

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03337

研究課題名(和文)高機能・高性能FRCCの合理的な材料設計手法と包括的な評価手法の提案

研究課題名(英文) Proposal of rational material design methods and comprehensive evaluation methods for high performance and functional FRCC

研究代表者

西脇 智哉 (Nishiwaki, Tomoya)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60400529

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、繊維補強セメント系複合材料に着目し、高機能化・高性能化を実現する材料設計のためのデータベース構築と、包括的な評価手法の開発に取り組んだ。FRCCに対して用いる補強繊維について、センチメートル～ナノメートルオーダー、かつ、様々な材質について実験検討などを行って、データベースを整備した。このような幅広い補強繊維の組み合わせを利用した調合設計が可能となるよう、目標として定めた複数の指標(例えば、ひずみ硬化、自己修復効果、ワーカビリティ、コストなど)を総合的に評価するための指標を整備した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

FRCC材料は、長期に亘る建築や社会インフラストックの有効活用や、それを支える維持管理の確実な遂行に資すると期待される一方で、その高機能化・高性能化を実現する材料設計手法は必ずしも体系立てられていなかった。本研究課題で示した各種補強繊維の横断的なデータベースや、FRCC材料の総合評価手法は、設定した性能項目に対して適切な補強繊維の組み合わせ方法を検討するための、材料設計手法に大きく資するものである。

研究成果の概要(英文)：In this project, a database of fiber-reinforced cementitious composite (FRCC) and comprehensive evaluation indices are developed for the design of high functionality and high performance FRCC, by conducting experiments on various kinds of reinforcing fibers in the order of centimeters to nanometers. In order to make it possible to design mix proportions using such a wide range of reinforcing fiber combinations, comprehensive indices were developed to evaluate multiple indicators (e.g., strain hardening, self-healing effect, workability, cost, etc.) that were set as targets.

研究分野：建築材料

キーワード：繊維補強セメント系複合材料 データベース 性能評価指標 単繊維引抜試験

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。

## 1. 研究開始当初の背景

我が国は既に人口減少の局面にあり、環境問題も一層切迫度が増す中で、今まで以上に長期に亘る建築や社会インフラストックの有効活用や、それを支える維持管理の確実な遂行が喫緊の課題となっている。しかし、昨今の社会情勢からは、このような維持管理に投資可能な人的・金銭的コストが厳しく制限されざるを得ず、省力化・効率化の推進に強い要請がある。

このような背景から、コンクリート構造物の長寿命化への要請が大きい。本研究課題では、長寿命化に資すると期待される、FRCC (Fiber Reinforced Cementitious Composite: 繊維補強セメント系材料) を対象に、その高機能化・高性能化を実現する材料設計手法の提案と、包括的な評価手法の開発に取り組む。適切な材料設計を行うことにより、FRCC に対しては複数微細ひび割れを伴う疑似的なひずみ硬化現象の付与が実現可能である[1]こと、その際には異なる補強繊維を多段階に用いることでより高い効果が得られる[2]こと、また、新たな機能として微細なひび割れにおける自己修復効果が強く期待できること[3]などが確認されている。中でも、異なるサイズの補強繊維を複合的に用いることで、高強度化や高靱性化が実現可能である。その一方で、異なる繊維を複合的に用いる手法は Rossi など早くから提案[4]しているが、たとえば Li らが構築した ECC 材料の材料設計手法[5]のような体系化には至っていない。また、数多くの実験結果からマイクロ繊維(ワラストナイト)の効果は確認されているものの[6]、その補強メカニズムの直接的な評価も十分ではない。近年では、より微細な繊維として、カーボンナノチューブ(CNT)やセルロースナノファイバー(CNF)といったナノオーダーの繊維状材料の検討が数多く行われているが、コンクリートのような「廉価な」材料に対しては、現実的な適用には未だ至っておらず、補強メカニズムに基づいた合理的な材料設計手法は確立されていない。さらに、従来から用いられている鋼繊維・合成樹脂系繊維などに加え、ワラストナイトなどの鉱物系繊維や上述のナノオーダーの繊維など、現在は極めて広範な補強繊維が提案され、それぞれが繊維の特徴に基づいて個別に材料開発を行っている状況がある。そのため、これらの広範な FRCC 材料を統一的に扱い、FRCC に用いる各種繊維の横断的なデータベースの構築、各種繊維の特徴を踏まえた材料設計手法の提案、各種の FRCC を総合的に評価可能な指標の提案などにより、材料設計から実構造物へ適用までを統一的に扱うためのガイドラインが望まれている。

