

1. まえびき 近年、鋼構造物の抵抗強度を構造物の信頼性設計の観点から検討することや国内外での重要な研究課題となっている。本研究は鋼工形はりの実験データに基づいて曲げ抵抗強度を提示するものであり、安全性の評価法として Galembos らの LFRD Format¹⁾ と東海鋼構造物研究グループの SGST Format²⁾ を参照して抵抗強度項の検討を行う。

2. 修正細長比の誘導 一般に、コンパクト断面をもつはりの曲げ強度は弾性および非弾性領域では極座屈によって支配され、塑性領域では塑性モーメント M_p に到達する。このことから、無次元座屈軸として $\delta_r = M_u/M_p - \lambda = \sqrt{M_p/M_E}$ 関係を用いることによって降伏応力、断面寸法および荷重形式にあまり限定されずに極座屈強度を表わすことができる。しかし、修正細長比 λ に含まれる弾性極座屈モーメント M_E はかなり複雑になるので、その簡略化が必要である。ここでは、 M_E の表式として文献(3)の式(6.16)を用いて、2軸対称工形断面に対し次の修正細長比を誘導した。

$$\lambda = \sqrt{\frac{M_p}{M_E}} \approx \frac{2K_1K_2(K_yL/b)}{\pi\sqrt{C_1}} \sqrt{\frac{\sigma_{yf}}{E}} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 $K_1 = [3 + \frac{3}{2}\alpha(\frac{A_w}{A_f})]^{\frac{1}{2}}$, $K_2 = [x_1 + \{1 + x_2^2 + x_2(\frac{K_yL}{b})^2\}^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}}$, $x_2 = 0.312[2 + (\frac{A_w}{A_f})(\frac{L}{C_1})^2]^{\frac{1}{2}}(\frac{L}{A_f})^2$, $x_1 = (\frac{2C_2\theta}{A})$, $\alpha = \sigma_{yp}/\sigma_{yf}$ 。なお、 C_1 , C_2 は荷重形式と枝端の境界条件(K_y, K_z)によって定まる係数である。このように、式(1)は荷重形式や横荷重の作用条件にも対応でき、そしてフランジと腹板の断面積比や断面の主要寸法比によって表わされているため、比較的容易に、しかも精度よく M_p ベースの修正細長比を求めることができる。

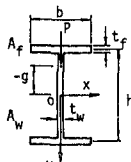


Fig. 1

3. 抵抗強度項の検討 文献(1)の LFRD Format を前提とすると、はりの曲げに対する抵抗強度項は

$$\phi M_{u,n} = M_{u,m} \exp(-\alpha\beta R_r) \quad \text{----- (2)}$$

で与えられる。ここに、 $M_{u,n}$ = 公称曲げ強度、 $M_{u,m}$ = 実測強度の平均値。そして、抵抗係数中は上式から $\psi = M_{u,m}/M_{u,n}$ とおくと $\phi = \psi \exp(-\alpha\beta R_r)$ ----- (3) で表わされる。以下、 ψ 項の具体的な評価を式(1)の修正細長比に基づいてはりの挙動範囲別に検討する。

1) 弾性領域 ($\lambda \leq \lambda_e$) では

$M_{u,m} = P_m \cdot M_p, m = P_{m,p} \cdot (\gamma_{yf} Z_x)_m$, $M_{u,n} = M_p, n = \gamma_{y,n} Z_{x,n}$ 。ここに、 γ_{yf} = フランジの降伏応力、 Z_x = 塑性断面係数である。 γ はフランジと腹板の降伏応力の相違を加味する係数であり、 $\gamma = \{1 + \frac{1}{4}\alpha(\frac{A_w}{A_f})\} / \{1 + \frac{1}{4}(\frac{A_w}{A_f})\}$ 。

