

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04409

研究課題名（和文）数値解析のV&Vに基づく地盤の変形予測解析の信頼性向上

研究課題名（英文）Reliable deformation analysis based on verification and validation of numerical method

研究代表者

渦岡 良介（Uzuoka, Ryosuke）

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：40333306

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：数値解析による地盤の変形予測について、従来の決定論的な予測ではなく、各種モデル化の不確かさの定量化に基づく確率論的な予測を行い、予測結果の信頼性を向上させるを目的とする。数値解析による地盤の変形予測精度は、模型実験や現場計測事例との比較を通じて数多く検討されているが、変形予測の客観的な精度が保証されておらず、予測精度は実験者と計算者に強く依存している。本研究では、近年機械分野で導入が進んでいる数値解析のV&Vの考え方に基づき、模型実験と数値解析の比較において、各種モデル化の不確かさの定量化に基づいて数値解析の妥当性を確認し、信頼性・信用性を高めた変形予測解析の方法論を提案する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

模型実験および数値解析の両方で各種モデル化の不確かさを考慮することによって、従来主観的であった数値解析の妥当性の確認が客観的で合理的なものとなる。また、数値解析の変形予測精度の客観的な評価に基づき、信頼性・信用性を高めた変形予測解析の方法論を確立することで、様々な地盤解析の信頼性向上に寄与することができ、実務設計における数値解析の合理的利用が促進される。

本研究では粘性土地盤の変形解析を対象として、種々の不確かさを考慮し、数値解析の変形予測精度の客観的な評価を行った。V&Vの考え方に基づき地盤の変形予測解析の信頼性・信用性を高める方法論を示した先例となるものである。

研究成果の概要（英文）：A numerical analysis was validated for shear and consolidation deformation of clay ground base on uncertainty quantification referring ASME V&V10.1 (2012). The numerical analysis is a soil-water coupled analysis on finite deformation porous media theory. First, centrifugal experiments with the established conditions were performed, and probability distributions of deformation of clay ground were obtained. Second, some triaxial tests with the established conditions were performed, and some elasto-plastic material parameters were assumed as normal distributions from the test results. Third, numerical analyses simulated the centrifugal experiments of clay ground deformation using the uncertainty of elasto-plastic parameters and the embankment load. By comparing the experimental and numerical results, the uncertainty quantification of clay ground deformation and validity of numerical method were discussed.

研究分野：地盤工学

キーワード：数値解析 地盤と構造物 変形予測 不確か性の評価

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

有限要素法に代表される数値解析による地盤の変形予測解析は、模型実験・現場計測・被災事例の再現解析を通じて、予測精度の検証が行われてきた。軟弱地盤上の盛土の構築過程などの準静的問題(図1)を始めとして、近年では盛土の地震時変形予測などの動的問題(図2)でも数値解析による地盤の変形解析が実務で利用されている。いずれの図でも解析は実測値を概ね再現しているが、この判断は解析者の主観に基づくものであり、実測値や解析値が有する不確かさの定量化に基づく妥当性の確認(Validation)がなされていない。また、数値計算の正しさの検証(Verification)が明確になっておらず、数値計算の不正確さが解析結果に含まれている可能性がある。従来は土の構成式に代表されるモデルの表現力向上が研究主題となっているため、数値計算の正しさや各種モデル化の不確かさを曖昧にしたまま予測精度の検討が行われており、実務における数値解析による変形予測の信頼性・信用性が向上しない一因となっている。

地盤の不均質性、設計用地盤定数の不確かさやモデル化誤差については従来から確率論に基づいて検討されており、近年の信頼性設計に生かされている²⁾。また、これらの不確かさが有限要素法による数値解析結果に与える影響も検討されている³⁾。このように地盤構造物の信頼性設計に関する研究は進んでいるが、前述のような模型実験結果、現場計測結果およびその数値解析による変形予測結果を確率論に基づき検討した事例はほとんどなく、近年の複雑な弾塑性モデルを用いた数値解析による変形予測精度は決定論的に議論されており、実験者や解析者の主観的な判断によって数値解析の妥当性の確認がなされている。

