

X 線 CT データおよび画像相関法を用いた三軸圧縮下における砂のひずみ場の測定

Strain field measurements in sand under triaxial compression using X-ray CT data and Digital Image Correlation

渡邊 陽一*・大谷 順**・レノア ニコラ***・ホール ステファン****・高野 大樹*****

Yoichi Watanabe, Nicolas Lenoir, Stephen Hall and Jun Otani

*学生会員 工修 熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程・日本学術振興会特別研究員
(〒860-8555 熊本市黒髪 2 丁目)

**正会員 Ph.D. 熊本大学大学院自然科学研究科教授 (〒860-8555 熊本市黒髪 2 丁目)

***Ph.D. Engineer of Research, Institut Navier, University Paris-Est, France

****Ph.D. Researcher, University of Joseph Fourier, France

*****Ph.D. Post Doctoral Fellow, 3S-R Laboratoire, France

This paper presents the results of an experimental study on strain localization in soil. The purpose is to characterize in space and time the internal strains and strain localization patterning in a sand specimen undergoing triaxial compression. In-situ triaxial tests were conducted on Yamazuna sand at a confinement pressure. Complete 3D images of the specimen were obtained at several loading stages throughout the test and analyzed by 3D-volumetric Digital Image Correlation in order to obtain three-dimensional incremental displacement and strain fields. Based on the results of X-ray CT / 3D-DIC combination, the deformation process and especially the strain localization are quantitatively characterized in space and time under triaxial compression conditions.

Key Words: strain localization, triaxial compression test, X-ray CT, digital image correlation, sand

1. 序論

地盤工学の分野において、砂の変形挙動および破壊現象の解明は重要な研究課題のひとつであり、砂の破壊現象は局所ひずみの進展により生じると考えられている。これらについては、室内力学試験において荷重下における供試体内の変位およびひずみ計測の研究が数多く行われている^{1),2)}。しかしながら、これらは平面ひずみ下の現象であったり、マーカーや着色した粒状材料を土中に配置し、その軌跡から変位およびひずみ量を計測しているのがほとんどであり、地盤内部のひずみの進展を 3 次元下の挙動として解明した例は少ない。

一方、今日工学的には非破壊試験法として知られている、電磁気的な現象と画像解析手法を組み合わせた X 線 CT スキャナや MRI のような装置が地盤工学の分野においても用いられつつある。これらの装置の利点は「非破壊かつ三次元的に内部現象を把握する」ことである。著者らは、これまで地盤工学における X 線 CT の適用に関する多くの研究成果を報告している^{3),4),5),6)}。本論文のテーマについても X 線 CT を用いて、土中のひずみの局所化およびその進展メカニズムを 3

次元的に解明する研究を行っている⁷⁾。ここでは粒度のよい地盤材料を対象として、X 線 CT と三軸圧縮試験を連動させ、CT データから粒径の大きな土粒子の移動を 3 次元的に可視化し、それらの粒子を追跡することにより三軸圧縮下における砂中の変位特性について解明した。さらに変位計測から得られた土粒子の 3 次元変位データを用いて有限要素解析を行い、ひずみ量の定量的考察を行った。しかしながら、この研究の大きな欠点としては、ある限られた土粒子の 3 次元変位データを用いてひずみ量を算出しているため、実際の供試体の挙動を必ずしも精度よく反映しているとは言えない点である。

本研究では、X 線 CT スキャナおよびデジタル画像相関法(Digital Image Correlation 以下、DIC と呼ぶ)を用いて、砂の三軸圧縮試験の CT 撮影およびその画像解析を実施することで、砂の変位特性および局所ひずみの進展過程を 3 次元的に解明することを目的とする。ここでは、DIC 解析を用いて X 線 CT データより土中内部の変位量および、3 次元下でのせん断ひずみ量および体積ひずみ量を求めることで、砂中の局所ひずみの進展について定量的な考察を試みるものである。

2. 三軸圧縮試験

2.1 実験概要

本研究で用いた X 線 CT 用三軸圧縮試験装置を写真-1 に示す. X 線 CT 用三軸圧縮試験装置は従来の三軸圧縮試験装置と比べ, 以下のような工夫がなされている. ^{8),9),10)}

- 1) 試料台の最大積載重量(980N)を考慮して, 小型かつ軽量(総重量 283N)に作製されている.
- 2) X 線の透過能力を考慮して, 撮影領域内では鉄支柱ではなくアクリルセル筒を用いて反力を取り, 上載荷重を支える構造となっている.
- 3) 撮影中は, X 線 CT 撮影室が完全に遮蔽されるが, 遮蔽されても引き続きデータ計測を可能とする計測システムを有している.

本研究では気乾状態での砂の三軸圧縮試験を対象とした. 本実験で用いた山砂の粒径加積曲線を図-1 に示す. 山砂は図に示すように, 粒度がよく 0.001mm から 4.75mm までかなり広い範囲の土粒子を含んでおり, 平均粒径は $D_{50}=0.54\text{mm}$ である. 表-1 に物理特性を示す. 表-1 から土粒子の配合を示す均等係数 U_c は, 54.1 であることから, 土粒子の配合がよい地盤材料であることがわかる. 供試体は, 高さ 100mm, 直径 50mm の円筒形とし, $Dr=90\%$ および乾燥密度 1.579t/m^3 になるように突き棒を用いて 5 層かつ各 20 回ずつ締固めて作製した.

実験手順は以下のとおりである.

