

[201] プレストレストコンクリート円筒断面部材のねじり特性に関する研究

正会員 長 滝 重 義 (東京工業大学工学部)
 正会員 岡 本 享 久 (東京工業大学工学部)
 正会員 ○李 承 漢 (東京工業大学大学院)
 劉 安 明 (大同コンクリート工業)

1. まえがき

ねじりを受ける鉄筋コンクリート（以下「RC」と略称）部材の耐力・変形性状は既往の研究成果に基づき、一応設計に反映されるまでに解明されているが、プレストレストコンクリート（以下「PC」と略称）部材については土木学会・PC標準示方書および本年刊行予定の土木学会・コンクリート標準示方書（設計編）でも、PC部材が受け持つねじりひびわれ耐力はプレストレスを考慮した弾性論により、終局耐力についてはRC部材の条項を準用することにより対処することになっている。しかしながらPC部材に関する設計の趨勢を見るにⅢ種PCのようにひびわれを許容し、より自由度を持つ設計方法に向いつつあることを考慮すると、ねじりを主たる外力として受ける部材についてもひびわれ発生後の塑性的な挙動、終局強度および剛性を知ることは今後合理的な設計を行う上で急務な課題である。

以上のことより本研究はPC部材の基本的な耐ねじり性状を知る目的で純ねじりをうける円筒断面部材を対象としてトラスモデルに基づき任意の荷重段階における変形を予測する解析を行うとともに、導入プレストレスおよび鋼材量を変えて載荷実験を実施し、この種部材の最大耐力、作用ねじりモーメントとねじり角の係数さらには導入プレストレスがねじり挙動に及ぼす影響について検討し、ねじりを受けるPC部材の合理的な設計方法の確立のための基礎資料を得ようとするものである。

2. 解析

2.1 解析上の仮定

解析にあたり以下のような仮定を設けた。すなわち、a) 図-1に示すように円筒断面部材を展開し、これをトラスモデルと考えた。その上で作用ねじりモーメントを仮想外力としてのせん断流に置き換え、このせん断流と鋼材およびコンクリートの応力との釣合い式を求める。b) 斜ひびわれ間のコンクリートはそれを横切るスターラップと軸方向に配置された鋼材の影響により二軸状態の圧縮-引張状態となり、Vecchio と Collins¹⁾ および Hsu²⁾ の考え方を参照して図-2に示すような応力・ひずみ関係となる。c) せん断流の通路厚の中心は図-1に示すように考え、仮定したせん断流の通路厚は上縁から $\beta_1 \cdot X$ 位置にあるとした。また、斜ひびわれ間のコンクリート・ストラット内の主圧縮方向はひびわれ角度と同一となる。d) ひびわれ発生後、斜ひびわれ間のコンクリート・ストラットに及ぼす導入プレストレスの影響はなく、プレストレスの影響はすべて軸方向のPC鋼材が受け持つ。e) 斜ひびわれ面に沿って発生する骨材のかみ合い作用は無視する。f) PC鋼材および鉄筋の応力-ひずみ関係は、bi-linear と仮定する。

2.2 構成方程式

軸方向鉄筋としてPC鋼材のみ配筋された円筒断面を展開し、図-1に示す立体トラスモデルに基づき解析を行う。まず軸方向およびスターラップ方向の釣合いを考えると式(1)および式(2)が成立する。

$$\pi(D-2\beta_1 \cdot X) \sin^2 \alpha \cdot \sigma_a \cdot X = A_{sl} \cdot (\sigma_{st} + \sigma_{sp}) \quad \text{----- (1)}$$

$$\pi(D-2\beta_1 \cdot X) \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \sigma_a \cdot X = A_{st} \cdot \sigma_{st} \cdot \pi \cdot D_0 \cdot \tan \alpha / S \quad \text{----- (2)}$$

ねじりモーメントは式(1)および式(2)から部材断面の中心についてモーメントの釣合いを考えることによって式(3)が得られ、中立軸深さ x (図-1参照)も同様にして式(1)および式(2)から以下のように

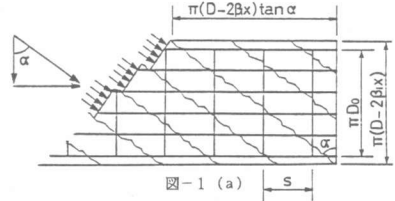


図-1 (a)

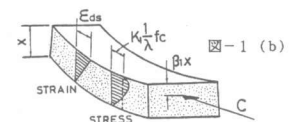


図-1 (b)

