

A Response of Photovoltaic Array Frame by Loading Experiment Simulating Frost Heaving

Takanori KADOTA^{*1‡}
Yusaku FUJITA^{*4}

Dai NAKAMURA^{*2}
Shinya SATO^{*5}

Yoichi HINATA^{*3}
Satsuki KATAOKA^{*6}

載荷実験による太陽電池アレイ用鋼製架台の凍上時の応答把握

門田峰典^{*1‡}
藤田優作^{*4}

中村 大^{*2}
佐藤信也^{*5}

日向洋一^{*3}
片岡沙都紀^{*6}

Abstract

In recent years, there have been serious damage to photovoltaic array frames in the east Hokkaido region that appears to have been caused by frost heaving. Decreasing the load carrying capacity due to damage to columns is concerned in the long-term service. In this study, a loading experiment was conducted using full scale specimen to figure out the response of members when large frost heaving occurs. In this experiment, the same specimen used in outdoor frost heaving test was reused. Steel pipe pile under the column was removed to install hydraulic jack at the bottom of the column, and reaction foundation was constructed before the experiment. Results of study, it showed that torsional deformation occurred in the column as the jack-up amount increased. Also, increasing amount of jack-up, it caused concern about module-to-module interference. However, the preceding interference between girder beams did not cause catastrophic damage to the module.

Keywords: Photovoltaic array frame, Frost heaving, Member response, Loading experiment, Full scale specimen
キーワード：太陽電池アレイ用鋼製架台、凍上、部材応答、載荷実験、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は、著者らが撮影した太陽電池アレイ用鋼製架台（以降、架台と呼称する）の被害例である。図1a)は、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れ変形の事例であり、塑性化による荷重支持能力の低下が懸念される。また、図1b)は、支柱間に変位差が生じた事例であり、モジュールが曲げ変形することで破損している可能性がある。これらの基礎の諸元は不明であるが、地盤の凍結深さに対して基礎の埋設深さが浅く、凍上によって変状したものと推測できる。なお、前者のねじれ変形については、支柱自体のねじり剛性が低いため、生じると考える。



a) Torsion of column



b) Panel warping

Fig.1 Example of the frost heaving

*1 Associate 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, Kitami Institute of Technology

*3 Nihon Kasetsu Co., Ltd.

*4 Graduate School of Engineering, Kitami Institute of Technology

*5 Associate Professor, Muroran Institute of Technology

*6 Assistant Professor, Kitami Institute of Technology

Received: January 9 2026, Accepted: May 8 2026

*1 北見工業大学工学部 准教授（〒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 北見工業大学大学院 工学研究科

*5 室蘭工業大学 准教授

*6 北見工業大学 助教

（原稿受付：2026 年 1 月 9 日，受理日：2026 年 5 月 8 日）

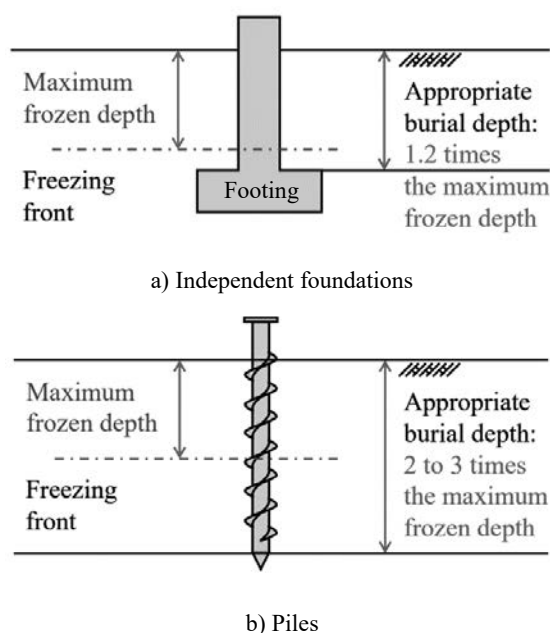


Fig.2 Appropriate burial method
Adapted from Reference 3)

このような寒冷地特有の課題に対し、著者らは凍上対策となる基礎形式および埋設深さに関する研究^{1)~4)}を行っている。図2に基礎の断面図を示すが、独立基礎の場合にはフーチング上面を最大凍結深さより深く埋設することで、凍上による持ち上がりが抑制できることを示した³⁾。また、図3から、フーチング幅が大きくなるに従って、凍上量および残留変位量が減少していることがわかる³⁾。これは、凍上による反力がフーチング上面に作用するため、抵抗面積が大きくなればなるほど、凍上による変位を低減できると考えられる⁴⁾。つまり、凍上対策としてフーチング幅を十分に確保することが重要となる。

