

# スチールハウス用パネル部材の曲げ耐力に関する研究

## Strength of Structural Elements for Steel Framed Houses

半谷 公 司<sup>\*(1)</sup>  
Koji HANYA

菅野 良 一<sup>\*(2)</sup>  
Ryoichi KANNO

宇野 暢 芳<sup>\*(3)</sup>  
Nobuyoshi UNO

### 抄 録

スチールハウスは、溝形鋼と合板等の面材をドリルねじで一体化したパネルを基本要素として構成される。溝形鋼と面材が一体となったパネルとして設計されることは少なく、溝形鋼単独で外力に抵抗するとして設計されている。パネル化すると耐力上昇効果があり、溝形鋼単独より大きな耐力と評価できる場合が多い。溝形鋼と合板によって構成されるパネルを対象として、溝形鋼と合板の合成効果、及び合板が溝形鋼に生じる座屈を補剛する効果について、実験と解析に基づいて定量的に検討し、それぞれの効果を適正に反映した設計技術を提案する。本設計技術を適用すれば、スチールハウスの経済設計と薄板鋼部材の耐力向上が可能となる。

### Abstract

Steel framed houses are made up of panels which are composed of steel channels and sheathings such as gypsum boards and plywood with self-drilling screws. In design, the panels are generally designed such that only the channels can resist against external forces and the composite actions of the panels are scarcely considered. It is, however, observed in some cases that the panels show larger strength than those calculated based on the strength only of the channels. In this paper, especially for the panels composed of plywood and steel channels, the composite actions of both materials and the buckling restraining effect of the channels are studied based on experiments and analyses. New design methods taking into account of the composite actions are proposed, which make the steel houses more economical and improve the strength.

### 1. 緒 言

スチールハウスは、枠組壁工法<sup>1)</sup>を基本としており、厚さ0.8～1.6mmの建築構造用表面処理軽量形鋼<sup>2)</sup>(以下溝形鋼と略す)と厚さ9～15mmの構造用合板や石膏ボード等の面材(以下面材と略す)によって構成される。躯体を成す基本要素は、溝形鋼(枠材)と面材をドリルねじ<sup>3)</sup>で接合したパネル状の構造要素(以下パネルと略す)である。スチールハウスでは、このようなパネルで床、壁、屋根を構成し、相互に接合、一体化して構造躯体を形成する(図1参照)。

スチールハウスの設計では、面内せん断力に対する耐力壁や床構面の設計を除いて<sup>4)</sup>、面材と溝形鋼が一体となったパネルとして設計されることは少なく、一般的には溝形鋼単独で外力に抵抗するとして設計されている<sup>5)</sup>。しかしながら、これまで筆者らは多くの実験<sup>6-8)</sup>によって、パネルの曲げ耐力は溝形鋼単独の計算耐力の数倍に及ぶケースもあり、面材と溝形鋼が組み合わされる効果は小さくないことを確認している。従って、枠材となる溝形鋼の部材特性に加えて、パネルとしての構造特性を調査し、設計に適正に反映させることが重要である。

本報は、このような背景の下、溝形鋼が面材とパネル化されたことによって曲げ耐力が上昇する効果を実験、解析の両面で調査し、

新しい設計法を提案することを目的とする(図2参照)。ここでは、パネル化による曲げ耐力上昇効果を、1)面材が枠材とともに外力に分担して抵抗する“合成効果”、2)面材が枠材に生じる座屈を拘束する“拘束効果”の二つに分けて取り扱っている。なお、本研究で対象とする厚さ1mm前後の薄鋼板に関する研究は、欧米で活発に行わ

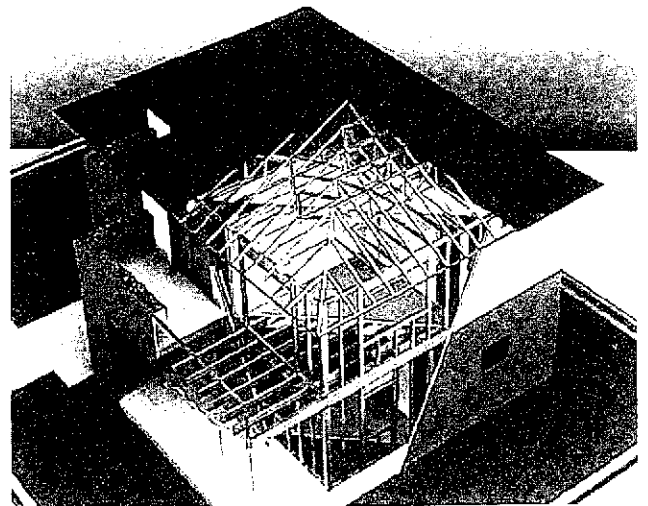


図1 スチールハウスの構造

\*<sup>(1)</sup> 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 研究員  
千葉県富津市新富20-1 ☎293-8511 ☎(0439)80-2925

\*<sup>(2)</sup> 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員 Ph.D.

\*<sup>(3)</sup> 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主幹研究員

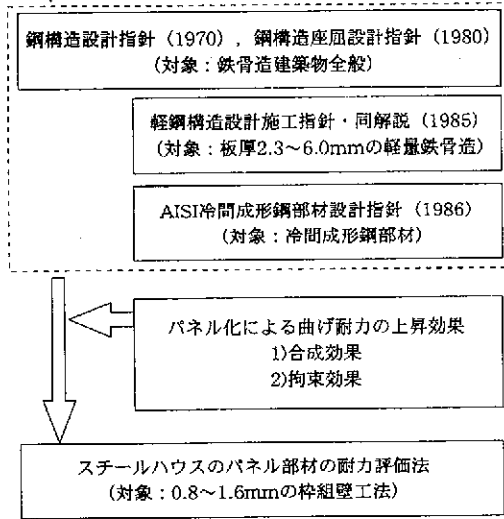


図2 既往の設計方法と本報の関係

れており<sup>9,10)</sup>, 設計指針も確立されているが<sup>11)</sup>, スチールハウスを対象とした面材による曲げ耐力上昇効果に関する研究は見られない。

## 2 スチールハウスにおけるパネルと設計での取り扱い

スチールハウスを構成するパネルは、壁、床、屋根の3種に大別できる。また、断面構成に注目すると、枠材の両面に面材が付くタイプと、片面だけに面材が付くタイプとに分類できる(図3参照)。壁の場合には、固定荷重等による鉛直力と地震等による水平力が主な外力となり、パネルは面内に生じる圧縮力とせん断力への抵抗要素として働く。床や屋根の場合には、固定荷重や雪荷重による鉛直力が主な外力となり、パネルは面外曲げモーメントへの抵抗要素として働くことになる。

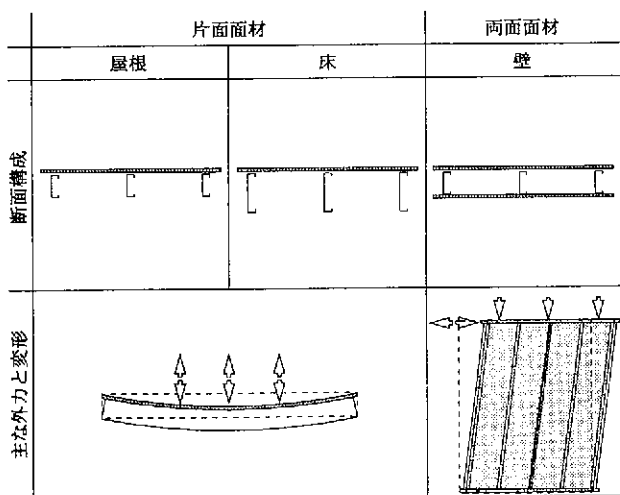


図3 パネルの分類

現状のスチールハウス設計<sup>5)</sup>での面材の効果の取り扱いは、パネルのタイプや作用する力によって異なっている。たとえば、面内に生じるせん断力に対しては面材が耐力を負担するものとしているが、面外への曲げについては無視している。一方、座屈拘束効果に関しては、両面から面材が取り付けられる壁では、面材によって縦枠材(スタッド)の弱軸方向(壁の面内方向)の曲げ座屈が拘束されるとしている。片面に面材が取り付けられる屋根や床でも、面材に接するフランジが圧縮となる様な曲げモーメントを受ける場合には、溝形鋼の横座屈は十分に拘束されるとしているが、逆に面材側が引張の場合には、面材による座屈拘束は不明確であるとして、その効果を無視している。