図-1 トラスモデル

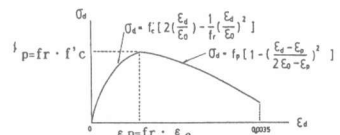


図-2 斜コンクリート
ストラット間の
応力-ひずみ関係

に求めることができる。

$$T = \frac{(D-2\beta_1 \cdot X)}{2} \cdot \sqrt{\frac{Asl \cdot (\sigma_{sl} + \sigma_{sp}) \cdot Ast \cdot \sigma_{st} \cdot U}{S}} \quad \text{----- (3)}$$

$$x = 0.5 \times \left[\frac{D}{2\beta_1} - \sqrt{\left(\frac{D}{2\beta_1}\right)^2 - \frac{2 \{Asl \cdot (\sigma_{sl} + \sigma_{sp}) + Ast \cdot \sigma_{st} \cdot \pi \cdot D_0/S\}}{\pi \cdot \beta_1 \cdot \sigma_d}} \right] \quad \text{----- (4)}$$

次に図-1を参照して変形の適合条件式を考えると、単位長さ当りのねじり角はせん断ひずみと鋼材、斜ひびわれ間のコンクリートひずみの関係³⁾より式(5)が得られる。

$$\phi = \frac{P_0}{2A_0} \left[\frac{\epsilon t}{\tan \alpha} + \epsilon l \tan \alpha - \frac{\epsilon d}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha} \right] \quad \text{----- (5)}$$

外力によって仕事が行なされると、内部エネルギーは最小を保とうとする。このことは与えられた荷重に対し、外力による変位は最小となることであり、 $d\phi/d\alpha = 0$ の条件から式(6)が求められる。

$$\tan^2 \alpha = (\epsilon t + \epsilon d) / (\epsilon l + \epsilon d) \quad \text{----- (6)}$$

斜ひびわれ間のコンクリートの曲げ変形は平面弾性論を参考にして、単位長さ当りのねじり角(ϕ)およびひびわれ角度(α)によって式(7)に、また、図-1に示すコンクリート斜材の曲率は中立軸深さ x とコンクリート表面の圧縮ひずみ ϵds の関係²⁾から式(8)のように与えられる。

$$\phi = \phi \cdot \sin 2\alpha \quad \text{---- (7)} \quad \phi = \epsilon ds / x \quad \text{----- (8)}$$

式(5)、(6)、(7)、(8)を用いて、 ϵl と ϵds および ϵt と ϵds の関係を求めると以下ようになる。

$$\epsilon ds = \frac{P_0}{2A_0} (\epsilon l + \epsilon d) \sin^2 \alpha \quad \text{----- (9)}$$

$$\epsilon ds = \frac{P_0}{2A_0} (\epsilon t + \epsilon d) \cos^2 \alpha \quad \text{----- (10)}$$

次に軸方向鉄筋およびスターラップのひずみは式(9)および式(10)をそれぞれ式(1)、(2)に代入ことによって、次式のように与えられる。

$$\epsilon l = 0.5 \left[-(\epsilon lp + \epsilon d) + \sqrt{(\epsilon lp + \epsilon d)^2 + \frac{\pi (D-2\beta_1 \cdot X)^2 \cdot \epsilon ds \cdot \sigma_d}{2Asl \cdot El} - 4(\epsilon lp + \epsilon d)} \right] \quad \text{--- (11)}$$

$$\epsilon t = 0.5 \left[-\epsilon d + \sqrt{(\epsilon d)^2 + \frac{(D-2\beta_1 \cdot X)^2 \cdot \epsilon ds \cdot \sigma_d \cdot s}{2Ast \cdot Et}} \right] \quad \text{----- (12)}$$

また、図-2に示すコンクリート応力-ひずみ曲線のSoftening係数 fr はVecchio & Collins²⁾による式(13)を用いるものとする。

$$fr = 1 / \sqrt{(\epsilon l + \epsilon t + 2\epsilon d) / \epsilon d - 0.3} \quad \text{----- (13)}$$

