

V-2 RCスラブにおける鉄筋のダウエル作用について

北海道大学 正員 〇堺 孝 司

北海道大学 正員 角田与史雄

1. まえがき

鉄筋コンクリート(RC)を構造用部材として合理的に利用するためには、部材としての力学的性質を余すところなく明らかにすることが肝要である。このために、これまで種々の観点から、RC部材に関する実験並びに理論的研究が数多く行なわれてきた。しかしながら、RCはコンクリートおよび鉄筋各々の材料特性に加えて複合材料としての様々な力学的性状を有し、それらが相互に複雑に影響し合うことから、RC部材の挙動についての普遍的な理解を得るに至っていない問題が多いと言えよう。

RC部材における鉄筋の主要な役割は、鉄筋軸方向の引張力あるいは圧縮力に対して抵抗することであり、部材の設計は一般にこの基本的な考えの下で行なわれている。ところが、RC部材にひびわれが発生した後、ひびわれをまたぐ鉄筋には、軸方向力の他にせん断力も作用することがある。このようなせん断力は、ひびわれ断面におけるコンクリートの相対的なずれによって誘起されるものであり、この作用は一般に鉄筋のダウエル作用(dowel action)と呼ばれ、RC部材の変形状態および耐荷性状をより正確に捉える上で解明しなければならない力学的性質の一つである。このダウエル作用は、コンクリート舗装版の目地を横切って埋設されるタイバー、せん断力の作用するRCはりにおける斜ひびわれ発生後の主鉄筋、またRCスラブにおいては、コンクリートの硬化、乾燥、温度変化などによって生じた厚さ全体を貫通するひびわれをまたぐ鉄筋(配筋面外に対するせん断作用)あるいは断面力の主方向と配筋方向とが一致しない場所における曲げひびわれを横切る鉄筋(配筋面内に対するせん断作用で、引張を受けるRCシャイベにおいて生じる場合もある)、などで見られる。また特殊な例として、ねじりを受けるRC部材の主筋においてダウエル作用のあることが知られている。

RCはりにおけるダウエル作用の研究は、せん断耐力に対するダウエル作用の貢献度を調べることをその主目的としているものが多いが(1)、最近、鉄筋とコンクリートとの間の付着作用とダウエル作用の相互作用に関する研究も行なわれるようになってきた(2)。このようなRCはりあるいははりをモデル化したものによる研究の他には、一層基礎的なモデル供試体を用いて、ダウエル作用によるダウエル破壊強度を推定するための定式化を目指した研究も行なわれてきた(3)。著者らは、これまで、RCスラブの貫通ひびわれをモデル化した人工ひびわれを有するRCはりを用いた鉄筋のダウエル挙動に関する研究(4)の他、ダウエル破壊メカニズムを根本的に理解しかつダウエル破壊強度に及ぼす各種変数の影響を幅広く捉えることを目的に、単純化したモデル供試体による実験的研究も行なってきた(5)。

このように、これまでダウエル作用に関して行なわれてきた研究は、著者らをも含めて、ダウエル作用によって鉄筋下のコンクリートが脱落する破壊パターンとなるものが大部分を占めており、RCスラブあるいはシャイベのひびわれ発生後に生じる場合のある配筋面内のダウエル作用を扱っている研究は少ない。このような背景に基づき、本論文では、ひびわれ発生後における配筋面内のダウエル作用を受けるRCスラブの変形挙動を解明するために、ダウエル作用を含めたRCスラブの変形理論を導き、ダウエル剛性の過渡状態を、一つのモデル化に基づいてRCスラブ要素の曲げ実験結果より定式化し、さらに数値計算によって各種変数の変形挙動に及ぼす影響について調べることをその目的とした。

