

東京大学工学部 学生員 ○長谷川彰夫
東京大学工学部 正 員 西野 文雄
東京大学工学部 正 員 奥村 敏恵

1. 序

従来、鋼柱の局部座屈に関しては、純圧縮柱に関するものが多く、¹⁾²⁾ 圧縮と曲げを受ける鋼柱の局部座屈に関する研究は極めて少ない。それで筆者等は現実の鋼構造には避けたい残留応力、及び塑性化の影響を考慮して、そのような問題に関する解析を行い、合わせて実験を一部終了したので、ここに報告する。

2. 解 析

研究の対象として考えたものは Fig.1 に示すような圧縮と曲げを受ける溶接箱型断面柱の局部座屈問題である。残留応力は溶接部で降伏引張応力、板要素中央部で一定圧縮応力が作用しているものとする。この種の局部座屈は一般に断面全体が連成して生ずる。従って、計算は断面の連成局部座屈について行った。それと共に断面構成板各々に検討を加える為に純圧縮を受ける板要素、¹⁾²⁾ 圧縮を曲げを受ける板要素について計算を行った。計算方法は差分法を適用し、計算上の仮定は次の通りである。

i) 材料は完全弾塑性体である。ii) 塑性理論は変形理論によるものとし、座屈時の歪の逆転を考えない Bijlaard の式を適用する。iii) 残留歪と外力歪は“重ね合わせ”が成立する。iv) 圧縮と曲げは比例負荷により与える。即ち、塑性域においても応力と歪は 1 対 1 に対応する。v) 連成座屈計算においては箱型断面の 4 端の相対変位はないものとし、フランジ、ウェブ共に等しい残留圧縮応力を有するものとする。

3. 実 験

圧縮と曲げを受ける柱の局部座屈実験を行う為に Table1 に示すような実験計画を立てた。材料は板厚 6 mm の SM41 鋼板で溶接により接合し応力焼鈍は行っていない。圧縮と曲げを与える載荷方法は偏心圧縮（比例負荷）とし Fig.2 の概要図で示すように

Table1 Test Plan

SM41 Steel		Thickness 6mm	
Specimen No.	Component Plate	Dimension (b×d×L)	Weight (kg)
41-A-35	2E 185×6×670 2E 213×6×670	179×219×670	25.1
41-A-40	2E 210×6×760 2E 243×6×760	204×249×760	32.4
41-A-45	2E 235×6×850 2E 273×6×850	229×279×850	40.7
41-A-50	2E 260×6×940 2E 303×6×940	254×309×940	49.9
41-A-55	2E 285×6×1030 2E 333×6×1030	279×339×1030	60.0

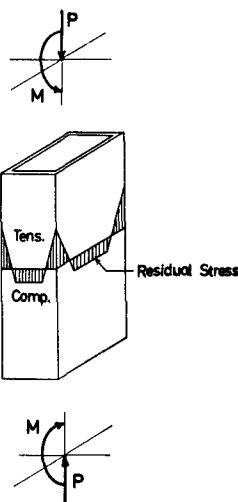
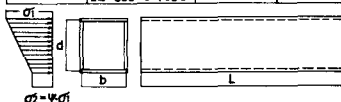
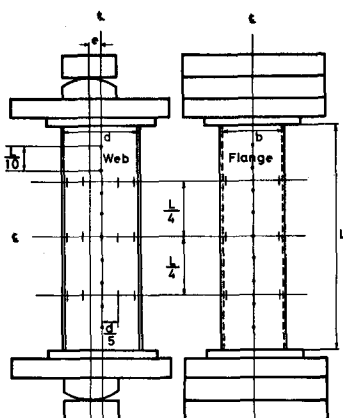


Fig.1 Box Section Column under Bending and Compression



Note : 1 : Strain Gauge
2 : Dial Gauge

Fig.2 Test Set up

一軸ローラー支承により、実際の载荷を行った。与える偏心量はTable1下图に示すように箱型断面ウェブの引張側圧縮縁応力度 σ_2 が圧縮側圧縮縁応力度 σ_1 の $\frac{1}{2}$ 、即ち $\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ でパラメーター ψ を定義すると $\psi = 0.5$ に弾性計算においてなるように決定した。箱型断面は圧縮フランジが先行座屈しないようにフランジとウェブの辺比 $\frac{b}{d}$ を0.8としているが、この場合の所定偏心量はウェブ高の一割、即ち $\frac{e}{d} = 0.1$ である。载荷時の測定は圧縮方向の縮み、歪、及び各構成板の面外たわみについて行い、局部座屈の検出は荷重—たわみ曲線より行った。偏心圧縮局部座屈実験結果をTable2,3に示す。尚、ここで σ_R , Eは素材試験より求められ、 σ_y にはFig.3に示された静的降伏応力度を用いた。素材試験によれば材料の静的降伏応力度は 2653 Kg/cm^2 、弾性係数は $2.17 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$ である。

