

建物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

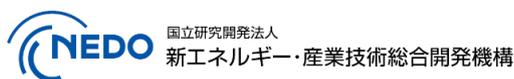
技術資料：

住宅木造屋根設置型太陽光発電設備の耐風圧性能試験と

緊結部付近の木造屋根の挙動

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

住宅木造屋根設置型太陽光発電設備の耐風圧性能試験と緊結部付近の木造屋根の挙動

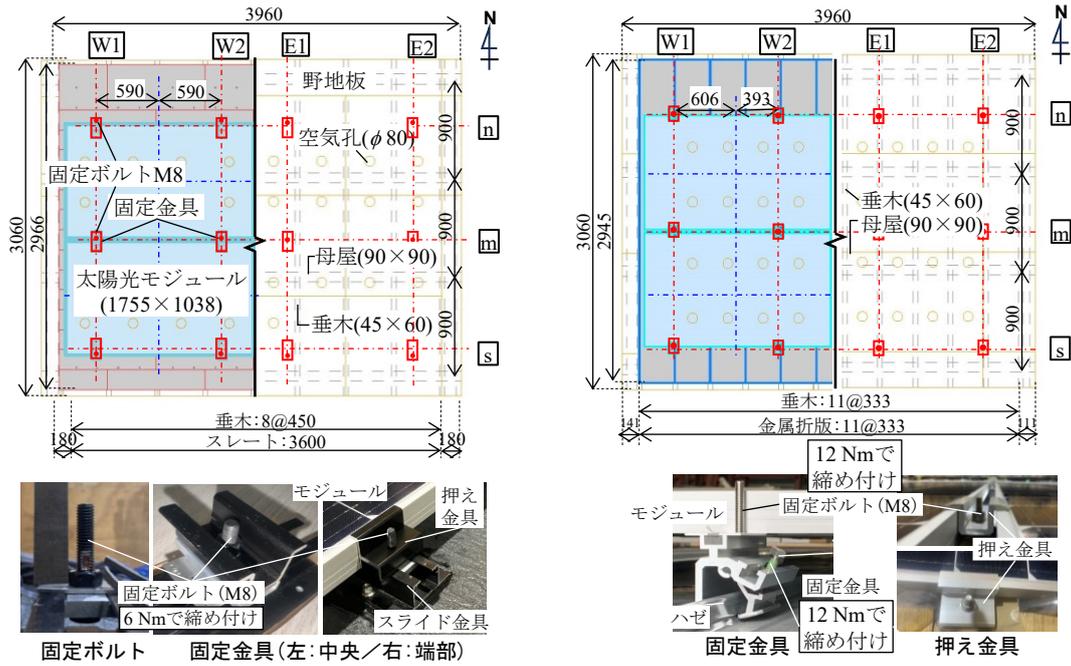
1. 概要

太陽電池パネルを建物上に設置する場合、供用年数中に作用する風圧力をはじめとする外力に対して太陽光発電設備および固定する建物側の損傷は避けなければならない。しかし、建物の形状や設置個所を考慮した設計風圧力に関する検討は進められているが、風圧力を受けた太陽光発電設備を設置した建物にどのような損傷が発生しうるかについては、ほぼ情報がない。本技術文書では、太陽光発電設備を設置した住宅木造屋根を想定したアセンブリ試験体の圧力载荷試験結果を示し、風による吹上圧力が屋根面に作用した場合に生じうる損傷過程を明らかにする。また、部分試験の結果をもとに、吹上圧力に対する損傷を避けるための知見をまとめる。

2. 住宅木造屋根設置型太陽光発電設備の吹上圧力に対する耐風性能

2.1 試験計画

図 2-1 に、住宅木造屋根上に太陽電池モジュールを設置したアセンブリ試験体を示す。(a) はスレート屋根試験体であり、(b) は縦葺きの金属屋根試験体である。アセンブリ試験体は左右対称形であり、図 2-1 では、右半分に母屋と垂木の配置を示す図、左半分に(a)スレートや(b)金属屋根および太陽電池パネル設置状況を示す。木造屋根は、一般的な住宅木造屋根の仕様に準拠した¹⁾。母屋と垂木には、ヒノキ材 90 mm×90 mm とホワイトウッド 45 mm×60 mm を用いた。垂木の間隔は、(a)では 450 mm であるのに対し、(b)では金属屋根の幅に合わせて 333 mm とした。表 2-1 に、各部材の接合方法一覧を示す。野地板 $t=12$ mm は N50 釘@150 mm (表 2-1) で垂木に固定した。スレートは野地板にビス ($\phi 4.2 \times 25$ mm (表 2-1)) で 1 枚につき 4 箇所固定した。金属屋根はそれぞれ西側端部をビス ($\phi 4.2 \times 25$ mm (表 2-1)) で垂木に固定した。太陽電池モジュールは、1755 mm×1038 mm の比較的大きな寸法のものを採用し、2 行×2 列で配置した。モジュール固定金具は 3 行 4 列で配置し (図 2-1 中に赤で示す)、各モジュールを南北それぞれ 2 箇所、計 4 箇所で固定した。つまり、中央の m 行に配した固定金具は、 n 、 s 行の端部固定金具の約 2 倍の荷重が作用することになる。(a)スレート屋根試験体では、モジュールを押え金具固定し、スライド金具を野地板に木ネジ 4 本で固定した (図 2-1(a)下)。(b)金属屋根試験体では、固定金具のボルトに初期張力を入れて金属屋根のハゼを挟むことで固定する (図 2-1(b)下)。



(a) 試験体 1: スレート屋根

(b) 試験体 2: 金属屋根

図 2-1 太陽電池パネルを設置した木造屋根アセンブリ試験体概要

表 2-1 アセンブリ試験体各部位の接合方法

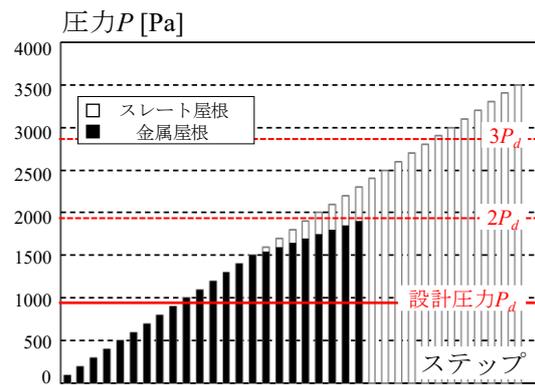
| | |
|-----------------------|--------------------------------------|
| 固定金具の固定ボルト | M8 ボルト |
| 金属屋根—野地板（金属屋根試験体） | ビス（ $\phi 3.2 \times 32$ ）@平均 333 mm |
| スライド金具—野地板（スレート屋根試験体） | 木ネジ（ $\phi 3.2 \times 60$ ） |
| 野地板—垂木 | 釘 N50@150 mm |

図 2-2 に、図 2-1 のアセンブリ試験体の加圧試験概要を示す。図 2-2 (a) H 形鋼で組んだ架台の上にアセンブリ試験体を載せ、母屋と鉄骨架台を長ボルトで固定した。架台の側面を耐圧壁で囲み、太陽電池パネル直下の野地板と屋根葺き材に空気孔（ $\phi 80$ ）（図 2-1）を設けた屋根面上（太陽電池パネルより下）を一枚のシートで風止して、圧力を制御する圧力箱を作製した。加圧方向は、太陽電池パネルへの吹上圧力とした。太陽電池パネルへの吹上圧力は、加圧時に屋根面上を覆うシートが膨んで太陽電池パネル下面を押すことで作用させた。図 2-2 に、加圧計画を示す。設計圧力 P_d は 947 Pa を想定している。設計風圧は、設計基準風速 V_0 を 34m/s、地表面粗度区分を III、屋根面の高さ H を 7 m、屋根勾配を 4 寸勾配（21.8 度）として算出した²⁾。加圧は、片方向繰り返し漸増加圧とした。各ステップでは、目標圧力到達後に 10 秒程度圧力を維持し、減圧した。



試験体の固定

風止(スレート屋根)