本報では、これらパネルのうち屋根や床を研究の対象とした。屋根、床ともに、図4に示す溝形鋼の片面に合板が接合されたパネルであり、自重や積載荷重などによって生ずる面外曲げモーメント(たとえば図5)が主たる作用力となる。これらパネルに作用する曲げモーメントは、図6に示されるような“正曲げ”と“負曲げ”の2種類の状態に分類できる。正曲げは、合板の接合された方のフランジに圧縮力が生じる応力状態であり、負曲げは、合板が接合されていないフランジに圧縮力が生じる状態を指す。いずれの状態かによって、合成効果と拘束効果が大きく異なるため、以下では、これらを明確に分けて取り扱っている。

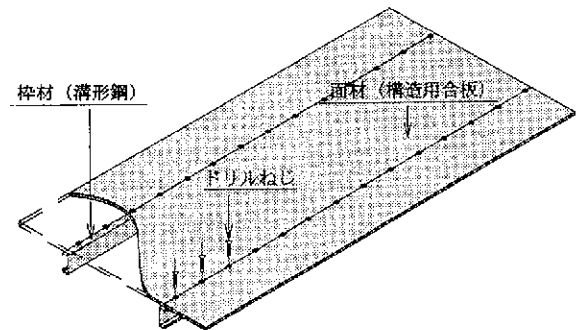


図4 対象とするパネル

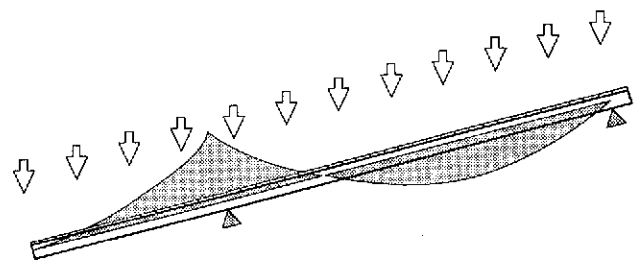


図5 屋根における代表的なモーメント分布

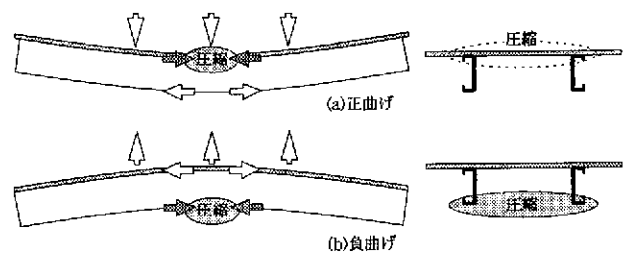


図6 パネルにおける正曲げと負曲げ

### 3. パネルの曲げ試験と耐荷特性について

本章では、パネルの曲げ性状を検討するために行った面外曲げ試験の概要を述べ、耐荷特性と合成効果、拘束効果などについて考察する。

#### 3.1 パネル曲げ試験の計画概要<sup>6,7)</sup>

試験体は溝形鋼と構造用合板(JAS1級、板厚 $t=9$ mm)をドリルねじ(軸径4.2mm)で接合したパネルとし、4点曲げ試験を実施した(図7参照)。曲げの作用方向によって、パネルの耐荷特性が異

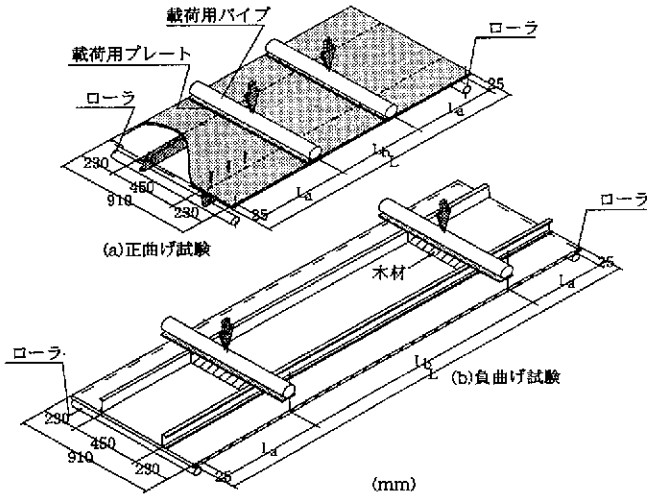


図7 試験体と載荷方法

なるため、正曲げ試験(図7(a))と負曲げ試験(図7(b))の二種類を実施した。負曲げ試験では、端部をナイフエッジ状に加工した木材を載荷点下に設置し、載荷点間( $L_b$ )を極力溝形鋼の座屈長と等しくなるようにした。また、この木材は、荷重がパネル全体に均一に分布するための役割も果たしている。

実験パラメーターは、1)曲げモーメントの作用方向(正曲げ/負曲げ:図7参照)、2)ドリルねじの打設ピッチ、3)載荷点間の距離( $L_b$ )、4)溝形鋼の形状(リップ無し/リップ付き、表1参照)の四種類とした。

正曲げ試験のシリーズでは、スチールハウスの屋根や床には、通常リップ付きの溝形鋼が使用されているが、データの蓄積を意図してリップ無し溝形鋼も対象に加えた。また、ドリルねじの打設ピッチを25mm~200mmの範囲で変化させて、一体性の程度の影響を調査できるようにした。負曲げ試験のシリーズでは、リップ付き溝形鋼を使用し、ドリルねじのピッチは変化させず、座屈長の影響を調査するために、載荷点間の距離( $L_b$ )をパラメーターとした。

#### 3.2 正曲げ作用下における挙動と合成効果<sup>8)</sup>

図8及び表1に試験結果を、スチールハウスの設計での評価方法<sup>5)</sup>に基づく計算耐力と比較して示す。この計算耐力は溝形鋼単独の曲げ耐力であり、面材が横座屈を拘束するとして、安全率を1、鋼材の降伏点 $\sigma_y$ をF値(材料の基準強度)とした局部座屈耐力<sup>6)</sup>に基づいている。図8から、ドリルねじの打設ピッチが200mmから小さくなるに従って、初期剛性、最大耐力ともに大きくなる傾向が分か

