

プレートガーダーのフランジ垂直座屈強度の算定法

VERTICAL BUCKLING STRENGTH OF COMPRESSION FLANGES ON PLATE GIRDERS

三上 市藏* 木村 泰三** 徳田 浩一***

By Ichizou MIKAMI, Taizou KIMURA, and Koichi TOKUDA

An approximate method to predict the vertical buckling strength of plate girder flanges is presented for the limit state design. The present method can apply to the plate girders with the unsymmetrical cross-section and/or multi-stiffened web. The vertical buckling strength of compression flanges may be calculated from the buckling strength of web plate subjected to combined bending and compression. The present method has a good agreement with the some experimental results. Parametric analysis was carried out, and a simple design formula of vertical buckling strength was proposed.

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に、その基礎となる終局強度を統一的に表現する必要がある。著者らは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ようなプレートガーダーの終局強度の算定法を研究^{1) - 3)}してきた。この理論は実験結果とよく一致することが確かめられた。^{1) - 5)}

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。⁶⁾上記の理論³⁾では、横座屈とねじれ座屈については十分に検討されているが、垂直座屈に関しては未検討であった。

フランジ垂直座屈については、Basler⁶⁾が、湾曲した圧縮フランジから受ける垂直方向応力によって腹板が弾性座屈するものとして、腹板の限界幅厚比を与えた。彼は、腹板が受けている桁曲げによる水平方向応力を無視している。

これに対して、長谷川・和田・西野⁷⁾はこの座屈を圧縮フランジと腹板の一部からなるT形断面柱の垂直座屈として捉える方法を示した。また、藤井^{8) 9)}は腹板がフランジを弾性バネ支持すると考え、腹板の弾性有限変位挙動をFEM解析して、バネ定数を計算し、フランジの垂直座屈強度を算定した。

これら3つの研究の対象は、対称断面プレートガーダーに限られ、非対称断面プレートガーダーのフランジ垂直座屈強度の算定法は開発されていない。また、これらの研究は、いずれも垂直補剛材を有する腹板に対するもので、水平補剛材と垂直補剛材を有する腹板に関してはなんらわかっていない。^{2) 10)}

* 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) (〒543 大阪市天王寺区上本町5丁目7番12号);元関西大学大学院

*** 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)

本研究では、Basler⁶⁾の考え方を発展させ、非対称断面プレートガーダーの腹板に適用でき、また、水平・垂直補剛腹板を有するプレートガーダーにも適用できる、フランジ垂直座屈強度の算定法を提案する。この方法は設計計算の便宜を考慮して簡易なものとしてある。また、この方法による強度を過去に行われた実験結果と比較して、この算定法の妥当性を検討する。

この算定法によると、非対称断面であるか、水平補剛材を有する場合には繰り返し計算が必要となることがあり、設計計算が煩雑になる。そこで、フランジ垂直座屈強度に対するパラメータの影響を数値的に検討し、簡略な設計式を提案する。

2. フランジ垂直座屈強度の算定法

2.1 板パネルの座屈強度

図-1のような組合せ応力を受ける板パネル(長さ a 、幅 b 、厚さ t_w 、 x 方向応力の応力勾配係数 ψ_1) を考える。

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

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

を使って表現する。

(1) x 方向の圧縮強度

x 方向の圧縮に対する弾性座屈応力 $\sigma_{cr^e, cx}$ は次式から求められる。

$$\sigma_{cr^e, cx} = k_{cx} \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t_w}{b} \right)^2 \quad (2)$$

ここに、 E は弾性係数、 μ はポアソン比、 k_{cx} は x 方向の圧縮に対する座屈係数で、次式から算定できる。

$$\left. \begin{aligned} k_{cx} &= (b/a + a/b)^2 & : a/b < 1 \\ &= 4 & : a/b \geq 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

x 方向の圧縮強度 $\sigma_{ult, cx}$ は、弾性座屈応力 $\sigma_{cr^e, cx}$ に対するパラメータ λ_{cx} を用いて、次の三上の式¹⁾ から求められる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ult, cx} / \sigma_{yw} &= 1 & : \lambda_{cx} \leq 0.526 \\ &= (0.526 / \lambda_{cx})^{0.7} & : \lambda_{cx} > 0.526 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 σ_{yw} は腹板の降伏応力である。

(2) y 方向の圧縮強度

y 方向の圧縮に対する弾性座屈応力 $\sigma_{cr^e, cy}$ は次式から求められる。

$$\sigma_{cr^e, cy} = k_{cy} \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t_w}{a} \right)^2 \quad (5)$$

ここに、 k_{cy} は y 方向の圧縮に対する座屈係数で、次式から算定できる。

$$\left. \begin{aligned} k_{cy} &= 4 & : a/b \leq 1 \\ &= (b/a + a/b)^2 & : a/b > 1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

y 方向の圧縮強度 $\sigma_{ult, cy}$ は、弾性座屈応力 $\sigma_{cr^e, cy}$ に対するパラメータ λ_{cy} を用いて、次の三上の式¹⁾ から求められる。

