

強風被害にみる太陽電池発電設備の 構造的弱点と耐風設計の要点

Structural weak points of photovoltaic mounting systems on
wind disaster and the main points of the wind-resistance design

高森浩治*

1. はじめに

太陽光発電設備（PV 設備）の強風、地震、積雪等の自然事象による架台や基礎の構造的な被害は後を絶たない。これらの被害の多くは、電気設備技術基準の解釈第 46 条第 2 項において設計荷重として示されている JIS C 8955⁽¹⁾ で算出される荷重に達しない事象で発生しており、それらの支持物（架台や基礎）の強度は十分でなかったと言える。構造的被害の要因としては、設計の不備、施工不良、維持管理の緩怠が想定されるが、とりわけ設計の不備は、構造安全性の根幹を揺るがすことになり、その後の施工や維持管理を完全に行ったとしても、構造被害のリスクは残り続ける。つまり、構造設計を確実にすることが、その後の被害リスク低減に最も効果的である。

また強風被害では、自身の設備の被害だけでなく、飛散した PV モジュールや支持物によって他者に危害を加える危険性があり、飛散し PV 設備が近隣の建物に衝突した事例も報告されている⁽²⁾。幸いにして、現在までに人身事故に至った例は聞いてないが、経済産業省は PV 設備の強風被害に強い懸念を示している。

本報では、強風被害の事例にみられる構造的弱点について考察したうえで、強風被害リスク低減のための耐風設計の要因について述べる。

2. 強風被害の実例と被害要因

2.1 架台の被害とその要因

図 1 は 2015 年 6 月に群馬県伊勢崎市で発生したダウンバーストと推定される突風で被害を受けた地上設置型 PV 設備である。この PV 設備の架台は、建築足場に広く用いられている単管と呼ばれる鋼管

（ $\phi 48.6\text{mm} \times t2.4\text{mm}$ の鋼管）で構成されていた。被害の主要因は単管クランプと呼ばれる接合部での変形（ズレや抜け）であり、単管の変形や折損は殆ど見られなかった。図 1（下段）は、架台に用いられていたアルミニウム合金製のモジュール固定金具の状況である。この固定金具とモジュールは嵌込み式で固定されているが、固定金具が取り付けられている単管クランプは回転方向への抵抗力が小さいため、クランプが回転し、モジュールが脱落したものと推測される。また、一部の固定金具で破断しているものも確認された。さらに、架台の部材数が少ないため、構造強度上の冗長性が低く、一箇所の破壊から連鎖的に破壊していると考えられる。

