

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：31103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04646

研究課題名(和文) 養生と暴露環境に着目したコンクリート構造物の表層品質とスケールング抵抗性

研究課題名(英文) Influence of curing and its after environmental exposure on surface quality and de-icing salt scaling resistance of concrete structures

研究代表者

阿波 稔 (ABA, MINORU)

八戸工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10295959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は寒冷地域のコンクリート構造物を対象としたフィールド調査および室内試験を通じて養生方法・期間およびその後の暴露環境に着目し、表層品質(緻密性)とスケールング特性との関係について明らかにすることを目的としたものである。本研究の範囲内で以下のことがいえる。(1) 橋梁下部工を対象とした実構造物の表層品質調査を行った。その結果、水掛かりが少なく乾燥下に暴露されている部位は表面微細ひび割れが増大し、表層透気係数や表面吸水速度が増加する傾向にあった。施工段階において追加養生を実施した部位では、その傾向は緩やかであった。(2) 表面吸水速度の低下に伴いコンクリートのスケールング抵抗性は大きく改善した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

積雪寒冷地におけるコンクリート構造物は、凍結防止剤の影響と凍結融解作用により表層劣化(スケールング)を受けやすい環境下にある。寒冷地域においてコンクリート構造物の耐久性を確保するためには、施工段階における養生方法とその後の暴露環境に着目し、表層品質(緻密性)とスケールング抵抗性との関係を総合的、且つ定量的に把握することが不可欠といえる。そして、それら知見や要素技術を統合し、より本質的な性能である劣化抵抗性に立脚した汎用性の高い品質確保技術を構築することは、コンクリート工学上極めて重要な意義を持つと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to investigate the influence of curing and its after environmental exposure on surface quality and de-icing salt scaling resistance of concrete structures in cold climates. Research outcomes are as follow ; (1) Decline in the surface quality as microcracks in drying environmental would affected the increase of surface air permeability and surface water absorption, in case of shortage of curing period of concrete. (2) Decreasing the surface water absorption speed due to additional curing condition greatly improves the de-icing salt scaling resistance of concrete.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：土木材料 コンクリート 表層品質 養生 凍結融解抵抗性 気泡組織

### 1. 研究開始当初の背景

寒冷地におけるコンクリート構造物は凍結融解作用により、特有の凍害を受けやすい環境にある。また、近年、凍結防止剤などの塩化物が存在する環境下では凍結融解との複合作用により劣化が促進され、表層劣化（スケーリング）が顕在化してきている。さらに劣化が進行した段階では、外部劣化因子からの保護層としてのかぶり（表層部）コンクリートの機能が低下し、内部鉄筋の腐食やアルカリシリカ反応などの複合劣化を誘発するケースが報告されている。そして、複合劣化にともなう構造物の維持管理コストの増大が指摘されている。

一方、単品個別製造となるコンクリート構造物の品質は、使用材料に加えて打込みや締固め、ブリーディング、養生等の施工状況の影響を大きく受けることが知られている。特に施工段階において養生が不足する場合、表層部コンクリートの緻密性が損なわれ、スケーリングが進行する恐れがある。土木学会コンクリート標準示方書「施工編」では、十分な給水養生を行った場合を想定し、コンクリートの強度発現や初期凍害への影響を参考に検討された湿潤養生期間の標準が示されている。しかしながら、コンクリートの緻密性向上の観点から湿潤養生を長期間持続することの有用性は指摘されているものの、所要の劣化抵抗性を確保するための具体的な養生方法と期間については明確になっていない。

さらに、養生期間終了後の環境作用による乾燥、湿潤、乾湿の繰返し、温度変化などの暴露条件もコンクリート構造物の表層品質や劣化抵抗性に著しく関与するものと考えられる。しかし、実構造物における養生条件の相違とその後の設置（暴露）環境がコンクリートの表層品質・耐久性に及ぼす影響については十分に明らかにされておらず、不明な点が多い。

