

天然および再生骨材を使用した 高流動高靱性コンクリートに関する実験的研究

渡辺 健^{*1} 渡部 憲^{*2} 大津 直人^{*3}

Experimental Study on High-Fluidity Ductile-Fiber-Reinforced Concrete Using Natural and Recycled Aggregate

by

Ken WATANABE^{*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. In the current study, we examined the material properties of high-fluidity fiber-reinforced concrete (HFFRC) using natural and recycled aggregates. The water-binder ratios were 40, 50 and 60% for HFFRC, and the fiber volume fraction was 3%. Two types of loading were used: the compressive test and the four-point bending test. The dimensions of specimens were 100 (diameter) × 200 (height) mm for the compressive test and 100 × 100 × 400 mm for the four-point bending test. It is concluded that HFFRC using natural and recycled aggregates has sufficient crack dispersing property, compressive ductility and flexural ductility, these properties obtained from HFFRC using natural aggregate are no major differences compared with those from HFFRC using recycled aggregate, suggesting the potential applicability of HFDFFRC in the range of this study.

Keywords: Recycled aggregate, Ductile-fiber-reinforced concrete, High-fluidity

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。例えば、諏訪田ら³⁾や小川ら⁴⁾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⁵⁾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、優れた流動性(施工性)を示す高流動ハイブリッド型繊維補強セメント複合材料について一連の検討を行い、それぞれの繊維混入率を適切にコントロールすることで、一定の力学的性能を確保しながら高い流動性を有した材料を設計することが可能であること等を明らかにしている。しかし、DFRCC のコストが高い、水和熱や乾燥収縮による影響が大きい等の問題に関する研究は、一部報告されているものの^{例えば、6)}、その数は未だに少なく、未解明な

*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 株式会社サガテック

Table 1 Outline of specimen.

Specimen	Aggregate	Water-binder ratio (W/B) (%)	Sand-binder ratio (S/B) (%)	Sand-total aggregate ratio (s/a) (vol.%)	Fiber volume fraction (V_f) (vol.%)	Fiber volume mixing ratio (V_m) V:S	Replacement ratio of fly ash (%)
N-HFFRC-40	N	40	40	86	3.0	7:3	20
N-HFFRC-50		50	65				
N-HFFRC-60		60	90				
R-HFFRC-40	R	40	40	85			
R-HFFRC-50		50	65				
R-HFFRC-60		60	90				

Table 2 Material property of aggregate.

Aggregate		Maximum size (mm)	Surface-dry density (g/cm ³)	Water absorption (%)	Fineness modulus
N	Crushed stone	10	2.65	2.45	5.95
	Crushed sand	5	2.64	1.04	2.92
	Pit sand	1.2	2.62	1.47	1.40
R	Coarse aggregate	10	2.59	2.66	6.04
	Medium fine aggregate	2.5	2.57	3.14	2.61
	Very fine aggregate	0.6	2.54	4.45	1.16

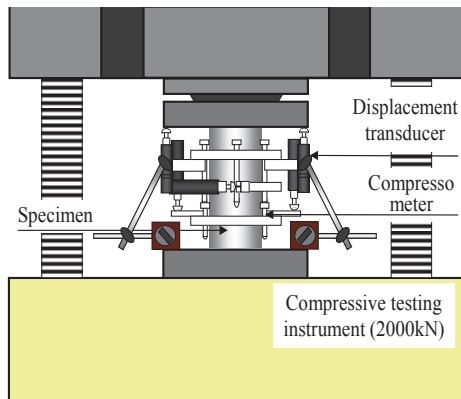


Fig.1 Compressive loading system.

点も多い。

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おり、研究成果および施工事例も報告されている^{例え、7)}。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。そのため、筆者らの一部ら⁸⁾は、DFRCCへの再生細骨材の適応性を検討している。また、中村ら⁹⁾は、DFRCCへの再生細骨材のみでなく、再生粗骨材の適応性について検討を行っている。

以上のような背景から、筆者の一部ら¹⁰⁾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に再生細骨材を使用した高流動DFRCC(以下、HFDPRCCと略記)の材料特性について検討を行った。その結果、再生細骨材を使用したHFDPRCC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を明らかにしている。また、前述のように、これまでに開発されているHFDPRCCは、細骨材として、珪砂を使用した

