

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26289186

研究課題名（和文）メンテナンスフリーRC構造物を実現する自己修復FRCCの開発と適用

研究課題名（英文）Development of self-healing UHP-FRCC for maintenance-free RC structures and its application

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） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：自己修復機能を有するUHP-FRCC（超高強度・高靱性繊維補強セメント系複合材料）に関する材料設計と、この材料の劣化環境下における耐久性および自己修復性能の評価、また、構造部材への適用を検討した。その結果、PVA繊維の併用によって力学性能と自己修復性を両立可能であること、劣化環境下においても自己修復性能機能の発現を期待できることを確認した。また、パネル形状としてRC部材の表面に用いることを提案し、力学性能の確保と、特にFAを大量使用したUHP-FRCCとすることで、環境負荷低減効果を得られることを確認した。これらの結果から、RC構造物のメンテナンスフリー化への基礎的な知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：In this study, the self-healing UHP-FRCC (Ultra-High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite) was developed and investigated to enhance the service life of RC structures without maintenance works even under severe conditions. Application of the UHP-FRCC for structural members of RC structures was also explored. As a result, it was confirmed that UHP-FRCC with PVA fibers could enhance the capability of self-healing without degradation of its mechanical performances. We used the UHP-FRCC as the surface panels of the RC members, and it was confirmed that the mechanical performance of the members with the UHP-FRCC panels could be obtained by the numerical analysis and experimental approach. In particular, UHP-FRCC with high volume fly ash showed the effect of reducing environmental impact. From these results, we can obtain the basic knowledge for the realization of maintenance-free RC structures.

研究分野：建築材料

キーワード：建築構造・材料 自己修復コンクリート UHP-FRCC メンテナンスフリー 耐久性 埋設型枠パネル

### 1. 研究開始当初の背景

我が国は既に人口減少のフェーズに入っており、近年は環境問題も一層切迫度が増している。このような中で、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。一方で、我々の社会基盤を支えるコンクリート構造物のストックは既に莫大な規模となっており、これらを網羅的に維持管理しながら継続的に供用していくことには限界がある。特に、昨今の社会情勢からは、このような検査から適切な補修・補強作業といった一連の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・効率化の推進が強く求められている。すなわち、高い耐久性とメンテナンスフリーを両立できるコンクリート構造物が求められている。

### 2. 研究の目的

このような背景から、申請者らはコンクリートにひび割れが生じた場合にも、水分などの供給に伴ってコンクリート自身がこれを自律的に閉塞する「自己修復コンクリート」の開発に取り組み、適切な材料設計による繊維補強セメント系複合材料 (Fiber Reinforced Cementitious Composite, FRCC) などでも成果をあげてきた。また、これとは別途、並行して取り組んできた超高強度・高靱性 FRCC (UHP-FRCC; Ultra-High- Performance FRCC) に関しては、適切な組み合わせによる、長さや形状の異なる複数種類の補強短繊維と、 $200 \text{ N/mm}^2$  級の超高強度マトリックスの組み合わせによって、複数微細ひび割れの発生による疑似ひずみ硬化現象や  $20 \text{ N/mm}^2$  以上の引張強度などの極めて優れた力学性能を実現してきた。本研究課題では、これらの要素技術の組み合わせにより、具体的には UHP-FRCC に対して自己修復に特化した FRCC の材料設計手法を融合させることで、高い自己修復機能と力学特性を両立させる新しい材料開発と目的として検討を行った。また、これを構造的にも利用可能な方法を提案することにより、メンテナンスフリーのまま超長寿命を実現する RC 構造の開発を目的として検討を行った。

### 3. 研究の方法

本研究課題は、以下の 3 つの検討項目に大別される。すなわち、(1) 極めて高い自己修復性能と力学性能を併せ持つ FRCC の材料設計、(2) 様々な劣化環境下における耐久性と自己修復性能の評価、および、(3) 構造部材への適用の検討である。

まず、FRCC の材料設計に関しては、これまでそれぞれ独立して検討してきた、超高強度・高靱性を指向する UHP-FRCC と合成繊維などを用いた自己修復 FRCC について、互いに融合させての高度化を目指した。

