

流動解析手法を用いたフレッシュコンクリートの施工性評価に関する研究

浦野 真次 根本 浩史
(技術研究所) (土木技術本部)

Study on Evaluation of Filling-ability of Fresh Concrete by Flow Simulation

by Shinji Urano and Hiroshi Nemoto

Abstract

In this paper, MPS method was applied to fluid analysis of self-compacting concrete. MPS method is one of the particle method, and it is suitable for the simulation of moving boundary or free surface problems and large deformation problems. The constitutive equation of fresh concrete is assumed as bingham model. In order to investigate flow Stoppage and flow speed of fresh concrete, numerical analysis examples of slump flow and L-flow test were performed. In addition, to evaluate verification of compactability of self-compacting concrete, numerical analysis examples of compaction at the part of CFT diaphragm were performed.

As a result, it was found that the MPS method was suitable for the simulation of compaction of fresh concrete, and a just appraisal was obtained by setting shear strain rate of flow-limit and limitation point of segregation.

概 要

本研究は、流動解析手法による実際の構造物を対象とした施工性の評価方法の確立を目的として、粒子法の1つであるMPS法を適用し、フレッシュコンクリートの流動解析手法としてのMPS法の有効性と課題について検討を行った。その結果、フレッシュコンクリートの構成則をbi-viscosityモデルとしたMPS法による流動解析結果は、フレッシュコンクリートのスランプ(フロー)、Lフロー試験、CFTの充填状況の流動挙動をよく表現でき、充填性評価方法として有効であることを示した。実際の構造物を対象とした施工性の評価では、閉塞などの現象を評価するため、ビンガム流体の「分離限界点」を指標として、CFTの圧入時のダイヤフラム部付近における材料分離や閉塞の不具合の危険性について評価できる可能性があることを示した。

§1.はじめに

構造物の品質保証および施工の合理化を目的として、また締固め作業が困難な構造物の構築に対して、土木・建築を問わず高流動コンクリートと呼ばれる流動性の高いコンクリートが適用されている。流動性の高いコンクリートは、比較的複雑な断面形状や過密配筋部などに自重やポンプの圧入のみで充填することが要求されるため、事前にその充填性を把握することが非常に重要となる。このため、構造物によっては実大規模の施工実験が必要となり、費用と期間を要するため、多くの実験ケースを行うことができない。しかし、コンクリートの流動解析手法を用いた施工性の評価技術を確認することができれば、多くのパラメータスタディを行うことができ、事前の施工性の予測が可能となる。実大施工実験を行うとしても、確認の実験だけ行えばよく、その大幅な省略が可能となる¹⁾。

フレッシュコンクリートの流動解析を用いた施工性の評価には大別して2つの方向性があると考えられる。1つは実大規模の型枠や充填個所の流動挙動を予測し流動勾配や未充填個所を検討する方向であり、もう1つは局所的な領域でのコンクリートの分離挙動や閉塞現象を予測する方向である。前者は、マクロな挙動の追跡が目的であるため、必ずしもコンクリートの材料をすべて正確にモデル化する必要はなく、骨材の運動などを考慮しなくとも、フレッシュコンクリートを連続体と仮定して評価することが可能である。一方、後者ではコンクリートの材料を可能な限り正確にモデル化し、非連続体と仮定して微視的な挙動を検討する必要がある。それぞれの評価の目的や求められる解析の精度などに応じて、適した解析手法を選択する必要がある²⁾。筆者らは、これまで提案されているフレッシュコンクリートの流動解析手法の中で、粘塑性空間要素法³⁾を用いて、地下連続壁のコンクリートやコンクリー

ト充填鋼管柱(CFT)を対象として、充填状況の評価などを行った^{4),5)}。粘塑性空間要素法では、フレッシュコンクリートを連続体であるビンガムモデルとして解析を行い、比較的大きな領域の充填挙動を可視化することができると考えられ、施工性の評価に有力な手法であることを示した。しかし、解析は2次元断面を対象とし、要素分割の煩雑さから複雑な形状や障害物を取り扱うことができず、フレッシュコンクリートのスランプフローや粘性の相違を明確に評価できないなどの課題も示された。

近年、数値解析手法の高度化および計算機能の向上に伴い、大変形問題に適した解析手法として、粒子法の1種であるMPS(Moving Particle Semi-implicit)法が提案され⁶⁾、ニュートン流体を液相とする実現象をよく再現できることが報告されている。MPS法は、非圧縮性流れを解析する有力な解析法の1つであり、セルや要素を必要とせず自由境界の大変形を容易に表現できる手法である。そのような利点に基づき、ニュートン流体ではないフレッシュコンクリートを対象として、MPS法による3次元流動解析が試みられるようになってきた^{7)~10)}。富山らは、MPS法におけるフレッシュコンクリートの構成則の適用性の課題などをLフロー試験やスランプ試験の解析結果に基づき検討し⁹⁾、¹⁰⁾、その有効性を示した。しかし、MPS法を用いた流動解析での流動停止判定などの課題により、型枠内での充填挙動での流動勾配や未充填箇所を検討する段階には至っていない。また、フレッシュコンクリートのモデルを連続体で仮定しているため、狭隘な断面での閉塞の危険性があるような箇所での施工性の評価手法が確立しておらず、MPS法により実際の施工を対象とした検討はなされていないのが現状である。そこで、本研究では、フレッシュコンクリートの施工性の評価手法としてのMPS法の有効性について検討を行った。

§2.解析手法

2.1 MPS法の概略

MPS法は、対象とする空間の要素分割を必要とせず、粒子(計算点)を発生させ、個々の流体粒子の運動を見るラグランジュ法で非圧縮性流れを解析する手法である。MPS法では連続体を有限個の粒子に置き換え、粒子間相互作用モデルに重み関数 w を利用する。任意の粒子に作用する力はその粒子から一定の範囲(影響半径)内に存在する粒子と相互作用すると、重み関数は式(1)を用いている。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e - r}{r_e} & r \leq r_e \\ 0 & r_e < r \end{cases} \quad (1)$$

ここで r は粒子間距離、 r_e は粒子間相互作用の及ぶ範囲の半径である。粒子 i およびその近傍粒子 j の位置ベクトルをそれぞれ \vec{r}_i 、 \vec{r}_j とすると粒子 i の位置における重み関数の和をとった粒子数密度は式(2)であらわされる。

$$\langle n \rangle_i = \sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \quad (2)$$

非圧縮性流れでは、流体の密度は一定であるので、粒子数密度も一定である。粒子の初期配列からこの一定値を n^0 とした。

支配方程式である連続の式およびNavier-Stokes式に関して、支配方程式に含まれる微分演算子の勾配とラプラシアンは、粒子 i のある物理量を Φ として下式のモデルが用いられる。

$$\langle \nabla \Phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{\Phi_j - \Phi_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} (\vec{r}_j - \vec{r}_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right] \quad (3)$$

$$\langle \nabla^2 \Phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} \left[(\Phi_j - \Phi_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right] \quad (4)$$

d は空間次元数、 λ は変数分布の分散を解析解と一致させるための係数であり、下式であらわされる。

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) |\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2}{\sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)} \quad (5)$$

