

# 論文 PC鋼棒にプレストレスを導入したRC柱の耐震補強に関する実験的研究

富名腰 泉\*1・山川 哲雄\*2・李 文聰\*3・倉重 正義\*1

**要旨:** せん断スパン比1.5のRC造短柱に、コーナブロックを介して外帯筋状に配置したPC鋼棒にプレストレスを導入し、耐震補強した柱の一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験を行い、靱性に富んだ曲げ破壊先行の柱試験体に改善できた実験結果と、これらの解析結果を整理し、本補強法の有効性を検証した。

**キーワード:** PC鋼棒, プレストレス, RC柱, 耐震補強, 靱性, 曲げ破壊

## 1. 序

著者らはコーナブロックを介して外帯筋状に、しかも同一平面上に配置したPC鋼棒にプレストレスを導入するRC柱の靱性型耐震補強法を提案した<sup>1,2)</sup>。それによると、せん断破壊するせん断スパン比1.5の既存RC柱を靱性に富んだ曲げ破壊先行の柱に容易に改善することができた。しかし、上記の文献1), 2)では主筋量はやや少ない方であるが(12-D10( $P_g=1.38\%$ )), コンクリート強度が27.4MPaと実状よりやや高めに設定されているので、本論では実状に合わせてコンクリート強度を低くし(18.4MPa), しかも主筋量が多い(12-D13( $P_g=2.44\%$ )), 同じせん断スパン比1.5のRC柱の耐震補強実験を計画した。したがって、本研究における柱は文献1)と同じせん断スパン比1.5といえども、さら

にせん断破壊しやすい脆性柱に近い状況にある。このような柱でも本耐震補強法によりせん断強度を大幅に増大させることができるならば、曲げ強度が大きく、しかも靱性が期待できる曲げ破壊を先行させることが可能となる。このような耐震性

能、いわゆる強度と靱性の改善が可能かどうかを検証することに、本研究の目的がある。

## 2. 実験計画

250mm正方形断面を有するせん断スパン比1.5の短柱5体の加力実験を計画した。耐震補強の詳細をFig.1に、その一覧表をTable 1に示し、使用材料の力学特性値などをTable 2に示

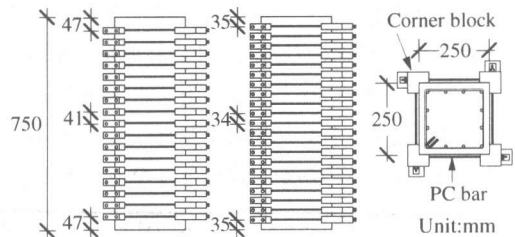


Fig. 1 Details of seismic retrofit for RC column

Table 1 Column specimens

	R99M-P0	R99M-P150	R99M-P105	R99M-P41'	R99M-PH34'
Specimen					
$\frac{M}{VD}=1.5$	250	75	60	41	34
PC Bar	—	3.8φ-@150	3.8φ-@105	5.4φ-@41	5.4φ-@34
Prestress	—	490MPa			840MPa
Concrete	$\sigma_B=18.4\text{MPa}$				$\sigma_B=24.1\text{MPa}$
Common details	Longitudinal reinforcement: 12-D13 SD295A( $p_g=2.44\%$ ) Transverse reinforcement: φ3.7-@105( $p_w=0.08\%$ ) Unit:mm				

\*1 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (正会員)

\*2 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 工博 (正会員)

\*3 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻

\*4 高周波熱錬(株) 製品事業部 営業部 次長

**Table 2 Properties of rebars and PC bars**

Type		A(cm <sup>2</sup> )	f <sub>y</sub> (MPa)	ε <sub>y</sub> (%)	E <sub>s</sub> (GPa)
Rebar	D13	1.27	359	0.18	199.6
	φ3.7	0.11	333	0.17	195.9
PC bar	φ3.8	0.11	1202	0.60	200.0
	φ5.4	0.23			

Notes: A = cross section area, f<sub>y</sub> = yield strength of steel, ε<sub>y</sub> = yield strain of steel, E<sub>s</sub> = modulus of elasticity.