新設構造物の凍上対策として、この成果が設計・施工ガイドライン⁵⁾に反映された一方、既存構造物においては凍上被害のリスクが高いものが存在しており、凍上現象に伴う架台およびモジュールの応答を定量的に把握したうえで適切な対策を施し、凍上被害を未然に防ぐ必要がある。なお、現状は、凍上によって損傷した架台の長期耐荷性能が明らかになっていないため、積極的な補修や補強が実施されていないものと考えている。

これまで著者らは、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や解析的な検討を行ってきた。2023年11月から2024年4月まで実施した冬季実験⁶⁾では、凍上量の増加に伴う各部材の応答特性、荷重の分担や伝達について明らかにした。しかしながら、実験中に生じた凍上量は30mmとなり、実際の現場で確認された100mm近い凍上変位を踏まえると、架台およびモジュールの最大の応答を捉えるに至っていない。

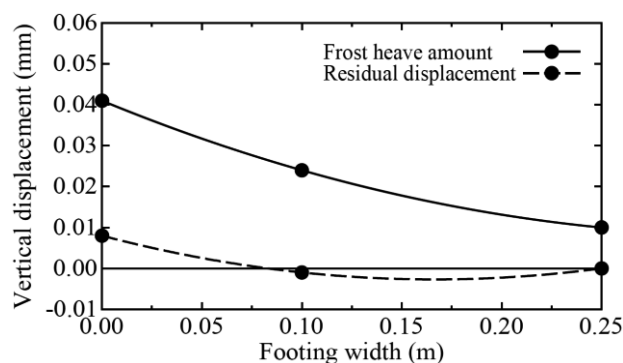


Fig.3 Relationship between footing width of the independent foundation and amounts of frost heave and residual displacement
Adapted from Reference 3)

そこで本研究では、冬季実験に使用した実物供試体を用い、支柱下端をジャッキアップすることで凍上を模擬した載荷実験を実施した。なお、冬季実験では、部材剛性の違いを評価するため、ガイドライン⁷⁾に沿って設計した場合と、部材断面を小さくした場合の2種類の供試体を用いていたが、本稿ではガイドライン⁷⁾に沿って設計した供試体に対して載荷実験を行った。

2. 実験方法

2.1 対象構造

2.1.1 架台の部材諸元

凍上に伴う支柱の変状を確認するため、本載荷実験では部材同士がピン接合で、引張ブレースにより水平力を柱脚に伝達させる一般的な構造諸元を採用した。つまり、予めねじれ変形を抑制するような部材の変更や補強などは実施していない。

荷重設定は設計指針⁸⁾、部材照査はガイドライン⁷⁾に準じて行った。設計荷重については、北海道北見市の地域条件で算出した。具体的には、風圧荷重として基準風速30m/s、積雪荷重として地上垂直積雪量100cm、地震荷重として地域地震係数0.9をそれぞれ考慮した。また、断面力および変形は、部材を線材に置換した立体フレームにて算出し、全体座屈および局部座屈による許容応力度の低減を考慮した断面計算を行った。架台の説明図を図4に、部材断面を表1にそれぞれ示す。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紹介しているが、その他は直接部材同士を接続させた。

2.1.2 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、厚さは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。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。

