

画像解析による簡便な砂の変位場計測方法

上野 勝利¹・高島 伸哉²・望月 秋利³・馬 陰峰⁴

¹正会員 工修 徳島大学講師 工学部建設工学科 (〒 770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

²正会員 (財) 駐車場整備推進機構 調査研究部次長 (〒 102-0093 東京都千代田区平河町 2-7-4)

³正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒 770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

⁴Ph. D. 徳島大学助手 工学部建設工学科 (〒 770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

画像解析による、簡便で汎用的な模型砂地盤の変位場計測手法を開発した。提案する手法は模型砂地盤表面を撮影した画像間で、相互相関係数を用いたパターン認識により変位を求める手法であり、i) 変位場計測のための標点設置が不要である、ii) 解析領域を包含する4つの既知点の座標のみを用い、写真撮影や画像取り込み時に生じる画像ひずみの補正が可能である、といった特徴を持つ。そのため、模型実験での変形解析時の省力化が図れ、また過去に実施した実験の変形解析にも適用可能である。本論文では解析原理および計測精度の検証、解析の例示を行い、写真撮影方法を適切に選択すれば、2画素以内の精度で変位計測が可能であることを示す。

Key Words : measurement, image processing, visualization, displacement, deformation, localization, sand

1. はじめに

模型実験では、変形性状の把握が破壊メカニズムの解明や力学モデルの構築のための第一歩であり、何らかの方法により模型地盤の変位を計測し、変形を可視化する必要がある。変形の可視化技術については、清水・小長井¹⁾のレビューに詳しいが、簡便で汎用的な方法は少ない。微視的な変形を精度よくとらえる方法としてレーザスペckル法²⁾やモアレ縞法³⁾がある。しかしこれらの方法は特殊な装置が必要であり、特にモアレ縞法は汎用性に難点があると判断され、本研究が目的とする簡便で汎用的な方法には採用しがたい。

一方、現在広く用いられている変位計測方法に、標点法^{4),5),6)}がある。標点法では、模型地盤表面に標点を埋め込むか、ゴム膜に格子を描き、標点や格子点の移動を写真等から読み取る。しかし標点法には、多数の標点の設置や座標読み取りの労力が多いこと。変位計測は標点の大きさや設置位置によって制限されるため、すべり線などの局所的・微視的な変形をとらえることが難しいこと。座標読み取り精度をあげるためには、工具顕微鏡などの専用の読み取り装置が必要であり、作業が容易でないこと、等の欠点がある。

本研究の目的は、上記の標点法の欠点を改良し、今後標点法を代替し得る砂の模型実験での標準的な変位場解析手法を提供することにある。今までにも微視的な変位計測に画像解析のいくつかの応用が試みられている^{7),8)}。しかし、遠心模型実験の様にカメラと模型の位置関係が変動する場合には、適切な画像のひずみ補正を行う必要がある⁹⁾、その補正方法も必要となる。そこ

で著者らは、変位の測定にパターン認識技術を、画像のひずみ補正に有限要素法で用いられているアイソパラメトリック要素を応用した、簡便で汎用的な変位場解析手法を開発した。以下、提案する手法をCCIP(Cross-correlation and Isoparametric)法と呼ぶ。

CCIP法は、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技術¹⁰⁾(以下CC(Cross-correlation)法と呼ぶ)を応用し、検出する方法である。2²⁴色のカラー画像を扱うことによりパターン認識率を向上させ、画像と実物間の座標変換方法に有限要素法で用いられているアイソパラメトリック要素を利用することにより、汎用・簡便で精度の高い測定を可能にする工夫を加えた。CCIP法では最低限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。更に、変位計測に標点が不要であり、解析領域を包含する最少4つの既知点があれば、画像のひずみ補正や実物への座標変換が行えるため、実験の省力化や、標点を埋設せずに行った過去の実験の詳細な変位場解析にも利用できるという利点がある。

2. 変位場計測手法

(1) 模型地盤の写真撮影および画像の入力

本手法では模型砂地盤表面の写真撮影に、デジタルカメラ、35mmあるいは大判のカメラを用いる。デジタルカメラは、解像度が十分であれば経費と手間の軽

減が期待できる。35mmや大判のカメラを用いる場合には、i) 写真店にてフォトCDを作成する、ii) フィルムスキャナやイメージスキャナを用いる、等の画像入力方法がある。2画像間の変形量が大きすぎると、パターン認識に失敗する可能性があるため、一連の変形過程を多数の段階に分けて写真に撮影する。

