

再生骨材を使用した高靱性コンクリートに関する実験的研究

中村 允哉^{*1} 渡部 憲^{*2}

Experimental Study on Ductile Fiber Reinforced Concrete Using Recycled Aggregate

by

Masaya NAKAMURA^{*1} and Ken WATANABE^{*2}

(Received on Sep. 29, 2010 and accepted on Nov. 17, 2010)

Abstract

Nowadays it is indispensable to take global environmental issues into consideration during industrial activities. In concrete industries as well, studies on recycled aggregate concretes have extensively been carried out, aiming to resolve the problem of environmental destruction caused by extraction of natural aggregates or the problem of depletion of natural aggregates. In view of these situations, it is important to investigate new applications of recycled aggregates. For example, the investigation concerning applicability of Ductile Fiber Reinforced Cementitious composites (DFRCC) using recycled fine aggregate was reported. DFRCCs are composites of cementitious material reinforced with fibers, which is superior to the existing fiber reinforced concrete (FRC), especially in terms of crack-dispersing property and mechanical ductility. However, example of the construction to use DFRCC is not so much because of mechanical defects and so on. If the performance of DFRCC can be achieved by FRC, those problems will be solved. In the present study, we examined potential applicability of ductile fiber reinforced concrete (DFRC) using recycled aggregate. Two kinds of concretes were examined. The water-cement ratios were 45, 50 and 55% for concrete. The sand-total aggregates ratios were 60, 80 and 100%. The fiber volume fractions were 2, 3 and 4%. Three types of loading were used, i.e., compressive, split tensile and 3-point bending tests. The dimensions of specimens were 100 (diameter) x 200 (height) mm for compression and splitting tests and 100 x 100 x 400mm for 3-point bending tests. This paper presents conclusions confirming the sufficient crack dispersing property, compressive ductility, and flexural ductility of fiber reinforced concrete using recycled aggregate, suggesting a potential applicability of DFRC.

Keywords: Recycled aggregate, Fiber, Fiber reinforced concrete, Ductile-fiber-reinforced concrete

1. はじめに

現在、地球環境問題に対する社会的関心が高まり、生産活動において切り離すことのできない問題となっている。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、利用技術の一例として、再生細骨材を使用した高靱性セメント複合材料(Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites 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、既存の繊維補強コンクリートをはるかに上回るひび割れ分散性や、曲げ、引張、圧縮破壊時の靱性を有する材料である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変わる高性能な

補修用材料、衝撃緩衝材料など、新しい各種の用途が期待でき、土木・建築のコンクリート分野に技術革新をもたらす可能性を有している。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、他の材料と比較してコストが高い、大量供給を行うシステムが確立されていないといった施工上の問題点が挙げられるほか、マトリックスとして主にモルタル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く、構造体としての強度を十分に発現できないといった材料特性上の問題点が考えられ、既存の繊維補強コンクリートに用いられる材料、調合にて DFRCC の性能を達成することができれば、上記の問題点の改善を含む、多くの付加価値をもつ有用な材料になり得ると考えられる。このような背景から、堀越ら⁴⁾は PVA 繊維を用いた高靱性コンクリート(Ductile Fiber Reinforced Concrete 以下、DFRC と略記)に関する研究を行っており、粗骨材混入、繊維径および繊維混入率、単位水量および単位セメント量の変化が及ぼす曲げ靱性

*1 工学研究科建築学専攻修士課程

*2 工学部建築学科准教授 博士(工学)

Table 1 outline of specimens

Specimen	Coarse aggregate	Water-binder ratio (W/B) (%)	Fine aggregate-cement ratio (S/C) (%)	Sand-total aggregate ratio (s/a) (%)	Fiber volume fraction (V_f) (%)	Mixing proportion of fiber (V_m)		
NC45-S80-VF3-V7-S3	N	45	80	80	3	V(7)+S(3)		
NM50-S100-VF3-V7-S3	-	-	100	100				
NC50-S80-VF3-V7-S3	N	50	80	80				
2NC50-S80-VF3-V7-S3	2N		60	60				
NC50-S80-VF3-V7-S3	N	55	80	80				
NC55-S80-VF3-V7-S3	N		79	80				
RC45-S80-VF3-V7-S3	R	45	79	80	3	V(7)+S(3)		
RM50-S100-VF3-V7-S3	-	-	100	100				
RC50-S80-VF3-V7-S3	R	50	80	80				
2RC50-S80-VF3-V7-S3	2R		60	60				
RC50-S80-VF3-V10-S0	R	50	79	80			2	V(10)
RC50-S80-VF3-V5-S5	R						4	V(5)+S(5)
RC50-S80-VF2-V7-S3	R	55	59	60	3	V(7)+S(3)		
RC50-S80-VF4-V7-S3	R				79	80		
RC50-S60-VF3-V7-S3	R	55	79	80	3	V(7)+S(3)		
RC55-S80-VF3-V7-S3	R				79	80		

