

傾斜地設置型/営農型/水上設置型

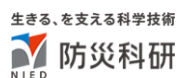
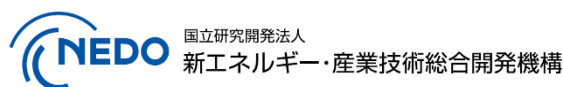
太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2025 年版

技術資料：

アルミ製パネル受け材継ぎ手部の曲げ耐力評価

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

アルミ製パネル受け材継ぎ手部の曲げ耐力評価

1. 概要

太陽光発電システム架台の代表的な架構形式の一つとして、太陽電池モジュールを設置するパネル受け材に継ぎ手を設けて延長しながら複数スパンに架ける形式がある。パネル受け材継ぎ手の接合方法は、パネル受け材（角材）内部にインサートを挿入し、ビスやボルトなどで固定する方法が一般的である。このインサートを用いた継ぎ手部の耐力確認は、架台設計時には見落とされがちであり、参考となる継ぎ手部の耐力を示した破壊試験も見当たらない。【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）¹⁾（結果詳細は文献2））太陽光発電用架台（アルミ製）の耐風性能試験では、強風時に負圧を受けて架構の一部の浮き上がりが生じた場合に、この継ぎ手部が早期に破壊して架台の耐風性能が著しく低下する可能性が示された。本資料では、アルミ製パネル受け材を対象に4点曲げ試験を実施し、設計時に参考となる継ぎ手部の破壊性状および耐力を示す。

2. パネル受け材継ぎ手部の曲げ破壊試験（継ぎ手の接合法の影響）

文献1)に示す太陽光発電システム架台の耐風圧試験を実施した架台を構成するパネル受け材（押し出し材）の4点曲げ試験を実施し、パネル受け材および継ぎ手部の破壊性状と曲げ耐力を明らかにする。

(1) 4点曲げ試験の試験計画

図2-1、図2-2に文献1)で使用したパネル受け材連結部の4点曲げ試験の荷重装置および荷重条件を示す。支点間距離は1,600 mm、加力点距離は1,000 mmであり、支持点と加力点は鋼棒を用いてピン支持条件とした。鋼棒と試験体間には、パネル受け材の局所的な支圧を避けるためにゴム板と金属板を挟んだ。

