

## プレートガーダーの曲げによるフランジと腹板の連成座屈実験

## COUPLED TESTS OF LATERAL-TORSIONAL BUCKLING AND WEB BUCKLING OF PLATE GIRDERS UNDER BENDING

前川幸次\*・伊藤義人\*\*・福本昉士\*\*\*

By Kohji MAEGAWA, Yoshito ITOH and Yuhshi FUKUMOTO

This paper presents the experimental researches on the coupled behavior of lateral-torsional buckling and web buckling of transversely stiffened plate girders. The cross-sectional dimensions of all the six specimens were proportioned to prevent from local torsional buckling of compression flange, and the web width-thickness ratio was kept constant being equal to 200 for mild steel which is over the current JRA upper limit, 152. Then the effect of preceded web buckling on the ultimate strength of girders failed by lateral-torsional buckling is investigated. In-plane bending strength was also examined. The test results are also compared with those for girders with the web width-thickness ratio smaller than the JRA limit.

*Keywords*: plate girder, experimental study, web buckling, lateral-torsional buckling, ultimate strength

## 1. 緒 言

プレートガーダーの腹板はその周辺をフランジと垂直補剛材で支持されているため、腹板が座屈した後も桁が耐荷能力を持続することはよく知られている。プレートガーダーは板としての挙動とはりとしての挙動が存在する力学的に複雑な構造であるが、終局状態としての耐荷力算定のための力学モデルが多く提案され実験との比較が行われている。プレートガーダーが3つの荷重パターン（純曲げ、せん断、および曲げとせん断）を受ける場合のそれぞれの座屈形式について、Baslerら<sup>1)~3)</sup>は腹板座屈後の桁の耐荷力をモデル解析により検討し評価式を提案した。それ以来、多くの理論的研究<sup>4)~8)</sup>および実験的研究<sup>5), 9)~14)</sup>が報告されている。また、これまでに提案されている種々の耐荷力評価式に対する検討や実験値の調査と検討を行った研究<sup>15), 16)</sup>もある。

それらの研究のうち、福本ら<sup>9)</sup>はプレートガーダーの面外強度は横倒れ座屈として評価できることおよび横倒

れ座屈強度に対する残留応力の影響が顕著であることを示し、また福本ら<sup>10)</sup>は横倒れ座屈に対する水平補剛材の効果を検討している。森脇・藤野<sup>11)~13)</sup>は荷重パターンごとに初期不整の影響を考慮した腹板座屈強度式を提案している。しかしながら、必ずしも腹板の座屈挙動とプレートガーダーの耐荷力の関連については検討していない。その中にあって、小西ら<sup>5)</sup>は直交異方性板としての弾性座屈解析により腹板の曲げ座屈とフランジの水平座屈およびねじれ座屈との連成座屈を研究し、福本ら<sup>9)</sup>は用いた実験桁について腹板の曲げ座屈は横倒れ座屈強度に直接の関連はないようであると報告している。また長谷川ら<sup>14)</sup>は、圧縮フランジのねじれ座屈および水平座屈崩壊が防止されたプレートガーダーでは腹板の幅厚比を現行の道路橋示方書<sup>18)</sup>の規定値（構造用炭素鋼で水平補剛材をもたない腹板に対しては152である）よりもかなり大きくしても降伏モーメント程度の面内強度を保持できることを示している。

道路橋示方書の腹板最大幅厚比の規定値（152）に対応するAASHTO<sup>19)</sup>の荷重係数設計法におけるそれは192であり、この値は疲労問題によって決まっているが、これにより面内強度が降伏モーメントに到達することも保証されている。腹板の幅厚比を緩和する場合、早期の腹板座屈の面外強度（圧縮フランジの水平・ねじれ座屈

\* 正会員 工博 石川工業高等専門学校助教授（現・金沢大学工学部）（〒929-03 石川県河北郡津幡町北中条）

\*\* 正会員 工博 名古屋大学助手 工学部土木工学科（〒464 名古屋千種区不老町）

\*\*\* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科（〒565 吹田市山田丘2番1号）

崩壊)への影響についてあらかじめ検討しておく必要がある。

以上を踏まえ、かつ、先の福本らの報告<sup>9)</sup>の継続研究として、水平補剛材をもたないプレートガーダーの静的純曲げ、および曲げとせん断による耐荷力実験を実施した。本実験結果、本実験桁より腹板の幅厚比は小さいが同種の実験結果<sup>20)</sup>およびより理論に基づく耐荷力解析結果の比較により、腹板の座屈挙動がプレートガーダーの面外強度(圧縮フランジの水平座屈崩壊)に及ぼす影響について報告する。

## 2. 実験内容

### (1) 試験桁

腹板の座屈が桁の横ねじれ耐荷力(ここでは桁の断面特性がプレートガーダーに属することから、圧縮フランジの水平座屈による崩壊とよぶ)に与える影響を明らかにする目的で、Table 1 に示すような6体の試験桁を製作した。Table 1 には各試験桁の横拘束点間長、パネル縦横比、荷重・支持状態、および断面寸法がまとめてある。A シリーズ(桁 GA0~GA3)は支点およびスパン3等分点の載荷点において面外変形を拘束した2点載荷であり、中央部の載荷点間は純曲げを受ける桁に相当している。なお、桁 GA0 についてはすべての垂直補剛材の位置でも圧縮フランジの水平変位を拘束した。B シリーズ(桁 GB1, GB2)は支点およびスパン中央の載荷点において面外変形を拘束してあり、1つの試験桁に対して片曲げとせん断力を受ける桁を2つ設定している。これらのほかに残留応力測定用の桁 GR も製作した。

試験桁は垂直補剛材をもつ二軸対称 I 形プレートガーダーであり、フランジおよび腹板はそれぞれ材質 SS 41 で 8 mm 厚の圧延鋼板および 3.4 mm 厚のコイル材から溶断したのち手溶接により組み立てた。断面寸法は、フ

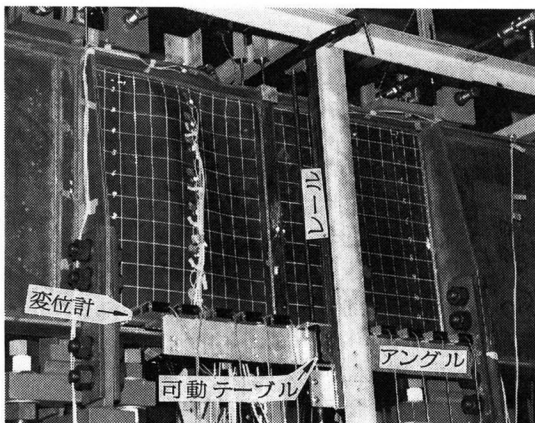


Fig. 1 Web Deflections Measurement.