一方、近年では航空・原子力などの機械分野においては、V&V(Verification & Validation)すなわち、数値計算の正しさの検証(Verification)と不確かさの定量化に基づいた実測値との比較による妥当性の確認(Validation)を通じて、数値解析のより適切な実務利用を促進する試みが国内外で始まっている⁴⁾。

2. 研究の目的

以上のような背景を踏まえて、本研究は、数値解析による地盤の変形予測について、従来の決定論的な予測ではなく、各種モデル化の不確かさの定量化に基づく確率論的な予測を行い、予測結果の信頼性を向上させることを目的とする。この際、数値解析のV&Vの考え方に基づき、模型実験と数値解析の比較において、実験者と計算者の主観的な判断ではなく、各種モデル化の不確かさを定量化した上で数値解析の妥当性を確認する。数値解析の変形予測精度の客観的な評価に基づき、信頼性・信用性を高めた変形予測解析の方法論を提案する。

模型実験および数値解析の両方で各種モデル化の不確かさを考慮することによって、従来主観的であった数値解析の妥当性の確認が客観的で合理的なものとなる。数値解析の変形予測精度の客観的な評価に基づき、信頼性・信用性を高めた変形予測解析の方法論を確立することで、様々な地盤解析の信頼性向上に寄与することができ、実務設計における数値解析の合理的利用が促進される。

3. 研究の方法

盛土のある粘性土地盤の変形挙動、飽和砂質土地盤上の直接基礎の地震時挙動、傾斜した飽和砂質土地盤の地震時挙動を対象として、同一条件下での遠心模型実験を多数実施し、種々の実験条件の不確かさを考慮した盛土および基礎地盤の変形量を計測する。また、盛土材料および基礎地盤材料の力学試験も実施し、その不確かさも把握する。上記の室内試験・模型実験を対象として、開発済の数値解析手法を適用し、解析解との比較や数値解析条件の感度解析を通じて、数値計算の正しさの検証(Verification)を行う。その後、種々の解析条件の不確かさを考慮したモンテカルロシミュレーションによる再現解析を実施し、モデル化の不確かさを考慮した数値解析の妥当性の確認(Validation)を行い、その方法論を確立する。

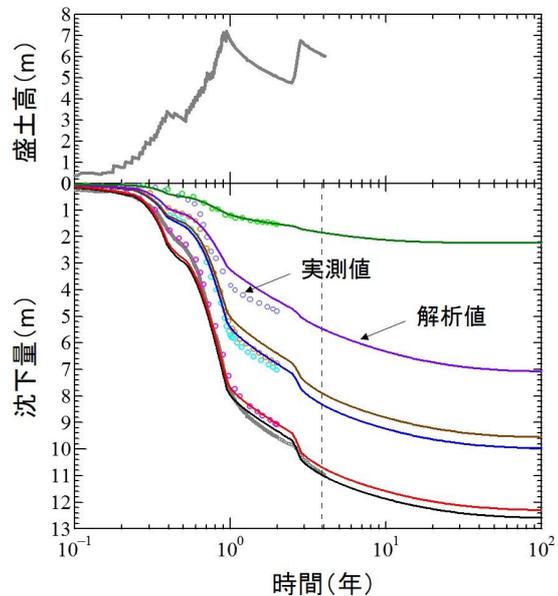


図1 現場実験：軟弱地盤上の盛土高と層別沈下(実測値と解析値)(中井健太郎氏提供, 2014)

