

論文 アラミドベルトとコーナブロックを用いた RC 柱の プレストレスング耐震・応急補強法

佐藤 元*1・山川 哲雄*2・稲葉 はるか*3・Nasrollahzadeh Nesheli, Kooroush*4

要旨:本研究は柱四隅のコーナブロックを介してアラミドベルトを外帯筋状に周回させた上で、プレストレスを導入して横補強したRC極短柱の耐震・応急補強法を提案し、一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験でその有用性を検証したものである。さらに、本補強法を同じコンセプトに属する既発表のPC鋼棒補強法とも比較検討した。

キーワード:アラミド繊維ベルト, RC極短柱, 耐震・応急補強, プレストレス, PC鋼棒

1. 序

本研究はコンクリートを拘束すれば、コンクリートの強度が改善され、靱性が向上するという周知の知見に基づいている。せん断補強効果と受動的拘束効果(パッシブコンファインメント)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、先に発表したPC鋼棒補強法¹⁾と同様にこれらの補強効果に加えて、アラミド繊維ベルトにプレストレスを導入することで、能動的拘束効果(アクティブコンファインメント)の利用により、アラミド繊維ベルト補強RC柱の耐震性能、なかでも靱性を大きく改善したことに本研究の特色がある。

この工法の外の長所は従来の巻き立て工法では補強が困難とされてきた直交壁、袖壁や窓枠などが付随したRC柱にも容易に応用できることである。しかも、重機を必要とせず、工事が簡便で、短い施工期間で居ながら補強が可能である。

したがって、既存不適格建築物の耐震補強、さらには被災直後の余震対策や2次災害防止のための応急補強としても有効に機能することが期待できる。以上のような観点からRC柱の靱性型補強として、アラミド繊維ベルト(以降、単にアラミドベルトと呼称する)にプレストレスを導入し

て外帯筋状に補強するRC柱の新しい耐震・応急補強法を提案する。

次いで、本補強法の有用性を検証するために、せん断破壊した補強前の基準試験体1体とアラミドベルトで補強した5体、及びPC鋼棒で補強した試験体2体¹⁾の合計8体(せん断スパン比M/(VD)=1.0)の実験結果を利用して、補強RC極短柱に関する耐震性能の評価と比較検討を試みる。

2. 耐震・応急補強柱試験体の加力実験

鉄筋、アラミドベルト(幅17mm, 厚さ0.612mm×2)及びPC鋼棒の使用材料の力学的特性をTable 1に示す。Table 2に柱試験体詳細の一覧と各試験体の最終破壊モードを示す。補強RC柱試験体の形状、寸法や配筋状況をFig. 1に、写真をFig. 2に示す。アラミドベルトはループ状になっており、外帯筋状に周回させる時は二重に重なった状態で利用し、ループの両端をカプラーで連結し、ボルトを締め付けることで所定のプレストレスを導入する。アラミドベルト補強試験体のコンクリート強度は19.8MPa、基準試験体及びPC鋼棒補強試験体のコンクリート強度は20.7MPaである。

プレストレスはアラミドベルトでは破断強度の約1/2(8000 μ で940MPa程度)、PC鋼棒では降

*1 横浜ゴム(株) MB事業開発部 主幹(正会員)

*2 琉球大学 教授・工博(正会員)

*3 (株)大林組(元琉球大学大学院学生) 工修

*4 琉球大学大学院 理工学研究科 博士後期課程・工修(正会員)

Table 1 Mechanical properties of material

	$a^*3(\text{mm}^2)$	$\sigma_y(\text{Mpa})$	$\epsilon_y(\%)$	$E(\text{Gpa})$
Aramid fiber belt*1	10.4	2093	1.78	117.6
Rebar(D10)	71.0	371	0.20	185.5
Hoop(3.7φ)*2	11.0	333	0.17	195.9
Hoop(3.7φ)	11.0	391	0.19	205.0
PC bar(3.8φ)	11.0	1202	0.61	197.0
PC bar(5.4φ)	23.0	1202	0.61	197.0

*1 σ_y = fracture stress of fiber belt, ϵ_y = fracture strain of fiber belt, *2 R99S series, *3 a=cross section area.