主要なプログラムはFortranで記述したため、入力画像ファイル形式には、ビットマップ画像の輝度情報を、テキストファイル中に10進数によって表現するportable pixmap(ppm, カラー)あるいはportable graymap(pgm, 白黒)形式を採用した。写真撮影時に生じる画像のひずみやずれを補正し、画像上の座標(以下、画像座標と呼ぶ)を実物上の座標(以下、実座標と呼ぶ)に変換するために、観察平面内には解析領域を包含する実座標上の既知点が4点以上必要である。

(2) CC法によるパターン認識

図-1に、CC法により変形前後の2画像間に対応する始点と終点の画像座標 (X_0, Y_0) 、 (X_d, Y_d) を求める手順を示す。変形前後の画像から、それぞれ (X_0, Y_0) 、 (X'_d, Y'_d) を中心とする大きさ $(2n+1) \times (2n+1)$ の小画像(それぞれ参照画像、試験画像と呼ぶ)を切り出し、一度一次元のベクトルデータ V_1, V_2 に変換する。そして両者の相互相関係数 R_{12} を式(1)により算出する。

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

ここで v_{1i}, v_{2i} はそれぞれベクトル V_1, V_2 の*i*番目の要素である。

試験画像の中心座標を1画素づつ変化させて R_{12} を求め、 R_{12} が最大となる時の (X'_d, Y'_d) を、参照画像の中心の画像座標 (X_0, Y_0) に対応する、変形後の画像座標 (X_d, Y_d) とする。参照座標の中心位置を変化させて、上記の作業を解析領域全体にわたり繰り返し、変形前後の2画像間に対応する画像座標 (X_0, Y_0) 、 (X_d, Y_d) を求める。この方法により複雑な2次元の計算を省くことができ、計算の簡略化と速度の向上が図れる。

大きな変形まで解析するためには、一連の変形過程を多数の段階に分けて写真に撮影する。そして最初の解析で得られた終点の画像座標 (X_d, Y_d) を、次の段階の解析時には始点の画像座標 (X_0, Y_0) とし、第2段階の変形後の終点の画像座標 (X_d, Y_d) を求める。以下順次繰り返すことにより各点の軌跡を得ることが出来る。

カラー画像を取り扱う際には、赤、緑、青のそれぞれの輝度データについて相互相関係数を求め、3つの値の平均値を用いてパターン認識を行う。

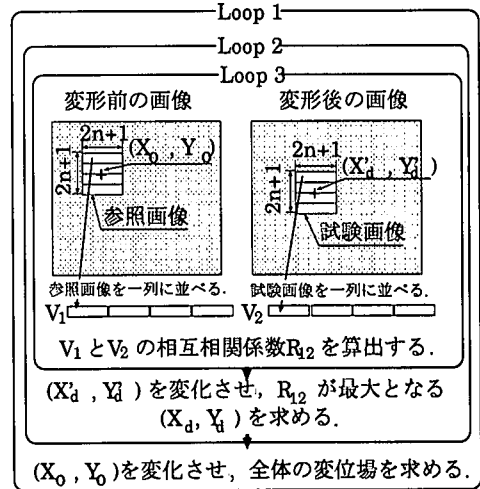


図-1 CC法によるパターン認識手順

(3) IP法による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 (X_0, Y_0) 、および (X_d, Y_d) 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。そこで当初、アフィン変換¹¹⁾による補正を検討した。しかし、アフィン変換では座標の平行が保存されるため、例えばカメラの感光面と模型の観察面の間の傾きに起因する、正方形が台形となる変形(遠近感)を補正することはできない。特に遠心模型実験では、模型装置の揺動やストロボスコープの同期のずれなどから、カメラと模型の観察面の平行や位置関係を一定に保つことは極めて難しい。そのため、上記のアフィン変換の欠点は致命的になる⁹⁾。その欠点を排除するためには、有限要素法で用いられているアイソパラメトリック要素を座標変換に応用すれば良いことに気が付いた。以下、アイソパラメトリック要素を応用した座標変換方法をIP法と呼ぶ。

