

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02402

研究課題名(和文) 液状化中の誘導異方性の変化を考慮した再液状化被害予測手法の開発と対策効果の検証

研究課題名(英文) Development and validation of a damage prediction method for reliquefaction taking into consideration the variation in induced anisotropy during liquefaction

研究代表者

山田 正太郎 (Yamada, Shotaro)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70346815

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：室内要素実験を元に液状化中に誘導異方性の系統的な変化が生じていることに加え、液状化終了時の異方性の状態が再液状化抵抗に大きな影響を与えることを明らかにした。砂質土が示すこのような液状化・再液状化挙動を数値的に再現するために、SYS Cam-clay modelとDrucker-Prager modelを融合した複合負荷弾塑性構成式を提案した。また、動的な水～土連成解析コードに同モデルを実装した上で、液状化および再液状化現象の諸特性が説明できることを示した。さらに、浸透固処理工法による液状化対策を例に挙げ、開発した解析理論に基づいて液状化対策効果を評価可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液状化被害を受けた地区に住む人々は、またいつ訪れるかわからない地震による再液状化被害に常に不安を憶えながら生活を営んでいる。また、当該地区は人口流出現象にも直面している。これらの不安を軽減するために様々な液状化対策工法が提案されているが、その効果を定量的に予測するのは難しい。本研究では、誘導異方性に着目して再液状化現象の主要なメカニズムを明らかにするとともに、砂質土の誘導異方性の変化を考慮可能な数理モデルを開発した。さらには、提案モデルを水～土連成解析コードに実装し、液状化対策効果の評価に適用可能であることを例証した。

研究成果の概要(英文)：Based on laboratory element experiments, it was revealed that a systematic change in induced anisotropy occurs during liquefaction and that the state of anisotropy at the end of liquefaction significantly affects the re-liquefaction resistance. To numerically reproduce such liquefaction and re-liquefaction behavior of sandy soils, we proposed the combined loading elasto-plastic constitutive equation that integrates the SYS Cam-clay model and the Drucker-Prager model. The model is implemented in a dynamic soil-water coupled analysis code and is shown to explain various characteristics of liquefaction and re-liquefaction phenomena. Furthermore, this study demonstrated that the liquefaction countermeasures using the permeation grouting method could be evaluated based on the developed analysis theory.

研究分野：土木工学

キーワード：液状化 再液状化 水～土連成解析 弾塑性 動的解析 誘導異方性

1. 研究開始当初の背景

2018年北海道胆振東部地震で、札幌市清田区里塚にて甚大な液状化被害が生じた。2011年東北地方太平洋沖地震でも、千葉県浦安市は市の面積の86%で液状化被害に見舞われた。復旧・復興が進んでも、これらの液状化被害を受けた地区に住む人々は、またいつ訪れるかわからない地震による再液状化被害に常に不安を憶えながら生活を営んでいる。また、当該地区は人口流出現象にも直面している。一方で、むしろ政策として当該地域を住宅地以外の方法で利用すべきとの選択的土地利用を主張する意見も聞こえる。また、3.11以降、再液状化への対策工法が多数提案されている。しかしながら、これらの工法が災害からの短期間での提案であったこと、再液状化現象のメカニズムが十分に理解されていなかったこと、地盤の力学的性質を記述する数理モデル化に限界があることなどから、理論的な検証が十分になされないまま今日を迎えている。

2. 研究の目的

本研究は、このような議論に科学的根拠を持って臨むために、一度液状化被害を受けた地域の再液状化現象を含む液状化被害予測を可能にする数値解析技術確立することを目的とする。加えて、本研究では、開発した数値解析技術を液状化対策手法の有効性の検証に用いることを目指す。

3. 研究の方法

本研究では以下の4つのプロセスに分けて研究を推進した。

(1) 室内要素試験による再液状化現象のメカニズムの解明

三軸試験および中空ねじり試験装置を用いて液状化中に誘導異方性が変化する様子を捉える。また、液状化終了時の異方性の発達程度が再液状化抵抗に与える影響について明らかにする。

(2) 液状化および再液状化現象を表現可能な弾塑性構成式の開発

粘土と砂を区別しない統一的な土の弾塑性構成式の開発を試みた。特に誘導異方性の変化を適切に記述することで、砂のサイクリックモビリティの表現を目指した。さらに、(1)で実施した再液状化試験のシミュレーションを行うことで、開発した構成式の妥当性を検証した。

