サブピクセルの精度をもつ相互相関法による変位場計測

1. はじめに

著者らは変形性状の把握が、破壊メカニズムの解明やカ 学モデルの構築のための第一歩であるとの観点から、標点 を用いる方法¹⁾や、相関法による標点を必要としない変位 場計測手法を開発してきた²⁾³⁾⁴⁾。相関法による変形計測で は、変形前後の画像からそれぞれテンプレートを抜き出し、 両者の類似性を判定する。当然、変形した画像に対応出来 なければ、高精度は望めない。更に局所に変形が集中する 破壊時の変形計測に際し、ひずみを正確に測定するために は、画像データの解像度は有限であるため、画像データの最 小単位である画素(ピクセル)よりも細かな精度で変位を算 出しなければならない。以上の視点から、著者らは30%程 度のひずみまで対応可能な、サブピクセル精度の変位計測 手法を開発したので報告する(適用例は文献⁶⁾も参照)。

2. 変位場計測手法

手法の詳細は文献³⁾に詳しいが、以下簡単に説明する。

変形前後の2つの画像から、それぞれ $(X_o, Y_o), (X'_d, Y'_d)$ 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。

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

変形後の画像より取り出した試験画像の中心座標 (X'_d, Y'_d) を変化させ、相互相関係数 R_{12} の最大点を探索し、変形前の画像の座標 (X_o, Y_o) に対応する変形後の画像の座標 (X_d, Y_d) を決定する。探索の手法を工夫することにより高精度化を図った。以下、本手法を CC 法と呼ぶ。

なお、画像のひずみ補正と実座標への変換には、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 換に応用した方法 (IP 法)³⁾を用いた。

徳島大学工学部	正員	上野 勝利
徳島大学大学院、同済大学大学院	学生員	李 元海
徳島大学工学部	正員	望月 秋利
西松建設 (株) 技術研究所	正員	萩原 敏行
西松建設 (株) 技術研究所	正員	今村 眞一郎

3. 精度検証

(1) 検証方法

検証に用いた画像は文献³⁾と同一のもので、4 号硅砂を 撮影した、1 画素がおよそ 0.1mm に対応する 500×500 画 素の正方形画像である。この画像に平行移動、回転あるい は変形を与えた画像を作成した。CC 法によって 50 画素間 隔でn = 81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画像座標 (X_0, Y_0) との間の標 準偏差を元に、式-(2) により誤差 eを求めた。

$$\begin{cases} \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=81} \{(X_i - X_{0i})^2\}}{n}} \\ \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=81} \{(Y_i - Y_{0i})^2\}}{n}} \\ e = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \end{cases}$$
(2)

(2) 検証結果

図-1(a) は変形は与えず x, y 方向にそれぞれ 0.05 画素ず つ平行移動させた画像に対する CC 法の精度検証結果を示 したものである。なお、0.6 画素以上の誤差が発生したケー スのプロットは、図中から除いてある。参照画像寸法が大 きくなるほど誤差が小さくなる傾向が見られた。参照画像 寸法が 81x81 以上のケースでは高々0.05 画素程度の誤差で あり、精度良くマッチングが行われたことが分かる。一方、 5×5 画素の参照画像は小さすぎ不適当だった。

等方圧縮・膨張、純粋せん断および単純せん断変形を与 え、参照画像寸法を21×21 画素とした結果を図-1(b) に示 す。変形量が25%程度を越えると誤差が増加する傾向が見 られるものの、30%程度のひずみとなる変形に対し0.2 画 素程度の誤差を示した。



図-1 CC 法による検証結果



図-2 解析画像 (s = 2.0 mm)

4. 適用例

過去に行った開放型一面せん断試験⁵⁾に適用した例を示 す。縦120mm 横180mm の2つ割直方体せん断箱に、最小 粒径 $D_{min}=250\mu\mathrm{m}$,最大粒径 $D_{max}=300\mu\mathrm{m}$ の均等粒径乾 燥硅砂 (CA) からなる、厚さ 40mm の供試体を作成し、拘 束圧を与えずに、2mm 乃至 5mm の変位を与えた。変形の 様子を 35mm フィルムカメラで撮影し、フォト CD 化して デジタル画像とした。画像の解像度は86µm/画素であり、 20 画素 (約 1.7mm) 間隔で約 6,500 点の変位を算出した。 図-2にはせん断変位 s = 2.0mm の段階の画像を示す。

図-3 ならびに図-4 は、画像解析から得られた変位分布 をもとに、最大せん断ひずみと体積ひずみの分布を作図し たものである。図-2を目視しただけでは変形しているとは 分からないが、画像解析によってせん断箱の角から複数の せん断層が発達していく過程が、見事に捉えられている。 そして供試体中央部にS字を伸ばしたように変形が集中す る領域が発生し、その周りを取り囲むようにレンズ型の領 域で変形が生じ、せん断箱の壁付近では壁面の拘束により デッドゾーンが存在していることがわかる。変形の大きな 箇所では体積膨張が生じ、レンズ型の領域の境界付近に体 積圧縮が生じていることがわかる。

あとがき 5.

地盤に発生するせん断層やコンクリートのクラックなど、 マスの破壊時には変形が局所に集中する。そのような箇所 でひずみを算出するためには、大変形に対応可能な高解像 度で、高精度な変形計測手法が必要となる。提案手法は、 そのような要求を満たすことを目的として開発したもので、 ひずみ 30%程度の変形に対し、0.2 画素程度の精度を確保 できる。これにより従来の X 線写真による 2 次元模型のす べり線観察は、カメラとパソコンによる画像計測によって 代替することが可能で、さらにすべり線近傍のひずみ計測 が可能となった。今後本手法は変形・破壊現象の理解を助 ける強力なツールとして期待できる。

参考文献

1) Mochizuki, A. and Mik asa, M.(1984):Deformation Mea-surement of Slope Models in Centrifuge, Proc. of Int. Sym-





図-4 一面せん断による体積ひずみ分布 (s = 2.0mm)

0.0

Compression 5.0%

-5.0%

Expantion

po. on Geotechnical Centrifuge Model T esting pp.129-148 2) 大藤ら (1999):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

- 3) 上野ら (2000):画像解析による簡便な砂の変位場計測方法、
- 土木学会論文集、III-53, No.666, pp. 339-344 上野ら (2002):サブピクセルの精度をもつ相互相関法の2次元 4)
- 模型実験への適用、日本実験力学会講演論文集、pp.256-261 上野ら (1994):開放型一面せん断装置を用いた種々の粒状体 5) に発生するせん断層の寸法測定、地盤の破壊とひずみの局所 化に関するシンポジウム発表論文集、pp.49-56
- Li et al.(2003):Observ ation of deformation for soil foundation using photogrammetry, The 58th annual meeting of JSCE, in print.