## 2. 研究の目的

ここでは、上述の3項目を整理し、ナノ～マイクロレベルの微細繊維補強メカニズムの確認、および、FRCC に用いる各種繊維の横断的なデータベースの構築、各種繊維の特徴を踏まえた FRCC 材料としての総合評価指標の提案の2項目を研究目標とした。

### 微細繊維補強メカニズムの確認と補強繊維のデータベース構築

FRCC に対して用いる繊維は、これまでも複数種類の繊維を用いた複合的な補強効果が確認されてきた[2]が、その範囲は限定的で、形状・長さが違う程度の組み合わせが基本であった。ここでは、合理的な材料設計手法の提案を目指し、データベースを整備する。

### 補強繊維の組み合わせを含めた総合評価指標の提案

広い補強繊維の組み合わせ範囲における調合設計手法について検討を行うことを目的として、補強繊維を複合的に用いた場合であっても適用可能な、総合評価指標の提案を行う。申請者らのこれまでの検討[7]からは、複数種類の繊維を併せて使用した場合に得られる複合効果を、力学特性の側面から評価した事例がある。この一方で、目標として定めた複数の指標(例えば、ひずみ硬化、自己修復効果、ワーカビリティ、コストなど)を総合的に評価するための指標は整備されていない。これまで数多くの FRCC 材料が提案・開発されてきているが、これらは個々に開発された材料として独立した評価を行うことが一般的である。例えば、力学特性を取り上げる場合、通常は引張強度と靱性能がトレードオフになるが、双方を両立させる UHP-FRCC なども開発されている。合理的な材料設計手法に寄与することを目的に、複数の評価軸を取り入れた総合評価方法を提案する。

## 3. 研究の方法

### (1) 微細繊維補強メカニズムの確認とデータベース構築

ここでは、微細繊維の補強メカニズムを確認すると共に、これらの繊維を含めたデータベースの構築を行う。微細繊維に対して直接的な引張試験などを行うことは容易でなく、ここでは FRCC としての挙動を測定対象としている。そのため、微細繊維を混入させたマトリックスに長さ 30 mm の端部がフック形状である鋼繊維を埋設し、この単繊維引き抜き試験を中心に行った。引き抜き試験の概要例を図 1 に示す。CNT・CNF など微細繊維を用いる場合には、予め練混ぜ水に所要量を溶いた上で、超音波ホモジナイザーによって十分な分散を与えた。CNT の場合は、他の材料と混ぜ合わせる前に、1 wt.% の水溶液に対して 30 分間分散を行った。ここでは、引き抜き強度だけでなく、引き抜き時の靱性や引き抜き部分のマトリックスの破壊面積、また、鋼繊維の埋め込み角度も評価パラメータとした。これらの結果も含めて、データベースを構築した。

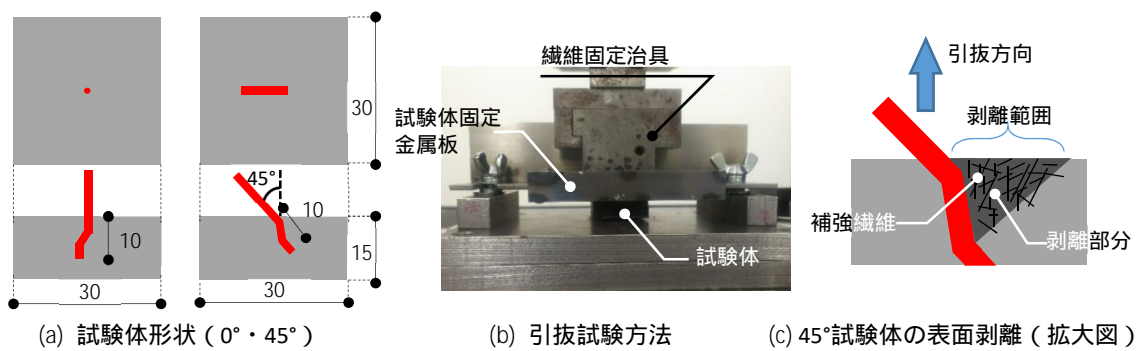


図1 試験方法概要

(2) 補強繊維の組み合わせを含めた総合評価指標の提案

個々に開発された FRCC 材料に対しては、例えば力学特性(強度・靱性能など)や耐久性、施工性など、あるパラメータに着目して評価し、その優位性を示すといった形の研究論文が一般的である。ここでは、これらの多面的な性能評価項目を並列してレーダーチャートなどによる一元的な総合評価指標を提案する。FRCC 材料の実構造物への適用に当たっては、評価すべき材料特性は多岐に亘り、必ずしも極めて優れた材料性能が常に求められる訳ではない。複数の評価軸を横並びに取り入れることで、より合理的な材料設計手法に寄与することを目指す。

