

## 論文

## [1029] 超流動コンクリートのコンシステンシー評価試験の可視化

佐藤良一\*<sup>1</sup>・若林正憲\*<sup>2</sup>・橋本親典\*<sup>3</sup>・辻幸和\*<sup>4</sup>

## 1. はじめに

近年、コンクリート打設現場では現場作業員の不足、高齢化から作業の省力化、習熟度による品質のばらつき等、が問題となっている。また、打設作業に伴うバイブレーターの使用は騒音をもたらし、作業環境の悪化や近隣に対する配慮などから操業時間縮小の原因となっている。

このような情勢から、超流動コンクリートの概念が提唱され [1]、いくつかの施工例も見られるようになった。超流動コンクリートは締固め不要というその性格上、フレッシュコンクリート時の特性（流動性、材料分離抵抗性、間隙通過性）の評価が従来のコンクリートより重要となってくる。そして現在、超流動コンクリートのコンシステンシー評価試験として、スランプフロー試験、L型フロー試験、V型漏斗試験が、実際に超流動コンクリートを扱っている研究室や現場で多く用いられている。

一方、当研究室では、フレッシュコンクリートモデルの可視化実験手法を用いて、従来ブラックボックスであった様々なフレッシュコンクリートの流動機構を定量化してきた [2] [3]。本研究では、超流動コンクリートのコンシステンシー評価試験における流動機構の解明を目的とし、スランプフロー試験、L型フロー試験、V型漏斗試験の装置内を流動するコンクリートの可視化を行い、定量的評価方法に関する検討を行った。

## 2. 実験概要

## 2. 1 使用材料

モデルコンクリートは固液2相系モデルとし、粗骨材粒子群に人工軽量骨材（最大粒径 20mm、比重 1.66、FM値 6.6、実積率 63.9%、M/珪石系）を使用し、モデルモルタルには無色透明な高吸水性高分子樹脂水溶液（比重 1.0）を使用した。モデルコンクリートの配合は、高吸水性高分子樹脂の添加量とモデルモルタルとモデル粗骨材の容積比（以下、 $V_g/V_m$ ）によって決定した。モルタルの粘性はP漏斗による流下時間（以下、P漏斗値）で制御した。また、モデルモルタルのトレーサーとして発泡スチロール粒子（粒径 2.5mm）を、適量混入した。

試験装置は、実際にコンシステンシー評価試験で使われているものの中で、代表的なサイズのものを出出し、同サイズの物を内部が可視化出来るように5mm厚の亚克力板で作製した。ただし、スランプフロー試験については、亚克力板を円錐状に加工するのが困難であるため八角錐で近似した。3種類の試験方法について図-1に示す。

## 2. 2 実験方法

## 2. 2. 1 スランプフロー試験

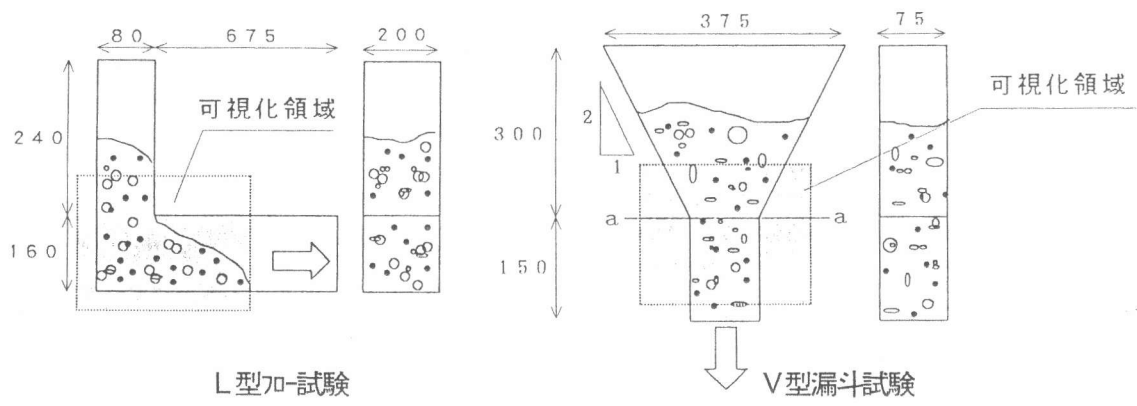
JIS A 1101 コンクリートのスランプ試験法に基づき、スランプコーンを上げてからモデルコンクリートが停止（もしくは90秒経過）するまでのトレーサー粒子の動きを、試験器の下方にセットしたビデオカメラに収録する。

