

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

Displacement property in sand under triaxial compression using X-ray CT

渡邊 陽一*・大谷 順**・レノア ニコラ***・高野 大樹****

Yoichi Watanabe, Jun Otani, Nicolas Lenoir, and Daiki Takano

*学生会員 工修 熊本大学大学院自然科学研究科博士前期課程 (〒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. 平成 18 年度熊本大学客員研究員 (University of Joseph Fourier, France)

****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)

The purpose of this paper is to evaluate displacement property of sand in three dimensions using X-ray CT. Here in this paper, the displacements in the soil are visualized under triaxial compression. So called "Yamazuna sand" which has the wide range of the size of soil particles is used in this test and the displacement property is evaluated by tracing a large number of the represented soil particles in the resulted X-ray CT images. First of all, the displacements in the soil under one dimensional compression are visualized in order to develop the proper image processing analysis and this method is also used in the case of triaxial compression test. Finally, the displacements in the soil specimen are visualized and also quantified as well in three dimensions.

Key Words: displacement, triaxial compression test, X-ray CT, image processing analysis, sand

1. 序論

地盤の力学的挙動を解明する方法としては、土を連続体として扱う連続体力学的アプローチと個々の土粒子の存在を反映した粒状体力学的アプローチがある。これらは数値解析において前者は有限要素法、後者は個別要素法に代表される。これら解析において最も重要な事項は土のモデル化すなわち構成式と言える。これまで多くの構成式が提案されているが、そのほとんどはいわゆる三軸圧縮試験を代表とする要素試験結果が用いられている。しかしここで疑問となるのは、「はたして要素試験の供試体の平均的な応力とひずみの関係が実際の地盤挙動を代表しているであろうか?」という点である。これらについて、荷重下における土粒子群の移動を平面的に追跡する可視化手法の提案^{1), 2)}が多くなされている。しかし、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子材料を土中に配置しその軌跡を評価する方法がほとんどであり、実際の土中の挙動を反映しているとは必ずしも言えない。

一方、今日工学的には非破壊試験法として知られつつある、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)}。本論文のテーマに関しても、CT データ上より土中に配置したマーカーの移動を 3 次元的に可視化した事例は比較的多く存在する⁶⁾。しかし上記と同様、実際の土粒子群の移動を可視化した例は少ない⁷⁾。

本研究の目的は、X 線 CT と三軸圧縮試験を連動させ、圧縮応力下の供試体内の土粒子群の動きを 3 次元的に可視化することで供試体内の土の変位特性を解明することを目的とした。ここでは、地盤材料として粒度がよい山砂を用い、その土粒子群よりマーカーとなる粒子を決定し、それらの粒子を CT 画像上で追跡することで土の変位計測を試みる。さらにこれら実施過程において、土粒子群の移動を定量的に評価する画像解析手法の確立について検討するものである。

2. X線CT用三軸圧縮試験装置

本研究で用いたX線CT用三軸圧縮試験装置を写真—1及び図—1に示す。実施した一次元圧縮試験についても本装置を用いた。X線CT用三軸圧縮装置は従来の三軸圧縮装置と比べ、以下のような工夫がなされている⁸⁾。

- 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撮影室は完全に遮蔽されるため、遮蔽されても引き続きデータ計測が行えるプログラムを開発している。

なお、熊本大学所有のX線CTスキャナの詳細については参考文献⁹⁾を参照されたい。

3. 実験概要

3.1 実験内容

本研究では、土粒子を3次的に可視化し、土粒子の移動計測を可能とする画像解析手法を確立するために、まず最初に簡単なケースとして一次元圧縮下の挙動を対象とした土粒子群の変位計測を行った。続いて、同様の材料を用いて三軸圧縮試験を行い、供試体内部の挙動を可視化するとともに、一次元圧縮試験で

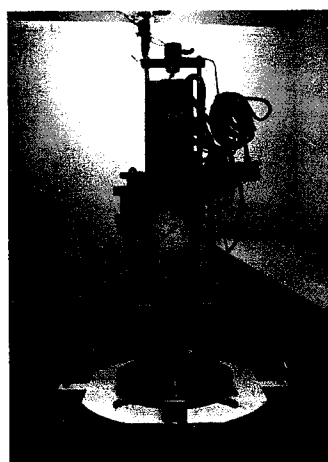
用いた画像解析手法により三軸圧縮下において異なる載荷段階での変位計測を行い、それら結果について考察する。

