

# 論文 高靱性型セメント系複合材料を用いた柱部材の構造性能に関する実験研究

笠原 美幸\*<sup>1</sup> ・松崎 育弘\*<sup>2</sup> ・中野 克彦\*<sup>3</sup> ・福山 洋\*<sup>4</sup>

**要旨：** ビニロン繊維をモルタルに混入した高靱性型セメント系複合材料(以下 PVA-HPFRCC)は、ひび割れ発生以降に引張強度を維持し、大きな引張靱性を有するという特性を持つ。本論文では、PVA-HPFRCCを用いた柱部材の曲げせん断実験を行い、従来の RC 柱部材と比較することにより、軸力負担下における PVA-HPFRCC 柱部材の構造性能を検討した。結果として、RC 柱部材には見られない、ひび割れの分散およびひび割れ幅の抑制効果があり、せん断補強効果、付着性能および高軸力に対する拘束効果の向上により、柱部材としての飛躍的な靱性能の向上が得られることを報告している。

**キーワード：** 高靱性型セメント系複合材料, せん断補強効果, 高軸力, 靱性能

## 1. はじめに

コンクリートはひび割れ発生以降や最大圧縮強度以降、急激に強度が低下する脆性的な材料である。これに対して、著者らが研究を進めている高靱性型セメント系複合材料は、モルタル中にビニロン繊維 (PVA: Polyvinyl Alcohol) を体積比で 1.5%程度混入することにより、ひび割れ発生以降に引張強度を維持し、大きな引張靱性を有する。また、最大圧縮強度以降においても緩やかに応力度が低下する性状を示す。このような高靱性型セメント系複合材料は HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites) ともよばれ、高い靱性を持つことにより、コンクリートの使用領域の拡大が期待できる。

このような PVA-HPFRCC を構造部材に適用した場合、従来の材料とは異なる力学的特性が、部材の構造性能に特異な影響を及ぼすと考えられる。文献1)では PVA-HPFRCC を梁部材に適用し、ひび割れの分散によるひび割れ幅の開口抑制、せん断耐力、付着耐力の向上とい

った繊維混入によるせん断補強効果を確認した。

そこで、本論文では、PVA-HPFRCC を柱部材に適用し、従来の RC 柱部材と比較することにより、軸力負担下における PVA-HPFRCC 柱部材の構造性能を把握することを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2. 1 試験体

表-1 に試験体および計算結果一覧、図-1 に試験体配筋図を示す。試験体総数は 10 体で、文献2)における RC 試験体 3 体 (No. I, II, III [軸力比: 0.2]) と、高軸力を設定した No.4, 5 [軸力比: 0.4] の RC 試験体 2 体を比較用試験体とし、それぞれに対応する PVA-HPFRCC を用いた試験体 (以下 PVA 試験体) 5 体を計画した。

試験体は実大の 1/3 スケールを想定し、断面  $B \times D = 300 \times 300 \text{mm}$ 、せん断スパン  $a = 450 \text{mm}$ 、(せん断スパン比:  $a/D = 1.5$ )、主筋 12-D13(主筋比:  $pg = 1.7\%$ )である。

試験体要因は、コンクリート 2 種類 (RC, PVA

* 1	東京理科大学大学院	工学研究科建築学専攻	(正会員)
* 2	東京理科大学教授	工学部建築学科 工博	(正会員)
* 3	東京理科大学助手	工学部建築学科	(正会員)
* 4	建設省建築研究所	国際地震工学部 主任研究員 工博	(正会員)