coarse aggregate: N-Crushed stone (Percentage of absorption :0.53%, Maximum size :10.0mm)
 2N-Crushed stone (Percentage of absorption :0.53%, Maximum size :20.0mm)
 R-Recycled coarse aggregate (Percentage of absorption :2.09%, Maximum size :10.0mm)
 2R-Recycled coarse aggregate (Percentage of absorption :2.09%, Maximum size :20.0mm)
 Fine aggregate: Crushed sand(Percentage of absorption :1.03%, Maximum size :5.0mm)
 P/sand (Percentage of absorption :2.11%, Maximum size :1.2mm)
 The mixing proportion of crushed sand and pit sand are 7:3
 Recycled fine aggregate (Percentage of absorption :4.83%, Maximum size :5.0mm)
 Cement : ordinary portland cement
 Fiber: V-PVA fiber (Diameter :0.2mm, Length :18mm, Young's modulus :27kN/mm², Tensile strength :979N/mm²)
 S-Steel fiber (Diameter :0.55mm, Length :30mm, Young's modulus :210kN/mm², Tensile strength :1080N/mm²)

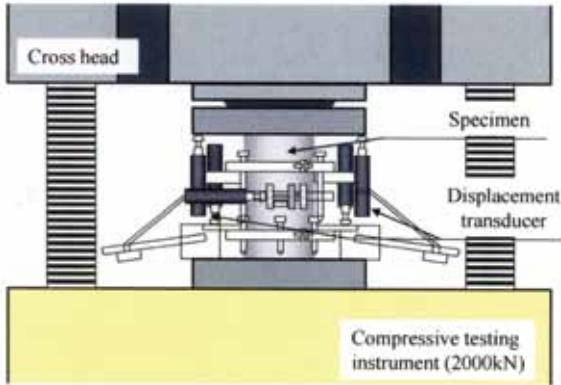


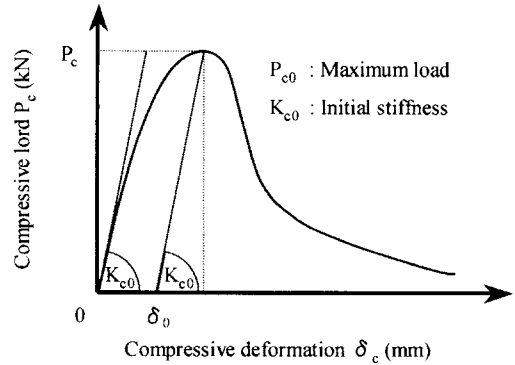
Fig. 1 Compressive lording system

への影響を明らかにしたが、繊維種類、骨材種類などによる比較は行っておらず、未解明な点も多い。

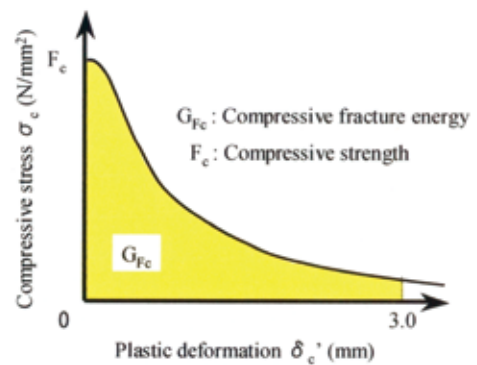
よって本研究では、水和熱の低減、乾燥収縮の抑制、圧縮強度の向上、コストの改善といった、モルタルとコンクリートを比較した際に挙げられる利点の付与、ならびに再生骨材の用途拡大を目的とし、その第一段階として、天然および再生骨材を使用した DFRC の実現性について検討した。

2. 実験方法

本研究では、Table 1 に示す天然骨材繊維補強モルタルおよびコンクリート、再生骨材繊維補強モルタルおよびコンクリートの 1 軸圧縮試験、割裂引張試験および切欠き梁 3 点曲げ試験を行った。マトリックスの種類は、天然細骨材を使用したモルタル(NM)、再生細骨材を使用したモルタル(RM)、最大寸法 10mm および 20mm の砕石を使用したコンクリート(NC, 2NC)、最大寸法 10mm および 20mm の再生粗骨材を使用したコンクリート(RC, 2RC)の 6 種類とし、水結合材比(W/B)を 45%, 50%, 55%, 細骨材率(s/a)を 100%, 80%, 60%, 目標スランプ値を



