

曲げねじりをうける鉄筋コンクリート部材の設計法

早稲田大学 松島 博

1. 要 旨 曲げとねじりと同時にうける長方形断面の鉄筋コンクリート部材について、その破壊機構を明らかにし、設計の一方法を提案した。

構造物を構成するコンクリート部材は、その配置や断面形状等によつては、曲げモーメント、せん断力および軸力等とともに、これらによる二次的なねじりモーメントをうけることが多いが、これに対する設計法は現在ところ未だ確立されてない。構造物の設計に際して、機能上および外観上の要求と大胆に取り入れる傾向が強まるにつれて、益々、部材に細長い形状のものや、断面が非対称のものが多くなつてあろう。従つて、これまでのようにねじりモーメントを無視することは危険であり、また場合によつては却つて不経済なこともある。また、地震時には多くの場合、ねじりモーメントがその他の外力とともに加わり、このために、曲げモーメントや軸力等に対しては充分安全なように設計された構造物が破壊することがある。従つて、合理的な破壊強度設計法の発展のためには、ねじりとうける鉄筋コンクリート部材の設計法を明らかにしなけれならぬ。

部材の設計に當つては、強度上ばかりでなく、変形上も適度の安全度をもたせる必要がある。従つて、種々の荷重段階における変形量の評価と、変形に關する安全度の検討は、強度に關するものと同等の重要性をもっている。とくに、部材に対して許容変形量が設けられるときは、この検討を欠くことは出来ない。しかし、コンクリート部材のねじりに關する従来の研究において、変形を理論的に取扱つたものはほとんどない。その理由は、変形に關して一般的に考慮が不十分であつたことのほか、これまで多く用ゐられてきた曲げねじりの相関曲線による方法では、それが破壊機構に基づくものでないで、これでは変形を理論的に解明することが不可能だからである。そこで、本研究では、部材の破壊機構を明らかにし、強度と変形を同時に評価してその安全性について検討する一方法を提案した。

2. ねじりモーメントと鉄筋コンクリート部材 構造物を構成する鉄筋コンクリート部材に対して主な荷重としてねじりモーメントが作用しないように構造物を設計するのが得策であらう。しかし、これが避けられない場合のほか、種々の条件によつて二次的なねじりモーメントが誘起されて、これらが構造物の安全性を低下させることが多い。二次的なねじりモーメントは、主として力の作用位置と部材断面のせん断中心との偏心によつて起る。このときは一般に、曲げモーメント、せん断力および軸力等の全部または一部とともにねじりモーメントが作用する。また、鉄筋コンクリート部材に純ねじりが作用する場合でも、ひびくひの発生とその発達に伴つて部材断面が変化し、次第に、曲げねじりの状態に移行する。

ねじりとうける鉄筋コンクリート部材のひびくひの発生および破壊機構には、まだ不明確な点が多く、従つてその設計法も確立されてないで、構造物の安全性を高めるためには、その機構を明らかにした上で、部材の強度と変形を正しく評価する方法を得ることが必要である。このとき、安全性を確保する点で、ねじりモーメントは次のような問題点をもっている。

a) 強度上から、まず、ねじりせん断応力の追加は一般に危険側に作用するばかりでなく、このとき、鉄筋の配置方向と力の作用方向とが一致しないために、鉄筋の有効断面積が減少し、従って、同一鉄筋量でその補強効果は低下する。適切ならせん鉄筋の使用は有効であるが、曲げねじりの比に応じてその配置を決めることは困難で、施工上も問題がある。従って、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ることが一般的で、このときは、曲げねじりおよびせん断力による力の作用方向への鉄筋断面積の成分が、その有効断面積となる。

b) 変形上からは、とくに、ひびわれ発生後のねじり剛度の低下は著しく、従って、ねじり変形の急激な増大のために起る構造物内のモーメントや力の再分配が短時間に進行し、安全度を害することがある。

c) 耐久性の点からは、ひびわれの問題がある。ねじりひびわれにおいては、荷重増加とともに、そのひびわれ幅が増大するほかに、ひびわれ面にそってすべりが加わり、このために鉄筋とコンクリートの剥離幅は、曲げの場合以上に大きくなることが予想される。従って、設計荷重作用時の許容ひびわれ幅は、曲げの場合以下に制限する必要がある。

3. 構造解析

長方形断面をもち、軸方向鉄筋とこれに直交する閉じたスターラップで補強された鉄筋コンクリート部材に、曲げとねじりが同時に作用するときの破壊機構を解明し、その強度と変形を正しく評価し得る理論式を誘導する。このために、上記の部材に現われる破壊面に着目して、その射影に近似した逆台形複鉄筋仮想断面を仮定し、この仮想断面の抵抗モーメントと変形から、部材の強度と変形を評価する方法を採用した。

このためにまず、コンクリートと鉄筋の応力度とひずみ度の関係式と、その破壊時近傍に重負において定める。この関係式を基礎にして、仮想断面における力の釣合いとひずみの条件とともに満足するように、部材の強度と求める。ついで、変形と、部材軸まわりのねじり角と、部材軸に直交する軸まわりの回転角について評価する。

部材は、明確な降伏点をもつ鉄筋を用いて、つり合い鉄筋比以下に補強されているものとする。従って、ある一定荷重で引張鉄筋が降伏してプラスチックヒンジが形成され、ついで、圧縮域コンクリートの圧壊とともにヒンジが終了して部材は破壊する。前者と部材降伏強度時とし、後者と部材終局強度時と定義する。

