

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630228

研究課題名(和文) 高強度・高靱性FRCCブロックによる完全リユースが可能なメーソンリー構造の開発

研究課題名(英文) Fundamental study on development of a completely reusable masonry structure system using UHP-FRCC blocks

研究代表者

西脇 智哉 (Nishiwaki, Tomoya)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60400529

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、完全リユースが可能な建築システムとして、引張応力下においても優れた力学性能を発揮するUHP-FRCCを用いたブロックによる、乾式接合のみを用いたメーソンリー構造を提案した。基礎的な解析と実験を行い、単体としてのUHP-FRCC材料またはUHP-FRCCブロック、また、その組積体としての性能を確認した。また、LCCO2解析などを行って環境評価を行い、社会情勢に合わせた積極的な改築によって、環境負荷を低減できる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a novel construction system using UHP-FRCC blocks which is completely reusable has been proposed. Since UHP-FRCC shows excellent mechanical performance even under tensile stress, the proposed system enable buildings to consist only of an unbonded connection without the need for reinforcing materials. Based on some results of numerical analyses and experimental studies, good potential of an UHP-FRCC block and its small structural members were confirmed. In addition, LCCO2 analyses of the proposed reusable construction system were carried out. As a results, reduction of environmental impact can be obtained because the proposed system can be adapted for changing social situation.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：建築構造・材料 繊維補強セメント系複合材料(FRCC) リユース メーソンリー 乾式接合 減築 LCC

1. 研究開始当初の背景

近年の環境問題への対応として、建築材料・施工の分野では国内外を問わず、構造物の長寿命化などストック重視の取り組みが活発に行われている。ただし、我が国においては人口減少の傾向が既に明らかであり、現在の構造物ストックの規模を、現在のレベルのまま今後も維持し続けることは必ずしも合理的ではない。また、建築に要求される機能・性能は時代と共に大きく変化し、構造躯体のレベルで十分に耐久的な建築物であったとしても、社会的・経済的なニーズと合わなくなってしまったことで取り壊しが決定されるケースは少なくない。そのため、スケルトン・インフィル (SI) や既存建築物のコンバージョンなどが注目を集めているが、構造躯体そのものが大きな制約条件となり、その時代時代の要求に迅速に対応することは容易ではない。これらを背景からは、構造部材の完全リユースを可能とすることで、建築物を積極的に減築あるいはスクラップアンドビルドできる新しい構造形式が有効な解決策となり得るものと考えられる。ここでは、完全リユース建築システムとして、繊維補強セメント系複合材料 (fiber reinforced cementitious composites; 以下 FRCC) によるブロックを用いた乾式接合のみによるメゾンリー構造を提案する。研究代表者を含めた近年の研究成果では、FRCC に対して超高強度マトリックスと多段階の繊維補強を適用することにより、疑似ひずみ硬化を示しながら約 1% の終局ひずみを示す高靱性と、普通コンクリートの設計基準強度に匹敵する 20 N/mm² 程度の引張強度の双方を両立させることが可能である超高強度・高靱性繊維補強セメント系複合材料 (ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites; 以下 UHP-FRCC) を開発しつつある。この UHP-FRCC による優れた力学特性を利用することで、鉄筋とコンクリートの付着を基本とする従来の RC 構造とはまったく異なる構造形式を模索することにより、完全リユースが可能な建築構造を提案できるものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、上述の UHP-FRCC を用いたブロックを作製し、このブロックを乾式接合のみで組積することによるメゾンリー構造を提案する。乾式接合のみとすることにより、メゾンリー部材の組みばらしが可能となることで、構造部材を完全にリユースしながら、建築物を積極的に減築あるいはスクラップアンドビルドできる新しい構造形式を得られるものと考えられる。通常鉄筋コンクリート造では、引張応力を鉄筋が負担し、これが付着を通してコンクリートと一体化した構造となるが、ここでは FRCC、特に UHP-FRCC の優れた力学特性を利用することで、ブロックの乾式接合のみによるメゾンリー構造を提案し、その実現可能性について基礎的な検討を行う。

