壁型枠への高流動コンクリート打設の流動シミュレーション

FLOW SIMULATION OF HIGH-FLUIDITY CONCRETE INTO WALL TYPE FORM

石黒和浩*, 森 博嗣**, 富谷潤一***, 上杉誠一****

*Kazuhiro ISHIGURO, Hiroshi MORI, Junichi TOMITANI
and Seiichi UESUGI*

In this paper, the high-fluidity concrete placing into the wall form with the obstructions is simulated in order to confirm that this 3-D flow simulation system can be applied to full-sized structure. In the beginning, the parametric studies are carried out about the handling between the form and fresh concrete on the touching side, and the rheology constants on the fluid surface are examined. As a result, the experiment is simulated by correcting the rheology constant of the surface material, multiplying the rate of VOF(volume of fluid) and decreasing to 1/2. Next, the parametric studies are executed about the rheology constants and the amount of obstructions in the wall form by this decrease method. As a result, it is clarified that this 3-D flow simulation system can correctly express the influence by the rheology constants and the amount of obstructions.

Keyword : flow simulation, high-fluidity concrete, fresh concrete, rheology, wall type form

流動シミュレーション, 高流動コンクリート, フレッシュコンクリート, レオロジー, 壁型枠

1. はじめに

フレッシュコンクリートの流動挙動をシミュレーションによって事前に予測することにより、適切な打設や締固めの方法を計画することが可能となり、コンクリート工事における施工の合理化・省力化を実現できる。特に、締固めを行わない高流動コンクリートを用いる施工においては、コンクリートの充填状況を予測することが非常に重要になるため、各施工条件に合わせたコンクリートの品質設定や打設計画の事前検討を行ううえで、流動シミュレーション技術の確立が求められている。

フレッシュコンクリートの流動シミュレーションを行うためには、入力値となる力学特性の定量化と、流動解析手法の検討が必要となる。力学特性の定量化においては、フレッシュコンクリートのレオロジー特性をビンガムモデルにより表現し、降伏値と塑性粘度を測定する研究^{1)~3)}、応力状態を考慮したビンガムモデルによる測定⁴⁾⁵⁾など数多くの成果が報告されている。一方、フレッシュコンクリートの流動解析手法については、理論式を展開して挙動を解明する理論的手法⁶⁾や数値計算を用いる解析的手法^{7)~9)}等が挙げられ、スランブ試験や管内流動を対象とした研究が報告されている。しかし、いまだ解析例は少なく、その多くはコンシステンシー試験や小規模の型枠を対象とした2次元解析であり、実際の施工規模のものや壁状の構造物などにおいて

3次元的影响を考慮した例はほとんどみられない。

著者らは、これまでニュートンモデルおよび非ニュートンモデルを対象とした3次元熱流体解析プログラム¹⁰⁾を拡張して、ビンガムモデルの解析が可能な流動シミュレーションシステムを開発し、スランブ試験の2次元流動シミュレーションを行った¹¹⁾。

本研究は、開発した流動シミュレーションシステムの実施工への適用性を検討するため、壁状の型枠に障害物がある場合の全体的な流動現象を対象とした3次元流動シミュレーションを行った。最初に境界部分(型枠と接する位置のフレッシュコンクリート)の取扱い方法を決定するために、標準的な流動性能を持つ高流動コンクリートを対象とした解析結果と、同様の条件で行った実験結果¹²⁾¹³⁾との比較・検討を行った。続いて、検討結果により決定した境界部のモデルを用いて、フレッシュコンクリートのレオロジー定数と壁型枠中に配置する障害物量をパラメータとした解析を行った。実験結果との比較・検討により、本流動シミュレーションシステムの実規模の3次元挙動に対する適用性について報告する。

2. 解析方法

2.1 解析手法

フレッシュコンクリートは、セメントペーストと骨材より成る複合

* 安藤建設(株)技術研究所 研究員

** 名古屋大学大学院工学研究科建築学専攻 助教授・工博

*** 安藤建設(株)建築本部技術部

**** (株)ソフトウェアクレイドル

Research Engineer, Research Center, Ando Corporation
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, Nagoya Univ.,
Dr. Eng.
Ando Corporation
Software Cradle Co., Ltd.

