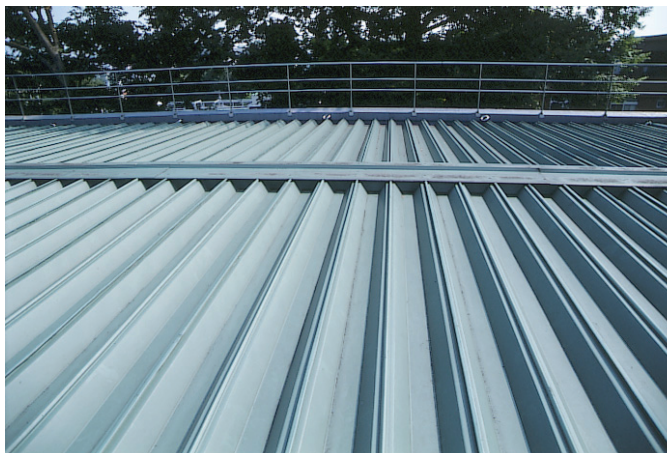


# 金属立平葺きと折板の耐風圧試験

(財)日本建築総合試験所 試験研究センター 耐風試験室 室長 博士 (工学)  
西村 宏昭



## 1. はじめに

平成19年6月の建築基準法の改正によって、それまで建築確認に要求されていなかった外装材の構造計算書も建築確認図書に添付する義務が明記された。外装材における構造計算の要点は、設計荷重の計算とこれを受ける建材(部材や材料)の強度(耐力)の確認、および両者の比較による建材の安全性の表明である。設計荷重の設定は設計者が行うが、建材の強度は建材製造者から提供される技術データに基づくのが通例である。

構造計算書における建材の強度については、設計荷重を受けるときの許容応力度または許容耐力の表明が要求されている。許容応力度または許容耐力の要求は、それらの注目する建材が破壊するときの最大応力度または最大耐力とは異なり、それよりも小さい(安全率で除した)値を示すことであることから、設計荷重下での建材の健全性と耐力の余裕の確認が必要であることを意味する<sup>1)</sup>。

外装材は通常、複数の部品や材料で構成され、荷重を受けたときの変形量は大きく、想定荷重下での力の伝達は複雑であるため、強度の確認は解析的手法によるのではなく、試験による方が適切であることが少なくない。ここで解析的手法とは、想定される荷重下で部材に生じる応力度を計算で求め、材料の許容応力度と比較する、いわゆる許容応力度設計手法をいう。こ

の方法は構造体の設計では広く行われているが、屋根葺き材等の外装材では接合部周辺の応力度の集中やモーメントを受ける薄板に発生する応力度が変形量の増加と共に非線形な挙動を示すことなどによって、特に極限荷重下での、理論的推定が困難なことがある。言い方を変えれば、建材内部の一部または一部の部品が塑性領域にある極限状態では許容応力度設計はなじまない。

JIS A6514「金属製折板用屋根構成材」では、折板屋根の2点集中載荷によって折板に発生する歪を測定し、断面係数を求める方法を記しているが、その後は材料の許容応力度と比較することを基本としている。この方法は、折板の断面係数をその断面寸法と材料物性から計算するのではない点で实际的であるが、接合部の性能が評価されないことと、変形量が大きくなると断面係数が変化する(応力度の中立軸が移動することから、極限状態の折板の耐力が正確に評価されず、製品の性能評価方法としては十分とは言えない。

2008年に改訂された銅板製屋根構法標準SSR 2007<sup>2)</sup>は接合部の強度試験を取り入れた、より進んだ銅板製屋根の性能評価方法を盛り込んでいる。また許容応力度評価ではなく許容耐力評価を基本の評価方法としている。ただし、耐風圧試験は標準試験ではなく、参考試験として扱われ、標準試験を行った上で、必要に応じて参考試験を行うことが望ましいとしている。耐風圧試験は、装置が大掛かりで、多くの製造

者が耐風圧試験を利用できる環境にないことから、参考試験に位置付けられていると考えられる。諸外国の規準、例えばASTM E 1592<sup>3)</sup>やAS 4040.0<sup>4)</sup>の例では、構成材個材ではなく、アセンブリ(組み合わされた製品)の試験体に実際の荷重に近い風圧荷重を掛けることを基本としている。今後、耐風圧試験が製品の性能試験として利用されることが期待される。

