

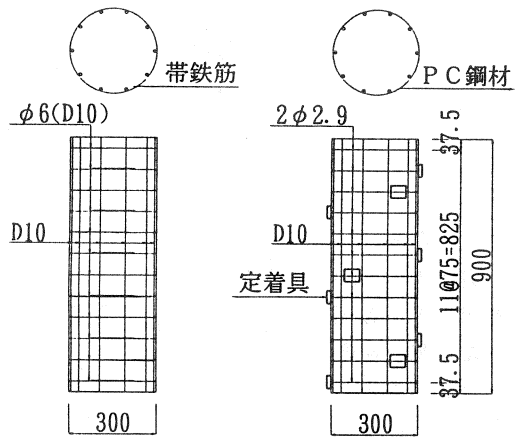
(13) PC鋼材を帯鉄筋に用いた円柱供試体の鉛直載荷試験

(株)ピー・エス 開発技術部	正会員	鈴木 義晃
(株)ピー・エス 土木技術部	正会員	○森 拓也
(株)ピー・エス 土木技術部	正会員	張 建東
(株)ピー・エス 開発技術部	正会員	久保 欣也

1. はじめに

兵庫県南部地震以後、既設橋脚の補強が各地で精力的に施工されている。現在、RC橋脚の補強工法として、鋼板巻き立て工法やRC巻き立て工法が採用されているが、それぞれ維持管理や施工性などに問題がある。これに対し、高強度のPC鋼材を帯鉄筋として用いることにより大幅なじん性の改善が可能であれば、有効な補強工法となり得る。

帯鉄筋の拘束効果とコンクリートの応力-ひずみ関係については、多くの実験研究<sup>1)</sup>が報告されており、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」の準用に関する参考資料(案)<sup>2)</sup>(以下、「復旧仕様」と称す)でもその評価方法が示されている。しかしながら、PC鋼材を帯鉄筋に用いた場合の拘束効果に関してはほとんど研究されておらず、実用化のためにはこの点の解明が不可欠である。本研究は、高降伏点強度を持つPC鋼材を帯鉄筋に用いた場合、復旧仕様によるコンクリート応力-ひずみ曲線のモデル適用性の検証と、PC鋼材の横拘束効果によるじん性の増加を実験的に明らかにしようとしたものである。また、PC鋼材の初期引張応力度が横拘束効果に与える影響についても比較検討を行った。



B, C 供試体                      D~F 供試体

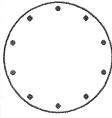
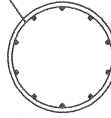
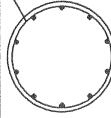
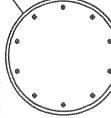
図-1 供試体配筋図

2. 実験概要

供試体は直径 30cm × 高さ 90cm の円柱形であり、表-1 に示す A~F の 6 種類とした。その配筋を図-1 に示す。供試体数は各タイプ 3 体ずつの計 18 体である。全供試体には鉄筋比約 1% の軸方向鉄筋を配置した。A 供試体には帯鉄筋がなく、B と C 供試体にはそれぞれ  $\phi 6$  と D10 の帯鉄筋を配置した。D~F 供試体は PC 鋼材 SWPR2N2  $\phi 2.9$  を帯鉄筋として供試体の外部に巻き付け、それぞれ初期引張応力度を変化させた。

本実験は、普通鉄筋と PC 鋼材の拘束効果の比較に着目し、全供試体の帯鉄筋間隔を同一とした。使用する最小 PC 鋼材  $2\phi 2.9$  を用い、実橋レベルの帯鉄筋比約 1% となるよう間隔を 75mm にした。供試体 E、F に実際に導入された引張応力度  $\sigma_{pe}$  は鋼材のひずみ計測により測定した。PC 鋼材は特殊金具により一段ずつ定着し、金具の影響を軽減するため定着位置を  $90^\circ$  ずつずらした。本実験では、早強ポルトランドセメントを使用し、その配合は表-2 に示す通りである。また、ミルシートによる鉄筋と PC 鋼材の力学的性質を表-3 に示す。PC 鋼材は鉄筋に比べ 5~6 倍の高い降伏点強度を有している。

