

論文 再生骨材を使用した高靱性コンクリートの材料特性

中村 允哉^{*1}・渡部 憲^{*2}

要旨：本研究では高靱性セメント複合材料と同等の性能を有する繊維補強コンクリートの開発および適用を目的に、天然および再生粗骨材を使用した繊維補強コンクリートの1軸圧縮試験、割裂引張試験、切欠き梁3点曲げ試験を行い、各種材料特性に与える繊維種類、骨材種類、粗骨材最大径の影響について検討した。検討の結果、本研究で示した調合により、再生粗骨材を使用した繊維補強コンクリートにおいても高靱性セメント複合材料と同等の性能を達成できること、切欠き梁3点曲げ試験において、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すること等の知見が得られた。

キーワード：高靱性コンクリート、高靱性セメント複合材料、再生骨材、繊維

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、天然骨材採取に伴う環境破壊や天然骨材資源の枯渇問題から、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。また、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も考えられる。そのため、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言える。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、粗骨材混入量、繊維径および繊維体積混入率、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への影響を明らかにしたが、繊維種類、骨材種類、粗骨材最大径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、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が製造可能であるかを検討した。

2. 実験方法

本研究では、表-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(砕砂と山砂を質量比7:3で混合)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10および20mmの砕石を使用したコンクリート(NC, 2NC)、最大寸法10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種類とした。なお、本研究で使用した再生骨材は、再生骨材製造プラントより入手したものであり、原骨材種類については不明である。また、JIS A 5021⁵⁾およびJIS A 5022⁶⁾と比較した結果、再生粗骨材はH相当、再生細骨材はM相当であった。水結合材比(W/B)は45, 50, 55%, 細骨材率(s/a)は100, 80, 60%, 目標スランプ値は18cm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,

*1 東海大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東海大学 工学部建築学科准教授 工博 (正会員)

表-1 実験概要

試験体名	マトリックス種類	水結合比 W/B (wt.%)	細骨材セメント比 S/C (wt.%)	細骨材率 s/a (vol.%)	繊維体積混入率 V _f (vol.%)	繊維体積混合比 V _m :V:S		
NC45-S80-VF3-V7-S3	NC	45	80	80	3	7:3		
NM50-S100-VF3-V7-S3	NM	50	100	100				
NC50-S80-VF3-V7-S3	NC		80	80				
2NC50-S80-VF3-V7-S3	2NC		60	60				
NC50-S60-VF3-V7-S3	NC	55	80	80				
RC45-S80-VF3-V7-S3	RC	45	79	80	3	7:3		
RM50-S100-VF3-V7-S3	RM	50	100	100				
RC50-S80-VF3-V7-S3	RC		79	80				
2RC50-S80-VF3-V7-S3	2RC						2	4
RC50-S80-VF2-V7-S3	RC	50	79	80			10:0	
RC50-S80-VF4-V7-S3							5:5	
RC50-S80-VF3-V10-S0							7:3	
RC50-S80-VF3-V5-S5							5	60
RC50-S60-VF3-V7-S3							55	79

粗骨材 (G) 砕石 (吸水率: 0.54%, 最大寸法: 20mm, 粗粒率: 6.57)
 再生粗骨材 (吸水率: 2.09%, 最大寸法: 20mm, 粗粒率: 6.47)
 細骨材 (S) 天然細骨材: 砕砂 (吸水率: 1.02%, 最大寸法: 5mm)
 山砂 (吸水率: 2.11%, 最大寸法: 1.2mm)
 砕砂と山砂を質量比7:3で混合使用 (粗粒率: 2.54)
 セメント (C) 再生細骨材 (吸水率: 4.88%, 最大寸法: 5mm, 粗粒率: 2.67)
 普通ポルトランドセメント
 GF: 分離低減材, SF: シリカフェューム
 混和材 V: PVA繊維 (径: 0.2mm, 長: 18mm, 弾性係数: 27kN/mm², 引張強度: 975N/mm²)
 繊維 S: 鋼繊維 (径: 0.55mm, 長: 30mm, 弾性係数: 210kN/mm², 引張強度: 1080N/mm²)

