

水平補剛材をもつプレートガーダーの横倒れ耐荷力

ULTIMATE STRENGTH OF LONGITUDINALLY STIFFENED PLATE GIRDER DUE TO LATERAL BUCKLING

福本 暁士*・久保 全弘**
By Yuhshi Fukumoto and Masahiro Kubo

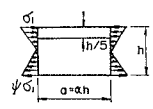
1. 緒 言

プレートガーダーの曲げ強度におよぼす水平補剛材の効果には、次のような考え方がとられている。まず、Klöppel らの研究^{9),10)}にみられるように、補剛材の腹板に対する面積比 δ 、曲げ剛比 r 、板の縦横比、作用応力条件に対して座屈係数 k を線形座屈理論をもとにして求めたもので、板の座屈応力 σ_{cr} の値が補剛材で区分されたサブパネルの4周単純支持板として求めた応力の値と等しくおいたときに対応する補剛材の δ 、 r のことを最適剛比とよんでいる。この考え方によれば、基本的には真直な板が限界応力に達して座屈するとき、水平補剛材も腹板とともに腹板面外へ座屈変形することになり、補剛材は、板の座屈に対して節線となることはない。Stüssi と Dubas¹⁵⁾ は座屈に対して腹板が水平補剛材線上で節線になるように、中間支持された連続板としての座屈応力と補剛材つき板の座屈応力を等しくおいたときに対応する r^* を補剛材の最小必要剛比とよんでいる。純曲げの場合の上によって得られた r_0 と r^* の値は **Table 1** のようになる。また、DIN 4114 の r_0 の値も示してある。DIN 4114 に規定される r_0 の値は $\alpha \leq 1.8$ では (1)、(2) に比べて上まわる r 値を与えているが、 $\alpha > 1.8$ では (1) による r_0 値に近い値を近似している。Massonnet¹²⁾ は腹板座屈後の水平補剛材の変形がプレートガーダーの耐荷力に重要な影響をおよぼすとし

て、桁が曲げを受けて崩壊にいたるまで水平補剛材が真直であるために必要な剛度を最小剛比 r_0 を基本にして求めている。水平補剛材の腹板高さへのとりつけ位置により、 $r_{req.} = (3 \sim 7) \times r_0$ の曲げ剛比をもたせることを提案している。Owen と Rockey¹⁴⁾ は腹板の幅厚比 $\beta = 751$ という非常に薄い腹板をもつプレートガーダーに1本および2本の水平補剛材をとりつけた場合の純曲げによる耐荷力実験を行ない、補剛材の曲げ剛比 $r = 0 \sim 8 r_0$ について曲げ耐荷力を求めた。その結果、Massonnet が提案した桁の極限状態までに必要とされる水平補剛材の曲げ剛比 $r_{req.}$ は妥当な値であることを確認している。Cooper^{1),6)} は水平補剛材を1本有するプレートガーダーの曲げによる面外強度を圧縮フランジと水平補剛材からなる柱の横座屈としてとりあつかった。そして、水平補剛材を1本有するプレートガーダー ($\beta = 407 \sim 447$, $r = 1 \sim 2 r_0$) の実験を行ない、曲げ耐荷力の理論との比較を行なっている。小松¹⁸⁾ は1本および2本の水平補剛材を有するプレートガーダー ($\beta = 191 \sim 295$, $r = 4 \sim 5 r_0$) の曲げ耐荷力実験を行ない、桁の極限強度、腹板の有効幅などを検討している。また、前田²⁰⁾ は圧縮フランジ SM 58、腹板 SS 41、引張フランジ HT 80 からなるハイブリッドガーダー ($\beta = 141 \sim 281$, $r = 4 \sim 6.5 r_0$) の曲げ実験を行ない、面内曲げ性状、曲げ耐荷力などを考察している。

以上のように、水平補剛材をもつ腹板および桁としての耐荷力におよぼす補剛材の効果については、すでに多

Table 1 Optimum Relative Rigidities.

Optimum Relative Rigidity r		Web Aspect Ratio α								Web Condition $\delta = 0.1, \psi = -1$ 
		0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.25	2.5	
(1) Klöppel	r_0	12.5	21	30	40.5	51.5	58.5	62.5	64.5	65
(2) Stüssi & Dubas	r^*	16	25.5	36.5	49	61.5	73	83	89.5	92
(3) DIN 4114	r_0	21	29	41.5	53.5	66	70	70	70	70

* 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 名城大学助手 理工学部土木工学科

くの研究が発表されてきている^{5),19),20)}。筆者は、先にプレートガーダーが面外変形を伴うときの曲げ耐荷力を桁の横倒れ座屈強度を基本として求めてきたが^{7),22)~25)}、ここでは水平補剛材をもつ桁の曲げによる横倒れ耐荷力に対して、以下のような観点にたって研究を行なった。

(1) 桁の横倒れ座屈強度に対する水平補剛材の強度材としての貢献度、すなわち、腹板断面の変形を制限し補剛材が横倒れ座屈強度に与える効果を積極的に評価する。本来、補剛材の係数 δ , r は腹板の座屈に対する補剛のためのパラメーターであるが、ここでは、そのようにして設けられた補剛材が桁の横倒れに対してどのような効果をもつかを調べようとしたものである。

(2) 桁のフランジ、補剛材に含まれる残留応力分布、初期変形が桁の横倒れ耐荷力におよぼす効果について評価する。崩壊にいたるまでの荷重と断面の変形についての実験値と計算値との比較を行なう。

(3) 水平補剛材の $r=0, 2r_0, 5r_0$ の供試体(6体)を用いて、上下不等フランジをもつプレートガーダーの曲げによる横倒れ耐荷力実験と各種参考荷重との比較検討をする。

(4) 水平補剛材をもつプレートガーダーの横倒れ耐荷力に対する基本強度式の算定などである。

2. 横倒れ耐荷力の理論

(1) 横倒れ座屈強度

水平補剛材をもつ桁の等曲げによる横倒れ座屈強度を求め、水平補剛材が座屈強度に与える影響を調べた。解析にあたって残留応力分布ならびに断面の降伏域のひろがり容易に加味するために断面を小区分する方法をとり、一軸対称断面部材の横倒れ座屈強度を求める汎用のプログラムを作成した。

