

膨張材および収縮低減剤が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エネルギー、 曲げ靱性係数および拘束膨張ひずみに及ぼす影響

飯島 友貴^{*1} 渡部 憲^{*2} 大瀧 諄^{*1}

Effects of Expansive Additive and Shrinkage Reducing Admixture on Compressive fracture energy, Flexural toughness and Restrained expansion strain of Ductile-Fiber-Reinforced Cementitious Composite Using Recycled Fine Aggregate

by

Tomoki IJIMA^{*1}, Ken WATANABE^{*2} and Jun OTAKI^{*1}

(Received on Sep. 29, 2018 and accepted on Nov. 8, 2018)

Abstract

Research on recycled aggregate is being actively 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 a limited number of 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 mechanical properties of DFRCC using recycled fine aggregate (R-DFRCC), we conducted a compressive test, three-point bending test and restrained expansion test on the R-DFRCC. As a result, even though there is a difference of expansive additive, the mixing use of expansive additive and addition or removal of shrinkage reducing admixture, there will be no difference to the restrained expansion strain of R-DFRCC at the age day 7, if the replacement rate of the expansive additive is same. But, we conclude that the replacement rate of the expansive additive, the difference of expansive additive, the use mixing of expansive additive and addition or removal of shrinkage reducing admixture has influence to the mechanical properties of R-DFRCC such as the compressive toughness and flexural toughness.

Keywords: Recycled fine aggregate, DFRCC, Expansive additive, Shrinkage reducing admixture, Restrained expansion strain

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。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¹⁾。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²⁾、その数は未だ少ないのが現状である。理由の1つとして、収縮ひずみが非常に大きいという問題が挙げられる。これまでに、筆者らの一人らは、DFRCC の収縮特性について検討を行った³⁾。その結果、例えば、水セメント比を 55% とし、骨材として珪砂 7 号を使用した DFRCC の乾燥収縮ひずみは、乾燥材齢 6 ヶ月で 3120 μ となっており、DFRCC 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剤の適用性に関する研究報告もなされている^{4,5)}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。

ところで現在、地球環境問題に対する社会的関心の高

*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	Aggregate	Water-binder ratio (W/B) (%)	Sand-binder ratio (S/B) (%)	Fiber volume fraction (V _f) (vol.%)	Replacement ratio of expansive additive (EX) (%)	expansive additive mixing ratio LB:CSA	Addition amount of shrinkage reducing agent (Cwt.×%)
EX0	R	50	65	3	0	0:0	0
EX0-SRA2						0:0	2
EX5-10:0					5	10:0	0
EX5-0:10						0:10	
EX5-5:5						5:5	
EX5-5:5-SRA2					10	10:0	0
EX10-10:0						0:10	
EX10-0:10						5:5	
EX10-5:5						0:0	
PLM					240	0	0

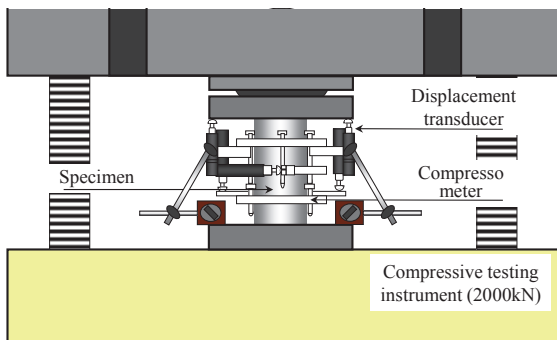


Fig. 1 Compressive loading system.

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。このような背景から、渡部ら⁶⁾は、再生骨材の更なる有効利用技術確立のため、骨材として再生細骨材を使用した DFRCC に関する検討を行ってきた。

以上より、本研究では、再生細骨材を使用したモルタルベースの DFRCC(以下、R-DFRM と略記)の収縮ひずみ低減を目的に、まず、第一段階として膨張材および収縮低減剤を添加した R-DFRM の力学特性について検討を行った。

2. 実験概要

本研究では、Table 1 に示す R-DFRM の材齢 2, 7 および 28 日における 1 軸圧縮試験、材齢 28 日における 3 等分点曲げ試験および材齢 7 日までの拘束膨張試験を行った。なお、比較対象として、繊維を混入しないプレーンモルタルの材齢 28 日における 1 軸圧縮試験も行った。

