

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

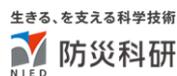
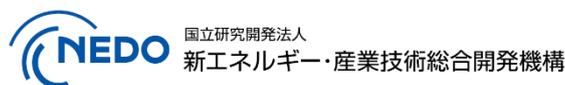
技術資料：

杭の凍上が架台や太陽電池モジュール等の

上部構造に与える影響

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

杭の凍上が架台や太陽電池モジュール等の上部構造に与える影響

1. 凍上による太陽電池アレイ用鋼製架台の部材応答

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。写真 1-1 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、凍上対策として有効となる基礎形式および埋設深さの研究^{1,2)}が実施されており、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、凍上対策として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、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。



a) 支柱のねじり



b) モジュールの持ち上がり

写真 1-1 凍上被害事例

2. 対象構造

2.1 架台の部材諸元

架台の説明図を図 2-1 に、部材断面を表 2-1 にそれぞれ示す。なお、図中に示す数字は表 2-1 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、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紹介しているが、その他は直接部材同士を接続させている。

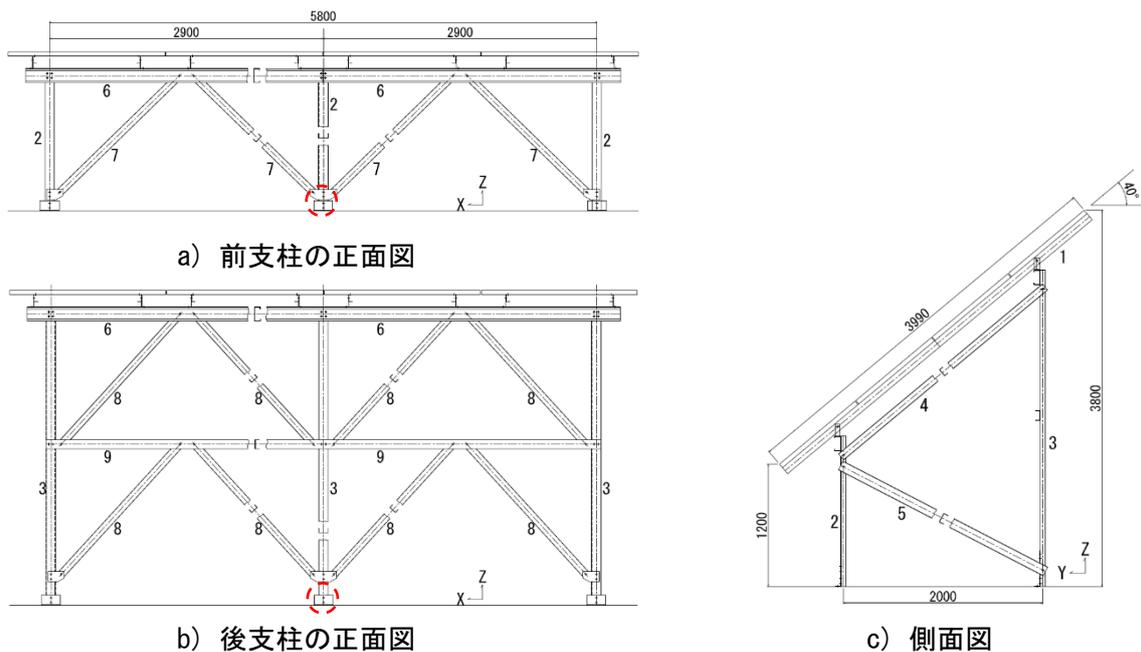


図 2-1 構造図

表 2-1 部材断面

部材番号	部材名称	供試体 1	供試体 2
1	垂木	[-80×40×2.3	[-60×30×2.3
2	前柱	[-100×50×2.3	[-80×40×2.3
3	後柱	[-100×50×2.3	[-80×40×2.3
4	小屋梁	[-80×40×2.3	
5	軸ブレース	[-100×50×3.2	[-80×40×2.3
6	桁梁	C-150×65×20×3.2	C-100×50×20×3.2
7,8	桁ブレース	[-80×40×2.3	
9	中間梁	[-100×50×2.3	[-80×40×2.3

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。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、モジュールの設計荷重は 2.4MPa となる。

2.3 基礎条件

供試体に対し、図 2-1 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（写真 2-1）。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）¹⁾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 1m×1m 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°C・day となった。



a) RC 基礎



b) スパイラル杭

写真 2-1 基礎条件

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2-1c)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3-1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、支柱の変形に追随するブレース（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。

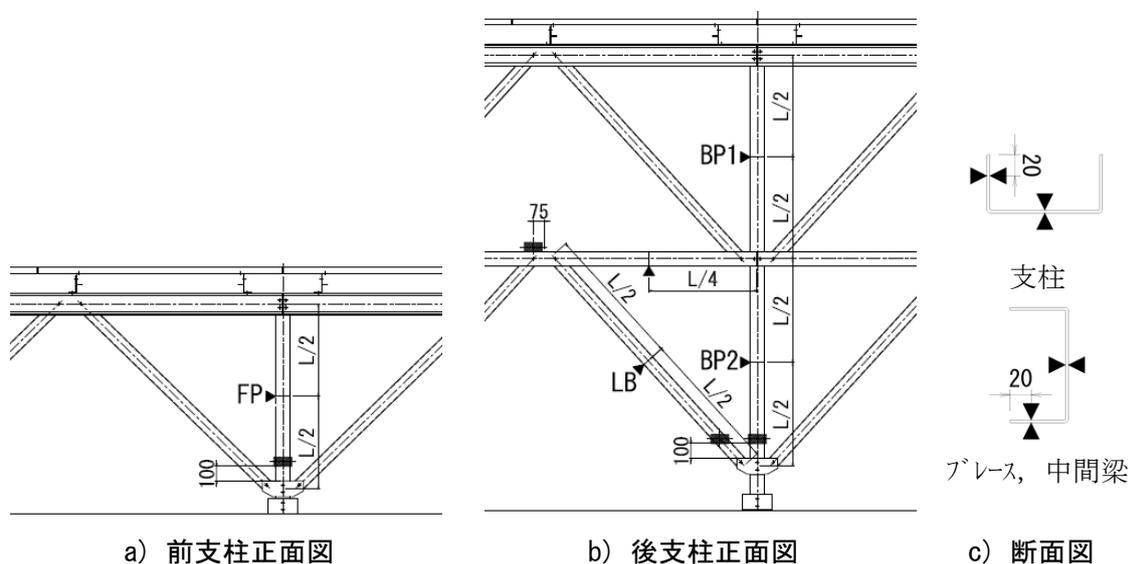


図3-1 計測位置

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 3-1 中の■で示す位置を計測対象とした。具体的な位置として、前後支柱に対して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）に対して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、各計測方向を写真 3-1 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。

