

特集 「品質の向上をめざして」

二重折板屋根の熱伸縮に対する疲労損傷評価

浅井 英克 時野 谷 浩良

Fatigue Damage Evaluation on Thermal Expansion of Folded Plate Roof

Hidekatsu Asai Hiroyoshi Tokinoya

Abstract

Folded plate roofs are often used on steel structures. However, it has recently been found that the strength of their connections decreases because of cyclic thermal expansion. In this research, cyclic tests simulating the thermal expansion were performed to obtain knowledge on the fatigue damage caused by thermal expansion. The following result was found: iron parts referred to as “upper hangers” get damaged due to cyclic thermal expansion, but their fatigue life can be predicted by means of improving the existing fatigue life law. Finally, a new method to evaluate the fatigue damage life of folded plate roofs is proposed, and an evaluation example for preventing fatigue damage is described.

概 要

二重折板屋根は気密性・断熱性に優れた屋根構法として、工場・倉庫等の鉄骨造建築で比較的多く用いられている。しかし近年、熱伸縮の繰返しに伴って接合部の強度が低下し、設計風速以下でも強風被害の生じることが問題となっている。そこで、熱伸縮に起因する接合部の品質劣化を防ぎ、強風被害を防止することを目的に、はぜ締め形二重折板屋根を対象として、熱伸縮を模擬した水平変位繰返し試験を行った。試験の結果、はぜ締め形二重折板屋根では「吊子」と呼ばれる金物が疲労損傷し、熱伸縮の繰返しに対して弱点となることが分かった。さらに、この吊子の疲労損傷寿命は既往の寿命推定則を援用した評価式で評価できることが分かった。最後に、試験から得た疲労寿命評価式を用いて、具体的な熱伸縮に対する疲労検討例を示した。

1. はじめに

二重折板屋根は気密性・断熱性に優れた屋根構法として、工場・倉庫等の鉄骨造建築で比較的多く用いられている。二重折板屋根(はぜ締め形)は多くの部品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、以下これらを接合部と総称する)を介して構造躯体(母屋)に伝達される。しかし近年、熱伸縮の繰返しに伴って接合部の強度が低下し(以下「疲労」と称す)、設計風速以下の風でも二重折板屋根が飛散するなどの被害が問題¹⁾²⁾となっている。そのため、熱伸縮に起因する接合部の品質劣化を防ぎ、耐風性能を維持することが求められている。

Photo 1は熱伸縮によって二重折板屋根の接合部の一部であるボルト(重ね形, Fig.2参照)が疲労破壊した被害事例である。上葺折板は外気温の変化や日射の有無によって伸縮するため(Photo 1の⇄方向)、接合部には応力が発生する。熱伸縮が何度も繰返されると、応力伝達の主体であるボルトが疲労破壊するのである。

本報では、熱伸縮に起因する強風被害の防止を目指して、水平繰返し試験に基づいた二重折板屋根の疲労検証法について紹介する。ここでは、熱伸縮量・繰返し数をパラメータとした水平繰返し試験を行い、熱伸縮の繰返しに対して弱点となる部位を特定するとともに、当該部位の損傷寿命を既往の寿命推定則を用いて評価する。さ

