

1. まえがき

横倒れ座屈強度と初期不整を有するはりの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、多くの研究者によって有意義な研究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、座屈および後座屈強度と耐荷力の相互の関連性とその強度値の大小を解析モデルを用いて明確にするものである。なお用いた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

初期不整 u_0 を有する 2 軸対称 I 形ばりに、等曲げ M_0 が作用する場合の基礎方程式は

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

となる。両端単純支持ばりの初期変形を $\sin$ の半波長に仮定すれば、次の解

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

$$U = \frac{U_0}{(M_E/M_0)^2 - 1}, \quad \Phi = \frac{P_{FE} U_0}{\{(M_E/M_0)^2 - 1\} M_0}$$

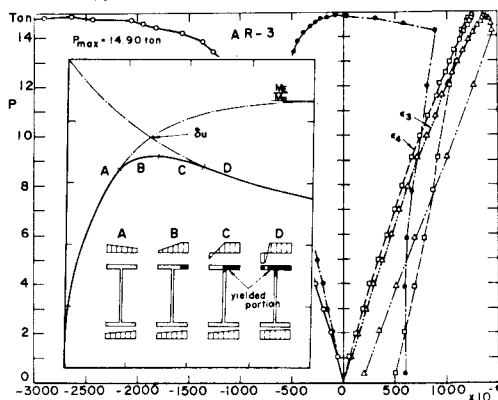


図-1 曲がりばりの荷重-ひずみ関係

を与える。一方、筆者らの初期不整程度の曲がりを有する曲がりばりの耐荷力実験によると、横断面の応力分布は図-1の④～⑧のように変化する。領域⑧の応力状態に対して、 u および φ の値を弾性解(式-2)に仮定し、弱軸に関する曲げモーメントの関係 $M_y = M_{UF} + M_{LF} = M_0 \varphi$ を用いてはり中央部のねじり角を求める。

$$\Phi = \frac{M_{UF} + M_{LF}}{M_0} = \frac{\sigma_y t b^2}{6 M_0} \left[\frac{3}{2} - \frac{3}{2} \left(\frac{M_0}{\sigma_y t d} \right)^2 \right] + \left(1 - \frac{P_{FE} d}{2 M_0} \right) \frac{\pi^2 E b}{2 \sigma_y L^2} \cdot \frac{U_0}{(M_E/M_0)^2 - 1} \quad (3)$$

次に、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次の正規化した細長比 λ をえ、この式-5の M_E を用いて式-2および3の曲線の交点(図-4の δu)を耐荷力と定義すると式-4を与える。

$$\left(\frac{M_u}{M_p} \right)^4 - \left\{ 1 + \left(\frac{M_E}{M_p} \right) + \frac{2 \pi^2 E b}{3 \sigma_y L} \cdot \frac{U_0}{L} \right\} \left(\frac{M_u}{M_p} \right)^2 + \left(\frac{M_E}{M_p} \right)^2 = 0 \quad (4) \quad M_E = \sqrt{\frac{\pi^2 E I_y}{L^2} (GK + \frac{\pi^2 E I_y}{L^2})} \div \frac{\pi^2 E t b^3 d}{12 L^2}, \quad \lambda = \sqrt{\frac{M_p}{M_E}} \div \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{L}{b}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (5)$$

上式は耐荷力 M_u について直接解くこともできるが、ここでは座屈長さ λ_u について解くと次式を与える。

$$\lambda_u = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\alpha_1}{1 - \delta^2} \right)^2 - \frac{1}{\delta^2} - \frac{\alpha_1}{2(1 - \delta^2)}} \quad (5) \quad \text{但し} \quad \delta = \frac{M_0}{M_p}, \quad \alpha_1 = \frac{4 \pi}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \frac{U_0}{L}$$

3. 座屈強度解析

図-1より、 u および φ を $\sin$ 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-2の弾性座屈解析モデルを考える。弾性座屈の場合、残留応力の影響は無視でき、座屈時の応力状態に対して次の解を与える。

$$M_y = M_{cr} \Phi = -EI_F \frac{d^2 u_{LF}}{dz^2} = \frac{\pi^2 E t b^3 d}{12 L^2} \Phi \quad \therefore M_{cr} = \frac{\pi^2 E t b^3 d}{12 L^2} = M_E, \quad \text{至: 不定} \quad (6)$$

非弾性座屈する場合、圧縮トランジの弾性核のみを有効とし、図-3の $(2d)^3$ を $(2d)^2$ に近似すれば式-7のランキン・タイプの座屈強度式を与える。

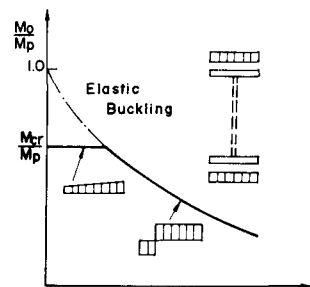
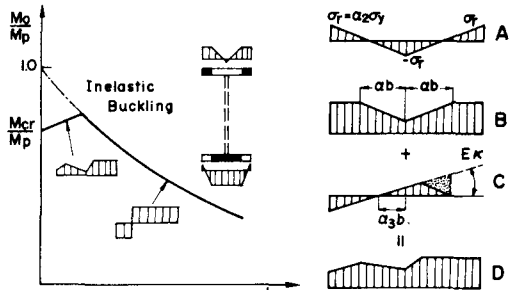


図-2 弾性座屈解析モデル

$$\frac{M_o}{M_p} = (1 - 4\alpha^2\alpha_2) = \frac{M_{Ec}}{M_p} = \frac{(2\alpha)^2}{\lambda^2} \quad \therefore \delta_{cr} = \frac{1}{1 + \alpha_2\lambda^2} \quad (7)$$

