

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420549

研究課題名(和文)フレッシュコンクリートのレオロジー性質の定量化と施工設計への応用

研究課題名(英文)Quantification of rheological properties of fresh concrete and its application to construction design

研究代表者

三島 直生 (Mishima, Naoki)

三重大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30335145

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、コンクリート工事の施工設計の確立を目指して研究を行った。本研究成果としては、2次元ではあるものの、実大の型枠内のフレッシュコンクリートの流動を、リアルタイムでシミュレートできる解析プログラムの開発に成功した。また、2次元解析とするための型枠内の配筋の再現方法に関する基礎的な実験も行い、2次元解析で3次元の配筋の流動抵抗を再現できる可能性も示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is establishment of construction design of concrete construction. As results of this research, It was succeeded to develop a new analytical program that can simulate flow of fresh concrete in real size wall form with steel reinforcement, in real time, although it is two dimensional. In addition, fundamental experiments on method of reproducing three-dimensional reinforcing bars in mold for two - dimensional analysis were conducted. And possibility of reconstructing flow resistance of three - dimensional reinforcing bars by two - dimensional analysis was also shown.

研究分野：コンクリート工学

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 壁型枠 流動勾配 配筋 振動締固め リアルタイム解析

1. 研究開始当初の背景

高度な構造設計をし、良質な材料・適正な調(配)合を用いた場合にも、施工(養生も含む)が適正でなければ高品質な鉄筋コンクリート構造物は生産できない。現状の鉄筋コンクリートに関する研究動向を考えると、構造設計および材料・調(配)合に関する研究は、ある一定の水準に達しているのに対し、施工に関しては、未だに基礎的な段階を脱していない。

現状の経験則に基づいた施工では、想定外のコンクリートの充填不良や材料分離などが発生し、均一なコンクリートが製造されないために、所要の構造・耐久性能が得られない場合がある。このため、施工の効率化、コンクリートの品質の安定化を実現するための方法に関する研究・開発が急務となっている。

一方で、関連学会等においては、施工に関する研究にもっとエネルギーが費やされるべきであるにもかかわらず、依然として施工に関する学術研究は多くない。

この最大の理由としては、施工時に取り扱う材料であるフレッシュコンクリートの物性評価方法が確立していないこと、および型枠内のフレッシュコンクリートの挙動を予測する手法が確立されていない事などが挙げられる。今後、鉄筋コンクリートをより信頼性のある構造材料としていくためには、これらの問題を解決する、すなわち、施工に関する学術的な研究のレベルアップが不可欠であるとともに、実務レベルに適用可能なフレッシュコンクリートの流動予測手法の開発が急務となる。

2. 研究の目的

鉄筋コンクリート構造物の生産段階は、大きく分けて「構造設計段階」、「材料設計段階」、「施工段階」、「維持管理段階」に分けることができる。本研究では、この中の「施工段階」に理論的な「設計」の考え方を導入し「施工設計」を実現することを最終的な目標としている。これにより、鉄筋コンクリート構造物の生産効率が向上するだけでなく、欠陥を無くすことによる品質向上および品質の安定化が可能となる。さらにその結果として、構造物の長寿命化および「維持管理段階」における大幅な負担低減が期待される。

本研究では、この施工設計を実現するために不可欠な、フレッシュコンクリートの流動性の定量化手法の開発および型枠内のフレッシュコンクリートの流動性を予測するための解析手法の開発を目指す。

3. 研究の方法

施工設計の実現に向けて、本研究では、配筋された型枠内におけるフレッシュコンクリートの流動をシミュレートできる解析手法の開発、およびその実験的な検証を並行して行



写真-1 小型壁型枠(300×300×50mm)