(1) 破壊面 曲げの垂直応力と、ねじりせん断応力による主応力がコンクリートの引張強度をこえた部分に、最初のひびわれ ab が発生し、これに伴って部材内部に応力の再分布が起って、 ab 側が引張域に、その反対側が圧縮域となる。そして、ひびわれは ad, bc と発達し、最終的に cd にそってコンクリートが圧壊して Fig.1 のように破壊面が形成される。

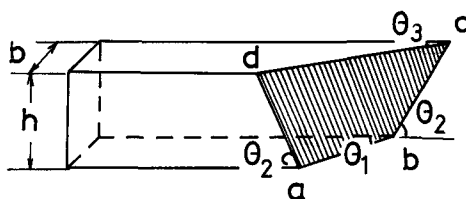


Fig. 1

Fig.1 に示す角度 θ_1 と θ_3 は、主応力方向の計算と実験結果から、Fig.2 のように示される。

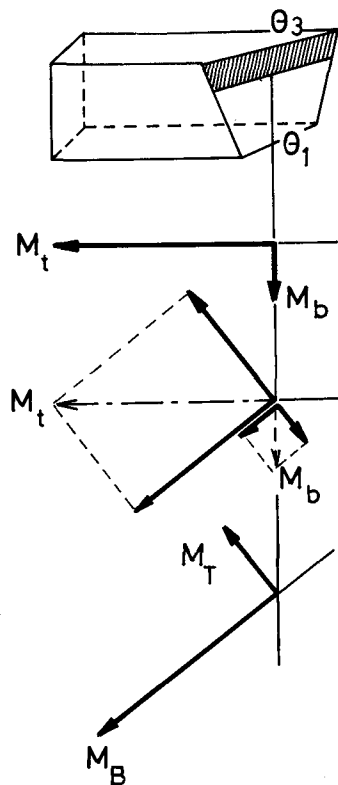
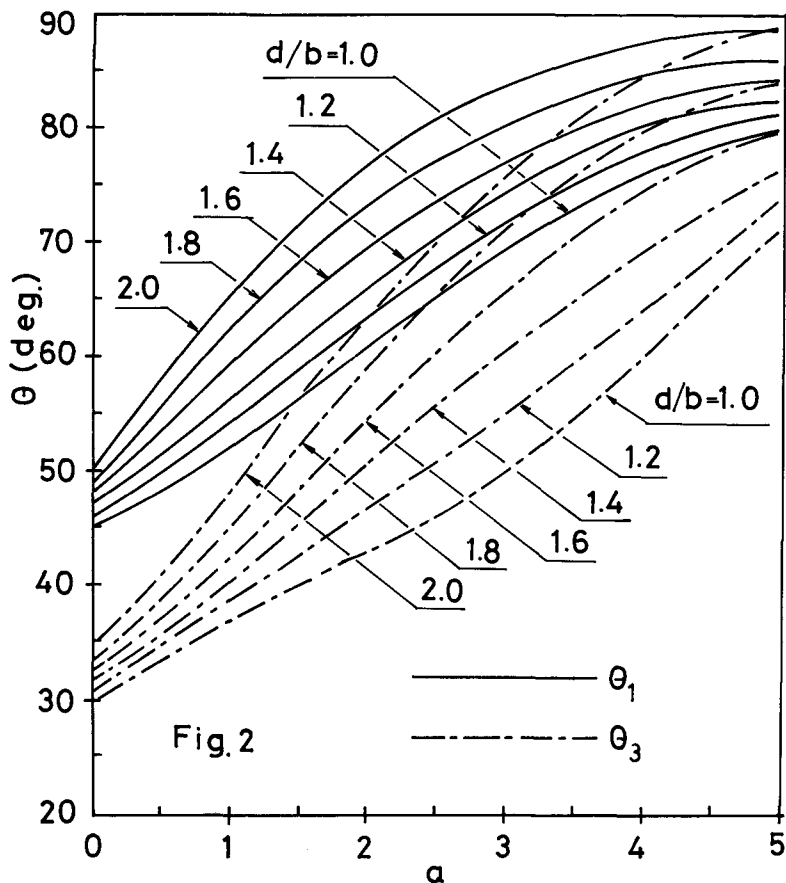


Fig. 3

(2) 仮想断面に作用する部材力 モーメントをベクトル表示し、その軸を矢印で示し、正のモーメントは矢印に向って右廻りであるとする。このとき、Fig.3 に示すように、部材に働く外力である曲げモーメント M_b とねじりモーメント M_t は、仮想断面に於いて、曲げ部材力 M_B と回転部材力 M_T として作用する。ここで、破壊面の斜影に逆似しお逆台形断面を仮想断面と仮定する。

(3) コンクリートと鉄筋の、応力度とひずみ度の関係 破壊時近くまで正しく表わし得るようは、次のように決める。

$$\frac{G_c}{G_{co}} = \frac{E_c}{E_{co}} \cdot e^{1 - \frac{E_c}{E_{co}}} \quad (1)$$

