

工場・倉庫向け新鉄骨システムの開発

～軽量化と経済性を追求した新しいシステム建築鉄骨構造～

Development of New Steel Structure for Low-rise Buildings
 ～New pre-engineered lightweight and economical Steel Structure～

中村 泰教 Yasunori NAKAMURA
 技術開発第一研究所 構造商品開発室
 シニアマネジャー

引野 剛 Tsuyoshi HIKINO
 建築・鋼構造事業部 鋼構造ソリューション部
 鋼構造技術室 鋼構造開発グループ マネジャー

大場 高秋* Takaaki OOBA
 建築・鋼構造事業部 鋼構造ソリューション部
 構造設計室 シニアマネジャー

市川 康 Yasushi ICHIKAWA
 建築・鋼構造事業部 鋼構造ソリューション部長

抄 録

当社のシステム建築商品「スタンパッケージ®」は、2012年6月に「スタンパッケージ R™」としてハード、ソフト両面から全面的にリニューアルされた。新商品の最大の特徴は、当社が独自に開発した新鉄骨部材の「SP ウェーブフレーム®」を採用していることである。SP ウェーブフレーム®は、主要構造部材の柱及び梁部材であり、波形に成形した薄肉鋼板をフランジ鋼板で挟み込んだ断面で構成され、従来のH形鋼と比べて大幅な軽量化を図っている。本稿では、構造実験に基づいたSP ウェーブフレーム®の基本的な構造性能について報告する。併せて、母屋、胴縁等に用いるC形薄板軽量形鋼のSPL ビーム™についても構造的な特徴について報告する。

Abstract

“Stan-Package”, pre-engineered building developed by Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., Ltd.(NSENGI) has been renewed as “Stan-Package R” with a reformation of both product and design in June 2012. The most distinctive feature of “Stan-Package R” is a new steel frame called “SP Wave-frame” which has been originally developed by NSENGI. This new steel frame is composed of columns and girders, and its member has a corrugated thin web plate and flat flange plates at the both ends of the web. It is realized that the new member is very lighter than conventional H-shape member. This paper shows the fundamental structural characteristics of “SP Wave-frame”, being based upon the result of experiments. Besides, it is reported that structural characteristic of “SPL-beam” which has been developed as purlins and furring strips.

1 緒言

「システム建築」とは、建築物を構成する部材(骨組、屋根、壁、建具等)の形状、寸法、接合方法、納まりを標準化し、建築生産プロセス(設計・製作・施工)をシステム化、省力化した工業化製品の

総称で、高品質、短工期、低価格を特徴とする。

当社では、図1に示すように、商品開発から生産体制整備までをプレエンジニアリングと捉え、更に販売体制を整備した独自のシステム建築である「スタンパッケージ®」を1972年に商品化している。スタンパッケージ®は、主に工場・倉庫向けの建築物

を中心に、構造体、仕上げ材等の建築各部分の独自商品化、IT技術の活用、及び設計施工の徹底した標準化により高い品質の建築物を短工期かつ低価格で提供してきた。そして2012年6月スタンパッケージ[®]は、品質、工期、価格を更に追求し、「スタンパッケージRTM」としてハード、ソフト両面から全面的にリニューアルしている。本稿では、スタンパッケージRTMに導入した新鉄骨システムの技術について述べる。

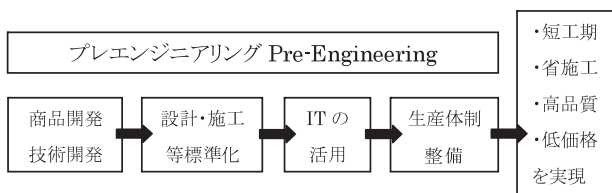


図1 システム建築の概要
Fig. 1 Outline of pre-engineered building

2 新鉄骨システム

図2にスタンパッケージRTMの骨格部分である新鉄骨システムを示す。新鉄骨システムは新しく開発した柱及び梁部材のSPウェーブフレーム[®](図3参照)と、2次部材として用いるSPLビームTM(図4参照)から構成される。

