論文 可視化手法によるボックス形充塡試験装置を充塡するフレッシュコ ンクリートの流動挙動に対する一考察

原 勝哉*1·橋本 親典*2·渡邊 健*3·石丸 啓輔*4

要旨:可視化実験手法によりボックス形充填試験装置を充填するフレッシュコンクリート内部の流動挙動を 可視化した。また、可視化実験を反映させたフレッシュコンクリートの粒状体・流体連成解析を行い、可視化 実験結果と解析結果の流動現象を比較検討し、粒状体・流体連成解析の再現性について検討した。結果とし て、配筋条件の違いによる可視化モデルコンクリートの充填過程の違いが明らかとなった。また、本解析手 法はフレッシュコンクリートの充填過程を物理的に再現できる可能性があることがわかった。 キーワード:可視化、粒状体・流体連成解析、フレッシュコンクリート、加振ボックス充填試験

1. はじめに

"百聞は一見にしかず"と言われるように、目で見るこ とは流れの現象を理解するための最適な手段である。"可 視化"とは、直接、目で見ることができない流動現象を 視認可能とする技術である。この可視化技術を用いて、 橋本らは従来までブラックボックス化していたフレッシ ユコンクリート内部の力学的挙動(流動中に発生する材 料分離や流動機構等)を可視化した。可視化により、フ レッシュコンクリートを力学的に理解することは、設計 施工に有利に働く。これまで検討してきた流動現象とし て,ポンプ圧送時におけるテーパ管内の流動¹⁾,2軸強 制練りミキサ内における練混ぜ性能²⁾等がある。また, 著者らはこれまで、3次元流動解析技術の1つである"粒 状体・流体連成解析手法"を用いることによりフレッシ ュコンクリートの流動現象の再現を試みてきた。既往の 研究成果 3)より、粒状体・流体連成解析手法を用いるこ とにより、フレッシュコンクリート内部の流動現象を3 次元で可視的に捉えることができ、設計施工における有 用性が期待できることが示唆された。

本研究では上述した可視化実験手法と粒状体・流体連 成解析手法を踏まえ、2つの検討を行った。1つ目に可視 化実験手法により構造物のかぶり部を想定したボックス 形充填試験装置を充填するフレッシュコンクリートの流 動挙動を可視化し、流動現象に対する考察を行った。2つ 目に可視化実験を反映させたフレッシュコンクリートの 粒状体・流体連成解析を行った。可視化実験結果と解析 結果の流動現象を比較検討し、粒状体・流体連成解析手 法の再現性について検討した。実験と解析、2 つの可視 化手法によりフレッシュコンクリートの流動挙動を力学 的に理解することを目的とした。

2. 可視化実験概要

加振ボックス充填試験 ⁴を対象に可視化実験を行った。 実験では、アクリル製のボックス形充填試験装置を用い た。実験に用いたボックス形充填試験装置の形状を図-1 に示す。A 室と B 室の境界に流動障害を設けている。流 動障害は、D10 鉄筋を 35mm 間隔で柵状 5 本配置した流 動障害 R1 (鉄筋 5 本), D13 鉄筋を 35mm 間隔で柵状 3 本配置した流動障害 R2 (鉄筋 3 本), 無筋の流動障害 R3 (鉄筋 0 本)を用いた。

2.1 使用材料

可視化実験では、コンクリートを固液2相系の粘性流 体と仮定し、モデルモルタル、モデル骨材を用いた。橋 本が提案してきた可視化モデルコンクリート¹¹と異なり、



図-1 ボックス形充塡試験装置・流動障害

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)
*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博 (正会員)
*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門准教授 博(工) (正会員)
*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部総合技術センター技術専門職員 (正会員)





写真-1 造粒焼成体

写真-2 可視化モデル コンクリート

モデル骨材の密度とモデルモルタルの密度をほぼ同程度 にした。従来の川砂利・川砂とは異なり,最近の骨材は, 砕石・砕砂や再生骨材あるいはフライアッシュを細砂の 代替品として用いられる。そのため,モルタルの密度と 骨材の密度に大きな差がなくなってきている。このよう な現状を鑑み,密度差をほぼ同程度とした。

