

論文 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

丸山 裕生^{*1}・渡部 憲^{*2}

要旨:本研究では、水結合材比の異なる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について検討を行うため、一軸圧縮試験および三等分点曲げ試験を、材齢7、28および91日で実施した。その結果、再生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おり、水結合材比が40から60%の範囲において、再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートの水結合材比を定めれば、本研究で示した手法により、圧縮強度発現が推定できる等の知見が得られた。

キーワード: 再生骨材, 高靱性コンクリート, 高流動, 強度発現, 長期性状

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初期ひび割れ発生後も複数のひび割れが継続的に形成され(原文では、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力学特性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。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。しかし、経済産業省の碎石等動態統計調査結果によると、例えば、平成28年度の再生骨材の出荷量は17,795(千t)であり、内訳は、道路用・その他用が17,705(千t)、コンクリート用が91(千t)となっている。再生骨材を使用した高性能なコンクリート系材料の開発は、今後、コンクリート用骨材としての再生骨材の利用推進のための一助とな

るものと、筆者らは考えている。

以上のような背景から、地球環境に配慮した、高性能なコンクリートの実現を目指して、筆者らの一人らは、混和材としてフライアッシュ、骨材として再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート(以下、R-HFDFRCと略記)の力学特性について検討を行った³⁾。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、R-HFDFRC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。

そのため、本研究では、長期性状を検討するための第一段階として、材齢91日までのR-HFDFRCの強度発現について検討を行った。また、圧縮強度等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で表現することを試みた。

2. 実験概要

本研究では、表-1に示すR-HFDFRCの一軸圧縮試験および三等分点曲げ試験を、材齢7、28および91日で行った。

(1) 使用材料

本研究で使用した再生骨材の物性一覧を、表-2に示す。再生骨材は、湿式磨砕法により製造されたものである。再生粗骨材の品質はH相当のものをを使用した。また、再生細骨材の中目と細目の混合割合(質量比)は、W/B=40および50%で4:6(混合砂の絶対密度:2.54g/cm³、吸

表-1 試験体概要

試験体名	水結合材比 (%)	細骨材率 (vol.%)	細骨材結合材比 (%)	繊維体積混入率 (vol.%)	繊維体積混合比 (V:S)	フライアッシュ置換率 (%)
R-HFC-40	40	85	40	3.0	7:3	20
R-HFC-50	50		65			
R-HFC-60	60		90			

表-2 再生骨材の物性一覧

骨材種類	最大寸法 (mm)	表乾密度 (g/cm ³)	絶対密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
粗骨材	10	2.58	2.52	2.54	6.04
細骨材	中目	2.57	2.50	2.98	2.48
	細目	2.55	2.45	4.07	1.20

*1 東海大学大学院 工学研究科建築土木工学専攻 (学生会員)

*2 東海大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

水率:3.95%), W/B=60%で2:8(混合砂の絶乾密度:2.53g/cm³, 吸水率:4.26%)であり, 品質はM相当である。なお, 粗骨材の最大寸法が大きくなると, 繊維による架橋が困難になるため, 本研究では, 再生粗骨材の最大寸法を10mmとした。今後, 粗骨材の最大寸法をより大きくした場合の検討を行う必要がある。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, 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, 分離低減材およびフライアッシュII種(密度:2.34g/cm³)を使用した。

(2) 調合

本研究では, R-HFDFRCの水結合材比(W/B)を40, 50および60%, 細骨材率を85%とした。繊維は, VとSを混合使用し, 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とした。フライアッシュのセメント置換率は, 20%とした。

2.1 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験の概要を, 図-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による試験体中央部