SPウェーブフレーム[®]は、波形に成形された薄肉鋼板ウェブを、フランジ鋼板で挟み込んだ波形ウェブ鉄骨で、フランジとウェブを片側隅肉溶接で接合することを特徴とした鉄骨部材である。波形鋼板は、その幾何学的な形状効果によって同厚の平板と比べて、面外剛性、面内せん断剛性が高く、ウェブに適用することで、ウェブ厚の薄肉化が可能であり、部材の軽量化、施工性の向上、及び使用鋼材の低減が期待できる。図2に示されるような小屋物建家(平家建て)においては、一般に部材は曲げモーメントや変形から決定され、通常のH形鋼ではせん断耐力が過剰になる場合が多い。SPウェーブフレーム[®]は薄いウェブ厚のまま梁成を大きくし、大きな曲げ耐力を確保出来る部材であり、このような建物では効果的な部材であると言える。例えば表1に示すように、ほぼ同等の断面二次モーメントのH形鋼とSPウェーブフレーム[®]の部材重量を比較すると、SPウェーブフレーム[®]の方が圧倒的に重量

を軽くできる。

SPLビームTMは、母屋・胴縁等に用いるC形薄板軽量形鋼である。1.6mmから2.2mmの薄肉の溶融亜鉛メッキ薄板から加工し、母屋・胴縁に適した耐力となるよう薄肉のまま大きな部材成とし、軽量化を図っている。

以上のように新鉄骨システムでは、部材に薄板を用いることで軽量化を図っており、従来に比べて使用鋼材量を約30%低減することに成功し、環境負荷軽減にも寄与している。



図2 新鉄骨システム(写真)
Fig. 2 New pre-engineered steel structure (Photo)



図3 SPウェーブフレーム[®](写真)
Fig. 3 SP Wave-frame (Photo)



図4 SPLビームTM(写真)
Fig. 4 SPL-beam (Photo)

表1 重量比較
Table 1 Comparison of weight

| | H形鋼 | SPウェーブフレーム [®] |
|------------------------------|----------------|-------------------------|
| 部材サイズ | H-450x200x9x14 | W-600x150x2.2x12 |
| 断面二次モーメント (cm ⁴) | 32,900 | 31,121 |
| 単位重量 (kg/m) | 74.9 | 39.8 |

3 SPウェーブフレーム[®]

ここでは、SPウェーブフレーム[®]の波形ウェブ鉄骨部材の曲げ性能とせん断性能に関して座屈の観点から記述する。

3.1 せん断曲げ実験について

3.1.1 実験の目的

波形ウェブ鉄骨部材の片持ち梁によるせん断曲げ実験を行い、波形ウェブ梁の座屈特性、崩壊機構を明らかにすることを目的とする。

3.1.2 実験概要

逆対称曲げを受ける中間補剛された梁を想定し、その半スパンを取り出した片持ち梁のせん断曲げ実験を行った。図5に実験概要を示す。固定端側(下端)では試験体はエンドプレートに溶接され高力ボルトで固定される。荷重載荷側(上端)では面外方向変位、回転、振りを拘束している。また、部材の中央部では横座屈防止のために面外補剛を行っている。荷重は、単調載荷を基本としている。

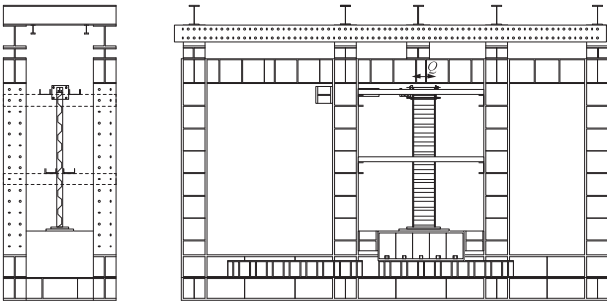


図5 実験概要(写真)
Fig. 5 Outline of experiment (Photo)

