

北海道大学 正員 堺 孝 司

北海道大学 正員 角田与史雄

北海道大学 正員 能町 純雄

1. まえがき 近年、鉄筋コンクリート(RC)構造物の設計法として、限界状態設計法の概念に基づく設計法の採用が世界的な潮流となってきた。日本においても、現在用いられている許容応力度設計法から限界状態設計法への移行が検討されていることは周知の通りである。限界状態設計法では、構造物の終局耐力に対する安全性の検討に加えて、使用性状など、考えられるあらゆる限界状態に関して注意を払わなければならないので、従来設計上あまり明確な位置づけがなされず、あいまいに扱われてきた問題についての解明が必要となり、このような問題が解決されて初めて限界状態設計法の真価が発揮される可言えよう。上述のような意味においてRCスラブを考えてみると、ひびわれ幅の検討などのような、使用状態における性状を把握する上でまだ解明されなければならない問題が残されているように思われる。この問題の複雑さは、RCスラブにおいては一般に主曲げモーメントの方向と配筋方向とが一致しないということに起因している。RCスラブの曲げ変形挙動が作用曲げモーメント方向と配筋方向との相互関係に大きく依存するだろうことは、鉄筋が板状の補強材ではなく、方向性をもった繊維状補強材として配置されていることから明らかである。

本研究では、鉄筋の繊維状補強材としての特性、引張部コンクリートの有効性、およびひびわれ面における鉄筋のほぞ作用ならびに骨材のかみ合せ作用の二次的な影響などを考慮したRCスラブの新しい曲げ変形理論を導出し、一方向曲げ実験によって理論を補完すると共に、実験結果とそれに対応する数値計算結果との比較を行なった。また、本理論によるRCスラブの変形特性を見るために、若干の数値計算を行なった。なお、本研究に対して著者の一人が吉田研究奨励金を受けた。ここに記して謝意を表する。

2. 理論的考察 ひびわれ発生後における引張部コンクリートの曲げ剛性に対する寄与は、鉄筋の弾性係数 E_s を見かけ上変化させることによって間接的に評価する。すなわち、次式の関係を用いる：

$$\sigma_s = f E_s \bar{\epsilon}_s, \quad \bar{E}_s = E_s f, \quad f = 1 / [1 - (T_{s\xi, cr} / T_{s\xi})^2] \quad (1)$$

ここで、 $T_{s\xi, cr}$ および $T_{s\xi}$ はそれぞれ、ひびわれ発生時および任意の荷重レベルにおけるひびわれ位置での ξ 方向 (ひびわれ方向 η と直角な方向) 鉄筋軸力を表わす。次に、RCスラブ要素の鉄筋群 i の受けもつ力の ξ, η 方向成分と鉄筋の平均ひずみとの間の関係は、近似的に次式で表わすことができる：

$$\begin{Bmatrix} T_{si\xi} \\ T_{si\eta} \\ T_{si\xi\eta} \end{Bmatrix} = h E_c \begin{bmatrix} C_{i4} & C_{i3} \\ C_{i2} & C_{i1} \\ C_{i3} & C_{i2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{si\xi} \\ \epsilon_{si\eta} \\ \gamma_{si\xi\eta} \end{Bmatrix} \quad (2) \quad \begin{aligned} C_{im} &= \bar{n} p_i \beta_i \sin^{(4-m)} \rho_i \cos^m \rho_i \\ \beta_i &= d_i / h, \quad \bar{n} = E_s / E_c \\ \rho_i &= \theta_i + \phi \end{aligned}$$

