

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：18001  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2017～2019  
課題番号：17H03344  
研究課題名（和文）合理的なコンクリート施工と施工後の表層品質予測を可能にする充填解析法の開発  
  
研究課題名（英文）Development of filling analysis method that enables rational concrete construction and surface quality prediction  
  
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） 11,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、合理的なコンクリート充填解析法の開発を目的として、フレッシュ性状の予測、レオロジー定数の推定方法、さらには目視材料分離判定の推定方法について検討した。  
その結果、機械学習によるフレッシュ性状予測が有効であること、スランプフロー試験よりレオロジー定数が推定可能であること、また、ロジステック回帰分析により目視材料分離判定の推定が可能であることを確認するとともに、振動下のレオロジー定数の変化を求めることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
近年、RC構造物の施工条件や使用材料の多様化、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。そのような社会背景にあって、合理的なコンクリートの充填解析法の確立に向けた研究は、学術的には社会的にも意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, for the purpose of developing a rational concrete filling analysis method, we investigated the prediction of freshness properties, the estimation method of rheological constants, and the estimation method of visual material separation judgment.  
As a result of the examination, the prediction of fresh properties by machine learning is effective, the rheology constant is possible from the slump flow test, the visual material separation judgment can be estimated by the logistic regression analysis. Furthermore, the change in rheological constant under vibration could be examined.

研究分野：建築材料学

キーワード：フレッシュコンクリート レオロジー 流動解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

コンクリートは、流動性を有するフレッシュ状態の時期に型枠内に打込み・充填することによって、設計者の意図する様々な造形の構造物を継ぎ目のない一体なものとして作ることが出来る。しかし、その打込み・充填の仕上がり具合の良否は、コンクリートが不透明であることや、型枠で囲まれた密閉空間に打込まれることにより目視で確認することが出来ず、ワーカビリティの状態やバイブレータの挿入間隔、締固め時間等を判断材料として、技術者や職人らの経験に依存している。しかし、近年は、施工条件と使用材料の多様化や過密配筋、複雑な部材断面、さらには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いる。

上記のような状況より、コンクリート工事の最適化の観点から、高流動コンクリートの利用促進や、ICTの有効活用による現場施工の効率化が求められている。

高流動コンクリートの利用促進については、JIS A 5308:2019 (レディーミクストコンクリート)が改正され、呼び強度 27 以上の普通コンクリートを対象に、荷卸し地点のスランプフロー値によってレディーミクストコンクリートの流動性を管理することが可能となっている。

現場施工の効率化には、従来ならば不可視部位や高密度配筋部位に対しては、実物大の型枠や配筋を試作して充填性を確認する施工実験を行う場合があったが、この代替として BIM と連携した流動解析によるフレッシュコンクリート充填予測の可能性が期待されている。

しかし、現状においては、高流動コンクリートの流動性を表すレオロジー定数を求めることや、材料分離抵抗性の判断、振動下におけるレオロジー定数の変化などについては知見が少なく、合理的な流動解析が行えていない。

### 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) 機械学習による高流動コンクリートのフレッシュ性状予測
- (2) 高流動コンクリートのレオロジー定数(降伏値と塑性粘度)の推定とその確からしさの確認
- (3) 高流動コンクリートのレオロジー定数を用いた目視材料分離判定結果の推定
- (4) 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変化

### 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(1)～(4)の各項目に対し、次のような検討や開発を行った。

- (1) 機械学習手法として、ニューラルネットワーク、ランダムフォレスト、LightGBM を各手法により、過去の高流動コンクリートのフレッシュ性状に関する研究データを用いて、各種材料情報、調合情報、練り混ぜ情報、環境情報などの説明変数(特徴量)より、フロー値、500 mmフロー到達時間、フロー停止時間、空気量の目的変数を学習し予測するシステムを構築した。
- (2) 既往の研究成果(小門ら<sup>1)</sup>)を用いて、スランプフロー試験結果より高流動コンクリートのレオロジー定数を予測し、粒子法の一つである MPS 法を用いてそのレオロジー定数の確からしさを確認した。
- (3) 高流動コンクリートのレオロジー定数を用いてロジステック回帰分析により目視材料分離判定結果を予測する手法を開発した。
- (4) 振動試験台を用いて、加える振動加速度を変えてスランプフローの広がりの変化よりレオロジー定数の変化を検討した。

### 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) 機械学習による高流動コンクリートのフレッシュ性状予測

機械学習手法として、ニューラルネットワーク、ランダムフォレスト、LightGBM を用いて検討したが、ランダムフォレストによる予測精度が最も高かった。そこで、ここではランダムフォレストによる研究成果について述べる。