本報告では、外装材の構造設計に要求される許容耐力について解説し、金属立平葺き屋根と折板屋根の耐風圧試験の例を示した。

## 2. 許容耐力と安全率

外装材の構造計算書に要求されるのは許容耐力である。許容耐力は最大耐力(破壊強度)を安全率で除した値である。安全率をどのように設定したら良いかという適切なガイドラインがないので私見を述べる。

建築基準法は、法第1条に明記されているように、建築物に要求される最低の基準であり、基準法を守ってさえいれば建築物は安全であるという保証を与えるものではない。なぜなら、建築基準法に基づく風荷重も起こり得る最大の荷重ではないからである。平成12年建設省告示第1458号で計算される風荷重は、過去のデータから統計的に推定された将来「十分」起こり得る値を示しており、決して最大の値が計算される訳ではない。台風は自然現象であるから、建築基準法の値を超える風が発生することもあり得るのである。

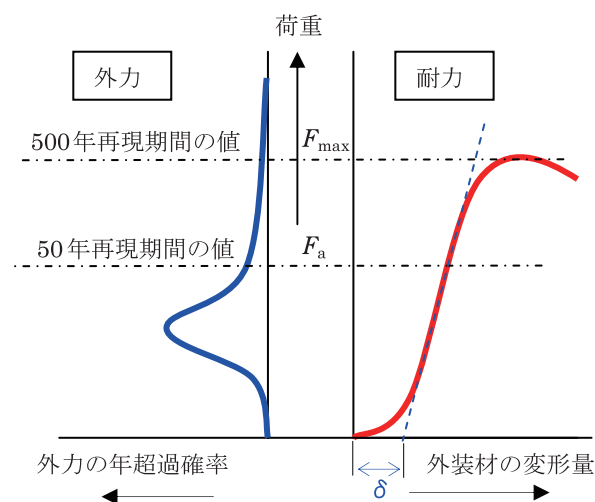
超高層建築物の構造骨組は基準法の荷重で損傷せず、またその1.6倍の荷重で倒壊しないように設計されている。これは2段階の荷重レベルにおいてそれぞれ損傷限界と終局限界を対応させていることになる。しかし、外装材は終局限界状態においては法律で規定されていないため、これに対応する設計がなされていないことも多い。外装材は構造骨組と一体となって建築物を構成し、外力である風荷重は外装材と構造骨組に同時に作用するので、同じレベルの荷重で設計されるべきである。外装材よりも構造骨組が強い風を受けることなどあり得ないのである。外装材については建築基準法に基づく荷重に対して許容耐力が要求されているので損傷限界については設計手順の中に既に組み込まれているが、終局限界については建築基準法の中で明記されていないので設計者が考慮しなければならない。

終局限界状態では、構造骨組ですら倒壊するかどうかの極限の荷重を想定しているので、外装材についてはダメージがないという健全性までは要求されず、脱落しない性能(施行令第39条2項の要求事項)が満たされるだけで十分である。損傷限界状態と終局限界状態の荷重はそれぞれ、50年と500年再現期間の値に相当し、その比は約1.6であり、これはすなわち安全率の最小の値に他ならない。したがって、材料強度に求め

られる安全率は、1.6以上は必要で、可能なら2.0以上を採用することが望ましい。

図1は年最大風荷重の分布と外装材の耐力の関係を示した概念図である。図の右側は荷重と外装材の変形量の関係、つまり荷重-変形曲線を表している。この曲線は、ある荷重まではほぼ直線的に変化するが、途中から直線から外れて勾配が小さくなり、最大値を示した後建材が破壊することを示している。その最大値が終局耐力 $F_{max}$ である。終局耐力を安全率で除した値 $F_a$ が許容耐力である。 $F_{max}$ を1.6(可能なら2.0)で除して得られる $F_a$ の値がこの曲線のほぼ直線の範囲にあれば、その荷重を受けた外装材の除荷後の変形量はその直線の延長線がX軸と交わる点に移動し、残留変位量 $\delta$ は許容範囲にあるであろう。この場合にはその外装材は深刻なダメージを受けないと考えられるので、外装材は修復せずに継続使用することができる。 $F_a$ が直線から大きく外れる位置にあれば、安全率を大きく設定して、より小さい許容耐力を設定することが望ましい。

