

# 論文 細径短繊維を混入した FRC の材料特性と R/FRC はりのせん断挙動に関する基礎的研究

中道 優太\*1・上田 尚史\*2

**要旨:** 繊維径 40 $\mu$ m, 繊維長 12mm の PVA 細径短繊維を混入した繊維補強コンクリート (FRC) の材料特性を, 力学特性と寸法安定性の観点から評価した。単位水量 180~220kg/m<sup>3</sup>, 繊維混入率 0.0~1.5vol%の範囲で検討した結果, 細径短繊維の混入が圧縮強度や静弾性係数, 自由収縮ひずみに及ぼす影響は小さいことを確認した。一方, 曲げ試験の結果から, 細径短繊維の混入により, ひび割れ発生直後の急激な応力低下を抑制できることを示した。また, 細径短繊維を混入した鉄筋コンクリート (R/FRC) はりのせん断挙動においては, 細径短繊維が斜めひび割れの開口を抑制することで, ひび割れ発生後も曲げ剛性を保持できることを示した。

**キーワード:** 繊維補強コンクリート, ひび割れの開口抑制, 引張軟化特性, PVA 繊維, せん断挙動

## 1. はじめに

近年, 多種多様な繊維補強セメント複合材料 (Fiber Reinforced Cementitious Composite, 以下 FRCC) が開発されている。これまでに FRCC は, 主に補修材料や補強材料として利用されてきたが, その材料特性から構造部材としての適用も検討もされている<sup>1)</sup>。

現在, FRCC に使用されている短繊維は, 繊維径 600 $\mu$ m 程度, 繊維長 30mm 程度の太径短繊維と, 繊維径 100 $\mu$ m 以下, 繊維長 10mm 前後の細径短繊維に大別される。一般的に, 前者は繊維補強コンクリート (Fiber Reinforced Concrete, 以下 FRC) に用いられ, 後者は繊維補強モルタル (Fiber Reinforced Mortar, 以下 FRM) に用いられる。とりわけ細径短繊維は, 微細なひび割れに対して架橋力を発揮するため, 引張特性の優れたひずみ硬化型複合材料 (Strain Hardening Cementitious Composite, 以下 SHCC) を実現できることが知られている。しかし SHCC 等の FRM は粗骨材を含まないため, ヤング係数やひび割れ発生後のせん断抵抗性能が低い。また, 粉体量の多さから自己収縮によるひび割れ発生が懸念される。

一方, FRC は粗骨材を含むため, ひび割れの抑制や RC はりのせん断耐力が向上すること<sup>2) 3)</sup>だけでなく, コンクリートの自己収縮応力の低減に効果的であることが示されている<sup>4)</sup>。ここで, 細径短繊維をコンクリートに混入することで, より引張特性の優れた FRC を得られる可能性がある。しかし, 細径短繊維の混入による流動性の低下が著しく, 一般には FRC としては用いられない。そこで, 著者らは, FRC に対する余剰ペースト理論の適用性を検討し, 余剰ペースト量を考慮することで, 細径短繊維を 1.0vol%混入した場合でもある程度の流動性を確保できることを示した<sup>5)</sup>。

本研究では, 次のステップとして, 細径短繊維を混入

した FRC の硬化後の基礎的な材料特性を評価するために, 圧縮試験と 3 等分点曲げ試験による力学特性と, 自由収縮ひずみによる寸法安定性を評価した。また, 細径短繊維が RC 部材の構造性能に及ぼす影響を検討するために, 細径短繊維を混入した鉄筋コンクリート (以下 R/FRC) はりのせん断破壊試験を行った。

## 2. 細径短繊維を用いた FRC

本研究で使用した材料の物性を表-1 に示す。セメントには普通ポルトランドセメント (以下, C) を使用し, 流動性を確保するために, 混和材としてフライアッシュ II 種 (以下, FA) を用いた<sup>6)</sup>。細骨材 (以下, S) には川砂を, 粗骨材 (以下, G) には碎石を使用した。細径短繊維としては, 繊維径 40 $\mu$ m, 繊維長 12mm のポリビニルアルコール繊維 (以下, PVA12) を使用した。なお, 比較のために, 繊維径 660 $\mu$ m, 繊維長 30mm の太径短繊維 (以下, PVA30) による FRC も作製した。

