

PC ばりにおける無応力軸鉄筋の効果について

俣 野 善 治*

1. はじめに

無応力軸鉄筋が、PCばりの曲げ性状に及ぼす影響については、これまでにかなり明らかにされている。坂、六車、奥島博士らは、無応力引張り補強筋がPCばりの曲げ破壊耐力を増強させることを指摘するとともに、コンクリートの硬化乾燥収縮によって、はりのきれつ曲げモーメントの低下をもたらすことを明らかにした。これらの研究は、いずれもPCばりの曲げ耐力を鉄筋で補強するという考えを基本にしたものである。

一方、井原、小寺氏は、長大スパン構造物の経済的設計を追及する立場から、いわゆるPRC構造を提唱し、きれつが分散して発生すること、きれつ発生後の曲げ剛度が純PCばりほど低下しないこと、などを実験的に明らかにした。しかし、このPRC構造はあくまでもRC構造のきれつ発生を遅らせることを目的としたものであり、復元性などのPC構造の利点を減殺してしまう危険性がある。

本報告では、軸鉄筋をあくまでもPCばりの曲げ補強筋として扱い、無応力軸鉄筋のPCばりの曲げ剛度に対する効果を調べ、同時に普通丸鋼と異形丸鋼とを補強筋として用いた場合のきれつ発生性状の差異を実験結果に照らして論じる。あわせて、PCばりの曲げ剛度—曲げモーメント関係を表わす実験式を提起し、実験の結果とかなりよい一致をみることを示す。

2. きれつ、降伏、破壊曲げモーメントの計算式

コンクリートの応力—ひずみ関係式として次式を採用する。

$$\left. \begin{aligned} \text{圧縮} \quad \sigma_c &= E_0 \delta + B \delta^2 + C \delta^3 \\ \text{引張り} \quad \sigma_t &= E_0 \delta + m B \delta^2 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

(1) PS導入時のひずみ

PS導入直後のはり断面の応力とひずみを、図—1に示す。PS導入力 $P=C$ (圧縮合力) であるから、矩形ばりの場合

* 長崎造船大学助教授 建築学科

$$P = b \int_0^h \sigma_z dz + E_s a_r \left(\delta_1 + \delta_2 \frac{d_r}{h} \right) \dots \dots \dots (2)$$

上縁に関するモーメントのつり合から(自重を考慮する)

$$\begin{aligned} M &= P \left(\frac{h}{2} + e - \frac{M_d}{P} \right) \\ &= b \int_0^h \sigma_z z dz + E_s a_r \left(\delta_1 + \delta_2 \frac{d_r}{h} \right) d_r \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

式(1)の3次の項を無視して、 $\delta_z = \delta_1 + \delta_2(z/h)$ とともに式(2)、(3)に代入すると、

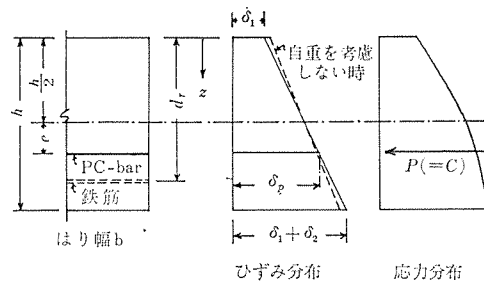
$$\begin{aligned} \frac{P}{bh} &= E_0 \left(\delta_1 + \frac{1}{2} \delta_2 \right) + B \left(\delta_1^2 + \delta_1 \delta_2 + \frac{1}{3} \delta_2^2 \right) \\ &+ E_s p_r \left(\delta_1 + \delta_2 \frac{d_r}{h} \right) \dots \dots \dots (2)' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{P}{bh^2} \left(\frac{h}{2} + e - \frac{M_d}{P} \right) &= E_0 \left(\frac{1}{2} \delta_1 + \frac{1}{3} \delta_2 \right) \\ &+ B \left(\frac{1}{2} \delta_1^2 + \frac{2}{3} \delta_1 \delta_2 + \frac{1}{4} \delta_2^2 \right) \\ &+ E_s p_r \left(\delta_1 + \delta_2 \frac{d_r}{h} \right) \frac{d_r}{h} \dots \dots \dots (3)' \end{aligned}$$

ここに、 E_s 、 a_r は鉄筋のヤング係数と断面積、 $p_r = a_r/bh$ 、式(2)'、(3)' から δ_1 、 δ_2 を求め、式(4)を用いてPC鋼棒の位置のコンクリートの圧縮ひずみ δ_p を計算する。

$$\delta_p = \delta_1 + \delta_2(d/h) \dots \dots \dots (4)$$

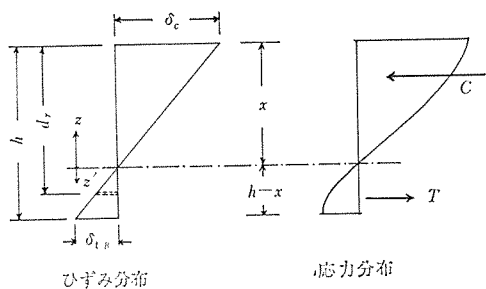
図—1 PS導入時の応力とひずみ



(2) きれつモーメント

きれつ時のはり断面の応力とひずみ分布を、図—2に示す。引張側コンクリートの最大ひずみが δ_{tB} になったとききれつが入るとし、コンクリートの圧縮応力—ひずみ関係式としては式(1)の3次の項を省略したものを使う。平面則が成り立つとすれば、中立軸から z および

図-2 きれつ時の応力とひずみ



z' の点のひずみ $\delta_z, \delta_{z'}$ は次のように表わせる。

$$\delta_z = \frac{z}{x} \delta_c = \frac{\delta_{tB}}{h-x} z, \quad \delta_{z'} = \frac{\delta_{tB}}{h-x} z' \quad \dots\dots(5)$$