3.1.3 試験体

図6に試験体図、表2に試験体諸元を示す。試験体は実大スケールの1/1.5スケール(D=600mm成に対して)の縮小試験体で、試験体パラメータはフランジ幅、厚さ、ウェブ厚さ、フランジとウェブの溶接範囲である。フランジとウェブの組立溶接は、片側隅肉溶接である。

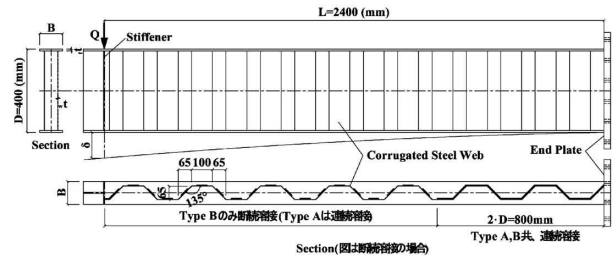


図6 試験体図
Fig. 6 Details of specimen

表2 試験体諸元
Table 2 Dimensions of specimen

| No. | 試験体名称 | D (mm) | B (mm) | wt (mm) | it (mm) | L (mm) | $r\sigma_y$ (N/mm ²) | $w\sigma_y$ (N/mm ²) | 溶接 |
|-----|------------|--------|--------|---------|---------|--------|----------------------------------|----------------------------------|----|
| 1 | 1.6_9A | 400 | 110 | 1.6 | 9 | 2.4 | 320 | 354 | 連続 |
| 2 | 1.6_9_165A | | 165 | 1.6 | 9 | | 320 | 354 | |
| 3 | 1.6_12A | | 110 | 1.6 | 12 | | 335 | 354 | |
| 4 | 1.6_16A | | 110 | 1.6 | 16 | | 349 | 354 | |
| 5 | 1.6_9B | | 110 | 1.6 | 9 | | 320 | 354 | 併用 |
| 6 | 1.4_9B | | 110 | 1.4 | 9 | | 320 | 289 | |

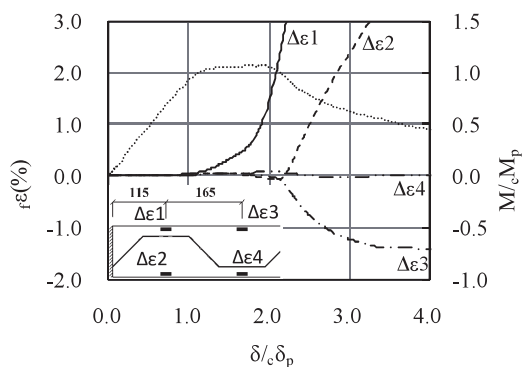
D 部材成(=400mm) L 部材長さ
B フランジ幅 $r\sigma_y$ フランジ降伏強度(引張試験結果)
wt ウェブ厚 $w\sigma_y$ ウェブ降伏強度(引張試験結果)
it フランジ厚 溶接 フランジとウェブの組立溶接
試験体名称: (ウェブ厚)_(フランジ厚(幅))_(A,B)
A: 連続溶接, B: 連続・断続溶接併用

3.1.4 実験結果

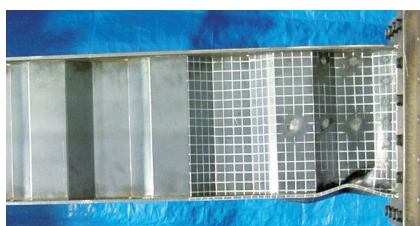
フランジ座屈歪について

図7(a)及び図8(a)に曲げモーメント-変位関係と共に、圧縮側フランジの座屈歪進展状況を示す。縦の右軸は、曲げモーメントの指標で、片持ち梁先端の荷重荷重Qに部材長さLを乗じた曲げモーメントMを式(1)に示す全塑性曲げモーメント cM_p で無次元化している。縦の左軸は、 $\Delta\epsilon 1 \sim \Delta\epsilon 4$ の指標で、フランジ両面に貼付した歪ゲージ値の差である。正側はウェブに引き込まれる方向にフランジの座屈変形が進展していることを意味する。横軸は、荷重点水平変位 δ を cM_p に対する弾性変位 $c\delta_p$ (式(2))で無次元化している。ここで、 iZ_p はフランジのみの塑性断面係数、 $i\sigma_y$ はフランジの降伏強度、 eK は初期剛性で実験値である。

