

令和 5 年 10 月 24 日現在

機関番号：53301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04563

研究課題名（和文）セメントの水和解析に基づく合理的な養生計画立案手法の提案と高精度化

研究課題名（英文）Proposal of rational curing planning method based on hydration analysis of cement and improvement of its accuracy

研究代表者

福留 和人（Fukudome, Kazuto）

石川工業高等専門学校・環境都市工学科・教授

研究者番号：60517548

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：セメントの水和解析に基づいて養生計画を合理的に立案する養生計画立案手法を提案している。本研究では、提案手法の完成度および実用性を高め、社会実装を推進することを目的に検討課題に取り組んだ。その結果、以下の成果を得た。(1)提案手法の各種養生工法への適用性を拡大した。(2)提案手法の各種セメントへの適用性を拡大した。(3)生産性および低炭素化と養生による性能確保の両立を考慮した養生立案手法を開発した。以上の成果から、各種条件に応じて必要養生期間を算定可能な養生計画立案プログラム、および、低炭素化と生産性の両立を考慮可能な完成度の高い養生計画立案支援プログラムを完成させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果により、各種養生工法および各種セメントを用いた時の必要養生期間を合理的に求めることができ、費用対効果を考慮した合理的で確実な養生計画の立案が可能となる。また、各種条件から必要養生期間を容易に算定可能な養生計画立案支援プログラムの提供により社会実装が推進され、所要の性能を有するコンクリート構造物の構築に繋げることができる。さらに、生産性あるいは低炭素化と養生による性能確保の両立を考慮した養生計画立案手法の開発により、コンクリート工の生産性の向上、低炭素型セメントの利用拡大による炭素排出量の低減など、各種課題解決に大きく貢献できる。以上より、研究成果の学術的意義および社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：We proposed a curing planning method that makes a rational curing plan based on the hydration analysis of cement. The purpose of this study was to improve the degree of perfection and practicality of the proposed planning method for curing, and to promote its social implementation. As a result, the following results were obtained. (1) The applicability of the proposed method to various curing methods was expanded. (2) The applicability of the proposed method to various types of cement was expanded. (3) We developed a curing planning method that considers both productivity and low carbonization and securing performance by curing. Based on the above results, we have completed a curing planning program that can calculate the required curing period according to various conditions, and a highly complete curing planning support program that can consider both low carbonization and productivity.

研究分野：土木工学 土木材料，施工，コンクリート工学

キーワード：養生 養生計画 水和解析 目標水和率 必要養生期間 生産性 低炭素化

## 1. 研究開始当初の背景

所要の性能を有するコンクリート構造物を構築する上で養生は極めて重要な作業工程である。養生の重要性は広く認識されているものの、具体的な養生計画立案手法が存在しないというのが一般的な認識である。提案する「セメントの水和解析に基づく養生計画立案手法」は、養生の本来の目的に基づいた合理的な手法と言えるが、養生に関わる多くの技術者、研究者に十分認識されていないのが実状である。

所要の性能を有するコンクリート構造物の構築の実現のためには、提案する「セメントの水和解析に基づく養生計画立案手法」の完成度、実用性を高め、社会実装を推進していくことが急務である。

## 2. 研究の目的

### (1) 各種養生工法への適用性の拡大

近年開発が進められている各種養生工法（養生マット、噴霧養生、保水養生テープ、膜養生剤等）への適用性を高めることが必要となる。そのために、各種養生工法の性能を調査し、コンクリートの耐久性に及ぼす効果を把握する。さらに、養生工法の応じた水和解析の条件の設定方法を見出すとともに、各種養生工法の養生効果の解析による評価の妥当性を検証する。

### (2) 各種セメントへの適用性の拡大

低熱型セメントの適用事例が増加している。また、カーボンニュートラルに向けて、混合セメント、低炭素型セメントの利用拡大が急務となっている。これらのセメントは、強度発現が遅いことから養生期間を延長することが必要であり、より合理的に求めることが求められる。このことから、養生条件がコンクリートの性能に及ぼす影響を把握するとともに水和解析による評価の妥当性を検証し、各種セメントへの適用性を確認する。