ランジ幅  $b$ 、フランジ厚  $t$ 、腹板高  $h$ 、腹板厚  $t_w$ 、および垂直補剛材間隔  $a$  として表わされるパネルの縦横比  $a/h=0.82\sim 1.37$ 、フランジの突出幅厚比  $b/2t=6.9$ 、および腹板の面積と圧縮フランジの面積の比  $A_w/A_{cf}=2.3$  である。試験桁は実物大ではないが、これらの値は実用に供されるプレートガーダーの範囲内にある。しかし道路橋示方書における水平補剛材をもたない腹板の最大幅厚比は SS 41 (保証降伏点応力度  $\sigma_y=235\text{ N/mm}^2$ ) に対して  $h/t_w=152$  に制限されているが、本試験桁では腹板の座屈を先行させるために腹板の換算幅厚比  $\beta (= (h/t_w) \cdot \sqrt{\sigma_{yw}/235}$ ,  $\sigma_{yw}$  は腹板の降伏点応力度の実測値) を 200 としてある。中間垂直補剛材は Table 1 のように等間隔で両側に配置し、板幅および板厚をそれぞれ 50 mm および 5.4 mm とした。その腹板に対する剛比  $\gamma_v$  は道路橋示方書の必要剛比  $\gamma_{v,req}$  の約 20~50 倍とかなり大きい。補剛材の間隔が腹板高の 0.8~1.4 程度で腹板幅厚比も極端に大きくないことから、剛比が大きいことによる面内強度への影響はわずかであり<sup>14)</sup>、面外強度への影響も文献 17) を参考とした弾性座屈のモデル解析<sup>15)</sup>によれば無視できると考えられる。A シリーズにおける支点と載荷点間の腹板はせん断座屈を防ぐために腹板厚  $t_w^*$  を 5.4 mm としてある。載荷点、支点および拘束治具の取付け位置の形状は文献 20) のとおりである。

Table 1 Test Program.

Test Girder	L (m)	a/h	Loading & Boundary Conditions	Cross Section
GA0	1.0	0.82		
GA1	1.0	0.82		
GA2	1.5	1.23		
GA3	2.0	1.10		
GB1	2.0	1.10		
GB2	2.5	1.37		

注1) 純曲げを受けるプレートガーダーをフランジと腹板の一部からなる圧縮側の柱と引張側の柱によって表わし、それらは中間で垂直補剛材を介して連結されているものとする。この系の圧縮柱の座屈荷重を Ritz の方法で解く。

製作過程で生ずる桁軸直角方向の曲がりおよび腹板のたわみは、それぞれ油圧曲げ矯正および点加熱矯正により、製作許容値（それぞれ  $l/1000$  および  $h/250$ ）以下に抑えた。ここに、 $l$  は桁長である。また、フランジの直角度に対しても油圧曲げ矯正を行った。

(2) 静的曲げ試験装置と計測装置

載荷・拘束装置および載荷手順は文献(20)と同じであり、各荷重段階における変位とひずみの計測は次のように行った。

フランジの水平変形は計測用フレームから伸ばしたひずみ変換式変位計 11 台を用いてフランジ先端で測定した。また腹板の変形は主要な 2 パネルを対象とし、1 パネル当たり 65 (縦 13×横 5) の格子点で測定した。その方法は Fig. 1 に示すように、鉛直に設置した高精度レール上の可動テーブルに固定したアルミ製アングルに 10 台のひずみ変換式変位計 (1 パネル当たり 5 台) を取り付け、可動テーブルを移動しながら同時に 10 点ずつの変位を腹板高方向に 13 か所で測定する。桁の曲げ変形が大きくなるにつれて横一列に取り付けたすべての変位計を同時に測定位置に合わせることはできないが、ずれは最大でも 2 mm 程度であり、その影響は小さく、1 パネル当たり 5 台の変位計で腹板としての変形モードのみならず桁の水平変形をも測定できるメリットは大きい。

ひずみは引張フランジを除いた板面の表裏について単軸ゲージを使用して測定し、板面外曲げの除去および局部座屈の確認を行った。また、B シリーズにおいては桁中央部の 4 パネルについて各中央断面の中立軸位置で、ロゼットゲージを使用して主応力度およびその方向の確認を行った。

3. 実験結果および考察

(1) 素材試験, 断面寸法, 残留応力, 初期たわみ

試験桁を製作した 3.4 mm および 8.0 mm の鋼板についてそれぞれ 6 本および 3 本の JIS 1 号試験片を作り引張試験を行った。Table 2 はそれらの平均値を示したものであり、実験値の整理では弾性係数  $E=208 \text{ kN/mm}^2$ , ポアソン比  $\nu=0.24$  とし、降伏点応力度  $\sigma_y$  は各板厚に対する表の値を用いる。

各試験桁における断面諸量の差はほとんどなく、実験結果の整理には次の値を用いる。すなわち桁高  $d=623 \text{ mm}$ , フランジ幅  $b=110.4 \text{ mm}$ , 腹板厚  $t_w=3.37 \text{ mm}$ ,

Table 2 Tensile Coupon Test Results.

	t	$\sigma_y$	$\sigma_u$	E	$\nu$
	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	
Web	3.4	288.6	401.3	206.2	0.23
Flange	8.0	271.7	437.8	209.2	0.25

