

ウェブの変形を考慮した I 形断面ばりの 弾塑性横倒れ座屈強度

ELASTO-PLASTIC LATERAL BUCKLING STRENGTH OF I-SECTION BEAMS
WITH FLEXIBLE WEB

深沢泰晴* 杉原美好**

By Yasuharu FUKASAWA and Miyoshi SUGIHARA

An analysis is presented for elasto-plastic lateral buckling of I-section beams in due consideration of the effects of web distortion. By extending the instability theory formulated by Vlasov for thin-walled beams to lateral buckling of I-section beams with flexible web, governing equations of the problem are derived. A procedure of numerical evaluation of lateral buckling strength is developed for the simply supported beams with typical patterns of residual stress distribution, loaded by uniform bending into elasto-plastic range. Numerical results in the form of buckling curves, evaluated by the present method, show that the effects of web distortion considerably reduce the elasto-plastic buckling strength as well as elastic buckling strength in cases of the beams with particular cross-sectional proportions.

1. はじめに

構造物を合理的に設計するには、その構造物の終局耐力を正確に評価することが必要不可欠であるが、近年における電算機の驚異的な発達や構造解析法自体の進歩がこれを可能にしつつある。鋼構造において、最も重要な構成要素として幅広く使用されている圧延 I 形鋼はり、溶接 I 形プレートガーダーなどの I 形断面材の終局耐力を支配する曲げねじれ座屈強度についても、より高精度な評価方法の確立を目指し、断面変形を考慮した解析^{1)~6)}局部座屈と全体座屈の連成問題の解析^{7)~12)}等の研究が活発に行われてきた。

distortional buckling と呼ばれる断面変形を伴う曲げねじれ座屈については、著者らも一次元の棒理論にもとづく簡便な支配方程式の誘導と、座屈特性の検討を行った¹³⁾。それらの結果を総合すると、断面変形を伴う I 形断面

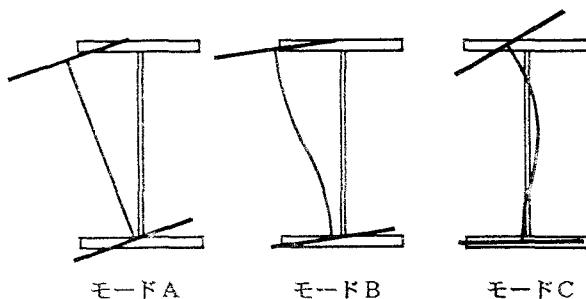


図-1 断面変形のモード

* 工博 山梨大学教授 工学部土木工学科 (〒400 山梨県甲府市武田4丁目3-11)

** 工修 山梨大学助手 工学部土木工学科 (〒400 山梨県甲府市武田4丁目3-11)

ばりの横倒れ座屈のうち、弾性座屈の基本的特性としては、次のことが知られている。①座屈時の断面変形モードは、図-1の3種に類別され、モードAは断面形不変のままのねじれ状態に近いものであり、モードBは圧縮フランジの横曲げが卓越し、モードCは圧縮フランジのねじれが卓越するタイプである。②断面変形による座屈強度の低下は、モードAおよびモードBの場合には小さいが、モードCでは大きな値に達する。③はりのスパンが短いほど、ウェブおよびフランジの断面が細長いほど、座屈時の断面変形はモードCに近づき、したがって座屈強度の低下の度合も大きくなる。

本報告は、上述のような断面変形を伴うI形断面ばりの横倒れ弾性座屈の基本特性を踏まえながら、実用的な観点からすればより重要な意味をもつと思われる非弾性座屈に対して断面変形の及ぼす影響を解明しようとするものである。ここでの解析は、一次元の棒理論として著者らが誘導した支配方程式¹³⁾に基づき、それを非弾性域へ拡張するかたちで行う。具体的な数値解析においては、はりの長さおよび断面寸法に関する無次元パラメータを変化させたパラメトリック解析を行い、この種の非弾性座屈についての特性を明らかにする。

2. 支配方程式

解析の対象とする2軸対称のI形断面および座標系とその断面変形を図-2に示す。座標系は次の2組を用いる。一つは、図心を原点O、断面の主軸をx, y軸、母線に平行な軸をz軸とする(O-x, y, z)座標である。他は、部材の各構成薄板断面材の図心を原点O_i、各薄板断面材の弱軸および強軸をそれぞれn軸およびs軸とする右手直交座標系(O_i-n, z, s)である。