高流動コンクリートのスランプフロー試験によるフレッシュ性状データ 842 組を収集し、その内からランダムに取り上げた 600 組をデータを用いて K 分割交差検証法によりランダムフォレストによる学習を行い、残り 242 組を未学習データとして学習結果の検証用に用いた。当初の特徴量(説明変数)は 60 項目を使用した。学習の結果、重要な特徴量が 10 項目に絞れたので、2 回目の学習においては、特徴量(説明変数)を 10 項目とした学習を行った。図-1 にその学習モデルによる未学習データのフレッシュ性状(スランプフロー値、500 mmフロー到達時間、

フロー停止時間、空気量)の推定結果を示す。

図-1より、ランダムフォレストによるフレッシュ性状の予測結果は、実測結果を比較的良好に示していることが分かる。

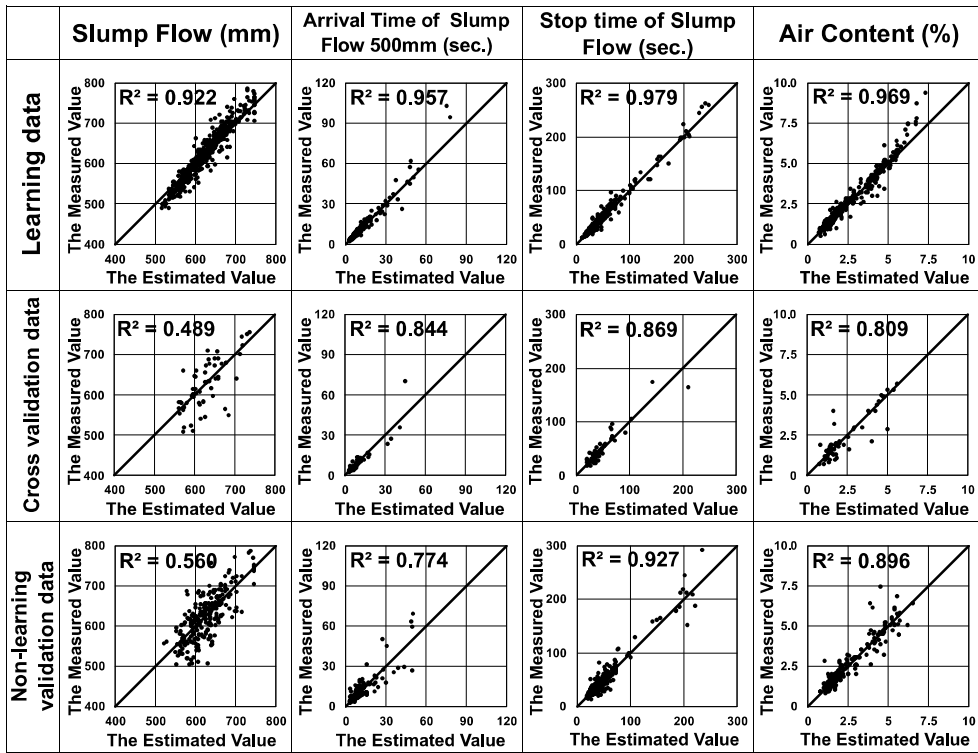


図-1 ランダムフォレストによるフレッシュ性状の予測結果

(2) 高流動コンクリートのレオロジー定数の推定とその確からしさの確認

ここでは、既往の研究成果(小門ら<sup>1)</sup>)を用いて、スランプフロー試験結果より高流動コンクリートのレオロジー定数を予測し、粒子法的一种であるMPS法を用いてそのレオロジー定数の確からしさを確認した。なお、数値解析用にはビンガムモデルを近似するRegularized Binghamモデルを用いた。図-2にRegularized Binghamモデルの概要を記す。

ところで、JIS A 5308:2019(レディミクストコンクリート)が改正され、呼び強度27以上の普通コンクリートを対象に、荷卸し地点のスランプフローにてレディミクストコンクリートの流動性を管理することが可能となった。

そこで、そのような高流動コンクリートのスランプフローをMPS法で再現することを試みた。

図-3にはMPS法によるスランプフロー試験のモデル概要を示す。なお、Regularized Binghamモデルの応力成長指数 $m$ を1として、低せん断ひずみ速度領域において軟化する非Bingham modelとしている。