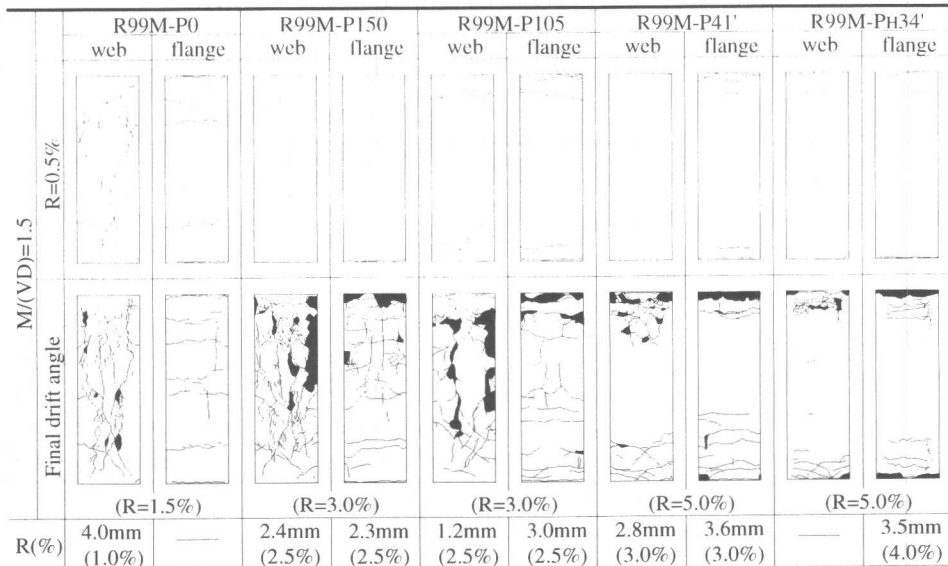
す。P C鋼棒を利用した外帯筋タイプの方法は、柱四隅に配置したコーナブロック[材質：S45C(機械構造用炭素鋼)]を介して3.8φおよび5.4φのP C鋼棒を同一平面上に外周帯筋のように配置した上で、そのP C鋼棒にプレストレスを導入して柱を高横拘束する耐震補強法である。

載荷方法は建研式加力装置を用い、一定軸圧縮力比0.2のもとで、正負繰り返し水平加力実験を行った。本試験体はせん断スパン比が1.5と小さい上に、コンクリート強度が小さく、主筋量が2.44%と多いので、せん断破壊もしくは付着割裂破壊が生じやすい柱と推定される。したがって、P C鋼棒の間隔を粗の状態から密に、しかもP C鋼棒の径とプレストレスレベルも変動させた実験を行い(Table 2参照)、靱性に富んだ理想的な曲げ破壊が可能かどうかの検証も意

図した。特に密な補強として、5.4φのP C鋼棒を34mmピッチに配置し、P C鋼棒の降伏ひずみの約2/3に相当する4200μ(840MPa)のプレストレスを導入したR99M-PH34'も用意した。それ以外の試験体は3.8φと5.4φのP C鋼棒を、降伏点ひずみ(約6000μ)の約1/3強の2450μ前後(490MPa)のプレストレスを導入した。ただし、R99M-PH34'は他の試験体(σ<sub>B</sub>=18.4MPa)と異なり、コンクリート強度が打設日程と加力実験日程との関係で24.1MPaとやや高くなっている。

### 3. 実験結果と考察

観察された柱試験体のひび割れをFig.2に示す。なお、Fig.2の下段に参考まで測定した最大ひび割れ幅とその時の部材角Rを( )に示した。せん断力Vと部材角R、および柱材軸の平均鉛直ひずみε<sub>v</sub>と部材角Rの関係に関する実験結果をFig.3に示す。Fig.3のV-R曲線に破線で示した直線は、P-δ効果を考慮した多段配筋柱の曲げ強度略算値<sup>3)</sup>である。Fig.4にP C鋼棒の配置を示し、その中から柱頭と柱中央における代表的なP C鋼棒(Fig.4に示す番号)のひずみ測定結果をFig.5に示す。なお加力実験中に降伏したP C



Note: Arabic numerals denote maximum crack width and its drift angle in parentheses.

