

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：18001
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21K04355
研究課題名（和文）高流動コンクリートのレオロジー定数推定法と振動および間隙通過を考慮した充填解析
研究課題名（英文）Estimation of rheological constants of high flow concrete and filling analysis method considering vibration and gap-passability
研究代表者
山田 義智（Yamada, Yoshitomo）
琉球大学・工学部・教授
研究者番号：80220416
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、鉄筋コンクリート部材の合理的なコンクリート充填解析法の開発を目的として、フレッシュコンクリートの流動特性をレオロジー定数で表した。また、振動下や間隙通過性を考慮した流動解析手法を開発した。なお、レオロジー定数は設計時にも求められるように、コンクリートの使用材料や調合などから機械学習で求められるような開発も行った。
さらに、本研究では、機械学習およびロジスティック回帰による目視材料分離判定法も併せて開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の鉄筋コンクリート構造物の施工条件および使用材料の多様化、過密配筋化と複雑な部材断面の増加、さらには労働者人口低下による技術者不足の状況も相俟って、コンクリート工事を取り巻く環境は厳しくなっており、コンクリート工事の合理化は、建設業界において喫緊の課題である。従って、コンクリートの流動性を物理的に表し、合理的なコンクリートの充填解析法の確立を目標とした本研究は、学術的および社会的にも意義がある。

研究成果の概要（英文）：In order to develop a rational concrete filling analysis method, the flow properties of fresh concrete were expressed in terms of rheological constants. In addition, a flow analysis method was developed that takes into account the flow during vibration and gap passage. Furthermore, a visual material separation determination method based on machine learning and logistic regression was developed.

研究分野：建築材料・施工

キーワード：レオロジー MPS解析 機械学習 ロジスティック回帰 間隙通過性

1. 研究開始当初の背景

地震国である我が国の RC 構造物のコンクリート工事においては、過密な配筋である各部材に豆板などが生じないようにフレッシュコンクリートを打込み密実に充填する必要がある。コンクリート工事においては、フレッシュコンクリートの流動性の評価が重要であり、現況ではスランプ試験やスランプフロー試験などのコンシステンシー試験を用いて施工性の判断を下している。しかし、スランプ値やスランプフロー値が同じであったとしても、ポンプ圧送性、材料分離抵抗性や間隙通過性さらには仕上げの作業性は異なり、最終的な施工性の判断は技術者の経験則による部分が大きい。また、スランプ試験によるコンクリートの施工性の評価は一般的な施工条件を前提としており、特殊な条件下でコンクリートの施工性を判断するには、実施工の状況を再現したモデル試験体により施工実験などが必要となり、過大なコストや時間を要する。さらに、近年は高密度な配筋の構造物の増加や、良質な骨材の不足、各種混和材料の使用頻度が増加している背景に加え、経験豊富な技術者が不足する傾向にあるため、従来型の経験則にもとづくコンクリートの施工性評価は難しい局面も多くなると危惧される。

これらのコンクリート施工の問題を解決するために、次のような課題がある。まず、従来は定性的な評価であったコンクリートの流動性を、レオロジーに基づいて定量的に評価すること、さらに、そのレオロジー定数を用いて、RC 部材・部位へのフレッシュコンクリートの打込み、充填をシミュレーションによって予測する技術の開発。また、コンクリートの打込みにバイブレーターを使用する際の、コンクリートの流動性の変化を定量的に捉える技術の開発である。

2. 研究の目的

本研究では、フレッシュコンクリートの流動特性をレオロジーに基づき理解して、上記に記した流動解析手法の課題を解決することを目的とした。そのために、本研究では以下の項目に着目して研究を行った。

- (1) 高流動コンクリートのレオロジー定数をスランプフロー試験より推定する方法の開発
- (2) 振動下における高流動コンクリートの間隙通過性の評価
- (3) 機械学習による高流動コンクリートの流動性予測法とレオロジー定数予測法の開発
- (4) 機械学習による目視材料分離判定手法の開発
- (5) 間隙通過時のレオロジー定数変化モデルによる MPS 流動解析法の開発

