

再生細骨材を使用した高流動高靱性セメント複合材料の 長期強度の発現性状

丸山 裕生^{*1} 渡部 憲^{*2} 大津 直人^{*3}

Long-Term Strength Development Properties of High-Fluidity Ductile-Fiber-Reinforced Cementitious Composites Using Recycled Fine Aggregate

by

Yumi MARUYAMA^{*1}, Ken WATANABE^{*2} and Naoto OTSU^{*3}

(Received on Sep. 27, 2016 and accepted on Nov. 10, 2016)

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 DFRCC (HFDFRCC) using recycled fine aggregate. The excellent crack dispersing and fracture toughness of HFDFRCC using recycled fine aggregate (R-HFDFRCC) were confirmed. However, research on the long-term properties of R-HFDFRCC has not been carried out. To apply R-HFDFRCC to RC structures, it is necessary to clarify the material properties (long-term strength development properties) of R-HFDFRCC, and so tests were carried out. It is concluded that the equation proposed in this study can be used to approximate the strength development of R-HFDFRCC.

Keywords: Recycled fine aggregate, Ductile-fiber-reinforced cementitious composites, High-fluidity, Long-Term Strength Development Properties

1. はじめに

近年、地球環境問題に対する取り組みは重要な課題である。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、渡部ら¹⁾も、再生骨材の更なる有効利用技術確立のため、高靱性セメント複合材料(以下、DFRCCと略記)²⁾への再生細骨材の適用性を検討してきた。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²⁾。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³⁾、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、大津ら⁴⁾は、高流動コンクリートに注目し、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に、混和材としてフライアッシュ、細骨材として再生細骨材を使用した高流動DFRCC(以下、HFDFRCCと略記)の材料特性について検討を行った。その結果、水結合材比(W/B)=50~60%の範囲において、PVA繊維を単独使用した場合、再生細骨材を使用したHFDFRCCは、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等の知見を得た。しかし、再生細骨材を使用したHFDFRCCの強度発現について、長期材齢での検討は行っていない。再生細骨材を使用したHFDFRCCを鉄筋コンクリート構造物に適用しようとする場合、耐

*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

*3 株式会社スガテック

Table 1 Outline of specimens.

Specimen	Fine aggregate	Water-binder ratio (W/B) (%)	Sand-binder ratio (S/B) (%)	Fiber volume fraction (V_f) (vol.%)	Replacement ratio of fly ash (%)
R-HFFRM-40	R	40	40	3.0	20
R-HFDFRCC-50		50	65		
R-HFDFRCC-60		60	90		
N-HFDFRCC-50	N	50	65		
R-DFRCC-50	R	50	65		-

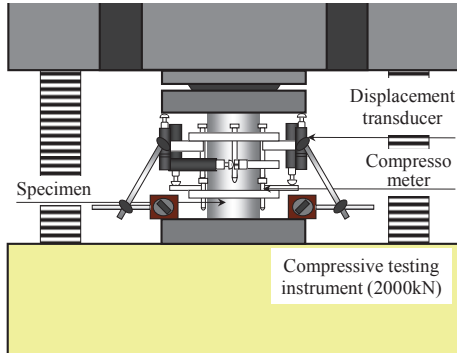


Fig.1 Compressive loading system.

久性の観点からも、再生細骨材を使用した HFDFRCC の強度発現等の長期性状について十分検討しておく必要がある。

以上より、本研究では、再生細骨材を使用した HFDFRCC に関する材齢 91 日までの強度発現について検討を行った。また、圧縮強度および曲げ強度に関する強度発現について、既往の強度発現式をベースとした近似式をさらに簡便な実験式で表現することを試みた。

