

PC 鋼材を拘束筋としたコンクリートの応力-ひずみ関係

鈴木宣政¹・久保明英²・中井裕司³・浅井洋⁴

¹正会員 （株）ピーエス三菱 技術本部 （〒104-8215 中央区銀座 7-16-12）

²正会員 （株）ピーエス三菱 技術研究所 （〒250-0875 小田原市南鴨宮 2-1-67）

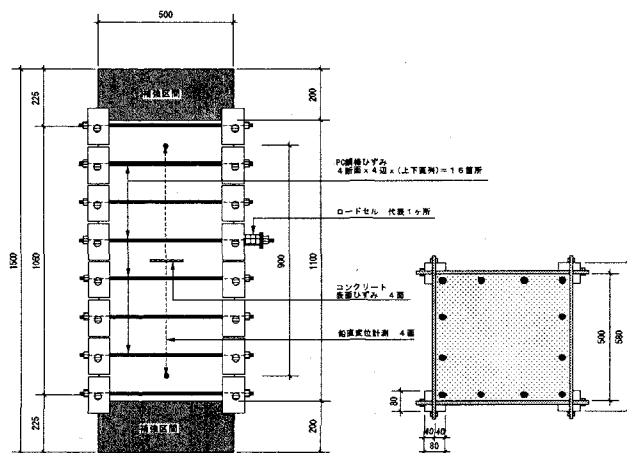
³正会員 三井住友建設（株）土木技術部 （〒164-0011 中野区中央 1-38-1）

⁴正会員 三井住友建設（株）技術研究所 （〒329-0432 栃木県河内郡南河内町仁良川 1726）

1. はじめに

現在、鉄筋コンクリート橋脚では、大規模地震時における塑性変形性能向上の必要性から、多量の帯鉄筋や中間帯鉄筋が配置され施工上の問題となっている。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確保が可能であれば、塑性ヒンジ領域における配筋の合理化に対し有効な手段になると考えられる。

本研究では、帯鉄筋として PC 鋼材を用いた場合のコンクリートの応力-ひずみ関係を、円柱および角柱供試体の一軸圧縮荷重試験により検証するとともに、PC 鋼材量および導入緊張力が拘束効果に与える影響についても検討する。



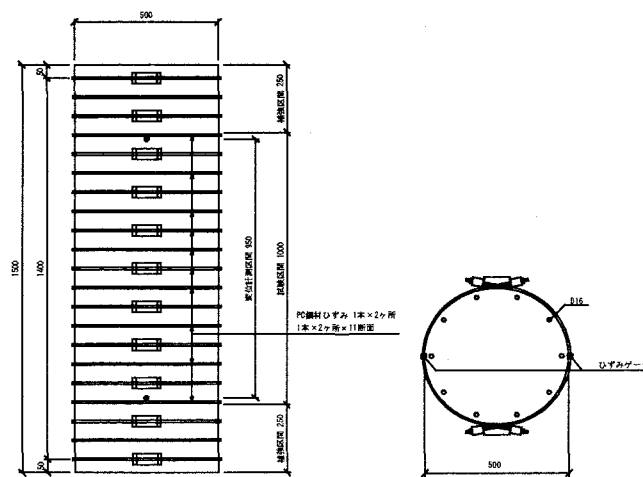
(a) 角柱供試体

2. 試験の概要

(1) 供試体の概要

供試体の概要を図-1 に、諸元を表-1 に示す。角柱供試体（LS シリーズ）は、500×500 の正方形断面で、高さ 1500mm である。軸方向鉄筋は、D16mm 鉄筋が純かぶり 16mm で各辺に 4 本配置されている。供試体の上下端 200mm は、補強区間とし D16mm の帯鉄筋を 5 本配置している。拘束筋としての PC 鋼材は、異形 PC 鋼棒（φ7.1mm、φ9.0mm、φ10.7mm）を使用し、150mm 間隔（全角柱供試体共通）で供試体外側にコーナ一部定着体を介して配置されている。

