

平成 29 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26712020

研究課題名(和文)土の相変化を伴う土構造物および地盤の脆弱化・破壊機構の解明と予測

研究課題名(英文) Prediction of failures and damages of geostructures and the ground caused by phase-change of soils

研究代表者

藤澤 和謙 (Fujisawa, Kazunori)

京都大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30510218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、1) 土の間隙水と土粒子の運動の把握、2) 相変化の遷移過程におけるせん断強度変化の把握、3) 土の流動化・流亡現象の予測シミュレータの開発、に取り組んだ。その中では、浸透流によって流動化した非粘着性材料の移動速度式を提案するとともに、浸透流と通常の水の流れ(流体のみによって占められた領域の流れ)を連成計算することを可能にした。

研究成果の概要(英文)：This research project has conducted the three tasks: Motion of pore water and soil particles transported by seepage flows, shear strength during phase-change of soils, and numerical simulation of fluidized soils. The study on these topics have proposed the prediction formula of migration rate of sand particles due to seepage flows and achieved the coupled numerical analysis of flows in porous and fluid domains.

研究分野：農業農村工学

キーワード：土 破壊 相変化

1. 研究開始当初の背景

浸透流によって土粒子が流亡し、土塊内に水みちが形成される現象はパイピングと呼ばれ、フィルダム、ため池、堤防といった水の浸透を許す土構造物の主要な被害要因である。近年は豪雨が激甚化し、これら施設の維持・管理とともに災害に対する強化が求められている。また、最近顕在化する地盤の空洞化や陥没は、地中を流れる水の作用によって土粒子が流亡することで発生し、拡大が進むものと考えられる。このように、土構造物や地盤の被害は、土の流亡に起因する可能性が高いが、どのように空洞化や水みちの形成に至るのかについては不明な点が多くあり、現在においてもその現象の予測は困難である。

例えば、填砂現象では浸透水の水圧と圧力勾配の増加により、土の有効応力（土粒子間の拘束力）が減少し、流動化することによって浸透水とともに砂が流出する。このように、土の流亡が起きるには、拘束圧が小さい状態において、十分な流体力が作用することが必要である。土粒子流亡の発生を見極め、その後の状況を予測するには、流動化を開始した時点及びその後の土の挙動を知る必要がある。しかし、従来の土質力学は土(塊)が固体として存在する範囲を対象とするため、土の流亡を扱うことができない。この土質力学の不十分さが、土の流亡現象の予測を困難にし、それによる被害が多く発生する一つの原因と言える。土の流亡を予測可能にするには、固体としての土が流動化し、流体のように挙動する過程、すなわち「土の相変化」についての力学的機構を明らかにすることが求められる。

そこで、本研究では土の流亡に起因する被害を防止・軽減し、ため池堤体などの土構造物や地盤の防災・減災に寄与することを全体構想とし、具体的には、土の相変化を力学的に把握するとともに、土の流亡現象を予測するシミュレータの開発を具体的な目的に掲げた。

2. 研究の目的

本研究では、前節の背景及び目的を鑑み、以下の課題に取り組んだ。

- 1) 流動化した土を対象として間隙水と土粒子の運動を明らかにする。(填砂は典型的な土の流動現象であるため、浸透破壊によって填砂を生じさせ、そのときの間隙水圧、間隙率、水と土粒子の速度を実験によって詳細に調査する。)
- 2) 固体から流体への遷移過程において、せん断強度の変化を明らかにする。(上記の課題1の実験に、摩擦力の計測を追加し、相変化の遷移過程におけるせん断強度の変化を測定する。)
- 3) 土の流動化・流亡現象の予測シミュレータの開発する。

3. 研究の方法

前節の研究課題に沿って 1) 土の間隙水と土粒子の運動の把握、2) 相変化の遷移過程におけるせん断強度変化の把握、3) 土の流動化・流亡現象の予測シミュレータの開発、に取り組んだ。それぞれの研究方法を簡潔にまとめると以下のようなものである。

