

非対称断面プレートガーダーの終局強度に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON ULTIMATE STRENGTH OF PLATE GIRDERS WITH UNSYMMETRICAL CROSS-SECTION

三上 市蔵* 木村 泰三** 徳田 浩一***

By Ichizou MIKAMI, Taizou KIMURA, and Koichi TOKUDA

Six welded plate girder models with unsymmetrical cross-section were tested to examine the behaviour and strength on the ultimate state. These models were made of structural steel (SS41). The two models were designed to discuss the girder collapse due to torsional buckling of compression flange. The four models were used to estimate the relation between the girder collapse and the so-called vertical buckling of compression flange.

An approximate method for predicting the ultimate strength of the plate girders with unsymmetrical cross-section and/or multi-stiffened web is proposed. It is found that the present method has a good agreement with the some results from the present and other tests.

1. まえがき

プレートガーダーの限界状態設計法を確立するための終局強度に関する実験はこれまでに多数行われている。^{1) 2)}しかし、2軸対称断面プレートガーダーの実験に限られており、上下非対称断面プレートガーダーに対する実験は行われていないようである。

プレートガーダーが曲げを受ける場合の崩壊形式は圧縮フランジの挙動からみて、横座屈、ねじれ座屈、垂直座屈に分類できる。³⁾このうち、垂直座屈に関する実験は、Basler⁴⁾、小西⁵⁾、Cooper⁶⁾、小西・米澤・三上⁷⁾、Owen⁸⁾、長谷川・西野・奥村⁹⁾、長谷川・和田・西野¹⁰⁾によって行われているが、2軸対称断面に限られている。

本研究では、上下非対称断面プレートガーダーが曲げおよび曲げ・せん断を受ける場合の実験を行い、その終局挙動および終局強度を明らかにする。実験桁は鋼溶接プレートガーダー6体で、2体は曲げ・せん断のもとで、圧縮フランジのねじれ座屈で崩壊するように設計した。他の4体はフランジ垂直座屈に関する実験に供し、曲げおよび曲げ・せん断を与えた。

一方、著者らは非対称断面を有する場合や、多数の補剛材が任意の位置に配置された場合でも適用できるプレートガーダーの終局強度の算定法を研究してきた。^{11) - 14)}終局曲げ強度については、圧縮フランジの横座屈またはねじれ座屈が生じる場合の算定法を文献11)12)に、圧縮フランジの垂直座屈のみが生じる場合

* 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564 吹田市山手町3丁目3番35号)

** 工修 全日本コンサルタント(株) 大阪本社 (〒543 大阪市天王寺区上本町5丁目7番12号)

*** 関西大学大学院 博士課程前期課程 (〒564 吹田市山手町3丁目3番35号)

の算定法は文献14) に提案した。本論文では文献11)12)14) に基づいて、圧縮フランジの横座屈、ねじれ座屈、垂直座屈のすべてを考慮した終局強度算定法の最終案をまとめ、付録に示す。

最後に、本論文の実験および既報^{9) 15) - 21)} の実験の結果に対して、付録の算定法による終局強度を求め、その算定法の妥当性を検証する。

2. 終局強度実験

2.1 実験桁

上下非対称断面の S S 4 1 溶接プレートガーダー模型 6 体 (C, C1, VB, VB1, VB2, VC) を製作した。Fig. 1 に示すように、3 体は曲げ、3 体は曲げ・せん断のもとで、斜線を施した部分をテストパネルとした。テストパネルの実測寸法を Table 1 に、主なパラメータを Table 2 に示す。ただし、 A_w は腹板の断面積、 A_{fc} は圧縮フランジの断面積、 A_{ft} は引張りフランジの断面積、 B は圧縮領域の幅、 ϕ は桁としての応力勾配係数である。

実験桁 C, VB, VC は単調載荷のもとで実験を行ったが、これまで上下非対称断面プレートガーダーに対する繰り返し載荷の実験が行われていないので、終局強度に対する影響を調べるために、他の実験桁 C1, VB1, VB2 には繰り返し荷重を与えた。

実験桁 C, C1 は曲げ・せん断のもとでフランジねじれ座屈で崩壊するように設計した。C1 は C よりも腹板の圧縮領域が広くなるようにした。実験桁 VB, VB1, VB2, VC はフランジ垂直座屈で崩壊するように設計した。

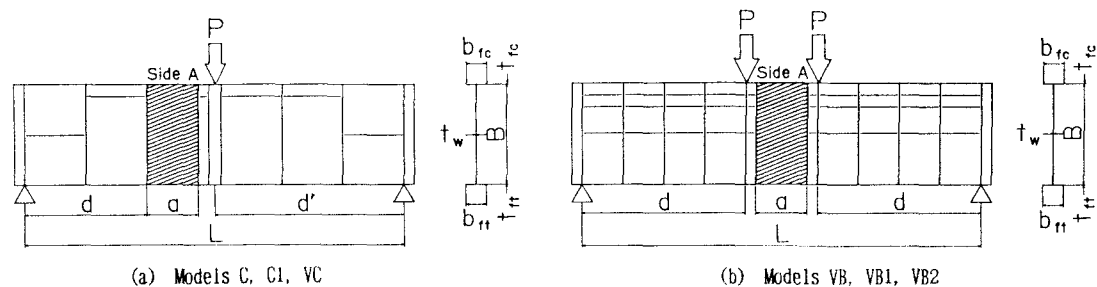


Fig. 1 Girder models with one testing panel

Table 1 Dimensions of testing girder models

Model	C	C1	VB	VB1	VB2	VC
Span L (mm)	5598.0	5594.3	5591.0	5597.0	5591.0	5598.0
Web length a (mm)	747.1	753.7	797.9	797.0	747.3	798.5
Web depth B (mm)	901.0	903.2	1002.0	1001.0	999.0	1001.0
Web thickness t_w (mm)	4.5	4.5	2.1	2.1	2.1	2.2
Compression flange width b_{fc} (mm)	190.0	190.0	120.0	189.0	169.3	120.0
Compression flange thickness t_{fc} (mm)	6.08	6.24	10.25	6.63	4.62	10.35
Tension flange width b_{ft} (mm)	190.0	199.3	130.8	190.2	169.0	130.0
Tension flange thickness t_{ft} (mm)	10.38	14.50	13.80	9.57	6.43	13.87
d (mm)	1799.7	1794.8	2244.7	2119.1	2112.7	1696.4
d' (mm)	2800.7	2797.4	—	—	—	2793.4

そのうちVB, VB1, VB2には曲げを, VCには曲げ・せん断を作用させた。VB, VB1, VB2では圧縮フランジの幅厚比を変えて, 圧縮フランジのねじれ座屈強度を変化させた。腹板の幅厚比はVBとVB1 では等しく, VB2 では小さくした。これによってVB2 では, 圧縮フランジの終局強度と腹板の終局強度が接近している。腹板の圧縮領域の幅はVBとVB1 では等しいが, VB2 では大きくなるようにした。