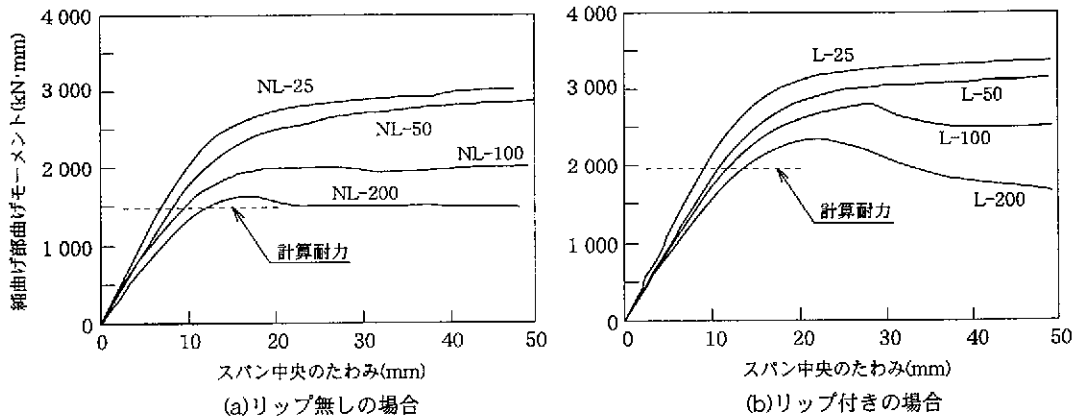


図8 パネルの正曲げ試験結果

表1 試験体と試験条件一覧表

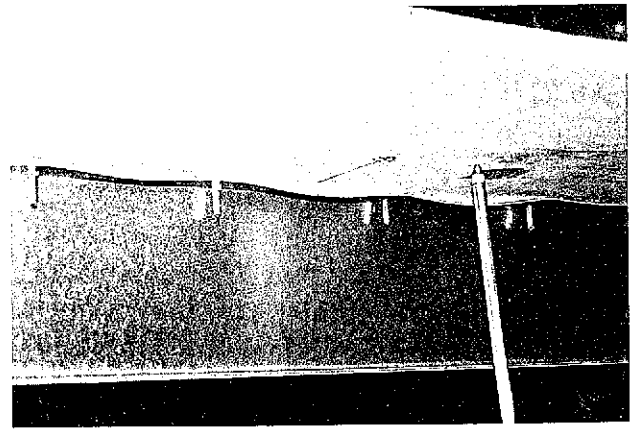
No.	記号	板厚 (mm)	降伏点 $\sigma_y$ (MPa)	引張強さ $\sigma_u$ (MPa)	形状、寸法 (mm)	試験方法	全長L (mm)	純曲げ区間 $L_b$ (mm)	せん断スパン $L_a$ (mm)	ねじピッチ (mm)	実験結果		形鋼単独の計算耐力 (kN·mm)
											最大耐力 (kN·mm)	初期剛性 (kN·mm <sup>2</sup> )	
1	NL-25	0.81	289	392	[25]	正曲げ	1 820	590	590	25	3 010	96.9	1 479
2	NL-50									50	2 884	75.6	
3	NL-100									100	2 123	65.6	
4	NL-200									200	1 619	55.8	
5	L-25	0.79	308	405	[25]	正曲げ	1 820	590	590	25	3 382	94.3	1 952
6	L-50									50	3 133	79.4	
7	L-100									100	2 574	74.0	
8	L-200									200	2 340	66.2	
9	LR-500	0.79	308	405	[25]	負曲げ	1 820	500	635	100	1 736	-	1 668
10	LR-910						1 820	910	430		1 874	-	674
11	LR-1200						1 820	1 200	285		1 696	-	388
12	LR-1600						2 730	1 600	540		1 780	-	218

る。ねじのピッチが最大の200mmと最小の25mmのケースの比較では、リップ付きの溝形鋼の場合では初期剛性、最大耐力ともに40%程度増大しており、リップ無しでは80%程度の増加を示している。また、実験耐力はいずれも計算耐力よりも大きな値を示している。このように、ドリルねじ本数の増加に伴って、溝形鋼と合板の一体性が高まり、大きな合成効果が発揮されることが分かる。

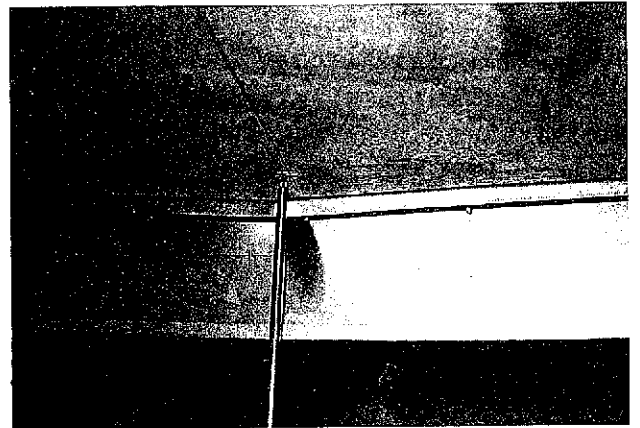
試験体の挙動に注目すると、リップ無し、リップ付きのケースとも類似しており、最大耐力は圧縮を受けるフランジとウエブの局部座屈によって決定されている(写真1参照)。座屈発生の前後では、ドリルねじ接合部の破壊も同時に進展しており、せん断スパン部では、ねじの傾斜も観察されている(写真2参照)。なお、リップ付きの方が最大耐力が大きいが、これは、溝形鋼の局部座屈耐力の大小に起因しているためである。

図9に、スパン中央における断面内のひずみ分布を示す。各ケースで比較しやすいように、溝形鋼フランジ部のひずみ( $\epsilon_{up}$ )が $750\mu\text{m}$ 程度の時の分布を示している。図中の $M_m$ は、各ひずみ分布が発生している純曲げ部での曲げモーメントの値であり、断面最上部の $\epsilon_w$ は合板のひずみ量である。ひずみ分布から、1)ドリルねじのピッチが25mmのケースでは、ほぼ平面保持が成立していること、2)ドリルねじのピッチの増大とともにフランジ部のひずみ $\epsilon_{up}$ と合板のひずみ $\epsilon_w$ の差が大きくなり、平面保持が崩れることが分かる。また、ドリルねじピッチの増大によって、溝形鋼断面内の中立軸が押し下げられ、その結果として、合板と接合される上側の圧縮フランジのひずみ値がより増大しやすい状況になることも理解できる。なお、実測したひずみ値からは、溝形鋼のフランジが降伏ひずみ( $\epsilon_y$ )に至る前後で局部座屈が発生する傾向にあった。

以上のように、正曲げ状態におけるパネルの合成効果は大きく、この効果を考慮した合理的な設計法の確立が必要である。



(a)リップ無しの場合



(b)リップ付きの場合

写真1 正曲げ試験における圧縮フランジの局部座屈

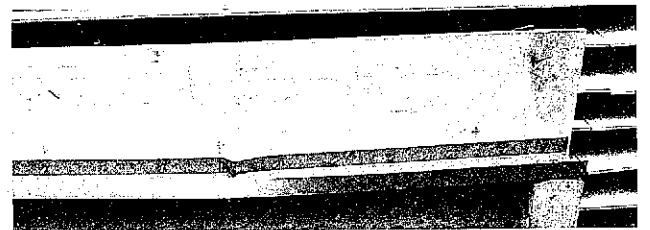


写真2 せん断スパン部でのドリルねじの傾斜

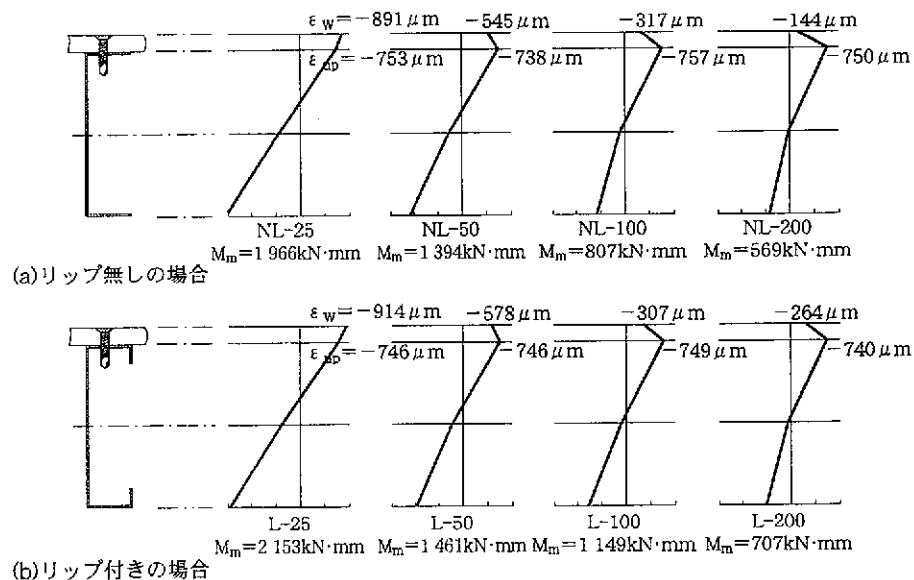


図9 ひずみ分布 ( $\epsilon_{up}=750\mu\text{m}$ の時の実験値)

3.3 負曲げ作用下における挙動と拘束効果<sup>7)</sup>

図10は負曲げ試験の結果である。各試験体ではスパンなどの条件が異なるため、荷重-変形関係の比較は意味を持たないことに留意する必要がある。計算耐力を表1及び図10中に示す。この計算耐力は溝形鋼単体の短期レベルでの横座屈耐力<sup>5,12)</sup>であり、載荷点間距離Lbを横座屈長とし、素材試験で確認した鋼材の降伏点をF値としている。