Table 2 Extremely short column specimens

	Specimen	Prestress	space (mm)	σ_B (MPa)	N	Failure mode
Standard	R99S-P0	-	-	20.7		S
	R00S-A150/2		150		0.2	FB
AFRP belt	R00S-Aw65/2*	$\sigma_u/2$				F
	R00S-A65h/2		65	19.8	0.4	FC
	R00S-A65/0	0				SF
	ER00S-A65/2	$\sigma_u/2$			0.2	F
	R99S-P105	$\sigma_y/3$		105	20.7	SB
PC bar	5.4φ R99S-P41'		41			F

Common details Rebar: 12-D10($p_g=1.38\%$), Hoop: 3.7φ@105($p_w=0.08\%$)
 σ_u =broken stress of aramid belt, σ_y =yield stress of PC bar

* Note : Aw indicates double width(17 × 2=34mm) aramid belt.

伏点強度の約 1/3(2450 μ で 490MPa 程度)を導入した。プロットに用いたマークの配色は破壊モードを示す。黒色はせん断破壊した試験体であり、灰色は曲げ圧縮破壊、もしくは曲げ降伏後の付着破壊した試験体である。そして、白色は靱性に富んだ曲げ破壊した試験体である。

載荷方法は一定軸圧縮力比 0.2 と、0.4(試験体 R00S-A65h/2 の 1 体のみ)のもとで、正負繰り返し水平加力実験を行った。加力装置は建研式加力装置を用い、部材角が 3% まで 0.5% ずつ増分させながら各部材角で 3 回ずつ繰り返す。部材角が 3% まで至っても、最大水平耐力の 80% 以上を維持している状態であれば、部材角 4% 及び 5% で正負 1 回繰り返し、耐震性能の確認を行った。

柱試験体のせん断力 V- 部材角 R と、柱材軸の平均伸縮ひずみ ϵ_v - 部材角 R 関係を Fig. 3 及び Fig. 4 に示す。なお、 $\epsilon_v (= \delta v/h)$ は柱材軸の伸縮量を柱の内法高さで除した平均鉛直ひずみである。V-R 曲線に多段配筋柱の略算式²⁾による曲げ強度 $V_{r,2}$ を、P- δ 効果を考慮して点線で示す。補強なしの基準 RC 柱試験体 R99S-P0 では、R=0.5% のピーク時に最大耐力を示し、その後せん断劣化が進み、急激に耐力を失った。この柱の破壊モードはせん断破壊である。