2. ダウエル作用を考慮したRCスラブの変形理論

互に直交する鉄筋群が作用曲げモーメント方向とそれぞれ θ_1, θ_2 なる角度で配筋され、それらの鉄筋比並びに有効高さが p_1, d_1 および p_2, d_2 なるRCスラブにおいて、作用曲げモーメントと直交する方向から ϕ なる方向にひびわれが発生し変形する状態を考慮する(図.1)。ひびわれ発生後の変形は、コンクリート引張部の剛性に対する寄与を考慮して、ひびわれ位置およびひびわれ間のひずみの平均値で扱うのが合理的である。ひびわれ発生後の過渡状態における平均剛性の低下過程についてはRCはりに関して種々の提案がなされているが、ここでは、鉄筋のヤング係数 E_s の代りに換算ヤング係数 $\bar{E}_s = \sigma_s / \epsilon_s$ を

用いることによって剛性評価を行うことにし、 $\sigma_s - \bar{\epsilon}_s$ 曲線としてCEB-FIP指針に採用されている式を用いる。このとき、換算ヤング係数は次式で表わせる：

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

ここで、 $\sigma_{s,cr}$ はひびわれ発生時の状態IIにおける鉄筋応力である。上式をスラブに適用する場合、 $\sigma_{s,cr}$ および σ_s はそれぞれ ξ 方向の鉄筋軸力 $T_{s\xi,cr}$ および $T_{s\xi}$ に置き換えることができる。いま、スラブの鉄筋群 i のひびわれ発生後の平均ひずみを $\bar{\epsilon}_{si\xi}, \bar{\epsilon}_{si\eta}, \bar{\gamma}_{si\xi\eta}$ で表わし、有効高さ係数 $\beta_i = d_i / h$ を導入する。ところで、 $\bar{\epsilon}_{si\eta}$ は他に比べて微小であるので以下ではこれを無視する。従って、このときの i 方向鉄筋の受け持つ軸引張力による ξ, η 方向成分は、次式で表わすことができる：

$$\begin{pmatrix} T_{si\xi} \\ T_{si\eta} \\ T_{si\xi\eta} \end{pmatrix} = h E_c \begin{pmatrix} C_4 & C_3 \\ C_2 & C_1 \\ C_3 & C_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\epsilon}_{si\xi} \\ \bar{\gamma}_{si\xi\eta} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\text{ここに、} C_m = \bar{n} \rho_i \beta_i \sin^{(4-m)} \rho_i \cos^m \rho_i \quad (3)$$

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

ξ 方向の変形の適合条件、力のつり合いおよびモーメントのつり合い条件より(図.2)，

$$\bar{\epsilon}_{t\xi} / (1-k) = \bar{\epsilon}_{si\xi} / (\beta_i - k) = \bar{\epsilon}_{c\xi} / k \quad (5)$$

$$\sum_i T_{i\xi} = C_\xi = 0.5 k h E_c \bar{\epsilon}_{c\xi} \quad (6)$$

$$M_\xi = \sum_i T_{i\xi} (\beta_i - k/3) h \quad (7)$$

せん断ひずみおよびねじりモーメントに対しても同様に、

$$\bar{\gamma}'_{t\xi\eta} / (1-k) = \bar{\gamma}'_{si\xi\eta} / (\beta_i - k) = \bar{\gamma}'_{c\xi\eta} / k \quad (8)$$

$$\sum_i T_{i\xi\eta} = C_{\xi\eta} = 0.5 k h G_c \bar{\gamma}'_{c\xi\eta} \quad (9)$$

$$M_{\xi\eta} = \sum_i T_{i\xi\eta} (\beta_i - k/3) h \quad (10)$$

ここで、 $T_{i\xi} = T_{si\xi}$ となることは明らかであるが、 $T_{i\xi\eta}$ は必ずしも $T_{si\xi\eta}$ と一致するとは限らない。この場合、不釣り合い力 $D_i = T_{i\xi\eta} - T_{si\xi\eta}$ は、鉄筋のダウエル作用およびひびわれ面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ものである。しかしながら、ダウエル作用とかみ合せ作用の分離は実際問題として難しく、ここではそれらを一体として扱う。即ち、ここで言うダウエル力とは、骨材のかみ合せ作用を含めたものを意味する。このダウエル力の存在によって、せん断変形 $\bar{\gamma}_{si\xi\eta}, \bar{\gamma}_{t\xi\eta}, \bar{\gamma}_{c\xi\eta}$ は、 $M_{\xi\eta}$ による変形 $\bar{\gamma}'_{si\xi\eta}, \bar{\gamma}'_{t\xi\eta}, \bar{\gamma}'_{c\xi\eta}$ と、ダウエル力 D_i による二次変形 $\bar{\gamma}''_{si\xi\eta}, \bar{\gamma}''_{t\xi\eta}, \bar{\gamma}''_{c\xi\eta}$ との和からなる。いま、 $M_y / M_x = m_y$ 、 $M_{\xi\eta} / M_\xi = m_{\xi\eta}$ と置くと、 $m_{\xi\eta}$ は次式で表わすことができる：