2.1 調査概要

(1) 使用材料

使用骨材は、再生細骨材{R, 中目(最大骨材寸法:2.5 mm, 表乾密度:2.58 g/cm³, 吸水率:2.98%, 粗粒率:2.61)}とした。セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.16 g/cm³)を使用した。繊維は、PVA 繊維(径:0.2 mm, 長さ:18 mm, 弾性係数:27 kN/mm², 引張強度:975 N/mm²)を使用し、繊維体積混入率(V_f)を 3.0%とした。混和材料は、分離低減材、膨張材(EX)および収縮低減剤(SRA)を使用した。膨張材は、石灰系{LB(密度:3.14 g/cm³)}とカ

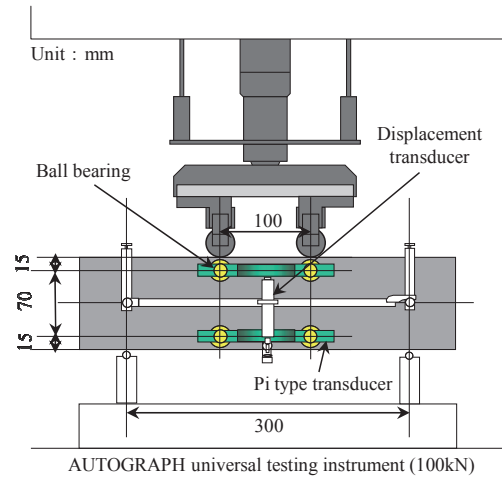


Fig. 2 Trisecting-point loading system.

ルシウム・サルフォ・アルミネート系{CSA(密度:2.93 g/cm³)}の2種類を単独または混合使用した。収縮低減剤(密度:1.01 g/cm³)はポリエチレンアルキルエーテル系を使用した。

(2) 調査

本研究では、R-DFRM の水結合材比(W/B)を 50%とし、細骨材結合材比(S/B)は 65%とした。膨張材はセメント置換で使用し、セメント置換率は 0, 5 および 10%とした。膨張材混合比(LB:CSA)は 10:0, 0:10 および 5:5 とした。収縮低減剤はセメント重量に対して 0 および 2%を水置換で添加した。なお、比較対象である、繊維を混入しないプレーンモルタル(PLM)は、W/B を 50%とし、R-DFRM のモルタルフローと同等の大きさとなるように S/B を調整した。

2.2 1 軸圧縮試験

1 軸圧縮試験の概要を Fig. 1 に示す。荷重は、2000 kN 耐圧試験機を使用して行った。試験体は 100φ×200 mm 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。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。

圧縮破壊エネルギー(G_{FC})は、文献¹⁷⁾に示す手法により算出した(文献¹⁷⁾中の塑性変形 3.0 mm までの値)。

2.3 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 0.2 mm/min に制御した。試験体は 100×100×400 mm 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⁸⁾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。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⁹⁾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。

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

ここに、 $f1_b$ ：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。

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

ここに、 $f2_b$ ：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 ：破壊断面の高さ(mm)である。

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

2.4 拘束膨張試験

拘束膨張試験は文献¹⁰⁾に準じて行った。Fig. 3に概要を示す。試験体は100φ×200 mm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、材齢は7日までとし、各計測データは、データロガーを使用して取り込んだ。

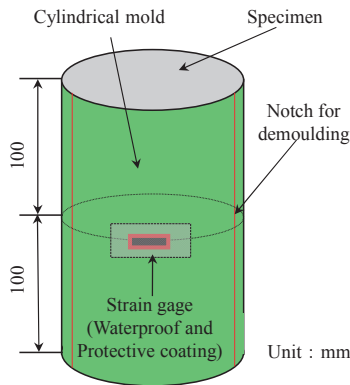


Fig. 3 Restrained expansion test.

