

円形断面を有するコンクリート部材のねじり挙動

泉 満明*

1. 緒 言

コンクリート構造物（鉄筋およびプレストレストコンクリート構造物）において、円形断面を有する部材は、柱、梁あるいは杭等として多用されている。これらの部材は常時の载荷によるねじりモーメントの影響は小さい。しかし、地震時にはねじりモーメントの作用を大きく受ける部材もある。さらに、プレキャストコンクリート杭をねじ込み施工を行う場合には、大きなねじりモーメントが作用することになる。これらのことを考えると、円形断面に関するねじりモーメントの影響は部材設計および施工上不可欠の検討項目といえる。しかし、円形断面コンクリート部材のねじり挙動については研究があまり進んでおらず不明点が多い。

本研究においては、らせん状のひび割れおよび斜め曲げ破壊の2種類の形式を基本として、ひび割れおよび終局ねじりモーメント算定式を誘導し、各種の実験結果と提案式による算定値との比較検討を行った。

これらの研究と既往の研究結果から、円形断面を有するコンクリート部材がねじりモーメントを受ける場合の設計方針を示した。

2. 研究の概要

円形断面のコンクリート部材のねじりに関する実験は、20世紀前半に Grof および Mörsch によって、らせん鉄筋を含む RC 部材について行われた。わが国においては福田によって行われた。その後、RC 部材のねじりについての研究はあまり行われておらず、1966年に動的解析として Szilard によって行われた。その後、PC 部材について児島、池田ら²⁾および村田ら³⁾による研究が行われた。筆者も RC 部材⁴⁾および PC 部材⁵⁾について研究を行ってきている。一方において、コンクリート部材のねじり破壊形式については、Lecig⁵⁾による斜め曲げ形式が発表され、その後、Hsu⁶⁾によって発展され、ACI 基準にも採用された。らせんひび割れの形式（立体トラス）は Rausch¹⁾によって提案され、さらに、

Collins⁷⁾らによって圧縮場理論として発展し、これは土木学会コンクリート示方書にも採用されてきている。Lecig あるいは Rausch によって示されたものは、いずれも長方形断面に関して適用されており、そのままでは円形断面部材には適用できないので、この研究において円形断面に適用する理論式を誘導する。

筆者^{8),9)}の研究によると、図-1 (a) に示す破壊形式は、部材に作用するねじりモーメントが支配的な場合に採用するのが適切である。図-1 (b) に示す形式は、純ねじりの場合にも無筋および補強鉄筋量が少ない場合には適用可能であるが、ねじりと曲げさらにせん断力の組合せ力が作用する場合にも採用することができる。

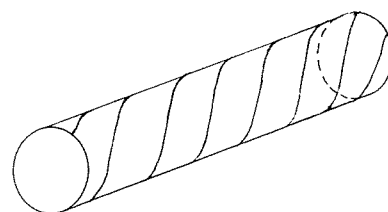
一般に、コンクリート部材のねじりモーメント (M_t) は既往の研究から、次式が提案されている。

$$M_t = M_{tcn} + M_{ts} \dots \dots \dots (1)$$

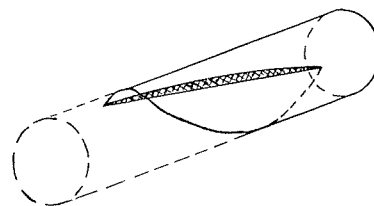
ここで、 M_{tcn} : コンクリートによるねじり抵抗モーメント

M_{ts} : 鋼材によるねじり抵抗モーメント

プレストレストコンクリートについても、上式は同様に適用できるものである。



(a) 立体トラス形式



(b) 斜め曲げ形式

図-1 円形断面を有するコンクリート部材のねじり破壊形式

*1 Mitsuaki IZUMI : 名城大学 理工学部土木工学科 教授

◇論文◇

ねじりひび割れモーメントに関しては、式(1)の M_{tcn} が支配的なものであるが、鋼材量が多くなると M_{ts} の影響も大きくなってくる。

ねじり終局モーメントに関しては、ひび割れの場合と異なり、一般に M_{ts} が支配的となるが、作用しているプレストレス力のため M_{tcn} も相応なねじり抵抗を分担する。しかしながら、ひび割れ発生前と後では M_{tcn} の性質は全く異なり、前者ではコンクリートの応力度に関連し、後者においては、斜め圧縮力の分担と作用しているプレストレス力(軸力)に関連したコンクリートの摩擦抵抗(ひび割れ面におけるせん断伝達等)と推定できる。これらの仮定に基づいて算定式を提案する。

ねじりモーメントとねじり回転角の概略の関係を図-2に示す。図からひび割れ発生までは、補強鋼材量の多寡にかかわらずほぼ同一のねじり一回転角を示すが、ひび割れ発生後は、補強鋼材量によりその後の挙動は著しく異なる。

- ・ A 曲線を示すものは補強鋼材量が著しく少なく、ひび割れ発生と同時にねじり破壊が発生し、もろい破壊挙動を示す。
- ・ B 曲線は、補強鋼材量がほぼひび割れモーメントに抵抗できるだけ配置されている場合で、靱性のある挙動を示す。
- ・ C 曲線は、補強鋼材量がひび割れモーメントに抵抗できる以上に配置されている場合である。Bの場合と同様、靱性の高い挙動を示す。
- ・ D 曲線は、補強鋼材量が過多(Over-Reinforcement)になると、コンクリートの圧壊が生じ、Aとは異なるものであるが、もろい破壊挙動を示すことになるので注意しなければならない。

