

特集 「自然災害にそなえる」

二重折板屋根の耐風性能に影響する熱伸縮の解析的検討

浅井 英克 時野谷 浩良

Analytical Study on Thermal Expansion Affecting Wind Bearing Capacity of Folded Plate Roof

Hidekatsu Asai Hiroyoshi Tokinoya

Abstract

Folded plate roofs are often used on steel structures. However, many of them have been damaged by strong winds such as typhoon. Investigation of damaged roofs has shown that one factor in this damage is a reduction in roof joint strength caused by cyclic heat expansion. This paper describes the effect of heat expansion of a folded plate roof, particularly to the joints, through an analytical case study that has modeled a folded plate roof, roof joints and purlins. The analytical results are as follows. 1) The heat expansion of a folded roof plate and roof joints are affected by purlin deformation. Heat expansion at the edge of the purlin is much larger than at the center. 2) If the heat expansion of a roof joint is regarded as free heat expansion, it can be very different from the real heat expansion of the building. 3) If the stiffness of the roof joints or purlins is high, large axial force can be induced in the folded roof plate.

概 要

二重折板屋根は台風時の強風などによって上葺折板が飛散する被害が頻発しており、耐風安全性の向上が課題となっている。被害調査事例によれば、折板の熱伸縮の繰返しによる接合部の強度劣化が被害の一因と考えられており、耐風性能の評価において熱伸縮量の把握が必要となっている。本報は二重折板屋根に生じる熱伸縮量を解析的に検討するものである。二重折板屋根および下地鉄骨を線材に置換し、上葺折板に熱応力を作用させる弾性フレーム解析を行い、折板の熱伸縮によって接合部に生じる水平変位を考察した。その結果、接合部に生じる水平変位は母屋の変形(剛性)の影響を大きく受け、上葺折板の自由伸縮量とは大きく異なることが分かった。また、同一母屋上でも材端と中央では柱・大梁からの拘束が異なるために接合部の水平変位は大きく異なり、特に拘束の強い母屋端部では接合部の水平変位が大きく、接合部に大きな応力が発生して強度低下の要因となり得ることが分かった。

1. はじめに

二重折板屋根は気密性・断熱性などに優れた屋根構法として、工場・倉庫等の建築鉄骨造で比較的多く用いられている。二重折板屋根(ハゼ式)は多くの部材から構成されており(Fig.1参照)、上葺折板に作用した風圧力は種々の金物(上吊子、断熱金具、下吊子、タイトフレーム、以下これらを接合金物と総称する)を介して構造躯体(母屋)に伝達される。

しかし近年、台風時の強風などによって上葺折板屋根が飛散する被害が頻発しており、耐風安全性の向上が課題となっている¹⁾。これまでの被害調査によれば、折板の繰返し熱伸縮による接合部の強度劣化が被害の一因と考えられている²⁾。このような現状を踏まえ、筆者らは各種の試験・解析を通して二重折板屋根の耐風性能の解明に取り組んできた^{3,4)}。文献4)では繰返し熱伸縮後の接合金物の耐風強度を実験的に検証しており、例えば±10mmの熱伸縮が上葺折板に多数回生じた場合、上吊子やタイトフレームにき裂が生じて、接合金物の耐風強度が大きく劣化することを示している。

一方、熱伸縮の影響を耐風設計に反映するためには熱

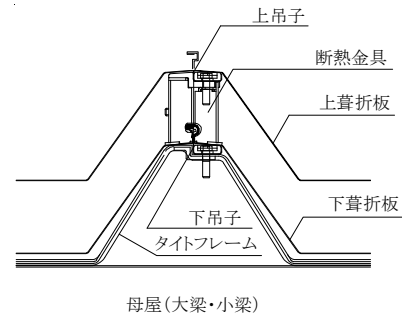


Fig. 1 二重折板屋根(ハゼ式)の例
Example of Folded Plate Roof

伸縮負荷(熱伸縮量・熱伸縮回数等)の適切な評価が必要であるところ、熱伸縮負荷に関する研究例は非常に限られており^{例えば5)6)}、熱伸縮に対する安全性を評価できるレベルには至っていない。

本報では、熱伸縮負荷の評価手法を確立することを目的に、実建物における二重折板屋根の熱伸縮量を解析的に検討する。二重折板屋根と下地鉄骨を線材に置換し、上葺折板に熱応力を作用させる弾性フレーム解析を行い、特に繰返し熱伸縮に対して弱点となり易い接合金物に着目して、熱応力による二重折板屋根の変形メカニズムを

