

PC鋼棒にプレストレスを導入して耐震補強したRC柱の耐力評価

○正会員 山川 哲雄¹⁾ 同 鴨川 茂義²⁾
同 倉重 正義³⁾ 同 花井 勉⁴⁾

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[1]。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、この研究はパイロット実験として、せん断破壊する柱を本耐震補強によって靱性に富んだ曲げ破壊タイプに改善可能かどうかにか点が置かれたので、本耐震補強によるせん断強度の増大量を確実に押さえることが出来なかった。そこで、補強後の耐力を精度よく推定できる評価式を確立する必要がある。そのため、本研究ではせん断破壊した補強前の基準試験体8体と補強試験体8体の計16体、および曲げ破壊した補強試験体9体の合計25体の実験結果を利用して、耐震補強

RC柱の耐力評価を試みたものである。

2. 柱試験体と実験結果一覧

合計25柱試験体の試験体名称、せん断スパン比、コンクリート強度、PC鋼棒の補強法、配筋など試験

R99○-P△□☆

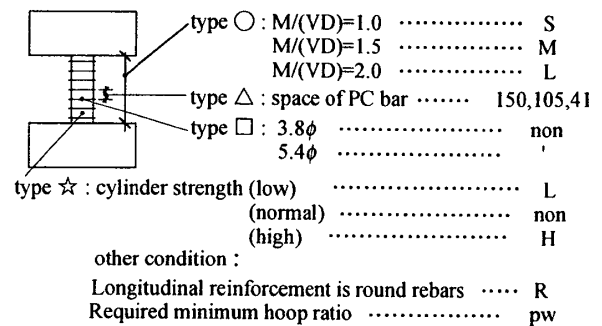


Fig. 1 Detail of the specimen

Table 1 Measured and calculated shear, flexural and bond strength for total 25 specimens

M/(VD) (No. of specimen)	Mark	Specimen	σ_B (MPa)	PC bar	Longitudinal reinforcement	Transverse reinforcement	V_s (Arakawa) Vf	V_s (AIJ) Vf	τ_{bu} τ_f	V_{exp} Vf	Failure mode
1.0 (5)	■	R99S-P0		-			0.787	0.462	0.607	0.568	S
	▨	R99S-P105	20.7	3.8φ-@105			0.904	0.793	0.687	0.754	S-B
	□	R99S-P41'		5.4φ-@41	12-D10	3.7φ-@105	1.237	1.537	1.019	1.027	F-B
	■	R98S-P0	31.6	-	(pg=1.38%)	(pw=0.08%)	0.809	0.502	0.762	0.703	S
	□	R99S-P41'H	30.9	5.4φ-@41			1.174	1.452	1.145	1.183	F
1.5 (17)	●	R99M-P0		-			0.721	0.386	0.709	0.671	S
	●	R99M-P150		3.8φ-@150			0.815	0.711	0.794	0.857	S-B
	●	R99M-P105	18.4	3.8φ-@105			0.848	0.824	0.830	0.818	S-B
	○	R99M-P41'		5.4φ-@41			1.202	1.711	1.325	0.990	F-B
	○	R99M-PH34'		5.4φ-@34			1.293	1.808	1.574	1.141	F
	●	R99M-P0H		-	12-D13		0.765	0.423	0.840	0.712	S
	●	R99M-P150H	26.8	3.8φ-@150	(pg=2.44%)	3.7φ-@105	0.848	0.704	0.925	0.841	S-B
	○	R99M-P41'H		5.4φ-@41		(pw=0.08%)	1.180	1.712	1.463	0.980	F-B
	●	R99M-P0L		-			0.695	0.362	0.631	0.583	S
	●	R99M-P150L	14.2	3.8φ-@150			0.796	0.702	0.716	0.640	S-B
	○	R99M-P41'L		5.4φ-@41			1.220	1.703	1.245	0.908	F-B
	2.0 (3)	▲	R99L-P0		-			0.770	0.456	1.115	0.730
▲		R99L-P150	21.2	3.8φ-@150	12-D13	3.7φ-@105	0.940	0.892	1.241	0.940	S-B
▲		R99L-P41'		5.4φ-@41	(pg=2.44%)	(pw=0.08%)	1.400	2.300	2.029	0.980	F

Note: V_s =shear strength, Vf=flexural strength, τ_{bu} =bond strength, τ_f =bond stress, V_{exp} =measured lateral capacity,

S=shear failure, S-B=bond slip after shear failure, F=flexural failure, F-B=bond slip after flexural failure

