

# 論文 再生細骨材を使用した高流動繊維補強モルタルに関する基礎的研究

大津 直人<sup>\*1</sup>・渡部 憲<sup>\*2</sup>

**要旨：**本研究では、高靱性セメント複合材料のワーカビリティの改善および再生細骨材の用途拡大を目的として、水結合材比の異なる、再生細骨材を使用した高流動繊維補強モルタルのフレッシュ試験、1軸圧縮試験および3等分点曲げ試験を行い、再生細骨材を使用した高流動高靱性セメント複合材料実現の可能性について検討した。その結果、PVA繊維を単独または鋼繊維と混合使用した場合、水結合材比=40～60%の範囲において、再生細骨材を使用した高流動高靱性セメント複合材料が実現可能である等の知見が得られた。

**キーワード：**高靱性セメント複合材料, 再生細骨材, 高流動

## 1. はじめに

近年、既存の繊維補強コンクリートをはるかに上回る性能を有する高靱性セメント複合材料(以下、DFRCCと略記)が開発されている<sup>1)</sup>。DFRCCとは、セメント系材料を繊維で補強した複合材料であり、曲げ応力下において複数ひび割れ特性を示し、曲げ、引張、圧縮破壊時の靱性が大幅に向上した材料である<sup>1)</sup>。この材料は、一般的なコンクリートの脆性的な性質を克服していることから、コンクリート系構造要素の性能や耐久性の大幅な向上が見込めるほか、従来のセメント系材料に変わる高性能な補修用材料、衝撃緩衝材料など、新しい各種の用途が期待されている。しかし、実際にDFRCCを使用した施工例は報告されているものの<sup>2)</sup>、その数は未だ少ないのが現状である。この理由としては、施工性の問題や、他の材料と比較してコストが高い等の問題が挙げられる。今後、DFRCCの利用を推進していくためには、既存材料の改良を含む新しい材料の開発が必要であると考えられる。

そこで、筆者らは、高流動コンクリートに注目した。高流動コンクリートとは、流動性を著しく高めたコンクリートであり、一般的なコンクリートと比較して少ない振動・締め固め作業でコンクリートを型枠内に充填できる。したがって、施工の省力化を図れ、結果としてトータルコストの削減が期待できる<sup>3)</sup>。このような性能をDFRCCに付与することにより、優れたワーカビリティを持つDFRCCが開発できれば、前述の問題を解決する有用な材料になり得る。このような背景から、諏訪田ら<sup>4)</sup>や小川ら<sup>5)</sup>は、細骨材として珪砂7号、繊維としてPVA繊維を用いた、優れたワーカビリティを持つDFRCCについて一連の検討を行い、調合、練り混ぜ方法、強度特性等を明らかにしている。また、菊田ら<sup>6)</sup>は、細骨材として珪砂、繊維として鋼繊維とPVA繊維を用いた、高流動DFRCC(以下、HDFRCCと略記)について一連の検討を行い、鋼繊維の混入率が引張強度等に及

ぼす影響を明らかにしている。

ところで、現在、生産活動を実施するにあたり地球環境に対応する取り組みは重要な課題であり、コンクリートの分野においても、解体コンクリート塊から取り出した再生骨材を使用して再びコンクリートを製造する、再生骨材コンクリートの研究が活発に実施されている。今後、コンクリートのリサイクルを更に積極的に推し進めるためにも、再生骨材の新たな有効利用技術を開発しておく必要がある。

以上より、本研究では、DFRCCのワーカビリティの改善および再生細骨材の用途拡大を目的として、再生細骨材を使用したHDFRCC実現の可能性について検討した。また、前述のように、これまでに開発されているHDFRCCは、珪砂を使用したものである。本研究では、コンクリート用細骨材として一般的に使用されている、砕砂や山砂を使用した場合のHDFRCC実現の可能性についても合わせて検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験概要

繊維補強モルタル(以下、FRMと略記)の試験体概要および調合を表-1に示す。FRMの種類は、目標スランプフローを55cmと定めた天然細骨材(N)を使用したDFRCC(N-DFRCC)、目標スランプフローを75cmと定めた高流動FRM(以下、HFFRMと略記)で、Nを使用したHFFRM(N-HFFRM)および再生細骨材(R)を使用したHFFRM(R-HFFRM)の3種類とした。なお、既存のDFRCC調合をベースとして、各種混和材料を添加、増量する程度では、HFFRMの目標スランプフローを達成できなかった。そのため、細骨材の粒度分布等を調整し、数多くの試し練りを行うことにより、表-1に示す調合を得た。

