

令和元年6月13日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18146

研究課題名（和文）液浸法実験と粒子ベースの数値計算による内部侵食の微視スケールでの可視化と把握

研究課題名（英文）Microscopic visualization and understanding of internal erosion of geo-materials: Development of experimental technique and particle based numerical method

研究代表者

福元 豊 (Fukumoto, Yutaka)

長岡技術科学大学・工学研究科・助教

研究者番号：60757350

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：地盤の内部侵食を詳細に把握するために、浸透流と土粒子を微視スケールで直接的に観察できる方法の開発を模型実験と数値計算の両面からおこなった。模型実験では、屈折率マッチング技術にもとづく方法により、土骨格中の浸透流の流速を2次元的に直接取得することができた。数値計算では、模型実験で得られた結果との比較をしながら、粒子-流体連成モデルを高度化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

深刻な地盤災害の引き金となる内部侵食を土粒子とその間隙のスケールで可視化して把握できる方法を確認すれば、その発生・進行メカニズムへの理解を深めることが期待できる。本研究で得られた結果は、内部侵食を微視スケールで摩擦・衝突・流体などが複雑に絡み合ったマルチフィジックス現象として捉えた、新しい切り口を与えるものであると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Direct observation methods for the seepage flow and the soil particles were developed in order to deeply understand the mechanisms of the internal erosion of geo-materials. The experimental technique, which is based on the RIMS (Refractive Index Matching Scanning), was developed, and it was found that the two dimensional velocities of the seepage flow inside the soil matrix can be directly obtained from the image analysis. In addition, the 3-D direct numerical simulation method, which is based on the coupled particle-fluid model, was also developed and was improved by comparing with experimental results.

研究分野：地盤工学

キーワード：内部侵食 浸透流 混相流 可視化

## 1. 研究開始当初の背景

地盤の内部侵食は深刻な地盤災害の引き金となるが、その発生・進行メカニズムには不明な点が多い。「内部侵食」と一口に言っても、**suffusion, contact erosion, piping** などのようにいくつかのタイプに分類される。現状ではタイプごとに整理された理論が提案され始めているものの、種々の様相をみせる内部侵食の統一的な解釈が完成されるまでには至っていない。

内部侵食の取り扱いが難しい理由としては、直接観測できない土中で起こることが挙げられる。侵食が進行するメカニズムを予測することはできるが、実際に数値計算や模型実験で再現し確認できなければ、それらは推測の域を出ない。よって、通常は見えない内部侵食を可視化して、それが発生・進行する様子を把握できる方法が確立されれば、現象のより深い理解に向けて大きく前進することが期待される。また、そもそも内部侵食とは、粒状体である土に対して流体である間隙水及び間隙空気が微視スケールで複雑に作用することによって生じる現象であるため、連続体力学に根ざした土質力学の理論のみでは不十分であり、粒状体力学にもとづく微視的な視点での検討も必要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、深刻な地盤災害の引き金となる内部侵食を微視スケールで可視化して、それが土中で発生・進行する様子を詳細に把握することである。具体的には、屈折率マッチング技術（液浸法）に PIV/PTV 計測を組み合わせた模型実験により土粒子と間隙水の挙動をレーザーシート上で 2 次元的に可視化し、さらに、その結果を踏まえて高度化した粒子ベースの手法による数値計算により 3 次元的に内部侵食を把握可能とする。直接観測が難しい内部侵食を、MRI や X 線 CT のような大掛かりな装置を使わずに土粒子とその間隙のスケールで正しく観察できる方法が確立されれば、その発生・進行メカニズムへの理解が飛躍的に深まると考えられる。

## 3. 研究の方法

### (1) 模型実験

屈折率マッチング技術とは、対象物をそれと同じ屈折率を持つ液体中に浸すことで、直接見えない内部の断面を可視光のもとで観察可能とする実験手法である。これに PIV/PTV 計測を組み合わせて、内部侵食に伴う土粒子と間隙水の動きを捕捉する。光学フィルターを使うことで、シリコンオイル中に浮遊させた蛍光トレーサー粒子とガラスビーズを区別した撮影を可能にする。撮影した画像の処理段階においては、PIV (Particle Image Velocimetry) によって間隙流体の流速を精度良く取得できる方法と装置について検討する。

### (2) 数値計算

土粒子と間隙水の両方を 3 次元で直接解くことが可能なシミュレータを開発・高度化した後に、応用計算を行う。間隙に存在する流体を土粒子の粒径以下の解像度で解く直接数値計算には高い計算コストがかかるため、まずは、並列化やメモリ使用量の削減などのプログラミング上の工夫を取り入れてシミュレータを高速化する。また、高レイノルズ数流れのもとで計算が破綻しないための間隙流体に対する安定計算手法を導入して、シミュレータの適用範囲を広げる。また、高度化したシミュレータを用いて、液浸法による模型実験に対応した条件での応用計算を実行する。模型実験の結果との比較を通して開発した数値計算モデルの妥当性を確認する。

