

基礎不良を有する太陽光パネル架台の 耐風圧性能と改善策

Wind Resisting Performance of Solar Panel Mounting Structure with Partially Defective Pile Foundations and Application of Simple Measure

古川 幸*

1. はじめに

太陽光パネルを取り付ける架台（以降、太陽光パネル架台）は、パネル重量の軽さから架構に作用する自重および地震力が小さく、スパンの比較的大きいスレンダーな部材を用いた架構が採用される。また、部材間の接合には回転を許容した接合が用いられ、現場組立において厳密な施工精度を必要としないようにボルト接合部には適宜長孔が設けられることが一般的である。その結果、太陽光パネル架台は外力に対して変形しやすく、特に積雪や風圧力など太陽光パネル面に作用する外力に対して柔らかく変形する。このような3次元的に柔な構造体では、架台を構成する部材の一部が不測の事態で損傷した場合、その部材が負担していた荷重を他の部材が代わりに負担するという、いわゆるバックアップ機能が働きにくいという特徴を有する。

丘陵地等、傾斜地に太陽光発電所が建築される場合、1～3 m程度の短い杭が太陽光パネル架台の基礎に良く採用される。しかし、傾斜地における基礎の施工精度は確保が難しく、施工後も雨水で表層地盤が削られて場合によっては杭頭部が大きく露出してしまふことはよく知られている。また、文献1)～3)では、設計風圧力に達しないで杭基礎が引き抜けた事例が報告されている。

一般的な建築物では、杭基礎の上に鉄筋コンクリート部材で構成される剛強な基礎階床架構が設けられる。地震力が作用した場合、基礎階床架構が剛体移動することで杭頭部の水平変形量が均一となり（つまり並列バネ）、一部の杭が損傷しても他の健全な杭に負担力が分配される。一方で、暴風時に太陽光パネル架台に負圧力が作用して一部の杭が支持力不足で引き抜けた場合、その杭の支持力を柔らかい架台を介して他の杭まで伝達する必要に迫られるた

め、一部の部材に過剰な負担が発生し、架台が耐える風圧力が著しく低下することが予想される。

太陽光発電所は場合によっては数ヘクタール以上広がるため、発電所全体で杭支持力を検査・管理することは現実的ではない。そこで本研究では、実大の太陽光パネル架台の耐風圧試験を実施し、基礎不良が生じた場合における架台の破壊性状および損傷する圧力の設計風圧力にする安全率を明らかにした。さらに、簡便な改善方法を提案し、その効果を検証したのでここで報告する。

2. 太陽光パネル架台の耐風圧試験の試験計画

図1に、太陽光パネル架台試験体の全景を、太陽光パネル設置前の状態で示す。図2に、試験体詳細を示す。(a)は西側立面図であり、(b)は太陽光パネル、(c)は太陽光パネル面伏図である。パネル1枚の寸法は約1 m × 1.6 mであり、重量は1枚20 kgである。4行 × 5列で配置したパネルは、東西方向に5本配したパネル受け材、および南北に配した構面1～3の筋交付き柱梁架構に支持される。北側構面にV字型（図9の試験体I、II）に東西筋交が設置されている。

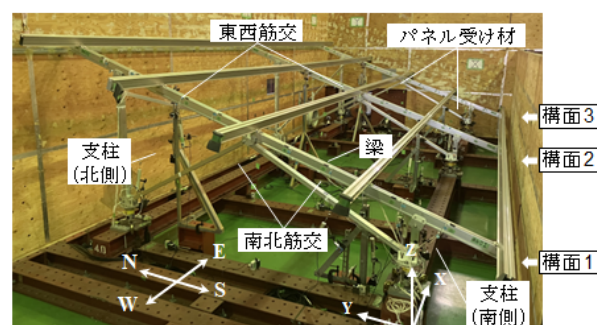


図1 試験体架構（太陽光パネル設置前）

* 大阪公立大学大学院工学研究科都市系専攻 講師



パネル受け材	梁	柱	南北筋交
$A=561$	$A=645$	$A=289$	$A=207$
$Z=15212$	$Z=14858$	$Z=8127$	$Z=1943$

柱脚接合部

パネル受け材
押え金具

パネル受け材
連結部

Journal of ISES

改善案——「既存架台」	試験体	試験体名	載荷レベル	支持条件	改善箇所
	I	I-A	弾性-破壊	A	
	II	II-A	弾性	A	
		II-B	弾性-破壊	B	
	III	III-A	弾性	A	受け材連結部 位置移動
		III-B	弾性-破壊	B	
	IV	IV-A	弾性	A	浮き上がりにも効く東西筋交あり
		IV-B-C1	弾性	B-C1	
		IV-B-C2	弾性-破壊	B-C2	