**Fig. 2 Observed cracking patterns**

鋼棒には Fig.4 で×印を付した。

本試験体は主筋量が 12-D13 (pg=2.44%) と多い割には、せん断補強筋が一般に少ない傾向 (3.7φ @105 (pw=0.08%)) にある。基準柱試験体 R99M-P0 は R=0.5% の 3 回目の押し引き時に、柱中央に顕著なせん断ひび割れが生じた (Fig.2 参照)。そのため 1.5% までの正負繰り返し加力により耐力が著しく低下し、破壊に至った。柱の主筋が引っ張り降伏しない前の脆的なせん断破壊であった。また R99M-P150 は、R=0.18% と R=-0.14% 時に柱頭にせん断ひび割れが生じたが、耐力低下は見られなかった。しかし、R=1.12% と R=-0.6% で柱中央部にせん断ひび割れが生じ、柱中央部が膨張して、No.3 の PC 鋼棒が降伏近くに至った。No.4 の PC 鋼棒は Figs.4,5 に示すように、降伏した。web の 4 段目の PC 鋼棒も降伏し (Fig.4 の×部分)、Fig.3 に示すように R99M-P150 の耐力低下は部材角の増大とともに徐々に観察された。柱の主筋は降伏せず、せん断破壊後に付着すべりが生じている (Fig.3 参照)。

R99M-P105 は R99M-P150 と同様に主筋が降伏せず、せん断破壊後に付着すべりが生じた。なお、この柱の PC 鋼棒は降伏していない。最大耐力は R99M-P150 とほぼ同じであるが、耐力低下はある程度押さえられた。

一方、R99M-P41' は正負繰り返し外力による耐力低下が非常に小さく、主筋が降伏強度に達し、曲げ降伏後に付着すべりが若干生じた。この柱の耐震性能は R99M-P105 に比べ著しく改善された。しかし、十分満足できるような耐震性能結果ではない。また、R99M-PH34' は柱の部材角を 5.0% まで増大させても水平耐力の低下がなく、履歴特性は紡垂形に近い安定したループを描いている (Fig.3 参照)。すなわち、主筋が曲げ