2.2 材料特性と初期たわみ

使用鋼材の材料試験結果をTable 3 に示す。

載荷に先立って, 実験桁の腹板とフランジの初期たわみを測定した。Table 4 に腹板の最大初期たわみ $w_{0, \max}$ を示す。板厚の小さい鋼板を使用したために, 道路橋示方書²²⁾ の許容値より大きな値を示している。

Table 2 Non-dimensional parameters

Model	C	C1	VB	VB1	VB2	VC
a/B	0.829	0.834	0.796	0.796	0.831	0.798
B/t_w	200	201	477	477	428	455
$b_{rc}/2t_{rc}$	15.63	15.22	5.85	14.25	18.32	5.80
A_{rc}/A_w	0.285	0.292	0.585	0.596	0.414	0.564
A_{rt}/A_w	0.486	0.711	0.858	0.866	0.576	0.819
B_c/B	0.557	0.605	0.556	0.555	0.541	0.553
ϕ	-0.796	-0.654	-0.799	-0.802	-0.850	-0.808

Table 3 Results of standard material testing

Model		C	C1	VB	VB1	VB2	VC
Yield stress σ_y (kgf/cm ²)	Web plate	2673	2673	2653	2197	2197	2653
	Compression flange	2921	2921	2648	2932	2955	2648
	Tension flange	2648	2753	2848	2770	2932	2848
Young's modulus E ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	Web plate	2.10	2.10	2.06	2.13	2.13	2.06
	Compression flange	2.07	2.07	2.08	2.07	2.06	2.08
	Tension flange	2.08	2.08	2.10	2.09	2.07	2.10
Poisson's ratio μ	Web plate	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
	Compression flange	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28
	Tension flange	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28

Table 4 Initial deflections on each web panel

Model	C	C1	VB	VB1	VB2	VC
$w_{0, \max}$ (mm)	1.63	4.20	4.44	4.79	7.53	3.71
$w_{0, \max}/B$	1/553	1/215	1/226	1/210	1/119	1/270

3. 実験結果と考察

3.1 桁のたわみ

実験桁中央の桁たわみと荷重との関係の主なものをFig. 2に示す。この図より非対称断面の場合も対称断面の場合と同様に、荷重－たわみ曲線は腹板の単一パネルの座屈の影響を受けず、崩壊荷重の70～80％まで線形性を示している。また、繰り返し荷重を与えても、荷重－たわみ曲線の包絡線は単調載荷の場合と同じ経路を通る。

3.2 腹板のたわみ

腹板中央断面の面外たわみ分布をFig. 3に示す。実験桁VBを除いて、荷重の増加にともなってたわみが大きくなっているのがわかる。実験桁VBでは、崩壊荷重に近づくにつれてたわみが急増している。これは実験桁VBのフランジ強度が大きいため、腹板の単一パネルの座屈後に圧縮縁近傍で応力欠損が起こり、中立軸の位置が引張りフランジ側に移動して、圧縮領域が広がったためと考えられる。

