

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：82707

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820219

研究課題名(和文) ミクロな土構造に着目した防波堤マウンドの破壊メカニズムの解明と設計法の高度化

研究課題名(英文) Investigation of failure mechanism of soil under seepage flow based on micro mechanism

研究代表者

高野 大樹 (Takano, Daiki)

独立行政法人港湾空港技術研究所・その他部局等・その他

研究者番号：80626218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、津波越流時や河川増水時に生じる大きな浸透流を受ける土構造物の破壊メカニズムの解明を最終的な目的とした。具体的には、粒子のサイズや形状、その配置に代表されるミクロな土の構造に着目し、マイクロフォーカスX線CTを用いて大きな浸透流を受ける地盤の破壊過程を可視化し、定量的に評価した。また、実験より得られた土のミクロな情報を利用し、土全体の力学挙動を再現できる数値破壊シミュレーションの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Micro characterization such as grain movement or strain localization in sandy soil is investigated using micro X-ray tomography. Moreover, failure of soil under seepage flow is visualized and evaluated in 3D using tomography images. Finite element (FE) modeling of sand with microcharacterization is discussed in this research. The proposed FE method is implemented with particle discretization whose mesh size and geometry is determined from X-ray CT data. In this study, a series of results of triaxial compression tests on sand are discussed. Laboratory test results are compared with simulation results, and the validation of the proposed model is discussed.

研究分野：地盤工学

キーワード：浸透 PDS-FEM 粒状体 マイクロX線CT 可視化 浸食

1. 研究開始当初の背景

臨海地帯に産業が集中する我が国において、護岸や防波堤などの港湾構造物の研究は、社会基盤整備政策の中でも中心的な位置に存在してきた。これに対し、2011年に起こった東日本大震災では、多くの港湾施設において多大な被害が確認された。写真1は転倒した防波堤の写真である。これらの被害の多くは長周期の地震動によって生じた斜面の崩壊や液状化などに代表される地盤の被害に加え、津波による水の流れからの被害も甚大であった。特に防波堤の被災については、図1に示すように津波による外力、洗掘作用などの水工学的要因に加え、地震動によるマウンドの支持力の低下、大きな浸透流による破壊、マウンド材料の抜け出しなど地盤工学的要因が発生したと考えられる。これらの現象は独立して生じたものではなく、水の流れと地盤の変形、破壊現象が相互に作用して生じた複合的な災害である。これらの現象を定量的に評価しこれにより実設計を高度化するためには、水と土の相互作用を詳細に解明し、得られた物理的知見に基づいた設計技術の提案が必要である。

2. 研究の目的

本研究は、津波越流時や河川増水時に生じる大きな浸透流を受ける土構造物の破壊メカニズムの解明を最終的な目的とした。具体的には、粒子のサイズや形状、その配置に代表されるミクロな土の構造に着目し、マイクロフォーカスX線CTを用いて大きな浸透流を受ける地盤の破壊過程を可視化、定量的に評価することによりミクロな視点から水・土の連成挙動を解明する。また、実験より得られた土のミクロな情報を利用し、土全体の力学挙動を再現できる数値破壊シミュレーションの開発を行う。

3. 研究の方法

本研究では、3つの項目について研究を行った。

1) 砂の三軸圧縮試験時の変形・破壊挙動の可視化と定量的評価

砂の三軸圧縮下の内部挙動を、マイクロフォーカスX線CTを用いて可視化する。さらに

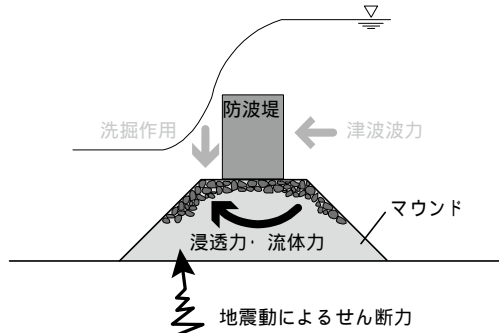


図1 津波により防波堤に作用する外力

得られた3次元画像に対して、画像解析手法を用いた変形解析を行い、変形の局所化などの挙動を定量的に評価する。

2) 浸透流による地盤内細粒分の移動現象の観察

浸透流によって地盤内で生じる細粒分の移動の観察にマイクロフォーカスX線CTを適用する。

3) 土のミクロな力学特性に基づいた有限要素解析

X線CTを用いた1), 2)の実験で得られた結果に基づきモデル化を行う。

4. 研究成果

1) 砂の三軸圧縮試験時の変形・破壊挙動の可視化と定量的評価

マイクロフォーカスX線CTを用いて砂の三軸圧縮下の変形・破壊挙動を可視化した。マイクロフォーカスX線CT装置は独立行政法人港湾空港技術研究所所有のものを用いた。図-2は実験中の様子を示す。