円柱供試体（LC シリーズ）は、φ500mm の円形断面で、高さ 1500mm である。軸方向鉄筋は、D16mm 鉄筋が純かぶり 16mm で 10 本配置されている。上下端 250mm を補強区間とし、D16mm の帯鉄筋を 6 本配置している。拘束筋としての PC 鋼材は、PC 鋼より線



(b) 円柱供試体

図-1 供試体の概要

表-1 供試体の諸元

供試体		PC鋼材		断面積 A_{pc} mm ²	配置間隔 s mm	体積比 ρ_{pc} %	導入緊張力 P_i kN/本	導入緊張力 ／降伏荷重
角柱	LS0	SBPDL 異形PC鋼棒	—	—	—	—	—	—
	LS1		φ 7.1mm	40	150	0.21	49.1	0.86
	LS2		φ 9.0mm	64		0.34	73.5	0.80
	LS3		φ 10.7mm	90		0.48	101.1	0.77
	LS4		φ 9.0mm	64		0.34	0.0	0.00
	LS5		φ 9.0mm	64		0.34	39.0	0.43
円柱	LC0	SWPR3N PC鋼より線	—	—	—	—	—	—
	LC1		φ 2.9mm × 3本	19.82	100	0.16	12.0	0.32
	LC2				70	0.23	12.0	0.32
	LC3				50	0.32	12.0	0.32
	LC4				70	0.23	0.0	0.00
	LC5				70	0.23	6.0	0.16

表-2 コンクリートの配合

設計強度 N/mm ²	スランプ cm	Gmax mm	空気量 %	W/C %	s/a %	単位水量 kg/m ³
25.5	18	20	4.5	57	52.1	175

表-3 鋼材の機械的性質

名称 (規格)	断面積 mm ²	引張荷重 kN	伸び %	降伏荷重 kN	弾性係数 N/mm ²
異形PC鋼棒 7.1mm SBPDL	40	59.3	9	57.4	201100
異形PC鋼棒 9.0mm SBPDL	64	95.1	9.5	91.4	199400
異形PC鋼棒 10.7mm SBPDL	90	136	11	130.6	202700
PC鋼より線 2.9mm×3本より SWPR7N	19.82	39.8	8	37.6	201800
異形鉄筋 D16	198.6	114.1	22.9	77.3	216000

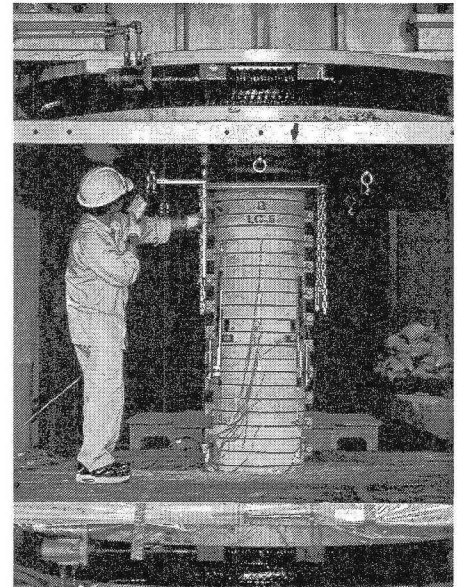


写真-1 供試体設置状況

(φ 2.9mm×3 本より、全円柱供試体共通)を用い、50mm, 70mm, 100mm 間隔で配置されている。

角柱供試体は PC 鋼材の断面積と導入緊張力を、円柱供試体は PC 鋼材の配置間隔と導入緊張力をパラメータとしている。

供試体に使用したコンクリートの配合を表-2 に、PC 鋼材の材料試験結果を表-3 に示す。なお、供試体のコンクリートは同一の生コン車から採取したものである。

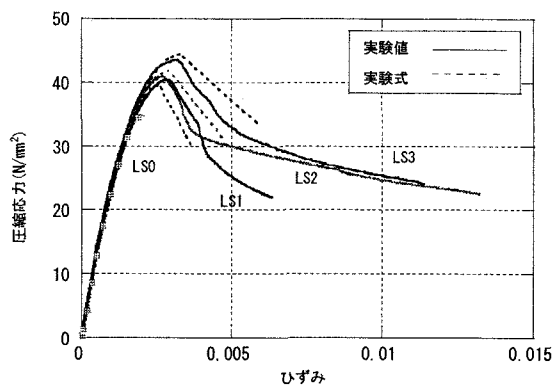
(2) PC 鋼材の緊張力管理

使用した PC 鋼材の半数にはひずみゲージを設置し、事前に張力とひずみの関係を調査した。この張力-ひずみ関係と緊張時のロードセルの値を参考にして導入緊張力を調整した。載荷試験までに減少する緊張力は、試験前に調整を行った。