図1 外力の年超過確率分布と外装材の耐力の関係



図の左側は外力の年超過確率を、外装材の耐力と対応させて示している。許容耐力 $F_a$ に対応させた建築基準法の荷重は発生し得る最大値ではなく、(確率は低い)それを超える荷重が発生し得ることを示している( $F_a$ を超える曲線部分)。終局耐力 $F_{max}$ を超える外力も、さらに確率は低い、発生し得る。そのときには、構造骨組すら想定以上の荷重に耐えられるかどうか分からないので、外装材の余耐力は要求されないであろう。

## 3. 金属立平葺きの耐風圧試験

### 3.1 試験体

試験体は、野地板の上にビス留めした通し吊子を介して金属屋根葺き材を固定した2.6m×2.9mの屋根パネルである(写真1)。金属板は、働き幅400mm、厚さ



0.4mmのガルバリウム鋼板で、金属板どうしは互いにかしめられ、形成されるハゼの内部にステンレス板製の通し吊子が400mmのピッチ(屋根葺き材の働き幅と同じ)で設けられている。吊子はビスで、野地板を貫通して母屋(C-100×50×50×2.3、ピッチ600mm)に固定される。したがって、金属板は600mm×400mmのピッチで固定されていることになる。

この試験体の作成で特徴的なことは、軒先とケラバを再現したことである(図2、図3)。一般に、屋根の端部には強い風圧が作用するので、設計では屋根の端部は特に注意が必要な箇所である。実際に、屋根の強風被害は端部の屋根葺き材の剥離が起点となって広がるケースが多い。したがって、屋根端部での屋根葺き材の固定は重要であるが、一方で漏水にも配慮が必要であることから、屋根葺き材をビス等で貫通して固定することは少ない。この製品においても軒先やケラバに固定された水切り金物(唐草と呼ばれる)を包むように屋根葺き材を折り曲げて、風による吸い上げ力に抵抗する方式が採用されている。ところが、屋根上の金属板は日射や気温変化の影響を受けて伸縮するので、金属板が熱膨張した状態では、吸い上げ力に抵抗すべき端部での金属板の水切り金物への掛けりの長さが短くなることがある。本試験では最悪の状態でも屋根葺き材の耐風性能が保持されることを確認するため、故意に軒先部の「掛けり長さ」を短くした。もともとの掛けり長さは30mmであるが、熱膨張の効果 considering、それを19mmとした。なお、温度変化を $\Delta t=60\text{ K}$ 、実際の葺き材長さを $L=30\text{ m}$ 、鋼材の熱膨張率を $\alpha=1.2\times 10^{-5}$ とすると、軒端部での膨張長さは $L/2\times \Delta t\times \alpha=11\text{ mm}$ と計算される(図2)。

野地板の上に固定される屋根葺き材の耐風圧試験で重要な注意点は、屋根葺き材に所定の圧力を掛けることである。一般に行われるように、この試験でも試験体を気密な圧力箱に固定した状態で、圧力箱内の圧力を増減して試験体に圧力を加える方法、いわゆる圧力箱方式を採用した。この場合、通常の仕様の試験体を用いると、野地板が気密であるため圧力は野地板が負担し、屋根葺き材に圧力が掛からない状態となる。これは、屋根葺き材を圧力箱の内側に向けて固定しても、圧力箱の外側に向けて固定しても同じである。そこで、野地板に(吊子固定部を避けて)適当な穴を開け、その穴を通して圧力が屋根葺き材に加わるように

した(写真2)。この穴は、もちろん実物には無く、試験の便宜上設けたものである。この試験体の場合には野地板に穴を開けることにより、屋根葺き材が圧力を負担し、野地板は圧力を負担しないことになる。屋根葺き材に作用する風圧は吊子～ビス～母屋を通して構造骨組に伝達される。ビスは野地板を貫通するのみで、野地板には力の伝達がない。したがって、穴を吊子のビス位置近くに開けなければ、野地板に開けた穴は試験結果に影響しないと考えられる。



写真1 試験体の外観(屋外側)

