

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.56 No.3 September 2017

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

NATIONAL INSTITUTE OF MARITIME,
PORT AND AVIATION TECHNOLOGY

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 56 卷 第 3 号 (Vol. 56, No. 3) , 2017 年 9 月 (September 2017)

目 次 (CONTENTS)

1. 杭間地盤をセメント固化改良した組杭の横抵抗特性
..... 松村聡, 松原宗伸, 藤井愛彦, 水谷崇亮, 森川嘉之, 佐藤真 3
(Lateral resistance of coupled piles with its intermediate soil stabilized by cement treating method
..... Satoshi MATSUMURA, Takanobu MATSUBARA, Naruhiko FUJII,
Takaaki MIZUTANI, Yoshiyuki MORIKAWA, Makoto SATO)

2. 画像解析に基づいた粒状体材料の変形挙動の評価と数値再現手法の提案
..... 高野大樹 29
(Evaluation of Deformation Process of Granular Materials Based on Image Processing
and Development of Numerical Simulation Method
..... Daiki TAKANO)

3. 数値解析および模型実験によるレベル 1 地震動に対する胸壁の照査用震度算出手法の検討
..... 小濱英司, 府川裕史 49
(Numerical Analysis and Model Testing on a Method for Evaluation
of Coastal Parapet Levees' Seismic Coefficients for Level-1 Earthquakes
..... Eiji KOHAMA, Hirofumi FUKAWA)

画像解析に基づいた粒状体材料の変形挙動の評価と 数値再現手法の提案

高野 大樹*

要 旨

地盤工学において地盤の変形・破壊メカニズムを理解することは重要な研究課題である。港湾・空港施設において厳しい外力条件に対し、軟弱地盤、埋立地盤の液状化による流動、噴砂現象、安定処理地盤の変形・破壊挙動や速い流れと地盤の相互作用など複雑な現象が生じることが予測されている。これらの破壊に至るまでの変形プロセスを、境界値問題に置き換え数値解析で精緻に予測する方法が必要である。本報告では、土の粒子レベルでの挙動を評価しうる画像解析方法を開発し、砂を対象として、三軸圧縮下における変形・破壊挙動を試みた。実験では X 線 CT と全視野測定法を組み合わせた変形プロセスの新しい評価手法を開発し、その有用性を実証した。さらに、CT 画像解析から得られる地盤材料のミクロな情報を利用した FEM 解析手法を提案した。FEM 解析には粒状離散化手法を実装した PDS-FEM (Particle Discretization Scheme) を用い、メッシュのジオメトリの決定に三次元 CT 画像から得られる情報を用いた。解析結果は、一般的な砂の圧縮挙動を良く再現できており、簡易な破壊の表現手法を用いて複雑な粒状体の挙動を再現しうることを実証した。

キーワード：粒状体，砂，三軸圧縮試験，X 線 CT，画像解析，粒状離散化，有限要素法

* 地盤研究領域 地盤改良研究グループ 主任研究官
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5055 Fax：046-844-0618 E-mail：takano-d@pari.go.jp

Evaluation of Deformation Process of Granular Materials Based on Image Processing and Development of Numerical Simulation Method

Daiki TAKANO*

Synopsis

In geotechnical engineering, understanding the mechanisms of deformation and failure of granular materials is essential. For detailed analysis, both macro and microscale conditions should be considered; however, geotechnical analysis methods that can handle the microscale condition are not sufficiently developed. In experimental studies, quantitative evaluation of deformation and failure behavior from micro to macroscale can be achieved through full-field measurements of displacement and strain fields in soil specimens under load. In the present study, in-situ triaxial compression tests on sand that allow simultaneous loading and X-ray scanning were performed. In addition, 3D displacement and strain field analysis and 3D grain tracking were conducted based on X-ray CT data. A geotechnical analysis method that utilizes this method may be considered effective. Moreover, the author propose a finite element (FE) analysis method that considers the microscale condition of granular materials using X-ray CT data. The FE analysis is implemented with particle discretization, and both mesh size and geometry are determined from X-ray CT data. Particle Discretization Scheme (PDS)-FEM is used for numerical simulation of failure behavior. As a result of the numerical analysis, a series of results for the triaxial compression test on sand is discussed. Laboratory test results are compared with simulation results, and the validation of the proposed model is discussed.

Key Words: Granular materials, Sand, Triaxial compression test, X-ray tomography, Image analysis, Particle discretization, Finite element method

* Senior Researcher, Soil Stabilization Group, Geotechnical Engineering Department
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5055 Fax : +81-46-844-0618 E-mail : takano-d@pari.go.jp

目 次

要 旨	29
1. はじめに	33
2. X線CTの適用と画像解析手法の開発	33
2.1 X線CTの地盤材料への適用	33
2.2 画像解析手法の開発	34
3. 粒状体材料の変形挙動の評価 —三軸圧縮試験への適用—	37
3.1 実験概要	37
3.2 実験結果と考察	38
4. 粒状離散化有限要素法を用いた砂の三軸圧縮シミュレーション	43
4.1 解析法の概要	43
4.2 解析結果と考察	44
5. まとめ	45
謝辞	45
参考文献	45

1. はじめに

地盤工学において地盤の変形・破壊メカニズムを理解することは重要な研究課題である。港湾・空港施設において厳しい外力条件に対し、軟弱地盤、埋立地盤の液化による流動、噴砂現象、安定処理地盤の変形・破壊挙動や速い流れと地盤の相互作用など複雑な現象が生じることが予測されている。これらの破壊に至るまでの変形プロセスを、境界値問題に置き換え数値解析で精緻に予測する方法が必要である。また、港湾構造物の設計では性能設計への移行が進められているが、実験や調査、観測結果に基づき、物性のばらつき、破壊モードを適切に評価することで信頼性設計に基づく部分係数設計法の高度化が期待できる。

粒状体材料である土の塑性変形は、土粒子構造の変化に起因するものである。マクロスケールにおける地盤の大変形、破壊問題をミクロなスケールで観察されるメカニズムを用いて説明しようという研究が盛んに行われている^{1), 2), 3)}。土のミクロな挙動の解明を試みる実験的なアプローチでは、供試体の高解像度な3次元画像を取得可能な μ フォーカス型X線CTを適用する事例が多い。X線CTは被験体の内部構造を非破壊で可視化する装置であり、約20年前から地盤工学への適用が行われている^{4), 5), 6)}。近年は、CT撮影と載荷などの実験を同時に行うことが可能な実験装置が開発されており、3次元画像を時系列で取得することが可能となった。

近年は、砂粒子の運動を独立して評価する手法が多く用いられている^{7), 8)}。また、CT撮影と載荷などの実験を同時に行うことが可能となり、時系列の3Dイメージング(4D)での画像取得が可能となった。さらに、実験で得られる画像に対してDigital Image Correlation (DIC)などの全領域測定法を適用することで、三次元での物理量を計測することが可能となった^{9), 10)}。一方、土の変形解析法は有限要素法(FEM)が多く用いられる。しかし、FEMでは地盤の流動化や固化処理土の破壊後の挙動など不連続的な挙動は解析が困難となる。大変形や不連続的な変形が解析可能な手法としては個別要素法(Discrete Element Method: DEM)に代表される粒子法が近年多く適用されている。しかしながら、粒子法を用いた解析¹¹⁾ではデモンストレーション的に大変形挙動を示すに留まっており、さらなる検証が求められる。

本報告では、土の粒子レベルでの挙動を評価しうる画像解析方法を開発し、埋立材料として使用される粒度分布の良い砂などを対象として、三軸圧縮下における変形・破壊挙動を試みる。実験ではX線CTと全視野測定法を組み合わせた変形プロセスの新しい評価手法を開発し、その有用性を実証する。さらに、CT画像解析から得られる地盤材料のミクロな情報を利用したFEM解析手法を提案する。FEM解析には粒状離散化手法¹²⁾を実装

したPDS-FEM (Particle Discretization Scheme)を用い、メッシュのジオメトリの決定に三次元CT画像から得られる情報を用いる。解析結果は、一般的な砂の圧縮挙動を良く再現できており、簡易な破壊の表現手法を用いて複雑な粒状体の挙動を再現しうることを実証している。

2. X線CTの適用と画像解析手法の開発

2.1 X線CTの地盤材料への適用¹⁶⁾

X線CTの基本的な概念は逆解析である。つまり、X線を様々な角度から照射して得られる投影画像を用いて物体の内部の密度の違いや原子組成の違いを再構成する。この再構成画像により被験体の内部状況を非破壊かつ三次元で可視化することに最大の特徴を有する。現在、医療用、産業用、マイクロフォーカス型など様々なタイプのCT装置が開発されている。医療用のCT装置では、放射線被曝による人体への悪影響を考慮して、X線エネルギーを約100 keVと低く、照射時間を可能な限り短く制限しており、X線が被験体を透過しにくい条件となる。このため、短時間でX線の減衰を正確に測定するためにX線検出器の1素子のサイズが比較的大きくなる。よって、医療用のCT装置では、空間解像度が高いものでも数百 μm と限られている。これに対して産業用のCT装置では上記のような制限はなく、高エネルギーのX線や、長い照射時間での撮影が可能となり、検出器1素子当たりのサイズを小さくすることができる。これにより高い空間分解能を有する3次元画像を得ることが可能となる。しかしながら、医療用の装置と比べX線の照射時間が長くなり、時間分解能が低下する欠点も有する。近年は高エネルギーのX線を利用した産業用X線CT装置の他にも、数 μm から数百nmの空間分解能を持つマイクロ(ナノ)フォーカスX線CTも開発され、工業製品の非破壊検査や、地盤材料を含む種々の材料の力学特性などを解明する研究に用いられている。