IP法では、任意の四辺形間の変換が可能であるため、画像から実物への座標変換と同時に、上記の遠近感の補正にも利用できる。また、広角レンズ使用時に顕著になる画像の歪曲差の補正には、解析領域を連続した複数の四辺形により分割し、それぞれ4節点要素で補正することにより近似的に対処可能である。アフィン変換でも、複数の領域に分けた補正は可能であろうが、領域の境界上での連続性が保たれないという欠点がある。IP法はその欠点も排除することができる。

IP法のもう一つの利点は、実験時の作業が簡便なことである。従来、遠近感の補正のためには、写真撮影時の視点に関する情報が必要であった⁹⁾。一方IP法では、座標変換に最低限必要な情報は、解析領域を包含する観察面内の4つの既知点の座標のみである。そのため、例えば過去に行われた実験の写真を解析する際に、カメラの位置が不明であっても、補正を行うことができ

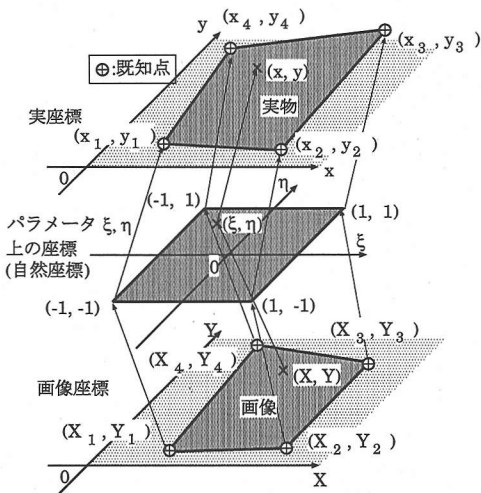


図-2 座標変換方法の概念

る。更に、アフィン変換や Mochizuki・Mikasa(1984)の方法⁹⁾に必要な、誤差最小化の手順は不要である。

図-2に、4節点IP法による画像座標の実座標への変換の概念を示す。アイソパラメトリック要素では、パラメータ (ξ, η) からなる座標系を自然座標とよぶ。有限要素法では、パラメータ (ξ, η) を介して、実座標と変位を関連づけている。一方IP法では、変位の代わりに、画像座標 (X, Y) を自然座標と関連づける。そして、画像座標の内挿多項式の逆関数を作成し、画像座標 (X, Y) から対応する自然座標 (ξ, η) を求め、実座標の内挿多項式により (ξ, η) から実座標 (x, y) を求める。上記の手順により、画像座標から実座標への座標変換と、画像ひずみの補正が可能となる。

(4) データ解析および出力

本手法では、画像解析により得られた変位データから、4節点アイソパラメトリック要素を用いた数値微分¹²⁾により、解析領域内のひずみ分布を求めた。また、変位ベクトル図、変位の等値線図、最大せん断ひずみおよび面積ひずみの等値線図を、ポストスクリプト形式で出力するプログラムを作成した。

3. 精度の検証

CCIP法ではCC法によるパターン認識により変位を求めるため、模型地盤自体の変形や、写真撮影や画像入力の際に生じる倍率や向きの違いが大きくなるとパターン認識に失敗する恐れがある。加えて参照画像寸法が精度に影響すると考えられるため、適切な大きさを見出す必要がある。そこで、市販の画像処理プログラムを用いて、カラーの原画像に対し画像上で既知の変形を与えた画像を作成し、CC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。

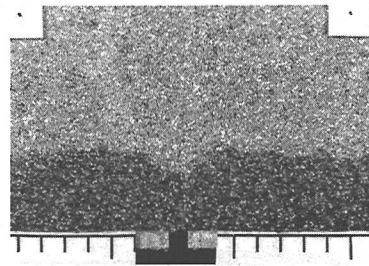


写真-1 検証に用いた画像 (10mm/1目盛)

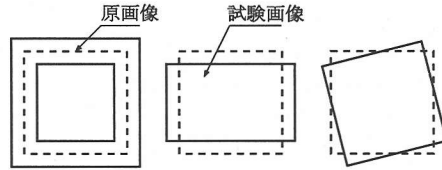


図-3 検証した変形

表-1 4号硅砂の物理的性質

D_{max}	1.10 (mm)	U_c	1.86
D_{60}	1.04 (mm)	U'_c	1.52
D_{50}	1.02 (mm)	ρ_s	2.622 (g/cm ³)
D_{10}	0.56 (mm)		