らに、具体的に二重折板屋根の与条件(建物供用期間、屋根長さ等)を設定し、この条件下における疲労損傷の危険性を、先の寿命評価法を用いて検討する。

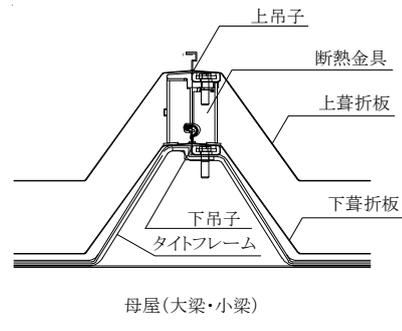


Fig. 1 二重折板折板(はぜ締め形)の例
Example of Folded Plate Roof

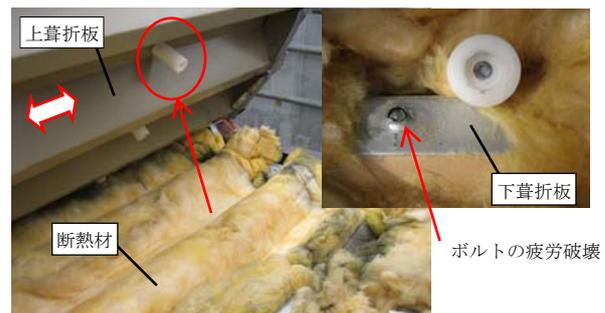


Photo 1 熱伸縮による接合部(重ね形)の被害事例
Example of Connection Damage by Thermal Expansion

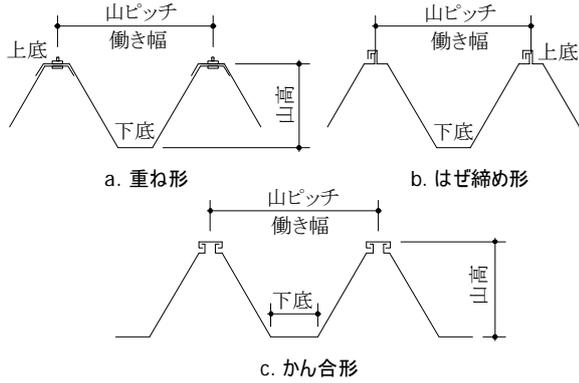


Fig. 2 折板の接合方法
Connections of Folded Plate Roof

Table 1 試験体一覧
List of Specimen

No.	試験体名	熱伸縮量	繰返し数	接合部間隔	接合部数
		S_{max} (mm)	N_{max} (回)	p (m)	(個)
1	A20-015-32	±20	150	3.0	2
2	A10-6-32	±10	6,000	3.0	2
3	A5-12-32	±5.0	6,000	3.0	2
4	A7.5-12-32	±7.5	12,000	3.0	2
5	A20-6-32	±20	12,000	3.0	2
6	A10-6-12	±10	6,000	1.0	2
7	A15-6-22	±15	6,000	2.0	2
8	A10-12-14	±10	6,000	1.0	4
9	A5/10-12-14	±5/±10	6,000	1.0	4

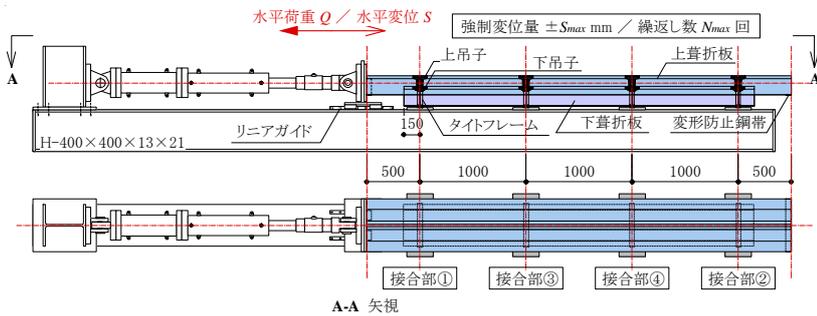


Fig. 3 試験体形状および荷重状況
Test Specimen and Loading Condition

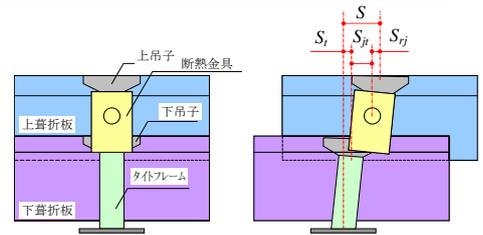


Fig. 4 接合部各部の変位成分の定義
Definition of various deformation

2. 試験概要

二重折板屋根の接合方法は3種類に大別される³⁾(Fig. 2参照)。Fig. 1に示すはぜ締め形、Photo 1に示す重ね形に加え、かん合形が存在する。ここでは、近年使用されることが多い働き幅(1山分)500mmの「はぜ締め形」二重折板屋根を試験対象とする。

Table 1に試験体一覧、Fig. 3に試験体形状および荷重状況を示す。試験は熱伸縮を模擬した強制水平変位を上葺折板に与える水平変位繰返し荷重である。この水平変位により、上吊子、断熱金具、下吊子、タイトフレームは、すべりを伴いながら強制的に変形する(Fig. 4参照)。

試験体は幅が500mm(1山分)、山高160mmであり、全長(上葺折板長さ)4m、接合部が2箇所ものを標準とする。試験パラメータは熱伸縮量、繰返し数、接合部間隔、接合部数、荷重方法(一定・変動)であり、試験体によって上葺折板の全長(2~4m)は異なる。

接合部の名称として、接合部が2箇所の試験体にあつてはジャッキに近い側を接合部①、ジャッキに遠い側を接合部②と称す(Fig. 3参照)。また、接合部が4箇所の試験体では、接合部①および接合部②の間に接合部③および接合部④を設ける(Fig. 3参照)。試験方法は、接合部①における上葺折板の水平変位を制御変位として、熱伸縮(強制変位)量 S_{max} (繰返し数 N_{max})を与える一定振幅繰返し荷重である。ただし、試験体A5/10-12-14に関しては、 $S_{max} = \pm 5\text{mm}$ と $S_{max} = \pm 10\text{mm}$ を各80回、20回ごとに繰返す変動振

