論文　ＰＣ鋼棒によりプレストレスを導入した極短柱の耐震補強法に関する実験と解析

飯干　福馬[*1]・山川　哲雄[*2]・李　文聰[*3]

要旨：著者らは外横補強材としてのＰＣ鋼棒にコーナーブロックを利用してプレストレスを導入し，高横拘束した既存ＲＣ柱の靭性型耐震補強法を提案した。しかし，ＰＣ鋼棒が主筋を直接拘束していないので，高軸圧縮力が柱に作用する場合主筋の座屈が発生し，本耐震補強は不利ではないかと考えられる。そこで，このような危惧の有無を明らかにすべく，高軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験を行い，耐震補強極短柱の弾塑性挙動を検討した。

キーワード：ＰＣ鋼棒，プレストレス，極短柱，高軸力，耐震補強，靭性，ＲＣ柱

１．序

ＰＣ鋼棒などの外横補強材を用い，簡便な手法と管理のもとでプレストレスを導入すれば，ＲＣ柱のせん断強度を大幅に増大させ，かつ曲げ圧壊を防止し，せん断破壊しやすい短柱でも靭性に富んだ曲げ降伏機構に破壊機構の変更が可能となる。このように外横補強材によりプレストレスを導入することは，せん断補強効果と受動的横拘束効果（パッシブコンファインメント）のみを利用した鋼板や連続繊維シートを用いた従来の巻き立て工法と異なり，これらの効果に加えてさらに能動的横拘束効果（アクティブコンファインメント）を利用することになる。

以上の観点から，著者らは外横補強材としてのＰＣ鋼棒にコーナーブロックを組み合わせてプレストレスを導入し，高横拘束した既存ＲＣ柱の靭性型耐震補強法を提案した[1)]。しかし，本補強法ではPC鋼棒が柱四隅のコーナーブロックを介して，柱の外周に沿ってコンクリート表面とPC鋼棒の表面間に3mmのスペースを維持しながら配置された。したがって，ＰＣ鋼棒が主筋を直接拘束していないので，軸圧縮力が大きくなると主筋の座屈が生じ，耐震性能の改善に不利になるおそれがでてきた。そこで，本論文では外横補強材にＰＣ鋼棒を利用した場合の高軸圧縮力下の耐震補強効果に注目して，これらの耐震加力実験を行った。

２．実験計画

250×250mmの正方形断面で柱高さ500mmの極短柱による，一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験を建研式加力装置で行った。軸力比は0.2を基準に高軸力比0.4と0.6で行い，部材角R=0.5%から0.5%の増分で3回づつ繰り返し，3.0%まで強制変形を与え，それでも靭性能が期待できる場合にはR=4.0%と5.0%を1回づつ正負繰り返した。柱試験体総数は5体である。

これらの力学的材料定数を主筋や帯筋も含めて**Table 1**に，柱試験体における耐震補強の詳細を**Fig. 1**に，利用したコーナーブロックの詳細図を**Fig. 2**に，試験体一覧表を**Table 2**にそれぞれ

Table 1 Properties of reinforcement

Reinforcement		a(cm^2)	f_y (MPa)	ε_y (%)	E_s (GPa)
Rebar	D10	0.71	371	0.20	186
Hoop	ϕ3.7	0.11	391	0.19	205
PC bar	ϕ5.4	0.23	1202	0.61	200

Note : a=cross section area, f_y=yield strength of steel, ε_y=yield strain of steel, E_s=modulus of elasticity.

*1 高周波熱錬（株）　製品事業部　開発計画部　課長　（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　理工学研究科博士後期課程生産エネルギー工学専攻　工修　（正会員）

