

論文 コンステンシー評価試験装置内を流動するコンクリートのせん断ひずみ速度分布

加古 慎*1・橋本 親典*2・杉山 隆文*3・辻 幸和*4

要旨：本研究は、高流動コンクリートのコンステンシー試験として用いられているスランプフロー試験、Lフロー試験およびV漏斗試験装置内を流動するフレッシュコンクリートの変形特性を定量化するために、フレッシュコンクリートの可視化モデルを用いて、ひずみロゼット法に基づいた最大せん断ひずみ速度分布を求めた。その結果、スランプフロー試験とLフロー試験では、試験開始直後約1秒間以内では10～20/sec程度のひずみ速度が、開始直後1秒以降では0.5/sec以下のひずみ速度が発生する。一方、V漏斗試験では、常に10/sec程度のひずみ速度が発生することが明らかになった。

キーワード：コンステンシー試験、ひずみロゼット法、ひずみ速度、可視化実験

1. はじめに

現在、高流動コンクリートのコンステンシー評価試験としては、スランプフロー試験、Lフロー試験やV漏斗試験等が提案されている。しかし、コンステンシー評価試験の物理的意義については未だ明らかにされていない。これに対し著者らは、従来のブラックボックスであったコンステンシー評価試験装置内部を流動する高流動コンクリートの流動状況をモデルコンクリートにより可視化し、着目トレーサ粒子の流跡線に基づいて定量的評価を行ってきた[1]。

本研究では、スランプフロー試験、Lフロー試験およびV漏斗試験装置内を流動する高流動コンクリートの変形特性の定量化を目的として、可視化モデルコンクリート中に存在する4つの着目トレーサ粒子群の相対距離の変化にひずみロゼット法を適用し、流動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、コンステンシー評価試験装置内を流動するコンクリートの変形特性について考察する。

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粗骨材（粗骨材の最大寸法20mm、比重1.66、FM値6.6、実積率63.9%、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を水に添加した無色透明の粘性流体を用いた。また、着目トレーサ粒子として発泡スチロール粒子（平均粒径2.5mm、比重0.02）を少量混入した。モデルコンクリートの配合は、粗骨材容積比とモルタルの粘性で決定される。モルタルの粘性はP漏斗流下時間を用いて管理する。モデルコンクリートの粗骨材容積比は50%で一定とし、モルタ

*1 群馬大学大学院 工学研究科建設工学専攻（正会員）

*2 群馬大学助教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

*3 群馬大学 助手 工学部建設工学科、Ph.D（正会員）

*4 群馬大学 教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

ルの粘性を変化させることによって、実際の高流動コンクリートの各コンシステンシー評価試験の試験値とほぼ一致するように調節した。すなわち、スランプフロー試験ではフロー値=65±2cm、V漏斗試験では流下時間=4秒を標準とし、スランプフロー試験で用いるモデルモルタルのP漏斗流下時間を30秒とし、V漏斗試験で用いるモデルモルタルのP漏斗流下時間を200秒とした。また、Lフロー試験の試験値の設定が困難であるため、Lフロー試験に用いるモデルモルタルのP漏斗流下時間は、スランプフロー試験に用いるモデルモルタルと同じ30秒とした。

2.2 スランプフロー試験

実際のスランプコーンと同体積の正8角錐形状のコーンをアクリル板で作製し、図-1に示すアクリル板上でJIS A 1101コンクリートスランプ試験法に基づき試験を行う。モデルコンクリートが流動する状況をアクリル板下方から撮影する。撮影時間は、トレーサ粒子が停止するまで、あるいは90秒間とする。同一条件のスランプフロー試験の撮影を5回行う。