ξ 方向に関する平面保持の仮定と力のつりあいより式 (3) ~ (5) が、またせん断ひずみに関する中立軸位置が ξ 方向ひずみに関する中立軸位置に等しいと仮定すると同様な関係として式 (6) ~ (8) が得られる：

$$\bar{\epsilon}_{t\xi} (1-k) = \bar{\epsilon}_{si\xi} (\beta_i - k) = \bar{\epsilon}_{c\xi} / k \quad (3) \quad \Sigma T_{i\xi} = C_{\xi} = 0.5 k h E_c \bar{\epsilon}_{c\xi} \quad (4)$$

$$M_{\xi} = \Sigma T_{i\xi} (\beta_i - k / 3) h \quad (5) \quad \bar{\gamma}'_{t\xi\eta} (1-k) = \bar{\gamma}'_{si\xi\eta} (\beta_i - k) = \bar{\gamma}'_{c\xi\eta} / k \quad (6)$$

$$\Sigma T_{i\xi\eta} = C_{\xi\eta} = 0.5 k h E_c \bar{\gamma}'_{c\xi\eta} \quad (7) \quad M_{\xi\eta} = \Sigma T_{i\xi\eta} (\beta_i - k / 3) h \quad (8)$$

ところで、 $T_{i\xi} = T_{si\xi}$ であるが $T_{i\xi\eta}$ は必ずしも $T_{si\xi\eta}$ と一致するとは限らない。その差 $D_i = T_{i\xi\eta} - T_{si\xi\eta}$ は、鉄筋のほぞ作用および骨材のかみ合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力である。従って、全せん断ひずみは、 $M_{\xi\eta}$ に対応するせん断ひずみ $\bar{\gamma}'$ と D_i による付加的なせん断ひずみ $\bar{\gamma}''$ との和からなると考えることができる。これらのせん断ひずみを、ここでは、近似的に次式で表わす：

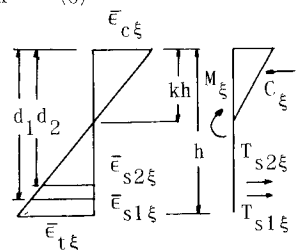


図.1 ξ 方向のひずみと力

$$\bar{\gamma}'_{t\xi\eta} / \bar{\epsilon}_{t\xi} = \bar{\gamma}'_{s\xi\eta} / \bar{\epsilon}_{s\xi} = \bar{\gamma}'_{c\xi\eta} / \bar{\epsilon}_{c\xi} = 2m_{\xi\eta} \quad (m_{\xi\eta} = M_{\xi\eta} / M_{\xi}) \quad (9)$$

$$\bar{\gamma}'_{t\xi\eta} = \sum_j \alpha_{tj} D_j / hE_c, \quad \bar{\gamma}'_{s\xi\eta} = \sum_j \alpha_{sj} D_j / hE_c, \quad \bar{\gamma}'_{c\xi\eta} = \sum_j \alpha_{cj} D_j / hE_c \quad (10)$$

式(2)～(10)を考慮すれば、最終的に、中立軸位置係数 k は次式で計算することができる：

$$k = \sqrt{R_1^2 + 2R_2} - R_1 \quad (11)$$

$$R_1 = \sum_i \bar{n} p_i \beta_i \cos^4 \rho_i + \sum_{ij} \bar{n} G_{ij} p_i \beta_i \sin \rho_i \cos^3 \rho_j, \quad R_2 = \sum_i \bar{n} p_i \beta_i^2 \cos^4 \rho_i + \sum_{ij} \bar{n} G_{ij} p_i \beta_i \beta_j \sin \rho_i \cos^3 \rho_j$$

$$G_{ii} = \{ (1 - \alpha_{s1i} A_i \sin \rho_i) (2m_{\xi\eta} + \alpha_{s1i} A_i \cos \rho_i) + (\alpha_{s1i}^2) A_i A_i \cos \rho_i \sin \rho_i \} / F,$$

$$G_{ij} = \alpha_{s1i} A_i (\cos \rho_i + 2m_{\xi\eta} \sin \rho_i) / F, \quad A_i = n p_i \beta_i \cos^2 \rho_i (m_{\xi\eta} \cos \rho_i - \sin \rho_i)$$

$$F = (1 - \alpha_{s11} A_1 \sin \rho_1) (1 - \alpha_{s22} A_2 \sin \rho_2) - (\alpha_{s12})^2 A_1 A_2 \sin \rho_1 \sin \rho_2$$

3. 実験的検討および数値計算例

RCスラブ要素供試体は、幅50cm、厚さ10cm、長さ180cmの長方形板であり、中央部50cm×50cmに一方方向一様曲げを加えた。供試体総数は10であり、配筋方向および鉄筋比を種々変化させた ($\theta_1 = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$: $p_1 = 0.00698, 0.00846, 0.0135$: $p_2 = 0.00698, 0.0135$)。

