

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04424

研究課題名（和文）コンクリート製造・施工の効率化を目指した調合設計・養生計画支援システム

研究課題名（英文）Support System for Plans of Mix Proportion and Production Method of Concrete

研究代表者

杉山 央（SUGIYAMA, HISASHI）

宇都宮大学・地域デザイン科学部・教授

研究者番号：50344015

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：コンクリート製造・施工の効率化を進めるため、数値計算によって調合設計や養生計画を策定するための支援システムを構築することを目的とする。すなわち、コンクリート部材内のセメント水和反応、微細組織形成、発熱・熱伝導、水分移動、強度発現を精緻に予測するシミュレーション技術をベースとして、計算によって調合や養生の最適解を導出するシステムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

このシステムを利用することにより、数多くの実験や過度の養生を行うことなく、主にシミュレーション計算によって目標性能を満足させるための調合設計・養生計画を効率的かつ合理的に策定することができる。さらに、時間や労力を最小限に抑えた製造・施工方法の提案につなげることができるので、実務面での活用や効果も期待できる。

研究成果の概要（英文）：Temperature and water content of concrete in the hardening process have an influence on the strength development. Therefore, the prediction of temperature and water content in the concrete member is important.

In this study, the simulation model for heat conduction in full-size concrete member was proposed using the mathematical model for cement hydration and microstructure formation. Temperature at each position in concrete member could be calculated by the model. Moreover, the simulation model for water diffusion in full-size concrete member was proposed. This model made it possible to express the water consumption by cement hydration, water diffusion in concrete member, and water evaporation from the surface of concrete after removing forms. Water content at each position in concrete member could be calculated by the model.

Using the heat conduction model and the water diffusion model, the support system for plans of mix proportion and production method of concrete was developed.

研究分野：工学・建築学・建築材料

キーワード：コンクリート セメント水和発熱 水分拡散 強度発現 シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

震災復興や五輪準備による建設ラッシュへの対応を背景として、建築工事の効率化（工期短縮、省力化、低コスト化など）が求められている。その中でも、特にコンクリートの製造・施工において多大な時間や労力が費やされており、その改善が急務となっている。具体的には、次のような問題が存在している。

- (1) コンクリートの調合を定める際には構造体コンクリートの強度が必要となるが、高強度コンクリートについては実際の構造部材を模擬した大型試験体を作製して構造体コンクリート強度を調べる方法が採られている。これには多大な時間と労力が費やされている。
- (2) コンクリートを順調に硬化させる目的で施工時に湿潤養生を行うが、この期間は強度レベルに関わらず一律に定められている。しかし、水分逸散の少ない高強度コンクリート等については過度の湿潤養生期間となり、必要以上の時間が費やされている。
- (3) プレキャストコンクリートの製造過程では、脱型時、出荷日および保証材齢にそれぞれ所要の強度を満足する必要があるが、調合設計や養生計画の策定プロセスが複雑である。このため、数多くの実験を要しており、多大な時間と労力が費やされている。

これらの問題を解決してコンクリート製造・施工の効率化を進めるための方策が必要となっている。

### 2. 研究の目的

コンクリートはセメントなどの使用材料の種類、調合条件、養生条件、環境条件などによって硬化後の性質が大きく異なり、その複雑な強度特性を把握するために数多くの実験が必要となる。種々のコンクリートの強度特性を精度よく予測計算することができれば、問題解決の一助となる。そこで、本研究では、コンクリート製造・施工の効率化を進めるため、各種のシミュレーション技術を利用して、主に数値計算によって最適な調合設計や養生計画を策定するための支援システムを構築することを目的とする。

研究代表者は、これまでにセメントの水和反応・組織形成モデル<sup>1),2)</sup>を考案し、これを利用してコンクリート部材内の発熱・熱伝導・水分移動・強度発現をシミュレートする技術<sup>3),4),5),6),7)</sup>を開発してきた。この既存技術をベースとし、新たにコンクリート部材外への熱拡散（放熱、受熱）や水分逸散（蒸発、凝縮）のシミュレーション技術を加えることで、様々な環境条件（外気の温度、湿度、風速）に対応できるように発展させ、調合設計・養生計画支援システムに利用する。

