

論文 新素材とコンクリートのみで構成されたハイブリッド コンクリート柱の耐震加力実験

山川 哲雄^{*1}・佐藤 元^{*2}・米須 健^{*3}・張 愛暉^{*4}

要旨：本論文は鋼材を一切利用しないで、コンクリートと新素材（主筋、帯筋及び正方形形成形管）のみからなる新しいハイブリッド柱に関する一定軸圧縮力下の正負繰返し水平加力実験を行い、これらの弾塑性挙動に関する実験結果を報告すると共に、若干の考察を行った。その結果、本論文で提案する新しいハイブリッド柱は鉄筋を利用した従来のハイブリッド柱と同等か、それ以上の耐震性能を示したが、一方主筋の破断現象も一部に見られ、今後さらなる検討が実験および解析の両面から必要となった。

キーワード：アラミドロッド、アラミド繊維、正方形形成管、耐震性能、ハイブリッド柱

1. はじめに

山川らは連続繊維シートにエポキシ樹脂を含浸させて炭素繊維¹⁾、又はアラミド繊維²⁾正方形形成管を試作し、鋼管に代わって、打込み型枠兼横補強材として利用したハイブリッドRC柱を提案してきた。これらのハイブリッドRC柱の主筋や帯筋には鉄筋が採用された。したがって、ハイブリッドRC柱はコンクリートと新素材に加えて、鋼材から構成されている。これらの耐震加力実験を行った結果、耐震構造材として有用であることがわかった。それは、成形管が帯筋と共にコンクリートを横拘束し、かつカバーコンクリートの剥落を防止するからである。

そこで、これらの柱の主筋や帯筋をすべて新素材によるロッドやスパイラル筋、格子筋に置き換え、鋼材を一切利用しない新しいハイブリッド柱に関する一定軸圧縮力下の正負繰返し水平加力実験を行い、ハイブリッド柱の弾塑性挙動を実験的に検討した。

これらのハイブリッド柱は腐食環境がきわめて強い海洋構造物や、磁場などが発生する特殊な構造物などには有効に利用される可能性を有

している。したがって、鋼材を一切利用しないで、コンクリートと新素材のみからなる新しいハイブリッド構造に関する研究も、将来的には重要な研究課題になるものと期待されている。そのような中であって、本研究は連続繊維シートで試作した正方形形成管を利用した先駆的な一つの試みでもある。

2. 実験計画

使用材料の力学的特性を **Table 1** に、試験体一覧表を **Table 2** に示す。柱試験体は正方形断面(250mm×250mm)、柱高さ750mm、せん断スパン比1.5の6体である。ただし、そのうちの1体は主筋が鉄筋であり、残りの5体は主筋が珪砂付き約13φ(mm)のアラミドロッドである。

アラミド正方形形成管（AFRP管と呼称する）のみで横拘束した試験体は、主筋が鉄筋とアラミドロッドからなる各1体で、コンクリート強度が37MPa前後ではほぼ等しい。残りのアラミドロッド柱試験体シリーズF00Mの4体は、やや高強度の48MPa程度である。やや高強度コンクリートを採用した理由は、アラミドロッドの付

*1 琉球大学教授 工学部環境建設工学科・工博（正会員）

*2 横浜ゴム（株）MB事業開発部 主幹（正会員）

*3 大城組（株）（元琉球大学大学院生） 工修（正会員）

*4 中国浙江大学構造工程研究所助教授（元琉球大学助教授） 学術博士（正会員）

Table 1 Properties of material

Reinforcement		Thickness or section area	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	E (GPa)
Longitudinal reinforcement	AFRP rod (RA13S)	127 mm ²	1373 *	2.00 *	69
	Steel bar (D13)	127 mm ²	359	0.18	202
Transverse reinforcement	AFRP spiral (RA6)	32 mm ²	1373 *	2.00 *	69
	CFRP grid (NEFMAC)	31 mm ²	1799 *	1.77 *	101
	AFRP sheet (1 ply)	0.193 mm	2060 *	1.80 *	118

Note : The symbol * denotes the fiber has a linear elastic behavior until fracture.