2. 実験概要

本研究では、Table 1 に示す繊維補強モルタル(以下、FRM と略記)の 1 軸圧縮試験および 3 等分点曲げ試験を、材齢 7, 28 および 91 日で行った。FRM の種類は、天然細骨材 {N, 砕砂(最大骨材寸法: 2.5mm, 表乾密度: 2.64g/cm³, 吸水率: 1.17%, 粗粒率: 2.86)と山砂(最大骨材寸法: 1.2mm, 表乾密度: 2.60g/cm³, 吸水率: 2.07%, 粗粒率: 1.40)を混合}を使用した HFDFRCC(N-HFDFRCC), 再生細骨材 {R, 中目(最大骨材寸法: 2.5mm, 表乾密度: 2.58g/cm³, 吸水率: 2.98%, 粗粒率: 2.61)と細目(最大骨材寸法: 0.6mm, 表乾密度: 2.54g/cm³, 吸水率: 4.41%, 粗粒率: 1.16)を混合}を使用した高流動 FRM(R-HFFRM), HFDFRCC(R-HFDFRCC)および R(中目)を使用した DFRCC(R-DFRCC)の 4 種類とした。セメントは普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³)を使用し、W/B は 40, 50 および 60%とした。なお、N-HFDFRCC および R-DFRCC は比較対象であり W/B を 50%のみとした。繊維は PVA 繊維(径: 0.2mm, 長さ: 18mm, 弾性係数: 27kN/mm², 引張強度: 975N/mm²)を使用し、繊維体積混入率(V_f)を 3.0%とした。また、文献⁴⁾より、W/B=40%において PVA 繊維を単独使用した場合、十分なひび割れ

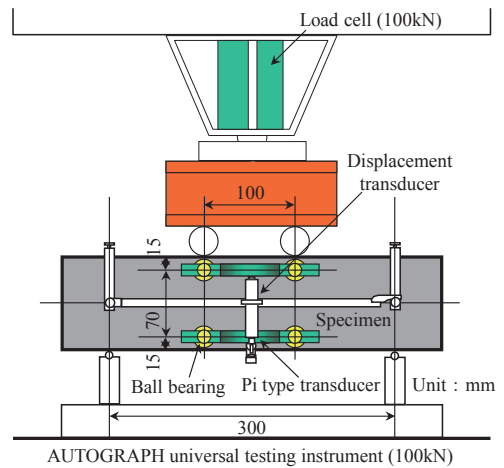


Fig.2 Trisecting-point loading system.

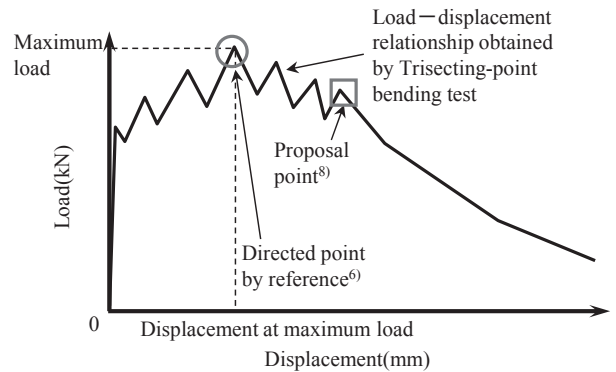


Fig.3 Image of load-displacement relationship.

分散性を有していないとの知見を得た。そこで、本研究では、W/B=40%のみ試験体名を HFFRM とした。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: 2.30g/cm³, HFFRM および HFDFRCC のみセメント置換率 20%で使用)を使用した。

2.1 1 軸圧縮試験

1 軸圧縮試験の概要を Fig.1 に示す。荷重は、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・横ひずみおよび荷重盤間変位とした。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 日で脱型し、試験時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^{5,2)}に示す手法により算出した(文献^{5,2)}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⁶⁾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

Table 2 Strength test results.

Speciment	Compressive strength (F_c) (N/mm ²)			Young's modulus (E) (kN/mm ²)			Compressive fracture energy (G_{Fc}) (N/mm)			Flexural strength (f_{1b}) (N/mm ²)			Tensile strength (F_{tb}) (N/mm ²)			Flexural toughness (f_{2b}) (N/mm ²)			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-HFFRM-40	30.7	43.2	55.7	14.1	17.0	20.4	42.1	47.8	63.4	6.71	8.20	6.75	2.30	2.79	2.37	3.93	4.35	3.00	2.35	2.17	2.29	4.2	3.7
R-HFDFRCC-50	19.7	28.5	41.0	10.7	13.5	16.7	32.9	42.4	54.2	5.20	5.78	7.31	1.72	1.90	2.49	3.88	3.64	4.09	4.40	3.24	3.09	8.0	6.0	5.8
R-HFDFRCC-60	12.5	21.3	31.2	8.04	11.4	15.0	27.1	39.8	45.4	3.76	5.82	6.40	1.29	1.99	2.20	2.27	4.18	3.94	2.06	3.47	3.20	6.7	7.2	6.8
N-HFDFRCC-50	19.2	27.9	40.7	10.7	12.7	14.9	25.2	40.3	42.0	4.91	5.98	7.62	1.71	2.03	2.57	3.92	4.47	5.07	3.86	3.94	2.84	9.8	8.5	6.8
R-DFRCC-50	26.0	33.4	39.2	12.5	14.6	16.6	46.0	51.1	51.6	6.62	7.69	7.81	2.12	2.40	2.71	4.27	3.95	3.63	4.45	2.95	1.99	7.8	6.3	6.2

