

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：13904

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889035

研究課題名(和文) 掃流力と浸透力に着目した流体-地盤境界域のダイナミクスと水際地盤災害の統一的解釈

研究課題名(英文) Dynamics of fluid-soil boundary induced by tractive force and seepage force and its applied for geo-hazard in waterside

研究代表者

松田 達也 (MATSUDA, Tatsuya)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：50736353

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：自由表面流れに起因して発生する過剰間隙水圧の発生機構とその値を定量的に評価するため、移動床実験により地盤内の間隙水圧変動を詳細に観測した。さらに、自由表面流れにより誘発される移動床内の浸透流の速度分布を求め、その流速値を用いてBernoulliのエネルギー保存則から過剰間隙水圧を算出し、実験値と比較した。過剰間隙水圧の発生について理論値と実験値を比較したところ、自由表面流れに起因して地盤内に浸透流が発生し、流速差に伴って地盤表層では過剰間隙水圧が発生することを明らかとし、移動床極表層では、理論値と実験値は定量的に一致することを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, is discussed to generating of excess pore water pressure induced by free surface flow by the movable bed experiment and exact theory. As a result, seepage flow in the ground surface was generated by free surface flow and the excess pore water pressure was generating induced by differential of velocity in seepage in extreme surface of ground. Therefore, we confirmed that generating the excess pore water pressure in extreme surface of ground was influenced by seepage flow by compared by an experimental result and exact solution.

研究分野：地盤工学

キーワード：洗掘 浸食 掃流力 透水力 過剰間隙水圧

1. 研究開始当初の背景

地盤洗掘について、例えば、津波と地盤の相互作用は、これまでの研究で地盤表層に作用する掃流力と土粒子の自重に基づく、力のつり合い関係から評価することが一般的であり、主として地形変化に着目した研究が行われてきた。しかし、東日本大震災における海岸構造物（防波堤）の被害に着目すると、越流洗掘型、堤頭部洗掘型等の構造物周辺の支持地盤が大規模に洗掘されて、構造物が大破したケースが多い。申請者は、これまでに遠心力載荷装置を用いた津波実験により、津波力を受ける防波堤では支持地盤がせん断変形することや地盤内を浸透力が発生することで強度が低下し、支持力破壊に伴って防波堤が不安定化することを明らかにした。そのなかで、地盤洗掘については、上記に述べた掃流力の作用に加え、地盤内部で過剰間隙水圧が発生し、洗掘を助長させることを発見した。津波による構造物の不安定化に着目した既往の研究では、津波作用時の地盤応力状態に着目した洗掘メカニズムを検討した事例は極めて少なく、このような見逃された現象について詳細に検討する必要性を認識するに至った。また、水際の地盤工学について、例えば、津波や高潮などに対しては国土を安全に保っていくための技術およびその選定方法の提案が切望されている。水際の地盤安定性の制御では、これまでに流体 - 構造物 - 地盤の連成に関する視点が強く注目されてこなかったことや地盤洗掘について見落とされていたメカニズムがあることが挙げられる。そのため、流体 - 地盤境界域における洗掘、浸食、流動、浮遊、堆積といった土砂移動現象や地震時の液状化現象については、個々の現象ごとにメカニズムの解明と、それに応じた対策が施されてきた背景があり、水際地盤工学における現象の統一的解釈が必要不可欠である。

よって、本研究では流体 - 地盤境界域における現象について、水理-地盤工学の知見に基づいて現象メカニズムを評価するため、水際における地盤工学的諸問題（液状化、洗掘、流動）をマルチスケールに捉え、マルチフィジクスの統一的解釈を図ることを目的として研究を行う。

2. 研究の目的

津波と地盤の相互作用は、これまでの研究で地盤表層に作用する掃流力と土粒子の自重に基づくつり合い関係から評価することが一般的であり、津波作用時の地盤応力状態に着目した洗掘を検討した研究は極めて少ない。そこで、マルチスケールで地盤洗掘を考察するため、掃流力と浸透力による流体 - 土粒子の相互作用に着目した移動床水路実験および2次元個別要素法と流体計算を連成させた数値実験を行う。その結果を踏まえて粒状体の変形・移動挙動を考察し、挙動が適切に表現可能な力学数理モデルを構築する。