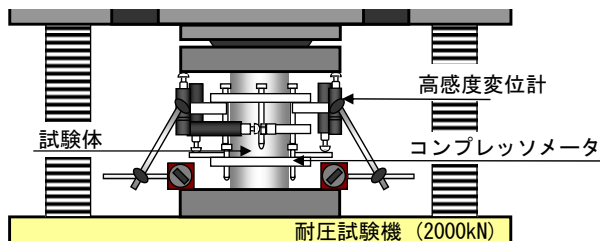
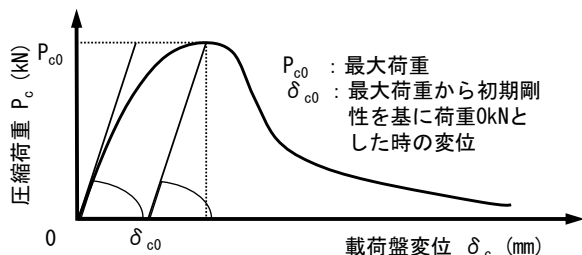
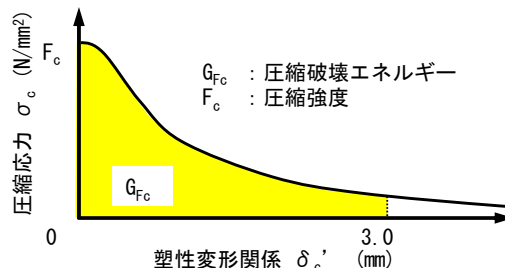


図-1 一軸圧縮載荷



(a) 荷重-载荷盤間変位関係



(b) 圧縮応力-塑性変形関係

図-2 圧縮軟化挙動の評価方法

の縦・横ひずみおよび載荷盤間変位とした。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。

図-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^{4),5)}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)-載荷盤間変位(δ_c)関係(図-2(a))を圧縮応力(σ_c)-塑性変形(δ_c')関係(図-2(b))に変換する。次に, σ_c - δ_c' 関係から δ_c' が3.0mmまでの面積を求める。本研究ではこれを G_{Fc} として評価した。なお, $\delta_c'=3.0$ mmと定めた理由は, σ_c - δ_c' 関係において, 十分に σ_c が低下する領域までを含む値として G_{Fc} を定義するためである。

2.2 三等分点曲げ試験

三等分点曲げ試験の概要を, 図-3に示す。載荷は, 100kN AUTOGRAPH型精密万能試験機を使用して行った。試験体は, 100×100×400mmの角柱試験体とし, 各要因5体製作した。三等分点曲げ試験は, 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⁷⁾に準じて, 以下の手法で評価した。

まず, 曲げ強度(f_{lb})は, 以下の式により求めた。

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

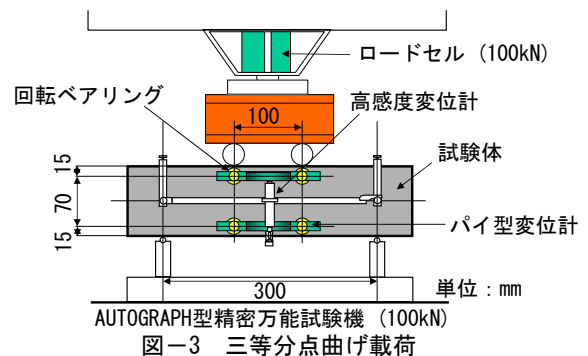


図-3 三等分点曲げ載荷

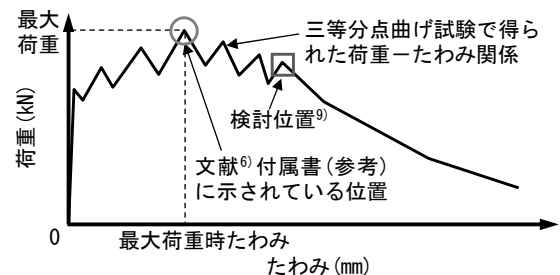


図-4 荷重-たわみ関係のイメージ

ここに、 f_{lb} :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。

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

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、曲げ応力- δ_{tb} 関係において、軟化部分も含めた $f2_b$ を評価するため、 $f2_b$ を δ_{tb} が7.5mmとなる時点での値とした。

三等分点曲げ試験で得られたP- δ_{tb} 関係の中には、最大荷重以降もひび割れ分散を繰り返し、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(図-4参照)。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_{tb})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(図-4の四角印位置)において F_{tb} 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

表-3に、一軸圧縮試験および三等分点曲げ試験により得られた、材齢91日までのR-HFDFRCの強度試験結果を、図-5に、材齢91日までのR-HFDFRCの材料特性-材齢関係を示す。