- 1) 非粘着性の材料を用い、上向き浸透流によって発生するボイリング現象を利用して、土粒子間の摩擦の影響がない状態における土粒子と間隙水の運動を把握する。
- 2) 十分な動水勾配を有する水平方向の浸透流によって、砂(塊)を流動的に運動させることで土粒子間の摩擦が存在する土の流動化現象を再現し、運動が開始される前後での土のせん断強度(=摩擦角)の変化を把握し、モデル化を行う。
- 3) 土と水の運動方程式をオイラー型の数値解法によって解析することで、土の流動化と流亡現象を解析可能とする。

4. 研究成果

上述の3つの研究課題・方法について、1つ目と3つ目について、まとまった成果を得ることが出来た。以下にその内容を報告する。

(1) 上向き浸透流によって流動砂の運動

透破壊時の砂粒子の運動(移動速度)を測定するに当たり、図1に示すU字型浸透破壊試験機を作製した。試験機のU字管は厚さ5mmの透明アクリルによって作られ、その断面は1辺が90mmの正方形である。同図に示すように、U字管の右端は水位を一定に保たれた貯水槽に接続され、浸透破壊時には左側のU字管出口から砂が流出する。U字管を用いた理由は、浸透破壊によって砂が左側出口から流出しても、右側に詰められた砂が継続

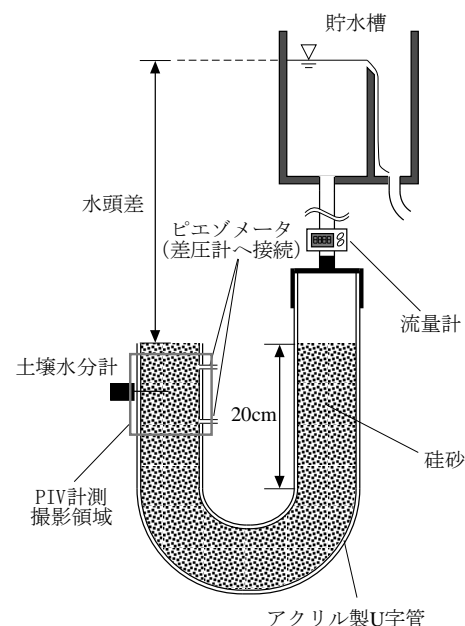


図1 U字管を用いたボイリング実験装置

的に左側に送られ、比較的長い時間にわたって土粒子の移動を観察することが可能なためである。試験材料には、珪砂 6 号（粒径 0.1-0.85 mm, 平均粒径 0.3 mm, 土粒子密度 2.64 g/cm³, 最大間隙比 0.508, 最小間隙比 0.391）を用いた。

試験方法は次の通りである。まず、水中落下法により U 字管に珪砂を充填し、その右端と貯水槽をホースで接続した。この時点で、浸透破壊が発生しない程度に貯水槽を持ち上げ、試験開始前の初期透水係数 k_0 を測定した。その後、貯水槽をさらに持ち上げ、限界動水勾配以上の動水勾配を作用させることで、浸透破壊を発生させた。砂の移動が始まると、U 字管の左側出口において砂粒子の速度をハイスピードカメラによる PIV 計測を行うと同時に、砂の間隙率を土壌水分計で測定した（土壌水分計は体積含水率を測定するため、飽和土の場合は間隙率を測定できる）。また、U 字管の出口付近では、ピエゾメータを差圧計につなぎ、流出側の動水勾配の測定も行った。U 字管の右側では流入する水の流量を流量計で測定した。

