

# 論文 高靱性型セメント系複合材料を用いた制振デバイスの構造性能に関する実験的研究

北爪 秀和\*<sup>1</sup> 松崎 育弘\*<sup>2</sup> 中野 克彦\*<sup>3</sup> 八太伸幸\*<sup>4</sup>

要旨：本報ではセメント系材料にビニロン繊維を混入し、制振デバイス等への利用を意図した高靱性型セメント系複合材料を用いた短スパン部材の構造性能を明らかにすることを目的としている。文献1)の結果をもとに15体のせん断実験を行い、曲げ降伏時のレベルが3~4N/mm<sup>2</sup>でありせん断スパン比が0.5や0.38という非常に小さい部材においても、繊維を混入することでひび割れの分散効果や優れた靱性能などを有することを明らかにしている。またこのような部材において試験区間をスタブに埋め込むことでずれ変位が抑制できること、せん断スパン比により剛性が制御できること、曲げ耐力が制御できること等を明らかにしている。  
キーワード：高靱性型セメント系複合材料, デバイス, せん断スパン比, せん断応力度

## 1. はじめに

著者らはここ数年にわたりセメントにビニロン繊維を混入し、極めて引張靱性に富む高靱性型セメント系複合材料を用いたRC部材についての実験研究<sup>2)</sup>を行っている。これまでこのような材料を柱・梁といった構造部材に適用した実験を行い、その結果ひび割れの分散に伴う損傷の低減、高い靱性能の確保及び繊維によるせん断補強効果が得られ、構造部材として高い構造性能を有していることを示してきた。

そこで著者らは、それらの成果からこの部材が地震時の建物の損傷制御を行う制振デバイスとして利用可能であると考え研究を行っている。この制振デバイスは建物に間柱または壁部材として用いることを想定し、せん断スパン比を小さくすることによる高剛性の実現、さらに高靱性による高いエネルギー吸収能力の実現により制振効果を生み出す部材である。しかし既往のRC部材における実験研究においては、このようなせん断スパン比の小さいRC部材による制振デバイスはほとんど例がなく、その構造性能を正確に把握することは困難であるのが現状である。そこでまずその構造性能を把握する目的

で実験を行っている<sup>3)</sup>。この報告では、せん断スパン比 $a/D=1\sim 0.5$ の極めて小さい短スパン部材において、曲げ降伏時のレベルが3~4N/mm<sup>2</sup>という非常に高い曲げ耐力においても、剛性および曲げ耐力を調節することができることを明らかにしている。

そこで本報では、さらに剛性を高めるためにせん断スパン比 $a/D=0.38$ を計画し、せん断応力度レベル、せん断補強筋比を変動させた結果を示すこととした。また繊維混入による構造性能への効果を明らかにすることを目的に、RC試験体を主としたコンクリート種類を変動させ、試験区間をスタブ内に埋め込んだ試験体、シャキーに代わるせん断抵抗要素としてダボ筋を用いた試験体、主筋の抜け出し抑制を意図したスリーブの試験体を計画し、剛性・曲げ耐力・損傷・靱性能といった構造性能への影響を検討し、高靱性型セメント系複合材料による履歴エネルギー吸収型の制振デバイスとしての利用の可能性を明らかにすることを目的にしている。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

* 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 博士(工学)	(正会員)
* 4	東京理科大学大学院	工学研究科建築学専攻	(正会員)

表 - 1 試験体一覧 (No.1~No.6 は文献 1))

