

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：57403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00607

研究課題名(和文) 微生物によるひび割れ治癒機能を付与したローカーボン性能を有するPCグラウトの開発

研究課題名(英文) Development of low-carbon PC grout with crack self-healing function using microorganisms

研究代表者

松家 武樹 (Matsuka, Takeju)

熊本高等専門学校・拠点化プロジェクト系先端研究コアグループ・准教授

研究者番号：40517554

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では材料工学と生物工学の2つの側面からのアプローチにより、微生物によるひび割れ治癒機能を付与したローカーボンPCグラウトの開発を目的としている。

尿素、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の3つの混和材を組み合わせたPCグラウトは、規定の工学性能を有することに加えローカーボン性能が高いこと、かつ微生物がより多く生存できる環境を創出できることを明らかにした。一方、結合材に対して0.5%以内のドライイーストの添加量であれば、PCグラウトのレオロジー性能および強度特性に及ぼす影響は小さいこと、および最もシビアな環境下となるPCグラウト中でもイースト菌の一部は生存していることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土木分野において、CO2排出量の低減は喫緊の課題である。セメント系材料の一つであるPCグラウトは、コンクリート道路橋で用いられる重要な建設材料であるが、製造時に多量のCO2を排出する。さらに、PCグラウトは橋梁の安全性能に重要な役割を果たしているものの、橋梁内部に存在する構造であるためひび割れの修復には大量のエネルギーを要する。本研究は材料工学と生物工学の学際的アプローチにより、PCグラウトの従来性能を確保したローカーボン化と微生物によるひび割れ治癒の可能性を示唆したことは学術的に意義がある。本研究はCO2排出量の抑制と持続可能な維持管理に向けた取り組みであり、社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop low carbon PC grout with self-healing function using microorganisms by taking two approaches from material engineering and biological engineering.

It was found that PC grout composed of urea, fly ash and blast furnace slag powder has high low carbon performance in addition to the specified engineering performance and can create a more viable environment for microorganisms. On the other hand, the effect of dry yeast on the fluidity and compressive strength of PC grout was small when the dry yeast addition rate to cement was 0.5%. Furthermore, microscopic observation results found the possibility that some of the yeast survived in hardened PC grout, which is the most severe environment.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：PCグラウト ローカーボン 微生物 自己治癒 レオロジー 強度特性 温度応力解析 サステイナビリティ評価

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、低炭素社会に向けた取組みが世界全体（パリ協定：COP21）で議論され、工学分野においても技術開発を行う上で「ローカーボン化」は避けられない課題である。土木分野では国内総CO<sub>2</sub>排出量の約10%にあたる年間1.2億トンのCO<sub>2</sub>が排出されている。特に、主要な土木建設材料であるセメントの製造過程では、769kg/tonのCO<sub>2</sub>を排出しており、土木分野の総CO<sub>2</sub>排出量の31%を占める（日本コンクリート工学会：コンクリートの環境テキスト（案）〔改訂版〕）。すなわち、セメントの使用量を低減できれば、土木分野におけるローカーボン化に大きく貢献できる。しかし、単純なセメント量の低減では構造物の性能を低下させることとなる。

セメントの使用割合が多い建設材料のひとつにPCグラウトがある。PCグラウトとは水、セメントおよび混和剤（増粘剤と高性能減水剤を組合わせたもの）を練混ぜ製造した材料であり、主にコンクリートの道路橋に使われている。具体的には、コンクリート道路橋の安全性・使用性を保証するために、シース管とPC鋼材の間に注入される材料である（図-1）

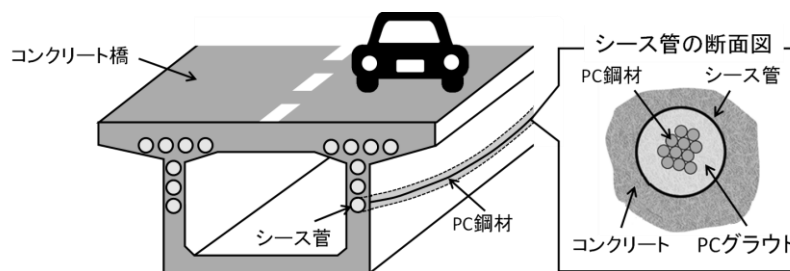


図-1 PCグラウトの施工場所の概念図

PCグラウトは材料製造時に多量のCO<sub>2</sub>を排出すること、およびコンクリート内部に存在する構造であるため収縮に伴うひび割れの修復には大量のエネルギーを要する大規模なものとなり必然的に大量のCO<sub>2</sub>を排出することが課題としてあげられていた。

