

論文 ミクロ・メゾ・マクロの3段階ひび割れ補強型 HFRCC へ及ぼす細骨材粒径の影響

中川 佑哉*1・菊田 貴恒*2・西脇 智哉*3・三橋 博三*4

要旨:本研究では、マクロ繊維として鉄筋を用いたミクロ・メゾ・マクロの3段階ひび割れ補強型 HFRCC へ及ぼす細骨材粒径の影響を検討するため、HFRCC の繊維混入率および細骨材粒径をパラメータとして角柱試験体による引張荷重試験を行い、力学特性およびひび割れ分散性を調べた。その結果、HFRCC と鉄筋の複合化により HFRCC の力学特性への骨材粒径による影響は小さくなり、特に繊維混入率が小さい場合には骨材粒径が比較的大きいもので高い引張性能が得られた。また、鉄筋が複合化されることでひび割れに対する架橋効果が増すだけでなく、許容できなかったマクロなひび割れを制御できることで大きなひび割れ分散性を得ることができた。

キーワード: 繊維補強セメント複合材料, 一軸引張試験, 角柱試験体, 鉄筋, 細骨材粒径

1. はじめに

ハイブリッド型繊維補強セメント複合材料(Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites : 以下 HFRCC) は、物性の異なる2種類の繊維を用い、その相互作用によって、それぞれの繊維の単一混入では得られない、高い引張靱性能を実現している材料である^{例えば1)2)}。HFRCC は引張荷重が作用した場合、初期ひび割れ発生後、微細なひび割れを複数発生させながらひずみの増大とともに強度が増大する特性がある。その材料特性から、実構造物への適用が期待され、近年では構造部材レベルでの研究も活発に行われている³⁾。

これまで筆者らは、HFRCC の中でも高い靱性能と施工性とを両立させる調合を開発してきた⁴⁾。これらの調合には多量の繊維を混入させ、割れ面を架橋する繊維の効果によって、重要な材料特性である複数ひび割れの発生を促し、曲げ及び引張応力下における靱性能の向上を実現してきた。このような材料を実構造物に適用することにより、地震などの大きな外力に対して、微細なひび割れの発生を伴って多くのエネルギーを吸収することができ、構造物のひび割れ制御につながると考えられる。

構造部材レベルでの研究は HFRCC や繊維補強セメント複合材料(Fiber Reinforced Cementitious Composites : 以下 FRCC)と鉄筋を組み合わせた実験が行われており、せん断耐力が向上することなどが報告がされている³⁾。しかし、構造部材に用いる前段階において、開発された高性能な HFRCC や FRCC は、鉄筋と複合化された場合の性能評価を行っているものは少なく、検討が十分に行われているとは言えない。国枝らは、UHP-SHCC(Ultra High Performance - Strain Hardening Cementitious Composites)と

D6 鉄筋を複合化させ、鉄筋本数に応じた材料性能への影響を評価するため 50×200×900mm の角柱試験体による一軸引張試験を行い、UHP-SHCC と鉄筋の複合化を行うことで、ひび割れ分散性の向上やテンションステイニング効果が安定して生じることなどを報告している⁵⁾。

そこで本研究では、図-1 に示す、スケールの異なるひび割れを長さや径が異なる複数の繊維によって連続的に補強を行うマルチスケールコンセプトのもと、鉄筋を3番目の補強繊維として位置付けている。3段階繊維補強はサイズの異なる繊維がミクロレベルのひび割れおよびメゾレベルのひび割れそれぞれを連続的に効率良く補強し、鉄筋によってマクロレベルのひび割れ幅の制御および試験体の2次曲げを抑制するマルチレベル補強手法である⁶⁾。HFRCC に鉄筋を複合化することにより、引張応力下におけるさらなるひび割れ分散性の向上や、引張靱性能の向上を期待している。

HFRCC と鉄筋との3段階補強の複合効果を論じるためには、HFRCC と鉄筋が複合化された場合の影響を適切に評価する必要がある。これまでの高靱性材料は比較的小さな骨材粒径のものを用いる場合が多く、マトリッ