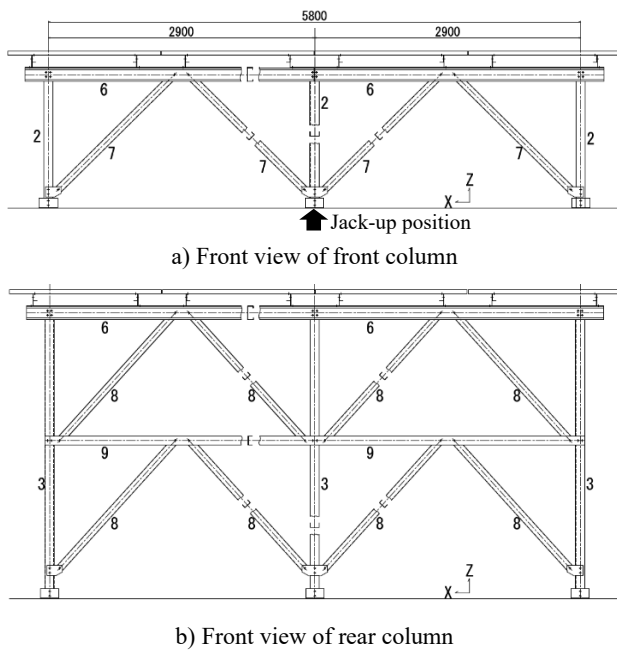


Fig.4 Structural diagram

2.1.3 基礎の諸元

本実験では、凍上を模擬するため、支柱下端に油圧ジャッキを設置した載荷実験を行うこととした。冬季計測時の基礎条件としては、中央の柱（前支柱、後支柱）のみが凍上するよう、中央の柱は最大凍結深に対して根入れを1mと浅くしたスパイラル杭、凍上させない4隅はフーチング上面を最大凍結深より深く埋設したRC基礎とした（図5）。詳細は、文献6）を参照いただきたい。このため、実験に際し、スパイラル杭を撤去し、ジャッキアップ時に生じる反力に抵抗できる基礎を構築した。なお、ジャッキアップの対象は、図4a)に示すように中央の前支柱のみとした。

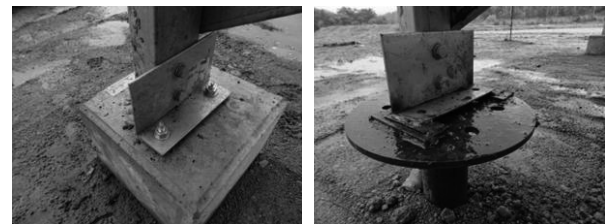
2.2 計測条件

2.2.1 ひずみ計測

冬季計測⁶⁾によって、凍上時には、支柱からブレース、桁梁へと荷重が伝達されることを明らかにしている。なお、

Table 1 Cross section of members

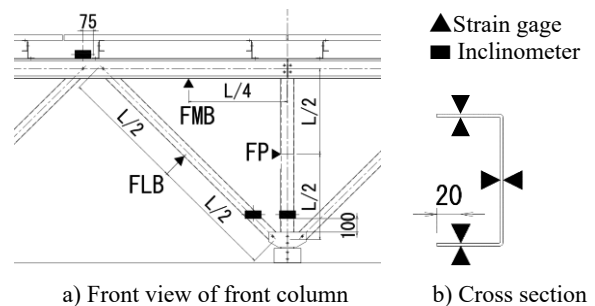
Number	Member	Cross section
1	Rafter	[-80×40×2.3
2	Front column	[-100×50×2.3
3	Rear column	[-100×50×2.3
4	Roof beam	[-80×40×2.3
5	Axial brace	[-100×50×3.2
6	Girder beam	C-150×65×20×3.2
7,8	Brace	[-80×40×2.3
9	Middle beam	[-100×50×2.3



a) RC foundation

b) Spiral pile foundation

Fig.5 Foundation conditions



a) Front view of front column

b) Cross section

Fig.6 Measurement points

桁梁とは、図4に示す番号6のリップ溝形鋼の呼称である。これを踏まえ、前支柱、左ブレース、桁梁に対して、応力集中の影響を避けた部材の中間の軸方向ひずみを計測した。また、ねじれ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（図6）。ただし、桁梁はリップ溝形鋼であり、内面への貼付作業が困難となったため、フランジは板表面のみとしている。なお、冬季計測時に設置した後支柱側の部材のひずみも参考に計測したが、応答が小さいことから、本稿では後支柱側の計測位置および応答の考察は割愛する。

2.2.2 傾斜計測

支柱の全体座屈とブレースおよび桁梁のねじれを把握するため、図6中の■で示す位置に傾斜計（日本仮設：ZANGETSU）を設置した。具体的には、支柱に対してガセットプレート上端から100mmのウェブ、ブレースに対して支柱の傾斜計と同じ高さとなるウェブ位置とした。また、桁梁に対しては、ブレースが接続される位置のフランジ上面とした。支柱およびブレースへの設置状況および各計測方向を図7に示す。

