

三軸試験におけるステレオフォトグラメトリーに基づく全体及び局所変形計測手法

山口大学大学院 学生会員 ○多岐 涼太
 山口大学大学院 正会員 吉本 憲正
 山口大学大学院 正会員 中田 幸男

1. はじめに

不均質な地盤条件において、三軸試験等の要素試験では各部分の正確な特性を把握できない。そのため一般的に局所変位計が用いられるが、局所変位計は文字通り「局所」の変位のみ計測可能で計測範囲が狭く、高価であることが多い。そのため局所変位計よりも安価であり、可視領域全体の局所的な変位・変形を定量化できる画像解析の適用を考えた。現在、平面ひずみ試験における2次元画像解析より、不均質供試体の各部分で異なる変形特性を示すことがわかっており²⁾、このことから3次元条件においても局所変形について検討することは重要と言える。しかし、3次元画像解析を適用する研究はあまり実施されていない。そのため本研究では、3次元画像解析手法(ステレオフォトグラメトリー)の開発および三軸試験への適用について検討する。

2. 実験方法

本研究では三軸試験機を用いて、画像解析による供試体移動量の検証を行う。供試体サイズは、半径が25mm、高さ10mmの円柱供試体である。この供試体に取り付けるメンブレンの表面に、図1に示すように5×5mm間隔で半径2mmの標点をプロットしている。実験後の画像解析ではこの標点を追跡し、座標を取得する。

実験では、供試体を作製した後、供試体表面の撮影のために、webカメラを設置する。図2に示すように、用いたカメラは2台であり、それぞれカメラ1、カメラ2とする。供試体中心と各カメラは150mm離れた位置に設置し、カメラ2は、カメラ1から供試体中心を基準に45°回転させた位置に設置した。撮影準備後、軸荷重を載荷させながら、軸の移動距離0mm~15mmまで、1mm間隔で2方向から撮影を行った。移動距離は、外部に取り付けた軸変位計により測定する。

3. 画像解析

画像解析の手順について、実験時に撮影した画像に対して、レンズの歪みをとるため幾何補正を実施する。その後、幾何補正後の画像に対して、2章に示した標点を追うことで、各標点の座標を取得する。最後に、得られた2次元座標について、座標変換を行う。前工程で取得した座標はx-y軸の2次元座標であり、x-y-zの3次元座標にするために、得られた2次元座標を3次元座標に変換する必要がある。

座標変換を行うにあたり、必要な計算式を示す。座標変換式は、三角測量の考え方をを用いて定義した。計算式を以下の式(1)~(6)に示す。

$$L_1 = \frac{L \tan \theta_2'}{\tan \theta_1' \tan \theta_2'} \dots (1), \quad a = \frac{L_1}{\cos \theta_1'} \dots (2)$$

$$x = a \sin \theta_1 \dots (3), \quad z' = a \cos \theta_1 \dots (4)$$

$$z = 150 - z' \dots (5), \quad y = z' \tan \theta_3 \dots (6)$$

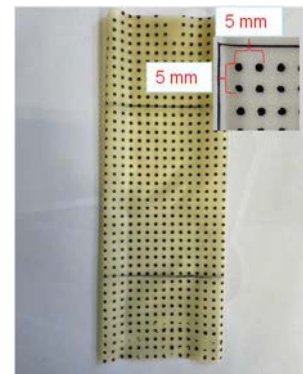


図1 メンブレン

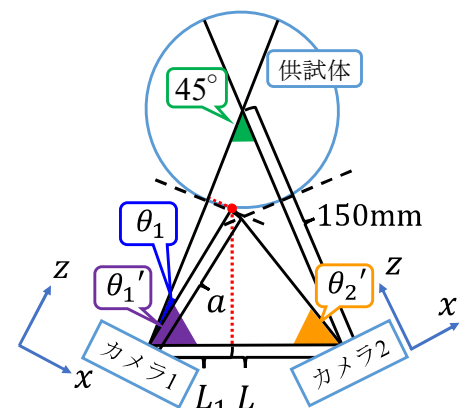


図2 供試体俯瞰図

キーワード 三軸試験, ステレオフォトグラメトリー, 座標変換

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1 山口大学工学部社会建設工学科

TEL 0836.85-9344

図2, 3より, L はカメラ同士の直線距離, L_1 は L に任意点から垂線おろし, 2分した際のカメラ1側の長さ, θ_1 は任意点とカメラ1, 供試体中心で作られる角度, θ_1' は任意点, カメラ1, カメラ2で作られる角度, θ_2' は任意点, カメラ2, カメラ1で作られる角度, θ_3' は任意点, カメラ1, 供試体中心で作られる角度である.

