

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H05509・20K20434

研究課題名（和文）土のミクロスケール多相系組織形態変化のモデル化 - 地盤変形予測技術の再構築へ

研究課題名（英文）Modeling of multiphase microstructural morphological changes of soil - Toward rebuilding soil deformation prediction technology

研究代表者

肥後 陽介 (Higo, Yosuke)

京都大学・経営管理研究部・教授

研究者番号：10444449

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,900,000 円

研究成果の概要（和文）：土粒子相，水相，空気相のミクロスケール多相系組織形態変化に基づき，(1) 土質力学の基本的な物理量で土の強非線形挙動をモデル化するとともに，(2) 土が粒状材料として潜在的に持つミクロな不均質性からマクロな物性値の空間的変動までをモデル化することで，土粒子・間隙スケールの物理に根差した地盤挙動予測技術を構築した．X線マイクロCTと画像解析によるミクロスケール多相系組織形態変化の抽出，マイクロメカニクスベースモデルの開発，データサイエンスを導入した不均質性のモデル化という，近年の革新的な実験・技術・理論を実践した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

土の挙動の源は，土粒子，間隙中の水，空気が形成する微視的なスケールの「組織形態」の幾何学的変化にある．本研究で実施した土の根源的性質である組織形態変化のモデル化は，X線マイクロCTと画像解析，マイクロメカニクスベースモデル，データサイエンスという，先端技術導入の一方で，既存の調査・実験で得られるごく基本的な物理量を用いた力学挙動の記述により，広範な土木実務者の地盤挙動解釈を飛躍的に深度化させることが可能とする．土粒子・間隙スケールの物理に根差した地盤挙動予測技術を構築することで，自然ハザードに対する土砂災害予測をはじめとする国土保全技術の向上に寄与し得る．

研究成果の概要（英文）：Based on the multiphase microstructural morphological changes of soil particle, water and air phases, this study (1) models the strongly non-linear behaviour of soil with the fundamental physical quantities of soil mechanics and (2) models the inherent microscopic heterogeneity of soil as a granular material to the spatial variation of macro physical properties, thereby developing a technology for predicting geotechnical behaviour rooted in the physics of the soil particle and pore scale has been developed. Putting into practice recent innovations in experimentation, technology and theory: the extraction of micro-scale multiphase microstructural morphological changes using X-ray micro-CT and image analysis; the development of micromechanics-based models; and the modelling of heterogeneity by introducing data science.

研究分野：地盤工学

キーワード：土の形態変化 ミクロスケール 多相系 マイクロメカニクスベースモデル データサイエンス

1. 研究開始当初の背景

土の挙動の源は、土粒子、間隙中の水、空気が形成する微視的なスケールの「組織形態」の幾何学的変化にある。現在の土の力学モデルは、種々の条件下での土の挙動の記述が可能であるものの、地震や非常常浸透など複雑な実挙動の定量的な再現には、多くの非線形関数と物理的意味の不明確なパラメータが必要である。このため、パラメータ設定と結果の解釈が困難で、土木実務への普及は一部の熟練した地盤工学の技術者に限られている。そこで、これらの解析法に加え、土本来の粒状体としての物理的根拠が明確なモデル化によって、土木技術者が容易に解析し地盤挙動を理解できる手法の整備が土構造物の建設・保全に不可欠との考えに至った。

土は土粒子の集合体であることから、ミクロスケールで潜在的な不均質性を有する。盛土・堤防など均質と見なされる土構造物においても、局所的な弱部や高透水層といった不均質性が堤防の決壊や斜面崩壊などの地盤災害のトリガーとなることは広く知られている。しかし、不均質性の原因と影響を明示的に評価する方法が無く、明らかに揺らぎを持つ N 値等の地盤定数を平均化するなどの究極の現象論が定着し、土の不均質性の研究は停滞している。これに対して、地盤内部の可視化技術の研究も盛んに行われているが未だ開発段階にあり、既存の実験・調査技術から地盤内部の不均質性を記述する理論的アプローチの着想を得た。

地盤工学の力学的記述の「わかりにくさ」(物理的根拠の不明確さ、地盤工学の独自性)は、分野融合型の新しい災害予測を阻害し、合理的な意思決定システムの構築においてのボトルネックになっている。地盤力学は従前の現象論的事実のモデル化に終始するアプローチから、本研究構想のような、本質的な物理に根差したアプローチへの転換が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、土粒子相、水相、空気相のミクロスケール多相系組織形態変化に基づき、