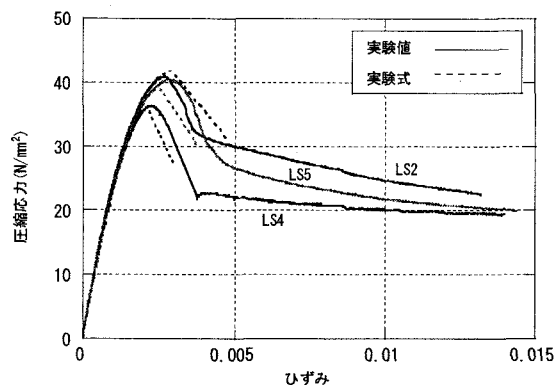
(3) 載荷方法および計測項目

載荷は、独立行政法人土木研究所所有の 30MN 載荷試験機を用いて行った。載荷方法は、変位制御による単調一軸圧縮載荷とし、載荷速度は毎分 1mm とした。本載荷に先立ち、変位 1mm 程度の予備載荷を行い、供試体の設置と計測器の点検を行った。供試体の設置状況を写真-1 に示す。

計測項目は、鉛直荷重、軸方向変位、PC 鋼材ひずみとした。軸方向ひずみは、角柱供試体では 4 面の中央 900mm 区間における変位、円柱供試体では 4 面中央 950mm 区間における変位を計測し、これを区間長で除して求めた。参考のために、コンクリート表面ゲージにて軸方向ひずみと横方向ひずみも計測した。なお、計測のサンプリング間隔は 0.5Hz である。

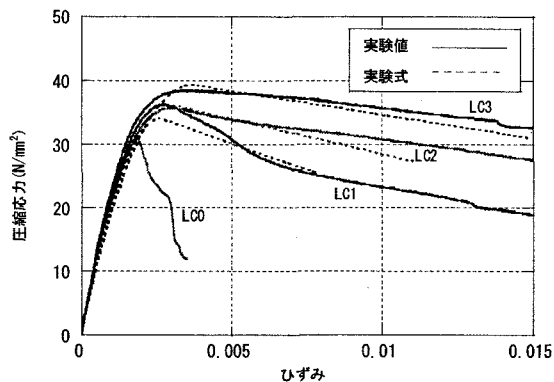


(a) 体積比をパラメータとした供試体

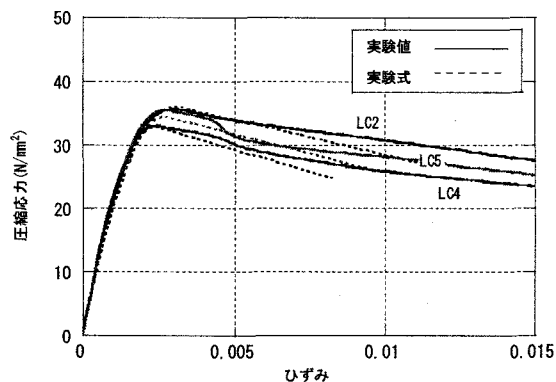


(b) 緊張力をパラメータとした供試体

図-2 角柱供試体の応力-ひずみ関係



(a) 体積比をパラメータとした供試体



(b) 緊張力をパラメータとした供試体

図-3 円柱供試体の応力-ひずみ関係

3. 試験結果と評価

(1) 試験結果の概要

試験結果の一覧を表-4に示す。併せて、各3本のシリンダー（ $\phi 100 \times 200$, $\phi 150 \times 300$ ）により測定した圧縮特性も示す。角柱供試体におけるPC鋼材の断面積（体積比）をパラメータとした供試体の応力-ひずみ関係を図-2(a)に、導入緊張力をパラメータとした供試体の応力-ひずみ関係を図-2(b)に示す。円柱供試体における配置間隔（体積比）をパラメータとした供試体の応力-ひずみ関係を図-3(a)に、緊張力をパラメータとした供試体の応力-ひずみ関係を図-3(b)に示す。なお、図中には、後述する実験式による結果も比較のために示している。

