

論文 緊張PC鋼棒で横補強したRC柱の正負繰返しせん断破壊性状

新城 良大*1・山川 哲雄*2・森下 陽一*3・中田 幸造*4

要旨：せん断破壊するRC柱にコーナブロックを用い、PC鋼棒で外部横補強した上で緊張力を導入することによって、靱性に富んだ曲げ破壊に移行させる耐震補強法では、せん断強度を精度良く評価することが重要である。それにも関わらず、本補強法を適用した場合のせん断強度について、十分な研究がなされていなかった。そこで、本研究では緊張PC鋼棒で外部横補強したRC柱のせん断破壊実験を行い、精度良くせん断強度を評価するための設計式の提案を試みた。

キーワード：せん断破壊実験，PC鋼棒，プレストレス，せん断強度，横補強

1. 序

山川，倉重らにより提案された緊張PC鋼棒を外部横補強材として用いた耐震補強法は、これまでの実験的研究で優れたせん断補強効果が確認されている¹⁾。しかし、そのせん断性状については設計上重要な課題であるにも関わらず、未だ未解明な点が残っている。これまでの実験の多くは、PC鋼棒により十分に横補強された場合の実験であり、曲げ破壊へ移行させる実験であった。つまり、外部横補強材としての緊張PC鋼棒の横拘束効果およびせん断補強効果とせん断耐力との関係がまだ十分に究明されていない。そこで、本研究では緊張PC鋼棒を粗に補強した上でせん断破壊先行となるように試験体を計画し、せん断耐力の確認およびその評価式について検討した。

2. 実験概要

本実験で用いた試験体は、全て250×250mmの正方形断面の柱試験体であり、3つのシリーズに分けられる。シリーズ1はせん断スパン比1.5(h=750mm)で、主筋が12-D19($p_g=5.51\%$)、さらに割裂防止のため文献2)で提案されている付着補強筋を配筋した(D6-@52.5)。シリー

ズ2,3はせん断スパン比1.0(h=500mm)で、主筋は12-D10($p_g=1.36\%$)となっている。これらのシリーズは、シリーズ1のような付着割裂防止筋は一切配筋されていない。帯筋については全試験体共通で、3.7φ-@105($p_w=0.08\%$)である。鋼材の力学的特性をTable 1に示す。

実験内容は、シリーズ1が2種類の径のPC鋼棒について、緊張力を導入しないものと導入したもの、およびPC鋼棒で外部横補強していない基準試験体の5体である。シリーズ2は補強間隔をさらに粗にした場合について、緊張力を導入していないものと導入したもの(ER05S-P2とER05S-P3は同じ条件)、シリーズ3はシリーズ1と同じ間隔で、導入する緊張力を変数とした。なお、全ての試験体においてPC鋼棒

Table 1 Mechanical properties of materials

Reinforcement	a (mm ²)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	E (GPa)	
Hoop	3.7φ (1)	11	643.1	0.32	199.2
	3.7φ (2)	11	558.8	0.29	190.3
Hook	D6	32	393.0	0.22	176.1
Rebar	D10 (1)	71	334.7	0.18	181.5
	D10 (2)	71	400.7	0.23	172.5
	D19	287	526.3	0.28	190.8
PC bar	3.8φ	11	1278.5	0.60	215.5
	5.4φ	23	1103.0	0.54	206.0

Notes: a=cross section area, σ_y =yield strength of steel, E=Young's modulus of elasticity.

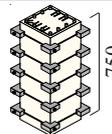
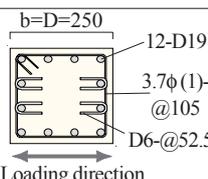
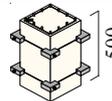
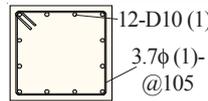
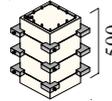
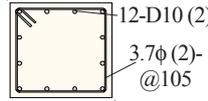
*1 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 工博 (正会員)

*3 琉球大学 工学部環境建設工学科助教授 工博 (正会員)

*4 琉球大学 工学部環境建設工学科助手 工修 (正会員)