#### (1) 使用材料

本研究で使用した細骨材は、N{砕砂(最大骨材寸法:5.0mm, 表乾密度:2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:0.94%, 粗粒

\*1 東海大学 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

\*2 東海大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

表-1 試験体概要および調合

試験体名	細骨材種類	水結合材比(W/B)(%)	細骨材結合材比(S/B)(%)	繊維体積混入率(V <sub>f</sub> )(%)	繊維体積混合比(V <sub>m</sub> )(割)	フライアッシュ置換率(%)	水(W)(kg/m <sup>3</sup> )	セメント(C)(kg/m <sup>3</sup> )	結合材 <sup>*1</sup> (B)(kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 <sup>*2</sup> (S1)(kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 <sup>*2</sup> (S2)(kg/m <sup>3</sup> )	高性能AE減水剤添加率(B×%)(%)	分離低減剤添加量(kg/m <sup>3</sup> )			
N-HFFRM-40-V10	N	40	40	3.0	V(10)	20	419	839	1049	168	252	0.4	6.71			
N-HFFRM-50-V10		50	65				424	679	849	110	440		12.9			
N-HFFRM-60-V10		60	90				429	572	715	129	517		14.9			
R-HFFRM-40-V10	R	40	40		V(7)+S(3)		415	830	1037	166	249		8.30			
R-HFFRM-40-V7-S3							411	822	1027	164	247		12.3			
R-HFFRM-50-V10		50	65		420		672	840	218	327	13.4					
R-HFFRM-60-V10		60	90		422		563	703	127	509	16.9					
N-DFRCC-50-V10	N	50	65					-	428	856	856		390	167	-	18.8

\*1 セメント(C)とフライアッシュを合計した値である。

\*2 天然細骨材(N)の場合、S1:砕砂、S2:山砂である。再生細骨材(R)の場合、S1:中目、S2:細目である。

率:2.57)と山砂(最大骨材寸法:1.2mm, 表乾密度:2.64g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:1.48%, 粗粒率:1.67)を混合}およびR{中目(最大骨材寸法:2.5mm, 表乾密度:2.58g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:3.01%, 粗粒率:2.61)と細目(最大骨材寸法:0.6mm, 表乾密度:2.52g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:4.57%, 粗粒率:1.27)を混合}である。セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm<sup>3</sup>)を使用した。繊維はPVA繊維(V, 径:0.2mm, 長さ:18mm, 弾性係数:27kN/mm<sup>2</sup>, 引張強度:975N/mm<sup>2</sup>)および鋼繊維(S, 径:0.55mm, 長さ:30mm, 弾性係数:210kN/mm<sup>2</sup>, 引張強度:1145N/mm<sup>2</sup>)を使用した。混和材料は高性能AE減水剤, 分離低減剤およびフライアッシュII種(密度:2.28g/cm<sup>3</sup>)を使用した。

## (2) 調合

本研究では、HFFRMの水結合材比(W/B)を40, 50および60%とした。N-DFRCCは比較対象でありW/Bを50%のみとした。なお、N-HFFRMに使用したNにおける砕砂と山砂の混合割合(質量比)は、W/B=40%で4:6(混合砂の表乾密度:2.65g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:1.26%, 粗粒率:2.03), W/B=50および60%で2:8(混合砂の表乾密度:2.65g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:1.37%, 粗粒率:1.85)である。また、R-HFFRMに使用したRにおける中目と細目の混合割合(質量比)は、W/B=40および50%で4:6(混合砂の表乾密度:2.54g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:3.95%, 粗粒率:1.81), W/B=60%で2:8(混合砂の表乾密度:2.53g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:4.26%, 粗粒率:1.54)である。さらに、N-DFRCC-50に使用したNにおける砕砂と山砂の混合割合(質量比)は、7:3(混合砂の表乾密度:2.66g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:1.10%, 粗粒率:2.30)である。繊維はPVA繊維を使用し、繊維体積混入率(V<sub>f</sub>)を内割りして3.0%とした。なお、W/B=40%におけるR-HFFRMについては、文献<sup>7)</sup>の実験結果より、V<sub>f</sub>を3.0%, 繊維体積混合比(V<sub>m</sub>)をV:S=7:3とした試験体も用意した。フライアッシュのセメント置換率は、HFFRMのみ20%とした。練混ぜ時間は、6分(ミキサーに細骨材, フライアッシュおよびセメントを投入し空練り0.5分, その後、水を加え練混ぜ3分, 続いて、繊維を2分間で投入, 最後