負曲げ時のパネルの挙動は、いずれの試験体も類似しており、弾性的な挙動を示した後に、溝形鋼の座屈により最大耐力に至っている。LR-1200は他と比較してやや異なる性状を示しているが、これは支点近傍での局部変形が同時に発生したことによるものである。これら負曲げの耐力は、正曲げ耐力(図8(b))と比較して50~70%程度に留まっていることが分かる。面材がない場合の座屈形態である横座屈とはモードが異なっており、フランジやウェブが横方向に倒れ、溝形鋼の断面が変形するモードを示している(写真3参照)。計算値と実験耐力の比較においても顕著な差が見られる。溝形鋼単独の場合に生ずる横座屈の場合は、座屈長が大きくなると座屈耐力は減少するが、実験では座屈長増大に伴う耐力低下はほとんど生じていない。最も座屈長の大きなLR-1600の実験耐力は、計算耐力の約8倍にも至っており、非常に大きな耐力差が生じていることが分かる。

以上のように、負曲げ状態では、面材の存在を考慮しない計算耐力と実際の耐力は大きな開きがあり、面材の無視は不経済な設計を招くことになる。従って、面材の影響を考慮した設計法の確立が重要な課題になる。なお、正曲げ試験で観察された合成効果は、負曲げ作用下では比較的小さいことが実験で示唆されており、設計上無視しても問題がないと考えられる。

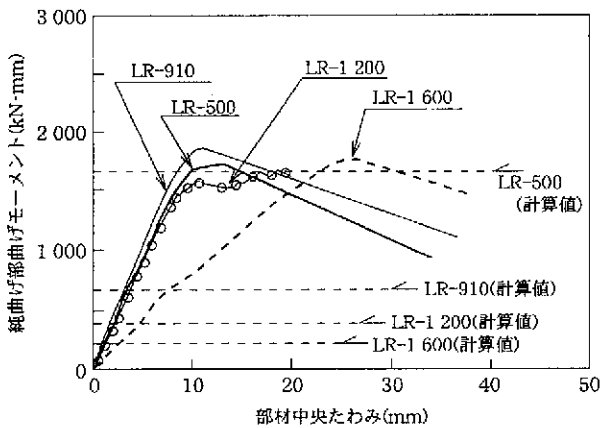


図10 パネルの負曲げ試験結果

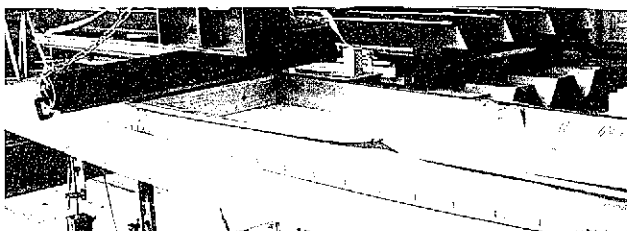


写真3 負曲げ試験における座屈性状

4. 合成効果を考慮したパネルの正曲げ耐力<sup>6,8)</sup>

本章では、3章で観察された実験結果に基づいて、パネルが正曲げを受ける場合の溝形鋼と合板の合成効果を考慮した耐力評価法を提案する。耐力評価法は、鋼とコンクリートの合成梁の耐力評価法<sup>13)</sup>を参考にして、まず、溝形鋼と合板が完全に一体となった場合について検討し、続いて不完全合成の場合へと拡張する。

4.1 完全合成パネルの耐力評価

溝形鋼と合板が完全に一体化されている場合は、パネル断面内での平面保持が仮定できる。図11(a)に、完全合成のパネルが正曲げを受けた場合の断面内ひずみ分布を示す。溝形鋼の圧縮フランジのひずみを $\epsilon_{up}$ とし、合板のひずみを $\epsilon_w$ とする。ここでは、単純化のため、合板内のひずみは一定とし、完全合成時には $\epsilon_{up}$ と $\epsilon_w$ は等しい値を持つとする。なお、合板の板厚を $t_p$ とし、溝形鋼と合板のヤング係数を各々 $E_s$ 、 $E_p$ (=7680MPa)とする。

最大耐力を算出するためには、最大耐力時の条件を定める必要がある。3章で示した実験によれば、最大耐力は局部座屈によって決定されており、おおむね圧縮フランジが素材の降伏ひずみ $\epsilon_y$ に到達した時点と対応している。本報では、これに基づいて、溝形鋼の圧縮フランジが $\epsilon_y$ に至った時点と最大耐力時と仮定した。この考え方は、AISIの冷間成形鋼部材設計指針<sup>14)</sup>における溝形鋼の終局曲げ耐力算出の条件と同じである。

この条件の導入により、完全合成時のひずみ分布は図11(a)のようになり、対応する応力分布が図11(c)のように定まることになる。ここで、中立軸の位置を示す距離 $x_a$ は、図11(c)に示す $P_{wc}$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ の合力の総和がゼロとなる条件から算出できる。 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ の算出では、鋼構造設計規準式<sup>15)</sup>に基づいて、F値あるいは降伏点 $\sigma_y$ に対応する有効幅を考慮する。また、 $P_{wc}$ の算出では、せん断遅れによる合板の有効幅 $b_e$ を考慮する必要がある。有効幅 $b_e$ の設定は今後の検討課題であるが、ここでは実験で得られた合板のひずみ分布による検討から、溝形鋼1本当たりの合板負担幅に1/2を乗じた幅として安全側に設定することにした。なお、図11(c)の応力分布では、圧縮フランジのひずみを $\epsilon_y$ としている関係上、引張フランジ全域と引張側のウェブの一部( $x_p$ の範囲)が降伏域にある。

図11(c)の応力分布に基づいて、中立軸回りのモーメントMを計算すれば完全合成を仮定した正曲げ耐力が得られることになる。完全合成時の計算値と実験値を比較して、図12(a)、(b)の左端に棒グラフで示す。水平矢印の位置は実験結果を示す。完全合成時の耐力は、実験でドリルねじを最も密に打設したNL-25、L-25とほぼ一致している。これは、提案した評価法がおおむね妥当な評価を与えることを示すものと考えられる。

4.2 不完全合成パネルの耐力評価

完全合成を満足するのに十分な本数のドリルねじを打ち込むことは施工性等の面から考えて容易ではないため、実際のパネルの使用条件を前提とした不完全合成時の耐力評価法を提案する。

3章の実験で観察されたように、ドリルねじのピッチが大きくなり、溝形鋼と合板の一体性が小さくなると、溝形鋼の圧縮フランジのひずみと合板のひずみの差が大きくなり、パネル断面の平面保持が崩れる現象が観察される。このひずみ差により、中立軸が引張側(下側)に移動し、より小さな荷重で溝形鋼の圧縮フランジが降伏ひずみ $\epsilon_y$ に到達する。この結果、小さな荷重レベルで局部座屈を起