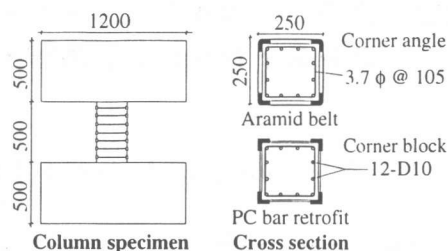


Fig. 1 Dimensions and reinforcement arrangement

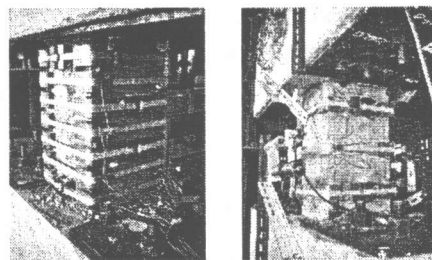


Fig. 2 RC column specimen retrofitted by aramid belts

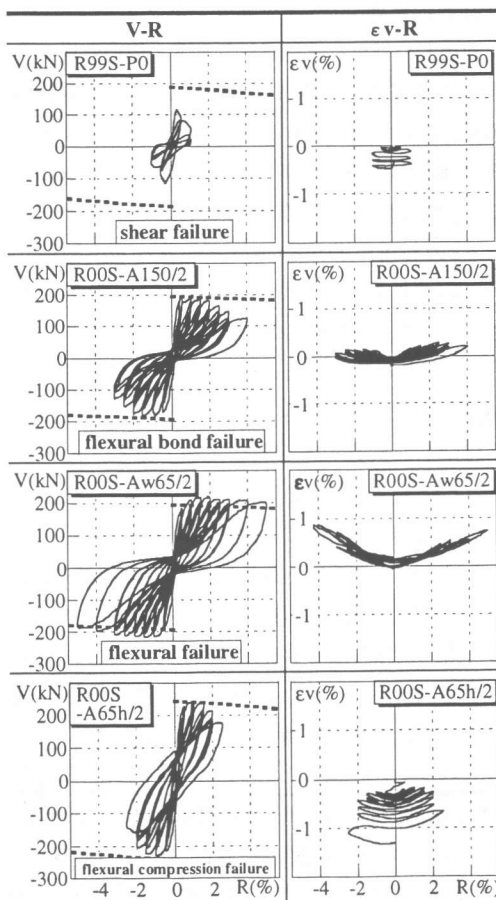


Fig. 3 Measured V-R and ϵ_v -R

アラミドベルト(ベルト幅17mm,厚さ0.612×2=1.224mm,間隔150mm)による補強試験体R00S-A150/2は,R=2.0%までは安定した性状を示したが,それ以降徐々に耐力が低下した。この柱の破壊モードは曲げ降伏後の付着破壊である(Fig. 3参照)。

幅17mmのアラミドベルトを2本横にすき間なく並べて一組とし,それを65mm間隔で配置したダブル幅の補強試験体R00S-Aw65/2(ベルト幅17×2=34mm,厚さ1.224mm)は,補強効果が最も大きい。この試験体はR=5.0%まで安定した履歴曲線V-Rと ϵv -Rを示した。最終破壊モードは曲げ破壊と判断したが,若干付着劣化も観察される(Fig. 3参照)。

軸力比0.4の高軸力下の補強試験体R00S-A65h/2(ベルト幅17mm,厚さ1.224mm,間隔65mm)では,R=2.0%以降ピーク時荷重が急激に低下しており,主筋の降伏状況を考慮しても柱頭ヒンジ部の圧壊が生じ始めたと思われる。柱頭のヒンジ領域における圧縮側のコンクリートがはらみ出し,曲げ圧縮破壊が進行した。軸ひずみ ϵv も部材角の増大と共に圧縮ひずみが増大しており,耐力も急激に低下した。最終破壊モードは曲げ圧縮破壊と判断した。

応急補強を想定した柱試験体のV-Rと ϵv -RをFig. 4に示す。補強試験体ER00S-A65/0(ベルト

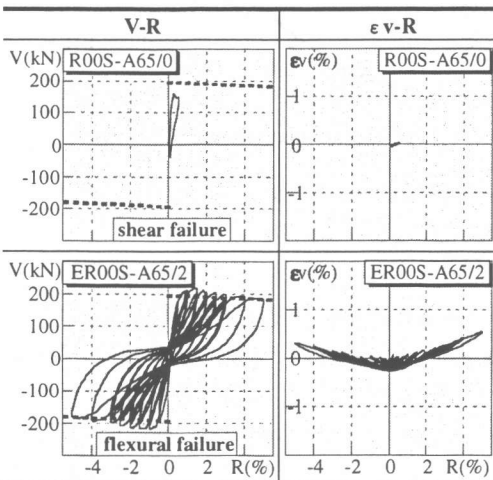


Fig. 4 V-R and ϵv -R of emergency retrofit column

幅17mm,厚さ1.224mm,間隔65mm)は,第一段階でプレストレスを0とした加力実験を行い,第二段階で応急補強としてプレストレスを繊維の破断ひずみレベルの約1/2である8000 μ まで導入し,加力実験を続行した。プレストレスを導入する前の一回目のR=0.5%でせん断ひび割れが生じたが,アラミドベルト補強によりせん断ひび割れの拡大が防止された。その後は応急補強としてプレストレス導入により,安定した性状の履歴曲線を示した。最終破壊モードは曲げ破壊と判断したが,若干の付着劣化も見られる。