(1) 圧縮強度発現

図-5(a)、(b)および(c)によれば、材齢91日までのR-HFDFRCの圧縮強度(F_c)、ヤング係数(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。また、同一材齢であれば、R-HFDFRCの F_c 、Eおよび G_{Fc} は、W/Bの低下に伴い増大している。なお、既往の研究³⁾によれば、W/B=50%における材齢28日のR-HFDFRCの F_c および G_{Fc} は天然骨材を使用したHFDFRC(以下、N-HFDFRCと略記)と比較して、 G_{Fc} は同程度であるが、 F_c は3.4%低下している。今回の結果においても、天然骨材を使用した場合と比較して、同程度の F_c の低下が考えられる。

(2) 曲げ強度発現

図-5(d)、(e)および(f)によれば、材齢91日までのR-HFDFRCの f_{lb} 、 F_{tb} 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。この理由として、R-HFDFRC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、繊維による架橋が行

表-3 強度試験結果

試験体名	圧縮強度 (F_c) (N/mm ²)			ヤング係数 (E) (kN/mm ²)			圧縮破壊 エネルギー (G_{Fc}) (N/mm)			曲げ強度 (f_{lb}) (N/mm ²)			引張強度 ($F_{t,b}$) (N/mm ²)			曲げ靱性係数 ($f2_b$) (N/mm ²)			引張終局 ひずみ ($\epsilon_{tu,b}$) (%)			ひび割れ本数 (本)		
	7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
R-HFC-40	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	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	0.94	1.86	8	8	6
R-HFC-60	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

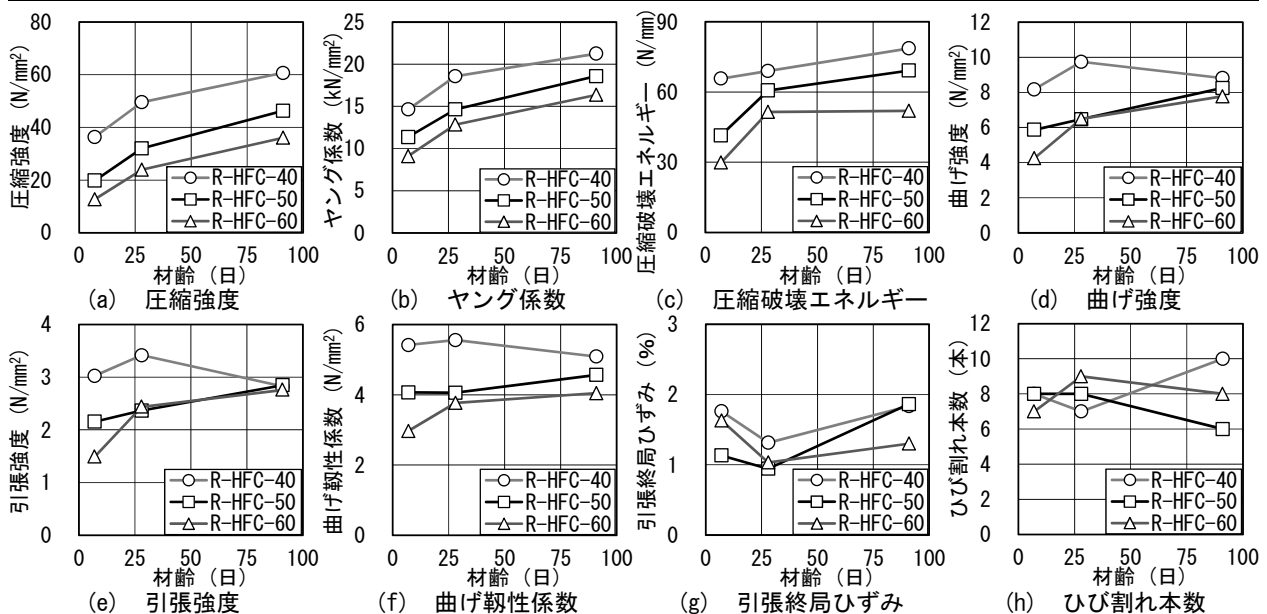


図-5 材齢91日までのR-HFDFRCの材料特性-材齢関係

われても、架橋による荷重上昇が困難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。以上、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 4N/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。なお、既往の研究³⁾によれば、W/B=50%における材齢28日のR-HFDFRCの f_{1b} および f_{2b} はN-HFDFRCと比較して、 f_{1b} は19.0%、 f_{2b} は19.8%低下している。今回の結果においても、天然骨材を使用した場合と比較して、同程度の f_{1b} および f_{2b} の低下が考えられる。