上記のような勾配やラプラシアンの微分演算子が支配方程式に導入される離散化の方法がMPS法の特徴であり、入部ら^{7),8)}、富山ら^{9),10)}の解析方法と同様である。なお、後述する構成則に示すように材料の非線形性を有することから、富山らは計算精度の向上を図るため非線形性に対する収斂計算を行っているが¹⁰⁾、本解析では計算の時間ステップを考慮することにより計算精度を確保することとした。MPS法の詳細については、既報⁶⁾を参照されたい。

一般的に、粒子法では壁境界を粒子として表して計算するが、本手法では壁境界を粒子で表現せず、壁境界に表面メッシュを用いた。粒子と影響半径内にある壁境界との相互作用を計算するが、壁粒子を用いないため、応力などの計算上粒子解像度を高くすることなく壁境界を正確に表すことができ、壁粒子を用いて同

数の流体粒子を用いた計算をした場合と比較すると大幅に粒子数を削減することができる。なお、壁境界面はノンスリップ条件とした。

2.2 粒子間距離の設定

本解析では、フレッシュコンクリートをビンガム流体と仮定し均質な連続体モデルとして取り扱っている。このため、当然のことながら流動挙動を解析するうえで粗骨材などのコンクリートの個々の材料の挙動は考慮しておらず、均質なビンガム流体を粒子化して挙動を検討している。このとき、計算領域全体に対して粒子間距離を小さくするほど粒子数は多くなり、詳細な流動状況の表現が可能となる。本研究では、解析対象すべてのケースにおいてビンガム流体のマクロな挙動を表現することを考慮して、予備解析の結果から、粒子間距離を 10mm とした。流動状況を解析結果の図として表示する場合、粒子間距離を 10mm とすると 1 つの粒子は直径 10mm の粒子として表現される。この 1 つ 1 つの粒子が均質なビンガム流体の流動を表現しており、コンクリート中の骨材の動きを表現するものではない。

2.3 フレッシュコンクリートの構成則

本解析では、フレッシュコンクリートを連続体モデルとして取り扱い、ビンガム流体と仮定した。既往の文献²⁾と同様に、ビンガム流体として仮定した場合、せん断応力が降伏値未満では不動状態とみなされ、ひずみ速度が零の状態となるため応力が不定となり解析が不可能となる。そのため、本解析手法においても、**図-1**に示すようにせん断応力が降伏値近傍の応力に達するまでは、高粘性流体として扱う **bi-viscosity** モデルとした。構成式は次の二つの式で示される。

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\left(\eta + \frac{\tau_y}{\sqrt{\Pi}}\right)\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \quad \Pi \geq \Pi_c \quad (6)$$

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\left(\eta + \frac{\tau_y}{\sqrt{\Pi_c}}\right)\dot{\epsilon}_{ij}^v \quad \Pi < \Pi_c \quad (7)$$

ここで、 P は圧力、 η は塑性粘度、 τ_y は降伏値、 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ は流動時のひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_{ij}^v$ は不動時のひずみ速度、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ、 $\Pi = 2\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}$ である。 Π_c は流動状態と不動状態の降伏基準値であり、流動限界ひずみ速度 π_c を用いて次式であらわされる。

$$\Pi_c = (2\pi_c)^2 \quad (8)$$

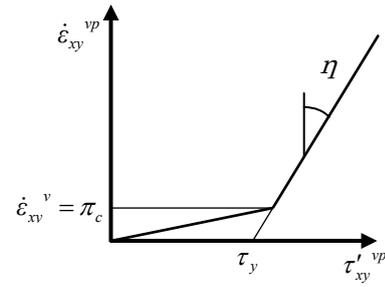


図-1 bi-viscosity モデル

この流動限界ひずみ速度 π_c をより低く設定することにより、構成則上はビンガムモデルに近づくこととなる。しかしながら、 π_c を小さくした場合、実際のコンクリートに対し解析上の流動停止時間が長くなったり、安定条件を満たす解析時間間隔が短くなるため計算時間が長くなるなどの点が指摘されている²⁾。流動停止の判定は、フレッシュコンクリートの施工性の評価において流動勾配や未充填個所を検討する場合に重要な問題である。適切な流動停止の判定が行われなければ、流動途中の挙動は精度よく解析できたとしても、最終的に領域内を流動してしまい、流動勾配や未充填個所を評価することはできない。

本解析では、課題である上述した適切な流動限界ひずみ速度 π_c の検討、ビンガム定数の相違が流動速度に及ぼす影響の検討および MPS 法のフレッシュコンクリートの施工性の評価方法の適用について検討した。

§3.MPS 法による高流動コンクリートの流動解析

3.1 流動停止の判定条件に関する検討

スランプ試験を解析する場合、既に述べたように、フレッシュコンクリートを **bi-viscosity** モデルとしているため、流動限界ひずみ速度による不動状態の判定を行わなければ流動が停止せず、任意のスランプあるいはスランプフローを表現することができない。そこで、不動状態の判定の基準として扱う流動限界ひずみ速度 π_c を検討するため、スランプ試験の解析を実施した。

図-2に示すように、解析は 3 次元としてコンクリート部分を粒子化し、実際の試験でスランプ板となる底面は、**図-2**には示していないが、コンクリートの下面に配置して壁境界として表面メッシュを用いた。粒子化はコンクリートのみであり、生成粒子数は 5342 個であった。スランプ試験のスランプ開始からフローしていく流動の途中で、その流動が停止する状態を模擬することを目的として、降伏値 $\tau_y = 1000\text{Pa}$ 、塑性粘度 $\eta = 300\text{Pa}\cdot\text{s}$ を入力値とした。既往の文献¹¹⁾に示される降伏値算定式(9)によれば、降伏値 $\tau_y = 1000\text{Pa}$

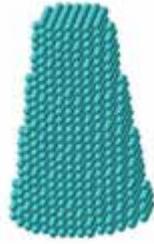


図-2 スランプフロー試験の粒子モデル

の場合、スランプは約 17.5cm となる。

$$\tau_y = \frac{\alpha \rho G (H - Sl)}{100\sqrt{3}} \quad (9)$$

ここで、 α はスランプの形状パラメータで $7/12$ 、 ρ は試料の密度 (kg/m^3)、 G は重力加速度 (m/s^2)、 H は初期の試料高さ 0.3 (m)、 Sl はスランプ (m) である。

上記のレオロジー定数を入力値として、流動限界ひずみ速度 π_c を $0.01 \sim 0.5$ と変化させた解析を実施した。すべての粒子のひずみ速度が流動限界ひずみ速度以下となり、粒子が不動状態と判定された時点でのスランプとの関係を図-3 に示す。流動限界ひずみ速度 π_c が小さくなるほど不動状態と判定された時点のスランプが大きくなり、入力値とした降伏値 $\tau_y = 1000\text{Pa}$ に相当するスランプ約 17.5cm を超えて流動する状況となった。この図から、本解析では流動限界ひずみ速度 π_c が 0.1 程度が妥当であると考え、解析上の流動停止の判定条件とすることとした。