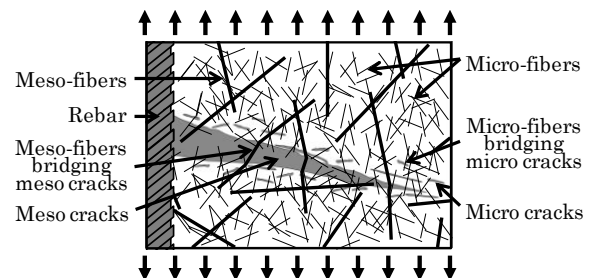


図-1 三段階繊維補強の概念図

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程前期 (現大林組) (正会員)

*2 日本工業大学工学部 建築学科 助教 博士(工学) (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 東北大学 名誉教授 工学博士 (正会員)

表-1 使用骨材の粒径

骨材種類	記号	密度(g/cm ³)	粒径(mm)
珪砂 1号	S1	2.61	3.35-1.18
珪砂 4号	S4		1.18-0.425
珪砂 7号	S7		0.425-0.106

表-2 繊維の物性値

繊維	記号	密度(g/cm ³)	長さ(mm)	直径(μm)	引張強度(MPa)	弾性係数(GPa)
Vinylon	R40	1.3	6	40	1600	40
(PVA)	R100		12	100	1100	25

表-3 異形鉄筋の物性値

鉄筋種類	呼び名	公称直径(mm)	降伏強度(MPa)	引張強度(MPa)
SD295A	D6	6.35	356	525

表-4 調合条件

シリーズ名	W/B (Wt.%)	FA/B (Wt.%)	Sn/B (Wt.%)	Fiber (Vol.%)	
				R100-12mm	R40-6mm
S(1.4or7)+D6-1.8, NB-1.8	40	30	40	1.8	0.75
S(1.4or7)+D6-1.3, NB-1.3				1.3	
S(1.4or7)+D6-0.8, NB-0.8				0.8	

凡例 FA= フライアッシュ, S=けい砂 B=セメント + フライアッシュ

クスと繊維の付着を向上させ、繊維の架橋効果を有効に機能させることで高い引張性能を発揮しやすくしている。一方、比較的骨材粒径が大きい場合は、骨材表面近傍の遷移帯などの影響により、マトリクスと繊維の付着が低下するなどの要因により、高い引張性能を発揮することが難しい⁷⁾。

高靱性化がこれまで困難とされていた比較的大きな骨材を用いた HFRCC に鉄筋を複合化させることにより高い架橋効果が発揮されることを期待しており、HFRCC と鉄筋が複合化された場合の材料側の性能の変化、つまり HFRCC の繊維混入率および骨材粒径を変化させた場合の引張応力下における力学特性の変化を確かめる必要がある。

そこで本研究では、引張応力下における HFRCC と鉄筋の複合効果へ骨材粒径が与える影響の評価を目的とし、HFRCC の繊維混入率および骨材粒径をパラメータとして、HFRCC 部分の力学特性およびひび割れ分散性の評価をすることで検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究に使用した材料は、早強ポルトランドセメント(密度:3.14g/cm³)、フライアッシュ II 種(密度:2.33g/cm³)、表-1 に示す通り細骨材として 1号, 4号および 7号珪砂(密度:2.61g/cm³)、高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系)、セルロース系増粘材、鉄筋(D6)およびビニロン繊維である。使用したビニロン繊維の物性値を表-2 に示す。本研究で用いたビニロン繊維は、繊維径が太いものの方が流動性を比較的確保しやすく、また、繊維同士の干渉が起り難いため⁸⁾、直径 100μm の繊維を主たる繊維補強

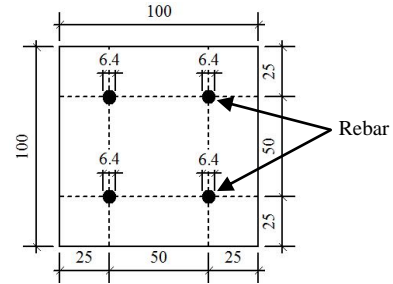
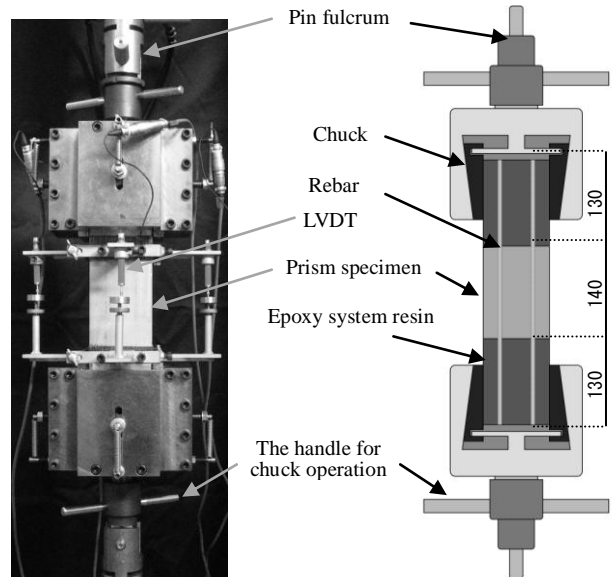


