

# 論文 型枠内を流動するフレッシュコンクリートのせん断ひずみ速度分布

小山広光\*<sup>1</sup>・橋本親典\*<sup>2</sup>・辻幸和\*<sup>3</sup>・杉山隆文\*<sup>4</sup>

**要旨：**任意の型枠内でのフレッシュコンクリートの変形特性を定量的に評価することを目的として、可視化実験手法を用いて流動状況を観察し、変形挙動をひずみ速度の時間経過に伴う発生状況の違いにより定量化を行った。実験の結果、モデルコンクリートはスラブ型枠および壁型枠内の流動において、モルタルの粘性に関わらずそれぞれ一定のレベルのひずみ速度を有していること、壁型枠内の流動はスラブ型枠内の流動に比べひずみ速度が2倍程度であるとともに、主ひずみ速度と流動方向とのなす角度が大きくなることが明らかになった。

**キーワード：**ひずみ速度、ひずみロゼット法、可視化実験、流動性状

## 1. はじめに

高流動コンクリートのように自己充填性が高いコンクリートは、自重で生じる圧力勾配により流動する。一方、自己充填性が低くスラブの小さいコンクリートにおいても、バイブレータなどを用いて外部より流動化のための振動エネルギーを与えることにより、流動性を確保する。いずれの場合も、型枠内にコンクリートが打ち込まれる際には、コンクリート自体が流動・変形し任意の型枠内に充填されている。したがって、外部から観察される流動挙動は同じであると思われる。

「施工設計」の概念に基づく流動解析手法を構築するに当たり、フレッシュコンクリートの流動性状を定量的に評価することが必要である。そのためには、流動のメカニズムに関する情報が必要不可欠であるが、型枠内でのフレッシュコンクリートの挙動に関して定量的に把握した研究<sup>1)</sup>は少ないのが現状である。

本研究は、流動状態を直接検討できる可視化実験手法を用いることにより、型枠内でのフレッシュコンクリートの流動性状を「ひずみ速

度」という特性で定量的に評価することを試みた。本実験では、水平方向の流動が卓越するスラブ状の型枠と、鉛直方向の流動が卓越する壁状の型枠の流動性状について着目した。スラブ型枠では水平方向、壁型枠では鉛直方向の二次元平面内におけるフレッシュコンクリートの変形性状の定量化を試みた。定量化は、可視化モデルコンクリート中に存在する着目トレーサ粒子群あるいは粗骨材粒子群の相対距離の変化にひずみロゼット法を応用し、経過時間に伴う最大せん断ひずみ速度や主ひずみ速度の分布状況を求めることにより行った。

## 2. 実験概要

### 2. 1 モデルコンクリート

モデルコンクリートは固液2相系モデルとし、モデル粗骨材として人工軽量骨材（最大寸法10mm、表乾比重1.66、粗粒率6.3、実積率65.6%、メサライト系）を用いた。モデルモルタルとして高吸水性高分子樹脂（デンプンとアクリル酸ソーダの高分子共重合物、以下、高分子と称す）を水に添加した無色透明の粘性流体（比重

\*1 群馬大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 徳島大学助教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

\*3 群馬大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

\*4 群馬大学助教授 工学部建設工学科 Ph. D. (正会員)

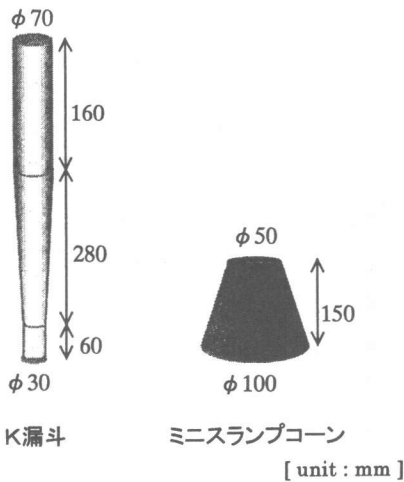


図-1 K漏斗・ミニスランプコーンの形状寸法

表-1 モデルモルタルの性状

高分子添加量 (g/l)	増粘剤添加量 (g/l)	K漏斗 流下時間 (s)	ミニスランプ フロー (cm)
2.5	0	1.5	26.0
	2.0	1.8	29.5

