

論文

[2133] 高強度コンクリートを用いたアンボンド PC はりの曲げ耐荷特性

小林和夫\*1 · 政氏信之\*2 · 仁枝 保\*3

1. はじめに

最近PC施工の省力化や合理化などの面からアンボンドPC構造が注目されているが、その力学的特性はコンクリート強度やPC鋼材比など種々の要因により影響される。本研究は、特に、高強度コンクリートを用いたアンボンドPCはりの曲げ耐荷特性について検討したものである。

ここでは、PC鋼材量と横拘束鉄筋量を要因とし、 $f_{ck} = 700 \text{kgf/cm}^2$ の高強度コンクリートを用いたアンボンドPC単純はりに対して曲げ載荷試験を実施し、最大耐力や終局域のPC鋼材応力・変形特性などの基本的耐荷特性を  $f_{ck} = 400 \text{kgf/cm}^2$  のものと比較するとともに、耐荷特性に与えるコンクリート強度の影響をボンドPCはりの場合と対比検討することとする。

2. 試験概要

2. 1 供試体の種類

供試体は、図-1、図-2に示す幅 x 高さ x 全長 = 15 x 20 x 200 cm の長方形断面 (PC鋼棒有効高さ  $d_p = 14 \text{ cm}$ ) の単純はりとし、以下のものを主要因に選定して静的曲げ載荷試験を実施した。

(a) PC鋼材断面積・付着の有無 : PC鋼棒 (神鋼鋼線工業社製のC種1号-φ13, φ17) とスパイラルシースとの間隙にセメントペーストグラウトを注入したボンドタイプ (Bタイプ) および同様のPC鋼棒をグリース充填プラスチックシースで被覆したアンボンドタイプ (Uタイプ) の2タイプとした。

なお、グラウトは注入用高性能減水剤ボゾリスGF-700を用いて  $W/C = 35\%$  (早強ポルトランドセメント) とした。はりの試験時 (プレストレス導入直後にグラウトし約1週間後に載荷試験) のグラウト用ペーストの圧縮強度は平均  $405 \text{kg/cm}^2$  であった。

(b) コンクリート圧縮強度 : 目標強度を  $f_{ck} = 400, 700 \text{kgf/cm}^2$  の2種類とした。後者には高性

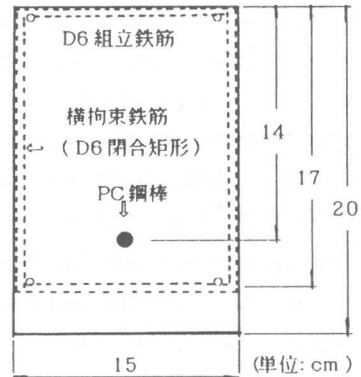


図-1 PCはり断面寸法

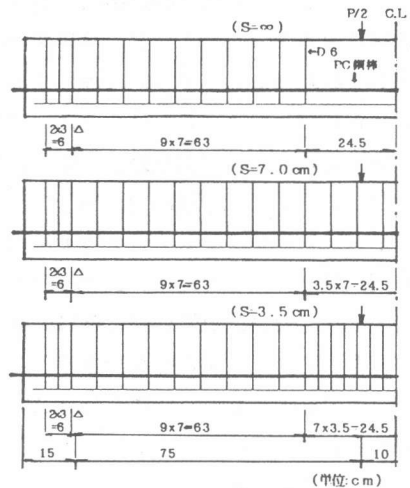


図-2 PCはり配筋図

\*1 大阪工業大学教授 工学部土木工学科, 工博 (正会員)

\*2 大阪工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻

\*3 大阪工業大学講師 工学部土木工学科 (正会員)

能減水剤レオビルドNL-4000 (NMB社製)を使用した。

PCはりの載荷試験時の実圧縮強度は、平均値でそれぞれ425, 690 kgf/cm<sup>2</sup>であった。

(c) 横拘束鉄筋の配置間隔：

図-2のように、横拘束鉄筋(端部に135°フック付き閉合型矩形スターラップ)の配置間隔sとして、s=∞, 7.0, 3.5 cmの3種類を選定し、スパン中央領域の49cm区間に配置した。これらは、横拘束鉄筋比(1組の横拘束鉄筋の体積と横拘束鉄筋間隔に対応するコアコンクリート体積との比)でそれぞれρ=0, 1.04, 2.07%に相当する。