一軸対称断面部材の等曲げによる横倒れ座屈強度式は両端単純支持部材では一般に次の式で表わされる^{17),22)}。

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L_e} \sqrt{B_y} \sqrt{(C_T - \bar{K}) + \frac{\pi^2}{L_e^2} C_w} \dots (1)$$

ここに、 L_e =単純支持された部材の長さ、 B_y =弱軸まわりの曲げ剛度、 C_T =St. Venant のねじれ剛度、 C_w =そりねじれ剛度である。また、 \bar{K} 項は断面に生ずる垂直応力によって発生するせん断中心まわりの付加トルクになり、**Fig. 1** に示す分割断面では

$$\bar{K} = \sum_i \sigma_{ij} \rho_{ij}^2 A_{ij} \dots (2)$$

のようになる。

座屈強度におよぼす各種剛度の考え方は残留応力と曲げ応力の和が降伏点応力 σ_y に達した断面部分 (**Fig. 1** の黒く塗りつぶした部分) については接線係数理論を用

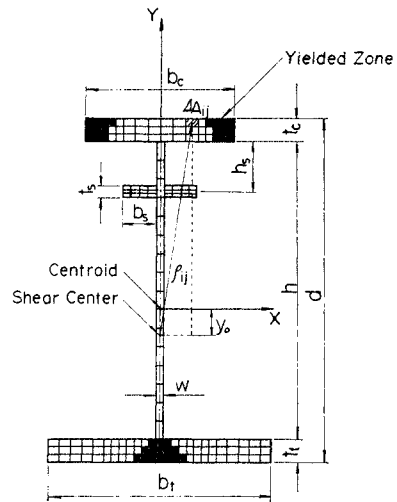


Fig. 1 Cross-Sectional Segments.

いた²²⁾。数値計算では断面の曲げモーメント—曲率関係を求めるのに、断面の重心点でのひずみを適当にえらび、trial and error にて断面における $\sum_i \sigma_{ij} \Delta A_{ij} = 0$ が得られたときの曲率にしたがうひずみ分布を求め、これに対応する断面の曲げモーメント、応力分布、断面に生ずる降伏域のひろがりを求めることができる。このようにして求めた曲げモーメント—曲率—降伏域のひろがり関係を用いて B_y, C_T, C_w, \bar{K} の値を小区分した断面に対して求め、式(1)に代入すると、等曲げを受ける

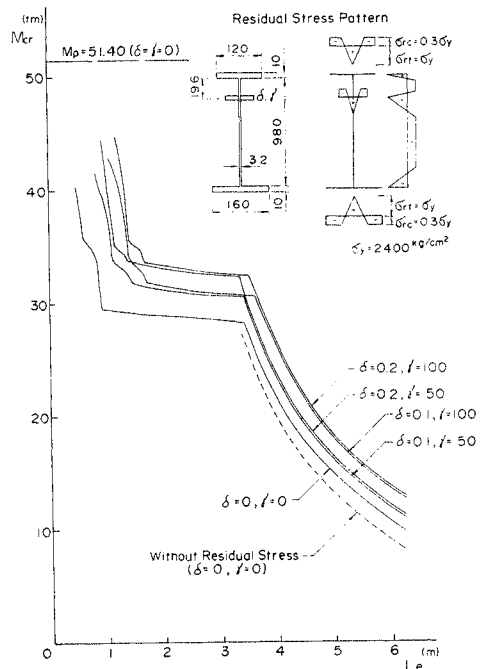


Fig. 2 Lateral Buckling Strength of Longitudinally Stiffened Plate Girders.

横倒れ座屈強度が求まる。

Fig. 2 は水平補剛材をもつ I 形桁 (SS 41 材) の横倒れ座屈強度を式 (1) により求めた結果を示す。**Fig. 1** に示すように、残留応力分布の勾配が急なところは面積区分を細かくとり、上下のフランジ 24×8、腹板 30×1、水平補剛材 16×5 の断面分割数をとった。図中の水平補剛材のない桁 ($\delta=0, r=0$) の弾性座屈強度曲線は断面分割法によって得られた理論値であるが、Clark³⁾ による厳密解とほぼ一致している。ここに、 δ, r は水平補剛材に関するパラメーターであり、 $\delta=A_s/A_w, r=EI_s/Dh$ によって表わされる²⁾。また、 I_s は水平補剛材の腹板面に関する断面 2 次モーメント $I_s=2b_s^3t_s/3$ が用いである。なお、ねじれに対する腹板の断面変形を考慮した座屈強度の低減は約 1.5% ほどであり、両者の差はないとみなしうる¹¹⁾。**Fig. 2** の実線の座屈強度曲線群は図中に示すような残留応力分布形状を仮定して求めた弾性ならびに非弾性横倒れ座屈強度を示しており、水平補剛材の面積比 δ と曲げ剛比 r をパラメーターとしている。水平補剛材による横倒れ座屈強度の向上は弾性域では r による影響が顕著であるが、これに反して非弾性域ではむしろ δ による影響が大きくなっている。

次に、水平補剛材が桁の降伏モーメント M_y 、全塑性モーメント M_p におよぼす効果と横倒れ座屈強度におよぼす効果とを比較したのが **Fig. 3** である。縦軸には無補剛桁に対する有補剛桁の強度の増加割合をとっている。なお、水平補剛材に対しては板厚を一定にして自由突出幅 b_s を変化させながら、比較したものである。この図からわかるように、 M_y, M_p (面内強度) の増加率よりも非弾性横倒れ座屈強度の増加率が常に上まわっており、腹板の座屈強度の向上に対して入れた水平補剛材が横倒れ座屈に対しても効果があることが明らかになった。

(2) 横倒れ耐荷力と変形

プレートガーダーの横倒れ変形に伴う曲げ耐荷力は前

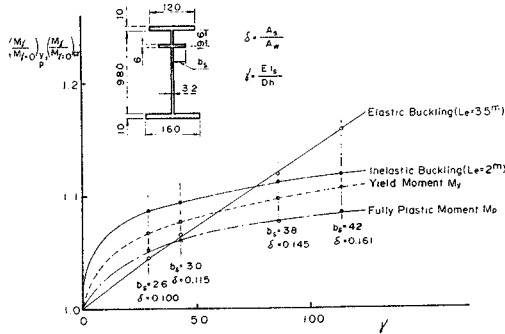


Fig. 3 Effect of Longitudinal Stiffener upon the in-plane and out-of-plane Strength of Plate Girder.