鉄筋

$$E_s \leq E_{sy}$$

$$G_s = E_s E_s$$

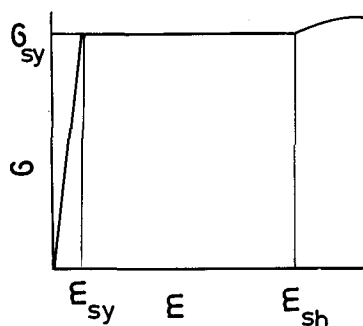
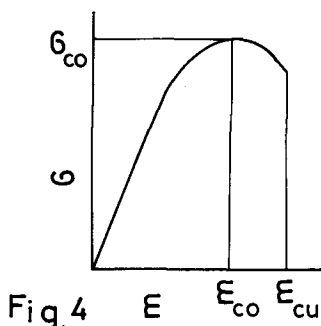


Fig. 4

$$E_{sy} < E_s \leq E_{sh} \dots \dots G_s = G_{sy}, \quad E_{sh} < E_s < E_{s,max} \dots \dots G_s = G_s \cdot (1 + A \log \frac{E_s}{E_{sh}}) \quad (2)$$

(4) 強度 Fig. 5 に示すような、仮想断面をもつ逆台形断面複鉄筋部材について、力の釣合とひずみの条件から、次の一般式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} C_1 \eta k - C_2 \eta k^2 + C_3 p \frac{G_{s1}}{G_{co}} - C_4 p \frac{G_{s1}}{G_{co}} &= 0 \\ \frac{M_B}{bd^2 G_{co}} &= C_1 \eta k^2 + C_2 \eta k^3 + C_3 p \frac{G_{s1}}{G_{co}} (k - \frac{d'}{d}) + C_4 p \frac{G_{s1}}{G_{co}} (1 - k) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $\eta = E_c / E_{co}$, $\eta_{1-4} = f(\eta)$, $C_{1-4} = f(a, d/b)$

式 (3) を k と M_B について解けば、部材の強度は次式で求められる。

$$M_t = \frac{M_B}{\gamma(\cos \theta_3 + a \sin \theta_3)}$$

$$M_b = a \cdot M_t \quad (4)$$

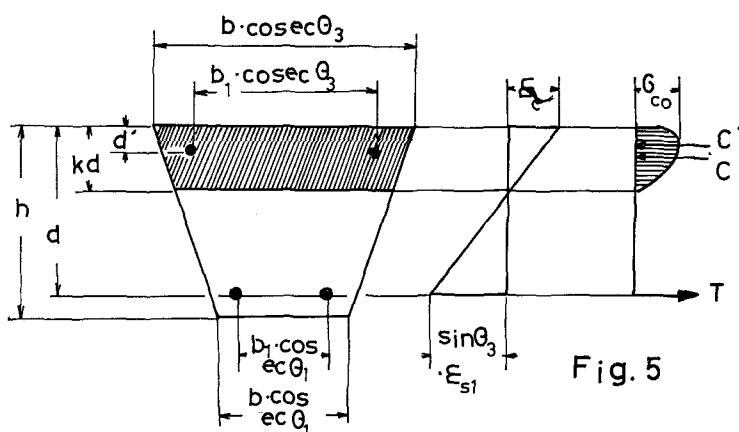


Fig. 5

この一般式に種々の荷重段階における条件を与えることによって、設計荷重作用時、

部材降伏および破壊時に関する式が、次のように求められる。

a) 設計荷重作用時 ひずみ発生から部材降伏前までの任意荷重に対して、

$$\left. \begin{aligned} C_{II} \eta k^3 - C_I \eta k^2 - C_I \frac{E_s E_c}{G_{co}} (C_{III} \frac{p'}{p} + C_{IV}) p k + C_I \frac{E_s E_c}{G_{co}} (C_{III} \frac{p' d'}{p d} + C_{IV}) p &= 0 \\ C_{II} \eta k^4 + C_I \eta k^3 + C_I \frac{E_s E_c}{G_{co}} \left[(C_{III} \frac{p'}{p} + C_{IV}) k^2 - (2 C_{III} \frac{p' d'}{p d} + 2 C_{IV}) k + C_{III} \frac{p}{p} (\frac{d'}{d}) + C_{IV} \right] p &= \frac{\gamma(\cos \theta_3 + a \sin \theta_3) M_k}{bd^2 G_{co}} k = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

b) 部材降伏時 引張鉄筋のひずみが、降伏ひずみに達することを条件に、

$$\left. \begin{aligned} C_I \eta k_{sy} - C_{II} \eta k_{sy}^2 + C_{III} p \beta \frac{k_{sy} - \frac{d'}{d}}{1 - k_{sy}} - C_{IV} p \beta &= 0 \\ \frac{M_{Bsy}}{bd^2 G_{co}} &= C_I \eta k_{sy}^2 + C_{II} \eta k_{sy}^3 + C_{III} p \beta \frac{(k_{sy} - \frac{d'}{d})}{1 - k_{sy}} + C_{IV} p \beta (1 - k_{sy}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