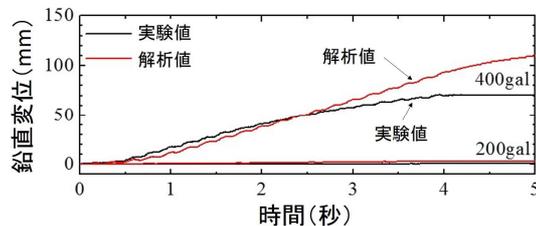


図2 模型実験：地震時の盛土法肩の鉛直変位(実験値と解析値)¹⁾

4. 研究成果

ここでは、盛土のある粘性土地盤の変形挙動を一例として、研究成果について述べる。

(1) 遠心模型実験

実験模型概要図を図3示す。実験模型は、排水層、粘性土地盤、盛土の3層で構成される。排水層は珪砂4号、粘性土地盤は信楽粘土、盛土は珪砂7号とファインサンド（微粉末シリカ）を重量比8:2の比率で混ぜた混合砂を使用した。実験は、予圧密載荷・予圧密除荷・盛土1G・盛土50Gの4段階である。スラリー粘土を土槽に投入した後、表面に載荷板を設置して所定の時間予圧密を行う（予圧密載荷）。予圧密終了後、圧力の除荷と載荷板を取り外し、粘性土地盤表面を整地する（予圧密除荷）。盛土は、正方形の型枠内で最適含水比12.1%の混合砂を、目標締固め度85%で5層（層厚1cm）に分けて突き固める。この土塊を粘性土地盤上に設置した後、所定の形状（法面勾配1:2）に整形した（盛土1G）。遠心力載荷装置に実験模型を設置する。最終の遠心加速度は50Gとし、5Gずつ段階的に載荷する。遠心力載荷後に盛土を取り除き、粘性土地盤高さを電子ノギスで計測する（盛土50G）。粘性土地盤の沈下量は、盛土を取り除いた時と予圧密除荷時の地盤高さの差と定義する。以上の作製手順と載荷手順を確立し、実験の不確実性を考慮して8ケース実施した。

各ケースの予圧密後の沈下量のヒストグラムを図4に示す。ヒストグラムの縦軸は相対度数を表し、各区間の頻度を総頻度で除した値である。平均値は30.20cm、変動係数は2.5%であった。変動係数が小さいことから再現性が高く、概ね同条件で実験を行えたと考えられる。また、遠心力載荷終了後での図3中の地点A（盛土直下）および地点B（盛土法尻）における鉛直沈下量のヒストグラムを図5に示す。地点Aにおいて平均値は5.56cm、変動係数は12.6%、地点Bにおいて平均値は1.92cm、変動係数は33.5%であった。

(2) 三軸試験

数値解析に使用する弾塑性モデルのパラメータを得るための圧密非排水三軸試験を実施した。実験材料は遠心模型の粘性土地盤で用いた信楽粘土である。予圧密載荷後にブロック状に切り出し、成形して三軸試験機に設置した。試験は拘束圧を変えて7ケース実施した。

数値解析で用いる弾塑性モデルの材料パラメータとして、圧縮指数、膨潤指数、限界状態応力比が必要であり、これらの不確実性を検討した。これらのヒストグラムを図6に示す。圧縮指数、膨潤指数および限界状態応力比の変動係数はそれぞれ7.3%、3.9%、1.2%であった。三軸試験における不確実性は遠心模型実験と比較して小さいと言える。

(3) 数値解析手法の検証

数値解析手法として既存の有限変形多孔質体理論に基づく有限要素法⁵⁾を用いた。粘性土の構成モデルには修正Cam-Clayモデルを用いた。盛土のある粘性土地盤の変形挙動を想定し、二次元応力解析や一次元圧密解析の解析解を用いてコード検証を実施した。また、遠心模型地盤を対象として、Richardson外挿を用いて解析検証を実施した。その際、有限要素法の格子収束性を正確さの次数（格子サイズの変化に対する誤差の変化度合い）を用いて判定した。