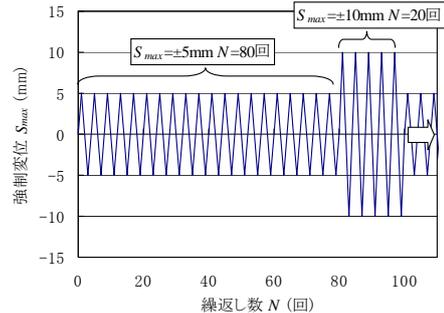


Fig. 5 荷重スケジュール(試験体 A5/10-12-14)
Loading Schedule (Specimen A5/10-12-14)

幅繰返し荷重とする(Fig. 5参照)。

計測項目は水平荷重 Q および上葺折板の水平変位 S のほか、次に示す3種類の水平相対変位も計測する。

- δ : タイトフレーム—母屋(不動点)間の相対変位
- δ_j : 断熱金具—タイトフレーム間の相対変位(すべりを含む)
- δ_j : 上葺折板—断熱金具間の相対変位

3. 試験結果

3.1 破壊性状

主な破壊性状は次の2種類である(Photo 2参照)。

- ・タイトフレームの損傷(き裂・破断)
- ・上吊子の損傷(き裂・破断)

その他、下葺折板に対する断熱金具のすべり痕も見られた(Photo 2(c)参照)。

Table 2に上吊子の損傷(き裂・破断)発生回数を示す。上吊子の損傷は、き裂発生が予想される位置に貼付した2枚のひずみゲージ値から判断した。すなわち、Photo

Table 2 上吊子の損傷発生回数
Damage Cycle of Upper Hanger

No.	試験体名	上吊子損傷(き裂・破断)回数 N_f (回)			
		接合部①	接合部②	接合部③	接合部④
1	A20-015-32	-	-		
2	A10-6-32	-	3,800		
3	A5-12-32	-	-		
4	A7.5-12-32	-	-		
5	A20-6-32	3,350	750		
6	A10-6-12	5,850	3,150		
7	A15-6-22	5,450	1,050		
8	A10-12-14	2,700	-	2,750	-
9	A5/10-12-14	10,080	3,080	7,299	6,199

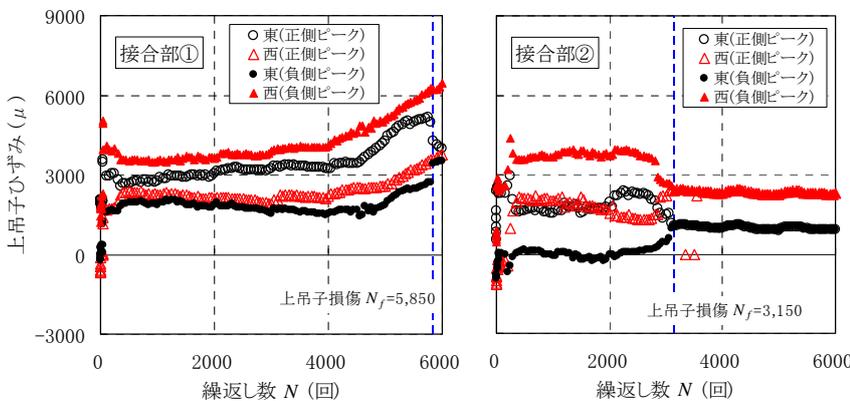
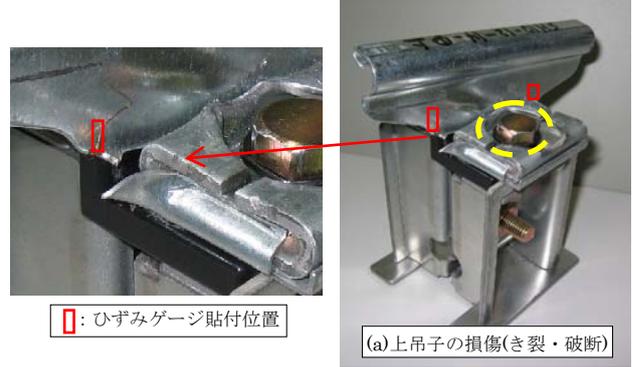


Fig. 6 変位ピーク時の上吊子ひずみ-繰返し数 N 関係 (試験体 A10-6-12)
Upper Hanger Peak Strain - Cycle N relationship (Specimen A10-6-12)