節 (1) の横倒れ座屈強度を基準にして求めるが、断面の St. Venant のねじれ剛度を無視すると、圧縮側フランジ部を柱とみなした解析法として取扱いうる。文献 1) ではプレートガーダーの圧縮側フランジと腹板の 1/6 からなる T 形断面柱の横倒れ座屈を考慮しており、また文献 4) では水平補剛材を 1 本もつ場合は、圧縮側フランジと水平補剛材からなる柱の横倒れ座屈として取扱っている。文献 1), 4) はいずれも初期変形のない桁を対象としており、固有値問題として取扱っている。

初期変形をもつ桁の弾性横倒れ解析は断面変形がない場合は Nylander¹³⁾, Trahair¹⁴⁾ などによって行なわれており、初期変形が曲げ強度におよぼす度合いを調べている。文献 13) は **Fig. 4** に示す初期変形 (点線の断面) をもつ桁の曲げ弾性横倒れ変形とモーメントとの関係を求めている。すなわち、

(a) 初期変形が部材の水平変位のみによる場合

[**Fig. 4** (a)]

$$u = \frac{u_0}{\left(\frac{M_E}{M}\right)^2 - 1} \left[1 + \frac{\frac{M_E}{M}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\kappa}{\pi}\right)^2}} \right] \sin \frac{\pi z}{L_e} \dots\dots\dots (3a)$$

(b) 初期変形が部材の水平変位とねじれによる場合

[**Fig. 4** (b)]

$$u = \frac{u_0}{\frac{M_E}{M} - 1} \sin \frac{\pi z}{L_e} \dots\dots\dots (3b)$$

(c) 初期変形が部材のねじれのみによる場合

[**Fig. 4** (c)]

$$u = \frac{u_0}{\left(\frac{M_E}{M}\right)^2 - 1} \left[1 + \frac{M_E}{M} \sqrt{1 + \left(\frac{\kappa}{\pi}\right)^2} \right] \sin \frac{\pi z}{L_e} \dots\dots\dots (3c)$$

ここに、 u_0 = 圧縮側フランジの初期水平変位、 u = 曲げによって生ずる水平変位、 M = 作用曲げモーメント、 M_E = 弾性横倒れ座屈モーメント、 $\kappa = L_e \sqrt{C_T/C_w}$ である。薄肉腹板をもつプレートガーダーでは、一般に式 (3) において $\sqrt{1 + (\kappa/\pi)^2} \cong 1$ とおけるので、式 (3a), (3c) は式 (3b) と一致する。

本研究では初期変形をもつプレートガーダーの曲げによる面外変形ならびに横倒れ耐荷力について考察するも

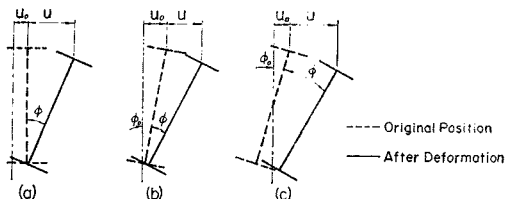


Fig. 4 Initial Imperfections of Girders.

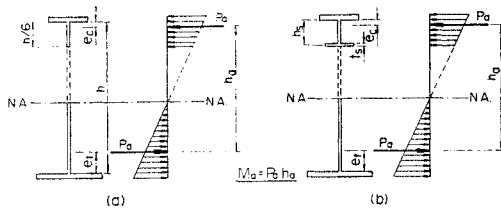


Fig. 5 Effective Cross Section for Ultimate Bending Strength.

のである。そして、前節(1)で求めた固有値問題としての横倒れ座屈強度との比較を行ない、これらの結果と実験結果との比較検討を行なっている。水平補剛材のない桁では Fig. 5 (a) に示すように圧縮側フランジと腹板の一部 ($h/6$) からなる T 形断面を有効断面とした柱とみなし、また 1 本の水平補剛材をもつ桁では Fig. 5 (b) のように圧縮側フランジと水平補剛材とその間にはさまれた腹板からなる断面を有効断面とした柱とみなし、このような柱の初期変形と残留応力をもつ中心圧縮柱としての耐荷力を求めた。

初期変形は桁の圧縮側フランジの初期水平変位によって代表させ、その形状を $u_{0z} = u_0 \sin(\pi z/L_e)$ と仮定し、柱の中央断面 ($z=L_e/2$) で最大値 u_0 になるようにした。数値計算は柱の材長を 20 等分して、この分割要素の変位曲線を円弧と仮定し、断面に存在する残留応力を考慮した曲げモーメント—曲率—軸力関係をもとに数値積分法によって行なった。また、Fig. 5 に示すように、圧縮側腹板の欠損部を無視した有効断面に関して曲げ応力分布を仮定すると、断面に生ずる圧縮合力と引張合力

の作用点間距離 h_a を定めることができる。このようにして、柱としての最高強度 P_a が求めれば、桁の横倒れ耐荷力は $M_a = P_a h_a$ によって求めることができる。

Fig. 6 は桁に作用する曲げモーメント M とスパン中央における圧縮側フランジの横倒れに伴う水平変位 u との関係を表わしたものである。図において、弾性の横倒れ座屈強度 M_E は式 (3 b) の 2 次の弾性解析曲線において u を無限大にしたときの強度に一致する。図中の 2 次の剛塑性解析曲線は桁の全塑性モーメント M_p における圧縮側応力部を柱とした場合に、スパン中央断面で軸力と曲げモーメントの降伏条件を満足するものとして求められる曲線である。また、2 次の弾塑性解析曲線は断面の残留応力と初期変形を考慮した柱の解析から得られる曲線である。図中の真の挙動と記した太実線は桁の実際の荷重—変形挙動であり、上に示した参考曲線によって横倒れの荷重—変形関係を説明することができる。