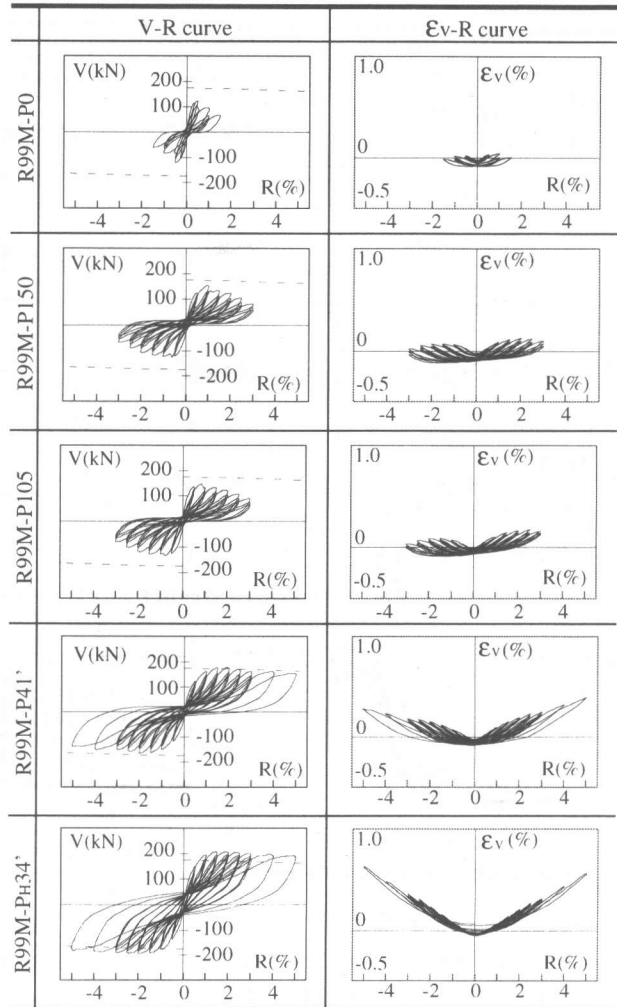


Fig.3 Measured V-R and  $\epsilon_v$ -R relationships

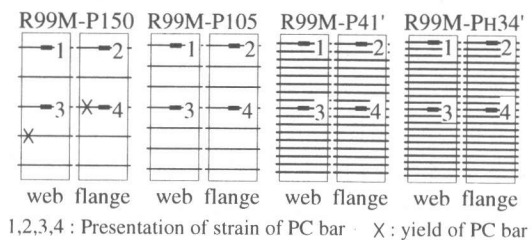


Fig.4 PC bar arrangement

降伏し、耐震性能がかなり改善されていることがわかる。このことは、Fig.3 に示した  $\epsilon_v$ -R 曲線からも明らかである。さらに、Fig.5 に示した PC 鋼棒のひずみからも、柱頭のひずみ変化が大きく、柱中央部分はひずみ変化がほとんど見られず、剛体的挙動を呈している。

