

大阪市立大学工学部 正員 山口寿男

" 中井 博

" 学生員 久保元生

1. まえがき

はりの横たおれ座屈に関する研究は古くから多くの研究者によって理論的、実験的になされ、近年では材料的非線形性と考慮した横たおれ座屈に関する多くの研究成果が発表されており、設計基準にとり入れられている。しかしながら、水平面内に曲率を有する曲線I形ばりを対象にしたこの種の研究はほとんどなく、曲げ圧縮応力度に関する規定も直線ばりの規定と準用してきた。著者らは、曲線I形ばりの両端に強軸まわりの曲げモーメントを作用させたときの横たおれ座屈崩壊実験を実施し、曲線I形ばりは幾何学的非線形性、および材料的非線形性が直線部材に比して顕著なため、曲線I形ばりの横たおれ座屈崩壊強度は直線部材のそれよりも低下させるべきことを強調してきた。本文は曲線I形ばりの非弾性横たおれ座屈解析を行い、実験値との比較検討と種々試み、最後に曲線I形橋の許容曲げ圧縮応力度について考察するものである。

2. 基礎式

直線I形ばりの横たおれ座屈のような分岐型の座屈は、同じ荷重状態、同じ境界条件でごく微少な差を有する2つの独立な解が存在する条件から求められる。曲線I形ばりの場合、両端に強軸まわりの曲げモーメント M_0 を作用させると、荷重の増加に伴って、たわみおよび断面回転角が除々に起こる。しかし、荷重・変位曲線の実験結果の一例を図-1に示すが、横たおれ座屈モーメント M_{cr} 付近で水平変位 v 、断面回転角 β 、鉛直たわみ w が急激に大きく生じていることがわかる。それで、実際の荷重・変位曲線を図-1中の点線で示したように理想の荷重・変位曲線で仮定すると、両端に曲げモーメント M_0 が作用するときの横たおれ座屈によって生ずる変位量 v^* , β^* に関する座屈方程式は次式で表わされる。

$$EI_y \left(\frac{d^4 w^*}{ds^4} - \frac{1}{R_s} \frac{d^2 \beta^*}{ds^2} \right) + \frac{1}{R_s} EI_y \left(\frac{d^2 w^*}{ds^2} - \frac{1}{R_s} \beta^* \right) - \frac{d^2}{ds^2} (T_x^0 \varphi_3^*) - \frac{1}{R_s} M_y^0 \left(\frac{d^2 v^*}{ds^2} + \frac{v^*}{R_s^2} \right) = 0$$

$$EI_z \left(\frac{d^4 v^*}{ds^4} + \frac{d^2 v^*}{R_s^2 ds^2} \right) + \frac{d^2}{ds^2} \left\{ M_y^0 \left(1 - \frac{I_z^*}{I_y} \right) \beta^* + T_x^0 \varphi_3^* \right\} = 0 \quad \dots (1)$$

$$EI_w \left(\frac{d^4 \beta^*}{ds^4} + \frac{1}{R_s} \frac{d^2 w^*}{ds^2} \right) - \overline{GK}^* \left(\frac{d^2 \beta^*}{ds^2} + \frac{1}{R_s} \frac{d^2 w^*}{ds^2} + \frac{d}{ds} \left(\frac{M_y^0 \varphi_3^*}{EI_y} \right) \right) - \frac{1}{R_s} EI_y \left(\frac{d^2 w^*}{ds^2} - \frac{\beta^*}{R_s} \right) + M_y^0 \left(\frac{d^2 v^*}{ds^2} + \frac{v^*}{R_s^2} \right) = 0$$

$$\text{ここに、} \overline{GK}^* = GK^* + \int_A \sigma^* r^2 dA \quad \dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} M_y^0 &= M_0 \cos(\phi - \pi/2) / \cos \frac{\pi}{2} ; \text{曲げモーメント} \\ T_x^0 &= M_0 \sin(\phi - \pi/2) / \cos \frac{\pi}{2} ; \text{ねじりモーメント} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

