

論文 打込み型枠兼横補強材としてアラミド正形成形管を利用した合成RC柱の耐震加力実験

米須 健^{*1}・山川 哲雄^{*2}・仲 鵬^{*3}・佐藤 元^{*4}

要旨:適切な巻数で成形されたアラミド繊維シート正形成形管を打込み型枠兼横補強材として、在来の帯筋と併用することにより強度かつ韌性に富んだ、いわゆる耐震性能に優れた合成RC柱の可能性を検討するために、せん断スパン比1.5の合成RC柱に関する耐震加力実験を行った。その結果、アラミド繊維正形成形管と帯筋で二重に横拘束した合成RC柱試験体は高軸力においても韌性に富んだ曲げ破壊先行の弾塑性挙動を示した。

キーワード:打込み型枠, 横補強材, アラミド繊維, 正形成形管, 耐震性能, 合成RC柱

1. 序

著者らは連続繊維シートにエポキシ樹脂を含浸させて製作した成形管を鋼管にかわって、打込み型枠兼横補強材として利用した新しい合成RC柱を提案した¹⁾。炭素繊維シートを5プライ重ねて製作した正形成形管を用いて、帯筋を併用した場合としない場合について従来のRC柱と、その柱を板厚3.2mmの鋼板で耐震補強したRC柱についての比較を行うために、一定軸圧縮力下の正負繰返し水平加力実験を行った¹⁾。その結果、炭素繊維正形成形管を用いたせん断スパン比2.0の合成RC柱(12-D13, $P_g=2.44\%$)は帯筋の有無にかかわらず、鋼板で耐震補強したRC柱と遜色ない耐震性能を示し、新素材とコンクリートを基盤にした新しい合成構造の可能性を期待させるものとなった¹⁾。

そこで、次年度にはアラミド繊維シートで正形成形管を製作し、次いで太径の鉄筋(D19)を用いて主筋量(8-D19, $P_g=3.67\%$)をふやし、せん断スパン比1.5の合成RC柱について同じ加力実験を行った²⁾。しかし、多量な主筋の曲げ強度を発揮させるための正形成形管や帯筋の横

補強量が不足し、付着すべりが生じ、曲げ強度に達することなく加力実験が終了した。

したがって、本研究ではせん断スパン比を付着すべりが生じやすい1.5のまま、文献1)と同じ主筋量(12-D13, $P_g=2.44\%$)まで減少させるとともに、アラミド繊維シートの巻数を変化させ、かつ帯筋も併用した正方形断面合成RC柱の加力実験を計画した。本研究は帯筋と適切な巻数で構成されたアラミド繊維正形成形管(以後、AFRP管と呼称する)を併用することにより、強度と韌性に富んだ、いわゆる耐震性能に優れた合成RC柱の可能性を検討したものである。

2. 試験体

試験体はTable 1に示す4体である。その内わけは基準RC柱1体、帯筋の有無による4層AFRP管RC柱試験体各1体と、帯筋と6層AFRP管で二重に横拘束したRC柱試験体の1体の合計4体である。主筋比は2.44%でRC柱の配筋量としては多い方であり、帯筋比は1.28%で上限値をやや上回っており、せん断スパン比は1.5である。したがって、今回の試験体は主筋量が多い前回

*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 理工学研究科生産エネルギー工学専攻・工修(正会員)

*4 横浜ゴム(株)BD推進室(事業開発推進室)担当課長

Table 1 Column specimens

Specimen	Standard	AFRP tube		
	H99M-A0	H99M-A44	H99M-A44h	H99M-A66h
Elevation (mm)				
Cross section (mm)				
$\frac{N}{(bD\sigma_B)}$		0.35		0.7
Common details	Longitudinal reinforcement : 12-D13 SD295 ($P_g=2.44\%$) Transverse reinforcement : D6-@40 SD295 ($P_w=1.28\%$) Shear span to depth ratio : $M/(VD)=1.5$ Strength of concrete cylinder : $\sigma_B=36.8\text{MPa}$			

Table 2 Properties of material

	Thickness or section area	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	E (GPa)
Aramid fiber sheet (1 ply)	0.193mm	2059	1.80*	117.7
Longitudinal reinforcement	(D13) ₂ 127mm ²	359	0.18	202.1
Transverse reinforcement	(D6) ₂ 32mm ²	466	0.21	223.1

*The Aramid fiber sheet has a linear elastic behavior until fracture.