$$m_{\xi\eta} = (1 - m_y) \sin \phi \cos \phi / (\cos^2 \phi + m_y \sin^2 \phi) \quad (11)$$

さらに、 $T_{i\xi\eta} = m_{\xi\eta} T_{si\xi}$ なる仮定をすれば、次式が成り立つ：

$$\bar{\gamma}'_{t\xi\eta} / \bar{\epsilon}_{t\xi} = \bar{\gamma}'_{si\xi\eta} / \bar{\epsilon}_{si\xi} = \bar{\gamma}'_{c\xi\eta} / \bar{\epsilon}_{c\xi} = 2 m_{\xi\eta} \quad (12)$$

また、 D_i による付加せん断ひずみを次式で与える：

$$\bar{\gamma}''_{t\xi\eta} = \sum_j \alpha_{tj} D_j / h E_c \quad (13)$$

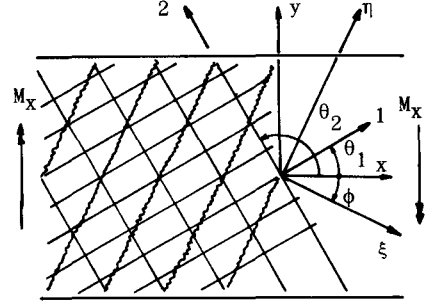


図. 1 ひびわれの生じたRCスラブ

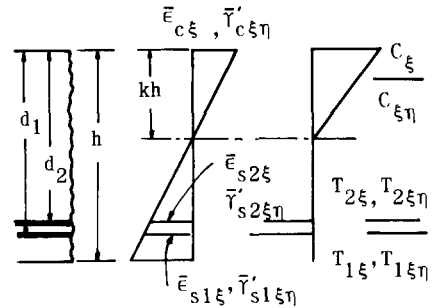


図. 2 ひずみ分布、内力

$$\bar{\gamma}_{si\xi\eta}'' = \sum_j \alpha_{sij} D_j / h E_c \quad (14)$$

$$\bar{\gamma}_{c\xi\eta}'' = \sum_j \alpha_{cj} D_j / h E_c \quad (15)$$

ここで、ダウエル力 D_i は、ひずみを用いて次式で表わすことができる：

$$D_i = h E_c A_i (\bar{\epsilon}_{si\xi} \cos \rho_i + \bar{\gamma}_{si\xi\eta} \sin \rho_i) \quad (16)$$

$$\text{但し, } A_i = \bar{n} p_i \beta_i \cos^2 \rho_i (m_{\xi\eta} \cos \rho_i - \sin \rho_i) \quad (17)$$

従って、 i' を事象(1,2)に対する i の余事象を表わすとすれば、式(12),(14),(16)より $\bar{\gamma}_{si\xi\eta}$ は、

$$\bar{\gamma}_{si\xi\eta} = \sum_j^{i,i'} G_{ij} \bar{\epsilon}_{si\xi} \quad (18)$$

$$\text{ここに, } G_{ii} = ((1 - \alpha_{sii}' A_i' \sin \rho_i') (2 m_{\xi\eta} + \alpha_{sii} A_i \cos \rho_i) + (\alpha_{sii}')^2 A_i A_i' \cos \rho_i \sin \rho_i') / F \quad (19)$$

$$G_{ii'} = \alpha_{sii}' A_i' (\cos \rho_i' + 2 m_{\xi\eta} \sin \rho_i') / F \quad (20)$$

$$F = (1 - \alpha_{s11} A_1 \sin \rho_1) (1 - \alpha_{s22} A_2 \sin \rho_2) - (\alpha_{s12})^2 A_1 A_2 \sin \rho_1 \sin \rho_2 \quad (21)$$