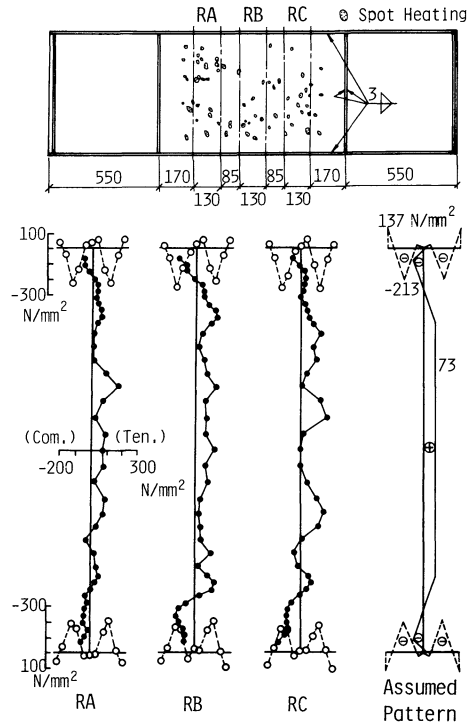


Fig. 2 Residual Stress Measurement.

フランジ厚  $t=8.03 \text{ mm}$ , 強軸および弱軸まわりの断面 2 次モーメント  $I_x=23100 \text{ cm}^4$  および  $I_y=180 \text{ cm}^4$ , ねじり定数  $J=4.6 \text{ cm}^4$ , そりねじり定数  $I_w=170000 \text{ cm}^4$  である。したがって材質によって無次元化した腹板の幅厚比は  $(h/t_w) \cdot \sqrt{\sigma_y/E} = 6.7$  であり、構造用炭素鋼に換算した換算幅厚比  $\beta = (h/t_w) \cdot \sqrt{\sigma_{yw}/235} = 200$  となる。

残留応力の測定には曲げ試験桁と同じ断面寸法の桁 GR を製作し、油圧曲げおよび点加熱による矯正を行った後に Fig. 2 に示す 3 断面 (RA, RB, RC) について切断法により、フランジは 11, ウェブは 39 分割し、コンタクトゲージにより計測した。計測した残留応力分布から、フランジでは先端部に引張、溶接部にわずかな引張、およびそれらの中間部に大きな圧縮を生じており、腹板ではかなり乱れているものの引張の傾向が認められる。溶接部は一般に降伏点に近い引張を示すが、本試験桁では腹板が極端に薄く溶接後の硬化収縮を十分に拘束しきれずに変形を許したため、溶接部の残留応力がほとんど生じなかったものと考えられる。このような残留応力の分布形は、腹板厚が薄く大きな幅厚比をもつ実験桁の特徴である<sup>22)</sup>と思われる。実験桁に対する数値解析を行うために、測定結果および自己平衡と二軸対称条件をもとに仮定した残留応力分布を図中に示す。

初期たわみとしては圧縮フランジの水平たわみおよび腹板パネルの面外たわみを測定した。前者は試験桁を載

荷装置にセットした後、桁の両端に張り渡したみず糸とフランジ縁の水平距離をノギスで測定し、後者は基準平面からの測定が困難であったので、試験桁を横に寝かせた状態で1パネル当たり11断面で測定した。その最大たわみと製作許容値の比が矯正前の値とともに Table 3(a), (b) に示されており、いずれも製作精度は満たされている。なお、Table 3(b) でパネル名の上付 (+) は曲げ試験において腹板の面外たわみを計測したパネルであることを、記号 ↓ P は載荷点の位置を表す。

(2) 試験桁の強度特性値、および実験強度

6体の試験桁の強度特性値と実験による耐荷力(最高

Table 3(a) Initial Maximum Deflections of Comp. Flange (lateral direction) [ $e_{max}/e_a$ ,  $e_a = l/1000$ ].

Girder	GA0	GA1	GA2	GA3	GB1	GB2
as-weld	1.67	0.33	1.56	0.33	0.63	1.00
after leveling & set-up	0.77	0.29	0.45	0.63	0.53	0.45

Table 3(b) Initial Maximum Deflections of Web Panels [ $\delta_{max}/\delta_a$ ,  $\delta_a = h/250$ ].

Girder Panel	GA0			GA1			GA2			GA3			
	#P	P1*	P2*	#P	P1*	P2*	#P	P1*	P2*	#P	P1*	P2*	P3
as-weld		1.03	1.44		1.03	0.62		2.26	2.68		2.88	2.47	2.88
after leveling		1.17	0.67		0.57	0.57		0.49	0.57		0.59	0.69	0.86

Girder Panel	GB1						GB2							
	P1	P2*	P3*	#P	P4	P5	P6	P1	P2	P3	#P	P4*	P5*	P6
as-weld	2.06	0.01	0.82	1.24	1.85	2.27	2.47	0.62	1.65	2.06	1.65	2.27		
after leveling	0.34	0.44	0.45	0.59	0.71	0.49	0.62	0.55	0.69	0.93	0.83	0.56		

Remarks: P<sub>i</sub>\* is a panel of which deflection was measured during loading

# denotes the location of stiffener for applying load

Table 4(a) Summary of Reference and Experimental Loads (A-series).

Load (kN)	P <sub>y</sub> ①	P <sub>p</sub> ②	P <sub>u</sub> <sup>o</sup> (M) ③	P <sub>1cr</sub> ④	P <sub>wcr</sub> (σ) ⑤	P <sub>wcr</sub> (σ) ⑥	P <sub>max</sub> ⑦	P <sub>wex</sub> (k <sub>cr,ex</sub> ) ⑧		⑩/① ⑭	⑩/③ ⑮	⑩/④ ⑯
GA0	201	238	194	235	99	164	215	140(33.8)	156(37.7)	1.07	1.10	0.92
GA1	201	238	194	226	99	164	218	172(41.5)	127(30.7)	1.09	1.11	0.96
GA2	134	159	130	131	66	109	139	103(37.3)	118(42.7)	1.04	1.06	1.06
GA3	101	119	98	91	50	83	91	74(35.4)	78(37.3)	0.90	0.93	1.00

Table 4(b) Summary of Reference and Experimental Loads (B-series).