X線CTの基本原理は投影画像を基に供試体の内部を再構成する逆解析である¹³⁾。供試体を様々な角度から撮影した複数のX線投影画像に代数的再構成法(algebraic reconstruction technique)や逆投影法(back projection principle)を用いることで¹³⁾、その断面画像を再構成する。さらに、これらの連続した複数の断面画像を重ね合わせることで供試体の三次元画像を得ることができる。具体的には、断面画像はX線の線減衰係数の空間分布に基づき再構成される¹⁴⁾。線減衰係数は、Beer-Lambertsの法則により一般に次式で表される。

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (1)$$

ここで、 I_0 および I はそれぞれ透過前のX線強度、透過後のX線強度、 x はX線の透過距離、 μ は物質の線減衰係数を表す。特に線減衰係数はX線エネルギーおよび物

質の密度と原子組成に依存する係数である。X線CTで一般に用いられるX線エネルギーと被検体では線減衰係数は以下の式で定義される。

$$\mu = \rho(a + bZ^{3.8} / E^{3.2}) \quad (2)$$

ここで、 ρ は被験体の密度、 Z は原子番号、 E はX線エネルギーを示す。 a および b は装置固有の定数である¹⁵⁾。線減衰係数の空間分布は多くのCT装置でしばしば以下の式を用いてCT値(もしくはHounsfield Unit)に換算される。

$$CT \text{ value} = k \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} \quad (3)$$

ここで μ_t は対象とする材料の線減衰係数、 μ_w は水の線減衰係数、 k は比例定数を表す。このCT値は、絶対値ではなく相対値であり、CT装置により変化し、また同じ装置でも撮影する物体によって異なる。図2.1は塩化ビニル製モールドに詰められた同一の砂供試体を対象とし、X線の起電圧を150, 200, 300 kVと変化させ撮影した画像のCT値ヒストグラムである¹⁶⁾。ヒストグラムからは、二つのピーク値が確認できるが、これは、それぞれ砂供試体および塩化ビニル製モールドを示す。また、起電圧の違いによりそれぞれのピーク値も異なる値を示している。

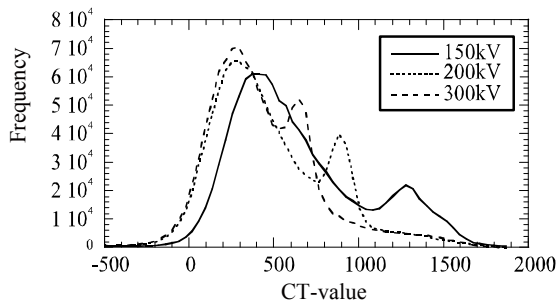


図 2.1 異なる起電圧による CT 値ヒストグラム

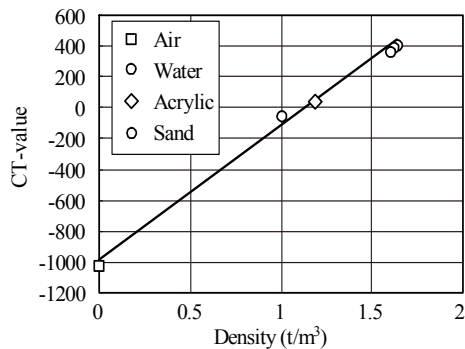


図 2.2 供試体密度と CT 値の関係

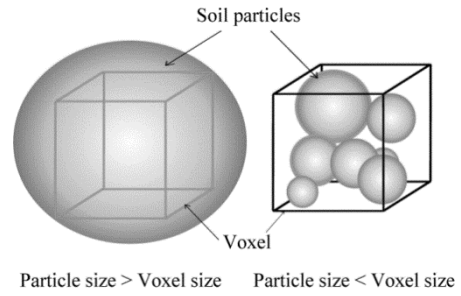


図 2.3 Partial Volume Effect (部分体積効果)

これは線減衰係数がX線のエネルギーにより変化すると共に、X線エネルギーが起電圧などにより変化するためである。図2.2は同一形状の供試体を、起電圧を一定として撮影した際の密度とCT値の関係を示したものである。これより密度とCT値は強い相関を示すことがわかる。CT画像を構成する画素は通常のデジタルカメラの画像などとは異なり厚さを有し、voxel(ボクセル)と呼ばれる。地盤材料をCT撮影した場合、土粒子の大きさは場合によって1voxelの大きさよりも小さくなり、図2.3に示すように1voxelの中に複数の土粒子が存在することが多々ある。このときのCT値はvoxel内に含まれる土粒子と間隙の密度を平均化した値に対応する。このような現象をPartial Volume Effect(部分体積効果)という¹⁷⁾。このため、CT値が土粒子自体の密度を示しているのか、マスとしての土の密度を示しているのかを粒子サイズと解像度から把握しておくことが重要となる。

2.2 画像解析手法の開発

固体力学における実験的な研究手法は、画像解析や光学的測定方法における近年の著しい発達により大きく進展している^{18), 19), 20), 21)}。その一つとして、Full-Field Measurement(全領域測定法)があげられる²²⁾。材料の力学特性を調べるにあたり通常用いられる計測方法は、供試体の境界部分に取り付けた変位計や圧力計などの変換器を用いて行われている。このような離散的な点での計測で評価される材料の力学的な応答は全体的な応答であり、供試体の平均的な特性を評価しているに過ぎない。このため地盤材料のような不均質な材料であり、ひずみの局所化など不均一な変形挙動を示す材料の力学特性を評価するためには離散的な計測ではなく、供試体全領域で変形、密度、温度などの物理量が測定可能な手法を適用することが有効となる。地盤材料に対する全領域測定法の適用は古くから試みられており、

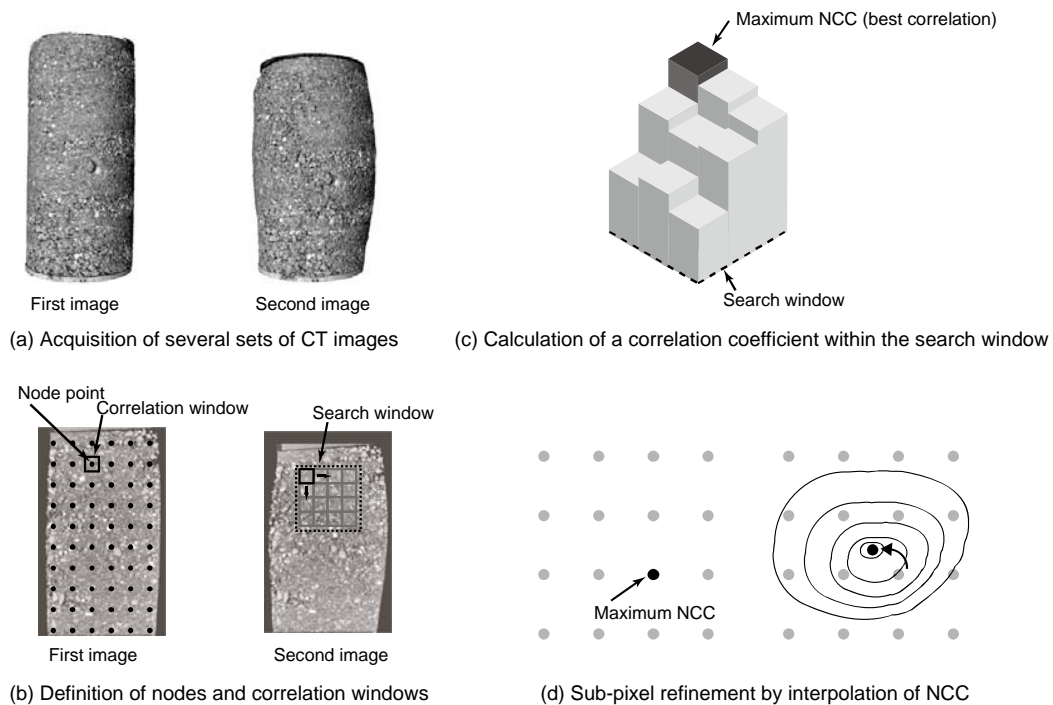


図 2.4 DIC 解析の手順

その例としては、地盤材料の全体を投影しマーカの移動や材料自体の密度変化を可視化するX線投影画像を用いた研究^{23), 24)}や、変形前後の供試体写真から視覚的に変形領域を同定する写真測量技術 (False Relief Stereophotogrammetry²⁵⁾) が挙げられる。X線CTも材料の内部を3次元的に可視化することができる全領域評価法の一つとして数えることができる。近年ではX線CTによる3次元イメージングと粒子追跡法 (Particle Tracking Velocimetry (PTV))^{26), 27), 28), 29)} や、デジタル画像相関法 (Digital Image Correlation(DIC))^{30), 31), 32), 33)}などの画像解析手法を組み合わせる事により、単なる画像の観察では得られない定量的な情報を画像解析より抽出する研究が多く行われている^{34), 35), 36), 37)}。

(1) DICによる変位場、ひずみ場の計測方法の開発
DICを用いた変位場の計測は過去20年間で盛んに用いられるようになった。地盤工学分野においても実験室レベルの模型実験で変形のプロセスを可視化するために用いられている³⁸⁾。DICは2つのデジタル画像間の空間変換を求める数学的手法である。実際の解析では、デジタル画像を小さな領域に分割し各領域を追跡し画像全領域の変位を算出する。この処理は、画像中に現れる材料自

体の構造や細かいテクスチャを追跡するため、マーカなど異物を供試体や模型地盤に挿入する必要がなく、マニュアルでの変位補正等も必要としない。本報告で開発したDIC手法は、Hall³³⁾が提案した方法を参考にした。開発した手法は、3次元画像を対象とし、表面だけでなく内部の空間変位場を求めることが可能である。図2.4は具体的なDICによる変位解析の手順を示す。解析は以下の手順に従う。