表-2 パターン認識の検証条件

項目	範囲	間隔
等方圧縮・膨張変形	-30~30(%)	2.5(%) 毎
純粋せん断変形	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に、検証に用いた画像を示す。用いた試料は4号硅砂であり、表-1にその物理的性質を示す。赤、青、黄色、オレンジ色、黒に着色した砂粒子を混ぜた乾燥硅砂を空中落下法により乾燥密度が1.5g/cm³となるようにガラス製の土槽内に散布し、長さ60cm、奥行き16cm、深さ15cmの模型地盤を作成した。その側面を6×4版カメラにより撮影し、プリントをイメージスキャナで入力した。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号硅砂の最大粒径 D_{max} は1.10mmであり、概ね11×11個の画素が1粒子に対応する。

表-2にCC法の検証条件を示す。写真-1から作成した原画像に、図-3に示す等方圧縮・膨張、純粋せん断変形、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画素まで変化させ、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める画像座標 (X_0, Y_0) との間の標準偏差を元に、式(2)に

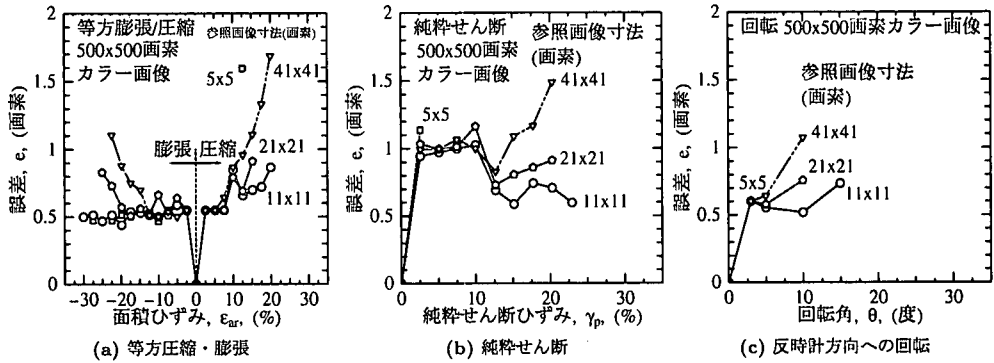


図-4 CC法の検証結果

表-3 参照画像寸法と適用可能な変形の範囲との関係

参照画像寸法 (画素)	等方圧縮・膨張 (%)	純粋せん断 (%)	回転 (度)
5×5	-22.4~7.6	0~7.5	0~3
11×11	-30.0~20.0	0~23.0	0~15
21×21	-25.0~15.2	0~20.3	0~10
41×41	-22.0~20.0	0~20.3	0~10

表-4 写真撮影条件

実験名	使用カメラ+ 画像入力方法	解像度 (mm/画素)	参照画像寸法
落し戸実験	6×4 版カメラ+ イメージスキャナ	1.6×10^{-1}	21×21 (画素)
一面せん断	35mm カメラ+ フォト CD	2.3×10^{-1}	41×41 (画素)

より誤差 e を求めた。

$$\begin{cases} \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=16} \{(X_i - X_{0i})^2\}}{n}} \\ \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=16} \{(Y_i - Y_{0i})^2\}}{n}} \\ e = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \end{cases} \quad (2)$$

図-4(a-c)に、検証の結果得られた変形量と誤差の関係を示す。1画素以内の誤差は座標の量子化誤差であり、CC法によるパターン認識が正確に行われたと判断できる。なお、図-4では、誤差が2画素を越える結果は明確な誤判定とみなし、除外した。表-3に参照画像寸法と計測可能変形量との関係を示す。

大きさ5×5の参照画像は、等方膨張変形を除き結果に誤判定が多く、適用不能であった。これは、参照画像が小さすぎた結果、情報量が少なく、画像の違いを判別できないためである。一方、大きさ11×11以上の参照画像を用いたケースでは、10%程度の変形量の範囲では、参照画像の大きさによる精度の違いはほとんど見られない。変形量が10%を越えると、参照画像が大きくなるほど誤差が大きくなる傾向があるものの、15%程度までは十分な精度で測定が可能であった ($\tan 10^\circ = 0.176$)。変形量が15%を越える範囲で最も誤差が小さなケースは、大きさ11×11の参照画像を用いたケースであった。参照画像が大きくなるほど情報量が増えるため、CC法による誤判定が減ると考えられるが、今回の検証結果は逆の傾向を示した。これは

