

[113] 高強度コンクリートを用いたⅢ種プレストレストコンクリート部材に関する研究

正会員 六車 照 (京都大学工学部)
 正会員 渡辺 史夫 (京都大学工学部)
 小倉 正恒 (清水建設設計部)
 正会員○紺谷 修 (京都大学大学院)

1 序文

Ⅲ種プレストレストコンクリート構造は、長期荷重下でのたわみ、ひびわれ等を容易に制御できる反面、プレストレス導入に伴って曲げ靱性が低下する。曲げ靱性の改善の一方法として、コンクリート圧縮強度を増大させることが考えられるが、一方コンクリート圧縮強度の増大は引張強度をも増大させるため、曲げひびわれ発生時における解放引張力が大きくなり不連続な挙動を示したり、以後のひびわれ分散性が悪くなる可能性がある。本報告は、これらの点について、4種類の圧縮強度をもつコンクリートを使用したRC、Ⅲ種PCはり計8本によって実験的研究を行ない、考察を加えたものである。

2 供試体

供試体はRCシリーズと、約10 kgf/cm²の平均プレストレスをもつPRCシリーズに分けられる。RCシリーズは引張側普通鉄筋として、2-D10とD13を使用した複筋断面をもつ(引張鉄筋比0.71%)。PRCシリーズは引張側普通鉄筋として、2-D10を使用した複筋断面をもち(引張鉄筋比0.38%)、偏心距離4 cmの位置に1-D9.2mm SBPR 130/145のPC鋼材を直線配置した。RCシリーズ、PRCシリーズとも設計基準強度300 kgf/cm²、500 kgf/cm²、700 kgf/cm²、900 kgf/cm²のコンクリートを使用したはりを各1本ずつ製作した。供試体の詳細を図1に示す。普通鉄筋応力が2000 kgf/cm²に到達する時で定義した長期許容曲げモーメントは、RCシリーズで1.03~1.05 t·m PRCシリーズで1.36~1.39 t·mであった。

供試体に使用した各コンクリートの配合を表1に、力学的性質を表2に示す。PC鋼材および普通鉄筋の力学的性質を表3に示す。

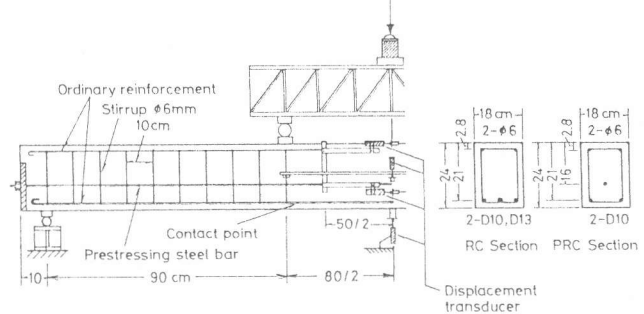


図1 供試体および荷重、試験装置

表1 コンクリートの配合

Concrete	Mix proportion by weight	W/C (%)	Cement content (kg/m ³)	Admixture* (%)
C300	1:2.177:3.224	51.8	342.9	—
C500	1:1.036:2.416	37.0	500	1.8**
C700	1:0.805:1.878	33.0	600	1.8**
C900	1:0.852:1.988	25.3	650	1.8**

* Water reducing admixture, ** Ratio to cement weight

表2 コンクリートの力学的性質

Concrete	Compressive strength (kg/cm ²)	Tensile strength (kg/cm ²)	Elastic modulus* (kg/cm ²)	Stress block coefficient at k1k3 max		
				k1k3	k2	εcu(%)
C300	349	27.8	2.79x10 ⁵	0.725	0.418	0.325
C500	463	38.2	3.48x10 ⁵	0.720	0.415	0.321
C700	616	44.3	3.56x10 ⁵	0.648	0.389	0.298
C900	783	48.1	4.52x10 ⁵	0.648	0.389	0.299

* Tangent modulus at 1/3f_c'

表3 鋼材の力学的性質

	Modulus of elasticity (kg/cm ²)	yield strength (kg/cm ²)
φ6mm round bar	2.04x10 ⁶	3360
φ10mm deformed bar	1.96x10 ⁶	3036
φ13mm deformed bar	1.90x10 ⁶	3700
φ9.2mm prestressing steel bar	1.97x10 ⁶	14400*

* 0.2% off set stress

表4 試験結果(1)