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

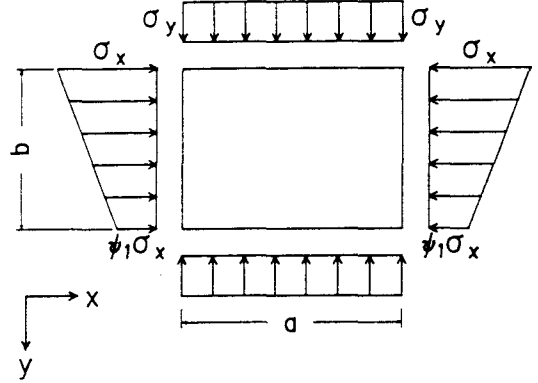


図-1 組合せ応力を受ける板パネル

(3) x方向の曲げ強度

曲げに対する弾性座屈応力 $\sigma_{cr^e, b}$ は次式から求められる。

$$\sigma_{cr^e, b} = k_b \frac{\pi^2 E}{12 (1 - \mu^2)} \left(\frac{t_w}{b} \right)^2 \quad (8)$$

ここに、 k_b は曲げに対する座屈係数で、 $k_b = 23.9$ である。

曲げ強度 $\sigma_{ult, b}$ は、弾性座屈応力 $\sigma_{cr^e, b}$ に対するパラメータ λ_b を用いて、次の奈良の式¹²⁾ から求められる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ult, b} / \sigma_{Yw} &= 1 & : \lambda_b \leq 1.21 \\ &= (1.21 / \lambda_b)^{0.42} & : \lambda_b > 1.21 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

(4) x方向の曲げ・引張り強度

曲げ・引張りの場合 ($-7 \leq \phi_1 \leq -1$)、座屈係数 k_b は次式¹⁾⁻³⁾ から算定できる。

$$k_b = 23.9 \left[(1 - \phi_1) / 2 \right]^2 \quad : -7 \leq \phi_1 \leq -1 \quad (10)$$

圧縮領域の幅は $b_c = b / (1 - \phi_1)$ と表せるので、幅 $2b_c$ を有する仮想腹板が曲げを受ける場合の座屈係数を $k_b = 23.9$ として計算すると、式(10)が得られる。

この座屈係数 k_b を使って、式(1)から λ_b を求め、式(9)を適用して、曲げ・引張りに対する終局強度 $\sigma_{ult, bt}$ を求める。

(5) x方向に曲げ・圧縮、y方向に圧縮応力を受ける場合の終局強度

x方向に曲げ・圧縮、y方向に圧縮応力を受ける場合の終局強度は次の相関式¹³⁾ から求められる。

$$\sqrt{\left(\frac{(1 + \phi_1) \sigma_x}{2 \sigma_{ult, cx}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{ult, cy}} \right)^2} + \left(\frac{(1 - \phi_1) \sigma_x}{2 \sigma_{ult, b}} \right)^2 = 1 \quad (11)$$

ここに、 $\sigma_{ult, cx}$ はx方向の圧縮強度、 $\sigma_{ult, cy}$ はy方向の圧縮強度、 $\sigma_{ult, b}$ はx方向の曲げ強度である。

(6) x方向に曲げ・引張り、y方向に圧縮応力を受ける場合の終局強度

x方向に曲げ・引張り、y方向に圧縮応力を受ける場合の終局強度は次の相関式から求められる。

$$\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{ult, cy}} \right) + \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{ult, bt}} \right)^2 = 1 \quad (12)$$

ここに、 $\sigma_{ult, bt}$ はx方向の曲げ・引張り強度である。

2.2 プレートガーダーのフランジ垂直座屈強度

Basler⁶⁾ の考え方を、非対称断面プレートガーダーに拡張する。水平補剛材がない場合は図-2 (a) に示す垂直補剛材間の単一パネルの座屈時が、水平補剛材がある場合は図-2 (b), (c) のように圧縮縁側単一パネルの座屈が対象となる。図-2 (b) の場合、桁は図-3のような応力状態にある。単一パネルが、桁曲げによる水平方向の曲げ・圧縮応力と、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。

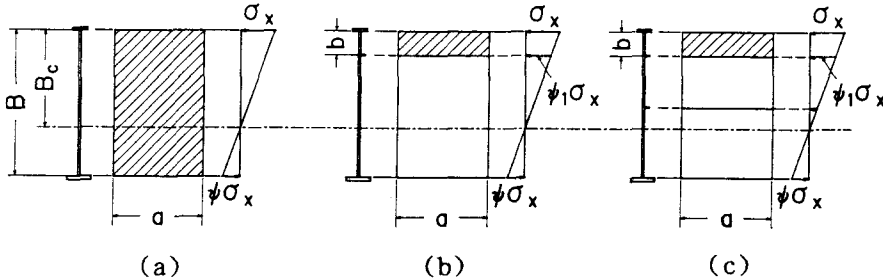


図-2 垂直座屈を照査する腹板のパネル

対象パネルの終局強度を式(11)から定めることにする。

図-1の応力と図-3の応力との関係は以下ようになる。

(1) x方向作用応力

x方向作用応力 σ_x は次のように表される。

$$\sigma_x = \sigma_{ult} \quad (13)$$

(2) y方向作用応力

y方向作用応力 σ_y は以下のようにして求められる。まず、桁の曲げ変形による中立軸における曲率半径 ρ は次のようになる。

$$\rho = B_c / \varepsilon_{fc} \quad (14)$$

ここに、 B_c は桁としての圧縮領域の幅、 ε_{fc} は圧縮フランジの軸ひずみである。

したがって、圧縮フランジの中央面の曲率半径 ρ_c は次のようになる。

$$\rho_c = \rho - B_c = \left[\frac{1}{\varepsilon_{fc}} - 1 \right] B_c \approx \frac{1}{\varepsilon_{fc}} B_c \quad (15)$$