3.2 一次元圧縮試験

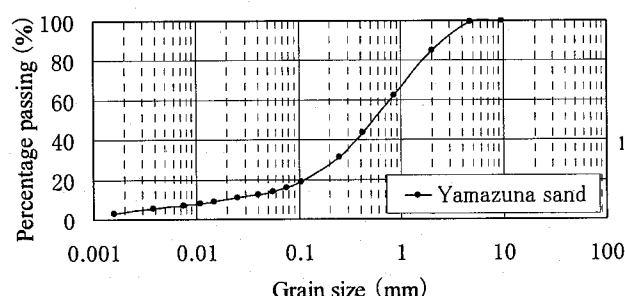
本実験で用いた山砂の粒径加積曲線を図—2に示す。山砂は図に示すように、粒度がよく 0.001mm から 10mm までかなり広い範囲の土粒子を含んでいる。供試体は高さ 100mm、内径 50mm、厚さ 4mm の塩化ビニール性モールド(以下、塩ビモールド)中に、乾燥状態の山砂を相対密度 $D_r=90\%$ になるよう締固めて作製した。供試体の概要および物理特性をそれぞれ図—3と表—1に示す。一次元圧縮試験は、X線CT用三軸圧縮試験装置を用いて行った。セル室内の下部ペダスタルの上に塩ビモールドが中心となるように設置し、その上に載荷キャップを置き、上部より載荷することで実施した。載荷速度は 0.3%/min の単調載荷とし、CT撮影は載荷前、軸ひずみ 10%時の2段階で実施した。撮影範囲は、一次元圧縮試験において供試体下部に比べ上部が土粒子の移動量は比較的大きいと考えたため、供試体上部より 10mm までとした。なおCTの撮影条件は、起電圧 150kV、管電流 4mA、X線照射厚 0.3mm、撮影ピッチ 0.3mmを採用した。なお、本研究では一断面のCT撮影時間は 5min である。

3.3 三軸圧縮試験

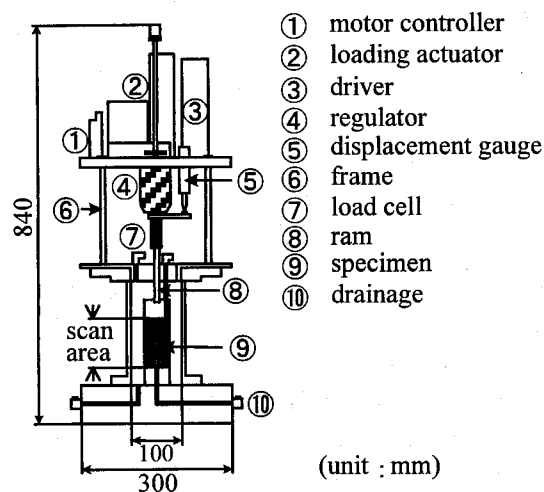
試料は一次元圧縮試験と同じく山砂を用いた。供試



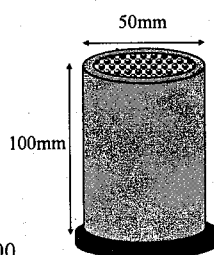
写真—1 X線CT用三軸試験装置



図—2 山砂の粒径加積曲線



図—1 X線CT用三軸試験装置概略図



図—3 供試体概要図

表—1 山砂の物理特性

ρ_s (t/m ³)	2.695
ρ_{dmax} (t/m ³)	1.615
ρ_{dmin} (t/m ³)	1.256
D_{50} (mm)	0.55
U_c	54.2

体は高さ 100mm、直径 50mm の円筒形であり、 $Dr=90\%$ になるように予定量の 1/5 各に突き棒で 20 回ずつ締固めることにより作製した。

実験では、通常の砂の三軸圧縮試験は飽和した供試体を用いて試験が行われるが、今回は土粒子の三軸圧縮下での移動を確認することを目的としているため、気乾状態での三軸圧縮試験を行った。

実験手順は以下のとおりである。

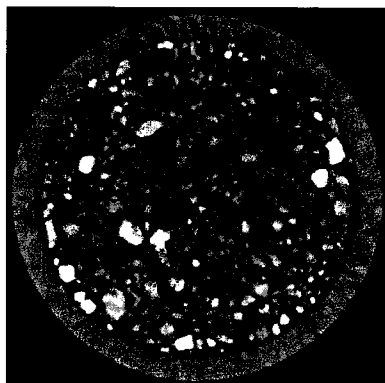
- 1) 試料は気乾燥状態として、負圧法により供試体を作製する。
- 2) 負圧(20kPa 程度)を側圧に置き換えるために、まず負圧の 1/2 の値(10kPa)を側圧として与え、同時に負圧を 1/2 減少させる。その後、側圧を最初の負圧の値まで増加させ、負圧を解除する。
- 3) 両面を排気状態とし、拘束圧 50kPa としてせん断を行う。
- 4) 三軸圧縮試験装置を CT 撮影台に取り付け、供試体の初期状態を CT 撮影する。
- 5) 撮影終了後、三軸圧縮試験を開始する。ここでは、軸ひずみ 4%まで載荷した後、載荷をストップし、排気コックを閉める。その後、直ちに X 線 CT 撮影を行う。
- 6) 軸ひずみ 4%での撮影終了後、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。

ここで、載荷速度は一次元圧縮試験と同様に 0.3%/min の変位制御で行い、CT 撮影の条件は、一次元圧縮試験と同様、すべての実験を通して、電圧 150kV、管電流 4mA、X 線の照射厚 0.3mm、撮影ピッチ 0.3mm とした。撮影範囲は供試体全体の挙動を対象とするため、供試体底面を基準として供試体上部までとした。