図-4にはスランプフロー値が450mm~700mm程度となる各試料(W2,W3,W14,W16試料)のフロー広がり曲線の実測値とMPS解析結果を比較して示している。同図より、MPS法は実測結果を概ね表しているが、スランプフローの小さいW3試料では、MPS解

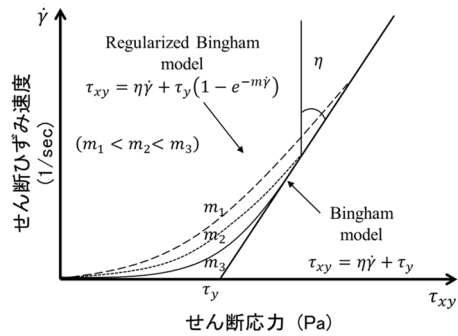


図-2 Regularized Binghamモデル

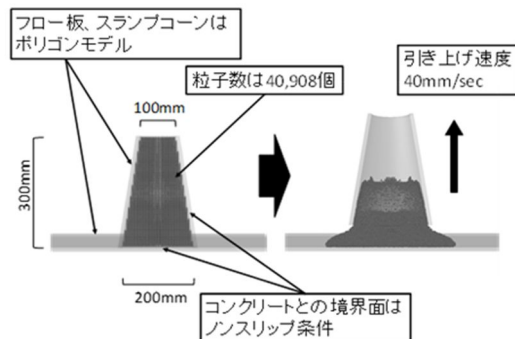


図-3 スランプフロー試験の解析モデル概要

析と実測のスランプフローの差が若干大きい傾向が認められた。

図-5 には各試料の各到達時間のフロー断面の流速分布図を示す。同図より、流動初期のコンクリートの流れにはフローコーンの遮蔽の影響があることが認められる。

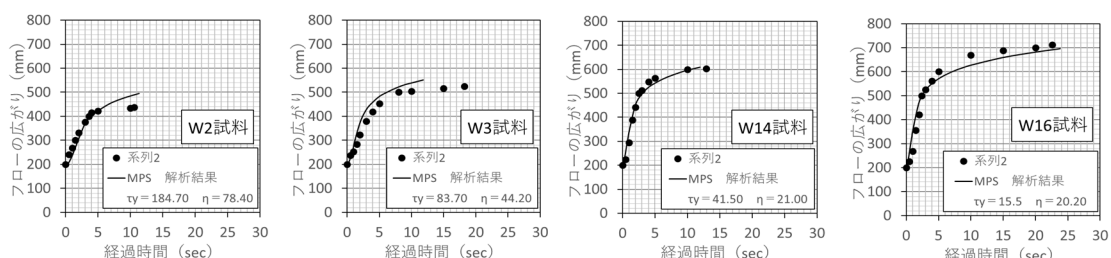


図-4 MPS 法によるフローの広がり曲線と実測結果の比較

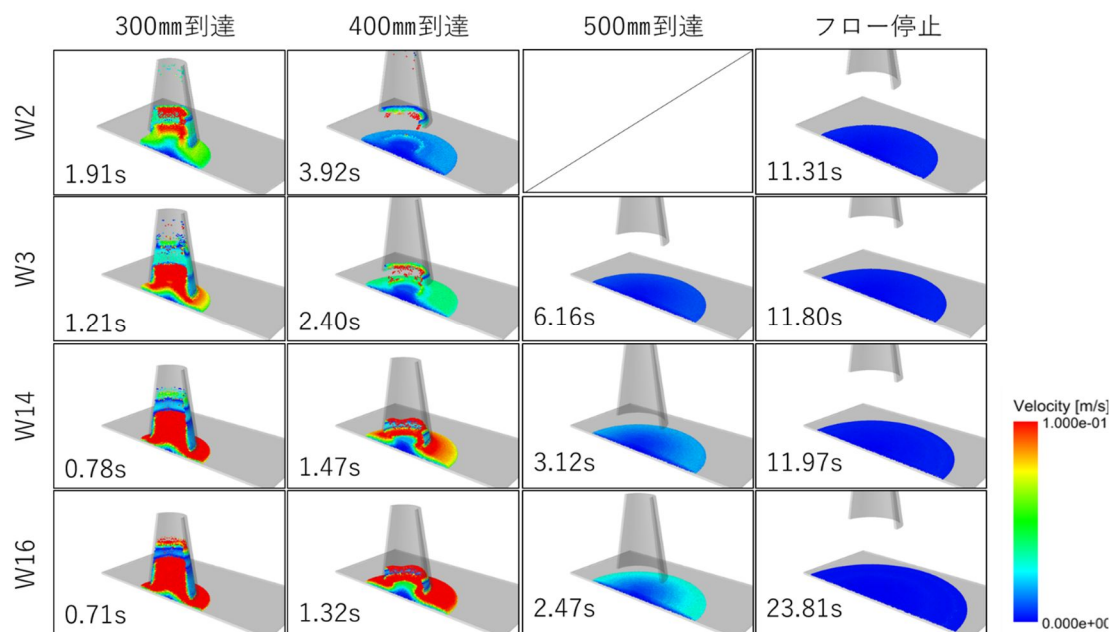


図-5 各試料の各到達時間におけるフロー断面の流速分布スナップショット

(3)高流動コンクリートのレオロジー定数を用いた目視材料分離判定結果の推定

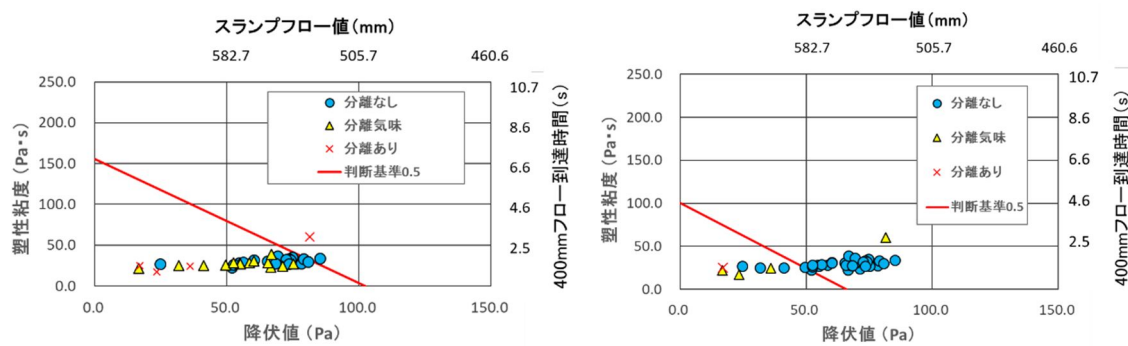
フレッシュ性状の一つとして目視材料分離の判定も重要である。表-1 は、上記の推定したレオロジー定数と機械学習の一種ともされるロジステック回帰により目視材料分離判定した際の回帰分析表である。ロジステック回帰に使用したデータは、既往のフレッシュ性状試験で得られたものである。ここでは、試験結果 265 ケースが学習データとして使用された。

