

論文 緊張PC鋼棒と鋼板で能動拘束した極低強度コンクリートRC柱の水平加力実験

並里 弥生^{*1}・中田 幸造^{*2}・山川 哲雄^{*3}

要旨：本研究ではせん断損傷RC柱の残存コンクリート強度を模擬することを念頭に、コンクリート強度が4.5MPaの極低強度コンクリートRC柱を製作し、緊張PC鋼棒と鋼板で能動的に外部横補強を行った。能動的横拘束がコンクリート強度や曲げせん断性能に与える影響を検証するため、鋼板の有無、鋼板板厚、PC鋼棒の補強間隔を実験変数として水平加力実験を行った。その結果、緊張PC鋼棒による鋼板の圧着により、かぶりコンクリートの剥落防止や中間主筋の座屈が抑制でき、耐力や靱性が向上することを明らかにした。最後に、実験結果から拘束コンクリート強度を逆算し、能動側圧との関係について検証した。

キーワード：極低強度コンクリート、プレストレス、PC鋼棒、コンファインドコンクリート、鋼板

1. 序

緊張PC鋼棒による外部横補強法は（以下、PC横補強法）、コンクリートの圧縮強度を上昇させ¹⁾、かつRC柱のせん断強度も上昇させる²⁾。PC横補強法をせん断損傷RC柱の応急補強法に適用することで³⁾、シリンダー強度の10%前後（2～4MPa前後）まで低下した損傷レベルIVの残存コンクリート強度⁴⁾を、シリンダー強度（25～28MPa）近傍まで回復させ得ることが明らかにされている³⁾。

文献5)では、せん断損傷RC柱の残存コンクリート強度が応急補強後に大きく回復する研究成果を出発点とし、残存コンクリート強度を模擬するために、圧縮強度が4.0MPa前後の極低強度コンクリートRC柱を緊張PC鋼棒と鋼板で外部横補強し、一定軸力下での正負繰り返し水平加力実験を行った。本研究では、緊張PC鋼棒と鋼板による能動拘束が拘束コンクリート、および曲げせん断性能に与える影響の解明を目的とし、鋼板の有無、鋼板板厚、PC鋼棒の補強間隔をパラメーターとして水平加力実

験を行い、実験結果から拘束コンクリート強度を逆算し、能動側圧との関係について検証した。

2. 実験計画

試験体一覧をTable 1に示す。試験体は1辺が250mmの正方形断面で、柱高さ500mm、せん断スパン比1.0の極短柱である。試験体の主筋にはD10を12本使用し

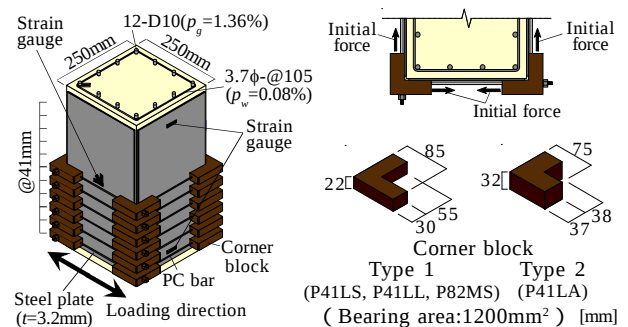


Fig. 1 Details of retrofitted by steel plates and PC bar

Table 1 Details of specimens

Specimen	R09S-RC4	R10S-P41LS	R10S-P41LL	R10S-P41LA	R10S-P82MS
Elevation $M/(VD)=1.0$					
σ_B	3.3MPa	4.5MPa			
PC bar	-	5.4φ-@41mm			
Initial strain of PC bar	-	1176μ	1215μ	1150μ	2405μ
σ_r	-	1.1MPa			
σ_b	-	4.6MPa	4.8MPa	4.5MPa	9.5MPa
Steel plate	-	470 × 240 × 3.2mm	470 × 240 × 1.2mm	-	470 × 240 × 3.2mm
$N/(bD\sigma_B)$	1.5	1.07			

Common details Axial force=300kN, Rebar:12-D10($p_g=1.36\%$), Hoop:3.7φ-@105($p_w=0.08\%$).

Notes: $M/(VD)$ =shear span to depth ratio, σ_B =cylinder strength, σ_r =lateral confining pressure, σ_b =bearing stress, $N/(bD\sigma_B)$ =axial force ratio.

*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 工学部環境建設工学科助教 博士（工学）（正会員）

*3 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 工博（正会員）

Table 2 Mixing values of concrete(kg/m³)

	W	C	W/C	P	Fine aggregate	Gravel	Chemical agent
R09S-RC4	180	86	211(%)	208	934	902	5290(ml.)
R10S- Series	178	83	215(%)	217	876	910	7500(ml.)