プレストレスコンクリート部材の場合には、プレ

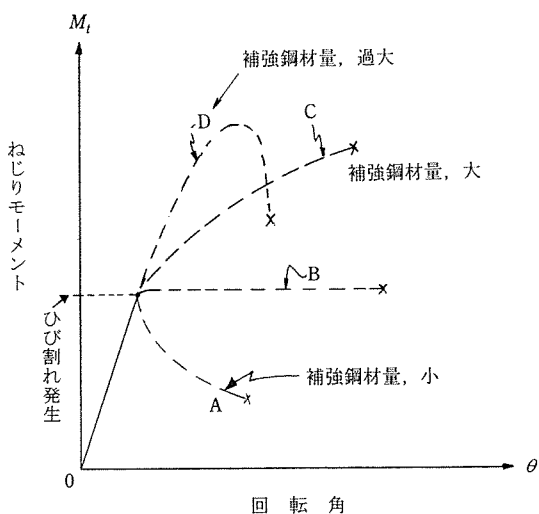


図-2 補強鋼材量に関連したねじりモーメントと回転角の概略の関係

ストレスの効果により、ひび割れ発生モーメントが大きくなり、必然的に A の形式が多くなるので、補強鋼材量について設計上留意する必要がある。

3. 円形断面に関するねじり理論式

3.1 ねじりひび割れ発生モーメント算定式

ねじりモーメントによるコンクリート部材のひび割れ発生モーメントは、既往の研究によると、鉄筋(鋼材)量が少ない場合、鉄筋補強の有無による影響は無視できるとされている。一般に算定式としては、弾性理論、斜め曲げ理論および完全塑性理論に基づいて提案式が示されてきている。

弾性理論によるねじりひび割れ発生モーメント(M_{tc})算定式は、

$$M_{tc} = \frac{\pi D^3}{16} \sigma_{ct} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\frac{\pi D^3}{16}$: ねじり断面係数、 D はコンクリート部材の直径

σ_{ct} : コンクリートの引張強度

となる。

式(2)の σ_{ct} に対して、組合せ応力状態のコンクリートの引張強度およびプレストレスを導入した場合の効果を考慮した式を誘導する。

組合せ応力状態のコンクリートの引張強度(σ_{ct}')は、純ねじりの場合を仮定すれば、

$$\sigma_{ct}' = \frac{\sigma_{cuo} \cdot \sigma_{cto}}{\sigma_{cuo} + \sigma_{cto}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 σ_{cuo} : コンクリートの一軸圧縮強度

σ_{cto} : コンクリートの一軸引張強度

となる。

プレストレスを導入した場合のねじりに対する効果(K_p)は

$$K_p = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{cpl} + \sigma_{cpv}}{\sigma_{cto}} + \frac{\sigma_{cpl} \cdot \sigma_{cpv}}{\sigma_{cto}^2}} \dots\dots (4)$$

ここで、 σ_{cpl} : 軸方向プレストレス応力度

σ_{cpv} : 横方向(円周方向)プレストレス応力度

となる。

コンクリート部材のねじりに対する鉄筋の補強は、一般に図-3に示すように軸方向鉄筋とそれに交差する横方向鉄筋で構成される。これらの鉄筋を仮定の薄肉鋼製円筒とする。

円筒の仮想厚さ(t_s)は

$$t_s = \frac{A_l}{\pi D_s} + \frac{A_v \cos \xi}{s} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 A_l : 軸方向鉄筋の全断面積

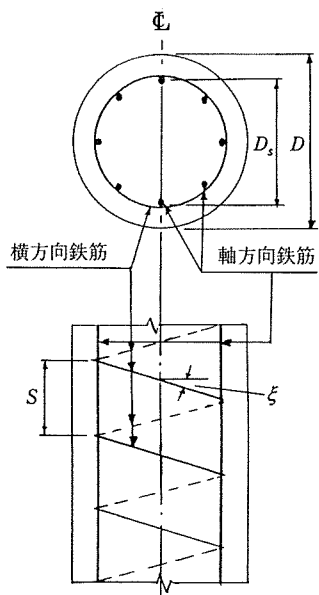


図-3 鉄筋コンクリート円形断面

- A_v : 横方向鉄筋の1本の断面積
- D_s : 横方向鉄筋の中心を結ぶ径
- s : 横方向鉄筋の軸方向配置間隔
- ζ : 横方向鉄筋の配置角度 (図-3 参照)。

となる。したがって、 M_{ts} は

$$M_{ts} = 2 A_m t_s \tau_{ts} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 A_m : D_s で囲まれた面積

τ_{ts} : ねじりによるせん断応力度

となる。

以上の式 (2)~(6) を重ね合わせるにより、円形断面のコンクリート部材のねじりひび割れ発生モーメントの一般式は、

$$M_{tc} = \frac{\pi D^3}{16} \frac{\sigma_{cuo} \cdot \sigma_{cto}}{\sigma_{cuo} \cdot \sigma_{cto}} \sqrt{1 + \frac{\sigma_{cpl} + \sigma_{cpv}}{\sigma_{cto}} \frac{\sigma_{cpl} \sigma_{cpv}}{\sigma_{cto}^2}} + 2 A_m t_s \tau_{ts} \dots\dots\dots (7)$$

となる

斜め曲げ理論式は、図-4 に示す理想化した破壊面を仮定し、円形断面部材にねじりと曲げモーメントが同時に作用する場合として誘導する。

$$M_t \cos \alpha + M_{\sin \alpha} = \frac{\pi D^3 \cos \alpha}{32} \sigma_{cto} \dots\dots (8a)$$

ここで、 $M = k_1 M_t$ とすると

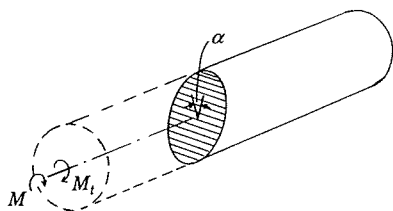


図-4 斜め曲げ破壊面

$$M_t = \frac{\pi D^3}{16} \sigma_{cto} \left\{ \frac{1}{2 \sin \alpha (\cos \alpha + k_1 \sin \alpha)} \right\} \dots\dots (8a)$$

