

論文 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

三島 直生*1・山田 義智*2・崎原 康平*3・谷口 遼*4

要旨：本研究の最終目標は、コンクリート工事の施工現場において、実大施工レベルのフレッシュコンクリートの流動解析を、リアルタイムで行うことのできるツールを開発することにある。本報では、解析のリアルタイム化を実現するため、対象を 2 次元解析とし、壁型枠を対象に、フレッシュコンクリートの流動時の障害物となる配筋の再現方法およびフレッシュコンクリートの流動性の表現方法に関して検討を行った。さらに、施工途中における振動締めおよびポンプの筒先の移動の再現に関するリアルタイム解析の優位性を示すとともに、同解析プログラムの実施工および教育ツールなどへの適用可能性に関する将来展望を示した。

キーワード：フレッシュコンクリート、壁型枠内流動、2 次元リアルタイム解析、配筋、振動締め

1. はじめに

1.1 建設現場の生産性向上に関する最近の動向

(1) 未来投資会議

平成 24 年に出された日本の将来人口予測によれば、今後 50 年間に、生産年齢人口（15～64 歳人口）は半減し、老年人口（65 歳以上人口）は 2 割弱増加するとされている¹⁾。このような背景のもと、政府の平成 29 年度に向けた新成長戦略を策定する場として、平成 28 年 9 月に未来投資会議が設置された。同月に行われた第 1 回の会議において、他分野に先んじて建設現場の生産性向上が取り上げられている²⁾。これは、2020 年の東京オリンピックパラリンピック関連の建設需要、および高度経済成長期に建設された建造物のリニューアル需要の増加が見込まれる一方で、建設業を担う人材の急激な減少が予想されるためであり、建設現場の生産性向上が緊急の課題となっていることを示している。同会議では、ICT、人工知能等の新技術を活用し、建設現場の生産性を 2025 年までに 20%向上させるよう目指すとの方針が決定されており、ここで *i-Construction* が重要なキーワードとして取り上げられている。

(2) *i-Construction*

i-Construction とは、国土交通省が進める、ICT や人工知能などの革新的技術を導入して、建設現場の生産性向上を目指す取組みであり、平成 28 年 4 月に報告書が取りまとめられている³⁾。同報告書の中では、建設現場の労働者は高齢化率が他業種と比べて非常に高く、10 年後には現在と同水準の工事は不可能となるため、生産性の劇的な向上が急務かつ不可欠な状況であること、建設工事の中で最も生産性の向上が遅れている分野が「土工事」

と「コンクリート工事」であり、生産性は 30 年前とほとんど変わらないこと、およびこれらの 2 工事で全技能労働者の約 4 割を占めることなどが背景として述べられており、その対応策の中心となるトップランナー施策として「ICT 技術の全面的な活用 (ICT 土工)」「規格の標準化 (コンクリート工)」「施工時期の平準化」が提示されている。

このうち、ICT 土工に関しては、ドローン測量、3D-CAD および GPS 建機などの導入が既に始まっており、成果が出つつある。今後の課題としてはオペレータの育成と建機の導入コストに関する問題の解決が挙げられている^{4,5)}。

一方、コンクリート工に関しては、全体最適の考え方を導入し、部材の規格の標準化によりプレキャスト製品や鉄筋などの工場製作化を進め、生産性の向上を目指すことが主要施策として取り上げられている^{3,4)}。ここで、建設現場における労務作業の軽減を目的とした場合には、プレキャストコンクリート工法の採用が効果的であるが、全てのコンクリート工事がプレキャスト化に相応しいわけではなく、コスト、工期および労務確保等のバランスによりプレキャストコンクリートか現場打ちコンクリートかの選択をする必要がある⁵⁾。このため、コンクリート工事についてはプレキャスト化だけでなく、多面的な検討が不可欠となる。