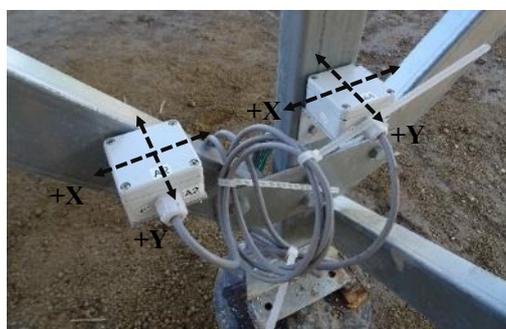


写真 3-1 傾斜計位置と方向

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。

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（写真 3-2）。



写真 3-2 計測状況

4. 計測結果の整理と部材応答の考察

4.1 共通事項

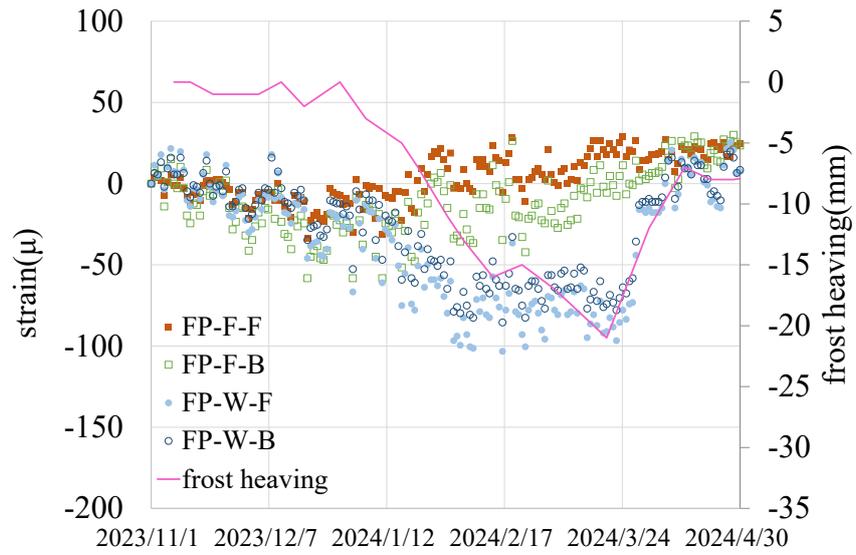
以降では、ひずみと凍上量の関係および傾斜角と凍上量を示す。なお、計測値は凍上量の測定と整合させ、正午の値を抽出している。グラフ中の“F-F”、“W-B”などの添え字は、ハイフン (-) の左側がフランジ (F) およびウェブ (W) を、右側が前面 (F) および裏面(B)を示す。また、凍上量は鉛直上向きを負の値として図中に示している。

4.2 前支柱のひずみー凍上量関係

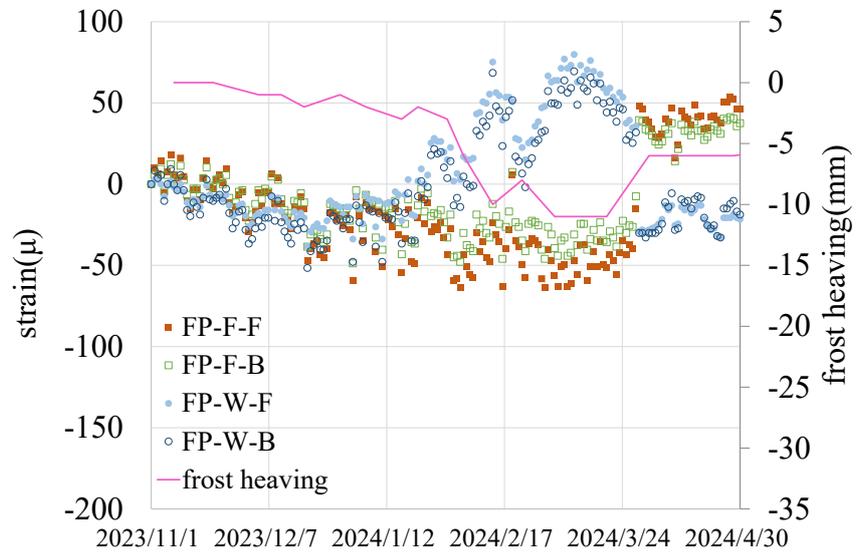
前支柱のひずみー凍上量関係を図 4-1 に示す。最大凍上量は、供試体 1 で-21mm、供試体 2 で-11mm となった。前述するように、凍上させるための基礎の条件は供試体間で同様としているが、2 倍の凍上差が生じた。

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が、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、他の部材とウェブ面で接続され、そこから力が伝達するため、断面中立軸からの偏心が要因として挙げられる。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、右側のフランジ面にのみ設置されるため、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。変形方向が供試体 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) 供試体 1



