

1. まえがき

初期不整を有するはりの横倒れ座屈強度と耐荷力に関する理論的および実験的研究は数多く行われ、有意義な成果が挙げられている。本研究は、これらの成果をふまえて、座屈強度および後座屈強度と耐荷力の関連性を解析モデルを用いて明確にするものである。なお記号は全て、横倒れ座屈解析に用いられているものを使用し、その説明を割愛するものとします。

2. 耐荷力解析

西野³⁾は座屈前の変形を考慮した座屈に関する基礎方程式を文献¹⁾に示している。その式(9.11)において、等曲げ M_0 のみが作用する2軸対称I形はりの座屈前後の強軸に関する曲げモーメントが変化しない場合、

$$EI_y \frac{d^4 u}{dz^4} + \frac{I_x - I_y}{I_x} M_0 \frac{d^2 \varphi}{dz^2} = 0, \quad EI_{\omega} \frac{d^4 \varphi}{dz^4} - GK_T \frac{d^2 \varphi}{dz^2} + M_0 \frac{d^2 u}{dz^2} = M_0 \frac{d^2 u_0}{dz^2} \quad (1)$$

となる。両端単純支持はりの初期変形を $\sin$ の半波長に仮定すれば

$$u_0 = U_0 \sin \frac{\pi z}{L}, \quad u = U \sin \frac{\pi z}{L}, \quad \varphi = \Phi \sin \frac{\pi z}{L} \quad (2)$$

$$U = \frac{U_0}{(M_E/M_0)^2 - 1}, \quad \Phi = \frac{I_x}{I_x - I_y} \frac{P_{yE} U_0}{\{(M_E/M_0)^2 - 1\} M_0} \quad \text{但し, } M_E = \sqrt{\frac{I_x}{I_x - I_y} \frac{\pi^2 EI_y}{L^2} (GK_T + \frac{\pi^2 EI_{\omega}}{L^2})}$$

をえる。一方、筆者らの初期不整程度の曲がりを有するはりの耐荷力実験²⁾によると、はりの横断面の応力分布は図-1の①~④のように変化する。領域④の応力状態に対して、 u および φ を弾性解に仮定し、弱軸に関する曲げモーメントの関係 $M_y = M_{UF} + M_{LF} = M_0 \varphi$ を用いてスパン中央部のおじり角を求めると次式をえる。但し、 $I_x/(I_x - I_y) \approx 1$ に近似する。

$$\Phi = \frac{M_{UF} + M_{LF}}{M_0} = \frac{\sigma_y t b^2}{6 M_0} \left[\frac{3}{2} - \frac{3}{2} \left(\frac{M_0}{\sigma_y b t d} \right)^2 + \left(1 - \frac{P_{yE} d}{2 M_0} \right) \frac{\pi^2 E b}{2 \sigma_y L^2} \left(\frac{M_0}{M_E} \right)^2 - 1 \right] \quad (3)$$

式2および3の曲線の交点を耐荷力と定義すると次式をえる。

$$\left(\frac{M_0}{M_p} \right)^4 - \left\{ 1 + \left(\frac{M_E}{M_p} \right)^2 + \frac{2 \pi^2 E b}{3 \sigma_y L} \frac{U_0}{L} \right\} \left(\frac{M_0}{M_p} \right)^2 + \left(\frac{M_E}{M_p} \right)^2 = 0 \quad (4)$$

I形断面のウェブを無視し、ずんぐりしたはりを対象とするときの座屈モーメントと正規化した細長比入をえる。

$$M_E = \sqrt{\frac{\pi^2 EI_y}{L^2} (GK_T + \frac{\pi^2 EI_{\omega}}{L^2})} \approx \frac{\pi^2 E t b^3 d}{12 L^2}, \quad \lambda = \sqrt{\frac{M_p}{M_E}} \approx \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{b}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (5)$$

上記の関係を用いて、式4を入について解くと次式をえる。

$$\lambda = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\alpha_1}{1 - \delta^2} \right)^2 - \frac{1}{\delta^2} - \frac{\alpha_1}{2(1 - \delta^2)}} \quad \text{但し } \delta = \frac{M_0}{M_p}, \quad \alpha_1 = \frac{4 \pi}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \frac{U_0}{L} \quad (6)$$

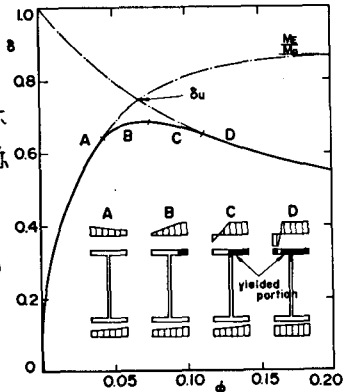


図-1 耐荷力解析モデル

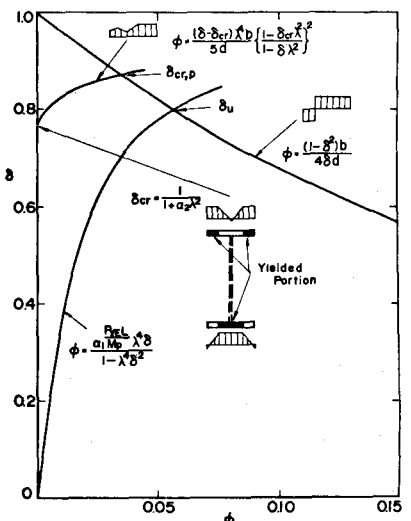
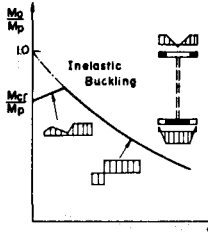