c) 部材破壊時 圧縮側コンクリートの最大歪ひずみが曲げ圧縮破壊ひずみに達する条件で、

$$\left. \begin{aligned} E_{sh} < E_s, \quad E_{sy}' < E_s' \\ C_I \eta k_{cu} - C_{II} \eta k_{cu}^2 + C_{III} p \beta - C_{IV} p \beta (1 + A \log \frac{E_s}{E_{sh}}) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{M_{Bcu}}{bd^2 G_{co}} = C_I \eta k^2 + C_{II} \eta k^3 + C_{III} p' \beta' (k - \frac{d'}{d}) + C_{IV} p \beta (1 + A \log \frac{E_s}{E_{sh}}) (1 - k_{cu}) \\
& \bullet E_{sh} < E_s, E_s' \leq E_{sy} \quad \left. \begin{aligned} & C_I \eta k - C_{II} \eta k^2 + C_{III} p' \frac{k_{cu} - d'}{k} \frac{E_s E_{cu}}{C_5 G_{co}} + C_{IV} p \beta (1 + A \log \frac{E_s}{E_{sh}}) \\ & \frac{M_{Bcu}}{bd^2 G_{co}} = C_I \eta k^2 + C_{II} \eta k^3 + C_{III} p' \frac{(k_{cu} - d')^2}{k_{cu}} \frac{E_s E_{cu}}{C_5 G_{co}} + C_{IV} p \beta (1 + A \log \frac{E_s}{E_{sh}}) (1 - k_{cu}) \\ & \bullet E_{sy} \leq E_s < E_{sh}, E_s' \leq E_{sh} \\ & C_I \eta k - C_{II} \eta k^2 + C_{III} p' \frac{k_{cu} - d'}{k} \frac{E_s E_{cu}}{C_5 G_{co}} - C_{IV} p \beta = 0 \end{aligned} \right\} \text{--- (8)} \\
& \bullet E_s \leq E_{sy} < E_{sh}, E_s' < E_{sh} \quad \left. \begin{aligned} & \frac{M_{Bcu}}{bd^2 G_{co}} = C_I \eta k^2 + C_{II} \eta k^3 + C_{III} p' \frac{(k_{cu} - d')^2}{k_{cu}} \frac{E_s E_{cu}}{C_5 G_{co}} + C_{IV} p \beta (1 - k_{cu}) \\ & \bullet E_{sy} \leq E_s < E_{sh}, E_s' < E_{sh} \\ & C_I \eta k - C_{II} \eta k^2 + C_{III} p \beta - C_{IV} p \beta = 0 \end{aligned} \right\} \text{--- (9)} \\
& \bullet E_s \leq E_{sy} < E_{sh}, E_s' < E_{sh} \quad \left. \begin{aligned} & \frac{M_{Bcu}}{bd^2 G_{co}} = C_I \eta k^2 + C_{II} \eta k^3 + C_{III} p' \frac{(k_{cu} - d')^2}{k_{cu}} \frac{E_s E_{cu}}{C_5 G_{co}} + C_{IV} p \beta (1 - k_{cu}) \\ & \bullet E_{sy} \leq E_s < E_{sh}, E_s' < E_{sh} \\ & C_I \eta k - C_{II} \eta k^2 + C_{III} p \beta - C_{IV} p \beta = 0 \end{aligned} \right\} \text{--- (10)} \\
& \frac{M_{Bcu}}{bd^2 G_{co}} = C_I \eta k^2 + C_{II} \eta k^3 + C_{III} p' \beta' (k_{cu} - \frac{d'}{d}) + C_{IV} p \beta (1 - k_{cu})
\end{aligned}$$

(5) 変形 仮想断面について求めた四角角とねじれ角のそれぞれ、部材軸方向の成分の和が部材のねじれ角。すなわち、部材軸と直交する方向の成分の和が部材の四角角であるとすれば、

$$\phi = \sin \theta_3 \eta d + \cos \theta_3 \cdot \theta d, \quad \theta = \cos \theta_3 \eta d + \sin \theta_3 \cdot \theta d \quad \text{--- (11)}$$

式中の ηd と θd は、それぞれの変位成分に応じて求められる。

a) 設計荷重作用時

b) 部材降伏時

c) 部材破壊時

$$\phi = C_{11} \frac{E_c}{k}, \quad \theta = C_{12} \frac{E_c}{k} \quad \phi = C_7 \frac{E_{sy}}{1-k}, \quad \theta = C_8 \frac{E_{sy}}{1-k} \quad \phi = C_9 \frac{E_{cu}}{k}, \quad \theta = C_{10} \frac{E_{cu}}{k} \quad \text{--- (12)}$$

4. 断面の計算 断面計算のための強度の基準と、部材の降伏強度にとる。すなわち、設計荷重 $\times \phi_s$ (ϕ_s : 安全係数, $\phi_s \geq 1.0$) が降伏強度となるような断面を計算する。

引張鉄筋に軟鋼を用いるとき、そのひずみ硬化のために、一般に降伏強度から終局強度に至るまでには若干の余裕がある。しかし、その余裕は余り大きいものではなく、また、部材降伏後の剛度、とくに、ねじり剛度の低下は著しいので、断面計算のための基準を降伏強度にとるのが適当である。