すべての実験はCTスキャナ内で行われ、軸ひずみ1%ごとに供試体の3次元画像を取得した。実験材料には相馬硅砂2号(平均粒径1.89mm)を用いた。供試体は緩詰(相対密度・ $Dr=50%$ )・密詰( $Dr=90%$ )の供試体2ケースについて試験を行った。図-3は三軸圧縮試験の結果である。密供試体ではせん断応力がピークを示した後に軟化するのに対し、緩供試



図-2 実験装置の概観

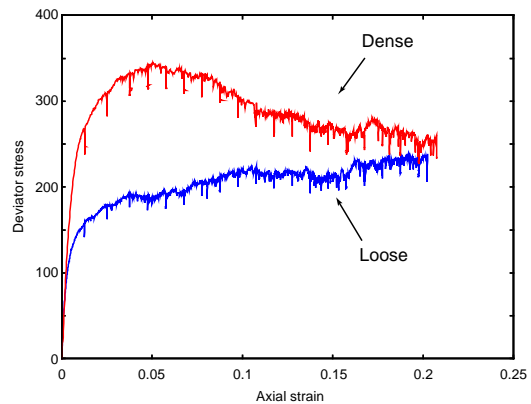


図-3 実験結果

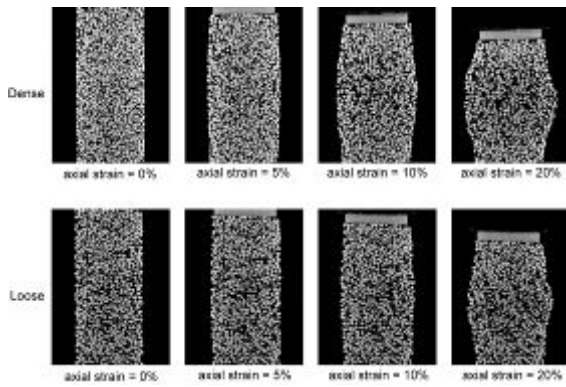


図-4 異なる軸ひずみレベルにおける供試体の鉛直断面画像

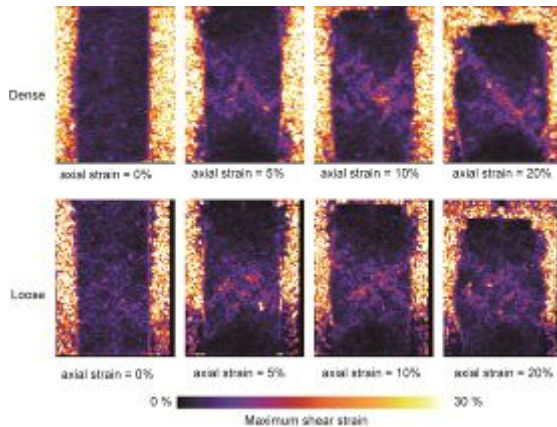


図-5 DIC 解析の結果 (最大せん断ひずみの分布)

体では明確なピークを示すことなく、残留応力に収束する、一般的な砂の力学挙動が確認できる。図-4 は実験中に得られた、異なる軸ひずみレベルにおける CT 画像である。供試体を構成する砂粒子が独立して観察できる。また、軸ひずみの増加に伴い、黒く示された空隙が拡大していくことが確認できる。これらの三次元 CT 画像に対し、Digital Image Correlation(DIC)を適用し、供試体内の変位場・ひずみ場を求めることで、変形の局所化挙動の定量的な評価を試みた。図-5 は鉛直断面における最大せん断ひずみ増分の分布を示す。密供試体では供試体中央の高さ付近に局所化が生じており、最終的には一つのせん断面が形成されている。一方、緩供試体では載荷の最終段階でも明確なせん断面は形成されずに供試体中央に広くせん断帯が分布する結果となった。

