

構造設計の基本と NEDO 設計ガイドラインの解説

Basics of structural design and commentary of guidelines on structures design
for photovoltaic array created by NEDO research project

奥地 誠*・高森浩治**

1. はじめに

再生可能エネルギーの固定買取制度（FIT 制度）の導入によって爆発的に増加した太陽光発電設備（以下、PV 設備と称する）の一部には、設計荷重よりも小さい風や雪の影響で倒壊したり、飛散したりするものが見受けられる。PV 設備の構造的被害が発生している要因としては、構造設計の不備、施工不良、保守点検の緩怠などであるが、構造設計に不備がある場合には、施工や保守点検を確実に実施したとしても被害発生の恐れはなくなる。つまり、構造設計を確実に実施することが、安心、安全な PV 設備の構築の基本となる。

電気事業法の規制を受ける PV 設備は、電気設備の技術基準（電技）およびその解説（電技解釈）で要求される構造強度を確保する必要がある。具体的な構造上の要求事項としては JIS C 8955:2004¹⁾ に示されている。しかし、その内容は PV 設備の構造設計を行うための技術的な情報として必ずしも十分ではない。一方、PV 設備の構造設計に関する技術資料はほぼ整備されていなかったため、PV 設備の被害を増加させないためには、構造設計に関するガイドラインやマニュアル等を整備することが喫緊の課題になっていた。さらに JIS C 8955 の 2017 年の改正²⁾ に伴って設計荷重の適正化が図られ、風荷重や雪荷重は大幅に増加した。これによって、PV 設備の設計者や架台メーカーは、現状の設計書や架台の仕様を見直す時期を迎えていた。

このような背景のもとに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）の研究プロジェクトの一環として、一般社団法人太陽光発電協会と奥地建産株式会社が共同で「地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン」を作成する

こととなった。

本報では、まず構造設計を行ううえでの基本的な考え方について解説し、次に上述の設計ガイドラインの要点について述べる。

2. 構造設計の基本

被害を受けた PV 設備にも立派な構造計算書が添えられていて、その構造強度の真偽を見定めることは大変な作業であるが、得てして構造設計の基本的部分で誤っていることが多い。ここでは、構造力学および構造設計の基本事項について、間違いやすい点をピックアップして解説する。

2.1 構造の安定・不安定

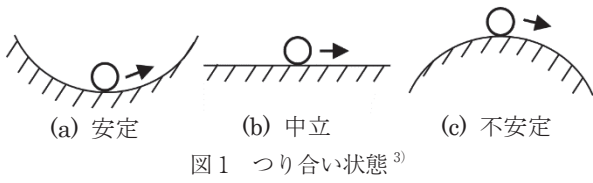
そもそも、構造物（建築物や橋梁、トンネルなどの土木構造物）は安定構造を前提につくられているのでこれに関する解説が少ない。構造物の安定・不安定は、構造力学の基本的な知識で、基本的であるがゆえに、丁寧な説明はされていないので改めて解説する。

図 1 には、つり合い状態を示す (a)、(b)、(c) の例があり、それぞれの球はその位置で静止しているのでこれに関する解説が少ない。構造物の安定・不安定は、構造力学の基本的な知識で、基本的であるがゆえに、丁寧な説明はされていないので改めて解説する。

図 1 には、つり合い状態を示す (a)、(b)、(c) の例があり、それぞれの球はその位置で静止しているので、力は釣り合っている。図 1 の→に示す方向に力を加えたときに球はどうなるかを考えると、(a) は移動後に元の位置に戻り、(b) は移動した位置に留まり、(c) は図外に転げ落ちる。このことから力の釣り合い条件を満たし、球が静止していても、その状態は同一ではないことがわかる。このような釣り合いの状態を (a)「安定」、(b)「中立」、(c)「不安定」と呼ばれて区別されている³⁾。

