

広島大学工学部 正 藤井 堅, 広島大学工学部 正 大村 裕
山口県 正 野 裕 誠, 清水建設 正 河野泰直

1. まえがき

従来, 曲線桁の腹板の非線形挙動に関する研究は, C. G. Calver¹⁾, 倉面ら²⁾, 三上ら³⁾をはじめかなりの研究報告がある。しかし, これらの解析では, 解析モデルの境界条件, 荷重条件等に問題が残されている。例えば, フランジ・ウェブ相互の作用については十分な検討がなされていない。また, 曲線桁特有のねじり変位がウェブの挙動に及ぼす影響も明らかにしておく必要があると考える。本解析では, フランジを扇形板, ウェブを円筒曲板としてとらえ, 有限要素法を用いて桁の断面変形解析を行った。要素の形状関数は Nagata の方法に従っており, 剛体変位と歪みエネルギーに關与する項に分けて与えている。

2. 円筒シェル要素

(i) 変位-歪み関係式

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \\ \gamma_{\theta z} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_{,\theta}/R + U/R \\ W_{,z} \\ W_{,\theta}/R + V_{,z} \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} U_{,\theta}^2/R^2 \\ U_{,z}^2 \\ 2U_{,\theta}U_{,z}/R \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$U = u, \quad V = v - \zeta u_{,\theta}, \quad W = w - \zeta u_{,z},$$

(u, v, w は中央面の変位)

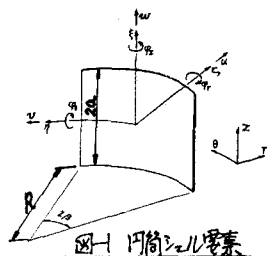


図-1 円筒シェル要素

(ii) 形状関数

形状関数は, 24個の一般化変位を用いて, 次の如くである。

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos \beta \eta & \sin \beta \eta & 0 & a \zeta \sin \beta \eta & -a \zeta \cos \beta \eta & R \sin \beta \eta \cos \beta \eta \\ \sin \beta \eta & -\cos \beta \eta & 0 & -a \zeta \cos \beta \eta & -a \zeta \sin \beta \eta & R \sin^2 \beta \eta \\ 0 & 0 & 1 & -R \sin \beta \eta & 0 & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \delta_6 \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \zeta^2 \beta \eta^2 & \zeta^3 \beta \eta^2 & \zeta \eta^2 & \zeta^2 \beta \eta^2 & \zeta^3 \beta \eta^2 & \zeta \eta^2 \\ & & 0 & & & 0 \\ & & & & & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_7 \\ \delta_8 \\ \delta_9 \\ \delta_{10} \\ \delta_{11} \\ \delta_{12} \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \zeta \eta^3 \\ \delta_{13} \\ \delta_{14} \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} 0 & \zeta \eta^3 & 0 & \zeta \eta^3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \zeta \eta^3 & 0 & \zeta \eta^3 & 0 & \zeta \eta^3 & 0 & \zeta \eta^3 & \zeta \eta^3 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{15} \\ \delta_{16} \\ \delta_{17} \\ \delta_{18} \\ \delta_{19} \\ \delta_{20} \\ \delta_{21} \\ \delta_{22} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

3. 扇形板要素

(i) 変位-歪み関係式

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \gamma_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_{,r} \\ U_{,\theta}/r + U/r \\ U_{,\theta}/r + V_{,r} - V/r \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} U_{,r}^2 + W_{,r}^2 \\ U_{,\theta}^2/r^2 + W_{,\theta}^2/r^2 \\ 2(U_{,r}U_{,\theta} + W_{,r}W_{,\theta})/r \end{Bmatrix} \quad (3)$$

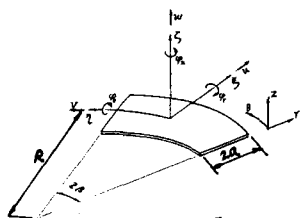


図-2 扇形板要素

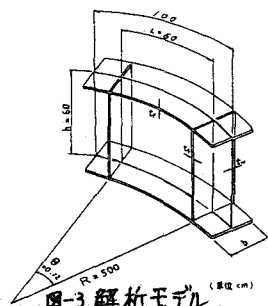


図-3 解析モデル

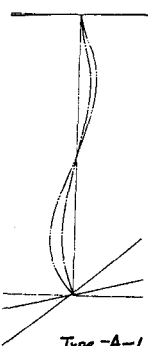


図-4 断面変形図

Tension Side

Compression Side

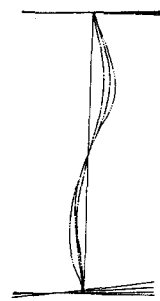


図-5 断面変形図

(iii) 形状関数

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \eta & \sin \beta \eta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \beta \eta & \cos \beta \eta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (R+a_3) \sin \beta \eta & R-(R+a_3) \cos \beta \eta & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \\ \xi_5 \\ \xi_6 \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} 5 \eta^2 \cos \beta \eta & 5 \eta^2 \sin \beta \eta & 5 \eta^2 \cos \beta \eta & 5 \eta^2 \sin \beta \eta & 5 \eta^2 \cos \beta \eta & 5 \eta^2 \sin \beta \eta \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \\ \xi_5 \\ \xi_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 5 \eta^2 \cos \beta \eta & 5 \eta^2 \sin \beta \eta & 5 \eta^2 \cos \beta \eta & 5 \eta^2 \sin \beta \eta \end{Bmatrix} \quad (*)$$