- 1) 試料は気乾燥状態として, 負圧法により供試体を作製する.
- 2) 負圧(20kPa 程度)を側圧に置き換えるために, まず負圧の 1/2 の値(10kPa)を側圧として与え, 同時に負圧を 1/2 減少させる. その後, 側圧を最初の負圧の値まで増加させ, 負圧を解除する.
- 3) 両面を排気状態とし, 拘束圧 50kPa としてせん断

を行う. 三軸圧縮試験装置を CT 撮影台に取り付け, 供試体の初期状態を CT 撮影する.

- 4) 撮影終了後, 三軸圧縮試験を開始する. ここでは, 載荷は 0.3%/min. の変位制御で行い, 軸ひずみ 4% まで載荷した後, 載荷をストップし, 排気コックを閉める. その後, 直ちに X 線 CT 撮影を行う.
- 5) 軸ひずみ 4% での撮影を終了後, 軸ひずみ 7, 11 及び 15% の場合においても 5) の手順を繰り返し実施する.

CT 撮影の条件は, すべての実験を通して, 電圧 150kV, 管電流 4mA および X 線の照射厚 0.3mm とし, 撮影ピッチ 0.3mm で供試体下端から上端までを撮影範囲とし, 全 345 断面の撮影を行った.

2.2 X 線 CT 画像

図-2 は供試体の CT 断面画像の一例である. CT 撮影より得られる CT 画像は, CT 値と呼ばれる材料の X 線吸収特性により定式化された値の空間分布による 14bit のデジタル画像であり, CT 値の高い領域(高密度領域)は白色, また CT 値の低い領域(低密度領域)は黒色で, 256 階調の白黒濃淡レベルにより表示される. 本研究では, 地盤内部の密度変化を可視化できる CT 値-500~3500 の範囲を 256 階調で示す. 今回使用した CT 装置で得られる一断面画像は, 画素数 2048×2048 , 1 ボクセルサイズは $0.073\text{mm} \times 0.073\text{mm} \times 0.3\text{mm}$ (X 線照射厚)である. 本実験では粒度のよい地盤材料を用いているため, 粒径の大きさによって空間分解能がはっきりと表れていることがわかる. 粒径の大きい土粒子は 1 ボクセルサイズより大きいため, 単一粒子としてはっきりと認識され白く表示されるが, 粒径の小さい土粒子は空間分解能より小さいため単一粒子として評価されず, 土粒子群とその間隙としての平均化された密度として評価されることになる.



写真-1 X線CT用三軸試験装置

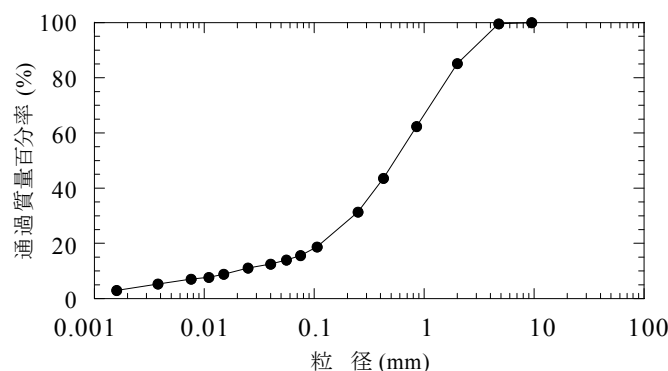


図-1 山砂の粒径加積曲線

表-1 山砂の物理特性

ρ_s (t/m ³)	2.695
$\rho_{d\max}$ (t/m ³)	1.615
$\rho_{d\min}$ (t/m ³)	1.256
D_{50} (mm)	0.54
U_c	54.2

2.3 実験結果および考察

図-3 は拘束圧 50kPa 下での応力-ひずみ曲線である。図中の Initial, Level A, Level B, Level C および Level D は、X 線 CT 撮影を行った軸ひずみレベルを示す。軸ひずみ 7%まではそれぞれ非線形に増加し、応力ピーク後はひずみ軟化とともに一定の残留強度に収束している。これらは一般的に密に詰まった砂の挙動と同様であると言える。本実験結果は、CT 撮影のために载荷を一時ストップすることによる応力緩和が生じているが、これについては単調载荷による実験結果と比較することで、結果の信頼性は確認している。