### 3.2 試験目標荷重の設定

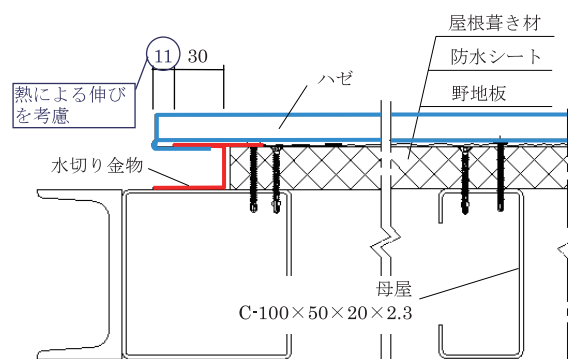


図2 試験体詳細図(軒先部、寸法単位：mm)

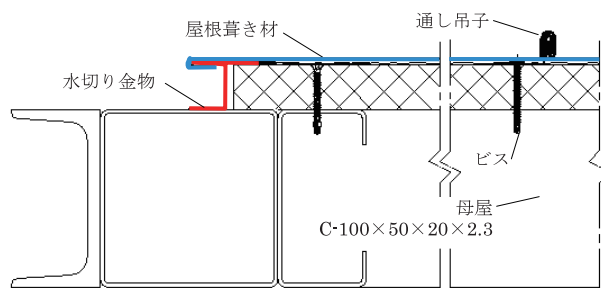


図3 試験体詳細図(ケラバ部)



写真2 圧力箱に取り付けられた試験体  
(野地板の屋内面が見える)

試験目標荷重は平成12年建設省告示第1458号に基づいて設定した。風荷重は、建設地の位置、周りの状況、建築物の形状やサイズなどによって変化し、設計される建築物ごとに、設計者によって設定される必要があるが、ここでは特定の建築物のためでなく、一般に想定される標準的な低層建築物のための風荷重を次の仮定の下で算出した。

- ・ 地表面粗度区分；Ⅲ
- ・ 基準風速； $V_0 = 34 \text{ m/s}$
- ・ 建築物の高さ； $H = 15\text{m}$
- ・ ピーク風力係数(屋根の隅角部用)； $\hat{C}_f = -4.3$

この条件での設計風荷重は $-2.21\text{kN/m}^2$ となり、これより試験目標荷重を $-2.3\text{kN/m}^2$ とした。ここで設定した試験目標荷重は、種々の設計条件をすべて考慮した実際に生じ得る最大荷重ではないことに注意する必要がある。したがって、この試験荷重よりも小さい実際の設計風荷重についてのみ、試験に供した製品

を採用することができる。

### 3.3 試験方法

試験では、試験体の屋外面を内側にして試験体を圧力箱に気密に固定し、圧力箱内の圧力を下げることにより、屋根葺き材に負圧(表面を引く圧力)を掛けた(写真2)。試験体は、装置の都合上、鉛直の姿勢で固定されたが、屋根葺き材の重量が載荷圧力に比べて十分小さいので、結果への影響はないと考えられる。載荷は、図4に示すように、段階的に目標荷重まで掛けた後、一旦除荷して残留変形を観察した後、再び段階的に載荷して試験体の終局強度(すなわち、破壊強度)を確認した。

試験体各部の変形は目標荷重までの載荷の間のみで測定した。目標荷重除荷後に残留変位量を測定後、破損を避けるために変位計を取り外して、以降の載荷段階では変位量の測定は行わず、破壊強度の確認のみを行った。