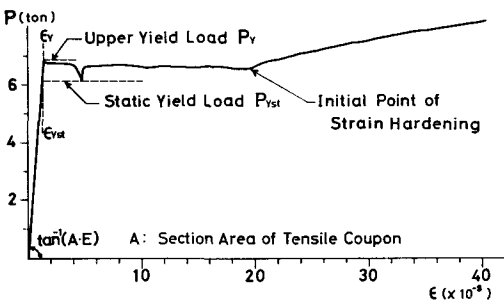


Fig. 3 Load-Strain Curve of Tensile Coupon Test

Table 2 Dimension of Specimens

Specimen No.	Flange b mm	Web d mm	Thickness t mm	Length L cm	Eccentricity e mm	Section S cm ²	b/d	d/t	ψ
41-A-35	180.8	219.3	5.83	66.9	22	46.65	0.824	37.6	0.100
41-A-40	205.4	248.0	5.92	75.8	25	53.68	0.828	41.9	0.101
41-A-45	230.0	280.0	5.95	84.9	28	60.69	0.821	47.1	0.100
41-A-50	255.5	309.0	5.83	94.0	31	65.83	0.827	53.0	0.100
41-A-55	280.6	339.7	5.96	102.9	34	73.94	0.826	57.0	0.100

Table 3 Buckling Test Results

Specimen No.	$\frac{d}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$	$\frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$	R_t ton	R_{bt} ton	P_{cr} ton	P_{bt} ton	$\frac{R_{bt}}{R_t}$	$\frac{P_{bt}}{P_{cr}}$
41-A-35	1.315	1.084	123.76	101.5	102.8	107.6	0.820	0.831
41-A-40	1.465	1.213	142.40	115.0	116.3	118.7	0.808	0.817
41-A-45	1.647	1.352	161.00	119.0	122.0	129.0	0.739	0.758
41-A-50	1.853	1.533	174.60	110.0	112.8	114.0	0.630	0.646
41-A-55	1.993	1.646	196.20	114.0	119.5	122.0	0.581	0.609

4. 実験結果と計算結果の比較、検討

実験結果によれば局部座屈現象は、圧縮フラスジ、ウェブではほぼ同時に表われており、引張側フランジはほとんど座屈していない。解析の項で述べたようにこの場合は箱型断面が連成して座屈している。以下、計算結果との検討に用いる実験値は座屈荷重 (Table3 における $\frac{P_{cr}}{P_y}$)を採用する。Fig.4に本実験の場合の計算結果（座屈曲線）と実験値を示した。即ち曲線は箱型断面で $\frac{b}{d} = 0.8$ 、偏心比 $\frac{e}{d} = 0.1$ の場合の計算結果で横軸にウェブ巾厚比、縦軸に全体の偏心座屈荷重をとって表わしてある。座屈曲線は残留圧縮応力比をパラメーターとしてあらわしているが実験値は $\frac{\sigma_2}{\sigma_y} = 0.5$ の曲線にほぼのっている。実際の残留圧縮応力比は本実験の試験体のような場合には $\frac{\sigma_2}{\sigma_y} = 0.3$ 付近と思われるから、実験値はやや低目に出ているとも考えられる。しかし圧縮と曲げの相関より決まる全塑性耐力を保持し得る最大の巾厚比については実験値と計算結果が比較的よく一致している事は注目すべき事である。次に各構成板に注目して検討してみる。まずそれには全体の偏心荷重がそれぞれの構成板にどの程度の外力を及ぼすかを決定しなくてはならない。弾性体の場合、各構成板に対する全体偏心荷重の分配は比例計算で簡単であるが、塑性域、残留応力を考慮した場合は数値計算の

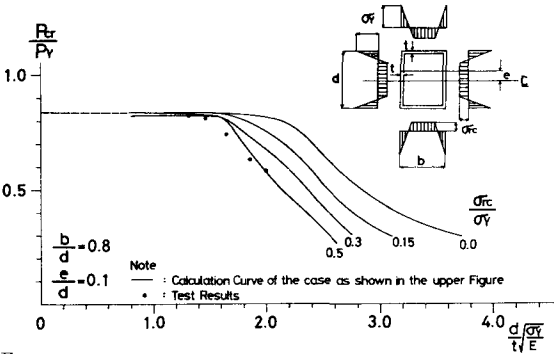


Fig. 4 Comparison of Tests with Calculations
— Plate Assemblies forming Box Section —