*奥地建産株式会社 代表取締役 会長

**奥地建産株式会社 耐風プロジェクト ジェネラルマネージャー



この概念を構造物に置き換えると矢印の方向の力が任意の「外力」として作用したときに、構造物が「変形」、「移動」しない状態を安定と呼ぶ。PV 設備の場合、任意の「外力」とは JIS C 8955 などに規定されている風や積雪、地震、自重などによる荷重をいう。不安定構造物では、これらの外力を受けた場合に抵抗もなく「変形」して形状が崩れたり、構造物が容易に「移動」してしまう。それに対し安定構造物では外力を受けても構造物がもつ抵抗力（反力）が釣り合い、構造物の形状が崩れたり、移動することはない。当然のことながら、モジュール、架台、基礎から構成される PV 設備には安定構造物としての性能が要求される。

2.2 構造のモデル化

構造設計では「構造物の力学モデル化」を行う。実際の柱や梁では複雑な要素が絡み合っているため単純化して、平面の骨組みに構造をモデル化し、柱、梁などの部材を「線材」に見立てることが一般的である。部材と部材の接合部を「節点」、構造物を支える地盤や他の構造物との結合点を「支点」・・・まさしく“支える点”と呼ぶ。このようなモデル化を「構造物の力学モデル」と呼び、図2は、部材、支点、節点をモデル化した例である。

部材同士をつなぐ代表的な「節点」はピン節点と剛節点と呼ばれる二種類であり、表1のイメージと記号で表記される。

- (1) ピン節点は部材同士の回転が自由である接合点
- (2) 剛節点は部材と部材の間の回転もずれもない接合点

(1) は丁番のように回転するが、部材同士は離れない接合である。また構造力学で剛には「一体化する」という意味があり、例えば柱と梁という部材同士を一体化させることが (2) の剛節点であり、ラーメン構造の節点は剛節点である。剛節点の例は一体化された鉄筋コンクリート構造の柱・梁の接合部や、図3の左に示す鉄骨構造ではガセットプレートや高力ボルトを適切に使用した接合部である。このように、一体化することが剛節点であり、図3の右のようにボルト複数本使用しているだけの理由では剛接

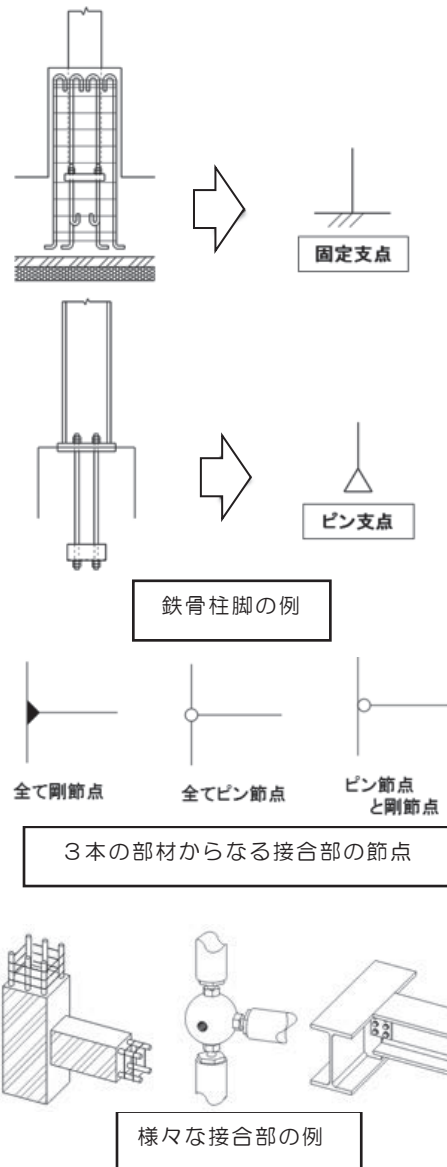


図2 構造物の支点と節点⁴⁾

表1 節点の種類とそれらの特徴・イメージ

名称	ピン(ヒンジ)節点	剛節点
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・相対移動拘束 ・相対回転自由 ・一般的にトラス構造の接合点 ・モーメントはゼロ 	<ul style="list-style-type: none"> ・相対移動拘束 ・相対回転拘束 ・一般的にラーメン構造の接合点
部材結合力	2	3
イメージ		
記号		
反力の表現		