(a) Compressive load-compressive deformation relationship



(b) Compressive stress-plastic deformation relationship

Fig. 2 Estimation procedure of compression softening curve

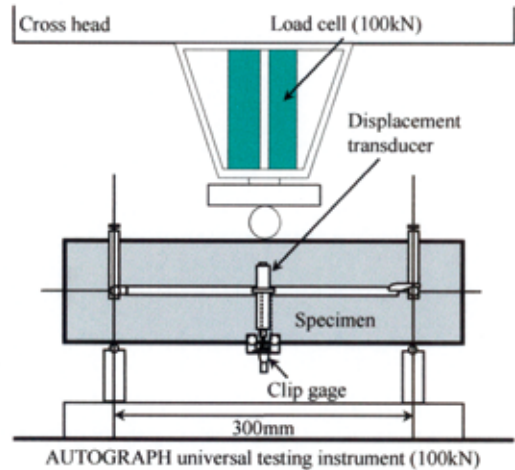


Fig. 3 3-point Loading system

18.0cm とした。繊維は PVA 繊維(径:0.2mm, 長さ:18mm)と鋼繊維(径:0.55mm, 長さ:30mm)を混合使用し、繊維体積混入率(V_f)を 2%, 3%, 4%, PVA 繊維(V)と鋼繊維(S)の繊維体積混合比(V_m)を 10:0(V(10)), 7:3(V(7)+S(3)), 5:5(V(5)+S(3))とした。

2.1 一軸圧縮試験

Fig. 1 に、1 軸圧縮載荷の概要を示す。載荷は 2000kN 耐圧試験機を使用した。試験体は $\phi 100 \times 200$ mm の円柱試験体とし、前掲した Table1 の調査毎に 3 体製作した。試験体は打設後 2 日で脱型し、試験時(材齢 28 日)まで標

準水中養生とした。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。

Fig. 2 に、圧縮軟化挙動の評価方法について示す。評価方法は文献¹⁾を参考に、以下の手法で評価した。

まず、実験で得られた圧縮荷重-載荷盤間変位関係を圧縮応力-塑性変形関係に変換する。次に、圧縮応力-塑性変形関係から塑性変形が 3.0mm までの面積を求め、本研究ではこれを圧縮破壊エネルギー(G_{Fc})として評価した。なお、実験結果で塑性変形が 3.0mm まで得られていないものは、実験データを外挿して G_{Fc} を求めた。

2.2 切欠き梁 3 点曲げ試験

Fig. 3 に、切欠き梁 3 点曲げ載荷の概要を示す。試験体は 100×100×400mm の角柱試験体とし、前掲した Table 1 の調合毎に 3 体製作した。試験体は打設後 2 日で脱型し、試験時(材齢 28 日)まで標準水中養生とした。切欠きは載荷直前にダイヤモンドカッター(刃厚: 2mm)を使用して試験体中央に深さ 50mm となるように施工した。支点間のスパンは 300mm である。載荷は、AUTOGRAPH 型精密万能試験機を用いて行い、クロスヘッド速度は 0.2mm/min とした。計測項目は、荷重、スパン中央部のたわみ、および切欠き口の開口変位とした。

曲げ靱性は文献⁵⁾を参考に、以下の手法で評価した。まず、曲げ強度は以下の式より求めた。

$$f1_b = \frac{P \cdot \ell}{b \cdot h^2} \times \frac{3}{2} \quad (1)$$

ここに、 $f1_b$: 曲げ強度 (N/mm²)、P: 最大荷重 (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、以下の式によって求めた。

$$f2_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{\ell}{b \cdot h^2} \times \frac{3}{2} \quad (2)$$

ここに、 $f2_b$: 曲げ靱性係数 (N/mm²)、 T_b : 原点から δ_{tb} までの荷重-たわみ曲線の積分値 (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。