Table 2 Column specimens

Specimen	H99M-A44	F00M-A44	F00M-A0a	F00M-A44a	F00M-A0c	F00M-A44c
Elevation (mm)						
M/(VD)=1.5						
Cross section (mm)						
f'_c (MPa)	36.8	37.9	47.7			
Longitudinal reinforcement	12-D13 ($P_g=2.44\%$)	12-AFRP rod ($P_g=2.44\%$)				
Transverse reinforcement			AFRP spiral-@40 ($P_w=0.64\%$)		CFRP grid-@40 ($P_w=1.24\%$)	

着劣化を極力防止するためである。主筋に従来の鉄筋を利用したハイブリッド柱は、主筋にアラミドロッドを利用したハイブリッド柱の基準試験体として利用し、両者を比較検討することによって、主筋にアラミドロッドを利用したハイブリッド柱の力学特性を、ある程度知ることができるからである。本試験体に用いた帯筋は、アラミドスパイラル筋と炭素繊維格子状筋の2種類である。帯筋の力学特性を Table 1 に示す。本試験体では横拘束効果をさらに高めるために、帯筋に加えて、さらにAFRP管を採用した。AFRP管は繊維目付量280g/m²、幅300mmのアラミド繊維シートを金型に周回させ、エポキシ樹脂を含浸させて試作した。ただし、AFRP管はその隅角部に約25 mm程度の曲率半径を設けた。

実験は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ド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でFig. 1参照）を用いて、一定軸圧縮力（軸力比0.35）下の正負繰り返し水平加力実験を行った。部材角Rを0.5%ずつ、同一振幅で3サイ

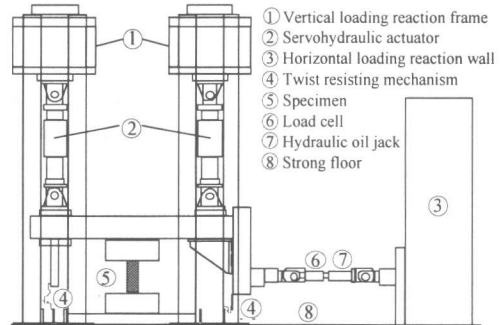


Fig. 1 Detail of setup

クルずつ正負繰り返しの変形制御で3%まで行った後、4、5%を目標に1サイクルずつ正負繰り返した。

3. 実験結果

各試験体のひび割れ図を Fig. 2 に、各試験体のせん断力 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. 3 に示す。Fig. 2 のひび割れ図は、AFRP 管がない基準試験体では各部材角ごとに観察されたが、AFRP 管柱試験体においては加力実験終了後、AFRP 管を剥

Specimen	Standard column without AFRP tube					AFRP tube			
	F00M-A0a		F00M-A0c			H99M-A44	F00M-A44	F00M-A44a	F00M-A44c
Drift angle	0.5%	1.0%	0.5%	1.5%	3.0%	After loading test			
Loading direction  Illustrated crack face									
Loading direction  Illustrated crack face									

Fig. 2 Observed cracking patterns

ぎ取ってひび割れを観察した。

H99M-A44は帯筋が配筋されず、主筋に鉄筋を用い、AFRP管でのみ横拘束したため横拘束効果が不足し、主筋が曲げ降伏強度に到達することなく付着劣化が進行した。そのため、水平耐力も部材角の増大とともに次第に低下していった(Fig. 3参照)。

F00M-A44 は H99M-A44 の主筋が、鉄筋に替わってアラミドロッドが配筋されているため H99M-A44 と異なった弾塑性挙動を示している。F00M-A44 の水平耐力は部材角の進行とともに緩やかに低下しているが、H99M-A44 ほど落ち込んでいない (Fig. 3 参照)。しかも、エネルギー吸収量の大きい紡錘形状の履歴曲線を示している。加力実験終了後、AFRP 管をはぎ取るとカバーコンクリートが剥落しそうなほど、コンクリートの損傷がひどかった。しかし、AFRP 管による横補強のため、カバーコンクリートの剥落が防止されていた。