角柱・円柱供試体ともに、応力上昇域においては各供試体でほぼ等しい剛性を有している。最大荷重時の応力およびひずみは、体積比が増加するにしたがい、導入緊張力が増加するにしたがい、大きくなる傾向にある。特に、無補強供試体（LS0, LC0）に比較して圧縮応力の増加は顕著である。

応力軟化域では、角柱供試体と円柱供試体とで異なった挙動を示している。角柱供試体は、応力下降域と応力収束域の2段階の挙動を示す。著しい応力の下降域から収束域へ以降する段階でコンクリートの剥落や

表-4 試験結果一覧

供試体		最大圧縮応力時	
		圧縮応力 N/mm ²	ひずみ
角柱	LS0	34.9	0.002000
	LS1	40.4	0.002850
	LS2	41.0	0.002730
	LS3	43.5	0.003140
	LS4	36.3	0.002310
	LS5	40.4	0.002880
円柱	LC0	30.8	0.001850
	LC1	36.3	0.002800
	LC2	35.7	0.003030
	LC3	38.4	0.003700
	LC4	33.1	0.002540
	LC5	35.5	0.002770
$\phi 100 \times 200$		38.7	0.002740
$\phi 150 \times 300$		35.4	0.002430

破壊面が明確になり、軸方向鉄筋の座屈が生じ出し、その後座屈により押し出されたPC鋼材が破断して終局へ至る。応力下降域から応力収束域へ移行する折れ点は、最大圧縮応力の60%~80%程度に位置しており、体積比の増加や緊張力の増加にしたがい、その割合は増加している。これに対し円柱供試体では、明確な応力下降域は見られず、緩やかな荷重低下を示す。破壊は、最大応力以降にひび割れが顕著となり、コンクリートの剥落、軸方向鉄筋の座屈、PC鋼材の破断を経て