となる。式 (8 b) において、角度 α はねじりモーメント (M_t) を最小とすることで求められ、

$$\frac{dM_t}{d\alpha} = 0$$

とすると

$$\cos 2\alpha + k_1 \sin \alpha (1 + \cos \alpha) = 0 \dots\dots\dots (9)$$

となる。式 (9) において $K_1 = 0$ ($M = 0$) とすると、

$$\alpha = 45^\circ$$

となり、斜め曲げ理論によるねじりひび割れ発生モーメント (M_{tc}) は

$$M_{tc} = \frac{\pi D^3}{16} \sigma_{cto} \dots\dots\dots (10)$$

となる。この式は結果的には純ねじりに関して式 (2) と同一のものとなる。なお、完全塑性理論では $M_{tc} = \pi D^3 / 12$ となる。

3.2 終局ねじりモーメント算定式

円形断面を有するコンクリート部材の終局ねじり算定式の誘導には、図-1 に示すように、

- 1) 立体トラス形式
- 2) 斜め曲げ形式

に基づいた2つの理論がある。

これらの理論により導かれた式にはそれぞれの特徴があり、立体トラス理論により導かれた式は、純ねじりに近い応力状態に対して合理的に適用可能である。一方、斜め曲げ理論による式は、純ねじりからねじりと曲げの組合せの応力状態に適用可能である。さらに、この2つの理論による式を組み合わせることにより純ねじりから純曲げまでさらにせん断力の各応力状態に対する合理的な式を誘導することが可能である。以下に、立体トラス理論⁸⁾に基づく式および斜め曲げ理論⁹⁾に基づく式を示す。

(1) 立体トラス理論による終局ねじり算定式

円形断面を有するコンクリート部材の配筋は図-5 に示すように、一般に軸方向とそれを囲む横方向鉄筋で構成されている。立体トラス理論に基づいて式を誘導する場合、トラス部材としてのコンクリートの圧縮斜材の厚さ (t) を仮定し、仮想の中空円筒断面として中実断面を取り扱うことにする。このことは、既往の研究により、コンクリート断面の中心部は部材のねじり強度に対する有効性が低いことが明らかで、合理的とされている。したがって、円形断面のコンクリート部材のねじりに対する有効断面積 (A_c) は、

$$A_c = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} = \pi t D_m \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 D_m : 仮想厚さ (t) の中心を結ぶ円の直径

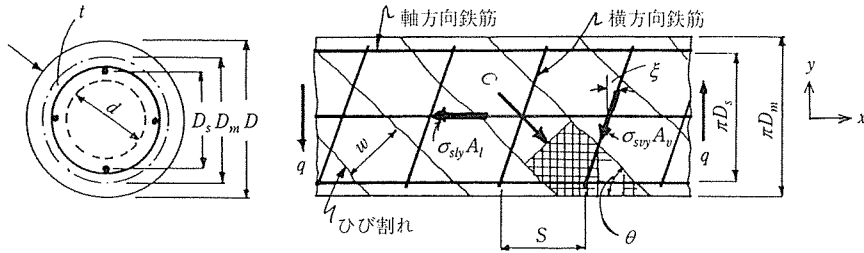


図-5 円形断面および展開図

となる。

立体トラスの圧縮斜材は、図-5に示すようにひび割れ間の幅 (w) で、有効厚さ (t_m) の断面寸法を有し、平均圧縮応力 (σ_{cm}) が作用していると仮定する。

圧縮斜材の合力 (C) は、図-5に示すように、

$$C = \sigma_{cm} w t_m \dots\dots\dots(12)$$

ここで、 $t_m = k_1 t$, $k_1 \leq 1.0$

となる。

合力 (C) の x 軸方向の成分 (C_x) は (図-5 参照)。

$$C_x = C \cos \theta = \sigma_{cm} w t_m \cos \theta \dots\dots\dots(13 a)$$

となる。同様に、 y 軸方向の成分 (C_y) は、

$$C_y = C \sin \theta = \sigma_{cm} w t_m \cdot \sin \theta \dots\dots\dots(13 b)$$

となる。

部材軸方向および円周方向の力のつり合いは、

$$\left. \begin{array}{l} \text{部材軸方向 } \sigma_{sl} A_l = \pi D_m \sigma_{cm} t_m \cos^2 \theta \\ \text{円周方向 } \sigma_{sv} A_v \cos \xi = s \sigma_{cm} t_m \sin^2 \theta \end{array} \right\} \dots\dots(14)$$

ここで、 σ_{sl} , σ_{sv} : 軸方向, 横方向鉄筋応力

となる。

横断面の単位長さ当りに作用するせん断流 (q) は、

$$q = \sigma_{cm} t_m \sin \theta \cos \theta \dots\dots\dots(15)$$

となり、ねじりモーメント (M_t) と q の関係より、

$$M_t = 2 A_m t_m \sigma_{cm} \sin \theta \cos \theta \dots\dots\dots(16)$$

ここで、 A_m : せん断流の合力で囲まれた面積

となる。

ねじりひずみエネルギー (U) を、 $\frac{\partial U}{\partial \alpha} = 0$ の条件で、部材のねじり回転角 (θ) の算定式を導くと、

$$\tan^2 \theta = \frac{\epsilon_l \frac{\pi D_m}{P_0} + \epsilon_c}{\epsilon_v \frac{P_v \cos \xi}{P_0} + \epsilon_c} \dots\dots\dots(17)$$

ここで、 P_v : 横方向鉄筋の周長

P_0 : せん断流合力の通路の周長

$\epsilon_l, \epsilon_v, \epsilon_c$: 軸方向, 横方向鉄筋およびコンクリートのひずみ

となる。

圧縮応力の分布深さ (t_m) の算定は、式 (14) より、

$$t_m = \frac{1}{\sigma_{cm}} \left(\frac{A_l \sigma_{sl}}{\pi D_m} + \frac{A_v \sigma_{sv} \cos \xi}{s} \right) \dots\dots\dots(18)$$

