

論文 補強筋に鉄筋または新素材を用いた正方形アラミド繊維成形管コンクリート柱の実験的研究

大浜 綾子^{*1}・山川 哲雄^{*2}・仲 鵬^{*3}

要旨: 打込み型枠兼横補強材としての正方形アラミド繊維成形管と、補強筋に鉄筋または新素材を用いてこれらの弾塑性挙動、中でも特に耐震性能を検討するために一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験を行った。その結果、新素材を補強筋に用いても鉄筋と同様にエネルギー吸収に富んだ耐震性能を示した。そのためには、補強筋の種類にかかわらず十分な横補強が必要であることがわかった。

キーワード: アラミド繊維, 正方形成形管, アラミドロッド, CFRP筋, 横補強, 耐震性能

1. 序

山川らは打込み型枠兼横補強材として連続繊維シート成形管を利用し、補強筋に従来の鉄筋を用いたハイブリッドRC柱の耐震性能を実験的に検討してきた¹⁾。その結果、中子筋付き帯筋を多用し、かつ連続繊維シート成形管で二重に横補強すれば、鋼管横補強RC柱と同じように高い耐震性能が得られることを明らかにした。連続繊維シート成形管には、炭素繊維やアラミド繊維が用いられ、断面形状も正方形のみならず円形についても加力実験を行なった。

次いで、従来の鉄筋にかわって補強筋に新素材を用いて、鋼材を一切用いないでコンクリートと新素材からなるハイブリッドコンクリート柱の研究を2000年度から始めた²⁾。この研究では正方形アラミド繊維シート成形管(以後AFRP管と呼称する)を打込み型枠兼横補強材として用いた。その結果、横補強効果がハイブリッド柱に期待できれば、補強筋に鉄筋を用いた場合と同様に新素材を補強筋に用いても、紡錘形状の大きなヒステリシスループを描くことがわかった。ただし、加力実験結果はせん断スパン比が1.5で、軸力比が0.35の場合である。

このようにAFRP管を用いた上で、補強筋に鉄筋を用いても新素材を用いても、大差ない耐震

性能が得られたので、さらにこの要因を検討すべく、補強筋に鉄筋と新素材を用いた2通りについて一定軸力下の正負繰り返し水平加力実験を計画した。

2. 実験計画

使用材料の特性をTable 1に示す。連続繊維の特性値はメーカーによる規格値である。試験体一覧をTable 2に示す。柱試験体は250 mm正方形断面、高さが750 mm、せん断スパン比M/(VD)が1.5である。6体の柱試験体のうち基準試験体であるH01M-A0以外の5体は、AFRP管が利用されている。アラミド繊維シートは1プライあたり繊維目付量が280g/m²である。AFRP管は断面隅角部の応力集中を緩和するために25 mmの曲率

Table 1 Properties of materials

Reinforcement	Thickness or section area	σ _u , σ _y (MPa)	ε _u , ε _y (%)	E (GPa)
Steel bar (D19)	287 mm ²	380	0.20	189
Steel bar (D13)	127 mm ²	359	0.18	202
AFRP rod (13φ)	135 mm ²	1519	3.70	53
AFRP rod (7.4φ)	48.8 mm ²	1668	3.70	53
Steel bar (D6)	32 mm ²	466	0.21	223
CFRP grid	31 mm ²	1799	1.77	101
AF sheet (1 ply)	0.193 mm	2060	1.80	118

Notes: σ_u = tensile strength of FRP, σ_y = yield strength of steel, ε_u = tensile strain of FRP, ε_y = yield strain of steel, E = modulus of elasticity of steel or FRP.