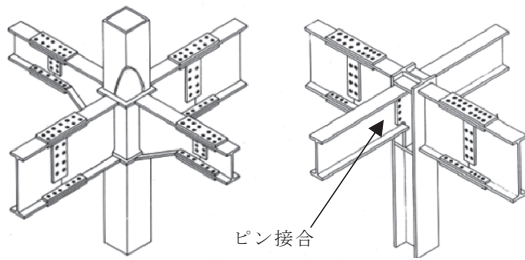


図3 適切に接合された剛節点の例³⁾

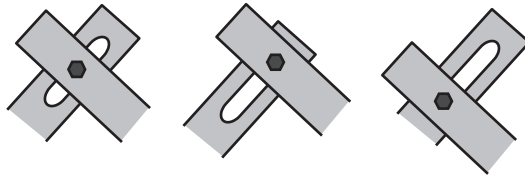


図4 長穴による接合例

表2 支点の種類とそれらの特徴, イメージ

名称	ローラー	ピン	固定
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・一方に並進可能 ・それと垂直方向は拘束 ・回転自由 	<ul style="list-style-type: none"> ・移動拘束 ・回転自由 	<ul style="list-style-type: none"> ・移動も回転も拘束
反力数	1	2	3
イメージ			
記号			
反力の表現			

合としない。また、実務でよく目にする、図4の長穴やスロットレールとスロットナットを使用した節点は、ピン節点や剛節点に該当しない。あえて表現すればローラー節点としてモデル化できるが、構造モデルとしては特殊であり、この節点を有する構造物に関して荷重条件を十分考慮し安全性を確認する必要がある。

支点には、ローラー、ピン、固定の三種類があり表2に示すようなイメージと記号である。この支点が外力に抵抗する力を反力という。

2.3 モデル化の具体例

部材「線材」と部材の接合点「節点」と結合点「支点」を使ったモデル化を具体的に解説する。図5(a)は不安定な形の構造モデルを、右上の節点を「剛接合」することで部材結合力を増やしたり(図5(a')),「部材」を増やす(図5(a''))ことで安定構造としている。図5(b)は支持が不安定なモデルを、支点の拘束を増やす(図5(b'))ことで安定モデル

