

九州大学工学部 正員 小川村彰彦

正員 大塚久哲

正員 吉村虎蔵

1. まえがき

現行の鋼道路橋示方書にはフランジ自由突出部の幅厚比制限が定められている。この規定は一律圧縮応力のみが作用する直線形のフランジについて定められたものである。ところが近年、道路線形状の要求から、主桁に曲線工形を用いた曲線橋が多く建設されるようになり、また、この曲線橋は通常の荷重が作用しても主桁内に曲げモーメントの他に曲げねじりモーメントが發生し、また主桁の初期曲率の影響によりフランジ内の応力分布は一律ではなくなる。本研究は、曲線工形圧縮フランジに曲げ応力とねじり応力とが働く場合の弾塑性座屈強度を求め、曲線工形フランジの自由突出幅について考察したものである。

2. 解析理論

解析上の仮定は文献(1)と同じであり、本研究もBijlaardの塑性変形理論を用いている。このとき、応力増分とひずみ増分の関係が次式で定義される。

$$\begin{Bmatrix} \Delta \sigma_r \\ \Delta \sigma_\theta \\ \Delta \tau_{r\theta} \end{Bmatrix} = E \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & 0 \\ k_2 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & k_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_r \\ \Delta \varepsilon_\theta \\ \Delta \gamma_{r\theta} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

モーメントと曲率の関係は次式で定義される。

$$\begin{Bmatrix} M_r \\ M_\theta \\ M_{r\theta} \end{Bmatrix} = \frac{Et^3}{12} \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & 0 \\ k_2 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & k_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_r \\ \chi_\theta \\ \chi_{r\theta} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$k_1 \sim k_4$ は弾性域、塑性域に応じて次のように表わされる。弾性域では $k_1 = \frac{1}{1-\nu^2}$, $k_2 = \frac{\nu}{1-\nu^2}$, $k_3 = \frac{1}{1-\nu^2}$, $k_4 = \frac{1}{2(1+\nu)}$ 。塑性域では $k_1 = \frac{1}{5-4\nu+3e}$, $k_2 = \frac{2}{5-4\nu+3e}$, $k_3 = \frac{4}{5-4\nu+3e}$, $k_4 = \frac{1}{2+2\nu+3e}$ 。ここで $e = \varepsilon_y/\varepsilon_p - 1$, $\varepsilon = \text{外カヒズミ}$, $\varepsilon_y = \text{降伏ひずみ}$, $\nu = \text{ポアソン比}$ である。また、面外変位 w の変位階数は次式にて仮定する。

$$w = \sum_m \left[(1 - \frac{3}{2}R^2 + \frac{1}{2}R^3) \psi_{m1} + b(R - R^2 + \frac{1}{2}R^3) \psi_{m2} + (\frac{3}{2}R^2 - \frac{1}{2}R^3) \psi_{m3} + b(\frac{1}{2}R^2 - \frac{1}{2}R^2) \psi_{m4} \right] \sin \frac{m\theta}{\alpha} \quad (3)$$

ただし、座屈モードは θ 方向には $\sin$ の半波と考えてよいから、 $m=1$ に對してのみ計算を行えばよい。

扇形帯板要素の座屈変形にともなうポテンシャルエネルギー Π は次式で与えられる。

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^\alpha \int_r (M_r \chi_r + M_\theta \chi_\theta + M_{r\theta} \chi_{r\theta}) r dr d\theta - \frac{1}{2} \int_0^\alpha \int_r \sigma_\theta(r) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 r dr d\theta \quad (4)$$

式(4)にポテンシャルエネルギー停留の原理を用いれば扇形帯板要素の基本式を得る。

3. 曲線工形フランジの局部座屈強度

(1) 解析モデル

図1に示す外側フランジのモデルを解析する。残留応力分布は溶接型残留応力分布とし、 $\sigma_{r2} = \sigma_r$, $\sigma_{r1} = \frac{1}{2}\sigma_r$, $\frac{1}{2}\sigma_r$, $\frac{1}{2}\sigma_r$ の3例を計算した。中心角は $\alpha = 0.05\text{rad}$ とする。応力状態は一律圧縮、三角形応力分布、台形応力分布の3例を計算した。残留応力、あるいは引張応力が有る場合の弾塑性時の平均座屈応力は次式によって算定するものとする。

$$\sigma_{cr} = \sigma - \int \sigma_3 dx / b \quad (5)$$

$$\sigma_{cr1} = \sigma - \int \sigma_3 dx / \frac{1}{2}(2 - \alpha) \quad (6)$$

(5)式は一律圧縮応力状態、(6)式は応力勾配がある場合の座屈応力である。

1) 幅厚比(b/t)とアスペクト比(b/a)の関係

幅厚比はアスペクト比の増加にもほぼ一様に減少するが、アスペクト比10程度でほぼ収束することが確かめられたので、以下の計算は $b/a=10$ で計算した。

3) 残留応力、付加応力、中心角の影響

図3、4、に中心角 $\alpha=0.05$ radの時の座屈曲線を示した。その結果、残留応力の大小、及び応力勾配によつて R_{cr} は大きく影響を受けることがわかる。ただし、図には示していないが、矩形板($\alpha=0.0$)及び $\alpha=0.3$ radの時の座屈曲線もこれとほぼ同一になり、中心角の影響は小さいことがわかった。

