

回転粘度計内部の流動速度分布とせん断応力の同時測定およびその考察

東京大学大学院 学生会員 ○田中 俊成
 東京大学生産技術研究所 フェロー会員 岸 利治

1. はじめに

コンクリートの打設作業の合理化という観点からフレッシュコンクリートの流動特性を把握することは重要な事項であり、コンクリートの構成マトリックスであるモルタルやセメントペーストのレオロジー特性に関する研究が多くなされている。ところで、代表的なレオロジー指標として、二重円筒を有する回転粘度計による見かけせん断速度—せん断応力関係（流動曲線）の測定がある。この測定においては、見かけせん断速度の算出のために二重円筒内の速度分布をニュートン流体の挙動に従うことを仮定する。JIS R 1652 によれば、このような仮定が成り立つために、外円筒と内円筒の直径比が 1.2 以下であることが望ましいとしている。しかし、比較的大きな砂を含むモルタルのような材料の場合、均質性を保つために直径比を大きくするのが好ましい。直径比が大きい場合、二重円筒内の流動速度分布がニュートン流体のそれとは異なり、非線形性が強く表れるという報告もある²⁾。したがって、サスペンションのレオロジー測定の際に見かけせん断速度を基準に議論を行う場合、流動速度分布の変化という情報が欠落している可能性がある。そこで、本研究では、回転粘度計によるレオロジー測定と同時に、流動場表面を上方よりカメラで撮影し、二重円筒間の速度分布を測定した。そして、速度分布の変化とせん断応力の変化の関連を考察した。

2. 実験概要と結果

2. 1 使用試料とレオロジー測定

本研究では、セメントペーストと同様に凝集性の粉

体であり、水和による影響を無視できる石灰石微粉末のペーストを使用した。水粉体比 (W/P) を 25% とし、ナフタレンスルホン酸系の高性能 AE 減水剤を粉体質量比で 0.8% 添加した。使用した水は水道水である。さらに、流動場を観察する際のトレーサー粒子として、赤色蛍光粉末を粉体質量比で 0.05% 添加した。練り混ぜは自公転ミキサーを使用し、1000rpm で 1 分間練り混ぜた。試料の練り混ぜが終了後、5 分間静置し、回転粘度計によるせん断応力測定を開始した。回転粘度計は T 社の共軸二重円筒回転粘度計であり、使用したローターの半径は 8.4mm、外円筒の半径は 17.6mm (外円筒/内円筒直径比 2.1)、ローターと外円筒間の Gap サイズは 9.2mm である。測定にあたり、図-1 に示すようにローターの回転速度を 5rpm から 40rpm まで段階的に上昇させ (上昇過程とする)、その後再び 5rpm まで減少させる (下降過程とする) ように設定した。図-1 中にはせん断応力の測定結果も併せて示している。

2. 2 流動速度分布の測定

流体中に投入したトレーサー粒子の微小時間当たりの変位量から、速度を求める粒子画像流速測定法 (PIV)³⁾ によって、石灰石微粉末ペーストの動きに追従するトレーサー粒子の速度を求めた。図-2 に実験全体のセットアップの概要を示す。白色に懸濁したペースト中で蛍光粒子を可視化するために、測定領域斜め上方より、紫外線を照射した。さらに赤色系の光のみを透過させるフィルターをレンズに装着し、粒子画像を鮮明にした。ローターは粘度計に鉛直に直結しており、カメラをローター上方に設置できない。そこで、カメラは水平方

