

東京大学工学部 学生員 ○長谷川彰夫

" 正員 西野文雄

" " 奥村敏恵

1 序

溶接トラス圧縮部材などのような 構造用溶接圧縮部材は一般に平板要素により構成される為、そのような部材に中心圧縮が作用する場合、その部材が応力的に耐え得る断面を持つと共に、座屈を生じないように設計しなければならない。その場合、全体座屈に対する細長比の制限と共に、その構成板が局部座屈しないように中厚比の制限が必要である。溶接部材においては内部残留応力が発生し、それが座屈耐力に与える影響は一般に無視できない。本報告においては、そのような残留応力が構成板の局部座屈にどのような影響を与えるかを、実験的に検討し、合わせて一緒に行った理論計算結果と比較対照する事を目的とし、箱梁構造物等に見られる溶接圧縮部材の設計に一つの指針を与えようとするものである。

Table 1-1 Test Materials (SM41 Steel)

Specimen No.	Compositive Plate	Dimension of Specimen ($b \times d \times L$)
41-6-26	2R-160 $\times$ 6 $\times$ 640	160 $\times$ 160 $\times$ 640
	2R-148 $\times$ 6 $\times$ 640	
41-6-30	2R-185 $\times$ 6 $\times$ 740	185 $\times$ 185 $\times$ 740
	2R-173 $\times$ 6 $\times$ 740	
41-6-32	2R-198 $\times$ 6 $\times$ 800	198 $\times$ 198 $\times$ 800
	2R-180 $\times$ 6 $\times$ 800	
41-6-34	2R-210 $\times$ 6 $\times$ 840	210 $\times$ 210 $\times$ 840
	2R-198 $\times$ 6 $\times$ 840	
41-6-38	2R-235 $\times$ 6 $\times$ 940	235 $\times$ 235 $\times$ 940
	2R-223 $\times$ 6 $\times$ 940	
41-6-40	2R-248 $\times$ 6 $\times$ 1000	248 $\times$ 248 $\times$ 1000
	2R-236 $\times$ 6 $\times$ 1000	
41-6-42	2R-260 $\times$ 6 $\times$ 1040	260 $\times$ 260 $\times$ 1040
	2R-248 $\times$ 6 $\times$ 1040	
41-6-46	2R-285 $\times$ 6 $\times$ 1140	285 $\times$ 285 $\times$ 1140
	2R-273 $\times$ 6 $\times$ 1140	
41-6-52	2R-320 $\times$ 6 $\times$ 1280	320 $\times$ 320 $\times$ 1280
	2R-308 $\times$ 6 $\times$ 1280	
41-6-60	2R-370 $\times$ 6 $\times$ 1480	370 $\times$ 370 $\times$ 1480
	2R-358 $\times$ 6 $\times$ 1480	
41-10-26	2R-260 $\times$ 10 $\times$ 1040	260 $\times$ 260 $\times$ 1040
	2R-240 $\times$ 10 $\times$ 1040	
41-10-34	2R-340 $\times$ 10 $\times$ 1360	340 $\times$ 340 $\times$ 1360
	2R-320 $\times$ 10 $\times$ 1360	
41-10-42	2R-420 $\times$ 10 $\times$ 1680	420 $\times$ 420 $\times$ 1680
	2R-400 $\times$ 10 $\times$ 1680	
41-10-60	2R-600 $\times$ 10 $\times$ 2400	600 $\times$ 600 $\times$ 2400
	2R-580 $\times$ 10 $\times$ 2400	

2 実験

序に述べたような目的で、箱型溶接圧縮柱の圧縮試験計画を立てた。材料は実用上の使用範囲内でほぼ、完全弾塑性体と近似し得る SM41 鋼材を用いている。箱型溶接圧縮柱は Table 1-1 に示すように、6 mm 板厚 10 本、10 mm 板厚 4 本を製作した。圧縮柱の高さは全体座屈を生じない程度に短く、端部の影響が入らない程度に長くしてある。又残留応力を測定する為、Table 1-2 に示すように、圧縮柱と同じ鋼板より切り出した板片の両中端部に、圧縮柱製作と同じ条件で溶接ビードを盛ったものを製作した。又、試験に供する材料の材料定数を測定する為、1 号引張試験片を準備し、素材試験を行った。残留応力の測定は製作した 6 mm 板厚 4 板、10 mm 板厚 4 板のビード加工板片を、機械的分割による応力弛緩法により行った。尚、残留歪の測定はストレインゲージによって行った。得られた結果の一例を Fig. 1 に示す。