Notes: W=water, C=cement, W/C=water-cement ratio, P=stone powder.

Table 3 Mechanical properties of materials

	Reinforcement		<i>a</i> (mm ²)	σ_y, σ_u^* (MPa)	<i>E</i> (GPa)
R09S-RC4	Rebar	D10	71	355	201
	Hoop	3.7 ϕ	11	683	202
R10S- Series	Rebar	D10	71	357	184
	Hoop	3.7 ϕ	11	593	199
	PC bar	5.4 ϕ	23	1103*	206
	Steel plate	<i>t</i> =3.2mm	-	306	203
		<i>t</i> =1.2mm	-	336	215

Notes: *a*=cross sectional area, σ_y =yield strength of steel, σ_u^* =ultimate tensile strength of steel, *E*=Young's modulus of elasticity.

($p_g=1.36\%$), 3.7 ϕ の帯筋を105mm間隔で配筋した($p_w=0.08\%$)。試験体総数は,コンクリート強度 $\sigma_B=3.3\text{MPa}$ の無補強基準試験体⁶⁾が1体(水セメント比:211%,Table 2参照),コンクリート強度 $\sigma_B=4.5\text{MPa}$ の補強試験体が4体(水セメント比:215%,Table 2参照)の計5体である。鋼板を使用した試験体には,鋼板に直接軸力を作用させないように,柱頭柱脚に15mmのクリアランスを設けた(鋼板は実験終了まで上下スタブに接触しなかった)。

無補強基準試験体R09S-RC4⁶⁾(以下,R09S-は省略)は,既発表の試験体だが,比較・検討のためここに再掲する。

R10S-P41LS,R10S-P41LLは(以下,R10S-は省略),直径5.4mmのPC鋼棒を41mm間隔で配置し,導入する緊張力によりそれぞれ厚さ3.2mm,1.2mmの鋼板を柱表面に圧着した試験体である(目標緊張ひずみは1200 μ)。本試験体では,鋼板の板厚の影響を照査する。P41LAは直径5.4mmのPC鋼棒を41mm間隔で配置し,柱表面に鋼板を圧着しない試験体である。ただし,PC鋼棒の緊張力でコーナブロック(Fig. 1参照)がRC柱表面にめり込むことを防ぐために,コーナブロックの下に軽量アングルを設置した。鋼板を圧着している試験体とP41LAとの比較により,鋼板の拘束効果を検証する。P82MSは直径5.4mmのPC鋼棒を82mm間隔で配置し,導入する緊張力により厚さ3.2mmの鋼板を柱表面に圧着した試験体である。P82MSはP41LS,P41LLと同じ能動側圧 σ_r (式(1))を導入するために,目標緊張ひずみを2450 μ とした。

$$\sigma_r = (2_p a) / (b_p s)_p E \cdot \varepsilon_{pt} \quad (1)$$

ここで, p_a :PC鋼棒断面積, b :柱幅, p_s :PC鋼棒間隔, p_E :PC鋼棒のヤング係数, ε_{pt} :PC鋼棒の緊張ひずみである。本試験体ではPC鋼棒の補強間隔を変数とし,P41LS,P41LLとの比較・検討を行う。鋼材の機械的性質をTable 3に示す。全てのPC鋼棒には軸部中央に弾性ひずみゲージを貼付し,ひずみを管理した。

水平加力実験では,部材角 $R=0.125\%, 0.25\%$ を各1回,

$R=0.5\%, R=0.75\%$ を各2回, $R=1.0\% \sim 3.0\%$ を0.5%の増分で各2回,その後 $R=4.0\%, 5.0\%$ を各1回繰り返した。載荷軸力は,耐震補強の対象となる既存建築物のコンクリート強度 F_c を24MPaと想定した長期軸力比0.2に相当する300kNである。よって,軸力比はRC4が1.5,P41LS,P41LL,P41LA,P82MSでは1.07の高軸力となる。なお,無補強基準試験体RC4($\sigma_B=3.3\text{MPa}$)の圧縮耐力計算値は509kN(コンクリート負担分:206kN,主筋負担分:303kN),コンクリート強度が4.5MPaで無補強の場合の圧縮耐力計算値は585kNである(コンクリート負担分:281kN,主筋負担分:304kN)。軸力載荷はPC鋼棒への緊張ひずみ導入後に行ったが,軸力載荷によるPC鋼棒ひずみの変化量は4体とも非常に小さかった(最大で87 μ)。