実験後の腹板の残留たわみの主なものをFig. 4に示す。曲げ・せん断を受ける実験桁VCでは、せん断に対する斜張力場が明確に形成されていることがわかる。

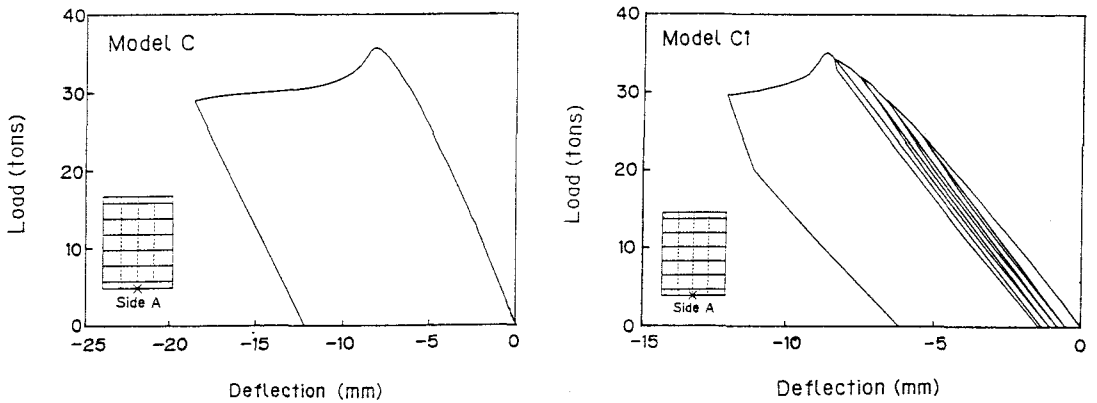


Fig. 2 Girder deflections

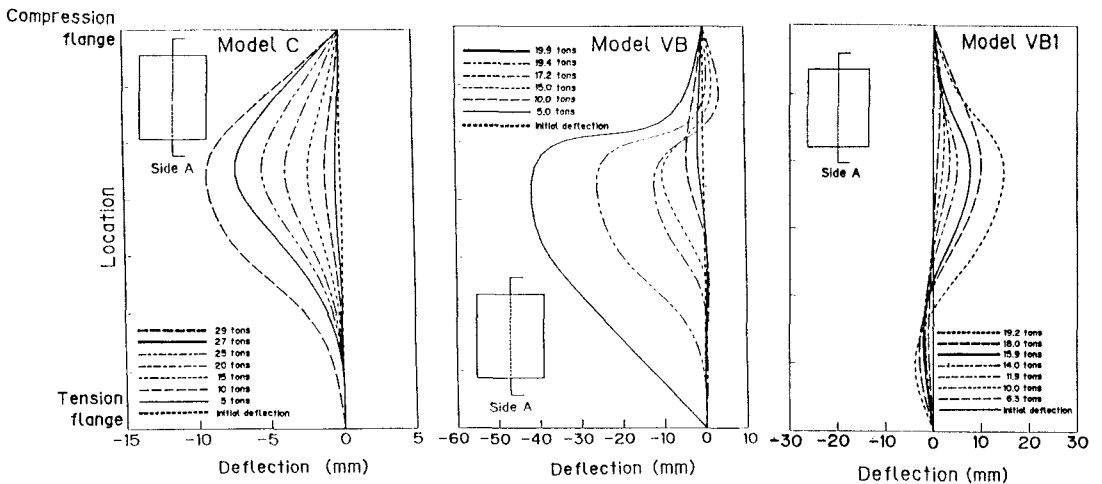


Fig. 3 Distributions of web deflection

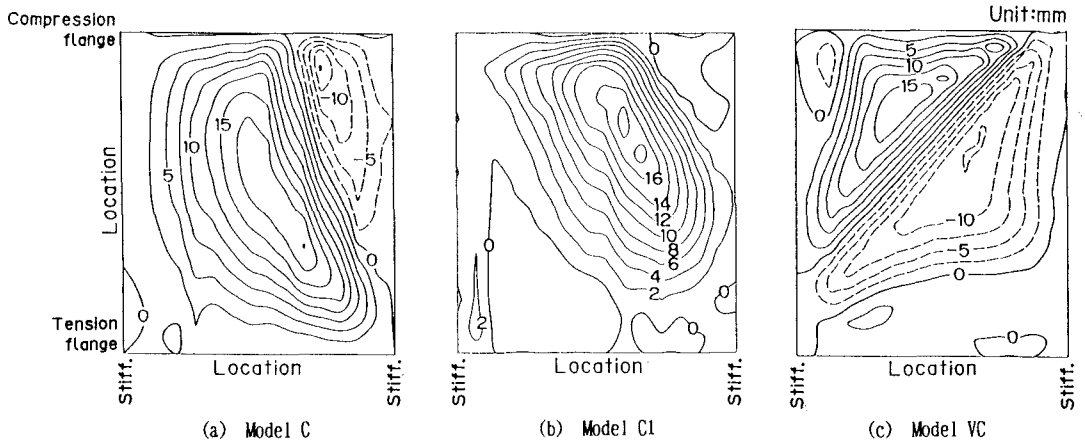


Fig. 4 Residual deflections on each web panel tested

これに対して、同じく曲げ・せん断を受ける実験桁C, C1では斜張力場が十分には発達していない。その原因を調べるために、実験桁C, C1の腹板パネルの主応力分布をFig. 5に示す。圧縮縁では大きな圧縮直応力が作用し、引張り縁ではかなり大きい引張り直応力が作用している。すなわち、実験桁C, C1では、せん断応力よりも大きい曲げ応力が作用しており、腹板の曲げ座屈後、すぐに桁の崩壊が生じたものと考えられる。

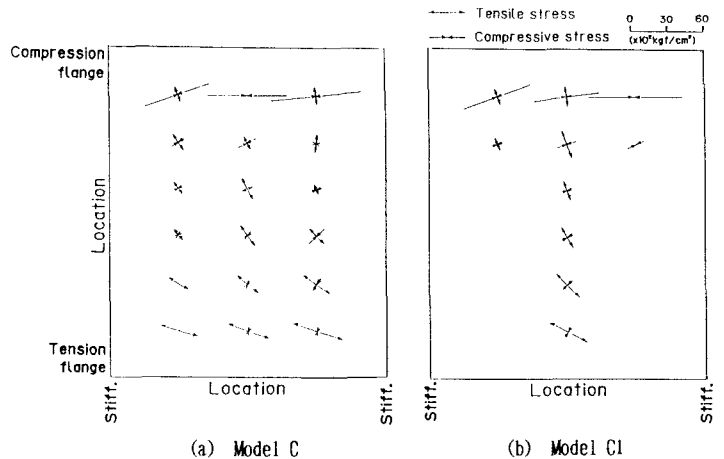


Fig. 5 Distributions of membrane principal stresses

3.3 圧縮フランジのひずみ

Fig. 6に圧縮フランジの桁軸方向の板曲げひずみ分布の主なものを示す。このひずみはSide AとSide Bの両面のひずみの平均値を採っている。実験桁C, C1, VB1, VB2では、ひずみが荷重の増加とともに増大するが、崩壊に達したとたんに急激に板曲げが増大しているの、崩壊形式はねじれ座屈であると考えられる。これに対して実験桁VB, VCでは、板曲げ変形が単調に進展しているので崩壊形式はねじれ座屈ではないと考えられる。

3.4 腹板のひずみ

Fig. 7に腹板における桁軸方向の膜ひずみの分布の主なものを示す。この図から明らかなように、腹板が座屈すると、圧縮領域の応力欠損のため、中立軸の位置が引張りフランジ側に移動している。

3.5 中立軸の位置

実験桁の設計上の中立軸の位置と、ひずみの実測値から測定される位置とを比較するとTable 5のようになる。両者はよく一致していることがわかる。ただし、実測値は初期の荷重に対して求めたものである。

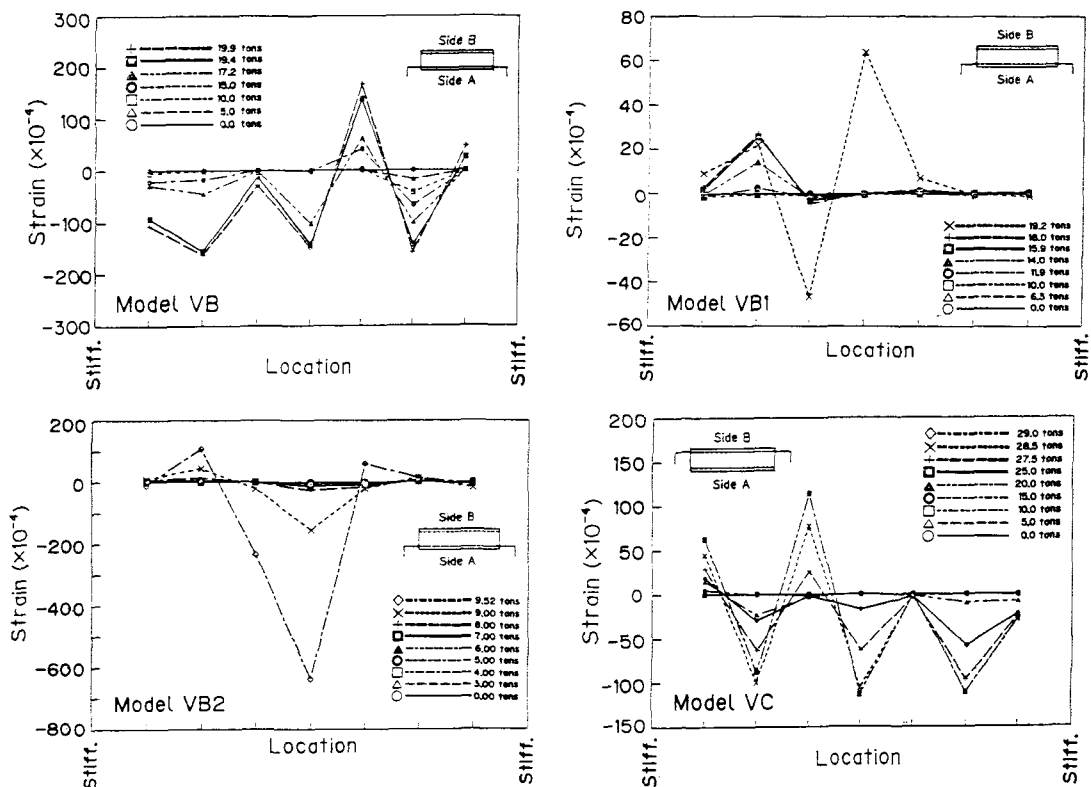


Fig. 6 Distributions of plate-bending strains in longitudinal direction on each compression flange