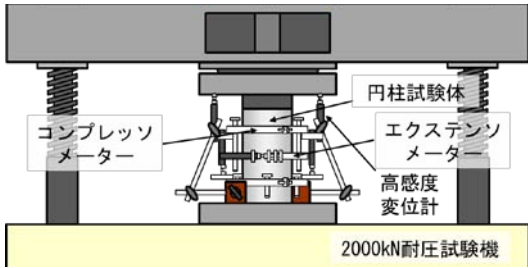


図-1 1軸圧縮載荷

4%, PVA 繊維(V)と鋼繊維(S)の繊維体積混合比(V_m)を V10:S0, V7:S3, V5:S5 とした。

2.1 1軸圧縮試験

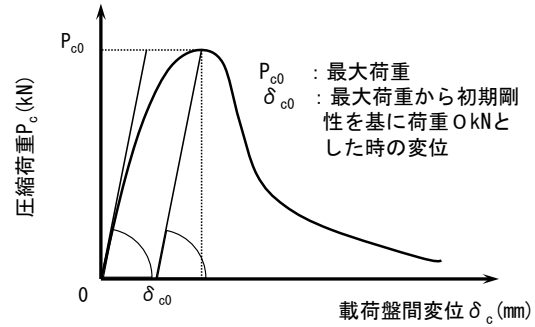
図-1に、1軸圧縮載荷の概要を示す。載荷は2000kN耐圧試験機を使用した。試験体はφ100×200mmの円柱試験体とし、各要因3体製作した。試験体は打設後2日で脱型し、試験時(材齢28日)まで標準水中養生とした。計測項目は、荷重、標点距離を100mmとしたコンプレッションメーターによる試験体左右の縦ひずみ、およびエクステンソメーターによる試験体中央部の横ひずみ、ならびに載荷盤間変位とし、各計測データはデータロガーを使用して記録した。

図-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。

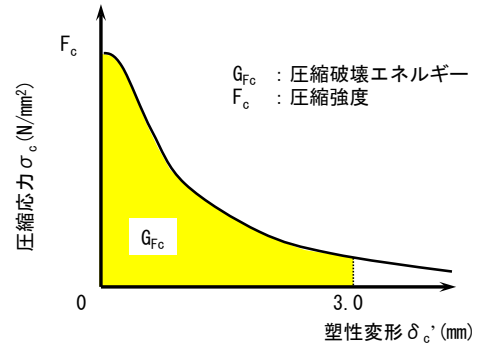
まず、実験で得られた圧縮荷重(P_c)ー載荷盤間変位(δ_c)関係を圧縮応力(σ_c)ー塑性変形(δ_c['])関係に変換する。次にσ_cーδ_c[']関係からδ_c[']が3.0mmまでの面積を求め、本研究ではこれを圧縮破壊エネルギー(G_{Fc})として評価した。なお、実験結果で塑性変形が3.0mmまで得られていないものは、実験データを外挿してG_{Fc}を求めた。

2.2 切欠き梁3点曲げ試験

図-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、各要因3体製作した。試験体は打設後2日で脱型し、試験時(材齢



(a) 荷重ー載荷盤間変位関係



(b) 圧縮応力ー塑性変形関係

図-2 圧縮軟化挙動の評価方法

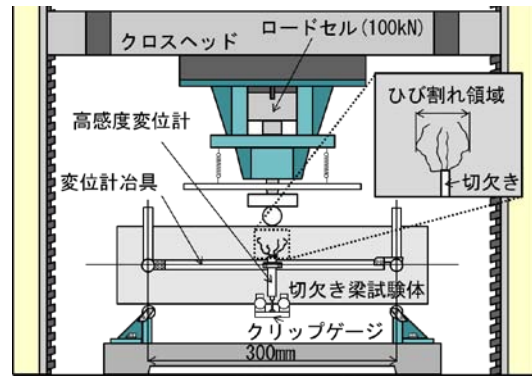


図-3 切欠き梁3点曲げ載荷

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、支点間のスパンは300mmとした。載荷は、100kN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、各計測データはデータロガーを使用して取り込んだ。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。また、図-3中に示した通り、試験後に切欠き先端部に発生したひび割れの本数およびその発生領域を計測し、本研究ではこれをひび割れ本数およびひび割れ領域として評価した。

