

13. フレッシュコンクリートの型枠内流動に対する 2次元リアルタイムシミュレータの開発

三重大学大学院工学研究科 ○ 三島 直生
 琉球大学工学科 山田 義智
 琉球大学工学科 崎原 康平

1. はじめに

将来的な労働者不足の対策が緊急の課題となっている建設業において、コンクリート工事は最も生産性の改善が遅れている分野の一つであり、早急な対策が求められている¹⁾。

コンクリート工事における生産性向上および品質確保を目的として、フレッシュコンクリートの型枠内流動移動を数値解析により予測するための研究が多く行われている²⁾が、一般的な工事の大多数で使用されている普通コンクリートの振動締固めやポンプの筒先移動などを再現することのできる解析手法はほとんど無い。

本研究では、これらの複雑な状況をシミュレートすることを目的として、フレッシュコンクリートの流動解析をリアルタイム化し、振動機およびポンプの筒先の移動を、実施工と同じようにフレッシュコンクリートの流動状況を確認しながら解析内で行える手法の開発を試みている³⁾。

本報では、実際の無筋中型壁型枠内のフレッシュコンクリートの流動実験の結果と比較することで、本解析手法によるフレッシュコンクリートの流動挙動の再現性を検証した。

2. 中型壁型枠内流動実験

2.1 実験概要

(1) 使用材料およびコンクリートの調合

表-1に使用材料を、表-2にコンクリートの調合表を示す。本実験では、フレッシュコンクリート（以下、単にコンクリート）の目標スランブを18cmおよび8cmの2水準に変化させた。ただし、コンクリートは同一のものを扱い、表-3に示すように経時変化によるスランブの低下を利用してスランブを変化させた。スランブ試験は型枠内流動実験の前後で実施した。

(2) 試験方法および測定項目

スランブ試験はJIS A 1101に準拠して行った。

型枠内流動実験は、後述する型枠に対するコンクリートの打込みの様子を、透明な型枠側面から

表-1 コンクリートの使用材料

使用材料	特性
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.15g/cm ³
細骨材	安濃川産陸砂, 密度: 2.63g/cm ³
粗骨材	志摩産硬質砂岩砕石, 最大寸法 20mm, 密度: 2.68g/cm ³
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

表-2 コンクリートの調合表

W/C	単位量(kg/m ³)				HAE/C (%)
	W	C	S	G	
0.56	182	325	804	924	0.46

[注]W: 水, C:セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材, HAE/C: セメントに対する混和剤の質量添加率

表-3 実験のタイムスケジュール

時刻	作業内容	スランブ*
16:40	コンクリート練上り (静置: 10min)	
16:50	スランブ試験	19.2 cm
16:54	型枠内流動実験 (1回目)	
16:56	スランブ試験 (静置: 25min)	17.9 cm
17:23	ミキサでの再攪拌、スランブ試験	9.7 cm
17:27	型枠内流動実験 (2回目)	
17:30	スランブ試験	6.4 cm

[注]*: 実測した生データを示す。

デジタルビデオカメラで測定した。測定画像から、打込み時は10sごと、振動締固め時は1sごとに画像を抽出し、コンクリートの充填形状を得た。

実験は2017年8月9日に実施し、実験実施時の環境条件は温度29.0℃、湿度65%RHであった。

(3) 型枠および打込み方法

図-1に使用した型枠の形状・寸法を示す。内寸は700×1400×100 (mm)の無筋の壁型枠としたが、型枠固定用のセパレータは使用した。型枠材料にはコンクリート用型枠合板を用い、図-1の手前側の1面のみ、コンクリートの流動状況を計測するために12mm厚の透明ポリカーボネート板とした。