曲げモーメント-変位関係から、いずれも全塑性曲げモーメント cM_p を確保できており、フランジが全塑性曲げモーメント cM_p を發揮するまでウェブによりフランジが座屈拘束されていることが分かる。フランジとウェブの溶接が連続、断続に関わらず全ての試験体について同様である。次に耐力低下後の最終破壊状況について述べる。曲げ型の試験体であ

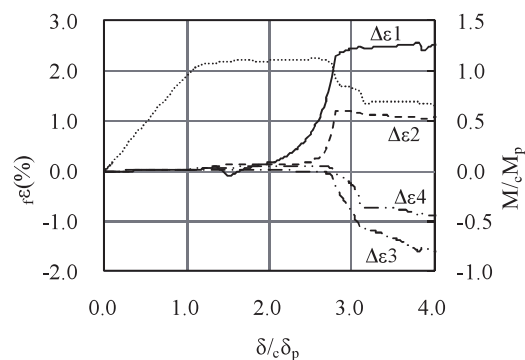


(a) フランジ座屈進展状況
(a) Condition of the progress of flange buckling

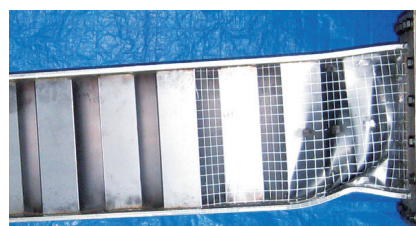


(b) 崩壊形式：曲げ型(写真)
(b) Collapse mode: Bending mode(Photo)

図7 試験体1.6_9A
Fig. 7 Specimen 1.6_9A



(a) フランジ座屈進展状況
(a) Condition of the progress of flange buckling



(b) 崩壊形式：曲げせん断型(写真)
(b) Collapse mode: Bending-shear mode(Photo)

図8 試験体1.6_12A
Fig. 8 Specimen 1.6_12A

る1.6_9Aでは図7(b)のようにフランジが捩れるように座屈変形している様子が分かる。試験体1.6_9_165Aや試験体1.6_9Bも同様の破壊形式となっている。破壊形式が曲げせん断型の試験体1.6_12Aでは図8(b)に示すように、フランジだけでなくウェブにも変形が進展し、最終的にはウェブ内側にフランジが座屈変形している。この破壊形式は試験体1.4_9Bも同様である。破壊形式がせん断型の1.6_16Aでは、図9のようにフランジの座屈変形は殆ど見られずウェブが座屈変形している。

曲げ型では、フランジ突出幅の広い側の $\Delta\epsilon_1$ と $\Delta\epsilon_3$ の座屈歪が増大、続いて狭い側の $\Delta\epsilon_2$ が $\Delta\epsilon_1$ と同じ側へと増大している。この結果から、最初フランジは突出幅の広い側で座屈変形が生じ、最終破壊状況ではウェブ内側に座屈することが分かる。この挙動は曲げせん断型でも同様である。 $\Delta\epsilon_1$ と $\Delta\epsilon_2$ の座屈歪の間隔を見ると、曲げ型に比べて曲げせん断型の方が近接し、かつ、傾きも大きいことから、ウェブに引き込まれるフランジ座屈変形の進行速度が比較的早いことが分かる。また、曲げせん断型の $\Delta\epsilon_1$ と $\Delta\epsilon_2$ の座屈歪の増加が頭打ちとなっていることから、歪ゲージ貼付位置付近にフランジ座屈変形が集中していることを示している。座屈変形



図9 破壊形式：せん断型(試験体1.6_16A)(写真)
Fig. 9 Collapse mode: Shear mode(Specimen 1.6_16A)(Photo)