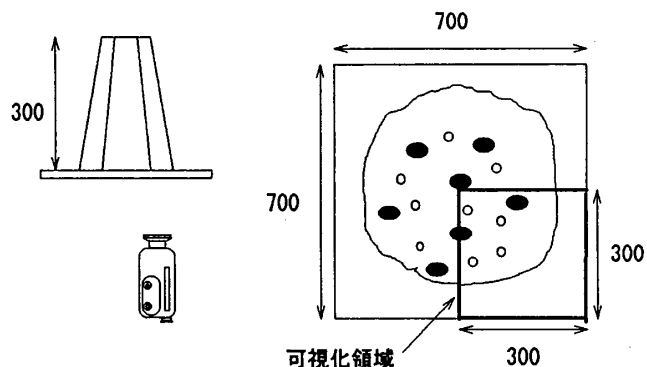


図-1 スランプフロー試験

2.3 Lフロー試験

図-2に示す実際の試験機と同寸法の試験機をアクリル板で作製する。容器内にモデルモルタルを投入し、ゲートを開いてトレーサ粒子が停止（もしくは90秒経過）または水平部先端の壁にモデルコンクリートが到達するまで、側面よりビデオカメラで撮影する。試験回数は、スランプフロー試験と同様で、同一条件で5回の撮影を行う。

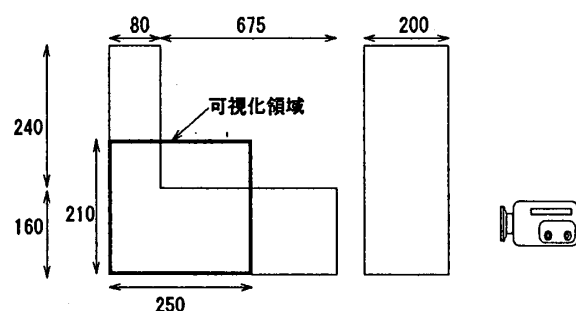


図-2 Lフロー試験

2.4 V漏斗試験

図-3は、実験に用いたV漏斗試験の寸法を示す。他の試験装置と同様にすべてアクリル板で作製する。漏斗内にモデルコンクリートを詰め、ゲートを開き流下時間を測定する。撮影方向は側面とし、同一条件のV漏斗試験の撮影を5回行う。

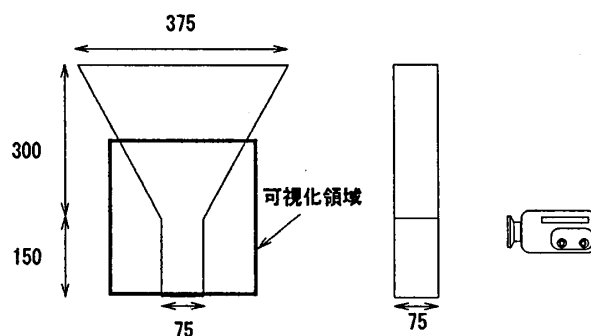


図-3 V漏斗試験

2.5 画像処理方法

可視化領域内にX軸、Y軸を設定し、図-4に示すように領域内にその座標位置が明確に観察される4つのトレーサ粒子群（A、B、C、D）の時刻tにおける座標位置を取得する。

そのトレーサ粒子群を追跡し、0.03秒毎あるいはトレーサ粒子群が少なくとも粒子直径以上の距離を移動した時点で、時刻t+Δtにおけるトレーサ粒子群の（A'、B'、C'、D'）の座標位置を取得する。基本的にトレーサ粒子は可視化領域内、あるいはそれが確認できなく

