

# 再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートの 強度発現および収縮特性

丸山 裕生<sup>\*1</sup> 渡部 憲<sup>\*2</sup> 飯島 友貴<sup>\*1</sup> 大瀧 諄<sup>\*1</sup>

## Strength Development and Shrinkage Behavior of High-Fluidity Ductile-Fiber-Reinforced Concrete Using Recycled Aggregate

by

Yumi MARUYAMA<sup>\*1</sup>, Ken WATANABE<sup>\*2</sup>, Tomoki IJIMA<sup>\*1</sup> and Jun OTAKI<sup>\*1</sup>

(Received on Sep. 29, 2017 and accepted on Nov. 09, 2017)

### Abstract

Recently, researches on recycled aggregate have been actively carried out in the concrete industry. In order to promote the recycling of concrete more extensively, it is necessary to develop new technology for effectively using recycled aggregate. As an example, research on ductile-fiber-reinforced cementitious composites (DFRCC) using recycled fine aggregate has been reported. DFRCCs are composites of cementitious material reinforced with fibers, which have multiple cracking characteristics and much improved toughness during bending, tension and compression fracture. However, due to workability-related defects and so on, there are only a limited number of examples of construction using DFRCC. If DFRCC with excellent workability characteristics can be developed, those problems would be solved. Therefore, this study focused on high-fluidity concrete, and examined the material properties of high-fluidity ductile-fiber-reinforced concrete (HFDFRC) using recycled aggregate. To apply HFDFRC using recycled aggregate (R-HFDFRC) to RC structures, it is necessary to clarify the long-term material properties (such as strength development and shrinkage behavior) of R-HFDFRC. In order to evaluate the long-term material properties of R-HFDFRC, we first conducted compressive test, trisecting-point bending test and shrinkage tests on the R-HFDFRC for materials that had aged 7, 28 and 91 days. Then we tried to apply the approximation formulas which are based on conventional strength development formulas. It is concluded that the overall trend in strength development in R-HFDFRC can be broadly approximated with our equation proposed.

**Keywords:** recycled fine aggregate, ductile-fiber-reinforced concrete, high-fluidity, strength development properties, shrinkage behavior

## 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、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か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>、その数は未だに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、マトリックスとして主にモルタルやセメントペーストを使用しているため、一般的なコンクリートと比較して水和熱や乾燥収縮による影響が大き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。

ところで、現在、生産活動を実施するにあたり地球環境問題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おり、研究成果および施工事例も報告されている。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。

以上のような背景から、筆者らの一人<sup>3)</sup>は、混和剤としてフライアッシュ、骨材として再生細・粗骨材を使用

\*1 工学研究科建築土木工学専攻修士課程

\*2 工学部建築学科教授

Table 1 Mix proportions of HFDfRC and DfRM.

Specimen	Type of DfRCC	Aggregate	Water-binder ratio (W/B) (%)	Sand-total aggregate ratio (s/a) (vol%)	Sand-binder ratio (S/B) (%)	Fiber volume fraction (V <sub>f</sub> ) (vol%)	Fiber volume mixing ratio (V <sub>m</sub> ) V:S	Replacement ratio of fly ash (FA) (%)	Water (W) (kg/m <sup>3</sup> )	Cement (C) (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse aggregate*1 (G) (kg/m <sup>3</sup> )	Fine aggregate*1, *2 (kg/m <sup>3</sup> )		Air entraining and high-range water reducing admixture (Sp) (B×%)	Segregation-reducing agent (GF) (B×%)
												(S1)	(S2)		
R-HFC-40-V7S3	R-HFDfRC	1R	40	85	40	3.0	7:3	20.0	399	797	71	159	239	0.5	1.7
R-HFC-50-V7S3			50		65				403	646	93	209	314	0.5	2.3
R-HFC-60-V7S3			60		90				403	537	109	121	486	0.5	3.3
R-HFC-50-V10S0			50		65				403	645	93	209	313	0.5	2.4
R-HFM-40-V10S0	R-HFDfRM	2R	40	100	40	3.0	10:0	-	412	824	-	206	206	0.5	1.4
R-HFM-50-V10S0			50		65				421	667	-	270	270	0.5	2.3
R-HFM-60-V10S0			60		90				420	561	-	190	443	0.5	3.4
R-FM-50-V10S0			50		65				-	425	850	-	553	-	-
N-HFM-50-V10S0	N-HFDfRM	N	50	-	65	-	-	20.0	423	671	-	109	435	0.3	2.2

\*1 See to Table 2 for physical property of aggregate

\*2 Recycled fine aggregate, S1 : Medium fine aggregate, S2 : Very fine aggregate  
Natural fine aggregate, S1 : Crushed sand, S2 : Pit sand

Table 2 Physical property of aggregate.

Aggregate		Maximum size (mm)	density in saturated surface-dry condition (g/cm <sup>3</sup> )	Percentage of absorption (%)	Fineness modulus	
1R	Recycled	Coarse	10	2.58	2.54	6.04
		Medium fine	2.5	2.57	2.98	2.48
		Very fine	0.6	2.55	4.07	1.20
2R	Recycled	Medium fine	2.5	2.58	2.98	2.61
		Very fine	0.6	2.54	4.41	1.16
N	Natural	Crushed sand	2.5	2.64	1.17	2.86
		Pit sand	1.2	2.60	2.07	1.40

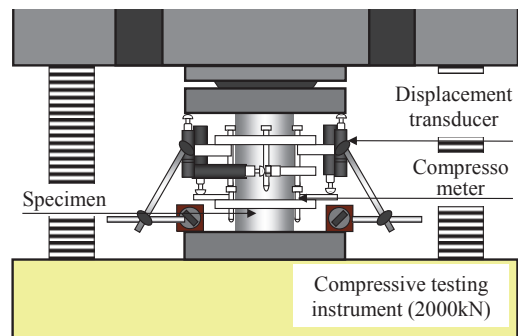


Fig.1 Compressive lording system.

