

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 強度特性および膨張収縮特性

安西 拓巳^{*1} 渡部 憲^{*2}

Strength Properties and Expansion-Shrinkage Properties of High-Fluidity Ductile-Fiber-Reinforced Cementitious Composite Using Recycled Fine Aggregate

by

Takumi ANZAI^{*1} and Ken WATANABE^{*2}

(Received on Sep. 30, 2019 and accepted on Nov. 7, 2019)

Abstract

Research on recycled aggregate is actively being carried out in the concrete industry. To promote the recycling of concrete more extensively, it is necessary to develop new technologies for effectively using recycled aggregate. As an example, research on ductile-fiber-reinforced cementitious composite (DFRCC) using recycled fine aggregate has been reported. DFRCC has multiple cracking characteristics and much improved toughness during bending, tension and compression fracture. However, due to large shrinkage strain, there are few examples of construction using DFRCC. A conceivable method for controlling the shrinkage strain is to add an expansive additive and a shrinkage-reducing admixture. To evaluate the effects of the additive and admixture on the strength properties and expansion-shrinkage properties of high-fluidity DFRCC using recycled fine aggregate (R-HFDFRCC), we conducted a compressive test, three-point bending test, restrained expansion test and free expansion-shrinkage test on the R-HFDFRCC. As a result, we conclude that the amount of expansive additive added, the difference of expansive additive, the mixing of expansive additive, and the addition or removal of shrinkage-reducing admixture have an influence on the mechanical properties of R-HFDFRCC such as the compressive toughness and flexural toughness. R-HFDFRCC with water-binder ratios ranging from 40% to 60% showed sufficient flexural toughness and crack dispersion performance even when an expansive additive or shrinkage-reducing admixture was added.

Keywords: Recycled fine aggregate, DFRCC, Expansive additive, Shrinkage-reducing admixture

1. はじめに

近年、地球環境問題に対する社会的関心の高まりから、コンクリートの分野においても、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り、その一例として、再生細骨材を使用した高靱性セメント複合材料(以下、DFRCCと略記)に関する研究なども報告されている¹⁾。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。その理由として、流動性等の施工性が劣る、収縮ひずみが大きくなる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、既存の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ている。

このような背景から、筆者の一人らは、DFRCCのワーカビリティの改善および再生骨材の用途拡大を目的とし、再生細骨材を使用したモルタルベースの高流動DFRCC(以下、R-HFDFRMと略記)を開発した⁴⁾。次の段階として、収縮ひずみ低減に関する検討が必要である。既往の研究⁵⁾では、水結合材比を50%としたR-HFDFRMの乾燥収縮ひずみは、乾燥材齢6ヶ月において3500 μ 以上となることがわかっている。JASS 5⁶⁾によれば、一般的なコンクリート(計画供用期間の級が長期および超長期)の乾燥収縮ひずみは、乾燥材齢6ヶ月で800 μ 以下と規定されており、R-HFDFRMの収縮ひずみ低減は重要な課題である。一般的なコンクリートの収縮ひずみ低減手法として、膨張材および収縮低減剤の添加が挙げられる。超高強度ひずみ硬化型セメント系材料や合成短繊維を混入した高強度軽量骨材コンクリートへの、膨張材および収縮低減

^{*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 Outline of specimens.

Specimen	Water-binder ratio (W/B) (%)	Sand-binder ratio (S/B) (%)	Fiber volume fraction (V _f) (vol.%)	Replacement ratio of fly ash (%)	Unit expansive additive amount (EX) (kg/m ³)	Expansive additive mixing ratio (LB:CSA)	Addition amount of shrinkage reducing admixture (Cwt.×%)	Restrained expansion test	Free expansion-shrinkage test	
RHM40-EX0	40	40	3	20	0	0:0	0	-	-	
RHM40-EX80-10:0					80	10:0		-	-	
RHM50-EX0					0	0:0		○	○	
RHM50-EX0-SRA2	50	65			40	10:0	2	○	○	
RHM50-EX40-10:0								○	-	
RHM50-EX40-0:10								-	-	
RHM50-EX80-10:0					80	10:0		○	○	
RHM50-EX80-0:10								○	○	
RHM50-EX80-5:5						5:5		○	○	
RHM50-EX80-10:0-SRA2						10:0	2	○	○	
RHM50-EX80-0:10-SRA2								-	-	
RHM50-EX120-10:0					120	10:0		○	-	
RHM50-EX120-0:10								-	-	
RHM60-EX0	60	90			0	0:0	0	-	-	
RHM60-EX80-10:0					80	10:0		-	-	

剤の適用性に関する研究報告もなされている^{7,8)}が、今後、DFRCC への適用性に関する研究事例をさらに蓄積しておく必要がある。

以上より、本研究では、R-HFDFRM の収縮ひずみ低減を目的とし、一般的なコンクリートにおける標準使用量以上の膨張材を添加した R-HFDFRM において、膨張材を添加していない場合と比較して 1000μ 以上の収縮ひずみを低減することを目標とした上で、強度特性および膨張収縮特性について検討を行った。なお、一般的なコンクリートでは、標準使用量の膨張材を添加した場合(文献⁹⁾では 30kg/m^3)、膨張材を添加していない場合と比較して、 150μ 以上の収縮ひずみ低減効果が期待できるとされている¹⁰⁾。

