

ねじりを受けるプレストレストコンクリート部材のひびわれ

松 島 博* 久 家 秀 龍**
顚 原 正 美*** 竹 田 勝 仁****

Initial Cracking of the Prestressed Concrete Members under Torsion

By Hiroshi Matsushima*, Hidetatsu Kuga**,
Masami Ebara***, Katsutoshi Takeda****

Synopsis: Stiffness of the prestressed concrete members under torsion reduces remarkably with their initial cracking, and strength margin from cracking to failure is generally smaller than the reinforced concrete members.

So, for the design of these members, it must be carefully examined whether cracking may be allowed or not under design load.

The authors studied about strength and deformation at initial cracking, and they have proposed some considerations on design of these members according to the results of theoretical and experimental analysis.

要旨: ねじりを受けるプレストレストコンクリート部材は、ひびわれ発生に伴ってその剛度が著しく低下し、又プレストレスの導入によってそのひびわれ強度は増加するが、その後破壊に至るまでの強度上の余裕は少い。従って、このような部材の設計において、設計荷重下でひびわれ発生を許してよいかどうかは慎重に検討すべき問題である。

この論文は、ひびわれ発生時の強度と変形について理論的及び実験的に検討し、その結果に基づいて設計のための若干の考察を加えたものである。

1. 従来の研究

1-1 初期ひびわれの発生

① 複合応力下のコンクリートの破壊条件

純ねじり及びねじりを含む組合せ荷重を受けるプレストレストコンクリート部材のひびわれ発生強度を評価するためには、複合応力下のコンクリートの破壊条件を明らかにする必要がある。N. Swamy²⁾ と P. Zia³⁾ によればこのような破壊条件として次のものがある。

a) 最大応力度理論

最初 Lamé' と Clayperon が提案しさらに Rankine がこれを発展させたもので、コンクリートのような脆性材料によく適合する。

これは任意点の主応力度が材料の引張又は圧縮強度に達したときに破壊し、その点を通る他の平面上にある他の応力は無視できるとする。図示すれば図-1の通りである。

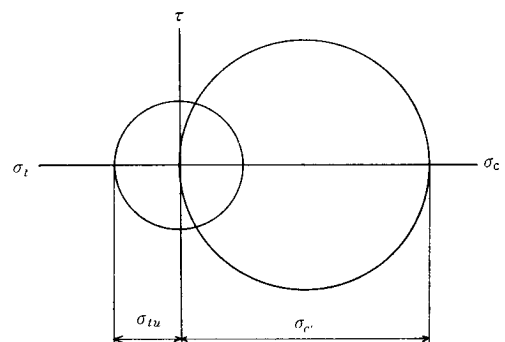


Fig. 1 最大応力度理論

b) 最大ひずみ度理論

St. Venant が提案したもので主として脆性材料に適用されるが、N. Swamy は延性材料に対しても最大応力度理論よりも良い実験結果を与えるとした。これは、ある点の最大ひずみが材料の軸引張又は軸圧縮試験で得ら

* 土木工学科教授、工学博士
Professor, Civil Engineering Division, Dr. of Engineering

** 土木工学科技手
Assistant, Civil Engineering Division

*** 小沢コンクリート工業株式会社技術研究所、技術部長
Chief of Engineering Section, Technical Institute of Ozawa Concrete Industry Co., Ltd.

**** 同上、研究員
Member of Engineering Section, The same Institute

れる最大ひずみに達したとき破壊するとしたもので、一般式は、

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{E} \{ \sigma_{xx} - \mu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \} \leq \frac{\sigma_{max}}{E}$$

c) 最大せん断応力度理論

Guest が提案したもので、N. Swamy によれば脆性材料に対しても延性材料に対しても安全側の結果を与える。ある荷重状態の材料は、最大せん断応力度が純せん断で決定される極限せん断応力度をこえるときに破壊するとした。

d) 最大ひずみエネルギー理論

Beltrain と Huber、及び Haigh によって別々に提案され、さらに Hencky と Von Mises が発展させた理論である。材料の破壊は、その中に蓄積される弾性ひずみエネルギーの総量によって決定されるとする。しかし、N. Swamy は、これは弾性破壊に対しては有効であるが、塑性性質をもつコンクリートに対しては適用に制限があるとした。

e) 内部摩擦理論

Coulomb の提案になるもので、材料の破壊は主応力方向に傾いた面上のすべりによって起るとし、このときのすべり抵抗は粘着力に等しい一定のせん断強度とすべり面に垂直な応力に比例する内部摩擦からなるとした。そして、せん断応力度がこの組合せ抵抗力をこえるときに破壊するとした。

この理論を図示すれば図-2の通りで、Coulomb のもの、及びこれを一般化した Mohr のものがある。Mohr の円は組合せ応力下の試験から1組の最大応力円を描き、それらに包絡線を引いたものである。

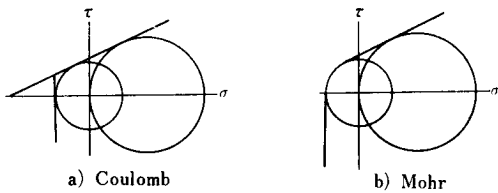


Fig. 2 内部摩擦理論

f) Cowan の理論

Cowan はコンクリートの破壊条件として、最大応力度理論と内部摩擦理論を組合せて図-3のものを提案した。図の 37° はコンクリートの内部摩擦角であり、破壊条件を示す線の直線部分は Rankine のもので、斜線部分は内部摩擦理論に基づくものである。