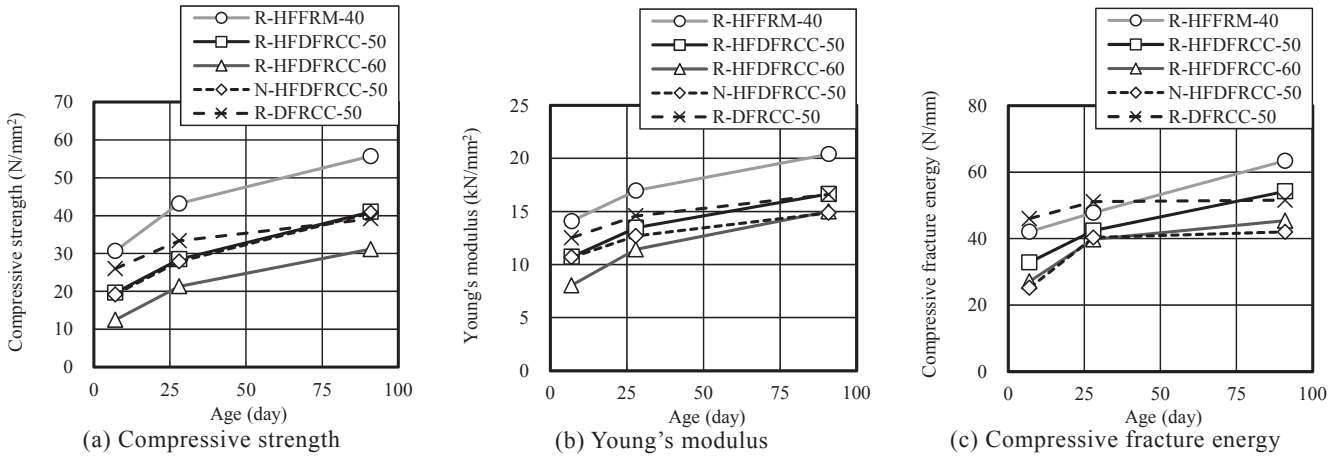


Fig.4 Compressive strength, young's modulus and compressive fracture energy – age relationship.

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日で脱型し、試験時まで標準養生とした。

曲げ靱性は文献⁷⁾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。

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

ここに、 f_{1b} : 曲げ強度(N/mm²)、 P : 荷重(N)、 ℓ : 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。

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

ここに、 f_{2b} は曲げ靱性係数(N/mm²)； T_b は原点から δ_{tb} までの曲線下の面積(N・mm)； δ_{tb} はスパン中央部のたわみ(mm)； ℓ はスパン(mm)； b は破壊断面の幅(mm)； h は破壊断面の高さ(mm)である。

なお、本研究では、 f_{2b} を δ_{tb} が7.5mmとなる時点での値とした。

3等分点曲げ試験で得られた $P-\delta_{tb}$ 関係の中には、最大荷重以降もひび割れ分散を繰り返す、その後、荷重が再上昇することなく急激に低下し始める場合がある(Fig.3参照)。このような場合、文献⁶⁾に示される手法では、最大荷重時において引張強度($F_{t,b}$)および引張終局ひ

ずみ($\epsilon_{tu,b}$)を算出するため、 $\epsilon_{tu,b}$ を過小評価している可能性がある。そこで、本研究では、文献⁶⁾を基に荷重が再上昇することなく急激に低下し始める位置(Fig.3の四角印位置)において $F_{t,b}$ および $\epsilon_{tu,b}$ を算出した⁸⁾。

3. 結果と考察

3.1 強度発現試験結果

Table 2に、実験により得られたFRMに関する材齢91日までの強度試験結果を示す。

(1) 圧縮強度発現

Fig.4に、1軸圧縮試験により得られた材齢91日までのFRM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。