図-2 D6 シリーズ配筋図 (鉄筋比:1.25%)



(a) 設置状況

(b) 断面概略図

図-3 2方向楔型治具の設置状況および断面概略図⁹⁾

材と位置付け混入した。次に、使用した異形鉄筋の物性値を表-3 に示す。

2.2 試験体概要

本研究で用いた HFRCC の調合条件およびシリーズ名を表-4 に示す。調合はペースト部分の材料割合および細径のビニロン繊維である R40 繊維の混入率を一定とし、ペースト部分の細骨材は粒径の異なる珪砂 1, 4 および 7 号を用い、また、主たる補強繊維である太径の R100 繊維は 1.8, 1.3 及び 0.8Vol.% の 3 条件を設定し、この 9 調合を用いて 100×100×400mm の角柱試験体を作製した。各調合の角柱試験体には異形鉄筋を配していないもの(NB: No Bar)、図-2 に示す通り D6 鉄筋を配したものの 2 つの配筋条件を設定しており、調合条件と併せて計 18 パターンの検討を行った。

練り混ぜには容量 50 リットルの二軸ミキサーを用い、角柱試験体 3 本を同一バッチから採取した。練り混ぜは粉体及び細骨材を空練り後、水と高性能 AE 減水剤を投入して 3 分混練、R40 繊維を投入して 3 分混練、最後に R100 繊維を投入して 3 分混練した。試験体の養生方法は、打設後 24 時間湿空養生を行い、脱型後は水中養生とし、材齢 28 日で実験を行った。

2.3 一軸引張試験方法

角柱試験体による一軸引張試験は、菊田が提案している試験方法⁹⁾を用いた。HFRCCは、ひずみ硬化挙動を継続する領域において、ひび割れの発生に伴う2次曲げが極わずかしか発生しないため、両端ピンのように試験の拘束が低い支持条件であっても十分にその材料が有している性能を評価できることが確認されている。そのため、この試験方法では両端ともにピン支持としている。

装置への設置状況を図-3(a)に示す。また、図-3(b)に示すように試験体端部を機械的に挟み込む2方向楔型治具を用い、その内部に設けられたテーパ部分のチャックと試験体の摩擦力で引張力を試験体に伝達している。

挟み込み長さ90mmと局所的な応力集中区間20mmを考慮し、試験体の両端から130mmの部分はガラス繊維シートを巻きつけて接着することにより補強を行った。これによりチャックの締付け応力による局所的な破壊を予防するとともに、引張力による変形領域を試験体中央部に明確化した。変位計測には試験体の4面にそれぞれ高感度変位計を取り付け、検長区間140mmで計測することとした⁹⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 鉄筋が複合化されたHFRCCの引張挙動の変化

図-4には、鉄筋の一軸引張載荷試験の結果と本実験の結果を比較するため、荷重-ひずみ関係のグラフを示す。各シリーズの引張試験結果は角柱試験体3体の試験結果の平均値を示している。図-4(a), (b), (c)における灰色破線(D6_4)のグラフは鉄筋1本の直接引張試験結果の4倍の値を示している。

図-4より、鉄筋を複合化させることで全てのシリーズにおいてひずみ3%程度までのひずみ硬化が確認された。しかしながら、珪砂1号を用いたS1D6-0.8およびS1D6-1.3は、ひずみ4%前後において引張荷重が大幅に低下しており、鉄筋の直接引張試験結果を大きく下回る結果となった。また、そのときに埋設された4本の鉄筋の内、ある1本の周囲のマトリクスの変位が局所的に増大していることが確認できた。これらのシリーズでは、繊維の架橋による応力伝達が小さく、かつ、曲げが作用したため、鉄筋の付着による荷重の負担分が大きくなり、ひび割れ端部から引き抜けが進行したと考えられる。