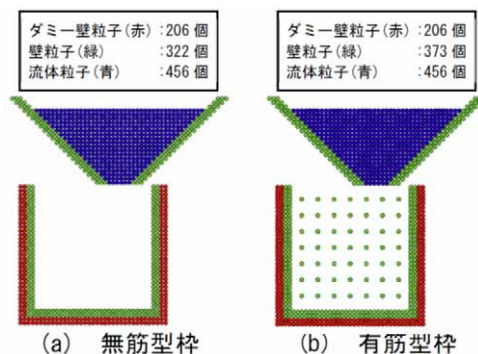


図-1 解析の初期要素構成

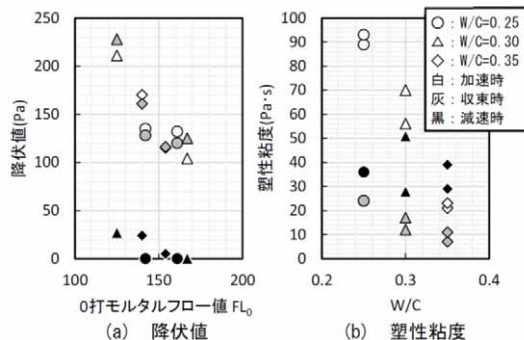


図-2 レオロジー定数と各要因の関係

った。

4. 研究成果

(1) MPS法を用いたフレッシュモルタルの2次元型枠内流動解析に関する基礎研究

近年、流体解析のための解析手法として注目されている粒子法(MPS法)を用いた検討を試みた。本節では、その基礎段階として、フレッシュモルタルを試料とした小型壁型枠内流動実験および同解析を行い、配筋の影響の再現性を中心に検討した。写真-1に実験に用いた型枠および配筋を、図-1に解析の初期要素構成を示す。本解析では、解析負荷の低減を目的に、2次元解析を採用した。

図-2には、モルタル用回転粘度計を用いて測定したレオロジー定数の測定結果を示す。解析に用いるビンガム定数として、図-2に示した実測データを用いたところ、実験結果と比較して解析結果の流動勾配が小さくなった。この原因としては、解析に用いた構成則(Regularized Bingham model)および初期粒子間距離の影響などが考えられる。また、本解析では流動の停止条件を流速で決定しているため、塑性粘度の値が非常に大きな影響を及ぼす結果となった。実測レオロジー定数の

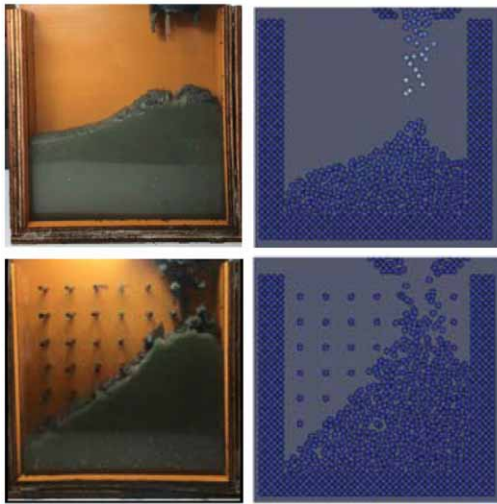


図-3 実験結果と解析結果の比較  
(上段：無筋、下段：有筋)

数値解析への適用方法に関しては今後の課題となるが、ここでは、解析に用いるビンガム定数として、逆解析により無筋型枠における流動勾配が実験と一致する値を用いた。

図-3に、実験結果と解析結果の比較の例を示す。同図からは、値の差はあるものの、解析により流動勾配に関しては、配筋の影響をある程度評価できていると言える。ただし、これらの値は前述した流動停止の判定方法により大きく変動するため、流動の停止判定および入力値の設定方法に関する課題が残った。

(2) フレッシュコンクリートの壁型枠内流動に関する2次元リアルタイム解析手法の開発に関する基礎的研究

施工設計の実現に向けて、施工現場で、ある程度の精度を持った実大施工シミュレーションを、リアルタイムで簡易に行うことのできるツールの開発を試みた。

本研究では、解析精度をある程度犠牲にしても、解析負荷を低減してリアルタイム解析とすることで得られるメリットが充分にあると考え、2次元のリアルタイム解析を採用して研究を進めた。