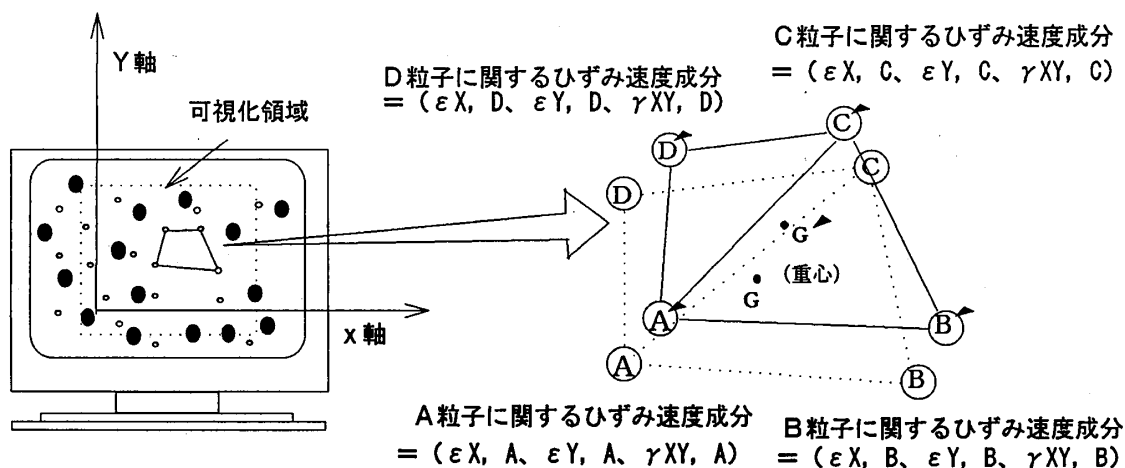


図-4 ひずみ速度の算定方法

なるまで追跡するが、スランプフロー試験については、可視化領域に広がるモデルコンクリート中のトレーサ粒子を途中から出現するものも含め無作為に計測領域全体を平均的に選択しその座標位置を取得する。なお可視化領域に対し高さ方向の影響 [1] が関与すると考えられるが、本実験では底面におけるコンクリートの広がりをも2次元平面としてとらえ、高さ方向の挙動は無視した。Lフロー試験は、試験開始直後1秒間はモデルモルタル充填部、開始直後1秒以降はX軸方向の流動部のトレーサ粒子群の座標位置をスランプフロー試験と同様に取得する。V漏斗試験は、Y軸方向に流動するモデルコンクリートが吐出口に達するまで追跡し、モデルコンクリートが観察できる領域内であるべく平均的にトレーサ粒子群の座標位置を取得する。また、Lフロー試験とV漏斗試験に関しては、可視化領域に対する奥行き方向の影響はないものと思われる。

2.6 ひずみ速度

ひずみ速度の測定手法の原理は、ひずみロゼット法を用いて算出する（図-4参照）。トレーサ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る。例えばトレーサ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（ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ ）を求める。縦ひずみ速度は、各流動経過時刻における2点のトレーサ粒子間距離（AB、AC、AD）の時間的変化を意味する。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（ $\varepsilon_X, A, \varepsilon_Y, A, \gamma_{XY}, A$ ）に変換する。その算定式を次に示す。

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_X \cos^2 \theta_1 + \varepsilon_Y \sin^2 \theta_1 + \gamma_{XY} \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_1$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_X \cos^2 \theta_2 + \varepsilon_Y \sin^2 \theta_2 + \gamma_{XY} \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_2$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_X \cos^2 \theta_3 + \varepsilon_Y \sin^2 \theta_3 + \gamma_{XY} \sin \theta_3 \cdot \cos \theta_3$$

（ θ は各直線がX軸となす角度とする）

他のトレーサ粒子B、C、Dについても同様に各トレーサ粒子を原点として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。トレーサの頂点A、B、C、Dから得られる各ひずみ成分の平均値（ $\varepsilon_X, \text{ave}, \varepsilon_Y, \text{ave}, \gamma_{XY}, \text{ave}$ ）をトレーサ粒子群領域全体の平均的な変形特性を定量化する物理量とみなす。したが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 $\dot{\gamma}_{\max}$ および最大主ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_1$ と最小主ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_2$ を算定する [2]。

3 実験結果

3.1 スランプフロー試験

スランプフロー試験では、試験開始直後1秒間以内と開始直後1秒以降で、発生するひずみ速度の大きさが相当異なる。図-5は、スランプフロー試験開始直後から1.2秒間以内で、経過時間に伴う最大せん断ひずみ速度の発生状況を示す。試験開始よりひずみ速度が急激に増加し、0.5秒後付近でピークを迎える。本実験では平面での流動に関して解析しているためピーク値については高さ方向の影響が大きく関与していると考えられる。また、1秒後には急激に減少する。

試験開始直後1秒以降の最大せん断ひずみ速度の発生状況を図-6に示す。最大せん断ひずみ速度は急激に減少し、試験開始時から10秒後にはほぼ一定の値となっている。スランプフロー試験におけるフロー値を決定すると考えられる時間帯では、最大せん断ひずみ速度が非常に小さいレベルにある。