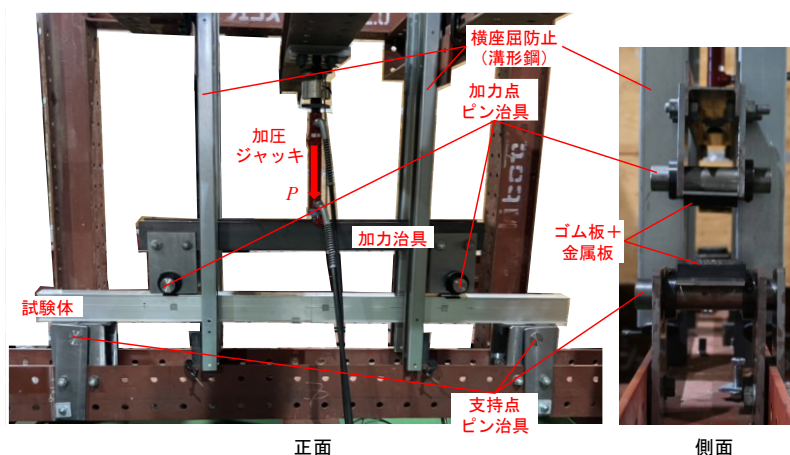


図2-1 パネル受け材連結部の4点曲げ試験全景

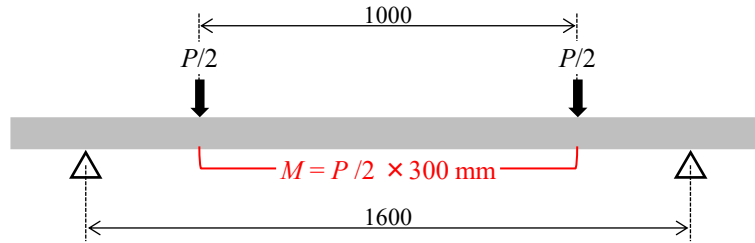


図 2-2 パネル受け材継ぎ手部の 4 点曲げ試験概要

図 2-3 に図 2-1 中央のジャッキの載荷力 P の各サイクルにおける目標載荷荷重を示す。載荷は、漸増片方向繰り返し載荷とした。

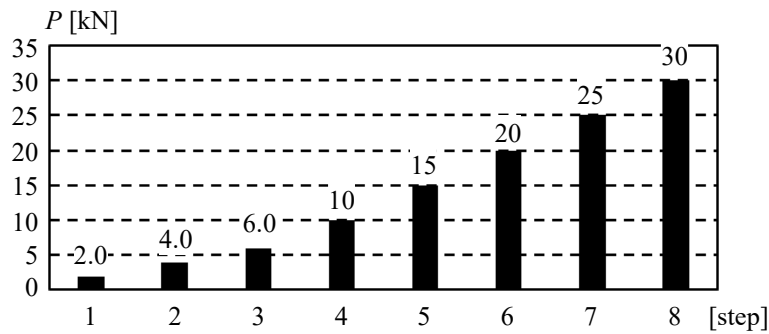
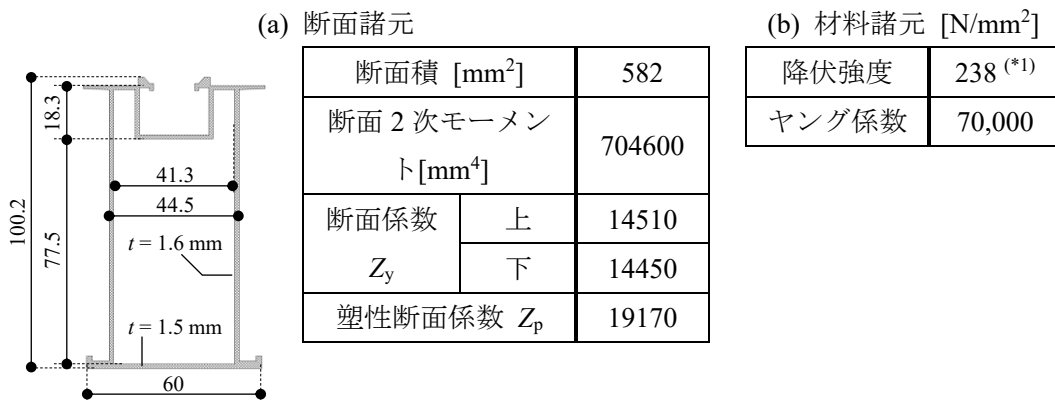


図 2-3 載荷計画

表 2-1 に、パネル受け材の(a)断面諸元および(b)材料諸元を示す。パネル受け材は、パネル固定金具を差し込む凹部を上部に有する。アルミの材種は AL6005-T5 である。

表 2-1 パネル受け材試験体の断面・材料諸元



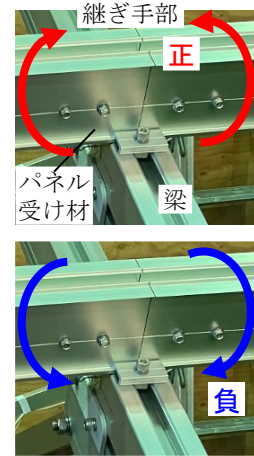
(*)1) 引張実験結果

表 2-2 に、試験体一覧を示す。試験体は、パネル受け材単体（継ぎ手部無）、継ぎ手部を有する試験体 5 種類とした。試験体変数は、①インサート長さ（250 mm と 400 mm）、②エポキシ樹脂系接着剤を用いてインサートとパネル受け材を接着固定したもの、③貫通ボルトでインサートを固定したもの、④②③を併用したものである。図 2-3、図 2-4 に継ぎ

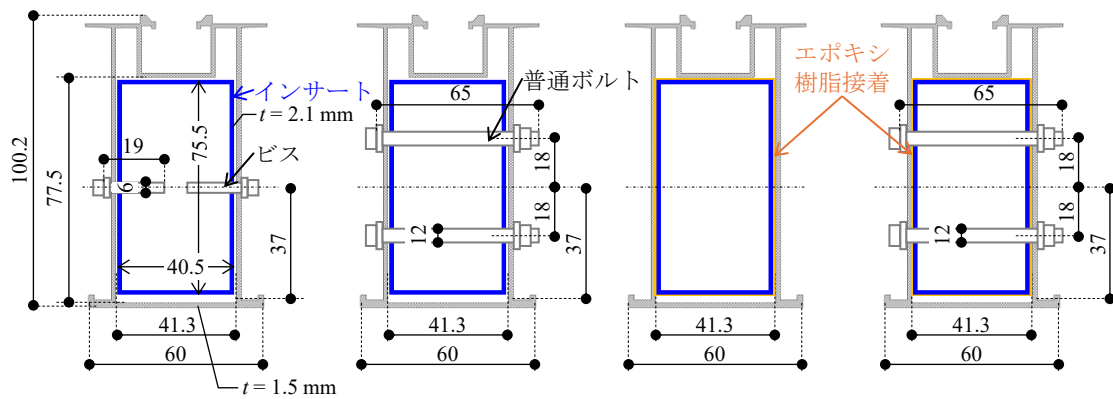
手部の構成を示す。試験体としたパネル受け材は上下非対称であることから、曲げモーメントを作用させる方向も試験変数とした。

表 2-2 試験体一覧

試験体	曲げ方向	インサート長さ	供試体数
継ぎ手部無	正	無	1
	負		3 ^(*)
インサート 長さ 250+ビス	正	250 mm	1
	負		3
インサート 長さ 400+ビス	正	400 mm	1
	負		3
接着	負		3
ボルト固定	負		2
接着+ボルト固定	負		3