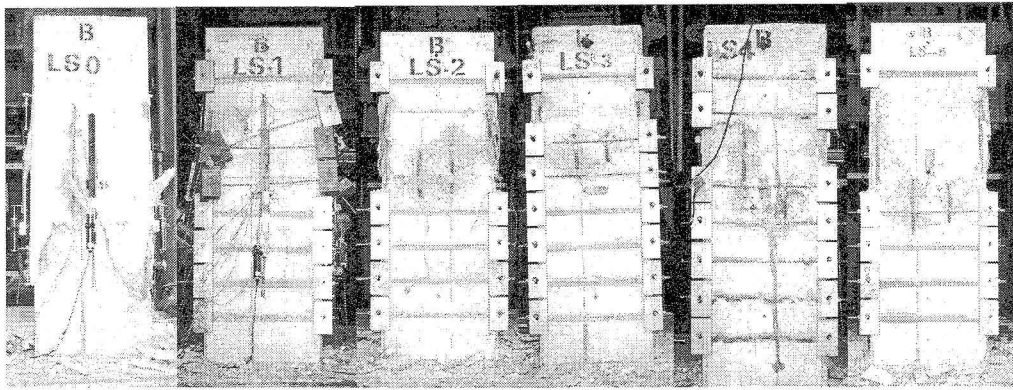


写真-2 最終損傷状況（角柱供試体：左からLS0～LS5）

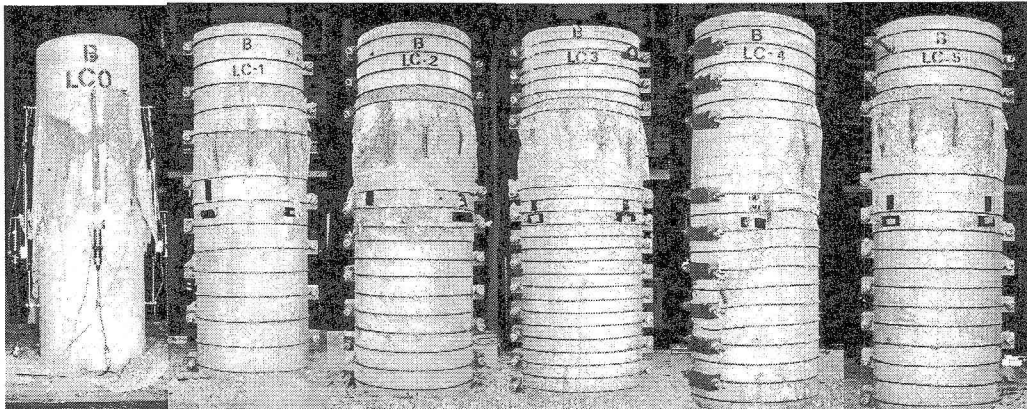


写真-3 最終損傷状況（円柱供試体：左からLC0～LC5）

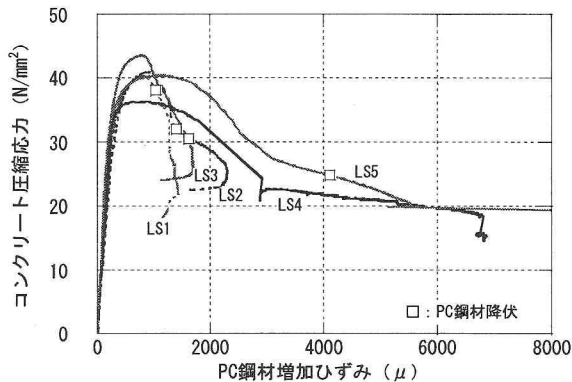


図-4 PC 鋼材増加ひずみ（角柱供試体）

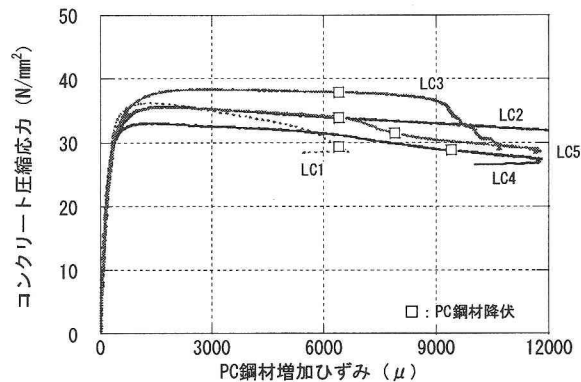


図-5 PC 鋼材増加ひずみ（円柱供試体）

終局を迎える。

一方、星限らの異形鉄筋を用いた同様の試験¹⁾では、応力軟化域は、拘束断面形状によらず、応力下降域と応力収束域からなっている。その移行点は、体積比1%程度以下の供試体では、最大圧縮応力の50%程度あるいはそれ以下で生じている。結果を比較すると、PC鋼材を拘束筋とし、かつ緊張力を導入して横拘束を与える手法は、最大圧縮応力以降の応力低下を抑制すると考えられる。特に、円柱供試体では、急激な耐力低下を抑制する効果が認められる。

写真-2 および写真-3 に最終損傷状況を示すが、PC鋼材の体積比の増加と導入緊張力の増加とともに、損傷領域が局所化する傾向にあることがわかる。

(2) PC 鋼材の挙動

角柱供試体および円柱供試体のコンクリート圧縮応力とPC鋼材ひずみの関係を図-4および図-5にそれぞれ示す。図中のひずみは、破壊位置近傍に配置されていたPC鋼材のひずみであり、角柱供試体では1段4本のPC鋼材ひずみの平均値、円柱供試体では1段2ヶ所に設置したひずみゲージの平均値である。降伏点は、表-3の降伏荷重を断面積と弾性係数で除した値から初期緊張力によるひずみを引いた値として定義したものである。円柱供試体では、巻くことによりPC鋼より線に曲げひずみ(±5800μ)が発生するが、ここでは加算していない。