箱型溶接圧縮柱の圧縮試験は東京大学工学部大型構造物試験室の、ロードセル計測式 2000 ton 構造物試験機で行った。測定は構成板の荷たわみとダイヤルゲージで、圧縮ひずみとストレインゲージで行い読みは各荷重載荷後、数分経た、静的な状態において行っている。測定結果の一例を Fig. 2 に示す。

Table 1-2 Plates for Residual Stress Measurement

Specimen No.	Dimension ($b \times d \times L$)
41-6-26R	154 $\times$ 6 $\times$ 640
41-6-34R	204 $\times$ 6 $\times$ 840
41-6-42R	254 $\times$ 6 $\times$ 1040
41-6-60R	354 $\times$ 6 $\times$ 1480
41-10-26R	250 $\times$ 10 $\times$ 1040
41-10-34R	330 $\times$ 10 $\times$ 1360
41-10-42R	410 $\times$ 10 $\times$ 1680
41-10-60R	590 $\times$ 10 $\times$ 2400

以上 実験による測定結果の統括を Table 2 に示す。尚、Table 2 における σ_{cr}/σ_Y は Fig. 1 より中央部における残留一定圧縮応力を平均化して読み、Fig. 3 の図のように理想化した場合の残留一定圧縮応力比である。

3 理論解析

理論上の平板座屈曲線を求めるにあたっては、残留応力や塑性化の影響を考慮する為、解析的に解けないので、基礎方程式を差分化し、その間の線型性と仮定して、電子計算機により数値計算を行った。計算上の仮定は次の通りである。

- i) 境界条件は4辺単純支持である。
- ii) 平板中央面に一方向圧縮力が働く。
- iii) 板厚は一定である。
- iv) 材料は完全弾塑性体である。
- v) 座屈時に歪の逆転はなく、応力歪関係は、バイラードの式を用いる。
- vi) 残留応力は溶接線に平行、即ち圧縮荷重方向に働き、その方向に対称な変化はない。
- vii) 残留応力と外力による応力については“重ね合わせ”が成立する。

計算の結果は最終的に平板座屈曲線として表示され、次式のよう整理できる

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = \frac{k_{pr}}{k} \frac{1}{\lambda^2} \quad \text{但し} \quad \lambda = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y \cdot 12(1-\nu^2)}{E \pi^2 k}}$$

ここで λ は座屈パラメーターと称するものであり、 k は弾性一様圧縮の場合の座屈係数で、4辺単純支持の場合には4である。 k_{pr} は残留応力と塑性化の影響を考慮した場合の座屈係数で数値計算の結果求められる。