3. 実験結果

3.1 水平荷重*V*-部材角*R*関係と破壊状況

Fig. 2(a)~(e)に水平荷重*V*と部材角*R*の関係, Fig. 2(f)~(j)に柱の軸ひずみ ε_v と部材角*R*の関係を示す。なお,本研究では, $F_c=24\text{MPa}$ の場合の曲げ強度計算値⁷⁾を参考値として Fig. 2(b)~(e)に示した。

Fig. 3は,RC4とP41LAについては最大水平耐力時,その他の試験体は実験終了後の最終破壊状況である。

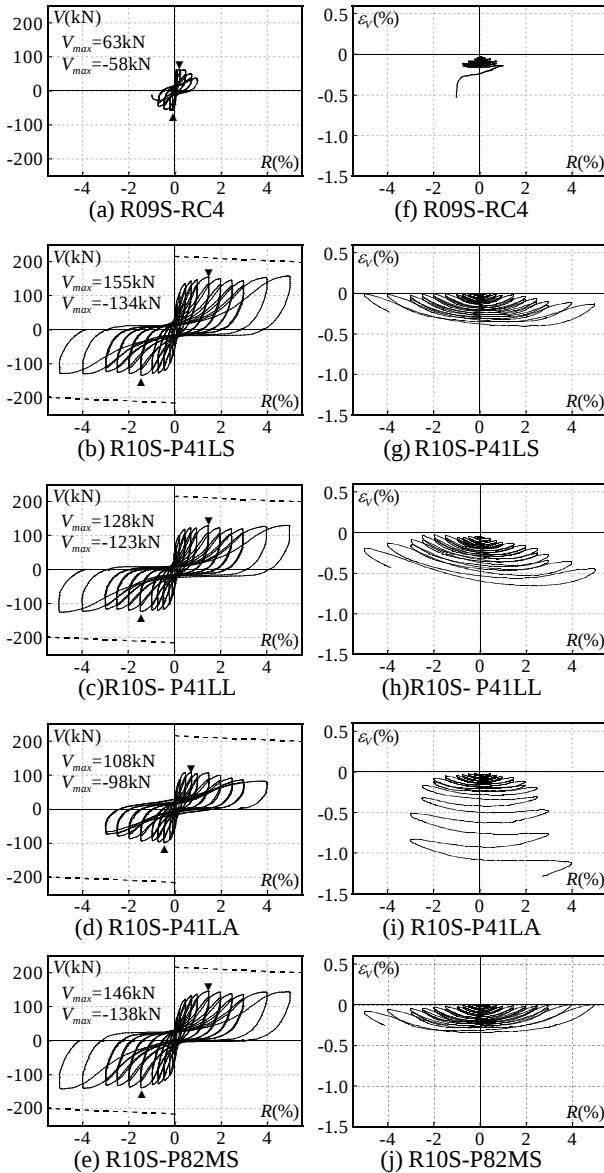
Fig. 2(a)より無補強基準試験体のRC4は, $R=0.25\%$ で最大水平耐力に到達し,せん断ひび割れも生じ始めた。 $R=0.5\%$ で柱頭の隅主筋が圧縮降伏し, $R=0.75\%$ の2回目のサイクルまでにひずみゲージを貼付した全ての柱頭主筋が圧縮降伏した。実験中は主筋に沿ったひび割れも確認できたが,最終的に $R=1.0\%$ でせん断破壊し, Fig. 2(f)のように軸ひずみが急激に進行して軸力を支えきれなくなったため実験を終了した。

Fig. 2(b)より,P41LSは $R=-0.25\%$ で柱脚部引張側に曲げひび割れが発生し, $R=\pm 1.5\%$ で水平荷重155kN,-134kNに達した後,耐力低下を生じた。 $R=\pm 1.5\%$ では柱頭柱脚の隅主筋1本で引張降伏が確認された。この時の柱頭フランジ面(加力方向と直交方向の面, Fig. 1参照)の鋼板ひずみ(周方向のひずみ)は,最大でも引張降伏ひずみの約半分程度である。 $R=\pm 1.5\%$ 以降,圧縮ひずみの進行とともに耐力低下を生じたことから,圧縮側コンクリートの圧壊が進行したと考えられる。正側では一旦耐力が低下した後,再び耐力がわずかに上昇した。 $R=5.0\%$ で柱頭フランジ面鋼板は引張降伏ひずみに到達していることから,拘束効果がやや増加したことが耐力上昇の要因と考えられる。

Fig. 2(c)より,P41LLは $R=0.25\%$ で柱脚部引張側に曲げひび割れが観察され, $R=\pm 1.5\%$ で水平荷重128kN,-123kNに達した後,耐力低下を生じた。 $R=\pm 1.5\%$ で主筋の引張降伏は生じておらず,柱頭フランジ面の鋼板ひず

み(周方向のひずみ)は,最大で引張降伏ひずみの4割程度であった。P41LSと同様,鋼板の横拘束効果の増大により, $R = \pm 4.0\%$, 5.0% 時に耐力がやや上昇した。

Fig. 2(d)より,P41LAは $R = -0.5\%$ で柱頭の引張側と圧縮側に曲げひび割れが生じ, $R = 0.75\%$ で最大水平耐力108kNを記録した。この時,主筋の引張降伏は生じていな



Notes: ▼ Peak point, - - - - Flexural strength ($F_c = 24\text{MPa}$)⁷⁾.