目標性能を満足させるためには、使用材料の種類（セメント、骨材など）、調合（水セメント比、単位セメント量など）および養生方法（湿潤養生期間、加熱養生条件など）を適切に定める必要がある。そこで、各種条件を変えながらシミュレーション計算を繰り返して行い、目標性能を満足させるための最適解を導出する演算モデルを構築する。このシステムが完成すれば、数多くの実験や過度の養生を行うことなく、主にシミュレーション計算によって目標性能を満足させるための調合設計・養生計画を効率的かつ合理的に策定することができる。さらに、時間や労力を最小限に抑えた製造・施工方法の提案につなげることができるので、実務面での活用や効果が期待できる。

### 3. 研究の方法

調合設計・養生計画支援システムを構築するため、本研究では以下の検討を行った。

- (1) コンクリートの熱拡散および水分逸散の基礎物性値を明らかにするための実験  
図1に示す小型風洞装置を製作して、送り込む空気温度・湿度・風速を変えながらコンクリート試験体表面の温度変化速度と水分逸散速度を調べる。この実験結果から、熱拡散に関する基礎物性値（コンクリート表面の対流熱伝達率など）および水分逸散に関する基礎物性値（コンクリート表面の物質移動係数、交換速度係数など）を明らかにする。

- (2) コンクリート部材外への熱拡散・水分逸散シミュレーション技術の構築

(1)より明らかになった基礎物性値を用いて、熱拡散・水分逸散シミュレーションモデルを構築し、既存技術との統合を行う。これにより、コンクリート部材内の発熱・熱伝導・水分移動とコンクリート部材外への熱拡散・水分逸散を関連付け、それらの影響を反映させた強度発現の予測計算が可能になる。

- (3) 調合設計・養生計画支援システムの構築

(2)で構築したシミュレーション技術を利用して、各種条件を変えながらシミュレーション計算を繰り返して行い、目標性能を満足させるための最適解を導出する演算モデルを構築する。

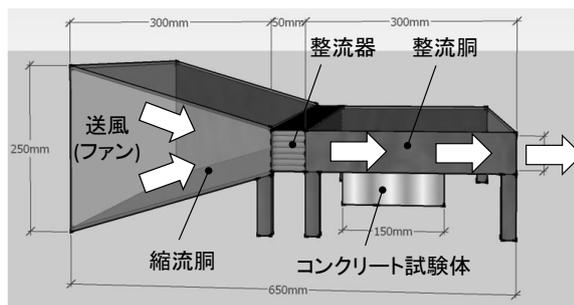


図1 小型風洞装置の概要

(4) 調査設計・養生計画支援システムの適合性の検証

ケーススタディを設定し、調査設計・養生計画支援システムによって適切な養生計画を導出する。その養生計画に従って実大コンクリート試験体を作製し、温度の経時変化およびコア供試体強度を調べる。実験結果をもとに適切な養生計画であったかどうか、支援システムの適合性を検証する。

4. 研究成果

(1) コンクリートの熱拡散および水分逸散の基礎物性値

熱拡散および水分逸散の基礎物性値について検討したが、ここでは水分逸散の基礎物性値について報告する。水セメント比 25、40 および 55% の 3 種類のコンクリート試験体を作製し、材齢 91 日まで封かん養生を行った。それぞれ試験体について、図 2 に示した小型風洞装置に設置して上面を乾燥させながら経時的に質量を測定した。小型風洞装置の送風機の回転速度を調整して整流胴内の風速を 1.0m/s とした。上面乾燥を 28 日間行った後、試験体を 105℃ で乾燥させて絶乾質量を測定し、これをもとに上面乾燥中の含水率を求めた。一方、水分拡散モデルを用い、実験と同じ条件を設定して試験体の含水率の経時変化を計算した。図 2 に含水率変化量の実測値および計算値を示す。実測値と計算値の整合より、20℃における水分拡散係数の値を  $6.0 \times 10^{-8} \text{ (m}^2/\text{s)}$  に設定した。

水分拡散の活性化エネルギーの値を設定するため、コンクリート壁試験体 (厚さ 100mm) の含水率測定実験の結果<sup>8)</sup>を利用した。水分拡散モデルを用い、実験と同じ条件を設定して壁試験体の含水率の経時変化を計算した。水分拡散の活性化エネルギーを  $0 \sim 2.0 \times 10^5 \text{ J/mol}$  の範囲において  $2.0 \times 10^3 \text{ J/mol}$  の間隔で値を変えて含水率の計算を繰り返した。図 3 に含水率の実測値および計算値を示す。計算値と実測値の偏差平方和が最小となる値は  $1.2 \times 10^4 \text{ (J/mol)}$  であった。

