

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：32407

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820320

研究課題名(和文) 引張強度20MPa以上を実現する超高強度ひずみ硬化型セメント複合材料の開発

研究課題名(英文) Development of the very high-strength strain hardening cement composite of more than 20 MPa of tensile strength

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：混入する繊維に関して鋼繊維を中心に様々な検討を行い、物性の異なる2種類の繊維をマトリクスに混入するハイブリッド型の繊維混入が引張強度の向上に非常に効果が高いことが確認された。特に複合混入する繊維の中で太く長い鋼繊維については、引張強度、靱性能に及ぼす混入量の影響が非常に大きく、2Vol.%までは混入量の増加と共に著しく引張強度が向上することが明らかとなった。また、これら材料の設計手法に関する検討を実施し、2種類の金属繊維を混入した場合の引張性能は合計混入量5Vol.%の範囲においては、それぞれの繊維の単独混入時にける引張性能の足し合わせでおおよそ推定可能であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：This research was studied about materials design of the very high-strength strain hardening cement composite of more than 20 MPa of tensile strength. A result showed that it's effective in improvement of the tensile strength to mix 2 kinds of steel fiber different in the physical properties in a matrix. In especially, the influence on the tensile strength and the toughness is very big for the mixture amount of the long steel fiber. The tensile strength improved remarkably with increase of the mixture amount of the long steel fiber at the reach to the 2Vol.%. Moreover, it was examined material design method. Tensile performance of mixed two different fibers at the reach to the 5Vol.%. it was revealed by summing the tensile performance at a single entry of each of the fibers is approximately be estimated.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 繊維補強セメント複合材料 鋼繊維 材料設計手法 一軸引張試験 超高強度材料

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られてきた。しかしながら、時代を経て、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靱求められるようになり、地震動や外的環境因子に対して高い耐久性を有する高性能なセメント系材料が求められるようになってきた。

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新しい長寿命型構造架構を実現するため、引張強度で 20MPa 以上の超高強度と引張終局ひずみで 2% 以上の高靱性を併せ持つ画期的な「超高強度・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

本研究は主に 3 つの項目について検討を行なった。第一には、提案する「超高強度・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などに関する検討である。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。例えば撚り線状に特殊加工された鋼繊維とポリエチレン繊維のハイブリッド化を実施することで、ひび割れ先端の微細なひび割れをポリエチレンが、より大きなひび割れを鋼繊維が補強するという、ひび割れの大きさに対応した繊維による補強を実現することで、高い靱性を付与できることがわかっている。

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「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極細のマイクロスチールファイバー」、等を検討対象に取り上げ、これらの性能を一軸引張試験から比較

検討した。

第二には、2 種類の繊維を組み合わせることで実現する「超高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合材料」の材料設計手法に関する検討である。物性の異なる 2 種類の繊維を組み合わせるといった材料設計の場合、その繊維の組み合わせは無数に存在することから、最小の試験結果から様々な繊維混入量の組み合わせによる引張性能の推定が可能か検討した。具体的には組み合わせる 2 種類の繊維のそれぞれ単独混入時の引張試験結果から計算的にそれぞれの性能を単純加算することで、ハイブリッド化した場合の引張性能を推定可能か試みた。

第三には、大断面試験体による一軸引張試験方法の検討である。実構造物の設計にこれら「超高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合材料」の性能を反映させるためにも、より大きな断面での試験が必要となるため、100×100 角の角柱試験体による一軸引張試験について検討した。

4. 研究成果

(1) 超高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合材料を実現する最適な繊維の組合せに関する検討