ンリー構造を提案し、その実現可能性について基礎的な検討を行う。

3. 研究の方法

研究期間内の具体的な研究目的としては、以下の 3 点に大別できる。すなわち、[1] 安定的に 20 N/mm² 以上の引張強度と疑似ひずみ硬化の得られる UHP-FRCC 材料の開発、[2] UHP-FRCC ブロックによる、乾式接合のみで実現可能なメゾンリー構造の提案と試作、[3] 完全リユースによる減築あるいはスクラップアンドビルドによる環境負荷軽減の可能性の検証である。[1]については、水結合材比 (W/B) が 0.15 程度の超高強度マトリックスと複数種類の補強繊維の組み合わせを中心とした、調合設計に関するパラメトリックスタディを行う。[2]は本研究の中心的な課題であり、数値解析と実験の両面から検討を行う。ブロック形状の数値解析によるパラメトリックスタディを、[1]の検討結果として得られる UHP-FRCC の材料物性値を用いて行う。また、ここから得られるブロック形状のテストピースを用いての実験を行う。加えて、ブロックの寸法安定性についても、自己収縮とクリープによる変形を中心に検討する。[3]に挙げた環境性能の評価については、日本建築学会が発行する LCA 指針をベースとして、完全リユースが実現した仮定のもとに評価を行う。

4. 研究成果

(1) 提案する完全リユース建築システム

具体的な研究成果に先立って、本研究で提案している完全リユース建築システムについて概説する。これは、「レゴブロック」のように、単純形状なブロックの組み合わせによって、自由に組み立て・解体が可能な乾式接合のみによる組積造の構造躯体を想定している。このブロックに対して、引張応力下においても優れた力学性能を示す UHP-FRCC を用いることで、通常鉄筋コンクリートに必須となる鉄筋とコンクリートの付着を省略し、乾式のみによる接合と、このことによる繰り返しの組み立て・解体が可能になると考えられる。図 1 は、この構造形式のコンセプトを示したものである。代表的なブロックは十字形状をしており、インターロッキングを介して相互に接合されることで、地震力などによる引張力やせん断力が生じた場合でも、UHP-FRCC により抵抗する。ブロックのサイズは重機や装置を必要とせず人間の手で運搬・組み立てが可能な範囲を想定して、一辺が 200 mm 以下程度、重量 20 kg 以下程度を範囲として、後述の解析検討も踏まえて、図 2 に示すように長さ 210 mm × 幅 190 mm × 高さ 210 mm の十字形状を選択した。また、この際には最大の繊維長さ (30 mm) も考慮して、ランダムな繊維の分散および配向が得られる範囲のブロックサイズとして

設計した。

技術革新、人口減少を初めとする社会情勢の変化は、建築に要求される性能項目やその水準を大きく変える可能性がある。一方で、このような要求の変化に、建築物そのものの改修などによって応えようとした場合、投入すべき資源、エネルギー、経済的なコストも膨大になる。すなわち、地震などの自然災害などと同様に、要求性能の変化もある確率によって発生する「リスク」と捉えることができる。完全リユース建築システムの開発は、新規の資材などの投入を最小限に抑えたまま、臨機応変な減築やスクラップアンドビルドを可能にできる可能性がある。このように、環境負荷低減への寄与しながら、建築ニーズの多様化とその変化の早さといった「リスク」への対応を可能にすると同時に、建築生産サイクルの健全化による生産性・建設技術の向上にも繋がると考えられる。単純な部材リユースという観点だけでなく、建物移転や減築といった躯体部分の変化にも対応することで、内外装・設備機器の技術水準向上にも対応しやすく、コスト・環境負荷を最小限に抑えることが可能と考えられる。

