

[-49]

断面変形を伴うI形ばりの横倒れ座屈における鉛直補剛材の効果について

山梨大学工学部 正 員 岡村 美好

山梨大学工学部 正 員 深沢 泰晴

1. は じ め に 著者らはこれまでに、薄肉鋼部材の終局耐力の評価の一環として、2軸対称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解析を行い^{2),3)} その座屈特性および断面変形の与える影響を明らかにしてきた。

ここでは、より汎用的な解析を行うため、不等フランジを持つI形ばりについてウェブの変形を考慮した有限変位場を求め、仮想仕事の原理¹⁾を用いて線形化した有限変位における剛性方程式を誘導し、有限要素法による座屈荷重の算定を行った。また、ウェブの変形を拘束することにより、断面変形を考慮したI形ばりの横倒れ座屈に与える鉛直補剛材の効果についても検討した。

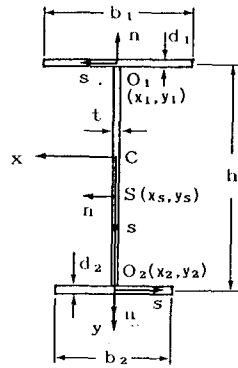


図-1 座標形

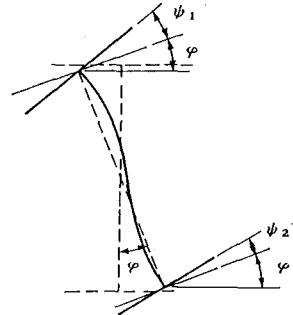


図-2 断面変形

2. 有限変位場 図-1のような不等フランジを持つI形ばりが図-2のような断面変形を生じる場合、せん断中心Sのx, y軸方向変位を u_s, v_s 、図心Oのz軸方向変位を w_c とすれば、通常の薄肉ばりに対する仮定を拡張することにより、任意点のx, y, z軸方向の変位成分は次のように求められる

$$u = u_s - (y - y_s) \varphi - \frac{1}{2} x \varphi^2 - \left\{ (y - y_1) + x \left(\varphi + \frac{1}{2} \phi_1 \right) \right\} \phi_1 \mu_1 \quad (1)a$$

$$v = v_s + x \varphi - \frac{1}{2} (y - y_s) \varphi^2 + \left\{ x - (y - y_1) \left(\varphi + \frac{1}{2} \phi_1 \right) \right\} \phi_1 \mu_1 \quad (1)b$$

$$w = w_c - x u_s' - y v_s' - \omega \varphi' - \theta_1 \phi_1' \mu_1 + (y u_s' - x v_s') (\varphi + \phi_1 \mu_1) - \kappa_1 \varphi' \phi_1 \mu_1 \quad (1)c$$

ここに、ウェブの変形は直線で近似し、3次以上の高次項は無視している。また

$$\begin{aligned} \omega &= \int_{s_c}^s \rho_n^* ds - n \rho_s, \quad \theta_1 = -n \lambda_{s1}, \quad \kappa_1 = \int_{s_c}^s (\rho_s^* - \lambda_{s1}^*) ds - n \rho_n^* \\ \rho_n &= x l + (y - y_s) m, \quad \rho_s = -x m + (y - y_s) l \\ \lambda_{n1} &= x l + (y - y_1) m, \quad \lambda_{s1} = -x m + (y - y_1) l \end{aligned} \quad \mu_i = \begin{cases} 1 & (i=1: \text{上フランジ}) \\ 1 & (i=2: \text{下フランジ}) \\ 0 & (i=3: \text{ウェブ}) \end{cases}$$

であり、肩添字の*印は薄肉中心線での値を表す。さらに、 l, m は次式で表される方向余弦である。

$$l = \cos(x, n), \quad m = \sin(y, s)$$

式(1)より非零のひずみ成分は次のように求められる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= w_c' + \frac{1}{2} \{ (u_s')^2 + (v_s')^2 \} + y_s u_s' \varphi' - x (u_s'' + v_s'' \varphi) - y (v_s'' - u_s'' \varphi) - \omega \varphi'' \\ &\quad + \frac{1}{2} \{ x^2 + (y - y_s)^2 \} \varphi'^2 - \theta_1 \phi_1'' \mu_1 + \frac{1}{2} \{ x^2 + (y - y_1)^2 \} \phi_1'^2 \mu_1 \\ &\quad + y_1 u_s' \phi_1' \mu_1 + (y u_s'' - x v_s'' - \kappa_1 \varphi'') \phi_1 \mu_1 + (\rho_s \lambda_{s1} + \rho_n \lambda_{n1} - \kappa_1) \varphi' \phi_1' \mu_1 \end{aligned} \quad (2)a$$

$$2\gamma_{sz} = 2n (\varphi' + \phi_1' \mu_1) \quad (2)b$$

また、ウェブの変形にともなう生じるひずみ成分は次式で与えられる。

$$\varepsilon_s = -n \dot{\alpha}_1 \phi_1 - n \dot{\alpha}_2 \phi_2 \quad (2)c$$