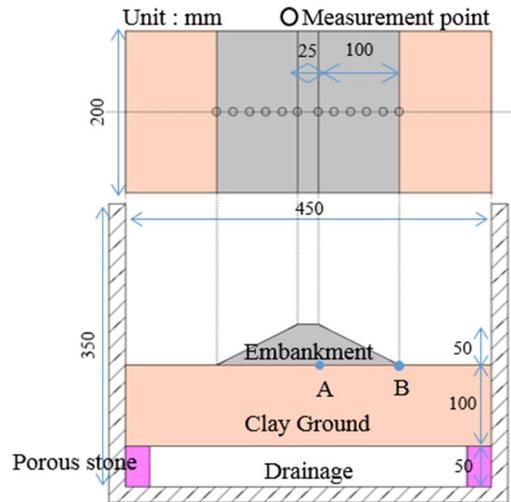


図3 遠心模型実験の概要図

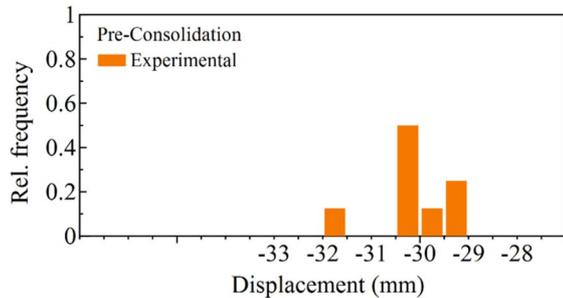


図4 予圧密後の沈下量のヒストグラム

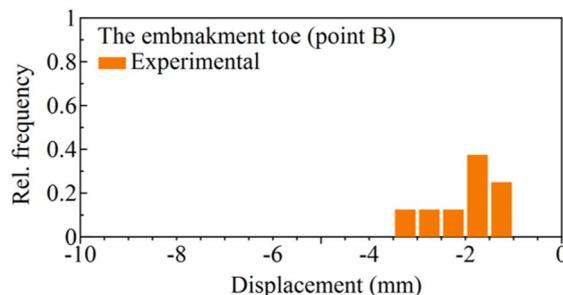
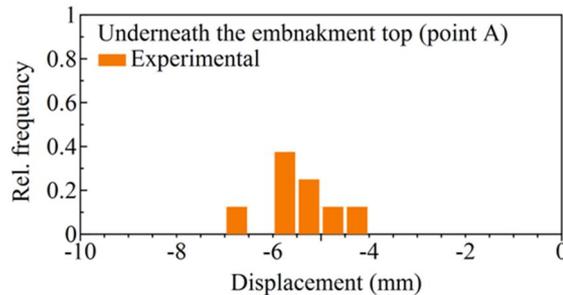


図5 遠心力載荷後の沈下量のヒストグラム（上：地点A、下：地点B）

一次元圧密の解析解に対する正確さの次数を図7に示す。微小変形を仮定した Terzaghi の解析に対して、深さ 10m の弾性体土柱モデルを用いた。幅 1m、深さ 5m (2 要素) と幅 0.3m、深さ 1.6m (18 要素) のメッシュサイズを用い、地表面沈下量と深度 2.5m での間隙水圧に対する正確さの次数を算定している。数値解がメッシュサイズの影響を受ける圧密開始付近において、格子収束に伴う正確さの次数は最大で、沈下量がおおよそ 2 次精度、間隙水圧は 6 次精度であることを確認した。圧密の進行とともに数値解が解析解に収束することから、正確さの次数も減少していくことがわかる。

また、(4) で対象とする問題に対して格子収束性を確認した。有限要素モデルを図 8 に示す。土骨格変位の境界条件は底面を全方向固定、側面を水平方向固定とした。間隙水圧の境界条件は、地表面に間隙水圧 0kPa を設定した。遠心模型実験を想定して盛土を等分布帯荷重として与えた。最終荷重値は 2.0kPa である。用いたメッシュサイズは、0.0025m、0.005m、0.01m である。点 A (図 8) における沈下量に対する正確さの次数を図 9 に示す。荷重の小さいときは、メッシュサイズの影響が小さいが、荷重が増加するほど正確さの次数は大きくなり、最終的には 2 次精度に近づくことを確認した。以上から解析コードや離散化モデルの正しさを確認した。