材料と言えるが、流動中の性状と挙動から、連続体の流動現象としての取り扱いが可能と判断し、著者らが開発した3次元熱流体解析プログラムにより解析を行った。なお、高密度に配筋された部分をフレッシュコンクリートが通過する際には、粗骨材とモルタルマトリックスの相対移動が生じ、連続体としての取扱いが難しくなるが、鉄筋の近傍におけるレオロジー性質を変化させることにより、全体的な流動性状を近似的に表現することが可能であると考えられる。また、レオロジー的性質の変化割合や影響範囲は、フレッシュコンクリートを粗骨材とモルタルに分離してモデル化し、鉄筋近傍の挙動を解析することによって求められるものと思われる。ただし、本研究では、壁状構造物における境界面の3次元的影響についてのみ検討することとした。本手法は、数値解析手法の一つであるコントロールボリューム法を用いている。

解析プログラムにおいて扱っている基本方程式は、流動解析に関するものと、自由表面のアルゴリズムに関するものがある。流動解析における基本方程式とは、式(1)に示す Navier-Stokes の運動方程式と、式(2)に示す流体質量の保存式である。

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} &= \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \nabla^2 u \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \nabla^2 v \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} &= \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \nabla^2 w \\ \nabla^2 &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

ここに、 X, Y, Z : 位置座標

u, v, w : X, Y, Z の流体速度

t : 時間

ρ : 密度

η : 粘性係数

表面形状が重要な問題を扱う場合、自由表面を含む流動解析を行う必要がある。自由表面の評価方法としては、(1)SURF、(2)MAC、(3)ALE、(4)VOF が挙げられ、本解析プログラムでは、その代表的モデルである VOF 法を採用した。VOF (Volume of Fluid) 法は、流動現象を解析するための解析領域内流体要素に、その要素内に流体が占める流体体積の比率 (流体体積率 VOF) を定義し、移流計算によって、変化する自由表面を求めるものである。また、VOF 値は $0.0 \leq \text{VOF} \leq 1.0$ の範囲 ($\text{VOF}=0.0$: 気相, $\text{VOF}=1.0$: 液相, $0.0 < \text{VOF} < 1.0$: 表面要素) であり、各要素の VOF 値が決まれば、表面要素が決定され、表面形状が定まる。また、VOF 関数の時刻および空間での変化は、保存則を示す式(3)を離散化し、数値計算することによって求められる。

$$\frac{\partial \text{VOF}}{\partial t} + \frac{\partial \text{VOF} * u}{\partial X} + \frac{\partial \text{VOF} * v}{\partial Y} + \frac{\partial \text{VOF} * w}{\partial Z} = 0 \quad (3)$$

ここに、VOF: VOF 値

なお、解析における外力条件として、重力加速度を作用させ、また流体 (フレッシュコンクリート) は非圧縮として取り扱った。

2.2 降伏関数

フレッシュコンクリートの降伏関数については、降伏値 τ_y を持つビンガムモデルで表されると考えられる。本解析プログラムでは、基本的にはニュートンモデルおよび非ニュートンモデルの使用を想定

図1 見かけの粘性係数を使用した降伏関数

しているため、ビンガムモデルの降伏関数を使用するためには見かけの粘性係数 η' を与えて表現する必要がある。ビンガムモデルの降伏関数を式(4)に、見かけの粘性係数使用の降伏関数を式(5)に示す。

ビンガムモデルの降伏関数

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} + \tau_y \quad (4)$$

見かけの粘性係数使用の降伏関数

$$\tau = \eta' \cdot \dot{\gamma} \quad (5)$$

$$\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_{LIM} \rightarrow \eta' = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \eta$$

$$\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_{LIM} \rightarrow \eta' = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}_{LIM}} + \eta$$

ここに、 τ : せん断応力

η : 塑性粘度

$\dot{\gamma}$: せん断ひずみ速度

τ_y : 降伏値

η' : 見かけの粘性係数

$\dot{\gamma}_{LIM}$: 定数

通常、ビンガム流体の降伏関数では、塑性粘度 η は一定値として扱われるが、見かけの粘性係数 η' は、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関数として定義される。これにより、ニュートンモデルの降伏関数を用いてビンガムモデルの降伏関数を近似する。見かけの粘性係数 η' を使用する降伏関数を図1に示す。せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が限りなく0に近づくと見かけの粘性係数 η' は発散するため限界値 $\dot{\gamma}_{LIM}$ を設けて解析を行った。なお、 $\dot{\gamma}_{LIM}$ の値により、解析に用いる最大の見かけの粘性係数が変化するため、解析結果に影響する。 $\dot{\gamma}_{LIM}$ をパラメータとした事前検討を行い、本解析で対象とする高流動コンクリートにおいて解析結果に大きな影響を与えなかった $\dot{\gamma}_{LIM}=1.0\text{E-}3(1/\text{s})$ を用いることとした。