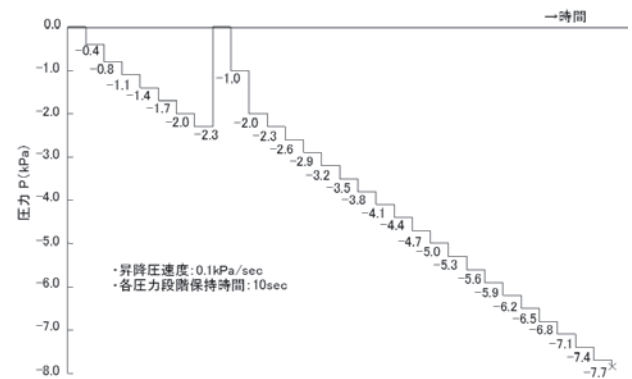


図4 載荷段階

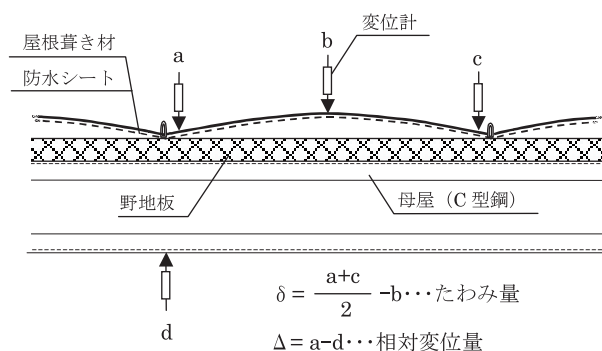
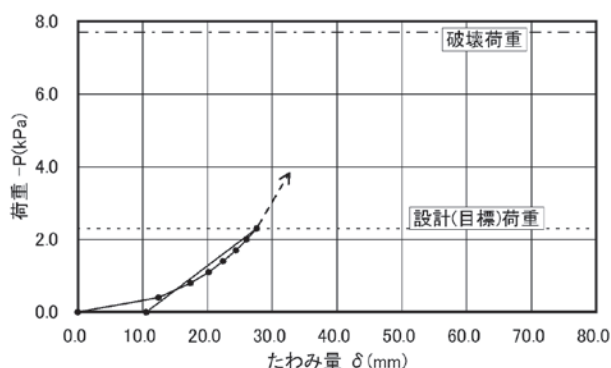
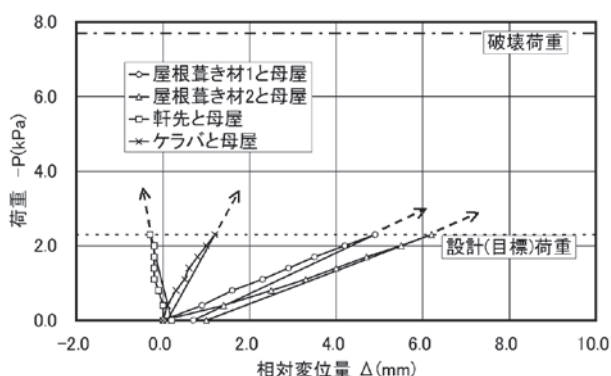


図5 変位計設置位置



(a) 屋根葺き材のたわみ量



(b) 屋根葺き材，軒先およびケラバと母屋間の相対変位量

図6 変位量測定結果

### 3.4 試験結果

目標荷重の負圧 $-2.3\text{kN/m}^2$ までの載荷において、試験体各部での破壊、曲げ等の重大な損傷は観察されなかった。図5に示す試験体中央部での屋根葺き材のたわみ量と母屋に対する相対変位量の測定結果を図6に示す。前述のように、変位量の測定は目標荷重までの載荷時に限った。

目標荷重の除荷後、屋根葺き材の中央部で、上方向への膨らみとして約10mmの残留変位量が確認された(図6 (a))。この残留変形が有害であるか否かの判断が許容の可否基準となる。言うまでもなく、残留変

形は小さいことが望ましいが、いかなる金属薄板においてもいくらかの残留変形は避けられない。この製品の場合、働き幅に対する膨らみの比は3/100程度で、目視でわずかに認識できる程度である。この残留変形(金属板の膨らみ)は屋根葺き材の機能を損なうものではなく、積雪や熱収縮の影響によって時間の経過と共に減少する(元に戻る)ことも期待できるので、強度の面では許容範囲にあると判断される。

母屋に対する屋根葺き材固定部付近の相対変位量と軒先およびケラバ付近の相対変位量(図6 (b))は、荷重に対して直線的に変化し、それらの残留変位量は十分小さい。したがって、固定部付近の部材はほぼ弾性的に挙動しており、目標の荷重を受けても耐力上健全であると判断できる。

残留変位量の確認の後、再び荷重を段階的に上げて、荷重 $-7.7\text{kPa}$ の載荷後における試験体の破壊を確認した。この破壊荷重は目標荷重の約3.4倍であることから、試験体は許容耐力に対して安全率3.4を有することができる。