No.	試験体名	断面形状 b × D (mm × mm)	試験区間 長さ h (mm)	a/D	コンクリート				主筋			レベル (N/mm <sup>2</sup> )	せん断補強筋		せん断抵抗要素			
					コンク リート種類	使用繊維	混入率 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	径	種類		降伏点強度 (N/mm <sup>2</sup> )	間隔 (mm)	pw (%)	スリーブ ダボ筋	埋め 込み	配筋 タイプ
6	PVA-(30-50-3)	200 × 450	450	0.50	PVA	PVA-1	1.5	41.6	1.6	D16	SD250	263	3.0	80	0.89%	-	-	普通
7	PVA-(45-50-6)										SD345	394	4.5	40	1.78%			
8	PVA-(30-38-3)	200 × 600	450	0.38	PVA	PVA-1	1.5	47.2	2.1	D13	SD295	353	3.0	80	0.89%	-	-	普通
9	PVA-(45-38-6)										SD295	365	4.5	80	1.78%			
10	PVA-(30-50-13)	200 × 450	450	0.50	RC	-	-	41.7	3.0	D16	SD250	263	3.0	40	3.55%	ダボ筋	-	タイプA
11	PVA-(45-50-6)E <sub>1</sub>										SD345	394	4.5	40	1.78%			
12	RC-(178-50)E <sub>1</sub>	200 × 600	450	0.38	RC	-	-	39.9	3.0	D16	SD345	369	4.5	80	0.89%	-	-	普通
13	RC-(89-50)E <sub>1</sub>										SD295	330	3.0	40	1.78%			
14	RC-(178-38)E <sub>1</sub>	200 × 450	450	0.50	PVA	PVA-1	1.5	40.4	1.5	D16	SD345	369	4.5	80	0.89%	-	-	普通
15	PVA-(178-50)E <sub>1</sub>										SD295	330	3.0	40	1.78%			
16	PVA-(89-50)E <sub>1</sub>	200 × 600	450	0.38	PVA	PVA-1	1.5	46.3	1.9	D16	SD295	330	3.0	80	0.89%	-	-	普通
17	PVA-(89-50)E <sub>2</sub>										SD345	369	4.5	40	1.78%			
18	PVA-(178-38)E <sub>1</sub>	200 × 450	450	0.50	PVARC	PVA-2	1.0	45.7	3.0	D16	SD295	330	3.0	80	0.89%	-	-	普通
19	PVARC-(89-50)E <sub>1</sub>										SD345	369	4.5	80	0.89%			
20	PVATL-(89-50)E <sub>1</sub>	SD345	369	4.5	80	0.89%												

表 - 1 に試験体一覧, 図 - 1 に試験体形状を示す。試験体の共通要因は試験区間長さ h = 450mm、幅 b=200mm、上下端部にせん断抵抗要素としてシヤキーを導入、コンクリート圧縮強度は 40N/mm<sup>2</sup>、部材の破壊モードは曲げ降伏先行型であることである。変動要因は以下の 6 項目とした。せん断スパン比 2 水準 [a/D = 0.5, 0.38] 部材曲げ降伏時のせん断応力度 レベル 2 水準 [ = 3.0, 4.5 N/mm<sup>2</sup>] せん断補強筋の配筋 2 タイプ [普通, タイプ A] せん断補強筋比 2 水準 [pw = 0.89, 1.78%] コンクリート 4 水準 [普通コンクリート (RC), 繊維混入モルタル (以下 PVA), 繊維混入普通コンクリート (以下 PVARC), 繊維混入フライアッシュコンクリート (PVATL)] せん断抵抗要素 [スリーブ, ダボ筋, 埋め込み型の有無]。なおせん断スパン比は試験区間のせいを D = 450, 600mm とすることで変動させた。

2.2 材料特性

表 - 2 に本実験で使用した繊維の材料特性、表 - 3 に使用したコンクリートの調合表, 図 - 2 に各種コンクリートの応力度 ( ) - 歪み度 ( ) 関係を示す。PVA の練り混ぜは基本的に文献 1) に準じて行い, PVARC, PVATL のビニロン繊維は実用化を目的に PVA の 10 倍の太さのものを使用し, 骨材率を通常の RC に比べ 1.5 倍程度とした。使用したビニロン繊維は体積比で PVA 試験体に 1.5%, PVARC, PVATL 試験体に 1.0% 混入している。コンクリート各種の材料特性は, 圧縮においては PVA のヤング係数が他に比べて 5 割程度となっている。引張においては RC に比べ PVA は最大引張強度以降も緩やかに応力度が低下しており,

