

PC鋼材を帯筋に使用したコンクリート柱の横拘束効果について

大谷 悟司¹・吉岡 民夫²・川島 一彦³・庄 司学⁴

¹正会員 オリエンタル建設（株）技術研究所（〒321-43 栃木県真岡市鬼怒ヶ丘5）

²正会員 工博 オリエンタル建設（株）技術研究所（〒321-43 栃木県真岡市鬼怒ヶ丘5）

³フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科（〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1）

⁴正会員 東京工業大学助手 工学部土木工学科（〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1）

1. はじめに

帯鉄筋を用いた橋脚に対する拘束効果は、帯鉄筋比が高く、また、降伏点が高いほど向上する¹⁾。そこで、鉄筋の代わりに、鉄筋に比べて4～6倍高い降伏点を有し、スパイラル加工や曲げ加工が可能な細径異形PC鋼棒や、スパイラル加工や曲げ加工することなく、比較的容易に円形断面の鉄筋コンクリート橋脚（以下、RC橋脚という）に巻き立てることが可能であり、緊張・定着することにより、新旧コンクリートを一体化することが可能なPC鋼より線を、帯筋に使用することにより、じん性の向上が期待される。本研究は、PC鋼材を帯筋に使用した場合のコンクリートの横拘束効果を、RC橋脚の地震時保有水平耐力法による耐震補強計算に反映できるようにすることを目的として、PC鋼材で横拘束されたコンクリート柱供試体の一軸圧縮試験を行い、コンクリートの軸方向応力度－軸方向ひずみ関係を検討したものである。

2. 実験に用いた供試体および実験方法

本実験では、断面形状、PC鋼材の体積比（以下、帯筋比 ρ_s と呼ぶ）をパラメータとして星隈ら²⁾の帯鉄筋による横拘束効果の実験を参考に、表－1に示すように無補強供試体も含め合計24体を用いて実験を行った。断面形状は、帯筋にPC鋼棒を使用した供試体では円形と正方形の2種類を、帯筋にPC鋼より線を使用した供試体では円形を対象とした。帯筋にPC鋼棒を使用した供試体では直径または辺長を200mm、高さ600mmとし、帯筋にPC鋼より線を使用した供試体では直径400mm、高さ1,200mmとした。形状や横幅と高さの比は従来の研究を参考として定めたものである

表－1 実験に用いた供試体

No.	断面形状	断面寸法	帯筋		
			種類	ピッチ (mm)	帯筋比 (%)
A-1	円形	$\phi 200\text{mm}$ $\times$ $h 600\text{mm}$	PC鋼棒 (ウルボン)	0	0
A-2				211	0.38
A-3				167	0.48
A-4				143	0.56
A-5				93	0.86
A-6				70	1.14
A-7				47	1.70
A-8				35	2.29
A-9				24	3.33
B-1	正方形	$\square 200\text{mm}$ $\times$ $h 600\text{mm}$	PC鋼棒 (ウルボン)	0	0
B-2				211	0.38
B-3				167	0.48
B-4				143	0.56
B-5				93	0.86
B-6				70	1.14
B-7				47	1.70
B-8				35	2.29
B-9				24	3.33
C-1	円形	$\phi 400\text{mm}$ $\times$ $h 1,200\text{mm}$	PC鋼より線	0	0
C-2				100	0.20
C-3				67	0.30
C-4				53	0.37
C-5				43	0.46
C-6				35	0.57

²⁾ ³⁾。PC鋼より線は正方形断面のRC橋脚には使用できないことから、円形断面のみを対象とした。

供試体は断面形状、帯筋種類によりA～Cの3シリーズに分類される。A、Bシリーズは帯筋にPC鋼棒を使用し、Cシリーズは帯筋にPC鋼より線を使用したものである。Aシリーズでは円形断面で、帯筋比 ρ_s を0.38～3.33%に変化させた。Bシリーズは正方形断面で、帯筋比はAシリーズと同様とした。Cシリーズは緊張・定着するためにPC鋼より線をコンクリート表面に配置したものである。緊張、定着のためにR