2. 実験概要

本研究では、Table 1 に示す R-HFDFRM の 1 軸圧縮試験、3 等分点曲げ試験、拘束膨張試験および自由膨張収縮試験を行った。

2.1 調査概要

(1) 使用材料

骨材は、等級が M 相当(今回実施している密度及び吸水率試験の結果から判断¹¹⁾)の再生細骨材{中目(最大骨材寸法: 2.5mm , 表乾密度: 2.51g/cm^3 , 絶乾密度: 2.45g/cm^3 , 吸水率: 3.66% , 粗粒率: 2.40)と細目(最大骨材寸法: 0.6mm , 表乾密度: 2.54g/cm^3 , 絶乾密度: 2.42g/cm^3 , 吸水率: 4.34% , 粗粒率: 1.20)を混合}を使用した。セメントは、普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm^3)を使用した。繊維は、PVA 繊維(径: 0.2mm , 長さ: 18mm , 弾性係数: 27kN/mm^2 , 引張強度: 975N/mm^2)を使用し、繊維体積混入率(V_f)を 3% とした。混和材料は、高性能 AE 減水剤、分離低減材、フライアッシュ II 種(密度: 2.29g/cm^3 , セメント置換率 20% で使用)、膨張材(EX)および収縮低減剤(SRA)を使用した。EX は、コンクリートに一般的に使用されている¹²⁾石灰系(LB, 密度: 3.14g/cm^3)およびカルシウム・サルフォ・アルミネート系(CSA, 密度: 2.93g/cm^3)の 2 種類を単独または混合使用した。なお、LB と CSA は、混合使

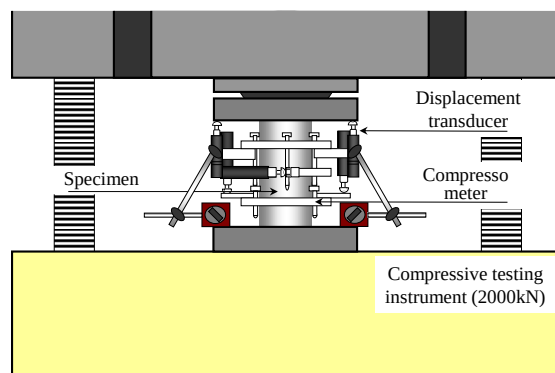
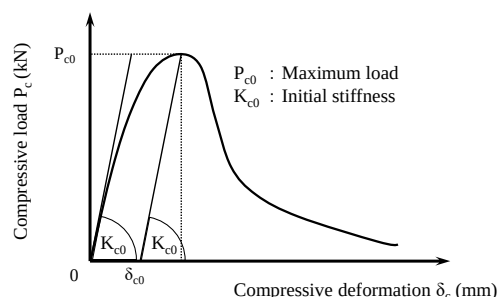
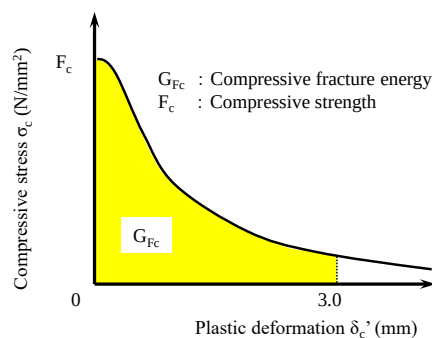


Fig. 1 Compressive lording system.



(a) Compressive load-compressive deformation relationship



(b) Compressive stress-plastic deformation relationship

Fig. 2 Estimation procedure of compression softening curve.

用することにより、エトリンガイトと水酸化カルシウムの両方の結晶成長を促し、従来よりも少ない添加量で同

等の膨張性能を得られる¹²⁾とされている。SRAは、ポリオキシエチレンアルキルエーテル系(密度: 1.01g/cm³)を使用した。

(2) 調査

本研究では、R-HFDFRMの水結合材比(W/B)を40, 50および60%とした。EXは単位量で添加し、単位EX量は0, 40, 80および120kg/m³とした。EX混合比(LB:CSA)は10:0, 0:10および5:5とした。SRAは、セメント質量に対して0および2%を水置換で添加した。

2.2 1軸圧縮試験

Fig. 1に、1軸圧縮試験の概要を示す。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、鋼製型枠を使用して各要因6体製作した。1軸圧縮試験は、文献¹⁾に準じて行い、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。なお、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。

Fig. 2に、圧縮破壊エネルギー(G_{Fc})の評価方法について示す。評価方法は、文献^{1,13)}に示す以下の手法により算出した。

まず、実験により得られた圧縮荷重(P_c)ー荷重盤間変位(δ_c)関係(Fig. 2(a))を圧縮応力(σ_c)ー塑性変形(δ_c)関係(Fig. 2(b))に変換する。次に、 σ_c ー δ_c 関係から、 $\delta_c=3.0$ mmまでの微小 δ_c 増分量とその時点の σ_c との積の総和(Fig. 2(b)中の着色部)を求める。本研究ではこれを G_{Fc} として評価した。

2.3 3等分点曲げ試験

Fig. 3に、3等分点曲げ試験の概要を示す。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、鋼製型枠を使用して各要因6体製作した。3等分点曲げ試験は、文献¹⁴⁾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。なお、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。

曲げ靱性は文献¹⁵⁾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} : 曲げ靱性係数(N/mm²)、 T_b : 原点から δ_{tb} までの曲線下の面積(N・mm)、 δ_{tb} : スパン中央部のたわみ(mm)、 ℓ : スパン(mm)、 b : 破壊断面の幅(mm)、 h : 破

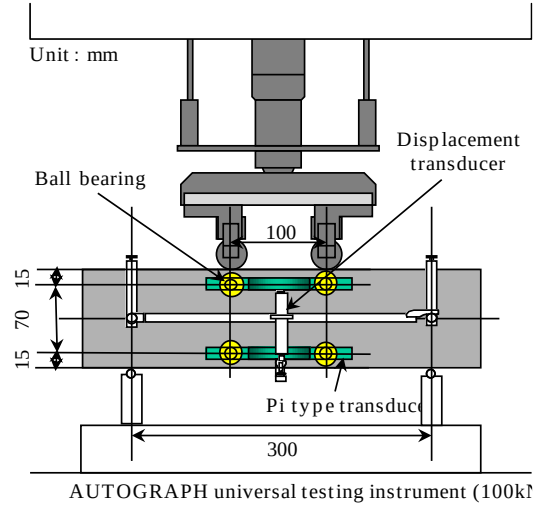


Fig. 3 Trisecting-point loading system.