流動限界ひずみ速度 π_c を 0.1 とした場合のスランプ試験の解析例を図-4 に示す。塑性粘度 $\eta = 300\text{Pa} \cdot \text{s}$ を一定として、降伏値 τ_y を 160Pa および 1000Pa とした解析を実施した。ここで、 $\tau_y = 160\text{Pa}$ の場合は、既往の文献¹¹⁾からスランプフロー 50cm 程度のコンクリートの降伏値を表すものと考え、 $\tau_y = 1000\text{Pa}$ の場合は前述したとおりスランプは 17.5cm の降伏値を表すと考えた。任意の解析ステップでの粒子の流動限界ひずみ速度以上のせん断ひずみ速度が生じている粒子をオレンジ色の粒子で表示し、流動限界ひずみ速度以下のせん断ひずみ速度となった(不動状態と判定された)粒子を青色で示す。

解析結果 (a) に示す $\tau_y = 160\text{Pa}$ の場合、時間の進行とともにスランプフローし、流動開始から 5 秒経過後においてスランプフローが 45cm 程度となるとともに、まだ流動限界ひずみ速度 $\pi_c = 0.1$ の以上のせん断ひずみ速度となる部分(オレンジ色の部分)がある。その後スランプフローが 48cm 程度ですべての粒子が流動限界ひずみ速度 $\pi_c = 0.1$ の以下のせん断ひずみ速度(青色)の不動状態と判定された。一方、(b) に示す τ_y

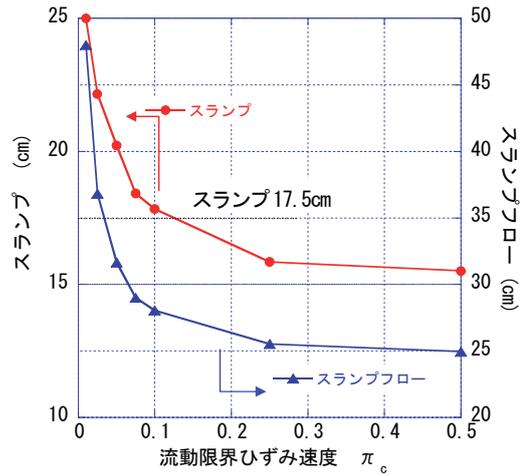


図-3 流動限界ひずみ速度 π_c による不動状態の判定

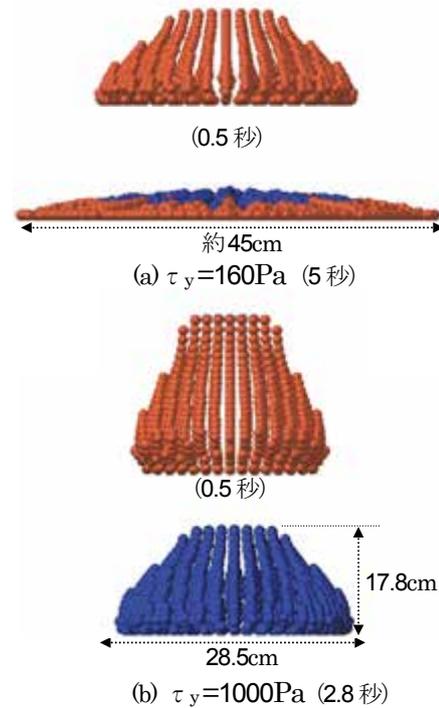


図-4 降伏値を変化させた場合のスランプ挙動

$= 1000\text{Pa}$ の場合、スランプする速度が遅くなるとともに、流動開始から 2.8 秒経過後において、ほぼ 100% の粒子が流動限界ひずみ速度 $\pi_c = 0.1$ の以下のせん断ひずみ速度(青色)となった。この時、スランプ 17.8cm 、スランプフローは 28.5cm であった。以上のスランプ試験の解析結果より、降伏値の相違に対して、流動限界ひずみ速度 π_c を 0.1 とすれば、流動解析上の流動停止の相違を表現する上で問題ないものと考えられる。

図-4 に示す解析結果 (b) のケースおよびスランプ 16.5cm の実際のコンクリートのスランプ挙動の変化(コーンを引き上げてからの上端の上がり)を図-5 に示す。開始から 0.5 秒程度までのスランプ挙動は、解析の方がスランプが大きくなるものの、それ以降のス

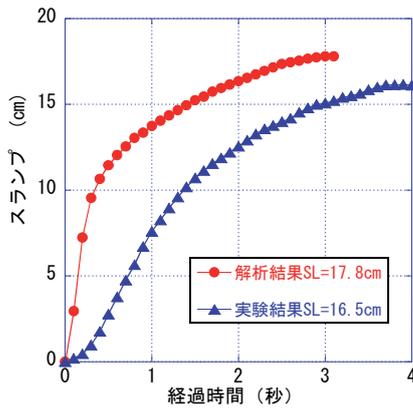


図-5 スランプ挙動の解析結果および実験結果との比較

スランプ変化量の傾向は概ね一致している。0.5秒程度までは実際のスランプ試験のコーンの引上げなどが影響してスランプが変化すると考えられるが、流動途中の変形速度は、塑性粘度が影響を及ぼしていると考えられるため、その影響について検討することとした。

3.2 流動速度に及ぼすビンガム定数の影響

ビンガム定数の相違によって、自重で変形・流動するフレッシュコンクリートの流動速度は変化する。そのため、前述の最終的な流動停止だけでなく、ビンガム定数の相違が流動速度に及ぼす影響について検討することは、本解析を施工性の評価手法として適用する上で重要である。そこで、Lフロー試験装置内における50cmフロー時間について、実測値と解析値を比較することとした。ここで、解析値と比較するため、実際のLフロー試験にはモルタルを用いることとした。これは、モルタルではコンクリートと比較して塑性粘度が $1/10$ 以上小さくなるもの²⁾、¹²⁾、フローや漏斗流下時間などから降伏値および塑性粘度を精度よく算定するための方法が提案されていること¹²⁾、また解析上ではコンクリートでもモルタルでもビンガム流体として扱われビンガム定数を変化させるだけであり、特に区別がないためである。

モルタルは、水セメント比を28.4%として、高性能AE減水剤の添加量を調整して流動性の異なる2種類の配合を製造した。その結果、表-1に示すようなミニスランプフローおよびK漏斗流下時間¹²⁾となった。配合Aと比較し、配合Bはフローが大きく漏斗流下時間が短い性状となっている。この実際のモルタルの測定値から降伏値および塑性粘度を既往の実験式(10)、(11)¹²⁾により算定した。

$$\tau_y = 5.45 \times 10^4 / m_{sf} - 140 \quad (10)$$

$$\eta = T_k / 131 \quad (11)$$

表-1 モルタルの流動性およびビンガム定数

配合	ミニスランプフロー m_{sf} (mm)	K漏斗流下時間 T_k (s)	降伏値 τ_y (Pa)	塑性粘度 η (Pa·s)
A	215	19.3	113.5	14.7
B	285	11.6	51.2	8.8