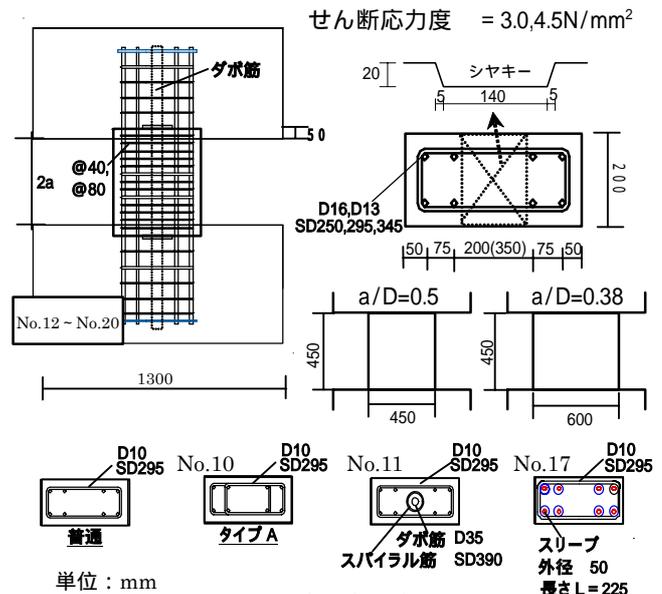


図 - 1 試験体形状

表 - 2 使用繊維

材料	比重 g/cm <sup>3</sup>	長さ mm	直径 mm	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 N/mm <sup>2</sup>
PVA-1	1.3	15	0.04	1850	4.39 × 10 <sup>4</sup>
PVA-2	1.3	30	0.40	880	2.94 × 10 <sup>4</sup>

表 - 3 使用コンクリート調合表

コンクリート種類	水割合 材比 (%)	単位使用量						
		水 W (kg/m <sup>3</sup> )	セメント C (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材		粗骨材 G (kg/m <sup>3</sup> )	繊維 Vf (kg/m <sup>3</sup> )	水和剤 SP (kg/m <sup>3</sup> )
				S (kg/m <sup>3</sup> )	最骨材率 (%)			
RC	50.0	185	370	742	44	990	-	3.70
PVA	45.0	458	1018	397	100	-	19.5	-
PVARC	44.5	185	416	1056	66	578	13	4.72
PVATL	44.5	185	416	1058	74	382	13	4.59

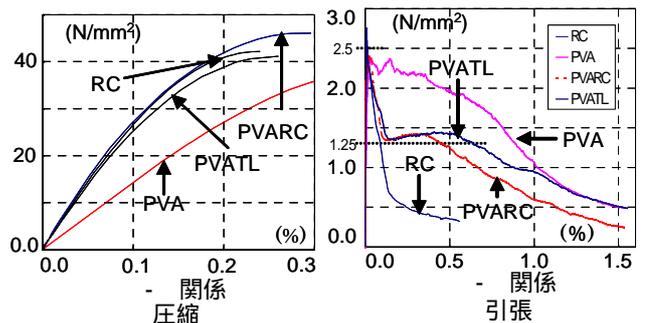


図 - 2 コンクリート - 関係

表 - 4 実験結果一覧

No.	曲げひび割れ		せん断ひび割れ		部材降伏		最大耐力 Q(kN)
	Q(kN)	(mm)	Q(kN)	(mm)	Q(kN)	(mm)	
6'	107.8	0.51	210.3	1.13	302.2	2.81	393.4
7	71.3	0.29	193.3	1.00	429.2	4.27	476.5
8	139.8	0.54	256.0	1.12	354.6	2.88	416.6
9	153.9	0.48	287.2	1.15	502.2	3.40	534.0
10	113.4	0.53	183.4	1.04	318.4	2.83	430.5
11	94.5	0.49	181.1	1.19	424.6	9.00	584.2
12	153.9	0.26	207.6	0.65	477.0	3.37	488.9
13	74.0	0.16	239.1	0.81	426.5	2.81	437.9
14	238.9	0.31	266.9	0.37	595.5	2.47	595.5
15	258.1	0.35	177.8	0.43	506.0	3.99	528.2
16	85.7	0.22	156.4	0.55	517.6	5.64	521.6
17	163.7	0.54	156.0	0.55	509.6	3.94	578.1
18	131.1	0.30	242.0	0.56	624.4	3.37	624.4
19	78.7	0.11	241.6	0.44	512.4	2.81	533.3
20	90.3	0.19	182.5	0.47	465.2	3.31	476.2

PVARC, PVATL は最大強度時以降に、最大応力度の5割程度の応力度で歪み度0.5%程度まで維持し、それ以降は緩やかに応力度が低下している。

### 2.3 実験方法

加力は建研式加力装置により変形制御による正負交番繰り返し载荷とした。変形制御の変位は上下スタブ間の相対変位とした。なお、制振デバイスは間柱的な部材として考えているため軸力を無視して考えるが、安定した加力を行う目的も兼ねて本研究ではフレーム重量の約 55 kN を軸力として作用させることとした。