図1の太陽光パネル架台で想定する設計風圧力は、1333 Pa（基準風速 34 m/s、用途係数 1.0、地表面粗度区分 III、風力係数 $C_f = 1.61$ （負圧、パネル面傾斜角 20° ））¹⁾である。負圧力 1333 Pa がパネル面に作用した際、発生する部材力 D （Demand）に対する部材の降伏耐力 Y （Yielding Strength）の安全率（ $= Y/D$ ）は最も小さい部材（ここではパネル受け材）で2程度が確保されている。

– 16 –

破壊に至らしめるまで加圧した場合の2種類実施した。弾性加圧試験は、限られた試験体数のもとで試験体条件を変更した場合の架構応力分布を明らかにする目的で実施した。以降、例えば「試験Ⅱ-A」とは試験体Ⅱの支持条件Aの試験を指す。改善を施した試験体Ⅲ、Ⅳについては、4.1節で説明する。

載荷は、太陽光パネル面への負圧力作用時を想定した片方向繰り返し漸増加圧とした。図1の試験体周辺を耐圧壁で囲み、試験体との隙間をシートで封止して太陽光パネルを下側から加圧した。図4に各

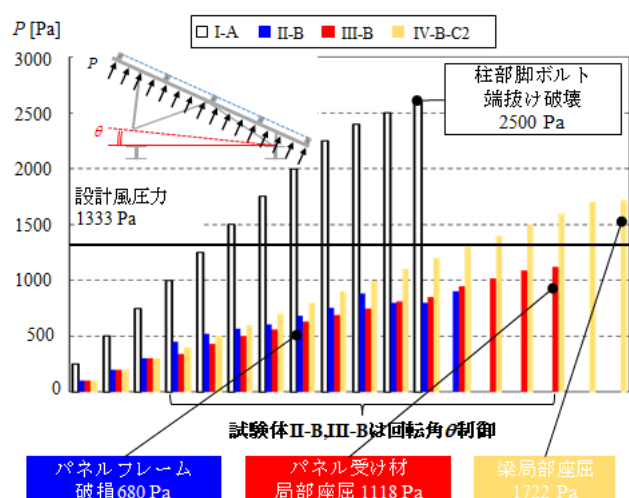


図4 載荷ステップ

試験の加圧計画を示す。目標圧力 P の漸増を基本とし、変形量が多い試験Ⅱ-B、Ⅲ-B では $P = 300$ Pa 以降は柱脚の浮き上がり回転角 θ (図4左上) で制御した。加圧速度 10 Pa/s 以下の準静的加圧となる条件であり、各サイクルにおける制御目標値に到達した後は、到達時の圧力 P を 10 秒間維持して減圧した。

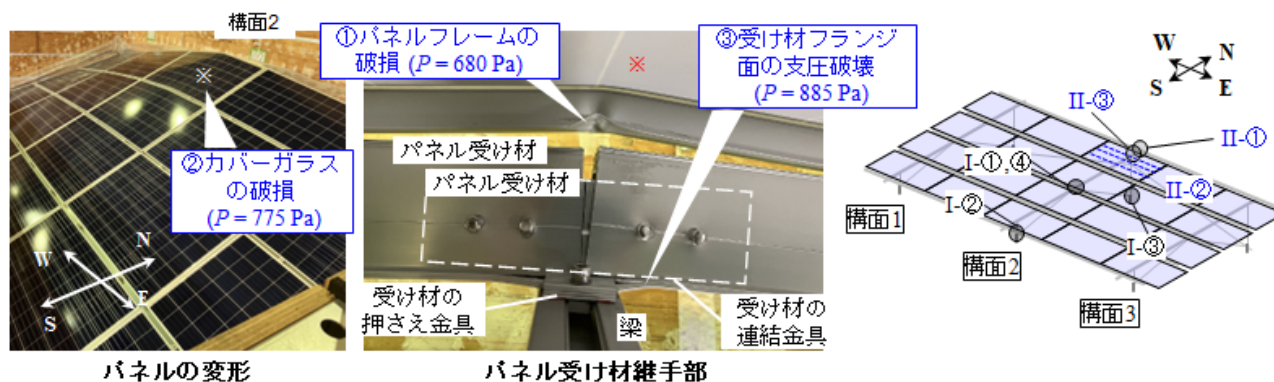
3. 耐風圧試験結果～基礎不良を有する場合～

図5に、(a) 全固定支持条件試験体(試験体Ⅰ-A)、(b) 基礎不良を模した一部非固定支持条件試験体(試験Ⅱ-B)の負圧作用時の損傷の進展状況を示す。なお、負圧下で太陽光パネル架台に生じた応力状態、変位分布は、文献4)を参照されたい。