まず、Fig.4(a)および(b)によれば、材齢91日までのR-HFFRMおよびR-HFDFRCCの F_c および E は、W/Bの相違に係らず、材齢の経過に伴い増大している。また、W/B=50%において、材齢91日までのR-HFDFRCCおよびN-HFDFRCCの F_c および E は、材齢の相違に係らず、大きな差はない。さらに、材齢91日までのR-DFRCC-50およびR-HFDFRCC-50の F_c および E は、材齢7および28日ではR-HFDFRCC-50<R-DFRCC-50となっているが、材齢91日の F_c はR-HFDFRCC-50>R-DFRCC-50となり、 E はR-HFDFRCC-50≒R-DFRCC-50となっている。文献⁹⁾によれば、フライアッシュを使用したコンクリートは長期強度の増進が大きいとされており、R-HFDFRCC-50においてもコンクリートと同様の傾向が確認できた。

次に、Fig.4(c)によれば、材齢91日までのR-HFFRM

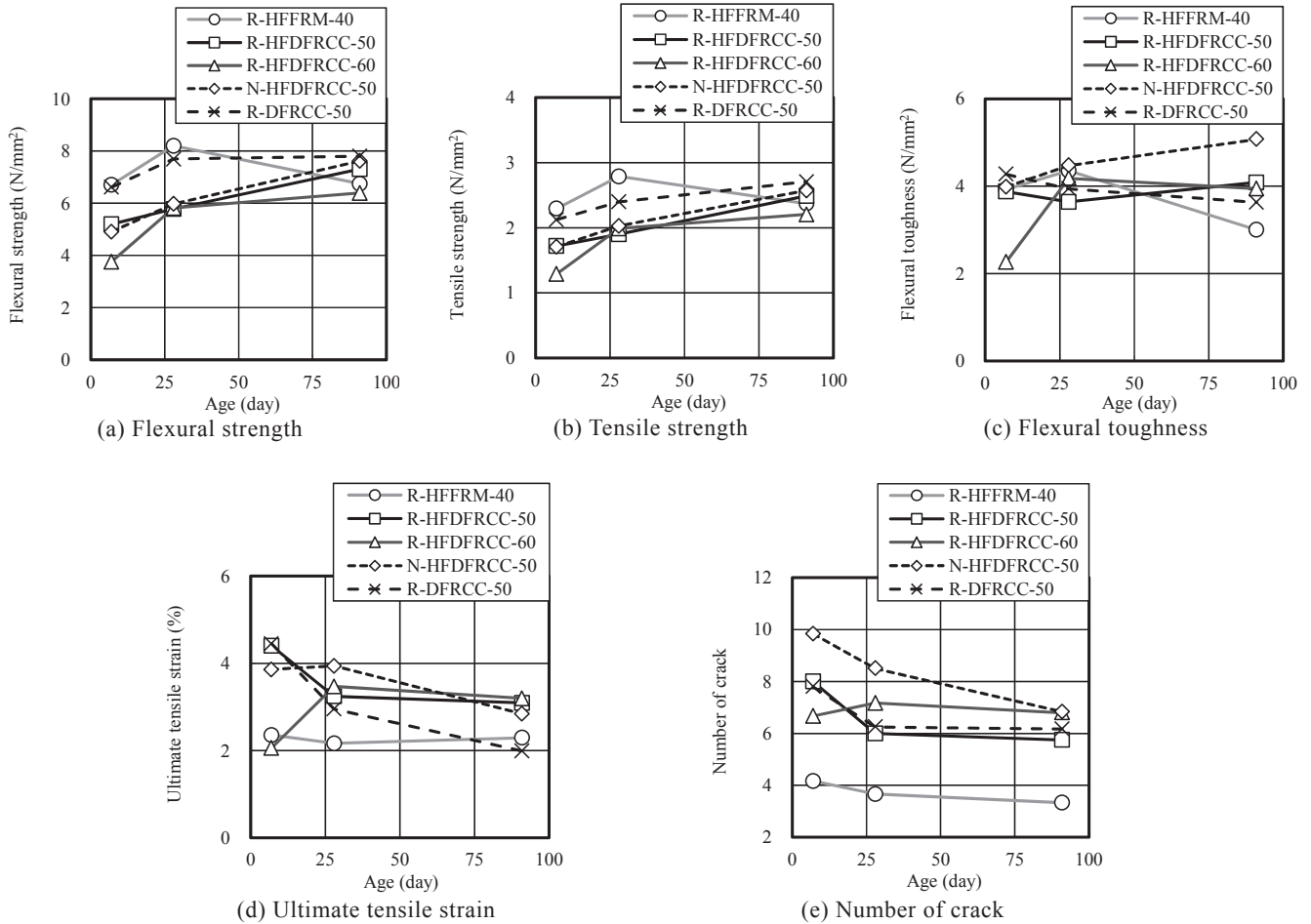


Fig.5 Flexural strength, tensile strength, flexural toughness, ultimate tensile strain and number of crack—age relationship.