1.0) を用いた。また、レオロジー定数を変化させるために増粘剤（セルローズ系）を使用した。モデルモルタルの配合は高分子を 2.5g/l 添加，増粘剤を無添加の場合と 2.0g/l の場合の 2 種類とし，粘性は図-1 に示すミニスランプコーンと K 漏斗を用いて管理した。各試験結果を表-1 に示す。モデルコンクリートのモデルモルタルに対するモデル粗骨材の容積比は 0.5（粗骨材の容積濃度では 33.1%）とした。また，モデルコンクリートにはコンクリートの流動を追跡するトレーサー粒子として発泡スチロール粒子（平均粒径 2.5mm，比重 0.02）を適量混入した。

## 2.2 スラブ型枠流動実験

図-2 に示すアクリル板（厚さ 10mm）のスラブ型枠に，型枠の一端からモデルコンクリートをポリバケツで投入した。投入量と投入時間は，実施工の打込み速度を想定して 48m<sup>3</sup>/h

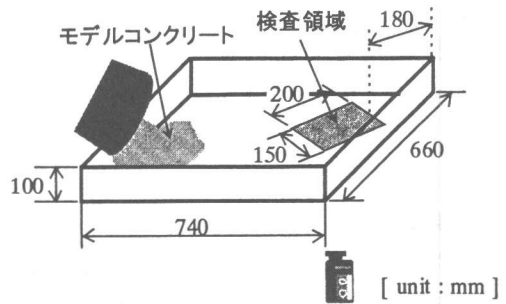


図-2 水平方向用スラブ状モデル型枠

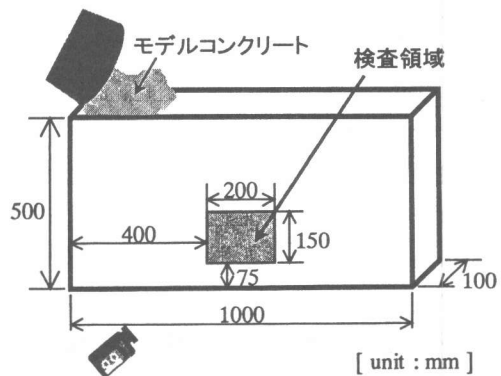


図-3 鉛直方向用壁状モデル型枠

の 1/2 モデルとし，投入量 25ℓ，投入時間 15s とした（25ℓ/15s=6m<sup>3</sup>/h，長さスケールで 1/2 より 6m<sup>3</sup>/h×2<sup>3</sup>=48m<sup>3</sup>/h）。型枠下部よりビデオカメラで底面を撮影し，撮影箇所は投入位置の対角方向で型枠側面の影響が少ないと思われる部分を選択して，これを検査領域とした。

本研究では，コンクリートを打ち込む現場での打込み状態を想定し，投入位置付近においては若干不安定な流動状態ではあるが，検査領域内で投入位置から対角方向へほぼ定常的に流動する状態を再現していると考えた。撮影時間はトレーサー粒子が静止するまでとした。

## 2.3 壁型枠流動実験

図-3 に示すアクリル板の壁状型枠に，型枠の端部からモデルコンクリートを投入した。投入量と投入時間はスラブ型枠の場合と同様 48m<sup>3</sup>/h の 1/2 モデルとし，投入量 40ℓ，投入時間 24s とした。検査領域は，図-3 に示す位