(4) 数値解析手法の妥当性確認

(3) で検証した数値解析手法、(2) の三軸試験で設定した材料パラメータの不確実性を考慮して、不確実性を考慮して(1)の遠心模型実験結果を再現する。

材料パラメータは三軸試験結果より得られた平均値と標準偏差に基づき、正規分布を仮定して正規乱数を 200 組発生させた。解析では盛土荷重のばらつきや粘性土地盤の不均質性の影響も検討した。ここでは、均質地盤を対象とした盛土荷重一定での結果を示す。用いた有限要素モデルを図 10 に示す。図 8 と同様なモデルであるが、地表面の荷重は遠心模型実験で用いた盛土を考慮したものとしている。予圧密過程から遠心力载荷までの過程を有限変形解析で再現している。

遠心力载荷過程における地点 A および B (図 10) での鉛直沈下量のヒストグラムを図 11 に示す。地点 A において実験値の最頻値よりも数値解の最頻値は過小評価しているが、分布として概ね重なる結果を得た。しかし、実験値の最頻値付近と重なる部分の数値解では、変形モードが実験と異なっており、盛土载荷面に段差が発生していた。実験では盛土の载荷面に段差はなく、滑らかな曲線状であった。この段差が要因となり沈下量が大きくなる傾向にあった。数値解の最頻値付近では、盛土载荷面が滑らかな曲線状となり実験の挙動とも整合していた。これらの変形モードの違いを図 12 に示す。コンターは相当ひずみを表しており、変形モードの違いが相当ひずみの分布に表れている。地点 B における数値解は顕著に偏る結果となった。地点 A のように数値解が分布しないことから、地点 B は材料パラメータの影響を受けていな

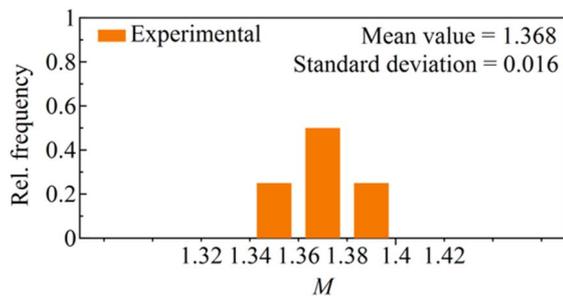
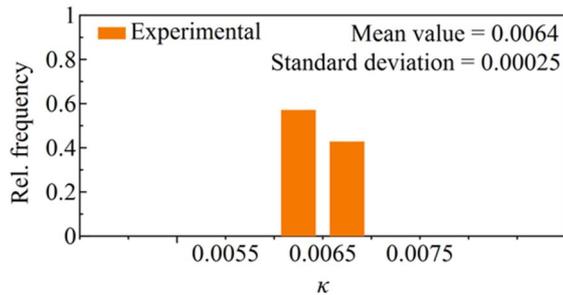
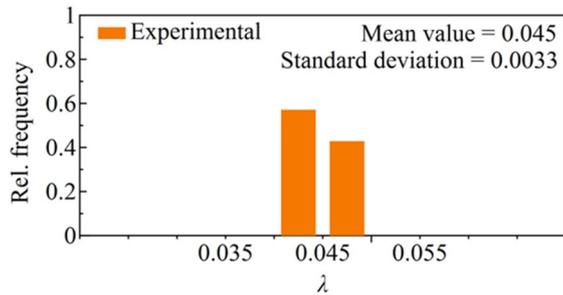


図 6 弾塑性モデルの材料パラメータのヒストグラム (上: 圧縮指数、中: 膨潤指数、下: 限界状態応力比)

