

曲線プレートガーダーの非弾性座屈特性に関する研究[‡]A STUDY ON INELASTIC BUCKLING CHARACTERISTICS
OF HORIZONTALLY CURVED PLATE GIRDERS

有住康則*, 矢吹哲哉**, 下里哲弘***, 長嶺由智****

Yasunori ARIZUMI, Tetsuya YABUKI, Tetsuhiro SHIMOZATO and Yoshitomo NAGAMINE

*工博 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒903-01 沖縄県西原町字千原1番地)

**工博 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 (〒903-01 沖縄県西原町字千原1番地)

***工修 首都高速道路公団 (前・琉球大学大学院修士課程, 〒100 東京都千代田区霞ヶ関1丁目4番1号)

****工修 (株)宮地鐵工所 (前・琉球大学大学院修士課程, 〒103 東京都中央区日本橋小伝馬町15番18号)

The behavior of instability of horizontally curved, I-shaped plate girders subjected to equal end moments is investigated by a nonlinear inelastic analysis. Their inelastic buckling modes are particularly focused. The investigation results show that the curved girders buckle in the three fundamental buckling-mode shapes and the possibilities of these instabilities depend on not only the plate-slenderness but also the initial radius of curvature.

Key Words: thin-walled plate girders, curved girders, local buckling, instability

1. まえがき

薄肉I形断面を有する直線プレートガーダーの圧縮フランジの代表的な面外座屈崩壊様式として、T形フランジとしての横倒れ座屈及びねじれ座屈に起因する崩壊様式があることがよく知られている²⁾。一方、近年薄肉I形断面を有する曲線プレートガーダーの不安定挙動についても解析的及び実験的研究が行われ、曲線プレートガーダーを構成するウェブ板及びフランジ板の局部座屈挙動について検討されている。それらの代表的な研究成果として、曲線I形プレートガーダーの構成鋼板の局部座屈に関する幅厚比制限についての提案が行われている^{3),4)}。一方、曲線I形プレートガーダーの横倒れ座屈挙動についても解析的及び実験的研究が行われ、横倒れ座屈強度に基づいた設計法に関する提案も行われている⁵⁾。また、曲線I形プレートガーダーの構成板要素の強度評価式に基づき、設計区分の考え方に適用可能な形での曲線I形プレートガーダーの曲げ強度評価式の提案の試みも行われている⁶⁾。しかしながら、薄肉I形断面を有する曲線プレートガーダーの非弾性有限変位領域における座屈崩壊様式については、まだ十分には解明されていないのが現状である。特に、曲線I形プレートガーダーの非弾性座屈モードの分岐に桁の曲率が如何に影響を及ぼすかについては、まだ十分に解明されておらず、構造物の真の強度に基準を置いた限界状態設計法の確立の上からも、曲線I形プレートガーダーの崩壊様式を明確にする必要があると思われる。

本研究では、図-1に示すような桁両端に等曲げモーメントが作用する単純支持された薄肉I形断面を有する鋼曲線プレートガーダーについて、弾塑性有限変位解析^{7),8)}を行った。特に、曲線プレートガーダーの構造諸元、とりわけ、曲線桁の曲率が桁の非弾性座屈崩壊様式に及ぼす影響について解析的検討を行った。本論文では、先ず初めに弾塑性有限変位解析法の概略を示し、次に薄肉I形断面を有する鋼曲線プレートガーダーの極限強度に影響を及ぼすと考えられる因子を種々変化させてパラメトリック解析を行い、桁の構造諸元が極限強度特性に及ぼす影響について検討を行った。更に、パラメトリック解析によって得られた座屈変形モード図、崩壊時の塑性進展図及び耐荷力曲線等に基づいて、曲線プレートガーダーの座屈崩壊様式の分類を行った。