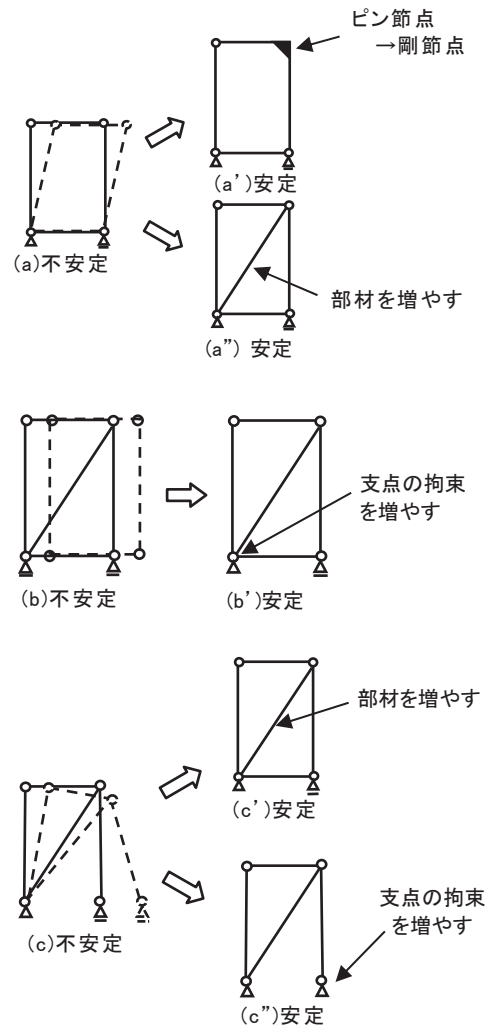


図5 不安定な形の構造モデルの安定化例

としている。図5(c)は形と支持が不安定であるモデルを部材を増やす(図5(c'))か、支点の拘束を増やす(図5(c''))かして安定化させている。

さて、困ったことにこのモデル化を間違ってしまうと不安定構造を安定構造と誤認するので、正確にモデル化を進める必要がある。コンピュータを利用した構造計算を行う場合に接合の違いの意味を理解せず剛節点とする事例が多い。ピン節点とした場合に当然計算が成立せず、エラー(不安定構造)となり、節点を剛節点にすると計算が成立するので単純に剛節点を選択するケースが多く見受けられる。図5(a)のモデルで解説すると、ピン節点であるので実際には先の図5(a'')のように部材を増やすことが必要であるが、部材が増えることを嫌い図5(a')の選択を行うケースである。計算は成立するが、実際の構造はピン接合のままなので不安定構造であり小さな力で倒壊する危険がある。筆者が架台の倒壊など被災事例で相談を受けたときにこの種の間

違いが多く見受けられた。

2.4 許容応力度設計法

許容応力度とは、構造体が損傷しない範囲の力に対する許容値である。例えば人間は痛みを感じ更に力が増してきたときに「まいった、降参、勘弁して、ギブアップ！」と叫ぶが、このときは骨が折れたり、筋が伸びきったりするレベルよりも低めに我慢の限界を設けている。この限界が人間の力に対する許容値である。中には痛みに強く骨が折れてしまう人がいるかもしれないが、許容値を低めしておくことでケガを防止できる。建築物はものを言うことが出来ないので「まいった！」とはいわない。そこで構造体の我慢の限界（損傷しない程度の低い値）を許容応力度としている⁶⁾。つまり、外力を受けても部材や節点、支点に使われている材料・部品が、外力を受ける前のもとに戻る「弾性範囲内」にあり、なおかつその部材の供用期間中に損傷しない限界が「許容応力度」である。

歴史的に見れば、関東大震災の大地震を経験し、建築物の破壊強度の1/3の応力度を許容応力度として名付けたのが最初であると言われている。「許容応力度設計法」とは部材の最も危険な断面の最大応力度が許容用応力度を超えないように設計する手法である。