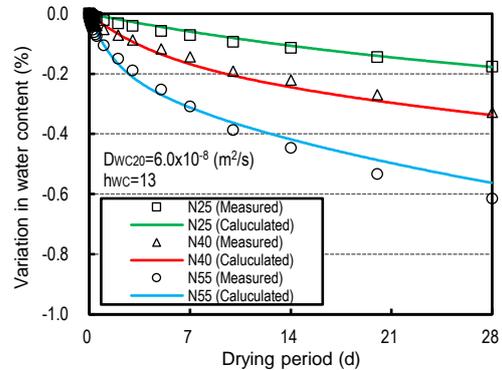


図 2 20℃における水分拡散係数

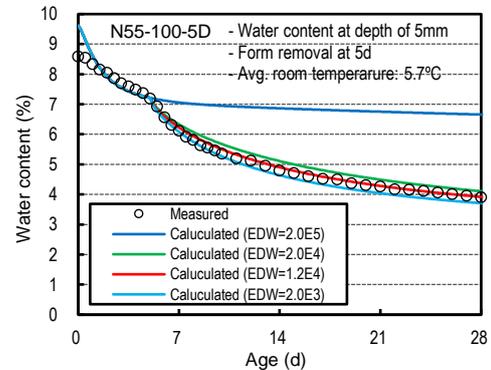


図 3 水分拡散の活性化エネルギー

(2) コンクリート部材外への熱拡散・水分逸散シミュレーション技術の構築

シミュレーション計算の流れを図 4 に示す。セメントの水和反応によって水が消費され、発熱が生じ、微細組織が形成される。これらの進行過程をセメントの水和反応・組織形成モデルにより計算する。

