

曲げを受ける I 型断面曲線プレートガーダーの 弾性有限変位挙動について

ON THE ELASTIC FINITE DISPLACEMENT BEHAVIOUR OF
HORIZONTALLY CURVED I-SECTION PLATE GIRDERS UNDER BENDING

樋 渡 滋* 倉 西 茂**
by Shigeru HIWATASHI and Shigeru KURANISHI

A study of behaviour of curved plate girders under bending is made, emphasizing mainly the interactions between the flange plates and the web plate. The analyses are carried out by using finite element method based on the finite displacement theory. In this paper, the behaviour of curved plate girders under bending is described, such as out-of-plane displacement of web plate, in-plane bending stress distribution and corresponding effective web width, resisting moment of girders and so on. The results show that so-called vertical buckling of flange plate does not arise from loss of the bending capacity of the plate girder. Moreover some discussions about the more reasonable boundary conditions of the web pannel as partial structural element for analyzing curved plate girders are described.

1. まえがき

プレートガーダーは、その形状および力学的な性質から、直線プレートガーダーと曲線プレートガーダーとに分類される。

直線プレートガーダーの座屈特性や耐荷力については、既に数多くの理論的あるいは実験的な研究がなされてきており、これに関連した論文も多い。特にプレートガーダーの曲げ耐荷力は、フランジの水平座屈、ねじれ座屈および垂直座屈の三つの要因によって決定されることが Basler ら¹⁾によって提唱された。

Basler らがウェブの垂直座屈によって決定されるとしたプレートガーダーの耐荷力は、ウェブの幅厚比およびフランジとウェブの断面積比によって支配されると考えられてきたが、長谷川ら^{2,3)}によって、これらの要因が決定的なものでないことが指摘された。

前川ら⁴⁾は伝達マトリックス法を用いて残留応力が存在する曲線 I 形ばりの耐荷力解析を行ない、若干の実験データーとの比較によって解析法の検証をするとともに、耐荷力曲線を提案したが、曲線プレートガーダーの設計基準としてまとめるには至っていない。また、この論文では解析対象の断面が特定されているために、厳密な意味での一般性に乏しい。中井らは文献7)において、曲線 I 桁橋の横倒れ座屈強度を弾塑性有限変形解析を行って算定して、実験結果と比較して良い一致を見るとともに、横桁（あるいは対傾構）および横構が十分に剛であれば、桁全体としての横倒れ座屈は生ぜず、その固定点間距離内での横倒れ座屈挙動が並列曲線 I 桁橋の崩壊につながることを述べるとともに、また横桁（あるいは対傾構）および横構の設計に関する指針を与えている。また文献8)において曲線 I 桁腹板の曲げ強度に関する実験を行ない貴重

* 正会員 工修 東北学院大学助教授 工学部土木工学科 (〒985 多賀城市中央1-13-1)

** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科 (〒980 仙台市荒巻字青葉)

なデータを示しているが、実験桁の安全率の照査と問題の提起に止まり、曲線桁の挙動を左右すると思われるウェブの幅厚比、フランジ断面の大きさなど個々のパラメーターの影響までは論じられていない。一般にプレートガーダーの耐荷力解析においては、座屈等の極限状態にいたるまでの挙動が解析されていないために、必ずしも正しくない飛躍を伴った結論が導かれる可能性がある。

最近、曲線プレートガーダーの挙動あるいはその使用限界の研究に関する解析手法や解析的あるいは実験的研究、またそれに基づいた設計手法等について多く発表されているが、それらの問題が解明されたという状態には未だ至っていない。

筆者らは、さきに、曲線プレートガーダーの部分構造としてウェブプレートのみを取り出して、円筒パネルとしてその有限変形挙動解析を行っている⁵⁾。その中で曲げ作用を導入するために必要な条件、すなわち隣接パネルとの適合条件を満足する载荷法、曲げをうけてパネルに生ずる面内曲げ圧縮応力分布の偏り、その結果としてのウェブの有効断面の評価、圧縮フランジとの接合部に生ずる面外方向せん断力およびモーメント、ウェブプレートの見かけ上の垂直ひずみなどについて論じた。

前論文⁵⁾のように、ウェブプレートのみを取り上げて解析することは、ウェブプレートの有限変形領域での基本的な挙動を調査する点では役立つが、フランジプレートとウェブプレートとの変形拘束作用、曲げ応力分布に対する影響、あるいはフランジプレートの安定性を論ずるには十分ではない。そこで本論文は、曲げを受ける曲線プレートガーダーの挙動について、曲線プレートガーダーに関する従来の論文ではあまり取扱われていないフランジとウェブの相互作用の影響に主として注目して、部分構造としてウェブプレートのみを取り出して解析した前論文との差異を明らかにするとともに、曲線プレートガーダーの全般的な弾性挙動の特性について述べたものである。

2. 解析方法および解析パラメーター

水平補剛材をもたない二軸対称プレートガーダーから上下フランジを含めて垂直補剛材で囲まれた部分を取り出して、解析対象パネルとする。曲げ作用は、前論文で述べたように曲げモーメントではなく曲げ変位で与えるのが妥当と思われるので、これを採用する。すなわち、曲げ作用に相当するウェブ高の中央位置からの距離に比例する垂直ひずみ（曲げ強制ひずみ： ϵ_0 ）を与えたとともに、純曲げ状態を作るための一様垂直ひずみ（調整ひずみ： ϵ_H ）を作用させる（図-1）。曲げ強制ひずみと調整ひずみの合計を強制ひずみ（ ϵ ）と呼ぶことにする。パネルは、曲げと軸方向について完全に剛な垂直補剛材を持つものとして、垂直補剛材位置（載荷辺）の境界条件は円周方向に単純支持とし、半径方向および垂直補剛材の軸方向（鉛直方向）の変位を拘束した。解析は対称性を利用してパネルの右半分について行なったため、パネルの中央線上で垂直軸まわりの回転を拘束している。上下辺は、ウェブプレートのみを取り出して解析する場合には、面内鉛直方向および円周軸まわりの回転を自由（単純支持：S.S.）および固定（回転固定：Fix）の二通りとし、フランジを有するパネルでは全ての方向の変位と回転を自由とした。このうち、単純支持状態に関するデータは前論文のものを使用した。