(a) 全固定支持条件においては、設計風圧力 1333 Pa 時には損傷は確認されなかった。① $P = 1800$ Pa 加圧終了時にパネル受け材3を梁(構面2)に固定する押え金具に隙間が発生していることが認められ、② $P = 2000$ Pa で構面2の後柱の基礎締結金具の長孔でボルトの滑りが認められた。最終的には、③ $P = 2500$ Pa で構面2北側の基礎締結金具においてボルト端抜け破壊が生じて架台が南側に倒れこみ、④ $P = 2600$ Pa でパネル受け材3中央に配したパネル受け材押え金具が破損した。試験



(a) 全固定支持条件 (試験Ⅰ-A)



(b) 一部非固定支持条件 (試験Ⅱ-B)

図5 破壊性状 (既存架台/基礎不良有無)

II-Aの結果から各部材に作用する部材力を外挿して推定した結果、③④の損傷発生と同時にパネル受け材が降伏していたと考えられる。

(b) 構面2北側支柱柱脚部を固定しなかった場合(試験体II-B)、図5(b)に示す通り、パネル受け材5中央が高く浮き上がり、東西方向のパネル受け材に支持された太陽光パネル面が大きく湾曲した。その結果、① $P = 680$ Paで図中※で示す太陽光パネルのフレーム下部が折れ曲がり、その後② $P = 755$ Paで同パネルのガラスの割れが確認された。③ $P = 885$ Paでパネル受け材5の中央連結部において内部に挿入した連結金具(表1、図7(a))からの支圧力を受けた受け材下フランジに亀裂が生じた。④ $P = 900$ Pa時にはパネル受け材4のパネル押え金具が梁から外れ、加圧を終了した。

試験体IIで北側構面に設けた東西筋交は、構面2北側支柱柱脚部が浮き上がると、筋交端部に設けたボルトが長孔を滑って移動し、ボルトが孔端部を支圧し始めた後はスレンダーな筋交がすぐに座屈して抵抗力を失ったため(図6)、浮き上がりに対して全く効果を発揮しなかった。余談ではあるが、東西筋交は主に地震力に対して設けるものであるが、地震時にもボルトが施工上の都合で設けた長孔を滑ることで、孔のクリアランス分は東西筋交が抵抗力を全く発揮しなくなるということには注意されたい。

以上から、図1に示す太陽光パネル架台試験体の終局耐力(不可逆的な破損発生時)は、全固定支持条件では設計風圧力に対して2程度の安全率を有していたのに対して、一部非固定支持条件では0.5まで低下した。一部の基礎に支持力不足が発生した場

合、特に東西方向構面の脆弱性から、太陽光パネル架台が当該基礎の支持力を他の基礎へ分配する能力に想像以上に乏しいことが明らかになった。

4. 耐風圧試験結果～改善策を施した場合～

4.1 東西方向軸組の脆弱性への対処案

3章の結果を踏まえ、基礎不良時を想定した圧力載荷試験を、架構条件を改善したIII、IVの2体についてさらに実施した(表2)。

試験体IIIでは、パネル受け材連結部における早期破壊を防ぎ、母材の曲げ降伏を先行させる条件で、太陽光パネル架台の設計風圧力に対する安全率および破壊性状を明らかにすることを目的とした。図7に改善前と後の連結部を示す。設計風圧力1333 Pa以下におけるパネル受け材連結部の破壊を防ぐため、パネル受け材連結部をエポキシ樹脂で固定しかつ普通ボルトで接合(図7(b))した。補強後の接合部耐力をボルトによる母材支圧降伏時として算出すると、補強前の1.5倍となる。さらに、図5のように構面2北側の基礎が浮き上がった場合には、パネル受け材中央に最も大きな曲げモーメントが作用するため、曲げモーメントが0.6倍程度に抑えられる中央から左右に2 m移動した場所に連結位置を設けた(図8)。

試験体IVでは、非固定柱脚の浮き上がり時に抵抗するように構面間をつなぐ東西筋交を既存架台(試験体II)に追加した(図9)。ここで、試験体IVでは既存架台(試験体I、II)の東西筋交(図9の

