V-36　ねじりをうける鉄筋コンクリート部材の補強方法について

早稲田大学　正員　松島　博

1) 要旨　ねじりをうける鉄筋コンクリート部材においては、ひびわれ発生から破壊までの余裕が曲げの場合に比較して一般に小さいとされている。これは、ねじりに対する補強方法がまだ明らかではなく従って適切な補強が行なわれていないことも大きな理由の一つであろう。ここでは、曲げ−ねじりをうける長方形断面鉄筋コンクリート部材に対して、とくに曲げ−ねじり比の変化に対応しうることに重点をおいて補強方法を提案した。ねじりに対してはらせん鉄筋の使用も効果的であるが、これは円形断面以外にとっては施工が困難であり、またねじりの作用方向が変化したり曲げ−ねじりが作用する場合には問題がある。従って一般に軸方向鉄筋とこれに直交する閉じたスターラップを用い、斜方向力の部材軸方向成分とこれえの直交成分をそれぞれの鉄筋で分担させるのがよい。本研究は、後者の場合について検討したものである。

2) 鉄筋比　曲げ−ねじりは部材に対して Skew Bending として作用するものとし、そのときの破壊面を理想化して Fig. 1 のような仮想断面を設定する。このとき、引張側における軸方向鉄筋とスターラップの配置方向と内力の作用方向との関係は Fig. 2 の通りである。図において、θ_1 と θ_3 は主応力方向の計算結果と多くの実験結果に基づいて、あらかじめ定めておくことができる。

部材は明確な降伏点をもつ鉄筋でつり合い鉄筋比以下に補強されているものとする。このとき、まず引張鉄筋が降伏しついで圧縮側コンクリートが圧壊して部材は破壊するが、設計のためには部材の降伏時を基準にとる。仮想断面に基づく解析および数値計算の結果、部材降伏時の中立軸係数 k について次の近似式が得られた。

$$\left.\begin{array}{lll} 5.0 \geqq \alpha \geqq 0: & k \fallingdotseq 0.193 + 1.610\,p\beta \cdots\cdots & 0.125 \geqq p\beta \geqq 0 \\ & k \fallingdotseq 0.310 + 0.680\,p\beta \cdots\cdots & p\beta > 0.125 \\ \infty \geqq \alpha > 5.0: & k \fallingdotseq 0.165 + 1.610\,p\beta \cdots\cdots & 0.125 \geqq p\beta \geqq 0 \\ & k \fallingdotseq 0.274 + 0.680\,p\beta \cdots\cdots & p\beta > 0.125 \end{array}\right\} \cdots\cdots (1)$$

強度については、

$$\frac{M_{tsy}}{bd^2\sigma_{co}} = \frac{1}{\alpha}\cdot\frac{M_{bsy}}{bd^2\sigma_{co}} = \frac{\lambda}{\cos\theta_3 + \alpha\sin\theta_3}\left[(C_1\eta_3 k^2 + C_2\eta_4 k^3) + C_3 p'\beta' \frac{(k - \frac{d'}{d})^2}{1-k} + C_3 p\beta(1-k)\right]$$

$$C_{1\sim3} = f(h/b,\ \alpha), \qquad \eta_{3\sim4} = f(\varepsilon_c/\varepsilon_{co}) \cdots\cdots (2)$$

式(2)において $C_2\eta_4 k^3$ を無視して、

$$p\beta = \left(\frac{M_{tsy}}{bd^2\sigma_{co}}\cdot\frac{\cos\theta_3 + \alpha\sin\theta_3}{\lambda} - C_1\eta_3 k^2\right) \Big/ \left[C_3\left\{\frac{p'\beta'}{p\beta}\cdot\frac{(k-\frac{d'}{d})^2}{1-k} + (1-k)\right\}\right] \cdots\cdots (3)$$

式(3)を用いて $M_{tsy}/bd^2\sigma_{co}$ と $p\beta$ との関係を計算し、Fig. 3〜4 に示す。このとき $p'\beta'/p\beta = 0.5$ とした。ここで求めた軸方向鉄筋のほかに、つぎに示すようなスターラップがともに必要である。