<記号説明>

2. 3 解析のフローチャート

本解析のフローチャートを示すと、図-3のようになる。

3. 実験

3. 1 供試体

供試体の断面寸法を図-4に示す。導入プレストレスは0 kgf/cm²(以下「RC」と略称)、40 kgf/cm²(以下「PCA」と略称)およ

- A_0, P_0 : せん断流の中心で囲まれた面積およびせん断流の中心を結ぶ周長
- D, D_0 : 円筒断面の直径およびスターラップで囲まれた断面の直径
- S, U, α : スターラップの間隔、周長およびスターラップ方向からのひびわれ角度
- $\epsilon ds, \epsilon d, \phi$: 斜ひびわれ間のコンクリートスタート表面のひずみ(最大値0.0035)、せん断流通路位置のひずみおよび曲率
- $\epsilon_0, f'c$: 最大圧縮応力点におけるコンクリートひずみ($\epsilon_0=0.002$)および圧縮強度
- f_p, ϵ_p : コンクリートSofteningを考慮した時のコンクリートの最大応力(=fr f'c)およびその点におけるひずみ(=fr ϵ_0)
- σ_d : Softeningを考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係を等価応力ブロックとした時の平均応力($\sigma_d = k_1 fr f'c$)
- fr : コンクリートSoftening係数(=1/ λ)
- k_1, β_1 : Softeningを考慮したコンクリートの等価応力ブロックに関する係数
- $Asl, \sigma_{sl}, \epsilon_l$: 軸方向PC鋼材の全断面積、引張応力および引張ひずみ(導入プレストレスの影響は含まない)
- $\sigma_{sp}, \epsilon_{lp}$: 軸方向PC鋼材の導入引張応力および導入引張ひずみ
- $Ast, \sigma_{st}, \epsilon_t$: スターラップ1本の断面積、引張応力および引張ひずみ
- El, Et : 軸方向PC鋼材およびスターラップの弾性係数

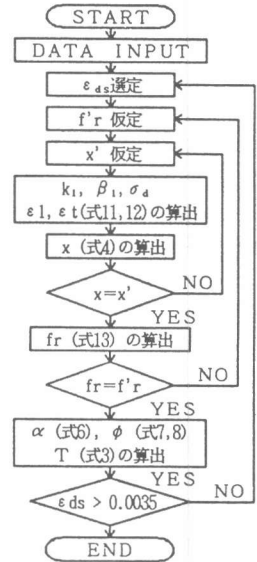


図-3 フローチャート

び80kgf/cm²（以下「PCB」と略称）の3種とした。軸方向の鋼材は、図-4に示すようにPCAシリーズでは異形PC鋼線・呼び名7.4mmを円周方向等間隔に6本、RCおよびPCBシリーズでは異形PC鋼線・呼び名9.2mmを同様に8本配置した。横方向の配筋には、らせん鉄筋を用い、鉄筋比（ $P_v(\%) = 4A_{st} / 100 \cdot S \cdot D$ ）を0.26%、1.0%、1.5%および2.0%の4種に変化させた。それぞれの P_v における使用鉄筋の種類と配置間隔は、0.26%の場合 $\phi 3.2$ mmを100mmピッチ、1.0%の場合D-6を50mmピッチ、1.5%の場合D-10を70mmピッチ、さらには2.0%の場合D-10を55mmピッチとした。これらの鋼材の引張試験結果を表-1に示す。なお、PCAシリーズについてはコンクリートの圧縮強度（ $f'c$ ）を650kgf/cm²および800kgf/cm²の2種に変えた。

表-1 鋼材の引張試験結果

名称	断面積 (mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	ヤング係数 (kg/cm ²)
PC鋼線 $\phi 7.4$	39.7	144.8	152.2	2.17×10^4
PC鋼線 $\phi 9.2$	62.5	143.0	153.0	2.15×10^4
鉄筋 $\phi 3.2$	8.04	75.6	75.6	1.84×10^4
鉄筋D6	30.3	36.8	61.1	1.99×10^4
鉄筋D10	65.6	40.5	58.8	1.98×10^4

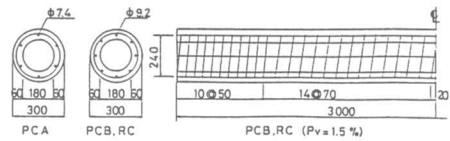


図-4 供試体の断面寸法(mm)