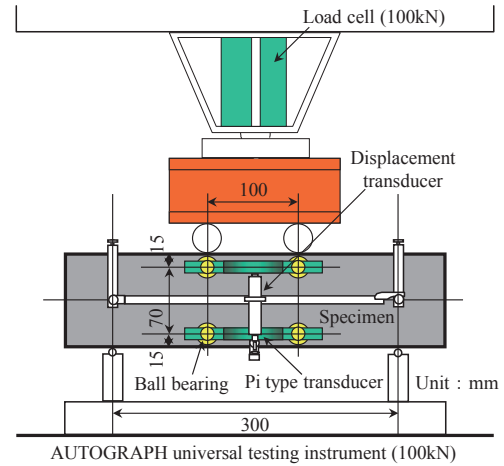


Fig.2 Trisecting-point loading system.

ものである。そのため、筆者の一部ら¹⁰⁾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と山砂を使用した場合のHFDPRCCの材料特性についても合わせて検討を行った。その結果、砕砂と山砂を使用したHFDPRCC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を明らかにしている。

そこで本研究では、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に、粗骨材として再生粗骨材、細骨材として再生細骨材を使用した高流動高靱性コンクリート(以下、HFDPRCと略記)のフレッシュ性状および力学特性について検討を行った。また、粗骨材として砕石、細骨材として砕砂と山砂を使用したHFDPRCのフレッシュ性状および力学特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

高流動繊維補強コンクリート(以下、HFFRCと略記)試験体の概要をTable 1に示す。HFFRCの種類は、目標スランプフローを65cmと定めたHFFRCで、天然骨材(N)を使用したHFFRC(N-HFFRC)および再生骨材(R)を使用したHFFRC(R-HFFRC)の2種類とした。

(1) 使用材料

本研究で使用した骨材は、N(粗骨材として砕石、細骨材として砕砂と山砂を混合)およびR(粗骨材として再生粗骨材、再生細骨材として中目と細目を混合)である。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/cm³)を使用した。繊維はPVA繊維(V、径:0.2mm、長さ:18mm、弾性係数:27kN/mm²、引張強度:975N/mm²)および鋼繊維(S、径:0.55mm、長さ:30mm、弾性係数:210kN/mm²、引張強度:1145N/mm²)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/cm³)を使用した。

(2) 調合

前掲、Table 1に示す通り、本研究では、HFFRCの水

Table 3 Material properties.

Specimen	Fresh					Hardening						
	Mortar flow (mm)	Slump flow (cm)	Air (%)	Time to reach the flow 50cm (s)	Material segregation	Density (g/cm ³)	Young's modulus (E) (kN/mm ²)	Compressive strength (F _c) (N/mm ²)	Compressive fracture energy (G _{Fe}) (N/mm)	Flexural strength (f _{lb}) (N/mm ²)	Flexural toughness (f _{2b}) (N/mm ²)	Number of crack
N-HFFRC-40	233	60.5	1.9	11.8	Nothing	2.10	19.0	46.3	63.1	7.45	4.54	7.8
N-HFFRC-50	214	62.2	1.8	9.2		2.08	14.2	31.2	54.7	5.73	3.33	9.0
N-HFFRC-60	226	65.0	1.7	13.1		2.06	12.4	22.3	42.5	5.87	3.55	7.5
R-HFFRC-40	243	68.3	2.3	13.2		2.09	17.9	44.0	62.1	7.16	3.50	6.1
R-HFFRC-50	213	65.9	1.8	13.0		2.06	14.8	28.8	53.4	5.29	3.08	7.5
R-HFFRC-60	214	62.9	2.3	7.1		2.04	12.9	20.8	37.3	5.55	3.27	7.5

結合材比(W/B)を 40, 50 および 60%, 細骨材率(s/a)は, N-HFFRC では, 86%, R-HFFRC では, 85%とした. 繊維は, PVA 繊維と鋼繊維を混合使用し, 繊維体積混入率(V_f)を内割りで, 3.0%, PVA 繊維と鋼繊維の繊維体積混合比(V_m)を V:S=7:3 とした. フライアッシュのセメント置換率は, 20%とした. なお, 文献¹¹⁾によれば, 一般的な高流動コンクリートの s/a は, 48~52%程度とされている. 一方で, 本研究で使用した HFFRC の調合は, 85%となっており, 高流動高靱性化を目的としているため, 特殊な調合となっている.