Table 2 Details of test specimens

Series	Specimen	M/(VD)	σ_B (MPa)	Diameter of PC bar	PC bar interval	Initial tension strain (μ)	Elevation (mm)	Cross section (mm)
1	ER05M-P0	1.5 (h=750mm)	21.3	-	-	-		
	ER05M-P150N					0		
	ER05M-P150		2450 (528MPa)					
	ER05M-P150NL		0					
	ER05M-P150L		2450 (505MPa)					
2	ER05S-P2	1.0 (h=500mm)	25.8	3.8φ	250mm	2450 (528MPa)		
	ER05S-P3					2450 (528MPa)		
	ER05S-P4					0		
3	ER04S-P150N/P65S1	1.0 (h=500mm)	27.2	3.8φ	150mm	0		
	ER04S-P150					2450 (528MPa)		
	ER04S-P150/P65S2					3700 (797MPa)		

Notes: M/(VD)=shear span to depth ratio, σ_B =compression strength of concrete.

による外部横補強を施しても、曲げ降伏を伴わずせん断破壊が先行するように計画した。試験体一覧を Table 2 に示す。

載荷は、長期軸力比に相当する一定軸圧縮力比 0.2 のもとで正負繰り返し水平加力を行った。加力方法は部材角 R=0.125%, 0.25% を各 1 回, 0.5% から 0.5% の増分で 2 回ずつ (シリーズ 3 のみ 3 回ずつ) 繰り返した。

3. 実験結果

3.1 試験体の破壊状況

実験より得られたスケルトンカーブを Fig. 1 に、せん断破壊実験終了後の試験体のひび割れ状況を Fig. 2 にそれぞれシリーズごとに示す。本論文では、せん断破壊した試験体の最大耐力をせん断強度と定義しているため、その関係上 Fig. 1 のグラフではシリーズ 2 の ER05S-P4, シリーズ 3 の ER04S-P150/P65S2 は負側の結果を示してある。シリーズ 2, 3 については、PC 鋼棒がひび割れの拡大を防ぎ、急激な耐力低下は

起こっていないものの、最大耐力点においてカーブが鋭角に低下しており、耐力低下が比較的明瞭である。ひび割れ状況等からもせん断破壊と判断した。一方、付着補強筋の入っているシリーズ 1 では耐力低下がそれほど明瞭ではない。ひび割れ状況からみても、柱幅面に付着補強筋が入っているためかせん断ひび割れが柱の両側に抜け難いようである。シリーズ 1 の基準試験体について、せん断力 V と部材角 R の関係である V-R 曲線を Fig. 3 に示す。グラフに示されている計算値は、全て AIJ 靱性指針式³⁾を用いた。なお、付着補強筋は付着強度にのみ考慮しており、文献 2) で提案されている式により考慮した。グラフを見ると、計算上せん断破壊先行であり、ひび割れ状況を見てもせん断破壊をしているものと思われる。シリーズ 1 の試験体は主筋が D19 と断面積が大きいために、せん断破壊後の主筋のだぼ効果が大きく、耐力低下が緩やかになるものと思われる。よって、シリーズ 1 は耐力低下は明瞭でないが、ひび割れ状況

