

軽量圧延H形鋼短柱の最大強度に関する 実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE ULTIMATE STRENGTH OF
ROLLED H-SECTION STEEL STUB-COLUMNS

山尾敏孝* 青木徹彦** 崎元達郎***

By Toshitaka YAMAO, Tetsuhiko AOKI and Tatsuro SAKIMOTO

An experimental study on the ultimate strength of thin-walled rolled H-section stub-columns subjected to axial compression is performed. Forty specimens with various width-to-thickness ratio of the compression plates of the cross section and various height of stub-columns are tested. The measurement of residual stresses and geometric imperfections were taken accurately prior to testing. Based on the test results, interaction formulae for predicting the ultimate strength of thin-walled rolled H-section stub-columns under compression are proposed.

1. まえがき

軽量圧延H形鋼部材は近年の圧延製法技術の向上に伴い鋼材料の有効利用のために開発された部材で、従来の圧延形鋼部材に比べフランジおよびウェブの板厚が極めて薄く作られている。そのため、従来のH形部材より同一断面積における断面性能が優れており、また全製造過程が製鉄所内で高度に自動管理されているため、製品の均質化と高い寸法精度が期待できる。その反面これを土木構造物の圧縮部材として用いるときには構成要素の局部座屈の発生や腐食による断面減少などが問題になると思われる。

一般の鋼部材強度は、その最大応力を短柱圧縮実験等で得られた部材の降伏応力で無次元化して整理し、設計式等に反映させているが、全体座屈に先だて構成要素の局部座屈が生ずるような圧縮部材では、短柱であっても降伏強度に達しないため、局部座屈を生ずる短柱部材をその部材の見かけの降伏強度と見なして部材強度を低減係数Qで無次元化する、いわゆるQ-Factor法を用いて設計すると便利である。この方法では短柱圧縮強度が圧縮部材の基本強度として重要な役割を果たす。

薄肉部材の連成座屈に関する研究は我が国では溶接H形部材に関する研究が山尾、崎元¹⁾²⁾らにより、またコイル状の座屈実験が青木、福本³⁾により行われている。後者の実験結果にはほとんどばらつきは見られない。これは高周波加熱の場合、接合に要する入熱量が極めて小さく、従って残留応力やそのばらつきも小さかったためと思われる。

*	工博	熊本大学助教授	工学部土木環境工学科	(〒860	熊本市黒髪2-39-1)
**	工博	愛知工業大学教授	工学部土木工学科	(〒470-03	豊田市八草町)
***	工博	熊本大学教授	工学部土木環境工学科	(〒860	熊本市黒髪2-39-1)

本研究では、構成板要素が局部座屈を生じるような薄肉の軽量圧延H形鋼を圧縮材として用いるときに必要となる設計基本強度を、短柱強度の統計的分布特性から実験的に明らかにすることを主な目的としている。また、軽量圧延H形鋼の短柱強度に関する実験データはほとんどないのが現状であることより、この種の柱の部材に対して同一条件下の実験データを多く収集し、ばらつきの実態を把握する。また、最大強度は部材を構成する板の幅厚比、短柱の部材長の違い、初期たわみや残留応力などの初期不整が影響すると考えられるためこれらの測定を行った。最後に短柱の最大強度について2～3の評価式と実験結果の比較検討を行った。

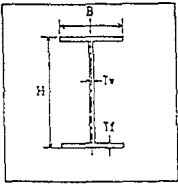
表1 供試体の公称断面諸元

Type	H (mm)	B (mm)	Tf (mm)	Tw (mm)	Area (cm ²)	Ix (cm ⁴)	Iy (cm ⁴)	r (cm)
A	150	100	4.5	3.2	13.73	551	75.0	2.34
B	200	100	4.5	3.2	15.33	1046	75.1	2.21
C	250	125	4.5	3.2	19.18	2068	147.0	2.76
D	250	150	4.5	3.2	21.43	2407	253.2	3.44

2. 実験供試体および実験方法

2.1 実験供試体

実験に使用する軽量圧延H形鋼短柱の公称断面寸法はJIS規格表より選んだもので、別途行った長柱実験と同じ公称断面寸法を有するA、B、C、Dの4タイプとする。断面公称寸法と他の公称断面諸元も表1に示す。供試体の材質はSS41クラスとする。圧縮実験に用いる供試体の長さは、長さによる圧縮強度の変化を調べるために、表2に示すように各断面タイプ毎にウェブ幅の1.5倍から4倍まで0.5倍刻みで変化させ、これを各1体づつの計6体及び細長比20の供試体4体の計10体とし、全部で40体製作した。実験の種類は予備実験としての(1)母材引張試験、(2)初期たわみの測定、(3)残留応力の測定と短柱圧縮実験からなる。



