

# [97] プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げ性状について

正会員 鈴木 計夫 (大阪大学)

正会員 O 大野 義照 (大阪大学)

佐田 裕之 (大阪大学)

## 1. まえがき

プレストレスト鉄筋コンクリート (PRCと略記) は鉄筋コンクリート (RCと略記) とプレストレストコンクリート (PCと略記) の中間領域に位置し、普通鉄筋と緊張材の断面積の割合を変えることによって、要求される耐力と使用性能の安全度をともに過不足なく満足させることができる。このPRC部材の採用は部材設計において自由度を高め、経済的な部材設計を可能にするものと考えられるが、本格的な実用化に際してはコンクリートの乾燥収縮・クリープによるプレストレスト減退や曲げひびわれ幅算定上の問題があり、またくり返し載荷時のひびわれ幅や変形の履歴特性などを明らかにしておく必要がある。

本報告は断面の曲げ破壊耐力をほぼ等しく選定したRC、PRCおよびPCはりにおいて、普通鉄筋と緊張材の断面積の割合すなわちプレストレスの程度と載荷時期を要因にとり上げ、単調およびくり返し載荷実験を行なって上述の問題について検討を行なったものである。

## 2. 実験概要

2.1 使用材料： コンクリートは早強ポルトランドセメント、山砂および最大寸法 10mm の碎石を用いたレディミクストコンクリートで、重量配合比 1 : 1.80 : 2.24、水セメント比 55% である。はり試験体と同一養生条件下においたφ10x20 cm のシリンダーおよび 12x20x80 cm の曲げ試験体から求めたコンクリートの力学的性質を表 1 に示す。普通鉄筋は D6、D10、D18 の異形鉄筋を、緊張材は PC 鋼 7 本より線を使用した。

2.2 試験体の性質： はり試験体は表 2 に示すようにプレストレスの程度を 5 水準とし、単調載荷試験体 5 体 (1 シリーズ)、くり返し載荷試験体 5 体 (2 シリーズ)、アンボンド試験体 2 体 (4 シリーズ) およびこれらの試験体より載荷時期を遅らせて載荷迄のコンクリートの乾燥収縮・クリープの影響を調べた試験体 5 体 (8 シリーズ) の計 17

体である。試験体記号の末尾の数字はシリーズ名を表わ

す。試験体の形状は図 1 に示すように 12x20x200 cm の単筋矩形はりで、異形鉄筋はその重心を下縁から 8cm の高さかつ側面からのコンクリートかぶり厚さを 2cm に、緊張材は下縁から 6.7cm の位置に配置した。緊張材の初引張応力度は規格降伏点強度の 80% (12,000kg/cm<sup>2</sup>) を目標値とした。表 2 に示すプレストレス係数  $\lambda$  および  $\lambda^*$  はそれぞれ (1) および (2) 式の定義によって算定したもので、 $\lambda^*$  の算定には建築学会 PC 規準の曲げ破壊耐力の計算式を用いた。

$$\lambda = A_p \cdot \sigma_{py} / (A_p \cdot \sigma_{py} + A_s \cdot \sigma_{sy}) \quad (1)$$

ここに  $A_p$  : 緊張材断面積、 $A_s$  : 普通鉄筋断面積

表 1 使用材料の性質

コンクリート				
材令 (日)	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	割裂強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ( $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup> )
26	275	-	-	2.53
81	310	27.1	28.8	2.48
39	304	32.4	32.8	2.64
46	323	30.1	36.7	2.64
132	301	26.1	43.5	2.09

鋼材

鋼材種		断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏応力度 (kg/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ( $\times 10^6$ kg/cm <sup>2</sup> )
普通鉄筋	D6	0.28	39.5	2.1
	D10	0.63	40.1	
	D18	1.12	45.7	
PC 鋼	φ6.2	0.232	175	2.03
	φ7.9	0.364	178	2.01
	φ10.8	0.706	185	1.96
	φ12.4	0.924	172	1.97