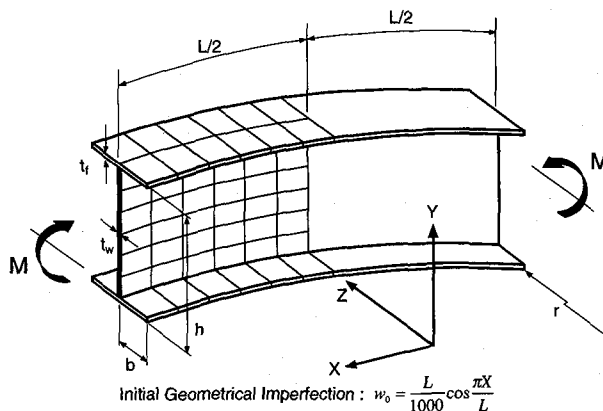


図-1 解析モデル

[‡]この論文は「土木学会論文集, 第519号/I-32, pp.51~56」¹⁾に登載されたものを和訳・再吟味し、修正加筆したものである。

2.解析法及び解析モデル

本研究では、図-1に示す桁両端に等曲げモーメントが作用する薄肉I形断面を有する鋼曲線プレートガーダーの非弾性座屈崩壊様式に桁の曲率が及ぼす影響を解明するため、鋼曲線プレートガーダーを図-2に示すアイソパラメトリックシェル要素でモデル化し、弾塑性有限変位理論に基づいた数値解析を行った。幾何学的非線形挙動を考慮したつり合い方程式は、更新ラグランジ法による増分理論に基づいて定式化を行った。本解析法の詳細については文献7)及び文献8)に述べられているので、ここでは解析に用いた主な仮定とつり合い方程式を次に示す。解析に用いた主な仮定は、(1)アイソパラメトリックシェル要素では、中央面に対する法線は変形後も直線を有する；(2)中央面法線方向（板厚方向）の直ひずみは無視する；(3)材料は、等質等方性の完全弾塑性体とし、Von Misesの降伏条件及びPrandtl-Reussの塑性流れ理論に従う；等である。

更新ラグランジ法による増分理論に基づく、増分前のつり合い状態 C_n から荷重が変化して変形状態 C_{n+1} に移行した場合の増分後のつり合い方程式は、仮想仕事の原理を適用すると、次のように与えられる。

$$\int_{V(n)} D_{(n)} \Delta \varepsilon_{ij}^L \delta \Delta \varepsilon_{ij}^L dV_{(n)} + \int_{V(n)} {}^n \sigma_{ij} \delta \Delta \varepsilon_{ij}^N dV_{(n)} = {}^{n+1} R - \int_{V(n)} {}^n \sigma_{ij} \delta \Delta \varepsilon_{ij}^L dV_{(n)} \quad (1)$$

ここで、 $D_{(n)}$ は材料の剛度テンソル、 $\Delta \varepsilon_{ij}^L$ 、 $\Delta \varepsilon_{ij}^N$ は増分ひずみの線形ひずみ成分と非線形ひずみ成分、 ${}^n \sigma_{ij}$ は状態 C_n におけるCauchyの応力及び ${}^{n+1} R$ は外力の仮想仕事である。式(1)で示したつり合い方程式をマトリックス表示すると次式のようにになる。

$$[{}^n K] \{\Delta \bar{U}\} = \{{}^{n+1} F_{ex}\} - \{{}^n F_{in}\} \quad (2.a)$$

$$[{}^n K] = [{}^n K_L] + [{}^n K_{NL}] \quad (2.b)$$

ここで、 $[{}^n K]$ は接線剛性マトリックス、 $[{}^n K_L]$ は要素の剛性マトリックス、 $[{}^n K_{NL}]$ は幾何剛性マトリックス、 $\{\Delta \bar{U}\}$ は増分変位ベクトル、 $\{{}^{n+1} F_{ex}\}$ は状態 C_{n+1} における等価節点外力項及び $\{{}^n F_{in}\}$ は状態 C_n の応力状態によって評価される等価節点内力項である。本解析では、接線剛性マトリックス等の積分は、板厚方向への塑性域の進展を考慮できるように配慮し、 $2 \times 2 \times 5$ ($= \xi \times \eta \times \zeta$) のGaussの数値積分を用いて行った。また、ひずみ及び応力度の評価は各Gaussの数値積分点で行った。一方、式(2)に示す非線形方程式の解は、増分法にNewton-Raphson法を併用した逐次収斂計算によって導出した。

本研究で解析の対象とした桁モデルは、図-1に示す二軸対称薄肉I形断面を有する単純支持曲線プレートガーダーであり、桁の両端に等曲げモーメントが作用する場合について弾塑性有限変位解析を行った。解析では、桁及び載荷荷重の対称性を考慮してスパンの半分を解析対象とした。解析に用いた構成鋼板（軟鋼）の材料特性値は、ヤング係数