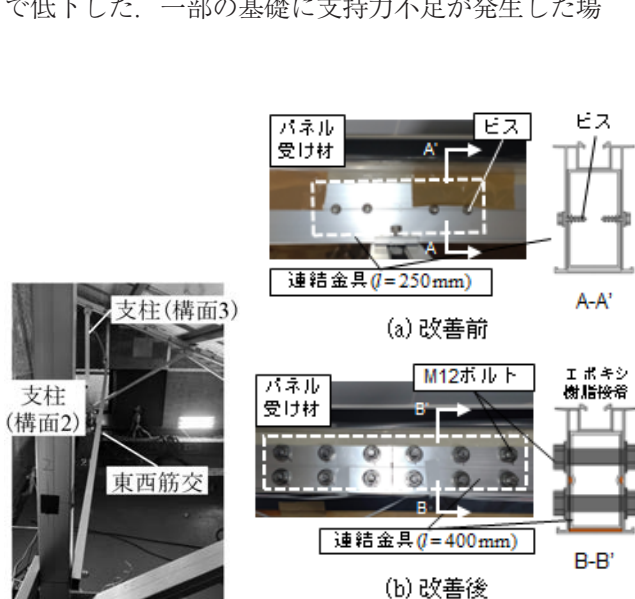


図6 東西筋交いの座屈(試験体II-B)

図7 改善案1: パネル受け材連結部の補強

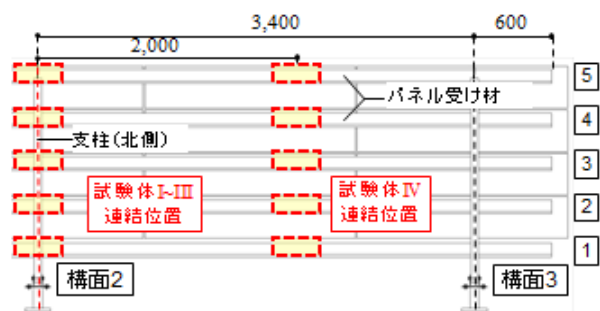


図8 改善案1: パネル受け材連結部の位置

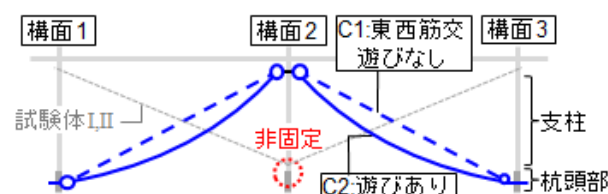


図9 改善案2: 北側構面への東西筋交の追加

灰色破線)は付与していない。追加した東西筋交には鋼棒(一般構造用鋼材SS400)を採用し、直径は既存の東西筋交の耐力と等しくなる7mmとした。なお、筋交の許容引張力は母材(寸法:20mm×40mm 厚さ1.4, 1.9mm, 材料:アルミ)の許容引張力44kNではなく、ボルト接合部のM8ボルトの許容せん断力9kNを採用した^{付録1}。一方、地震力に対して東西筋交に必要な引張耐力は1.4kN(水平震度0.3とする)に留まる。筋交断面は接合ディテールで決まったと考えられ、設計要求値に対してはもともとかなり余裕を持った設計となっている。試験体IVで追加した東西筋交は、構面1, 3の杭頭部に直接固定した(図9)。既存架台における筋交と同様に支柱柱脚にボルト固定する方法を採用しなかった理由は、浮き上がった構面2北側柱脚の支持力を両側の構面1, 3の支柱柱脚が負担するとした場合、柱脚接合部が設計圧力以下で破壊すると推定されたためである。また、3次元に柔らかく変形する太陽光パネル架台の筋交としてワイヤーロープのような柔な部材での補強がふさわしいと考え、加圧当初から筋交が抵抗するようにした試験体IV-B-C1と、非固定基礎部が100mm程度浮き上がってから筋交が抵抗するように筋交いに遊びを作った試験体

IV-B-C2について試験を実施した。なお、試験体IIの試験結果より、100mmの浮き上がり程度であれば、架台は十分に弾性を保つことを確認している。

4.2 耐風圧試験による改善策の効果の検証

図10に、一部非固定支持条件で試験を実施した、試験III-B(図7, 8)、試験IV-B-C2(筋交遊びあり)(図9)の破損状況を示す。なお、負圧下で太陽光パネル架台に生じた応力状態、変位分布は、文献5)を参照されたい。