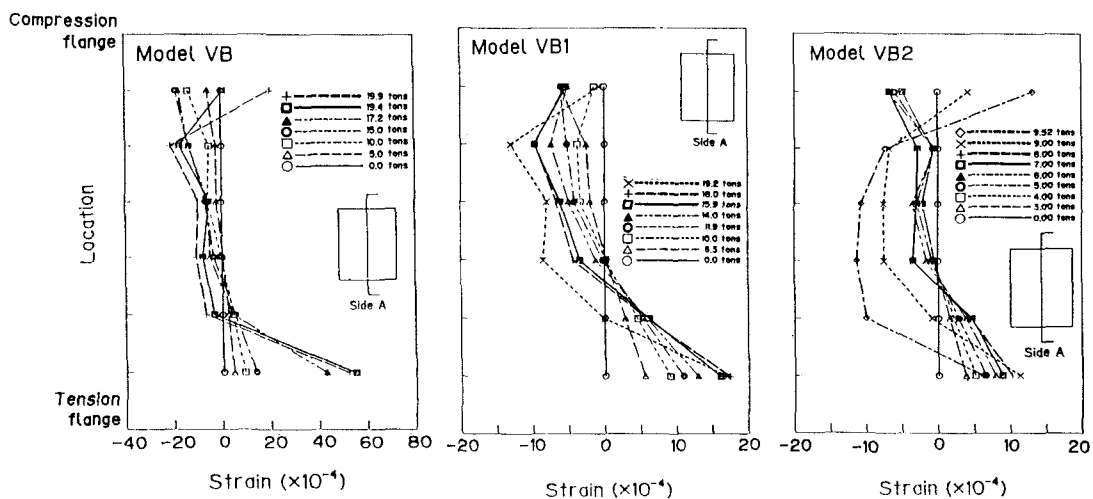


Fig. 7 Distributions of membrane strains in longitudinal direction on each web panel

3.6 桁の崩壊と終局強度

各実験桁の崩壊荷重 P_{max} をTable 6 に示す。ただし、 M_{max} は実験による最大曲げモーメント、 V_{max} は実験による最大せん断力、 M_{yf} は圧縮フランジの降伏モーメント、 M_p は全塑性曲げモーメント、 V_p は全塑性せん断力である。

たわみとひずみの測定値や観測結果から判断して、実験桁VB、VCでは圧縮フランジの横座屈（Fig. 8），実験桁C、C1、VB1、VB2 では圧縮フランジのねじれ座屈（Fig. 9）が原因で桁として崩壊した。

3.7 非対称断面の終局強度

3.1 ～3.4 からわかるように、 $-0.654 < \psi < -1$ の範囲の非対称断面に対する実験結果から、対称断面と同様な強度特性が得られた。

4. フランジ垂直座屈に関する考察

実験桁VB、VB1、VB2、VCの実験結果を使って、フランジ垂直座屈について検討する。腹板中央断面における垂直方向の膜ひずみの分布をFig. 10に示す。フランジ垂直座屈が生じておれば、腹板の圧縮縁で垂直方向に圧縮応力が作用しているはずであるが、図から明らかにように引張り応力が観測されている。

Table 5 Distance of neutral axis from compression flange

Model	Distance of neutral axis		Ratio (1) / (2)
	Measured (1)	Designed (2)	
C	0.579	0.557	1.039
C1	0.582	0.605	0.962
VB	0.584	0.556	1.050
VB1	0.553	0.555	0.996
VB2	0.591	0.541	1.092
VC	0.584	0.553	1.056

Table 6 Experimental results of web buckling and ultimate strength

Model	P_{cr} (tf)	P_{max} (tf)	M_{max} (tf · m)	V_{max} (tf)	M_{Yr} (tf · m)	M_p (tf · m)	V_p (tf)	$\frac{M_{max}}{M_{Yr}}$	$\frac{M_{max}}{M_p}$	$\frac{V_{max}}{V_p}$
C	29 ～ 32	35.70	44.02	17.86	49.68	58.10	62.57	0.886	0.758	0.285
C1	28 ～ 32	35.10	43.26	17.55	54.00	61.46	62.72	0.801	0.704	0.280
VB	11 ～ 13	19.90	44.67	—	45.32	48.28	—	0.986	0.925	—
VB1	9 ～ 11	19.20	40.69	—	47.86	50.23	—	0.850	0.810	—
VB2	5 ～ 7	9.52	20.11	—	30.28	31.20	—	0.664	0.645	—
VC	4 ～ 6	29.00	34.70	14.47	46.22	49.26	33.73	0.751	0.704	0.429

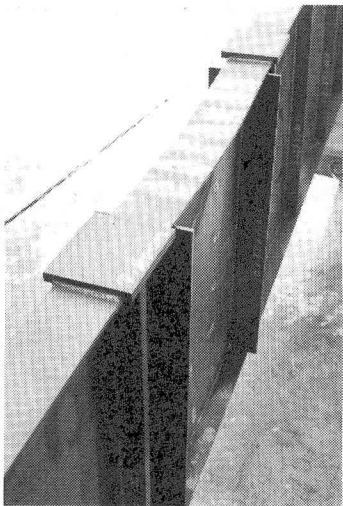


Fig. 8 Top view of collapsed Model VB

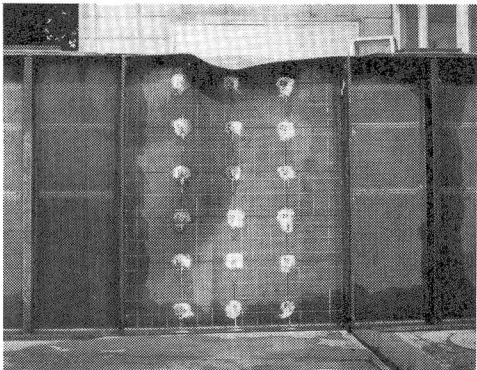


Fig. 9 Side view of collapsed Model VB2

垂直方向圧縮応力 σ_{cy} (式(9)の第2項に該当、文献14)の式(20))の理論値は小さい。腹板には桁の曲げにともなう水平方向直応力(圧縮) σ_{cx} が作用しており、応力 $-\mu \sigma_{cx}$ (引張り)が垂直方向に作用するはずで、この値が大きいの、 $\sigma_{cy} - \mu \sigma_{cx}$ が引張り応力として観測されたものと考えることができる。

腹板の単一パネルの座屈荷重の推定値 P_{cr} をTable 6に示す。また、荷重と腹板の面外たわみとの関係をFig. 11に示す。これらの表と図からわかるように、腹板座屈後に、ただちに桁の崩壊に到らず、フランジの後座屈強度がみられる。フランジ垂直座屈は腹板の座屈に起因しているので、フランジ垂直座屈が生じておれば、桁としての後座屈強度はないはずである。フランジの一部が垂直方向に落ち込む現象が生じる場合でも、それは桁の崩壊直後である。

4体の実験桁の挙動を見ると、腹板が座屈した後、さらに荷重が増加し、実験桁VB、VCでは圧縮フランジの横座屈、実験桁VB1、VB2では圧縮フランジのねじれ座屈が生じて、桁の崩壊に到ったものと

思われる。Fig. 9に示される実験桁VB2の崩壊後の様子で、圧縮フランジはねじれているが、垂直方向には落ち込んではいない。このことはFig. 12の圧縮フランジの垂直残留たわみ分布からもわかる。