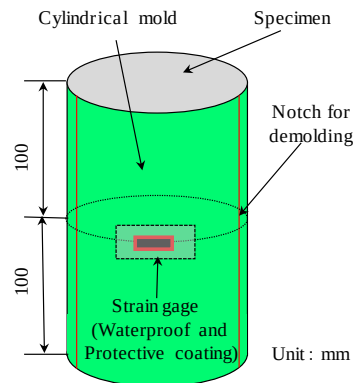


Fig. 4 Restrained expansion test.

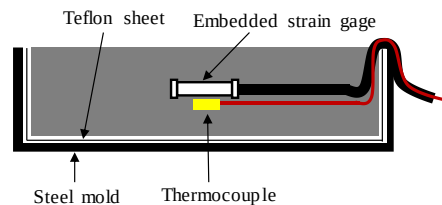


Fig. 5 Free expansion-shrinkage test.

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。

2.4 拘束膨張試験

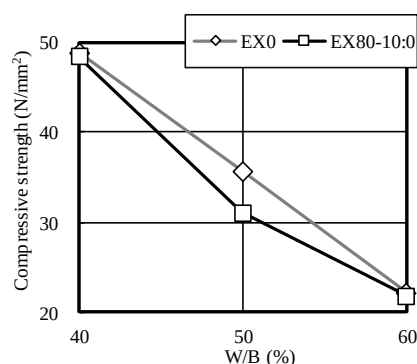
Fig. 4に、拘束膨張試験¹⁶⁾の概要を示す。試験体は100φ×200mmの円柱試験体とし、ブリキ製円筒型枠を使用して各要因3体製作した。計測項目は、ひずみゲージによる型枠円周方向の拘束膨張ひずみとした。試験体は、打込み後、恒温恒湿室内(20℃, 60%RH)での封緘養生とした。なお、計測は材齢7日までとした。

2.5 自由膨張収縮試験

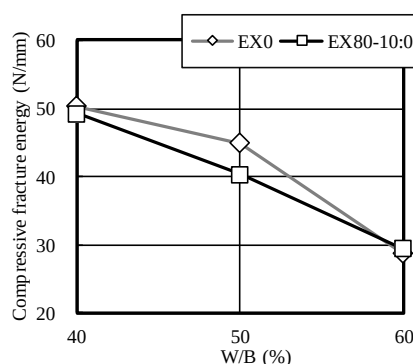
Fig. 5に、自由膨張収縮試験の概要を示す。試験体は、100×100×400mmの角柱試験体とし、各要因2体製

Table 2 Mechanical properties.

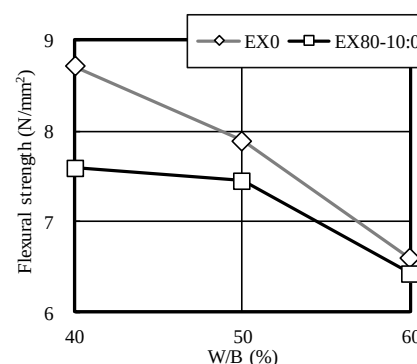
Specimen	Fresh test		Compression test			Bending test		
	Slump flow (cm)	Air content (%)	Density (g/cm^3)	Compressive strength (F_c) (N/mm^2)	Compressive fracture energy (G_{fc}) (N/mm)	Flexural strength (f_{lb}) (N/mm^2)	Flexural toughness (f_{2b}) (N/mm^2)	Number of cracks
RHM40-EX0	73.0	1.4	2.01	48.8	50.3	8.71	3.66	4
RHM40-EX80-10:0	72.5	1.5	2.03	48.4	49.3	7.59	2.70	4
RHM50-EX0	69.0	0.6	1.99	35.7	44.9	7.89	4.34	4
RHM50-EX0-SRA2	71.5	2.1	1.97	32.0	39.6	6.72	3.91	5
RHM50-EX40-10:0	74.0	1.3	1.98	32.0	43.3	7.24	4.54	4
RHM50-EX40-0:10	75.5	0.8	1.97	33.1	42.4	7.72	5.03	4
RHM50-EX80-10:0	74.0	1.0	1.97	31.1	40.3	7.45	4.79	5
RHM50-EX80-0:10	72.5	1.1	1.96	31.6	44.3	6.68	4.31	5
RHM50-EX80-5:5	75.0	1.3	1.98	34.1	41.9	7.34	4.63	5
RHM50-EX80-10:0-SRA2	68.0	1.5	1.99	32.2	41.5	7.71	6.02	7
RHM50-EX80-0:10-SRA2	73.0	1.3	1.96	30.0	42.9	7.44	4.47	4
RHM50-EX120-10:0	75.5	1.3	1.96	28.0	34.3	7.43	4.81	5
RHM50-EX120-0:10	73.5	0.8	1.95	30.3	41.5	7.49	4.73	5
RHM60-EX0	76.5	1.1	1.93	22.1	28.7	6.60	4.86	5
RHM60-EX80-10:0	75.2	1.6	1.93	21.8	29.3	6.43	4.96	6