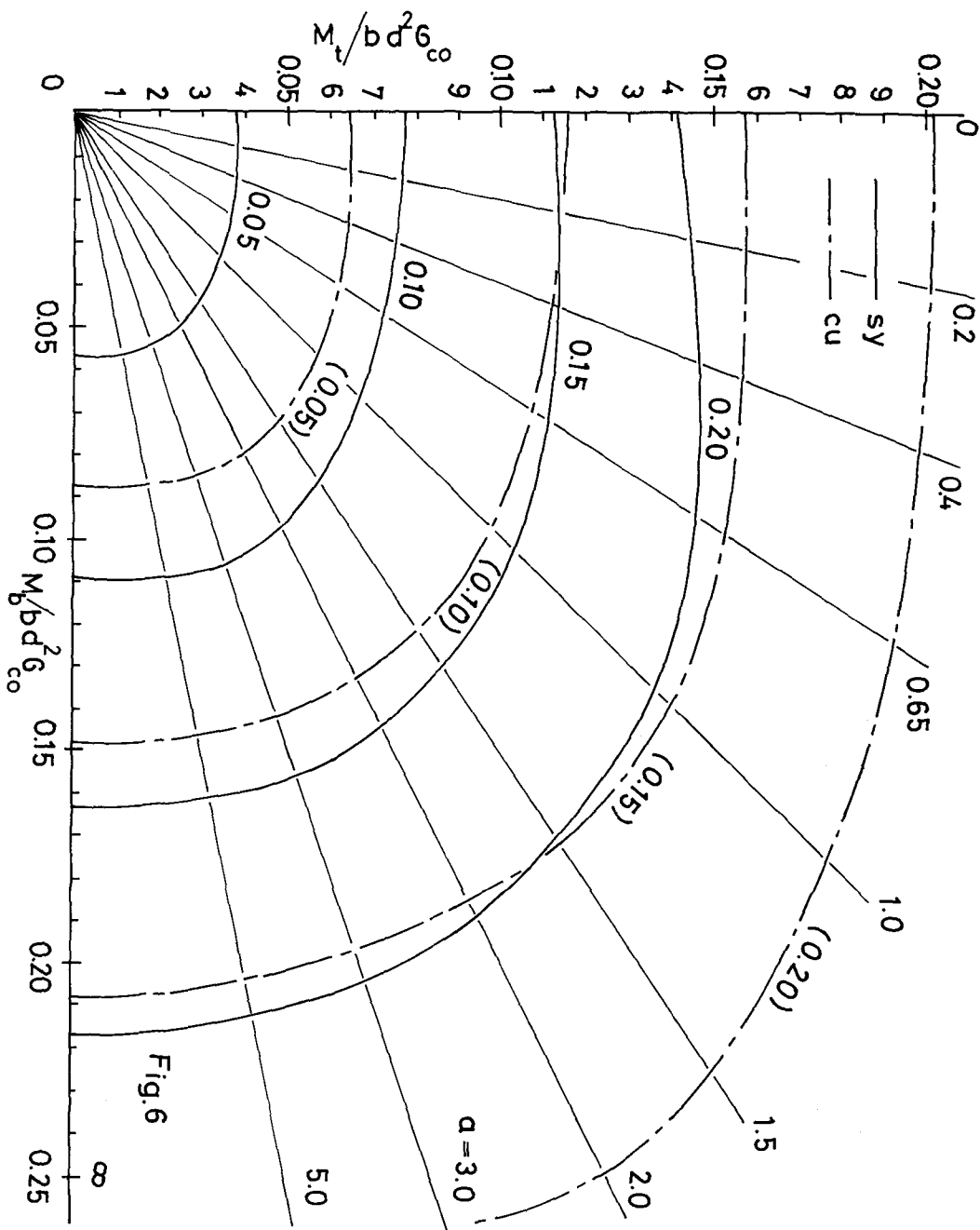
もし、耐久性の長から、設計荷重作用時にひびくれ発生と許すときは、ひびくれ発生強度と基準にして断面を計算する。この設計法については、別に提案した。³⁾

式(5) ~ (10) において、 a と d/b の値を与えれば、 C_{1-4} が決まり、従って、 $p \beta$ の値に応じて、降伏強度および終局強度に因する k と $M_t/bd^2 G_{co}$ の値を、あらかじめ求めておくことが出来る。これらの計算結果の詳細については省略するが、さらに、これに基づいて画いた M_t と M_b の相関曲線と、鉄筋比ごとに Fig. 6 に示す。

設計荷重 M_t と a が既知で、 G_{co} と G_{sy} が既知がまは仮定出来るときは、断面の計算は次の順序で行なう。

- b と d を仮定し、 $\frac{\phi_s M_t}{bd^2 G_{co}}$ と計算する。

- Fig.6 から、ここで計算した $\phi M_t / bd G_{co}$ に対応する $P\beta$ を求める。
- このとき、軸方向鉄筋は、 $A_s = P \cdot bd$ 、スタープは、 $r = mp = \frac{a_{sv}}{bs}$ から $\frac{a_{sv}}{s} = m \cdot p \cdot b$ を計算して、 a_{sv} と s の組合せを決める。ここで、 $m = \frac{r}{p}$ は、Fig.7 に示す。
- b, d, A_s, a_{sv}, s の組合せを数組求め、これらの中から、別に定めるねじりに関する構造細目や経済性等を考慮して、断面を選択する。



5. 変形の計算 設計荷重作用時と部材降伏時および終局時の変形を、ねじり角と回転角について計算する。このとき、変形はすべて、部材に形成されるプラスチックヒンジ部分に集中するものと仮定する。

a) 設計荷重作用時 さきに誘導した式(5)において、 d/b , p , E_s , G_{co} と a , M_t は既知であるから、これらの値と代入すれば未知数 k と η に関する二つの方程式が得られ、これを解くことが出来る。これを直接解くことは困難なので、それぞれの方程式について $k-\eta$ 曲線を通き、その二曲線の交点の座標を求めれば良い。 η の値から $E_c = \eta E_{co}$ と計算すれば、変形は次式から求められる。

