

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686078

研究課題名(和文) 自己治癒機能を有する繊維補強セメント系複合材料の開発と適用

研究課題名(英文) Development on Fiber Reinforced Cementitious Composite with Self-Healing Function and its Applications

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) 20,300,000円、(間接経費) 6,090,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリートに生じるひび割れを、材料自らが閉塞させることが可能な利用可能な新しい繊維補強セメント系複合材料(Fiber Reinforced Cementitious Composite; FRCC)の開発とその適用方法について検討を行った。適切な合成繊維や混和材料を用いることで自己治癒の効果を増大することが可能であることが、マイクロスコブ観察や水密試験などの性能評価試験から確認された。また、実環境を意識した様々な養生条件下においても自己治癒が発揮されることが確認された。防水層など実構造物への適用を意識した自己治癒FRCCの適用方法についても検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Some types of self-healing FRCCs (fiber reinforced cementitious composite) were studied and developed. It was confirmed that FRCCs using proper raw materials, e.g. synthetic fibers and/or other admixtures, had great capability of the self-healing function via microscopic observation and other performance tests. Such self-healing process was also confirmed under various curing conditions. Application of self-healing FRCCs was suggested for example 'maintenance free waterproof layer' of buildings.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：建築構造・材料 自己治癒 繊維補強セメント系材料 ひび割れ メンテナンスフリー

1. 研究開始当初の背景

スクラップアンドビルドの限界が叫ばれて久しく、インフラを含めた建設構造物の長寿命化やストック重視の傾向は一層重要な検討課題となる。しかしメンテナンスの重要性が増す一方で、検査の実施そのものが困難である場合も少なくない。特に大規模コンクリート構造物を網羅的かつ継続的に、詳細に検査することは、コストや手間の面で大きな負担となる。加えて、補修が必要と診断された場合でも、構造物の立地や形状、用途によっては補修が困難となる場合もあり、また、構造物が大規模であるほど物理的・技術的には補修が可能であっても、人的・金銭的なコストの問題から包括的な実施は不可能あるいは非常に困難となってしまう場合も少なくない。また、コンクリートには様々な原因によって不可避免的にひび割れが生じ、特に建築物では漏水などの深刻な瑕疵の原因になる場合も多い。

この一方で、コンクリートに生じるひび割れが十分に小さい場合には、水分供給を受ける環境下で自然に閉塞する「自己治癒」現象が知られている。このようなひび割れの閉塞は、教科書にも記載がある古くから知られた現象である。すなわち、本来的にコンクリートはひび割れを自己治癒できる材料であるといえる。しかし、このような自己治癒現象は、十分な水分が常時供給される特定の条件下のみで見られる現象であり、工学的な利用は難しいのが実情であった。そのような背景から、本研究ではコンクリート構造物の安全性と使用性の向上に資する技術として、コンクリート材料自身が発生したひび割れ閉塞させる、自己治癒コンクリート (FRCC) の開発に取り組んだ。

2. 研究の目的

本申請課題では、一般的なコンクリート材料においても確認される自己治癒の機構を積極的に活用し、工学的に利用可能な新しい繊維補強セメント系複合材料 (**Fiber Reinforced Cementitious Composite; FRCC**) を開発することを目的として検討を行った。また、その適用例として、建築物のメンテナンスフリーを指向した防水層への利用など、アプリケーションの提案を行った。

上述のように、コンクリートのひび割れ見られる自己治癒現象はそのひび割れ幅が十分に小さい場合に生じ易い。FRCC の特徴には、脆性的な破壊を抑え、微細なひび割れを分散して発生させる点が挙げられるため、この自己治癒現象を促進・コントロールできることが期待される。また、このひび割れ自己治癒は、炭酸カルシウムの析出が大きな要因であるとされている。この自己治癒メカニズムを、繊維や混和材などの構成材料を含めて明確にすることで、自己治癒に最適化した材

料設計を行い、日常的な降雨程度の限られた水分のみが供給されるような場合にも十分なひび割れの閉塞と水密性の回復が可能なFRCCの開発を行った。

3. 研究の方法

研究期間内の具体的な研究項目としては、使用材料の物性と自己治癒メカニズムの関連性の解明と、この知見に基づく材料設計、試作供試体による性能評価試験、実構造物への適用を意識した自己治癒FRCCによるアプリケーションの開発などが挙げられる。