Photo 2 破壊状況
Damage Situation

2(a)の□に示す2箇所(東・西)にひずみゲージを貼付し、このひずみゲージが断線した時、もしくは正負変位ピーク時のひずみ値がほぼ同じ値となった時の繰返し数 N を、上吊子の損傷発生回数 N_f とした。試験体A10-6-12を例として、変位ピーク時の上吊子ひずみ-繰返し数 N 関係をFig. 6に示す。図中の破線は上吊子損傷回数 N_f を表す(Fig. 7およびFig. 8においても同じ)。

タイトフレームの破壊性状について説明する。タイトフレームのき裂はA20-015-32(繰返し数 $N_{max}=150$)を除くすべての試験体で生じた。また試験体A10-12-14では、一部の接合部でタイトフレームの脚部が破断(き裂が全断面を貫通)した。この試験体は接合部②における上吊子の取付けボルト(Photo 2中の○印参照)の締付けが不十分であった。試験体A10-12-14以外では、タイトフレームの破断は生じていない。

次に、上吊子の破壊性状に関して説明する。強制変位量が小さな $S_{max}=\pm 5\text{mm}$, $S_{max}=\pm 7.5\text{mm}$ の試験体では、繰返し数が $N_{max}=12,000$ 回に至っても上吊子が損傷(き裂・破断)しない。一方、強制変位量が大きな $S_{max}=\pm 20\text{mm}$ の試験体では、 $N_f=750$ 回で上吊子が損傷している。これから、熱伸縮量の大小が上吊子の損傷に大きく影響することが

分かる。

熱伸縮によって上吊子が損傷することは耐風性能の劣化に直結することとなり、はぜ締め形二重折板屋根の耐風設計では、上吊子の疲労損傷を検証することが重要となる。

3.2 熱伸縮の繰返しに伴う水平荷重の推移

熱伸縮の繰返しと水平荷重 Q の関係について考察する。Fig. 7に6種類の試験体について、変位ピーク時の水平荷重 Q_{max} -繰返し数 N 関係を示す。図には、上吊子の損傷回数 N_f を示す。変動振幅試験体であるA5/10-12-14については、 $S_{max}=\pm 5\text{mm}$, $\pm 10\text{mm}$ の場合を示す。

全体的な性状を見ると、接合部が2箇所の試験体に関しては、上吊子損傷時に水平荷重 Q_{max} が大きく減少することが分かる(同図(a)~(c)参照)。一方、接合部が4箇所の試験体に関しては、このような傾向が顕著には現れていない(同図(e)(f)参照)。

パラメータの影響を、Fig. 7において考察する。

1) 強制変位量 S_{max} の影響について (同図(a)(b)参照)

強制変位量の大きなA20-6-32($S_{max}=\pm 20\text{mm}$)はA10-6-32($S_{max}=\pm 10\text{mm}$)に比べて、上吊子が早期に損傷