*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 元琉球大学助手 博士(工学) (正会員)

Table 2 Column specimens

Specimen	H01M-A0	H01M-A22t	H00M-A66t	H01M-A11	F01M-A11c	F01M-A44c	
Elevation (mm)							
Cross section (mm)							
σ_B (MPa)	37.7		37.9	43.8	52.4		
Longitudinal reinforcement	8-D19 $p_g=3.67\%$			12-D13 $p_g=2.44\%$	12-7.4 ϕ $p_g=0.94\%$		
Transverse reinforcement	Hoop	3-D6 @30 $p_w=1.28\%$			4-D6 @40 $p_w=1.28\%$		
	Tube	$p_{wf}=0\%$	$p_{wf}=0.31\%$	$p_{wf}=0.93\%$	$p_{wf}=0.15\%$	$p_{wf}=0.62\%$	
Common details	M/(VD) : 1.5			N/(bD σ_B) : 0.35			

半径をもうけ、エポキシ樹脂で成形することによって試作した。

柱試験体 H01M-A0, H01M-A22t, H00M-A66t はそれぞれ補強筋が主筋(8-D19), および帯筋(3-D6@30) とともに通常の異形鉄筋が用いられており, 配筋量も同じであるが, AFRP管のプライ数が異なっている。すなわち, H01M-A22tは2プライ, H00M-A66tは6プライのAFRP管で横補強されている。H01M-A0はAFRP管なしの主筋量, 帯筋量が多い通常のRC柱である。H01M-A11は1プライのAFRP管で, 主筋(12-D13)および帯筋(4-D6@40)に通常の異形鉄筋を利用している。

F01Mシリーズは補強筋に新素材が利用されている。主筋に小径のアラミドロッド(7.4 ϕ)を12本用いた場合と, 鉄筋の主筋径と同じ径のアラミドロッド(13 ϕ)を8本用いた場合についてハイブリッド柱を1体ずつ用意した。アラミドロッドはアラミド2でつくられ, 付着性能を高めるためにロッドの表面にスパイラル状に小さなアラミドロップが巻き付けられ, ロッドと一体となり異形鉄筋における節の役割をしている。F01Mシリーズでは, 中子筋付き帯筋として格子状のCFRP(炭素繊維)筋を利用している。CFRP格子状筋は6 ϕ 筋に相当する。

原理的に建研式加力装置に相当する装置を用

い, 一定軸圧縮応力(軸力比0.35)下の正負繰返し水平加力実験を行った²⁾。部材角Rを0.5%ずつ, 同一振幅で3サイクルずつ正負繰返しでの水平変形制御で3%まで行った後, 部材角4%と5%を目標に1サイクルずつ正負繰返しした。

3. 実験結果

Table 3に実験結果の一覧を示し, 各試験体のひび割れ状況をFig. 1に示す。AFRP管がないRC柱試験体では各部材角ごとにひび割れ図が観察されたが, AFRP管柱試験体には加力実験終了後, AFRP管を剥いでひび割れを観察した。したがって, Fig. 1のひび割れ図は各試験体の破壊状況でもある。柱試験体 H01M-A11, F01M-A11c, F01M-A44cの柱せい面には主筋に沿った

Table 3 Summary of experimental results

Specimen	V_{max} (kN)	R_v (%)	R_f (%)	Failure
H01M-A0	291.2	0.96	1.70	B
H01M-A22t	345.4	1.50	2.50	FB
H00M-A66t	376.8	2.43	> 5.00	F
H01M-A11	316.8	1.42	> 5.00	F
F01M-A11c	240.1	1.00	> 5.00	F
F01M-A44c	294.1	1.44	4.78	F

Notes : V_{max} = experimental peak shear force in push loading direction, R_v = experimental drift angle corresponding to V_{max} , R_f = experimental ultimate drift angle corresponding to the shear force decreasing to 80 percent of the V_{max} , B = bond failure, FB = bond failure after flexural yielding, F = flexural failure.