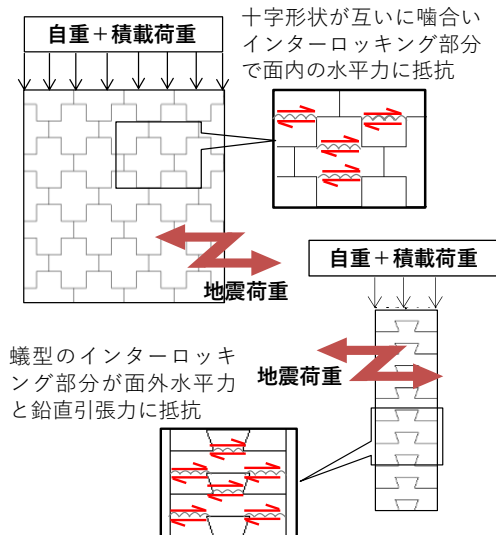


図1 提案するUHP-FRCCブロックによる完全リユース建築システムの概要

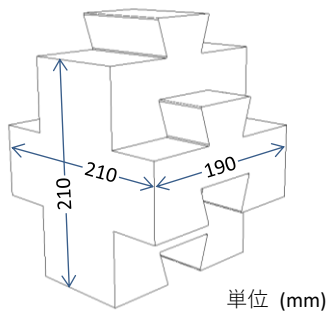


図2 UHP-FRCCブロックの基本形状

(2) ブロックに用いるUHP-FRCC材料

ここで用いるUHP-FRCC材料は、図3に示す多段階の繊維補強と超高強度マトリックスの組み合わせを基本的な考え方としてい

る。本報告書では紙幅の関係で詳細は割愛するが、用いる繊維の組み合わせ (S 繊維: 長さ 6 mm・ストレート形状、H 繊維: 長さ 30 mm・両端フック形状) と混入率などをパラメータとして実験的な検討を行った。その結果、異なる形状・サイズの繊維を組み合わせるよりも高強度・高靱性を両立しながら得られることが確認された (図4)。特に、鈹物繊維であるワラストナイトをマイクロ繊維として用いることにより、補強繊維の効果が大きくなること、得られる試験結果のばらつきを抑えて安定的な性能を発揮できることが確認された。また、後述のように寸法安定性を考慮した場合には、蒸気養生などによって初期段階から十分な強度発現を得ることが重要である。

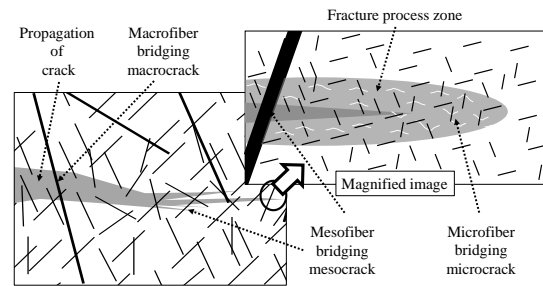


図3 UHP-FRCCに用いる多段階における繊維補強の概念図

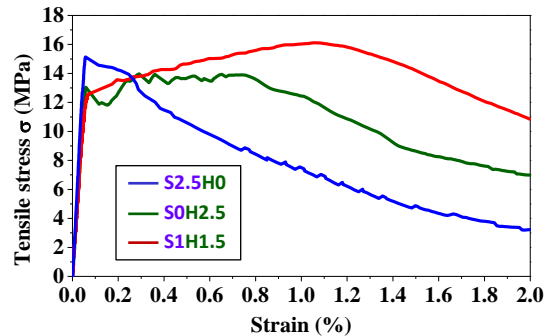


図4 UHP-FRCCの引張性能(S1H2.5)

(3) UHP-FRCCブロックおよび組積体の検討

① ブロック形状の有限要素解析による検討

UHP-FRCCブロックについて、適切な形状を決定するために有限要素解析を行った。ここでは、市販の汎用有限要素解析ソフトであるABAQUSを用い、UHP-FRCCの構成則には前節の検討で得た応力-ひずみ曲線に基づいて、等方性の材料であるものと仮定して適用した。インターロッキング部分について、図2に示した十字形状を基本として、応力集中の緩和を目的に各端部に与える曲率と、インターロッキングの貫入部分のアスペクト比をパラメータとした。結果の一例を図5に示す。最大主応力で評価する場合、曲率を大きく、貫入部のアスペクト比を小さくした場合に、これを緩和できることが確認できる。これらの結果を踏まえ、図6に示す組積体としての力学特性を、同様の有限要素解析によ

って評価した。ただし、図 6(b)に示すように対称性から解析モデルは半分のみとした。この結果は、実験結果と併せて後述する。

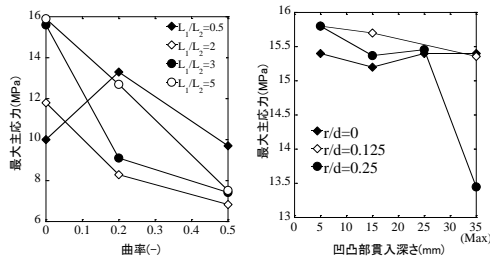


図 5 有限要素解析による検討

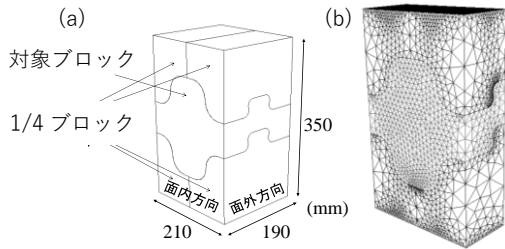


図 6 UHP-FRCC ブロックによる組積体(a)と、そのモデル化(b)