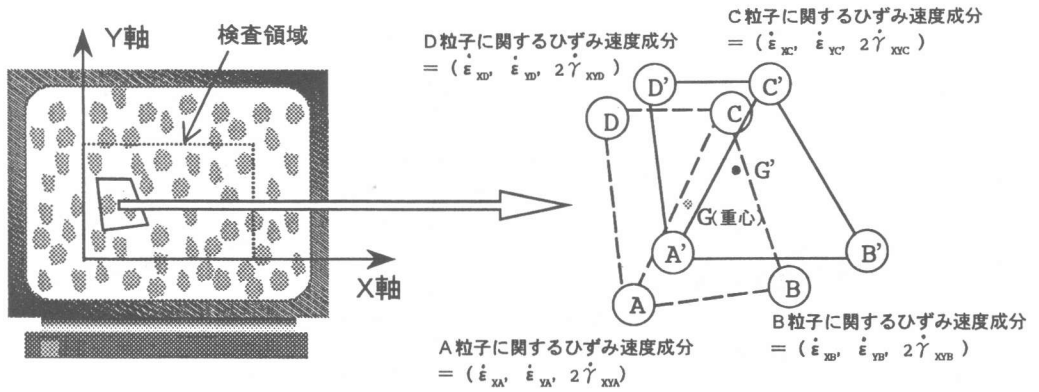


図-4 トレーサー粒子群とひずみ速度成分

置に設置する。検査領域の横にビデオカメラを設置し、モデルコンクリートの流動性状を、トレーサー粒子が静止するまで撮影した。

#### 2.4 画像処理方法

検査領域内では、流動方向をX軸として、それに対して垂直にY軸を設定した。図-4に示すように検査領域内にその座標位置が明確に観察される4つのトレーサー粒子群の時刻tにおける座標位置(A, B, C, D)を取得する。その粒子群を追跡し、0.03秒毎あるいは粒子群が少なくとも粒子の直径以上の距離を移動した時点で、時刻t + Δtにおける粒子群の座標位置(A', B', C', D')を取得する。なお、検査領域に対し、それぞれの実験において、高さ・奥行きの影響が関与すると考えられるが、本実験では底面・側面におけるコンクリートの広がりや2次元平面としてとらえ、高さ方向・奥行き方向の挙動は無視した。

#### 2.5 ひずみ速度

ひずみ速度の算出には、ひずみロゼット法を用いる(図-4参照)。粒子群で囲まれる四角形領域のひずみ速度は、四角形の各頂点ごとにひずみロゼット法を適用し、ひずみ成分を求めた。例えば粒子Aに着目すると、ここを原点として直線AB, AC, ADをひずみロゼット法の3方向の軸として考え、3方向の軸に関して縦ひずみ速度( $\dot{\epsilon}_I, \dot{\epsilon}_{II}, \dot{\epsilon}_{III}$ )を求める。縦ひずみ速度は、各流動時刻における2点の粒子間

距離(AB, AC, AD)の時間的变化を意味する。次に、この縦ひずみ成分を全体座標系に関するひずみ速度成分( $\dot{\epsilon}_X, \dot{\epsilon}_Y, 2\dot{\gamma}_{XY}$ )に変換する。その算定式を式(1)に示す。

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_I &= \dot{\epsilon}_X \cos^2 \theta_I + \dot{\epsilon}_Y \sin^2 \theta_I + 2\dot{\gamma}_{XY} \sin \theta_I \cdot \cos \theta_I \\ \dot{\epsilon}_{II} &= \dot{\epsilon}_X \cos^2 \theta_{II} + \dot{\epsilon}_Y \sin^2 \theta_{II} + 2\dot{\gamma}_{XY} \sin \theta_{II} \cdot \cos \theta_{II} \\ \dot{\epsilon}_{III} &= \dot{\epsilon}_X \cos^2 \theta_{III} + \dot{\epsilon}_Y \sin^2 \theta_{III} + 2\dot{\gamma}_{XY} \sin \theta_{III} \cdot \cos \theta_{III} \end{aligned} \quad (\theta \text{は各直線がX軸となす角度とする})$$

…… (1)

他の粒子B, C, Dについても同様に各骨材を原点として3方向の軸に関する縦ひずみ速度ならびに全体座標系に関するひずみ速度成分を算出する。粒子の頂点A, B, C, Dから得られる各ひずみ速度成分の平均値( $\dot{\epsilon}_{X_{ae}}, \dot{\epsilon}_{Y_{ae}}, 2\dot{\gamma}_{XY_{ae}}$ )を、骨材群領域全体の平均的な変形特性を定量化する物理量と見なす。従って各ひずみ速度の平均値は、四角形の重心位置Gでのひずみ速度成分を表すものとした。3つのひずみ速度成分から、最大せん断ひずみ速度  $2\dot{\gamma}_{max}$  と最大・最小主ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2$  を算定する。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 スラブ型枠流動実験