曲げ靱性は文献⁷⁾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、 f_{1b} ：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。

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

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。

本研究では、たわみが7.5mmとなる時点の曲げ靱性係数を指標A、たわみが15mmとなる時点の曲げ靱性係数を指標Bとして評価した。

3. 結果と考察

3.1 各種材料特性

表-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。

(1) 圧縮強度

図-4に、天然および再生骨材を使用した繊維補強モルタルおよびコンクリートの1軸圧縮試験により得られ

た圧縮強度(F_c)とW/B、s/aおよび V_f の関係を示す。

まず、図-4(a)に示した F_c -W/B関係に注目すると、骨材種類を問わずW/Bの増加に伴い F_c が低下していることが分かる。

次に、図-4(b)に示した F_c -s/a関係に注目すると、 F_c は本研究の範囲内において、(s/a=60%の場合)>(s/a=100%の場合)>(s/a=80%の場合)となっている。また、 F_c と骨材種類および粗骨材最大径の関係について比較すると、本研究の範囲内においては骨材種類および粗骨材最大径が F_c におよぼす影響は少ないことが分かる。

さらに、図-4(c)に示した F_c - V_f 関係に注目すると、RC50-S80-V7-S3においては V_f の増加に伴い F_c は低下する傾向を示していることが分かる。

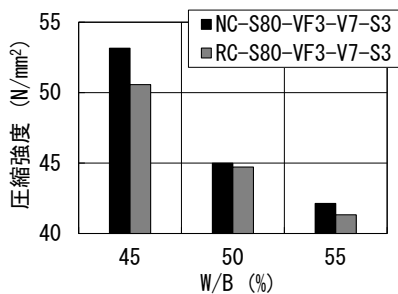
(2) 曲げ強度、曲げ靱性係数およびひび割れ本数

図-5に、天然および再生骨材を使用した繊維補強コンクリート($V_f=3\%$ 、 $V_m=V7:S3$ 、s/a=80%)の切欠き梁3点曲げ試験において得られたW/Bと f_{1b} 、 f_{2b} 、およびひび割れ本数の関係を示す。

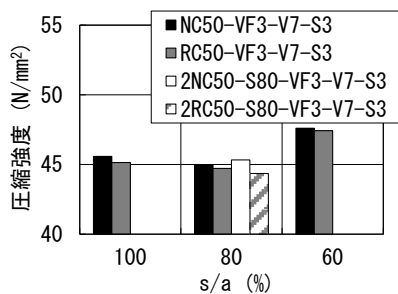
まず、図-5(a)に示した f_{1b} -W/B関係に注目すると、NC、RCともにW/Bの増加に伴い f_{1b} が低下する傾向を示しているが、RCの f_{1b} はW/B=45%ではNCと比較して低く、W/B=50および55%では高くなっており、RCはNCと比較してW/Bの増加に伴う f_{1b} の低下量が少ない