図-5(g)によれば、材齢91日までのR-HFDFRCの $\varepsilon_{tu,b}$ 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。

図-5(h)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。なお、既往の研究³⁾によれば、W/B=50%における材齢28日のR-HFDFRCのひび割れ本数はN-HFDFRCと比較して、同程度であった。

前述の通り、 f_{2b} とは、 $\delta_{tb}=7.5\text{mm}$ までの平均曲げ応力であり、材齢91日までのR-HFDFRCの f_{2b} は、材齢28日以

降であれば 4N/mm^2 程度以上ある。また、複数ひび割れ発生とは、文献⁶⁾によれば、2本以上の独立したひび割れが発生する場合と定義されており、材齢91日までのR-HFDFRCのひび割れ本数は、6本程度以上ある。

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} 、 $\varepsilon_{tu,b}$ 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〕⁹⁾(以下、JSC Eと略記)およびCEB-FIP Model Code 1990¹⁰⁾(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:

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

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

表-4 材料定数および近似誤差(圧縮強度およびヤング係数)

試験体名	材料定数				実験結果に対する式(3)および式(4)の近似誤差(%)						実験結果に対する式(5)および式(6)の近似誤差(%)					
					圧縮強度(F_c)			ヤング係数(E)			圧縮強度(F_c)			ヤング係数(E)		
	α	β	γ	s	7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
R-HFC-40	0.763	5.25	2.60	0.334	-9.83	5.22	-0.464	1.60	1.03	-4.99	-2.35	0.000	-5.21	7.34	0.000	-5.87
R-HFC-50	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	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

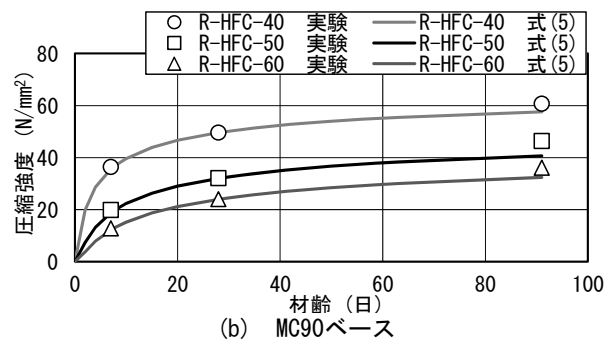
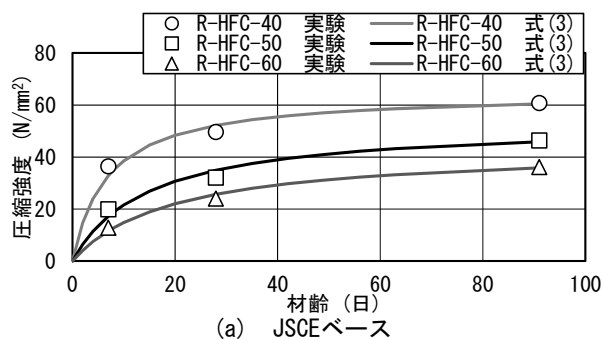


図-6 圧縮強度-材齢関係

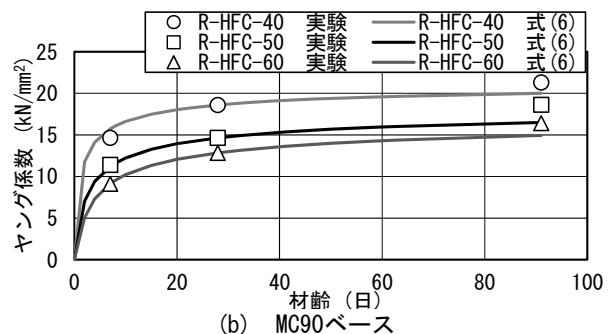
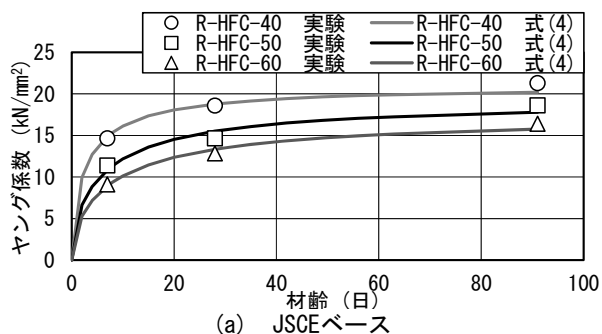