参照画像が大きすぎると変形に追従できず、誤判定した結果と考えられる。一概な変形を与えた場合は徒に参照画像を大きくしても計算時間が長くなるばかりでなく、精度の向上にも悪影響を及ぼす場合もあり得ることがわかった。

以上の結果から、i) 参照画像の大きさは少なくとも11×11画素以上必要であること、ii) 上記の例では砂粒子が1単位の画像パターンを形成している。画像パターンに比べ参照画像が小さくなると、精度は急激に低下するため、画像パターンと同程度以上の大きさの参照画像を用いる必要があること、iii) 上記2点を満たせば、変形量が15%程度の範囲では、参照画像の大きさによって誤差に大きな違いがないこと、を見出した。すなわち、1単位の画像パターンに対し、解像度を0.1倍程度、参照画像の大きさを2~4倍程度とし、平均的な変形量が高々15%以内となる間隔で写真撮影すれば、CC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できる、という結果を得た。

4. 適用例

以下にCCIP法の、落し戸実験および一面せん断試験での変形計測への適用例を示す。表-4に、用いた写真の撮影条件を示す。

(1) 落し戸実験

道路面下の空洞発生メカニズムを明らかにするためにに行った模型実験¹³⁾で、土槽と模型地盤は検証に用い

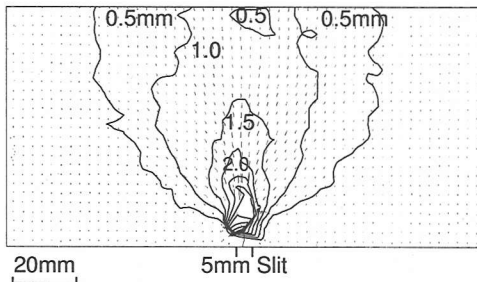


図-5 変位ベクトルと変位の等値線

たものと同一である。土槽の下部には幅5mmのスリットを有する上げ底板が設けられており、その下は水槽になっている。背面から水槽に水を供給し、水浸とともにスリットから砂が排出され、空洞が発生・発達していく過程を正面からの写真撮影により観察・記録し、CCIP法により変位場を解析した。写真-1は撮影した写真の一例であり、用いた試料は表-1に示したものである。解析する際の変形量を小さくするために、6段階に分けて写真撮影して順次解析を行い、幅150mm、高さ76mmの範囲について約3mm間隔で変位を求めた。その結果を図-5に示す。細線は変位ベクトルを、太線は0.5mm毎の変位の等値線を示す。なお、スリット直上の等値線が密集している部分17点を除き、せん断ひずみは $6 \times 15\% = 90\%$ 以内であり、前述の検証結果から全体の挙動を捉えられたと判断した。

図からスリット直上には幅20mm、高さ40mm程度の大きな鉛直変位が生じる範囲が存在し、その周辺ではスリットへの向心的な変位が生じたことがわかる。以上のように、CCIP法は砂の模型実験での巨視的な変位計測に適用でき、破壊メカニズムの解明に有用な道具であることが確認できた。

(2) 一面せん断試験

観察面を開放した一面せん断試験機を用い、供試体表面の変形を観察した例である¹⁴⁾。用いたせん断箱は、鉛直面がせん断面となる長さ300mm、幅200mm、高さ40mmの2つ割直方体であり、通常的一面せん断試験では中間主応力面となる観察面(上面)は開放した。このせん断箱内に、空中落下法により乾燥豊浦砂供試体(間隙比 $e=0.85$)を作成し、拘束圧を与えずにせん断変形を与え、せん断変位 $s=2\text{mm}$ 毎に上面からの写真撮影を行なった。そしてCCIP法による解析を逐次行い、約4.6mm間隔で変位を求め、その累積値から最大せん断ひずみ($\gamma_{max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3$)分布を算出した。写真-2は、解析に用いた画像の一つで、 $s=10\text{mm}$ の時の供試体の様子を示している。