表-2 材料特性一覧

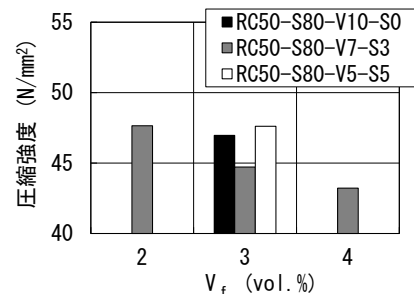
試験体名	フレッシュ時		硬化時									
	スランブ (cm)	空気量 (%)	曲げ強度 (f_{1b}) (N/mm ²)	曲げ靱性係数 (f_{2b})		ひび割れ本数 (本)	ひび割れ領域 (mm)	単位容積質量 (g/cm ³)	ヤング係数 (E) (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (初期ひび割れ強度) (N/mm ²)	圧縮破壊エネルギー (G_{fc}) (N/mm)
				指標A (N/mm ²)	指標B (N/mm ²)							
NC45-S80-VF3-V7-S3	20.0	2.4	13.5	10.7	7.27	5	29.7	2.15	20.5	53.2	3.51	-
RC45-S80-VF3-V7-S3	19.5	2.5	12.2	9.33	6.59	4	32.3	2.11	19.8	50.6	3.49	-
NM50-S100-VF3-V7-S3	23.0	2.3	8.70	5.90	3.81	5	26.0	2.11	18.2	45.6	3.09	58.5
RM50-S100-VF3-V7-S3	22.0	2.6	9.66	7.09	4.75	5	33.6	2.07	18.1	45.1	3.54	67.5
NC50-S80-VF3-V7-S3	20.5	2.5	10.7	8.25	5.70	6	30.1	2.08	18.4	45.0	3.29	66.1
RC50-S80-VF3-V7-S3	20.5	2.5	11.9	9.43	6.57	5	35.8	2.09	18.4	44.7	3.11	52.5
2NC50-S80-VF3-V7-S3	22.5	2.4	9.53	7.29	4.84	4	29.8	2.11	18.7	45.3	3.51	48.6
2RC50-S80-VF3-V7-S3	21.0	2.2	8.78	5.91	3.71	5	29.0	2.08	18.3	44.4	3.37	58.8
RC50-S80-VF2-V7-S3	25.5	2.1	9.75	6.26	4.14	4	24.4	2.07	19.3	47.7	3.45	57.2
RC50-S80-VF4-V7-S3	14.0	2.3	11.4	8.77	5.80	4	25.7	2.09	17.8	43.2	3.24	69.1
RC50-S80-VF3-V10-S0	18.0	2.4	8.53	5.78	3.85	4	24.2	2.02	17.6	47.0	3.13	63.9
RC50-S80-VF3-V5-S5	22.5	2.5	13.3	10.0	6.75	5	32.2	2.13	18.9	47.6	3.60	60.6
NC50-S60-VF3-V7-S3	15.0	2.5	12.7	9.79	6.86	4	34.3	2.11	19.7	47.6	3.61	56.3
RC50-S60-VF3-V7-S3	14.0	2.5	13.4	10.5	7.39	5	37.8	2.08	18.7	47.4	3.31	68.8
NC55-S80-VF3-V7-S3	21.5	2.5	10.4	7.98	5.51	5	30.5	2.06	16.8	42.1	3.28	-
RC55-S80-VF3-V7-S3	21.0	2.5	11.7	9.16	6.41	6	34.5	2.04	17.1	41.3	3.15	-



(a) W/Bによる比較



(b) s/aによる比較



(c) V_f による比較

図-4 圧縮強度

ことが分かる。また、図-5 (b)に示した $f_{2b}-W/B$ 関係においても同様の傾向が確認できる。これは、マトリックス強度と繊維の架橋効果との関係、および粗骨材の粗粒率と繊維の架橋効果との関係が影響を及ぼしていると考えられる。まず、前掲した表-1 より、本研究で使用する再生粗骨材は碎石と比較して粗粒率が低いことが分かる。次に、前掲した表-2 より、RC の F_c および割裂引張強度は NC と比較して低いことが分かる。また、DFRCC はマトリックス強度の増加や骨材寸法の増加に伴い、繊維での架橋が困難となることが知られている²⁾。このことから、本研究の範囲内では NC と比較して RC は繊維による架橋効果が高いと推測できる。これを踏まえると、 $W/B=50$ および 55% では、マトリックス強度の増加に伴う f_{1b} の増大効果が、繊維の架橋効果の増加に伴う f_{1b} の増大効果を下回ったため、繊維での架橋効果が高い RC の f_{1b} が NC と比較して高くなったと考えられる。一方、 $W/B=45\%$ では、マトリックス強度の増加に伴う f_{1b} の増大効果が、繊維での架橋効果の増加に伴う f_{1b} の増大効果を上回ったため、マトリックス強度の高い NC の f_{1b} が RC と比較して高くなったと考えられる。

次に、図-5 (c)に示したひび割れ本数- W/B 関係に注目すると、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 が製造できる可能性が高いと言える。

3.2 圧縮破壊挙動

(1) 繊維体積混入率による比較

図-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 ($V_m=V7:S3$, $s/a=80\%$) の 1 軸圧縮試験により得られた σ_c -縦ひずみ (ϵ) 関係、および σ_c - δ_c 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 σ_c - ϵ 関係、ならびに各 σ_c - δ_c 関係は代表的な値を示している(図-7 も同様である)。

