

低緊張応力 PC 梁の復元力特性に関する実験的研究

(株)ピーエス三菱 PC 建築部 正会員 博士(工学) ○福井 剛  
 日本大学同 理工学部 同 工学博士 浜原 正行  
 松井建設(株) 技術部 同 博士(工学) 内田 龍一郎

1 はじめに

中低層 PCaPC 建物においては、梁の PC 鋼材量が鉛直荷重によって決まる場合が多い。これに対して、高層建物では地震時応力が支配的になるため、PC 鋼材量は中低層建物と比較してかなり多くなる。このような部材に中低層並みの緊張応力を与えると、施工時及び長期荷重時のコンクリートの応力条件が厳しくなるため、PC 鋼材の緊張時応力を低く設定せざるを得なくなる。しかし、低緊張応力下での PC 部材の挙動を検討しようとした実験例は数少ないため、不明な点が多数残されている。

本報告は PC 鋼材の緊張応力、鋼材係数、及び PC 鋼材の位置を要因とした 8 体の PCaPC 梁の正負繰り返し載荷実験を行い、低緊張応力下での PC 部材の力学的特性を実験的に検討しようとするものである。

2. 実験概要

図 1 に全試験体の梁断面、図 2 に配筋詳細の一例 (RP6-q25, RP3-q25) を示す。図 2 に示すとおり、試験体はいずれもスラブとの境界に厚さ 20mm のモルタル目地を有する圧着タイプ PCaPC 造の片持梁であり、普通鉄筋 (4-D10) は目地部位置でカットされている。梁断面寸法は幅 (b) 150mm, せい (D) 300mm とし、PC 鋼材には直径 15.2mm の PC より線を用いた。表 1 に試験体概要を示す。表 1 に示したとおり、試験体は実験要因を PC 鋼材の緊張応力 (規格降伏値の 30%, 60%), 鋼材係数  $q (=PC 鋼材の規格降伏荷重 / (b \cdot D \cdot \sigma_B) = 0.125, 0.25)$ , および断面内における PC 鋼材の位置 (上下 2 段, 中央 1 段, 3 段) とした 8 体である。

表 2 にコンクリート調査表, 表 3 にコンクリート材料試験結果, 表 4 に鋼材の材料試験結果を示す。

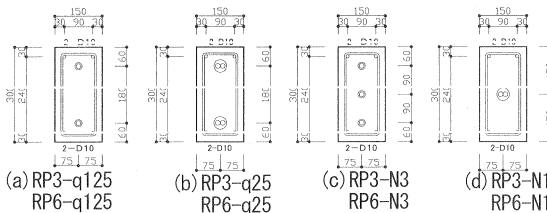


図 1 梁断面

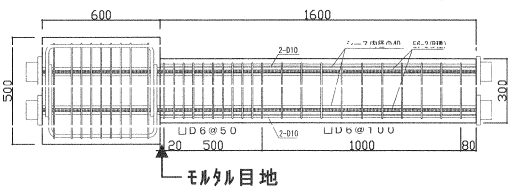


図 2 配筋詳細 (例: RP6-q25, RP3-q25)

表 1 試験体概要

試験体	$P/P_{ym}$	$N$	1 段当り PC 鋼材	$q$	$\sigma_P/\sigma_B$	$d_p/D$
RP3-q125	0.3	2	1 本	0.123	0.074	0.8
RP6-q125	0.6		$\phi 15.2$		0.148	
RP3-q25	0.3		2 本	0.247	0.148	
RP6-q25	0.6		$\phi 15.2$		0.296	
RP3-N1	0.3	1	2 本	0.247	0.074	0.5
RP6-N1	0.6		$\phi 15.2$		0.148	
RP3-N3	0.3	3	1 本	0.123	0.111	0.8
RP6-N3	0.6		$\phi 15.2$		0.222	

表 2 コンクリート調査表

A (%)	W/C (%)	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	G	S
4.5	42	175	417	875	817