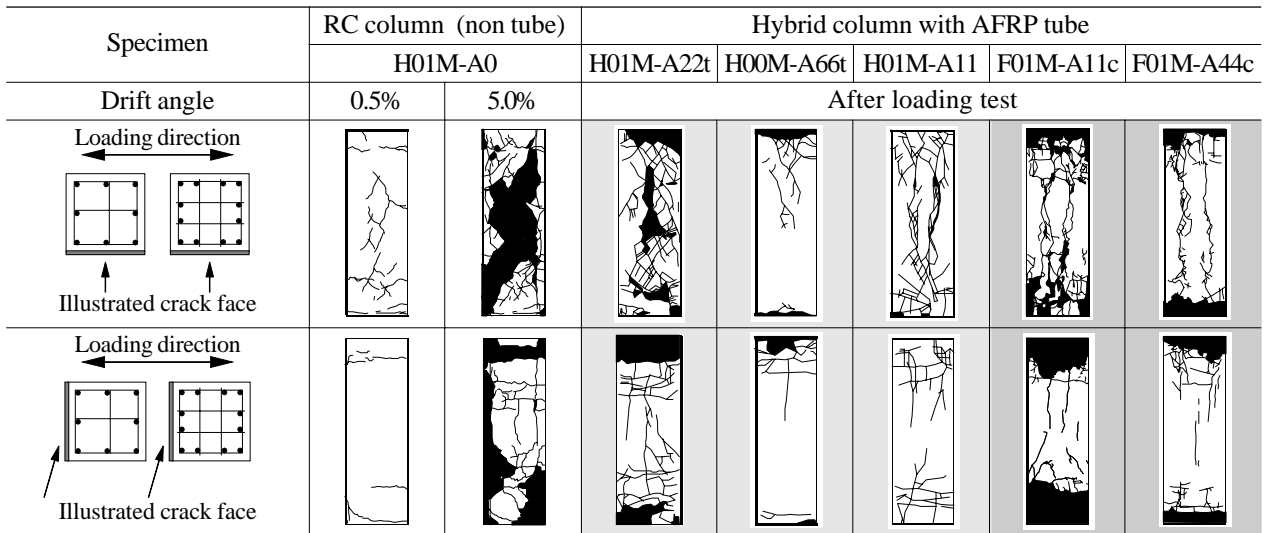


Fig. 1 Observed cracking patterns

付着ひび割れが観察される。しかし、柱試験体 F01M-A44c は Table 2 に示すように 8 本の主筋しか配筋されていないのに、12 本の主筋が配筋された他の 2 つの柱試験体とほぼ同じような傾向のひび割れが柱せい面に見られる。このひび割れは CFRP 格子状筋を中子筋付き帯筋として採用し、その中子筋が外周筋の外に突起のように交点から出ていることによる影響ではないかと推定される²⁾。

せん断力 V - 部材角 R 履歴曲線と、柱中心軸上の平均伸縮ひずみと部材角の関係である ϵ_v - R 曲線を合わせて Fig. 2 に示す。同図に、最外縁主筋が降伏する時の曲げ強度略算値 V_f ³⁾ を P - δ 効果も

考慮した実線で示し、F01M-A11c、F01M-A44c ではアラミドロッドの破断強度の 15% を算入した曲げ強度略算値を点線で示す。

基準試験体 H01M-A0 では、 $R=0.5\%$ で中央の主筋に沿った付着ひび割れが発生し、 $R=1.0\%$ では水平耐力が最大値に到達し、柱の角の主筋に沿って付着ひび割れが発生した。 $R=1.0\%$ を越えた後、柱の対角線に沿ってひび割れがつながり、カバーコンクリートが剥がれ落ちた。主筋 (8-D19) は曲げ応力による降伏点強度に到達せず、曲げ破壊より先に付着破壊が生じた。

