

九州大学工学部 学生員 〇平田 洋
 ≡ ≡ 正会員 彦坂 熙
 ≡ ≡ 正会員 高海 克彦

1. 緒言

薄肉開断面曲りばりにおいては、断面変形の防止およびねじり剛性の増加を図るために対傾構・ストラット・横構等の横つなぎ材による補剛が不可欠である。しかし、曲りばりの解析において断面剛を仮定する限り、横つなぎ材の応力と断面変形防止効果の合理的評価は困難であり、この問題の解析には通常有限要素法等による立休解析が行われる。これに対し本研究は、基本解析は断面剛を仮定する曲げねじり理論で行なり、横つなぎ材の断面変形防止効果を別途合理的な手法で評価し、一次元の曲りばり理論の修正により断面変形挙動を解析する手法を提示するものである。

2. 横つなぎ材をもつ曲りばりの座標系と断面変形

図1のような円柱座標系 (r, ρ, α) 中に、 N 枚の薄板要素からなる多角形開断面曲りばりを考え、中立点 C を原点とする (x, y, α) 座標系を設ける。 x, y 軸は各々 ρ, r 軸に平行に定め、さらに、板厚中心線に一致する曲線座標 s と、その法線方向座標 n の (n, s, α) 座標系を設ける。本研究では断面変形を、図2のように薄肉多角形開断面ばりを構成する薄板の接合点(節点)において相隣る板要素がなす相対回転角 θ_i で定義する。 N 枚の薄板からなるはりの断面変形の自由度は、 $N-3$ である。

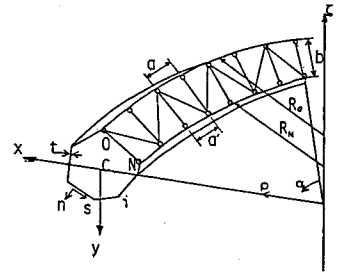


図1 補剛曲りばりの座標系

3. 断面変形のつりあい方程式

横つなぎ材をもつ薄肉開断面曲りばりについて、断面剛を仮定する準開断面曲りばりとしての変位と応力はすべて既知とすれば、断面変形によるはりの任意点の n, s 方向付加変位 u, v は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} u &= u_s l + u_n m - r \alpha \rho - \sum_{i=1}^{N-3} r_{ai} \mu_i \theta_i \\ v &= -u_s m + u_n l + r \alpha \rho + \sum_{i=1}^{N-3} r_{bi} \mu_i \theta_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\text{ただし, } \mu_i = \begin{cases} 1 & (s \leq s_i) \\ 0 & (s > s_i) \end{cases}$$

ここに、 u_s, u_n, ρ は断面変形に伴う s, n 方向の剛体付加変位および剛体付加回転角であり、 l, m は、 $l = \cos(\alpha, n)$ 、 $m = \cos(\alpha, s)$ で定義される方向余弦、 r_{ai}, r_{bi} はせん断中心から、また r_{ai}, r_{bi} は節点 i から任意点に引いた位置ベクトルの s および n 方向成分である。

横構は、力学的性質が等価な幅 b 、板厚 t の仮想薄板に置き換えて扱う。この仮想薄板の曲げ剛性は 0 で、はり軸方向垂直応力も受け持たないが、せん断変形とはり軸直角方向伸縮には抵抗し、 θ^* のせん断流と単位長当り P^* の s 方向軸力を受けるものとする(図3)。仮想薄板厚 t は、横構トラスパネルに貯えられるひずみエネルギーのうち、 θ^* による仮想薄板のエネルギーをトラス部材軸力によるひずみエネルギーに等置して定められる。

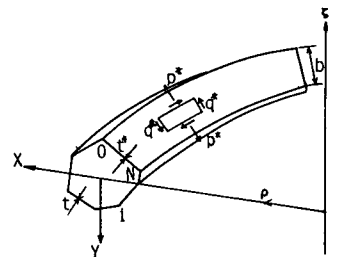


図2 断面変形の定義

図3 横構の仮想薄板置換

断面変形による薄板中央面でのせん断ひずみ γ_{sx} の式を板厚中心に沿って1周積分すると、軸方向変位の適合

条件から δ^* が次式で表わされる。

$$\delta^* = \frac{2R_s}{(R_N + R_o)} \left\{ G \frac{2\Omega}{b/t^*} \cdot \frac{1}{R_s} \left(\varphi' - \frac{v'_s}{R_s} \right) + \sum_{i=1}^{N-3} G \cdot \frac{R_o^2}{R_N^2} \cdot \frac{2\Omega_i}{b/t^*} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \theta'_i \right\} \quad (2)$$

ここに、 $2\Omega = R_s^2 \oint \frac{ds}{R_s^3} da$ 、 $2\Omega_i = R_s^2 \int_{a_i}^{a_{i+1}} \frac{v_{si}}{R_s^3} da$ 、 R_s はせん断中心の曲率半径、 G はせん断弾性係数。

他方、 P^* による仮想薄板のはり軸直角方向伸びと、断面変形によるはり仮想薄板の x 方向相対変位の適合条件より、 P^* が次式で表わされる。

$$P^* = \frac{R_o - R_N}{R_N \log(R_o/R_N)} \cdot \sum_{i=1}^{N-3} E^* \cdot \frac{v_{si}^*}{b/t^*} \cdot \theta_i \quad (3)$$