3. 結果と考察

3.1 各種材料特性

Table 2 に、実験により得られた繊維補強モルタル、およびコンクリートの各種材料特性一覧を示す。

Table 2 Material properties

No.	Specimen	Fresh					Hardening							
		Slump (cm)	Flow (mm)	Air (%)	Flexural strength ($f1_b$) (N/mm ²)	Flexural toughness (Z_b)		Number of crack*1	Crack band width*2 (mm)	Density (g/cm ³)	Young's modulus (E) (kN/mm ²)	Compressive strength (N/mm ²)	Split tensile strength*3 (N/mm ²)	Compressive failure energy (G _{fc}) (N/mm ²)
						Displacement t: 7.5mm (N/mm ²)	Displacement t: 15mm (N/mm ²)							
1	NC45-S80-VF3-V7-S3	20.0	335	2.4	13.5	10.7	7.27	5	29.7	2.15	20.5	53.2	3.51	-
2	RC45-S80-VF3-V7-S3	19.5	355	2.5	12.2	9.33	6.59	4	32.3	2.11	19.8	50.6	3.49	-
3	NM50-S100-VF3-V7-S3	23.0	470	2.3	8.70	5.90	3.81	5	26.0	2.11	18.2	45.6	3.09	58.5
4	RM50-S100-VF3-V7-S3	22.0	475	2.6	9.66	7.09	4.75	5	33.6	2.07	18.1	45.1	3.54	67.5
5	NC50-S80-VF3-V7-S3	20.5	410	2.5	10.7	8.25	5.70	6	30.1	2.08	18.4	45.0	3.29	66.1
6	RC50-S80-VF3-V7-S3	20.5	405	2.5	11.9	9.43	6.57	5	35.8	2.09	18.4	44.7	3.11	52.5
7	2NC50-S80-VF3-V7-S3	22.5	445	2.4	9.53	7.29	4.84	4	29.8	2.11	18.7	45.3	3.51	48.6
8	2RC50-S80-VF3-V7-S3	21.0	430	2.2	8.78	5.91	3.71	5	29.0	2.08	18.3	44.4	3.37	58.8
9	RC50-S80-VF2-V7-S3	25.5	545	2.1	9.75	6.26	4.14	4	24.4	2.07	19.3	47.7	3.45	57.2
10	RC50-S80-VF4-V7-S3	14.0	305	2.3	11.4	8.77	5.80	4	25.7	2.09	17.8	43.2	3.24	69.1
11	RC50-S80-VF3-V10-S0	18.0	335	2.4	8.53	5.78	3.85	4	24.2	2.02	17.6	47.0	3.13	63.9
12	RC50-S80-VF3-V7-S5	22.5	435	2.5	13.3	10.0	6.75	5	32.2	2.13	18.9	47.6	3.60	60.6
13	NC50-S60-VF3-V7-S3	15.0	320	2.5	12.7	9.79	6.86	4	34.3	2.11	19.7	47.6	3.61	56.3
14	RC50-S60-VF3-V7-S3	14.0	310	2.5	13.4	10.5	7.39	5	37.8	2.08	18.7	47.4	3.31	68.8
15	NC55-S80-VF3-V7-S3	21.5	450	2.5	10.4	7.98	5.51	5	30.5	2.06	16.8	42.1	3.28	-
16	RC55-S80-VF3-V7-S3	21.0	420	2.5	11.7	9.16	6.41	6	34.5	2.04	17.1	41.3	3.15	-

*1: The values indicate the number of cracks observed after the test for notched beam specimen

*2: Measured with vernier calipers for the specimens with multiple cracking property

*3: Initial cracking stress for fiber reinforced concrete

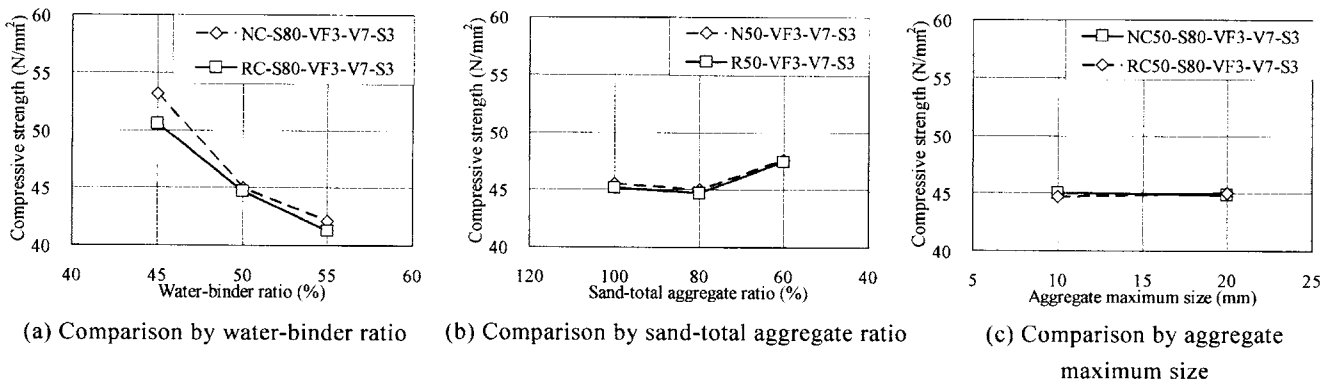


Fig. 4 Compressive strength

(1) 圧縮強度

Fig. 4 (a)に、天然および再生骨材を使用した W/B の異なる繊維補強コンクリート ($V_f=3\%$, $V_m=V(7)+S(3)$, $s/a=80\%$) の圧縮試験により得られた圧縮強度-W/B 関係を示す。Fig.4 (a)より、W/B の増加に伴い圧縮強度が低下していることが分かる。