本供試体では断面寸法が小さいので、横拘束鉄筋に対するかぶりコンクリートの存在とその寸法効果の影響を除去するため、図-1に示すように断面圧縮縁および両側面に対するかぶり厚が0となるように横拘束鉄筋を配置した。

いずれのPCはりにおいても、プレストレス導入時のPC鋼材緊張応力は0.6 f<sub>PV</sub> (f<sub>PV</sub>: PC鋼材の実降伏点強度)とした。それによるコンクリート断面下縁の導入プレストレスの値はφ=13, φ=17 PC鋼棒使用の場合でそれぞれ約80, 115 kgf/cm<sup>2</sup>である。

なお、アンボンドPCはりでは、プレストレス導入後に直ちに載荷試験を実施したため、有効プレストレスは緊張応力に等しい。一方、ボンドタイプでもプレストレス導入後約1週間で載荷試験を実施したため、この場合にも有効プレストレス力は近似的にPC鋼材の導入時緊張力に等しいとみなすことができる。

以上の要因をもとに作成したPCはり供試体の種類を表-1に示す。

## 2.2 載荷試験

試験は、図-2に示すようにいずれもスパン170cmの単純はりとし、せん断スパン長と曲げスパン長をそれぞれ75cm, 20cmとした対称2点荷重による単調漸増載荷とし、スパン中央と両支点位置の鉛直変位、スパン中央部の曲率(250mmπ型ゲージによる)、上下縁コンクリートひずみ、PC鋼棒応力(ボンドタイプ: スパン中央部のPC鋼棒に貼布した2枚の検長3mm防水ストレインゲージによるひずみ測定値から鋼棒の応力-ひずみ関係を用いて算出、アンボンドタイプ: 図-3のようにはり両端部に設置したロードセルで直接的に測定)を計測した。

表-1 PCはり供試体

はり記号	PC鋼材		コンクリート目標強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	横拘束鉄筋間隔 S (cm)	
	A <sub>P</sub>	付着			
G 1	φ13 (*1)	U	400	∞	
G 2			700		
G 3			400	7.0	
G 4			700		
G 5		400	∞		
G 6		B		700	
G 7				700	7.0
G 8	φ17 (*2)	U	400	∞	
G 9			700		
G 10			400	7.0	
G 11			700		
G 12			B	400	3.5
G 13				700	
G 14		400		∞	
G 15		700			
G 16		700	7.0		

\*1) f<sub>PV</sub>=142.2kg/mm<sup>2</sup>

f<sub>PU</sub>=149.6kg/mm<sup>2</sup>

\*2) f<sub>PV</sub>=117.2kg/mm<sup>2</sup>

f<sub>PU</sub>=128.6kg/mm<sup>2</sup>

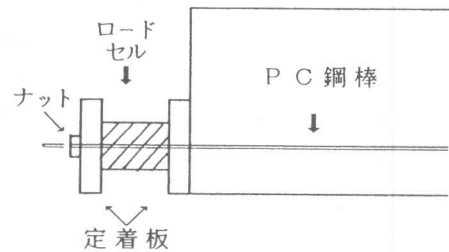


図-3 アンボンドタイプ

### 3. 結果と考察

#### 3. 1 結果

曲げひびわれ発生荷重, 最大荷重とその時のPC鋼材応力の実験値および計算値を一括して表-2に示す。

荷重-PC鋼材応力, たわみ関係の数例を図-7~10, 図-11~15に示す。

表-2, 図-7~9, 図-14~15中の計算値はコンクリート, PC鋼材, D6組立鉄筋の応力-ひずみ関係を図-4のように仮定し算定した。

コンクリートの応力-ひずみ関係については, 無拘束の場合には $f_c$ 。以降の低下勾配としてParkら[1]の提案による係数 $Z$ 値を用いたが, 横拘束を与えた場合には精度上著者の一人らが提案している文献[2]のモデル式を用いた。