#### 4. 折板の耐風圧試験

#### 4.1 試験体

試験体は、梁を想定したH型鋼にタイトフレームを溶接し、タイトフレームに吊子を介して鋼板製折板を葺いた二重折板屋根パネルである。下折板はタイトフレームにボルト止めされた吊子とともに折り曲げられて固定され、その上部に形成されるハゼを挟み込むように固定される断熱金具の吊子とともに上折板が折り曲げ固定された。この構法では上折板と下折板の間に空間ができ、そこにグラスウールを挟み込むことにより屋根パネルの断熱性を向上させることができる。断熱金具は固定金具間にプラスチックを挿入した金具で、上折板に作用する風力は金具を通して伝えるが、上折板と下折板間の熱橋（ヒートブリッジ）を遮断するように工夫されている。耐風圧試験では断熱材は強度に関係しないので、グラスウールの挿入は行わなかった。

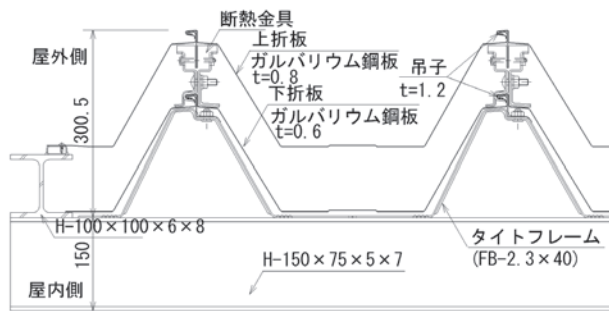
試験体は幅4m×奥行き(流れ方向) 7mの大きさとし、スパン長3.225mのタイトフレームの2スパンが再現された。折板の働き幅は0.5mで8山分が再現された。折板は山高165mmのガルバリウム鋼板で、上折板と下折板の厚さはそれぞれ0.8mmと0.6mmである。吊子は厚さ1.2mmの溶融亜鉛メッキ鋼板である。試験体の断面を図7に、室内側外観を写真3に示す。写真3では下折板の室内面が見えている。

強風を受ける実際の屋根では、上折板の表面には風による引き上げ圧力（負圧）が作用し、下折板の下面（室内面）には建築物の室内の圧力が作用する。上折板と下折板の間の圧力は、主に軒先やケラバの木口の気密度に依存する。通常は面戸などで木口が塞がれること、下折板は室内に対して気密であることから、

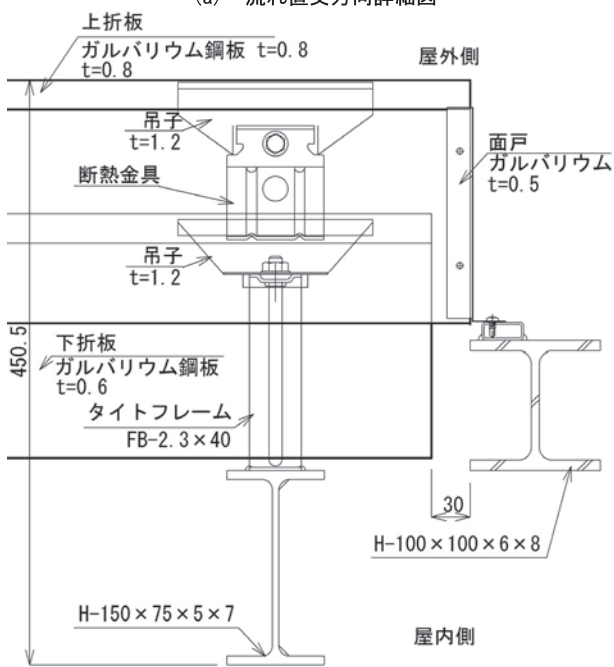


上折板と下折板間の空隙は比較的弱い負圧が作用すると思われる。その場合、上折板に作用する風力は、表面に作用する圧力からいくらか低減された値となるが、この空隙の圧力は正確に分からないので、ここでは安全側にこの空隙の圧力をゼロと考えた。

試験体は、面戸と隙間調整用の部材を用いて上折板を圧力箱に気密に取り付けた。下折板は上折板より長さが端部でそれぞれ30mm短く作られており、枠と下折板の間には空隙がある。このことにより、立平葺きで野地板に穴を開けたように、上折板のみに圧力が加わるようになる。



(a) 流れ直交方向詳細図



(b) 流れ方向詳細図

図7 試験体断面図



写真3 折板試験体 (室内側)