に、0.5分練混ぜて終了)とした。

## (3) 試験項目

本研究では、前掲、表-1に示すFRMのフレッシュ試験, 1軸圧縮試験および3等分点曲げ試験を行った。フレッシュ試験では、スランブフロー試験および空気量試験を行った。1軸圧縮試験および3等分点曲げ試験用試験体は、打込み後2日で脱型し、試験時(材齢28日)まで標準養生とした。

### 2.2 1軸圧縮試験

1軸圧縮試験は、文献<sup>8)</sup>に準じて行い、載荷は、2000kN 耐圧試験機を使用して行った。試験体は100φ×200mmの円柱試験体とし、各要因3体製作した。計測項目は、荷重、コンプレッソメーターによる試験体中央部の縦・横ひずみおよび載荷盤間変位とした。なお、ヤング係数(E)は、コンプレッソメーターによる試験体中央部の縦ひずみから、JIS A 1149<sup>9)</sup>に準じて算出した。また、圧縮破壊エネルギー(G<sub>Fc</sub>)は、文献<sup>10, 11)</sup>に示す手法により算出した(文献<sup>10, 11)</sup>中の塑性変形3.0mmまでの値)。各データはデータロガーを使用して取り込んだ。

### 2.3 3等分点曲げ試験

3等分点曲げ試験は、繊維補強セメント複合材料の曲げモーメント-曲率曲線試験方法<sup>12)</sup>に準じて行い、載荷は、100kN AUTOGRAPH型精密万能試験機を使用して行い、クロスヘッド速度を0.2mm/minに制御した。試験体は100×100×400mmの角柱試験体とし、各要因3体製作した。計測項目は、荷重、スパン中央部のたわみとした。各データはデータロガーを使用して取り込んだ。また、試験後に、純曲げ区間内に発生したひび割れ本数を目視により計測し、本研究ではこれをひび割れ本数とした。

曲げ靱性は、繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法<sup>13)</sup>を参考にして評価した。

まず、曲げ強度は以下の式により求めた。

$$f_{1b} = \frac{P \cdot \ell}{b \cdot h^2} \times \frac{3}{2} \quad (1)$$

ここに、f<sub>1b</sub>:曲げ強度(N/mm<sup>2</sup>), P:荷重(N), ℓ:スパン

(mm),  $b$ :破壊断面の幅(mm),  $h$ :破壊断面の高さ(mm)である。

次に、曲げタフネスは曲げ靱性係数で表され、以下の式により求めた。

$$f2_b = \frac{T_b}{\delta_{ib}} \times \frac{\ell}{b \cdot h^2} \times \frac{3}{2} \quad (2)$$

ここに、 $f2_b$ :曲げ靱性係数(N/mm<sup>2</sup>),  $T_b$ :原点から $\delta_{ib}$ までの曲線下の面積(N・mm),  $\delta_{ib}$ :スパン中央部のたわみ(mm),  $\ell$ :スパン(mm),  $b$ :破壊断面の幅(mm),  $h$ :破壊断面の高さ(mm)である。

本研究では、曲げ応力- $\delta_{ib}$ 関係(後掲、図-4参照)の軟化部分も含めた $f2_b$ を評価するため、文献<sup>7)</sup>等を参考に、 $f2_b$ を $\delta_{ib}$ が7.5mmとなる時点での値とした。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 各種材料特性

表-2に、実験により得られたFRMの各種材料特性一覧を示す。また、写真-1に、FRMのスランブフロー試験結果の一例(R-HFFRM)を示す。

##### (1) スランブフロー

表-2によれば、HFFRMのスランブフローは、71.2~75.9cmとなっており、W/Bおよび骨材種類の相違に係らず、材料分離を生じることなく(写真-1は、スランブフ

ロー試験結果の一例であるが、全ての結果において材料分離無し)、目標スランブフローを概ね達成できた。ここで、N-HFFRM-50およびN-DFRCC-50のスランブフローに注目すると、N-DFRCC-50<N-HFFRM-50となっており、その差は12.6cmである。即ち、HFFRMはDFRCCと比較して、ワーカビリティの改善効果を期待できる。

##### (2) ヤング係数、圧縮強度および曲げ強度

図-1(a)~(c)に、FRMの $E$ 、圧縮強度( $F_c$ )および $f1_b$ とW/Bの関係を示す。

図-1(a)~(c)中のVを単独使用した場合の結果によれば、HFFRMの $E$ 、 $F_c$ および $f1_b$ は、骨材種類の相違に係らず、W/Bの増加に伴い低下している。また、同一W/BにおけるR-HFFRMの $E$ 、 $F_c$ および $f1_b$ は、N-HFFRMと比較して大きな差はなく、骨材種類の相違がHFFRMの各値に及ぼす影響は小さい。ここで、W/B=50%におけるN-DFRCCおよびN-HFFRMの $E$ 、 $F_c$ および $f1_b$ に注目すると、N-DFRCC>N-HFFRMとなっている。これは、フライアッシュがHFFRMの強度発現に影響を及ぼしたためと考えられる。なお、W/B=40%における、VとSを混合使用したR-HFFRMの $F_c$ は、Vを単独使用した場合と比較して低くなっている。これは、フレッシュ時の空気量の相違(前掲、表-2参照)に起因するものと考えられ