結論として、フランジ垂直座屈は桁の崩壊形式としては生じないで、フランジの強度は横座屈またはねじれ座屈のいずれかで決定されるものと考えることができる。

5. 実験結果による強度算定法の検証

5.1 本論文の実験結果

本論文の実験結果と付録に示す強度算定法による理論値とをTable 7に比較する。ただし、 M_{ult} は終局曲げ強度、 V_{ult} は終局せん断強度、 β はテストパネル両端での曲げモーメント比、 ξa は変化する曲げを等曲げに換算する位置である。また、曲げ・せん断の理論相関曲線²³⁾を、縦軸 V/V_{ult} 、横軸 M/M_{ult}

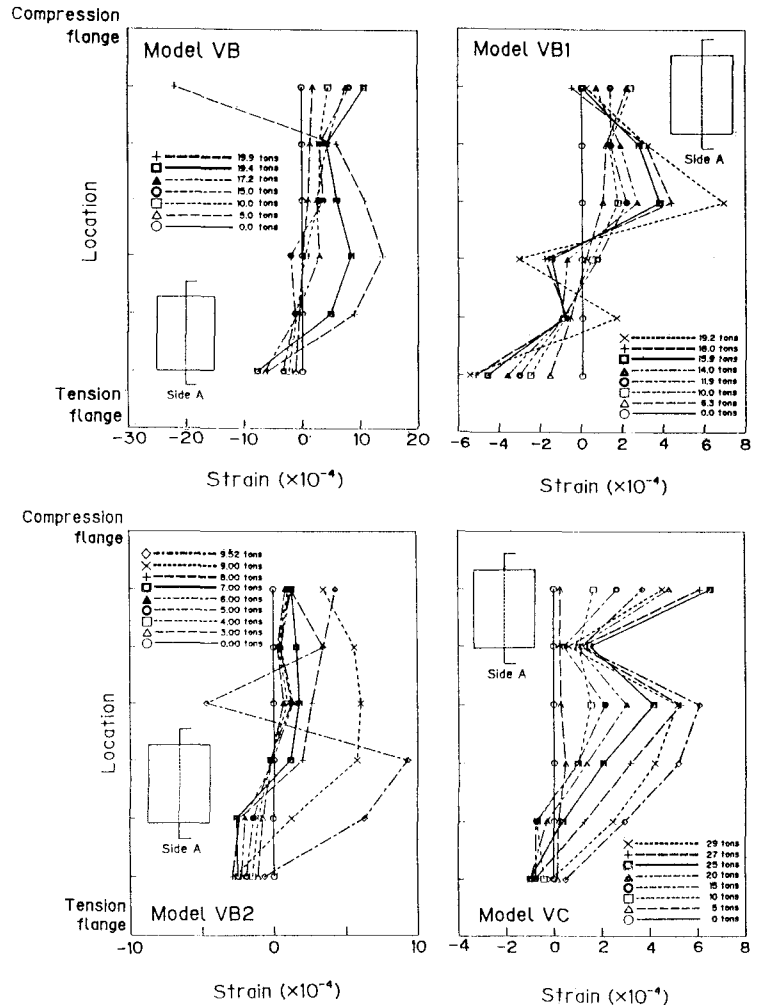


Fig.10 Distributions of membrane strains in transverse direction on each web panel

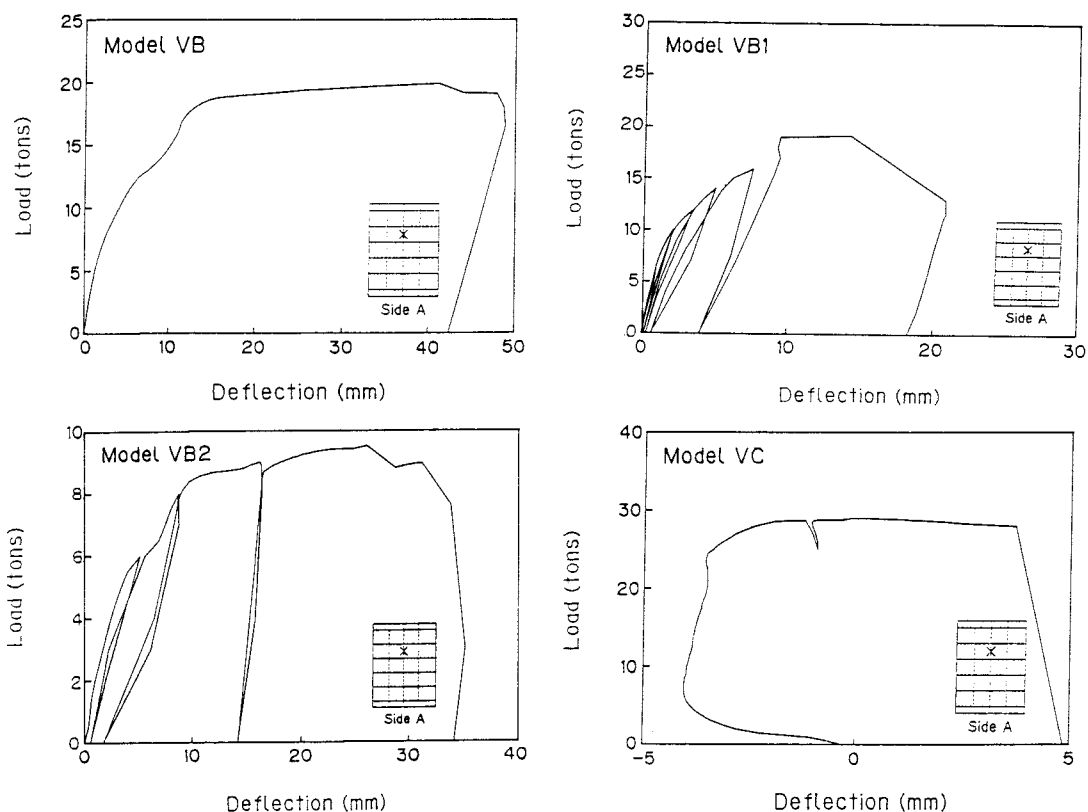


Fig.11 Out-of-plane deflections on each web panel

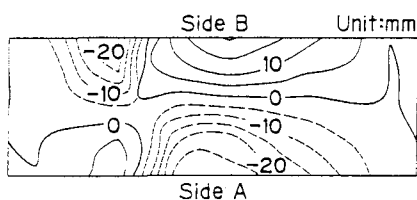


Fig.12 Residual deflection on compression flange of Model VB2

Table 7 Theoretical and experimental ultimate strength

Model	Theoretical		Experimental					$\frac{M_{max}}{M_{ult}}$	$\frac{V_{max}}{V_{ult}}$	$\frac{L_{ex}}{L_{th}}$
	M_{ult} (tf · m)	V_{ult} (tf)	β	ξ	P_{max} (tf)	M_{max} (tf · m)	V_{max} (tf)			
C	38.59	37.58	0.707	0.111	35.70	44.02	17.86	1.141	0.475	1.149
C1	40.86	38.86	0.704	0.111	35.10	43.26	17.55	1.059	0.452	1.067
VB	39.17	—	1.0	—	19.90	44.67	—	1.141	—	1.141
VB1	35.20	—	1.0	—	19.20	40.69	—	1.156	—	1.156
VB2	18.74	—	1.0	—	9.52	20.11	—	1.073	—	1.073
VC	40.06	17.76	0.680	0.121	29.00	34.70	14.47	0.866	0.815	1.001