練混ぜ時間は, 6.5 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 分間で投入し, さらに, 0.5 分練混ぜ. 最後に, 粗骨材を投入し, 0.5 分練混ぜて終了)とした.

(3) 試験項目

本研究では, 前掲, Table 1 に示す HFFRC 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, モルタルフロー試験, スランプ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 軸圧縮試験の概要を Fig.1 に示す. 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 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 1149¹²⁾に準じて算出した. また, 圧縮破壊エネルギー(G_{Fe})は, 文献^{8, 13)}に示す手法により算出した(文献^{8, 13)}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 等分点曲げ試験の概要を Fig.2 に示す. 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ー曲率曲線試験方法¹⁴⁾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 5 体製作した. 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独立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¹⁵⁾に準じて評価した.

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.

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

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 7.5mm 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

Table 3 に, 実験により得られた HFFRC の各種材料特性一覧を示す.

(1) スランプフロー

Fig.3 および 4 に, HFFRC のスランプフロー試験結果を, W/B 別に示す.

Table 3, Fig.3 および 4 によれば, HFFRC のスランプフローは, 60.5~68.3cm となっており, 骨材種類および W/B の相違に係らず, 材料分離を生じることなく, 目標スランプフロー65cm を概ね達成できた.

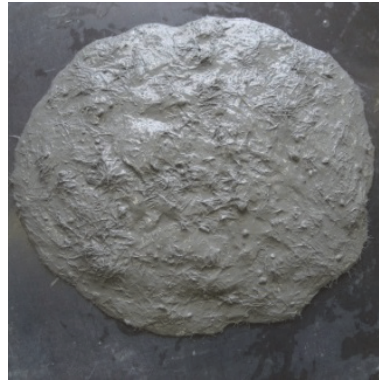
(2) ヤング係数, 圧縮強度および曲げ強度

Fig.5 に, HFFRC の E, 圧縮強度(F_c)および f1_b-W/B 関係を示す.

Fig.5 によれば, HFFRC の E および F_cは, 骨材種類の相違に係らず, W/B の増加に伴い減少している. この傾



(a) N-HFFRC-40



(b) N-HFFRC-50



(c) N-HFFRC-60

Fig.3 Slump flow test (Using natural aggregate).



(a) R-HFFRC-40

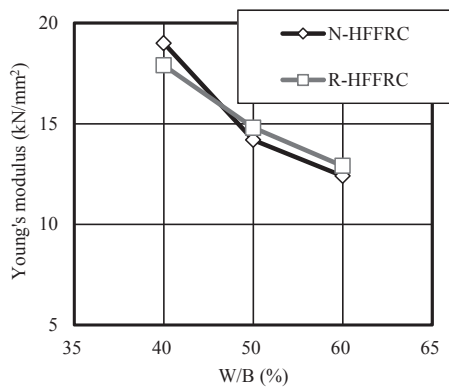


(b) R-HFFRC-50

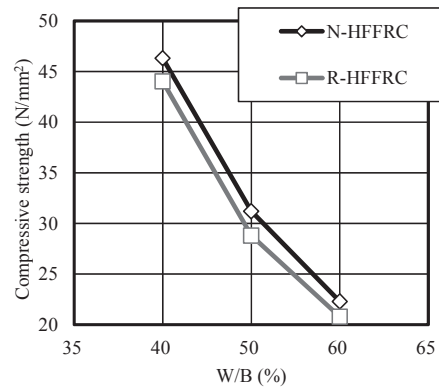


(c) R-HFFRC-60

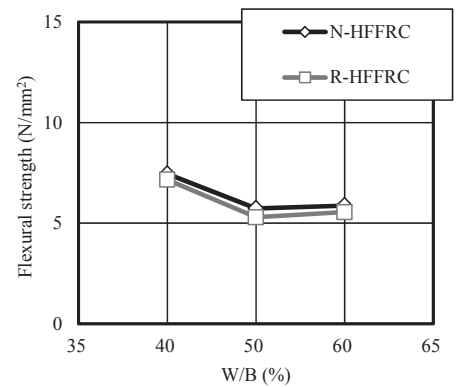
Fig.4 Slump flow test (Using recycled aggregate).