Fig. 4 (b)に、天然および再生骨材を使用した s/a の異なる繊維補強モルタルおよびコンクリート ($V_f=3\%$, $V_m=V(7)+S(3)$) の圧縮試験により得られた圧縮強度-s/a 関係を示す。Fig.4 (b)より、s/a=100~80%においては圧縮強度が低下したが、s/a=80~60%においては圧縮強度が増加する傾向を示した。

Fig. 4 (c)に、天然および再生骨材を使用した粗骨材最大径の異なる繊維補強コンクリート ($V_f=3\%$, $V_m=V(7)+S(3)$, $s/a=80\%$) の圧縮試験により得られた圧縮強度-粗骨材最大径関係を示す。Fig.4 (c)より、骨材種類、骨材最大径の変化による圧縮強度への影響は見られなかった。

(2) 曲げ強度、曲げ靱性係数およびひび割れ本数

Fig. 5 に、天然および再生骨材を使用した W/B の異なる繊維補強コンクリート ($V_f=3\%$, $V_m=V(7)+S(3)$, $s/a=80\%$) の切欠き梁3点曲げ試験により得られた f_{1b} , f_{2b} およびひび割れ本数-W/B 関係を示す。

まず、Fig. 5 (a)に注目すると、NC、RC ともに W/B の増加に伴い f_{1b} が低下する傾向を示すものの、NC と比較

し、RC では W/B の増加に伴う f_{1b} の低化量が少ないことが分かる。また、Fig. 5 (b)では、RC は W/B の増加に係わらず f_{2b} がほぼ一定の値を示していることが分かる。

次に、Fig. 5 (c)に注目すると、NC、RC 共にひび割れ本数は5本程度発生しており、再生粗骨材を使用した場合においてもひび割れ分散性を有し、DFRC が実現可能であることが分かった。

3.2 圧縮破壊挙動

(1) 繊維混入率による比較

Fig. 6 に、再生骨材を使用した V_f の異なる繊維補強コンクリート ($V_m=V(7)+S(3)$, $s/a=80\%$) の圧縮破壊試験により得られた圧縮応力-縦ひずみ関係、および圧縮応力-塑性変形関係を示す。なお、縦ひずみは載荷盤間に取り付けた変位計により計測した値であり、各圧縮応力-縦ひずみ関係、ならびに各圧縮応力-塑性変形関係は代表的な値を示している (Fig. 7 も同様である)。

Fig. 6 (a)より、 V_f の増加に伴い圧縮強度は低下しているが、Fig. 6 (b)の圧縮強度-塑性変形関係において延性的な傾向を示していることが分かる。また、前掲した Table 2 の試験体 No.6, No.9, No.10 に注目すると、 V_f の増加に伴い G_{Fc} が増加する傾向を示していることが分かる。