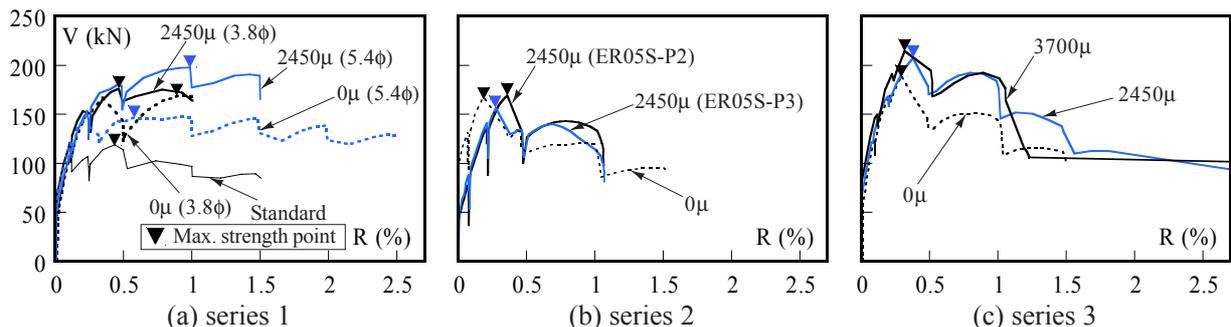


Fig. 1 Experimental skeleton curves

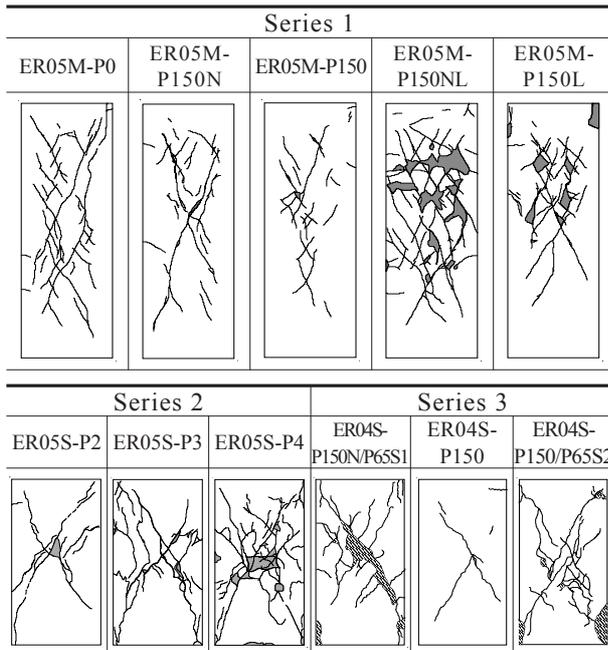


Fig. 2 Observed cracking patterns after shear test

や、実験時の観察等により全ての試験体においてせん断破壊と判断した。

3.2 初期緊張ひずみによる影響

シリーズ1の3.8φ、シリーズ2の試験体では、PC鋼棒に緊張ひずみを導入してもせん断耐力にほとんど差は見られないが、シリーズ1の5.4φ、シリーズ3の試験体において、PC鋼棒に緊張力を導入した試験体の方がせん断耐力が高くなるという結果が得られた(Fig. 1参照)。PC鋼棒径5.4φの試験体は耐力上昇が特に明瞭に現れており、シリーズ3の試験体では緊張ひずみとせん断耐力が比例して大きくなった。文献4)でも、柱に横方向のプレストレスを加えることでせん断耐力が高くなるという実験結果が報告されている。

3.3 せん断強度時の部材角

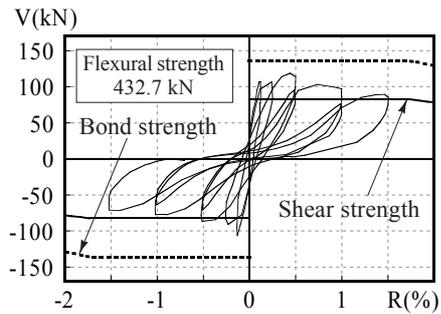


Fig. 3 Measured V-R relationship (ER05M-P0)

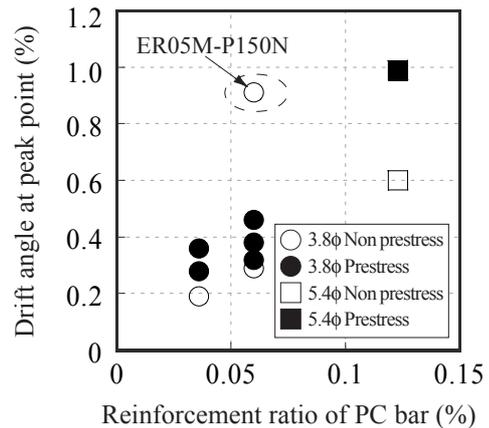


Fig. 4 Drift angle at peak point versus reinforcement ratio of PC bar

せん断耐力時の部材角とPC鋼棒の補強筋比との関係をFig. 4に示す。破線の円で囲んだ試験体を除けば、PC鋼棒による補強量の上昇とともにせん断耐力時の部材角も大きくなっていることがわかる。また、同じ補強量においても緊張力を導入した方がせん断耐力時の部材角が大きくなっていることがわかる。