- 1) 変形前, 変形後のデジタル画像を取得する。(図-2.4(a))
- 2) 変形前の画像中に節点群を定義する。(図-2.4(b))
- 3) 各節点を中心に相関窓を定義する。(図-2.4(b))
- 4) 変形後の画像で相関窓を検索領域内で1画素ずつ移動させながら、検索領域内の全画素における相関係数を算定する。(図-2.4(c))
- 5) 相関が最も高い位置を移動後の領域と同定する。ここで画素単位(整数値)の移動量が求まる。(図-2.4(c))
- 6) 5)で得られた画素単位での移動量に対してサブピクセル補正を行う。サブピクセル補正とは、画素単位以下の分解能で移動量を補正する手法であり、実数での変位分布を求めることが可能となる。(図-2.4(d))

7) 得られた変位場を基にひずみ場を求める。
サブピクセル補正には、相関係数の分布を補完することで最大値をとる座標を補正した。相関係数は式(4)より算出した。

$$NCC(u, v, w) = \frac{\sum_{x,y,z} (I_1(x, y, z) + I_2(x + u, y + v, z + w))^2}{\sum_{x,y,z} (I_1(x, y, z)^2 + I_2(x + u, y + v, z + w)^2)} - 1$$

..... (4)

ここで、 $NCC(u, v, w)$ は正規化した相関係数、 I_1 および I_2 は変形前後におけるCT画像の輝度値、 (x, y, z) は最初の画像に設定した節点群の座標、 (u, v, w) は第1画像-第2の画像間の各節点の変位量を示す。 NCC の値は-1から1の値を取り、1の場合両画像中の相関窓内の輝度パターンが完全に一致したことを示す。

以上のように、DICは対象物の変位や変形をデジタル画像の微小領域の相関から求める手法であり、多くはデジタルカメラによって撮影された2次元画像に対して適用される。しかし、解析対象となる画像がCT画像のように3次元であれば、3次元的な変形挙動を解析することが可能となる。解析結果の精度や、解像度は様々な要因

によってもたらされる。精度は元となる画像の濃淡コントラストや、これに含まれるノイズなどのエラー、相関係数を求めるアルゴリズムによって左右される。解像度に関しては、当然ながら、元となる画像の解像度が高いほど解析結果もより高解像度となるが、節点群の配置によっても解像度が異なる。また、相関窓の大きさにより解析精度が異なるため、原画像の解像度や、画像の質によって相関窓の大きさを調整する必要がある。

(2) 粒子追跡法の開発

CT画像内の全粒子の運動を追跡するためには、CT画像に表示されている粒子をすべて独立して識別(セグメンテーション)する必要がある。今回行ったCT画像からの個別粒子のセグメンテーション手法について示す。はじめにノイズやカップリングなどアーティファクト除去

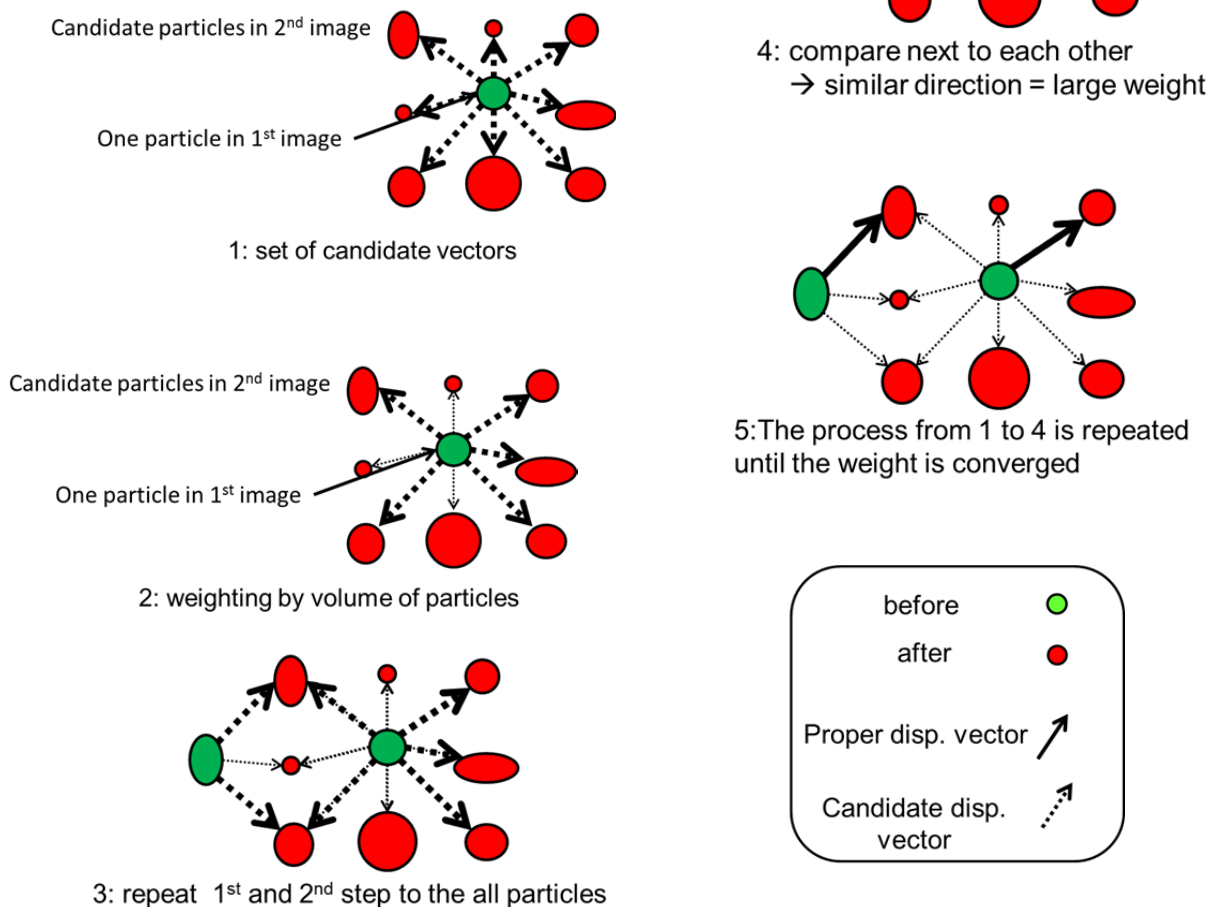


図 2.5 弛緩法による粒子追跡の手順

のために Subtract Back Ground 処理と 3D MedianFilter を適用した。次に、粒子と間隙を区別するために Local Threshold による二値化処理を行った。次に、Morphological Opening Filter を用いて粒子のコア部分と考えられる画像を取り出し、3D Watershed 処理で接触しているコア粒子を分離した。今回のように接触した粒子の移動追跡には接触粒子のセグメンテーションを精度よく行うことが非常に重要である。

特に今回の手順で効果的であったのは 3D Watershed によるセグメンテーションを精度よく行うための前処理として、粒子のコア部分に近いと考えられる領域を Morphological Opening Filter を用いて抽出した点である。この処理により 3DWatershed の過分割を抑制することができた。

セグメンテーションされた個別粒子からは粒子一つ一つの重心座標、体積、表面積、平均半径などの情報を抽出することができる。続いて、抽出された全粒子の情報から変位ステップ間の粒子同定を行う。粒子の同定には参考文献 8)を参考に弛緩法を用いた。弛緩法の概要を説明する。

- 1) 各粒子が移動する領域内のすべての粒子重心座標を検索し候補ベクトルとする (図 2.5-1)。そのため一つの粒子には複数の候補ベクトルが存在することになる。
- 2) この候補ベクトルには、各粒子重心座標を持つ体積、表面積、平均半径などの数値情報と比較してその候補ベクトルの確からしさの指標として確率が付与される (図 2.5-2)。以上の処理を 3 次元画像内すべての粒子に適用する (図 2.5-3)。
- 3) 次に、一定領域内の近傍の他粒子が持つ候補ベクトルを検索して比較し、似た方向を持つ候補ベクトルが存在する場合はその候補ベクトルの確立が上がり、そうでない場合には確率が下がるという計算を複数回行う (図 2.5-4)。
- 4) この結果、特定の候補ベクトルの確立が上昇して収束する (図 2.5-5)。

つまり、移動粒子の周囲には似た動きをする粒子が存在するという仮定を元にして、集合体として整合が取れた (つじつまが合った) 移動ベクトルを見つけることができるというものである。同定された粒子はナンバリングされ、ステップ間粒子の空間移動量、回転量などの空間変位情報を計算し画像中の粒子 voxel に書き込みを行うことで個別粒子の空間的な移動量を把握できる画像となる。

3. 粒状体材料の変形挙動の評価—三軸圧縮試験への適用—

3.1 実験概要

開発した画像解析方法を適用して粒状体の変形挙動を評価するために三軸圧縮試験への適用を行った。実施した三軸圧縮試験は、圧密排水条件とし、2 種類の砂を対象とした。三軸圧縮試験装置は CT 装置の回転テーブル上に設置することが可能であり、すべての実験プロセスは CT 装置内で実施された。図 3.1 は使用した CT 装置の外観である。

今回の実験で使用した粒状体材料は、比較的粒度が揃った相馬珪砂 2 号と粒度分布が広い山砂を用いた。山砂は、実際の沿岸域の埋め立て材料として使用されている材料である。図 3.2 に山砂の粒度分布、表 3.1 に相馬珪砂 2 号および山砂の物理量を示す。三軸圧縮試験における供試体サイズは、山砂が $\phi 50 \text{ mm} \times \text{H}100 \text{ mm}$ 、相馬珪砂が $\phi 35 \text{ mm} \times \text{H}80 \text{ mm}$ とした。相馬珪砂における実験では、全粒子追跡法の適用を目的としたため、CT 画像内ですべての粒子が識別できるように、粒径が大きくばらつきの少ない砂を選択した。実際の建設現場において使用される埋込材などの地盤材料は、山砂のように粒度分布が広い材料が使用される。このような材料を対象として CT による可視化実験を行った場合、土粒子の中には画像の解像度よりも小さいサイズの粒子が多数含まれていることが想定される。今回の実験では、このように、すべての粒子を可視化、識別不可能な材料に対して定量的な変形プロセスの評価が可能かを調べるために山砂を用いた。