必要がある。座屈計算と同じ仮定のもとに行った計算結果を Fig.5 に示す。その図で横軸は全体の偏心荷重、縦軸は各構成板の断面力である。この図では残留圧縮応力比 $\frac{\sigma_{rc}}{\sigma_y} = 0.3$ の場合の結果を示してあるが、その大きさによる断面力分配の様子はそれほど大きな変動はない。各構成板の座屈曲線と実験結果を比較する際に、実験値としては実験より得られる座屈偏心荷重より、Fig.5の計算曲線を使用して各構成板の座屈荷重を決定するものとした。圧縮側フランジは純圧縮を受ける板要素で実験の座屈状況より判断して、Unloading Edge が単純支持に近いと考えられるから、その場合の座屈曲線との比較を Fig.6 に示した。ここで横軸はフランジ巾厚比、縦軸は圧縮フランジ純圧縮断面力である。それによればこの場合も若干、実験値は低目に出ているものの、傾向はほぼ一致しており、全塑性耐力を保持し得る最大の巾厚比については実験値と計算結果は良い一致を示している。次にウェブに注目して実験値と計算結果の比較を行う。ウェブは圧縮と曲げを受ける板要素と考える事が出来る。Fig.7-1~2 はUnloading Edge の境界条件と残留圧縮応力比を規定し軸圧縮力をパラメーターとしてウェブ巾厚比と座屈モーメントの関係で、座屈曲線を表わし実験値と比較したものである。計算座屈曲線によればたてに切り立った部分でわかるように主に弾性域で軸圧縮

力を受けている場合、弾性域内のモーメントによる座屈荷重の低下はほとんどないと考えられる。しかし、全塑性耐力はモーメントの影響が大きく支配する事に注意する必要がある。実験値の所に示した数字は実験

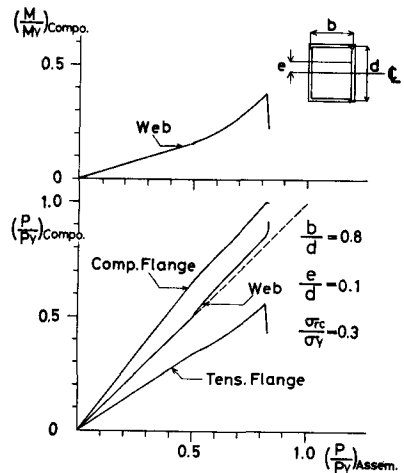


Fig.5 Distribution of Sectional Force to Component Plates

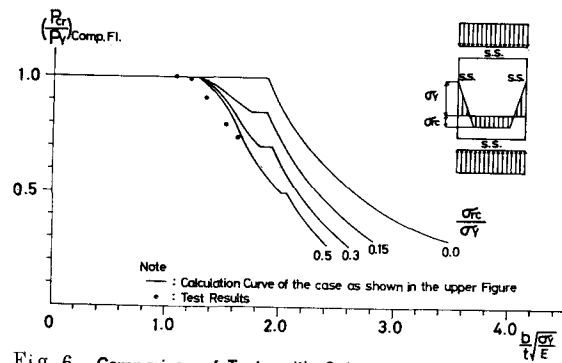


Fig.6 Comparison of Tests with Calculations - 2 - Flange Plate of Compression Side