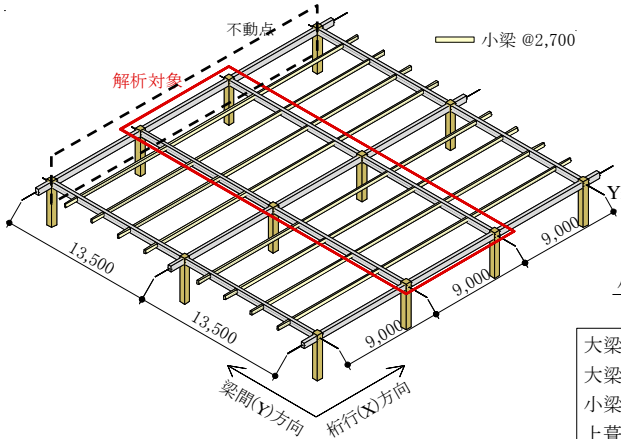


Fig. 2 検討対象
Study Object

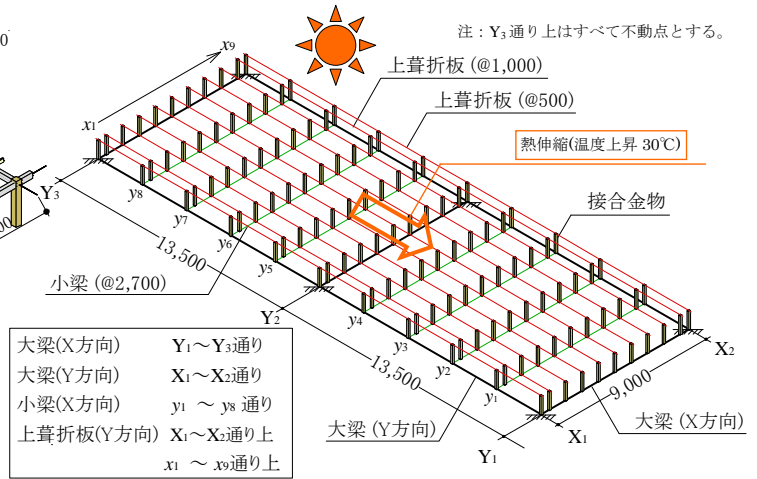


Fig. 3 解析モデル
Analytical Model

Table 1 解析ケース一覧
List of Analytical Case

解析ケース	上葺折板 (1m幅当り)		接合金物 (1m幅当り)		振じりの扱い		
	断面積	断面二次モーメント	全長	断面二次モーメント	大梁 (X方向)	小梁	
	A_r mm ²	I_r cm ⁴	L_j mm	I_j mm ⁴			
Case1	1,274	300	270	3,200	振じり拘束	サンブナン 振じれ考慮	
Case2				0			
Case3				320			
Case4				32,000			
Case5				3,200			サンブナン 振じれ考慮
Case6				3,200			水平変位・振じり拘束

Table 2 鉄骨断面リスト
List of Steel Girders

部材名	断面
大梁(X方向)	H-400×200×8×13
大梁(Y方向)	H-500×200×10×16
小梁	H-350×175×7×11

明らかにする。

2. 解析概要

検討対象とするのはFig.2に示すような桁行(X)方向9mスパンの1スパン分、梁間(Y)方向13.5mスパンの2スパン分の屋根架構である。梁間方向の一端は熱伸縮に対する不動点と考える。これは、梁間方向が4スパンの建物(折板長さ54m)の中央を不動点とみなした場合に相当する。Fig.3に解析モデルを示す。ここでは、上葺折板、接合金物(上吊子、断熱金具、下吊子、タイトフレーム)、鉄骨梁の3要素を線材にモデル化する。以下、鉄骨梁のうち、大梁(X方向)と小梁をあわせて母屋と呼ぶ。

Table1に解析ケース一覧、Table2に鉄骨断面リストを示す。解析ケースはCase1を標準とする全6ケースであり、解析パラメータは接合金物の水平剛性(断面二次モーメント)と鉄骨梁の水平剛性・振じり剛性である。Case1に対し、Case5は大梁の振じれ拘束をなくした場合、Case6は母屋が剛な場合に相当する。

二重折板屋根は働き幅(1山分)500mmのハゼ式折板を対象とし、上葺折板を表す線材要素は、2山分(1m幅)を合わせて1要素とする。Table1に示す上葺折板の断面積(重