ところで、圧縮領域の幅 B_c

$$B_c = B / (1 - \phi) \quad (16)$$

と表せるから、式(15)は次のようになる。

$$\rho_c = \frac{B}{1 - \phi} \frac{1}{\varepsilon_{fc}} \quad (17)$$

圧縮フランジの断面積を A_{fc} 、作用圧縮応力を σ_{fc} とすると、腹板が圧縮フランジから受ける垂直方向応力と、圧縮フランジの軸方向応力の垂直方向成分力のつり合いから、

$$\sigma_y t_w = A_{fc} \sigma_{fc} / \rho_c \quad (18)$$

となるので、式(17)を使うと、

$$\sigma_y = \frac{A_{fc} \sigma_{fc}}{B t_w} (1 - \phi) \varepsilon_{fc} \quad (19)$$

となる。ここで、 $\varepsilon_{fc} = (\sigma_{fc} + \sigma_r) / E$ と考える。²⁾ただし、 σ_r は圧縮フランジの残留応力である。

式(19)から次式が得られる。

$$\sigma_y = (1 - \phi) \frac{A_{fc}}{A_w} \frac{\sigma_{fc}^2 + \sigma_{fc} \sigma_r}{E} \quad (20)$$

ここに、 A_w は腹板の断面積である。

(3) 垂直座屈強度

式(13)、式(20)を式(11)に代入すると、曲げ・圧縮の場合 ($-1 < \phi_1 < 1$) の垂直座屈強度 σ_{ult} を与える次式が得られる。

$$\sqrt{\left(\frac{1 + \phi_1}{2} \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{ult, cx}} \right)^2 + \left(\frac{(1 - \phi)}{E} \frac{A_{fc}}{A_w} \frac{\sigma_{ult}^2 + \sigma_r \sigma_{ult}}{\sigma_{ult, cy}} \right)^2} + \left(\frac{1 - \phi_1}{2} \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{ult, b}} \right)^2 = 1 \quad (21)$$

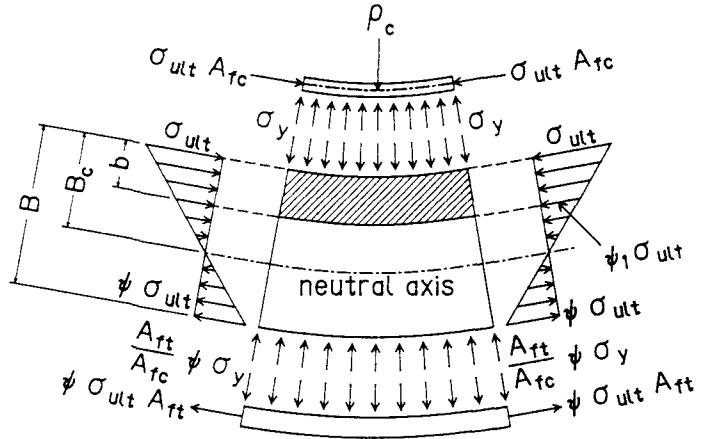


図-3 フランジ垂直座屈時の応力状態

図-2(a)に示すように水平補剛材のない場合には、 $b \rightarrow B$ 、 $\phi_1 \rightarrow \phi$ とおけば、2.1節の式を使い、 x 方向の圧縮強度 $\sigma_{ult, cx}$ 、 y 方向の圧縮強度 $\sigma_{ult, cy}$ 、 x 方向の曲げ強度 $\sigma_{ult, b}$ 、 x 方向の曲げ・引張り強度 $\sigma_{ult, bt}$ を求めることができる。

曲げ・圧縮の場合 ($-1 < \phi_1 < 1$) には、式(21)から垂直座屈強度 σ_{ult} が得られる。

曲げ・引張りの場合 ($-7 \leq \phi_1 \leq -1$) には、式(12)から次式が得られる。

$$\left\{ \frac{(1-\phi)}{E} \frac{A_{fc}}{A_w} \frac{\sigma_{ult}^2 + \sigma_r \sigma_{ult}}{\sigma_{ult, cy}} \right\} + \left\{ \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{ult, b}} \right\}^2 = 1 \quad (22)$$