式(5),(6),(18)より、中立軸位置に関する係数 k は次式より計算することができる：

$$k^2 + 2 R_1 k - 2 R_2 = 0 \quad (22)$$

$$\text{ここに, } R_1 = \sum_i \bar{n} p_i \beta_i \cos^4 \rho_i + \sum_i \sum_j \bar{n} G_{ij} p_i \beta_i \sin \rho_i \cos^3 \rho_i \quad (23)$$

$$R_2 = \sum_i \bar{n} p_i \beta_i^2 \cos^4 \rho_i + \sum_i \sum_j \bar{n} G_{ij} p_i \beta_i \beta_j \sin \rho_i \cos^3 \rho_i \quad (24)$$

式(13)～(15)で導入した付加せん断ひずみに対する影響係数 $\alpha_{ti}, \alpha_{sij}, \alpha_{ci}$ は、 D_i による変形を偏心せん断力による弾性変形にモデル化することによって推定することができる。いま、見かけ上のせん断係数を G とし、 $n_D = G/G_c, G_c = E_c/2, e_i = d_i - h/2$ を考慮すれば、

$$\alpha_{ti} = 2 (1 + 6 e_i / h) / n_D \quad (25)$$

$$\alpha_{sij} = 2 (1 + 12 e_i e_j / h^2) / n_D \quad (26)$$

$$\alpha_{ci} = 2 (1 - 6 e_i / h) / n_D \quad (27)$$

n_D は、せん断剛性の低下過程を表わす係数、すなわちダウエル剛性に相当するものである。この n_D を実験より推定するために、鉄筋比および配筋方向を種々に変えたRCスラブの一方曲げ実験を行い、引張縁せん断ひずみ $\bar{\gamma}_{t\xi\eta}$ を測定した。計算上の引張縁ひずみが実験値 $\bar{\gamma}_{t\xi\eta}$ となるように、載荷程度 $T_{s\xi}/T_{s\xi,cr}$ に応じて、トライアルで n_D を決定した。厳密に言えば、 n_D の値は鉄筋比および配筋方向によって異なると思われるが、供試体数および実験結果のばらつきなどの問題により、それらの影響を見ることは困難であった。そこで次に、ひびわれ方向角の影響を見るために、(a) ひびわれ方向角を 0° とした場合 (b) 実験結果より測定した平均ひびわれ方向角を用いた場合、の二つについて $n_D - T_{s\xi}/T_{s\xi,cr}$ 関係をプロットした(図. 3, 4)。試算の結果、 $n_D = a (T_{s\xi,cr}/T_{s\xi})^{1.5}$ の形でほぼ表わすことのできる事が分ったので、(a), (b) のそれぞれの場合について最小二乗法により a を求めた。その結果、両者の差は小さく、この形で表わせば、 $n_D - T_{s\xi}/T_{s\xi,cr}$ 関係に及ぼすひびわれ方向角の影響は小さいことが明らかになった。最終的には、両者の平均をとって、ひびわれ方向角、鉄筋比および配筋方向に関係なく

n_D として次式を採用することとした：

$$n_D = 0.424 \left(T_{s\xi,cr} / T_{s\xi} \right)^{1.5} \quad (28)$$

これで、変形計算に必要な諸量のうち、 ϕ を除いてすべてが得られたことになるが、 n_D に対しては影響の小さかったひびわれ方向角が全体の変形に対してどの程度の影響を与えるかが残された問題である。それを調べるために、実験で観測した平均ひびわれ方向角を用いて変形計算を行なった。その結果、ひびわれ方向角の変形に及ぼす影響は比較的小さく、その影響が大きと思われる配筋状態の鉄筋降伏近傍で5,6%であり、実用上無視できることが分った。このひびわれ方向角なるものは、実際には、変形の増大とともに徐々に大きくなると思われるものであり、計算で用いたひびわれ方向角が最終的なひびわれ状態から得たものであることを考慮すれば、その影響はさらに小さくなるものと思われる。