この他の主な設計方法には、「終局強度設計法」や「限界状態設計法」などがあるが、いずれも実務でPV設備を設計するには適切な設計法とは云い難い。

よく似た言葉として、「限界荷重」や「終局荷重」があるが、設計方法とは別物である。

3. NEDO 研究における設計ガイドライン作成

図6に設計ガイドラインの作成スケジュールを示す。1章で述べたように、PV設備の構造設計に関

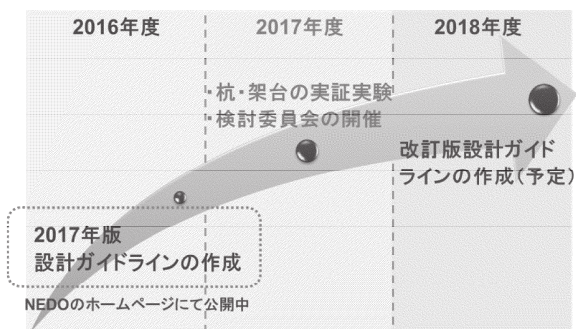


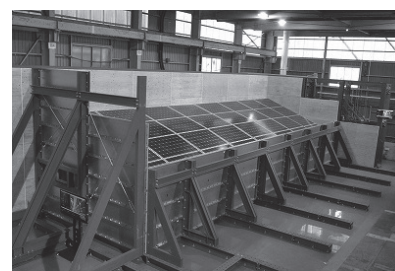
図6 設計ガイドラインのスケジュール

する技術資料の作成は喫緊の課題となっていたことから設計ガイドラインの初版を2016年度末までに発行することを目標に進められた。FIT導入後に急増したPV設備は、架台や基礎（杭）の多様化が進み、それらの耐力性能、構造的な特徴や問題点についての知見がほとんどなかった。そのため初版(2017年版)の設計ガイドラインでは、建築物の構造設計に関する基準や指針等からPV設備に適用できる内容を抜粋し、電技で要求されている構造強度を満足するPV設備の支持物を実現するための設計方法を取りまとめた。なお、この設計ガイドラインはNEDOのWebページからダウンロードできるので、是非ご利用いただきたい。

建築物の基準をもとに取りまとめた2017年版設計ガイドラインは、PV設備への適合性をより高める必要がある。PV設備支持物の設計上の現時点における主要課題は、各種杭基礎の支持力および架台の構造形式並びに部材接合部の接合方法の違いによる耐力特性の差異と構造的弱点の把握である。これらについての知見を得るために、PV設備に使用されている種々の杭や架台を対象とした実証試験を2017年度より実施している(図7)。実証試験の結果から得られた知見をもとに設計ガイドラインの改定案を作成し、学識経験者から構成される検討委員会での議論を経て2018年度に改訂する予定である。



(a) 杭基礎の支持力試験



(b) PVアレイ支持架台の耐風圧試験

図7 実証試験の様子

4. 2017年版設計ガイドラインの概要

2017年版設計ガイドラインは全7章から構成されており、計画、調査、設計荷重、基礎と架台の設計、腐食防食など、構造設計に関連する事項はほぼ網羅されている。ここでは、設計上の要点を8つに絞って解説する。

4.1 事前調査

発電所の建設予定地とその周辺の地形や地盤について、資料調査や現地調査を行うことによって、地盤沈下、地すべり、土砂の流入・流出などの危険性を事前に把握することが可能である。資料調査では、国土院発行の地形図や土地条件図などの地図資料の他に既往地盤調査資料も有用である。また、植生や地名も地域に固有な地盤条件を知る資料として有益である。現地調査では、調査地を中心として周辺の観察を行い、地形や造成盛土などの状況から地盤の安全性や不同沈下の危険性について評価する(図8)。これらの危険性がある場合には、地盤改良、のり面保護、排水計画などの対策工法を検討する。

近年、豪雨によって太陽光発電設備が設置された斜面が崩壊する被害事例(図9)も見られることから、事前調査によってその危険性を判断することは重要である。

4.2 地盤調査

PV設備を設置する地盤の支持力を把握すること

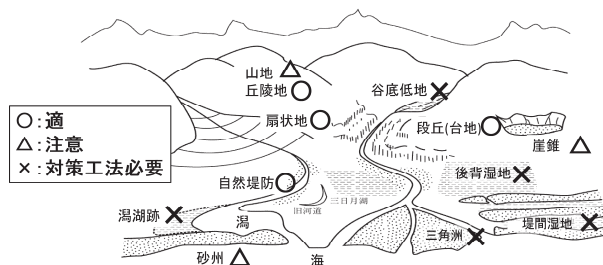


図8 地形と地盤の見方

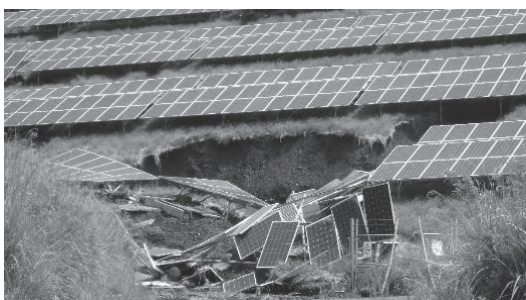


図9 豪雨によって斜面が崩壊した被害事例

により、地震、強風、積雪などによって生じる外力に耐えうる基礎の設計が可能となる。地盤調査方法には標準貫入試験、スウェーデン式サウンディング試験(SWS試験)、簡易動的貫入試験などがあるが、本ガイドラインでは比較的容易に実施できるSWS試験(図10)での調査を推奨している。調査ポイント数は、敷地の規模と形状、地盤の状態から判断して適切に設定する必要があるが、表3に示す発電所の規模に対する調査ポイント数の目安を示している。