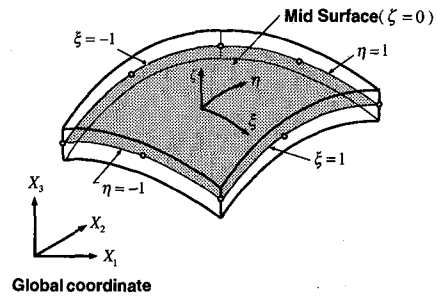


図-2 アイソパラメトリックシェル要素

$E = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、せん断弾性係数 $G = 8.1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、初期降伏応力度 $\sigma_y = 240 \text{ N/mm}^2$ 、及び初期降伏ひずみ $\varepsilon_y = 0.00114$ とした。解析モデルのウェブ板の幅厚比 h/t_w は、道路橋示方書⁹⁾に規定された無補剛板としての制限幅厚比 $h/t_w = 152$ の値に固定した。即ち、ウェブ板の幅厚比パラメーターの値は、

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h}{t_w} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_y}{23.9\pi^2 E}} = 1.106 \quad (3)$$

となり、この幅厚比パラメーターの値を有する直線桁の断面では、設計区分上ウェブ板の局部座屈の発生は制限されることになる。桁の初期たわみとして、道路橋示方書⁹⁾に規定されている製作誤差を考慮して、最大許容値 ($L/1000$) をスパン中央で有するcos半波形状を面外方向に次式に示すように仮定し、すべての解析モデルに適用した。

$$w_0 = \bar{w}_0 \cos(\pi x / L) \quad (4)$$

解析において用いたパラメーターは、フランジ板の幅厚比 b/t_f 、スパンと初期曲率半径との比（以下曲率パラメーターと称する） L/r 、フランジの断面積 A_f とウェブの断面積 A_w の比（以下断面積比パラメーターと称する） A_f/A_w 、及びI形断面を有するプレートガーダーの細長比パラメーター $\bar{\lambda}_s$

の4個である。なお、細長比パラメーター $\bar{\lambda}_s$ は次式のように定義される¹³⁾。

$$\bar{\lambda}_s = \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \sqrt{\frac{A_f + A_w / 6}{I_f}} \quad (5)$$

ここで、 I_f はフランジの断面二次モーメントである。表-1に

表-1 解析パラメーター及びその変動範囲

Item (1)	Symbol (2)	Range of values (3)
Curvature parameter	L/r	0.0, 0.01, 0.03, 0.05
Sectional area parameter	A_f/A_w	0.2, 0.4, 0.8
Modified slenderness ratio	$\bar{\lambda}_s$	0.369, 0.615, 0.861, 1.107, 1.353, 1.599
Width-to-thickness ratio of flange	b/t_f	8, 16
Width-to-thickness ratio of web	h/t_w	152
Initial imperfection	$\bar{w}_0$	$L/1000$
Yield stress parameter	E/σ_y	875

本研究で選択したパラメーターの変動範囲を示す。なお、パラメーターの変動範囲は、鋼曲線プレートガーダーに関する実績調査結果¹⁰⁾に基づいて決定した。本研究では、フランジの幅厚比が道路橋示方書で規定された圧縮応力を受ける自由突出板（フランジ）の制限幅厚比 $b/t_f=16$ に等しい値を有する断面を特に薄肉断面と称することとする。解析における要素分割は、図-1に示すように、スパンの半分のフランジを6x2分割及びウェブを6x6分割とした。なお、要素分割は、以上示した分割数を用いれば十分な精度が得られることを、本パラメトリック解析を行う前に確認した。

3. 耐力特性

3.1 断面積比パラメーターの影響

曲率パラメーター $L/r=0.03$ 及びフランジ板の幅厚比 $b/t_f=16$ を有する曲線I形プレートガーダーについて、断面積比パラメーターを $A_f/A_w=0.2, 0.4, 0.8$ と変化させた場合の極限強度と細長比パラメーターの関係を図-3に示す。なお、図中、縦軸は曲線I形プレートガーダーの最大曲げモーメント $M_{max,1st}$ を直線桁とした場合の純曲げによる降伏モーメント（以下降伏純曲げモーメントと称する） M_y で無次元化して示してあり、横軸は細長比パラメーターを示す。また、図中には道路橋示方書⁹⁾に規定された基準耐力曲線及び弾性横倒れ座屈曲線も同様に示してある。図-3から明らかなように、本研究で採用した断面諸元を有する曲線I形プレートガーダーの極限強度は、断面積比パラメーターの増加に伴ってわずかにではあるが増大している。

