

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04682

研究課題名（和文）東京東部低地における液状化等による防潮施設の被害予測

研究課題名（英文）Prediction of damage to tide protection facilities due to liquefaction in the lowlands of eastern Tokyo

研究代表者

竹山 智英（Takeyama, Tomohide）

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：00452011

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ボーリング調査結果等を利用して三次元地盤モデルを作成し、地盤が経験してきた応力履歴を表すパラメータである過圧密比を地震計測結果とシミュレーションを基に機械学習によって推定する手法の構築を行った。また、地震応答解析を行うための解析コードを保守・拡張が容易にできるように可読性を重視し、GPUによる並列化を行った。東京都23区の地盤モデルを作成し、地震応答解析を行って、液状化リスクの評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果の学術的意義や社会的意義（200字程度，最大300文字，改行2回まで）

広域の三次元地盤モデルをボーリングデータ等から、ほぼ自動的に構築する技術開発を行った。学術的意義としては、簡易的な地盤調査のみでは困難な過圧密比の推定を機械学習により可能であることを示した。土粒子と間隙水の相互作用を考慮した物理モデルに基づくシミュレーションに使用することを前提とした数値モデルであり、これにより液状化リスク評価を広域にシミュレーションベースで行えることが社会的意義である。

研究成果の概要（英文）：In this study, a method was developed to create a three-dimensional ground model using the results of borehole investigations and other data. A machine learning method was developed to estimate the over consolidation ratio, a parameter that represents the stress history experienced by the ground, among the material constants of the ground. Observed earthquake records and simulation results were used to train the neural network. An analysis code for seismic response analysis was developed to enable parallel computation on a GPU. Readability was emphasized so that the analysis code can be easily maintained and extended. A ground model of the 23 wards of Tokyo was created and earthquake response analysis was performed to evaluate liquefaction risk.

研究分野：地盤工学

キーワード：地震応答解析 過圧密比 機械学習 液状化 地盤モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

江東デルタの低平地には地下水くみ上げにより広域的に地盤沈下が生じたため、地盤高が満潮位よりも低いゼロメートル地帯と呼ばれる地域がある。1970年代には揚水が規制され、現在では地盤沈下は落ち着いているものの、それまでに生じた沈下は回復せずに残ったままである。生じた沈下は最大で約4.5mにも達している。首都圏ではゼロメートル地帯のみならず臨海地域全体への高潮の侵入を防ぐために堤防、防潮堤、水門等の防潮施設が設置されている。現在、首都直下地震の発生が懸念されており、国や地方公共団体並びに関係諸機関で対策が取られているが、地震による揺れや液状化によって、こういった防潮施設が被災し、機能不全を起こす可能性が全くないわけではない。その後、防潮施設の修復が完了しないうちに台風による高潮が発生した場合、甚大な被害を受けることになってしまうのではないかと危惧している。そのため、首都直下地震による東京都東部低地を対象とした広域的な被害予測が必要であると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、東京東部低地の地震応答・液状化シミュレーションを行い、防潮施設や治水施設に与える被害の程度を評価することであり、そのシミュレーションを実施するためにボーリング調査結果等を利用して三次元地盤モデルを作成し、地震計測結果を用いてその精度を継続的に向上させることができる手法を構築することである。

3. 研究の方法

(1) 三次元地盤モデルの構築

ボーリングデータ等から数値計算に使うことを前提とした三次元地盤モデルを自動構築する技術開発を行った。基となるデータは、ボーリングデータ(XMLファイル)、数値地盤標高データ(XMLファイル)であり、地盤パラメータの推定には、推定式または値をユーザー定義できるようにした。ボーリングデータから、緯度経度、孔口標高、水位、土質岩種類区分、標準貫入試験結果を読み込み、鉛直方向に等間隔に情報を持たせた。標準貫入試験の結果であるN値は、等間隔にデータがあるわけではないので、逆距離荷重法によって補完する。また、地盤パラメータの推定を行う際、土質岩種類区分ごとに異なるパラメータ推定式を用いることが考えられるが、ボーリングデータに記載されている土質岩種類区分は多岐にわたるため、土質岩種区分に応じたユーザーが定義する土質カテゴリを設定する。次に数値標高データを読み込み、鉛直方向に等間隔に情報を持つボーリングデータと組み合わせ、グリッド状に情報を持つ三次元モデルを作成する。各格子点は、土質カテゴリを持つ。土質カテゴリは、水平面内で最近傍のボーリングデータの土質カテゴリと一致させた。また、地表面は標高データに合わせた。次にグリッド状のモデルの土質カテゴリが同一の格子点を囲むように領域を作成する。土質カテゴリ毎の境界(主に層境界)に要素の面があるようにするためである。土質カテゴリ境界面の作成には、Marching Cubes法¹⁾を用いた。次に有限要素法用のモデルを作成する。メッシュの作成にはオープンソースソフトウェアであるGmsh²⁾を用いた。地盤パラメータの推定を行うため、条件と推定式または値をユーザーが定義し、それらにしたがって設定が行われるようにした。要素ごとにある条件にあてはまるときにある推定式を適用し、パラメータ推定が行われる。