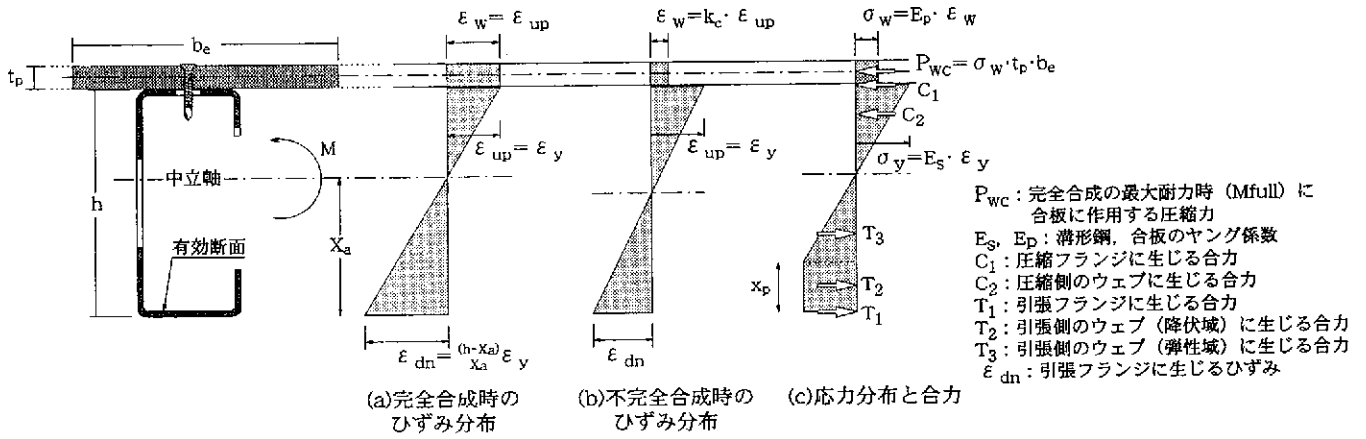


図11 正曲げ耐力評価におけるひずみと応力分布

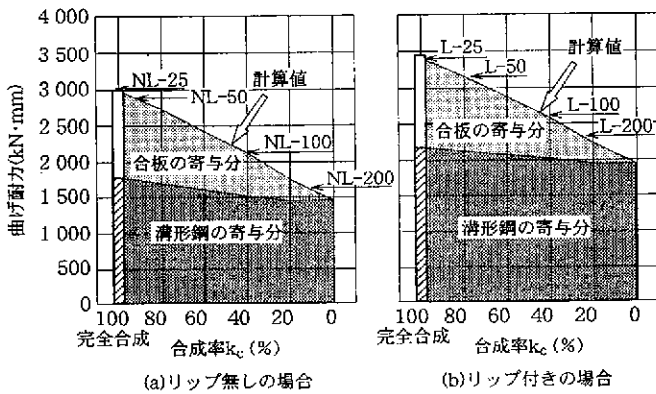


図12 合成率 $k_c$ と曲げ耐力

こし、最大耐力に至ることになる。

ここでは、このひずみの差に注目し、合板と薄形鋼圧縮フランジのひずみの比 ( $\epsilon_w / \epsilon_{up}$ ) を合成率  $k_c$  と定義して、不完全合成の耐力評価をする。合成率  $k_c$  を導入すれば、図11(b)に示すように、合板のひずみは  $\epsilon_w = k_c \cdot \epsilon_{up}$  で得られるため、 $\epsilon_{up}$  が  $\epsilon_y$  に至った時点が最大耐力とすると、パネル耐力は前節で示した完全合成の場合と同様に算出することができる。

合成率  $k_c$  を 0~100% まで変化させた場合のパネル曲げ耐力の計算結果を図12に示す。グラフでは薄形鋼と合板のそれぞれの耐力への寄与分の変化が分かりやすいよう分けて示している。合成率の増大と共に、特に合板の寄与分が増え、曲げ耐力が大きくなるのが分かる。また、計算結果と実験結果との比較から、各実験がどの程度の合成率を持つかも把握できる。

このような方法で不完全合成のパネル耐力を算出するためには、薄形鋼と合板の一体性の程度を考慮して、合成率  $k_c$  を定めることが必須となる。ここでは、合成梁の耐力評価の考え方<sup>13)</sup>に基づいて検討を進めた。図13は、3章の実験で示した試験条件であり、パネルの一体性の程度は、モーメントがゼロの点と最大点の間で規定されるせん断スパン部  $L_p$  での薄形鋼と合板間のせん断力伝達能力に依存する。今、 $L_p$  に打設されたドリルねじのせん断耐力の合計値を  $n \cdot P_v$  ( $P_v$ : ドリルねじ 1 本当たりの最大せん断耐力、 $n$ : せん断スパンのドリルねじ本数) とし、完全合成の最大耐力時 ( $M_{full}$ ) に合板に作用する圧縮力を  $P_{wc}$  (図11(c): 前節の方法で算出できる) とする。ここで、 $P_{wc}$  は完全合成を確保するためにドリルねじ部で伝達すべき

力であり、 $n \cdot P_v$  は伝達可能な力となるため、両者の比 ( $= n \cdot P_v / P_{wc}$ ) は一体性の程度を表す尺度とすることができる。

本報では、実験結果との比較に基づいて、この比  $n \cdot P_v / P_{wc}$  と合成率  $k_c$  との関係を図14のように仮定し、 $n \cdot P_v / P_{wc}$  によって  $k_c$  を定めるようにした。図14に基づいて計算した耐力値と実験結果を比較して図15に示す。ここで、 $P_v$  については、別途実施した合板と鋼板のドリルねじ接合部のせん断試験により、 $P_v = 1400N$  と設定しているが、実際の設計では、文献5)などに基づいて安全率を 1 として算出できる。図15から、計算値はかなり良い耐力評価を与えていることが分かる。

より一般的なのはね出し単純梁の場合(図16参照)でも同様に、正曲げの領域で、ドリルねじに加わるせん断力が同一方向になる区間  $L_p$  ごとに  $n \cdot P_v / P_{wc}$  を求めて  $k_c$  を定め、上記の不完全合成の耐力評価法を適用して評価できる。なお、本章で提案したモデルは最大耐力時に引張側で降伏を許容するため、安全率の取り方については配慮を要する。