一方、同様の珪砂1号を用いているS1D6-1.8シリーズ

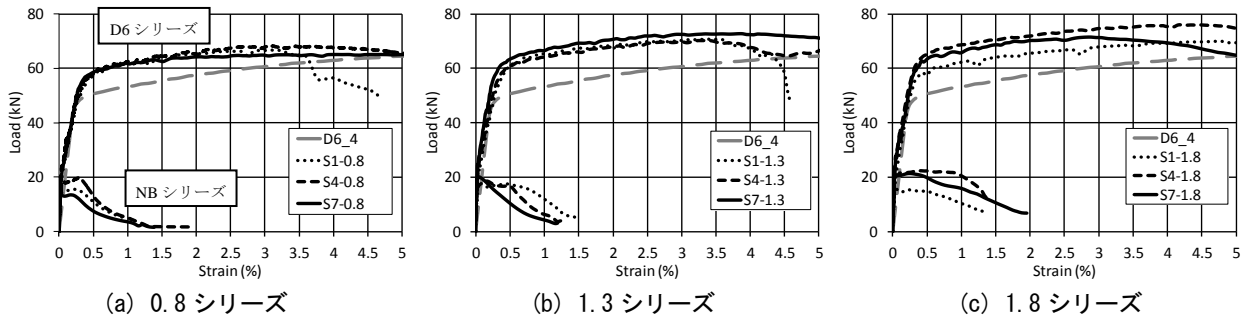


図-4 角柱試験体および異形鉄筋の引張荷重-ひずみ関係

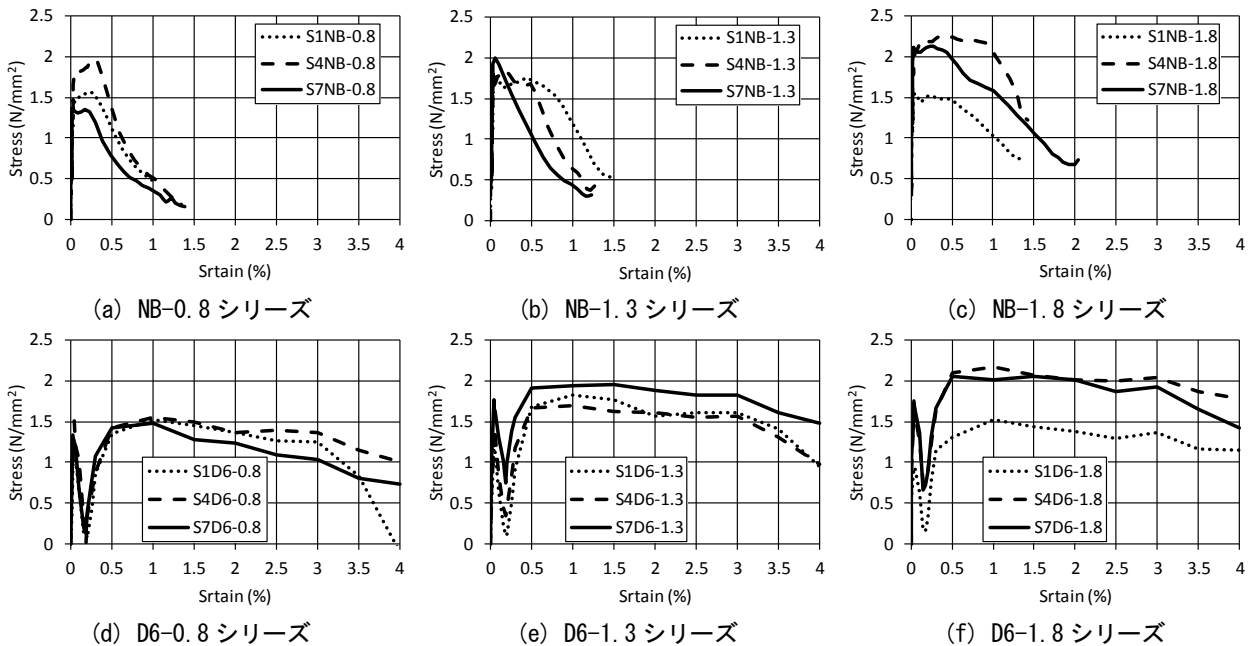


図-5 各シリーズのHFRCC部分の応力-ひずみ関係

では、鉄筋の引き抜けが生じている傾向はなく、繊維の混入による鉄筋の引抜荷重の負担減が考えられる。他シリーズにおいてもひずみ 5%以上といった大変形域において引張荷重が鉄筋の直接引張試験結果を下回るが、実際の試験体中の鉄筋は HFRCC による拘束や曲げなどが作用することにより強度が低下することが考えられ、鉄筋の引き抜けは生じていないと考えられる。

3.2 HFRCC 部分の力学特性の変化

図-5 は図-4 の角柱引張試験結果から鉄筋の直接引張試験結果を差し引いた HFRCC 部分のみに相当する応力-ひずみ関係を示している。NB シリーズは角柱引張試験結果の応力-ひずみ関係を示す。

図-5(d)~(f)より、D6 シリーズにおいて、初期ひび割れから鉄筋が塑性化するひずみ 0.2%付近までの HFRCC 部分の強度低下が確認された。試験体中の鉄筋の挙動は、鉄筋 1 本の直接引張試験結果を 4 倍にしたグラフよりも弾性域の立ち上がりの傾きが緩やかになり、かつ、鉄筋の塑性化する領域が小さくなると考えられるため、強度低下は鉄筋の過大評価が要因であると考えられる。今後は鉄筋の挙動を正しく把握することにより強度低下をなくせると考える。また、骨材粒径と繊維混入率の二つの視点から力学特性を比較し考察を行う。図中(a)~(c)は NB シリーズを、(d)~(f)は D6 シリーズの結果を示している。全てのシリーズにおいて鉄筋を複合化することにより、重要な力学特性であるひずみ硬化挙動およびひずみ軟化挙動が確認された。

