

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：32407

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760565

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Development and evaluation of high strength and the high toughness strain-hardening cementitious composite

研究代表者

菊田 貴恒 (KIKUTA, TAKATSUNE)

日本工業大学・工学部・助教

研究者番号：20599055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は高い引張強度と高い靱性能を有するひずみ硬化型セメント複合材料を実現することである。この強度と靱性の相反する性能を両立させるためには、適切な調合条件や混入する繊維種など、材料性能に支配的な影響因子を明らかにする必要がある。本研究では鋼繊維と合成繊維を混入したハイブリッド型のSHCCの引張性状に及ぼす繊維の複合効果を明らかにすることを目標とし各種の検討を行った。その結果、鋼繊維と合成繊維の複合化およびマトリックス調合の最適化によって、高強度・高靱性SHCCが実現できることが明らかとなった。高強度・高靱性SHCCの引張特性に及ぼす影響因子としては、水結合材比と鋼繊維が支配的である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this paper is to develop the material design of Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC) which has high strength and toughness under tensile stress. For this purpose, it is necessary for appropriate kinds of fiber and mix proportion of matrix to be chosen and for constitution of conditions to be clarified. The present study aims to clarify combined effects of fiber cocktail on the tensile properties under uniaxial tensile stress of SHCC using steel fibers and synthetic fibers. In the result, firstly, it was revealed that tensile strength and toughness can be enhanced by mixing steel and synthetic fiber of appropriate quantity. Finally, mixing enough steel fiber and lowering the water-binder ratio, the tensile strength and toughness of the composites increases by dispersing high strength to depend on steel fiber.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：建築構造・材料 破壊力学 繊維補強 ひび割れ セメント複合材料

1. 研究開始当初の背景

セメント系材料及びコンクリートの力学的特性上最大の欠点は“引張に脆い”という点である。そのため構造物には、適切な靱性を付与することが必要となる。これまで、この適切な靱性を付与するためセメント系材料及びコンクリートは鉄筋もしくは鉄骨と組み合わせることによって一層の利用拡大を進めてきた。しかしながら、阪神大震災や東日本大震災などの想定を超える巨大地震を経て、セメント系材料に要求される性能も次第に多様化し、コンクリート構造物の長寿命化など、持続可能なコンクリート構造物が強求められるようになってきている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、従来のコンクリート構造よりも大きな地震荷重等に対して安全で、尚且つライフサイクルが長い長寿命型構造架構を実現するため、引張強度で 10MPa 以上の超高強度と引張終局ひずみで 3% 以上の高靱性を併せ持つ画期的な「高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合材料」の開発である。また、これら材料の特徴的性能である引張応力下でのひずみ硬化挙動や複数ひび割れの発生を適切に評価し、構造部材の設計に材料性能を反映させるためより部材断面に近い大断面試験体を用いた一軸引張試験法をあわせて開発することである。

3. 研究の方法

(1) 提案する「高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合材料」の根幹となる、最適な繊維の組合せや混和材などの調合に関する検討を行う。これまでの検討から、繊維物性の異なる繊維をハイブリッド混入することで、繊維相互の複合効果によって単独で繊維を混入した場合よりも、引張強度や靱性が向上することが明らかになりつつある。これらの知見を元に、さらに高引張強度化するために、水セメント比の低減や繊維の組合せを従来型の「スチールコードとポリエチレン」のみならず、極細鋼繊維を混入することで高いひび割れ架橋力を期待した「スチールコードと極細のマイクロスチールファイバー」、繊維端部のフックによるマトリクスとの機械的な付着特性を引張強度に期待した「両端フックスチールファイバーとポリエチレン」、12~13mm の繊維同士の組合せによるひび割れ架橋繊維本数の増加に期待した「ストレートショートスチールファイバーと合成繊維」等も検討対象に取り上げ、それらの性能をダンベル型試験体による一軸引張試験から比較検討した。

(2) 高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合材料等の引張性能に期待した新しい材料の性能評価方法はまだ確立されていない。そこで、材料の特徴的性能である引張応力下でのひずみ硬化挙動や複数ひび割れの発生を適切に評価し、構造部材の設計に材料性能を