3. 結果と考察

3.1 強度試験結果

Table 2に、実験により得られた R-DFRM に関する強度試験結果を示す。なお、Table 2には、PLMに関する1軸圧縮試験結果も示す。

(1) 1軸圧縮試験結果

Fig. 4(a)に R-DFRM 試験体より得られた圧縮強度(F_c)の経時変化、Fig. 4(b)に R-DFRM 試験体より得られた材齢 28 日における F_c -膨張材置換率関係を示す。なお、Fig. 4(a)中には、PLM の材齢 28 日における F_c も示してある。

まず、Fig. 4(a)によれば、材齢 2 日における膨張材や収縮低減剤を添加した場合の F_c は、EX10-0:10を除いて、膨張材および収縮低減剤無添加の場合(EX0)と比較して低下(16.2~50.9 %)し、特に、膨張材混合使用の場合(EX5-5:5およびEX10-5:5)、大きく低下(45.1~50.9 %)している。しかし、材齢の経過に伴い、その差は縮小し、材齢 28 日における膨張材や収縮低減剤を添加した場合の F_c は、EX0と比較して3.51~11.0 %低い値となっている。なお、EX10-0:10の F_c は、材齢に係らずEX0と同程度であるが、材齢 28 日では、EX0と比較して2.21 %低い値となっている。

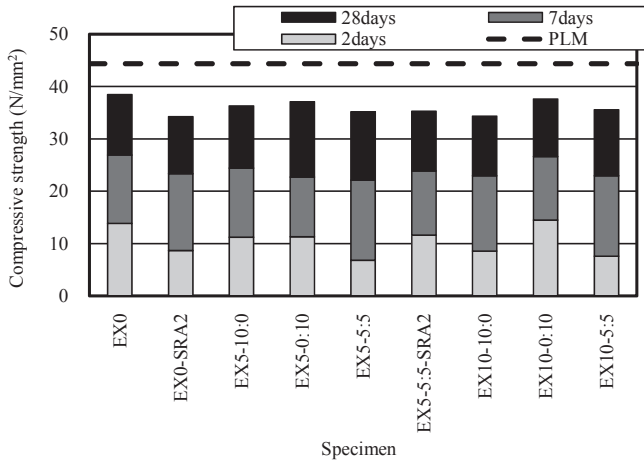
以上、R-DFRM の F_c は、膨張材や収縮低減剤を添加することで低下しており、コンクリートと同様^{11,12,13)}の傾向を示すことがわかった。ただし、文献¹⁴⁾では、収縮低減剤を添加した場合、コンクリートの F_c は増加するという結果も示されており、収縮低減剤の添加が R-DFRM の F_c に及ぼす影響について、今後、さらに検討が必要である。

ここで、材齢 28 日における EX0 および PLM について注目すると、EX0 の F_c は、PLM と比較して 13.3%低下している。この理由は、EX0 の場合、剛性の低い PVA 繊維を混入しているためである。

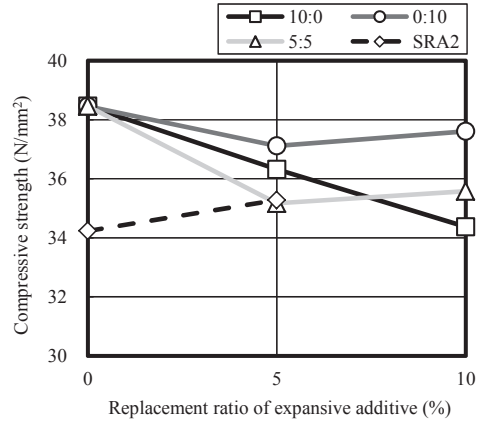
次に、Fig. 4(b)によれば、膨張材のみを添加した場合の F_c -膨張材置換率関係は、膨張材置換率 0~5 %間においては、膨張材種類の相違および膨張材混合使用に係らず、EX0 と比較して低下(3.51~8.56 %)している。しかし、膨張材置換率 5~10%間においては、膨張材種類の相違や膨張材混合使用によって異なる傾向を示している。膨張材として LB を単独使用した場合の F_c は、膨張材置換率の増加に伴い低下しており、コンクリートと同様¹⁵⁾

Table 2 Strength test results.