3. 数値計算例

ダウエル作用によってコンクリートに伝えられる力 D_i およびそれによるせん断変形 $\bar{\gamma}_{si\xi\eta}$ が、他の諸量と比してどの程度の大きさを占めているのかを調べるために数値計算を行なった。計算は全て $\phi = 0^\circ$ で行なった。従って、図. 1 において、 ξ, η 座標軸は x, y 座標軸に一致する。なお、計算で用いた諸元は、 $h=0.1m, d_1=0.08m, d_2=0.07m, n=E_s/E_c=7, M_{cr}=0.55tm/m, E_c=3 \times 10^6 t/m^2$ である。

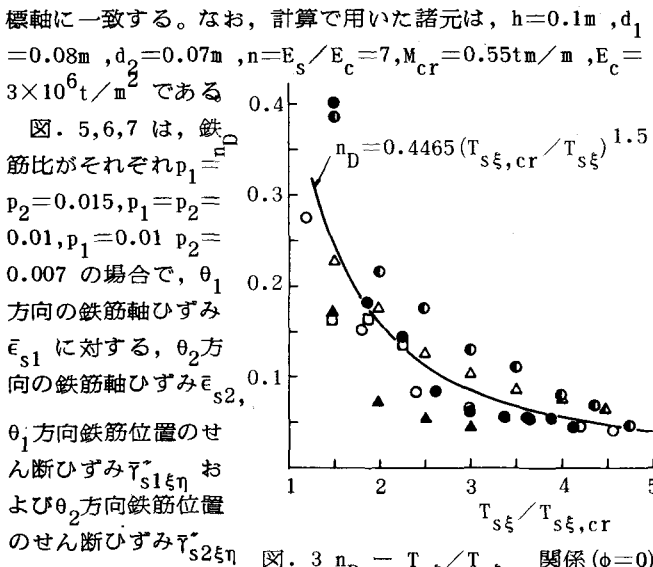


図. 3 $n_D - T_{s\xi,cr}/T_{s\xi}$ 関係 ($\phi=0$)

この比を、載荷程度に応じて計算した結果を示したものである。なお、 $\phi = 0^\circ$ であることから、 $\bar{\gamma}_{si\xi\eta} = \bar{\gamma}_{si\xi}$ となる。これらの図は、載荷程度に応じて各ひずみ比が変化することを示している。また、 $\bar{\epsilon}_{s2}/\bar{\epsilon}_{s1}$ は θ_1 の増加と共に増加するが、 $\theta_1=45^\circ, \theta_2=135^\circ$ で、 $\bar{\epsilon}_{s2}/\bar{\epsilon}_{s1} \neq 1$ であるのは、 $d_1 \neq d_2$ である

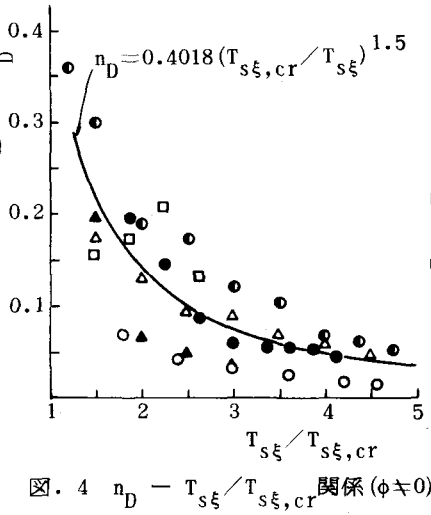


図. 4 $n_D - T_{s\xi,cr}/T_{s\xi}$ 関係 ($\phi \neq 0$)