\*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 工学部建設工学科

\*3 群馬大学 工学部建設工学科、工博（正会員）

\*4 群馬大学 工学部建設工学科、工博（正会員）



L型フロー試験

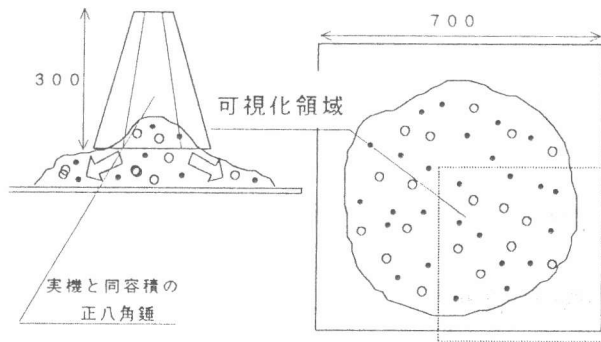
V型漏斗試験

### 2.2.2 L型フロー試験

鉛直部にモデルコンクリートをつめ、ゲートを上げてからモデルコンクリートが停止（もしくは90秒経過）または水平部の壁に到達するまでのトレーサー粒子の動きを、側面からビデオカメラに収録する。

### 2.2.3 V型漏斗試験

漏斗にモデルコンクリートを詰め、下方のふたを開き、流下する状況を側面からビデオに収録する。また、漏斗の中のモデルコンクリート流量の時間的変化を求めするために、図のa-a断面を着目断面とした。



スランプフロー試験

図-1 実験概要

## 2.3 モデルコンクリートの配合

スランプフロー・L型フロー・V型漏斗の各試験について使用するモデルコンクリートの配合を以下に決定した。

### 2.3.1 スランプフロー試験

一般に良好な流動性を有する超流動コンクリートのフロー値は65cm程度であるため[4]、モデルコンクリートの目標フロー値も65cmと設定した。また、一般の超流動コンクリートの $V_g/V_m$ が0.5程度であることから[4]、モデルコンクリートの $V_g/V_m$ を0.5で一定とし、P漏斗値を200~10秒程度に変化させフロー値が65cmになるモデルコンクリートのP漏斗値を決定した。P漏斗値とスランプフロー値の関係を図-2に示す。その結果、スランプフロー試験に用いるモデルコンクリートの $V_g/V_m$ は0.5とし、モデルモルタルを製造する高分子樹脂水溶液の添加量は、P漏斗値が30秒になるよう決定した。