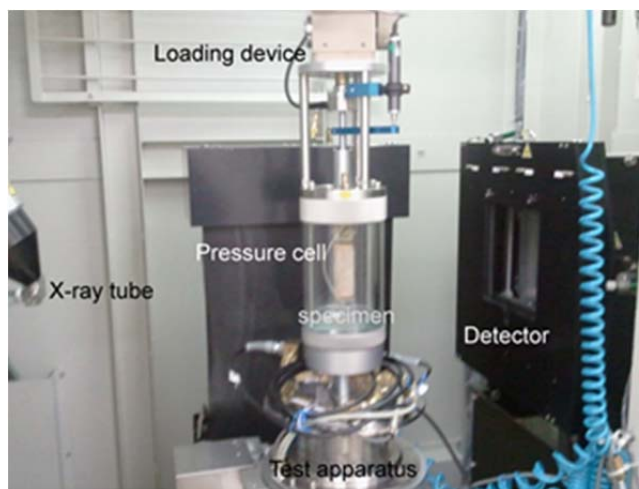


図 3.1 X 線 CT 用三軸圧縮試験の外観

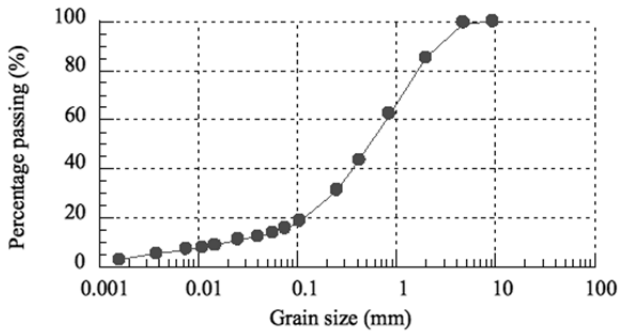


図 3.2 山砂の粒度分布

表 3.1 使用した材料の物理量

	Soma Sand #2	Yamazuna Sand
Specific gravity, G_s	2.65	2.695
Median particle size, D_{50}	1.89 mm	0.54
Goeffficient of uniformity, U_c	1.5	54.2
Max. void ratio, e_{max}	1.115	1.146
Min. Void ratio, e_{min}	0.710	0.669

表 3.2 実験条件

	Soma sand #2	Yamazuna Sand
Drainage condition	Drained	Drained
Relative density (%)	50 % and 90 %	90 %
Confining pressure (kPa)	150 kPa	50 kPa and 150 kPa
Saturation condition	Air dried	Air dried

表 3.2 に実験条件を示す。相馬珪砂の実験では供試体密度をパラメータとし、相対密度 50%および 90%の供試体を対象とした。拘束圧は 150kPa で一定とした。山砂の実験では、供試体密度を 90%で一定とし、拘束圧を 50kPa, 150kPa とした。供試体の作製方法は、供試体を 5 層に分けて、所定の量の材料を所定の高さになるまで突き固める方法で作成した。すべての実験は気乾状態において行われた。

3.2 実験結果と考察

(1) 山砂を対象とした実験結果⁴⁰⁾

図 3.3 は異なる拘束圧下で行った三軸圧縮試験における軸差応力-軸ひずみ関係である。図中の initial, A~D および 1~4 は供試体の CT 撮影を行った変位レベルを示している。CT 撮影は荷重を一時的に中断し、荷重軸を固定して行った。どちらの曲線も、軸ひずみ 7%程度でピークを示し、後にひずみ軟化を示している。一般的な密な砂の挙動を示すことが確認できる。また、CT 撮影のための荷重中断による応力緩和が生じている。本実験は、気乾燥状態において荷重を行ったために、間隙流体の移動から体積変化を直接計測することが出来なかった。

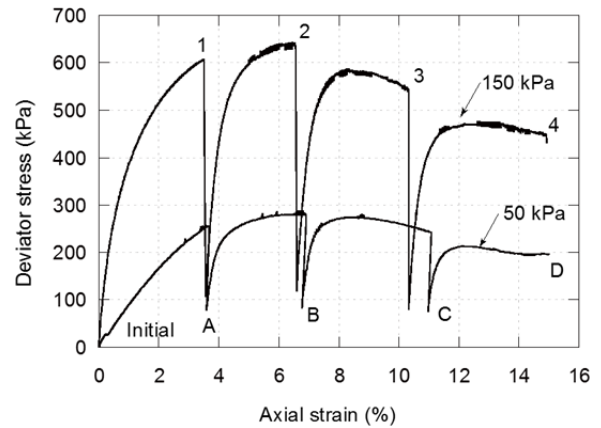


図 3.3 山砂供試体の三軸圧縮挙動

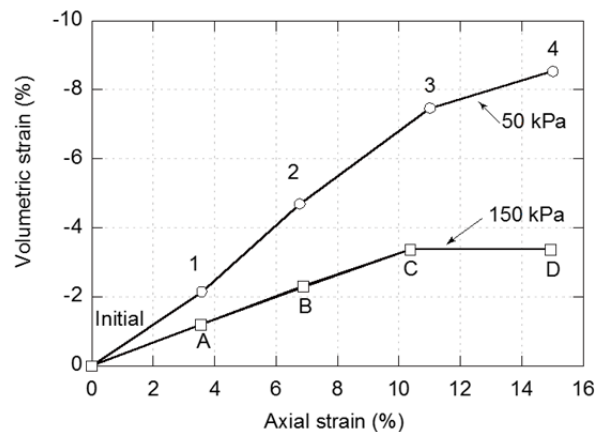


図 3.4 CT 画像から求めた体積ひずみ-軸ひずみ関係

しかし、CT 画像中のメンブレン内側の砂部分に相当する画素を積分することで CT 撮影を行った軸ひずみでの供試体の体積を算出することが出来る。図 3.4 は画素の積分より得られた体積を基にして算出した体積ひずみと軸ひずみの関係である。ここでは、圧縮を正とした。ど

これらの供試体も荷重を通して膨張を示していることがわかる。一般的な三軸試験で計測される荷重初期段階での体積収縮は今回の計算精度では観察されなかった。CT撮影を密に行うことでより詳細な挙動を画像解析より観察することが可能となると考えられる。

図 3.5 は拘束圧 50kPa での供試体の 3 次元再構成画像である。供試体の上端から鉛直下方向に向けて荷重を行った。実験の最終段階で (図 3.5 中の D) 外観にせん断面が形成されていることがわかる。図 3.6 は、3 次元画像を供試体中心部でスライスした画像である。鉛直断面は、最終的に形成されるせん断面に直行するように作成した。CT 画像中で、暗色は低密度、明色は高密度を示す。山砂の CT 画像中には、空隙のみに相当する画素 (黒色の部分) と、土粒子のみに相当する画素 (白色の部分)、パーシャルボリュームエフェクトにより土粒子と空隙が混在した画素 (灰色) が存在することがわかる。比較的粒径が小さい粒子により形成されたマトリックスの中に大きい粒子が混在している状況を確認できる。図 3.6(a)および(b)からわかるように、両供試体で荷重に伴い供試体が樽型に変形していることがわかる。50kPa の Initial 時の鉛直 CT 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、応力ピーク時の Level B の鉛直 CT 断面画像を見ると、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、Level C においては左上部から中心部を通り右下部まで帯状の低密度領域が発生しており、加えて、右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 Level D において左上から右下に広がる低密度領域帯が体積変化とともにより顕著に現れることが確認できる。150kPa においても、50kPa と同様に、応力ピーク前に供試体内部で低密度領域が確認され、供試体左上部から右下部方向に傾いた帯状の低密度領域が発達していることが確認できる。これより、最も顕著な密度変化は、供試体の周面ではなく内部から始まることが確認でき、ここから外部へと密度が変化する領域が帯状に伸びて供試体を貫くと同時にひずみ軟化が始まる。その後、供試体を貫いた帯状の領域にのみ変形が集中するようになり、せん断帯を形成している。図 3.7 は、第 2 章において示した粒子追跡法を本実験結果 (50kPa) へ適用した結果である。先に述べたように、山砂は広い粒度分を持つため、今回撮影した CT 画像からすべての粒子を抽出することは不可能である。そこで、粒径がボクセルサイズより大きい (画像中に白く表示されている) 粒子のみを抽出し、粒子追

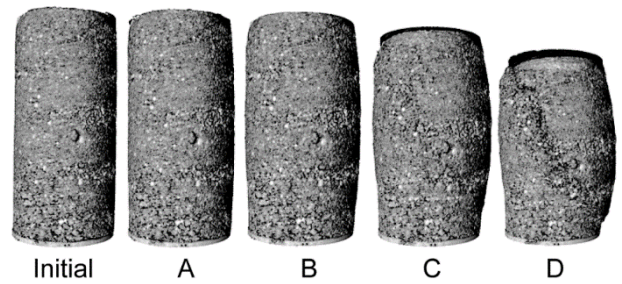


図 3.5 三軸試験中における供試体の三次元画像

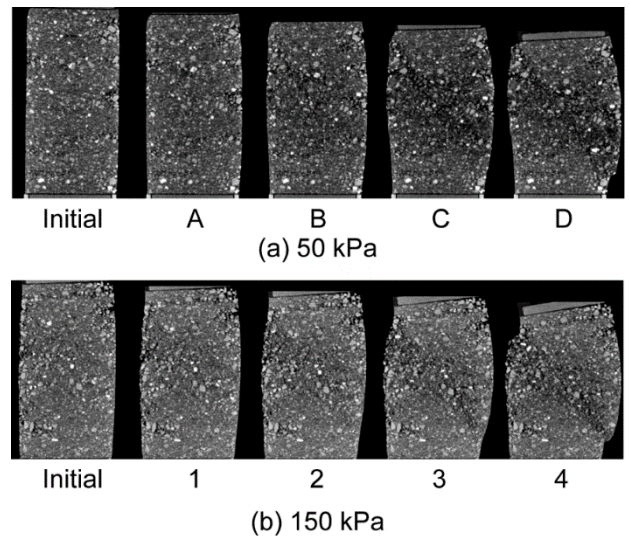


図 3.6 供試体の鉛直断面画像

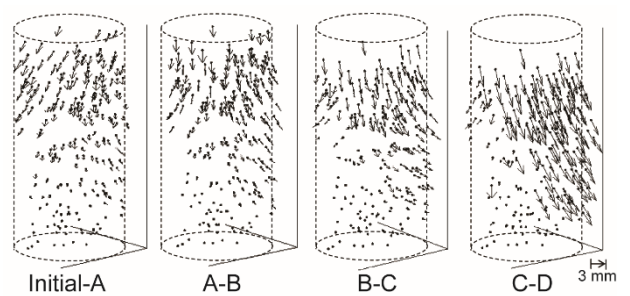


図 3.7 抽出した粒子の移動ベクトル (50kPa)