なお, ここではこれらの提案式を $f_{ck} = 700 \text{ kgf/cm}^2$ の高強度コンクリートにも準用することとした。一方, PC鋼材にはBlakeleyら[3]のモデル式を用いた。計算ではPC鋼材総ひずみ $\epsilon_P$ は変形適合係数 $\beta$ を用いて次式で表し, ボンドでは $\beta = 1.0$ , アンボンドでは文献[4]の結果と供試体の荷重点位置を考慮し $\beta = 0.25$ と仮定した(図-5)。

$$\epsilon_P = \epsilon_{P0} + \beta (\epsilon_{P1} + \epsilon_{P2})$$

$$\epsilon_{P2} = \epsilon_c (d_p - x) / x$$

$\epsilon_{P0}$ : PC鋼材緊張ひずみ

$\epsilon_{P1}$ : PC鋼材位置のプレストレスによるコンクリートひずみ

表-2 載荷試験結果

供試体 記号	曲げひびわれ発生荷重		最大荷重時鋼材応力			最大荷重		
	実験値 $P_{cr}$ (t)	計算値 $P_{cr}$ (t)	応力		計算値 $\Delta\sigma_{pu}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	実験値 $P_u$ (t)	計算値 $P_u$ (t)	$\frac{P_u}{P_{cr}}$
			実験値 $\sigma_{pu}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	実験値 $\Delta\sigma_{pu}$ (kg/cm <sup>2</sup> )				
G 1	3.75	3.83	11820	3230	3940	6.57	6.44	1.02
G 2	4.30	4.14	12790	3980	4150	7.55	6.95	1.09
G 3	3.00	3.80	12500	3980	5170	6.65	7.13	0.93
G 4	4.80	4.16	12600	3730	5350	8.34	7.60	1.10
G 5	3.75	3.87	12910	4340	5660	8.27	7.20	1.15
G 6	4.40	4.13	14080	5490	5550	8.70	7.48	1.16
G 7	4.90	4.11	14150	5640	5820	8.62	7.67	1.12
G 8	4.65	5.02	9660	2520	2510	8.69	7.95	1.09
G 9	5.50	5.31	10730	3370	3270	9.76	8.85	1.10
G 10	4.60	4.99	10300	3220	3810	8.98	8.98	1.00
G 11	5.40	5.14	11140	4100	4610	9.73	9.95	0.98
G 12	5.10	4.97	11900	4900	4730	10.04	9.50	1.06
G 13	5.25	5.18	11650	4520	4590	10.64	10.17	1.05
G 14	4.25	4.92	11630	4460	4200	9.96	9.04	1.10
G 15	5.55	5.21	11800	4350	4880	10.50	10.11	1.04
G 16	5.80	5.24	11850	4820	4740	10.90	10.16	1.07

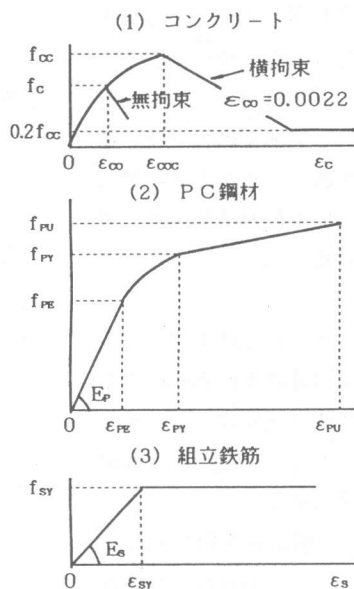


図-4 応力-ひずみ関係

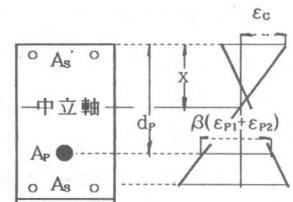


図-5 断面のひずみ分布

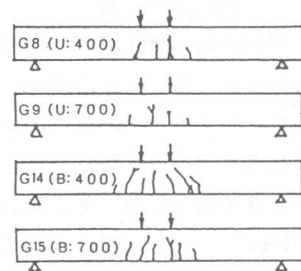


図-6 ひびわれパターン

### 3. 2 考察

#### (1) 耐荷力

曲げひびわれの分散性状に関しては、PC鋼材付着の有無による差はみられたが、コンクリート強度の影響はほとんど認められない(図-6)。一方、曲げ破壊性状については横拘束鉄筋の影響が最も大きく、PC鋼材付着の有無やコンクリート強度に関係なく、その配置間隔を密にするほどコンクリートの圧壊が緩やかに生じ、終局時に靱性に富んだ破壊性状を呈した。

表-2に示すように、曲げひびわれ耐力については、プレストレスレベルを同一とした場合には高強度コンクリートの使用により増大するが、PC鋼材付着や横拘束鉄筋の影響はみられない。