(2) 過圧密比の推定

本研究で行うシミュレーションに使用する構成モデルに必要な地盤パラメータは、三軸試験などの適切な室内試験結果があれば決定することができるが、それらの室内試験は高額であるため、通常のボーリング調査では実施されないものである。そのため、構成モデルに必要なパラメータは、例えばN値との相関性などから推定する。N値からは強度や剛性に関するパラメータを推定することができるが、その地盤が経験してきた応力履歴を表すパラメータである先行上載圧(過去その地盤が受けた最大の上載荷重)はN値とは相関性がないため推定することができない。しかし地盤の応力履歴は液状化強度に影響を与えることが知られており、重要なパラメータのひとつである。したがって、先行上載圧は、過去の地震計測結果とシミュレーションをもとに機械学習によって推定する手法を提案した。

(3) GPU並列化

本研究では、地震応答解析・液状化解析に地盤応答解析コードであるDACSAR-1³⁾を使用している。DACSAR-1によってある程度大規模な解析を実施した場合、現在の計算速度では不十分である。民間企業等が比較的規模の大きな解析を安価に行うことができるようにするため、DACSAR-1のGPU並列化を行った。その際、今後の発展性を考慮し、可読性及び拡張性を重視した実装を行った。並列化にはNVIDIA社が提供しているCUDA(Compute Unified Device Architecture)と呼ばれる同社製GPU向けのプログラミング言語を用いた。

(4) 東京23区の液状化リスク評価

ボーリングデータを基に東京23区の地盤モデルを作成し、地震応答解析を行って、液状化リスクの評価を行った。

4. 研究成果

(1) 三次元地盤モデルの構築

神戸市灘区住吉山手渦森台周辺を対象として、三次元地盤モデルを作成した例を示す。Kunijiban⁴⁾から得られた12本のボーリングデータを使用している。図-1に読込んだ数値標高データとボーリングデータ、それらを組み合わせて作成したグリッド状のモデルを可視化したものを示す。土質カテゴリとして、粘土、砂、礫を指定した。図-2に土質カテゴリ境界面を示す。図-3にGmsh²⁾を用いてメッシュ分割し、パラメータを設定した例を示す。