### 2. 研究の目的

本研究では従来のPCグラウトに要求されている「レオロジー性能・力学性能」に加え、新たに「ローカーボン性能」の指標を取り入れた配合条件の最適化と練混ぜシステムを確立し、PCグラウトの高性能化を図るものである。さらに、PCグラウト特有の環境下で生存する微生物を創出し、その微生物から分泌される接着タンパク質形成を利用したひび割れ部への自己治癒機能の検証を行い、PCグラウトの長寿命化を目指すものである。これら2つの側面からのアプローチを達成することにより、微生物による自己治癒機能を付与したローカーボン性能を有するPCグラウトの開発が本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験概要

本研究で使用したPCグラウトの材料は、顆粒タイプの尿素（U）、普通ポルトランドセメント（C）、フライアッシュ（FA）、高炉スラグ微粉末（BS）、高粘性タイプの混和剤（Ad）、ドライイースト（Y）、水（W）を使用した。表-1および表-2に、配合および練混ぜ方法のパラメータを示す。試験項目は、フレッシュ性状ではJP漏斗を用いた流動性試験、空気量試験、単位容積質量試験および円筒容器を用いたフロー試験を行った。さらにPCグラウト硬化過程における内部温度およびB型回転粘度計によりPCグラウトの粘度も測定した。硬化後における試験では圧縮強度試験を行った。

表-1 配合パラメータ

パラメータの項目	変数
練混ぜ水に対する尿素の置換率 (%)	0、10
セメントに対するフライアッシュの置換率 (%)	0、10、20、30
セメントに対する高炉スラグ微粉末の置換率 (%)	0、10、20、30、40、60
セメントに対するドライイーストの添加率 (%)	0、0.5、1.0、2.0

表-2 練混ぜ方法のパラメータ

パラメータの項目	変数
攪拌羽根の回転数 (rpm)	600、1300
練混ぜ途中の静置時間 (秒)	0、150、300、600、750
静置回数 (回)	0、1、2

## (2) 解析概要

本研究では、尿素、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末による温度ひび割れ抑制効果を明らかにするために、温度応力解析専用プログラムを用いて有限要素法解析を行った。図-2に解析モデルを示す。

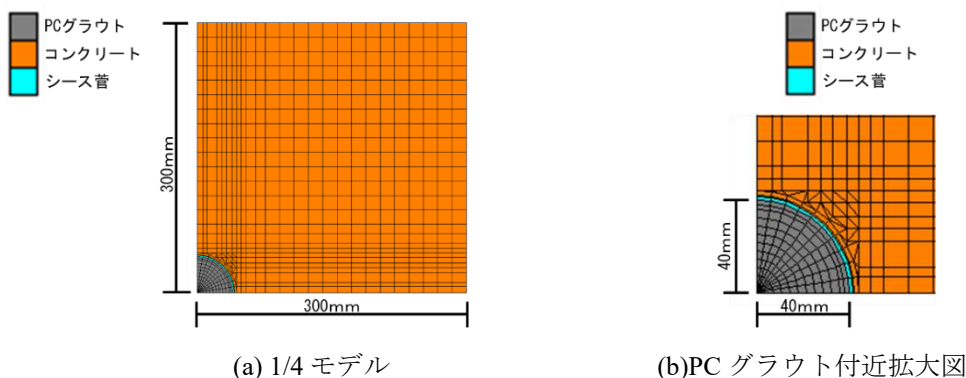


図-2 解析モデル

## (3) ムラサキイガイを模倣した接着タンパク質の発現

ムラサキイガイのドーパ含有タンパク質の繰り返し単位をベースに3種の接着タンパク質(Mgfp1, Mgfp3, Mgfp5)を設計した。制限酵素処理によりタンパク質発現用ベクターpET15bに乗せ換え、大腸菌BL21株にて発現し、His-tagを用いて精製した。チロシンをドーパへと変換するチロシナーゼを青枯れ病菌のゲノムよりクローニングした。接着タンパク質とチロシナーゼを用いて接着試験を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 各種混和材料を用いたPCグラウトの諸特性