## 2) 浸透流による地盤内細粒分の移動現象の観察

浸透実験の概要を図-6 に示す。浸透実験には内径 10 mm、高さ 40 mm のアクリル製の円筒容器を用いた。流入口、流出口には 75  $\mu$ m 以下の粒子が通過できる金属メッシュをセットした。給水タンクにはマリオット管を設置して一定の水頭とし、脱気水を供試体下部から流入させて上向流による浸透実験を

行った。実験材料には相馬珪砂 5 号とシルトを用いた。重量比を変えて混合し、細粒分含有率 (Fc) を調整した。気乾状態の 2 つの材料を十分に混合した後、容器内に 3 層に分けて突き詰め、試料高さ 25 mm の供試体を作製した。供試体作製後、飽和度を高めるために一定水位の動水勾配 ( $i=1$ ) で 15 時間の透水を行い初期地盤とした。次に一定水位の動水勾配 ( $i=5$ ) で約 1 時間の浸透実験を行った。一定の時間間隔で水と細粒分の流出量を計測し、透水係数と細粒分の累積流出割合の経時変化を記録した。X 線 CT 撮影は浸透実験前後に実施した。

図-7 に供試体  $Fc=9.1\%$  と  $Fc=28.6\%$  の累積細粒分流出割合を示し、図-8 に浸透実験初期の透水係数に対する経時変化を示す。細粒分の少ない  $Fc=9.1\%$  では比較的高い割合で細粒分の流出が生じた。 $Fc=9.1\%$  では粗粒分で構成されたマトリックスの空隙は細粒分で満たされておらず、細粒分の移動が  $Fc=28.6\%$  と比べて容易であるためと考えられる。ただし、もともとの細粒分含有量が少ないため、実験精度や供試体サイズの影響もあるため追加の確認が必要である。また、 $Fc=9.1\%$  では約 1 時間の浸透実験後に透水係数が浸透初期と比較して約 30% 低下していたことから、細粒分の移動による内部構造の変化 (目詰まり) が生じたと推定される。図-9 に X 線 CT

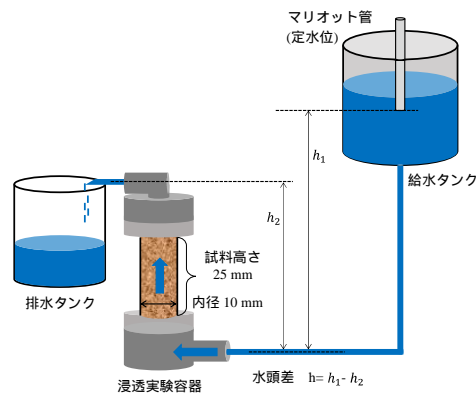


図-6 透水実験概要

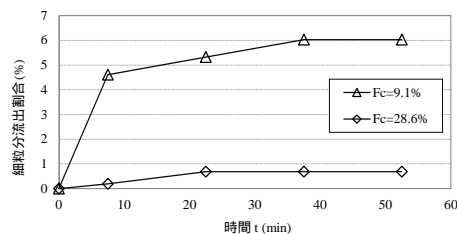


図-7 累積細粒分流出割合の経時変化

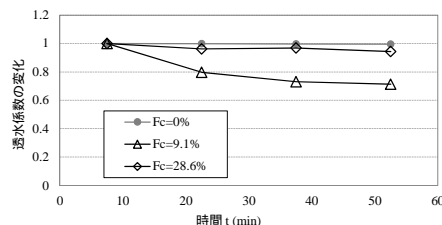


図-8 透水係数の経時変化



画像を示す。密度の高い砂鉄と珪砂は白及び明灰色で示されており、暗灰色がシルト、黒色が水を示している。元画像をMCW法5)で多値化処理するとそれぞれの材料の占有空間情報を得ることができる。図-10は浸透実験前後のCT画像とシルトが移動した領域を示している。浸透前にシルト、浸透後に水となった領域を内部侵食(赤色)とし、その逆を目詰まり(青色)と判定した。図-11の $F_c=9.1\%$ では供試体内の各所で内部侵食と目詰まりが生じているのに対して、 $F_c=28.6\%$ ではシルトがもともと詰まっていなかった間隙の境界付近で移動が卓越している様子が観察された。