Specimen	Effective prestress at centroidal axis (kg/cm ²) σ _p	Cracking moment (t·m) M _{cr}		Maximum crack width at service load level W _{max} (mm)
		Meas.	Calc.	
RC-300	0.0	0.63	0.52	0.101
PRC-300	12.1	1.04	0.93	0.115
RC-500	0.0	0.81	0.71	0.080
PRC-500	11.5	1.08	1.09	0.128
RC-700	0.0	0.81	0.83	0.075
PRC-700	11.8	1.08	1.21	0.118
RC-900	0.0	0.90	0.88	0.059
PRC-900	11.6	1.26	1.26	0.079

表5 試験結果(2)

Specimen	First yielding of reinforcement				Ultimate limit of section*				Ductility ratio		Mode of Failure**
	Meas.		Calc.		Meas.		Calc.		Meas.	Calc.	
	My (t-m)	$\epsilon_{yx} \times 10^{-3}$ (1/cm)	My (t-m)	$\epsilon_{yx} \times 10^{-3}$ (1/cm)	Mu (t-m)	$\epsilon_{ux} \times 10^{-3}$ (1/cm)	Mu (t-m)	$\epsilon_{ux} \times 10^{-3}$ (1/cm)			
RC-300	1.64	1.31	1.60	1.10	1.99	20.9	1.84	1.47	16.0	13.4	c
PRC-300	1.71	0.79 0.75	1.73	1.02	2.48	10.9 10.4	2.32	1.05	13.8 13.9	10.3	c
RC-500	1.70	1.13 1.06	1.63	1.04	2.11	30.3 30.0	1.88	1.75	26.8 20.8	16.8	c
PRC-500	1.62	0.86 1.00	1.70	1.03	2.67	25.7 23.5	2.36	1.29	31.0 23.5	12.5	s
RC-700	1.71	1.38	1.53	0.89	2.15	22.6	1.87	1.97	16.4	22.1	c
PRC-700	1.58	0.20 0.69	1.75	1.02	2.69	31.8 21.2	2.44	1.36	35.3 30.8	13.3	s
RC-900	1.68	1.23 1.20	1.66	1.00	2.27	36.5 29.5	1.94	2.24	29.2 24.6	22.4	c
PRC-900	1.68	0.88	1.71	0.94	2.66	9.50	2.41	1.71	20.0	18.2	c

* Concrete strain at the extreme compression fiber equals to ϵ_{cu}
 ** C : Failed by concrete crushing at the compression zone of midspan section
 S : Fracture of prestressing steel bar at midspan section

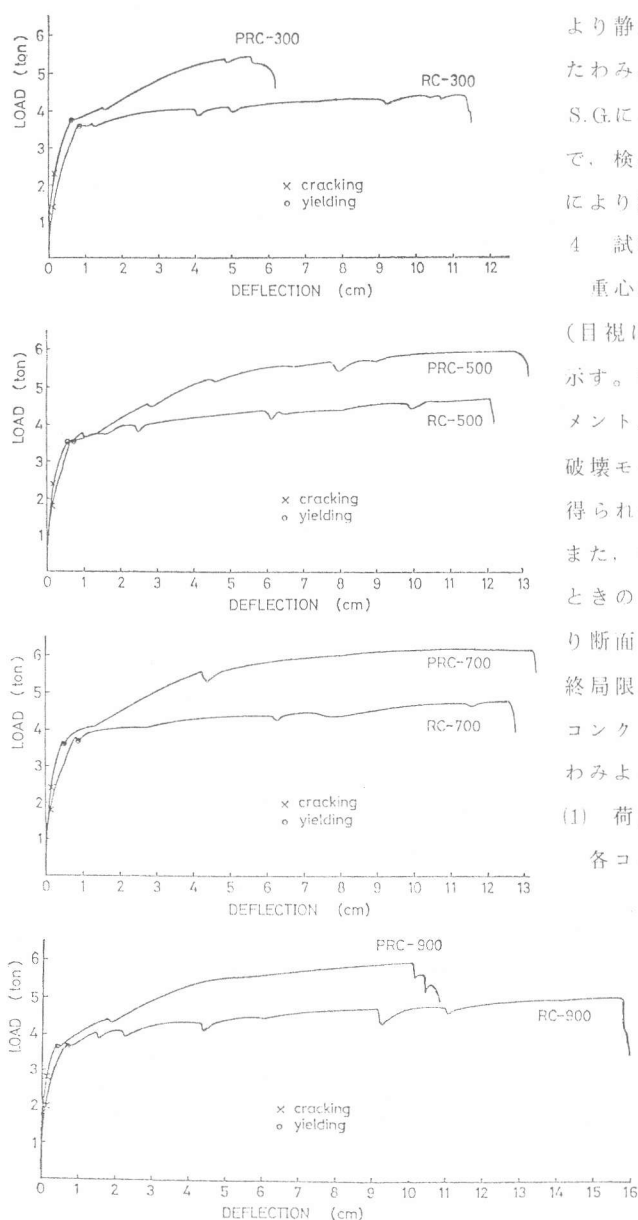


図2 荷重-たわみ曲線

PRCシリーズは、材令18日でプレ
 ストレス導入を行ない、導入後直ちに
 水セメント比45%のセメントペースト
 によりグラウチングを行なった。グラ
 ウトペーストの試験時圧縮および引張
 強度は、それぞれ291 kgf/cm², 10.9 kgf/cm²
 であった。