4.3 設計荷重

設計荷重は、JIS C 8955:2017「太陽電池アレイ用支持物の設計用荷重算定方法」に規定されている荷重を基本としており、公共工事標準仕様書などで指定があった場合にはそれに従うこととした。なお、同JISに示された設計荷重は、電技解釈にて引用されているJIS C 8955:2004から全面的に変更されており、雪荷重および風荷重については大幅に増加し

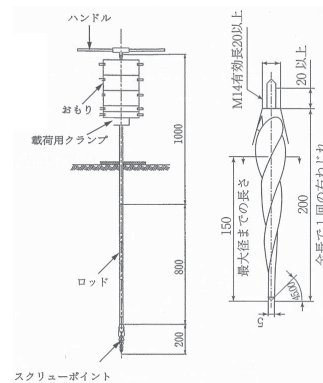


図10 SWS試験(手動式)⁵⁾

表3 発電所の規模と調査ポイント数の目安

発電所の規模	調査ポイント数
50kW未満(約500㎡)	3
100kW(約1000㎡)	3~5
1000kW(約10000㎡)	10以上

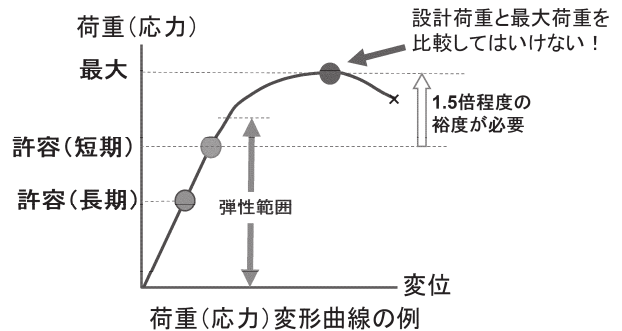


図11 許容応力度設計の考え方

ている。また、ここで規定されている設計荷重は許容応力度（許容耐力）設計に用いるためのものであり、図 11 に示すように、最大応力（最大荷重）と比較するものでないことに注意する必要がある。

4.4 直接基礎の設計

コンクリート等の重量物を基礎に用いる直接基礎の場合、図 12 に示すように上部の架台から伝達される荷重に対して、地盤反力、基礎の自重、基礎底面の摩擦力（基礎が土中に埋まっている場合は、側面の土圧）などで抵抗する。自重や雪荷重のように下向きの荷重が作用する場合には、地盤反力によって抵抗するが、風荷重や地震荷重のように基礎に水平力も作用する場合や基礎の中心から外れた位置に架台（支柱）が接続される場合には、図 12 (a) のように基礎底面には偏った荷重が作用するので、必要とする最大の地盤反力（抵抗力）より地盤支持力が上回ることを確認する必要がある。風荷重による浮き上がりや転倒に対しては、図 12 (b), (c) のように基礎自重が抵抗力になるので、架台から伝達される浮上り力や転倒モーメントより基礎自重による鉛直力やモーメントが上回るようにする必要がある。また、地震荷重や風荷重などの水平力による滑動に対しては、図 12 (d) のように基礎底面の摩擦力が抵抗力となるが、風荷重によって浮上り力と水平力が同時に作用している場合には、見掛け上の基礎自重が減るので、摩擦力も低下することに注意する必要がある。なお、基礎が沈下、浮上り、転倒、滑動することは、設計上は支持物の破壊と見なされるので、設計荷重に対して許容応力度設計を行うためには、設計荷重と釣り合う抵抗力に対して 1.5