ひずみ硬化に関して、NB シリーズでは 0.8 および 1.8 シリーズの一部においてひずみ硬化がみられた。一方、D6 鉄筋を用いた全てのシリーズでは、ひずみ 0.2%程度において強度低下があるものの、初期ひび割れが生じたと考えられるひずみ 0.1%程度における強度に対して、ひずみの増大とともにさらに強度が上昇しており、ひずみ 1~1.5%程度で最大強度となっている。特にひずみ軟化については力学特性の変化が顕著であり、NB シリーズでは最大強度以降に急激に強度が低下したが、D6 シリーズでは最大強度以降も急激な強度低下はなく、ひずみ 3%程度の大変形域まで緩やかに強度が低下している。

図-5(a)および(d)の 0.8 シリーズについて、(a)の NB シリーズにおいて S1 および S4 を用いたシリーズでひずみ硬化は確認できたが、ひずみ軟化挙動に関して大きな違いはみられなかった。繊維混入率が小さい場合、珪砂の粒径が大きくなるほど骨材表面の遷移帯の影響で性能が低下すると予想していたが、珪砂 7 号よりも粒径の大きな S1 や S4 の方が性能が高くなった。S7 を用いた場合、粒径が小さいことで遷移帯の影響が小さく、よりマトリクスが緻密になっていることが考えられるが、S1 や S4 のように骨材粒径が大きくなると遷移帯の影響が大きく

なり、ひび割れが生じやすい状態となるため複数ひび割れを伴ってひずみ硬化が生じたと考えられる。また、発生したひび割れの進展を骨材が妨げ、ひび割れが迂回することでひび割れが複雑化したことも要因として考えられる。これらは(d)の D6 シリーズの試験結果についても同様に考えることができ、ひずみ軟化域は S7 に比べ S1 および S4 の方がより強度の低下が緩やかであった。

図-5(b)および(e)の 1.3 シリーズについて、(b)の NB シリーズはいずれもひずみ硬化は生じなかったが、最大強度以降のひずみ軟化挙動に違いが生じた。上記で述べたように鉄筋がない状態では骨材粒径が小さいものに比べ、骨材粒径が大きい方がよりひずみ軟化が緩やかに進行した。しかし、(e)の D6 シリーズでは強度の差はあるものの、ひずみ硬化およびひずみ軟化はほぼ同一の傾向を示した。珪砂粒径が小さいものほど NB シリーズから D6 シリーズへの性能の向上が大きいことから、1.3 シリーズにおける HFRCC と D6 鉄筋の複合効果は骨材粒径が小さいものほど大きいと考えられる。