2 プライの AFRP 管柱 H01M-A22t では $R=1.5\%$ で主筋の引張降伏強度に到達し、水平耐力が最

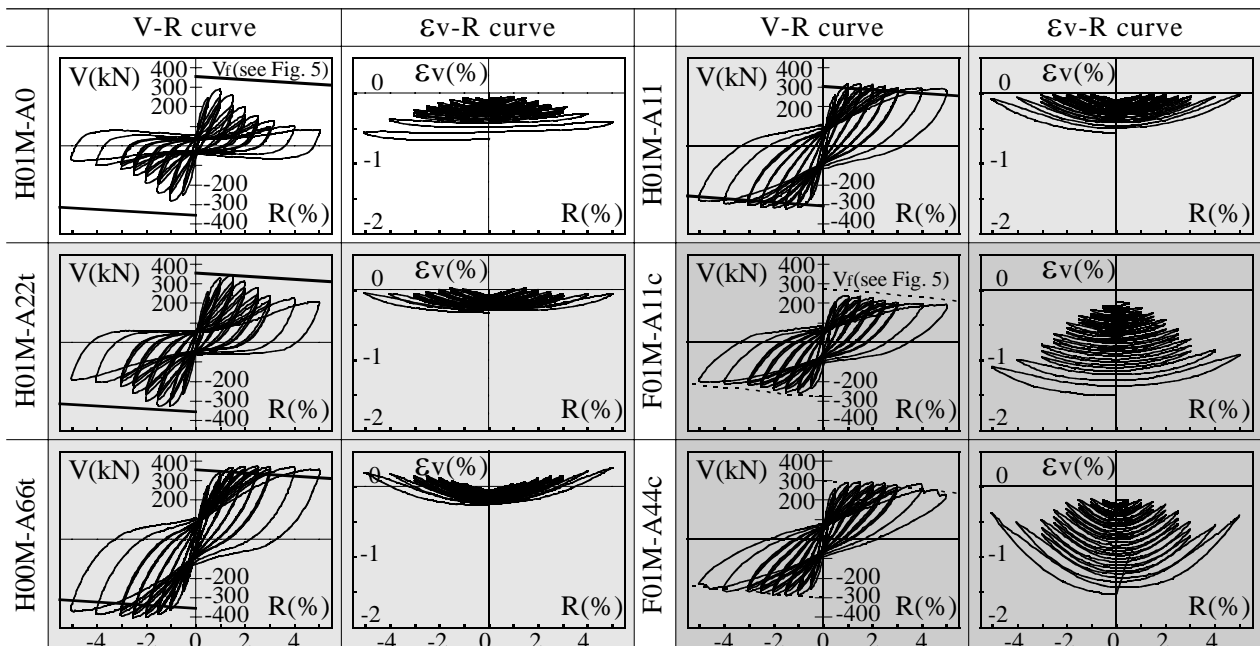


Fig. 2 Measured V-R and ϵ_v -R relationships

大となった。R=1.5%を越えた後、水平耐力は次第に低下した。実験終了後柱頭、柱脚に曲げひび割れと、中央の主筋に沿った付着ひび割れが観察された。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。Fig. 2のV-R曲線も付着割裂の傾向を示している。これは、いずれも横補強量や横拘束効果が不足しているからである。

6プライのAFRP管柱H00M-A66tは曲げ破壊が先行し、十分な靱性能力を示した。柱の塑性ヒンジ領域内に、コンクリートの圧縮破壊が観察されたが、付着割裂ひび割れは見られなかった。

1プライのAFRP管柱H01M-A11のせん断強度は曲げ破壊時のせん断強度レベルに到達し、主筋(12-D13)がその能力を十分に発揮している。これは、せん断補強筋である帯筋が上限値の $p_w=1.2\%$ をやや上回る $p_w=1.28\%$ 配筋されている上に、1プライのアラミド繊維シート(横補強筋比 $p_{wf}=0.15\%$ 相当)で試作された成形管で二重に横補強されているので、主筋量に見合った横拘束効果が十分に期待できるからである。

補強筋がすべて新素材で構成された試験体F01M-A11cとF01M-A44cの加力実験から得られたV-R曲線は、エネルギー吸収に富んだ紡錘形状をしている。

帯筋量は同じであるが主筋径(13φ)、本数と主筋量が異なり、4プライのAFRP管を用いて、横補強量を増加させた柱試験体F01M-A44cは、主筋の効果が若干加算された水平耐力を示してい

る。しかもV-R曲線の形状がやや細くなり、少し立ち上がった傾向を示している。ただし、部材角がR=4%からR=5%にかけてV-R曲線の一部乱れが生じている。この原因は主筋がスタブ内の定着端から少しすべったことに起因していると推定される。