## 4. 研究成果

### (1) 土中の浸透流の直接的計測のための模型実験

屈折率マッチング手法を応用した模型実験を実施し、実験的に土中の浸透流を直接的に観察する方法を検討した。実験材料は、土粒子を模したアクリル球（粒径 8 mm, 屈折率 1.49）と間隙流体を模したシリコンオイルを用いた。

図-1(a)はシリコンオイル中に浮遊させた蛍光トレーサー粒子の挙動をレーザーシート上で光学フィルター越しに高速度カメラで撮影した画像である。画像中の黒く見えるのが固体領域を示し、白く輝いて見えるのが流体領域である。そして、この撮影画像に対して PIV にもとづく画像解析をおこなうことで、図-1(b)のような 2 次元的な流速ベクトルの分布を取得した。試料作製方法や撮影方法を工夫しながら実験を繰り返すことで、固体領域と流体領域の境界が鮮明で精度の高い画像を取得できるようになった。

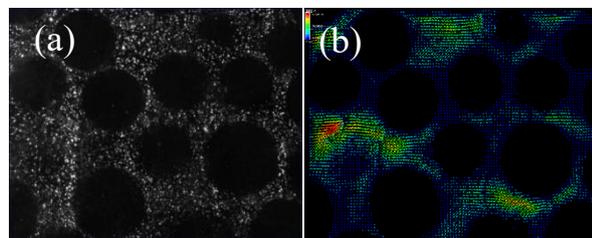
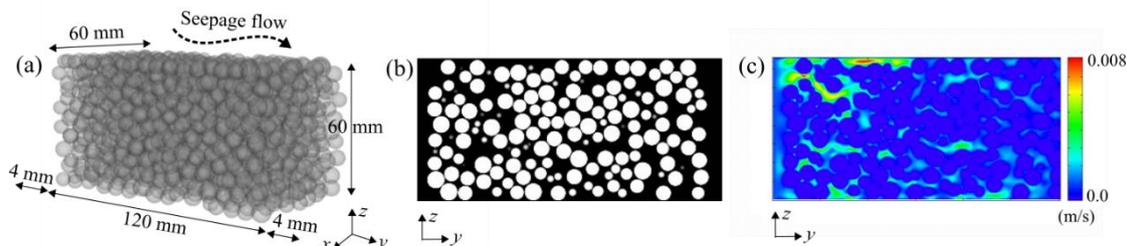


図-1 (a)レーザーシート上の撮影画像 (b)画像解析後の流速ベクトルの分布を示す図<sup>1)</sup>

## (2) 土粒子-浸透流連成の数値計算手法による浸透流の直接観察

開発を進めた数値計算手法は、個別要素法と格子ボルツマン法を連成して土粒子と浸透流の両方を直接解くものである。本研究では、とくに、間隙流速の大きさの分布に着目し、模型実験で得られた結果との比較検討をおこなうことで、数値計算手法の妥当性を確認した。

模型実験を模擬した数値計算モデルは、例えば、**図-2**のように作成した。**図-2(a)**はモデルの全景で、**図-2(b)**は $x=30\text{mm}$ における $yz$ 断面である。固体粒子の配置の作成は、個別要素法の計算によって行った。固体粒子の平均粒径は $8.0\text{mm}$ である。解析領域は模型実験装置に対応させて $60\times 128\times 60\text{mm}$ とし、 $xz$ 断面の一方を一定流入境界、他方を自由流出境界とした。これらの条件の下、定常状態に至るまで計算を行った。**図-3(c)**は結果の一例で、 $x=30\text{mm}$ における $yz$ 断面の流速分布である。