国土交通省に設置されたコンクリート生産性向上検討協議会において、施工の効率化が期待される要素技術として、プレキャスト化以外に、現場打ちコンクリートにおける埋設型枠工法、機械式継手・機械式定着工法および高流動コンクリートの採用などが検討されている⁶⁾。

*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 琉球大学 工学部環境建設工学科 助教 博士(工学) (正会員)

*4 株式会社構造計画研究所 製造企画マーケティング部 修士(工学)

(3) コンクリートの確実な施工のためのPDCAサイクル研究委員会

平成28年9月に、日本コンクリート工学会に設置された上記研究委員会(2014.4~2016.3,委員長:綾野克紀)の報告会が開催された⁷⁾。同委員会では、コンクリート工事の合理化・省力化だけでなく、生産されるコンクリート構造物の品質の確保に不可欠な、コンクリート工事におけるPDCAサイクルのあり方が議論された。

WG2(シミュレーションWG,主査:山田義智)では、品質管理活動に用いるツールの1つとしてフレッシュコンクリートの流動解析を取り上げ、その現状およびBIM/CIMとフレッシュコンクリートの型枠内流動解析との連携に関して議論され、施工性のチェックや施工計画の立案など、施工の合理化に対する流動解析の適用可能性を示すとともに、残されている課題を示した。

既に、BIM/CIMによる型枠および配筋の3次元データを用いたフレッシュコンクリートの流動解析の事例も報告されており⁸⁾、実用化に向けた検討が進められている。

1.2 フレッシュコンクリートの流動解析の現状

前述の研究委員会における議論では、フレッシュコンクリートの流動シミュレーションとして、実務で使用可能な実大の型枠内流動の解析結果が強く求められた。しかし、現時点では実務に適用可能な流動解析プログラムは限られており、またそのような流動解析プログラムであっても、解析条件等の設定の難しさと、解析時間の長さが、流動解析技術の普及と実務への適用に対する大きな障害となっている。

また、現状の流動シミュレーションについては精度に言及するレベルになく、これは、フレッシュコンクリートのレオロジーモデルの構築および試験方法の整備が進んでいないために、実測されたレオロジー定数を入力値としたシミュレーション手法が確立していないためと考えられる。

既往のフレッシュコンクリートの型枠内流動解析の対象は、ほぼ全てが高流動コンクリートを想定した単調な自重流動であり、そのほとんどでは構成則としてビンガムモデルが用いられている。高流動コンクリートの型枠内流動に対しては、ビンガムモデルの適用性が高いことは既に多くの論文で報告されている⁹⁾。

しかし、一般的な工事の大多数で使用されているのは普通コンクリートであり、普通コンクリートの配筋された型枠内への打込みでは、振動締めが不可欠である。このため、振動による流動化を再現できない限り実用レベルでは適用範囲が極端に限定されることになる。

既往の研究においては、通常レオロジー定数とは別に、振動下のレオロジー定数を設定するなどし、部分的または全領域に対して振動下のレオロジー定数を適用す

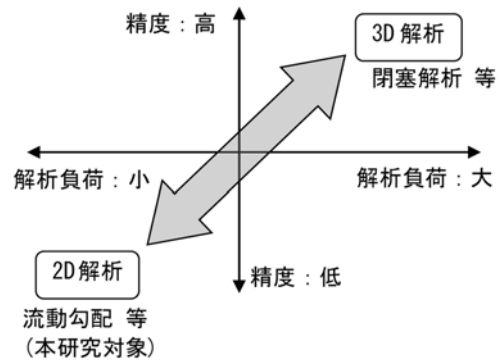


図-1 本研究の位置づけ

ることで振動下の充填状況を再現した研究¹⁰⁾もあるが、現実の施工では、フレッシュコンクリートの充填状況を確認しながら、部分的に、かつ移動しながら振動機による締め固めを行うため、従来のような解析開始から終了までの解析条件を全て解析開始前に設定する方法では、現実的な打設シミュレーションを行うことは難しい。同様のことがポンプの筒先の移動においても言える。