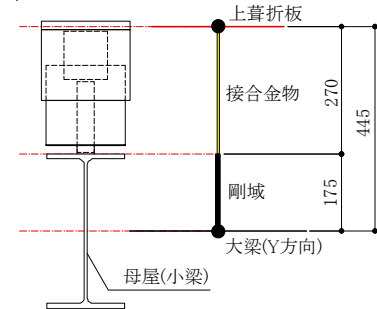


Fig. 4 接合金物のモデル化
Model of Connection

量10kg/m²に相当)と断面二次モーメントは、実在する0.8mm厚の折板(働き幅500mm)のメーカーカタログを参照して定めた。

接合金物を表す線材要素は、Fig.4に示すように全長を445mmとし、母屋中心とタイトフレーム下端(母屋上端)までを剛域(長さ175mm)とする。接合金物の長さ270mmは実在のものを参照に定めた。接合金物の水平剛性 K_j (両端固定、折板幅1m当り)はFig.5に示す試験およびFig.6に示す試験結果(いずれも詳細は文献4)参照)から、水平変位 $S=5\text{mm}$ における割線剛性(Fig.6参照)として

$$K_j = 0.4\text{kN/mm} \quad (1)$$

に定めた。Table1中に示すCase1(標準)の断面二次モーメント3,200mm⁴は、両端固定、全長270mmの線材要素が式(1)の水平剛性 K_j となるように断面二次モーメントを定めたものである。

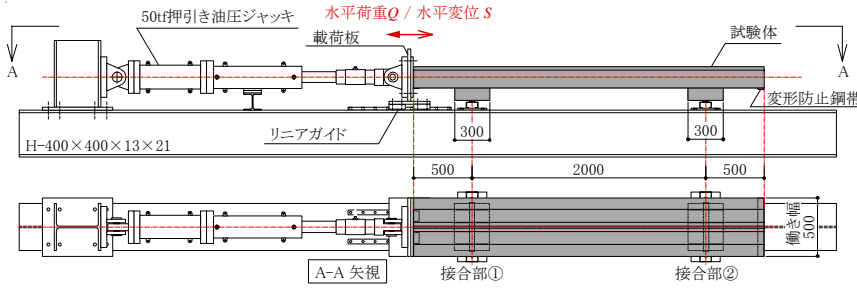


Fig. 5 熱伸縮繰返し試験
Cyclic Thermal Expansion Test

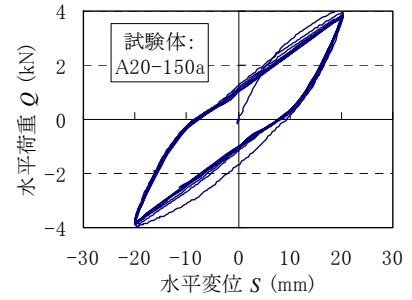


Fig. 6 水平荷重 Q -水平変位 S 関係(載荷初期)
Load Q - Displacement S Relationship

本報における解析条件を以下に列記する。

- 1) 温度応力は上葺折板のみに+30℃を作用させ、接合金物と鉄骨梁には温度応力を作用させない。なお、上葺折板の線膨張係数は 1.2×10^{-5} とする。
- 2) 大梁と大梁(柱梁接合部)は剛接合、小梁と大梁はピン接合とする。また、柱梁接合部は完全固定(並進・回転はなし)とする。
- 3) 大梁と大梁、大梁と小梁の偏心は無視する。
- 4) 鉄骨梁(大梁・小梁)の捩じりは拘束する場合を除き、サンブナン捩じりのみを考慮(曲げ(反り)捩じりは無視)する。
- 5) 対称面(X_1 通り、 X_2 通り、 Y_3 通り)上に位置する線要素の断面量は、Table1もしくはTable2に示す断面量の半分とする。

3. 解析結果

3.1 標準ケースの結果概要

本報では、上葺折板の熱伸縮量(水平変位) δ_r を次の3種類の変位成分に分離して考察する(Fig.7参照)。

- ・ 母屋の水平変位 δ_p
- ・ 母屋の捩じれ変位 δ_w
- ・ 接合金物の水平変位 δ_j

このうち、接合金物の繰返し特性(Fig.6参照)に影響するのは水平変位 δ_j であり、下式で求めることができる。

$$\delta_j = \delta_r - \delta_p - \delta_w \quad (2)$$

δ_w は母屋の捩じり角 ϕ_w を用いて下式で求める。なお、下式(3)中の係数「445」は、母屋材軸から上葺折板上底までの距離を表す(Fig.4参照)。

$$\delta_w = 445 \cdot \phi_w \quad (3)$$

以下、標準ケース(Case1)の解析結果を検討する。

3.1.1 母屋材軸(折板流れ直交)方向の性状

折板の水平変位 δ_r 、母屋の水平変位 δ_p 、母屋の捩じれ変位 δ_w 、接合金物の水平変位 δ_j の分布をFig.8に示す。ここでは、 Y_1 通り大梁、 Y_2 通り大梁、 y_1 通り小梁、 y_3 通り小梁(Fig.3参照)の4つの母屋上における性状を考察する。