図-7 ヤング係数-材齢関係

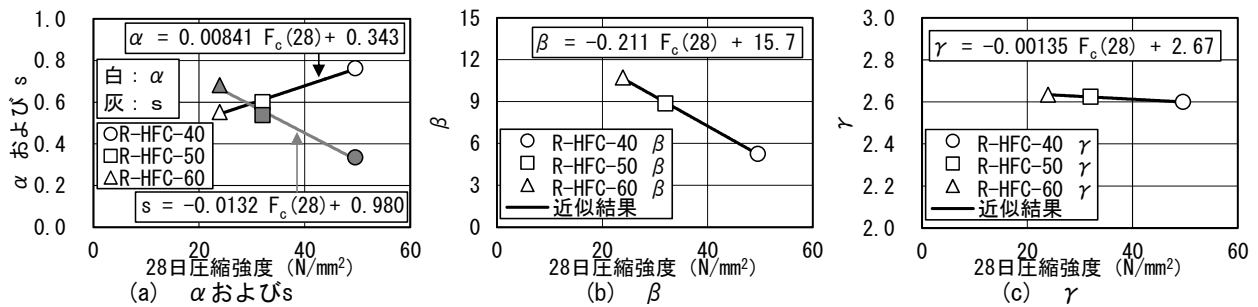


図-8 各材料定数(α , β , γ および s)—材齢28日における圧縮強度関係

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(N/mm^2)およびヤング係数(kN/mm^2), α , β , γ および s :材料定数である。

表-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、図-6および図-7に、一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。

表-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、+7.34~11.3%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。

図-8に、R-HFDFRCの各材料定数(α , β , γ および s)— $F_c(28)$ 関係を示す。

まず、図-8(a)によれば、 α は $F_c(28)$ の増加に伴い、ほぼ直線的に増大する傾向にある。また、 s は $F_c(28)$ の増加に伴い、ほぼ直線的に減少する傾向にある。

次に、図-8(b)によれば、 β は $F_c(28)$ の増加に伴い、ほぼ直線的に減少する傾向にある。

さらに、図-8(c)によれば、 γ は $F_c(28)$ の増加に伴い、若干減少する傾向にある。

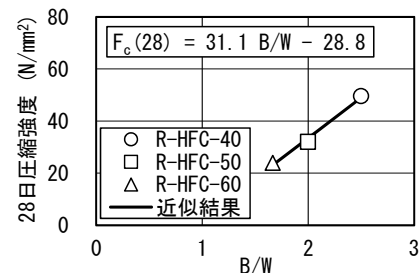


図-9 材齢28日における圧縮強度— B/W 関係

以上より、各材料定数(α , β , γ および s)は $F_c(28)$ の関数で表すことが可能であると思われる、各材料定数について、直線近似すると図-8に示す近似式が得られる。

なお、R-HFDFRCの $F_c(28)$ と B/W の関係は、図-9に示す通りである。R-HFDFRCの $F_c(28)$ — B/W の関係について、直線近似すると図-9に示す近似式が得られる。

即ち、本研究と使用材料、養生条件および試験条件(載荷速度、試験体寸法)が同一の場合、 $W/B=40\sim60\%$ において、 W/B を定めれば、材齢91日までのR-HFDFRCの圧縮強度発現(F_c および E)が推定できる。

(2) 曲げ強度発現

図-10に、R-HFDFRCの一軸圧縮試験および三等分点曲げ試験により得られた、 f_{lb} および F_{lb} — 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。図-10(a)によれば、 f_{lb} — 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、図-10(b)の F_{lb} — 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_{lb} および F_{lb} は、一般的に F_c の累乗関数として表される(例えば、10),11),12)。そこで、本研究におい