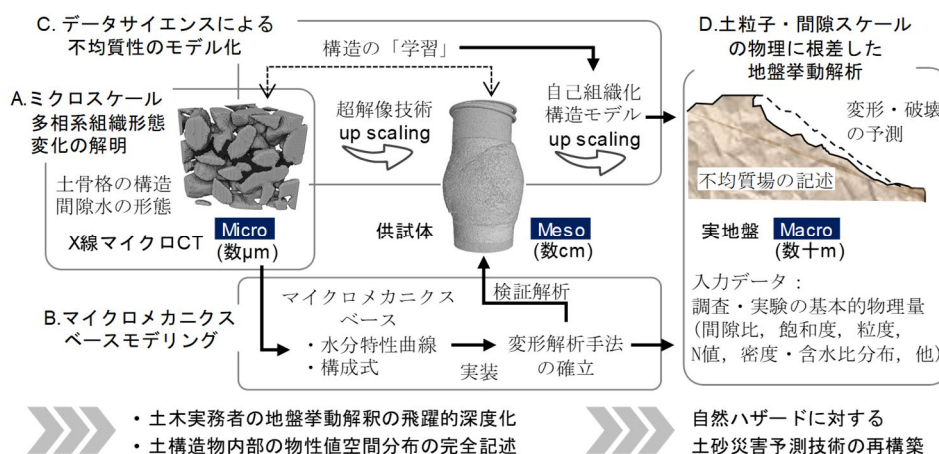
- (1) 土質力学の基本的な物理量で土の強非線形挙動をモデル化するとともに、
- (2) 土が粒状材料として潜在的に持つミクロな不均質性からマクロな物性値の空間的変動までをモデル化することで、

現象論的なマクロ挙動に基づいた従前のモデルとは異なる、土粒子・間隙スケールの物理に根差した地盤挙動予測技術を再構築し、自然ハザードに対する土砂災害予測をはじめとする国土保全技術の向上に寄与することを目的とする。

X線マイクロCTと画像解析によるミクロスケール多相系組織形態変化の抽出、マイクロメカニクスベースモデルの開発、データサイエンスを導入した不均質性のモデル化という、近年の革新的な実験・技術・理論を実践する。これらの先端技術導入の一方で、既存の調査・実験で得られるごく基本的な物理量を用いた力学挙動の記述により、広範な土木実務者の地盤挙動解釈を飛躍的に深度化させる。さらに、可視化が困難な土構造物内部の物性値の分布を既存技術で得られる地盤情報から完全に構築する先駆的理論を提示する。

3. 研究の方法

以下の図に示した A~D について研究を実施する。根幹となる土粒子スケールの実験データを A で取得し、データを活用した B, C の 2 つの理論構築を並行実施する。これらを統合したタスクとして D を実施し、上記の研究目的を達成する。



4. 研究成果

ページ数の制限のため、代表的な成果である単一粒径砂における粒子間結合力へのサクシオン寄与効果のモデル化について報告する。

近年、X線マイクロCTを用いた単一粒径砂を用いた不飽和土の保水性試験および三軸圧縮試験の微視的観察から、土粒子間に形成される液架橋の数が不飽和土のせん断強さに大きく影響を及ぼしていることが明らかとなった例えば¹⁾。本研究では、この実験結果を定量的に解釈することを目的とし、サクシオンの粒子間結合力への寄与効果を微視的観点からモデル化した。具体的には、密度の異なる試料を用いた保水性試験で得られた、異なる保水状態における液架橋の数に着目し、接触点粒子間力の増加に寄与する液架橋の変化を定量化した。さらに、このモデルを土粒子間の相互作用に立脚した土の構成式である、マイクロメカニクススペースモデル(MMモデル)²⁾に適用し、粒子間結合力へのサクシオン寄与効果を表現するための枠組みを提示する。

不飽和状態における間隙水は、液架橋として粒子間接触点に付着する。そして、これが持つサクシオンは、粒子間結合力の増加に寄与する。したがって、間隙水の有するサクシオンが粒子間結合力増加に寄与するかどうかは、液架橋の存在量に依存すると考えて、サクシオン寄与度としてこれを定量化することとした。