3. 研究の方法

本研究では、研究目的を達成するために、上記 ~ の各項目に対し、次のような検討や開発を行った。

- (1) 球引き上げ試験によりモルタルのレオロジー定数測定を行うと同時に、同じモルタル試料を用いてスランプフロー試験を行い、スランプフロー値から降伏値、400mmフロー到達時間より塑性粘度を推定する式を提案した。ここで、レオロジー試験はモルタルで行っているが、コンクリートもモルタルとおなじ連続体であると仮定すれば、推定式は有効であると考えられる。
- (2) 振動下における高流動コンクリートの間隙通過性について実験的に検証するために、加振変形試験機を用いて、無振動下および振動下においてJリングフロー試験を行って、PJ値やブロッキング値（B値）の関係を検討した。
- (3) 使用材料と調合およびモルタルのフロー試験結果より、高流動コンクリートの流動性（スランプフロー値と400mmフロー到達時間）およびレオロジー定数の機械学習による予測手法の開発を行った。また、予測に際して、どの特徴量が予測に影響しているのかを、特徴量のPermutation Feature Importance (PFI)やShapley Additive Explanations (SHAP)およびPartial Dependence Plot (PDP)を用いて定量的に考察を行った。
- (4) 既往の実験結果をもとに、機械学習による目視材料分離判定手法を開発した。また、機械学習で重要であった特徴量を用いて、確率的な手法であるロジスティック回帰による目視材料分離判定手法も開発した。
- (5) 間隙通過時に粗骨材が滞留することを考慮して、レオロジー定数が変化するモデルを組み込んだMPS解析手法を開発した。

4. 研究成果

ここでは、上述の2章の研究の目的および3章の研究の方法に記載した項目毎に研究成果を纏める。

(1) 高流動コンクリートのレオロジー定数をスランプフロー試験より推定する方法の開発
 コンクリートもモルタルと同じビンガム流体の連続体であると見なし、コンクリートのフロー試験で得られる流動特性は同じレオロジー定数を有するモルタルと同様であると考え、モルタルで求められた図1に示す指数関数式でコンクリートの降伏値を決定し、塑性粘度もモルタルと同様に400 mmあるいは300 mmフロー到達時間で決定した。これらのレオロジー定数を用いてコンクリートのフロー試験をMPS解析で再現したところ、図2に示すように解析結果は実測結果を表し、求めたレオロジー定数の有効性が確認された。

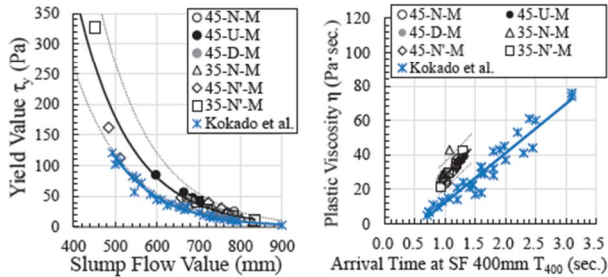


図1 スランプフローおよび400mmフロー到達時間とレオロジー定数（降伏値と塑性粘度）の関係

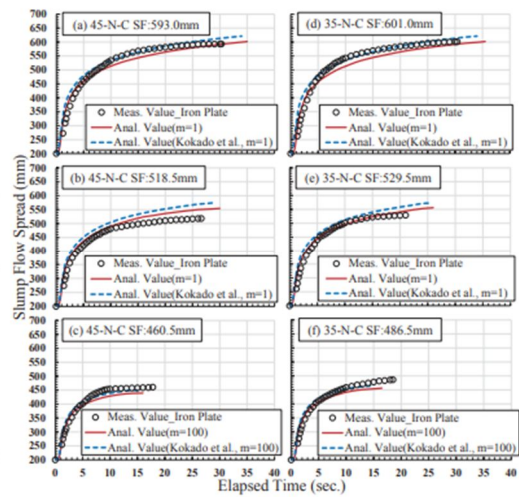


図2 スランプフロー試験のMPS法による再現結果

(2) 振動下における高流動コンクリートのレオロジー定数の推定

写真1に示す加振変形試験機を用いて、無振動下および振動下においてJリングフロー試験を行って、PJ値やブロッキング値（B値）の関係を検討したところ、無振動下ではPJ値とB値の相関が高く、互いに関連性のある間隙通過性の評価指標であることが分かった。また、PJ値にはスランプフロー値即ち降伏値の影響が大きく、B値は単位セメント量などの塑性粘度に関わる項目の影響が示唆された。一方、振動下においては、加振時間の増加とともにPJ値は低下するものの、B値は逆に増加する無振動下とは異なり互いに関連性が認められなかった。