モデル骨材は、造粒焼成体(粒径:10mm~12mm,密度:0.85g/cm³)を使用し、青、緑、白の3色に着色した。 実験に用いた造粒焼成体を**写真-1**に示す。モデルモルタ ルには密度が1.0g/cm³である、でん粉とアクリル酸ソー ダの高分子共重合物である高吸水性高分子樹脂溶液を用 いた。モデルモルタルは、無色透明な粘性流体である。 モデルモルタルの粘性は高分子樹脂の添加量によって変 化させることが可能である。本実験では4.0g/1一定とし た。添加量4.0g/1はミニスランプコーン(上端直径50mm, 下端直径100mm,高さ150mm)を用いたスランプフロー 試験で140~150mm 程度のフローとなった。このモデル モルタルの粘性は、B 形回転粘度計で計測した結果, 10Pa・s程度であった。

実験に用いた可視化モデルコンクリートを写真-2 に 示す。実験に用いた可視化モデルコンクリートの計量値 を表-1 に示す。可視化モデルコンクリートの実験パラメ ータは、骨材とモルタルの容積比とした。骨材とモルタ ルの容積比(以降, VG/VMと称す。)を、50%、60%の2 種類とした。50%は、高流動コンクリートの骨材濃度を 想定し、単位粗骨材量が少ない配合である。一方、60% は、スランプ8~12cmの一般的な土木用コンクリートの 骨材濃度に近く、単位粗骨材量の多い配合である。

2.2 試験方法

1) モデルモルタルの作製



図-2 可視化モデルコンクリートの充填状況

正確に計量した高吸水性高分子樹脂と水をダマが発生 しないように注意し均質となるように混合する。高吸水 性高分子樹脂溶液のスランプフローが安定した状態にて 規定のスランプフローが得られているかを確認し,必要 量を正確に計量する。

2) モデルコンクリートの作製

正確に計量したモデル骨材である造粒焼成体(青球, 緑球,白球)各々とモデルモルタルを均等質となるよう に混合する。

3) 容器への充塡

白,緑,青色に着色した造粒焼成体を用いたモデルコ ンクリートを,ボックス形充塡試験装置A室を軸方向に 3分割し(上層,中層,下層),各モデルコンクリートが 混ざらないように慎重に充塡する。モデルコンクリート を充塡したボックス形充塡試験装置を図-2に示す。

4) ボックス充塡試験

可視化モデルコンクリートを満たした後,ゲートを開け,B室に可視化モデルコンクリートを流し込む。加振 ボックス充填試験⁴0は,B室のゲートと相対する壁面に おいて,試料の充填高さが 300mm に到達するまで行う。 しかしながら,本試験は内部振動機である棒状バイブレ ータによる加振を行わなかった。フレッシュコンクリー トの粒状体・流体連成解析において,内部振動の再現が 困難であるためである。そのため,300mm に到達しなく ても,流動が停止するまで充填試験を行うこととした。

No.	流動障害 (鉄筋本数)	V _G /V _M	必要量(g)						
			下層(青)		中層(緑)		上層(白)		
			造粒焼成体	モデルモルタル	造粒焼成体	モデルモルタル	造粒焼成体	モデルモルタル	
1	R1(5本)	50%	1399.7	3293.3	1473.3	3466.7	1473.3	3466.7	
2		60%	1574.4	3087.5	1657.5	3250.0	1657.5	3250.0	
3	R2(3本)	50%	1399.7	3293.3	1473.3	3466.7	1473.3	3466.7	
4		60%	1574.4	3087.5	1657.5	3250.0	1657.5	3250.0	
5	R3(0本)	50%	1399.7	3293.3	1473.3	3466.7	1473.3	3466.7	
6		60%	1574.4	3087.5	1657.5	3250.0	1657.5	3250.0	

表-1 可視化モデルコンクリート計量値

既往の研究報告 4を参考に試料の充填高さが 190mm に 達した時間を,190mm 到達時間とした。0~190mm 区間 の通過速度を間隙通過速度とし,流動障害部分を通過し た可視化モデルコンクリートが型枠に充填される際の間 隙通過性を評価した。本実験では棒状バイブレータによ る振動は行わず,可視化モデルコンクリートの自重によ り充填を行った。

3. 粒状体·流体連成解析

粒状体流体連成解析は、粒状体挙動解析コードと熱流 動解析コードを連成させた解析手法⁵⁾である。流体解析 を行って流速や圧力分布を求め、求められた流速や圧力 分布を用いて粒状体解析の個々の粒子に作用する流体抗 力を求めて粒子の運動を解く。粒状体解析で得られた粒 子の分布と流体抗力を流体解析に反映させた上で再度流 体解析を行う。この計算を繰り返し行い、流体解析と粒 状体解析との間で双方向にデータのやり取りを行うため、 粒状体が運動することによって流体が運動するような現 象を模擬可能となっている。