3. 実験的考察

以下の実験的考察は筆者の一人福本の指導のもとに横山(文献 27)が行なった実験内容をもとに、前章の理論的考察と比較を行なうために実験資料に考察を加えたものである。

(1) 供試体寸法

供試体は腹板をできるだけ薄くし、圧縮側フランジ下縁から腹板高さ h の 0.2 の位置で両側に水平補剛材をとりつけた溶接プレートガーダーである。すなわち、桁高さ $d=100$ cm、腹板厚 $w=0.32$ cm であり、腹板の幅厚比は $\beta=h/w=306$ となっている。供試体長さは $L=2.8$ m (2 パネル、アスペクト比 $\alpha=1.02$) と $L=3.3$ m (3 パネル、アスペクト比 $\alpha=0.85$) の 2 種類を用い、弾塑性域で横倒れ座屈が生ずるように配慮してある。また、水平補剛材の剛度は Klöppel^{(9), (10)} に基づく最適曲げ剛比 (腹板の上下縁の応力比 $\psi=-0.87$ の場合) r_0 の 0 倍、2 倍、5 倍と変化させてあり、そのほかの断面寸法は同一にした。なお、使用鋼材はフランジ SM 50、腹板と補剛材 SS 41 である。

Fig. 7 は供試体の詳細図であり、Table 2 には供試体寸法がまとめてある。Table 2 には DIN 4114 に規定されている式から求めた水平補剛材の最適剛比 r_0 が参考のためにあげてあるが、これは Klöppel による r_0 よりも大きな値を与えている。本論文では Klöppel に基づく最適曲げ剛比 r_0 によって議論を進めることにする。Table 3 には各供試体の断面諸性質がまとめてある。水平補剛材をとりつけたことにより、鋼重としては

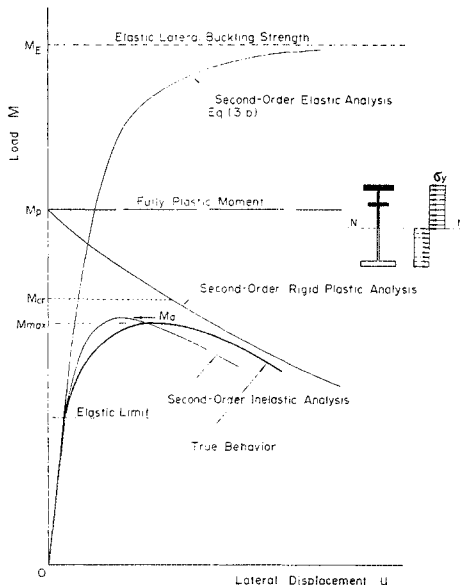


Fig. 6 Schematic Curves illustrating Load-Lateral Displacement Relationship.

Table 2 Longitudinal Stiffeners of Test Girders.

Test Girders	Cross Section (mm)	b_s (mm)	t_s (mm)	δ	r	Klöppel ($\psi = -0.87$)		DIN 4114		L (mm)	$\alpha = a/h$	Number of Panels
						r_0	r/r_0	r_0	r/r_0			
UA-0	$h=980$	0	0	0	0	—	0	—	0	2800	1.02	2
UA-1	$b_c=120$	30	6	0.12	43	20	2.1	32.4	1.3	2800	1.02	2
UA-2	$b_t=160$ $tw=3.2$	42	6	0.16	114	22	5.1	36.6	3.1	2800	1.02	2
UB-0	$t_c=10$	0	0	0	0	—	0	—	0	3300	0.85	3
UB-1	$t_t=10$	26	6	0.10	29	14	2.0	24.4	1.2	3300	0.85	3
UB-2	$\beta = h/tw=306$	38	6	0.15	86	16	5.2	28.6	3.0	3300	0.85	3

Table 3 Cross-Sectional Properties of Test Girders.

Test Girders	A_s (cm ²)	A (cm ²)	I_g (cm ⁴)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	r_x (cm)	r_y (cm)	W_c (cm ³)	A/A_0	W_c/W_{c0}
UA-0	0	59.36	0	93 047	486	39.59	2.86	1 744	1.0	1.0
UA-1	3.60	62.96	12.62	96 685	498	39.19	2.81	1 879	1.061	1.078
UA-2	5.04	64.40	33.15	98 026	519	39.01	2.84	1 931	1.085	1.107
UB-0	0	59.36	0	93 047	486	39.59	2.86	1 744	1.0	1.0
UB-1	3.12	62.48	8.41	96 224	494	39.24	2.82	1 861	1.053	1.067
UB-2	4.56	23.92	24.83	97 585	510	39.07	2.83	1 913	1.077	1.097

A_0, W_{c0} for Plate Girders without Longitudinal Stiffener (UA-0 and UB-0)

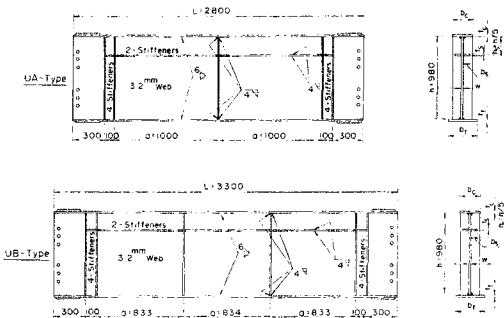


Fig. 7 Test Girders.