3.4 PC鋼棒のひずみ

最もPC鋼棒補強量の少ないシリーズ2についてPC鋼棒ひずみと部材角の関係をFig. 5に示す。実験終了時にはPC鋼棒は降伏ひずみに達しているが、最大耐力時には降伏していない

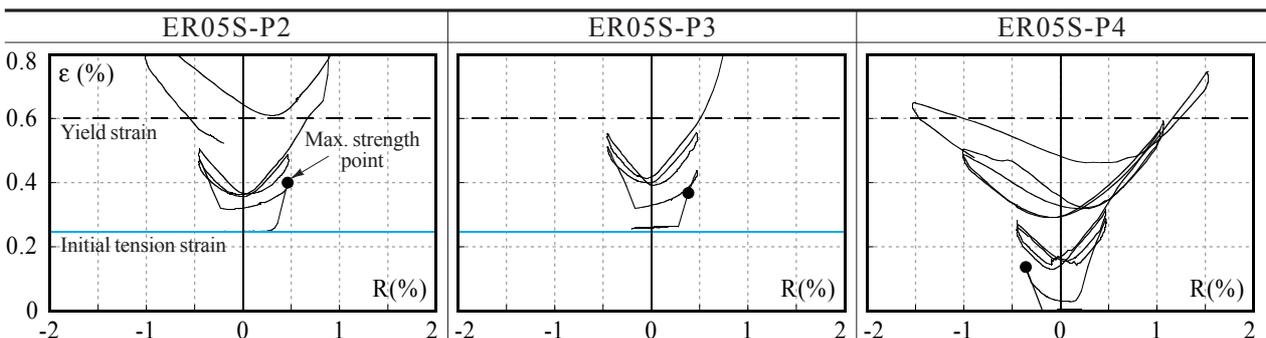


Fig. 5 Measured strain of PC bar

ことがわかる。文献4)の実験においても降伏ひずみの高い横補強材 ($\varepsilon_y=0.73\%$) を用いているが、全ての試験体においてせん断圧縮破壊であったとしている。このことから降伏ひずみの高い横補強材を用いた場合、せん断耐力時に補強筋は降伏しないものと考えられる。

4. せん断強度に関する検討

せん断強度時にPC鋼棒が降伏していないことは3章で述べた。故に、せん断強度の算定にあたり、帯筋と同じようにPC鋼棒に降伏強度を用いるのはせん断強度を過大評価することになる。Fig. 6にせん断強度(最大耐力)時のPC鋼棒のひずみと初期緊張ひずみとの関係を示す。なお、グラフの縦軸は初期緊張ひずみを差し引いた値(受動的ひずみ増分)となっている。グラフを見ると、PC鋼棒径3.8φと5.4φとはあまり差が無く、さらに異なる初期緊張ひずみの場合においてもほとんど差が見られないことがわかる。そこで、せん断強度に寄与するPC鋼棒の受動的ひずみ増分 $\Delta_p\varepsilon$ を一定とし、平均値として次式を得た。

$$\Delta_p\varepsilon = 0.2 \times 10^{-2} \quad (1)$$

なお、平均するにあたって、降伏ひずみを超えているものは降伏ひずみに直し、破線の円で囲まれている試験体は除外して平均した。なお、この除外した試験体は、Fig. 4中の破線で囲まれた試験体と同一のものである。この試験体の