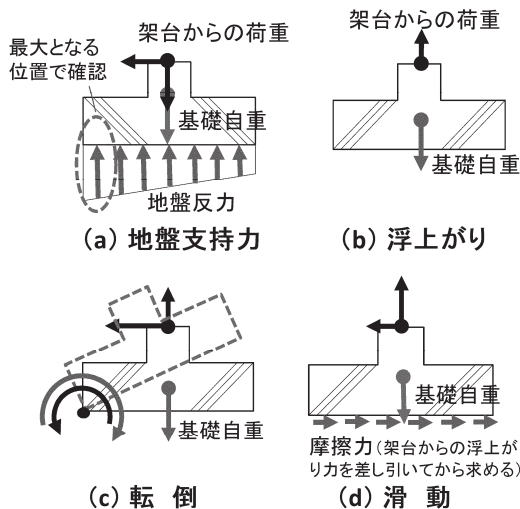


図 12 基礎に作用する荷重と抵抗力

倍以上の余裕を持たせる必要がある。

4.5 杭基礎の設計

杭基礎は、杭の形状だけでなく杭が打ち込まれる地盤の性状によってその支持力が大きく異なるので、設置現場において実際に使用される杭の支持力試験（載荷試験：図 13）を行なって、その結果をもとに設計荷重に対する耐力確認をおこなうことが基本となる。

図 14 に風荷重を受けたとき際に杭に作用する力と杭の支持力の関係を示す。太陽光発電設備の杭は上部の架台が直接接合されるので、主に鉛直下向きの支持力が期待される建築物（重量物）の杭と異なり、比較的大きい上向きや横向きの支持力も期待される。そのため、杭の支持力（抵抗力）試験は、押し込み、引抜きの鉛直方向と水平方向の 3 方向について行うことが重要である。

4.6 架台の安定構造

強風や積雪によって被害を受けた太陽光発電設備の多くは、不安定構造の架台が採用されている。安定構造と不安定構造の概念については、2 章の「構造設計の基本」にて詳述しているのでここでは省略するが、架台の構造設計において安定構造とすることは言うまでもない。図 15 は、太陽光発電設備において比較的多くみられる不安定構造の架台と、それ



図 13 杭の支持力試験の様子（水平載荷試験）

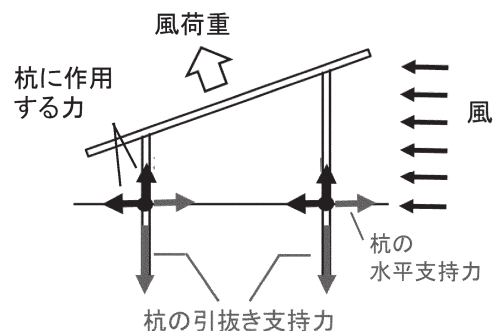


図 14 杭に作用する力と杭の支持力（風荷重の例）

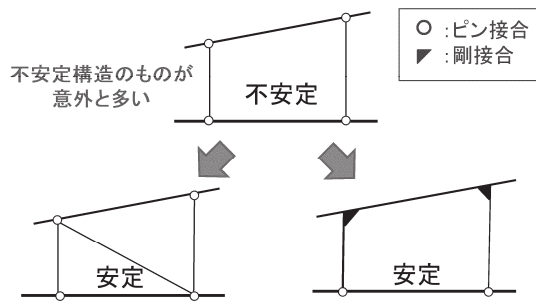


図 15 太陽光発電設備の架台における安定構造と不安定構造

らを安定構造とするための方法を示したものである。多くの不安定構造の架台は、ピン接合であるものを剛接合としてしまっているケースである。部材間の接合部を剛接合とするには、プレートを当てて多数のボルトで固定するなどの措置が必要であるが、架台に採用されている接合部の多くはピン接合あるいは完全な剛接合ではないと認識する必要がある。