(3) 水～土連成解析による液状化・再液状化現象の数値シミュレーション

(2)で開発した弾塑性構成式を慣性力を考慮した水～土連成解析コードに実装して、液状化・再液状化現象の数値シミュレーションを実施した。特に、(1)で明らかにした再液状化のメカニズムが境界値問題の中でも再現され得るのかという点に重点を置いて数値解析を実施した。

(4) 水～土連成解析による液状化対策工法の数値シミュレーション

(3)で開発した数値解析コードを用いて既存の液状化対策工法の有効性を照査することを試みた。本研究では浸透固化処理工法を取り上げて、その有効性について照査を行った。

4. 研究成果

(1) 誘導異方性の変化に着目した再液状化現象のメカニズムの解明

三軸試験装置および中空ねじり試験装置を用いた系統的な実験により、液状化中に生じる誘導異方性の変動の様子を捉えるとともに、再液状化に及ぼす異方性の影響を把握した。その結果、液状化終了時の異方性が高位に発達している場合には、ある方向にせん断された際に、非常にゆるい砂に似た挙動が現れるために、再液状化強度が著しく低下することを明らかにした。図1は再液状化試験結果の一例を表しており、液状化抵抗が低くなる場合もあれば高くなる場合もあることが示されている。このようなことが生じるのは、液状化試験をどこで停止するのかということに応じて異方性の発達程度が異なるためである。この実験のように、再液状化メカニズムが明らかになっていると、次の液状化のしやすさを意図的に制御することも可能である。この他にも、誘導異方性の存在に起因する諸現象を様々なせん断試験を実施することで把握した。

(2) 複合負荷弾塑性構成式の提案

骨格構造概念に基づくSYS Cam-clay modelと、非排水せん断挙動の特徴を再現可能な非関連Drucker-Prager modelが同時に負荷を呈することが可能な複合負荷弾塑性構成式を開発した。図2は複合負荷弾塑性構成式を構成する2つのモデルの負荷面を表している。既往の二重硬化モデルもCam-clay系のモデルとDrucker-Prager modelの降伏曲面を用いるが、このモデルでは択一的にしか負荷を呈することしかできないのに対し、複合負荷弾塑性構成式は、独立な二つのモデルが同時に複合的な負荷状態を呈することができるという点で今までにない全く新しい数理構造を有している。複合負荷弾塑性構成式に誘導異方性の効果を取り込むことによって、液状化および再液状化現象が再現可能であることを例証した。これらの一連の取り組みの中で、誘導異方性の新たな発展則を提案した。この発展則は線形な回転硬化則を変数変換によって非線

形な発展則に変換するものであり、この発展則により非対称な振幅を持つ繰返しせん断挙動も再現が可能になった。さらに、中間主応力の影響を考慮可能な修正応力を定義し、複合負荷弾塑性構成式に導入した。中空ねじり試験装置を用いて中間主応力の大きさを変化させた実験を実施し、それを元に検証を行ったところ、構成式上で中間主応力の影響が適切に考慮可能であることが分かった。これらの要素を取り入れた複合負荷弾塑性構成式によって、図1に示す再液状化試験の再現を試みた。図3はそのシミュレーション結果である。図1の諸特徴をよく再現できていることが分かる。