1.3 本研究の位置づけと目的

本研究の最終目標は、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を開発することにある。

本報では、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ている。図-1に本研究の位置づけを示す。

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ホやタブレット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。

ここで、上記の議論は、3次元の精密な解析を否定するものではなく、2次元の簡易解析と3次元の精密解析を適切に使い分けることで、より現実的な施工設計が実現する。

本報では、実用的な解析ツールとするために不可欠となる、流動時の障害物となる配筋の再現方法、およびフレッシュコンクリートの流動性の表現方法に関して検討を行った。さらに、同シミュレーションの適用可能性に関する将来展望も述べる。

2. 解析プログラムの概要

2.1 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¹¹⁾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、2.4で述べるような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。

2.2 構成則および流動性の調整方法

本解析の粘性流体の物理演算の部分では、まず各粒子について、周囲の接触している粒子を探索する。続いて接触している粒子との距離に応じて、接触の重みを算出し、粒子毎に合算する。この値は各粒子の周りの圧縮の程度を表しており、この値を用いて圧力の計算が行われる。接触している粒子間に、圧力に基づく力が働き、さらに付加的な力の計算では、粘性抵抗力および表面張力が働く。粘性抵抗力は、衝突する粒子の法線方向の相対速度を小さくするように働き、表面張力の計算では密度を一定に保つ力と、表面をなめらかにする力が働く。これらの粒子に加わる全ての力に基づいて粒子の速度ベクトルが更新され、位置が更新される。流体粒子の流動性は *viscousStrength* (粒子衝突時に粒子の相対速度を減らす程度) および *dampingStrength* (粒子衝突時に法線方向に働く減衰力) の2つのパラメータにより決定される。両係数とフレッシュコンクリートのスランブ値などとの関係は現時点では不明であり、今後の実験による検証と関係の定式化が不可欠となる。

2.3 解析手順

解析の主な手順は、粒子と剛体の相互作用、および粒子同士の相互作用の計算をステップごとに行っている。各相互作用の計算手順は、接触の判定→圧力の計算→付加的な力の計算→力の適用と速度ベクトルの更新→位置の更新、となる。振動機の影響の考慮では、振動機の一定影響範囲内に含まれる粒子を探索し、該当する粒子の流動性を高めるよう物性値を変更する。流動停止条件の考慮では、粒子速度が閾値以下の粒子を探索し、該当する粒子を速度0の剛体粒子として取り扱う。図-2に本解析のフローチャートを示す。

2.4 本解析プログラムの特徴

(1) 配筋の再現方法

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。このため、大胆な仮定により、メッシュ筋と同等な流動の

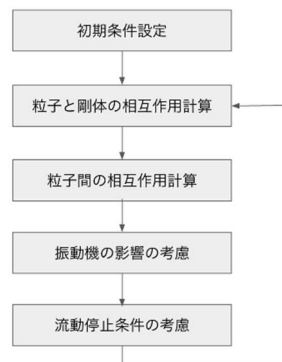
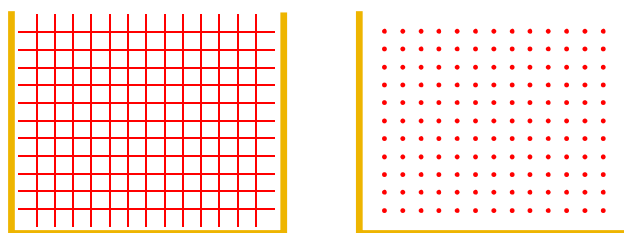


図-2 本解析のフローチャート



(a) メッシュ筋

(b) 2D 解析鉄筋

図-3 メッシュ筋の2次元解析のためのモデル化の例

| | | |
|--------|--------------------------|--------------------------|
| 型枠条件 | 高さ [mm] | <input type="text"/> |
| | 柱幅 [mm] | <input type="text"/> |
| | 壁幅 [mm] | <input type="text"/> |
| | 壁厚 [mm] | <input type="text"/> |
| 配筋条件 | 柱フープ [mm] | D @ <input type="text"/> |
| | 壁メッシュ [mm] | D @ <input type="text"/> |
| コンクリート | スランブ [cm] | <input type="text"/> |
| | 吐出速度 [m ³ /h] | <input type="text"/> |
| | 上限体積 [m ³] | <input type="text"/> |