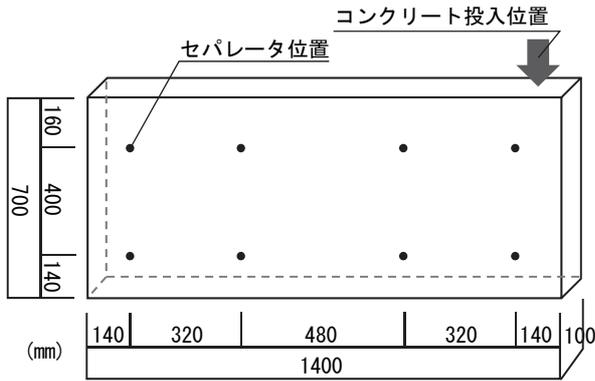


図-1 中型壁型枠の形状・寸法

コンクリートの投入位置は、図-1の右上部とし、投入位置のコンクリートが型枠天端に達した時点で打込みを終了した。このため、コンクリートのスランプによって打込み時間および打込み体積は異なる。

打込み方法は、容量約1Lのハンドスコップを用いて2sで1杯のペースで連続して投入した。打込み速度および打ち込まれたコンクリートの体積は、型枠側面から見たコンクリートの面積を画像解析により求めて算定した。表-4に、目標スランプ、実測スランプ（型枠流動実験前後の平均値）、打込み時間、打込み体積および打込み速度を示す。

1回目の型枠内流動実験（目標スランプ：18cm）では、打込み完了後に、棒状バイブレータ（振動数200～250Hz、振幅1.5mm、振動部径28mm、振動部長さ186mm）による振動締め固めを行い、充填状況の測定を行った。

2.2 実験結果とその考察

写真-1に、型枠内流動実験から得られた測定画像の例を示す。補剛材に隠れた部分の形状は、周囲のコンクリートの位置から内・外挿して求めた。

(1) 打込み過程

図-2に、壁型枠内の打込み過程の時刻歴を示す。

図(a)に示すスランプ18.5cmでは、打込み開始60s後にコンクリートが型枠の左端に到達し、その後、流動勾配が大きくなる傾向がある。これは、型枠底部のすべりの影響でコンクリートの先端が型枠左端に到達するまでは流動勾配が小さくなるためと考えられる。

図(b)に示すスランプ8.0cmでは、10～40sの間は水平方向の流動がほとんどなく、コンクリートが上方に積み上がっている。その後、50sの時点で上層のコンクリートが左下方に崩れ流動勾配が多少緩やかになったが、図(a)に示すスランプ18.5cmと比べると明らかに流動勾配は大きくなった。

(2) 締め固め過程

図-3に、スランプ18.5cmの場合の、振動締め固め過程の時刻歴を示す。同図中には棒状バイブレータの挿入位置も示す。棒状バイブレータは振動さ

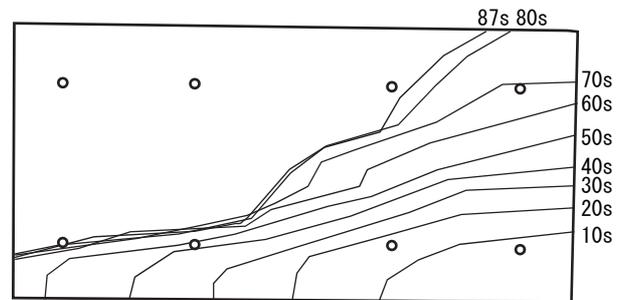
表-4 壁型枠への打込み条件

項目	1回目	2回目
目標スランプ (cm)	18	8
実測スランプ* (cm)	18.5	8.0
打込み時間 (s)	87	60
打込み体積 (L)	47.4	30.5
打込み速度* (L/s)	0.545	0.509
(m ³ /h)	1.96	1.83