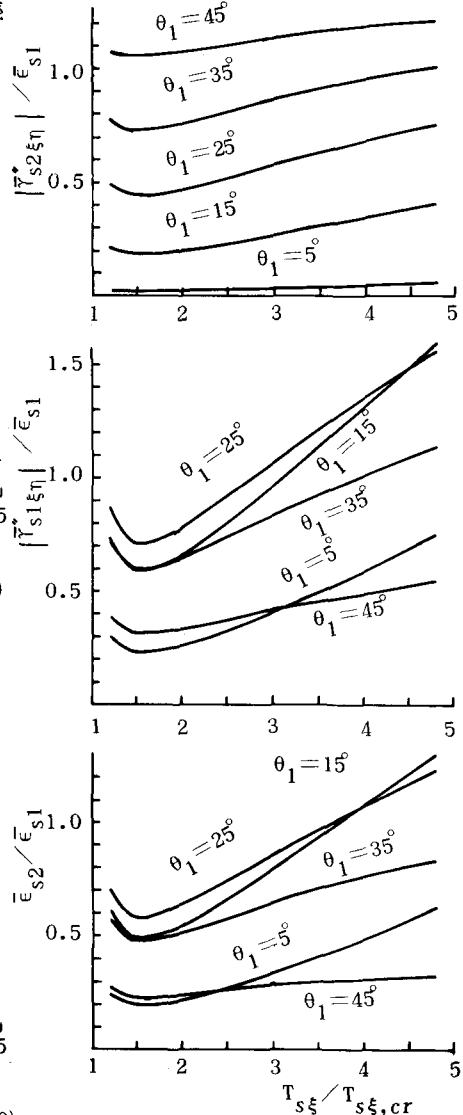


図. 5 ひずみ比 ($p_1=p_2=0.015$)

