

名古屋工業大学 正員 ○ 長谷川 彰夫
 東京大学 正員 西野 文雄
 東京大学 正員 奥村 敏恵

1. 序 最近プレート・ガーダーのウェブの薄肉化が進むとともにそれに関連し水平補剛材の剛性評価が問題と
 なっている。それに注目して、薄いウェブを持つプレート・ガーダーの曲げ耐力力に関し、水平補剛材の有無、お
 よび剛性の大小、溶接残留応力などのように影響を与えるか
 ついての実験的研究を行った。製作した桁は **Table 1** (試験桁諸
 元), **Table 2** (試験パネル諸元) に示す7体で鋼種は全々SM
 41である。試験桁のウェブの幅厚比 h_{tw} は250 (水平補剛材付
 ウェブの現行規定) と350 (座屈安全率を1.6としたときの許
 容幅厚比) で **Table 2** に示すようにそれぞれのシリーズに対し
 水平補剛材に関するパラメータを変えてその影響を調べると
 ともに、水平補剛材の取り付け方の影響を調べるための桁 (B-
 35-1E), 残留応力の影響を調べるために応力焼鈍を施した桁
 (B-35-1A) についても実験した。水平補剛材は桁 B-35-1E
 を除きウェブ両面に取り付け垂直補剛材とは溶接により接合し
 ている。桁 B-35-1E は片面取り付けとし、その影響ははき
 り現われるように垂直補剛材との間に5mmの間隔をあけた。
 フランジは上下対称で全ての桁に対し同一断面 (225×9mm,
 突出脚幅厚比 $b/t_f = 12.5$) であり、試験パネルの辺長比 γ_0 も
 1.5として統一している。以上の試験桁を用いて二点荷重単純
 曲げ耐力力実験を実施した。

2. 実験結果と考察 実験により得られた耐力力と試験桁の
 断面特性値とともに **Table 3, 4** に示す。素材試験結果と **Table**
5 に示す。実験の状況と **Photo 1** に、試験パネルの崩壊状況例
 と **Photo 2** に示す。実験により得られた試験パネルのモーメン
 トと曲率の関係と、実測残留応力を考慮した場合の座屈を無視
 した一次解析
 の計算結果と
 ともに **Fig. 1**
 に示す。計算
 曲線と実験曲
 線の差が座屈
 変形による断
 面の剛性低下
 の影響と判断

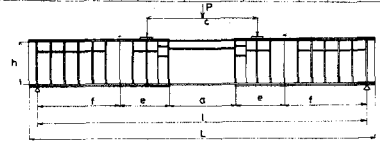
Table 3 Summary of Test Results

Test Girder	Sectional Properties (t=mm)					Test Results					Material SM41		
	Mall	Mf	My	Mp	Wip	Must	Pudy	Pust	ton	ton	γ/y	As	As/A
250 Series													
B-25-0	24.0	39.8	47.9	52.7	14.0	140.0	41.0	40.0	0	0	0	0	0
B-25-1	24.0	39.8	47.8	56.7	Beyond	51.0	51.5	51.0	1.06	3.02	0.0444		
B-25-5	24.1	39.6	47.5	55.8	Beyond	56.4	57.5	56.4	4.73	7.01	0.0976		
350 Series													
B-35-1	36.0	55.8	71.6	82.8	59.0	70.0	71.1	70.0	1.04	3.27	0.0418		
B-35-1A	36.0	55.8	71.6	83.0	59.0	78.0	78.5	78.0	1.02	3.29	0.0420		
B-35-1E	36.0	55.9	71.7	82.3	59.0	67.0	68.1	67.0	0.94	2.18	0.0281		
B-35-5	36.0	55.9	71.7	88.0	59.0	77.5	78.5	77.5	4.94	7.60	0.0917		

Remarks 1) Mall, My and Mp in parentheses are calculated, neglecting Stiff's Area
 2) Applied γ_0 for My and Mp: Static yield Stress, Syst. of Flanges
 3) γ_0 for Mall: 1250kg/cm² (Ry, Spec. in Japan)
 4) A: Total Area of I-Section ($A_s + A_w$)

Table 1. Dimensions of Specimens.