折板の水平変位(同図(a))を見ると、いずれの母屋上で

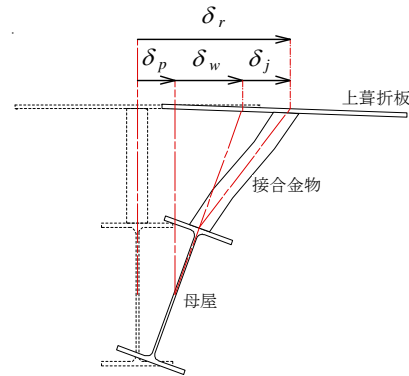


Fig. 7 変位成分
Displacement Component

も母屋中央(X_1 通りから4.5mの位置)における水平変位が大きく、母屋端部(X_1 通りから1.5m・8.5m付近)における水平変位が小さい。これより、折板屋根の熱伸縮量(水平変位)は、母屋変形の影響を受けることが分かる。実際上葺折板の熱伸縮量が母屋上の位置(中央・端部等)で異なる場合、隣接する上葺折板相互にずれを生じさせる力(上葺折板の面内せん断力)が生じると考えられる。

母屋の水平変位(同図(b))と母屋の捩じれ変位(同図(c))を見ると、母屋中央では水平変位が卓越するのに対し、母屋端部では捩じれ変位が卓越している。大梁との接合部となる母屋端部は水平変位が拘束される反面、捩じれ変位はかなり大きくなっている。なお、同図(c)で大梁上での捩じれ変位がいずれも0なのは、解析条件として大梁の捩じれを拘束したことによる。

接合金物の水平変位(同図(d))を見ると、いずれの母屋上でも母屋端部では接合金物の水平変位が大きく、母屋中央では接合金物の水平変位が小さい。これより接合金物の水平変位についても母屋変形の影響を受け、母屋端部に設置されたものほど大きな水平変位を生じると考えられる。

Fig.9に自由伸縮量(=線膨張係数×不動点からの距離×温度上昇(本報では+30℃))に対する折板と接合金物の水平変位の比率を示す。本解析ケースによると、折板の水平変位は自由伸縮量の概ね0.8~1.0の範囲にある。一方、接合金物の水平変位は自由伸縮量の概ね0.15~0.85の範囲にあり、折板の自由伸縮量をそのまま接合金物の水平変

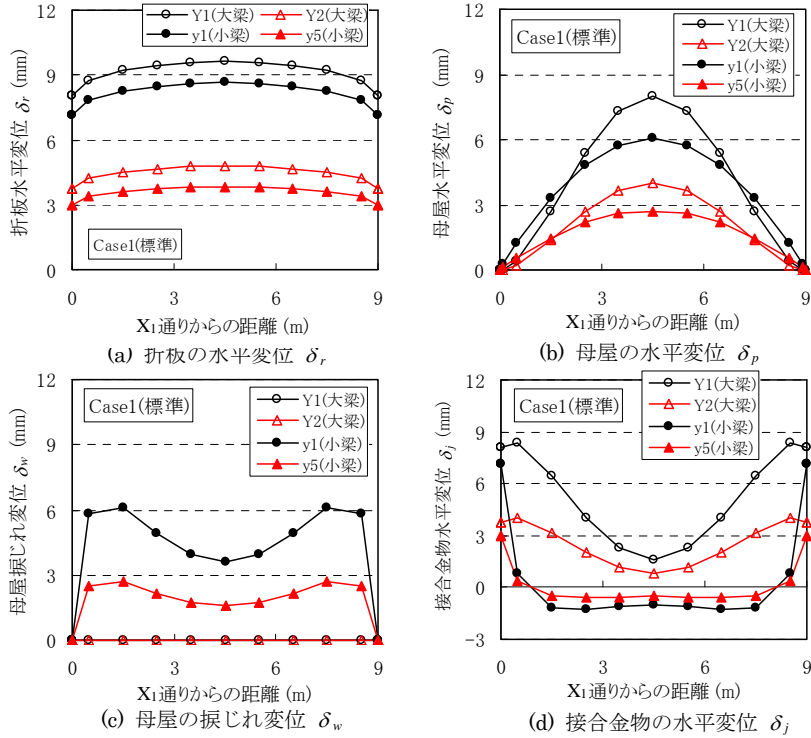


Fig. 8 二重折板屋根・母屋の変位性状 (母屋材軸方向)
Displacement of Folded Plate Roof and Purline (Direction of Purline Axis)