表-1 ロジステック回帰分析表

判断基準	変数名	AIC	寄与率	回帰係数	p値	判定	調整オッズ比	99%信頼区画		判別の確率
								下限	上限	
判断基準0.5	定数	263.2	0.304	3.0791	0.000	[**]	-	-	-	74.0%
	推定降伏値			-0.0468	0.000	[**]	0.954	0.937	0.972	
	推定塑性粘度			-0.0308	0.005	[**]	0.970	0.943	0.997	
	観察状況			1.7099	0.000	[**]	5.528	2.288	13.36	

図-6 は、ロジスティック回帰による目視材料分離判定の検証を行った結果である。図中の記号は実験参加者の判定結果であり、○印は分離なし、△は分離ぎみ、×は分離ありである。同図の(a)は練り舟による目視材料分離判定を表し、(b)はフロー試験後の目視材料分離判定を表している。ここでは、目視材料分離判断の確率基準を0.5に設定しており、図中の実線が判定基準となる。この実線を境に右上が目視材料分離なし、左下が目視材料分離ありとなる。従って、降伏

値が小さく（フロー値が大きく）、塑性粘度が小さい（400 mmフロー到達時間が短い）と目視材料分離の確率が高まることが分かる。また、図-6 より、練り舟で判定した方が、フロー試験後に判定する場合より材料分離と判定される確率が高まることが分かる。なお、ロジステック回帰で分離と判定された範囲には実測結果では分離していないと判断される結果も多いため、今後はさらにデータ数を増やして検証することで、その信頼性を高める必要がある。