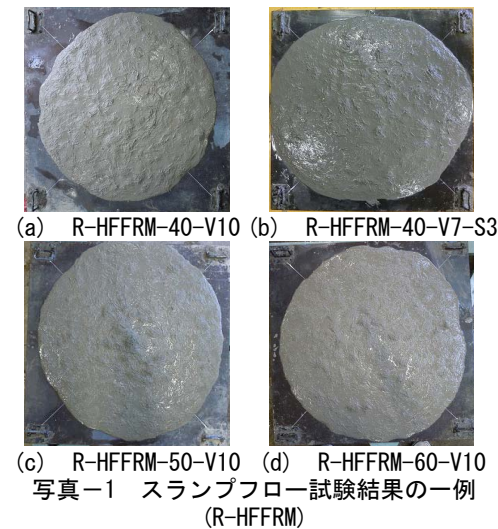


表-2 材料特性一覧

試験体名	フレッシュ時		硬化後						
	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ヤング係数 (E) (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (F <sub>c</sub> ) (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮破壊エネルギー (G <sub>Fc</sub> ) (N/mm)	曲げ強度 (f1 <sub>b</sub> ) (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ靱性係数 (f2 <sub>b</sub> ) (N/mm <sup>2</sup> )	ひび割れ本数
N-HFFRM-40-V10	72.4	0.8	2.05	16.8	48.3	54.8	7.31	2.76	2
N-HFFRM-50-V10	71.3	1.1	2.00	13.1	31.0	48.2	6.69	4.60	8
N-HFFRM-60-V10	75.9	1.2	1.97	11.7	21.7	35.9	5.58	4.48	8
R-HFFRM-40-V10	71.2	1.2	2.02	17.7	47.3	58.2	7.91	4.00	3
R-HFFRM-40-V7-S3	73.4	2.2	2.08	17.6	43.2	63.7	8.21	4.92	7
R-HFFRM-50-V10	73.1	0.8	1.98	13.8	33.3	55.3	7.39	5.41	7
R-HFFRM-60-V10	74.0	1.3	1.94	11.1	21.1	42.3	5.78	3.68	8
N-DFRCC-50-V10	58.7	2.5	2.03	14.7	38.1	55.8	8.01	3.23	4