4. 曲線解析

解析は図3のようなモデルに対し、荷重増分法を適用した。また、応力-歪み関係式は完全弾塑性とした。剛性行列の作成は、剛体変位に対応する項(20~26)を削除している。

荷重条件は、あらかじめ梁理論によって端部の変位を求め、それを強制変位として入力した。また、反りねじりは両端で完全反り拘束とした。Case-1は $t_f=6mm$, $t_w=3mm$, $b=250mm$ とし、Case-2は $t_f=10mm$, $t_w=3mm$ とし、 A_f/A_w は一致させた。また、type-Aは中央断面での曲げとねじりの比 $\eta_f/\eta_t=2$ としたものであり、type-Bは、両端でねじり角を拘束したものである。

中央断面の変形状態を図-4に示す。また、図-5は、両端の断面力を示している。図-6は、断面変形によるフランジねじり角を示す。type-Aではフランジのねじり座層を生じ、その後、ねじり変位は増加するものの強度的には期待できる。また、type-Bと比較してtype-Aはねじり角が小さめに現われているのは、ねじりモーメントの方向をフランジのねじり変位を拘束するように作用させたためと思われる。

本解析では、ウェブは特に非線形性の強い挙動を示し、はっきりとした座層現象は現われなかった。また、座層解析では2次の座層モードが得られたが、本解析では、1次から3次のモードに移行する現象を呈した。

参考文献 1) Silver C.G.他; Bending Behavior of Cylindrical Web Panels, Proc. ASCE 104/98 5710 2) 倉田 福彦; 曲げとねじり曲線プレートが受ける1次プレートの弾性挙動について, 2000論文集, 1998.11 3) エト 他; 曲げとねじり円筒腹板パネルの非線形挙動, 土木学会論文集, 1990.7

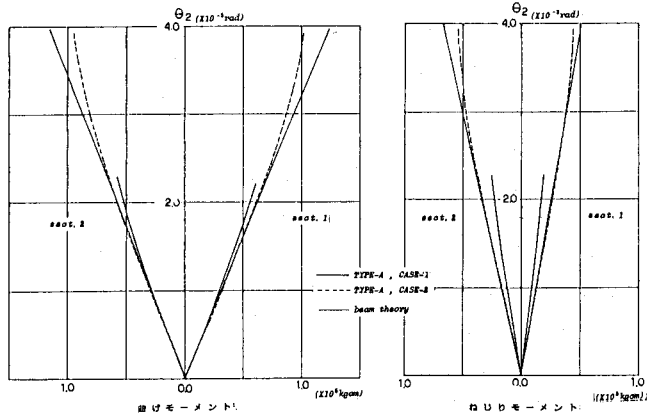


図-5 断面力

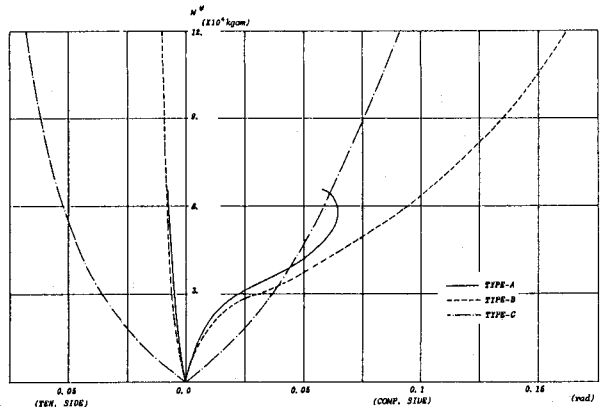


図-6 荷重-相対ねじり角曲線 type-1

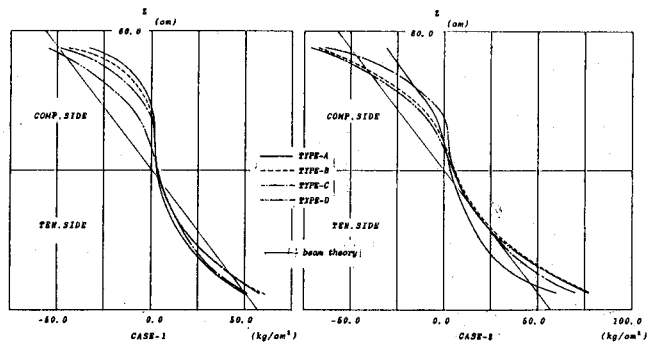


図-7 周方向応力分布図