非弾性横座屈の解析を行うにあたり、次のような仮定を設ける：

①断面変形としてはウェブの変形のみを考える。

②はりの材料は完全弾塑性体である。

③降伏状態は部材軸方向の直応力によって決まる。

④座屈時におけるSt.Venantのねじり剛性は断面の降伏状態に影響されない。¹⁴⁾

②から④の仮定より、応力-ひずみ関係は、次のようになる。

$$\sigma_z = \begin{cases} E \varepsilon_z : \varepsilon_z < \varepsilon_Y \\ \sigma_Y : \varepsilon_z \geq \varepsilon_Y \end{cases} \quad \tau_{sz} = 2G \gamma_{sz} \quad \sigma_s = E \varepsilon_s \quad (1)_{a, c}$$

ここに、 σ_Y は降伏応力、 ε_Y は降伏ひずみ、Eはヤング係数、Gはせん断弾性係数である。

ウェブの変形を伴う1軸対称のI形断面はりの弾性横座屈変形の支配方程式は、座屈変形前の状態で作用している軸力を $N^{(0)}$ 、x軸まわりの曲げモーメントを $M_y^{(0)}$ 、y軸方向荷重を $q_y^{(0)}$ とすれば、図心Oのx軸方向変位u、断面全体のねじれ角 φ 、および上、下フランジの独自のねじれ角 ψ_1 、 ψ_2 に関して次のように表すことができる。

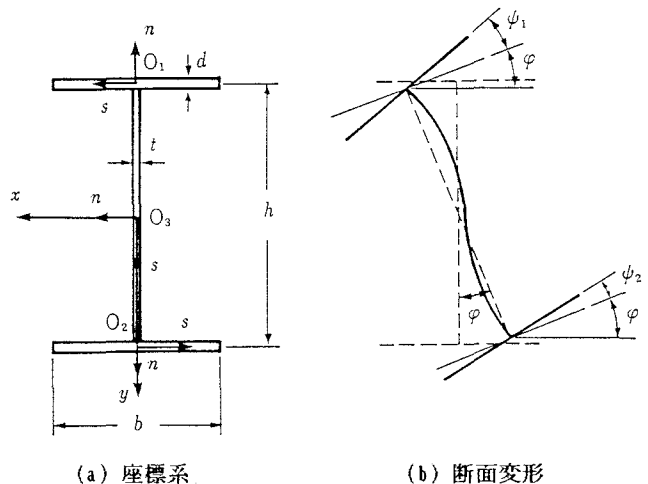


図-2 座標系と断面変形

$$EI_{xx} u'''' - \{N^{(0)} (u + y_s \varphi)'\}' + (M_y^{(0)} \varphi)'' = 0 \quad (2)_a$$

$$EI_{\omega\omega} \varphi'''' - GJ_s \varphi'' + EI_{\omega\omega}^{f1} \phi_1'''' + EI_{\omega\omega}^{f2} \phi_2'''' - GJ_s^{f1} \phi_1'' - GJ_s^{f2} \phi_2'' \\ - y_s (N^{(0)} u')' + M_y^{(0)} u'' - (K^{(0)} \varphi' + K_1^{(0)} \phi_1' + K_2^{(0)} \phi_2')' + q_y^{(0)} y_c \varphi = 0 \quad (2)_b$$

$$EI_{\omega\omega}^{f1} (\varphi + \phi_1)'''' - GJ_s^{f1} (\varphi + \phi_1)'' + \frac{2EI_{\omega}}{h} (2\phi_1 + \phi_2) - \{K_1^{(0)} (\varphi + \phi_1)'\}' = 0 \quad (2)_c$$

$$EI_{\omega\omega}^{f2} (\varphi + \phi_2)'''' - GJ_s^{f2} (\varphi + \phi_2)'' + \frac{2EI_{\omega}}{h} (\phi_1 + 2\phi_2) - \{K_2^{(0)} (\varphi + \phi_2)'\}' = 0 \quad (2)_d$$

ここに、 $EI_{\omega} (=Et^3/12)$ はウェブの単位幅あたりの z 軸まわりの曲げ剛性、 EI_{xx} 、 $EI_{\omega\omega}$ 、 GJ_s はそれぞれ有効断面の y 軸まわりの曲げ剛性、反り剛性、およびSt.Venantのねじり剛性を表す。さらに、上添字 $f1$ 、 $f2$ はそれぞれ上、下フランジに関する量であることを表す。また、 y_s 、 y_c はそれぞれせん断中心および $q_y^{(0)}$ の作用点の y 座標である。なお、 $K^{(0)}$ 、 $K_1^{(0)}$ 、 $K_2^{(0)}$ は

$$K^{(0)} = \int_A (\sigma_z^{(0)} + \sigma_r) \{ (x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 \} dA \quad (3)_a$$

$$K_1^{(0)} = \int_{Af1} (\sigma_z^{(0)} + \sigma_r) (x - x_s)^2 dA \quad (3)_b$$

$$K_2^{(0)} = \int_{Af2} (\sigma_z^{(0)} + \sigma_r) (x - x_s)^2 dA \quad (3)_c$$