表-1 供試体概要

供試体タイプ	A	B	C	D、E、F
断面		$\phi 6@75$ 	D10@75 	$2\phi 2.9@75$ 
コンクリート目標強度 $\sigma_{ck}$	270 kgf/cm <sup>2</sup>			
帯鉄筋	—	$\phi 6$	D10	$2\phi 2.9$
降伏強度 $\sigma_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	—	2400	3000	17500
体積比 $\rho_s$ (%)	0.0	0.50	1.27	0.23
換算体積比 <sup>(注1)</sup> (%)	0.0	0.40	1.27	1.37
供試体数	3	3	3	各3体

注1) 換算体積比は、鉄筋(SD295)との降伏点強度比を体積比に乗じたもの。

- ・ 供試体D: 初期引張応力度を導入しない
- ・ 供試体E: 初期引張応力度として、 $1/6 \sigma_{py}$ を導入
- ・ 供試体F: 初期引張応力度として、 $1/3 \sigma_{py}$ を導入

### 3. 載荷方法および計測項目

実験は、1000tf 圧縮試験機を用いて一軸圧縮載荷を行った。載荷速度は約 0.2mm/分を目標とした。鉛直荷重、軸方向変位、帯鉄筋のひずみおよびコンクリートの表面ひずみを計測した。供試体の軸方向ひずみは試験機の載荷板間の変位を4本の変位計によって計測し、それを供試体全高で除して求めた。

表-2 コンクリート配合表

粗骨材 最大寸 法(mm)	空気量 (%)	水セメ ント比 W/C(%)	細骨材 率 s/a(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> ) 水		
				セメント	細骨材	粗骨材
20	4.0	55.0	40.0	160	290	1128

表-3 鉄筋およびP C鋼材の力学的性質

		降伏強度 kgf/cm <sup>2</sup>	引張強度 kgf/cm <sup>2</sup>	伸び率 %	弾性係数 kgf/cm <sup>2</sup>
帯鉄筋	$\phi 6$ SR235	3420	4560	35.4	$2.10 \times 10^6$
	D10 SR295A	3780	5210	25.1	$2.10 \times 10^6$
P C鋼材 $2\phi 2.9$ SWPR2N		19930	21320	7.5	$1.95 \times 10^6$

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 破壊状況

各供試体の最終破壊状況を写真-1に示す。帯鉄筋のないA供試体では、最大応力以後、荷重が急激に低下し、非常に脆性的な破壊に至った。帯鉄筋を配置した供試体では、縦ひび割れが生じた後かぶり部分のコンクリートが剥落したが、その後の荷重はそれほど急速に低下することはない。P C鋼材を使用し初期引張応力度を導入したE、F供試体では、他の供試体に比べ、最大応力に至るまでの外観上の損傷は比較的

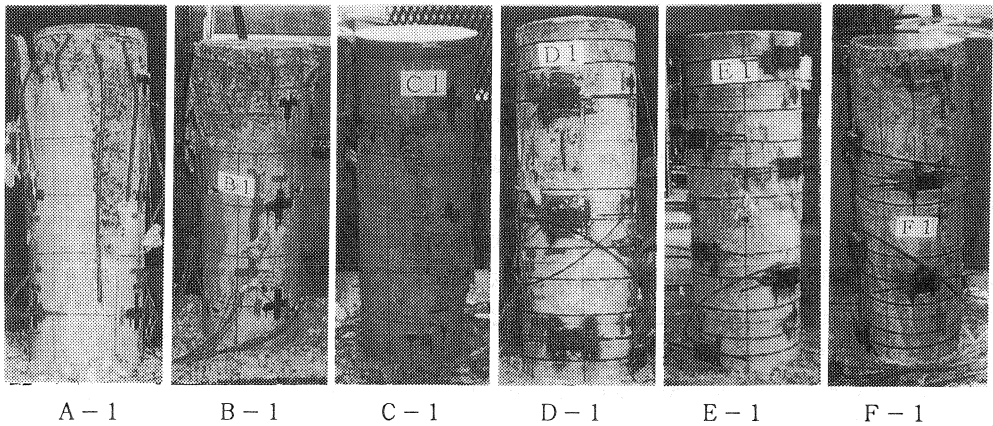


写真-1 最終破壊状況(シリーズ1)

