える。また、フランジ表裏のひずみに若干の差が見られ、面外変形の発生を示唆している。前後の支柱を接続するブレースは、支柱の片側(計測対象の支柱では右側)のフランジ面にのみ設置され、拘束が非対称となることが要因と考える。

続いて、供試体2に着目すると、とりわけウェブでは、凍上量の変化に追従した変化を示している。ウェブの最大ひずみは80 μ となり、供試体間での最大凍上量の比率を踏まえると供試体2の方が大きく、支柱の断面減少に伴う影響がみられる。ウェブでは引張ひずみが、フランジでは圧縮ひずみが生じるため、正面手前側に凸となる曲げ変形が考えられる。変形の方法が供試体1と異なる理由として、部材の断面減少による影響とは考えにくく、出来形や部材接続部による条件の違いが挙げられる。また、フランジの表裏のひずみに若干の差が見られることから、面外変形が発生している可能性がある。

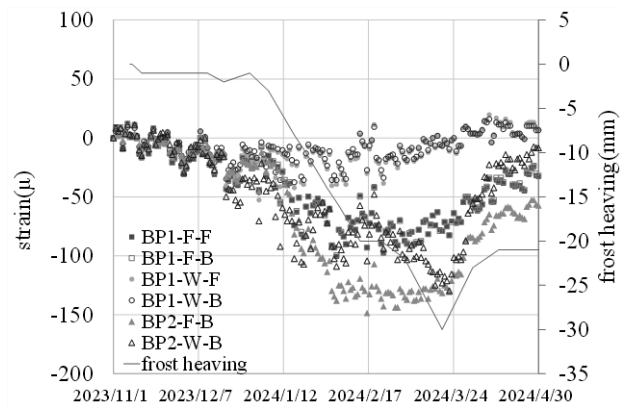


a) Specimen No. 1

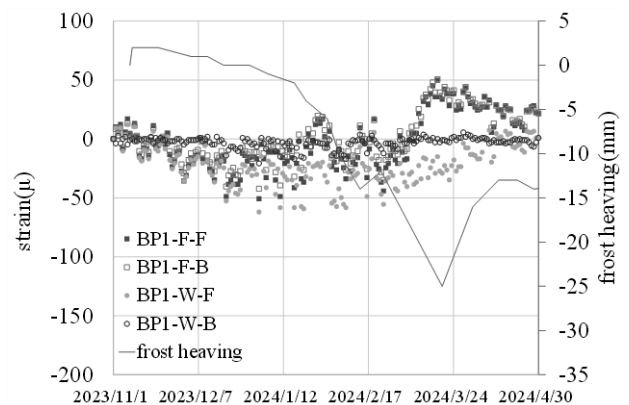


b) Specimen No. 2

Fig.7 Strain - frost heaving relationship (front column)



a) Specimen No. 1



b) Specimen No. 2

Fig.8 Strain - frost heaving relationship (rear column)

4.3 後支柱のひずみー凍上量関係

後支柱のひずみー凍上量関係を図8に示す. 最大凍上量は, 供試体1で-30mm, 供試体2で-25mmとなり, 前支柱に比べて供試体間の差は小さかった.

まず, 供試体1の上側(BP1)に着目すると, 前項で記載したように, 荷重伝達の観点からウェブでの圧縮ひずみが大きくなると考えるが, ウェブよりもフランジで圧縮ひずみが増加し, 最大凍上時では-90 μ 程度となる. これから, 正面前側に凸となる曲げ変形が生じていると考えられるが, ウェブ表裏のひずみには差が見られず, ひずみ計測から変形を推定することは困難となった. 下側(BP2)は, フランジの最大ひずみが-140 μ 程度となり, 下側の方が大きくなる. 特徴的なのは, 凍上量が-20mmを超えた辺りからフランジのひずみは横ばいを示す一方, ウェブでは圧縮ひずみが増加し, 一時的に同じひずみとなる. フランジとウェブの2点の計測ではあるが, 断面内で様な圧縮ひずみが生じている可能性がある. この要因として, 凍上量の増加とともに反力も増加し, 基礎と支柱下端を接続するボルト部ではこの分担が大きく, すべりが生じたと考えられる. ボルトは普通ボルトであり, 設計上はすべりを許容している. なお, すべりが生じることでウェブの軸圧縮ひずみが減少するはずだが, 曲げ引張ひずみが曲げ圧縮ひずみに転じる影響の方が大きいと推測する.

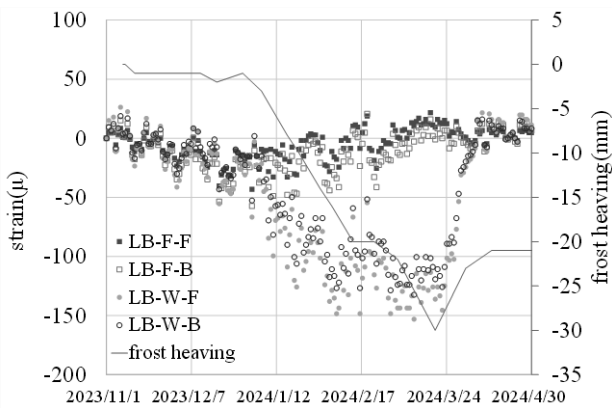
続いて, 供試体2のウェブでは, 表裏ともに凍上との関係性が見られず, 正確なデータが得られていない可能性がある. このためフランジのみに着目すると, 凍上量の増加とともに引張ひずみが増加し, 最大ひずみは51 μ となる.