また,応急補強試験体ER00S-A65/2と,ダブル幅の補強試験体R00S-Aw65/2では,ベルト補強量が1:2の関係にあるが,部材角R=5.0%まではほぼ同じ性状を示した(Figs. 3, 4参照)。これは応急補強前の損傷が小さかったことに加えて,軸力比が小さい場合はシングル幅(17mm)ベルトで十分であり,ダブル幅(17mm×2)ベルトは過剰補強であることを示唆している。

補強前の基準試験体R99S-P0がR=0.5%未満でせん断破壊し,耐力が低下したのに対し,補強試験体R00S-A150/2はR=0.5%で最大耐力を示し,曲げ強度に達した。2.0%以後の加力で付着

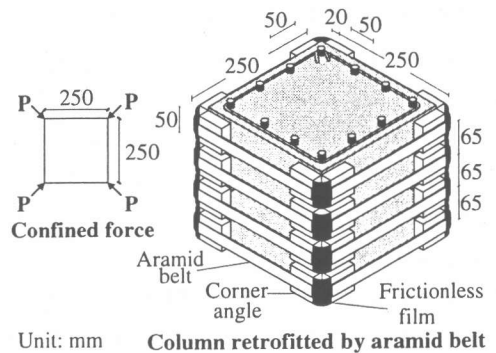


Fig. 5 Confined force due to confinement

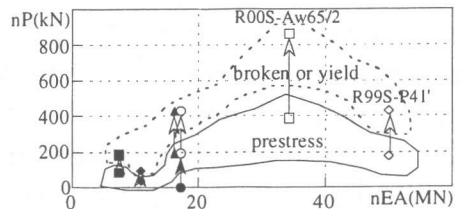


Fig. 6 Confined force nP versus axial stiffness nEA

劣化が顕著になったが、アラミドベルト間隔150mmでもせん断破壊を防止できた。補強試験体R00S-A65h/2は同じ補強量であるER00S-A65/2と比較して、高軸圧縮力下のため最大耐力後の強度低下が著しい。

3. アラミドベルトとPC鋼棒補強試験体

アラミドベルト補強試験体の補強効果を検討するために、PC鋼棒補強試験体との比較検討を試みる。どちらの補強法もプレストレスの導入によりコンクリートを横拘束することによって、せん断補強効果に加えて、受動的かつ能動的に高い補強効果を期待できる靱性型の補強法である。PC鋼棒またはアラミドベルトをいずれもコーナブロック、又はコーナアングルを介して柱の外側に周回させ、プレストレスを導入することによって、柱断面隅角部から対角線方向に圧縮力Pが拘束力として作用する（Fig. 5参照）。一方、PC鋼棒とアラミドベルトではそれぞれ軸剛性(EA)が異なる。コンクリートに生ずるひび割れを抑制するためには、これらの補強部材の軸剛性はできるだけ高い方が望ましい。さらに、この軸剛性は受動的横拘束効果にも影響する。参考までに、PC鋼棒が降伏した場合とアラミドベルトが破断した場合について、Fig. 5に示す圧縮力Pを計算する。これらの圧縮力Pと軸剛性EAは、柱の補強に用いられたPC鋼棒とアラミドベルトの組(柱を1周して1組)の総数nを乗じて評価し、これらの計算結果をFig. 6に整理する。

Fig. 6から軸剛性はそれほど大きくなくても、拘束力がある程度あれば補強効果が期待できる。しかし、柱の軸力比が大きくなると、拘束力のみでは限界があることもFig. 6は示唆している。特に、これらの補強材が主筋を直接拘束していないので、高い軸圧縮力が作用した場合でも、軸剛性や横拘束力の増大で補強効果を改善できるかどうかは、今後の課題である。プレストレスはいずれにしても導入した方が望ましいが、能動的な拘束力を与え過ぎると、一旦ひび割れが生じた後逆に柱の損傷を加速させ、耐震性能を劣化させる恐れ