ここに、 x_s はせん断中心の x 座標、 $\sigma_z^{(0)}$ は座屈変形前の状態での直応力、 σ_r は部材軸方向の残留応力、 $Af1$ 、 $Af2$ はそれぞれ上、下フランジの断面積である。

式(2)は、ウラゾフによって定式化された薄肉ばりの3次元不安定問題の理論における断面形不変の仮定をウェブについて解除し、さらに残留応力の影響項を付加することによって導かれたものである。

以下では具体的な解析として、1軸対称I形断面ばりの強軸まわりに一定曲げモーメント $\overline{M}_y$ が作用する場合のウェブの変形を考慮した横倒れ座屈を扱う。

この場合、次式が成り立つ。

$$q_y^{(0)} = N^{(0)} = 0 \quad M_y^{(0)} = \overline{M}_y \quad (4)_a, b$$

また、式(3)a-cの値をそれぞれ次のように書くことにする。

$$K^{(0)} = \overline{K} \quad K_1^{(0)} = \overline{K}_1 \quad K_2^{(0)} = \overline{K}_2 \quad (5)_a-c$$

式(4)、(5)を式(2)に代入すると座屈変形の支配方程式が次のように求められる。

$$EI_{xx} u'''' + \overline{M}_y \varphi'' = 0 \quad (6)_a$$

$$EI_{\omega\omega} \varphi'''' - GJ_s \varphi'' + EI_{\omega\omega}^{f1} \phi_1'''' + EI_{\omega\omega}^{f2} \phi_2'''' - GJ_s^{f1} \phi_1'' - GJ_s^{f2} \phi_2'' \\ + \overline{M} u'' - \overline{K} \varphi'' - \overline{K}_1 \phi_1'' - \overline{K}_2 \phi_2'' = 0 \quad (6)_b$$

$$EI_{\omega\omega}^{f1} (\varphi + \phi_1)'''' - GJ_s^{f1} (\varphi + \phi_1)'' + \frac{2EI_{\omega}}{h} (2\phi_1 + \phi_2) - \overline{K}_1 (\varphi + \phi_1)'' = 0 \quad (6)_c$$

$$EI_{\omega\omega}^{f2} (\varphi + \phi_2)'''' - GJ_s^{f2} (\varphi + \phi_2)'' + \frac{2EI_{\omega}}{h} (\phi_1 + 2\phi_2) - \overline{K}_2 (\varphi + \phi_2)'' = 0 \quad (6)_d$$

3. 弾塑性横倒れ座屈値の算定

3.1 降伏領域の決定と弾塑性曲げモーメントの算定

弾塑性座屈解析を行う場合、まず最初に降伏領域の決定が必要となる。本研究では、I形断面を微小要素に分割し、力の釣り合いからそれぞれの微小要素の直応力を求め、降伏領域を決定する¹⁵⁾

図-3のようにI形断面ばりの上、下フランジおよびウェブをそれぞれ2m個の微小要素に分割する。なお、ここでは、板厚は他の断面寸法に較べ小さいものとして、板厚方向には分割しないこととする。

微小要素の図心の直ひずみを ε_z とすれば

$$\varepsilon_z = \varepsilon_\phi + \varepsilon_0 + \varepsilon_r \quad (7)$$

ここに、 ε_ϕ は断面全体の図心からの距離に比例するひずみ、 ε_0 は断面に一樣に生ずるひずみ、 ε_r は残留ひずみである。降伏ひずみ ε_Y 、降伏曲率 ϕ_Y 、曲率 ϕ を用いて式(7)を変形すれば

$$\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_Y} = 2 \frac{\phi y}{\phi_Y h} + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_Y} + \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_Y} \quad (8)$$

軸方向に力が作用しない場合を扱っているので、力の釣り合いより

$$P = \int_A \sigma_z dA = \sum \sigma_z \Delta A = 0 \quad (9)$$

ここに、 ΔA は微小要素の断面積である。上式の両辺を降伏軸力 P_Y で除して無次元化し、式(1)aを考慮すれば、

$$\frac{P}{P_Y} = \frac{1}{A} \left(\sum \frac{\sigma_z}{\sigma_Y} \Delta A \right) = \frac{1}{A} \left(\sum \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_Y} \Delta A_e + \sum \Delta A_p \right) = 0$$

したがって

$$\sum \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_Y} \Delta A_e + \sum \Delta A_p = 0 \quad (10)$$

ここに、 ΔA_e 、 ΔA_p はそれぞれ弾性微小要素、塑性微小要素の断面積を、 Σ は微小要素についての和を表す。式(10)に式(8)を代入すると

$$\sum \left(2 \frac{\phi y}{\phi_Y h} + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_Y} + \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_Y} \right) \Delta A_e + \sum \Delta A_p = 0 \quad (11)$$