### (3) 生産性向上と性能確保の両立を考慮した養生計画立案手法の検討

確実な養生の実施は重要であるが、養生期間の延長は生産性低下に繋がることから望ましいとは言えない。そこで、生産性向上と養生による性能確保の両立を考慮した養生立案手法の開発を目的に検討を加える。

### (4) 低炭素化と生産性向上との両立を考慮した養生計画立案手法の検討

低炭素型セメントを使用する場合、一般的なセメントより長期の養生が必要であることが想定され、生産性の低下につながる可能性は高い。そこで、低炭素化と生産性向上との両立を考慮した養生立案手法を開発することを目的に検討を加える。

### (5) 養生計画支援プログラムの開発

提案手法の社会実装のために、水和解析を行わなくても簡易に必要な養生期間を求められる養生計画立案支援プログラムの開発を目的に検討する。(1)～(4)の成果により適用性の拡大を図るとともに、低炭素化と生産性の両立を考慮可能な完成度の高い養生計画立案支援プログラムの開発を進める。

## 3. 研究の方法

### (1) 各種養生工法への適用性の拡大

各種養生工法の水分供給・保持性能を調査するとともに、各種養生工法の養生効果を把握するために、表層透気係数（トレント法）および超音波伝播速度を測定した。次に、水分移動解析を実施し、各種養生工法の水分供給・保持性能に応じた境界条件の設定方法を見出すとともに、水和解析結果とコンクリートの実測値を比較することで養生効果の水和解析による評価の妥当性を検証した。

### (2) 各種セメントへの適用性の拡大

養生条件が各種セメントを用いたコンクリートの性能に及ぼす影響を把握するとともに水和解析による評価の妥当性を検証した。養生は水中養生とし、養生期間を2～28日の間で変化させた。また、水セメント比 W/C の影響を把握するために、60、50 および 40% の3水準設定した。測定項目は、3. (1)と同様とした。

### (3) 生産性向上および低炭素化との両立を考慮した養生計画立案手法の検討

生産性向上と養生による性能確保の両立を考慮した養生立案手法を開発することを目的に検討を加えた。ここでは、設計材齢の設定によって生産性向上との両立を図る方法を検討することとした。すなわち、設計材齢を短縮することで目標水和率目標水和率が低下し、必要養生期間が短縮されることから、生産性向上に繋げることが可能となる。さらに、同様の考え方で、低炭素化と生産性向上との両立を考慮した養生立案手法を開発することを目的に検討を加えた。

### (4) 養生計画立案支援プログラムの開発

水和解析を行わなくても必要養生期間を求められる養生計画立案支援プログラムの開発を検討する。まず、各種要因が必要養生期間に及ぼす影響を定量化し、必要養生期間の算定式を整備する。次に、(1)～(3)の成果も組み込み、各種養生工法および各種セメントへの適用性を高めるとともに、養生による性能確保と生産性および低炭素化の両立を考慮可能な、完成度の高い養生計画立案支援プログラムの開発を進める。

#### 4. 研究成果

##### (1) 各種養生工法への適用性の拡大

図-1 に養生中の質量変化を示す。養生工法によって水分供給性能に差が見られた。解析による養生効果の評価の妥当性を検証するにあたり、境界条件の検討を行った。解析にはコンクリート材料性能プログラム DuCOM を用いた。図-1 に質量変化率の解析値も示すが、実測値と合致しており、水分供給保持性能に応じた境界条件を得ることができた。

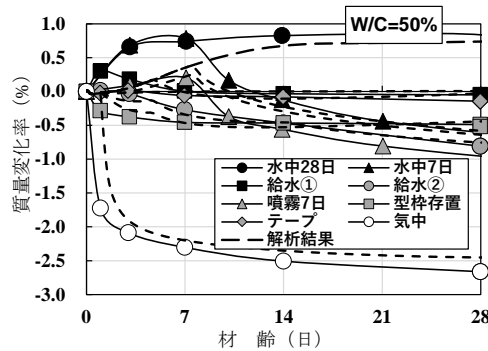


図-1 実測値と解析値の比較 (W/C=50%)

