

デジタル画像を利用した粒子一流体系内部の速度場計測

筑波大学  
筑波大学  
筑波大学

学生会員  
正会員  
正会員

竿本 英貴  
松島 亘志  
山田 恭央

1. はじめに

粒子一流体系の挙動は土木工学の分野のみならず、機械工学や粉体工学など、様々な分野で積極的に研究がなされているものの1つである。地盤工学においては、液化化や砂や礫の透水問題、ボイリング、パイピングなどがこの範疇であり、粒子一流体系の内部を観察し、挙動を把握することは重要である。一方、近年のデジタル技術の発達はめざましく、高解像度、高時間分解能を持つ CCD カメラが市販され、入手が比較的容易になってきた。本研究では、この CCD カメラを可視化実験手法である LAT<sup>1)</sup>(Laser-Aided Tomography) および PIV<sup>2)</sup>(Partilce Image Velocimetry) と組み合わせることにより、粒子一流体系内部の速度場を計測することを試みた。

2. 可視化手法とデジタル画像の取得方法

可視化手法には、LAT と PIV を併用する。LAT は粒状体の内部を観察するために開発された可視化手法である。光学ガラスを粉砕することにより生成した粒子を用いて模型を作成し、光学ガラスと同じ屈折率を有する液体で模型を飽和させて試験体を作成する。次いで、シート状にしたレーザー光を試験体に透過させる。粒子表面で光の散乱が起こり、レーザーシート面内の粒子輪郭が観察可能となる。他方、PIV は流体力学の分野でよく用いられる可視化手法である。流体中に無数のトレーサ粒子（大きさ数十ミクロン）を混入し、レーザー光をシート状にして流れに照射することにより、レーザーシート面内のトレーサ粒子が光り、パターンを作り出す。微小時間に対するパターンの移動量を調べることにより、流体の速度場を求めることができる。ここでは、同じ屈折率を有するガラス粒子と液体から成る LAT 供試体に PIV で用いられるトレーサ粒子を混入することにより、ガラス粒子と液体の挙動を同時に可視化する。

デジタル画像を取得する方法については、従来の画像計測手法と全く同じであり、CCD カメラから画像ボードを介して PC にデジタル画像が保存される (図-1)。今回は 100 万画素、30 フレーム/秒の CCD カメラと、メモリ 2GB の PC を用いて計測システムを構築した。

3. 可視化実験

1 辺が 100mm のアクリル製の容器に、ガラス粒子と、トレーサ粒子を混入したシリコンオイル、および 載荷装置につながった板付きのアクリル棒を詰めて供試体を作成し、0.75mm/s でアクリル棒を引き抜くという可視化実験を行った。実験は 2 種類行い、一方は供試体全体を撮影し、全体の速度場の観察を目的としたもの (case1) である。もう一方はアクリル棒につけた板近傍の領域を拡大撮影し、局所的な速度場の観察を目的としたもの (case2) である。どちらの場合も、レーザーシート面内の 2 次元的な速度場の可視化実験であ

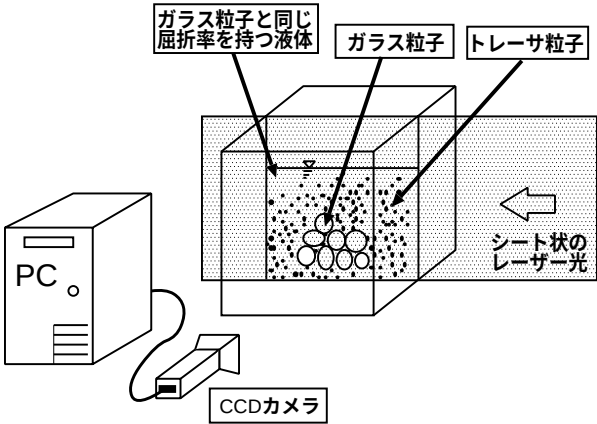


図-1 計測システムの概要

る。また、撮影倍率はそれぞれ 0.130mm/pixel(case1), 0.049mm/pixel(case2) となっている。実験に用いた供試体の概要を図-2に、ガラス粒子とシリコンオイルの諸元を表-1にそれぞれ示す。供試体を作成した後、各場合に対して初期状態を撮影したものが、図-3および図-4である。