となる。ここで、 $t_m = k_2 t \frac{\sigma_{cu}}{\sigma_{cm}}$ とすると、

$$t = \frac{1}{k_2 \sigma_{cu}} \left(\frac{A_l \sigma_{sl}}{\pi D_m} + \frac{A_v \sigma_{sv} \cos \xi}{s} \right) \dots\dots\dots(19)$$

ここで、 $k_2 = k_1 \frac{1}{\lambda}$, $\frac{1}{\lambda}$ は終局時におけるコンクリートのソフトニング係数¹⁰⁾

となる。

圧縮場理論における斜材のコンクリート強度は、Hsuによると最大強度時において、近似的に $\frac{1}{\lambda}$ に比例するとしている。したがって、斜材のコンクリート強度 (σ_{cd}) は、

$$\sigma_{cd} = \frac{1}{\lambda} \sigma_{cu} \dots\dots\dots(20)$$

ここで、 λ : 強度低下係数

$$\lambda = \sqrt{\frac{\epsilon_l + \epsilon_t + 2 \epsilon_d}{\epsilon_d}} - 0.3$$

ϵ_l, ϵ_t : 軸方向, 横方向鉄筋のひずみ

ϵ_d : コンクリート斜材のひずみ

となる。式 (20) によって求めた σ_{cd} を式 (19) の σ_{cu} に代入して t を求める。

式 (15) に式 (12) を代入すると、

$$M_{ts} = 2 A_m \sqrt{\frac{\sigma_{sl} A_l}{\pi D_m} \frac{\sigma_{sv} A_v \cos \xi}{s}} \dots\dots\dots(21)$$

となる。さらに、鉄筋応力度の算定式は、

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{sl} = \epsilon_{cs} \left(\frac{A_m}{P_0 t \cos^2 \theta} - 1 \right) \frac{E_{sl} P_0}{2 \pi D_m} \\ \sigma_{sv} = \epsilon_{cs} \left(\frac{A_m}{t \sin^2 \theta} - 2 P_0 \cos \xi \right) \frac{E_{sv}}{P_v} \end{array} \right\} \dots\dots(22)$$

ここで、 ϵ_{cs} : コンクリートの最大圧縮ひずみ

E_{sl}, E_{sv} : 軸方向, 横方向鉄筋の弾性係数

となる。

終局時におけるコンクリート円形断面部材のねじり剛性 ($G_c K_{cu}$) と回転角 (θ_u) は、

$$\left. \begin{array}{l} G_c K_{cu} = \frac{4 A_m}{\epsilon_{cs} \sigma_{cu}} \left(\frac{\sigma_{sl} A_l}{\pi D_m} \frac{\sigma_{sv} A_v \cos \xi}{s} \right) \\ \theta_u = \frac{\epsilon_{cs}}{2} \sigma_{cu} \sqrt{\frac{\pi D_m}{\sigma_{sl} A_l} \frac{s}{\sigma_{sv} A_v \cos \xi}} \end{array} \right\} \dots\dots(23)$$

となる。

プレストレストコンクリート部材に式(18)~(23)を適用する場合には、各式の $\sigma_{sl}A_l, \sigma_{sv}A_v \cos \xi$ の項にPC鋼材に関連した項を追加する必要がある。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{sl}A_l &\rightarrow \sigma_{sl}A_l + \sigma_{spl}A_{pl} \\ \sigma_{sv}A_v \cos \xi &\rightarrow \sigma_{sv}A_v \cos \xi + \sigma_{spv}A_{pv} \cos \xi' \end{aligned} \right\} \dots (24)$$

ここで、 $\sigma_{spl}, \sigma_{spv}$: 軸方向PC鋼材, 横方向PC鋼材の応力度

A_{pl}, A_{pv} : 軸方向, 横方向PC鋼材の断面積

となる。ここで、プレストレストコンクリート部材への適用に注意しなければならない点がある。

- a) 鉄筋はプレストレスにより圧縮応力が導入されている。
- b) PC鋼材はプレストレス導入により引張応力が生じている。
- c) 終局時にはコンクリート部材にひび割れが発生しているため、上記a), b)の点を考慮して $\sigma_{sl}, \sigma_{sv}, \sigma_{spl}, \sigma_{spv}$ の仮定を図-6に示すように行う必要がある。
- d) 式(24)の関係はPC鋼材がコンクリートと十分な付着が期待できる場合に適用可能である。外ケーブルの場合にはe)の項に示す仮定が必要となる。
- e) 外ケーブルの場合はコンクリートとの付着が全長にわたっては期待できない。実験によるとPC鋼材応力度が増加する。これは、ねじりひび割れの発生によって、軸方向に部材の長さが増加する影響によるものと推定される。これを軸力の増大と仮定して、終局ねじりに算入する必要がある。
- f) ひび割れ発生後のコンクリート部材のねじりモーメントに抵抗する要素として、e)に記した軸力とその増大が、ひび割れ間のインターロックによるねじり抵抗として追加されるのがプレストレストコンクリートの特徴の一つではないかと推定され