少なく、ひび割れの進展がプレストレスによって拘束されているものと考えられる。D~F 供試体では比較的早期にP C鋼材が破断するものもあったが、破断は全て当実験用に設置した特殊定着具のP C鋼材屈曲部で生じており、実橋でこのような定着をしなければ早期のP C鋼材破断は生じないものと考えられる。

#### 4. 2 軸方向応力度-軸方向ひずみ

図-2に各シリーズごとの軸方向応力度-軸方向ひずみ曲線を示す。これより、各供試体の初期剛性においては明瞭な差異はみられなかった。なお、供試体A-1、C-2の初期剛性に若干の異常が見られたが、これは上部載荷板と供試体の接触面に局部的に生じた損傷の影響と推測される。

最大応力および最大応力時のひずみについては、A、B、C 供試体では帯鉄筋体積比が大きいほどその増加は大きい。また、P C鋼材を帯鉄筋としたD、E、F 供試体では導入引張応力度の大きいものほど最大応力も若干増加する傾向を示した。帯鉄筋にP C鋼材を用いたD~F 供試体は $\phi 6$ を用いたB 供試体と比較し、最大応力後の下降勾配は格段に緩やかになり、P C鋼材を使用することによって、じん性の向上が期待できることを示している。また、D、E、F 供試体を比較すると、E 供試体の下降勾配は最も緩やかであり、これは体積比が6倍の帯鉄筋を配置したC 供試体とほぼ同等であった。また、初期に引張応力を与えないDおよび導入引張応力度の大きいF 供試体は、E 供試体に比べ下降勾配が急にな

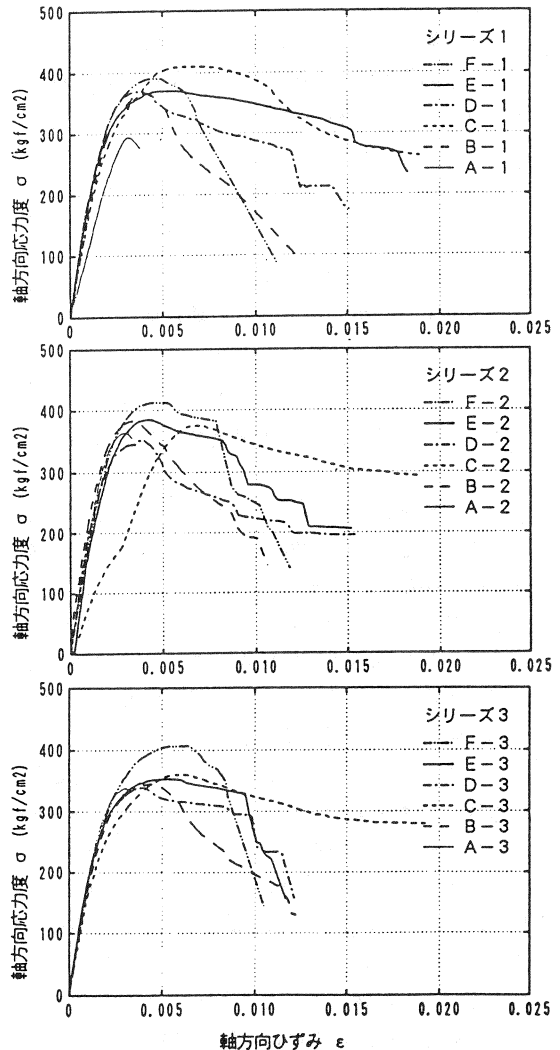


図-2 軸方向応力度-軸方向ひずみ曲線

る結果が得られた。

#### 4. 3 軸方向応力度-帯鉄筋ひずみ

図-3にシリーズ1の軸方向応力度-帯鉄筋ひずみ曲線を示す。最大応力時の帯鉄筋周方向ひずみは1000 ~ 3000  $\mu$ 程度であり、この点において鉄筋とP C鋼材に明確な差異は見られなかった。この結果によれば普通強度鉄筋の場合、最大応力時では帯鉄筋はほぼ降伏点に達しているといえるが、P C鋼材の場合、まだ降伏点強度に達していないことになる。したがって、P C鋼材を帯鉄筋に使用しても、その高降伏点強度に見合った最大応力度の大幅な増加は期待できないものと考えられる。