記号 A: 空気, W: 水, C: セメント量, S: 細骨材量, G: 粗骨材

表 3 コンクリート材料試験結果

試験体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
RP3-q125	52.3	3.07	3.64
RP6-q125	51.9	2.95	3.83
RP3-q25	49.3	3.12	3.66
RP6-q25	48.3	2.93	3.72
RP3-N1	47.7	3.09	3.14
RP6-N1	51.6	3.01	3.32
RP3-N3	50.9	2.93	3.68
RP6-N3	51.7	2.99	3.88

【共通因子】  $\sigma_P = 40\text{N/mm}^2$ , 幅  $b = 150\text{mm}$ , 全せい  $D = 300\text{mm}$

せん断スパン  $a = 1200\text{mm}$ ,  $P_{ym} = 222\text{kN/本}$ ,  $p_w = 0.85\%$

【記号】  $P$ : 緊張力,  $P_{ym}$ : PC 鋼材規格降伏荷重

$N$ : PC 鋼材の段数,  $q$ : 鋼材係数  $= P_{ym} / (b \cdot D \cdot \sigma_B)$

$\sigma_P$ : 平均プレストレス  $= P / (b \cdot D)$ ,  $\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度

$d_p$ : 圧縮縁から引張側 PC 鋼材までの距離

$p_w$ : 曲げ拘束筋=一組の肋筋の断面積 / (梁幅・肋筋間隔)

**載荷方法** 図3に試験体載荷装置を示す。試験体はスタブと鉄骨をPC鋼棒によって緊結し、載荷はスタブのフェイスから1200mm離れた梁先端に設置した200kNの串型ジャッキを用いて正負繰り返し加力を行った。載荷ルールは、初期ひび割れ発生荷重で正負1回繰り返し、1/500、1/200、1/100、1/75、1/50、1/30の部材角で正負3回繰り返し返した後、1/20で正負1回繰り返し返した。

### 3 実験結果

#### 3.1 最終破壊状況

図4(a)~(d)は最終破壊状況を示したものの一例である。いずれの試験体もモル目地部とスタブ、プレキャスト梁部の境界が肌別れする形で曲げひび割れが生じ、その後は、このひび割れの開口とコンクリートの圧壊が進行した。

最終破壊状況を各試験体シリーズ間で比較すると以下ようになる。1)規格降伏荷重の60%で緊張したRP6シリーズの試験体は、30%で緊張したRP3シリーズの試験体に比べ、梁端部付近の圧壊が顕著であった。2)鋼材係数を0.25に設定したq25シリーズの試験体は、鋼材係数を0.125に設定したq125シリーズの試験体に比べ梁端部付近の圧壊が顕著に見られた。ひび割れ領域については両シリーズの間に顕著な違いは見られなかったが、q25シリーズの試験体はq125シリーズの試験体に比べひび割れ本数が多かった。3)鋼材係数の小さいq125シリーズの試験体と断面中央にPCより線が配置されているN1シリーズの試験体は梁端部付近の圧壊が小さかった。

#### 3.2 荷重—部材角関係

図5(a)~(d)は各試験体の梁せん断力と部材角の関係を示したものである。図5より以下のことが指摘できる。1)いずれの試験体も原点復帰傾向が強くエネルギー消費能力の乏しいS字型の履歴性状を示している。2)規格降伏荷重の60%で緊張したRP6シリーズの試験体は部材角の3%付近で最大荷重を迎えているのに対して、規格降伏荷重の30%で緊張したRP3シリーズは最大荷重を迎えるのが遅く、部材角の5%付近でも荷重が増加していた。これはRP3シリーズ試験体がRP6シリーズ試験体に比べ、PC鋼材の初期ひずみが小さいため曲率が増加してもPC鋼材張力が小さな値に留まっていたことに起因していると考えられる。

表4 鋼材の材料試験結果

	鉄筋		PCより線
	D6	D10	φ15.2
降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	376	373	1750
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	560	508	1900
ヤング係数 (×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )	2.61	1.88	1.95
伸び (%)	29.7	26.5	7.10