ここに、 E^* は P^* による仮想薄板のひずみエネルギーと部材軸力のひずみエネルギーを等置して得る換算ヤング係数、 v_{si}^* は節点 i から仮想薄板に下した垂線の長さ。

いま、横断面 $\alpha = \alpha_k$ に対傾構を有し、横構を仮想薄板に置換した準閉断面ばりが任意荷重を受けて断面変形するものとする。はり仮想薄板の接合線 図4 スリットを入れた曲りばりの一方にスリットを入れて開断面ばりにし、スリット部に単位長さ当り P^* の力と δ^* のせん断流を仮想薄板面内方向に外力として作用させても力学的に等価である(図4)。このとき、式(1)の変位に基づく仮想仕事の原理から、横構と対傾構を有する薄肉閉断面ばりの断面変形の $N-3$ 個のつりあひ方程式が次のように得られる。

$$\sum_{j=1}^{N-3} \left[\frac{1}{R_s^2} E I_{ij} \theta_j'' + \left\{ G \frac{2\Omega}{b/t^*} \left(\frac{H_{ijw}}{I_w} - 2\Omega - \frac{R_o^2}{R_N^2} 2\Omega_i \right) \frac{2}{(R_N + R_o) R_s} - E(I_{ij} + J_{ij}) \frac{1}{R_s^3} \right\} \theta_j'' + \left\{ f_{ij} + \frac{1}{R_s^2} E K_{ij} + E^* \frac{v_{si}^* \cdot v_{sj}^*}{b/t^*} \cdot \frac{R_o - R_N}{R_s \log(R_o/R_N)} \right. \right. \\ \left. \left. - G \frac{4\Omega_i \Omega_j}{b/t^*} \cdot \frac{G_{ijw}}{I_w} \cdot \frac{2}{(R_o + R_N)} + \sum_{k=1}^N \frac{E A_k}{\alpha} \cdot \bar{r}_{ki} \cdot \bar{r}_{kj} \delta(\alpha - \alpha_k) \right\} \theta_j \right] - \int_a \left\{ \frac{\rho}{R_s} (p_n \bar{r}_{ni} - p_n \bar{r}_{oi}) + \frac{\partial \theta^{(n)}}{\partial s} \bar{r}_{ni} + \frac{1}{R_s} \theta^{(n)} t (y - y_i) \right\} \mu_i da = 0 \\ (i = 1, 2, \dots, N-3) \quad (4)$$

ここに、 I_{ij} 、 H_{ijw} 、 f_{ij} 、 K_{ij} 、 G_{ijw} は断面形状によつて決まる既知関数、 p_n 、 p_n は各々単位面積当りの外力の n 、 x 方向成分、 $\theta^{(n)}$ 、 $\theta^{(n)}$ は断面剛の仮定に基づくはり理論による軸方向応力とせん断流、 E はヤング係数、 A_k 、 d は各々対傾構の断面積と長さ、 δ はディラックのデルタ関数、 $\bar{r}_{ki}$ 、 $\bar{r}_{kj}$ は、各々節点 i 、 j から対傾構に下した垂線の長さ。

4. 計算例

図5の諸元を有する2主桁曲りばりを対象として数値計算を行った。はりの交点では断面変形が拘束されるものとし、部材断面積が 2.5 cm^2 の横構(図5(b)の破線部材)を6パネル、断面積 $A_d = 3.0 \text{ cm}^2$ の対傾構を図5(a)のように2本配置し、横断面配置係数 K を0、1、 ∞ と変化させた。

100 kg/m^2 の荷重を上フランジに満載した時の外主桁と下フランジとの接合部の水平変位・垂直変位の分布を図6に示す。

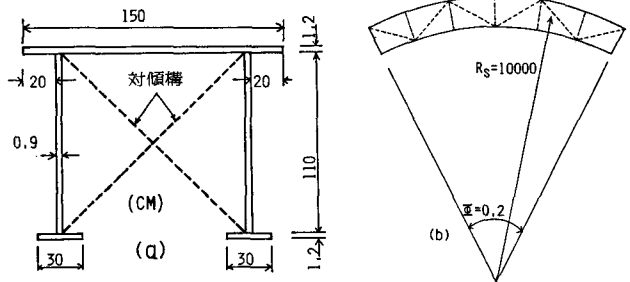


図5 2主桁曲りばりの解析モデル

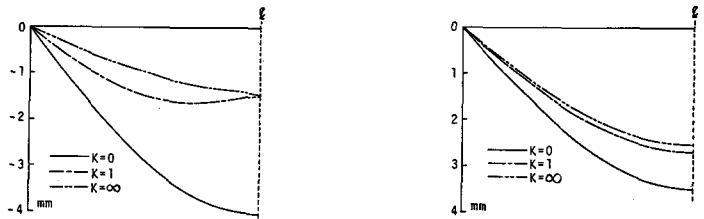


図6 外主桁下フランジ中央の水平変位(左図)と同垂直変位(右図)