Series	Test Girder	Test Panel	Stiff Panel	Support Panel	Load Distance	Span	Stiff Length	Web Depth
250	B-25-0	1200	900	1500	2000	6000	6300	800
	B-25-1							
	B-25-5							
	B-25-1E							
350	B-35-1	1680	910	1500	2500	6500	6800	1120
	B-35-1A							
	B-35-1E							
	B-35-5							



* Location of Bolt Joints.

Table 2 Dimensions of Test Panels

Test Girder	Flange	Web	Test	2b/t	h/tw	a/h	Aw/Acf	L. Stiff
	2b/t	h/tw	Panel					Do-ts
B-25-0	226x9.0	796x3.1	1193	25.2	257	1.50	1.22	0
B-25-1	226x9.0	795x3.1	1193	25.2	257	1.50	1.21	33.6x4.5
B-25-5	226x9.0	795x3.1	1192	25.2	257	1.50	1.22	59.9x5.9
B-35-1	226x9.0	1114x3.1	1674	25.3	361	1.50	1.70	36.5x4.5
B-35-1A	226x9.0	1114x3.1	1674	25.3	361	1.50	1.71	36.7x4.5
B-35-1E	226x9.0	1115x3.1	1674	25.2	358	1.50	1.73	48.5x4.5
B-35-5	226x9.0	1115x3.1	1674	25.4	358	1.50	1.71	64.5x5.9

Test Girder	$\gamma_0 (A_s/A_w)$	Y	Y'	γ/y	L ($\times 10^3$)	n	Remarks
B-25-0	1.21	61.7	58.2	1.06	78330	0	Not Stiffened
B-25-1	0.124	61.7	58.2	1.06	80120	10.7	D.
B-25-5	0.285	417.1	88.2	4.73	81970	25.0	D.
B-35-1	0.095	54.9	53.0	1.04	78440	0	D.
B-35-1A	0.095	54.3	53.1	1.02	78230	14.1	D.
B-35-1E	0.125	55.1	58.0	0.94	163000	9.5	D. Annealed
B-35-5	0.219	376.0	76.1	4.94	163400	30.8	D.

Remarks: 1) () : L: Stiff. Area is ignored
 2) n : Distance from center-to-Neutral-Axis
 3) D : Double Sided Stiff., S : Single Sided Stiff.
 4) γ/y : Calculated by DIN 4114

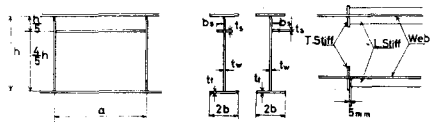


Table 4 Web Slenderness and Non-dimensionalized Moments

Test Girder	γ/y	h/tw	γ_0	M_y/M_p	M_y/M_p	M_y/M_p	M_y/M_p	M_y/M_p	M_y/M_p
250 Series									
B-25-0	1.06	257	8.89	0.292	0.833	1.100	0.935	0.759	
B-25-1	1.06	257	8.89	Beyond M_p	0.833	1.098	1.063	0.968	
B-25-5	4.73	257	8.89	Beyond M_p	0.833	1.098	1.177	1.072	
350 Series									
B-35-1	1.04	361	12.31	0.822	0.779	1.131	0.975	0.862	
B-35-1A	1.02	359	12.24	0.821	0.779	1.131	1.085	0.959	
B-35-1E	0.94	356	12.14	0.822	0.779	1.132	0.932	0.824	
B-35-5	4.94	358	12.21	0.818	0.779	1.133	1.075	0.948	

Remarks 1) E in γ/y : 2.1×10^4 kg/cm², γ_0 in h/tw : Syst. of Flanges
 2) My and Mp in case of neglecting Stiff's Area are used

Table 5 Summary of Tensile Coupon Test Results

Girder Element	Thickness	σ_{ys} kg/cm ²	σ_{ys} kg/cm ²	σ_{ys} kg/cm ²	E
Web	3.1	3495	3350	4752	2.30
Flange	9.0	2634	2474	4419	2.26
L. Stiff.	4.5	3267	3146	4436	1.15
L. Stiff.	5.9	2823	2703	4314	2.37