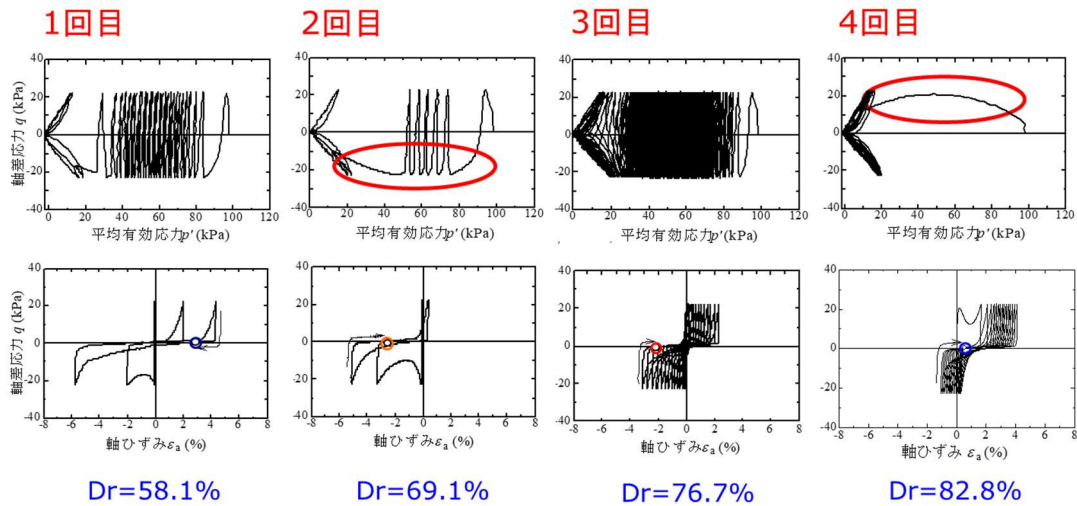
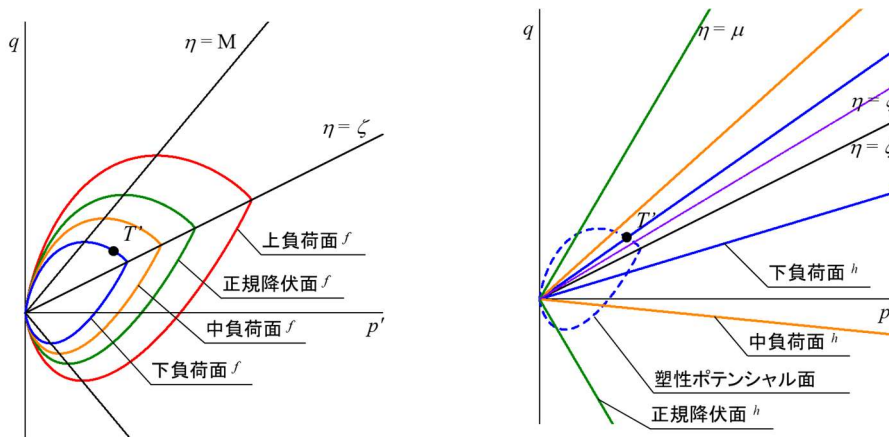