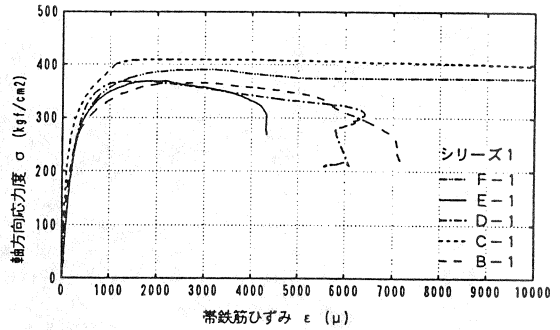


図-3 軸方向応力度-帯鉄筋ひずみ曲線

#### 5. P C鋼材による拘束効果の定式化

本実験結果から、復旧仕様を基本にP C鋼材を帯鉄筋とした時のコンクリート応力-ひずみ関係の定式化を以下に行った。

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8 \alpha \cdot \rho_s \cdot \sigma_t \quad (1)$$

$$\epsilon_{cc} = 0.002 + 0.033 \beta \cdot \frac{\rho_s \cdot \sigma_t}{\sigma_{ck}} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t &= 3000 + \sigma_{pe} \text{ (P C鋼材)} \\ \sigma_t &= \sigma_y \text{ (普通鉄筋)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$E_{des} = 11.2 \cdot \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s \cdot \sigma_y} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_{pe}$ は $\sigma_y/3$ を超えてはならない

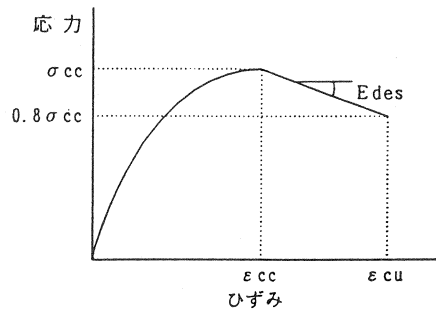


図-4 コンクリートの応力-ひずみモデル

最大応力度と最大応力時のひずみについては、式(1)、(2)に示すようにこの時点でのP C鋼材の引張応力度 $\sigma_t$ を用いる。実験結果によれば、最大応力時のP C鋼材ひずみは平均で約1500  $\mu$ であり、その時のP C鋼材の引張応力度は式(3)で求められる。ここで、 $\sigma_{pe}$ は導入された引張応力度であり、P C鋼材が緊張されていない場合は $\sigma_t = 3000 \text{kgf/cm}^2$ だけを評価することになる。一方、最大応力以後の下降勾配については、P C鋼材の高降伏点強度 $\sigma_y$ が期待できるため、復旧仕様が適用できるものとする。なお、終局応力度やその他の計算は復旧仕様モデルと同様とした。

P C鋼材を帯鉄筋に使用したD、E、F供試体に対し、シリーズごとに実験結果と本提案式の比較を図-5に示す。復旧仕様でP C鋼材の降伏点強度をそのまま代入した場合にはコンクリート最大応力度、最大応力時のひずみを過大評価することになるが、本提案式ではこの点が適正に是正されたものとなる。

一方、最大応力以後の下降勾配に着目すると、降伏点強度を用いた計算値は実験結果をほぼ適切に評価しており、最大応力以後の領域においてP C鋼材の高い降伏点強度がじん性の向上に期待できることが確認された。なお、実験結果によれば導入引張応力度の高いF供試体はE供試体よりも急な下降勾配となっており、導入引張応力度が高くなるとかえってじん性の改善効果が低減することを示している。しかしながら、本提案式ではF供試体に対しても若干安全側の評価となっており、F供試体の導入引張応力度レベル(降伏点強度の1/3程度)までに対して有効なものと考えられる。