(a) Young's modulus



(b) Compressive strength



(c) Flexural strength

Fig.5 Young's modulus, Compressive strength and flexural strength—W/B relationship.

向は、文献¹⁰⁾(HFDRCの傾向)と同様である。一方、HFFRCの f_{lb} は、骨材種類の相違に係らず、 $W/B=40\sim50\%$ の範囲では W/B の増加に伴い減少するものの、 $W/B=50\sim60\%$ の範囲では W/B の増加に伴い若干増大している。また、同一 W/B におけるR-HFFRCの F_c および f_{lb} は、N-HFFRCと比較して若干低くなっている。一方、HFFRCの E は、このような傾向が不明瞭である。

(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

Fig.6に、HFFRCの G_{Fc} 、 f_{2b} およびひび割れ本数— W/B の関係を示す。

まず、Fig.6(a)によれば、HFFRCの G_{Fc} は、骨材種類の相違に係らず、 W/B の増加に伴い減少している。この傾向は、文献¹⁰⁾(HFDRCの傾向)と同様である。また、同一 W/B におけるR-HFFRCの G_{Fc} は、N-HFFRCと比較して、若干低くなっており、特に $W/B=60\%$ では、その差が大きくなっている。文献¹⁶⁾(DFRCの傾向)によれば、 $100\phi\times200mm$ の円柱試験体を使用した場合、同一 W/B

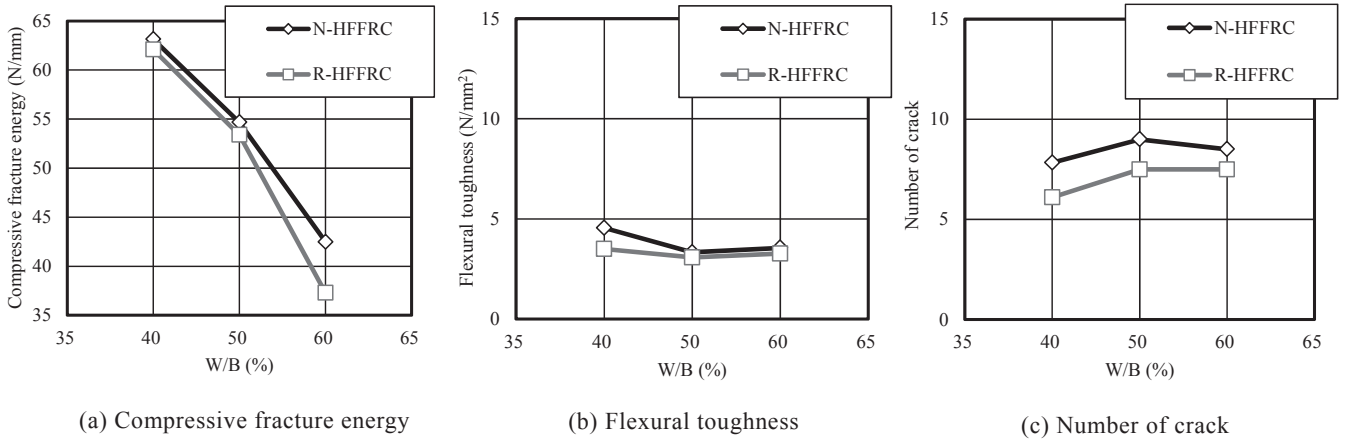


Fig.6 Compressive fracture energy, flexural toughness and number of crack - W/B relationship.