さらに、流体 - 地盤 - 構造物連成問題における水際における地盤工学的問題（液状化、洗掘、流動）の統一的解釈できるようにチャレンジする。

3. 研究の方法

土（固相） - 水（液相） - 空気（気相）の相互間問題に対して、ミクロレベルによる流体 - 土粒子の力学的相互作用について検討し、粒状体の変形・移動、破壊挙動を適切に表現するための数理的モデルを構築する。これを基にして、水際における地盤工学的諸問題（液状化、洗掘、流動）とリンクさせ、現象の統一的解釈ができるようにチャレンジする。地盤洗掘については移動床水路装置およびDEM-CFD解析を用いて、地盤表層に作用する掃流力とそれに伴い発生する地盤内の応力状態変化を詳細に観測する。流体 - 土粒子のマクロメカニクスにより得た、粒状体の変形・移動、破壊挙動を適切に表現するための数理的モデル構築する。さらに、本研究で構築した洗掘モデルを連続体で広域的に地盤の変形破壊を再現でき粒子法を導入し、移動床水路実験およびDEM-CFDによる数値実験の結果をベンチマークとして、現象の定性的・定量的評価を行う。具体的な内容を下記に記す。

(1) 流体 - 土粒子の相互作用に着目した土粒子移動実験

小型高速度カメラを用いて土粒子の移動をPIV画像解析システムにより捉え、流体トレーサーを用いた流体速度を計測し、掃流力と土粒子移動の関連性を検討する。堆積地盤内に間隙水圧計を設置し、地盤表層に作用する移動流に応じて発生する間隙水圧の変動を調べ、理論解との比較を行い、現象の妥当性を検討する。掃流力と合わせて、土粒子に作用する外力・内力を定量的に示し、それに応じた土粒子の移動を考察する。

(2) 流体 - 土粒子の相互作用に着目した数値解析手法の開発

個別要素法（DEM）を用いて、土粒子単相における流れ中の力学特性を表現する。DEM-CFDハイブリッド解析コードを高速計算用プログラムに拡張する。

(3) 粒状体の変形・移動、破壊挙動を適切に表現するための数理的モデル化

移動床水路実験により得られた結果をもとに、流体 - 地盤の力学的相互作用を満足し、地盤内部の間隙水圧変動を考慮した地盤洗掘モデルを構築する。

(4) マクロへの転換と流体 - 構造物 - 地盤の連成解析手法への拡張

粒状体の変形・移動、破壊挙動を適切に表現するための数理的モデルを導入し、移動床水路実験およびDEM-CFD解析手法を用いた

数値実験の結果をベンチマークにして、洗掘現象の定性的・定量的評価を行う。これにより、流体 - 構造物 - 地盤連成解析手法へと拡張に向けた準備を行う。

4. 研究成果

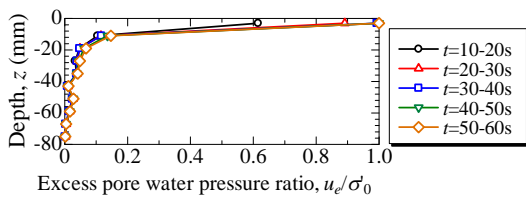
(1) 流体 - 土粒子の相互作用に着目した移動床実験

開水路流れが作用する地盤表層の低拘束圧状態における土粒子の移動現象について、開水路流れに起因する掃流力と地盤内部に作用する透水力の影響に着目した考察を行った。移動床材料として様々な種類の地盤材料を用いて検討した。本報告では、特段、河川下流域および海岸域を想定して、砂質土である豊浦砂を用い、密度（相対密度）を変化させて検討した結果について報告する。

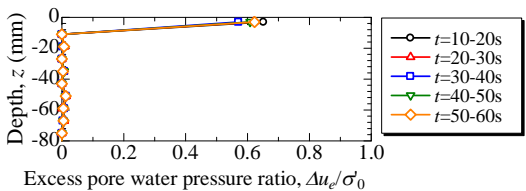
まず、開水路流れに起因する掃流力を算出し、土粒子の移動との関連を調べたところ、既往の研究が示すとおり土粒子の移動判定が可能であることを確認した。

次に、洗掘現象について考察すると、流れの作用により地盤表層にはデューン（またはディンプル）と呼ばれる、丘形状が形成された。その形状は、堆積地盤（移動床）の密度によって形成過程・変動速度に差が生じることが明らかとなった。特に、緩く堆積した地盤では、密に堆積した地盤と比較して、地形変化が早く、早期において変動速度が速いことがわかった。そこで、このように地盤密度に依存する現象を解明するため、堆積層内に間隙水圧計を設置し、土要素レベルに着目して過剰間隙水圧に起因する地盤内部の応力変化の影響も併せて考察した。

緩く堆積した地盤では、開水路流れの作用に伴い浸透流が発生し、水位変動による水圧変化以上の過剰間隙水圧が発生した。この過剰間隙水圧の上昇は、地盤表面における低拘



(a) 緩く堆積した地盤



(b) 密に堆積した地盤

図-1 過剰間隙水圧の発生に伴う地盤の強度低下
(過剰間隙水圧比：1.0 になると液状化状態)