Fig. 2 Measured V - R and ε_v - R relationships

R09S-RC4	R10S-			
	P41LS	P41LL	P41LA	P82MS
$R = 0.25\%$	Final	Final	$R = 0.75\%$	Final

Fig. 3 Observed cracking patterns (depth side)

い。付着ひび割れはほぼ無く,加力とともに柱上部に細かいひび割れが多発し,コンクリートの剥落が多くなり,中間主筋が大きく座屈したため $R = 4.0\%$ で実験を終了した。

Fig. 2(e)より,P82MSは $R = 0.25\%$ で柱脚部引張側に曲げひび割れが生じ始め, $R = 1.5\%$ で最大水平耐力146kNを記録した。この時,主筋の引張降伏は生じておらず,柱頭フランジ面の鋼板ひずみ(周方向のひずみ)は,最大で引張降伏ひずみの4割程度であった。その後耐力は一旦低下したが,P41LS,P41LLと同様,鋼板の横拘束効果の増大により, $R = \pm 4.0\%$, 5.0% 時でやや耐力が上昇した。

なお本論文では, $R = \pm 3.0\%$ 時まで最大となった水平荷重を最大水平耐力実験値とし,実験結果の検証を行う。

Fig. 3より実験中の観察および最終破壊状況から,無補強基準試験体RC4はせん断破壊であるが,その他の補強試験体に関しては曲げ圧縮破壊と考えられる。

3.2 柱主筋のひずみ

Fig. 4は,補強試験体の柱高さ方向における隅主筋のひずみである。Fig. 4は各部材角正側の第1サイクル耐力時のデータであり, $R = 1.5\%$ 時までを示している。Fig. 4より,全試験体において付着劣化が顕著でないことが確認できる。これは補強試験体の最終ひび割れ状況(Fig. 3参照)に付着ひび割れが見られないことと対応している。

3.3 鋼板のせん断力

Fig. 5はウェブ面鋼板の3軸ゲージから求めた鋼板1枚の負担せん断力の算出結果である。Fig. 5(b)には,引張試験による降伏強度を $\sqrt{3}$ で除して求めたせん断降伏強度に,鋼板断面積を乗じて求めたせん断降伏荷重を破線で

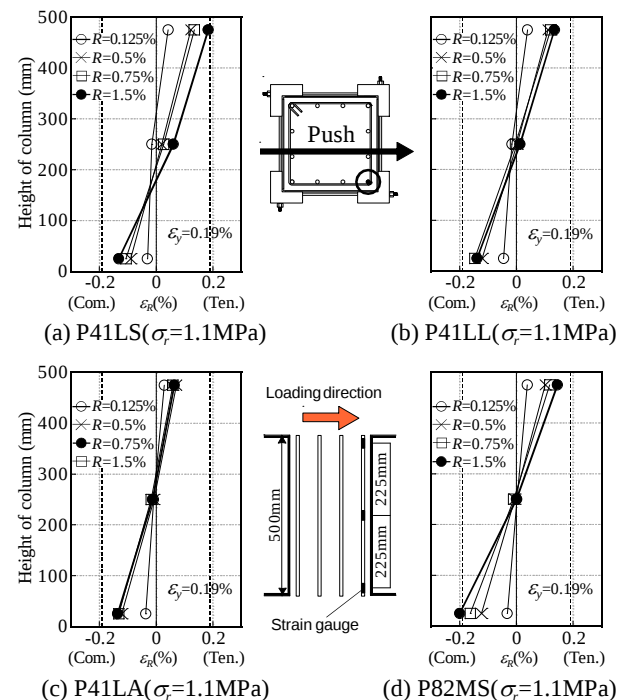


Fig. 4 Strain distributions of longitudinal reinforcements along the height of columns