の試験体²⁾より付着割裂しにくい傾向にある試験体といえる。AFRP管はTable 2に示すような力学的特性を有するアラミド繊維シートをエポキシ樹脂で固めて試作したものである。4層AFRP管の厚さは3.3mm~4.9mmで平均3.8mm程度、6層AFRP管は5.0mm~5.6mmで平均5.3mm、AFRP管隅角部の曲率半径はいずれも約25mmの正方形チューブである。

AFRP管にコンクリートを打設する際には、前回同様にAFRP管の板剛性(面外曲げ剛性)が小さいためにフレッシュコンクリートの側圧により、AFRP管が外にはらみ出す現象が見られた²⁾。打設前後の測定によると側圧が大きい柱脚部近傍の中央面で、4層AFRP管は最大2.3mm、6層AFRP管は最大0.7mmである。

3. 実験結果

2台のサーボアクチュエータにより加力ビームをテストベットに対して常に平行に維持する加力装置(原理的には建研式加力装置に同じ)を用いて、一定軸圧縮力(軸力比0.35, 0.7)下の正負繰り返し水平加力実験を行った。各試験体のひび割れをFig. 1に、せん断力V-部材角R関係、および柱材軸方向の平均伸縮ひずみ ϵ_v -部材角R関係をFig. 2に示す。なお、Fig. 2のV-R曲線に破線で示した直線は、多段配筋柱に関する曲げ強度の略算解³⁾である。AFRP合成RC柱は加力実験終了後、AFRP管を剥いでひび割れを観察した。

基準RC柱H99M-A0は、部材角R=0.5%までは繰り返し加力による耐力低下もほとんどなく、安定した性状を示した。R=1.5%の繰り返し加力から各部材角ピーク時の水平耐力が緩やかに低下した。加力実験時のひび割れ観察で、R=1%時に柱脚部に若干せん断ひび割れが生じ、その後、主筋に沿う付着割裂ひび割れが形成され、逆S字型ループ性状を若干示してきた。この柱の破壊モードは曲げ降伏後の付着割裂破壊であると推定される。

AFRP合成RC柱H99M-A44は、帯筋が配筋されていないため、帯筋が配筋された同じAFRP合成RC柱H99M-A44hよりも早い時点のR=0.5%

Specimen	Standard			AFRP tube				
	H99M-A0			H99M-A44	H99M-A44h	H99M-A66h		
Drift angle	0.5%	1.5%	3.0%	After loading test				
Loading direction								
	Illustrated crack face			0.4	3.0	3.0	0.5	0.6
Loading direction								
	Illustrated crack face			—	—	3.0	0.8	0.6

Note: The numerals are width of the maximum crack (mm).