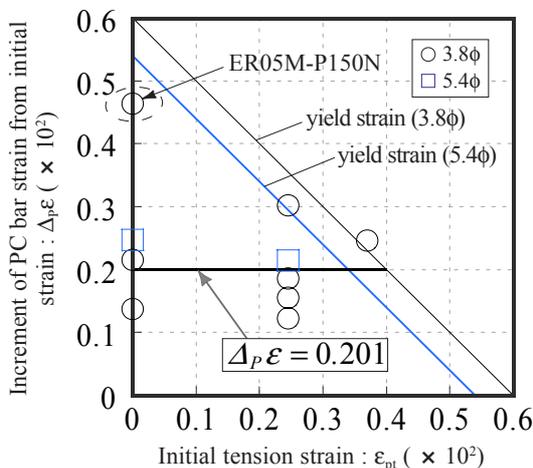


Fig. 6 Increment of PC bar strain at peak point

受動的ひずみ増分が大きいのは、最大耐力以前にせん断破壊(鋭角な荷重低下)を起こしているためである(Fig. 1参照)。せん断強度時におけるPC鋼棒のひずみ ${}_p\varepsilon_T$ は $\Delta_p\varepsilon$ に初期緊張ひずみ ε_{pt} を加えた次式で表される。

$${}_p\varepsilon_T = 0.2 \times 10^{-2} + \varepsilon_{pt} \leq {}_p\varepsilon_y \quad (2)$$

ここで ${}_p\varepsilon_y$:PC鋼棒の降伏ひずみである。故に、せん断強度時のPC鋼棒の存在応力度 ${}_p\sigma_e$ は、

$${}_p\sigma_e = {}_pE \cdot {}_p\varepsilon_T \leq {}_p\sigma_y \quad (3)$$

となる。ここで ${}_pE$:PC鋼棒のヤング係数、 ${}_p\sigma_y$:PC鋼棒の降伏強度である。

式(3)で与えられるせん断強度時のPC鋼棒の存在応力度を用いてせん断耐力の評価を試みる。まず、AIJ 靱性指針のせん断強度式誘導で用いられている応力伝達機構に基づき、PC鋼棒により補強された場合のせん断強度式を次のように提案する。

$$V_{u1} = \mu(p_{we} \cdot \sigma_{wy} \cdot b_e \cdot j_e + {}_p p \cdot {}_p\sigma_e \cdot b \cdot D) + [v_c \cdot \sigma_{cB} - 5(p_{we} \cdot \sigma_{wy} \cdot b_e \cdot j_e + {}_p p \cdot {}_p\sigma_e \cdot b \cdot D) / ({}_p\lambda \cdot b \cdot D)] b \cdot D \cdot \tan\theta / 2 \quad (4)$$

$$V_{u2} = \{(p_{we} \cdot \sigma_{wy} \cdot b_e \cdot j_e + {}_p p \cdot {}_p\sigma_e \cdot b \cdot D) + {}_p\lambda \cdot b \cdot D \cdot v_c \cdot \sigma_{cB}\} / 3 \quad (5)$$

$$V_{u3} = {}_p\lambda \cdot b \cdot D \cdot v_c \cdot \sigma_{cB} / 2 \quad (6)$$

ここで ${}_c\sigma_{cB}$:PC鋼棒の拘束効果を考慮したコンファインドコンクリート強度、 ${}_p p$:PC鋼棒による補強筋比、 ${}_p\lambda$:PC鋼棒によるトラス機構の有効係数である。その他の記号については文献3)を参照されたい。

PC鋼棒によるトラス機構の有効係数 ${}_p\lambda$ について、本補強法は柱四隅にコーナブロックがあるため、Fig. 7のような拘束領域を考えた。有効拘束領域 ${}_p A_e$ は次式で計算できる。

$${}_p A_e = b \cdot D \left(1 - \frac{{}_p s'}{2D} - \frac{(w_i')^2}{4bD} \right) \quad (7)$$

ここで ${}_p s'$:コーナブロック間の隙間、 w_i' :PC鋼棒の有効横支持長さである。よってPC鋼

分はPC 鋼棒の径に依存しない (Fig. 6 参照)。

なお、式 (4) ~ 式 (6) 中の PC 鋼棒の横拘束効果を考慮したコンファインドコンクリート強度 σ_{cB} の算定は文献 5) により提案されている式で算出するものとする。式 (6) はコンクリートのせん断圧縮によりせん断耐力が頭打ちとなる領域、つまり補強限界を意味しているが、文献 4) によると、プレストレス導入方法が異なるものの、補強限界の状態においてもプレストレスを導入することによりせん断耐力の上昇が確認されている。このことから、コンクリート強度に PC 鋼棒の拘束効果を加えたコンファインドコンクリート強度を用いることは好ましいと思われる。