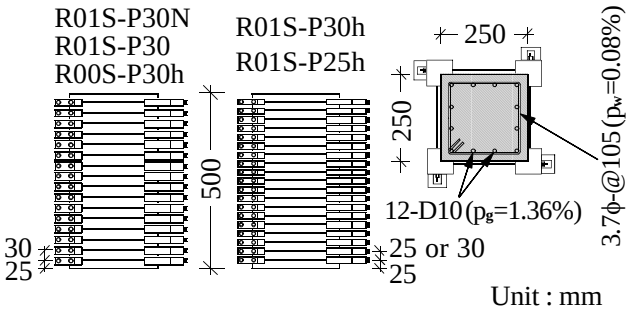

Fig. 1 Details of seismic retrofit for columns

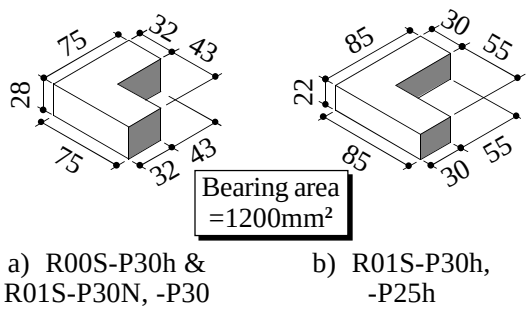

Fig. 2 Details of corner block

Table 2 Column specimens

	Seismic retrofit				
	R01S-P30N	R01S-P30	R00S-P30h	R01S-P30h	R01S-P25h
Specimen M/(VD)=1.0	30	30	30	30	25
N/(bDσB)	0.4		0.6		
PC bar	5.4ϕ-@30				5.4ϕ-@25
Prestress	Non	490MPa			
σB	16.6MPa		16.5MPa	16.6MPa	
Common details	Rebar : 12-D10 (p_g=1.36%), Hoop : 3.7ϕ-@105 (p_w=0.08%) Unit : mm				

示す。**Fig. 2** b) に示したコーナーブロックは，高軸力比0.6の柱試験体R01S-P30hとR01S-P25hの両試験体に用いたが，この支圧面積は**Fig. 2** a) に示した従来からのコーナーブロックと同じである。しかし，ウイングの幅が細く，その分長いので横拘束効果が中間主筋まで有効に作用し，座屈防止効果がある程度期待できる。ＰＣ鋼棒のプレストレスは降伏点ひずみの約1/3強の2450μで，ＰＣ鋼棒（5.4ϕ）1本当たり11.3kNである。

３．実験結果及び考察

観察された各柱試験体のひび割れ状況を**Fig. 3** に示す。柱試験体のせん断力Ｖと部材角Ｒ，及び柱材軸上の平均ひずみ ε_v と部材角Ｒの関係に関する実験結果を**Fig. 4** に示す。**Fig. 4** のV-R曲線図に破線で示した直線は，多段配筋柱の曲げ強度略算値[2)]である。さらに，**Fig. 5** にＰＣ鋼棒のひずみ測定結果の明示位置を示し，**Fig. 6** にこれらのひずみ測定結果を示す。