3) スターラップ比と軸方向鉄筋比の割合　Fig. 2 によれば仮想断面における引張力の、それぞれ軸方向鉄筋とスターラップの分担する成分 T_1 と T_2 は、

$$T_1 = T\sin\theta_3 = A_s\sigma_{s1}, \qquad T_2 = T\cos\theta_3 = a_{sv}\frac{1.5\,b\cot 45^\circ}{s}\sigma_{s2} \cdots\cdots (4)$$

部材降伏時の破壊面付近の複数のひびわれを考えれば、破壊面に露出したスターラップだけでなく破壊面を含むある領域内のスターラップが有効に働らくと考えられるから、式(4)において有効なスターラップ本数を $\gamma \cdot b \times \cot\theta_1 / s$ ($\gamma > 1.0$) とし、ここでは近似的に $\gamma = 1.5$, $\theta_1 = 45^\circ$ とした。

軸方向鉄筋とスターラップが同時に降伏することを条件に、式(4)から、

$\sec\theta_3\, a_{sv}\frac{b}{s}\times 1.5\,\sigma_{s2y} = \mathrm{cosec}\,\theta_3\, A_s\,\sigma_{s1y}$，ゆえに、$\frac{r\beta_2}{p\beta_1}=\frac{d}{b}\cdot\frac{1}{1.5}\cot\theta_3$ ……………(5)

式(5)を用いて計算し、h/bの値ごとにαと$r\beta_2/p\beta_1$との関係をFig.5に示す。

4) 鉄筋の配置　式(3)で$p\beta_1$が、さらに式(5)で$r\beta_2$が得られれば材料について$\beta=\sigma_{sy}/\sigma_{co}$を決めて、軸方向鉄筋については$A_s$を、スターラップについては$a_{sv}/bs$を求めることができる。

a) スターラップ間隔は、$\sigma_{s2}\leqq\sigma_{s1}$の条件から式(4)を用いて　$s\leqq(1.5\tan\theta_3)(a_{sv}/A_s)\cdot b$ …(6)
さらに、$s\leqq b$，$s\leqq h/2$ ($b\leqq h$) でなければならない。Fig.6に$1.5\tan\theta_3$の値を示す。

b) 軸方向鉄筋は長方形スターラップの内側で少くともその四隅に配置し、その間隔は$1.5b_1$以下とする。軸方向鉄筋とスターラップは溶接して定着する。溶接の効果を示す実験結果はFig.7の通りで、溶接すれば最大荷重以後も強度の低下が少なくその70%程度の抵抗モーメントを保持しながら大きな変形に耐えられた。

5) 鉄筋比と部材の変形能力　部材降伏とともにプラスチックヒンジが形成され、破壊とともにヒンジは終了する。その間の変形能力は鉄筋比の増加とともに減少し、その状況の一例はFig.8の通りである。

6) つり合い鉄筋比と、最小、最大鉄筋比　つり合い鉄筋比$p_0\beta_0$を求めるためのひずみの条件は、

$\varepsilon_s=\varepsilon_{sy}$，$\varepsilon_s'=\{(k-\frac{d'}{d})/(1-k)\}\varepsilon_{sy}$，$k=\varepsilon_{cu}/(\varepsilon_{cu}-\sin\theta_3\,\varepsilon_{sy})$ ……………(7)

中立軸係数一般式は、$C_1\eta_1 k - C_2\eta_2 k^2 + C_3 p'(\sigma_s'/\sigma_{co}) - C_3 p(\sigma_s/\sigma_{co}) = 0$ ……………(8)

式(7)を式(8)に代入して、

$$p_0\beta_0 = \left[\frac{C_1}{C_3}\cdot\frac{1}{1+\zeta} - \frac{C_2}{C_3}\cdot\frac{\eta_2}{(1+\zeta)^2}\right]\Big/\left[1-\frac{p'\beta'}{p_0\beta_0}\left\{\frac{1}{\zeta}-\left(1+\frac{1}{\zeta}\right)\frac{d'}{d}\right\}\right],\quad \zeta=\frac{\varepsilon_{sy}}{\varepsilon_{cu}} \quad\cdots\cdots(9)$$

式(9)によれば$h/b=1.0$，$\alpha=0$，$p'\beta'/p_0\beta_0=0$のとき$p_0\beta_0=0.427$ ($\varepsilon_{cu}=4500\times10^{-6}$, SD30)である。