耐久性の評価に関しては、通常の耐久性評

価に加えて、予めひび割れを導入した上で、凍害環境や塩害環境、および、これらの複合劣化環境における自己修復能力と耐久性を確認した。

また、これらの UHP-FRCC 材料の構造部材への適用についても検討を行う。この際、極めて大きいセメント・繊維の使用量を必要とする UHP-FRCC を、RC 躯体のコンクリート部分に単純に置き換えて用いるのではなく、施工性・経済性の面からもパネル形状の埋設型棒として RC 部材の表面に適用することを検討した。また、環境負荷の更なる低減を目的として、産業副産物であるフライアッシュ (FA) を大量使用することを提案した。セメントを FA に置換することによって、通常は特に弱材齢の段階で力学性能が犠牲にならないが、ここでは環境指標 (具体的には  $\text{CO}_2$  排出量) と構造指標を併せて評価する Eco-Mechanical Index (EMI) を提案することで、より合理的な評価方法を提案した。

これらの検討項目から、実構造物レベルまでを勘案した問題点を抽出・整理し、自己修復コンクリートの実用化に向けた知見を蓄積した。

### 4. 研究成果

#### (1) 自己修復 UHP-FRCC の調合設計

UHP-FRCC は、上述のように極めて高い力学的性能が、材料レベルでは既に確認されている。ここでは、これにより高い自己修復効果を得るための調合設計に関して検討を行った。具体的には、PVA などの合成繊維の併用と、FA などの混和剤混入について検討を行い、ここでは特に前者について示す。

本検討では、基本となる UHP-FRCC の調合 (UHP-N シリーズ、 $W/B = 0.15$ 、 $SF/B = 0.18$ 、 $S/B = 0.35$ 、 $W_o/B = 0.13$ 、長鋼繊維 (長さ  $30 \text{ mm}$ 、両端フック加工):  $1.5 \text{ vol.}\%$ 、短鋼繊維 (長さ  $6 \text{ mm}$ 、ストレート形状):  $1.0 \text{ vol.}\%$ 。ただし、 $W$ : 水、 $B$ : 結合材、 $SF$ : シリカフューム、 $S$ : 砂、 $W_o$ : ワラストナイト) に対して、自己修復 FRCC として用いる合成繊維として最も効果が高いと考えられる PVA 繊維を  $2 \text{ vol.}\%$  添加した試験体 (UHP-P シリーズ) を用いて各種の実験を行った。その結果、引張強度などの力学的特性の低下はほとんど見られず、影響は小さいことが確認された。また、図 1 は、ひび割れを導入した上で 28 日まで水中浸漬した場合の透気係数比の経時変化を示したものである。この図からは、UHP-P シリーズが、UHP-N シリーズよりも透気係数の回復割合が顕著であることを確認できた。図 2 は、これらのシリーズのひび割れ表面のマイクロスコブ観察写真である。UHP-N シリーズについても、ひび割れ幅が  $100 \mu\text{m}$  以下の場合にはひび割れの閉塞が確認されたが、それ以上の場合には十分な閉塞が確認できなかった。その一方で、UHP-P シリーズについては、より大きなひび割れ幅の場合であっても閉塞が確認された。すなわち、UHP-FRCC に

対して適切な PVA 繊維を添加することにより、より高い自己修復効果を付与可能であることが確認された。

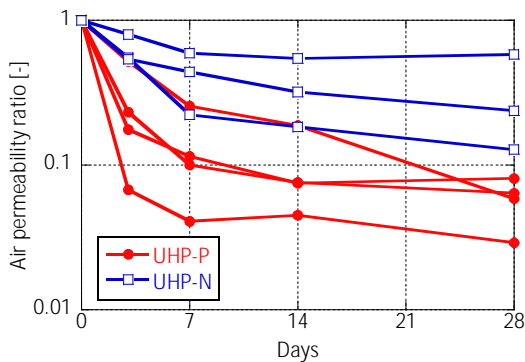
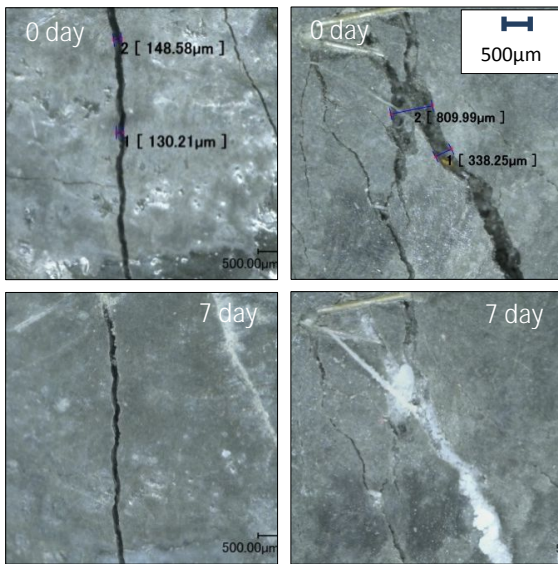