H= Height, B= Width
Tf, Tw= Plate Thickness of Flange and Web
Ix, Iy= Geometrical moment of inertia about X and Y axis
r= Radius of gyration of area about weak axis(Y)

表2 供試体の長さ及び本数

Type (H×B) (mm)	Length (mm) and (L/r)							Weight (kg/m)
	S20	S1	S2	S3	S4	S5	S6	
A (150×100)	468 (4)	225	300	375	450	525	600	10.8
	(20)	(9.1)	(12.8)	(16.0)	(19.2)	(22.4)	(25.6)	
B (200×100)	442 (4)	300	400	500	600	700	800	12.0
	(20)	(13.6)	(18.1)	(22.6)	(27.1)	(31.7)	(36.2)	
C (250×125)	552 (4)	375	500	625	750	875	1000	15.1
	(20)	(13.6)	(18.1)	(22.6)	(27.2)	(31.7)	(36.2)	
D (250×150)	688 (4)	375	500	625	750	875	1000	16.8
	(20)	(10.9)	(14.5)	(18.2)	(21.8)	(25.4)	(29.1)	

L/r= Slenderness ratio

2.2 予備試験と結果

(1) 母材引張試験

JIS 5号試験片の母材引張試験より得られたフランジ（各タイプ4本）、ウェブ（各タイプ2本）及びそれらの各部材断面面積の荷重平均による降伏応力（ σ_{yf} , σ_{yw} , σ_y ）を各タイプごとに表3に示す。降伏応力はSS41鋼材の基準降伏応力点 2400 kgf/cm^2 を大きく上回る平均降伏応力 $\sigma_y = 4107 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ が得られた。ヤング係数 $E = 2.14 \times 10^6 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.261$ となった。

表3 母材引張試験の結果

Type	σ_{yf} (kgf/cm ²)	σ_{yw} (kgf/cm ²)	σ_y (kgf/cm ²)
A	3891	4324	4075
B	4157	4457	4280
C	4337	4181	4270
D	3698	3939	3802
Specimens	16	8	
Mean	4021	4225	4107
S	286	200	278
Cov	7.1(%)	4.7(%)	6.8(%)

S: Standard Deviation
Cov: Coefficient of Variation

表4 最大初期たわみ量

Type	f_{0w}/H (Mean)	Cov	$f_{0\epsilon}/Bf$ (Mean)	Cov
A	0.896	48(%)	2.270	47(%)
B	1.827	28(%)	3.257	35(%)
C	0.808	32(%)	3.168	43(%)
D	0.877	44(%)	3.423	40(%)
Mean	1.102	38(%)	3.030	41(%)

Cov: Coefficient of Variation

(2) 初期たわみの測定

フランジ及びウェブの軸方向初期たわみの測定とフランジ、ウェブの板としての周方向初期たわみの測定の両者を行った。軸方向及び周方向とも測定は別途製作した測定装置のダイヤルゲージを用いた。

最大初期たわみ量(mm)と部材長との関係を図1に示す。部材長Lはウェブ高さHで無次元化している。どのタイプのフランジ及びウェブも最大初期たわみ量の長さに対する変化には一定に傾向がみられず、フランジとウェブではほぼ同程度の変形量であった。

ウェブの最大初期たわみ量について見ると、タイプ別ではタイプBが最も大きな値(0.458 mm)を示したが、それでも一般的なウェブ初期たわみ許容値 $H/250$ の約半分の大きさであった。他のタイプのほとんどのウェブ初期たわみは

$H/1000$ 程度の大きさであった。

初期たわみの値は最も大きなタイプBを除き、部材長が長くなると若干大きくなる傾向がみられたがばらつきも大きく変動係数の平均値は約 38%であった。フランジの最大初期たわみ量(0.343 mm)の場合も一般的許容値 $Bf/100$ の1/2程度の小さなものであった。長さに対する変化はほとんどなく、ばらつきが大きく変動係数の平均値は約 41%であった。各タイプのウェブおよびフランジ最大初期たわみの値および変動係数を表4に示す。