破壊形式からみれば、鉛直部分は劈開破壊で斜線部分はせん断破壊を示す。

さらに、修正 Cowan 理論を図-4示すが、これは

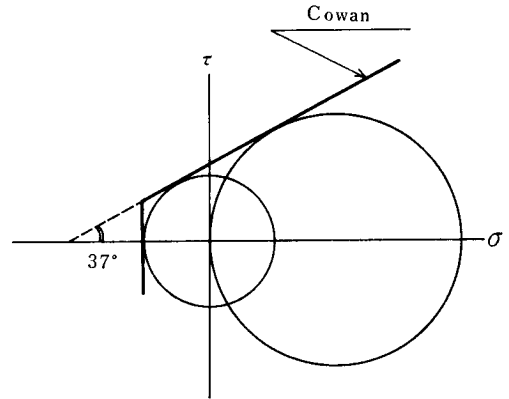


Fig. 3 Cowan の理論

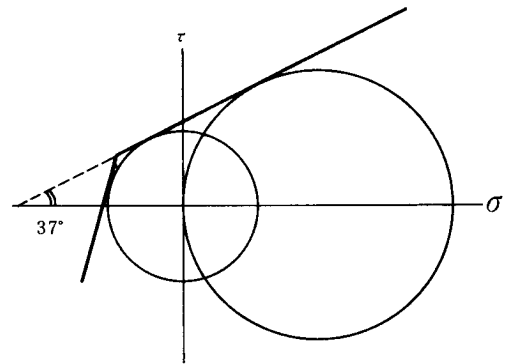


Fig. 4 修正 Cowan の理論

Cowan 理論の原形よりも Mohr のものに近い。

② PC 部材のねじりに対する各種破壊条件の適用

P. Zia³⁾ は、プレストレスの大きさとねじりせん断強度との理論的相関曲線を各種破壊条件に基づいて図-5のように示した。

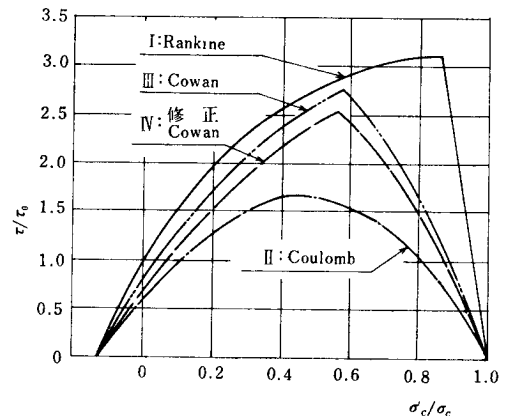


Fig. 5 $\sigma_c' - \tau$ 相関曲線

ここで, σ_c' : プレストレス

σ_c : コンクリートの圧縮強度

τ_0 : $\sigma_c' = 0$ のときのねじりせん断強度

τ : プレストレスを与えた時のねじりせん断強度

Humphrey の実験 ($\sigma_c = 550 \text{ kg/cm}^2$, $\tau_0 = 52.4 \text{ kg/cm}^2$) によれば, I, III は危険側で, II は安全側に過ぎ, IV は実験結果と良く一致した。

P. Zia³⁾ は, Modified Cowan 理論を用いて σ_c'/σ_c と τ (見かけのねじりせん断強度) との関係を示し, 実験によってこれを立証した。

1-2 ねじりひびわれ強度

プレストレストコンクリート部材のねじりひびわれ強度についてはいくつかの研究結果が発表されているが, 未だ十分なものは無い。また, いづれもひびわれ強度の定義を明らかにしないでこれを論じているところにも問題がある。

プレストレスの導入によってひびわれ強度はある程度迄増大するが, 破壊強度の増加は少ない。又, ひびわれ発生に伴う剛度低下は著しく, 設計上大きい意味をもっている。

① ひびわれ強度

R. H. Evans ら⁵⁾ は, 曲げ-ねじりを受けるプレストレストコンクリート部材について次のように示した。ここで M_{boc} と M_{bo} はそれぞれ純曲げひびわれ及び破壊モーメントである。

a) $M_b < M_{boc}$:

ねじりせん断応力度は長辺中央 $\tau_1 = M_t / \gamma_1 b^2 h$ で, 短辺中央では $\tau_2 = M_t / \gamma_2 b^2 h$ である。コンクリートの塑性状態を考慮して γ_1 の代りに γ_2 を用いれば, $M_{te} = \gamma_2 b^2 h \sigma_{tu}$ である。

uniform prestress を σ_p とすれば

$$M_{te} = \gamma_2 b^2 h \cdot \sqrt{\sigma_{tu}(\sigma_{tu} + \sigma_p)}$$

b) $M_{boc} < M_b < 0.8 M_{bo}$, $0.8 M_{bo} < M_b$:

このときは底面にひびわれが発生して破壊する。

底面の主引張応力度を σ_{tu} に等しくとって,

$$-\sigma_{tu} = \frac{\sigma_n}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_n}{2}\right)^2 + \tau_a^2}$$

$$\tau_a^2 = \sigma_{tu}^2 + \sigma_{tu} \sigma_n$$

$\sigma_n = -M_{bc} / Z + \sigma_{pr}$: 底面の垂直応力度

σ_{pr} : 底面におけるプレストレス

$\tau_a = M_{te} / \gamma_2 b^2 h$: 底面のねじりせん断応力度

従って,

$$M_{te} = -C_1 + \sqrt{C_1^2 + C_2}$$

$$C_1 = 3\sigma_{tu}\psi\gamma_2^2 b^3, C_2 = (\sigma_{tu}^2 + \sigma_{tu}\sigma_{pr})\gamma_2^2 b^4 n^2$$

P. Zia によれば⁴⁾, 曲げ-ねじりを受けるプレストレ

ストコンクリート部材が腹鉄筋をもたないときはひびわれ発生とともに破壊し, $M_{te} = M_{tu}$ 及び $M_{oc} = M_{bu}$ はプレストレスの影響を考えた無筋コンクリート部材として求めればよいとした。

② 剛 度

この問題に関する研究は少ない。E. L. Kemp らはプレストレストコンクリート部材のねじり剛度について次のような研究成果を発表している。又, ひびわれ発生に伴いねじり剛度は12%以下に低下し応力の再分配が危険な状態となることが多いので, 設計はひびわれモーメントを基準に行うべきであるとする考え方もある。

a) 純ねじりの場合

無筋及び鉄筋コンクリート部材については次の弾性式が良い結果を与える。

$$K_{t-50} = \beta \cdot b^3 d \cdot G = \beta \cdot b^3 d \cdot (28.44 \times 10^9) \cdot \sqrt{f_c'}$$

K_{t-50} : ひびわれ強度×1/2のねじり剛度

又, Chander らの実験によればプレストレスの大きさとその偏心は初期剛度に対してほとんど影響を与えないとした。

T-, L-形断面部材に対して, Evans らは断面全体にわたってコンクリート強度が均一であれば 図-6 に示す各要素長方形のねじり剛度を次の分布係数を用いて表わすことができるとした。

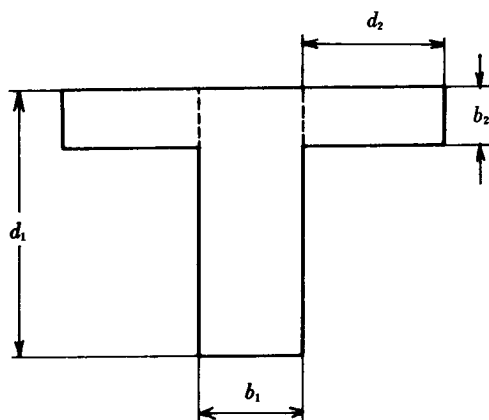


Fig. 6 要素長方形

$$\text{ウェブ分布係数 } (DF_1) = \frac{\beta_1 b_1^3 d_1}{\beta_1 b_1^3 d_1 + n \beta_2^3 d_2}$$

$$\text{フランジ分布係数 } (DF_2) = \frac{\beta_2 b_2^3 d_2}{\beta_1 b_1^3 d_1 + n \beta_2^3 d_2}$$

n : L形... 1

T形... 2

b) 曲げ-ねじりの場合

Pandit と Warwaruk は, 曲げ-ねじりを受けるコンクリート部材のひびわれ発生前のねじり剛度は純ねじり

の場合よりも低下し次式で示されるとした。

$$K'_{t-50} = K_{t-50} / \left(1 + \frac{M_u}{M_{u0}} \right)$$

M_{u0} , M_u : それぞれ純曲げ及び曲げ-ねじりの
ときの終局曲げモーメント

上式は長方形, T形及びL形断面をもつ鉄筋及びプレ
ストレストコンクリート部材に適用できるとした。

1-3 ひびわれ発生の影響

ひびわれ発生による剛度低下とこれに伴うモーメント
の再分配はねじりの場合は著しいが, これについての研
究に見るべきものは少ない。

2. ひびわれ強度の定義

ねじりひびわれ強度の定義を, $M_t-\theta$ 曲線 (M_t : ねじ
りモーメント, θ : ねじれ角) における第1変曲点に対
応するねじりモーメントとする。