(a) 試験体の加圧方法

(b) 加圧計画

図 2-2 アセンブリ試験体の加圧方法

2.2 試験結果

2.2.1 破壊性状

図 2-3 と図 2-4 に、加圧試験における屋根上に太陽電池モジュールを設置したアセンブリ試験体の損傷進展・最終破壊状況を示す。

図 2-3 に示すスレート屋根試験体では、2500 Pa にスライド金具（図 2-1 E2m）を固定した付近の野地板と垂木の間で 1 mm 程の隙間を目視で確認した。その後、3500 Pa 加圧時に固定金具（図 2-1 W1m）の木ネジが野地板から外れて北西側の太陽電池モジュールが吹き飛び、加圧を終了した。3500 Pa 除荷時には、野地板と垂木間の隙間は釘が見える程になった（図 2-3 右上）。中央の m 行のスライド金具が最初に野地板から外れたのは、図 2-1 に示すように、m 行のスライド金具は南北 2 面の太陽電池パネルを固定するため、端部より大きな風圧力（スライド金具にとっては屋根からの引抜き力）が作用したためである。また、野地板と垂木の隙間が顕著となった箇所も m 行のスライド金具近傍であった。野地板の垂木からの剥離開始の圧力については、図 2-7 で近傍の変位計測値から推定する。

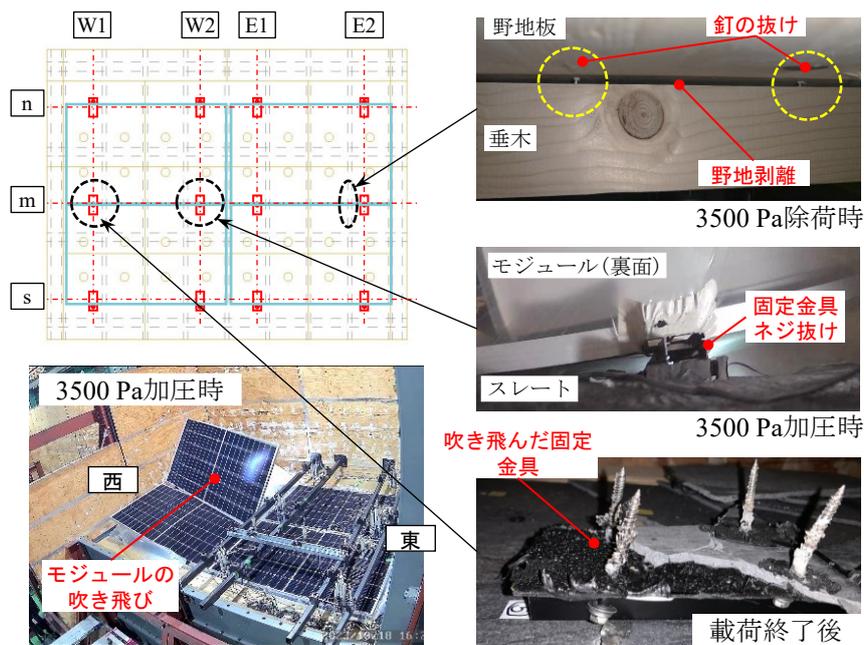


図 2-3 破壊性状（試験体：スレート屋根）

図 2-4 に示す金属屋根試験体では、1000 Pa 除荷時にモジュールを固定した金属屋根のハゼ直下の垂木の割れを確認した（図 2-4 右上）。1500 Pa 加圧時に最初（図 2-1 W2m 付近）の太陽電池パネルを固定したハゼ直下のビスが抜けた（図 2-4 右中）。以降連鎖的に隣接するビスが抜け、1900 Pa 加圧時にモジュールが大きく浮き上がり加圧を終了した（図 2-4 左下）。終了後、W1 および W2 列の嵌合部が持ち上がり、外れていることを確認した（図 2-

4右下)。図 2-4 に示す通り、太陽電池パネルを固定したハゼ直下のビスが、西側でほぼ抜けたことが分かる。なお、1000 Pa 以降、垂木の割れの進展は目視では認められなかった。

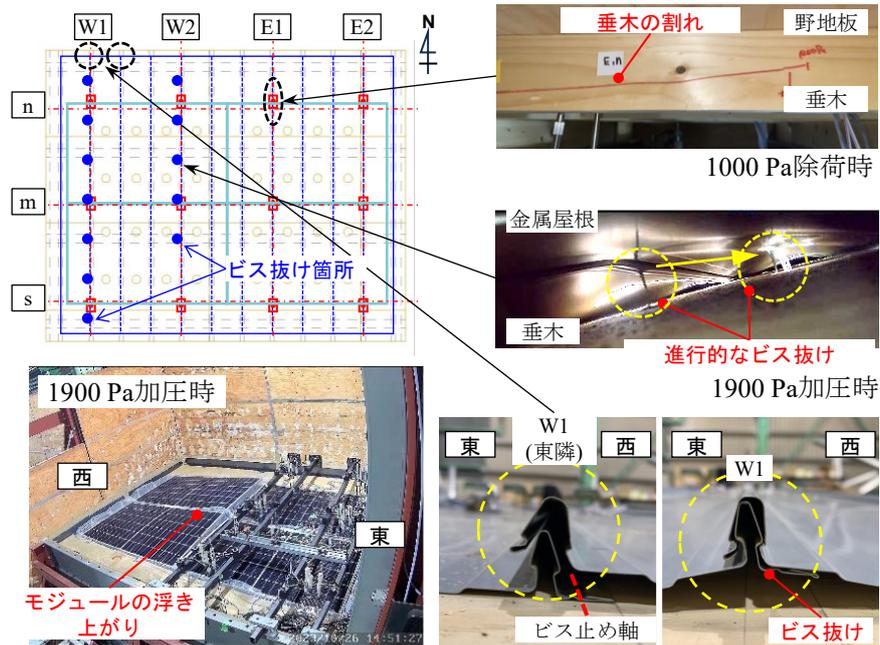


図 2-4 破壊性状 (試験体: 金属屋根)

図 2-5 に、金属屋根試験体の垂木の割れを確認した箇所を示す。図には、屋根面を構成する各垂木面の東側立面を示した。図 2-1 に定義した太陽電池モジュールを固定したハゼをビス止めした垂木横には W1~E2 を記載した。図 2-5 より、ハゼをビス止めした垂木において、特に太陽電池モジュール固定金具付近で垂木の割れが生じていることが確認できる。表 2-1 に示す通りビスの深さ (25 mm) が垂木のせい (45 mm) に対して浅かったことが原因である可能性がある。今後、詳細な検討が必要と考える。

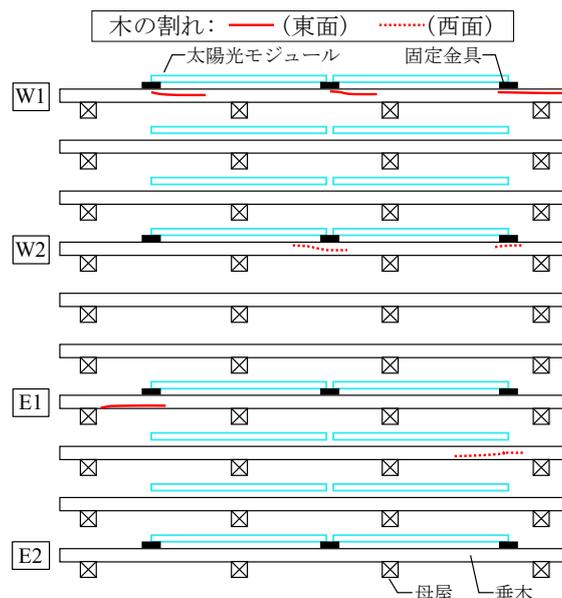


図 2-5 垂木の割れ発生箇所 (試験体: 金属屋根)

2.2.2 固定金具への作用引抜き力および木造屋根の損傷開始圧力の推定

図 2-6 に、野地板の鉛直変位と圧力の関係を示す。計測箇所は、凡例に示す通りで、屋根面上の軸を示す記号は図 2-1 に定義する。なお、図中の縦赤破線 P_d は設計風圧を示す。(a) スレート屋根では、1500 Pa 程度までは中央固定金具 (m : 赤線) が端部の 2 倍程度の変形を示した。1500 Pa 以降は、E2m は E1m よりも大きな値を取った。これは、野地の剥離が原因と考えられる。固定金具位置が左右対称ではない(b)金属屋根では、E1m の変形が最大となり、E1n、E2m、E1s が同程度で続き、E2n、E2s が最小となった。以上から、それぞれの変位計測位置の垂木および架台に固定されている母屋との相対関係が完全には同じではないものの、図 2-6 に示す鉛直変位の関係から、固定金具の負担力は、図 2-6 中に示すそれぞれの有効面積からおおよそ推定できると言える。