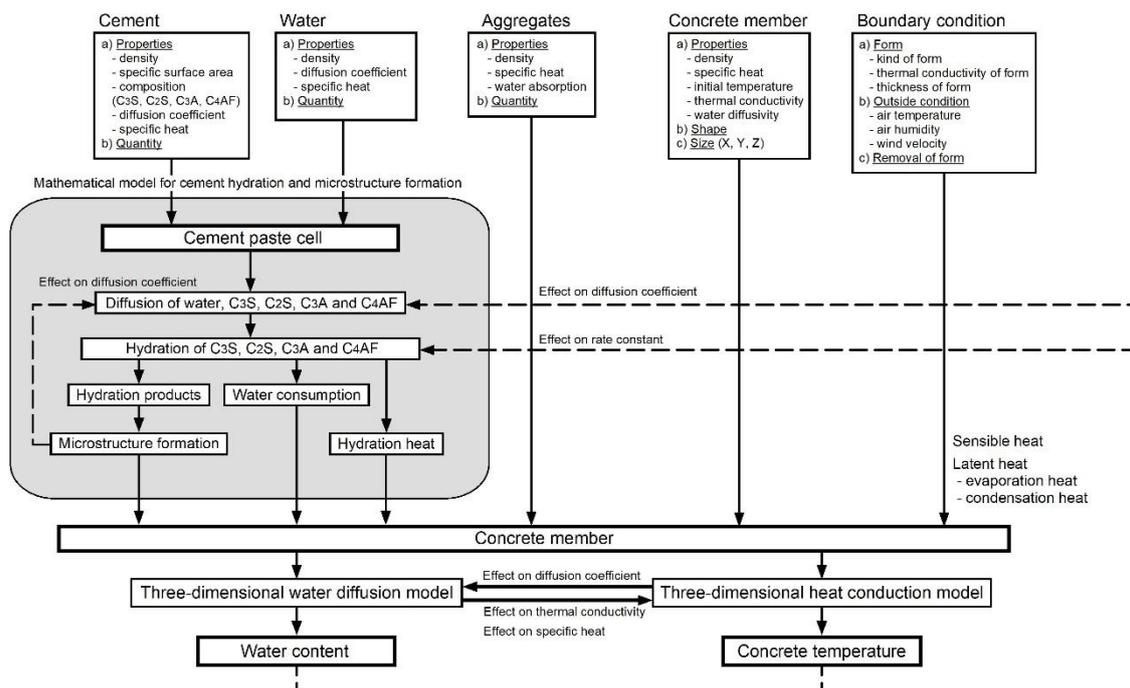


図 4 熱拡散・水分逸散シミュレーションの流れ

そして、コンクリート部材では、セメントの水和発熱および部材表面における熱伝達によって温度勾配が発生して熱が移動する。この進行過程を発熱・熱伝導モデルによってシミュレートし、部材内の温度を計算する。また、部材内の位置によって温度が異なるため、セメントの水和反応による水分消費速度も異なる。加えて、型枠が除去されると部材表面から水が逸散する。このように、部材内では水分濃度の勾配が発生して水が移動する。この進行過程を水分拡散モデルによってシミュレートし、部材内の含水率を計算する。含水率は熱伝導率および比熱に、また温度は水分拡散係数にそれぞれ影響を及ぼすため、水分拡散モデルと熱伝導モデルは互いに依存した関係にある。さらに、温度および含水率が異なるとセメントの水和反応・組織形成の進行も異なるため、部材内の位置に応じて個別に水和反応・組織形成のシミュレーションを行う必要がある。この一連の計算が 1 ステップである。算出された含水率および温度は次ステップの計算に影響を及ぼす。これらの計算ステップを繰り返し、含水率および温度の経時変化を計算する。

(1)で定めた熱拡散および水分逸散の基礎物性値を用いて、壁試験体 N48.4-WA-3D (一般強度、壁厚 600mm、材齢 3 日脱型)、柱試験体 N28.3-HA-3D (高強度、断面 1000×1000mm、材齢 3 日脱型) および N48.4-HA-3D (一般強度、断面 1000×1000mm、材齢 3 日脱型) の温度および含水率をシミュレーション計算した結果を図 5 に示す。

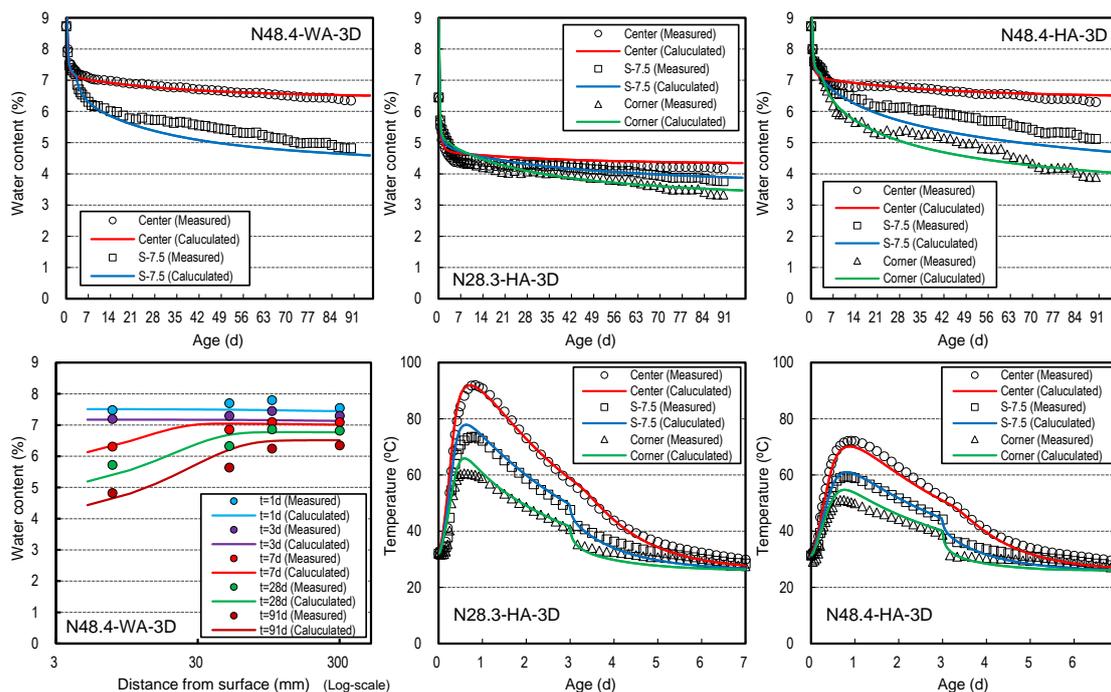


図 5 各種実大試験の温度および含水率のシミュレーション計算結果

### (3) 調査設計・養生計画支援システムの構築

(2)のシミュレーション計算技術では、既知の情報を入力することによって、温度、含水率、強度などが出力される。これを利用して、目標性能を満足するための最適な調合および養生条件を出力するシステムを構築した。図 6 に養生温度の最適解導出計算の流れを示す。まず、養生温度の初期値を設定して入力する。これをもとに温度、含水率、強度などをシミュレーション計算する。出力された結果が目標値および許容誤差を満足するかどうかの照査を行う。目標値および許容誤差を満足する場合は、入力値を最適解として導出する。目標性能を満足しない場合は、STEP1 まで戻り、新たな入力値を設定して目標値および許容誤差を満足するまで繰り返しシミュレーション計算を行い、最終的に最適解を導出する。

