

論文 鉄筋近傍を流れるフレッシュコンクリートの流動解析に関する研究

山口 悟*1・橋本 親典*2・水口 裕之*3・高島 信博*4

要旨：性能照査型設計法としての施工設計を行うために必要である流動解析技術の構築を目的として、3次元非圧縮粘性流体の汎用数値プログラムを用いて、複数の鉛直鉄筋が存在するスラブ型枠内での高流動コンクリートの水平方向の充填状況を解析し、既往の可視化実験と比較した。その結果、本解析プログラムに得られるせん断ひずみ速度分布を実験結果に一致させるためには、コンクリートの物性値（塑性粘度、降伏値）よりも流入コンクリートの経時変化の定量化が重要であることが明らかになった。

キーワード：せん断ひずみ速度、塑性粘度、降伏値、可視化実験

1. はじめに

新しいコンシステンシー評価指標¹⁾ならびに評価試験²⁾に基づいて、性能照査型設計法としての施工設計を行うためには、実際のコンクリート打込み状況をモデル化し、施工する前に締固め可能か、あるいは充填可能か否かを判定するための流動解析技術が必要である。言い換えれば、コンクリートを打ち込むときに最も危険と想定される危険断面について、検討対象としているコンクリートが設定した打込み方式で、要求された施工時間内に隅々まで充填できるかどうかの可能性を照査することができるようにするための流動解析技術が必要となる。一方、これまでのビンガム体モデルとしてフレッシュコンクリートを取り扱った流動解析技術は、流動現象を忠実に再現することに精力が注がれており、計算時間や記憶容量の点から、施工現場で技術者が簡単に扱うことができるというレベルには至っていない³⁾。

本研究では、コンクリートの打込み現場で現場技術者が充填性の照査を簡単に実施することを目的として、複数の鉛直鉄筋が存在するスラブ型枠内の高流動コンクリートの充填状況を解析対象とし、三次元非圧縮粘性流体の汎用数値解析プログラムによる流動解析技術に必要な入力データにつ

いて検討した。

2. 解析概要

2.1 解析手法の説明

本プログラムは、三次元非圧縮粘性流体の汎用数値解析プログラムであり、特に自由表面を持つ流れ、機械・地形・建物など複雑な形状をした障害物の周りの流れ、あるいは固体障害物の移動を伴う流れの計算に適している。本プログラムのベースは、1980年に米国ロスアラモス研究所で研究・発表された解析手法である。

本プログラムにおいて流動場を解析するために使用している基礎方程式は、連続の式(1)・運動方程式(2)・流体体積の移動方程式(3)の3種類であり、直交座標系で示すと以下のように表される。

$$\frac{\partial A u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i A_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right\} + g_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi F}{\partial t} + \frac{\partial A u_i F}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

なお、上式に用いた記号の意味を以下に示す。

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻（正会員）

*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博（正会員）

*3 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博（正会員）

*4 構造計画研究所(株)解析技術本部環境評価グループ 工修

x_i	: 位置ベクトル	m
t	: 時間	sec
u_i	: 流速ベクトル	m/sec
Φ	: 流体占有率	VOL 比
A	: 開口率	面積比
P	: 単位密度あたりの圧力	m^2/sec^2
ν	: 動粘性係数	m^2/sec
g_i	: 重力加速度	m/sec^2
F	: 流体体積比	VOL 比
ρ	: 密度	kg/m^3

本プログラムでは以上に示した基礎方程式を有限体積法により離散化し、問題に応じた適切な境界条件・初期条件の下で数値的に解いていく。計算結果としては、各3次元計算メッシュ点での流速、圧力、体積占有率などが求まる。