図-4 本解析プログラムの設定画面の例

阻害効果を持つ配筋を2次元で再現する必要がある。

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する(以下、2D解析鉄筋)。本報で対象としている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する。図-3に、鉄筋の置換方法のイメージを示す。

このメッシュ筋の2次元解析のためのモデル化について、筆者らは既報¹²⁾において、300×300×50 (mm)の小型の壁型枠に対するモルタルの充填実験を行っている。同実験では、メッシュ筋および2D解析鉄筋でモルタルの流動勾配の比較を行った。実験の結果、流動勾配と0打モルタルフロー値FL₀の関係は2種類の鉄筋で近い値を取っており、メッシュ筋を2次元化して解析上で模擬的に再現できる可能性があるかと結論付けている。検証として充分とはいえないが、本報ではこのような鉄筋の置換が可能と仮定して解析を行う。

(2) 型枠および配筋の設定方法

型枠および配筋は自動作成を基本とする。これは、解

析の条件ファイルの設定の煩雑さが数値解析の一般への普及の阻害要因の1つとなっていると考えるためであり、複雑な形状の型枠等は別途考慮するとして、標準的な型枠および配筋は自動作成できることを目指す。図-4に、現在作成中の設定画面を示す。ただし、同図中の設定項目の中には、本論文で取り上げていない項目も含まれている。

(3) フレッシュコンクリートの流動性

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する。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。

本解析における流体は、厳密な粘性体ではないものの、粘性体に近い挙動を示す。ただし、フレッシュコンクリートは粘塑性体であり、充填状況を評価するための流動解析では、流動の停止が再現される必要がある。このため、簡易的にこの流動停止を表現するために、本解析では流速がある値 v_s 以下となった時に剛体となって静止する設定とした。

また、振動により流動化した時の特性を完全流体として別に設定しておき、振動機に近づいた時に完全流体に切り替わる設定とした。振動機周囲の流動化範囲は、JASS 5(2015)の7.6節c項にある棒型振動機の挿入間隔の上限である60cmを参考にして、半径300mmの範囲とした。

以上の設定により、例えば、ポンプ筒先から排出されたフレッシュコンクリートは、高粘度流体として自重により流動し、所定の流速を下回った時点で剛体として静止する。その後、振動機が近づいて流動化範囲に入った場合には、完全流体となって再流動化し、振動機が遠のき流動化範囲から外れた時点で高粘度流体に戻り、所定の流速を下回った時点で剛体となって静止する。

表-1で示した各設定条件は、現時点においては仮に設定されたものであり、今後、その妥当性に関して実験的な検証を進める予定である。

(4) ポンプの吐出量

ポンプの吐出量は、設定画面で実際の数値を設定するが、2次元解析であるため、解析上は壁厚で除した単位時間当たりの吐出面積として解析結果に反映される。これにより、理論上はポンプの吐出量と打設時間、型枠容積は整合させることができる。ただし、フレッシュコンクリート要素の体積保存に関する解析誤差の検証については今後の課題となる。

(5) ポンプの筒先および棒状振動機の移動

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。

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

表-2 解析条件一覧

| 項目 | | 設定値等 | |
|-------------|------|--|--------------------------|
| 型枠・配筋 | 部材種別 | 壁 | |
| | 型枠寸法 | 高さ 3000×幅 4000×厚さ 150 (mm) | |
| | 配筋 | D10@150 シングル | |
| ポンプの吐出速度 | | 44.1 (m ³ /h) [65 (粒子/s) = 81681 (mm ² /s)] | |
| フレッシュコンクリート | 共通 | 粒子半径 | 0.02 (m) |
| | | 粒子密度 | 2.0 (g/cm ³) |
| | 通常時 | dampingStrength | 1.0 |
| | | viscousStrength | 0.25, 0.60 |
| | | 粒子が流動停止する速度 v_s | 0.001, 0.004 (m/s) |
| | 停止時 | | 剛体 |
| 振動時 | | 完全流体 | |