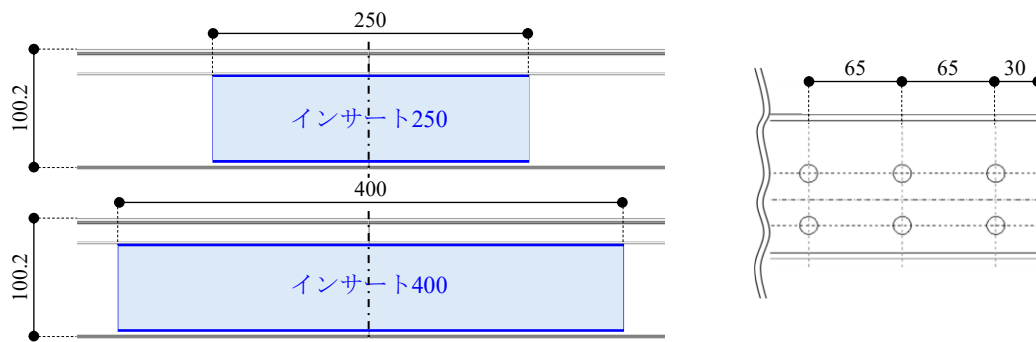


(*)1 3 体のうち 1 体は、ねじれを伴う局所変形を生じたため、検討からは省く



(a) ビス固定 (b) ボルト固定 (c) 接着固定 (d) 接着+ボルト固定

図 2-4 パネル受け材継ぎ手部の構成

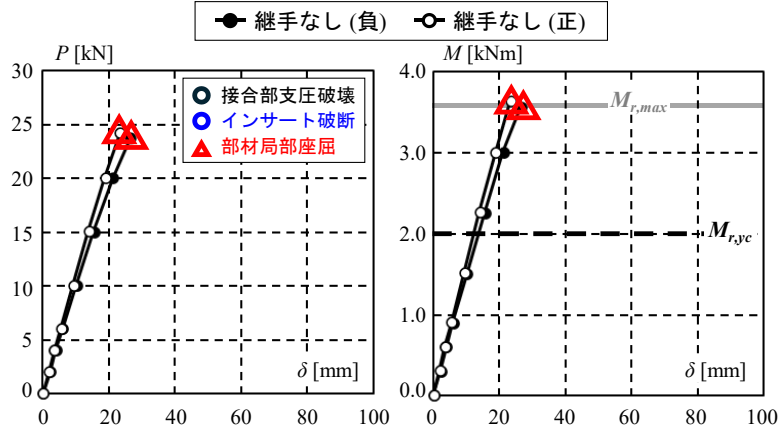


(a) インサート (b) ボルト孔

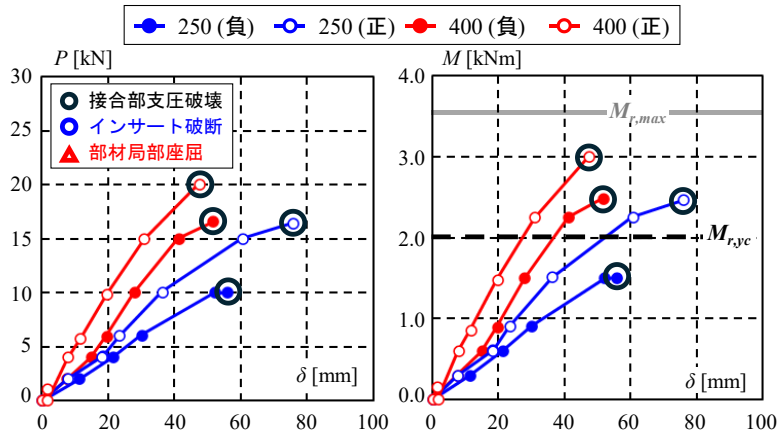
図 2-5 パネル受け材継ぎ手部の部材詳細

(2) 4点曲げ試験の試験結果

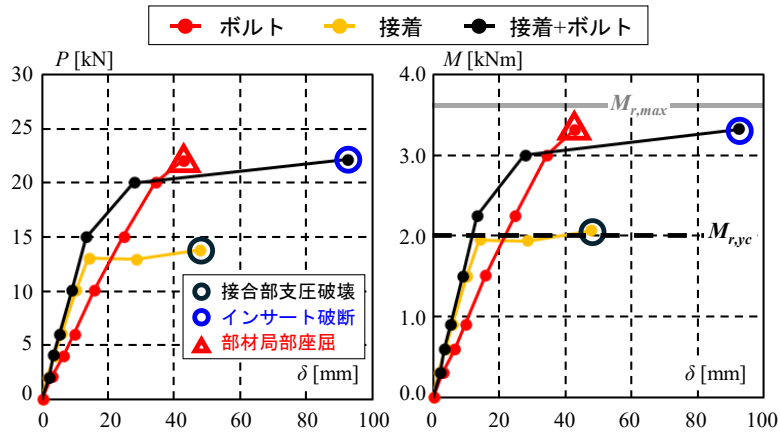
図 2-6 に荷重 P と中央変位 δ 関係図（各サイクルピーク値を抽出）を示す。表 2-3 に各試験体の最大荷重（破壊時の荷重）をまとめる。