上述の計測により、U 字管の出口における浸透流速（ダルシー流速を間隙率で除したものは、次のように求められる。水と砂粒子の非圧縮性を仮定すれば、右端からの水の流入量と左端からの間隙水と土粒子の流出量が等しく、

$$q = Anv + A(1-n)v_s \quad (1)$$

の等式を得る。ここに、 q と A は右端からの水の流入量と U 字管の断面積であり、 n 、 v 、 v_s 左端における間隙率、浸透流速、砂粒子の速度を意味する。式(1)では、 v 以外は直接的に計測されており、同式を v について解くことで、U 字管出口での浸透流速を得る。

この実験から得られる結果は 2 つある。一つは、動いている土の中を流れる浸透流速のモデルであり、もう一つは土粒子の移動速度である。前者は後者の予測式を導出するために必要となる。

図 2 に、試験中の q/A （U 字管への流入量 q を断面積 A で除したもの）と砂粒子の速度 v_s を示す。同図からは、 q/A は v_s よりも常に大きいことが分かる。式(1)を変形すると、 q/A と v_s の差には、

$$q/A - v_s = n(v - v_s) \quad (2)$$

の関係がある。つまり、間隙水の浸透流速は砂粒子の速度よりも大きい結果の表れである。図 2 の実線は、

$$q/A = v_s + ki \quad (3)$$

によって計算された q/A を示す。ここに、 k は透水係数、 i は動水勾配であり、試験中の透水係数の値は初期透水係数 k_0 を計測された間隙率 n から Kozeny-Carman 式を用いて補正を行った。図 2 からは式(3)は試験中の流速の様子をうまく記述できることが見てとれる。式(3)は式(2)を考慮すると

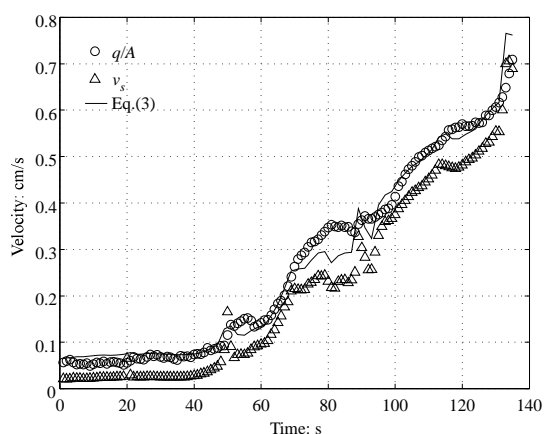


図 2 流入流速と砂粒子の速度の時間変化

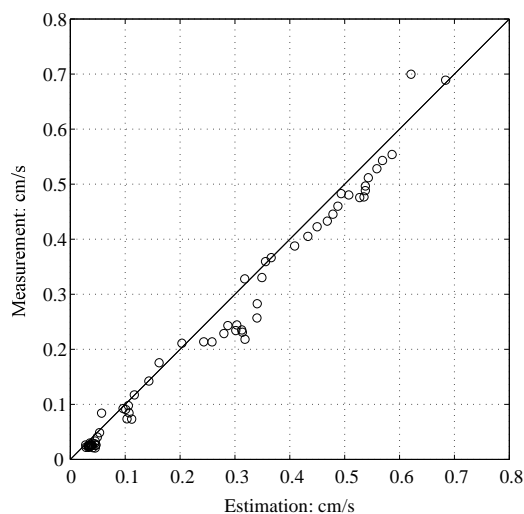


図 3 流入流速と砂粒子の速度の時間変化

$$n(v - v_s) = ki \quad (4)$$

と変形でき、土粒子移動を伴うときの Darcy 則が成立つことが分かる。

砂粒子の移動速度 v_s の予測式を導出するため、単位体積に含まれる土粒子に作用する浸透力は、次のように表される（式(5)の導出は省略するが式(3)が利用される）。

$$-(1-n)\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{n^2 \rho_s g}{k}(v - v_s) \quad (5)$$

ここに、 p 、 ρ 、 g 、 z はそれぞれ間隙水圧、水の密度、重力加速度、鉛直座標である。 ρ_s を砂粒子の密度とし、式(5)の浸透力が単位体積に含まれる砂粒子の重量（ $= (1-n)\rho_s g$ ）に等しいとおいて、 v について解くと

$$v_s = v - \frac{k(1-n)}{n^2} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} - i \right) \quad (6)$$