反映させるためより部材断面に近い大断面試験体を用いた一軸引張試験法を検討した。本研究では一般的に曲げ試験等に使用される 100×100×400mm の角柱試験体を用いた一軸引張試験法を提案する。これは、従来使用されてきた薄板状試験体（ダンベル型試験体：厚さ 13mm や 30mm）の 10~25 倍程度の断面積を有するため、従来の試験法よりも部材断面内の繊維配向により近い状態で性能評価できる利点があり、研究代表者が過去に提案した楔方式の一軸引張試験治具を改良し、大断面を有する試験体による一軸引張試験方法について検討した。

4. 研究成果

(1) 引張性能に及ぼす繊維の複合効果

合計繊維混入率を 1.75% として、合成繊維 PE6 と鋼繊維スチールコードをそれぞれ単独混入した FRCC と、PE6 とスチールコードを複合化した HFRCC（ハイブリッド型繊維補強セメント複合材料、本研究で目指す高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合材料を包括する繊維補強材料の略称）の一軸引張試験結果の平均曲線を図 1 に示す。繊維の複合化によって、引張強度および最大荷重時のひずみが大きくなり、より優れた疑似ひずみ硬化域挙動を示すことが確認できた。これは合成繊維と鋼繊維を複合化する場合、合成繊維は体積当たりの混入本数が多くなるため、破壊が開始されるマイクロレベルでは、多数の微細なひび割れに対する架橋効果が大きい。さらに、ひび割れが進展したメゾレベルでは、剛性の高い鋼繊維に応力が集中して、マトリクス界面で鋼繊維が高い摩擦抵抗力を発揮するため、鋼繊維によって高い引張強度が発揮される。この際、鋼繊維は周囲のマトリクスを破碎しながら引抜けることが知られているが、合成繊維によって鋼繊維周囲のマトリクスが補強されることで引張特性が向上したものと考えられる。

表 1 繊維物性

繊維物性	密度 g/cm ³	繊維長 mm	直径 μm	引張強度 MPa	アスペクト比	
Steel	SC	7.8	32	400	2850	80
	HDR	7.8	30	380	2911	78.9
	DR	7.8	30	550	1350	54.5
	OL	7.8	13	160	2000	81.3
Synthetic	PE6	0.97	6	12	2580	500
	PE12	0.97	12	12	2580	1000

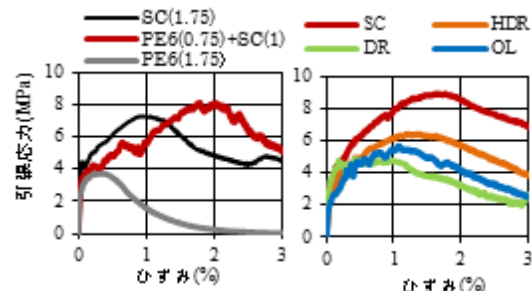


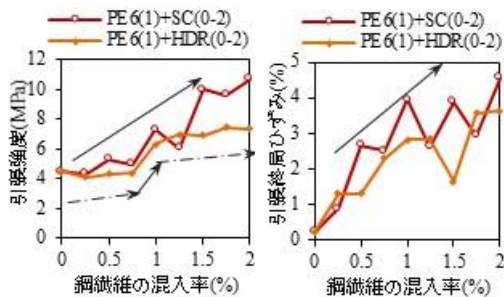
図 1 繊維の複合効果 図 2 鋼繊維形状

鋼繊維形状による影響を検討するために、4種類の鋼繊維(2Vol.%)とPE12(0.75Vol.%)を混入したHFRCCの一軸引張試験結果の平均曲線を図2に示す。アスペクト比と繊維強度のいずれも高いSCおよびHDRを用いたHFRCCが優れた疑似ひずみ硬化挙動を示している。特にSCは微小径の鋼繊維を複数本撚り合わせて繊維が構成されているため、表面の微細な凹凸によって、マトリックス界面で高い摩擦抵抗力が発揮されたと考えられ、そのためひずみ3%を超える大変形域でも初期ひび割れ応力を超える高い引張応力を保持できることが明らかとなった。