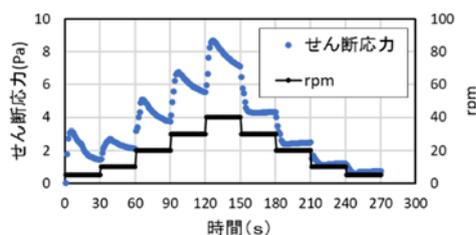


図-1 設定プログラムとせん断応力の測定結果

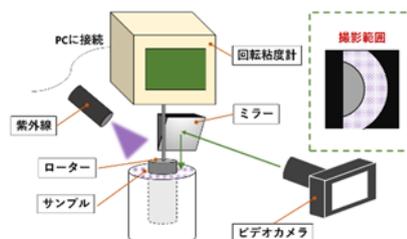


図-2 実験概要図

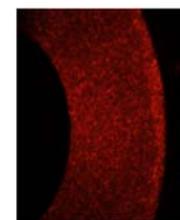


図-3 流動場の様子

キーワード 凝集性サスペンション, 回転粘度計, 速度分布, 可視化, 粘度変化特性,

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 TEL 03-5452-6394

E-mail : shtanaka@iis.u-tokyo.ac.jp

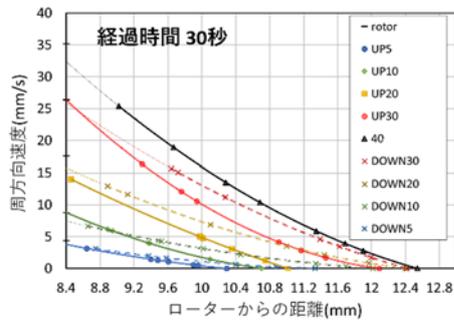


図-4 各 rpm の経過時間 30 秒の速度分布

向に設置し、ローター上方に 45 度で設置したミラーを介することにより流動場の動画を取得した(図-3)。撮影した動画を静止画に変換し、トレーサー粒子の微小時間の変位量から流動場における速度分布を求めた。速度分布はローター中心を 0 とした半径方向距離で整理した。図-4 には、測定した速度分布の例として、各 rpm で 30 秒経過したときの速度分布の測定結果を示す。図-5 には、流動先端(速度が 0 になる位置)の値を、経過時間を横軸にとって整理している。図-4 中で例えば、UP5_30 は上昇過程(UP)の 5rpm データを意味する。下降過程(DOWN)も同様である。

3. 考察とまとめ

せん断応力の時間変化と流動速度分布の広がりと比較し、以下の 3 つの観察を得た。

- i). 図-1, 図-4 より、同じ測定ステップ内の 30 秒間に着目したとき、上昇過程ではせん断応力は減少し、流動域が拡大している。下降過程では、せん断応力は増加し、流動域は縮小している。そして、上昇過程と下降過程を比較したとき、上昇過程では流動域が急速に拡大するが、下降過程での流動域縮小は緩慢である。
 - ii). 図-1, 図-4 より、上昇過程と下降過程の同じ rpm に着目したとき、上昇過程よりも下降過程の方が、せん断応力は低く、流動先端は広がっている。
 - iii). 図-4 より、上場過程よりも下降過程の方が速度分布の非線形性が小さい。つまり、上昇過程において徐々に外側まで速度が広がっていくが、下降過程では上昇過程の速度分布まで戻らない。
- i), ii) より、同じ rpm である場合、流動域が狭いほどせん断応力が大きくなる。これは、図-4 が示すように、流動域が狭いほど、速度分布が急峻であり、ローター壁面での実際のせん断速度が大きくなるためだと考えら

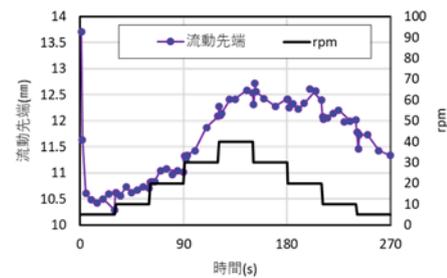


図-5 各 rpm の経過時間 30 秒の速度分布

れる。この結果から、粘度測定の際、試料の全域が流動している場合としていない場合では測定結果に影響を与える可能性が示唆される。また、iii) の現象は、サスペンションの粘性低下と粘性回復の観点から以下のように考察した。上昇過程において凝集構造が徐々に破壊され、下降過程では回復していくが、現象 i) で確認したようにせん断応力の変化は、上昇過程では急速な減少、下降過程では緩慢な上昇である。このことから、本実験では、凝集体の破壊速度は相対的に急速であり、凝集速度は相対的に緩慢であることが予測される。速度分布は流体の粘性で徐々に外側に伝播していく。上昇過程では粘性の急速な低下により、速度分布も急速に広がるが、下降過程では、粘性の緩慢な上昇により、緩慢に縮小していくと考えられる。この差異が現象 iii) において、非線形性の違いとして現れたものと考えた。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP16H02354 の助成を受けたものである。また、本研究で用いた石灰石微粉末は菱光石灰工業株式会社に提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 金城賢作, 山田義智, 富山潤: セメントペーストのレオロジー特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集 / 日本コンクリート工学協会 編, Vol.29, No.2, pp. 31-36, 2007.
- 2) 山崎慈生: サスペンションの流動速度分布の定式化と流動曲線の焦点シフトから見た時間依存変化に関する研究, 東京大学修士論文, 2016
- 3) 大川原真一: 粒子画像流速計測法(PIV)の工学的基礎-原理およびトレーサ粒子の選定, B&R: journal of Japanese Society of Biorheology / 日本バイオレオロジー学会 [編], Vol.12, No.3, pp. 139-147, 1998