束圧領域において、地盤の強度を低下させ、液状化に似た応力状態を誘発することが明らかとなった(図-1)。実験で使用した豊浦砂を用いたせん断試験では、せん断帯幅 b_f が土粒子の平均粒径 D_{50} の約 10~16 倍程度であることが既知であり、豊浦砂においては $D_{50} = 0.17 \text{ mm}$ であることから、せん断帯幅 $b_f = 2.72 \text{ mm}$ 程度と考えられる。本実験結果においては、地盤が強度低下する領域は地盤表層から $z = -7.75 \text{ mm}$ 以浅となり、水流の影響を受けて、せん断試験において生じたせん断帯幅以上にせん断層が誘発された可能性が考えられる。

(2) 流体 - 土粒子の相互作用に着目した数値実験

流れ構造と地盤の変形メカニズムを考察するため、個別要素法と数値流体解析手法の連成解析により現象の詳細に観察する数値実験を行った。前述した移動床実験の幾何学的条件もとに解析モデルを作成し、粒子径が異なる地盤材料を用いた検討を行った。

粒子径に伴う間隙径の大きさによって地盤空間内の過剰間隙水圧の発生値・分布に差が生じることがわかった(図-2)。移動床実験で観察した地盤の洗掘現象を再現するためには、特に、浸透流の流れと土粒子への影響については重要であり、流れ構造と土のせん断変形を複合的に考察する必要があることを明らかとした。

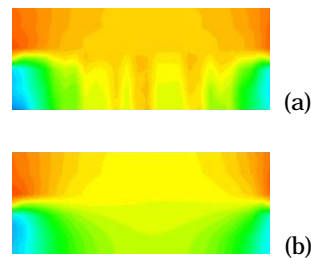


図-2 粒径の異なる堆積地盤内の自由表面流れに起因する間隙水圧コンター図：(a)、粒子径の小さい地盤構造；(b)、粒子径の大きい地盤構造

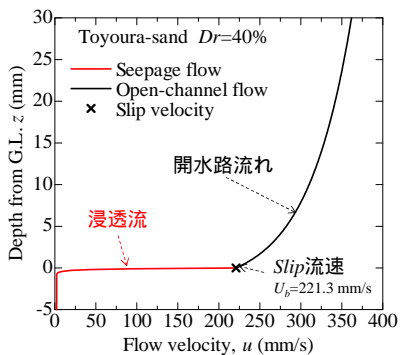
(3) 粒状体の変形・移動、破壊挙動を適切に表現するための数理的モデル化に関する検討

自由表面流れ下において発生した地盤内の過剰間隙水圧の発生要因について検討した。特に、本問題は固体力学と流体力学が複雑に絡み合う系における力学問題であるため、いくつかの考えられる要因を分類し、各々の影響を分析することが望ましいと判断した。そこで、本研究では、流れ構造と土粒子に作用する流体力を適切に評価するため、土粒子の移動・回転が生じないと仮定した多孔質剛体地盤において、流体力学の観点から自由表面流れに誘発される浸透流に焦点をあて、速度勾配に起因して発生するベル

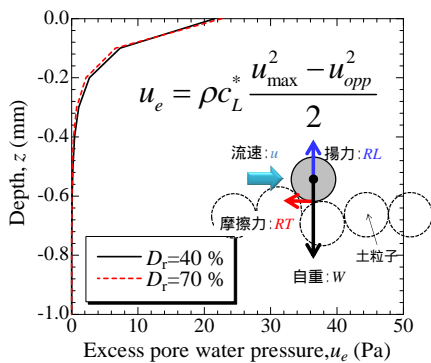
ヌーイの定理に基づく地盤内部の間隙水圧変動について理論的に考察した。

移動床実験をベースとして、計算に用いるパラメータを決定した。流れ場における流速分布を算出した結果、移動床の相対密度による速度分布の違いは明確には現れず、極めて表層にのみに浸透流が生じる結果となった(図-3(a))。次に、算出した浸透流の流速差を用いて、始終表面流れに誘発される浸透流に伴って発生する地盤内の過剰間隙水圧について求めた。その結果、地盤の極表層においては過剰間隙水圧が発生することを明らかとし、実験値は約 20 ~ 30 Pa となるのに対して、理論値では最大で約 22 Pa となり、比較的现象が再現できていることがわかった(図-3(b))。

実験値においては、幾何学上、地盤表層の変状が発生することで流れの乱流による圧力変動の影響、圧力伝播の影響の水理学的な要因が含まれていると考えられるため、その点についても今後は考慮する必要があると考える。