図1 再液状化試験結果



(a) SYS Cam-clay model

(b) DP mode

図2 複合負荷弾塑性構成式

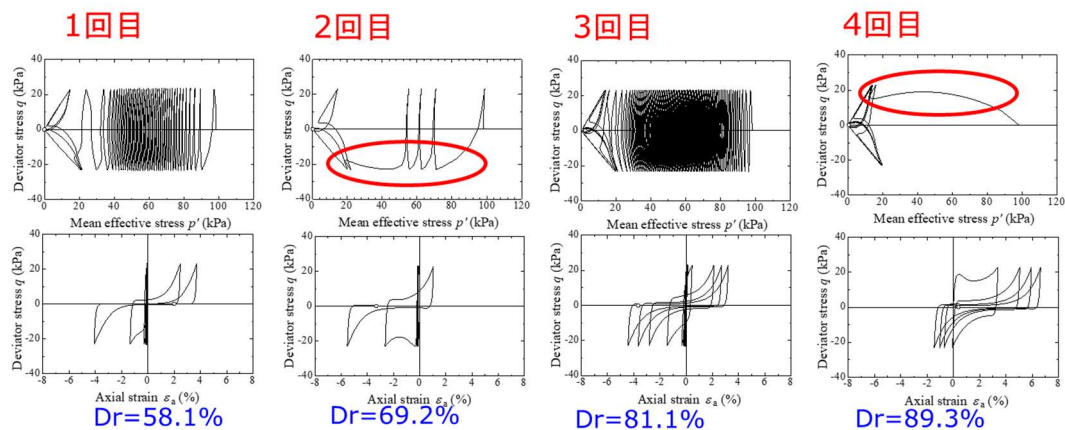


図3 複合負荷弾塑性構成式による再液状化試験のシミュレーション結果

(3) 水～土連成解析による液状化・再液状化現象の数値的再現

複合負荷弾塑性構成式を慣性力を考慮した水～土連成解析コードに実装した。また、同解析コードの時間積分スキームに整合するように応力および内部状態変数の更新アルゴリズムを構築した。水～土連成の境界値問題として再液状化が表現可能であることを例証するために、水平成層地盤を想定した一次元の地震応答解析を実施した。図4は入力加速度と解析ケースを示した模式図である。はじめに、通常地震応答解析を行った。その後、圧密計算を行った後に、入力加速度を半分にして再液状化計算を行った。これら一連の計算を基本ケースとする。比較のために、地震履歴を受けていない地盤に対しても入力加速度を半分にして計算を行った。これを比較ケースと呼ぶ。図5は地震終了時の過剰間隙水圧比分布を示している。基本ケースと比較ケースを比べた場合、入力を半分にした比較ケースの方が液状化範囲が明らかに小さくなっていることが分かる。さらに、基本ケースの2回目の計算結果を見ると、入力を半分にしたにもかかわらず、1回目と同様な範囲で液状化が生じていることを確認できる。図6は地表面の加速度応答を示している。基本ケースの1回目の地震時は地盤が液状化したことにより、地表面に地震波が伝わらなくなる様子や、サイクリックモビリティの影響により、スパイク状の波形が発生している。基本ケースの2回目の地震時にも同様な特徴が現れているが、比較ケースは顕著な液状化が発生していないため、同様な特徴は現れていない。図7は地盤内の要素挙動を表した図である。基本ケースの2回目の有効応力経路に着目すると、ある方向に载荷した際に、有効応力が著しく減少していることを確かめることができる。これは、図1でも見られる特徴であり、初回の地震の影響で誘導異方性が高位に発達したために、液状化抵抗が低下したことを示している。このように、一連の解析の中で、一度液状化した地盤の液状化強度が液状化履歴を受ける以前よりも低下することを表現可能であるとともに、このような現象が生じるのは、液状化終了時に異方性が高位に発達しているためであることを解析的に示すことができた。