解析に使用したパラメーターはウェブの幅厚比（ $\lambda = h/t$ ）および形状比（ $\alpha = 1/h$ ）、曲率半径（ R ）、上下フランジ各々の断面積（ A_f ）とウェブ断面積（ A_w ）との比 $\beta = A_f/A_w$ の四個であるが、曲率の影響を強調するために比較的曲率半径の小さい値（ $R = 30m$ ）として、曲率半径とウェブ高（ h ）との比 R/h が25のものを中心としたが、必要に応じて60m、120mの場合も解析の対象とした。フランジ断面の幅厚比は14～

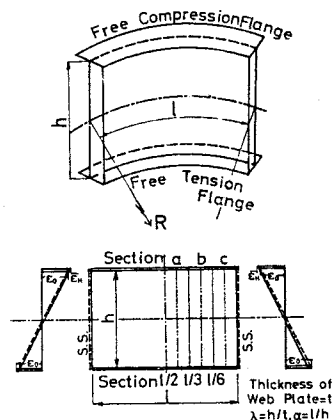


図-1 解析対象パネル、断面名称および载荷方法

20のものを使用した。

他のパラメーターの変動範囲は次の通りであるが、省略されたケースもある。

$$\lambda = 150, 300, 400, 500 \quad \alpha = 0.5, 2/3, 1.5 \quad \beta = 1/4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$$

これらの変動範囲は前論文で明らかにされたようなウェブプレートに最も不利となる値を中心として、直線プレートガーダーにおいて座屈現象が生じやすい値を選んでいるが、形状比 (α) については、 $\alpha = 2/3$ のときにプレートガーダーの曲げ抵抗が最も大きくなる傾向が見られる (図-1.1 参照) ので、この値を一応の基準値として、これを中心にして解析した。また、フランジ・ウェブ断面積比 (β) については、一般によく用いられている値を中心としている。

解析に際して仮定された事項は前論文と同じであり、パネル材料のヤング率は $E = 205.8 \text{ GPa}$ とした。解析は四辺形円筒要素を用いて、幾何学的非線形問題として有限要素法によった。変位関数も前論文と同じく Brebbia and Connor⁹⁾ の式を採用した。

有限要素分割は、パネル右半分をフランジを含めて円周方向に 3 等分、ウェブを上下方向に 16 等分し、上下フランジも円周方向に 3 等分した。フランジ要素はウェブ要素と同じく浅いシェルの理論によるフランジの構造的断面係数を有する一要素として扱われた。ウェブの分割数による精度のチェックは前論文で行なわれた。接点断面および要素中心断面の名称などを図-1 に示す。

非線形つりあい方程式の解法は、荷重増分法と Newton-Raphson 法を組み合わせた方法を採用し、収束のための繰返しは不平衡力による変位変動が 1.5% 以下になる段階まで行なった。

3. 解析結果

(1) 部分構造として取り上げられたウェブプレートの挙動とプレートガーダーの挙動の差異について

図-2 は部分構造としてウェブプレートのみを取り出して解析した場合とフランジを持つプレートガーダーとして解析した場合のウェブの面外変位分布を、ウェブ圧縮縁での曲げ強制ひずみ $\epsilon_0 = 0.012$ および 0.022 の段階で比較したものである。使用したパラメーターは図中に書き込んである通りである。フランジのねじり剛性が、ウェブプレートの面外変位を弾性拘束すると考えられるので、プレートガーダーのウェブプレートの面外変形は、上下縁を単純支持したウェブプレートと回転を拘束したウェブプレートの中間の値

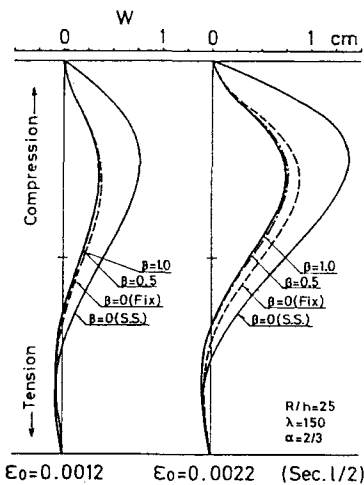


図-2 面外変位 (w) の分布

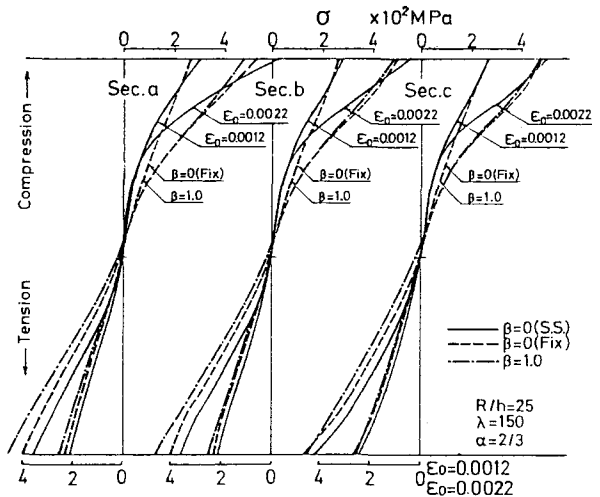


図-3 面内曲げ応力度 (σ) の分布

になることが期待されるが、図に見られるようにプレートガーダーの面外変形は回転を拘束したウェブプレートのそれより小さくなっている。また、図-3はウェブプレートに生ずる面内曲げ応力分布