コンクリート部材におけるひびわれの発生は, 部材に
対して強度, 変形及び耐久性の見地から大きい影響を及
ぼすがひびわれ発生強度の決め方は一般に明確ではない。

その方法としてまず初期ひびわれ発生の観測によるも
のがある。ひびわれの目視可能な限界は 2~4/100 mm
程度と思われるが, 観測方法によってはさらに微細なも
のから発見することができる。従ってこの方法はひびわ
れ幅について基準を設けなければひびわれ強度を厳密に
は定め難い。

ついで, ひびわれ発生に伴う挙動の変化に基づくもの
が考えられ, その一つとして $M_t-\theta$ 曲線における第一変
曲点のねじりモーメントをとる方法がある。ひびわれ発
生と発達に伴う変形の増加は曲げの場合に比べて著しい
が, これはひびわれが断面四周に発達し内部釣合機構が
急速に変化するためである。構造解析の立場からは, こ
の方法をとるのが妥当であろう。

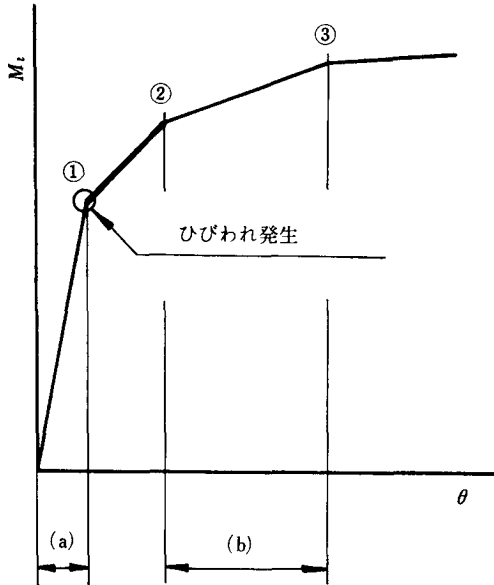
純ねじりを受けるプレストレストコンクリート部材
(Aシリーズ) について, ひびわれの発見 (測微鏡によ
り $\omega=1/100$ mm) からこれが発達して断面四周に連続
するまでのねじりモーメントの大きさを表-1に示す。

この区間は, 図-7に示すような全断面有効の状態から
トラス型釣合状態へ移行する領域であるが, ここで定義

表-1: ひびわれの発生と発達に対応するねじりモーメントの値 (Aシリーズ) (kg, m)

試 験 体 の 記 号	理 論 値	初期ひびわ れの発見 (1/100mm)	荷重-変形 曲 線 の 第 1 変曲点	ひ び わ れ の 発 達		
				$\omega=$ (5/100mm)	$\omega=$ (10/100mm)	らせん状に ほぼ連続
0	1	979 (1.00)	1070 (1.09)	1350 (1.38)	—	—
	2	979 (1.00)	1085 (1.11)	1220 (1.25)	1447 (1.48)	1598 (1.63)
30	1	1274 (1.00)	1600 (1.26)	1688 (1.32)	—	1800 (1.41)
	2	1274 (1.00)	1416 (1.11)	1660 (1.30)	1778 (1.40)	1899 (1.49)
	4	1300 (1.00)	1417 (1.09)	1230 (0.95)	1598 (1.23)	1960 (1.51)
60	1	1586 (1.00)	1840 (1.16)	1840 (1.16)	2140 (1.35)	2260 (1.42)
	2	1586 (1.00)	1839 (1.16)	1740 (1.10)	—	2080 (1.31)
90	1	1808 (1.00)	1959 (1.08)	1780 (0.98)	2140 (1.18)	2260 (1.25)
	2	1808 (1.00)	2080 (1.15)	1820 (1.01)	2440 (1.35)	—
	4	1778 (1.00)	1670 (0.94)	1600 (0.90)	2260 (0.90)	2501 (1.41)
平 均		1.00	1.12	1.14	1.32	1.43
		—	1.00	1.02	1.18	1.28

したひびわれ強度はひびわれを肉眼で発見したときの強度にもほぼ等しい。



- (a): 全断面有効状態
(b): トラス型釣合状態

Fig. 7 釣合状態の変化

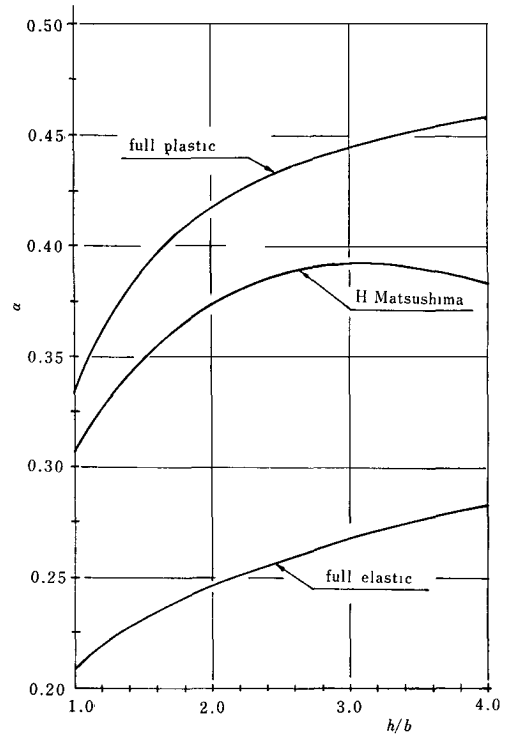


Fig. 8 \$\alpha\$ の値

3. ひびわれ強度の評価法

3-1 一般式

長方形断面をもつコンクリート部材のねじりひびわれモーメント M_{tc} を示す一般式は次の通りである。

$$M_{tc} = \alpha b A_s \sigma_{tu}$$

α : 断面の縦横比に基づくねじり定数

b : 断面の短辺の長さ

$A_s = A_c + n A_s$: ねじり換算断面積

ここで、 α の値はコンクリートの塑性を考慮した Modified Membrane Analogy に基づいて定めたもので、その値は図-8 に示す通りである。¹⁾

3-2 垂直応力分布の影響

プレストレストコンクリート部材が純ねじり又は曲げ-ねじりを受けるときのねじりひびわれモーメントを求める。このために、プレストレスのみ又はプレストレスと曲げによる垂直応力とともにねじりせん断応力が作用する場合を考えて図-9 のような応力分布を仮定する。

