

山梨大学工学部 正員 ○杉原 美好

山梨大学工学部 正員 深沢 泰晴

1. はじめに

本来はねじりに弱いI型断面材も、近年の構造物の複雑化につれて、曲げ部材としてはもとより、ねじれ部材としても機能することを余儀なくされる場合が多くなってきている。曲線格子げた橋や斜角格子げた橋の主げたとして用いられるI型プレートガーダーなどは、その好例といえよう。このようなねじりを受けるI型断面材の終局耐力の評価に際しては、通常の解析では無視されているウェブプレートの面外への曲げ変形の影響をも正確に把握しておくことが必要である。

ウェブの変形を考慮したI型断面材が等端モーメントを受ける場合の横倒れ弾性強度については、従来定説となっている理論に本質的な誤りがあることを既に指摘してきたが¹⁾、本報告では、まずウェブの変形を考慮したI型断面材の三次元弾性安定問題の一般的な載荷状態に対する支配方程式の誘導の概略を示す。次に、ウェブの変形が塑性座屈に及ぼす影響を把握するために、等端モーメントに対する横倒れ塑性座屈の解析を行う。その際、残留応力としては一応圧延I型钢のものを適用してみた。

2. 支配方程式の誘導

図-1(b)のような断面変形に対応して、3次以上の微小項を無視した有限変位に対する変位場は、 x, y, z 軸方向の変位成分を u, v, w とすると次式のように求められる。ここで、板厚は十分小さいものとして変位は板厚中心線で代表させるものとし、すなわち、

a) ウェブに対する変位

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 - y\varphi, & v &= v_0 - \frac{1}{2}y\varphi^2 \\ w &= w_0 - y(v_0' - u_0'\varphi) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

b) フランジに対する変位

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 - y\varphi - \frac{1}{2}x(\varphi + \varphi_1)^2 \\ v &= v_0 + x(\varphi + \varphi_1) - \frac{1}{2}y\varphi^2 \\ w &= w_0 - x\{u_0' + v_0'(\varphi + \varphi_1)\} - y(v_0' - u_0'\varphi) - \omega\varphi' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 u_0, v_0, w_0 は圆心の x, y, z 軸方向変位であり、

$$\varphi_1 = \begin{cases} \varphi_1 & (\text{上フランジ}) \\ \varphi_2 & (\text{下フランジ}) \end{cases}$$

である。また、ひずみは次式のように求められる。

a) ウェブに対するひずみ

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_n &= 2Y_{zn} = 2Y_{no} = 0, & \varepsilon_o &= -n\alpha_1\varphi_1 - n\alpha_2\varphi_2, & 2Y_{oz} &= 2n\varphi' \\ \varepsilon_z &= w_0' + \frac{1}{2}(u_0'^2 + v_0'^2) - y(v_0' - u_0'\varphi) + \frac{1}{2}y^2\varphi'^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

b) フランジに対するひずみ

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_o &= \varepsilon_n = 2Y_{zn} = 2Y_{no} = 0, & 2Y_{oz} &= 2n(\varphi' + \varphi_1') \\ \varepsilon_z &= w_0' + \frac{1}{2}(u_0'^2 + v_0'^2) - x\{u_0' + v_0'(\varphi + \varphi_1)\} - y(v_0' - u_0'\varphi) + \frac{1}{2}x^2(\varphi' + \varphi_1')^2 + \frac{1}{2}y^2\varphi'^2 - \omega\varphi'' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $2Y_{oz}, \varepsilon_o$ は、先の仮定と近似により零となるが、実際には、板厚中心線をはずれた断面上に存在するので、微小変位での値¹⁾を用いて考慮する。

式(1)～(4)に仮想仕事の原理を適用し、さらに線形化を行うと、座屈変形のつり合い式を求めることができる。はりに表面力のみが作用する場合には、座屈変形のつり合い式は次式のようになる。