(a) 東西方向部材であるパネル受け材の弱点となる連結部を補強した試験体III-Bでは、① $P = 810$ Paで曲げパネル受け材5中央が降伏した。② $P = 1118$ Paでパネル受け材5に支持される構面2北側のパネルガラス面が破壊した。また、ほぼ同時に③パネル受け材1中央部押え金具の脱落、④パネル受け材3, 5においてパネル受け材フランジ面が局部座屈した。設計風圧力 $P = 1333$ Paには達しなかったものの、連結部の破壊を防ぐことで、破壊に至る風圧力は大きく改善された。なお、図7に示した補強方法は、部材先行降伏を実現するために考案したものであり、実用的とは言えない。東西方向のパネル受け材連結部の接合方法に関しては、改善方法の検討が今後必要と考える。

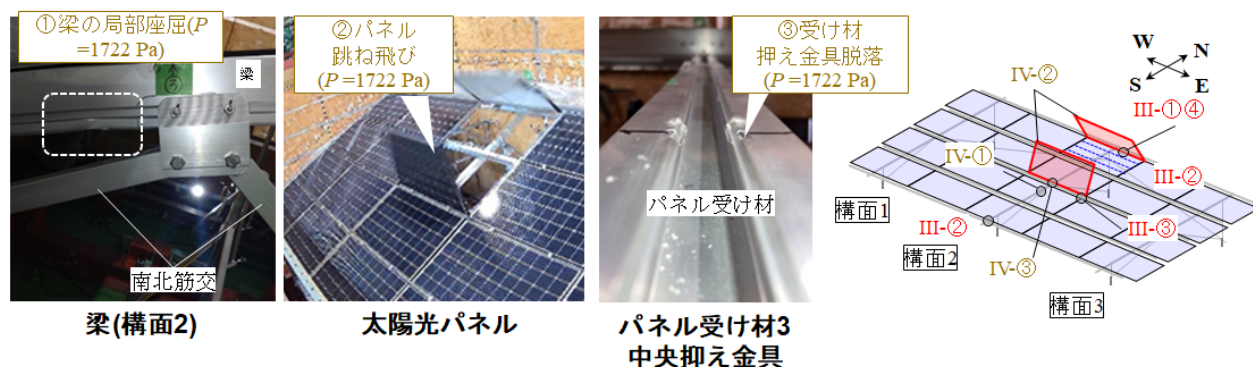
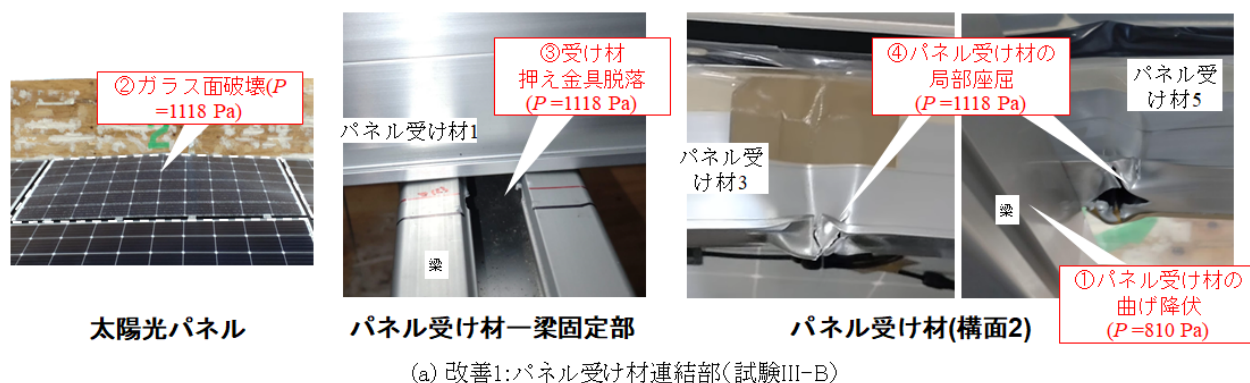


図10 破壊性状(改善架台/基礎不良有)