1) 琉球大学 教授・工博 2) 同・大学院生 3) 高周波熱錬(株) 製品事業部営業部・次長 4) (株)日本システム設計・取締役

体の詳細と、破壊形式やせん断強度に関する実験値と計算値の比較などを **Table 1** に示す。また、試験体の名称に関する基本的ルールに関して **Fig.1** に示す。せん断スパン比別には1が5体、1.5が17体、2が3体である。コンクリート強度は最低強度が14.2MPaで、最大強度が31.6MPaであり、標準強度が18.4MPaから23.5MPaの間にある。これらの実験結果は建研式加力装置を用いて、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より得られたものである。なお、これらの詳細な実験結果は本研究報告に発表している「PC鋼棒によるプレストレスを導入したRC柱の耐震補強実験(その1~5)」を参照されたい。

本研究の主な目的は序でも述べたように、補強後の耐力を精度よく推定できる評価式を確立することである。そのために、PC鋼棒で耐震補強してもせん断破壊する試験体を利用して、補強後のせん断強度をできるだけ正確に評価する必要がある。と同時に、曲げ破壊した補強試験体についても曲げ強度の確認と、曲げ破壊させるために必要な補強設計評価式を確立することが求められる。せん断強度の評価のためにはせん断破壊する試験体を必要とすることから、一般に多めの主筋を配筋し、曲げ強度を相対的に増大させた試験体を製作した。この多めの主筋量は既存RC柱では限界値に近い量かと思われる。したがって、せん断破壊、またはせん断破壊後の付着すべりが生じる試験体は補強前の規準RC柱試験体と、3.8φのPC鋼棒を150mmまたは105mmピッチで耐震補強した試験体である。一方、曲げ破壊もしくは曲げ降伏後の付着すべりを生じる試験体は曲げ強度よりせん断強度を大幅に引き上げるために、5.4φのPC鋼棒を用い41mmまたは34mmピッチで耐震補強している。41mmの補強レベルは既存RC柱で言えば、13φのPC鋼棒を100mm間隔で配置して耐震補強し

たことに相当する。耐震補強してもせん断破壊、もしくはせん断破壊後の付着すべりを生じた試験体が16体であり、曲げ破壊または曲げ降伏後の付着すべりを生じた試験体が9体である。

せん断破壊や曲げ破壊するこれらの試験体のせん断スパン比は1.5を標準に1と2、そしてコンクリート強度は20MPa前後を標準に14MPaと30MPa前後を採用し、耐震補強の対象となる既存のRC柱を概ね包括している。さらに丸鋼を主筋に用いた場合や、帯筋が規定の最小帯筋比を満足しているせん断スパン比1.5のRC柱についても検討を行った。

3. 強度評価について

せん断強度評価式を誘導するためには、その第1歩として実験結果をより正確に評価することが重要である。このような観点から、本報告ではスケールエフェクトを考慮できる修正荒川 mean 式を採用する。修正荒川 mean 式は (1) 式で与えられる。

$$V_s = \left\{ \frac{0.115K_u K_p (17.6 + F_r + 4.1\sigma_r)}{(M/Vd) + 0.12} + 0.845 \sqrt{p_w \sigma_{rv} + p_r (\sigma_m - \sigma_r)} + 0.1\sigma_m \right\} b_j \quad \dots (1)$$

- | | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| K_u : 断面寸法による補正係数 | K_p : 引張鉄筋比 p_r (%) による補正係数 |
| p_w : せん断補強筋比 | |
| σ_{rv} : せん断補強筋降伏応力度 | p_r : PC鋼棒による帯筋比 |
| σ_m : 柱軸方向応力度 | σ_{rv} : PC鋼棒の降伏応力度 |
| d : 柱有効せい | σ_r : 側圧 (MPa) |
| M/V : $h_0/2$ | σ_m : PC鋼棒の緊張応力度 |
| j : 応力中心間距離 | h_0 : 柱内法高さ |

(1)式でコンクリート強度の項に含まれる $4.1\sigma_r$ がプレストレスによる能動的横拘束効果によるコンクリート強度上昇分である。これを無視する場合には σ_r を零におけばよい。また、PC鋼棒は高強度鋼材で、しかも帯筋と同じ機能を有するので、既存の帯筋比にPC鋼棒を単純加算した。ただし、プレストレスがPC鋼棒にすでに導入されているので、(1)