3.2 曲率パラメーターの影響

桁の曲率が曲線I形プレートガーダーの極限強度に及ぼす影響を検討するため、断面積比パラメーター $A_f/A_w=0.2$ を有する曲線I形プレートガーダーについて、曲率パラメーターを $L/r=0, 0.01, 0.03, 0.05$ と変化させた場合について解析を行った。解析によって得られた極限強度と細長比パラメーターの関係を図-4に示す。図中、縦軸は曲線I形プレートガーダーの最大曲げモーメント $M_{max,1st}$ を直線桁とした場合の純曲げによる降伏モーメント M_y で無次元化して示し、横軸は細長比パラメーターを示す。なお、本研究では、曲線I形プレートガーダーの極限強度に及ぼす桁曲率の影響を検討することを主目的としているため、基準値としての降伏曲げモーメントに直線桁とした場合の純曲げによる降伏曲げモーメントを選択している。即ち、曲げモーメントに連成する曲げねじりモーメントによって生じるフランジ面内の曲げモーメントの影響を考慮して降伏曲げモーメントを評価すると、基準となるべき降伏曲げモーメントの値が曲率によって変化し、曲率の影響を明確に評価できない可能性があることを考慮している⁶⁾。図-4から明らかなように、直線I形プレートガーダー（ $L/r=0$ ）の極限強度曲線は、道路橋示方書⁹⁾に規定された基準耐力曲線と比較的良好一致している。他方、曲線I形プレートガーダーの極限強度は、道路橋示方書に規定された基準耐力曲線より小さな値を示しており、同一細長比パラメーターで比較すると曲率パラメーターが増加するに従って強度は減少している。

3.3 局部座屈の影響

曲げを受ける鋼I形プレートガーダーの極限強度を評価するためには、部材の不安定挙動のみならず、桁断面を構成する圧縮フランジ板とウェブ板の局部不安定挙動についても検討しなければならない。そこで鋼プレートガーダーの極限強度に及ぼす構成鋼板の局部座屈の影響を評価するために、まず初めにフランジの断面形状を種々変化させて終局強度解析を行った。解析結果の一例を、断面積比パラメーターの値が $A_f/A_w=0.4$ で、比較的厚いフランジ断面を有する桁モデルについて図-5及び図-6に、断面積比パラメーター $A_f/A_w=0.2$ で、比較的薄いフランジ断面を有する桁モデルについて図-7及び図-8に、それぞれ示す。なお、図-5及び図-7には、フランジの幅厚比 $b/t_f=8$ を有するプレートガーダーの耐力曲線を示し、また、細長比パラメーターが $\bar{\lambda}_g=0.5$ と比較的小さな値の場合の代表的な座屈モードを図-6及び図-8に示してある。なお、基本的な局部座屈挙動をまず明確に把握するために、直線プレートガーダーの解析結果について示してある。また、図-5及び図-7には、比較のため横倒れ座屈の影響のみを考慮した梁要素

