

北海道大学 正員 角 田 与史雄
 堺 孝 司
 能 町 純 雄

1. まえがき

鉄筋は細い棒状体であるため、軸方向の変形に対しては効果的に抵抗できるが、それ自身の曲げおよびせん断剛性は非常に小さいので、鉄筋コンクリートスラブの曲げ剛性は、配筋方向と主曲げモーメントの方向との偏角に応じて異なる値をとる。その影響は、ひびわれ発生前の状態ではそれ程大きくはならないが、ひびわれ発生後ではかなり大きなものとなる。本文は、このようなスラブの曲げ変形特性についての一つの定式化法を示し、実験的検討を加えたものである。なお、スラブの曲げひびわれの入り方には大別して；一方向のひびわれのみが生ずる場合、直交する二方向にひびわれが生ずる場合、および上面と下面とにそれぞれ一方向のひびわれが生ずる場合の三種があるが、第二の場合はそれぞれの鉄筋方向に対してはり理論を適用することで十分と考えられ、また、第三の場合は第一の場合の拡張として取扱うことが可能であるので、以下では専ら第一の場合について述べる。

2. 計算方法

ひびわれ発生後のスラブの変形に対しては一般に圧縮鉄筋およびコンクリートのポアソン比の影響は二次的なものとして取扱うだけで十分であるので、以下ではこれを無視する。引張鉄筋は、最大主曲げモーメントの方向の x 軸から θ_1 および θ_2 の方向に配置されているものとし、ここでは簡単のために両者に対する有効高さ d は等しいと近似し、それぞれの方向の鉄筋比を p_1 および p_2 とする。また、ひびわれの方向は y 軸から $-\varphi$ なる角度にあるものとし、その方向に ξ, η 軸をとる (図-1)。

ところで、状態Ⅰから状態Ⅱへの過渡状態を取扱う方法は、従来、はりを対象として種々の提案がなされている。その一つとして、ひびわれ位置の鉄筋応力 σ_s とひびわれをまたぐ平均ひずみ $\bar{\epsilon}_s$ とを関係づける方法がある。この種の 방법은、状態Ⅱの計算を行う場合に、鉄筋のヤング率として実際の値 E_s を用いる代りに、引張ゾーンのコンクリートの寄与を考慮して、換算されたヤング率 $\bar{E}_s = \sigma_s / \bar{\epsilon}_s$ を用いることと実質的にはほぼ同じである。ここでは CEB-FIP 指針の $\sigma_s - \bar{\epsilon}_s$ 関係を用いることにすれば、 $\bar{E}_s$ は次式で与えられる。

$$\bar{E}_s = E_s / \left\{ 1 - \left(\frac{\sigma_{s,cr}}{\sigma_s} \right)^2 \right\} \quad \text{--- (1)}$$

ここに $\sigma_{s,cr}$ は、ひびわれ発生時の鉄筋応力を状態Ⅱの理論で計算した値を表わす。

いま、スラブが変形して、鉄筋位置の高さの面に平均ひずみ $\bar{\epsilon}_{s\xi}, \bar{\epsilon}_{s\eta}, \bar{\gamma}_{s\xi\eta}$ が生じたものとする。これらの中、 $\bar{\epsilon}_{s\eta}$ は他に比べて微小であるので以下ではこれを無視する。このとき鉄筋の受持つ力の ξ, η 方向成分は、次式で表わされる。

$$\begin{Bmatrix} T_{s\xi} \\ T_{s\eta} \\ T_{s\xi\eta} \end{Bmatrix} = d E_c \begin{vmatrix} C_4 & C_3 \\ C_2 & C_1 \\ C_3 & C_2 \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\epsilon}_{s\xi} \\ \bar{\gamma}_{s\xi\eta} \end{Bmatrix} \quad \text{--- (2)}$$

ここに

$$C_m = \sum_i \bar{n}_i p_i \sin^{(4-m)} \rho_i \cos^m \rho_i \quad \text{--- (3)}$$

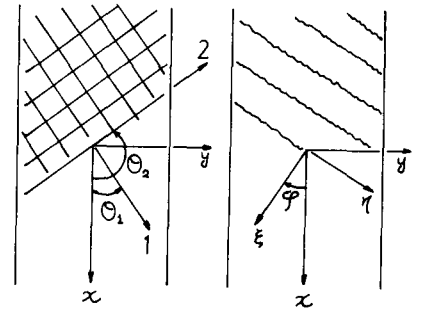


図-1

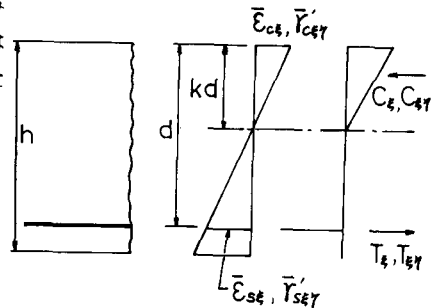


図-2

$$\bar{n} = \bar{E}_s / E_c, \quad \rho_i = \theta_i + \varphi \quad \text{--- (4)}$$