## 4.2 試験方法

試験体は鉛直の姿勢で上折板を内側にして圧力箱に取り付けられた。折板は前述の立平葺きよりも重量が大きいため、水平の姿勢にある通常の状態からの载荷と同等の結果を得るために、自重(9.9kgf/m<sup>2</sup>)分の圧力+0.1kPaを加圧した状態を荷重ゼロの初期値とした。試験に適用した载荷段階を図8に示す。

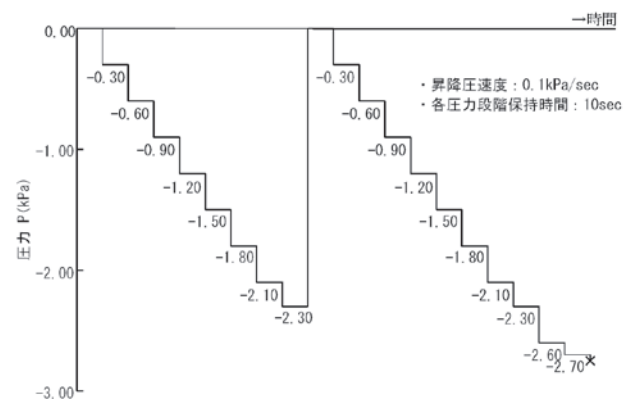


図8 载荷段階

## 4.3 試験結果

試験結果の荷重-変形曲線を図9に示す。試験体は負圧-2.3kPaまでの载荷において異常は観察されなかった。除荷後における最大残留変位量(上折板と梁

間の相対変位量)は-4.6mmであった。図9 (b)から、上折板と梁との相対変位量が圧力-2.0kPa付近から急激に増加していることが分かる。これ以降の圧力を受けると断熱金具周りで部分的な塑性化が進行しているものと思われる。2回目の負圧-2.7kPaまで異

常は観察されなかったが、これ以降の昇圧中に中央の梁上にある断熱金具部で上折板が吊子から外れ、ハゼ部が損傷した(写真4)。

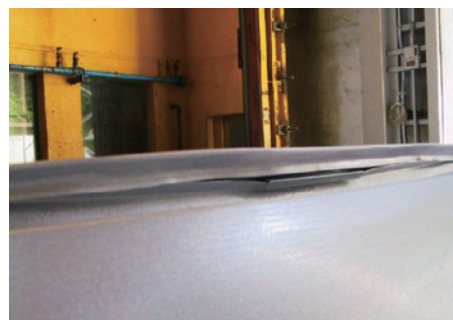
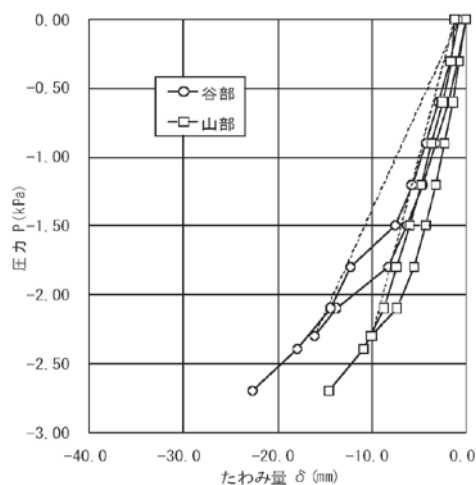
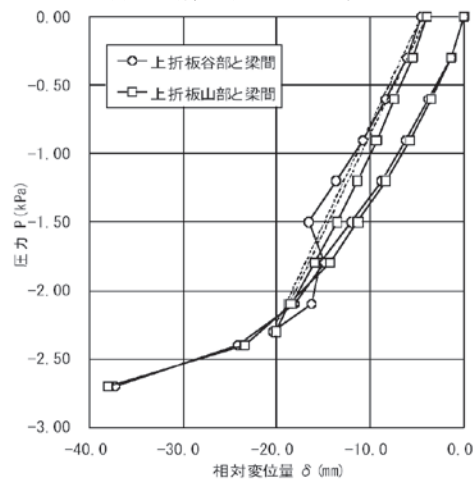