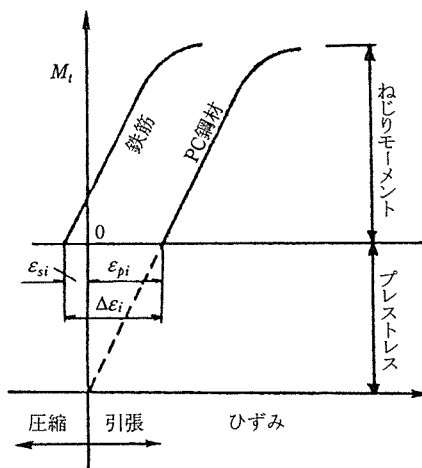


図-6 軸方向鉄筋とPC鋼材のひずみ

る。

(2) 終局時におけるコンクリートのねじり抵抗

終局時におけるコンクリート部分のねじり抵抗は、圧縮斜材の役割以外にコンクリートのひび割れ面におけるせん断力の伝達によるものも存在すると仮定する。

終局時におけるねじりひび割れ間のせん断滑り量については不明であるが、FIP-CEBの規定¹¹⁾では約2.0mmの滑り変化が生じた場合の式が示されている。ここではプレストレスの増大の影響は不明な点が多いので、単に導入されたプレストレスの影響のみを考慮して式の変形を行うと、せん断抵抗応力度($\tau_{fu \cdot d}$)は

$$\tau_{fu \cdot d} = 0.1 \sigma_{cu}^{2/3} (\sigma_{pe} \sin \theta)^{1/3} - \sigma_{pe} \cos \theta^{1/3} \dots (25)$$

ここで、 σ_{cu} : 設計コンクリート圧縮強度

σ_{pe} : 外力(プレストレス)による接触面の垂直応力度

となる(図-7参照)。

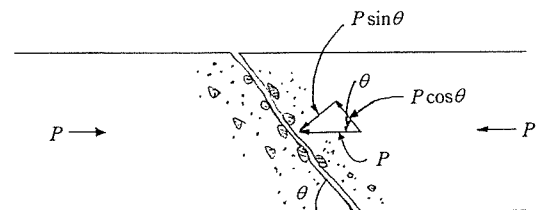


図-7 ひび割れ面におけるせん断抵抗

この $\tau_{fu \cdot d}$ をコンクリート部分が負担するねじりモーメントに関する抵抗応力度とする。

これによるねじり抵抗モーメント(M_{tc})は、

$$M_{tc} = 2 \pi t \left(r - \frac{t}{2} \right)^2 \tau_{fu \cdot d} \dots (26)$$

ここで、 t : 式(19)で求めた壁厚

r : 円形断面の半径

となる。したがって、立体トラス理論に基づく終局ねじりモーメント(M_{tu})は

$$M_{tu} = 2 A_m \sqrt{\frac{\sigma_{sl} A_l}{\pi D_m} \frac{\sigma_{sv} A_v \cos \xi}{s}} + 2 \pi t \left(r - \frac{t}{2} \right)^2 \tau_{tw \cdot d} \dots (27)$$

となる。

(3) 斜め曲げ理論による終局ねじり算定式^{9), 12)}

円形断面のコンクリート部材にねじりモーメントを載荷すると、図-8に示すような斜め曲げ破壊面を生じる場合もある。

図-3に示す軸方向鉄筋と横方向鉄筋を有する円形断面部材を図-8に示すような、部材軸に α の角度を有する引張ひび割れおよびその両端を結ぶ圧縮面で構成され

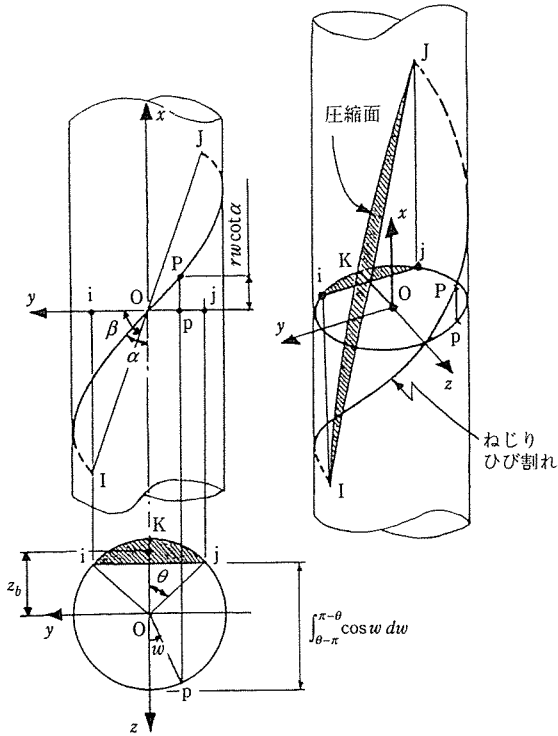


図-8 円形断面を有するコンクリート部材の斜め曲げ破壊面
た破壊面に関するねじり抵抗機構について検討を加える。

図-8 に示すように、IJ を結ぶらせん状のひび割れが発生し、IJK のコンクリート部分に圧縮を受けるものとする。円形断面はねじりモーメント (M_t)、曲げモーメント (M) および軸力 N を受けるものとする。

図-3 より、軸方向鋼材力 (F_l) は

$$F_l = \Sigma A_l \sigma_{sly} \dots\dots\dots (28)$$

ここで、 ΣA_l : 軸方向鉄筋全断面積

σ_{sly} : 軸方向鉄筋降伏点

横方向鋼材力 (F_v) は、

$$F_v = A_v \sigma_{svy} \frac{r_l}{s} \dots\dots\dots (29)$$

ここで、 A_v : 横方向鉄筋一本断面積

σ_{svy} : 横方向鉄筋の降伏点

r_l : 横方向鉄筋の中心半径

s : 横方向鉄筋の軸方向間隔

図-8 に示すように、圧縮部の IJK を Oyz 面に投影した $IOJ=2\theta$ とする。 C_x, C_y, C_z はコンクリートの圧縮合力の x, y および z 軸方向の成分とする。 z_b は、 Ox 軸と圧縮合力の作用点との距離とする。

