

PIV 画像解析の地盤力学への適用

山口大学大学院 学生会員 ○村上裕幸

山口大学工学部 正会員 中田幸男 吉本憲正

山口大学大学院 正会員 兵動正幸

1. はじめに

地盤工学において液状化や浸透破壊、ボイリングなどの現象を解明するために現在では数値解析などの手法が用いられ、その技術の開発、精度の向上が図られている。しかし、粒子・流体系の内部を画像により観測し挙動を把握する画像解析の研究は地盤工学において未だ乏しい。そこで本研究では、PIV 画像解析手法（Particle Image Velocimetry：粒子画像流速測定法）を地盤力学に適用するための基礎的研究を目的とする。

2. PIV の原理

図1は微小に異なる2時刻でデジタル撮影された2画像の模式図である。先の時刻に取得した画像1の画像中に検査領域を設け、その検査領域が後の時刻に取得した画像2のどこに移動したか探索領域内を移動しながら検査していく。その際どこに移動したかを相互相関法に基づいて求める。この関数は局所的な輝度値パターンの類似度を相互相関で評価するものである。¹⁾ 相互相関係数Rを式(1)に示す。

$$R = \cos \theta = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} (f_k - \bar{f})(g_k - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (f_k - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (g_k - \bar{g})^2}} \quad (1)$$

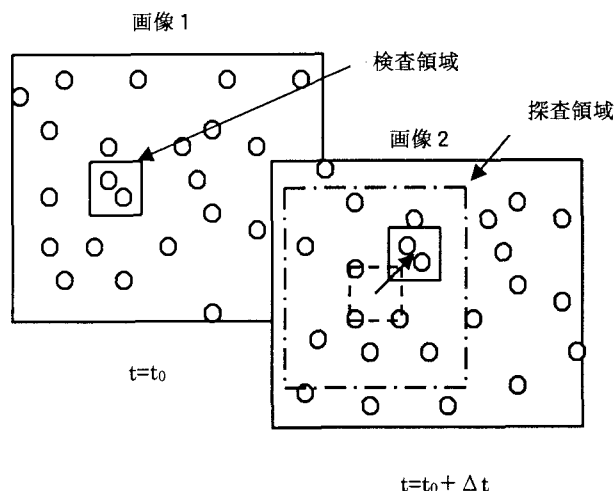


図1 PIVの原理

式(1)には画像1と画像2の輝度値 f, g が 1pixel ごと

に代入され相互相関係数Rが最大となった位置に検査領域の輝度値パターンがマッチしたと判断され、そこに移動したことを認識する。この相互相関法は、局所的な輝度値や濃度分布を粒子分布パターンとして利用するため、画像が取り込まれる時間間隔で輝度値パターンが大きく変化しないことなどで誤ベクトルが減少する。

3. 砂箱移動試験

PIVでは移動量が画像分解能より小さければ移動量を計測できず、誤ベクトルが現れやすいと言われている。しかし、地盤力学の実験における変位測定の方法として適用するためには微小変位まで求めることが重要である。そこで本研究では、物体の移動が 1pixel に満たない場合に PIV 画像解析が適用できるかどうかの精度・信頼性を検討するために砂箱移動試験を行なった。側面がアクリル製の箱に Silica 砂をタッピング法で相対密度 $D_r=90\%$ になるように作製し、カメラレンズと砂箱の距離を 30cm 離して設置した。試験においては 800 万画素のカメラを用いている。この箱を右に 0.01mm, 0.02mm, ...と移動量を増加させながら水平移動させ、0.1mm まで移動させたときの画像を取得した。実際の移動距離 0.01mm が画像上ではどのくらい移動しているのか図2に示す。また PIV 解析結果による 0.01mm 移動時の平均移動量 (pixel) を示している。図2よりすべて解像度で 0.01mm の移動が 1pixel に満たないことがわかる。また解析結果の平均移動量と実際の移動量の誤差が大きいたことがわかる。本研究では PIV 画像解析の

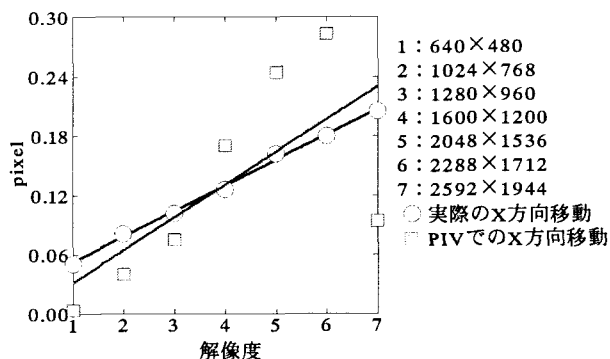


図2 砂箱の0.01mm水平移動のときの実験結果

精度・信頼性の検討のため平均二乗誤差（rms 誤差）を指標として用いている。平均二乗誤差とは正解値と解析値の二乗誤差である rms（root mean square）誤差のことで精度評価の指標 E として用いられる。その²⁾ 平均二乗誤差を式（2）に示す。

$$E^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ (u_m - u_t)^2 + (v_m - v_t)^2 \right\} \quad (2)$$