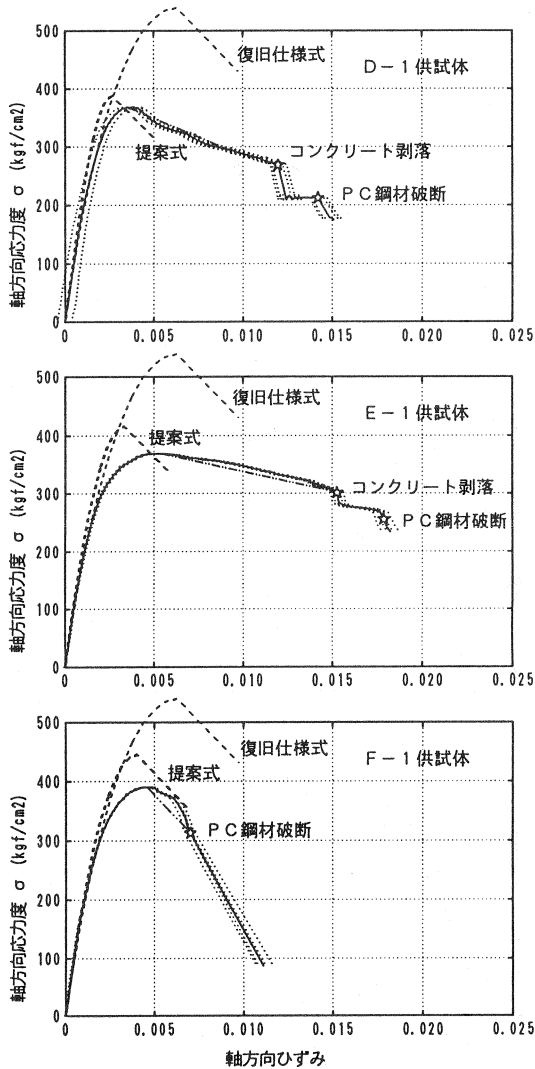


図-5(1) 軸方向応力度-ひずみ関係

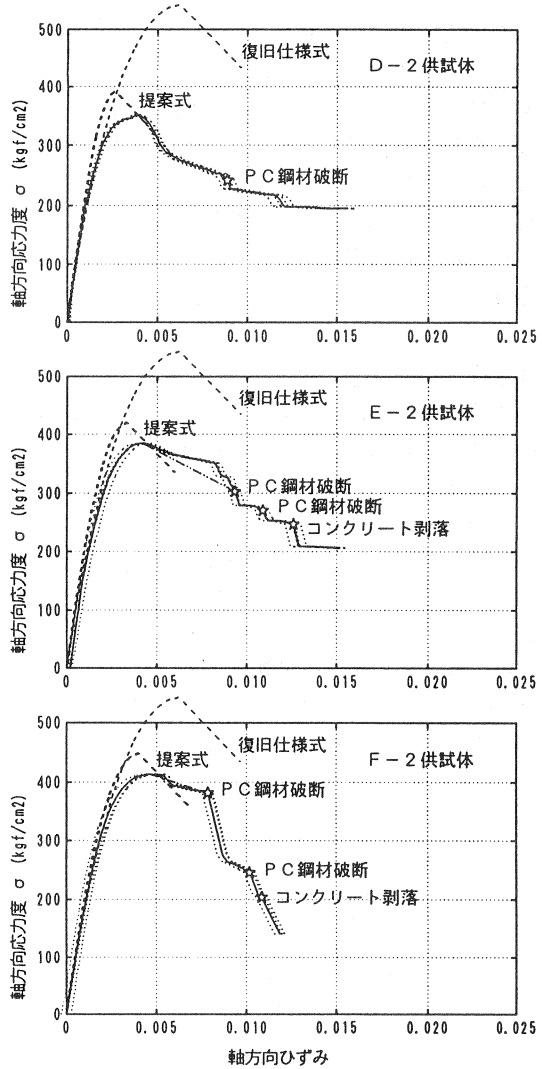


図-5(2) 軸方向応力度-ひずみ関係

6. まとめ

本実験は、高降伏点強度を持つP.C鋼材を帯鉄筋に用いた場合のコンクリート応力-ひずみ関係に着目し、円形コンクリート柱の一軸圧縮試験を行った。今回の実験結果の範囲でまとめると、以下の通りである。