この部分で検討した調査を表 1 に示す。繊維については両端フック付き鋼繊維 (以下 DR、 $\phi 380 \mu\text{m} \times 30\text{mm}$)、ストレート短繊維 (以下 OL、 $\phi 160 \mu\text{m} \times 6\text{mm}$ 、 $\phi 100 \mu\text{m} \times 13\text{mm}$)、撚線型鋼繊維 (以下 SC、 $\phi 400 \mu\text{m} \times 32\text{mm}$) を使用した。図 1 に一軸引張試験の結果から算出した平均の引張応力-ひずみ関係を示す。(a) に示す DR、OL 繊維を 0.25% ずつ増やした試験では、繊維量が DR1.5%、OL1% の試験の最大引張強度は $11.53\text{N}/\text{mm}^2$ になり、繊維量が 1.5% 増えた DR2%、OL1.5% の試験が最大引張強度 $15.55\text{N}/\text{mm}^2$ になった。

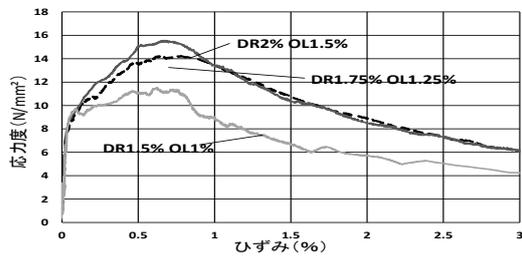
(b) に示す OL 繊維を増やした試験では、繊維量 3.5% の最大応力が $13.28\text{N}/\text{mm}^2$ となった。しかし繊維量 4% では最大引張強度が $11.99\text{N}/\text{mm}^2$ になり、3.5% よりも低い結果になった。繊維量について示した (a)、(b) より、短繊維を増やすよりも長繊維を増やす方が強度が大きくなることが認められる。しかし、繊維量を増やせばひび割れ面に架橋する繊維が増えるが一定量を超えると施工性も悪くなり、引張性状の低下を引き起こすことも考えられる。

(c) に示す鋼繊維種を変えた試験体の結果から、ストレート形状の OL13mm の最大引張強度は $11.66\text{N}/\text{mm}^2$ となり、一方、繊維長が 30mm 程度でなおかつ繊維形状に工夫が施された SC、DR の最大引張強度は $12.85\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $12.68\text{N}/\text{mm}^2$ とそれぞれ OL 繊維よりも高い引張強度を示している。これは、SC 繊維の特徴である微細な凹凸や DR 繊維の末端変形により、マトリクスとの付着力や機械的な引掛り作用が OL 繊維よりも優れているためだと考えられる。

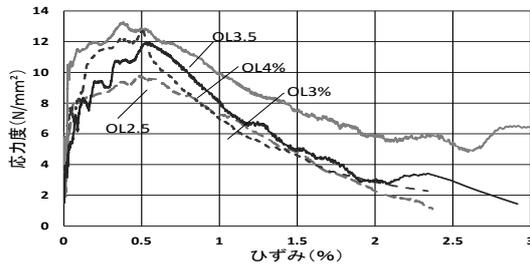
これらの結果から、高い引張強度と靱性能を実現するには、組み合わせる繊維の中でメインのひび割れ補強繊維となる長繊維の混入量やマトリクスとの付着性などが重要であることが明らかとなった。検討した繊維の組み合わせの中で最も高強度・高靱性な性能が発現した DR2%、OL1.5%の一軸引張試験結果

表 1 調査

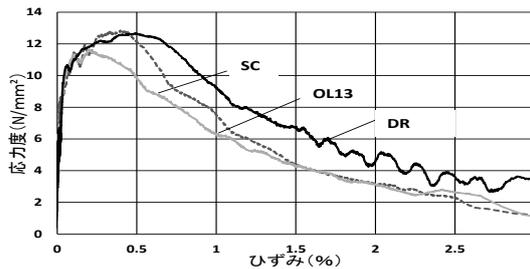
	W/B	減水剤	Dr Vol%	OL Vol%	養生時間 h	養生温度 °C	
Dr.2 OL.1.5	16%	0.8	2	1.5	24	90	
Dr.1.5 OL.2			1.5	2			
Dr.1 OL.2			2	2			
Dr.1 OL.2.5			2.5	2			
Dr.1 OL.3			3	2			
Dr.1 OL.3.5			3.5	2			
Dr.1 OL.4			4				
SC.1 OL.2	16	0.8	SC1	2	24	90	
OL13-1 OL6-2			OL13-1	1			
Dr.1 OL.2			1	1			
Dr.1.5 OL.1-48							48
Dr.1.5 OL.1-72							72
Dr.1.5 OL.1-15							150
Dr.1.5 OL.1-18			180				