C橋脚の耐震補強用に開発された定着具を使用した。PC鋼より線1本当たりの緊張力は24.5kNとし、帯筋比 ρ_s を変化させた。この緊張力は実際のRC橋脚に導入できるプレストレスを考慮して定めたものである。いずれの供試体ともコンクリートのかぶりの影響を少なくするために、かぶりは1mmとした。各シリーズの代表的な供試体の帯筋配置を図-1に示す。

PC鋼棒としてはウルボンを使用した。ウルボンは直径7.1mmの異形断面であり、PC鋼より線としては2.9mm3本よりPC鋼より線を用いた。PC鋼より線を使用する場合には、コンクリート表面にPC鋼より線を配置するため防蝕性、防錆性を考慮し、アンボンド処理されたPC鋼より線を使用した。表-2に使用したPC鋼棒およびPC鋼より線の材料試験結果を示す。

早強ポルトランドセメントを使用し、呼び強度は27N/mm²、またスランプは8cmとした。粗骨材としては最大寸法7.5mmの豆砂利を使用した。供試体には軸方向筋を配置し、一般の橋脚を想定して面積比で1%程度になるようにした。

拘束コンクリート柱の圧縮載荷実験は、東京工業大学の500tf万能試験機（A，Bシリーズ）と日本大学理工学研究所の3,000tf大型構造物試験機（Cシリーズ）を用いて行った。変位制御による単調一軸圧縮とし、載荷速度は、A，Bシリーズでは毎分1.0mm、Cシリーズでは毎分0.2mmとした。実験では、荷重、変位、コンクリートおよび帯筋のひずみを計測した。供試体の軸方向ひずみは、上下面間の相対変位を全高で除して算出した。供試体と試験機載荷板との隙間の影響を少なくするために、両者の間に石膏を入れた。

3. 横拘束したコンクリート柱の軸方向応力度－軸方向ひずみの関係

図-2は帯筋にPC鋼棒を使用した供試体に対する結果であり、(a)は円形断面（Aシリーズ）を、(b)は正方形断面（Bシリーズ）に対する結果である。図-3は帯筋にPC鋼より線を使用した供試体に対する結果である。

図-2、3より、無補強供試体の場合には、円形断面（A-1，C-1）、正方形断面（B-1）ともに、コンクリートの軸方向ひずみが2,300～2,500 μ 付近で最大圧縮応力度 f_{cc} に達し、その後、軸方向ひずみの増加とともに軸方向応力度は低下する。

図-2より、帯筋にPC鋼棒を使用した供試体の軸方向応力度－軸方向ひずみの関係を、A-2～A-4（円形断面）およびB-2～B-4（正方形断面）のように帯筋比が小さい場合と、A-5～A-9（円形断面）およびB-5～B