圧縮合力 C および引張合力 T は、それぞれ式 (6), (7) で表わせる。

$$C = b \int_0^x \sigma_z dz = b \int_0^x \left\{ E_0 \frac{\delta_{tB}}{h-x} z + B \left(\frac{\delta_{tB}}{h-x} z \right)^2 \right\} dz$$

$$= bh \frac{\delta_{tB}}{1-x_1} \left\{ E_0 \cdot \frac{x_1^2}{2} + B \frac{\delta_{tB}}{1-x_1} \cdot \frac{x_1^3}{3} \right\} \quad \dots\dots(6)$$

$$T = b \int_0^{h-x} \sigma_{z'} dz' + E_s a_r \frac{d_r - x}{h-x} \delta_{tB}$$

$$= b \int_0^{h-x} \left\{ E_0 \frac{\delta_{tB}}{h-x} z' + mB \left(\frac{\delta_{tB}}{h-x} z' \right)^2 \right\} dz'$$

$$+ E_s a_r \frac{d_r - x}{h-x} \delta_{tB} = bh \frac{\delta_{tB}}{1-x_1}$$

$$\cdot \left\{ E_0 \frac{(1-x_1)^2}{2} + mB \frac{\delta_{tB}}{1-x_1} \cdot \frac{(1-x_1)^3}{3} \right.$$

$$\left. + E_s p_r \left(\frac{d_r}{h} - x_1 \right) \right\} \quad \dots\dots(7)$$

ここに $x_1 = x/h$

一方、このときの PC 鋼棒の引張力は、次式で与えられる。

$$P + \Delta P = P + E_p a_p \left(\frac{h/2 + e - x}{h-x} \delta_{tB} + \delta_p \right) \quad \dots\dots(8)$$

軸方向の力のつり合い ($C = T + P + \Delta P$) より下記の x_1 に関する 3 次式が得られる。

$$\frac{1}{2} E_0 \{ x_1^2 - (1-x_1)^2 \} + \frac{1}{3} B \left(\frac{\delta_{tB}}{1-x_1} \right) \{ x_1^3 - m(1-x_1)^3 \}$$

$$- E_s p_r \left(\frac{d_r}{h} - x_1 \right) - E_p p_p \left(\frac{1}{2} + \frac{e}{h} - x_1 \right)$$

$$- \left(\frac{P}{bh} + E_p p_p \delta_p \right) \frac{1-x_1}{\delta_{tB}} = 0 \quad \dots\dots(9)$$

ここに、 E_p, a_p は PC 鋼棒のヤング係数および断面積で、 $p_p = a_p/bh$ である。

式 (9) を解けば中立軸比 x_1 が得られる。次に、きれつモーメント M_{cr} は

$$M_{cr} = b \int_0^x \left\{ E_0 \frac{\delta_{tB}}{h-x} z + B \left(\frac{\delta_{tB}}{h-x} z \right)^2 \right\} z dz$$

$$+ b \int_0^{h-x} \left\{ E_0 \frac{\delta_{tB}}{h-x} z' + mB \left(\frac{\delta_{tB}}{h-x} z' \right)^2 \right\} z' dz'$$

$$+ E_s a_r \frac{(d_r - x)^2}{h-x} \delta_{tB} + \left\{ P + E_p a_p \frac{\delta_{tB}}{h-x} \right.$$

$$\left. \cdot \left(\frac{h}{2} + e - x \right) + E_p a_p \delta_p \right\} \left(\frac{h}{2} + e - x \right)$$

$$\frac{M_{cr}}{bh^2} = \frac{\delta_{tB}}{1-x_1} \left[\frac{1}{3} E_0 \{ x_1^3 + (1-x_1)^3 \} + \frac{1}{4} B \left(\frac{\delta_{tB}}{1-x_1} \right) \right.$$

$$\left. \cdot \{ x_1^4 + m(1-x_1)^4 \} + E_s p_r \left(\frac{d_r}{h} - x_1 \right)^2 \right.$$

$$+ E_p p_p \left(\frac{1}{2} + \frac{e}{h} - x_1 \right)^2 \left. \right]$$

$$+ \left(\frac{P}{bh} + E_p p_p \delta_p \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{e}{h} - x_1 \right) \quad \dots\dots(10)$$

となる。いま断面の回転角を φ とすれば、曲げ剛度 K は

$$\frac{K_{cr}}{bh^3} = \frac{M_{cr}}{bh^2} / h \varphi_{cr} \quad \dots\dots(11)$$

から求まる。ここに

$$h \varphi_{cr} = \frac{\delta_{tB}}{1-x_1} + h \varphi_p; \quad h \varphi_p = \delta_2 \quad \dots\dots(12)$$

(3) 降伏および破壊モーメント

図-3 降伏(破壊)時の応力とひずみ

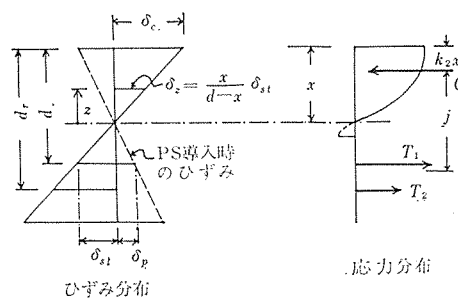


図-3 に応力とひずみ分布を示す。この場合はコンクリートの引張力は無視できる。平面則を用いて

$$\delta_z = \frac{z}{x} \delta_c = \frac{z}{d-x} \delta_{st}$$

圧縮合力 C は

$$C = b \int_0^x \sigma_z dz = b \int_0^x \left\{ E_0 \frac{\delta_c}{x} z + B \left(\frac{\delta_c}{x} z \right)^2 + C \left(\frac{\delta_c}{x} z \right)^3 \right\} dz$$

$$= bh \frac{\delta_c}{x_1} \left\{ \frac{1}{2} E_0 x_1^2 + \frac{1}{3} B \left(\frac{\delta_c}{x_1} \right) x_1^3 + \frac{1}{4} C \left(\frac{\delta_c}{x_1} \right)^2 x_1^4 \right\}$$

$$= bh \frac{\delta_{st}}{d/h - x_1} \left\{ \frac{1}{2} E_0 x_1^2 + \frac{1}{3} B \left(\frac{\delta_{st}}{d/h - x_1} \right) x_1^3 \right.$$

$$\left. + \frac{1}{4} C \left(\frac{\delta_{st}}{d/h - x_1} \right)^2 x_1^4 \right\} \quad \dots\dots(13)$$