4. 実験結果と考察

4.1 X 線 CT 画像

図—4 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

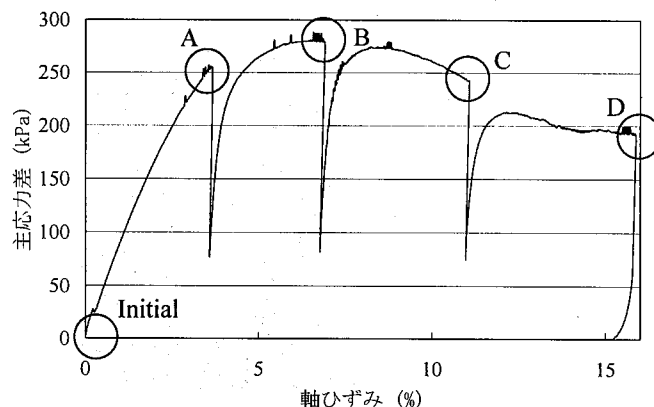


図—4 一次元圧縮試験でのCT断面画像の一例

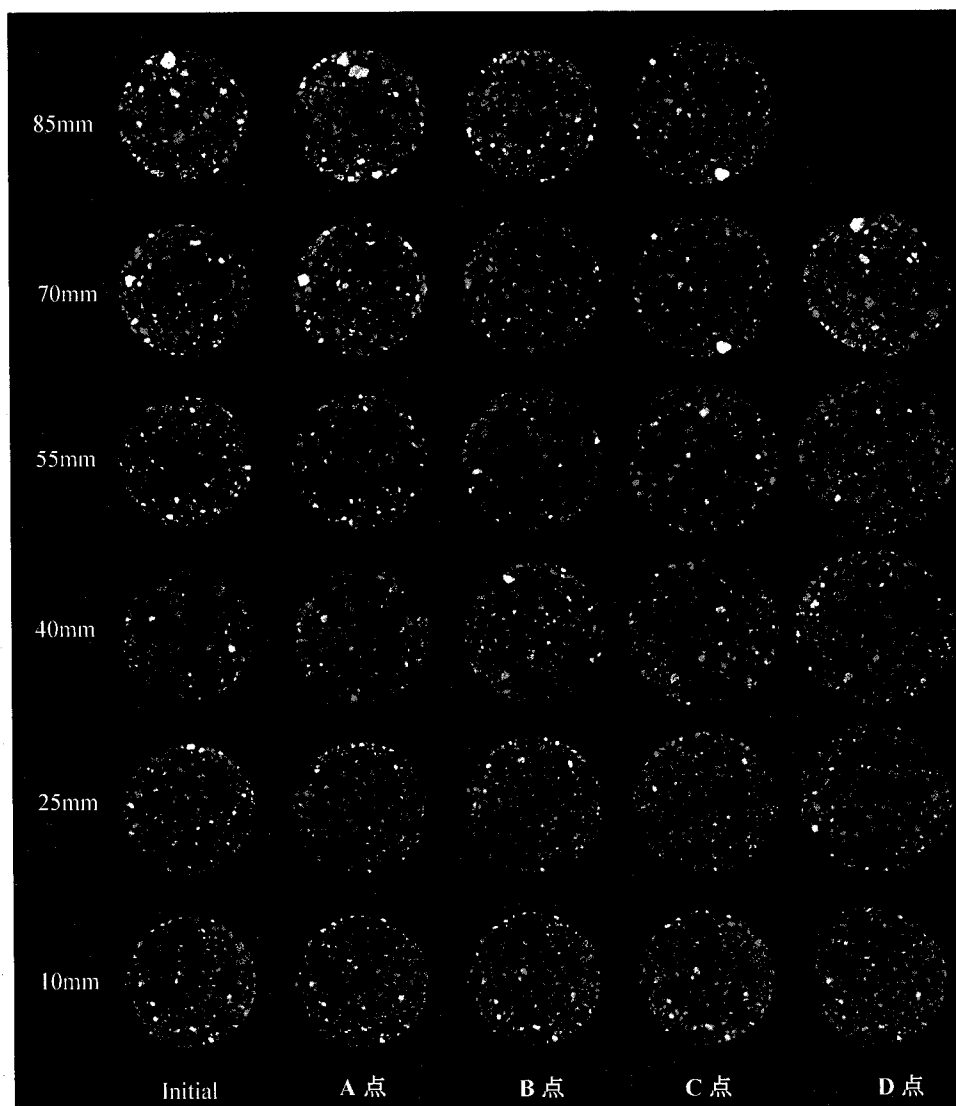
の X 線吸収特性で定式化された値の空間分布による 14bit のデジタル画像であり、CT 値の高い領域(高密度領域)は白色、また CT 値の低い領域(低密度領域)は黒色で、256階調の白黒濃淡レベルにより表示される。今回使用した CT 装置で得られる断面画像は、画素数 2048×2048、1 ボクセルサイズは 0.073mm×0.073mm×0.3mm(X 線照射厚)である。