コンクリートの練混ぜには, 容量 60 リットルの強制 2

表-1 材料の物性値

使用材料	備考
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度:3.15g/cm <sup>3</sup>
フライアッシュ	JISA6201 II 種, 密度:2.25g/cm <sup>3</sup>
細骨材	普通砂, 密度:2.60g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	最大寸法:20mm 密度:2.67g/cm <sup>3</sup>
PVA 繊維 (PVA30)	繊維径:660 $\mu$ m, 繊維長:30mm, 密度:1.3g/cm <sup>3</sup>
PVA 繊維 (PVA12)	繊維径:40 $\mu$ m, 繊維長:12mm, 密度:1.3g/cm <sup>3</sup>
混和剤	増粘剤一液型高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物と 増粘性高分子化合物の複合体)

\*1 関西大学大学院 理工学研究科環境都市工学分野都市システム工学専攻(学生会員)

\*2 関西大学 環境都市工学部都市システム工学学科准教授 博士 (工学) (正会員)

表-2 配合とフレッシュ性状

ケース	繊維混入率	W/B (%)	FA/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						スランプ*2 (cm)	空気量*1 (%)
	V <sub>f</sub> (Vol%)				W	C	FA	S	G	PVA		
180-NC	0.0	40	30	50	180	315	135	794	801	0	6.5	1.4
180-PVA30-1.0	1.0							781	801	13	(50)	2.1
180-PVA12-1.0								7.5	1.9			
200-NC	0.0				200	350	150	744	764	0	15	1.7
200-PVA30-0.5	0.5							737	757	6.5	(68)	2.6
200-PVA12-0.5								11	2.8			
200-PVA30-1.0								1.0	731	751	13	(58)
200-PVA12-1.0	5.5								2.3			
200-PVA30-1.5	1.5							712	731	19.5	(55)	2.5
200-PVA12-1.5					2.5	2.5						
220-NC	0.0				220	385	165	695	714	0	19	1.6
220-PVA30-1.0	1.0							682	700	13	18.5	2.2
220-PVA12-1.0		1.5	2.3									

混和剤は繊維補強コンクリートの上にセメント重量の1.5%添加

\*1: 空気量は、硬化体の重さと体積から算出した値を示す。\*2: ( ) の数値はスランプフローを示す。

軸ミキサーを用いた。粉体と細骨材を 30 秒間空練りした後、水を投入し 30 秒間練り混ぜた。その後、粗骨材を投入し 90 秒間練り混ぜた後に繊維を投入し、120 秒間練り混ぜた。練上がり後に、所定の型枠に打設した。

表-3 実験要因と検討項目

実験要因	検討項目
繊維種類	力学特性、寸法安定性
繊維混入率	力学特性、寸法安定性
単位水量	寸法安定性

### 3. 細径短繊維を用いた FRC の材料特性の評価

#### 3.1 配合および実験要因

表-2 に配合を示す。配合は、既往の研究<sup>5)</sup>において PVA12 を 1.0%混入した際にスランプが 8cm 程度得られた FRC として、単位水量 200kg/m<sup>3</sup>、細骨材率 50%のケース (200-PVA12-1.0) を基準とした。この配合は余剰ペースト理論に基づいたものである。表-3 に実験要因とそれぞれの検討項目を示す。繊維寸法および繊維混入率は力学特性ならびに寸法安定性に及ぼす影響について、単位水量は寸法安定性に及ぼす影響について、それぞれ着目した。なお、モルタルの性状を統一するために、単位水量や繊維混入率の違いによらず s/a を一定として配合を決定した。

表-2 に、スランプ試験の結果を示すが、PVA12 を混入した場合に、流動性が著しく低下する結果となった。ただし、硬化後のコンクリート密度から推定される空気量は、1.4~2.8%程度であり、充填性に問題はないことを確認している。