Specimen	Compressive strength (F_c) (N/mm ²)			Compressive fracture energy (G_{fc}) (N/mm)			Flexural strength ($f1_b$) (N/mm ²)	Flexural toughness ($f2_b$) (N/mm ²)	Restrained expansion strain ($\times 10^{-6}$)
	2 days	7 days	28 days	2 days	7 days	28 days			
	EX0	13.8	26.9	38.5	31.1	39.9			52.4
EX0-SRA2	8.68	23.4	34.2	19.5	38.5	39.8	7.26	5.16	-14
EX5-10:0	11.2	24.4	36.3	26.2	41.9	53.3	8.53	5.12	328
EX5-0:10	11.3	22.7	37.1	26.8	39.3	46.5	8.21	5.02	289
EX5-5:5	6.80	22.1	35.2	16.9	38.5	51.3	7.63	3.38	309
EX5-5:5-SRA2	11.6	23.9	35.3	25.4	39.4	41.0	8.35	6.73	328
EX10-10:0	8.59	22.9	34.4	19.5	40.1	49.3	7.21	5.35	847
EX10-0:10	14.5	26.6	37.6	32.1	47.0	51.2	6.87	5.28	825
EX10-5:5	7.60	22.9	35.6	18.3	43.6	49.8	7.80	4.45	827
PLM			44.4						



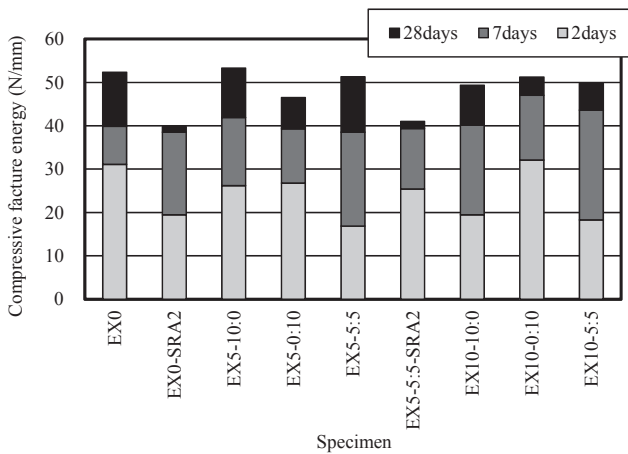
(a) Time dependent change



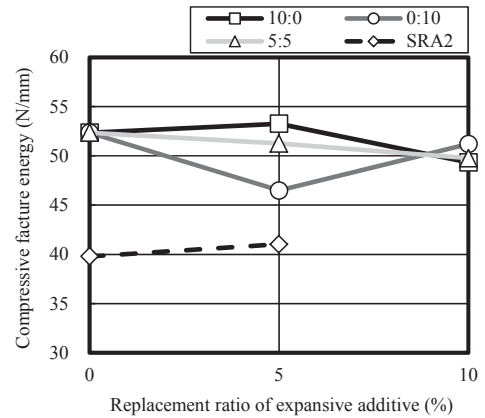
(b) Compressive strength –

replacement ratio of expansive additive relationship

Fig. 4 Compressive strength.



(a) Time dependent change



(b) Compressive fracture energy –

replacement ratio of expansive additive relationship

Fig. 5 Compressive fracture energy.

の傾向を示している。しかし、膨張材として CSA を添加した場合(膨張材混合使用も含む)、膨張材を添加することにより、EX0 と比較して F_c は低下(2.21~8.56 %)するものの、膨張材置換率を 5 %から 10%に増加させても、 F_c の低下は見られない。なお、収縮低減剤を添加した場合の結果に注目すると、膨張材無添加の場合(EX0-SRA2)の F_c は、EX0 と比較して低下(11.0%)している。しかし、収縮低減剤と膨張材を併用することにより(EX5-5:5-SRA2)、 F_c の若干の改善(EX0-SRA2 と比較して 3.05%増加)が見られる。文献¹⁶⁾によれば、モルタルに膨張材および収縮低減剤を添加した場合の F_c は、収縮低減剤のみを添加した場合と比較して、収縮低減剤の種類によって、増加する場合もあれば、低下する場合もある。