##### (2) 各種セメントへの適用性の拡大

提案する手法でセメントの鉱物組成あるいは混合材混合率の影響を考慮した解析を行えば、低熱型セメントや低炭素型セメントを用いた場合の必要養生期間の算定が可能である (図-2)。次に養生条件がコンクリートの性能に及ぼす影響を把握するとともに水と解析による評価の妥当性を検証した。図-3 に水和率の解析値と表層透気係数の関係を示す。いずれのセメントおよび水セメント比においても、水和率の解析値と表層透気係数の対数は良好な直線関係が見られ水と解析による評価の妥当性が確認された。

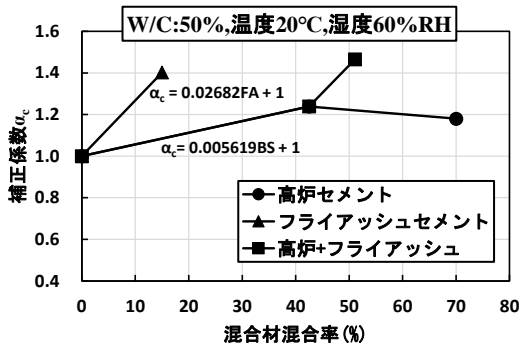


図-2 混合材混合率と補正係数  $\alpha_c$  の関係

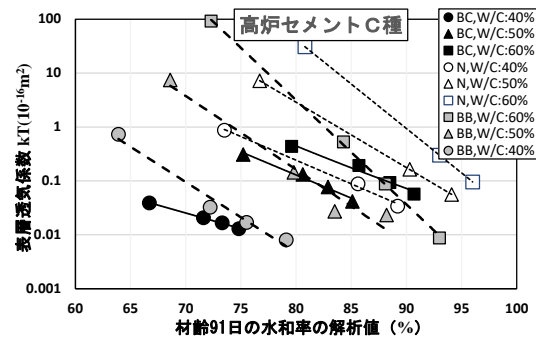


図-3 水和率と表層透気係数の関係

##### (3) 生産性向上との両立を考慮した養生計画立案手法の検討

##### 1) 生産性確保の基本的な考え方：設計材齢変更による必要養生期間の短縮

図-4 に給水養生期間と達成材齢 91 日における水和率の関係を示す。10°C で 25 日程度と算定されるが、設計材齢を 21 日、14 日と短縮することで目標水和率が低下するため必要養生期間を短縮できる。つまり、図-5 に設計材齢と必要養生期間の関係を示すが、環境温度が低くても、設計材齢の設定によって養生期間の短縮が可能となる。