図-6(a-c)に、10%毎の等値線で表したせん断ひずみ分布を示す。せん断変位の増加とともに発生するせん断帯の成長¹⁵⁾をとらえており、大島ら¹⁶⁾が示した

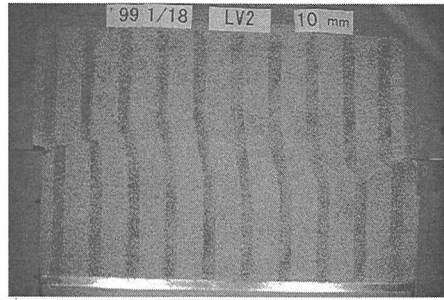


写真-2 豊浦砂の一面せん断試験(せん断変位 $s=10\text{mm}$)

通常の供試体中央断面での変形や、Kobayashi *et al.*¹⁷⁾の解析結果と類似した結果を得た。

これらの図ではひずみを算出した2860点中、せん断帯上のそれぞれ24点、47点、50点のひずみの値が、1段階あたり15%を越えた。CCIP法ではパターン認識に失敗した場合には、極端に異なった点を出力する。しかしせん断帯に隣接する8点を除き乱れはみられず、全体の変位場解析は適切に行われたと判断できる。巨視的な変位場解析ではせん断帯の幅は、画像パターンの1単位と見做し得る。したがって変形が集中するせん断帯の幅(約2mm)に比べ、参照画像寸法(約9.4mm)を大きめに取れば、参照画像内での変形が平均化され、パターン認識は適切に行われるものと考えられる。一方、せん断帯内部など、微視的な変位場解析にCCIP法を適用する場合には、顕微鏡写真などより拡大した画像を用い、せん断帯幅の15%程度のせん断変位毎に写真撮影を行う必要があると考えられる。

以上の例示によって、標点法ではとらえることが難しいすべり線やせん断帯といった変形の局所化の観察にも、CCIP法は適用可能であることが確認できた。

5. おわりに

本研究の結論は以下のとおりである。

1. 相互相関係数によるパターン認識技術(CC法)を砂の変位場計測に応用し、アインパラメトリック要素を応用した簡便な座標変換・画像のひずみ補正方法(IP法)を開発し、標点を用いない簡便で汎用的な変位場計測手法(CCIP法)を提案した。
2. 1単位の画像パターンに対し、解像度を0.1倍程度、参照画像の大きさを2~4倍程度とし、変形量が高々15%以内となる間隔で写真撮影すれば、CC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できる。
3. CCIP法は、砂の模型実験での巨視的な変位計測から、すべり線やせん断帯といった局所的、微視的な変位計測まで適用可能である。
4. CCIP法では計測のための標点が不要であり、カメラの設置位置が不明でも、4点以上の既知点が

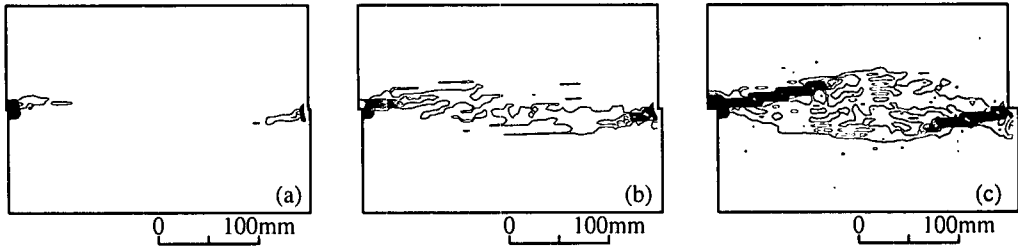


図-6 最大せん断ひずみ分布 (間隔: $\Delta\gamma_{max} = 10\%$); (a) せん断変位 $s=2\text{mm}$, (b) $s=4\text{mm}$, (c) $s=10\text{mm}$