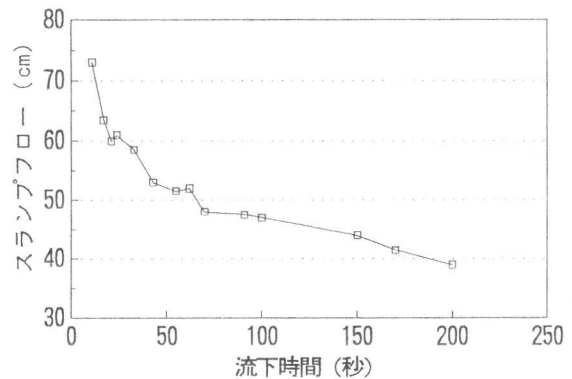


図-2 P漏斗値とスランプフロー

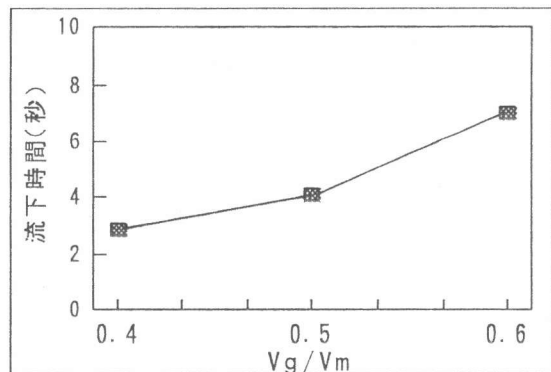


図-3  $V_g/V_m$ と流下時間

### 2. 3. 2 L型フロー試験

この試験については、実験器具のサイズが様々で [4] 目標となるパラメータを定めにくいのと、モデルコンクリートの挙動としてスランプフロー試験に近いという既往の文献の報告から、モデルコンクリートの配合はスランプフロー試験と同じものを使用した。

### 2. 3. 3 V型漏斗試験

各種文献から、V型漏斗を流れるコンクリートの平均流速を求めた結果、目標とする流下時間を4秒に決定した。また、この試験ではテーパ部において骨材同志の干渉が起こるため、モデルモルタルの粘性よりも粗骨材濃度の変化が、流下時間により影響すると判断し、Pロート値=200秒で、 $V_g/V_m$ を0.4~0.6に変化させて流下時間を測定した。 $V_g/V_m$ とV型漏斗流下時間の関係を図-3に示す。V型漏斗試験に用いるモデルコンクリートの配合は、 $V_g/V_m=0.5$ 、P漏斗値=200秒と設定した。

### 2. 4 解析方法

試験装置の撮影領域にX-Y座標を設定し、画面に出現したトレーサー粒子の位置座標の変化を0.1秒毎に追跡した。次に、得られたトレーサー粒子の位置座標データを、3次元スプライン関数を用いて連続関数に補間し、その補間曲線を流跡線とした。速度ベクトルは、スプライン関数で得た連続関数を時間で微分することにより算出した。また、V型漏斗試験では着目断面位置での速度ベクトルから着目断面直角方向速度ベクトルを求め、断面流量を求めた。

## 3. 結果および考察

### 3. 1 スランプフロー試験

スランプフロー試験を下方から可視化すると着目トレーサー粒子は、試験開始前から底面にあるものと、試験開始後に底面に出現するものが観察される。スランプフロー試験の初期の挙動としては、試験開始から1.5秒程度で40cm程度広がり、その後は非常にゆっくりとした動きになる。トレーサー粒子の出現時間を0秒、0.2~0.3秒後、0.4~0.5秒後の3段階に分けて、それぞれの出現時間におけるトレーサー粒子の軌跡の一例を図-4~6に示す。扇型の直角部分は、スランプコーンの中心を表し、トレーサー粒子群は中心から扇形の弧に向かって進む。内側の弧はスランプコーンの大きさを現し、試験開始直後のモデルコンクリートの自由表面の先端である。外側の弧は90秒後あるいは停止し