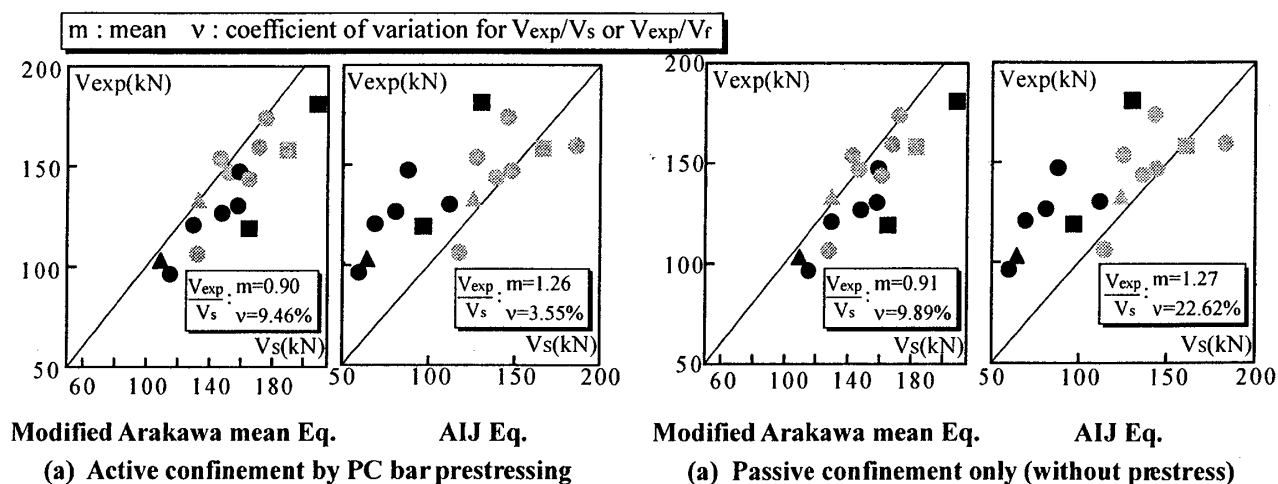


Fig.2 Measured and calculated shear strength based on shear failure specimens

式に示すようにP C鋼棒の降伏点強度から緊張応力度分を差し引く。AIJ式[3]に関してもこのような考えで、同じようにP C鋼棒とプレストレスの効果を反映させる。

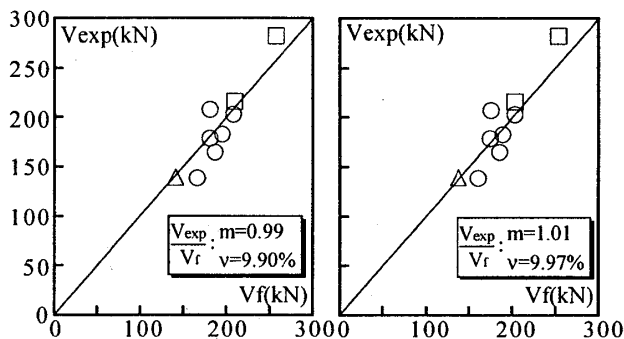
こうして定義した修正荒川mean式とAIJ式を評価するために、せん断破壊で耐力が支配された耐震補強前の基準RC柱試験体8体と、せん断破壊が支配的で粗にP C鋼棒で耐震補強した試験体8体の実験結果を計算結果と比較する。Fig. 2より、修正荒川mean式がAIJ式[3]より実験結果をよく説明できる。能動的拘束効果の有無は大きな影響を与えていないが、以降の検討においては特にことわりが無い限り、P C鋼棒で耐震補強した試験体では能動的横拘束効果を考慮した修正荒川mean式を採用する。ただし、荒川mean式はFig. 2に示すように実験値を平均で約10%も下回って評価しているのので、補強設計式を提案する際には、AIJ式とともに荒川min式も合わせて検討する必要がある。

同様に曲げ強度の精度を示すためにTable 1から曲げ破壊した試験体9体を取り出して、P C鋼棒による能動的横拘束効果も考慮したファイバーモデルによる精算値と、多段配筋柱の曲げ強度略算値を曲げ

強度実験値と比較し、Fig. 3に示す。Fig. 3より、P C鋼棒による能動的横拘束効果も考慮したファイバーモデルによる曲げ強度精算値がごくわずかよいことがわかる。したがって、これ以降実験結果の整理に関しては、P C鋼棒で耐震補強した試験体では能動的横拘束効果を考慮して、ファイバーモデルにより曲げ強度を計算する。