そのために、「液架橋割合」というパラメータを本研究独自に導入した。これは、ある領域における全接触点数と、液架橋の付着する接触点数の比をとったもので、ある一つの接触点に液架橋が付着する確率と言い換えることもできる。液架橋割合は0から1まで分布するものであり、大きいほど液架橋の存在量は多いので、サクシオン寄与度は高い。これを定量的に評価してモデル化するため、先行研究で行われたX線マイクロCTを用いたゆる詰め・密詰めの豊浦砂保水性試験データを利用し、画像解析により液架橋割合を算出した。

$D_{50} = 0.187 \text{ mm}$ の豊浦砂を用いて、水中落下法によりゆる詰め・密詰めの供試体を作製した。そして、水頭式吸引法により排水・吸水の順に履歴を与えた。各試験ケースの供試体諸量を表1に、得られた水分特性曲線を図1に示す。図より、水分特性曲線の密度依存性、およびヒステリシスが確認できる。また、図中のシンボル位置に当たる各飽和度でX線マイクロCTによる内部構造の可視化を行った。そして、得られたCT画像を土粒子・水・空気に三値化することで、図に示すような三値化画像を取得した。

三値化画像を画像解析することにより、接触点をカウントする。まず、撮影領域内の全ての土粒子をラベル化し、隣り合う土粒子同士を全て探索することで全接触点数を得る。その後、得られた全接触点の内、その周囲に液架橋が存在する接触点を液架橋の付着する接触点として判定し、その数をカウントする。最後にそれぞれの比を取ることで、液架橋割合を算出できる。

表1 豊浦砂保水性試験の供試体諸量

Case	Loose	Dense
Height (mm)	17.74	20.07
Diameter (mm)	18.00	20.00
Void ratio e	0.822	0.637
D_r (%)	42.38	93.63
Initial S_r (%)	100 (assumption)	

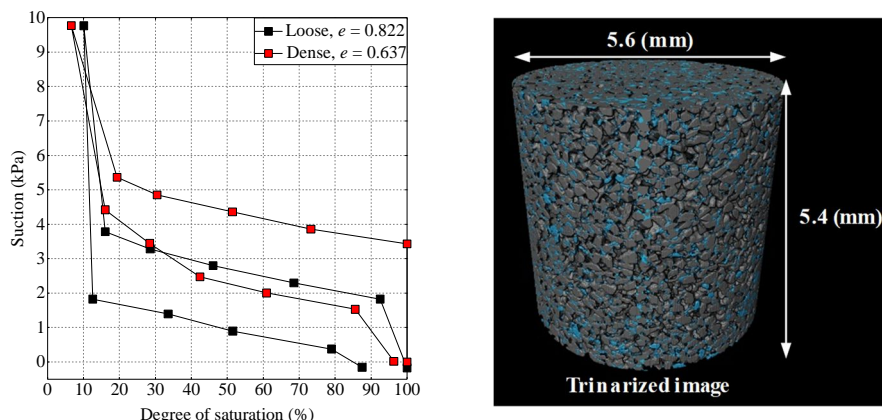


図1 豊浦砂保水性試験の実験結果および三値化画像

各飽和度で算出された液架橋割合と、飽和度との関係性をプロットしたものを図2に示す。この関係性を液架橋割合分布と呼ぶこととする。高・低飽和度で0に近づき、中程度の飽和度でピークを持つような分布となっている。また、そのピーク位置がゆるめなほど左に位置する分布となっている。これらの傾向を間隙水の存在形態に起因するものとして説明し、液架橋割合分布を物理的に有意なものであると判断して、関数近似によりモデル化を行うこととした。

液架橋割合分布を、分布によって関数近似した。分布は形状が液架橋割合分布と酷似し、フィッティングすると非常に良い相関を示すとともに、高・低飽和度で液架橋割合0、中程度の飽和度で液架橋割合1となる分布形状を確実に満足できる。その上で、液架橋割合分布のピーク位置飽和度が間隙比から理論的に算出できることに着目し、間隙比によってピーク位置が遷移する分布を表現した。実際に間隙比を推移させながら液架橋割合分布をプロットしたものを図3に示す。本研究ではこれを液架橋割合分布モデルとして用いる。

サクシオン寄与効果モデル全体像の概念図を、図4に示す。まず、各時間ステップで間隙比はMMモデルから算出されるものとして既知数とする。その上で、菊本ら(2009)³⁾が提案した水分特性曲線モデルに基づき、既知の間隙比、サクシオン、水分履歴から飽和度を算出する。そして、液架橋割合分布のピーク位置を間隙比から算出し、得られた分布のうち現在の飽和度に対応する部分が、液架橋割合として算出される。算出された液架橋割合はある接触点への液架橋付着確率と同義であり、サクシオンの寄与確率と言い換えることもできる。すなわち、サクシオン寄与度を定量的に評価した値である。