I_y^*, I_z^* ; y^* 軸, z^* 軸に関する断面2次モーメント,

K^*, I_w^* ; 純ねじり定数, そりねじり定数, φ_3^*, φ_3^* ; y^* 軸, z^* 軸まわりの回転角, $\pi (=L/R_s)$; 中心角, ϕ ; 角座標, σ_x^* ; 断面内要素の応力, r ; セン断中心から断面内要素までの距離を示す。

3. 解析方法

曲線I形ばりは両端に曲げモーメントが作用しても曲げ応力 σ_0 の他にそり応力 σ_w が生じるので、これらの応力とさらに、溶接による残留応力 σ_r を考慮した非弾性横たおれ座屈解析を伝達マトリックス法で解析する。解析に用いる仮定は、1) 材料は完全弾塑性体とする。2) 溶接による残留応力は図-3に示すものを用いる。計算上の

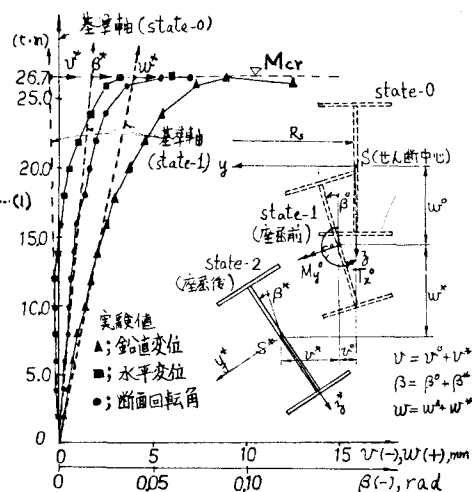


図-1 荷重・変位曲線

仮定としては 3) I_y^* , I_z^* , K^* , I_w^* は剛性低減法により決定する³⁾。もちろん, 4) 曲げ応力, およびねじり応力を求めるための断面力は低減した剛性を用いて求める。5) 断面力が収束するまで 3)~4) をくり返す。

式(1)の連立微分方程式を解き, 格間 k についてマトリックス表示と

$$y_{e,k} = F_k \cdot y_{o,k} \quad \dots (4)$$

となる。ここに, F_k は 12 行 12 列の格間行列 (紙面の都合上省略当日発表表) である。そして, k 個の格間を有する桁全体の計算を行い, 境界条件より得られる係数行列 $[A]$ を求め, $|A| = 0$ なる条件より座屈荷重を決定する。図-4 にフローチャートを示す。また, 境界条件は実験桁と同じく強軸まわりの曲げに対して単純支持, ねじり, および弱軸まわりの曲げに対して固定とする。

4. 数値計算例と実験値との比較

表-1 に L/b ($L=2.5$ m), 中心角 ($\alpha=L/r_0$) を種々変化させたときの最終耐荷力に関する計算値と実験値を示す。また, $\alpha=0$ にしたときは文献²⁾ による結果とよく一致し, 解析方法が妥当であることを示している。中心角が非常に大きいときを除いては計算値と実験値はよく一致する。

一方, 図-5 は曲線工形ばりの $M/M_p \sim M_w/M_{wp}$ の相関曲線を示すが, 全塑性モーメントに至らず $M = M_{cr}$ で横たわれ座屈している様様を示す。

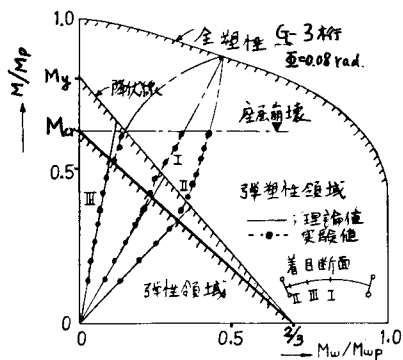


図-5 $M/M_p \sim M_w/M_{wp}$ 相関曲線

5. 考察

図-6 は縦軸に G_{cr}/G_y , 横軸にパラメータ α をとって実験結果と計算値とをプロットしたものである。ただし, 鋼道路橋設計示方書における直線(1)と比較するために, 境界条件がねじり, および弱軸まわりの曲げに対して単純支持となるよう, パラメータ α 中の l と $l = \beta L$ としている。曲線工形ばりの弾性座屈モーメントと両者の境界条件のもとで解いて, 換算スパン係数 β を求めている (実験桁では $\beta = 0.45 \sim 0.50$)。図-6 を観察すると, 中心角が大きくなるに連れて横たわれ耐荷力 α が大きくなり, β が大きくなり, 図-6 示方書の他に平行で減少することがわかる。