図-5(c)および(f)の 1.8 シリーズについて、(c)および(f)より、S1 シリーズの強度が他 2 シリーズと比べ 0.5N/mm^2 程度低い結果となった。粒径の大きな骨材を用いる場合、分離させないためにはペースト部分に高い粘性が必要であり、粒径の小さな骨材を用いたものに比べ繊維を混入させたときのワーカビリティは低くなる。そのため S1-1.8 シリーズでは適切なワーカビリティを得ることができず、強度低下を生じさせる有害な欠陥が内包されていたと考えられる。欠陥としては繊維同士の過剰な接触や有害な気泡の多量混入などが考えられる。一方、S4 および S7 シリーズではひずみ硬化およびひずみ軟化において上記の図-5(e)と同様の傾向を示した。

HFRCC と鉄筋の複合効果は、ひずみ硬化については骨材粒径による影響は小さいが、ひずみ軟化については骨材粒径が小さいものの方が大きくなる傾向を示した。しかし、鉄筋を複合化したことにより得られる HFRCC の力学特性は、骨材粒径が変化しても同程度の性能が得られており、特に繊維混入率が小さい場合には骨材粒径が比較的大きい方が高い引張性能が得られた。また、骨材粒径が大きい場合には多量の繊維混入はワーカビリティの低下が起るため難しくなるが、第 3 番目の補強繊維である鉄筋を用いることで性能の向上を図ることができ、高靱性化のための有用性が示された。

3.3 ひび割れ分散性について

図-6 にひび割れ本数-繊維混入率の関係を示す。ひび割れ本数は、各試験体表面に発生したひび割れを目視による観測を行った。図中のプロットは各試験体の各表面のひび割れ本数であり、1 試験体ごとに 4 点、1 シリーズ合計 8 点もしくは 12 点プロットされている。図中白