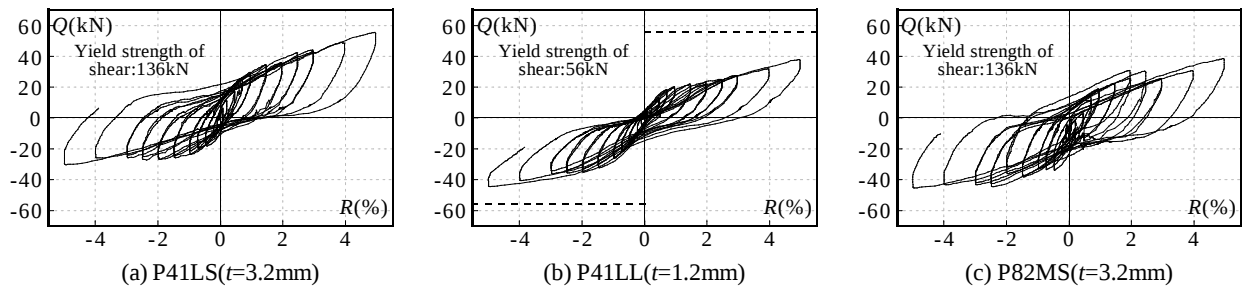


Fig. 5 Observed shear force of steel plates

示した。最大水平耐力時の鋼板 1 枚の負担せん断力は、P41LS、P82MS(鋼板板厚:3.2mm)はそれぞれ34kN、38kNを示しており、せん断降伏荷重136kNに対してそれぞれ25%、28%の割合であった。P41LL(鋼板板厚:1.2mm)の負担せん断力は32kNで、せん断降伏荷重56kNに対し57%であった。鋼板が緊張PC鋼棒で圧着されているため、Fig. 5のようにせん断力を負担できることがわかる。

3.4 PC鋼棒のひずみ

Fig. 6は柱高さ方向におけるPC鋼棒のひずみである。これらは各部材角正側の第1サイクル耐力時のデータであり、 $R=1.5\%$ 時までを示している。Fig. 6より、P41LS、P41LL、P41LAに関しては、PC鋼棒のひずみ増分にあまり変化が見られないものの、P82MSではPC鋼棒ひずみが減少している。鋼板は離散的に配置された緊張PC鋼棒によるコーナブロックからの支圧応力度(式(2)、Table 1参照)を分散させると考えられるが、P82MSの σ_b/σ_p は $2.6(\sigma_p=0.8\sigma_b)^{5)}$ であり、他の試験体($\sigma_b/\sigma_p=1.3$)に比べて大きい。そのため、鋼板が圧着されていても柱へのPC鋼棒からの支圧応力度は他の試験体に比べて大きく、加えて、RC柱は水平加力で損傷を受けているため、PC鋼棒の大きな支圧応力度でRC柱が縮んだことがPC鋼棒ひず

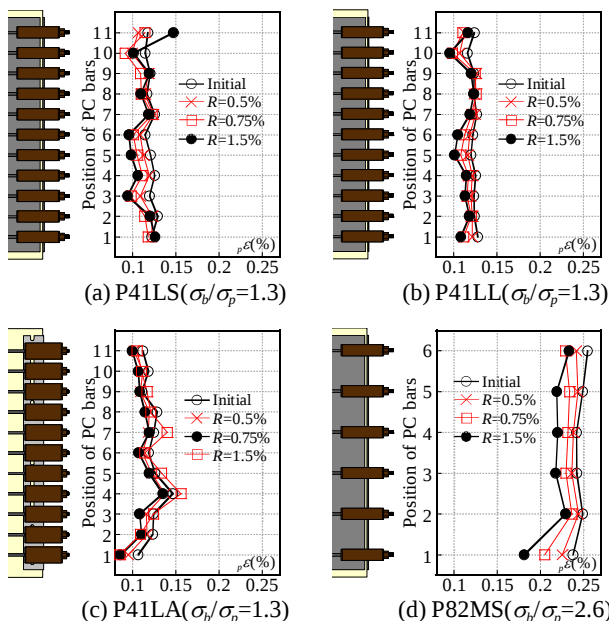


Fig. 6 Distribution of PC bar strain along the height of column

みの減少をもたらした要因であると考えられる。

$$\sigma_b = (E_p \cdot \varepsilon_{pt} \cdot p \cdot a) / B a \quad (2)$$

ここで、 $B a$: コーナブロック支圧面積(1200mm²)、

3.5 スケルトンカーブ

Fig. 7は実験変数で整理し、水平荷重 V を $bD\sigma_p$ で除した値と部材角 R との関係を示したスケルトンカーブである。Fig. 7には、無補強基準試験体RC4のスケルトンカーブが比較のため示されている。鋼板の有無と板厚で整理したFig. 7(a)より、鋼板が圧着されていないP41LAがコンクリートの剥落、中間主筋の座屈により耐力低下が生じているのに対し、鋼板を圧着することでP41LSとP41LLは耐力と靱性が改善されている。また、鋼板が厚くなれば水平耐力の改善が見られる。ただし、改善に寄与する鋼板板厚の限界は確認されている^{5), 6)}。能動側圧と鋼板板厚が同じでPC鋼棒の補強間隔を変数として整理したFig. 7(b)より、ほぼ同等の履歴性状が得られていることから、鋼板はPC鋼棒からの能動側圧を均等に柱へ作用させていると考えられる。