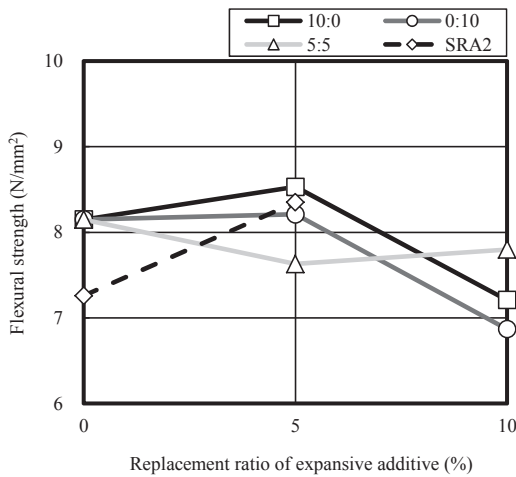
今後、膨張材や収縮低減剤の添加が R-DFRM の F_c に及ぼす影響について、さらに検討が必要である。

Fig.5(a)に R-DFRM 試験体より得られた G_{Fc} の経時変化、Fig.5(b)に R-DFRM 試験体より得られた材齢 28 日における G_{Fc} –膨張材置換率関係を示す。

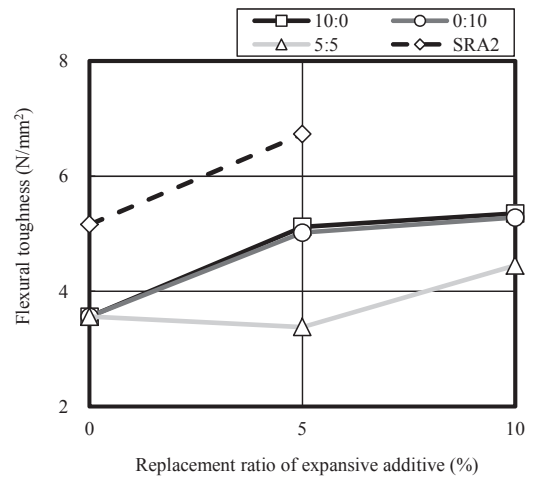
まず、Fig. 5(a)によれば、材齢 2 日における膨張材や収縮低減剤を添加した場合の G_{Fc} は、EX10-0:10 を除いて、EX0 と比較して低下(13.9~45.8 %)し、特に、EX5-5:5 お

よび EX10-5:5 では、大きく低下(41.3~45.8 %)している。しかし、膨張材のみを添加した場合、材齢の経過に伴い、その差は縮小し、材齢 28 日における G_{Fc} は、EX0 を上回るもの(EX5-10:0)もある。なお、材齢 28 日における収縮低減剤を添加した場合の G_{Fc} は、膨張材添加の有無に係らず、EX0 を大きく下回っている(21.6~24.0%)。また、EX10-0:10 の G_{Fc} は、EX0 と比較して、材齢 2 日では同程度であるが、材齢 7 日では大きく増加(17.8 %)している。しかし、材齢 28 日においては、EX0 よりも若干低下(2.19%)している。

次に、Fig. 5(b)によれば、膨張材のみを添加した場合の G_{Fc} –膨張材置換率関係は、膨張材置換率 0~5 %間においては、膨張材種類の相違や膨張材混合使用によって異なる傾向を示している。しかし、膨張材置換率が 10 %まで増加すると、いずれの場合においても G_{Fc} は、EX0 と比較して低下(2.19~5.78 %)している。なお、収縮低減剤を添加した場合の結果に注目すると、EX0-SRA2 の G_{Fc} は、EX0 と比較して低下(24.0 %)している。しかし、収縮低減剤と膨張材を併用することにより(EX5-5:5-SRA2)、 G_{Fc} の若干の改善(EX0-SRA2 と比較して 3.12%増加)が見られる。



(a) Flexural strength



(b) Flexural toughness

Fig. 6 Flexural strength, Flexural toughness—replacement ratio of expansive additive relationship.