ここに、 $(\dot{}) = \partial()/\partial s$ であり、

$$\alpha_1 = -\frac{h}{8} \left\{ \left(\frac{2s}{h} \right)^3 - \left(\frac{2s}{h} \right)^2 - \left(\frac{2s}{h} \right) + 1 \right\}, \quad \alpha_2 = -\frac{h}{8} \left\{ \left(\frac{2s}{h} \right)^3 + \left(\frac{2s}{h} \right)^2 - \left(\frac{2s}{h} \right) - 1 \right\}$$

3. 有限要素法の適用 文献1) の手法を用いて、仮想仕事の原理に式(1)、(2)を代入することにより線形化有限変位場に基づく剛性方程式を求めることができる。曲げモーメント M が作用する場合の剛性方程式は次のように表すことができる。

$$[K_e + MK_G] \{d\} = \{F\} \quad (3)$$

ここに、 $\{F\}$ は荷重増分ベクトル、 $\{d\}$ は変位増分ベクトルであり

$$\{d\}^T = [u_i \ u'_i \ \varphi_i \ \varphi'_i \ \psi_{1i} \ \psi'_{1i} \ \psi_{2i} \ \psi'_{2i} \ u_j \ u'_j \ \varphi_j \ \varphi'_j \ \psi_{1j} \ \psi'_{1j} \ \psi_{2j} \ \psi'_{2j}] \quad (4)$$

式(3)の剛性マトリクスの固有値を算定することにより、ウェブの変形を伴うI形ばりの横倒れ座屈荷重を求めることができる。

4. 数値解析結果と考察 一定曲げモーメントが作用するI形ばりについて支持条件を変えたときの座屈モーメントとスパンの関係を図-3に示す。片持ちばり以外の支持条件では、圧縮フランジのねじれ座屈はほぼ値で生じ、スパンが長くなるとそれぞれ断面形不变の座屈曲線に沿ったものとなる。一方、片持ちばりでは、断面変形を考慮したことによる座屈モーメントの低下が特に顕著であり、座屈モーメントはスパンが長くなるのに伴って徐々に低下して断面形不变の曲線に近づく。

断面変形を考慮したI形ばりの横倒れ座屈強度に対する鉛直補剛材の効果について検討する。補剛された部材の解析は補剛材の曲げ剛性およびねじれ剛性をも考慮して行うべきであるが、ここでは簡単のために鉛直補剛材取り付け位置のウェブの変形を拘束することにより行った。すなわち、節点 i が補剛材の取り付け位置ならば、境界条件として次式を導入する。

$$\psi_{1i} = \psi_{2i} = 0 \quad (5)$$

等間隔に鉛直補剛材を配置した場合について、その間隔 a と座屈荷重の関係を図-4に示す。縦軸は補剛材を考慮したときの座屈荷重を無補剛のときの座屈荷重で除して無次元化してある。単純支持ばりでは補剛材間隔が変化しても座屈荷重はほとんど変化しないが、片持ちばりでは補剛材間隔が狭くなるに伴って座屈荷重は大きくなり、 $a/h = 0.5$ では補剛材のないときの2倍の強度となっている。

5. あとがき 断面変形を考慮したI形ばりの横倒れ座屈に対する鉛直補剛材の効果について一例を示したが、その他のものについては講演時に発表する予定である。

文献 (1) Hasegawa, Liyanage, Ikeda, and Nishino : Concise and Explicit Formulation of Out-of-plane Instability of Thin-walled Members, Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 2, No. 1, 1985.

(2) 深沢, 杉原 : 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, 1985.

(3) 深沢, 杉原 : 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, 構造工学論文集, Vol. 33A, 1987.

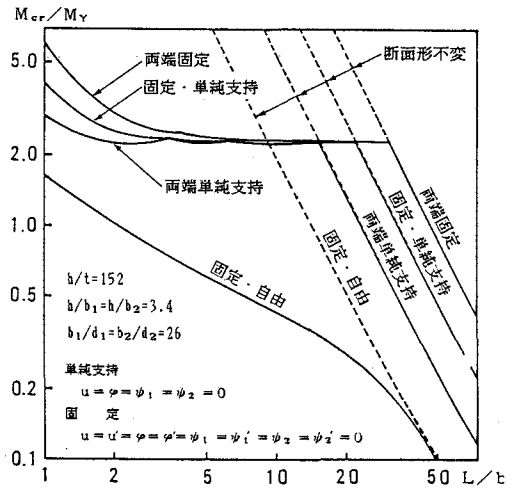


図-3 支持条件による座屈曲線の違い

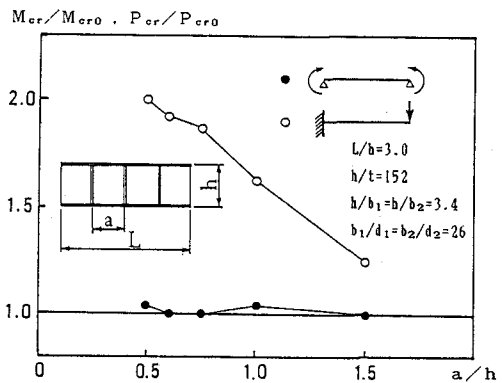


図-4 鉛直補剛材の影響