上式により、与えられた曲率、残留ひずみに対する ε_0 を求めることができる。すなわち、式(9)を満足する応力分布が求められ、断面の降伏状態を求めることができる。このときの曲げモーメントは次式により求められる

$$\bar{M}_z = \int_A \sigma_z y dA = \sum \sigma_z y \Delta A_e + \sum \sigma_Y y \Delta A_p \quad (12)$$

3.2 断面定数の計算

2.における仮定より断面の塑性領域は外力に対して抵抗しないものとする。St.Venantのねじれ定数を除いたその他の断面定数は有効断面（弾性領域）に対するものとして定義することができる。また、有効断面に対する図心およびせん断中心の位置は断面の降伏状態により異なることから、それぞれの降伏状態に応じた図心およびせん断中心を求め、それらに基づいた断面定数の計算が必要となる。

断面の降伏による図心の移動量 Δy は

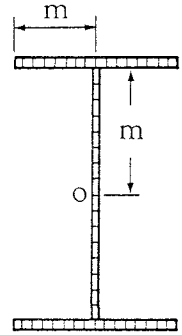


図-3 断面の要素分割

$$\Delta y = \frac{\int_A y dA}{\int_A dA} = \frac{\sum y \Delta A_e}{\sum \Delta A_e} \quad (13)$$

また、下フランジの板厚中心線よりせん断中心までの距離 y_s' は次式によって求められる

$$y_s' = \frac{I_{xx}^{f1}}{I_{xx}^{f1} + I_{xx}^{f2}} h \quad (14)$$

ここに、 I_{xx}^{f1} 、 I_{xx}^{f2} はそれぞれ上、下フランジの y 軸に関する断面二次モーメントであり、次式により求められる。

$$I_{xx}^{f1} = \int_{Af1} x^2 dA = \sum_{f1} x^2 \Delta A_e \quad I_{xx}^{f2} = \int_{Af2} x^2 dA = \sum_{f2} x^2 \Delta A_e \quad (15)_{a, b}$$

ここに、 $\sum_{f1}$ 、 $\sum_{f2}$ はそれぞれ上、下フランジについての和を表す。

また、式(6) で用いた断面定数は次のように表すことができる。

$$I_{xx} = \int_A x^2 dA = \sum x^2 \Delta A_e \quad (16)_a$$

$$I_{\omega\omega}^{f1} = I_{xx}^{f1} (h - y_s')^2 \quad I_{\omega\omega}^{f2} = I_{xx}^{f2} (y_s')^2 \quad (16)_{b, c}$$

$$I_{\omega\omega} = I_{\omega\omega}^{f1} + I_{\omega\omega}^{f2} \quad (16)_d$$

3.3 座屈荷重の決定

ここでは、はり単支持されているものとして以下の解析をすすめる。スパンを L とし、境界条件は次式で表されるものとする。

$$z=0, \quad z=L \quad ; \quad u=u''=\varphi=\varphi''=\phi_1=\phi_1''=\phi_2=\phi_2''=0 \quad (17)$$

このときの座屈形は、 C_i ($i=1, 2, 3$) を任意定数として

$$[u \quad \varphi \quad \phi_1 \quad \phi_2]^T = [C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad C_4]^T \sin \left(\frac{n\pi}{L} z \right) \quad (18)$$

と表すことができる。ここに、 n はモード次数である。式(18)を式(6)に代入することによって、次のような固有値方程式が得られる。

$$\begin{vmatrix} EI_{xx} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 & -\bar{M}_v & 0 & 0 \\ EI_{\omega\omega} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 + GJ_s + \bar{K} & EI_{\omega\omega} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 + GJ_s^{f1} + \bar{K}_1 & EI_{\omega\omega}^{f2} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 + GJ_s^{f2} + \bar{K}_2 \\ EI_{\omega\omega}^{f1} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 + GJ_s^{f1} + \bar{K}_1 + \frac{4EI_w}{h} \left(\frac{L}{n\pi} \right)^2 & \frac{2EI_w}{h} \left(\frac{L}{n\pi} \right)^2 & \\ \text{Sym.} & EI_{\omega\omega}^{f2} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 + GJ_s^{f2} + \bar{K}_2 + \frac{4EI_w}{h} \left(\frac{L}{n\pi} \right)^2 & \end{vmatrix} = 0 \quad (19)$$