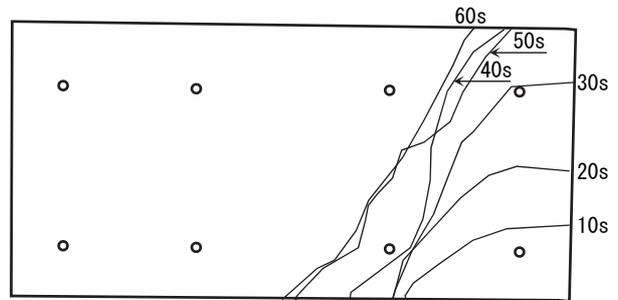
[注]*：平均値を示す。



写真-1 型枠内流動実験の測定画像の例（1回目、50s）



(a) 1回目（スランプ18.5cm）



(b) 2回目（スランプ8.0cm）

図-2 コンクリートの打込み過程の時刻歴

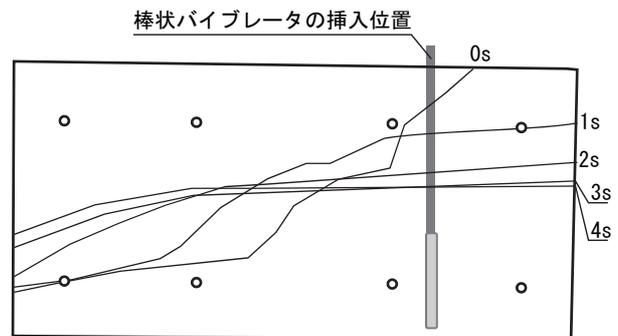


図-3 コンクリートの振動締め固め過程の時刻歴（1回目、スランプ18.5cm）

せた状態で鉛直に挿入し、底部に達した直後に鉛直に抜去した。振動時間は挿入開始から抜去完了までで4s間であった。コンクリートの流動は棒状バイブレータの抜去とほぼ同時に停止した。

コンクリートの流動は、振動開始とともに上部のコンクリートが左下方に流動し、棒状バイブレータ近傍はほぼ水平となって流動が停止した。本実験で用いた壁型枠は壁厚が100mmと薄いため、型枠自体も振動して流動化範囲が通常よりも広くなった可能性が考えられる。

3. 2次元リアルタイムシミュレータによる解析

3.1 解析概要

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⁴⁾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。本シミュレータの主な特徴は以下の通りである³⁾。

- 1) 2次元のリアルタイム解析である
- 2) 振動機およびポンプの筒先が自由に移動可能
- 3) 形状寸法の設定により型枠および配筋が自動作成される
- 4) コンクリートの状態を流動状態、停止状態、振動下の流動化状態の3段階に分類している(表-5参照)

本解析は、物理演算方法としては厳密性に欠けるため、解析で用いるコンクリートの流動パラメータをレオロジー試験などで実測して決定することができない。このため、実験と同じ条件を再現した逆解析により流動パラメータを同定する必要がある。本報では、先述の中型壁型枠内流動実験を再現した解析を行い、コンクリートの流動の再現性を検証する。

表-6に、本報で実施する解析の設定条件の一覧を示す。このうち、コンクリートの流動性を調整するために、粘性に関連したviscousStrength(以下、vis.Stre.)および降伏値に関連した流動停止速度 v_s を変化させた。また、バイブレータの影響範囲(コンクリートが流動化する範囲)は型枠による振動伝播を考慮して、広めの500mmとした。ポンプの吐出速度およびコンクリートの打込み体積は、実験結果に基づき各スランブに対応した値を用いた。

3.2 解析結果とその考察

(1) 解析結果の変動

図-4に、全ての設定条件を同一として実施した5回の解析結果(コンクリートの充填形状)の比較を示す。図(a)に示す打込み完了後の結果からは、充填高さで100mm程度、型枠中央部付近の流動勾配で25°程度の差が発生している。このような結果の変動の原因は、本解析でポンプの筒先から吐出されるコンクリート粒子が、ポンプ筒先の幅(200mm)の範囲内のランダムな位置に生成される

表-5 コンクリートの物性の分類³⁾

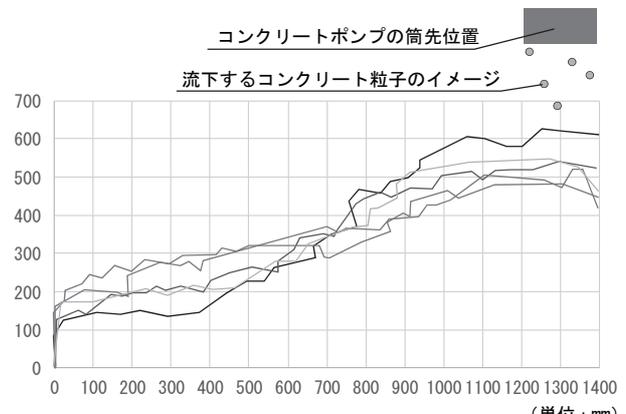
フレッシュコンクリートの状態	状態の存在条件	フレッシュコンクリートの特性
(a) 通常の流動状態	流速 $> v_s$	高粘度流体
(b) 流動の停止状態	流速 $\leq v_s$	剛体
(c) 振動下の流動化(液状化)状態	振動機による流動化範囲内	完全流体