2.3 境界条件

流体 (フレッシュコンクリート) と固体 (型枠, 障害物) 間の境界条件は、流体と固体間には滑りがないものとし、境界面の応力条件は速度分布に比例するものとした。

3. 境界部分の低減方法に関する予備解析

壁状の型枠中を流れるフレッシュコンクリートの流動現象をシミュレートするにあたり、最初に2次元解析を行った。その結果、2次元解析によって実験結果をシミュレートするためには、フレッシュコンクリートのレオロジー定数を3倍程度に増加させる必要があった⁽⁴⁾。2次元解析では、壁状の型枠において最も面積が大きい前後の型枠面に接する境界 (以降、単に前後の型枠面と呼ぶ) が考慮されないため、レオロジー定数を大きくする必要があったと考えられる。したがって、

正確なレオロジー定数を用いて壁状の型枠をシミュレートするためには、3次元解析を行う必要があると判断された。

一方、3次元解析を行った結果、逆にレオロジー定数を1/2以下に低減する必要があった¹⁵⁾。壁の厚み方向の要素分割数が少ないため、境界面からの影響による速度分布が粗くなり、境界の影響を過大に評価する可能性を懸念して、分割数によるパラメトリックスタディを行った。しかし、分割数を2, 3, 4, 5と変えても流動形状の違いはほとんど現れなかった。

実際のコンクリートが型枠中を流動する場合、型枠面に噴霧された水の上を滑るような現象や、型枠面でペースト分が分離して境界層となるような現象が観察される。解析上では、コンクリートを均質体と捉え単一のレオロジー定数を与えて評価しているが、境界面では異なったレオロジー定数使用の必要性を示唆すると考えられる。

以上の考慮を踏まえて、本研究では、解析に用いるコンクリート全体のレオロジー定数を変化させるのではなく、境界部分のみのそれを低減する方法について以下に検討を行う。

3.1 解析モデル

検討に用いた解析モデルを図2に示す。壁状の型枠を想定し、型枠中には直方体の障害物を配置し、壁の厚み方向（Y方向の中心）で対称モデルとした。コンクリートの打設は、実験と同様にロートのモデル化を行い、その上面に連続流入流出境界を設けて、先端には流速規定により一定流速を与えた。解析領域内（壁型枠およびロート）のXZ平面のメッシュ分割は10mmピッチとした。Y方向メッシュ分割は、パラメトリックスタディにおいて2分割では解析が不安定であったため3分割とし、型枠近傍の境界付近で速度勾配が大きく、中央では勾配がなくなる栓流の速度分布を示すことを考慮して、中央部から30、10、10mmの分割とした。また、図中に①～④で示した障害物間中央位置の試料上昇高さを10秒毎にプロットし、この値を用いて解析結果の評価を行った。

3.2 境界部分の低減

境界部のレオロジー定数の低減を行う範囲は、固体（型枠）表面より1要素（厚さ10mm）とした。実際に流動している状態における境界部分のレオロジー定数を測定することは難しいため、表1に示す各種低減条件で解析を行い、その結果を実験結果と比較して、最適な低減条件を絞り込むこととした。ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ に対応する見かけの粘性係数 η' を1/1～1/10に低減した。また、垂直応力の増加にともないせん断抵抗力が増加するとの研究結果⁹⁾を考慮して、コンクリート自重による垂直応力が作用する型枠底面および障害物上面の低減率を他の

図2 解析モデル（障害物粗）

表1 境界部分の低減条件

低減条件	
ケース1	低減しない
ケース2	すべての境界部を1/5
ケース3	すべての境界部を1/10
ケース4	型枠底面と障害物上面の境界部を1/2その他を1/5
ケース5	前後の型枠に接する境界部を1/10その他を1/1

図3 低減ケース1～3の試料上昇高さ

図4 低減条件ケース4.5の試料上昇高さ

図5 実験における試料上昇高さ

型枠面より小さくしたケースについても解析した。垂直応力はコンクリートの高さ（深さ）により変化するため、打設の進行にともないせん断抵抗力も変化するものと考えられるが、計算が煩雑となるため今回の解析では一定値とした。