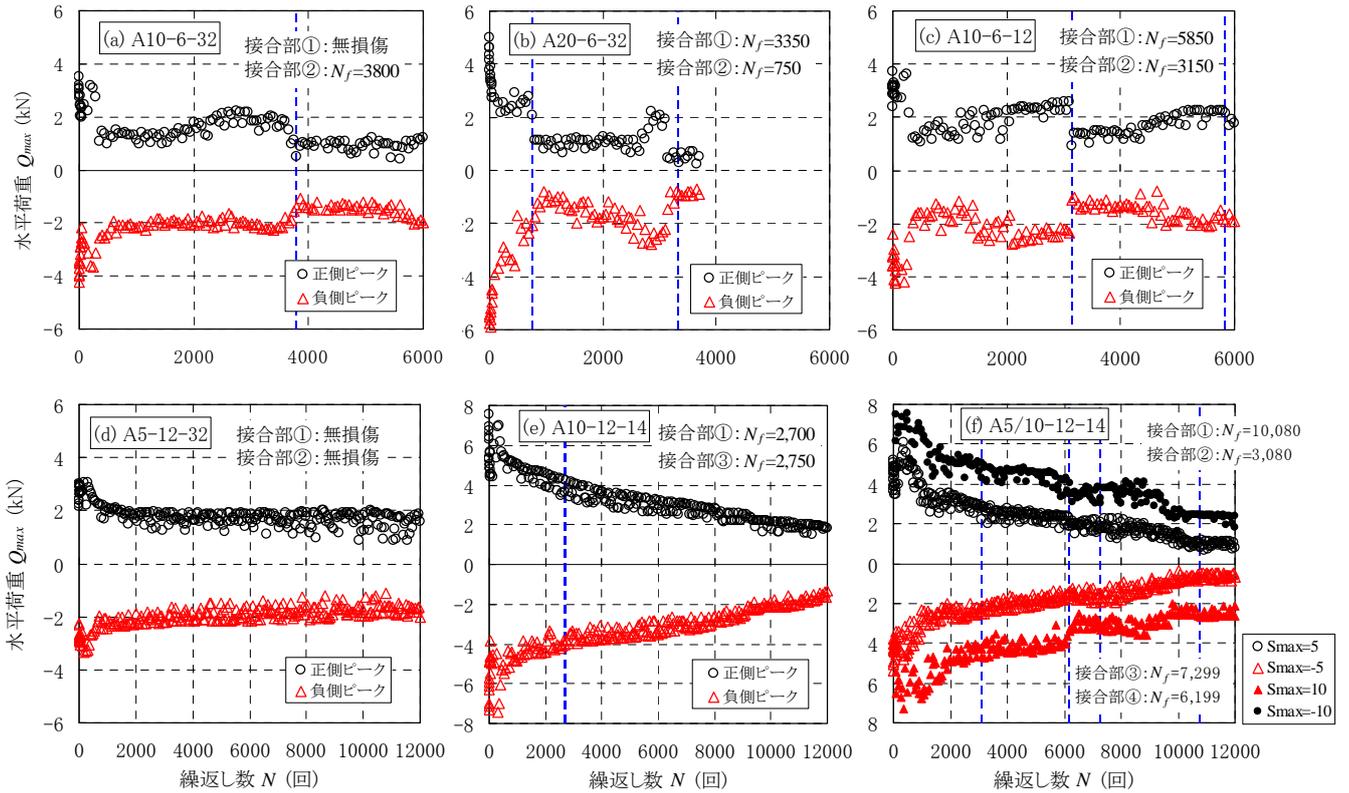


Fig. 7 変位ピーク時の荷重 Q_{max} -繰返し数 N 関係
Peak Load Q - Cycle N Relationship

するため、 Q_{max} も早期に劣化している。逆に強制変位量の小さなA5-12-32($S_{max}=\pm 5\text{mm}$)は繰返し数が $N=12,000$ に至っても上吊子は損傷せず、水平荷重 Q_{max} は2.0kN程度で安定的に推移している(同図(d)参照)。

2) 接合部間隔の影響について (同図(a)(c)参照)

接合部間隔が小さいA10-6-12($p=1\text{m}$)はA10-6-32(接合部間隔 $p=3\text{m}$)に比べて、若干早期に上吊子が損傷し、 Q_{max} も若干早期に劣化する。

3) 接合部数の影響について (同図(a)(e)参照)

接合部が4箇所(A10-12-14)と接合部が2箇所のA10-6-32を比べると、荷初期の Q_{max} は前者が約8kN、後者が約4kNであり、 Q_{max} は概ね接合部数に比例している。しかし、 N が増加するにつれて、A10-6-32は Q_{max} が増減するのに対し、A10-12-14は Q_{max} が漸減する。したがって、荷初期以外では接合部数に比例する履歴とはなっていない。

4) 振幅の種類(一定・変動)の影響について (同図(e)(f)参照)

変動振幅試験体A5/10-12-14は一定振幅試験体に比べて、強制変位 $S_{max}=\pm 10\text{mm}$ の回数がかかなり少ないものの、変位ピーク時($S_{max}=\pm 10\text{mm}$)の Q_{max} - N 関係は概ね同じ履歴である。

以上より、上吊子の損傷回数や、変位ピーク時の水平荷重 Q_{max} は、強制変位量、繰返し数、接合部間隔、接合部数、振幅の影響を受けることが分かる。

4. 上吊子の損傷寿命の評価

建物供用期間を通して接合部が設計耐力を維持するためには、上吊子の疲労損傷に対する設計が重要となる。本章では、熱伸縮が生じて上吊子が損傷しない熱伸縮量・繰返し数の範囲を実験的に定める。

4.1 上葺折板-断熱金具間の相対変位による寿命評価

Fig. 4に示す通り、上葺折板の熱伸縮量 S は、さまざまな構成部品の変位成分の累加となる。ここでは上吊子の損傷に影響する変位成分として、上葺折板-断熱金具間の相対変位 $r_j S$ に着目する。この $r_j S$ の正負ピーク時の差分を上葺折板-断熱金具間相対変位振幅 $\Delta r_j S$ とし、 $\Delta r_j S$ と上吊子の損傷との関係を考察する。