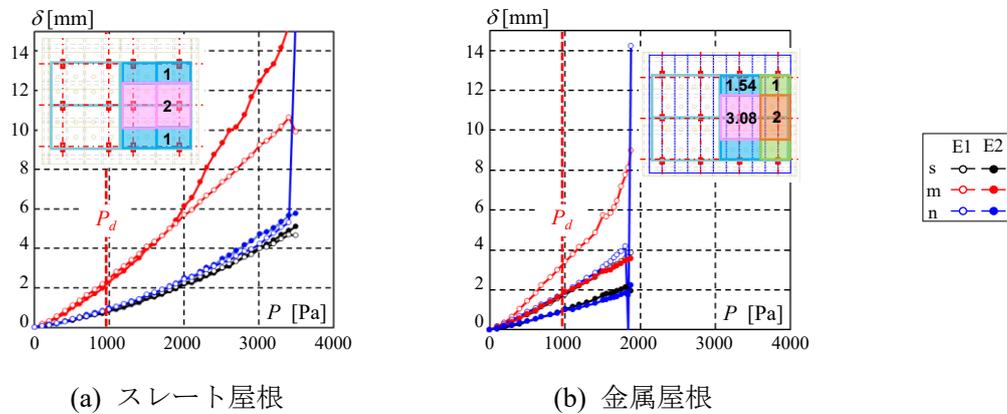


図 2-6 野地板の鉛直変位

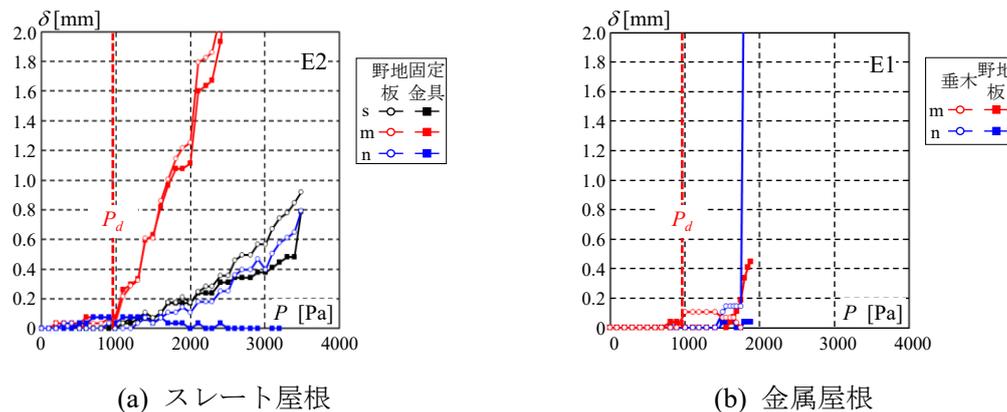


図 2-7 野地板の残留鉛直変位

図 2-7 に、野地板と固定金具の残留鉛直変位と圧力の関係を示す。ここで残留変位とは、図 2-2(b) に示す加圧サイクルにおける除荷完了時の変位を指す。(a) より 1000 Pa 付近から図 2-4 右上に示すように野地板の剥離が観測された E2m の残留変位の増加がみられることから、設計圧力付近から野地板の剥離が既に始まっていた可能性がある。文献 3) では、野地板

を垂木に固定していた N50 釘の引抜き耐力は 1~2 kN と実験結果が示されている。一方、固定金具 E2m に 1000 Pa 時に作用する引抜き力は、図 2-6 図中に示す有効面積を採用すると 0.9 kN となる。つまり、野地板に固定された固定金具から作用する引抜き力は、野地板を垂木に固定した釘のうち直近の 1 本でほぼ負担していた可能性が高い。こちらは、3 章で実験的に検討する。図 2-6(b)より、E1n と E1m の残留変位からは、垂木割れとの因果は認められなかった。

2.2.3 固定ボルトの発生歪

図 2-8 に、太陽電池パネルを固定している M8 ボルトに貼付した歪ゲージの計測歪と圧力との関係を示す。図 2-1 に示した通り、メーカー推奨値に従って(a)スレート屋根では 6 Nm、(b)金属屋根では 12 Nm でボルト初期張力を導入した。なお、太陽電池パネルは北側と南側の長辺を固定金具で固定したことから、歪ゲージは北側と南側が対になるように貼付した。図 2-8 (a)スレート屋根の場合、初期の締め付け時からボルトに曲げが入り、その後加圧すると、設計風圧 P_d 程度までは大きな変動は見られないが、 $1.5P_d$ 付近からボルトの曲げ歪の増加が顕著となった。最終的には $3.5P_d$ 程度で降伏歪に達したと推測される。この固定ボルトにおける曲げモーメントの発生は、スレート屋根では、凹凸面に防水用のシール材を塗布した上に固定金具を固定することから、締め付け時に曲げ変形が生じやすいことが原因と考えられる。図 2-8 (b)金属屋根でも同様に締め付け時の曲げ歪の発生およびその後の曲げ歪の増加がみられた。一方で、歪の増加傾向は(a)スレート屋根の場合よりも安定した。これは、太陽電池パネルの固定金具を金属屋根のハゼをグリップして固定することから、引抜き力に対する抵抗する部材が比較的安定していたため、と推測する。

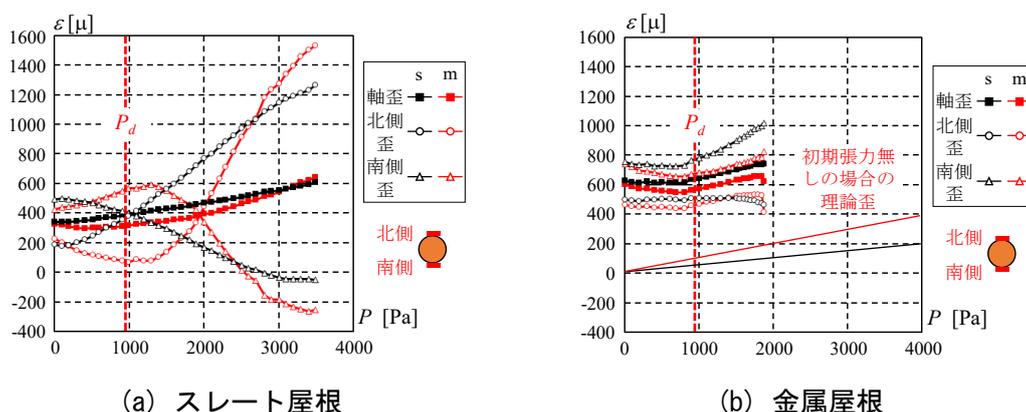


図 2-8 野地板の鉛直変位

2.3 太陽電池パネルと木造屋根アセンブリ試験体の加圧試験まとめ

2.2 節に示す試験結果から、吹上圧力による引抜き力に直接抵抗する固定ボルトは、設計風圧の 2 倍程度の圧力に対しても問題はないと言える。また、太陽電池パネルの脱落を伴うような被害についても、スレート屋根では設計風圧の 3 倍、金属屋根では 1.5 倍程度の圧力

まで耐えることが分かった。一方で、設計風圧時には、固定金具を介して引張力を受ける木造屋根の野地板の剥離あるいは垂木の割れが発生する可能性が示された。

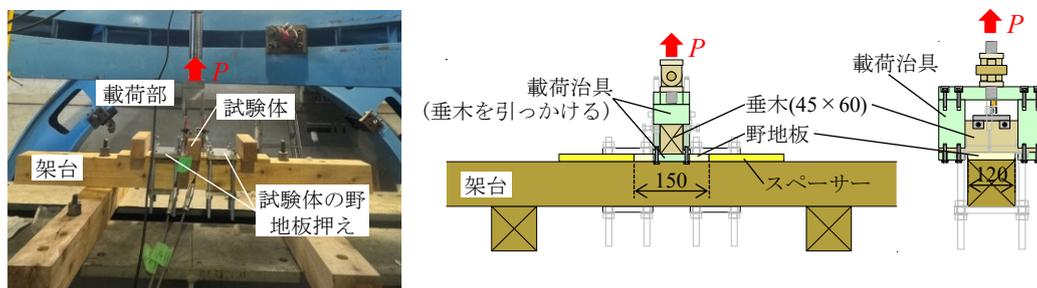
3. 垂木に釘固定された野地板の剥離耐力

2章より、太陽電池パネル面に作用する吹上圧力が固定金具を介して引張集中荷重として木造屋根に作用する場合、釘で垂木に留め付けられた野地板の剥離が早期に生じる可能性が示された。そこで、3.1節では野地板を垂木に固定した釘の引抜き耐力の試験結果をまとめ、3.2節では3.1節の試験体と同時に製作した木造屋根を模した垂木に釘で固定した野地板の面外引抜き試験（野地板の剥離試験）の結果をまとめる。