被害発生場所に隣接する農業用ハウスが無被害であったことから、現地での風速は設計風速以下であったと推測される。

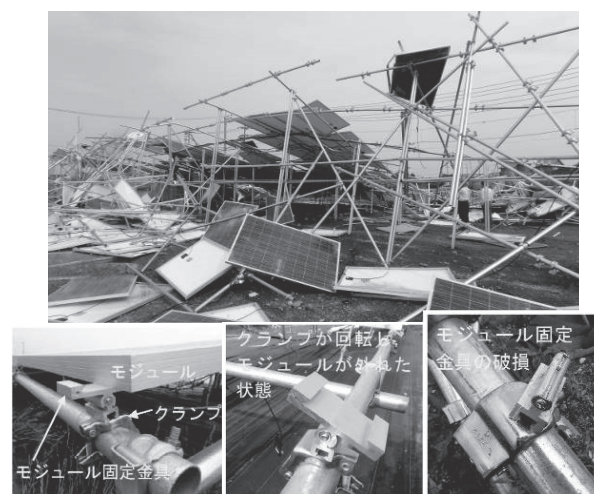


図 1 単管架台の被害事例

* 構造耐力評価機構



図2 アルミ製架台の被害事例

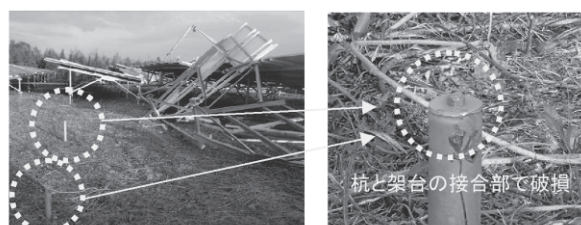


図3 杭基礎の被害

図2は2016年の台風16号の強風によって鹿児島県で発生した地上設置型PV設備の被害である。このPV設備の架台は、アルミニウム合金製であるが、図2(左)のように押出成形された主要部材(梁材)が中央部で折損していた。また、図2(右)はアルミ合金の部材の接合部に多く用いられるスロット部分での損傷である。アルミ合金材は熱処理(焼入れと冷却)によって材料強度を向上させることができるため部材の肉厚を減らすができるが、その反面、材料の靱性が低下することもあるので、脆性的な破壊には注意が必要である。

図3は2017年の台風21号の強風によって岡山県で発生した地上設置型PV設備の被害であり、杭と架台の接合部での破損が被害の主要因であった。杭頭と架台が鋼製金具を介して1本のボルトで結合されていたが、そのボルトが破断したため、架台全体の崩壊に至っている。杭頭と架台を1本のボルトで接合する場合、架台が斜め方向に引き上げられると、杭外周部を支点とするテコの原理によってボルトの引張り力が増大するが、設計上配慮されていないことが多い。

2.2 杭基礎の被害

図4は前述の群馬県での突風被害と同じ現場で見られた杭が引き抜けた事例である。ここで使用されていた杭は架台と同じ単管($\phi 48.6\text{mm}$)で、杭の貫入深さは800～1000mmと浅い状態であった。また、杭が引き抜けた部分の地盤は深さ800mm程度まで盛土されており、比較的軟らかい地盤であったと考えられる。さらに、杭の間隔が縦横それぞれ約3mの間隔であり杭1本当たりのモジュール面の負担面積が約 9m^2 であったことから、杭の支持力が

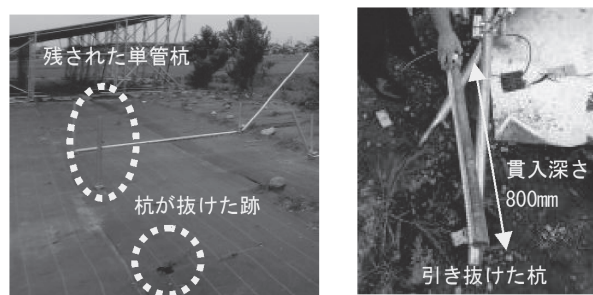


図4 単管杭の被害



スクリュー杭(兵庫県) スパイラル杭(静岡県)

図5 スクリュー杭, スパイラル杭の被害

不足していた蓋然性が高い。

図5は、2017年の台風21号および2018年の台風12号の強風によってスクリュー杭およびスパイラル杭が引き抜けた事例である。これらの杭は近年広く使用されており、ネジ状の部分での抵抗によって大きい支持力を期待するものであるが、これらの被害事例では設計風速以下の強風で引き抜けている。杭の支持力は、その形状と地盤性状(地質や固さ)によって大きく左右されるので、原位置試験(実際にPV設備が建設される位置での杭の支持力試験)を実施することが原則となるが、試験が実施されていないことも少なくないのが現状である。

2.3 建物上設置型PV設備

図6は、2018年の台風21号の強風によって、神戸市で発生した建物上設置型PV設備の被害である。このPV設備は5階建ての集合住宅の屋上に設置されていたが、架台ごと南西方向へ約30m飛翔し、隣接する住宅の屋根に接触した後に住宅地の法面に落下した。PV設備が飛散した原因は、集合住