図-5に投入開始からの経過時間に伴う最大せん断ひずみ速度  $2\dot{\gamma}_{max}$  の発生状況の一例を示す。検査領域への到達時間の相違からピーク

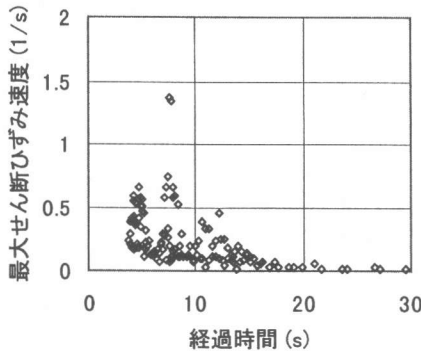


図-5 最大せん断ひずみ速度発生状況

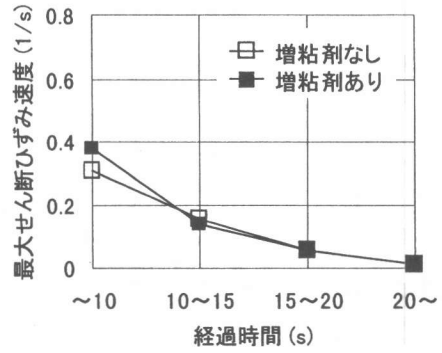


図-7 最大せん断ひずみ速度の平均値

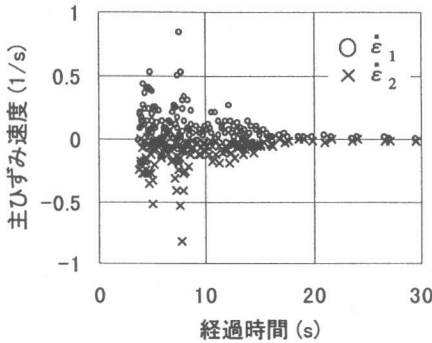


図-6 主ひずみ速度発生状況

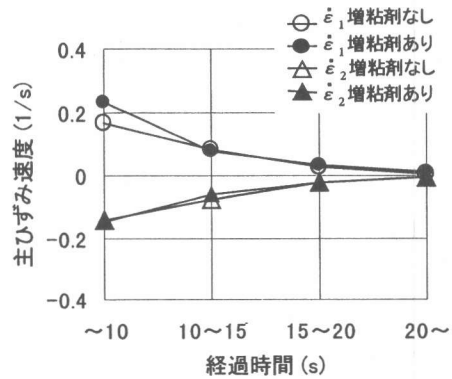


図-8 主ひずみ速度の平均値

に達する時間は若干異なるものの、いずれの試料においても、経過時間 10 秒以内でピークに達する。この時間の流動は、試料の先端付近が検査領域を通過する時間であった。その後、最大せん断ひずみ速度は次第に減少して、投入終了の 16 秒以降は、非常に小さいレベルの値となり、零に漸近する。

モデルコンクリートの投入開始からの経過時間に伴う最大および最小主ひずみ速度 ( $\dot{\epsilon}_1$ ,  $\dot{\epsilon}_2$ ) の発生状況の一例を図-6 に示す。分布状況は最大せん断ひずみ速度と同様に、10 秒以内でピークに達し、投入終了後は零に漸近する。最大主ひずみ速度はほとんどが正の値、最小主ひずみ速度はほとんどが負の値となり、ひずみ速度が零の時間軸に対して、ほぼ対称的な分布であった。これは、モデルコンクリート中

のトレーサー粒子群で囲まれる四角形領域に引張ひずみと圧縮ひずみが同程度に発生していることを示している。

得られたひずみ速度の発生状況から、経過時間を投入開始から 10 秒、10 秒から 15 秒、15 秒から 20 秒、20 秒以降の間隔毎に平均値を求め、経過時間に伴うひずみ速度の変化を検討する。