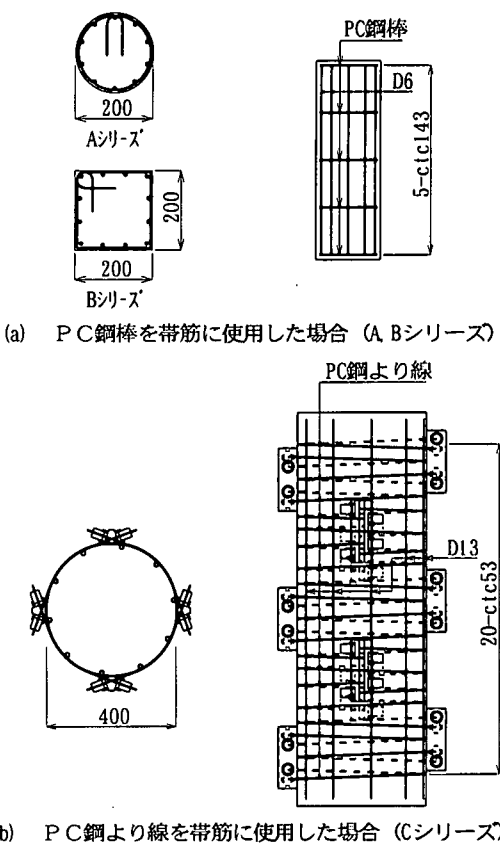


図-1 代表的な供試体の帯筋配置図

表-2 実験に用いたPC鋼材の材料特性

公称値	名称	SBPDL 1275/1420 (7.1mm)	
		断面積	mm ²
PC鋼棒 (ウルボン)	弾性係数	N/mm ²	2.0×10 ⁵
	降伏強度	N/mm ²	1,275
	引張強度	N/mm ²	1,420
	伸び	%	5.0
	名称	SWPD3L 1715/1910 (3-2.9mm)	
PC鋼より線	断面積	mm ²	19.82
	弾性係数	N/mm ²	2.0×10 ⁵
	降伏強度	N/mm ²	1,715
	引張強度	N/mm ²	1,910
	伸び	%	3.5
試験値	弾性係数	N/mm ²	2.12×10 ⁵
	降伏強度	N/mm ²	1,397
	引張強度	N/mm ²	1,483
	伸び	%	9.6
	弾性係数	N/mm ²	2.17×10 ⁵
PC鋼より線	降伏強度	N/mm ²	1,941
	引張強度	N/mm ²	2,052
	伸び	%	4.5

-9（正方形断面）のように大きい場合に分けて整理すると以下ようになる。

（1）帯筋比が0.38～0.56%と小さい場合

円形断面（A-2～A-4）、正方形断面（B-2～B-4）ともに、最大圧縮応力度 f_{cc} は20～27N/mm²で、これが生じる時の軸方向ひずみ ϵ_{cc} は2,600～3,100 μ である。これらに対しては、断面形状および帯筋比の違いによる影響は顕著には現れていない。しかし、最大圧

縮応力度以後の下降勾配は帯筋比の増加につれて緩やかになり、また終局時のひずみも帯筋比が大きくなるにつれて増加する。このような傾向は、正方形断面より円形断面の方が顕著であり、円形断面の方が正方形断面よりも拘束効果が大きいことがわかる。

このように、 f_{cc} や ε_{cc} に対しては帯筋比が増加してもその効果があまり現れてこないが、下降勾配に対しては帯筋比の効果が現れてくる。これは、帯筋比が0.38~0.56%と小さい場合には、応力上昇域ではP C鋼棒による横拘束力がまだ小さく、P C鋼棒の横拘束効果が顕著に現れていないためと考えられる。その後、コンクリートが最大圧縮応力度に達して周方向に膨張し始め、P C鋼棒による拘束力が大きくなり、横拘束効果が現れてくると同時に、供試体の形状による影響も次第にはっきり現れるようになってくると考えられる。

(2) 帯筋比が0.86~3.33%と大きい場合

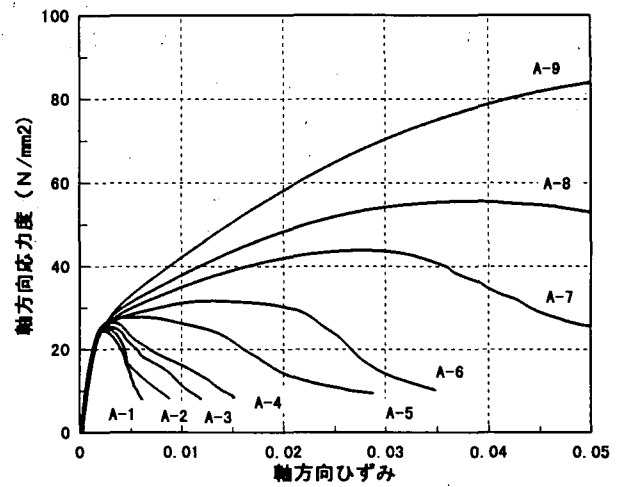
円形断面 (A-5~A-9)、正方形断面 (B-5~B-9) ともに、コンクリートの軸方向ひずみが2,300~2,500 μ 程度に達しても、軸方向応力度は、無補強供試体や帯筋比が0.38~0.56%程度と小さい場合のように低下することはなく、軸方向応力度は軸方向ひずみの増加とともに上昇し続ける。

上述した帯筋比が小さい場合とは異なり、この場合には、拘束効果に及ぼす断面形状の影響がはっきり現れている。例えば、円形断面供試体 (A-8) の場合を見てみると、コンクリートの軸方向ひずみが約2,500 μ に達すると、軸方向応力度の上昇勾配は緩やかとなり、コンクリートの軸方向ひずみが約4,000 μ に達すると、軸方向応力度の上昇勾配は約 $1.3 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 程度になる。その後、ほぼこの上昇勾配で軸方向応力度は上昇し続け、やがて軸方向応力度は最大となる。この時のコンクリートの軸方向応力度は56.6 N/mm^2 であり、軸方向ひずみは38,900 μ である。