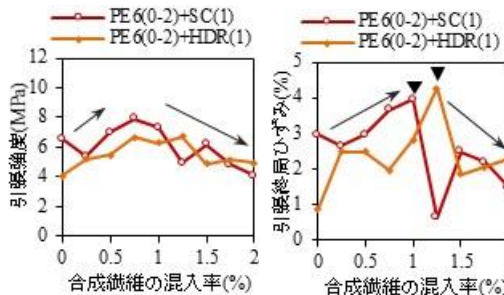
(2) 引張性能に及ぼす補強繊維の混入率

鋼繊維と合成繊維の混入率による影響を検討したHFRCCの引張特性を図3に示す。図3(a)から、鋼繊維の混入率の増加に伴い、引張強度および引張終局ひずみが概ね向上することが確認できる。これは繊維本数が増加し、1本あたりに伝達される応力が分散されて、さらに鋼繊維の引抜けによるマトリックスの破砕が合成繊維によって低減されたことで、強度および靱性が向上したためと考えられる。

一方で図3(b)から、合成繊維の混入率は、適正範囲が存在することがわかった。繊維量が過少であると多数の微細なひび割れの架橋効果が小さく、また鋼繊維が引き抜ける際に破砕される周囲のマトリックスの補強効果が小さい。逆に過多であると、繊維同士の接触が欠陥となる。さらに鋼繊維形状によって、その適正範囲が異なることがわかった。



(a) 鋼繊維混入率とHFRCCの引張特性関係



(b) 合成繊維混入率と引張性状の変化

図3 補強繊維の複合効果によるHFRCCの引張特性

(3) 引張性能に及ぼす水結合材比の影響

図4に示すように鋼繊維の混入率の増加に

伴う、顕著な引張特性の向上が確認できた。一方、水結合材比25%と30%とでは引張特性に大差はなく、20%と30%を比較すると引張強度は向上する傾向がみられた。靱性については、水結合材比が低い20%ではひずみ軟化域で脆性的にマトリックスが破壊されるため、特に鋼繊維の混入率1%までは引張終局ひずみが低い傾向にあるものの、1.5%以上の混入で靱性は高くなっている。マトリックス強度を高くして鋼繊維に伝達される応力を高めることでより繊維の架橋効果が発揮され、さらに鋼繊維の本数が増やして高い応力を分散させることで、高強度かつ高靱性なHFRCCが開発できた。

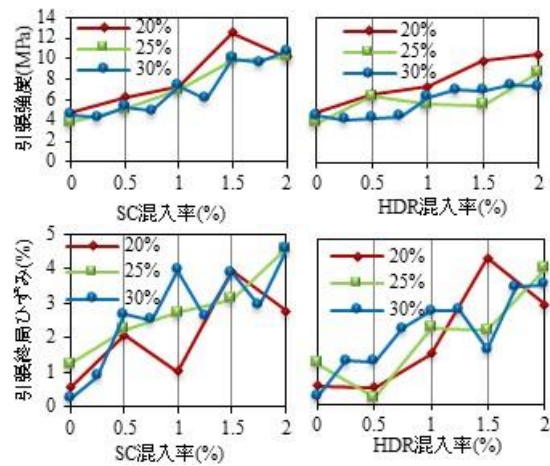


図4 水結合材比と鋼繊維混入率が引張性状に及ぼす影響

(4) 高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合材料を実現すべく各種検討を重ねた結果、図5に示すような高い引張強度と高靱性性能を併せ持つ新しい材料を実現することができた。この一連の検討から得られた知見を以下に示す。

- ①高強度・高靱性HFRCCの引張特性に及ぼす影響因子としては、水結合材比と鋼繊維が支配的である。
- ②アスペクト比と繊維強度が高く、特に繊維表面に微細な凹凸をもつ鋼繊維を用いたHFRCCは優れた引張特性を示す。
- ③鋼繊維と合成繊維を複合化する場合、合成繊維の混入率には適正範囲が存在する。