相關式(22)から、垂直座屈強度が次のように陽に求めることができる。

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{yw}} = & \left\{ - (1-\phi) \frac{A_{fc}}{A_w} \frac{\sigma_r}{E} \frac{\sigma_{yw}}{\sigma_{ult, cy}} \right. \\ & + \sqrt{\left\{ (1-\phi) \frac{A_{fc}}{A_w} \frac{\sigma_r}{E} \frac{\sigma_{yw}}{\sigma_{ult, cy}} \right\}^2 + 4 \left\{ \frac{\sigma_{yw}}{\sigma_{ult, b}} \right\}^2 + 4 (1-\phi) \frac{A_{fc}}{A_w} \frac{\sigma_{yw}}{E} \frac{\sigma_{yw}}{\sigma_{ult, cy}}} \\ & \left. / 2 \left\{ \left\{ \frac{\sigma_{yw}}{\sigma_{ult, b}} \right\}^2 + (1-\phi) \frac{A_{fc}}{A_w} \frac{\sigma_{yw}}{E} \frac{\sigma_{yw}}{\sigma_{ult, cy}} \right\} \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

応力勾配係数が $-1 < \phi_1 < 1$ の場合のみ、式(21)から繰返し計算を行って σ_{ult} を求めることになる。

3. プレートガーダーの終局曲げ強度

3.1 垂直座屈に基づくプレートガーダー終局曲げ強度

圧縮フランジの座屈(横座屈またはねじれ座屈)が先行するとき($\sigma_{ult, f} \leq \sigma_{ult}$)は圧縮フランジの座屈が崩壊になる。これに対して、腹板の垂直座屈が先行するとき($\sigma_{ult, f} > \sigma_{ult}$)は、腹板垂直座屈後の曲げモーメント M_{ult} はフランジが負担し崩壊に到る。このように考えれば、桁の終局曲げ強度は次のようになる。¹⁾⁻³⁾

$$\frac{M_{ult}}{M_{yf}} = \frac{\sigma_{ult, f}}{\sigma_{yf}} \quad : \sigma_{ult, f} \leq \sigma_{ult} \quad (24a)$$

$$\frac{M_{ult}}{M_{yf}} = \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{yf}} \left\{ 1 + \frac{(1-\phi) (\sigma_{ult, f} / \sigma_{ult} - 1)}{1 + \phi^2 A_{ft} / A_{fc} + (1 + \phi + \phi^2) A_w / 3A_{fc}} \right\} \quad : \sigma_{ult, f} > \sigma_{ult} \quad (24b)$$

ここに、 M_{yf} は圧縮フランジ降伏モーメント、 σ_{yf} は圧縮フランジの降伏応力、 A_{ft} は引張りフランジの断面積、 $\sigma_{ult, f}$ は圧縮フランジの横座屈またはねじれ座屈の強度である。

応力勾配係数 $\phi \leq -1$ の場合、引張りフランジの降伏に対する条件は次のようである。

$$\frac{M_{ult}}{M_{yf}} \leq -\frac{1}{\phi} \quad (25)$$

3.2 実験結果との比較

本論文で提案したフランジ垂直座屈強度算定法に基づくプレートガーダーの曲げ強度の妥当性を検証するために、既報の実験¹⁴⁾⁻²¹⁾の結果と比較する。また、Basler⁶⁾、長谷川⁷⁾、藤井⁹⁾の理論との比較も行う。

以下では、終局曲げ強度の実測値を M_{ex} として整理する。

(1) 供試体

試験桁は対称断面であり、載荷状態は純曲げである。試験パネルは無補剛腹板または垂直補剛腹板である。

試験桁は表-1に示す13体である。

(2) 終局曲げ強度の理論値

本算定法による終局曲げ強度の理論値 M_{ult} を垂直補剛材間の腹板に対して計算した。ただし、圧縮フランジの残留応力 σ_r の影響を調べるために、 $\sigma_r / \sigma_{yf} = 0.0, 0.3, 0.5$ の場合について計算した。

(3) 実験値と理論値との比較

終局曲げ強度の実験値 M_{ex} / M_{yf} と理論値 M_{ult} / M_{yf} を比較すると、表-1のようになる。本算定法は、大多数の供試体に対してやや過大な値を予測している。特に、過大な値が予測されたのは、B-01であるが、これは腹板の垂直座屈が先行し、その後、圧縮フランジがねじれ座屈すると予測している。²⁾ B-25-0についても過大な値が予測されているが、これは腹板の垂直座屈が生じる前に圧縮フランジのねじれ座屈が生ずる²⁾タイプで、垂直座屈実験用の供試体にはなっていないことになる。

B-25-0を除いたすべての供試体は腹板の垂直座屈が先行するタイプで、腹板座屈後のフランジの余剰耐荷力を考慮した本算定法が妥当な終局強度を予測することがわかる。実験値と理論値の比 M_{ex} / M_{ult} の平均値によると、理論値は3%過大ではあるが、ばらつきが少なく、他の理論と比べて遜色がないことがわかる。