上式より座屈荷重に対するスパン L の限界値を求めることができる。この計算を繰り返し行い、座屈曲線が描かれる。

4. 数値計算例と考察

単純支持の2軸対称のI形ばりが強軸まわりの一定曲げモーメントを受ける場合について、ウェブの変形を考慮した横倒れ座屈解析を式(19)によって行った。

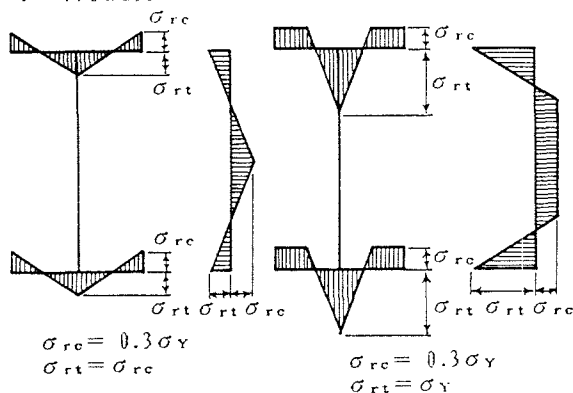
I形ばりとしては、圧延I形鋼ばりと溶接I形プレートガーダーの2種類を想定し、それぞれに対して図-4に示すような残留応力分布を仮定した。¹⁶⁾

数値計算は、はりの長さ L 、フランジ幅 b 、フランジ厚 d 、ウェブ高さ h 、ウェブ厚 t についての無次元パラメータ L/b 、 b/d 、 d/t 、 h/b を変化させて行った。残留応力は弾性座屈および弾塑性座屈の両者に対して考慮した。計算結果は、座屈モーメント M_{cr} と断面の一部が降伏を始めるモーメント M_Y との

比を縦軸とし、 L/b を対数目盛の横軸とする、いわゆる座屈曲線にまとめた。

それらの一例として、まず図-5から図-8を示す。図-5と図-6は圧延I形鋼ばりの場合であり、図-7と図-8は溶接I形プレートガーダーの場合である。これらの図には座屈モードの各次数 $n=1, 2, \dots$ に対する曲線が示されており、また弾性座屈、ウェブの変形を無視した場合との比較がなされている。ウェブの変形によって座屈荷重が低下する場合の L/b の範囲は、他のパラメータの値との関連で定まるが、この L/b の範囲においては弾性座屈の場合と同様に圧縮フランジのねじれが卓越する座屈モードであり、2次以上のモードの座屈を考慮する必要がある。なお、ウェブの変形を考慮した場合でも、多くの場合、弾性座屈荷重は弾塑性座屈荷重よりも大きい、 L/b 、 b/d 、 d/t 、 h/b の値によっては、前者の値が

σ_Y : 降伏応力 σ_{rc} : 圧縮残留応力 σ_{rt} : 引張残留応力



(a) 圧延I形鋼ばり (b) 溶接I形プレートガーダー

図-4 残留応力分布モデル

M_{cr}/M_Y

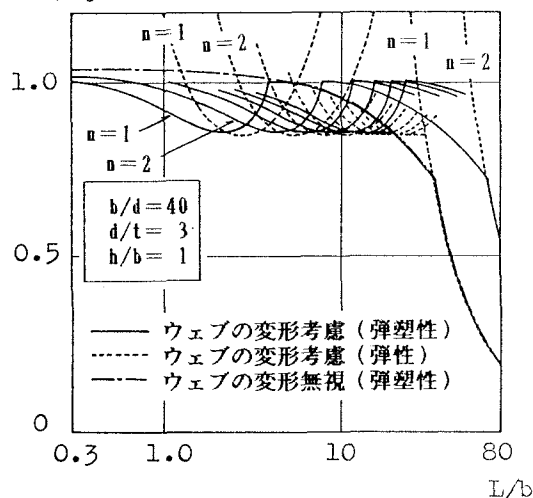


図-5 圧延I形鋼ばりの座屈曲線 (I)

M_{cr}/M_Y

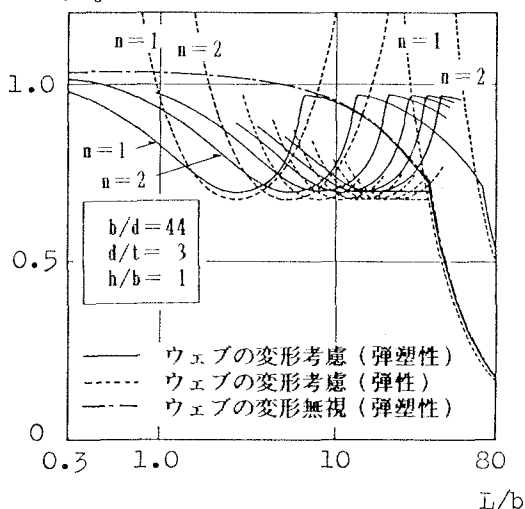


図-6 圧延I形鋼ばりの座屈曲線 (II)