4.2 三軸圧縮試験の実験結果

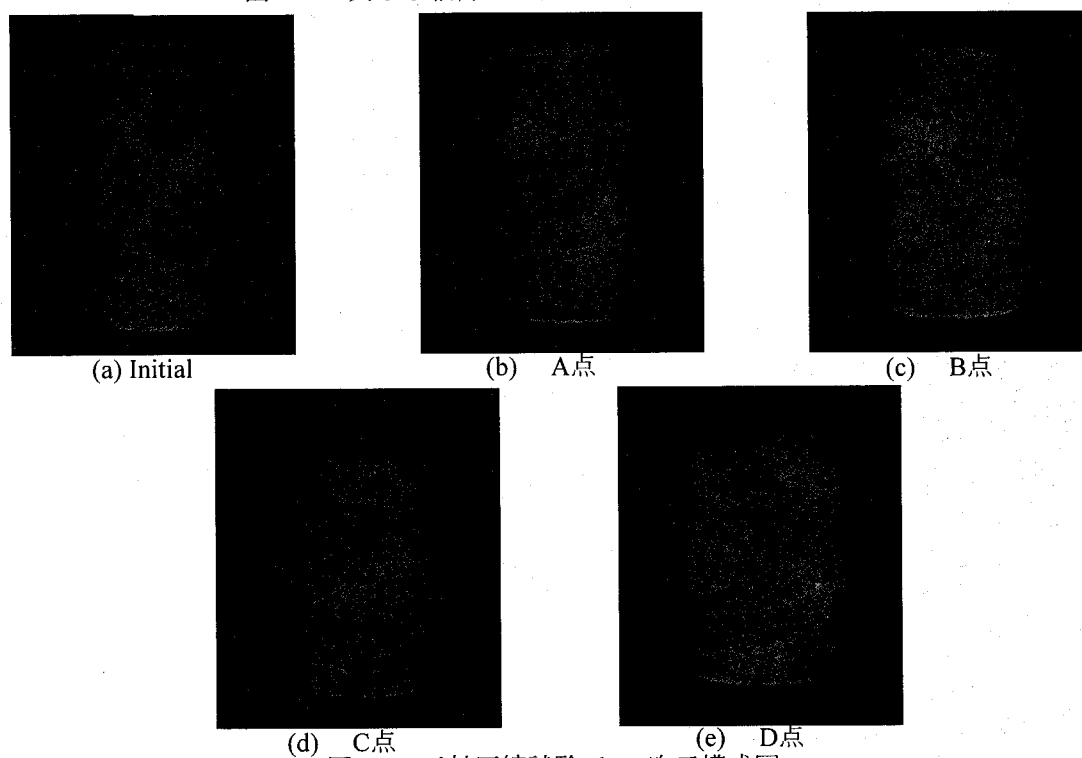
図—5 は拘束圧 50kPa 下での応力—ひずみ曲線である。図中の Initial、A 点、B 点、C 点及び D 点は、X 線 CT 撮影を行った軸ひずみレベルを示す。ここでは、CT 撮影のために載荷を一時ストップすることによる応力緩和が生じているが、これについては単調載荷による実験結果と比較することで、結果の信頼性は確認している⁸⁾。図—6 は、供試体底面からの高さ $h=10、25、40、55、70$ 及び 85(mm)の X 線 CT 断面画像を示す。これらを見ると、B 点において既に供試体の上部側面に低密度領域が発生していることがわかる。さらに C 点からはひずみが局所化した領域が供試体上部より下部の方へと進展している。また、実験終了時の D 点においては、全体的なせん断帯へと進展していることが確認できる。次に、せん断帯を三次元的に可視化するために CT 断面画像を重ね合わせて再構築した 3 次元画像を作成した。図—7 は(a) Initial、(b) A 点、(c) B 点、(d) C 点及び(e) D 点における 3 次元画像である。応力—ひずみ曲線においてピーク応力付近である B 点ではせん断帯の確認はできないが、ピーク応力後の C 点では供試体の左上部から供試体の右下部に向かって、せん断帯が発生していることが確認できる。また、D 点では、せん断帯がさらに顕著に確認できる。さらに供試体内部でのせん断帯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—8 は(a) Initial、(b) A 点、(c) B 点、(d) C 点及び(e) D 点における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