$$\phi = C_{11} \frac{E_c}{k}, \quad \theta = C_{12} \frac{E_c}{k}$$

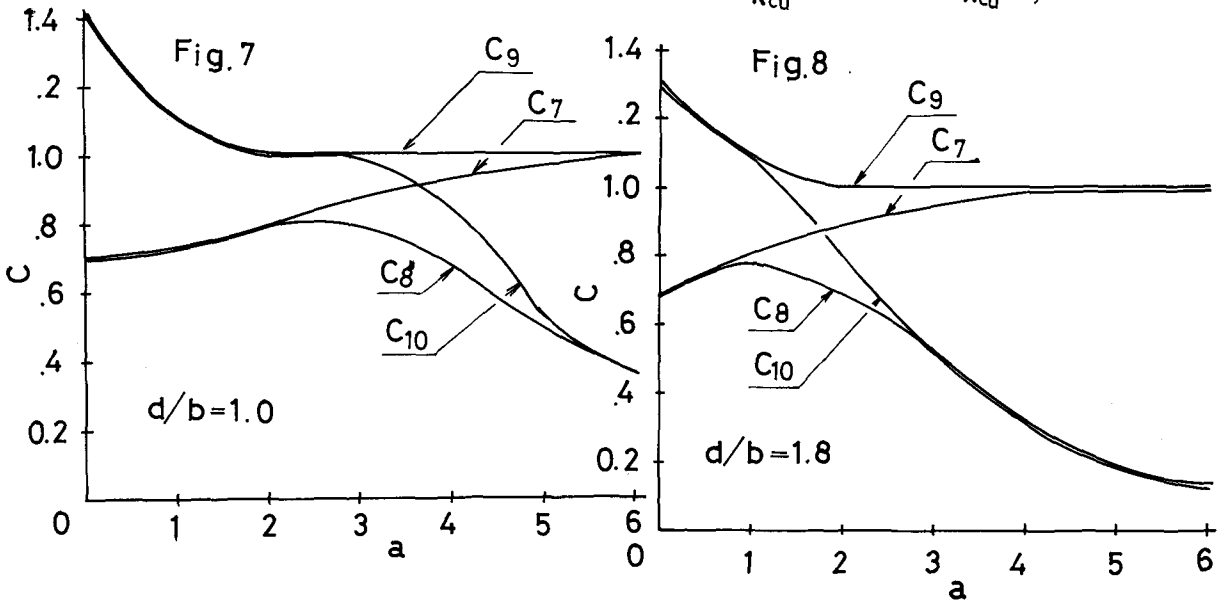
b) 部材降伏時 次式を用いて計算する。

$$\phi_{sy} = C_7 \frac{E_{sy}}{1 - k_{sy}}, \quad \theta_{sy} = C_8 \frac{E_{sy}}{1 - k_{sy}} \quad \left. \vphantom{\phi_{sy}} \right\} (12)$$

c) 部材破壊時 次式を用いて計算する。

$$\phi_{cu} = C_9 \frac{E_{cu}}{k_{cu}}, \quad \theta_{cu} = C_{10} \frac{E_{cu}}{k_{cu}}$$

ここで、 C_7-10 の計算結果の一部を次に示す。



6. 安全度の検討 部材の設計に当たって、ここでは次の方法で安全度の確保を図った。

- コンクリート強度は $G_{co} = 0.85 \cdot G_{ck}$ と用いる。
- 断面計算のための強度の基準に、部材の降伏強度と用いる。降伏強度から終局強度までには若干の余裕がある。さらに、安全係数 $\phi_s (>1.0)$ を用いて、設計荷重 $\times \phi_s$ が降伏強度となるようにする。

• 計算した断面について、設計荷重作用時、部材降伏時および破壊時の、それぞれ強度と変形を計算し、その余裕を求めて、安全度を検討する。

安全度の検討は、次のように行う。

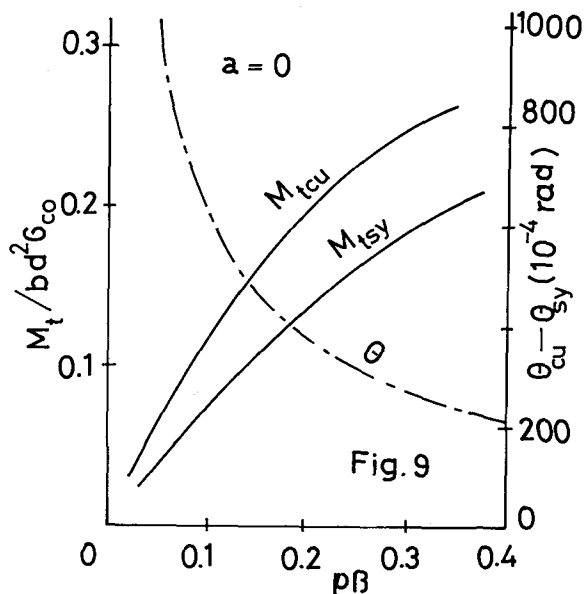
(1) 強度上の安全度 計算した断面について $PB = \frac{A}{bd} \cdot \frac{G_{sy}}{G_{co}}$ を計算する。Fig. 6 から、これに対応する $M_{tsy}/bd^2 G_{co} \times M_{tcu}/bd^2 G_{co}$ の値を求めて、 M_{tsy} と M_{tcu} を計算する。