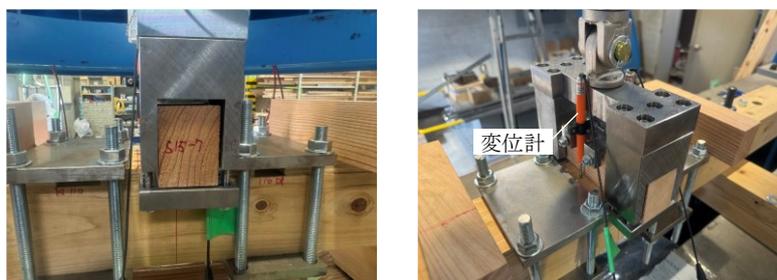
3.1 釘抜き試験

3.1.1 試験計画

図3-1に、釘1本で野地板（合板）を垂木に固定した試験体を用いた釘抜き試験概要を示す。釘は、従来の木造屋根施工と同様に釘打ち用コンプレッサーを用いて打ち付けた。合板を鋼板で架台に挟み込んで長ボルトで固定し、ジャッキに取り付けた治具に垂木を引っかけることで釘に引抜き力 P を与えた。釘抜き変位は、垂木に固定した変位計を合板にあてて計測した。荷重は、引抜き変位 $\delta=10\text{ mm}$ に到達するまで行った。



(a) 試験体と荷重装置全体



(b) 試験体固定状況と荷重治具

図3-1 釘抜き試験

表3-1に、試験体リストを示す。野地板（合板）は、2章のアセンブリ試験で用いた板厚 $t=12\text{ mm}$ を基準に、 $t=9, 15\text{ mm}$ とした。垂木には、同様に2章のアセンブリ試験で用いた

ホワイトウッド ($w=0.46$) を基準に、柔らかい杉 ($w=0.30\sim0.38$) と米松 ($w=0.45\sim0.53$) とした⁴⁾。ここで、 w は気乾比重である。

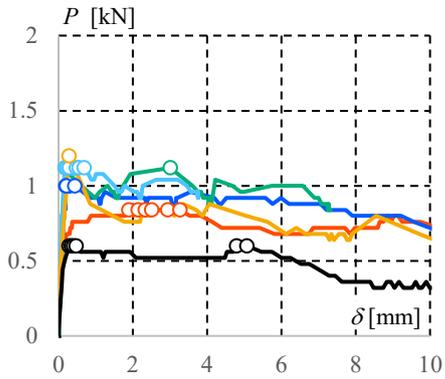
表 3-1 釘抜き試験の試験体リスト

| 野地板 板厚 t [mm] | 垂木材種 | 供試体数 |
|-----------------|-----------------------|-------|
| 9 | 杉(S)、ホワイトウッド(W)、米松(P) | 各 8 体 |
| 12 | 杉(S)、ホワイトウッド(W)、米松(P) | 各 8 体 |
| 15 | 杉(S)、ホワイトウッド(W)、米松(P) | 各 8 体 |

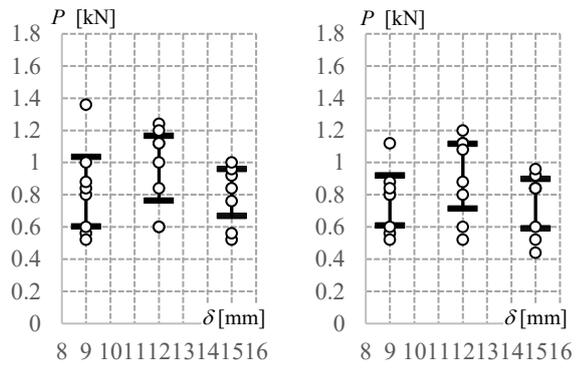
3.1.2 試験結果

図 3-2 に、釘引抜き力 P と釘抜け変位 δ の関係を、野地板 $t=12$ mm に関して示す。垂木が杉とホワイトウッドの場合には、ほぼ線形に荷重が上がった後そのまま最大荷重に到達した。多くの供試体で $\delta=1$ mm 程度までに荷重が最大荷重の 6~8 割まで低下し、その後 $\delta=6$ mm 程度までは荷重をほぼ維持した。 $\delta=10$ mm には引抜き力 P が最大荷重から半減した供試体も存在するが、中には 8 割を維持したものも存在した。一方、米松の場合は、線形に荷重が上がったのち大きく剛性低下したのちも荷重を維持するか緩やかに増加を続け、杉やホワイトウッドのように最大荷重に達して劣化勾配に転じる傾向は見られなかった。中には $\delta=2$ mm 以上で最大を迎えた供試体も存在した。最大荷重到達後も急激に荷重を下げることはなく、 $\delta=10$ mm 時点で引抜き力 P は最大荷重の 5~8 割を維持した。以上から、野地板を垂木に打ち付けた釘は、引抜きが開始しても直ちに抵抗力を失うことはなく、 $\delta=10$ mm までは抵抗力を発揮することを確認した。

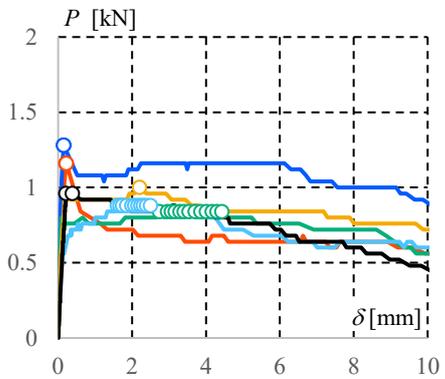
図 3-3 に、それぞれの試験パラメータごとに、供試体 8 ケの結果を示す。また、それぞれのばらつきを考慮し、釘引抜き耐力の平均値の 95%信頼区間を追加し、図 3-4(a)にまとめる。参考のため、木質構造設計指針³⁾で参照されている釘の引抜き試験結果 (気乾比重 $w=0.4\sim0.65$ の垂木使用。材種不明) も図 3-4(b)に示す。今回実施した試験結果の方が、引抜き耐力が全体的に低い傾向を示した。木質構造設計指針³⁾の参考文献より、釘の打ち方 (手打ちかコンプレッサー使用か) などの情報がないため、本件は引き続き慎重な検討を要する。杉の釘引抜き耐力は低い傾向にあり、95%信頼区間の下限で 0.6 kN 程度に留まること分かる。また、ホワイトウッドや米松の場合でも引抜き耐力の下限が 0.75 kN 程度となる可能性がある。なお、杉以外は、野地板厚 t が厚くなるほど釘引抜き耐力が低下する傾向がみられ、 $t=9$ mm に対して $t=12$ mm では信頼区間の下限で 1 割、上限で 2 割程度低下した。



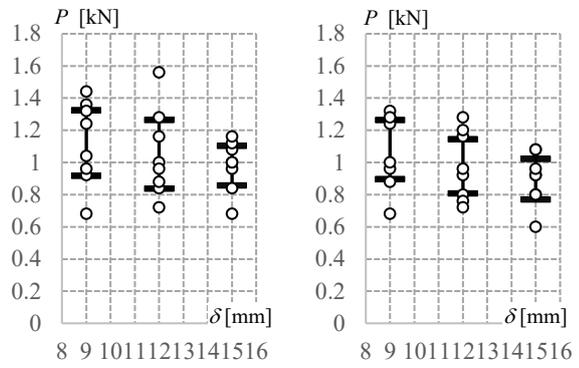
(a) 垂木：杉



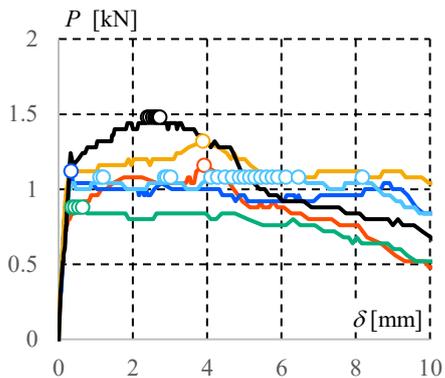
(a) 垂木：杉



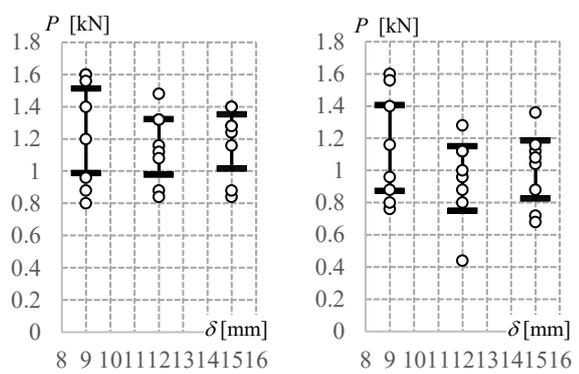
(b) 垂木：ホワイトウッド



(b) 垂木：ホワイトウッド



(c) 垂木：米松



(c) 垂木：米松

図 3-2 釘引抜き力-釘抜け変位
(野地板 $t=12$)