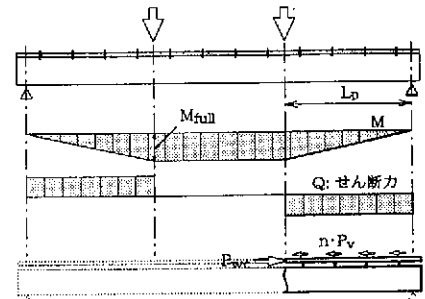


図13 等曲げ試験における  $P_{wc}$  と  $n \cdot P_v$  の関係

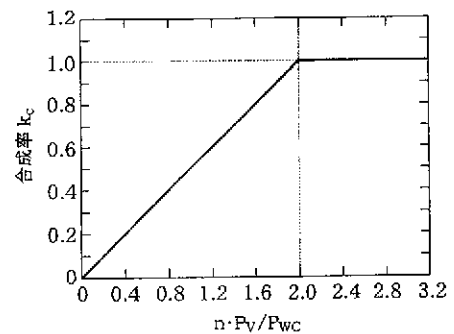


図14 合成率  $k_c$  と  $n \cdot P_v / P_{wc}$  の関係

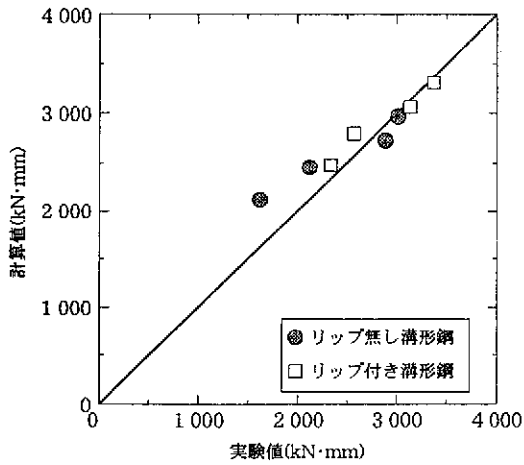


図15 耐力の実験値と計算値の比較

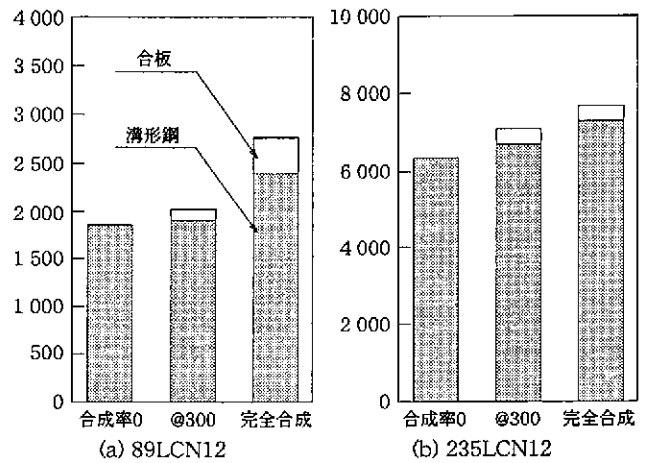


図17 スチールハウス部材での具体的検討

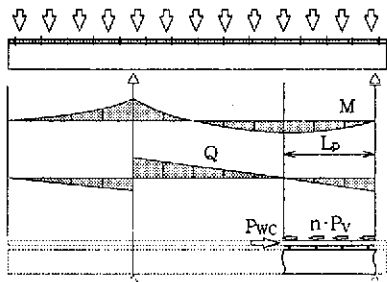


図16 一般的な条件での考え方

### 4.3 スチールハウスでの具体的な検討

一般的な仕様の屋根と床を対象として、合成効果を考慮したパネル耐力算出を試みた。対象としたのは、屋根部を想定したパネル(溝形鋼89LCN12(C89×40×12×1.2)+ $t_p$ 9mmの合板)、床部を想定したパネル(溝形鋼235LCN12(C235×40×12×1.2)+ $t_p$ 15mmの合板)である。計算では、等分布荷重を受ける単純梁を想定し、屋根部ではスパンを1.82m、床部ではスパンを2.73mと仮定した。いずれも溝形鋼は455mmピッチで配置されているとし、計算では溝形鋼1本当たりの耐力を求めた。

スチールハウスで標準と考えられる軸径4.2mmのドリルねじを300mmピッチ(@300)で打設した場合に加え、合成率がゼロと完全合成の場合の合計3ケースを計算した(図17参照)。@300の結果は、合成率ゼロの場合と比較して、89LCN12、235LCN12ともに約10%程度の耐力上昇を示している。完全合成の場合と比較すると、89LCN12では約70%、235LCN12では約90%の耐力となる。このように、標準的な@300で10%程度の最大耐力の上昇を見込めること、また、高さの低い溝形鋼では一層の耐力上昇が可能であることが分かる。更に合成効果を発揮させるためには、溝形鋼と合板の接合度の向上が必要となるが、ドリルねじ本数の増大は施工性を低下させるため、ドリルねじ1本当たりの耐力を向上させたり、接着剤を適用したりすることなどが今後の課題になる。

なお、高さの高い溝形鋼(例えば235LCN12)では、提案した評価法の妥当性を検証していないこと、更には合成効果が大きくなると終局耐力時に引張側鋼材のひずみ値と降伏領域が大きくなることなどが危惧されるため、別途実験での調査が必要である。

## 5. 座屈拘束効果を考慮したパネルの負曲げ耐力

本章では、負曲げを受けるパネルの座屈拘束効果について、弾性座屈解析に基づいて考察を加え、パネルが負曲げを受ける場合の耐力評価法を提案する。なお、3章で述べた負曲げ時における面材と溝形鋼の合成効果は小さいため考慮していない。

### 5.1 弾性座屈解析とゆがみ座屈

パネルの座屈特性をより詳細に調査するために、3章で示した負曲げの試験体を対象とした弾性座屈解析を行った。解析は、シドニー大学で開発された有限帯板要素法(FSM)に基づく弾性解析プログラムTHIN-WALL<sup>14,15)</sup>を使用した。このプログラムでは、部材軸方向の座屈モードを正弦関数の半波で、部材軸直交方向を多項式で近似した帯板要素を使用しており、部材の断面をこの帯板要素で分割して評価している。なお、この解析では部材軸方向の断面形状、板厚、作用する応力は一律として仮定している。

対象とする負曲げ状態のパネルの解析モデルを図18に示す。ここでは、合成効果を無視しているため、溝形鋼ウエブ中央を中立軸Nとした純曲げ状態の応力分布を仮定している。またモデル化に当たっては、ドリルねじ接合部に相当する部分は合板による拘束を考慮するため、x方向とy方向の変位と、z軸回りの回転を拘束している。部材長さ( $L_b$ 、座屈長と呼ぶ)を変化させて解析を行い、座屈長の変化による座屈強度と座屈モードの変化を調査した。

負曲げ状態のパネルの解析に加えて、比較のために、合板の拘束を除いた解析(合板なし)と曲げモーメントの作用方向が反対となる正曲げ状態の解析(正曲げ)も併せて行った。正曲げの解析において

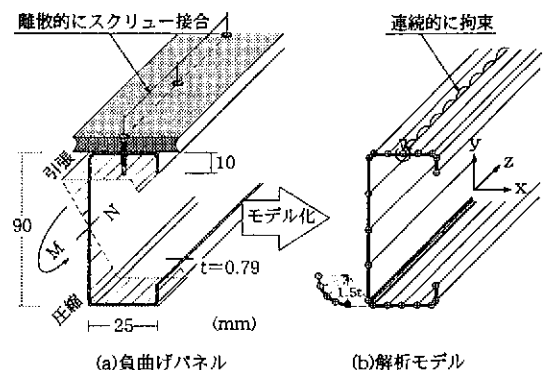


図18 座屈解析のモデル化

は、実際には合成効果により中立軸が移動するが、ここではこれを無視している。縦軸に溝形鋼最外縁の応力度で表した弾性座屈強度 $\sigma_{cr}$ をとり、横軸に部材長さをとった3ケースの解析結果を図19に示す。図中には、各ケースで出現する特徴的な座屈のモードも併せて示す。負曲げでは、座屈長の増大に伴って、局部座屈(モード1-2)からフランジ全体が横に倒れる座屈(モード2-2)へ移行し、更にウェブが横に倒れる座屈(モード4)へ進展していく様子が分かる。モード2-2とモード4の断面の変形を伴う座屈は、負曲げ試験で観察されたモードと類似しており、座屈解析は実際の座屈モードを良く評価していると考えられる。

一方、溝形鋼単独の場合(合板なし)では、モード1とモード2は負曲げのケースと同様であるが、座屈長が大きくなるとモード3の横座屈に移行する様子が分かる。

これらの結果から、溝形鋼の引張フランジ側に接合された合板は、横座屈(モード3)の発生を抑え、断面の変形を伴うような別の座屈モード(モード4)を励起させて、より大きな座屈耐力を発揮させる効果を持つことが理解できる。なお、溝形鋼単独の場合では座屈長が長くなると座屈強度は単調減少する性状を持つが、合板の拘束によって、極値を持つ性状に移行することも大きな特徴である。モード4に代表される断面の変形を伴う座屈は、Distortional Buckling(以下、ゆがみ座屈と呼ぶ)<sup>10,16-18)</sup>と呼ばれ、局部座屈や全体座屈とは区別して取り扱われており、近年精力的な研究が行われている。

図19に示す正曲げのケースでは、負曲げ、合板なしのケースと特徴を異にしている。この場合、圧縮を受ける部分が合板によって直接拘束されているため、ゆがみ座屈や横倒れ座屈は発生せず、局部座屈のみが生じることになる。この結果も3章の実験観察と合致している。

以上のように、負曲げのケースでは、合板の拘束により横座屈が拘束されて別のモードであるゆがみ座屈が生じ、これが座屈耐力を上昇させる要因になることが分かった。現状の鋼構造関連の設計指針<sup>5,12,18)</sup>では、このようなゆがみ座屈は評価の対象外であるため、これを適切に考慮できる耐力評価法が必要となる。

5.2 ゆがみ座屈を考慮した耐力評価

パネルの負曲げ耐力評価においては、一般的な座屈耐力の評価と同様に、弾性座屈耐力が基本となる。図20は、図19の負曲げの弾性座屈解析結果のうち、ゆがみ座屈の結果だけを取り出したものである。しかし、これを直接耐力評価の基本とすることはできないこ

とに注意を要する。適用した有限帯板要素法では、座屈解析が簡易であるという特徴を持つものの、帯板要素の応力作用方向の座屈モードを正弦関数の半波で近似しているため、複数の座屈モードが同時に発生するような複雑なモードは評価できない欠点がある。従って、解析結果から実際の弾性座屈強度曲線を得るためには、“ある座屈長で発生する座屈モードと強度は、その座屈長以下で強度が最小になる点によって決定される”ことを考慮する必要がある。具体的には、図20の破線で表した包絡曲線が実際の弾性座屈強度を示し、座屈耐力評価の基本となる。図20の破線によれば、Aの領域はモード2で、Bの領域はモード4で支配されることになる。