b) 供試体 2

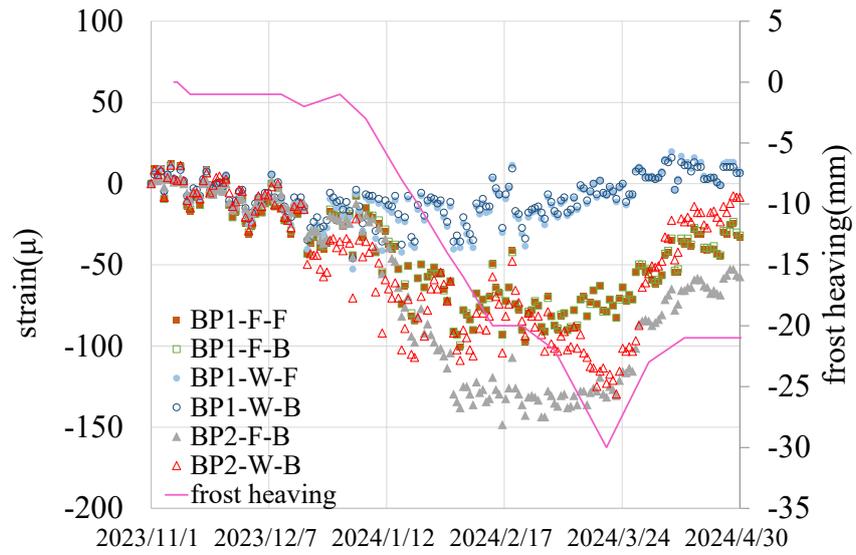
図 4-1 前支柱のひずみ - 凍上量関係

4.3 後支柱のひずみ－凍上量関係

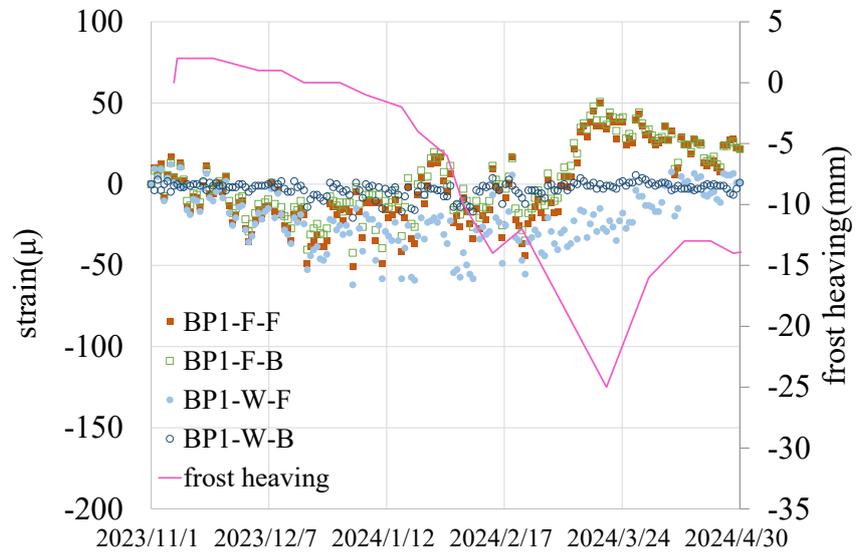
後支柱のひずみ－凍上量関係を図 4-2 に示す。最大凍上量は、供試体 1 で-30mm、供試体 2 で-25mm となり、前支柱に比べて供試体間の差は小さかった。

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、正面手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、断面内で一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。



a) 供試体 1



b) 供試体 2

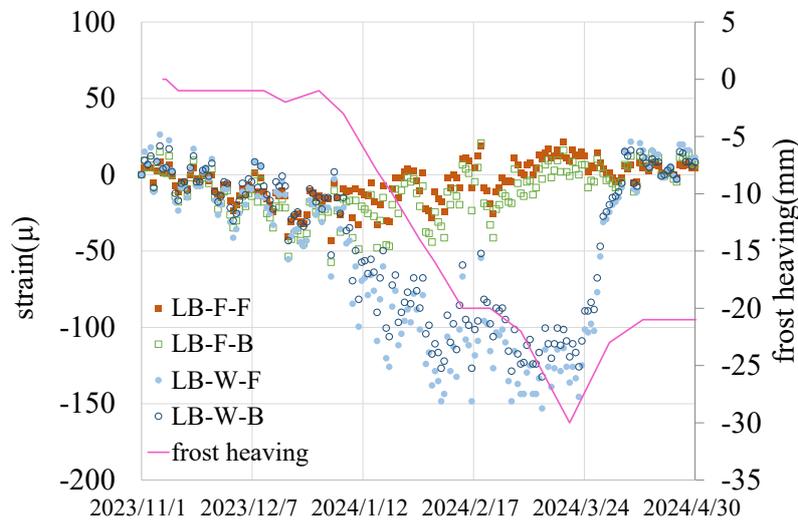
図 4-2 後支柱のひずみ - 凍上量関係

4.4 ブレースのひずみ-凍上量関係

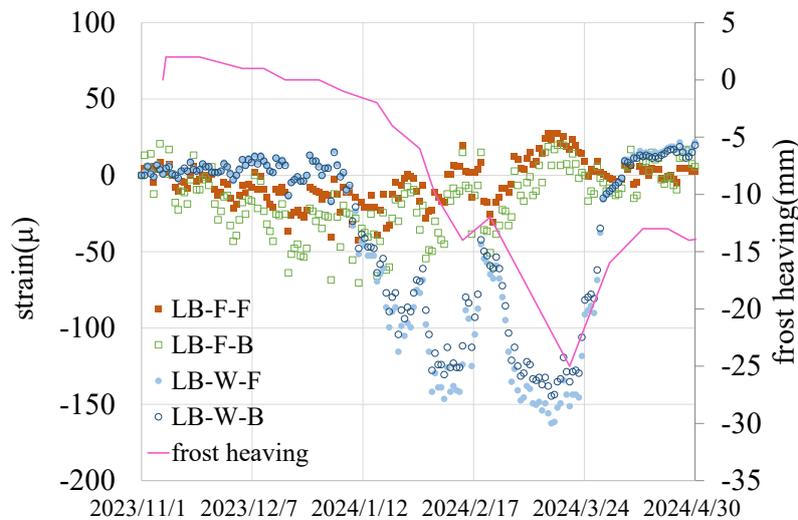
ブレースのひずみ-凍上量関係を図 4-3 に示す。なお、図中に示す凍上の推移は、後支柱側の計測結果である。

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) 供試体 1



b) 供試体 2

図 4-3 ブレースのひずみ - 凍上量関係

4.5 傾斜角－凍上量関係

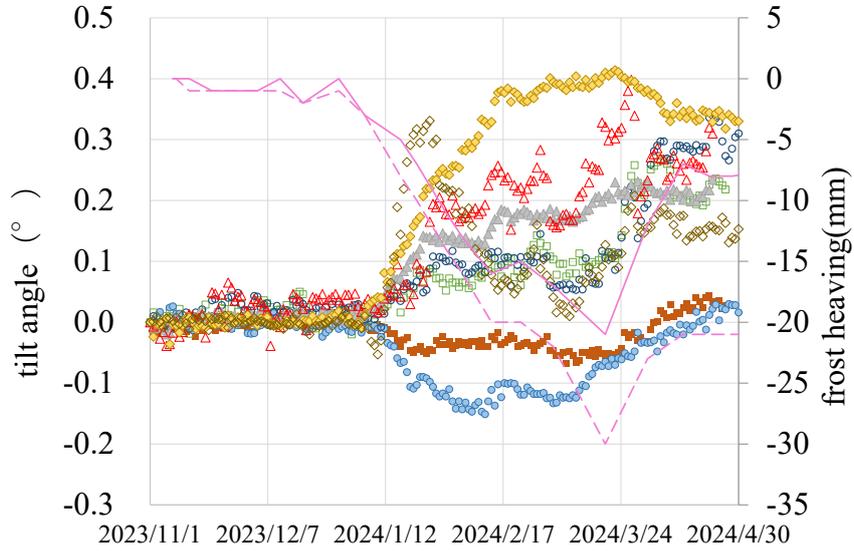
傾斜角－凍上量関係を図 4-4 に示す。

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。

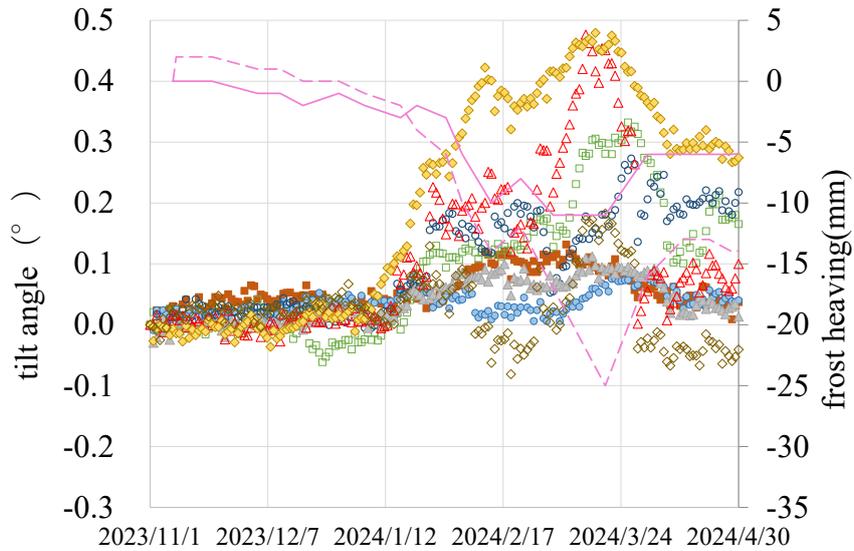
ブレースでは、両供試体ともに+X 方向および+Y 方向に傾斜していくことから、ねじり変形が生じていることがわかる。傾斜の方向は正面手前側となり、他の部材に比べて大きな変形を示す。