を得る。図 3 には、式(6)から計算される土粒子の速度の推定値と測定値の関係を示す。同図は式(6)によって精度良く砂粒子の流出速度が予測できることを示す。少し推定値に比べて測定値の方が小さい傾向があるが、これは周面摩擦や土壌水分計のプロブが抵抗

になった結果と考える。

(2) Navier-Stokes/Darcy 流の連成解析

精度ある流体解析を目的として、Two-domain method に基づくダルシー流とナビエ・ストークス流の同時解析を行った。流体相の支配方程式にはナビエ・ストークス式、ダルシー相のそれにはダルシー・ブリンクマン式を用いる。二相の境界では、圧力と境界法線方向流速については連続条件を課し、境界接線方向流速は Beavers-Joseph 条件を満たすように接続を行うと同時に、幅広いレイノルズ数を有する流れに対応できるように、流体相においてはコヒーレント構造モデルを導入した Large Eddy Simulation (以下、LES) を実現する。

手法には部分段階法を適用した有限体積法である。有限体積法では、変数(圧力と流速)が計算セルの内部で定義されるため、二相の境界における接続条件(Beavers-Joseph 条件)は、計算セル間での変数の補間方法にて記述される。以下では支配方程式について説明した後、計算例としては、高レイノルズ数のキャビティ流れを取り上げ、流体相での LES 計算とダルシー相での浸透流の同時解析を報告する。

流体相における支配方程式は非圧縮性流体のナビエ・ストークス式であるが、LES の定式化にあたって同式にフィルター操作を行い、サブグリッドスケールの流れにコヒーレント構造モデルを適用すると以下となる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \nu_{SGS}) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (8)$$

$$\nu_{SGS} = C\Delta^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \quad (9)$$

$$C = C_1 |F_{CS}|^{\frac{3}{2}}, \quad C_1 = \frac{1}{20}, \quad F_{CS} = \frac{Q}{E} \quad (10)$$

$$Q = \frac{1}{2} (\bar{W}_{ij}\bar{W}_{ij} - \bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}), \quad E = \frac{1}{2} (\bar{W}_{ij}\bar{W}_{ij} + \bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}) \quad (11)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad \bar{W}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

ここに、 \bar{u}_i 、 \bar{p} 、 ρ 、 ν はそれぞれフィルター後の流速と圧力(ピエゾ圧)、密度、動粘性係数であり、 x_i 、 t は直角座標と時間を意味する。CSM は、壁境界に壁法則や Smagorinsky モデルのモデル係数の減衰などを必要としないことに加えて、安定性の高いモデルとして知られる。そのため、境界面が必ず存在する流体相とダルシー相における流れの計算

に対しても、容易に実装することができる。ダルシー相の支配方程式には、以下で表されるダルシー・ブリンクマン式を用いる。

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\langle u_i \rangle \langle u_j \rangle}{\lambda} \right) = -\frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle^*}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \langle u_i \rangle}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\lambda \nu}{K} \langle u_i \rangle \quad (14)$$

ここに、 λ と K は間隙率と固有透水係数、 $\langle u_i \rangle$ は流速の体積平均(ダルシー流速に対応)、 $\langle p \rangle^*$ は圧力の相体積平均(流体相の領域で空間平均を施したものであり、通常測定される水圧に対応する)である。固有透水係数 K は透水係数 k とは $K = kv/g$ (g は重力加速度の大きさ)の関係がある。

ここでは、計算領域の下部にダルシー相を有するキャビティ流れを上述の手法によってシミュレートする。解析対象は、高さと幅が 0.1 m の正方形領域であり、底面に 0.025 m の厚さの多孔質領域がある(図 4 参照)。多孔質体の透水係数は 0.002 m/s、間隙率は 0.5 とした。上面の境界条件は、水平方向に 1.0 m/s の流速を与え、側面及び下面はノンスリップ境界とした。動粘性係数は水を想定して、 1.0×10^{-6} m²/s とした。この計算のレイノルズ数 Re は 100,000 に対応する。