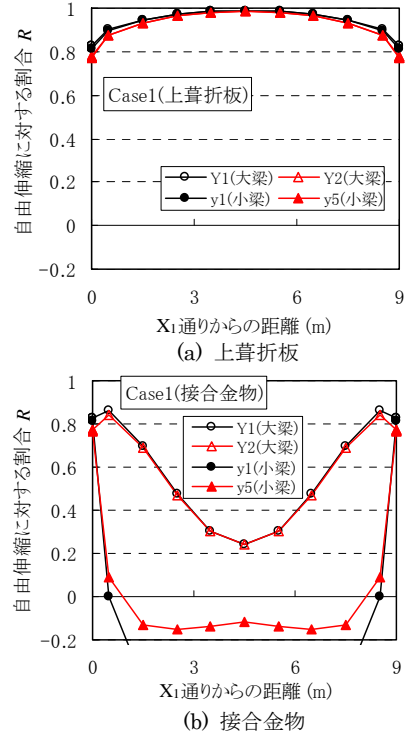


Fig. 9 自由膨張に対する変位割合 (母屋材軸方向)
Displacement Rate to Free Expansion (Direction of Purline Axis)

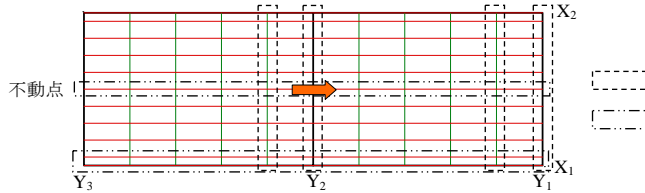


Fig. 8~Fig. 9 の表示箇所
Fig. 10~Fig. 13 の表示箇所

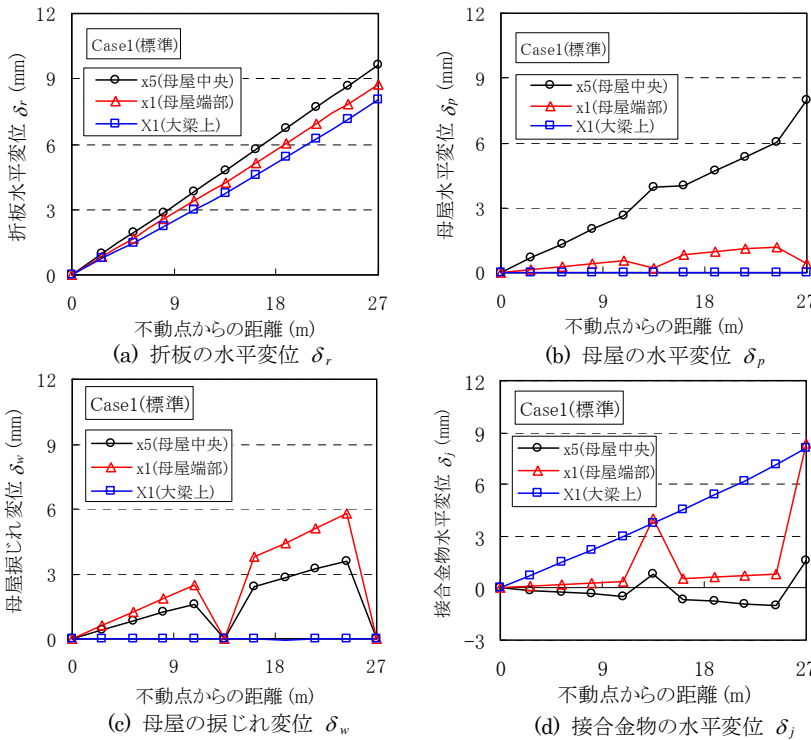


Fig. 10 二重折板屋根・母屋の変位性状 (母屋材軸方向)
Displacement of Folded Plate Roof and Purline (Direction of Purline Axis)