約9%までの増加になっているが、圧縮側断面係数の増加は鋼重の増加割合より2%ほど大きくなっている。

(2) 実験方法

曲げ実験は箱形断面のかなり剛な載荷用はりを用いて行なった²³⁾。載荷用はりとは供試体との連結は形鋼を介してHTボルト締めによって固定した。載荷は中央の供試体に等曲げモーメントが作用するように2点集中荷重として、載荷用はりに加圧した。また、載荷用はりの両側面に横倒れ防止枠を配置し、供試体は横倒れに対して固定支持の条件が満足されるようにしてある。

測定は上下フランジのひずみ測定、水平変位、鉛直変位およびねじれ角測定をそれぞれ行ない、あわせて腹板、水平補剛材のひずみ測定とたわみ測定も行なった。

Photo. 1 は実験の全景写真である。

(3) 実験結果

a) 供試体の初期変形

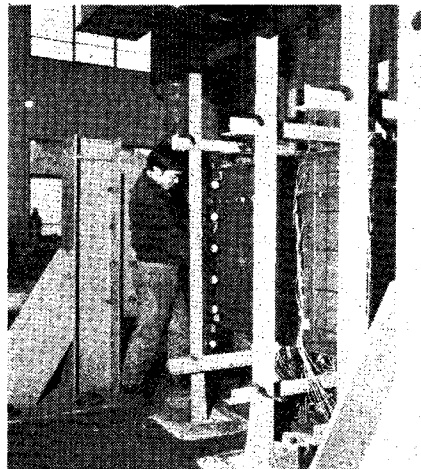


Photo. 1 Girder UA-1 during Test.

Table 4 Initial Imperfections.

Test Girders	Compression Flange		Web	
	\bar{u}_0 (mm)	\bar{u}_0/L	δ_0 (mm)	δ_0/tw
UA-0	0	0	4.5	1.42
UA-1	0	0	4.6	1.44
UA-2	2	1/1 400	2.5	0.78
UB-0	6	1/ 550	6	1.88
UB-1	3	1/1 100	3.6	1.12
UB-2	1	1/3 300	2.7	0.85

供試体は薄肉腹板のため、溶接組立による加工ひずみが生じたが、実際の桁製作と同様にひずみとりきょう正を行なった。Table 4 は供試体の初期変形量をまとめたものである。フランジの初期変形としては載荷用はりにとりつけ、加圧できる状態のもとで、スパン中央での圧縮側フランジの水平方向の初期たわみ量を供試体の両

端部からの曲りによって測定した。また、腹板の初期たわみは上下フランジと腹板との溶接線を含む面からの面外たわみとして測定した。Table 4 には腹板の最大初期たわみ量もまとめてあり、最大値は腹板厚の約2倍になっている。

b) 鋼材の引張試験

供試体のフランジと腹板に用いた板厚 10 mm, 3.2 mm の JIS 1号引張試験結果を Table 5 に示す。なお、実験結果の整理は材料強度として同表の平均値を用いている。

c) 荷重変位曲線

Fig. 8, 9, 10 は供試体のスパン中央断面における圧縮側フランジの水平変位 u 、鉛直変位 v と作用モーメント M との関係を示したものである。水平変位 u は圧縮側フランジの水平曲げによる変曲点（スパンの 1/4 点）からの相対変位によって表わしてある。図中、 v に対する一点鎖線は弾性たわみ曲線 $v=ML^2/8EI_x$ を表わしており、また実線は Fig. 2 に示した残留応力分布

Table 5 Mechanical Properties of Steels.

SM 50 Steel (Flange)

Specimens	σ_y (kg/cm ²)	σ_u (kg/cm ²)	ν	E (kg/cm ²)	σ_u/σ_y	thickness (mm)
T-1	3 460	5 430	0.27	($\times 10^6$) 2.08	1.569	10
T-2	3 497	5 437	0.27	2.09	1.554	
T-3	3 566	5 461	0.28	2.10	1.531	
Average	3 508	5 443	0.27	2.09	1.551	

SS 41 Steel (Web)

Specimens	σ_y (kg/cm ²)	σ_u (kg/cm ²)	ν	E (kg/cm ²)	σ_u/σ_y	thickness (mm)
T-1	2 165	3 515	0.25	($\times 10^6$) 2.01	1.623	3.2
T-2	2 146	3 506	0.29	2.17	1.634	
T-3	2 120	3 506	0.31	2.12	1.654	
Average	2 143	3 509	0.28	2.10	1.637	

σ_y = Static Yield Stress, σ_u = Ultimate Stress
 ν = Poisson's Ratio, E = Young's Modulus

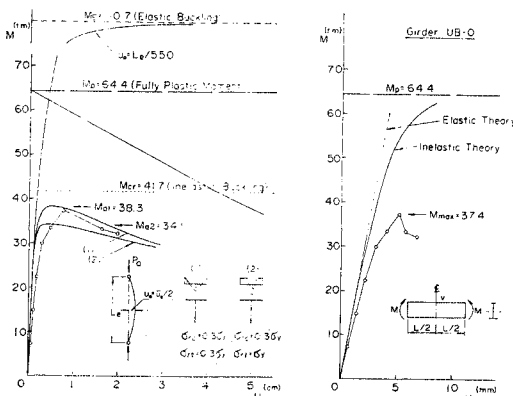


Fig. 8 Load-Deflection Curves for Girder UB-0.

を考慮した非弾性面内たわみ曲線である。実測による $M-v$ 曲線が面内たわみ曲線から離れてくるのは、作用モーメントとともに桁が面外変形 ($M-u$ 曲線) していることを表わしている。

d) 横倒れ耐荷力の実験値と腹板パネルの強度

Table 6 には、実験から得られた各供試体の最高荷重 M_{max} ならびに桁の横倒れ座屈強度と腹板パネルの強度がまとめてある。横倒れ座屈の計算値 M_{cr} は Fig. 12, 13 に示す残留応力分布 (A) および (B) を用いて

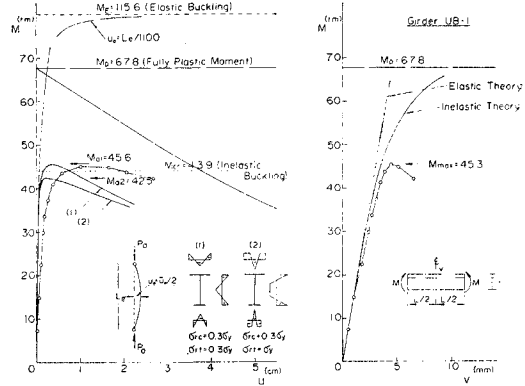


Fig. 9 Load-Deflection Curves for Girder UB-1.