となり、降伏時は $\delta_{st} = \delta_{yp} - \delta_p$ を、破壊時は $\delta_c = \delta_{cu}$ を用いればよい。ここに δ_{yp} は PC 鋼棒の降伏時ひずみ度、 δ_{cu} はコンクリートの圧縮破壊ひずみ度を示す。

一方、引張合力 T は、

$$T = T_1 + T_2$$

$$T_1 = bh p_p \sigma_p, \quad T_2 = bh p_r \sigma_r \quad \dots\dots(14)$$

ここに、 σ_p, σ_r はそれぞれ PC 鋼棒および鉄筋の応力度で、一般に降伏値を用いればよい。ただし鋼材の降伏に先立って、コンクリートが圧壊する場合には注意を要す

る。次に、 $C=T$ から中立軸比 x_1 を求め、次式から曲げ耐力を計算する。

$$M = T_1(d - k_2x) + T_2(d_r - k_2x) \dots\dots\dots(15)$$

3. 曲げ剛度—曲げモーメント関係式

PCばりまたはRCばりの曲げ剛度 K は、き裂の発生後急激に低下する。この特性に合った $M-K$ 関係式はいは従来いくつかの提案がなされている。これら諸式は、いずれも $M=0$ から $M=M_{cr}$ までを直線式で与え、 $M=M_{cr}$ 以降に対して次のような式で表わしている。

放物線式

$$K = K_{cr} - (K_{cr} - K_y) \cdot \left\{ 2 \frac{M - M_{cr}}{M_y - M_{cr}} - \frac{(M - M_{cr})^2}{(M_y - M_{cr})^2} \right\} \dots\dots(16)$$

双曲線式

$$K = K_{cr} \frac{M/M_{cr}}{a + b(M/M_{cr})^x} \left. \begin{aligned} a = 1 - b, \quad b = \left\{ \frac{M_y}{M_{cr}} \cdot \frac{K_{cr}}{K_y} - 1 \right\} / \left(\frac{M_y}{M_{cr}} \right)^x \\ \dots\dots\dots(17) \end{aligned} \right\}$$

ここに、 M_{cr} 、 K_{cr} はき裂時の M_y 、 K_y は降伏時の値を示す。なお、式(17)で $x=1$ の場合が坂博士の式であり、式(17)そのものは筆者の修正式である。

しかし、これらの式はいずれもたわみ計算に際して複雑な数値計算を要する。さらに、き裂発生前後のはりの曲げ性状を扱うとき、 M_{cr} を境にして異なる式を用いると、不便な場合がある。そこで、 $M=0$ から、 $M=M_y$ までを一つの式で表わしうる次の式を提起しよう。

$$K = \frac{K_0}{1 + \left(\frac{K_0}{K_{cr}} - 1 \right) \left(\frac{M}{M_{cr}} \right)^n \left\{ 1 + a \left(1 + \frac{M}{M_{cr}} \right) \right\}} \left. \begin{aligned} 0 \leq a \leq \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{n} \right) \left(\frac{M_y}{M_{cr}} - 1 \right) - 1} \\ n = \frac{\log \left\{ \frac{K_0}{K_y} - 1 \right\} / \left(\frac{K_0}{K_{cr}} - 1 \right) - \log \left\{ 1 + a \left(1 - \frac{M_y}{M_{cr}} \right) \right\}}{\log(M_y/M_{cr})} \end{aligned} \right\} \dots\dots(18)$$

この式は (M_{cr}, K_{cr}) 、 (M_y, K_y) を通り、 $M=0$ のとき $K=K_0$ 、かつ $dK/dM=0$ をみたす(図-4 参照)。式(18)は $a=0$ のとき簡単になる。すなわち、

$$K = \frac{K_0}{1 + \left(\frac{K_0}{K_{cr}} - 1 \right) \left(\frac{M}{M_{cr}} \right)^n}; \quad n = \frac{\log \left\{ \left(\frac{K_0}{K_y} - 1 \right) / \left(\frac{K_0}{K_{cr}} - 1 \right) \right\}}{\log(M_y/M_{cr})} \dots\dots(18)'$$

式(18)'で表わされる K を有する単純支持ばりが三等分点集中荷重を受けるときのスパン中央のたわみ δ_{cent}

は次式のように簡単な形で表わせる(図-5 参照)。

$$\delta_{cent} = \frac{23 l^3}{1296 K_0} (2P) \cdot \left\{ 1 + \frac{3}{23} \cdot \frac{5n + 23}{n + 3} \left(\frac{K_0}{K_{cr}} - 1 \right) \left(\frac{P}{P_{cr}} \right)^n \right\} \dots\dots(19)$$

図-4 曲げモーメントと曲げ剛度の関係

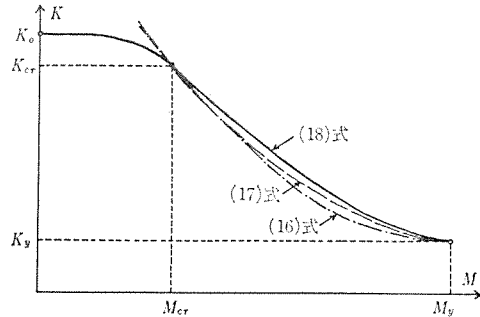
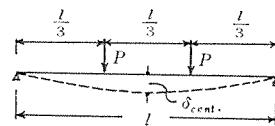