リアルタイムシミュレーションの優位性としてまず挙げられるのは、実際の施工と同様に、振動機やポンプの筒先の位置といった設定条件を、コンクリートの流動状況を確認しながら変更できる点にある。実施工で行われているこれらの条件変更を解析的に再現するための、ほぼ唯一の解決方法であると考えられる。

また、一般ユーザに対しては、結果がすぐに得られること、および解析負荷が少ないためにスマートフォンやタブレット端末で解析可能であることなどから、これまで数値解析に馴染みのない実務者（現場管理者および現場作業員）にも普及が期待できることなどが挙げられる。

表-1 フレッシュコンクリートの物性の分類

フレッシュコンクリートの状態	状態の存在条件	フレッシュコンクリートの特性
(a) 通常の流動状態	流速 $> v_s$	高粘度流体
(b) 流動の停止状態	流速 $\leq v_s$	剛体
(c) 振動下の流動化(液状化)状態	振動機による流動化範囲内	完全流体

[注]  $v_s$ : 粒子が流動停止する速度

① 解析方法

本解析で用いる物理演算方法は、粒子法に近い解析手法を大幅に簡略化し、リアルタイム解析を実現した解析エンジンをフレッシュコンクリートの流動解析に適用したものである。物理演算方法としては厳密性に欠ける部分はあるものの、リアルタイム解析であることのメリット、および現時点のフレッシュコンクリートの構成則自体に厳密性があまり期待できないことなどから、本解析プログラムでは近似的な物理演算の結果を、各種の仮定に基づいた設定条件を適用することにより、現実の挙動に近づける方法を採用した。

2次元解析を対象とした場合、例えば壁型枠内のメッシュ筋などはそのままでは再現することができない。本解析では、2次元解析上の配筋として、鉄筋径と同一直径の円形要素に置き換えることとし、壁型枠に配置されているメッシュ筋については、メッシュ筋の交点に当たる位置に2次元解析のための鉄筋を配置した。

また、数値解析をより広く実務者等に普及させることを目的として、開発するプログラムにおいては、標準的な型枠および配筋は自動作成できることを基本とした。

表-1に、本解析におけるフレッシュコンクリートの物性の分類を示す。本解析では3つの状態に分けてフレッシュコンクリートの挙動を表現している。すなわち、通常の流動状態、流動の停止状態、および振動下の流動化(液状化)状態である。