4.7 接合部

モジュール枠と架台、架台の部材間、架台と基礎の各接合部は、部材間に作用する荷重を確実に伝達できるように設計する必要がある。しかしながら、接合部の力の伝達は複雑であることが多い。本設計ガイドラインでは、構造計算によって接合部の耐力を適切に評価することができない場合には載荷試験によって確認することを推奨している。また、強風等による飛散防止を考慮して、PV モジュール枠と架台の接合部、架台の部材間の接合部では、貫通ボルトや溶接による固定を基本とし、押え金具やクランプ等の専用金具を用いる場合には載荷試験や詳細な構造計算による確認を要求している。

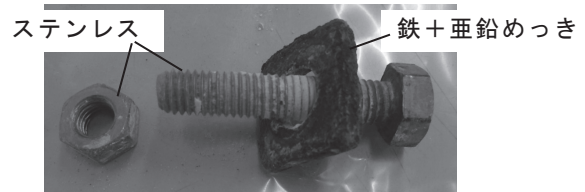
4.8 防食（腐食対策）

太陽光発電設備の架台や基礎（杭）は、長期間にわたり腐食・腐朽することなく健全な状態を保つ必要がある。本設計ガイドラインにおいては、架台や杭に使用する部材は、腐食又は腐朽しにくい材料を用いる場合を除き、その表面をめっきや塗装等で防食することを要求している。

図 16 は、太陽光発電設備で多く見られる腐食の事例である。図 16 の (a) は塩害による腐食の事例であり、部材の表面は塗装による防食を行っているが、部材端部からの腐食が進行している。大気中の塩分量が多い沿岸地域においては、設置後数年で腐食がかなり進行する場合もあるので、使用環境に応



(a) 塩害による腐食



(b) 異種金属接触による腐食

図 16 腐食の事例

じた仕様を決定するが重要である。

図 16 の (b) は、ボルトと座金の異種金属接触による腐食の事例である。この事例では、ステンレスのボルト・ナットと溶融亜鉛めっきの座金の組合せで使用されており、座金の腐食が進行している。これらはいずれも腐食しにくい材料であるが、一般的に電位差のある金属が電解質中（水に濡れたときのように電気が流れやすい状態）で接触すると、片方の金属（ここでは電位の低い側の亜鉛）が腐食することがあるので、異種金属が接触する場合には部材間に絶縁部材を挟むなどの配慮が必要である。

5. まとめ

FIT 制度の導入によって太陽光発電所は急増したが、強風や積雪による被害も増加傾向にある。その被害原因として、安定構造や許容応力度設計を誤認しているケースが多く見受けられることから、本報では構造設計の基本について解説したうえで、NEDO 研究で作成した設計ガイドラインに記載されている構造設計の要点について述べた。当然のことながら、すべてを網羅しているわけではなく、構造設計の実務においてはより専門的な知識が必要であるが、構造を理解していただくための足がかりとしていただければ幸いである。

また、NEDO 研究にて実施している杭や架台の実証試験の結果からは多くの知見が得られているが、新たな課題も浮き彫りになってきている。これらの課題については、今後追加検討を行い設計ガイドラインに展開したいと考えている。PV 設備の基礎・架台のより合理的な設計手法の確立を最終目標

として、設計ガイドラインの改定を 2018 年度中に行う予定である。

謝辞

ここで紹介した「地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン」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）の委託業務の結果得られたものである。関係各位に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本規格協会：JIS C 8955 太陽電池アレイ用支持物設計標準（2004）
- 2) 日本規格協会：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）
- 3) 彰国社：建築大辞典（第 2 版）（1993）
- 4) 松本慎也：図解入門 よくわかる 構造力学の基本（2014）
- 5) 日本建築学会：構造用教材（2014）
- 6) 浅野清昭：改訂版 図説 やさしい構造設計（2017）
- 7) 浅野清昭：改訂版 図説 やさしい構造力学（2017）