3.1 解析理論

1) 流体解析

圧縮性流体の質量保存式は以下のようになる。

$$\frac{a}{dt} \int_{V} \rho_{f} \epsilon \vec{v} dV + \int_{S} \rho_{f} \epsilon \vec{v} \cdot ds = 0 \tag{1}$$

ここで、V:解析領域の体積、s:解析領域の面積、 ρ_f : 流体密度、 \vec{v} :流速、 ϵ :空隙率である。

圧縮性粘性流体の運動量保存則は次のように表す。

$$\frac{d}{dt}\int_{V} \rho_{f}\epsilon\vec{v}dV + \int_{S} \rho_{f}\epsilon\vec{v}\vec{v}\cdot ds$$

$$= \int_{S} \epsilon T \cdot ds + \int_{V} \vec{f_b} dV \tag{2}$$

$$T = \mu \nabla \vec{v} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial t}\right) I - pI \tag{3}$$

ここで, μ:粘性係数, p:流体圧力, I:単位行列, f: 外力(粒子からの反力や重力加速度)である。

2) 粒子と流体の相互作用

粒子と流体の相互作用として以下を考慮した。

流体抗力

粒子と流体との相対速度によって生じる流体抗力を

以下の式により考慮した。

$$\vec{f}_{drag} = \frac{1}{2}\rho_f |\vec{u} - \vec{v}| (\vec{u} - \vec{v})\pi r^2 \cdot C_d \cdot \epsilon^{-\chi} \tag{4}$$

ここで,係数xは経験則として,次のように定義される。

$$\chi = 3.7 - 0.65 \exp\left(-\frac{\left(1.5 - \log_{10}(Re_p)\right)^2}{2}\right)$$
(5)

ここで、 C_d :抗力係数、 ρ_f :流体密度、r:粒子半径、v: 流体の速度、 \vec{u} :粒子の速度、 Re_p :粒子のレイノルズ数 である。ここで、

$$C_d = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_p}}\right)^2, \quad Re_p = \frac{2\rho_p r |\vec{u} - \vec{v}|}{\mu}$$
(6)

を用いた。

② 圧力勾配

粒子に作用する浮力や圧力勾配による影響の考慮と して以下の式を与えた。

$$\vec{f}_p = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_f \vec{g} \tag{7}$$

3) 粒状体解析

粒子挙動の計算には Cundall⁶らが開発した汎用個別 要素法コードを用いた。粒子に作用する流体力として式 (4)と式(7)の和である以下を与えた。

$$\vec{f}_{fluid} = \vec{f}_{drag} + \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_f \vec{g} \tag{8}$$

粒子の運動は式(8)を用いて表した。

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \frac{\vec{f}_{mech} + \vec{f}_{fluid}}{m} + \vec{g}$$
(9)

ここで, \vec{f}_{mech} : 粒子間力, m: 粒子の質量, \vec{g} : 重力加速度である。

3.2 解析概要

1) 解析対象

本研究で実施した可視化実験を解析対象とした。本解 析で用いるボックス形充填試験装置モデルおよび流動障 害モデルは既往の研究³⁾を参考とする。解析対象となる ボックス形充填試験装置および流動障害を図-1 に示す。 流動障害は可視化実験と同様に,流動障害 R1(鉄筋 5 本),流動障害 R2(鉄筋 3本),流動障害 R3(鉄筋 0本) とした。実験同様,振動条件は与えなかった。解析時間 は 30 秒,時間刻みは 1.0×10⁻³ とした。可視化実験と同 様に,解析開始直後から,B 室のゲートと相対する壁面

表-2 コンクリートモデル

No.	流動障害	V _G /V _M	各	<u>·層別粒子数(個</u>	モルタルモデル	粘性係数	
	(鉄筋本数)		下層(青)	中層(緑)	上層(白)	密度(g/cm ³)	(Pa∙s)
1	D1(5+)	50%	3145	3310	3310	1.00	10
2	RI(5本)	60%	3538	3724	3724		
3		50%	3145	3310	3310	1.00	10
4	R2(3本)	60%	3538	3724	3724		
5	$P_2(0 \pm)$	50%	3145	3310	3310	1.00	10
6	れる(0本)	60%	3538	3724	3724		