図 5 に計算された流体相の流速と渦度の分布を示す。計算の初期は、右側面に一つの渦が発生する($t=0.25$ 秒)が、時間とともにその渦は下方に移動した。渦が流体相とダルシー相の境界に近づくと、その境界に沿っていくつかの渦が連なるように発達した($t=2.75$ 秒)。この計算で設定したレイノルズ数の大きさ($Re=100,000$)となると定常状態に落ち着くことなく、常にいくつかの渦が出現と消

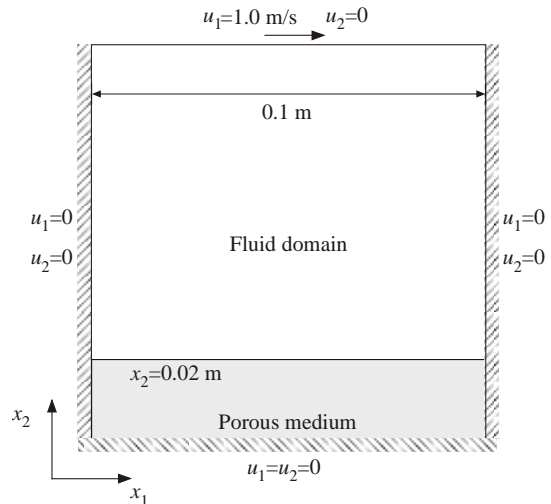


図 4 解析領域と境界条件(キャビティ流れ)

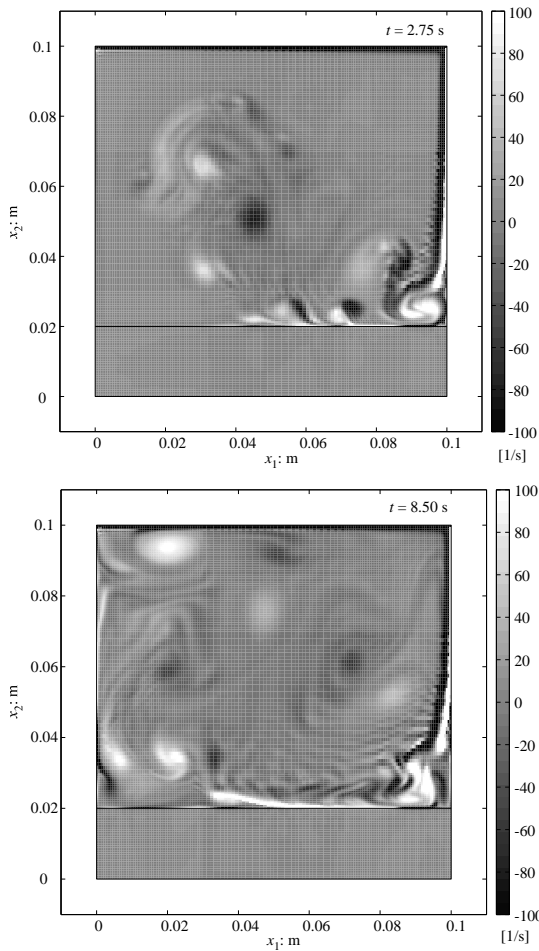


図5 渦度分布 ($t=0.25, 2.75, 8.50$ 秒後)