図1 透気係数の経時変化



(a) UHP-N (b) UHP-P  
図2 ひび割れ観察

(2) 様々な劣化環境における耐久性の評価  
UHP-FRCCの耐凍害性と自己修復効果

上述のUHP-FRCC(UHP-Nシリーズ)に対して、JIS A 1148 A法による凍結融解試験を600サイクルまで行い、耐凍害性を検討した。試験体は40×40×160mmの角柱とし、通常の試験体に加えて、凍結融解環境下における自己修復性能を確認するため、予めひび割れを導入した試験体も準備した。ひび割れの導入には、4点曲げによる一回の正負交番荷重を実施し、供試体の両側面(打設時の型枠設置面)に対して引張縁ひずみが1%に相当する複数微細ひび割れ(累計開口幅0.4mmに相当)を導入した。

図3に凍結融解サイクル数と相対動弾性係数(relative dynamic Young's modulus, RDYM)の関係を示す。また、図4にはひび割れ表面の観察写真を、異なるサイクル数およびひび割れ幅ごとに示す。図3より、ひび割れを導入していない試験体については、凍結融解600サイクル終了時においても相対動弾性係数の低下は確認されず、RDYMがやや100%

を上回る良好な凍結融解抵抗性が確認された。これは、養生条件やAE剤の使用の有無を変更しても同様の傾向であり、特に初期養生として蒸気養生を行っていない場合には、より大きなRDYMの増大が確認された。凍結融解試験の開始前に、ひび割れを導入した場合には、RDYMがひび割れ導入直後に35%程度まで低下したが、試験開始直後から急激に上昇(回復)し、凍結融解100サイクル付近では、耐凍害性の有無の判断基準となる60%を上回った。その後、凍結融解600サイクル終了時点では、80%程度までの回復が確認された。これらのことから、UHP-FRCCは凍害環境下においても、自己修復性能を発現することが明らかになった。このことは、併せて計測した質量変化率や細孔構造の変化の傾向からも確認することができた。ひび割れの導入によって供試体内部まで水分が供給されるに伴う、未水和セメントの水和によって、ひび割れ内部に水和生成物が形成されたことに起因するものと考えられる。ただし、図4に示されるように、開口幅40μm程度の微細なひび割れにおいては十分なひび割れの閉塞が確認できる一方で、90μm程度のひび割れ幅の場合は析出物が確認されたものの、600サイクル経過時点においても閉塞は確認できなかった。すなわち、自己修復性能を効率的に発現させるためには、ひび割れの分散および微細化が重要であることが確認できた。

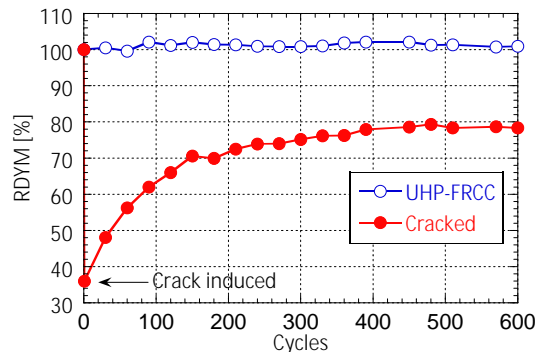
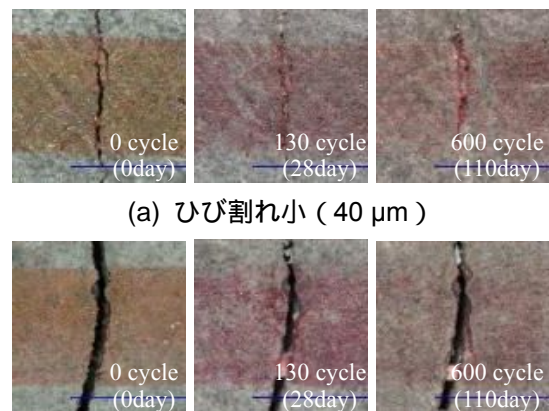