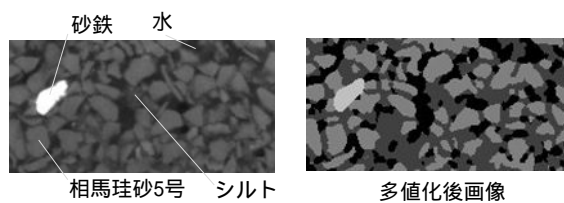


図-9 MOW法によるCT画像の多値化

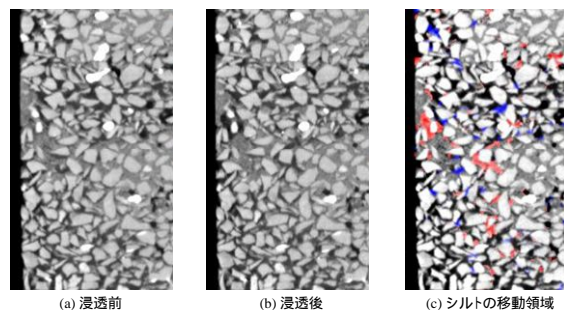


図-10 浸透前後のCT画像と細粒分移動領域の抽出

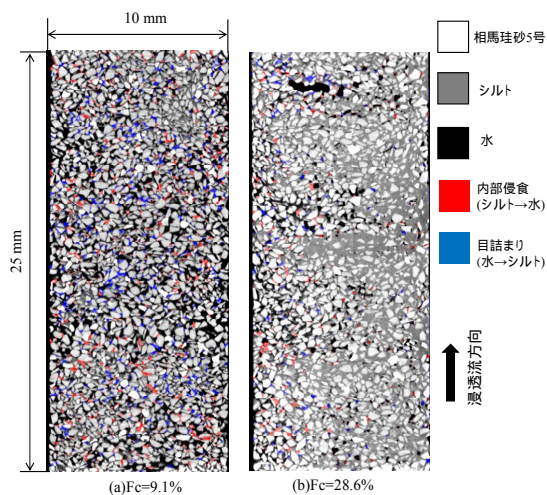


図-11 細粒分含有率の異なる供試体における内部侵食と目詰まりの分布

### 3) 土のミクロな力学特性に基づいた有限要素解析

ここでは、砂のような粒状体材料を対象に、その力学挙動を数値解析で表現する計算方法について検討した。粒状体の力学挙動を計算する場合、連続体ベースおよび粒状体ベースで計算する方法が考えられる。近年は後者を用いた数値解析が多く行われているが、計算可能な粒子数がコンピュータの能力に左右されることや、入力パラメータと材料の物理特性との関係性など制約も多い。本研究では、Horiら(2005)のParticle Discretization Scheme Finite Element Method (PDS-FEM)の有効性に着目し、これにCT画像から得られるミクロな物性を入力パラメータとすることで、砂の力学挙動を再現する計算方法の確率を試みた。PDS-FEMは通常のFEMと同等の精度・局所性を保ちつつ、破壊を簡便に表現できる解析ツールである。図-12は通常のFEMとPDS-FEMの違いを表した図である。PDS-FEMは変位場を不連続で重なり合わない特性関数で離散化する。その点を変位場を互いに重なりあい微分可能な形状関数で離散化する通常のFEMと異なる。今回の解析において破壊は、各要素間で計算されるトラクションの応力比によって定義した。要素間におけるトラクションの応力比が入力パラメータによって計算されるしきい値よりも大きければその境界は破壊したとみなす。破壊した境界では、該当する要素剛性行列の要素をゼロにすることで、応力の伝達が生じない、つまり、破壊に至ったとみなす。