Fig. 8に接合部が2箇所の4試験体について、上葺折板-断熱金具間相対変位振幅 $\Delta r_j S$ -繰返し数 N 関係を示す。図より

- ①相対変位振幅 $\Delta r_j S$ は繰返し数 N の変化に伴って増減すること
- ②上吊子の損傷回数 N_f において相対変位振幅 $\Delta r_j S$ は大きく増加すること

がわかる。①のように相対変位振幅 $\Delta r_j S$ が増減するのは、断熱金具のすべり(剛体移動)(Photo 2(c)参照)が、繰返しを通して変動するためと考察する。

ここでは、下式(1)で求める平均相対変位振幅 $\Delta r_j S_{ave}$ を

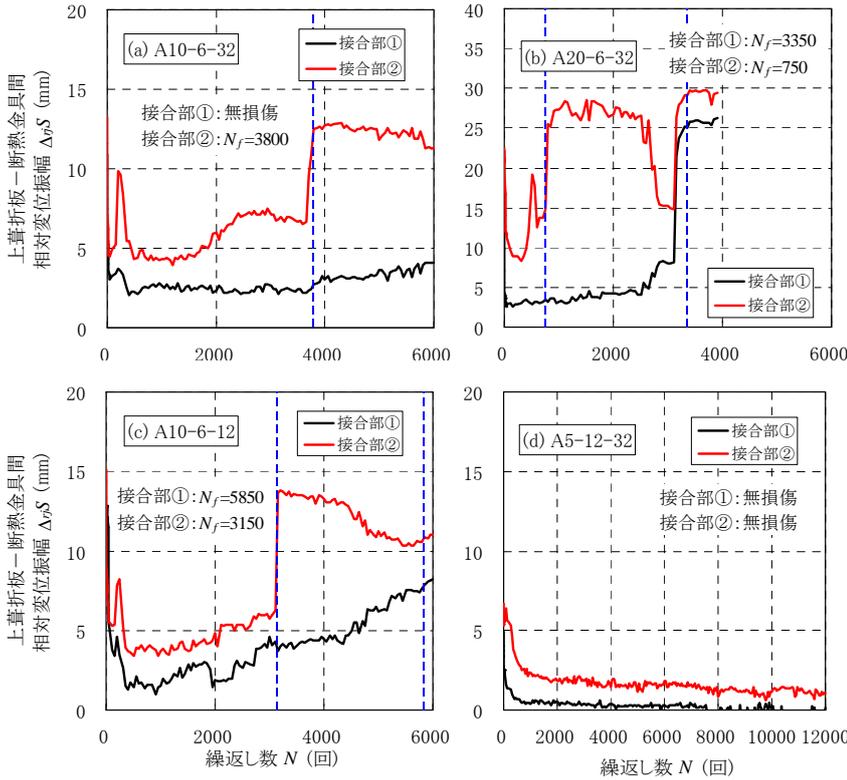


Fig. 8 上葺折板－断熱金具間相対変位振幅 $\Delta_{rj}S$ －繰返し数 N 関係
Relative Displacement Amplitude $\Delta_{rj}S$ －Cycle N Relationship

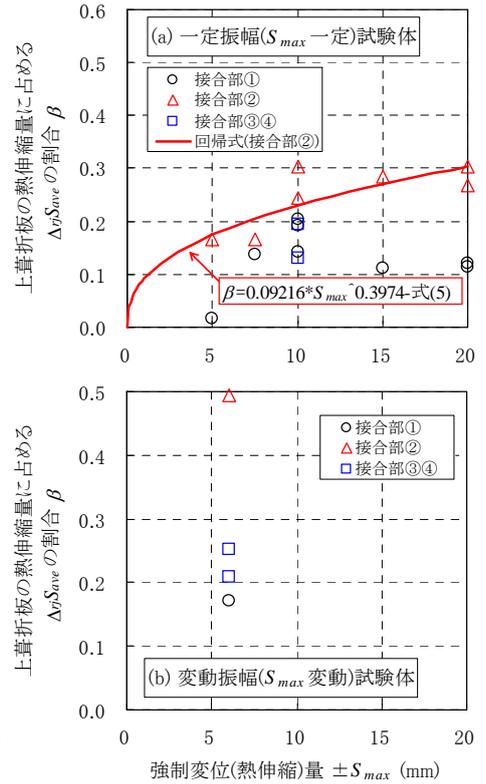


Fig. 10 上葺折板の熱伸縮量に占める $\Delta_{rj}S_{ave}$ の割合
Rate of $\Delta_{rj}S_{ave}$ for Thermal Expansion