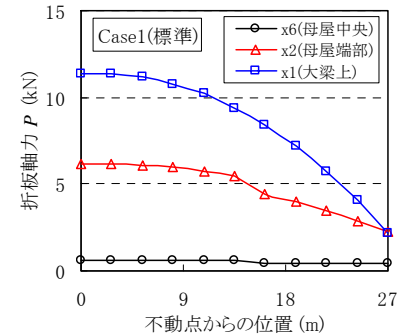


Fig. 11 折板の軸力 (0.5m 幅当り)
Axial Force of Roof (in 0.5m width)

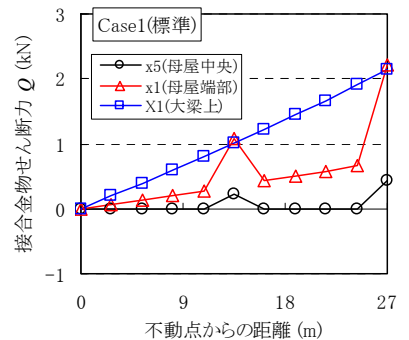
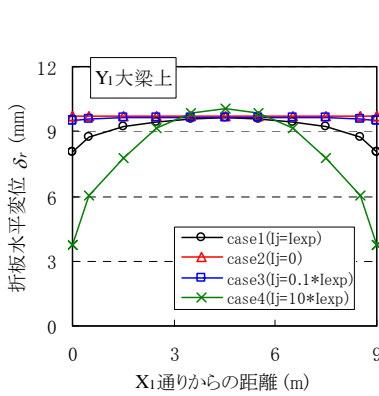
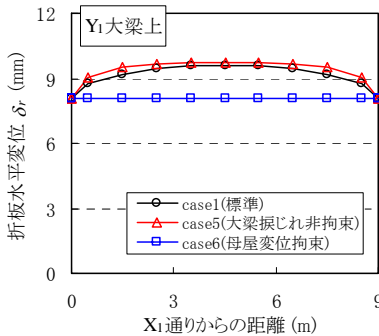


Fig. 12 接合金物のせん断力 (0.5m 幅当り)
Shear Force of Connection (in 0.5m width)

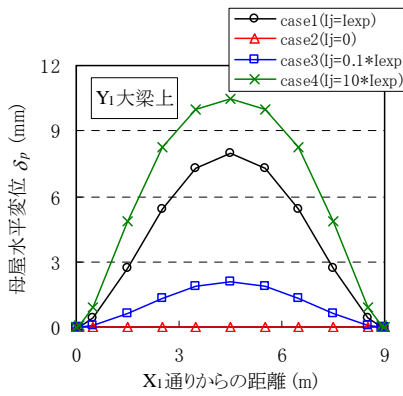


(a) 接合金物剛性の影響

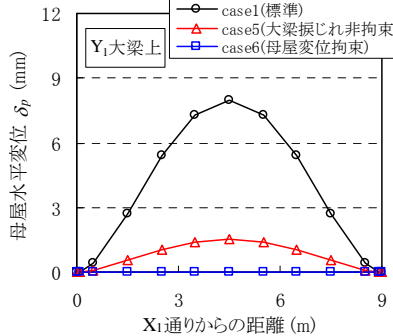


(b) 母屋剛性の影響

Fig. 13 折板の水平変位
(母屋材軸方向)
Displacement of Roof
(Direction of Purline Axis)

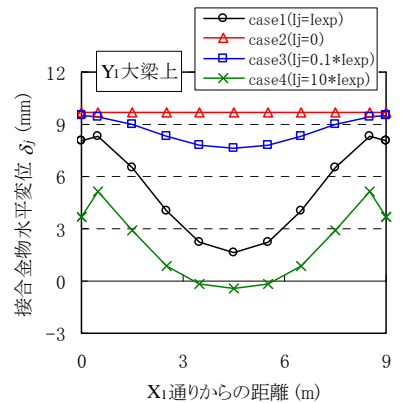


(a) 接合金物剛性の影響

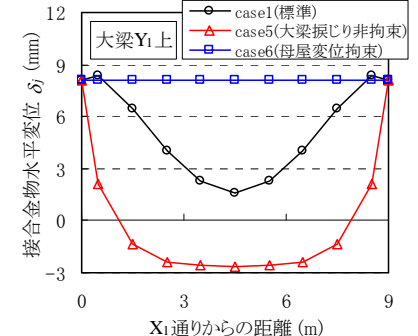


(b) 母屋剛性の影響

Fig. 14 母屋の水平変位
(母屋材軸方向)
Displacement of Purline
(Direction of Purline Axis)