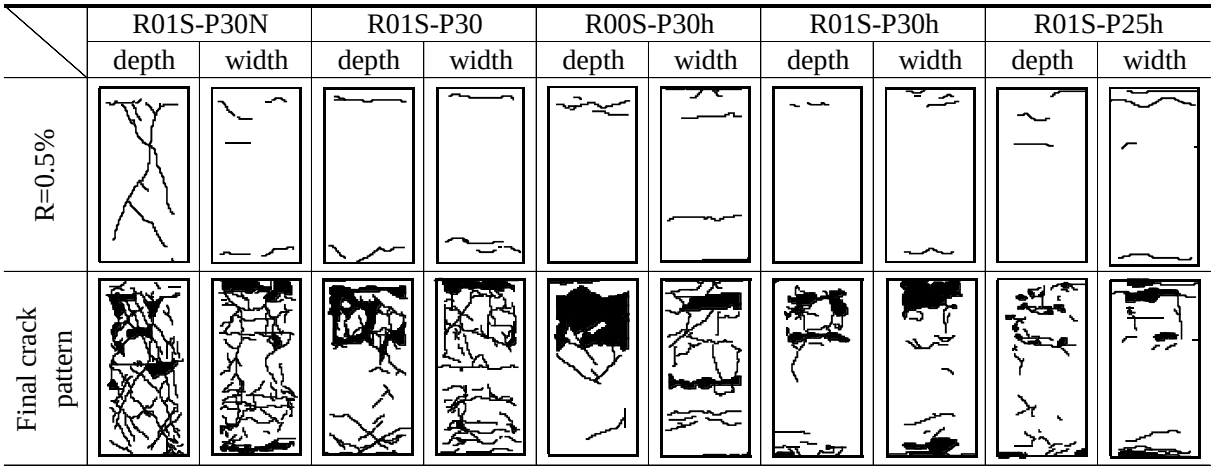

Fig. 3 Observed cracking patterns

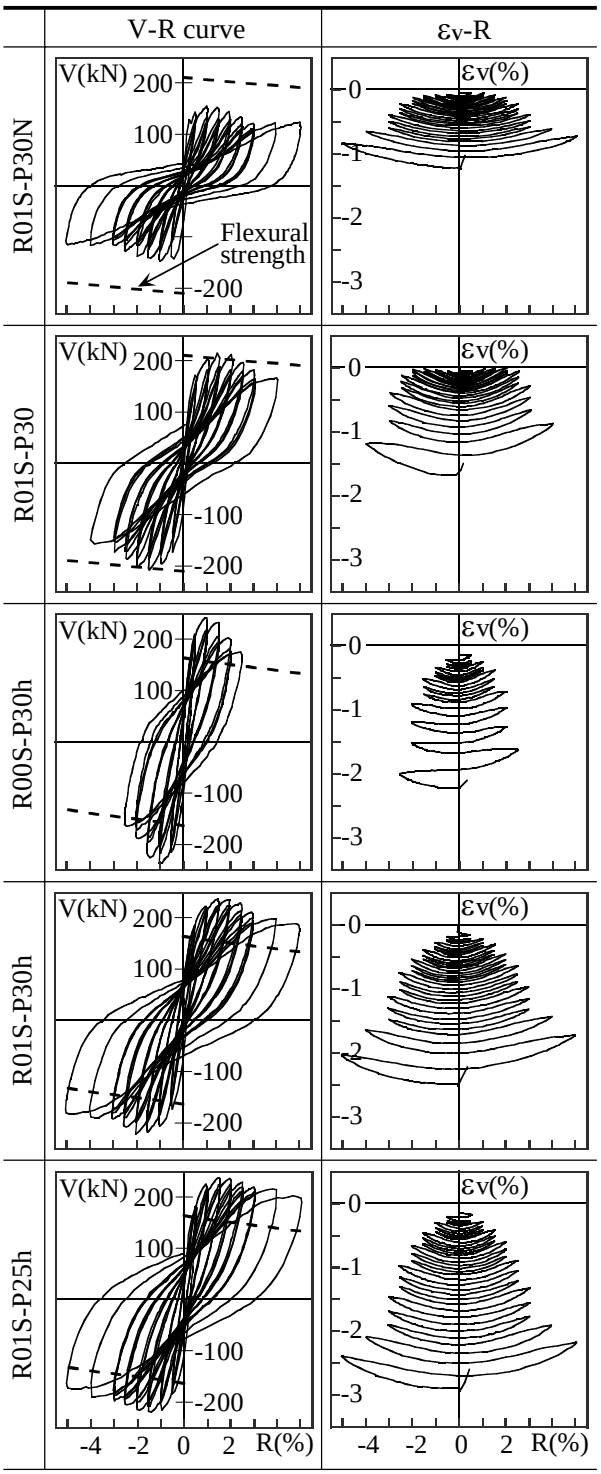

Fig. 4 Measured V-R and ε_v-R relationships

軸力比0.4で，ＰＣ鋼棒にプレストレスを導入していない柱試験体R01S-P30Nは，最初の載荷時のR=0.26%でせん断ひび割れが生じ（**Fig. 3**参照），耐力が少し低下した。その後ＰＣ鋼棒の受動的横拘束効果により，R=0.32%時から耐力が上がるが，多段配筋柱の曲げ強度略算値に到達しない前に付着劣化を起こし（**Fig. 3**参照），十分な補強効果を期待できないことがわかる。本試験体は曲げ降伏していないので主筋も引張降伏せず，また柱端部の曲げ圧壊も，主筋の座屈も小さい傾向にあるので，ε_v-R曲線における圧縮ひずみの進展は緩慢である（**Fig. 4**参照）。

一方軸力比0.4で，ＰＣ鋼棒にプレストレスを導入する柱試験体R01S-P30は，水平耐力が多段配筋柱の曲げ強度略算値に到達し，かつ靭性に富んだ弾塑性挙動を示していることが分かる（**Fig. 4**参照）。したがって，プレストレスによる能動的横拘束効果は効果的であることが分かる。