(a) パネル受け材



(b) インサート長さ



(c) 連結部の改善案

図 2-6 パネル受け材の荷重—変位関係

表 2-3 パネル受け材・連結部曲げ耐力まとめ

試験体 (インサート固定方法)	曲げ方向	最大曲げモーメント [kNm]				破壊形態
		#1	#2	#3	平均	
継ぎ手無	正	3.63*	—	—	3.63	部材局部座屈
	負	3.56	3.54*	—	3.55	部材局部座屈
インサート長さ 250	正	2.46*	—	—	2.46	継ぎ手部支圧破壊
	負	1.50*	1.35	1.18	1.34	継ぎ手部支圧破壊
インサート長さ 400	正	3.00*	—	—	3.00	継ぎ手部支圧破壊
	負	2.57	2.48*	2.59	2.55	継ぎ手部支圧破壊
接着	負	2.04	2.07*	1.88	2.06	継ぎ手部支圧破壊
ボルト固定	負	3.20	3.31*	—	3.26	部材局部座屈
接着+ボルト固定	負	3.39	3.32*	3.27	3.33	継ぎ手部破断

(*) 図 2-6 に荷重-変形関係を示した試験体

図 2-7 に試験後の各試験体の破壊状況を示す。ここで、図 2-7 中の「上面」とは太陽電池モジュールが固定される側を示す。表 2-3 には、各試験体の破壊形態もまとめた。

パネル受け材（継ぎ手部無）では、最大荷重時に正曲げ、負曲げともに加力点直下で局部座屈が発生した（図 2-7）。曲げ耐力は、正側で $M_{\max}=3.63$ kNm、負側で $M_{\max}=3.55$ kNm で、曲げ方向による差は小さかった。

継ぎ手を設けた試験体の曲げ耐力は、全てパネル受け材の部材曲げ耐力に達しなかったが、図 2-6 中に横線で示したパネル受け材の短期許容曲げ耐力 $M_{r,yc}$ と比較すると、インサート長さが 250 mm の試験体とインサートとパネル受け材を接着した試験体以外は、パネル受け材の短期許容曲げ耐力を上回る結果となった。インサート長さが 250 mm と短く、インサートとパネル受け材をビス固定した試験体が最も曲げ耐力が低く、パネル受け材フランジの支圧破壊が生じた。これは、内部に挿入したインサートがパネル受け材フランジを支圧した結果である。正曲げ、負曲げ双方で同様な破壊形式となったが、図 2-4 に示すようにパネル受け材は上下非対称断面であり、太陽電池モジュールを固定する上面の方が支圧破壊が生じにくい。そのため、パネル受け材上面を支圧する正曲げ時の耐力は、下面を支圧する負曲げ時よりも 1.0 kNm 耐力が上昇した。インサート長さを 400 mm とした場合、破壊形態は継ぎ手部支圧破壊と同様であったが、インサート長さ 250 mm に比べて有意に曲げ耐力が上昇した。

本実験では、継ぎ手部の接合方法として接着、貫通ボルト、接着+貫通ボルトを検討したが、いずれも部材本体の曲げ耐力には達しなかった。接着試験体では、初期剛性が継ぎ手無と同程度まで上昇するが、接着部が早期に剥がれて曲げ耐力の向上が見込めなかった。貫通ボルト試験体では、破壊形式は加力部の局部座屈に移行した。最も強固な継ぎ手部とした接

着+貫通ボルト試験体では、継ぎ手部においてインサートが引きちぎられるような破壊を示した。全試験体の中でインサートの固定度が高く、インサートへの負担が増加してしまったためと考えられる。