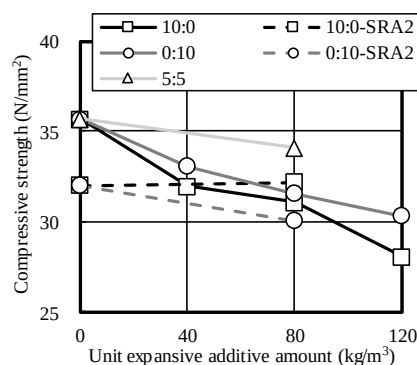
(a) Effect of W/B



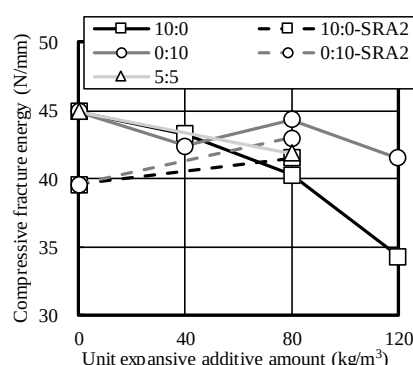
(a) Effect of W/B



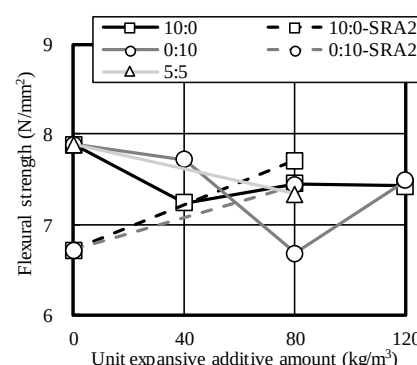
(a) Effect of W/B



(b) Effect of unit expansive additive amount (W/B=50%)



(b) Effect of unit expansive additive amount (W/B=50%)



(b) Effect of unit expansive additive amount (W/B=50%)

Fig. 6 Compressive strength.

Fig. 7 Compressive fracture energy.

Fig. 8 Flexural strength.

作した。計測項目は、検長 100mm の埋め込み型ひずみゲージによる自由膨張収縮ひずみおよび熱電対による試験体温度とした。型枠の内側と試験体との摩擦抵抗を低減するため、型枠の内側にはテフロンシート(厚さ: 0.1mm)を 2 枚重ねて敷設し、その間にシリコンオイルを塗布した。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 日で恒温恒湿室内(20℃, 60%RH)での空中養生とした。

3. 結果と考察

3.1 強度試験結果

Table 2 に、各種試験により得られた R-HFDFRM の材料特性一覧を示す。

(1) 1 軸圧縮試験結果

Fig. 6(a)および(b)に、1 軸圧縮試験により得られた R-HFDFRM の圧縮強度(F_c)–W/B 関係および F_c –単位 EX 量関係を示す。

まず、Fig. 6(a)によれば、W/B を変化させた場合の F_c は、EX の有無に係らず、W/B の増加に伴い低下している。また、同一 W/B であれば、EX を添加した場合の F_c

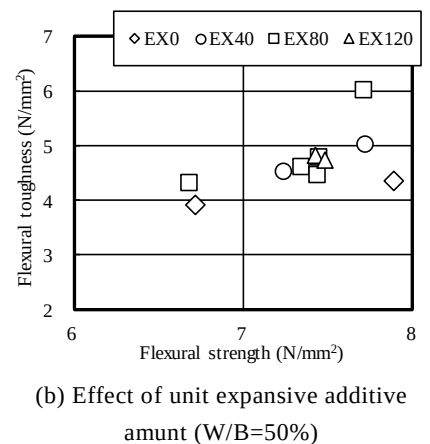
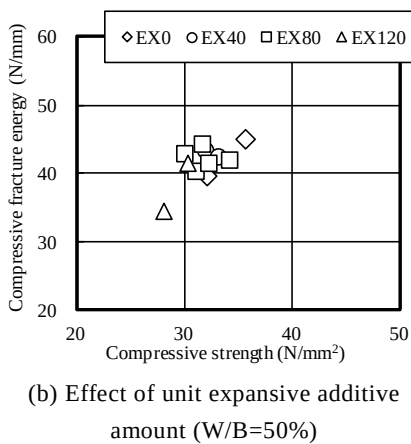
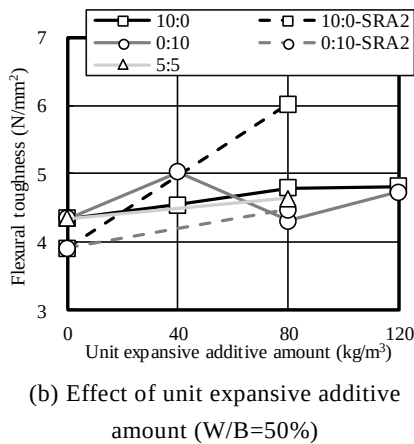
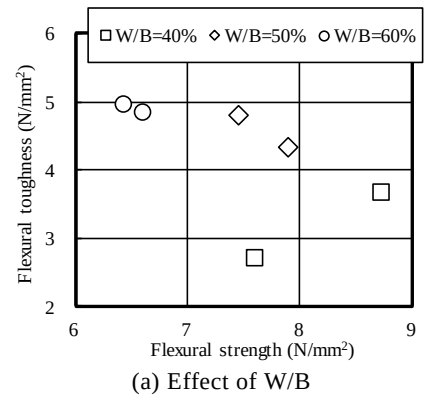
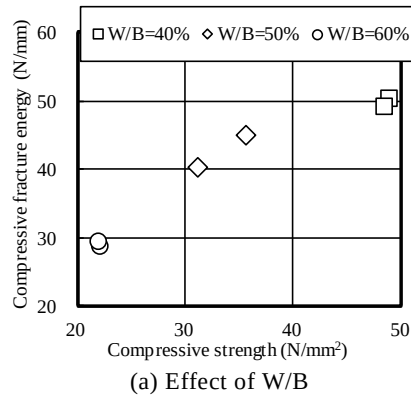
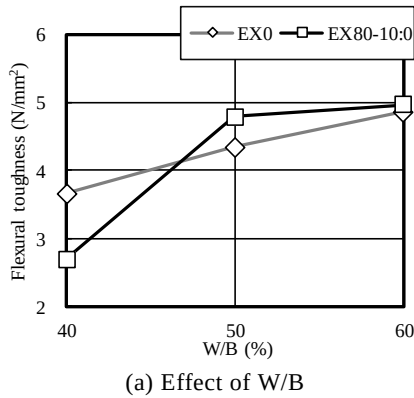