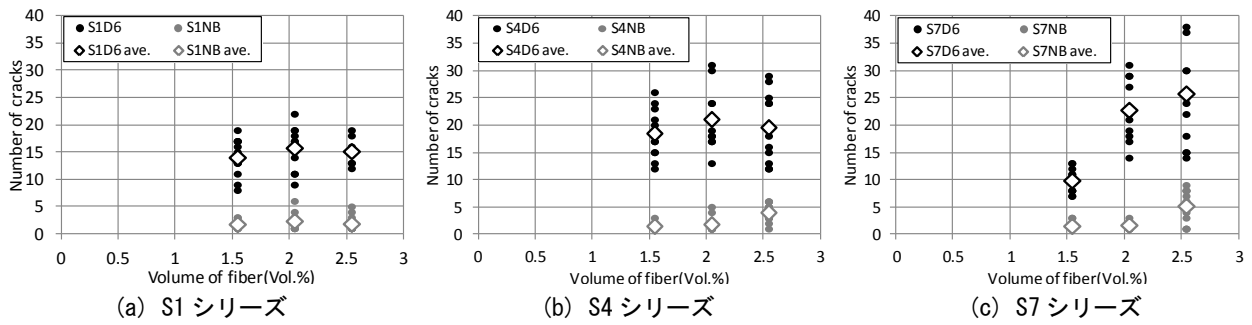


図-6 ひび割れ本数-繊維混入率の関係

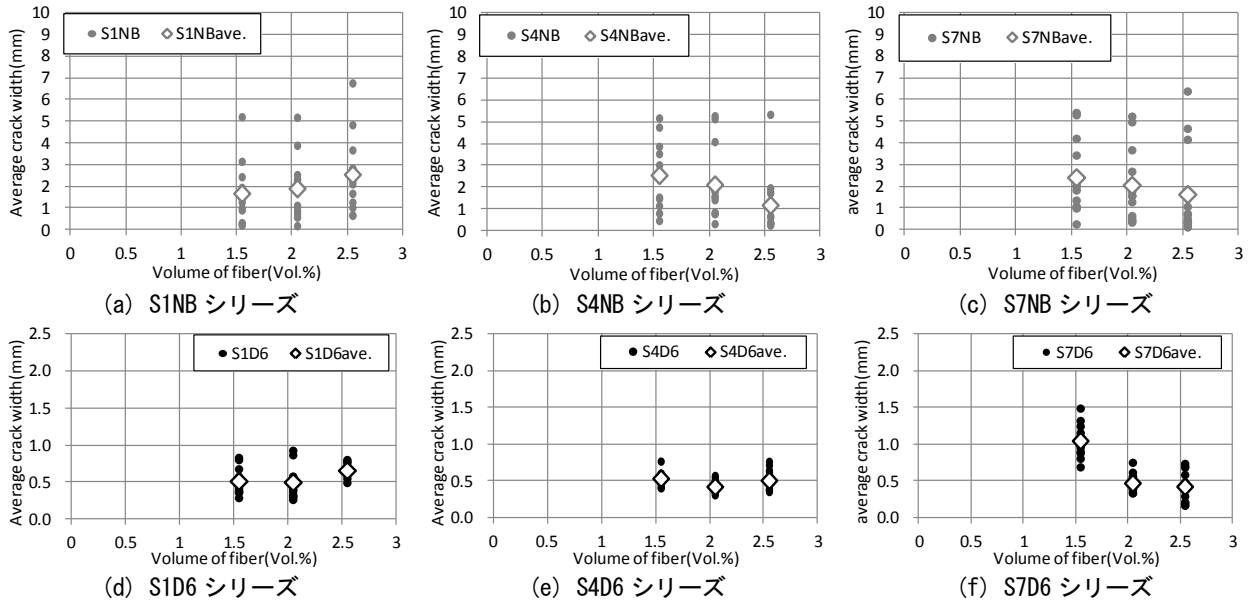


図-7 平均ひび割れ幅-繊維混入率の関係

抜きのプロットは、各シリーズのひび割れ本数の平均値を示している。図-7 は平均ひび割れ幅-繊維混入率の関係を示す。平均ひび割れ幅は載荷終了時の各面の変形量をひび割れ本数で除すことによって求めた。図中白抜きのプロットは、各シリーズのプロット全ての平均ひび割れ幅の平均値を示している。ただし、NB シリーズと D6 シリーズではグラフの縦軸のスケールが異なる。図-6 および図-7 は共通して X 軸に繊維混入率を用いており、主混入繊維である長繊維の R100 および短繊維の R40 繊維の合計値を示している。

図-6 より、全てのシリーズにおいて、NB シリーズよりも D6 シリーズの方がひび割れ本数が増加していることが分かる。NB シリーズと比較して S1 シリーズでは 12 本程度、S4 シリーズでは 15 本程度、S7 シリーズでは 8~20 本程度のひび割れが増加した。また、繊維混入率を上げることによりひび割れ本数の増加を期待していたが、S1 および S4 シリーズでは繊維混入率の増大に伴ったひび割れの増加は明確には確認されなかった。一方、S7 シリーズでは繊維混入率の増大に伴ってひび割れ本数が増加した。この二つの違いはマトリクスの性状が大きく関与していると考えられ、骨材粒径が異なることによる緻密

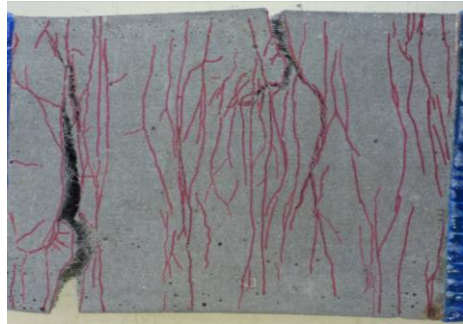
さや均一性の違いによるものであると考えられる。

表-1 より、S7 の粒径は非常に細かく、粒体の中でも粉体に近いといえる。従って、S7 を用いて形成されるマトリクスは緻密で高い均一性を有しており、少量の繊維では複数ひび割れが連続的に形成しにくい。一方、マトリクスが緻密になることで繊維との高い付着が得られ、繊維混入率を高めることで複数ひび割れが連続的に形成したと考えられる。また、S1 および S4 は比較的粒径が大きく、S7 の場合と比べてマトリクスの緻密さや均一性は低下し、さらにブリーディングなどの影響から骨材表面とマトリクスの界面部分の脆弱さも増すと考えられる。これらより、マトリクス部分はひび割れが発生しやすい状態であり、少ない繊維混入率であっても鉄筋を複合化することで安定して複数ひび割れが進展したと考えられる。しかし、マトリクス部分の緻密さや均一性が低下したことで付着性能が低下し、繊維混入率を高めたときのひび割れ面における繊維の架橋効果が十分に発揮できず、ひび割れ本数の増加がみられなかったと考えられる。