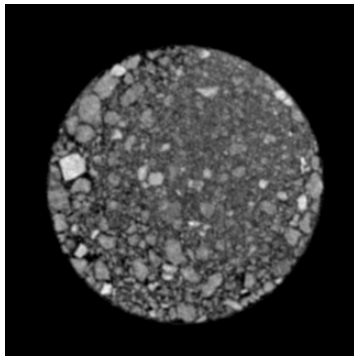


図-2 CT断面画像

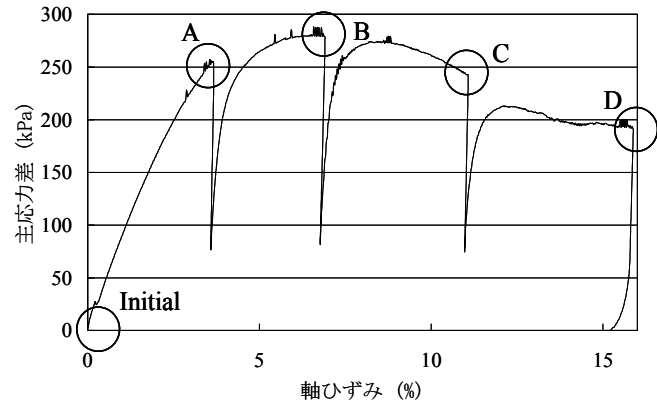


図-3 応力-ひずみ曲線

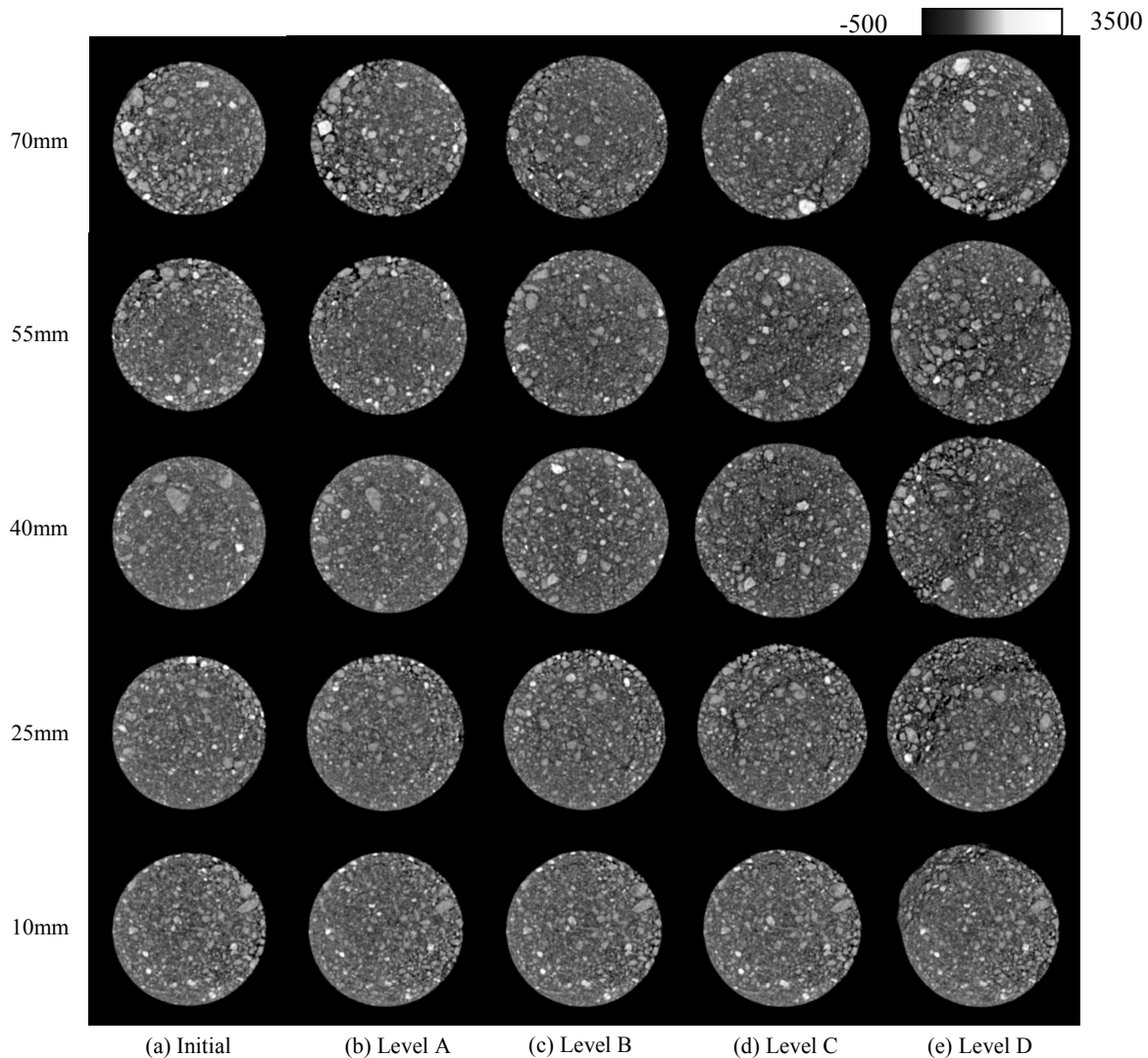


図-4 異なる载荷ステップにおけるCT断面画像

密度領域の顕著な進展が確認できる。図-5 は(a)Initial, (b) Level A, (c) Level B, (d) Level C および(e) Level D における供試体の 3 次元再構成画像である。応力-ひずみ曲線においてピーク応力付近である Level B では帯状の低密度領域を確認できないが、ピーク応力後の Level C では供試体の右上部から供試体の左下部に向かって、帯状の低密度領域が発生していることが確認できる。また、Level D では、帯状の低密度領域がさらに顕著に確認できる。ここで、供試体内部での低密度領域の発生過程を確認するために、3 次元再構成した画像から最も密度変化が顕著な断面を選定し、供試体の直径にあたる位置での鉛直断面画像を作成した。図-6 は(a) Initial, (b) Level A, (c) Level B, (d) Level C および(e) Level D におけるそれら鉛直断面画像である。(a) Initial 時の鉛直断面画像からは、本実験では供試体を試料の 1/5 ずつに分割して締固めて作製したため、供試体の周りには低密度領域が層になって表れていることがわかる。また、応力ピーク前の(c) Level B の鉛直断面画像を見ると、図-5 の画像では現れなかつ

た低密度領域が供試体内部に発生していることが確認できる。さらに、(d) Level C においては右上部から中心部を通り左下部まで帯状の低密度領域が発生しており、加えて、左上から中心に向かって局所化した低密度領域が進展していることも確認できる。また、最終的には(e) Level D において右上から左下に広がる低密度領域帯が体積変化とともに顕著に現れることが確認できる。以上のことから、CT 画像より得られる密度変化の結果から、応力ピーク後に帯状の局所化した低密度領域が発生していることが確認され、密度変化としてではあるが、CT 画像により供試体内部の局所化現象を詳細に検討可能であると言える。しかしながら、CT 画像から得られる結果は密度変化であるために、現象を定性的には評価しているものの、定量的評価には至っていない。よって、以下では DIC 解析を用いた 3 次元せん断ひずみ量および体積ひずみ量の算出を試みる。