本研究では、液架橋の有するサクシオンによる粒子間結合力を、実験データをもとにモデル化した。そのために、サクシオンの寄与度を表すパラメータとして液架橋割合を導入し、先行研究で行われたX線マイクロCTを用いた豊浦砂保水性試験の実験データから液架橋割合を算出した。そして、液架橋割合を飽和度との関係性でプロットしたものを液架橋割合分布と呼び、これをモデル化した。得られた液架橋割合はサクシオンの寄与確率と同義であることから、サクシオン寄与度を定量的に評価した値であると結論付けた。

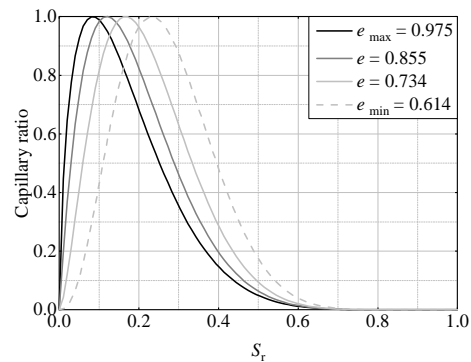
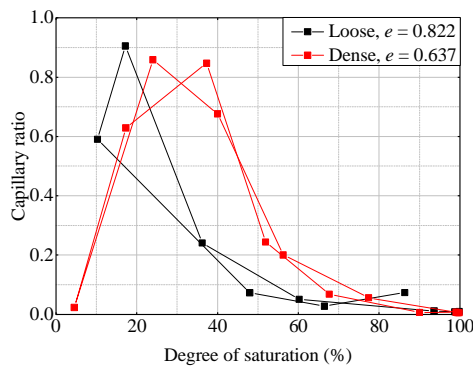