図-2 後座屈強度と耐荷力値

3. 座屈強度解析

図-1より, u および φ を $\alpha \sin$ の半波長とし, 下フランジの面外変形は生じないものとして, 図-3の横倒れ座屈解析モデルを考える。弾性座屈する場合, 残留応力は無視でき, 座屈時の応力状態に対して次の解を与える。

$$M_y = M_{cr} \Phi = -EI_f \frac{d^2 u_{lf}}{dz^2} = \frac{\pi^2 E \times b^3 d}{12 L^2} \Phi \quad \therefore M_{cr} = \frac{\pi^2 E \times b^3 d}{12 L^2} = M_E, \text{ 重: 不定} \quad (7)$$



また, 圧縮フランジが完全に降伏した状態での重は次式となる。

$$M_y = M_o \Phi = \frac{\sigma_y \times b^2}{4} \left[1 - \left(\frac{M_o}{\sigma_y b \times d} \right)^2 \right] \quad \therefore \Phi = \frac{b}{4d} \frac{1 - \sigma^2}{\sigma} \quad (8)$$

非弾性座屈する場合, 圧縮フランジの弾性核の有効とし, $(2d)^3$ を $(2d^2)$ に近似するとランキン・タイプの座屈強度式を与える。

図-3 座屈解析モデル

座屈後の応力分布として図-3の④を考える

と $M_y = M_o \Phi = \int_{A_{fl}} \sigma_z \times dA$ より④の σ_3 が求まる。また, ④の応力分布より面内モーメントを求めると次式となり, これより座屈後の重を与える。

$$\frac{M_o}{M_p} = \frac{P_{uf} d}{M_p} = (1 - 4\alpha^2 d_2) + \frac{6MEd}{M_p b} \left\{ \left(\frac{1}{2} - d_3 \right)^2 + (d + d_3)^2 \right\} \Phi$$

$$\Phi = \frac{(\sigma - \sigma_{cr}) \lambda^2 b}{5d} \left(\frac{1 - \sigma_{cr} \lambda^2}{1 - \sigma \lambda^2} \right)^2 \quad \text{但し } d_3 = \frac{1 + (2d)^3 - 2\sigma \lambda^2}{3(1 - (2d)^2)} \quad (10)$$

4. 数値計算例および考察

図-2はねじれ角と作用モーメントの関係を示し, 図より残留応力により座屈強度が低下する場合, 後座屈強度を期待できることがわかる。

図-4は座屈強度と後座屈強度および耐力力の関係を示し, 通常よく用いられる細長比では, $U_o/L = 1/1000$ の場合, 座屈強度, 耐力力, 後座屈強度の順に強度が増加することがわかる。

図-5は各設計基本強度式と本解析値との関係を示し, この図より道示は $\sigma_{cr}/\sigma_y = 0.5$ なる残留応力を有するはりの座屈強度に対応し, ECCSの座屈曲線は $U_o/L = 1/1000$ なる初期不整を有するはりの耐力力に対応することがわかる。

参考文献

- 1) 西野文雄, 他3名: 軸力と曲げおよびねじりを受ける薄肉断面部材, 土木学会論文集, '86.225, pp.1~15.
- 2) 福本彦士, 西田進: 曲線I形梁の耐力力実験, 中部支部講演概要集, 1979年2月, pp.46~47.

$$\frac{M_o}{M_p} = (1 - 4\alpha^2 d_2) = \frac{MEo}{M_p} = \frac{(2d)^2}{\lambda^2} \quad \therefore \sigma_{cr} = \frac{1}{1 + d_2 \lambda^2} \quad (9)$$

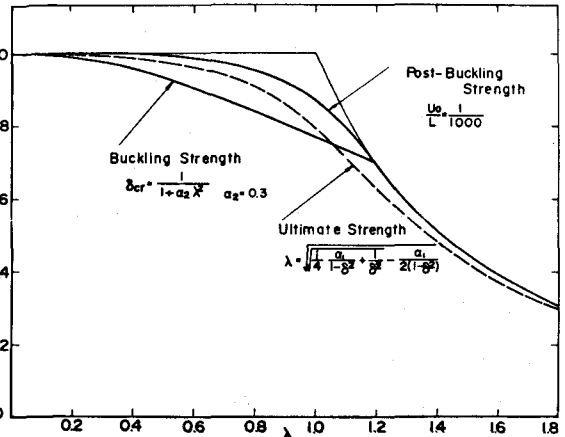


図-4 座屈強度, 後座屈強度, 耐力力の関係

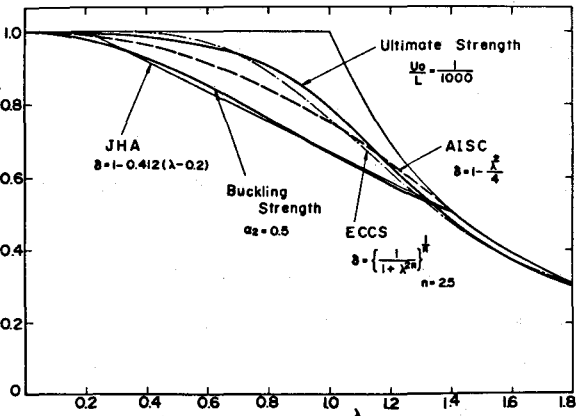


図-5 設計基本強度式と座屈強度, 耐力力との関係