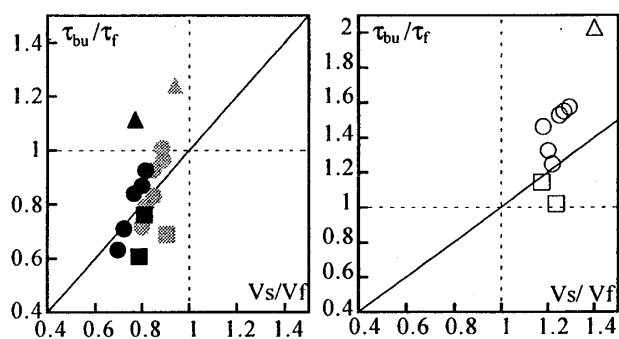
Fig. 4に付着余裕度とせん断余裕度の関係を全試験体について、破壊形式ごとに整理する。なお、付着強度は文献[4]に基づいて計算する。Fig. 4より、破壊形式のいかんにかかわらず付着余裕度とせん断余裕度の間にはある程度相関関係が存在する。すなわち、せん断余裕度が小さいと付着余裕度も小さいし、一方せん断余裕度が1を超えてくると付着余裕度も1を超え、せん断余裕度とともに次第に大きくなる。

実験結果とせん断余裕度および付着余裕度の関係を、破壊形式ごとにせん断破壊と曲げ破壊にわけてFig. 5に示す。多少のばらつきはあるが実験結果と計算結果は概ね一致している。このことはP C鋼棒で耐震補強した試験体のせん断強度は上記の(1)式で、また曲げ強度はファイバーモデルで概ね評価できることを意味している。しかも、せん断余裕度が1を境



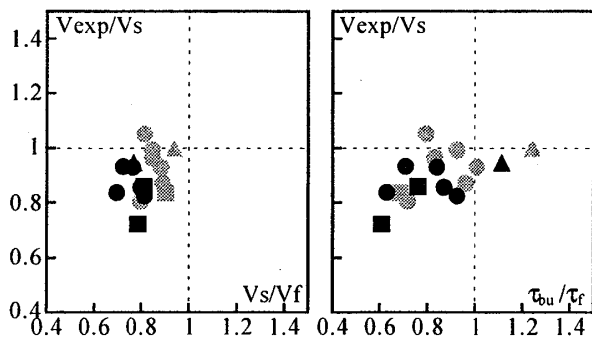
(a) Fiber model (b) Simplified Eq.

Fig.3 Measured and calculated flexural strength based on flexural failure specimens