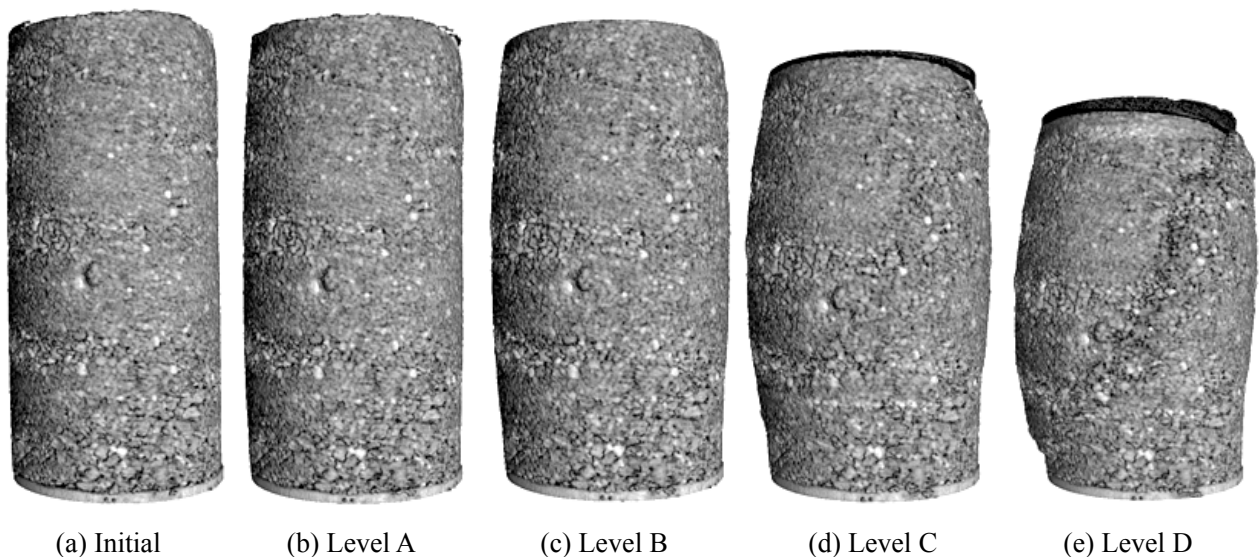


図-5 三軸圧縮試験での 3 次元再構成図

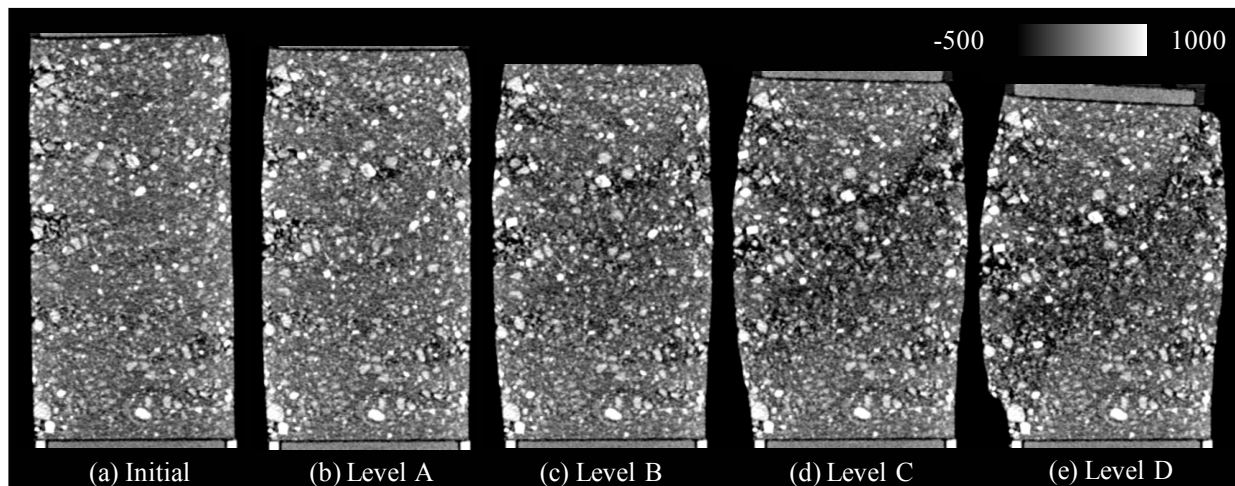


図-6 三軸圧縮試験での鉛直 CT 断面画像

3. DIC(Digital Image Correlation)の概要

2次元DIC手法は1980年代から固体力学や流体力学の分野で発達し、様々な空間かつ時間スケールにおいて、異なる荷重条件下かつ種々の材料に適用されている¹¹⁾。DIC解析は、測定対象物の変形前後のX線CT画像を用いて、得られたデジタル画像を画像処理することで、供試体内部の変位量とひずみ量の計測を可能とする手法である¹²⁾。