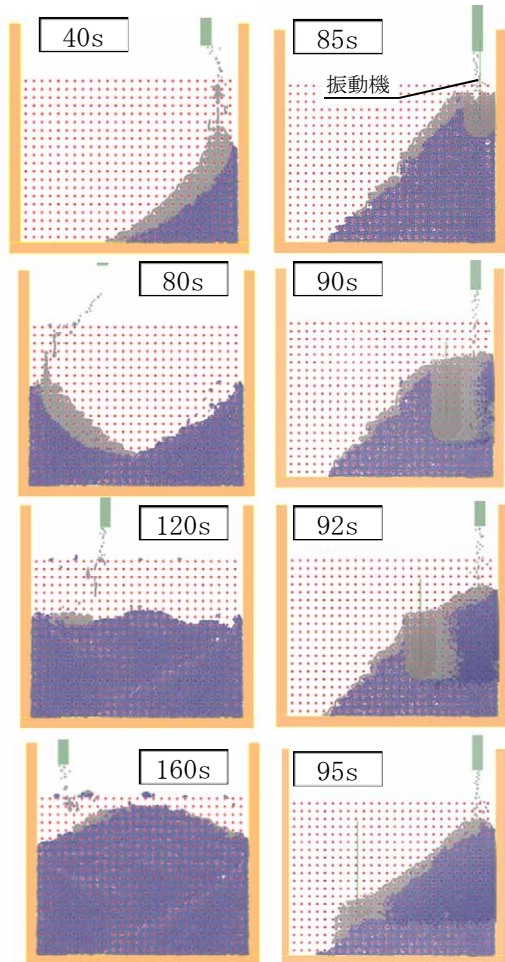
ポンプの筒先および振動機は、マウスドラッグによって任意に移動できるものとした。

② 解析結果

図-4に、解析結果の例を示す。図によれば、ポンプの筒先の移動および振動機による流動化が解析的に再現されているのが分かる。また、流動の停止速度を設定したことにより、図-5に示すような鉄筋周りの未充填部が再現され、さらに、振動機による締固めによりその未充填部が解消される様子も再現することができた。

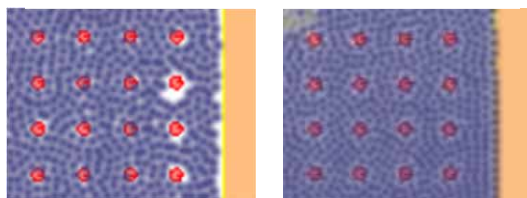
③ 2次元リアルタイムシミュレーションの適用可能性

本解析ソフトの利用対象者は、コンクリート工事の管理者および工事従事者を想定しており、考えられる利用方法を以下に示す。



vis. Stre. = 0.60,  $v_s = 0.001$  m/s (a) ポンプの筒先の移動  
 vis. Stre. = 0.25,  $v_s = 0.004$  m/s (b) 振動機の移動

図-4 解析結果の例



(a) 振動前 (b) 振動後  
 図-5 鉄筋周囲の充填状況の拡大図

- 1) 現場管理者が、コンクリート工事前に解析を行い、PDCA サイクルをまわし、施工計画を立案する。
- 2) 現場管理者が、実際のコンクリート工事と同時並行して解析を行い、施工の進捗を確認しながら振動機および筒先の移動や、型枠の叩き位置の指示を出す。(当日に到着したコンクリートの流動性をインプットして計画段階との誤差を確認しながら施工する)
- 3) 現場経験の少ない作業者が、事前教育の一環としてコンクリートの打込みの段取りや注意点を学習する。
- 4) 現場作業者が、実際のコンクリート工事

表-2 流動勾配実験の要因と水準

要因	水準
配筋の種類	メッシュ筋*、2D筋
0打モルタルフロー値 $FL_0$	120, 140, 160, 180
鉄筋径 $\phi$ (mm)	$\phi 3$ , $\phi 6$ , $\phi 9$
鉄筋間隔@ (mm)	30, 40, 50
型枠幅 (mm)	50, 100

[注] 〃: 基本水準, \*: 型枠幅 100のみダブルとし他はシングル

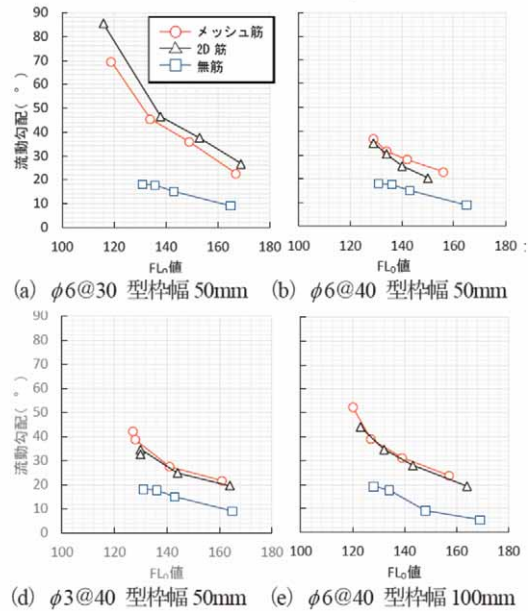


図-6 メッシュ筋と2D筋の違いが流動勾配と  $FL_0$  の関係に及ぼす影響の例

と同時並行して解析を行い、コンクリートの充填状況を確認しながら施工する。

- 5) コンクリート2次製品工場で、コンクリートの充填状況を確認しながら施工する。
- 6) ロボット化施工に必要なAIの学習用データとしての活用、および機械化施工時のコンクリートの充填状態をAIが認識するためのツールとして活用する。