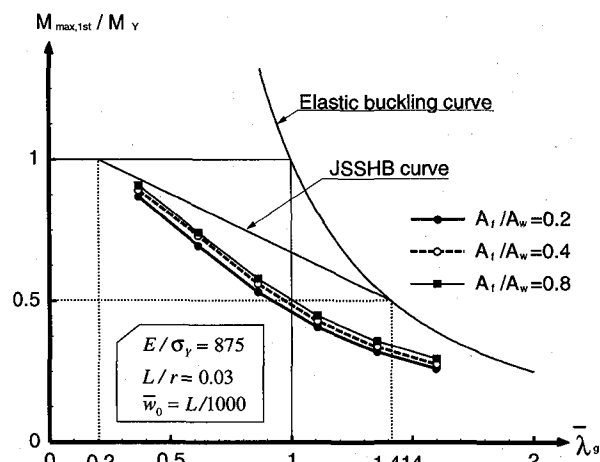


図-3 断面積比パラメーターの影響

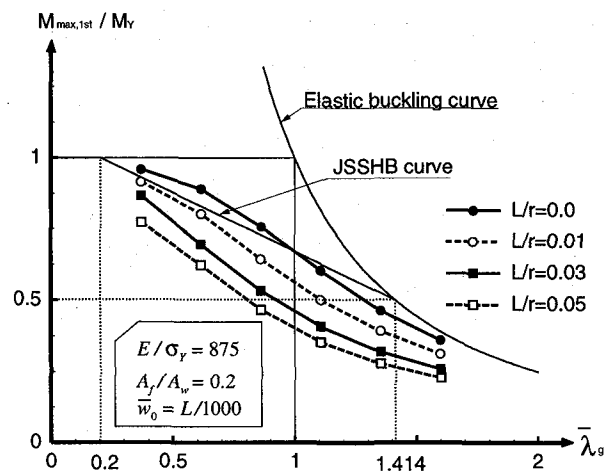


図-4 曲率パラメーターの影響

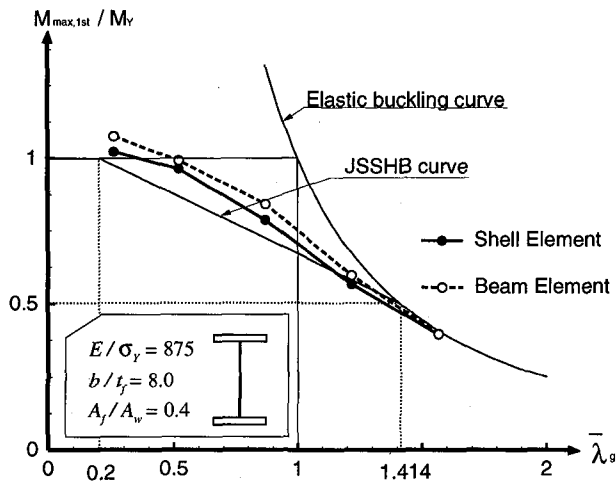


図-5 厚いフランジ断面を有するプレートガーダーの
局部不安定現象の影響

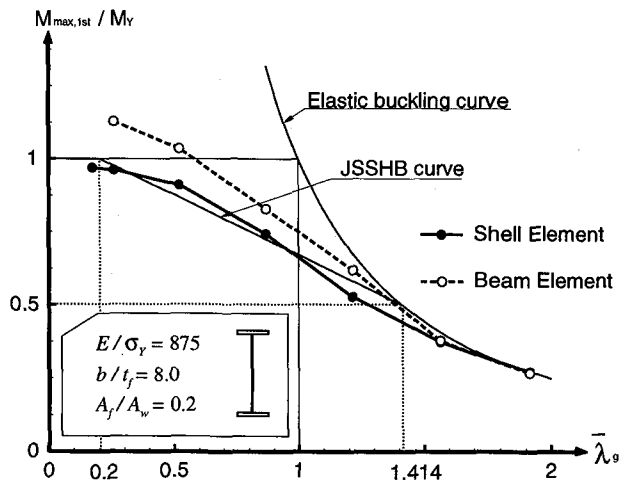


図-7 薄いフランジ断面を有するプレートガーダーの
局部不安定現象の影響

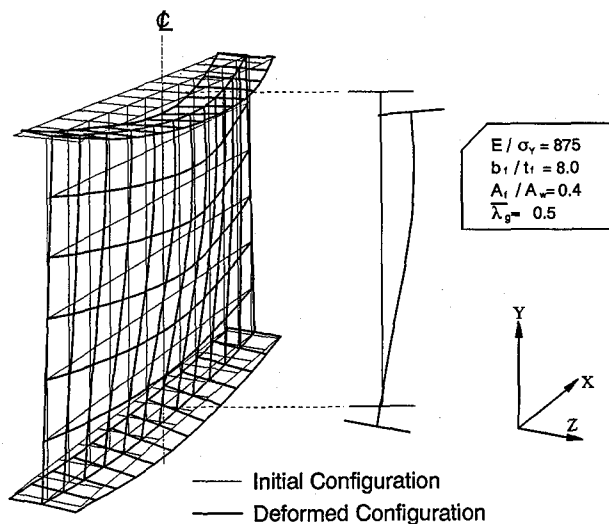


図-6 厚いフランジ断面を有する桁の非弾性座屈モード

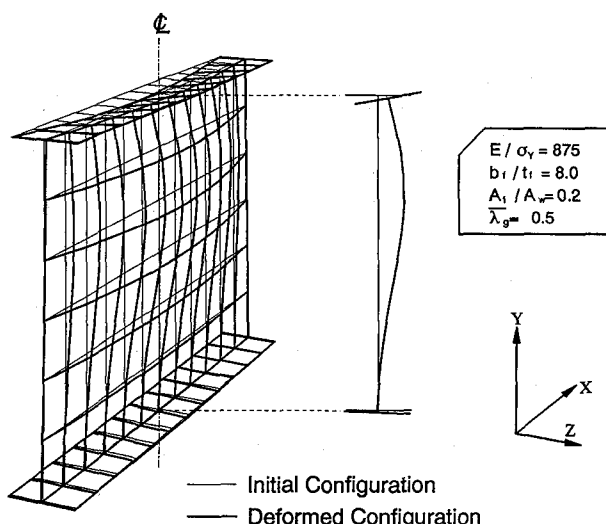


図-8 薄いフランジ断面を有する桁の非弾性座屈モード

を用いた弾塑性有限変位解析結果^{11),12)}についても併示した。なお、図-5～図-8に示した桁モデルは同一のウェブ諸元を有している。

等曲げモーメントの作用する鋼I形プレートガーダーでは、厚い断面を有する圧縮フランジは、桁に作用する圧縮力の大部分を局部座屈を伴わずに分担する。ウェブに作用する圧縮力は、変形後は圧縮フランジに沿った有効な帯板部分を除いて圧縮フランジに再分配される。従って、桁不安定挙動は、そのウェブの有効部分と圧縮フランジが一体となって等しい圧縮力を受ける柱の不安定挙動と等価であると評価される。