Fig. 9 Flexural toughness.

Fig. 10 Compressive fracture energy – compressive strength relationship.

Fig. 11 Flexural toughness – flexural strength relationship.

は、EX および SRA 無添加(EX0)と比較して低下(0.910～12.9%)している。

次に、Fig. 6(b)によれば、EX や SRA を添加した場合の F_c は、EX0 と比較して低下(4.46～21.4%)している。また、単位 EX 量を変化させた場合の F_c (図中の 10:0 および 0:10)は、単位 EX 量の増加に伴い低下している。

以上、R-HFDFRM の F_c においても、コンクリート(例えば、17,18)と同様の傾向が確認できた。

Fig. 7(a)および(b)に、1 軸圧縮試験により得られた R-HFDFRM の G_{Fc} –W/B 関係および G_{Fc} –単位 EX 量関係を示す。

まず、Fig. 7(a)によれば、W/B を変化させた場合の G_{Fc} は、EX の有無に係らず、W/B の増加に伴い低下している。また、同一 W/B であれば、W/B=60%を除き、EX を添加した場合の G_{Fc} は、EX0 と比較して低下(2.09～10.3%)している。

次に、Fig. 7(b)によれば、EX や SRA を添加した場合の G_{Fc} は、EX0 と比較して低下(1.30～23.7%)している。また、単位 LB 量を変化させた場合の G_{Fc} (図中の 10:0)は、 F_c と同様、単位 LB 量の増加に伴い低下している。単位 CSA 量を変化させた場合の G_{Fc} (図中の 0:10)は、EX0 と比較して低下(1.30～7.59%)するものの、単位 CSA 量の増加に伴う G_{Fc} の傾向は不明瞭である。

以上、R-HFDFRM の G_{Fc} は、 F_c と同様、EX や SRA を

添加することで低下する傾向にあることがわかった。

(2) 3 等分点曲げ試験結果

Fig. 8(a)および(b)に、3 等分点曲げ試験により得られた R-HFDFRM の f_{1b} –W/B 関係および f_{1b} –単位 EX 量関係を示す。

まず、Fig. 8(a)によれば、W/B を変化させた場合の f_{1b} は、EX の有無に係らず、W/B の増加に伴い低下している。また、同一 W/B であれば、EX を添加した場合の f_{1b} は、EX0 と比較して低下(2.57～12.9%)しており、 F_c と同様の傾向を示すことがわかった。

次に、Fig. 8(b)によれば、EX のみを添加した場合の f_{1b} は、EX0 と比較して低下(2.16～15.3%)している。また、単位 LB 量を変化させた場合の f_{1b} (図中の 10:0)は、EX0 と比較して低下(5.50～8.28%)するものの、単位 LB 量の増加に伴う低下は確認できない。単位 CSA 量を変化させた場合の f_{1b} (図中の 0:10)は、EX0 と比較して低下(2.16～15.3%)するものの、単位 CSA 量の増加に伴う f_{1b} の傾向は不明瞭である。なお、SRA を添加した場合の f_{1b} (図中の SRA2)に注目すると、SRA のみを使用した場合、EX0 と比較して低下(14.8%)している。しかし、EX と SRA を併用することで、SRA のみを使用した場合と比較して、 f_{1b} が大きく増加(10.7～14.6%)した。

Fig. 9(a)および(b)に、3 等分点曲げ試験により得られた R-HFDFRM の f_{2b} –W/B 関係および f_{2b} –単位 EX 量関係

を示す。

まず、Fig. 9(a)によれば、W/Bを変化させた場合の f_{2b} は、EXの有無に係らず、W/Bの増加に伴い増加している。また、同一W/Bであれば、W/B=40%を除き、EXを添加した場合の f_{2b} は、EX0と比較して増加(2.15~10.6%)しており、 G_{Fc} と異なる傾向を示すことがわかった。以上のことは、W/Bの増加やEXを添加したことによりマトリックスの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。

次に、Fig. 9(b)によれば、EXのみを添加した場合の f_{2b} は、EX0と比較して同程度(-0.623%)または増加(4.72~15.9%)している。また、単位LB量を変化させた場合の f_{2b} (図中の10:0)は、単位LB量の増加に伴い増加している。単位CSA量を変化させた場合の f_{2b} (図中の0:10)は、EX0と比較して同程度(-0.623%)または増加(9.02~16.0%)するものの、単位CSA量の増加に伴う f_{2b} の傾向は不明瞭である。なお、SRAを添加した場合の f_{2b} (図中のSRA2)に注目すると、SRAのみを使用した場合、EX0と比較して低下(9.91%)している。しかし、EXとSRAを併用することで、SRAのみを使用した場合と比較して、 f_{2b} が大きく増加(14.3~54.0%)し、特に、LBとSRAを併用した場合に、大きな曲げ靱性改善効果が確認できる(EX0と比較して38.8%増加)。