### 3. 実験結果・検討

表 - 4 に試験体実験結果一覧を示す。各試験体について以下の項目で比較検討した。

#### 3.1 せん断応力度 レベル

図 - 3 に  $a/D=0.5$  におけるせん断応力度 レベルによる比較を示す。曲げ降伏時の レベルが  $3\text{N}/\text{mm}^2$  である No.6' 及び  $4\text{N}/\text{mm}^2$  である No.7 は、設定した レベルで  $R=1/8\text{rad.}$  まで曲げ耐力を維持し、優れた靱性能を有していることが分かる。またひび割れ状況において、No.7 は No.6' 試験体に比べ同一変形角におけるひび割れの数が若干多いが、小さい幅のせん断ひび割れが試験体全体に分散していることが分かる。

図 - 4 に  $a/D=0.38$  におけるせん断応力度 レベルによる比較を示す。No.9 の  $R=1/16\text{rad.}$  の正载荷で主筋がスタブと試験区間の境界面におけるダボ抵抗により破断し、No.8 の  $R=1/8\text{rad.}$  においても同様に主筋が破断した結果となった。しかし、どちらの試験体においても設定した

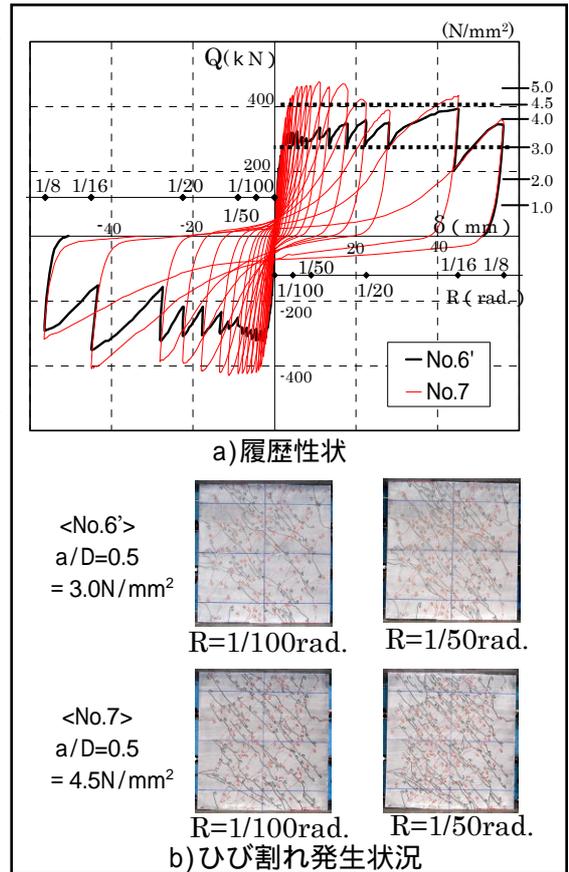


図 - 3 レベルによる履歴・破壊性状 ( $a/D=0.5$ )

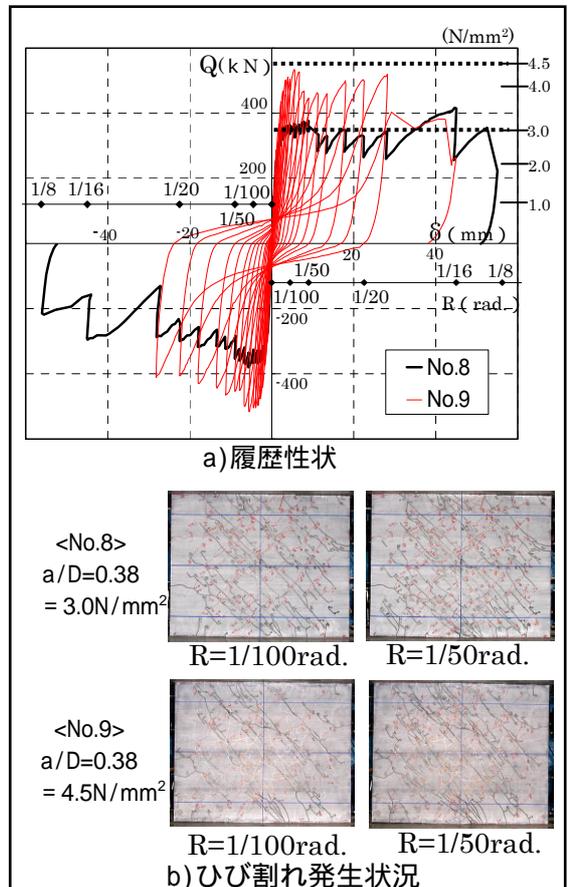


図 - 4 レベルによる履歴・破壊性状 ( $a/D=0.38$ )