3 試験方法

試験は材令24~27日で行ない、載荷
 は図1に示すように、支点間距離260
 cm, 曲げスパン80 cm, 剪断スパン90 cm
 の3点荷重とし、正方向単調載荷に

より静的破壊試験を行なった。測定は、荷重、スパン中央全
 たわみ、曲げスパンにおける相対たわみ、上下縁ひずみ、W.
 S.G.による上縁ひずみ、ひびわれ幅(引張側普通鉄筋レベ
 ルで、検長10 cmの手持式スティックフレガコンタクトゲー
 ジにより測定)について行なった。

4 試験結果および考察

重心軸位置の有効プレストレス、ひびわれ発生モーメント
 (目視により確認)、長期荷重時の最大ひびわれ幅を表4に
 示す。また表5には、引張側鉄筋降伏時、終局限界時のモー
 メント、曲率、および靱性率について測定値と理論値を示し、
 破壊モードも示す。ただし、断面解析には材料試験によって
 得られたコンクリート、鋼材の応力-ひずみ関係を用いた。
 また、コンクリートの応力ブロック係数 k_1, k_2 が最大値をと
 るときのひずみをコンクリート圧縮限界ひずみ(ϵ_{cu})とし、は
 り断面コンクリート上縁ひずみが ϵ_{cu} に達した時を解析上の
 終局限界時とした。なお、 ϕ_y, ϕ_u, μ の測定値欄の上段は
 コンクリート上下縁ひずみより、下段は曲げスパンの相対た
 わみより求めた値である。

(1) 荷重(P)-曲げスパン中央たわみ(δ)関係

各コンクリート強度別にP- δ 関係を図2に示した。引張
 鉄筋降伏時の荷重はRCシリーズ、PRCシリーズ
 ともにほぼ等しい値を示しているが、降伏後の荷
 重はPRCシリーズにおいて著しく上昇している。
 これは、供試体設計時に想定したPC鋼材降伏強度
 に比べて、実強度がそれを上回っており引張側普
 通鉄筋が降伏した後もまだかなりの間PC鋼材が
 弾性域にあったためである。断面コンクリート圧縮
 強度の増大に伴って、RCシリーズ、PRCシリー
 ズともにたわみ剛性が大きくなっている。また、同