図-6 (a) より、 V_f の増加に伴い F_c は低下しているが、 F_c 以降の負勾配が延性的となる傾向を示しており、図-6 (b)においても同様の傾向が確認できる。また、前掲した表-2 中の当該試験体の G_{Fc} 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) 繊維体積混合比による比較

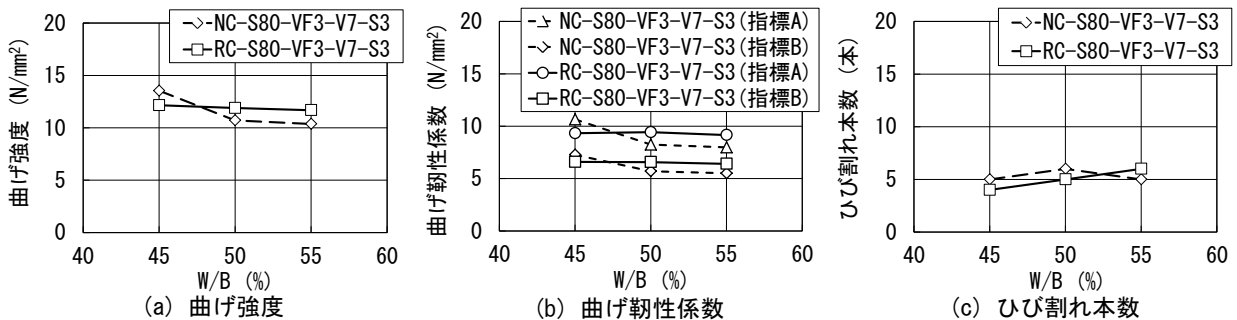


図-5 曲げ強度、曲げ靱性係数およびひび割れ本数

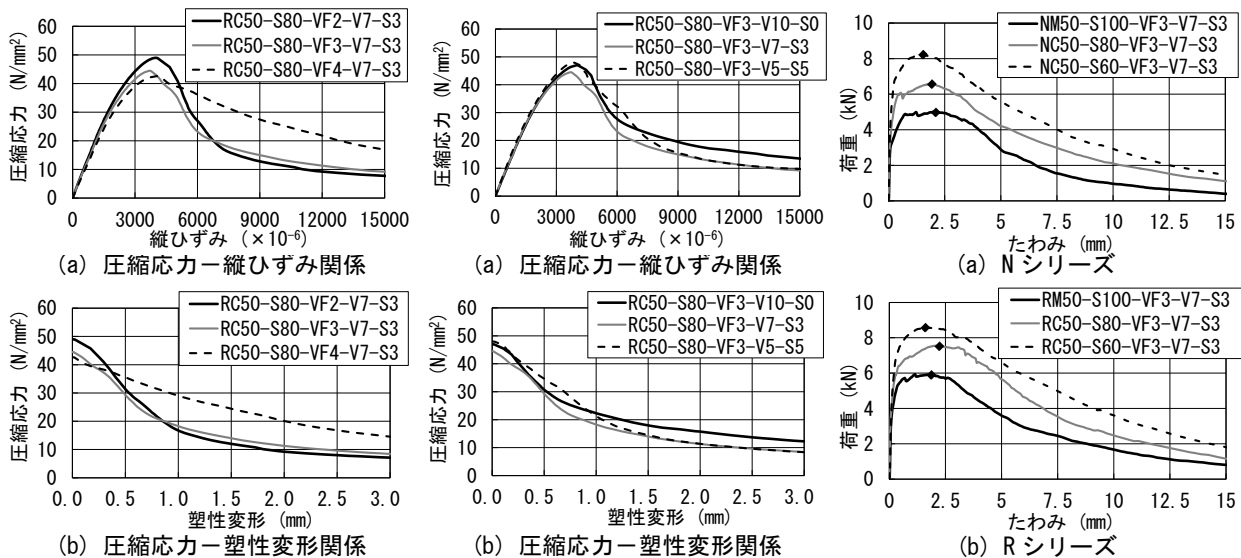


図-6 圧縮応力-縦ひずみ関係
および圧縮応力-塑性変形関係
(V_f による比較)

図-7 圧縮応力-縦ひずみ関係
および圧縮応力-塑性変形関係
(V_m による比較)

