

I 形ばりの弾性横座屈に及ぼすウェブの変形の影響

THE EFFECTS OF WEB DISTORSION ON LATERAL ELASTIC BUCKLING OF I-BEAMS

深沢泰晴* 杉原美好**

By Yasuharu FUKASAWA and Miyoshi SUGIHARA

An approximate analysis is presented of the effects of web distortion on elastic lateral buckling of I-beams. By extending the general instability theory formulated by Vlasov for thin-walled beams to flexural-torsional buckling of I-beams with flexible web, a system of differential equations governing the problem is derived. The effects of web distortion on elastic lateral buckling of simply supported beams with doubly symmetric I-section in uniform bending about major axis, are analyzed on the basis of the proposed equation, and are numerically demonstrated in comparison with the results calculated for I-beams with rigid cross section and results obtained by other authors. The effect of initial residual stress with two patterns for as-rolled and as-welded sections is also investigated.

1. はじめに

本来はねじりに弱い I 形断面材でも、近年の構造物の複雑化にともない、ねじり部材として機能することを余儀なくされる場合が多くなってきた。曲線プレートガーダーや斜角支持のプレートガーダーはその代表的な例といえよう。また、曲げ部材や圧縮部材として用いられる場合であっても、ねじれ座屈との関連で、そのねじれ強度が重要な意味をもってくることも少なくない。ねじりを受けるこのような I 形断面材の耐荷性能の評価に際しては、通常の解析では無視されているウェブの面外への曲げ変形の影響を正確に把握しておくことが必要である。

この種の問題については、まず反りねじれ問題が Goodier と Barton¹⁾ によって扱われ、ウェブの変形を考慮することにより実質的なねじり抵抗の減少が生ずることが示された。その後、奥村²⁾ならびに加藤³⁾の両者は、ほとんど同一の理論展開のもとに、一定曲げモーメントを受ける I 形断面ばりの横倒れ座屈強度に及ぼすウェブの面外への曲げ変形の影響を解析し、フランジの板厚に対するフランジ幅の比が一定値を越えると座屈強度が急激に低下することを示した。この結論は、その後の我が国のプレートガーダーの設計理念に少なからぬ影響を与えてきているように思われる。

近年になって、有限要素法や有限帯板法を用いて、この種の問題が解析されるようになった。すなわち、Hancock⁴⁾ は、有限帯板法によって、曲げを受ける I 形ばりの局部座屈と全体座屈の連成関係を論じた。さらに、Hancock, Bradford, Trahair 等^{5), 6)} は、断面変形を考慮した I 形ばりの曲げねじれ座屈問題に対して、エネルギー原理により一次元の有限要素法による定式化をおこない、各種の境界条件の差異の影響をも検討している。薄木と長谷部⁷⁾ は、二次理論に基づく変位場の設定から出発し、その支配方程式を求めている。

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

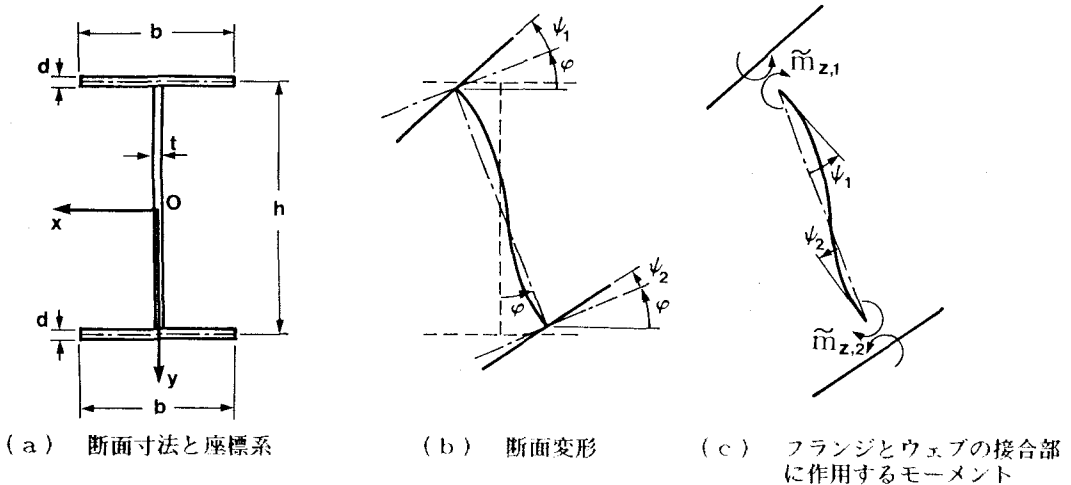
** 工修 山梨大学助手 工学部土木工学科 (同 上)