同表からわかるように各々の板幅による無次元化量はウェブに比べフランジが約3倍大きかった。

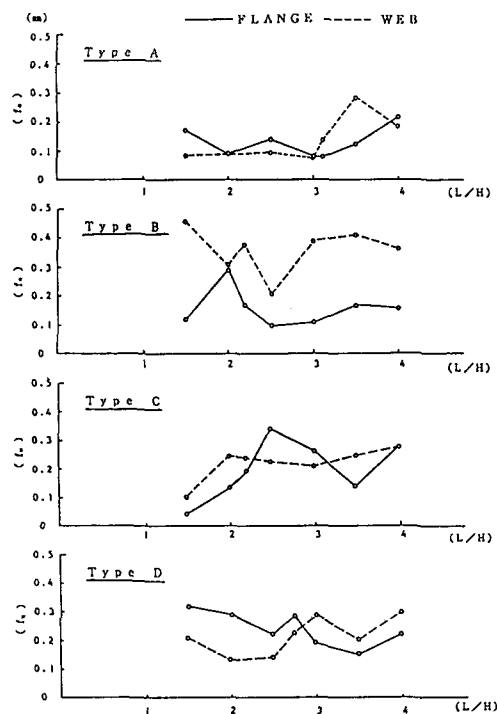


図1 部材長と最大初期たわみ量の関係

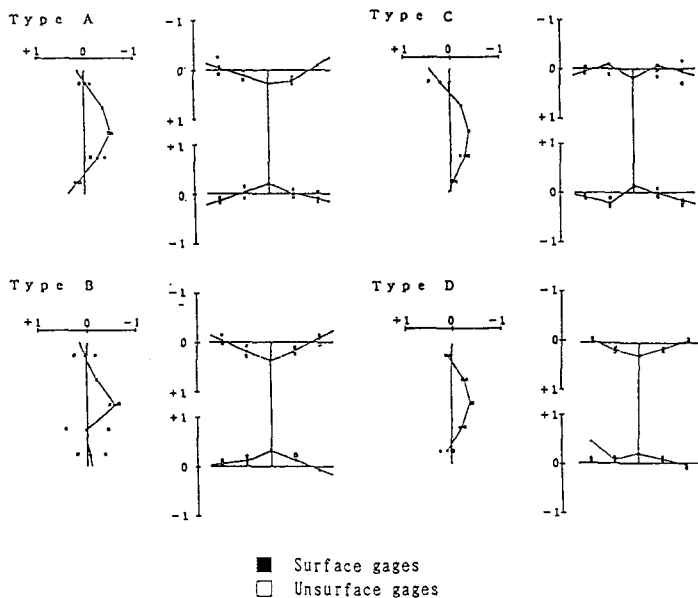


図2 各タイプの残留応力分布

(3) 残留応力の測定

残留応力測定結果を図2に示す。実線は表裏のひずみゲージによる値の平均値である。各タイプとも通常の圧延H形部材の残留応力分布形状と類似の分布結果が得られた。すなわち、フランジで三角形分布、ウェブでは放物線形であった。タイプCではローラーによる圧延工程および直線化仕上げ工程(Roller Straightening)の影響と思われる分布も見られた。最大圧縮残留応力の大きさはフランジ端部で $0.2\sigma_y$ 程度、ウェブ中央部で約 $0.5\sigma_y$ の大きさであった。