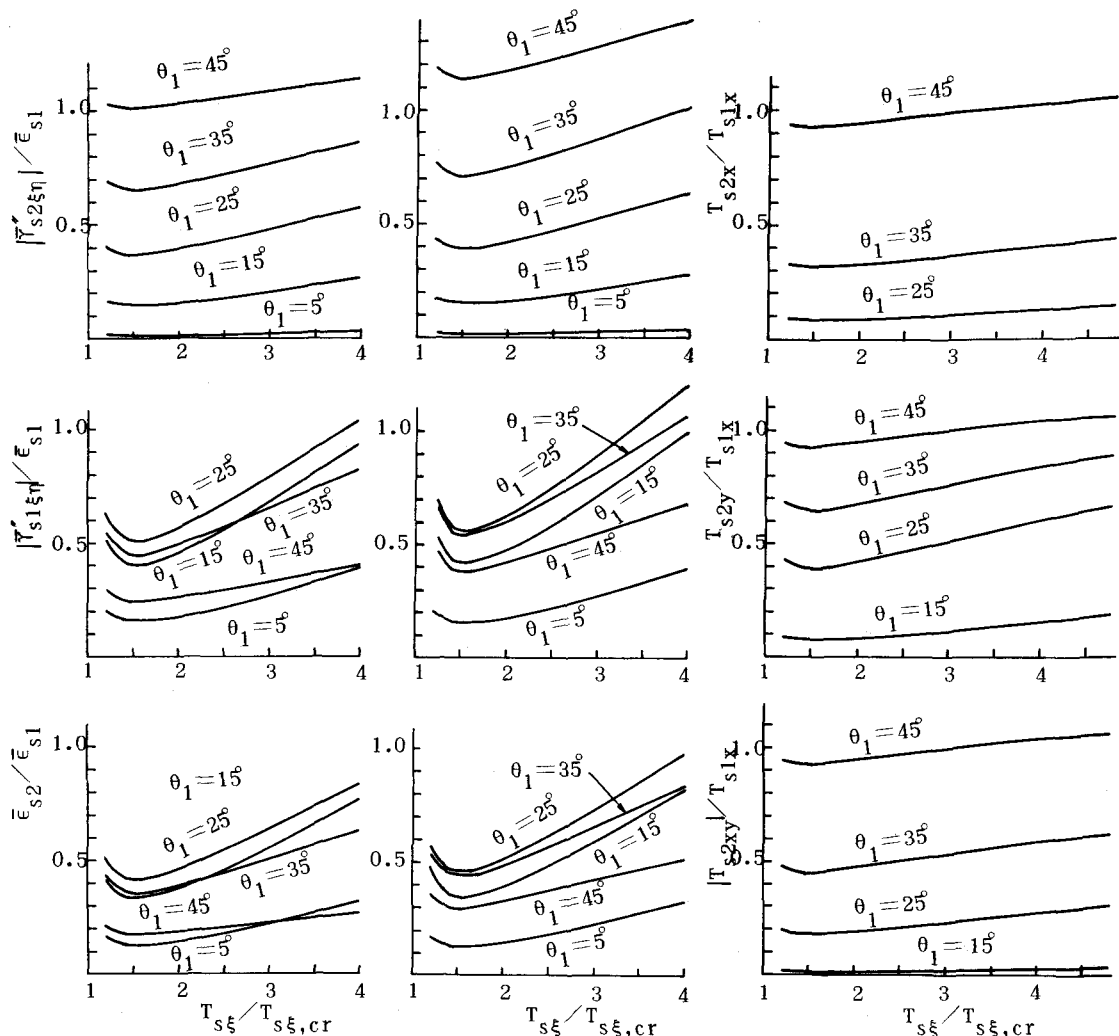


図. 6 ひずみ比 ($p_1=p_2=0.01$) 図. 7 ひずみ比 ($p_1=0.01$, $p_2=0.007$) 図. 8 軸力比 ($p_1=p_2=0.015$)

ためであり、もし $d_1=d_2$ および $p_1=p_2$ であるなら $\epsilon_{s2}/\epsilon_{s1}=1$ となる。これらの図はまた、 $|\bar{T}_{s1\xi\eta}|/\epsilon_{s1}$ が θ_1 の増加と共にある所まで増加するが、それを超えると逆に減少することを示している。このことは、各荷重レベルで、 $|\bar{T}_{s1\xi\eta}|/\epsilon_{s1}$ が最大となる配筋方向が存在していることを示す。

図. 8, 9 は、 θ_1 方向の鉄筋軸力の x 方向成分に対する θ_2 方向の鉄筋軸力の各成分の比を、鉄筋比 $p_1=p_2=0.015$ および $p_1=p_2=0.01$ の場合について、各荷重レベルに対して計算したものである。なお、 $\phi = \phi'$ で計算しているので、

ダウエル力は $D_i = -T_{s1\xi\eta}$ となる。これら軸力比はすべて、ひびわれ直後を除いて、荷重レベルの増加と共に緩やかに増加している。また、 $\theta_1=45^\circ$ の場合、常に $T_{s2x}/T_{s1x} = T_{s2y}/T_{s1y} = |T_{s2xy}|/T_{s1xy}$ となる。 T_{s1xy}/T_{s1x} および T_{s1y}/T_{s1x} の値は、鉄筋比には全く関係なく、配筋方向のみに依存している (図. 10)。ダウエル力 D_1 および D_2 はそれぞれ反対方向に作用しており、実際には、互に打ち消し合う力を除いた分だけがダウエル力としてコンクリートに伝達されることになる。図. 11, 12 は、配筋方向をパラメータにした各荷重レベルごとの $(T_{s1xy} - |T_{s2xy}|)/T_{s1x}$ を計算したものである。これらの図は、

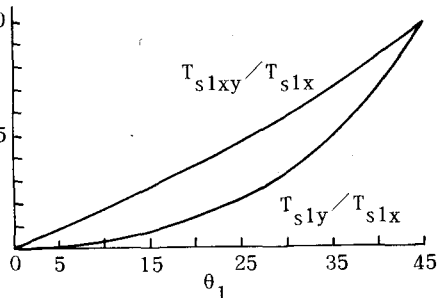


図. 10 軸力比

コンクリートに伝達されるダウエル力と T_{s1x} の比がひびわれ直後を除いて荷重の増加と共に減少すること、および各荷重レベルごとに

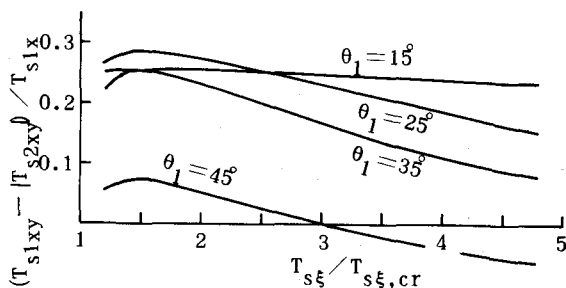


図. 11 軸力比 ($p_1=p_2=0.015$)