る。数値計算では、有限帯板法の結果との対比をおこない、また座屈前のたわみ変形の影響も明らかにしている。

本研究においては、まず軸力ならびに強軸まわりの曲げを受ける２軸対称のＩ形断面ばりについて、ウェブの変形を考慮した横倒れ座屈の支配方程式を、慣用の薄肉ばり理論の拡張の形で誘導する。すなわち、慣用の薄肉ばり理論の仮定の一つである断面形不変の仮定をウェブに対して解除した解析に基づき、横倒れ座屈変形にともなう換算付加荷重^{B)}の算出をおこない、それによってつり合い式を導こうとするものである。具体的な解析では、一定曲げモーメントを受ける単純支持ばりのウェブの変形を考慮した横倒れ弾性座屈について、その座屈特性を分析・解明するとともに、既往の各理論との比較検討もおこない、前述の奥村ならびに加藤の両論文の問題点を明らかにする。残留応力についても、圧延型および溶接型の２つの代表的分布形をとりあげ、ウェブの変形を考慮した場合の影響度合いを調べる。

2. 微小変位問題の支配方程式

ここでの解析の対象は、図－１（ａ）に示すような２軸対称のＩ形断面のはりとする。座標系としては、はりの断面の図心Ｏを原点とし、断面の主軸と一致する x 、 y 軸と、はりを構成する母線に平行な z 軸とからなる右手直交座標系（ $O-x, y, z$ ）を用いる。



図－１ 座標系、断面変形

断面形を不変とした場合のこのはりの変位表示のつり合い式は、慣用の薄肉ばり理論によって次のように与えられる。

$$E I_{xx} u'''' - q_x = 0 \quad , \quad E I_{yy} v'''' - q_y = 0 \quad (1a, b)$$

$$E I_{\omega\omega} \varphi'''' - G J_s \varphi'' - m_z = 0 \quad (1c)$$

ここに、 u 、 v および φ は、それぞれ断面の図心 O の x 、 y 軸方向変位および断面のねじれ角であり、 q_x 、 q_y および m_z は、それぞれはりの単位長さあたりに作用する x 、 y 方向荷重およびねじりモーメント荷重である。また、 $E I_{xx}$ 、 $E I_{yy}$ 、 $E I_{\omega\omega}$ 、および $G J_s$ は、それぞれはりの y 、 x 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。（ $'$ ）は、 $d(\quad)/dz$ の意である。

さて、図－１（b）のように、ウェブの変形を許し、それにもなつて上、下フランジがそれぞれ ψ_1 、 ψ_2 だけさらにねじれた場合の力のつり合い式を求める。

まず、断面全体に対するつり合い式としては、式（1c）に上、下各フランジの付加的ねじれ角 ψ_1 、

ψ_2 による分を加えた形の次式が得られる。

$$E I_{\omega\omega} \varphi'''' - G J_s \varphi'' + E I_{\omega\omega}^f (\psi_1 + \psi_2)'''' - G J_s^f (\psi_1 + \psi_2)'' - m_z = 0 \quad (2)$$

ここに、 $E I_{\omega\omega}^f$ および $G J_s^f$ はフランジ一枚分の反り剛性および St. Venant のねじり剛性である。

次に、図-1(c)に示すように、ウェブと上、下フランジの間で授受される内力としてのモーメントをはりの単位長さあたりそれぞれ $\tilde{m}_{z,1}$, $\tilde{m}_{z,2}$ とすると、これらはたわみ角法の基本式と同様に、

$$\tilde{m}_{z,1} = -\frac{2E I_w}{h} (2\psi_1 + \psi_2), \quad \tilde{m}_{z,2} = -\frac{2E I_w}{h} (\psi_1 + 2\psi_2) \quad (3a, b)$$

と表される。ここに、 $E I_w (= E t^3/12)$ はウェブの単位幅あたりの曲げ剛性であり、 h は上、下両フランジの間隔である (図-1(a))。さて、上、下各フランジに対するつり合い式は、両フランジにそれぞれ式(1a, c)を適用し、さらに式(3a, b)を荷重として考慮することによって、次のように得られる。

$$E I_{\omega\omega}^f (\varphi + \psi_1)'''' - G J_s^f (\varphi + \psi_1)'' + \frac{2E I_w}{h} (2\psi_1 + \psi_2) - m_{z,1} = 0 \quad (4a)$$

$$E I_{\omega\omega}^f (\varphi + \psi_2)'''' - G J_s^f (\varphi + \psi_2)'' + \frac{2E I_w}{h} (\psi_1 + 2\psi_2) - m_{z,2} = 0 \quad (4b)$$

ここに、 $m_{z,1}$, $m_{z,2}$ はそれぞれ上、下各フランジに作用するねじりモーメント荷重である。

ウェブの変形を考慮した場合、式(1c)に代わって、式(2)および式(4a, b)がねじれに関する支配方程式となる。これらの式において、 $E I_{\omega\omega}^f = 0$ とおけば、Goodier と Barton¹⁾ の式と一致する。後述するように、圧縮側フランジのねじれ変形が卓越する横座屈の場合には、このようなフランジの反り剛性の影響が無視できないほど (図-4, 5 参照) なので、ここでは、 $E I_{\omega\omega}^f$ の項を考慮することにした。