② ブロック組積体に対する実験的検討

図 6 に示した解析検討のためのモデルと同様の UHP-FRCC ブロックを複数体作製し、これを組積体として組み上げて圧縮およびせん断荷重試験を行った。ブロックの作製に当たっては、3次元プリンタによりブロック形状を出力した後、これを型材として型枠を作製し、得られた型枠を用いて UHP-FRCC を打設して目的のブロックを得た。荷重試験結果の一例として、圧縮試験後の組積体に生じたひび割れ状況を図 7 に、これをモデル化した解析結果として得られた主応力分布図を図 8 に示す。この試験体においては、図 7 に示すように、ひび割れは中央ブロック面内方向と上部ブロックの界面からの発生が目視で確認され、中央ブロックの場合は下方に、上部 1/4 ブロックは上方に伝播した。最大荷重の到達直前では、面内側表面だけでなく面外側中央ブロック表面にも鉛直方向のひび割れが確認され、最終的に中央ブロックの両端が剥離される形で破壊に至った。図 8 の主応力分布が示す応力集中箇所と、図 7 のひび割れ形状は概ね一致しており、荷重過程においても解析結果は実験によるひび割れの進展と対応していることが確認された。そのため、解析結果は概ね妥当であったものと評価できる。実験によって得られた組積体全体としての変位-荷重曲線と、この解析結果の比較を図 9 に示す。計測変位から算出した剛性は、立ち上がりの部分を除くと解析値とほぼ一致していることが確認できる。初期剛性については、ブロック間の接合部におけるクリアランスの影響が表れたものと考えられる。ブロックとして組み上げることを前提とするために、クリアランスを完全になくすことは

できないが、ブロック作製の寸法精度の向上によって初期剛性も解析値の剛性に近づくものと考えられる。ただし、寸法精度の向上に当たっては、型枠および打設の精度の管理だけではなく、自己収縮・乾燥収縮、および、荷重に伴うクリープ変形も寸法精度に影響を与えることが予想された。そのため、寸法安定性に与えるこれらの影響について、次に示すように実験的な検討を行った。

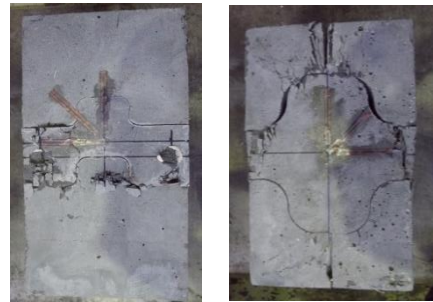


図 7 組積体のひびわれ状況の例

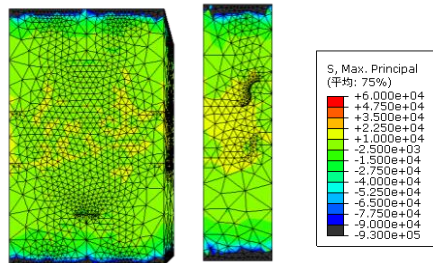


図 8 主応力分布図の例

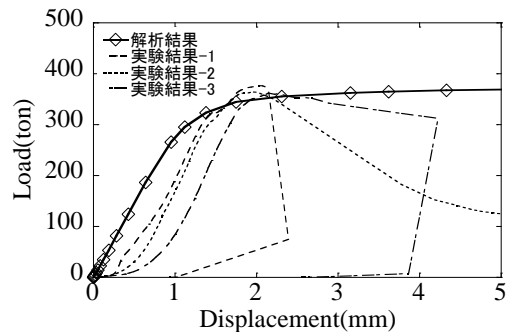


図 9 UHP-FRCC の引張性能(S1H2.5)