Fig. 10 a) に実験値と式 (4) ~ 式 (6) による計算値との比較を示す。また、Fig. 10 b) に実験値と修正荒川 mean 式⁶⁾による計算値との比較、Fig. 10 c) に修正荒川 min 式との比較を示す。修正荒川式は帯筋の項に PC 鋼棒の項を累加した式を用いた (式 (9) 参照)。なお、AIJ 靱性指針式と同じように、コンファインドコンクリート強度を用いて計算した。

$$Q_{su} = \left\{ \frac{\alpha \cdot K_u \cdot K_p (17.6 + \sigma_{cB})}{M/Vd + 0.12} + 0.845 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy} + p_p \cdot \sigma_e + 0.1 \sigma_0} \right\} b \cdot j \quad (9)$$

Fig. 10 より、修正荒川 mean 式では平均値 1.02、変動係数 8.5% と精度良く評価できている。AIJ 靱性指針式と修正荒川 min 式ではどちらも安全側の評価となっているが、修正荒川 min 式の方が精度が高くなっている。しかし、文献 7) によると、補強量が多くなると荒川式の精度が悪くなることが報告されている。ちなみに今回の試験体は、AIJ 靱性指針の式 (4) ~ 式 (6) のうち全試験体とも式 (4) に相当し、補強量が少ないことを意味している。つまり、荒川式による評価の精度が良いのは PC 鋼棒の横補強

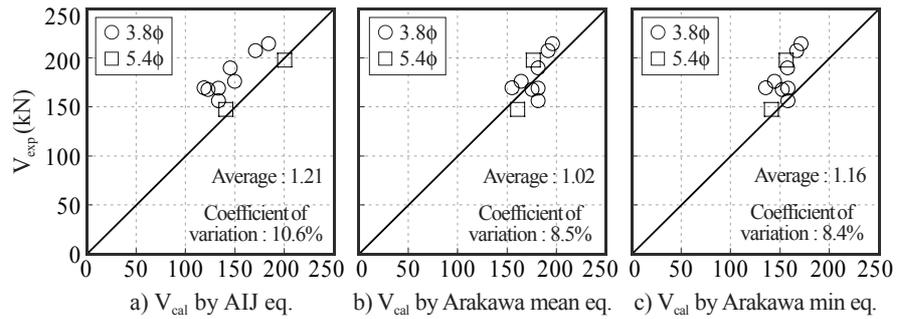


Fig. 10 Comparison of experimental and calculated strength

量が少ないためであり、多くなると AIJ 靱性指針式の方が精度が高くなると思われる。

5. 結論

- 1) PC 鋼棒に緊張ひずみを導入すると、せん断耐力およびせん断耐力時の部材角が大きくなることが分かった。
- 2) PC 鋼棒は降伏ひずみが高いため、せん断耐力時に降伏せず、実験より得られたせん断強度時の PC 鋼棒のひずみを AIJ 靱性指針式、修正荒川式に導入することにより、実験結果を良好に評価することができた。

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) 長友克寛, 佐藤裕一, 松原三郎, 高橋恵子: 非閉鎖型補強筋による付着割裂強度の改善効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 2, pp. 1135-1140, 2005
- 3) 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, 1999
- 4) 渡部洋, 河合繁, 香取慶一, 篠原保二, 林静雄: 横方向プレストレスによる鉄筋コンクリート柱のせん断ひび割れ制御と終局耐力の評価, 日本建築学会構造系論文集, No. 577, pp. 109-116, 2004. 3
- 5) 中田幸造, 日高桃子, 古川照, 山川哲雄, 崎野健治: 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
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999
- 7) 山川哲雄, 鴨川茂義, 倉重正義: 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 柱の性能と設計, 日本建築学会構造系論文集, No. 537, pp. 107-113, 2000. 11