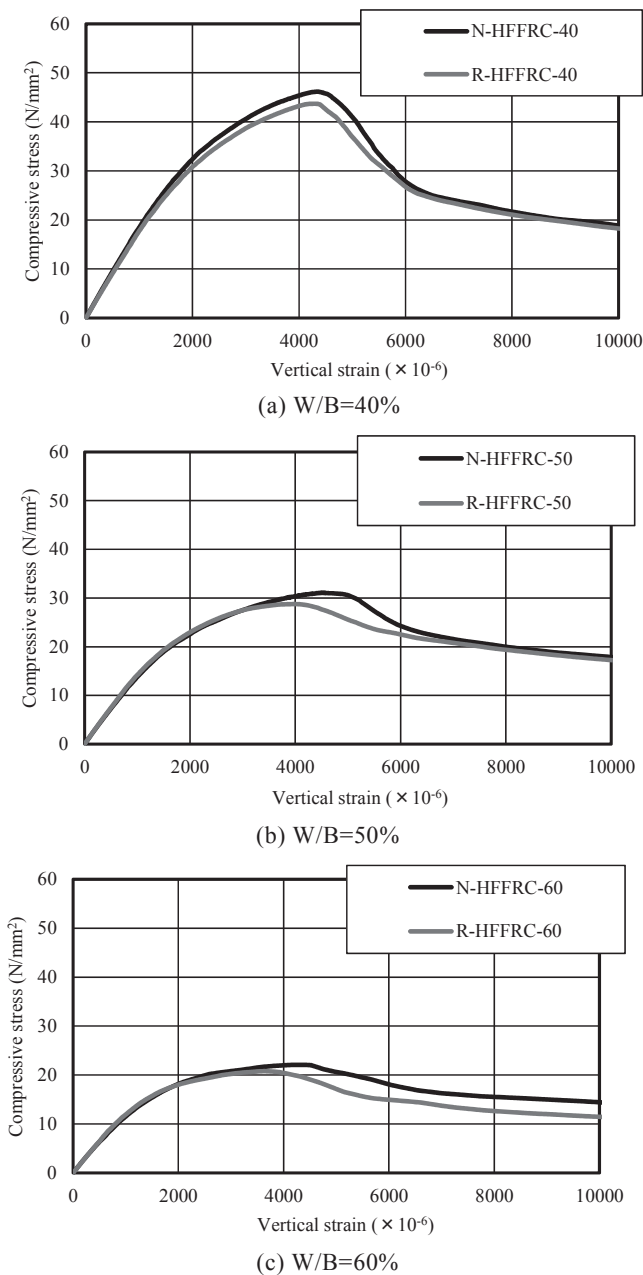


Fig.7 Compressive stress - vertical strain relationship.

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、本研究の傾向と概ね同様である。

次に、Fig.6(b)によれば、HFFRC の f_{2b} は、骨材種類の相違に係らず、W/B=40~50%の範囲では W/B の増加に伴い減少するものの、W/B=50~60%の範囲では W/B の増加に伴い若干増大している。また、同一 W/B における R-HFFRC の f_{2b} は、N-HFFRC と比較して若干低くなっており、特に W/B=40%ではその差が大きくなっている。なお、 f_{2b} は、 $\delta_{ib}=7.5\text{mm}$ までの平均曲げ応力を意味する値であり、HFFRC は W/B および骨材種類の相違に係らず、十分な曲げ靱性を有していることがわかる。

さらに、Fig.6(c)によれば、HFFRC のひび割れ本数は、W/B および骨材種類の相違に係らず、6 本程度以上となっている。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 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のひび割れを確認しており、HFFRC は W/B および骨材種類の相違に係らず、十分なひび割れ分散性を有していることがわかる。

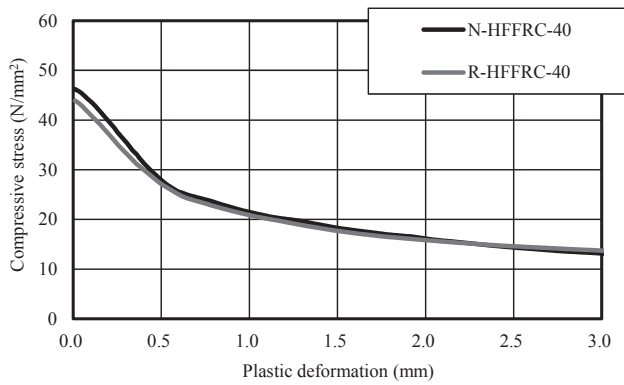
即ち、W/B および骨材種類の相違に係らず、HFFRC は十分な曲げ靱性およびひび割れ分散性を有していること(HFDFRC が実現可能)がわかった。