それらの比を最大にする配筋方向が存在していること、などを示している。また、実際にコンクリートに伝達されるダウエル力、大きくともせいぜい T_{s1x} の30%程度である。

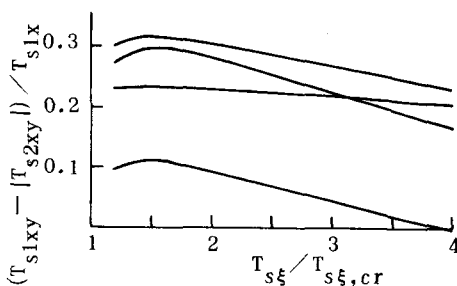


図. 12 軸力比 ($p_1=p_2=0.01$)

なお、 $\theta_1=45^\circ$ の場合、

$p_1=p_2$ および $d_1=d_2$ であれば、それぞれの方向の鉄筋のダウエル力は打ち消し合って消滅することは言うまでもない。

4. あとがき

本論文は、ひびわれ発生後における配筋面内のダウエル作用の影響を考慮したRCスラブの変形理論を導びくと共に、ダウエル剛性に関する過渡曲線の定式化を試み、それらを用いた数値計算によってスラブの変形特性を明らかにした。

本論文の理論過程で導入したダウエル力とは、前述のように骨材のかみ合せ作用をも含めたものであることに注意しなければならない。理想的には両者の分離が望ましいが、スラブの複雑な挙動からみて、現状ではこのような扱いも止むを得ないものと言えよう。しかしながら、スラブの変形挙動に及ぼすトータルな力および変形としては、この扱いはほぼ妥当なものであると考える。

なお、本研究は昭和54年度文部省科学研究費によって行なったものであり、実験では北海道大学工学部土木工学科構造工学講座の木村勉技官の協力を受けた。ここに合せて謝意を表する。また、数値計算には北海道大学大型計算機センターの HITAC M-180 を使用した。

(参考文献)

- (1) 例えば、Jones, R: The Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams in Shear, Magazine of Concrete Research, Aug. 1956
- (2) R. Jimenez, : Bond and Dowel Capacities of Reinforced Concrete, ACI Journal, Jan. 1979
- (3) 例えば、Fenwick, R.C., : Mechanisms of Shear Resistance of Concrete Beams, Proc of ASCE, ST, Oct. 1968.
- (4) 角田, 堺, 能町: ひびわれをまたぐ鉄筋のせん断力伝達能力に関する研究, セ技年報 XXXI, 昭52.
- (5) 能町, 角田, 堺: 鉄筋のダウエル作用による破壊強度について, セ技年報 XXXII, 昭53.

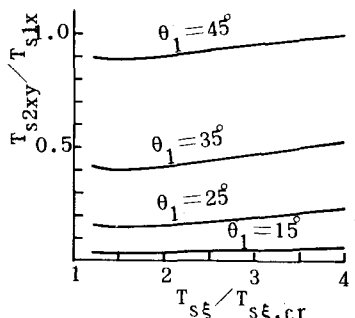
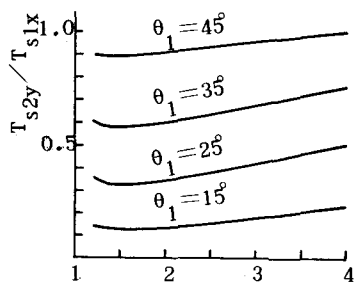
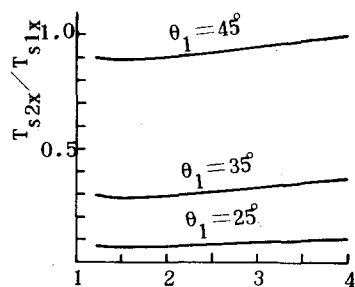


図. 9 軸力比 ($p_1=p_2=0.01$)