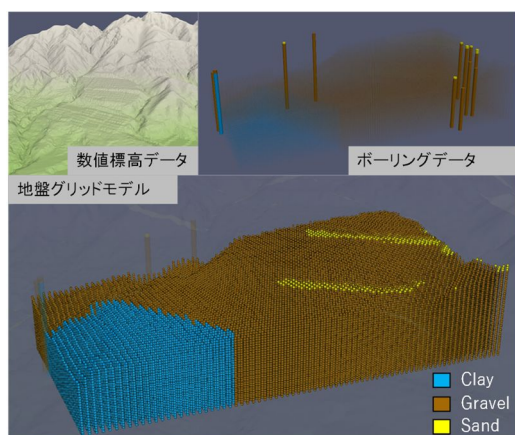


図-1 数値標高データとボーリングデータから作成されたグリッド状のモデル

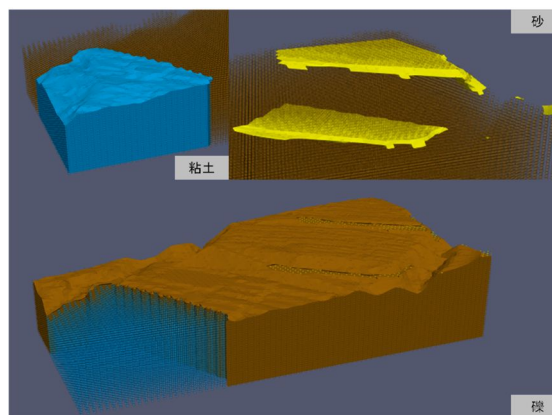


図-2 土質カテゴリの境界領域

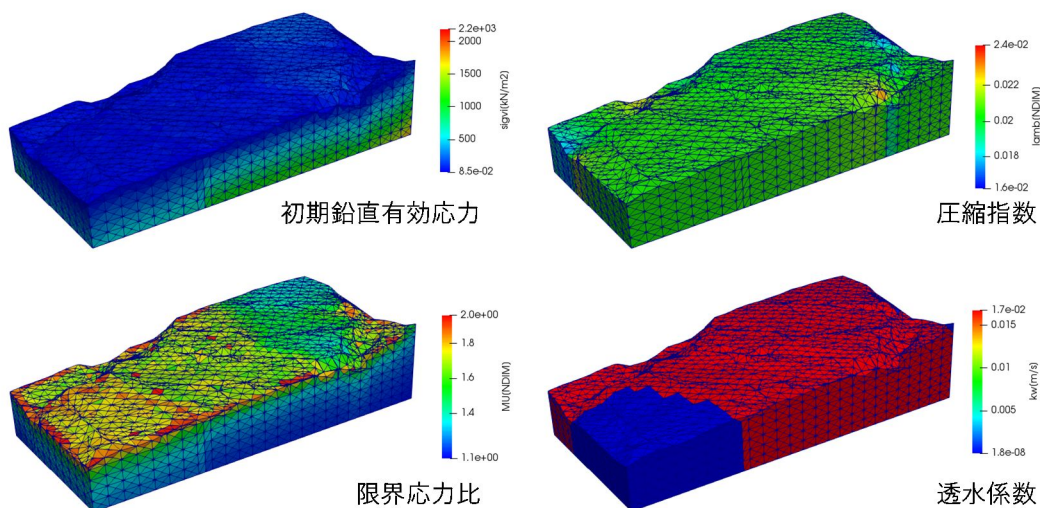


図-3 メッシュと設定された地盤パラメータ

(2) 過圧密比の推定

本研究では、過圧密比を推定する手法としてニューラルネットワークを用いた。設定したニューラルネットワークは、5層（入力層、中間層3層、出力層）である。ニューラルネットワークの学習には確率的勾配法を用いた。対象地点は、国土交通省港湾局による観測点（新木場）である。観測点の地盤情報を図-4に示す。この地盤を埋土・盛土層、上部砂質土層、シルト層、下部砂質土層の4層に分類し、各層で過圧密比が一定であると仮定した。過圧密比以外の地盤パラメータは、N値との相関関係から推定し、過圧密比をランダムに設定した2000ケースの地震応答解析を実施し、教師データとして使用した。推定された過圧密比は埋土・盛土層で5.9、上部砂質土層で13.2、シルト層で1.0、下部砂質土層で4.6であった。推定された過圧密比を用いて、地震応答解析を実施した。図-5に地表面加速度の観測結果と計算結果のフーリエスペクトルを示す。概形はおおよそ一致し、推定された過圧密比によって、実際の地震の応答を概ね再現可能であることを確認した。