最小鉄筋比を理論的に決めることは困難であり、破壊強度がひびわれ強度以上になる下限を最小鉄筋比とし、これをT.T.C.Hsuの実験結果[2]から求める。鉄筋比を広範囲に変えて行なった実験から、M_{tu}/M_{tc}と$r\beta_2$との関係をFig.9に示し、$M_{tu}/M_{tc}>1.0$のとき補強効果が現われたものとすれば$(r\beta_2)_{min}\fallingdotseq 0.020$で、このとき式(5)の関係に従って軸方向鉄筋がともに必要であるが、例えば$h/b=1.0$のとき$(p\beta_1)_{min}=\frac{0.020}{1.15}=0.017$だから、$(p\beta_1+r\beta_2)_{min}=0.037$となる。

最大鉄筋比はこの実験結果からは明らかではない。設計のためには、つり合い鉄筋比以下でしかも部材の変形能力を考えて定めなければならない。

7) 結　論　あるコンクリート断面に対して補強するためには$M_t/bd^2\sigma_{co}$を計算しFig.3~4によって$p\beta_1$を、これとFig.5によって$r\beta_2$を求める。σ_{s1y}とσ_{s2y}とσ_{co}を決めてA_s、a_{sv}/bsを計算する。ついで軸方向鉄筋は4-(2)の条件、スターラップは式(5)の条件に従って配置を決める。このとき、コンクリート断面が小さくても鉄筋量を多くして強度上の要求をある程度までは満足させることができるが、変形能力が低下して脆い破壊挙動を示すに至ることがある。断面の決定に当っては強度上の要求を満たすことはもちろん、必要な程度の変形能力をも確保できるようにしなければならない。

記号：$\alpha=M_b/M_t$，$\beta=\sigma_{sy}/\sigma_{co}$，$\lambda$=中立軸の傾斜に関する補正係数，$\sigma_{s1}$，$\sigma_{s1y}$=軸方向鉄筋の応力度と降伏点応力度，$\sigma_{s2}$，$\sigma_{s2y}$=スターラップに関するもの，$\sigma_{co}$=コンクリートの最大圧縮応力度，$\varepsilon_{co}$，$\varepsilon_{cu}$=$\sigma_{co}$に対応するひずみと最大曲げ圧縮ひずみ，$A_s$=軸方向鉄筋断面積，$a_{sv}$=スターラップ1本の断面積，$M_t$，$M_b$=ねじりモーメントと曲げモーメント，$p=A_s/bd$，$r=a_{sv}/bs$，$s$=スターラップ間隔，

参考文献：1) 松島博：曲げねじりをうける鉄筋コンクリート部材の破壊機構，第27回土木学会年次講演概要　2) T.T.C.Hsu : Torsion of Structural Concrete - Behavior of Reinforced Concrete Rectangular Members, ACI SP - 18, 1968.