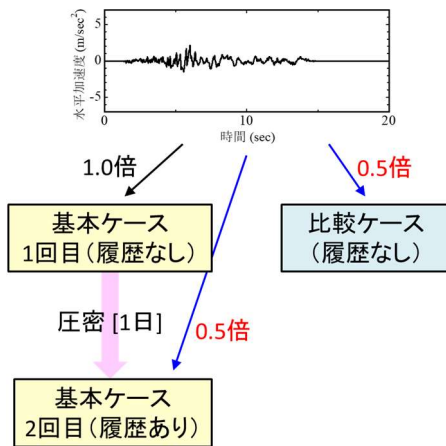


図4 入力地震動と解析ケース

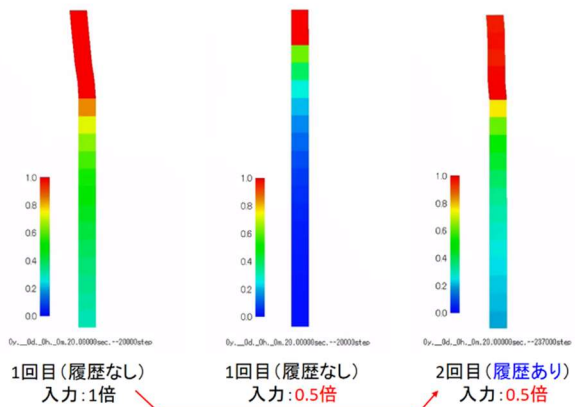


図5 地震終了時の過剰間隙水圧比分布

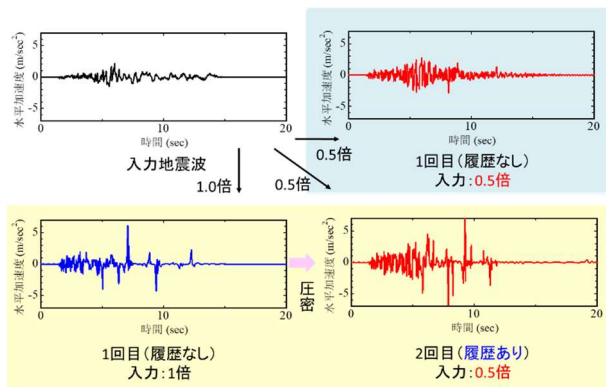


図6 地表面応答

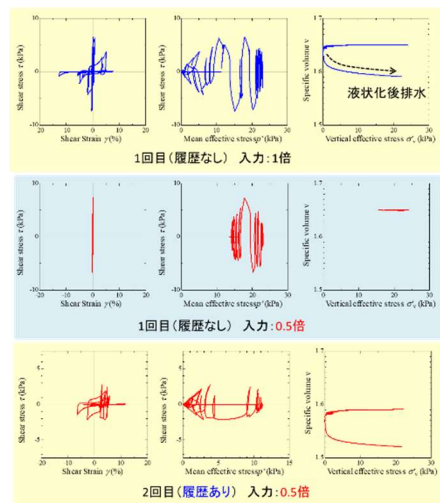


図7 地盤内の要素挙動

(4) 水～土連成解析を用いた浸透固化処理工法による液状化対策効果の照査

開発した計算コードを用いて液状化対策工法の対策効果について照査した。数ある液状化対策工法の中で浸透固化処理工法に焦点を当てた。図8は仙頭ら(2015)が実施した浸透

固化処理土の繰返し非排水せん断結果である。振幅が大きいこともありサイクリックモビリティを呈しているが、ひずみの進展が抑制されていることが特徴である。図 9 は複合負荷弾塑性構成式により、この試験を再現した結果であり、概ねその特徴を捉えることができる。次に、盛土法尻直下を浸透固化処理工法により改良した場合を想定して水～土連成解析を実施した。図 10 は計算に用いた有限要素メッシュを示し、図 11 はせん断ひずみ分布を示している。