最大曲げ耐力に関しては、横拘束鉄筋無配置の場合、ボンドタイプでは $f_{ck}' = 700 \text{ kgf/cm}^2$ に高強度化しても $400 \text{ kgf/cm}^2$ のものより5%程度しか増大しないのに対し、アンボンドタイプでは15%程度増大する。このように、コンクリート強度が最大曲げ耐力に及ぼす影響はボンドタイプに比べアンボンドタイプの方がかなり顕著となる。一方、アンボンドタイプとボンドタイプを比較すると、横拘束鉄筋無配置の場合、前者は後者比べて最大曲げ耐力は10~20%低下する。しかし、アンボンドタイプでは横拘束鉄筋の配置による耐力の増大がボンドタイプより著しく、例えば $s=3.5$  cm間隔( $\rho=2.07\%$ )で配置すると $f_{ck}' = 400, 700 \text{ kgf/cm}^2$ の場合それぞれ最大耐力は $\rho=0\%$ に比べ15%、10%程度増大し、その結果 $\rho=0\%$ のボンドタイプと同等の耐力が得られる。なお、このように横拘束鉄筋の配置にともなうアンボンド部材の最大曲げ耐力の増大はコンクリート強度の小さい場合ほど著しいようである。

前記方法で $\beta=1.0$ として求めたボンドタイプの最大曲げ耐力の計算値は実験値とかなりよく一致している。一方、本供試体のアンボンドタイプでは、 $\beta=0.25$ と仮定した近似計算により、コンクリートを高強度化すること、また横拘束鉄筋配置間隔を密にすることによる最大耐力の増大傾向がよく説明でき、最大耐力そのものの値も実験値とかなりよく一致している。

#### (2) PC鋼材応力

横拘束鉄筋無配置の場合、図-7, 8に示すアンボンドタイプでは、曲げひびわれ発生以後の比較的低荷重レベルでの $P-\sigma_p$  曲線にはコンクリート強度によって明瞭な差は認められない。しかし、 $f_{ck}' = 700 \text{ kgf/cm}^2$ のような高強度コンクリートを適用すると $f_{ck}' = 400 \text{ kgf/cm}^2$ の普通強度のものに比べて最大荷重時に到達しうるPC鋼材応力が著しく増大することが明瞭にうかがえる。これに対して、ボンドタイプの場合には、図-9

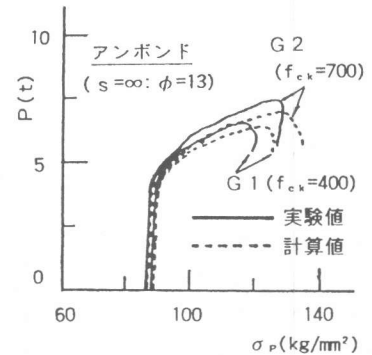


図-7 P- $\sigma_p$

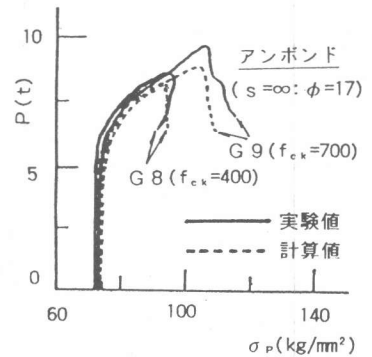


図-8 P- $\sigma_p$

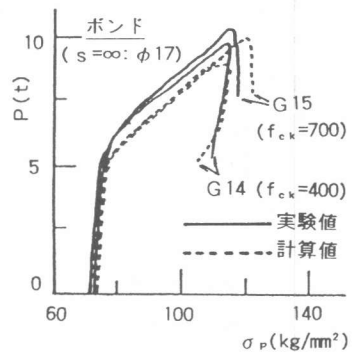


図-9 P- $\sigma_p$

に示すように最大荷重に至るまでの荷重レベルにおける  $P-\sigma_p$  曲線の形状ならびに最大荷重時のPC鋼材応力に及ぼすコンクリート強度の影響は非常に小さい。

さらに、図-10に示すように、横拘束鉄筋無配置の場合、曲げひびわれ発生以後の荷重レベルではアンボンドタイプのPC鋼材応力はボンドタイプに比べて小さく、最大荷重時には両者にかなり差が認められる。しかしアンボンドタイプの場合、比較的低荷重レベルでの  $P-\sigma_p$  曲線には横拘束鉄筋によって明瞭な差はみられないが、配置間隔を密にし横拘束を大にすると最大荷重時に到達しうる鋼材応力が增大し、終局域においてはボンドタイプ ( $\rho=0\%$ ) との差が非常に小さくなることが認められる。