なお、実験に用いたコンクリートは、粉体系の高流動コンクリートであり、スランブフロー69.1cm、50cm フロー到達時間5.6秒であった。これらのコンシステンシー試験結果と球引上げ試験¹⁹⁾の結果¹⁹⁾などから、解析に用いるレオロジー定数は、降伏値 τ_y を50Pa、塑性粘度 η を100Pa・sと設定した。

3.3 解析結果および考察

境界部のレオロジー定数の低減条件を変えて解析した結果を図3.4に、試料上昇高さ（図2中の①～④の高さ）と経過時間の関係として示す。また、図5に実験で得られた試料上昇高さを示す。図中で、同時刻における各測点間の高さの差は、流動中の勾配を示し、同時刻における①と④の高さの差は全体的な勾配を示す。

ケース1では、各測点間および全体の流動勾配とも、すべての時刻において非常に大きい。先に述べたように、壁状の構造物などの3次元解析を行うにあたっては、境界部分の見かけの粘性係数を低減する必要があることがわかる。ケース2～5においては、比較的实验結果を良くシミュレートしている。ケース3では、各測点間および全体の流動勾配とも、実験結果より小さめの値となっている。ケース2では、全体的な勾配は実験結果を良くシミュレートするものであるが、③と④の20秒後や①と②の30～50秒後などで一部異なる。ケース4,5においては、微細な部分に違いはあるが、各測点間および全体の流動勾配とも非常に良く実験結果をシミュレートしている。

実験結果を良くシミュレートできたケースは、前後の型枠面に接する境界部分を他の境界部分よりも大きく低減して計算したものであった。ケース2,3が、ケース4よりも一致しなかった原因は、前後の型枠面に接する境界部分以外の低減率が大きすぎたためと考えられるが、垂直応力を考慮した効果は顕著ではないことが予想できる。境界部分にレオロジー定数の小さい層が存在する現象は、すべての境界で等しく生じるものと考えられ、前後の型枠面だけを大きく低減する必要があるとは考えにくい。そこで、壁近傍の流動現象を明確にするため、流れを単純化したモデルによって検証を行った。

図6に解析モデルと解析結果を示す。矩形の管内の流入側に流速（管内の流速が壁型枠の解析時の流速と同程度になる値に設定）を与え、壁の厚み方向（Y方向の中心）で対称モデルとした。流体の接する境界部はすべて non-slip 条件とし、境界部のレオロジー定数の低減等は行わず、重力加速度をZ方向に与えた状態で、降伏値 τ_y を50Pa、塑性粘度 η を100Pa・sとして解析を行った。図中左側の境界部無処理の

結果において、XY平面3.5秒にて境界部に接する面で流体が存在しない部分が発生し6.0秒後でも依然として存在しない部分がある。XZ平面の出力図によれば、重力により上面で付着や剥離が生じるが、下面では流体の存在しない部分は発生しない。

本解析のVOF法は、一般に自由表面の形状解析に用いられるものである。流体体積率VOF値<1.0の部分については、周囲のVOF値の分布により流体表面を推定するが、運動方程式等の計算段階では、VOF値=1.0と同様に処理される。つまり、流体と境界との接触量等の流体形状は考慮されておらず、VOF値に応じた抵抗力が取り扱われている。このため、VOF値<1.0の要素において、流体と境界が接触していない場合においても抵抗力が発生したり、接触面に相当する抵抗力とは異なる抵抗力が作用する場合がある。材料の粘性が小さい場合

図6 矩形管内の流動解析

表2 VOF値を乗じる解析条件

	低減条件
ケース6	すべての要素のレオロジー定数にVOF値を乗ずる
ケース7	VOF値を乗じ、さらにすべての境界部を3/4に低減
ケース8	VOF値を乗じ、さらにすべての境界部を1/2に低減

図7 VOF値を乗じた場合の試料上昇高さ

は、これによる誤差は形状解析にほとんど影響しないが、粘性が大きい場合には無視できないものとなる。流動中の先端等の境界部分においては、ひずみ速度が大きく粘性も大きいため、過大な抵抗力が流れを阻害する方向に作用する。このため、この部分で力の変化が不連続になり、なめらかな流れにならないと考えられる。したがって、すべての要素のレオロジー定数に VOF 値を乗じることで、形状を考慮した力を作用させる近似手法を試みた。その結果を図6の右側に示す。境界部に特に処理を行わない結果と比較して、流体の存在しない不自然な部分が発生せず、連続的でなめらかな流れが再現されている。壁型枠のシミュレーションにおいても同じ効果が得られるものと考えられる。