4. 研究成果

(1) 微細繊維補強メカニズムの確認とデータベース構築

マクロレベルの鋼繊維から、CNF・CNT といったナノレベルまでスケールや材質の異なる各種のひび割れ補強繊維を対象として、各種の繊維の補強効果をはじめとした各種特性についてデータベースの構築を試みる。ここでは、その主要な成果の一つとして、補強メカニズムの解明と力学特性のデータベース化を目指して実施した単繊維引抜試験について述べる。メゾ・ミクロ・ナノサイズの繊維を、単独および組み合わせて用いた場合の効果を明らかにするため、最も大きなひび割れ補強繊維であるマクロレベルの鋼繊維の引き抜き特性に着目した実験を行った。特に、スケールの異なる複数の繊維でモルタルマトリックスを補強した場合における繊維の組み合わせおよび埋め込み繊維の配勾角(0°・45°)が鋼繊維の引き抜き特性に及ぼす影響についても検討した。ここでは、表1に例を示す大きさや形状の異なる複数種類の補強繊維について、マトリックスの水結合材比を16%で一定とした調査(圧縮強度220~240 MPa程度)の場合についての結果を示す。各補強繊維について、HDR 繊維をマクロサイズの繊維として位置づけ、引き抜き試験の際の埋め込み繊維として用いた。また、HDR 繊維と比較して、大きさの小さい残り5種類の繊維については、OLについてはメゾサイズ、以下Wo, Arについてはミクロサイズ、CNT, CNFについてはナノサイズの補強繊維として、モルタルマトリックスの一部として用いた。また、これら各サイズの補強繊維を組み合わせ、複合的に用いることによる効果について検討を行った。

表1 使用材料例(カタログデータを含む)

名称	略称	備考
フック型鋼繊維	HDR	形状:両端フック,密度:7.85 g/cm <sup>3</sup> ,長さ:30 mm,直径:0.38 mm,アスペクト比:78.9
ストレート鋼繊維	OL	形状:ストレート,密度:7.85 g/cm <sup>3</sup> ,長さ:6 mm,直径:0.16 mm,アスペクト比:37.5
ワラストナイト	Wo	形状:針状結晶,密度:2.90 g/cm <sup>3</sup> ,長さ:0.05~2 mm,アスペクト比:3~20
アラミド	Ar	密度:1.39 g/cm <sup>3</sup> ,繊維長:0.8 mm,繊維径:0.012 mm
カーボンナノチューブ	CNT	集束型,繊維長:0.03~0.6 mm,繊維径:10 nm
セルロースナノファイバー	CNF	セルロース短繊維,粘度:6000 mPa·s(2 wt.%ゲル),比表面積:120 m <sup>2</sup> /g,重合度:650

単繊維引抜試験結果について、図2に埋め込み角度ごとに示す。埋め込み角度が0°の場合、シリーズごとの平均最大荷重はマトリックス中に補強繊維を用いた場合もNFと同程度となり、補強効果は見られなかった。一方で、各シリーズで最も大きな荷重を示した試験体に着目すると、いずれもNFで最も大きい引抜荷重を示した試験体よりも大きくなった。各シリーズにおいてばらつきが見られるが、引抜強度が増加しているものは補強繊維が適切に混練され、繊維の性能が発揮されたと考えられる。埋め込み角度を45°にした場合は、0°の結果と比較するとNFを除いたいずれのシリーズについても、最大荷重は同等以上となっている。また、各シリーズともNFよりも最大荷重は大きくなる傾向を示した。これは、繊維混入及び埋め込み繊維の配勾によるスナッピング効果を得て引抜強度が増大したものと考えられる。次に各試験体の靱性を表す、平均曲線下の面積について考える。0°については、Wo, CNFを除くシリーズについてはNFよりも大