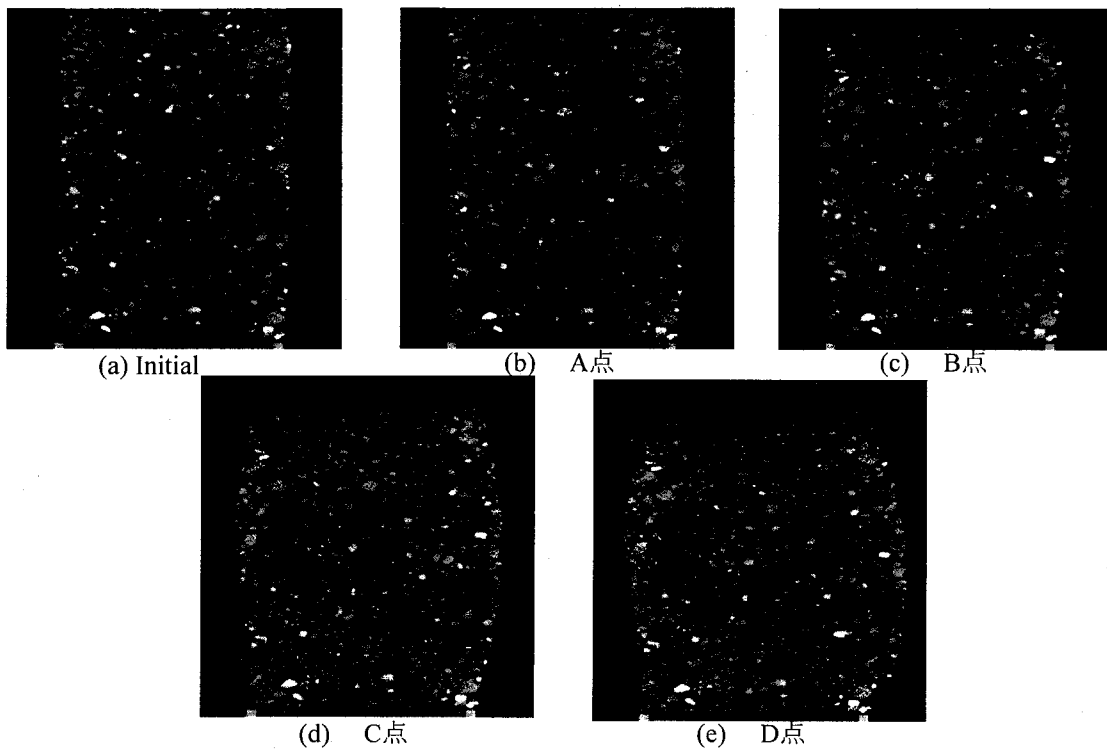
図—5 応力—ひずみ関係



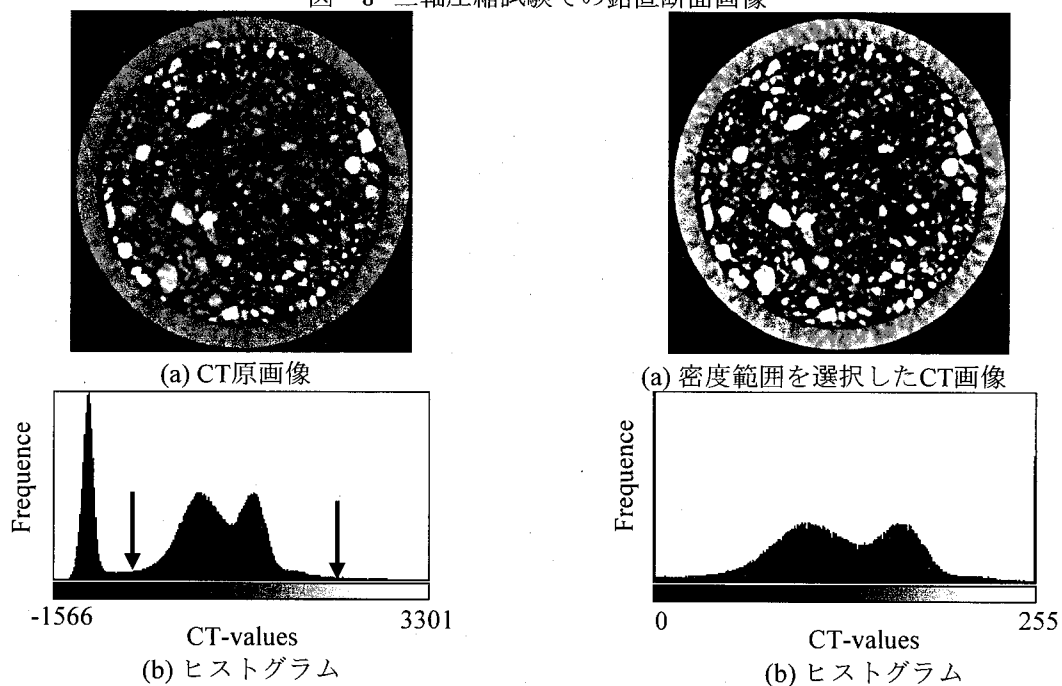
図—6 異なる载荷ステップにおける CT断面画像



図—7 三軸圧縮試験での3次元構成図

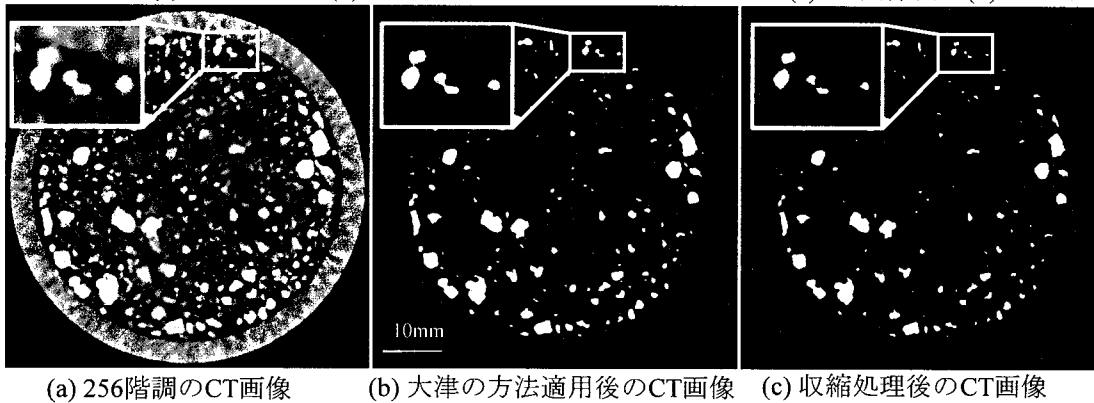


図—8 三軸圧縮試験での鉛直断面画像



図—9 14bitの(a) CT画像及び(b) ヒストグラム

図—10 8bitの(a) CT画像及び(b) ヒストグラム



図—11 2値化処理プロセス

が層になって表れていることがわかる。また、(c) B 点の鉛直断面画像を見ると、図-7の画像では現れなかったひずみが局所化した領域が左上部から中心に向かって発生していることが確認できる。さらに、(d) C 点においては左上部から中心部を通り右下部までせん断帯が発生していることがわかる。加えて、右上部から中心に向かってひずみが局所化した領域が進展していることも確認できる。以上より、CT 画像により供試体内部の現象をより詳細に検討可能であると言える。