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 ($\Phi 14$) と軸芯 ($\Phi 12$) 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。

- front column_X-direction
- rear column_X-direction
- ▲ brace_X-direction
- ◆ middle beam_X-direction
- frost heaving(front column)
- front column_Y-direction
- rear column_Y-direction
- △ brace_Y-direction
- ◇ middle beam_Y-direction
- - - frost heaving(rear column)



a) 供試体 1



b) 供試体 2

図 4-4 傾斜 - 凍上量関係

4.6 凍上による部材応答の考察

4.6.1 架台全体の応答性状

本研究で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。各部材は塑性化せず、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が発生することも十分考えられる。このため、支柱中央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 4-1）。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が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。

表 4-1 -30mm 凍上時の最大ひずみ

	前支柱	後支柱	ブレース
供試体 1	138 μ (1.00)	-130 μ (1.00)	-153 μ (1.00)
供試体 2	218 μ (1.58)	42 μ (0.32)	-194 μ (1.27)

5. 凍上による太陽電池アレイ用鋼製架台の部材応答のまとめ

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、支柱中央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。

6. 凍上を模擬した太陽光電池アレイ用鋼製架台のジャッキアップ実験

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および解析的な検討を実施している。2023年11月から2024年4月まで実施した屋外実験では、凍上の増加に伴う各部材の応答特性や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程度と想定より小さく、実現状況にて起こる架台およびモジュールの応答を捉えるに至っていない。

ここでは、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強制変位実験を実施した。

7. 対象構造

7.1 架台の部材諸元

架台の説明図を図7-1に、部材断面を表7-1にそれぞれ示す。なお、図中に示す数字は表2-1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、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紹介しているが、その他は直接部材同士を接続させている。

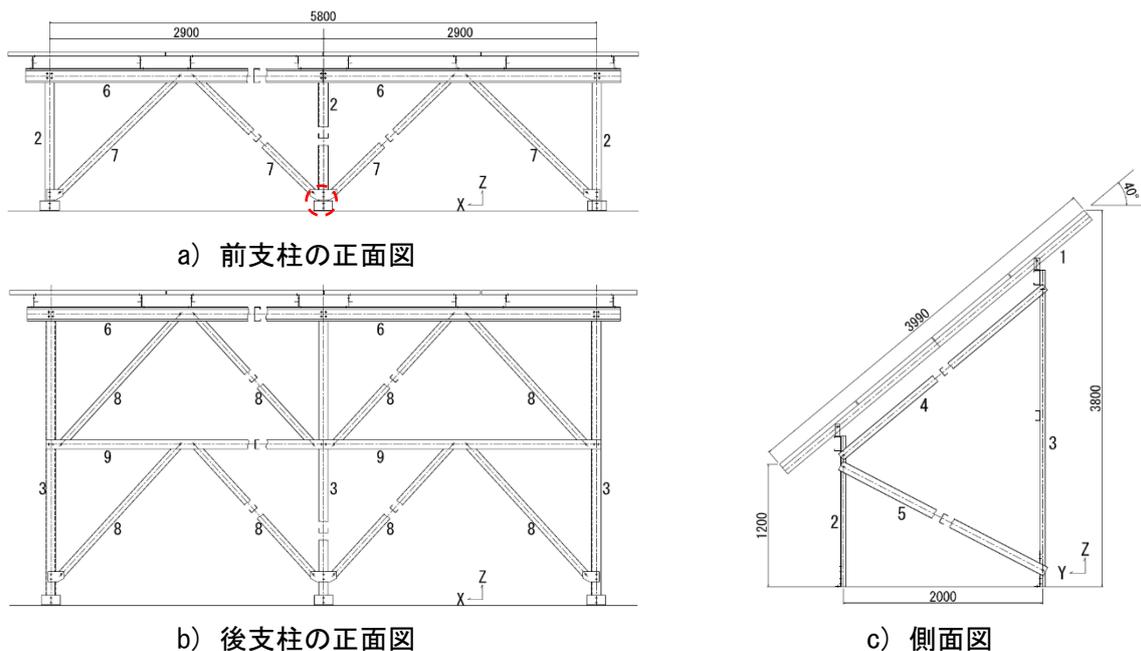


図 7-1 構造図

表 7-1 部材断面

部材番号	部材名称	供試体 1	供試体 2
1	垂木	[-80×40×2.3	[-60×30×2.3
2	前柱	[-100×50×2.3	[-80×40×2.3
3	後柱	[-100×50×2.3	[-80×40×2.3
4	小屋梁	[-80×40×2.3	
5	軸ブレース	[-100×50×3.2	[-80×40×2.3
6	桁梁	C-150×65×20×3.2	C-100×50×20×3.2
7,8	桁ブレース	[-80×40×2.3	
9	中間梁	[-100×50×2.3	[-80×40×2.3

7.2 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。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、モジュールの設計荷重は 2.4MPa となる。

8. 強制変位実験に向けた実験計画

8.1 はじめに

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強制変位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には根入れ 1m のスパイラル杭を、凍上させない 4 隅には RC 基礎をそれぞれ施工している（写真 3-1）。このため、実験に際して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する必要があった。また、使用する油圧ジャッキは手動式となり、連動ができないため、ジャッキアップする支柱を 1 本に限定させる必要があった。

そこで、実験に先駆けて FEM 解析を行い、ジャッキアップ時の架台およびモジュールの応答を把握するとともに、対象とする支柱や計測位置を計画した。



a) RC 基礎



b) スパイラル杭

写真 8-1 基礎条件

8.2 FEM 解析による応答の把握

8.2.1 モデル化の方針

供試体 1 を対象とした解析モデルを図 8-1 に示す。解析コードは MIDAS NFX 2019 R1 である。架台を構成する部材同士はボルト 1 本で接合されており、回転の影響を再現するため、図 8-1b) に示すようにソリッド要素で詳細にモデル化した。図 8-1c) は、ソリッド要素部のボルトを切断した図となる。一方、その他の部位となる部材中央やモジュールは、解析コストを軽減するため、シェル要素でモデル化した。なお、モジュールと架台を接続するボルト部は、棒要素を用いている。メッシュ分割の条件として、局所的な応力集中や座屈変形が把握できるよう、要素サイズ 10mm、アスペクト比 1:1 を基本とした。