以上、数値計算による結果と Fig. 3 に実験で示してある。ここでは、残留一定圧縮応力比がパラメーターである。

4 結果の検討

Table 2 における実験結果と、Fig. 3 の平板座屈曲線上に

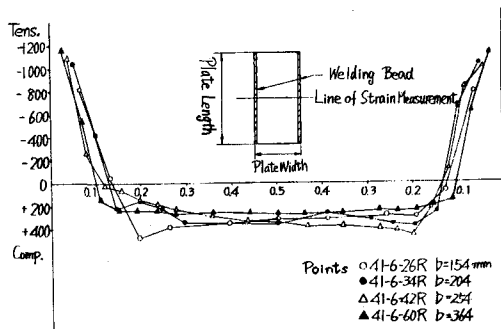


Fig. 1 Summary of Residual Strain Distribution

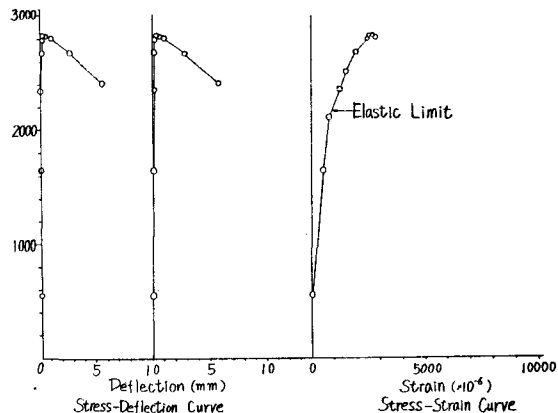


Fig. 2 Results of Plate Buckling Tests

Specimen No. 41-6-34

Table 2 Summary of Test Results

Specimen No.	$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y}$	$\frac{b}{t}$	λ	$\frac{\sigma_{cr}}{k}$ kg/cm ²	$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y}$	$\frac{G_u}{k}$ kg/cm ²
$t=6mm, E=2.04 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2, \sigma_Y=2810 \text{ kg/cm}^2, \nu=0.28$						
41-6-26	0.23	22.60	0.444	2940	1.046	2940
41-6-30		26.40	0.518	2840	1.011	2840
41-6-32		28.45	0.558	2780	0.989	2740
41-6-34	0.23	30.25	0.594	2820	1.004	2820
41-6-38		33.39	0.655	2800	0.996	2820
41-6-40		36.13	0.709	2840	1.011	2840
41-6-42	0.23	37.70	0.740	2600	0.925	2640
41-6-46		40.63	0.798	2690	0.957	2710
41-6-52		45.75	0.898	2400	0.854	2440
41-6-60	0.19	53.26	1.045	1900	0.676	1910
$t=10mm, E=2.04 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2, \sigma_Y=2688 \text{ kg/cm}^2, \nu=0.28$						
41-10-26	0.23	24.00	0.461	3020	1.124	3020
41-10-34	0.23	32.14	0.617	2540	0.945	2550
41-10-42	0.15	40.08	0.770	2220	0.826	2250
41-10-60	0.12	56.86	1.092	1730	0.644	1870

プロットし、理論結果との検討を行う。理論曲線においては残留応力による座屈応力の低下がはっきりと現われているが、実験の結果からもそれが裏付けられている。

残留応力の大ききの程度は、実験の結果により、中央部の残留一定圧縮応力により、代表させ得るが、今、板中とその残留一定圧縮応力の関係をグラフで示すと Fig. 4 のようになり、その結果、大体の推定で次のようになる。

$$b < (300 \sim 350) \text{ mm} \quad \frac{\sigma_{rc}}{\sigma_Y} = 0.23$$

$$(300 \sim 350) \text{ mm} < b < 1000 \text{ mm} \quad \frac{\sigma_{rc}}{\sigma_Y} = 0.1 \sim 0.23$$

従って一般に圧縮部材の構成板として用いられる残留一定圧縮応力比は、バラツキを考慮しても 0.3 以下と考えてよい。

今、平板座屈曲線における実験結果を見ると次のような事が言える。

実験結果は、残留一定圧縮応力比が 0.23 の付近で中

ばにれて、バラツキしている。しかしそのバラツキは残留一定圧縮応力のバラツキと同程度、あるいはそれ以上である。この原因としては、材料定数そのもののバラツキ、特に塑性的に座屈した場合は降伏応力度のバラツキ、又、溶接による欠陥の発生や偏心、初期たわみ等の幾何学的初期不整などが考えられる。そのような種類のバラツキは実用上、避ける事が非常に難しく、ある程度やむを得ないものもある。又、前に述べたようにこのような種類の圧縮柱構成板では、残留一定圧縮応力比は 0.23 付近になるのであるから、結論として残留応力の存在そのものは、その耐力に非常に大きく影響するが、その大きさについては、それほど神経質になる必要はないものと考えられる。

しかし、今回の実験で、結果の少し弾性的に座屈する構成板、即ち中厚比の大きい構成板においては理論曲線から考えられるように、残留応力の影響が顕著にあらわれるはずであるから、その大きさには注意する必要がある。尚、残留応力の座屈耐力に対する影響は中厚比、即ち Fig. 3 における座屈パラメーターにより変化する事が、以上の実験及び理論結果により明確になったが、それによると、中厚比が小さくなるに従い、残留応力の影響が緩和され、中厚比がある値以下(この場合の座屈パラメーター λ を限界座屈パラメーター λ_{cr} と採り、本解析の場合は 0.67 である。) になると、残留応力の有無にかかわらず降伏応力度まで耐え得る事が明らかになった。この場合、全断面塑性的に座屈する事を示すものである。