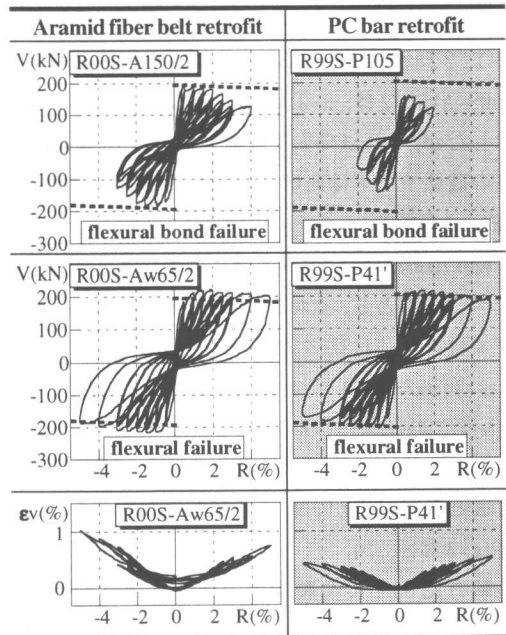


Fig. 7 Measured V-R and ϵ_v -R relationships

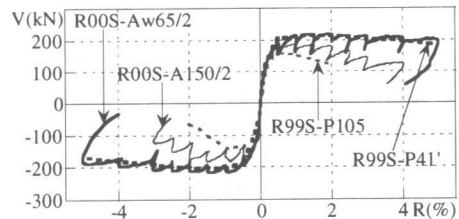


Fig. 8 Measured skeleton curves

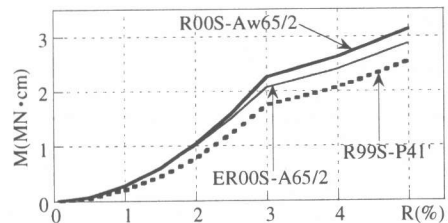


Fig. 9 Accumulated absorbed energy

もある。したがって、適切なプレストレスレベルが存在するものと推定される。

アラミドベルト補強柱試験体と、既発表のPC鋼棒補強柱試験体¹⁾の補強効果を検討するために、Fig. 7に柱試験体のせん断力V-部材角R関係と、柱材軸上の伸縮ひずみ ϵ_v -部材角R関係を示す。PC鋼棒5.4φを41mm間隔で補強した試験体R99S-P41'と、ダブル幅アラミドベルト補強試験体R00S-Aw65/2は共に曲げ破壊しており、そ

の性状はほぼ一致している。PC 鋼棒 3.8ϕ を 105mm 間隔で補強した試験体 R99S-P105 はせん断ひび割れ後の付着破壊に対し、アラミドベルト補強試験体 R00S-A150/2 は、曲げ降伏後の付着破壊を示している。これは Fig. 6 に示すように、横拘束力の差異にあると推定される。これらの試験体はいずれもプレストレスが、アラミドベルトでは破断強度の約 1/2, PC 鋼棒では降伏強度の約 1/3 導入されている。

Fig. 7 に示す曲げ破壊した柱試験体 (R99S-P41' と R00S-Aw65/2) の鉛直ひずみ-部材角関係から、PC 鋼棒補強試験体 R99S-P41' は、アラミドベルト補強試験体 R00S-Aw65/2 と比較して、軸方向の平均引張りひずみが約 1/2 である。これはアラミドベルトが高いプレストレスのため、横拘束効果が大きいからと思われる。Fig. 8 にスケルトンカーブを、Fig. 9 に累積エネルギー吸収量をそれぞれ示す。Fig. 8 と Fig. 9 より、アラミドベルトで補強した試験体は PC 鋼棒で補強した試験体と同等か、それをやや上回る耐震性能を示している。

