

令和元年5月29日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06778

研究課題名(和文) 長寿命型構造架構を実現する超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料の開発

研究課題名(英文) Development of the very high-strength strain hardening cement composite of long-life structure

研究代表者

菊田 貴恒 (KIKUTA, TAKATSUNE)

日本工業大学・建築学部・准教授

研究者番号：20599055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：混入する繊維に関して微小な繊維を中心に様々な検討を行い、カーボンナノチューブや長さ0.1mm～0.8mm以下の極短繊維などと鋼繊維を適切に複合混入することが引張強度の向上に効果が高いことが確認された。特に0.5mm程度の極短繊維(アラミド繊維)と長さ13mmのストレート鋼繊維、長さ30mmの両端フック付き鋼繊維のように段階的に寸法の異なる繊維を複合混入した場合に著しく引張強度が向上することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は相反する性能である高強度と高靱性を両立し長寿命構造架構を可能とする新たな「超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料」の開発を目的としたものである。本研究は、これまでの研究知見を活かしながら、「段階的なひび割れ補強を実現する繊維のハイブリッド化」により、引張強度22MPa以上の超高強度と高靱性をそれぞれ両立させる、全く新しい独創的な材料設計手法を提案したものであり、広い意味での繊維補強セメント系複合材料の利用促進に大きく寄与するものと考えられる。

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 25MPa of tensile strength. As a result, hybrid mixing of carbon nanotubes or ultrashort fibers and steel fibers was effective in improving tensile strength. In particular, the tensile strength is remarkably improved when fibers having different dimensions are combined in a stepwise manner such as ultrashort fibers of 0.5 mm in length, straight steel fibers of 13 mm in length, and steel fibers of 30 mm in length.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：FRCC 複合効果 繊維 超長寿命 破壊力学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 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く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 25MPa 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。

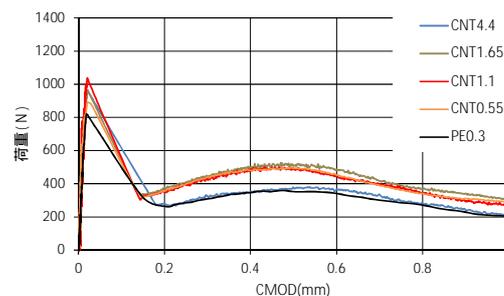
### 3. 研究の方法

本研究は主に 2 つの項目について検討を行なった。第一には、ひび割れを補強する繊維についてその繊維長さに応じて、ナノ繊維、極短繊維、短繊維、長繊維と定義し、破壊進行領域のような極小さなひび割れを補強するカーボンナノチューブやセルロースナノファイバー、さらには極短繊維のひび割れ補強効果とそれらが引張強度に及ぼす影響について検討した。第二には、それらのナノ繊維や極短繊維と短繊維もしくは長繊維との複合混入について検討し、3 種類の繊維の複合混入によりひび割れを段階的に補強することで提案する「超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料」が実現可能となることを明らかにするため検討を行った。