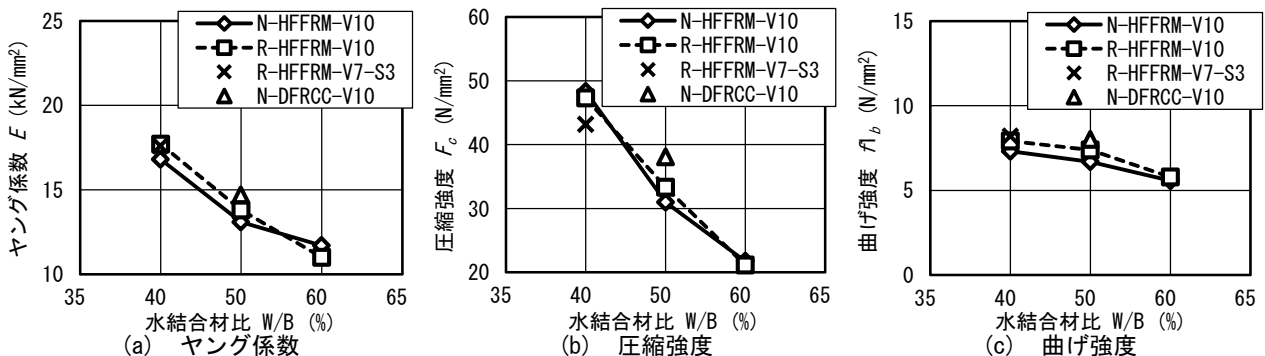


図-1 ヤング係数、圧縮強度および曲げ強度-W/B関係

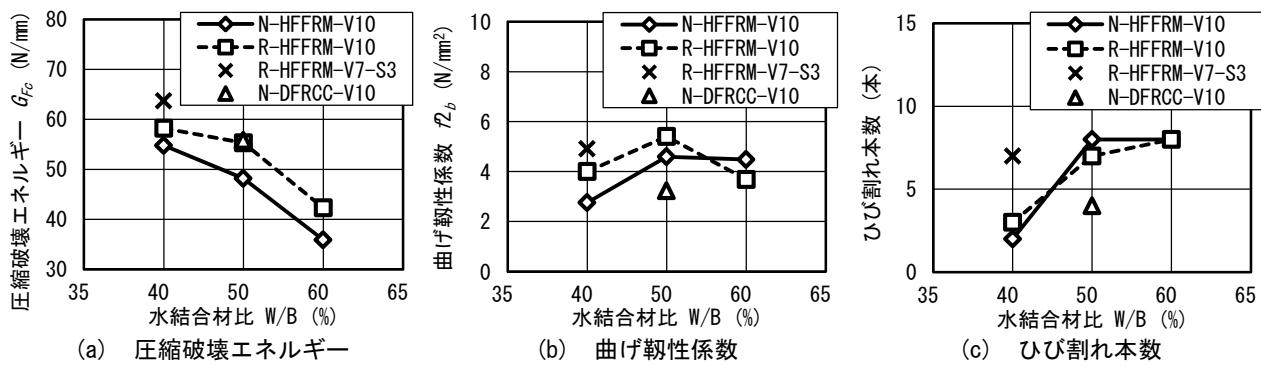


図-2 圧縮破壊エネルギー、曲げ靱性係数およびひび割れ本数-W/B関係

る。ただし、後述(図-2参照)のように、VとSを混合使用したR-HFFRMの $G_{Fc}$ 、 $f_{2b}$ およびひび割れ本数は、Vを単独使用した場合と比較して高くなっている。これは、文献<sup>7)</sup>(DFRCCの傾向)に示す通り、VとSを混合使用したことによる補強効果である。

### (3) 圧縮破壊エネルギー、曲げ靱性係数、およびひび割れ本数

図-2(a)～(c)に、FRMの $G_{Fc}$ 、 $f_{2b}$ およびひび割れ本数とW/Bの関係を示す。

まず、図-2(a)中のVを単独使用した場合の結果によれば、HFFRMの $G_{Fc}$ は、骨材種類の相違に係わらず、W/Bの増加に伴い低下している。また、同一W/BにおけるR-HFFRMの $G_{Fc}$ は、N-HFFRMと比較して高くなっている。文献<sup>14)</sup>によれば、100φ×200mmの円柱試験体を使用した場合、同一W/BにおけるR-DFRCCの $G_{Fc}$ は、N-DFRCCと比較して同程度か若干低くなる傾向を示しており、本研究の傾向と相違している。骨材種類の相違等に伴う、吸水率、密度、最大骨材寸法、岩種、粒度分布および粒径の相違等がHFFRMの $G_{Fc}$ に及ぼす影響について、今後、詳細に検討を行う必要がある。ここで、W/B=50%におけるN-DFRCCおよびN-HFFRMの $G_{Fc}$ に注目すると、N-DFRCC>N-HFFRMとなっている。これは、フライアッシュの置換に伴うN-HFFRMの $F_c$ の低下に起因するものと考えられる。なお、W/B=40%における、VとSを混合使用したR-HFFRMの $G_{Fc}$ は、Vを単独使用した場合と比較して高くなっており、文献<sup>11)</sup>(DFRCCの傾向)と同様である。

次に、図-2(b)中のVを単独使用した場合の結果によれば、HFFRMの $f_{2b}$ は、W/B=40～50%の範囲において、骨材種類の相違に係わらず、W/Bの増加に伴い増大している。しかし、HFFRMの $f_{2b}$ は、W/B=50～60%の範囲において、W/Bの増加に伴い、N-HFFRMではほぼ一定値となるが、R-HFFRMでは低下している。また、同一W/BにおけるR-HFFRMの $f_{2b}$ は、N-HFFRMと比較して、W/B=40および50%では若干高くなっているが、W/B=60%では若干低くなっている。 $f_{2b}$ は $\delta_{2b}=7.5\text{mm}$ までの平均曲

げ応力を表しており、骨材種類によりW/Bの影響は相違しているものの、HFFRMは十分な曲げ靱性を有していることがわかる。ここで、W/B=50%におけるN-DFRCCおよびN-HFFRMの $f_{2b}$ に注目すると、N-DFRCC<N-HFFRMとなっている。これは、N-HFFRMにおいて、フライアッシュの置換に伴いマトリックス強度が低下した一方で、繊維による架橋が容易になったこと等が考えられるが、今後、詳細な検討が必要である。なお、W/B=40%における、VとSを混合使用したR-HFFRMの $f_{2b}$ は、Vを単独使用した場合と比較して高くなっており、文献<sup>7)</sup>(DFRCCの傾向)と同様である。