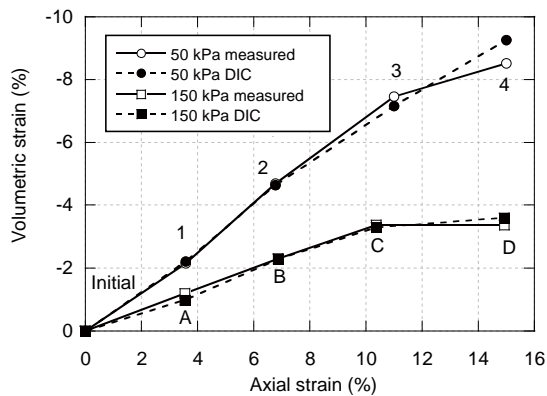


図 3.8 CT 画像から求めた体積ひずみと DIC から求めた体積ひずみの比較

跡を行った。

図 3.7 は、抽出した土粒子の移動ベクトルを示している。これより、供試体が均一に変形し、次第に局所が生じていく過程が確認できる。このように、代表的な粒子の移動を追跡した結果からは、供試体の全体的な変形傾向を把握することが可能となる。土の破壊メカニズムをより詳細に検討するためには、変位場およびひずみ場から局所化現象のメカニズムを読み解くことが大変重要となる。これらを達成するためには、供試体のサイズをより小さくすることと、高解像度の X 線検出器を使用することが必要となる。しかしながら、供試体サイズを小さくすると、その応答が広い粒度分布を持つ土を代表するかが不明確となる。パターンマッチングの一つである DIC 解析は詳細な変形の解析のために開発された。図 3.6 に示すように、山砂の CT 画像は、様々な粒子で構成される豊富なコントラストを有するため、DIC 解析では詳細な変形解析が可能となると考えられる。

山砂の 3 次元 CT 画像を、軸載荷時の供試体内部の変位増分、ひずみ増分を算出するために三次元体積画像相関法(3D volumetric DIC)を用いて解析した。図 3.8 は図 3.4 で示した CT 画像から算出した体積ひずみと DIC より算出した体積ひずみの比較である。DIC より算出した体積ひずみは、供試体内の各ボクセルの体積ひずみの平均値である。DIC 解析の結果は、軸ひずみ 15% の段階で若干過小評価するものの、画像から算出した体積ひずみとほぼ同じ値を示しており、DIC 解析の妥当性が確認された。最終段階で現れた体積変化の過小評価は、パターンマッチングのエラーによるものと考えられる。言い換えれば、実験の最終段階では、せん断面内に局所化した変形により、土粒子のマトリクスが大きく乱されたためにパターンマッチングの精度が局所的に低下したためと考えられ

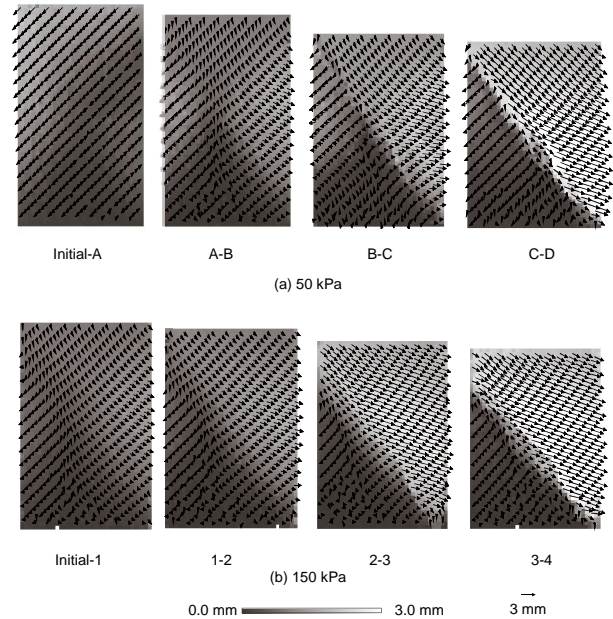


図 3.9 3D-VDIC より算出した鉛直断面上の変位ベクトル分布

る。このため、せん断面内の一部分では、相関係数が著しく低下する部分が確認された。この現象は、局所化と共に、3 次元取得の間隔を狭く設定することである程度低減できるものと考えられる。図 3.9 は 3D-VDIC によって算出した鉛直断面上の変位増分ベクトル分布である。鉛直断面は、図 3.6 に示した断面とはほぼ同じ位置を示している。両ケースにおいて軸載荷の進展と共に供試体は 2 つのパーツに別れていくことがわかる。また、2 つのパーツの境界部分は、載荷に伴いより鮮明に発達している。図 3.7 で示した粒子追跡では、得られる 3 次元変位量が離散的であるのに対し、図 3.9 の 3D-DIC の適用結果では、なめらかで、連続的な分布が得られている。よって、この変位分布に基づき、各ひずみ量を連続体力学的なアプローチ手法（具体的には、FEM の変位とひずみを関係付ける B マトリクスを用いることで得られる）から算出することが可能である。

図 3.10 に得られた最大せん断ひずみ分布を示す。発達した局所化領域は点線で強調されている。両ケースとも、ピーク後に幅広い局所化領域が形成され、残留状態に至るに従い供試体の変形が次第に局所化していき、複数あったせん断帯が次第に一つの領域に集中していくことがわかる。また、150kPa のケースでも全体の変形プロセスは同じだが、initial-1 の画像で、水平方向に広がる複数のせん断ひずみが卓越した帯状の領域が確認できる。供試体作成方法として、供試体高さを 5 層に分け突き固める方法を適用したが、これらの帯状の領域は突固めの境界

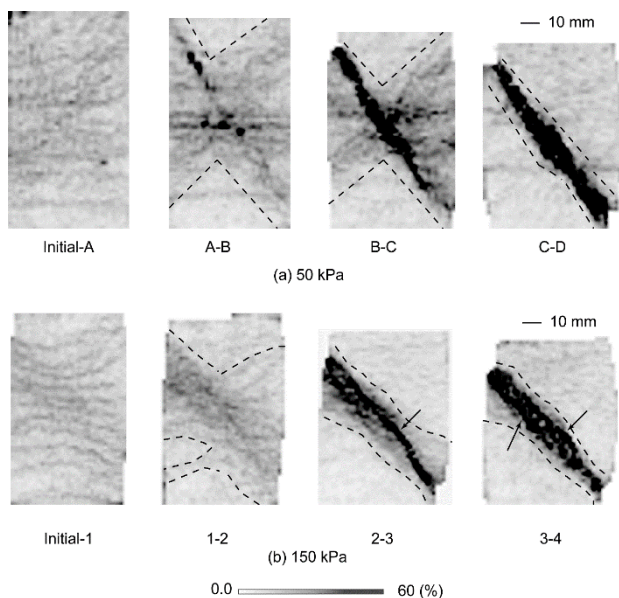


図 3.10 最大せん断ひずみの分布

とは明らかに位置、数ともに異なっており、突固めの影響であるとは考えがたい。よって、ピーク前後で異なる局所化のモードが発生することが考えられる。また、最終的に形成されたせん断帯の幅は、50kPaで10.9mm (D_{50} の21倍)、150kPaで16.8mm (D_{50} の30倍)であった。これは、粒径の揃った砂において観察されるせん断帯の幅より大きい(一般的には10倍程度とされる)これは、今回使用した材料が様々な粒径の粒子を含むことが原因の一つであると考えられる。つまり粒径の幅が広いために、一つの粒子が他の粒子に対して有する接触点の数が多くなり、内部構造が発達しやすい状況であったと推測される。

図3.11は体積ひずみの分布である。明色は体積膨張を、暗色は体積収縮を示す。体積変化はせん断ひずみが卓越した領域で生じている。また、せん断帯内部では主に体積膨張が卓越しているが、部分的には体積収縮を示しており、複雑な破壊面を形成している。これは、粒状体材料特有の破壊モードであり、いわゆるせん断帯内部において粒子同士の乗り上げや、落ち込みにより生じていると推察できる。また、150kPaのInitial-1の結果では、せん断ひずみ分布と同様に水平方向に伸びる複数の帯が確認でき、主に圧縮を示していることがわかる。