図-5



4. 実 験

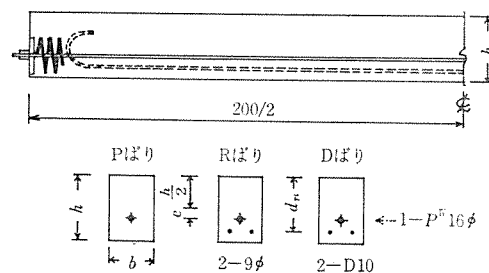
(1) 供試体と材料

補強筋の効果をはかる基準にするために、補強筋のない普通PCばり(Pばり)を3本、これと同一の断面およびPC鋼棒を用いたPCばりの引張側に普通丸鋼を入れた供試体(Rばり)と異形丸鋼を入れた供試体(Dばり)を各3本製作した。コンクリート断面は、 10×15 cm、材長は2mで、PC鋼材は、公称径 16ϕ の第4種高周波焼入れ鋼棒を使用した。補強鉄筋としては公称径 9ϕ (SR 24) を各2本、または公称径 10ϕ (SD 30) を各2本使用した(図-6)。供試体の諸寸法を表-1に示す。

PC鋼棒の力学的諸性質は、図-7を、補強鉄筋のそれは表-2を参照されたい。

コンクリートの調合は $1 : 2.11 : 2.42$ 、 $W/C = 42.5\%$ とした。セメントは普通ポルトランドセ

図-6 供試体

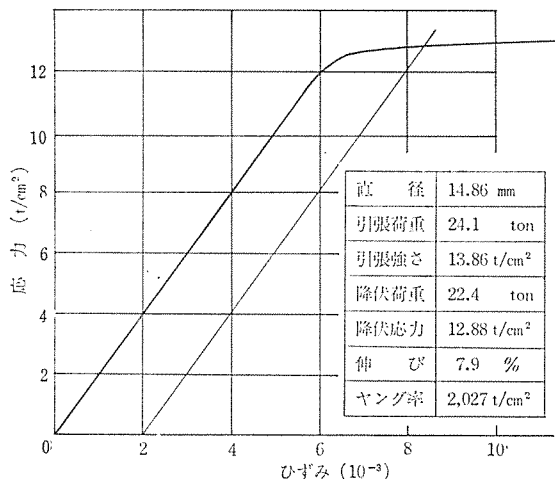


メントを使用し、砂は川内川産、砂利は長崎・小江原産の碎石を用いた。コンクリート打設後、材令1週まで湿

表-1 供試体の諸寸法

はり番号	b (cm)	b (cm)	e (cm)	鉄筋の公称径	d _r (cm)	a _r (cm ²)	p _r = $\frac{a_r}{bh}$ (%)
P-1	10.0	15.1	2.6	—	—	—	—
-2	10.1	15.6	2.6	—	—	—	—
-3	10.1	15.1	2.6	—	—	—	—
R-1	10.0	15.0	2.6	9φ	13.2	$\begin{pmatrix} 0.62 \\ 0.61 \end{pmatrix}$	0.82
-2	10.0	15.1	2.8	〃	13.3	$\begin{pmatrix} 0.62 \\ 0.62 \end{pmatrix}$	0.82
-3	10.1	15.1	2.4	〃	13.2	$\begin{pmatrix} 0.63 \\ 0.61 \end{pmatrix}$	0.81
D-1	10.0	15.2	2.7	D 10φ	13.4	$\begin{pmatrix} 0.71 \\ 0.71 \end{pmatrix}$	0.94
-2	10.1	15.1	2.6	〃	13.4	〃	0.94
-3	10.0	15.1	2.7	〃	13.3	〃	0.94

図-7 PC鋼棒の力学的性質



注：高周波熱錬（株）の試験結果より

表-2 補強鉄筋の力学的性質

はり番号	直径 (mm)	降伏点応力 (t/cm ²)	引張強さ (t/cm ²)	ヤング率 E _r (t/cm ²)
R-1	8.86・8.80	2.92	4.22	2 130
-2	8.89・8.90	2.94	4.27	2 140
-3	8.95・8.80	2.43	3.81	2 140
D-1	公称径 10	3.44	5.33	2 130
-2	〃	3.64	5.46	2 130
-3	〃	3.67	5.36	2 120

表-3 セメントの試験結果

比重	粉末度 (ブレン)	凝 結				
		室温	湿度	始 発	終 結	
3.16	3 200	20°C	95%	2時26分	3時38分	
安定性	フロー値	圧縮強さ (kg/cm ²)			養生温度	
		3日	7日	28日	室温	水温
良	244 mm	127	226	417	20.1°C	20.3°C

注：日本セメント（株）八代工場の試験結果より

布養生し1週目のPS導入(P=12.3t, σ_g ≒ 80 kg/cm²)直後グラウト(W/C=40%)注入を行ない、試験2日前まで水中養生した。セメントおよび骨材の試験結果を、表-3, 4, 図-8 に示す。コンクリートの力学的諸性質を表-5 に示す。

(2) 試験方法

供試体をスパン1.8mで単純支持し、オイルジャッキにて三等分点集中荷重を行なった(図-9参照)。荷重状況を図-10に示す。荷重調整は圧縮用ロードセルによって行ない、きれつ発見まで250kg間隔で荷重したのち、いったん除荷した。続いて同一間隔で破壊直前まで再荷重、再除荷した。最後に500kg間隔で荷重して破壊に至らしめた。

スパン中央および荷重点(三等分点)直下の計3カ所に1/100mm鉛直ダイヤルゲージを設置して鉛直たわみ

表-4 骨材の試験結果

	比 重		吸水率 (°/wt)	洗い試験 流失率 (%)	単位容積 重量 (kg/l)	実積率 (%)
	絶乾	表乾				
細骨材 (川砂)	2.39	2.48	3.67	0.80	1.58	66.3
粗骨材 (碎石)	2.64	2.68	1.58	1.47	1.63	61.7