表-1 強制曲げひずみ (ϵ_0) と調整ひずみ (ϵ_H) ($\times 10^{-4}$)

強制曲げひずみ	調整ひずみ など	$\epsilon_0 = 12$			$\epsilon_0 = 22$		
		ϵ_H	$\epsilon_0 + \epsilon_H$	ϵ_H / ϵ_0	ϵ_H	$\epsilon_0 + \epsilon_H$	ϵ_H / ϵ_0
フランジ	上下辺単純支持	1.483	13.483	0.122	4.000	26.000	0.182
なし	上下辺回転拘束	0.513	12.513	0.043	1.878	23.878	0.085
フランジ	$\beta = 0.5$	0.290	12.290	0.019	0.788	22.788	0.036
つき	$\beta = 1.0$	0.148	12.148	0.012	0.500	22.500	0.023

の比較を示している。応力欠損の度合は、上下辺を単純支持したウェブプレートのみのもものが著しく、フランジ付きのものは回転を拘束したウェブプレートのみのもものよりもやや少ない。このためフランジなしの場合には、純曲げ状態を与えるための調整ひずみ (ϵ_H) が大きくなり、曲げ強制ひずみ (ϵ_0) と調整ひずみを合計したウェブ圧縮縁における強制ひずみ量 (ϵ) はフランジなしの場合の方がフランジを有するものよりも大きくなる (表-1)。これは不足の圧縮応力分をフランジが負担してくれるためである。したがって、同一の曲げ強制ひずみを受ける場合には、図-3に見られるように圧縮部の応力レベルはフランジなしの方がフランジ付のものよりも高くなるために、前述のような変位分布の現象が現われると考えられる。プレートガーダーの部分構造としてウェブプレートのみを取り出すとき、本論文のように強制変位で曲げ作用を与えて解析する場合には、フランジとの接合部にあたる縁端の回転を拘束した方が、フランジを有するものにより近いものが得られる。

(2) ウェブの面外変位分布について

ウェブの面外変位分布の例として、 $\alpha = 2/3, \beta = 0.5$ の場合を、その幅厚比 λ をパラメーターとして図-4に示す。当然のことながら、同一の強制ひずみを与える場合、幅厚比 λ が大きい程面外変位量が大きくなるが、この傾向は特に載荷辺に近い断面 1/8 (断面の名称については図-1 参照) で著しい。幅厚比 λ が 300 と 500 では、面外変位量の最大値に大きな差異は認められないが、150 の場合に比較すると格段に大きい。また、幅厚比 λ が 300 を越えると、パネル中央の断面 1/2 で圧縮フランジ近傍に変位の方向の逆転が生ずるが、特に $\lambda = 500$ の場合には曲げ強制ひずみ $\epsilon_0 = 0.0008$ ($\sigma_0 = \epsilon_0 \times E = 184 \text{ MPa}$) の段階から起り、これに影響されて断面 1/3 での最大変位量が減少する。図は省略するが、形状比 α が 1.5 と大きい場合、幅厚比 $\lambda = 300$ でフランジ・ウェブ断面積比 $\beta = 0.5$ では変位の逆転は生じないが、 β が 1.0 になると $\epsilon_0 = 0.0012$ ($\sigma_0 = 245 \text{ MPa}$) の段階で逆転が発生するようになり、形状比による変位モードの差が現れ