* B-25-1, B-35-1, B-35-1A, B-35-1E
 ** B-25-5, B-35-5

できる。

ウェブの幅厚比が250である250シリーズの試験桁に関して初めに考察する。桁B-25-0は水平補剛材を持たない桁で、完全に弾性座屈する場合である。実験によれば計算座屈モーメントの3倍近い耐力モーメントが得られている。これは後座屈強度の大きいことを示しているとも言えるが座屈モーメントの計算で、フランジとの境界を単純支持としてフランジねじれ剛性の効果を期待していないことにもよるものである。数値計算結果¹⁾によれば、桁B-25-0のようにフランジ剛性がウェブ剛性に比較して極端に大きい場合にはその効果は大きく、固定条件としての座屈強度を十分に期待できる。しかし桁B-25-0の耐力は降伏モーメントと保持できず、いわゆるフランジ・モーメント程度に留まっており、水平補剛材の必要性を示していると言える。この実験値を無補剛桁の耐力に関するBasler²⁾、藤井の提案曲線と比較したのがFig. 2である。この結果によれば両者の理論より実験値がかなり下回っている。この原因は両理論ともに垂直補剛材間隔の曲げ耐力に与える影響に対する検討がなされていないためと思われる。ウェブの座屈強度の立場からは垂直補剛材間隔はあまり意味を持たないがウェブ座屈後では圧縮フランジはいわば圧縮を受ける柱としての挙動とするものであり、その意味で圧縮フランジの面内変位を拘束する垂直補剛材の効果は大きい。本実験でBasler、藤井による理論値をかなり下回ったのは、パネル辺長比を1.5と大きくとったためで、逆に言えば両者の理論を正当なものにするには、辺長比の制限、すなわち、垂直補剛材間隔の制限が必要であろう。

250シリーズで水平補剛材を有する桁B-25-1、B-25-5は両桁ともに計算上の座屈モーメントが降伏モーメントを超えている。実験においても降伏モーメントを超えた耐力モーメントが得られており、その意味では現行規定の十分な安全性を示している。桁B-25-1はDIN4114で規定する水平補剛材最小剛比 γ^* を有するもので、桁B-25-5はそれに対し水平補剛材剛比を5倍にしたものであるが、補剛材のねじれ剛性の効果を無視した従来の弾性座屈理論のもとでは、

ほとんど増えないはずの耐力能力が実験値では約10%の耐力上昇を得ている。これは水平補剛材の場合には、ウェブに対し極端な不等間隔配置(1/2点)をとっているためにそのねじれ剛性の効果が大きく、それを無視して計算された最小剛比概念が必ずしも正しくはないことを示している。補剛材剛性を高めることにより得られる耐力上昇は、それによる桁断面の断面積増大と比較しても十分な大きなものであり、その意味で現行の最小剛比 γ^* より大きな剛性と現実の設計に採用すべきであると思われる。

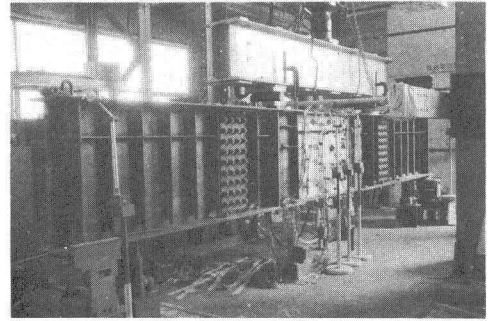
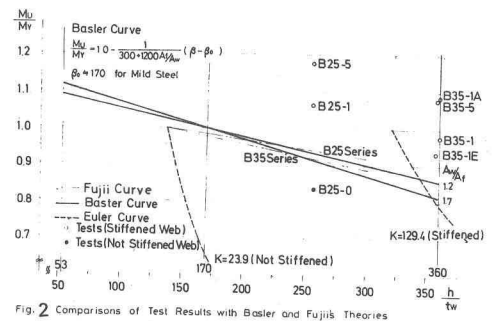
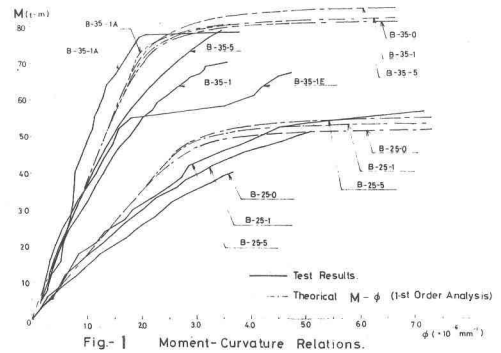