そのような背景のもと、実構造物への実装を目的として寒冷地コンクリートの耐久性確保の観点から、その品質確保技術について包括的に評価・検討することが望まれている。

### 2. 研究の目的

本研究は、凍結防止剤などの塩化物が存在する凍結融解環境を想定し、施工段階における養生（方法・期間）とその後の暴露環境を踏まえて、コンクリート構造物の表層品質（緻密性）の観点からスケーリング抵抗性について検討するものである。以下に研究期間内の具体的な目的を示す。

(1) フィールド調査による実構造物の養生とその後の暴露環境が表層品質（緻密性）に及ぼす影響の評価

青森県内および岩手県内において近年建設された施工時期の異なる構造物（橋梁下部工）を対象にコンクリート表層部の緻密性を非破壊試験（表層透気試験、表面吸水試験、表層目視（面的な微細ひび割れ））で評価する。

(2) 室内試験によるコンクリートの表層品質（緻密性）とスケーリング抵抗性の評価

寒冷地域における一般的なコンクリート配合により試験体を作製する。試験体は養生方法（給水・封緘・気中養生、保温・給熱養生）および温度・期間を変化させ、材齢に応じて表層品質（緻密性）を評価する。そして、コンクリートの養生に起因する緻密性とスケーリング抵抗性との関係を定量的に評価する。

### 3. 研究の方法

(1) 実構造物の表層品質（緻密性）の調査

本研究で調査したコンクリート構造物はいずれも国土交通省東北地方整備局三陸国道事務所管内および青森河川国道事務所管内の復興道路（三陸沿岸道路）あるいは上北道路（青森県上北郡六戸町から七戸町に至る高規格幹線道路、一部供用）である。表-1 にその一覧を示す。

表-1 調査構造物の一覧

構造物名称	調査部位	コンクリートの仕様	施工時期	調査時期	養生日数 (型枠存置期間)	脱型後の追加養生	透水型枠
A橋下部工	橋台(A1, A2) 縦壁	24-8-25BB	2010年6月～7月	2013年11月	10日	なし	—
B橋下部工	橋脚(P2)	27-8-25BB	2009年12月 ～2010年2月	2013年11月	5日	なし	—
C橋下部工	橋台(A1, A2) 縦壁・胸壁	24-8-25BB	2014年1月～2月	2014年6月	縦壁:14日 胸壁:7日	なし	—
D橋下部工	橋脚(P2, P3, P4)	24-12-25N	2015年1月 ～2015年4月	2015年7月	7日	シート養生	○
E橋下部工	橋台(A1) 縦壁	24-8-25N	2014年10月	2015年6月	7日	なし	—

実構造物の調査項目は、表層目視評価および表層透気試験（トレント法：図-1）・表面吸水試験（SWAT法：図-2）とした。表層目視評価は、表層部コンクリートの緻密性に関係する面的な微細ひび割れとした。一般的に「良」とされる範囲を4点、3点、2点、1点に分類し、さらに「否」の「0点」を加えて5段階の評価（0.5刻みで採点）を行った。コンクリートの表層透気試験および表面吸水試験は、地面から1.5～2mの位置で横断方向に対して測定した。また、測定前に同一箇所インピーダンス法による表面含水率も計測した。



図-1 表層透気試験（トレント法）

#### （2）養生に着目したスケーリング抵抗性の評価

本実験では、24-12-25（W/C=50～55%）の生コンクリートを使用した。空気量は5.0～5.5%とし、使用するセメントは、普通ポルトランドセメント（N）および高炉セメントB種（BB）とした。また型枠は、一般型枠と透水型枠の2種類とした。供試体寸法は、150×150×530mmの角柱供試体を用いた。

養生条件として、寒中コンクリートを想定し、養生温度、型枠脱型材齢、追加養生の方法と日数をパラメータとして設定した。なお、いずれの条件においても、型枠脱型材齢までは10℃の恒温養生を実施し、相対湿度は60%程度で管理を行った。また追加養生終了後、材齢63日まで気中養生を行った後、後述する各試験に供した。材齢7週において、型枠側面を試験面として、非破壊試験である表面吸水試験（SWAT法）を実施した。また、表面吸水試験の後、供試体を150×150×150mmに整形し、JSCE-K-572に準じてスケーリング試験を実施し、表層品質とスケーリング抵抗性の関係について検討した。