上式から3次元座標を計算できるが, 図2より, 得られた座標は各カメラで x - z 軸の方向が異なる. 供試体の局所のひずみを計算する際, 各カメラで得られる座標を供試体の中心を原点とした座標に置換する必要がある. 本研究では一般的な座標変換方法に従って座標変換を実施した. 以下に回転の式(7)を示す.

$$\begin{pmatrix} x' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} \dots (7)$$

ここで, x, z は回転前, x', z' は回転後の座標である. 回転角の θ は, カメラ1とカメラ2の間の角度を用いる. 2章より角度は 45° だが, 式(3)より算出される回転座標は反時計回りに移動するため, 今回の回転角は, $\theta = 360 - 45 = 315(^\circ)$ となる.

4. 実験結果

図4より計測する標点は, トップキャップと接している計測点63としており, 図5に軸を高さ方向(y 軸)に軸載荷により圧縮させた距離(実移動距離)と, 画像解析から得られた y 軸方向の標点の移動距離(標点移動距離)について, 実移動距離との誤差を計算し, 結果を示す. 誤差は式(8)により求めた.

$$\text{誤差} = 100 - \frac{\text{標点移動距離}}{\text{実移動距離}} \times 100 \dots (8)$$

グラフより, 載荷初期の移動量が1mm地点の誤差は大きいですが, 載荷に伴い移動量が増加するにつれ誤差は小さくなっている. これより x - y - z 座標を3次元座標軸にプロットし, 図6に示す. 図4と同様に載荷後供試体下部の膨張が確認でき, x - z 軸座標も画像と対応しているように見えることから, 概ね適切に算出できていると思われる.

5. まとめ

三角測量の原理を適用し, 供試体標点の3次元座標を算出できた. また, 座標の回転式を用いて各カメラにより算出された座標群の軸方向を統一することができた. 実験結果より, 載荷初期の移動量が1mmを除き, 移動量が増加するにつれ比較的小さい誤差で計測できることが確認できた. また, 計算により得られた3次元座標をグラフにプロットし, 概ね妥当な結果が得られていることが確認できた.

参考文献

- 1) 西村聡: 室内土質試験における微小～大変形計測へのステレオフォトグラメトリーの適用性, 第56回地盤工学研究発表会, 13-4-1-01
- 2) 小川泰世, 吉本憲正: 平面ひずみ試験による分級構造を有する砂質土のせん断特性, 2023
- 3) 川上潤之介, 吉本憲正: 劣化セメント安定処理土の強度変形特性に関する基礎的研究, 2018
- 4) Davide Scaramuzza, Roland Siegwart: A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras, 2006

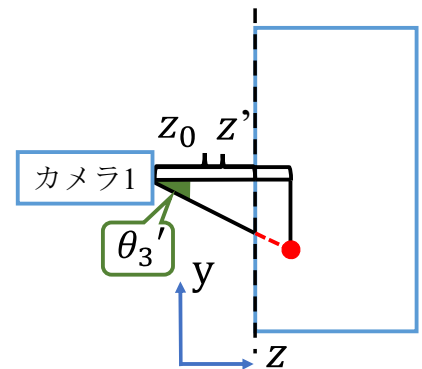


図3 供試体断面図

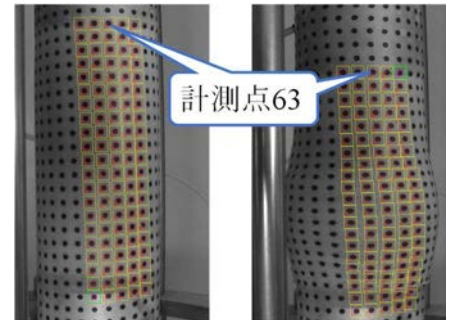


図4 載荷前後の供試体画像

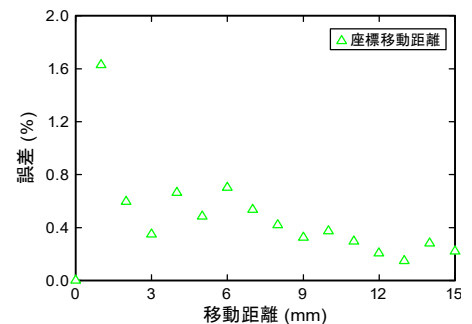


図5 移動距離誤差

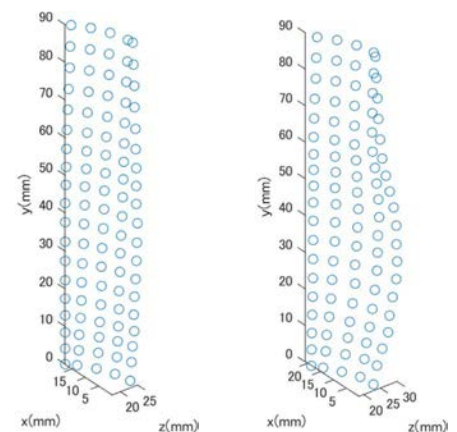


図6 載荷前後の供試体標点の座標