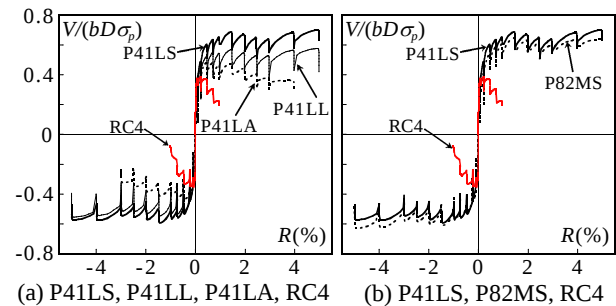


Fig. 7 Skeleton curves

4. 能動的横拘束効果の検証

4.1 拘束コンクリート強度実験値の逆算

本章では、緊張PC鋼棒と鋼板で能動拘束された極低強度コンクリートRC柱($\sigma_b=4.5\text{MPa}$)の水平耐力が、無補強RC柱に比べて大きく上昇する要因を最大水平耐力実験値を用いて検証する。本節では、各試験体における正負の最大水平耐力実験値の平均値から拘束コンクリート強度 $\exp \sigma_{cb}$ (鋼板による負担分を含む)の逆算を行う。逆算においては、鉄筋の強度直線とコンクリートの強度曲線の単

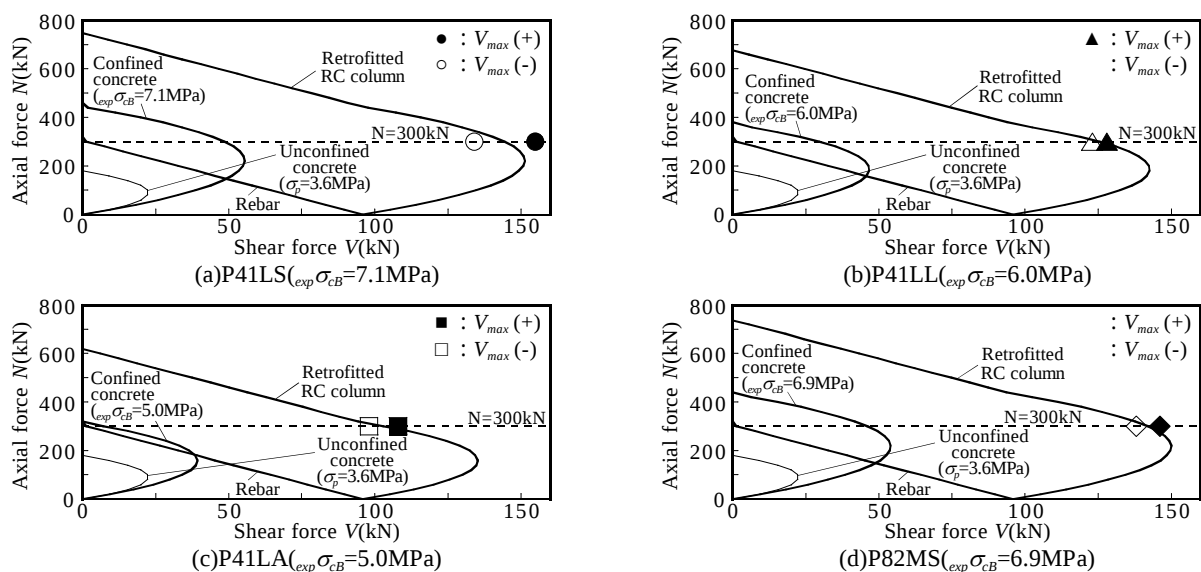


Fig. 8 N-V interaction curves

純累加曲線が正負の最大水平耐力実験値の平均値を通過するようなコンクリート強度を求める。このようにして求めた軸力 N -せん断力 V の関係を Fig. 8 (a) ~ (d) に示す。Fig. 8 には、比較のため無拘束コンクリート強度 3.6 MPa ($=0.8\sigma_p$) のコンクリートの強度曲線も示している。Fig. 8 より、全ての試験体の実験値は釣合い軸力より上方に位置している。また、無拘束コンクリートの強度曲線は小さく、緊張 PC 鋼棒のみ、あるいは緊張 PC 鋼棒と鋼板で能動拘束するとコンクリート強度が大きく増大することがわかる。