DIC解析結果はCT画像を直接観察することでは得られない定量的なデータを得ることが可能なことを示している。

(2) 相馬珪砂を対象とした実験結果

相馬珪砂2号での実験では、全部で21セットの3次

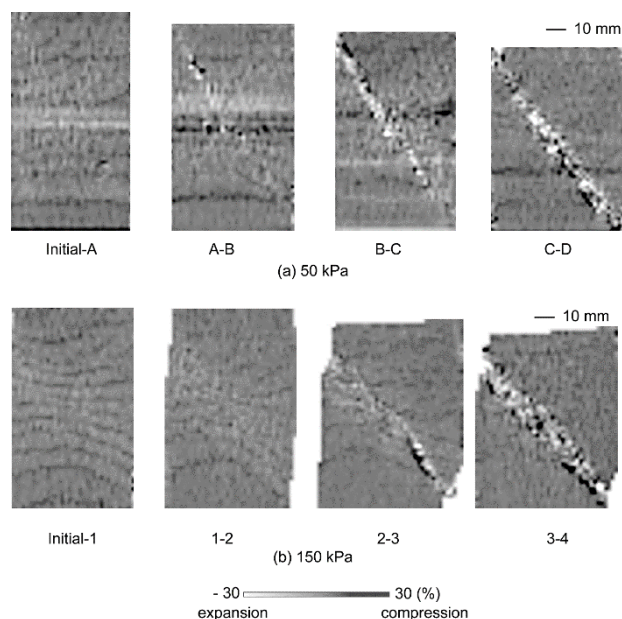


図 3.11 体積ひずみの分布

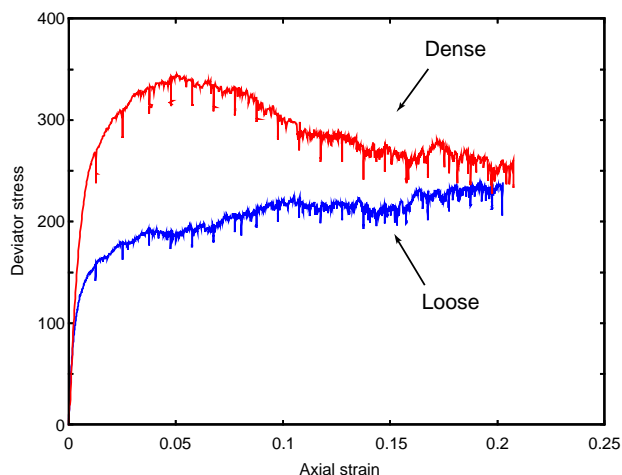


図 3.12 三軸圧縮条件下における相馬珪砂の力学応答

元画像を得た。図3.12は実験から得られた軸差応力および体積ひずみ-軸ひずみ関係である。密な供試体ではピークがはっきりと確認できるのに対し、緩い供試体では明確なピークを示すことなく残留応力に至っている。図3.13は密な供試体の軸差応力-軸ひずみ関係と体積ひずみの関係を示す。CT撮影は図3.13中のA~Hで示す軸ひずみで実施している。体積ひずみはDIC解析より求めた。全体を通して供試体は膨張傾向にあることがわかる。

図3.14は供試体のCT鉛直断面画像である。図3.6の山砂とは異なり、すべての粒子が目視で確認できる。図3.15は図3.14の画像に対しDIC解析を行った結果としての最大せん断ひずみの分布である。密な供試体では、軸ひずみの進展とともに明確な局所化領域が形成されるのに対し、緩い供試体では中心部にせん断ひずみが集中す

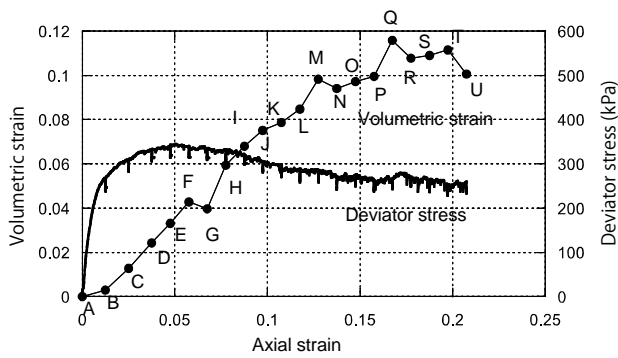


図 3.13 密供試体での体積ひずみ-軸ひずみ関係

るものの、はっきりとしたすべり面は確認できない。

図 3.14 の CT 画像で識別・抽出された 1 供試体内の砂粒子の総数は約 9360 個であった。そのうち各ステップ間で同定された粒子は 9000 個程度となり、粒子追跡の精度は 96%以上と高いことが確認された。図 3.16 は CT 画像中の各同定粒子に任意の関心情報を付与したものである。重心位置から計算された各粒子の空間移動量をカラーコンターで表示した各ひずみレベル間での供試体鉛直断面画像である。この画像から载荷初期のステップ A から B においてはまだひずみの局所化は生じておらず、一次元圧縮に近い変位状態であることが観察される。また、ピーク強度付近において供試体端部にはコーン状の一体化挙動を示す領域が形成され、供試体中央部の水平変形が卓越し始める。ピーク後は供試体両端のコーン状領域の傾斜部が接続してクロスするせん断面の候補部分が発達し、褶曲状態として左上から右下に向かうせん断面を形成したと考えられる。このように個別の粒子を追跡することで一連の変形プロセスのなかでマイクロな変位情報を集めることなどが可能になった。また、本手法のもう一つの利点は、その計算コストの低さである。DIC 解析が計算用のワークステーションを用いて 1 ステップ数日を要するのに対し、3D 粒子追跡では数分の単位で計算が終了する。

以上より、DIC および粒子追跡法を用いて、粒状体材料の変形挙動がマイクロなスケールで定量的に評価することが可能となった。地盤材料は土粒子と間隙流体と間隙空気の多層混合材料であるため、それぞれの相互作用が地盤材料の変形挙動に大きく影響を及ぼす。したがって、今回開発した手法のように、土粒子の構造変化を明らかにするためには地盤材料の変形メカニズムを知りモデル化することが重要である。

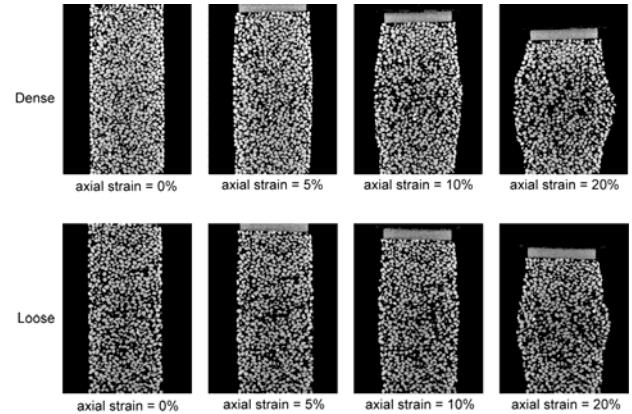


図 3.14 三軸圧縮条件下の相馬珪砂の鉛直断面

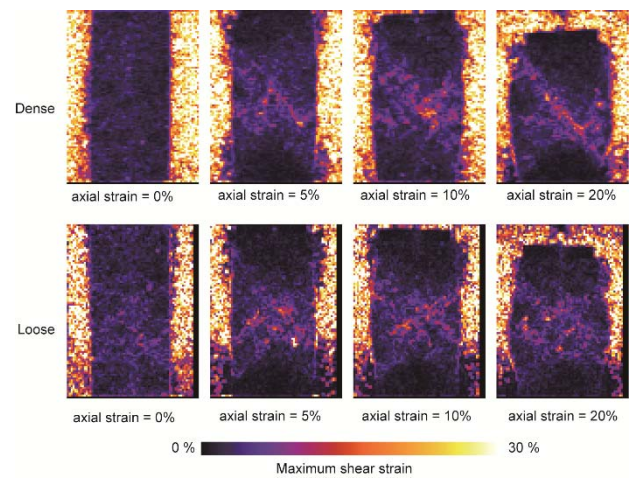


図 3.15 DIC 解析の適用結果（最大せん断ひずみ分布）

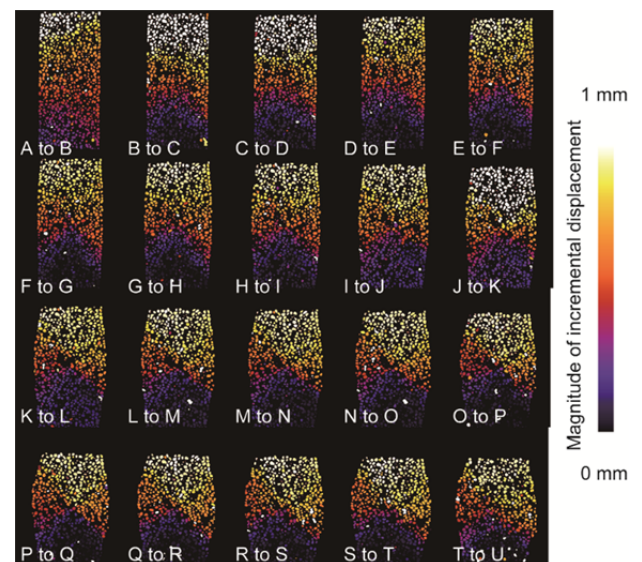


図 3.16 CT 画像中の同定粒子に任意の関心情報を付与した例（粒子の空間移動量）

4. 粒状離散化有限要素法を用いた砂の三軸圧縮シミュレーション⁴¹⁾

第3章までに示したように、材料の可視化技術の発展に伴い、粒状体供試体内部の間隙の分布や局所的な変形挙動を3次元的に観察・評価することが可能となった。このような実際の供試体から得られる粒状体の内部構造を初期条件として全体の変形・破壊挙動を予測するための研究はあまり行われていない。本報では粒状体材料の変形挙動をシミュレートするための解析法を提案する。再現対象としたのは、3章で示した相馬珪砂2号の三軸圧縮結果である。提案する手法は、粒状離散化手法を用いた有限要素法にX線CTから得られたミクロな間隙分布を初期条件として導入したものである。本手法の特徴として、少ない入力情報を用いて、ひずみ軟化や密度依存性などの粒状体の力学挙動をよく再現できることである。