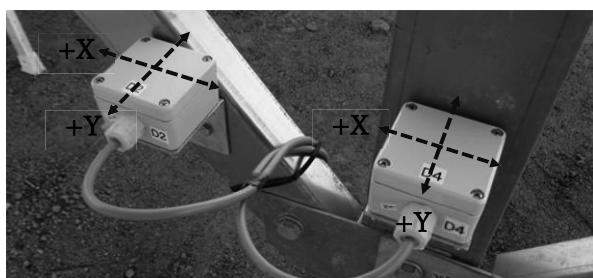


Fig.7 Inclinometer installation status

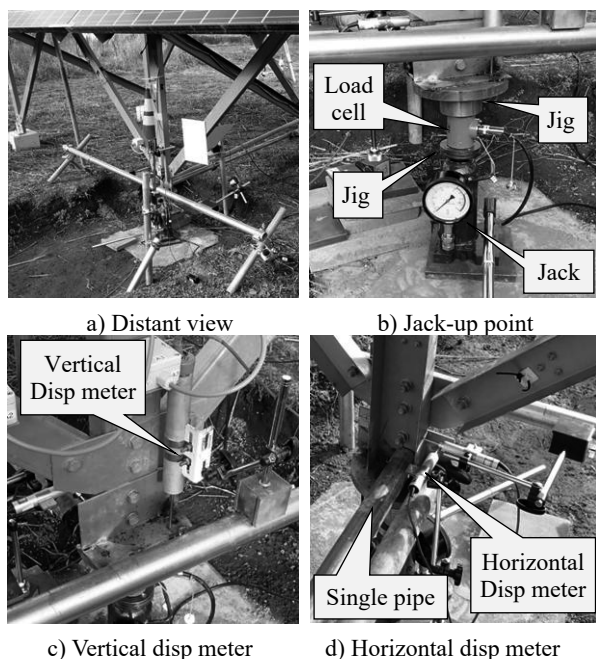


Fig.8 Measurement status

2.2.3 反力および変位の計測

ジャッキアップ時の反力は、支柱下端と油圧ジャッキの間に位置するロードセルにて計測した。設置状況を図 8b) に示す。油圧ジャッキ側は、ジャッキのサドルにはめ込んで固定する鋼製治具を製作し、ロードセル下端にねじ止めた。これにより、油圧ジャッキとロードセルは、軸圧縮下で回転しない仕様となっている。支柱下端側は、支柱下端に溶接で取り付け付けた鋼製治具に対して、ロードセルの円柱型の起歪部を接触させている。つまり、ヒンジ支持となる。本来であれば、杭基礎と同様に回転を拘束する支持条件とすべきであるが、ロードセルの仕様上、困難であった。

ジャッキアップ時の支柱下端の鉛直変位は、図 8c) に示す接触式変位計および水準測量によって計測した。ここで、予備載荷時に 10mm 程度ジャッキアップを行った結果、支柱が時計回りにねじれることがわかった。支柱のねじれは冬季計測にて確認されていないため、図 8d) に示すように、支柱下端部のウェブ裏面に単管を当てて、支柱のねじれを抑制した。この際、参考として、接触式変位計を用いてフランジ中央の水平変位を計測するとともに、目視にてねじれ変形の程度を把握した。