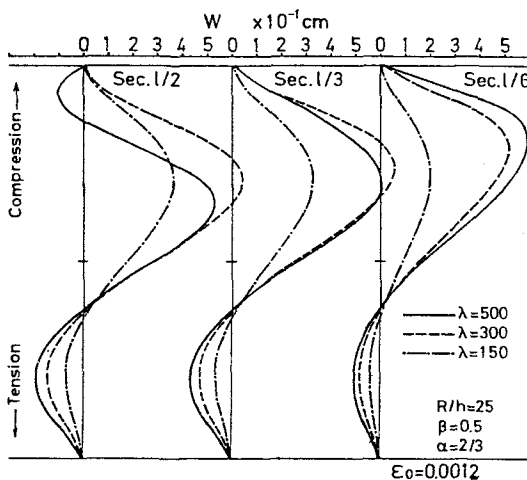


図-4 面外変位 (w) の分布、 λ による比較

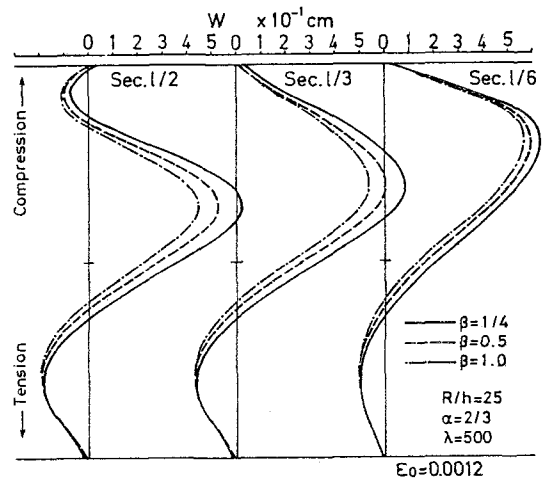


図-5 面外変位 (w) の分布、 β による比較

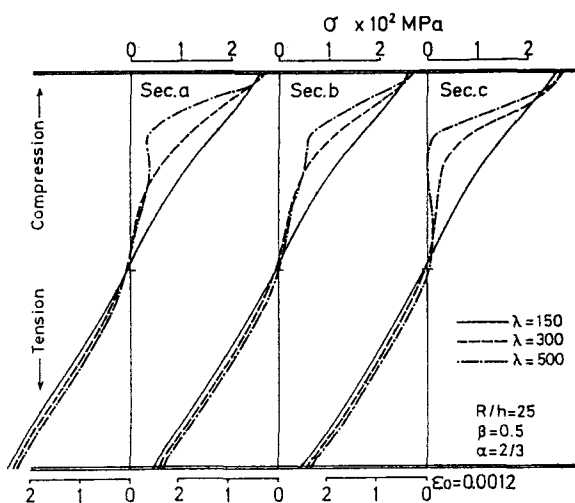


図-6 面内曲げ応力度の分布、 λ による比較

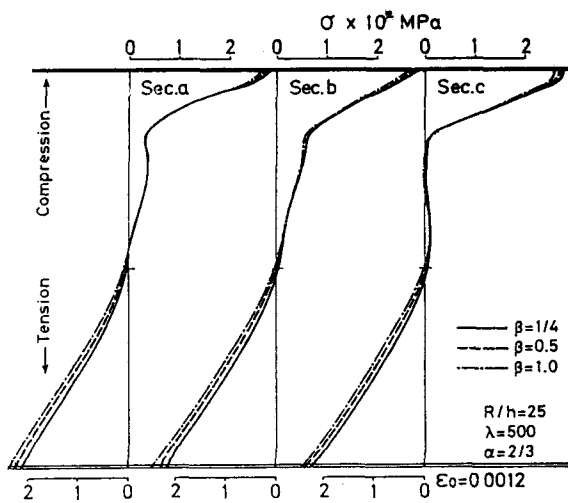


図-7 面内曲げ応力度の分布、 β による比較

る。

図-5は、 $\alpha = 2/3$ 、 $\lambda = 500$ の場合についてのウェブの面外変位分布を断面積比 β をパラメーターとして表わしている。 β による大きな差異は認められないが、フランジ断面が小さい場合にフランジ自身の水平方向変位が大きくなることと、フランジ断面が大きい場合の方が断面1/2における面外変位方向の逆転が応力レベルの低い段階から発生し、また逆転した変位の絶対量が大きくなる傾向が認められる。 $\lambda = 300$ の場合にもこの傾向が認められるが、 $\lambda = 150$ では前述のとおり変位に逆転は生じない。

(3) ウェブの面内曲げ応力分布について

ウェブの面内曲げ応力分布の一例を図-6に示す($\alpha = 2/3$ 、 $\beta = 0.5$)。幅厚比が大きくなるにつれて、ウェブ圧縮部の応力欠損の状態が顕著になるが、この応力欠損は載荷辺に近い断面cで早く現われ、欠損の度合も著しい。幅厚比 λ が150の場合には、ウェブの最大応力が250MPa程度では応力欠損は目立たないが、420MPaまで増大すると無視できない値になる。

面内曲げ応力分布をフランジ・ウェブ断面積比 β をパラメーターとして表わしたものが図-7で、応力欠損の様子は断面積比 β の影響をあまり受けないことがわかる。

図-4～7を併せて考察するとき、次の点が注目される。すなわち、圧縮部における面外曲げ変位量が大いとき、面内曲げ応力分布形における圧縮部の応力欠損の度合が著しく、面外変形モードと応力欠損の度合とが連動しており、変形モードによって応力度分布が決定されることが考えられる。これは3.(1)で述べられたフランジを持たないウェブプレートの場合にも共通している。

(4) ウェブの有効断面

Basler¹⁾は面内曲げ応力度分布における応力欠損の度合を評価し、圧縮フランジの応力度を算定するモデルとして、圧縮フランジとウェブの一部からなるT型柱断面を考えている。これに対応して本論文では、圧縮部の抵抗モーメントの観点からウェブの有効幅を算定する。

プレートガーダーにおいて応力欠損を生ずるような面内曲げ応力分布を考えると、その圧縮応力部分が中立軸まわりに持つモーメントを M とする。一方、曲げ応力分布が直線であれば、圧縮縁応力度が同じ大きさの場合に圧縮部分が中立軸まわりに有するモーメントは、当然 M より大きくなる。この場合、中立軸まわ

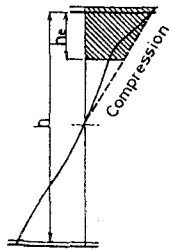


図-8 ウェブの

有効幅の定義

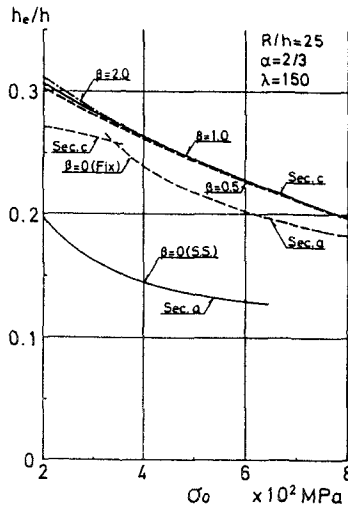


図-9 ウェブの有効幅と応力レベルの関係

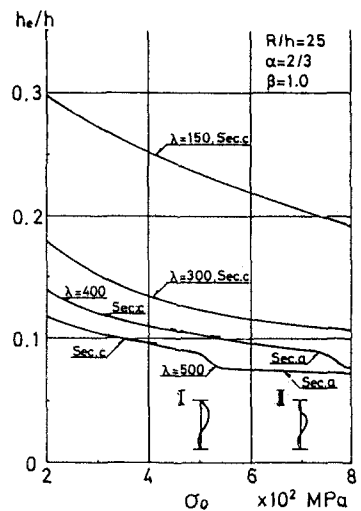


図-10 有効幅と応力レベルの関係

りにMと同じ大きさのモーメントを生ずる部分を圧縮縁から切り取り、これをウェブの有効断面と定義し、 h_e であらわす(図-8)。ウェブ高hで無次元化した有効断面 h_e/h を用いて議論する。