#### 3.2 力学特性の評価

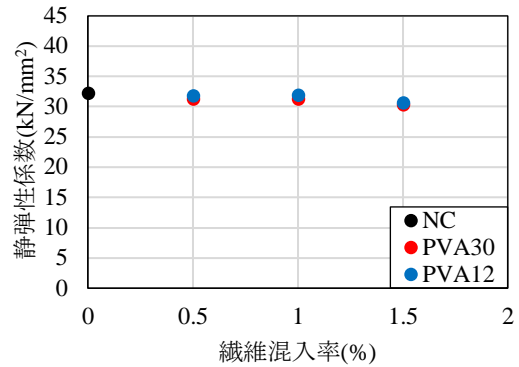
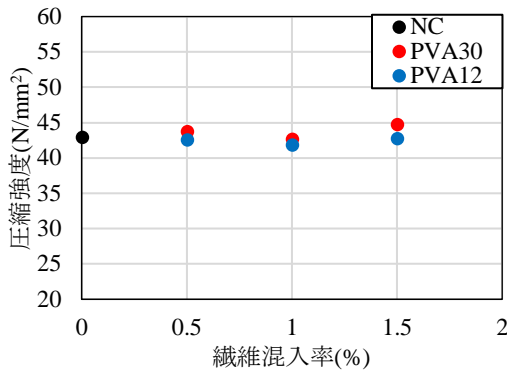
力学特性は、圧縮試験により得られる圧縮強度と静弾性係数、ならびに 3 等分点曲げ試験から得られる荷重-変位関係により評価した。圧縮試験にはφ100×200mm の円柱供試体を、3 等分点曲げ試験には、100×100×400mm の角柱供試体を用いた。供試体は打設翌日に脱型し、20℃の水中にて養生した。試験は材齢 28 日に実施した。供試体は各試験に対して 3 体作製し、それぞれの平

表-4 FRCC の材料特性

ケース	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
180-NC	43.8	35.3
180-PVA30-1.0	45.6	34.0
180-PVA12-1.0	39.9	32.4
200-NC	43.0	32.3
200-PVA30-0.5	43.8	31.3
200-PVA12-0.5	42.6	31.8
200-PVA30-1.0	42.7	31.4
200-PVA12-1.0	41.9	32.0
200-PVA30-1.5	44.8	30.4
200-PVA12-1.5	42.8	30.7
220-NC	43.8	30.2
220-PVA30-1.0	42.8	30.1
220-PVA12-1.0	41.2	29.1

均値を評価値とした。

表-4 に圧縮試験から得られた圧縮強度と静弾性係数を示す。圧縮強度は 39.9~45.6N/mm<sup>2</sup>、静弾性係数は 29.1~35.3kN/mm<sup>2</sup>であり、わずかな違いはあるものの、概ね同程度の力学特性であった。ここで、一例として単位水量 200kg/m<sup>3</sup>における繊維混入率と圧縮強度および静弾性係数の関係を図-1 に示すが、圧縮強度と静弾性係数ともに、繊維混入率の違いや繊維種類の違いによる明確な差は確認されなかった。また、図-2 には単位粗骨材絶対容積と静弾性係数の関係を示す。図より、単位粗骨材絶対容積が増加することで静弾性係数が若干増加する傾向にあることが分かる。すなわち、前述した静弾性係数の違いは、既往の研究<sup>6)</sup>と同様に、単位粗骨材絶対容積の量に影響しているといえる。なお、紙面の都合上割愛す



(a) 繊維混入率と圧縮強度の関係

(b) 繊維混入率と静弾性係数の関係

図-1 圧縮試験の結果 (単位水量 200kg/m³)

るが、圧縮強度については、単位粗骨材絶対容積の量との相関は見られなかった。

なお、本研究では着目しなかったが、細径短繊維のひび割れ抑制効果により、最大荷重以降の応力低下が緩やかになる可能性が考えられる。この点については、改めて確認する必要がある。