解析に適用した各材料の機械的性質および材料定数を表 3-1 に示す。架台は SGMH400、普通ボルト（めっき処理）は SS400 であり、これら鋼部材の物性値は鋼構造設計基準⁵⁾を参照した。また、応力-ひずみ曲線は、降伏応力を 235N/mm^2 とした完全バイリニアでモデル化した。降伏条件はフォンミーゼスである。モジュールのガラスは半強化ガラスであり、メーカーのサイトから物性値を確認した⁶⁾。ガラスの応力-ひずみ曲線は、種類や板厚によら

ず最大強度まで比例関係を示す⁷⁾ことから、半強化ガラスの引張強度 42 N/mm^2 で折れる完全バイリニアとした。また、モジュールのフレームはアルミニウムであるが、メーカーヒアリングより材料に関する詳細な情報が入手できなかったため、ここでは、建材や形材に多用される 6000 系とし、その中でも A6N01S-T5 の物性値⁸⁾を採用した。応力-ひずみ関係は、降伏応力を 225 N/mm^2 とした完全バイリニアでモデル化した。

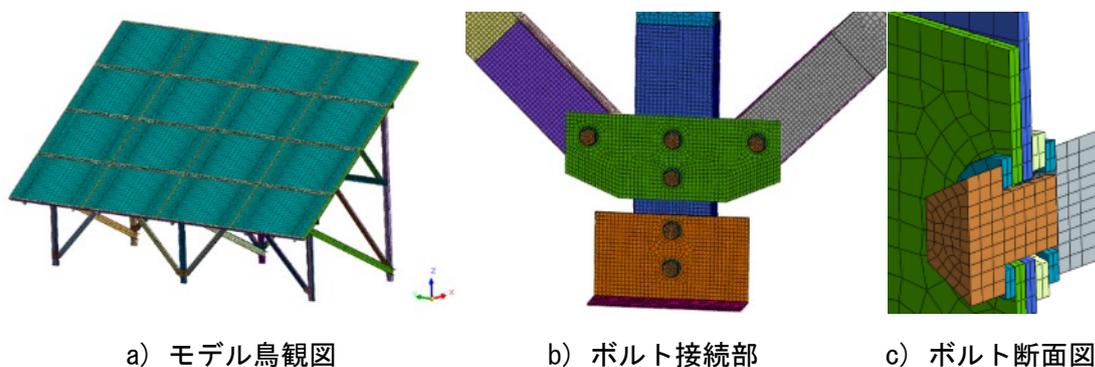


図 8-1 解析モデル

表 8-1 材料物性

	鋼材	半強化ガラス	アルミニウム
弾性係数 (N/mm^2)	2.05×10^5	7.3×10^4	7.0×10^4
ポアソン比	0.30	0.20	0.33
単位体積重量 (kN/m^3)	77.0	25.0	27.0

8.2.2 荷重条件

自重は、表 3-1 に示す単位体積重量と部材寸法から分配させた。モデル化を省略した部材はないため、単位体積重量の割増しは行っていない。

対象とする支柱下端に変位制御による漸増荷重を定義することで、ジャッキアップによる柱の持ち上げりを模擬した。ステップは 0.1mm 毎とした。

8.2.3 境界条件

強制変位を与えない左右 4 隅の柱下端は、ジャッキアップによって変位しないとみなし、完全固定とした。ソリッド要素部は、部材同士の節点を共有せず、接触条件を定義した。具体的には、ボルト、座金、ナットを含めた部材同士の接触面において、垂直方向および法線方向の接触力を受ける条件を定義した。この際、めっきのすべり係数は $0.1 \sim 0.3$ となることから平均の 0.2 を採用した。また、ボルトの初期応力度として、降伏応力の 7 割となる 164.5N/mm^2 を入力した。

8.2.4 解析結果

特徴的な変形として、図 8-2 には、中央の前柱のみを 17mm ジャッキアップさせた際の結果を示す。これから、モジュールがハの字に開き、前側で干渉することが見て取れる。一方、中央の後支柱のみをジャッキアップさせた際には、このような変形は見られなかった。このことから、ジャッキアップの対象は中央の前支柱のみとし、支柱間の変形差による支柱の応答やモジュールの破損の有無を確認することとした。ここで、凍上現象は地盤内の水分量に依存するため、1本の支柱のみが凍上するということも十分考えられると判断した。

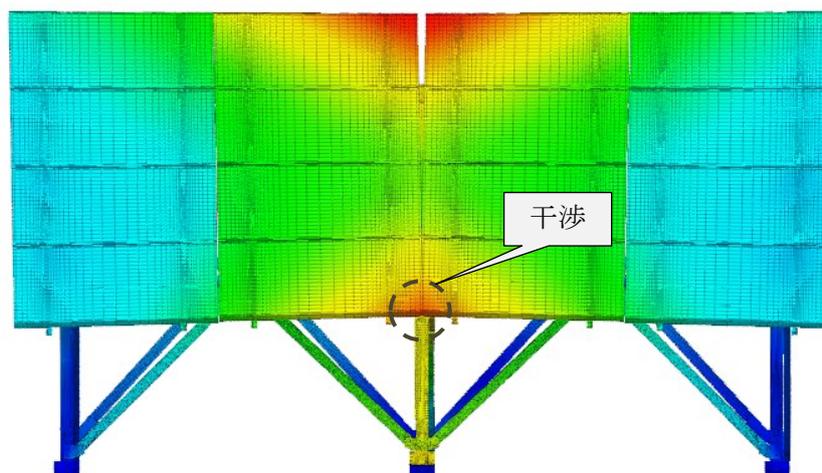


図 8-2 前支柱のみを 17mm ジャッキアップした際の変形図

8.3 解析結果を踏まえた計測条件の設定

8.3.1 ひずみ計測

ひずみを計測する対象は、ジャッキアップを行う前支柱、前側の左ブレース、前側の桁梁を基本とした。計測断面は、応力集中の影響を避けた各部材の固定点の中間とし、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（図 8-3）。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。

8.3.2 傾斜計測

支柱の全体座屈とブレースおよび桁梁のねじりを把握するため、図 3-2 中の■で示す位置を計測対象とした。具体的な位置として、支柱に対してはガセットプレート上端から 100mm のウェブ、ブレースに対しては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。設置状況と各計測方向を写真 3-2 に示す。