3.2 圧縮破壊挙動

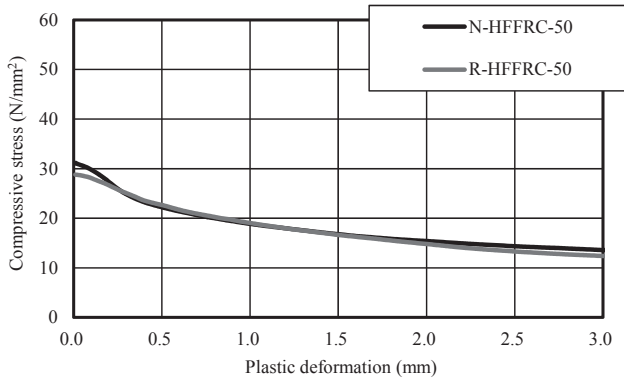
(1) 圧縮応力-縦ひずみ関係

Fig.7 に、1 軸圧縮試験により得られた HFFRC の圧縮応力(σ_c)-縦ひずみ(ϵ_c)関係を、骨材種類別に示す。なお、 ϵ_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。

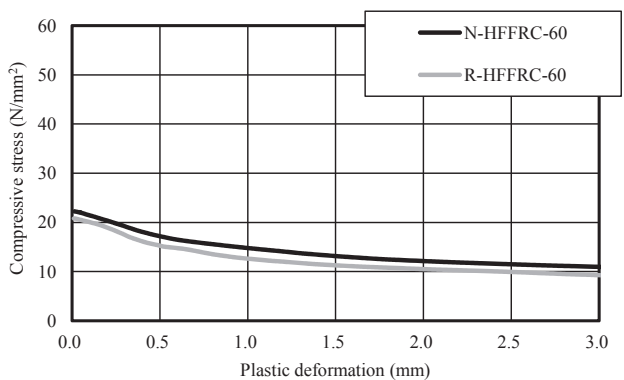
Fig.7 によれば、HFFRC の σ_c - ϵ_c 関係における、 F_c 以降、急激に σ_c が低下する際の負勾配(以下、 F_c 以降の負勾配と略記)は、骨材種類の相違に係らず、W/B の増加に伴い緩やかとなっている。この傾向は、文献¹⁶⁾(DFRCC の傾向)と同様である。なお、同一 W/B の場合、R-HFFRC の F_c 以降の負勾配は、W/B=40 および 50%では、N-HFFRC



(a) W/B=40%



(b) W/B=50%



(c) W/B=60%

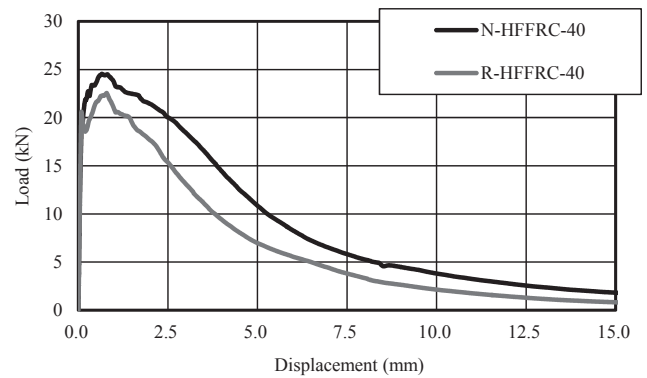
Fig.8 Compressive stress—Plastic deformation relationship.

と比較して、若干緩やかとなっており、W/B=60%では、若干きつくなっている。一般的に、 F_c 以降の負勾配は、 F_c の低下に伴い緩やかとなり、同一 F_c であれば、 G_{Fc} の低下に伴いきつくなる。前述の、Fig.5(b)および Fig.6(a)の同一 W/B における F_c および G_{Fc} に関する傾向 (R-HFFRC の F_c および G_{Fc} は、N-HFFRC と比較して若干小さくなっており、特に、W/B=60%では、 G_{Fc} の差が大きくなっていること)が、骨材種類の相違する HFFRC の F_c 以降の負勾配の傾向に反映されているものと思われる。