(a) 接合金物剛性の影響



(b) 母屋剛性の影響

Fig. 15 接合金物の水平変位
(母屋材軸方向)
Displacement of Connction
(Direction of Purline Axis)

位とみなすと実際に接合金物に生じる水平変位との差が大きいと考えられる。

3.1.2 屋根勾配(折板流れ)方向の性状

Fig.10に屋根勾配方向について、折板の水平変位、母屋の水平変位、母屋の捩じれ変位、接合金物の水平変位の分布を示す。ここでは、 x_5 通り小梁(母屋中央)上、 x_1 通り小梁(母屋端部)上、 X_1 通り大梁(直交大梁)上の性状を考察する。

折板の水平変位(同図(a))を見ると、不動点から離れるにつれ、折板の水平変位がほぼ線形に増加することが分かる。母屋の水平変位(同図(b))と母屋の捩じれ変位(同図(c))を見ると、Fig.8と同様に、母屋中央では水平変位は卓越するのに対し、母屋端部では捩じれ変位が卓越する。さらに、接合金物の水平変位(同図(d))を見ると、母屋中央上では水平変位が小さく、逆に直交大梁上では水平変位が大きい。母屋の変位が大きい領域では接合金物の変位の割合が低下すると考えられる。

Fig.11に折板の軸力、Fig.12に接合金物のせん断力(接合金物の左右に生じる折板の軸力の差をとったもの)を示す。いずれも折板の働き幅0.5m幅に換算した値を示す。Fig.10(d)が示す性状と同様であり、母屋中央では折板の軸力および接合金物のせん断力は小さく、逆に直交大梁上では両者の値は大きくなる。

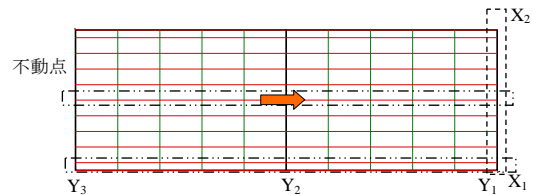


Fig. 13~Fig. 15の表示箇所

Fig. 16~Fig. 17の表示箇所

3.2 接合金物および下地鉄骨の剛性の影響

次に、解析パラメータ(接合金物の剛性、下地鉄骨の剛性)の影響を検討する。

3.2.1 母屋材軸(折板流れ直交)方向の性状

Fig.13~Fig.15に折板、母屋、接合金物の水平変位を示す。ここでは Y_1 通り大梁(軒先に相当)上での性状を考察する。各図(a)には接合金物の剛性の影響を示すが、いずれも接合金物の剛性の大小により、折板、母屋、接合金物の水平変位は大きく異なっている。

Fig.13(a)を見ると、接合金物の剛性が大きいほど、母屋端部における折板の水平変位は低下し、逆に剛性が小さいと折板の水平変位は大きく、折板の自由伸縮量(本解析では Y_1 通り大梁上で9.72mm)に近くなる。同図(b)を見ると、母屋の剛性が大きいほど折板の水平変位は低下し、特に母屋の水平変位・捩じれ変位を拘束したcase6(鉄骨

下地が剛の状態)では、母屋上での位置に関わらず折板の水平変位が8mm程度(自由伸縮量の8割程度)である。

Fig.14(a)およびFig.15(a)を見ると、接合金物の剛性が大きいほど、母屋の水平変位は大きくなり、逆に接合金物の水平変位は小さくなっている。言い換えれば、接合金物の剛性により母屋と接合金物の変位割合は異なる。

3.2.2 屋根勾配(折板流れ)方向の性状

Fig.16に接合金物の水平変位を示す。ここでは x_5 通り(母屋中央)と x_1 通り(母屋端部)上において、接合金物の剛性の影響を考察する。

いずれの場合においても、接合金物の剛性が非常に小さい場合($I_j=0$)には不動点からの距離に比例して接合金物の水平変位が大きくなっており(自由伸縮量に等しい)、さらに大梁上(不動点から13.5mおよび27mの位置)で接合金物の変位が局所的に大きくなっている。後者については、大梁と小梁の剛性の差が影響する。小梁に比べて大梁は剛性が高いためあまり変位を生じず、逆に接合金物には大きな変位が生じる。

Fig.17に接合金物のせん断力を示す。ここでは x_5 通り(母屋中央)と x_1 通り(母屋端部)上において、下地鉄骨の剛性の影響を考察する。本図より、下地鉄骨の剛性が大きいほど接合金物に生じるせん断力は大きくなること、下地鉄骨が完全に剛に近い場合には不動点からの距離に比例して接合金物のせん断力が大きくなること、母屋端部に比べて母屋中央で生じる接合金物のせん断力は小さいことがわかる。言い換えれば、下地鉄骨の剛性が小さいほど下地鉄骨の変位が大きくなり、逆に接合金物の水平変位が小さくなるためせん断力も小さくなる。