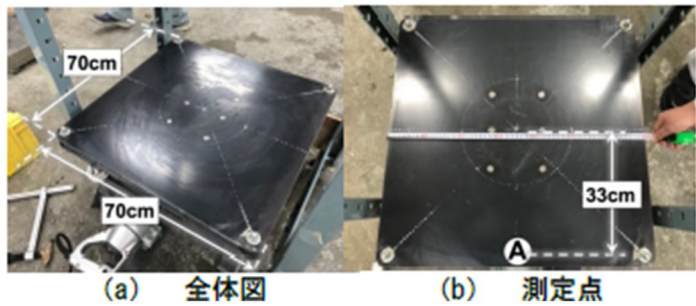


写真1 加振変形試験機の概要

(3) 機械学習による高流動コンクリートの流動性予測法とレオロジー定数予測法の開発

高流動コンクリートの流動性の予測を目的として、簡便なモルタルフロー試験で得られるモルタルの流動性や使用材料・配調合の情報を特徴量（説明変数：25項目）として、機械学習による予測手法を提案し、得られた予測値の有効性を検証した。また、各特徴量が高流動コンクリートの流動性へ及ぼす影響について検証した結果、特徴量を4項目まで削減できた（図3参照）。そして、この4項目の特徴量がコンクリートの流動性に与える影響を定量的に評価した。

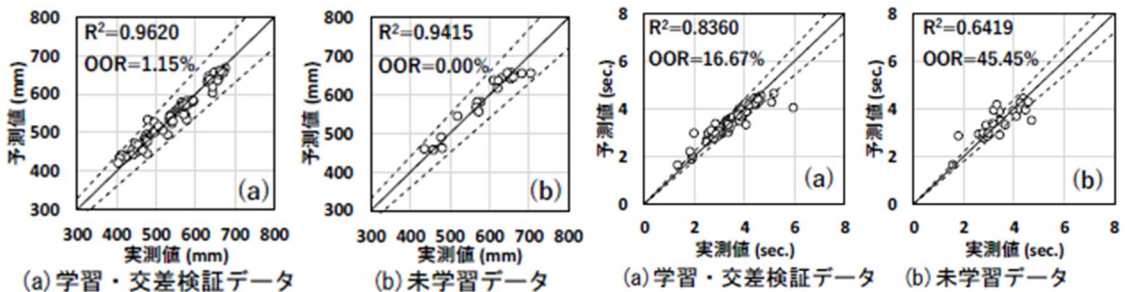


図3 4項目の特徴量によるスランプフロー値と400mmフロー到達時間の予測

高流動コンクリートにおける新たなレオロジー定数予測手法として、コンクリート中の流動に寄与しないモルタルを見かけ上粗骨材の一部として扱う「骨材化モデル」を提案し、それを適用した「骨材化モデル粘度式」によるコンクリートのレオロジー定数予測法の検討を行った。なお、骨材化モデル粘度式の未知数となる骨材化係数は、コンクリートの使用材料の各物性値や調合、モルタルのレオロジー定数およびモルタルのせん断ひずみ速度などを説明変数として機械学習により求めた。その結果、骨材化係数は非常に高い精度で予測でき、骨材化モデル粘度式によるコンクリートのレオロジー定数についても高い精度で予測することができた（図4参照）。