表-1 試験体および計算結果一覧

No	試験体名	軸力比	コンクリート			主筋(SD295)	せん断補強筋(SD295)		計算値						
			種類	$\sigma_B$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)		$E_c$ (GPa)	配筋	$\sigma_y$ (MPa)	pw	Qmu <sup>(1)</sup> (kN)	Qsu0 <sup>(2)</sup> (kN)	Qsu50 <sup>(3)</sup> (kN)	$\tau_{bu}$ <sup>(4)</sup> (MPa)	$\tau_f$ <sup>(5)</sup> (MPa)
I	RC-20-013	0.2	普通	27.0	-	20.1	12-D13 Pr=1.7%	D6@160	318	0.13	233	149	70	4.39	3.68
II	RC-20-060		普通	27.2	-	20.2		D10@80	367	0.60	234	305	152	5.73	
III	RC-20-119		普通	30.0	-	21.1		D10@40	341	1.19	247	455	181	7.80	
1	PVA-20-013	0.2	PVA-	22.2	-	8.92	12-D13 Pr=1.7%	D6@160	341	0.13	207	134	61	3.98	3.57
2	PVA-20-060		HPFRCC	21.0	1.43	8.52		D10@80	388	0.60	201	289	125	5.04	
3	PVA-20-119		HPFRCC	20.2	1.55	7.89		D10@40	388	1.19	197	366	134	6.41	
4	RC-40-060	0.4	普通	24.7	1.96	20.6	12-D13 Pr=1.7%	D10@80	388	0.60	250	301	142	5.46	3.57
5	RC-40-119		普通	25.6	2.20	19.3		D10@40	388	1.19	256	422	162	7.23	
6	PVA-40-060		PVA-	19.8	-	8.11		D10@80	388	0.60	220	284	119	4.89	
7	PVA-40-119	HPFRCC	20.9	1.79	7.75	D10@40	388	1.19	227	374	137	6.52			

(1) 曲げ強度: 多段配筋柱の曲げ終局強度式<sup>4)</sup> (2)(3)せん断強度: 終局強度型耐震設計指針<sup>5)</sup>(2): 非靱性(3): 靱性(1/50rad)  
 (4) 付着剥離強度: 終局強度型耐震設計指針 (5) 設計付着強度: 終局強度型耐震設計指針

-HPFRCC), せん断補強筋比 3 水準(pw = 0.13%, 0.60%, 1.19%), 軸力比 2 水準 (N/(B·D·σ<sub>B</sub>)=0.2, 0.4) である。なお, 表-1 に材料試験結果に基づく計算値を示した。計算式は RC 部材で用いられている式を準用した。pw=0.13% の試験体はせん断破壊先行型, pw=0.60% および pw=1.19% の試験体は, 曲げ降伏後のせん断破壊および曲げ降伏を想定した。

表-2 に PVA-HPFRCC の調合表, 図-2 にコンクリートと PVA-HPFRCC の引張, 圧縮についての応力度(σ)-歪み度(ε)関係の一例を示す。なお, PVA-HPFRCC の引張, 圧縮特性は, 文献 3) の試験方法により求めた。ビニロン繊維は長さ 15mm, 直径 40.8 μm のものを使用し, 体積比で 1.5% 混入した。PVA-HPFRCC の引張時の σ-ε 関係は, 最大引張強度時以降も 1% 程度まで強度を維持し, その後も緩やかに応力度が低下する性状を示している。また, 圧縮時の σ-ε 関係は, 最大圧縮強度時(σ<sub>B</sub>)の歪みが 0.4%, 0.8σ<sub>B</sub> 時の歪みが 0.8% と, σ<sub>B</sub> 以降の圧縮靱性がコンクリートに比べて大きく, ヤング係数が小さくなっている。なお, 実験時の引張強度は, コンクリートで 2.1MPa, PVA-HPFRCC で 1.6MPa であり, 圧縮強度は, コンクリートで 25MPa, PVA-HPFRCC で 20MPa であった。