以上、R-HFDFRMの f_{2b} は、EX添加量、EX種類の相違、EX混合使用およびSRAの有無により変動するものの、優れた曲げ靱性を有していることがわかった。また、前掲、Table 2によれば、R-HFDFRMのひび割れ本数は、EX添加量、EX種類の相違、EX混合使用およびSRAの有無に係らず、4~7本となっている。文献14)によれば、曲げ応力下で独立した複数ひび割れの発生とは、最大荷重に達する以前に供試体の純曲げ区間内に、目視で確認できる2本以上の独立したひび割れが発生する場合を指すとしている。本研究では、試験後に、純曲げ区間内に発生した独立したひび割れ本数を目視により計測し、ひび割れ本数としているが、最大荷重に達する以前に複数ひび割れを確認しており、R-HFDFRMは、十分なひび割れ分散性を有していることがわかった。

即ち、本研究の範囲において、EXやSRAを添加した場合においても、R-HFDFRMは、優れた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、長期材齢における、EXおよびSRAを添加したR-HFDFRMの強度特性について検討する必要がある。

(3) 破壊靱性と強度の相関

Fig. 10に、1軸圧縮試験により得られたR-HFDFRMの $G_{Fc}-F_c$ 関係、Fig. 11に、3等分点曲げ試験により得られたR-HFDFRMの $f_{2b}-f_{1b}$ 関係を示す。

それぞれ相関係数を算出すると、Fig. 10(a)では0.97、Fig. 10(b)では0.67、Fig. 11(a)では-0.58、Fig. 11(b)では0.58となった。W/Bの変化に伴う $G_{Fc}-F_c$ 関係、EXやSRAの添加に伴う $G_{Fc}-F_c$ 関係およびEXやSRAの添加に伴う $f_{2b}-f_{1b}$ 関係は正の相関を示すが、W/Bの変化に伴う $f_{2b}-f_{1b}$ 関係は負の相関を示すことを確認できた。

3.2 拘束膨張試験結果

Fig. 12に、拘束膨張試験により得られたR-HFDFRMの材齢7日までの拘束膨張ひずみ-材齢関係を示す。

まず、EX混合比の影響(Fig. 12(a))に注目すると、材齢7日における拘束膨張ひずみは、単位EX量が同じであれば、LB単独使用(EX80-10:0, 647μ)>LBとCSAを混合使用(EX80-5:5, 597μ)>CSA単独使用(EX80-0:10, 524μ)となっている。単位EX量が 80kg/m^3 の場合、LB単独使用の拘束膨張ひずみが最も大きくなることがわかった。また、単位EX量の影響(Fig. 12(b))に注目すると、材齢7日における拘束膨張ひずみは、単位EX量を 40kg/m^3 から 80kg/m^3 に2倍とすることで約2.8倍、 40kg/m^3 から 120kg/m^3 に3倍とすることで約4.8倍に増加している。さらに、SRAの影響(Fig. 12(c))に注目すると、材齢7日における拘束膨張ひずみは、LBを単独使用した場合(EX80-10:0)が 647μ 、LBとSRAを併用した場合(EX80-10:0-SRA2)が 600μ となっている。EXを添加したR-HFDFRMの拘束膨張ひずみに及ぼすSRAの影響は、小さいことがわかった。

3.3 自由膨張収縮試験結果

Fig. 13に、自由膨張収縮試験により得られたR-HF

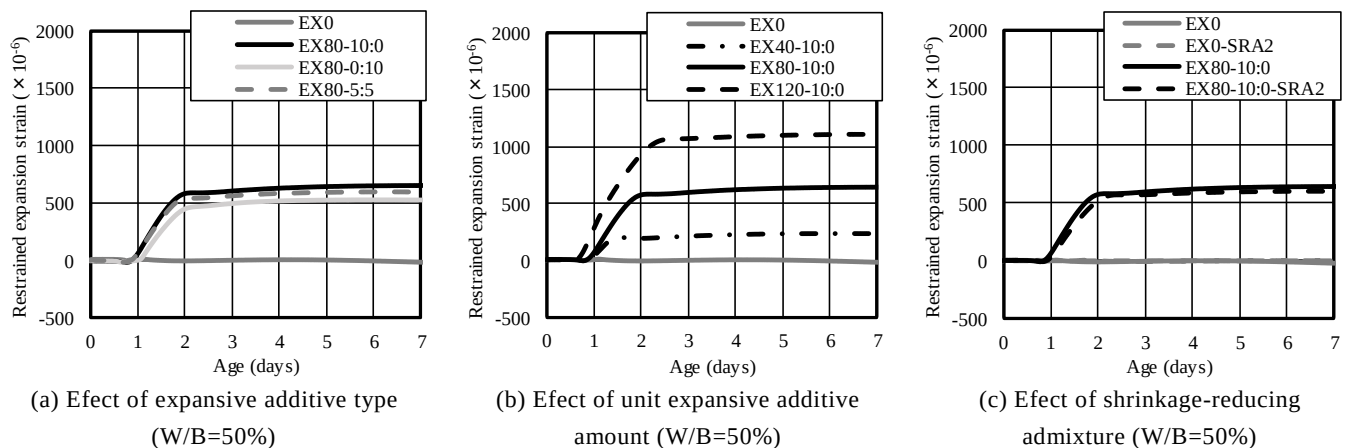
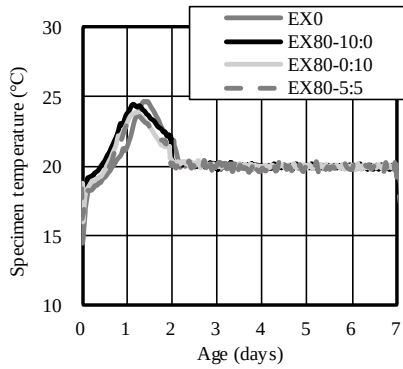
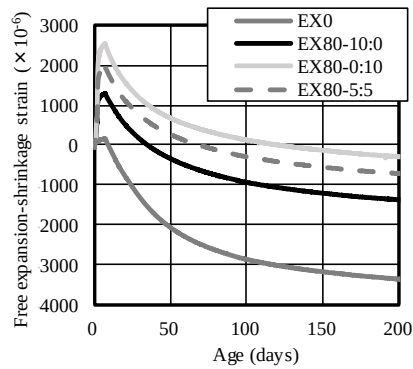