表 2 試験体の性質

試験体記号	普通鉄筋 両端中央	緊張材 7本より線	プレストレス 係数 (%) 入*	鉄筋 係数 φ*	緊張材 初引張力 (ton)	コンクリート下縁 初プレストレス (kg/cm <sup>2</sup> )	載荷時 材令 (日)
RC-2 3 8	D13	D6	-	0	0	0	39
							45
							129
LC1-2 3 4	D10	D10	6.2	85	29	0.205	2.78
							2.81
							2.76
							2.75
LC2-2 3 8	D10	D6	7.9	51	44	0.231	4.86
							4.48
							4.85
LC3-2 3 4	-	D6	10.8	86	82	0.308	8.40
							8.22
							8.34
							8.10
PC-2 3 8	-	-	12.4	100	100	0.380	11.15
							11.00
							11.05

$\sigma_{py}$  : 緊張材の降伏点応力度、 $\sigma_{sy}$  : 普通鉄筋の降伏点応力度

$$\lambda = \frac{M_{u,p}}{M_{u,p} + M_{u,s}} \quad (2)$$

ここに  $M_{u,p}$  : 曲げ破壊時の緊張材の分担する曲げ抵抗モーメント

$M_{u,s}$  : 曲げ破壊時の普通鉄筋の分担する曲げ抵抗モーメント

### 2.3 試験体の製作および養生： 脱型（材令 8 日）後恒温

恒温室（20℃、65%）で湿布養生をし、プレストレッシン

グを材令 24、25 日（1、2、4 シリーズ）および 27 日（8 シリーズ）に行ない、

4 シリーズを除いて直ちにセメントペースト（8 週圧縮強度 86.4 kg/cm<sup>2</sup>）をグラウ

チングした。その後 1、2、4 シリーズの試験体は荷重の前日迄湿布養生を継続し、

8 シリーズの試験体は同室で気中養生した。これらの試験体と同一養生条件下におい

たはり試験体と同じ断面形状のコンクリートプリズムの乾燥収縮およびクリープ係数

（持続応力 62.5 kg/cm<sup>2</sup>）を図 2 に示す。

### 2.4 荷重および測定方法： 荷重は図 1 に示すように 8 等分点荷重で、8 シリー

ズの試験体は鉄筋ひずみの測定値が最大で 1000x10<sup>-6</sup> 程度で 10 回、それ以後は同じ

く 2000x10<sup>-6</sup> 程度および単調荷重試験体の最大荷重の 85%、90%、95% の荷重でそれぞれ 1 回くり返し載

荷した。荷重階はひびわれ発生の確認迄は 0.1 ton、以後 0.2 ton とし、ひびわれの発生は下縁に貼付したワイヤース

トレインゲージのひずみを調べながら 20 倍の拡大鏡によって確認した。ひびわれ幅は鉄筋位置のコンクリー

ト表面の幅をコンタクトゲージ（検長 4 cm）にて、鉄筋のひずみは鉄筋の表面の 10ヶ所に貼付したワイヤース

トレインゲージにて測定した。

### 3. 実験結果と考察

曲げひびわれモーメント  $M_{cr}$  および曲げ破壊モーメント  $M_u$  の実験値と計算値をまとめて表 8 に示す。最大耐

力はすべての試験体とも鉄筋が降伏した後、コンクリートの圧縮破壊で決まり、1 シリーズの試験体の  $M_u$  は 1.86

~1.92 t-m で各試験体の  $M_u$  はほぼ等しいとみなせる。曲げひびわれモーメント  $M_{cr}$  (計1) はコンクリートの引張応

力歪関係を完全弾塑性と仮定し、引張強度を割裂強度で与え引張塑性率を 0.6 として算定した値である。実験値

と比較してかなり大きいのは、表 1 に示したようにコンクリートの曲げ強度が材令 182 日の値を除いて、ほぼ割

裂強度に等しいことによるものと考えられる。

直接、曲げ強度を用いて (8) 式から算定した

略算値  $M_{cr}$  (計2) はほぼ実験値と一致し、コン

クリート下縁の有効プレストレスが求めれば、

$M_{cr}$  は略算式によって算定できる。

$$M_{cr}(\text{計2}) = (\sigma_{tb} + \sigma_{cp}) \cdot Z \quad (3)$$