あとがき 曲線工形ばりの許容曲げ圧縮応力度 (図-5 の実験) に関する詳細は講演会当日発表します。

参考文献 1) 中井, 幸江, 吉川, 片井; 土木学会関西支部, 昭51, I-56, 2) 幸江, 塩見, 島田; 土木学会関西支部, 昭51, I-58, 3) 吉田博, 井本芳隆; 土木学会論議集 208号, 1972, 12, 4) E. U. Ojalvo and M. Newman; Buckling of Naturally Curved and Twisted Beams, ASCE EM5, 1968, 11, 5) The Task Committee on Curved Girders of the ASCE-ASHTO; Curved I-Girders Bridges Design Recommendations, ASCE ST5, 1977, 5.

表-1 最終耐荷力 (t.m)

桁(72mm幅)	$\alpha=0.5$		$\alpha=0.17$		$\alpha=0.08$		$\alpha=0$		参考文献		
	実	計	実	計	実	計	実	計			
G-1(6cm)	4.6	3.6	1.3	6.7	7.4	0.9	8.2	8.7	0.9	10.3	10.3
G-2(8cm)	5.4	6.0	0.9	8.8	9.3	0.9	11.2	11.6	1.0	12.3	12.3
G-3(10cm)	6.3	9.1	0.7	11.6	11.2	1.0	13.9	13.4	1.0	13.6	13.6
G-4(12cm)	7.8	11.8	0.7	14.2	13.7	1.0	18.0	15.4	1.2	15.6	15.6
G-5(14cm)	—	—	—	18.1	15.9	1.1	19.7	17.3	1.1	17.9	17.9

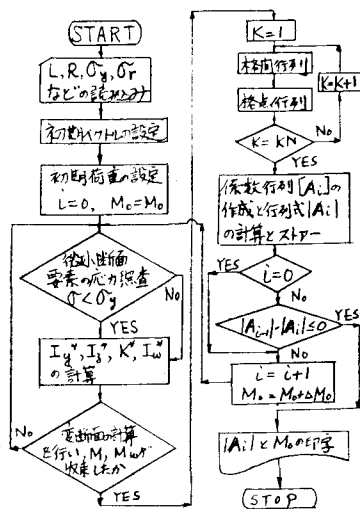
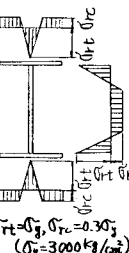
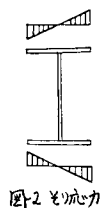


図-4 フローチャート

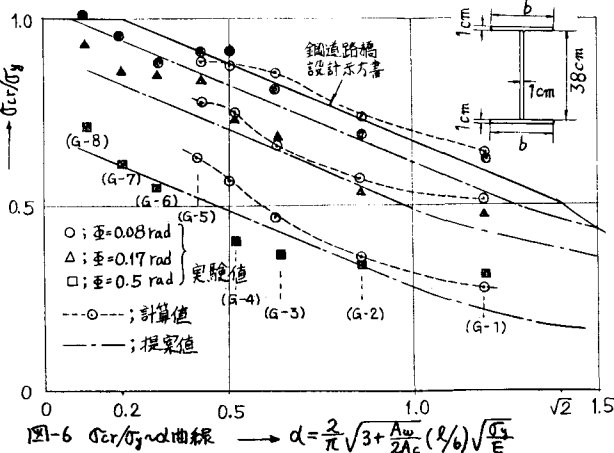


図-6 G_{cr}/G_y 曲線 $\rightarrow \alpha = \frac{2}{\pi} \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c} \left(\frac{l}{b} \right) \sqrt{\frac{G_y}{E}}}$