Load (kN)	P <sub>y</sub> ①	P <sub>p</sub> ②	P <sub>u</sub> <sup>o</sup> (M) ③	P <sub>u</sub> <sup>o</sup> (V) ③'	P <sub>1cr</sub> ④	P <sub>wcr</sub> (σ) ⑤	P <sub>wcr</sub> (σ) ⑥	P <sub>wcr</sub> (τ) ⑦	P <sub>wcr</sub> (τ) ⑧	P <sub>wcr</sub> (σ+τ) ⑨	P <sub>wcr</sub> (σ+τ) ⑩	P <sub>max</sub> ⑪	P <sub>wex</sub> ⑫	⑬	⑩/① ⑭	⑩/③ ⑮	⑩/③' ⑯	⑩/④ ⑰
GB1	201	238	230	461	224	120	198	198	275	103	161	223	123	69	1,109	0.969	0.484	0.996
GB2	161	193	177	415	160	93	153	171	261	83	132	174	75	76	1,081	0.983	0.419	1.088

Remarks:

- P<sub>y</sub> = Yield Load of Girder
- P<sub>p</sub> = Full Plastic Load of Girder
- P<sub>1cr</sub> = Ultimate Load by FEM in consideration of Nondistortion and Initial Deflection ( $l/2000$  for A-series and  $l/4000$  for B-series)
- P<sub>u</sub><sup>o</sup>(M) = Ultimate Load calculated from Ultimate Moment Capacity,  $M_u^o = [1 - ((h/t_w) - 5.7/\sqrt{\sigma_y})] / (300 + 1200(A_{fc}/A_w)) M_y$ , P<sub>u</sub><sup>o</sup>(M) for B-series is defined as the Load when the Bending Moment at h/2 from the center of girder reaches the ultimate Moment Capacity M<sub>u</sub><sup>o</sup>
- P<sub>u</sub><sup>o</sup>(V) = Ultimate Load calculated from Ultimate Shear Capacity,  $V_u^o = [(\tau_{cr}/\tau_y) + 0.87(1 - (\tau_{cr}/\tau_y))] / \sqrt{1 + (a/h)^2} V_p$
- M<sub>y</sub>, V<sub>p</sub> = Yield Moment, Yield Shear Capacity respectively
- P<sub>wcr</sub>(σ) = Web Buckling Load under Pure Bending(⑤: Unloaded Edges simply supported, ⑥: fixed)
- P<sub>wcr</sub>(τ) = Web Buckling Load under Pure Shear(⑦: Four Edges simply supported, ⑧: Long Edges clamped, Ends simply supported)
- P<sub>wcr</sub>(σ+τ) = Web Buckling Load under Combined Bending and Shear,  $(\sigma/\sigma_{cr})^2 + (\tau/\tau_{cr})^2 = 1$ , (⑨: ⑤ & ⑦, ⑩: ⑥ & ⑧)
- P<sub>max</sub> = Experimental Maximum Load
- P<sub>wex</sub> = Experimental Web Buckling Load of Each Panel (Minimum Value estimated from P-δ<sup>2</sup> curves)
- k<sub>cr,ex</sub> = Buckling Coefficient calculated from P<sub>wex</sub> for Web Panel under Pure Bending

荷重)および腹板座屈荷重は、AシリーズおよびBシリーズについてそれぞれ Table 4(a) および Table 4(b) にまとめてある。各強度特性値を桁に作用する荷重で表わし、それらの意味を表の下に記してある。特に、P<sub>1cr</sub>は初期たわみを円弧で表わした弾塑性有限変位解析<sup>20)</sup>による解析結果であり断面変形は考慮されていない。P<sub>wcr</sub>(σ)は腹板の弾性曲げ座屈荷重であり、Bシリーズではスパン中央に最も近いパネルのスパン中央から h/2 離れた断面で算定した。また、P<sub>wex</sub>は各試験桁で変形を計測した2パネルについて P-δ<sup>2</sup>法により推定した腹板の座屈荷重である。実験から腹板の座屈荷重を客観的に推定するのは難しいが<sup>11)-13)</sup>、パネル周辺からの相対たわみ(δ)が最も成長した点について Fig. 3 のように求めた。Aシリーズの P<sub>wex</sub> から逆算した座屈係数 k<sub>cr,ex</sub> は 30~43 (平均値 37.0) であり、非載荷辺の境界条件は単純支持(弾性座屈係数の理論値 k<sub>cr</sub>=23.9) よりも

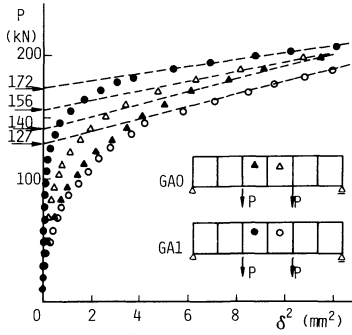


Fig. 3  $P-\delta^2$  Curves (GA0, GA1).

固定支持 ( $k_{cr}=39.6$ ) に近いようである。ちなみに Basler<sup>11</sup> の曲げ極限強度式では近似値として  $k_{cr}=36.0$  が用いられている。

(3) 荷重-変形特性

ここでは、Table 4 の各種荷重値を参考にしながら、荷重-変形特性について検討する。

Fig. 4(a) および Fig. 4(b) はそれぞれ A シリーズおよび B シリーズの荷重とスパン中央の鉛直たわみの関係を示している。荷重は弾性限荷重  $P_y$  で、たわみはせん断力を考慮した弾性限たわみ  $\delta_y$  で無次元化してある。図から、最高荷重近くまで一点鎖線で表わした弾性たわみと実験値の差はほとんどなく、荷重面内に対する荷重・支持条件が満たされているといえる。また、長い桁では最高荷重に達した後の急激な除荷を生じており、これは降伏による剛性低下の影響よりもむしろフランジの水平座屈変形を伴った除荷である。

Fig. 5 は各試験桁の圧縮フランジの水平変形形状を表わしている。荷重段階は  $P=0$  (-----, 初期たわみ),  $P=0.9P_{max}$  (○—○, 桁 GA0 については  $0.98P_{max}$ ) および  $P=P_{max}$  (●—●) であり、荷重による実際の変形は破線と実線の差で表わされる。記号 X で表わした横拘束治具の取付け点では、桁 GA0 を除いて横変形はほぼ拘束されており、最高荷重時の圧縮フランジの変形

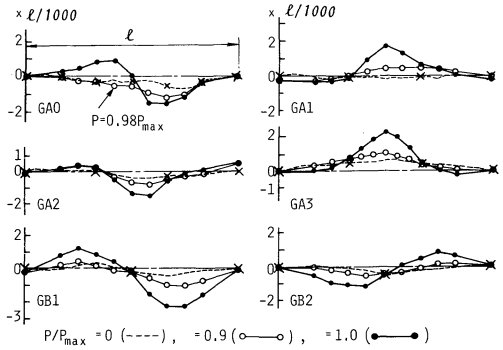


Fig. 5 Initial Lateral Bow and Net Deflections.