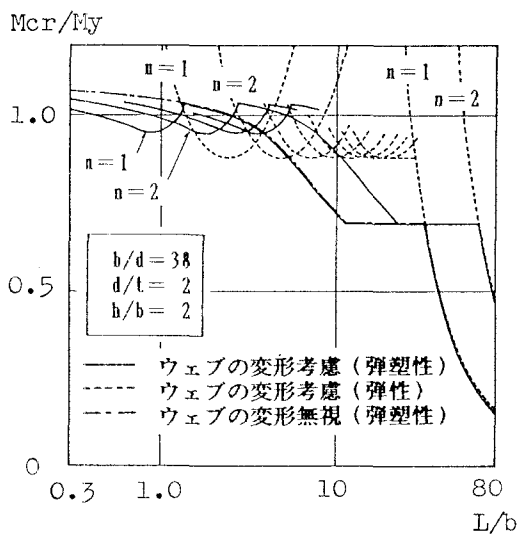


図-7 溶接 I 形プレートガーダーの座屈曲線 (I)

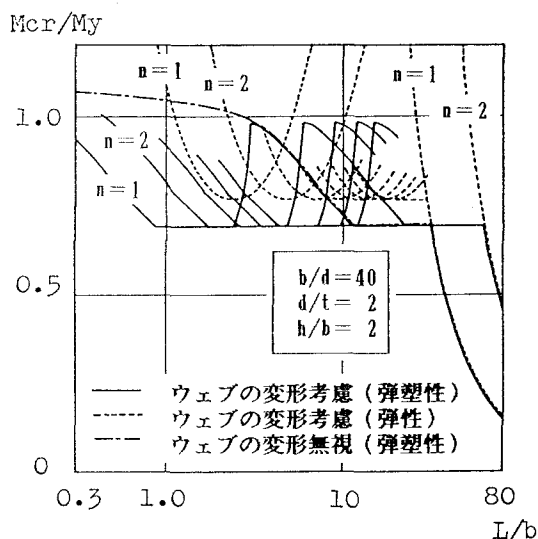


図-8 溶接 I 形プレートガーダーの座屈曲線 (II)

後者の値を下まわり、弾性座屈荷重が最小座屈荷重となる場合があることも知られる。

次に、パラメータ b/d , d/t , h/b を圧延鋼ばりおよび溶接鋼ばりのそれぞれに対して、実用的な範囲で変化させて描いた座屈曲線によって、弾塑性座屈におけるウェブの変形の影響度合を調べたが、その代表例を図-9から図-14に示す。ウェブの変形による座屈荷重の低下に対して最も顕著な影響を及ぼすパラメータは圧延、溶接の両者の場合とも b/d であり、 $b/d < 37$ の範囲ではウェブの変形の影響はほとんど現れないが、 $b/d > 37$ では b/d の値の増大にともなって座屈荷重の低下も著しくなることがわかる。この傾向は圧延より溶接の方に顕著にみられる。また、 $b/d > 37$ の範囲では d/t の値も大きいほど座屈荷重は低下するが、 h/b の値の変化による影響は少ない。

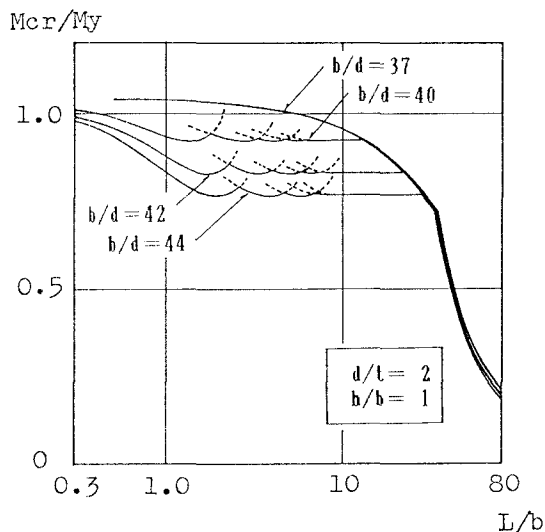


図-9 圧延 I 形鋼ばりの座屈曲線 (III)

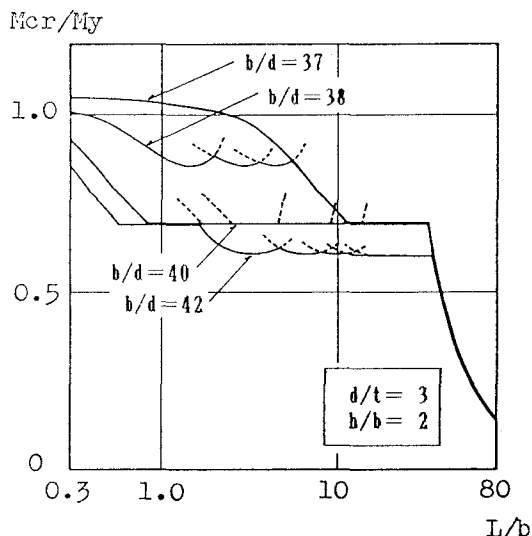


図-10 溶接 I 形プレートガーダーの座屈曲線 (III)