先に導入した付加せん断ひずみに対する影響係数は、つりあい力 D_j による変形を偏心せん断力 D_j による弾性変形にモデル化して求めた。その際、

せん断剛性の低減を表わす係数として $n_D = G / G_c$ (G : 見かけ上のせん断弾性係数)を導入した。荷重レベルに応じて変化するこの n_D の値を、鉄筋軸力比($T_{sx,cr} / T_{sx}$)の関数で表わすことができれば非常に都合が良い。このために、実験で測定した $\theta = \pm 45^\circ$ 方向の引張面ひずみからせん断ひずみを算定し、このひずみに対応する n_D を各供試体毎および各荷重レベル毎に試算法で決定した。最終的に、それらの平均的な過渡曲線として次式を得た：

$$n_D = 0.86 (T_{sx,cr} / T_{sx})^2 \quad (12)$$

但し、問題を簡単にするために $\phi = 0^\circ$ とした。従って、 n_D の決定により、2で導出した曲げ変形理論は数値計算可能となった。

図.2は、作用曲げモーメントとその方向の引張縁ひずみとの関係についての実験結果とそれに対応する数値計算結果との比較の2,3の例を示す。参考のために、 $n_D = \infty$ (付加せん断ひずみを考慮しない)の場合を一点鎖線で示した。この一点鎖線と実線との関係を見れば、実際のひびわれ変形挙動の特異性が顕著である。図.3に示した数値計算例では、配筋方向と付加変形量との相関を見ることができ、本理論の特性が現われている。

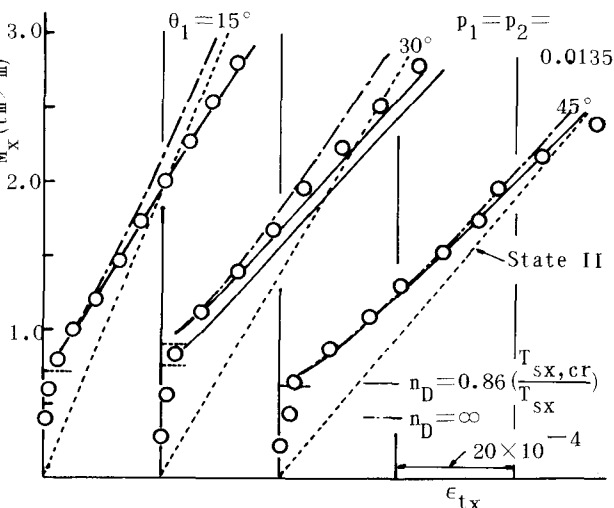


図.2 実験結果および対応する数値計算結果の例

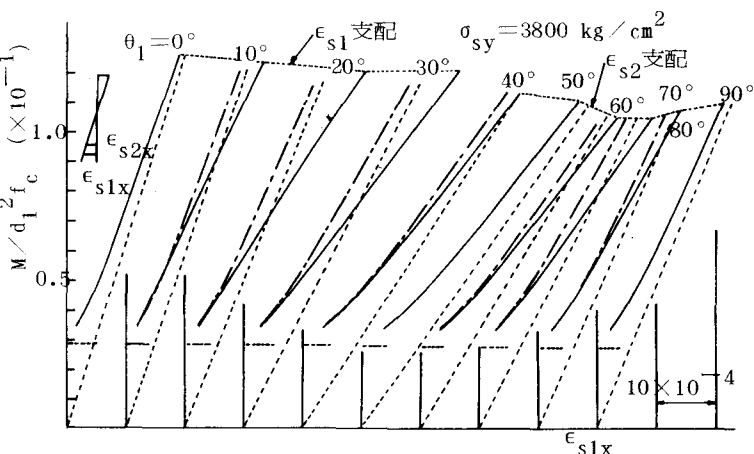


図.3 数値計算例 ($h = 25\text{cm}, d_1 = 22\text{cm}, d_2 = 20.4\text{cm}, p_1 = p_2 = 0.01$)