は曲げ型と比べ局所的であり、最大耐力後の曲げモーメント-変位関係で劣化勾配が大きいことに現れている。

以上より、本部材のフランジ局部座屈はフランジ突出幅の広い側で生じ始めることが分かった。

$${}_cM_p = {}_tZ_p \cdot {}_t\sigma_y \quad \text{式(1)}$$

$${}_c\delta_p = {}_cM_p / {}_cK \quad \text{式(2)}$$

歪分布について

図10にウェブに貼付した3軸歪ゲージより得られた $0.8 \cdot {}_cM_y$ 時の主歪分布を示す。 ${}_cM_y$ ($={}_tZ \cdot {}_t\sigma_y$ 、 ${}_tZ$:フランジのみの断面係数)はフランジのみの降伏曲げモーメントである。いずれの試験体も計測位置において主歪は材軸方向に対してほぼ 45° となっている。

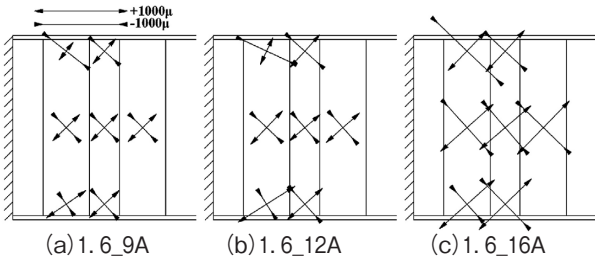
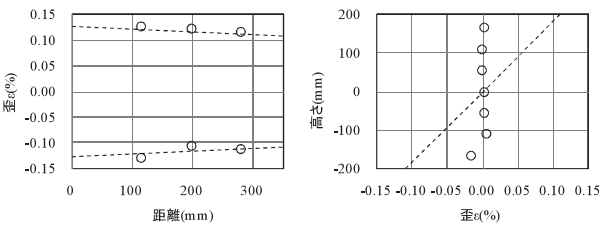


図10 ウェブ主歪分布(0.8・ M_y 時)
Fig. 10 Distribution of principal strain of web(in case of 0.8・ M_y)

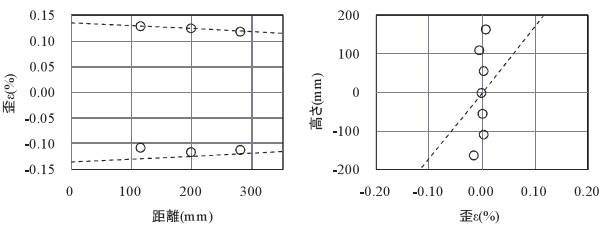
図11及び図12はフランジ、ウェブに貼付した1軸ゲージより得られた弾性域(0.8・ M_y 時)の材軸方向歪分布である。(a)フランジの横軸は固定端からの距離、(b)ウェブの縦軸はウェブ成で中心を0としている。図中の点線は、平面保持を仮定して算出した歪の理論値である。フランジの材軸方向歪はほぼ理論値と一致しているが、ウェブには殆ど材軸方向歪は生じておらず、曲げモーメントに抵抗していない。

以上の結果から、波形ウェブ鉄骨では、折り曲げ効果によって材軸方向力に対してウェブでは抵抗せずフランジのみで抵抗し、せん断力に対してはウェブで抵抗していると判断出来る。また、ウェブでは純せん断場が形成されていることも示される。



(a) フランジ (a) Flange
(b) ウェブ (b) Web

図11 材軸方向歪分布(0.8・ M_y 時) : 1.6_9A
Fig. 11 Distribution of strain along a member axis(in case of 0.8・ M_y) : Specimen 1.6_9A



(a) フランジ (a) Flange
(b) ウェブ (b) Web

図12 材軸方向歪分布(0.8・ M_y 時) : 1.6_12A
Fig. 12 Distribution of strain along a member axis(in case of 0.8・ M_y) : Specimen 1.6_12A