σ_r の影響は、理論値にほとんど現れなかったので、本算定法においては、 $\sigma_r / \sigma_{yf} = 0$ を用いることにする。

他の理論については、長谷川理論⁷⁾は、厳密式も近似式もともに実験値を的確に評価している。しかし、B-01, G2-T1, G2-T2, B-25-0, B-25-A, B-25-Bの6供試体については過大な値を予測している。藤井理論⁸⁾は、腹板幅厚比 $B / t_w > 500$ のTG-0を除くすべての供試体に対して、ばらつきの少ない妥当な値を予測している。しかし、長谷川理論⁷⁾よりもばらつきがやや大きく、B-01, G2-T1, G2-T2, A, B-25-0, B-25-Bの6供試体については過大な値を予測している。Basler理論⁶⁾は大多数の供試体に対して圧縮フランジ降伏モーメントを予測していて、実用的でない。

4. パラメトリック解析と近似算定式

本章では垂直補剛材間の腹板の垂直座屈強度 σ_{ult} に関してパラメトリック解析を行い、垂直座屈強度に影響を与えるパラメータを数値的に明らかにし、その結果に基づいて設計式として用いることのできる近似式を導く。

パラメータは腹板縦横比 α 、腹板の換算幅厚比 ζ 、腹板と圧縮フランジの断面積比 q_c 、水平補剛材が設けられた場合の圧縮縁側の単一パネルの幅と腹板幅との比 η 、計算式を簡単化するための材料定数 ε_y の5つで、次の記号を用いて表す。

$$\alpha = \frac{a}{B}, \quad \zeta = \frac{B}{t_w} \sqrt{\frac{\sigma_{yw}}{E}}, \quad q_c = \frac{A_{fc}}{A_w},$$

$$\eta = \frac{b}{B} \quad (\text{無補剛のとき } \eta = 1), \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_{yw}}{E} \quad (26a-e)$$

4.1 パラメトリック解析

鋼材としてSS41 ($\sigma_{yw} = 2400 \text{ kgf/cm}^2$) およびSM58 ($\sigma_{yw} = 4600 \text{ kgf/cm}^2$) をとりあげ、該当する ε_y の値に対して本算定法で解析したが、相違がみられなかったので、以下では $\sigma_{yw} = 2400 \text{ kgf/cm}^2$ とする。 $\alpha = 0.5$ 、 $q_c = 0.5$ の場合について、終局強度に対する応力勾配係数 ϕ の影響を図-4に示す。これによると、曲げ・引張り ($-2 \leq \phi \leq -1$) の場合は純曲げ ($\phi = -1$) の場合より強度が高くなり、曲げ

表-1 終局曲げ強度の実験値と理論値との比較

Reference	Model	ζ	$\frac{M_{\max}}{M_{vr}}$	M_{ult}/M_{vr}							
				Present			Hasegawa		Fujii	Basler	
				$\sigma_r/\sigma_{vr}=0.0$	$\sigma_r/\sigma_{vr}=0.3$	$\sigma_r/\sigma_{vr}=0.5$	Exact	Approximate			
14)	B-0-1	14.33	0.743	0.871 T	0.871 T	0.871 T	0.791	0.793	0.790	1.000	
15)	G2-T1	6.36	0.905	0.959 L	0.959 L	0.959 L	0.963	0.975	1.000	1.000	
	G2-T2	6.36	0.966	0.973 T	0.973 T	0.973 T	0.969	0.982	1.000	1.000	
	G4-T1	14.76	0.900	0.960 L	0.960 L	0.960 L	0.878	0.866	0.876	0.919	
	G4-T2	14.76	0.954	0.976 Y	0.976 Y	0.976 Y	0.929	0.922	0.876	0.919	
16)	LB-1	14.80	0.891	0.954 T	0.954 T	0.954 T	0.891	0.882	0.829	0.825	
17)	TG-0	23.86	0.854	0.924 L	0.923 L	0.923 L	0.777	0.757	—	0.499	
18), 19)	A	9.74	0.919	0.923 T	0.923 T	0.923 T	0.879	0.884	0.920	1.000	
20)	B-25-0	10.26	0.834	0.922 T	0.922 T	0.922 T	0.924	0.928	0.925	1.000	
21)	B-21-A	8.01	1.000	0.921 T	0.921 T	0.921 T	0.955	0.962	0.944	1.000	
	B-21-B	8.01	0.980	0.920 T	0.920 T	0.920 T	0.946	0.952	0.943	1.000	
	B-25-A	9.53	0.920	0.910 T	0.910 T	0.910 T	0.918	0.923	0.908	1.000	
	B-25-B	9.53	0.900	0.910 T	0.910 T	0.910 T	0.904	0.908	0.908	1.000	
$M_{\max}$		Mean		0.970	0.970	0.970	1.004	1.004	1.001	0.998	
M_{ult}		Standard deviation		0.061	0.061	0.061	0.051	0.057	0.060	0.222	

Note : L = Lateral buckling of compression flange, T = Torsional buckling of compression flange, Y = Yielding of compression flange

・圧縮 ($-1 < \psi < 0$) の場合は純曲げの場合より強度が低下する。これは x 方向圧縮応力が終局強度に与える影響が大きいためと考えられる。

断面積比の影響を調べるため、 $q_c = 0.5, 2.0$ のときの $\sigma_{ult} / \sigma_{yw}$ と ζ との関係を図-5, 6 に示す。図-5 は曲げ・引張りの場合であり、図-6 は曲げ・圧縮の場合である。これらの図から、終局強度に対する断面積比の影響は小さいことがわかる。以下では $q_c = 0.5$ とする。