モードは各桁の理想的な水平座屈モードになっている。また、荷重初期における変形の方向は初期たわみに影響されるようである。桁 GA0 は面内曲げ耐力を知るために横拘束点間距離を同じスパン長の桁 GA1 の 2 分の 1 にしてあり、最高荷重にごく近い  $0.98P_{max}$  においても図の右側の載荷点 (3 等分点) 以外は十分に横拘束されている。しかし、最高荷重時の圧縮フランジの変形モードは理想的な水平座屈モードより少しずれており、最高荷重も桁 GA1 と同じである (Table 4 の欄①参照)。このように強度が高くなり得なかったのは、腹板の座屈変形はかなり進展していたことから、プレートガーダーの面内曲げ強度の限界値に達したためであろうと考えられる。

本試験桁は腹板が早期に座屈するように設計されており、 $P-\delta^2$  法により推定した座屈荷重は客観的ではないもののそのような実験結果 (Table 4 の欄①~③) を得た。Fig. 6(a), (b) および (c) は最高荷重の約 95% における付加変形モード (初期たわみを含まない腹板の変形量と桁の水平変形量の和) の例を表わしており、それ

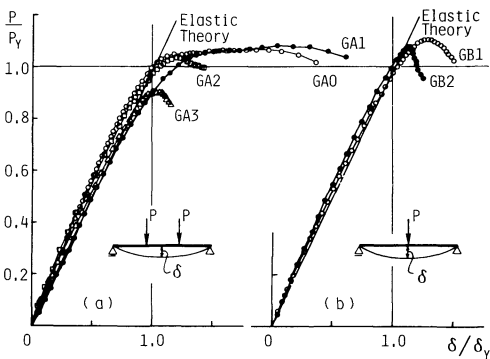


Fig. 4 Load-Vertical Deflection Curves.

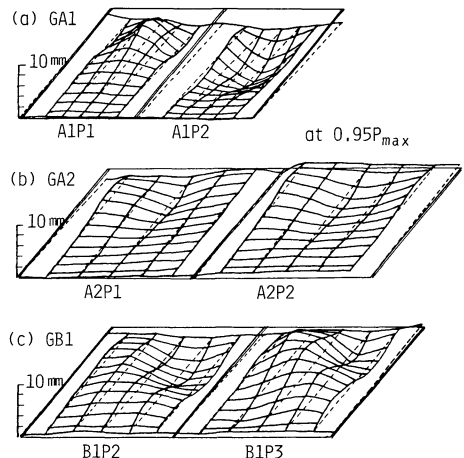


Fig. 6 Out-of-plane Girder Deflections including Additional Web Deflections.

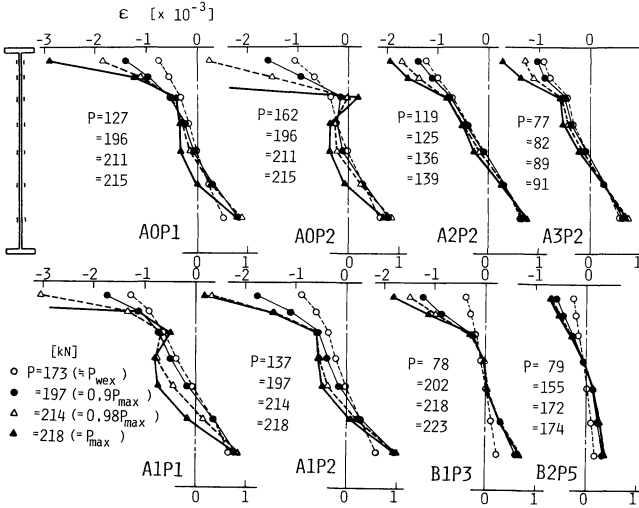


Fig. 7 Distributions of Normal Strain of Web Panels.

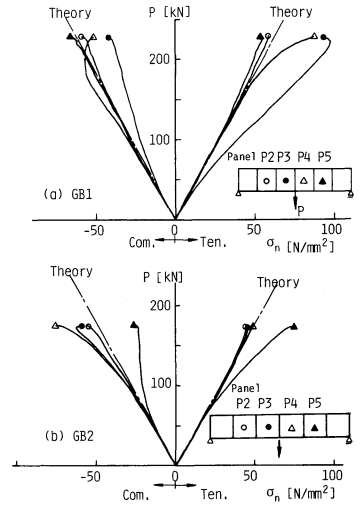


Fig. 8 Load-Principal Stress Relations.

ぞれ桁 GA 1, GA 2 および GB 1 の主要な 2 パネルに対応している (パネル名 A1P1 は桁 GA 1 のパネル P1 を表わし, パネルの位置は Table 1 および Table 3(b) を参照). 腹板と上下フランジの接合部 (正確には腹板側へ 20 mm の位置) を破線で結んであり, この基準線からのずれは各断面における腹板の変形に相当する. Fig. 6 およびその他の実験結果から次のことがわかった.