図-3に尿素投入前後における練混ぜ水の温度測定結果を示す。練混ぜ水の温度は、尿素置換に伴い低下しており、4.5°Cから8.4°Cの範囲で練混ぜ水の温度を低下させている。尿素は高い水溶性を有し、溶解時に吸熱反応を起こすといった性質を有していることを裏付けたデータである。図-4には、PCグラウトの内部温度と経過時間の関係を示す。PCグラウトの内部温度は、混和材料無混入のN配合に比して混和材料混入の配合(U10およびU10FA20)の方が低くなっている。これは混和材料の置換に伴いセメントの使用量が少なくなったこと、および尿素的吸熱反応の効果であるといえる。

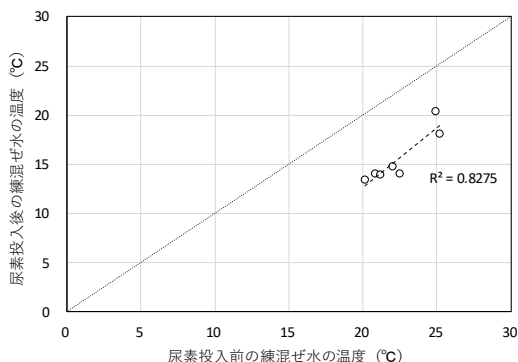


図-3 尿素投入前後の練混ぜ水の温度

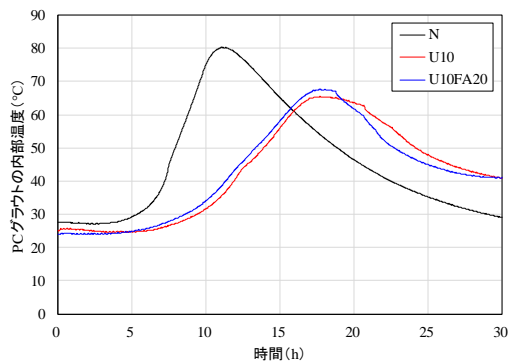


図-4 PCグラウトの内部温度

PCグラウトの圧縮強度を図-5に示す。尿素を使用すると圧縮強度は低下している。さらに、尿素、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の使用は、初期強度を著しく低下させることが明らかとなった。一般に、PCグラウトの圧縮強度の基準値は、材齢7日の圧縮強度が30N/mm<sup>2</sup>以上とされている。本研究では、尿素の使用と高炉スラグ微粉末の置換率を60%とした場合には、基準強度に達していないが、それ以外の配合では基準強度を満たす結果となった。

図-6には、PCグラウト1m<sup>3</sup>あたりのCO<sub>2</sub>排出量を示す。尿素の使用はCO<sub>2</sub>排出量が増加させたが、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の置換率を上げることで、大幅にCO<sub>2</sub>排出量を減少させることが明らかとなった。なお、ここに示すCO<sub>2</sub>排出量は501~1125kg/m<sup>3</sup>の範囲である。

図-7には、PCグラウト1m<sup>3</sup>あたりのコストを示す。PCグラウトのコストは、主にセメント、尿素および化学混和剤が支配的であることが明らかとなった。なお、ここに示すコストは52,838円から66,706円/m<sup>3</sup>の範囲である。

図-8には、強度指数、コスト指数、CO<sub>2</sub>指数の関係の一例を示す。強度指数は、圧縮強度の

標準的な管理値である材齢 7 日での 30N/mm<sup>2</sup> を基準に算出した。コスト指数と CO<sub>2</sub> 指数は混和材料無混入の N 配合を基準に算出した。なお、三角形の面積が大きいほど、総合的な性能が高いことを示している。これらの結果から、PC グラウトの強度指数は概ね基準値以上であることが明らかであり、PC グラウトの配合設計では環境性能への配慮が重要であると結論づけられる。