した高流動高靱性コンクリート(以下、HFDfRC と略記)の力学特性について検討を行った。このような材料を鉄筋コンクリート構造物に適用しようとする場合、耐久性の観点からも、再生細・粗骨材を使用した HFDfRC の強度発現および収縮特性等の長期性状について十分検討しておく必要がある。

そのため、本研究では、再生細・粗骨材を使用した HFDfRC に関する強度発現および収縮特性について検討を行った。

## 2. 実験の概要

本研究では、Table 1 に示す HFDfRC の 1 軸圧縮試験、3 等分点曲げ試験および収縮試験を行った。ただし、R-HFC-50-V10S0 は収縮試験のみである。また、モルタルベースの DfRCC(DfRM)の収縮試験も、合わせて行った。HFDfRC および DfRM の種類は、再生細・粗骨材を使用した HFDfRC(R-HFDfRC)、再生細骨材を使用した高流動 DfRM(R-HFDfRM)、再生細骨材を使用した DfRM(R-DfRM)および天然細骨材を使用した高流動 DfRM(N-HFDfRM)の 4 種類とした。

### (1) 使用材料

本研究で使用した骨材の物性一覧を、Table 2 に示す。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、分離低減材およびフライアッシュ II 種(密度:R-HFDfRC では 2.34g/cm<sup>3</sup>, R-HFDfRM および N-HFDfRM では 2.28g/cm<sup>3</sup>)を使用した。

### (2) 調査

本研究では、R-HFDfRC および R-HFDfRM の水結合材比(W/B)を、40, 50 および 60%とした。なお、R-HFC-50-V10S0, R-FM-50-V10S0 および N-HFM-50-V10S0 は、W/B を 50%のみとした。細骨材率は、R-HFDfRC では 85%、DfRM では 100%とした。なお、本研究で使用した、HFDfRC および DfRM の調合は、数多くの試し練りを行い、定められたものである<sup>3)</sup>。粗骨材の混入は、乾燥収縮等に起因する収縮の軽減等を狙ったものである。ただし、細骨材率を一般的なコンクリートレベルに近づけると、R-HFDfRC は、材料分離を生じ、目標スランプフローを満足できないという結果を得ている<sup>3)</sup>。そのため、本研究で使用した R-HFDfRC の調合においても細骨材率を 85%とした。繊維は V および S を使用し、繊維体積混入率を 3.0%、V と S の繊維体積混合比(V:S)を 7:3 および 10:0 とした。

### 2.1 1 軸圧縮試験

1 軸圧縮試験の概要を、Fig.1 に示す。载荷は、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 5 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・横ひずみおよび载荷盤間変位とした。各データは、デー

タロガーを使用して取り込んだ。なお、試験体は、打込み後 2 日(湿布養生)で脱型し、試験時(材齢 7, 28 および 91 日)まで標準養生とした。

また、圧縮破壊エネルギー( $G_{Fc}$ )は、文献<sup>5,4)</sup>に示す手法により算出した(文献<sup>1,4)</sup>中の塑性変形 3.0mm までの値)。

### 2.2 3等分点曲げ試験

3等分点曲げ試験の概要を、Fig.2 に示す。荷重は、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 5 体製作した。3等分点曲げ試験は、文献<sup>5)</sup>付属書(参考)に準じて行い、計測項目は、荷重、スパン中央部のたわみおよび曲率とした。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。なお、試験体は、打込み後 2 日(湿布養生)で脱型し、試験時(材齢 7, 28 および 91 日)まで標準養生とした。

曲げ靱性は文献<sup>6)</sup>に準じて、以下の手法で評価した。

まず、曲げ強度は、以下の式により求めた。

$$f1_b = \frac{P \cdot \lambda}{b \cdot h^2} \quad (1)$$

ここに、 $f1_b$  : 曲げ強度(N/mm<sup>2</sup>)、P : 荷重(N)、 $\lambda$  : スパン(mm)、b : 破壊の幅(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。

$$f2_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{\lambda}{b \cdot h^2} \quad (2)$$

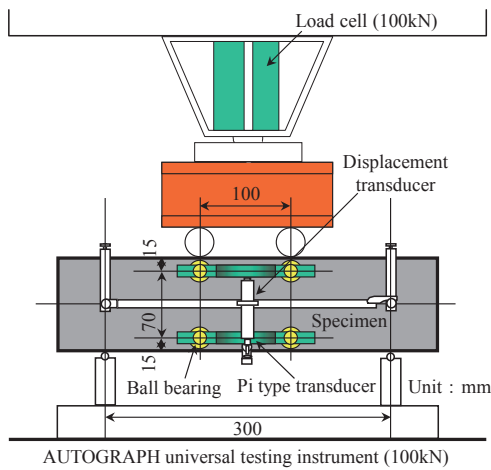


Fig.2 Trisecting-point loading system.