3. 横倒れ座屈の支配方程式

y 軸に関して対称な薄肉断面ばりの横倒れ座屈問題においては、断面形不変の場合、座屈変形にともなうて生ずる、いわゆる換算付加荷重は次式で与えられる。

$$q_x = \{ N^{(0)} (u + y_s \varphi)' \}' - (M_y^{(0)} \varphi)'' \quad (5a)$$

$$m_z = y_s (N^{(0)} u')' - M_y^{(0)} u'' + (K^{(0)} \varphi')' - q_y^{(0)} y_c \varphi \quad (5b)$$

ここに、 q_x および m_z は、それぞれ x 軸方向の換算付加荷重および換算付加ねじりモーメント荷重である。 $N^{(0)}$ 、 $M_y^{(0)}$ および $q_y^{(0)}$ は、それぞれ座屈変形前の状態で作用している軸力、 x 軸まわりの曲げモーメントおよび y 軸方向荷重を表す。 y_s および y_c は、せん断中心および $q_y^{(0)}$ の作用点の y 座標である。さらに、 $K^{(0)}$ は次式で表される。

$$K^{(0)} = \int_A \left(\frac{N^{(0)}}{A} + \frac{M_y^{(0)}}{I} y \right) (x^2 + y^2) dA \quad (6)$$

ここに、 A ははりの断面積である。

さて、2軸対称の I 形ばり ($y_s = 0$) のウェブの変形を考慮した場合について、横倒れ座屈変形にともなうて生ずる換算付加荷重を求める。まず、 q_x については式(5a)がそのままあてはまる。換算付加ねじりモーメント荷重は、式(5b)に対応して解析すると、断面全体に対するものは、

$$m_z = -M_y^{(0)} u'' + (K^{(0)} \varphi' + K_1^{(0)} \psi_1' + K_2^{(0)} \psi_2')' - q_y^{(0)} y_c \varphi \quad (7a)$$

となり、また上、下各フランジに対するものは、次のように得られる。

$$m_{z,1} = |K_1^{(0)} (\varphi + \psi_1)'|', \quad m_{z,2} = |K_2^{(0)} (\varphi + \psi_2)'|' \quad (7b, c)$$

式(7a~c)における $K^{(0)}$, $K_1^{(0)}$, $K_2^{(0)}$ は、それぞれ次式で表される。

$$K^{(0)} = r^2 N^{(0)}, \quad K_1^{(0)} = \bar{r}_f^2 N^{(0)} - \beta_y M_y^{(0)}, \quad K_2^{(0)} = \bar{r}_f^2 N^{(0)} + \beta_y M_y^{(0)} \quad (8a \sim c)$$

ここに、

$$r^2 = \frac{1}{A} \int_A (x^2 + y^2) dA \quad (9a)$$

$$\bar{r}_f^2 = \frac{1}{A} \int_{A_1} (x^2 + y^2) dA = \frac{1}{A} \int_{A_2} (x^2 + y^2) dA \quad (9b)$$

$$\beta_y = -\frac{1}{I_{yy}} \int_{A_1} x^2 y dA = \frac{1}{I_{yy}} \int_{A_2} x^2 y dA \quad (9c)$$

さらに、 A_1 , A_2 はそれぞれ上, 下各フランジの断面積である。

結局、ウェブの変形を考慮した2軸対称のI形ばりの横倒れ座屈の支配方程式は、式(2)および式(4a, b)の荷重項を、式(5a)および式(7a~c)で置き換え、さらに式(8a~c)を考慮することによって、次式のように求められる。

$$E I_{xx} u'''' - \{N^{(0)}(u + y_s \varphi)\}' + (M_y^{(0)} \varphi)'' = 0 \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} E I_{\omega\omega} \varphi'''' - G J_s \varphi'' + E I_{\omega\omega}^{(f)} (\psi_1 + \psi_2)'''' - G J_s^{(f)} (\psi_1 + \psi_2)'' \\ + M_y^{(0)} u'' - \{r^2 N^{(0)} \varphi'\} + (\bar{r}_f^2 N^{(0)} - \beta_y M_y^{(0)}) \psi_1' \\ + (\bar{r}_f^2 N^{(0)} + \beta_y M_y^{(0)}) \psi_2' + q_y^{(0)} y_c \varphi = 0 \end{aligned} \quad (10b)$$

$$\begin{aligned} E I_{\omega\omega}^{(f)} (\varphi + \psi_1)'''' - G J_s^{(f)} (\varphi + \psi_1)'' + \frac{2 E I_w}{h} (2 \psi_1 + \psi_2) \\ - \{\bar{r}_f^2 N^{(0)} - \beta_y M_y^{(0)} (\varphi + \psi_1)'\}' = 0 \end{aligned} \quad (10c)$$

$$\begin{aligned} E I_{\omega\omega}^{(f)} (\varphi + \psi_2)'''' - G J_s^{(f)} (\varphi + \psi_2)'' + \frac{2 E I_w}{h} (\psi_1 + 2 \psi_2) \\ - \{\bar{r}_f^2 N^{(0)} + \beta_y M_y^{(0)} (\varphi + \psi_2)'\}' = 0 \end{aligned} \quad (10d)$$