あれば補正可能である。したがって模型実験での変位場解析の省力化のみならず、過去の実験写真の解析にも利用出来る。

謝辞：本研究の一部は文部省科学研究費補助金奨励研究(A)No.5855066, 同 No.11750444(研究代表者:上野勝利), 基盤研究(B)(2)No.11450182(研究代表者:望月秋利)の補助を受けて行ったものである。記して関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 清水正喜, 小長井 一男: 2.4 計測技術, 地盤の破壊とひずみの局所化, 地盤の破壊とひずみの局所化に関する研究委員会編, 土質工学会, pp.42-49, 1994.
- 2) Tatsuoka, F., Nakamura, S., Huang, C.-C. and Tani, K.: Strength anisotropy and shear band direction in plane strain tests of sand, *Soils and Foundations*, Vol. 30, No. 1, pp.35-54, 1990.
- 3) 山田 朝治, 横関 俊介 編著: モアレ縞・干渉縞応用計測法, コロナ社, 1996.
- 4) 山口 柏樹, 木村 孟, 藤井 斉昭: 遠心荷重装置による浅基礎の支持力実験, 土木学会論文報告集, 第 233 号, pp.71-85, 1975.
- 5) 小田 匡寛, 古戸 幸博: 浅い基礎の支持力問題における進行性破壊の意味, 土木学会論文報告集, 第 321 号, pp.113-122, 1982.
- 6) Shibuya, S., Mitachi, T. and Tamate, S.: Interpretation of direct shear box testing of sands as quasi-simple shear, *Geotechnique*, Vol. 47, No. 4, pp.769-790, 1997.
- 7) Horii, H., Takamatsu, K., Inoue, J. and Sasaki, N.: Measurement of displacement field by "Matching method" and observation of strain localization in soft rock, *Imaging Technologies: Techniques and Applications in Civil Engineering*, ASCE, pp.10-19, 1997.
- 8) Guler, M., Edil, T.B. and Bosscher, P.J.: Measurement of particle movement in granular soils using image analysis, *Jour. of Computing in Civil Engineering*, Vol. 13, No. 2, ASCE, pp.116-122, 1999.
- 9) Mochizuki, A. and Mikasa, M.: Deformation measurement of slope models in centrifuge, *Proc. of Int. Sympo. on Geotechnical Centrifuge Model Testing*, Tokyo, pp.139-148, 1984.
- 10) 河田 聡, 南 茂夫 編著: 第 9 章 パターン認識とマッチド・フィルタリング, 科学計測のための画像データ処理—パソコン/EWS 活用による画像計測&処理技術—, CQ 出版社, pp.205-220, 1994.
- 11) 例えば, 安居院 猛, 永江 孝規: Chapter 6 アフィン変換, PostScript グラフィクス, 新紀元社, pp.159-174, 1993.
- 12) 例えば, Segerlind, L.J.: *Applied Finite Element Analysis*, (邦題 応用有限要素解析), 川井 忠彦 監訳, 丸善, 1978.
- 13) 高島 伸哉, 梶谷 昌世, 上野 勝利, 望月 秋利, 桂田 哲郎: 水浸による路面下空洞の発生・発達現象の観察, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp.111-112, 2000.
- 14) 大藤 泰彦, 上野 勝利, 望月 秋利: 一面せん断をうける砂供試体の変形, 土木学会 第 54 回 年次学術講演会講演概要集, 第 3 部 (A), pp.42-43, 1999.
- 15) Morgenstern, N. R. and Tchalenko, J. S.: Microscopic structures in kaolin subjected to direct shear, *Geotechnique*, Vol. 17, pp.309-328, 1967.
- 16) 大島 昭彦, 高田 直俊, 土橋 徹: 定圧一面, 単純せん断試験の供試体変形と強度特性の比較, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp.417-418, 1999.
- 17) Kobayashi, I., Ohta, H. Hirata, M. and Iizuka, A.: Shear strength mobilization in shear box test under constant volume, *Slope Stability Engineering*, Vol.2, Balkama, pp.763-768, 1999.

(2000. 3. 31 受付)

SIMPLE MEASUREMENT OF DISPLACEMENT FIELD OF SAND BY IMAGE PROCESSING

Katsutoshi UENO, Shinya TAKASHIMA, Akitoshi MOCHIZUKI and Xianfeng MA

The authors developed a simple and general displacement field measuring method using a technique for image analysis. The proposed method, named CCIP method, requires no target installed in the model to measure displacement field on sand. A newly developed correction method for distortion of image needs no longer information than the coordination of four datum points covering the analyzed zone. These features can reduce labor in the preparation of model sand and the analysis of displacement fields. An evaluation of accuracy and two examples are presented in this paper. The results show that the method can measure deformations in sand within an accuracy of 2 pixels of the images employed.