図6 建物上設置PVの被害

宅の屋上面と架台との緊結に問題があったと推測される。この PV 設備は、建物の築年数から後付けで設置されたものと推測される。既存の建物に PV 設備を設置する場合、架台は屋根の防水性能を損なわないように屋根の構造体に固定される必要があるが、屋根と架台の緊結強度を十分に確保できないことがあり、その緊結部が破損して飛散する事例が多くみられる。また、飛散した PV 設備でも受光すると発電するので、感電や電気火災等の 2 次被害の恐れがある。そのため、専門業者によって早期に撤去されることが望ましい。

2.4 水上設置型 PV 設備

図 7 は 2018 年の台風 21 号の強風によって、大阪狭山市の溜池に設置された水上設置型 PV 設備が被害を受けた事例である。水上設置型 PV は、造成工事が不要、PV モジュールの冷却効果がある、藻の発生が抑制されるなどの理由から近年増加傾向にあるが、現時点ではその設計・施工に関する技術的知見は乏しい。国内における水上設置型 PV 設備は、フロート（浮体物）にモジュールを取り付け、フロート同士を互いに連結し、外周部のフロートを水面下の地中に打ち込んだ杭、あるいは水中に沈めたコンクリートブロック等の重量物にワイヤー等で係留する工法が一般的に採用されている。この被害では、係留部材が破損して外周のフロートがめくれ上がったようであるが、めくれ上がったフロートに係留用のワイヤーが残っていないことから、フロートとワ

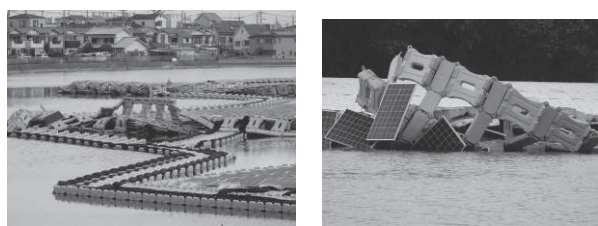


図 7 水上設置 PV の被害

イヤーの接合部が破損したと推測される。

3. 架台・基礎の構造設計における要点

ここでは、主として地上設置型 PV 設備を対象に、基礎と架台の構造設計の要点について述べる。

3.1 電気事業法上での要求事項

地上設置型 PV 設備の支持物に要求される構造上の要求性能は、電気設備技術基準の解釈（電技解釈）の第 46 条第 2 項に明記されており、この要求は事業用電気工作物だけでなく、電技解釈第 200 条にお

いて 50kW 未満の一般電気工作物についても適用されることが規定されている。なお、電技解釈第 46 条第 2 項は 2018 年 10 月に改正されており、主な変更点は次のとおりである。

- a. 安定した構造の支持物であることを要求
- b. 設計荷重の引用規格の更新（JIS C 8955 の 2004 年版から 2017 年版に変更）
- c. 基礎への要求事項の明示

これらのうち、b. 設計荷重の変更の影響は大きく、風圧荷重の適正化による大幅な増加が PV 設備への要求性能を引き上げることになった。そのため、架台や杭のメーカーは 2017 年版の JIS C 8955 の設計荷重に適合する製品仕様に見直す時期を迎えている。

3.2 構造設計の要点

(1) 風圧荷重の設定

風圧荷重 W は式 (1) に示すとおり、風力係数 C 、速度圧 q 、受風面積 A の積で求められるので、風力係数 C や速度圧 q に比例して風圧荷重は増減する。

$$W = C \cdot q \cdot A \quad (1)$$

上述したように JIS C 8955 の 2017 年の改正に伴い、風圧荷重は大幅に増加しており、その要因はアレイ面の風力係数の適正化（増加）と地表面粗度区分の適用変更である。

図 8 は、地上設置型 PV 設備のアレイ面の風力係数についての新（2017 年版）・旧（2004 年版）JIS の比較である。同図から分かるように JIS の改正に伴い風力係数は大幅に増加している。例えばアレイ勾配が 20° の場合、順風（正圧：アレイ面を上から押す方向の荷重）で 1.5 倍、逆風（負圧：アレイ面を下から押す方向の荷重）で 1.6 倍になっている。これと同様に、建物上に設置される PV 設備のアレイ面の風力係数も大幅に増加している。