- a) 純曲げを受ける A シリーズと曲げとせん断を受ける B シリーズでは, 付加変形モードが異なる.
- b) すべての桁で隣接するパネル間には垂直補剛材を節とした変形の連続性がみられる. これは腹板の変形が座屈によることを意味している.
- c) 図には初期たわみを示していないが, 桁 GA 2 および GB 1 の付加変形 (座屈変形) モードは明らかに初期たわみの成長したものではない. 荷重初期における付加変形は初期たわみによって影響されるが, 最終的にはパネル固有の座屈変形モードが生じるといえる.

d) 桁 GA 1 および GA 2 では, 圧縮フランジの水平座屈モードと腹板の桁長方向の座屈モードは異なっている. 一般に腹板の座屈は桁の耐荷力に対して負の効果をもつと考えられるが, フランジと腹板の座屈モードが一致しないことはその負の効果を相殺する可能性がある.

Fig. 7 には各実験桁の代表的なパネルの中央断面について桁長方向のひずみ分布の進展状況を示す. 荷重段階は記号 (○, ●, △ および ▲) で表わされ, それぞれは  $P_{wer}$ ,  $0.9 P_{max}$ ,  $0.98 P_{max}$  および  $P_{max}$  に対応している. 圧縮側ではひずみ分布の直線性が乱れる応力欠損の傾向がみられ, A シリーズでは同時に中立軸が引張側に移動していく傾向がみられる.

次に B シリーズで, 載荷点に近いパネルの各中央断面における中立軸位置の荷重-主応力度関係を Fig. 8(a), (b) に示す. 一点鎖線は一次理論による主応力度を表わす. 低荷重段階での測定値と理論値の差はないが, ある荷重以上では理論値に比べて引張主応力度が増加し圧縮主応力度が減少する傾向が桁 GB 1 ではパネル P3 および P4, 桁 GB 2 ではパネル P5 にみられる. 主応力度分布図は求めていないがこの傾向は斜張力作用を示すと考えられる (ただし, 目測できるような変形は現われなかった). 特に桁 GB 1 の P3 および桁 GB 2 の P5 では  $P-\delta^2$  法による座屈荷重 (Table 4(b) 欄⑬) をかなり低く推定したが, その推定値の前後で主応力度は理論値から急激に離れているのがわかる.

本試験桁のフランジ突出幅厚比は  $b/2t = 6.9$  であり, 桁の弾性限荷重までフランジはねじれ座屈を生じないことになっているが, ねじれ座屈現象の発生の有無を検討しておく. Fig. 9 は桁 GA 2 のパネル中央断面の圧縮フランジ左右端および圧縮フランジから, 150 mm 離れた腹板における表裏の桁軸方向ひずみと荷重の関係を示している. 各曲線の番号 (1~6) はひずみゲージの番号に対応しており, Fig. 5 および Fig. 6 のフランジの水平移動方向 (←) および腹板の変形方向 (点線) も示してある. なお, 横軸は  $-\epsilon/\epsilon_y$  であり, ひずみ  $\epsilon$  は引張を正としてある. 図から次のことがわかる.

- a) パネル A2P2 では, 矢印 (←) 側のフランジ端ひずみ (No.1, 3) は反対側の端ひずみ (No.2, 4) に比べて小さい. これはフランジの水平変形の曲率から予想される端ひずみの増減と一致している. ところがパネル A2P1 では矢印 (←) 側のフランジ端ひずみが大きく, フランジの水平変形の変曲点がパネル A2P1 の中央断

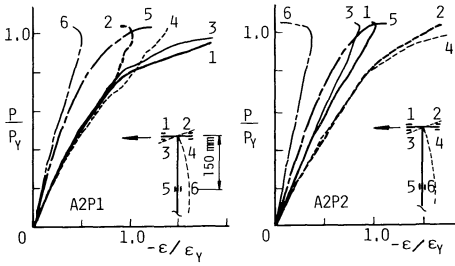


Fig. 9 Load-Normal Stress Curves in Girder Sections.

面よりもスパン中央側に生じていることを表わしている。

b) 点線で示した腹板の面外変形による凹凸から予想されるひずみの進展と腹板の表裏におけるひずみの進展は一致する。

c) 腹板とフランジの変形の連続条件からフランジに図の点線のような変形を仮定すると、パネルA2P1およびA2P2ともにNo.1, 4の側が凹で圧縮、逆にNo.2, 3の側は凸で引張となる。これによって生じる付加的なひずみによって、図のようなフランジの表裏におけるひずみの差を説明できる。したがって、本実験では早期に起こった腹板の座屈変形による変形の連続性としてフランジのねじれ変形が生じたと考えられる。

d) パネルA2P1ではある荷重に達した後、フランジの一端の表裏(No.2, 4)でひずみが極端に乱れているが、他端の表裏(No.1, 3)ではひずみレベルが大きいかかわらずひずみは乱れていない。したがって、この極端な乱れもフランジが板としての局部座屈(ねじれ座屈)を生じたためではなく、腹板の座屈変形が影響したものと考えられる。

Aシリーズでは他の桁のパネルにおいても同様な結果

が得られた。Bシリーズでは、フランジの表裏のひずみの差は明確には現われなかった。これはひずみの測定がパネル中央断面であったことと、Fig.6(c)のようにBシリーズの腹板の座屈変形がせん断変形であったことによると考えられる。

(4) 耐力に対する腹板座屈の影響

本試験桁の崩壊形式は圧縮フランジの水平座屈であると判断できたので、本節では耐力(最高荷重  $P_{max}$ )をはりの横ねじれ耐力の評価式と同じように断面力で表示し、またプレートガーダーでは塑性強度  $M_p$  を期待できないことから降伏モーメント  $M_y$  をベースとした耐力係数  $\eta = M_U / M_y$  および修正細長比  $\lambda_w = \sqrt{M_y / M_E}$  を用いて整理する。ここに、 $M_U = P_{max}$  に対応する最大曲げモーメント、 $M_E =$ 注目している桁の支持・荷重条件下での弾性横ねじれ座屈モーメントである。Fig.10にはAシリーズおよびBシリーズに相当する本実験値(それぞれ記号GA0~GA3(△)およびGB1~GB2(▲)、腹板の換算幅厚比  $\beta = 200$ )、細長比  $\lambda_w$  は本実験桁と同程度で、腹板座屈を起こしにくくした桁による横ねじれ座屈実験値<sup>20)</sup>(それぞれ記号GE~GH(○)およびGA~GD(●)、 $\beta = 130$ )およびAシリーズに相当し、細長比  $\lambda_w$  が比較的大きな桁で腹板座屈の影響も検討した横倒れ座屈実験値<sup>9)</sup>(記号A~G(+),  $\beta \approx 220$ )をまとめてある。また、実線および破線は本実験桁の断面諸量を用い断面変形を無視した耐力解析結果<sup>20)</sup>であり、図中のモデル化した桁軸直角方向の初期たわみとFig.2に仮定した残留応力分布が用いられている。この解析法の妥当性は腹板の座屈が生じなかった実験値について文献20)で確認されている。解析値が細長比の大きなところでも弾性座屈曲線( $1/\lambda_w^2$ )よりかなり低くなっているのはフランジの残留応力が圧縮側に偏っているこ