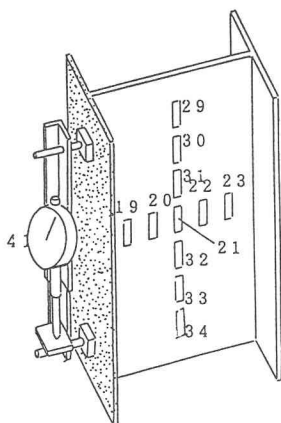


図3 ひずみゲージと変位計の取付け位置

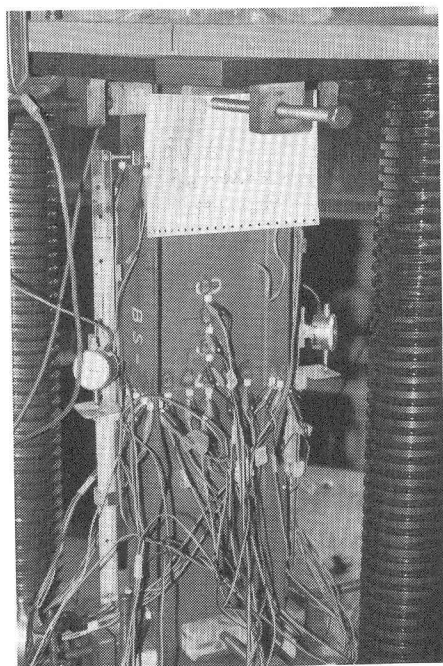


写真1 短柱試験の実験状況

2.3 実験方法

供試体の端面を平面に仕上げ、図3に示した位置にひずみゲージと変位計を付けた供試体を載荷装置に据え付ける。供試体に一樣な応力が導入されているかどうかチェックするため、同図に示していないが、部材端からフランジ半幅程度離れたフランジ表面上、上下各4点に整置用ひずみゲージを貼り付けた。そして予想最大荷重の20%程度の荷重を加えて整置用ひずみゲージの値を読み、各ひずみゲージの値と4点の平均値との差が最終的に全て3%以内に収まるまで供試体の下側にセットしてある2枚のくさび上の円盤(斜円盤)を回転し、載荷調整を繰り返した。

載荷は予想最大荷重(供試体の断面積と降伏応力の積の半分の荷重)の80%までは、予想最大荷重の10%間隔で載荷し、80%を過ぎてからはウェブ中央の位置のひずみゲージによるひずみ制御にかえた。特に、測定モニター画面上の曲線で変化がみられる部分や最大荷重付近が密に取れるように測定を行った。実験は荷重が最大荷重の2/3程度に低下するまで続けた。短柱圧縮実験の実験状況を写真1に示す。

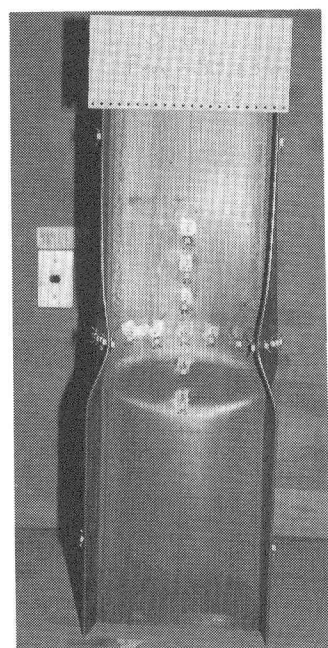


写真2 実験後の供試体

3. 実験結果とその考察

(1) 最大応力

最大応力を各タイプごとの断面平均降伏応力 σ_y で無次元化したものを表5に示す。また、写真2は実

験後の供試体の一例を示したものである。他の試験体もほとんどすべてが類似の崩壊状態を示した。最大応力は部材長の変化にかかわらずほぼ一定の結果を示した。表には各タイプごとの最大応力の平均値と変動係数を示しているが、最大応力の平均値 $\sigma u/\sigma y$ は 0.97~0.74の内にあり、変動係数は2.4(%)~5.0(%)の内にあり、ばらつきは小さいものであった。

(2) 最大応力とフランジ最大初期たわみ量との関係

H形断面短柱の最大強度は、一般的形状寸法ではウェブの局部座屈強度よりフランジの局部座屈強度に支配されると考えられる。また、最大応力は主に残留応力と初期たわみにより支配されると思われるため、フランジ初期たわみと最大応力の関係について調べた。結果を図4に示す。同図で初期たわみ f_0 はフランジ半幅 Bf で無次元化した。図より最大応力はフランジの初期たわみ量が小さくなるとわずかに増大するといえなくもないが、この程度の小さな初期たわみ量ではほぼ一定の値を示した。フランジの初期たわみ形状はほとんどの部材において sin 半波形で、高次項が現れるものは初期たわみの小さいものであった。フランジ局部座屈卓越モードの半波長はこれらに比べ十分小さく、初期たわみモードとの関連は小さいものと思われる。

(3) 平均応力とひずみの関係

試験体のウェブおよびフランジ上に貼り付けたひずみゲージ (図3 参照) の値と断面平均応力 (P/A P : 荷重、 A : 断面積) との関係、4 種の断面の供試体の内 $AS5 \sim DS5$ の代表例について図5に示す。いずれも部材中央高さにおけるひずみを表す。なお、他の供試体についても各タイプともほぼこれらと同様な挙動を示した。タイプAではウェブ、フランジとも最大荷重近くまで大きな局部座屈が見られず、ほぼ降伏荷重まで達している。ところが同じフランジ幅厚比を有するタイプBでは早期にウェブが座屈し、それにひきづられフランジに変形が生じている。また、ウェブには明確に後座屈挙動が見られる。タイプCでは大きな幅厚比をもつウェブが座屈した後も最大強度は約2倍も上昇している。この間フランジの変形はほとんどしてない。ウェブのひずみが途中で反転しているのは、局部座屈変形状が上下方向に移動したためと思われる。タイプDはタイプBと類似の挙動を示している。