なお、本解析では、すべてメッシュの体積占有率が 100%の時点で充填完了状態とし、計算終了時と定義する。

2.2 本解析技術による評価方法の特徴

一般的な流体力学における流動解析技術では、各計算メッシュ単位で求められた流速、圧力、体積占有率等のパラメータを流動経過時間毎に追跡し、実際の挙動、すなわち実験結果との整合性を検討し、解析プログラムの予測精度を定量的に評価する。しかしながら、フレッシュコンクリートの流動挙動は、ニュートン流体でモデル化できる流動挙動とは相当異なる。また、ビンガム体モデルとしての流動挙動とも異なる点が既往研究から指摘されている。混相流としては、非常に粒度分布に幅を有する混相流であり、骨材粒子のかみ合わせや接触による乱れやモルタルの粘性等の影響で、一様な流体的挙動よりも粉体の集合体として挙動の方が支配的になる場合も多い³⁾。そのため、解析結果の妥当性を検証するための精度の高い実験結果が必ずしも得られていない。定点観測の実験データでは、ばらつきが大きくコンクリートの流動を精度良く定量的に把握することは困難である。

本研究では、可視化実験結果⁴⁾⁵⁾を用いることとした。フレッシュコンクリートの可視化では、ある領域のコンクリートの平均的な流れを、最

大せん断ひずみ速度という変形に関する物理量を用いて定量的に評価する。したがって、本解析技術の計算結果の評価方法としては、計算メッシュ単位での出力データを個々に詳細に検討するのではなく、検討断面全体でランダムに計算メッシュを抽出し、検討断面の平均的な流れの挙動として出力データを評価する。すなわち、実験結果の精度に合わせた解析結果の評価を行うこととした。本評価方法を導入することにより、流動解析の要素数を低減しかつ計算時間を短くすることが可能となる。

2.3 施工設計と本解析技術の関係

今回のコンクリート流動解析に適用するにあたり、コンクリートのモデルは降伏値と塑性粘度をある値で固定したビンガム流体とする。つまり、降伏値と塑性粘度は変化するのではなく、ある一定の振動エネルギーを与えられたときに流動するコンクリートの物性値は同一とする。従来の流動解析では、フレッシュコンクリートの性質を降伏値や塑性粘度で正確に表現することによって、より精度の高い充填予測技術が実現すると考えられていた。

しかし、フレッシュコンクリートは外部から力を加えることで流動化し、ある配筋された型枠内に打ち込まれるのが普通であり、流動化してしまえば、流動化する前に異なる降伏値や塑性粘度を有するコンクリートも同様な挙動、すなわち「同程度のせん断ひずみ速度で流動する」ということが可視化実験⁴⁾⁵⁾から明らかになってきた。

本解析技術では施工の可否を検討する性能照査のために降伏値と塑性粘度を使うことにし、フレッシュコンクリートの性質としてはある所定の降伏値と塑性粘度を発揮するために必要な振動エネルギーで規定し、流動解析に用いる降伏値と塑性粘度はある程度の範囲内で固定する。短時間でかつ簡単に流動解析を行うためには、入力データをなるべく少なくするのがよく、そのためにはフレッシュコンクリートの性質を単純化することが重要である。以上の仮定を導入

することにより、施工設計が簡単になると考えられる。

2.4 解析条件

本解析では見かけの粘性をせん断ひずみ速度のレベルで変化させることにより、ビンガム流体をモデル化した。すなわち、

$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta(\dot{\gamma}) = \infty, \quad \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta(\dot{\gamma}) = 0 \quad (4)$$

とする。せん断応力と見かけの粘性、せん断ひずみ速度の関係を以下に示すと必ずしも τ と $\dot{\gamma}$ は直線関係ではない。

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} \doteq \eta \dot{\gamma} + \tau_y \quad (5)$$

τ : せん断応力(N/m²)

η : 塑性粘度(N/m²・s)

$\dot{\gamma}$: せん断ひずみ速度(1/s)

τ_y : 降伏値(N/m²)