弾性座屈領域でのそのウェブの有効な帯板部分の大きさは、Basler¹³⁾によって、式(5)に示したように $A_w/6$ と与えられている。等曲げモーメントを受ける厚いフランジ断面を有するプレートガーダーの極限強度は、桁全体の横倒れ座屈不安定現象に、より強く影響を受けるといふ特性を有している。このことは、図-5に示した厚いフランジ断面を有するプレートガーダーの耐力力曲線において、構成鋼板の局部座屈不安定挙動を考慮していない梁要素を用いた終局強度解析結果とシェル要素を用いた解析結

果が比較的良く一致しており、また、図-6に示したシェル要素を用いた終局強度解析結果より得られたプレートガーダーの代表的な座屈崩壊モードが、局部座屈モードよりは桁の横倒れ座屈モードを示していることから明らかである。他方、図-7から明らかのように、シェル要素を用いた終局強度解析で得られた薄いフランジ断面を有するプレートガーダーの極限強度の値は、細長比パラメータの値が減少するに従って梁要素を用いた終局強度解析結果と比較して、小さくなっている。これは、薄い圧縮フランジ断面を有する桁が、十分な横倒れ座屈抵抗、即ち横倒れ全体座屈挙動に対して高い強度 (λ_g が小さい値) を有しているならば、圧縮フランジ板とそれに隣接するウェブ部分においてねじれ座屈が先行する可能性が高いことを示している。このことは、図-8から明らかのように、シェル要素を用いた終局強度解析結果より得られたプレートガーダーの代表的な座屈崩壊モードは、桁の横倒れ全体座屈モードよりはむしろ局部座屈モードを示していることから明らかである。