図-7は試験開始直後1秒間以内における最大主ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_1$ と最小主ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_2$ の関係を示す。最大せん断ひずみ速度と同様に試験開始直後から0.5秒後付近でピークを迎え、その後急激に減少する傾向が見られる。最小主ひずみ速度に関しては、ほぼ零付近に集中している。これは、トレーサ粒子を頂点とする四角形の面積が、経過時間とともに拡大していることを意味する。試験開始直後1秒以降の主ひずみ速度の発生状況を図-8に示す。最大せん断ひずみ速度の発生状況と同様で、10秒後以降はほとんど零付近に集中し、非常に変形速度が小さい。

3.2 Lフロー試験

Lフロー試験についても、スランプフロー試験と同様に試験開始直後1秒以内と、開始直後1秒以降と区別して示す。開始直後1秒間以内における最大せん断ひずみ速度の発生状況を図-9に、開始直後1秒間以降のそれを図-10に示す。試験開始直後から0.4秒後付近でピークとなり、スラ

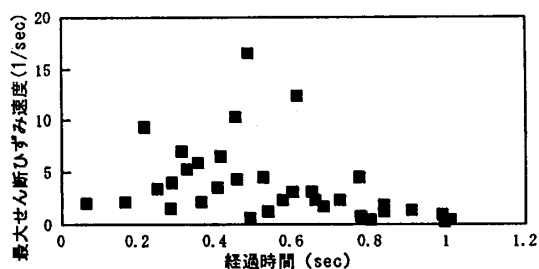


図-5 スランプフロー試験における

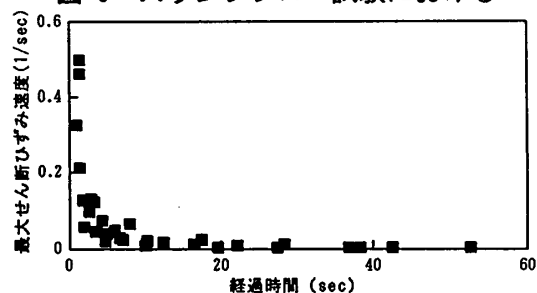


図-6 スランプフロー試験における
1秒以降の最大せん断ひずみ速度分布

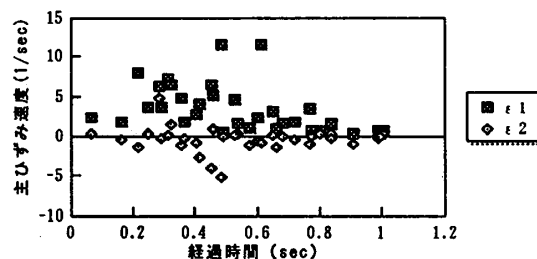


図-7 スランプフロー試験における
初期の主ひずみ速度分布

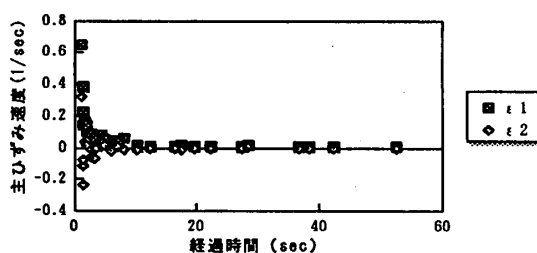


図-8 スランプフロー試験における
1秒以降の主ひずみ速度分布

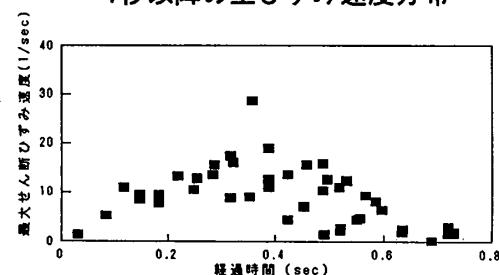


図-9 Lフロー試験における
初期の最大せん断ひずみ速度分布

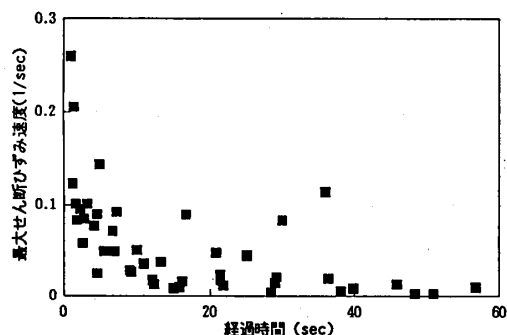


図-10 Lフロー試験における
1秒以降の最大せん断ひずみ速度分布

ンプフロー試験より若干高いレベルにある。Lフロー試験の場合側面から撮影しておりモデルコンクリートの受ける重力方向に関して大きいせん断ひずみ速度が発生したためと考えられる。その後、モデルコンクリートは全体的に底面部に達し、可視化領域に対しY軸方向の流れからX軸方向の流れへと変化するために、開始直後0.8秒以後で最大せん断ひずみ速度は零に向かって収束する。開始直後1秒以降に関してはスランプフロー試験と同様に経過時間とともに徐々に零に漸近する。

試験開始直後1秒間以内の主ひずみ速度の発生状況を図-11に、開始直後1秒間以降のそれを図-12に示す。最大せん断ひずみ速度と同様に0.4秒後付近で最大、最小共に主ひずみ速度はピーク値となる。最小主ひずみ速度に着目すると、そのほとんどの値が負の値である。これは重力を受けたモデルコンクリートが底面部に達すると、重力方向に行き場を失いX軸方向の流れとなるため、トレーサ粒子を頂点とする四角形が圧縮されていることを意味する。開始直後1秒以降の主ひずみ速度の発生状況は、最大せん断ひずみ速度と同様に最大、最小主ひずみ速度ともに零に漸近する傾向が見られる。