4. 幅厚比制限への提案

図3、4をもとに残留応力 $\sigma_{ry} = 1/2$ の場合の限界幅厚比を各種鋼材について求めると表1を得る。これから応力勾配や付加応力の場合の b/t は1/3程度大きくなることがわかる。

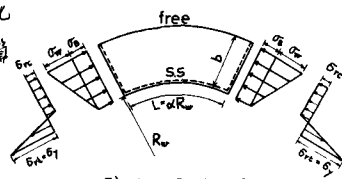


図-1 解析モデル

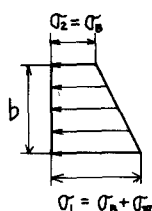


表-1 自由突出部の幅厚比

steel	σ_y	b/t		
		$\frac{\sigma_w}{\sigma_s}=0.0$	$\frac{\sigma_w}{\sigma_s}=0.5$	$\frac{\sigma_w}{\sigma_s}=1.0$
SS41	2400	13	16	16
SM50	3200	12	14	14
SM50Y	3600	11	13	13
SM58	4600	10	11	12

参考文献

- 1) 大塚 吉村 戸崎: 有限変位法による曲線工材の弾塑性座屈強度解析, 第34回工学会年次学術講演会概要集, 1979, 10
- 2) 橋本 伊藤: フランジの局部座屈強度とフランジ幅厚比制限, 工学会論文集, 160号, 1968, 10
- 3) 西野 隆: Residual Stress and Local Buckling Strength of Steel Columns, 土木学会論文集, 172号, 1969, 12
- 4) Culver-Frampton: Local Instability of Horizontally Curved Members, Proc. of ASCE, Vol. 96, No. ST2, Feb. 1970.
- 5) 川村 大塚 戸崎: 有限変位法による曲線工材フランジの局部座屈強度解析, 第34回工学会年次学術講演会概要集, 1979, 10

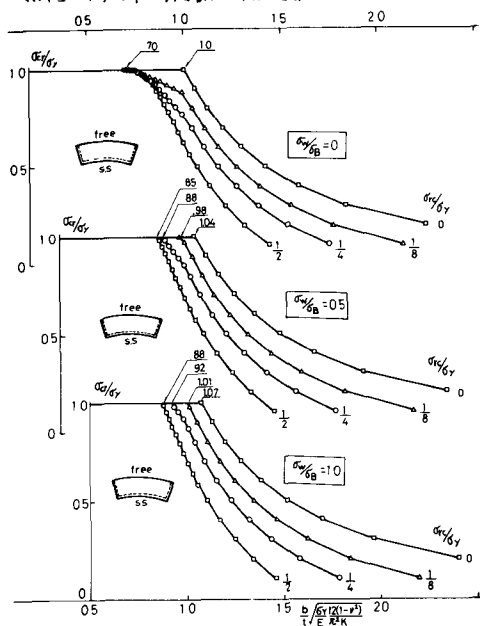


図-3 外側フランジ($\alpha=0.05$)の座屈曲線 (その1)

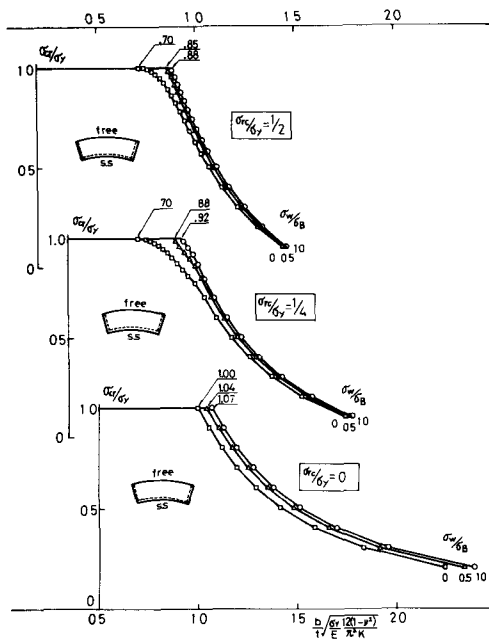


図-4 外側フランジ($\alpha=0.05$)の座屈曲線 (その2)