座屈耐力の評価に当たっては、柱の曲げ座屈などと同様に、素材の降伏、初期不整、残留応力の影響と局部座屈との連成を考慮する必要がある。中心軸圧縮を受ける柱の曲げ座屈<sup>19)</sup>を例にとると、素材の降伏、初期不整、残留応力の影響は、Johnsonの放物線式<sup>19)</sup>に代表される実験式の適用によって弾性座屈耐力値と素材の降伏点から算出することで考慮している。また、局部座屈との連成は、降伏等を考慮した座屈強度(応力度)と有効幅に基づいて求めた断面積を乗じて座屈耐力として考慮している。ゆがみ座屈と局部座屈の連成については不明な部分も多いが、本報では、柱の場合と同様な方法で考慮した。なお、ゆがみ座屈に対する同様な評価法は、溝形鋼柱や薄板屋根を対象にKwon<sup>19)</sup>やSerrette<sup>18)</sup>によって既に示されている。

図21に、本報で提案するゆがみ座屈耐力の評価法をまとめて示す。参考のため、合板の拘束効果を考慮しない現状の横座屈耐力の評価法<sup>5,12)</sup>も示す。ステップ1の弾性ゆがみ座屈強度の算出法は、

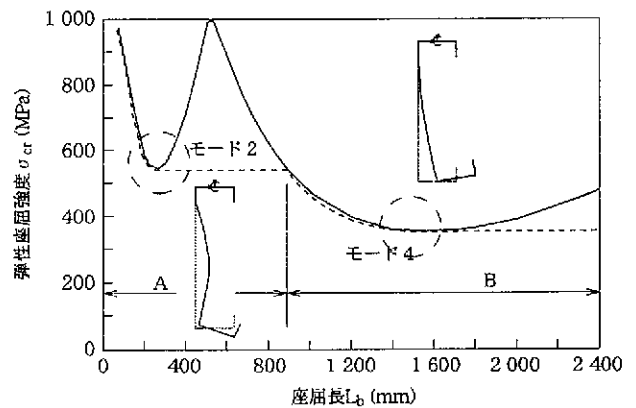


図20 ゆがみ座屈強度とモード

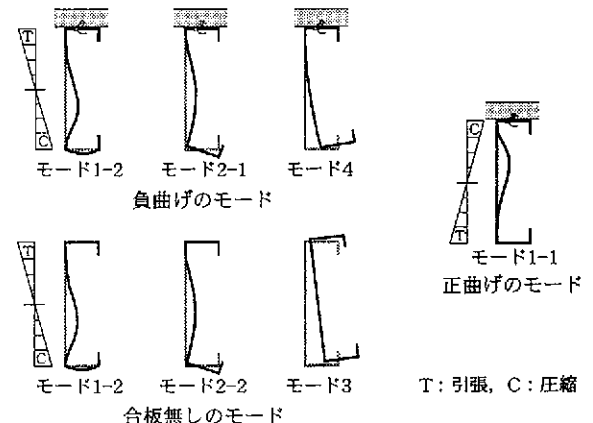
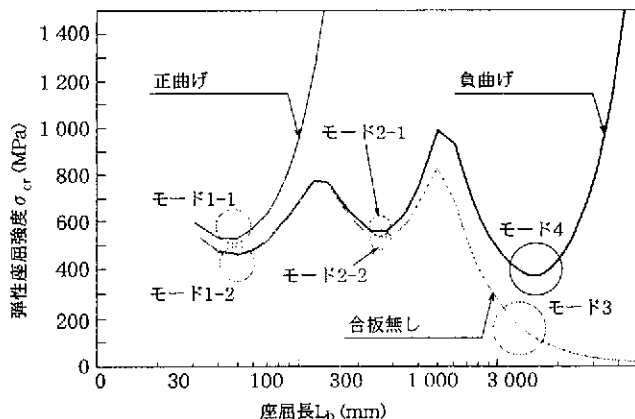


図19 弾性座屈強度と座屈モード



座屈耐力の評価法 (溝形鋼の場合)	提案するゆがみ座屈耐力の評価法
ステップ1: 弾性座屈強度の計算	
弾性横座屈強度 $\sigma_{cre} = \frac{1}{2} C_1 \pi^2 E / (L_b / i)^2$ $C_1$ : モーメント分布の影響を示す係数 $i$ : 断面二次半径, $E$ : ヤング係数	弾性ゆがみ座屈強度 $\sigma_{crd} = \left\{ \begin{array}{l} \text{座屈モデルに基づく計算} \\ \text{FEMに基づく計算} \\ \text{FSMに基づく計算等} \end{array} \right\}$
ステップ2: Johnson式を基本とする座屈強度 $\sigma_{cr}$ の計算	
$\sigma_{cre} > 0.6 \sigma_y$ のとき $\sigma_{cr} = \sigma_y \left( 1.1 - 0.3 \frac{\sigma_y}{\sigma_{cre}} \right) \leq \sigma_y$ $\sigma_{cre} \leq 0.6 \sigma_y$ のとき $\sigma_{cr} = \sigma_{cre}$	$\sigma_{crd} > 0.5 \sigma_y$ のとき $\sigma_{cr} = \sigma_y \left( 1 - 0.25 \frac{\sigma_y}{\sigma_{crd}} \right) \leq \sigma_y$ $\sigma_{crd} \leq 0.5 \sigma_y$ のとき $\sigma_{cr} = \sigma_{crd}$
ステップ3: 局部座屈との達成を考慮した曲げ耐力 $M_{cr}$ の計算	
曲げ耐力 $M_{cr} = Z_e \sigma_{cr}$ $Z_e$ : 有効幅に基づいて計算した断面係数	

図21 提案する座屈耐力評価法と溝形鋼

本報では先に説明した有限帯板要素法(FSM)による(図20の破線の結果となる)。ステップ2のJohnson式に基づく座屈強度の計算で、左右の式中の係数が若干異なっているが、これはSerretteら<sup>17)</sup>やAISIの冷間成形鋼構造の知見<sup>11)</sup>を反映させたためであり、加工硬化や比例限度の評価の差によって生じている。 $\sigma_y$ は素材の降伏点であり、設計においてはF値を用いる。ステップ3の $Z_e$ は、F値(実験値との比較では $\sigma_y$ とする)に対応する有効幅<sup>19,5)</sup>を仮定して計算した有効断面係数である。

図21に基づいて計算したゆがみ座屈耐力と3章で説明したパネルの負曲げ試験結果に基づいて、曲げ耐力と座屈長との関係を比較して図22に示す。図22には、本報では説明していない別シリーズで実施した実験結果(図中のハッチングを施した丸印)と面材による拘束効果を見無視した場合の計算耐力(図21の横座屈耐力の評価法で算出)も示している。提案した評価法に基づく計算値は、実験値と良く対応している。また、合板の拘束効果を見無視した場合と比較して、座屈長の大きな領域では、提案する評価法を用いることで経済的な設計が可能となることも分かる。

なお、実設計におけるゆがみ座屈耐力の評価に当たっては、正確な座屈長を与えるのが困難であるため、図20に示したモード2と4のいずれか小さい耐力を弾性ゆがみ座屈耐力として、座屈長によらない評価を行うことが必要であると考えられる。

### 5.3 スチールハウスでの具体的な検討<sup>20)</sup>

スチールハウス用の床根太、たるきなどの溝形鋼を対象として、前節の評価法に基づいた検討を行った。対象とした溝形鋼は、高さが異なる235LCN12(C235×40×20,  $t=1.2$ )、140LCN12(C140×40×12,  $t=1.2$ )、89LCN12(C89×40×12,  $t=1.2$ )の3種類とした。文献5)に基づいて、F値=280MPaとして計算した短期許容曲げ応力度 $\sigma_{cr}$ と座屈長 $L_b$ の関係を図23に示す。参考のため、面材の拘束を考慮しない場合の $\sigma_{cr}$ も示している。溝形鋼の高さが大きいほど $\sigma_{cr}$ の値が小さくなる傾向が見られるが、最低でも