表-2 PVA-HPFRCC 調合表

繊維名	水		体積		所要量						
	セメント比 W/C	混入率 Vf	水 W (kg/m <sup>3</sup> )	セメント C (kg/m <sup>3</sup> )	砂 <sup>1)</sup> S (kg/m <sup>3</sup> )	繊維 Vf (kg/m <sup>3</sup> )	増粘剤 <sup>2)</sup> V (g/m <sup>3</sup> )	消泡剤 <sup>3)</sup> (g/m <sup>3</sup> )			
PVA(U-2)	60.0	1.5	524	873	349	19.5	524	52.4			

1) 砂率 S/C: 40% 2) 増粘剤量 V/W: 0.1% 3) 消泡剤量 V × 10%

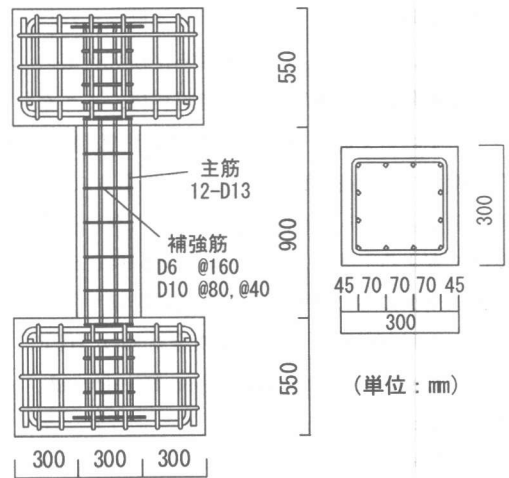


図-1 試験体配筋図

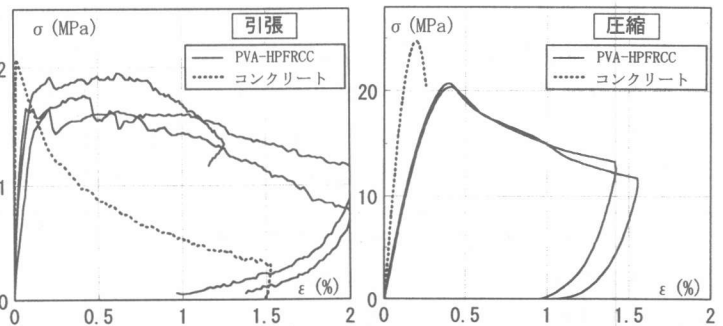


図-2 PVA-HPFRCC σ-ε 関係

## 2. 2 実験方法

図-3に加力装置図、図-4に载荷履歴を示す。加力は建研式加力により行い、一定の軸力(N)を保ち、正負交番繰り返し载荷とした。軸力は試験体ごとに、材料試験によるコンクリートの圧縮強度( $\sigma_B$ )に基づき導入した。加力の制御は変位制御とし、変位 $\delta$ は上下スタブ間の相対変位とした。