(2) 繊維混合比による比較

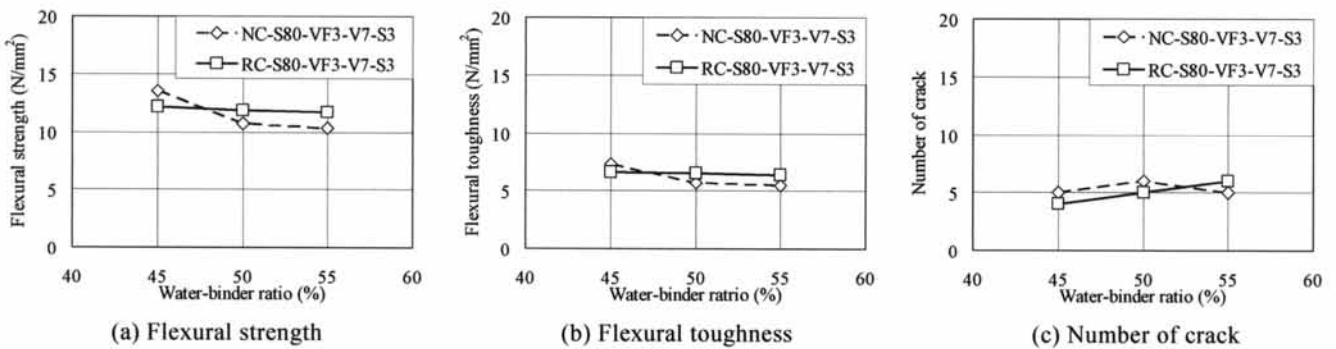


Fig. 5 Flexural strength, flexural toughness and number of crack

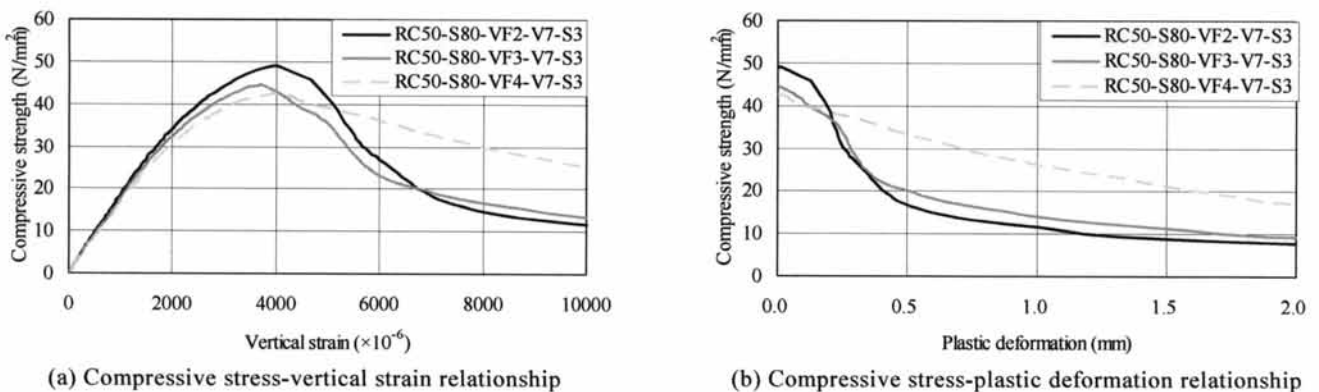


Fig. 6 Compressive stress-vertival strain relationship and Compressive stress-plastic deformation relationship (Comparison by fiber volume fraction)

Fig. 7 に、再生骨材を使用した繊維混合比の異なる繊維補強コンクリート ($V_f=3\%$, $s/a=80\%$) の圧縮破壊試験により得られた圧縮応力-縦ひずみ関係、および圧縮応力-塑性変形関係を示す。

Fig. 7 (b) の圧縮強度-塑性変形関係において、圧縮強度以降 0.5mm までは RC50-S80-VF3-V5-S5 の負勾配が最も緩やかであるが、0.5mm 以降は PVA 繊維のみを使用した RC50-S80-VF3-V10-S0 の負勾配が最も緩やかとなり、前掲した Table 2 の試験体 No.6, No.11, No.12 の G_{Fc} においても RC50-S80-VF3-V10-S0 が最も高い圧縮靱性を示していることが分かる。

3.3 曲げ破壊挙動

(1) s/a による比較

Fig. 8 に、天然および再生骨材を使用した s/a の異なる繊維補強モルタルおよびコンクリート ($V_f=3\%$, $V_m=V(7)+S(3)$) の切欠き梁 3 点曲げ試験により得られた荷重-たわみ関係を示す。なお、Fig.8 中に印したマークは最大荷重時を示しており、各荷重-たわみ関係は代表的な値を示している (Fig. 8~10 も同様である)。

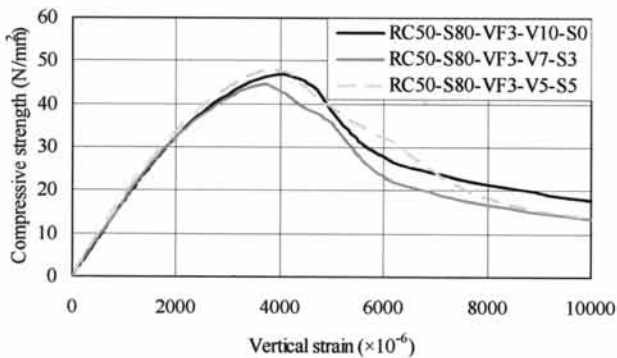
Fig. 8 (a) より、天然骨材を使用した繊維補強コンクリートでは、 s/a の低下に伴い最大荷重は増加するが、最大