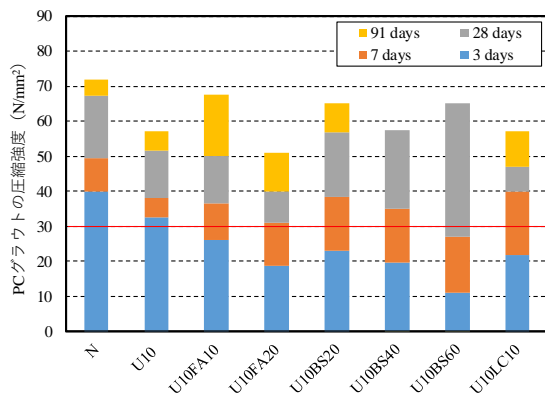


図-5 圧縮強度

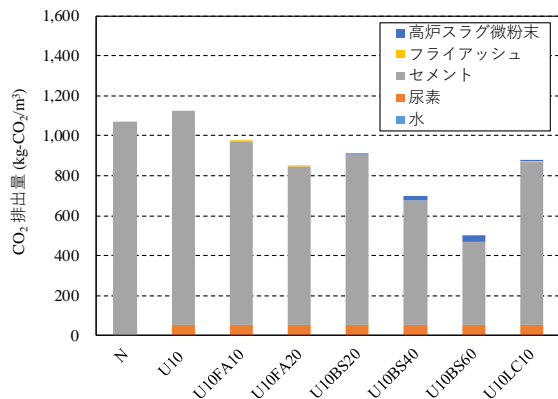


図-6 CO<sub>2</sub> 排出量

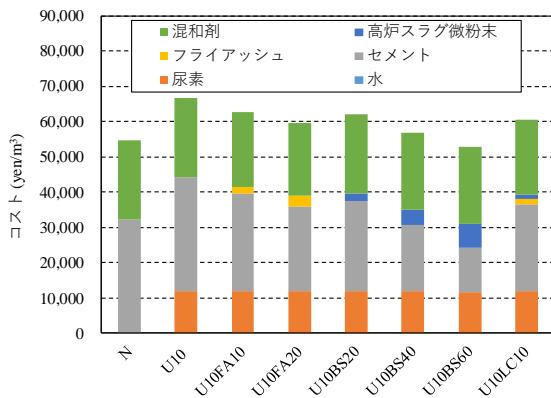


図-7 コスト

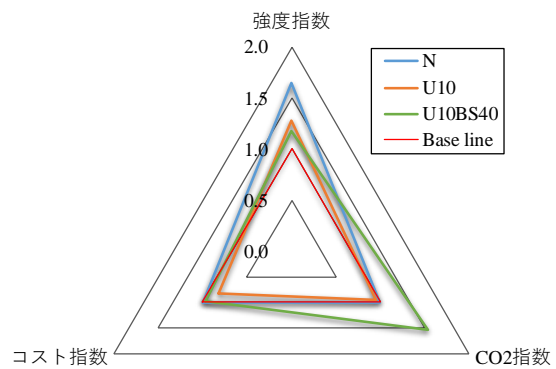


図-8 サステナビリティ評価

(2) ドライイーストを用いた PC グラウトの諸特性

図-9に PC グラウトの流下時間の結果を示す。ドライイーストの添加量の増加は流下時間を長くさせていることがわかる。同図には高粘性 PC グラウトの規格上限値 23 秒および下限値 14 秒のラインも示す。本結果より、ドライイースト 1.0%以上の添加は規格流下時間内に収まっていない。つまり、流動性の観点から鑑みると、ドライイーストの添加量はセメント量に対して 1.0%未満にする必要があることが明らかとなった。

図-10には、PC グラウトの圧縮強度を示す。ドライイースト含有の PC グラウトは、1.0%以下の添加率であれば N 配合と同程度の圧縮強度を有している。しかしながら、2.0%のドライイーストの添加率では材齢 7 日の時点で圧縮強度はゼロであり基準強度を満たさない。つまり、圧縮強度の観点から鑑みると、ドライイーストの添加量はセメント量に対して 2.0%未満にする必要があることが明らかとなった。