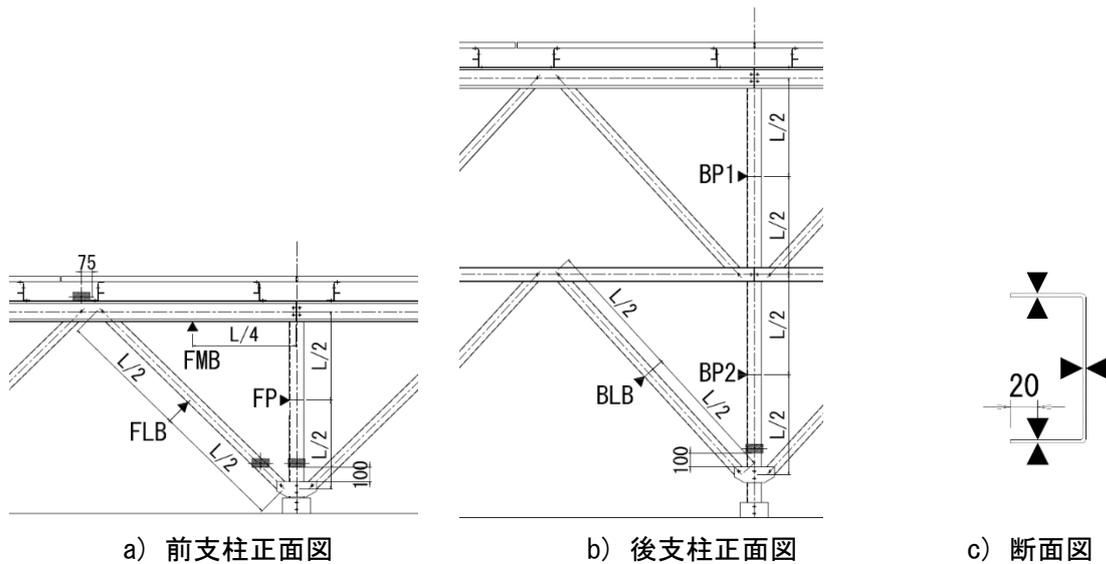


図 8-3 計測位置

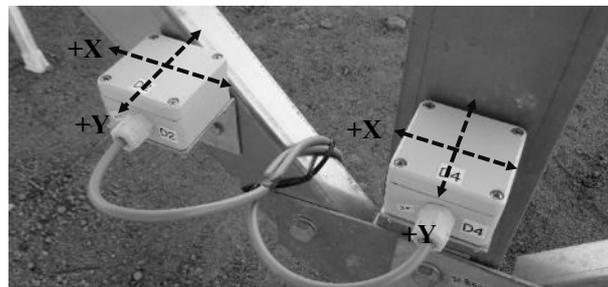


写真 8-2 傾斜計位置と方向

8.3.3 反力および変位の計測

計測状況を写真 3-3 に示す。ジャッキアップ時の反力は、写真 8-3b)に示すように、油圧ジャッキの上に取り付けたロードセルにて計測した。ロードセルと油圧ジャッキは治具によって固定している。また、支柱側は、支柱下端に溶接で取り付けられた治具に対して、円柱型の起歪部を接触させた。つまり、ヒンジ支持となり、鉛直軸回りに回転する条件となる。

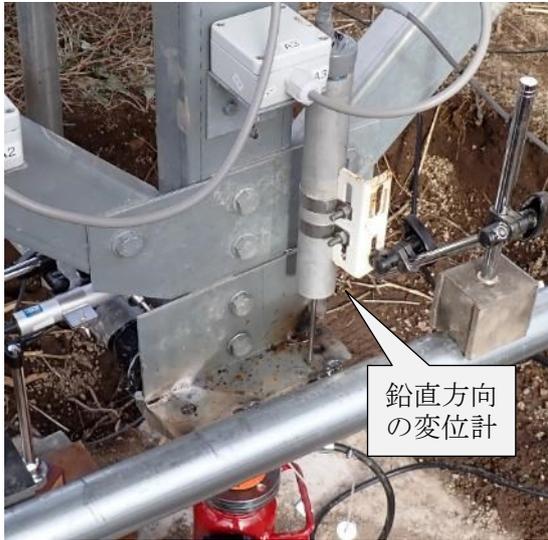
ジャッキアップ時の支柱下端の鉛直変位は、写真 8-3c)に示す接触式変位計によって計測した。ここで、事前の解析の結果、支柱が時計回りにねじれることがわかったが、冬季計測時には支柱のねじりは生じておらず、上記ヒンジ支持ではスパイラル杭の抵抗を再現できない可能性があった。そこで、写真 8-3d)に示すように単管でガセットプレート裏面を押さえ、回転を拘束することとした。その際、念のため回転変位を接触式変位計にて計測した。



a) 遠望



b) ジャッキアップ点



c) 鉛直方向の変位計



d) 水平方向の変位計

写真 8-3 計測状況

9. 計測結果の整理と部材応答の考察

9.1 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 程度毎にジャッキアップを保持した状態にてデータを収録し、その後、16kN を過ぎてからは反力に対して鉛直変位が増加したため、変位制御として2~3mm 毎にデータ収録を行った。

9.2 反力と変位の関係

以降では、供試体 1 に対する試験結果を示す。なお、応答が小さい後支柱側は割愛する。

図 9-1 には、ジャッキ反力と鉛直方向および水平方向の変位の関係を示す。まず、反力と水平変位の関係について説明する。反力が小さいうちは、単管の拘束もあり、前支柱にはねじれが生じていない。なお、支柱が単管を押し返す状況から、ジャッキアップ序盤は解析と同様、時計回りのねじりが生じていることを確認している。ただし、7kN あたりからマイナス側の値にシフトし、反時計回りにねじり始めたため、一度除荷を行い、変位計の盛替えを行った。その後、ジャッキアップを再開し、11.8kN を超えてから一気に反時計回りのねじりが進展したため、13.3kN で除荷を行い、拘束用の単管を盛替えた。最終的には 90mm までジャッキアップを行ったが、40mm 近い変形が発生しており、単管で拘束されるにも関わらず、大きなねじり変形を示した。つまり、土質条件にも依存すると思われるが、1 章で例示する支柱のねじりは、凍上量の増加とともに発生する可能性がある。

続いて、反力と鉛直変位の関係に着目すると、ジャッキアップ序盤は概ね一定勾配で推移していくが、10kN~16kN、16kN 以降で勾配が緩やかになり、剛性の低下を示す。このうち、10kN 近傍に着目すると、ボルト接続部で「ギシギシ」という音が聞こえるようになり、恐らく、ボルト部ですべりが発生し、部材の回転に伴い変位が増加した可能性が高い。この図から、前述する支柱のねじりとの直接的な応答の関連性は見られないものの、ねじりの発生に起因し、支柱やブレースに降伏や座屈といったイベントが発生したと考えられる。

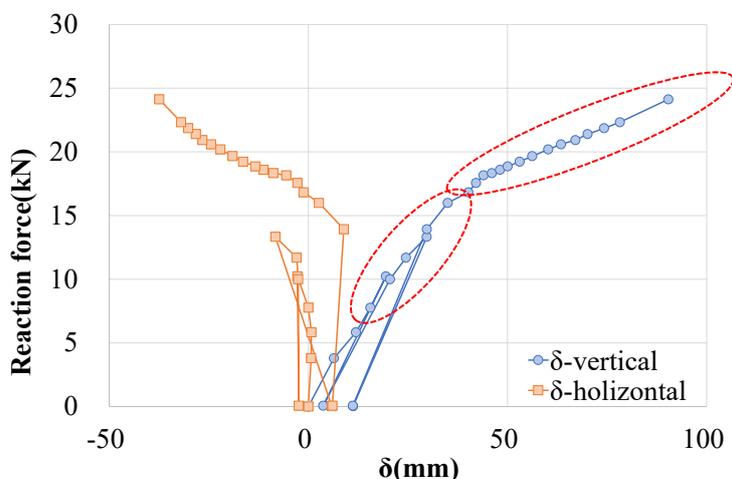


図 9-1 反力 - 変位関係

9.3 各部材の応答

9.3.1 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。また、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) を示しており、頭の記号は L が下側もしくは左側、U が上側、R が右側となる。また、右側が前面 (F) および裏面 (B) を示す。