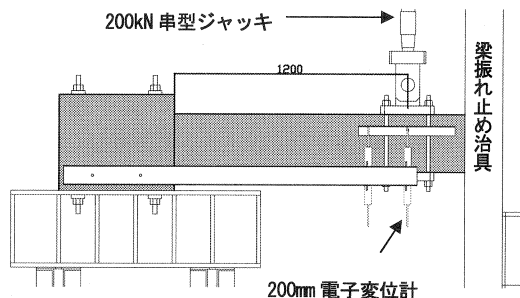


図3 載荷装置

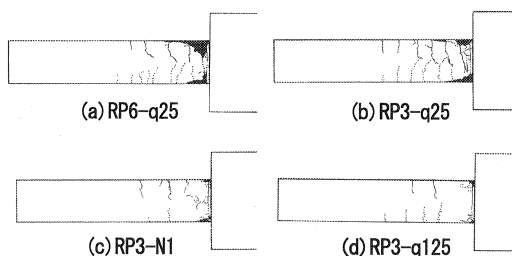


図4 最終破壊状況

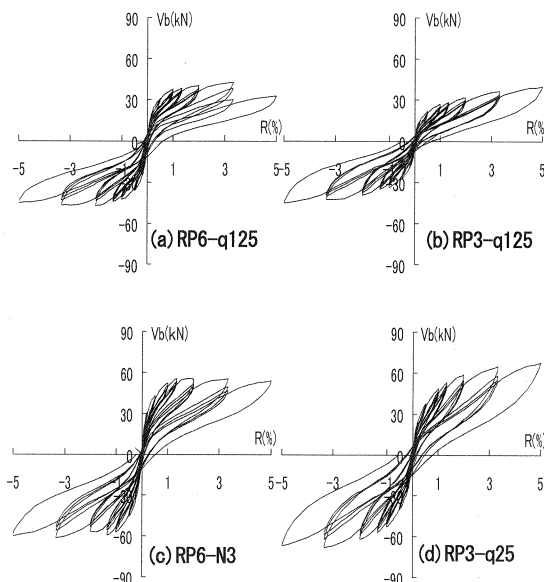


図5 梁のせん断力と部材角の関係

3.3 最大荷重

表5は曲げ終局強度の計算値 $cV_w$ 、最大荷重 $eV_u$ の一覧を示したものである。曲げ終局強度は(1)式によった。

$$cV_w = M_u / a \text{ ----- (1)}$$

ここに、 $a$ =せん断スパン、 $M_u$ =終局モーメント、コンクリートの縁歪を0.3%に設定し、 $e$ 関数法によって求めた。

表5より以下のことが指摘できる。

1)規格降伏荷重の60%で緊張した試験体(RP6)の実験値/計算値は0.949~1.030の範囲に収まっており、計算精度は比較的高い。2)規格降伏荷重の30%で緊張した試験体(RP3)の実験値/計算値は0.860~0.969と計算値が実験値を若干大きめに評価している。

3.4 曲げ降伏点

表6は降伏部材角の実験値 $cR_y$ と式(2)、(3)式による計算値 $cR_y$ 、および $eR_y/cR_y$ の一覧を示したものである。なお、降伏部材角の実験値は文献2)に倣い、最大荷重の90%に達した時点での部材角 $R_{y1}$ とスルトカーブの勾配が初期剛性の5%以下に低下した時点での部材角 $R_{y2}$ のうち、いずれか小さい方の値で評価した。

$$cR_y = 0.9 \cdot M_u / (\alpha_y \cdot K_e) \text{ ----- (2)}$$

$$\alpha_y = [0.043 \cdot (1 + a/D) + 1.64 \{ \eta_r \cdot p_t + \eta_p \cdot p_g \cdot (\sigma_{py} / \sigma_y) \cdot (d_g / D) \}] \cdot (d / D)^2 \text{ ----- (3)^1)}$$

ここに、 $M_u$ : 終局モーメント(3.3節による)、 $K_e$ : 初期剛性、 $\eta_p$ : PC鋼材に関するヤク係数比、 $D$ : 梁せい(=300mm)、 $a$ : せん断スパン(=1200mm)、 $\sigma_{py}$ =PC鋼材の降伏応力、 $P_g$ =PC鋼材の総断面積/( $b \cdot D$ )、 $d_g$ : 圧縮縁からPC鋼材の重心までの距離、 $d$ : 引張鉄筋に関する有効せい