このとき、安全率は、降伏に対して M_{ty}/M_t で、破壊に対して M_{cu}/M_t である。

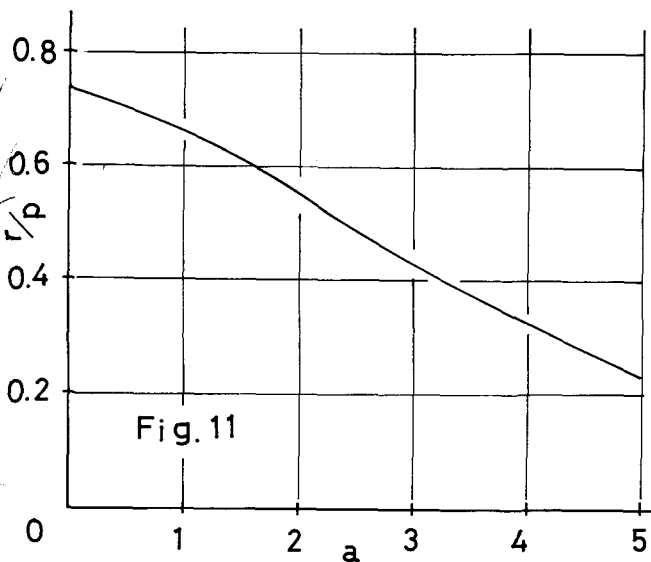
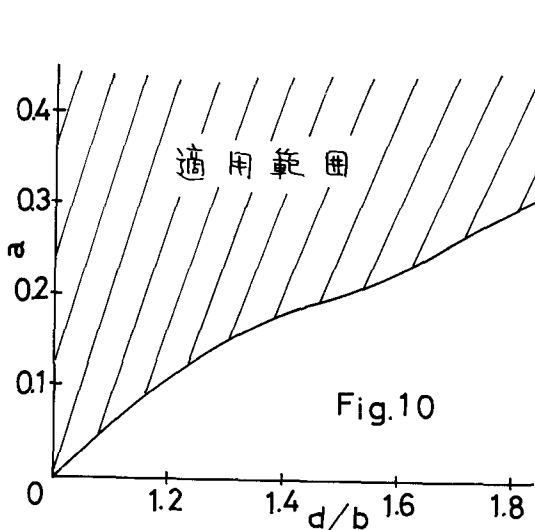
(2) 変形上の安全率 (5) に示す要領で、 ϕ 、 θ と ϕ_{sy} 、 θ_{sy} および ϕ_{cu} 、 θ_{cu} を求めれば、安全率は降伏に対して $\frac{\phi_{sy}}{\phi}$ 、 $\frac{\theta_{sy}}{\theta}$ であり、また破壊に対して $\frac{\phi_{cu}}{\phi}$ 、 $\frac{\theta_{cu}}{\theta}$ である。

これらの安全率によって、構造物 または部材の安定度を検討 $\frac{\phi_{sy}}{\phi}$ 、 $\frac{\theta_{sy}}{\theta}$ するのであるが、このようにして計算した安全率は、強度と変形によって一般に一致しないし、また、変形だけについても、断面の縦横比と曲げねじり比の組合せによっては、ねじり変形と曲り変形に関して安全率が異なることも予想される。そして、変形量と予測することの困難さや、部材に起る変形量のばらつきの大きいことを考えれば、変形の安全率と強度の安全率よりも大きくとるのが適当であろう。

強度上の安全率には余裕があつても、プラスチックヒンジの回転角がその回転限界とこえれば、部材は変形の面で終局状態に達するから、これらの安全率の両方、調和のとれた余裕が必要である。すなわち、Fig. 9 に計算結果の一例を示したように、鉄筋比を大きくすれば抵抗モーメントは増大するが、変形能力は減少するので、その調和をどこに求めるかは、これから研究すべき問題である。また、実際の構造物においては、荷重にはもたらんこと、強度の点でも材料強度のばらつきのほかに設計計算の近似や施工誤差等の不確定要素があり、従つて、安全度の検討に確率論的概念を導入することが必要となる。



7. 本設計法の適用範囲



構造解析において行なった仮定に基づいて、この設計法の適用範囲を次の通りとする。

1. 長方形断面ともち、軸方向鉄筋とこれに直交する筋をスターラップで補強した鉄筋コンクリート部材が、曲げとねじりと同時に作用する場合に適用する。

2. 部材は、明確な降伏点をもつ軟鋼で、つり合い鉄筋比以下に補強されているものとする。これ以外の場合に対しては、ここで示した設計式と設計用図表はそのままでは使用出来ないが、一般式はこの場合も正しい。ゆえに、補強方法に応じた条件を一般式に組合せることによって、適用範囲を拡張することは可能である。

3. 仮想断面の仮定から、ねじりモーメントと正の曲げモーメントの組合せに対して、部材下面が引張域で上面が圧縮域となる場合に適用される。この関係はグラフで示せば Fig.10 の通りである。

4. スターラップ比と軸方向鉄筋比との割合は、仮想断面における力の作用方向と、それぞれ鉄筋の有効断面積によって定められる。従って、この割合は、部材断面縦横比と曲げねじり比の組合せによって変化するが、これらの関係を Fig.11 に示す。

8. 実験

ここで提案した設計法の適否を検討するために実験を行なった。試験体の形状寸法は Fig.12 の通りで、コンクリートの設計基準強度は $G_{ck} = 300 \text{ kg/cm}^2$ とし、鉄筋