3.1 DICの原理

一般的なDIC手法は、1)相関係数 $C(\Phi)$ の定義、2)変形前の画像から変形後の画像内に相関領域 D (Search window)と同じ領域を変形後の画像内で同定することによる移動量 Φ の算出、および3)画素サイズ以下の変位場を評価するための補間処理の3つから成り立つ。変形前と変形後の画像内における任意の点 x における関数をそれぞれ $f(x)$ と $g(x)$ とする。相関領域 D とそれらの変換関数 $\Phi(D)$ は、次式で示す正規化相互相関係数 $C(\Phi)$ を用いて求められる¹³⁾。

$$C(\Phi) = 1 - \frac{\langle (f - \langle f \rangle) \cdot (g \circ \Phi - \langle g \circ \Phi \rangle) \rangle}{\sqrt{\langle (f - \langle f \rangle)^2 \rangle \cdot \langle (g \circ \Phi - \langle g \circ \Phi \rangle)^2 \rangle}}$$

$$= 1 - \frac{\langle f \cdot g \circ \Phi \rangle - \langle f \rangle \cdot \langle g \circ \Phi \rangle}{\sqrt{(\langle f^2 \rangle - \langle f \rangle^2) \cdot (\langle (g \circ \Phi)^2 \rangle - \langle g \circ \Phi \rangle^2)}} \quad (1)$$

ここで、 $\langle a \rangle$ は相関領域 D 上のスカラー a の平均値であり、 $g \circ \Phi = g(\Phi(x))$ である。上式より、相関係数は最小値0(完全一致)から最大値2(不一致)となる。

次にCT画像は各voxelにCT値が個々に設定されているため離散的であることから、平均CT値は立体領域 D 内の N voxel内の合計の平均によって近似される。

$$\langle a \rangle \approx \frac{1}{N} \sum_{i,j,k} a_{ijk} \quad (2)$$

ここで、 a_{ijk} は三次元空間 (i,j,k) における値 a (CT値)である。変形後の位置 $\Phi(i,j,k)$ は整数値であるとは限らないために、 $(g \circ \Phi)_{ijk}$ の計算では補間を必要とする。本研究では、補間法としてトリリニア補間法を用いて、 $\Phi(i,j,k)$ 周辺の8voxelを用いて近似を行い、移動量を求めた。

3.2 解析手順

図-7は供試体の変形前と変形後の断面画像および鉛直断面画像である。本解析で用いた供試体のすべての断面画像は 900×900 voxelの画像であり、その画像を x,y 方向に60分割することで、節点を定義した。同様に鉛直断面画像は 900×345 voxelの画像であり、 y 方向に60分割、 z 方向に23分割することで、節点を定義した。次に、変形前の画像内に任意の領域(ROI: Region of Interest)を設定する。ここではROIの最小サイズを $15 \times 15 \times 15$ (unit: voxel)とした。また、変形前後での画像内の相関を探索するために、変形後の画像内に相関領域 D (Search window)を設定した。続いて、領域内での各ボクセルについて相関係数を算出し、その中で最も良い相関係数を得た位置を変形後の画像から決定し、変形前後での3次元移動量を求めた。ここで得られた移動量は整数値であるが、必ずしも整数値を得られるとは限らない。そこで、3次元補間法を適用することで、移動量を補間し、最適な3次元変位量を算出した。最後に、得られた3次元変位量を微分することで、せん断ひずみ量および体積ひずみ量をそれぞれ算出し、加えて各ひずみステップにおいても上記の手順を繰り返すことで全変位場を計算した。本手法の詳細については参考文献¹²⁾を参照されたい。