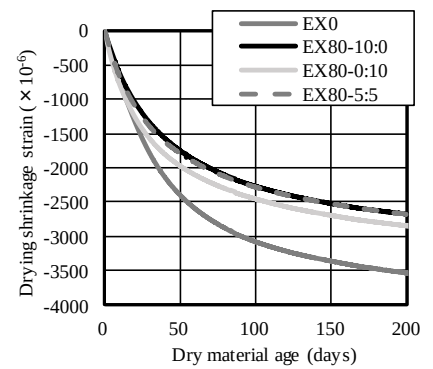
Fig. 12 Restrained expansion strain – age relationship.



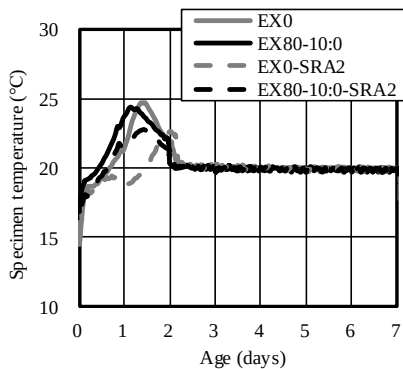
(a) Effect of expansive additive type (W/B=50%)



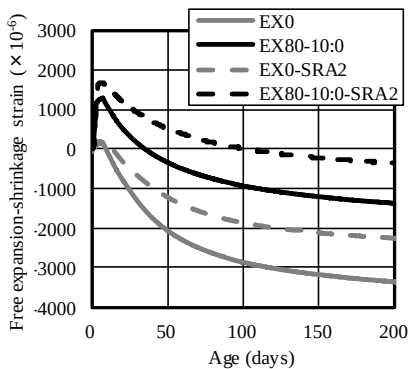
(a) Effect of expansive additive type (W/B=50%)



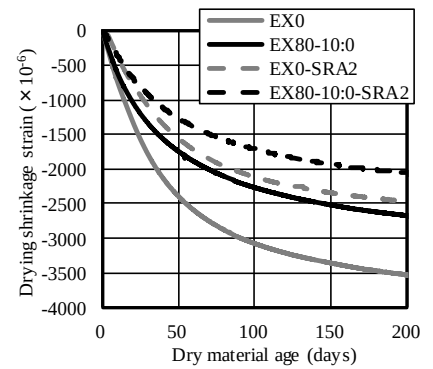
(a) Effect of expansive additive type (W/B=50%)



(b) Effect of shrinkage-reducing admixture (W/B=50%)



(b) Effect of shrinkage-reducing admixture (W/B=50%)



(b) Effect of shrinkage-reducing admixture (W/B=50%)

Fig. 13 Specimen temperature - age relationship.

Fig. 14 Free expansion-shrinkage strain - age relationship.

Fig. 15 Drying shrinkage strain - age relationship.

DFRM の材齢 7 日までの試験体温度 - 材齢関係を示す。SRA を添加した場合(図中の SRA2)の最高温度は、22.7～22.8℃となっており、その他の場合(23.6～24.7℃)と比較して低くなっている。なお、本研究では、試験体の最高温度が 22.7～24.7℃であったため、温度上昇に伴う各ひずみの補正は行っていない。

Fig. 14 に、自由膨張収縮試験により得られた R-HFDFRM の自由膨張収縮ひずみ - 材齢関係を示す。ここでは、打込み直後を初期値とした。

まず、EX 混合比の影響(Fig. 14(a))に注目すると、材齢 7 日における自由膨張ひずみは、CSA 単独使用(EX80-0:10, 2537 μ)>LB と CSA を混合使用(EX80-5:5, 1945 μ)>LB 単独使用(EX80-10:0, 1288 μ)>無添加(EX0, 156 μ)となっている。今回使用した EX(同一添加量)の場合、CSA 単独使用(RHM50-EX80-0:10)の自由膨張ひずみが最大となった。このことは、前掲、Fig. 12(a)の傾向(拘束膨張ひずみは、LB 単独使用が最大)と相違している。一因として、硬化過程における膨張のタイミングの影響等が考えられる。また、材齢 189 日における自由収縮ひずみは、無添加(EX0, 3327 μ)>LB 単独使用(EX80-10:0, 1342 μ)>LB と CSA を混合使用(EX80-5:5, 685 μ)>CSA 単独使用(EX80-0:10, 265 μ)となっており、材齢 7 日における自由膨張ひずみの影響を受けていることがわかった。