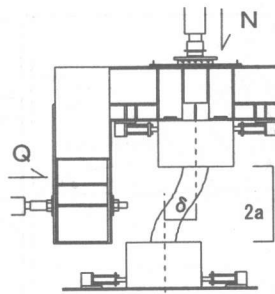


図-3 加力装置図

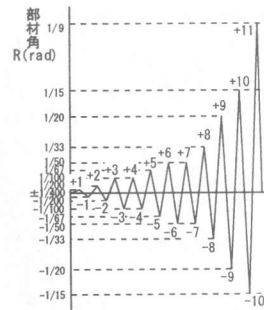


図-4 载荷履歴

表-3 実験結果一覧

試験体名	曲げひび割れ		せん断ひび割れ		部材降伏		最大耐力		(最大耐力) <sup>(1)</sup>		破壊モード <sup>(2)</sup>
	$Q_{bc}$ (kN)	$\delta_{bc}$ (mm)	$Q_{sc}$ (kN)	$\delta_{sc}$ (mm)	$Q_y$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$Q_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	$Q_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	
I RC-20-013	79	1.0	188	3.2	-	-	269	7.8	265	7.8	S
II RC-20-060	79	1.0	188	3.4	-	-	271	8.9	267	8.9	S
III RC-20-119	89	1.1	199	3.7	-279	-7.9	273	8.7	269	8.7	F→B
1 PVA-20-013	61	0.9	141	2.9	228	9.0	250	25.5	239	13.7	F
2 PVA-20-060	113	2.3	133	2.9	217	8.3	255	41.1	240	26.4	F
3 PVA-20-119	90	1.6	141	3.3	209	7.7	235	25.8	225	12.7	F
4 RC-40-060	119	1.2	241	4.5	-	-	272	7.0	265	7.0	FC
5 RC-40-119	140	1.3	230	3.3	-	-	301	9.1	292	9.1	FC
6 PVA-40-060	89	1.3	207	4.6	254	9.1	265	12.4	255	12.4	F→FC
7 PVA-40-119	93	1.3	216	4.6	258	8.1	280	13.1	269	13.1	F→FC

(1)はP- $\delta$ 効果を考慮していない値  
(2) S:せん断破壊 F:曲げ破壊 B:付着破壊 FC:曲げ圧縮破壊

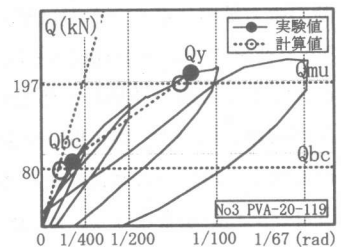
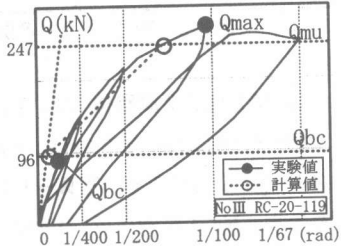
## 3. 実験結果および検討

### 3. 1 破壊性状および変形状

表-3に実験結果一覧を示す。なお、せん断力(Q)は、軸力による付加モーメント(P- $\delta$ 効果)を考慮した値である。PVA試験体は、RC試験体に比べて剛性、最大耐力が小さくなっている。これは、PVA-HPFRCCのヤング係数や強度が、コンクリートに比べて小さいためであると考えられる。図-5にNo.III(RC)、No.3(PVA)の初期剛性、降伏時剛性の計算値 $\theta$ と実験値の比較を示す。計算式はRC部材で用い

られている式を準用した。これによると、

No.III, No.3ともに、計算値は実験で得られたせん断力-変形角の関係を概ね再現できている。従って、PVA柱部材の初期剛性および降伏時剛性は、RC部材で用いられている方法により評価できると考えられる。



計算式 $\theta$ ( $k_0$ :初期剛性  $\alpha_y$ :剛性低下率)

$$k_0 = \left( \frac{h_0^3}{12E_c I_c} + \frac{kh_0}{G_c A_c} \right)^{-1}$$

$$\alpha_y = \left( 0.043 + 1.64np + \frac{0.043a}{D} + 0.33\eta_0 \right) \left( \frac{d}{D} \right)^2$$