図 3-3 釘引抜き耐力の分布
(左：最大；右：1 mm 変位時)

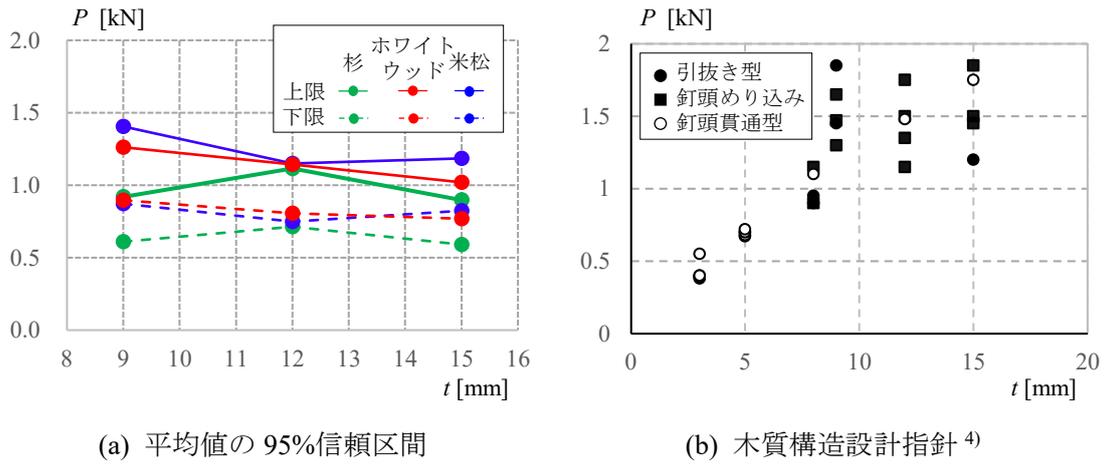


図 3-4 釘引抜き耐力

3.2 垂木に釘固定された野地板の面外引抜き試験（野地板剥離試験）

3.2.1 試験計画

図 3-5 に、2 章のアセンブリ試験体における木造屋根の一部を模した、垂木に釘固定した野地板の面外引抜き試験の全体概要を示す。

図 3-6(a)には試験体および荷点概要、(b)には計測計画を示す。試験体は、900 mm × 900 mm の野地板に 450 mm ピッチの垂木を 3 本配して、それぞれ N50 釘をおおよそ 150 mm ピッチで固定した。試験体の入れ替えをスムーズにするため、垂木端部は鋼板で挟み込んで長ボルトで架台に固定する方法を採用した（図 3-5）。荷点は、垂木平行方向に関しては中央を維持し、垂木との距離を変数として野地板の端部を基準に $X = 100, 225, 350$ mm の 3 か所とした。荷点は、太陽電池パネルの固定金具を想定し、図 3-5 に示すように M10 ボルト 4 本（100 mm × 50 mm）で垂木と荷点を固定した。変位計設置箇所を、図 3-6(b) に示す。

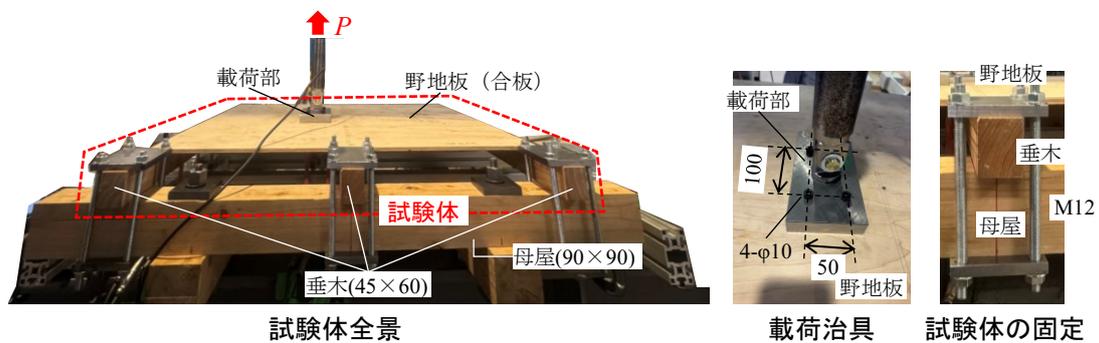


図 3-5 垂木に釘固定された野地板の面外引抜き試験概要

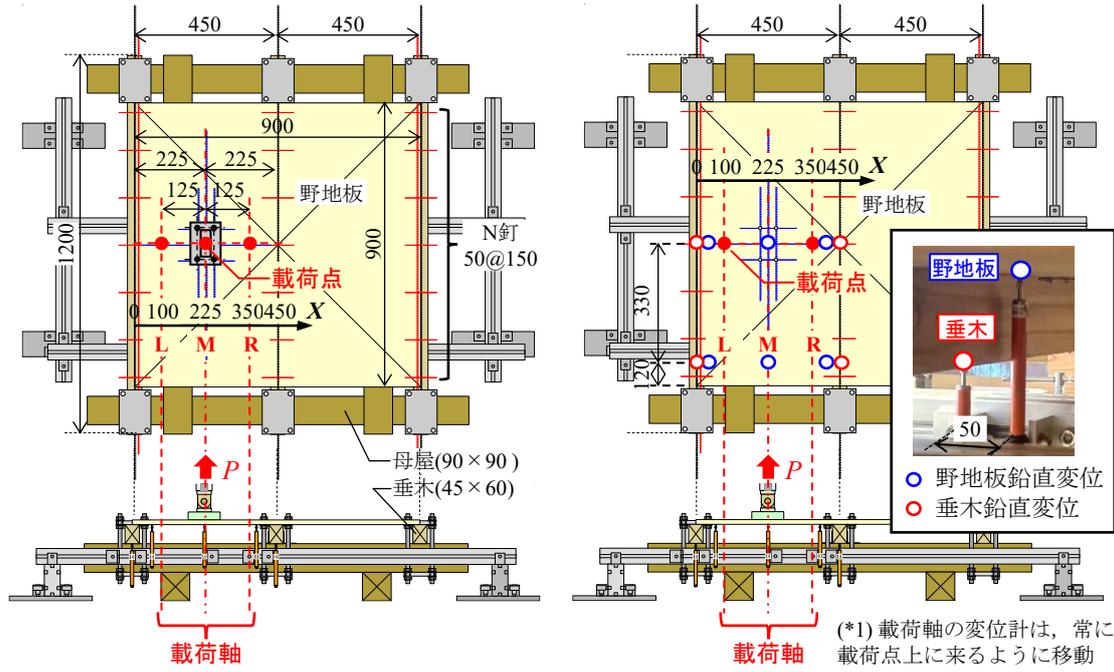


図 3-6 試験体詳細と試験計画

表 3-2 に試験体リストを示す。破壊試験では、どこかの釘が完全に抜けたことを目視で確認できるまで実施した。

表 3-2 野地板面外引抜き試験の試験体リスト

| 野地板 板厚 t [mm] | 垂木 材質 | 載荷軸（野地板端部から の距離） X [mm] | 供試体数 (破壊試験数) | 試験体 記号 |
|--------------------|----------------|------------------------------|-----------------|----------------------|
| 9 | 杉(S) | 100 (L) 225(M) 350(R) | 各 6 体 (2 体) | LS9 MS9 RS9 |
| 12 | 杉(S) | 100 (L) 225(M) 350(R) | 各 6 体 (2 体) | LS12 MS12 RS12 |
| 15 | 杉(S) | 100 (L) 225(M) 350(R) | 各 6 体 (2 体) | LS15 MS15 RS15 |
| 9 | ホワイトウッド (W) | 100 (L) 225(M) | 各 6 体 (2 体) | LW9 MW9 RW9 |
| 12 | ホワイトウッド (W) | 100 (L) 225(M) | 各 6 体 (2 体) | LW12 MW12 RW12 |
| 9 | 米松(P) | 100 (L) 225(M) | 各 6 体 (2 体) | LP9 MP9 RP9 |
| 12 | 米松(P) | 100 (L) 225(M) | 各 6 体 (2 体) | LP12 MP12 RP12 |