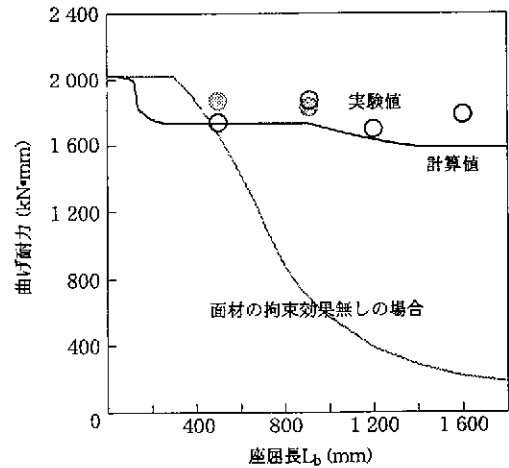


図22 実験値と計算値の比較

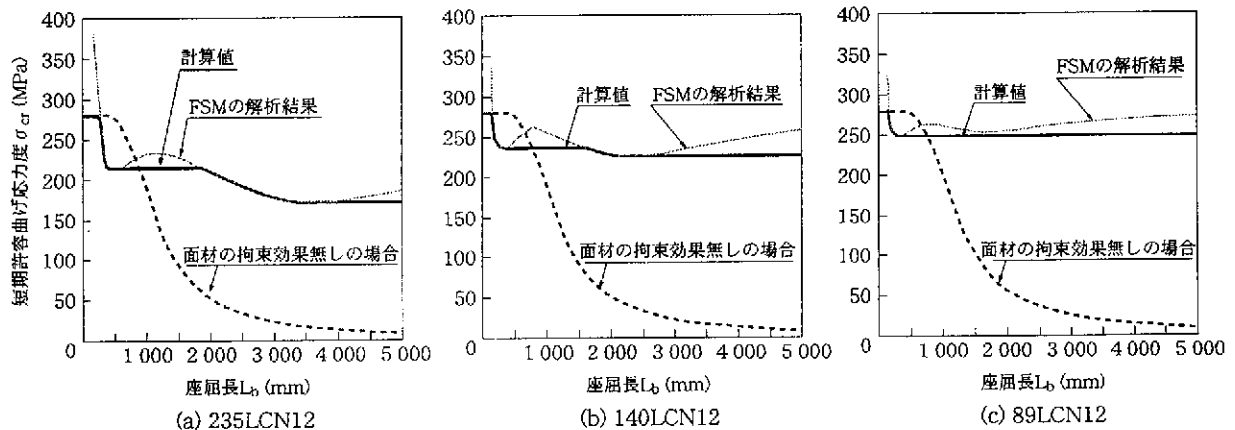


図23 負曲げを受けるスチールハウス部材の短期許容曲げ応力度と座屈長の関係

F値の50~90%の値に留まることが分かる。高さの影響は、高さの増加につれて、フランジ部が側方に倒れやすくなるためであると考えられる。また、座屈長1mを越えるあたりから、面材の拘束効果が顕著になる傾向も分かる。なお、235LCN12の様な高さの大きな溝形鋼への提案式の適用性は、現状十分に確認されていないため、今後実験などでの検討が必要である。

## 6. 結言

本報で、スチールハウスの屋根や床に代表される溝形鋼と合板をドリルねじで接合したパネルを対象として、その構造特性を実験、解析によって調査し、合成効果や座屈拘束効果を適正に反映した設計法を提案した。得られた成果は、スチールハウスの経済設計と薄鋼板部材の耐力向上を可能とするものである。以下に、本研究で得られた成果をまとめて示す。

- 1) パネルの曲げ試験を通じて、溝形鋼と合板の合成効果や合板による溝形鋼の座屈拘束効果はかなり大きいことを定量的に示すとともに、これら効果を考慮した設計法の必要性を明らかにした。
- 2) 正曲げを受けるパネルでは、溝形鋼の横座屈は十分に拘束されることを実験、解析で示した。また、負曲げを受けるパネルでは、溝形鋼と合板の合成効果は小さいことを指摘した。
- 3) 溝形鋼と合板の合成効果を考慮した耐力評価法を提案し、その妥当性を確認した。提案した評価法では、不完全合成の場合のパネルの耐力評価も可能である。この評価式を標準的なスチールハウスの仕様に適用した場合の効果も示され、約10%程度の耐力増加が期待できること、高さの小さな溝形鋼では、更なる耐力増大が可能であることを示した。
- 4) 負曲げを受けるパネルにおいて、引張側の合板は、溝形鋼の横座屈を拘束して異なるモードの座屈(ゆがみ座屈)を励起して、耐力を上昇させる効果を持つことを明らかにした。また、弾性座屈解析に基づく座屈耐力評価法を提案し、その妥当性を確認するとともに、スチールハウスにおける実用上の効果も定量的に示した。

## 参考文献

- 1) 建設省住宅局監修：枠組壁工法建築物構造計算指針。1992年。日本ツーバーフォー建築協会。1992。645p.
- 2) 鋼材倶楽部：鋼材倶楽部規格 建築構造用表面処理軽量形鋼。鋼材倶楽部。1997.7。21p.
- 3) 鋼材倶楽部：鋼材倶楽部規格 スチールハウス用ドリルねじ。鋼材倶楽部。1997.6。26p.
- 4) Kawai, Y., Kanno, R., Hanya, K.: Cyclic Shear Resistance of Light Gauge Steel Framed Walls. Structures Congress '97, 1997, ASCE, p.433-437
- 5) 鋼材倶楽部：スチールハウス構造計算指針'1997.5 改訂版。鋼材倶楽部。1997.5
- 6) 半谷、菅野：冷間成形薄板溝形鋼と構造用合板をスクリー接合した合成パネルの曲げ試験。日本建築学会学術講演会梗概集。1996
- 7) 半谷、菅野：薄鋼板溝形鋼と構造用合板からなる合成パネルの曲げ耐力(その1~その3)。日本建築学会学術講演会梗概集。1997.9
- 8) Hanya, K., Kanno, R., Kawai, Y.: Study on Composite Panels consisting of Cold-formed Steel Channels and Plywood with Self-drilling Screws. Structures Congress '97, 1997, ASCE, p.428-432
- 9) Yu, Wei-Wen: Cold-Formed Steel Design. 2nd ed. John Wiley & Sons, 1991, 631p.
- 10) Hancock, G.J.: Design of Cold-Formed Steel Structures. 2nd ed. Australian Institute of Steel Construction, 1988, 240p.
- 11) American Iron and Steel Institute: Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. 1986 Edition with 1989. Addendum, AISI, 1989, 82p.
- 12) 日本建築学会：軽鋼構造設計施工指針・同解説。1985, 215p.
- 13) Johnson, R.P.: Composite Structures of Steel and Concrete. Vol.1. 2nd ed. Blackwell Scientific Publications, 1994, 210p.
- 14) The University of Sydney, School of Civil and Mining Engineering: THIN-WALL Ver. 1.2 A Computer Program for Cross-Section Analysis and Finite Strip Buckling Analysis of Thin-Walled Structures. 1995, 27p.
- 15) Papanagelis, J.P., Hancock, G.J.: Computer Analysis of Thin-Walled Structural Members. Computers and Structures. 56(1), 157-176 (1995)
- 16) 加藤、秋山：上フランジを連続拘束されたH形断面鋼梁の弾性横座屈。日本建築学会論文報告集。(232), 41-49(1975)
- 17) Kwon, Y.B., Hancock, G.J.: Tests of Cold-Formed Channels with Local and Distortional Buckling. J. of Structural Engineering. 117(7), 1786-1803(1992)
- 18) Serrette, R.L., Pekoz, T.: Distortional Buckling of Thin-walled Beams / Panels, I Theory and II Design Methods. J. of Struc. Eng. 757-776 (1995)
- 19) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針 1996改訂。1996.1, 367p.
- 20) 半谷、菅野：スチールハウス用薄板溝形鋼の負曲げ耐力。日本建築学会学術講演会梗概集。1998.9