図-5 剛性比較

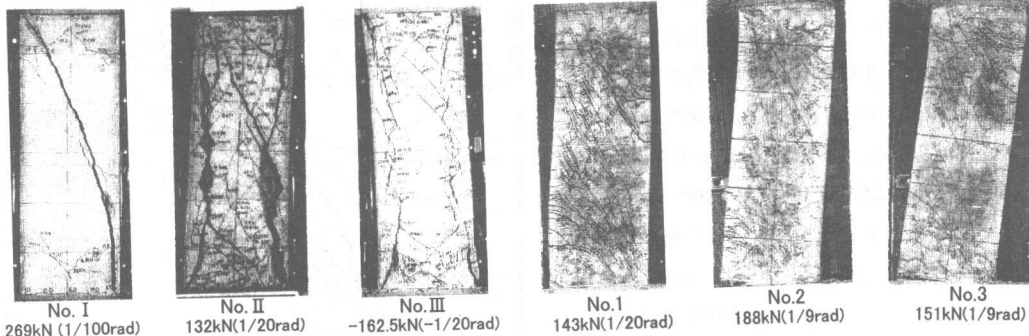


写真-1 軸力比0.2試験体最終破壊状況

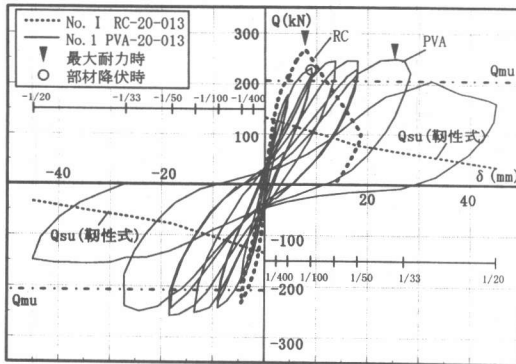


図-6 No I, 1 Q- $\delta$  曲線比較

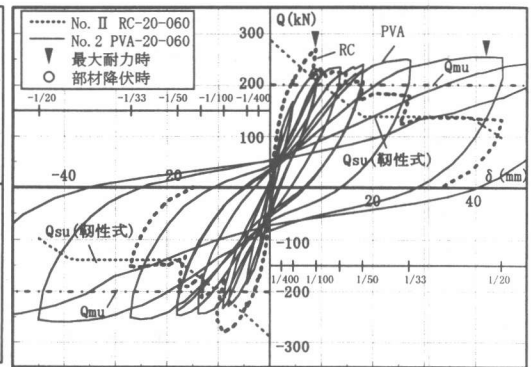


図-7 No II, 2 Q- $\delta$  曲線比較

(1) 軸力比 0.2 試験体 (No. I, II, III, 1, 2, 3)

図-6~8にNo.1~3のQ- $\delta$ 関係とNo. I~IIIのQ- $\delta$ 包絡線を、写真-1に最終破壊状況を示す。No. I 試験体は、1/100 (rad.) でせん断斜張力破壊に至り、急激に耐力が低下した。No. II 試験体は、-1/100(rad.)で試験体上部部に大きなせん断ひび割れが発生するとともにせん断破壊に至った。No. IIIは-1/100(rad.)で部材降伏し、繰り返し载荷により主筋に沿った付着ひび割れが顕著となり、耐力が低下した。一方、No.1, 2, 3PVA 試験体は1/100 (rad.) において主筋が引張降伏し、部材降伏に至った。部材降伏後、No.1 はせん断破壊に至った 1/33 (rad.) まで、No.2, 3 は1/9(rad.)まで耐力低下を生じなかった。各 PVA 試験体とも、RC 試験体に比べて、せん断耐力の向上、被りコンクリートの剥離の改善により、破壊モードが変化した、靱性能が向上した。また、PVA 試験体の特徴であるせん断ひび割れの分散が見られ、せん断ひび割れの発生数は、せん断補強筋比が大きくなるにつれ少なくなる傾向を示した。

(2) 軸力比 0.4 試験体 (No. 4, 5, 6, 7)

図-9, 10にNo.6, 7のQ- $\delta$ 関係とNo.4, 5のQ- $\delta$ 包絡線を、写真-2に最終破壊状況を示す。No.4, 5RC 試験体は1/100 (rad.) 付近で最大耐力を迎えるとともに、主筋が圧縮降伏した。その後、部材降伏することなく、柱頭部のコンクリートの圧壊と主筋の座屈が進行し、主筋に沿った被りコンクリートの剥離が生じ、