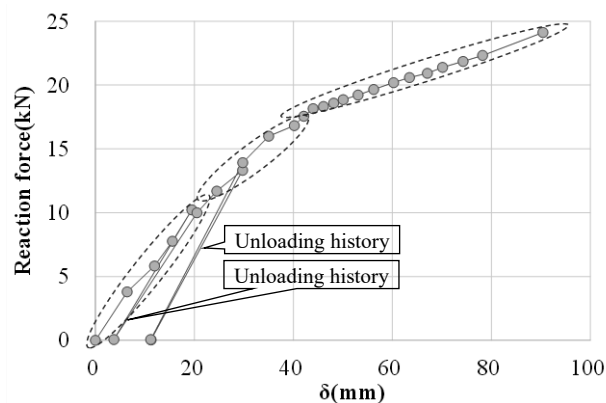


Fig.9 Reaction force – vertical displacement of column relation

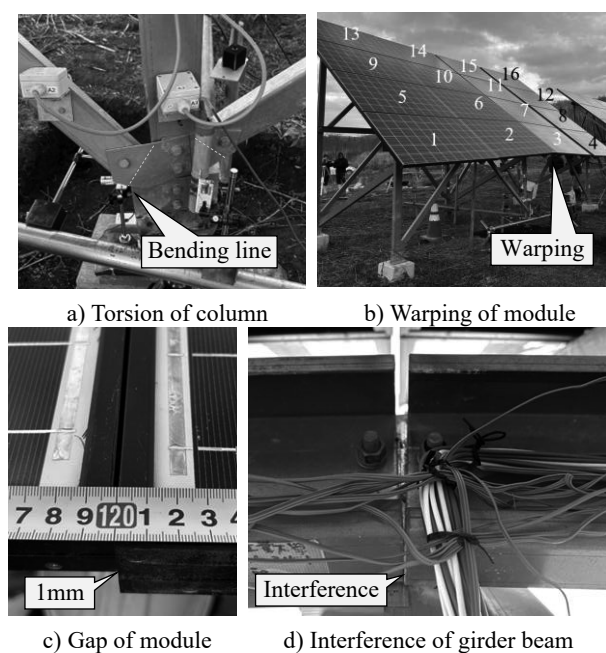


Fig.10 Deformed state (90mm jack-up)

3. 実験結果

3.1 データのサンプリング

ジャッキアップは手動となるため、反力-変位関係を踏まえて、データのサンプリングを決定した。具体的には、反力と鉛直変位とが線形応答を示す間は、2kN 程度毎に変形を保持した状態でデータを収録し、その後、16kN を過ぎてからは反力に対して鉛直変位の増加割合が大きくなったため、変位制御に切り替えて、2~3mm 毎にデータ収録を行った。

3.2 反力と変位の関係

図 9 には、ジャッキ反力と支柱の鉛直変位の関係を示す。

ジャッキアップ序盤は、支柱が時計回りに回転し、単管を押し返す様子が伺えた。しかし、発生する反力が小さいことから、ねじれてはいない。5.8kN (12mm) を超えたあたりから反時計回りに支柱がねじれ始めたため、一度除荷

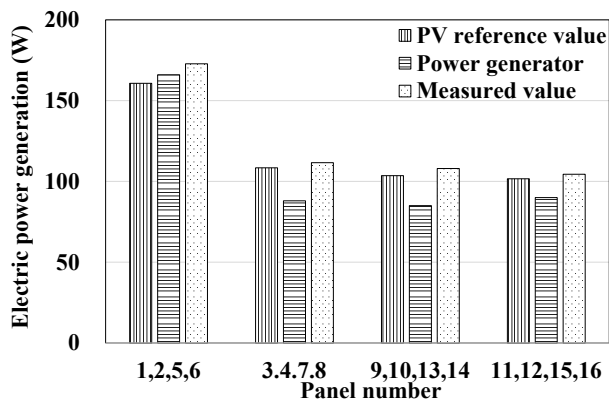


Fig.11 Comparison of electric power generation

を行い、変位計の盛替えを行った。この際、4mm の残留変形が発生していることを確認した。ジャッキアップを再開し、10kN (19mm) まで載荷した後、中央の前支柱とブレース、中央の前支柱と桁梁のボルト接続部で「ギシギシ」という音が聞こえ始めたとともに、急激に反時計回りのねじれが進展したため、13.3kN (30mm) で除荷を行い、変位計および拘束用の単管を盛替えた。このねじれの進展は、14φ のボルト孔と φ12 ボルト軸部でのクリアランスにてすべりが発生したものと考えるが、詳細な検証はできていない。なお、この時点で 11mm の残留変位を確認した。

ジャッキ反力と鉛直変位の関係における勾配、つまり、架台の剛性に着目すると、ジャッキアップ序盤は概ね一定勾配で推移していくが、12kN (25mm) で 1 度目の剛性低下を、18kN (44mm) で 2 度目の剛性低下を示す。ただし、90mm のジャッキアップにおいても、荷重低下を示すことなく、支柱を持ち上げる変形（つまり凍上）に対して抵抗している様子が伺え、架台として致命的な状態とはならないことがわかる。なお、剛性低下の要因については、後述する変形状況および各部材の応答を踏まえて考察する。

3.3 変形状況

図 10 には、90mm ジャッキアップ時の変形状況を示す。支柱のねじれが進展する中で、左右のブレースが変形を拘束するが、ガセットプレートの曲げ耐力が小さいため、ブレースの縁端部との接続線に沿った曲げ変形が生じている。ガセットプレートが先行して降伏することで、支柱およびブレースには致命的な変形は生じていない。このことから、想定外の大きな凍上によって支柱がねじれても、変形が残留するガセットプレートのみを交換することで、設計荷重に対する構造安全性を確保できる可能性がある。なお、このガセットの変形は、11mm の残留変位が生じた時点から見られている。