新 JIS での地表面粗度区分の適用を表 1 に示す。地表面粗度区分とは、対象地点周辺の地表面の粗さ（地表面の粗滑）を I ～ IV の 4 段階で区分するものであり、例えば海上の埋立地のように周辺に風の流れの抵抗になるような地物がほとんどない地域には区分 I、都市部のように多くの建物が密集する地域

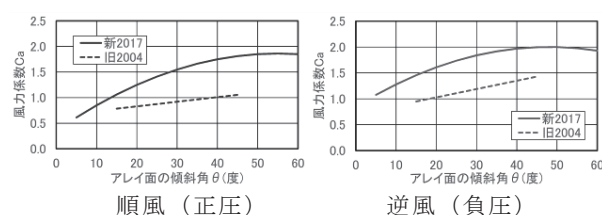


図 8 アレイ面の風力係数の新・旧 JIS の比較

表1 地表面粗度区分（新JIS）

地表面粗度区分		Z_b (m)	Z_G (m)	α
I	都市計画区域外にあって、極めて平坦で障害物がない区域	5	250	0.10
II	都市計画区域外にあって地表面粗度区分Iの区域外の区域又は都市計画区域内にあって地表面粗度区分IVの区域以外の区域のうち、海岸線又は湖岸線（対岸までの距離が1,500m以上のものに限る。以下同じ。）までの距離が500m以内の区域	5	350	0.15
III	地表面粗度区分I、II又はIV以外の区域	5	450	0.20
IV	都市計画区域内にあって、都市化が極めて著しいものとして特定行政庁が規則で定める区域	10	550	0.27

には区分Ⅳが適用される。つまり、区分の数値が小さいほど設計風速が大きくなり、設計風速から求められる速度圧 q が大きくなる。2017年の改正に伴い、区分Ⅰでの「特定行政庁が規則で定める区域」や区分Ⅱでの「高さ13m未満のアレイを除く」の文言が削除された。これによって、旧JISではほとんどの地域で区分Ⅲが適用されていたが、新JISでは区分ⅠやⅡが適用される地域が大幅に広がり、それらの地域での速度圧 q が増加している。なお、速度圧 q の増加割合は、区分ⅢからⅠへの適用変更で2.2倍、区分ⅢからⅡで1.5倍になる。前述の風力係数の増加も併せて考慮すると風圧荷重 W は2.5～3.5倍になり、建物上設置型PVではさらに増加割合が大きくなる場合もある。

(2) 許容応力度設計

電技解釈第46条第2項では、JIS C 8955によって算出された設計荷重に対する許容応力度設計が要求されている。許容応力度とは、「構造物の構造要素を構成する各材料が外力に対する安全性の確保を目的として、設計上各部に生ずる応力度が超えないように定めた応力度の限界値」⁽³⁾であり、一般的な許容応力度設計においては、想定した外力（設計荷重）を受けた場合においても、もとの機能を損なわない（もとの状態に戻る）ことを条件としている。