および R-HFDFRCC の 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。また、W/B=50%において、材齢 91 日までの R-HFDFRCC および N-HFDFRCC の G_{Fc} は、R-HFDFRCC > N-HFDFRCC となっている。文献⁴⁾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-HFFRM の G_{Fc} は、N-HFFRM と比較して高くなる傾向を示しており、本研究の傾向と同様である。さらに、材齢 91 日までの R-DFRCC-50 および R-HFDFRCC-50 の G_{Fc} は、材齢 7 および 28 日では R-DFRCC-50 > R-HFDFRCC-50 となっているが、材齢 91 日では R-DFRCC-50 < R-HFDFRCC-50 となっている。これは、前掲、Fig.4(a)および(b)同様、フライアッシュの置換に伴う R-HFDFRCC-50 の長期強度の増進に起因するものと考えられる。

(2) 曲げ強度発現

Fig.5 に、3 等分点曲げ試験により得られた材齢 91 日までの FRM の f_{1b} 、 $F_{t,b}$ 、 f_{2b} 、 $\epsilon_{tu,b}$ およびひび割れ本数—材齢関係を示す。

まず、Fig.5(a)および(b)によれば、材齢 91 日までの R-HFFRM および R-HFDFRCC の f_{1b} および $F_{t,b}$ は、R-HFFRM を除いて、材齢の経過に伴い増大している。これは、W/B=40%において、材齢の経過に伴うマトリックス強度の増大により、ひび割れ分散性に関する補強効

果が低下したこと等が考えられる。また、W/B=50%において、材齢 91 日までの R-HFDFRCC および N-HFDFRCC の f_{1b} および $F_{t,b}$ は、材齢の相違に係らず、大きな差はない。さらに、材齢 91 日までの R-DFRCC-50 および R-HFDFRCC-50 の f_{1b} および $F_{t,b}$ は、材齢の相違に係らず、R-DFRCC-50 > R-HFDFRCC-50 となっているが、材齢 91 日ではその差が小さくなっている。これは、前掲、Fig.4 (a)および(b)同様、フライアッシュ混入による影響であると考えられる。

次に、Fig.5(c)によれば、材齢 91 日までの HFDFRCC の $f_{2b}(\delta_{tb}=7.5\text{mm}$ までの平均曲げ応力)は、W/B および骨材種類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 4N/mm² 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。

さらに、Fig.5(d)によれば、材齢 91 日までの HFDFRCC の $\epsilon_{tu,b}$ は、W/B および骨材種類の相違により材齢の経過に伴う傾向は異なるものの、2%程度以上となっている。

最後に、Fig.5(e)によれば、材齢 91 日までの HFDFRCC のひび割れ本数は、W/B および骨材種類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、HFDFRCC 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。

Table 3 Material constant and approximation error.

Speciment	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		
	α	β	γ	s	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-HFFRM-40	0.712	6.24	2.62	0.380	-12.2	6.98	-0.645	-3.48	4.83	4.40	-3.72	0.00	-8.16	-0.271	0.00	-9.32
R-HFDFRCC-50	0.616	7.94	2.51	0.443	-17.3	11.2	-1.11	-5.29	4.71	-3.69	-7.13	0.00	-15.3	1.09	0.00	-10.8
R-HFDFRCC-60	0.585	9.46	2.47	0.587	-12.0	8.39	-0.870	2.52	4.22	-8.32	-5.22	0.00	-11.4	6.28	0.00	-13.4
N-HFDFRCC-50	0.604	8.15	2.39	0.452	-17.8	11.7	-1.16	-11.1	5.25	1.91	-7.55	0.00	-16.2	-5.33	0.00	-5.74
R-DFRCC-50	0.809	4.19	2.54	0.269	-8.76	4.29	-0.366	-0.91	2.80	-4.26	-1.79	0.00	-3.97	2.13	0.00	-6.63