## (2) 補強繊維の組み合わせを含めた総合評価指標の提案

総合評価指標の提案を目的として、複数の繊維を用いた FRCC の異なる特性に着目して評価を行った。ここでは、繊維補強コンクリートのフレッシュ性状、硬化後の力学特性、および、ひび割れ後の自己修復特性を取り上げた評価の一例を示す。

本検討では、細骨材・粗骨材を用いたコンクリートに、サイズの異なる 2 種類の PP 繊維を使用した。細径 PP 短繊維 (FS、直径 13.5  $\mu\text{m}$ 、アスペクト比 445) および、太径 PP 短繊維 (FL、直径 374  $\mu\text{m}$ 、アスペクト比 53) である。単位水量 275  $\text{kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比 40%、細骨材率 45% としたコンクリートに、2 種類の繊維の合計添加率が 1.00 vol.% になるように用いた。例えば、FS を 0.75 vol.%、FL を 0.25 vol.% とした場合には、S75-L25 としている。ここでは、それぞれの評価指標として、フレッシュ性状についてはスランプを、力学特性については圧縮強度・曲げ強度・曲げ試験時の靱性を、自己修復特性としてひび割れ閉塞率を取り上げている。図 3 には、力学特性の測定事例として、基準化曲げ応力と曲率の関係を示す。ここでは、得られた試験体の強度差を考慮して靱性を比較するため、各最大曲げ応力で除している。靱性評価指標には、このグラフの曲線下面積を曲率 0.2 (1/m) まで算出した値を用いた。この図に示すように、繊維を用いない場合と比較して、繊維を添加した配 (調) 合では面積値が大きくなり、繊維の添加による靱性の顕著な改善が見られた。特に、FS と FL の比率に着目すると、FS の添加率を増大するとともに面積値が大きくなる傾向がみられる。

このような結果を総合して評価するために、3 項目における最適調合のスコアを 1 と規格化して総合スコアを算出した例を図 4 に示す。たとえばフレッシュ性状については、最もスランプが大きかった繊維なし (22 cm) を基準として、それぞれのスランプを規格化した数値で示している。同様に、力学特性・自己修復特性についても最も優れた値を示した調合を基準に規格化し、それぞれの値を積み上げて、図 4 の棒グラフとして示している。この例では、繊維の添加によってフレッシュ性状は低下するものの、力学特性では向上が見られ、ひび割れ後の自己修復性状が得られている。その結果、繊維の混入によって総合スコアは向上し、この事例の範囲内では S75-L25 シリーズが最適な調合となる。このことにより、強度を基準化して考えた場合、FL に比べて、FS は靱性の改善に対してより効果的だと考えられる。