図9は、部材の荷重－変形曲線を用いて許容応力

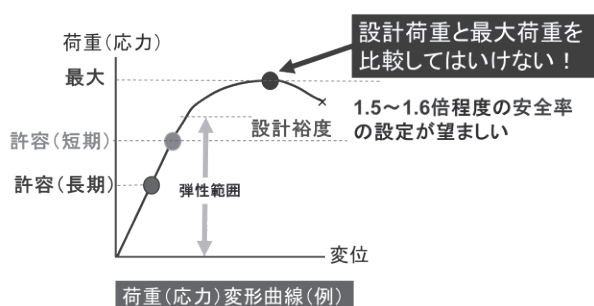


図9 許容応力度設計の考え方

度設計の考え方を示したものである。各部材の許容応力度は、通常、部材の弾性範囲内に設定されており、許容応力度設計においては、設計荷重が作用した際に当該部材に生じる応力度が許容応力度以下になるように部材の断面や支点間隔等を決定する。ここで重要なことは設計荷重が作用した際の部材の応力度の部材と最大応力度と比較してはいけないことである。特に載荷試験の結果を用いる場合には、試験での最大荷重と設計荷重（当該部材に作用する荷重）を比較しているケースも見受けられるので、注意する必要がある。

また、部材の許容応力度に対する安全率（＝最大応力度／短期許容応力度）として1.5程度を確保することが望ましい⁽⁴⁾。

(3) 接合部の設計

接合部の設計において多く見られる誤った事例は次のとおりである。

- ・主要部材の強度計算のみを実施し、接合部の強度計算を行っていない
- ・接合部の設計において作用する荷重の想定が間違っている
- ・部材間が偏心して接合されていることが考慮されていない
- ・摩擦を利用している接合部において、摩擦力の検討が行われていない

接合部は複数の部材から構成されているので、全ての部材において部材間の力を確実に伝達できる強度を有することの確認が重要である。PV設備の架台においては、図10のように部材同士が偏心して接合される場合が多いので、軸力や曲げモーメントだけでなく捩じれの影響を考慮する必要がある。また、アルミ合金製架台に広く用いられているスロットによる接合や単管クランプ等の摩擦を利用した接合部を採用する場合には、その部位に作用する力に対して十分な摩擦抵抗があることを確認する必要がある。これらの事項について机上計算による確認が難しい場合や設計に不安がある場合には、載荷試験によって確認することが重要である。なお、図

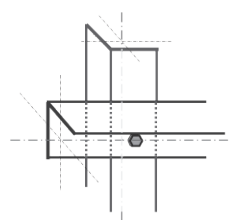


図10 偏心した接合部の例



図11 単管クランプによる接合部の例

11 は単管クランプを用いた接合部の例であるが、偏心と摩擦を考慮した設計が求められるので、机上計算によって確認することは非常に困難であると言える。

(4) 杭基礎の設計

杭基礎の設計において多く見られる誤った事例は次のとおりである。

- ・ 地盤性状（地質・固さなど）を把握していない
- ・ 建築用の杭の支持力計算式を用いている
- ・ 杭の支持力試験を実施していない
- ・ 杭の水平方向の支持力について検討していない

杭の支持力は、杭の形状だけでなく地盤性状によって大きく異なるため、造成された（切土、盛土された）敷地に PV 設備を建設する場合には、地盤性状を詳細に調査しておくことが望ましい。

また、小規模建築物用の杭の支持力算定式を用いて、細径で短い PV 用の杭の支持力を計算すると、図 12⁽⁵⁾ のように過大評価（危険側の評価）される場合があるので、杭の支持力は図 13 に示すような原位置試験（実際に PV 設備が設置される地盤での試験）によって確認することが重要である。また、PV 設備のアレイ面は傾斜しているため、強風時には杭の頭部に比較的大きい水平力も作用する。そのため、杭の原位置試験は、鉛直方向（押し込み・引抜き）の支持力だけでなく、水平方向の支持力試験も実施しておく必要がある。