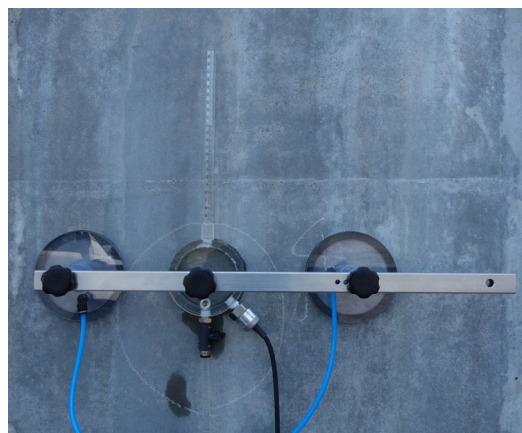


図-2 表面吸水試験（SWAT法）

## 4. 研究成果

### （1）フィールド調査による実構造物の養生とその後の暴露環境が表層品質（緻密性）に及ぼす影響

施工時の養生期間の異なる構造物において実施した表層透気試験の結果の一例を図-3に示す。A橋下部工（堅壁）は10日、B橋下部工（橋脚）は5日、C橋下部工（堅壁）は14日、砂土路川橋下部工（胸壁）は7日の養生日数（型枠存置期間）となっている。これらの結果より、養生期間の短い部位ほど、面的な微細ひび割れが多く発生し、表層透気係数が増大する傾向にある。これは、材齢初期に乾燥を受けた部位ほど表層品質（緻密性）が低下しやすいものと考えられる。

透水型枠を使用した構造物（D橋下部工）の表層透気試験と表面吸水試験の結果を図-4および図-5に示す。使用した透水型枠は布製の透水シートを型枠面に敷設するタイプであり、コンクリート表面の余剰水の排出や表面気泡の低減により表層品質の改善を期待する工法である。また、図中には比較として透水型枠を使用していない構造物（E橋下部工）の結果も記載した。両構造物は同一の生コン工場により施工されたものである。D橋の橋脚は小判型の断面形状であり曲線部の試験結果を白抜きで示した。同橋梁は施工段階でブリーディングが多く発生していること、透水型枠に加えて1ヶ月程度のシート養生も実施していることが特徴である。橋脚の直線部における表層透気係数は、 $0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 未満であり、 $0.001 \times 10^{-16} \text{m}^2$ の部位も確認された。しかし、曲線部（白抜き）の表層透気係数は、直線部と比較して大きく $0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ を超える部位もあった。これは、小判型断面の曲線部にブリーディングが集まりやすいことから、ブリーディングの影響によるものと考えられる。D橋下部工（直線部）の表面吸水速度は $0.1 \text{ml/mm}^2/\text{sec}$ 未満であり、ほとんど吸水されない部位も認められた。また、一般型枠を使用し、脱型後に追加養生を行っていないE橋下部工の表層透気係数は $0.1 \sim 10 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 程度、表面吸水速度は $0.2 \sim 0.6 \text{ml/mm}^2/\text{sec}$ 程度であった。

表-2は、橋梁下部工を対象とし施工時における追加養生および透水型枠使用の有無、さらにその後の暴露環境が表層透気係数および表面吸水速度に及ぼす影響を示したものである。C橋下

部工およびD橋下部工における施工後の初回調査時と2020年10月の表層透気係数および表面吸水速度の調査結果を示したものである。これらの結果より、追加養生を実施していないC橋下部工では経年の乾燥によって面的な微細ひび割れが増加し、表層透気係数が低下した。一方、透水型枠を使用し追加養生を実施したD橋下部工では、経年暴露による面的な微細ひび割れの増加は確認されず、表層透気係数および表面吸水速度は極めて低い値であった。このことから、初期養生および追加養生を十分に実施し、緻密な表層組織を形成することは、その後の暴露環境における乾燥を抑制させ、面的な微細ひび割れの発生を低減するとともに、良好な表層品質が確保されることが分かった。