図-3 に単位水量 200kg/m³ における各繊維混入率の 3 等分点曲げ試験による曲げ応力-変位関係を示す。図より、PVA12 および PVA30 を混入した供試体 (以下 PVA12 供試体および PVA30 供試体) とともに、繊維混入率が高いほど、ひび割れ発生直後の応力低下は抑えられ、より大きなエネルギー吸収能を示す結果が得られた。ここで、PVA30 供試体では、いずれの繊維混入率においても、ひび割れ発生直後に急激に曲げ応力が低下し、その後一定の応力を保持したまま大きく変形する破壊挙動となった。一方、PVA12 供試体では、繊維混入率 1.0vol% と 1.5vol% において、ひび割れ発生直後の急激な曲げ応力の低下は抑えられ、変位が 0.5mm 程度までは PVA30 供試体よりも大きな応力を保持した状態で変形する結果となった。その後、応力が低下しながら変形する挙動を示した。これは、繊維混入率が同じであっても、PVA12 供試体の方が混入している繊維の本数が多いため、ひび割れ面に存在する繊維は多くなり、ひび割れ発生直後の応力低下を繊維の架橋効果により抑制したためであると考えられる。

なお、破壊後にひび割れ面を確認したところ、いずれの供試体においても、主に繊維の破断が生じていたことを確認している。

### 3.3 寸法安定性の評価

寸法安定性は、自由収縮ひずみにより評価した。供試体には、100×100×400mm の角柱供試体を用い、供試体両端に埋め込んだ測定子間の長さをダイヤルゲージで測定することで自由収縮ひずみを求めた。供試体は打設翌日に脱型し、材齢 7 日まで 20°C の水中にて養生した。その後、20°C 60% R.H. の恒温恒湿室内にて気中養生を行った。長さ変化は、材齢 7 日を初期値とし、経過日数 7 日、14

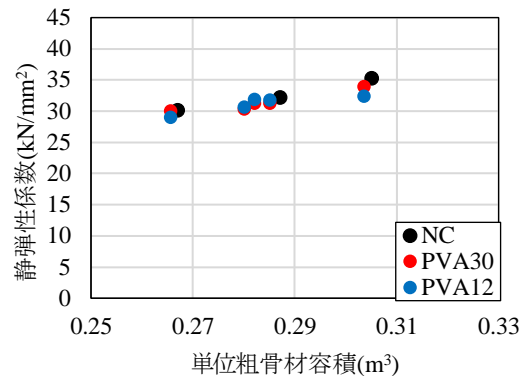


図-2 単位粗骨材絶対容積と静弾性係数

日、28 日、2 ヶ月、3 ヶ月、6 ヶ月で測定した。供試体はそれぞれの試験に対して 3 体作製し、それぞれの平均値を評価値とした。

図-4 に経過日数と自由収縮ひずみの関係を示す。図において、負値が収縮ひずみである。図より、いずれの供試体においても、日数の経過とともに自由収縮ひずみが増加し、経過日数およそ 100 日で  $600 \sim 700 \times 10^{-6}$  程度となった。収縮は収束する傾向にあり、最終的な自由収縮ひずみは  $800 \times 10^{-6}$  程度になることが推察される。

図-4(a) は、繊維混入率の違いに着目したものである。いずれの繊維混入率においても、繊維無混入供試体 (NC 供試体) の自由収縮ひずみと顕著な差はみられなかった。また、図-4(b) は、単位水量の違いに着目したものである。いずれの単位水量の増減による自由収縮ひずみの違いは数  $10 \times 10^{-6}$  程度であり、通常のコングリートと同程度であった<sup>8)</sup>。限られた検討ではあるが、PVA 繊維を用いた FRC においても単位水量  $180 \sim 220 \text{kg/m}^3$  の変化では、自由収縮ひずみに及ぼす影響は小さいことが示された。

### 4. R/FRC はりのせん断挙動の評価

前節で述べた 3 等分点曲げ試験の結果から、細径短繊維を混入した FRC は、太径短繊維を混入した FRC よりも曲げひび割れ発生直後の応力低下が抑えられることが明らかとなった。そこで、本節ではそのような引張特性

