

# 論文 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

張 建東\*<sup>1</sup> ・ 森 拓也\*<sup>2</sup>

**要旨：**既設橋脚の耐震補強では、十分な帯鉄筋を配置することによるじん性の向上が重要視されている。しかし、多量の帯鉄筋の配置は施工上の問題となる場合がある。これに対し、PC 鋼材を帯鉄筋に使用することにより、十分なじん性の改善が可能であれば一つの有効な解決方法となり得る。本研究では、帯鉄筋として降伏点強度の高いPC 鋼材を用いた場合のコンクリート応力-ひずみ関係を一軸圧縮載荷試験により検証した。また、PC 鋼材の導入プレストレス量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。

**キーワード：**耐震補強、コンクリート応力-ひずみ曲線、PC 鋼材、拘束効果、じん性

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以後、旧耐震基準で設計された既存橋脚の補強が急務となっている。鉄筋コンクリート橋脚の補強工法として、現在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の問題点を有している。これに対し、高強度のPC 鋼材を帯鉄筋として使用することによって、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、既に多くの実験研究[1]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)[2](以下、「復旧仕様」)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する研究報告は少なく、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 鋼材を帯鉄筋に使用した場合、「復旧仕様」によるコンクリート応力-ひずみモデルの適用性を検証するとともに、PC 鋼材の横拘束効果によるじん性の向上を実験的に明らかにしようとするものである。また、PC 鋼材の導入プレストレス量が拘束効果に与える影響についても比較検討を行う。

## 2. 供試体の概要

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種類とする。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ている。A供試体には帯鉄筋がなく、BとC供試体にはそれぞれφ6と

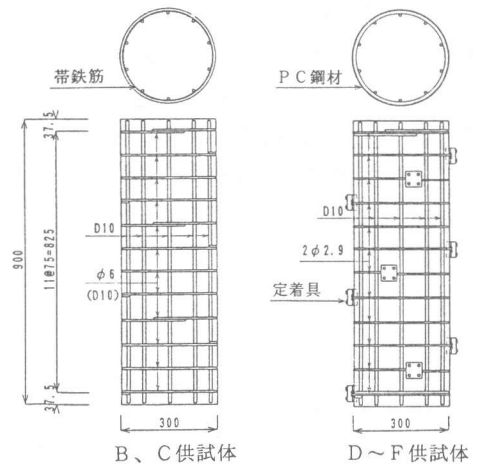
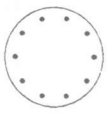
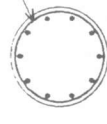
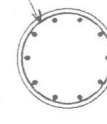
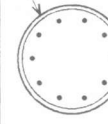


図-1 供試体の配筋図

\*1 (株)ピー・エス土木技術部、(正会員)

\*2 (株)ピー・エス土木技術部主任研究員

表-1 供試体の概要

供試体タイプ	A	B	C	D、E、F
断面	Plain 	$\phi 6@75$ 	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。

D10の帯鉄筋を配置した。D~F供試体はP C鋼材SWPR2N2 $\phi 2.9$ を帯鉄筋として供試体の外部に巻き付け、それぞれプレストレス力を変化させて導入している。

- ・ 供試体D: プレストレスを導入しない
- ・ 供試体E: 初期プレストレスとして、 $\sigma_{pi} = 60 \text{ kgf/mm}^2$ を導入
- ・ 供試体F: 初期プレストレスとして、 $\sigma_{pi} = 120 \text{ kgf/mm}^2$ を導入

本実験は、普通鉄筋とP C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。使用しうる最小P C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プレストレス $\sigma_{pe}$ は鋼材のひずみ計測により緊張端の初期プレストレス $\sigma_{pi}$ の約53%であった。P C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°ずつずらした。