アレイ面は、ジャッキアップによってハの字に開くことを確認した。これにより、モジュール同士の隙間が小さくなり、干渉すると思われたが、1mm まで近づいた後は変化が見られなくなった。なお、ジャッキアップ開始前において、モジュール同士の隙間は 10mm あったため、9mm 近

づいたことになる。

これに対し、桁梁同士の隙間は当初 5mm あり、ジャッキアップ 17kN (40mm) 時点で下側のフランジで干渉することがわかった。つまり、先行して桁梁が干渉することで、モジュールの変形が拘束され、モジュールの外傷は生じなかった。念のため、モジュール内部の電気系統への影響を確認するため、開放電圧および発電力を計測した。開放電圧は、公称値 37.2V に対して 33V～35V となり、曇天であったこともあり妥当な範囲であると判断した。発電力は、太陽光発電装置（日本仮設：スーパーひまわり）に接続し、計測した。この際の基準値は、日射計（Sanpo Instrument：SM206）による計測値をモジュール面積に換算した。また、別途計測した電流と電圧から発電力を算出し、比較を行った。比較の結果を図 11 に示す。横軸は、図 10b) に示すパネルを 4 枚直列に繋いだ組合せを示している。この結果、発電力は、太陽光測定機で計測した基準値および計測値と概ね一致することから、モジュール内部の電気系統への影響はないと判断した。

3.4 各部材の応答

3.4.1 共通事項

以降に示すグラフでは、ひずみの推移をわかりやすくするため、除荷時のデータは省略している。グラフ中の“LF-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)を示している。また、頭の記号は、支柱では正面から見て L が左側、R が右側、ブレースおよび桁梁では L が下側、U が上側となる。ハイフン(-)の右側については、表面(F)および裏面(B)を示す。なお、FP が前支柱、FLB がブレース、FMB が桁梁となる。

3.4.2 前支柱のひずみ

図 12 には、前支柱のひずみを示す。ウェブ、フランジともに、90mm のジャッキアップにおいても最大ひずみは 500μ 以下となり、弾性域に留まることがわかる。

ウェブでは、ジャッキアップによって圧縮ひずみが増加していくが、10kN～14kN 間には不連続な履歴を示す。これは上述するボルト部でのすべりのタイミングと一致する。その後、圧縮ひずみが急増するが、こちらは桁梁同士の干渉による影響と考える。なお、表裏のひずみは一致しており、ウェブの曲げ変形は見られない。

一方、左右のフランジではウェブと異なる履歴を示す。まず左フランジでは、ジャッキアップ序盤に引張りひずみが発生し、ウェブと対称の履歴を示すが、その後ひずみは増加しないことから、荷重の分担は少ない。また、右フランジでは、表面はウェブと類似した履歴となるが、裏面では徐々に引張りひずみが増加していく。これは、前後支柱を接続するブレースが正面向かって右側のフランジ面に取り付くため、鉛直方向およびねじれ変形が拘束され、フランジに面外変形が生じたと考える。