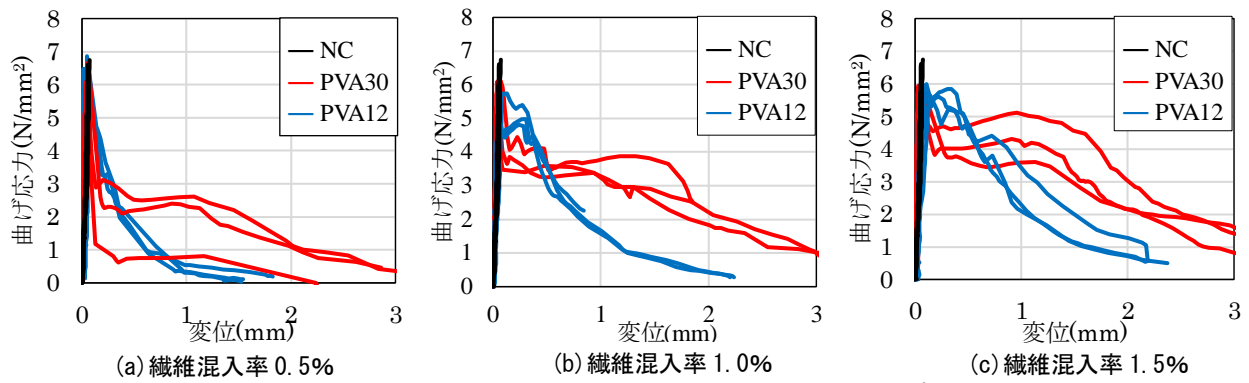


図-3 3等分点曲げ試験結果 (単位水量 200kg/m<sup>3</sup>)

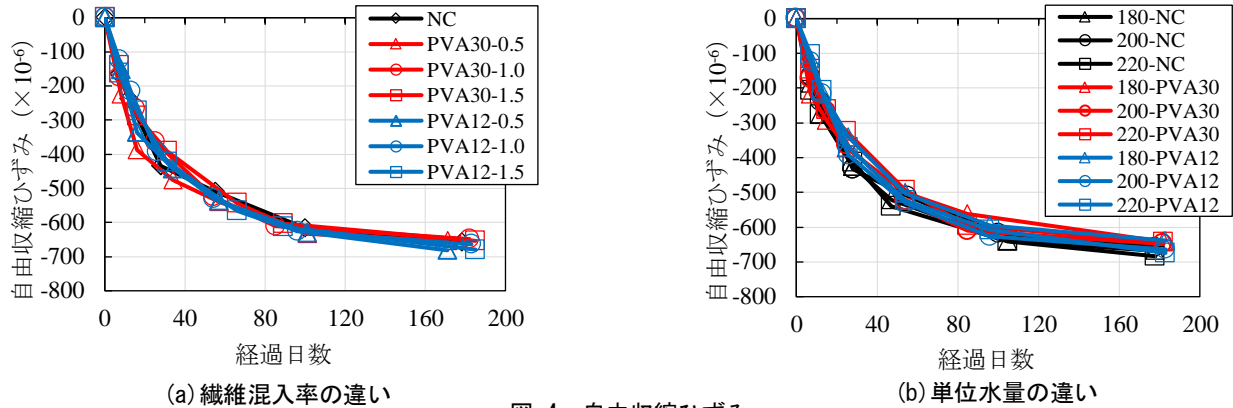


図-4 自由収縮ひずみ

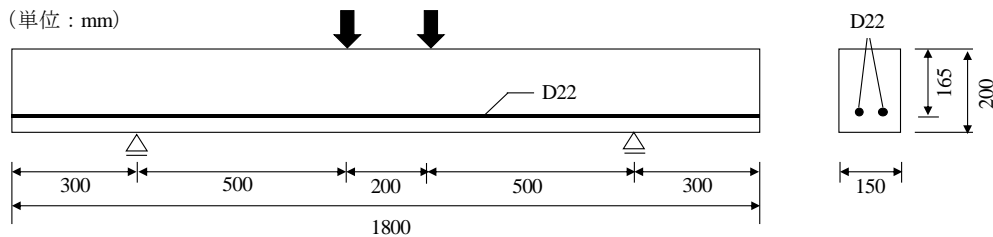


図-5 供試体寸法および配筋図

が、鉄筋により補強したはり (R/FRC はり) のせん断挙動に及ぼす影響について検討した。

#### 4.1 実験概要

図-5 に R/FRC はり 供試体の寸法および配筋図を示す。供試体の寸法は、幅 150mm、高さ 200mm であり、主鉄筋として D22 ( $f_y=390\text{N/mm}^2$ ) を上縁から 165mm の位置に 2 本配置した。鉄筋の端部は、曲げ加工や鋼板による機械的な定着は行っておらず、支点外側に 300mm の定着区間を設けることで定着を図った。また、支点内側に 100mm ごとにひずみゲージを貼り、鉄筋のひずみを測定した。荷重は、せん断スパン 500mm、等曲げ区間 200mm の 2 点荷重で行った。せん断スパン比は 3.03 であり、繊維無混入の場合には、せん断破壊するはり 供試体である。