[注] v_s : 粒子が流動停止する速度

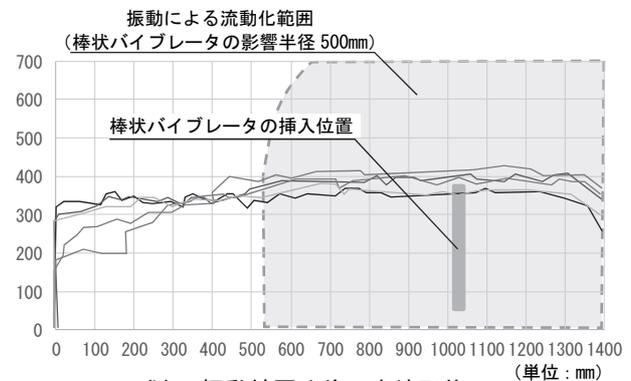
表-6 解析の設定条件一覧

項目	設定値等	
解析の時間刻み	1/60 (s)	
型枠・配筋	部材種別	壁
	型枠寸法	高さ 700×幅 1400×厚さ 100 (mm)
	配筋	無し
コンクリート	粒子半径	0.02 (m)
	粒子密度	2.23 (g/cm ³)
	dampingStrength*	1.0
	viscousStrength* 粒子が流動停止する速度 v_s^*	解析対象の流動性に応じて変更
バイブレータの影響範囲	半径 500 (mm)	
ポンプの吐出速度**	1.96, 1.83 (m ³ /h)	
打込み体積**	47.4, 30.5 (L)	