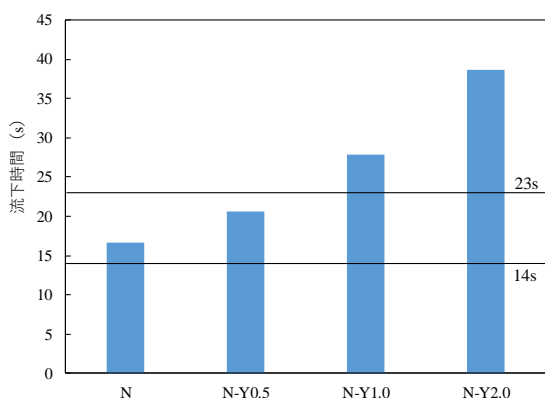


図-9 流下時間

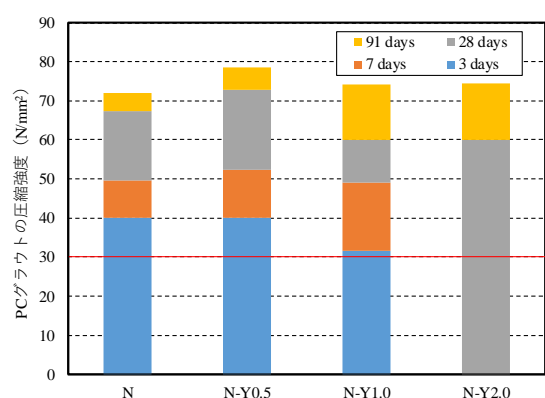


図-10 圧縮強度

本研究では微生物による自己治癒の基本的な可能性を調べるために、酵母の生存をメチレンブルー染色と顕微鏡を用いて観察した。図-11にイースト菌の観察結果を示す。N-Y0.5、N-Y1.0、N-Y2.0のいずれにおいても、生存を意味する白色の酵母と死を意味する青色の酵母の両方が観察できた。一般に、酵母の耐熱性は60°C程度と知られている。80°CになるPCグラウトの中心部の酵母は死滅し、大気により冷却されたPCグラウト表面付近の酵母は生存したと考えられる。

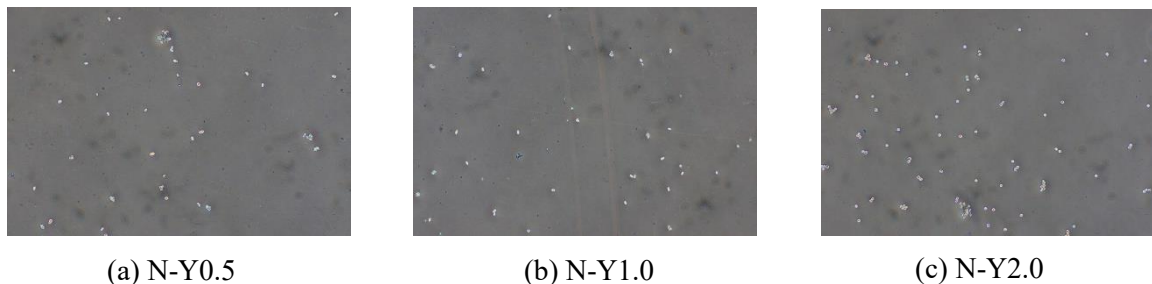


図-11 イースト菌の観察

### (3) PCグラウト周辺のコンクリートの最小ひび割れ指数

図-12に、混和材料有無によるPCグラウト周辺のコンクリートの最小ひび割れ指数の一例を示す。なお、ここに示す最小ひび割れ指数は値が大きいほどひび割れ発生確率を小さくするものである。本解析結果では、混和材料の利用によりPCグラウト周辺のコンクリートの最小ひび割れ指数の値は全体的に大きくなっている。このことから、PCグラウトへの混和材料の利用は、その周辺コンクリートの温度ひび割れの抑制に効果的であることが示唆された。

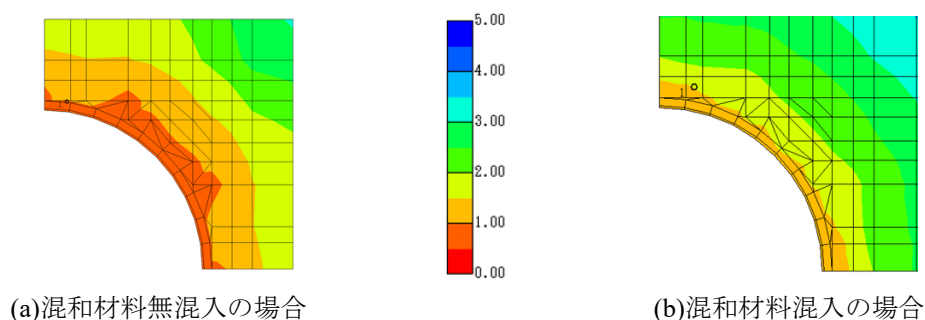


図-12 最小ひび割れ指数

### (4) 接着タンパク質の発現と接着試験

Mgfp1、Mgfp3、Mgfp5について培養時間や温度について検討した。Mgfp1については30°C、3時間の条件で過剰発現に成功した。図-13にHis-tag精製後のMgfp1のSDS-PAGEを示す。Mgfp1は分子量18.6kDaに確認でき、濃度は110 µg/mLであった。Mgfp3、Mgfp5については水不溶性となり精製は困難であった。精製したMgfp1とチロシナーゼを用いて接着試験を行ったが、試験機に設置する前にはがれたために計測はできていない。アルカリ環境下であるPCグラウト上での接着にはアミノ酸配列や接着性能の発現方法に変更が必要であることが示唆された。

