

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 2023 年版

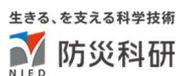
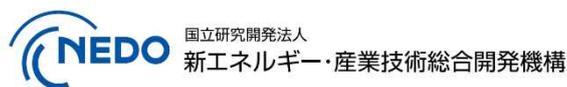
技術資料：

太陽光発電システム用架台の耐風性能試験

(一部杭基礎支持力が不足している場合)

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。

2024 年 5 月 31 日



更新・修正履歴

- ・ 2023/4/28 公開
- ・ 2024/5/31 内容更新

太陽光発電用架台の耐風性能試験（一部杭基礎支持力が不足している場合）

1. 概要

「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 技術資料」【技術資料 G1】¹⁾杭基礎支持力の実証実験により、貫入深さが 1~3m の杭基礎では、地盤調査より得た地盤特性値から推定した極限周面摩擦力に対して試験結果が大きくばらつくことが示された。斜面に太陽光発電設備が建設された場合には、杭基礎施工の困難さもあり、架台を支持する一部の杭基礎では支持力が不足する可能性が考えられる。

同文献【技術資料 E1】²⁾では、太陽光発電用架台の全柱脚が固定された条件下で耐風性能試験を実施し、「設計荷重」に対して「破壊荷重³⁾」が 1~4 倍程度の安全率があることが示されている。本資料では、文献²⁾で実施された太陽光発電用架台の耐風性能試験を基本とし、さらに一部の杭で支持力が不足している架台を想定した試験を実施する。試験結果より、一部の基礎浮き上がりに対する太陽光発電用架台の脆弱性を明らかにし、対処案を提示する。

2. 試験計画

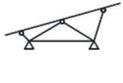
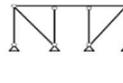
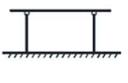
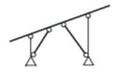
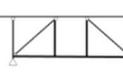
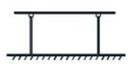
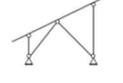
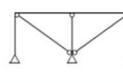
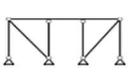
試験体は、文献²⁾において耐風圧性能試験が実施された太陽光発電用架台のうち、「iii ピン構造（アルミニウム製）」およびモジュール面支持架構を「列数に応じて連結」を採用した（表 2-1 黄色枠線）。本架台では、東西に配した 5 本のパネル受け材を南北に配したピン構造で支持する。太陽電池モジュールの寸法および配列は、全て文献²⁾に準じた。太陽光発電用架台を支持する杭のうち一部の杭基礎支持力が不足しているという支持条件は、6 箇所ある柱脚のうち 1 箇所のみ固定せず浮き上がりを許容する支持条件とすることで簡単にモデル化した。なお、非固定支持とした柱脚は、負圧力下で最も大きな引抜き力が作用する北側中央に位置する。試験体架台の設計荷重は 1334Pa である。なお、文献²⁾では破壊荷重を接合部の滑りで決定しているが、架構を構成する部材の軸あるいは曲げ降伏時を破壊荷重と定義すると、同架台の安全率は 2 程度（破壊荷重 2600 Pa）と推定される。

試験では、太陽電池モジュール設置面の鉛直方向変位を計測した。また、基礎固定条件の違いによる架台に発生する応力分布の違いを比較するために、南北方向に配した架構（表 2-1(a)側面）に歪ゲージを添付した。

耐風圧試験に用いた装置は、文献²⁾を参照されたい。シートによる漏気防止処置は、非固定支持とした柱脚の浮き上がり変位を 450mm 程度まで許容できるように行った。

表 2-1 一部基礎非固定用試験体の架台構造形式 (文献²⁾ 転記)

(a) 構造形式

No.	構造形式	構造形式図		材質	No.	構造形式	構造形式図		材質
		側面	背面				側面	背面	
i	ピン構造			鋼製	iv	柱構造			アルミニウム + 鋼製
ii	方づえ + ピン構造			鋼製	v	柱構造			アルミニウム + 鋼製
iii	ピン構造			アルミニウム製	vi	ピン構造			鋼製 単管パイプ