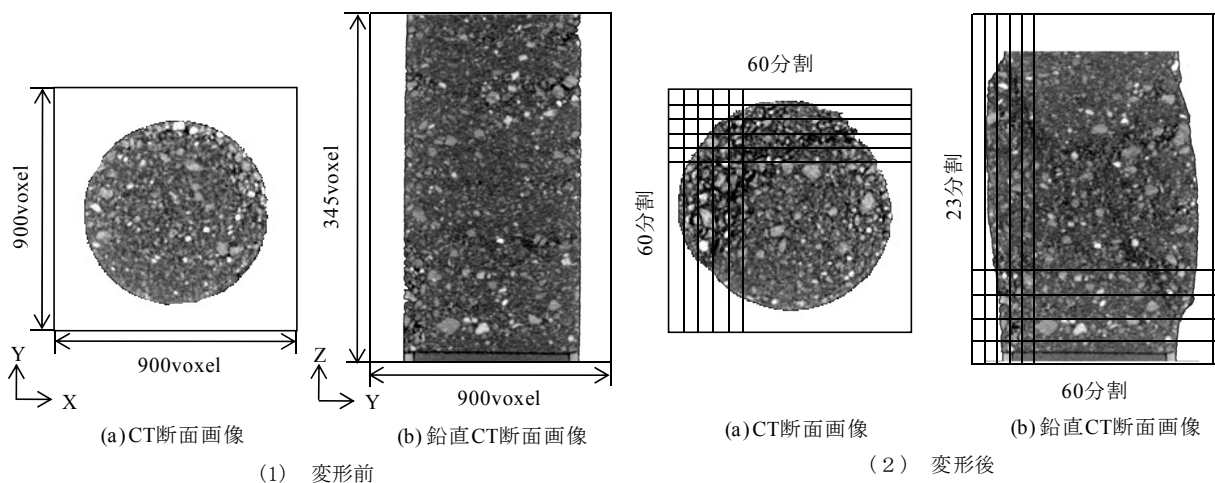


図-7 DIC解析手順の説明図

3.3 DIC 解析結果および考察

DIC 解析を実験結果(拘束圧 50kPa)に適用する. まず土中内部の変位特性を解明するために 3 次元変位ベクトルを求めた. ここでは, CT 撮影を行った各ひずみレベル間の相対量としての移動量を変位ベクトルとして表している. 図-8 は, (a) Initial→Level A, (b) Level A→Level B, (c) Level B→Level C および(d) Level C→Level D の 4 段階での 3 次元変位ベクトル図である. (a) Initial→Level A の変位ベクトル図では, 供試体下部に比べ供試体上部では変位量が 3mm 程度であることが確認できる. また, 土粒子の移動方向については, 供試体下部では多方向に移動し, ある一定方向に定まっていなかったことが確認できる. (b) Level A→Level B の変位ベクトル図からは, 供試体上部の土粒子の移動が右側面に向かって移動していた(a)の段階に対して, 供試体の下部方向に移動していることがわかる. また, 供試体の中心部では右側面に移動していることが確認できる. このことから, 供試体上部より加えて, この段階においても供試体上部から下部方向へ変位量が徐々に減少していることが確認できる. 続いて, (c) Level B→Level C の変位ベクトル図は, (b) の段階に比べ, 土粒子群を形成して, 左側面に向かって変位していることが確認できる. さらに, (d) Level C→Level D の変位ベクトル図からは, まとまった土粒子群を形成して左側面に向かって変位していることが確認できる. 以上のように土粒子の三次元変位を計測し可視化した. 次に土中内部のせん断ひずみの進展過程を考察するために, 図-6 に示す CT 断面画像と同じ高さでのせん断ひずみ分布を図-9 に示す. ここでは, せん断ひずみ量 0.3 以上を白色, ひずみ量ゼロを

黒色とする 0~0.3 を白黒濃淡で示している. (b) Level A→Level B の断面画像から, 高さ 40mm および 55mm の供試体内部ではせん断ひずみが発生していることが確認できる. (c) Level B→Level C では, 供試体中心部で局所化したせん断ひずみが卓越し, 2 本のせん断ひずみ分布が供試体上部と下部方向に進展していることが確認でき, 最終の(d) Level C→Level D では, 帯状のせん断ひずみ領域が供試体上部から下部方向に顕著な進展が見られる. これらの結果を図-6 の(d) Level D と比較すると, 低密度領域帯とせん断ひずみ領域帯の分布状態が比較的一致していることが伺える. 次に, せん断ひずみ分布の断面画像から 3 次的にせん断ひずみ量を抽出した画像を図-10 に示す. これらの 3 次元画像は, 可視化しやすくするために各ステップのせん断ひずみ量を(a) Level A→Level B では 0.1 以上, (b) Level B→Level C では 0.15 以上および(c) Level C→Level D では 0.2 以上の値として示している. 応力ピーク前の(a) Level A→Level B では, 帯状の卓越したせん断ひずみが 2 本形成していることがわかり, それぞれのせん断帯が交差していることが確認できる. 応力ピーク後の(b) Level B→Level C では, 交差していた 2 本のうち, 片方のせん断帯が右上部から左下部方向に進展しており, (c) Level C→Level D では最終的に曲面状のせん断帯を形成していることが確認できる. 以上のことから供試体内のせん断帯の進展過程は, 応力ピーク付近において 2 本の交差するせん断帯が形成し, 応力ピーク後の残留ひずみ領域では 1 本のせん断帯となるこれまでの研究成果と類似しており, 均質から不均質となる砂の破壊過程を 3 次元かつ定量的に評価していると言える¹⁴⁾.