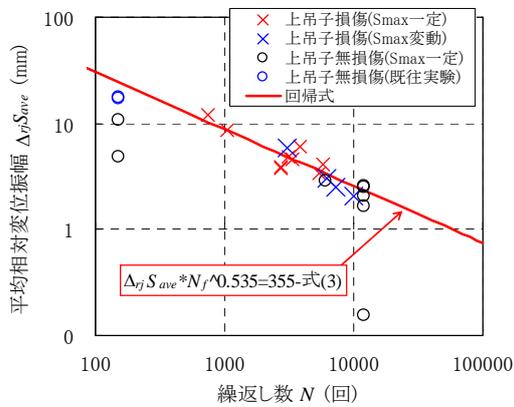


Fig. 9 平均相対変位振幅 $\Delta_{rj}S_{ave}$ －繰返し数 N 関係
Average Relative Displacement Amplitude $\Delta_{rj}S_{ave}$ －Cycle N Relationship

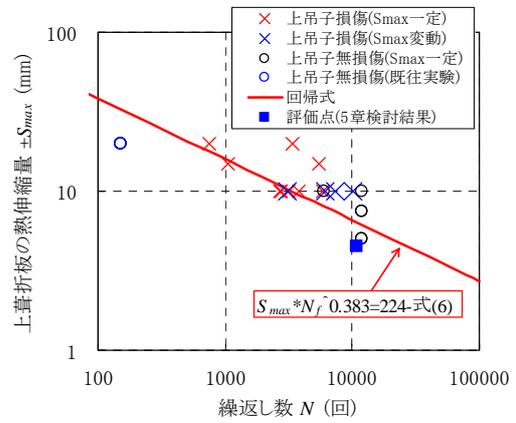


Fig. 11 上葺折板の熱伸縮量 $\pm S_{max}$ －繰返し数 N 関係
Thermal Expansion $\pm S_{max}$ －Cycle N Relationship

導入して、上吊子の損傷を考察する。

$$\Delta_{rj}S_{ave} = \frac{1}{N} \sum_i^N \Delta_{rj}S_i \quad (1)$$

ここで

上吊子が損傷する場合： $N=N_f$ (Fig. 2参照)

上吊子が損傷しない場合： $N=N_{max}$ (Fig. 1参照)

Fig. 9に平均相対変位振幅 $\Delta_{rj}S_{ave}$ －繰返し数 N 関係(対数表示)を示す。ここでは、上吊子が損傷した13箇所の接合部(Table 2参照)を「×」で表し、所定の繰返し数 N_{max} に至っても上吊子が損傷しなかった8箇所の接合部を「○」で表す。なお、既往の試験結果⁴⁾も併記する。

Fig. 9より、上吊子が損傷した接合部(×)については、平均相対変位振幅 $\Delta_{rj}S_{ave}$ と繰返し数 N_f の間には明瞭な負の相関が見られる。そこで、疲労寿命則の1つであるCoffin-Manson則を援用して、下式(2)の形で回帰式を求め

$$\Delta_{rj}S_{ave} \cdot N_f^\alpha = C \quad (2)$$

一定振幅試験体のうち、上吊子が損傷した9箇所の接合部(Table 2参照)を用いれば、定数 α と C は次の値となる。

$$\alpha = 0.535 \quad C = 355 \quad (3)$$

Fig. 9には回帰式(3)を示す。平均相対変位振幅 $\Delta_{rj}S_{ave}$ を用

いた式(2)は、いずれの試験パラメータ(強制変位量, 繰返し数, 接合部間隔, 接合部数, 振幅の種類)に対しても, 上吊子の損傷寿命を精度良く評価できることが分かる。

4.2 熱伸縮量による寿命評価

前節では, 平均相対変位振幅 $\Delta_{rj}S_{ave}$ で接合部(上吊子)の損傷寿命を評価できることが分かった。しかし, $\Delta_{rj}S_{ave}$ の挙動は複雑であり, その定量的な把握は困難である。一方, 設計の観点からは, 上葺折板の熱伸縮量 S_{max} で接合部(上吊子)の損傷寿命を推定できることが望ましい。そこで, 全熱伸縮量($2S_{max}$)に占める平均相対変位振幅 $\Delta_{rj}S_{ave}$ の割合 β (下式(4))を調べる。

$$\beta = \frac{\Delta_{rj}S_{ave}}{2 \cdot S_{max}} \quad (4)$$

Fig. 10に割合 β と熱伸縮量 S_{max} の関係を示す。図中では, 一定振幅荷重と変動振幅荷重に区別して示す。変動振幅荷重では, $S_{max}=\pm 5\text{mm}$ と $S_{max}=\pm 10\text{mm}$ の強制変位が4:1に回数比で荷重されるため, ここでは回数による重み付けにより, $S_{max}=\pm 6\text{mm}$ として割合 β を求めた。