次に、縦横比の影響を調べるため、 $\alpha = 0.5, 1.0$ のときの $\sigma_{ult} / \sigma_{yw}$ と ζ との関係を図-7, 8 に示す。図-7 は曲げ・引張りの場合であり、図-8 は曲げ・圧縮の場合である。これらの図から、終局強度に対する縦横比の影響は曲げ・引張りの場合は小さいが、曲げ・圧縮の場合には影響が現れ、 α が大きくなると終

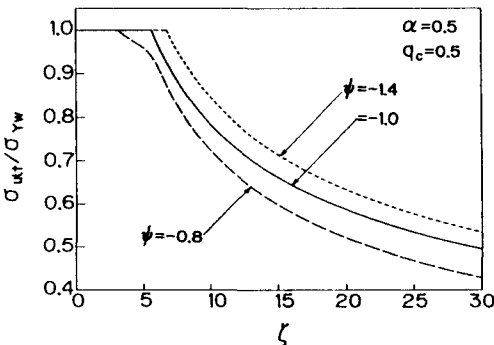


図-4 応力勾配係数の影響

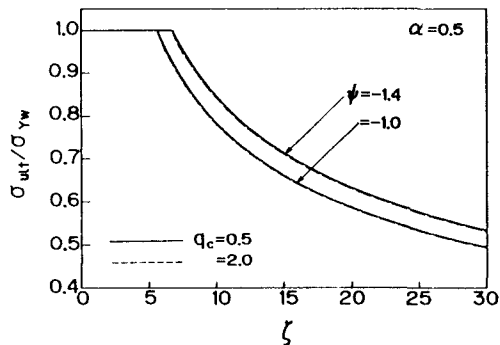


図-5 断面積比の影響

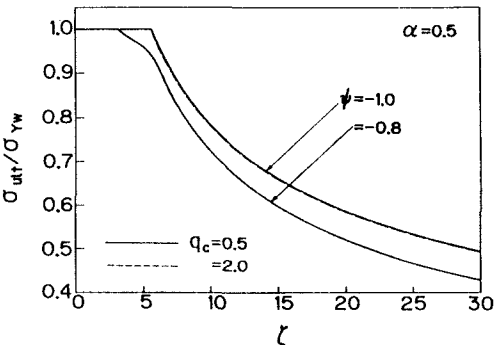


図-6 断面積比の影響

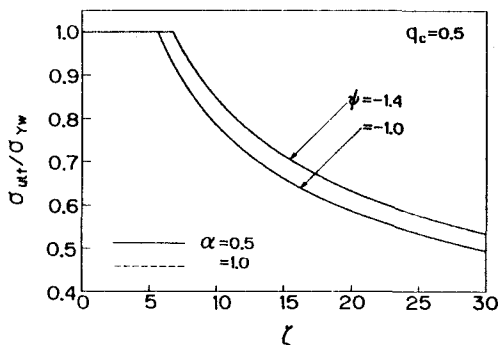


図-7 縦横比の影響

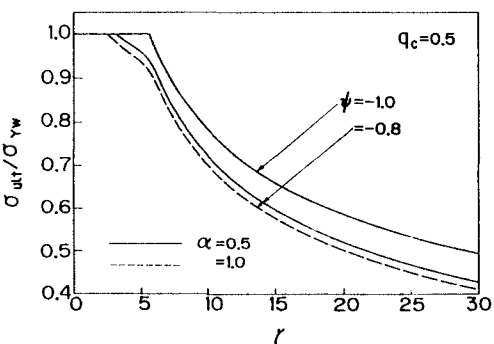


図-8 縦横比の影響

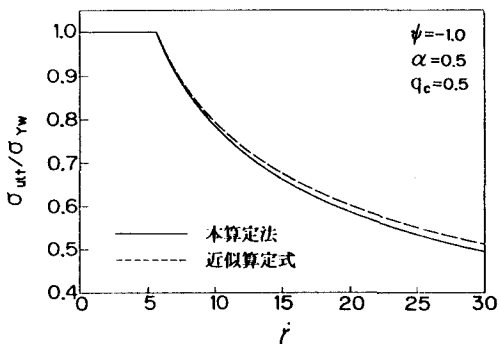


図-9 算定式と近似式との比較

局強度は低下する。

4.2 近似算定式

純曲げの場合に適用できる近似式を次のように仮定する。

$$\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{yw}} = \left(\frac{5.624}{\zeta} \right)^{0.4} : \phi = -1.0 \quad (27)$$

本算定法と近似式(27)による強度を比較すると図-9のようになる。 $\zeta=30$ のときでも誤差は3.5%で、式(27)が良い近似値を与えることがわかる。

曲げ・引張りを受ける場合、仮想腹板の考え方をを用いると、強度の算定が簡単になる。仮想腹板幅 B_* を考え、縦横比 $(1-\phi)\alpha/2$ 、断面積比 $(1-\phi)q_c/2$ に対して本算定法で強度を算定し、元の腹板に対して本算定法で求めた強度と比較すると図-10のようになる。この図から曲げ・引張りの場合には、仮想腹板の考え方を導入すれば妥当な強度が算定できる。すなわち、純曲げの場合の終局強度が計算できれば、曲げ・引張りの場合の強度が換算によって求まる。