4.2 拘束コンクリートの強度上昇率

Fig. 9 では拘束コンクリート強度の逆算結果を棒グラフで示した。P41LA の値は緊張 PC 鋼棒のみで横拘束された結果であり、P41LS, P41LL, P82MS の逆算結果が P41LA の結果より大きいのは、離散的配置の PC 鋼棒からの能動側圧がより均等に柱に作用していること、鋼板が主筋の座屈抑制やコンクリートの剥離・剥落防止に寄与していることが考えられる。なお、最大水平耐力時におけるフランジ面鋼板の周方向ひずみは小さく (3.1 節)、鋼板自体の横拘束効果は小さいものと推測される。Fig. 10 は、Fig. 9 に示した拘束コンクリート強度逆算結果 $_{exp}\sigma_{CB}$ を無拘束

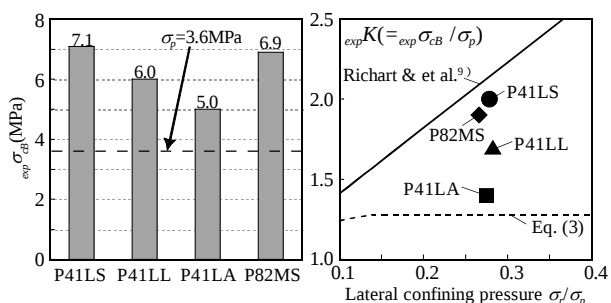


Fig. 9 Estimated compressive strength of confined concrete

コンクリート強度 σ_p で除した強度上昇率実験値 $_{exp}K$ と能動側圧の関係である。Fig. 10 には、文献 1) の式 (3) と Richart らの拘束係数 $4.1^{(9)}$ を使用した場合の計算結果も併せて示した。なお、式 (3) は二次式であるため、極値 ($\sigma_r/\sigma_p = 0.16$ で $K = 1.28$) 後は極値で一定として示した。

$$K = -10.9(\sigma_r/\sigma_p)^2 + 3.5(\sigma_r/\sigma_p) + 1.0 \quad (3)$$

Fig. 10 より、緊張 PC 鋼棒のみで外部横補強された P41LA は式 (3) に近く、P41LS, P41LL, P82MS は式 (3) の計算結果を大きく超え、Richart らによる計算結果との間に位置している。

4.3 最大水平耐力と能動側圧の関係

緊張 PC 鋼棒と鋼板による補強試験体において、導入した能動側圧が最大水平耐力に及ぼす影響を調べるため、本実験および文献 5), 6) で得られた最大水平耐力 V_{exp} を $bD\sigma_p$ で除した値と式 (1) より求めた能動側圧 σ_r を σ_p で除した値との関係を Fig. 11 に示す。なお、文献 5), 6) より用いる最大水平耐力実験値は、 $R = \pm 3.0\%$ までで最大となった正負の水平荷重の平均値を最大水平耐力実験値とした。文献 5), 6) の試験体一覧、および実験結果は Table 4 に示されている。Table 4 に示す試験体の形状寸法、主筋、帯筋の配筋状況は全て Table 1, Fig. 1 と同一である。なお、Fig. 11 のデータは強い相関を示しており (相関係数 0.89)、参考のために回帰曲線を示した。Fig. 11 より、試験体に導入する能動側圧の増加に伴って最大水平耐力も上昇し、コンクリート強度が低い試験体ほど高い能動的横拘束効果が表れることがわかる。

4.4 拘束コンクリートの強度上昇率の傾向

Table 4 には 4.1 節と同様の手法により求めた各試験体の拘束コンクリート強度と無拘束コンクリート強度からの強度上昇率 $_{exp}K$ を示し、 $_{exp}K$ と能動側圧 σ_r/σ_p との関係を Fig. 12 に示した。Fig. 12 より、データは強い相関を示し

Table 4 Details of specimens and test results^{5) 6)}

Specimen	σ_B (MPa)	σ_p (MPa)	ε_{pt} (μ)	pS (mm)	PC bar	t (mm)	V_{exp} (kN)	σ_r (MPa)	$exp \sigma_{cB}$ (MPa)	$exp K$	σ_r / σ_p
R09S-P25MS4 ⁶⁾	3.3	2.6	2736	25		3.2	177	4.2	10	3.8	1.59
R09S-P25MSt4 ⁶⁾	3.3	2.6	2500	25		12	197	3.8	11.5	4.4	1.44
R09S-P41MS15 ⁶⁾	14.9	11.9	2639	41		3.2	234	2.4	24	2.0	0.20
R06S-MS4 ⁵⁾	4.0	3.2			5.4 ϕ	3.2	114		5.6	1.8	0.72
R06S-MSt4 ⁵⁾	4.0	3.2				12	119		6.0	1.9	0.72
R06S-MS8 ⁵⁾	7.6	6.1	2450	41		3.2	186	2.3	10.5	1.7	0.38
R06S-MS35 ⁵⁾	35.4	28.3				3.2	277		35	1.2	0.08

Notes: ε_{pt} =initial tensile strain, pS =interval of PC bar, t =thickness of steel plate, V_{exp} =max. lateral force capacity.