図-4より、角柱供試体では最大圧縮応力まで各供試

体で大きな差は見られず、150～200N/mm²程度の応力に相当するひずみが生じている。PC 鋼材の降伏は、応力下降域から応力収束域へ移行する付近で生じている。図-5 に示す円柱供試体では、コンクリートの最大圧縮応力となる少し前からPC 鋼材の増加速度は増し始め、最大圧縮応力後に終了している。最大圧縮応力に至るまでのひずみ増加量を応力換算すると、280～580 N/mm²程度となっている。図-3 の応力-ひずみ関係を見ると、LC1 および LC5 については降伏点に相当する圧縮応力付近に変調が確認できる。

(3) PC 鋼材増加応力度の評価

PC 鋼材による拘束効果を検証する上で、最大圧縮応力時の PC 鋼材増加応力を評価することは重要な要因であると考えられる。図-6 に PC 鋼材の増加張力と体積比の関係を示す。図中の各供試体の増加張力は、最大圧縮応力時における各段の平均増加ひずみの最大値に、PC 鋼材の弾性係数と断面積を乗じて計算した値である。図より増加張力と体積比は相関関係にあることがわかる。ただし、この関係は、今回の実験の範囲では鋼材の配置間隔にのみ依存しており、他のパラメータの解析や実験による検証が必要である。

(4) 最大圧縮応力時の応力とひずみの評価

一般的に最大圧縮応力時の応力とひずみに対する拘束効果は、補強筋の鋼材比と強度の積で評価される。しかし、本試験では、導入緊張力の違いにより最大圧縮応力とひずみが変化していることから、その影響も考慮して評価する。

図-7 は、縦軸を圧縮強度比 (f_{cc}/f_{co})、横軸を PC 鋼材に生じている応力 ($f_{pci} + \Delta f_{pc}$) と体積比 (ρ_{pc}) の積を無補強供試体の圧縮強度 (f_{co}) で除した値として整理したものである。同様に、図-8 は、最大圧縮応力時の軸方向ひずみ (ϵ_{cc}) について検討した結果である。両図より、最大圧縮応力時の応力およびひずみは、導入緊張力と増加張力を考慮した PC 鋼材による拘束効果と概ね線形関係にあることがわかる。一般的に、拘