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

なお、本研究では、 $f2_b$ を  $\delta_{tb}$ が 7.5mm となる時点での値とした。

引張強度( $F_{t,b}$ )および引張終局ひずみ( $\epsilon_{tu,b}$ )は、文献<sup>7)</sup>に示す手法により算出した。

### 2.3 収縮試験

本研究では、乾燥開始材齢を 7 日とした、HFD FRC および DFRM の収縮試験を行った。試験体は、100×100×400mm の角柱試験体とし、各要因 2 体製作した。収縮ひずみは、試験体内部中央に検長 100mm の埋め込み型ひずみゲージを設置して計測した。各データは、データロガーを使用して取り込んだ。なお、試験体は、打込み後 2 日(湿布養生)で脱型した。その後、標準養生とし、材齢 7 日で恒温恒湿室(20°C, 60%RH)での空中養生とした。

## 3. 結果と考察

### 3.1 強度発現試験結果

Table 3 に、1 軸圧縮試験および 3 等分点曲げ試験により得られた、材齢 91 日までの R-HFD FRC の強度試験結果を示す。

#### (1) 圧縮強度発現

Fig.3 に、1 軸圧縮試験により得られた、材齢 91 日までの R-HFD FRC の圧縮強度( $F_c$ )、ヤング係数(E)および  $G_{Fc}$  - 材齢関係を示す。

Fig.3 によれば、材齢 91 日までの R-HFD FRC の  $F_c$ 、E および  $G_{Fc}$  は、W/B の相違に係らず、材齢の経過に伴い増大している。

#### (2) 曲げ強度発現

Fig.4 に、3 等分点曲げ試験により得られた、材齢 91 日までの R-HFD FRC の  $f1_b$ 、 $F_{t,b}$ 、 $f2_b$ 、 $\epsilon_{tu,b}$  およびひび割れ本数 - 材齢関係を示す。

まず、Fig.4(a), (b) および (c) によれば、材齢 91 日までの R-HFD FRC の  $f1_b$ 、 $F_{t,b}$  および  $f2_b$ ( $\delta_{tb}=7.5$ mm までの平均曲げ応力)は、W/B=50 および 60% では材齢の経過に伴い増大している。一方、W/B=40% では材齢 28 日で最大値となり、材齢 91 日で低下している。これは、R-HFD FRC において、W/B の相違および材齢の経過に伴いマトリックス強度が増大した一方、繊維による架橋が困難になったこと等が考えられるが、今後、詳細な検討

Table 3 Strength test results.

Specimen	Compressive strength ( $F_c$ ) (N/mm <sup>2</sup> )			Young's modulus (E) (kN/mm <sup>2</sup> )			Compressive fracture energy ( $G_{Fc}$ ) (N/mm)			Flexural strength ( $f1_b$ ) (N/mm <sup>2</sup> )			Tensile strength ( $F_{t,b}$ ) (N/mm <sup>2</sup> )			Flexural toughness ( $f2_b$ ) (N/mm <sup>2</sup> )			Ultimate tensile strain ( $\epsilon_{tu,b}$ ) (%)			Number of crack		
	7 days	28 days	91 days	7 days	28 days	91 days	7 days	28 days	91 days	7 days	28 days	91 days	7 days	28 days	91 days	7 days	28 days	91 days	7 days	28 days	91 days	7 days	28 days	91 days
R-HFC-40-V7S3	36.4	49.6	60.7	14.6	18.6	21.3	65.8	69.0	78.6	8.17	9.74	8.82	3.03	3.42	2.83	5.42	5.56	5.09	1.76	1.31	1.83	8	7	10
R-HFC-50-V7S3	19.8	32.0	46.3	11.4	14.6	18.6	41.5	60.6	69.2	5.87	6.48	8.25	2.16	2.37	2.85	4.07	4.06	4.57	1.13	0.943	1.86	8	8	6
R-HFC-60-V7S3	12.7	23.9	36.1	9.11	12.8	16.4	29.9	51.5	52.0	4.25	6.50	7.77	1.49	2.44	2.76	2.97	3.77	4.05	1.63	1.03	1.30	7	9	8

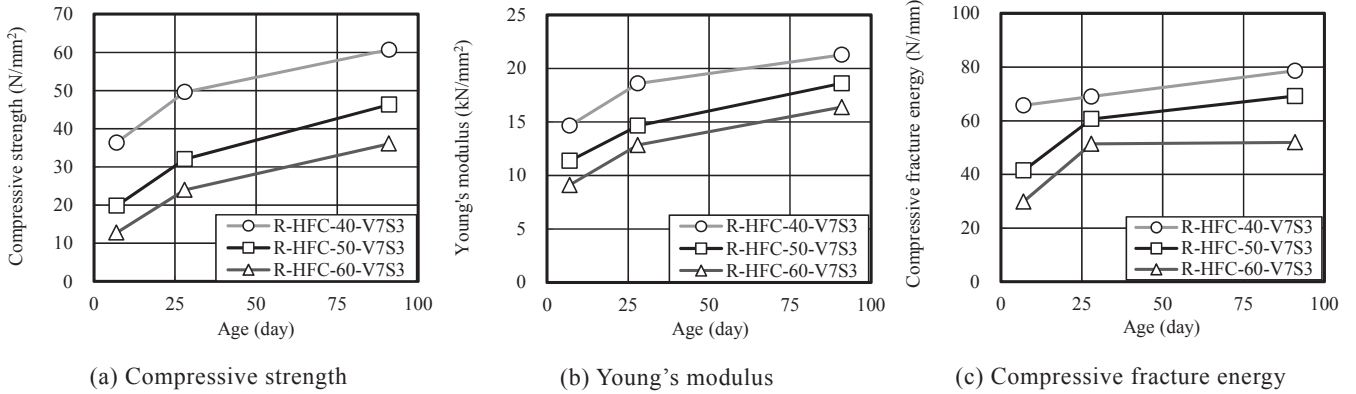


Fig.3 Compressive strength, young's modulus and compressive fracture energy – age relationship.