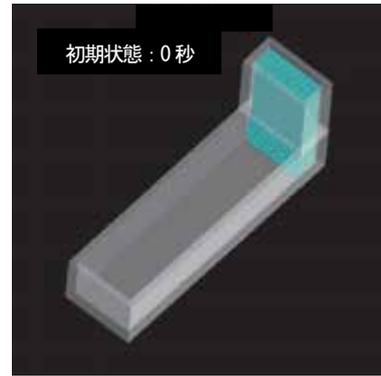
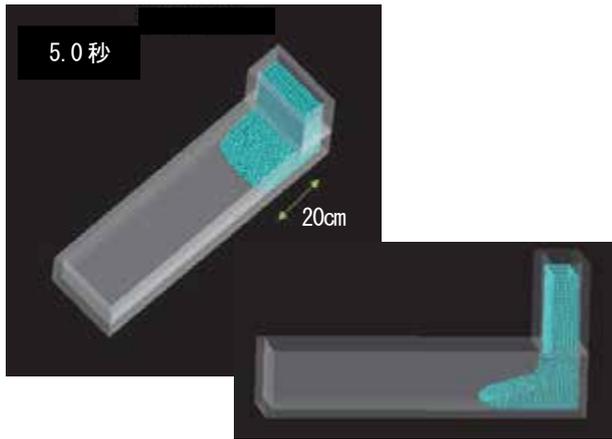


図-6 Lフロー試験の粒子モデル

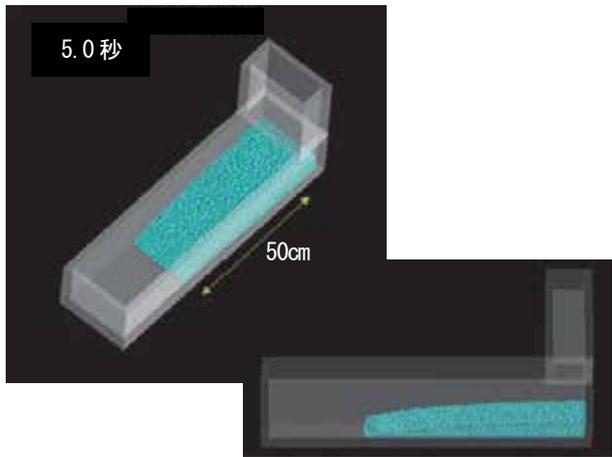
ここで、 m_{sf} はミニスランプフロー(mm)、 T_k はK漏斗流下時間(s)である。算定結果を表-1に示す。これらの配合A、Bのビンガム定数を入力値として、Lフロー試験の解析を行った。

Lフロー試験のモルタルを粒子径10mmでモデル化した状況を図-6に示す。粒子化はモルタルのみであり、生成粒子数は6400個であった。表-1に示す配合A、Bの降伏値 τ_y および塑性粘度 η を入力値として、Lフロー試験の解析を行い、流動開始から約5秒後フローの状況の結果を図-7に示す。なお、本解析では、実験での仕切り板の引上げは考慮せず、解析の開始とともに開口部から流動するものとした。

配合Aの降伏値および塑性粘度のケース(a)では、流動開始から5秒後のフローが約20cm程度であった。これに対して、配合Bの降伏値および塑性粘度のケース(b)では、流動開始から5秒後に約50cm程度までフローしている。両ケースのLフロー試験時の50cmフロー到達時間を比較し、図-8にミニスランプフローと50cmフロー到達時間の関係を示す。ミニスランプフローが大きく漏斗流下時間の小さな配合Bでは50cmフロー到達時間が短く、ミニスランプフローが小さく漏斗流下時間の大きな配合Aでは50cmフロー到達時間が長くなった。したがって、表-1に示したモルタルの流動性状と定性的な傾向は一致し、ビンガム定数の相違を反映する結果となった。しかし、型枠形状が複雑になったり、鉄筋などが配置された場合には、流動速度の傾向が実現象と一致しなくなることも考えられるため、境界条件の摩擦やすべりなどに関し



(a) 配合 A



(b) 配合 B

図-7 Lフロー試験の流動解析結果

て、今後検討する必要がある。

§4.MPS 法によるフレッシュコンクリートの施工性の判定方法に関する検討

4.1 施工性の判定方法の概念

3章における適切な流動限界ひずみ速度 π およびビンガム定数の相違が流動速度に及ぼす影響は、コンクリートやモルタルを連続体であるビンガム流体と仮定したうえで、自重で流動する挙動についての停止や流動速度について検討したものであった。しかし、実際の施工はスランプフローのように自重で充填していく障害物の少ない状態ばかりではなく、狭隘な断面や鉄筋などの障害物が存在する場合が多い。

特に高流動コンクリートなどの流動性の高いコンクリートは、静止した状態においても、施工時に流動している状態においても、十分な材料分離抵抗性を有していることが求められる。しかし、間隙通過時や強制的なせん断力、高速での流動のような動的な状態では、材料の均一性に関して限界状態があるものと考えられ

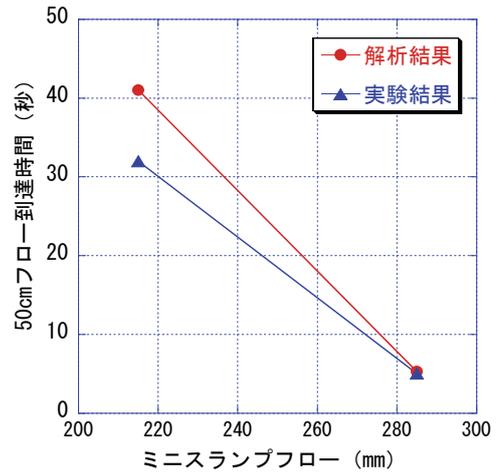


図-8 ミンスランプフローと 50cm フロー到達時間の関係

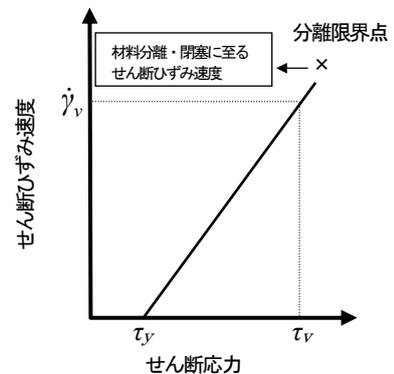


図-9 フレッシュコンクリートのコンシステンシー曲線

る。すなわち、ある一定以上の大きなせん断応力やせん断ひずみ速度となる変形領域では、実際のコンクリートでは材料分離や断面変化部分での骨材のアーチングなどが発生し、流動停止や閉塞が生じるのである。一方、本研究のように、フレッシュコンクリートをビンガム流体と仮定した場合、せん断ひずみ速度が大きい場合や断面変化部分でも材料の均一性は変化せず、流動停止や閉塞は流動解析上発生しない。障害物が少ない場合の流動勾配や充填形状を求めるだけであれば、解析による評価が可能であるが、障害物が存在し閉塞などの現象を評価するためには、何らかの境界条件の設定や判定方法を検討する必要がある。