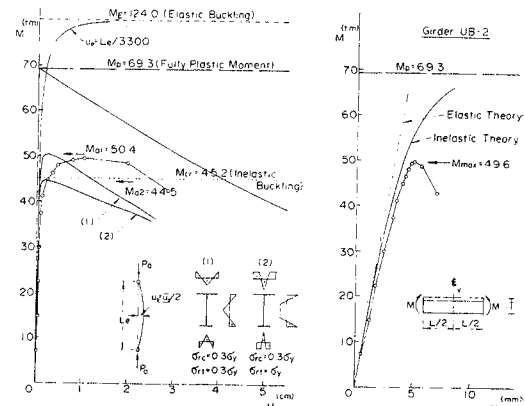


Fig. 10 Load-Deflection Curves for Girder UB-2.

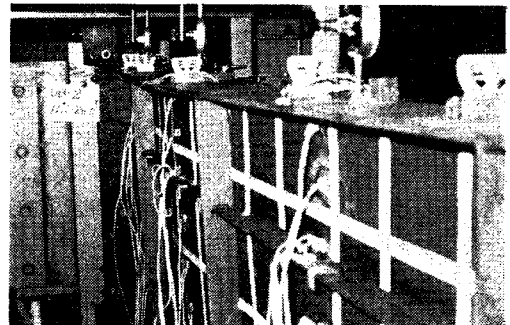
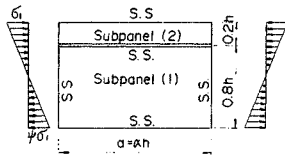


Photo. 2 Girder UB-2 after Failure.

Table 6 Lateral Buckling and Web Plate Buckling Strength.

Test Girders	Lateral Buckling Strength					Web Buckling*	
	Experimental M_{max} (tm)	Theoretical				Theoretical	
		Residual Stress Pattern				Subpanel	
		(A)	(B)	(A)	(B)	(1)	(2)
	M_{cr} (tm)	M_{max}/M_{cr}	M_{cr} (tm)	M_{max}/M_{cr}	M_{w1} (tm)	M_{w2} (tm)	
UA-0	47.2	51.99	0.908	41.92	1.126	7.75	—
UA-1	54.2	54.81	0.989	44.49	1.218	37.72	45.55
UA-2	51.2	59.98	0.854	46.63	1.098	40.94	47.00
UB-0	37.4	50.10	0.747	41.78	0.895	7.41	—
UB-1	45.3	52.77	0.858	43.91	1.032	35.78	45.01
UB-2	49.6	56.43	0.879	45.23	1.097	38.90	46.47

* Boundary Condition



S.S.: Simply Supported

式 (1) から求めた値である。 M_{cr}/M_{max} の値が供試体により異なるのは、Fig. 8, 9, 10 からみてもわかるように圧縮側フランジの水平方向の初期変形が表われているとみなしうる。腹板強度の計算値 M_w はそれぞれ、サブパネル (1) および (2) を 4 周単純支持板として作用応力のもとで求めた弾性座屈値である。

Photo. 2 は水平補剛材をもつ桁 (UB-2) の実験後の横倒れ変形状況を示したものである。

4. 考 察

(1) 横倒れ変形に伴う作用モーメント—水平変位曲線

Fig. 8, 9, 10 の左側は スパン中央における 作用モーメント—水平変位曲線 ($M-u$ 曲線) を整理してある。なお、曲げ実験が横倒れに対して両端固定支持桁として行なっているので、 $M-u$ 曲線の計算は部材の長さとして座屈有効長さ $L_e=L/2$ を、初期変形として Table 4 に示した \bar{u}_0 による $u_0=\bar{u}_0/2$ を用いた。これらの図で細い実線の弾性曲線は u_0 の実測値を用いて式 (3b) より求めたものである。太い実線の弾塑性曲線 (1), (2) は圧縮側フランジ部を柱とみなした非弾性解析から求めてあり、図中に示す u_0 の実測値と残留応力分布 (1) および (2) を用いた。また、 M_{cr} は Fig. 2 に示した残留応力分布を考慮して求めた非弾性横倒れ座屈強度である。縦軸の M_p から斜め右に降下する曲線は Fig. 6 に示した 2 次の剛塑性解析から得られた曲線であり、 $M-u$ 関係の上限を与えていることがわかる。これらの図で残留応力分布 (1) を用いて求めた最高強度 M_{a1} は横倒れ耐荷力の実験値 M_{max} に接近している。また、実験によって得られた $M-u$ 曲線は初期の荷重段階から

理論曲線よりも大きく生じているが、Fig. 8, 9, 10 に示した各参考曲線によってよく説明されている。

(2) 横倒れを伴う桁の最高強度

Fig. 11 は水平補剛材を圧縮側フランジ下縁から腹板高さの 0.2 の位置に 1 本とりつけた場合の横倒れ耐荷力を、柱としての最高強度によって求めたものであり、初期変形 $u_0=L_e/1000$ と一定にして、水平補剛材の面積比 δ と曲げ剛比 γ が変化させてある。縦軸には σ_a/σ_y をとり横軸に $\lambda=(L_e/r_c/L_e/r_c)_{elastic}$ をとっている。ここに、 $\sigma_a=M_d/W_{c0}$ 、 W_{c0} は水平補剛材のない桁の圧縮側断面係数である。また、断面 2 次半径 r_c は Fig. 5 に示した有効圧縮断面の腹板の中心線に関する断面 2 次半径 $r_c=\sqrt{I_c/A_c}$ を用いた。この図からも、水平補剛材による強度の向上が認められる。また、Fig. 2 でみられたと同様に、弾性域では r による影響が大きい、非弾性域では δ による影響が大きくなっている。

Fig. 12 は水平補剛材をもたない桁 ($\delta=0, \gamma=0$) の横倒れ最高強度曲線を図示したものである。縦軸に σ_a/σ_y あるいは σ_{cr}/σ_y をとり、横軸に $\lambda=(L_e/r/L_e/r)_{elastic}$

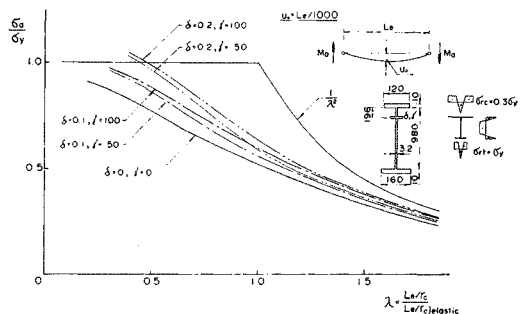


Fig. 11 Effect of δ -and γ -values on Ultimate Bending Strength Curves.