さらに、図-2(c)中のVを単独使用した場合の結果によれば、HFFRMのひび割れ本数は、W/B=40%において骨材種類の相違に係わらず、2～3本程度となっている。しかし、W/B=50～60%の範囲における、HFFRMのひび割れ本数は、骨材種類の相違に係わらず、7本以上となっている。なお、W/B=40%における、VとSを混合使用したR-HFFRMのひび割れ本数は、Vを単独使用した場合と比較して増えており、7本となっている。

以上より、Vを単独使用した場合、骨材種類の相違に係わらず、W/B=50～60%の範囲において、十分なひび割れ分散性および曲げ靱性等を有しており、HDFRCCが実現可能である。また、VとSを混合使用した場合、W/B=40%において、十分なひび割れ分散性および曲げ靱性等を有しており、再生細骨材を使用したHDFRCCが実現可能である。

### 3.2 圧縮応力-縦ひずみ関係

図-3(a)および(b)に、1軸圧縮試験により得られたFRMの $\sigma_c$ -縦ひずみ( $\epsilon_c$ )関係を、骨材種類別に示す。なお、 $\epsilon_c$ は載荷盤間に取り付けた変位計により計測した値である。各 $\sigma_c$ - $\epsilon_c$ 関係は代表的な値を示している。

図-3(a)および(b)中のVを単独使用した場合の結果によれば、HFFRMの $\sigma_c$ - $\epsilon_c$ 関係における、 $F_c$ 以降、急激に $\sigma_c$ が低下する際の負勾配は、骨材種類の相違に係わらず、W/Bの増加に伴い緩やかとなっている。これは、文献<sup>14)</sup>(DFRCCの傾向)と同様である。また、同一W/Bにお

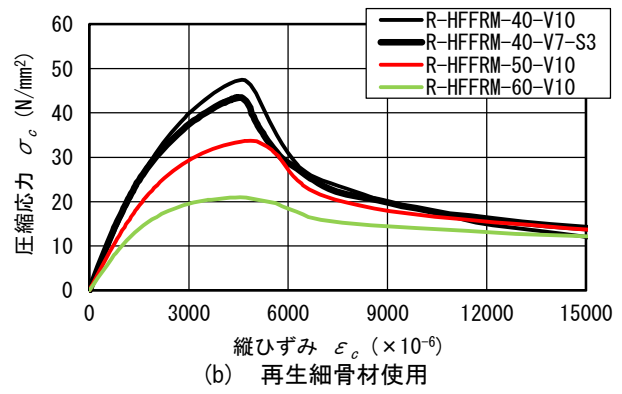
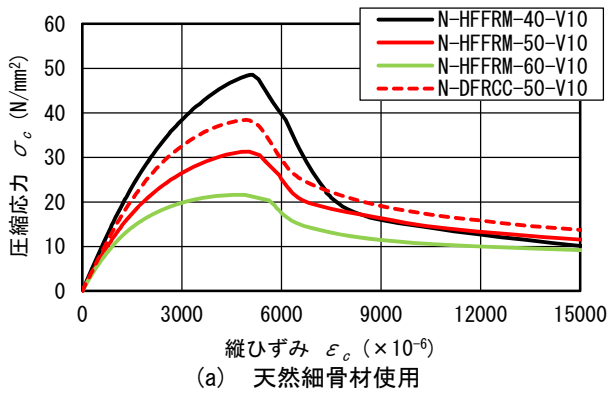


図-3 圧縮応力-縦ひずみ関係

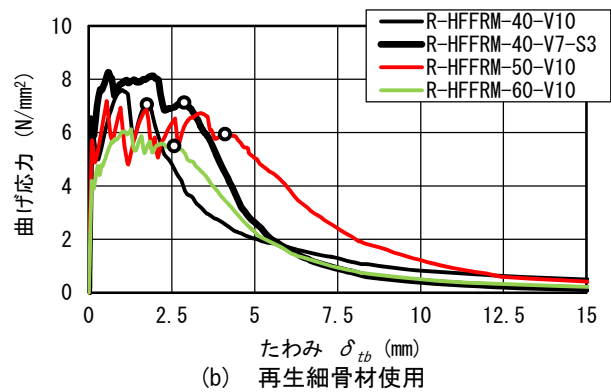
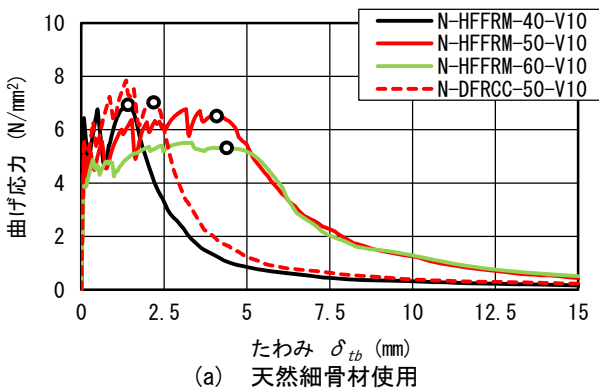