表2に示すように、VOF 値を乗ずる条件を変化させて解析を行った。その結果を試料上昇高さと経過時間の関係として図7に示す。特に境界部分の低減を行わずに VOF 値を乗じただけのケース6において、図3のケース1と比較して、流動勾配が大きく改善され、VOF 値を乗じたことによる効果が確認できる。また、実験結果との比較によれば、境界部分の低減は必要であるものの、それほど大きく低減する必要はなく、すべての境界部分を1/2とするケース8でほぼ現象をシミュレートすることができた。つまり、過大であった前後の型枠面による影響が適正になったと考えられる。低減率1/2は、モルタルのレオロジー定数がコンクリートの1/10程度¹²⁾であること、境界部分の厚さが実際にはごく薄いものであるのに対して、解析では1要素(10mm)としていたこと等を考慮すれば妥当な値と考えられる。境界部分の要素厚さを変化させた場合には、低減率を変える必要が考えられるが、境界面の挙動を適切に評価するためと解析時間の面から低減率を1/2とし、境界部分の要素厚さを10mm 程度とすることが望ましい。

境界部分の取り扱い方法は、境界部分要素の見かけの粘性係数に VOF 値を乗ずるとともに、1/2に低減する条件に決定した。

続いて、フレッシュコンクリートのレオロジー定数と壁型枠中に配置する障害物量をパラメータとした解析を行い、本境界部の低減方法の適用性を確認する。

4. 解析および実験的検証

4.1 解析項目

解析に用いたレオロジー定数を表3に示す。標準的な高流動コンクリートの調査(標準調査)に加えて、降伏値がやや大きい調査(降伏値大)、塑性粘度がやや大きい調査(粘性大)についても解析を行った。降伏値大は高性能 AE 減水剤の添加量を減少させたものであり、粘性大は増粘剤を添加し、高性能 AE 減水剤の添加量を増加させたものである。それぞれ、スランプフローや50cm フロー到達時間と球引上げ試験の結果¹³⁾からレオロジー定数を決定した。この他、障害物量を増加させたもの(解析モデルを図8に示す)についても解析を行った。この場合も、コンクリートの打設方法および解析領域内(壁型枠およびロート)のXY, YZ 平面のメッシュ分割は、図2の解析モデルと同様である。

4.2 結果の考察

図9～14に、打設されたコンクリートが0.01, 0.03, 0.06, 0.09m³の時点で流動中の形状を比較したもの、および、試料上昇高さ(図2,8中の①～④の高さ)と経過時間の関係を解析条件毎に示す。図9の標準調査における障害物粗の試料上昇高さと経過時間の関係は、図7の

ケース8および図5に相当する。流動形状の図中の数値は、流動形状を近似する直線(図中の細い線)の勾配を示し、上段が解析結果、下段が実験結果である。

図9の標準調査における障害物粗の流動形状については、各段階ともに解析結果と実験結果の間に大きな違いは見られない。レオロジー定数が適切で、流れのパターンを忠実にシミュレートすることができたためと言える。図中に示した近似直線の勾配については解析結果がやや大きめの傾向を示すが、その差は微少であった。

図10の標準調査における障害物密の流動形状については、体積0.01m³の時点で大きく異なる。これは、実験において、打設開始直後にロート中で骨材が閉塞する現象が発生し、短時間ではあったがコンクリートが供給されなかったため、その間に高流動コンクリートのセルフレベリング性により、流動勾配が減少したことによる。これ以外のケースではいずれも良くシミュレートできており、近似曲線の勾配も体積0.01m³の場合を除いて良く一致している。近似曲線の勾配は、標準調査における障害物粗よりも大きくなっており、その傾向は打設中期の体積0.03, 0.06m³の時点において顕著である。試料上昇高さと経過時間の関係においても、20～70秒の範囲で、障害物密の方が①～④

表3 解析に用いたレオロジー定数

	レオロジー定数	
	降伏値 τ_y (Pa)	塑性粘度 η (Pa·s)
標準調査	50	100
降伏値大	100	100
粘性大	50	200

図8 解析モデル(障害物密)