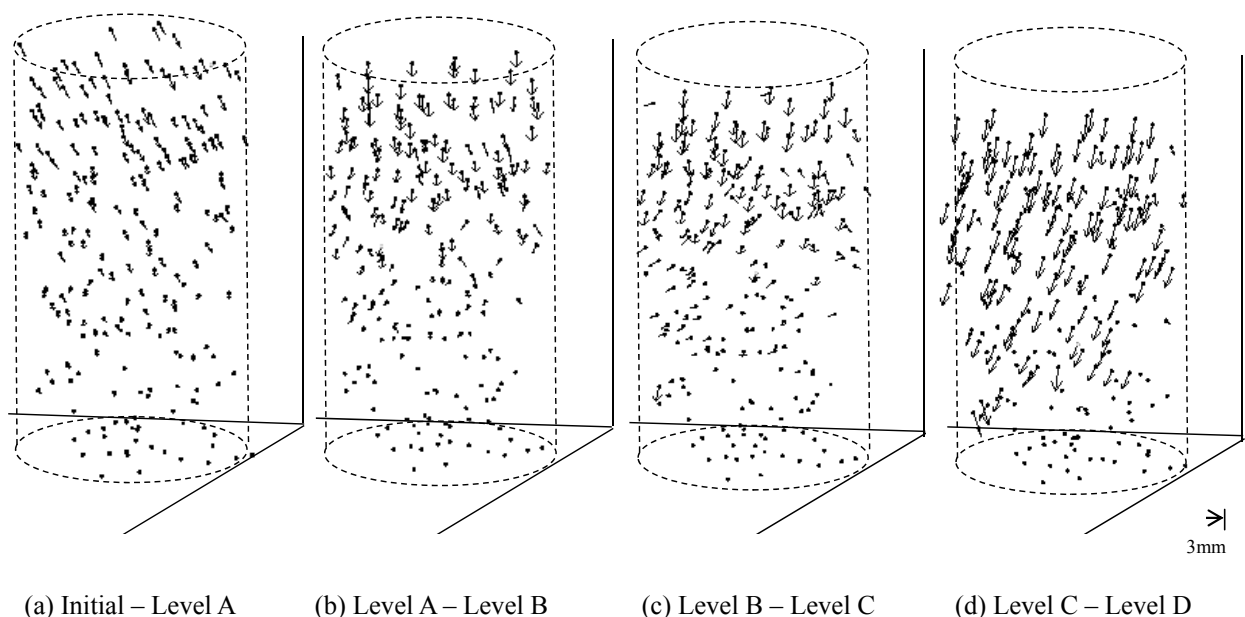


図-8 DIC解析より求めた3次元変位ベクトル図

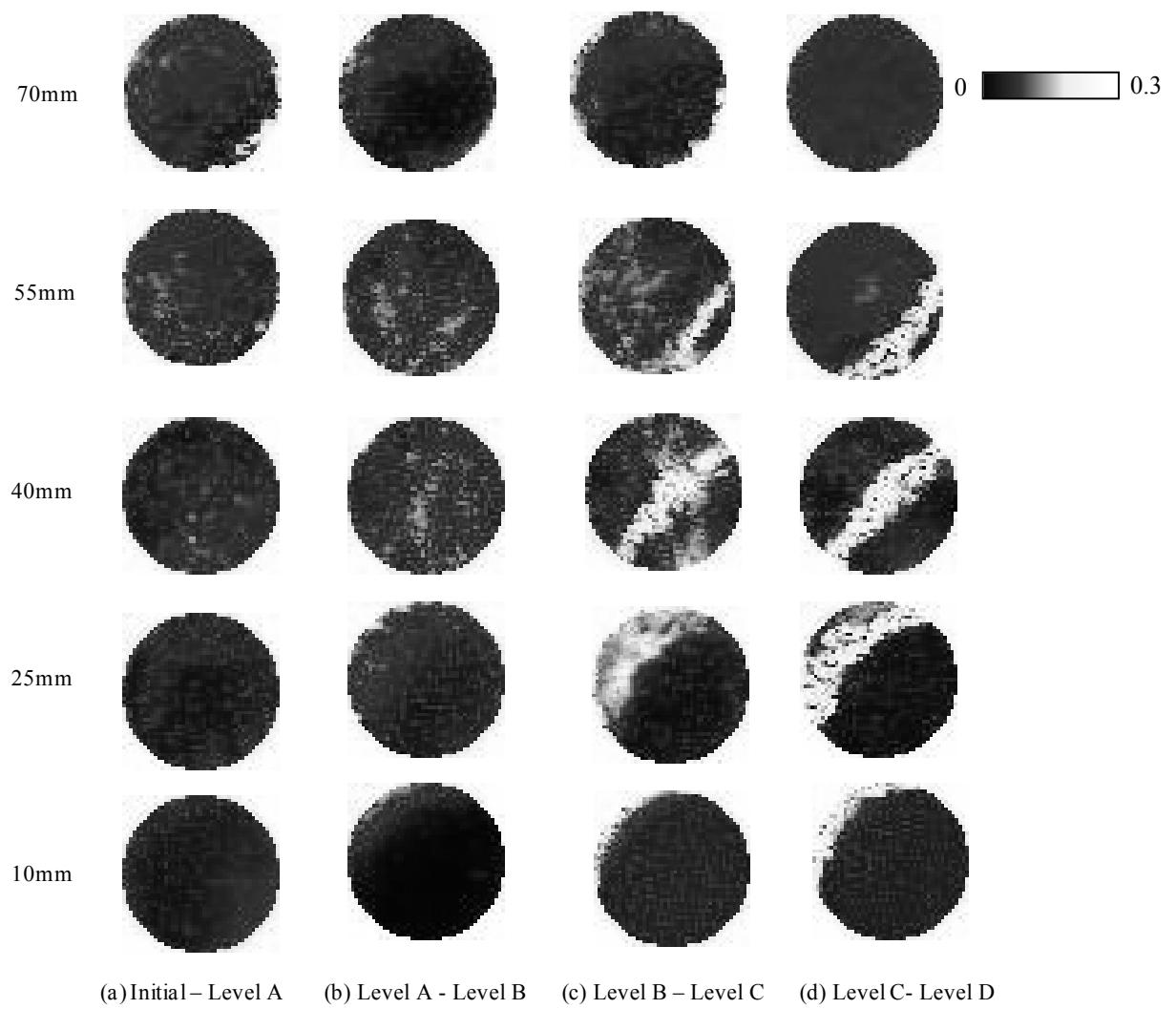


図-9 せん断ひずみ分布図

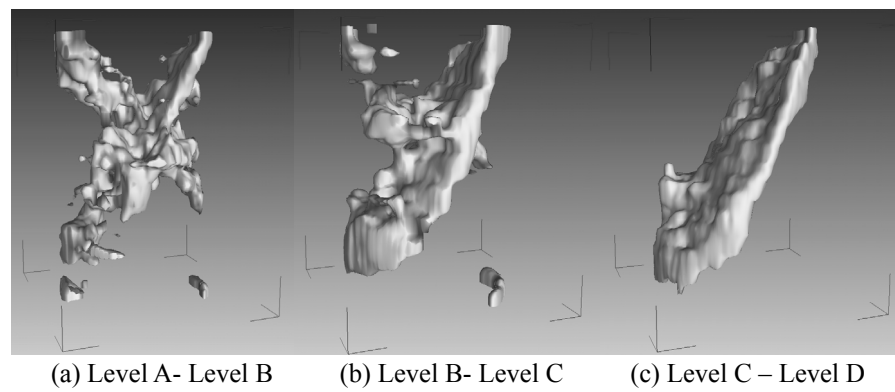


図-10 3次元せん断ひずみ分布図

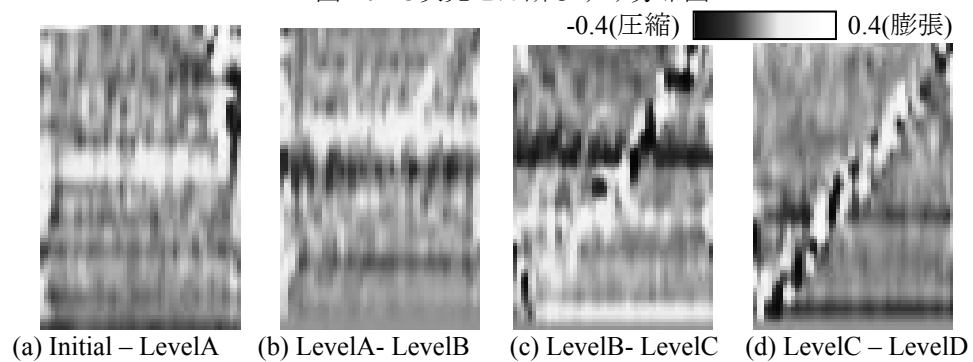


図-11 体積ひずみ分布図

続いて、実験結果に示した鉛直断面画像と同様に、供試体の直径にあたる位置での体積ひずみ分布図を図-11に示す。ここでは体積ひずみ-0.4以下(圧縮)を黒色、また0.4以上(膨張)を白色で示している。全体的にはCT撮影条件による誤差が水平にいくつか生じているものの、応力ピーク付近のLevel B以降では、せん断帯内部に圧縮領域を確認することができる。また、(d) Level C→Level Dでは、せん断帯内部全体にわたって膨張と圧縮の領域が現れている。このことから、一般的に供試体内でのせん断帯の形成にはダイレイタンスの影響が重要であると考えられるが、ここでのDIC解析結果では、せん断帯内部において膨張と圧縮の両方が現れていることが観察され、大変興味深いと言える。

本研究では、X線CTとDIC解析を組み合わせることで、砂の三軸圧縮下における供試体内部に発生するひずみ場の局所化進展過程を定量的に評価すると共に、土の破壊現象について詳細な検討を行った。今後の課題としては、せん断帯の幅や土粒子の回転などといったより詳細な現象解明について、本報の手法を用いて行う事が挙げられる。

4. 結論

本論文では、砂を対象とした破壊現象、すなわちひずみの局所化現象を解明するために、X線CTと三軸圧縮試験を連動させ、CTデータを用いたDIC解析を行うことにより、これまでのCT画像としての密度変化のみの考察から、変位量やひずみ量の定量的考察を可能とした。特に、応力ピーク前に広範囲にせん断ひずみが分布し、応力ピーク後には、せん断帯に沿ってせん断ひずみ量が卓越することを三次元的に確認した。さらに、体積ひずみ分布ではせん断帯内部の圧縮と膨張領域が交互に発生するという現象を確認したことは、土の破壊現象のより詳細な解明に大きく寄与したと考える。

参考文献

- 1) Yamamoto, K. and Otani, J.: *Microscopic observation on progressive failure on reinforced foundations*, Soils and Foundations, 40(2):pp.25-37, 2001.
- 2) Nielsen S.F., Poulsen H.F., Beckmann F., Thorning C. and Wert J.A.: *Measurements of plastic displacement gradient components in three dimensions using marker particles and synchrotron X-ray absorption microtomography*, Acta Materiala 51, pp. 2407-2415, 2003.
- 3) Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y.: *Application of X-ray CT Method for Characterization of Failure in Soils*, Soils and Foundations, 40 (2): pp.113-120, 2000.
- 4) Otani, J. and Obara, Y.: *X-ray CT for Geomaterials* BALKEMA, 2003.