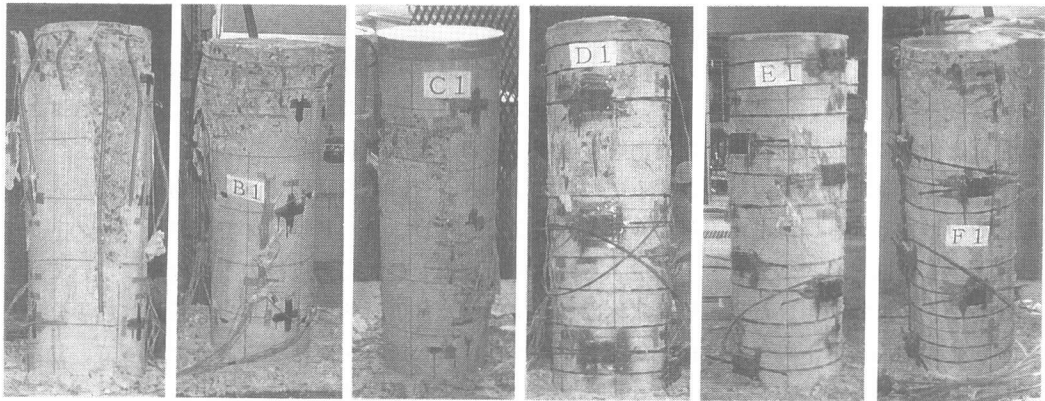
本実験では、早強ポルトランドセメントを使用し、その配合は表-2に示す通りである。また、ミルシートによる鉄筋とP C鋼材の力学的性質を表-3に示す。P C鋼材は鉄筋に比べ5~6倍の高い降伏点強度を有している。

表-2 コンクリート配合一覧表

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 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	4.0	55	40	160	290	741	1128

表-3 鉄筋と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	$2.1 \times 10^6$
	D10 SD295A	3780	5210	25.1	$2.1 \times 10^6$
P C鋼材 $2\phi 2.9$ SWPR2N		19930	21320	7.5	$1.95 \times 10^6$



A-1      B-1      C-1      D-1      E-1      F-1

写真-1 最終破壊状況（シリーズ1）

### 3. 載荷方法および計測項目

本実験は、1000tf圧縮試験機を用いて、一軸圧縮載荷で行った。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。

### 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かった。PC鋼材を使用しプレストレスを導入した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PC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PC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PC鋼材破断は生じないものと考えられる。

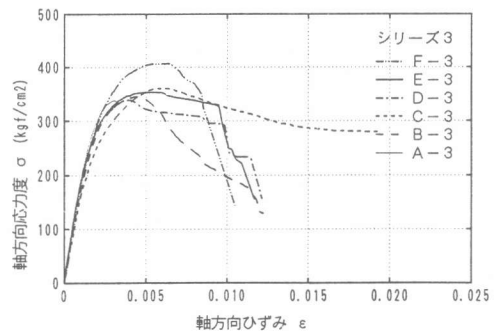
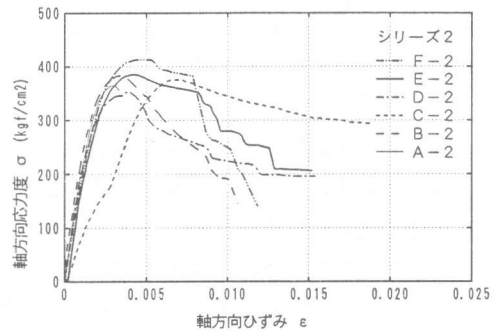
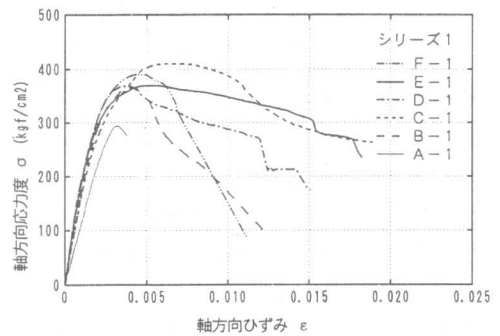


図-2 軸方向応力度-ひずみ関係

#### 4. 2 軸方向応力度－軸方向ひずみ

図-2に各々シリーズごとの実験結果を示す。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生じた局所的な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供試体では導入プレストレス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。最大応力以後の下降勾配については、帯鉄筋にP C鋼材を用いたD～F供試体はφ6を用いたB供試体と比較し、体積比は約半分であるが、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。ただし、導入プレストレスの大きいF供試体は、下降勾配が急になる結果であった。

