

Ⅲ-27 画像による模型砂地盤の変位測定手法の開発

徳島大学大学院 学生員○谷 孝浩 徳島大学工学部 正会員 上野 勝利
 徳島大学工学部 正会員 望月 秋利 徳島大学工学部 馬 陰峰

1. はじめに 模型実験で写真などから模型表面の変位を測定するためには、模型内に多数の標点を設置し標点の座標を読み取る必要があった。そこで本研究では、標点を用いずに砂の模型実験での変位計測を試みた。提案する手法（以下、CCIP 法と呼ぶ）は、模型地盤の観察面上で数個の砂粒子からなる塊の移動を、変形前後の画像間の相互相関係数を判定基準とするパターン認識¹⁾により検出する方法である。本手法では、カメラとパソコンがあれば巨視的な変形の計測が可能であり、加えて 1 画素間隔での変位計測が可能のため顕微鏡下の微視的な変形も計測することができる。ここでは計測精度の検証と解析の例示を行い、画像による変位計測手法について報告する。

2. 画像解析手法 (1) パターン認識 CCIP 法では変形前後の画像からそれぞれ小画像を切り出し、それらの 2 画像間の類似性を式(1)の相互相関係数 C_{12} より判定した。

$$C_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{(2n+1)^2} v_{1i} \cdot v_{2i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{(2n+1)^2} v_{1i}^2 \cdot \sum_{i=1}^{(2n+1)^2} v_{2i}^2}} \quad (1)$$

ここで v_{1i}, v_{2i} はそれぞれ画像を表すベクトル V_1, V_2 の i 番目の要素である。変形後の画像から小画像を切り出す際の中心点の画像座標を種々変化させ、相互相関係数 C_{12} が最大となる時の座標を、変形前の画像座標に対応する変形後の画像座標とした。さらに解析を行う領域内で、変形前の画像から小画像を切り出す際の中心座標を格子状に変化させ、解析領域全体の変位を算出した。

(2) 画像のひずみ補正と実座標への変換 変位を算出するためには、上記の作業により得られた画像座標を実座標に変換し、写真撮影時のひずみを補正する必要がある。特に遠心模型実験では、カメラと模型の位置関係が一定に保たれないため、正方形が画像上では台形状に変形するひずみの補正は重要となる²⁾。CCIP 法では、有限要素法で用いられている 4 節点アイソパラメトリック要素を応用し、画像のひずみ補正も考慮した変換を行った。図-1 は画像座標の実座標への変換の概念を示している。

3. 精度の検証 カラーの原画像に対し画像上で変形を与えた試験画像を作成し、CCIP 法の精度と適用範囲を検証し、参照画像寸法と精度の関係を調べた。写真-1 検証に用いた画像表-1 に行った検証の条件を示す。用いた画像は、4 号珪砂の模型地盤を撮影した写真-1 であり、この画像から 500×500 画素の正方形画像を取り出し、検証のための原画像とした。1 画素がおおよそ 0.1mm に対応し、おおよそ 51mm 四方の範囲を表している。4 号珪砂の最大粒径は 1.10mm であり、概ね 11×11 個の画素が 1 粒子に対応している。写真-1 の画像に等方圧縮・膨張、単純せん断変形、回転の 3 種の変形を与えた試験画像を作成し、参照画像の大きさを 5×5 画素から 41×41 画素まで変形させ、100 画素間隔、 $n=16$ 箇所の変形後の画像座標 (X, Y) を求めた。そして与えた変形量から求まる (X_0, Y_0) との間の標準偏差を元に式(2) によ

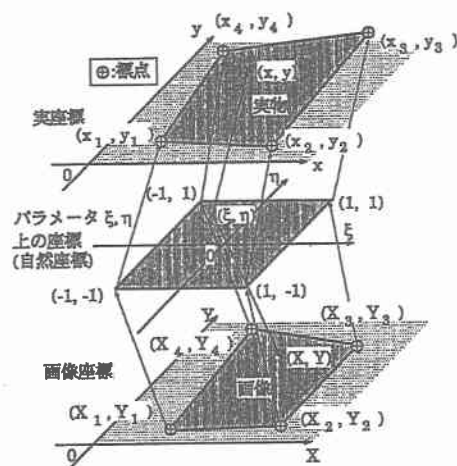


図-1 座標変換方法の概念図

表-1 検証の条件

項目	範囲	間隔
等方圧縮・膨張変形	-30~30(%)	2.5(%) 毎
単純せん断変形	0~30(%)	2.5(%) 毎
反時計方向への回転	0, 3, 5, 10, 15, 20(度)	
参照画像寸法 (画素)	5×5, 11×11, 21×21, 41×41	