[注]*: 表-5(a)の状態における設定値、**: スランブごとに実験の実測結果を設定

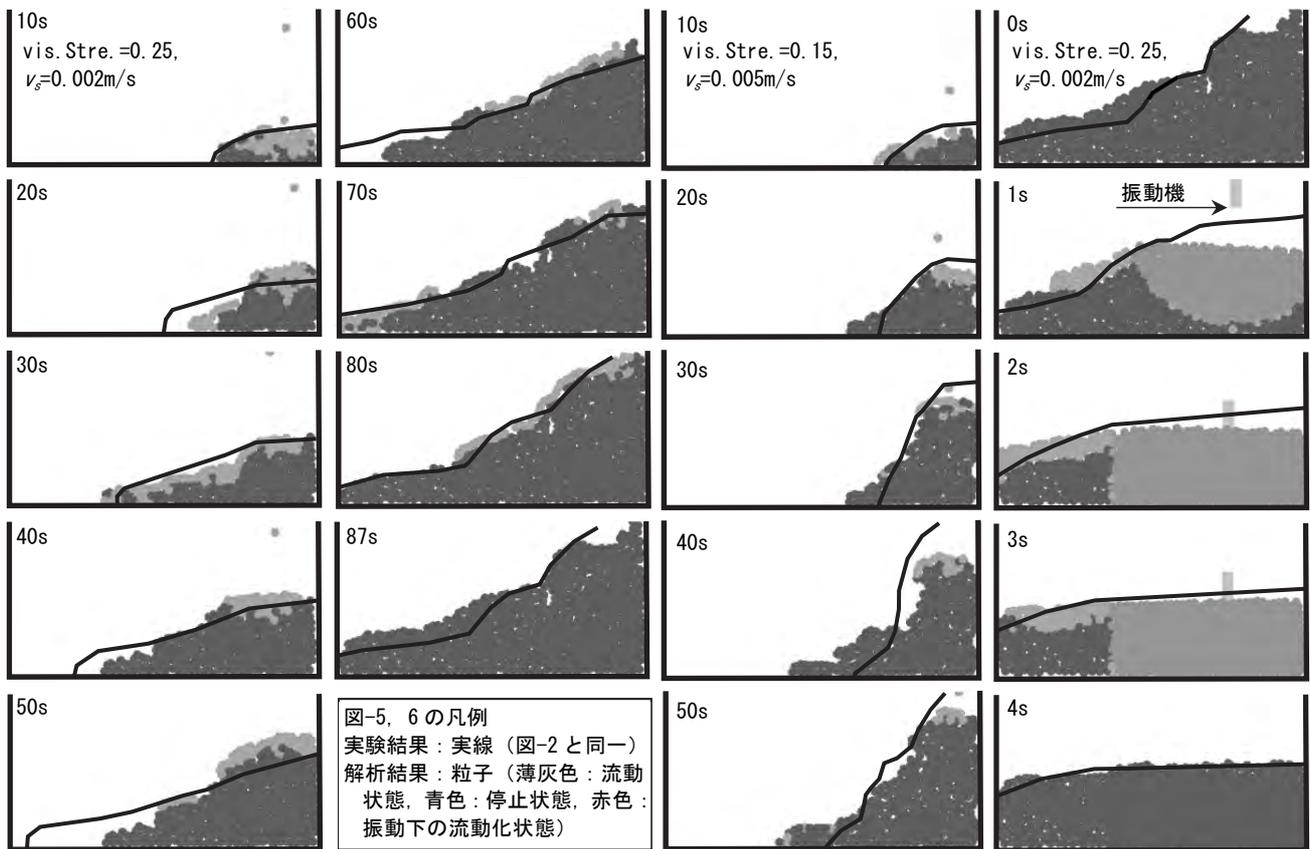


(a) 打込み完了後の充填形状 (単位: mm)



(b) 振動締め後の充填形状 (単位: mm)

図-4 同一設定条件下での5回の解析結果の比較
(vis. Stre.=0.1, $v_s = 0.002\text{m/s}$,
吐出速度=1.96m³/h, 打込み体積=47.4L)



(a) スランプ 18.5cm

(b) スランプ 8.0cm

図-6 振動締め時の比較
(スランプ 18.5cm)

図-5 打込み時における実験結果と解析結果の比較

ことによる微妙な違いに起因していると考えられる。この変動幅を減らす方法としては、コンクリートの吐出位置を固定すること、およびコンクリート粒子のサイズを細かくすること等が考えられる。ただし、実施工においても、同一調合、同一スランプのコンクリートで、同条件で打ち込んだとしても完全に同じ結果とはならず、ある程度の変動幅を持った挙動としてとらえる方が実用上は妥当と考えることもできるため、この解析結果の変動の取扱いについては今後の課題とする。

図(b)には、振動締め後の充填形状の比較を示す。振動の影響範囲を中心に、振動前と比べて変動幅は小さくなっているとみることができる。

(2) 実験結果の再現性

図-5 および図-6 に、それぞれ打込み時および振動締め時の実験結果と解析結果の比較を示す。実験結果は前掲図-2 のデータをそのまま用い、解析結果については実験結果に近くなるように vis.Stre. および v_s を調整した結果の一例を示す。

図-5 からは、スランプの異なるコンクリートの型枠内の充填状況を、流動性に関する 2 つのパラメータの調整により、時刻歴まで含めて概ね一致させることができている。

図-6 からは、振動締めによる流動化および充填の状況をほぼ正確に再現できている。また、無振動で打ち込まれた時点では、コンクリート内部

に空隙が見られるが、振動締めされた領域ではこの空隙が充填され、緻密なコンクリートとなっていることが解析的に表現されている。

ただし、ここで示した解析結果は比較的实验結果に近いものを例示しており、同一条件下での解析でも前述したように結果がある幅で変動するため、流動パラメータの決定方法および運用方法についてはさらに検討を進める必要がある。

謝辞

本実験を実施するにあたり、木村洸貴君(三重大学学生)の助力を得た。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) i-Construction 委員会報告書, i-Construction 委員会, 2016.4
- 2) 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
- 3) 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, Vol.39(1), pp.1213-1218, 2017.7
- 4) LiquidFun Programmer's guide, <http://google.github.io/liquidfun/Programmers-Guide/html/index.html>