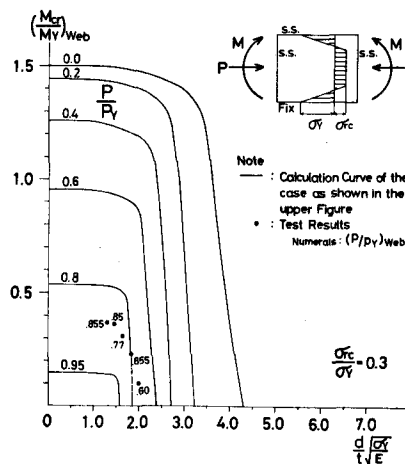


Fig.7-1 Comparison of Tests with Calculations - 3 - Web Plate

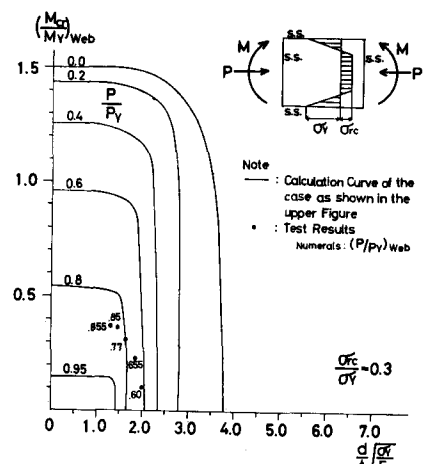


Fig.7-2 Comparison of Tests with Calculations - 4 - Web Plate

結果によるウェブの軸圧縮力である。ここに示した2つの図より判断すると両 Unloading

Edge が単純支持で残留圧縮応力比 $\frac{\sigma_r}{\sigma_y}$ が 0.3 の場合の Fig7-2 の曲線に実験値が比較的良好一致している。実験において実際に座屈状況を観察するとウェブ引張側の Unloading Edgeは固定端と考える方が適切であると思われたが、実験値は両 Unloading Edge単純支持の場合の計算結果に良く合うのは、一つには連成座屈の場合

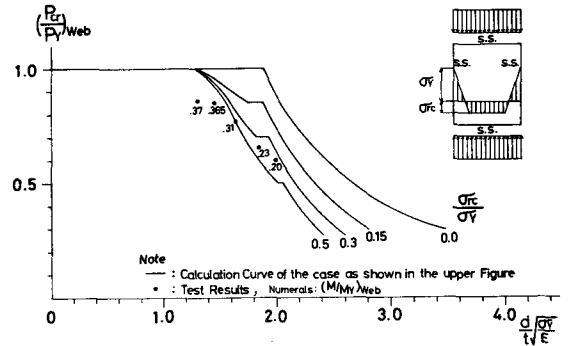


Fig. 8 Comparison of Tests with Calculations -5-
— Web Plate —

の比較から判断されるように実験値が計算結

果に対し、やや低目に出ている事に起因するものと思われる。計算結果によれば曲げと圧縮を受ける板要素では弾性座屈の場合、曲げによる座屈荷重の低下は非常に少いから今、ウェブにおける実験値を純圧縮の場合の計算座屈曲線と比較したものを Fig.8 に示した。ここに横軸はウェブ巾厚比、縦軸はウェブ軸圧縮力で実験値の所に示した数字は実験結果より計算されたウェブのモーメントである。それによればこの場合も両 Unloading Edge単純支持の座屈曲線に比較的良好合っている事がわかる。但し、実験値で $\frac{P_r}{P_y}$ が 1.0 にゆかないのは曲げによる全塑性耐力の低下によるもので局部座屈に直接関係はない。以上、種々の座屈曲線と実験結果を検討した。実験値は計算結果に対しやや低目に出ているようであるが、全塑性耐力を保持し得る最大の巾厚比については、実験値と計算結果が比較的良好一致している。実験値がやや低目に出ているというのは実際には残留圧縮応力比 $\frac{\sigma_r}{\sigma_y}$ が 0.5 になる事は少ないという今までの実験測定結果に基づくものである。²⁾ 現実の座屈現象は計算にのせにくい残留応力のバラツキや、溶接部の欠陥、初期たわみ等の初期不整も敏感に影響するものと思われ、それらが影響し合っ、残留圧縮応力比 $\frac{\sigma_r}{\sigma_y}$ が 0.5 の場合の計算曲線に近い実験結果が得られたものとも考えられる。

5. 結 論

圧縮と曲げを受ける箱型断面柱の局部座屈について、構成板の巾厚比が大きく弾性座屈する場合と巾厚比が小さく塑性座屈する場合とでは、その局部座屈特性は大きく異なる。即ち、巾厚比が大きい場合は残留応力による座屈荷重の低下が大きく、又モーメントによる座屈荷重の低下はほとんどない。逆に巾厚比が小さい場合は残留応力による座屈荷重の低下はなく、曲げによる最大耐力の低下は全塑性耐力に関する圧縮と曲げの Interaction Curve により支配され、直接的には局部座屈を考慮する必要がない。両者の限界巾厚比については実験値と計算結果は比較的良好一致しており、実用設計上、大きな意味を有するものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) Nishino, F. and Tall, L. "Residual Stress and Local Buckling Strength of Steel Columns" Proc. of JSCE No. 172, 1969-12
- 2) 長谷川, 西野, 奥村, "鋼柱の局部座屈実験" 第 25 回年次学術講演会講演集 46. 11