Fig. 1 Observed cracking patterns

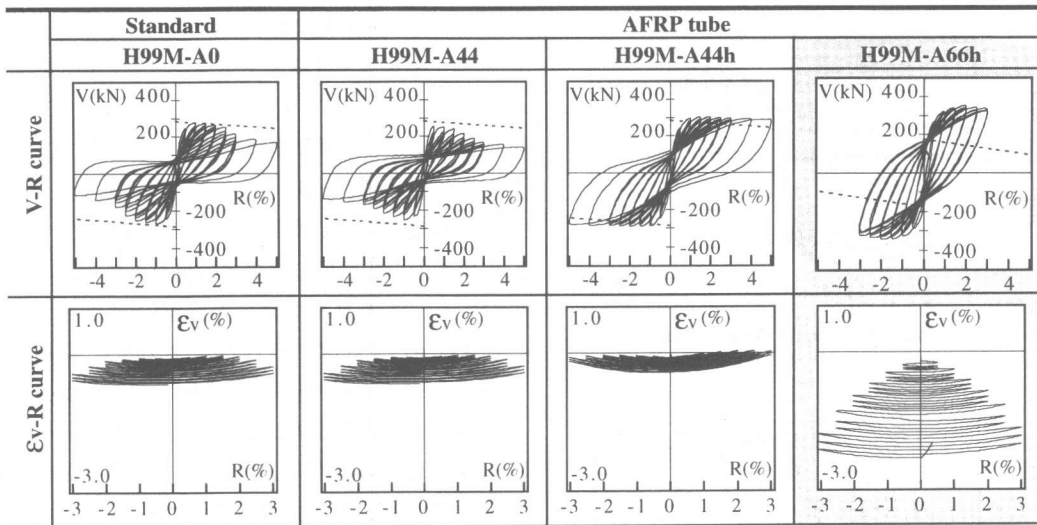


Fig. 2 Measured V-R and ϵ_v -R relationships

のピークに達する前に、耐力低下が生じ、その後の繰り返し加力から各部材角ピーク時の水平耐力が部材角の増加につれてH99M-A0よりやや低下する傾向にある。実験終了後のひび割れ観察で、主筋に沿う付着割裂ひび割れが見られ、カバーコンクリート自身の剥落は見られないが、ハンマーによる打撃で容易にカバーコンクリートが剥落し、かつ主筋の座屈が確認された。この柱の破壊モードは付着割裂破壊であると推定される。

AFRP 合成 RC 柱 H99M-A44h は、その繰り返し加力においても安定した曲げ性状を示し、最大水平耐力に達した後も水平耐力の劣化は見られなかった。実験終了後のひび割れ観察で、主筋に沿う付着割裂ひび割れが若干確認されたが、この柱の破壊モードは曲げ破壊である (Figs. 1,2 参照)。

AFRP 合成 RC 柱 H99M-A66h は軸力比が 0.7 と高く、H99M-A44h に比べて軸力も大きいので最大耐力も高く、耐震性能に優れた履歴曲線を描いている。しかし、 $R=3.0\%$ 時に柱が面外に傾きかけたため実験を終了した。実験終了後のひび割れ観察で、主筋に沿う付着割裂ひび割れ、コンクリートの圧縮ひび割れが若干確認されたが、この柱の破壊モードは曲げ破壊である (Figs. 1,2

参照)。

Fig. 2 に示す柱材軸方向の平均伸縮ひずみ ϵ_v -部材角 R 関係より、H99M-A0 と H99M-A44 は、水平耐力の低下とともに軸圧縮ひずみが前回同様に若干増加している。一方、H99M-A44h は水平耐力が安定しているため軸圧縮ひずみが安定し、部材角が大きくなると若干軸引張ひずみが生じている。H99M-A66h は軸力比が 0.7 とかなり大きいので、加力実験中に柱頭柱脚部の AFRP 管にコンクリート圧壊による凸起(膨らみ)が確認された。これらのことより水平耐力は安定しているが、軸圧縮ひずみが他の試験体に比べ増加している。

各試験体のスケルトンカーブの比較図を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、H99M-A0 と AFRP 管のみの H99M-A44 は、帯筋と AFRP 管を併用した他の試験体に比べて、部材角の増加とともにかなり水平耐力が劣化しているのがわかる。

せん断力 V -部材角 R 関係より得られた累積エネルギー吸収量の比較図を Fig. 4 に示す。部材角 3% 以降が折れ線になっているのは部材角 4.5% は 1 サイクルのみの累積エネルギー吸収量のためである。Fig. 4 より H99M-A44 は帯筋が無く AFRP 管のみで横補強された試験体であるゆえに累積エネルギー吸収量は H99M-A0 よりも $R=1.0$