図2 実験データからプロットした液架橋割合分布

図3 間隙比に依存した液架橋割合分布

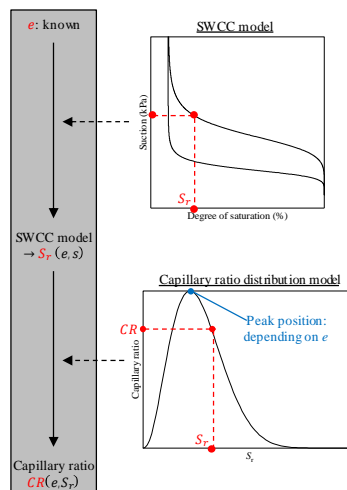


図4 サクシオン寄与効果の全体像概念図

参考文献

- 1) Kido, R.: Microscopic characteristics of partially saturated soil and their link to macroscopic responses, Doctoral thesis, Graduate School of Engineering, Kyoto University, 2019.
- 2) Matsushima, T. and Chang, C. S.: An elasto-plastic constitutive model of granular materials based on contact force distribution, *Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media*, pp.293-298, 2006.
- 3) 菊本 統, 京川裕之, 中井照夫: サクシヨン履歴・間隙比・温度の影響を考慮した水分特性曲線モデル, 応用力学論文集, Vol.12, pp.343-352, 2009.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 ESHIRO Shizuka, HIGO Yosuke	4. 巻 18
2. 論文標題 Introduction of density distribution in soil-water characteristic curve model with regular packing structure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Geotechnical Journal	6. 最初と最後の頁 17 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3208/jgs.18.17	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Otake Yu, Honjo Yusuke	4. 巻 62
2. 論文標題 Challenges in geotechnical design revealed by reliability assessment: Review and future perspectives	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 101129 ~ 101129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2022.101129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 TOMIZAWA Yukihiisa, TSUDA Yuto, YOSHIDA Ikumasa, OTAKE Yu	4. 巻 79
2. 論文標題 3D SPATIAL DISTRIBUTION ESTIMATION OF GEOTECHNICAL PROPERTIES CONSIDERING NONSTATIONARY IN THE DEPTH DIRECTION AND IMPROVEMENT OF CALCULATION EFFICIENCY BY KRONECKER PRODUCT	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-15056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fukushima Yo, Higo Yosuke, Matsushima Takashi, Otake Yu	4. 巻 16
2. 論文標題 Liquid bridge contribution to shear behavior of unsaturated soil: modeling and application to a micromechanics model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Geotechnica	6. 最初と最後の頁 2693 ~ 2711
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11440-021-01263-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 JIANG Xiaoyu、MATSUSHIMA Takashi	4. 巻 77
2. 論文標題 RHEOLOGICAL AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS IN GRANULAR SHEAR FLOW OF 2D ELLIPTICAL PARTICLES	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_297 ~ I_305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2_I_297	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Huang Quanshui、Ma Gang、Matsushima Takashi、Zhou Wei、Lin Mingchun	4. 巻 61
2. 論文標題 Effect of disordered pore distribution on the fracture of brittle porous media studied by bonded DEM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 1003 ~ 1017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2021.05.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Preud'homme Nicolas、Opsomer Eric、Vandewalle Nicolas、Lumay Geoffroy	4. 巻 249
2. 論文標題 Effect of grain shape on the dynamics of granular materials in 2D rotating drum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 06002 ~ 06002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202124906002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsushima Takashi、Blumenfeld Raphael	4. 巻 249
2. 論文標題 Statistical properties of cell stresses in 2D granular solids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 02006 ~ 02006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202124902006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Ikumasa, Tomizawa Yukihisa, Otake Yu	4. 巻 136
2. 論文標題 Estimation of trend and random components of conditional random field using Gaussian process regression	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers and Geotechnics	6. 最初と最後の頁 104179 ~ 104179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compgeo.2021.104179	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 ENDO Naoki, OTAKE Yu, HIGO Yosuke, MURAMATSU Shogo	4. 巻 76
2. 論文標題 VISUALIZATION OF MICRO MORPHOLOGY FOR SOIL MICROMECHANICS MODELING : AN APPLICATION OF SUPER-RESOLUTION TO X-RAY CT IMAGES	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_35 ~ I_44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.76.2_I_35	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Higo Yosuke, Kido Ryunosuke	4. 巻 Published Online
2. 論文標題 A microscopic interpretation of hysteresis in the water retention curve of sand	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Geotechnique	6. 最初と最後の頁 1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1680/jgeot.23.00084	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Kido Ryunosuke, Higo Yosuke
2. 発表標題 Characterization of water retention states in partially saturated sand based on morphology of pore water and pore air using X-ray micro computed tomography
3. 学会等名 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ohtani Yuya, Kido Ryunosuke, Higo Yosuke
2. 発表標題 Visualization of fabric tensor of very loose saturated sand under undrained triaxial compression
3. 学会等名 33rd KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, Singapore (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Uehira Kento, Kido Ryunosuke, Higo Yosuke
2. 発表標題 Change in coordination number of pore water in unsaturated sand under triaxial compression
3. 学会等名 33rd KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, Singapore (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江城静順, 肥後陽介
2. 発表標題 土粒子構造の密度不均一性を考慮した理論的な水分特性曲線モデルの構築
3. 学会等名 土木学会関西支部 2022年度 年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江城静順, 肥後陽介
2. 発表標題 規則充填構造を用いた水分特性曲線の推定における密度分布の導入とその適用範囲
3. 学会等名 第 57 回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江城静順, 肥後陽介
2. 発表標題 水分特性曲線の推定における間隙の空気侵入値モデルの影響
3. 学会等名 第66回理論応用力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Matsushima, Y. Higo, Y. Otake
2. 発表標題 4-CELL ANALOGICAL MODEL TO DESCRIBE PLASTIC SHEAR BEHAVIOR OF GRANULAR SOLID
3. 学会等名 International Conference on Nonlinear Solid Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Matsushima, Y. Higo, Y. Otake
2. 発表標題 4-cell analogical model to describe plastic shear behavior of granular geomaterials
3. 学会等名 33rd ALERT Geomaterials workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福島陽, 肥後陽介, 大竹雄, 松島亘志
2. 発表標題 単一粒径砂における粒子間結合力へのサクシオン寄与効果のモデル化
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 肥後陽介, 福島陽, 大竹雄, 松島亘志
2. 発表標題 単一粒径砂における粒子間結合力への サクシオン寄与効果のMMモデルへの適用
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松島 亘志 (Matsushima Takashi) (60251625)	筑波大学・システム情報系・教授 (12102)	
研究分担者	大竹 雄 (Otake Yu) (90598822)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------