フレッシュコンクリートをビンガム流体と仮定した場合について、村田は、コンクリートのコンシステンシー曲線は無限長の直線とならず、図-9に示すようにある点においてコンクリートの材料分離を表す「分離限界点」が存在するとしている¹³⁾。したがって、分離限界点という条件を導入すれば、均一なビンガム流体と仮定したフレッシュコンクリートに対して、実際のコンクリートでは材料分離や骨材のアーチングなどが発生して流動停止や閉塞が生じる、という危険性を

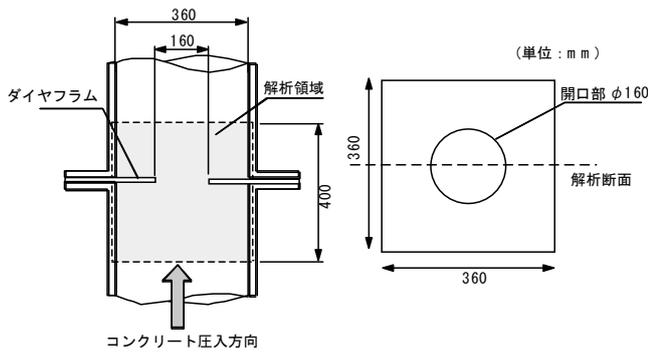


図-10 CFT ダイヤフラム部付近の形状

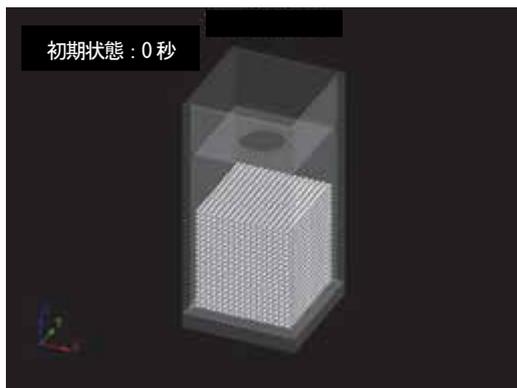


図-11 CFTダイヤフラム部付近の粒子モデル

検討することができると考えられる。以上より、ここではコンクリート充填鋼管柱(CFT)を対象として、コンクリート圧入時におけるダイヤフラム部付近の流動解析を実施し、流動挙動を観察するとともに施工性の判定を試みることにした。

4.2 CFT ダイヤフラム部付近の圧入状況の解析条件

CFTの施工では、コンクリートを柱脚から一気に押し上げるポンプ圧入工法が主流である。CFTは、連続して配置されたダイヤフラムにより流動が阻害されるため、開口部分での閉塞の危険性などが問題となる場合がある。しかし、コンクリートの性状、圧入速度や断面形状などが施工性に及ぼす影響は施工実験を除いて定量的に評価する方法がないのが現状である。

図-10に示すようなCFTダイヤフラム部付近の形状を対象として、コンクリート圧入状況の3次元解析を実施した。鋼管の内径は360×360mmの角形鋼管であり、φ160mmの円形の開口部を有するダイヤフラムが1枚配置されているものである。圧入されるコンクリートを粒子径10mmでモデル化した解析の初期状態を、図-11に示す。生成粒子数は47,775個であった。下方から圧入されるコンクリートは、ダイヤフラムが近くなければ中央部分のコンクリートが大きく盛り上がりながら上昇する場合は少ないと考え、本解析では粒子の初期状態は平面状に配置した。ただし、解析結

果において粒子がダイヤフラム部到達時には若干ではあるが中央が上昇した状態で到達している。これは、壁境界をノンスリップ条件としているためである。また、本解析では、ダイヤフラム部の開口部におけるコンクリート流動挙動に着目し、隅角部などの充填性について検討しなかったため、空気抜きの小孔は省略した。圧入される粒子に初期条件とし鉛直上方にて圧入速度を与え、速度が変化した場合の流動挙動を観察するため、16.7mm/sおよび66.7mm/sの2種類とした。この圧入速度は、それぞれ1.0m/minおよび4.0m/minの打上り高さ、ポンプの吐出量として7.8m³/hおよび31.1m³/hに相当する。圧入するコンクリートの性状は、スランプフロー50cmおよび60cmのものとし、既往の文献^{14), 15)}に示される降伏値算定式(12)によりビンガム定数を定めた。

$$\tau_y = \frac{15^2 \rho G V^2}{4\pi^2 S f^5} \quad (12)$$

ここで、 Sf : スランプフロー(mm)、 ρ : 単位容積重量(g/mm³)、 G : 重力加速度(mm/s²)、 V : 試料の体積(mm³)である。単位容積重量を2.35g/mm³としたときの算定結果より、スランプフロー50cmのコンクリートは降伏値 $\tau_y=127\text{Pa}$ とし、スランプフロー60cmのコンクリートは降伏値 $\tau_y=51\text{Pa}$ とした。ここでは、スランプフローから算定される降伏値の影響を検討するため、塑性粘度は、 $\eta=300\text{Pa}\cdot\text{s}$ で一定とした。既往の文献によれば塑性粘度が300Pa・sのとき、50cmフロータイムは約9秒である¹⁴⁾。

4.3 圧入状況の解析結果

スランプフロー50cm($\tau_y=127\text{Pa}$ 、 $\eta=300\text{Pa}\cdot\text{s}$)のケースについて、圧入速度を16.7mm/sおよび66.7mm/sとした場合の流動解析結果をそれぞれ図-12および図-13に示す。図上段はダイヤフラム開口部からコンクリートが流出した時点であり、下段はコンクリートが解析領域上部まで達した時の充填状況である。それぞれの図中には圧入開始からの経過時間を示す。いずれも、圧入され開口部から流出した後は山形状に盛り上がりながら上昇する結果となった。写真-1に示す実際の充填状況は、圧入速度が16.7mm/sに近い施工での状況を示したものであるが、解析結果の開口部からの流出状況は同様の様子であると考えられる。図-13に示す圧入速度の大きな66.7mm/sの場合、図-12に示す圧入速度16.7mm/sの場合と比較して、山形状の勾配は大きい傾向となっており、圧入速度が大きい場合には開口部からの流出後に鋼管内で平坦になりにくいと考えられる。CFTの形式によっては、比

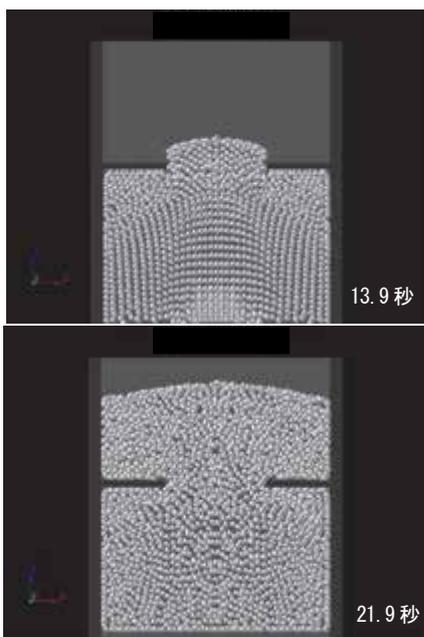


図-12 CFTダイヤフラム部付近の流動解析結果
(圧入速度：16.7mm/s)