4.4 ブレースのひずみー凍上量関係

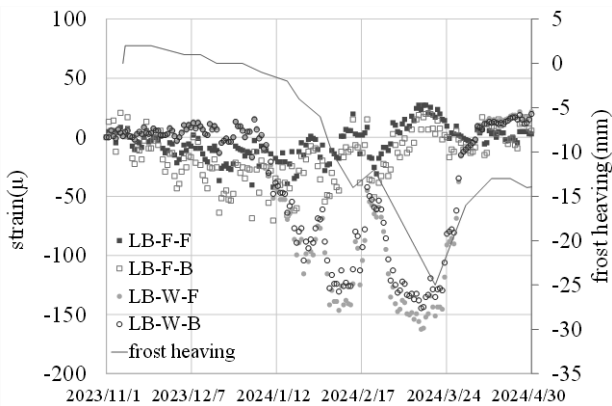
ブレースのひずみー凍上量関係を図9に示す. なお, 図中に示す凍上の推移は, 後支柱側の計測結果である.

まず, 供試体1のウェブでは, 凍上の進展とともに圧縮ひずみが増加し, 最大-153 μ となる. また, 表面のひずみは裏面に対してマイナス側にシフトし, 表裏で差が見られる. 一方, フランジでは, 次第に引張側に転じ, 最大凍上量近傍にて上に凸となる推移を示す. このことから, 正面奥側に凸となる曲げ変形を示すと考えられる.

続いて, 供試体2に着目すると, ウェブの最大ひずみは-162 μ となり, 供試体1よりも2の方が大きい. 断面減少に伴い, 凍上量とひずみの間に明確な関係性がみられる. ひずみの推移としては, 供試体1と同様で, 正面奥側に凸となる曲げ変形を示すと考える. フランジ表裏のひずみは, 供試体1よりも差が生じており, 支柱や中間梁の断面減少に伴い, 面外変形が生じやすくなっている可能性がある.

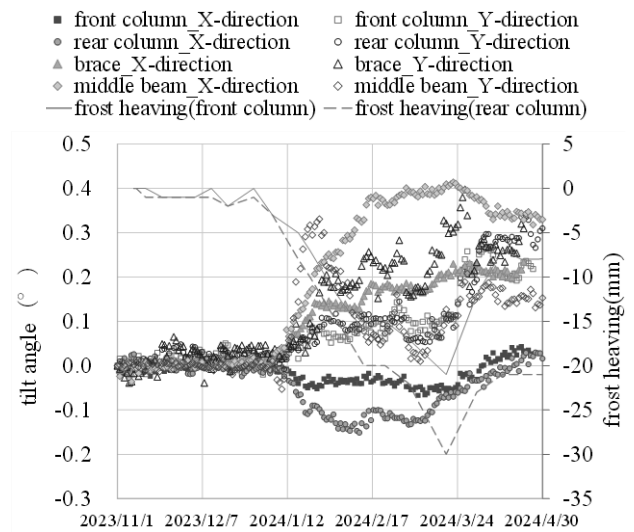


a) Specimen No. 1

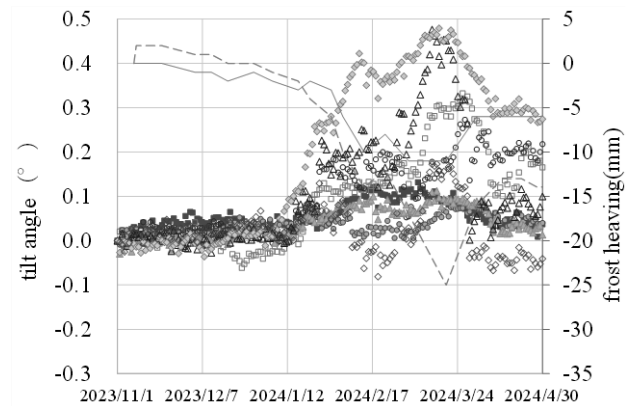


b) Specimen No. 2

Fig.9 Strain - frost heaving relationship (brace)



a) Specimen No. 1



b) Specimen No. 2

Fig.10 Tilt angle - frost heaving relationship

4.5 傾斜角ー凍上量関係

前支柱および後支柱に着目すると、供試体1では、凍上量の増加とともに、-X方向、+Y方向の傾斜角が大きくなり、正面手前側および正面右側に倒れる曲げ変形を示す。

ブレースでは、両供試体ともに+X方向および+Y方向に傾斜していくことから、ねじり変形が生じていることがわかる。傾斜の方向は正面手前側となり、他の部材に比べて大きな変形を示す。