ＰＣ鋼棒の配置間隔を30mmにして，軸力比を0.6に上げた柱試験体R00S-P30h[3]は，正負繰り返し水平加力実験結果によると，V-R曲線は少し大きな紡錘形状を描いているが軸圧縮力が大きいので，柱頭の主筋が座屈し，カバーコンクリートがはらみだした。その結果，カバーコンクリートがＰＣ鋼棒に接し，分布横荷重をＰＣ鋼棒が直接受けることになり，柱頭の柱せい側のＰＣ鋼棒が降伏した（**Fig. 6**参照）。このように高軸力下では若干課題があるものの，本補強法はせん断破壊する柱のせん断強度を大幅に引き上げ，靭性に富んだ曲げ挙動に移行させうることが可能な耐震補強法である見通しを得た。

同じ軸力比0.6で，ＰＣ鋼棒の間隔が30mmで配置した試験体R01S-P30hと，間隔が25mmでＰＣ鋼棒を配置した試験体R01S-P25hは望ましい曲げ挙動をしている（**Fig. 4**参照）。しかも，高軸圧縮力と横拘束効果の影響で多段配筋柱の曲げ強度略算値[2]より，かなり高めの実験結果が得られている。このことは柱試験体R00S-P30hでも同じである。曲げ強度略算値が高軸力比になるほど低下している理由は，略算値に横拘束効果による影響が考慮されていないため，本論の柱試験体の軸力比が全て釣り合い軸力比を越え，軸力比の増大と共に，曲げ強度略算値が次第に小さくなるからである。