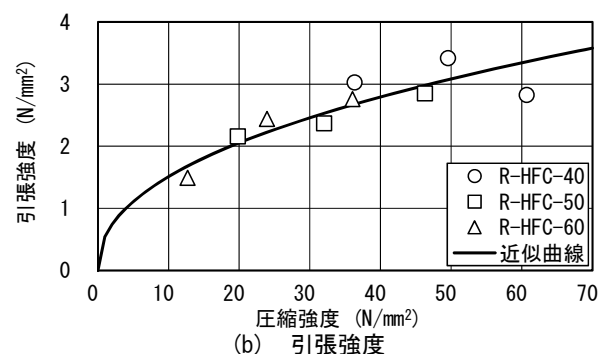
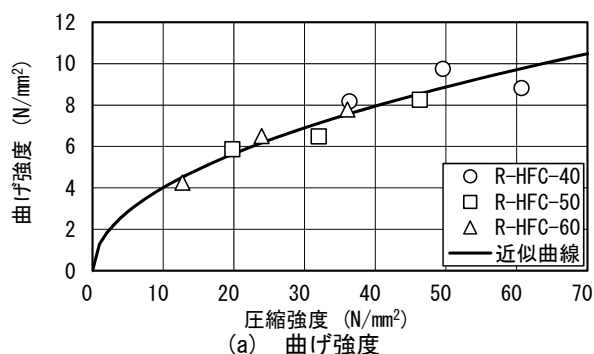


図-10 曲げ強度および引張強度—圧縮強度関係

表－5 材料定数および近似誤差
(曲げ強度および引張強度)

(a) 曲げ強度					
試験体名	材料定数		実験結果に対する 式(7)の近似誤差 (%)		
	A	B	7日	28日	91日
R-HFC-40	1.29	0.493	-7.17	-9.28	10.7
R-HFC-50			-4.14	9.99	3.55
R-HFC-60			6.44	-4.97	-2.84
(b) 引張強度					
試験体名	材料定数		実験結果に対する 式(8)の近似誤差 (%)		
	C	D	7日	28日	91日
R-HFC-40	0.545	0.443	-11.5	-10.1	19.0
R-HFC-50			-5.13	6.96	4.58
R-HFC-60			13.0	-8.68	-3.33

ても、R-HFDFRCの f_{lb} および F_{tb} に関して、以下の近似式による近似を試みる。

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

$$F_{tb} = C \times F_c^D \quad (8)$$

ここに、A、B、CおよびD:材料定数である。

表－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_{lb} の近似誤差は、+10.7～-9.28%、式(8)による F_{tb} 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_{lb} および F_{tb} 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。ただし、R-HFDFRCの f_{lb} および F_{tb} は、 F_c が50N/mm²を超えると低下する傾向にあり、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。

以上より、本研究と使用材料、養生条件および試験条件(載荷速度、試験体寸法)が同一の場合、 $F_c \leq 50\text{N/mm}^2$ の範囲において、材齢の相違する各種R-HFDFRCの F_c から、 f_{lb} および F_{tb} が推定できることがわかった。

即ち、本研究と使用材料、養生条件および試験条件(載荷速度、試験体寸法)が同一の場合、 $F_c \leq 50\text{N/mm}^2$ の範囲において、R-HFDFRCの F_c を定めれば、曲げ強度発現(f_{lb} および F_{tb})が推定できる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を、以下にまとめる。

- 1) 再生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) 本研究と使用材料、養生条件および試験条件(載荷速度、試験体寸法)が同一の場合、水結合材比が40から60%の範囲において、水結合材比を定めれば、本研究で示した手法により、再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートの材齢91日までの圧縮強度発現(圧縮強度およびヤング係数)が推定できる。
- 3) 本研究と使用材料、養生条件および試験条件(載荷速度、試験体寸法)が同一の場合、圧縮強度が50N/

mm²以下の範囲において、再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートの圧縮強度を定めれば、本研究で示した手法により、曲げ強度発現(曲げ強度および引張強度)が推定できる。

謝 辞

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
- 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
- 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) 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
- 10) CEB:CEB-FIP MODEL CODE1990、Thomas Telford
- 11) 近藤泰夫、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
- 12) 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、第472号、pp. 11-16、1995