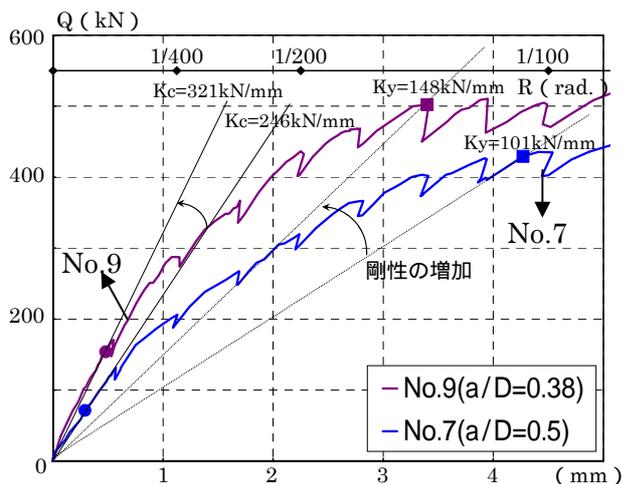


図 - 5 せん断スパン比による剛性

レベルで  $R=1/16\text{rad.}$  まで曲げ耐力を維持しており、優れた靱性能を有していることが分かる。またひび割れ発生状況から  $a/D=0.5$  の試験体と同様に小さい幅のせん断ひび割れが試験体全体に分散し、損傷が低減されていることが分かる。

以上より、 $a/D=0.5, 0.38$  という非常に小さいせん断スパン比で、曲げ降伏時のレベルが  $3.0, 4.5\text{N/mm}^2$  である部材においても、ひび割れの分散に伴う優れた靱性能を有しているということがいえる。

### 3.2 せん断スパン比の違いによる剛性

図 - 5 にせん断スパン比による初期剛性・降伏時剛性を示す。なお初期剛性は「曲げひび割れ発生時の剛性」、降伏時剛性は「引張側に配筋された鉄筋が降伏現象を示しかつ  $Q-\delta$  上で剛性が大きく低下した点の剛性」とした。文献 1) ではせん断スパン比  $a/D$  が  $1 \sim 0.5$  の範囲においてせん断スパン比が小さくなると初期・降伏時剛性が上昇することを示した。図より、せん断スパン比  $a/D=0.38$  の試験体においても  $a/D=0.5$  の試験体に比べ初期・降伏時剛性共に上昇しており、せん断スパン比を小さくすることで更に剛性を高めることが可能であることが分かる。

### 3.3 RC と PVA の比較

図 - 6 に  $a/D=0.5$  における RC と PVA の比較を示す。 $R=1/100$  程度までは No. 12 (RC), No. 15 (PVA) 両試験体とも剛性・曲げ耐力・剛性低下など同様の履歴性状を示している。しかし  $R=1/100\text{rad.}$  以降においては No. 12 (RC) は耐力低下している

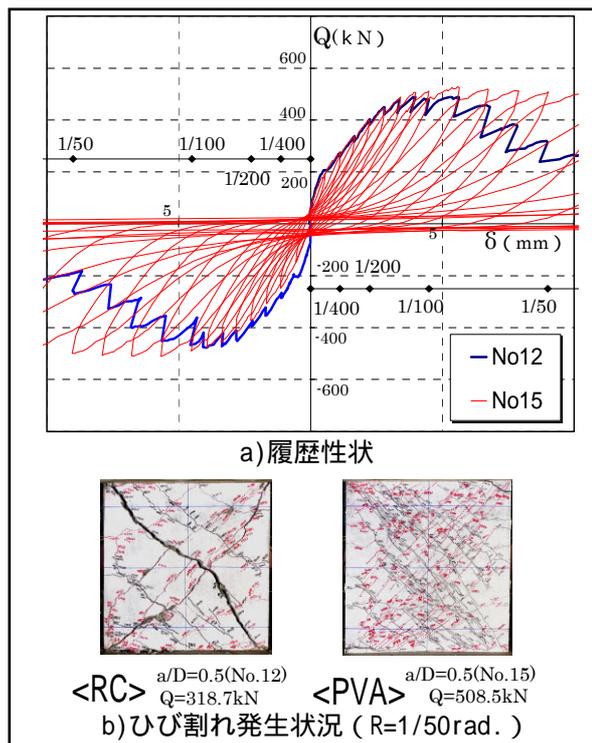


図 - 6 RC と PVA の履歴・破壊性状の比較 ( $a/D=0.5$ )