3. 2次元リアルタイム解析による解析例

3.1 解析条件

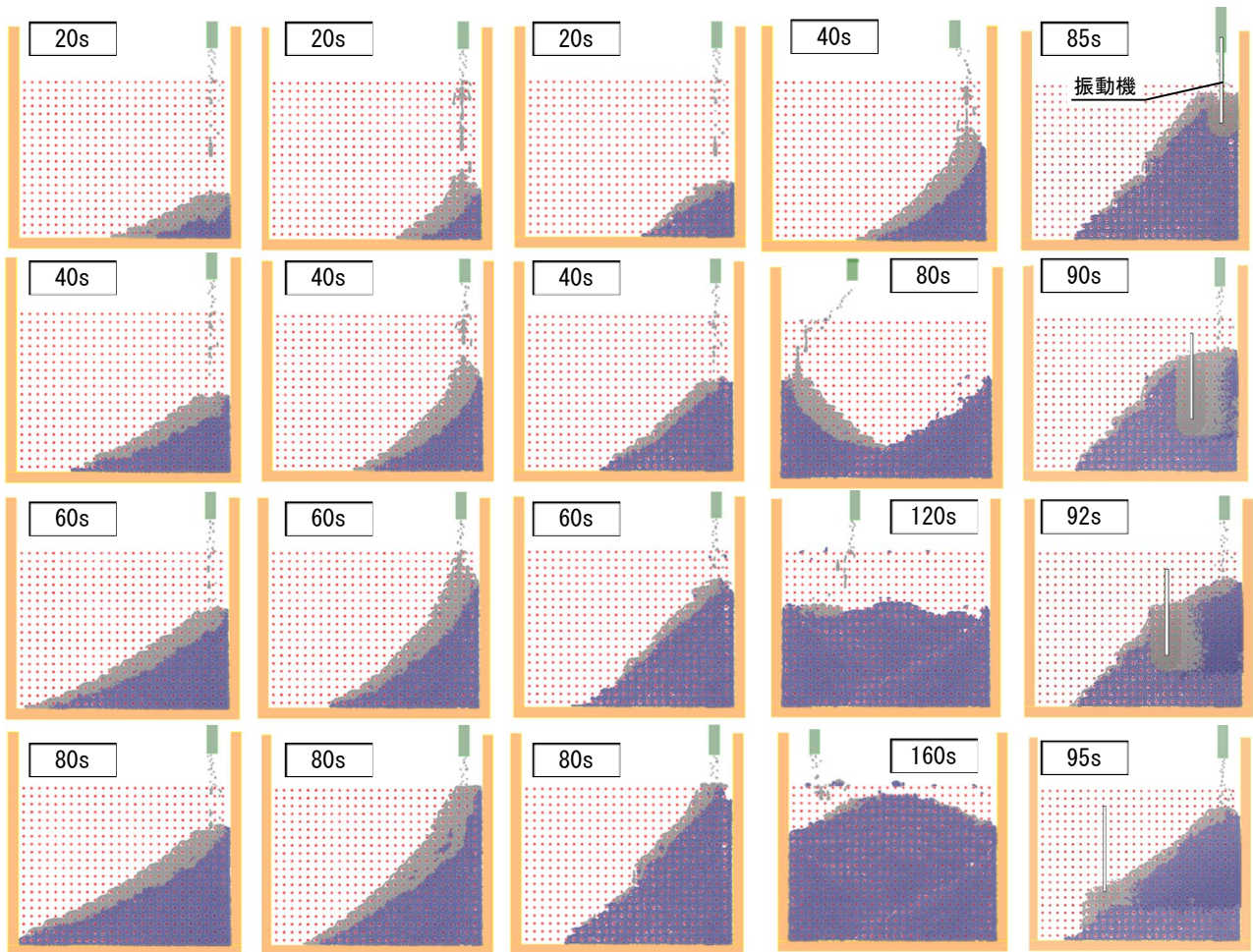
表-2に、解析条件を示す。本報では、解析要因として、フレッシュコンクリートの通常の状態における流動性(viscousStrength)、およびフレッシュコンクリートが流動停止する速度 v_s を取り上げ、それ以外に、振動機による流動化およびポンプの筒先の移動による充填状況の変化を確認した。