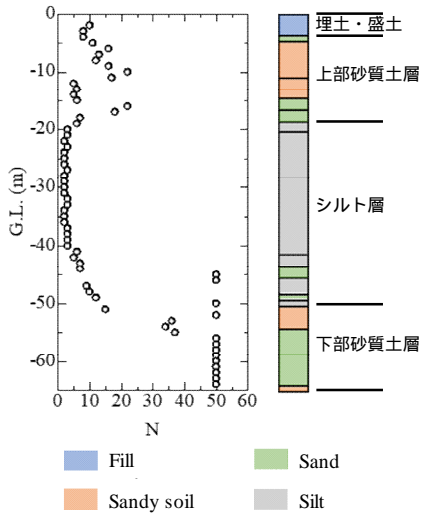


図-4 観測地点の地盤情報

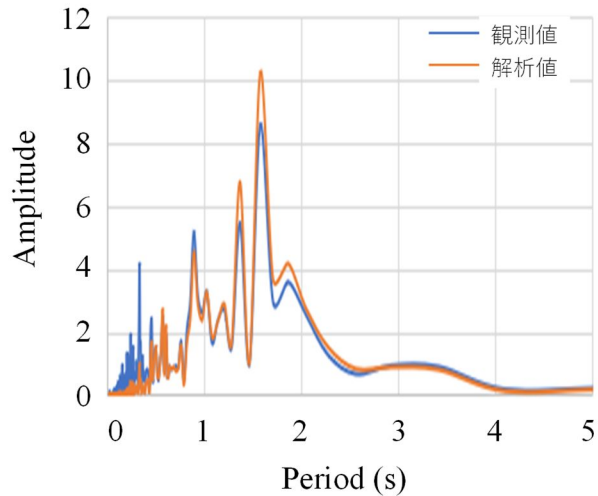


図-5 地表面加速度のフーリエスペクトル

(3) GPU 並列化

可読性を確保しつつ、CPU メモリから GPU 用メモリへのデータコピーの際に生じる処理コストを削減するため、レポジトリ構造と呼ぶデータ構造を実装した。可読性、拡張性を保つため、有限要素法による解析で使用する要素をクラスとして定義することを考える。要素クラスには、要素として具備すべき変数がメンバ変数として定義される。例えば、各種積分点での応力やひずみなどである。解析で使用する複数の要素のオブジェクトをベクトルデータとして用いる場合、各要素が持っている応力やひずみなどのメンバ変数は、それぞれのメンバ変数に対して連続したメモリ領域に格納されない。CPU メモリから GPU メモリへのコピー、またはその逆を行う際、連続したメモリ領域をコピーする方が高速であるため、メンバ変数用の連続したメモリ領域をメンバ変数ごとに予め用意しておく、各要素クラスのメンバ変数には確保されたメモリ領域を割り当てるようにすれば、各メンバ変数のコピーを高速に行うことができる。この予め用意しておくメンバ変数用の連続したメモリ領域を扱うためにレポジトリクラスを用意した。

有限要素法で使用する要素オブジェクトは、ベクトルデータとして格納するのが自然である。ただし、要素には 4 節点四角形要素、3 節点三角形要素、8 節点六面体要素など様々な形状、節点数のものがあ、それぞれの要素で必要な処理が異なる。例えば、剛性マトリクスを計算し返す関数 `cal_Kuu` をメンバとして持たせることを考えると、要素の基底クラス (element クラス) を定義し、`cal_Kuu` を仮想関数として持たせ、形状などの異なる各要素のクラスは基底要素クラスを継承させ、`cal_Kuu` をオーバーライドさせれば、要素クラスのインスタンスの実際の型によって適切な関数を呼び出すことができるため、可読性、保守性、拡張性の観点から望ましい。このような継承を利用した機能は多態性 (ポリモーフィズム) と呼ばれるものである。ただし、ポリモーフィズムを利用するためには、基底クラスのポインタに継承させたクラスのインスタンスを作成する必要がある。したがって複数の要素を定義するために `element*` 型の配列を用意する必要がある。そのためのメモリを動的に確保するため、`element**` 型の変数が必要となる。ここで、`element**` 型の `elems` をある関数に引数として渡す場合、ホスト関数では、ホストメモリのアドレスを、カーネル関数では、デバイスメモリのアドレスを渡す必要がある。ホスト関数に渡す場合は、上記のようなコーディングで良いが、カーネル関数に渡す場合は、`element*` 型メモリを `cudaMalloc` で確保し、カーネル内で `new` 演算子により要素のインスタンスを作成しなければならない。このような一連の処理をカプセル化するため、コンテナクラスを用意した。図-6 にコンテナクラスの概要を示す。

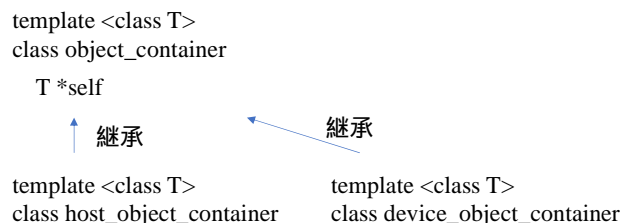


図-6 object_container クラスなど

`object_container` クラスはクラステンプレートであり、`T*` 型のメンバ変数を持つ。また、`host_object_container` クラス、`device_object_container` クラスは `object_container` クラス