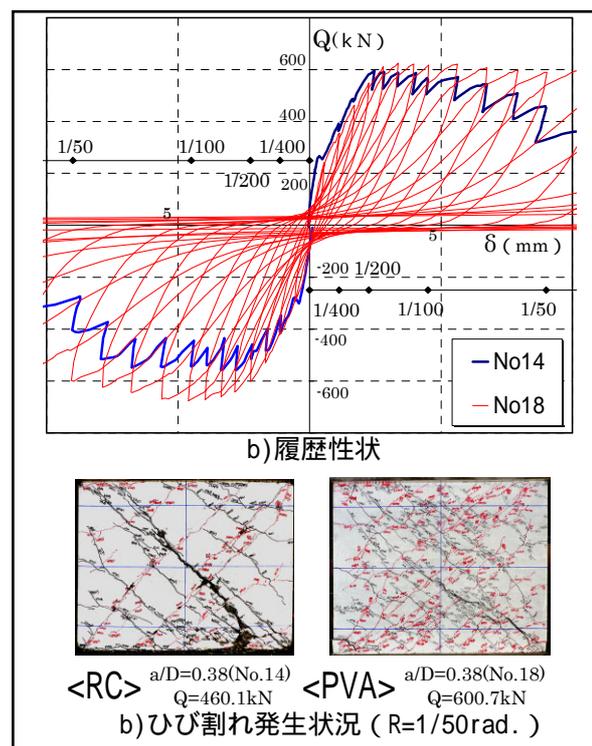


図 - 7 RC と PVA の履歴・破壊性状の比較 ( $a/D=0.38$ )

が、No. 15 (PVA) は曲げ耐力を維持している履歴性状を示した。また No. 14 (RC) に比べ No. 12 (RC) は小さい変形角から試験体対角方向のせん断ひび割れが大きく開いてせん断破壊していた。

図 - 7 に  $a/D=0.38$  における RC と PVA の比較を示す。 $R=1/200\text{rad.}$  では No. 15 (PVA) は試験体全

体にせん断ひび割れが分散していた。また  $R=1/200$  以降においては  $a/D=0.5$  と同様に No.14(RC)は耐力低下し、No.18 (PVA)は曲げ耐力を維持している履歴性状を示した。また  $R=1/50rad.$  においても No.14(RC)に比べ No.18 (PVA)は試験体全体に細かいせん断ひび割れが分散してせん断破壊に至っていない。

以上より  $a/D=0.5, 0.38$  というせん断スパン比が非常に小さい部材において、繊維を混入することにより、ひび割れの分散に伴う靱性能の向上効果が発揮されるといえる。

### 3.4 せん断抵抗要素による効果

図 - 8 に埋め込みによる効果として No.7 と No.15 の履歴性状、 $R=1/16rad.$  における破壊性状、各サイクル折り返し点における試験区間とスタブ間のずれ変位を示す。履歴性状をみると、曲げ降伏後  $R=1/100rad.$  程度から No.15(埋め込み型)は耐力低下し、最終的には試験体対角線上に開いたせん断ひび割れが大きくなることでせん断破壊に至っている。ここで  $R=1/100rad.$  までの各サイクルのずれ変位をみると、No.15 (埋め込み型)の値が No.7 に比べ小さくなっており、試験区間をスタブに埋め込むことでずれ変位が大きく抑制されていることがわかる。つまり、試験区間をスタブ内に埋め込むことでずれ変位を減少させ相対変位を減少させることで、剛性・靱性能といった性能を制御できるといえる。またダボ筋・スリーブを導入することによるスリップ性状の改善は見られなかった。

### 3.5 コンクリート種類別の比較

図 - 9 にコンクリート種類による履歴性状、 $R=1/100rad.$  における試験体状況、 $1/100rad.$  までのひび割れ幅を示す。RC に比べ繊維を混入している PVARC, PVATL は、せん断ひび割れの分散効果及び靱性能の向上がみられるが、PVA ほど多くのひび割れが入らず曲げ降伏後の耐力低下が激しいのがわかる。ここで試験体における最大せん断ひび割れ幅をみると、曲げ降伏付近の  $1/100rad.$  程度から耐力低下をしている RC, PVARC, PVATL は最大せん断ひび割れ幅が急激