横軸にウェブ圧縮縁に与えられた強制曲げひずみ ϵ によって生ずる応力 σ_0 をとり、縦軸に前に述べたパネル内の3つの断面のうちで最も小さな値となる無次元有効断面をとって、フランジ・ウェブ断面積比 β をパラメーターとして表わしたものが図-9である。図中で $\beta \approx 0$ はフランジ付きのものであり、 $\beta = 0$ はフランジを有しないウェブのみのもので、上下辺が単純支持の場合(S.S.)と回転拘束の場合(Fix)とを示す。全てのケースで、応力レベルが上昇するにつれて有効幅は減少する。有効幅はフランジ付きのものが、回転を拘束したウェブプレートのみのもより大きく、単純支持のものは両者より、はるかに小さい。これはモーメントの相当の部分をフランジが負担するために、ウェブは小さなモーメントを負担するだけで、ウェブの応力状態がシビアにならないことと、文献5)や本論文3.(1)に述べられたような調整ひずみの大きさが有効断面の減少に大きく影響することにあると思われる。フランジの影響と見られる β による変動は、図の $\lambda = 150$ の場合を含めて小さい。図中に Section a, b, c とあるのは解析された断面のうちで有効幅が最も小さくなるのがそれらの断面であることを示している。

有効幅と応力レベルの関係をウェブの幅厚比 λ をパラメーターとしてあらわしたものが図-10である。 λ が大きいと有効幅は小さくなり、特に $\lambda \geq 300$ の場合に著しい。 $\lambda = 400$ と 500 の場合にみられる段差は、ウェブの面外変形モードが図中の(I)の状態から(II)の状態に変わることで、したがって曲げ応力度分布のモードが変わることに対応している。幅厚比が小さく応力レベルが低い段階では、最小の有効幅を与えるのは断面cであるが、幅厚比が大きくなり、かつ応力レベルが高くなると、その断面は断面aに移動する。

表-2は解析された

パラメーター範囲の一

部について、ウェブの

圧縮縁応力 σ が降伏

点応力に達したときの

各種鋼材の無次元有効

幅を表わしている。有

効幅は幅厚比 λ に大き

表-2 無次元有効断面 (h_e/h)

上段: SS41 ($\sigma_y=235.2\text{MPa}$) 中段: SM50Y ($\sigma_y=352.8\text{MPa}$) 下段: SM58 ($\sigma_y=450.8\text{MPa}$)

形状比 (α)		0.5			2/3				形状比 (α)		2/3
幅厚比 (λ)		150	300	500	150	300	400	500	幅厚比 (λ)		150
フランジ つき	$\beta = 0.5$				0.294	0.187		0.111	フランジ なし	上下辺	0.298
					0.269	0.140		0.098		0.253	
					0.251	0.127		0.090		0.226	
	$\beta = 1.0$	0.288	0.156	0.106	0.297	0.171	0.130	0.111		単端支持	0.279
		0.248	0.143	0.090	0.271	0.142	0.114	0.100			0.250
		0.227	0.128	0.083	0.253	0.129	0.106	0.091			0.238
									回転固定	0.238	

く影響され、形状比 α の影響は小さく、フランジ・ウェブ断面積比 β にはほとんど影響されない。

(5) 抵抗曲げモーメント

本解析で対象とされているような曲率半径が比較的小さい場合に、曲線プレートガーダーの面内曲げ応力は、線形解析の段階から応力欠損をとまなう分布を示し、断面の抵抗曲げモーメントは直線プレートガーダーにおいて直線分布する場合の抵抗曲げモーメントより小さくなる。ウェブ中央面の延長面上における圧縮フランジの縁端応力度がある値になるときの抵抗曲げモーメントで、直線分布すると仮定した場合のものを M_0 、実際の分布によるものを M であらわすと、 M/M_0 は応力欠損をとまなうための無次元化された抵抗曲げモーメントとなる。

種々の幅厚比 λ 、フランジ・ウェブ断面積比 β およびウェブ形状比 α の曲線プレートガーダーの抵抗曲げモーメントとウェブ中央面上のフランジ縁端に生ずる最大圧縮応力度 σ であらわした応力レベルとの関係を示しているのが図-1.1である。抵抗曲げモーメントは応力レベルの増高にとまなうて低下する。幅厚比 λ が大きくなるにつれて、またフランジ・ウェブ断面積比 β が小さくなるにつれて低下の程度が著しい。抵抗曲げモーメントはウェブの形状比 α の影響も受けるが、実際に用いられている鋼材の降伏点応力度以内の範囲では、 α が $2/3$ の場合に抵抗曲げモーメントが大きく、 $2/3$ からはずれるとやや小さくなる傾向がみられる。しかしながら、抵抗曲げモーメントは形状比には比較的鈍感であり、幅厚比 λ とフランジ・ウェブ断面積比 β に敏感である。 $\sigma = 0$ の値は線形解析によるものを示している。

図-1.2は、 $\alpha = 2/3$ で $\beta = 0.5$ および 1.0 の場合の抵抗曲げモーメントを、幅厚比 λ をパラメーターとして表わしたものである。 β が小さいほど、 λ に敏感である。すなわち、同一の幅厚比 λ の場合には、 β が小さいほうが常に抵抗曲げモーメントが小さく、その差は応力レベルが高い程、また λ が大きい程著しい。