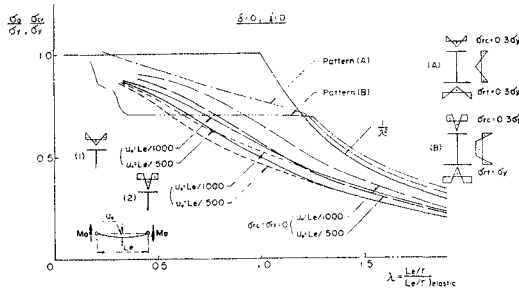


Fig. 12 Ultimate Bending Strength Curves for Plate Girder without Longitudinal Stiffener.

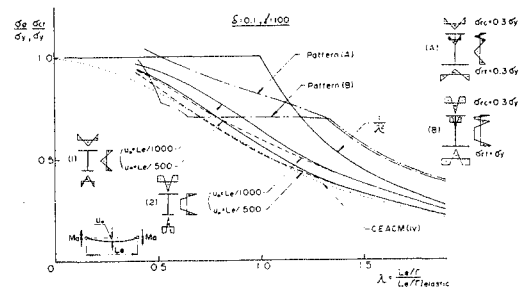


Fig. 13 Ultimate Bending Strength Curves for Plate Girder with Longitudinal Stiffener.

をとっている。ここに、 $\sigma_{cr} = M_{cr} / W_{c0}$ であり、また、断面 2 次半径 r は横倒れ座屈強度曲線には Table 3 にあげた $r_y = \sqrt{I_y / A}$ を、最高強度曲線 (1), (2) には有効圧縮断面の腹板の中心線に関する断面 2 次半径 r_c を用いた。図中に示す残留応力分布 (A) および (B) を考慮して求めた弾塑性横倒れ座屈強度は一点鎖線と二点鎖線の曲線によって示してある。実線の強度曲線は残留応力分布 (1) を考慮して最高強度を求めたものであり、初期変形 $u_0 = L_e / 1000$, $u_0 = L_e / 500$ について与えてある。点線の曲線は残留応力分布 (2) を仮定して求めたものである。残留応力のない場合の強度曲線は破線によって表わしてある。この図に示した各強度曲線によって残留応力と初期変形が桁の最高強度に与える影響をみることができる。

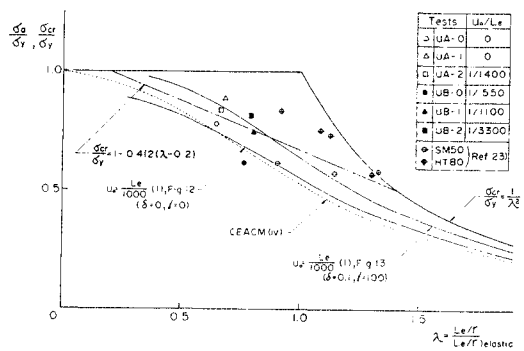


Fig. 14 Comparison of Ultimate Bending Strength between Theory and Test.

Fig. 13 は Fig. 12 と同様な強度曲線を水平補剛材をもつ桁 ($\delta = 0.1$, $r = 100$) の場合について示したものである。なお、図中の CEACM(IV) の曲線はヨーロッパ鋼構造協会連合の VIII 技術委員会が提案している鋼柱の耐力曲線 (IV) である²¹⁾。この曲線は $\sigma_{rc} = 0.5 \sigma_y$ と $u_0 = L_e / 1000$ を仮定して求められた強度を基本としており、I 形溶接断面の弱軸に関する耐力である。Fig. 13 に示した最高強度曲線はこの提案曲線とほぼ同様な傾向を表わしている。

$\sigma_y = 3508 \text{ kg/cm}^2$ を用いた。図中には文献 23) による水平補剛材をもたないプレートガーダー (腹板の幅厚比 $\beta = 133, 166$) の実験値も記入してある。図中の一点鎖線は文献 23) で提案している非弾性横倒れ座屈強度式である。点線は Fig. 13 に示した CEACM(IV) の曲線である。また、Fig. 12, 13 の $u_0 = L_e / 1000$, 残留応力分布 (1) の場合の最高強度曲線も示してある。この 2 本の曲線の差は $\delta = 0.1$, $r = 100$ なる水平補剛材による強度の向上を表わしている。この図から、各供試体の初期変形量と最高強度との相関関係をみることができる。

Fig. 14 は Table 6 にあげた横倒れ耐力の実験値 M_{max} を $M_y = \sigma_y W_{c0}$ によって無次元化してプロットしたものである。 M_y の算定はフランジ板の降伏点応力

Table 7 には本実験の各供試体について桁の最高強度がまとめてあり、 M_{a1} , M_{a2} は Fig. 8, 9, 10 に示した残留応力分布 (1) および (2) を仮定して求めてある。また、同表には桁の全塑性モーメント M_p と弾性横倒

Table 7 Ultimate Bending Strength of Test Girders (Theory and Test).

Test Girders	Experimental		Theoretical					
	M_{max} (tm)	Effect of Stiffener	M_p (tm)	M_E (tm)	Residual Stress Pattern			
					(1)		(2)	
				M_{a1} (tm)	M_{max} / M_{a1}	M_{a2} (tm)	M_{max} / M_{a2}	
UA-0	47.2	1.0	64.37	153.46	—	—	—	—
UA-1	54.2	1.148	68.31	163.40	—	—	—	—
UA-2	51.2	1.085	69.79	177.99	51.37	0.997	46.16	1.109
UB-0	37.4	1.0	64.37	110.72	38.32	0.976	34.13	1.096
UB-1	45.3	1.211	67.80	115.58	45.55	0.995	42.49	1.066
UB-2	49.6	1.326	69.30	123.96	50.44	0.983	44.53	1.114

M_p = Fully Plastic Moment, M_E = Elastic Lateral Buckling Moment.