そこで、仮想腹板の考え方を導入した近似算定式を次のように考える。

$$\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{yw}} = \left(\frac{5.624}{\zeta_*} \right)^{0.4} : -2 \leq \phi \leq -1 \quad (28)$$

ここに、 ζ_* は仮想腹板に対する換算幅厚比で、次式より得られる。

$$\zeta_* = \frac{(1-\phi)}{2} \zeta \quad (29)$$

この近似式では、縦横比と断面積比が換算できない。近似式(28)による強度を元の腹板に対して本算定法で求めた強度と比較すると図-11のようになる。式(28)はやや高めの値を与えるが、誤差は小さく、近似算定式として用いることができる。

曲げ・圧縮を受ける場合の種々の ϕ に対する終局強度を求めると、図-12のようになる。図-12において $\phi=-1.0$ の場合を除いて、 $\zeta < 6$ の範囲で終局強度曲線に局所的な変化がみられる。その部分を拡大すると、図-13のようになる。この変化は、 x 方向の曲げ強度 $\sigma_{ult,b}$ が降伏応力に達し、腹板厚が増加しても

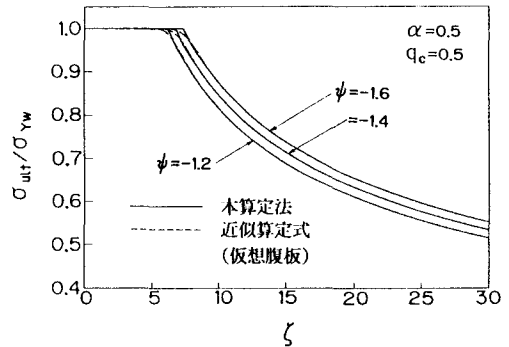


図-10 算定式と仮想腹板による近似式との比較

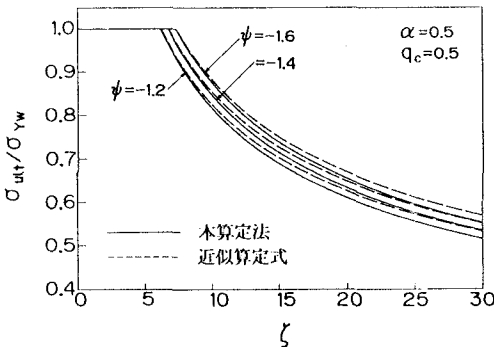


図-11 応力勾配係数に対する近似式

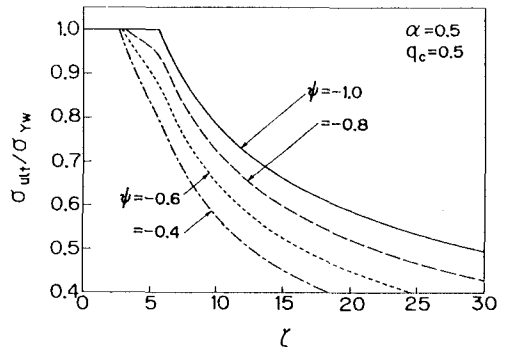


図-12 応力勾配係数の影響

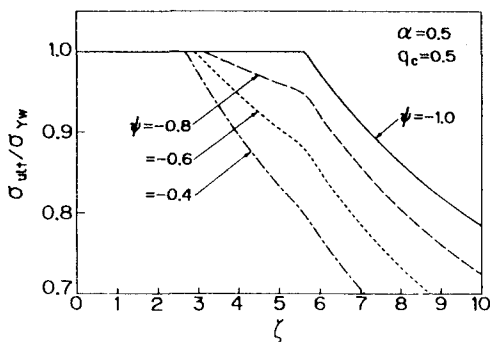


図-13 応力勾配係数の影響

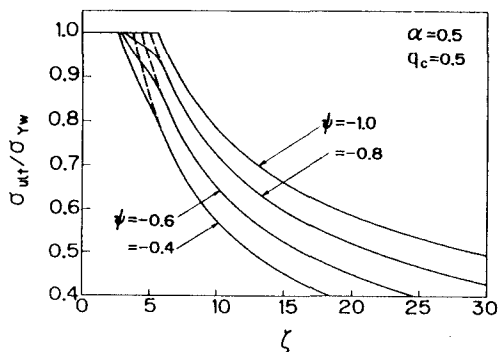


図-14 終局強度曲線に対する曲げ強度式の影響

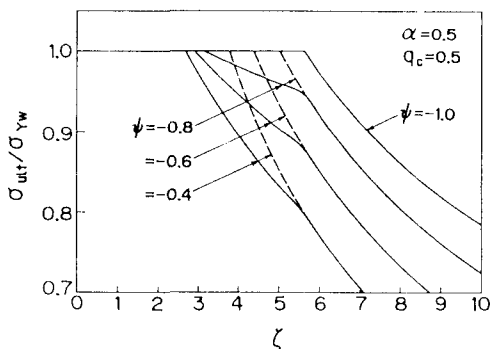


図-15 終局強度曲線に対する曲げ強度式の影響

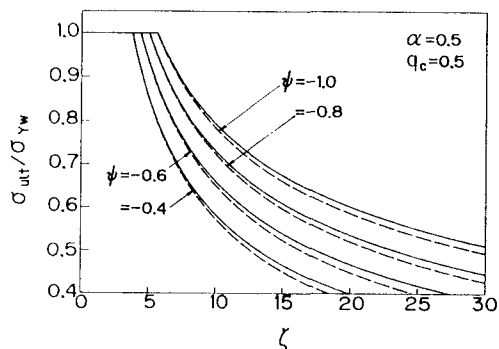


図-16 算定式と近似式との比較

曲げ強度が増加しないためである。そこで、曲げ強度が降伏応力を越えて増加できる^{12) 13)}とすると、図-14の破線の曲線が得られる。終局強度曲線の局所的な変化の部分拡大すると図-15のようになる。図-14, 15の中で、実線は本算定法の終局強度曲線であり、破線は曲げ強度が降伏応力を越えて増加すると仮定したときの終局強度曲線である。

これらの結果をもとに、曲げ・圧縮を受ける場合の近似算定式を次のように仮定する。

$$\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{yw}} = \left(\frac{2.524 - 3.1\psi}{\zeta} \right)^n \quad : -1 \leq \psi < 0 \quad (30)$$

ここに、 $n = 0.65 + 0.25\psi$ である。

図-16において、破線で表される終局強度曲線（図-14中の破線）と、実線で表される近似算定式(30)から求まる終局強度曲線を比較すると、この近似算定式の精度が良いことがわかる。

5. あとがき

対称断面プレートガーダーのみならず非対称断面プレートガーダーにも適用できるフランジ垂直座屈強度の算定法を提案した。この算定法に基づくプレートガーダーの終局曲げ強度の理論値を既報の実験値と比較すると、平均値で3%高目の値を与えるが、設計に使えることがわかった。

非対称断面プレートガーダーの垂直座屈強度を簡単に算定できる近似手法を検討した。プレートガーダーが、曲げ・引張りを受ける場合は仮想腹板の考え方を適用することで、精度の良い近似式が得られた。また、曲げ・圧縮を受ける場合に対する近似式も得られた。

多数の水平補剛材が任意の位置に設けられたプレートガーダーの場合には、圧縮縁側の単一パネルに本算定法を適用すれば垂直座屈強度を求めることができる。パラメトリック解析を行い、垂直座屈強度に及ぼす水平補剛材の位置の影響を数値的に明らかにし、設計計算に適した簡易な近似式を導くことが、今後の課題として残った。