(b) モジュール面支持架構の形式

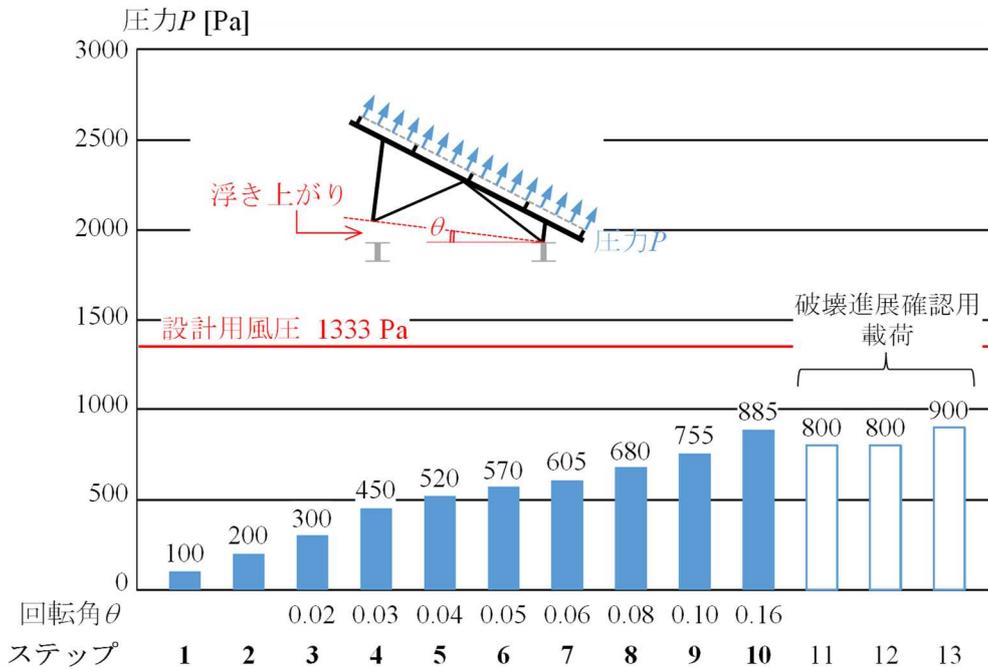
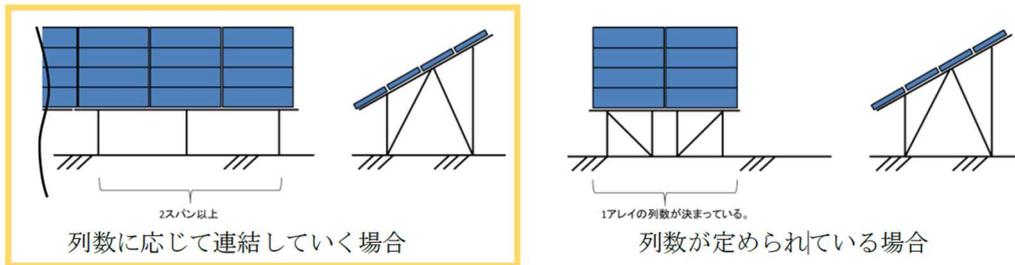


図 2-1 載荷試験の荷重ステップ (一部基礎非固定支持条件)

加圧は、杭に引抜きが発生する負圧载荷のみ実施した。図 2-1 に、一部基礎非固定試験における载荷ステップを示す。载荷は、目標圧力あるいは浮き上がり回転角 θ が目標値に達した後、圧力を 10 秒程度維持してから除荷するという方法で実施した。浮き上がり回転角 θ は、図 2-1 中に定義した柱脚の浮き上がりを許容した構面における架構回転角である。図 2-1 に示すように、载荷ステップ 3 までは目標圧力 P を 100Pa ずつ上昇させ、それ以降は浮き上がり回転角 θ を 0.01rad (0.06rad 以降は 0.02 rad) ずつ増加させた。载荷ステップ 10 では、浮き上がり変位が漏気防止シートの限界に達するまで载荷した。载荷ステップ 11~13 では、载荷ステップ 10 で生じたパネル受け材連結部破壊後の架台の損傷進展を確認するため、 $P = 800\sim 900\text{Pa}$ で繰り返し载荷した。なお、文献²⁾の全基礎固定試験における载荷ステップでは、架台が破壊に至るまで荷重ステップ毎に圧力 P を 250Pa ずつ上昇させている。詳細は、文献²⁾を参照されたい。