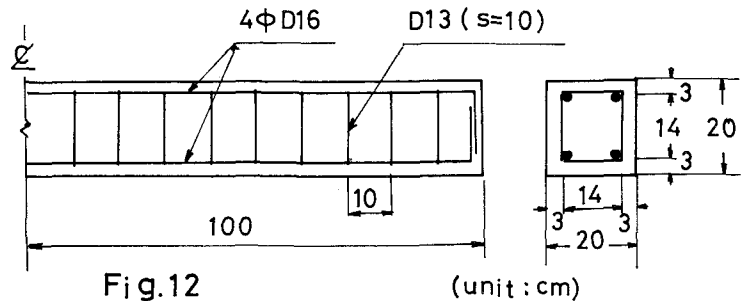


Fig.12

(unit: cm)

は SD30 を用いた。荷重は、ねじり試験機によりねじりモーメントを、油圧ジャッキにより中央荷重で曲げモーメントを、試験体ごとにあらかじめ定めた一定比率で、同時に与えた。 M_{tsy} , M_{tcu} について、実験結果と計算値との比較を Table 1 に示す。

Table 1

a	No.	M_t	test(tm)	calc.(τ)	test/calc.
0	A-1	sy	0.95	0.71	1.34
		cu	1.00	1.09	0.92
0	A-2	sy	0.95	0.71	1.34
		cu	1.00	1.09	0.92
0.65	B-1	sy	0.95	0.69	1.38
		cu	1.00	1.06	0.94
1.30	B-2	sy	0.80	0.62	1.29
		cu	1.20	0.96	1.25
2.60	C-1	sy	0.60	0.50	1.20
		cu	0.85	0.71	1.20
2.60	C-2	sy	0.75	0.50	1.50
		cu	0.85	0.71	1.20
∞	D-1	sy	2.13(M)	2.14	1.00
		cu	2.77(τ)	2.73	1.01

9. 結論 鉄筋コンクリート構造物の安全性を確保するために、ねじりの問題と集束に取扱う必要があることを指摘し、まず、曲げねじりと作用する長方形断面鉄筋コンクリート部材の設計法について提案した。

設計に当っては、強度だけでなく、変形および耐久性からの安全度の検

討が必要であるが、ここで提案した方法では、力の釣合いとともにひずみの条件とも満足するように、強度と変形と同時に取扱うことに重きを置いた。

曲げねじりを同時に受ける長方形断面鉄筋コンクリート部材には、その断面の縦横比と曲げねじり比の組合せ等によって変化する、ある破壊面が形成される。この破壊面は一種の曲面であるが、この斜影に着目してこれを仮想断面と仮定し、外力として作用する曲げモーメントとねじりモーメントと、この仮想断面に作用する部材力に置きかえた。さらに、断面形状と曲げねじり比の影響と、仮想断面の形状の変化に置きかえて、破壊機構の解析を行なった。その結果に基づいて設計法を提案した。

この方法は、実験結果との比較検討を進めている段階であるが、現在のところ、強度については、曲げねじり比の変化する全領域にもたつて、ほぼ正しく評価出来るようで、従って断面の計算に用いることが出来る。しかし、変形については十分ではない。変形の肉題の解決のためには、理論解析の充実もまた必要であるが、さらに、実験において、とくに部材降伏時と破壊時の変形を正しく測定する方法を見出す必要がある。これらの時期の変形は、とくにねじりの場合その進行が急速で、正確な測定が困難である。

本研究は多くの未解決の肉題を含んでいるが、まず解決すべき肉題は次の通りである。1. 変形に関して、理論解析の充実と、実験における測定法。2. 強度と変形における安全率のきめ方と、これらの間に調和のとれた安全度の検討。3. 仮想断面における中立軸の傾きの肉題。4. 最適鉄筋比および最大および最小鉄筋比。5. 本設計法の適用範囲外に対する解決策、等である。

あとがき 本研究に対し適切な御指導を頂いた、神山一教授に対し厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 神山一、鉄筋コンクリートはりのプラスチックヒンジの特性、昭和46年土木学会講演概要
- 2) 松島博、曲げねじりと受ける鉄筋コンクリート部材の破壊機構、昭和47年土木学会講演概要
- 3) Susumu KAMIYAMA and Hiroshi MATSUSHIMA, A Design Method for Reinforced Concrete Members based on Torsional Cracking Strength, Memoirs of the School of Science and Engineering, Waseda University, No. 35, 1971, p.87

記号

A_s, A'_s : それぞれ、引張側と圧縮側の軸方向鉄筋断面積 a_{sv} : スターラップ一本の断面積
 $a = M_b / M_t$, $\beta = G_{sy} / G_{co}$, γ : 補正係数 d : 有効高さ d' : かぶり
 b, h : それぞれ、断面の短辺と長辺の長さ, b_1, h_1 : スターラップの短辺と長辺の長さ
 E_{co} : コンクリートの最大応力度に対応するひずみ, E_{cu} : コンクリートの圧縮極限ひずみ
 E_{sy}, E'_{sy} : それぞれ、引張側と圧縮側の軸方向鉄筋の降伏ひずみ, E_s : 鉄筋のヤング係数
 E_{sh} : 鉄筋(軟鋼)のひずみ硬化領域に入るときのひずみで、 $E_{sh} \approx 10 E_{sy}$
 γd : 仮想断面についての、断面の回転角 ϕ : 部材についての、回転角
 ϕ_s : 断面計算のための安全係数, M_b : 曲げモーメント, M_t : ねじりモーメント
 $P = A b d$, $r = a / b s$, $m = r / p$, s : スターラップ間隔
 G_{co}, G_{cu} : それぞれ、コンクリートの最大および破壊時の曲げ圧縮応力度
 $\theta_t d$: 仮想断面についての、ねじり角, θ : 部材についての、ねじり角