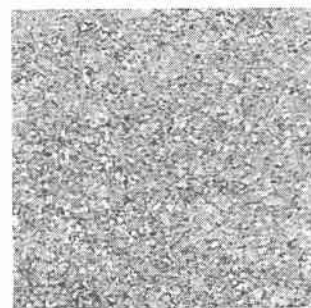


写真-1 検証に用いた画像

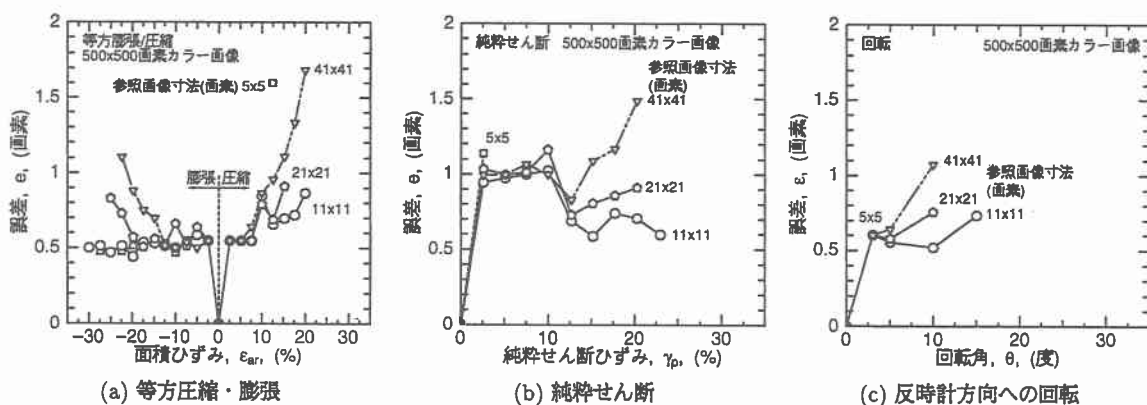


図-2 検証結果

り誤差 e を求めた。

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sqrt{\sum_{i=1}^{n=16} \{(X_i - X_{oi})^2\} / n} \\ \sigma_y &= \sqrt{\sum_{i=1}^{n=16} \{(Y_i - Y_{oi})^2\} / n} \\ e &= (\sigma_x + \sigma_y) / 2\end{aligned}\quad (2)$$

図-2(a-c)に、検証の結果得られた変形量と誤差の関係を示す。なお図-2では、変形量が大きくなり、パターン認識に失敗した結果は除外した。大きさ5×5の参照画像を用いたケースでは、等方膨張変形を除き、誤判定が多く適用不能であることがわかる。一方、大きさ11×11以上のケースでは15%程度の範囲の変形量では、参照画像による精度の違いはほとんど見られない。以上の結果から、参照画像の大きさは少なくとも11×11画素以上必要であり、砂粒子の大きさと同程度の大きさの参照画像を用いる必要があること、変形量が15%程度の範囲では、十分大きな参照画像を用いれば誤差に大きな違いが生じないこと、がわかる。したがって参照画像の大きさを砂粒子の2～4倍程度とし、局所的な変形量が15%以内となるように写真撮影すれば、CCIP法によって模型砂地盤の変形を2画素以内の精度で計測可能であることがわかる。

4. 適用例 観察面を開放した一面せん断試験機を用い、供試体

内部の変形を観察した例を示す³⁾。写真-2に解析に用いた画像(せん断変位 $s=10\text{mm}$)を、図-3に10%毎の等高線で表した最大せん断ひずみ分布を表す。供試体は乾燥豊浦砂を用い、空中落下法(間隙比 $e=0.85$)によって作成した。せん断変位2mm毎に写真撮影して、画像間でA点からB点、B点からC点を逐次軌跡をトレースするように、およそ4.6mm間隔の変位を求め、最大せん断ひずみ($\gamma_{\max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3$)分布を算出した。結果は、せん断箱のエッジから発生するせん断帯の成長をとらえている。

5. まとめ 画像解析によって標点が不要な簡便で汎用的な砂の変形計測手法を提案した。提案した手法では1画素間隔で2画素程度の精度の変位計測が可能であり、写真撮影を多数行うことにより、変形の局所化をとらえることも可能であった。また、変形前後の画像間でカメラの設定位置に多少のずれが存在していても、4点以上の既知点があれば補正可能な方法を開発する必要がある。CCIP法は上記の問題を解決するもので、模型実験の省力化のみならず、過去の実験データをより詳細に解析するためにも利用できると考えている。

参考文献 1)望月秋利:大阪市立大学学位請求論文 pp.53-73,1986 2)河田聡,南茂夫編著:科学計測のための画像データ処理,CQ出版社,pp.205-220,1994 3)大藤ら:一面せん断試験を受ける砂供試体の変形,第54回年次学術講演会,第3部(A),pp.42-43,1999

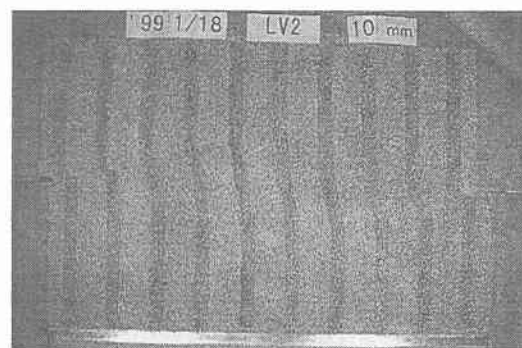


写真-2 豊浦砂の一面せん断試験

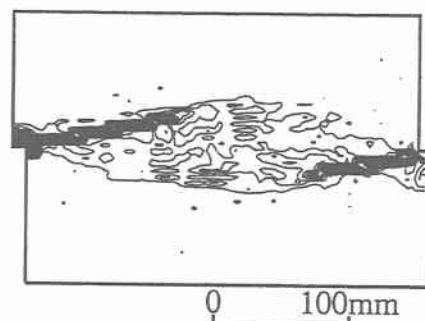


図-3 最大せん断ひずみ分布