3.3 V漏斗試験

図-13に試験開始直後からの経過時間と最大せん断ひずみ速度の関係を示す。時間とともに水頭差が減少し出口の流速は小さくなるが、

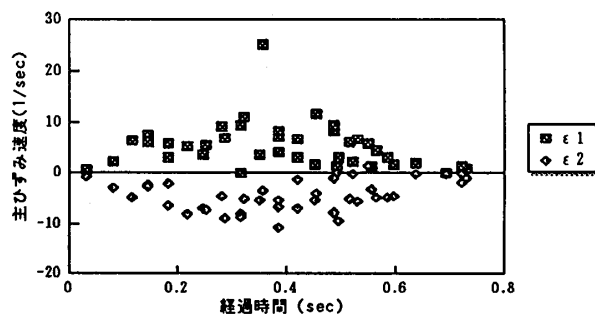


図-11 Lフロー試験における
初期の主ひずみ速度分布

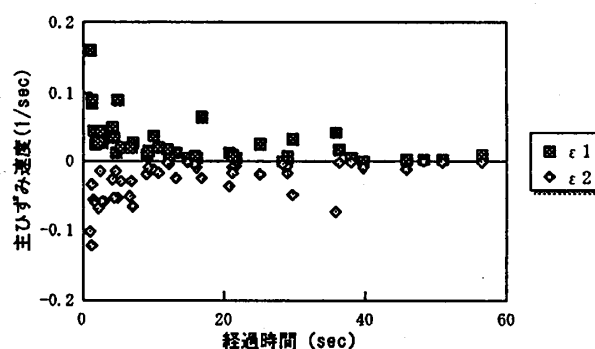


図-12 Lフロー試験における
1秒以降の主ひずみ速度分布

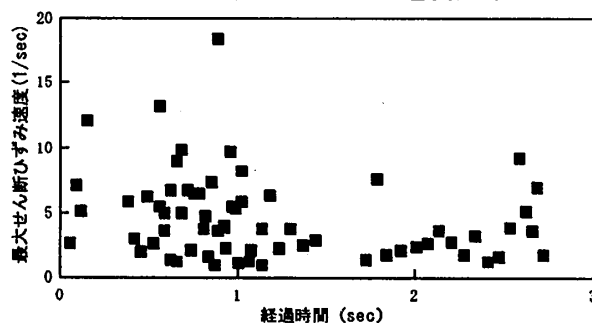


図-13 V漏斗試験における
経過時間と最大せん断ひずみ速度分布

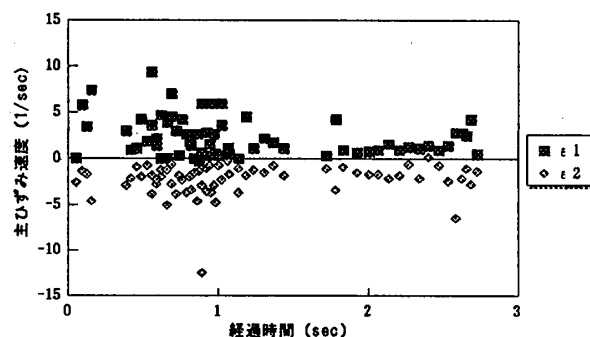


図-14 V漏斗試験における
経過時間と主ひずみ速度分布

試験後半に至っても高い最大せん断ひずみ速度を発生する。図-14に経過時間と主ひずみ速度の関係を示す。ピーク値は存在しない。また最小主ひずみ速度に関しても収束せずに高い値を示す。これは、流下する個々のコンクリートの要素が常に引張ひずみと圧縮ひずみが発生していることを意味する。トレーサ粒子群が流動方向に進行するに伴いV漏斗試験機の幅が狭くなり、Y軸方向には引張ひずみが、X軸方向には圧縮ひずみが発生するためと考えられる。

3. 4 レオロジー試験とコンシステンシー評価試験との関連性

フレッシュコンクリートのレオロジー定数を測定するレオロジー試験は、コンシステンシー評価試験と異なり、ビンガム体の構成方程式の特性値（降伏値と塑性粘度）を求める試験として物理的意義が明確である[3]。レオロジー試験とコンシステンシー評価試験のせん断ひずみ速度を比較することにより、各コンシステンシー評価試験の変形特性の相違点をより明確にすることができる。一般に、コンクリートのレオロジー試験としては、回転粘度計、球引上げ粘度計および平行板プラストメータがある[3]。モルタルやセメントペーストのレオロジー定数の測定に適する回転粘度計において、試料に与えるせん断ひずみ速度は0～10/sec程度であり、軟練りコンクリートに適する球引上げ粘度計は1.0/sec以下であり、硬練りコンクリートに適する平行板プラストメータでは0.01/sec以下のせん断ひずみ速度である[3]。