図-8 骨材のふるい試験結果

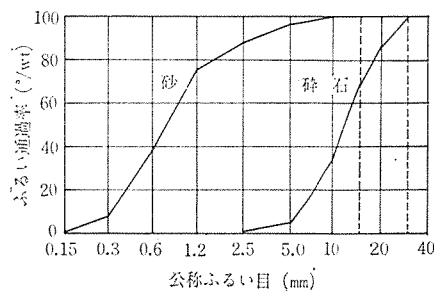


図-9 荷重点と測定位置

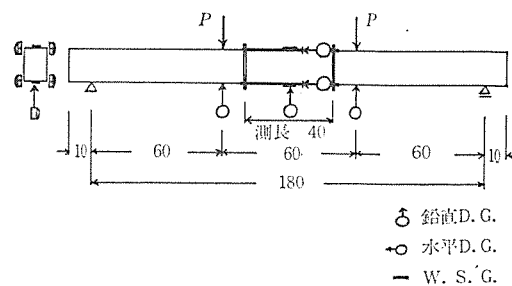


図-10 荷重状況説明図

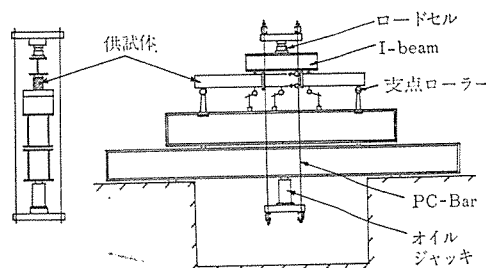


表-5 コンクリートの試験結果と力学的性質

材 令	はり 番号	ス ラ ン プ (cm)	空 気 量 (%)	平 均 圧 縮 強 度 (kg/cm ²)	引 張 強 さ 係 数 (kg/cm ²)	$\sigma = E_0 \delta + B \delta^2 + C \delta^3$ の係数							理論計算 に用いる 曲げ引張 強さ*** σ_{tB} (kg/cm ²)
						測 定 値 (kg/cm ²)				理論計算に用いる値**			
						E_0 (10 ⁵)	B (10 ⁸)	C (10 ¹⁰)	σ_{cB}	E_0 (10 ⁵)	B (10 ⁸)	C (10 ¹⁰)	
1 週 (PS 導入時)	P-1	1.8	2.4	349	—	3.034	-0.573	-0.72	361	3.174	-0.870	0.73	—
		1.6	2.0	326	—	3.042	-0.734	0.03	329	3.115	-0.953	1.02	—
		2.7	2.0	317	—	2.854	-0.662	0.00	317	3.092	-0.986	1.14	—
	R-1	1.9	2.1	302	—	3.197	-0.898	0.03	305	3.052	-1.041	1.34	—
		0.4	2.0	378	—	3.189	-0.708	-0.02	372	3.249	-0.763	0.34	—
		2.3	2.1	347	—	3.299	-1.252	2.02	323	3.168	-0.877	0.75	—
	D-1	0.7	2.7	363	—	3.297	-0.976	0.99	353	3.211	-0.817	0.54	—
		1.8	2.4	349	—	3.034	-0.573	-0.72	361	3.174	-0.870	0.73	—
		0.1	2.0	412	—	2.860	-0.217	-1.72	402	3.338	-0.637	-0.10	—
4 週 (試 験 日)	P-1			440	35.0	3.601	-0.790	0.56	445	3.403	-0.599	-0.16	28.6
				410	37.9	3.486	-0.652	-0.36	412	3.287	-0.662	0.10	27.4
				403	41.4	3.527	-0.804	0.37	416	3.257	-0.678	0.17	27.2
	R-1			425	33.8	3.491	-0.475	-1.37	428	3.345	-0.630	-0.03	28.0
				474	31.0	3.322	-0.123	-1.92	474	3.533	-0.529	-0.46	29.8
				500	39.5	3.471	-0.413	-0.66	507	3.637	-0.473	-0.69	30.9
	D-1			463	35.5	3.398	-0.290	-1.46	444	3.493	-0.551	-0.36	29.4
				440	35.0	3.601	-0.790	0.56	445	3.403	-0.599	-0.16	28.6
				523	41.7	3.685	-0.403	-1.04	543	3.725	-0.425	-0.89	31.7

* 各3本の円柱供試体(φ10×20)の平均値

** この実験のほか、当研究室で測定した23本の供試体($\sigma_{cB,28}=400\sim560$ kg/cm²)から得た次の関係式に平均圧縮強度を代入して求めた。
 $E_{0,7}=0.002586 \sigma_{cB,7} + 2.272$ (10⁵ kg/cm²) $B_{,7}=0.003656 \sigma_{cB,7} - 2.145$ (10⁸ kg/cm²) $C_{,7}=-0.01303 \sigma_{cB,7} + 5.27$ (10¹⁰ kg/cm²)
 $E_{0,28}=0.00388 \sigma_{cB,28} + 1.695$ (10⁵ kg/cm²) $B_{,28}=0.00210 \sigma_{cB,28} - 1.524$ (10⁸ kg/cm²) $C_{,28}=-0.0088 \sigma_{cB,28} + 3.71$ (10¹⁰ kg/cm²)

*** この実験のほか、当研究室で測定した31種の供試体($\sigma_{cB,28}=200\sim560$ kg/cm²)から得た次の関係式に平均圧縮強度を代入して求めた引張強さ係数の0.8倍を採った
 (引張強さ係数)= $0.047 \sigma_{cB,28} + 15.05$ (kg/cm²)

を測定した。スパン中央部軸方向上下縁ひずみ測定のために、1/1000 mm 水平ダイヤルゲージをはりの上下縁の高さに左右各2個すえ付け、測長40 cm間の伸縮量を測定した。同時にスパン中央はり上下面軸方向に電気抵抗線ひずみゲージ(ゲージファクター2.14, ゲージ長60 mm)を貼付してひずみ測定を行なった。ひずみおよびたわみは各荷重段階で、変形が安定したのち読みとった。各測定点を図-9に併記した。