ＰＣ鋼棒の配置間隔が25mmであれ（試験体R01S-P25h参照），30mmであれ（試験体R01S-P30h参照），差異はほとんどないが，部材角が3%

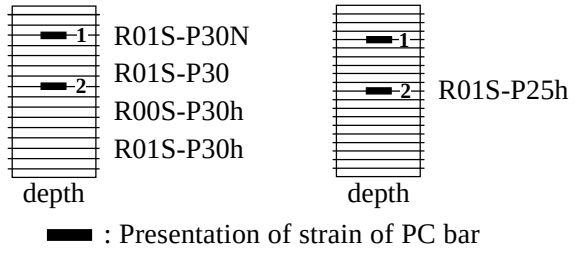

Fig. 5 Presentation of measured strain of PC bars

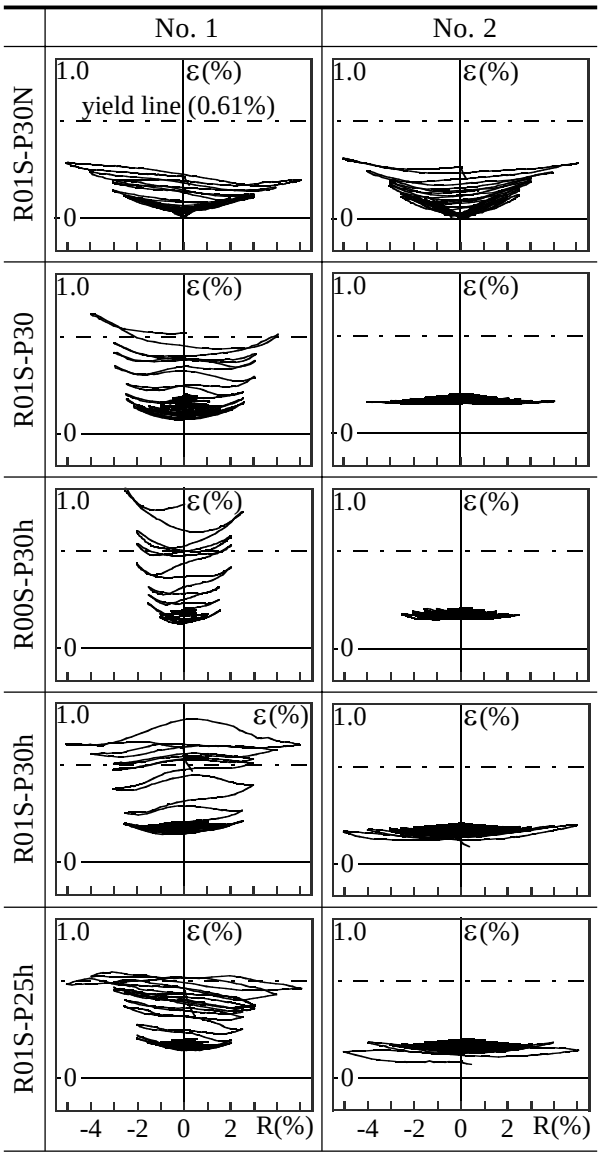

Fig. 6 Measured strain of PC bars

近くになるといずれの柱試験体も柱頭における中間主筋の座屈が目立ってきた。しかし, 試験体R00S-P30hと比較すると明らかに差異がある。この原因は**Fig. 2**に示したコーナーブロックの差異にある。すなわち, **Fig. 2** b)に示したコーナーブロックはウイングの幅が細く, その分長いので横拘束効果が中間主筋まで有効に作用し, 中間主筋の座屈防止効果がある程度期待できたからであると思われる。コーナーブロックにおいてウイングの長い（**Fig. 2** b) 参照）試験体 R01S-P25h と R01S-P30h は, ウイングの短い（**Fig. 2** a) 参照）試験体 R00S-P30h より靭性がさらに改善されたものと推定される。

Fig. 6からわかるように, 試験体R01S-P30Nの柱頭と柱中央のＰＣ鋼棒のひずみは部材角 R の増大と共に大きくなる。プレストレスを導入した各試験体の柱頭のＰＣ鋼棒のひずみは部材角Rが小さい範囲では, Rの増大と共にひずみは徐々に小さくなり, ＰＣ鋼棒のプレストレスが緩和される傾向にある。R が大きくなると柱頭のカバーコンクリートが膨張し（**Fig. 3**参照）, カバーコンクリートがＰＣ鋼棒に接し, 分布横荷重をＰＣ鋼棒が直接受けることになり, ＰＣ鋼棒が曲げによる降伏ひずみに到達する傾向にある。プレストレスを導入した各試験体の柱中央のＰＣ鋼棒のひずみの変化はRの増大と共に小さい。すなわち, コアコンクリートのはらみだしを, ＰＣ鋼棒が押さえこんでいることがわかる。

ＰＣ鋼棒にプレストレスを導入した補強柱試験体は曲げ強度略算値に等しいか, それ以上の実験結果になっている。しかし, 部材角Rが増大してくると曲げ圧壊も進行し, 高軸力のため主筋も座屈傾向になり, カバーコンクリートが徐々にはらみ出してくる。

以上の実験結果および考察より, 本補強法はコーナーブロックの支圧部分の面積形状と, ＰＣ鋼棒自身の剛性や生じる曲げモーメントなどにも注意を払うと, 高軸力に対しても十分に対処できることを示唆している。

４．解析的検討

軸力比の変化が曲げ強度に与える影響を検討するために, 横拘束されたコンクリートの構成則を崎野・孫式[4]で計算した結果を **Fig. 7** に示す。ただし, プレストレスによる能動的横拘束効果に関しては, 柱四隅のコーナーブロックを介

して，柱断面の対角線方向に作用する横拘束力を平均的な等価静水圧に換算する。その後，Richartの文献[5]にしたがって，この等価静水圧を4.1σ_r(σ_r= 静水圧)としてコンクリートのシリンダー強度に加算する。帯筋とＰＣ鋼棒は横補強筋として，従来の受動的横拘束効果のみを考慮した崎野・孫式に代入されることになる。**Fig. 7**より，横拘束効果が大きくなるにつれて，コンファィンドコンクリートの構成則であるσ-ε曲線が改善されていることがわかる。

Fig. 7に示したコンクリートの構成則を利用して，N-M曲線をファイバーモデルで計算する。この計算結果を**Fig. 8**に示す。**Fig. 8**からも横拘束効果が増大するにつれて，N-M曲線が外に向かって広がっていることがわかる。すなわち，曲げ耐力が増大している。また，実験結果もこの横拘束効果を考慮すると，よく一致することがわかる。さらに，つり合い軸力比も横拘束効果の増大にともなって大きくなっていることも，この計算結果から理解できる。