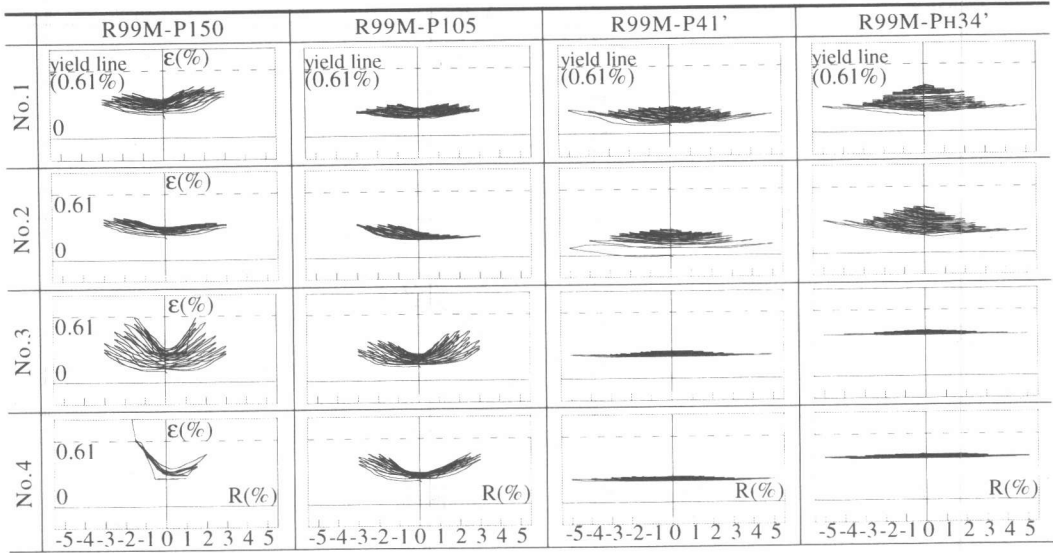


Fig. 5 Measured strain  $\epsilon$  of PC bars versus drift angle R

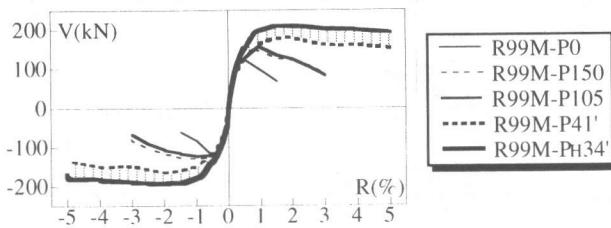


Fig. 6 Measured skeleton curves

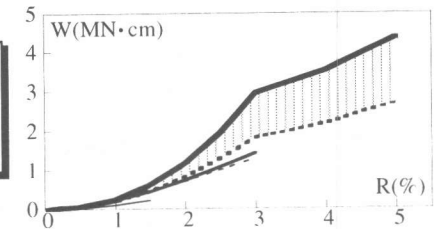


Fig. 7 Accumulated absorbed energy

Fig.5に示したPC鋼棒のひずみには、その形状から谷形、山形と水平形タイプの大きく3通りに分類できる。谷形は部材角の増大とともにPC鋼棒のひずみは大きくなるが、正負繰り返すごとにひずみが小さくなり、プレストレスが消失していることを意味する。一方、山形は部材角の増大とともにPC鋼棒のひずみは大きくなり、正負繰り返すごとにひずみが小さくなり、谷形と同じ挙動を示す。最後に水平形はPC鋼棒のひずみが部材角の増大や正負繰り返す回数にかかわらず、変動することなく初期状態を維持していることを意味する。

Fig.6に実験結果としてスケルトンカーブを、Fig.7に累積エネルギー吸収量をそれぞれ示す。Fig.8にせん断余裕度に対する耐力実験値とせん断、および曲げ強度計算値の比を示す。せん断強度 $V_s$ は靱性保証型指針式<sup>1)</sup>で計算し、曲げ強度 $V_f$ はファイバーモデルで計算した。5.4φの

PC鋼棒を34mmピッチで配置し、かつプレストレス(840MPa)を導入したR99M-PH34'の耐震性能が最も改善されている(Fig.6,7参照)。特に、PC鋼棒による横拘束効果が大きく、せん断強度が著しく増大するとともに、曲げ強度も増大している。これは初期のコンクリート強度がやや高い上に、横拘束効果にもなうコンクリート強度の増大による影響である。次いで、5.4φのPC鋼棒を41mmピッチで配置し、プレストレスを導入したR99M-P41'が良い。PC鋼棒で密に耐震補強したこれらの試験体は、Fig.8に示すようにせん断余裕度が1を越え、実験結果もファイバーモデルで計算した曲げ強度までほぼ到達していることがわかる。しかし、基準試験体を含む残りの試験体は、3体ともせん断余裕度が1より小さく、いずれもせん断破壊している。ただし、PC鋼棒で補強したR99M-P150、R99M-P105はPC鋼棒のおかげで、いったん生じ

$V_{exp}$ =measured lateral capacity,  $V_f$ =flexural strength by fiber model,  $V_s$ =shear strength by AIJ design guideline  
 $\mu$ =ductility factor,  $V_{bu}$ =shear strength due to bond failure,  $\tau_{bu}$ =bond strength by AIJ design guideline

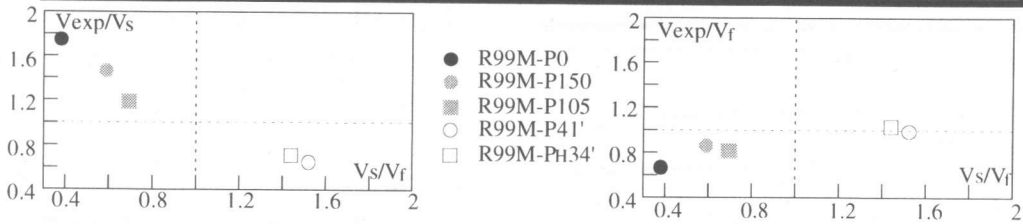


Fig. 8 Experimental results versus calculated shear/flexural strength

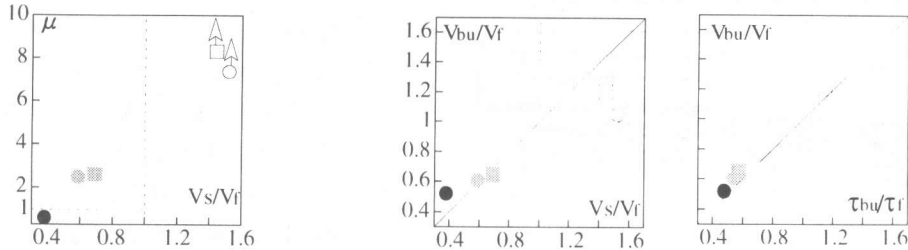


Fig. 9 Ductility factor versus shear/flexural strength

Fig. 10 Shear strength due to bond failure/flexural strength versus shear/flexural strength or bond strength/bond stress