3. 2 荷重方法

純ねじりを受けるPC円筒断面部材の荷重方法を図-5に示す。

4. 作用ねじりモーメントと単位長さ当りのねじり角の関係

図-6、図-7および図-8はそれぞれRCシリーズ、PCAシリーズおよびPCBシリーズの作用ねじりモーメント（ T ）と単位長さ当りのねじり角（ ϕ ）の関係を示す。実験による $T-\phi$ 曲線より、ねじり剛性は斜ひびわれ発生までは導入プレストレスの影響を受けず、弾性論の場合と同一の値となった。しかしながら、斜ひびわれ発生後の挙動は P_v の大小の影響を受け、 $P_v = 0.26\%$ の場合、各シリーズともにひびわれ発生と同時に耐力が30~40%程減少し、特にPCAおよびPCBでは斜ひびわれ耐力が最大耐力となり、斜ひびわれ後大幅に耐力が低下した。しかしながら $P_v = 1.0\%$ 以上の補強した部材では、斜ひびわれ発生後においても応力の再分配が見られ、部材のじん性は大幅に改善された。 $T-\phi$ 関係を総合的に見ると、斜ひびわれ前の領域（第1領域）、斜ひびわれ後ひびわれ本数が増大し、ひびわれ幅は増大せず耐力が一定を保つ領域（第2領域）なお、この領域では導入プレストレスが大きくなると剛性は低下せず、直ちに第3領域に移行する。次にひびわれ本数はほとんど増加せず、ひびわれ幅が拡幅し、耐力が増加する領域（第3領域）、さらには最大耐力に到達後、2次的なひびわれが発生し、耐力の増加なしに変形が進む領域（第4領域）の4領域に区分できた。なお、鋼材量が同一の場合、第3領域の傾きは導入プレストレスの影響を受けず

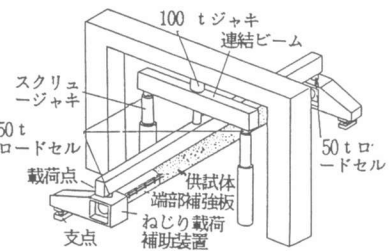


図-5 荷重方法

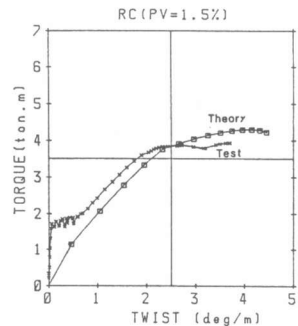


図-6 ねじりモーメントとねじり角の関係 (RC)

ほぼ同一となり、斜ひびわれ後の挙動は導入プレストレスの影響を受けなかった。解析による $T-\phi$ 曲線は、解析上の仮定がひびわれの飽和した状態を想定したトラスモデルに基づくことから当然のことではあるが第3領域の後半から実験値の傾向をとらえることができた。斜ひびわれ発生後において、同一ねじりモー

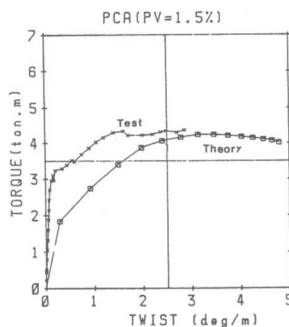


図-7 ねじりモーメントとねじり角の関係 (PCA)

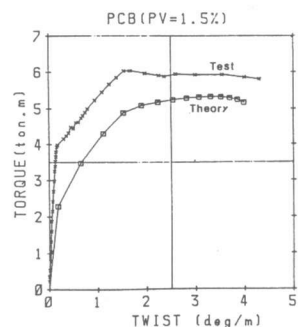
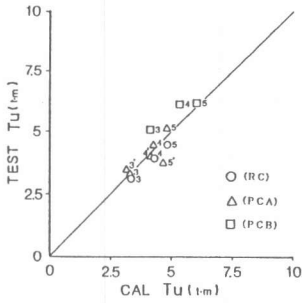


図-8 ねじりモーメントとねじり角の関係 (PCB)

メントにおけるねじり角(φ)が実験より解析の方が大きくなる理由として、ひびわれ面に沿って発生する骨材



のかみあい 図-9 終局ねじりモーメント作用が考えられ、しかもRC部材よりPC部材の方がこれらの影響が著しいようである。さらにはトラスモデルに基づく解析ではひびわれ本数が増す領域(第2領域)および第3領域の前半における中立軸の深さの算定方法が不十分であることも一因と考えられる。表-2は実験結果の一覧を示す。

この結果にもとづいて、最大耐力(Tu)に関する解析と実験による結果の比較を図-9に示す。全供試体のTu test/Tu calの比は0.99であり、変動係数は11.1%であった。なお、本年刊行予定の土木学会コンクリート標準示方書により求めたTu test/Tcalの比は安全係数を考慮した場合2.66となった。