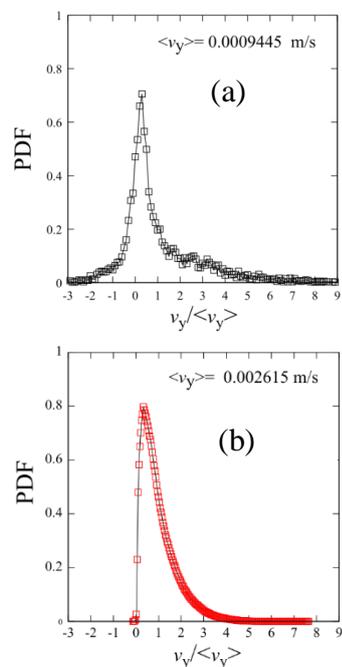


**図-2** 数値計算の概要 (a)モデルの全景 (b) $yz$ 断面の様子 (c) $yz$ 断面における流速の大きさの分布<sup>2)</sup>

## (3) 模型実験と数値計算の結果の比較

**図-3**は、模型実験と数値計算の比較結果の一例であり、多孔質体内の間隙流速の大きさの分布の確率密度関数(PDF)である。横軸の流速の大きさは $y$ 方向の流速の平均値 $\langle v_y \rangle / \text{m/s}$ で $y$ 方向の流速 $v_y$ を正規化したもので、縦軸はその頻度を示している。**図-3(a)**の模型実験から得られた $v_y$ の分布を見ると、平均流速よりも小さい $0 < v_y / \langle v_y \rangle < 1$ に頻度のピークを持つ分布となった。また、 $y$ 方向の平均流速の9倍以上の流速も計測された一方で、 $y$ 方向で負の値をもつ流速も計測された。次に**図-3(b)**の数値解析から得られた分布を見ると、こちらでも平均流速よりも小さい $0 < v_y / \langle v_y \rangle < 1$ にピークをもつ分布となっており、最大の流速の大きさは平均流速の8倍程度となった。この点では模型実験で計測された間隙流速の分布の特徴と一致しているが、 $y$ 方向で負の値をもつ流速の頻度の割合は模型実験に比べて小さくなった。

模型実験でPIVによる画像解析が対象とした範囲は $25\times 25\text{mm}$ であり、これが多孔質体領域全体の間隙流体移動の特徴を代表していると言えるかどうかについては今後の検討が必要である。また、模型実験では2次元的な浸透流の情報しか得ることができないが、数値解析では3次元的な検討が可能であり、この点の比較をさらに進めることも必要である。

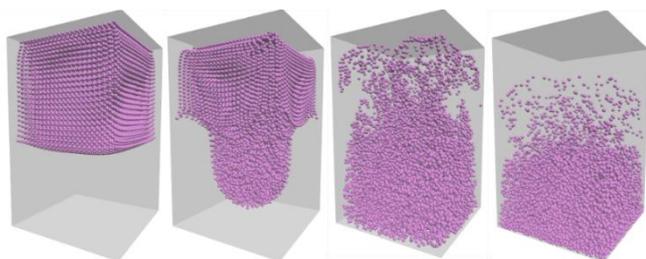


**図-3** 流速の確率密度関数<sup>1)2)</sup>  
(a)模型実験 (b)数値計算

## (4) 数値計算モデルの高度化

模型実験の結果を踏まえて3次元的に内部侵食を把握可能とするための粒子-流体連成の数値解析方法を以下のように高度化した。

**図-4**は、土粒子を想定した約1万個の球形粒子を流体中で落下させる計算例である。ここでの計算条件は、液浸法による浸透流と土粒子の可視化実験で用いたガラスビーズとシリコンオイルの物性値に相当するものである。数値計算モデルの妥当性は、容器中の3次元多粒子沈降の計算のほか、流れ中の球体に作用する抗力の計算、3次元多孔質体流れの計算も行うことで示した。



**図-4** 流体中の土粒子の挙動解析<sup>3)</sup>

図-5は、図-4での数値計算モデルをさらに拡張し、細粒分移動を取り扱えるようにした計算の例である。流体計算セルの大きさに対して、直径が小さい粒子との連成と直径が大きい粒子との連成とを組み合わせることで、細粒分と粗粒分が混在する地盤の内部侵食の問題への適用性を示した。

以上のように、模型実験と数値計算の比較について土粒子を固定した条件で実施できたが、土粒子が動く条件までは十分に検討が進まなかった。とくに、土粒子と浸透流の両方を詳細に計測するための実験的手法の開発は今後の課題である。