以上のことより、タイプにより様々な程度でウェブおよびフランジが相互に影響を及ぼしながら局部座屈を生じ、部材の最大強度が決定されている様子がわかる。

表5 実験結果

A		B		C		D	
Name	$\sigma u/\sigma y$	Name	$\sigma u/\sigma y$	Name	$\sigma u/\sigma y$	Name	$\sigma u/\sigma y$
ASB201	0.977	BSB201	0.813	CSB201	0.762	DSB201	0.759
ASB202	1.001	BSB202	0.771	CSB202	0.764	DSB202	0.694
ASB203	0.951	BSB203	0.803	CSB203	0.797	DSB203	0.725
ASB204	1.005	BSB204	0.764	CSB204	0.766	DSB204	0.712
AS1	1.006	BS1	0.868	CS1	0.839	DS1	0.801
AS2	0.946	BS2	0.775	CS2	0.796	DS2	0.773
AS3	0.966	BS3	0.777	CS3	0.744	DS3	0.750
AS4	0.963	BS4	0.770	CS4	0.770	DS4	0.754
AS5	0.949	BS5	0.774	CS5	0.779	DS5	0.681
AS6	0.979	BS6	0.802	CS6	0.761	DS6	0.733
Mean	0.974	Mean	0.792	Mean	0.778	Mean	0.738
S	0.023	S	0.032	S	0.027	S	0.037
Cov	2.4(%)	Cov	4.0(%)	Cov	3.4(%)	Cov	5.0(%)

S : Standard Deviation
 Cov: Coefficient of Variation

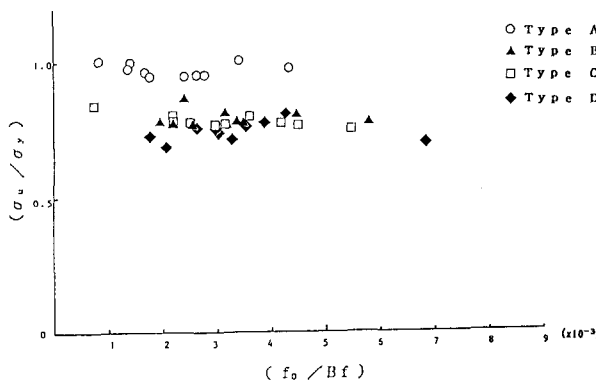
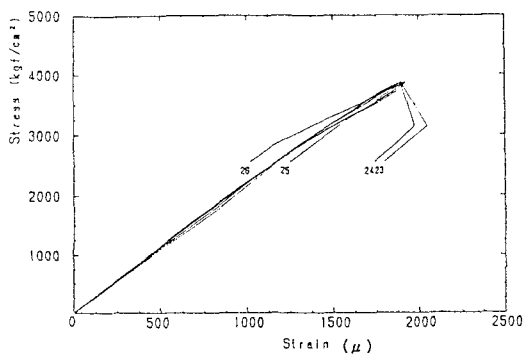
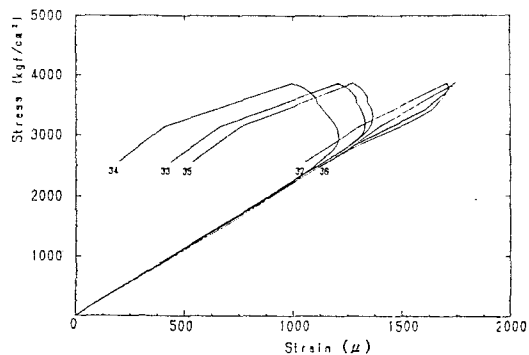


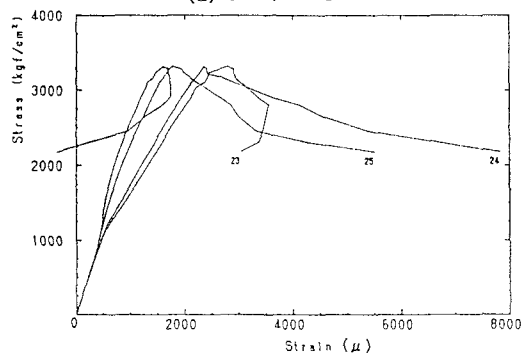
図4 最大応力とフランジ最大初期たわみ量の関係



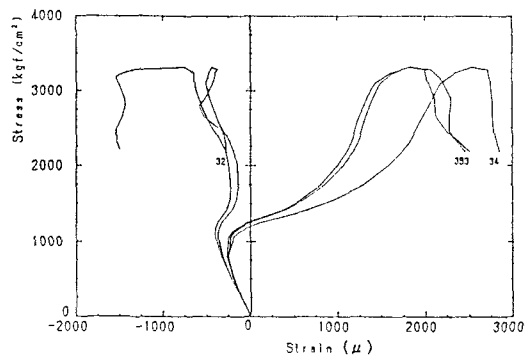
(a) AS5 (Flange)