5. 画像解析手法に基づく砂の変位計測

5.1 一次元圧縮試験

(1) 画像解析手法

画像処理の第一段階として、比較的粒径の大きな土粒子に着目し、その粒子移動を観察する。これには、CT 画像から着目する土粒子のみを抽出した画像を作成する必要がある。図-9は、CT 撮影より得られた原画像と CT 値のヒストグラムの一例である。ヒストグラムから原画像の CT 値は-1566~3301の範囲に分布していることがわかる。ここで CT 値は密度と強い相関関係を示すことから、他の粒子に比べ高密度である比較的粒径の大きな粒子を抽出するためには CT 値の高い範囲を選択すればよい。選択範囲を図中の矢印で示している。さらに画像解析処理を効率よく行うために、CT 画像を 14bit から 8bit に圧縮を行った。図-10には 256 階調の密度範囲を選択した CT 画像とそのヒストグラムを示す。図-9の原画像と比較すると、密度の違いによるコントラストの変化がはっきりわかり、比較的大きな粒子は密度が高いため、白く表示されていることが確認できる。さらに、ここで着目する比較的大きな土粒子だけを抽出するための処理が必要となる。

本研究では、供試体の CT 画像を単一粒子と背景とに分割する 2 値化処理手法を導入した。2 値化処理は、対象と背景との濃淡のコントラストが十分にある場合は容易であるが、様々な粒径の土粒子が混在している中では、微妙な濃淡変化となり、粒径の大きな粒子だけを抽出するためのしきい値設定は困難となる。画像解析の分野において、しきい値設定の安定化を図るためのしきい値自動決定法が各種提案されている。画像処理後の画像は、黒色と白色の 2 階調の画像で示される。ここでは比較的粒径の大きな土粒子を抽出可能としたしきい値自動決定法のひとつである大津の方法¹⁰⁾を用いた。この方法は、大津の判別分析法と呼ばれる方法であり、画像の濃淡ヒストグラムから統計的な意味での最適しきい値を決定する。あるしきい値によってヒストグラムを 2 つのクラスに分割した場合クラス間分散が最大になる値をしきい値に選ぶとい

う原理である。本研究では、以下の手順で画像解析を行った。

- 1) 図-10の 256 階調の CT 画像から大津の方法を用いてしきい値を選び、土粒子と背景とに分割し、2 値化処理を行う。
- 2) 連結している粒子をそれぞれに分割する収縮処理を実施する。

ここで、収縮処理とは連結している土粒子周辺に散在するノイズ的な画素を取り除くため、または細かい突起状のノイズを取り除くために行う方法である。

図-11に(a)256 階調の CT 原画像、(b)大津の方法を適用したしきい値処理後の CT 画像、及び(c)収縮処理後の CT 画像をそれぞれ示す。これら CT 画像の左上部に着目すると、土粒子は収縮処理により背景と粒子とに分割されることが確認できる。

(2) 画像解析結果と考察

2 値化処理した画像から 3 次元構成した画像を用いて粒子を選択し、粒子の中心座標を計測した。図-12は 3 次元構成した載荷前の粒子の画像を示す。ひずみ 10%時の場合でも同様に画像解析を行い、粒子の中心座標を計測した。これらの結果を用いて、粒子の 3 次元座標を求めることにより粒子移動の計測を行った。図-13 及び図-14 は載荷前の粒子がひずみ 10%時に移動した距離を 3 次元的にベクトル表示したものと、載荷前の粒子と移動距離とを合わせて表示したものをそれぞれ示す。これらの結果よりすべての土粒子は主として載荷方向に移動していることが確認できる。また、その結果はひずみ 10%以内であることから、用いた手法が比較的有効であることが確認できる。特に供試体上部の変位は軸ひずみ 10%の圧縮に対応した変位が見られ、供試体上部 10mm 以内においては変位ベクトル量は減少していることが確認できる。よって、変位は供試体上部より下部へと減少すると考えられる。このことから、一次元圧縮下における供試体内のひずみの伝達状況は撮影範囲 10mm 以内では有効に確認できたと考える。

5.2 三軸圧縮試験

(1) 画像解析手法

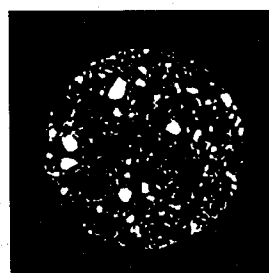


図-15
従来の画像解析手法を用いたCT断面画像

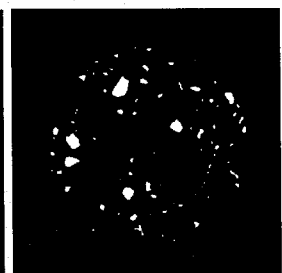
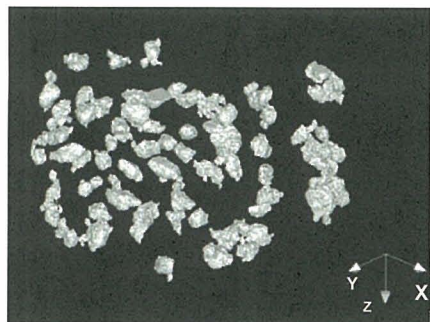
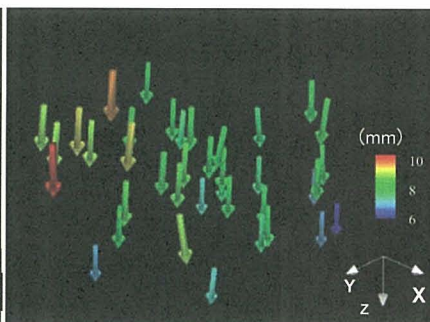