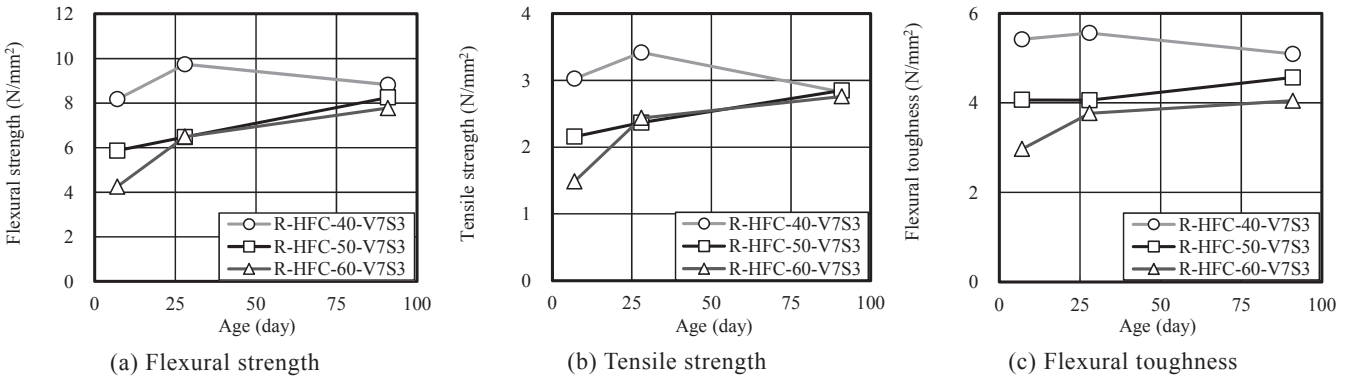
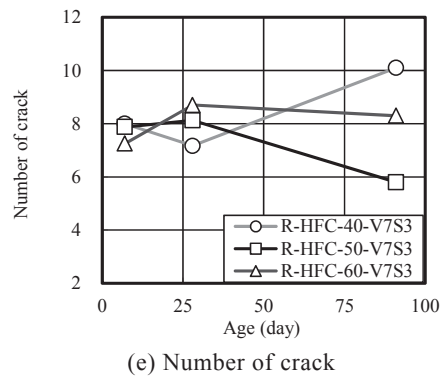
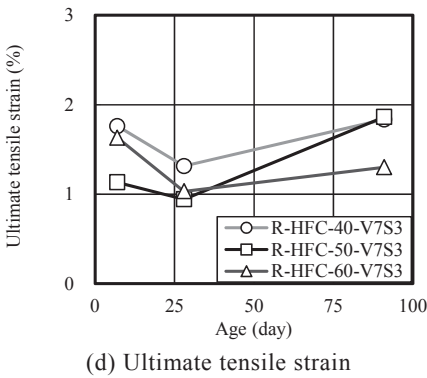


Fig.4 Flexural strength, tensile strength, flexural toughness, ultimate tensile strain and number of crack – age relationship.



が必要である。なお、材齢 91 日までの R-HFDFRC の  $f_{2b}$  は、W/B の相違により材齢の経過に伴う傾向は異なるものの、材齢 28 日以降であれば  $4\text{N/mm}^2$  程度以上となっており、十分な曲げ靱性を有していることがわかる。

次に、Fig.4(d)によれば、材齢 91 日までの R-HFDFRC の  $\epsilon_{tu,b}$  は、W/B の相違に係らず、材齢 28 日で最小値となっているが、W/B および材齢の相違に係らず 1%程度以上となっている。

最後に、Fig.4(e)によれば、材齢 91 日までの R-HFDFRC のひび割れ本数は、W/B の相違により材齢の経過に伴う傾向は異なるものの、6 本程度以上となっている。即ち、R-HFDFRC は材齢 91 日においても、十分な曲げ靱性およびひび割れ分散性を有していることがわかった。

今後、W/B の相違が  $f_{1b}$ 、 $F_{1b}$ 、 $f_{2b}$ 、 $\epsilon_{tu,b}$  およびひび割れ本数の経時変化に及ぼす影響について、詳細に検討を行う必要がある。

### 3.2 強度発現近似結果

#### (1) 圧縮強度発現

材齢 91 日までの R-HFDFRC の  $F_c$  および  $E$  に関して、土木学会コンクリート標準示方書 [施工編]<sup>8)</sup>(以下、JSCE と略記)および CEB-FIP Model Code 1990<sup>9)</sup>(以下、MC90 と略記)をベースとした近似式による近似を試みる。

JSCE ベース式：

$$F_c(t) = F_c(28) \cdot t / (\alpha \cdot t + \beta) \quad (3)$$

$$E(t) = \gamma \cdot \sqrt{F_c(t)} \quad (4)$$

MC90 ベース式：

$$F_c(t) = \exp \left[ s \left\{ 1 - (28/t)^{1/2} \right\} \right] \cdot F_c(28) \quad (5)$$

Table 4 Material constant and approximation error.