中間梁では、供試体1で+X方向の傾斜が大きく、中間梁断面に対して面内方向への曲げ変形が卓越して生じていると考えられる。また、-Y方向の傾斜も見られることから、ねじり変形の発生が伺えるが、最大凍上時には反転しており、複雑であることが+Y方向の傾斜の推移からわかる。これは供試体2でも確認でき、両供試体とも凍上量の増加に伴い、反力分担が多い基礎と支柱下端を接続するボルト部にて、ボルト孔(Φ14)と軸芯(Φ12)とのクリアランスでずれが生じたと考えられる。それにより、支柱の境界条件が変化し、変形モードが変わった可能性がある。供試体2における+X方向の最大傾斜は供試体1に比べて大きく、部材の断面減少に伴う影響と考えることができる。

4.6 凍上による部材応答の考察

4.6.1 架台全体の応答性

対象とした架台において、支柱では主に面内方向の曲げ変形が発生することを把握した。各部材は弾性域に留まったが、凍上量の増加に伴い曲げ変形が卓越し、接合部では応力集中による致命的な損傷の発生が十分考えられる。このため、各支柱の曲げ変形が最大となる位置に、ブレースを追加するなどの補剛対策を検討することが望ましい。

4.6.2 支柱位置および部材剛性による応答への影響

各部材のウェブに着目し、最大凍上量と最大ひずみの関係から、-30mm凍上時のひずみとして換算した(表2)。表中の()内は供試体1に対する比率を示す。なお、発生するひずみから部材は弾性域となり、凍上量とひずみに比例関係があると仮定している。

供試体1では、前後の支柱およびブレースに生じる最大ひずみは差がみられず、凍上時に発生する荷重は概ね均等に分担されることがわかる。これに対し、部材断面を小さくした供試体2では、前支柱で1.58倍、ブレースで1.27倍のひずみの増加を確認した。この要因として、部材剛性や出来形、接合部での差異などが挙げられる。これらのうち、部材剛性については、供試体2の支柱はブレースと同じ断面となるため、ブレースが伝達する荷重を前支柱で多く分担すると考えることができる。なお、後支柱では、正確なデータが取得できていない可能性があり、適切な比率とはなっていないが、供試体1の傾向から同様の分担を示すと想定できる。また、供試体2では、中間梁の部材断面が減少することで、供試体1に比べて大きな変形を示すと考える。これらより、凍上時は、支柱、ブレース、中間梁の順で荷重が伝達すると考えられ、これらの部材に対して適切な剛性が確保できるよう対策を講じる必要がある。

Table 2 Maximum strain by -30 mm of frost heaving

Specimen	Front column	Rear column	Brace
No. 1	138 μ (1.00)	-130 μ (1.00)	-153 μ (1.00)
No. 2	218 μ (1.58)	42 μ (0.32)	-194 μ (1.27)

5. まとめ

本研究では、凍上量と架台の部材応答の関係性を把握するため、実物供試体を用い、凍上に伴う架台のひずみや傾斜を連続的に計測した。以降にまとめを示す。

- ・ 凍上に伴い、前後の支柱や中間梁には曲げ変形が、ブレースには曲げねじり変形がそれぞれ生じる。
- ・ 凍上量の増加に伴い、支柱の曲げ変形が卓越し、接合部で致命的な損傷が発生することが考えられるため、各支柱の曲げ変形が最大となる位置にブレースを追加するなどの補剛対策を検討することが望ましい。
- ・ 凍上時の荷重伝達経路であると考えられる支柱、ブレース、中間梁に対して、凍上時に求められる適切な剛性が確保できるよう対策を講じる必要がある。

寒冷な年であれば、本研究を超える凍上量が計測されることも十分に考えられる。また、長期間にわたって発生し、その積み重ねで大きな凍上量となることもありうる。今後は、FEMによる解析的な検討と、凍上を模擬した強制変位実験を実施することで、部材に致命的な損傷が生ずる凍上量の予測と、補強案の検討を行っていく。

謝辞

本研究開発は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託事業「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／安全性・信頼性確保技術開発(傾斜地設置型並びに営農型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)」による支援を受けたものです。

参考文献

- 1) Kenta Nakai, Dai Nakamura, Kawaguchi Takayuki, Kajimoto Masashi, Elucidation of frost heave damage mechanism of solar panel mounting frame by full-scale model experiment, 58th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, 11-12-5-02, (2023).
- 2) 本田佳広, 中村大, 川口貴之, 川尻峻三, 模型実験によるソーラーパネル架台の凍上被害発生メカニズムの解明, 資源・素材学会北海道支部春季講演会講演要旨集, B-08, (2021).
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 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, 38-78, (2024), 神奈川県.
- 4) JIS C 8955, Load design guide on structures for photovoltaic array, 1-23, (2017), Japan.
- 5) Architectural Institute of Japan, Design Standard for Steel Structures, 7-32, (2005), Japan.