したがって、本研究で得られた各コンシステンシー評価試験で発生する最大せん断ひずみ速度と各レオロジー試験で与えているせん断ひずみ速度を比較すると次のことが言える。

- 1) スランブフロー試験やLフロー試験において試験開始直後1秒間以内に発生するせん断ひずみ速度やV漏斗試験において発生するせん断ひずみ速度は、コンクリートに与えるひずみ速度としては相当に大きい。
- 2) スランブフロー試験、Lフロー試験における試験開始直後1秒以降に発生する変形速度は、球引上げ粘度計や平行板プラストメータで与えているせん断ひずみ速度と同レベルである。

4. 結論

本研究で以下の知見が得られた。

- (1) スランブフロー試験とLフロー試験装置内を流動する高流動コンクリートでは、試験開始直後0.5秒付近で10/sec～20/sec程度の最大せん断ひずみ速度が発生し、開始直後1秒以降では0.5/sec以下の最大せん断ひずみ速度が発生し経過時間とともに零に漸近する。
- (2) V漏斗試験では、10/sec程度の最大せん断ひずみ速度が試験経過時間中常に発生する。
- (3) スランブフロー試験やLフロー試験において試験開始直後1秒間以内に流動するコンクリートやV漏斗試験を流下するコンクリートには、球引上げ粘度計や平行板プラストメータ等のレオロジー試験中のコンクリートよりも10～100倍程度の相当大きなせん断ひずみ速度が発生する。

参考文献

- [1] 佐藤良一・橋本親典・辻幸和：フレッシュコンクリートの可視化モデルによるコンシステンシー試験の流動特性の定量化、第2回超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp.9-16、1994.5
- [2] 橋本親典・本間宏記・丸山久一・清水敬二：変形管を流れるフレッシュコンクリートの変形性能の評価方法、土木学会論文集 No. 433/v-15、pp.91-100、1991.8
- [3] 日本コンクリート工学協会：フレッシュコンクリートの挙動研究委員会報告書、pp.121～140、1990.3