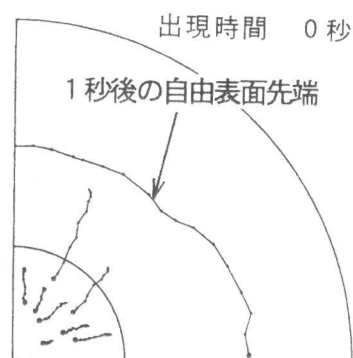


図-4 トレーサー粒子の位置座標

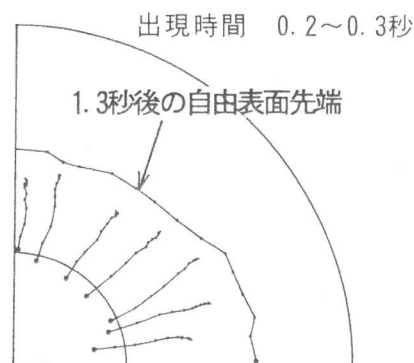


図-5 トレーサー粒子の位置座標

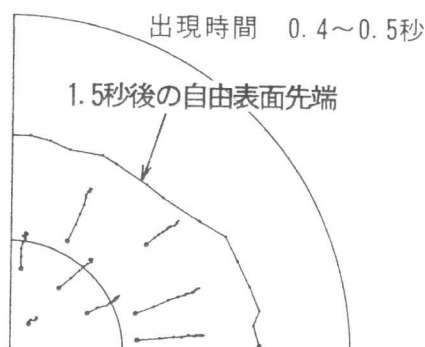


図-6 トレーサー粒子の位置座標

たモデルコンクリートの先端部であり、フロー値65cmの弧を現す。また、出現時間別のトレーサー粒子群の速度ベクトルの大きさの平均値の経時変化を図-7に示す。

スランプフロー試験における、モデルコンクリートの流動は、図-8に示す3つの領域に分かれて進行すると推測される。すなわち、試験開始直後では、領域1のコンクリートはあまり流動せず、領域2のコンクリートが主に流動する。その後、領域3のコンクリートが、領域1および2の上部に重なりゆっくりと流動する。領域1のコンクリートは開始直後から流動するが、あまり大きな速度では流動しない。これは図-7の「0秒」のグラフと一致する。

一方、領域2のコンクリートは、領域1のコンクリートの上を滑り落ちて流動するため、重力によって流動が加速し、流動速度が大きい。図-7の「0.2秒」がこれに対応する。

そして、領域1・2のコンクリートの流動がある程度落ちついた後で、その上から領域3のコンクリートが浸透するような形で流動し、この流動が試験終了まで継続する。図-7の0.4秒がこの流動に対応する。

領域1と領域2の試験開始初期における速度差により両者の界面にせん断面が生じ、それぞれが独立して流動する。その結果として領域2のコンクリートがせん断面上を滑りながら流動し、領域1のコンクリートは、領域2のコンクリートに拘束されるためにあまり流動しない。

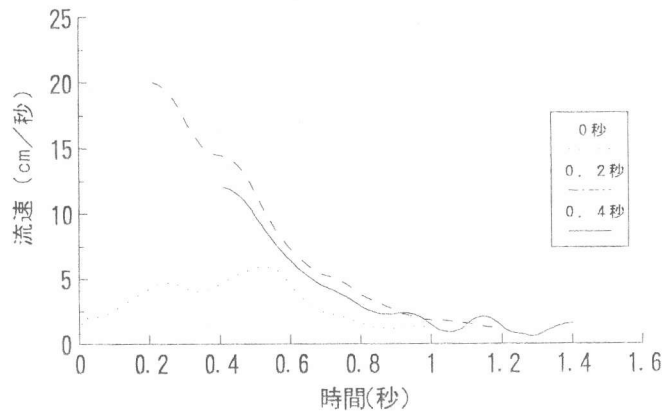


図-7 速度ベクトルの経時変化



図-8 スランプ試験におけるコンクリートの挙動

### 3. 2L型フロー試験

試験器の可視化領域の鉛直部を9つの領域に分け(図-9)、その中のトレーサー粒子の試験開始時から流動停止時までの代表的な流動線を図-10(上段)、11(中段)、12(下段)に示す。領域7にみられる線はモデルコンクリートが停滞している部分(停滞域)を表す。この停滞域は、ビデオ画面から目視観察によりモデルコンクリートがせん断を起こしているすべり線から求めた。