FRCC の材料設計に関しては、ポリビニルアルコール (PVA) をはじめとする有機繊維やフライアッシュ (FA) などの混和材料を取り上げ、これらについてパラメトリックスタディを行うために複数種類のFRCC供試体を作製し、施工性や力学特性について確認した。そのうえで、水分の供給によって得られるひび割れの自己治癒 (閉塞) 状況を確認した。自己修復効果の評価として、透水試験による透水係数の測定やトレント式透気試験機による気密性の評価のほか、マイクロスコブやSEMによる観察や、TG-DTAによる成分分析などを行い、漏水の有無や透水量の多寡だけではなく、ひび割れ部分で生じる析出物そのものの組成や、ひび割れ破面の形状などを計測し、析出プロセスと自己治癒性能の関係を確認した。

また、乾湿繰り返し環境試験や屋外暴露試験など、実環境での自己治癒性能の評価についても取り組んだほか、実構造物への適用を目的として、パネル状の供試体による施工方法や納まりも含めた防水層の開発について検討を行った。

4. 研究成果

(1) 合成繊維を用いた自己治癒FRCC開発

FRCC に用いる合成繊維の種類をパラメータとして、補強繊維の化学的な特性と自己治癒現象に及ぼす影響を基礎的な実験により確認した。補強繊維としてポリプロピレン (PP、化学的な極性なし)、断面形状を変更したPP (C-PP、異形断面として断面周長を増大)、ポリアセタール (POM、極性中程度)、エチレンビニルアルコール共重合体 (EVOH、極性中程度)、PVA (極性大) などの各種の合成繊維を取り上げた。これらの合成繊維が有するひび割れ自己治癒のポテンシャルを評価するために、FRCC 供試体 (40×40×160mm) を3点曲げ載荷試験により破断して繊維を表出させ、水中に浸漬して自己治癒物質 (炭酸カルシウム) の析出状況を確認した。その結果を図1に示す。この図からは、繊維のもつ化学的な極性の増大に伴って繊維周囲の析出量 (厚さ) が増大していることが確認できる。これは架橋繊維を核としたひび割れ内での析出量を示すものと考えられる。

また、これらの合成繊維を用いた板状の FRCC 供試体 (85×85×30mm) に対して、一軸引張載荷試験によりひび割れを導入し、水中に浸漬して得られた自己治癒効果の評価を行った。ひび割れを発生させた後に行った水中養生の各材齢において、ひび割れの表面の閉塞状況をマイクロSCOPE 観察により確認するとともに、透水試験によって透水係数を計測し、水密性能の回復を確認した。その結果、図2に示すように極性を有する繊維 (PVA など) と極性を持たない繊維 (PP) ではひび割れ閉塞の状況が異なり、PVA 繊維を用いた場合にはより大きいひび割れ幅であっても閉塞可能であったことが確認できた。また、このような析出の増大によるひび割れ閉塞の改善については、極性のない PP 繊維であっても表面の改質処理や、FA などの混和材の利用、鹼化度が低く水に容易に溶解する PVA を練混ぜ水に溶解させ、混和剤として用いたシリーズなどについても検討を行い、自己修復効果の改善が可能であることを確認した。

図3には、ひび割れの自己治癒に伴う各シリーズの透水係数の減少割合を示す。マイクロSCOPE 観察によってひび割れ表面の閉塞が確認された PVA シリーズは共に透水係数の減少割合が最も大きい結果となった。この一方で、同様に目視ではひび割れの閉塞が確認された POM および EVOH では水密性能の回復は確認できなかった。また、PP の透水係数は減少傾向を見せなかったが、D-PP はある程度の減少傾向が見られた。ただし、このような傾向は繊維の極性のみに依存するのではなく、微細な複数ひび割れの形成などの力学特性を併せ持つことも、高い自己治癒効果の一因になることが確認された。図4は、繊維ごとの自己治癒のポテンシャルとしての繊維周囲への析出厚さと、ひび割れ破面形状の複雑さ(ひび割れ破面面積/底面積)とを同時に軸とした場合の、透水係数の減少割合を示した3次元グラフである。この図から理解されるように、高い自己治癒効果を有する合成繊維を用いた FRCC のためには、繊維単独の化学的な極性だけでなく、微細な複数ひび割れやそれに伴う複雑なひび割れ破面の形状など、力学的な材料性能も併せて検討する必要があるものと考えられる。