3.1.5 座屈耐力評価

前節に示したフランジ座屈歪の進展状況から、フランジ突出幅の広い側で、フランジ局部座屈耐力評価を行う。図13に示すフランジ突出幅の広い側に関して、ウェブで3辺を単純支持された板要素の純圧縮座屈耐力式で、フランジ局部座屈耐力を評価する。

$$f\sigma_{cr} = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h}\right)^2 \quad \text{式(3)}$$

$$k = 0.425 \quad \text{式(4)}$$

ここで、 $f\sigma_{cr}$: フランジの局部座屈応力度、 k : 3辺単純支持の純圧縮の場合の座屈係数、 E : ヤング係数、 ν : ポアソン比、 t : フランジ厚、 h : 突出幅の広い側のフランジ幅(図13参照)。座屈係数 k については、フランジ長さ方向を無限長とした最小値を採用する。

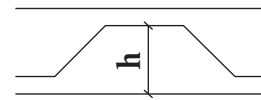


図13 フランジ突出幅
Fig. 13 Width of projecting side of flange

図14に、フランジ局部座屈耐力評価結果を示す。縦軸は、フランジ局部座屈応力度 $f\sigma_{cr}$ をフランジ降伏応力度 $f\sigma_y$ で基準化している。横軸はフランジ突出幅 h をフランジ厚 t で除した幅厚比を $\sqrt{(f\sigma_y/E)}$ で基準化している。図中実線は、式(3)で示される座屈曲線上の $f\sigma_{cr} = 0.6 \cdot f\sigma_y$ の点にて接線を引き、この接線と $f\sigma_{cr} / f\sigma_y = 1.0$ との交点を上限としたフランジ局部座屈耐力曲線である^{4), 5)}。また図中には、本せん断曲げ実験結果の他、圧縮及び等曲げ実験結果に

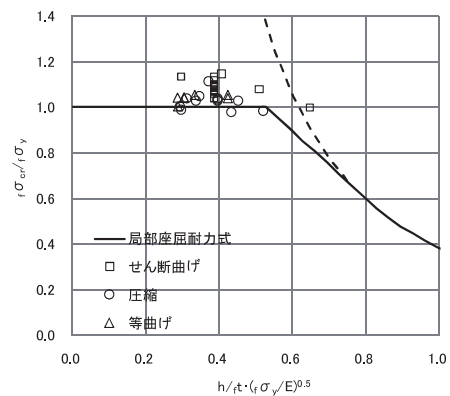


図14 フランジ局部座屈耐力評価
Fig. 14 Estimation of local buckling strength of flange

についてもプロットしている。プロットは最大耐力を t_{0y} で基準化した値である。実験を行った幅厚比範囲では、弾性範囲で局部座屈による耐力低下はなかった。本結果は図中の座屈耐力曲線との対応でも確認でき、ウェブがフランジのみの軸耐力を発揮するのに十分な座屈拘束を行えていることを表している。尚、圧縮及び等曲げ実験では、縮小試験体の他、実大スケール(ウェブ厚2.2mm)でも行っている。

3.2 せん断実験について

3.2.1 実験の目的

波形ウェブ鉄骨部材のせん断耐力を実大スケールにて確認する。

3.2.2 実験概要

実験は5000kN 圧縮曲げ試験機を用いた3点曲げの一方方向載荷である。図15に実験概要を示す。反力梁上に支点間距離3mの支点治具上に試験体を設置し、部材中央部に集中荷重を載荷する。荷重載荷点から左右に750mmの位置には、面外座屈止めを設置している。

3.2.3 試験体

図16に試験体、表3に試験体諸元を示す。実大部材断面の3種類のウェブ成476mm、626mm、776mmについて、ウェブ厚2.2mmでそれぞれ2体ずつせん断耐力確認、及びそのばらつきの確認を行う。