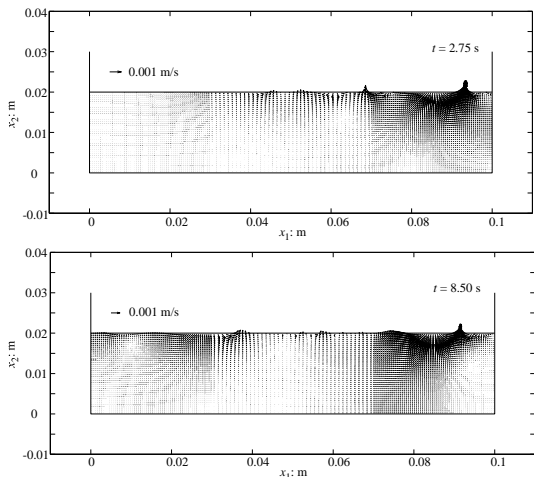


図6 ダルシー相の流速分布 ($t=2.75, 8.50$ 秒後)

減を繰り返す流れが流体相において計算される ($t=8.50$ 秒). 図6には, 2.75秒後と8.50秒後のダルシー相の流速分布を示す. そこでの流速は, 流体相と比較してかなり小さいため, ダルシー相における流速のみを図示している. 同図からは, 流体相との境界付近で渦が発生している箇所, ダルシー相の表面に水の流入と流出が生じることが見て取れる. このように, LESによってグリッドスケールで解像される渦が多孔質体中の浸透流に与

える影響を首尾よく計算することが可能となった.

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 11 件)

- ① 藤澤和謙, 村上 章: 鉛直上向きに生じる浸透破壊後の浸透流速と土粒子速度の予測理論, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.4, pp.511-520, 2014.
- ② 藤澤和謙, 辻村康祐, 村上 章: CWENOスキームによる浸透破壊中の砂の移動と浸透流の数値シミュレーション, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.4, pp.521-532, 2014.
- ③ 森本敏弘, 浅井 光輝, 笠間 清伸, 藤澤和謙, 井元佑介: 安定化 ISPH 法による拡張ダルシー則とナビエ・ストークス方程式の統一解法, 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学) 特集号, Vol.70, No.2, pp.I_213-I_221, 2014.
- ④ 佐藤真理, 藤澤和謙, 村上 章: 空洞領域を有する多孔質中の動的浸透流の周波数特性, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 71, No. 2, pp.I_521-I_532, 2015.
- ⑤ K. Fujisawa: Numerical analysis of backward erosion of soils by solving the Darcy-Brinkman equations. In Y. Bazilevs and K. Takizawa (Eds.), Advances in Computational Fluid-Structure Interaction and Flow Simulation: New Methods and Challenging Computations (pp. 193-201). Springer, 2016.
- ⑥ K. Fujisawa, S. Arimoto and A. Murakami: Simultaneous computation of Navier-Stokes and approximate Darcy flows solving the Darcy-Brinkman equations, 14th International conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, pp.1773-1778, 2014.
- ⑦ K. Fujisawa, K. Sakai and A. Murakami: Numerical analysis of seepage-induced erosion of soils by solving the Darcy-Brinkman equations, Scour and Erosion, ISCE2014, pp.381-387, 2014.
- ⑧ K. Tsujimura, K. Fujisawa and A. Murakami: Numerical analysis of 1D seepage failure process of sandy materials by CWENO method, Bifurcation and Degradation of Geomaterials in the New Millennium, pp.99-105, 2015.
- ⑨ K. Fujisawa and A. Murakami: Numerical analysis of preferential flows in soils by the Darcy-Brinkman equations, The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, JPN-045, 2015.

- ⑩ K. Fujisawa, A. Murakami and S. Nishimura: Estimation of hydraulic conductivity in an embankment using particle filter, The 6th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications, pp.618-623, 2016.
- ⑪ K. Fujisawa, A. Murakami and K. Sakai: Numerical analysis of backward erosion by soil-water interface tracking, The 6th Japan-Korea Geotechnical Workshop, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol.4, pp.84-87, 2016.