4. 純曲げによる横倒れ座屈荷重

スパン L で単純支持され、一定曲げモーメント $\bar{M}_y$ を受ける2軸対称のI形ばりについて、ウェブの変形を考慮した横倒れ弾性座屈荷重を定める。

この場合には、まず次式が成り立つ。

$$q_y^{(0)} = N^{(0)} = 0, \quad M_y^{(0)} = \bar{M}_y \quad (11a, b)$$

したがって、座屈変形の支配方程式は、式(10a~d)に式(11a, b)を代入して、次のように得られる。

$$E I_{xx} u'''' + \bar{M}_y \varphi'' = 0 \quad (12a)$$

$$\begin{aligned} \bar{M}_y u'' + E I_{\omega\omega} \varphi'''' - G J_s \varphi'' + E I_{\omega\omega}^{(f)} (\psi_1 + \psi_2)'''' \\ - (G J_s^{(f)} - \beta_y \bar{M}_y) \psi_1'' - (G J_s^{(f)} + \beta_y \bar{M}_y) \psi_2'' = 0 \end{aligned} \quad (12b)$$

$$\begin{aligned} E I_{\omega\omega}^{(f)} (\varphi + \psi_1)'''' - (G J_s^{(f)} - \beta_y \bar{M}_y) (\varphi + \psi_1)'' \\ + \frac{2 E I_w}{h} (2 \psi_1 + \psi_2) = 0 \end{aligned} \quad (12c)$$

$$\begin{aligned} E I_{\omega\omega}^{(f)} (\varphi + \psi_2)'''' - (G J_s^{(f)} + \beta_y \bar{M}_y) (\varphi + \psi_2)'' \\ + \frac{2 E I_w}{h} (\psi_1 + 2 \psi_2) = 0 \end{aligned} \quad (12d)$$

また、境界条件としては、次式が成り立つ場合を考える。

$$z=0, z=L \quad ; \quad u=u''=\varphi=\varphi''=\psi_1=\psi_1''=\psi_2=\psi_2''=0 \quad (13)$$

座屈形は、 C_i ($i=1, 2, 3, 4$) を任意定数として、

$$[u \quad \varphi \quad \psi_1 \quad \psi_2]^T = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4]^T \sin \frac{\pi}{L} z \quad (14)$$

と表すことができるので、これを式(12 a～d)に代入し、最終的には座屈値 $\bar{M}_y$ を定める固有値方程式が次のように得られる。

$$\begin{vmatrix} E I_{xx} \frac{\pi^2}{L^2} - \bar{M}_y & 0 & 0 \\ E I_{\omega\omega} \frac{\pi^2}{L^2} + G J_s & E I_{\omega\omega} \frac{\pi^2}{L^2} + G J_s - \beta_y \bar{M}_y & E I_{\omega\omega} \frac{\pi^2}{L^2} + G J_s + \beta_y \bar{M}_y \\ E I_{\omega\omega} \frac{\pi^2}{L^2} + G J_s - \beta_y \bar{M}_y + \frac{4 E I_w L^2}{h \pi^2} & \frac{2 E I_w L^2}{h \pi^2} \\ \text{SYM.} & E I_{\omega\omega} \frac{\pi^2}{L^2} + G J_s + \beta_y \bar{M}_y + \frac{4 E I_w L^2}{h \pi^2} \end{vmatrix} = 0 \quad (15)$$

式(15)で表される行列式は、 $\bar{M}_y$ に対して2つの実数根を与える。両者のうちで小さい値が最小座屈値であり、これに対応する座屈変形を1次モード、他を2次モードと呼ぶことにする。

5. 数値計算結果と考察

(1) 座屈特性および従来の理論との比較

一定曲げモーメントを受ける単純ばりの横倒れ座屈について、式(15)より求めた値と、奥村²⁾ならびに加藤³⁾による値、さらに断面形不变の場合の値との比較の一例を図-2に示す。縦軸の M_{cr} は $\bar{M}_y$ の座屈値であり、断面寸法に関するパラメータの値は図中に示したとおりである。また、 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$, $G = 8.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とした。1次モードの座屈値は、フランジの板厚に対するフランジ幅の比(b/d)がある値(この場合は約27)までは断面形不变の場合と断面変形を考慮した場合とではほとんど差がないが、 b/d がこの値を越えると両者の差は急激に拡大することがわかる。