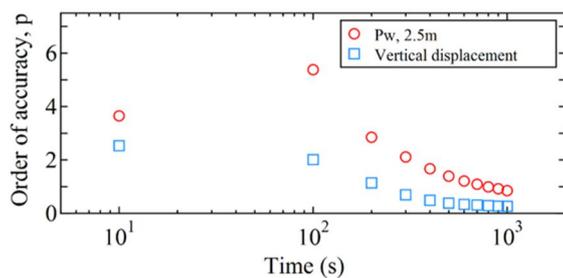


図 7 一次元圧密の解析解に対する正確さの次数

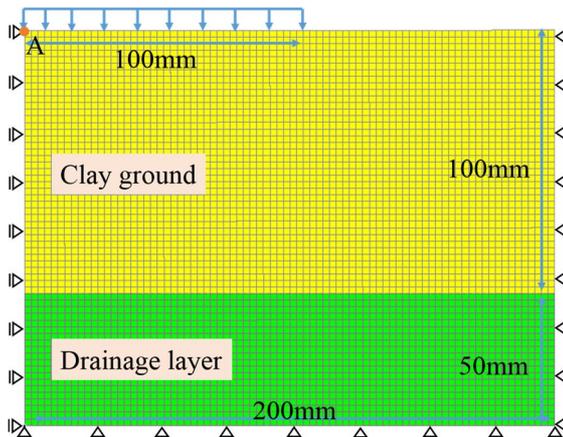


図 8 解析検証における有限要素モデル

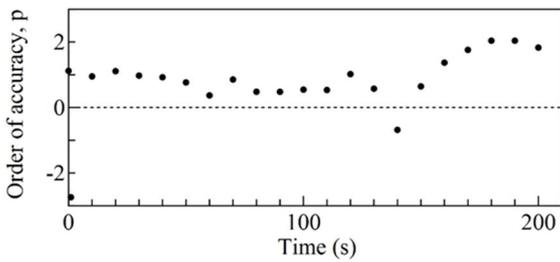


図9 点Aにおける沈下量に対する正確さの次数

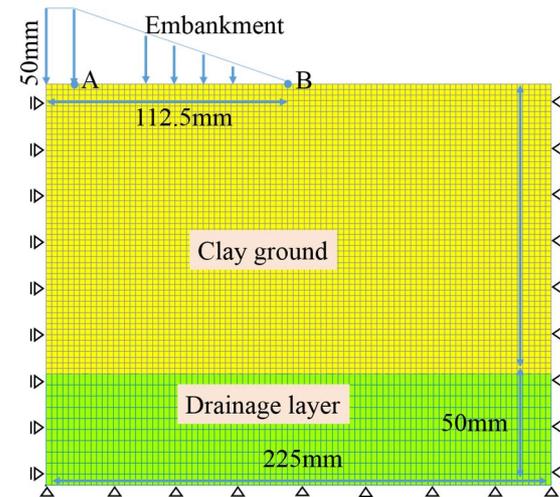
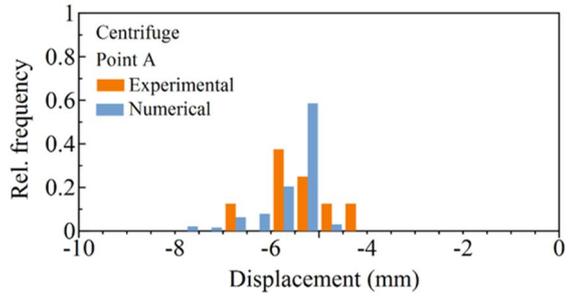


図10 妥当性確認における有限要素モデル

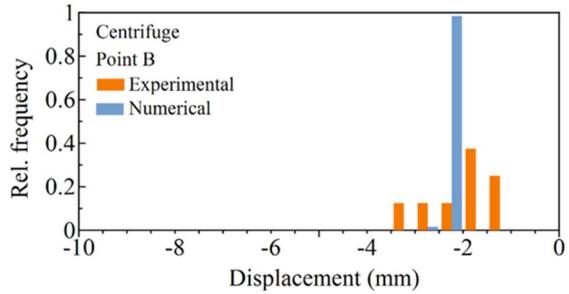


図11 遠心力载荷過程における地表面沈下量のヒストグラム(上:地点A、下:地点B)

いことが分かる。

以上のように粘性土地盤の変形解析を対象として、種々の不確実性を考慮し、数値解析の変形予測精度の客観的な評価を行った。V&Vの考え方にに基づき地盤の変形予測解析の信頼性・信用性を高める方法論を示した先例となるものであり、今後、様々な地盤の数値解析への応用が期待できる。