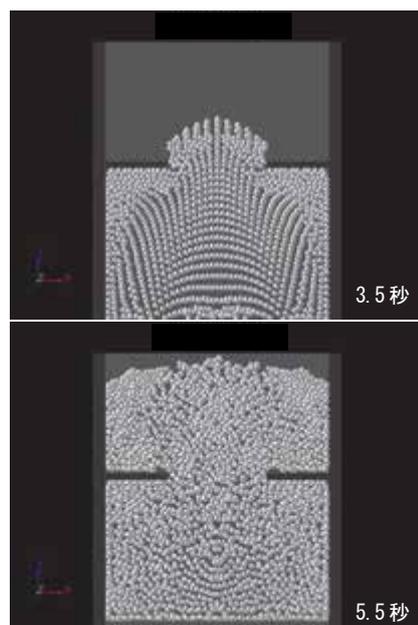


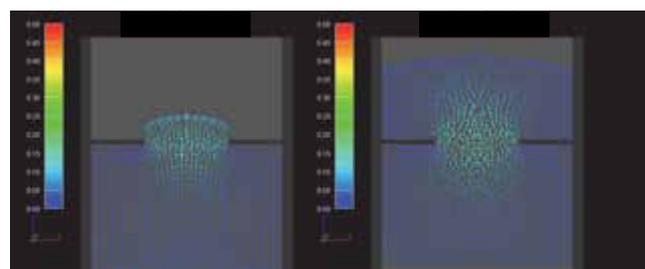
図-13 CFTダイヤフラム部付近の流動解析結果
(圧入速度：66.7mm/s)



写真-1 CFT ダイヤフラム部開口部の充填状況

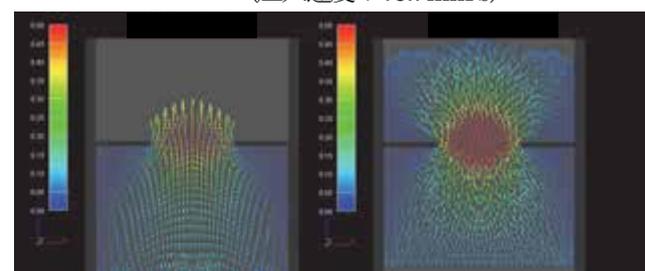
較的近い位置にダイヤフラムが2か所設置されているものもあり、圧入速度が大きくなるほどコンクリートに勾配がつきやすく、ダイヤフラム下面に空隙が生じやすくなることを示唆するものである。

図-14 および図-15 には、図-12 および図-13 のそれぞれの流動状況での速度ベクトルを示す。赤い部分が流速の早い部分を示し、青色になるほど速度が小さいことを示す。速度ベクトルにより、粒子の動きを観察すると、ダイヤフラムの開口部付近において流速が大きくなっていることがわかる。圧入速度が大きいほど、ダイヤフラムの開口部付近の流速が大きい。その速度ベクトルの分布から、下方より流動してきたコンクリートはダイヤフラム開口部の中心に向かって流動し、開口部より流出後放射状に流動する状況が認められる。また、ダイヤフラム下部の隅角部では、流速が非常に小さくなっており、コンクリートの流動しない停滞域となっている。このように、本解析手法によって、充填形状のみならず、流速分布や断面図変化部分での流動停止領域なども観察することが可能であることが示された。



(13.9秒) (21.9秒)

図-14 充填中の速度ベクトル図
(圧入速度：16.7mm/s)



(3.5秒) (5.5秒)

図-15 充填中の速度ベクトル図
(圧入速度：66.7mm/s)

図-12 および図-13 のそれぞれの流動状況における粒子間の相対変位から計算されるせん断ひずみ速度分布のコンター図を図-16 および図-17 に示す。赤い部分がせん断ひずみ速度の大きい部分(4.5～5.0/s)を示し、青色になるほどせん断ひずみ速度の小さい部分(0.0～0.5/s)を示す。いずれの分布状況においても、鋼管の壁面に近い部分やダイヤフラム上下面の隅角部においてせん断ひずみ速度は小さくなり、ダイヤフラム開口部付近で最も大きくなった。圧入速度の小さな

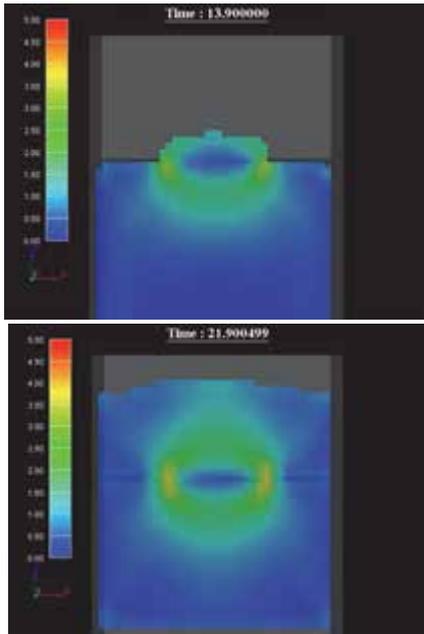


図-16 圧入中のせん断ひずみ速度の分布状況
(圧入速度：16.7mm/s)

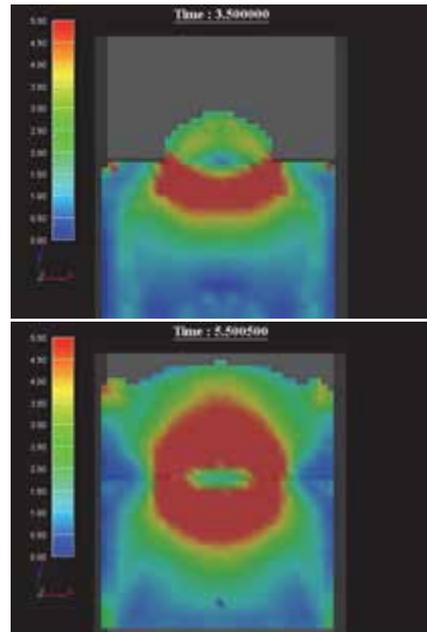


図-17 圧入中のせん断ひずみ速度の分布状況
(圧入速度：66.7mm/s)

16.7mm/s のケースの場合、発生するせん断ひずみ速度も小さくなり、せん断ひずみ速度が4.5～5.0/sとなるような赤い領域はほとんど認められない。一方、圧入速度の大きい66.7mm/sのケースの場合、上段のダイヤフラム開口部からコンクリートが流出した時点では開口部下面において、下段のコンクリートが解析領域上部まで達した時には開口部の上下でせん断ひずみ速度の大きな領域が発生した。ダイヤフラムによって急激に断面が減少したため、既に述べたようにダイヤフラム下面の流動停滞領域が生じる一方で、開口部を通過しようとするコンクリートは大きなせん断力を生じながら流動しているものと考えられる。開口部中心部にはせん断ひずみ速度が周囲よりも小さくなる部分が認められるが、これは開口部の通過時において粒子間に速度差が生じない栓流の状態となっていると考えられる。したがって、流速はダイヤフラム開口部中心部分が最も大きくなっており、せん断ひずみ速度は流動中の変形を要求される個所で大きくなっていることがわかる。