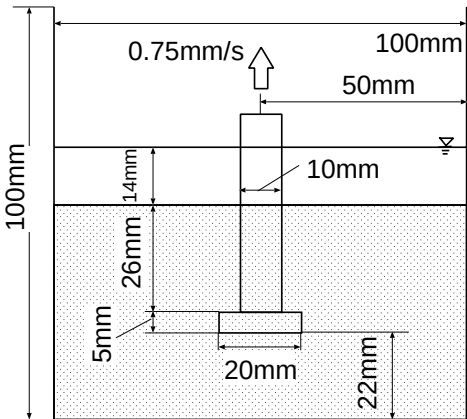


図-2 供試体の概要

表-1 ガラス粒子とシリコンオイルの諸元

|     | ガラス粒子                  | シリコンオイル                 | トレーサ粒子                 |
|-----|------------------------|-------------------------|------------------------|
| 密度  | 2.52 g/cm <sup>3</sup> | 1.02 g/cm <sup>3</sup>  | 1.02 g/cm <sup>3</sup> |
| 粒径  | 2mm～5mm                | —                       | 40μm                   |
| 動粘度 | —                      | 20.6 mm <sup>2</sup> /s | —                      |
| 屈折率 | 1.514                  | 1.514                   | —                      |

4. 実験結果

目視により実験の動画を確認すると、いずれの場合についても、引き抜きが始まると同時にアクリル棒の直下に空洞ができ始め、流体が流入している様子や、

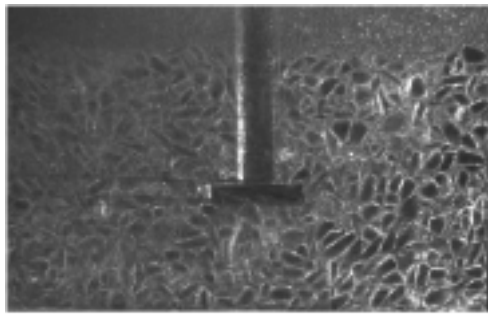


図-3 case1 の初期状態 (752×480pixel)

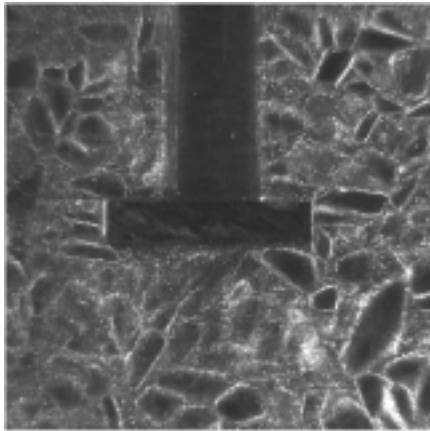


図-4 case2 の初期状態 (800×800pixel)

空洞中へのガラス粒子の落ち込み、粒状体の変形の様子が観察できた。

次に、2 画像間の画素値の相互相関を用いてパターンマッチングを行い、速度場の定量化を行った。case1 について、速度場を求めた例が図-5である。ここで、マッチングのために用いたテンプレートの大きさは31pixel 四方であり、2 画像間の時間間隔は0.167秒である。また、コンターの値は、アクリル棒の引き抜き速度で無次元化したものを示している。図-5より、板の左斜め上方のガラス粒子群の落ち込みと、直下の空洞中の流体の速度場が卓越していることがわかる。このことは、マッチング操作がガラス粒子の輪郭により構成されるパターンに対して機能したことを表している。case1 についてはガラス粒子の間隙中を流れる流体の挙動を定量化することは困難であり、ガラス粒子の速度場と空洞中の流体の速度場が測定可能であった。同様に、case2 についてテンプレート(29pixel 四方)を2pixel ずつずらし、速度場を求めた例が図-6である。空洞の下方のように、ガラス粒子が静止しており、間隙流体のみが移動している箇所について述べると、間隙流体の速度場が計測可能な領域もあるが、計測不可能な領域も存在している。このことは、画像から切り出すテンプレートにガラス粒子輪郭とトレーサ粒子のパターンが混在していて、両者に速度差があることによると考えられる。テンプレートのサイズを小さくすることでガラス粒子輪郭とトレーサ粒子のパターンが混在するのを回避しようと試みた。これにより測定可能な領域が多少増えたが、誤ベ