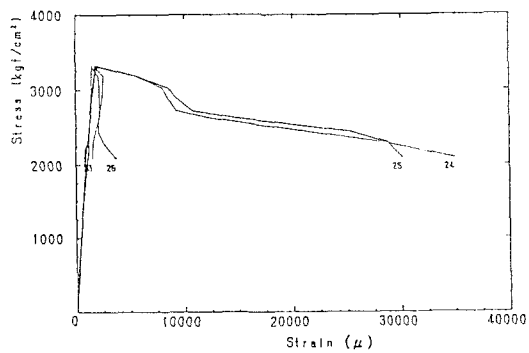
(b) AS5 (Web)



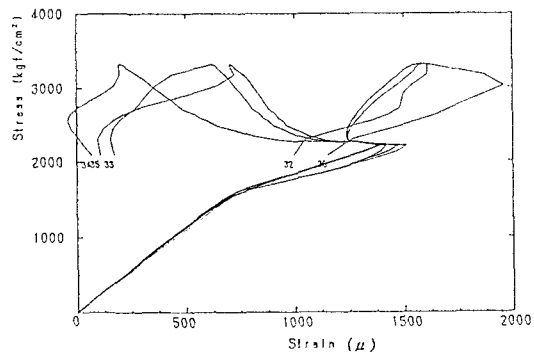
(c) BS5 (Flange)



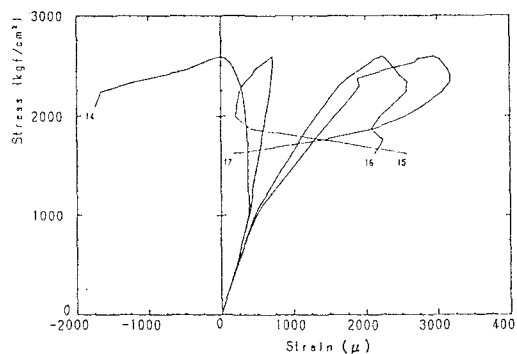
(d) BS5 (Web)



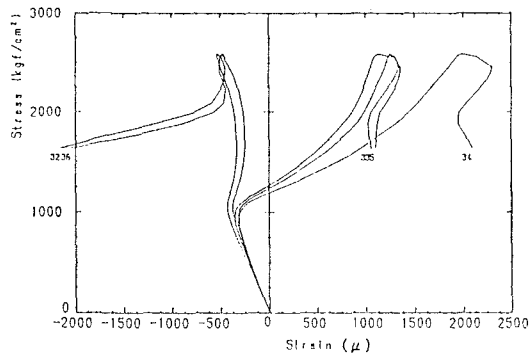
(e) CS5 (Flange)



(f) CS5 (Web)



(g) DS5 (Flange)



(h) DS5 (Web)

図5 平均応力とひずみの関係

(4) 最大応力と幅厚比パラメータとの関係

H形断面部材は幅厚比が異なる板要素の集成断面であるのでこれを等価の一枚の板と考え、溶接薄肉集成の場合と同様に、板全体の幅厚比パラメータを次に示す3式を用いて検討した。

(a) RfとRwの相乗平均による幅厚比パラメータReqの場合⁵⁾

$$Req = \sqrt{Rf \cdot Rw} \quad (1)$$

(b) 各板要素の断面積について加重平均をとる幅厚比パラメータRwmの場合

$$Rwm = (Af \cdot Rf + Aw \cdot Rw) / (Af + Aw) \quad (2)$$

(c) 構成板要素の相互の影響を考慮した幅厚比パラメータRfwの場合⁶⁾

$$\left. \begin{aligned} Rfw &= \frac{hw}{tw} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k_{wf}}} & \left(\frac{hwt_f}{b_ftw} > 3.07 \right) \\ &= \frac{b_f}{t_f} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k_{ff}}} & \left(\frac{hwt_f}{b_ftw} \leq 3.07 \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$R = (b/t) \cdot \sqrt{(\sigma_y/E) \cdot \{12(1-\nu^2)/(\pi^2 \cdot k)\}} \quad (4)$$