比較のために無改良の場合のせん断ひずみ分布も示した。改良域においてせん断ひずみの発生が顕著に抑制される様子が再現できている。図 12 は図 10 に示す各点の地表面沈下の様子を表している。改良域直上の(B-3)点では地震後の圧密沈下が抑制されていることを確認できる。これらの結果が示す通り、開発した構成式を搭載した水～土連成解析コードを用いて、浸透固化処理工法により、液状化および地震後の圧密沈下が大幅に抑制できることを例証した。この解析例に見られるように、開発した数値解析コードでは、液状化から地震後の圧密までを統一的に扱うことが可能である。本研究を通して、このような飽和地盤を対象とした統一的数値解析理論・数値解析コードを開発することができた。

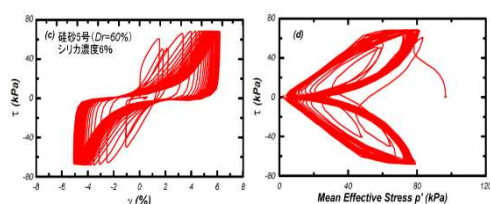


図 8 仙頭ら (2015) による実験結果

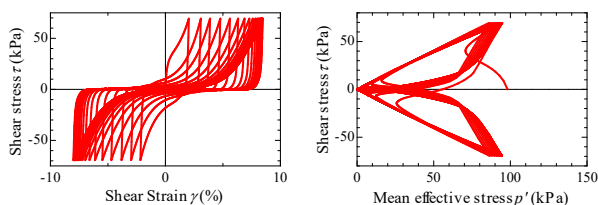


図 9 複合負荷弾塑性構成式による計算結果

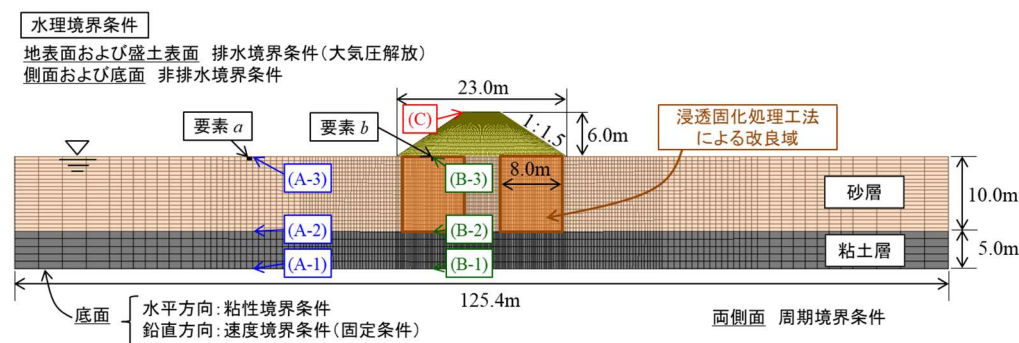
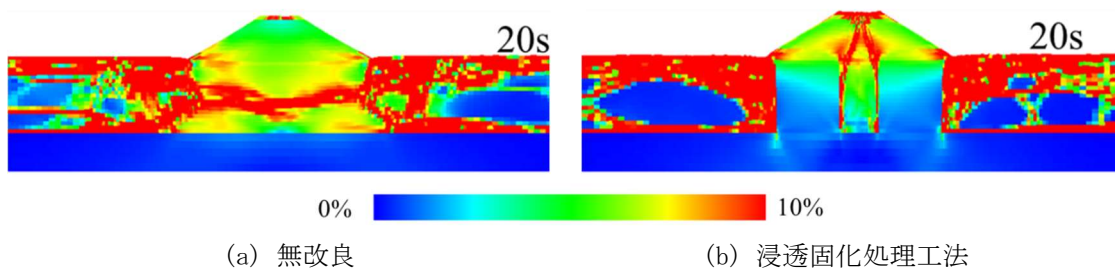