奥村ならびに加藤による座屈荷重は、本解析の結果よりもかなり小さい値をとり、また b/d がある値を越えて大きくなると急激に低下し、やがては零となる。座屈荷重が零となることは明らかに不合理である。それらの原因としては、定式過程において、①逆対称変形($\psi_1 = \psi_2$)を仮定しているが、上、下フランジでは応力状

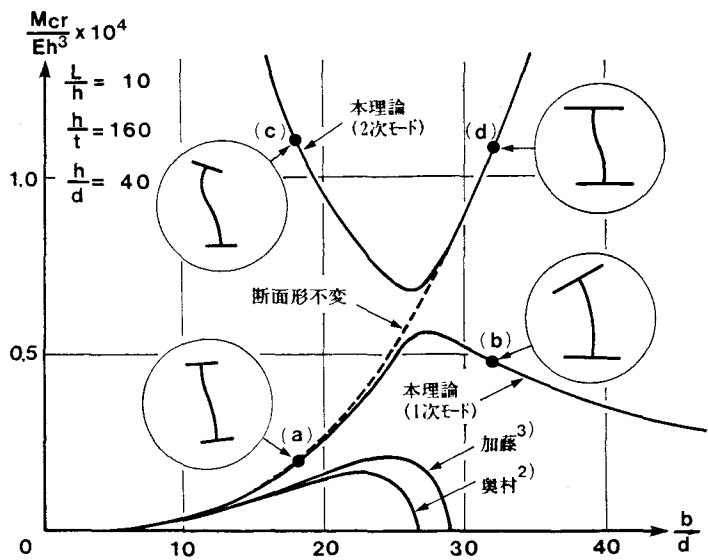


図-2 横倒れ座屈荷重の各理論による比較

態が異なり、この仮定はあてはまらない、②符号の取り扱いに問題がある、③座屈変形にともなう生ずる換算付加荷重の評価に問題がある、などが複合したためである。

一方、本研究による結果としては1次モードと2次モードの二つの座屈値を示したが、1次モードでは b/d がある値を越えて大きくなると b/d の増大につれて緩やかな低下を示す。なお、図中には代表的な断面変形として(a)、(b)、(c)、(d)点での断面変形を示した。(a)、(d)点ではウェブは逆対称に近い形に変形し、圧縮側フランジの横曲げが卓越しているが、(b)、(c)点では非対称に変形し、ともに圧縮側フランジのねじれが卓越していることがわかる。

図-3は、ウェブの板厚 $t=0$ としたときの座屈モーメント- b/d 曲線である。図-2において1次モードと2次モードを表している二つの曲線は、図-3においてはC点でつながり、曲線DCBは圧縮側フランジの単独のねじれ座屈値 P_{cr} とけた高 h の積 $P_{cr} \cdot h$ に一致する。このことから、図-2の1次モードにおいて b/d の増大とともに横倒れ座屈値が低下する原因は、圧縮側フランジのねじれ座屈によるものであることがわかる。これは、図-2中に示した(b)点の断面変形からもうかがえることである。

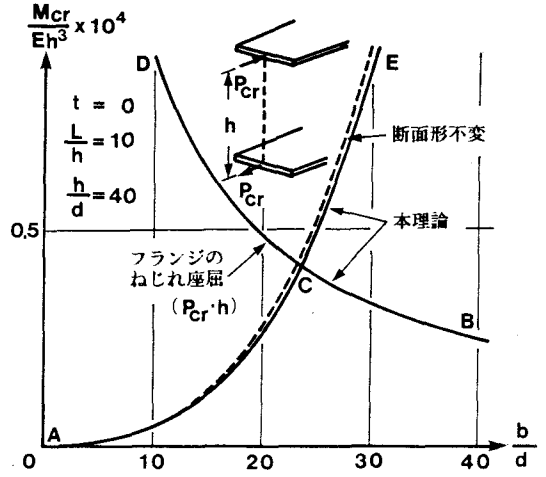


図-3 ウェブの板厚 $t=0$ のときの横倒れ座屈荷重- b/d 曲線

次に、本解析の有効性と適用範囲を確認するために、式(15)による計算値と Hancock⁴⁾の有限帯板法による結果とを比較したのが図-4および図-5である。両対数グラフに書かれた両図の縦軸の σ_{cr} は、 M_{cr} に対応する緑応力を表している。図-4に示される代表的な二つの断面(a)および(b)については両解析結果はほぼ合致しているといえよう(薄木と長谷部⁷⁾による値も、本解析結果と非常によく似た傾向を示している)。しかしながら、断面(b)に比べて h/t が2倍である図-5の断面(c)の場合には、