において, コンクリートモデルの充填高さが 190mm に 達した時間を 190mm 到達時間とし, 0~190mm 区間の通 過速度を間隙通過速度とした。

2) コンクリートモデル

表-2 に本解析における各種パラメータを示す。パラメ ータの設定に際して,表-1の可視化実験に用いた条件を 反映させたモデルである。表-2 における各モデル No.の 数字は表-1 における各配合 No.の数字と対応している。

本解析において、粒状体と流体の連成解析における、 材料のモデル化は既往の研究 ³⁾を参考にした。粗骨材モ デル(密度:0.85g/cm³, ばね定数法線方向:1.0×10⁷N/m, 接線方向:1.0×10⁷N/m)は球形要素、モルタルモデル(密 度:1.00g/cm³)は連続体モデルとして取り扱い、ニュー トン流体と仮定した。粗骨材モデル、モルタルモデルの 密度は可視化実験で用いた材料の物性値を用いた。コン クリートモデルにおけるパラメータは V_G/V_M, 粒子数, 粘性係数である。粒子数は V_G/V_M から算出した。粘性係 数は B 形回転粘度計で計測した粘度 10Pa・s とした。

4. 可視化実験結果

1) 充塡高さ・間隙通過性

図-3に、可視化実験結果における各配合と充填高さの 関係を示す。充填高さは、B室高さ方向における最終的 に流動が停止した位置である V_G/V_Mの増加,流動障害の 鉄筋本数の増加従い、充填高さは小さくなった。骨材数 が増加すること、鉄筋本数の増加することで流動の障害 となったためである。

図-4 に可視化実験における B 室高さ方向 0~190mm 区間の間隙通過速度を示す。VG/VMの増加,流動障害の 鉄筋本数の増加に従い,間隙通過速度は遅くなった。可 視化モデルコンクリートの粘性は全ての配合で同一であ るので,間隙通過速度は骨材数,流動障害の鉄筋本数に 大きく依存したと考えられる。骨材が多くなるほどアー チングの可能性が高まり,鉄筋本数が増加するほど可視 化モデルコンクリートの流入口が小さくなり,流動性が 低下した。



2) 流動挙動

図-5 に可視化実験結果(V_G/V_M=60%)の充填開始以降,2 秒後,5 秒後,7 秒後,10 秒後,20 秒後の結果を示す。図-5 において,上段に流動障害 R1(鉄筋5本)の実験結果,中段に流動障害 R2(鉄筋3本)の実験結果,下段に流動障害 R3(鉄筋0本)の実験結果を示す。

図-5, 流動障害 R1(鉄筋5本)に関して, 可視化モデ ルコンクリートは,充填開始とともにA室からB室に流 れ込み, B 室の下部が青色層で充塡された(初期充塡)。 B 室下部が満たされると、充填された青色層の上に、A 室から新たに緑色層が充填された。この際, A 室および B 室下部に青色層の骨材が滞留する。可視化モデルコン クリート自体が鉄筋による拘束を受けること、鉄筋に衝 突することによる流入エネルギーの減少が滞留の要因と して挙げられる。滞留部が存在することで、流動障害上 部の開口部からの充塡が支配的となる。流動障害上部の 開口部が間隙通過性に影響する。本試験の範囲では構造 物のかぶり部を想定しているB室の壁面には充塡開始前 における青色層と緑色層が充填されることがわかった。 流動障害 R1 は狭隘な配筋条件であるため,充填開始 5 秒後に青色のモデル骨材が鉄筋と壁面の間に詰まってお り、アーチングの発生が確認できた。アーチングの発生 により,可視化モデルコンクリートのB室への流入が阻 害され、他の配筋条件と比較して充填性、間隙通過性は 低い結果となった。

図-5,流動障害 R2(鉄筋3本)に関して,流動障害 R1 の実験結果と同様に,充塡開始とともに可視化モデルコ ンクリートは,A室からB室に流れ込み,B室の下部が 青色層で充塡され,その上にA室から緑色層が充塡され た。流動障害 R2の実験結果では,配筋条件が流動障害 R1よりも緩やかであるため,アーチング等の現象は発生 しなかった。

図-5, 流動障害 R3 (鉄筋0本) に関して, 無筋である ため充填性, 間隙通過性が他の配筋条件と比較して最も 高い。充填開始後, 10 秒, 20 秒後の B 室を見ると青色 層, 緑色層ともに競り上がるように充填されていること