σ'_c, σ_c : プレストレス又はプレストレスと曲げによる垂直応力度で、tension を-, comp. を+とする。

τ_{max} : 最大ねじりせん断応力度

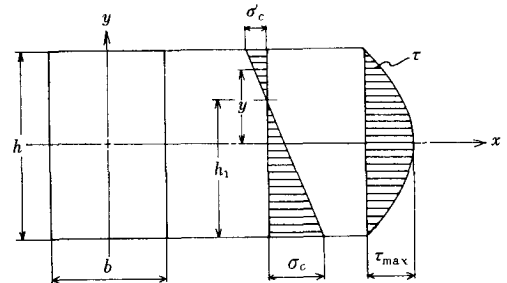


Fig. 9 垂直応力とねじりせん断応力の分布

$\infty \geq h_1 \geq \frac{h}{2}$ で、 $h_1 = \infty$ のときは uniform prestress である。

垂直応力度とねじりせん断応力度に基づく主引張応力度がコンクリートの引張強度に達したときにひびわれが発生することを条件に、断面の長辺側と短辺側のそれぞれについて求めたねじりモーメントの中で小さい方が部材のひびわれ強度である。

a) 断面長辺側

任意点の応力度は、

τ : 放物線分布を仮定して、

$$\tau = \left(1 - \frac{4y^2}{h^2}\right) \cdot \tau_{\max} = \left(1 - \frac{4y^2}{h^2}\right) \cdot \frac{M_{tc}}{\alpha b^2 h} \quad (1)$$

σ : 引張りのとき $\left(\frac{h}{2} \geq y \geq h_1 - \frac{h}{2}\right)$

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\frac{h}{2} - h_1 + y}{h - h_1} \sigma_c' \\ &= \frac{\frac{h}{2} - h_1 + y}{h - h_1} \cdot \left(-\frac{h - h_1}{h_1} \sigma_c\right) = -\frac{\frac{h}{2} - h_1 + y}{h_1} \sigma_c \\ \text{圧縮のとき } \left(h_1 - \frac{h}{2} \geq y \geq -\frac{h}{2}\right) \end{aligned}$$

$y \geq 0$:

$$\sigma = \frac{h_1 - \frac{h}{2} + y}{h_1 - \frac{h}{2}} \cdot \frac{h_1 - \frac{h}{2}}{h_1} \cdot \sigma_c = -\frac{\frac{h}{2} - h_1 + y}{h_1} \cdot \sigma_c$$

$y < 0$:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{h_1 - \frac{h}{2} - y}{h_1} \sigma_c \\ &= -\frac{\frac{h}{2} - h_1 + y}{h_1} \cdot \sigma_c \end{aligned} \quad (2)$$

これらを用いて,

$$\begin{aligned} \frac{\sigma}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} &= -\sigma_{tu} \\ \tau^2 &= \sigma_{tu}^2 \left(1 + \frac{\sigma}{\sigma_{tu}}\right) \end{aligned}$$

$$\left(\frac{M_{tc}}{\alpha b^2 h}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{4y^2}{h^2}\right)^2 = \sigma_{tu}^2 \left(1 - \frac{\frac{h}{2} - h_1 + y}{h_1} \cdot \frac{\sigma_c}{\sigma_{tu}}\right)$$

$$\therefore \frac{M_{tc}}{\alpha b^2 h \sigma_{tu}} = \frac{h^2}{h^2 - 4y^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{\frac{h}{2} - h_1 + y}{h_1} \cdot \frac{\sigma_c}{\sigma_{tu}}} \quad (3)$$

求めるひびわれねじりモーメント係数 $M_{tc}/\alpha b^2 h \sigma_{tu}$ は y を変数とする上式で与えられる最小値で, これを求めれば,

$$\left(\frac{M_{tc}}{\alpha b^2 h \sigma_{tu}}\right)_{\min.} = \sqrt{\frac{Ax+B}{x^2(2-x)^2}} \quad (4)$$

$$A = -\frac{h}{2h_1} \cdot \frac{\sigma_c}{\sigma_{tu}} \neq 0 \text{ のとき}$$

$$B = 1 + \frac{\sigma_c}{\sigma_{tu}}, C = (A - 2B)^2 + 12AB$$

$$y = \frac{h}{2}(x-1) \text{ で } x = \frac{(A-2B)+\sqrt{C}}{3A}$$

x の変域は $h_1/h \geq 0.50$ のとき,

σ が引張…… $2 \geq x \geq \frac{2h_1}{h}$

σ が圧縮…… $\frac{2h_1}{h} \geq x \geq 0$

$A=0$ は $h_1=\infty$ で uniform prestress の場合で,

$$\begin{aligned} \left(\frac{M_{tc}}{\alpha b^2 h \sigma_{tu}}\right)_{\min.} &= \sqrt{B} \\ x=1 \text{ で } y=0 \end{aligned} \quad (5)$$

b) 断面短辺側

引張りの生ずるおそれのある短辺側について考えれば

$\sigma = \sigma_c' \dots \dots \text{uniform prestress}$

$$\tau_{\max} = k \cdot \tau_{\max}$$

τ_{\max} : 長辺側中央における最大ねじりせん断応力度

k : 短辺と長辺における最大ねじりせん断応力度の比

従って

$$\frac{M_{tc}}{\alpha b^2 h \sigma_{tu}} = \frac{1}{k} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_c'}{\sigma_{tu}}} \quad (6)$$

σ_c' の符号は前記のように comp. は+, tension は-である。

部材のひびわれモーメント係数 $M_{tc}/\alpha b^2 h \sigma_{tu}$ は式(4)又は(5)と式(6)で計算した値のうちの小さい方である。

3-3 計算結果の一例

a) 上, 下縁の垂直応力度比 σ_c'/σ_c の値による区分 $\sigma_c'/\sigma_c = 1.0, 0.5, 0.2, 0.0, -0.3$ の場合について, 図-10~14に示す。