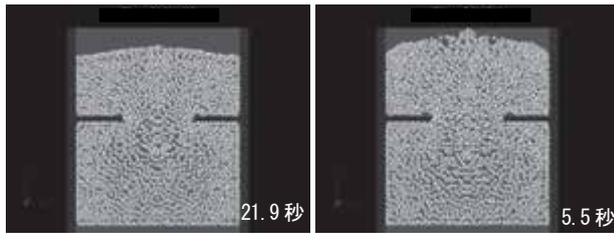
スランプフロー60cm($\tau_y=51\text{Pa}$ 、 $\eta=300\text{Pa}\cdot\text{s}$)のケースについて、圧入速度を16.7mm/sおよび66.7mm/sとした場合のコンクリートが解析領域上部まで達した時の充填状況を図-18に示す。また、同時点において粒子間に生じるせん断ひずみ速度分布のコンター図を図-19に示す。スランプフローが50cmの場合と比較して、充填されるコンクリートの形状や圧入中のせん断ひずみ速度分布にほとんど相違は認められなかった。実際の施工ではスランプフローの相違の

影響はあるものと考えられるが、これは、スランプフローやLフローのような自重での流動挙動よりも圧入という強制的に流動させる状況においては、スランプフロー10cm程度の相違よりも圧入速度の影響の方が卓越するためと考えられる。また、本解析では塑性粘度を一定とし降伏値のみを変化させているが、壁面の境界条件に関して降伏値の相違による摩擦やすべりなどを十分に考慮できていないことも影響していると考えられる。

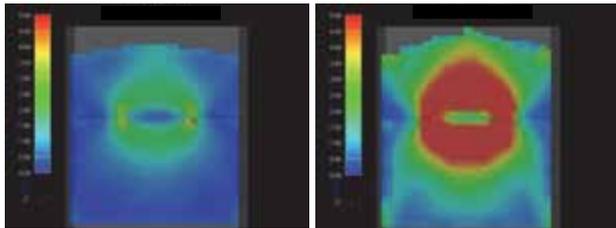
4.4 圧入状況に関する施工性の判定

CFTダイヤフラム部付近の形状を対象として、コンクリート圧入状況の3次元解析を実施し、充填状況、流速分布およびせん断ひずみ速度の分布を観察することができた。しかし、フレッシュコンクリートをビンガム流体で仮定した解析では、ビンガム定数や圧入速度の大小に関わらず流動が停止することはなく、解析領域内の充填が可能である。このため、閉塞などの現象を評価するためには、何らかの境界条件の設定や判定方法を検討する必要がある。図-9に示したような「分離限界点」を指標として、分離限界点を強制的に上回るせん断ひずみ速度を与えられた場合に材料分離や閉塞などの危険性が著しく上昇する、というのが1つの方法として考えられる。そこで、解析で得られた充填状況、流速分布およびせん断ひずみ速度分布の結果のうち、せん断ひずみ速度分布を用いた施工性の判定方法について検討する。

フレッシュコンクリートの分離限界点を求めるため



(16.7mm/s) (66.7mm/s)
 図-18 CFTダイヤフラム部付近の流動解析結果
 (スランプフロー60cmのケース)



(16.7mm/s) (66.7mm/s)
 図-19 圧入中のせん断ひずみ速度の分布状況
 (スランプフロー60cmのケース)

には、実際のコンクリートで材料分離や断面変化部分での骨材のアーチングなどが発生して流動停止や閉塞が生じることを再現して、それに至るせん断ひずみ速度の大きさを求めなければならない。しかし、実際の流動中のコンクリートからせん断ひずみ速度の大きさを測定することが困難であること、またビンガム定数を測定するレオロジー試験を実施した場合においても、試験に関するいくつかの問題点も指摘されている¹⁴⁾。よって、分離限界点を実測値から求めることは困難であると考え、以下に示す方法により分離限界点を暫定的に定めることとした。

筆者らは、高流動コンクリートが自重で変形・流動する際に生じるせん断ひずみ速度分布について、可視化モデルによって実験的に明らかにし、これを報告した^{16),17)}。スラブ状型枠内や壁状の型枠内を水平方向に流動する高流動コンクリートに発生するせん断ひずみ速度のレベルは、最大でも1.0/sであることを確認している¹⁶⁾。一方、鉛直下方に自重で流動し、流動する断面が急激に変化するV漏斗試験に関して、流動中の経過時間に伴うせん断ひずみ速度の分布を図-20に示す。Vg/Vmは粗骨材とモルタルの体積比率を示す。高流動コンクリートの配合を変化させてV漏斗流下時間を変化させた場合、V漏斗流下時間が大きいほど発生するせん断ひずみ速度の最大値も大きくなり、最大で10.0/s程度であることがわかる。マクロ的にとらえれば、流下時間やせん断ひずみ速度は高流動コンクリートの変形性能に対応して変化すると考えられる。このため、例えばV漏斗流下時間12.0秒で発生したせん断

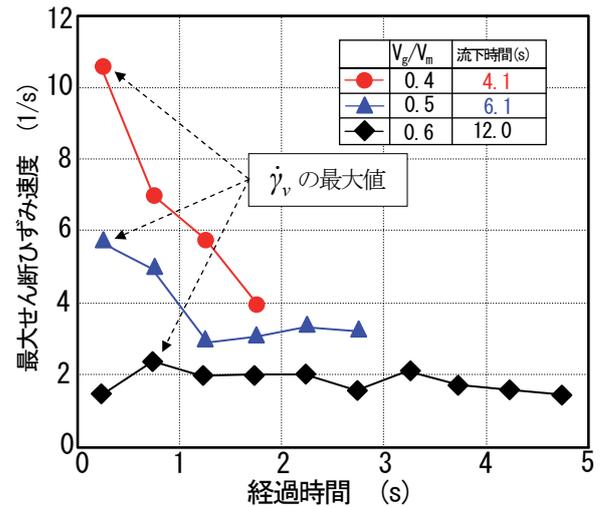


図-20 V漏斗試験の最大せん断ひずみ速度¹⁷⁾

ひずみ速度の最大値が2.0/s程度のコンクリートに10.0/s程度のせん断ひずみ速度が生じるようなせん断力などを与えた場合には、材料分離や閉塞するものと考えた。断面が急激に変化するV漏斗試験装置内で発生するせん断ひずみ速度は、各流下時間を示す高流動コンクリートの変形性能の最大限と断定できないが、材料分離や閉塞などの危険性が著しく上昇する値であると思われる。そこで、V漏斗試験装置内に発生するせん断ひずみ速度の最大値(図-20中の $\dot{\gamma}_v$ の最大値)を分離限界点と仮定し、これを強制的に上回るせん断ひずみ速度を与えられた場合に材料分離や閉塞などの危険性が著しく上昇すると判定することとした。