Photo 1 Test Alignments



Photo 2 Collapse Mode of Test Panel (B-35-1)



ウェブの幅厚比が350である350シリーズ試験桁について考察する。このシリーズは全て水平補剛材を持つウェブ周辺単純支持で水平補剛材のねじれ剛性の効果を無視した弾性座屈モーメントはTable 4に示すように降伏モーメントの80%程度であり、ほぼフランジモーメントと同じ値を持つ。実験によれば δ^* の水平補剛材を持つ桁B-35-1はほぼ降伏モーメントに相当する耐力モーメントが得られており、変形性状もFig. 1のM- ϕ 関係に示すように250シリーズ補剛桁に比較して大きく劣化することはない。従って軟鋼材の場合水平補剛材と有する桁はウェブの幅厚比を350程度にレマレ降伏モーメントに達する以前にウェブの座屈変形による崩壊は生じないこととわかる。この場合耐力力に関する安全率が許容応力度に関する基本安全率とほぼ同じになり、座屈に関する限りウェブ薄肉化許容の根拠を与え得るものと考えられる。水平補剛材の剛性を δ^* の5倍にした桁B-35-5は250シリーズの場合と同様に、桁B-35-1に対して約10%の耐力上昇を得ており、変形特性も同様に改善されていることから250シリーズに対する考察が妥当なものであることを示している。

焼鈍桁B-35-1Aは非焼鈍桁B-35-1と同一断面を有する桁であるが、桁B-35-1Aは桁B-35-1に比較して約10%の耐力上昇を得ている。従来プレートガーダーの曲げ耐力力に対しては残留応力はほとんど影響しないと考えられているが、これはウェブ幅厚比の小さい比較的Compactな断面に対してのみ実験的に証明されていることと、本実験によればウェブ幅厚比の大きいNon-Compactな断面では変形性状が曲げ耐力力に影響を及ぼし、従ってそのような断面を持つ桁は残留応力の存在により曲げ耐力力が低下すると考えるべきである。桁B-35-1Eは桁B-35-1と同一の水平補剛材剛性を持つが、後者が両側補剛材であるのに対し、前者は片側補剛材でかつ垂直補剛材との間に間隔をあけて面内曲げの偏心性と顕著にし、その影響を調べたものである。その曲げ耐力力は桁B-35-1に比較して約5%低く得られており、このような偏心性が曲げ耐力力に悪い影響を与えることを示している。これは補剛材の取り付けに関する細目として、プレートガーダーの製作基準においてモロ合注意を払うべき問題である。

3. 結論 実験より得られた結論をまとめると次の通りである。

- i) DIN4114に基づく最小剛比 δ^* の水平補剛材一本を配した桁のウェブ座屈モーメントが降伏モーメントの80%程度になるようにウェブ幅厚比 t/w を選べばそのプレートガーダーはフランジの水平座屈、ねじれ座屈を生じない限り、降伏モーメントを越える曲げ耐力能力を持つ。
- ii) 水平補剛材を断面の曲げ耐力能力に対し、より有効に働くようにするためには、 δ^* より大きな剛比を設計剛比として与えた方がよく、5 δ^* 程度の剛性が最適であろう。
- iii) 薄いウェブを持つNon-Compactなプレートガーダーにおいては残留応力は変形特性のみならず、曲げ耐力能力にも悪い影響を与える。
- iv) 無補剛プレートガーダーの曲げ耐力力に関するBasler, 藤井の理論は、垂直補剛材間隔に対する考慮がなく、従ってその間隔が大きい場合には、危険側の評価をしている。水平補剛材を有する場合には常に安全側の評価となる。

参考文献 1) 長谷川彰夫、大田孝二、西野文雄：“補剛された板要素の座屈強度に関する二、三の考察”
土木学会論文報告集に投稿中

2) Basler, K. and Thurlimann, B.: "Strength of Plate Girder in Bending", Proc. ASCE, ST6, Vol. 87, 1961, pp. 153~181

3) 秋田好雄、藤井登喜男：“座屈と塑性を考慮した最小重量設計；第2報”，造船協会論文集120号，1966，pp 156~164