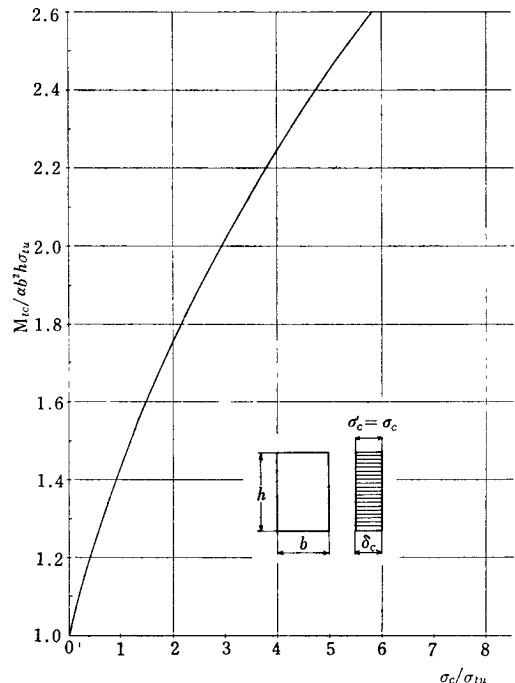


Fig. 10 ひびわれねじりモーメント係数

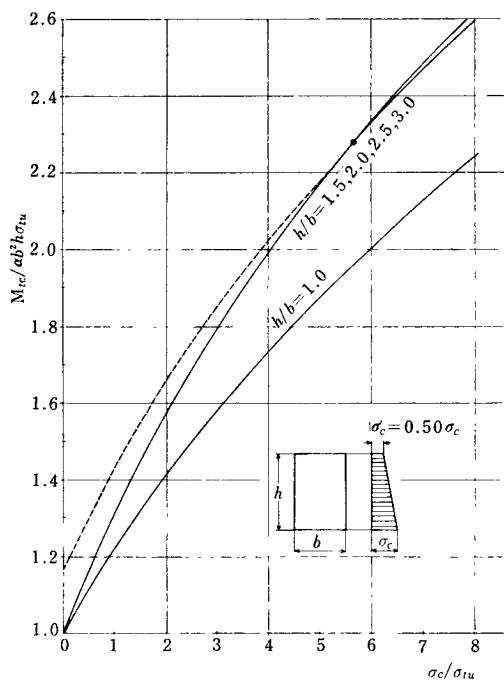


Fig. 11 ひびわれねじりモーメント係数

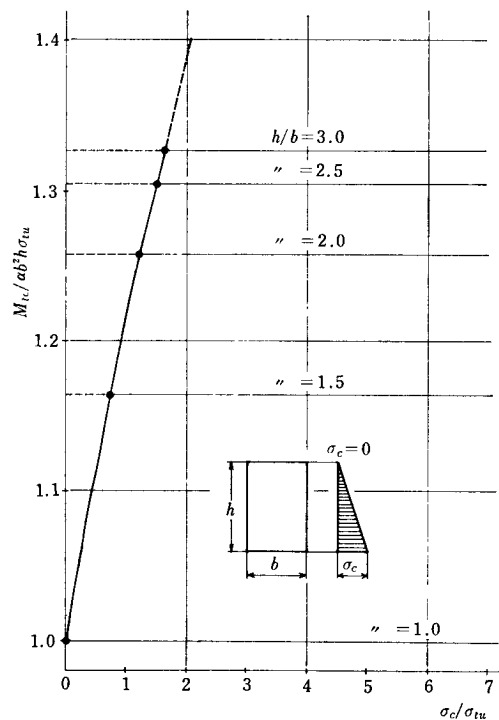


Fig. 13 ひびわれねじりモーメント係数

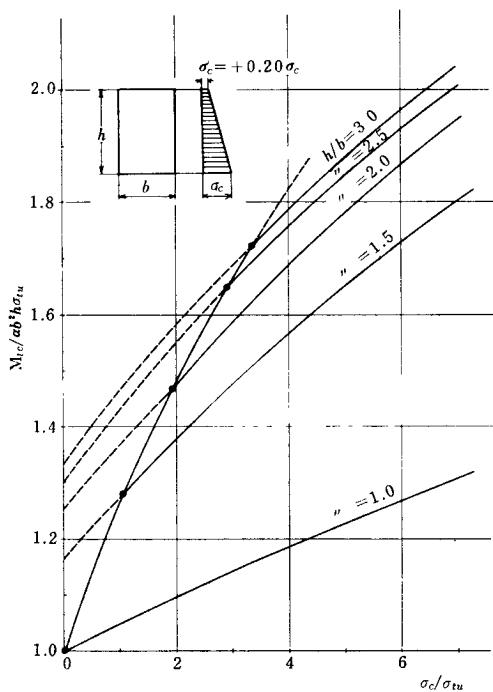


Fig. 12 ひびわれねじりモーメント係数

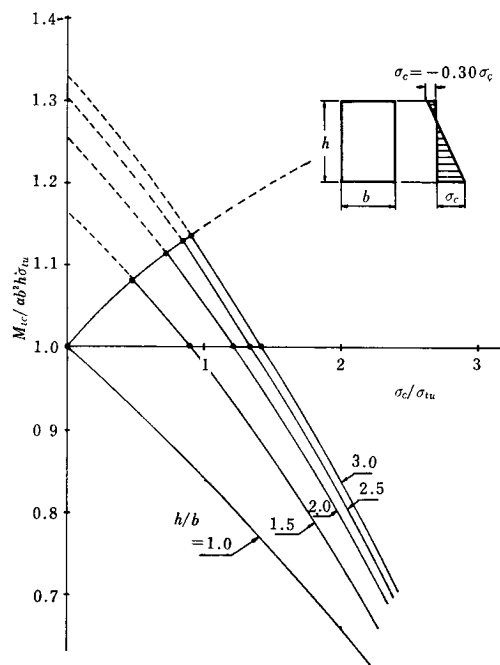


Fig. 14 ひびわれねじりモーメント係数

グラフで変異点をもつものについて、原点から変曲点までの曲線は断面長辺側に、それ以後の曲線は断面短辺側にそれぞれ発生する初期ひびわれでひびわれ強度が決定されることを示す。

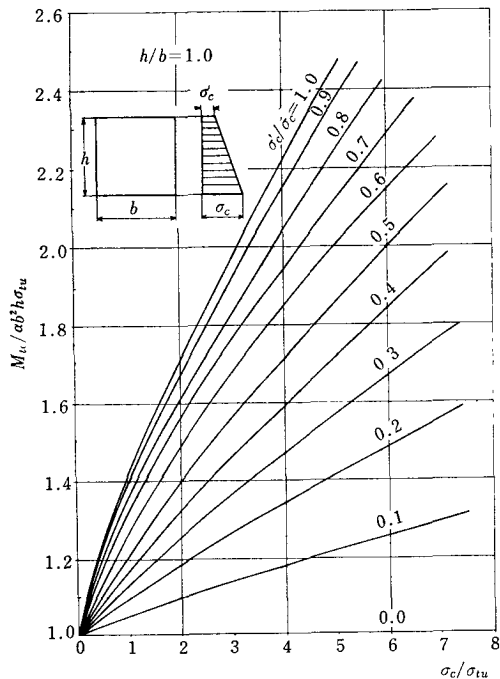


Fig. 15 ひびわれねじりモーメント係数

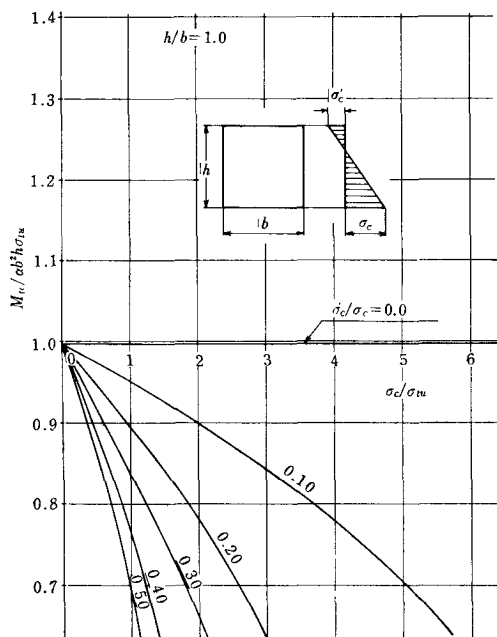


Fig. 16 ひびわれねじりモーメント係数

b) 断面の縦横比 h/b の値による区分
 $h/b=1.0$ の断面をもつ部材について、 σ'_c/σ_c 比が正及び負の場合に関するものを図-15, 16 に示した。