ここで、 u_m, v_m, u_t, v_t は、それぞれ解析により得られた X 方向、Y 方向の速度、正解の X 方向、Y 方向の速度である。図 3 は画像サイズが 640×480, 1024×768 のときの、1pixel 内で誤差がどのくらい変動しているのかを示したものである。誤差を正規化するため誤差 E を移動量で除した。図 3 より 1pixel 以内で誤差が上下することが確認され、移動量が 1pixel に近づくにつれ誤差が減少していることがわかった。

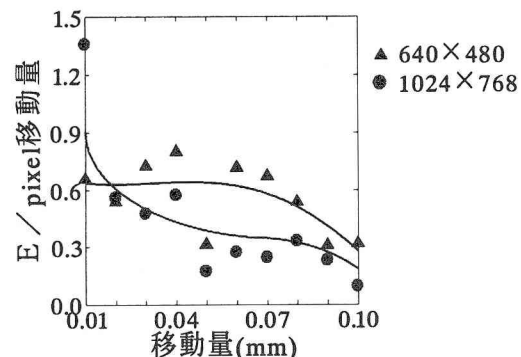


図 3 移動量と誤差の関係

4. 一軸圧縮試験

PIV 画像解析での変位測定の信頼性を検討するために一軸圧縮試験を行なった。試料として Silica 砂を用い、初期相対密度 $Dr=90\%$ を目標に突き固め法により供試体を作製した。10kPa の負圧をかけた状態でひずみ速度 0.1（%/min）でせん断を行ない、150 秒置きに画像を取得し、PIV 画像解析を行なった。変位計は供試体上部に設置、計測している。PIV 画像解析では供試体上部のペDESTAL 中央に基準点を設置した。図 4 に解析結果の画像を示す。画像解析の結果供試体上部のひずみ

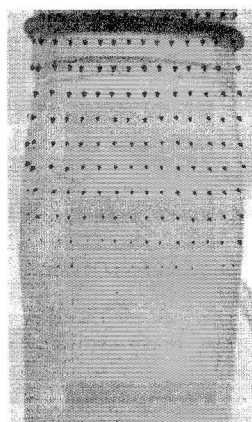


図 4 解析結果

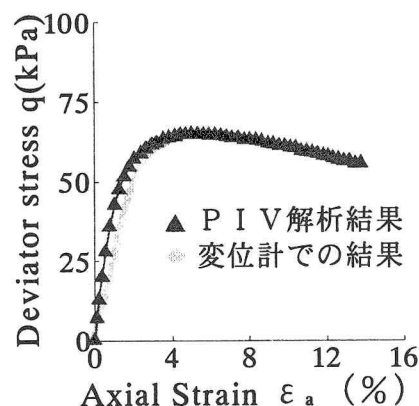


図 5 供試体中央部の応力 - ひずみ関係

量が大きく現れていることがわかる。供試体を 4 分割にし 1/4～3/4 の部分の応力-ひずみ曲線を図 5 に示す。変位計で計測する場合、供試体全体のひずみ平均をとるため、拘束されない供試体中央のひずみは今まで測定できなかった。PIV 画像解析は接触せずに特定箇所を計測できるため図 5 のように部分的なひずみ測定が可能である。

5. 適用例

土槽模型試験で二次元浸透破壊における地盤変形を PIV 画像解析法を用いて可視化した。試料は Silica 砂を用いて $Dr=60\%$ を目標に高さ 20 cm の土層を作製し、その上に鉛を充填したアルミ棒を載せた。このアルミ棒は仮想構造物を想定したもので、設置圧 1.2kPa に相当する。仮想構造物ののり先直下 20cm の深さから水圧を 0.5 秒間負荷させたときの土粒子の挙動を CCD カメラで撮影し、その画像で PIV 解析を行なった。今回は 20 万画素、60 フレーム/秒の CCD カメラを用いて画像を取得した。解析結果を図 7 に示す。のり先部分の地盤の支持力低下による粒子の移動が現れ、その円弧すべりを可視化することができた。

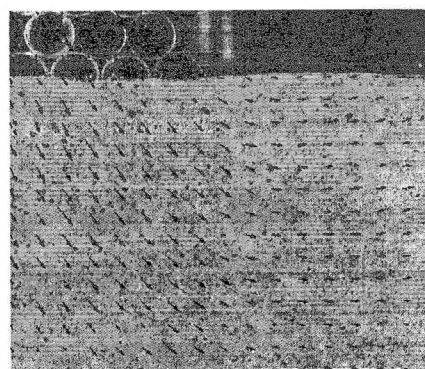


図 6 地盤変形

6. まとめ

砂箱試験により 1pixel 以内の砂箱移動の場合、誤差が上下していることから解像度と移動距離の関係が重要であることがわかった。一軸試験により非接触による部分的なひずみを求めることが可能であることを確認した。

(参考文献)

- 1) 酒井幸市 著 デジタル画像処理の基礎と応用-基本概念から顔面像認識まで - pp.84
- 2) 可視化情報学会編 PIV ハンドブック pp.149