図-16、図-17および図-19において得られたせん断ひずみ速度のレベルは、圧入速度の大きい66.7mm/sのケースで4.5~5.0/sであった。仮にこの時の高流動コンクリートのV漏斗流下時間が12.0秒であった場合、図-20より分離限界点は約2.0/sと仮定することができ、解析結果でのせん断ひずみ速度のレベルはこの倍程度となるため、閉塞などの危険性が大きいと判定できる。一方、高流動コンクリートのV漏斗流下時間が4.0秒と非常に速い配合であった場合、図-20より分離限界点は約10.0/sと仮定することができ、閉塞などの危険性が小さいと考えられる。

以上のように、施工性の判定方法に関して、フレッシュコンクリートをビンガム流体と仮定して行った流動解析結果によって得られたせん断ひずみ速度の分布と、分離限界点を比較検討することにより、材料分離や閉塞の不具合の危険性について評価できる可能性があると考えられる。しかし、今回検討した分離限界点は可視化実験から求めた仮定の値であり、実際の各種の配合から精度の高い分離限界点の設定方法を検討しなければならない。また、鉛直下方に流動するV漏斗

試験から求めた分離限界点と、上方に圧入する CFT の流動では自重の作用する方向が異なるため、分離限界点が異なる可能性があり、以上の検討は今後の課題である。

§5. 結論

本研究は、実際の構造物を対象とした施工性の評価を目的として、流動解析手法の粒子法の 1 つである MPS 法を適用して、適切な流動限界ひずみ速度の検討、ビンガム定数の相違が流動速度に及ぼす影響の検討およびフレッシュコンクリートの施工性の評価手法としての MPS 法の有効性について検討を行った。その結果、本研究の範囲内で以下のことがいえる。

- (1) フレッシュコンクリートの構成則を bi-viscosity モデルとした MPS 法による流動解析結果は、コンクリートのスランプ(スランプフロー)、L フロー試験、CFT の充填状況の流動挙動をよく表現でき、施工性の評価方法として有効であるといえる。
- (2) フレッシュコンクリートの流動勾配や未充填個所を検討する場合に重要な流動停止の判定のための流動限界ひずみ速度 π_c に関して、スランプフローの流動解析結果より、流動限界ひずみ速度 π_c を 0.1 程度とすることにより、流動解析上の流動停止の判定条件とすることができる。
- (3) L フロー試験の解析において、実測値であるモルタルの流動性状と解析結果における流動速度は定性的な傾向が一致し、ビンガム定数の相違を反映する結果となった。
- (4) CFT ダイヤフラム部付近の形状を対象として、コンクリート圧入状況の 3 次元解析を実施し、充填形状のみならず、流速分布や断面変化部分での流動停止領域なども観察することが可能であることを示した。

- (5) ダイヤフラムの開口部付近において、急激に断面が減少したため、ダイヤフラム下面に流動停滞領域が生じる一方で、開口部を通過しようとするコンクリートは大きなせん断力を生じながら流動し、せん断ひずみ速度の大きな領域が発生した。
- (6) 閉塞などの現象を評価するため、ビンガム流体の「分離限界点」を指標として、分離限界点を強制的に上回るせん断ひずみ速度を与えられた場合に材料分離や閉塞などの危険性が著しく上昇するという評価方法を適用した。これにより CFT の圧入時のダイヤフラム部付近における材料分離や閉塞の不具合の危険性について評価できる可能性があることを示した。

§6. おわりに

以上のように、MPS 法は実際の構造物を対象としたフレッシュコンクリートの施工性の評価を行う上で、非常に有効な手法であることを示すことができた。本研究で示した流動停止条件や分離限界点を導入することで、鉄筋を配置した型枠内への充填性の評価にも応用できると考えられる。ただし、鉄筋などは複雑な境界条件となるため、対象とする解析領域の規模にもよるが解析時間が大幅に増大することが予想される。大まかな充填性や流動勾配、未充填個所の把握を行う上で、配筋条件などの境界条件をどのようにモデル化ができるか、検討が必要である。

謝辞

流動解析の実施に際し、琉球大学山田義智教授、崎原康平助教には、貴重なご意見をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 谷川恭雄, 森博嗣: コンクリートの「施工設計法」の確立を目指して, セメント・コンクリート, No.501, pp.11-20, 1988.
- 2) 土木学会編: 第4章 フレッシュコンクリートのモデル化および充てん解析技術の現状と課題, フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題(II), pp.69-97, 2003.
- 3) 渡辺健治, 寺西浩司, 森博嗣, 谷川恭雄: 型枠内およびパイプ内におけるフレッシュコンクリートの流動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文報告集, No.451, pp.1-7, 1993.9.
- 4) 浦野真次, 北大路洋, 谷川恭雄, 森博嗣: 地下連続壁のコンクリートの充てん状況に関する解析的研究, 土木学会高流動コンクリートシンポジウム論文集, pp.31-36, 1996.
- 5) 浦野真次: コンクリート充填鋼管柱内の高流動コンクリートの施工性判定, フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題シンポジウム論文集, pp.II-45-II-52, 2000.
- 6) 越塚誠一: 日本計算工学会編 計算力学レクチャーシリーズ5 粒子法, 丸善, 2005.
- 7) 入部綱清, 伊良波繁雄, 富山潤, 松原仁: フレッシュコンクリートの流動問題への粒子法の適用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.905-910, 2003.
- 8) 入部綱清, 伊良波繁雄, 山田義智, 富山潤: MPS法による粗骨材を考慮したフレッシュコンクリートの三次元流動解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.1161-1166, 2004.
- 9) 富山潤, 入部綱清, 山田義智, 伊良波繁雄: ビンガム流体の流動解析におけるMPS法の適用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.2, pp.43-48, 2007.
- 10) 富山潤, 入部綱清, 崎原康平, 伊良波繁雄, 山田義智: フレッシュコンクリートの流動解析におけるMPS法の適用, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.164-171, 2009.
- 11) 日本コンクリート工学協会: 第3章各種試験時の流動挙動に関するアプローチ, フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告書, pp.93-122, 1996.4.
- 12) 河井徹: 高流動コンクリートの配合設計方法に関する実験的研究, 東京工業大学学位論文, pp.44-49, 1996.8.
- 13) 村田二郎, 岡田清: フレッシュコンクリートのレオロジー・コンクリートの弾性とクリープ, pp.43-51, 山海堂, 1970.
- 14) 日本コンクリート工学協会: 第1章ビンガムモデルによる基本的な力学性状の把握, フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告書, pp.1-50, 1996.4.
- 15) 小門武, 細田尚, 宮川豊章, 藤井學: スランプフロー試験によるフレッシュコンクリートの降伏値評価法の研究, 土木学会論文集, No.578/V-37, pp.19-29, 1997.11.
- 16) 浦野真次, 橋本親典, 辻幸和, 杉山隆文: 可視化実験手法による高流動コンクリートの流動性評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.585/V-38, pp.163-174, 1998.2.
- 17) 浦野真次, 橋本親典, 辻幸和, 杉山隆文: 可視化実験による高流動コンクリートの間隙通過時の施工性判定, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, V-188, pp.376-377, 1998.9.