膨張材置換率，膨張材種類の相違および膨張材混合使用が R-DFRM の G_{Fc} に及ぼす影響について，さらに検討が必要である。

(2) 3等分点曲げ試験結果

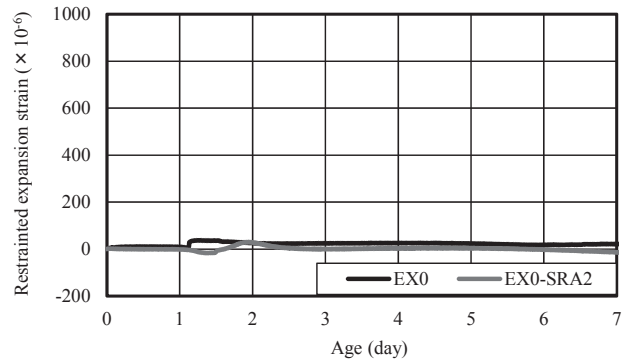
Fig. 6 に R-DFRM 試験体より得られた f_{1b} および f_{2b} —膨張材置換率関係を示す。

まず，Fig. 6(a)によれば，膨張材のみを添加した場合の f_{1b} —膨張材置換率関係は，膨張材置換率 0～5% 間においては，膨張材種類の相違や膨張材混合使用によって異なる傾向を示している。しかし，膨張材置換率が 10% まで増加すると，膨張材を添加した場合の f_{1b} は，EX0 と比較して低下(4.29～15.7%)している。なお，収縮低減剤を添加した場合の結果に注目すると，EX0-SRA2 の f_{1b} は，EX0 と比較して低下(10.9%)している。しかし，収縮低減剤と膨張材を添加することにより，EX5-5:5-SRA2 の f_{1b} は，EX0-SRA2 と比較して大きく増加(15.0%)し，EX0 と同程度以上となっている。

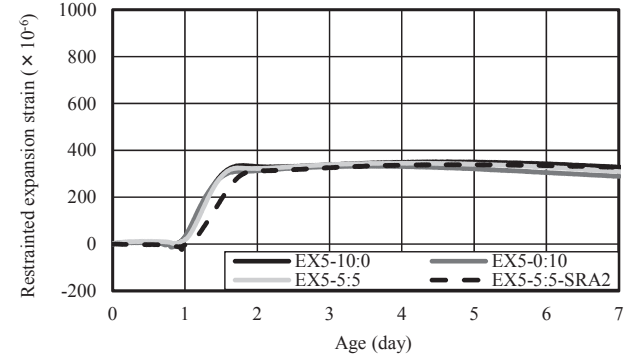
次に，Fig. 6(b)によれば，膨張材のみを添加した場合の f_{2b} は，膨張材置換率 0～5% においては，膨張材混合使用の場合は，若干低下(5.06%)しているが，膨張材単独使用の場合は大きく増加(41.0～43.8%)している。しかし，膨張材置換率が 10% まで増加すると，いずれの場合においても f_{2b} は，EX0 と比較して増加(25.0～50.4%)している。なお，収縮低減剤を添加した場合の結果に注目すると，EX0-SRA2 の f_{2b} は，EX0 と比較して大きく増加(44.9%)している。さらに，収縮低減剤と膨張材を併用することにより，より大きな曲げ靱性改善効果が確認できる(EX0 と比較して 89.0% 増加)。このことから，膨張材および収縮低減剤は，R-DFRM の曲げ靱性の向上に大きく寄与すると考えられる。

以上，R-DFRM の f_{1b} および f_{2b} が変動した理由は，膨張材や収縮低減剤の添加が，繊維の架橋効果に影響を及ぼしているためであると考えられる。

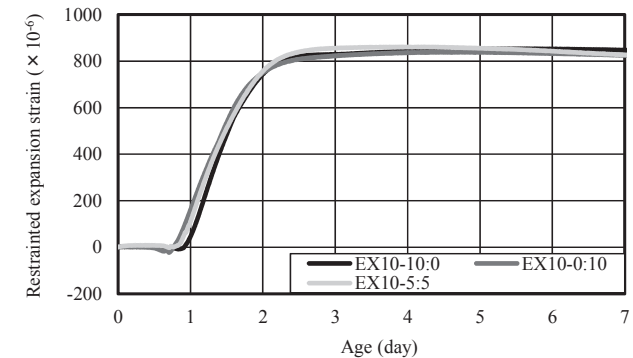
今後，膨張材や収縮低減剤の添加が，R-DFRM の f_{1b} および f_{2b} に及ぼす影響について，さらに検討が必要である。



(a) EX0



(b) EX5



(c) EX10

Fig. 7 Restrained expansion strain—age relationship.