グラフ中の変曲点については前述の通りである。

c) 断面に引張りが生ずる場合にねじりひびわれ強度を最大にするための圧縮側応力度の大きさと、そのときの $M_{te}/ab^3 h \sigma_{tu}$ の値を図-17 に示す。

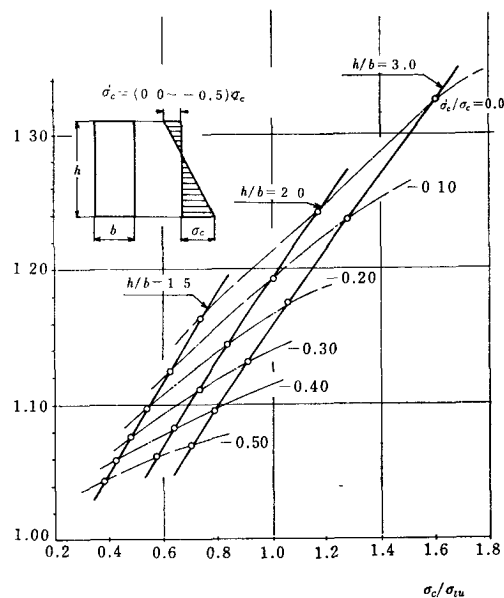


Fig. 17 $M_{te}/ab^3 h \sigma_{tu}$ を最大にするための σ_c / σ_{tu} の値

4. 実験の概要

4-1 試験体

(1) 種類、記号 表-2 に示す。

表中の記号は例えば A-1-30-2 のとき、

A : シリーズ

1 : 一体型、これに対して接合型は 2

30 : プレストレスの大きさ (kg/cm^2)

2 : はりの番号

A シリーズ…断面寸法が $15 \times 30 \text{ cm}$ で uniform prestress

B シリーズ…断面寸法が $15 \times 30 \text{ cm}$ で eccentric prestress

C シリーズ…断面寸法が $15 \times 45 \text{ cm}$ で uniform prestress

(2) 断面及び寸法 図-18-a), b) に示す。

(3) コンクリート

a) セメント 普通ポルトランドセメント

b) 粗骨材

表-2：試験体の種類と記号

	σ_p (kg/cm ²)	No.		σ_p (kg/cm ²)	No.		σ_p (kg/cm ²)	No.
A	0	1	B	0	1	C	0	1
		2			2			3
	30	1		60	1		30	1
		2			2			2
		4			4		60	1
	60	1		120	1			3
		2			2		90	1
	90	1		160	1			4
		2			2			
		4			4			

6号砕石 No. 2 最大寸法=20mm 比重=2.74

吸水量=1.24% F. M=6.96

c) 細骨材

荒目砂 比重=2.57 吸水量=2.08%

d) 配合——表-3

e) コンクリート強度及び弾性諸係数——表-4

(4) PC 鋼より線及び定着金具

a) PC 鋼より線

SWPR 7A (鈴木金属工業 KK 製)