図-7 より、平均ひび割れ幅を比較すると、NB シリーズではおよそ 1~3mm に対して D6 シリーズではおよそ 0.5~1mm である。NB シリーズに比べ D6 シリーズのほう



(a)NB シリーズ (ひずみ 1.5%)



(b)D6 シリーズ (ひずみ 7%)

写真-1 ひび割れ発生状況

が変形量は大幅に大きい、鉄筋が複合化されることによりその変形に伴ってひび割れが発生し、かつ、ひび割れが拡大せずに複数ひび割れが発生していることがわかる。これは写真-1に示すひび割れの発生状況からも明らかに読み取れる。複数ひび割れの進展はこれまで繊維のみでひび割れの拡大を制御し、その繊維が架橋できない時点で破壊に至ったが、鉄筋が第3番目の繊維の役割を果たすことにより、これまで以上にひび割れに対する架橋効果が増すだけでなく、許容することのできなかつたマクロレベルの大きなひび割れを制御できることで大きなひび割れ分散性を得ることができたと考えられる。

D6 シリーズでは骨材の粒径が変化しても平均ひび割れ幅の平均値はおよそ0.5mmであり、鉄筋によって骨材粒径による影響が小さくなることが考えられるため、将来的には粗骨材を用いたHFRCCの高性能化も可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 骨材粒径が大きくなることで鉄筋の付着強度が低下し、ひずみ4%程度の大変形域において鉄筋が引抜けとみられる挙動を示したが、繊維混入率を高めることで付着強度の向上が期待できることが示された。
- (2) HFRCCに鉄筋を複合化させることにより、引張時のHFRCCの力学特性への骨材粒径による影響を小さくすることができ、特に繊維混入率が小さい場合には骨材粒径が比較的大きいもので高い引張性能が得られた。

- (3) 鉄筋が第3番目の繊維の役割を果たすことにより、これまで以上にひび割れに対する架橋効果が増すだけでなく、許容することのできなかつたマクロレベルの大きなひび割れを制御できることで大きなひび割れ分散性を得ることができた。

謝辞

本研究は平成24-25年度科学研究費助成事業(若手(B)「高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合材料の開発と評価」研究代表者:菊田貴恒)の交付を受けて実施したものである。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) A. Peled, M. Cry and S. P. Shah : Hybrid Fibers in High Performances Extruded Cement Composites , Fiber-Reinforced Concrete(FRC) BEFIB' 2000, RILEM, pp.139-147, 2000
- 2) 川又篤, 三橋博三, 金子佳生, 福山洋 : ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料の靱性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp. 235-240, 2001
- 3) 田邊佑介, 中村匠, 前田匡樹 : ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料を用いた柱及び耐震壁の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1411-1416, 2008
- 4) 菊田貴恒 : ハイブリッド型繊維補強セメント複合材料の材料設計と性能評価に関する研究, 平成21年度東北大学 審査学位論文(博士), 2010.1
- 5) Minoru Kunieda, Mohamed Hussein, Naoshi Ueda : Enhancement of Crack Distribution of UHP-SHCC under Axial Tension Using Steel Reinforcement , Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.1, pp.49-57, Feb. 2010
- 6) 三橋博三, 六郷恵哲, 国枝稔 : コンクリートのひび割れと破壊の力学 -現象のモデルと制御-, 技報堂出版, p.5, 2010.7
- 7) 菊田貴恒, 三橋博三 : 繊維補強コンクリートの構成要素と材料の基本的性質, コンクリート工学, Vol.50, No.5, pp414-417, May. 2012
- 8) Evans, K. E. and Gibson, A. G. : Prediction of the maximum packing Fraction Achievable in Randomly Oriented Short-fibre Composites, Composites Science and Technology, Vol.25, pp.149-162, 1986
- 9) 菊田貴恒, 三橋博三, 秋田宏 : ひずみ硬化セメント複合材料の一軸引張試験用治具の開発に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.81-90, 2012.5