したがって 弾性領域での ψ 項は設計係数、材料係数および製作係数の平均値 P_m, M_m, F_m を用いて次のように変形される。 $\psi = P_m \cdot M_m \cdot F_m$, ここに $P_m = (M_u/M_p)_m$, $M_m = Z_m(\gamma_{yf}/\gamma_{y,n})_m$, $F_m = (Z_x/Z_{x,n})_m$ 。

ii) 弾性領域 ($\lambda > \lambda_e$) では

$M_{u,m} = P_m e \cdot M_E, m = P_m e \cdot (M_p/\lambda^2)_m$, $M_{u,n} = M_E, n = (M_p/\lambda_n^2)$ 。弾性領域での ψ 項は $\psi = P_m e \cdot M_m e \cdot F_m e \cdot D_m$, ここに $P_m e = [(M_u/M_p)/(1/\lambda^2)]_m$, $M_m e = (E/E_n)_m$, $F_m e = (Z_x/Z_{x,n})_m$, $D_m = (C_1/C_{1,n})_m \cdot (K_{y,m}/K_{y,n})_m \cdot (K_{z,n}^2/K_{z,m}^2)_m$ 。ここに、 D_m は等価モーメント係数 C_1 、有効長さ係数 K_y, K_z などを含む項であり、部材のモデル化に伴う誤差に対応するので、SGST Format のように校正係数 ϕ として別個に処理できよう。ここでは、標準状態を想定して $D_m = 1$ (確定量) と考える。

iii) 非弾性領域 ($\lambda_p < \lambda \leq \lambda_e$) では

$M_{u,m} = P_m x \cdot M_m = P_m \{f(\lambda)/M_p\}_m$, $M_{u,n} = M_c, n = [f(\lambda_n)M_p]_n$ 。ここに、非弾性基本強度 M_c を λ の関数で一般表示してある。この領域での材料係数と製作係数の ψ 項への効果は $f(\lambda)/f(\lambda_n)$ 比に依存することになる。塑性と弾性領域との連続性を考えて、材料係数のみ i) と ii) の領域での係数を用いて次のように直線補間で表わす。 $\psi = P_m x \cdot M_m x \cdot F_m x$, ここに、 $P_m x = [(M_u/M_p)/f(\lambda)]_m$, $M_m x = M_{m,p} - (M_{m,p} - M_{m,e})(\lambda - \lambda_p)/(\lambda_e - \lambda_p)$, $F_m x = F_{m,e}$ 。なお、 P_m, M_m, F_m の変動係数を V_p, V_M, V_F とすれば、式(2)中の抵抗強度の変動係数 V_R は $V_R = \sqrt{V_p^2 + V_M^2 + V_F^2}$ で与えられる。

4. 基本強度式の設定 以上の検討から、非弾性領域での実測強度の平均値を与える基本強度式、 $\delta_r = M_u/M_p = f(\lambda)$ の設定が必要となる。

1) 弾性領域に対する限界細長比 λ_p

図-3は塑性設計を対象にはりの回転容量 $R = \theta/\theta_p - 1$ と横補剛間隔 λ_b の関係を調べたものであり、図中には枝端モーメント比 $\rho = 1.0$ (等曲げ)、 $\rho = 0.0$ の実験値が

示してある。この図から、 M_p に到達して $R=1$ と $R=3$ を確保するための
 柱端モーメント比 ρ と横補剛間隔 λ_b の下界値と与える関係式を求め
 ると、図中のような式がえられる。次に、式(1)の修正細長比にあ
 いて $k_e=1$ とおき、 $\eta_g = \frac{b}{2} \left[3 \left(1 + \frac{A_w}{2A_f} \right) \right]^{-\frac{1}{2}}$ と考慮して λ_p の式を導くと、

$$\lambda_p = \frac{1}{\sqrt{C_1}} \left\{ \left[1 + \frac{1}{4} \alpha \left(\frac{A_w}{A_f} \right) \right] / \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{A_w}{A_f} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \lambda_b \quad \text{-----(4)} \quad \text{ここに、}$$