たせん断ひび割れが拡大せず、耐力低下を続けながらも  $R = \pm 3.0\%$  まで正負繰り返し加力を行なうことができた。それは Fig. 3 の V-R 曲線や  $ev$ -R 曲線、さらには Fig. 6 のスケルトンカーブの比較からも明白である。また、実験から得られた塑性率もせん断余裕度が增大するにつれて確実に増大し、靱性が確保されていることが Fig. 9 よりわかる。Fig. 9 で矢印は塑性率がそれ以上期待できることを示す。これは部材角  $R$  が大きいても  $R=5\%$  で、加力実験が終了しているからである。なお、塑性率の定義は文献 4) によった。さらに、付着破壊時のせん断強度  $V_{bu}$  もせん断余裕度にほぼ比例している。ここで用いた付着破壊時のせん断強度  $V_{bu}$  は、靱性型指針式による付着強度  $\tau_{bu}$  を、断面力として定義された靱性型指針式の  $V_{bu}$  に代入して求めた<sup>1)</sup>。その  $V_{bu}$  と付着強度  $\tau_{bu}$  の間にもほぼ相関関係が成立している。Fig. 10 の  $\tau_f$  は曲げ降伏時の付着応力であり、 $V_{bu}/V_f$  と  $\tau_{bu}/\tau_f$  は付着余裕度に相当する。その際にプレストレスは、能動的横拘束効果としてコンクリート強度の増大に寄与し、PC 鋼棒はせん断補強筋として取り扱った。ただし、PC 鋼棒の降伏点強度からプ

レストレスによる初期応力を差し引いた分を  $Pwe\sigma_{wy}$  の  $\sigma_{wy}$  に採用した。せん断スパン比が 1.5 で主筋量が  $P_g = 2.44\%$  と多く、帯筋が  $P_w = 0.08\%$  と少ない本試験体は、脆性的なせん断破壊しやすいかなり条件が厳しい RC 柱といえる。

このような柱の耐震性能を著しく改善するためには、R99M-PH34' のように、かなり密な PC 鋼棒の配置と高プレストレスの導入を必要とするようである。そうすれば、コンクリートの応力-ひずみ曲線が著しく改善されることが Fig. 11 よりわかる。すなわち、コンクリートを PC 鋼棒とプレストレスの導入で高拘束することにより、その強度と靱性が著しく増大する。ただし、R99M-PH34' のみはシリンダー強度がやや高く、24.1MPa であり、他はすべて 18.4MPa である (Table 1 参照)。Fig. 11 で示したコンファインドコンクリートの構成則<sup>5)</sup>を用い、ファイバーモデルに材軸方向の曲率分布を仮定して V-R 曲線を計算し<sup>6)</sup>、実験結果と比較した図が Fig. 12 である。実験では横拘束力とコンクリート強度の差異が曲げ強度に影響を与えているが、解析でもそれが反映されている。更に Fig. 13 で

