

(1-4) 不等フランジを持つ I 形ばりの曲げねじれ 耐力に及ぼす断面変形の影響

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 形断面材の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、線形化した有限変位に対する仮想仕事の原理¹⁾を用いて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。

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

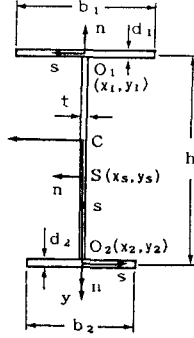


図-1 座標系

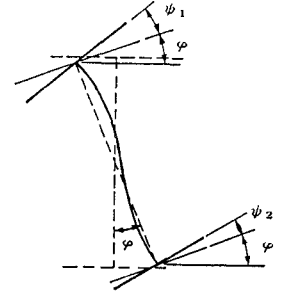


図-2 断面変形

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

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

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

ここに、ウェブは直線で近似し、3次以上の高次項は無視した。また

$$\omega = \int_{s_0}^s \rho_n^2 ds - n \rho_s, \quad \theta_1 = -n \lambda_{s1}, \quad \kappa_1 = \int_{s_0}^s (\rho_s^2 - \lambda_{s1}^2) ds - n \rho_n^*$$

$$\rho_n = x l + (y - y_s) m, \quad \rho_s = -x m + (y - y_s) l$$

$$\lambda_{n1} = x l + (y - y_1) m, \quad \lambda_{s1} = -x m + (y - y_1) l$$

$$\mu_1 = \begin{cases} 1 & (i=1: \text{上フランジ}) \\ 1 & (i=2: \text{下フランジ}) \\ 0 & (i=3: \text{ウェブ}) \end{cases}$$

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

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

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

また、ウェブの変形にともなって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、 $(\cdot) = \partial(\cdot)/\partial s$ であり、さらに

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

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

3. 有限要素法の適用

文献1)の手法を用いて、線形化した仮想仕事の原理に式(1)、(2)を代入することにより剛性方程式を求めることができる。なお軸力 N^0 、曲げモーメント M_x^0 、 M_y^0 が作用する場合の微小変位理論における直応力は、ウェブの変形を考慮した場合にも次式ようになる

$$\sigma_z^0 = \frac{N^0}{A} + \frac{M_x^0}{I_{xx}}x + \frac{M_y^0}{I_{yy}}y \quad (3)$$

4. 数値解析結果

3.で誘導した剛性方程式を用いて、断面変形を考慮したI形断面材の座屈荷重を固有値問題として求めた。

図-3、4は不等フランジを持つI形ばりに一定曲げモーメントが作用するときの横座屈曲線(1次モード)である。図-3は上フランジを一定として下フランジの寸法を変化させたもの、図-4は上フランジを一定として下フランジの寸法を変化させたものである。なお、縦軸の M_{cr} は2軸対称I形断面ばりの降伏モーメントである。下フランジが小さいときには、どの長さのばりでも座屈荷重はわずかに低下するが、上フランジが小さくなるとスパンの短いばりにおいては上フランジの減少に伴う座屈荷重の増大が見られる。

図-5は、2軸対称I形断面ばりに一定曲げモーメントが作用するとして境界条件を変えて計算を行った結果である。一端固定他端自由すなわち片持ちばり以外はスパンが長くなると高次モードのねじり座屈を生じ、一定の座屈荷重を示す。しかし、片持ちばりは一定値を示さず、スパンが長くなるにつれ断面形不変の曲線に漸近していくことがわかる。

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.

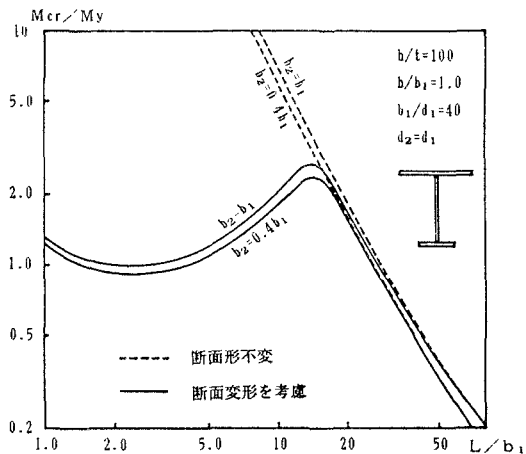


図-3 1軸対称I形断面ばりの横座屈曲線(1)

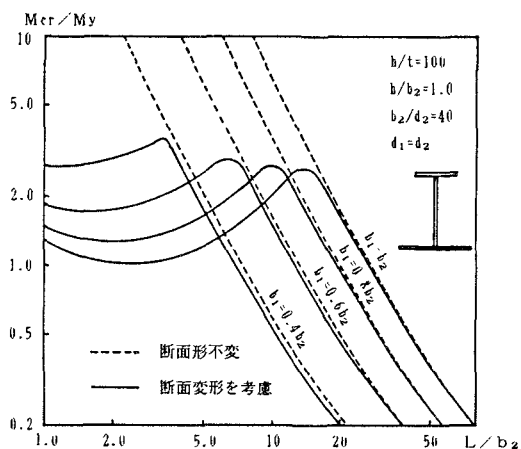


図-4 1軸対称I形断面ばりの横座屈曲線(2)

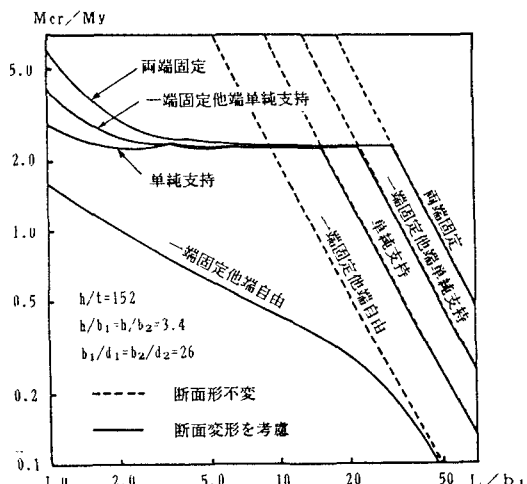


図-5 境界条件による座屈曲線の違い