一方、 ϵ_v -R曲線において部材角が大きくなると、 ϵ_v の圧縮ひずみが大きく減少している。この点では柱試験体F01M-A11cと異なるが、主筋に鉄筋を用いた柱試験体H01M-A11と比較すると、 ϵ_v -R曲線における圧縮ひずみの進展が一般に大きい。この理由として、アラミドロッドが圧縮力をほとんど負担できないからと思われる²⁾。このことから、主筋に新素材を利用した柱においては、圧縮力を負担する芯筋に相当する鋼材などを配置し、新素材で構成された主筋に圧縮力の負担を低減させ、引張力を主に負担するようにすれば効果的ではないかと考えられる。ただし、V-R曲線がエネルギー吸収に富んだ紡錘形状を描くかどうかはわからない。

Fig. 3にAFRP管の周方向の引張ひずみに関する測定結果を示す。1プライ成形管の周方向ひずみが最大7000 μ 前後に到達している。この7000 μ は文献4)によれば、せん断強度を計算する場合のせん断補強筋の有効ひずみとして採用されている。横補強量が大きくなると、AFRP管の周方向のひずみは一般に小さくなる傾向がある。また水平力に平行な面、直角な面ともAFRP管の周

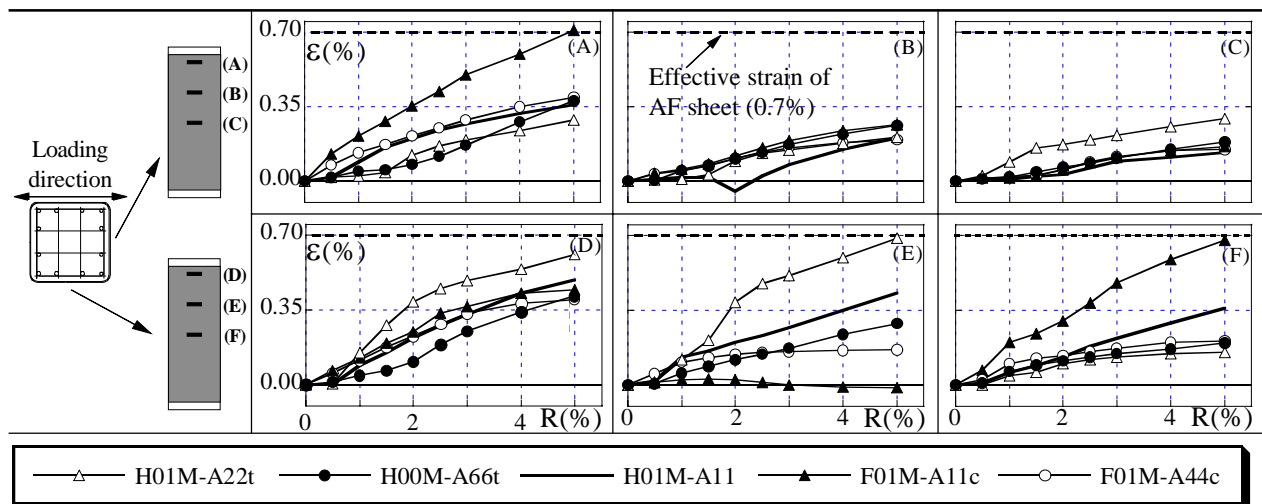


Fig. 3 Measured strain of AFRP tube versus drift angle relationships

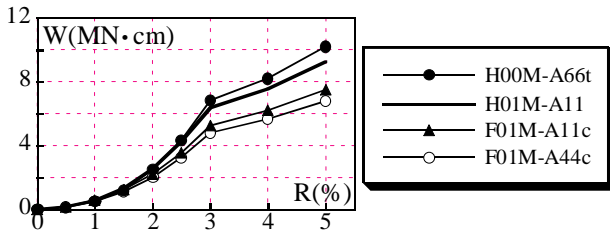


Fig. 4 Accumulated absorbed energy

方向ひずみは、柱頭近傍が柱中央部の反曲点近傍に比較して大きい傾向にある。柱端部はせん断力に加えて曲げモーメントが加わり、コアコンクリートの損傷と膨張が生じやすい。

Fig. 4にエネルギー吸収量の比較を示す。ただし、付着破壊した試験体H01M-A0とH01M-A22tは除く。鉄筋系のハイブリッド柱のエネルギー吸収量が新素材系より大きい。しかし、新素材系ではF01M-A11cがF01M-A44cより大きい。すなわち、横補強量が小さい方がエネルギー吸収量は大きく、横補強量が大きくなると横拘束効果が増大し、新素材特有の線形関係があらわれてくる傾向にある。そのために、曲げ破壊4体の中でF01M-A44cのエネルギー吸収量が最も小さくなったものと推定される。