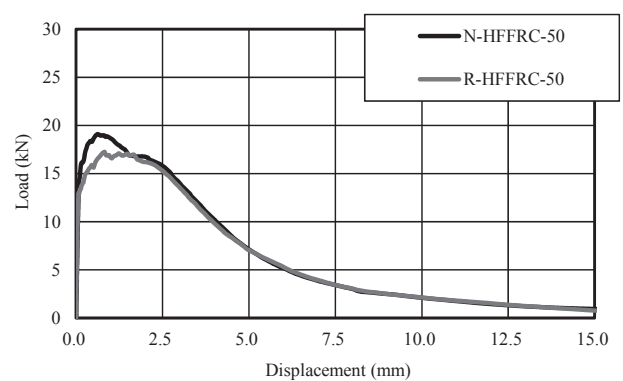
(2) 圧縮応力—塑性変形関係

Fig.8 に、1 軸圧縮試験により得られた HFFRC の σ_c —塑性変形(δ_c')関係を、骨材種類別に示す。

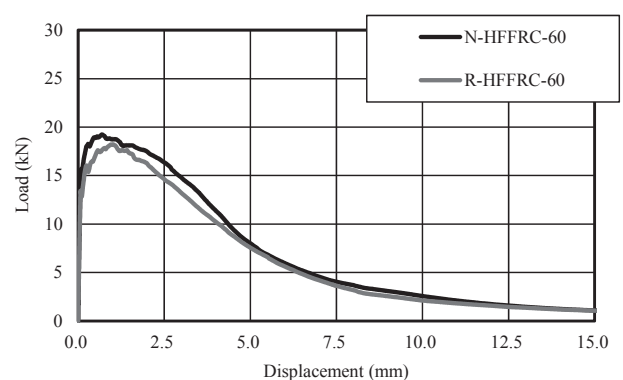
Fig.8 によれば、HFFRC の σ_c — δ_c' 関係における、 F_c 以降の負勾配は、骨材種類の相違に係らず、W/B の増加に



(a) W/B=40%



(b) W/B=50%



(c) W/B=60%

Fig.9 Load—Displacement relationship.

伴い、緩やかとなっていること等、前掲、Fig.7 の傾向と同様である。

3.3 曲げ破壊挙動

Fig.9 に、3 等分点曲げ試験により得られた HFFRC の P— δ_{ib} 関係を、骨材種類別に示す。

Fig.9 によれば、HFFRC の P— δ_{ib} 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、高い荷重レベルを保った状態でひび割れ分散を繰り返しながら最大荷重を迎えており、優れた曲げ靱性を有していることがわかる。また、同一 W/B の場合、最大荷重以降における R-HFFRC の破壊挙動は、N-HFFRC と比較して、W/B=40%では、脆性的となり、W/B=50 および 60%では、概ね同様の傾向を示した。これは、前述の、Fig.6(b)の同

一 W/B における f_{2b} に関する傾向(R-HFFRC の f_{2b} は、N-HFFRC と比較して若干低くなっており、特に、W/B=40%では、その差が大きくなっていること)が骨材種類の相違する HFFRC の破壊挙動の傾向に反映されているものと思われる。

4. まとめ

本研究では、天然および再生骨材を使用した高流動繊維補強コンクリートのフレッシュ試験、1 軸圧縮試験および3等分点曲げ試験を実施した。本研究の範囲において得られた知見を、以下に示す。

- 1) 目標スランプフローを 65cm と設定した高流動繊維補強コンクリートのスランプフローは、60.5～68.3cm となっており、骨材種類および W/B の相違に係らず、材料分離も生じていなかった。
- 2) 水結合材比=40～60%の範囲における高流動繊維補強コンクリートのひび割れ本数は、骨材種類の相違に係らず、6 本程度以上となっており、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。

今後はコストの低減、水和熱や乾燥収縮の抑制に関する検討を行う予定である。

謝辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た、現東海大学学生の澁澤凌君、加納夏樹君、大瀧諄君、増島夏熙君、春間光君、元東海大学学生の板倉雅之君、麻村勇太君および矢部智也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、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) 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)。
- 4) 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)。
- 5) 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)。
- 6) 渡部憲、河村準：細骨材としてシラスを使用したモルタルの長期性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.31, No.1, pp.439-444(2009)。
- 7) 大岡督尚、渡部憲、加藤晃敏：再生粗骨材コンクリートの場所内鉄筋コンクリート杭への適用、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.335-336(2004.7)。
- 8) 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)。
- 9) 中村充哉、渡部憲：再生骨材を使用した高靱性コンクリートの材料特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.33, No.1, pp.335-340(2011.7)。
- 10) 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(2016.7)。
- 11) 日本建築学会：建築工事標準示方書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 pp.407-425(2003)。
- 12) 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)。
- 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ー曲率曲線試験方法(JCI-S-003-2007)、コンクリート工学協会、8pp.(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) 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)。