図9 標準調査における障害物粗の流動形状

図 10 標準調合における障害物密の解析結果と実験結果の比較

図 11 降伏値大における障害物粗の解析結果と実験結果の比較

図 12 降伏値大における障害物密の解析結果と実験結果の比較

図 13 粘性大における障害物粗の解析結果と実験結果の比較

図 14 粘性大における障害物密の解析結果と実験結果の比較

の高さの差が大きく、流動勾配が急であることがわかる。また、流動が停止するときの勾配については、障害物量による差は顕著ではない。障害物量が増加することは障害物間の間隙が減少することであり、障害物の間隙比の現象が見かけ上の降伏値および塑性粘度の増加になるとの既往の研究結果⁷⁾にも一致している。試料上昇高さや経過時間の関係も、閉塞した区間においては実験結果と異なるものの、その他は良く一致している。

図11の降伏値大、障害物粗の流動形状については、0.03m³の時点でいくぶん形状が異なるが、その他の形状は一致している。近似直線の勾配については、解析結果の方が大きくなる傾向が現れている。試料上昇高さや経過時間の関係において、解析結果は全般に①～④の高さの差が大きく、流動勾配が急になり、流動が停止した後に残留する勾配についても大きくなっている。同じ障害物量の型枠においては、降伏値の増加は、全般の流動勾配上昇に作用するとともに、流動が停止するときの形状にも大きな影響を与えるものと考えられ、解析において顕著にその影響が現れている。解析に用いた降伏値、塑性粘度は、球引上げ試験結果によって求めた。フレッシュコンクリートのレオロジー一定数は、測定方法および換算方法によって測定値に大きな差異がみられるのが現状であり、本解析で用いた値も誤差を含む可能性が考えられる。たとえば、解析で用いる降伏値が本来の値より高く設定されていた場合、最終的な勾配が大きくなり、流動中の勾配にも影響を与える。本流動シミュレーションシステムをより完全なものとするためには、レオロジー一定数測定の方法などの検討も必要である。

図12の降伏値大、障害物密において近似直線の勾配が大きくなる傾向が見られるが、流動形状は比較的良くシミュレートされている。試料上昇高さや経過時間の関係においては、50～60秒程度までの解析結果と実験結果の差は小さいが、その後差が大きくなる。解析結果の最終勾配が大きいの、解析で用いた降伏値が大きいためであった可能性があり、流動中期の差が顕著でないことより、障害物量増加による塑性粘度の見かけ上の増加の方が、流動勾配に与える影響が顕著である。

図13の粘性大、障害物粗においては、近似直線の勾配が大きくなる傾向が幾分見られるものの、流動形状は比較的良くシミュレートされている。試料上昇高さや経過時間の関係においては、40～50秒程度までの解析結果と実験結果の差は小さいが、その後差が大きくなる。特に50秒以降で①の上昇量が実験結果と異なっている。時間の経過とともに①の高さが増加して、投入位置（ロート先端）との距離が小さくなると、解析においては塑性粘度が大きいためか、投入口から型枠中までコンクリートが連続してしまうのに対し、実験ではこのような現象は見られない。解析では、連続になるため上部からも流れに対する拘束を受け、①の試料上昇高さが大きくなる。これは、本解析例の特有の位置関係による現象と考えられる。

図14の粘性大、障害物密においても、近似直線の勾配が大きくなる傾向が見られ、流動形状については0.06m³の時点で異なっている。試料上昇高さや経過時間の関係においても、粘性大、障害物粗の場合と同様に、50秒以降で①の上昇量が実験結果と異なっている。障害物量が増加し、見かけ上塑性粘度が増加する⁷⁾ため、投入位置から型枠中までコンクリートが連続する現象の影響が顕著になるものと考えられる。試料上昇高さや経過時間の関係においては、①以外では、比較的良く一致している。実験において、塑性粘度の増加は、主に流動途中の勾配を増加させるものであり、停止するときの形状に与える影響は小さいことがわかった。また、解析結果も同様の傾向を示した。

全般的にみて、一部にレオロジー一定数の設定やコンクリート投入部の解析上の取り扱いに起因するとみられる誤差が生じたが、これらは顕著ではなく、全般的に良好なシミュレーション結果が得られたと思われる。