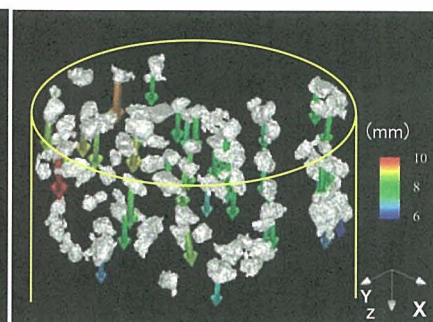
図-16
新たな画像解析手法を用いたCT断面画像



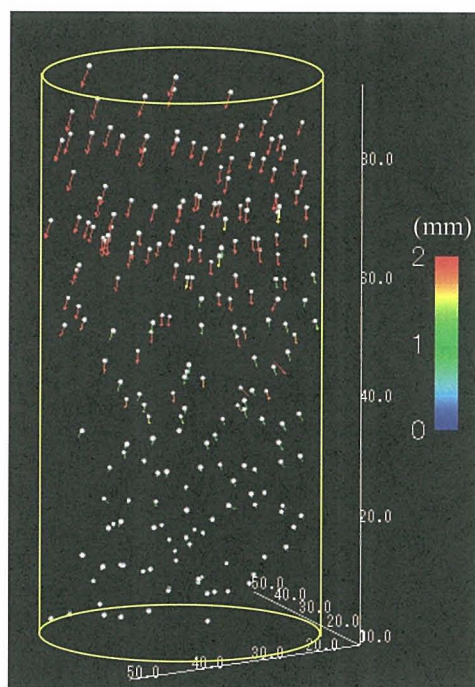
図一12
載荷前の土粒子の3次元画像



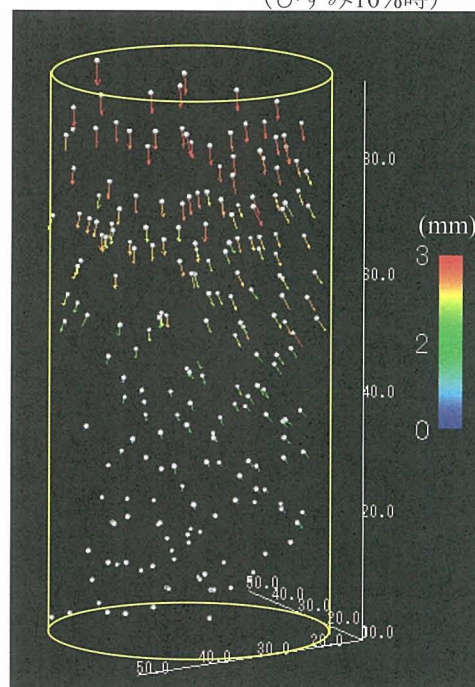
図一13 3次元ベクトル表示



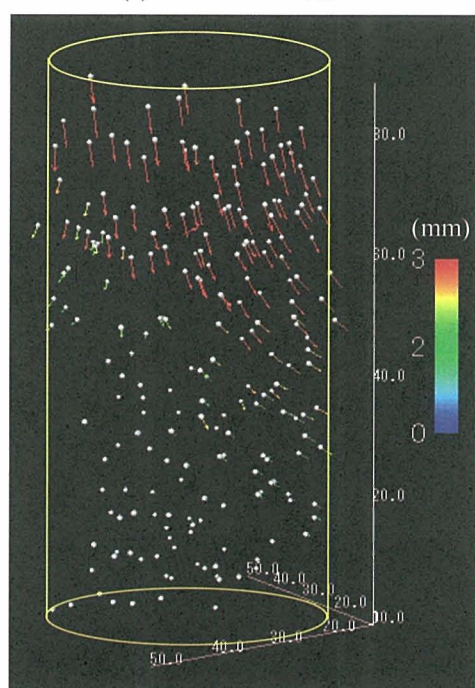
図一14
3次元移動変位ベクトル表示
(ひずみ10%時)