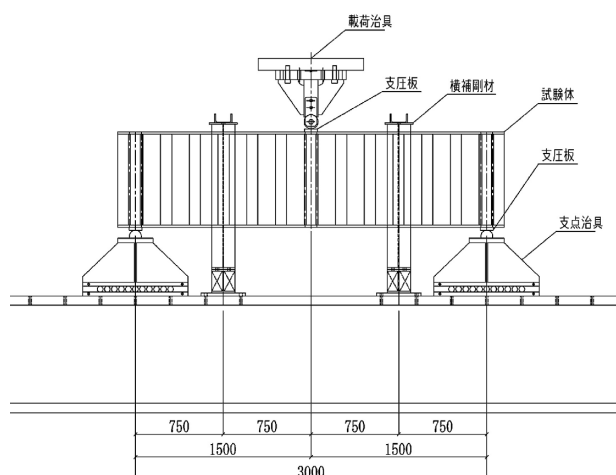


図15 実験概要
Fig. 15 Outline of experiment

表3 試験体諸元
Table 3 Dimension of specimens

| ウェブ成 (mm) | フランジ | | ウェブ | | | 降伏強度 (N/mm ²) | |
|--------------|--------|--------|-------|-------|-------|---------------------------|-----|
| | 厚×幅 | 鋼種 | 厚(mm) | 鋼種 | 成(mm) | フランジ | ウェブ |
| 476 | 19×200 | SM490A | 2.2 | SS400 | 476 | 382 | 359 |
| 626 | | | | | 626 | | |
| 776 | | | | | 776 | | |

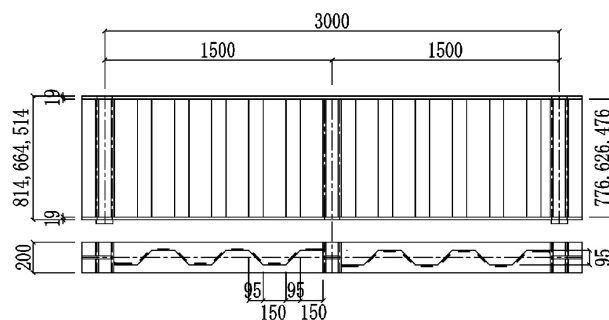


図16 試験体
Fig. 16 Details of specimen

試験体は、曲げ降伏が先行しないようなフランジサイズとしている。フランジとウェブの溶接は全線断続溶接としている。

3.2.4 実験結果

図17に全6試験体の最大せん断力の分布を示す。縦軸は、載荷荷重の1/2のせん断力、横軸はウェブ成である。いずれのウェブ成についても、2体の試験体で最大せん断力のばらつきは小さく安定している。本結果を基に最大せん断耐力の設定が可能であることを示している。尚、いずれの試験体についても、最大せん断耐力は、ウェブの降伏ではなく局部座屈で決定していた(図18(b)参照)。

図18にはウェブ成776mmの場合の(a)最大せん断耐力時、及び(b)荷重低下時のウェブ変形状況写真を示す。最大せん断耐力時直前においても、ウェブの面外変形は殆ど目視できず、最大耐力到達後荷重が低下する際に観察された。尚、(b)荷重低下時の変形状は、最大耐力到達後、ウェブに局部座屈が発生し荷重が低下した時点である。

以上、実大部材断面でウェブの局部座屈現象を確認し、ウェブの最大せん断耐力の確認を行った。本値を基に、設計で使用する、長期、短期、及び終局せん断耐力の設定を行うこととしている。