5. まとめ

本研究では、障害物を持つ壁型枠を対象としたフレッシュコンクリートの3次元流動シミュレーションを行った。標準的な流動性能を持つ高流動コンクリートを用いた解析と、同様の条件で実施した実験の結果を比較することによって、境界部分の取り扱い方法について検討した。また、フレッシュコンクリートのレオロジー一定数と壁型枠中に配置する障害物量をパラメータとした解析および実験を行い、結果を比較・検討した。本研究によって得られた知見は、以下のとおりであった。

- 1)境界部分の取り扱いについては、3次元解析において、すべての要素のレオロジー一定数にVOF値（流体体積率）を乗ずるとともに、境界部分ではその値を1/2に低減する方法を提案した。
- 2)本低減方法を用いて、レオロジー一定数と壁型枠中に配置する障害物量をパラメータとした解析を行った結果、解析結果と実験結果の違いは顕著なものでなく、実現象を十分にシミュレートすることができた。
- 3)調査によらず障害物量が増加することで流動勾配が増加し、見かけ上塑性粘度が増大する実現象を解析においてもシミュレートすることができた。
- 4)降伏値の増加は全般の流動勾配上昇に作用するのに対し、塑性粘度の増加は主に流動途中の勾配を増加させるという実現象を解析においてもシミュレートすることができた。

引用文献

- 1)村田次郎，菊川浩治：まだ固まらないコンクリートのレオロジー一定数測定法に関する一提案，土木学会論文報告集，pp.117～126，1979.4.
- 2)吉野 公，西林新蔵，井上正一，黒田 保：コンクリートのレオロジー一定数に及ぼす使用材料の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.581～586，1995.6.
- 3)水口裕之，河野 清：平行板プラスとメータによるフレッシュコンクリートのレオロジー一定数測定法に関する検討，フレッシュコンクリートの物性値の測定ならびに挙動に関するシンポジウム論文集，pp.17～24，1983.3.
- 4)森 博嗣，田中政史，谷川恭雄：フレッシュコンクリートのせん断変形性質に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.421，pp.1～10，1991.3.
- 5)寺田謙一，谷川恭雄，森 博嗣，黒川善幸，三島直生，若林信太郎：せん断ボックス試験に基づくモデル材料を用いたフレッシュコンクリートのレオロジー性質に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.511，pp.17～24，1998.9.
- 6)森 博嗣，谷川恭雄，黒川善幸，小村理恵：フレッシュコンクリートのスランピング挙動に関するレオロジー的考察，コンクリートの製造システムに関するシンポジウム論文集，pp.43～48，1992.5.
- 7)神田 亨，青景平昌：流動シミュレーションの実施工への適用に関する一考察，フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集，pp.37～42，1986.3.
- 8)森 博嗣，谷川恭雄：粘塑性有限要素法によるフレッシュコンクリートの流動解析，日本建築学会構造系論文報告集，No.374，pp.1～9，1987.4.
- 9)森 博嗣，谷川恭雄：フレッシュコンクリートの構成則に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.396，pp.9～16，1989.2.
- 10)榊ソフトウェアアクレイドル：3次元熱流体解析プログラムSTREAM
- 11)石黒和浩，富谷潤一：フレッシュコンクリートの流動シミュレ

ション（市販の流体解析コードの適用性），土木学会年次学術講演概要集第5部，pp. 1028～1029，1995. 9.

- 12) 青山晴洋，森博嗣，富谷潤一，石黒和浩，星野実，金井健一：障害物を有する壁型枠への高流動コンクリートの打設実験（その1 調合と基本性質），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），A-1，pp. 741～742，1997. 9.
- 13) 石黒和浩，森博嗣，富谷潤一，牧保峯，齊藤和秀，荒島猛：障害物を有する壁型枠への高流動コンクリートの打設実験（その2 壁型枠打設および粗骨材分布の均一性），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），A-1，pp. 743～744，1997. 9.
- 14) 石黒和浩，森博嗣，富谷潤一：障害物を有する壁型枠の2次元流動シミュレーション，土木学会年次学術講演概要集第5部，pp. 378～379，1998. 10.
- 15) 石黒和浩，森博嗣，富谷潤一：フレッシュコンクリートの流動シミュレーション（その1 障害物を有する壁型枠），日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），A-1，pp. 989～990，1998. 9.
- 16) 土木学会：フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集，pp. 190～192，1997. 9.
- 17) 野口貴文，友澤史紀，呉 相均：高流動コンクリートの間隙通過性に関するレオロジー的考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17，No. 1，pp. 23～28，1995. 6.

（2000年3月9日原稿受理，2000年8月2日採用決定）