

PTV 画像解析による角柱砂供試体を用いたひずみの局所化の観察

京都大学 学生会員 北原 秀樹 京都大学 フェロー会員 岡 二三生
 京都大学 正会員 小高 猛司 京都大学 学生会員 市之瀬 知子

1. はじめに: 著者らは、砂質土の中でも特にゆる詰め砂を対象として、内部構造の崩壊を伴う圧縮破壊に注目し、三軸圧縮試験を通してひずみの局所化挙動を観察してきた^{1), 2)}。今年度は、新たに砂質土角柱供試体を用いた三軸圧縮試験を行い、広範な密度の砂供試体表面に現れる局所的なひずみの分布の観察を行った。角柱供試体は3次元変形場におけるひずみの局所化を観察するのに適し、3次元数値シミュレーションへの適用性も高いことはすでに正規および過圧密粘土の実験で確かめている^{3), 4)}。本報では、特にPTV画像解析システムを用いた局所的なひずみの観察手法について説明し、画像解析によって得られた結果を示す。

2. 試料及び実験方法: 実験試料には粒径0.075mm~0.850mmに粒度調整した粒度分布の良い佐原砂を用いた。角柱砂供試体のサイズは、縦×横×高さを4×4×8(cm)とした。表1に本実験での供試体の間隙比および相対密度の一覧を示す。供試体は、専用モールド⁵⁾に乾燥状態の佐原砂を空中落下法で投入し、適宜モールドの外側を小槌で叩くことによって所定の密度となるように調整した。炭酸ガスによる飽和化を経て、初期有効拘束圧50kPaで等方圧密後、軸ひずみ20%になるまでひずみ速度0.1%/minで非排水及び排水せん断を行った。

No.	試験法	状態	間隙比	相対密度 $D_r(\%)$
CU-1	CU試験	Loose	1.08	18.5
CU-2	CU試験	Dense	0.82	95.6
CD-1	CD試験	Loose	1.04	28.7
CD-2	CD試験	Dense	0.81	99.1

表1 供試体の試験法、間隙比、相対密度

3. 画像解析の概要: 画像解析のためにあらかじめメンブレンに直径1mmの黒色ターゲットを2mm間隔正方形配置でプリントしておき、三軸圧縮中、軸ひずみ0.5%おきに、ターゲットをプリントした2側面を定点デジタルカメラで撮影した。撮影したデジタル写真はパソコンに入力後、PTV画像解析システムにより処理を行い、局所ひずみの観察に用いた。PTV (Particle Tracking Velocimetry)は、流体運動の可視化および流速計測を目的としたデジタル画像処理技術PIV (Particle Image Velocimetry)の一種であり、比較的大きなトレーサー粒子を直接追跡することができる⁶⁾。本実験では、メンブレン上のターゲットをトレーサー粒子と考える。具体的な画像解析の流れを図1に示す。フローチャート中の画像処理とは、入力されたデジタル写真に対し、マスキング(画像処理の領域指定)、二値化、ラベリング(各座標の指標付けとピクセル座標の決定)を施し、基準点を用いて各粒子の実座標を決定するまでの処理を表す。なお、マスキングの領域と二値化の閾値は、初期条件の写真で決定したものをそれ以後の軸ひずみの画像処理でも用い、一連の解析の自動化を図った。最終的に決定した各粒子の座標は、近傍の4点で正方格子を構成し、初期状態の座標からの各粒子の変位を用いて、1次の変位の内挿関数を用いて、格子内のせん断ひずみと体積ひずみを計算した。実際の変形は3次元であるが、ここでのひずみとは画像で計測される表面の2次元成分だけで考え、せん断ひずみと体積ひずみは次式のように定義した。

$$\gamma = \sqrt{e_{ij}e_{ij}}, \quad \varepsilon_v = \varepsilon_{kk} \quad i, j, k = 1, 2 \quad (2 \text{次元平面成分のみ考慮})$$

ここに、 e_{ij} は偏差ひずみであり、 $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - (\varepsilon_v/2) \cdot \delta_{ij}$ 、 δ_{ij} : クロネッカーのデルタ、である。