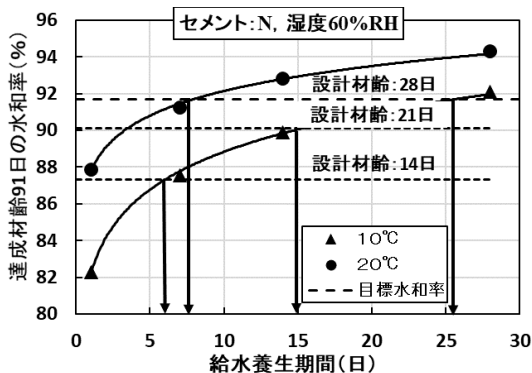


図-4 給水養生期間と達成材齢 91 日の水和率の関係

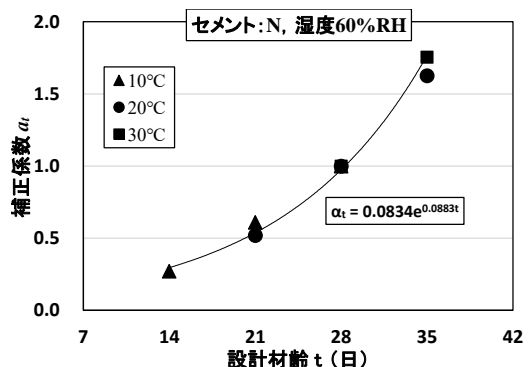


図-5 設計材齢と補正係数  $\alpha_t$  の関係

## 2) 設計材齢算定方法

養生計画立案支援プログラムの開発から、以下の必要養生期間の算定式が得られている。 $C_p$  は必要養生期間（日）であり、基準条件の必要養生期間  $C_{p0}$  に各要因の影響を表す補正係数を乗じて算定する。

$$C_p = \alpha_c \cdot \alpha_m \cdot \alpha_t \cdot \alpha_r \cdot \alpha_d \cdot \alpha_{temp} \cdot \alpha_{RH} \cdot C_{p0} \quad (1)$$

$\alpha_t$ ：設計材齢に関する補正係数、 $\alpha_c$ 、 $\alpha_m$ 、 $\alpha_r$ 、 $\alpha_d$ 、 $\alpha_{temp}$ 、 $\alpha_{RH}$ ：各種要因に関する補正係数

この算定式から、所定の養生期間  $C_p$  となるように条件選定が可能である。また、補正係数  $\alpha_t$  の算定式は以下が得られた（図-5）。

$$\alpha_t = 0.0834 \cdot \exp(0.0883 \cdot t) \quad (2)$$

$$t = \frac{\ln(\alpha_t / 0.0834)}{0.0883} \quad (3)$$

### 1) 配合補正方法

#### a) 圧縮強度、表層透気係数算定式

配合補正方法を得るため、圧縮強度試験および表層透気係数測定結果から、圧縮強度 ( $f'c$ ) 算定式および表層透気係数 (kT) 算定式を得た。

$$f'c = (A1 \cdot C/W + B1) \cdot \ln(t) + A2 \cdot C/W + B2 \quad (4)$$

$$\log(kT) = (A1 \cdot W/C + B1) \cdot \log(t) + A2 \cdot W/C + B2 \quad (5)$$

#### b) 配合補正方法の検討－圧縮強度確保

割増係数を  $\alpha$ 、設計基準強度  $f'ck$  とおいて、下式を圧縮強度算定式（式(4)）に代入する。

$$f'c = \alpha \cdot f'ck \quad (6)$$

圧縮強度算定式から算定された設計材齢  $t$  および設計基準強度  $f'ck$  を代入すると、水セメント比  $W/C$  が算定される。

$$W/C = \frac{A1 \cdot \ln(t) + A2}{\alpha \cdot f'ck - B1 \cdot \ln(t) - B2} \quad (7)$$

算定された水セメント比の材齢 28 日における圧縮強度として呼び強度を算定する。

$$\text{呼び強度} = \{ (A1 / (W/C) + B1) \ln(28) + A2 / (W/C) + B2 \} / \alpha \quad (8)$$

#### c) 配合補正方法の検討－耐久性確保

表層透気係数の明確な根拠による設定が困難のため、以下の配合補正方法を検討した。

① 設計基準強度  $f'ck$  および圧縮強度式(式(4))から原配合の水セメント比  $W/C_0$  を推定する。

$$W/C_0 = \frac{A1 \cdot \ln(28) + A2}{\alpha \cdot f'ck - B1 \cdot \ln(28) - B2} \quad (9)$$

② 原配合の水セメント比  $W/C_0$  および式(5)から原配合の表層透気係数  $kT_0$  を推定する。

$$\log(kT_0) = (A1 \cdot W/C_0 + B1) \log(28) + A2 \cdot W/C_0 - B2 \quad (10)$$

③ 設計材齢  $t$  を補正した時に、基準配合と同等の表層透気係数  $kT_0$  が確保される  $W/C$  を式(5)から算定する。

$$W/C = \frac{\log(kT_0) - B1 \cdot \log(t) - B2}{A1 \cdot \log(t) + A2} \quad (11)$$