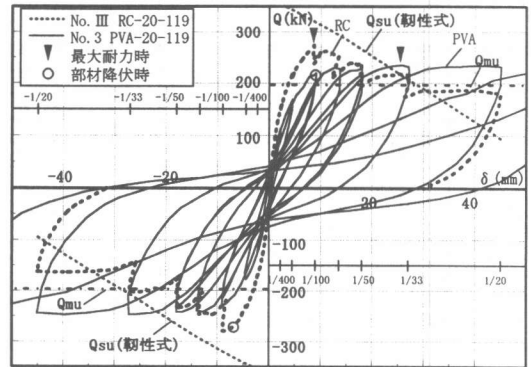


図-8 No III, 3 Q- $\delta$  曲線比較

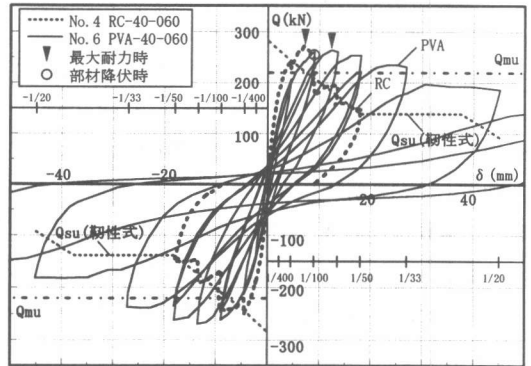


図-9 No4, 6 Q- $\delta$  曲線比較

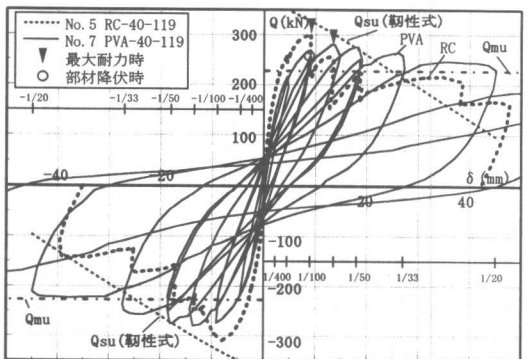


図-10 No5, 7 Q- $\delta$  曲線比較

耐力が著しく低下した。一方、  
No.6, 7PVA 試験体は 1/100

(rad.) で主筋が圧縮降伏した後  
も耐力を維持し、主筋の引張降伏  
により部材降伏に至った。部材降  
伏後、試験体上下端部のコンクリ  
ートの圧壊により、緩やかに耐力  
が低下した。しかし、RC 試験体  
で見られた、柱頭部の座屈や、被  
りコンクリートの剥離が見られ  
ず、PVA-HPFRCC の拘束効果により、高軸  
力下における圧縮靱性が向上した。

なお、 $Q-\delta$  関係図上に PVA 試験体の曲げ強  
度<sup>4)</sup>  $Q_{mu}$  と、降伏ヒンジを計画する場合のせん  
断強度式<sup>5)</sup>により、保証ヒンジ回転角に各変  
形角を代入して求めたせん断強度  $Q_{su}$  を示し  
た。RC 試験体は  $Q_{su}$  の低下に伴い耐力が低下  
しているが、PVA 試験体は  $Q_{mu}=Q_{su}$  となる変  
形角以降においても耐力を保持しており、せん  
断耐力の向上による靱性能の向上が認められる。

### 3. 2 PVA-HPFRCC の補強効果

#### (1) せん断補強効果

図-11 に No. I (RC), No.1(PVA)(軸力比 0.2,  
 $pw=0.13\%$ )のせん断補強筋の歪み分布を示す。  
RC 試験体と PVA 試験体は、せん断ひび割れの  
発生する 1/200(rad.)でほぼ類似した性状を示  
している。No. I は、1/100(rad.)でせん断破壊  
に伴い、急激に歪みが増大したのに対し、No.1  
は、1/100(rad.)ではひび割れの分散とともに歪  
みが試験区間全体で増大しており、1/50(rad.)  
で降伏歪みに達した。これは、PVA-HPFRCC  
のせん断補強効果により、せん断補強筋の負担