△：面的な微細ひび割れ、□：表面含水率

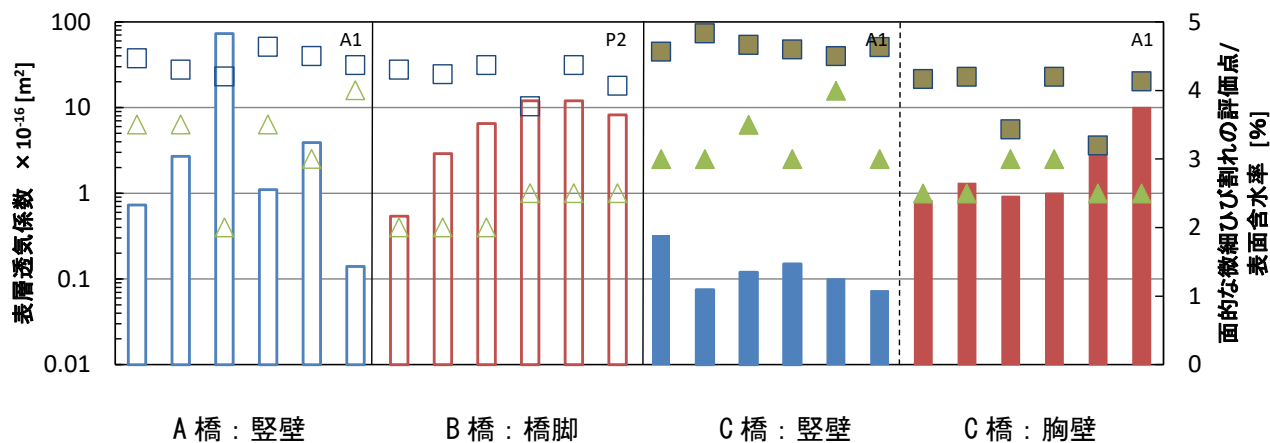


図-3 表層透気試験結果 (A橋、B橋、C橋)

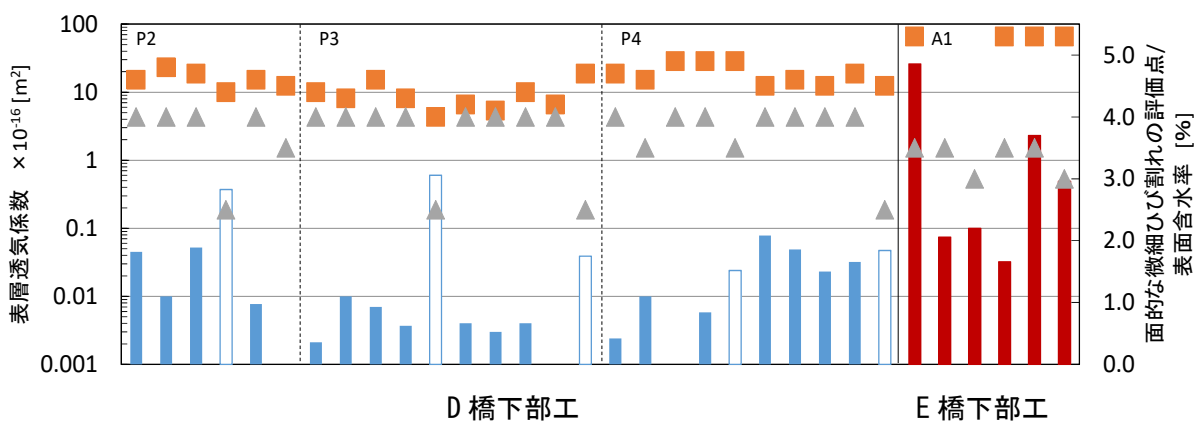


図-4 表層透気試験結果 (D橋下部工、E橋下部工)