ここに、Rf、Rwはそれぞれフランジ及びウェブの幅厚比パラメータであり式(4)より求める。 σ_y 、E、 ν は実測値を用いた。今回の実験に用いた供試体タイプごとのフランジとウェブの幅厚比及び幅厚比パラメータ等を表6に示す。各供試体タイプのReqやRwmと比べてRfwの値は幅厚比が大きなタイプでは若干大きく評価している。特に、Rfwで計算する場合ウェブの幅厚比に影響される式(3)の上側の式の使用と、表3に示すように部材の降伏応力のばらつき差がそのまま影響していると考えられる。

次に、短柱の最大応力を式(1)から(3)の場合について、最小二乗法により幅厚比パラメータを使用して求めた。その結果を式(5)から式(7)に示す。また、式(8)は文献6)で薄肉溶接鋼短柱の強度推定に用いた式である。

$$\sigma_u / \sigma_y = 0.586 \cdot (1 + 0.529 \cdot Req) / Req \quad (5)$$

$$\sigma_u / \sigma_y = 0.418 \cdot (1 + 1.076 \cdot Rwm) / Rwm \quad (6)$$

$$\sigma_u / \sigma_y = 0.437 \cdot (1 + 1.021 \cdot Rfw) / Rfw \quad (7)$$

$$\sigma_u / \sigma_y = 1 / \left(1 + \frac{Rfw - 0.6}{3.4} \right)^2 \quad (8)$$

表6 幅厚比パラメータ

Type	Bf/t _f	hw/t _w	Rf	Rw	Req	Rwm	Rfw
A	11.1	44.1	0.768	1.055	0.900	0.867	0.849
B	11.1	59.7	0.794	1.450	1.073	1.065	1.164
C	13.9	75.3	1.016	1.771	1.341	1.328	1.468
D	16.7	75.3	1.127	1.720	1.392	1.346	1.390

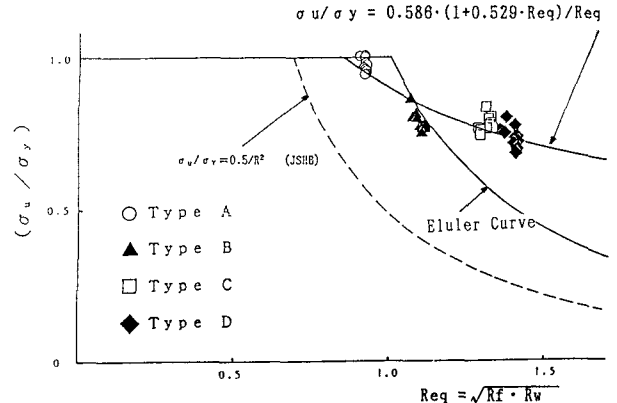


図6 最大応力と幅厚比パラメータReqの関係

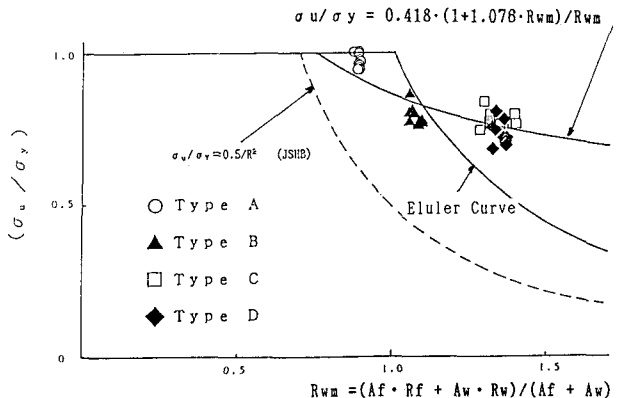


図7 最大応力と幅厚比パラメータRwmの関係

これらの幅厚比パラメータと最大応力の関係を図6～8にまとめて示す。図からもわかるように、最小二乗法で求めた3本の圧延H形鋼短柱の平均値強度曲線は、ほぼ同様な曲線となっていることがわかる。また、道路橋示方書⁸⁾の耐荷力曲線に比べて強度に余裕があり、幅厚比の大きい圧延の供試体においても十分な強度が得られることが分かる。