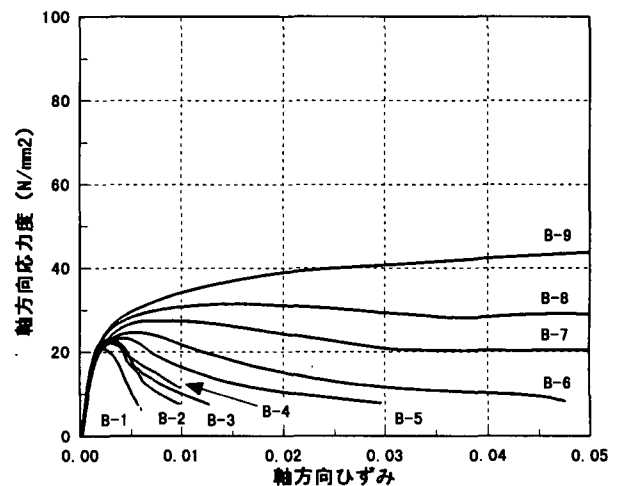
一方、正方形断面供試体 (C-8) の場合は、コンクリートの軸方向ひずみが約2,500 μ に達すると、軸方向応力度の上昇勾配は緩やかとなり、コンクリートの軸方向ひずみが約8,000 μ に達すると、軸方向応力度の上昇勾配は約 $1.7 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$ とほぼ水平に近くなる。やがて軸方向応力度は最大なるが、この時のコンクリートの軸方向応力度は31.5 N/mm^2 であり、軸方向ひずみは15,533 μ であった。これは、上述した円形断面供試体の軸方向応力度やその時の軸方向ひずみと比較すると、それぞれ43%、60%程度小さい。

以上のことから、帯筋比が同じであっても、円形断面の方が正方形断面よりP C鋼棒による拘束効果が大きいと考えられる。

帯筋にP C鋼より線を使用し、緊張・定着し、プレ



(a) 円形断面の場合 (Aシリーズ)



(b) 正方形断面の場合 (Bシリーズ)

図-2 帯筋にP C鋼棒を使用した場合のコンクリートの軸方向応力度-軸方向ひずみの関係

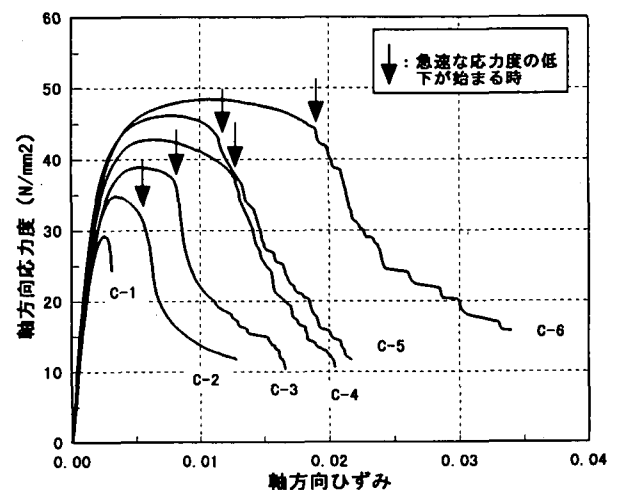


図-3 帯筋にP C鋼より線を使用した場合のコンクリートの軸方向応力度-軸方向ひずみの関係

ストレスを導入した供試体では、図－3より、帯筋比を大きくすると、コンクリートの最大圧縮応力度およびこの時の軸方向ひずみはともに大きくなる。最大圧縮応力度に達した後、軸方向ひずみの増加にともなう軸方向応力度は低下するが、この低下割合は帯筋比が大きい程小さくなる。さらに軸方向ひずみが増加し、軸方向筋の座屈が大きくなる。コンクリートの破壊およびP C鋼より線の破断をとともなう破壊による軸方向応力度の急速な低下が始まる時の軸方向ひずみをコンクリート柱の終局ひずみと考えると、帯筋比が大きくなる程このひずみは増加する。(図－3中の矢印の位置)