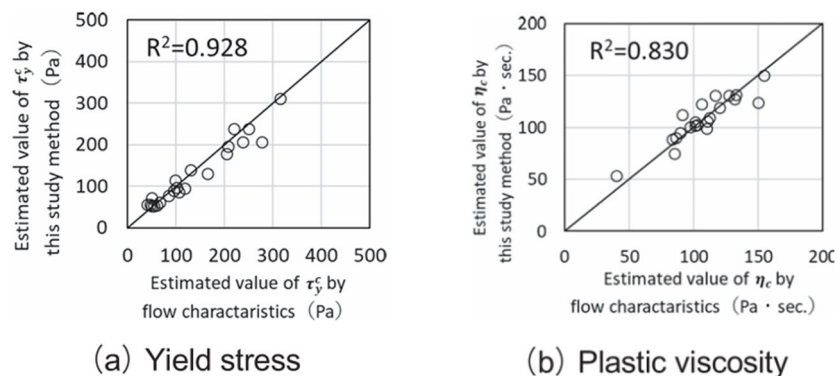


図4 機械学習によるレオロジー定数の予測

(4) 機械学習による目視材料分離判定手法の開発

本研究では、目視で行われる高流動コンクリートの材料分離判定を、コンクリートの使用材料や調合を特徴量（説明変数）として、機械学習を用いて予測することを試みた。ここでは、アンサンブル学習の一種である Random Forest (RF) および LightGBM (LGBM) を機械学習器として用いた。両学習器の精度を比較すると、わずかに LightGBM による結果が優れていた。

さらに、これら機械学習で得られた重要度の高い特徴量を用いて、統計学および機械学習の一種である Logistic Regression (LR) による分析を行った。この Logistic Regression の学習結果より、目視材料分離判定の確率的な予測式を提案するとともに、提案する予測式による目視材料分離判定の予測性能を検討した。その結果、Logistic Regression による予測結果は、機械学習による予測精度に劣るものの、ある程度の精度は示した（表1参照）。

ブラックボックスとなる機械学習に対して、Logistic Regression による判定は、比較的簡便な数式で目視材料分離判定が確率的に行えるので、コンクリートの調合設計において有用である。

表1 LR による混同行列と各評価指標

Cross validation data(Data: 530)				Non learning data(Data: 163)			
LR (Threshold: 0.5)		prediction class		LR (Threshold: 0.5)		prediction class	
		segregation	non segregation			segregation	non segregation
true class	segregation	197	68	true class	segregation	42	12
	non segregation	82	183		non segregation	47	62
evaluation index				evaluation index			
accuracy	0.72			accuracy	0.64		
precision	0.73			precision	0.84		
recall	0.69			recall	0.57		
specificity	0.74			specificity	0.78		
FPR	0.26			FPR	0.22		
F1 score	0.71			F1 score	0.68		
MCC	0.43			MCC	0.33		

(5) 間隙通過時のレオロジー定数変化モデルによる MPS 流動解析法の開発

本研究では、コンクリートが間隙を通過する前後で粗骨材の偏在を考慮してレオロジー定数を変化させる間隙通過モデルを提案し、この間隙通過モデルを適用した MPS 解析を用いて各調査の高流動コンクリートの Jリングフロー試験を再現することで、提案モデルの有効性を確認した。図 5 には Jリングフロー試験で得られたフローの広がり(図中赤丸記)と上記のモデルを考慮した MPS 解析結果 (実線) およびモデルを考慮しない MPS 解析結果 (破線) を示す。

スランプフロー値が 600 mmを超える試料(図の(g) ~ (l))に関しては粗骨材の滞留を表す係数が 0 もしくは 0 に近い値であったため、モデルを考慮しない MPS 解析結果と実測結果がよく一致したが、スランプフロー値が 600mm を超えない試料(図の(a) ~ (f))においては、モデルを考慮した MPS 解析結果が実測と一致した結果になった。