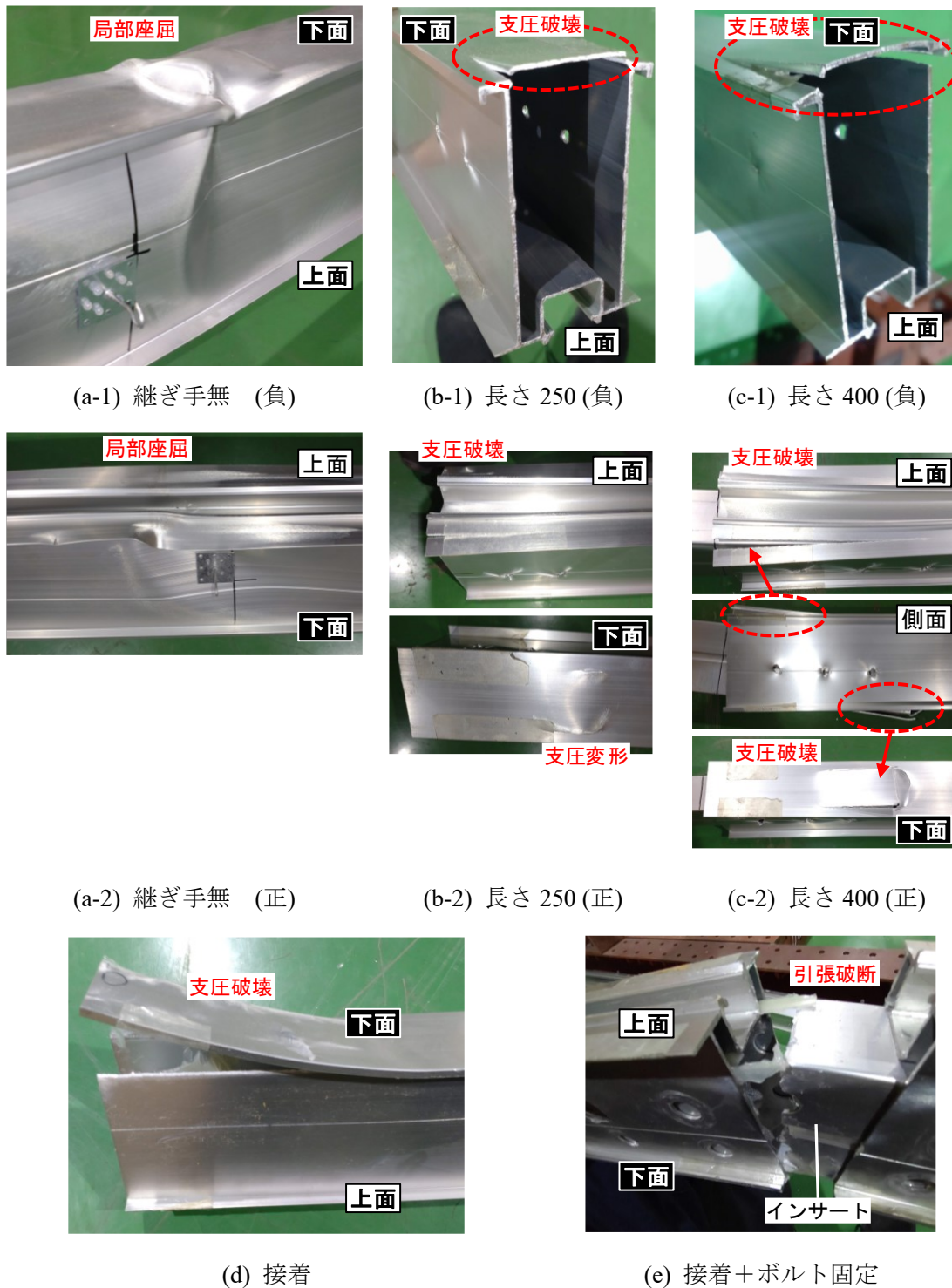


図 2-7 パネル受け材・パネル受け材継ぎ手の破壊状況

図 2-8 に継ぎ手部無試験体、インサート長さを変数とした試験体の損傷進展状況を示す。図より、インサート 250 mm 長さ試験体の継ぎ手部の変形が早期に進むのが確認できる。イ

ンサート長さを 400 mm (パネル受け材せいの 4 倍) とすることで、継ぎ手部の拘束度が向上することが分かる。



図 2-8 パネル受け材・パネル受け材継ぎ手部の損傷進展状況

3. アルミ角パイプによる曲げ破壊試験（板厚およびインサート長さの影響）

(1) 4点曲げ試験の試験計画

前節に引きつづき、アルミパネル受け材継ぎ手部の曲げ耐力に関係する母材の板厚およびインサート長さの影響を、アルミ角パイプ□-100×50×2.5（A6063S-T5）を用いて曲げ試験によって明らかにする。図 3-1 に角パイプの 4 点曲げ試験概要を示す。図 2-7(b-1)、(c-1)に示すインサートからの支圧を受けるフランジ面の支圧破壊を生じさせるため、角パイプの継ぎ手部側の支圧を受ける側のフランジ板厚を継ぎ手側の部材端部から 150 mm の範囲で切削して薄くした。図 3-1 に示す 4 点曲げ試験では、試験体上フランジに圧縮応力が発生し、さらにインサートからの支圧力が作用する。そのため、切削したフランジ板厚を制御した側を上側として試験を実施した。なお、図 3-1 ではこの切削してフランジの範囲を「試験部」と名付け赤色で示してある。本試験では全実験において同じインサート（角材）を使用した。インサート■-94.5×43 は、角パイプせい方向の遊びを 2 章のパネル受け材を参考に 2.5 mm とした。母材である角パイプへのインサート飲み込み長さ l_{in} は、下図に示すようにストッパーをインサートに固定することで制御した。 $l_{in} = 200, 300, 400, 500$ mm とした。なお、試験を実施した結果、 $l_{in} = 400$ mm の時点で板厚 $t = 2.5$ mm の加力部が局部座屈したため、 $l_{in} = 500$ mm の試験は実施していない。