ここに  $\sigma_{tb}$  : 同一断面無筋コンクリート

の曲げ強度

$\sigma_{cp}$  : コンクリート下縁の応力

$Z$  : 鋼材の断面積を考慮した引

張縁に関する断面係数

以下、緊張材の引張力有効率、曲げひびわ

れ幅および変形の順に結果とその考察につい

て述べる。

#### 3.1 緊張材引張力の有効率： 緊張材の

有効率、コンクリート下縁のプレストレスの

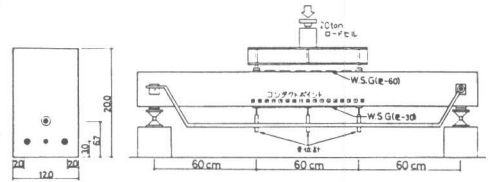


図 1 試験体形状と荷重方法

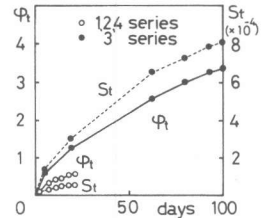


図 2 コンクリートの乾燥収縮とクリープ係数

表 8 実験結果一覧表

試験体	コンクリート下縁応力 $\sigma_{cp}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	曲げひびわれモーメント $M_{cr}$ (t-m)			曲げ破壊モーメント (t-m)		ひびわれ間隔 (cm)		
		実験値	算定値	略算値	実験値	算定値	平均間隔	最大間隔	
		$M_{cr}$ (実)	$M_{cr}$ (計1)	$M_{cr}$ (計2)			$l_{av}$	$l_{max}$	
RC-2	1	-2.1	0.24	0.508	0.278	1.92	1.76 (0.92)	7.9	12.1
	8	-3.1	0.18	0.486	0.268	1.89	1.76 (0.98)	7.6	11.8
	8	-	載荷前にひびわれ発生			1.84	1.75 (0.95)	6.8	11.8
LC1-	1	17.4	0.42	0.674	0.444	1.87	1.64 (0.88)	7.5	13.4
	2	15.7	0.42	0.658	0.429	1.88	1.64 (0.87)	9.0	12.8
	8	-10.7	0.80	0.851	0.292	1.74	1.68 (0.94)	8.0	11.5
	4	16.8	0.86	0.668	0.434	1.80	-	7.6	10.8
LC2-2	1	29.5	0.54	0.775	0.543	1.89	1.69 (0.89)	8.1	12.4
	2	27.9	0.42	0.760	0.529	1.95	1.69 (0.87)	8.6	13.8
	8	-1.9	0.88	0.429	0.865	1.82	1.68 (0.92)	8.5	13.2
LC8-	1	63.2	0.84	1.08	0.799	1.98	1.80 (0.91)	15.9	18.8
	2	62.2	0.78	1.02	0.791	2.14	1.80 (0.84)	11.1	16.8
	8	84.8	0.69	0.726	0.655	1.94	1.79 (0.92)	11.7	16.8
	4	61.8	0.81	1.01	0.787	1.78	-	12.6	17.5
PC-2	1	92.0	1.02	1.28	1.01	1.86	1.77 (0.95)	18.8	26.1
	2	90.1	1.02	1.22	0.998	1.88	1.77 (0.97)	18.8	27.4
	8	69.9	0.84	0.998	0.920	1.67	1.76 (1.05)	18.8	24.6

有効率などを表4に示す。両者を比較するため表4に示すコンクリート下縁の有効プレストレスはプレストレッシング前の収縮によって生じた鉄筋の元圧縮力による応力を除いた値である。普通鉄筋の断面積が大きい程、コンクリートの乾燥収縮・クリープによる緊張材の引張力の減退量は小さくなるが、コンクリートから鉄筋への応力の移行量が増すためコンクリートのプレストレスは逆に大きく減退している。表4には引張力有効率についてクリープ速度法を用いたクリープ解析結果およびコンクリートの変化応力 $\Delta\sigma_c(t)$ によるクリープひずみを $\Delta\sigma_c(t)/E_c \cdot \phi(t)/2$  ( $\phi(t)$ : クリープ係数)とする略算解も示す(両計算とも上下縁の収縮差は無視している)。実験値と比較して、略算解でも実用的には十分な精度で、有効引張力や有効プレストレスが算定できると言えよう。