(*1) 供試体 6 体中、釘が完全に抜けるまで載荷する破壊試験は 2 体。他は、3 kN まで載荷を実施。

3.2.2 試験結果

図 3-7 に引抜き力と野地板の面外変形関係を、破壊試験を実施した試験体の内 1 体について示す。25 mm レンジの変位計を使用したため、変位については釘抜け発生までは計測できていない。図 3-7 より、野地板厚 t が薄いほど剛性が大きく下がり、荷重が横ばいとなる変位は大きくなる傾向を示したが、おおよそ $\delta=15$ mm 程度までには最大荷重となることが分かる。載荷軸が中央垂木に近い場合（載荷軸 R）、中央垂木の釘が先に抜け始めるのを目視で確認したが、最終的には左端の野地板端部の釘が先に抜けて載荷を終了した。

表 3-3 に、垂木を杉としたとき、様々な野地板厚 t および載荷軸について、試験終了時の野地板の変形を示す。野地板厚 t および載荷軸によらず、野地板の左端の鉛直変位が大きくなり、最初の釘抜けは、野地板端部で発生した。野地板厚 t が小さい場合、野地板端部では載荷力を受ける中央の変位が最大となった。したがって、最終的には中央の釘が抜ける破壊が見られた。一方で、野地板厚 t が大きいほど、また載荷軸が端部から遠ざかると、野地板端部の変形が逆釣鐘形状から直線に近づく傾向が見られ、最終的には複数本の釘が同時に抜ける傾向を示した。

図 3-8、図 3-9 に、破壊試験を行った全パラメータについて、破壊性状を示す。各写真右肩に 2 体の破壊試験の最大荷重を示す。写真および図 3-7 に示したのは、最大荷重に○がついた方の試験体である。先述した野地板端部が逆釣鐘形状となり中央の釘が抜ける破壊形式を A、野地板が平面的に変形して複数本の釘が同時に抜ける破壊形式を B と定義して、試験体の破壊形式をカテゴリ分けした。図 3-8 の下段には、中央垂木の釘抜け状況も示す。図 3-8 より、野地板が最も柔らかく、かつ載荷軸が野地板端部に近い試験体 LS9 以外の試験体では、載荷終了時に中央垂木においても釘抜けが目視で確認された。

図 3-10 に、変位計で計測した野地板の変位分布を示す。分布はそれぞれ $P=2$ kN と最大荷重 P_{\max} 時に併せて、両者の中間について示した。なお、図 3-10 に示した分布に対応する荷重を図 3-7 に横線で示している。図 3-10 より、野地板端部近くに載荷した場合（載荷軸 L）は野地板端部に変形が大きく集中することが分かる。一方、垂木間中央（載荷軸 M）や中央垂木付近（載荷軸 R）に載荷した場合、野地板の鉛直変位分布は、最大荷重時以外はより一様に近づいた。以上から、垂木および野地板端部から 100 mm に載荷した場合は、端部垂木に打ち付けた釘に負担が集中することが推定される。

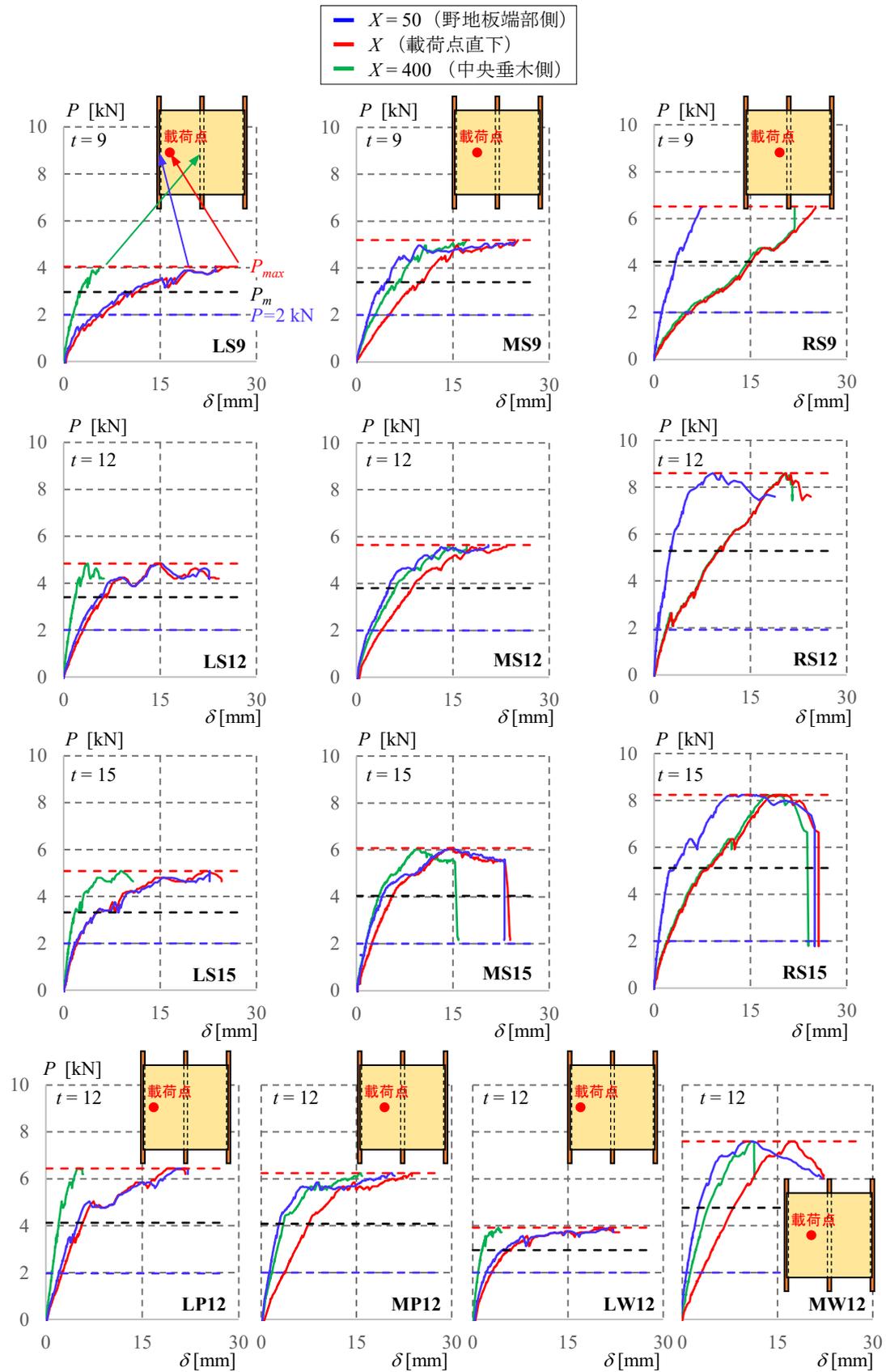
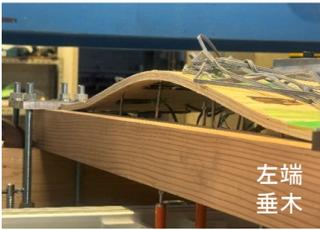
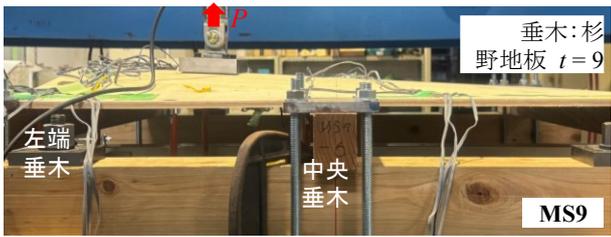
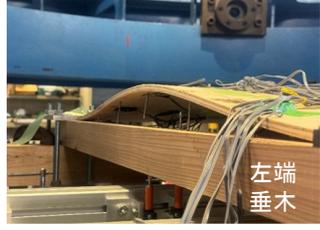
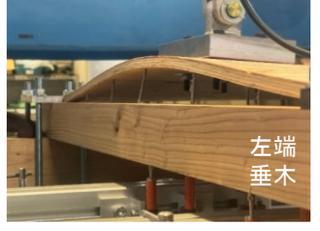
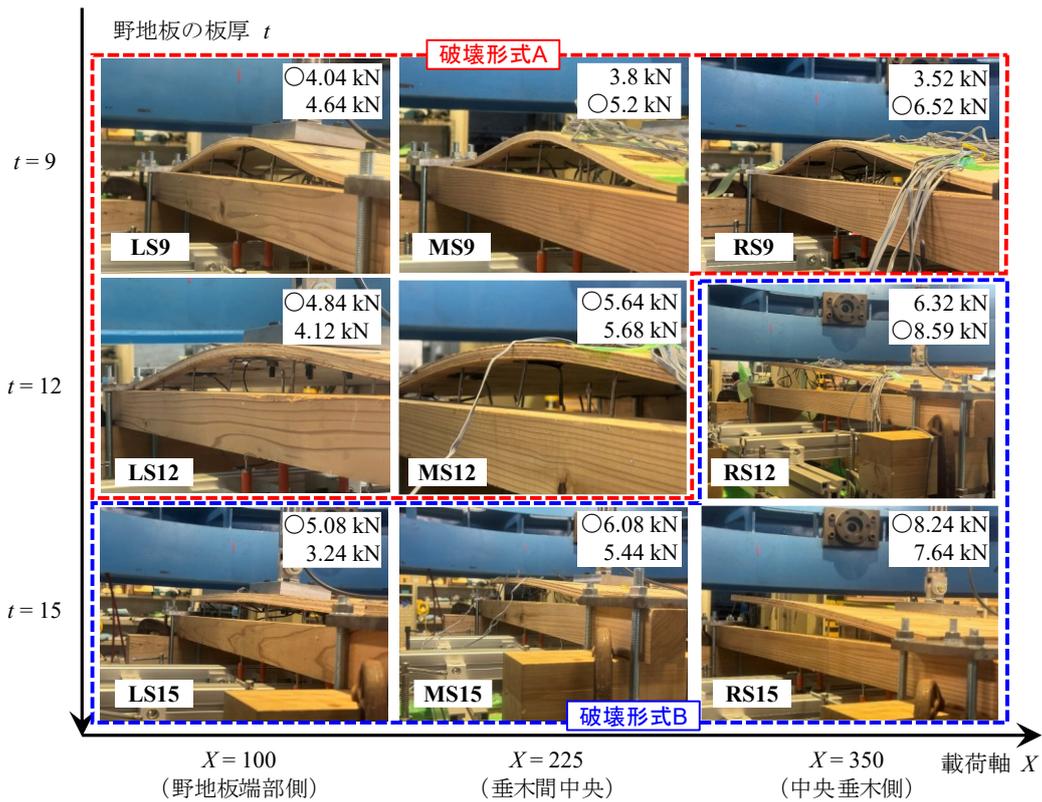