3. 試験結果

図 3-1 に、全基礎固定支持条件における架台の破壊性状を示す。全基礎固定支持条件では、1250Pa において梁と支柱接合部に滑りが発生し、1800Pa において太陽電池モジュール受け材押え金具の緩みが見られ、最終的には 2600Pa において中央北側の基礎締結金具でボルトの端ぬけ破壊および基礎板の破断が発生した。なお、同時点でパネル受け材中央が曲げ降伏していたと推測される。全基礎固定支持条件における終局荷重 2600Pa は、設計荷重 1334Pa に対して 2 倍の余裕度を有することが示された。

図 3-2 に、一部基礎非固定支持条件における架台の破壊性状を示す。北側中央の柱脚が浮き上がり、太陽電池モジュール面が大きく歪曲した。680Pa で非固定支持柱脚直上に配した北側中央の太陽電池モジュールフレームが座屈し、755Pa で同太陽電池モジュールのカバーガラスが破損した。その後も加圧し続けると、885Pa で最も北側に配したパネル受け材中央の連結部で太陽電池モジュール受け材が支圧破壊し、その後の繰り返し载荷で一つ南側の受け材押え金具が破損し落下した。架台の破壊荷重は 680Pa と判断でき、設計荷重 1334Pa に大きく満たなかった。

一部基礎浮き上がり時に太陽電池モジュール受け材が抵抗して東西に隣接する南北架構まで応力を伝達するには、太陽電池モジュール受け材の曲げ剛性は低すぎることを示唆される。また、一部非固定支持条件においては、パネル受け材中央の連結部の固定度の低さが原因で、北側中央柱脚が浮き上がった際に中央の連結部で太陽電池モジュール受け材が折れ曲がるような変形が生じた(図 3-2 右)。その結果、折れ曲がり部直上に配したモジュールのフレームが座屈し、その後のカバーガラスの破損を誘発したと考えられる。文献²⁾においても指摘されているが、太陽光発電用架台では、接合部および継手部の破損で耐風圧性能が決定される傾向にあることが、本試験でも明らかとなった。

以上の試験結果については、詳しくは文献⁴⁾を参照されたい。



パネル受け材押え金具の緩み (1800 Pa)

基礎締結金具の破損 (2600 Pa)

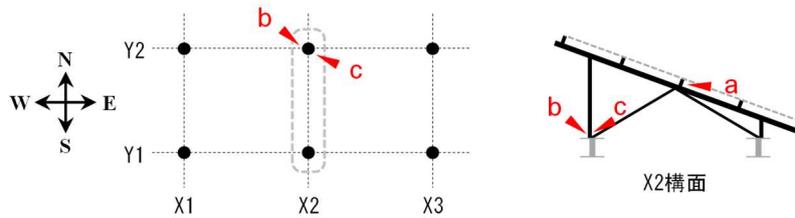
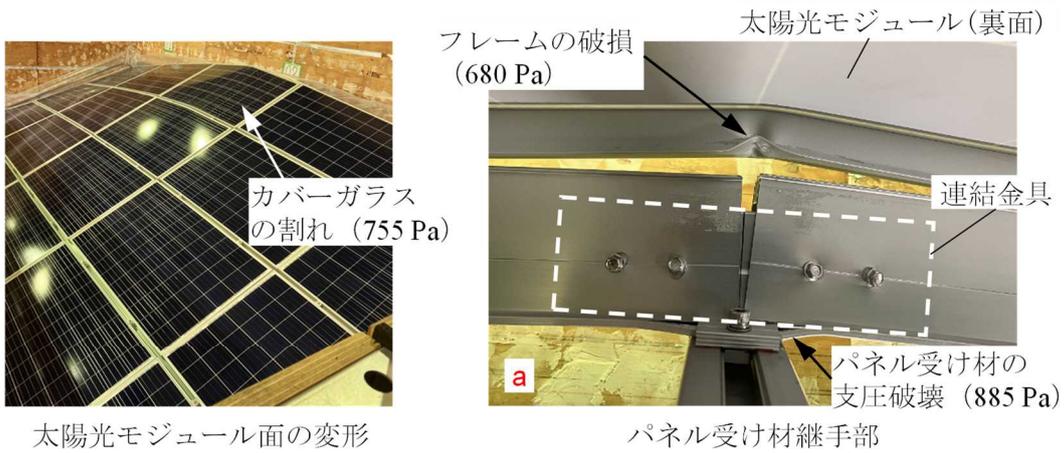