9.3.2 前支柱のひずみ応答

図9-2には、前支柱のひずみ応答を示す。ウェブでは、ジャッキアップ量の増加に伴い圧縮ひずみが増加していき、30mmの時点で一時的に減少するものの、その後は一定した増加を示す。表裏のひずみは一致しており、板曲げの影響は見られない。一方、左右のフランジではウェブと異なる応答を示す。まず左フランジでは、ジャッキアップ序盤に引張ひずみが発生し、ウェブと同様に30mmで減少する。ここまではウェブと対称の応答となるが、その後、引張ひずみや圧縮ひずみの増加が交互に生じ、複雑な応答を示す。また、右フランジでは表裏のひずみが異なっており、表面では圧縮、裏面では引張となる曲げ変形を示す。90mmのジャッキアップにおいても最大ひずみは500 μ 程度となり、部材は弾性域に留まっていることがわかる。

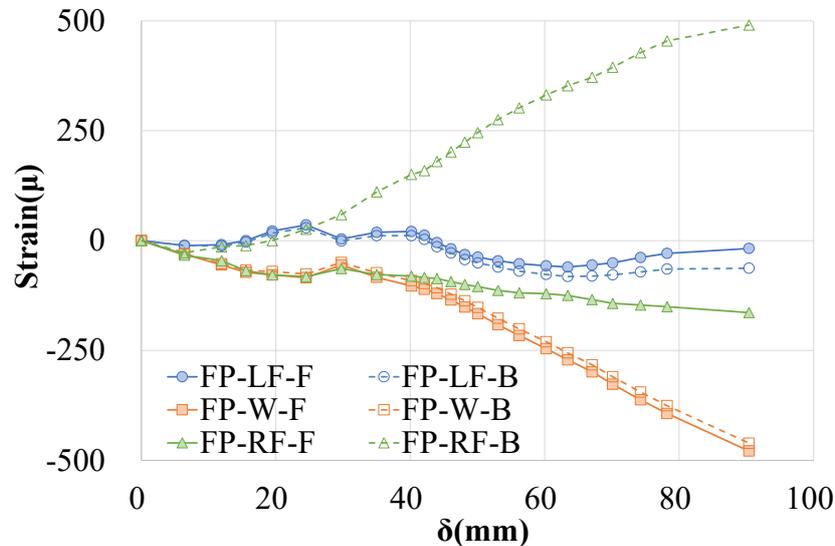


図9-2 前支柱のひずみ応答

9.3.3 ブレースのひずみ応答

図 9-3 には、ブレースのひずみ応答を示す。ウェブでは、圧縮ひずみが増加していき、30mm の時点で一時的に増加を示す。その後、ひずみが増加せず、概ね横ばいとなる。上下フランジでは、30mm で引張ひずみが一時的に増加するが、その後減少し、40mm 近傍から再び増加に転じる。応答としては前支柱の左フランジと類似する。

表裏のひずみの関係から、ウェブおよび上フランジでは軸圧縮が卓越して生じる一方、ジャッキアップ量の増加とともに、下フランジでは開きが見られ、板曲げの発生が見られる。最大ひずみは 250 μ 程度となり、前支柱に比べて半分程度となる。

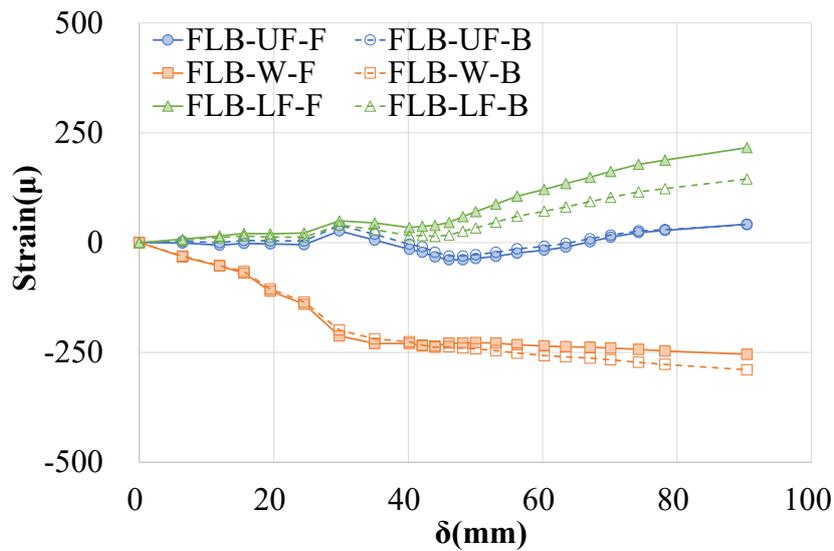


図 9-3 ブレースのひずみ応答

9.3.4 桁梁のひずみ応答

図 9-4 には、桁梁のひずみ応答を示す。ウェブでは、引張ひずみが増加していき、40mm 以降、ひずみが増加せず、概ね横ばいとなる。表裏でひずみの差はない。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、それぞれが対称の応答を示す。桁梁には、前支柱やブレースで見られた 30mm 時点での一時的なひずみ増加は確認されない。

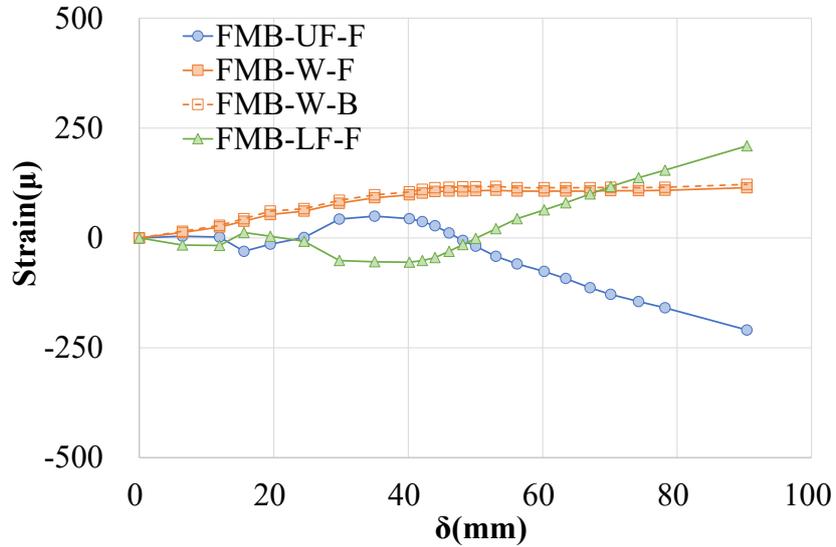


図 9-4 桁梁のひずみ応答

9.4 変形状況

写真 9-1 には、定点カメラで撮影した 90mm ジャッキアップ時のモジュールの変形状況を示す。これから、ジャッキアップ量の増加に伴い、事前の FEM 解析の結果と同様、モジュールが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ことを確認できる。