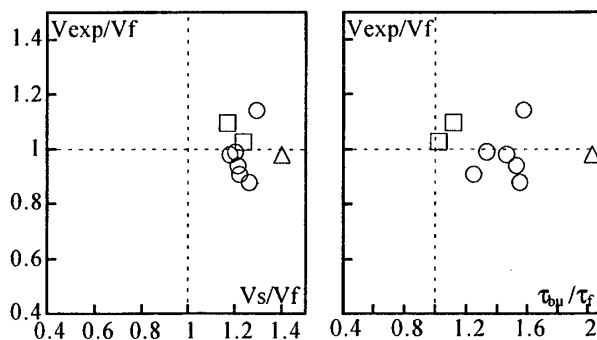


(a) Shear failure (b) Flexural failure

Fig.4 Calculated bond and shear strength



(a) Shear failure



(b) Flexural failure

Fig.5 Measured and calculated shear and bond strength

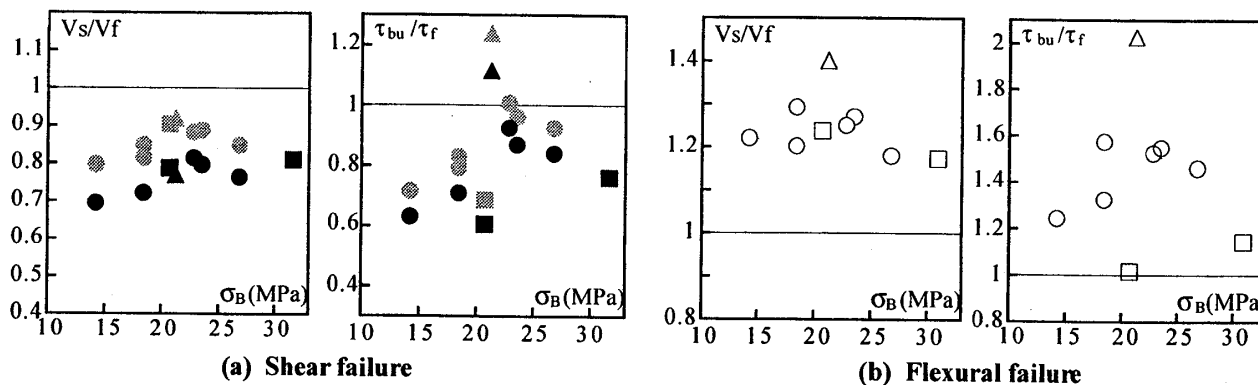


Fig.6 Calculated shear or bond strength versus concrete strength

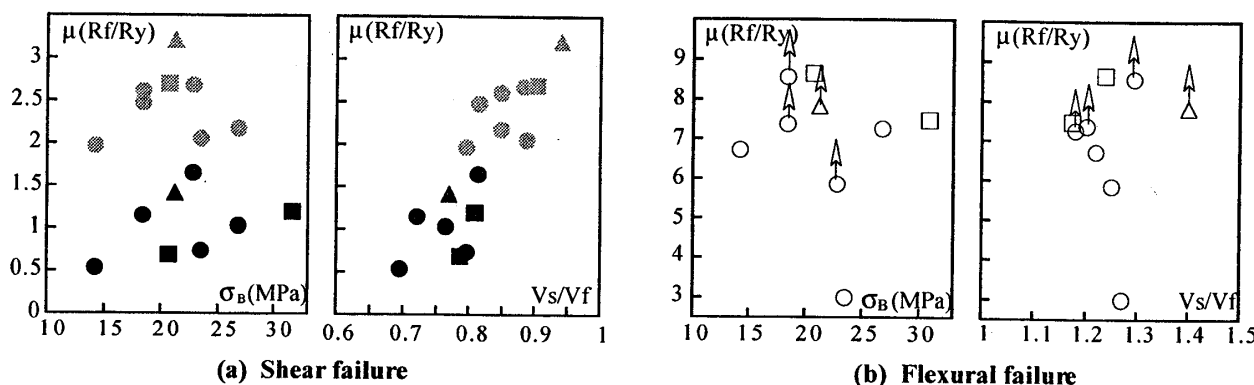


Fig.7 Ductility factor versus shear strength or concrete strength

に1以下はせん断破壊, 1を超える場合には曲げ破壊であることがわかる。一方, せん断余裕度に比較して, 付着余裕度は1を超えてもせん断破壊する試験体もあり, ばらつきがやや大きい。

Fig. 6にせん断余裕度または付着余裕度とシリンダー強度の関係を破壊形式に分けて整理する。Fig.7に塑性率 μ とシリンダー強度, またはせん断余裕度の関係を破壊形式ごとに整理して示す。塑性率は最大耐力が80%に低下した時の部材角, すなわち限界部材角実験値 R_f を降伏強度時の部材角である降伏部材角 R_y で除して求めた[3]。せん断破壊した試験体に塑性率を適用することはあまり意味のないことではあるが, Fig. 7によるとせん断破壊した試験体のうち, 補強前の試験体は塑性率がほぼ1.5以下である。PC鋼棒で少しでも補強すると, 塑性率が2から3程度に上昇することがFig. 7よりわかる。しかも, それはせん断余裕度の増大にもつながっているが, シリンダー強度には無関係である。

一方, 曲げ破壊した試験体は塑性率3の1体(丸鋼のR99M-41'R)を除き, 最低6以上の塑性率がある。これもコンクリート強度には関係しないが, せん断余裕度には少し関連している。すなわち, せん断余裕度が大きくなると, それにしたがって塑性率も大きくなる。なお, 図中の矢印は塑性率がそれ以上あるこ

とを示す。加力実験が最大 $R=5\%$ で終了しているからである。

4. 結論

柱の四隅のコーナブロックを介してPC鋼棒を外帯筋状に配置した上で, プレストレスを導入して耐震補強する本方法に関して, 補強柱の耐力評価を試みた。その結果, せん断強度は修正荒川mean式で, また曲げ強度はファイバーモデルで概ね実験結果を説明できることがわかった。ただし, 修正荒川mean式は本試験体の実験値より大きく評価するので, 設計式の提案にあたってはさらに検討が必要である。また, 曲げ強度に関しては慣用の略算式でも十分評価できるものと推定される。今後設計式の提案に向けて, さらに研究を継続する予定である。

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, 第526号, pp.141-145, 1999.12
- [2] 山川哲雄, 鴨川茂義, 倉重正義: PC鋼棒によるプレストレッシングを用いたRC柱の耐震補強法に関する実験的研究(その5) RC耐震補強柱の耐震補強設計法(試案), 日本建築学会学術講演梗概集(中国), pp.253-254, 1999.9
- [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補強指標(案)・同解説, 日本建築学会, 1997.7
- [4] 前田匡樹, 小谷俊介: 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2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C構造II, pp.657-658, 1994.9