コンクリートの流動を定量化しようとしたとき、隅角部等に現れる停滞域がコンクリート全体の流動性状に大きく影響

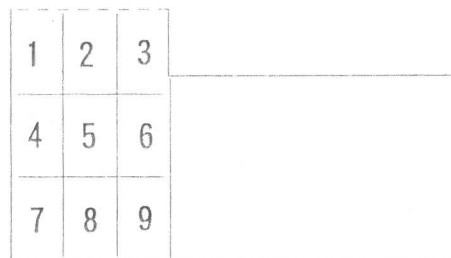


図-9 領域の分割状況

すると思われる。領域1～3では位置による停滞域の影響の差はあまりみられず、各領域のモデルコンクリートは、試験器の壁もしくは停滞域と自由表面の間を、層を成して流動しており、その移動量もほぼ等しいといえる。領域5・6は領域1～3のと同様の流動を示すが、領域4に関しては、停滞域と流動域の界面でせん断が起こっており、エネルギーロスが大きく、トレーサー粒子の移動量も極端に小さくなる。領域7は停滞域にあるためほとんど動いていない。領域9はゲートを開けて1番最初に開放される部分であり、それより上のモデルコンクリートの重力が集中するため、同じように底面との摩擦を受けている領域8より移動距離が大きい。

また上段、中段、下段で区切ると、トレーサー粒子の鉛直方向の移動量がほとんど等しいのに比べ、水平方向の動きがかなり異なる。モデルコンクリートの流動が、停滞域と流動域で互いに干渉し、下段に移行するほど停滞域の影響を受け、水平方向の流動性が悪くなり、延いては充填性、材料分離に悪影響を及ぼすものと思われる。

### 3. 3 V型漏斗試験

V型漏斗試験で得た位置座標データを図-13に、着目断面流量およびその時間的変化を図-14に示す。

位置座標データは計測間隔が一定であるため、単位時間当たりの流動距離を意味する。試験器の壁に近い方が壁面摩擦を受けるので、テーパ部、平行部共に速度が小さくなるが、その影響はテーパ部の方が顕著である。テーパ部は鉛直方向の摩擦に加え、水平方向にも摩擦を受けるためと考えられる。また、骨材同士の干渉による影響もテーパ部の方が大きいと予想される。

V型漏斗試験は、ある一定の体積のコンクリートが重力にまかせて落下するため、管路やポンプの管内流動とは異なり、その流量が時間的に変化する。したがって、モデルコンクリートを完全流体と仮定すると、ベルヌーイの定理

$$V = \sqrt{2gh}$$

から、流速は位置水頭の関数であり、位置水頭は経過時間の関数である。したがって、断面流量は経過時間に伴い急激に減少する。本実験から得られた着目断面流量の経時変化は減少関数である。しかし、試験開始

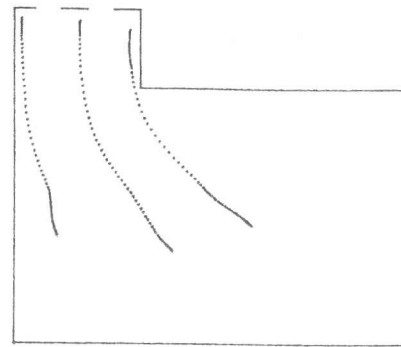


図-10 流跡線 (上段)

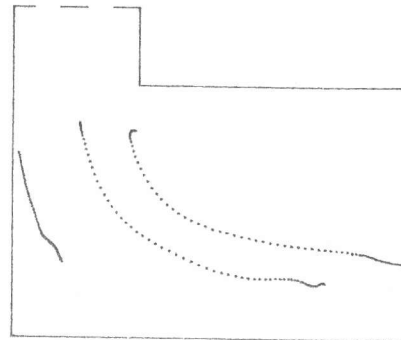


図-11 流跡線 (中段)

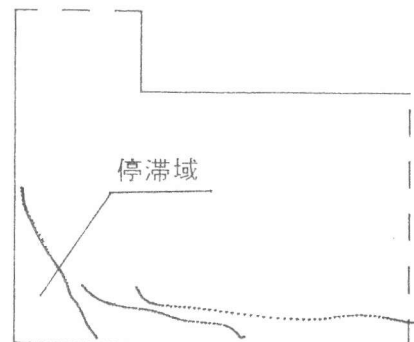


図-12 流跡線 (下段)