ここで初めに図-2 に示すように状態Ⅱに対応する応力状態を仮定することにより、モーメントのつり合い条件から

$$T_\xi = M_\xi / d (1 - \frac{k}{3}), \quad T_{\xi\eta} = M_{\xi\eta} / d (1 - \frac{k}{3}) \quad \text{--- (5)}$$

ここで $T_\xi = T_{s\xi}$ となるが、 $T_{\xi\eta}$ は必ずしも $T_{s\xi\eta}$ と一致するとは限らない。その場合、つり合い力 $D = T_{\xi\eta} - T_{s\xi\eta}$ は鉄筋の dowel action およびひびわれ面のかみ合わせ作用によってひびわれ間のコンクリートに伝達される。従ってせん断変形 $\gamma_{s\xi\eta}$ は $M_{\xi\eta}$ による変形 $\gamma'_{s\xi\eta}$ と、 D による二次変形 $\gamma''_{s\xi\eta}$ との和からなる。後者は一般的に次式で表わすことができる。

$$\gamma''_{s\xi\eta} = \alpha_s \frac{D}{d E_c} \quad \text{--- (6)}$$

このとき、力のつり合い条件より、中立軸高さの計算式が次式のように得られる。

$$\left. \begin{aligned} k &= \sqrt{A(2+A)} - A \\ A &= \frac{C_4 + 2 m_{\xi\eta} C_3 + \alpha_s (C_2 C_4 - C_3^2)}{1 + \alpha_s (C_2 - m_{\xi\eta} C_3)} \end{aligned} \right\} \quad \text{--- (7)}$$

ここに $m_{\xi\eta} = M_{\xi\eta} / M_\xi$ を表す。上式より k が定まれば、ひずみの計算が可能となる。

3. 実験的検討

二次変形に対する影響係数 α_s については、実験的に検討を行った。すなわち、配筋法を変えたスラブ供試体の一方向曲げ実験でのひずみ測定結果より、二次変形を偏心せん断力による変形に模倣し、近似的に次式を仮定できることがわかった。

$$\alpha_s = \frac{2}{n_D} \cdot \frac{d}{h} \left(1 + \frac{12e}{h^2} \right) \quad \text{--- (8)}$$

ここに $e = d - h/2$ を表す。また、 n_D は剛性の低下過程を考慮するための係数で、実験より推定された値は図-3 に示す通りである。これより実用上は次式を仮定することができよう。

$$n_D = (T_{s\xi,cr} / T_{s\xi})^{2.5} \quad \text{--- (9)}$$

ここに $T_{s\xi,cr}$ はひびわれ発生時の $T_{s\xi}$ の状態Ⅱの計算値を表す。なお、(1) 式に対しても上式と同じ変数を用いて表わすことができる。すなわち

$$\bar{E}_s = E_s / \{ 1 - (T_{s\xi,cr} / T_{s\xi})^2 \} \quad \text{--- (10)}$$

図-4 および図-5 は、上記の実験で測定された引張面の軸方向平均ひずみを、上記の方法による計算値と比較した例を示したものである。その際、計算上は $\varphi = 0$ と仮定した。実際には二次応力によりひびわれ方向の再分配が起るので、この仮定は必ずしも正確ではないが、計算値は実際の傾向を良く示している。また、図-5 には n_D の値を種々に固定したときの計算値も合わせて示してある。この図に見られるように、二次変形は、スラブのせん断変形に対してのみならず、軸方向の変形に対してもかなりの影響を及ぼす場合のあることがわかる。

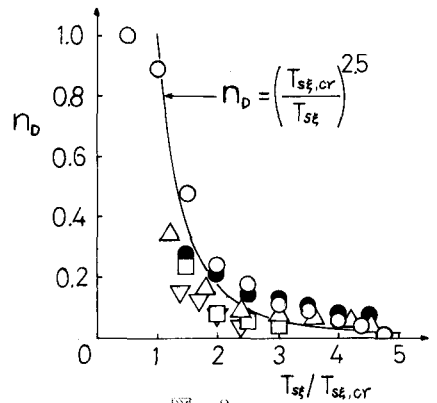


図-3

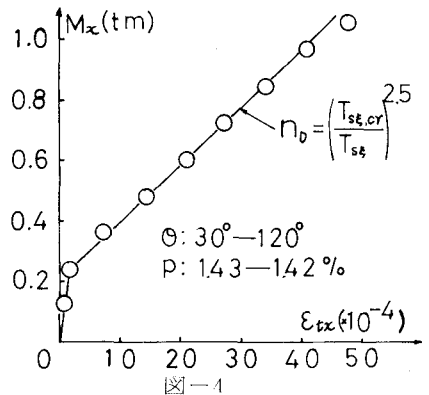


図-4

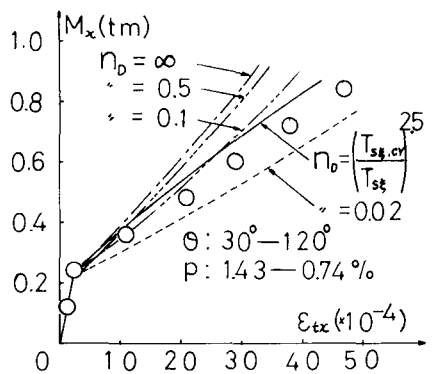


図-5