図 3-1 耐風圧実験における太陽光発電用架台の破壊状況 (全基礎固定支持条件)



太陽光モジュール面の変形

パネル受け材継手部

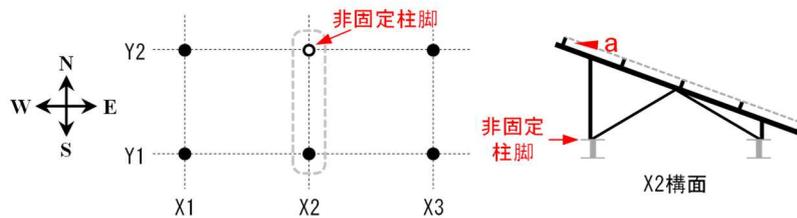


図 3-2 耐風圧実験における太陽光発電用架台の破壊状況 (一部基礎非固定支持条件)

4. 対策案

以上より、太陽光発電用架台において一部の杭で支持力が不足した場合は、負圧下の設計荷重に対して 2 倍の安全率を見込んでいたとしても、主に東西方向への架構の曲げ剛性の低さから、想定する耐風圧性能の保証が困難である可能性が示された。対処法として、第一に全ての杭基礎における設計支持力の確保が考えられるが、杭支持力の検査は実務上大きな労力を伴う。架台側の対処法として、東西方向の部材の曲げ剛性の向上や弱点となる可能性の高い接合部の補強、あるいは斜材を配して積極的に架台の浮き上がりに対する抵抗力を増加させるなどが考えられる。