表4 緊張材引張力有効率とコンクリート下縁のプレストレス有効率

試験体	緊張材有効引張力 (ton)	異形鉄筋圧縮力 (ton)	コンクリート下縁の有効プレストレス ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	コンクリート下縁の有効プレストレス率 (%)	緊張材引張力有効率 (%)		
					実験値	精算値	略算値
LC1-1	2.77	0.40	18.8	89.7	99.5	99.0	99.0
	2.47	2.17	-7.7	-88.1	89.4	87.8	87.1
LC2-1	4.85	0.46	80.7	93.6	99.7	98.9	98.9
	3.80	2.55	-1.3	-4.0	87.3	85.7	85.6
LC3-1	8.80	0.41	64.2	95.5	98.9	98.4	98.4
	6.82	1.68	85.8	53.6	81.7	80.4	80.4
PC-1	11.04	-	92.0	99.0	99.0	97.9	97.9
	8.86	-	69.9	75.9	75.9	76.0	76.0

3.2 ひびわれ間隔 $l$ : 新たにひびわれが発生しないひびわれ定常状態における等曲げスパン内のひびわれ間隔は、表8に示すようにグラウトの有無によって $l$ に差異はなく、また緊張材を考慮せず既往のRCのひびわれ間隔算定式による算定値は実験値と同程度ないしそれ以下で、緊張材のひびわれ分散に対する効果は認められなかった。緊張材を鉄筋と同一高さに配置した実験<sup>2)</sup>ではその効果が認められたのに対し、本実験の結果は普通鉄筋を下縁から8cmの位置に配置したのに対して緊張材を6.7cmの位置に配置したことによるものと考えられる。なお既往の多くのひびわれ間隔算定式のなかでは、図8に示すようにCEB・FIP指針(1970)のIV種の式による算定値が最もよく実験値と一致した。

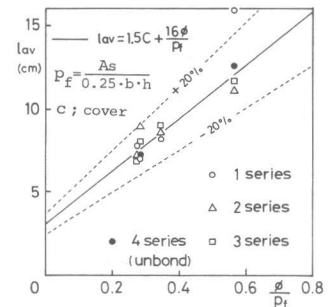


図8 平均ひびわれ間隔 $l_{av}$

3.8 ひびわれ幅: 曲げモーメントと平均ひびわれ幅の関係を図4に示す。1シリーズの試験体において曲げモーメント $1.2t \cdot m$  ( $M_u$ の60~65%)迄はプレストレスのひびわれ制御に対する効果が顕著に認められるがひびわれ発生後の鉄筋ひずみの増加がPCに近い程大きくかつひびわれ間隔も大きくなるため、それ以降の $W_{av}$ はPCに近い程大きくなった。また8シリーズの試験体は1シリーズの試験体に比べてプレストレスの大きな損失によってPRCはりのひびわれ性能は大きく低下した。

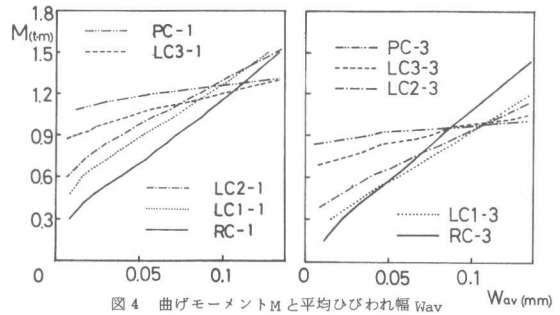


図4 曲げモーメントMと平均ひびわれ幅 $W_{av}$

一般にRCはりの曲げひびわれ幅は鉄筋の平均ひずみとひびわれ間隔の積で求められるが、コンクリートの乾燥収縮・クリープによる鉄筋への移行力が大きいPRC部材の場合はその影響を考慮しなければならない。その点の考慮は鉄筋位置のコンクリート応力が零の点からの平均鉄筋ひずみの変化量 $\Delta\bar{\epsilon}_s$ を捉えることによってでき、平均ひびわれ幅は図5中に示す(4)式で求められることを先に報告した<sup>2)</sup>。本実験の鉄筋への移行力が大きい8シリーズの試験体においても図5に示すように $W_{av}$ 、 $l_{av}$ と $\Delta\bar{\epsilon}_s$ の間には(4)式の関係が成り立っている。