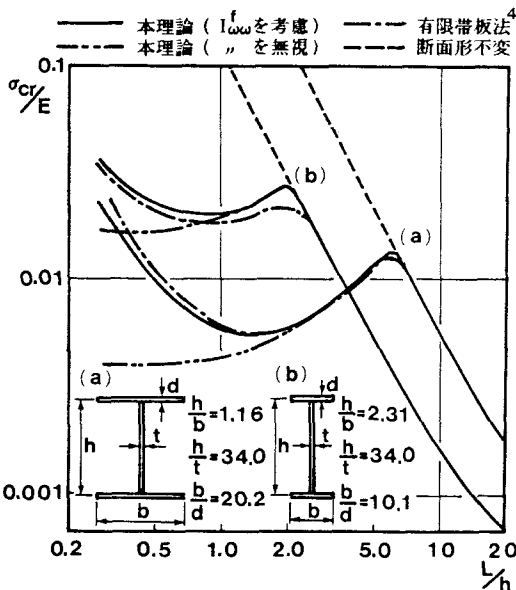


図-4 有限帯板法による値との比較(その1)

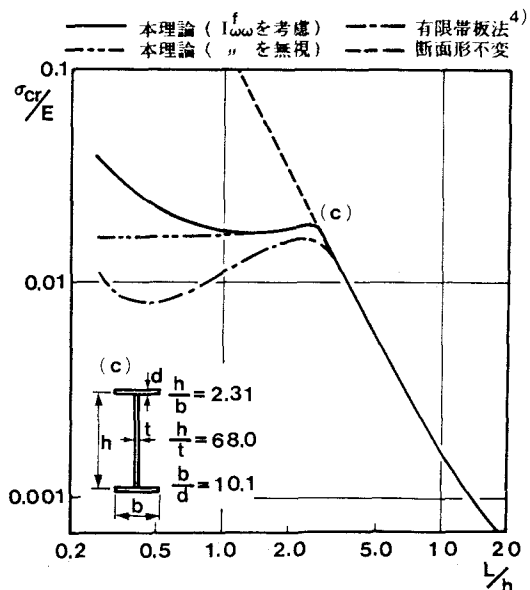


図-5 有限帯板法による値との比較(その2)

L/h が2以下の範囲では、両解析結果にかなりの開きがみられる。これは本解析では考慮されていないウェブの局部座屈の影響と推測される。したがって、このようなはりの場合には、本解析はその有効性を失うので、ウェブの局部座屈に対して別途配慮する必要がある。

(2) 断面寸法と座屈モーメントの関係

横倒れ座屈モーメントと断面寸法との関係を調べた結果を図-6～図-8に示す。いずれも縦軸は横倒れ座屈モーメント、横軸はけた高に対するフランジ幅の比 (b/h) である。図-6は、けた高に対するウェブの板厚の比 (t/h) をパラメータとして、1/75, 1/100, 1/150と変化させた場合である。ウェブの板厚