4.1 解析法の概要

本研究では Hori らが提案している粒状離散化有限要素法 (Particle Discretization Scheme Finite Element Method (PDS-FEM))¹²⁾の有効性に着目し、それに粒状体の内部構造モデルを導入することで粒状体の力学挙動を再現する計算方法の確立を試みた。図4.1に示すようにPDS-FEMでは変位場を不連続で重なり合わない形状関数で離散化する。さらに応力場とひずみ場をポロノイ分割に双対なドロネイ分割領域で離散化する。PSD-FEMでは破壊をポロノイブロック境界に対して計算された要素間の相対変位や境界応力がしきい値を超えたら Δu_{ij} の算定に寄与する要素剛性行列の成分をゼロにすることで表現する。以上の計算法によってPDS-FEMは通常のFEMと同等の精度・局所性を保ちつつ不連続場の発生を伴う破壊を簡易に表現できる解析法である。宮田らは、PDS-FEMをセメント改良土の脆性的な破壊挙動の予測に適用しており、実験結果の再現に成功している。

本研究では、砂供試体の三軸圧縮試験のシミュレーションを行うために、PDS-FEMにDrucker-Pragerの関連流れ則による弾塑性構成則を導入した。図4.2に本研究で用いた破壊の表現方法を示す。圧縮破壊の判定には、ポロノイブロック境界で算定されるトラクションの応力比が一定のしきい値を超えた場合に破壊とした。表4.1に解析に用いた入力パラメータを示す。パラメータは、弾性係数、ポアソン比、内部摩擦角、粘着力と破壊に関するパラメータの α_1 、 α_2 である。また、解析の初期において図4.3に示すような応力を伝達しない初期不連続境界

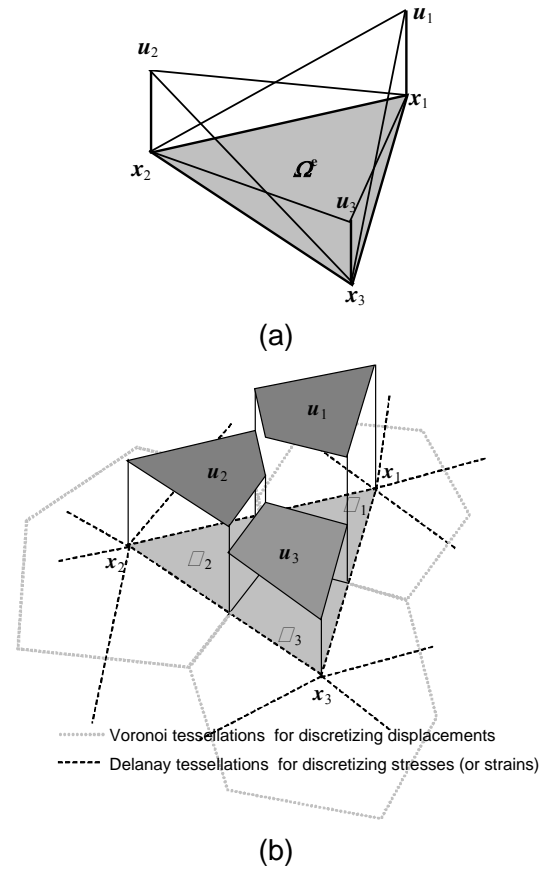


図4.1 通常のFEMとPDS-FEMにおける変位場の離散化の相違

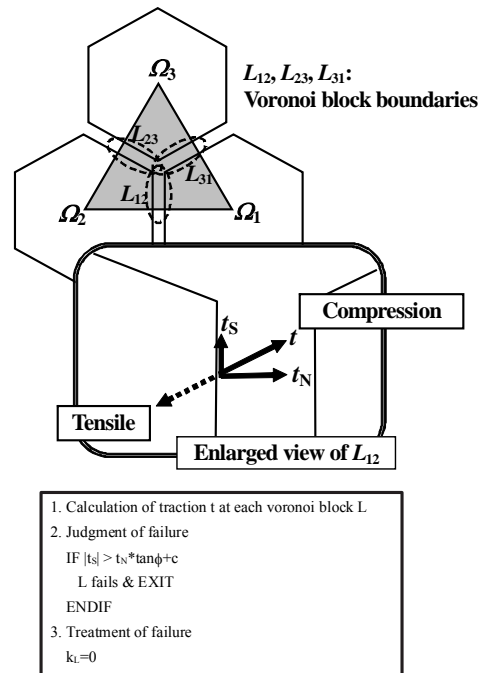


図4.2 破壊の表現方法

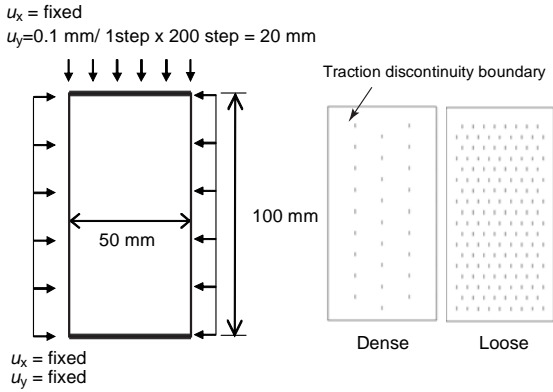


図 4.3 境界条件と初期不連続境界の分布

表 4.1 解析に用いた入力パラメータ

	Dense	Loose
Young's modulus, E	10 MPa	
Poisson's ratio, ν	0.33	
interparticle friction, ϕ	10 degrees	
interparticle cohesion, c	30 kPa	
Ratio of traction discontinuity boundary to all boundaries at initial condition	0.2	0.5
Confining pressure	150 kPa	

を解析メッシュ内に複数設けた。この初期不連続境界の数により供試体の初期密度を再現している。初期不連続境界の全体の要素数に対する割合は砂供試体の X 線 CT 画像より得られた間隙の割合より求めている。ただし、今回の解析ではその分布パターンについては均等配置とした。

4.2 解析結果と考察

計算から得られた応力ひずみ関係を図 4.4 に示す。密な供試体をモデル化したケースでは軸ひずみに伴い軸差応力が直線的に増加した後ピークに達する。ピーク後はひずみの増加に従い応力は軟化し、残留応力に達している。一方、緩い供試体をモデル化したケースでは、载荷の初期段階における軸差応力の直線的な増加は密なモデルと同様であるが、明確なピークは現れなかった。残留応力は密なモデルとほぼ同程度の応力に収束している。図 4.5、最大せん断ひずみの分布を示す。载荷の初期段階では均等に変形し、ピーク付近から局所化が始まるのは両モデルで共通に観察できる。最終的にはせん断変形が局所化するが、緩いモデルのほうで広く分布している。

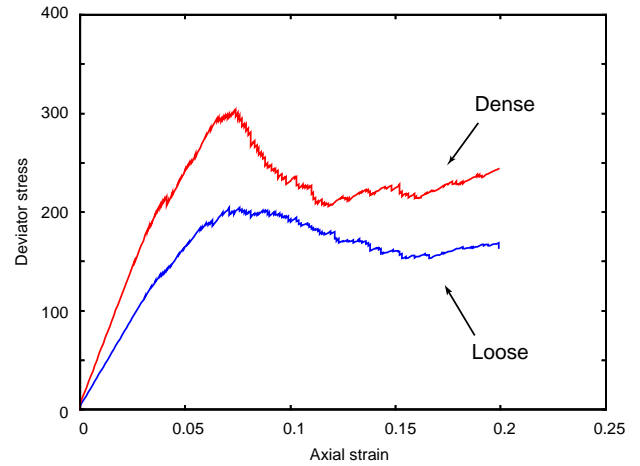


図 4.4 砂の三軸実験のシミュレーション結果

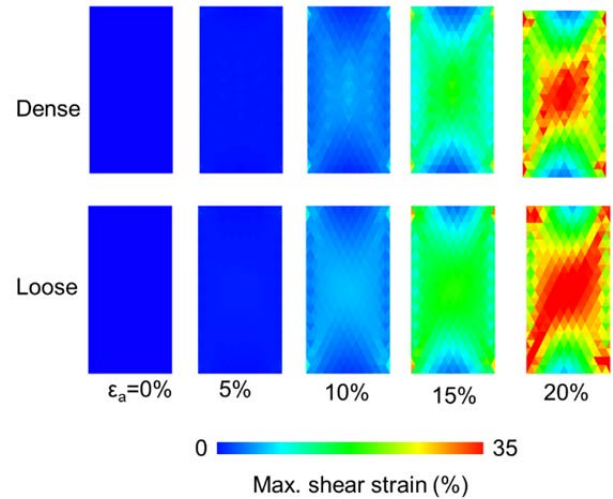


図 4.5 最大せん断ひずみの分布

以上より、本解析手法で一般的な砂の三軸圧縮挙動が再現可能であることがわかった。特に、ピーク強度を示す時の平均軸ひずみの大きさや、ピーク後の応力-ひずみ関係を表現するための直接的なパラメータは用いないところに本手法の特徴がある。

本章での目的は、最初に述べたように、粒状体材料の変形挙動を可視化実験から得られたマイクロな情報を利用してモデル化することである。今回対象とした材料は砂であったが、セメント改良土など境界条件によっては脆性的な挙動を示し、不連続面を形成するような変形モードを有する材料の挙動を再現することも可能である。また、港湾施設のように、砂や粘土といった地盤条件に改良地盤が構築されることや、間隙水の流れとの相互作用

を考えると、砂や粘土地盤を対象にした既存の解析法と今回示した有限要素法をカップリングで解くプログラム開発も必要である。

5. まとめ

本報告では、粒状体材料の不連続面の形成、流動問題など従来は計測、予測困難であった大変形問題を可視化、定量評価また予測再現しうる新たな計測・数値解析法を構築し、実験並びに実験の再現解析を通じて其の有用性を実証した。報告の内容は以下のようにまとめられる。

3次元画像解析法として、パターンマッチングによる変形解析と粒子追跡方法を示した。また、これらの手法とX線CTによる可視化手法を組み合わせることで、ミクロなスケールでの粒状体材料の複雑な変形挙動を定量的に評価しうることを示した。砂の三軸試験へ適用した結果、変形初期から終局的な破壊に至る一連のプロセスを粒子レベルで定量的に評価可能であることを示した。