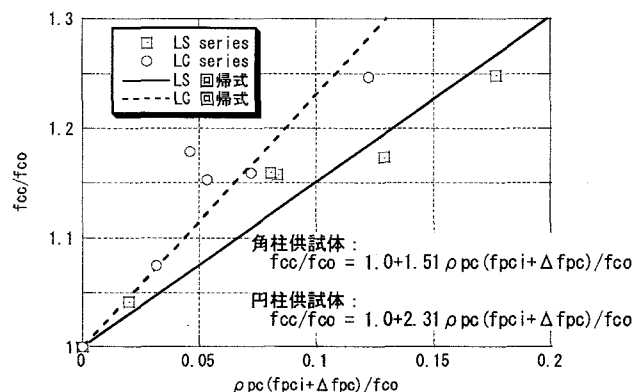


図-7 最大圧縮応力と補強比の関係

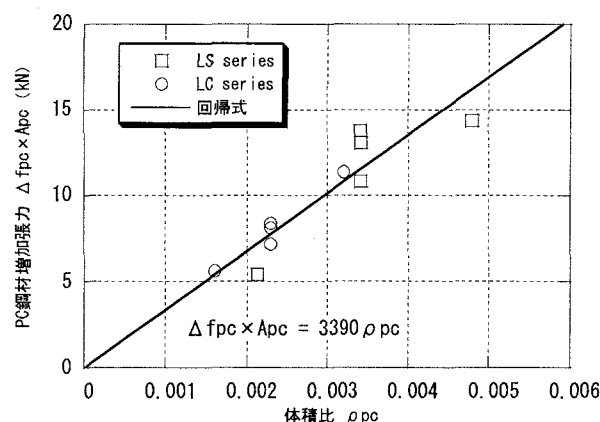


図-6 PC 鋼材増加張力と体積比の関係

束断面形状が拘束効果に及ぼす影響は大きく、矩形拘束の場合、円形拘束に比べ拘束効果が劣るとされており、本試験においても同様の結果が得られている。角柱供試体の拘束効果は、円柱供試体のそれと比較して、最大圧縮応力で 65%程度、最大圧縮応力時ひずみで 50%程度となっている。道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編²⁾ (以下、道路橋示方書) に示されている関係式では、その比率はそれぞれ 20%および 40%となっているが、本試験ではそれ程の差は生じていない。

(5) 応力軟化域の下降勾配の評価

拘束効果と下降勾配の関係について検討した結果を図-9 に示す。これは、道路橋示方書の関係式と整合をとるために、縦軸を下降勾配 (E_{des})、横軸を体積比 (ρ_{pc}) と PC 鋼材応力 [$(f_{pci} + \Delta f_{pc} + f_{pcy}) / 2$] の積を無補強供試体圧縮強度の 2 乗で (f_{co}^2) 除した値として、双曲線回帰を行った結果である。下降勾配 E_{des} は、応力が最大値からその 75%まで低減する範囲を直線回帰し、その傾きとして定義したものである。PC 鋼材応力は、最大圧縮応力時の PC 鋼材応力と降伏応力との平均応力とし、導入張力と増加張力の影響を考慮している。

星隈らの異形鉄筋を用いた試験では、下降勾配に対する拘束断面形状の影響は小さいという結果が得られている。しかしながら、本試験では、円柱供試体にお

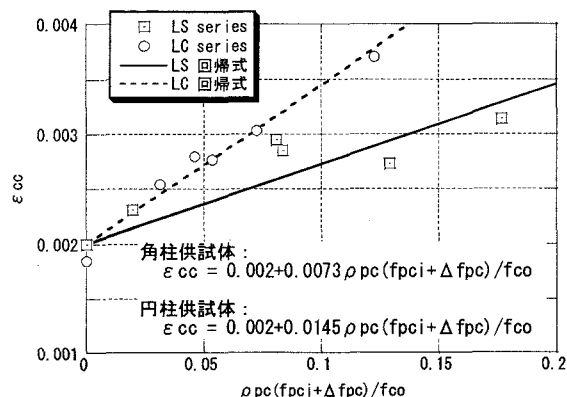


図-8 最大圧縮応力時ひずみと補強比の関係

いて最大圧縮応力後に急激な耐力低下を示さなかったため、拘束断面形状により大きな差が生じている。そこで、それぞれに対し回帰分析をした結果、概ね反比例の関係にあることがわかる。角柱供試体では、道路橋示方書の関係式と比較して勾配が大きくなる結果となっている。

(6) 実験式による応力-ひずみ曲線の評価

道路橋示方書の関係式を基本とし、図-6～図-9 に示す各検討の結果から下記の実験式を得た。図-2、図-3 には実験式による応力-ひずみ関係を併記している。図に示すように、実験式による計算結果は、実験結果の傾向をほぼ適切に評価しているものと考えられる。

応力上昇域 ($0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}$)

$$f_c = E_c \varepsilon_c \{1 - 1/n \cdot (\varepsilon_c / \varepsilon_{cc})^{n-1}\} \quad (1)$$

ただし、 $n = E_c \varepsilon_{cc} / (E_c \varepsilon_{cc} - f_{cc})$

応力下降域 ($\varepsilon_{cc} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$)

$$f_c = f_{cc} - E_{des}(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) \quad (2)$$

ただし、 $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} + 0.25f_{cc} / E_{des}$

・角柱供試体

$$f_{cc} / f_{co} = 1.0 + 1.51\rho_{pc}(f_{pci} + \Delta f_{pc}) / f_{co} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.0073\rho_{pc}(f_{pci} + \Delta f_{pc}) / f_{co} \quad (4)$$

$$E_{des} = 22.8f_{co}^2 / \{\rho_{pc}(f_{pci} + \Delta f_{pc} + f_{pcy}) / 2\} \quad (5)$$