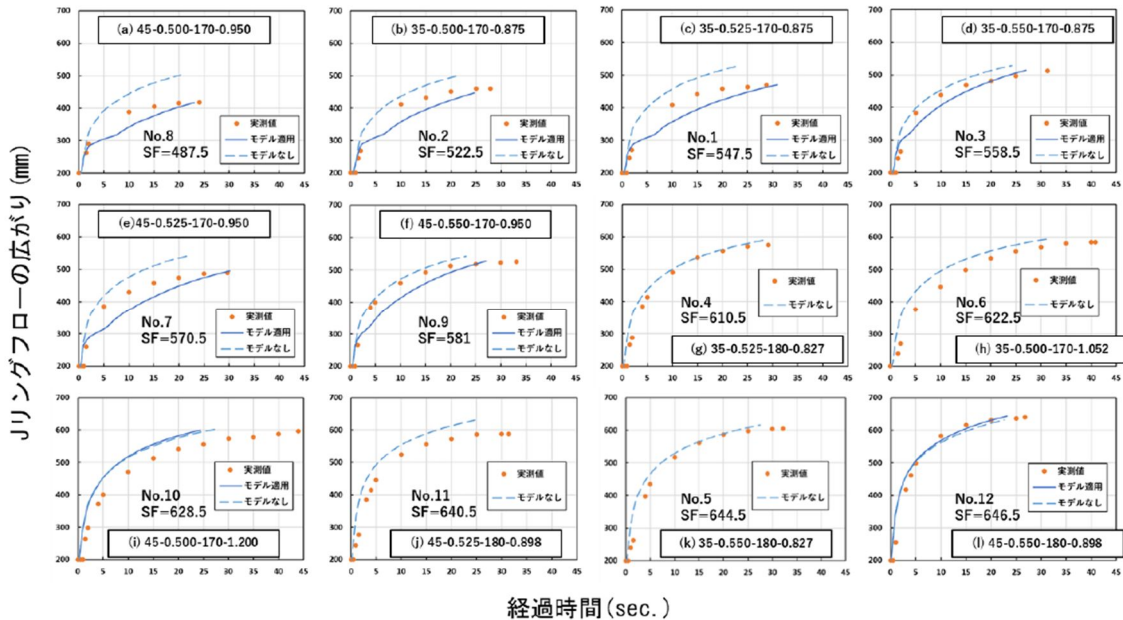


図 5 MPS 解析による Jリングフロー試験の再現結果

本研究では、複数の決定木を組み合わせて学習モデルの構築を行う Random Forest (以後、R F) により $\Delta\phi$ の予測を行い、Permutation Feature Importance (以後、PFI を用いて予測において重要な特徴量について考察を行った。学習に使用する特徴量については使用材料の物性値、調合情報など 20 項目で行った。

図 6(a)に $\Delta\phi$ の予測結果を示し、同図(b)に $\Delta\phi$ 予測における PFI 上位 8 項目を示す。同図(a)より、決定係数は 0.88 と高い精度で予測をすることが出来た。同図(b)より、 $\Delta\phi$ の予測において単位水量と VSP の添加率が突出して重要度が高いことが分かった。また、単位水量と VSP が高い調合では $\Delta\phi$ を低く予測しており、流動性が高い調合では粗骨材滞留による $\Delta\phi$ の影響が小さいことが分かった。