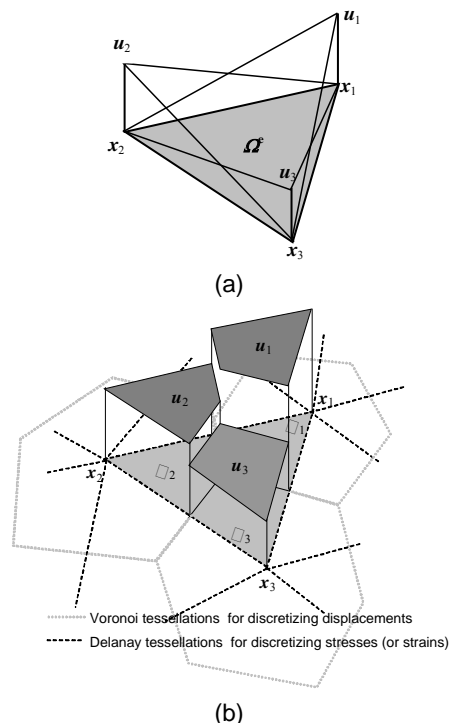


図-12 通常のFEMとPDS-FEMの違い

本研究では、砂のミクロな情報として、CT画像から求めた砂の間隙の大きさ、分布を計算に用いるメッシュに取り込み、計算を行った。解析における空隙は、計算初期から破壊した領域として定義され、その境界では応力の伝達が生じないようにした。供試体の密度は、この初期から破壊した領域の数を実際の間隙比と同じに設定することで表現した。

図-13はPDS-FEMによる砂の三軸圧縮試験のシミュレーション結果である。密供試体でのピーク後の軟化挙動がよく再現されている。また、緩供試体でも、実験結果を精度よく再現している。図-16は計算より得られた最大せん断ひずみの分布である。メッシュサイズが大きく未だ改善の余地が残されるが、密供試体においてクリアなせん断帯が形成されているのに対して緩供試体では供試体全体が変形していることが確認できる。

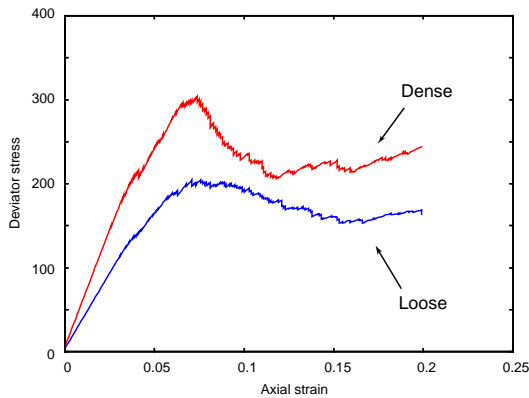


図-13 PDS-FEMによる計算結果

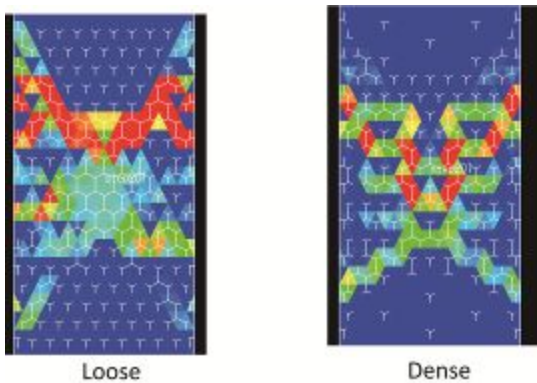


図-14 計算修旅時の破壊形態

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

Daiki Takano, Nicolas Lenoir, Jun Otani, Stephen A. Hall: Localised deformation in a wide-grained sand under triaxial compression revealed by X-ray tomography and digital image correlation, *Soils and foundations*, (採択決定, 2015年掲載予定)

〔学会発表〕(計4件)

D. Takano, Y. Miyata: FE modelling of sand with micro-characterisation, *Geomechanics from Micro to Macro*, pp 765-770, 2014.

・D. Takano, J. Otani, B. Chevalier: Experimental and numerical simulation of shear behavior on sand and tire chips, *Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics*, pp. 1545-1550, 2014.

・第48回地盤工学研究発表会 地盤工学会, 富山, 2013年7月23日-26日, マイクロフォーカスX線CTによる粒状体の三軸圧縮下における全粒子追跡手法の開発

・International conference of tomography on materials and structures, ゲント大学, ゲント・ベルギー, 2013年7月1-5日, Development of grain tracking method under triaxial compression test on X-ray tomography

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

高野 大樹(独立行政法人港湾空港技術研究所)

研究者番号: 80626218