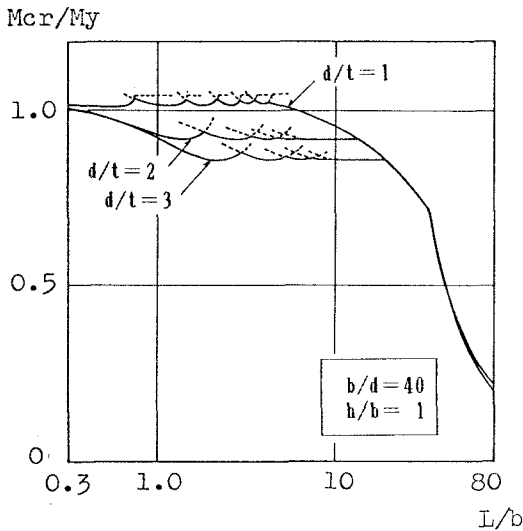


図-11 圧延 I 形鋼ばりの座屈曲線 (IV)

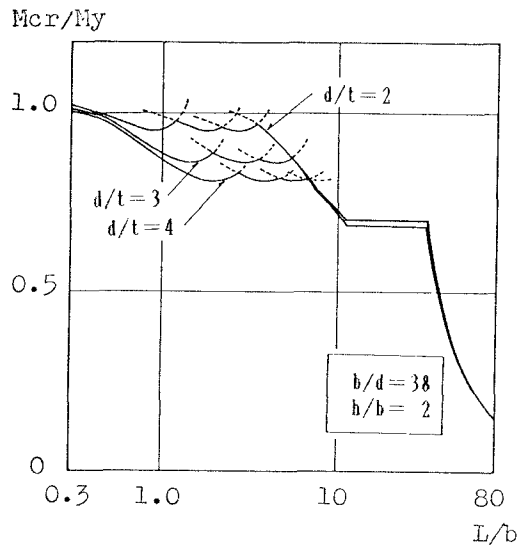


図-12 溶接 I 形プレートガーダーの座屈曲線 (IV)

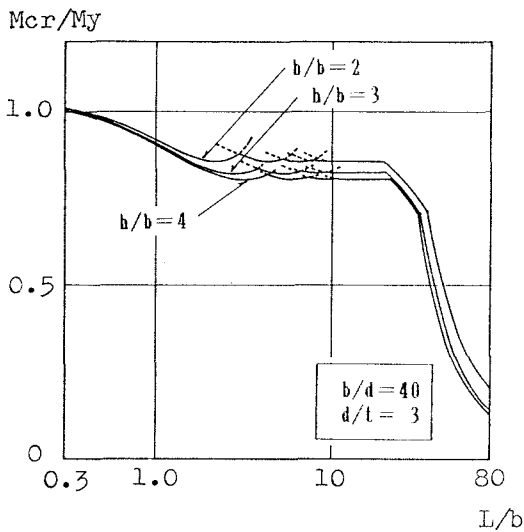


図-13 圧延 I 形鋼ばりの座屈曲線 (V)

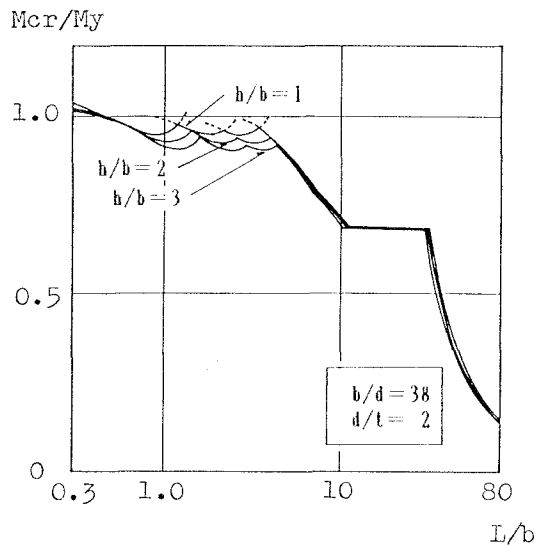


図-14 溶接 I 形プレートガーダーの座屈曲線 (V)

5. ま と め

本報告は、鋼構造物の終局耐力の評価方法の確立の一環として、断面変形を伴う I 形断面材の曲げねじれ座屈に関する著者らの前研究¹³⁾を進展させ、主として I 形ばりの弾塑性横倒れ座屈におけるウェブの変形の影響を解析し、その力学的特性を明らかにしたものである。ここでの解析は、一次元の棒理論による簡便な形の支配方程式に基づき、圧延 I 形鋼ばりおよび溶接 I 形プレートガーダーの 2 種類を想定して行った。両者にそれぞれ対応する残留応力分布の考慮のもとに、降伏領域の決定、有効断面による断面定数の算定等を経て、ウェブの変形を考慮した弾塑性横倒れ座屈荷重を決定する手順を示した。