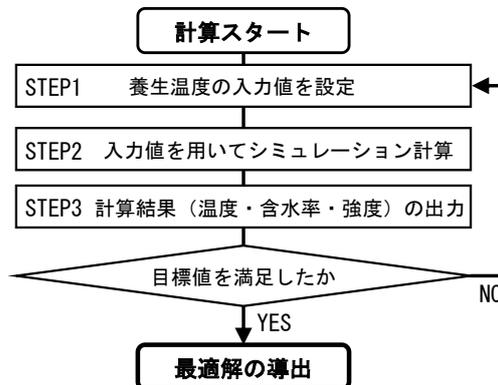


図 6 養生温度の最適解導出計算の流れ

### (4) 調査設計・養生計画支援システムの適合性の検証

スラブ部材 (2500×5000×205mm) を製造工場加熱養生するケースを取り上げた。満足させる目標強度は、脱型を行う材齢 18 時間で 15N/mm<sup>2</sup>、施工現場に出荷する材齢 7 日で 23N/mm<sup>2</sup>、さらには保証材齢である材齢 28 日で 28N/mm<sup>2</sup> を設定した。加熱養生の最高温度を調整することによって、目標強度を満足させる養生計画を導出することとした。

最適解導出計算で導出された加熱養生の最高温度は 61.2℃となった。加熱養生の最高温度を 61.2℃に設定して、強度発現のシミュレーション計算を行った結果を図 7 に示す。無駄なく、効率よく、材齢 18 時間、7 日および 28 日における目標強度を満足することがわかる。

目標強度を満たす最適解の妥当性を検証するため、写真 1 に示す模擬スラブ試験体 (1800×1800×205mm、側面に断熱材を設置) を作製し、導出した最高温度 61.2℃の条件で加熱養生を行った。そして、材齢 18 時間、7 日および 28 日にコア供試体を採取し、圧縮強度を測定した。

図 8 に温度履歴の解析値と実測値を示す。解析値とほぼ同じ実測値であり、正確に予測できていることが検証できた。図 9 に目標強度と実測強度の関係を示す。最適解に従って模擬スラブ試験体を作製した結果、材齢 18 時間、7 日および 28 日で目標強度を満足する実測値が得られた。導出した最高温度が最適であることが検証できた。