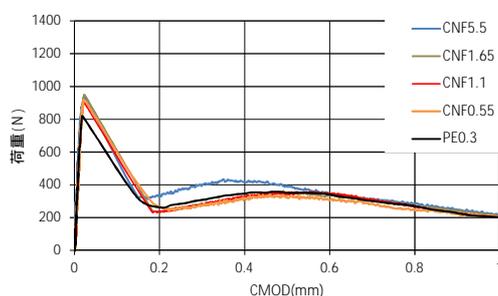
### 4. 研究成果

(1) カーボンナノチューブ、セルロースナノファイバー、極短繊維が引張強度に及ぼす影響

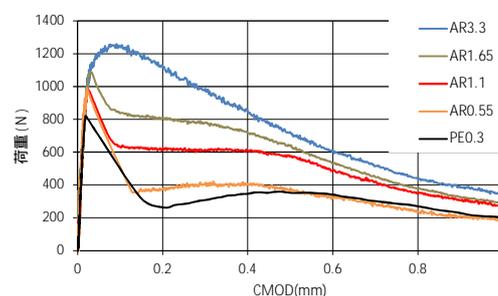
3 点曲げ試験から求めた短繊維単独混入および短繊維とナノ繊維、極短繊維の複合混入における荷重 - CMOD 関係を図 - 1 に示す。図 - 1(a)、(b) に示す CNT、CNF 混入に関しては CNT において第 1 ピークおよび第 2 ピークの荷重が向上しているが、全体的な傾向として、短繊維とナノ繊維との複合混入による曲げ性状の影響は限定的であることがわかる。一方、図 - 1(c) に示す極短繊維としてアラミドを混入した試験体では全ての混入量で第一ピークの向上が確認される。また、PE 繊維単独混入の試験体では第一ピーク以降の急激なひび割れ進展に伴って大きな谷が見られるのに対し、アラミドを混入した試験体では谷が完全に無くなっている。混入量 3.3% の試験体ではひび割れに伴う急激な落ち込みは無くなり、初期ひび割れ以降も荷重が増加する挙動が見られた。これはアラミドによって、ひび割れ先端における破壊進行領域が補強され、次のメゾレベルのひび割れを補強する PE 繊維への安定的な架橋力の伝達が行われたためにこのような挙動が見られたと考えられる。したがって、ナノサイズの繊維である CNT、CNF に関してはその複合効果は限定的であるものの、繊維長さ 0.5mm 以下のような極短繊維であってもひび割れ架橋特性に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。



(a) CNT シリーズ



(b) CNF シリーズ



(c) AR シリーズ

図 - 1 ポリエチレン繊維とナノ繊維、極短繊維を複合混入した荷重 - CMOD 関係 (平均曲線)

(2) 極短繊維（長さ 0.5mm アラミド繊維）の複合混入効果について

図 - 2 に繊維長 0.1, 0.25, 0.5mm の極短繊維と繊維長 6mm の短繊維を複合混入した試験体による荷重 - CMOD 関係を示す。なお図 - 2 の各図には比較のために短繊維を単独混入した場合の荷重 - CMOD 関係も合わせて示している。図 - 2(a), (b), (c) より、短繊維を単独で混入した試験体は 850N 付近で初期ひび割れの発生を迎え、そのひび割れ発生に伴い 350N 付近まで急激な荷重低下を示している。その後ひび割れ進展に伴う繊維架橋により緩やかに荷重が上昇し、CMOD が 0.4~0.5mm に達した時点で荷重上昇のピークを迎えている。このように初初期ひび割れから繊維架橋による荷重上昇のピークを迎えるまでの範囲において、荷重 - CMOD 関係が谷のような形を示していることから、短繊維の単独混入ではひび割れ発生時までに蓄積されるひずみエネルギー量に対してひび割れの急激な進展を抑制する架橋力が不足していると考えられる。

一方、極短繊維と短繊維を複合混入したものでは、図 - 2(a) に示すように極短繊維の繊維長さが 0.1mm であってもその混入率を増加させることで初期ひび割れ以降の荷重低下が徐々に小さくなり、極短繊維の混入率が 2.0 Vol.% 時には初期ひび割れ以降の急激な荷重低下はほぼなくなり、非常に安定的なひび割れ進展挙動を示した。したがって、繊維長さが 0.1mm（アスペクト比：7.7）の極短繊維であっても短繊維の単独混入時に不足した架橋力を補うことが可能であり、十分にひび割れ補強繊維として機能することが明らかとなった。