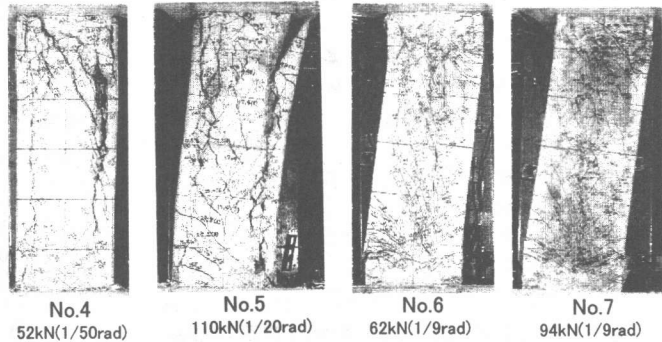


写真-2 軸力比 0.4 試験体最終破壊状況

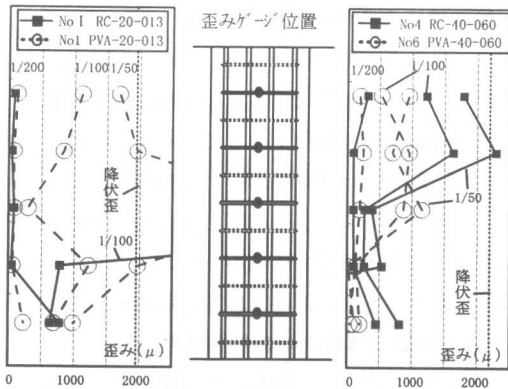


図-11 せん断補強筋歪み分布

力が小さくなっているためであると考えられる。

#### (2) 軸方向力に対する拘束効果

図-11 に No.4(RC), No.6(PVA)(軸力比 0.4,  
 $pw=0.60\%$ )のせん断補強筋の歪み分布を示す。  
これによると、1/100(rad.)において、No.4 は主  
筋の座屈に伴い、柱頭部の歪みが増大している  
のに対して、No.6 は歪みの増大する領域が広が  
り、歪みの増大率は小さくなっている。

また、図-12 に軸力比 0.4 の試験体(No.4~7)  
の軸方向歪み度一部材角関係を示す。No.4, 5  
(RC)は、柱頭部の主筋の座屈やコンクリートの

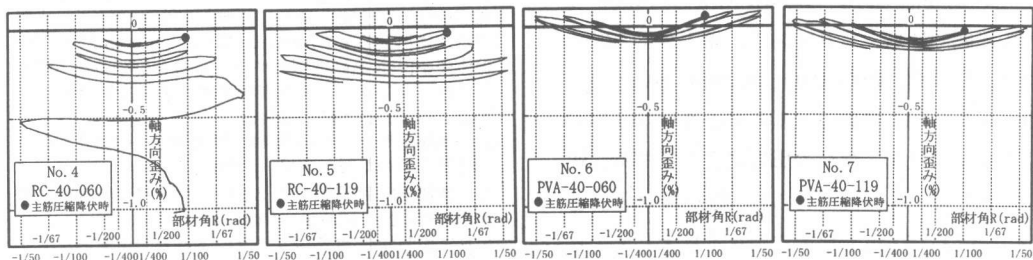


図-12 軸方向歪み度一部材角関係

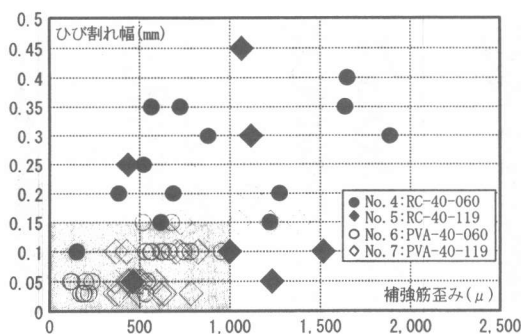


図-13 ひび割れ幅—せん断補強筋歪み関係

圧縮破壊により耐力低下の生じた 1/100(rad.)より、軸方向歪みの進行が著しくなっている。一方、No.6, 7(PVA)は、RC 試験体に比べ、軸方向歪みの進行が少なくなっている。