Fig. 7の構成則を利用してファイバーモデルでV-R曲線を計算した。せん断強度に関するAIJ靭性指針式V_u[6]と付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度V_{bu}（小谷・前田式[7]），及び実験で得られたスケルトンカーブとの比較を**Fig. 9**に示す。V_uとV_{bu}を計算する時には，コンクリート強度に上記のコンファインドコンクリートの強度を用い，ＰＣ鋼棒は帯筋比に算入して，これらのせん断強度を計算した。試験体R01S-30Nのファイバーモデルによる曲げ強度V_fとせん強度V_uと

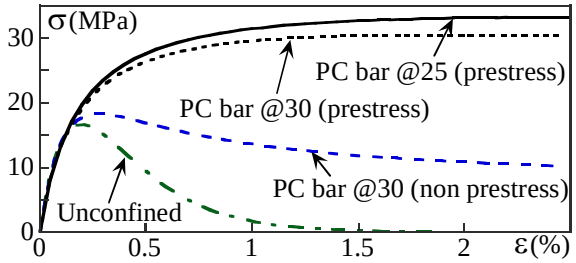

Fig. 7 σ-ε curves for concrete

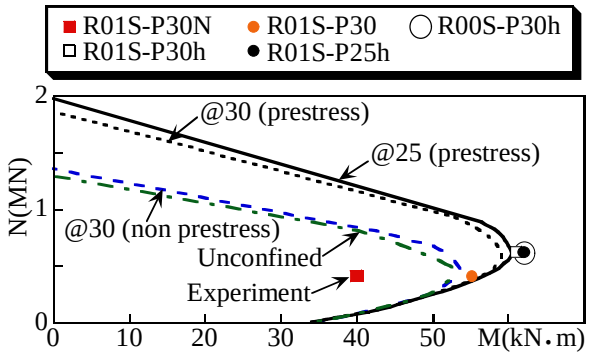

Fig. 8 Calculated N-M interaction diagrams and experimental results

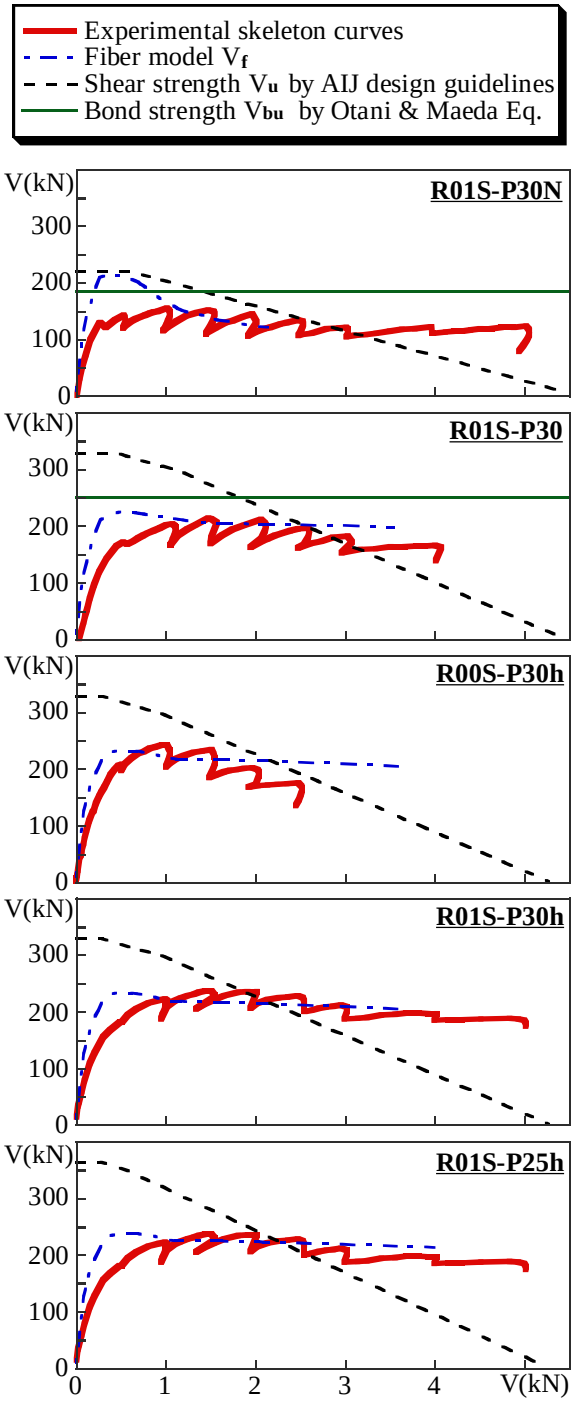

Fig. 9 Calculated and experimental results

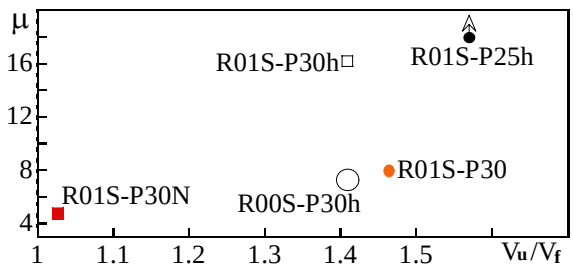

Fig. 10 Ductility factor μ versus V_u/V_f

付着破壊時のせん断強度V_{bu}の中に，V_{bu}が最も低いので，付着劣化と推定した。試験体R01S-P30のV-R曲線はファイバーモデルによる曲げ強度曲線V_fをほぼとらえている。

試験体R00S-P30h，R01S-P30hとR01S-P25hは軸力比が高く，付着破壊が生じにくい。また，試験体R01S-P30hとR01S-P25hのスケルトンカーブはファイバーモデルによる曲げ強度曲線V_fにほぼ一致し，曲げ破壊と判断した。一方，試験体R00S-P30hのV-R曲線が部材角R=1.5%以前は曲げ強度曲線V_fにほぼ一致し，R=1.5%以後は急に低くなっているので，曲げ圧縮破壊と推定した。

Fig. 10に塑性率μとせん断余裕度V_u/V_fの関係を示し，図中の矢印は塑性率がそれ以上期待できることを示す。なお，塑性率の定義は文献６）によった。**Fig. 10**からわかるように，試験体R01S-P25hの耐震性能が最も改善されている。また，同じ軸力比0.4で，ＰＣ鋼棒にプレストレスを導入していない試験体R01S-P30Nと導入した試験体R01S-P30の塑性率に関する差異は，**Fig. 10**に示すように小さい。