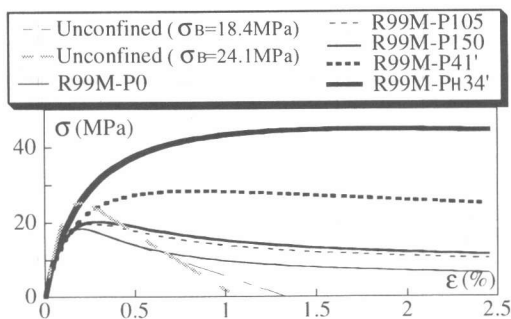


Fig. 11 Calculated stress-strain curves for concrete

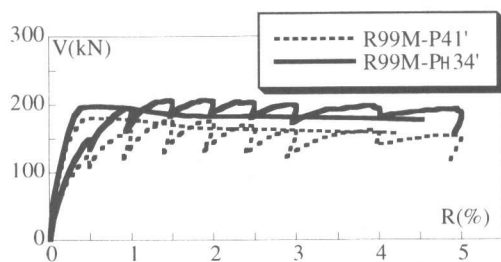


Fig. 12 Measured skeleton curves versus calculated flexural strength relationships

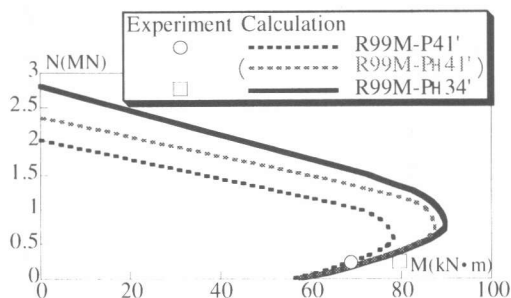


Fig. 13 Calculated N-M interaction diagrams and experimental results

R99M-P41' と同等の配筋，補強方法でコンクリート強度を R99M-PH34' と等しい 24.1MPa にした仮定の試験体(仮に R99M-PH41' とする)についても N-M 曲線を示す。この N-M 曲線からも，軸力が大きくなると，横拘束効果とコンクリート強度の差異が解析でも顕著に現れてくることわかる。

なお，補強 PC 鋼棒量を横補強比  $P_w$  として考えた場合，PC 鋼棒の径と補強間隔を共に大きくしても， $P_w$  が等しければ同じ耐震補強効果が得られるかは興味ある問題である。修正荒川式では  $P_w$  が等しければ同じせん断強度が得られるが，トラス・アーチ理論に基づく AIJ の靱性保

証型指針式<sup>1)</sup>では，トラスの有効係数が導入されているので，必ずしも同等の耐震性能が期待できるとは限らないと推定される。PC 鋼棒の径と間隔については実験的な検証も含めて，今後の検討課題である。

#### 4. 結論

PC 鋼棒を用い，かつプレストレスを導入する柱の耐震補強法は，主筋量が多く (12-D13 ( $P_g=2.44\%$ )) せん断破壊しやすい脆性柱に近い柱でも，せん断強度を大幅に増大させることができ，しかも靱性に富んだ曲げ破壊を先行させることが，加力実験により明らかになった。ただし，本例のような RC 柱にあってエネルギー吸収に富んだ理想的な曲げ挙動を得るためには，密に配置した PC 鋼棒と高いプレストレスが必要である。また，補強した PC 鋼棒が降伏するようでは，耐震性能の改善は期待できない。したがって，PC 鋼棒は地震外力を受けても降伏することのないように補強設計を行う必要がある。そのためには AIJ の靱性保証型指針式でせん断余裕度と付着余裕度が共に 1.0 を十分超えるように設計すればよいと考えられる。

#### 引用文献：

- 1) 鴨川茂義，山川哲雄，倉重正義：PC 鋼棒によるプレストレスで横補強した RC 柱の耐震実験，コンクリート工学年次論文報告集，第 21 巻，第 1 号，pp.415-420，1999
- 2) 山川哲雄，鴨川茂義，倉重正義：プレストレスを導入した PC 鋼棒で外帯筋状に横補強した RC 柱の耐震補強法に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 526 号，pp.141-145，1999.12
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 - 1999，日本建築学会，1999.11
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，日本建築学会，1999.8
- 5) 崎野建治，孫玉平：直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，No.461，pp.95-104，1994.7
- 6) 中山耕一，山川哲雄：FIBER モデルを用いた RC 柱の弾塑性解析に関する一検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造 II，pp.337-338，1994.9