3.2 フレッシュコンクリートの流動性

図-5(a), (b)に、viscousStrength(以下、vis. Stre.)を0.25および0.60に変化させた時の、解析結果の時刻歴を示す。流動停止する速度 v_s は0.001 (m/s)で一定としている。図はリアルタイムで解析した際のキャプチャ画像を示し、流動が停止している粒子を青色で表示している。

図によれば、vis. Stre.を変化させることにより、流動勾配が変化しており、フレッシュコンクリートの流動性の違いを再現できている。また、vis. Stre.=0.60の20~40sにおいて、ポンプの筒先から流下する途中のフレッシュコンクリートが鉄筋に引っかかる様子が確認され、この点でもvis. Stre.=0.25との挙動の違いが見られる。

流動の停止領域に関しては、最初に充填された右下の角部を中心に青色の流動停止粒子が存在しており、流動勾配の表層部をフレッシュコンクリートが流動している様子が観察される。

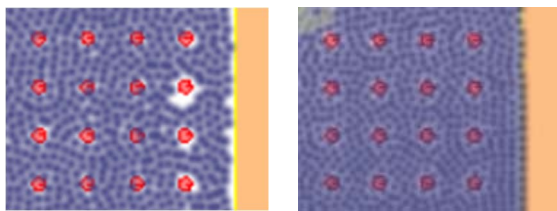


(a) vis. Stre. = 0.25, $v_s = 0.001$ m/s (b) vis. Stre. = 0.60, $v_s = 0.001$ m/s (c) vis. Stre. = 0.25, $v_s = 0.004$ m/s vis. Stre. = 0.60, $v_s = 0.001$ m/s vis. Stre. = 0.25, $v_s = 0.004$ m/s

図-5 フレッシュコンクリートの流動性を変化させた場合の解析結果
(青色：流動停止状態の粒子を示す)

図-7 ポンプの筒先を移動させた解析結果

図-8 振動機を移動させた解析結果



(a) 振動前[図-5(c), 80s] (b) 振動後[図-8, 92s]

図-6 鉄筋周囲の充填状況の拡大図

図-5(c)に、フレッシュコンクリートが流動停止する速度 v_s を 0.004 (m/s) に変化させた時の解析結果の時刻歴を示す。この時、vis. Stre. は 0.25 としている。vis. Stre. が 0.25 で同一の図-5(a)との比較からは、 v_s を大きくすることで流動勾配が大きくなっている。vis. Stre. を大きくした図-5(b)と比較すると、最終的な流動勾配はほぼ同程度になっているものの、傾斜部がより直線的になり、流動している層が薄くなっている。また、ポンプの筒先から流下する途中で鉄筋に引っかかる様子は見られず、これは v_s が低速時のみに影響を及ぼすパラメータであることに起因している。また、図-5(c)では、他と比べて鉄筋周囲に所々未充填部が見られると

いう特徴がある。図-6(a)に、充填状況の拡大図を示す。

vis. Stre. および v_s はそれぞれ独立に変化させることのできるパラメータであり、組み合わせて使用することでより広範囲な流動性を表現することができると考えられる。現実のフレッシュコンクリートとの関係を明確にするのが今後の課題となる。