ここでは、負圧下で基礎が浮き上がる場合について、図 4-1 に示す 2 つの対策の効果を検証する。なお、架構の部材断面は変更しない。

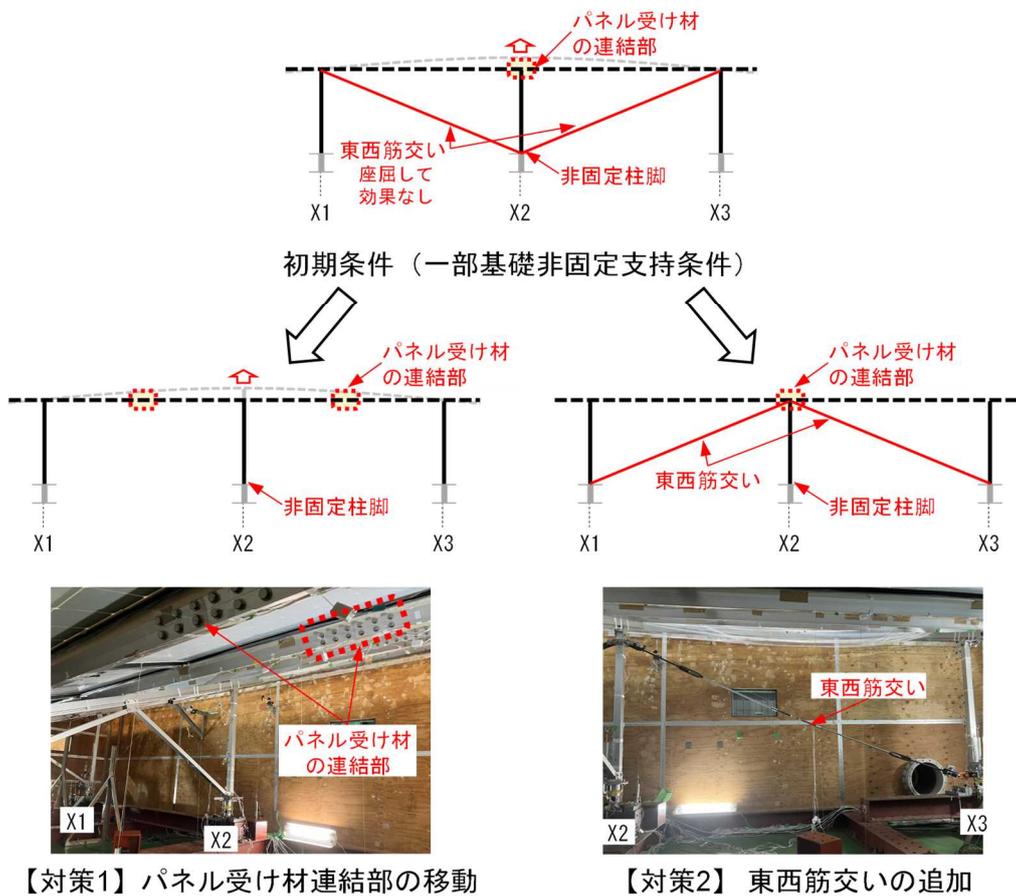


図 4-1 一部杭基礎不良を有する架台への対策案

【対策1：パネル受け材連結部の移動】基礎部直上にパネル受け材を延長するための連結部が存在する場合、連結部の回転を完全に拘束するような強固な接合を施さない限りは、当該基礎が浮き上がった際に図 3-2 に示すように連結部の回転に伴い上部のパネルを損傷させかねない。そこで、図 4-1 左下に示すように連結部をスパン中央に移動した。なお、本実験

では連結部の変形および損傷で架構の破壊が決定することを防ぐため、受け材内部に挿入した連結金具と受け材は接着剤で固定しかつ普通ボルトで固定した。その結果、連結部の接合耐力は約 1.5 倍程度増加した条件で試験を実施した。

【対策 2：東西筋交いの追加】基礎部が浮き上がる場合、図 4-1 右下に示すような筋交いを設けることが最も直接的な浮上り防止対策となる。ここでは、既設の東西筋交いと同等な軸降伏耐力を有する鋼棒 ($\phi=7\text{ mm}$) を筋交いとして採用した。既設の筋交いの軸降伏耐力は、筋交い断面の軸降伏ではなく端部接合部（普通ボルト M8 が 1 本）のボルト孔支圧降伏で決定している。なお、既設の東西筋交いは図 4-1 上に示すような方向で設置されており、中央の基礎浮き上がり時には筋交いが座屈して効果が全く見込めなかった。そこで、図 4-1 右下のように浮き上がりに効く方向に筋交いを配した。さらに、X2 構面が負担する風圧力を筋交いによって隣接する基礎まで伝達するため、隣接基礎部には鉛直方向にはほぼ 2 倍、水平方向には筋交いの角度に応じた荷重が付加的に作用する。架台自体の損傷を避けるため、筋交いは支柱ではなく杭基礎杭頭部に固定することで対処した。さらに、設計風圧 1334 Pa まで確実に筋交い降伏を防ぐため、図 3-2 の試験より非固定基礎の浮き上がり変位量が 100 mm 以下に留まる範囲で架台が弾性変形を保っていた知見を活かし、筋交いに予めたわみを設けて、非固定基礎部が 100 mm 程度浮き上がった時点から筋交いが効果を発揮し始めるという条件で試験を行った。

5. 対策案の効果の検証

以上に示すそれぞれ対策を施した試験体 2 体について負圧作用時を想定した耐風圧実験を実施した。対策 1 については図 2-1 に示すように 300 Pa 以降は回転角制御で加圧を行い、対策 2 については 100 Pa ピッチの漸増負圧力を破壊に至るまで作用させた。

【対策 1：パネル受け材連結部の移動】浮き上がりが生じる杭基礎直上からパネル受け材連結部を移動した場合、950 Pa で非固定基礎部直上のパネル受け材が降伏曲げモーメントに達し、1120 Pa で当該部のパネルガラスが割れ、パネル受け材抑え金具が脱落するとともに、受け材下フランジ側に大きな局部座屈が発生した。スパン中央に移動したパネル受け材連結部については、試験を通して損傷は見られなかった。以上から、全杭基礎が健全である場合には 2 倍の安全率を有するパネル受け材は、基礎浮き上がりが生じた場合には設計荷重 1334 Pa に満たずに局部座屈を生じて部材崩壊することが分かった。また、薄厚のアルミ部材を用いた場合、パネル受け材が降伏曲げ耐力に達してから局部座屈が発生して部材崩壊に至るまでの風圧力の余裕度は 1.4 倍程度であった。