$\eta(\dot{\gamma})$: 見かけの粘性

図-1 に、解析に用いた 3 種類のコンシステンシー曲線を示す。本解析では高流動コンクリートを対象とし、基準コンシステンシー曲線の降伏値は 30N/m²、塑性粘度は 50N/m²・s である。

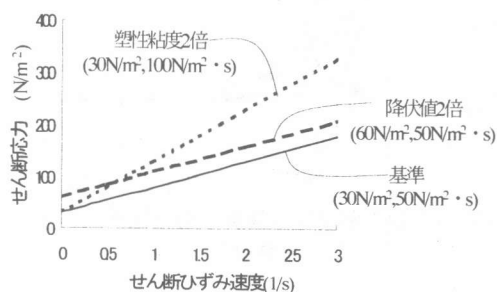


図-1 解析に用いたコンクリートのコンシステンシー曲線

解析条件は浦野らおよび小山が行った可視化実験⁴⁾⁵⁾に従い、図-2に示す 150×200mm の領域にコンクリートが流入する状況を解析対象とした。鉄筋間隔は 40mm, 26.67mm, 13.33mm の 3 種類とした。コンクリートの流入方法はコ

ンクリートの流入状況による解析結果の違いを考察するため可視化実験⁴⁾のから算出される流入速度とした。すなわち、25リットルのモデルコンクリートを 15 秒間で投入することから、

$$\frac{25(\ell) \times 1000}{15(s) \times 150(\text{cm}^2)} = 11.11(\text{cm/s}) \quad (6)$$

となる。

図-3 は、検査領域に到達するまでに 80% 速度が減少すると仮定し、初速度 8.8cm/s で流入させ流速を一定とした流速変化 A を示す。図-4 に示す流速変化 B は、流速変化 A と同じ初期値で経過時間とともに減速すると仮定した。図-5 は投入位置から検査領域までに流速が減少すると考えられるため初速度を 60% 減少すると仮定し初速度 6.6cm/s で流入させ、徐々に減速させた。流入させるコンクリートの総量は可視化実験における検査領域へのコンクリート到達量と同程度の量 (100mm×150mm×200mm=3ℓ) になるように一定とした。コンクリートの単位体積質量は 2300kg/m³ とする。

解析メッシュの数は 2240 個で、鉄筋本数 2 本と 1 本について行った。解析結果に示されるせん断ひずみ速度は図-6 の解析メッシュの概略に示すように検査領域全域にわたって隣接する 4 要素を 1 計測点とする計測点を 25 点設け、合計 100 要素のせん断ひずみ速度の平均値とした。鉄筋径は D16 で一定とした。要素数が 2240 個である本解析時間に要する時間は、最長で 10 分程度であり、これまでの解析手法⁶⁾⁷⁾に比べて格段に早い。よって本解析手法が実用化されれば現場レベルでの施工設計が実現されると思われる。