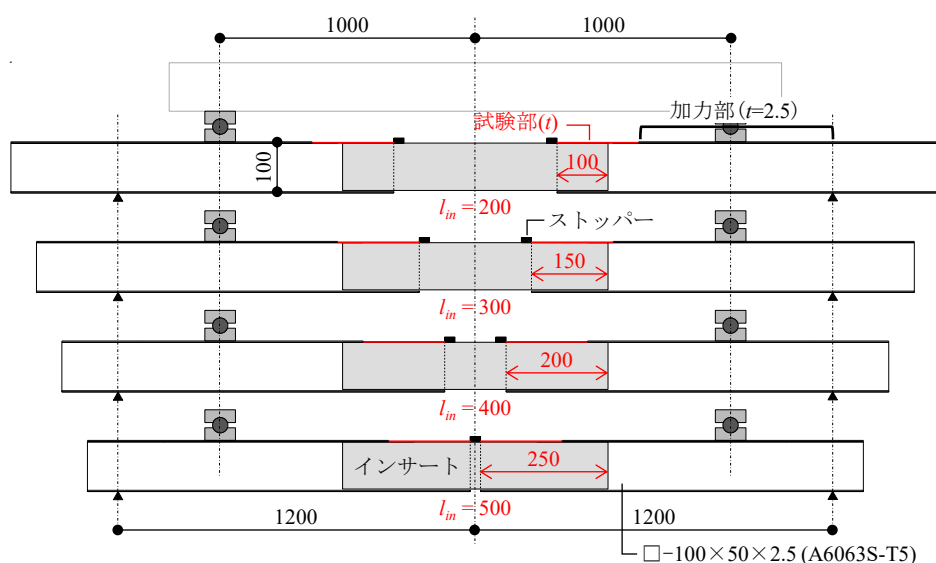


図 3-1 角パイプの 4 点曲げ試験概要

(2) 4 点曲げ試験の試験結果

図 3-2 に試験部の板厚 $t = 1.0$ mm、 1.5 mm、 2.0 mm の荷重－中央変位（インサート中央直下）を、図 3-3 に今回実施した全試験の曲げ耐力示す。

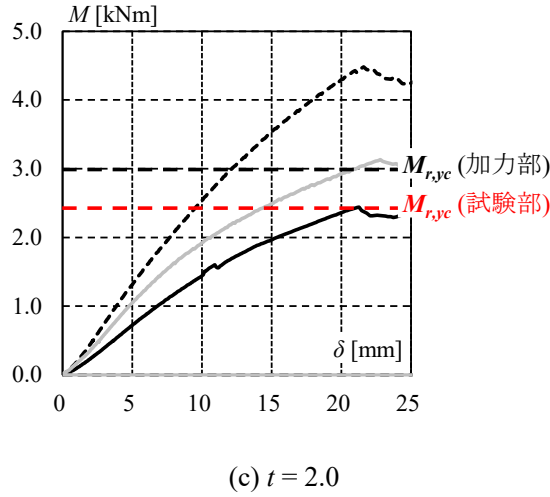
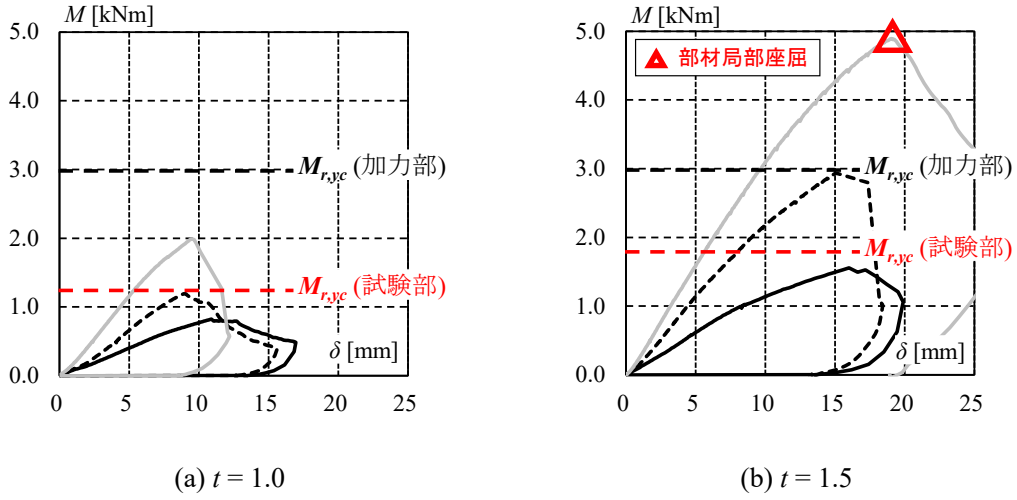
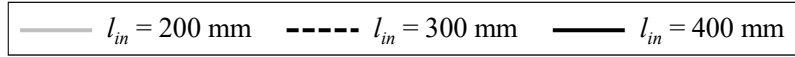