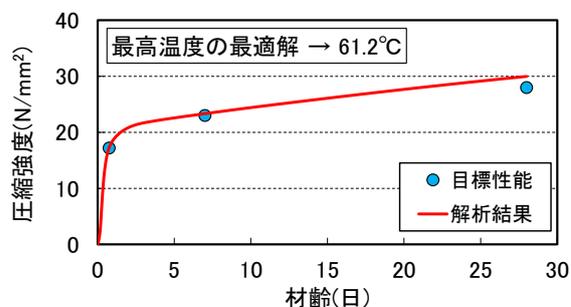


図 7 最適解の導出結果



写真 1 模擬スラブ試験体

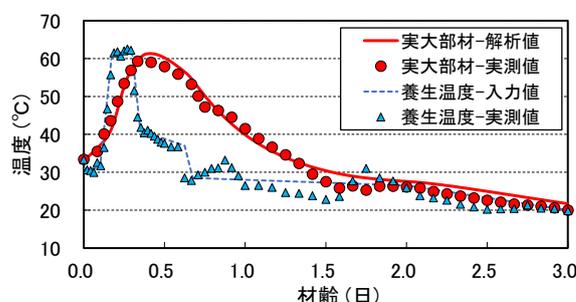


図 8 温度履歴の解析結果の検証

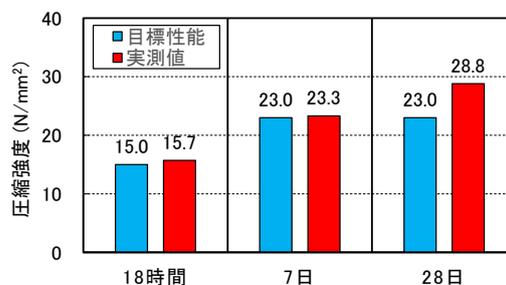


図 9 目標強度と実測強度

<引用文献>

- 1) 杉山央, 梶田佳寛: 非定常拡散理論に基づくセメントの水和反応・組織形成モデル, セメント・コンクリート論文集, 第 53 号, pp.35-42, 2000
- 2) H. Sugiyama and Y. Masuda: Mathematical model for the hydration of cement and the formation of microstructure based on the unsteady diffusion theory, International Workshop on Control of Cracking in Early-Age Concrete, pp.107-118, 2000.8
- 3) 杉山央, 梶田佳寛: セメントの水和反応・組織形成モデルを用いたコンクリートの強度発現推定, セメント・コンクリート論文集, 第 54 号, pp.646-653, 2001
- 4) 杉山央, 荒金直樹: セメントの水和反応・組織形成モデルを用いたコンクリートの発熱シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第 565 号, pp.9-16, 2003
- 5) 杉山央, 梶田佳寛: セメントの水和反応・組織形成モデルを用いたコンクリート部材の初期温度上昇予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 623 号, pp.9-17, 2008
- 6) H. Sugiyama: Prediction of Physical Properties of Concrete Using Mathematical Model for Cement Hydration and Microstructure Formation, Proceedings of International RILEM Symposium on Concrete Modelling, pp.353-360, 2008
- 7) 杉山央: セメントの水和反応・組織形成モデルを用いたプレキャストコンクリート部材の温度上昇予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 714 号, pp.1215-1225, 2015
- 8) 溝口真史, 杉山央: 厚さおよび脱型時期が異なるコンクリート壁体中の水分挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 1, pp. 445-450, 2017

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6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 5件）

1. 著者名 SUGIYAMA Hisashi	4. 巻 86
2. 論文標題 SIMULATION OF WATER DIFFUSION AND HEAT CONDUCTION IN CONCRETE MEMBER USING MATHEMATICAL MODEL FOR CEMENT HYDRATION AND MICROSTRUCTURE FORMATION	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 848 ~ 859
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.86.848	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 OMORI Eitaro, TANUMA Takehiko, SUGIYAMA Hisashi	4. 巻 28
2. 論文標題 DATA ANALYSIS ON CARBONATION PROGRESS OF PRECAST REINFORCED CONCRETE BUILDINGS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIJ Journal of Technology and Design	6. 最初と最後の頁 24 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.28.24	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 杉山央, 渡邊悟士	4. 巻 58
2. 論文標題 日本建築学会「プレキャスト複合コンクリート施工指針・同解説」改定の概要	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学	6. 最初と最後の頁 865 ~ 870
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 無
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 宮澤祐介, 杉山央	4. 巻 Vol.84, No.760
2. 論文標題 比表面積の大きな高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの長期性状	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 759-769
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.84.759	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 石川伸介, 鈴木好幸, 杉山央	4. 巻 Vol.26, No.62
2. 論文標題 高炉セメントB種にフライアッシュと膨張材を混和した高強度コンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する基礎検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 25-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.26.25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 杉山央	4. 巻 Vol.39
2. 論文標題 セメントの水和反応・組織形成モデルを用いたコンクリートの発熱・硬化シミュレーション	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 川田技報	6. 最初と最後の頁 4-9
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 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計8件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 八木澤遥, 藤本郷史, 杉山央, 鹿毛忠継, 松沢晃一, 中田清史
2. 発表標題 細骨材ふるい試験における異なるふるいシリーズ間の整合性に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福井大地, 杉山央
2. 発表標題 加熱および乾燥の複合作用を受けたコンクリートの強度性状
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 財津拓三, 杉山央
2. 発表標題 モルタルに内割り混合した微粉碎フライアッシュのボゾラン活性に及ぼす初期高温履歴の影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 財津拓三, 杉山央
2. 発表標題 モルタルに混和した微粉碎フライアッシュの充填効果に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大森栄太郎, 杉山央, 多田健次, 川越洋樹, 武田悠治
2. 発表標題 非破壊検査手法によるコンクリート接合面の欠陥探査に関する基礎研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福井大地, 杉山央
2. 発表標題 コンクリートの水分拡散と蒸発流束に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 財津拓三, 杉山央
2. 発表標題 モルタルに内割り混合した微粉碎フライアッシュのボゾラン活性に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福井大地
2. 発表標題 コンクリートの水分拡散と蒸発流束に関する研究
3. 学会等名 日本コンクリート工学会関東支部栃木地区研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 杉山央ほか7名	4. 発行年 2019年
2. 出版社 日本建築学会	5. 総ページ数 150
3. 書名 プレキャスト複合コンクリート施工指針・同解説	

〔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

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