<引用文献>

- 1) Matsumaru, T., Uzuoka, R., Two-phase and three-phase coupled analysis of embankment affected by seepage water and earthquake, Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics - Proceedings of the 14th IACMAG, 1379-1384, 2014.
- 2) 本城勇介, 地盤工学における信頼性設計に関する研究の展開と課題, 地盤工学会誌, 63(5), 1-5, 2015.
- 3) Fenton, G.A., Griffiths, D.V., Risk Assessment in Geotechnical Engineering, John Wiley and Sons Inc., 2008.
- 4) The American Society of Mechanical Engineers, Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10, 2006.
- 5) Uzuoka, R., Borja, R. I., Dynamics of unsaturated poroelastic solids at finite strain, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 36, 1535-1573, 2012.

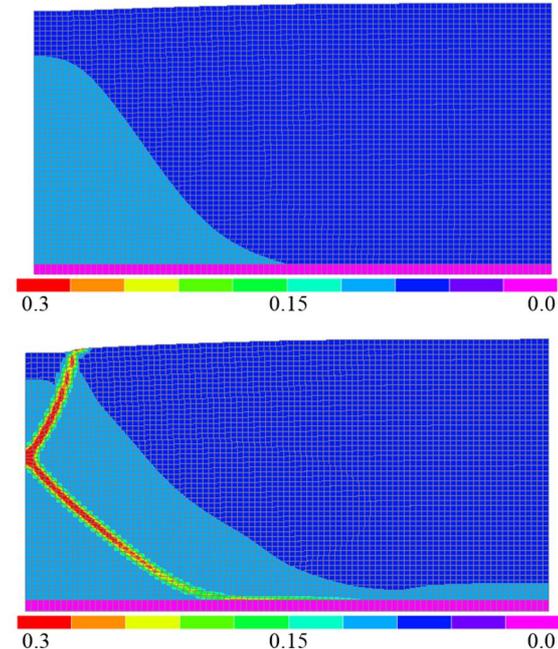


図12 遠心力载荷過程における粘土地盤の変形(カラーは相当ひずみ、上:実験同様に盛土载荷面が滑らかな場合、下:実験とは異なり盛土载荷面に段差が発生する場合)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 肥前 大樹, 上野 勝利, 渦岡 良介	4. 巻 75
2. 論文標題 粘性土地盤の圧密変形に関する数値解析の検証および妥当性確認	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_351-I_359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2208/jscejam.75.2_I_351	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 菅野 蓮華, 森口 周二, 高瀬 慎介, 寺田 賢二郎	4. 巻 73
2. 論文標題 個別要素解析に基づく落石防護工の最適設計手法に関する基礎的研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_469-I_479
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2208/jscejam.73.I_469	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 上原 直秀, 橋 一光, 菅野 蓮華, 森口 周二, 寺田 賢二郎, 高瀬 慎介, 大竹 雄	4. 巻 73
2. 論文標題 個別要素法を用いた落石解析における斜面物性の空間分布の影響	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_507-I_516
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2208/jscejam.73.I_507	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22件（うち招待講演 0件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 肥前 大樹, 上野 勝利, 渦岡 良介
2. 発表標題 均質な粘性土地盤の圧密解析における弾塑性パラメーターの不確かさの影響
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 肥前 大樹, 上野 勝利, 渦岡 良介
2. 発表標題 粘性土地盤の圧密変形に関する数値解析の検証および妥当性確認
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会・第22回土木学会応用力学シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上野 勝利, 肥前 大樹, 来島 尚樹
2. 発表標題 軟弱粘土上に築造された堤防の遠心模型実験
3. 学会等名 第9回遠心模型実験技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上野 勝利, 肥前 大樹, 来島 尚樹
2. 発表標題 軟弱粘土地盤上に築造された盛土の遠心模型実験と画像解析による変形計測
3. 学会等名 日本実験力学学会2019年度年次講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森口周二, 奥山大輝, 寺田賢二郎
2. 発表標題 落石解析における斜面の表面形状と物性値の空間分布の影響
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuji Moriguchi, Hasuka Kanno, Kenjito Terada
2. 発表標題 Simulation-aided optimal design approach for rockfall protection walls
3. 学会等名 2nd International Symposium on Seismic Performance and Design of Slopes (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Ueda, T. Wada, R. Uzuoka
2. 発表標題 Uncertainty quantification in centrifuge model tests and effective stress analyses on the seismic behavior of liquefiable sloping ground