各軸に関する力の成分のつり合いは、

$$Ox \text{ 軸 } N = C_x - F_l \left(\frac{\pi - \theta}{\pi} \right) \dots\dots\dots (30)$$

$$Oy \text{ 軸 } C_y = F_v \cot \alpha \int_{\theta - \pi}^{\pi - \theta} \cos w dw$$

$$= 2 F_v \cot \alpha \sin \theta \dots\dots\dots (31)$$

$$Oz \text{ 軸 } C_z = 0 \dots\dots\dots (32)$$

となる。

次に、各軸に関するモーメントのつり合いは、

$$Ox \text{ 軸 } M_t = C_y z_b + r_l F_v \cot \alpha \int_{\theta - \pi}^{\pi - \theta} dw$$

$$= C_y \left[z_b + r_l \frac{\pi - \theta}{\sin \theta} \right] \dots\dots\dots (33)$$

$$Oy \text{ 軸 } M = C_x z_b + r_l \frac{F_l}{2\pi} \int_{\theta - \pi}^{\pi - \theta} \cos w dw$$

$$- F_v \cot \alpha \int_{\theta - \pi}^{\pi - \theta} r_l w \cot \alpha \sin w dw$$

$$= C_x z_b + r_l F_l \frac{\sin \theta}{\pi} - 2 F_v r_l \cot^2 \alpha$$

$$[\sin \theta + (\pi - \theta) \cos \theta] \dots\dots\dots (34)$$

となる。

式 (28) と式 (30) より、

$$M_t = 2 F_v \cot \alpha [z_b \sin \theta + (\pi - \theta) r_l] \dots\dots\dots (35)$$

となる。

純ねじりの場合を考えて、 $M=0$ および $N=0$ とし、式 (28)、式 (33) および式 (35) より、

$$\cot \alpha = \sqrt{\frac{z_b F_l \left(\frac{\pi - \theta}{\pi} \right) + r_l F_l \frac{\sin \theta}{\pi}}{2 F_v r_l [\sin \theta + (\pi - \theta) \cos \theta]}} \dots\dots (36)$$

となる。

圧縮部の図心に圧縮応力の合力が作用するので、

$$z_b = \frac{2}{3} r \frac{\sin^3 \theta}{\theta - \sin \theta \cos \theta} \dots\dots\dots (37)$$

となる。

圧縮部のコンクリート強度を円柱供試体強度 (σ_{cu}) の 0.85 倍と仮定し、次式により θ を求める。

$$\frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{\pi - \theta} = \frac{F_l}{0.85 \sigma_{cu} \pi r^2} \dots\dots\dots (38)$$

式 (36)、式 (37) および式 (38) より、 $\cot \alpha, z_b$ および θ を求め、式 (35) に代入することで、斜め曲げ理論による終局ねじりモーメントを求めることができる。

この理論では、立体トラスの場合と異なり式 (27) に示すコンクリート部分のねじり抵抗は破壊形式より存在しないものと仮定する。さらに、実験値の比較検討の結果として、補正係数 $\eta=0.85$ を式 (35) に乗じた式 (39)

$$M_{tu} = 0.85 M_t \dots\dots\dots (39)$$

を実験結果の整理に採用する。

(4) 鋼繊維補強コンクリート部材のねじり強度

鋼繊維をコンクリートに混合した鋼繊維補強コンクリート部材のねじり挙動は、コンクリートの引張強度がみかけ上増加するために、無筋コンクリートと類似である。しかし、コンクリートの引張強度に対する増加係数を考慮して、式 (2) を変形する必要がある。

既往の研究によると、コンクリートの引張強度は、鋼繊維の混合比とアスペクト比に関連することが明らかになってきている。実験的研究¹³⁾によると引張強度の増加は、

$$\alpha_f = k_f \left(\frac{l_f}{d_f} \right)^{3/2} V_f \dots\dots\dots(40)$$

ここで、 k_f : 定数 0.067
 l_f/d_f : 鋼繊維のアスペクト比
 l_f, d_f : 鋼繊維の長さ, 直径
 V_f : 鋼繊維の混合比 (体積比)

となる。

したがって、鋼繊維補強コンクリートのねじり強度 (M_{ft}) は

$$M_{ft} = \frac{\pi D^3}{16} (1 + \alpha_f) \sigma_{ct} \dots\dots\dots(41)$$

となる。

プレストレスの影響等は式 (7) と同じ考え方で式 (41) に組み込むことで、プレレスト繊維補強コンクリート部材のねじり強度の算定が可能となる。

4. 実験結果と算定値の比較

筆者の実験の他に文献および発表されていない資料^(脚注)に基づいて、提案式と実験結果の比較を図-9 に示す。

(1) ひび割れ発生モーメント

ひび割れ発生モーメントの算定を式 (7) で行った結果と実験値の比較は図-9 に示すようであり、これより、算定値は実験値を比較的良く推定できているものと思わ

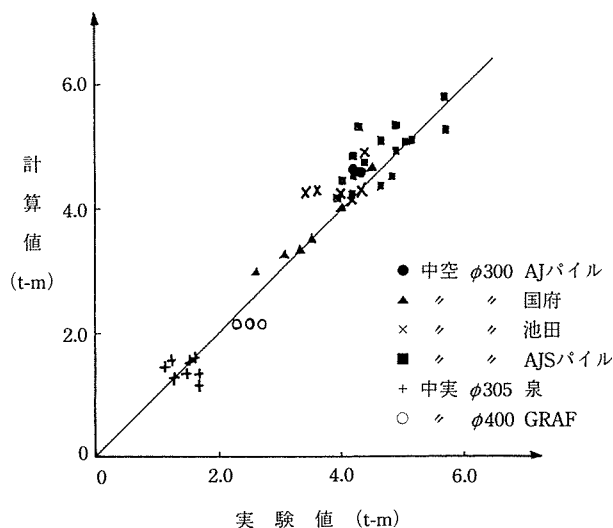


図-9 ねじりひび割れモーメントの計算値と実験値の比較

れる。多少、算定値が実験値を上回るものもある。

(2) 終局ねじりモーメント (立体トラス理論)