(4) UHP-FRCC の収縮およびクリープに対する寸法安定性の検討

上述のように、UHP-FRCC ブロックには高い寸法精度が求められる一方で、ここで用いる UHP-FRCC は水結合材比が 0.15 程度と極めて小さく、単位セメント量は約 1200 kg/m^3 と極めて多いため、特に自己収縮に起因する体積変化が懸念される。加えて、無筋での使用を前提としているため、クリープ変形についても検討を行う必要がある。これらのことから、打設後から蒸気養生期間も含めた長さ変化を実験により確認した。また、事前に強制変形によってひび割れを与えた状態で、持続的に荷重をかけることでクリープ変形についても検討を行った。

前者の結果を図 10 に示す。蒸気養生期間には約 500×10^{-6} 程度の収縮がみられるが、そ

の後の長さ変化は 50×10^{-6} 程度に抑えられており、高い寸法安定性が得られていることが確認できる。そのため、初期の打設段階においてこの自己収縮による体積変化を勘案して UHP-FRCC ブロックを作製することにより、十分な精度のブロックを得られるものと考えられる。また、図 10 にあるように、使用繊維の違いが収縮量に与える影響は限定的であった。加えて、養生条件を変えた実験結果より、乾燥収縮の影響は相対的に小さく、自己収縮と同程度であることが確認された。

後者のクリープ変形に関する検討結果について、図 11 にクリープ係数と経過日数の関係を示す。ここでは、ひび割れを導入した試験体に対する曲げクリープ載荷を行った。予め引張縁に約 1.0% のひずみを導入し、ひび割れが生じた状態で持続的な荷重を与えている。図中の FRCC シリーズ (ST: 鋼繊維使用、SY: 合成繊維使用、W/B=0.5) は、比較のためにおこなった普通強度の FRCC であり、これらの結果と比較して、UHP-FRCC のクリープ係数は小さく抑えられていることが確認できる。また、クリープ試験前後の試験体のひび割れ状況を比較すると、UHP-FRCC においては新たな微細ひび割れの発生が確認できた。このことから、微細ひび割れ本数の増加を伴って変形が進行する、すなわち、擬似たわみ硬化の延長として変形していると考えられる。

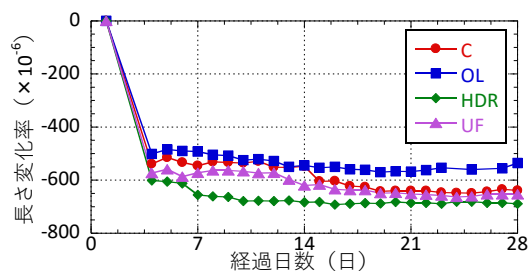


図 10 打設から材齢 28 日までの長さ変化

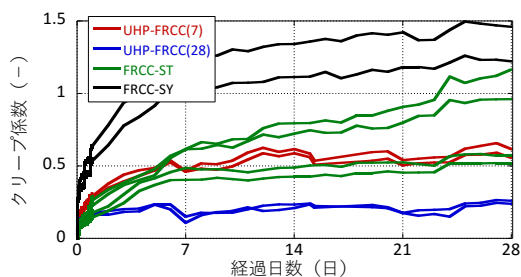


図 11 UHP-FRCC の引張性能(S1H2.5)

(5) シミュレーションによる LCCO₂ 予測

ここでは、提案する完全リユース建築モデル (以下、提案モデル) の、通常の RC 造 (以下、従来モデル) に対する環境負荷低減効果について LCCO₂ 解析を行い、利点と傾向を分析した。ここでは、既往文献を参考に、対象建築物を地上 3 階建て RC 造事務所ビル (延床面積約 1,700 m²) とした。従来モデルが全層全スパン RC 部材であるのに対して、提案

モデルは壁の構造躯体を UHP-HFRCC ブロックとし、床をボルト接合による ALC パネルとし、基礎は対象外とした。従来モデルでは建物規模は一定のまま 25 年ごとに大規模修繕を行うこととした。この一方で、提案モデルでは 35 年ごとに改築を行い、その際には設備・内外装材の半分をリニューアルし、その他の部分は再利用することとした。また、改築に当たっては予想人口減少率に合わせて延床面積を減らして再築することとした。リユース率は 100% とし、各種のインベントリデータから CO₂ 発生要因毎に加算する積み上げ法により環境負荷を算出した。