F00M-A0aは横拘束筋にアラミドスパイラル筋のみを用いた基準柱試験体で、部材角 $R=0.5\%$ の繰り返し載荷を終了し、1サイクル目の $R=1\%$ に達する手前で突然大きなせん断ひび割れが発生し、せん断破壊を起こした（Fig. 2参照）。アラミドスパイラル筋が部材角が小さいうちから横補強筋として十分に機能しなかったため、せん断破壊が生じたものと思われる。

F00M-A44aはF00M-A0aにAFRP管を用い、二重に横拘束した柱試験体で、水平耐力は部材角 $R=1\%$ で最大値に到達した後、 $R=3\%$ まで徐々に低下していった。しかし、それ以降 $R=4, 5\%$ までは耐力低下がほとんど見られなかった。履歴曲線はF00M-A44と同様に、エネルギー吸収の大きい紡錘形状になっている。

F00M-A0cは横拘束筋又はせん断補強筋として、中子筋付き帯筋に相当する炭素繊維格子状筋を用いた基準柱試験体で、F00M-A0aと比べ、約2倍の帯筋量が配筋されているため、せん断破壊は生じなかった。水平耐力は $R=1\%$ で最大になり、その後徐々に低下していった。履歴曲線はF00M-A44と同様に、エネルギー吸収の大きい紡錘形状になっている。ただし、**Fig. 2**からもわかるように、格子状帯筋の特色として³⁾、柱せい面で主筋(中段筋)に沿った細かなクロス状の付着ひび割れが発生している。さらに、部材角の増大と共に、これらのひび割れが連結し、カバーコンクリートが剥離・剥落する顕著な現象が生じた。しかし、格子状帯筋の格点が破断するような現象は見られなかった。それは、格子状帯筋の外周に沿って10mm程度の余長(突起)を確保していたからと思われる³⁾。

F00M-A44cはF00M-A0cにAFRP管を用い、二重に横拘束した柱試験体で、F00M-A0cに比較して水平耐力が約20%以上大きい。しかし、残留

変形がせん断破壊した試験体を除く F00M シリーズ中最も小さい。履歴曲線はエネルギー吸収の大きい紡錘形状であるが、履歴曲線の膨らみはそう大きくない。加力実験途中、 $R = 3, 4, 5\%$ のピーク近傍で大きな音がし、それと同時に水平耐力が急激に低下した。特に、 $R = 4, 5\%$ での耐力低下は大きい。加力実験終了後、AFRP 管を取り除いて、ひび割れを観察すると、柱頭や柱脚には降伏ヒンジを示す典型的な曲げひび割れが生じていた。カバーコンクリートをはぎ取り、アラミドロッドで製作された主筋の破損状況を観察した結果、一部の主筋が柱頭柱脚で破断していることがわかった。密に配筋された炭素繊維格子状筋と、AFRP 管で二重に横補強されたため、高い横拘束効果が得られた。そのために、柱頭と柱脚に明瞭な曲げヒンジが構成され、それ以外の部分が剛体的挙動をしたものと推定される。このことは Fig. 3 に示した ϵ_v - R 曲線において、柱材軸上の平均圧縮ひずみが全試験体の中で最も小さいことからわかる。したがって、柱頭や柱脚に曲げひずみが集中し、2% 程度のひずみレベルで繊維(アラミドロッド)の破断が生じたものと推定される。

AFRP 管におけるフープ方向のひずみ ϵ -部材角 R 関係を Fig. 4 に示す。AFRP 管のみで拘束している F00M-A44 は、全体的にひずみが大きい(それでも文献 4) で規定されている 0.7% 程度である。アラミドスパイラル筋と AFRP 管で