Specimen	Material constant				Approximation error of the formula (3) and (4) (%)						Approximation error of the formula (5) and (6) (%)					
					Compressive strength			Young's modulus			Compressive strength			Young's modulus		
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$s$	7 days	28	91	7 days	28	91	7 days	28	91	7 days	28	91
R-HFC-40-V7S3	0.763	5.25	2.60	0.334	-9.83	5.22	-0.464	1.58	1.04	-4.99	-2.35	0.000	-5.21	7.31	0.000	-5.87
R-HFC-50-V7S3	0.601	8.85	2.62	0.538	-13.4	9.07	-0.918	-4.34	5.94	-4.40	-5.61	0.000	-12.1	-1.55	0.000	-11.3
R-HFC-60-V7S3	0.552	10.7	2.63	0.680	-9.55	7.10	-0.758	-1.85	3.94	-3.79	-4.64	0.000	-10.1	0.344	0.000	-8.84

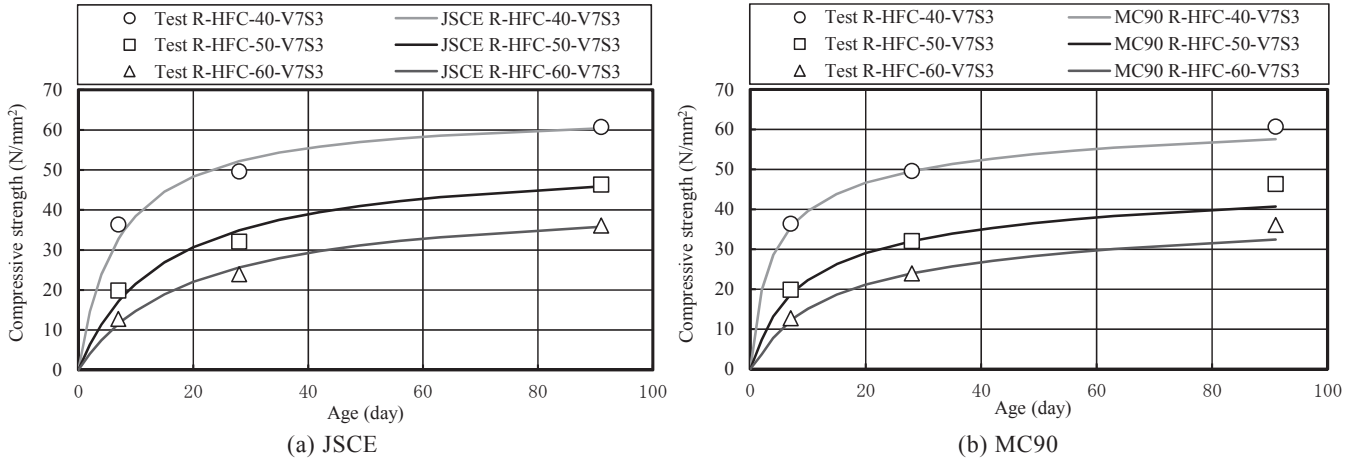


Fig.5 Compressive strength development.

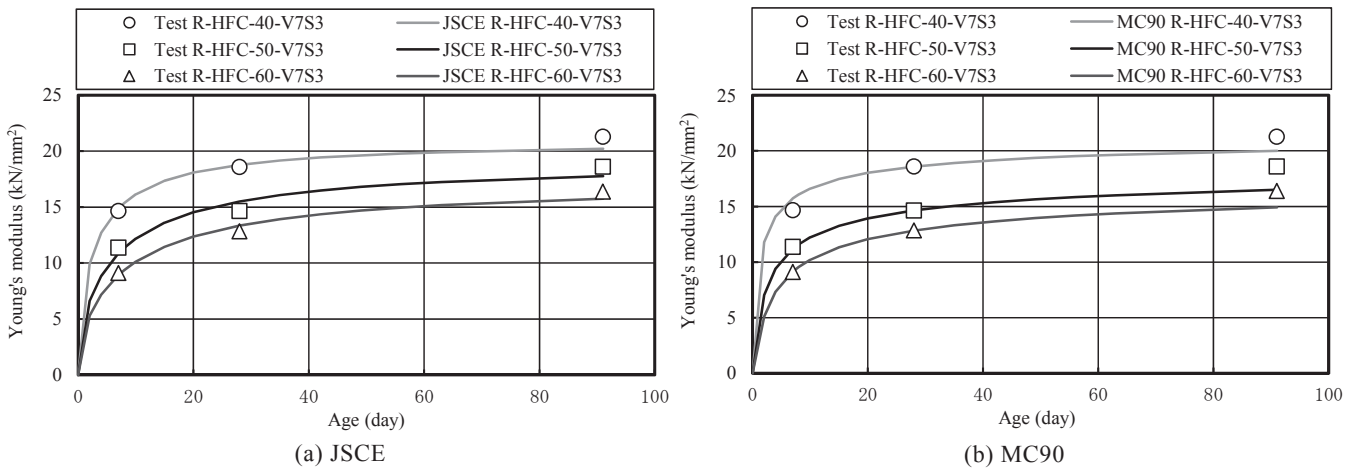


Fig.6 Young's modulus development.

$$E(t) = \sqrt{\exp \left[ s \left\{ 1 - (28/t)^{1/2} \right\} \right]} \cdot E(28) \quad (6)$$