(1) P.C鋼材を帯鉄筋に用い初期引張応力度を導入した供試体は他の供試体に比べ、最大応力度に至るまでに外観上の損傷は比較的少なかった。これは、ひび割れの進展がプレストレスにより拘束されているものと考えられる。

(2) 最大応力度と最大応力時のひずみについては、P.C鋼材を帯鉄筋に使用しても、P.C鋼材の高降伏点強度に見合った大幅な増加は期待できない。また、P.C鋼材の導入引張応力度が大きいほど、最大応力度と最大応力時のひずみは、若干増加する傾向を示した。

(3) 最大応力以後の下降勾配については、P.C鋼材を帯鉄筋とした場合、等量の鉄筋に比較し格段に緩やかにすることができ、最大応力以後の領域においてP.C鋼材の高い降伏点強度はじん性の向上に有効であった。

したがって、多量の帯鉄筋の代替としてPC鋼材を用いることにより同様のじん性を得ることが可能である。ただし、PC鋼材の導入引張応力度が高すぎると、その効果が低減する傾向にあることに留意する必要がある。

(4)実験結果に基づき、復旧仕様を基本に、PC鋼材を帯鉄筋に用いた場合に適用できるコンクリート応力度-ひずみ関係式を提案した。

参考文献

- [1]星隈、川島、長屋：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係、土木学会論文集、No.520/V.28,pp.1-11,1995.8
- [2]日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」の準用に関する参考資料(案)、1995.6
- [3]張、森：PC鋼材を帯鉄筋に用いた円柱コンクリートの応力-ひずみ関係、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19,No.2,pp.315-320,1997

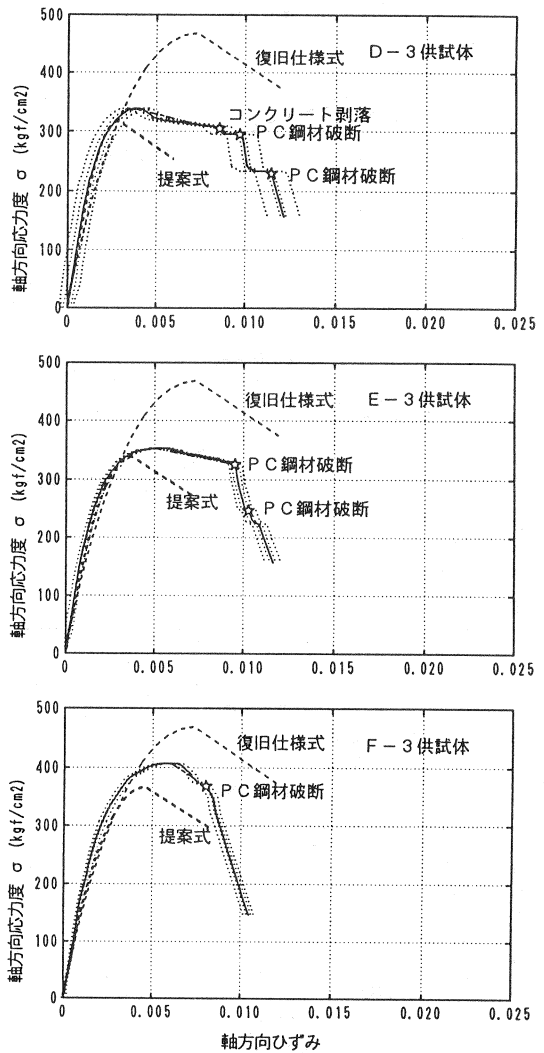


図-5(3) 軸方向応力度-ひずみ関係