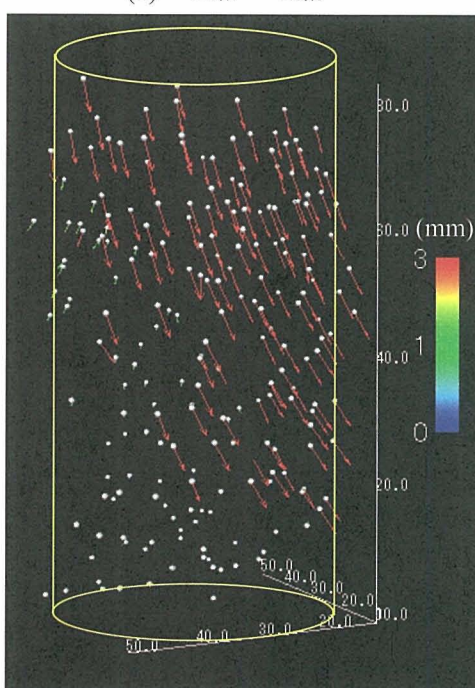
(a) Initial → A点



(b) A点 → B点



(c) B点 → C点



(d) C点 → D点

図一17 三軸圧縮試験での異なる載荷ステップにおける3次元変位ベクトル図

ここでは三軸圧縮下において適用した画像処理について紹介する。三軸圧縮試験においても一次元圧縮試験で用いた画像解析手法を用いて画像処理を行った。画像処理後のCT画像を図—15に示す。土粒子は背景と粒子とに分割されていることが確認できる。しかし、小さな土粒子を多く含んでいるため、単一粒子としての評価を行う際、画像解析が複雑になり、比較的粒径の大きな粒子だけを抽出する必要がある。そこで、今回は粒径の比較的大きな粒子を抽出するために、しきい値設定は一次元圧縮試験とは異なり、手動により決定することとした。さらに収縮処理を2回行うことで、連結している粒子をそれぞれ分割することを試みた。この手法を用いた画像処理結果のCT画像を図—16に示す。図より小さな土粒子が減少したことが確認でき、比較的大きな土粒子だけを抽出可能とした。

(2) 画像解析結果と考察

2値化処理した画像から3次元構成した画像を用いて土粒子を選択し、粒子の中心座標を計測した。続いて各軸ひずみでの粒子の中心座標を計測した。これらの結果を用いて、粒子の3次元座標を求めることにより粒子移動の計測を行った。図—17は、(a) InitialからA点、(b) A点からB点、(c) B点からC点及び(d) C点からD点の4段階での3次元変位ベクトルである。

(a)InitialからA点の変位ベクトル図は、変位量から移動変位量は4mm以下であることがわかる。また、供試体上部の土粒子は下部に比べて、全体的に左側面に向かって移動していることがわかる。(b) A点からB点の変位ベクトル図からは、供試体上部の土粒子の移動は全体的に供試体の左側面に移動していたが、供試体の左上部に着目すると、土粒子が左側面方向から内部に向かって移動していることが確認できる。また、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。ここで、(c) B点から点Cの変位ベクトル図からは、(b)の段階に比べ、土粒子群を形成して、右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) C点からD点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右側面に向かって変位していることが確認できる。このことから、三軸圧縮下において土中内部の土粒子移動を3次元的に可視化し、土粒子の変位計測を行うことを可能とした。しかしながら、画像解析には時間を費やし、完全には自動化に至っていない。本解析においては、各段階で得られた粒子の座標を手動により計測している。よって、収縮処理ではすべての粒子を分割することができない。このことから粒子と背景を区別するためには、しきい値処理の前に画像処理フィルターを導入した画像処理手法の適用を行う必要があると考え、今後の課題と言える。

6. 結論

本論文ではX線CTと三軸圧縮試験を連動させ、人工的なマーカを用いることなく、土中の抽出した土粒子群の動きを追跡することにより三軸圧縮応力下における砂中の変位特性についての解明を試みた。

画像解析手法や実験結果の精度向上についての検討は今後とも必要であると考え、土中内部の土粒子移動を3次元的に可視化することにより、変位特性をある程度解明できたと考える。今後は、本手法を完成させることで、より精度の高い変位特性の解明を試みると共に、ひずみ量についての定量的考察についても行っていく所存である。

参考文献

- 1) Yamamoto, K. and Otani, J. (2001) *Microscopic observation on progressive failure on reinforced foundations*, Soils and Foundations, 40(2):pp.25-37.
- 2) Nielsen S.F., Poulsen H.F., Beckmann F., Thorning C. and Wert J.A. (2003), *Measurements of plastic displacement gradient components in three dimensions using marker particles and synchrotron X-ray absorption microtomography*, Acta Materialia 51, pp. 2407-2415.
- 3) Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y. (2000). *Application of X-ray CT Method for Characterization of Failure in Soils*, Soils and Foundations, 40 (2): pp.113-120.
- 4) Otani, J. and Obara, Y.(2003) *X-ray CT for Geomaterials* BALKEMA
- 5) Otani, J., Dang Pham, K. and Sano, J. (2006) *Investigation of failure patterns in sand due to laterally loaded pile using X-ray CT*, Soils and Foundations, Vol.46(4):pp.529-535.
- 6) 高野大樹、ファンダンホア、大谷順 (2006):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.
- 7) Matsushima T., Uesugi J., Nakano T. and Tsuchiyama A. (2006), *Visualization of grain motion inside a triaxial specimen by micro X-ray CT at Spring-8*, Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, ISTE Ltd, pp. 255-261.
- 8) Otani J., Mukunoki T., and Obara Y. (2002), *Characterization of failure in sand under triaxial compression using an industrial X-ray CT scanner*, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, pp.15-22.
- 9) 椋木俊文 (2001):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.
- 10) Takagi M., Shimoda H. (2004), *Handbook of Image Analysis [Revised Edition]* 東京大学出版会 pp. 1519-1522. (2007年4月12日 受付)