ここに、 $t$ : 材齢(日)、 $F_c(28)$ および  $E(28)$ : 材齢 28 日における圧縮強度( $\text{N}/\text{mm}^2$ )およびヤング係数( $\text{kN}/\text{mm}^2$ ),  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  および  $s$ : 材料定数である。

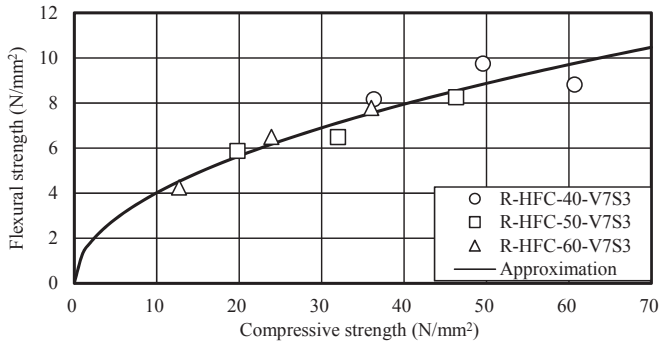
Table 4 に、式(3)~(6)の材料定数および各実験結果に対する式(3)~(6)の近似誤差を示す。また、Fig.5 および 6 に、1 軸圧縮試験により得られた、R-HFDFRC の  $F_c$  および  $E$  - 材齢関係を示す。なお、図中の曲線は式(3)~(6)による近似結果である。Table 4 によれば、材齢 91 日までの実験結果に対する式(3)による  $F_c$  の近似誤差は、+9.07~ -13.4%、式(4)による  $E$  の近似誤差は、+5.94~ -4.99%、式(5)による  $F_c$  の近似誤差は、0.000~ -12.1%、式(6)による  $E$  の近似誤差は、+7.31~ -11.3%となっている。材齢 91 日までの R-HFDFRC の  $F_c$  および  $E$  は、W/B の相違に係らず、式(3)~(6)により概ね近似可能である。ただし、 $F_c$

の場合、JSCE ベース式では材齢 7 日の近似誤差が、MC90 ベース式では材齢 91 日の近似誤差が大きくなっている。また、 $E$  の場合、MC90 ベース式では材齢 91 日の近似誤差が大きくなっている。

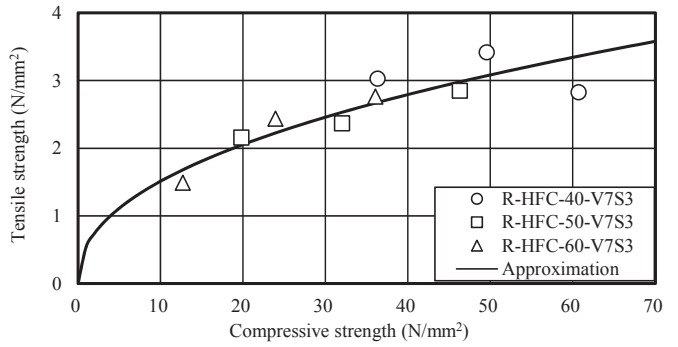
## (2) 曲げ強度発現

Fig.7 に、R-HFDFRC の 1 軸圧縮試験および 3 等分点曲げ試験により得られた、 $f_{1b}$  および  $F_{t,b} - F_c$  関係を示す。なお、図中の曲線は後述の式(7)および(8)による近似結果である。Fig.7(a)によれば、 $f_{1b} - F_c$  関係は、概ね一つの曲線で近似可能であると思われる。また、Fig.7(b)の  $F_{t,b} - F_c$  関係についても同様に、概ね一つの曲線で近似可能であると思われる。

コンクリートの  $f_{1b}$  および  $F_{t,b}$  は、一般的に  $F_c$  の累乗関数として表される<sup>9-11)</sup>。そこで、本研究においても、R-HFDFRC の  $f_{1b}$  および  $F_{t,b}$  に関して、以下の近似式による近似を試みる。



(a) Flexural strength



(b) Tensile strength

Fig.7 Flexural strength and tensile strength development.

Table 5 Material constant and approximation error.

Specimen	Material constant				Approximation error of the formula (7) and (8) (%)					
	Flexural strength		Tensile strength		Flexural strength			Tensile strength		
	A	B	C	D	7 days	28 days	91 days	7 days	28 days	91 days
R-HFC-40-V7S3					-7.17	-9.28	10.7	-11.5	-10.1	19.0
R-HFC-50-V7S3	1.29	0.493	0.545	0.443	-4.14	9.99	3.55	-5.13	6.96	4.58
R-HFC-60-V7S3					6.44	-4.97	-2.84	13.0	-8.68	-3.33

$$f_{l,b} = A \times F_c^B \quad (7)$$

$$F_{t,b} = C \times F_c^D \quad (8)$$

ここに、A、B、C および D：材料定数である。

Table 5 に、式(7)および(8)の材料定数および各実験結果に対する式(7)および(8)の近似誤差を示す。材齢 91 日までの実験結果に対する式(7)による  $f_{l,b}$  の近似誤差は、+10.7~−9.28%，式(8)による  $F_{t,b}$  の近似誤差は、+19.0~−11.5%となっている。材齢 91 日までの各 R-HFDFRC の  $f_{l,b}$  および  $F_{t,b}$  は、W/B の相違に係らず、式(7)および(8)により概ね近似可能である。即ち、材齢の相違する各種 R-HFDFRC の  $F_c$  から、 $f_{l,b}$  および  $F_{t,b}$  が推定できる可能性が高いことがわかった。ただし、R-HFDFRC の  $f_{l,b}$  および  $F_{t,b}$  は、 $F_c$  が  $50\text{N/mm}^2$  を超えると低下する傾向にあるため、本近似式の適用範囲は、 $F_c \leq 50\text{N/mm}^2$  とすべきである。