4. 解析的検討

各試験体の解析結果と実験結果の比較を Fig. 10 に示す。ただし、アラミドベルトによる受動的横拘束効果を反映させたコンクリートの構成則は、文献 3) によった。また、プレストレスは Richart の式⁴⁾により、能動的横拘束効果として、 $4.1\sigma_r$ (σ_r = プレストレスによる平均側圧)をコンクリート強度に加算した。AIJ 靱性指針式⁶⁾による付着強度式において、せん断補強筋としてのアラミドベルトに関する p_v を、アラミドのヤング係数/鋼のヤング係数比だけ減少させる。また、AIJ 靱性指針式によるせん断強度式の適用にあたっては、文献 5) にしたがって、プレストレスの有無に関わらず 0.7% のひずみに相当する応力度を、鋼の降伏点強度に読み替えて利用した。

試験体 R00S-A150/2 の解析では、最大耐力後の圧壊による耐力低下が緩やかに低下している。また、最大耐力が曲げ強度に達しており、実験の

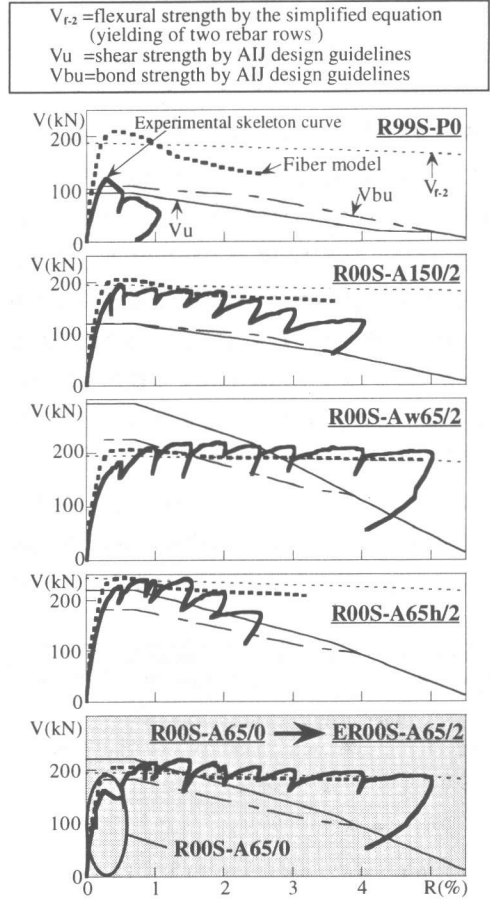


Fig. 10 Analytical and experimental results

最終破壊モードは曲げ降伏後の付着破壊である。AIJ 靱性指針式によるせん断強度計算値が、せん断破壊先行を予測させるほど小さいが、AIJ 靱性指針式の一般的な特性としてせん断補強筋が少ない場合は、せん断強度を小さく評価する傾向が強い。ちなみに、修正荒川 min 式によると、R00S-A150/2 のせん断強度は 158kN であり、AIJ 靱性指針式の 118kN より約 1.34 倍高い。

ダブル幅ベルト補強試験体 R00S-Aw65/2 は解析結果も、実験結果もともに曲げ破壊を示している。一方、高軸力下での補強試験体 R00S-A65h/2 は、曲げ降伏後の圧壊による耐力低下が激しく、十分な靱性を確保できない計算結果を示し、それは実験結果と同じ曲げ降伏後の圧縮破壊である。応急補強試験体 ER00S-A65/2 が補強試験体 R00S-A150/2 よりかなり良い性状を示し、実験