しかし，同じ軸力比0.6でも同じ30mm間隔のＰＣ鋼棒で横補強した試験体R00S-P30hとR01S-P30hはコーナーブロックの種類によって，塑性率の差異が顕著である。これは前述のように，コーナーブロックの支圧面積は両試験体とも同じであるが，R01S-P30hのコーナーブロックのウィング長さがR00S-P30hより長いので，コーナーブロックによる横拘束効果が中間主筋まで広がり，全ての主筋の座屈防止に寄与しているからである。

５．結論

ＲＣ柱の四隅にコーナーブロックを配置し、ＰＣ鋼棒を外帯筋状に架け渡し、かつプレストレスを導入する本耐震補強法に関する高軸力比下の５体の柱実験から、下記のことが明らかになった。

（１）高軸力比下では、プレストレスの導入効果が柱の耐震性能に顕著に現れる。

（２）コーナーブロックの支圧面積を確保しつつウイングを長くすれば、高軸力比(軸力比0.6)下でも本耐震補強法は効果的である。

参考文献：

１）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, No. 526, pp. 141-145, 1999.12.

２）日本建築学会:建築耐震設計における保有耐力と変形性能，日本建築学会，pp. 159-160, 1981.

３）飯干福馬，山川哲雄，田川利郎，李文聰：ＰＣ鋼棒にプレストレスを導入して外帯筋状に耐震補強したＲＣ極短柱の高軸力下での弾塑性挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23, No. 1, pp. 931-936, 2001.

４）崎野健治，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ーひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，No.461, pp. 95-104, 1994.7.

５）Richart, F.E. et al: A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, University of Illinois, Engineering Experimental Station, Bulletin , No 185, 1928.

６）日本建築学会:鉄筋コンクリート造建築物の靭性保証型耐震設計指針・同解説，日本建築学会，1999.8.

７）小谷俊介，前田匡樹：異形鉄筋とコンクリートの付着応力伝達機構に基づいた付着割裂強度式（その1, 2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，Ｃ構造Ⅱ，pp. 655-658, 1994.