(a) 開水路流れによって誘発される地盤内浸透流



(b) 浸透流に起因して発生する過剰間隙水圧

図-3 理論解より誘導した流速分布(a)と浸透流に起因して発生する地盤内の過剰間隙水圧分布(b)

(4) 鉛直流れを対象とした地盤洗掘現象の検討

前途までのミクロ・メゾレベルの検討結果を踏まえ、流体 - 構造物 - 地盤の連成解析手法への拡張に向けたマクロレベルの破壊現

象におけるマルチスケールなマッチングについて考察した。対象とした現象については、構造物を越流した比較的速い鉛直流れ(本稿では、ジェット流)による地盤の洗掘であり、地盤内部の間隙水圧の変化に着目した重力場洗掘実験ならびに粒子法による数値実験により洗掘形状と地盤強度の観点からみた洗掘メカニズムの解明を試みた。

越流による洗掘を模擬したジェット流による洗掘について豊浦砂および砕石を用いた実験と数値解析においても地盤内部の水圧変動について検討した結果、地盤の材料により地盤内部の水圧変化に違いがみられ、特に、砂質土である豊浦砂の場合は、前述した自由表面流れにおける洗掘現象と同様に地盤内部に過剰間隙水圧地盤が発生することを明らかとした。同現象については、数値解析においても地盤内部に水圧上昇を再現し、その上昇分はジェット流作用位置を中心とし、ある影響範囲を持って水圧が上昇していることがわかった。今後は、粒状体における低拘束圧下の変形モデルと組み合わせて、粒状体の変形・移動、破壊挙動を適切に表現することの重要性を示唆した。

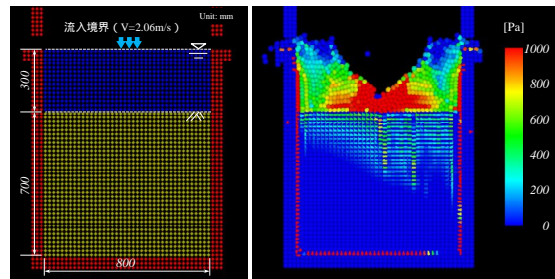


図-4 粒子法を用いた鉛直流れによる洗掘現象の検討
(地盤内に発生する過剰間隙水圧コンター図)

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 2 件)

Tatsuya Matsuda, Kenichi Maeda, Michio Miyake, Junji Miyamoto, Hiroko Sumida, Kazuhiro Tsurugasaki, Instability of a caisson-type breakwater induced by an earthquake-tsunami event, Soil Behavior and Geomechanics, ASCE, 査読有, 2016, pp. 528-537,

doi: 10.1061/9780784413388.055.

松田達也, 前田健一, 三宅達夫, 宮本順司, 鶴ヶ崎和博, 角田紘子, 地震津波による混成堤の破壊モードと性能規定に関する考察, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol.71 No.2, 2015, pp. I_1159-I_1164.

Doi: http://doi.org/10.2208/kaigan.71.I_1159

〔学会発表〕(計 13 件)

Tatsuya Matsuda and Kenichi Maeda: Scour of soil with dynamics interactions among soil-water induced by jet flow, 8th International Conference on Scour and Erosion, 2016.09.12-15, Oxford (UK), (発表決定) .

Tatsuya Matsuda, Kenichi Maeda, Michio Miyake, Kazuhiro Tsurugasaki, Junji Miyamoto, Hiroko Sumida: Instability on the sandy ground under breakwater due to earthquake and tsunami, The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015.11.09-13, Fukuoka.

Tatsuya Matsuda, Kenichi Maeda: Micromechanics on scour of sandy soil due to tsunami flow with multi-phase interaction, International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro, 2014.09. 01-03, Cambridge (UK).

Tatsuya Matsuda, Kenichi Maeda and Yoshimi Ito: Scour of the sandy soil with dynamic interactions among soil-water-gas due to tsunami, International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, 2014.09.22-25, Kyoto.

松田達也, 前田健一, 泉典洋, 伊藤嘉, 山口敦志, 三宅達夫, 宮本順司, 角田紘子, 鶴ヶ崎和博: 開水路流れに起因する地盤内過剰間隙水圧の発生機構に関する一考察, 第 27 回中部地盤工学シンポジウム, 2015.08.07, 名古屋市 .

松田達也, 前田健一, 山口敦志, 三宅達夫, 宮本順司, 鶴ヶ崎和博, 角田紘子: ジェット流の作用による地盤内の過剰間隙水圧発生メカニズムと洗掘に関する考察, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2015.09.13-16, 札幌市 .

(3) 連携研究者
なし .

〔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〕

ホームページ等

<http://www.geomech.ace.tut.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 達也 (MATSUDA, Tatsuya)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号 : 5 0 7 3 6 3 5 3

(2) 研究分担者

なし .