結果と fiber モデルによる解析結果はほぼ一致している。この破壊モードは曲げ破壊である。

5. アラミドベルト補強設計法の検討

Fig. 11 及び Fig. 12 に AIJ 靱性指針式⁶⁾による計算値を示す。V_{exp} は実験値による最大水平耐力、V_u はせん断破壊時のせん断強度、V_{bu} は付着破壊時のせん断強度、V_{r,2} は多段配筋柱の降伏曲げ強度略算値²⁾を示す。この V_{r,2} は略算値であることから、アラミドベルトによる横拘束効果が V_{r,2} には一切考慮されていない。V_u、V_{bu} に関しては4項と同じ取り扱いである。

Fig. 11 にせん断余裕度計算値 V_u/V_{r,2} と実験値 V_{exp}/V_{r,2}、及び付着余裕度計算値 V_{bu}/V_{r,2} と実験値 V_{exp}/V_{r,2} の関係を示す。Fig. 11 からせん断と

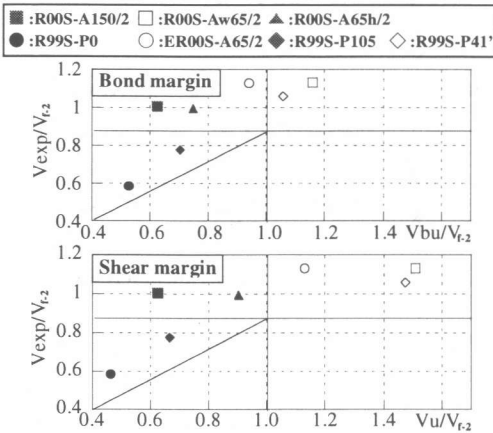


Fig. 11 Measured and calculated lateral capacity

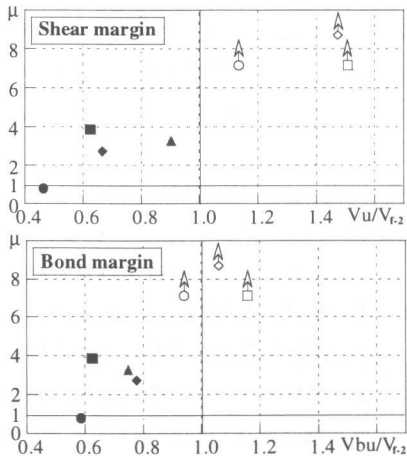


Fig. 12 Ductility factor μ

付着の各余裕度計算値が共に1以上あれば、曲げ破壊が着実に確保されていることがわかる。

Fig. 12 に塑性率 μ ($=R_f/R_y$) とせん断余裕度計算値 $V_u/V_{r,2}$ 、塑性率 μ と付着余裕度計算値 $V_{bu}/V_{r,2}$ の関係を示す。ただし、 R_f は最大耐力の80%時の部材角、すなわち限界部材角実験値である。 R_y は降伏時部材角を示す。図中の矢印は、 μ がそれ以上である事を示す。加力実験が最大 $R=5\%$ で終了しているからである。せん断と付着余裕度の増加に伴い μ が増大し、曲げ破壊する試験体は μ が大きい。

6. 結論

- 1) fiberモデルによる曲げ解析は、アラミドベルト補強柱の曲げ強度実験値をほぼ捕らえている。
- 2) せん断余裕度と付着余裕度に関する各計算値が共に1.0を超えるように補強設計を行えば、靱性のある曲げ破壊が期待できそうである。
- 3) ダブル幅アラミドベルト補強試験体 R00S-Aw65/2、及びアラミドベルト応急補強試験体 ER00S-A65/2 と PC 鋼棒補強試験体 R99S-P41' は、軸力比が小さい場合はほぼ同等の耐震性能を有する。
- 4) 従来の繊維シート補強では不可能なプレストレス導入をベルト補強は可能にし、かつ袖壁、腰壁や直交壁が付随した RC 柱にも耐震・応急補強を効果的に行うことができる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) アラミド繊維補強研究会: アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領(案), アラミド繊維補強研究会, 1998. 1
- 4) 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.
- 5) 日本建築防災協会: 連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計・施工指針, 日本建築防災協会, 1999. 9
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 日本建築学会, 1999. 8