これらは、PVA-HPFRCC が高軸力下において、被りコンクリートの剥離を阻止し、せん断補強筋の歪みを低減させることによって、拘束効果が向上しているためであると考えられる。

### (3) せん断ひび割れ幅の抑制効果

図-13 に No.4~7 のひび割れ幅—せん断補強筋歪み関係を、図-14 にサイクル折り返し時におけるひび割れ幅—部材角関係を示す。なお、ひび割れ幅は図-4 に示した載荷履歴の折り返し時にクラックスケールにより測定し、せん断補強筋の歪みは、測定したひび割れが横切る位置の歪みを測定した。また、図-14 で対象としたひび割れは、RC 試験体においてひび割れ幅が最大であったせん断ひび割れとした。(図-14 の凡例参照) RC 試験体は、せん断補強筋の歪みの増加に従い、ひび割れ幅が拡大する傾向があり、歪みが約 500 $\mu$  の時、ひび割れ幅が 0.2~0.4mm となっている。一方 PVA 試験体は、歪みが 1000 $\mu$  以下、ひび割れ幅が 0.15mm 以下の範囲内に抑えられており、歪みが約 500 $\mu$  の時、ひび割れ幅が 0.05~0.1mm となっている。また、RC 試験体は歪みが小さい場合においても、繰り返し載荷の影響によりひび割れ幅が拡大していく傾向がみられ、図-14 によると、1/67(rad.)で 2.5mm 程度に大きく拡大しているが、PVA 試験体は 1/20(rad.)においてもひび割

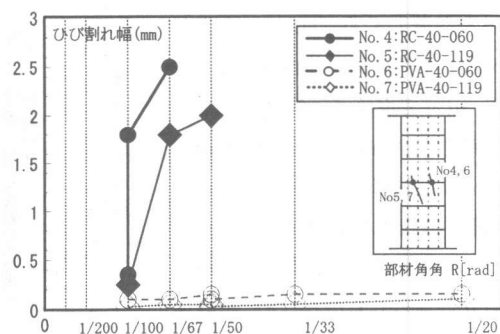


図-14 ひび割れ幅—部材角関係

れ幅を 0.15mm 以下に保持している。このように PVA 試験体は、従来の RC 試験体と比べ PVA-HPFRCC のひび割れ分散効果により、ひび割れ幅の拡大を抑制していることを確認した。

## 4. まとめ

引張靱性のある PVA-HPFRCC を柱部材に適用した場合、RC 柱部材と比較して、その変形性状、破壊性状が大きく改善されることを明らかにした。特に、PVA-HPFRCC の効果として、ひび割れ幅の抑制効果やせん断補強効果の向上、また高軸力下において、コンクリートの圧壊および被りコンクリートの剥離を阻止することによる、拘束効果の向上が確認された。

**謝辞** 本研究の一部は、日米ハイブリッド共同研究における「高引張強度・高靱性コンクリートのハイブリッド構造への利用研究委員会」の活動の一環として行ったものである。また、研究にあたって建設省建築研究所・諏訪田晴彦氏、磯雅人氏、(株)クラレの協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 蔵谷幸憲他:高靱性型セメント系複合材料を用いた梁部材の構造性能, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.21, No.3, 1999, pp511~516
- 2) 片岡隆広他:シート状炭素繊維によりせん断補強された RC 柱の靱性性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次講演会論文集, vol.19, No.2, 1997, pp213~218
- 3) 佐藤幸博他:高靱性型セメント系複合材料の基本的力学特性, コンクリート工学年次講演会論文集, vol.21, No.3, 1999, pp1435~1440
- 4) 日本建築センター:建築物の構造規定—建築基準法施行令第3章の解説と運用—, 1997
- 5) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990
- 6) 日本建築学会:鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, 1987