図3 RDYMの経時変化



(a) ひび割れ小(40 μm) (b) ひび割れ大(89 μm)

図4 ひび割れ観察

複合劣化環境における UHP-FRCC の耐久性と自己修復効果

複合劣化環境における UHP-FRCC の耐久性と自己修復効果を確認するために、強い塩害・凍害の複合環境と考えられる秋田県由利本荘市の海岸線から約 50 m の砂浜地と、比較的マイルドな環境と考えられる仙台市青葉区の東北大学青葉山キャンパス内に、2017 年 1 月より試験体を暴露した。試験体には予めひび割れを導入しており、経時的にトレント透気試験機によって透気係数を計測して推移を確認した。図 5 に示す、由利本荘市に暴露した試験体の透気係数比の推移のように、ひび割れの導入により低下した気密性が、暴露期間中に回復する傾向が確認できる。なお、暴露試験は現在も継続しており、複数回の季節変動の影響を確認する予定である。

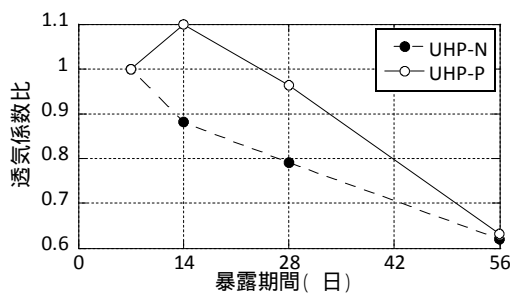


図 5 透気係数の経時変化

(3) UHP-FRCC の構造利用に関する検討  
UHP-FRCC の埋設型枠としての利用

ここでは、UHP-FRCC を埋設型枠として用いた RC 梁部材の 4 点曲げ載荷試験を実施すると共に、異種材料境界面における界面離間を考慮したファイバーモデル曲げ解析および剛体ばねモデル (Rigid Bodies-Spring Model, RBSM) による解析における応力解析と破壊状況を通して実験結果の分析を行った。

試験体は 100×100×400mm の縮小角柱を基本とし、鉄筋モルタル試験体 (NC) の他、図 6 に示すような、厚さ 10 mm の UHP-FRCC レイヤーを引張縁に配置した複合試験体 (UF) および、厚さ 10 mm の UHP-FRCC レイヤーに高さ 6 mm の台形のリップを 75 mm 間隔に設けた複合試験体 (UR) を用いた。

図 7 に各試験体の 1/50rad. 時の破壊状況を示す。UF では、モルタル部に曲げひび割れとせん断ひび割れが生じ、1/50rad. で梁中心部のモルタルと UHP-FRCC との間に界面離間ひび割れが生じた。引張側鉄筋は 1/75rad. で 1 本降伏，最大耐力時直前でもう 1 本降伏し，UHP-FRCC が引張破壊に至った。UR では、同様のひび割れ進展が見られたが、支点外のリップの拘束効果により界面滑りは生じなかった。一方で、リップに発生した界面離間ひび割れが、リップ角部分からモルタル部のせん断ひび割れを押し広げ、リップ周りの UHP-FRCC が引張破壊に至った。なお、引張側鉄筋は 1/50 rad. で 1 本降伏したのみである。いずれの場合も最大耐力は NC よりも高く、モルタル部