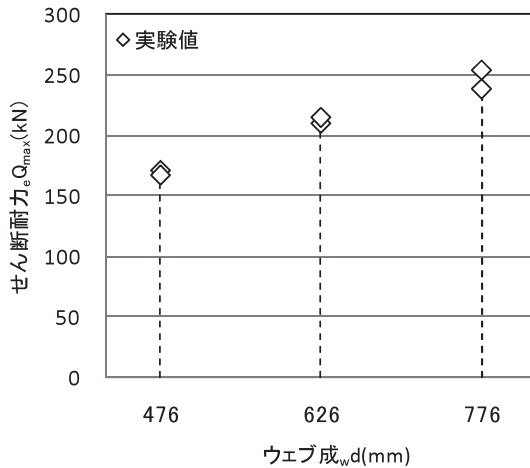


図17 最大せん断力分布
Fig. 17 Distribution of maximum shear force

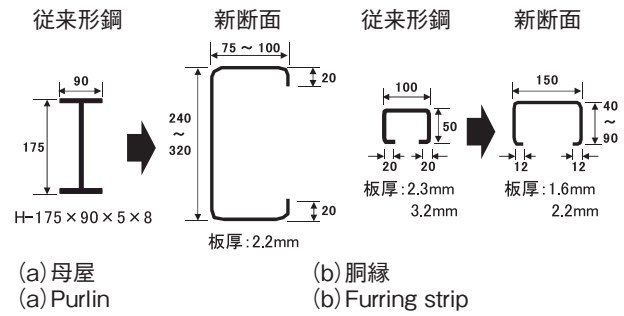


図19 SPL ビーム™ 形状
Fig. 19 Shape of SPL-beam



(a) 最大せん断耐力時 (b) 荷重低下時
(a) In case of max. shear force (b) In case of deterioration of shear force

図18 ウェブ変形状況(ウェブ成776mm) (写真)
Fig. 18 Condition of web deformation (web height 776mm) (Photo)

4 SPL ビーム™

SPL ビーム™ は、折板屋根を受ける母屋及びサイジング壁を受ける胴縁用として、新たに開発されたC型断面の部材である(図4参照:前出)。

図19に示すように、母屋及び胴縁のいずれについても、部材成を従来形鋼に比べて大きくすることによって、薄板(厚さ1.6~2.2mm)での部材構成を可能とし、それによって担保される大きな部材剛性から、胴縁ではスパン7m程度まで中間の間柱を省略することが可能となっている。この薄板を用いた軽量化によって、部材重量は、従来に比べ約60%と大幅に削減されている。さらに部材断面の種類として、板厚の違いの他、フランジ幅を細かく調整することによって、鋼材使用量を必要最小限としている。また、材質には、溶融亜鉛メッキ鋼板を採用し、軽量化だけではなく耐食性の向上も図っている。このように、SPL ビーム™ は、経済性と耐久

性を追求した新たな2次部材である。

5 結言

薄板をウェブに使用したSP ウェーブフレーム®について、構造実験を実施し、部材の基本性能を明らかにした。フランジ局部座屈耐力は、フランジの突出幅の広い側で、ウェブにより3辺を支持された純圧縮の局部座屈耐力式で評価出来ることを示した。ウェブについては、せん断座屈現象を実験で明らかにしせん断耐力設定を行った。

以上の結果を基に、SP ウェーブフレーム®の設計手法を確立するに至った。今後はシステム建築事業拡大のため、本部材を適用した「スタンパッケージR™」の普及に努め、更には適用範囲の拡大や改良・改善を図っていく予定である。

最後に、本部材の開発にあたり、構造実験等御指導頂きました東京工業大学准教授五十嵐規矩夫先生、技術指導頂きました東京大学名誉教授秋山宏先生に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中村泰教, 五十嵐規矩夫, 小坂圭祐; 波形鋼板ウェブ梁のせん断曲げ挙動(その1: 載荷実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 日本建築学会, pp. 651-652, 2011. 8
- 2) 小坂圭祐, 五十嵐規矩夫, 中村泰教; 波形鋼板ウェブ梁のせん断曲げ挙動(その2: 性能評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 日本建築学会, pp. 653-654, 2011. 8
- 3) 五十嵐規矩夫, 小坂圭祐, 中村泰教; せん断曲げを受ける波形鋼板ウェブ梁の塑性変形性能, 日本建築学会構造系論文集, 日本建築学会, Vol. 77, No. 673, pp. 443-451, 2012. 3
- 4) 鋼構造座屈設計指針, 日本建築学会, 2009. 11
- 5) 鋼構造設計規準, 日本建築学会, 2005. 9