[学会発表] (計 18 件)

- ① 辻村康佑, 藤澤和謙, 村上 章, 坂井孝太郎: CWENO スキームを用いた浸透による土質材料の流動化シミュレーション, 平成 26 年度農業農村工学会大会講演会, 2014 年 8 月.
- ② K. Fujisawa, S. Arimoto, A. Murakami: Numerical simulation of seepage flows in porous media coupled with Navier-Stokes flows, The 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, May, 2014.
- ③ 辻村康佑, 藤澤和謙, 村上 章, 坂井孝太郎: CWENO スキームを用いた浸透作用による砂の流動化シミュレーション, 第 49 回地盤工学研究発表会, 2014 年 7 月.
- ④ 坂井孝太郎, 藤澤和謙, 村上 章, 川並俊輔: 空洞を有する多孔質を流れる浸透流に対するダルシー数の影響, 第 49 回地盤工学研究発表会, 2014 年 7 月.
- ⑤ 藤澤和謙, 村上 章: 空洞・水みちを有する地盤中の浸透流解析, 第 11 回地盤改良シンポジウム, 2014 年 11 月.
- ⑥ 坂井孝太郎, 藤澤和謙, 村上 章: フェーズフィールド法を用いた浸透による後退侵食解析, 第 71 回農業農村工学会京都支部研究発表会, 2014 年 11 月.
- ⑦ K. Fujisawa: Numerical analysis of seepage-induced erosion by the Darcy-Brinkman equations, The 18th International Conference on Finite Elements in Flow Problems, March, 2015.
- ⑧ 佐藤真理, 藤澤和謙, 村上 章: Darcy-Brinkman 式による多孔質角柱周りの非定常流解析, 第 20 回計算工学講演会, 2015 年 6 月.
- ⑨ 藤澤和謙, 村上 章: Beavers-Joseph 条件を満足する Darcy/Navier-Stokes 流の数値解析手法, 第 20 回計算工学講演会, 2015 年 6 月.
- ⑩ K. Fujisawa: Numerical Simulation of Seepage-Induced Erosion of Soils by Solving the Darcy/Navier-Stokes Coupled Flows, The 13th US National Conference on Computational Mechanics, July, 2015.

- ⑪ 佐藤真理, 藤澤和謙, 村上 章: Darcy-Brinkman 式による多孔質体周囲の非定常流シミュレーション, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2015 年 9 月.
- ⑫ 藤澤和謙, 村上 章, 藤巻真由: 浸透破壊時の砂粒子の移動速度測定実験, 平成 27 年度農業農村工学会大会講演会, 2015 年 9 月.
- ⑬ 佐藤真理, 藤澤和謙, 村上 章: Darcy-Brinkman 式によって表現される動的浸透流の周波数特性, 第 72 回農業農村工学会京都支部研究発表会, 2015 年 11 月.
- ⑭ K. Fujisawa, A. Murakami and S. Nishimura: Estimation of hydraulic conductivity in an embankment using particle filter, 6th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications, May, 2016.
- ⑮ 佐藤真理, 藤澤和謙, 村上 章: Darcy-Brinkman 式を用いた乱流数値解析手法, 第 21 回計算工学講演会, 2016 年 5 月.
- ⑯ 藤澤和謙, 村上 章, 福島直子: 浸透流と表面流が作用する時の限界掃流力測定, 平成 28 年度農業農村工学会大会講演会, 2016 年 8 月.
- ⑰ 藤名瑞耀, 福元 豊, 岡田紘明, 村上 章, 藤澤和謙: 粒子-流体連成計算による粘性土の内部侵食モデル, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016 年 9 月.
- ⑱ 藤澤和謙, 村上 章, 藤巻真由: 上向き浸透流によって運ばれる砂粒子の移動速度測定, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016 年 9 月.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ

<http://www.agrifacility.kais.kyoto-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤澤 和謙 (FUJISAWA, Kazunori)
京都大学・大学院農学研究科・准教授
研究者番号: 30510218

(2) 研究分担者 (なし)

(3) 連携研究者 (なし)

(4) 研究協力者 (なし)