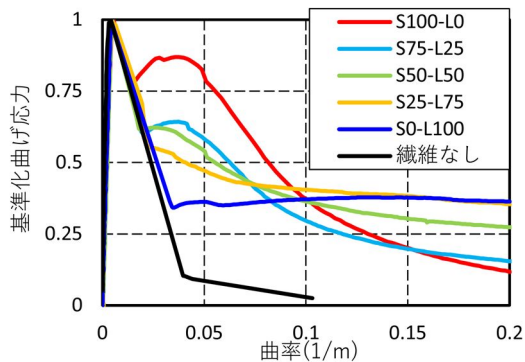


図 3 基準化曲げ応力と曲率の関係

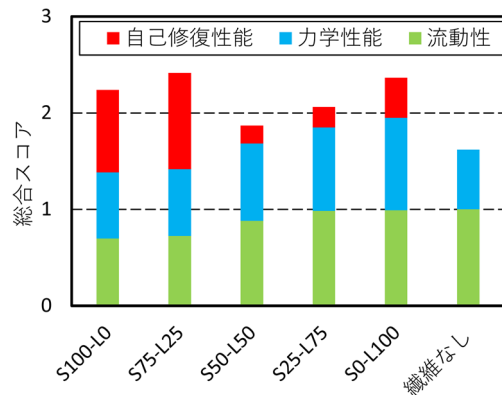


図 4 総合評価の例

## 【参考文献】

- [1] 日本コンクリート工学協会「高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う」2002
- [2] Kwon, S., Nishiwaki, T., Kikuta, T., Mihashi, H. Development of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced cement-based composites. ACI Materials Journal. 2014, vol. 111, no. 3, p. 309–318.
- [3] Nishiwaki, T., Koda, M., Yamada, M., Mihashi, H., Kikuta, T. Experimental study on self-healing capability of FRCC using different types of synthetic fibers. Journal of Advanced Concrete Technology. 2012, vol. 10, no. 6, p. 195–206.
- [4] Rossi, P., Acker, P., and Malier, Y. (1987). "Effect of steel fibres at two different stages: material and the structure." Materials and Structures, 20, 436-439
- [5] Li, Victor C., Mishra, Dhanada K., Wu, Hwai-Chung. Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites. Materials and Structures. 1995, vol. 28, no. 10, p. 586–595.
- [6] Kwon, S., Nishiwaki, T., Choi, H., Mihashi, H. Effect of wollastonite microfiber on ultra-high-performance fiber-reinforced cement-based composites based on application of multi-scale fiber-reinforcement system. Journal of Advanced Concrete Technology. 2015, vol. 13, no. 7, p. 332–344.
- [7] Fantilli, A. P., Kwon, S., Mihashi, H., Nishiwaki, T. Synergy assessment in hybrid Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHP-FRC). Cement and Concrete Composites. 2018, vol. 86, p. 19–29.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Steve W.M., Supit, Tomoya Nishiwaki	4. 巻 29
2. 論文標題 Compressive and Flexural Strength Behavior of Ultra-high Performance Mortar Reinforced with Cellulose Nano-fibers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology	6. 最初と最後の頁 365-372
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18517/ijaseit.9.1.7506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 李豪傑、西脇智哉、佐藤駿介、五十嵐豪	4. 巻 41
2. 論文標題 異なる径のPP短繊維を多添加した繊維補強コンクリートの材料特性及びひび割れに対する自己修復機能に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 305-310
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 李豪傑、西脇智哉、菊田貴恒、佐藤駿介	4. 巻 40
2. 論文標題 細径PP繊維を多混入した繊維補強コンクリートの作製方法に関する一検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 321-326
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 高桑謙吾、西脇智哉、Kwon Sukmin、五十嵐豪	4. 巻 40
2. 論文標題 ひび割れを有するUHP-FRCCの曲げクリープ時のひび割れ変化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 285-290
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大坂祐樹、西脇智哉、石山智、五十嵐豪	4. 巻 40
2. 論文標題 ひび割れを有するUHP-FRCCの凍結融解抵抗性能および自己治癒	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 279-284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 三浦大樹、西脇智哉、菊田貴恒	4. 巻 42
2. 論文標題 複数の補強繊維を用いたFRCCの単繊維引き抜きによる力学的性能の評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Choi Hyeonggil, Choi Heesup, Lee Bokyeong, Lee Dong-Eun	4. 巻 12
2. 論文標題 Shrinkage and Durability Evaluation of Environmental Load-Reducing FRPCM by Using Silicone Oil	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 1240 ~ 1240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma12081240	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 李豪傑、西脇智哉、菊田貴恒、佐藤駿介
2. 発表標題 細径PP繊維を多混入した繊維補強コンクリートの製作方法に関する検討
3. 学会等名 第81回日本建築学会東北支部研究報告会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 李豪傑、西脇智哉、佐藤駿介、菊田貴恒
2. 発表標題 細径PP繊維を多混入した繊維補強コンクリートの作製方法および収縮特性に関する研究
3. 学会等名 2018年度日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 李豪傑、西脇智哉、菊田貴恒、佐藤駿介
2. 発表標題 細径 PP 繊維を多混入した繊維補強コンクリートの製作方法および収縮特性に関する研究
3. 学会等名 2018年度日本建築学会大会（東北）学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井田知利、崔希燮、井上真澄
2. 発表標題 Ca2+とC032-を用いた自己治癒によるセメント系複合材料の効果的ひび割れ制御に関する研究
3. 学会等名 土木学会北海道支部 令和元年度年次技術研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	井上 真澄  (Inoue Masumi)  (00388141)	北見工業大学・工学部・准教授   (10106)	



## 6. 研究組織 (つづき)

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	菊田 貴恒 (Kikuta Takatsune) (20599055)	日本工業大学・建築学部・准教授  (32407)	
研究分担者	崔 希燮 (Choi Heesup) (70710028)	北見工業大学・工学部・助教  (10106)	
研究分担者	五十嵐 豪 (Igarashi Go) (10733107)	東北大学・工学研究科・助教  (11301)	