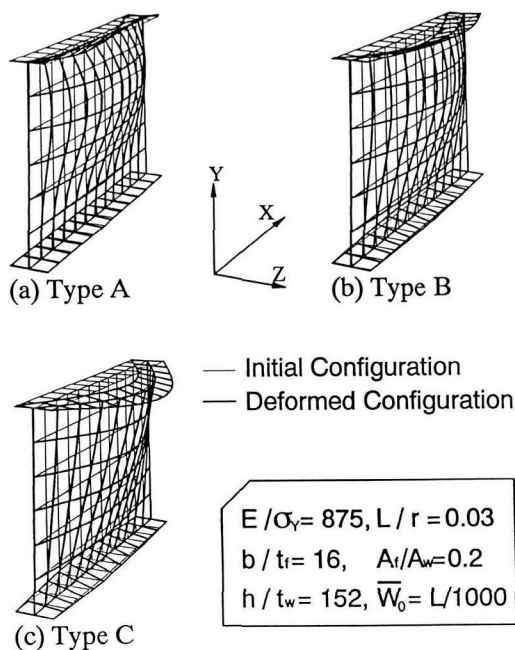


図-9 基本的座屈モード

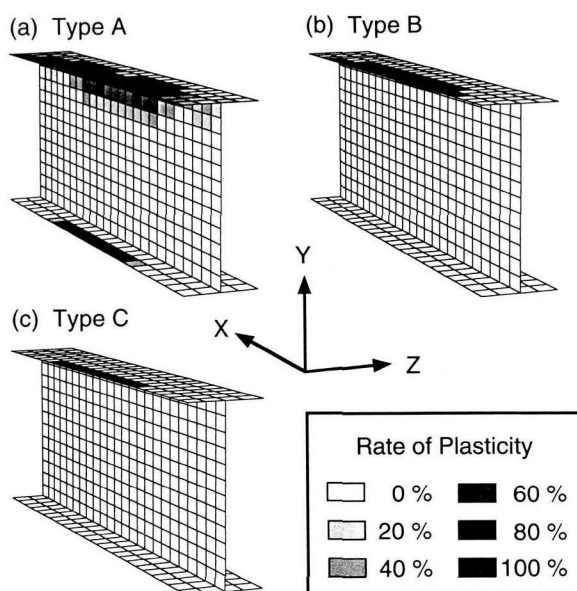


図-10 塑性域の進展

4. 非弾性座屈崩壊様式

4.1 基本座屈モード形状

等曲げモーメントが作用するI形断面を有する曲線プレートガーダーの座屈崩壊様式を明らかにするため、パラメトリック解析結果に基づいて非弾性座屈モード形状の検討を行った。その結果、以下に示す三つの基本的座屈モード形状があることが確認された。それらの代表的な座屈モード形状を図-9に示す。図-9(a)は、圧縮フランジにねじれ変形と側方への変形が生じ、それに伴ってウェブ圧縮部分が面外へはらみ出し変形を引き起こす局部座屈モード形状（以下Type-Aと称する）を示している。図-9(c)に示した横倒れ座屈モード形状（以下Type-Cと称する）では、桁断面を構成している鋼板の不安定現象を伴わずに、桁のスパン中央の圧縮フランジ部分を中心に桁全体が側方面外へ大きな横倒れねじれ変形が生じている。一方、局部座屈と桁全体の横倒れ座屈が連成した座屈モード形状（以下Type-Bと称する）では、上述した圧縮フランジのねじれ変形を伴って桁全体の横倒れ変形が生じている。図-9に示した曲線プレ-

トガーダーの基本的な座屈変形状に対応した断面及び桁の軸線方向への塑性域の分布状態を図-10に示す。なお、構成鋼板の板厚方向への塑性域の進展状況は、図中の凡例に示したように、弾性状態を0%とし、板厚方向へ完全に塑性化した場合を100%として百分率で表示した。図-10(a)に示した局部座屈変形モードに対応した塑性域の進展状況から明らかなように、ウェブ圧縮部分の側方への著しい変形と圧縮フランジのねじれ変形と側方への変形が生じていることが認められた。図-10(c)から明らかなように、横倒れ全体座屈挙動を示す曲線プレートガーダーでは、塑性域がスパン方向に沿って圧縮フランジに一樣に進展している。このことより、圧縮フランジがあたかも単独の柱のように不安定挙動を示した様子が窺える。図-10(b)に示した連成座屈モードの塑性域の進展状況は、局部座屈と横倒れ座屈挙動で見られた塑性域の分布状態を重ね合せた分布性状を示している。

4.2 座屈崩壊様式の分類

パラメトリック解析によって得られた座屈変形モード

表-2 非弾性座屈崩壊様式の分類

L/r	$\bar{\lambda}_g$					
	0.369	0.615	0.861	1.107	1.353	1.599
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
0.0	Type-A	Type-A	Type-A	Type-B	Type-C	Type-C
0.01	Type-A	Type-A	Type-B	Type-B	Type-C	Type-C
0.03	Type-A	Type-A	Type-B	Type-B	Type-C	Type-C
0.05	Type-A	Type-A	Type-B	Type-C	Type-C	Type-C

図、終局時の塑性進展図及び耐荷力曲線に基づいて、薄肉I形断面を有する曲線プレートガーダーの非弾性座屈崩壊様式の分類を行った。その結果を表-2に示す。これらの分類結果から、薄肉I形断面を有する曲線プレートガーダーの座屈崩壊様式は、桁の細長比パラメーターの大きさのみならず、桁の曲率の大きさによっても影響を受けることが明確となった。また、局部不安定現象は、曲率パラメーター L/r の値が小さい程、顕著となる。

5. 結論

本研究では、薄肉I形断面を有する鋼曲線プレートガーダーの非弾性座屈崩壊様式を解明するため、鋼曲線プレートガーダーをアイソパラメトリックシェル要素でモデル化し、弾塑性有限変位解析を行った。本研究によって得られた主な結論をまとめると以下ようになる。