本実験結果では、アンボンドPCはりにおいても、PC鋼材係数 ( $q = p f_{py} / f_c$ ,  $p$ : PC鋼材比,  $f_{py}$ : PC鋼材降伏点強度,  $f_c$ : コンクリート圧縮強度) が  $q = 0.3$  ( $\phi = 17$ ,  $f_{ck}' = 400 \text{ kgf/cm}^2$  が該当) 以下の場合、PC鋼材の有効プレストレス応力が  $0.6 f_{py}$  程度でも  $\rho = 2\%$  の横拘束鉄筋の配置により部材の終局状態にはPC鋼材の降伏点強度にほぼ等しい応力にまで到達し、前記のように最大耐力もかなり増大する。

一方、図-7~9に示すように、PC鋼材に対する変形適合係数  $\beta$  の値をボンドタイプでは  $\beta = 1.0$ 、アンボンドタイプでは本供試体の場合近似的に  $\beta = 0.25$  と仮定することによって、終局荷重域までの  $P-\sigma_p$  曲線を比較的良好に推定できる。また、表-2のように、最大荷重時のPC鋼材応力実験値に及ぼす諸要因の影響もこのような方法でかなりよく推定できる。

### (3) 荷重-たわみ関係

横拘束鉄筋無配置の基本部材について、コンクリート強度が  $P-\delta$  関係に及ぼす影響を検討する。図-11、図-12のように、PC鋼材付着の有無に関係なく、最大耐力時までの荷重域では、 $f_{ck}' = 700 \text{ kgf/cm}^2$  の高強度コンクリート部材は  $f_{ck}' = 400 \text{ kgf/cm}^2$  の部材に比べやや高い部材剛性を示す。最大耐力以降のフォーリングブランチ領域での  $P-\delta$  曲線の低下勾配に関しては、 $\phi = 13$  の低PC鋼材比の場合にはコンクリート強度の影響はほとんどみられない。しかし、 $\phi = 17$  の場合には  $f_{ck}' = 700 \text{ kgf/cm}^2$  の高強度コンクリート部材では  $f_{ck}' = 400 \text{ kgf/cm}^2$  の部材に比べて  $P-\delta$  曲線の低下勾配がむしろ緩やかとなる。したがって、フォーリング

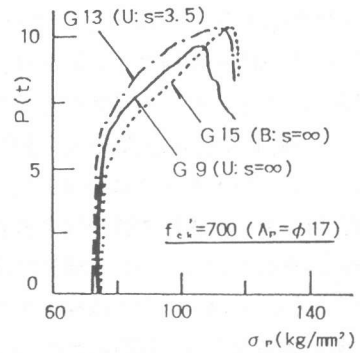


図-10  $P-\sigma_p$

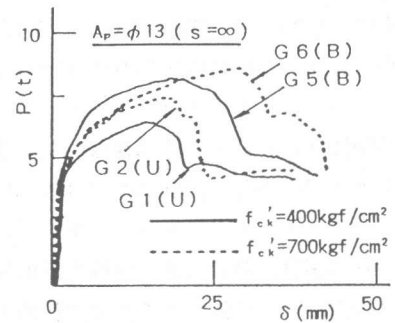


図-11  $P-\delta$

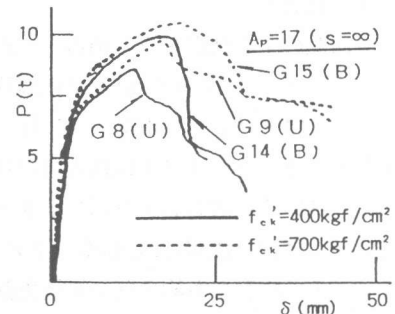


図-12  $P-\delta$

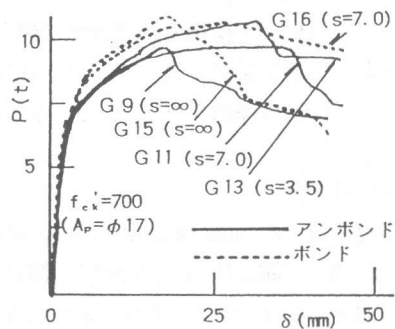


図-13  $P-\delta$

ブランチ領域での $P-\delta$ 曲線の低下勾配から評価した場合の部材靱性に関しては、 $f_{ck}'=400\text{ kgf/cm}^2$ と $f_{ck}'=700\text{ kgf/cm}^2$ の部材間では顕著な差はないが、PC鋼材量が多くなるとむしろ後者の方が大きな靱性を示す。