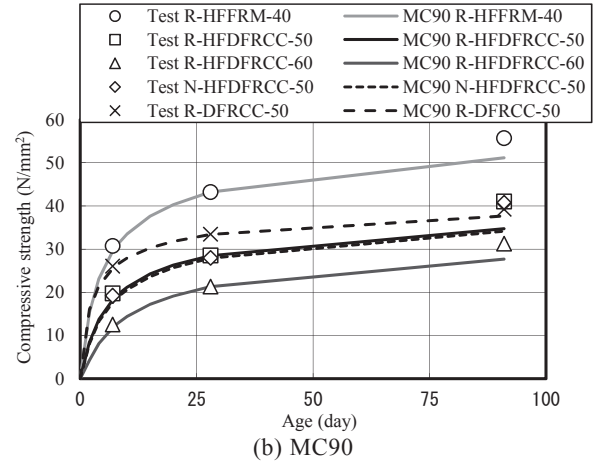
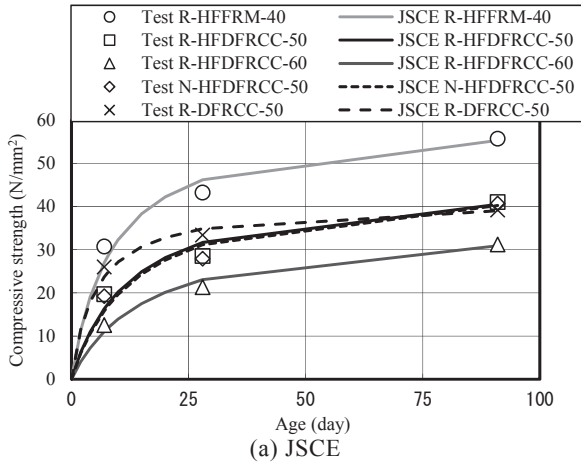


Fig.6 Compressive strength development.

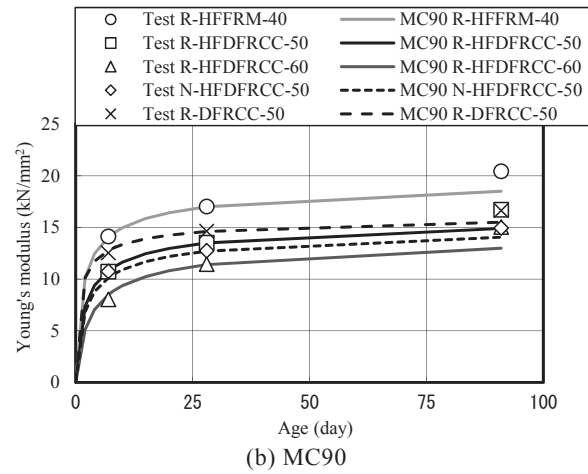
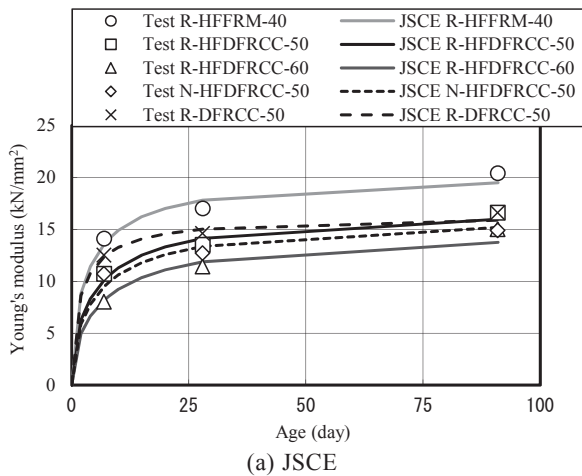


Fig.7 Young's modulus development.

3.2 強度発現近似結果

(1) 圧縮強度発現

材齢 91 日までの FRM 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]¹⁰⁾(以下、JSCE と略記) および CEB-FIP Model Code 1990¹¹⁾(以下、MC90 と略記) をベースとした近似式をさらに簡便な実験式で表現することを試みる。

JSCE ベース式：

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

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

MC90 ベース式：

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

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

ここに、 t は材齢(日)； $F_c(28)$ および $E(28)$ は FRM の 28 日圧縮強度(N/mm²) およびヤング係数(kN/mm²)； α 、 β 、 γ および s は材料定数である。

Table 3 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.6 および 7 に、1 軸圧縮試験により得られた、FRM に関する F_c および E