本章では、細径短繊維の混入の影響を確認するため、PVA12 を 0~1.5vol% の範囲において 0.5vol% 刻みで混入させた。また、比較のために、PVA30 を 1.0vol% 混入した供試体についても検討した。表-5 に配合を示す。配合は、前章で検討した 200-PVA12-1.0 (表-5 では PVA12-1.0)

を基準とし、単位粗骨材容積を一定として繊維を細骨材置換で混入することとした。これは、繊維混入率の違いにより、ひび割れ面における骨材のかみ合い作用が変化することを排除するためである<sup>3)</sup>。

供試体は、打設翌日に脱型し、材齢 35 日まで実験室内において湿布養生を行った後、荷重に供した。

#### 4.2 FRC の力学特性

表-6 に  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱供試体の圧縮試験から得られた圧縮強度と静弾性係数を示す。いずれも圧縮強度と静弾性係数は概ね同程度であった。なお、PVA12-1.5 が若干低くなっているのは、固練りであったために充填不良が生じていたためであると考えられる。

図-6 に  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  の中央に深さ 30mm の切欠きを有する角柱供試体の 3 点曲げ試験結果より得られた荷重-CMOD 関係を示す。図には、各供試体ケース 3 体の結果をそれぞれ示している。図より、前章で示した 3 等分点曲げ試験の結果と同様に、PVA12 を混入することで、ひび割れ発生直後の急激な応力低下を抑制すること

表-5 配合とフレッシュ性状

	繊維 混入率 V <sub>f</sub> (Vol%)	W/B (%)	FA/B (%)	V <sub>G</sub> (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						スランプ (cm)	空気量 (%)
					W	C	FA	S	G	PVA		
NC	0.0	40	30	28.1	200	350	150	756	751	0	12	0.9
PVA12-0.5	0.5									6.5	11.5	3.3
PVA30-1.0	1.0									13	(58)	1.8
PVA12-1.0										5	2.8	
PVA12-1.5	1.5									19.5	2.5	2.6

混和剤は繊維補強コンクリートのみにセメント重量の1.5%添加

が確認できる。また、PVA12を1.0vol%以上混入した供試体では、PVA30を混入した供試体よりもひび割れ発生直後の荷重は大きくなるのが認められた。ここで、得られた荷重-CMOD 関係を用いて、JCI 規準による多直線近似法<sup>9)</sup>により引張軟化曲線を求めた。図-7に得られた引張軟化曲線の一例を示す。図より、繊維無混入供試体 (NC 供試体) は、ひび割れ発生直後に引張応力は急激に低下した。一方、繊維を混入することで、仮想ひび割れ幅が増加した後も応力を保持しながら変形する挙動が得られた。PVA30を混入した供試体 (PVA30 供試体) では、PVA12を混入した供試体 (PVA12 供試体) よりひび割れ発生後の引張応力は小さいが、仮想ひび割れ幅が1.0mm においても応力を保持する結果となった。一方、PVA12 供試体では、繊維混入率が大きいほどひび割れ発生直後の引張応力の低下は小さくなる傾向が確認された。

#### 4.3 R/FRC はりのせん断挙動評価

図-8にR/FRC はりの載荷試験より得られた荷重-載荷点変位関係を示す。なお、図には、二羽らの棒部材式<sup>10)</sup>から計算した斜めひび割れ発生荷重 (2×V<sub>c</sub>) と等価応力ブロック法を用いて算定した終局曲げモーメントから得られた終局曲げ荷重 (M<sub>u</sub>/250) を併記している。