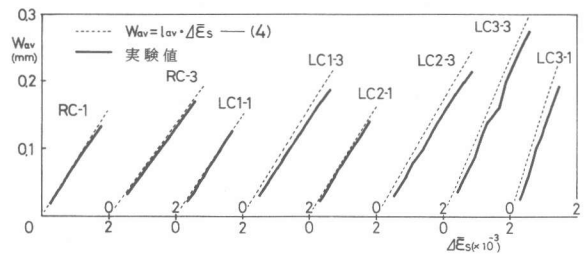
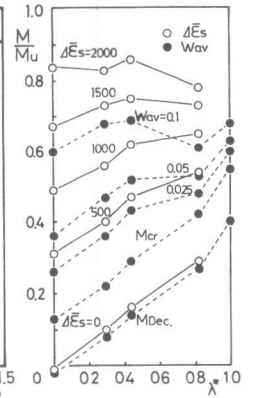
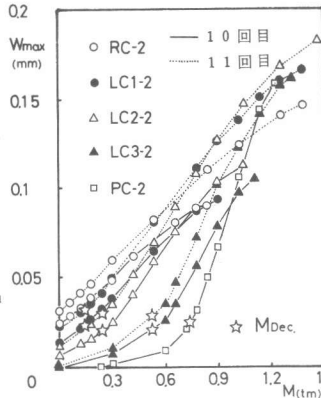


図5 平均ひびわれ幅 $W_{av}$ と $\Delta\bar{\epsilon}_s$

最大ひびわれ幅 $W_{max}$ と平均ひびわれ幅 $W_{av}$ との関係は、ひびわれ定常状態(本実験の場合 $W_{av}$ が0.05mm以上)になると $W_{max}/W_{av}$ は一定となり、その値は1.23~1.44であった。

最大ひびわれ幅 $W_{max}$ と平均ひびわれ幅 $W_{av}$ との関係は、ひびわれ定常状態(本実験の場合 $W_{av}$ が0.05mm以上)になると $W_{max}/W_{av}$ は一定となり、その値は1.23~1.44であった。

3.4 ひびわれの閉合性：最大鉄筋応力が2000kg/cm<sup>2</sup>程度で10回くり返した後の除荷時およびさらに4000kg/cm<sup>2</sup>近く迄載荷した後の除荷時(11回目)の曲げモーメントMと最大ひびわれ幅W<sub>max</sub>の関係を図6に示す。どの試験体のM-W<sub>max</sub>曲線も初載荷時にコンクリートに引張応力が生じない曲げモーメントM<sub>Dec.</sub>において明瞭な屈折点が認められ、その点におけるW<sub>max</sub>は10回目の除荷時には0.02mm以下、11回目の除荷時でも0.03mm程度で実際上ひびわれは閉じているものと見させる。



3.5 プレストレッシング係数 $\lambda$ 、 $\lambda^*$ ： $\Delta \bar{E}_s$ およびW<sub>av</sub>がある値の時の曲げモーメント比M/M<sub>u</sub>と $\lambda^*$ との

図6 除荷時のMと最大ひびわれ幅W<sub>max</sub>

図7 M/M<sub>u</sub>、M<sub>Wav</sub>と $\lambda^*$ の関係

関係を図7に示す。緊張材の引張力は $\lambda^*$ にほぼ比例することにより、ある $\Delta \bar{E}_s$ に対するMおよびM<sub>cr</sub>と $\lambda^*$ とは線型関係を示し、W<sub>av</sub>が0.05mm迄はあるひびわれ幅の時の曲げモーメントも $\lambda^*$ の増加にともなって増大することがわかる。緊張材と普通鉄筋が同じ高さに配置された場合は $\lambda$ は $\lambda^*$ と一致するが、一般的には、 $\lambda^*$ は曲げ破壊時の全曲げ抵抗モーメントに対する緊張材の分担する曲げ抵抗モーメントを意味する点からもプレストレッシングの程度を表わす指標として $\lambda$ より $\lambda^*$ が優れている。