3.4.3 ブレースのひずみ

図 13 はブレースのひずみである。荷重分担が多いウェ

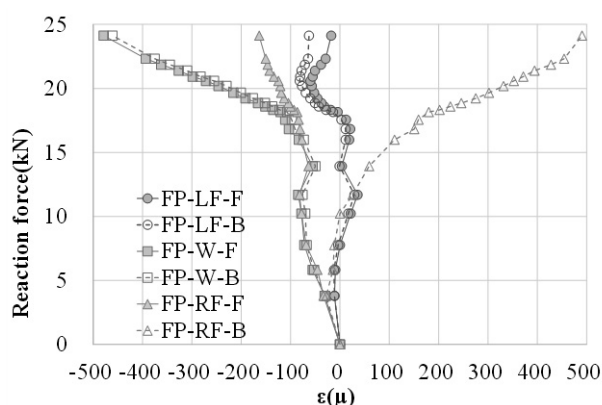


Fig.12 Strain response of front column

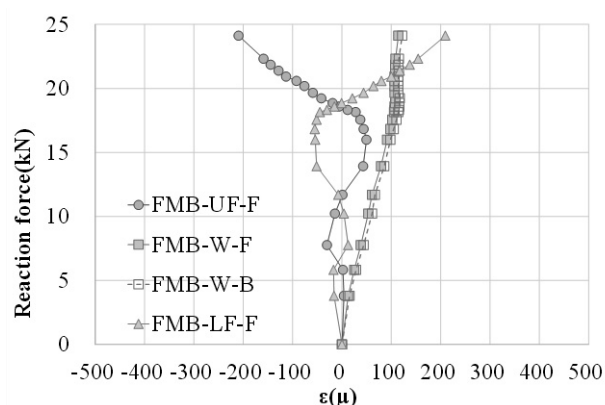


Fig.14 Strain response of front middle beam

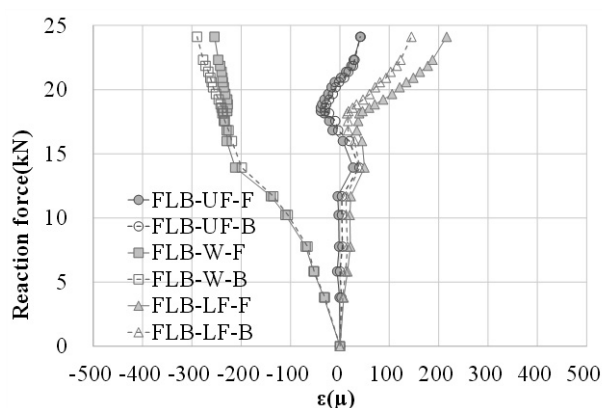


Fig.13 Strain response of front brace

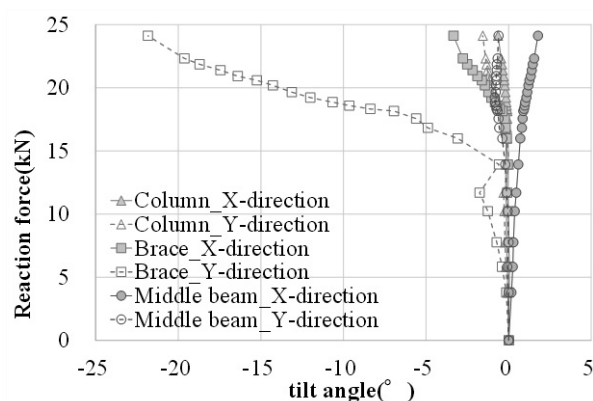


Fig.15 Tilt angle trend

ブでも最大ひずみは 300μ 以下と弾性域に留まる。

ウェブでは、ジャッキアップ量の増加とともに、圧縮ひずみがなだらかに増加していくが、 14kN 以降からひずみの増加割合が減少する。フランジでは、载荷初期においてウェブよりもひずみ量が小さく、全体的に引張ひずみが生じる。 14kN からは圧縮ひずみが増加しており、ウェブと同じくひずみの増加傾向が変化する。この時点においては、前述するガセットプレートの曲げ変形が確認されていることから、ガセットプレートの変形によりブレースへの力の伝達に変化し、ブレースのひずみの増加傾向に影響を与えたものと考えられる。

3.4.4 桁梁のひずみ

図 14 には、桁梁のひずみを示す。ウェブに比べて上下フランジのひずみが大きい、 200μ 程度となる。

ウェブでは、表面、裏面ともに引張ひずみが徐々に増加していくことから、桁梁には軸方向の引張力が発生していることがわかる。なお、桁梁下側フランジ同士の干渉の影響は、ウェブのひずみ履歴に現れていない。

上下フランジでは、引張ひずみや圧縮ひずみが交互に生じており、対称となる桁梁断面方向の面内曲げ変形を示している。前述するように、 5.8kN を超えたあたりから支柱のねじれる方向が時計回りから反時計回りへと変わっており、支柱のねじれが桁梁の曲げ変形に連成しているものと考えられる。また、ひずみの増加は 18kN 過ぎに見られ、桁

梁の干渉後、徐々に曲げ変形が進展したと思われる。

3.4.5 傾斜角の推移

図 15 は傾斜角の推移を示す。

支柱は、X 方向よりも Y 方向の傾斜角が大きく、図 12 に示すウェブ表裏のひずみからも、-Y 方向（正面奥側）に倒れていることを示す。目視では反時計回りにねじれることを確認しているため、倒れながらねじれていく様相を示す。ただし、傾斜角はジャッキアップ 90mm の時点で 2° 程度と、ねじれに対して小さい。