### 3.3 収縮試験結果

Fig.8 に、乾燥開始材齢を 7 日とした収縮試験により得られた、HFDFRC の収縮ひずみの経時変化を示す。

Fig.8 によれば、乾燥材齢 70 日の R-HFDFRC の収縮ひずみは、W/B=40%の場合(R-HFC-40-V7S3 :  $1789\mu$ )が最も小さく、次に W/B=60%の場合(R-HFC-60-V7S3 :  $1989\mu$ )、最後に W/B=50%の場合(R-HFC-50-V7S3 :  $2132\mu$ )となっている。本研究における調査に注目すると(前掲、Table 1 参照)、単位水量は、W/B=40%の場合が最も少ない。そのため、収縮ひずみは、W/B=40%の場合が最も小さくなった。また、W/B=50 および 60%の場合、単位水量は同程度である。しかし、単位粗骨材量は、W/B=50% < W/B=60%となっている。そのため、収縮ひずみは、W/B=50%の場合が最も大きくなったものと思われる。

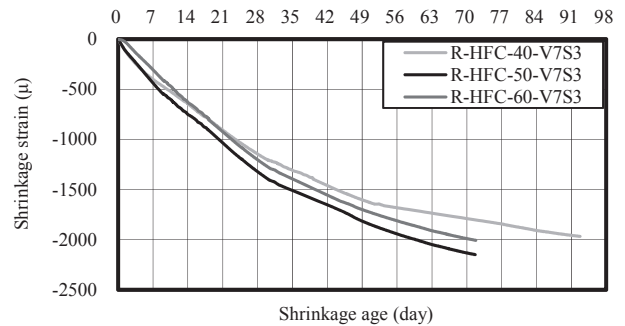
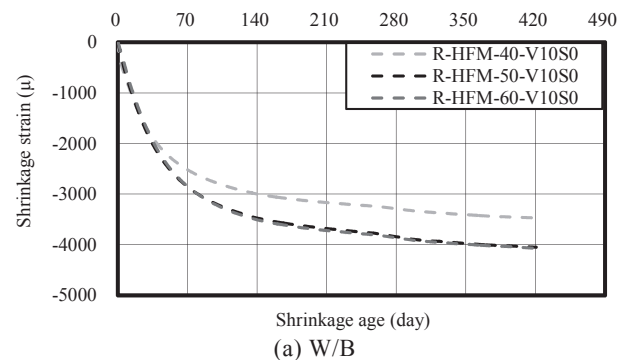
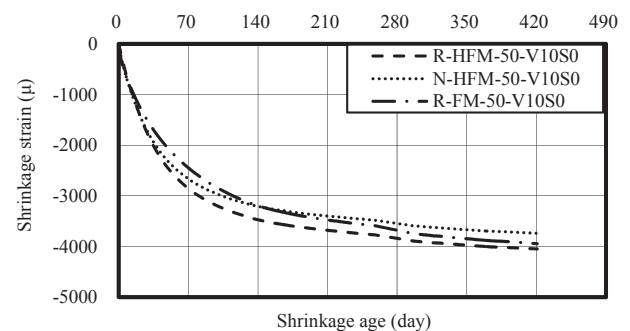


Fig.8 Shrinkage strain (HFDFRC).



(a) W/B



(b) Kind of DFRM

Fig.9 Shrinkage strain (DFRM).

Fig.9 に、乾燥開始材齢を 7 日とした収縮試験により得られた、DFRM の収縮ひずみの経時変化を示す。

まず、Fig.9(a)によれば、乾燥材齢 420 日の R-HFM の収縮ひずみは、W/B=40%の場合(R-HFM-40-V10S0 :  $3470\mu$ )が最も小さく、次に W/B=50%の場合(R-HFM-50-

V10S0 : 4048 $\mu$ ), 最後に W/B=60% の場合 (R-HFM-60-V10S0 : 4072 $\mu$ ) となっている. 本研究における調査に注目すると (前掲, Table 1 参照), 単位水量は, W/B=40% の場合が最も少ない. そのため, 収縮ひずみは, W/B=40% の場合が最も小さくなった. また, W/B=50% および 60% の場合, 単位水量は同程度である. しかし, 単位細骨材量 (細目) は, W/B=50% < W/B=60% となっており, 細骨材中の微粒分の影響で, 収縮ひずみは, W/B=60% の場合が最も大きくなったものと思われる.