数値計算は、単純支持の2軸対称I形断面ばりが一定曲げモーメントを受ける場合について、はりの長さL、フランジ幅b、フランジ厚d、ウェブ高さh、ウェブ厚tに関する無次元パラメータ L/b 、 b/d 、 d/t 、 h/b を変化させて行い、計算結果はいわゆる座屈曲線にまとめて、座屈特性の把握につとめた。その結果、圧延I形鋼ばりおよび溶接I形プレートガーダーの弾塑性横倒れ座屈におけるウェブの変形の影響特性について、次の諸点が明らかになった。

(1) $b/d \leq 37$ の範囲では、圧延および溶接の場合とも、ウェブの変形の影響はほとんど現れない。したがって、この場合にはウェブの変形を無視した解析で実用上充分といえる。

(2) $b/d > 37$ でかつ L/b が一定範囲内にある場合には、 b/d および d/t の値が大きいかほどウェブの変形による座屈荷重の低下の度合いが強まる。この傾向は圧延より溶接の場合の方が激しい。一方、 h/b の値の変化による影響は軽微である。

(3) ウェブの変形によって座屈荷重が低下をきたす L/b の範囲は、 b/d 、 d/t 、 h/b の値に応じて変化するが、弾性座屈の場合と同様に、その座屈時の断面変形モードは圧縮フランジのねじれが卓越するタイプである。 L/b のこの範囲では、2次以上の座屈も考慮する必要があるが、また、弾性座屈荷重が弾塑性荷重を下まわり最小座屈荷重となる場合もありうる。

参 考 文 献

- 1) Johnson, C.P. and Will, K.M. : Beam buckling of finite element procedure, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.100, No.ST3, pp.669~683, 1974.
- 2) Hancock, G.J., Bradford, M.A. and Trahair, N.S. : Web distortion and flexural-torsional buckling, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.106, No.ST7, pp.1557 ~ 1571, 1980.
- 3) Bradford, M.A. and Trahair, N.S. : Distortional buckling of I-beams, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.107, No.ST2, pp.355~ 377, 1981.
- 4) 薄木征三、長谷部薫：二次の変位場理論に基づく薄肉断面ばりの局部および全体座屈解析，土木学会論文報告集，第 344号/I-1，pp.357~366, 1984.
- 5) Usuki, S. and Hasebe, K. : Effects of pre-buckling deflections on local, distortional and lateral-torsional buckling of I-beams, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.2, No.2, pp.467s~479s, 1985.
- 6) 彦坂照、高海克彦、丸山義一：薄肉開断面部材の断面変形を考慮した有限変位理論と弾性安定問題への応用，構造工学論文集，Vol.32A, pp.265~275, 1986.
- 7) 福本嘯士、伊藤義則：フランジの局部座屈強度とフランジ幅厚比制限，土木学会論文集，第 160号，pp.27~38, 1968.
- 8) Rajasekaran, S. and Murry, D.W. : Coupled local buckling of wide-flange beam-column, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.99, No.ST6, pp.1003~1023, 1973.
- 9) 三上市蔵、赤松洋一、武田八郎：純曲げを受ける薄肉I断面曲がり桁の局部座屈と連成座屈，土木学会論文報告集，第 230号，pp.45~54, 1974.
- 10) 吉田博：H型鋼柱の局部座屈と曲げ座屈の連成座屈強度，土木学会論文報告集，第 243号，pp.19 ~ 32, 1975.
- 11) Hancock, G.J. : Local, distortional, lateral buckling of I-beams, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.104, No.ST11, pp.1787~1798, 1978.
- 12) Hancock, G.J. : Interaction buckling in I-section columns, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.107, No.ST1, pp.166~179, 1981.

- 13) 深沢泰晴, 杉原美好: I 形ばりの弾性横座屈に及ぼすウェブの変形の影響, 構造工学論文集, Vol.31A, pp.15~23, 1985.
- 14) Neal, B.G. : The lateral instability of yeilded mild steel beams of rectangular cross-section, Philosophical Transaction, Royal Soc. of London, Vol.212(A), 1950.
- 15) 吉田博: プレートガーダーの非弾性横倒れ座屈強度, 土木学会論文報告集, 第 220号, pp.1~8, 1973.
- 16) Nishino, F., Tall, L. and Okumura, T. : Residual stress and torsional buckling strength of H and cruciform columns, Trans. of JSCE, No.160, pp.75~87, 1968.

(1986年10月16日受付)