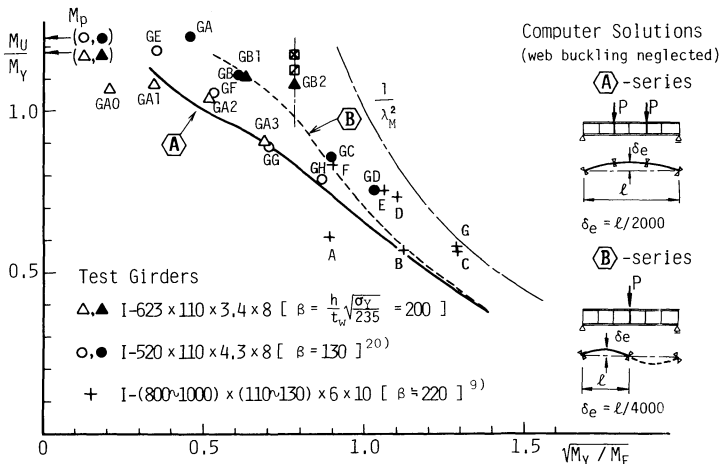


Fig. 10 Experimental and Analytical Results of Girders.

とによると考えられる。なお、実験値を Fig. 10 のような一般化された座標上で整理しても、モーメント勾配による降伏域の影響のため A シリーズと B シリーズを単一の耐力力曲線で表わせないことは文献 20) で指摘したとおりである。文献 20) の実験および本実験の試験装置は同じであり、試験桁について腹板の幅厚比だけが異なっている。したがって一般化された座標上で、明確な腹板の座屈を生じなかった実験値 (○および●) ならびに腹板の座屈を無視した耐力力解析結果と早期に腹板の座屈を生じた本実験値 (△および▲) とをそれぞれ比較することで、耐力力に対する腹板座屈の影響の有無を検討できる。

まず A シリーズで、本実験桁の断面はいわゆるノンコンパクト断面であり、細長比を十分に小さくして面内崩壊させた桁 GA 0 でも塑性強度  $M_p$  には到達しなかった。しかし腹板幅厚比が  $\beta=200$  と Basler<sup>1)</sup> の限界値 ( $\beta=170$ ) よりも大きく、しかも面積比が  $A_w/A_c=2.3$  と比較的大きいにもかかわらず、Basler の極限モーメント  $M_u^0$  はいうまでもなく降伏モーメントを十分に確保できている (Table 4(a) 欄⑭, ⑮および Fig. 10 参照)。

一方、B シリーズにおいては解析値がこれまでになく桁 GB 2 の実験値をかなり下回る結果となった。その原因は、試験桁がわずかに 2 体であることから推測の域を脱しないが、次のように考えられる。解析値 (破線) は横変形の境界条件を載荷点で単純支持としているが、横たわみ ( $v$ ) とねじり角 ( $\phi$ ) の境界条件として、①  $v=v'=\phi=\phi'=0$  および②  $v=v'=\phi=0$  を用いて解析を行った。その結果をそれぞれ記号ⓧおよびⓨで Fig. 10 に示す。実験値 (GB 2) はこれらと破線の間であり、初期たわみおよび拘束条件の影響があったものと考えられる。また、桁 GB 1 の最大曲げモーメントは桁 GA 0 のそれ (極限モーメント) より大きい。しかし、載荷断面から支点側へ  $h/2$  離れた断面 (最危険パネルのほぼ中央) で行った極限強度の評価値 (Table 4(b) 欄⑯, ⑰参照) に Basler<sup>1)</sup> の相関曲線を適用すると、本実験桁の極限強度は曲げによって決まる範囲にあること、ならびに桁 GA 0 の極限モーメントは理論値 ( $M_u^0$ ) よりも 10% 高いこと (Table 4(a) 欄⑮参照) から、桁 GB 1, GB 2 はともに面内崩壊したのではないと考えられる。

前述のように、A シリーズおよび B シリーズともに最高荷重に達する前に腹板の座屈が生じたと考えられる (Table 4 の欄⑩~⑬参照)。しかし、Fig. 10 の実験値および解析値から、腹板の換算幅厚比  $\beta=200$  の本実験桁においては修正細長比  $\lambda_w$  が 0.2~0.4 とかなり小さなところで腹板の曲げ座屈による崩壊と思われる面内強度の上限はあるものの、 $\lambda_w$  がそれより大きなところでは圧縮フランジの水平座屈崩壊に対する腹板座屈の影響は

ほとんどないといえる。さらに文献 9) の結果も踏まえて、腹板の曲げ座屈は圧縮フランジの水平座屈強度に直接の関連はないといえる。これは、溶接軽量 H 形鋼はりの横ねじれ座屈に対するフランジの局部座屈の影響がかなり大きいことを示した久保ら<sup>21)</sup> の結果と異なるところであり、桁の面外強度に対する腹板とフランジの貢献度の差を表わしている。

#### 4. 結 言

本研究は、腹板の幅厚比を現行示方書の制限値よりも大きくしたプレートガーダーが圧縮フランジの水平座屈で耐力を失う場合、早期に生じる腹板座屈が耐力力に及ぼす影響を実験的に明らかにすることを目的としたものである。得られた結論は次のようである。