れ座屈強度 M_E も併記してある。

5. 結 言

水平補剛材をもつプレートガーダーの曲げによる横倒れ耐荷力に関して理論的および実験的研究を行なった。得られた結論の主なものは次のようである。

(1) 腹板の座屈強度の向上のために入れる水平補剛材が横倒れ耐荷力にも影響をおよぼす点について検討した。弾性域および非弾性域における横倒れ座屈強度におよぼす水平補剛材の δ , r の効果は Fig. 2, 3 にみられるが、一般的に弾性座屈強度は δ によってはあまり変化しないが r によって比較的大きく変化し、座屈強度の向上が得られる。これに反して、非弾性域の座屈強度の向上は r よりも δ によって大きく変化する。

(2) プレートガーダーの曲げによる横倒れ耐荷力を求める場合の曲げ応力分布および抵抗する有効断面は Fig. 5 のように考え、水平補剛材も耐荷力に対して強度材として働くものとする。

(3) 崩壊にいたるまでの桁の圧縮側フランジの水平変位と荷重との関係は Fig. 8, 9, 10 のようになるが、圧縮側フランジ、水平補剛材、その間の腹板からなる有効圧縮部材が初期変形と残留応力のもとに、荷重とともに水平方向に変形しながら最高強度に達するとして求めた理論解析によってよく説明することができる。

(4) 有効圧縮部材の強度として求めた桁の横倒れ耐荷力と圧縮側フランジの初期変形との関係を Fig. 12, 13, 14 に示したが、これを用いて初期変形のある水平補剛材をもつ桁の横倒れ耐荷強度を求めることができる。

本研究は本州四国連絡橋公団から名古屋大学への委託研究(昭和46年度)の一部として行なったものであり、関係各位に深く感謝する次第である。供試体の製作加工は滝上工業(株)に依頼した。また、本論文中の実験は横山 敦君(現 愛知県土木部)に修士論文の一部として協力していただいたことを付記し、ここに厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- Basler, K. and Thürlimann, B.: Strength of Plate Girders in Bending, Proc. ASCE, Vol. 87, ST 6, August, 1961.
 - Bleich, F.: Buckling Strength of Metal Structures, McGraw-Hill, New York, 1952.
 - Clark, J.W. and Hill, H.N.: Lateral Buckling of Beams and Girders, Trans. ASCE, Vol. 127, Part II, 1962.
 - Cooper, P.B.: Strength of Longitudinally Stiffened Plate Girders, Proc. ASCE, Vol. 93, ST 2, April, 1967.
 - Design of Plate and Box Girders for Ultimate Strength, IABSE Colloquium, Proceedings, Volume-
- Band II, London, 1971.
 - D'Apice, M.A., Fielding, D.J. and Cooper, P.B.: Static Tests on Longitudinally Stiffened Plate Girders, Welding Res. Council Bull. Series No. 117, October, 1966.
 - Fukumoto, Y. and Kubo, M.: Lateral Buckling Strength of Girders with Bracing Systems, Preli. Rep. 9th Congress IABSE, Amsterdam, May, 1972.
 - Johnston, B.G.: The Guide to Design Criteria for Metal Compression Members, Second Ed. John Wiley & Sons, New York, 1966.
 - Klöppl, K. und Scheer, J.: Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1960.
 - Klöppl, K., und Möller, H.: Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten, Band II, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1968.
 - Maeda, Y.: Influence of Web Deformation upon Flexural-Torsional Buckling of I-Shaped Beams, Technology Report of Osaka Univ., No. 907, October, 1969.
 - Massonnet, C.E.L.: Stability Considerations in the Design of Steel Plate Girders, Trans. ASCE, Vol. 127, Part II, 1962.
 - Nylander, H.: Effect of Initial Deformations on Dimensioning with Regard to Lateral Buckling, The Royal Institute of Technology Bulletin No. 75, Stockholm, 1968.
 - Owen, R. and Rockey, K.: Ultimate Load Behaviour of Longitudinally Reinforced Webplates Subjected to Pure Bending, Publ. IABSE, Vol. 30-I, 1970.
 - Stüssi, F.C. and Dubas, P.: Le voilement de l'âme des poutres fléchies avec raidisseur au cinguieme supérieur. Etude complémentaire, Publ. IABSE, Vol. 18, 1958.
 - Trahair, N.S.: Deformations Geometrically Imperfect Beams, Proc. ASCE, Vol. 95, ST 7, July, 1969.
 - Trahair, N.S. and Kitiporchai, S.: Buckling of Inelastic I-Beams Under Uniform Moment, Proc. ASCE, Vol. 98, ST 11, November, 1972.
 - 小松定夫: 水平補剛材を有するプレートガーダーの極限強度に関する実験的研究, 大阪大学工学部土木研究報告, 1968年8月.
 - 小松定夫: 鋼構造物の極限強度設計法, 土木学会関西支部 1970年度講習会テキスト, 1971年3月.
 - 関西橋梁鉄骨溶接研究会: プレートガーダーの座屈に関する調査と研究, 1967年2月.
 - 成岡昌夫・福本昉士・伊藤敏一: ヨーロッパ鋼構造協会連合 VIII 委員会の鋼柱座屈曲線について, JSSC, Vol. 6, No. 55, 1970年.
 - 福本昉士・西野文雄共訳, Galambos 著: 鋼構造部材と骨組—強度と設計—, 丸善, 1970年.
 - 福本昉士・藤原 稔・渡辺信夫: 溶接 I 形部材の横倒れ座屈に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 189号, 1971年5月.
 - 福本昉士・久保全弘: 横構・対傾構をもつ桁の横倒れ座屈強度, 土木学会論文報告集, 第 196号, 1971年12月.
 - 福本昉士・久保全弘: 横補剛されたはりの横倒れ座屈に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第 206号, 1973年4月.
 - 前田幸雄・川井 豊: 水平補剛材を有するハイブリッドプレートガーダーの曲げ耐荷力, 第 18 回橋梁・構造工学研究発表会論文集, 1971年12月.
 - 横山 敦: 水平補剛材をもつプレートガーダーの曲げ耐荷力, 名古屋大学大学院修士論文, No. 72114, 1971年3月. (1973.6.20・受付)