図-8 荷重-たわみ関係
(s/a による比較)

図-7 に、再生骨材を使用した繊維体積混合比の異なる繊維補強コンクリート($V_f=3\%$, $s/a=80\%$)の1軸圧縮試験により得られた $\sigma_c-\epsilon_c$ 関係、 $\sigma_c-\delta_c'$ 関係を示す。

図-7 より、 F_c 以降 $\epsilon_c=6000\mu$ および $\delta_c'=0.5\text{mm}$ 程度までは RC50-S80-VF3-V5-S5 の負勾配が最も緩やかであるが、それ以降は 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、前掲した表-2 中の当該試験体の 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。これは、鋼繊維が PVA 繊維と比較して剛性が高いこと、および材質やアスペクト比に起因するマトリックスに対する付着の弱さが原因であると思われる。まず、 F_c 以降 $\epsilon_c=6000\mu$ および $\delta_c'=0.5\text{mm}$ 程度までの $\sigma_c-\epsilon_c$ 関係、 $\sigma_c-\delta_c'$ 関係の形状では、鋼繊維を混合使用した場合においては、発生したひび割れ面でのすべりに対し、鋼繊維が有効に作用したため、応力が比較的緩やかに低下したと考えられる。一方、PVA 繊維のみを使用した場合においては、PVA 繊維の剛性が低いことから、試験体が容易に変形し、応力が比較的急激に低下したと考えられる。次に、それ以降の $\sigma_c-\epsilon_c$ 関係、 $\sigma_c-\delta_c'$ 関係の形状は、試験体の変形量の増加に伴い繊維に作用する力が引抜き方向に変化したため、鋼繊維を混合使用した場合においては、鋼繊維が比較的容易に引抜け、 $\epsilon_c=6000\mu$ および $\delta_c'=0.5\text{mm}$ 以降における負勾配が急激になったと考えられる。一方、PVA 繊維のみを使用した場合においては、変形の増大に伴い PVA 繊維が引抜けに対する抵抗力が増加したため、 $\epsilon_c=6000\mu$ および $\delta_c'=0.5\text{mm}$ 以降における負勾配が緩やかになったと考えられる。なお、変形や引抜けに伴い鋼繊維がマトリックスを割り裂いたことも一因として推測できるが、今後、精査する必要があると考えている。

3.3 曲げ破壊挙動

(1) 細骨材率による比較

図-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 ($V_f=3\%$, $V_m=V7:S3$) 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、図-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

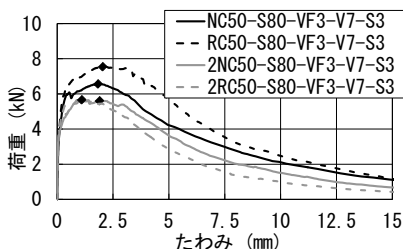


図-9 荷重-たわみ関係

(骨材種類, 粗骨材最大径による比較)

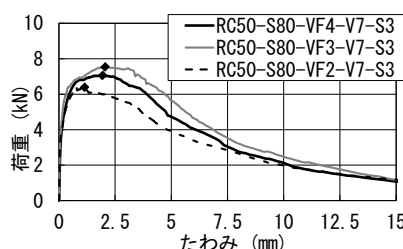


図-10 荷重-たわみ関係

(V_f による比較)

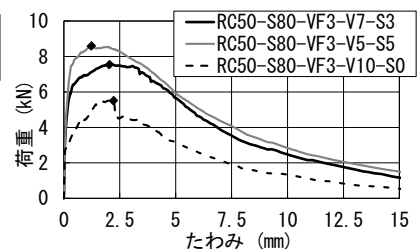


図-11 荷重-たわみ関係

(V_m による比較)

な値を示している(図-9 および 10 も同様である)。

図-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たわみは減少する傾向を示している。これは、粗骨材混入量の増加に伴いマトリックス強度が増大した一方で、マトリックス強度の増加に伴い繊維による架橋が困難になったためであると考えられる。しかし、図-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) 骨材種類, 粗骨材最大径による比較

図-9 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($V_f=3\%$, $V_m=V7:S3$, $s/a=80\%$)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。