Fig. 10より, 一定振幅荷重では, S_{max} の増加に伴って最大0.3程度まで割合 β は漸増すること, 一般的に接合部①に比べて接合部②の割合 β は大きいことが分かる。一方, 変動振幅荷重の場合, 割合 β は S_{max} が同程度の一定振幅試験体に比べて大きい。

ここでは, 一定振幅荷重の接合部②の結果から, β の値を下式(5)で近似する。

$$\beta = 0.09216 \cdot S_{max}^{0.397} \quad (5)$$

以上の式(2)~式(5)より, 熱伸縮量 S_{max} と上吊子の損傷回数 N_f との関係が下式(6)で求まる。

$$S_{max} \cdot N_f^{0.383} = 224 \quad (6)$$

Fig. 9の縦軸を熱伸縮量に変換し, 式(6)を併記した図をFig. 11に示す。Fig. 11より, 式(6)は実験での損傷発生回数の下限に概ね対応している。なお, 変動振幅試験体については, 回数による重み付けで熱伸縮量を評価すると, 変位割合 β が大きくなり, 式(6)では危険側の評価となる。ここでは変動振幅荷重に関しても $S_{max}=\pm 10\text{mm}$ の一定振幅荷重とみなすことで, 式(6)により安全側に評価することができた。種々の熱伸縮量を含む変動振幅荷重についても, 熱伸縮量が等価とみなせる一定振幅荷重として扱える方が, 寿命評価上は望ましい。そのため変動振幅荷重における等価熱伸縮量の評価が今後の課題となる。折板の温度は1日の間で小刻みに変化する⁵⁾ものであり, その影響を熱伸縮評価上は考慮すべきだからである。

5. 熱伸縮疲労に対する二重折板屋根の検討例

接合部(上吊子)の寿命評価式(6)を用いて, 熱伸縮疲労に対する二重折板屋根の安全性の具体的な検討例を示す。

与条件を次のように定める。

- ・二重折板屋根の種類は製品A(本報で実験した製品)
- ・一日当りの上葺折板の温度変化 $\pm 15^\circ\text{C}$ (温度差 30°C)
(1日のうちの小刻みな温度変化は無視する)
- ・折板長さ 50m
- ・建物供用期間30年

折板の中央部(片側から25mの位置)を不動点とすれば, 軒先の折板の熱伸縮(自由伸縮)量 S は, 線膨張係数を 1.2×10^{-5} として

$$S = 1.2 \times 10^{-5} \times (\pm 15) \times 25 = \pm 4.5\text{mm} \quad (7)$$

供用期間中, 熱伸縮が1日1回発生すると考えれば, 繰返し数 N は

$$N = 365 \times 30 = 10,950 \text{ 回} \quad (8)$$

この熱伸縮量 S と繰返し数 N を寿命評価式(6)で評価する。評価結果をFig. 11中に評価点■として示す。本図より, この条件下では接合部(上吊子)が疲労損傷しないと判断できる。

6. まとめ

熱伸縮に起因する二重折板屋根の強風被害を防止するため, 熱伸縮を模擬した水平繰返し試験を行った。試験より得られた結果は次のとおりである。

- ・熱伸縮の繰返しに対して弱点となる部位(本報では上吊子)の損傷寿命は, Coffin-Manson則を援用した評価式で推定できる。
- ・この寿命評価式を用いて二重折板屋根の疲労検証を行えば, 熱伸縮に起因する強風被害の危険性を低減することができる。

なお, 既往研究⁴⁾によれば, 熱伸縮経験後に上吊子が損傷(き裂・破断)していなければ, 接合部の耐風性能(負圧荷重に対する耐力)はほとんど劣化しない。そのため, 本手法で疲労損傷しないと判断できれば, 屋根施工時(熱伸縮未経験)と同等の耐風性能を有すると考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：非構造部材の地震・風被害の軽減に向けて, 2007年度日本建築学会大会(九州) 特別研究部門 研究協議会資料, 2007. 8
- 2) 日本金属屋根協会：鋼板製屋根構法標準 SSR2007, 2008. 1
- 3) 日本工業規格：JIS A 6514 金属製折板屋根構成材, 1995
- 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. 877-878, 2007. 8
- 5) 時野谷浩良, 鈴井康正, 浅井英克：金属系外装材の耐風性能に及ぼす繰返し荷重の影響 その1 屋根温度の実測事例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 921-922, 2005. 9