で図示したとき、原点から実験値までの距離は L_{ex} 、原点から相関曲線までの距離は L_{th} である。

Table 7 より提案した強度算定法は実験結果を 0.1～15.6%の誤差で安全側に評価していることがわかる。

Table 9 Statistical values of L_{ex}/L_{th}

	Bending	Shear	Bending & Shear	Total
Mean	1.101	1.131	1.137	1.120
Standard deviation	0.106	0.251	0.097	0.144

5.2 既報の実験結果

既報^{9) 15) 21)}の実験結果と強度算定法による理論値とをTable 8 に比較する。また、理論値と実験値との比について平均値および標準偏差を求めるとTable 9 のようになる。本算定法は実験結果を良く評価していることがわかる。

式(9)は繰り返し計算が必要である。垂直方向の圧縮応力(式(9)の第2項)の影響は小さいと考えられるので、この項を無視して算定した終局強度をTable 8 に併記した。

両理論値を比較すると、一例を除いて差がない。設計の便を考慮すれば、式(9)の第2項を無視して終局強度を算定するのがよい。

6. あとがき

本研究では、プレートガーダーの限界状態設計法の確立に寄与するため、上下非対称断面プレートガーダーが曲げおよび曲げ・せん断を受ける場合の実験を行い、その終局挙動および終局強度を明らかにした。

圧縮フランジの垂直座屈に関する実験結果は次のようである。

- ① フランジ垂直座屈が生じておれば、腹板の圧縮縁で垂直方向圧縮応力が作用しているはずであるが、垂直方向引張り応力が観測された。
- ② 腹板が薄い場合、桁の崩壊直後に、フランジの一部が垂直方向に落ち込む現象が観測された。
- ③ 腹板座屈後、ただちに桁の崩壊に到らず、フランジによる後座屈強度がみられた。桁はフランジの横座屈またはねじれ座屈が生じて崩壊した。

この結果から、フランジ垂直座屈は桁の崩壊形式としては生じず、フランジ強度は横座屈またはねじれ座屈で決定されることがわかった。

圧縮フランジの横座屈、ねじれ座屈、垂直座屈をすべて考慮した終局曲げ強度算定法を付録に示した。この算定法による終局強度は、本論文の実験および既報の実験の結果とよく一致することが確かめられた。

【謝辞】 本研究には関西大学情報処理センターの汎用コンピュータ FACOM M-780/10 とパーソナル・コンピュータ HP model-9816, HP model-9836, HP9000 model-332 を使用した。実験桁は駒井鉄工(株)で製作された。実験データの整理にあたっては、藤崎敦久君(関西大学大学院)と吉原宏敬君(日本電子計算(株))の協力を得た。本研究は平成2年度文部省科学研究費一般研究(B)(課題番号01460172, 研究代表者 三上市藏)の補助を受けた。

付録 腹板の終局曲げ強度の算定法

著者らは曲げを受けるプレートガーダーについて、非対称断面を有する場合、また多数の補剛材が任意の位置に配置された場合にも適用できる設計のための終局強度算定法を圧縮フランジの垂直座屈は生じないも

Table 8 Comparison of theoretical ultimate strength with test results

Loading	Model	Ref.	Present			Simplified		
			M_{max}	V_{max}	L_{ex}	M_{max}	V_{max}	L_{ex}
			M_{ult}	V_{ult}	L_{th}	M_{ult}	V_{ult}	L_{th}
Bending	VB	Present	1. 141	—	1. 141	1. 141	—	1. 141
	VB1	Present	1. 156	—	1. 156	1. 156	—	1. 156
	VB2	Present	1. 073	—	1. 073	1. 073	—	1. 073
	B-21	15)	1. 005	—	1. 005	1. 005	—	1. 005
	B-22	15)	1. 006	—	1. 006	1. 006	—	1. 006
	B-23	15)	1. 042	—	1. 042	1. 042	—	1. 042
	B-24	15)	1. 015	—	1. 015	1. 015	—	1. 015
	B-01	16)	0. 934	—	0. 934	0. 934	—	0. 934
	B-25-0	9)	0. 901	—	0. 901	0. 901	—	0. 901
	B-25-1	9)	1. 151	—	1. 151	1. 151	—	1. 151
	B-25-5	9)	1. 273	—	1. 273	1. 273	—	1. 273
	B-35-1	9)	1. 088	—	1. 088	1. 088	—	1. 088
	B-35-1A	9)	1. 213	—	1. 213	1. 213	—	1. 213
	B-35-1E	9)	1. 041	—	1. 041	1. 041	—	1. 041
	B-35-5	9)	1. 204	—	1. 204	1. 204	—	1. 204
	GA0	18)	1. 138	—	1. 138	1. 138	—	1. 138
	GA1	18)	1. 154	—	1. 154	1. 154	—	1. 154
	GA2	18)	1. 199	—	1. 199	1. 199	—	1. 199
	GA3	18)	1. 146	—	1. 146	1. 146	—	1. 146
	G E	19)	1. 263	—	1. 263	1. 263	—	1. 263
	G F	19)	1. 211	—	1. 211	1. 211	—	1. 211
	G G	19)	1. 118	—	1. 118	1. 118	—	1. 118
	G H	19)	1. 093	—	1. 093	1. 093	—	1. 093
	A _a BX ₁	20)	0. 930	—	0. 930	0. 930	—	0. 930
	A _a BX ₂	20)	0. 938	—	0. 938	0. 938	—	0. 938
	A _a BY ₁	20)	0. 954	—	0. 954	0. 954	—	0. 954
	A _a BY ₂	20)	1. 001	—	1. 001	1. 001	—	1. 001
	GBX ₁	20)	1. 094	—	1. 094	1. 094	—	1. 094
	GBX ₂	20)	1. 163	—	1. 163	1. 163	—	1. 163
	GBY ₁	20)	1. 124	—	1. 124	1. 124	—	1. 124
	GBY ₂	20)	1. 342	—	1. 342	1. 342	—	1. 342
	GBY ₁ -17	20)	1. 158	—	1. 158	1. 158	—	1. 158
	GBY ₂ -17	20)	1. 076	—	1. 076	1. 076	—	1. 076
Shear	S-21	15)	0. 298	0. 892	0. 895	0. 298	0. 892	0. 895
	S-22	15)	0. 308	0. 924	0. 927	0. 308	0. 924	0. 927
	S-23	15)	0. 302	0. 849	0. 852	0. 302	0. 849	0. 852
	S-24	15)	0. 339	1. 033	1. 036	0. 339	1. 033	1. 036
	S-25	15)	0. 328	1. 005	1. 007	0. 328	1. 005	1. 007
	S-26	15)	0. 296	0. 842	0. 845	0. 296	0. 842	0. 845
	S-01	16)	0. 252	0. 705	0. 708	0. 252	0. 705	0. 708
	S-25-0	17)	0. 510	1. 497	1. 502	0. 510	1. 497	1. 502
	S-25-5	17)	0. 652	1. 330	1. 349	0. 652	1. 330	1. 349
	S-35-1	17)	0. 687	1. 364	1. 385	0. 687	1. 364	1. 385
	S-35-1A	17)	0. 687	1. 364	1. 385	0. 687	1. 364	1. 385
	S-35-5	17)	0. 680	1. 349	1. 370	0. 680	1. 349	1. 370
	S-35-1D	17)	0. 740	1. 215	1. 254	0. 740	1. 215	1. 254
	S-35-1F	17)	0. 886	1. 245	1. 318	0. 886	1. 245	1. 318
Bending & Shear	C	Present	1. 141	0. 475	1. 149	1. 141	0. 475	1. 149
	VC	Present	1. 059	0. 452	1. 067	1. 059	0. 452	1. 067
	C-21	Present	0. 866	0. 815	1. 001	0. 866	0. 815	1. 001
	C-22	15)	0. 869	0. 856	1. 026	0. 869	0. 856	1. 026
	C-23	15)	0. 876	0. 864	1. 035	0. 876	0. 864	1. 035
	C-24	15)	0. 891	0. 921	1. 078	0. 891	0. 921	1. 078
	C-25	15)	0. 914	0. 934	1. 099	0. 914	0. 934	1. 099
	C-26	15)	0. 869	0. 886	1. 043	0. 869	0. 886	1. 043
	C-27	15)	0. 977	0. 640	1. 019	0. 977	0. 640	1. 019
	C-28	15)	1. 000	0. 717	1. 061	1. 000	0. 717	1. 061
	GB1	18)	0. 980	0. 831	1. 087	0. 980	0. 831	1. 087
	GB2	18)	1. 129	0. 614	1. 153	1. 129	0. 614	1. 153
	G A	19)	1. 251	0. 544	1. 262	1. 251	0. 544	1. 262
	G B	19)	1. 115	0. 532	1. 130	1. 115	0. 532	1. 130
	G C	19)	1. 143	0. 342	1. 145	1. 143	0. 342	1. 145
	G D	19)	1. 140	0. 186	1. 140	1. 140	0. 186	1. 140
	A _a CY ₁ -4-①	21)	1. 149	0. 137	1. 149	1. 149	0. 137	1. 149
	A _a CY ₁ -4-②	21)	0. 998	1. 001	1. 189	0. 998	1. 001	1. 189
	A _a CY ₁ -3.6	21)	0. 951	0. 843	1. 073	0. 951	0. 843	1. 072
	A _a CY ₁ -2.8	21)	0. 969	0. 960	1. 147	0. 969	0. 960	1. 147
	GCX ₁ -4	21)	0. 862	1. 083	1. 178	0. 862	1. 083	1. 178
	GCX ₂ -4	21)	0. 885	0. 815	1. 014	0. 885	0. 815	1. 014
	GCV ₁ -5	21)	1. 077	1. 093	1. 291	1. 077	1. 093	1. 291
	GCV ₁ -4	21)	1. 319	0. 861	1. 375	1. 319	0. 861	1. 375
	GCV ₁ -3.6	21)	1. 075	0. 996	1. 234	1. 075	0. 996	1. 234
	GCV ₁ -2.25	21)	0. 941	1. 091	1. 218	0. 941	1. 091	1. 218
		21)	0. 832	1. 275	1. 330	0. 832	1. 275	1. 330