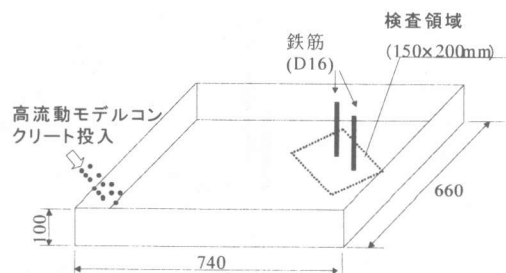


図-2 可視化実験状況の概要

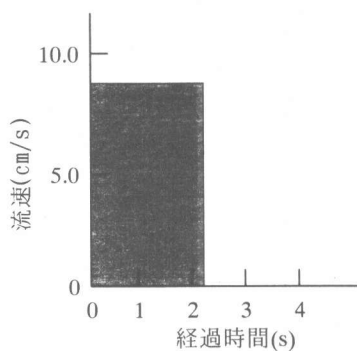


図-3 流速変化 A

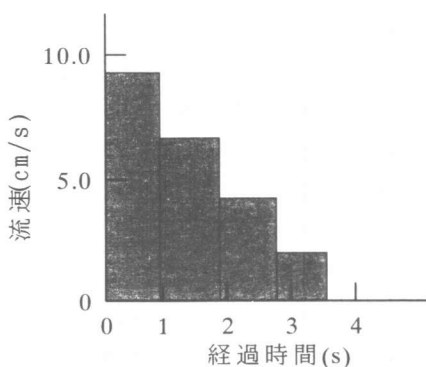


図-4 流速変化 B

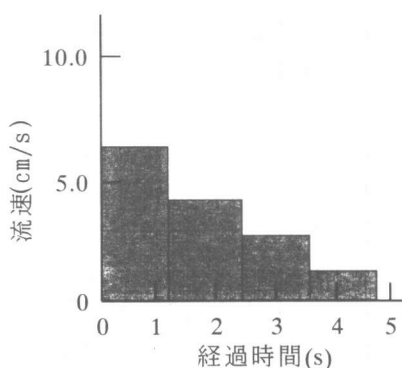


図-5 流速変化 C

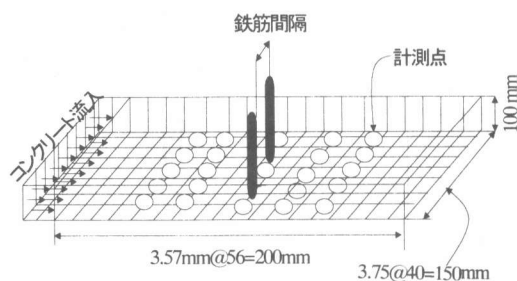


図-6 解析メッシュの概略

3. 解析結果

3.1 鉄筋間隔による比較

単鉄筋の場合における実験結果と解析結果を比較した経過時間に伴うせん断ひずみ速度を図-7に示す。解析は、検査領域にコンクリートが全く充填されていない状態から計算を実行する。可視化実験のせん断ひずみ速度は、充填が完了した後のデータである。よって、可視化実験の結果と比較するために解析結果の開始時点は、計測点すべてにコンクリートが流入した時点から安定した数値の計測が可能となる時間 T_0 秒後とした。なお、 T_0 は 8 秒程度であるが、流入条件および鉄筋間隔によって多少異なる。

充填完了直後では、すべての解析結果は実験結果に比べて非常に大きな値を示した。その後は、解析 A が可視化実験値に比べると非常に大きな値を示したが、解析 B、C は実験結果に近いせん断ひずみ速度の減少傾向と一致した。解析 C が、最もよく実験値に近い傾向を示す。

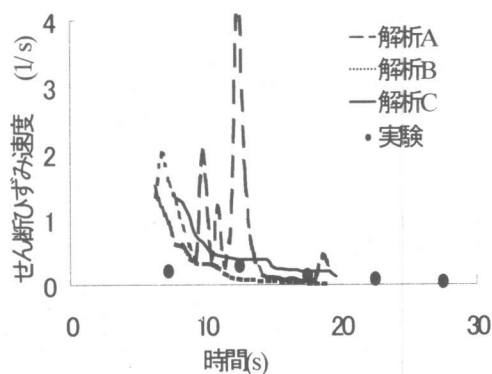


図-7 せん断ひずみ速度-時間関係 (単鉄筋)

図-8に鉄筋間隔 40mm におけるせん断ひずみ速度分布の解析と実験の比較を示す。解析 A、B においては充填完了時のせん断ひずみ速度に大きくずれが生じている。解析 A においては、それ以降に流入速度の急激な減少によって考えられるせん断ひずみ速度の急激な落ち込みがあり 10 秒以降は実験結果を大きく下回っている。解析 C は実験結果と近い挙動を示している。

図-9 に、鉄筋間隔 26.67mm の場合のせん断ひずみ速度分布の解析と実験の比較を示す。充填完了時刻におけるせん断ひずみ速度はすべての解析結果において実験結果と比較して大きく異なっている。特に解析 A においては充填完了後もせん断ひずみ速度が急激に増加している。しかし、充填完了後において解析 B, C は実験結果と同様に減少傾向を示した。