のひび割れ幅は NC よりも小さく抑制された。

これらの実験結果をファイバーモデル曲げ解析結果と比較すると、UF は有効係数 (モルタルと UHP-FRCC の境界面における応力伝達の低下を UHP-FRCC の耐力寄与分の低下率とみなして定めた係数) を 0.7 とした場合に、UR では有効係数を 0.6 とした場合に 1/50rad. まで剛性，耐力ともに概ね記述することができた。また、UR では UF よりも最大耐力が小さくなった。これは、リップ設置によってモルタル部にせん断ひび割れが進展しやすい形状となったことで、剛性低下が早期に生じたためと考えられる。この一方で、1/50rad. 以降の挙動に着目すると、UR の耐力低下の割合が UF よりも小さい。これは、UF・UR 共に 1/50rad. でモルタル部のせん断ひび割れが界面離間ひび割れまで進展したが、試験体 UR はリップとモルタルがよくかみ合い、モルタルと UHP-FRCC が形状的に一体性を保つことで、界面が滑ることによって引き起こされる脆性的な破壊を回避したためと考えられる。また、RBSM 解析結果からは、UHP-FRCC レイヤーと接着強度をモルタルの構成則の 0.5 倍以上としたところで最大耐力は頭打ちとなった。UHP-FRCC 埋設型枠の接着面にリップを設けて接着面積、すなわち、接着強度を増大させても、モルタル部の破壊進行を誘発し最大耐力を低下させる可能性があることが確認された。

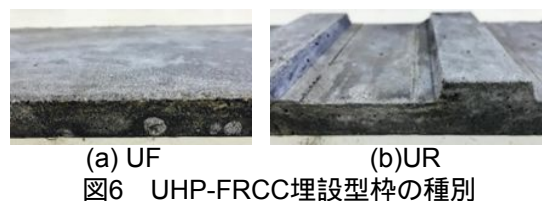
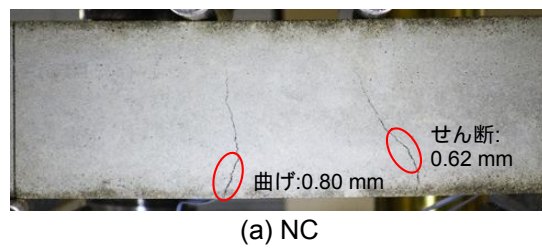
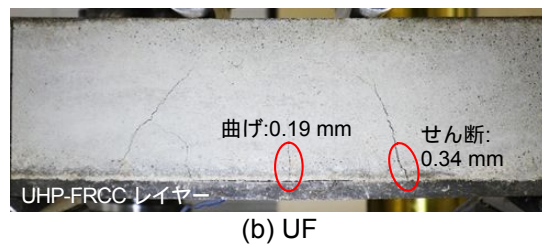


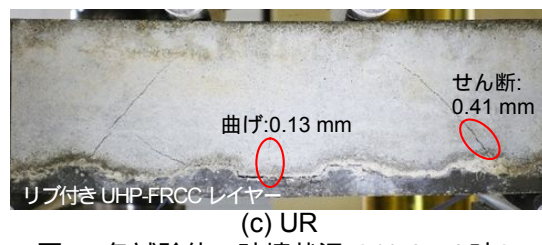
図 6 UHP-FRCC埋設型枠の種類



(a) NC



(b) UF



(c) UR

図 7 各試験体の破壊状況 (1/50rad. 時)

UHP-FRCC の埋設型枠としての利用

UHP-FRCC は極めて優れた力学性能および耐久性を有する一方で、普通強度コンクリートと比較して骨材量が少なく、水結合材比が極めて小さいため使用セメント量が大きい。すなわち、建設時点では大きな環境負荷を避けられない。そのため、上述のように埋設型枠としての利用など、適切な使用部位に対して適用する必要がある。また、一方で、コンクリート分野では環境負荷の低減を目的としてフライアッシュ (FA) の積極的な利用が推進されている。ここでは、FA の大量使用 (置換率 50%以上) を提案し、優れた力学特性と環境負荷低減の両立を目指し、力学性能 (Mechanical Index, MI) と環境負荷量 (Eco Index, EI) を定義して、これらの総合的な定量評価するための指標の提案を行った。