表-3は、最大圧縮応力度が鋼材の降伏点応力度に達したときの、各種鋼材の抵抗曲げモーメントを示している。幅厚比 λ が 150 の場合、 $\beta \geq 1.0$ では β による差異は明確には関連づけられない。 $\beta = 0.5$ と小さくなると、解析された全ての範囲で、特に応力レベルの高い部分で抵抗曲げモーメントが低下する。幅厚比 λ が大きい場合には、抵抗曲げモーメントは面積比 β に敏感で高い応力レベルでの低下が著しい。

(6) フランジの鉛直座屈－ウェブのバネ定数

フランジプレートの側方座屈およびねじれ座屈が防止されているとき、プレートガーダーの曲げ抵抗力は、上下のフランジプレートの間隔がウェブプレートの剛性によって保たれているときに始めて発揮され、その能力をウェブプレートが失うとき、曲げ抵抗力も失われると考えられる。Basler¹⁾ は、このウェブプ

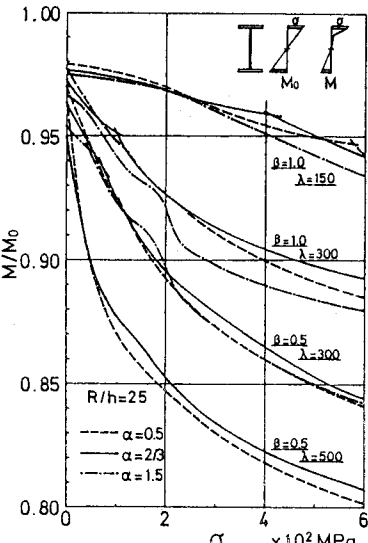


図-1.1 抵抗曲げモーメントと
応力レベルの関係

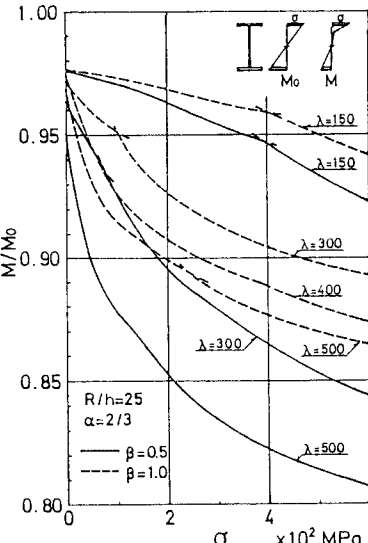


図-1.2 抵抗曲げモーメントと
応力レベルの関係

レートがフランジ間距離を保つ能力をフランジのはり曲げによる垂直方向圧縮力とウェブプレートの柱としての抵抗力との関係より論じて、フランジプレートの垂直座屈現象としてとらえている。しかし、前論文で指摘したように、元たわみのある直線プレートガーダーあるいは曲線プレートガーダーでは、曲げモーメントの作用

を受けてウェブプレートの面外変形が進行し、それにもなうウェブプレート上縁の鉛直方向の変位が生じ、Baslerの述べるような単純なモデルではこの現象を説明するのに充分ではない。

本解析においては、フランジの垂直座屈による顕著な曲げ抵抗力の低下は見られなかった。そこで、圧縮フランジを、ウェブによって鉛直変形を弾的に拘束された圧縮材とみなすとき、フランジの垂直座屈応力度をウェブのパネ定数の大きさより検討してみる。

ウェブの鉛直方向のパネ定数を次のようにして求める。フランジを持たない(ウェブのみの)曲線バネルを取り上げ、ある曲げ応力レベルにおいて不平衡力による繰返し計算が収束した段階で、ウェブの圧縮縁に一樣分布する鉛直方向圧縮力(q)を加えて線形解析を行ない、圧縮縁の鉛直変位(δ)を求めて、圧縮力との関係からパネ定数(γ) [チモシェンコ¹⁰⁾における基礎係数、 N/cm^2]を定める。解析はウェブの上下縁を単純支持したものと回転を拘束したものについて行なった。最小のパネ定数は、単純支持の場合には1/2断面に、回転拘束の場合には1/3断面にあらわれるが、その最小値に大きな差は認められない。鋼材の降伏点応力度付近でパネ定数が、小さい値になる回転拘束のもので議論する。

パネ定数 γ (逆数 $1/\gamma$ で表わされている)と曲げ強制応力 σ で表わされた応力レベルの関係を図-13に示す。このパネ定数は当然ウェブ全長にわたって一定の値とはならない。1/8断面においては、一見負のパネ定数となっているが、最小の値を与える1/3断面でのパネ定数によって議論することにする。形状比 α が大きくなるとパネ定数は小さくなるが、鋼材の降伏点応力度を越える範囲では応力レベルによるパネ定数の変動は比較的小さい。図のように幅厚比 $\lambda=240$ の場合には、最大のパネ定数は形状比 $\alpha=2/3$ で $\gamma=10.9$ kPa, $\alpha=1.0$ で $\gamma=8.6$ kPaとなる。プレートガーダーのフランジ断面と同じ断面を持つ弾性床上の直線柱の座屈応力度 σ_{cr} は、フランジの曲げ剛性が比較的大きい $\beta=1.0$ の場合に、 $\alpha=2/3$ で $\sigma_{cr}=86.9$ MPa, $\alpha=1.0$ で $\sigma_{cr}=39.2$ MPaと小さく、当然フランジの鉛直弾性座屈が生じなければならない。

しかしながら、3.(4),(5)で述べたように、ウェブの有効断面 h/h または抵抗曲げモーメント M/M_0 は特別の変化を示さずに連続的に変化することから、明らかな弾性座屈が起きているとは認められない。これはパネ定数が一定の値にはならないこと、それにもなうフランジの座屈有効長は支間幅より小さいことや、ウェブの後座屈領域でパネ作用の低下がないことにより、フランジ間距離の急激な減少は生じないことなどによるものと考えられる。したがって解析されたパラメーターの範囲では、曲線プレートガーダーの垂直座屈による急激な曲げ耐荷力の低下はあらわれないといえる。これは剛な垂直補剛材を持つプレートガーダーでは、ウェブの幅厚比がかなり大きい場合でも、フランジの弾性垂直座屈が生じないことを示している。結