図 3-2 継ぎ手を有する角パイプの荷重－変位関係

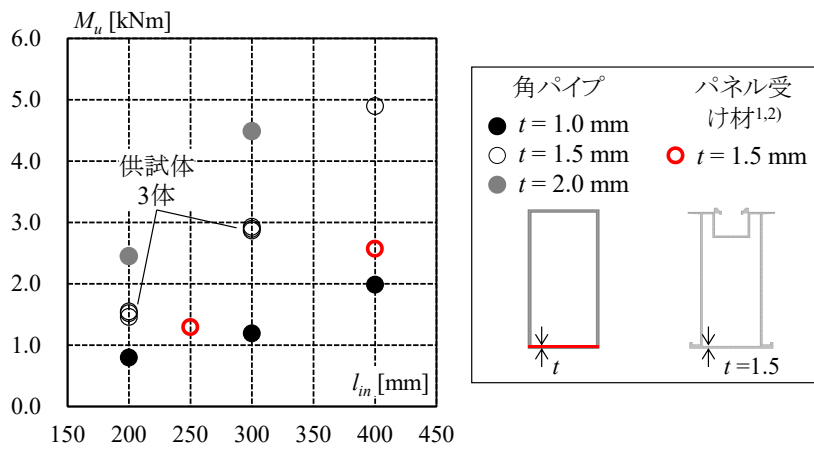


図 3-3 各パイプおよびパネル受け材の終局曲げ耐力

図 3-2 に示す通り、 $t=1.5\text{ mm}$ でインサート長さを $l_{in}=400\text{ mm}$ とした場合に、母材（加力部）が加力点直下で局部座屈した。それ以外は全て継ぎ手部で板厚を薄くしたフランジが支圧破壊した。図 3-2 には、母材が板厚を薄くした試験部の板厚の場合の降伏曲げ耐力 $M_{r,yc}$ （試験部）および加力部母材の降伏曲げ耐力 $M_{r,yc}$ （加力部）を破線で示す。図 3-2 より、インサート長さが $l_{in}=300\text{ mm}$ （つまり母材せいの 1.5 倍の埋込長さ）あれば母材（ $\square-100\times 50\times t$ ）の降伏耐力は発揮されると言える。しかし、図 3-3 に追加したパネル受け材継ぎ手部の曲げ耐力は、同じ厚さとした角パイプ $t=1.5\text{ mm}$ の試験結果に対して著しく曲げ耐力が減少していることが分かった。これは複雑な形状をしている場合、特にパネル受け材下フランジのようなはね出しを有する部分に残留応力が集中していた可能性が高い。なお、次章でパネル受け材母材の局部座屈を伴う終局曲げ耐力の評価を行ったが、こちらは材料試験より得た降伏強度が十分に発揮されていることが分かった。インサートを介して接合するパネル受け材継ぎ手部では、支圧破壊部がアルミ材製造時の残留応力が特に大きい場所と重複し、局所的に材の破壊強度が低下してしまう可能性が示された。本件は、継ぎ手部の設計時に特に注意されたい。

4. アルミ製パネル受け材の曲げ耐力評価

ここでは、2章の4点曲げ試験で母材局部座屈した継ぎ手部なし試験体に着目し、パネル受け材の降伏曲げ耐力と終局曲げ耐力を評価する。

短期許容曲げ耐力（降伏／弾性限）

図 2-7 に示すように、パネル受け材は局部座屈で最大曲げモーメントが決定した。局部座屈を考慮しない降伏曲げ耐力は(1-1)、(2)式より 3.4 kNm と算出される。局部座屈による降伏強度の低減率 Γ_d を「アルミニウム建築構造設計規準・同解説」³⁾に従った場合、降伏（弾性限）曲げ耐力は(1-2)、(2)式より 2.0 kNm と算出される。なお、パネル受け材下フランジの内幅は $b=40.5$ mm、厚さは $t=1.5$ mm とし、基準強度 F は表 2-1 の降伏強度 σ_y およびヤング係数 E を用いた。図 2-6(a)より $M=2.0$ kNm 付近から徐々に剛性低下がみられること、また、後述する終局曲げ耐力では局部座屈による強度低減を考慮しないと実験結果を評価できないことから、薄板のアルミ角材の短期許容曲げ耐力は局部座屈を考慮した(1-2)、(3)式での評価が望ましい。

$$M_{r,y} = f_t Z_y \quad (\text{パネル受け材試験体 : 3.40 kNm}) \quad (1-1)$$

$$M_{r,yc} = f_c Z_y \quad (\text{パネル受け材試験体 : 2.06 kNm}) \quad (1-2)$$

□局部座屈を考慮しない場合

$$f_c = F \quad (2)$$

□局部座屈を考慮した場合 2 縁支持の板・溶接による軟化域のない場合³⁾：

$$\begin{aligned} \text{a) } & \Gamma_d \leq 1.34 & f_c &= F \\ \text{b) } & 1.34 < \Gamma_d \leq 2.69 & f_c &= F(1 - 0.248\Gamma_d) \times 1.5 \\ \text{c) } & 2.69 < \Gamma_d & f_c &= 2.41F/\Gamma_d^2 \times 1.5 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\therefore \Gamma_d = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{F}{E}}$$

b : 板幅 [mm]

t : 板厚 [mm]