【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 を使用した。数値計算にあたって、吉原宏敬君（日本電子計算機）と藤崎敦久君（関西大学大学院）に関西大学工学部土木工学科の卒業研究として協力して頂いた。本研究は平成元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。

参考文献

- 1) 三上市藏：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」中間報告書，1988.4.
- 2) 三上市藏：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.
- 3) 三上市藏・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.
- 4) 塩見弘幸・伊藤義人・福本暁士：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，1987.3，pp.127-139.
- 5) 塩見弘幸・福本暁士：実験データによるプレートガーダーの終局限界強度式の検討，構造工学論文集，土木学会，Vol.34A，1988.3，pp.171-180.
- 6) Basler, K., and Thürlimann, B.: Strength of Plate Girders in Bending, Proc. of ASCE, Vol.87, No.ST6, Aug., 1961, pp.153-181.
- 7) 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，土木学会論文報告集，No.300，pp.33-42，1980.8.
- 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，No.374/I-6，pp.467-476，1986.10.
- 9) 大村 裕・藤井 堅・澄川文男：フランジ鉛直座屈に起因する曲線I型桁の曲げ耐力解析，土木学会年次学術講演会講演概要集，1988.10，I-118.
- 10) 座屈設計ガイドライン，第9章，土木学会，1987.
- 11) Mikami, I.: Discussion to "Basic compressive strength of steel plates from test data," by Y. Fukumoto and Y. Itoh, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.2, No.1, Apr., 1985, pp.293-294.
- 12) 奈良 敬・津田 真・福本暁士：面内曲げと圧縮を受ける鋼板の極限強度評価に関する研究，土木学会論文集，No.392，1988.4，pp.259-264.
- 13) BS 5400 : Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 3. Code of Practice for Design of Steel Bridges, British Standards Institution, 1982. (財)建設コンサルタンツ協会近畿支部長大鋼橋研究委員会訳：BS 5400 3編 鋼橋の設計指針，1983.12.
- 14) 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力実験報告，1988（印刷中）.
- 15) 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.
- 16) Cooper, P.B.: Strength of longitudinally stiffened plate girders, Proc. of ASCE, Vol.93, No. ST2, Apr., 1967, pp.419-451.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 小西一郎・米澤 博・三上市藏：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.
- 20) 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，No.234，1975.2，pp.33-44.
- 21) 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，No.305，1981.1，pp.1-9.

（1989年10月2日受付）