荷重時における変位は減少する傾向を示している。最大荷重の増加は、粗骨材の混入によるマトリックス強度の増加、および前掲した Table 2 の試験体 No.3~6, および No.13, No.14 のひび割れ領域より、クラックが粗骨材を迂回して進行したことでひび割れ領域が拡大したためであると考えられ、変位の減少は、粗骨材を混入した影響によって、繊維での架橋が困難となったためであると考えられる。しかし、Fig. 8 (b) に示した再生骨材を使用した繊維補強コンクリートでは、 $s/a=80\%$ において最大荷重時の変位が増加する傾向を示しており、今後、この現象の原因を明らかにしたいと考えている。

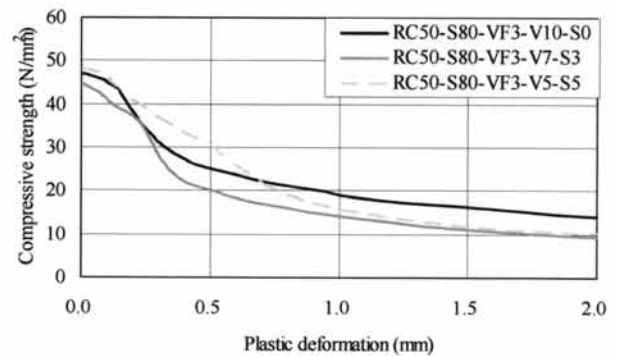
(2) 繊維混入率、繊維混合比による比較

Fig. 9 に、再生骨材を使用した V_f , V_m の異なる繊維補強コンクリート ($s/a=80\%$) の切欠き梁 3 点曲げ試験により得られた荷重-たわみ関係を示す。

Fig. 9 (a) より、 $V_f=2\sim3\%$ においては最大荷重が増加しているが、 $V_f=3\sim4\%$ においては最大荷重が低下した。これは、前掲した Table 2 の試験体 No.10 のスランブに注目すると、RC50-S80-VF4-V7-S3 は目標スランブを下回っていることから、繊維混入量の過多により流動性が低下し、繊維の分散が不十分となったためであると考えられ

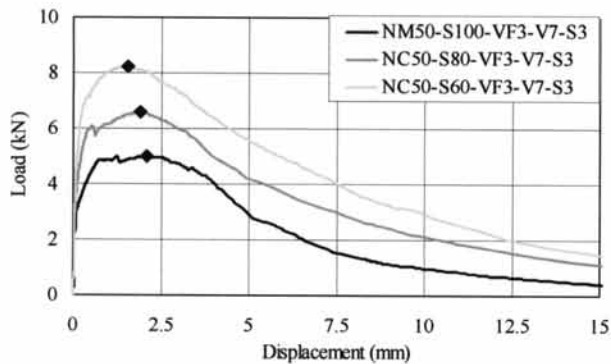


(a) Compressive stress-vertical strain relationship

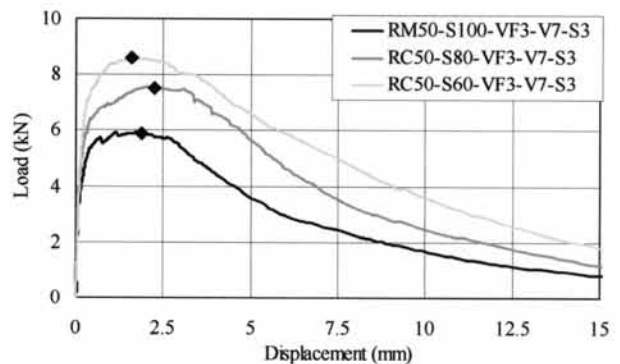


(b) Compressive stress-plastic deformation relationship

Fig. 7 Compressive stress-vertical strain relationship and Compressive stress-plastic deformation relationship (Comparison by mixing proportion of fiber)