図8においては、溶接の供試体に対して用いた式と比較して示したが、今回の実験より求めた式(7)の推定式の方が約1割程度大きくなっている。これは初期たわみ量が小さかったことより、残留応力分布及び圧縮残留応力の最大値等の相違が考えられる。また、タイプAの最大強度は文献⁹⁾に示された3辺単純支持、1辺自由の圧縮板強度に比べて高くなっており、タイプAが他のタイプの部材に比べてフランジのウェブによる弾性拘束がより強く現れたものと考えられる。今後、圧延短柱のパラメータ解析を行ってさらに検討する必要があると思われる。

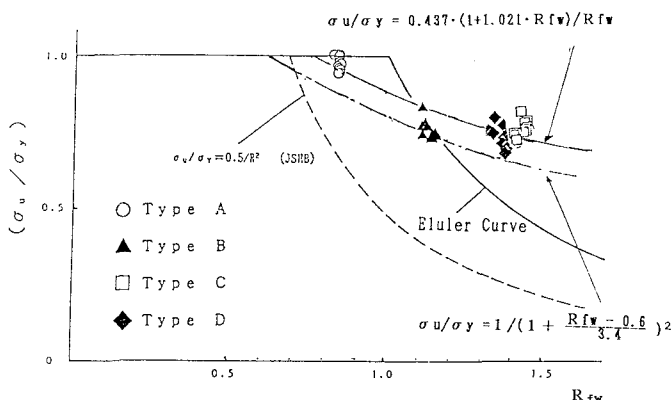


図8 最大応力と幅厚比パラメータ Rfw の関係

4. あとがき

薄肉の軽量圧延H形鋼短柱の圧縮強度実験を行なった。本研究より得られた主な結論は以下のようである。

- (1) 最大強度と初期たわみとの関係を調べると、どのタイプのフランジ、ウェブについても最大たわみ量と最大応力との間に一定の傾向はみられなかった。また最大たわみ量と部材長との間にも同じことが言えた。
- (2) 残留応力は一般の圧延H形断面部材とはほぼ同様の分布形を示した。すなわちフランジでは主に引張り残留応力が多く三角形分布を示し、ウェブでは圧縮残留応力がほとんどで放物線形の分布を示していた。最大圧縮残留応力の大きさは、フランジ端部で $0.2\sigma_y$ 、ウェブで $0.5\sigma_y$ 程度であった。
- (3) 最大応力は部材長によらずほぼ一定の値を示した。またばらつきも少なかった。最小二乗法によって求めた直線によりどのタイプでも部材長の増加にともなって、最大応力がわずかに低下する傾向がみられた。
- (4) 平均応力—ひずみ曲線より、タイプにより様々な程度でウェブおよびフランジが相互に影響を及ぼしながら局部座屈を生じ、部材の最大強度が決定されている様子や局部座屈挙動が観察できた。
- (5) 幅厚比パラメータと最大応力を降伏応力で無次元化した σ_u/σ_y との関係より、幅厚比が大きい薄肉圧延H形鋼短柱でも十分な強度が得られることが分かった。

本研究の一部は平成1, 2年度の文部省科学研究費補助金(一般研究C)の交付を受けた。また、実験実施にあたっては、愛知工業大学土木工学科 篠田和利君のご協力を得た。実験供試体は川崎製鉄(株)より提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 山尾敏孝・崎元達郎：薄肉H形鋼柱の連成座屈に関する実験的研究析，土木学会論文集，第380号/I-7，pp.383-390，1987.4
- 2) 山尾敏孝・崎元達郎：薄肉H形短柱の耐荷力挙動に関する実験的研究析，土木学会論文集，第380号/I-7，pp.331-339，1987.4
- 3) 青木徹彦・福本秀士：軽量溶接H形鋼柱の局部座屈と全体座屈に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.34A，pp.161-170，1988.3
- 4) Davids, A.J. and Hancock, G.J. : Compression Tests of Short Welded I-Sections, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 5, May, 1986.
- 5) 久保全弘・小川春由樹：薄肉鋼柱の極限強度の簡単な評価法，構造工学論文集，Vol.37A，pp.83-91，1991.3
- 6) 山尾敏孝・坪浦伸泰・崎元達郎：圧縮と曲げを受ける薄肉H形断面部材の相関強度とその評価式について，構造工学論文集，Vol.36A，pp.71-78，1990.3
- 7) AISC : Specifications for the Design, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings, 8th ed., New York, 1980.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1980年2月．
- 9) 土木学会：座屈設計ガイドライン，1987年10月．
- 10) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART A 一般構造物，1987年11月．

(1991年 9月30日 受付)