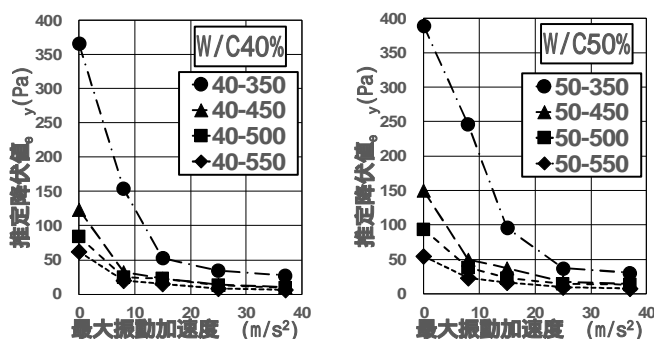


(a) 練り舟観察による目視材料分離判定 (b) フロー試験後の目視材料分離判定  
 図-6 ロジステック回帰による目視材料分離判定結果と実測結果との比較

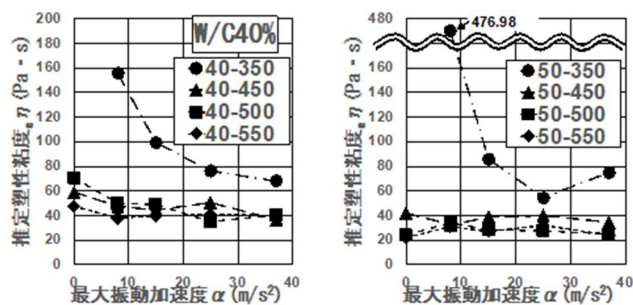
(4) 振動下における高流動コンクリートのレオロジー定数および間隙通過性の変化

高流動コンクリートを対象とし、振動下におけるレオロジー定数の変化について検討を行った。その結果、図-7 に示す様に最大振動加速度の増加に伴い降伏値は減少傾向を示すが、塑性粘度はスランプフロー値が 450mm 以上の試料では塑性粘度の変化は小さかった。ここで、レオロジー定数は、小門らの成果<sup>1)</sup>を利用している。

なお、今回の実験ではスランプフローが停止するまで振動を加える実験としたが、実際の打込みにおいては振動負荷時間も異なるため、最大振動加速度によりレオロジー定数の変化を整理するのではなく、振動エネルギーで整理する必要がある、今後の課題である。



(a) 最大振動加速度と推定降伏値の関係



(b) 最大振動加速度と推定塑性粘度の関係

図-7 最大加速度とレオロジー定数の関係

参考文献：

- 1) 小門武, 宮川豊章: スランプフロー試験による高流動コンクリートのレオロジー定数評価法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.45, No.634, pp.113-129, 1999. 11