桁梁は、両方向の傾斜角度が概ね同程度となる。X 方向の傾斜が曲げ変形、Y 方向の傾斜がねじれ変形を示すが、このうち Y 方向の傾斜は、支柱が正面奥側に倒れたことに追従して生じた可能性が考えられる。傾斜角は、ジャッキアップ位置から遠いためか、 $2\sim3^\circ$ の範囲と小さい結果となる。

ブレースは、支柱や桁梁に比べて傾斜角が大きく、特に、Y 方向における傾斜が顕著となる。図 13 に示すウェブ表裏のひずみには大きい差が見られないことから、曲げ変形は生じていないと考えられ、支柱が正面奥側に倒れたことに追従した変形もしくはガセットプレートの変形に起因する可能性が考えられる。支柱や桁梁は、桁梁同士が干渉する 17kN 近傍から傾斜角が増加しているが、ブレースでは幾分早く、ガセットプレートの降伏に影響している可能性がある。なお、ひずみの計測位置が部材中央部であった

ことから、ひずみ履歴にガセットプレートの降伏の影響が表れなかったと考える。

3.5 本実験で対象とする架台の耐荷性能

変形状況や各部材のひずみや傾斜角から、ガセットプレートの降伏や、ボルト部でのすべり、桁梁同士の干渉といったイベントおよびそのタイミングを確認した。これらを踏まえて、ジャッキ反力と鉛直変位の関係に見られる剛性低下の要因を推察すると、1 度目の剛性低下はボルト部のすべり、2 度目は桁梁同士の干渉によって生じることになる。90mm までのジャッキアップにおいても安定的な荷重抵抗を示すのは、本対象構造の部材がピン接合となり、フレキシブルに変形に追従したためだと考える。

4. 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、冬季実験に使用した実物供試体を用い、支柱下端をジャッキアップすることで凍上を模擬した載荷実験を実施した。供試体は、部材同士がピン接合で、引張ブレースにより水平力を柱脚に伝達させる構造諸元を採用しており、これと同様もしくは類似した構造諸元について、以下のことが言える。

- ・ ジャッキアップ量の増加に伴い、支柱にはねじれ変形が生じることを確認した。
- ・ 支柱がねじれ変形する場合、曲げ耐力の小さいガセットプレートが先行して降伏することで、支柱およびブレースに残留変形は生じなかった。この結果から、凍上現象に伴う支柱のねじれ変形が生じた場合は、ガセットプレートを交換することによって構造安全性を確保できる可能性がある。なお、凍上した支柱の上部に桁梁のつなぎ目がない(桁梁の部材中間部で支柱と接続されている)場合は、桁梁にも変形が発生すると考えられる。
- ・ アレイ面は、ジャッキアップ量の増加によってハの字に開いていき、モジュール同士の隙間が小さくなるが、桁梁が先行して干渉することで、モジュールに致命的な被害は生じない。

今後は、実験結果を再現できる解析モデルを作成するとともに、実際に凍上被害が生じた架台の諸元を用いて、解析的に架台の凍上対策やコストを含めた実用性について検討していく。

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), Fukuoka, Japan.
- 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) 中村大, 門田峰典, 川口貴之, 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, 太陽エネルギー, 50(4), 36-42 (2024).
- 4) Dai Nakamura, Tomohide Taniguchi, Takayuki Kawaguchi, Shunzo Kawajiri, Tatsuya Watanabe, Basic Study on the Frost Heaving Behavior of Structures Using Laboratory Model Experiments, Journal of Snow Eng. of Japan, 37(3), 23-33 (2021).
- 5) 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, 116-119, (2025), 神奈川県.
- 6) Takanori Kadota, Dai Nakamura, Yoichi Hinata, Kenichi Hiraiwa, Kenta Nakai, Yusaku Fujita, Member response of photovoltaic array frame by frost heaving, Journal of Japan Solar Energy Society (in Japanese), 51(2), 49-54 (2025) (DOI: 10.24632/jses.51.2_49).
- 7) 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, 76-124, (2025), 神奈川県.
- 8) JIS C 8955, Load design guide on structures for photovoltaic array, 1-23, (2017), Japan.