写真4 上折板の損傷状況



(a) 上折板の流れ方向のたわみ



(b) 上折板と梁との相対変位量

図9 試験結果

試験体は-2.7kPaを超えた圧力で損傷した。この圧力がこの試験体の終局耐力である。これより、終局耐力を安全率1.6で除した値-1.7kPaがこの試験体の許容耐力であるとして行うことができる。この試験体は2スパンを再現しており、屋根の一般部に適用される。屋根端部の荷重は一般部よりも大きい、それに適用する折板の耐力は1スパンの屋根を再現した試験体で確認することができる。屋根端部の固定金具にはスパンの約半分の荷重しか掛からないと考えて良いためである。

なお、断熱二重折板では、上折板の熱伸縮による固定金具の疲労の検討方法がSSR20072)に示されている。この耐疲労性能も重要であるので、確認する必要がある。

## 5. 材料強度のバラツキ

一般に建材の強度は、材料自体や施工によって生じるバラツキをもつ。設計に用いられる許容耐力は、これらのバラツキを考慮して、その最小値を基準にしない

ければならない。通常、強度のバラツキは多くの試験体を用いた試験結果によって統計的に評価され、例えばオーストラリア規準では試験体数が少ないときの耐力の低減率を決めている。しかし、数多くの試験体の製作費用と試験費用は、特に全体試験を計画した場合には、製造者の過大な負担となることがある。

立平葺きの試験の場合、屋根葺き材の耐風強度は、吊子の引き抜き強度、屋根端部における屋根葺き材の掛かり部の引き剥がし、および屋根葺き材の曲げ破壊のいずれかで決定されることが考えられる。それらはいずれも複数個またはある程度の広がりがある一つの試験体の中に存在し、例えば、本試験体の中にある吊子の数は24個、軒先の全長は4.8m、ケラバの全長は5.5m、曲げ破壊の可能性のある屋根葺き材の全長は13.8mである。試験体の破壊はそれらのうち最も弱い部位で生じる。したがって、このような複数の部材が組み込まれている全体試験の場合には、バラツキを考慮した耐力のほぼ最小値が推定できると考えられる。

折板の試験の場合も複数の折板と固定金具で構成された試験体を用いることにより、これらの中で耐力が最も小さい部位で強度が決定されている。このような場合には、1体の試験体でバラツキが考慮された強度の最小値が結果として得られると考えて良いであろう。

## 6. おわりに

屋根葺き材はしばしば強風で被害を受ける。多くの外装材がそうであるように、金属板は屋根の一部だけの被害に留まらず、屋根全体または広い面の被害に拡大することがある。これらの被害を軽減するには、細部にわたる確実に耐風設計を行うことが必要である。耐風設計では、適切な荷重の設定と、建材の適切な強度の確認が必要である。本報告は金属屋根葺き

材の耐風試験について述べた。

立平葺きの試験方法は、野地板に穴を開けて屋根葺き材に圧力が加わるように計画した。屋根葺き材の強度上の弱点部となり易い軒先とケラバを試験体で再現し、さらに屋根葺き材の熱膨張の影響を考慮して安全側に強度を評価できる試験体とした。試験の目標荷重は建築基準法に基づいて設定し、その目標荷重までの変位量測定とその荷重を超える破壊荷重を確認した。その結果、目標荷重除荷後の残留変形が比較的小さい(許容できる)ことから目標荷重を許容耐力とした。破壊荷重と許容荷重の比から安全率3であることが確認された。

折板の試験では、2スパン分を再現した断熱二重折板の例を紹介した。この試験では、終局耐力を確認して、安全率を1.6と設定し、許容耐力を求めた。SSR2007では、耐風圧試験は参考試験に位置付けられているが、製品の最終性能を確認する最も適した方法であると思われる。今後、各種の屋根葺き材の耐風性能試験が実施され、設計資料として設計者に提供されることが望まれる。

**謝辞** 立平葺きの試験は株式会社川上板金工業、折板の試験は奥平工業株式会社の依頼で行われた。本稿への転載を許可していただき感謝します。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会、建築物外装材の耐風設計と耐風性能評価に関するシンポジウム報告書、2008, 11.
- 2) 日本金属屋根協会&日本鋼構造協会、鋼板製屋根構法標準SSR2007, 2008.
- 3) ASTM E 1592-05, Standard Test Method for Structural Performance of Sheet Metal Roof and Siding Systems by Uniform Static Air Pressure Difference, 2005.
- 4) Australian Standard, AS 4040.0-1992, Methods of testing sheet roof and wall cladding, Part0: Introduction, list of methods and general requirements, 1992.