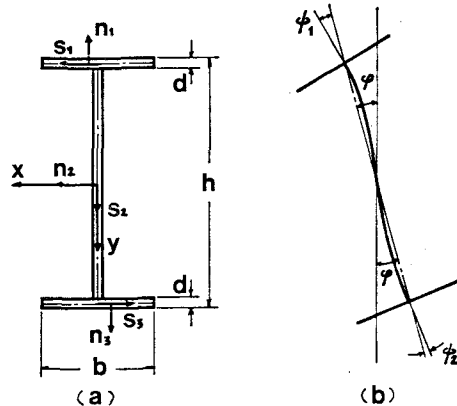


図-1 I型断面材の寸法、座標、変形

$$\left. \begin{aligned}
 (EAW''') &= 0, \quad (N''u''') - (EI_{xx}u''') - (M_y''\varphi''') = 0 \\
 (N''v''') - (EI_{yy}v''') + (M_x''\varphi''') + (M_z''\varphi_1''') + (M_z''\varphi_2''') &= 0 \\
 M_x''u'' - M_y''v'' - (EI_{xx}\varphi''') + \{k_1N''\varphi'' + (k_2^1N'' + k_3^1M_y'')\varphi_1'' + (k_2^2N'' + k_3^2M_y'')\varphi_2'' \\
 &\quad + GJ_{st}\varphi'' + GJ_{st}^1\varphi_1'' + GJ_{st}^2\varphi_2'' = 0 \\
 M_z''v'' + \{k_2^1N'' + k_3^1M_y''\}(\varphi'' + \varphi_1'') + GJ_{st}^1(\varphi'' + \varphi_1'') - EI_{y1}\varphi_1'' - EI_{y2}\varphi_2'' &= 0 \\
 M_z''u'' + \{k_2^2N'' + k_3^2M_y''\}(\varphi'' + \varphi_2'') + GJ_{st}^2(\varphi'' + \varphi_2'') - EI_{y2}\varphi_1'' - EI_{y1}\varphi_2'' &= 0
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 N'' , M_x'' , M_y'' は微小変位理論によって求められる断面力であり、上添字 φ_1 , φ_2 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、 k_1 , k_2 , k_3 は次式で定義される断面量である。

$$k_1 = \int_A (x^2 + y^2) dA / A, \quad k_2 = \int_A x^2 dA / A, \quad k_3 = \int_A x^2 y dA / I_{yy} \dots\dots\dots (6)$$

3. 塑性座屈

残留応力としては、図-2のような圧延I型钢のものを適用してみる。ここに、降

伏応力を σ_y とすれば、圧縮残留応力 σ_{rc} 、引張残留応力 σ_{rt} は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_{rc} &= 0.3 \sigma_y \\
 \sigma_{rt} &= \left[\frac{bd}{bd + t(h - 2d)} \right] \sigma_{rc}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

このとき、断面の降伏状態は図-3のように表すことができる。降伏部分を表わすパラメータ α , φ , ν と作用荷重との関係は、幾何学的条件とつり合い条件から求めることができる。

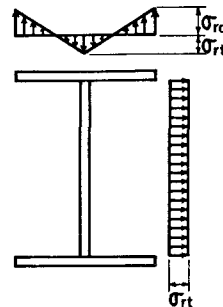


図-2 残留応力

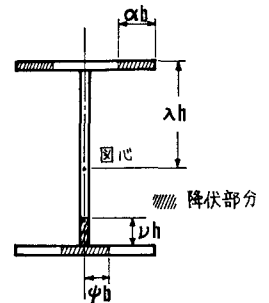


図-3 降伏断面

塑性域での座屈に対する抵抗は、断面の降伏してい

ない部分によってなされる。従って、有効断面に対する剛性を求め、作用荷重とともに式(5)に適用し、これを解くことにより、座屈強度と部材長との関係を求めることができる。

4. 計算結果と考察

ウェブの変形が

塑性座屈に及ぼす影響を調べるために、等端モーメントに対する横倒れ塑性座屈強度を、断面寸法を種々変化させて計算した。その結果の一例を図-4に示す。このとき、降伏応力 $\sigma_y = 2320 \text{ kg/cm}^2$ とし、残留応力も考慮して計算を行った。図-4において、縦軸は、横倒れ座屈モーメント M と全塑性曲げモーメント M_p との比 $(M/M_p)_{cr}$ で示し、横軸は、部材長 L と弱軸まわりの断面二次半径 I_y との比、すなわち、細長比 (L/I_y) で示した。図中には弾性解も示したが、細長比が大きくなると、断面形不変の場合と断面変形を考慮した場合の曲線はほぼ重なり、断面変形の影響はほとんど現れない。一方、細長比が小さくなると、断面変形の影響が現われ、座屈強度の低下を生ずる傾向があることがわかった。

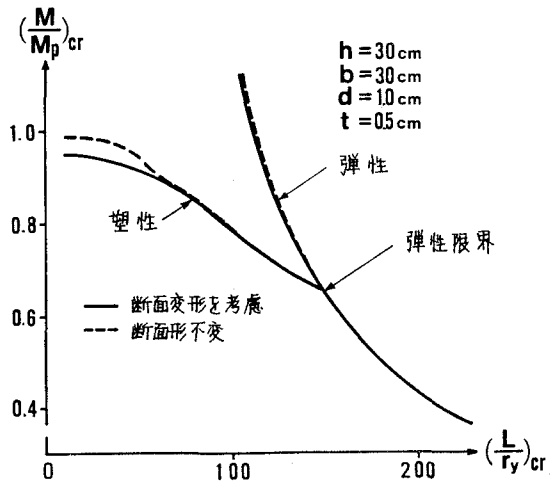


図-4 横倒れ座屈モーメント-細長比曲線

参考文献：1). 杉原，深沢：ウェブの曲げ変形を伴うI型アレートガーダーの横座屈後挙動（第2報），土木学会第38回年次講演会概要集，I-99，昭和58年10月 2). Theodore V. Galambos：Inelastic Lateral Buckling of Beams，Journal of the Structural Division，Proceeding of ASCE，Vol.89，No. ST5，1963.10