3.2 拘束膨張試験結果

前掲 Table 2 に、R-DFRM 試験体より得られた材齢 7 日における拘束膨張ひずみ、Fig. 7 に R-DFRM 試験体より得られた材齢 7 日までの拘束膨張ひずみ-材齢関係を示す。

Table 2, Fig. 7(a), (b)および(c)によれば、膨張材のみを添加した場合の材齢 7 日における拘束膨張ひずみは、膨張材置換率が同じであれば、膨張材種類の相違および膨張材混合使用に係らず、同程度となっている。また、膨張材置換率を 5%から 10%に倍増することで、拘束膨張ひずみは 2 倍以上(2.58~2.85 倍)増加している。なお、収縮低減剤と膨張材を添加した場合(EX5-5:5-SRA2)においても、拘束膨張ひずみは、膨張材のみを添加した場合(膨張材置換率 5%)と同程度となっている。

以上より、膨張材置換率が同じであれば、材齢 7 日における R-DFRM の拘束膨張ひずみは、膨張材種類の相違、膨張材混合使用および収縮低減剤添加の有無に係らず、同程度となる。しかし、圧縮靱性や曲げ靱性などの、高靱性材料を特徴付ける R-DFRM の力学特性には、膨張材置換率、膨張材種類の相違、膨張材混合使用および収縮低減剤添加の有無が大きく影響することがわかった。

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) 材齢 28 日における R-DFRM の圧縮破壊エネルギーは、膨張材置換率 5%とし、石灰系膨張材を単独使用した場合を除いて、膨張材や収縮低減剤を添加することにより低下し、特に、収縮低減剤を添加した場合、大きく低下した。
- 2) R-DFRM の曲げ靱性係数は、膨張材のみを添加し、膨張材置換率 5%、膨張材混合使用の場合を除いて、膨張材や収縮低減剤を添加することにより増加し、特に、収縮低減剤と膨張材を併用することにより、より大きな曲げ靱性改善効果が確認できた。
- 3) 膨張材置換率が同じであれば、材齢 7 日における R-DFRM の拘束膨張ひずみは、膨張材種類の相違、膨張材混合使用および収縮低減剤添加の有無に係らず、同程度となる。

謝辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た、現東海大学学生の安西拓巳君、倉内将君、光増優真君、元東海大学学生の白石佑太君および李涛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: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) 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) 渡部憲，大岡督尚，白都滋，白井伸明：高靱性セメント複合材料の材料特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，vol.27, No.1, pp.403-408 (2005).
- 4) 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).
- 5) 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剤の併用効果，土木学会論文集 E, vol.63, No.4, pp.575-589 (2007.10).
- 6) 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).
- 7) 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).
- 8) 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，p.8 (2007).
- 9) 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).
- 10) 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，p.8 (2012).
- 11) 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・収縮特性)，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp.673-674 (2015.9).
- 12) 中山英明，鳴瀬浩康，吉田浩一郎，白石良太：石灰石骨材を使用したコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.541-546 (2009).
- 13) 長塩靖祐，丸田浩：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 1.実験概要)，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，pp.233-234 (2017.8).
- 14) 辻埜真人，黒田泰弘，湯浅竜貴，片山行雄，依田侑也，菊池俊文，寺本篤史：膨張材と収縮低減剤を併用した超低収縮コンクリートの基本性能，日本建築学会大会(北海道)，pp.47-48 (2013.8).
- 15) 保利彰宏，高橋光男，辻幸和，原田真剛：低添加型膨張材を用いたコンクリートの基礎物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp.261-266 (2002).
- 16) 樋口隆行，吉野亮悦，盛岡実：膨張材を混和したモルタルの物性におよぼす収縮低減剤種の影響，セメント・コンクリート論文集，No.65, pp.196-202 (2011).