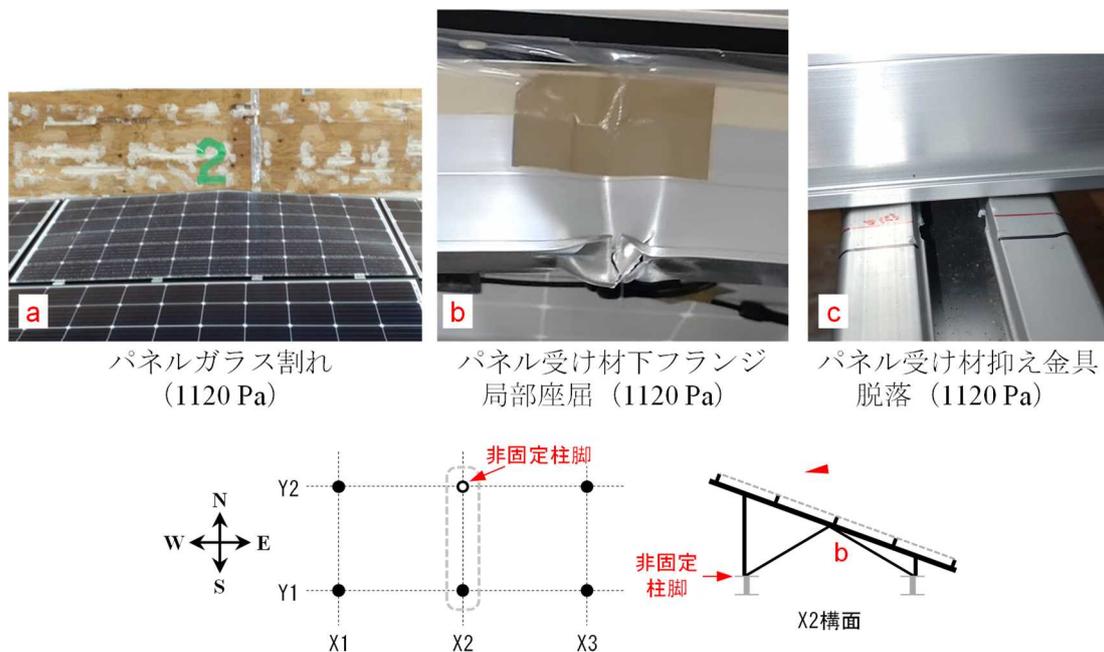


図 5-1 耐風圧実験における太陽光発電用架台 (対策 1) の破壊状況

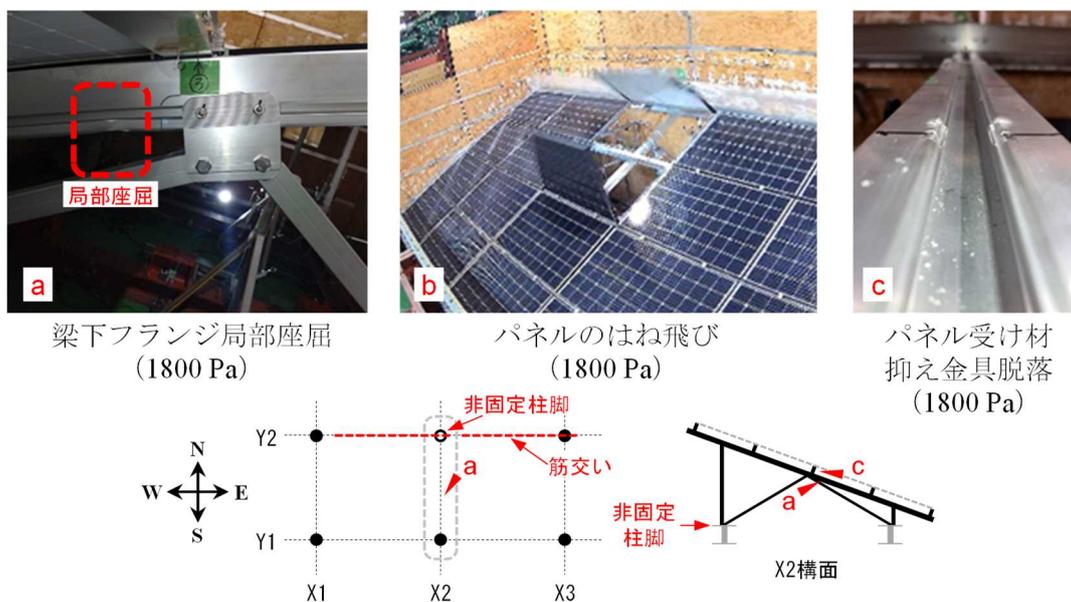


図 5-2 耐風圧実験における太陽光発電用架台 (対策 2) の破壊状況

【対策 2：東西筋交いの追加】非固定とした中央の基礎の浮き上がりにも効果を発揮する方向に東西筋交いを設けた場合、設計風圧 1333 Pa までは架構は弾性に留まり、1400 Pa で中央の南北構面の梁が降伏曲げモーメントに達した。その後 1500 Pa で筋交いが降伏し、1720 Pa で急激にパネルが跳ねとんだ。除荷後に観察したところ、曲げ降伏した梁の下フランジに局部座屈が発生しており、その反動でパネル受け材が脱落し、パネルが跳ねとんだと考えられる。基礎の浮き上がりが発生することで、対策前は設計風圧の半分程度で損傷が見られたが (図 3-2)、東西筋交いを浮き上がりにも効くように配することで、東西筋交いはパネ

ル受け材の曲げモーメント負担を緩和でき、設計風圧までは弾性範囲にとどめることができることが分かった。一方で、筋交い軸力が作用することで南北構面の梁の負担はむしろ増加し、梁が曲げ降伏して局部座屈に至った。梁部材も、パネル受け材同様に、降伏曲げ耐力に達してから局部座屈が発生して部材崩壊に至るまでの風圧力の余裕度は 1.2 倍程度であることも明らかになった。

以上から、基礎不良を有していた場合は設計風圧の 0.5 倍程度でパネルの破損を生じたのに対して、パネル受け材連結部の位置を負担の小さい個所へ移動する対策 1 では設計風圧の 0.8 倍程度で破壊に至り、東西筋交いを基礎の浮き上がりに効果があるように配した対策 2 では設計風圧の 1.3 倍で破壊に至った。パネル受け材の局部座屈で架台が破壊する場合はパネルの損傷は 1 枚のパネルガラスの割れに留まるものの、筋交いを設けて梁の局部座屈で架台が破壊する場合はパネルガラスの跳ね飛びを伴う理想的とは言えない破壊性状を示した。