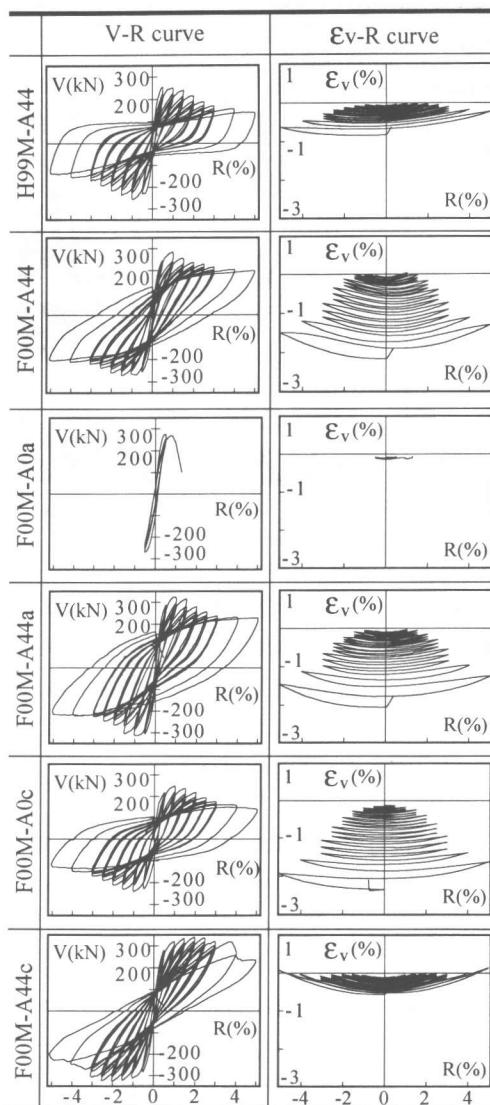


Fig. 3 Measured V-R and ϵ_v -R relationships

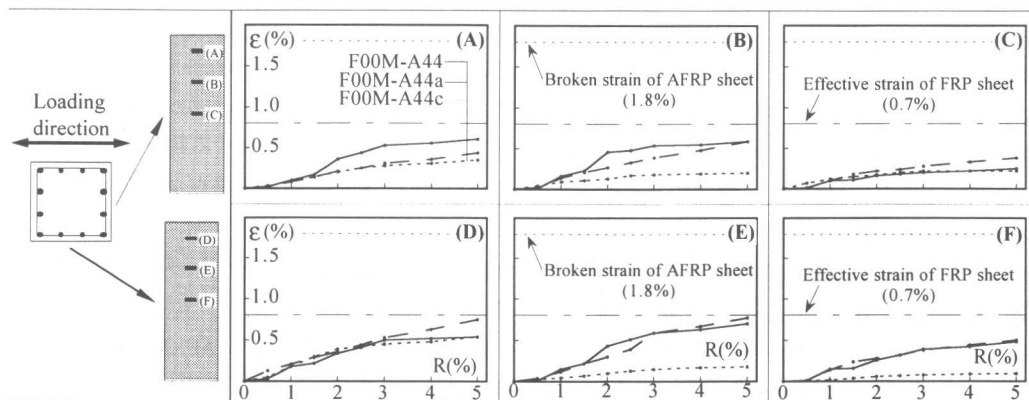


Fig. 4 Measured strain of AFRP tube versus drift angle relationships

二重に横拘束しているF00M-A44aも、F00M-A44と同じひずみレベルにあり、アラミドスパイラル筋はせん断力に対して効果が小さいようである。それはF00M-A0aがせん断破壊したことで理解できる。一方、中子筋付き帯筋に相当する炭素繊維格子状筋を用いたF00M-A44cは、その帯筋の横拘束効果が大きいいため、AFRP管のフープ方向ひずみが小さい傾向にある。