図 8 に示される柱部材を対象とし、通常の鉄筋コンクリートのコア (NC、圧縮強度 38 MPa、単位セメント量 370 kg と仮定) に対して、その周囲に UHP-FRCC を配置する形を想定した。一定の軸力 (19.4 MN = MI) を受けることを想定した場合の、柱に必要な断面面積から計算される CO<sub>2</sub> 排出量 (= EI) をまとめたものを表 1 に示す。ここで用いている UHP-FRCC の調査は上述の UHP-N を基準 (FA0) とし、FA 置換率をシリーズ名としている。NC の場合は必要となる柱断面が 715 mm と大きくなる一方で、UHP-FRCC を柱周囲に用いる場合には NC 部分を 505 mm と小さくすることができる。また、FA 置換率が大きい場合には材料強度がやや低下するため、埋設型枠の厚さを大きくする必要がある。これらを勘案した EI は、この表に示されるように NC の場合が最も大きく、また、UHP-FRCC を用いる場合であっても、FA を大量使用した場合の方が部材としての厚さが大きくなるものの、EI を削減することが可能であった。図 9 は、NC を基準とした場合の材料レベルでの EMI 評価と、想定する柱での EMI 評価である。材料レベルでは UHP-FRCC の単位体積あたりの環境負荷は NC と比較して大きい一方で、柱部材を想定した場合には断面面積の縮減によって環境負荷低減効果が期待できる。特に、FA 置換率が大きい場合では、より大きい環境負荷低減効果が確認された。提案した本指標によって、環境負荷低減効果と、構造指標を併せて評価することが可能であることが示された。

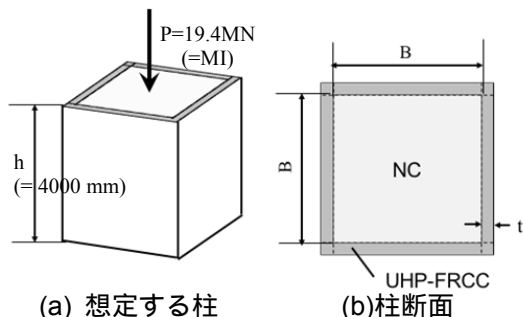


図8 UHP-FRCC埋設型枠の適用例

表1 各試験体の諸元と環境評価 (EI)

	B (mm)	T (mm)	EI (kg CO <sub>2</sub> )
NC	715	0	745
FA0	505	24	644
FA20		24	603
FA50		31	600
FA70		37	591

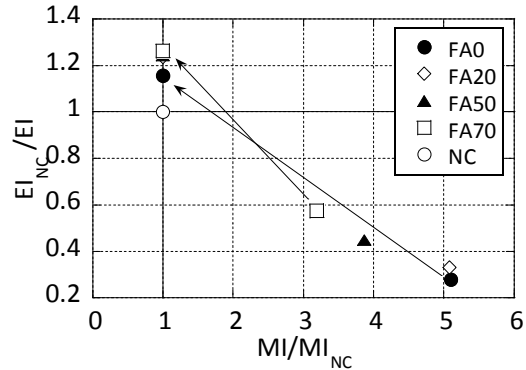


図9 想定する柱のEMI評価

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

山本拳大、高橋典之、西脇智哉：RC 梁部材の一面に設けた UHP-FRCC 埋設型枠が曲げ耐力に与える影響についての考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.39、2017.7 (印刷中)、査読あり

大坂進太郎、権代由範、西脇智哉：高強度高靱性セメント系複合材料の耐凍害性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.39、2017.7 (印刷中)、査読あり  
Tomoya Nishiwaki, Haruka Sasaki, Sukmin Kwon: Experimental study on self-healing effect of FRCC with PVA fibers and additives, Journal of Ceramic Processing Research, Vol.16, No.Special 1, pp.89s-94s, 2015、査読あり

佐々木悠、寺田健悟、五十嵐豪、西脇智哉：PVA 繊維を用いた FRCC の耐凍害性と自己治癒性能に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.37、No.1、pp.1321-1326、2015.7、査読あり

[学会発表] (計 13 件)

Tomoya Nishiwaki, Keita Suzuki, Sukmin Kwon, Go Igarashi, Alessandro P. Fantilli: Ecological and Mechanical Properties of Ultra High Performance - Fiber Reinforced Cementitious Composites containing High Volume Fly Ash, SHCC4, 2017.9.18, Dresden (Germany)