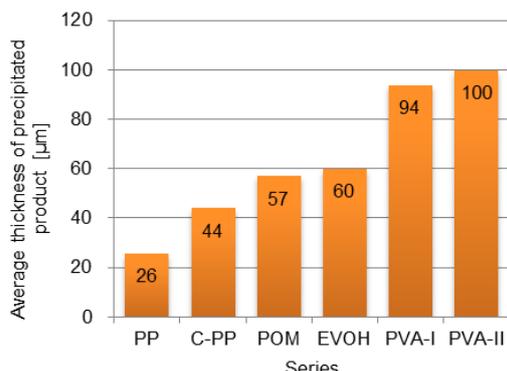


図1 繊維周囲への炭酸カルシウムの平均付着幅

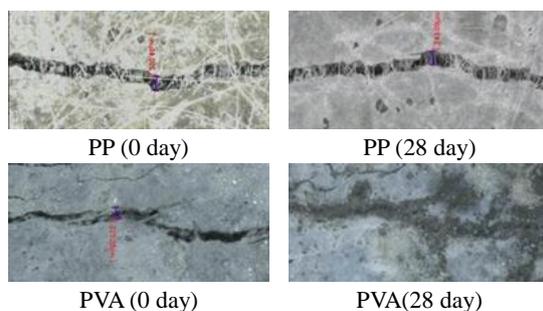


図2 ひび割れ閉塞状況の経時変化

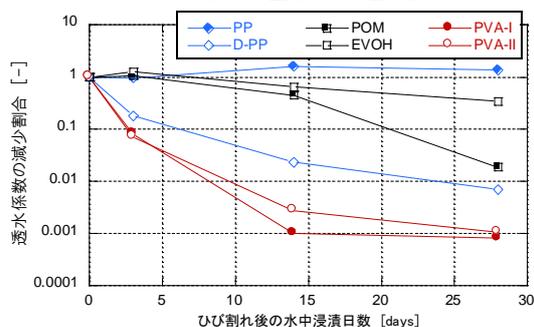


図3 水中浸漬日数と透水係数の減少割合の関係

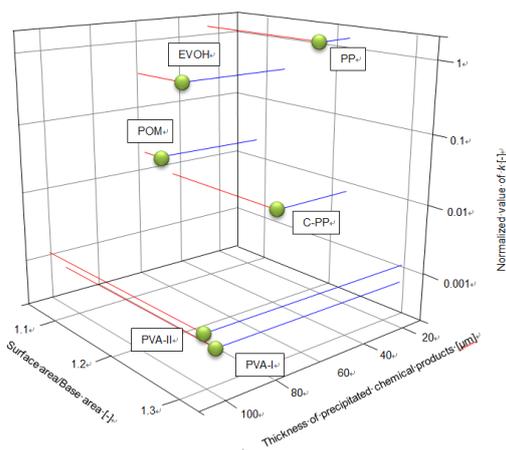


図4 繊維周囲の析出厚さ・ひび割れ破面形状と透水係数の減少割合の関係

(2) 超高強度・高靱性 FRCC の自己治癒効果
 超高強度・高靱性 FRCC (Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite; UHP-HFRCC) は、極めて低い水バインダー比 (W/B=15%程度) による超高強度と、適切な補強繊維の使用により高い引張性能を実現させたセメント系複合材料である。一軸引張応力下においても、微細なひび割れを分散発生しながら疑似的なひずみ硬化現象を実現し、20N/mm² 超の極めて高い引張強度が得られることも確認している。ここでは、補強繊維に複数種類の鋼繊維を用いた場合にも、ひび割れ発生後に水中に浸漬させることによって、ひび割れの自己治癒効果が得られること確認するための実験を行った。直接一軸引張載荷試験によって供試体に0.2%までのひずみを与えて複数の微細なひび割れを導入した後、第2養生として材齢28日まで水中に浸漬した供試体に対し、ひび割