各部材角における1サイクル目のせん断力 V -部材角 R 関係をFig. 5に示す。Fig. 5より、主筋の材料がアラミドロッドと鉄筋の違いで、耐力はF00M-A44が若干大きい。また、F00M-A44、F00M-A44a、F00M-A0cは $R=1\%$ でそれぞれ最大耐力に達し、その後徐々に耐力が低下していることが類似している。AFRP管で横拘束されていないF00M-A0cは、カバーコンクリートの剥離・剥落によりF00M-A44、F00M-A44aに比べ、 $R=4, 5\%$ 時においても徐々に低下している。

各部材角ごとに1サイクル目の水平耐力を最大水平耐力で除した耐力低下率をFig. 6に示す。図中に示す縦軸の0.8の値が、AIJ 靱性指針式⁵⁾における塑性限界である。Fig. 6より、F00M-A44c以外の試験体は $R=2\sim 3\%$ 間で塑性限界ラインに到達している。

各試験体のせん断力 V -部材角 R 関係より得られた累積エネルギー吸収量をFig. 7に示す。Fig. 7により、F00M-A44はH99M-A44より、エネルギー吸収量が若干大きい。F00M-A44cは、残留変形が小さく、履歴曲線が膨らんでいないため、せん断破壊した試験体を除くF00Mシリーズ中、エネルギー吸収量が最も小さい。

4. 実験結果の考察

主筋に連続繊維補強材を使用している部材の曲げモーメント、せん断力と軸方向力を同時に受ける場合の終局状態は、以下の2つが考えられる⁶⁾。

(1) 引張主筋の破断

(2) 圧縮側コンクリートと圧縮主筋の圧縮破壊

これらの終局状態を踏まえて、せん断破壊し

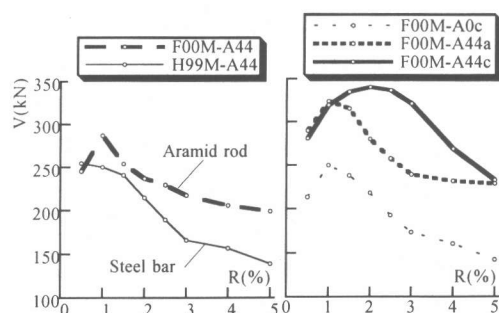


Fig. 5 Skeleton curve at first cycle

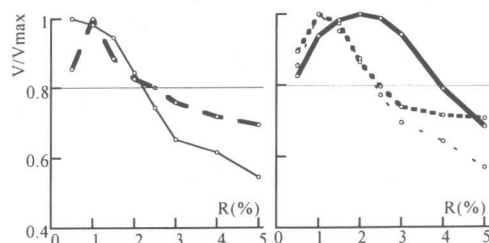


Fig. 6 Decreasing ratio of shear force

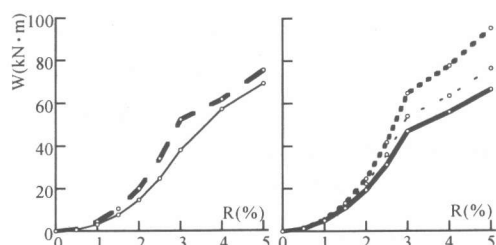


Fig. 7 Accumulated absorbed energy

た試験体以外のF00Mシリーズの破壊形式を検討した。F00M-A44cの破壊形式は(1)と推測される。この破壊形式は、アラミドロッドの引張力に対する圧縮側コンクリートの圧壊はほとんどなく、アラミドロッドが引張破断に至ったと推測される。ただし、アラミドロッドはほとんど圧縮力を負担しないものと推測される⁶⁾。また、アラミドロッドは圧縮・引張の繰り返し载荷により、引張強度が低下することが報告されている⁶⁾。したがって、圧縮側コンクリートの圧壊はほとんどなく、アラミドロッドに関する弾性材料としての特性が十分に引き出されつつ、圧縮・引張の繰り返し载荷により、引張強度が他の試験体より早い段階で低下し、アラミドロッドの破断に至ったと推測される。