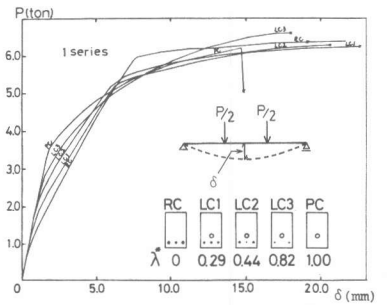


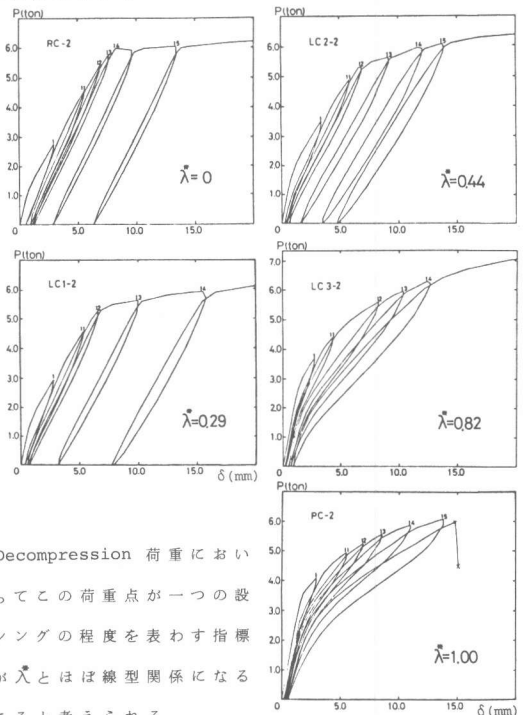
図8 単調載荷時のP- $\delta$ 曲線

3.6 たわみ：単調載荷試験体の荷重Pと中央たわみ $\delta$ の関係を図8に示す。 $\lambda^*$ が大きくなる程、鋼材の総面積が減少するため曲げひびわれ発生後の曲げ剛性の低下は大きくなるが、常時荷重に相当する範囲においてはプレストレス力によりたわみは低減される。くり返し載荷の場合のP- $\delta$ 曲線を図9に示す。除荷開始点が鉄筋の降伏前であれば、プレストレス力に応じて残留たわみは大幅に減少する。鉄筋の降伏後はLC1、LC2の残留たわみは大きく履歴曲線の形はRC typeを示し、LC3の履歴曲線はPC typeを示す。

#### 4. むすび

P RC部材を最も特徴づける曲げひびわれ性状に関して本実験結果をまとめると次のようになる。

1) 鉄筋位置のコンクリート応力が零となる点をコンクリートの乾燥収縮・クリープの影響を考慮して求め、この時点からの鉄筋ひずみの変化量とひびわれ間隔(測定値)との積で算定したひびわれ幅は実験値とよく一致した。2)



除荷開始点において鉄筋が降伏していなければ、いわゆる Decompression 荷重においてひびわれ幅は実際上閉じているものとみなせた。したがってこの荷重点が一つの設計上の指標点になるものと考えられる。3) プレストレッシングの程度を表わす指標として(2)式によって定義される $\lambda^*$ は、曲げひびわれ耐力が $\lambda^*$ とほぼ線型関係になることから(1)式のThürlimannの提案した $\lambda$ より有用であると考えられる。

謝辞：本研究は本学大学院修了生吉田孝君(産鳥建設)、院生吉田輝幸君の協力によって行なったものであり、また 著者記念 プレストレストコンクリート技術研究奨励基金より研究助成金の交付を受けたことを記して謝意を表します。  
参考文献：1) Thürlimann, B. und Caflisch, R.; Deutscher Beton-Verein e.V., Vorträge Betontag 1969, 2) 鈴木、大野：セメント技術年報、昭和53年

図9 くり返し載荷時のP- $\delta$ 曲線