を確認できる。無筋の状態では可視化モデルコンクリートに対する鉄筋の拘束がないため、A 室および B 室下部での骨材の滞留が緩やかである。障害となる鉄筋がない場合、可視化モデルコンクリートは B 室高さ方向に押し込まれるように充填されることがわかった。

可視化実験を行った結果,配筋条件の違いによる可視 化モデルコンクリートの充填過程の違いが明らかとなっ た。

5. 解析結果

図-6 に実験値と解析値の間隙通過速度の比較を示す。 解析結果における 0~190mm 区間の間隙通過速度を示す。 解析結果において、間隙通過速度は実験結果と同様の傾 向が得られた。V_G/V_Mの増加、流動障害の鉄筋本数の増 加に従い、間隙通過速度は遅くなった。間隙通過速度に 関して、実験結果と解析結果を比較すると、各配合、各 モデルは1:1には対応していないが、概ね整合性がある といえる。

図-7 に解析結果における各モデルと充填高さの関係 を示す。解析結果における充填高さは解析開始 30 秒後 の充填高さである。解析結果において、いずれの解析モ デルも充填高さは 220~230mm 付近で流動が停止した。 実験値にみられるような配合,試験条件の違いによる充 填高さの傾向は再現できなかった。190mm 区間以降の再 現性は今後の課題である。

図-8に、VG/Vm=60%、流動障害 R1(鉄筋5本)の解 析結果を示す。解析開始後、0秒後、5秒後、10秒後の 結果である。図中、上段が粗骨材モデルの解析結果、下 段がモルタルモデルの解析結果を示す。モルタルモデル 解析結果の網掛け部はコンクリートモデルの自由表面を 表現している。骨材モデルとモルタルモデルが一体とな って流動していることがわかる。解析結果においても可 視化実験と同様の傾向が確認できた。充塡開始とともに A室からB室にコンクリートモデル流れ込み、B室の下



部が下層(青色)で充填され,A室から新たな骨材(中 層:緑)が充填された。また,実験結果と同様に,A室 上層(白)はB室まで流動しなかった。また,実験結果 同様,解析開始5秒後において,鉄筋周辺部におけるア ーチングの発生(図-8破線部)が確認できた。鉄筋周辺 部にてアーチングが発生し,B室への流動が阻害される 現象を再現できている。

本解析手法は、可視化モデルコンクリートという限定 的な範囲ではあるが、フレッシュコンクリートの流動現 象を粗骨材モデルとモルタルモデルの2相系で3次元、 可視的に表現できる。設計段階において、閉塞等による 充塡不良の発生が予測される箇所に本解析手法を用いる ことで、充塡不良を事前に予測することができる可能性 がある。

6. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 配筋条件の違いによる可視化モデルコンクリート の充填過程の違いが明らかとなり、狭隘な配筋部周 辺でのアーチングを確認した。
- 0~190mm 区間の間隙通過速度に関して、実験結果 と解析結果に整合性が確認できた。
- 実験結果と解析結果の流動現象の比較を行った結果、本解析手法は可視化モデルコンクリートの範囲



において、充塡過程を物理的に再現可能である。

参考文献

- 橋本親典ほか:フレッシュコンクリートの管内流動 における閉塞過程の可視化に関する実験手法、コン クリート工学, Vol.26, No.2, pp119~127, 1988
- 吉田元昭ほか:2 軸強制練りミキサのブレード形状が超高強度コンクリートの練混ぜ時間の短縮化に与える影響,コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1639-1644, 2009
- 3) 原勝哉ほか: 粒状体・流体連成解析によるフレッシュコンクリートの充填評価, コンクリート工学年次 論文集, Vol.36, No.1, pp.1384-1389, 2014
- 4) 土木学会:コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会(341 委員会)第1期委員会報告書第I編委員会報告,フレッシュコンクリートの加振ボックス充てん試験方法(案),コンクリート技術シリーズ94号, pp.143-146,2011
- 5) 川原仁志ほか:流動と粒子挙動の連成解析システム の開発,計算工学講演論文集, Vol.13, pp.49-52, 2008
- 6) P.A.Cundall and O.D.Strack, "The distinct element method as a tool for research in granular media part I", report to the national science foundation concerning NSF grant eng 76-20711,1978.11