(1)  $P-\delta$  法により推定した腹板の座屈荷重は、純曲げを受ける A シリーズでは非載荷辺を固定とした弾性座屈荷重に近く、実験から求めた座屈係数  $k_{cr,ex}$  は 30~43 (平均 36.6) であった。しかし、曲げとせん断を受ける B シリーズでは非載荷辺を単純支持としパネル中央断面で評価した弾性座屈荷重よりも低く推定された。

(2) 腹板の座屈変形モードは必ずしも初期たわみモードに一致するものではなく、最終的にはパネル固有の座屈変形モードに移行するようである。また、パネル間では垂直補剛材を節とする変形の連続性が認められた。

(3) 桁 GA 1 および桁 GA 2 のような 2 パネルモデルでは、圧縮フランジの水平座屈モードと腹板の桁長方向の座屈モードが異なるため、これが桁の耐力力を高める方向に働く可能性があり、今後そのような影響に対する検討も必要である。

(4) 腹板座屈による変形の連続性からフランジのねじれ変形が認められた。このねじれ変形によって桁が直ちに耐力を失うことにはならなかった。

(5)  $\eta-\lambda_w$  で整理した実験値および解析結果から、腹板換算幅厚比  $\beta=200$  の本実験桁では面内崩壊による強度の上限はあるものの、圧縮フランジの水平座屈崩壊に対する腹板座屈の影響はないといえる。腹板幅厚比のさらに大きな場合、フランジの突出幅厚比が比較的大きく局部座屈を生じやすい場合および面内極限強度に対するせん断力の影響が大きい場合についてはなお検討する必要がある。

(6) Basler<sup>1)</sup> の限界値 ( $\beta=170$ ) よりも大きな幅厚比 ( $\beta=200$ ) をもち、面積比が  $A_w/A_c=2.3$  と比較的大きな桁であっても横拘束が十分であれば降伏モーメントを確保できた。これは AASHTO<sup>19)</sup> の荷重係数設計法における規定値 ( $\beta=197$ ) に対する 1 つの裏付けとなる。

本研究は昭和 61, 62 年度の文部省科学研究費補助金



(奨励A)の交付を受けた。実験において多大の労を願った重富 寿君(名古屋大学大学院)および当時石川高専在学中の桶村浩司, 本田康彦, 長谷川亨君に謝意を表します。また, 試験桁の製作では佐藤鉄工(株)および(株)カスガ工業にお世話になった。ここに感謝します。

#### 参考文献

- 1) Basler, K. and Thurlimann, B. : Strength of Plate Girders in Bending, Trans. of ASCE, Vol. 128, Part II, pp. 653~682, 1963.
- 2) Basler, K. : Strength of Plate Girders in Shear, Trans. of ASCE, Vol. 128, Part II, pp. 683~719, 1963.
- 3) Basler, K. : Strength of Plate Girders under Combined Bending and Shear, Trans. of ASCE, Vol. 128, Part II, pp. 720~735, 1963.
- 4) Herzog, M. A. M. : Ultimate Static Strength of Plate Girders from Tests, Proc. of ASCE, Vol. 100, No. ST5, pp. 849~864, May, 1974.
- 5) 小西一郎・米沢 博・三上市蔵: プレートガーダーの曲げ弾性座屈, 土木学会論文集, 第143号, pp. 1~8, 1967年1月.
- 6) 長谷川彰夫・和田耕造・西野文雄: プレートガーダーの曲げ耐力に関する新しい理論, 土木学会論文集, 第360号, pp. 33~42, 1980年8月.
- 7) 小松定夫・森脇良一・藤野真之・滝本哲四郎: 組合せ荷重を受けるプレートガーダーの極限強度, 土木学会論文報告集, 第321号, pp. 1~14, 1982年5月.
- 8) 藤井 堅・大村 裕: フランジ局部座屈に起因するプレートガーダーの曲げ耐力解析, 土木学会論文集, 第374号/I-6, pp. 467~476, 1986年10月.
- 9) 福本啓士・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, pp. 39~51, 1971年5月.
- 10) Fukumoto, Y. and Kubo, M. : Ultimate Bending Strength of Plate Girders with Longitudinal Stiffeners Failed by Lateral Instability, Der Stahlbau 12, pp. 365~371, 1977.
- 11) 森脇良一・藤野真之: 初期不整を有するプレートガーダーのせん断強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第249号, pp. 41~54, 1976年5月.
- 12) 森脇良一・藤野真之: 初期不整を有するプレートガーダーの純曲げ強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第264号, pp. 1~15, 1977年8月.
- 13) 藤野真之: 初期不整を有するプレートガーダーの組合せ強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第269号, pp. 1~16, 1978年1月.
- 14) 長谷川彰夫・和田耕造・西野文雄: ウェブの剛性に注目したプレート・ガーダーの曲げ耐力実験, 土木学会論文報告集, 第305号, pp. 1~9, 1981年1月.
- 15) 長谷川彰夫・堀口隆良・西野文雄: プレートガーダーの耐力に関する一考察(上)/(下), 橋梁と基礎, No. (4)/(5), pp. (25~32)/(8~12), 1977年(4)/(5)月.
- 16) 塩見弘幸・伊藤義人・福本啓士: プレートガーダーの耐力実験データの調査, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 33A, pp. 127~139, 1987年3月.
- 17) Horne, M. R. : The Elastic Lateral Stability of Trusses, The Structural Engineer, Vol. 38, No. 5, pp. 147~155, May, 1960.
- 18) 日本道路協会: 道路橋示方書/同解説, 1980年2月.
- 19) AASHTO : Standard Specifications for Highway Bridges, 12th Ed., 1977.
- 20) 福本啓士・前川幸次・伊藤義人・浅里芳行: モーメント勾配による溶接I形桁の横ねじれ座屈実験, 土木学会論文集, 第362号/I-4, pp. 323~332, 1985年10月.
- 21) 久保全弘・福本啓士: 局部座屈を伴う横倒れ座屈強度に関する研究, 第40回土木学会年次学術講演会講演概要集, I-78, 1985年9月.
- 22) 長谷川彰夫・西野文雄・奥村敏恵: 水平補剛材を有するプレート・ガーダーの曲げ耐力実験, 土木学会論文報告集, 第234号, pp. 33~44, 1975年2月.

(1987.10.5・受付)