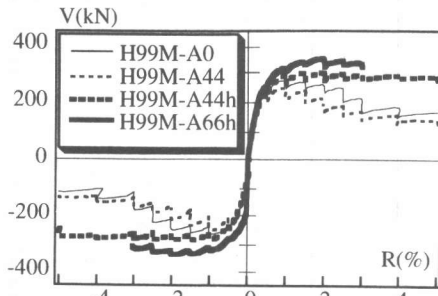


Fig. 3 Measured skeleton curves

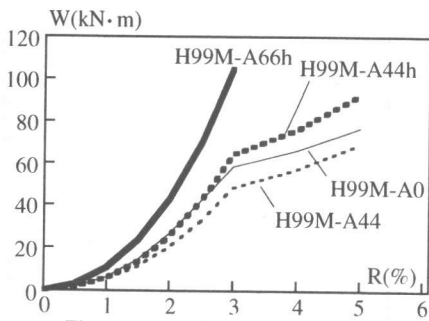


Fig. 4 Accumulated absorbed energy

%から低く、この時点より付着強度が劣化していることを示唆している。

4. 解析による検討

平面保持を仮定したFIBERモデルによる弾塑性解析を行い、実験結果と比較検討を行った。FIBERモデルは断面の解析であるが、これを部材レベルのV-R曲線に拡張するためには、材軸に沿って曲率分布を仮定する必要がある。柱両材端の曲げ降伏ヒンジ部に曲率が集中するものとして、その領域を柱せいの50%と仮定し、仮想仕事法を用いて計算した⁷⁾。帯筋による拘束コンクリートの構成則は崎野・孫の提案式⁵⁾を用い、帯筋とAFRP管、及びAFRP管のみで横拘束されたコンクリートの構成則はアラミド補強委員会による既存RC柱の帯筋とAFRPシートによる拘束効果を同時に考慮した式⁶⁾を用いた。各種拘束状態下のコンクリート構成則をFig. 5に示す。参考のため拘束されていないコンクリートの構成則を示し、AFRP管のみで横拘束した場合と比較すると、AFRP管のみで横拘束した場合は

コンクリート強度は若干上昇する程度であるが、急激な強度低下は解析上まったく生じないことがわかる。

実験結果と解析結果の比較をFig. 6に示す。せん断強度はスケールエフェクトを考慮した修正荒川mean式⁷⁾で計算し、その時利用するアラミド繊維の引張強度には繊維のヤング係数に有効ひずみ0.7%を乗じた値を引張強度として用いた⁸⁾。Fig. 6によれば、曲げ破壊したH99M-A44hとH99M-A66hの両試験体は、実験結果とFIBERモデルによる計算結果とほぼ一致している。しかし、H99M-A44は曲げ強度に到達する前に付着割裂破壊が生じ、耐力が低下しているものと推定される。

Fig. 5の構成則に基づいて付着すべりを無視した場合の曲げ強度計算を、FIBERモデルを用いて行った。Fig. 7にN-M相関曲線を示し、実験結果と比較した。曲げ破壊したH99M-A44hとH99M-A66h、および曲げ破壊先行のH99M-A0は実験値が曲線上又はその近傍にあり、その中でも特に前者の曲げ破壊した試験体は帯筋とAFRP管による二重の横拘束効果により曲げ強度と靱性が改善されている(Fig. 6参照)。一方、H99M-A44は横拘束材がAFRP管のみのため横拘束効果が不足し、実験値がN-M相関曲線に到達せず、付着すべりが生じている。このことはFig. 6と合わせて参照すればより明白であろう。