#### 4. 3 軸方向応力度－帯鉄筋ひずみ

図-3に示すように最大応力時の帯鉄筋周方向ひずみは1000～3000μ程度であり、鉄筋とP C鋼材には明確な差異は見られなかった。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が、P C鋼材の場合、まだ降伏点強度に達していない。このことから、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。

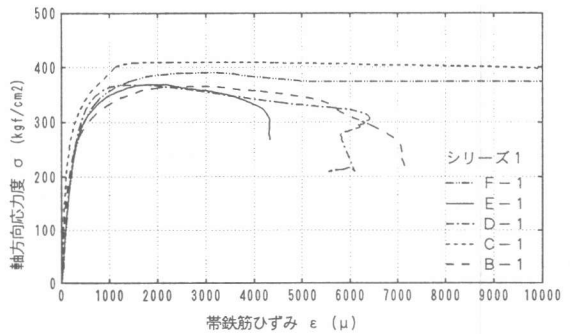


図-3 軸方向応力度－帯鉄筋ひずみ関係

#### 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行う。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σ<sub>t</sub>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1500μであり、P C鋼材の引張応力度は式(3)で求められる。ここで、σ<sub>pe</sub>は導入

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

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

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

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

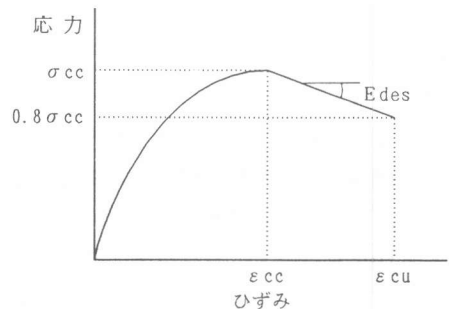


図-4 コンクリート応力－ひずみモデル

ここで、σ<sub>pe</sub>はσ<sub>y</sub>/3を超えてはならない

された平均プレストレスであり、P C鋼材がプレストレス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、復旧仕様式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する。

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。復旧仕様式に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。なお、E、F 供試体の平均導入プレストレスは前記に示したようにそれぞれ $\sigma_{pe} = 3180, 6360 \text{ kgf/cm}^2$ を用いた。

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いるものである。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プレストレスの高いF 供試体はE 供試体よりも急な下降勾配となっており、導入プレストレスが高くなると却ってじん性の