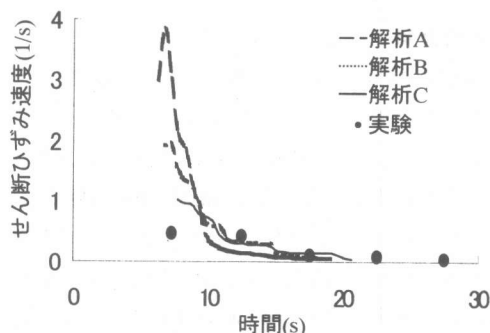


図-8 せん断ひずみ速度-時間関係
(鉄筋 2 本・鉄筋間隔 40mm)

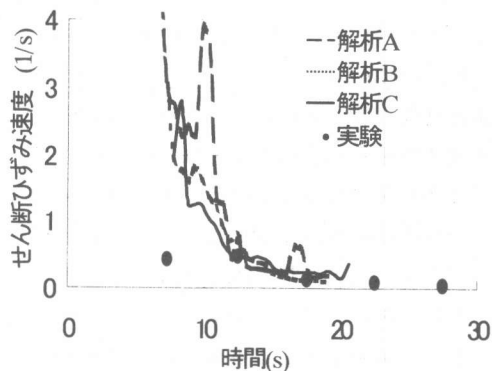


図-9 せん断ひずみ速度-時間関係
(鉄筋 2 本・鉄筋間隔 26.67mm)

図-10 に鉄筋間隔 13.33mm におけるせん断ひずみ速度分布の解析と実験の比較を示す。

充填完了時刻における解析と実験値のせん断ひずみ速度の差が、どの解析結果においても大きく、鉄筋間隔が大きい場合最も実験結果に近い傾向を示していた解析 C においても、充填完了直後にせん断ひずみ速度が増加傾向を示している。鉄筋が密に配置されることにより、実験

と解析との誤差が大きくなっている。これは対象検査区間に対して要素数が少ないためと思われる。従って、鉄筋間隔が小さくなる場合は要素の設定をさらに小さくする必要がある。

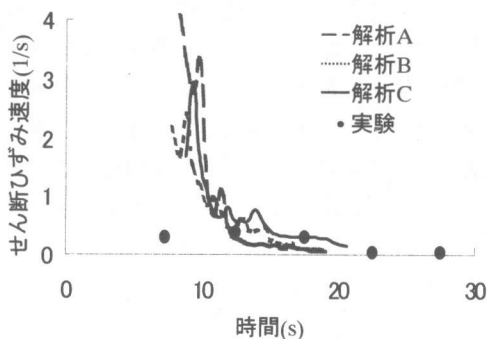


図-10 せん断ひずみ速度-時間関係
(鉄筋 2 本・鉄筋間隔 13.33mm)

3.2 物性値の変化による比較

塑性粘度と降伏値の変化が流動するコンクリートのせん断ひずみ速度-時間関係に及ぼす影響について検討する。

解析は、鉄筋間隔 40mm・鉄筋本数 2 本と鉄筋間隔 26.67mm・鉄筋本数 2 本とした。流速変化は 3.1 において実験結果に近い挙動を示した解析条件 C のみとした。鉄筋間隔 40mm・鉄筋本数 2 本における解析結果を図-11 に示す。基準とした値によるせん断ひずみ速度に比べて、塑性粘度を 2 倍にした解析結果と降伏値を 2 倍にした解析結果とに明確な差は現れなかった。