(3) 試験経過

昭和44年10月15日~11月21日の間にコンクリート材令4週で荷重試験を行なった。試験場所は本学建築構造実験室内で、試験期間中の室内気温および養生水槽の水温は、ほぼ22~16°C、相対湿度は、ほぼ70~80%であった。

無補強のPばりでは、ほぼ予定どおりの荷重できれつが発生したが、補強軸鉄筋を有するRおよびDばりでは予定荷重の85~95%できれつの発生をみた。次に、本実験ではコンクリートの圧壊がPC鋼棒の降伏に先行したために、いわゆるはりの降伏現象は現われず、破壊直前に除荷した場合の残留たわみが、どれほどの意味をもつか疑問ではあるが、補強軸鉄筋の有無にかかわらず、

きわめて良好な復元性を示した。

一方、きれつ発生性状は補強軸鉄筋の効果をはっきり現わした。すなわち、RおよびDばりでは、Pばりにくらべてきれつ間隔、きれつ幅ともに、半分近くに減少した。パーシャルプレストレスに基づく設計の指針になる。なお、RおよびDばりのきれつ間隔は、それぞれ2-9φおよび2-D10を引張筋としたRCばりのきれつ間隔に近い。

すべてのはりが、ほぼ予定どおりの荷重で上縁コンクリートの圧壊によって崩壊した。

図-11 (a)

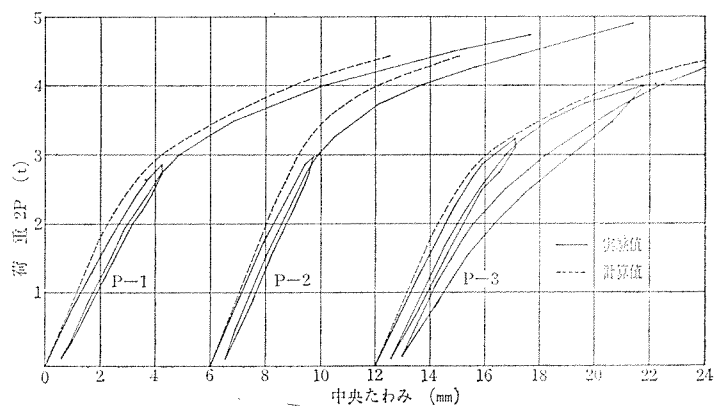


図-11 (b)

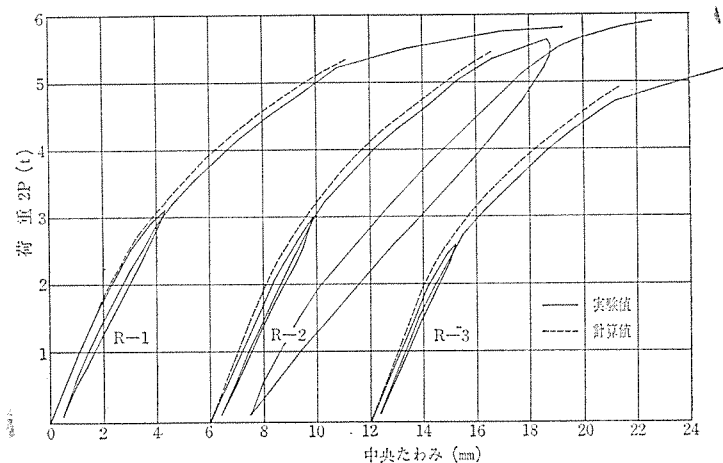


図-11 (c) スパン中央のたわみ

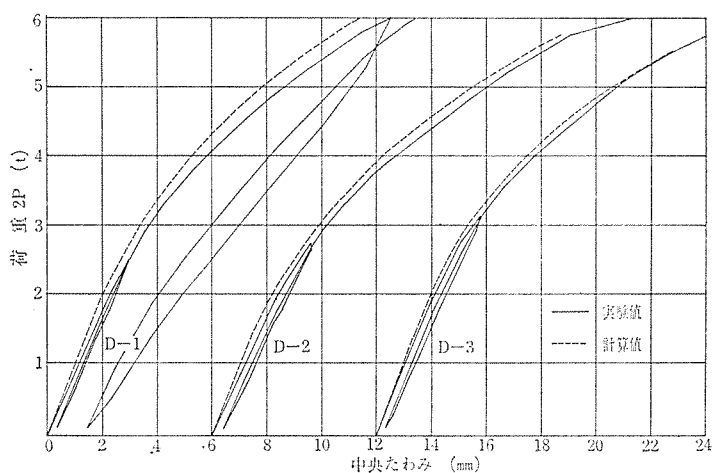


図-12 (a)

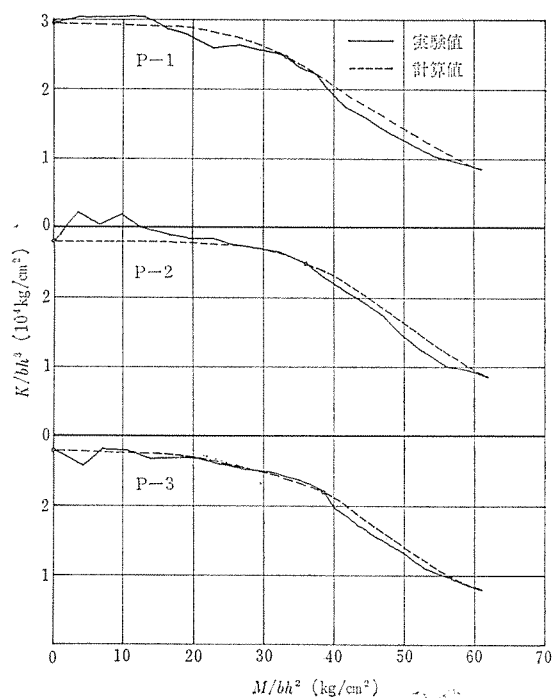
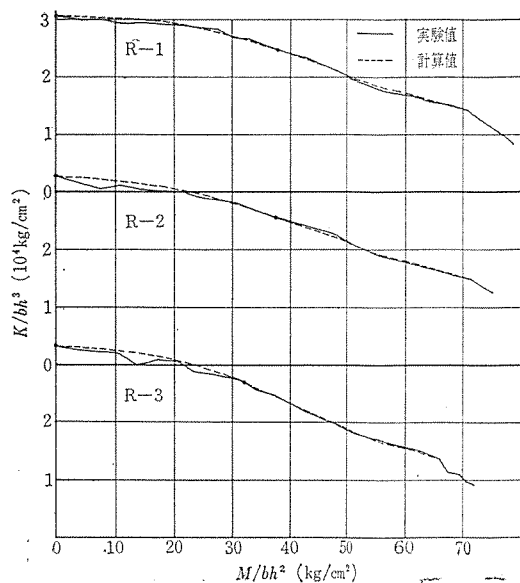