6. 設計時の留意点

図 3-2 と図 5-2 に示す試験結果は、初期の状態から基礎に浮き上がりが発生する最悪の条件を考慮したものである。したがって、設計時にパネル受け材の曲げ耐力に 2 倍程度の安全率を見込んでいれば、パネル受け材の連結部の位置をスパン中央に配することで、設計風圧までは大きな損傷を免れる可能性が高いと考えられる。また、パネル受け材の曲げモーメント負担を緩和する X 型に配置した東西筋交いも有効である。基礎の浮き上がりが発生した場合、筋交いに設計時には想定していなかった荷重を負担させることとなるため、筋交い端部接合部耐力および杭基礎の支持力の不足が原因で、予期せぬ壊れ方をする可能性はある。基礎不良時における太陽光発電用架台の耐風圧性能の著しい低下を防ぐには、架構を構成する部材および接合部の安全率のバランスをとった架構設計が重要である。

参考文献・注釈

- 1) 地上設置型太陽光パネル発電システム架台の設計ガイドライン 2019 年版 技術資料【G1】，2019 年 4 月 26 日
- 2) 地上設置型太陽光パネル発電システム架台の設計ガイドライン 2019 年版 技術資料【D1】，2019 年 4 月 26 日
- 3) 「破壊」時と判断する条件は、①部材が破壊した場合（座屈、折損）、②接合部に滑りや変形による破壊が生じた場合、③試験体に著しい変形（100 mm 以上）が生じ、試験体の一部が試験装置に接触した場合、としている。
- 4) 三上大輝，古川幸，奥地丈浩，高森浩治，谷口徹郎：基礎不良を考慮した太陽光発電用架台の耐風性能，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）B-1，構造 I，pp.155-156，2023 年 7 月

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。