F00M-A44, F00M-A44a, F00M-A0c の破壊形式は(2)と推測される。この破壊形式は、アラミドロッドの引張力に対する圧縮側コンクリートの圧壊により、弾性材料としてアラミドロッドの特性が十分に引き出されることなく、コンクリートの圧壊によって耐力が決まった。このことは Fig. 3 に示した ε_v -R 曲線において、柱材軸上の平均圧縮ひずみが大きいことから理解できる。しかも、コンクリートが圧壊しているため、その部分の軸方向圧縮ひずみが進展し、アラミドロッドの圧縮ひずみも大きくなり、アラミドロッドが提灯状になり、残留ひずみが生じたと思われる。

せん断破壊した試験体以外の F00M シリーズの履歴曲線は、紡錘形となることが共通していた。また、残留ひずみがない弾性材料のため、残留変形が生じないと思われるが、アラミドロッドに圧縮・引張の繰り返し载荷を行うと、次第に引張剛性が低下し、残留ひずみが若干生じる。その結果、残留変形のある紡錘形の履歴曲線を描いたものと推定される。

しかも、終局状態が異なると履歴曲線の膨らみ、つまり残留変形に大きな違いがあり、それはアラミドロッドが受ける圧縮・引張の繰り返し载荷の違いによる、アラミドロッドの残留ひずみの大小によるものと推測される。(2)の終局状態の場合、過度の圧縮ひずみが生じたアラミドロッドには、残留ひずみが(1)の終局状態より多く生じていると推測される。

5. 結論

1) 主筋であるアラミドロッドの引張破断ひずみ、及びその時の破断強度がきわめて大きい。したがって、そのために圧縮側コンクリートの圧縮強度が不足し、ハイブリッド柱の曲げ強度は圧縮側コンクリートの圧縮破壊で支配される。しかし、アラミドロッドの弾性材料としての特性を十分に引き出した F00M-A44c は、残留変形の小さい、エネルギー吸収量の少ない耐震性能を示した。しかも、F00M-A44c の柱頭・柱脚に

曲げひずみが集中し、この引張ひずみにアラミドロッドが追随できず、 $R = 3\%$ 前後から破断が始まったと推定される。このことは、主筋に破断ひずみの大きい材料が望ましいことを示唆している。

2) 主筋であるアラミドロッドの圧縮破壊時ひずみはきわめて小さいので、一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験で主筋が圧縮劣化し、残留変形が生じ、結果的に履歴曲線が紡錘形状になり、エネルギー吸収量の多い耐震性能を示したものと推定される。

3) AFRP 管のみで横拘束された試験体の中で、主筋が鉄筋の場合は付着劣化が生じた。しかし、アラミドロッドを主筋に利用した場合は付着劣化が生じることなく、圧縮側コンクリートの圧縮劣化が生じたものと推定される。

謝辞：本研究は平成 12 年度の高橋産業経済研究財団の研究助成(“新素材とコンクリートからなる新しいハイブリッド柱の研究開発” 山川哲雄)を受けた。また、新素材はファイベックス(株)と清水建設(株)から提供して頂いた。本加力実験は、琉球大学地域共同研究センター内の大型構造実験施設で行った。

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) 山川哲雄，仲鵬：アラミド繊維正方形形成管を用いたハイブリッド RC 柱の耐震性能に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.536, pp.115-120, 2000.10
- 3) 岡敬人，山川哲雄，仲鵬，藤崎忠志：格子状の連続繊維補強筋を帯筋に用いた RC 柱の弾塑性挙動，日本コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.3, pp.1249-1245, 1998.7
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 連続繊維補強コンクリート編集委員会：連続繊維補強コンクリート～諸性質と設計法，技報堂出版，1995.7
- 7) 小林克己，林英樹：長繊維補強材の引張・圧縮特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，C 構造Ⅱ，pp.139-140, 1992