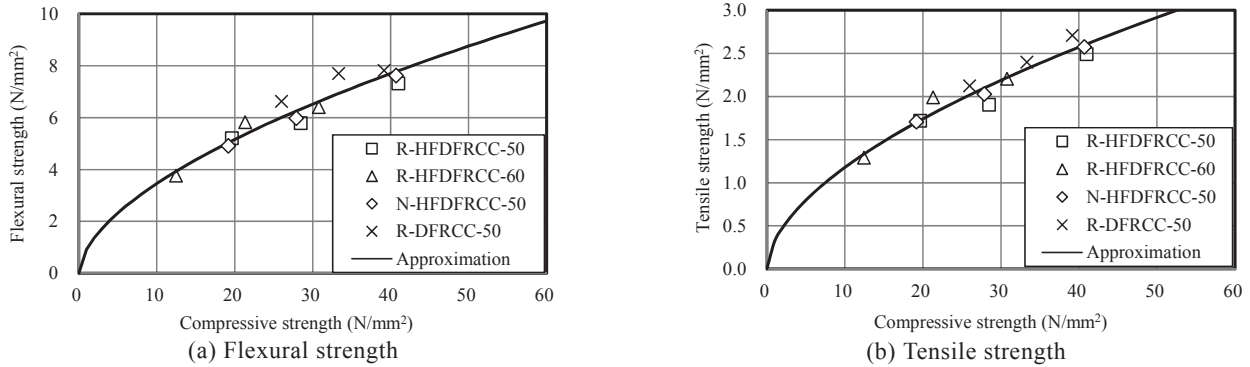


Fig.8 Flexural strength and tensile strength development.

Table 4 Material constant and approximation error.

Specimen	Material constant				Approximation error of the formula (7) and (8) (%)					
	Flexura strength		Tensile strength		Flexural strength			Tensile strength		
	A	B	C	D	7 days	28 days	91 days	7 days	28 days	91 days
R-HFDFRCC-50	0.9174	0.5766	0.3215	0.5638	-1.73	9.53	6.80	0.304	11.7	4.80
R-HFDFRCC-60					4.56	-7.90	3.47	3.50	-9.27	0.675
N-HFDFRCC-50					2.66	4.61	2.02	-0.356	3.59	1.01
R-DFRCC-50					-9.27	-9.90	-2.59	-4.98	-3.17	-6.09

一材齢関係を示す。なお、図中の曲線は式(3)~(6)による近似結果である。Table 3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、+11.7~ -17.8%、式(4)による E の近似誤差は、+5.25~-11.1%、式(5)による F_c の近似誤差は、0.00~-16.2%、式(6)による E の近似誤差は、+6.28~-13.4%となっている。材齢91日までのFRMの F_c および E は、W/B および骨材種類の相違に係らず、式(3)~(6)により概ね近似可能である。ただし、JSCE ベース式では、材齢7日の近似誤差が大きくなり、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.8 に、DFRCC に関する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.8(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.8(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(例えば、11, 12 および 13)。そこで、本研究においても、DFRCC の f_{1b} および $F_{t,b}$ に関して、以下の近似式をさらに簡便な実験式で表現することを試みる。

$$f_{1b} = A \times F_c^B \quad (7)$$

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

ここに、 A 、 B 、 C および D は材料定数である。

Table 4 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_{1b} の近似誤差は、

-9.90~+9.53%、式(8)による $F_{t,b}$ の近似誤差は、-9.27~+11.7%となっている。材齢91日までの各DFRCCの f_{1b} および $F_{t,b}$ は、W/B および骨材種類の相違に係らず、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DFRCCの F_c から、 f_{1b} 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。

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) 水結合材比=50~60%とした場合、再生細骨材を使用した高流動高靱性セメント複合材料は、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。
- 2) 繊維補強モルタル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) 材齢の相違する各種高靱性セメント複合材料の圧縮強度から、曲げ強度および引張強度が推定できる可能性が高い。

謝辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た、現東海大学学生の柳下陽平君、元東海大学学生の原口稔也君、小嶋真慈君および松竹友輝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) 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).
- 2) 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).
- 3) 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).
- 4) 大津直人，渡部憲：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，コンクリート工学年次論文集，vol.38，No.1(2016.4).
 - 5) 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).
 - 6) 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).
 - 7) 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).
 - 8) 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).
 - 9) 日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・設計指針・同解説，日本建築学会，204pp. (2007.10).
 - 10) 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).
 - 11) CEB：CEB-FIP MODEL CODE1990，Thomas Telford
 - 12) 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).
 - 13) 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).