図6は最大荷重の90%の点(図中、△)とスルトカーブの勾配が初期剛性の5%と以下となる点(図中、○)を示したものである。表6と図6より以下のことが指摘できる。

1)PC鋼材を規格降伏荷重の60%で緊張したRP6シリーズ試験体は、最大荷重の9割で定義した点とスルトカーブの勾配が初期剛性の5%以下となった点がほぼ一致している。これに対して、30%で緊張したRP3シリーズ試験体では前者が後者よりかなり大きい値となっている。2)実験値/計算値の平均値は1.41であり、(2)式、(3)式による計算値は全般的に実験値を過小評価している。

3.5 終局限界点

表7は終局限界部材角の実験値、計算値、および実験値/計算値の一覧を示したものである。終局限界部材角の実験値は文献3)に倣い、荷重が上位包絡線上で最大荷重の90%に低下したときの部材角として評価した。終局限界部材角の計算値は(4)式<sup>3)</sup>を用いて算定した。

$$R_{ou} = [5 - 7(1 - 2\eta_o) \cdot \eta_g - 12.5\eta_o] / 100 + (0.5 + 15 \cdot q_c) \cdot p_w \text{ ----- (4)}$$

ここに、 $\eta_o = N / (b \cdot D \cdot \sigma_B)$ 、 $\eta_g = P_e / (b \cdot D \cdot \sigma_B)$ 、 $P_w = a_w / (b \cdot S)$ 、 $q_c = a_c \cdot \sigma_y / (b \cdot D \cdot \sigma_B)$ 、 $a_w S$ —一組の肋筋の断面積、同間隔、 $a_o \sigma_y$ : 圧縮筋の断面積、同降伏応力、 $b, D$ : 部材幅、部材せい、 $\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度

表7より各試験体の終局限界部材角は(4)式によって安全側に評価できることが分かる。

表5 最大荷重の実験値と計算値の比較

試験体名	最大荷重 $V_w$ (kN)			計算値 $cV_w$ (kN)	$eV_u/cV_u$
	正	負	平均		
RP3-q125	39.72	45.31	42.52	46.57	0.913
RP6-q125	42.86	47.17	45.02	46.47	0.969
RP3-q25	67.37	68.05	67.71	69.88	0.969
RP6-q25	74.04	75.51	74.48	72.60	1.030
RP3-N1	30.40	32.36	31.48	36.60	0.860
RP6-N1	38.05	39.13	38.59	40.66	0.949
RP3-N3	47.37	55.31	55.31	57.44	0.963
RP6-N3	55.31	61.49	58.40	60.07	0.972

表6 降伏部材角の実験値と計算値の比較

試験体名	実験値 $R_y$ (%)= $\min(R_{y1}, R_{y2})$			計算値 $cR_y$ (%)	$eR_y/cR_y$
	正	負	平均		
RP6-q125	1.00	0.94	0.97	0.65	1.48
RP3-q125	1.00	0.99	1.00	0.67	1.48
RP6-q25	1.00	1.00	1.00	0.72	1.39
RP3-q25	1.34	1.33	1.34	0.71	1.88
RP6-N3	0.80	0.87	0.84	0.69	1.21
RP3-N3	1.00	1.00	1.00	0.68	1.48
RP6-N1	0.71	0.88	0.80	0.59	1.35
RP3-N1	0.50	0.50	0.50	0.52	0.96

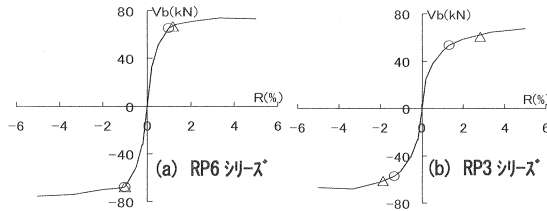


図6 降伏点の定義

表7 終局限界部材角の実験値と計算値の比較

試験体	実験値(%)	計算値(%)	実計
RP6-q125	>5.00	4.751	>1.052
RP3-q125	>5.00	5.086	>0.983
RP6-q25	>5.00	3.996	>1.251
RP3-q25	>5.00	4.700	>1.064
RP6-N3	>5.00	5.079	>0.984
RP3-N3	>5.00	5.255	>0.951
RP6-N1	>5.00	4.317	>1.158
RP3-N1	>5.00	4.913	>1.018