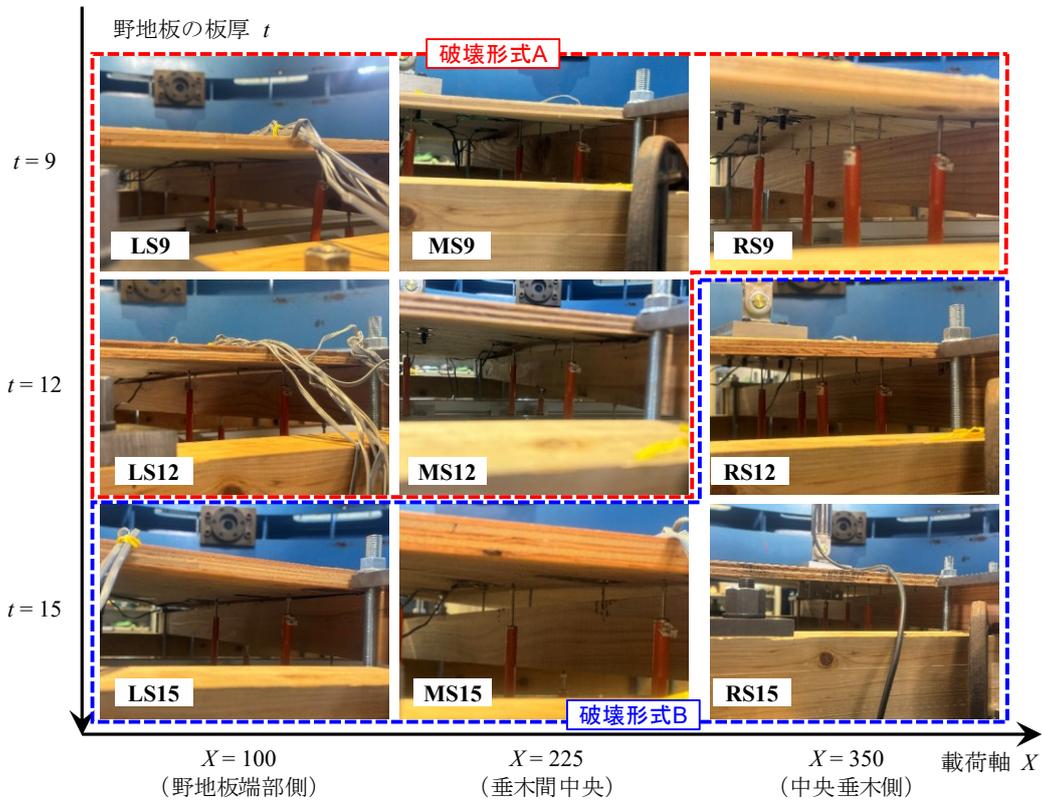
図 3-7 引抜き力—野地板鉛直変位関係

表 3-3 試験終了時の野地板変形(垂木: 杉)

| | | |
|------|---|--|
| MS9 |  |  |
| LS9 |  |  |
| MS12 |  |  |
| LS12 |  |  |
| MS15 |  |  |
| LS15 |  |  |



(a) 野地板端部



(b) 野地板—中央垂木固定部

図 3-8 最大荷重時の野地板剥離状況と破壊形式 (垂木: 杉)

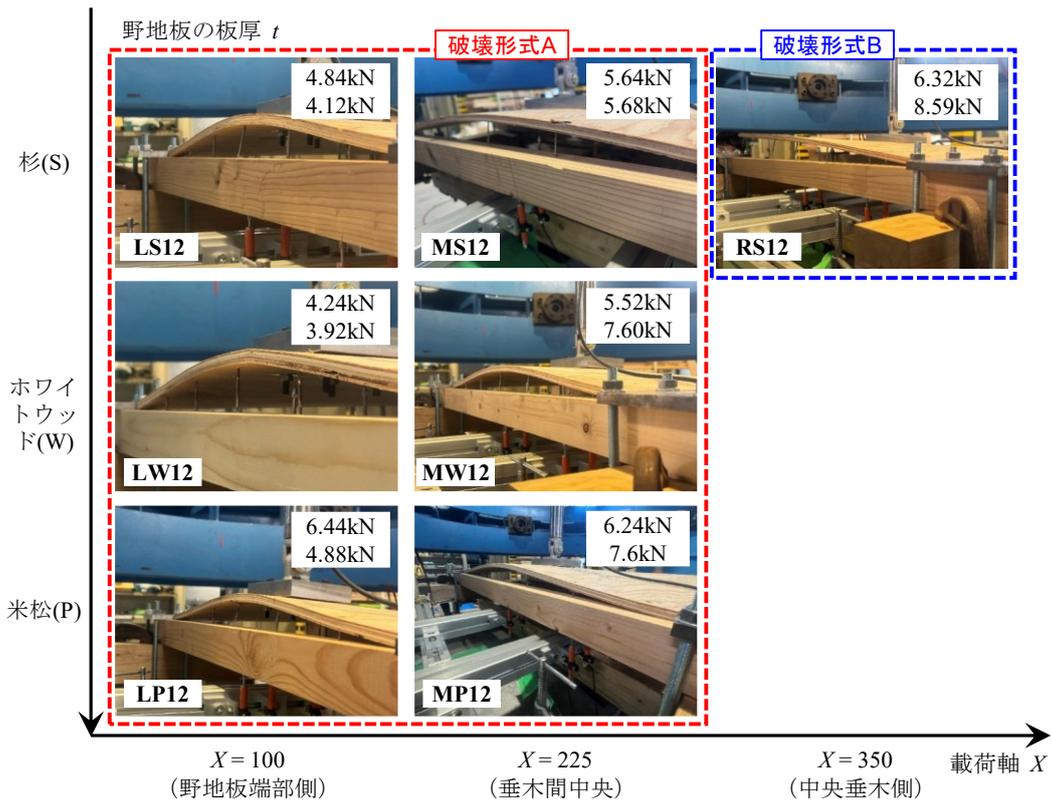


図 3-9 最大荷重時の野地板剥離状況と破砕形式 (垂木 : 杉、ホワイトウッド、米松)