4. 解析的検討

Fig. 5に加力実験で得られたスケルトンカーブと、AIJ靱性指針式による各強度算定式とを比較する⁵⁾。主筋や帯筋に鉄筋を用いたハイブリッド

RC柱は最外縁主筋の曲げ降伏を前提にした曲げ強度略算式³⁾に加えて、せん断強度式と付着強度式を用いて計算する⁵⁾。その結果、試験体H01M-A0とH01M-A22tは付着強度計算値が最も小さく、実験結果も付着破壊を示している。しかし、試験体H00M-A66tとH01M-A11は十分な横補強量のため、曲げ強度計算値が最も小さく、実験結果も靱性に富んだ曲げ破壊を示している。

AFRP管は文献4)により、0.7%時の応力を降伏点強度と見なし横補強筋のせん断強度に組み入れた。この考えは、帯筋に新素材を利用した場合も同じである。また、付着強度の計算にあたっては、AFRP管をせん断補強量として鉄のヤング係数に換算して組み入れた。主筋に用いたアラミドロッドはその破断まで効果的に曲げ強度に寄与していないので、破断強度の0%、15%についても計算を行なった。破断強度の0%はアラミドロッドの曲げ強度寄与を一切無視することであり、コンクリート強度のみで計算した曲げ強度ということになる。

F01M-A11cは実験で求められた正側のスケルトンカーブとコンクリートのみで計算した曲げ強度がほぼ等しい(Fig. 5参照)。しかし、負側のスケルトンカーブはアラミドロッドの破断強度の15%を算入した曲げ強度略算値にほぼ等しい(Fig. 2参照)。このことから、柱試験体F01M-A11c

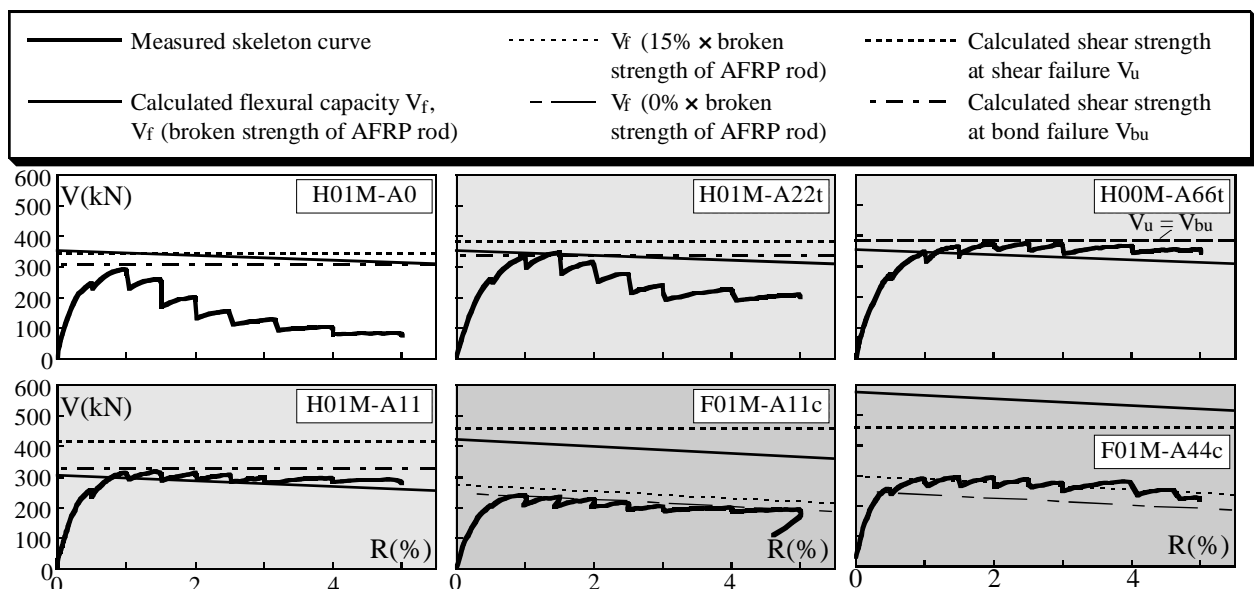


Fig. 5 Comparison between experimental and calculated results

は主筋に用いたAFRPロッドが7.4φと小さく、かつ主筋比 ($p_g=0.94\%$) が小さいので、曲げ強度に寄与する主筋の効果が少ない傾向にあると思われる。