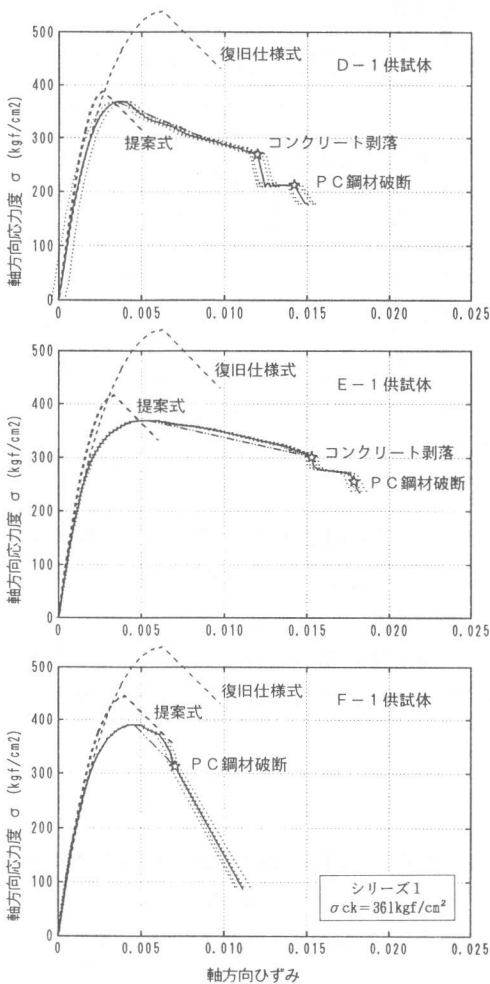


図-5(1) 軸方向応力度-ひずみ関係

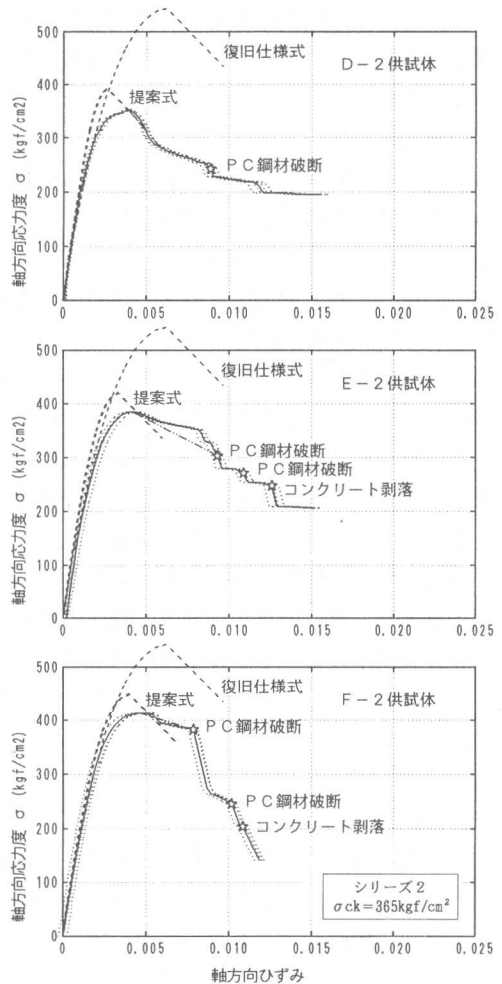


図-5(2) 軸方向応力度-ひずみ関係

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供試体の導入プレストレスレベル（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、導入プレストレスに上限値を設けることにした。

## 6. まとめ

本実験では、高降伏点強度を持つPC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。結論は以下の通りである。

(1) PC鋼材を帯鉄筋に用いプレストレス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く、ひび割れの進展がプレストレスにより拘束されていることと考えられる。

(2) 最大応力度と最大応力時のひずみについては、PC鋼材を帯鉄筋に使用しても、PC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、PC鋼材の導入プレストレスが大きいくほど、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、PC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る。最大応力以後の領域においてPC鋼材の高い降伏点強度はじん性の向上に有効であることが確認された。従って、大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が得られるものと言える。ただし、PC鋼材の導入プレストレスが高すぎると、その効果が低減する傾向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-ひずみ関係式を提案した。提案式による計算値は、実験結果の傾向をほぼ適切に評価している。

## 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

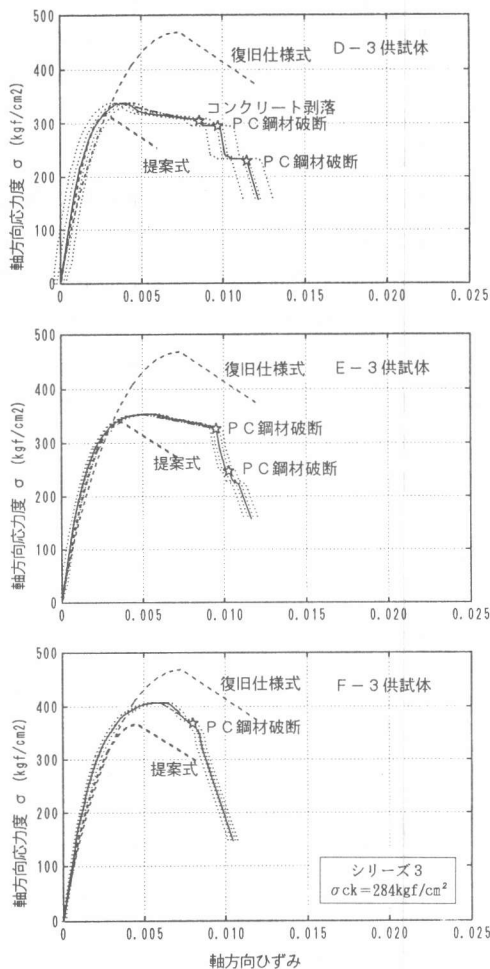


図-5(3) 軸方向応力度-ひずみ関係