を継承したクラステンプレートである。host_object_container クラスのコンストラクタでは、new[]演算子を用いて、self にホストメモリを確保し、device_object_container クラスのコンストラクタでは、cudaMallocを用いてself にデバイスメモリを確保する。object_container クラスにはメンバ関数 get が定義されており、T* self を返す。また、演算子[]のオーバーロードも定義されており、T self[] の参照を返す。

以上、レポジトリクラスとコンテナクラスについて述べたが、それらを組み合わせ、コンテナクラスに用意されるクラス T のメンバの情報をレポジトリに保存させることで、各メンバ変数のホストからデバイスへの、あるいはその逆のコピーをまとめて行うことができるようになる。

(4) 東京 23 区の液状化リスク評価

東京東部低地の液状化リスクを評価するために、東京 23 区の複数地点での一次元動的解析を実施した。構築した三次元地盤モデルから東西方向、南北方向に 1000m 間隔で解析対象地点を設定した。各解析地点の N 値および土質区分の分布を抽出し、地盤パラメータの設定を行った。本研究では、モデルケースとして 2 通りの地震動を用いて解析を行った。ひとつは東京都港湾局の HP で公開されている品川地震観測所で観測された東北地方太平洋沖地震の波形を使用した。もう一つは東京港における大正関東地震型の L2 地震動を使用した。図-7、図-8 にそれぞれの地震動に対する A.P. -30m 以浅の過剰間隙水圧比の最大値を示す。過剰間隙水圧比は過剰間隙水圧を初期の鉛直有効応力で除した値であり、一般に過剰間隙水圧比が 0.95 を超える場合に液状化が生じると考えられる。これらの図からそれぞれ地点毎の液状化リスクの違いがわかる。大正関東地震型 L2 地震動を用いたケースでは東北地方太平洋沖地震を用いたケースよりも過剰間隙水圧比の上昇している地点が多く見られた。この結果は、入力に使用した大正関東地震型 L2 地震動は東北地方太平洋沖地震と比較して最大加速度が大きいことが要因であると考えられる。一方、わずかではあるが、東北地方太平洋沖地震を用いたケースにおいて、大正関東地震型 L2 地震動を用いたケースよりも過剰間隙水圧比が上昇している地点が見られる。上述の通り、東北地方太平洋沖地震は大正関東地震型 L2 地震動と比較して振幅の小さな波が長時間続く波形となっている。この地震動の継続時間が液状化評価に影響していると考えられる。本解析では、江東区南部（臨海部）において、いずれのケースでも液状化リスクが高い地点が見られる。また、荒川や中川などの河川周辺では離散的に液状化リスクが高い地域が分布している。低地帯を水害から守る堤防や水門などの防潮施設は臨海部や河岸部に整備されるため、臨海部や河岸部の液状化リスクが高いという推定結果は憂慮すべき結果である。

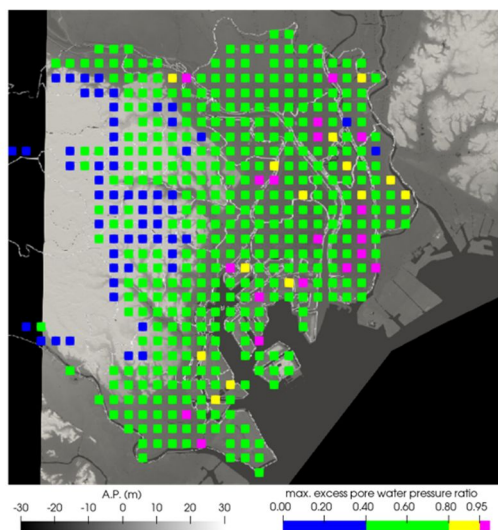


図-7 A.P. -30m 以浅の最大過剰間隙水圧比
(東北地方太平洋沖地震)