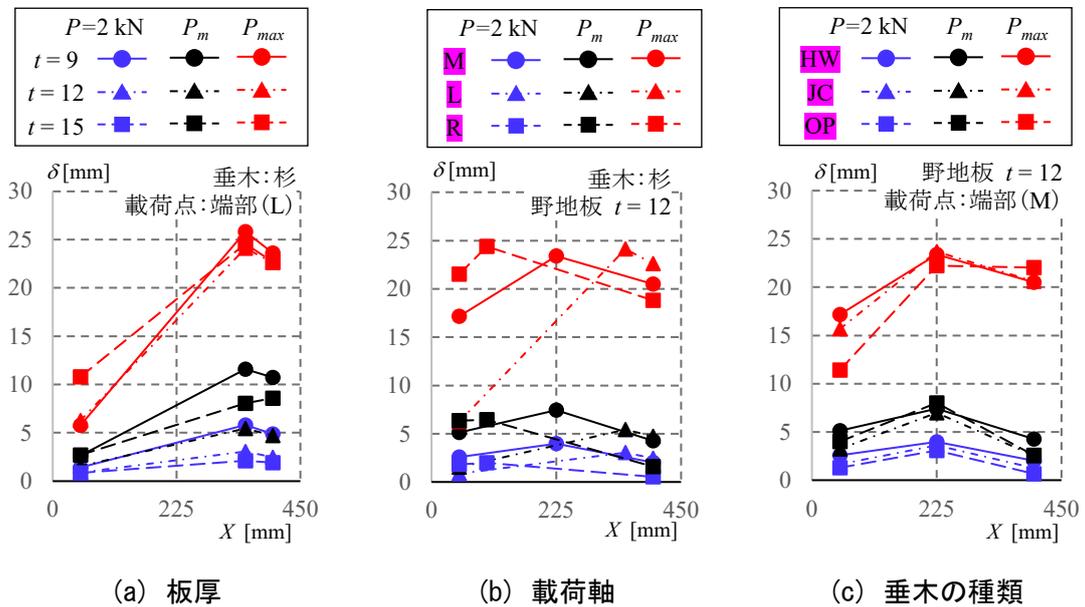
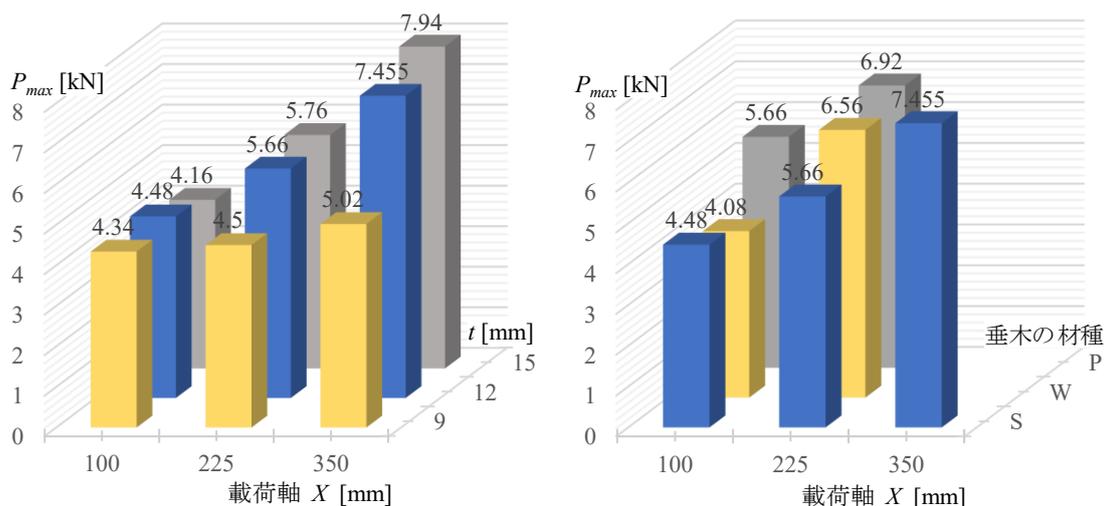


図 3-10 野地板の変形分布 (垂木平行方向)

図 3-11 に、今回検討したパラメータにおける野地板剥離最大耐力 P_{max} をまとめる。図 3-11 には、破壊試験を実施した 2 体の最大荷重の平均値を示す。今回用いた試験体では、野地板は左端と中央の垂木に計 14 本の釘で固定されているため、全ての釘が均等に引抜き力に抵抗した場合、釘単体の引抜き耐力（図 3-4(b)）を参考にすると垂木が杉の場合は 7 kN～14 kN、ホワイトウッドと米松の場合は、10 kN～17 kN 程度の耐力を有していることになる。これを踏まえて図 3-11 を確認すると、野地板剥離最大耐力は半分以下まで低下した。野地板端部近くに引抜き力を作用させた場合、野地板の厚さによらず野地板剥離最大耐力が 4 kN 程度（直近の釘 5 本程度の引抜き耐力の総和）にとどまった。一方で、載荷点が野地板端部から遠ざかるにつれ、野地板厚が厚くなるほど野地板剥離耐力が大きくなる傾向がみられる。以上から、垂木に釘固定された野地板端部より 100 mm 程度までに引抜き力が作用する場合には直近の釘の引抜き負担に大差はないものの、引抜き力作用点から最終的に釘が抜ける野地板端部固定部までの距離が大きいほど、引張力を伝える野地板面外曲げ剛性の影響が顕著に表れると考えられる。図 3-11 (b) より、垂木が堅くなるほど最大耐力 P_{max} が大きくなる傾向が見られた。



(a) 野地板板厚（垂木：杉）

(b) 垂木の材種（野地板板厚 $t = 12$ mm）

図 3-11 野地板剥離最大耐力

3.3 垂木に釘固定された野地板の剥離試験のまとめ

住宅屋根に一般的に用いられる野地板と垂木の組み合わせでは、釘の引抜き耐力の平均の下限值は 0.5～0.75 kN となった。野地板の剥離耐力は、野地板を垂木に固定している釘すべてが等しく野地板に作用する面外引抜き力を負担とした場合の耐力の半分以下に留まった。特に、野地板端部近くに面外引抜き力が作用する場合、最大耐力には直近幅 600 mm 程度の範囲に配した 5 本の釘の耐力しか発揮されなかった。

一方で、通常使用される太陽電池パネル面積は $1.0 \text{ m}^2 \sim 2.0 \text{ m}^2$ 程度であり（2章のアセンブリ試験で採用した太陽電池パネルは上限）、設計風圧時に屋根面に作用する引抜き力は $0.5 \sim 1.0 \text{ kN}$ 程度と考えられるため、最大荷重に対しては十分な余裕を有する。

4. まとめ

木造住宅屋根に太陽光発電設備を設置した場合、暴風時に作用する可能性がある吹上圧力に対する太陽電池パネル木造屋根の破壊性状、耐力をアセンブリ試験および部材試験で把握した。その結果、太陽電池パネルおよび太陽電池パネルを屋根に固定している固定金具は設計風圧に対して 1.5 倍以上の十分な余裕を有していることが分かった。一方で、もし搭載する太陽電池パネルの面積が比較的大きく、かつ留め具の数も 1 つのパネルに対して 4 箇所であるような場合には、野地板に固定した場合は野地板の剥離、垂木に固定した場合には垂木の割れといった損傷が設計風圧作用時には生じる可能性が明らかになった。

垂木に釘固定した野地板の剥離試験より、野地板端部近くに面外引抜き力が作用した場合に、野地板が剥離しやすい条件であることが分かった。屋根面における野地板の割り付けが不明の場合は、垂木と垂木の中央の野地板に太陽電池パネルの固定金具のネジを打ち付けるほうが良いと言える。また、比較的大きな太陽電池パネルを用いる場合には、固定金具の数を増やすことが推奨される。

参考文献・注釈

- 1) 木軸組み工法住宅の許容応力度設計 2017年版, 日本住宅・木材技術センター, 2017
- 2) 建築物の構造関係技術基準解説書, 一般財団法人 建築行政情報センター・一般財団法人 日本建築防災協会, 2015
- 3) 木質構造設計規準・同解説 -許容応力度・許容耐力設計法-, 日本建築学会, 第4版, 第7刷, 2021
- 4) 木材博物館, 木材の比重リスト, https://wood-museum.net/specific_gravity.php (2025/2/25 最終確認)

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」の結果として得られたものです。