粒状体材料の変形挙動においてピーク前後で局所化のモードが異なることを示した。ピーク後には傾きを持った膨張を伴うせん断帯が発生するのに対し、ピーク前には圧縮を伴う複数の局所化領域が確認された。

CT画像解析から得られる地盤材料のミクロな情報を利用したFEM解析手法を提案した。FEM解析には粒状離散化手法¹¹⁾を実装し、メッシュのジオメトリの決定に三次元CT画像から得られる情報を用いた。解析結果は、一般的な砂の圧縮挙動を良く再現できており、簡易な破壊の表現手法を用いて複雑な粒状体の挙動を予測しうることを実証した。

得られた知見と開発した解析手法は大変形を伴う地盤材料の破壊プロセスの合理的な評価・予測に大きく寄与しうるものであり、今後の適用・展開が期待される。

(2017年4月25日受付)

謝辞

本報告に記述した実験・解析の実施について、熊本大学大谷順教授、佐藤宇紘氏、防衛大学校宮田喜壽教授、Lund大学Stephen Hall博士、Bordeaux大学Nicolas Lenoir博士の指導・協力を得た。関係各位に記して謝意を表する。

参考文献

- 1) B. Baudet, M. Bolton (eds): Soil mechanics at the grain scale: issues 1 and 2, *Géotechnique*, Vol. 60, No. 5–6, 2010.
- 2) K. Soga, K. Kumar, G. Bisconti, M. Kuo (eds): Geomechanics from Micro to Macro, Proceedings of the TC105 ISSMGE International Symposium on Geomechanics From Micro to Macro, Vol. 1-2, CRC Press, 2014.
- 3) M. Jiang, F. Liu, M. Bolton (eds): Geomechanics and geotechnics: from micro to macro, IS-Shanghai 2010. CRC Press, 2010.
- 4) J. Desrues, R. Chambon, M. Mokuni, F. Mazerolle: Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography. *Géotechnique*, 46 (3): 529-546, 1996.
- 5) J. Otani, T. Mukunoki, Y. Obara: Characterization of failure in sand under triaxial compression using an industrial X-ray CT scanner. *International Journal of Physical Modeling in Geotechniques*, 2 (1): 15-22, 2002.
- 6) Alshibli, K.A., Sture, S., Costes, N.C., Frtanck, M.L., Lankton, M.R., Bastiste, S.N., Swanson, R.A.: Assessment of localized deformation in sand using X-ray computed tomography. *Geotechnical Testing Journal*, 23 (3): 274-299, 2000.
- 7) Hall SA, Bornert M, Desrues J, Pannier Y, Lenoir N, Viggiani G, Bésuelle P: Discrete and continuum experimental study of localised deformation in Hostun sand under triaxial compression using x-ray μ CT and 3D digital image correlation. *Géotechnique* Vol. 60, pp. 315–322, 2010.
- 8) Andò, E., Hall, S.A., Viggiani, G., Desrues, J. and Bésuelle, P.: Grain-scale experimental investigation of localized deformation in sand: a discrete particle tracking approach. *Acta Geotechnica*, 7, 1, 1-13, 2012.
- 9) Viggiani, G. and Hall, S.A.: Full-field measurements, a new tool for laboratory experimental geomechanics. 3 Fourth Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, IOS press, 3–26, 2008.
- 10) Higo, Y., Oka, F., Kimoto, S., Sanagawa, T., Matsushima, Y.: Study of strain localization and microstructural changes in partially saturated sand during triaxial tests using microfocus X-ray CT, *Soils and Foundations*, Vol. 51 No. 1, 2011.
- 11) A. Yerro, E.E. Alonso, N.M. Pinyol: The material point method for unsaturated soils, *Géotechnique* Vol. 65, pp. 201–217, 2015.
- 12) Hori, M., Oguni, K., Sakaguchi, H.: Proposal of FEM implemented with particle discretization for analysis of failure phenomena. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 53: 681–703, 2005.
- 13) A.C. Kak and M. Slaney: Principles of computed tomography Imaging, IEEE PRESS, 1988.
- 14) T. S. Curry, J. E. Dowdey and R. C. Murry: Christensen's physics of diagnostic radiology, Lea and Febiger, London, 1990.
- 15) Cormak, A. M.: Computed Tomography: Some History

- and Recent Developments, Proceedings of Symposia in applied Mathematics, Vol. 27, pp.35-42, 1982.
- 16) 高野大樹, 大谷順: X線CTによる地盤材料の可視化, 材料, Vol 62, No. 10, pp. 654-659, 2013.
 - 17) J. Otani, T. Mukunoki and K. Sugawara: Evaluation of Particle Crushing in Soils Using X-ray CT Data, Soils and Foundations, Vol. 45, No. 1, pp. 99-108, 2005.
 - 18) S. Sheppard, M.D. Mantle, A.J. Sederman, M.L. Johnson and L.F. Gladden "Magnetic resonance imaging study of complex fluid flow in porous media: flow patterns and quantitative saturation profiling of amphiphilic fracturing fluid displacement in sandstone cores" Magnetic Resonance Imaging, Vol. 21, pp. 365-367.
 - 19) C. Comina, C. Festa, S. Foti and G. Musso: Monitoring 3D diffusion processes with high-speed electric tomography, The Leading Edge, pp. 468-471, 2008.
 - 20) S.A. Hall, D. Hughes and S. Rowe: Local characterization of fluid flow in sandstone with localized deformation features through fast neutron imaging, Proceedings of 14th International Conference on Experimental Mechanics, Vol. 6, id.22008, 2010.
 - 21) B. Masschaele, M. Dierick, V. Cnudde, L. Van Hoorebeke, S. Delputte, A. Gildemeister, R. Gaehler and Hillenbach High-speed thermal neutron tomography for the visualization of water repellents, consolidants and water uptake in sand and lime stones, Radiation Physics and Chemistry, Vol. 71, pp. 807-808, 2004.
 - 22) F. Hild and H.D. Espinosa: Full field measurements and identification in Solid Mechanics, Special Issue of IUTAM Procedia, Vol. 4, pp. 1-226, 2012.
 - 23) K.H. Roscoe, J.R.F. Arthur and R.G. James: The determination of strains in soils by an x-ray method, Civ. Eng. Public Works Rev., Vol. 58, pp. 873-876 and 1009-1012, 1963.
 - 24) K.H. Roscoe: The influence of strains in soil mechanics, Géotechnique, Vol. 20, No.2, pp. 129-170, 1970.
 - 25) J. Desrues and G. Viggiani: Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 28, No. 4, pp. 279-321, 2004.
 - 26) R.J. Adrian: Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, Annual Review in Fluid Mechanics, Vol. 23, pp. 261-304, 1991.
 - 27) Matshushima, T., Uesugi, K., Nakano, T., Tsuchiyama, A.: Microstructural Quantification of Granular Assembly studied by Micro X-ray CT at Spring-8, Journal of Applied Mechanics: JSCE, Vol. 11, pp. 507-515, 2008.
 - 28) S.A. Hall, M. Bornert, J. Desrues, Y. Pannier, N. Lenoir, G. Viggiani and P. Besuelle: Discrete and continuum analysis of localized deformation in sand using X-ray micro CT and volumetric digital image correlation, Géotechnique, Vol. 60, pp. 315-322, 2010.
 - 29) Takano, D., Otani, J., Date, K., Yokota, Y., Nagatani, H.: Evaluation of Reinforcing Effect on Facebolts for Tunneling using X-ray CT and Centrifuge Model Test", Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C, Vol. 67, No. 1, pp. 107-118, 2011.
 - 30) P.J. Withers: Strain measurement by digital image correlation, Strain, Vol. 44, No.6, pp. 421-422, 2008.
 - 31) A. Rechenmacher, S. Abedi, O. Chupin: Evolution of force chains in shear band in sands, Géotechnique, Vol. 60, No. 5, pp.343-351.
 - 32) K.B. Bay: Methods and application of digital volume correlation, Journal of strain analysis, Vol. 42, pp. 745-760, 2008.
 - 33) S.A. Hall: A methodology for 7D warping and deformation monitoring using time-lapse seismic data, Geophysics, Vol. 71, 21-31, 2006.
 - 34) D. Muir Wood: Some observations of volumetric instabilities in soils, International Journal of Solids and Structures, Vol. 39, No. 13-14, pp. 3429-3449, 2002.
 - 35) M. Grediac: The use of full-field measurement methods in composite material characterization: interest and limitations, Composites: Part A, Vol. 35, pp. 751-761, 2004.
 - 36) J.J. Orteu: 3-D computer vision in experimental mechanics, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 47, No. 3-4, pp. 282-291, 2009.
 - 37) D. Takano, P. Besuelle, J. Desrues and S.A. Hall: Deformation in fractured argillaceous rock under seepage flow using X-ray CT and Digital Image Correlation", Advanced in Computed Tomography for Geomaterials, GeoX 2010, pp. 222-229, 2010.
 - 38) White, D.J., Take, W.A., Bolton, M.D.: Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry, Géotechnique, 53 (7). 619-631, 2003.
 - 39) 宮田喜壽, 重久伸一, 奥田聖章: ジオグリッドで補強された固化土の粒状離散化解析, 土木学会論文集 C, Vol. 63, No. 1, pp. 72-80, 2007.
 - 40) Daiki Takano, Nicolas Lenoir, Jun Otani and Stephen A. Hall: Localized deformation in a wide-grained sand under triaxial compression revealed by X-ray tomography and digital image correlation, Soils and Foundations, Vol. 55, No. 4, pp. 906-915, 2015.

- 41) D. Takano and Y. Miyata: FE modelling of sand with micro-characterization, Geomechanics from Micro to Macro, Proceedings of IS Cambridge 2014, pp. 765-770, 2014.

港湾空港技術研究所報告 第56巻第3号

2017.9

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2017) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。