次に, Fig.9(b) によれば, 乾燥材齢 420 日の R-HFM-50-V10S0 および N-HFM-50-V10S0 の収縮ひずみは, R-HFM-50-V10S0(4048 $\mu$ ) > N-HFM-50-V10S0(3740 $\mu$ ) となっている. 本研究における調査に注目すると (前掲, Table 1 参照), R-HFM-50-V10S0 と N-HFM-50-V10S0 の単位水量および単位細骨材量は同程度である. しかし, 本研究における骨材の物性に注目すると (前掲, Table 2 参照), 細骨材の表乾密度は, R-HFM-50-V10S0 < N-HFM-50-V10S0 となっており, 吸水率は, R-HFM-50-V10S0 > N-HFM-50-V10S0 となっている. そのため, 収縮ひずみは, R-HFM-50-V10S0 > N-HFM-50-V10S0 となったものと思われる. また, 乾燥材齢 420 日の R-HFM-50-V10S0 および R-FM-50-V10S0 の収縮ひずみは, R-HFM-50-V10S0 (4048 $\mu$ ) > R-FM-50-V10S0(3945 $\mu$ ) となっている. 本研究における調査に注目すると (前掲, Table 1 参照), 使用した細骨材は, R-HFM-50-V10S0 では中目および細目, R-FM-50-V10S0 では中目のみである. 細骨材中の微粒分の影響で, 収縮ひずみは, R-HFM-50-V10S0 > R-FM-50-V10S0 となったものと思われる.

Fig.10 に, 乾燥開始材齢を 7 日とした収縮試験により得られた, HFDRC および DFRM(W/B=50%) の収縮ひ

ずみの経時変化を示す.

まず, Fig.10(a) によれば, 乾燥材齢 49 日の R-HFC-50-V7S3 および R-HFC-50-V10S0 の収縮ひずみは, R-HFC-50-V7S3(1815 $\mu$ ) < R-HFC-50-V10S0(1997 $\mu$ ) となっている. 補強用繊維として S を混合使用することで, 収縮ひずみを 182 $\mu$  低減できることがわかった.

次に, Fig.10(b) によれば, 乾燥材齢 49 日の R-HFC-50-V10S0 と R-HFM-50-V10S0 の収縮ひずみは, R-HFC-50-V10S0(1997 $\mu$ ) < R-HFM-50-V10S0(2443 $\mu$ ) となっている. 粗骨材の混入に伴い, モルタルペーストが減少することにより, 収縮ひずみは, 446 $\mu$  低下することがわかった.

即ち, HFDRC に S および粗骨材を混入することにより, 収縮ひずみを大幅に低減可能であることがわかった.

#### 4. まとめ

本研究の範囲において得られた知見を, 以下に示す.

- 1) 再生細・粗骨材を使用した高流動高靱性コンクリートは, 材齢 91 日においても, 十分な曲げ靱性およびひび割れ分散性を有している.
- 2) 再生細・粗骨材を使用した高流動高靱性コンクリートの圧縮強度およびヤング係数の長期強度発現について, 本研究で示した実験式により概ね近似可能である.
- 3) 圧縮強度が 50N/mm<sup>2</sup> 以下の範囲において, 材齢の相違する再生細・粗骨材を使用した高流動高靱性コンクリートの圧縮強度から, 曲げ強度および引張強度が推定できる可能性が高い.
- 4) 再生細骨材を使用した高流動高靱性セメント複合材料に鋼繊維および再生粗骨材を混入することで, 収縮ひずみを大幅に低減可能である.

#### 謝辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た, 元東海大学学生の伊藤みなみさん, 椎名光君, 竹内純平君および吉川大貴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: 15K06307, 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, pp.1-10(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) 渡辺健, 渡部憲: 再生骨材を使用した高流動繊維補強コンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文集, vol.39, No.1, pp.271-276(2017.7).
- 4) 渡部憲, 大岡督尚, 白井伸明, 森泉和人: 各種コン

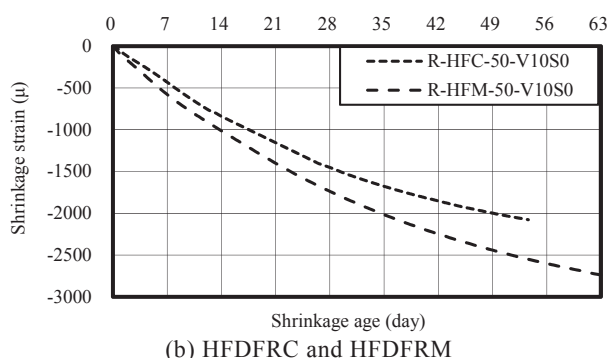
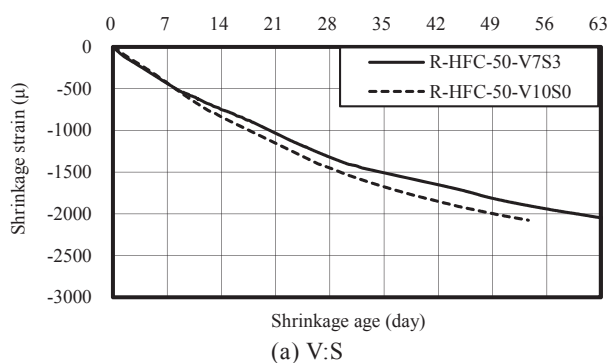


Fig.10 Shrinkage strain (HFDRC and HFDRCM).

- 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).
- 5) 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).
  - 6) 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).
  - 7) 渡部憲，佐藤史康，三浦康彰，渋谷恒太：各種細骨材を使用した高靱性セメント複合材料の引張軟化挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.287-292(2010.7).
  - 8) 土木学会：平成 8 年制定 コンクリート標準示方書[施工編]，pp.190-191(1996.3).
  - 9) CEB：CEB-FIP MODEL CODE1990，Thomas Telford
  - 10) 近藤，友澤史紀：コンクリート工学 ハンドブック，朝倉書店，pp.490(1965.10).
  - 11) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第 472 号，pp.11-16(1995.6).