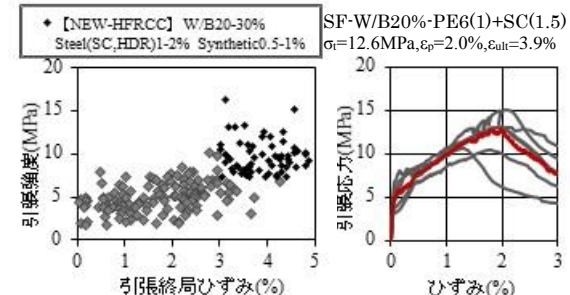


図5 高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合材料の実現

(5) 角柱試験体を用いた大断面試験体による引張性状評価方法

繊維補強セメント複合材料を含むセメント系材料においては、一軸状態で引張力を作用させても、ひび割れが発生することで、曲げ変形が生じてしまい、純粋な意味での引張性能の評価にならない。そこで、ひび割れ発生に伴う曲げ変形を抑制し、より正確な引張性状を把握するために図6に示すような試験体中に鉄筋を挿入し、その鉄筋による拘束効果で曲げ変形を抑制する試験方法を検討した。その結果を図7に示す。図7より、鉄筋を試験体中に挿入することで、試験体に発する曲げ変形による曲率は著しく小さくなることが明らかとなった。なお、繊維補強セメント複合材料部分の応力-ひずみ関係に関しては鉄筋を挿入した試験体の応力-ひずみ関係から鉄筋が負担する部分を差し引くことで計算する手法としている。したがって、これまで難しいとされていたセメント系材料の大断面試験体による一軸引張性状の評価であるが、本研究で提案する曲げ変形を抑制する方法を適用することで、簡単にそして安定的に性能評価可能であることが明らかとなった。

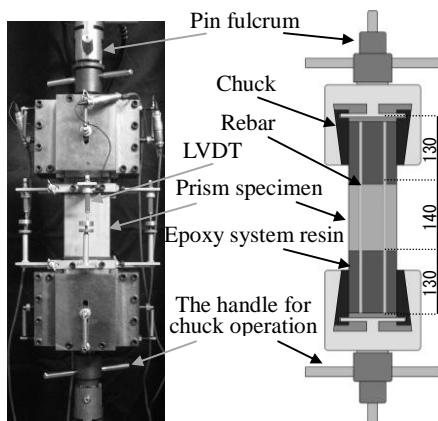


図6 楔型治具のその断面概要

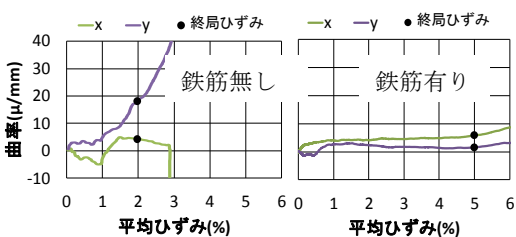


図7 鉄筋挿入による曲率低減効果

(6) この研究が及ぼすインパクト

さまざまな性能の繊維補強材料が提案されている中、本研究で提案した適切な調合と物性の異なる繊維の複合化という手法を用いることで、強度と靱性能という相反する性能を両立できることが明らかとなったことは、広い意味での繊維補強セメント複合材料の材料設計手法に新たな道を拓くものと期待される。また、材料の性能評価方法として

本研究で提案しているひび割れの発生に伴う曲げ変形を抑制する大断面試験体による一軸引張試験法は大きな断面の試験体でありながらも安定的に引張性状を確認できることから、より簡便な一軸引張試験法として繊維補強セメント複合材料の性能評価法として広く活用される可能性がある。

(7) 今後の展望

本研究によって、強度と靱性能を両立させた高強度・高靱性型の繊維補強材料が実現可能であることが示された。今後は、さらなる高強度化、高靱性化を実現できる材料設計手法を確立していく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 吉田理紗、菊田貴恒、西脇智哉、三橋博三、繊維の複合効果がハイブリッド型繊維補強セメント複合材料の引張性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.35, pp.1987~1992、2013

[学会発表] (計0件)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊田 貴恒 (KIKUTA, Takatsune)

日本工業大学・工学部・助教

研究者番号：20599055