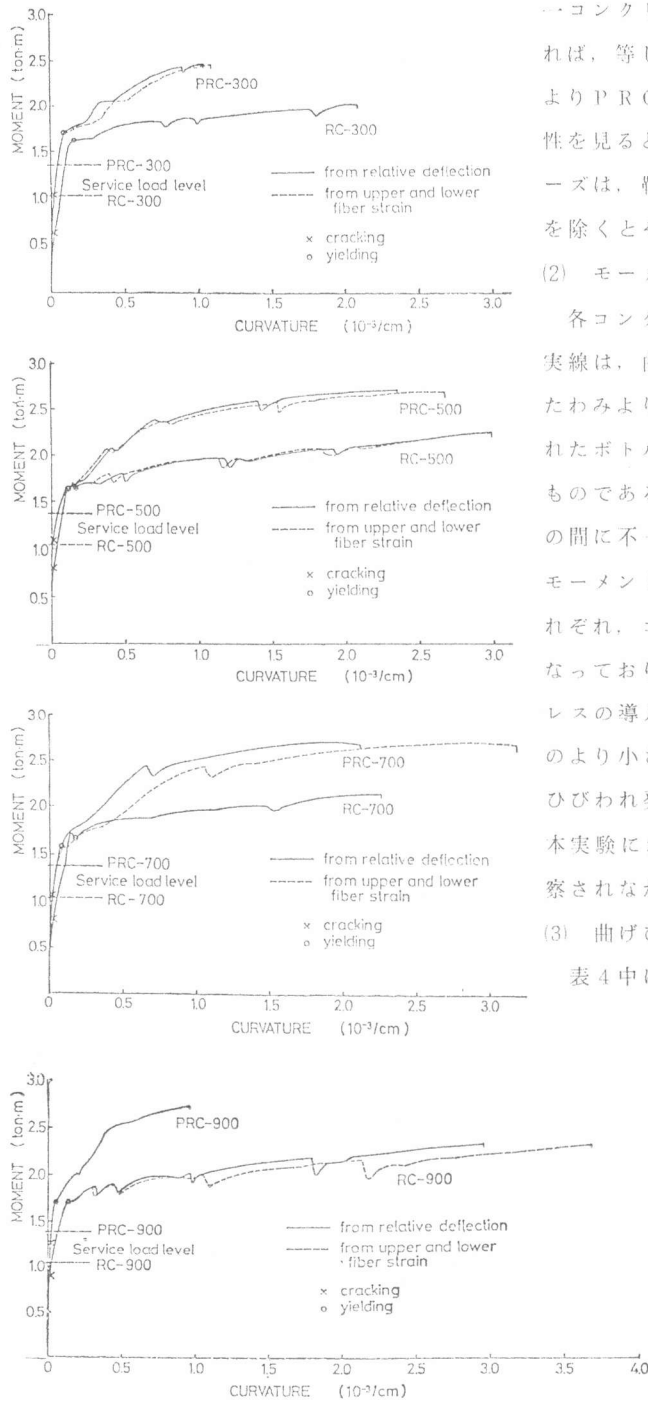


図3 モーメント-曲率関係

大による相反する影響が作用し合い、PRCシリーズにおける各供試体の長期荷重時ひびわれ幅がほぼ同一の値を示したものと推察される。参考のために各供試体のひびわれおよび破壊状況を図4にまとめて示した。

(4) 破壊性状

表5に示すように、PRC-500、PRC-700が曲げスパンにおけるPC鋼材の破断により破壊したことを除けば、曲げスパンにおける圧縮側コンクリートの圧壊により曲げ破壊した。また、コンクリートの圧縮強度が高くなるほど破壊は激しかった。ここで注意すべきことは、プレストレスの導入によって靱性の低下したPRC断面

一コンクリート強度のRCシリーズとPRCシリーズを比較すれば、等しい荷重レベルでのたわみは、プレストレスの効果によりPRCシリーズの方が小さい。最終たわみに関してその靱性を見ると、コンクリート圧縮強度の増大に伴って、RCシリーズは、靱性に富むようになり、PRCシリーズでもPRC-900を除くとその傾向が見られる。

(2) モーメント(M)-曲率(ϕ)関係

各コンクリート強度別にM- ϕ 関係を図3に示した。図中の実線は、曲げスパンにおいては断面曲率一定であるとして相対たわみより算出した曲率を示し、破線は、曲げスパンに埋込まれたボルトにより計測された断面上下縁ひずみの値より求めたものである。やはり引張側普通鉄筋の降伏とPC鋼材の降伏との間に不一致があったため、断面降伏後のPRCシリーズのモーメント上昇が著しい。RCシリーズ、PRCシリーズはそれぞれ、コンクリート圧縮強度増大に伴って曲げ剛性は大きくなっており、またPRCシリーズの破壊時終局曲率はプレストレスの導入により、同一コンクリート圧縮強度のRC断面のものより小さくなる。また、コンクリートの高強度化により曲げひびわれ発生時における断面曲率の飛越現象が心配されたが、本実験においてはRCおよびPRCともにそのような現象は観察されなかった。

(3) 曲げひびわれ幅

表4中に長期荷重時における最大ひびわれ幅の実測値を示しているが、RCシリーズについてみるとコンクリート強度の増大に伴って最大ひびわれ幅が減少している。それに対してPRCシリーズにおいては、最大ひびわれ幅がほぼ同一の値を示しておりコンクリート強度増大の影響は認められない。RCシリーズにおいて見られたように、一般にひびわれ間隔が同じであれば同じ鉄筋引張応力時におけるひびわれ幅はコンクリート強度が大きいほど小さくなる。しかしながら引張側鉄筋量が不十分であるとコンクリート強度の増大にともなって曲げひびわれが十分に発達せずひびわれ間隔が広がり、結果として局所のひびわれ幅が増大する。以上述べたコンクリート強度増

に高強度コンクリートを使用すると、靱性は改善されるが、それに伴って終局時のPC鋼材の伸びひずみは大きくなる。したがって、PC鋼材の破断の危険性も大きくなるわけである。Ⅲ種PC部材の場合、普通鉄筋の存在により、PC鋼材が破断しても耐力が全面的になくなるというわけではなく、急激な破壊は避けることができるが、PC鋼材破断の危険性をチェックすることは必要であろう。