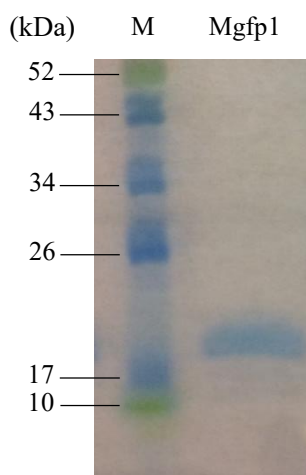


図-13 Mgfp1のSDS-PAGE M:分子量マーカー

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 河野恭生、松家武樹、池末啓太郎、富澤哲	4. 巻 26
2. 論文標題 ローカーボンPCグラウトのサステナビリティ評価	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 333-338
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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 西崎萌、富澤哲、本田晴香、松家武樹
2. 発表標題 酵母を含むPCグラウトの力学および粘度特性
3. 学会等名 第56回化学関連支部合同九州大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeju Matsuka, Satoshi Tomizawa, Hiroshi Yokota
2. 発表標題 Properties of PC grout using dry yeast and various admixtures
3. 学会等名 The 3rd ACF Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本田晴香
2. 発表標題 バイオと環境・材料分野との融合研究
3. 学会等名 第6回九州地区大会 - 高専若手研究者研究・教育セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富澤哲、本田晴香、松家武樹
2. 発表標題 微生物を含むPCグラウトの力学および粘度特性
3. 学会等名 日本農芸化学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeju Matsuka, Hiroshi Yokota, Natsume Takeshita, Koji Sakai
2. 発表標題 Status and future of construction industry and road bridges in Japan from the viewpoint of sustainability (accepted)
3. 学会等名 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富澤哲
2. 発表標題 サステナブル技術と微生物修復技術によるローカーボンコンクリートへの挑戦
3. 学会等名 第7回バイオフィルムセミナー(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本田晴香、富澤哲、松谷祐希、岩坪要、松家武樹
2. 発表標題 ローカーボンPCグラウト開発のための練り混ぜシステムの確立と微生物による自己治癒機能の付与
3. 学会等名 平成30年度全国高専フォーラム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西崎萌、富澤哲、本田晴香、松家武樹
2. 発表標題 微生物による自己修復機能を付与したローカーボンPCグラウトへの挑戦
3. 学会等名 第24回日本高専学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関原花、松家武樹、富澤哲、西崎萌
2. 発表標題 ドライイーストを用いたPCグラウトの諸特性
3. 学会等名 土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関原花、松家武樹、岩坪要、河野恭生、本田晴香
2. 発表標題 尿素を用いたPCグラウトの各種性能評価
3. 学会等名 土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富澤哲、松家武樹、本田晴香
2. 発表標題 微生物と土木材料が共存したローカーボンPCグラウトへの挑戦（その2）
3. 学会等名 第27回九州沖縄地区高専フォーラム
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 松家武樹、富澤哲、本田晴香、松谷祐希、岩坪要、河野恭生、岩見健史、関原花
2. 発表標題 微生物によるひび割れ治癒機能を付与したローカーボン性能を有するPCグラウトの開発
3. 学会等名 全国高専フォーラム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

researchmap <a href="https://researchmap.jp/matsuka2015/">https://researchmap.jp/matsuka2015/</a> 熊本高等専門学校ホームページ <a href="https://kumamoto-nct.ac.jp/gyouseki/2000082.html">https://kumamoto-nct.ac.jp/gyouseki/2000082.html</a>
---

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	富澤 哲  (Tomizawa Satoshi)  (90634709)	熊本高等専門学校・生産システム工学系BCグループ・講師   (57403)	
研究分担者	本田 晴香 (古賀晴香)  (Honda Haruka)  (90756983)	熊本高等専門学校・拠点化プロジェクト系教育連携コアグループ・助教   (57403)	
研究分担者	松谷 祐希  (Matsutani Yuki)  (80757120)	近畿大学・工学部・助教   (34419)	