図-12 (b)



(4) 試験結果

スパン中央における鉛直たわみを 図-11 に示す。いずれのはりも、きれつ発生直前までは弾性的挙動を示すが、補強筋を入れた R, D ばかりでは P ばかりにくらべて立上がり接線勾配が大きくなっている。一方、R, D ばかりでは補強筋があるにもかかわらず P ばかりにくらべて、きれつ荷重が等しいかあるいは低くなっている。きれつ発見後除荷したときの残留たわみは、R, D ばかりのほうが P ばかりにくらべて 60% 近く減少している。きれつ荷重以降についてみると、P ばかりではきれつ発生直後たわみの増加率が急に大きくなるのに対し、R, D ばかりではさほど顕著ではない。

たわみ曲線から読みとれるもう一つの事実は、破壊荷重の 85~90% で除荷したとき、R, D ばかりの残留たわみが P ばかりにくらべて 2 倍近くになるだけでなく、除荷曲線が P ばかりでは逆 S 形になっているのに対し、R, D ばかりでは、ほぼ直線になっていることである。

図-12 は、はり下縁のひずみ測定値から求めた曲げモーメント-曲げ剛度線図である。P ばかりにくらべて R, D ばかりでは初期の曲げ剛度 K がいくぶん大きくなっている。

また、P ばかりではきれつ発生直後の曲げ剛度 K の低下が顕著であるのに対し、R, D ばかりではこの現象はほとんど認められない。表-6 にきれつ時および破壊時の曲げモーメントと曲げ剛度の実験値を掲げた。

図-13 に P, R および D ばかりの代表的なきれつ時のスケッチを示す。はり下縁における平均きれ

図-12 (c)

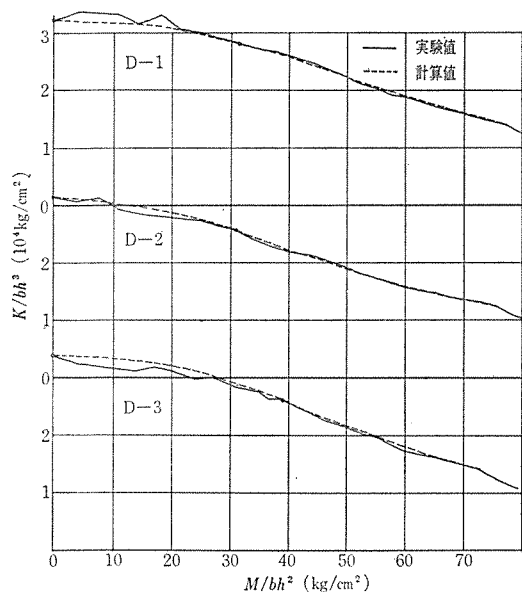


表-6 曲げモーメント M と曲げ剛度 K

はり番号	曲げモーメント M/bh^2 (kg/cm ²)						曲げ剛度 K/bh^3 (10 ⁴ kg/cm ²)			
	きれつ時			破壊時			初期	きれつ時		破壊時
	実験値	計算値	実/計(%)	実験値	計算値	実/計(%)	計算値	実験値	計算値	計算値
P-1	35.8	36.7	97.5	66.3	65.1	101.8	2.92	2.58	2.44	0.81
-2	36.4	34.8	104.7	64.7	61.9	104.5	2.80	2.56	2.42	0.77
-3	37.3	35.7	104.5	64.4	62.8	102.5	2.78	2.33	2.29	0.80
R-1	37.6	37.6	99.9	78.3	75.5	103.7	3.09	2.43	2.67	1.06
-2	37.1	39.5	94.0	80.7	81.3	99.3	3.26	2.56	2.86	1.09
-3	32.2	36.7	87.7	72.8	76.7	94.8	3.32	2.77	2.87	0.97
D-1	32.4	38.2	84.8	82.6	81.8	101.1	3.23	2.79	2.80	1.13
-2	35.9	37.6	95.7	81.9	81.3	100.8	3.16	2.45	2.73	1.17
-3	35.3	39.6	89.2	85.4	87.2	97.9	3.42	2.78	2.99	1.14

図-13 きれつ発生状況

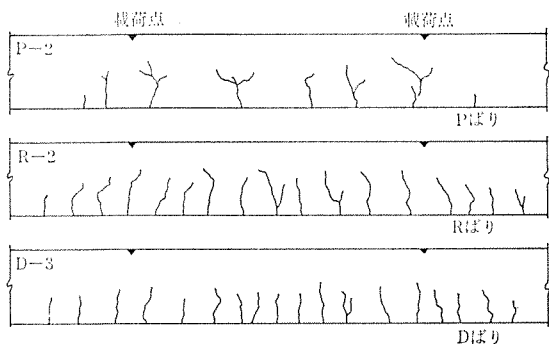


表-7 平均きれつ間隔

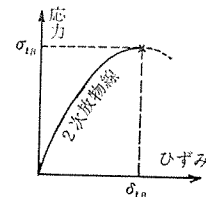
補強軸鉄筋	はり番号	きれつ間隔 (cm)	平均値 (cm)
なし	P-1	12.5	11.8
	-2	12.5	
	-3	10.4	
普通丸鋼	R-1	6.0	6.4
	-2	6.3	
	-3	7.0	
異形丸鋼	D-1	5.6	5.6
	-2	5.9	
	-3	5.3	