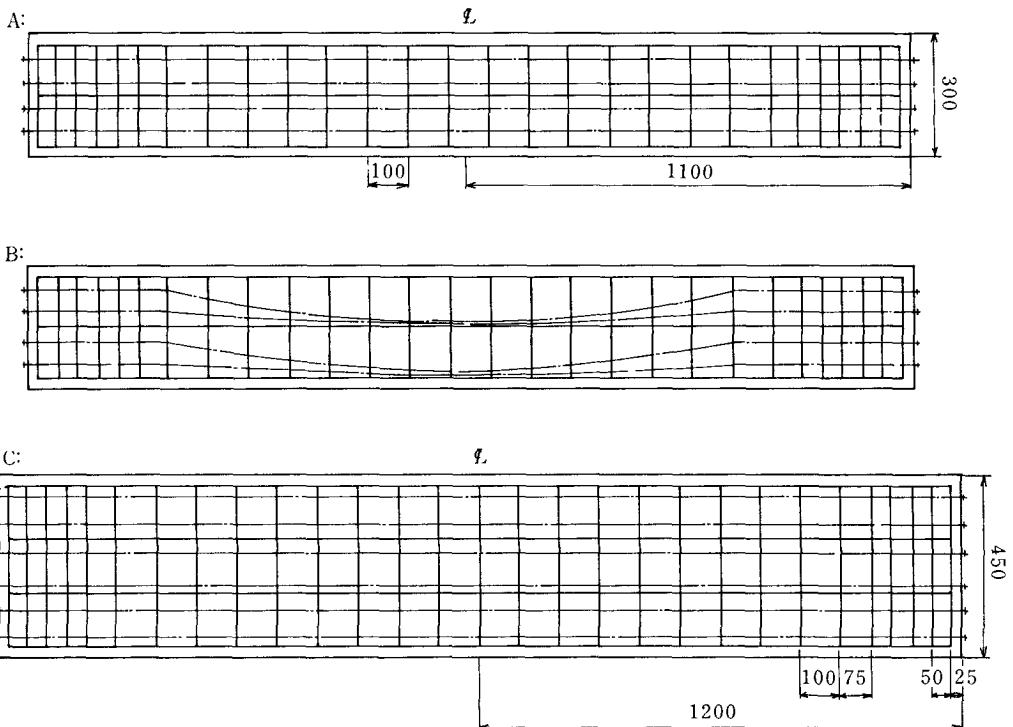
○呼び名：7本より9.3 ○公称断面積：51.61mm²

Fig. 18-a) 試験体断面寸法

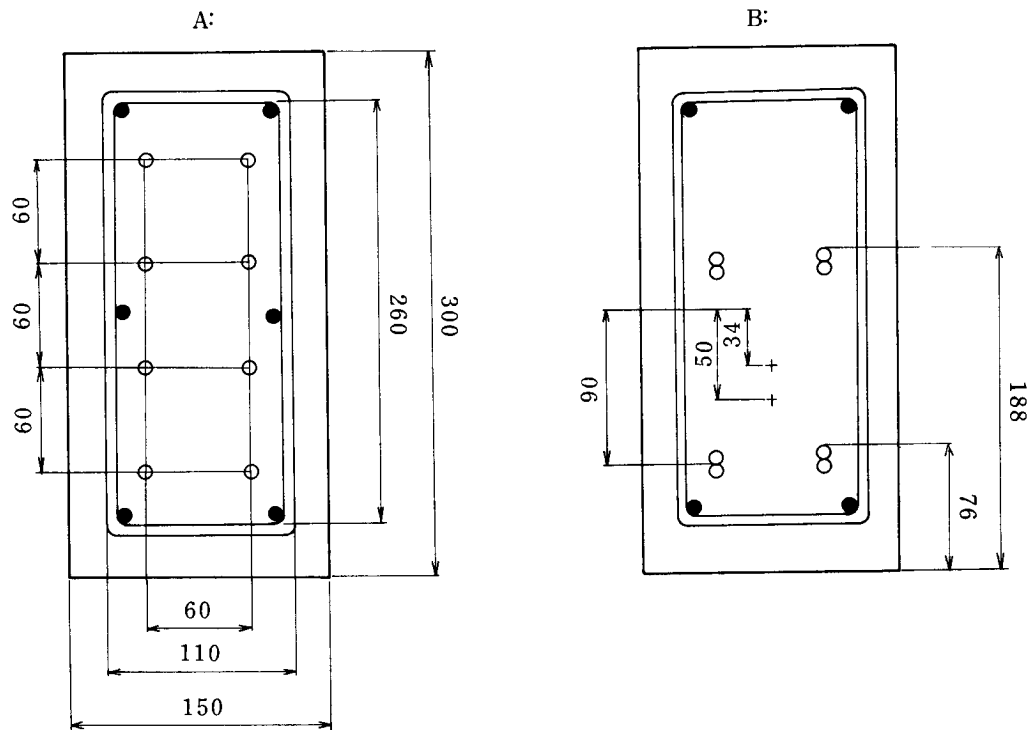


Fig. 18-b) 試験体断面寸法

表-3: コンクリートの配合

最大骨材寸 (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G (kg)	混和剤マイティー (g)	空気量 (%)
20	6.0±1.5	40	40	165	413	667	1091	2065	2.5

表-4: コンクリートの強度及び弾性諸係数

	σ_c (kg/cm ²)	(σ_{tu} ")	(σ_b ")	E (10 ⁵ ")	ν	G (10 ⁵ ")
A	488	39.1	73.7	3.81	0.18	1.61
B	534	41.3	66.3	4.33	0.18	1.84
C	547	45.2	67.5	4.32	0.22	1.77

- 引張荷重: 175kg/mm² 以上
- 0.2%永久伸びに対する荷重: 150kg/mm² 以上
- 破断時伸び: 3.5%以上
- レラクセーション値: 3.0%以下

b) 定着金具

くさび型 (鈴木金属工業 KK 製)

4-2 試験方法

油圧式ねじり試験機 1号機 (A, B シリーズ) 及び 2

号機 (Cシリーズ) を用い, 純ねじりを単調増加で加えた。この間, 一定荷重段階ごとに荷重増加を停止して所要の測定を行った。

測定事項は, ねじれ角, コンクリート表面と鉄筋のひびわれ及びひびわれの追跡とその幅の測定である。

4-3 実験結果

ひびわれねじりモーメントに関する次の値について, 表-1 に示した。

理論値

M_t - θ 曲線の第1変曲点に対応する M_t

ひびわれ幅が 1/100mm, 5/100mm 及び 10/100mm に達したときの M_t

ひびわれが成長して断面四角にらせん状に概ね連続したときの M_t

さらにひびわれ発生近傍の M_t - θ 曲線の一例を図-19に示す。これによれば、この曲線の第一変曲点モーメントはひびわれが目視できる程度 ($\omega_c=3\sim 4/100\text{mm}$) のときのねじりモーメントにほぼ一致する。

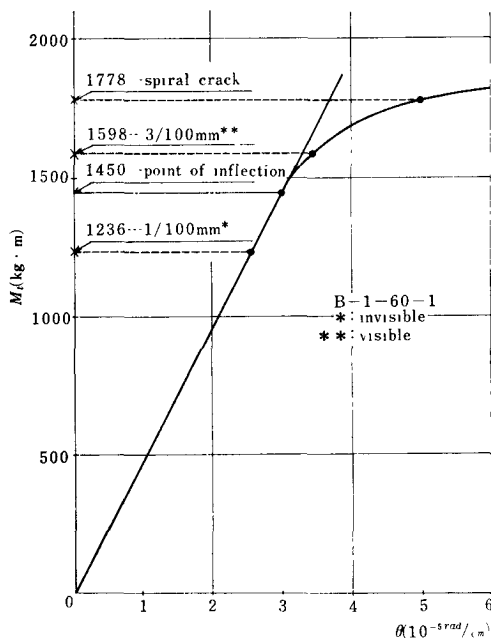


Fig. 19 ひびわれ発生近傍の M_t - θ 曲線

5. 実験結果の解析

5-1 ひびわれ強度に関する実験値と計算値の比較
表-5に示す。

5-2 ひびわれ発生前後のねじり剛度

(1) 釣合状態と剛度

ひびわれの発生と発達に伴う M_t - θ の関係の変化は、図-7に示す。ここで、

- 1: ひびわれ発生
- 2: ひびわれが発達して断面四周にらせん状に連続してトラス型釣合機構が成立。
- 3: トラス型釣合が破れて、斜め曲げ型釣合機構へ

移行。

そこで、0~1, 1~2及び2~3の間は M_t - θ が直線的に変化するものとして、それぞれの間のねじり剛度 M_t/θ を計算する。

各シリーズごとの上図の点1, 2及び3にそれぞれ対応する M_t と θ を表-6~8に示す。

これらの値を用いて、0~1間, 1~2間及び2~3間のねじり剛度を求めて、表-9に示す。

ひびわれ発生までの、すなわち0~1区間のねじり剛度の計算値は弾性論によって計算すれば、次の通りである。

A, B シリーズ:

$$\begin{aligned}\frac{M_t}{\theta} &= \beta \cdot b^3 A_t G = 0.2287 \times 15^3 \times 491 \times 1.70 \times 10^5 \\ &= 42.952 \times 10^8\end{aligned}$$

C シリーズ:

$$\begin{aligned}\frac{M_t}{\theta} &= \beta \cdot b^3 A_t G = 0.2633 \times 15^3 \times 729 \times 1.70 \times 10^5 \\ &= 73.419 \times 10^8\end{aligned}$$

各シリーズについてプレストレスが零のときのねじり剛度の計算値を1.00として、それぞれの区間における剛度比を表-10に示す。

このように、ねじり剛度はひびわれ発生に伴って急速に低下し、ひびわれがらせん状に発達してトラス型釣合状態が成立した段階では初期剛度の数% (2~5%) 迄低下する。

(2) プレストレスの影響

表-10によってみれば

a) 0~1: ひびわれ発生前の全断面有効の状態

本実験の範囲内では、ねじり剛度に対するプレストレスの影響は認められなかった。又、従来の研究においても同様の見解を示したものがある。

しかし、プレストレスによってコンクリートの見かけのせん断弾性係数 G の値が変化するものとするれば、これに伴ってねじり剛度も変化するものと思われ、さらに検討の余地がある。

b) 1~2: ひびわれが発達し、その長さが伸びて断面四周にらせん状に連続するまでの区間。この間にトラス型釣合機構が形成される。

プレストレスが大きいときは、この形成に至るまでの強度上の余裕が大きく、従って剛度が大きい。

c) 2~3: ひびわれがらせん状に連続して発達し、ひびわれ幅が増加する状態である。トラス型釣合機構が成立している。この区間は比較的安定した釣合状態にありプレストレスの値の大小に拘らず、剛度はほぼ一定値を示している。