(a) 繊維混入量の違いによる応力-ひずみ関係の比較



(b) OL 繊維混入量の違いによる応力-ひずみ関係の比較



(c) 鋼繊維種の違いによる応力-ひずみ関係の比較

図 1 引張応力-ひずみ関係

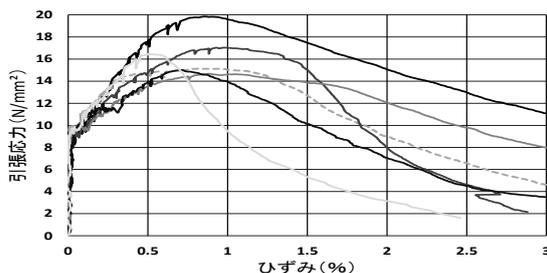


図 2 DR2.0+OL1.5 調査による引張応力-ひずみ関係

を図 2 に示す。引張試験のためばらつきが大きい、最大 20MPa 付近の応力が発現していることが確認できる。しかし、安定的に 20MPa を超える性能までは到達出来ておらず、今後の課題が残る結果となった。

(2) 超高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合材料の材料設計手法に関する検討

前項までの結果から繊維物性の異なる 2 種類の鋼繊維を用いたハイブリッド型の繊維の組み合わせにすることで、高強度・高靱性な引張性能を実現可能であることが明らかとなった。そこで、材料設計を簡易的に進めるためにも最小の試験結果から様々な繊維混入量の組み合わせによる引張性能の推定が可能か検討した。

ここでは表 2 に示す調査を用いて、ひび割れ補強のメインとなる長繊維と補助的な役割を担うストレート短繊維の混入量を 0.5Vol.% 刻みでそれぞれ単独混入し、一軸引張試験を実施した。その結果を単純加算し、様々な混入量によるハイブリッド型の超高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合材料の引張性能を推定した。試験は厚さ 30mm のダンベル型試験体を用い、検長区間 80mm の中央部分に 6mm 四方で切込みを入れ、切込み部分からひび割れが発生するように一軸引張試験を行った。繊維架橋応力とひび割れ開口変位 (CMOD) を計測した。

図 3 に示すとおり複合混入の実験値と計算値は近い値になった。表 3 は複合混入の吸収エネルギー量の実験値を 1.00 として計算値と比較した結果であり、計算値は平均 0.99 と約 1% 程度の差であった。したがって架橋則の単純加算によって精度よく繊維複合混入の架橋則の推定が可能だと考えられる。

次に、DR と OL 繊維の各繊維単一混入を 0.5vol.% ピッチで段階的に試験した実験値から、図 4 のグラフのように DR と OL 繊維の実験値を単純モデル化し、間の繊維量の値を計算によって補完し算出した。その補完値を単純加算し複合混入の計算値を算出、実験値と比較した。その結果、図 5 に示すように実験値と計算値のグラフはほぼ重なり合い、吸収エネルギー量でも、実験値 43.95N/mm、計算値 46.00N/mm と近い値になった。この結果から、各繊維単一混入の補完値による架橋則の単純加算からでも繊維複合混入の架橋則の推定が可能であると考えられる。

表 2 調査

SFC	S/B	(W+SP)/B	SP/B	DR	OL
wt%				vol%	
100	35	16	1.0	0.5~2.5	0.5~2.5

表 3 複合混入による吸収エネルギー量の増減割合

OL(vol%) \ DR(vol%)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
0.5	1.168	1.024	0.870	0.812	1.031
1.0	0.737	0.913	0.900	1.071	0.923
1.5	1.058	1.083	1.047	0.981	1.244
2.0	0.999	1.003	1.057	1.127	1.321
2.5	0.853	0.899	1.089	1.108	1.241