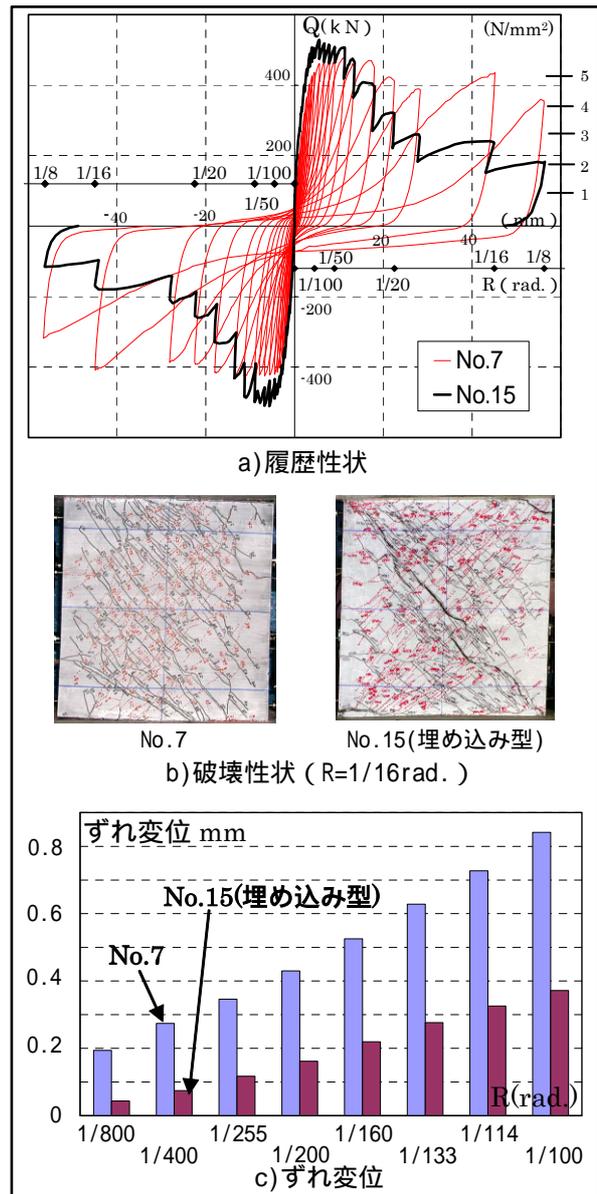


図 - 8 埋め込みによる効果

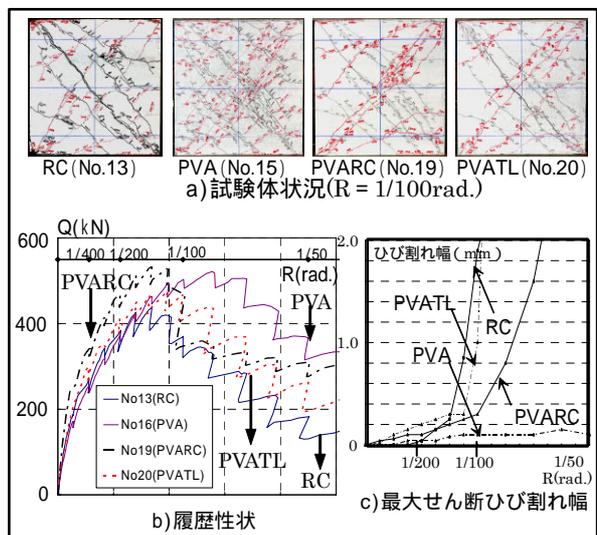


図 - 9 コンクリート種類別

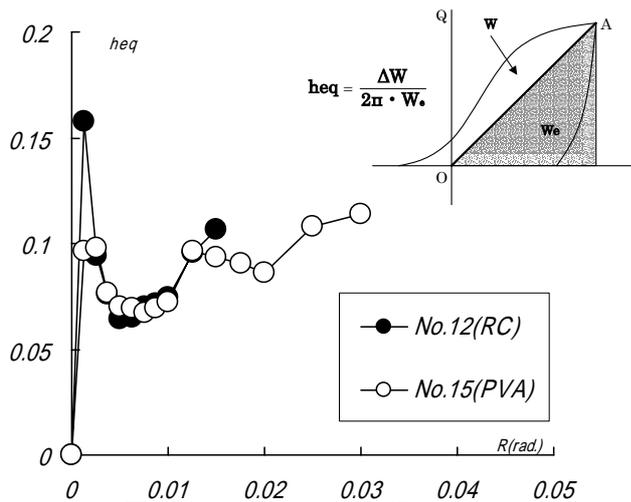


図 - 10 等価粘性減衰定数(a/D=0.5)

