

東京大学 学生員 上田 多門
 東京都立大学 正員 山崎 淳
 東京大学 学生員 松井 雅志

鉄筋コンクリート製薄肉円筒シェル構造物を鉄筋コンクリート製平板部材要素の集合体と考え、その要素のひびわれ発生前の弾性解析、及びひびわれ発生後の直交異方性板弾性解析を次に述べる鉄筋コンクリート製平板部材要素モデルを用いて行ない、実験結果との比較と若干の検討を加えた。

1. 鉄筋コンクリート製平板部材要素モデル（以下、RC平板モデルと呼ぶ）

- i) ひびわれ発生前の仮定；等方弾性体のコンクリートの中に、せん断剛性を持つ線材の鉄筋が直交2方向に含まれている。初期ひびわれは、コンクリートに作用する最大主引張応力と直角な方向に入る。
- ii) ひびわれ発生後の仮定；コンクリートはひびわれと直角な方向には剛性のない直交異方性体になるが、ひびわれを介してせん断力を伝達することができる。コンクリート及び鉄筋のせん断剛性の評価が重要な困難な問題であるが、各々、 $M_c G_c$, $M_s G_s$ ($G_c = \frac{E_c}{2(1+\nu_c)}$, $G_s = \frac{E_s}{2(1+\nu_s)}$: せん断弾性係数)として、低減係数 M を变化させる ($0 \leq M_c \leq 1$, $0 \leq M_s \leq 1$) ことにより、比較、検討を行なった。

以上の仮定を用いると、以下のような関係式を得る。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = (1-R-P) \begin{Bmatrix} \sigma_c \\ \sigma_s \\ \tau_{cs} \end{Bmatrix} + R \begin{Bmatrix} \sigma_c \\ 0 \\ \tau_{cs} \end{Bmatrix} + P \begin{Bmatrix} 0 \\ \sigma_s \\ \tau_{sy} \end{Bmatrix} \quad \text{----- (1)}$$

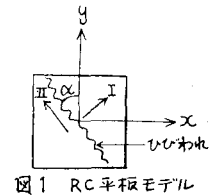


図1 RC平板モデル

コンクリート及び鉄筋の構成方程式は、ひびわれ発生前で

$$\begin{Bmatrix} \sigma_c \\ \sigma_s \\ \tau_{cs} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_c}{1-\nu_c^2} & \frac{\nu_c E_c}{1-\nu_c^2} & 0 \\ \frac{\nu_c E_c}{1-\nu_c^2} & \frac{E_c}{1-\nu_c^2} & 0 \\ 0 & 0 & G_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \sigma_s \\ \sigma_c \\ \tau_{sy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_s & 0 & 0 \\ 0 & E_s & 0 \\ 0 & 0 & G_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{----- (2a)}$$

ひびわれ発生後で

$$\begin{Bmatrix} \sigma_c \\ \sigma_s \\ \tau_{cs} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_c & 0 \\ 0 & 0 & M_c G_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_c \\ \epsilon_s \\ \gamma_{cs} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \sigma_s \\ \sigma_c \\ \tau_{sy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_s & 0 & 0 \\ 0 & E_s & 0 \\ 0 & 0 & M_s G_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{----- (2b)}$$

RC平板モデル全体の構成方程式は、式(1)(2)から

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{----- (3)} \quad [K] = \begin{bmatrix} (1-R-P) \frac{E_c}{1-\nu_c^2} + R E_c & (1-R-P) \frac{\nu_c E_c}{1-\nu_c^2} & 0 \\ \text{Sym.} & (1-R-P) \frac{E_c}{1-\nu_c^2} + R E_c & 0 \\ (1-R-P) G_c + (R+P) G_s & 0 & (1-R-P) G_c + (R+P) G_s \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} (1-R-P) E_c \sin^2 \alpha + 4(1-R-P) M_c G_c \sin \alpha \cos \alpha + R E_c & (1-R-P) E_c \sin \alpha \cos \alpha - 4(1-R-P) M_c G_c \sin \alpha \cos \alpha & -(1-R-P) E_c \sin^2 \alpha \cos \alpha - 2(1-R-P) M_c G_c \sin \alpha \cos \alpha (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \\ (1-R-P) E_c \sin \alpha \cos \alpha - 4(1-R-P) M_c G_c \sin \alpha \cos \alpha + R E_c & (1-R-P) E_c \cos^2 \alpha + 4(1-R-P) M_c G_c \cos^2 \alpha + R E_c & -(1-R-P) E_c \sin \alpha \cos \alpha + 2(1-R-P) M_c G_c \sin \alpha \cos \alpha (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \\ (1-R-P) E_c \sin \alpha \cos \alpha + 4(1-R-P) M_c G_c (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) + (R+P) M_s G_s & (1-R-P) E_c \sin^2 \alpha \cos \alpha + (1-R-P) M_c G_c (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) + (R+P) M_s G_s & (1-R-P) E_c \cos^2 \alpha + 4(1-R-P) M_c G_c \cos^2 \alpha + R E_c \end{bmatrix}$$