次に、横拘束鉄筋の配置効果に関しては、図-13によると、アンボンドタイプの場合、無拘束部材に対する最大耐力時までの荷重域では横拘束鉄筋による $P-\delta$ 曲線の差はみられない。しかし、横拘束鉄筋配置間隔を $s=3.5\text{ cm}$  ( $\rho=2.07\%$ )と横拘束をかなり大きくすると最大耐力が増大すると同時にきわめて靱性の優れた耐荷性状を示す。また、 $s=7\text{ cm}$  ( $\rho=1.04\%$ )と横拘束が比較的小さい場合には、最大耐力の増加はきわめて小さいが、部材靱性そのものは著しく改善される。

一方、ボンドタイプでも、 $s=7.0\text{ cm}$ では最大耐力の増加はほとんど期待できないが、部材靱性はアンボンドタイプの場合と同様にやはり大幅に改善される。

図-14, 15のように、全般的にコンクリート強度、PC鋼材付着の有無、横拘束鉄筋量による $P-\delta$ 曲線の相違は、先に述べた方法で比較的よく推定できる。

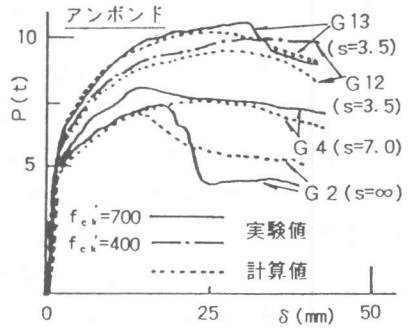


図-14 P-δ

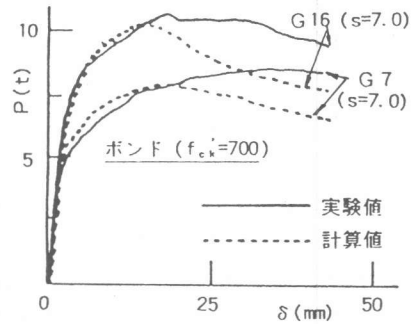


図-15 P-δ

#### 4. 結論

本研究の主な結果をまとめると、以下のようである。

- (1)  $f_{ck}'=700\text{ kgf/cm}^2$ の高強度コンクリートの適用によるPCはり部材の最大曲げ耐力の増大は、ボンドタイプに比べてアンボンドタイプの方がかなり顕著である。
- (2) ボンドタイプでは最大荷重時PC鋼材応力に及ぼすコンクリート強度の影響は非常に小さいのに対し、アンボンドタイプでは高強度コンクリートの使用によりかなり増大する。
- (3) 鋼材係数が0.3程度以下のアンボンド部材では、PC鋼材の有効プレストレスが0.6 $f_{pv}$ 程度でも約2%の横拘束鉄筋配置により、終局時鋼材応力はほぼ降伏強度に到達する。
- (4) 高強度コンクリートの使用により剛性はやや増大し、無拘束部材では最大耐力以降の $P-\delta$ 曲線の低下勾配は普通強度のものより緩やかとなる傾向がある。アンボンドの場合、1%程度の横拘束鉄筋比では最大耐力の増加はわずかであるが、靱性は著しく改善される。
- (5) 本供試体では、 $f_{ck}'=400, 700\text{ kgf/cm}^2$ のいずれもアンボンド部材ではPC鋼材変形適合係数を0.25とすることにより最大耐力以降も含めた耐荷特性をよく推定できた。

#### [参考文献]

- 1] Park, R. and Paulay, T.: Reinforced Concrete Structures, A Wiley-Inter. Pub., 1975
- 2] 藤井学・小林和夫・宮川豊章・井上晋・松本利彦: 横拘束コンクリートの応力-ひずみ関係の適用に関する検討, セメント技術年報, 42巻, 1988
- 3] Blakeley, Roger W.G. and Park, R.: Prestressed Concrete Sections with Cyclic Flexure, Jour. of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No. ST-8, Aug. 1973
- 4] 六車 照・渡辺史夫・西山峰広: アンボンドPC部材の曲げ終局耐力に関する研究, プレストレストコンクリート, Vol. 26, No. 1, Jan. 1984