終局ねじりモーメントの算定値と実験値の比較は図-10 に示すものである。図-10 (a) は立体トラス理論による式 (21) によるもので、一般に、算定値は実験値より相当に低い値を示すと同時に、ばらつきが非常に大きい。この原因の一つは、コンクリート部分の終局ねじりに対する分担の問題であり、検討が必要である。図-10 (b) に示すものは、コンクリート部分のねじり抵抗を加味した式 (27) による場合で、式 (21) によるものより精度が改良されているが、さらに研究の余地がある。

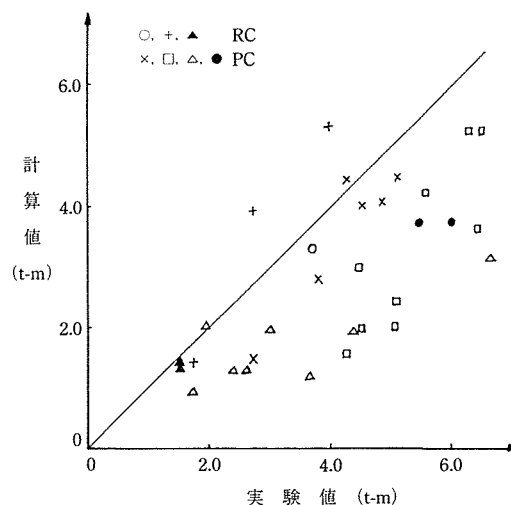


図-10(a) 終局ねじりモーメントの計算値と実験値の比較 (立体トラス理論…式 (21))

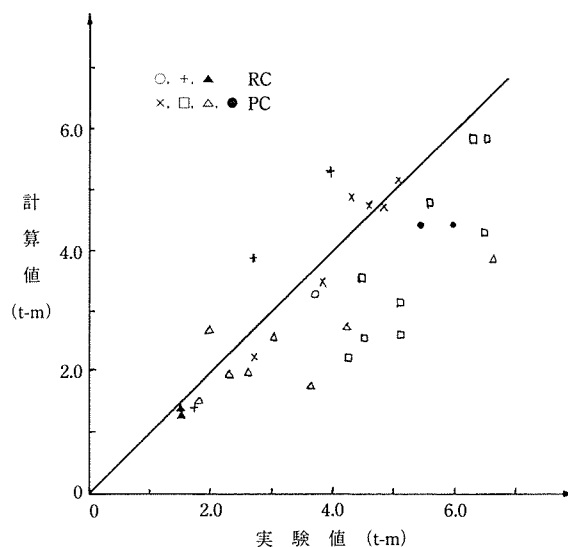


図-10(b) 終局ねじりモーメントの計算値と実験値の比較 (式 (27))

注；実験データとして参考とした文献

- a) 遠心力成型円筒 PC 部材のねじり強度に関する研究, 金沢大学工学部, (株)エー・ジェイ・エス, 1985 年
- b) AJ パイプのねじり実験, 日本鋼弦コンクリート株式会社, 1989 年
- c) 円形断面を有する PC 部材のねじり挙動, 名城大学, 泉研究室卒業研究, 1990 年

◇論文◇

(3) 終局ねじりモーメント(斜め曲げ理論)

斜め曲げ理論による式(39)による算定値と実験値の比較を図-11に示す。算定例が少ないが、純ねじりの場合には斜め曲げ理論式は、多少実験値より大きな値を与える。

(4) 鋼繊維コンクリート部材

図-12に鋼繊維コンクリート部材のひび割れおよび終局ねじりモーメントを式(41)による算定値と実験値を示した。式(41)は比較的实验値の推定が良好と思われる。

(5) ねじりひび割れ発生状況

鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート部材に鉄筋を配置した筆者の実験より示したものである。実験によると、鉄筋コンクリートあるいは鉄筋量の少ない場合には、図-1(b)に示す斜め曲げ破壊面を示したのものもある。

ひび割れの部材軸方向の角度は、鉄筋コンクリート部材(R-1.0)では約45°、プレストレストコンクリートでは、弾性理論で算定した角度でほぼ推定できる。その角度は導入プレストレス量が大きくなる程角度は小さくなる。図-13のPC桁でTC-0.75-10(プレストレス10 kgf/cm²)~TC-0.75-60(プレストレス60 kgf/cm²)と角度が小さくなっているのが明らかである。

5. 結論および設計方針

この研究の結果より、以下に示す結論と設計方針を提案する。

(1) 円形断面部材の純ねじりの挙動について

ねじりひび割れモーメントの算定に関しては、弾性理論に基づいた式(7)を適用できる。プレストレスの導入量が大きい場合は、鋼材の影響は無視できる。

(2) 終局ねじりモーメントの算定

a) 終局ねじりモーメントの算定は、純ねじりの場合立体トラス理論に基づいた式(27)の方が斜め曲げ理論に基づく式(39)より安全側の値を算定する。

b) プレストレストコンクリート部材の終局ねじりモーメントの算定には、コンクリートによるねじり抵抗モーメントを加算する式(27)が、式(21)より、精度高く算定可能と推定できる。

以上のように、理論値の精度は満足できるものではなく、未検討の事項も多く、今後研究を進める必要がある。

〈設計方針〉

本研究および既往の研究より、円形断面を有するコンクリート部材がねじりモーメントを受ける場合には、以下に示す設計方針を提案する。

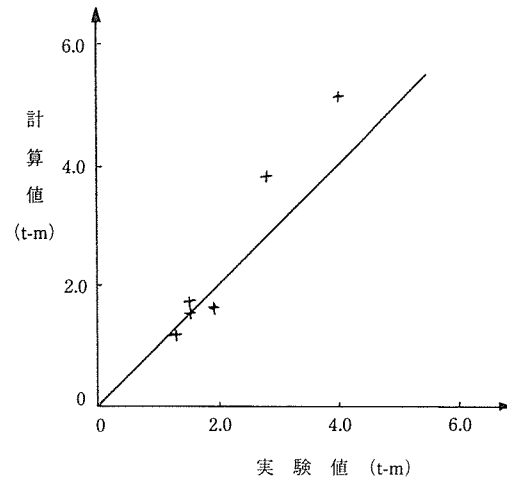


図-11 終局ねじりモーメントの計算値と実験値の比較(斜め曲げ理論…式(39))