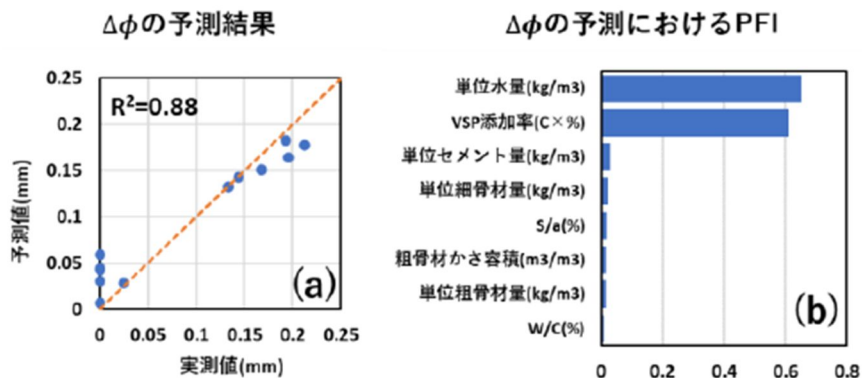


図 6 RF による $\Delta\phi$ の予測結果および PFI

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 4件）

1. 著者名 東舟道 裕亮, 山田 義智, 波平 康太, 平野 修也	4. 巻 45
2. 論文標題 モルタルの流動性や使用材料・配(調)合を用いた機械学習による高流動コンクリートの流動性予測と特徴量の影響分析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 784-789
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 平野修也, 山田義智, 西祐宜, 東舟道裕亮	4. 巻 87
2. 論文標題 締固めを要する高流動コンクリートのレオロジー定数推定とMPS解析によるその有効性の検証	5. 発行年 2022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 393-404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.87.393	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 比嘉龍一, 山田義智, 清水寛太, 崎原康平	4. 巻 76
2. 論文標題 機械学習による高流動コンクリートの目視材料分離判定の試み	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 410-418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14250/cement.76.410	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 東舟道裕亮, 山田義智, 平野修也	4. 巻 77
2. 論文標題 機械学習を援用した骨材化モデル粘度式による高流動コンクリートのレオロジー定数予測に関する基礎的研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 394-402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14250/cement.77.394	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 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kouta Namihira, Retu Miura, Yoshitomo Yamada
2. 発表標題 Prediction of Flowability of High Flow Concrete by Machine Learning Using Mortar Flowability Materials Used and Mix Proportions Information as Features
3. 学会等名 Proceedings of 16th International Symposium. Between Korea, Japan and China on performance Improvement of Concrete for Long Life Span Structure (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Retu Miura, Kouta Namihira, Yoshitomo Yamada
2. 発表標題 Machine Learning-Based Prediction of Fluidity of High-Flow Concrete
3. 学会等名 Proceedings of 16th International Symposium. Between Korea, Japan and China on performance Improvement of Concrete for Long Life Span Structure (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 波平康太, 三浦烈, 山田義智
2. 発表標題 間隙通過モデルを適用したMPS解析によるJリングフロー試験の再現
3. 学会等名 第63回 日本建築学会九州支部研究報告(鹿児島)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 三浦烈, 波平康太, 山田義智
2. 発表標題 ロジスティック回帰分析を用いた高流動コンクリートの目視材料分離判定予測の検討
3. 学会等名 第63回 日本建築学会九州支部研究報告(鹿児島)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 波平康太, 三浦烈, 平野修也, 山田義智
2. 発表標題 モルタルの流動性および使用材料・調合を特徴量とした機械学習による高流動コンクリートの流動性予測
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三浦烈, 波平康太, 東舟道裕亮, 山田義智
2. 発表標題 機械学習による高流動コンクリートの流動性予測
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kouta Namihira, Retu Miura, Yoshitomo Yamada
2. 発表標題 Prediction of Flowability of High Flow Concrete by Machine Learning Using Mortar Flowability Materials Used and Mix Proportions Information as Features
3. 学会等名 Proceedings of 16th International Symposium. Between Korea, Japan and China on performance Improvement of Concrete for Long Life Span Structure (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Retu Miura, Kouta Namihira, Yoshitomo Yamada
2. 発表標題 Machine Learning-Based Prediction of Fluidity of High-Flow Concrete
3. 学会等名 Proceedings of 16th International Symposium. Between Korea, Japan and China on performance Improvement of Concrete for Long Life Span Structure (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 波平康太, 三浦烈, 山田義智
2. 発表標題 間隙通過モデルを適用したMPS解析によるJリングフロー試験の再現
3. 学会等名 第63回 日本建築学会九州支部研究報告(鹿児島)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 三浦烈, 波平康太, 山田義智
2. 発表標題 ロジスティック回帰分析を用いた高流動コンクリートの目視材料分離判定予測の検討
3. 学会等名 第63回 日本建築学会九州支部研究報告(鹿児島)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 波平康太, 比嘉龍一, 山田義智, 平野修也
2. 発表標題 モルタルの流動性や使用材料および調合情報を特徴量とした機械学習による高流動コンクリートの流動性予測
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告第 62 号
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 比嘉龍一, 三浦烈, 波平康太, 山田義智
2. 発表標題 機械学習を用いた高流動コンクリートの目視材料分離判定に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告第 62 号
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三浦烈, 比嘉龍一, 東舟道裕亮, 山田義智
2. 発表標題 機械学習を用いた高流動コンクリートの流動性予測に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告第 62 号
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三浦烈, 波平康太, 東舟道裕亮, 山田義智
2. 発表標題 機械学習による高流動コンクリートの流動性予測
3. 学会等名 日本建築学会2023年度大会学術講演梗概集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 波平康太, 三浦烈, 山田義智, 平野修也
2. 発表標題 モルタルの流動性および使用材料・調合を特徴量とした機械学習による高流動コンクリートの流動性予測
3. 学会等名 日本建築学会2023年度大会学術講演梗概集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水寛太, 山田義智, 平野修也
2. 発表標題 振動下における高流動コンクリートのレオロジー定数変化に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水寛太, 比嘉龍一, 山田義智, 平野修也
2. 発表標題 振動下における高流動コンクリートの間隙通過に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2021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

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