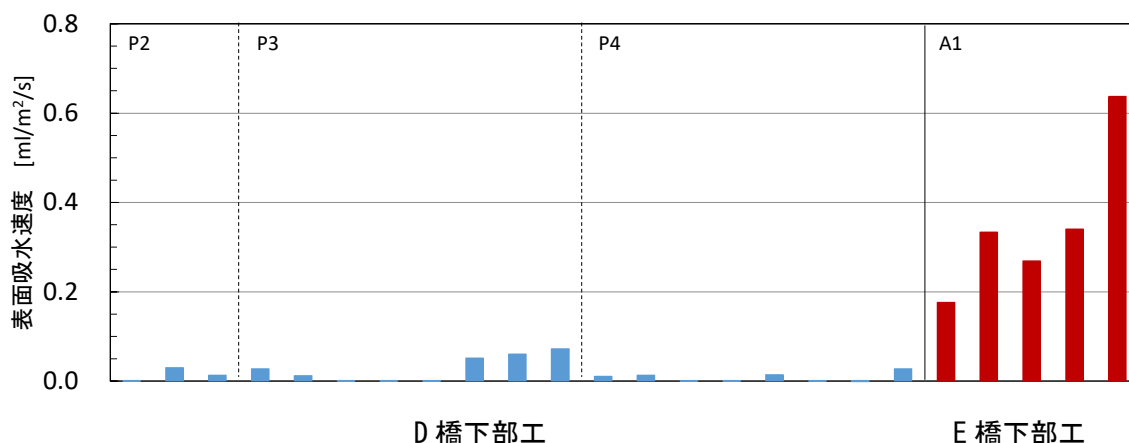


図-5 表面吸水試験結果 (D橋下部工、E橋下部工)

表-2 表層透気係数・表面吸水速度に及ぼす暴露環境の影響（平均値）

橋梁名	C橋下部工				D橋下部工			
	橋台 (A1)		橋台 (A2)		橋脚 (P2)		橋脚 (P3)	
調査部位								
調査時期	2014年6月	2020年10月	2014年6月	2020年10月	2015年7月	2020年10月	2015年7月	2020年10月
測定箇所	7	6	7	6	4	4	6	6
面的な微細ひび割れの評価点	3.3	2.8	2.8	2.7	3.5	3.9	3.5	4.0
表面含水率 (%)	4.6	4.3	4.1	4.4	4.5	4.3	4.3	4.3
表層透気係数 ( $\times 10^{-16} \text{m}^2$ )	0.141	1.881	0.330	1.358	0.106	0.046	0.110	0.001
表面吸水速度 ( $\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ )	—	0.400	—	0.600	0.053	0.008	0.028	0.008

(2) 養生に着目したコンクリートの表層品質（緻密性）とスケーリング抵抗性

コンクリートの初期養生後の追加養生がスケーリング抵抗性に及ぼす影響を図-6に示す。本実験では、30-12-25BB、目標空気量 6.0%の生コンクリートを使用した。これより、追加養生を実施した試験体は、実施していない試験体と比較し、スケーリング量が大きく低下した。

図-7 は寒中コンクリートを対象として温度制御の方法（給熱養生、保温養生）、追加養生の方法（型枠存置、保水シート、気中養生）および期間（7日、21日）、使用型枠（一般型枠、透水型枠）を変化させて実施した表面吸水試験とスケーリング試験（JSCE-K 572(6.10)）の結果の一例を整理したものである。本実験では、24-12-25（W/C=50~55%）の生コンクリートを使用した。空気量は5.0~5.5%とし、使用するセメントは、高炉セメントB種（BB）とした。また型枠は、一般型枠と透水型枠の2種類とした。これより、温度制御の方法、追加養生の方法・期間の違いによらず、表面吸水速度が高いものほど、累加スケーリング量が多く発生する傾向にある。また、表面吸水速度が  $0.3 \text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$  以下であれば軽微なスケーリング量となることが認められた。

以上のことから、追加養生も含めた養生によるコンクリート表層の緻密性の向上は、劣化抵抗性を確保する上で極めて重要な要因となるものと考えられる。また、非破壊試験である表面吸水速度を指標としてスケーリング抵抗性を評価できる可能性がある。