④ 算定された  $W/C$  から呼び強度を算定する（式(8)）。

$$\text{呼び強度} = \{ (A1 / (W/C) + B1) \ln(28) + A2 / (W/C) + B2 \} / \alpha \quad (12)$$

## 2) 算定事例

ここでは、養生期間を短縮する場合について検討する。基準の条件において任意の養生期間  $C_{popt}$  とするための設計材齢に関する補正係数  $\alpha_t$  は、次のようになる。

$$\alpha_t = \frac{C_{popt}}{C_{p0}} \quad (13)$$

式(2)および(3)から任意の養生期間  $C_{popt}$  に対する設計材齢  $t$  が算定される (図-6)。さらに、式(8)および(12)から圧縮強度および耐久性を確保するための呼び強度が算定される。図-7 に呼び強度の算定結果を示す。任意の養生期間とするための呼び強度の補正を合理的に算定できることが示されたと言える。圧縮強度確保の場合には、呼び強度の補正は5程度以下であるが、耐久性確保の場合には大幅な呼び強度の補正が必要であるという算定結果となった。つまり耐久性確保が求められる場合、適切な養生期間の確保が肝要であることを示しているとも言える。

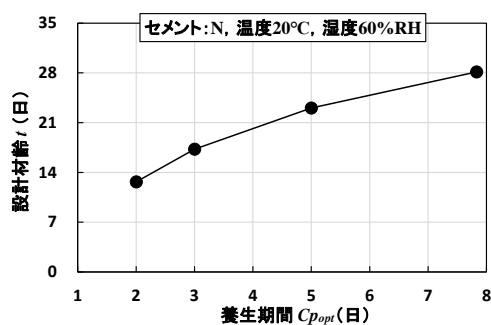


図-6 養生期間  $C_{popt}$  と設計材齢  $t$  の関係

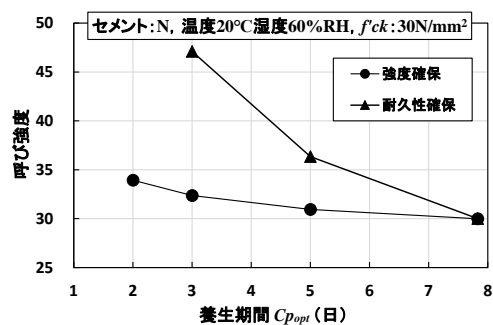


図-7 呼び強度の算定結果

#### (4) 養生計画立案支援プログラムの開発

本研究では、必要養生期間の算定式および各種条件が必要養生期間に及ぼす影響に関する補正係数の算定式を組み込み、簡易に必要な養生期間が算定可能な養生計画立案支援プログラムを開発した。プログラムは、汎用性等を考慮し、ExcelのVBAを用いて作成した。(1)、(2)の成果に基づき、各種セメントおよび各種養生工法への適用性も拡大した。さらに(3)の成果を組み込み、低炭素化と生産性との両立を考慮可能なプログラムを開発した。図-8 に入力フォームを図-9 に呼び強度算定結果の出力例を示す。セメントの種類として低炭素型セメントを選択すれば、低炭素化と生産性との両立を考慮する場合の呼び強度の補正値を算定することができる。

図-8 プログラム起動後の入力フォーム

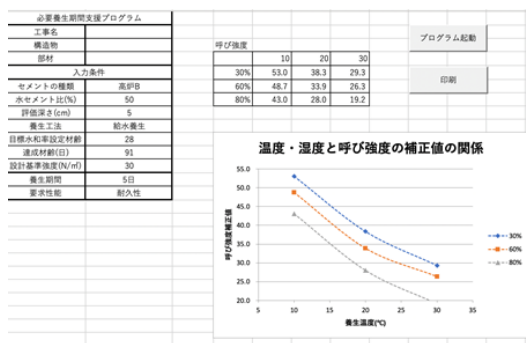


図-9 呼び強度算定結果 (出力画面)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 福留和人, 丸七菜摘, 眞井里菜, 齋藤 淳	4. 巻 21
2. 論文標題 各種養生工法の水分供給保持性能が水セメント比の異なるコンクリートの物質移動抵抗性に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集	6. 最初と最後の頁 131-136
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 -