表-3 抵抗曲げモーメント (M/M_0)
上段: SS41 ($\sigma_y=235.2$ MPa) 中段: SM50Y ($\sigma_y=352.8$ MPa) 下段: SM58 ($\sigma_y=450.8$ MPa)

形状比 (α)	0.5			2/3				1.5	
幅厚比 (λ)	150	300	500	150	300	400	500	150	300
$\beta=1/4$			0.772 0.748 0.732				0.774 0.748 0.735		
$\beta=0.5$		0.884 0.865 0.854	0.845 0.827 0.818	0.960 0.950 0.940	0.889 0.871 0.858		0.841 0.823 0.812		0.883 0.865 0.854
$\beta=1.0$	0.980 0.981 0.955	0.921 0.904 0.895	0.840 0.823 0.812	0.967 0.957 0.952	0.921 0.908 0.901	0.903 0.892 0.884	0.894 0.881 0.873	0.968 0.955 0.947	0.905 0.893 0.886

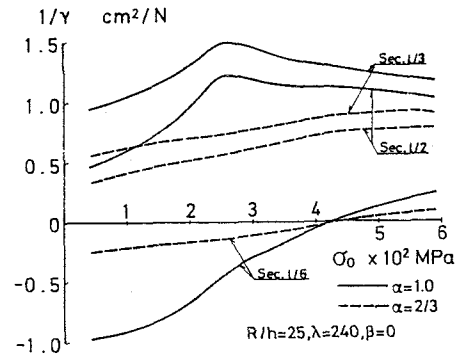


図-13 パネ定数(逆数)と応力レベルとの関係

局フランジの垂直座屈は、ウェブの面外曲げによる応力が材料の降伏点を越え、ウェブプレートがフランジプレートを支える能力を失ったときに生ずると考えられ、この問題はウェブプレートの応力問題としてとらえるのが適当と思われる。

(7) 付加的フランジ応力

a) ねじりモーメント 圧縮フランジに生ずるねじりモーメントはウェブの幅厚比 λ が小さい程、またフランジ断面積が大きい程大きくなるが、これによるせん断応力度は3.9MPa程度であり、設計において考慮される程のものにはならない。

b) 曲率半径方向せん断力 曲線プレートガーダーの持つ曲率に従い、曲げ応力の作用方向が変わるために圧縮フランジとウェブプレート間に半径方向のせん断力が生じる。この半径方向せん断力 τ を、 $\tau_0 = H/R = M/h/R$ の一次理論式によって求められたせん断力で無次元化された値 $k = \tau/\tau_0$ と圧縮フランジの最大曲げ応力度 σ との関係を表したものの一例が図-14である。せん断力 k は載荷辺に近い断面cに大きくあらわれ、スパン中央に近い断面aでは小さく断面bでは中間の値をとる。 k は応力レベルが上につれて幾分大きくなる傾向にあるが、断面cでは幾分変化が大きいものの、断面aではほとんど変化しない。 k の大きさは幅厚比 λ の大きさにほとんど左右されない。前論文において、フランジのない場合の圧縮縁の半径方向せん断力が幅厚比や応力レベルに敏感だったことと対照的である。断面cのせん断力は一般に幅厚比 λ が小さい程大きくなり、 $\beta \geq 1.0$ においては β による差異は小さい。 β が小さい程応力レベルの増加に敏感である。 β が小さく、 λ が大きい場合に、 k は20位の値となる。

c) 応力勾配 圧縮フランジには、面内曲げ応力のほかに鉛直軸まわりの曲げモーメントによる応力が生じ、面内圧縮応力分布は半径内側で大きく、外側で小さい分布となり、次式で表わされる応力勾配を生ずる。

$$\phi = (\sigma_1 - \sigma_2) / \sigma_1$$

ここに σ_1 : 半径内側での応力度

σ_2 : 半径外側での応力度

半径方向の曲げ応力が直線分布すると仮定したときの、パネルの各断面における応力勾配 ϕ と応力レベルの関係の一例を図-15に示す。応力勾配は断面aで大きく、断面cでは小さい。幅厚比 λ がある値以上になると、応力勾配の大きさは λ によらないが、 λ が小さい場合には λ に敏感である。応力勾配 ϕ は応力レベルが上にしたがって大きくなるが、図の形状比 $\alpha=2/3$ の場合には、 $\beta > 1.0$ で $\lambda > 300$ のときには、応力レベルによる変化は少ない。表-4は $\alpha=2/3$ の場合の鋼材の降伏点応力度の応力レベルにおける応力勾配 ϕ の値を示すが、 ϕ は β が小さい程大きくなり、極端なケースであるが、 $\lambda=500, \beta=1/4$ のときには応力勾

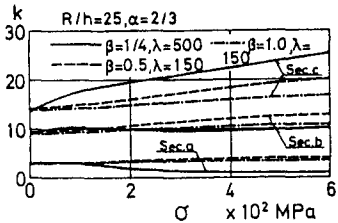


図-14 半径方向せん断力(k)

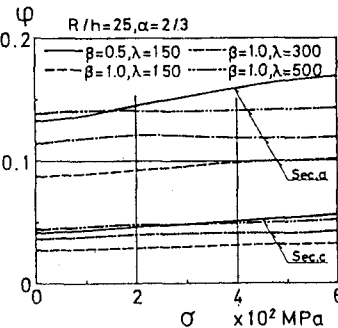


図-15 圧縮フランジの
応力勾配 (ϕ)