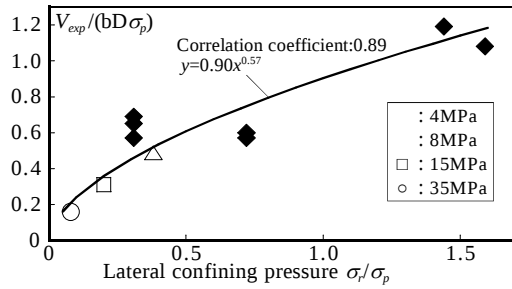


Fig. 11 $V_{exp} / (bD\sigma_p)$ versus σ_r / σ_p

ており (相関係数 0.91), 能動側圧が大きくなると強度上昇率も増大することがわかる。Fig. 12 には式 (3), Richart らによる拘束係数 4.1 を使用した結果, およびデータを回帰分析して得られた式 (4) を示している。

$$exp K = 1.74 \sigma_r / \sigma_p + 1.18 \quad (4)$$

式 (4) の回帰係数は 1.74 であり, Richart らによる拘束係数 4.1 より小さいが, 緊張 PC 鋼棒と鋼板で能動拘束を行えば, 能動拘束の増大とともに線形的に拘束コンクリート強度が増大する結果が得られた。

5. 結論

- (1) 緊張 PC 鋼棒で柱表面に鋼板を圧着し, 拘束することは, 極低強度コンクリートの剥落防止や中間主筋の座屈を抑制できるため, 耐力と靱性の向上に寄与するとともに, せん断補強効果も発揮する。
- (2) 鋼板を圧着すれば能動側圧がより平均化されるため, 鋼板の圧着は, PC 鋼棒の緊張力を上げて補強間隔を疎にするなどの補強効率の上昇にも寄与する。
- (3) 緊張 PC 鋼棒と鋼板による能動的な横拘束により, 極低強度コンクリート RC 柱の拘束コンクリート強度は線形的に増大する。

謝辞

本研究は日本学術振興会の平成 22 年科学研究費補助金 (基盤研究 (A)), 課題番号: 20246091, 代表者: 山川哲雄) の助成を受けた。実験では砂川恒雄琉球大学技術職員の尽力を頂いた。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 中田幸造, 日高桃子, 古川照, 山川哲雄, 崎野健治:

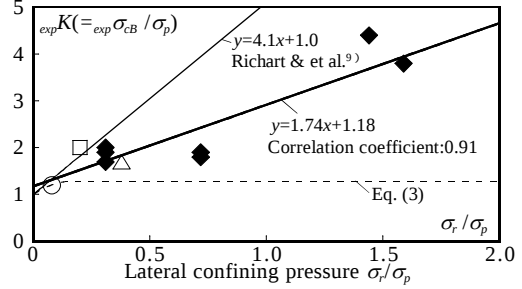


Fig. 12 Strength enhancement of confined concrete

緊張力を導入した PC 鋼棒により外部横補強された鉄筋コンクリート柱の応力ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, No.600, pp.147-153, 2006.2

2) 上原早奈恵, 中田幸造, 山川哲雄, 船木裕之: 緊張 PC 鋼棒で外部横補強された RC 柱のせん断強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.649-654, 2010

3) 山川哲雄, 宮城敏明: 緊張力を導入した PC 鋼棒と鋼板を用いたせん断損傷 RC 柱のせん断強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, No.586, pp.171-178, 2004.12

4) 上松茂, 山川哲雄, 吉井大輔, 中田幸造: せん断損傷 RC 極短柱の残存軸耐力と応急補強実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1123-1128, 2006

5) 新城良大, 山川哲雄, 中田幸造, Md. Nafiur RAHMAN: 極低強度コンクリートを用いた極脆性柱の耐震補強実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1237-1242, 2007.7

6) 中田幸造, 山川哲雄, 許田昇: 緊張 PC 鋼棒と鋼板による低強度コンクリート RC 柱への能動的な横拘束効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.145-150, 2010

7) 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, 1990

8) 中田幸造, 山川哲雄: 緊張アラミド繊維ベルトで外部横補強した RC 柱の中心圧縮性状, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 631 号, pp.1617-1624, 2008.9

9) Richart, F. E. et al: A Study of the Failure of Concrete under Compressive Stresses, University of Illinois, Engineering Experimental Station, Bulletin, No.185, 1928.11