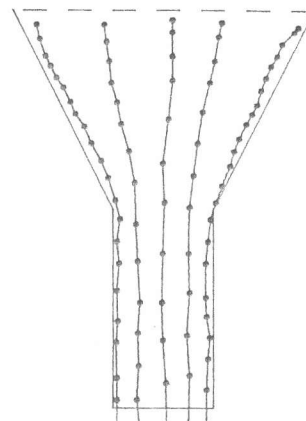


図-13 トレーサー粒子の位置座標

直後の流量の変化が急激でなく緩やかである。ロートの中に充填されたモデルコンクリートは、試験開始直前まで時間の経過と共に重力の作用を受け、骨材同士が噛み合っ安定しようとする。また、骨材を詰め終わってから試験を開始するまでの時間が長ければ、その作用も大きくなる。ゆえに、下方の出口を解放した直後(0.1秒後)では、移動を開始するための大きなロスが働き、流量の変化が小さくなったと思われる。

#### 4. 結論

超流動コンクリートのコンシステンシー評価試験の可視化を行い、流動機構の解明を目的として、定量的指標を検討した結果、本実験の範囲で以下のことが明らかになった。

1) スランプフロー試験の流動機構は、モデルコンクリートを3領域に分けることにより、模式的に説明できる。

2) L型フロー試験は、鉛直部分を9領域に分けて実験を行い、モデルコンクリートの流跡線、停滞域を確認した。

3) V型漏斗試験の流動特性は、着目断面流量の時間的变化により、定量化を行うことが可能である。

今後の課題としては、モデルコンクリートの粘性の変化が、各試験装置内の流動機構に与える影響についての検討等があげられる。

#### 謝辞

本研究は、平成5年度文部省科学研究費補助金(試験研究(B)(2)課題番号0555119)の一部により行ったものである。

#### 参考文献

- [1] 岡村甫、前川宏一、小沢一雅：ハイパフォーマンスコンクリート、技報堂出版、pp.2、1993
- [2] 橋本親典、堀口和宏、丸山久一、清水敬二：テーパ管を流動する可視化モデルコンクリートの乱れ計測システム、土木学会論文集、第402号/V-10、1989.2
- [3] 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、第433号/V-15、1991.8
- [4] 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(1)、pp.199-212、1993.5

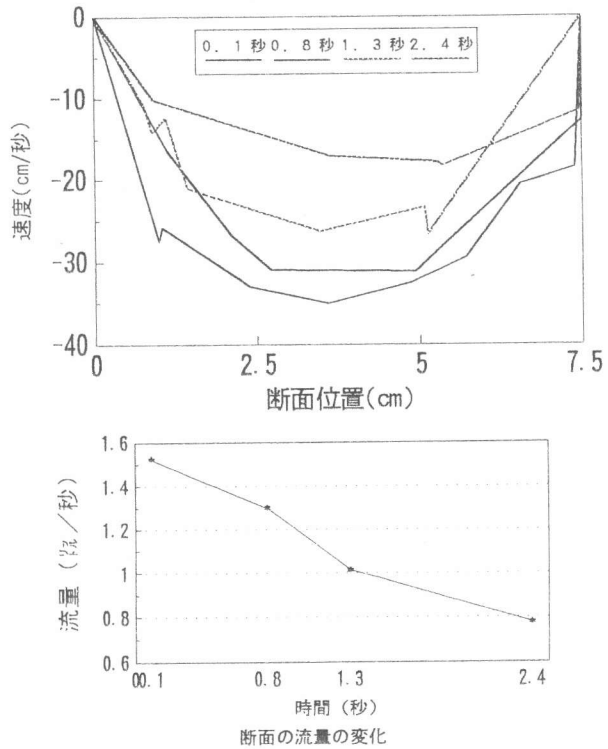


図-14 着目断面位置流量の経時変化