れの閉塞状況をマイクロスコープおよびSEMにより観察したほか、トレント式透気試験を行って気密性の回復について評価した。図5は、透気係数の変化を示したグラフである。この図からも確認できるように、UHP-FRCCは自己治癒によってひび割れを閉塞させて、気密性を回復することが可能であるものと確認できた。また、SEMおよびマイクロスコープ観察の結果などから、炭酸カルシウムの析出のみでなく、未水和セメントの影響が大きいものと考えられる。

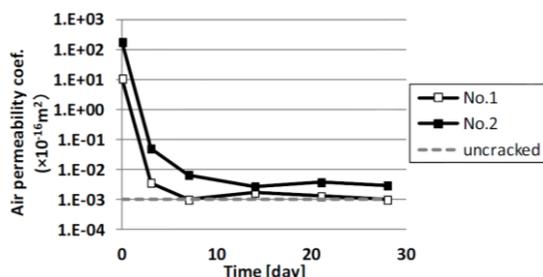


図5 繊維周囲の析出厚さ・ひび割れ破面形状と透水係数の減少割合の関係

(3) 乾湿繰り返しなどの環境条件と自己治癒効果

コンクリートに生じるひび割れの自己治癒は、潤沢な水分供給を受ける状況下で確認されてきたが、建築物などが置かれる実環境を考慮した条件下での自己治癒性能評価は行われていない。ここでは、養生条件の違いがFRCCのひび割れ自己治癒に及ぼす影響を明らかにするため、乾湿繰り返し試験・屋外曝露試験を行い、マイクロスコープ観察及び透水試験によって比較・評価した。その結果を、透水係数比を評価軸とし、浸漬時間との関係で示したグラフを図6に示す。実環境を考慮した条件下においても、ひび割れ自己治癒は進展すること、また、水密性能の回復の度合いは湿潤している時間に大きく影響を受けることを確認した。このことは、屋外曝露試験の結果からも、期間内における降雨時期と自己治癒の進展との関係として認められた。

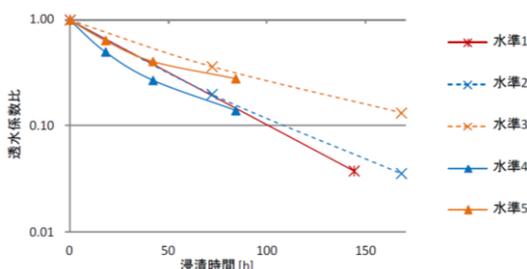


図6 浸漬時間毎の透水係数比

(4) 自己治癒FRCCの建築部位への適用

このひび割れ自己治癒FRCCの適用例として、メンテナンスフリーを指向した防水層としての利用を提案し、基礎的な実験的検討を

行った。パネル状に成形された自己治癒FRCCパネルを作製し、ひび割れが生じた場合にもこれを閉塞させ、水密性が回復することを確認した。パネル形状の試験体端部には接合のための目地を設け、パネル部分と同じ調合のFRCCによって目地部分を充填して一体化した。防水層とする際には、このような目地の設置により簡易な施工とすることが期待される。実験のパラメータとして目地およびひび割れの有無を取り上げ、JASS 8防水工事に記載の透水試験方法を参考に水密性の回復を評価した。図7に透水試験の結果を示す。これらの検討から、提案するFRCCパネルによって防水層として適用可能であること、接合部として設置したパネル目地にひび割れが生じた場合であっても、その変位が300 μm 程度の場合は自己治癒によって漏水量が減少し、水密性の確保が可能であることが確認された。

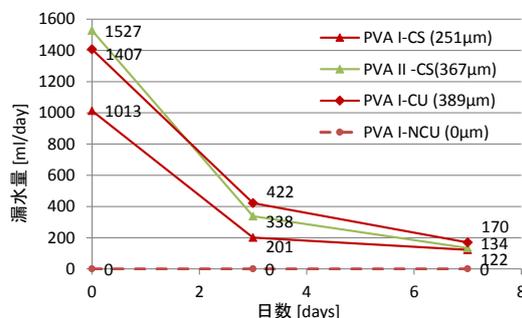


図7 透水試験結果

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5件)