4. まとめ

熱伸縮の繰返しが二重折板屋根の耐風性能に及ぼす影響を明らかにするため、熱伸縮によって接合部に生じる水平変位と応力発生状況を解析的に検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- ・接合部に生じる水平変位は、母屋の変形(剛性)の影響を大きく受け、上葺折板の自由伸縮量とは大きく異なる。
- ・同一母屋上でも、材端と中央では柱・大梁からの拘束が異なるため、接合部の水平変位は大きく異なる。特に、変形拘束の強い母屋端部では、接合部の水平変位が大きく、接合部に大きな応力が発生し得る。

既往の試験データ(例えば4)より、接合部の水平変位が大きい場合には接合部の強度低下が著しい。今後は熱伸縮の影響を考慮した耐風安全性の評価が必要である。

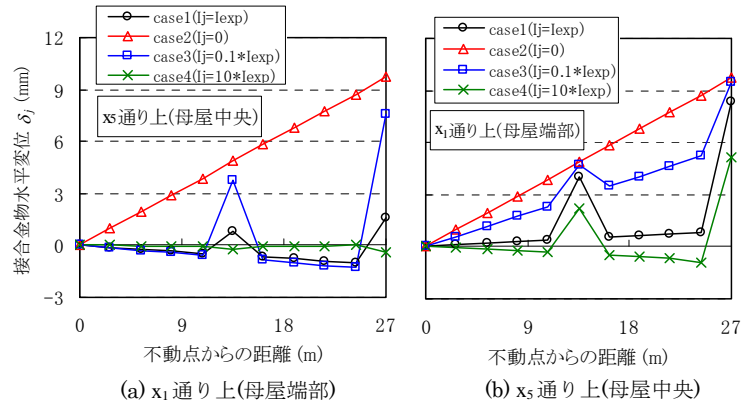


Fig. 16 接合金物の水平変位 (折板流れ方向)

Displacement of Connection (Direction of Roof Slope)

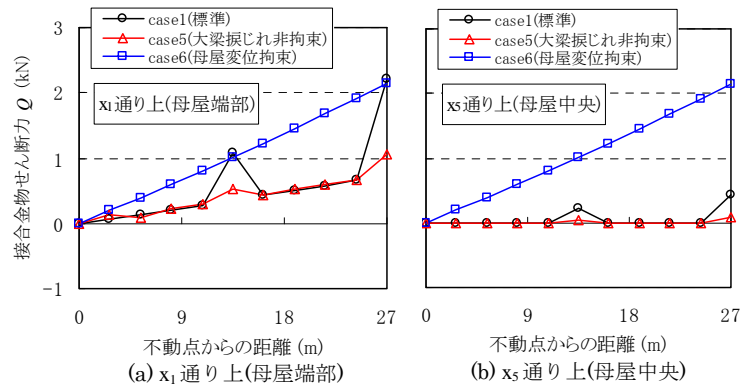


Fig. 17 接合金物のせん断力 (0.5m 幅当り)

Shear Force of Connection (in 0.5m width)

参考文献

- 1) 日経アーキテクチュア：「度重なる台風で屋根被害が多発 耐風基準の甘さが問題を深刻に」, pp. 24-28, 2004-11-15号
- 2) 日本建築学会災害委員会：新潟県中越地震、福岡県西方沖地震および2004年の台風による風水害から学ぶ, 2005年度日本建築学会大会 (近畿) 災害部門 研究協議会資料, pp. 21-40, 2005. 9.
- 3) 時野谷浩良, 鈴井康正, 浅井英克：折板葺屋根の負圧耐風性能に関する検討 その1~その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 849-854, 2006. 9
- 4) 時野谷浩良, 浅井英克, 鈴井康正：折板葺屋根の負圧耐風性能に関する検討 その4 熱伸縮の繰返しが二重折板屋根の接合部負圧耐力に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 887-888, 2007. 8
- 5) 中山昌尚：板屋根の台風被害についての一考察 折板の熱伸びのタイトフレームに与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 139-140, 2005.
- 6) 岡田恒, 西村宏昭, 奥田泰雄, 他：断熱二重折板の温度応力に関する検討 その1~その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 189-192, 2007. 8