図-7 は、モデルコンクリートにおける最大せん断ひずみ速度の、図-8 は主ひずみ速度の平均値の時間変化を示したものである。最大せん断ひずみ速度および主ひずみ速度とも、増粘剤の添加の有無による影響はほとんどみられず、最大せん断ひずみ速度はピーク値付近の平均が 0.3~0.4/s、主ひずみ速度のピーク値付近の平均が  $\pm 0.2/s$  のような分布を示した。

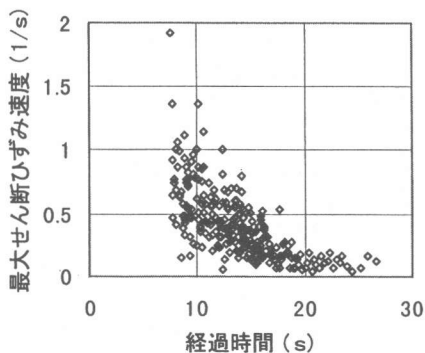


図-9 最大せん断ひずみ速度発生状況

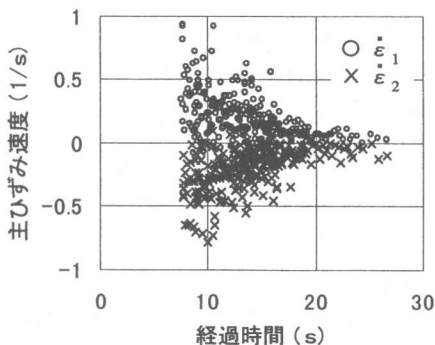


図-10 主ひずみ速度発生状況

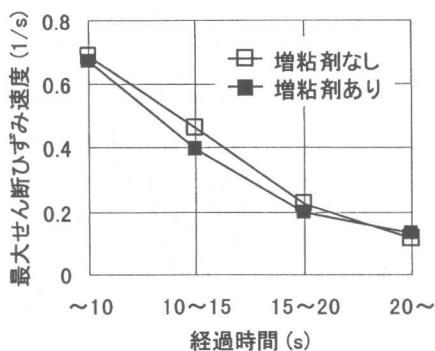


図-11 最大せん断ひずみ速度の平均値

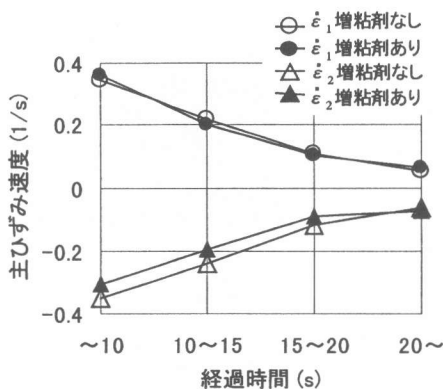


図-12 主ひずみ速度の平均値

### 3. 2 壁型枠流動実験

図-9に投入開始からの経過時間に伴う最大せん断ひずみ速度の、図-10に主ひずみ速度の発生状況の一例を示す。スラブ型枠と同様、経過時間10秒以内でピークに達し、投入終了の24秒以降は零に漸近するが、全体的にその値はスラブ型枠の流動より大きくなった。

スラブ型枠の場合と同様に、得られた最大せん断ひずみ速度の発生状況から、区切られた経過時間の間隔毎に平均値を求め、図-11、図-12に示す。スラブ型枠の場合と同様、増粘剤の添加による影響はあまり見られなかった。ピーク値付近の平均は、最大せん断ひずみ速度が0.7/s、主ひずみ速度は±0.4/sで、スラブ型枠の場合のものに比べ約2倍ほどの大きさであった。全体的にも約2倍程度の大きさであり、