4. 実験結果: 図2は各試験ケースの供試体側面部で観察される局所的なせん断ひずみと体積ひずみの分布である。実験では軸ひずみ0.5%おきに写真撮影をし、局所ひずみ分布の計測を行っているが、本報では紙面の都合により軸ひずみ4%ごとのデータを示している。また、その撮影は供試体の2側面で同時に行っているが、いずれの側面でも、定性的にも定量的にもほぼ同じ分布となったために、今回はその中の1側面での観察記録だけを示している。

せん断ひずみの分布に着目すると、50%までをグレースケールのコンターで表したこの図を見る限り、Looseの

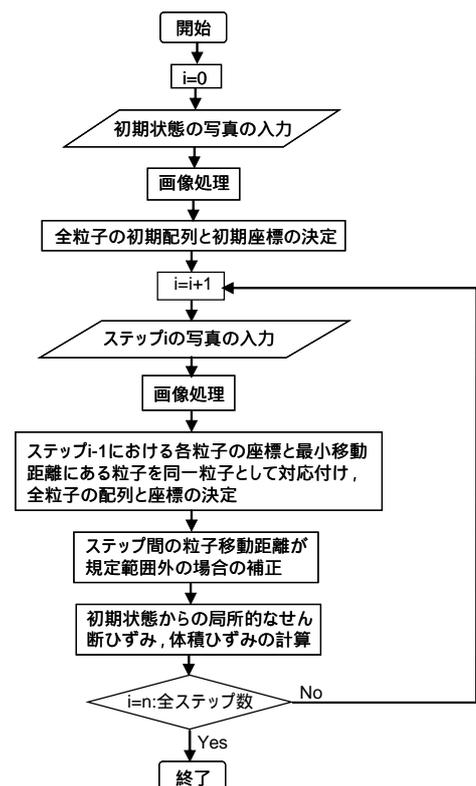


図1 画像解析による局所ひずみ計算の流れ

キーワード: 角柱供試体, ひずみの局所化, 砂, 画像解析

連絡先 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 075-753-5086

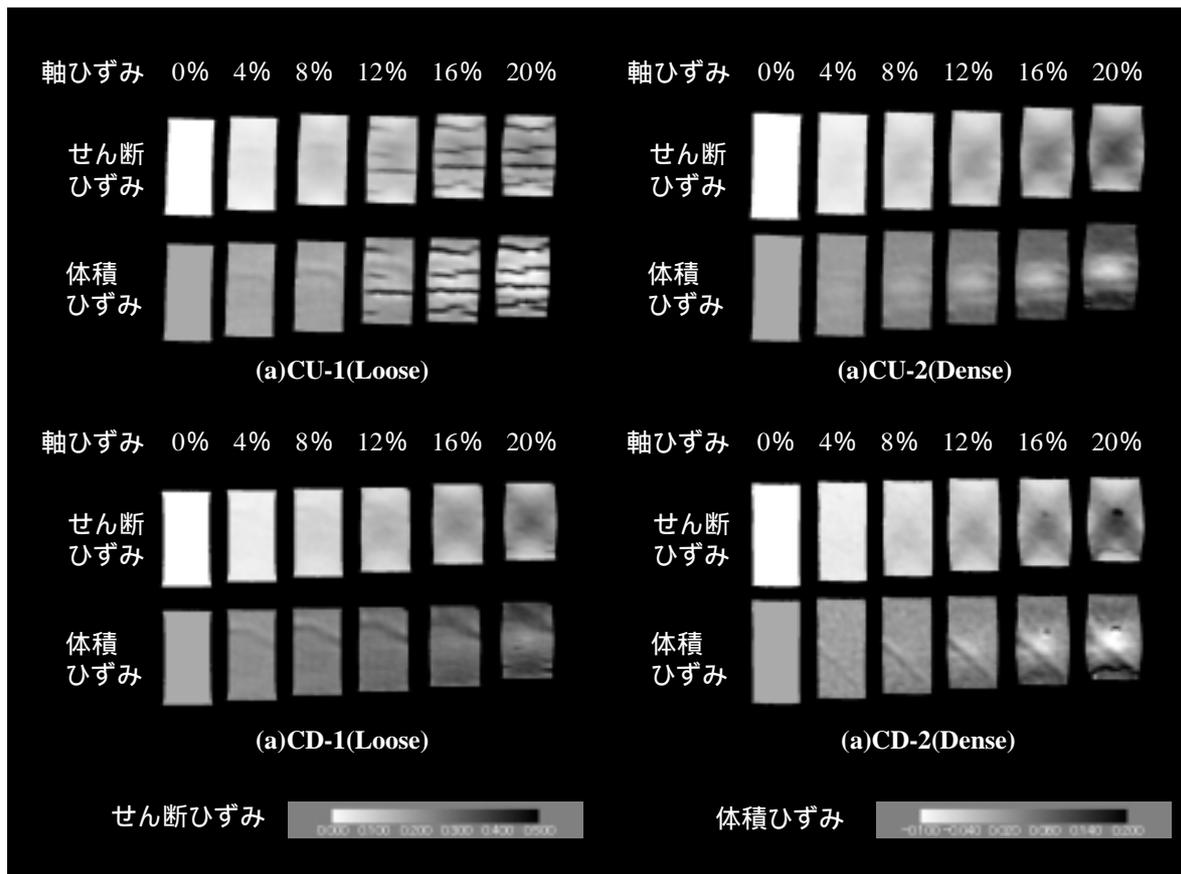


図2 供試体側面部で観察される局所的なせん断ひずみと体積ひずみの分布

CU-1を除いて、供試体の4隅から局所化したせん断ひずみを観察することができる。相対密度が大きいDenseのCU-2では局所化の集中度合いがCU-1より大きくなり、明確にX型に局所化した分布が現れている。また、相対密度がほぼ等しくても排水せん断を行ったほうがせん断ひずみの局所化は顕著で、X型の局所化した分布がより明確に現れている。このX型のせん断ひずみの集中帯は、最終的にはほぼひとつに収縮しているが、DenseのCU-2及びCD-2は軸ひずみ12%のコンター図より、はじめ上下端部から2つのX型のせん断ひずみの集中帯が発生し、せん断が進行するにつれて2つが重なり、より大きなせん断ひずみになったことがわかる。一方、LooseのCD-1は軸ひずみ16%のコンター図を見ると、上下端部付近から2つのX型のせん断ひずみの集中帯の発生が見られるが、CU-1はせん断ひずみの分布が曖昧で、供試体中央付近のせん断ひずみが周辺部よりも大きいという程度に留まっている。CU-1のせん断ひずみ分布に水平の帯があるが、これはせん断が進行するにつれて発生したメンブレンのたるみのためであるが、このたるみの発生から、非排水せん断下では相対密度が小さいほど、鉛直方向の軸圧縮ひずみが卓越していることがわかる。