- 5) Otani, J., Dang Pham, K. and Sano, J.: *Investigation of failure patterns in sand due to laterally loaded pile using X-ray CT*, Soils and Foundations, Vol.46(4):pp.529-535, 2006.
- 6) 高野大樹, ファンダンホア, 大谷順: X線CTを用いた水平荷重下における杭周辺地盤挙動の3次元可視化, 応用力学論文集 Vol.9, pp.513-520, 2006.
- 7) Watanabe, Y., Otani, J., Lenoir, N., Takano, D. and Mukunoki, T.: *Visualization of Strain Field in Sand under Triaxial Compression Using X-ray CT*, 57th Japan National Congress for Theoretical and Applied Mechanics, pp.119-124, 2008.
- 8) Watanabe, Y., Lenoir, N., Otani, J. and Nakai, T.: *Strain field measurements in sand under triaxial compression by tracking soil particles on X-ray CT data*, Soils and Foundations, 2010. (投稿中).
- 9) 棕木俊文: 地盤工学におけるX線CT法の適用に関する研究, 熊本大学大学院自然科学研究科博士学位論文, 2001.
- 10) 渡邊陽一, 大谷順, レノアニコラ, 高野大樹: X線CTを用いた三軸圧縮下における砂の3次元変位特性の解明, 応用力学論文集 Vol.10, pp.505-512, 2007.
- 11) Viggiani, G. and Hall, S.A.: *Full-field measurements, a new tool for laboratory experimental geomechanics*, Fourth Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, IOS press, pp.3-26, 2008.
- 12) Hall, S.A., Lenoir, N., Viggiani, G., Derues, J. and Besuelle, P.: *Strain localization in sand under triaxial loading: characterisation by x-ray microtomography and 3D digital image correlation*, Proceedings of International Symposium on Computational Geomechanics COMGeo09, 2009.
- 13) Lenoir, N., Bornet, M., Besuelle, P. and Viggiani, G.: *Volumetric Digital Image Correlation Applied to X-ray Microtomography Images from Triaxial Compression Tests on Argillaceous Rock*, Blackwell Publishing Ltd, Strain (2007) 43, pp.193-205, 2007.
- 14) Derues, J., Chambon, R., Monkin, M. and Manzerolle, F.: *Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography*, Geotechnique, 46, No.3, pp.529-546, 1996.

(2010年3月9日 受付)