に増大している。つまり繊維を混入することでひび割れの分散効果及び靱性能を向上効果があり、特に曲げ降伏時以降のひび割れをより多く分散させ幅を抑制することができれば耐力低下を抑制することができるといえる

### 3.5 エネルギー吸収能力

図 - 10 に a/D=0.5、図 - 11 に a/D=0.38 の RC と PVA 試験体の各変形角における等価粘性減衰定数を示す。なお図には各試験体が限界変形角を迎える直前の加力サイクルまでを示す。a/D=0.5 においては、No.12(RC)と No.15(PVA)の各変形角の等価粘性減衰定数の値は同程度であるが、PVA 試験体は RC 試験体よりも変形性能があるため全体として優れたエネルギー吸収能力を発揮しているといえる。また a/D=0.38 においては No.14(RC)より No.18(PVA)は若干等価粘性減衰定数の値が大きくなっている上、変形性能も高くエネルギー吸収能力が高いといえる。

以上より繊維混入により部材に高い変形性能を持たせることで、エネルギー吸収能力を高めることができ、せん断スパン比が小さい部材ほどその効果が大きいと考えられる。

## 4. まとめ

高靱性型セメント系複合材料を用いた制振デバイスの構造特性について以下の知見を得た。

せん断スパン比 a/D が 0.5, 0.38, レベルが 3 ~ 4N/mm<sup>2</sup> という部材においても、剛性の上昇、曲げ耐力の調節が可能である。また繊維を混入

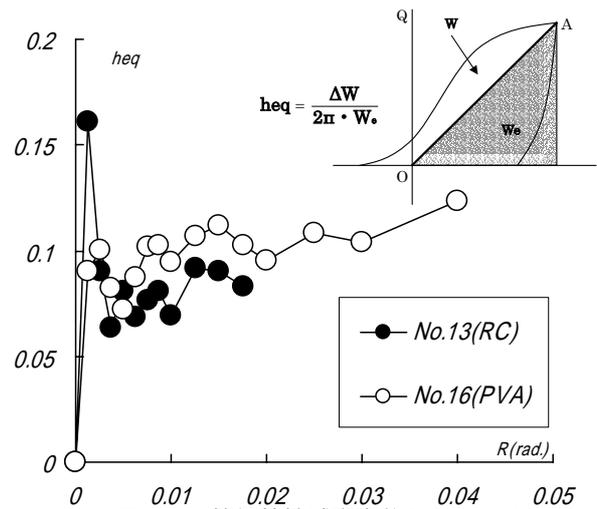


図 - 11 等価粘性減衰定数(a/D=0.38)

した部材が RC に比べひび割れの分散効果及び靱性能の向上効果が得られ、高いエネルギー吸収能力を期待することができる。RC 部材に繊維を混入することで、ひび割れの分散効果及びひび割れ幅の抑制により靱性能を向上させることができるが、デバイスとしての構造性能は得られず今後の検討が必要であった。部材端部のずれ変位を抑制することで試験区間の変形量を増加し、限界変形角が小さくなる脆性的な破壊が生じやすくなる。そのため部材の要求性能により選択をする必要があると考えられる。

### 「謝辞」

この研究を行うにあたり、高周波熱錬株式会社、(株)クラレ、日本プライスリープ株式会社に多大なご迷惑をおかけして材料提供していただきました。また実験を行うにあたり、独立行政法人建築研究所、国土技術政策総合研究所、(株)熊谷組の協力を得ました。この場を借りて謝意を表します。なお本研究の1部は日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」のエフェクタ部会(主査:藤田隆史 東京大学教授)に設置された「セメント系複合材料WG」(主査:松崎育弘 東京理科大学教授)における研究の一環として実施されたものであります。

### 「参考文献」

- 1) 諏訪田晴彦, 嶋大助, 磯雅人, 福山洋: 高靱性セメント材料の構造物への利用に関する基礎研究, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp545-546, 2000, 9
- 2) 笠原美幸, 藤原徳郎, 磯雅人, 中野克彦, 松崎育弘, 福山洋: 高靱性セメント材料の構造物への利用に関する基礎研究, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp549-552, 2001, 9
- 3) 藤原徳郎, 松崎育弘, 磯雅人, 福山洋: 高靱性型セメント系複合材料を用いたデバイスの構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp145-150, 2001, 7
- 4) 笠原美幸, 松崎育弘, 中野克彦: 高靱性型セメント系複合材料を用いた梁, 柱部材の構造性能に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.553, pp89-95, 2002, 3