3. 学会等名 Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, (ICEGE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 夜久将司・上田恭平・渦岡良介
2. 発表標題 飽和砂地盤上の住宅の液状化時の挙動に関する遠心模型実験とその不確かさの評価
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ruben R. VARGAS・上田恭平・渦岡良介
2. 発表標題 Validation of Numerical Predictions of Lateral Spreading Based on “Hollow-Cylinder Torsional Shear Tests” and a Large Centrifuge-Models Database
3. 学会等名 令和元年度 京都大学防災研究所 研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daiki Hizen, Ryosuke Uzuoka, and Katsutoshi Ueno
2. 発表標題 Validation of numerical analysis for deformation of clay ground based on uncertainty quantification
3. 学会等名 16th International Conference of IACMAG, International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 枅藤 宏樹, 上野 勝利, 肥前 大樹, 上寺 裕輝, 渦岡 良介
2. 発表標題 粘性土地盤の変形の再現性に関する遠心模型実験
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上野 勝利, 上寺 裕輝, 渦岡 良介, 肥前 大樹
2. 発表標題 再現性に着目した粘性土地盤の圧密変形に関する遠心模型実験
3. 学会等名 平成30年度土木学会四国支部第19回技術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 肥前大樹, 古賀愛理沙, 上野勝利, 渦岡良介
2. 発表標題 排水工法による住宅の液状化被害抑制効果に関する遠心模型実験
3. 学会等名 第15回日本地震工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田冬馬, 上田恭平, 渦岡良介
2. 発表標題 液状化傾斜地盤の地震時挙動予測高精度化に向けた遠心模型実験及び有効応力解析
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shuji Moriguchi, Naohide Uehara, Kenjito Terada
2. 発表標題 Effect of Spatial Distribution of Slope Material in Rockfall Simulations
3. 学会等名 International Symposium on Seismic Performance and Design of Slopes 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森口周二, 蛭間雄大, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 阿部慶太, 青木尊之
2. 発表標題 個別要素法を用いた土砂の衝撃力評価における解析条件の感度分析
3. 学会等名 第20回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森口周二, 上原直秀, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 大竹雄
2. 発表標題 落石シミュレーションにおける斜面の不確実性の影響
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 肥前大樹, 上野勝利, 渦岡良介
2. 発表標題 徳島大学の遠心模型実験装置と実験例
3. 学会等名 平成29年度 地盤と防災・環境に関するシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齊藤智隆, 相原慶輔, 上野勝利, 渦岡良介
2. 発表標題 不飽和砂質土の繰返し変形挙動に関する三軸試験
3. 学会等名 平成29年度 地盤と防災・環境に関するシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 肥前大樹, 藤田翔平, 堀江佳弘, 古賀愛理紗, 上野勝利
2. 発表標題 ラインホッパーを用いた空中落下法による模型地盤作成
3. 学会等名 平成29年度 地盤工学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ikami, Y., Ueno, K., Uzuoka, R.
2. 発表標題 Variation in seismic response of an embankment on liquefiable ground in dynamic centrifuge modeling
3. 学会等名 3rd International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuhiro Ikami and Ryosuke Uzuoka
2. 発表標題 Uncertainties in Geotechnical Centrifuge Modeling
3. 学会等名 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XII) and 6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM VI) (国際学会)
4. 発表年 2016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	森口 周二 (Moriguchi Shuji) (20447527)	東北大学・災害科学国際研究所・准教授 (11301)	
研究分担者	上野 勝利 (Ueno Katsutoshi) (70232767)	徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・准教授 (16101)	