さて、以上の結果をもとに、このような箱型圧縮柱構成板(即ち板中両端が溶接により拘束された板)の耐力曲線と、それをもとにして、ある安全率で餘した許容曲線について若干触れておく。

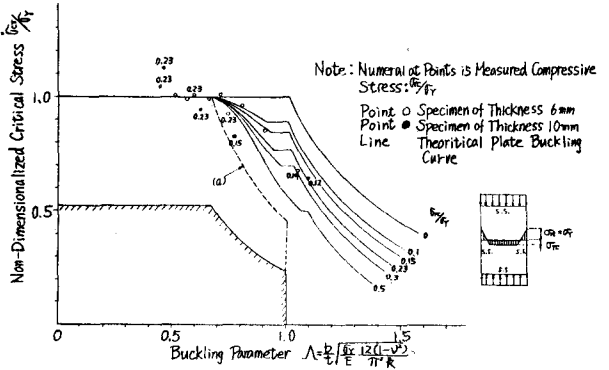


Fig. 3 Plate Buckling Curve and Test Results

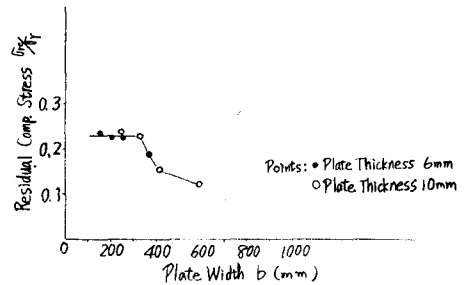


Fig. 4 Residual Compressive Stress and Plate Width Relations

耐力は、残留応力の存在により大きく影響を受ける。従って、耐力曲線においては、中厚比と、残留応力のない場合の弾性座屈曲線に対し、ある程度低減する必要がある。今、その低減率として限界座屈パラメータ Λ_{cr} を採用する。但しこの低減率では、中厚比の大きい場合に、残留応力の影響が過大となる為、適用範囲の中厚比を座屈パラメータ Λ で考えて1以下とする。以上を式で示すと次のようになる。

$$\frac{b}{t} \leq \Lambda_{cr} \sqrt{\frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}} \quad \text{但し} \quad \Lambda < 1$$

この結果は Fig. 3 上の実線(A)で示されている。今、 σ_R に対し $\sigma_R = n \sigma$ (n : 安全率 σ : 作用応力) と考え、例えば安全率として $n=1.9$ とし、他の諸数値を代入して計算すると次のような許容中厚比制限が得られる。但し材料定数は、SM41鋼材の規格値と手え、数値は丸めて示す。

$$\frac{b}{t} \leq \frac{1350}{\sqrt{\sigma}} \quad \text{但し} \quad \frac{b}{t} \leq 55$$

ここで σ は作用応力度で単位は kg/cm^2 である。この許容領域は Fig. 5 上の斜線部で示してある。

5 結語

- ① この程度の寸法の箱型溶接圧縮柱構成板の残留応力の大きさは、残留一定圧縮応力比で考えて、 $\sigma_R/\sigma = 0.1 \sim 0.23$ の間でバラツキを考慮しても0.3以下と考えてよい。
- ② 圧縮試験の結果によると、明らかに残留応力の存在により、座屈耐力が減ずる事が実証された。その程度については $\sigma_R/\sigma = 0.23$ の場合の理論曲線の近傍に存在している。
- ③ 実験の理論曲線に対する合致度は、残留応力のバラツキのみならず材料定数のバラツキ、溶接加工の不確定性にも、大きく影響を受ける。従って部材の設計においては溶接加工等に十分注意する必要がある。
- ④ 座屈耐力に対する残留応力の影響を示す場合の指標として限界座屈パラメータの考えが、理論的にも、実験的にも明らかにされた。これが耐力の推定において、非常に有効である事が判明した。

参考文献

- 1) Timoshenko & Gere Theory of Elastic Stability, 2nd Ed McGraw-Hill, New York 1961
- 2) Bijlaard, P. Theory and Tests on the Plastic Stability of Plates and Shells. JAS 9, 1949
- 3) Nishino, F. Buckling Strength of Columns and their Component Plates
Ph. D. Dissertation, Lehigh Univ. 1964
- 4) Nishino, F, Ueda, Y and Tall, L Experimental Investigation of the Buckling of Plates
with Residual Stresses