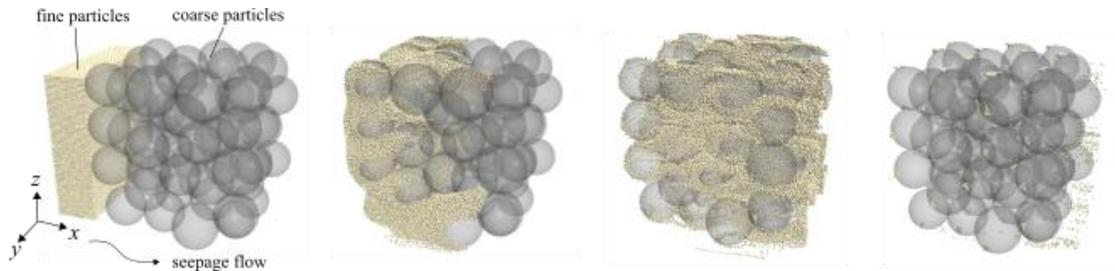


図-5 細粒分移動に対応した粒子-流体連成の数値解析モデル<sup>4)</sup>

#### 参考文献：

1. 宇井智章, 清野 颯, 福元 豊, 大塚 悟：土骨格中の浸透流の直接的観察手法の検討その1：RIMSを用いた模型実験，地盤工学研究発表会発表要旨集，Vol.53，pp.995-996，2018.
2. 福元 豊, 宇井智章, 清野 颯, 大塚 悟：土骨格中の浸透流の直接的観察手法の検討その2：模型実験と数値解析の比較，地盤工学研究発表会発表要旨集，Vol.53，pp.997-998，2018.
3. 福元 豊, 大塚 悟：浸透流と土粒子の直接数値計算のためのPS-MRT Lattice Boltzmannモデル，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.72，No.2，pp.I\_335-I\_343，土木学会，2016.
4. Yutaka Fukumoto, Satoru Ohtsuka: Coupled particle-fluid numerical simulation model for internal erosion of granular soils with a broad particle size distribution, 9th International Conference on Scour and Erosion, Vol.9, pp.639-644, Taipei, November, 2018.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① 福元 豊, 大塚 悟：浸透流と土粒子の直接数値計算のためのPS-MRT Lattice Boltzmannモデル，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.72，No.2，pp.I\_335-I\_343，土木学会，2016.  
([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/72/2/72\\_I\\_335/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/72/2/72_I_335/_article/-char/ja/))
- ② 岡田紘明, 福元 豊, 藤澤和謙, 村上 章：3次元粒子-流体連成計算モデルによる土中の水みち拡大過程のシミュレーション，土木学会論文集A2，Vol.73，No.2，pp.I\_429-I\_438，土木学会，2017. ([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/73/2/73\\_I\\_429/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/73/2/73_I_429/_article/-char/ja/))
- ③ Yutaka Fukumoto, Satoru Ohtsuka：3-D direct numerical model for failure of non-cohesive granular soils with upward seepage flow, Computational Particle Mechanics, Vol.5, No.4, pp.443-454, 2018.  
(<https://link.springer.com/article/10.1007/s40571-017-0180-5>)

〔学会発表〕（計8件）

- ① 藤名瑞耀, 福元 豊, 村上 章, 藤澤和謙：粘性土を考慮した内部侵食モデルによる粒子-流体連成シミュレーション，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.71，III-015，東北大学川内北キャンパス（仙台），2016.
- ② 岡田紘明, 福元 豊, 藤澤和謙, 村上 章：3次元粒子-流体連成モデルによる内部侵食の解析，地盤工学研究発表会発表要旨集，Vol.52，pp.873-874，名古屋国際会議場（名古屋），2017.
- ③ 宇井智章, 清野 颯, 福元 豊, 大塚 悟：土骨格中の浸透流の直接的観察手法の検討その1：RIMSを用いた模型実験，地盤工学研究発表会発表要旨集，Vol.53，pp.995-996，サンポートホール高松（高松），2018.
- ④ 福元 豊, 宇井智章, 清野 颯, 大塚 悟：土骨格中の浸透流の直接的観察手法の検討その2：模型実験と数値解析の比較，地盤工学研究発表会発表要旨集，Vol.53，pp.997-998，サンポートホール高松（高松），2018.
- ⑤ Yutaka Fukumoto, Satoru Ohtsuka: An effective direct numerical simulation model of granular soils and seepage flow by using DEM and LBM, 15th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Vol.15, 626, Wuhan, October, 2017.
- ⑥ Yutaka Fukumoto, Satoru Ohtsuka: Coupled particle-fluid numerical simulation model for internal erosion of granular soils with a broad particle size distribution, 9th International Conference on Scour

and Erosion, Vol.9, pp.639-644, Taipei, November, 2018.

- ⑦ Tomohiro Kitao, Yutaka Fukumoto, Kazunori Fujisawa, Akira Murakami: 2D numerical simulation of turbulent flow inside the soil by LBM, MPM 2019, Vol.2, pp.208-214, London, January, 2019.

〔図書〕 (計0件)

該当なし

〔産業財産権〕

該当なし

〔その他〕

ホームページ等 : [http://cde.nagaokaut.ac.jp/yutakafukumoto/main\\_japanese.html](http://cde.nagaokaut.ac.jp/yutakafukumoto/main_japanese.html)

## 6. 研究組織

該当なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。