NC 供試体は、95.2kN において斜めひび割れが発生し、急激に荷重が低下して破壊に至った。一方、繊維を混入した供試体では、100kN を超えても荷重を保持する結果となった。PVA30 供試体は、荷重が120kN 付近から曲げ剛性が低下しているのに対して、PVA12 供試体では、いずれの繊維混入率においても曲げ剛性の低下は見られなかった。これは、PVA12 供試体では PVA30 供試体と比較してひび割れ発生直後の引張応力の低下が小さいため、斜めひび割れの開口による曲げ剛性低下を抑制できたことによるものと考えられる。

終局時の挙動に着目すると、繊維混入率により最大荷重は異なるものの、いずれの供試体においても斜めひび割れの開口とともに急激に荷重が低下して破壊する挙動を示した。ただし、PVA12-1.5のみ、終局時は変形を伴いながら徐々に荷重が低下する挙動を示した。変位10mm において斜めひび割れの幅をクラックスケールにより測定した結果、ひび割れ幅は0.6mm 程度であった。このこ

表-6 FRCC はりの材料特性

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
NC	50.8	31.8
PVA30-1.0	51.1	29.7
PVA12-0.5	49.6	29.5
PVA12-1.0	50.7	30.6
PVA12-1.5	47.2	28.9

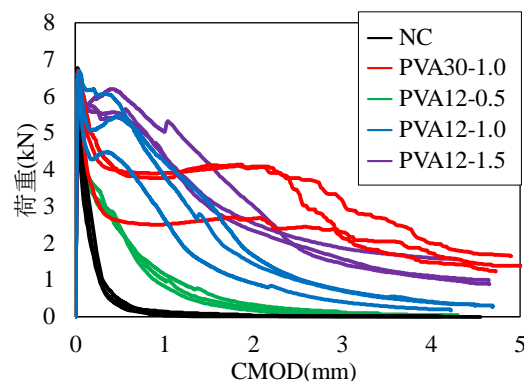


図-6 3点曲げ試験結果

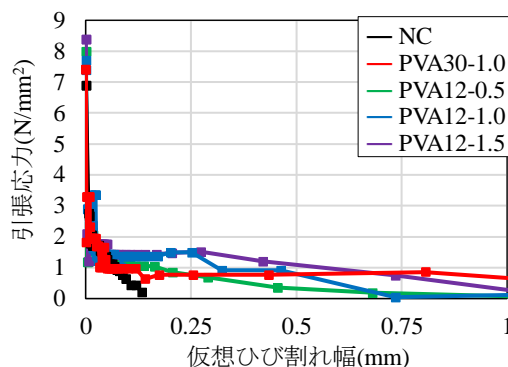


図-7 引張軟化曲線

とから、繊維の架橋効果によりひび割れの開口が抑制されることで、荷重が緩やかに低下したと推察される。また、最大荷重以降の変位7mm 程度において、ひずみゲージの値から鉄筋が降伏していることを確認した。以上の点から、PVA12-1.5は、他の供試体とは破壊時の挙動が異なっていたと考えられる。なお、破壊後にひび割れ面を確認したいところ、いずれの供試体においても、主に繊維の破断が生じていた。

図-9に繊維混入率と最大荷重の関係を示す。ただし、縦軸は圧縮強度の1/3乗で正規化したものである。図中の白抜きは、供試体の寸法や諸元が本研究と同一の



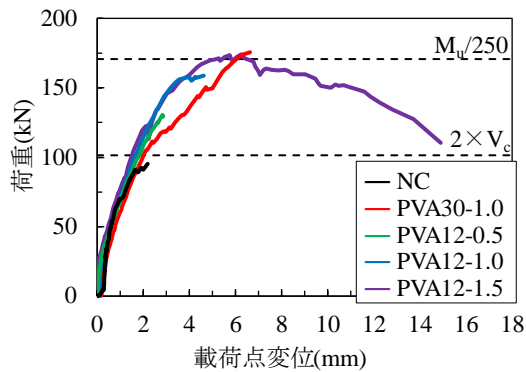


図-8 荷重—載荷点変位関係

PVA30を混入したR/FRCはり供試体の実験結果<sup>3)</sup>を基に算出している。図より、最大荷重は、繊維無混入供試体では本研究と既往の研究とでは同程度であるのに対して、繊維混入供試体では本研究の方が大きくなっていることが分かる。一方、PVA12においては、既往の研究と同様に繊維混入率の増加に伴い最大荷重が増加する傾向が得られた。繊維混入率の増加に伴う最大荷重の増加の程度は、既往の研究と概ね同程度であった。繊維の架橋効果は繊維の配向性に依存する<sup>例え</sup>ため、これらの結果のみにより繊維によるせん断耐力の向上効果を議論することは適切でない可能性もあるが、細径短繊維を用いた場合には、せん断耐力の観点から見ても、太径短繊維を用いた場合と同等程度の補強効果が期待できると考える。