図 12 にシミュレーション結果を示す。100 年の期間において、提案モデルでは 2 回の改築を行うにも関わらず、この期間に改築を行わない従来モデルと比較して、累積排出 CO₂ 量は 18.8% の削減量となった。また、図 13 は、提案モデルの改築周期と CO₂ 排出量比の関係である。ここでは、最も短周期の 5 年ごとの改築を 1 とした場合の比で示している。このグラフから、提案モデルにおいて改築を 20 年周期に行った場合に、最も CO₂ 排出量が低減されることが分かる。これ以上の期間とした場合には改築回数が減少するものの、床面積に応じた CO₂ 排出量となることで、また、より頻繁な改築では床面積の減少が見込まれるものの、改築そのものに伴う CO₂ 排出量の増大によって、100 年の期間を設定した場合には全 CO₂ 排出量が増大した。換言すると、今後の人口減少などの社会情勢を勘案した場合、単純な建物の長寿命化は必ずしも環境負荷の削減につながらない場合がある。本研究で示した完全リユース建築システムを用いた場合には、人口減少率に合わせたタイミングの良い短周期の減築や、その時代の環境技術などを取り入れることによって、環境負荷削減に有利に働く可能性があることが示唆された。

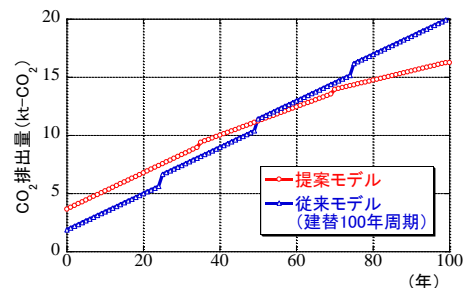


図 12 改築周期と CO₂ 排出量の関係

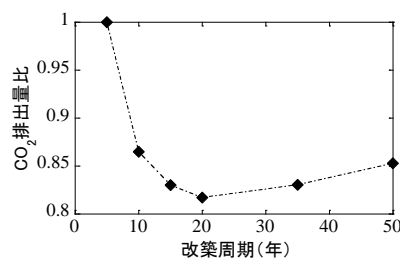


図 13 改築周期と CO₂ 排出量の関係

(6) まとめ

本研究では、完全リユースが可能な建築システムとして、引張応力下においても優れた力学性能を発揮する UHP-FRCC を用いたブロックによる、乾式接合のみを用いたメソソニー構造を提案した。基礎的な解析と実験を行い、単体としての UHP-FRCC 材料または UHP-FRCC ブロック、また、その組積体としての性能を確認した。また、LCCO₂ 解析などを行って環境評価を行い、社会情勢に合わせた積極的な改築によって、環境負荷の低減が可能であることを確認した。

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) 高桑謙吾、西脇智哉、Sukmin Kwon、五十嵐豪：超高強度高靱性繊維補強セメント系複合材料の収縮性状に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.38、2016.7 (掲載決定)、査読あり

[学会発表] (計 3 件)

- 1) 高桑謙吾、西脇智哉、KWON Sukmin、五十嵐豪：超高強度高靱性繊維補強セメント系複合材料の補強繊維種類が収縮特性に及ぼす影響に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、A-1 材料施工、2016.8.24~26 (発表決定)、福岡大学(福岡県・福岡市)
- 2) 大瀧浩人、KWON Sukmin、五十嵐豪、西脇智哉：曲げ載荷による複数微細ひび割れが生じた UHP-FRCC の短期曲げクリープ性状、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、A-1 材料施工、2016.8.24~26 (発表決定)、福岡大学(福岡県・福岡市)
- 3) Tomoya Nishiwaki, Sukmin Kwon, Hiroto Otaki, Go Igarashi, Faiz U. A. Shaikh, Alessandro P. Fantilli: Experimental Study on Time-Dependent Behavior of Cracked UHP-FRCC Under Sustained Loads, International RILEM Workshop on creep behaviour in cracked section of Fibre Reinforced Concrete, FRC-CREEP 2016, 2016.3.10~11, Valencia (Spain)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西脇 智哉 (Nishiwaki, Tomoya)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60400529

(2) 研究分担者

菊田 貴恒 (Kikuta, Takatsune)
日本工業大学・工学部・助教
研究者番号：20599055

桐越 一紀 (Kirikoshi, Kazuki)

東北大学・大学院工学研究科・技術専門職員
研究者番号：60240660

石山 智 (Ishiyama, Satoru)

秋田県立大学・システム科学技術学部・助教
研究者番号：80315647

崔 希燮 (Choi, Heesup)

北見工業大学・工学部・助教
研究者番号：70710028