$$C_1 = 1.75 - 1.05\rho + 0.3\rho^2 \leq 2.3, \quad \text{今、} \alpha = \frac{\sigma_{yf}}{\sigma_{yf}} = 1.15, \quad A_w/A_f = 1.012 \text{ (JIS 圧延}$$

$$\text{H 形鋼 70 断面の平均値)} \text{ を用いて } R=1, \lambda_b = 1.15 - 0.6\rho \text{ に対応する } \lambda_p \text{ を}$$

$$\text{求めると、等曲げ } (\rho=1.0, C_1=1.0) \text{ では } \lambda_p = 0.51 \text{ がえられる。}$$

ii) 弾性領域に対する限界細長比 λ_e

弾性から非弾性への移行限界値を示す λ_e は圧縮フランジの圧縮残留
 応力レベルによって支配される。式(1)から、 $M_E = S_x (\sigma_{yf} - \sigma_{rf})$ になる
 λ_e の式を導くと、 $\lambda_e = \left\{ \left[1 + \frac{1}{4} \alpha \left(\frac{A_w}{A_f} \right) \right] / \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{A_w}{A_f} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} (1 - \sigma_{rf}/\sigma_{yf})^{\frac{1}{2}} \quad \text{---(5)}$
 ここで Young によって提案されている圧延 H 形鋼の中断面と対表
 とした残留応力の推定式、 $\sigma_{rf} = 165 \left(1 - \frac{A_w}{2.4A_f} \right)$, MN/m^2
 を用いて $A_w/A_f = 1.012$ に対して λ_e を求めると $\sigma_{yf} = 245$
 N/mm^2 で $\lambda_e = 1.33$, $\sigma_{yf} = 324 \text{ N/mm}^2$ で $\lambda_e = 1.25$ がえられ
 る。ここでは両者の平均値 $\lambda_e = 1.291$ を用いる。以上の
 検討から、圧延 I 形鋼はりの非弾性領域における基
 本強度式として図-3 中の直線式を提案する。

5. 圧延はりの曲げ抵抗強度 圧延 I 形鋼はりの由
 げ強度の実験値 334 個 (うち着着のもの 78 個を含む) を
 用いて抵抗強度を検討してみる。図-3 は圧延はりの
 実験値について、横軸 λ の 0.1 セグメントごとの実測
 強度の平均値 m 、特性値 $m-2S$ を示したものであり、
 本研究で提案する基本強度式は実測強度の平均値によ
 く適合していることがわかる。次に式(3)で表わされる
 抵抗係数 ϕ を試算するにあたり、次の値を想定する。
 $M_m p = 1.15 (\bar{V}_m = 0.10)$, $M_m e = 1.00 (\bar{V}_m = 0.06)$, $F_m = 1.00 (\bar{V}_f =$
 $0.05)$ 。表-1 には 3. で検討した Format に従って求めた
 P_m, V_p, V_e および式(2)で $\alpha=0.55, \beta=3$ を仮定したときの抵
 抗係数 ϕ がまとめている。非弾性域の中値は λ の増大に
 伴い小さくなる傾向を示している。ここでは表-1 に示
 す重み付き平均値、塑性域では $\phi=0.94$ 、非弾性域では
 $\phi=0.88$ 、弾性域では $\phi=0.83$ を用いて補正公称抵抗強
 度式 $\phi R_n = \phi \bar{R}_n$ を表わす。図-4 は公称値ベースの座標
 軸 $\phi R_n = M_u/M_{p,n} - \lambda_n = \sqrt{M_{p,n}/M_{E,n}}$ 上に実験値をプロットし
 たものであり、図中の ϕR_n 式は実験値の下界とよく与え
 ていることがわかる。参考文献 1). Yura, Galambos,

and Ravindra: Proc. of ASCE, Vol. 104, No. ST9, pp. 1355-1369, 1978.