図 10 有限要素モデル



(a) 無改良

(b) 浸透固化処理工法

図 11 せん断ひずみ分布

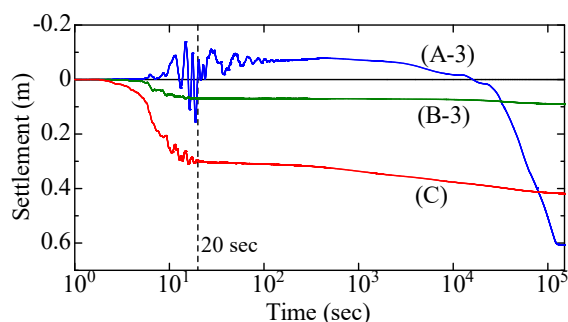


図 12 浸透固化処理工法を施したケースの地表面沈下量

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamada Shotaro, Noda Toshihiro	4. 巻 23
2. 論文標題 Finite-Deformation Cam-Clay Model Considering Elastic Dilatancy and Soil Skeleton Structure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Geomechanics	6. 最初と最後の頁 04022289-1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/IJGNAL.GMENG-7117	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 KUBOTA Tomoya, YAMADA Shotaro, KYOYA Takashi	4. 巻 78
2. 論文標題 SOIL-WATER COUPLED ANALYSIS METHOD WITH CAM-CLAY MODEL BASED ON MULTIPLICATIVE DECOMPOSITION OF DEFORMATION GRADIENT	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering)	6. 最初と最後の頁 251 ~ 260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejge.78.3_251	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 Hoshi Keitaro, Yamada Shotaro, Kyoya Takashi	4. 巻 55
2. 論文標題 Finite Element Analysis of Expansive Bedrock Considering Electro-chemo-mechanical Coupling Phenomena in Crystal Layers of Clay Minerals and Internal Structural Degradation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Rock Mechanics and Rock Engineering	6. 最初と最後の頁 7387 ~ 7407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00603-022-02997-3	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 Yamada Shotaro, Sakai Takayuki, Nakano Masaki, Noda Toshihiro	4. 巻 148
2. 論文標題 Method to Introduce the Cementation Effect into Existing Elastoplastic Constitutive Models for Soils	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering	6. 最初と最後の頁 04022013-1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002727	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 Yamada Shotaro, Noda Toshihiro, Nakano Masaki, Asaoka Akira	4. 巻 141
2. 論文標題 Combined-loading elastoplastic constitutive model for a unified description of the mechanical behavior of the soil skeleton	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computers and Geotechnics	6. 最初と最後の頁 104521-1 ~ 24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compgeo.2021.104521	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 窪田友也, 山田正太郎, 松原誠志朗, 京谷孝史	4. 巻 2021
2. 論文標題 変形勾配の乗算分解型有限変形理論に基づくCam-clay modelの定式化とF-bar法による体積ロッキング現象の回避	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 20210001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 窪田友也, 京谷孝史, 山田正太郎, 松原成志朗
2. 発表標題 Cam-clay model を用いた有限変形解析における体積ロッキング現象の回避に関する検討
3. 学会等名 第75回土木学会年次学術講演会講演
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小松龍之介, 山田正太郎, 京谷孝史, 松原成志朗, 劉曉東
2. 発表標題 微小変形理論に基づく Cam-clay modelの陰的応力更新アルゴリズムの構築
3. 学会等名 第75回土木学会年次学術講演会講演
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ganiev, J., Masaki, N. and Shotaro, Y.
2. 発表標題 Reproduction of shear behavior of fiber-reinforced Toyoura sand by SYS Cam-clay model
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会講演
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Xiaodong LIU, Seishiro MATUBARA, Syotaro YAMADA, Takashi KYOYA
2. 発表標題 Numerical analysis of the mechanical behavior of a tunnel excavated in swelling rockmass
3. 学会等名 第47 回岩盤力学に関するシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 窪田友也, 山田正太郎, 京谷孝史, 松原誠志朗
2. 発表標題 Cam-clay model を用いた有限変形解析における体積ロッキング現象の回避に関する検討
3. 学会等名 計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 窪田友也, 山田正太郎, 京谷孝史, 松原誠志朗
2. 発表標題 変形勾配の弾塑性乗算分解に基づく有限変形解析コードの開発とその精度検証
3. 学会等名 令和元年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小松龍ノ介, 山田正太郎, 京谷孝史, 松原誠志朗, 劉曉東
2. 発表標題 歪弾性構成則に基づくCam-clay modelの陰的応力更新アルゴリズムの構築
3. 学会等名 令和元年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shotaro Yamada, Toshihiro Noda, Masaki Nakano and Akira Asaoka
2. 発表標題 A Proposal of Combined Loading Elasto-plastic model
3. 学会等名 Asian Pacific Congress on Computational Mechanics
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamada, S. and Nakano, M.
2. 発表標題 Basic study on the anisotropy of sand by using hollow cylindrical torsional shear apparatus
3. 学会等名 Proc. of 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田正太郎, 野田利弘, 中野正樹, 浅岡顕
2. 発表標題 複合負荷弾塑性構成式への誘導異方性の新たな発展則の導入と妥当性の検証
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会講演 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部悠太, 山田正太郎, 京谷孝史
2. 発表標題 変形勾配の乗算分解理論に基づく等方性Cam-clay modelの再構築
3. 学会等名 令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米田玄德, 山田正太郎, 京谷孝史
2. 発表標題 動的問題における陰的Runge-Kutta法による時間積分法の構築および検証
3. 学会等名 計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部悠太, 山田正太郎, 京谷孝史
2. 発表標題 Eshelby-zeta 応力を用いた有限変形等方性 Cam-clay model の構築
3. 学会等名 計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部悠太, 山田正太郎, 京谷孝史
2. 発表標題 変形勾配の乗算分解型等方性 Cam-clay model の再構築
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会講演概要集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Abe, Y., Yamada, S., Kyoya, T.
2. 発表標題 Reconstruction of isotropic Cam-clay model based on multiplicative decomposition of deformation gradient
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Abe, Y., Yamada, S., Kyoya, T.
2. 発表標題 Reconstruction of isotropic Cam-clay model based on finite deformation theory
3. 学会等名 17th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Abe, Y., Yamada, S., Hoshi, K., Kyoya, T.
2. 発表標題 Reconstruction of Cam-clay model based on finite deformation theory guaranteeing the existence of the state boundary surface
3. 学会等名 XVII International Conference on Computational Plasticity
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 窪田友也, 山田正太郎, 京谷孝史
2. 発表標題 変形勾配の乗算分解に基づくCam-clay model を導入した水～土連成有限要素解析
3. 学会等名 計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小松龍ノ介, 山田正太郎, 京谷孝史
2. 発表標題 亜弾性構成則を用いたCam-clay modelの中点法による陰的応力更新アルゴリズムの構築
3. 学会等名 計算工学講演会論文集
4. 発表年 2021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	京谷 孝史 (Kyoya Takashi) (00186347)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	
研究分担者	野田 利弘 (Noda Toshihiro) (80262872)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	
研究分担者	中野 正樹 (Nakano Masaki) (00252263)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	
研究分担者	浅岡 顕 (Asaoka Akira) (50093175)	公益財団法人地震予知総合研究振興会・地震防災調査研究部・副首席主任研究員 (82669)	

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
---------	---------