鉛直方向の流動の方が、水平方向の流動よりも発生するひずみ速度が大きいことを表している。

### 3. 3 流動方向と主ひずみ方向のなす角度の分布状況

モデルコンクリートのひずみ状態を、モデルのひずみ円で表すと、スラブ型枠の場合と壁型枠の場合では、最大・最小主ひずみ速度の絶対値がほぼ等しく、最大せん断ひずみ速度が約2倍であることから、中心の座標は原点付近で同じとなり、半径が約2倍になっていると考えられる。実際のひずみ状態は、それぞれの点において主ひずみの方向が流動方向に対してある角度をもった状態で存在するので、フレッシュコンクリートの流動性状を定量的に考える上で、この角度の値も重要な指標となる。主ひずみの方向とX軸とのなす角度を $\alpha$ とし、その分布状

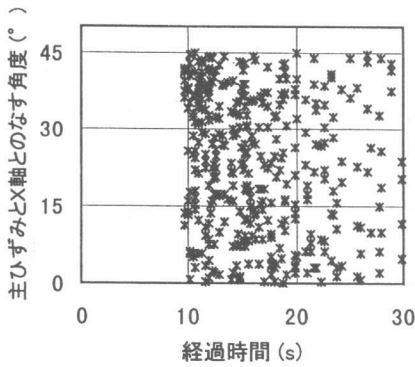


図-13 主ひずみの方向とX軸とのなす角度の経過時間による分布（スラブ型枠の場合）

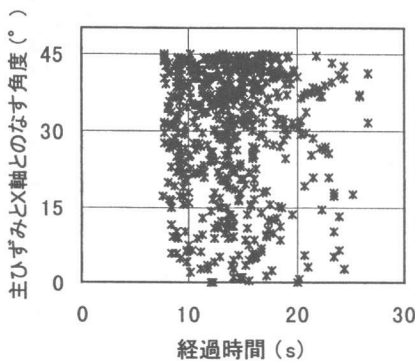


図-14 主ひずみの方向とX軸とのなす角度の経過時間による分布（壁型枠の場合）

況について検討する。

スラブ型枠および壁型枠の流動それぞれの経過時間における $\alpha$ の分布を図-13、図-14に示す。どちらの場合においても $\alpha$ は、ひずみ速度とは違い、経過時間の影響を受けていないといえる。スラブ型枠の場合では45°以下を全体的にほぼ一様に分布しているが、壁型枠の場合では45°に近いところに比較的集中して分布している。図-15は、 $\alpha$ の相対度数分布を表したものである。スラブ型枠の場合はほぼ平坦な分布であるが、壁型枠は角度が大きくなるにつれ、 $\alpha$ の相対度数が大きくなる。壁型枠はスラブ型枠に比べX軸方向、つまり流動方向と、ある一定の角度をもって主ひずみが作用していることを意味する。これは、壁型枠では流

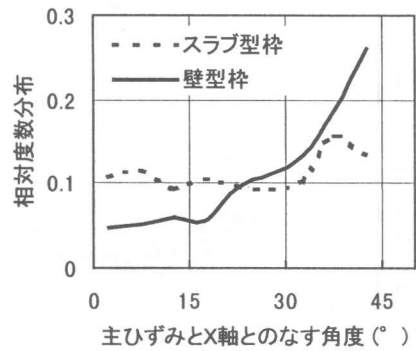


図-15 主ひずみの方向とX軸とのなす角度の相対度数分布

動方向に重力が作用することが、主ひずみの方向に影響を与えていると考えられる。

今後は、骨材濃度の変化による影響についても検討していく。また、型枠内部に鉄筋を配置させた同様の試験について、各種要因がひずみ速度に与える影響を検討していく予定である。

#### 4. 結論

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) スラブ型枠および壁型枠内でのフレッシュコンクリートの流動は、モルタルの粘性に関わらずほぼ一定のひずみ速度を有する。
- (2) フレッシュコンクリートの鉛直方向の流動では、重力の影響により、水平方向の流動より2倍程度大きい最大せん断ひずみ速度が発生し、流動方向と主ひずみ方向とのなす角度が大きくなる。

**謝辞：**本研究の実施および論文の執筆に際しては、清水建設株式会社技術研究所 浦野真次氏に貴重なご意見を頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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