2) 東海鋼構造研究グループ: 橋梁と基礎, Vol. 14, Nos. 11, 12, 1980. 3) SSRC: Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures.

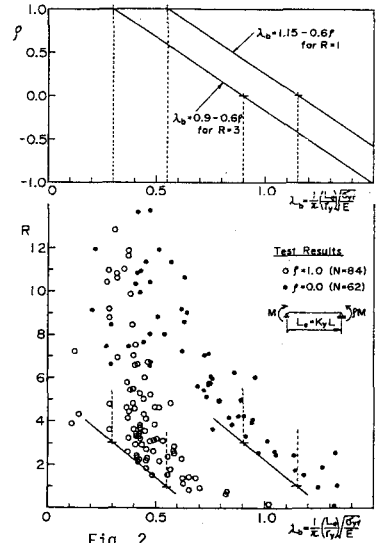


Fig. 2

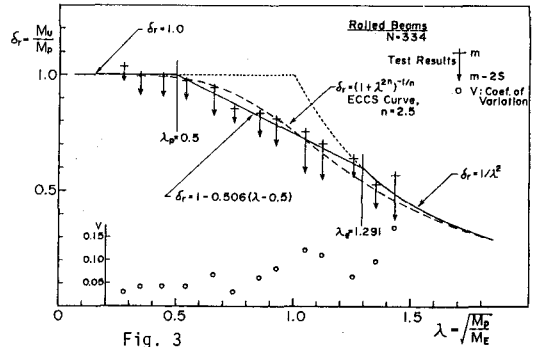


Fig. 3

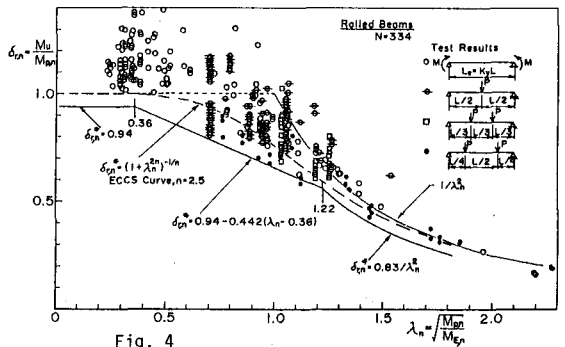


Fig. 4

Table 1

λ segment	λ mean	Number of Specimens	Test Values, M_u/M_p	Coef. of Variation	$M_u/\text{test}/M_p$	Coef. of Variation	Resistance Factor	Segmented	Weighted
0.2 - 0.3	0.276	15	1.035	0.030	1.035	0.030	0.116	0.983	
0.3 - 0.4	0.347	41	0.993	0.043	0.993	0.043	0.120	0.934	
0.4 - 0.5	0.441	16	0.932	0.043	0.992	0.043	0.120	0.935	
0.5 - 0.6	0.543	12	0.975	0.042	1.001	0.037	0.116	0.944	
0.6 - 0.7	0.660	6	0.948	0.068	1.030	0.063	0.122	0.943	
0.7 - 0.8	0.746	31	0.853	0.033	0.973	0.039	0.109	0.897	
0.8 - 0.9	0.850	37	0.839	0.061	1.023	0.057	0.112	0.920	0.887
0.9 - 1.0	0.929	32	0.816	0.076	1.041	0.072	0.118	0.915	
1.0 - 1.1	1.051	62	0.756	0.122	1.049	0.124	0.153	0.851	
1.1 - 1.2	1.123	19	0.703	0.110	1.028	0.115	0.143	0.838	
1.2 - 1.3	1.257	10	0.643	0.064	1.042	0.072	0.107	0.878	
1.3 - 1.4	1.352	19	0.530	0.098	0.968	0.105	0.131	0.780	
1.4 - 1.5	1.433	15	0.573	0.171	1.174	0.160	0.178	0.875	0.830
1.5 - 2.6	-	19	-	-	1.017	0.080	0.112	0.845	
Total 334									