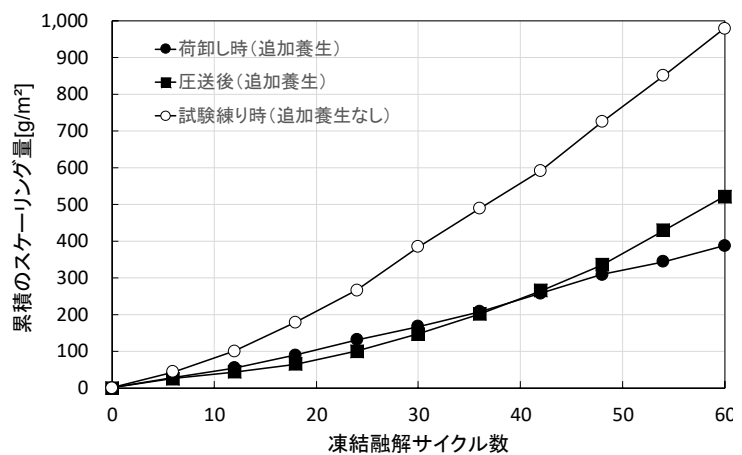


図-6 スケーリング試験結果

（コンクリート：30-12-25BB（目標空気量：6.0%）、試験方法：JSCE-K 572（6.10））

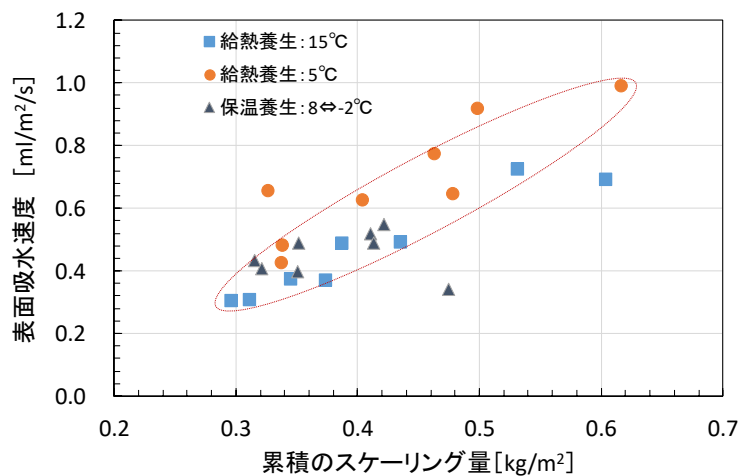


図-7 表面吸水速度とスケーリング抵抗性（養生の影響）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Kuang Yanhua, Takashima Naoto, Sakoi Yuki, Zhang Meng, Zytani Seiji, Aba Minoru, Tsukinaga Yoichi	4. 巻 297
2. 論文標題 Salt scaling resistance and microstructure analysis of fly-ash cement-based concrete treated with different surface penetrants	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Letters	6. 最初と最後の頁 129999 ~ 129999
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.matlet.2021.129999	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 Zhang Meng, Aba Minoru, Sakoi Yuki, Tsukinaga Yoichi, Shimomukai Kohei, Kuang Yanhua	4. 巻 19
2. 論文標題 Synergetic Effect of Expansive Agent (KEA) and Superabsorbent Polymers (SAP) on the Shrinkage, Strength and Pore Structures of Mortars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 26 ~ 39
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3151/jact.19.26	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 Zhang M., Aba M., Sakoi Y., Tsukinaga Y., Kuang Y.H., Wabiko S., Kushita M.	4. 巻 第10回
2. 論文標題 Practical improvement of deicing salt scaling resistance on RC bridge slab in the Tohoku region of Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations	6. 最初と最後の頁 1127 ~ 1133
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1201/9780429279119-153	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 迫井 裕樹、阿波 稔、松岡 智	4. 巻 Vol.4
2. 論文標題 振動締固めによるコンクリート中の空気量減少量の推定および硬化後の気泡特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 プレキャスト施工技術論文集	6. 最初と最後の頁 6 ~ 9
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0件

〔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	迫井 裕樹  (SAKOI YUKI)  (30453294)	八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授   (31103)	
研究分担者	月永 洋一  (TSUKINAGA YOICHI)  (60124898)	八戸工業大学・大学院工学研究科・教授   (31103)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------