次に、付着余裕度とせん断余裕度により試験体の耐震性能を検討した。その検討結果をFig. 8に示す。せん断余裕度はスケールエフェクトを

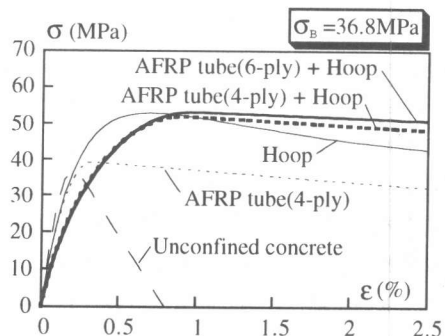


Fig. 5 Calculated stress-strain curves for concrete

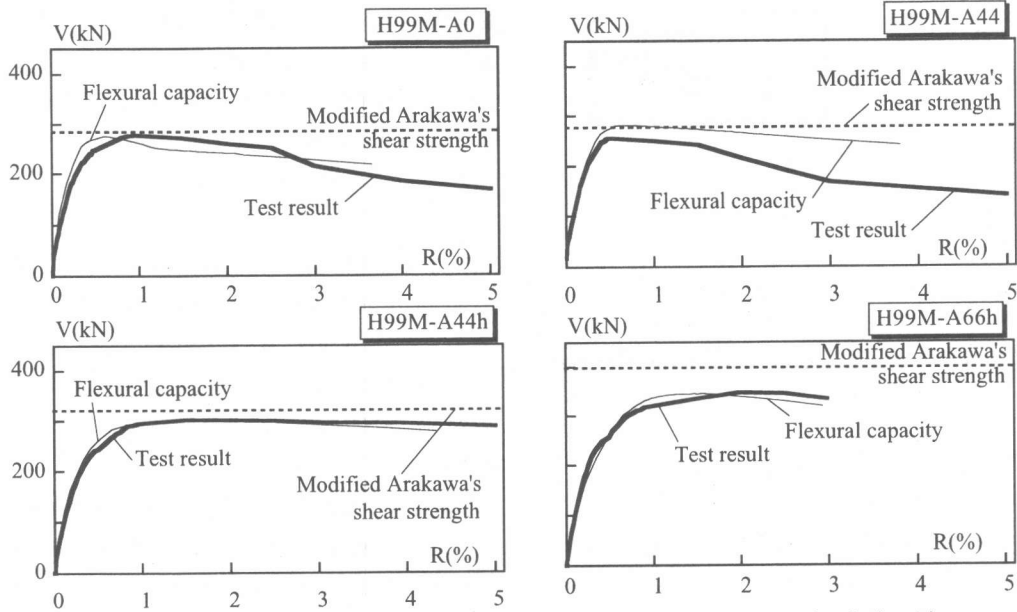


Fig. 6 Measured skeleton curves versus calculated flexural and shear strength relationships

考慮した修正荒川 mean 式によるせん断強度 V_s を、FIBER モデルで計算した曲げ強度 V_f で除した値、付着余裕度は文献 9) の付着破壊の影響を考慮した式によるせん断強度 V_{bu} を曲げ強度 V_f で除した値である。その際、アラミド繊維シートはその膜剛性 E_t を鋼管に換算し、 V_{bu} に用いた付着強度 τ_{bu} は文献 9) の指針式で計算した。

Fig. 8(a) に付着余裕度とせん断余裕度の関係を計算結果として示す。H99M-A44 はせん断余裕度が 1.0 を若干下回るが、付着余裕度は 1.0 を大きく下回り、計算上耐震性能がもっとも悪い。しかし、曲げ降伏先行後付着割裂破壊した

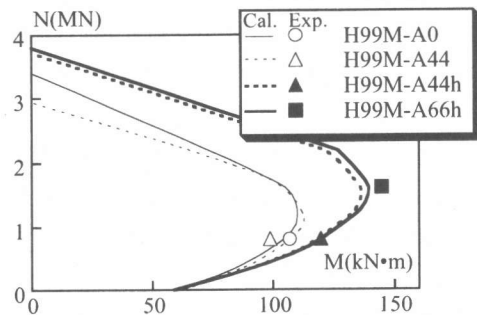
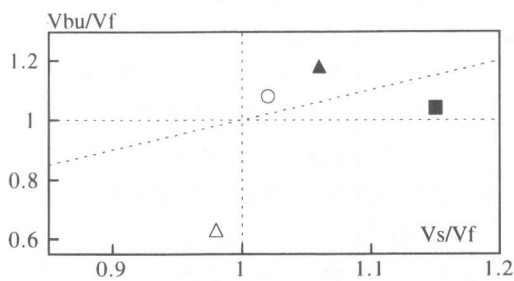
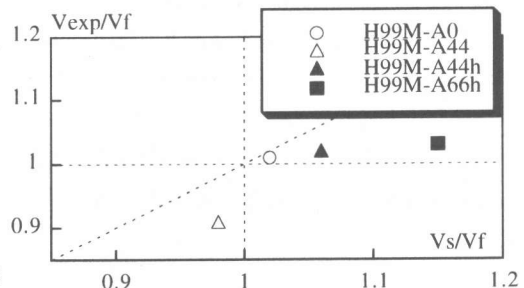