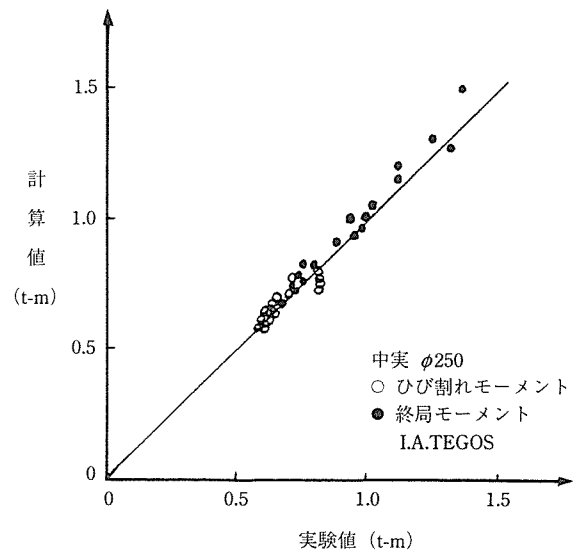


図-12 鋼繊維コンクリート部材¹⁵⁾

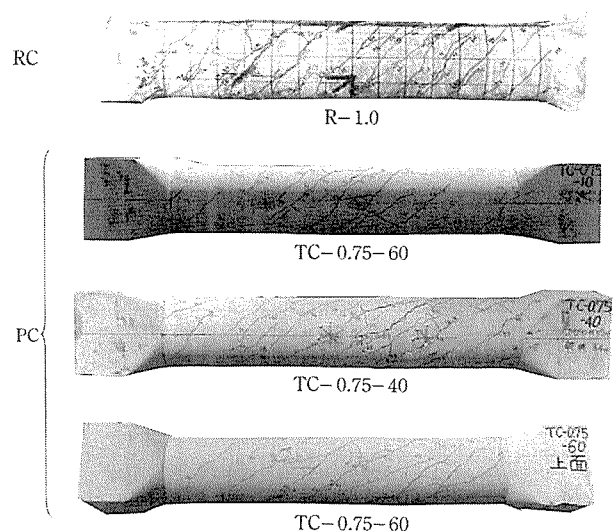


図-13 ひび割れ発生状態

- 1) ねじりモーメントの影響を大きく受ける円形断面の鉄筋およびプレストレストコンクリート部材について、ひび割れモーメントは式(7)を、終局モーメントは式(27)を適用し、安全率を考慮して設計に適用する。
- 2) 鉄筋およびプレストレストコンクリート円形断面部材の終局時のねじり破壊に対する靱性を高めるために、補強鋼材は、ねじりひび割れモーメントに抵抗できる以上の量を配置する。特にプレストレスの導入量の大きな部材については検討が必要である。
- 3) 杭等の施工時にねじりモーメントが部材に作用する場合には、式(7)により算定されるねじりひび割れ発生モーメントに適切な安全率(1.2~1.5)を考慮して、施工時の部材に加えるねじりモーメントを仮定しなければならない。
- 4) 円形断面に関して、ねじりモーメントと回転角の関係は、ひび割れ発生前では弾性理論を適用、ひび割れ発生後は、式(23)によって算定することができる。

参 考 文 献

- 1) E. Rausch : Torsionsbewehrung, Zentralblatt der Bauverwaltung 1921
- 2) 池田, 津野, 偉川 : 高強度スパイラル筋を用いたPC杭の振り耐力に関する実験, プレストレストコンクリート, Vol. 20, No. 1, Jan., pp. 6~9, 1978
- 3) 村田, 奥山, 国府 : ねじり抵抗の大きなプレキャストコンクリートくいに関する研究, プレストレストコンクリート, Vol. 20, No. 6, Dec., pp. 53~63, 1978
- 4) 松山, 泉, 清水 : 円形断面におけるコンクリート部材のねじり強度, 土木学会第39回年次学術講演会, V-50, pp. 409~410, 9月, 1984年
- 5) N.N. Lecig : Determination de la Resistance des Eléments à Section Rectangulaire en Beton Armé, soumis à l'Action Simultanée d'une Flexion et d'une Torsion. Beton i Zhelezobeton, pp. 109~113, No. 3, 1959
- 6) T.T.C. Hsu : Torsion of Structural Concrete—Behavior of Reinforced Concrete Rectangular Members, ACI SP-18, pp. 261~306, 1996
- 7) M.P. Collins : Diagonal Compression Field Theory—A Rational Model for Structural Concrete in Pure Torsion, ACI Journal, Vol. 71, No. 21, pp. 396~408, 8, 1974
- 8) 泉 満明 : コンクリート部材の終局ねじり強度の算定と設計法に関する研究, 土木学会論文報告集, 第305号, pp. 111~124, 1981年1月
- 9) 泉 満明 : ねじりと曲げを受けるコンクリート部材の終局強度と設計法, 土木学会論文報告集, 第327号, pp. 139~150, 1982年11月
- 10) T.T.C. Hsu, et al : Softening of Concrete in Torsion Members—Theory and Test, ACI Structural Journal, Vol. 87, No. 3, pp. 290~303, May-June, 1985
- 11) CEB-FIP Model Code 1990, p. 114
- 12) J. Fauchart, et al : Rupture des poutres de section Rectangulaire en Béton armé ou precontraint, par torsion et flexion circulaire combinées, ANNALES et ITBTP, No. 301, pp. 134~138, Jan., 1973
- 13) I.A. Tegos : Fiber Reinforced Concrete Beam with Circular Section in Torsion, ACI Structural Journal, Vol. 91, No. 4, July-August, pp. 473~482, 1989

【1996年3月26日受付】