次に、SRA の影響(Fig. 14(b))に注目すると、材齢 7 日における自由膨張ひずみは、LB と SRA を併用(EX80

-10:0-SRA2, 1683 μ)>LB 単独使用(EX80-10:0, 1288 μ)>SRA 単独使用(EX0-SRA2, 200 μ)>無添加(EX0, 156 μ)となっている。SRA を添加することで、材齢 7 日における自由膨張ひずみは、若干増加することがわかった。また、材齢 189 日における自由収縮ひずみは、無添加(EX0, 3327 μ)>SRA 単独使用(EX0-SRA2, 2234 μ)>LB 単独使用(EX80-10:0, 1342 μ)>LB と SRA を併用(EX80-10:0-SRA2, 339 μ)となっている。EX と SRA を併用することで、材齢 189 日における自由収縮ひずみは、大幅に低減(RHM50-EX0 と RHM50-EX80-10:0-SRA2 間の自由収縮ひずみの差で 2988 μ)でることがわかった。

Fig. 15 に、自由膨張収縮試験により得られた R-HFDFRM の乾燥収縮ひずみ - 乾燥材齢関係を示す。ここでは、乾燥開始時を初期値とし、初期値からのひずみを乾燥収縮ひずみとした。

まず、EX 混合比の影響(Fig. 15(a))に注目すると、乾燥材齢 182 日における乾燥収縮ひずみは、無添加(EX0, 3477 μ)>CSA 単独使用(EX80-0:10, 2798 μ)>LB と CSA を混合使用(EX80-5:5, 2628 μ)=LB 単独使用(EX80-10:0, 2628 μ)となっている。乾燥開始時を初期値とした場合、EX を添加することで、乾燥収縮ひずみは EX0 と比較して低下するものの、CSA 単独使用(RHM50-EX80-0:10)の乾燥収縮ひずみは、他の場合(EX 添加)と比較して、若干増加することがわかった。

次に、SRA の影響(Fig. 15(b))に注目すると、乾燥材

齢 182 日における乾燥収縮ひずみは、無添加(EX0, 3477 μ) > LB 単独使用(EX80-10:0, 2628 μ) > SRA 単独使用(EX0-SRA2, 2435 μ) > LB と SRA を併用(EX80-10:0-SRA2, 2021 μ)となっている。EX と SRA を併用することで、乾燥材齢 182 日における乾燥収縮ひずみは、大幅に低減(RHM50-EX0 と RHM50-EX80-10:0-SRA2 間の乾燥収縮ひずみの差で 1456 μ)でできることがわかった。

以上、R-HFDFRM の各種収縮ひずみは、コンクリートと同様¹⁹⁾、EX や SRA を添加することで大幅に低減できる。

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) 膨張材や収縮低減剤を添加した場合においても、R-HFDFRM は、優れた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) 圧縮靱性や曲げ靱性などの高靱性材料を特徴付ける R-HFDFRM の力学特性には、膨張材添加量、膨張材種類の相違、膨張材混合使用および収縮低減剤の有無が大きく影響する。
- 3) 材齢 189 日(乾燥材齢 182 日)における R-HFDFRM の自由収縮ひずみは、膨張材と収縮低減剤を併用することで大幅に低減でき、目標とした 1000 μ 以上の収縮ひずみ低減を達成することができた。

今後、収縮ひずみの更なる低減のため、EX や SRA を添加した R-HFDFRM への鋼繊維や粗骨材の混入を考えている。また、天然骨材を使用した場合についても、検討する予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり助力を得た、元東海大学大学院生の飯島友貴氏をはじめ、元東海大学学生の倉内将君、光増優真君、現東海大学学生の若佐知仁君、菊地晃久君、藤原賢吾君、山村優太君、佐藤英和君、柳下敬正君、藤井孝幸君、穴井大智君、岩崎史英君、長谷川真悠さんに謝意を表します。なお、本研究の一部は JSPS 科研費(課題番号: 18K04442, 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, pp.357-362 (2016).
- 5) 丸山裕生, 渡部憲, 飯島友貴, 大瀧諄: 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, 東海大学紀要工学部, Vol.57, No.2, pp.9-16 (2018).
- 6) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, pp.12,194,372 (2018).
- 7) 田中亮一, 網野貴彦, 國枝稔: 超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の収縮低減に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.259-264 (2017).
- 8) 河野克哉, 二羽淳一郎, 大滝晶生, 村田裕志: 高強度軽量骨材コンクリートはりのせん断特性に及ぼす合成短繊維と収縮低減材料の併用効果, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.4, pp.575-589 (2007.10).
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編], pp.247-255 (2012).
- 10) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, pp.106-124 (2006).
- 11) JIS A 5022: 再生骨材 M を用いたコンクリート (2018).
- 12) 日本建築学会: 膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状, pp.111-129, 196-235 (2013.7).
- 13) 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).
- 14) 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, pp.1-8 (2007).
- 15) 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).
- 16) JCI 規準: 円筒型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験方法(JCI-S-009-2012), コンクリート工学協会, pp.1-8 (2012).
- 17) 松本健一, 谷村充, 佐竹紳也: 水セメント比の異なる膨張コンクリートの基礎的性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.223-224 (2006.9).
- 18) 鈴木好幸, 三谷和裕, 浦川和也, 井戸康浩, 木村仁治, 飯田康介, 宮野和樹, 山田人司: コンクリートの乾燥収縮ひずみ制御方法に関する実験的研究(その 2 収縮低減剤および膨張材を使用したコンクリートの強度性状および膨張・収縮性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.673-674 (2015.9).
- 19) 丸田浩, 長塩靖祐: 膨張材と収縮低減剤を使用したコンクリートの膨張収縮特性(その 2.膨張収縮特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.235-236 (2017.8).