せん断伝達のない ($\gamma_{cs}=0$) ひびわれの角度 β は、次の4次方程式を解いて求まる。

$$\tan^4 \beta + \left\{ \frac{(1-R-P) E_c + 2(R+P) M_c G_s}{(1-R-P) E_c + R E_s} \left(\frac{\sigma_c}{\tau_{cs}} \right) - \frac{2(R+P) M_c G_s}{R E_s} \left(\frac{\sigma_s}{\tau_{sy}} \right) \right\} \tan^2 \beta + \left\{ \frac{2\{(1-R-P) E_c + R E_s\} (R+P) M_c G_s}{\{(1-R-P) E_c + R E_s\} R E_s} \left(\frac{\sigma_x}{\tau_{xy}} \right) - \frac{\{(1-R-P) E_c + 2(R+P) M_c G_s\} R}{\{(1-R-P) E_c + R E_s\} P_s} \left(\frac{\sigma_y}{\tau_{xy}} \right) \right\} \tan \beta - \frac{\{(1-R-P) E_c + R E_s\} R}{\{(1-R-P) E_c + R E_s\} P_s} = 0$$

ただし、 x, y : 鉄筋の方向

I, II: ひびわれと直角方向と平行方向

C, S: コンクリート, 鉄筋を示す。

σ , τ : 直応力, せん断応力 ϵ , γ : 直ひずみ, せん断ひずみ α , β : ひびわれの方向
 E , G : 弾性係数, せん断弾性係数 ν : ポアソン比 P : 鉄筋比 μ : 低減係数
 $[K_i]$ $[K_s]$: ひびわれ発生前, 発生後の剛性マトリックス

式(9)に有限要素法によって求めた断面力 (σ_x , σ_y , τ_{xy}) を代入すれば, ひずみ (ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy}) が求まる。

2. 実験結果との比較及び検討

RC 薄肉円筒シェル構造モデル実験結果との比較を荷重-ひずみ (ϵ_x , ϵ_y) 曲線を用いて行なった結果, 以下のことがわかった。なお既往の RC 平板部材の 2 軸載荷実験との比較も合わせて行ない, RC 平板モデルの妥当性をさうに検討した。

(※前田建設の鉄筋コンクリート格納容器のせん断実験)

・ひびわれ発生前のいわゆる弾性領域では, モデルは実際の挙動を良好に表現している。

・ひびわれ発生後は, ひびわれ幅が小さいと思われる間では, $\mu_s=1$ とした荷重-ひずみ曲線の傾きか, 荷重-ひずみ履歴の実験曲線の包絡線の傾きと比較的良く一致する。さらに荷重が大きくなり, ひびわれ幅が大きくなると, $\mu_s=0$ とした曲線の傾きに近づくか, あるいは, それ以上の傾きとなる。(図 2)

・RC 平板部材の実験結果との比較から, ひびわれと大きい角度で交わる方向の鉄筋の荷重-ひずみ曲線には, $\mu_s=1$ とした曲線の傾きが良好に一致し, 小さい角度で交わる方向の鉄筋には, 逆に $\mu_s=0$ とした曲線の傾きと比較的良く一致している。全般的に, 前者の鉄筋の方がモデルによる曲線と実験による曲線との傾きが良く一致している。(図 3)

・ μ_c , μ_s を変化したモデルによる曲線の比較から, μ_c より μ_s の与える影響の方が大きい事がわかる。(図 3)

これは, ひびわれがコンクリートに作用する主引張応力と直角な方向に出るため, ひびわれ面でのせん断変形がもとより小さい事によるものであろう。

・モデルによる初期ひびわれの角度 α と, 実験のひびわれの角度とは良好に一致している。また, ひびわれが発達し, 幅が広くなることによって, せん断伝達がなくなる時のひびわれの角度 β は, α とほぼ同じ値であり, このことは, 実験において終局時までひびわれの角度があまり変化していないことと対応している。ひびわれの角度があまり変化しない事は, コンクリートの圧縮応力の流れが変化していない事を示しており, モデルによる解を求めるのに用いた FEM 弾性解である断面力 (σ_x , σ_y , τ_{xy}) を, ひびわれ発生後も十分信頼をもって用い得ると思われる。

以上の比較検討から, この RC 平板モデルは, ひびわれ幅, ひびわれと鉄筋のなす角度など鉄筋のせん断変形に大きな影響を与える要因と μ との適切な関係を与えれば, 鉄筋が降伏するまでの応力解析を良好な精度を持つて行なえる事がわかった。

最後に, 多大なる資料と御助言を賜りました, 電力中央研究所 青柳征夫氏, 資料を提供していただいた, 前田建設工業株式会社 山田一字氏にこの紙面を借りて厚く御礼を申し上げます。

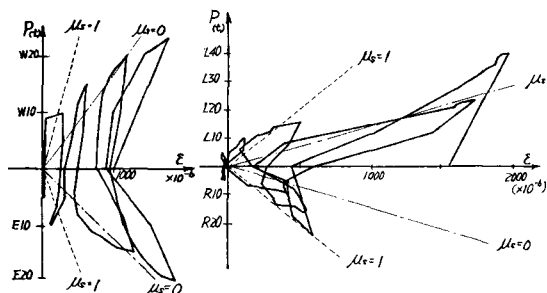


図 2.2

図 2.6

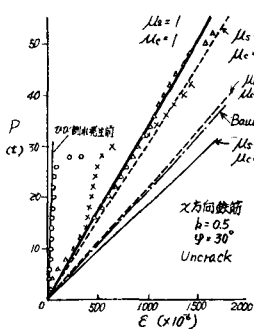


図 3.1

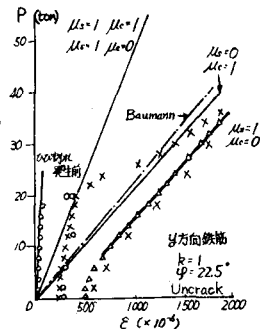


図 3.2