- ① 佐々木悠、山田洵、崔希燮、西脇智哉：養生条件の違いが繊維補強セメント系複合材料のひび割れ自己治癒に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、2014.7 (印刷中)、査読あり
- ② Tomoya Nishiwaki, Sukmin Kwon, Daisuke Homma, Makoto Yamada, Hirozo Mihashi: Self-healing capability of fiber reinforced cementitious composites for recovery of watertightness and mechanical properties, Materials, Vol. 7, No. 3, pp. 2141-2154, 2014.3, 査読あり
doi: 10.3390/ma7032141
- ③ 山田洵、西脇智哉、三橋博三、菊田貴恒：PVA混和剤およびフライアッシュがFRCCのひび割れ自己治癒現象に及ぼす影響に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、pp.1381-1386、2013.7、査読あり
- ④ 山田洵、国府田まりな、西脇智哉、三橋博三：繊維の種類と形状がFRCCのひび割れ自己治癒に与える影響に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.1、pp.1426-1431、2012.7、査読あり

- ⑤ Tomoya Nishiwaki, Marina Koda, Makoto Yamada, Hirozo Mihashi, Takatsune Kikuta: Experimental Study on Self-Healing Capability of FRCC Using Different Types of Synthetic Fibers, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 10, pp.195-206, 2012.6, 査読あり
doi: 10.3151/jact.10.195

[学会発表] (計 11 件)

- ① 佐々木悠、山田洵、崔希燮、西脇智哉 : ひび割れ自己治癒 FRCC による防水パネルの開発に関する基礎的研究、2014 年度日本建築学会大会学術講演会、2014.9.12-14、神戸大学
- ② 佐々木悠、山田洵、崔希燮、西脇智哉 : 乾湿繰り返し環境下における FRCC のひび割れ自己治癒性能に関する研究、第 77 回日本建築学会東北支部研究報告、2014.6.21-22、日本大学工学部
- ③ Tomoya Nishiwaki, Makoto Yamada, Takatsune Kikuta, Hirozo Mihashi: Evaluation of Self-Healing Capability of FRCC using PVA as Reinforcing Fiber and Admixture, International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies (SCMT3), 2013.8.19, 京都リサーチパーク
- ④ Sukmin Kwon, Tomoya Nishiwaki, Takatsune Kikuta, Hirozo Mihashi: Experimental Study on Self-Healing Capability of Cracked Ultra-High-Performance Hybrid-Fiber-Reinforced Cementitious Composites, International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies, (SCMT3), 2013.8.19, 京都リサーチパーク
- ⑤ 山田洵、西脇智哉、三橋博三、川上滋貴 : 乾湿繰り返し環境下における FRCC のひび割れ自己治癒に関する研究、2013 年度日本建築学会大会学術講演会、2013.9.1、北海道大学
- ⑥ Tomoya Nishiwaki, Makoto Yamada, Takatsune Kikuta, Sukmin Kwon, Hirozo Mihashi: Experimental study on evaluation of self-healing capability of FRCCs consist of different components, 4th International Conference on Self-Healing Materials 2013, (ICSHM2013), 2013.6.19, Ghent University, Belgium
- ⑦ Makoto Yamada, Tomoya Nishiwaki, Shigetaka Kawakami, Hirozo Mihashi, Takatsune Kikuta: Experimental Study on Self-Healing Capability of FRCC with Different Fiber Types and Shapes, 4th International Conference on Self-Healing Materials 2013, (ICSHM2013), 2013.6.17, Ghent University, Belgium
- ⑧ 山田洵、西脇智哉、三橋博三、菊田貴恒、国府田まりな : ひび割れ内部の表面粗さ

が FRCC のひび割れ自己治癒現象に与える影響に関する研究、2012 年度日本建築学会大会学術講演会、2012.9.13、名古屋大学

- ⑨ 西脇智哉 : 合成繊維を用いた繊維補強セメント材料のひび割れ自己治癒、(独) 日本学術振興会建設材料第 76 委員会第 408 回会議、2012.7.20、学士会館
- ⑩ 山田洵、西脇智哉、三橋博三、菊田貴恒 : FRCC のひび割れ自己治癒性状と破断面の凹凸性状の関係に関する研究、第 75 回日本建築学会東北支部研究報告、2012.6.16、八戸工業大学
- ⑪ 山田洵、国府田まりな、西脇智哉、三橋博三 : PVA 混和剤及びフライアッシュが FRCC のひび割れ自己治癒性状に与える影響に関する研究、第 66 回セメント技術大会、2012.5.30、ホテルメトロポリタン池袋

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