### 3.6 残留変形率

図7に残留変形率(=残留部材角/除荷開始時部材角)と除荷開始時部材角の関係を示す。図7より、以下のことが指摘できる。1)全体的に残留変形率は極めて小さく、最大でも8%程度である。2)いずれの試験体も残留変形率はピーク部材角1%付近で最小となっている。これは部材角1%以下の範囲では履歴ループ形状のS字傾向が小さかったことに起因している。3)全体的な傾向としてPC鋼材の配置が2段(図中、○、+、□、\*）、3段(図中、△、×）、1段(図中、◇、□)の順で残留が大きい。応力中心間距離はPC鋼材の配置が2段の試験体が最大、中央1段の試験体が最小であることから残留変形率は応力中心間距離に依存していると推察できる。

### 3.7 等価粘性減衰定数

図8は等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  と部材角の関係を示したものである。図8より以下のことが指摘できる。

- 1)いずれの試験体も  $R$  の上昇に伴い  $h_{eq}$  も増加する傾向を示しているが、その値は極めて小さく、最大でも7%程度である。
- 2)PC鋼材を一段配置した試験体(図中、□、◇)の等価粘性減衰定数は全般的に他の試験体より小さい。
- 3)緊張応力、鋼材係数が等価粘性減衰定数に及ぼす明瞭な影響は見られない。

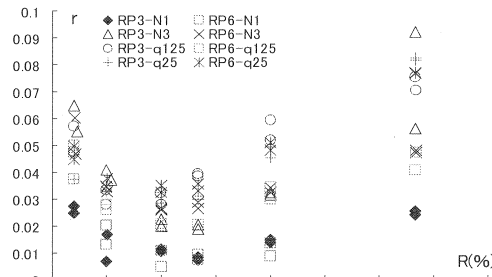


図7 残留変形率-部材角関係

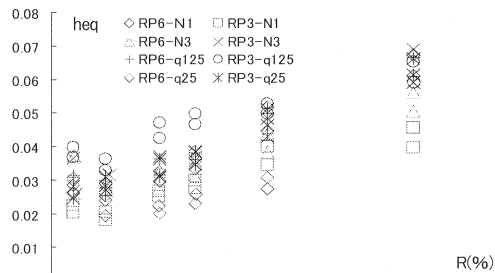


図8 等価粘性減衰定数-部材角関係

## 4. まとめ

1)いずれの試験体も規格降伏荷重の80%程度で緊張した通常のPC部材同様、エネルギー消費能力の乏しいS字型の履歴性状を示した。これに伴い、残留変形率、等価粘性減衰定数とも極めて小さい値を示した。

2) (1)式は、規格降伏荷重の60%で緊張した試験体の最大荷重は比較的精度良く推定できたが、30%で緊張した試験体については実験値を若干大きめに評価した。

3)通常の緊張応力部材を対象とした(2)式、(3)式による降伏部材角の計算値は全般的に実験値を過小評価した。最大荷重時の部材角は緊張応力の小さい試験体ほど大きい値を示した。終局限界部材角は(4)式によって安全側に評価できた。

**謝辞** 本研究は(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究である。研究に際して貴重なご助言を賜りました同協会の関係者各位に深い感謝の意を表します。

**参考文献** 1)浜原ほか：プレストレストコンクリート曲げ部材の復元力特性に関する研究、建築学会構造系論文報告集、No.383、pp.63-69、pp.63-69、1990、4 2)内田ほか：接合部の影響を考慮したPC梁の復元力特性、建築学会構造系論文報告集、No.575、pp.105-112、2004、1 3)日本建築学会：プレストレスト(鉄筋)コンクリート構造部材の設計法-現状と将来-、pp.147-154、2000、4