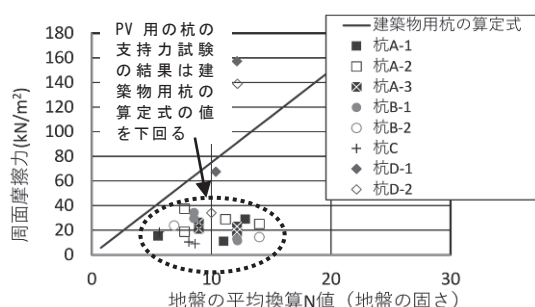


図 12 各種杭の支持力に関する設計算定式と原位置試験結果の比較（粘性土の場合）⁽⁴⁾

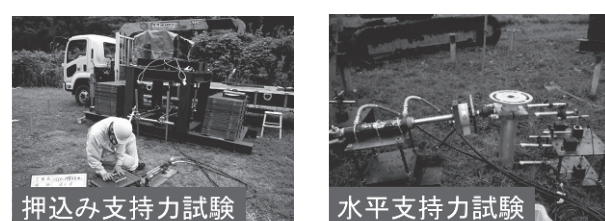


図 13 杭の原位置試験の様子

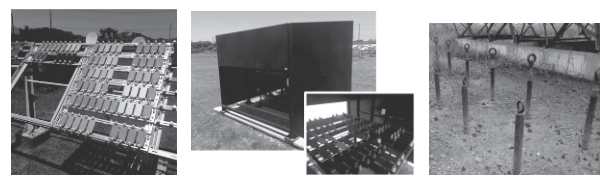


図 14 鋼材の暴露試験の様子

(5) 腐食対策

2012 年の FIT 制度以降に大量に導入された PV 設備は、5 年以上経過しており、腐食対策を怠った架台は、そろそろ腐食の問題が顕著になってくるころである。

図 14 は各種の腐食対策を施した鋼材の暴露試験の例である。これらの結果からは、雨がかからない架台下の環境下（遮蔽暴露）のほうが、雨がかかる環境下（直接暴露）よりも腐食が進行する場合があることが分かってきている。PV 設備の架台は雨がかかりにくい環境にあることから、鋼製の架台を用いる場合には亜鉛めっきや塗装等の十分な腐食対策を施しておくことが望ましい。他方、土壌暴露の結果からは、土壌中の鋼材における亜鉛めっきによる防食効果が低いことが把握されているので、鋼製杭を用いる場合には十分な腐食しろ（腐食による減肉を前提とした部材厚）を設けておくことが重要である。

4. おわりに

強風被害の調査を行い、破壊性状を把握することによって、構造設計上の問題点が浮き彫りになる。これらの情報の共有が、構造設計者や発電事業者に対する注意喚起になり、今後の PV 設備の支持物の安全性向上につながることを期待する。また、被害事例での問題点の対処法については、耐風設計の要点として概説したが、それらは設計手法の一例である。電気設備の技術基準では、性能設計が原則となっており、PV 設備に対する要求性能は示されているが、設計手法については規定されていない。安全性と経済性を併せ持つ支持物の開発においては、より高度な設計を求められるので、構造設計者には自身の思想や技量に合った設計をしていただきたい。

他方、PV 設備の設置環境は多様化しており、傾斜地、農地、水上等に設置される PV 設備が増加している。これらの PV 設備の構造設計上の課題は多く、風圧荷重に関する知見も少ないので、構造設計の入り口で躓いてしまう状況にある。今後、これらの課題についても取り組む必要があるが、十分な知

見を得るためには時間を要する。PV 業界の信頼を取り戻すためには立ち止まる勇気も必要である。

【謝辞】

被害調査および研究の一部は、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）の委託研究「太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト」の一環として実施された。

【参考文献】

- 1) 日本規格協会, JIS C 8955 : 2017 太陽電池アレイ支持物の設計用荷重算出方法, (2017)
- 2) 日本風工学会 太陽光発電システム風荷重評価研究会編, 太陽光発電システム耐風設計マニュアル, p.9 (2017)
- 3) 彰国社, 建築大辞典
- 4) NEDO, JPEA, 奥地建産, 地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン 2017 年版, p.7 (2017)
- 5) 竹ヶ鼻直人, 山崎稜真, 斧出雄太, 伊藤淳志, 地上設置型太陽光発電システム基礎杭の支持力評価 (その 2 載荷試験結果), 日本建築学会大会梗概集 (東北), (2018)