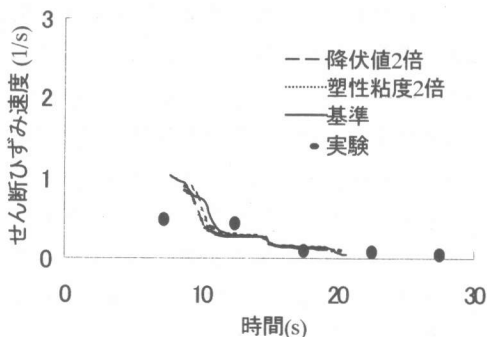


図-11 せん断ひずみ速度-時間関係
(40mm の場合における物性値による比較)

図-12に鉄筋間隔26.67mm・鉄筋本数2本における解析結果を示す。塑性粘度を2倍にしたもの、降伏値を2倍にしたもの双方において基準に見られるような充填完了後のせん断ひずみ速度の増加が無くなった。しかし、充填完了時間におけるせん断ひずみ速度の実験値との差は同程度である。従って、本解析方法では塑性粘度、降伏値を変化させても、コンクリート全体の流動状況には大きな影響を与えない。可視化実験においても粗骨材濃度や粘性の違いによるせん断ひずみ速度の違いはあまり大差がなかった。この傾向に関しては本解析方法による結果は可視化実験と一致する。

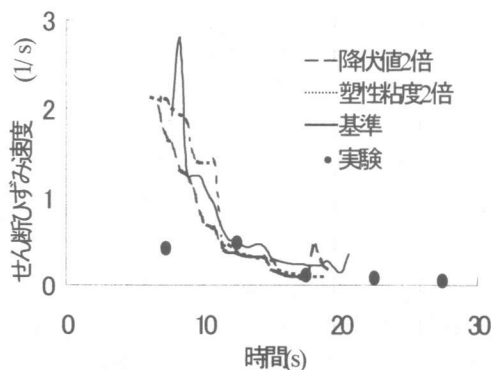


図-12 せん断ひずみ速度-時間関係
(26.67mmの場合における物性値による比較)

4. 結論

本研究では、施工の可否を検討する施工照査の技術として現場レベルで解析することができ流動解析技術の適用方法について検討した。これまでに行われた可視化実験と比較した結果、初速度をコンクリート投入位置における流速よりも小さく設定し、緩やかに減少させてゆくといった流速変化で流入させた解析条件が実験結果に最も一致することがわかり、流入コンクリートの経時変化の設定が重要であることが明らかになった。従って、検査領域に至るまでの流速減少の様子を研究し、解析条件に適用させる必要があると考えられる。

加えて、降伏値と塑性粘度の変化による解析

結果に大きな変化が見られず、本解析方法と実験結果の傾向に共通する点が見られた。

謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費補助金の基盤研究(B)(2)(課題番号：10555149、研究代表：橋本親典)に基づき実施されたものであることを付記いたします。

参考文献

- 1) 西川隆之、橋本親典、山地功二、水口裕之：加振装置を用いたフレッシュコンクリートのコンシステンシー評価試験方法の開発、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22,2000.6(投稿中)
- 2) コンクリート委員会示方書小委員会幹事会編：コンクリート標準示方書改定に関する中長期ビジョン「材料・施工 WG2.4.4 フレッシュコンクリートの品質」、土木学会、コンクリート技術シリーズ No.32,pp.22-25,1999.9
- 3) 魚本健人：コンクリート製造におけるコンピュータの利用、コンクリート工学, Vol.38,No.1,2000.1
- 4) 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
- 5) 小山広光、橋本親典、浦野真次、辻 幸和：壁状型枠におけるフレッシュコンクリートの鉄筋まわりの流動に関する可視化、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21,No.2,pp.325-330,1999.7
- 6) 吉岡靖司、浦野真次、橋本親典、辻 幸和：地下連続壁のコンクリートの充填予測に関する基礎的研究、コンクリート年次論文報告集, Vol.20,No.2,pp.283-288,1998.7
- 7) 西川隆之、橋本親典、吉岡靖司、浦野真次：充填試験装置の形状が高流動コンクリートの自己充填性能に与える影響、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22,No.2,pp.475-480,1999.7