例えば、C-2供試体(帯筋比0.20%)では、軸方向ひずみが3,525 μ で最大圧縮応力度の34.9N/mm²となる。この時のひずみは無補強供試体の1.43倍であり、応力度は1.19倍である。その後、軸方向応力度の下降勾配は 1.6×10^3 N/mm²と無補強供試体の下降勾配より緩やかになり、軸方向ひずみが5,371 μ に達すると軸方向応力度は急速に低下した。

一方、C-2供試体に比べて2.8倍の帯筋比を有するC-6供試体(帯筋比0.57%)では、軸方向ひずみが10,921 μ で48.5N/mm²の最大圧縮応力度となる。この時のひずみはC-2供試体の3.10倍であり、応力度は1.39倍である。その後、軸方向応力度の下降勾配は 5.4×10^2 N/mm²とC-2供試体の下降勾配より緩やかになり、軸方向ひずみが18,988 μ に達すると軸方向応力度は急速に低下する。

以上のことから、P C鋼より線を緊張・定着し、コンクリート柱にプレストレスを導入した場合には、帯筋比が増加すれば拘束効果は大きくなる。

4. 結論

P C鋼棒およびP C鋼より線による横拘束効果を把握するために、P C鋼棒およびP C鋼より線を帯筋に使用したコンクリート柱供試体の一軸圧縮試験を行い、帯筋比が増加した場合のコンクリートの軸方向応力度－軸方向ひずみの関係を求めた。本実験の範囲で得られた結論は以下の通りである。

(1) P C鋼棒による横拘束効果

a) 帯筋比が0.38～0.56%と小さい場合

①この範囲で帯筋比が増加しても、コンクリートの最大圧縮応力度は20～27N/mm²でありあまり変化しない。また、この値は無補強供試体の場合と比較してもあまり増加していない。

②この範囲で帯筋比が増加しても、コンクリートが最大圧縮応力度に達する時の軸方向ひずみは2,600～3,1

00 μ でありあまり変化しない。この値は無補強供試体と比較してもあまり変わらない。

③この範囲で帯筋比が増加すると、コンクリートが最大圧縮応力度に達した後の下降勾配は緩やかになり、終局ひずみを増加させる。このような傾向は正方形断面より円形断面の方が顕著である。

b) 帯筋比が0.86～3.33%と大きい場合

無補強供試体や上述の帯筋比が0.38～0.56%と小さい場合の拘束コンクリートのように、2,300～2,500 μ の軸方向ひずみでコンクリートが最大圧縮応力度に達し、その後、下降域に入っていくのではなく、コンクリートの軸方向応力度は軸方向ひずみの増加とともに単調に増加する。この増加割合は帯筋比が大きいほど大きく、また、円形断面の方が正方形断面に比べて大きい。

(2) P C鋼より線による横拘束効果

a) P C鋼より線を緊張・定着し、コンクリート柱にプレストレスを導入した場合、帯筋比が増加すれば最大圧縮応力度に達した以降の下降勾配は緩やかになり、軸方向応力度が急激に低下する時の軸方向ひずみも増加する。

b) P C鋼より線を緊張・定着し、コンクリート柱にプレストレスを導入した場合、帯筋比が増加すれば最大圧縮応力度は増大し、その時の軸方向ひずみも増加する。

謝辞

本研究に際しまして、実験供試体制作時に材料の御提供を頂きました高周波熱錬(株)の溝口茂氏、神鋼鋼線工業(株)の荒木毅氏、また、実験に際して大変有益な御意見を賜りました、東京工業大学研究生の細谷学氏(大成建設(株))に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 吉岡民夫, 廣瀬茂, 手塚正道, 長瀧重義: 帯筋に細径異形P C鋼棒を用いたコンファインドコンクリートの特性, 土木学会第51回年次学術講演会, V-513, pp. 1, 024-1, 025, 平成8年9月
- 2) 星隈順一, 川島一彦, 長屋和宏: 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
- 3) 細谷学, 川島一彦, 星隈順一: 炭素繊維シートで横拘束されたコンクリート柱の応力度－ひずみ関係, 東京工業大学地震工学研究グループ報告書, TIT/EERG96-2, 1996年8月