以上のことから、細径短繊維の混入は、R/FRCの構造性能に対して、斜めひび割れの開口の抑制ならびにせん断耐力の向上に対して、有効であるといえる。

## 5. 結論

本研究では、繊維径 40 $\mu$ m、繊維長 12mm の細径短繊維を混入した FRC の材料特性と R/FRC はりのせん断挙動に及ぼす影響について、実験的な検討を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 単位水量、繊維種類および繊維混入率の違いが細径短繊維を混入した FRC の圧縮強度、静弾性係数ならびに寸法安定性へ及ぼす影響は小さい。
- (2) FRC の曲げ試験の結果から、細径短繊維を混入することで、ひび割れ発生直後の急激な応力低下を抑えられる。また、その効果は繊維混入率が大きくなるほど顕著となることを明らかにした。
- (3) せん断破壊する R/FRC はりにおいては、細径短繊維を混入することで斜めひび割れの開口を抑制できると、ならびに最大荷重が増加することを示した。

今後は、細径短繊維を用いた際のせん断補強効果のメカニズムについて引張軟化挙動の観点から検討すると

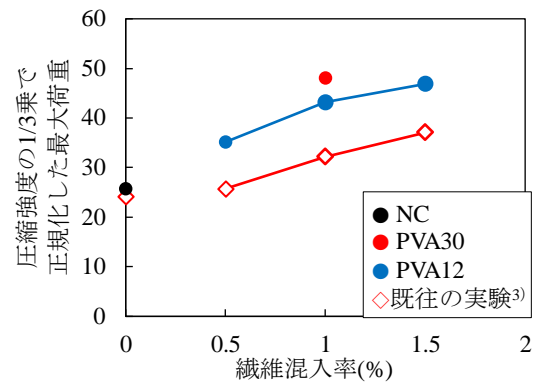


図-9 繊維混入率とはりの最大荷重の関係

もに、R/FRC のせん断挙動における寸法効果についても検討する予定である。

## 参考文献

- 1) 土木学会：繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会報告書、コンクリート技術シリーズ 119, 2018.
- 2) 喜多俊介, 小室文也, 二羽淳一郎：短繊維補強された RC 部材の力学的性状, コンクリート工学論文集, Vol20, No. 2, pp.1717-1722, 2003.
- 3) 上田尚史, 谷口拓峰, 鶴田浩章：マトリクスと繊維の違いが FRCC はりのせん断挙動に及ぼす影響に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol36, No.2, pp.1147-1152, 2014.
- 4) 宮澤伸吾, 黒井登起雄, 下村弥：繊維補強モルタルの自己収縮応力に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.560-565, 1997.
- 5) 中道優太, 上田尚史：繊維補強コンクリートの配合設計法に対する余剰ペースト理論の適用性に関する基礎的研究, コンクリート工学会論文集, Vol.41, No.1, pp.299-304, 2019.
- 6) 佐々木亘, 谷口秀明, 樋口正典：PVA 短繊維を用いた早強コンクリートの特性, コンクリート工学論文集, Vol.34, No.1, pp.250-256, 2012.
- 7) 巖樹光, 上田尚史：粗骨材を混入した SHCC の流動性と力学特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol40, No.2, pp.1213-1218, 2018.
- 8) 綾野克紀, 藤井隆史, 平喜彦：コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測に関する研究, 土木学会論文集, Vol.69, No.4, p.421-437, 2013.
- 9) JCI 規準・指針：JCI-S-001-2003, JCI-S-002-2003「切り欠きを用いた繊維補強コンクリートの荷重—変位曲線試験法」, 2003.
- 10) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第.372 号/V-5, pp.167-176, 1986.