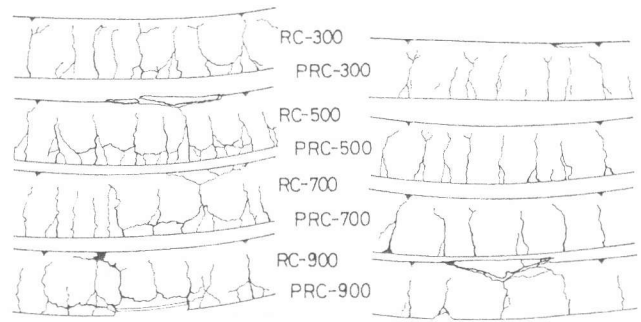


図4 破壊状況

(5) 鉄筋係数—断面曲率靱性関係

Ⅲ種プレストレストコンクリート部材に限らず、鉄筋コンクリートもしくはプレストレストコンクリート部材においても曲げ靱性は、鉄筋係数という一指標で評価されて来た。下に鉄筋係数の定義¹⁾を示す。

$$q = \frac{a_{tr} \cdot \sigma_{ry} + a_p \sigma_{py}}{b \cdot d_r} \cdot \frac{1}{F_c} \quad (1)$$

ここで a_{tr} および a_p 、 σ_{ry} および σ_{py} は普通鉄筋およびPC鋼材の断面積と降伏強度を表わし、 d_r は圧縮縁から引張鉄筋断面重心までの距離、 b は断面幅、 F_c はコンクリート圧縮強度を表わす。実験より得られた各供試体終局時の曲げ降伏時に対する断面曲率靱性評(曲げスパン相対たわみより算出)と上式で定義した鉄筋係数の関係をまとめて図に示した。同図中には、曲げ解析により得られた靱性率も同時に示した。図より明らかなように、コンクリート強度の増大が曲率靱性率増大に大きく寄与し、その評価の指標として鉄筋係数を用いてもよいと考えられる。なおRC-700供試体のみが計算値のじん性率を下回っているが、実験計測に何らかの不備があったものと考えられ、現在原因を調査中である。

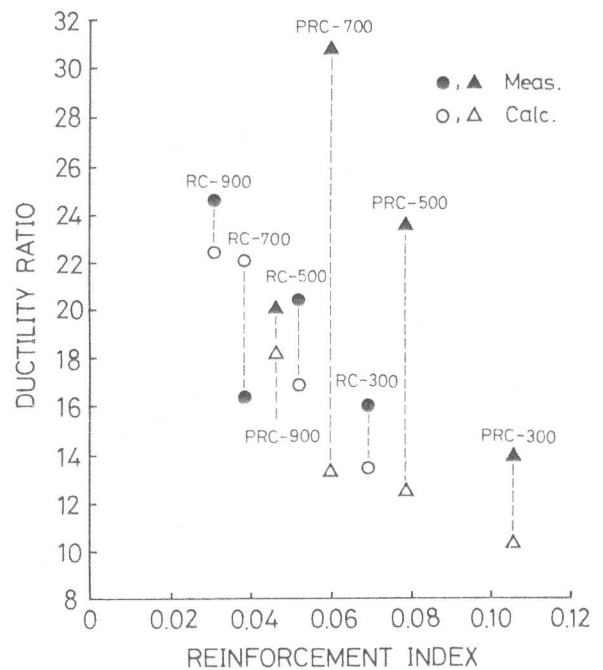


図5 鉄筋係数—断面曲率靱性関係

5 結論

本実験結果より以下の諸事実が明らかになった。

- (1) コンクリート強度の増大により曲げひびわれ荷重は増大する。また、PRCシリーズにおいてはひびわれの分散性は悪くなるが、長期荷重下における最大曲げひびわれ幅にはほとんど影響を与えない。
- (2) Ⅲ種PC部材の断面曲率じん性は、コンクリートの圧縮強度が増大すると大幅に改善される。また、曲率靱性は従来と同様にPC鋼材をも含んだ鉄筋係数(1)式で定義)で評価できる。
- (3) 高強度コンクリートの使用により曲げ靱性は大幅に改善される。しかしながら、それに伴ってPC鋼材伸びも大きくなり、本実験においても見られたように極端な場合には破断に至るため、何らかの鋼材伸びに対する限界値を設定してやる必要がある。

以上の結果は、本実験の範囲に対して得られたもので普通鉄筋量、PC鋼材量の他のくみ合わせに対しても、実験により、長期荷重下でのひびわれ幅、終局時における曲率靱性率につき調査を進めていく必要がある。

- 1) プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)設計・施行指針(案), 建築雑誌, Vol.97, 1982年6月号