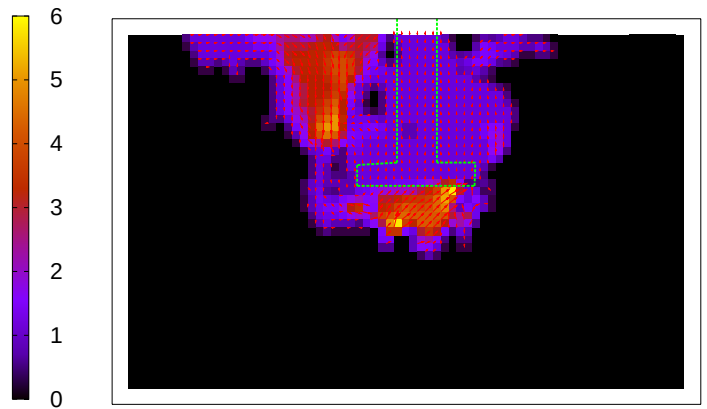


図-5 供試体内部の速度場 (case1, 実験開始から 17 秒後)

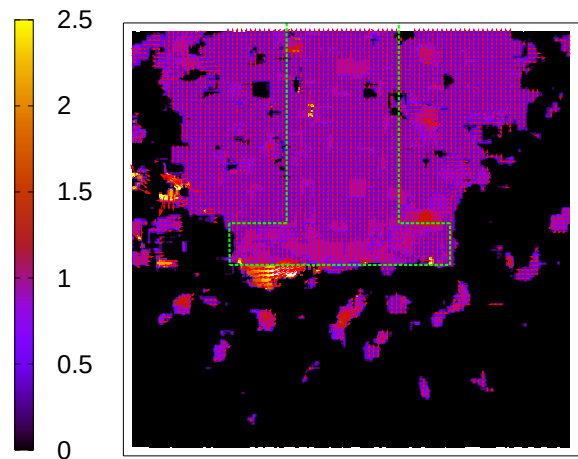


図-6 供試体内部の速度場 (case2, 実験開始から 0.1 秒後)

クトルの現れる割合も高くなった。また、現段階ではガラス粒子と間隙流体が両方とも動いている領域において、パターンマッチングにより作られるベクトル場が、ガラス粒子のものなのか、間隙流体のものなのかを完全に区別することはできない。

## 5. まとめ

case1 についてはガラス粒子群が作るパターンに対するマッチングが可能であり、ガラス粒子群の速度場の計測が可能である。また、間隙流体の速度場の計測は困難である。

case2 については、間隙中の流体に対して、計測可能な領域と不可能な領域が存在した。今後は供試体を作成する際に、トレーサ粒子に蛍光粒子を用いるなどの工夫を施すことにより、ガラス粒子と間隙の区別が可能となり、計測不可能であった領域における間隙流体の速度場が計測可能になると考えられる。また、この場合に対するガラス粒子の速度場の計測はパターンマッチングではなく、他の画像計測手法が必要となる。

## 参考文献

- 1) Matsushima, T., Ishii, T. and Konagai, K. : Observation of Grain Motion in the interior of a PSC Test Specimen by Laser-Aided Tomography, Soils&Foundations(2002), Vol.42, No.5, pp.27-36.
- 2) M. ラッフェル, C.E. ヴィラート, J. コンペンハンス著, 小林敏雄 監修, 岡本孝司, 川橋正昭, 西尾茂 訳: PIV の基礎と応用, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2000.