3.3 ポンプの筒先の移動

図-7 に、ポンプの筒先を移動させた場合の解析結果の例を示す。実際の施工の手順が再現されているだけでなく、振動締めを行わないで打設しているため、打重ね部にコンクリートの非連続部および未充填部が集中していることが分かる。実施工で見られる欠陥が再現されていることから、本解析プログラムの実用性の高さが伺える。

3.4 振動締め

図-8 に、振動機を挿入した場合の解析結果の例を示す。同図は図-5(c)の 80s 以降に振動機を挿入した結果である。振動機周囲が流動化し、完全流体となるために、粒子間に存在していた微小な空間および未充填部などが

充填され、結果としてフレッシュコンクリートのかき容積が減少し、流動停止した粒子を示す青色が濃くなる。

図-6に、振動前後の充填状況の比較を示す。

また、振動後には流動勾配が振動前と比べて緩やかとなっている。振動締固めによるフレッシュコンクリートの流動化および緻密化が再現できており、実務解析としての要件を備えていると言える。

4. 2次元リアルタイムシミュレーションの適用可能性

建設工事は、一般の機械製品等と異なり、基本的に1品生産であり、建設対象の形状や寸法は毎回異なる。また、コンクリート工事においては、同じ使用材料および型枠条件であったとしても、その日の気温や生コンの運搬時間によりコンクリートの流動性が異なり、打込みの状況は毎回異なる。このため、一般の製品開発の様に開発担当者が開発時に数回解析を行うだけの状況と異なり、本解析が実用化されれば、全てのコンクリート工事現場で毎回数値解析が実施されることも想定される。

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は以下の通りである。

- 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。

5. まとめ

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、また、リアルタイム化するメリットはコンクリート工事に特有な必要条件にも適合している部分が多いことを示した。

本数値解析手法は要素技術の1つであり、単独で用いて実用的な結果が得られるものではないが、その応用先

は本報で紹介したもの以外にも様々なものが考えられる。

また、冒頭で述べたコンクリート工事の生産性向上に向けた取組みに対しても、直接または間接的に適用が可能な技術であり、将来のロボット化施工の実現に向けては核心的技術となり得ると考えている。

謝辞

本研究費の一部は、平成28年度科学研究費補助金 基盤研究(C) (研究代表者：三島直生) によった。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本の将来推計人口(平成24年1月推計)報告書, 国立社会保障・人口問題研究所, 2012.3
- 2) 第1回未来投資会議 議事要旨, 首相官邸HP, 2016.9
- 3) i-Construction 委員会報告書, i-Construction 委員会, 2016.4
- 4) 宮武一郎: 生産性の向上について (i-Construction ~ICT 土工), 建設技術フェア 2016in 中部講演会資料, 2016.10
- 5) 建山和由: 建設技術の新たなステージ i-Construction, 建設技術フェア 2016in 中部講演会資料, 2016.10
- 6) コンクリートの生産性向上検討協議会 会議資料, 国土交通省HP, 2016.3-9
- 7) コンクリートの確実な施工のための PDCA サイクル研究委員会報告書, 日本コンクリート工学会, 2016.9
- 8) 上原義己, 山田義智, 崎原康平: BIM を利用した粒子法によるフレッシュコンクリートの充填シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.267-268, 2016.8
- 9) 例えば, 石黒和浩, 森博嗣, 富谷潤一, 上杉誠一: 壁型枠への高流動コンクリートの打設の流動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, No.538, pp.7-14, 2000.12
- 10) 例えば, 谷川恭雄, 森博嗣, 渡辺健治, 寺西浩司: 空間要素法によるコンクリートの打設シミュレーション, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.415-420, 1992.7
- 11) LiquidFun Programmer's guide, <http://google.github.io/liquidfun/Programmers-Guide/html/index.html>
- 12) 三島直生, 畑中重光: 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 材料施工, pp.265-266, 2016.8