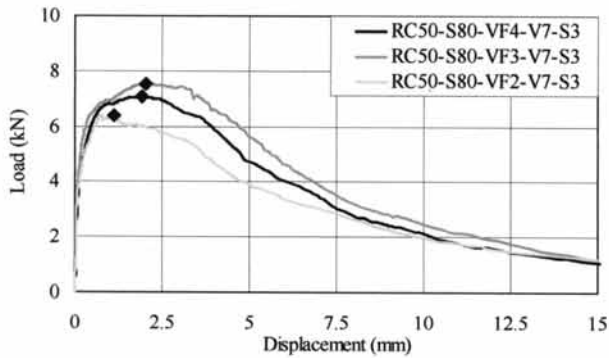


(a) Using natural aggregate

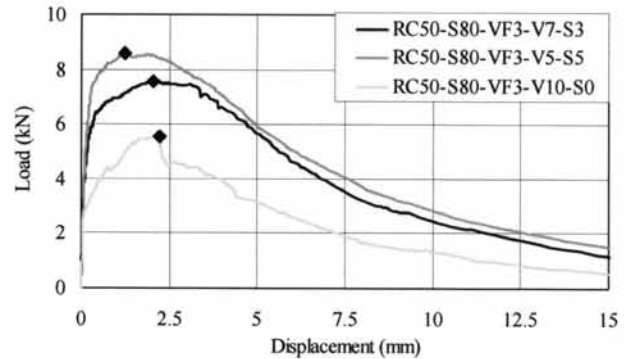


(b) Using recycled aggregate

Fig. 8 Load-Displacement relationship (Comparison by sand-total aggregate ratio)



(a) Comparison by fiber volume fraction



(b) Comparison by mixing proportion of fiber

Fig. 9 Load-Displacement relationship

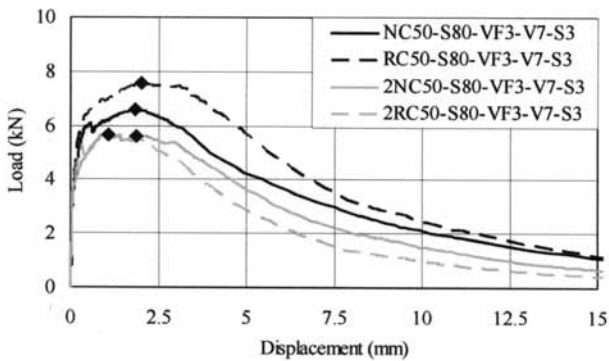


Fig. 10 Load-Displacement relationship

(Comparison by aggregate type and maximum size)

る。

Fig. 9 (b)より、鋼繊維混合比の増加に伴い最大荷重が増加しているが、最大荷重時における変位は減少する傾向を示している。また、PVA 繊維のみを使用したRC50-S80-VF3-V10-S0が、最大荷重到達後に大きく荷重が低下しているのに対し、鋼繊維を混合使用したRC50-S80-VF3-V7-S3、およびRC50-S80-VF3-V5-S5では最大荷重以降緩やかに荷重が低下していることが分かる。これは、PVA 繊維が初期ひび割れ時から最大荷重へ至るまでに発生する微細なひび割れに有効であることに対し、鋼繊維は微細なひび割れには架橋効果が低く、拡大したクラックに有効であるためだと考えられる。

(3) 骨材種類、粗骨材最大径による比較

Fig. 10に、天然および再生骨材を使用した粗骨材最大径の異なる繊維補強コンクリート ($V_f=3\%$, $V_m=V(7)+S(3)$, $s/a=80\%$)の切欠き梁3点曲げ試験により得られた荷重-たわみ関係を示す。

Fig.10より、粗骨材最大径の増加に伴い繊維での架橋が困難となり、最大荷重が低下しているが、前掲したTable 2に示すように、いずれも複数ひび割れ特性を示しており、最大径20mmの粗骨材を使用した場合においてもDFRCが実現可能であると言える。また、RC50はNC50と比較して最大荷重が増加しているが、これは、使用し

た再生粗骨材が砕石と比較して強度や粗粒率が低く、繊維による架橋効果が向上したためであると考えられる。

4. まとめ

本研究では天然および再生骨材を使用した高靱性コンクリートの実現性について検討した。本研究で得られた結果を要約すると、以下のようにまとめられる。

- (1) 本研究で示した調査により、再生骨材を使用した場合においても高靱性コンクリートが実現可能である。
- (2) 圧縮破壊試験において、繊維混入率の増加に伴い圧縮靱性が増加した。また、繊維混合比による比較では、PVA繊維のみを使用した要因が最も高い靱性を示した。
- (3) 切欠き梁3点曲げ試験において、繊維混入率2~3%においては最大荷重が増加し、靱性の改善を確認したが、4%では繊維混入量が過多となり、最大荷重が低下した。また、繊維混合比による比較では、鋼繊維混合比の増加に伴い最大荷重および曲げ靱性が増加した。

今後は水和熱の低減、乾燥収縮の抑制、コストの改善といった、高靱性コンクリートに期待できる付加価値の検討を行う予定である。

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
- 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.3, 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) 堀越哲郎, 齋藤忠, V.C.Li: PVA 繊維を用いた高靱性コンクリートに関する研究, 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.55-60, 2003.12
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 [基準編] 平成11年度版, JSCE-G552 繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法, pp.217-219