F : アルミニウム合金材の基準強度[N/mm²]³⁾

E : アルミニウム合金材のヤング係数[N/mm²]³⁾

終局曲げ耐力（最大耐力）

局部座屈を考慮しない場合、パネル受け材の全塑性曲げモーメントは 4.4 kNm と算出される。これは、パネル受け材の曲げ耐力（表 2-3）の 3.6 kNm より有意に大きい。そこで、終局状態において、断面に発生する応力に対して圧縮領域側は強度低減を考慮した局部座屈応力（(3)式）、引張領域側は降伏強度（(2)式）に達しているとした。図 4-1 に、終局時に

おける応力分布モデルを示す。図 4-1 の応力分布モデルに従って算出すると終局曲げモーメントは 3.0 kNm となり、実験より得た耐力 3.6 kNm を安全側に評価できる。

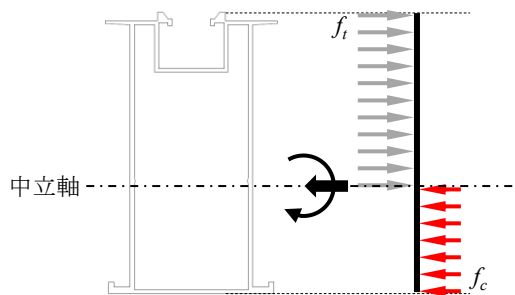


図 4-1 パネル受け材断面の応力分布モデル（終局時）

M-N 曲線（降伏／弾性限・終局時）

図 4-2 に、①局部座屈を考慮しない場合および②考慮した場合のパネル受け材の M-N 曲線を、降伏／弾性限および終局時について示す。図中には、パネル受け材の試験結果（最大耐力）も示す。図より、局部座屈を考慮した M-N 曲線は、実験より得た曲げ耐力をよく評価すると言える。

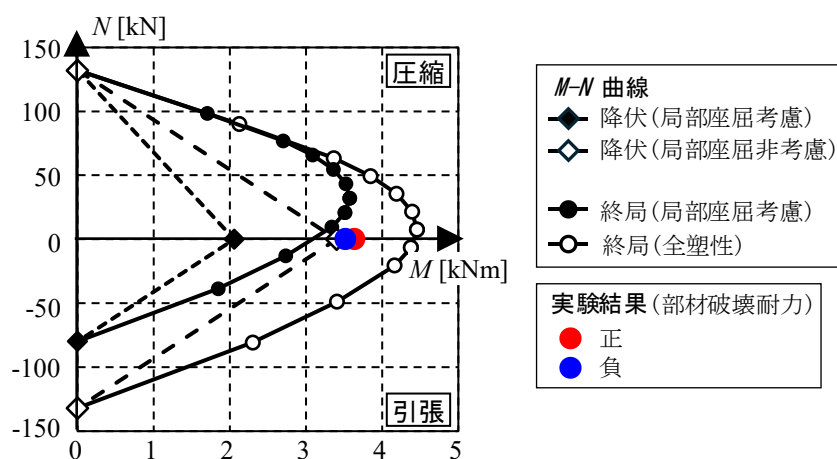


図 4-2 パネル受け材の M-N 曲線（降伏／弾性限・終局）

5. まとめ

アルミ製パネル受け材継ぎ手部の4点曲げ試験結果を踏まえ、以下に設計時の注意点を挙げる。

- (1) パネル受け材に限らず、薄板で構成されるアルミ製部材を使用する場合、部材の許容応力度は、アルミ指針³⁾などを参考に局部座屈による低減を考慮する必要がある。
- (2) パネル受け材フランジ板厚 $t=1.5\text{ mm}$ の場合、母材が先に短期許容曲げ耐力に達するためには、断面形状が複雑な場合にはインサートの埋込長さはせいぜいの2倍以上、断面形状が角パイプ相当の場合にはインサート埋込長さはせいぜいの1.5倍以上必要である。

(2)でインサート必要埋込長さに断面形状によって差が生じた理由は、部材製造時の残留応力の影響と推測される。上記の、インサート埋込長さの目安は今回の断面、材料条件に限ったものであり、今後の詳細な検証が必要であることに注意されたい。

参考文献・注釈

- 1) 傾斜地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)
- 2) 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
- 3) アルミニウム建築構造協議会、2021、アルミニウム建築構造設計規準・同解説、第2版 第3刷

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。