つ間隔は表-7を参照されたい。これら図表から補強軸鉄筋がきれつ発生性状を大きく変えることがわかる。Pばりを基準にした平均きれつ間隔は、Rばりで55%、Dばりでは48%になっている。

(5) 理論計算の結果

理論計算はすべて2.項に掲げた諸式を用いた。また補強軸鉄筋は常に算入した。

きれつモーメントの算定に際して、コンクリートの最大ひずみ度 δ_{tB} は図-14のよう 図-14 コンクリートの引張応力-ひずみ曲線にして求めた。また、約3週間水中養生を行なうなど乾燥収縮の影響を可能な限り防いだため、プレストレス力の減退はきわめて少なく(推定有効率 $\eta=0.98$)、きれつモーメントの算定時には、これを無視した。



この試験ではPC鋼材の降伏直前(降伏応力の約95%)でコンクリートが圧壊したために、コンクリートの最大圧縮ひずみ度を、3%としてはりの破壊モーメントを算定した。

以上の結果計算を、表-6に併記した。きれつモーメントは、Pばりの実験値と計算値がよい一致をみているのに対し、R、Dばりでは実験値が計算値を10%近く下まわっている。また、きれつ時の

曲げ剛度の計算値はR、Dばりのほうが、Pばりより約15%大きくなっているにもかかわらず、実験値はいずれのはりもPばりの計算値に近く、PばりとR、Dばりの間の差異は認められない。なお、破壊モーメントは各はりとも実験値と計算値がよく一致している。

初期剛度 K_0 の計算値と、きれつ時、破壊時の曲げモーメント M_{cr} 、 M_B および曲げ剛度 K_{cr} 、 K_B の実験値を式(18)'に代入して求めた $M-K$ 曲線を図-12に併記した(点線)。ただし、式(18)'の M_y 、 K_y に、 M_B 、 K_B を用いた。Pばりでは、きれつ直後の実験値が式(18)'の値を下まわっているが、R、Dばりでは両者がきわめてよく一致している。

上に求めた K の値をもとにして得られるたわみを、式(19)を用いて計算し、図-11に点線で表わした。初期の立上がり勾配のずれが目につくが、総体的に実験結果とよく一致している。R、Dばりにおいて、初期剛度 K_0 の算定の際、補強鉄筋を無視した場合、実験値にきわめて近い曲線が得られることが予想できる。

5. 結 論

以上の結果、次のことがいえよう。

1) 無応力軸鉄筋(引張側)はP Cばりの降伏または破壊曲げモーメントを増す。しかし、圧縮側コンクリートの圧壊がP C鋼棒の降伏に先行する場合、またはこれに近い場合には、この効果を十分期待できないばかりでなく、逆にP Cばりのじん性の低下をもたらす。

2) 無応力軸鉄筋はP Cばりのきれつモーメントを増大させない。コンクリートの硬化乾燥収縮が、軸鉄筋によるきれつモーメントの増分を打ち消してしまうか、場合によってはこれ以下に低下させる。

3) 無応力軸鉄筋はP Cばりのきれつを分散させる大きな効果をもつ。普通P Cばりのきれつ間隔に対して軸筋をもつP Cばりのきれつ間隔は約半分になる。丸鋼と異形丸鋼とでは、きれつ分散効果にさほど差はないが、後者のほうがより効果的である。

4) 無応力軸鉄筋はP Cばりにおけるきれつの発生直後の曲げ剛度 K の急激な低下を防ぎ、きれつ発生後初期の復元力特性を良好にする。しかし軸筋が降伏したあとは逆にP Cばりの残留変形を大きくする。

5) きれつ発生によって曲げ剛度 K があまり大きく低下しないP Cばりに対して、筆者の提起した曲げモーメント—曲げ剛度関係式は、実験結果をきわめてよく表わしうる。この式の特長は、曲げモーメントが0からはりが降伏(または破壊)するまでの全区間を唯一つの式で表わしうる点と、たわみ計算式を容易に導ける点にある。

6. おわりに

P C構造物の大ばり端部に無応力軸鉄筋がしばしば入れられるが、これが単に大地震時に補強の役目を果たすだけでなく、超過積載荷重を受けた場合または中程度の地震に見舞われた場合に、はりの剛度の低下を防ぐ効果を有することは、きわめて大切な事実である。今回の実験は、コンクリートの圧壊が鋼棒の降伏に先行する場合を扱ったが、引き続いて鋼棒の降伏が先行する場合を取り扱う予定である。

最後に、本報告中の実験を卒業研究としてとりあげ、労を惜しまずその遂行に協力して戴いた今給黎、菅野、高比良、野口、畑地、松藤の各氏、ならびに実験材料を快く供与して下さった白石建設(株)、三菱生コン(株)に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 坂 静雄：「鉄筋コンクリートの研究」
- 2) 坂・岡田・六車：「プレストレスト コンクリート」
- 3) 奥島・鈴木・藤岡：P Cばりの補強筋量と曲げひびわれ耐力(第9回P C研究発表会講演概要、昭44.2)
- 4) 小寺・岩城：プレストレスト鉄筋コンクリート桁の実験(第4回P C研究発表講演概要、昭39.2)
- 5) 井原道継：プレストレスト鉄筋コンクリートはりの試験(第5回P C研究発表会講演概要、昭40.2)
- 6) 俣野・大内・奥村・川村：鉄筋コンクリート逆T形梁の曲げ特性に関する実験的研究(日本建築学会中国・九州支部合同研究報告・第1号、昭44.4)
- 7) 俣野・高比良・今給黎・松藤：P Cばりにおける無応力軸鉄筋の効果について(第10回P C研究発表講演概要、昭45.2)

1970.5.7・受付