次に、座屈後の応力分布として左図の②を考えると $M_y = M_o\Phi = \int_{-b/2}^{b/2} \sigma_x \times dA$ より②の α_3 が求まり、②の応力分布より面内モーメントを求めると次式を与える。

$$\frac{M_o}{M_p} = \frac{P_{uf}d}{M_p} = (1 - 4\alpha^2\alpha_2) + \frac{6M_{Ed}}{M_p b} \left\{ \left(\frac{1}{2} - \alpha_3 \right)^2 + (\alpha + \alpha_3)^2 \right\} \Phi \quad (8)$$



これより、座屈後の重を求めると式-9となり、この重と 図-3 非弾性座屈解析モデル 圧縮トランジが完全に降伏した状態での重 (式-10) との交点 (図-4 の $\delta_{cr,p}$) の荷重を後座屈強度と定義する。

$$\Phi = \frac{(\delta - \delta_{cr})\lambda^2 b}{5d} \left\{ \frac{1 - \delta_{cr}\lambda^2}{1 - \delta\lambda^2} \right\} \quad (9) \quad M_y = M_o\Phi = \frac{\sigma_y t b^2}{4} \left\{ 1 - \left(\frac{M_o}{\sigma_y b t d} \right)^2 \right\} \quad \therefore \Phi = \frac{1 - \delta^2}{\delta} \cdot \frac{b}{4d} \quad (10)$$

4. 数値計算例および考察

図-4 は作用モーメントとねじれ角の関係を示し、実線は耐荷重を、点線は後座屈耐荷重を表す。図より、残留応力により座屈強度 $\delta_{cr} = 1/(1 + \alpha_2\lambda^2)$ が $\delta_E = 1/\lambda^2$ より低下する場合、後座屈強度を期待でき、その強度増加は $\alpha_2 = \sigma_r/\sigma_y$ が大きいほど大きいことがわかる。また、耐荷力 δ_u の初期面外変形 U_0 による強度低下は U_0 の対数にほぼ比例する。なお、はりの強度低下におよぼす影響は、正規化した細長比入の小さい領域では圧縮残留応力 σ_r の方が大きく、入の大きい領域では初期面内変形 U_0 の方が大きい。しかし $\lambda = 1.0$ 付近の場合、図より両者の影響はほぼ同程度であり、通常よく用いられる入の領域では両者は複雑に影響し合うものと思われる。

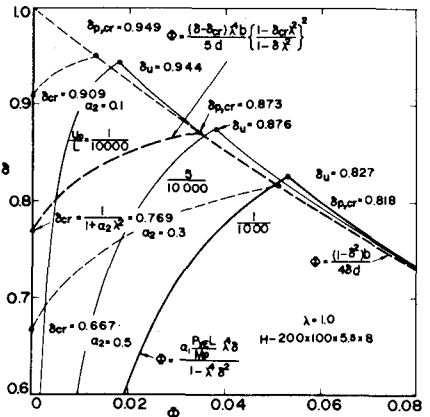


図-5 は座屈強度と後座屈強度および耐荷力の関係を示し、通常よく用いられる細長比では、 $U_0/L = 1/1000$ の場合、座屈強度、耐荷力、後座屈強度の順に強度が増加することがわかる。なお図中のプロットは福本、久保によって収集された実験値を表す。図-6 は各設計基本強度式と本解析値との関連性を示し、この図より直示の直線近似式は $\sigma_r/\sigma_y = 0.5$ なる残留応力を有するはりの横倒れ座屈強度に対応し、ECCS の座屈曲線は $U_0/L = 1/1000$ なる初期不整を有するはりの耐荷力に対応することがわかる。

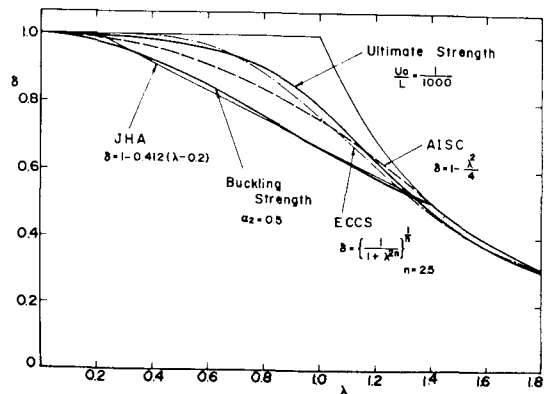
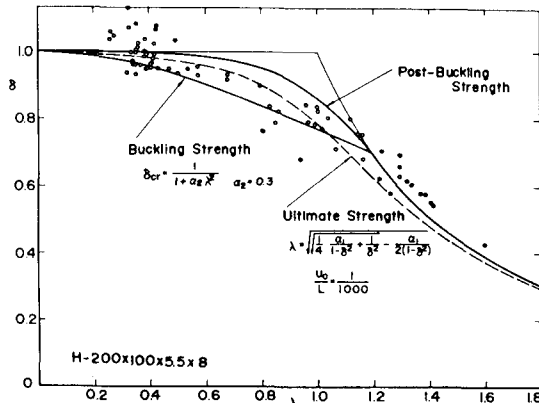


図-5 座屈強度、後座屈強度、耐荷力の関係

図-6 設計基本強度式と座屈強度、耐荷力との関係

1) Fukumoto, Y. and Nishida, S.: Ultimate Load Behavior of Curved I-Beams, Proc. of ASCE, Vol. 107, No. EM2.