- (1) 本研究で採用した構造諸元を有する鋼曲線I形プレートガーダーの極限強度は、断面積比パラメーター A_f/A_w の値が大きくなるに従って、わずかに増加する。
- (2) 降伏純曲げモーメント値で無次元化して描いた鋼曲線I形プレートガーダーの極限強度曲線は、道路橋示方書に規定された基準耐荷力曲線と比較して小さく、また、曲率パラメーター L/r が大きくなるに従って極限強度は低下する。
- (3) 厚い断面を有するプレートガーダーの圧縮フランジは、等曲げモーメントを受ける桁に作用する圧縮力の大部分を局部座屈を伴わずに分担するので、桁の極限強度は、桁全体の横倒れ不安定挙動に、より強く影響を受けるという特性を有している。一方、薄い圧縮フランジ断面を有する桁が、十分な横倒れ座屈抵抗、即ち桁の横倒れ不安定挙動に対して高い強度($\bar{\lambda}_p$ が小さい値)を有しているならば、圧縮フランジ板とそれに隣接するウェブ部分においてねじれ座屈が先行する可能性が高い。
- (4) 鋼曲線I形プレートガーダーの非弾性座屈崩壊様式を分類した結果、次に示す三つの基本座屈モードが有ることが確認された。即ち、(a)圧縮フランジにねじれ変形と側方への変形が生じ、それに伴ってウェブ圧縮部分に著しいはらみ出し変形が生じる局部座屈モード、(b)構成鋼板の不安定挙動を伴わずに、桁全体が側方へのねじれ変形が生じる横倒れ全体座屈モード、及び(c)局部不安定挙動と全体横倒れ不安定挙動を伴った連成座屈モード、である。
- (5) 鋼曲線I形プレートガーダーの座屈崩壊形式は、桁の細長比パラメーターのみならず、桁の曲率の影響を受ける。特に、局部座屈不安定現象は、曲率パラメーターが小さくなるに従って、顕著となる。

今後更に検討しなければならない主な研究課題として

は、残留応力度を考慮した場合の耐荷力特性評価、集中及び分布荷重載荷の場合の耐荷力特性評価、局部座屈を防止するための断面形状の制限、ブレースの必要条件、終局強度に関する系統的实验、及び不安定挙動を考慮した終局荷重設計法の確立等々がある。

参考文献

- 1) Yabuki, T., Arizumi, Y., Shimoizato, T. and Nagamine, Y.: Buckling Modes of Plate-Girders Curved in Plan, Journal of Structural Mech. and Earthquake Eng., JSCE, No.519/I-32, pp.51~56, 1995.
- 2) 土木学会：鋼構造物設計指針，PART A 一般構造物，1987.
- 3) 中井博，北田俊行，大南亮一，川井正：曲げを受ける曲線桁橋腹板の解析と設計に関する研究，土木学会論文集，No.368/I-5，pp.235~244，1986.
- 4) 藤井堅，大村裕：曲線I形桁におけるフランジの局部座屈と幅厚比制限，土木学会論文集，No.386/I-8，pp.339~347，1987.
- 5) Nakai, H. and Kotoguchi, H. : A Study on Lateral Buckling Strength and Design Aid for Horizontally Curved I-Girders, Proc. of JSCE, No.339, pp.195~206, 1983.
- 6) 藤井堅，中岡智昭：曲線プレートガーダーの曲げ耐荷力推定式，構造工学論文集，No.41A，pp.313~320，1995.
- 7) Yabuki, T., Arizumi, Y. and Yashiro, S. : Ultimate Strength and Its Practical Evaluation of Cylindrical Steel Shell Panels under Various Compressions, Journal of Structural Mech. and Earthquake Eng., JSCE, No.489/I-27, pp.37~47, 1994.
- 8) 有住康則，矢吹哲哉，八代茂：圧縮と曲げを受ける円筒パネルの極限強度に関する研究，構造工学論文集，Vol.41A，pp.337~348，1995.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1994.
- 10) 中井博，北田俊行，松村駿一郎，大南亮一，吉川紀：曲線桁橋腹板の実績調査，橋梁と基礎，No.5，pp.38~43，1981.
- 11) 倉西茂，矢吹哲哉：鋼アーチ橋の極限強度に及ぼす横構剛性の影響について，土木学会論文報告集，Vol.305，pp.47~58，1981.
- 12) 下里哲弘，矢吹哲哉，有住康則：LYR鋼開断面桁の耐荷力特性について，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，I-449，pp.1046~1047，1993.
- 13) Basler, K. : Plate Girders - Strength in Bending, Journal of the Structural Division, ASCE, No.2913, pp.655~681, 1961.

(1995年9月18日受付)