また、図 - 2(c) に示す繊維長さ 0.5mm の極短繊維混入時と、図 - 2(a), (b) に示す繊維長さが 0.1, 0.25mm の荷重 - CMOD 関係を比較すると、繊維長さ 0.5mm では繊維混入率 1.1Vol.% と他の繊維長さよりも少ない混入率で初期ひび割れ以降の急激な荷重低下が抑制されている。さらに繊維長さ 0.5mm の極短繊維混入時には繊維混入率を 2.2Vol.% まで増加させると、初期ひび割れの発生による荷重低下が一切起こらずに繊維架橋による荷重の上昇が発現しており、短繊維単独混入時の荷重 - CMOD 関係に見られる初期ひび割れ後の谷のような形の挙動がほぼ完全になくなっている。図 - 2(d) にはそれぞれの長さの極短繊維を 1.5Vol.% 混入した試験体の荷重 - CMOD 関係を示す。図 - 2(d) より、極短繊維の混入率が 1.5 Vol.% と同一の場合、極短繊維の長さが 0.1mm よりも 0.5mm と長くなるにしたがって初期ひび割れの発生に伴う荷重低下が小さくなり、より安定したひび割れ進展となることがわかった。

これらのことから、短繊維と共に複合混入した極短繊維は長さが 0.1mm~0.5mm と非常に短いですが、FRCC に一般的に使用されている長さ 10mm 前後の短繊維と同様にその繊維混入率および繊維長さによって曲げ特性に明確な差異を示すことが明らかとなった。

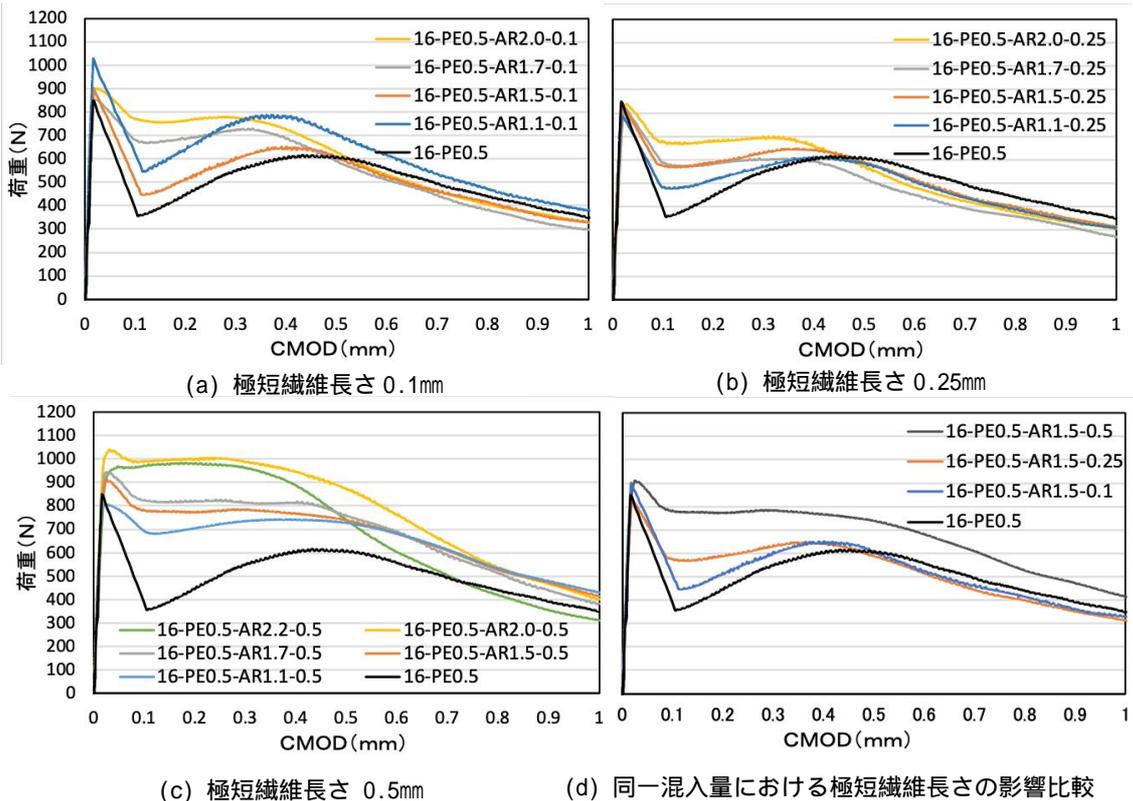
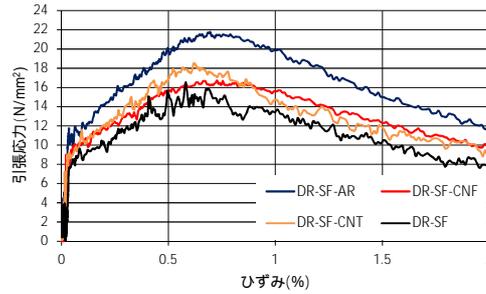