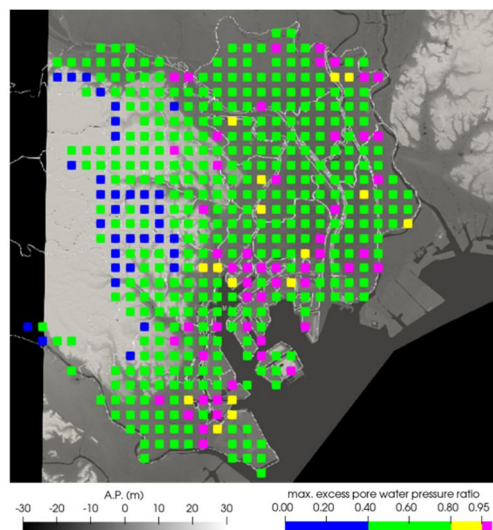


図-8 A.P. -30m 以浅の最大過剰間隙水圧比
(大正関東地震型 L2 地震動)

参考文献：

- 1) W.E. Lorensen, H.E. Cline: Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm, Computer Graphics, Vol. 21, No. 4, 1987.
- 2) <https://gmsh.info/>
- 3) Takeyama, T., Tachibana, S. and Furukawa, A.: A finite element method to describe the cyclic behavior of saturated soil, International Journal of Material Science and Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 20-25, 2015.
- 4) <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/index.html>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7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 Chen Jian、O-tani Hideyuki、Takeyama Tomohide、Oishi Satoru、Hori Muneo	4. 巻 32
2. 論文標題 A Probabilistic Liquefaction Hazard Assessment for Urban Regions Based on Dynamics Analysis Considering Soil Uncertainties	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Earth Science	6. 最初と最後の頁 1129 ~ 1138
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12583-021-1431-1	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 Takeyama Tomohide、O-Tani Hideyuki、Oishi Satoru、Hori Muneo、Iizuka Atsushi	4. 巻 26
2. 論文標題 Automatic Construction of Three-Dimensional Ground Model by Data Processing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 2881 ~ 2887
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMECH.2021.3105062	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 Ito Hajime、Ishida Yuko、Sansaard Veerasak、Takeyama Tomohide、Iizuka Atsushi	4. 巻 20
2. 論文標題 LEANING PAGODA OF AYUTTHAYA ANALYSIS WITH THREE-DIMENSIONAL EFFECTS AND GROUND UNCERTAINTY	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 161 ~ 169
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2021.82.j2108	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 Takeyama Tomohide、Honda Kazuya、Tachibana Shinya、Iizuka Atsushi	4. 巻 21
2. 論文標題 A PROCEDURE TO DETERMINE MATERIAL PARAMETERS BASED ON BOREHOLE DATA IN DYNAMIC ANALYSIS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	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） 10.21660/2021.85.j2228	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 Honda Kazuya, Takeyama Tomohide, Tachibana Shinya, Iizuka Atsushi	4. 巻 21
2. 論文標題 LIQUEFACTION RISK ASSESSMENT IN THE 23 WARDS OF TOKYO USING ELASTOPLASTIC ANALYSIS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 48 ~ 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21660/2021.86.j2270	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 有井拓也、太田有祐、橋伸也、竹山智英、飯塚敦	4. 巻 9
2. 論文標題 温度勾配による不飽和ペントナイト中の水分移動シミュレーション	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Kansai Geo-Symposium 論文集	6. 最初と最後の頁 218 ~ 222
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 -

1. 著者名 陳冉、竹山智英、銭谷誠司、橋伸也、飯塚敦	4. 巻 25
2. 論文標題 機械学習による過圧密比深度分布推定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 神戸大学都市安全研究センター研究報告	6. 最初と最後の頁 -
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 無
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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊関亮太、飯塚敦、竹山智英
2. 発表標題 地盤データの自動構築を目的とした大規模データ検索インベントリ
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤輝、竹山智英、大谷英之
2. 発表標題 広域の三次元有限要素モデルの自動構築とFEM解析プログラムへの適用
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林啓太、竹山智英、橘伸也、飯塚敦
2. 発表標題 動的解析を用いたアーチ効果の液化化への影響評価
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村彩奈、本田和也、竹山智英、橘伸也、飯塚敦
2. 発表標題 地盤グリッドモデルを用いた数値解析モデルの自動生成
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林勇佑、本田和也、竹山智英、橘伸也、飯塚敦
2. 発表標題 過圧密比の深度分布と地表面加速度の相関性
3. 学会等名 土木学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林勇佑, 本田和也, 竹山智英, 橘伸也, 飯塚敦
2. 発表標題 過圧密比の深度分布と地表面加速度の相関性
3. 学会等名 土木学会
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
---------------------------	-----------------------	----

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