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 YAMADA Yoshitomo、HIGASHIFUNAMICHI Yusuke、UEHARA Yoshiki、SAKIHARA Kohei	4. 巻 84
2. 論文標題 RHEOLOGICAL CONSTANTS MEASUREMENT OF CEMENT PASTE AND CEMENT PASTE FLOW ANALYSIS BY MARKER PARTICLE VISCO-PLASTIC FINITE ELEMENT METHOD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 139 ~ 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.84.139	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 崎原康平, 山田義智, 浦野真次, 平野修也	4. 巻 41
2. 論文標題 MPS法によるセメントペーストの3次元流動解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会年次論文集	6. 最初と最後の頁 1067-1072
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 古賀志門, 山田義智, 平野修也, 東舟道裕亮	4. 巻 41
2. 論文標題 ニューラルネットワークを用いた高流動コンクリートのフレッシュ性状とレオロジー定数の推定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会年次論文集	6. 最初と最後の頁 1037-1042
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 東舟道 裕亮, 山田義智	4. 巻 86
2. 論文標題 フロー試験によるセメントペーストのレオロジー定数推定法に関する研究	5. 発行年 2021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 -
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 清水寛太, 山田義智, 古賀志門, 平野修也	4. 巻 74
2. 論文標題 ランダムフォレストを用いた高流動コンクリートのフレッシュ性状推定の試み	5. 発行年 2021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 265-272
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 HIRANO Syuya, YAMADA Yoshitomo, NISHI Hironobu, SAKIHARA Kohei	4. 巻 85
2. 論文標題 RHEOLOGICAL CONSTANTS MEASUREMENT OF MORTAR THAT FLUIDITY IS EVALUATED BY SLUMP AND ANALYSIS OF SLUMP AND SLUMP FLOW OF MORTAR BY MPS METHOD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 993 ~ 1003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.85.993	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 Yusuke HIGASHIFUNAMICHI, Yoshitomo YAMADA, Yoshiki UEHARA and Kohei SAKIHARA	4. 巻 6
2. 論文標題 Flow Analysis for the L-flow Test of High- Fluidity Concrete by the Moving Particle SemiImplicit Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 6th International Conference on Construction Materials	6. 最初と最後の頁 368 - 1375
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 清水寛太, 山田義智, 平野修也, 崎原康平	4. 巻 42
2. 論文標題 振動下における低粉体系高流動コンクリートの推定レオロジー定数と間隙通過性および材料分離抵抗性に関する実験的研究	5. 発行年 2020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 1007 - 1012
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 YAMADA Yoshitomo、UEHARA Yoshiki、SAKIHARA Kohei、URANO Shinji	4. 巻 85
2. 論文標題 SLUMP FLOW SIMULATION OF HIGH FLUIDITY CONCRETE BY MPS METHOD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 663～672
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.85.663	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16件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 古賀志門, 山田義智, 東舟道裕亮, 平野修也, 崎原康平
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いたフレッシュコンクリートの流動性評価とレオロジー定数推定
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田義智, 東舟道裕亮, 比嘉善希, 平野修也
2. 発表標題 MPS法による高流動コンクリートのフローシミュレーション
3. 学会等名 第73回セメント技術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三島直生, 鹿毛忠継, 山田義智, 崎原康平
2. 発表標題 AIによる高流動コンクリートの材料分離判定システムに開発に関する基礎研究
3. 学会等名 第73回セメント技術大会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 比嘉善希, 山田義智, 東舟道裕亮, 崎原康平
2. 発表標題 ペーストフロー試験によるレオロジー定数推定方法の検討
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 東舟道裕亮, 山田義智, 比嘉善希, 崎原康平
2. 発表標題 粘塑性有限要素法を利用したフレッシュコンクリートのレオロジー定数推定
3. 学会等名 日本建築学会大会(東北)学術講演梗概集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 比嘉善希, 山田義智, 東舟道裕亮, 崎原康平
2. 発表標題 粘塑性有限要素法を利用したモルタルのレオロジー定数推定
3. 学会等名 日本建築学会大会(東北)学術講演梗概集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古賀志門, 山田義智, 東舟道裕亮, 比嘉善希, 崎原康平
2. 発表標題 ペーストフロー試験におけるセメントペーストのレオロジー定数推定方法の研究
3. 学会等名 日本建築学会大会(東北)学術講演梗概集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石井祐輔, 上原義己, 山田義智, 中新弥, 小川洋二
2. 発表標題 フライアッシュを混入した高流動コンクリートの間隙通過性に関する流動解析
3. 学会等名 土木学会全国大会第73回年次学術講演会梗概集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田 義智, 太田貴士, 土屋直子, 寺西浩司, 丹羽大地, 平野修也, 三島直生, 宮野和樹
2. 発表標題 高流動コンクリートの材料分離抵抗性および間隙通過時の性能の評価 (その5. ロジスティック回帰分析による目視材料分離判定)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水寛太, 山田義智, 平野修也, 崎原康平
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の推定および間隙通過性に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田 義智, 鹿毛忠継, 寺西浩司, 三島直生, 小泉信一, 平野修也, 宮野和樹, 太田貴士
2. 発表標題 低粉体系高流動コンクリートのフレッシュ性状に関する検討 その7. スランプフロー試験のシミュレーション
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東舟道裕亮, 山田義智, 古賀志門, 崎原康平
2. 発表標題 高流動コンクリートの流動性および間隙通過性に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 比嘉龍一, 平野修也, 東舟道裕亮, 山田義智
2. 発表標題 モルタルフロー試験によるレオロジー定数推定及びMPS法を用いたモルタルフロー試験の再現
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, 山田義智, 平野修也
2. 発表標題 ランダムフォレストによる高流動コンクリートのフレッシュ性状推定
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, 山田義智, 平野修也
2. 発表標題 アンサンブル学習を用いた高流動コンクリートのフレッシュ性状推定 その1. ランダムフォレストとLightGBMの比較
3. 学会等名 セメント技術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水寛太, 山田義智, 平野修也
2. 発表標題 アンサンブル学習を用いた高流動コンクリートのフレッシュ性状推定 その2スタッキングによる高精度化の検討
3. 学会等名 セメント技術大会
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
研究分担者	湯浅 昇 (Yuasa Noboru)  (00230607)	日本大学・生産工学部・教授  (32665)	
研究分担者	崎原 康平 (Sakihara Kohei)  (20647242)	琉球大学・工学部・助教  (18001)	
研究分担者	三島 直生 (Mishima Naoki)  (30335145)	国土技術政策総合研究所・住宅研究部・主任研究官  (82115)	
研究分担者	寺西 浩司 (Teranishi Koji)  (30340293)	名城大学・理工学部・教授  (33919)	

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