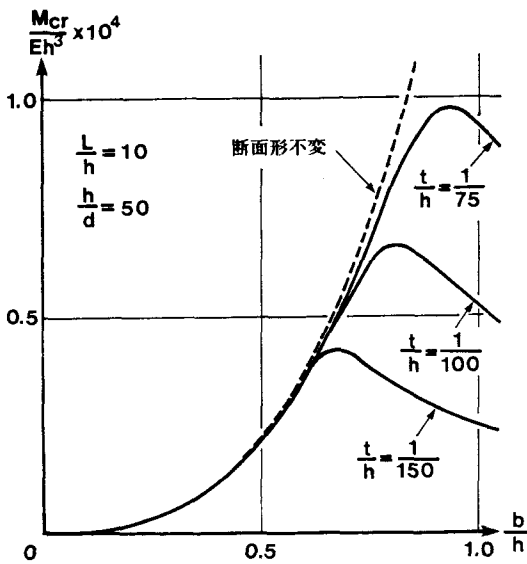


図-6 ウェブの板厚と座屈モーメントの関係

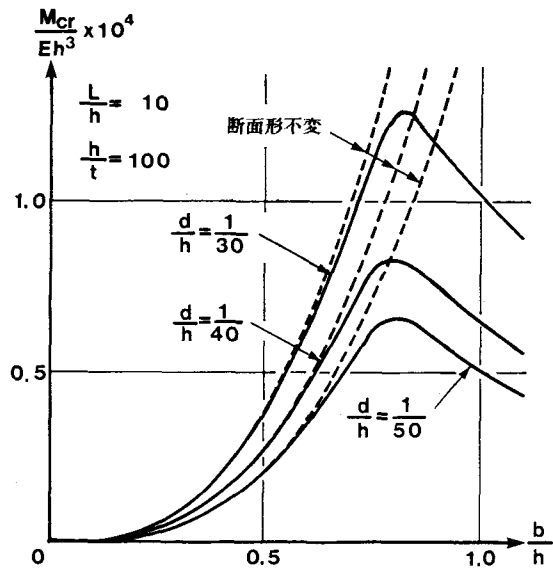


図-7 フランジの板厚と座屈モーメントの関係

が小さい断面ほど b/h の小さい値で極大値を示し、各極大値の差も大きいことがわかる。

図-7は、けた高に対するフランジの板厚の比 (d/h) を1/50, 1/40, 1/30と変化させた場合であるが、極大値の生ずる b/h の値はいずれもほぼ同じである。図-8は、けた高に対するスパンの比 (L/h) を7, 10, 13と変化させたものである。けた高を一定とした場合、スパンが短くなるとフランジ幅の小さい断面でも圧縮側フランジのねじり座屈が発生するようになるが、極大値の大きさはスパンに関係なくほぼ一定であることを示している。これらのことは、スパンの短いはりではねじれ座屈が支配的であること、はりのねじり座屈値はスパンに無関係であること、などからも予想されることである。

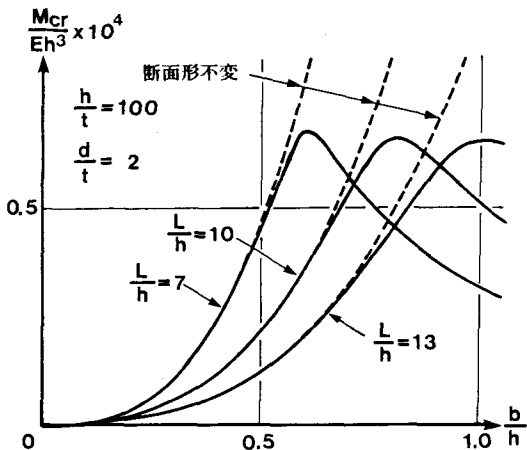


図-8 スパンと座屈モーメントの関係

(3) 残留応力の影響

ここでは、図-9に示すような圧延I型鋼と溶接I型鋼に相当する2種類の残留応力分布モデル⁹⁾について検討する。これらの残留応力分布は、その自己つり合い条件を考えることにより、断面全体、上、下各フランジのそれぞれに対して次のような断面力を生ずる。

$$K_r = \int_A \sigma_r (x^2 + y^2) dA, \quad K_{r,1} = \int_{A_1} (\sigma_r x^2) dA \quad (16a, b)$$

$$K_{r,2} = \int_{A_2} (\sigma_r x^2) dA \quad (16c)$$

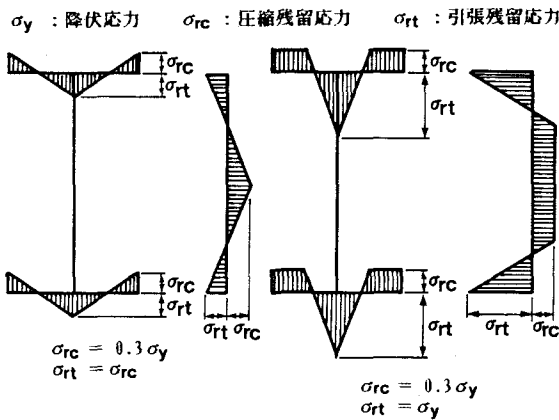
ここに、 σ_r はz軸方向の残留応力である。式(16a~c)を考慮することにより、式(8a~c)は次のようになる。

$$K^{(0)} = r^2 N^{(0)} + K_r, \quad K_1^{(0)} = \bar{r}_1^2 N^{(0)} - \beta_y M_y^{(0)} + K_{r,1} \quad (17a, b)$$

$$K_2^{(0)} = \bar{r}_2^2 N^{(0)} + \beta_y M_y^{(0)} + K_{r,2} \quad (17c)$$

式(8a~c)の代わりに式(17a~c)を用い、4.と同様な解析によって、ウェブの変形と残留応力の両方を考慮した横倒れ座屈荷重を求めることができる。

残留応力を無視した場合、圧延型および溶接型の残留応力分布をそれぞれ考慮した場合についての数値計算の一例を図-10に示す。断面形不変の場合ならびに圧縮側フランジの横曲げ座屈の範囲(b/h が M_{cr} のピークのときの値よりも小さい範囲)では、残留応力の影響はほとんど生じないが、フランジのねじり座屈に支配される範囲(b/h が M_{cr} のピークのときの値より大きい範囲)では残留応力の影響が現れ、座屈値の低下を示している。また、低下の割合は、溶接I型鋼の場合のほうが大きく、フランジ幅が大きくなるにつれて増大し、 $b/h = 1$ の断面では約20%の低下を示している。