・円柱供試体

$$f_{cc} / f_{co} = 1.0 + 2.31\rho_{pc}(f_{pci} + \Delta f_{pc}) / f_{co} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.0145\rho_{pc}(f_{pci} + \Delta f_{pc}) / f_{co} \quad (7)$$

$$E_{des} = 3.86f_{co}^2 / \{\rho_{pc}(f_{pci} + \Delta f_{pc} + f_{pcy}) / 2\} \quad (8)$$

ただし、 $\Delta f_{pc} = 3.39 \times 10^6 \cdot \rho_{pc} / A_{pc}$

ここに、

f_{cc} : 最大圧縮応力 (N/mm²)

f_{co} : 無補強供試体の最大圧縮応力 (N/mm²)

ε_{cc} : 最大圧縮応力時のひずみ

ε_{cu} : 終局ひずみ

E_c : 初期弾性係数 (N/mm²)

E_{des} : 下降勾配 (N/mm²)

ρ_{pc} : PC 鋼材の体積比

A_{pc} : PC 鋼材の断面積 (mm²)

f_{pci} : PC 鋼材の導入緊張応力 (N/mm²)

Δf_{pc} : 最大圧縮応力時の PC 鋼材増加応力 (N/mm²)

f_{pcy} : PC 鋼材の降伏応力 (N/mm²)

角柱供試体 :

$$E_{des} = 22.8f_{co}^2 / \{\rho_{pc}(f_{pci} + \Delta f_{pc} + f_{pcy}) / 2\}$$

円柱供試体 :

$$E_{des} = 3.86f_{co}^2 / \{\rho_{pc}(f_{pci} + \Delta f_{pc} + f_{pcy}) / 2\}$$

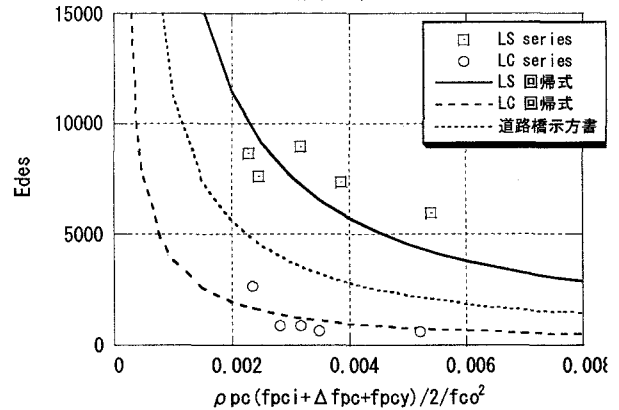


図-9 下降勾配と補強パラメータの関係

4. まとめ

本研究では、PC 鋼材を拘束筋としたコンクリート柱の 1 軸圧縮載荷試験を行い、その応力-ひずみ関係を検証した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) PC 鋼材の体積比や導入緊張力が増加すると、初期剛性は変わらないが、コンクリートの最大圧縮応力およびその時点のひずみは増加する傾向にある。
- 2) PC 鋼材を拘束筋とし、かつ緊張力を導入して横拘束を与える手法は、最大圧縮応力度以降の耐力低下を抑制する。特に、円柱供試体では急激な耐力低下を示さず、緩やかな下降勾配を示す。
- 3) 以上から、大量の帯鉄筋の代替として PC 鋼材を用いることにより、十分なじん性の確保が可能であると考えられる。
- 4) 道路橋示方書を基本とし、PC 鋼材導入緊張力および増加応力を考慮したコンクリート応力-ひずみ関係の実験式を得ることができた。ただし、最大圧縮応力時の増加応力に関しては、鋼材配置間隔のみに依存した形で評価をしているため、今後の検討が必要である。

謝辞：本研究は、独立行政法人土木研究所、財団法人土木研究センター、他民間 5 社による「高じん性コンクリート構造の配筋合理化技術に関する共同研究」の一環として実施したものである。ここに、関係各位に感謝の意を表する次第である。

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) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 : (社) 日本道路橋会, 平成 14 年 3 月