隙間の計測状況として、モジュール同士の隙間を写真 4-2 に、桁梁同士の隙間を写真 4-3 にそれぞれ示す。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 あったが、1mm まで近づいた後は変化が見られなくなった。一方、桁梁同士の隙間は当初 5mm あり、ジャッキアップ 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、桁梁が先行して干渉することで、ジャッキアップによる変形が拘束され、モジュール同士が干渉して破損することは生じなかったと考えることができる。

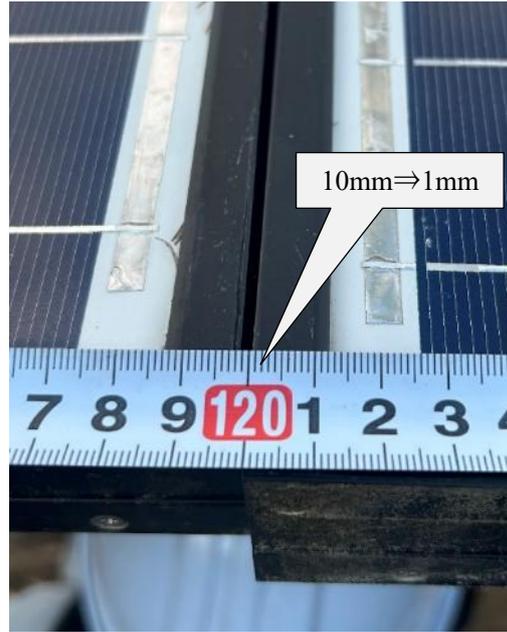
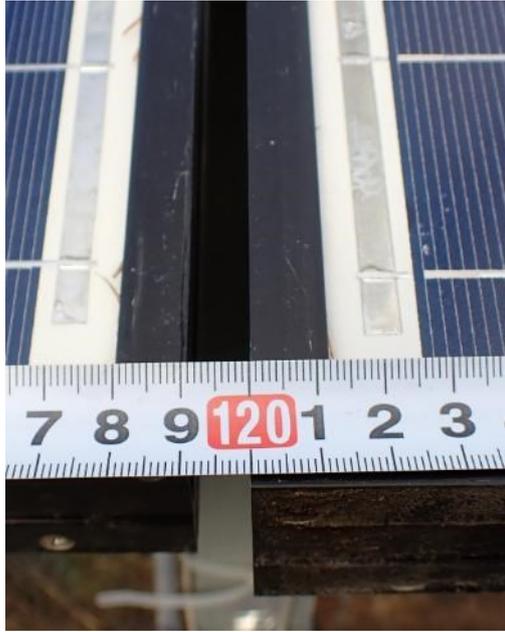


a) ジャッキアップ 0mm 時点



b) ジャッキアップ 90mm 時点

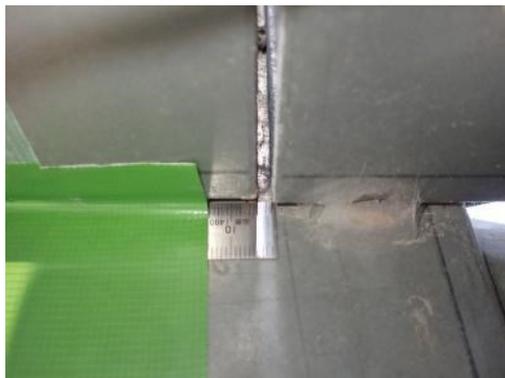
写真 9-1 架台全体の変形状況（定点カメラ）



a) ジャッキアップ 0mm 時点

b) ジャッキアップ 90mm 時点

写真 9-2 モジュール同士の隙間



a) ジャッキアップ 0mm 時点

b) ジャッキアップ 90mm 時点

写真 9-3 桁梁同士の隙間

ジャッキアップ点近傍の残留変形の状況を写真 9-4 に示す。前支柱とブレースを接続するガセットプレートにて、曲げ変形による部材降伏が確認でき、油圧ジャッキを撤去した後において、 30° 程度のねじり変形が支柱に残留している。降伏位置近傍のひずみは計測していないため、降伏に至った時点は明確ではないが、ジャッキアップ 30mm の時点から曲げ変形が卓越して発生した。このことは、図 9-2 に示す前支柱のひずみ応答や、図 9-3 に示すブレースのひずみ応答からも変化が確認できるため、タイミングとしては妥当であると判断できる。つまり、比較的小さいジャッキアップ量にて降伏するということであり、このような状態で、風荷重や地震荷重に対するパフォーマンスが確保できるかは不明となる。



写真 9-4 残留変形の状況

10. 凍上を模擬した太陽光電池アレイ用鋼製架台のジャッキアップ実験

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強制変位実験を実施した。以降に本研究のまとめを示す。

- ・ 90mm 程度のジャッキアップを行った結果、支柱間の変位差に伴う太陽光パネルの段差や、支柱のねじれ変形が生じた。これらは、実現象で生じている凍上被害と一致していることから、発生メカニズムを明確にできたと思っている。
- ・ ジャッキアップ量（凍上量）の増加に伴い、事前の FEM 解析の結果と同様、モジュールが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ことを確認した。ただし、前支柱の桁梁同士が先行して接触し変形を拘束することで、太陽電池モジュールには致命的な被害は生じなかった。

比較的小さいジャッキアップ量（凍上量）で、支柱とブレースを接続するガセットプレートが降伏に至ることがわかった。このような状態で、風荷重や地震荷重に対するパフォーマンスが確保できるかは不明であるため、今後、解析的に設計荷重に対する構造安全性を検証する必要がある。

参考文献

- 1) 中井健太, 中村大, 川口貴之, 鍛冶元雅史: 実物大規模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, 第 58 回地盤工学研究発表会, 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, 2024.
- 4) JIS C 8955: 太陽電池アレイ用支持物の設計用荷重算出方法, 2017.
- 5) 日本建築学会: 鋼構造設計基準, 2005.
- 6) Targray.com/solar/pv-glass (2023 年 9 月 30 日閲覧)
- 7) 長町祐吾, 北田俊行, 山口隆司, 松村政秀: 構造部材として用いるガラス板材料の静力学特性に関する実験的研究, 平成 21 年土木学会関西支部年次学術講演会, pp. I-15, 2009.
- 8) 前田義裕: アルミニウム構造物の現状, アルミニウム合金材の土木構造物への活用に関するシンポジウム, 1-5, 2012.

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。