(a) 圧延I型鋼 (b) 溶接I型鋼

図-9 残留応力の分布モデル

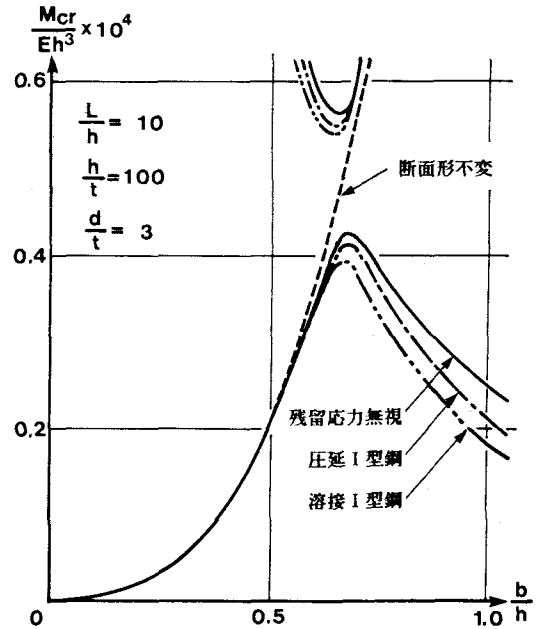


図-10 残留応力の影響

6. まとめ

本研究は、薄肉ばり構造の終局耐力の評価の一環として、ウェブの変形を考慮したI形断面ばりの主として横倒れ座屈問題について、その解析過程の定式化と、力学的特性の解明をおこなったものである。

まず、慣用の薄肉ばり理論を比較的簡明な形で拡張することによって、ウェブの面外への曲げ変形をとまなう2軸対称のI形ばりのねじり問題ならびに横倒れ座屈問題の支配方程式を誘導した。ここでの解析上の

仮定は、慣用の薄肉ばり理論の仮定のうち、断面形不変の仮定をウェブに対しては解除したことになる。次に、具体的な解析例として、一定曲げモーメントを受ける単純ばりを扱い、その横倒れ座屈モーメントの算定式を提示した。

解析結果に基づく数値計算によって、従来の理論との比較検討をおこなうとともに、座屈特性を分析した。その結果、次のことがわかった。①本解析結果の有効性と適用範囲が Hancock⁴⁾ の有限帯板法の結果との比較によって確認でき、本解析結果とは大きく異なる結果を与えている奥村²⁾ ならびに加藤³⁾ の研究には、その定式過程に本質的な問題がある。②最小座屈値に対応する断面変形モードは、I 形ばりの寸法との関連で 2 種類に大別される。一つは、上、下逆対称に近い断面変形モードであり、圧縮側フランジの横曲げ変形が卓越する座屈に対応するものである。もう一つは、上、下非対称の断面変形モードであり、圧縮側フランジのねじれ座屈に対応するものである。③ウェブの変形による座屈モーメントの低下は、前者のモードで座屈するはりではほとんどみられないが、後者のモードで座屈するはりでは大きな値に達する場合もあり、その低下傾向は、スパンが短いほど、フランジ幅が大きいほど、ウェブ厚が小さいほど顕著である。④さらに、後者の座屈では、残留応力によっても座屈荷重の低下がみられ、その低下の度合いは圧延 I 形鋼より溶接 I 形鋼の方が大きい。

参 考 文 献

- 1) Goodier, J. N. and Barton, M. V. : The Effects of Web Deformation on the Torsion of I-Beams, Journal of Applied Mechanics, vol.11, pp.A-35~40, 1944.
- 2) 奥村敏恵：溶接組立材の座屈に関する研究（第一報），溶接学会誌，第21巻10号，pp.276~283，1952.
- 3) 仲威雄，加藤勉，藤本盛久，菅野誠：座屈論，建築学大系12，pp.143~180，彰国社，1974.
- 4) Hancock, G. J. : Local, Distorsional, and Lateral Buckling of I-Beams, Journal of the Structural Division, ASCE, vol.104, No.ST11, pp.1787~1798, 1978.
- 5) Bradford, M. A. and Trahair, N. S. : Distorsional Buckling of I-Beams, Journal of the Structural Division, ASCE, vol.107, No.ST2, pp.355~377, 1981.
- 6) 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.
- 7) 薄木征三，長谷部薫：二次の有限変位理論に基づく薄肉断面ばりの局部座屈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.
- 8) Vlasov, V. Z. （奥村敏恵他共訳）：薄肉弾性ばりの理論，pp.207~214，技報堂，1967.
- 9) 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.
- 10) 西田進，星名博文：溶接組立断面部材の残留応力推定とその自己つり合い条件式，土木学会論文報告集，第 340号，pp.209~212，1983.
- 11) 杉原美好，深沢泰晴：ウェブの曲げ変形を伴う I 形プレートガーダーの横座屈後挙動（第2報），土木学会第38回年次学術講演会概要集，第 I 部，pp.197~198，1983.
- 12) 杉原美好，深沢泰晴：ウェブの曲げ変形を伴う I 形ばりの弾塑性座屈，土木学会第39回年次学術講演会概要集，第 I 部，pp.65 ~ 66，1984.