Fig. 7 Calculated N-M interaction diagrams and experimental results

V_s : Calculated shear strength
 V_{exp} : Experimental result
 V_{bu} : Calculated shear strength due to bond splitting
 V_f : Calculated flexural strength



(a) Calculation



(b) Experiment

Fig. 8 Measured strength and calculated bond, shear and flexural strength relationships

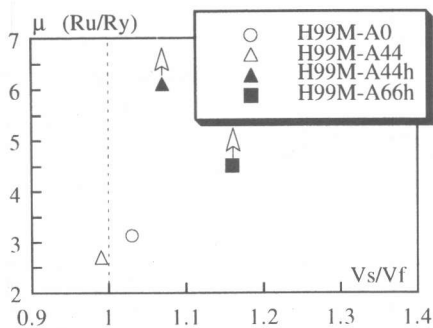


Fig. 9 Ductility factor versus shear/ flexural strength relationships

H99M-A0は、付着、せん断余裕度ともに1.0を上回るが、これは部材角が進行するとともに、カバーコンクリートの剥離剥落により付着強度が低下し、付着割裂破壊に至ったと推定される。

Fig. 8(b)でせん断余裕度に対する実験結果より、H99M-A44はせん断余裕度が不足し、かつ実験結果としての最大水平耐力実験値が曲げ強度計算値よりも小さい。このことに加えて、付着余裕度が1.0よりかなり小さいことを考えると、付着劣化が生じた可能性が強い。これ以外の試験体は3体ともせん断余裕度1.0を上回り、かつ最大水平耐力実験値が曲げ強度計算値を上回っており曲げ降伏先行を示唆している。

Fig. 9に塑性率とせん断余裕度の関係を示す。図中に示す塑性率は、最大水平耐力が80%低下した時の限界部材角 R_u を菅野が提案した降伏時剛性低下率と慣用の曲げ強度略算式³⁾を用いて算出した降伏部材角 R_y で除した値とした。なお、加力実験終了後の部材角においても耐力が80%に低下しない場合は、限界部材角 R_u はその部材角でとりあえず表示するが、Fig. 9で矢印は μ がそれ以上になることを示す。Fig. 9より、せん断余裕度が大きくなると、塑性率も増加することがわかる。しかし、せん断余裕度が1.0前後にある付着割裂破壊した試験体の塑性率は3.0前後である。

5. まとめ

打込み型枠と横補強材を兼ねるアラミド繊維

成形管を用いた正方形断面合成RC柱の一定軸圧縮力下の正負繰返し曲げせん断加力実験を行った。AFRP管と帯筋で二重に横拘束した合成RC柱試験体は高軸力（軸力比0.35, 0.7）下においても望ましい耐震性能を示した。

謝辞：本研究は平成11年度文部省科学研究費（基礎研究(C)11650592 研究代表者・山川哲雄）の助成を受けた。また、金秀建設（株）はじめ多くの関係者に多大な協力をいただきました。本加力実験は、琉球大学地域共同研究センター内の大型実験施設で行った。

参考文献：

- 1) 渡嘉敷貴之, 山川哲雄, 仲鵬: 打込み型枠兼横補強材としてCFRP管を用いた合成柱の耐震性能, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.1243-1248, 1998.7
- 2) 渡嘉敷貴之, 山川哲雄, 張愛暉, 佐藤元: アラミド繊維正形成形管を利用した合成RC柱の耐震性能, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.319-324, 1999.7
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準書・同解説 - 許容応力度設計法 - 1999, 日本建築学会, pp.51-69, 1999.11
- 4) 中山耕一, 山川哲雄: FIBERモデルを用いたRC柱の弾塑性解析に関する一検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集C (東海), pp.337-338, 1994.9
- 5) 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-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集 第461号, pp.95-104, 1994.7
- 6) アラミド補強研究会: 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), アラミド補強研究会, 1998.1
- 7) 李正浩, 清水泰: 鉄筋コンクリート柱部材の終局せん断耐力式に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, 第483号, pp.121-128, 1996.5
- 8) 建設省住宅局建築指導課: 連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート造建物の耐震改修設計・施工指針, 日本建築防災協会, 1999.9
- 9) 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, 日本建築学会, 1999.8