5. 鋼材のひずみ挙動

図-10および図-11はそれぞれPC鋼材およびスターラップのひずみ挙動を実験値と解析値と比較したものである。同一ねじりモーメントにおけるPC鋼材およびスターラップのひずみは、解析値の方が実験値より幾分大きな値を示した。本解析では導入プレストレスの影響を斜ひびわれ発生後において全て軸方向のPC鋼材が受け持つとして解析にとり入れた。Hsu⁴⁾も「コンクリートの decompression」を考慮して、同様の取り扱いをしている。彼の解析も第3領域後半、第4領域において実験値の傾向をとらえているが、導入プレストレスは、斜ひびわれ発生後も、ひびわれ面に沿うせん断力の伝達機構と密接な関係があることを考慮していないため、第2領域および第3領域前半では同一ねじりモーメントにおけるねじり角の解析において実験値より大きくなったことを付記しておく。

6. 結び

本研究は純ねじりを受けるPC円筒断面部材のひびわれ発生後のT-φ関係に注目して解析と実験の両面から検討を加えた。トラスモデルに基づく本解析は、第3領域後半および第4領域でのT-φ関係を推定でき、解析による最大耐力も実験値とはほぼ一致した。また、PC部材ではRC部材と比較し、第2領域および第3領域前半においてプレストレスの影響により、骨材のかみあい作用が卓越し、耐力的にもより有利となることが認められた。

<参考文献>

- 1). Vecchio, F. & Collins, M. P., IABSE Colloquium Advanced Mechanics No.115, pp.113-122, June, 1981.
- 2). T.T.C.Hsu and Mo Y.L., Univ. of Houston, Civil Eng. Dept., Research Report, pp.1-107, March, 1983
- 3). Paul Lampert, ACI, SP-35, pp.385-433, 1971.
- 4). T.T.C.Hsu & Mo Y.L., ACI Journal, pp.603-615, Sept.-Oct. 1985.

表-2 実験結果と計算値の比較

部材の種類	NO	有効プレストレス (Pv) %	鉄筋比 (Ca) %	壁厚 (mm)	コンクリート強度 (kg/cm ²)		ねじりモーメント (t-m)						
					圧縮	引張	ひびわれ				最大		
							実験値	実験値	計算値 (1)	計算値 (2)	実計(1)	実計(2)	
RC	1	0.0	0.26	6.31	811	51.4	73.9	1.98	1.98**	-	1.05	-	1.88
	2	0.0	0.26	6.38	795	55.3	76.0	1.91	1.91**	-	1.05	-	1.82
	3	0.0	1.0	6.75	795	55.3	76.0	2.13	3.11	3.35	1.83	0.928	1.70
C	4	0.0	1.5	6.59	760	48.4	84.6	1.79	3.93	4.30	1.65	0.914	2.28
	5	0.0	2.0	6.50	760	48.4	84.6	1.91	4.50	4.83	1.65	0.932	2.73
PCA	1	41.3	0.26	6.08	833	50.7	92.7	3.52	3.52**	-	1.03	-	3.40
	2	40.0	0.26	6.25	692	48.4	67.6	3.41	3.41**	-	1.03	-	3.30
	2'	38.2	0.26	6.38	625	46.0	62.7	3.10	3.10**	-	1.03	-	3.00
	3	38.3	1.0	6.45	891	57.7	70.3	2.74	3.28	3.29	1.94	0.997	1.69
	3'	41.8	1.0	6.20	625	46.0	62.7	3.10	3.45	3.16	1.74	0.916	1.98
PCB	1	82.5	0.26	6.10	916	55.4	68.6	3.98	3.98**	-	1.05	-	3.79
	2	72.9	0.26	6.83	692	48.4	67.6	3.87	3.87**	-	1.05	-	3.68
	3	72.7	1.0	6.70	898	58.2	76.3	4.29	5.07	4.13	1.94	1.228	2.61
	4	71.8	1.5	7.13	847	56.3	88.2	3.98	6.12	5.34	1.74	1.146	3.51
	5	73.5	2.0	7.19	847	56.3	88.2	3.94	6.21	6.05	1.74	1.026	3.57

注) **: ひびわれ発生時のねじりモーメント 計(1):本解析 計(2):土木学会RC示方書、安全係数考慮

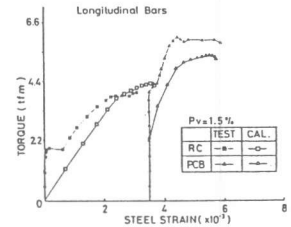


図-10 ねじりモーメントと鉄筋のひずみ(軸筋)

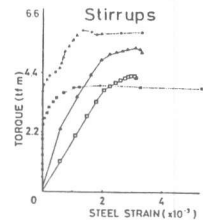


図-11 ねじりモーメントと鉄筋のひずみ(スターラップ)