Tomoya Nishiwaki, Shintaro Osaka, Yoshinori Gondai: Self-healing capability of UHP-FRCC under freeze/thaw cycles, 6th International Conference on Self-Healing Materials 2017 (ICSHM2017), 2017.6.26, Friedrichshafen (Germany)

高桑謙吾、五十嵐豪、西脇智哉：ひび割れ

の生じた繊維補強コンクリートにおける曲げクリープ性状に関する一考察、日本建築学会東北支部研究報告集、構造系、Vol.80、2017.6.17、由利本荘市文化交流会館カダレ（由利本荘市）

高桑謙吾、五十嵐豪、西脇智哉：ひび割れの生じた繊維補強コンクリートの繊維種類による曲げクリープ挙動の違い、日本建築学会大会学術講演梗概集（広島）A-1 材料施工、2017.8.31、広島工業大学（広島市）  
山本拳大、高橋典之、西脇智哉：UHP-FRCC埋設型枠を一面に設けた RC 梁部材の耐力と破壊挙動に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集（広島）A-1 材料施工、2017.8.31、広島工業大学（広島市）

Tomoya Nishiwaki: Enhancement of self-healing capability on FRCC using different types of fibers, 2nd International Workshop on Self-Healing and Intelligent Materials 2017 (SHIM2017), 2017.3.17, Hanyang University (Seoul, Korea)

Tomoya Nishiwaki, Hiroto Otaki, Go Igarashi, Sukmin Kwon, Faiz U.A. Shaikh, Alessandro P. Fantilli: Experimental study on the tensile and bending creep behavior of cracked UHP-FRCC, Mechanics of Structures and Materials: Advancements and Challenges, ACMSSM24, 2016.12.7, Perth (Australia)

Tomoya Nishiwaki, Haruka Sasaki, Sukmin Kwon, Go Igarashi, Hirozo Mihashi: Self-Healing Capability of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites (UHP-FRCC) with PVA fibers, HealCON conference, 2016.11.29, Delft (The Netherlands)

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, 2016.3.9, Valencia (Spain)

佐々木悠、五十嵐豪、西脇智哉：PVA 繊維を用いた FRCC の耐凍害性と自己治癒性能に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集( 関東 ) A-1 材料施工、2015.9.4、東海大学（平塚市）

Tomoya Nishiwaki, Haruka Sasaki, Sukmin Kwon, Hirozo Mihashi: Experimental study on recovery of watertightness due to self-healing capability of FRCC panels, RCCS2015, 2015.6.1, 長崎ブリックホール（長崎市）

Tomoya Nishiwaki, Haruka Sasaki, Sukmin Kwon, Go Igarashi, Hirozo Mihashi: Experimental study on self-healing effect of FRCC with PVA fibers and additives against freeze/thaw cycles, 5th International

Conference on Self-Healing Materials 2015 (ICSHM2015), 2015.6.22, Durham (USA)

Sukmin Kwon, Tomoya Nishiwaki, Hirozo Mihashi: Self-healing Capability of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHP-FRC), 5th International Conference on Self-Healing Materials 2015 (ICSHM2015), 2015.6.22, Durham (USA)

大瀧浩人、佐々木悠、五十嵐豪、西脇智哉：PVA 繊維を用いた FRCC の耐凍害性と自己治癒に及ぼす混和材料の影響、日本建築学会東北支部研究報告集、構造系、Vol.78、2015.6、山形大学（山形市）

## 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

権代 由範 (GONDAI, Yoshinori)  
仙台高等専門学校・総合工学科・准教授  
研究者番号：00553520

五十嵐 豪 (IGARASHI, Go)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：10733107

桐越 一紀 (KIRIKOSHI, Kazuki)  
東北大学・工学部・技術専門職員  
研究者番号：60240660

高橋 典之 (TAKAHASHI, Noriyuki)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：60401270

石山 智 (ISHIYAMA, Satoshi)  
秋田県立大学・システム科学技術学部・助教  
研究者番号：80315647

### (3) 研究協力者

FANTILLI, Alessandro  
Politecnico di Torino (伊)・准教授

KWON, Sukmin  
Land and Houses Institution (韓)・研究員

SHAIKH, Faiz U. A.  
Curtin University (豪)・准教授