のとして、文献11) にまとめた。また、圧縮フランジの垂直座屈を腹板の単一パネルの座屈として捉える算定法を文献14) に提案した。

本論文の実験結果によれば、圧縮フランジの垂直座屈は腹板の単一パネルの座屈として捉え、圧縮フランジの終局強度は横座屈またはねじれ座屈によって定まるものとするのが適当である。ここに、文献11) の単一パネルの終局強度の算定法を、文献14) に基づいて変更する。なお、腹板の部分パネルの終局強度は文献11) 、腹板の全体パネルの終局強度は文献12) 、腹板の終局せん断強度は文献13) の方法で算定する。

A.1 単一パネルの終局強度

A.1.1 弾性座屈応力¹⁴⁾

(1) 垂直方向の直応力による弾性座屈応力

垂直方向の直応力による弾性座屈応力 σ_{cr}^e は次式で求める。

$$\sigma_{cr}^e = k \frac{\pi^2 E}{12 (1 - \mu^2)} \left\{ \frac{t_w}{a} \right\}^2 \quad (1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} k = 4 & & : a/b_i \leq 1 \\ & = (b_i/a + a/b_i)^2 & : a/b_i > 1 \end{aligned} \quad (2)$$

Eは弾性係数、 μ はポアソン比、 t_w は腹板厚さ、 a は垂直補剛材間隔、 b_i は単一パネルiの幅である。

(2) 水平方向の直応力による弾性座屈応力

水平方向の直応力による弾性座屈応力 σ_{cr}^e は次式で求める。

$$\sigma_{cr}^e = k \frac{\pi^2 E}{12 (1 - \mu^2)} \left\{ \frac{t_w}{b_i} \right\}^2 \quad (3)$$

ここに、

$$\begin{aligned} k = 23.9 \left[(1 - \phi_i)/2 \right]^2 & & : -7 \leq \phi_i \leq -1 \\ & = (b_i/a + a/b_i)^2 & : a/b_i < 1 & : \phi_i = 1 \\ & = 4 & : a/b_i \geq 1 & : \phi_i = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\phi_i = (B_c - y_i) / (B_c - y_{i-1}) \quad (5)$$

ϕ_i は単一パネルiの水平方向の応力勾配係数、 B_c は腹板の圧縮領域の幅、 y_i は腹板圧縮縁と水平補剛材i段目の距離である。

A.1.2 終局強度¹⁴⁾

終局強度 σ_{ult} は弾性座屈応力 σ_{cr}^e と鋼材の降伏応力 σ_y とから計算されるパラメータ

$$\lambda = (\sigma_y / \sigma_{cr}^e)^{1/2} \quad (6)$$

を使って計算する。

(1) 垂直方向の圧縮強度

垂直方向の圧縮強度 $\sigma_{ult, cy}$ は次式から求める。

$$\begin{aligned} \sigma_{ult, cy} / \sigma_{yw} &= 1 & : \lambda \leq 0.526 \\ &= (0.526 / \lambda)^{0.7} & : \lambda > 0.526 \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 σ_{yw} は腹板の降伏応力である。

(2) 水平方向の圧縮強度 ($\phi_i = 1$)

水平方向の圧縮強度 $\sigma_{ult, cx}$ は式(7) から求める。

(3) 水平方向の曲げ強度 ($\phi_i = -1$)

水平方向の曲げ強度 $\sigma_{ult, b}$ は次式から求める。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ult, b} / \sigma_{yw} &= 1 & : \lambda \leq 1.21 \\ &= (1.21 / \lambda)^{0.42} & : \lambda > 1.21 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(4) 水平方向の曲げ・引張り強度 ($-7 \leq \phi_i < -1$)

水平方向の曲げ・引張り強度 $\sigma_{ult, bt}$ は式(8) から求める。

A.1.3 単一パネルの終局強度¹⁴⁾

単一パネルが桁曲げによる水平方向の曲げ・圧縮および引張り応力と、フランジからの垂直方向応力とを受けて座屈に到るものとする。対象パネルの終局強度は以下のようにして求める。