(b) 試験体 IV-B-C2 (筋交遊び有) では、 $P = 400$ Pa 程度で筋交いが引張力を負担し始め、① $P = 1400$ Pa で構面 2 梁の中央部が曲げ降伏した。② $P = 1722$ Pa で北側 2 枚のパネルのはね飛び、③ パネル受け材 3 中央押え金具の脱落、および筋交いの降伏が同時多発的に生じた。除荷後、構面 2 梁の中央部が局部座屈していることを確認した。なお、弾性範囲で加圧した浮き上がり当初から筋交が効く試験体 IV-B-C1 のより得た弾性時応力状態を外挿して架台の破壊状態を推測すると、 $P = 1630$ Pa で筋交降伏と試験体 IV-B-C2 よりも筋交の降伏が早まるものの、梁の降伏は $P = 1750$ Pa 程度と遅れると推定された。以上から、東西筋交が浮き上がりに対して効かせるように配置することで、東西部材のパネル受け材の曲げ降伏・局部座屈からより断面の大きい南北部材の梁の曲げ降伏・局部座屈に移行し、設計風圧力と同等な圧力まで架台を弾性に保つことが可能となることが分かった。

5. まとめ

基礎不良を有する太陽光パネル架台の負圧下における耐風圧性能を検討するため、実大試験体を用いた圧力載荷試験を実施した。その結果、東西方向部材のパネル受け材同士の連結部が弱点となる傾向があることが示された。設計風圧力に対して 2 倍の安全率を有する架台 (試験体 I-A) において、連結部の真下に基礎不良が発生した場合は、安全率が 0.5 まで低下する可能性がある (試験体 II-B)。連結位置をずらした場合でも、連結方法を工夫しない限り安全率は 0.5 程度に留まる (試験体 III-B より推定)。今後、パネル受け材を延長する連結部の接合方法について検討が必要である。構面間をつなぐ筋交を基礎の浮き上がりに対しても効くように配置した場合は、安全率は 1.3 倍まで改善した (試験体 IV-B-C2)。一方で、隣接基礎は設計における想定以上の引張力が作用することから、筋交の固定位置によっては接合部が破壊する可能性に留意する必要がある。

謝辞

本成果は、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) の結果をまとめたものである。また、図 5(a) の写真は、試験体 I-A の試験を実施した一般社団法人構造耐力評価機構より提供いただいた。また、試験実

施にあたって一般社団法人構造耐力評価機構の高森浩治様、奥地丈浩様に協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人 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ガイドライン 2019 年版, 2019 年
- 2) 国立研究開発法人 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ガイドライン 2019 年版技術資料, 2019 年
- 3) 奥地誠, 飯島俊比古, 田村良介, 高森浩治, 渡辺健二：くずれない・つぶれない太陽光発電設備の架台と基礎, オーム社, 2021 年
- 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 9 月
- 5) 三上大輝, 古川幸, 奥地丈浩, 高森浩治：基礎不良を考慮した太陽光発電用架台の耐風性能～架台に簡易的な対処を施した場合～, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 構造 I, 2024 年 8 月 (掲載予定)

付録 1 ボルト接合部の母材支圧降伏の影響

ボルトによって部材を接合した場合、部材の許容耐力は部材と部材接合部の許容耐力のうち最も低い値で本来は決まる。表 1 下に示したような接合ディテールを有する本架台の場合、ボルト接合部の許容耐力として、①ボルトの許容せん断力、②ボルト孔においてボルトから支圧力を受ける母材 (部材本体) の許容支圧力を考慮することになる。このうち、一般的に、最も低くなるのはボルト接合部の母材の許容支圧力である。しかし、太陽光パネル架台の許容応力度設計では特に接合部の許容応力度設計は適切になされていない例が多く、本試験で採用した架台も例に漏れない。例えば基準試験体である試験体 I-A では、設計風圧力 1333 Pa に満たない 830 Pa で南北筋交接合部が許容支圧力に達する。一方で、試験終了後にボルト孔の支圧変形は見られたものの、明確に架台破壊の要因となったものは確認できなかった。また、表 2 に示す試験体において、南北筋交が最大でボルト接合部の母材許容支圧力の 2 倍の軸力を負担している場合も確認された。部材力へのボルト接合部母材支圧降伏の影響については、今後

の課題としたい。

著者略歴



古川 幸（ふるかわ さち）

2006年3月 東北大学大学院工学研究
科都市・建築学専攻 博士前期課程
修了（修士（工学））

2006年9月～2008年4月 Master program

of Civil and Environmental Eng., Graduate School of
Eng., University of Michigan, USA 修了（Master of
Science in Engineering）

2011年9月 京都大学大学院工学研究科建築学専攻
博士後期課程 修了（博士（工学））

2012年4月～2021年3月 東北大学大学院工学研
究科都市・建築学専攻 助教

2021年4月 大阪市立大学（現大阪公立大学）大学
院工学研究科都市系専攻 講師（現職）