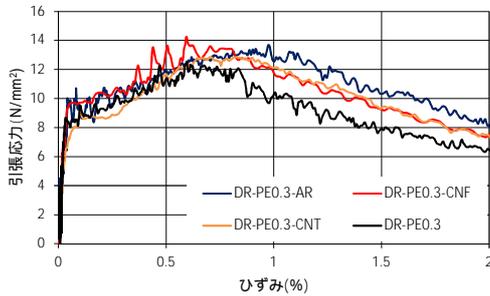
図 - 2 各極短繊維長さにおける荷重-変位関係

(3) 極短繊維、短繊維、長繊維の形状の異なる3種類の複合混入が引張強度へ及ぼす影響について

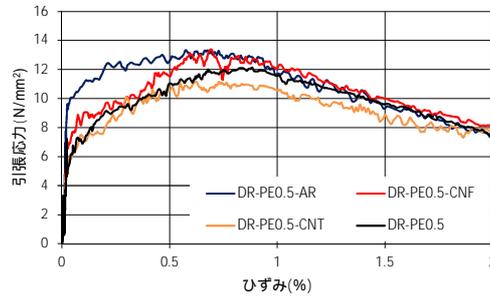
一軸引張試験から求めた長繊維と短繊維混入および3つ目の繊維としてナノ繊維もしくは極短繊維を複合混入した試験体における引張応力 - ひずみ関係を図-3に示す。鋼繊維の長繊維と短繊維を用いた調合である図-3(a)より、アラミドを混入することで引張強度22 N/mm<sup>2</sup>程度の超高強度を実現できていることが確認できる。これは極短繊維無混入の試験体と比べると約6 N/mm<sup>2</sup>程度強度が上昇しており、引張強度において極短繊維が著しく効果を発揮していることが確認できる。また、CNTを混入した試験体においても、微細繊維無混入の試験体と比べ、引張強度2.5 N/mm<sup>2</sup>程度の強度上昇が確認でき、ナノレベルの繊維でもある程度の複合効果が発揮されることが明らかになった。一方、図-3(b)、(c)に示す鋼繊維の長繊維とPE繊維を短繊維として混入した調合については、微細繊維の複合混入によりポストピークの挙動に若干の変化が見られるものの、引張強度や最大荷重時ひずみ等に大きな変化は確認されなかった。これは短繊維の混入量が長繊維や極短繊維よりも著しく少なかったことで、ナノ繊維もしくは極短繊維から短繊維への安定的な架橋力の伝達ができなかったためと思われる。



(a) DR-SF-各微細繊維



(b) DR-PE0.3%-各微細繊維



(c) DR-PE0.5%-各微細繊維

図-3 長繊維、短繊維、ナノ繊維、極短繊維を複合混入した一軸引張応力 - ひずみ関係 (平均曲線)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

菊田貴恒、三橋博三、ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料の力学特性に及ぼす極短繊維の影響、日本コンクリート工学会年次論文集、査読有、2019、印刷中

〔学会発表〕(計2件)

菊田貴恒、FRCCにおけるカーボンナノチューブのひび割れ架橋特性に関する研究、日本建築学会大会(東北)、2018

菊田貴恒、ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料における微小繊維の複合効果に関する研究、日本建築学会大会(中国)、2017

〔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：  
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：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。