(1) 水平方向に曲げ・圧縮、垂直方向に圧縮を受ける場合の終局強度

曲げ・圧縮の場合 ($-1 < \phi_i < 1$) の終局強度 σ_{ult} は次式から繰返し計算を行って求める。

$$\sqrt{\left\{ \frac{1+\phi_i}{2} \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{ult, cx}} \right\}^2 + \left\{ \frac{1-\phi}{E} \frac{A_{fc}}{A_w} \frac{\sigma_{ult}^2}{\sigma_{ult, cy}} \right\}^2 + \left\{ \frac{1-\phi_i}{2} \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{ult, b}} \right\}^2} = 1 \quad (9)$$

ここに、 ϕ は桁としての応力勾配係数、 A_w は腹板の断面積、 A_{fc} は圧縮フランジの断面積、 B は腹板の幅である。また、水平補剛材のない場合には、 $b_i \rightarrow B$ 、 $\phi_i \rightarrow \phi$ とおく。

なお、式(9) は文献14) の式において、圧縮フランジの残留応力 $\sigma_r = 0$ とおいたものである。

(2) 水平方向に曲げ・引張り、垂直方向に圧縮を受ける場合の終局強度

曲げ・引張りの場合 ($-7 \leq \phi_i \leq -1$) の終局強度 σ_{ult} は次式より求める。

$$\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{yw}} = 1 / \sqrt{\left\{ \frac{\sigma_{yw}}{\sigma_{ult, bt}} \right\}^2 + (1-\phi) \frac{A_{fc}}{A_w} \frac{\sigma_{yw}}{E} \frac{\sigma_{yw}}{\sigma_{ult, cy}}} \quad (10)$$

なお、式(10)も文献14) の式において、圧縮フランジの残留応力 $\sigma_r = 0$ とおいたものである。

A.1.4 腹板圧縮縁強度への換算¹²⁾

A.1.3 で得られる単一パネルの終局強度 $\sigma_{ult, i}$ は、当該パネルの圧縮縁側の値であり、次式を使って腹板圧縮縁側に対する値 $\sigma_{ult, i}'$ に換算する。

$$\sigma_{ult, i}' = \sigma_{ult, i} / (1 - y_{i-1} / B_c) \quad (11)$$

A.1.5 腹板の単一パネルの終局強度¹¹⁾

圧縮領域の単一パネルおよび圧縮領域から引張り領域に渡る単一パネルに対して終局強度を求め、その最小値を腹板の単一パネルの終局強度とする。

A.2 部分パネルの終局強度

部分パネルの終局強度は、水平補剛パネルを直交異方性板に置換して文献11) の式(14)～式(23)を用いて算定する。ただし、垂直方向の圧縮応力の影響は小さいので無視する。

A.3 全体パネルの終局強度

全体パネルの終局強度も、水平・垂直補剛パネルを直交異方性板に置換して文献12) の式(20)、式(30)～式(32)を用いて算定する。ただし、垂直方向の圧縮応力の影響は小さいので無視する。

A.4 腹板の終局曲げ強度

腹板の終局曲げ強度 $\sigma_{ult, w}$ は、水平補剛材がない場合は、単一パネルの終局強度と全体パネルの終局強度のうち小さい方の値で、水平補剛材がある場合は、単一パネルの終局強度、部分パネルの終局強度、全体パネルの終局強度のうち最小の値で与えられる。¹²⁾

A.5 プレートガーダーの終局曲げ強度

桁の終局曲げ強度は文献11) の式(3a), (3b) より求める。ただし、引張りフランジの降伏に対する条件は文献14) の式(25)で照査できる。

参 考 文 献

- 1) Galambos, T.V. (ed.) : Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, 1988.
- 2) 座屈設計ガイドライン, 第9章, 土木学会, 1987.
- 3) Basler, K., and Thürlimann, B. : Strength of Plate Girders in Bending, Proc. of ASCE, Vol.87, No. ST6, Aug., 1961, pp.153-181.
- 4) Basler, K., Yen, B.T., Mueller, J.A. and Thürlimann, B. : Web buckling tests on welded plate girders, WRC Bulletin, No.64, U.S.A., Sept., 1960.
- 5) 小西一郎(編) : 腹板座屈に関する実験的研究, プレート・ガーダーの耐荷力に関する理論と実験, 関西橋梁鉄骨溶接協会, 1965.7, pp.59-118.
- 6) Cooper, P.B. : Strength of longitudinally stiffened plate girders, Proc. of ASCE, Vol.93, No. ST2, Apr., 1967, pp.419-451.
- 7) 小西一郎・米澤 博・三上市蔵 : プレートガーダーの曲げ弾性座屈, 土木学会論文報告集, No.143, 1967.7, pp.1-8.
- 8) Owen, D.R.J., Rocky, K.C. and Skaloud, M. : Ultimate load behaviour of longitudinally reinforced webplates subjected to pure bending, Pub. of IABSE, Vol.30-1, 1970, pp.113-148.
- 9) 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・ガーダーの曲げ耐荷力実験, 土木学会論文報告集, No.234, 1975.2, pp.33-44.
- 10) 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・ガーダーの曲げ耐荷力実験, 土木学会論文報告集, No.305, 1981.1, pp.1-9.
- 11) 三上市蔵・木村泰三・山里 靖 : 設計のためのプレートガーダーの終局強度の算定法, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.35A, 1989.3, pp.511-522.
- 12) 三上市蔵 : プレートガーダーの強度と設計法, 土木学会関西支部共同研究グループ報告書「薄板構造の強度と設計に関する調査研究」最終報告書, 1989.6.
- 13) 三上市蔵・山里 靖 : 設計のためのプレートガーダーのせん断強度の算定法の改良, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.36A, 1990.3, pp.181-190.
- 14) 三上市蔵・木村泰三・徳田浩一 : プレートガーダーのフランジ垂直座屈強度の算定法, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.36A, 1990.3, pp.191-201.
- 15) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室 : 土木研究所資料, プレートガーダー耐荷力実験報告, No.2533, 1987.12.
- 16) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室 : 土木研究所資料, プレートガーダー耐荷力実験報告, 1988 (印刷中).
- 17) 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・ガーダーのせん断耐荷力, 土木学会論文報告集, No.235, 1975.3, pp.13-28.
- 18) 前川幸次・伊藤義人・福本嘯士 : 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, 土木学会論文集, No.392, 1988.4., pp.335-343.
- 19) 福本嘯士・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, No.362/I-4, 1985.10, pp.323-332.
- 20) 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, No.264, 1977.8, pp.1-15.
- 21) 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, No.269, 1978.1, pp.1-16.
- 22) 道路橋示方書・同解説, I 共通編・II 鋼橋編, 日本道路協会, 1990.2.
- 23) 西野文雄・長谷川彰夫 : 道路橋示方書 II 鋼橋編改訂の背景と運用, 8章 プレートガーダー, 橋梁と基礎, Vol.15, No.6, 1981.6, pp.8-13.

(1990年10月12日受付)