図-4 曲げ応力-たわみ関係

ける、 $F_c$ 以降、急激に $\sigma_c$ が低下する際のR-HFFRMの負勾配は、N-HFFRMと比較して大きな差はない。しかし、 $\epsilon_c=8000\mu$ 以降のR-HFFRMの残留 $\sigma_c$ レベルは、N-HFFRMと比較して、高くなっている。このことが、同一W/BにおけるR-HFFRMの $G_{F_c}$ は、N-HFFRMと比較して高くなること(前掲、図-2(a)参照)に関係しているものと思われる。なお、本実験で得られたHFFRMの $\sigma_c-\epsilon_c$ 関係における $F_c$ 以降の負勾配は、W/Bおよび骨材種類の相違により差異はあるものの、 $\epsilon_c=6000\sim 8000\mu$ の間に大きく変化し、その後の負勾配は緩やかになっている。そのため、 $\epsilon_c=8000\mu$ (全ての結果で、大きな負勾配の変化が終了した地点)を境として、 $\sigma_c-\epsilon_c$ 関係に関する考察を加えている。補足として、文献<sup>8)</sup>では、プレーンモルタルの $\sigma_c-\epsilon_c$ 関係が示されており、 $\epsilon_c=8000\mu$ におけるプレーンモルタルの残留 $\sigma_c$ レベルは、 $5\text{N/mm}^2$ 程度以下である。ここで、N-DFRCC-50およびN-HFFRM-50の $\sigma_c-\epsilon_c$ 関係(図-3(a))に注目すると、 $F_c$ 以降、急激に $\sigma_c$ が低下する際のN-HFFRM-50の負勾配は、フライアッシュの置換に伴う $F_c$ の低下により、N-DFRCC-50と比較して若干緩やかとなっている。なお、W/B=40%における、VとSを混合使用したR-HFFRMの、 $F_c$ 以降、急激に $\sigma_c$ が低下する際の負勾配は、Vを単独使用した場合と比較して同程度となっている。しかし、 $\epsilon_c=8000\mu$ 以降のVとSを混合使用したR-HFFRMの残留 $\sigma_c$ レベルは、Vを単独使用した場合と比較して高くなっている。これは、文献<sup>11)</sup>

(DFRCCの傾向)と概ね同様である。

### 3.3 曲げ応力-たわみ関係

図-4(a)および(b)に、3等分点曲げ試験により得られたFRMの曲げ応力- $\delta_{tb}$ 関係を、骨材種類別に示す。なお、図-4中の丸印は、曲げ応力が再上昇することなく急激に低下し始める時点(以下、軟化開始時と略記)を示している。軟化開始時は、ひび割れ分散終了時を意味している。また、各曲げ応力- $\delta_{tb}$ 関係は代表的な値を示している。

図-4(a)および(b)中のVを単独使用した場合の結果によれば、HFFRMの曲げ応力- $\delta_{tb}$ 関係は、W/Bおよび骨材種類の相違に係らず、初期ひび割れ発生後も、高い曲げ応力レベルを保った状態でひび割れ分散を繰り返しながら軟化開始時を迎えており、優れた曲げ靱性を有していることがわかる。ただし、骨材種類の相違に係らず、W/B=40%におけるHFFRMの軟化開始時 $\delta_{tb}$ は、他のW/Bにおける結果と比較して最も小さくなっている。前述のとおり、W/B=40%における、HFFRMのひび割れ本数は、Vを単独使用した場合、2~3本であり、十分なひび割れ分散性を有していない。文献<sup>7)</sup>によれば、Vを単独使用したDFRCCでは、W/B=50~60%の範囲において十分な補強効果が得られるとされており、HFFRMについても同様の傾向が確認できた。また、HFFRMの軟化開始時の $\delta_{tb}$ は、W/B=40~50%の範囲において、骨材種類の相違に係らず、W/Bの増加に伴い増大している。し