- (3) フレッシュモルタルの流動勾配に及ぼす配筋条件および型枠幅の影響に関する基礎的研究

フレッシュコンクリートの型枠内流動シミュレーションに対する、リアルタイム解析の有効性は前節の解析結果から示されたが、現時点で解析負荷の面からリアルタイム解析の実現には2次元解析とする必要がある。このため、メッシュ筋を2D筋に置き換えることの可能性を検討するための基礎段階として、フレッシュモルタルを試料とした小型壁型枠内流動実験を行い、2D筋によるメッシュ筋の再現性を検証した。

実験は写真-1に示した型枠と同一のものをを用い、配筋条件およびフレッシュモルタルの流動性を変化させた。実験の要因と水準を表-2に示す。

図-6 に、実験結果を示す。同図はメッシュ筋と 2D 筋の比較を示すが、本実験条件の範囲内では、ほぼすべての条件において、同一 0 打モルタルフロー値ではメッシュ筋と 2D 筋の流動勾配が一致する結果となり、メッシュ筋を 2D 筋でそのまま置き換えられる可能性が示された。

#### (4) まとめ

本研究では、コンクリート工事の施工設計の実現に向けた、フレッシュコンクリートの型枠内流動の解析手法の開発を試みた。得られた知見を以下に示す。

- ① MPS 法を用いた基礎研究からは、同解析手法によりフレッシュモルタルの壁型枠内流動挙動はある程度再現できるものの、流動判定および入力値の設定方法に課題が残ることが示された。
- ② フレッシュコンクリートの数値解析技術をリアルタイム化することで、従来とは全く異なる新たな適用可能性が見いだされた。
- ③ 解析をリアルタイム化することは、コンクリート工事をシミュレートするために必要な条件（ポンプの筒先や振動機の移動）にも適合している部分が多いことを示した。
- ④ 開発した 2 次元リアルタイム解析手法により、フレッシュコンクリートの型枠内流動に特徴的な流動勾配の変化や鉄筋周囲の未充填部の発生、振動締固めによる未充填部の解消などの挙動を再現することができた。
- ⑤ フレッシュモルタルを用いた型枠内流動実験の結果からは、3 次元のメッシュ筋による流動抵抗を、2 次元の解析による配筋でそのまま置き換えられる可能性が示された。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① 三島直生、山田義智、崎原康平、谷口遼：フレッシュコンクリートの壁型枠内流動に関する 2 次元リアルタイム解析手法の開発に関する基礎的研究：コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 39、No. 1、2017. 7（掲載決定）

〔学会発表〕（計 3 件）

- ① 三島直生：フレッシュコンクリートの壁型枠内流動に関する 2 次元リアルタイム解析手法の開発に関する基礎的研究：コンクリート工学年次大会 2017、仙台国際センター（宮城県・仙台市）、2017. 7. 12-14（発表確定）
- ② 三島直生：フレッシュモルタルの流動勾

配に及ぼす配筋条件および型枠幅の影響に関する基礎実験、第 71 回セメント技術大会、ホテルメトロポリタン（東京都・豊島区）、2017. 5. 29-31

- ③ 三島直生：MPS 法を用いたフレッシュモルタルの 2 次元型枠内流動解析に関する基礎的研究、日本建築学会大会、福岡大学（福岡県・福岡市）、2016. 8. 24-26

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

三島 直生 (MISHIMA, Naoki)  
三重大学大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：30335145

##### (2) 研究協力者

田中 準一 (Tanaka, Jyunichi)  
三重大学大学院工学研究科・大学院生（平成 26 年度）

チョウシハク (ZHANG Zibo)

三重大学大学院工学研究科・大学院生（平成 27 年度）