体積ひずみ分布に着目すると、相対密度が大きいほど、供試体端部では圧縮をし、中心部で膨張していることがわかり、供試体上下方向に不均一な変形をしている。LooseのCU-1及びCD-1においては、構造的に圧縮性が大きいことを反映し、ほぼ全域で体積圧縮しているが、やはり供試体端部ほど圧縮が大きいことがわかる。CD-1及びCD-2においては、せん断ひずみの局所化が観察された位置の近傍に、斜めに体積ひずみが集中している部分が見られる。

5. まとめ：ゆる詰め構造を持つ砂の角柱三軸試験を行い、PTV画像解析により供試体表面のせん断ひずみ及び体積ひずみ分布を可視化した結果、相対密度が大きくなるほど、せん断ひずみの局所化の程度が大きくなる一方で、供試体上下方向には不均一な圧縮変形が見られ、ひずみの局所化は排水三軸試験のほうが非排水三軸試験に比べて顕著であることがわかった。

参考文献：1) 辻・岡・小高・谷崎：細粒分を含むゆる詰め砂の変形パターンと圧縮帯，第38回地盤工学研究発表会概要集，435-436，2003。
 2) 岡・小高・辻・谷崎：石膏混じりゆる詰め砂における圧縮帯の観察，第38回地盤工学研究発表会概要集，433-434，2003。 3) 市之瀬・岡・小高・里村：角柱供試体を用いた正規及び過圧密粘土の三軸試験によるひずみの局所化の観察，第38回地盤工学研究発表会概要集，183-184，2003。
 4) 里村・岡・小高・木元・肥後・市之瀬：粘土角柱供試体を用いた三軸圧縮試験とその有限要素シミュレーション，第38回地盤工学研究発表会概要集，183-184，2003。 5) 北原・岡・小高・市之瀬：PTV画像解析によるひずみの局所化の観察，第39回地盤工学研究発表会概要集，2004。
 6) 可視化情報学会編：PIVハンドブック，森北出版，2002。