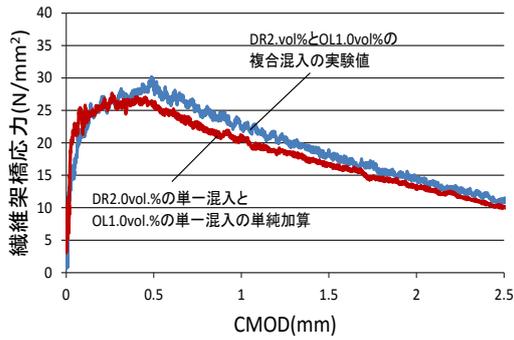


図3 複合混入（実験値）と単純加算（計算値）の比較

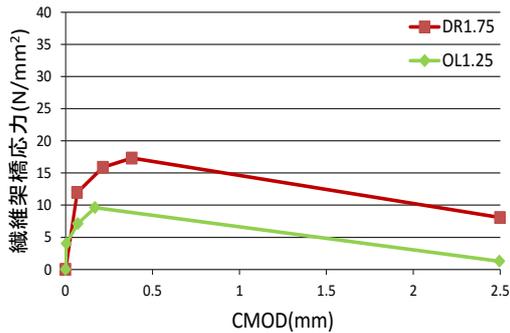


図4 計算から求めた単純加算における補充モデル

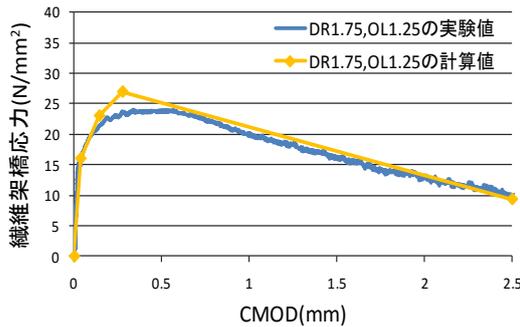


図5 実験値と補充モデルによる計算値との比較

(3) 大断面試験体による超高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合材料の一軸引張試験方法に関する検討

一軸引張試験は過去に作製した治具のチャック部を改良し、図6に示すように試験体端部を機械的に挟み込む2方向楔型治具とし、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する仕組みとしている。試験体断面は100×100mm角の角柱試験体とした。

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。

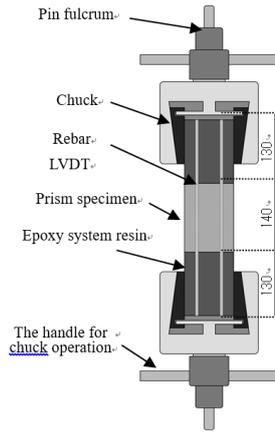


図6 大断面引張治具概要

開発した超高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合材料の一軸引張試験を実施したところ、かなりの確率でチャック部に滑りが生じてしまい最大強度等の引張性能の把握が非常に困難となったが、いくつかの試験体では厚さ30mmの小試験体で得られた引張強度の約半分程度で軟化挙動に移行する傾向が見受けられた。これらのことから、超高強度材料に対応した引張試験用治具については更なる検討が必要であり、今後の課題と言える。

(4) この研究が及ぼすインパクト

本研究で提案した2種類の鋼繊維によるハイブリッド型の繊維配合とすることで、引張強度20MPaに迫る超強度が実現可能であることが明らかとなり、広い意味での繊維補強セメント複合材料の新たな道を拓くものと期待される。また、繊維の単一混入時の引張性能から複合混入時の引張性能をそれぞれの繊維のひび割れ架橋性能を単純加算することで大凡推定可能であることが明らかとなり、繊維補強セメント複合材料の材料設計手法として広く活用される可能性がある。

(5) 今後の展望

本研究によって、引張強度20MPa級の超高強度・高靱性ひずみ硬化型セメント複合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0件)

[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