図-9 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、前掲した表-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、最大寸法 20mm の粗骨材を使用した場合においても DFRC が製造できる可能性が高いと言える。また、RC50 は NC50 と比較して最大荷重が増加している。これは、前掲した表-1 より、使用した再生粗骨材が砕石と比較して粗粒率が低いことから、繊維での架橋効果が向上したため、RC50 は NC50 と比較して最大荷重が増加したと考えられる。一方で、2RC50 と 2NC50 を比較した場合においては同様の傾向は見られなかった。これは、文献⁸⁾より、粗骨材最大寸法の増加に伴い繊維の分散性が損なわれ、RC50 と NC50 を比較した際の傾向と相違した可能性が推測できるが、今後、精査する必要があると考えている。

(3) 繊維体積混入率, 繊維体積混合比による比較

図-10 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($s/a=80\%$)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。

図-10 より、 $V_f=2$ および 3% においては V_f の増加に伴い最大荷重が増加しているが、 $V_f=3$ および 4% においては最大荷重が低下した。これは、前掲した表-2 中のス

ランプに注目すると、RC50-S80-VF4-V7-S3 は目標ランプ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る。

図-11 に、再生骨材を使用した 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。

前掲した表-2 および図-7 では、繊維混合比の変化に伴う圧縮強度の変動は見られなかったものの、図-11 では、鋼繊維混合比の増加に伴い最大荷重が増加しており、最大荷重時における変位は減少する傾向を示している。これは、繊維種類による架橋効果の違い、および圧縮と曲げとの破壊挙動の違いなど、複数の要因が影響を及ぼしていると考えられる。まず、鋼繊維を混合使用した場合の荷重-たわみ関係における最大荷重時までの挙動について、ひび割れが発生すると、ひび割れが粗骨材を迂回して進展していく。そこに斜めに鋼繊維が存在すると、鋼繊維の剛性が高いため、変形に対し鋼繊維が効果的に作用すると考えられる。また、変形の増加に伴い PVA 繊維も架橋効果を発揮するため、鋼繊維を混合使用した場合は、2 種類の繊維の相乗効果により、最大荷重が増加したと考えられる。一方、PVA 繊維のみを使用した場合の荷重-たわみ関係における最大荷重時までの挙動については、PVA 繊維は剛性が低いため、一定量変形した後に架橋効果を発揮すると考えられる。そのため、PVA 繊維のみを使用した場合は、ひび割れ発生後から最大荷重までの荷重-たわみ関係における剛性は、鋼繊維を混合使用した場合と比較して低いものの、最大荷重時のたわみは大きくなったと考えられる。また、最大荷重以降において、鋼繊維を混合使用した場合は、PVA 繊維が徐々に破断するとともに鋼繊維が抜け出すことにより、荷重が緩やかに低下したと考えられる。一方、PVA 繊維のみを使用した場合は、PVA 繊維が徐々に破断するが、鋼繊維が存在しないため、比較的脆性的な破壊挙動を示したと考えられる。なお、1 軸圧縮試験では、前述の通り、圧縮強度までは破壊に伴うひび割れが進展しないため、切欠き梁 3 点曲げ試験のような、鋼繊維の混合使用による強度の上昇は確認できなかったと考えられるが、今後、詳細に検討していく必要があると考えている。

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が製造可能であるかを検討した。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) 本研究で示した調合により、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製造できる可能性が高い。

- (2) 1 軸圧縮試験において、繊維体積混入率の増加に伴い圧縮靱性が増加した。また、繊維体積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、繊維体積混入率 2 および 3% では繊維体積混入率の増加に伴い最大荷重が増加し、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、繊維体積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。

謝 辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た、元東海大学学生の古舘允人君に謝意を表します。

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.3-55, 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, 斎藤忠, 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) JIS A 5021: コンクリート用再生骨材 H
- 6) JIS A 5022: 再生骨材 M を用いたコンクリート
- 7) 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
- 8) 小林一輔, 趙力采, 西村次男, 安室吉彌: 鋼繊維補強コンクリートの曲げ特性に及ぼす鋼繊維の形状寸法ならびに粗骨材最大寸法の影響, コンクリート工学協会年次論文集, Vol.3, pp.185-188, 1981