1. 著者名 福留和人, 齋藤淳	4. 巻 35
2. 論文標題 セメントの水和解析に基づく養生計画立案手法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学論文集	6. 最初と最後の頁 35-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/crt.32.35	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 福留和人, 山村准平, 帯刀香乃, 齋藤淳	4. 巻 20
2. 論文標題 各種養生工法の水分供給保持性能がコンクリートの耐久性に及ぼす影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集	6. 最初と最後の頁 89-94
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 -

1. 著者名 福留和人, 梶山優, 齋藤淳	4. 巻 1
2. 論文標題 水和解析に基づく養生計画立案手法の低熱型ポルトランドセメントへの適用検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会、コンクリート構造物の養生効果の定量的評価と各種養生技術に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 201-206
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 -

1. 著者名 福留和人、池上歩花、千田桃大、齋藤淳	4. 巻 21
2. 論文標題 湿潤養生期間が混合セメントB種を用いたコンクリートの物質移動抵抗性に及ぼす影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集	6. 最初と最後の頁 175-180
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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 福留和人，丸七菜摘，眞井里菜，齋藤 淳
2. 発表標題 各種養生工法の水分供給保持性能が水セメント比の異なるコンクリートの物質移動抵抗性に及ぼす影響
3. 学会等名 第21回 コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福留和人，丸七菜摘，眞井里菜，齋藤 淳
2. 発表標題 各種養生工法の水分供給保持性能がコンクリートの性能に及ぼす影響
3. 学会等名 土木学会令和3年度全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富田充宏，帯刀香乃，福留和人，山村准平，齋藤淳
2. 発表標題 各種養生工法の水分供給保持性能がコンクリートの性能に及ぼす影響
3. 学会等名 土木学会令和2年度全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山村准平, 福留和人, 帯刀香乃, 齋藤淳
2. 発表標題 水と解析に基づく養生計画立案手法の各種養生工法への適用検討
3. 学会等名 土木学会令和2年度全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高田莉里, 福留和人, 木下慶人, 齋藤淳
2. 発表標題 各種要因が必要養生期間に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 土木学会令和2年度全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福留和人, 木下慶人, 高田莉里, 齋藤淳
2. 発表標題 セメントの水と解析に基づく養生計画立案支援プログラムの開発
3. 学会等名 土木学会令和2年度全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福留和人, 山村准平, 帯刀香乃, 齋藤 淳
2. 発表標題 各種養生工法の水分供給保持性能がコンクリートの耐久性に及ぼす影響
3. 学会等名 第20回 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 福留和人
2. 発表標題 水と解析に基づく養生計画立案手法の低熱型ポルトランドセメントへの適用検討
3. 学会等名 土木学会, コンクリート構造物の養生効果の定量的評価と各種養生技術に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶山優
2. 発表標題 水と解析に基づく養生計画立案手法の低熱型セメントへの適用検討
3. 学会等名 土木学会令和元年度全国大会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 (10)福留和人、堀川旬、寺瀬一葉、齋藤淳
2. 発表標題 生産性向上と養生による性能確保の両立を考慮した養生計画立案手法 - 強度確保の観点からの検討
3. 学会等名 土木学会令和4年度全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福留和人、池上歩花、千田桃大、齋藤淳
2. 発表標題 湿潤養生期間が混合セメントB種を用いたコンクリートの物質移動抵抗性に及ぼす影響
3. 学会等名 第22回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム
4. 発表年 2022年

〔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	野間 康隆  (Noma Yasutaka)  (30796123)	株式会社安藤・間(技術研究所)・土木研究部・研究員   (92622)	
研究 分担者	齋藤 淳  (Saito Atsushi)  (60724961)	株式会社安藤・間(技術研究所)・土木研究部・主任研究員   (92622)	

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
---------	---------