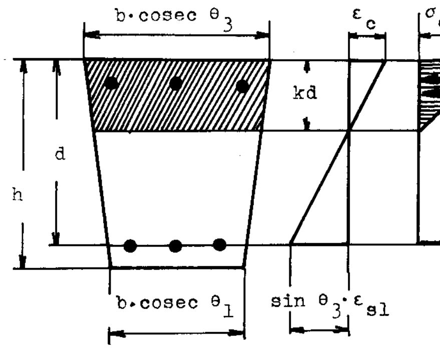

Fig. 1

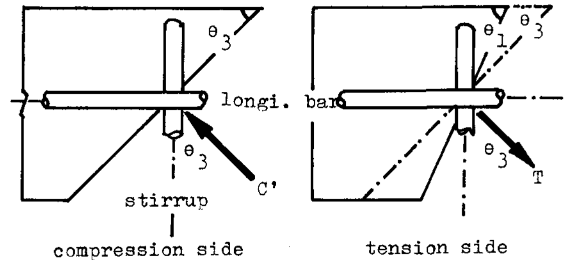

Fig. 2

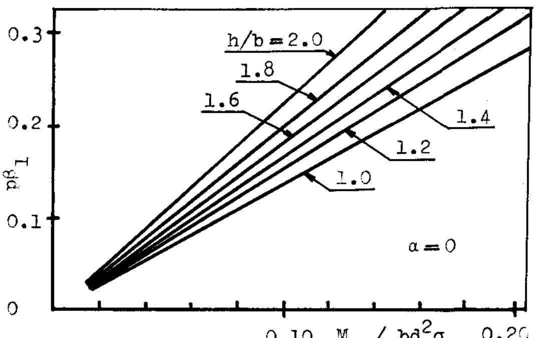

Fig. 3

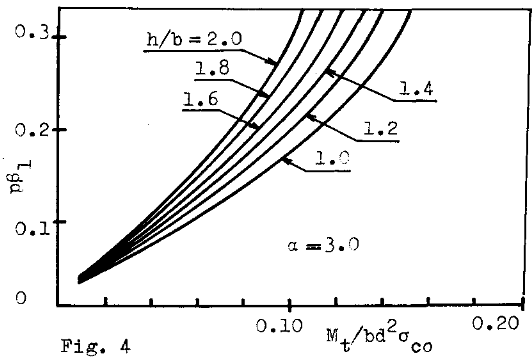

Fig. 4

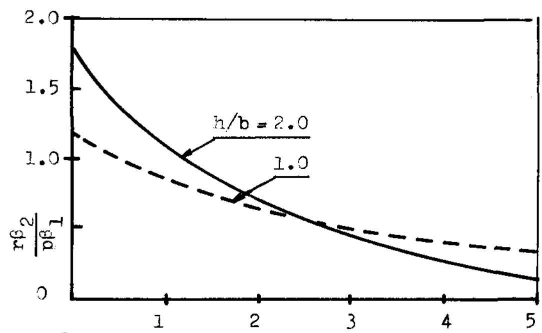

Fig. 5

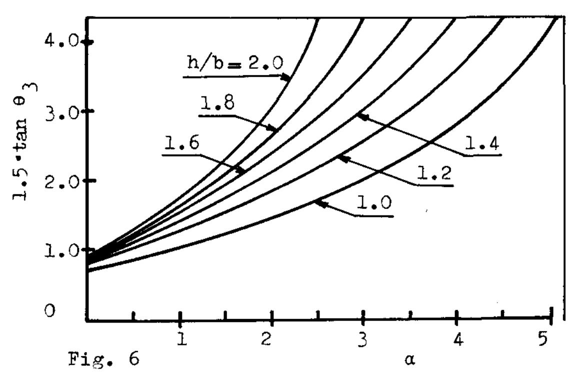

Fig. 6

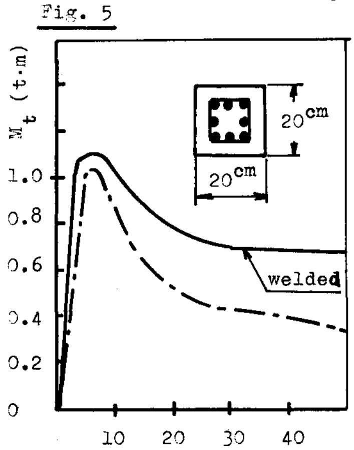

Fig. 7

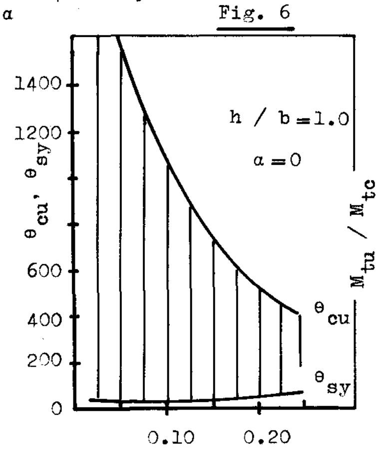

Fig. 8

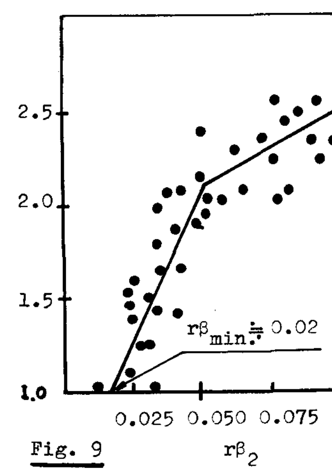

Fig. 9