表-5: ひびわれ強度に関する実験値と計算値

specimens			σ_c/σ_{tu}	M_{tc} (kg・m)			exp./calc.
				exp.		calc.	
A	0	1	0.00	1350	1285	1073	1.20
		2		1220			
	30	1	0.77	1688	1674	1449	1.16
		2		1660			
		4		1230			
	60	1	1.53	1840	1790	1695	1.06
		2		1740			
B	0	1	0.00	1070	1215	1109	1.10
		2		1360			
	60	1	1.45	1450	1440	1397	1.03
		2		1540			
		4		1330			
	120	1	2.90	1650	1640	1579	1.04
		2		1630			
	160	1	3.87	1840	1770	1634	1.08
		2		1700			
C	0	1	0.00	1730	1785	1800	0.99
		3		1840			
	30	1	0.66	2340	2315	2376	0.97
		2		2290			
	90	1	1.99	2710	2585	2664	0.97
		4		2460			

表-6: 鈎合機構の変化する各点における M_t と θ (Aシリーズ)

No.		1		2		3		4	
		M_t	θ	M_t	θ	$M_t \cdot \text{Max}$	θ	M_t	θ
0	1	1330	3.25	1423	7.38	1833	?		
	2	1447	4.24	1523	7.33	1960	32.70		
30	1	1688	5.19	1869	7.48	2080	21.00		
	2	1660	4.45	1900	9.33	2080	22.20		
60	1	1840	4.18	2200	7.36	2225	21.66		
	2	1740	4.15	2080	7.01	2261	24.51		
90	1	1780	4.45	2201	7.76	2340	21.49		
	2	1820	4.65	2381	8.43	2440	20.45		

表-7：釣合機構の変化する各点における M_t と θ (B シリーズ)

No.		1		2		3	
		M_t	θ	M_t	θ	M_t	θ
0	1	1070	2.400	1300	4.492	1839	27.355
	2	1360	2.363	1480	2.831	2020	25.005
60	1	1450	3.446	1900	7.055	2231	27.772
	2	1540	3.230	1840	5.684	2291	28.864
	4	1330	3.350	1658	7.658	2080	30.876
120	1	1650	3.900	2080	6.862	2321	20.917
	2	1630	5.913	1900	7.290	2400	29.123
160	1	1840	4.401	2200	6.047	2412	21.763
	2	1700	4.400	2080	7.347	2320	22.334
	4	1550	3.215	?	?	2493	20.299

表-8：釣合機構の変化する各点における M_t と θ (C シリーズ)

No.		1		2		3	
		M_t	θ	M_t	θ	M_t	θ
0	1	1730	2.60	2442	7.46	3890	42.32
	3	1590	2.10	2059	5.17	3219	41.61
30	1	1870	2.75	2784	8.66	3582	37.05
	2	1780	2.40	2640	9.05	3509	41.95
60	1	2340	3.19	3219	7.78	3840	34.00
	3	2290	3.70	3364	7.30	4060	32.60
90	1	2710	5.97	3582	9.80	4060	32.00
	4	2460	3.80	3582	8.97	4120	30.72

表-9：ねじり剛度

		$M_t/\theta (\times 10^8 \text{kg} \cdot \text{cm}^2)$		
		0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3
A	0	37.833	2.356	1.723
	30	34.914	6.411	1.480
	60	42.974	11.605	0.605
	90	39.570	13.780	0.752
B	0	51.069	10.994	2.397
	60	43.152	10.769	1.787
	120	42.308	17.063	2.003
	160	42.886	17.370	1.475
C	0	71.126	14.964	3.669
	30	71.084	14.199	2.726
	60	67.623	19.150	2.593
	90	64.737	22.235	2.314

Calc. A: $42.952 \times 10^8 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$ B: $42.952 \times 10^8 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$ C: $73.419 \times 10^8 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$

表-10: ねじり剛度比

		0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3
A	0	0.8808	0.0549	0.0401
	30	0.8129	0.1493	0.0345
	60	1.0005	0.2702	0.0141
	90	0.9213	0.3208	0.0175
B	0	1.1890	0.2560	0.0558
	60	1.0047	0.2507	0.0416
	120	0.9850	0.3973	0.0466
	160	0.9850	0.4044	0.0343
C	0	0.9688	0.2038	0.0500
	30	0.9682	0.1934	0.0371
	60	0.9211	0.2608	0.0353
	90	0.8817	0.3029	0.0315

6. 結 論

(1) コンクリート部材のひびわれについて考えるときは、初期ひびわれの発生について明確に定義してからこれに取り組むべきであろう。

ここでは、ひびわれ発生を $M_t - \theta$ 曲線の第一変曲点に対応するものとして定義した。コンクリート部材がねじりを受けるときは、ひびわれが断面四周に発達して剛度低下が著しく、この変曲点が明瞭に認められる。これは、そのまま内部釣合機構の変化に、従って応力の再分配につながっている。

ここで定義したねじりひびわれ強度は、実験によれば最大ひびわれ幅が目視できる程度 (3~4/100mm) になったときのねじりモーメントにほぼ等しい。

(2) プレストレスのみ及びプレストレスと曲げによる垂直応力の分布がねじりひびわれ強度に及ぼす影響は式-(4)~(6)によって、ほぼ正しく評価できる。

この式はねじりひびわれモーメント係数 $M_{tc}/abA_t\sigma_{tu}$ を示すもので、長方形断面部材を対象とし、その長辺側又は短辺側から定まる値を、最大主応力度説に従って求めたものである。

(3) ひびわれ発生までのねじり剛度は、弾性論による式、 $M_t/\theta = \beta b^3 A_t G$ によってほぼ正しく評価できる。ここで行った実験では、この剛度に対するプレストレスの影響は認められなかった。

図-7に示す①~②の区間は、ひびわれが発生し、ひびわれの数と長さが増加する段階であるが、プレストレスの影響が大きく現われている。

これに対して、ひびわれが断面四周にらせん状に連続

した後、新しいひびわれは発生しないで、既存のひびわれの幅が増大して行く段階、即ち②~④区間ではプレストレスの影響がほとんど認められない。この区間は、トラス型釣合機構が成立して比較的安定した釣合を保っているからである。

このようなねじり剛度の示す特色は、コンクリート構造物の設計のための直接の資料となるばかりではなく、プレストレスを受ける部材の釣合機構変化の解明のための一つの手がかりともなるう。

謝 辞

ねじりを受けるコンクリート構造物に関する一連の研究について、適切な御指導を頂きました故神山一博士に対して厚く感謝致します。ねじりに対する設計指針の確立に貢献することによって、その御遺志に報いたいと思っております。

参 考 文 献

- 1) S. Kamiyama and H. Matsushima, A Design Method of Reinforced Concrete Members based on Torsional Cracking Strength, Memoires of the School of Science and Engineering, WASEDA UNIVERSITY, No. 5, 1971
- 2) Naryan Swamy, The Strength of Plain, Reinforced and Prestressed Concrete Under Combined Stresses, Indian Concrete Journal, Oct., 1961
- 3) Paul Zia, Torsional Strength of Prestressed Concrete Members, Journal of ACI, April 1961
- 4) Paul Zia, Torsion Theories for Concrete Members, ACI SP-18-4
- 5) R. H. Evans and M. G. Khalil, The Behavior and Strength of Prestressed Concrete and Rectangular Beams Subjected to Combined Bending and Torsion, The Structural Engineer, Feb., 1970