F01M-A44c はアラミドロッドの破断強度の15% を算入した曲げ強度計算値に、実験で求められたスケルトンカーブが正負ともほぼ一致している。ロッドの破断強度の15% 時のひずみは0.56% である。アラミド2によるロッドの材料試験結果によると、引張破壊時のひずみが3.5% に対し、圧縮破壊時のひずみが0.5% になっている。しかも、その時の応力度は引張、圧縮ともひずみにほぼ比例し、それぞれ3015.5MPa と421.7MPa になっている。すなわち、圧縮強度は引張強度の約14% であり、ヤング係数もほぼ等しい。したがって、柱試験体は正負の繰り返し水平力によって、主筋としてのアラミドロッドが圧縮と引張を交互に受けることになる。圧縮ひずみが0.5% 前後の時にアラミドロッドは圧縮破壊し、引張サイドになった時にその能力を喪失し、引張ひずみに追従できずに曲げ強度に到達したと推定される。

加力実験で測定された柱脚隅角部における主筋のひずみを Fig. 6 に参考まで示す。アラミドロッドを主筋に用いた柱試験体 F01M-A11c では $R=-1.0\%$ を超えてからひずみが乱れ、部材角のいかににかかわらず引張ひずみに転じている。13φ のアラミドロッドを8本主筋に用いた柱試験体 F01M-A44c も $R=-1.0\%$ を超えてから、ひずみが乱れる傾向にある。しかし、引張り側では部材角 R にロッドのひずみがほぼ比例している。ロッドのひずみも0.5% 前後が限度であり、前述の推定をほぼ裏付けている。

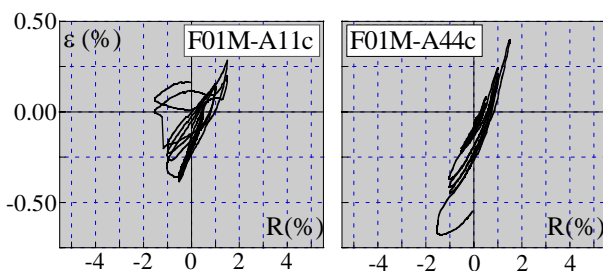


Fig. 6 Measured strain of AFRP rod

5. 結論

1) 補強筋に鉄筋を用いたハイブリッド柱で十分に横補強された場合、せん断耐力と付着耐力が同時に曲げ耐力を上回らなければ、曲げ降伏が先行しても、その後の靱性能力を期待できないことが分かった。

2) 補強筋に新素材を利用したハイブリッド柱においては、主筋に用いたアラミドロッドの高い引張強度が、曲げ強度にそのまま寄与しないことがわかった。アラミド2を用いた主筋では、その引張強度の約15% まで低減して計算した曲げ強度略算値で、実験結果をおおむね評価できた。また、この値はアラミドロッドの圧縮ひずみ限界の0.5% にほぼ相当する。

謝辞

アラミドロッドは帝人(株)、AFRP管は横浜ゴム(株)、CFRP格子状筋は清水建設(株)から提供していただきました。ここに、厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 仲鵬, 山川哲雄, 佐藤元, 山内智博: アラミド正形成形管を用いたハイブリッドRC柱の耐震性能と設計, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 668-672, 2001
- 2) 山川哲雄, 佐藤元, 米須健, 張愛暉: 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, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 23, No. 1, pp. 649-654, 2001.7
- 3) 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, pp. 154-155, 52-57, 日本建築学会, 1999.11
- 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, pp. 43-45, 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, pp. 142-162, 175-192, 1999.8