かし、HFFRMの軟化開始時の $\delta_{tb}$ は、W/B=50~60%の範囲において、W/Bの増加に伴い、N-HFFRMでは若干増大しているが、R-HFFRMでは低下しており、骨材種類の相違が $f_{2b}$ に及ぼす影響に関する傾向(前掲、図-2(b)参照)とほぼ合致している。即ち、W/Bの増加に伴う $f_{1b}$ の低下や、骨材種類の相違による軟化開始時の $\delta_{tb}$ の相違が、 $f_{2b}$ に影響を与えたものと思われる。骨材種類の相違がHFFRMの $f_{2b}$ や軟化開始時の $\delta_{tb}$ に及ぼす影響について、今後、詳細に検討を行う必要がある。ここで、N-DFRCC-50およびN-HFFRM-50の軟化開始時の $\delta_{tb}$ に注目すると、N-DFRCC-50<N-HFFRM-50となっている。これは、前掲、図-2(b)同様、N-HFFRM-50において、フライアッシュの置換に伴いマトリックス強度が低下した一方で、繊維による架橋が容易になったこと等が考えられるが、今後、詳細な検討が必要である。なお、W/B=40%における、VとSを混合使用したR-HFFRMの軟化開始時の $\delta_{tb}$ は、Vを単独使用した場合と比較して大きくなっている。文献<sup>7)</sup>によれば、DFRCCではW/B=40%において、VとSを混合使用することにより十分な補強効果が得られるとされており、R-HFFRMについても同様の傾向が確認できた。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見を、以下にまとめる。

- 1) 高流動繊維補強モルタルのスランプリューは、71.2~75.9cmとなり、骨材種類および水結合材比の相違に係らず、材料分離を生じることなく、目標スランプリュー75cmを概ね達成できた。
- 2) PVA繊維を単独または鋼繊維と混合使用した場合、水結合材比=40~60%の範囲において、再生細骨材を使用した高流動高靱性セメント複合材料が実現可能である。
- 3) PVA繊維を単独使用した場合、水結合材比=50~60%の範囲において、砕砂および山砂を使用した高流動高靱性セメント複合材料が実現可能である。

#### 謝辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た、元東海大学学生の新行内直樹君および木戸翔平君に謝意を表します。なお、本研究の一部はJSPS科研費(課題番号:15K060307、代表者:渡部憲)の助成を受けて行われたものである。

#### 参考文献

- 1) 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会:高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う、高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用

研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、128pp., 2002.1

- 2) 高強度・高靱性コンクリート利用研究委員会:高強度・高靱性コンクリート利用研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、pp.74-85, 2009.3
- 3) 日本建築学会:高流動コンクリートの材料・調査・製造・施工指針(案)・同解説、日本建築学会、189pp., 1997.1
- 4) 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(その10) PVA 繊維を用いたECC の練り混ぜ方法と力学的要求性能に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.545-546, 2000.9
- 5) 小川敦久, 末森寿志, 斉藤忠, Victor C. Li:ビニロン繊維を用いた高靱性FRCの流動性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.1, pp.73-78, 2001.7
- 6) 菊田貴恒, 三橋博三, 西脇智哉:ストレート鋼繊維とPVA繊維によるHFRCCの材料特性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.837-838, 2010.9
- 7) 渡部憲, 大岡督尚, 白都滋:再生細骨材を用いた繊維補強セメント複合材料の材料特性、コンクリート工学、テクニカルレポート, Vol.44, No.3, pp.11-18, 2006.3
- 8) 渡部憲, 加藤雄介:細骨材としてシラスを使用した高靱性セメント複合材料の材料特性、コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008.7
- 9) JIS規格:コンクリートの静弾性係数試験方法(JIS A 1149)、日本規格協会, pp.717-720, 2010.3
- 10) 渡部憲, 大岡督尚, 白井伸明, 森泉和人:各種コンクリートの圧縮軟化挙動、コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.493-498, 2000.6
- 11) 渡部 憲, 大岡督尚, 白都 滋, 加藤雄介:再生細骨材を使用した高靱性セメント複合材料の圧縮破壊挙動、コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.485-490, 2006.7
- 12) JCI規準:繊維補強セメント複合材料の曲げモーメント-曲率曲線試験方法(JCI-S-003-2007)、コンクリート工学協会, 8pp., 2007
- 13) 土木学会:コンクリート標準示方書[規準編]平成11年度版, JSCE-G552 繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法, pp.217-219, 1999.11
- 14) 渡部憲, 佐藤史康, 中村允哉, 加藤浩文:高靱性セメント複合材料の圧縮軟化挙動、コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.323-328, 2011.7