表-4 圧縮フランジの応力勾配 (ϕ)

上段: SS41 ($\sigma_y=235.2\text{MPa}$)
中段: SM50Y ($\sigma_y=352.8\text{MPa}$)
下段: SM58 ($\sigma_y=450.8\text{MPa}$)

形状比 (α)	2/3			
幅厚比 (λ)	150	300	400	500
$\beta = 1/4$				0.376
$\beta = 0.5$	0.148	0.210		0.210
	0.157	0.208		0.210
	0.163	0.208		0.213
$\beta = 1.0$	0.093	0.121	0.144	0.140
	0.097	0.120	0.143	0.141
	0.099	0.119	0.143	0.141

配ゆが0.4 を越えるので、フランジの小さな断面を用いる場合には注意を要する。

5. 結論

本論文では曲線プレートガーダーが曲げ作用を受ける場合の挙動を、フランジプレートとウェブプレートの相互作用の影響に注目して弾性有限要素解析を行なった。その結果以下の結論を得た。

(1) 曲線プレートガーダーの面外変形や面内曲げ応力度分布などの解析のために、ウェブプレートのみを部分構造として取出す場合、フランジプレートとウェブプレートの結合部に相当する辺の境界条件は、回転を拘束した方が単純支持とするよりもプレートガーダーに近い値が得られる。

(2) 曲線プレートガーダーの面外変形は、ウェブプレートの幅厚比が 300 を越えると極端に大きくなる。また、形状比が大きい場合にパネルの中央断面では変位の方向の逆転が生じるが、これは大きなフランジ断面を持つもの程著しい。

(3) ウェブの面内曲げ応力分布における応力欠損は、幅厚比が大きい程著しいが、フランジ断面の大きさにはあまり影響されない。また、プレートガーダーの面外変位モードと面内曲げ応力分布モードは関連が強い。

(4) 本論文で定義されたウェブプレートの有効幅は、プレートガーダーの方がウェブプレートのみのもより幾分大きくなる。有効幅はウェブの幅厚比に大きく影響されて、幅厚比が小さい程大きくなり、フランジ断面の大きさにはほとんど左右されない。実際に使用される鋼材の降伏点応力度における曲線プレートガーダーの有効幅は、幅厚比 150 の場合で0.23～0.25程度である。

(5) 曲線プレートガーダーの抵抗曲げモーメントは、形状比が0.5, 2/3, 1.5 の中では2/3 の場合に大きく、それ以外ではやや小さくなる傾向がみられるが、形状比による影響は小さく、ウェブプレートの幅厚比とフランジプレートとウェブプレートの断面積比に敏感である。けた理論において経済的な断面でのフランジ・ウェブ断面積比は0.5 であるが、断面積比が0.5 より小さいときには抵抗モーメントが低下し、この傾向はウェブプレートの幅厚比が大きい程著しいので、変断面ばりの縮小断面のようにフランジ断面が小さいときには断面の割増が必要である。その必要量は幅厚比 150 の場合で約5%である。

(6) 曲線プレートガーダーが曲げを受けるとき、十分に剛な垂直補剛材で補剛され、パネルの形状比が 1.0 以下であればフランジの弾性垂直座屈が生じることはない。フランジの垂直座屈は、ウェブが降伏状態に達してフランジを支持する能力を失ったときに生ずるもので、ウェブプレートの応力による降伏問題としてとらえるのが適当である。

(7) 曲線プレートガーダーのフランジには、付加モーメントにより応力勾配が生じ、フランジ断面が小さいときに大きくなる傾向があるので、設計に当っては十分な検討が必要である。

参考文献

- 1) Basler, K. and B. Thürlimann : Strength of plate girders in bending, Proc. of ASCE, Vol. 87, No. ST6, pp. 153～181, Aug. 1961.
- 2) 長谷川彰夫・堀口隆良・西野文雄：プレートガーダーの耐荷力に関する考察(上、下)、橋梁と基礎、Vol. 11, No. 4, No. 5, pp. 25～32, pp. 8～12, 1977年 4月, 5月.
- 3) 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、第 305号、pp. 27～37, 1981年 1月.
- 4) 前川幸治・吉田博：伝達マトリックス法による曲線 I 形ばりの耐荷力解析、土木学会論文報告集、第 312号、pp. 27～37, 1981年 8月.
- 5) 倉西茂・植渡滋：曲げを受ける曲線プレートガーダーのウェブプレートの弾性挙動について、土木学会論文報告集、第 315号、pp. 1～11, 1981年 11月.

- 6) Kuranishi, S. and S. Hiwatashi: Non-linear behavior of elastic web plates of curved girder under bending moment, Proc. of The 3rd Int. Coll. on Stability of Metal Struc. at Paris (Nov. 1983), pp. 305 ~ 312.
- 7) Nakai, H. and H. Kotoguchi: A study on lateral buckling strength and design aid for horizontally curved I-girder bridges, Proc. of JSCE, No. 339, pp. 195 ~ 204, Nov. 1983.
- 8) 中井博・北田俊行・大南亮一: 曲線桁腹板の曲げ強度に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第 340号、pp. 19 ~ 28, 1983年12月.
- 9) Brebbia, C. and J. Connor: Geometrically nonlinear finite-element analysis, Proc. of ASCE, 95, EM2, pp. 463 ~ 483, April, 1967.
- 10) Timoshenko, S.: Theory of Elastic Stability, McGraw Hill (1936)
- 11) Hiwatashi, S. and S. Kuranishi: The finite displacement behavior of horizontally curved elastic I-section plate girders under bending, Proc. of JSCE, Struct. Eng. /Earthq. Eng., Vol. 1, No. 1, Japan Society of Civil Engineers, Apr. 1984, pp. 173s-183s.