

令和元年6月18日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K18115

研究課題名（和文）深海底地盤力学の構築に向けた間隙流体-土骨格-熱力学連成モデルの確立

研究課題名（英文）Development of fluid-soil-thermo coupling model for deep sea geoengineering

研究代表者

野村 瞬 (NOMURA, Shun)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・技術研究員

研究者番号：20705701

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：深海底地盤の力学メカニズム解明に向け、特殊な環境変化を伴う地盤状態を評価できる理論の構築と検証のためのモデル実験、数値解析を行った。変形・流体浸透・物質輸送問題の連成手法を開発し、複合的な要因により変化する地盤環境の整理手法が提示された。本成果により、これまで切り離して整理されることの多かった地盤骨格における変形-安定問題、浸透問題、物質移動現象等を同時に扱うことが可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海底資源の産業利用を契機として、海底地盤の力学メカニズム解明に向けた関心が高まっている。様々な技術が結集された結果、地盤サンプルが高精度で採取できるようになり、原位置での応力測定も実施可能なレベルに迫っているといわれている。他方、特殊な環境に晒される地盤の性状を精確に把握できるモデルは未発達であり、観測事実を適切に説明し、長期管理手法に繋がるための理論の整理が必要とされていた。研究過程では、実験事実や解析結果を積み上げる中で複合的に生じる現象を総合的に理解する手法を模索した。

研究成果の概要（英文）：For elucidating the mechanics mechanism of deep seabed ground, the theoretical model which can evaluate the ground condition induced by environmental change was developed, and model experiment and numerical analysis were carried out for verification. A coupling model for deformation-fluid migration-material transport was developed, and a method to evaluate the ground environment was presented. The results show that we can simultaneously deal with deformation-stability problems, infiltration problems, mass transfer phenomena, etc. in the ground.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤力学 土質力学 海底地盤 有限要素法 多相混合体理論

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

海底資源の産業利用を契機として、海底地盤の力学メカニズム解明に向けた関心が高まっている(図-1)。

技術開発が継続的に進められた結果、地盤のサンプルが高精度で採取できるようになり、原位置での応力測定も実施可能なレベルに迫っているといわれている。他方、海底探査技術の発達により、南海トラフに存在するメタンハイドレードの他にも、多くの天然資源が海底に賦存している事実が明らかになっている。海底泥火山から噴出する“マンガクラスト”や“レアアース泥”に存在する貴金属類を豊富に含んだ無機溶液、地殻の割れ目から噴出する大量の高温熱水は人類にとって非常に有益な物質であり、物理特性把握のための観測が日々続けられている。

海洋地盤中の間隙流体には、地殻から局所的に排出される水溶性物質が溶解し、高い圧力を保ったまま地盤中を緩やかに移動している。さらに、地殻付近の熱源からは多量の熱エネルギーが絶えず供給されており、地盤の一部では高温化したままで局所的に留まっている。加えて、地盤には海洋底層流や引力に起因する応力変化が断続的に作用しているため、海洋地滑りや長期継続沈下を適切に評価することが重要となっている。

種々の手法により海洋地盤中の資源を回収するための手法が検討されているが、流体の運動整理が主な研究対象とされ、資源採取過程で地盤へ付与される力学的インパクトは十分に評価されておらず、適切なモデルによる現象の解明、開発手法の提案が急務の課題となっている。

2. 研究の目的

探査法の発達により、徐々に明らかになりつつある海底地盤の力学メカニズムを資源掘削や熱源利用に向けた具体的な工法へと繋げるには、①地盤骨格-間隙流体間で生じる相互作用、②地盤内物質の運動性、③領域の熱・物質伝播過程を総合的に評価することが重要となる。本研究では、種々の地盤環境変化を既存の飽和/不飽和地盤の力学モデルに適用し、深海底地盤工学構築に向けたガイドラインの提示を目的とした。また一部の資源は海底表層の未固結地盤にも濃縮しており、水分量や応力状態により通常の地盤力学とは異なる挙動を示すため、混合連続体材料としての力学の整理が必要となる。実験・数理理論を通して流体-固体の両方の中間状態にある地盤材料の挙動を検討する手法を併せて模索した。

3. 研究の方法

深海底地盤では、①間隙溶液による物質輸送現象、②温度・圧力変化による気体-液体間相変化、③海底地盤の変形安定性が複雑に絡み合い、多様な地盤環境変化が生じている。構築してきた不飽和土の力学モデルに、実験・理論解析より得られる事実を援用する中で、海底地盤で生じる物理化学現象を総合的に評価できる手法を模索した。力学モデルの構築には、多相混合体理論をもとに導出された相ごとの質量保存式と、複数材料間の相互作用を考慮した構成関係式を用いた。導出された多次元微分方程式は、適切な試験関数で積分した後、有限要素法へと適用するため、時間・空間離散化が行われ、多次元一次方程式として表現さ

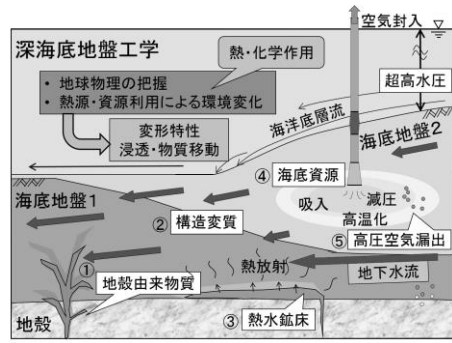


図-1 深海底地盤で生じる力学現象の模式図

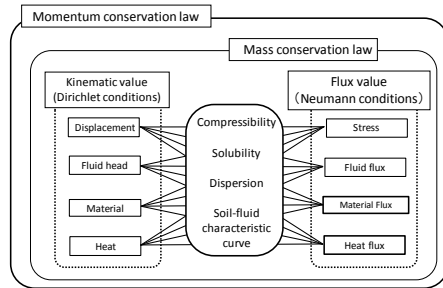


図-2 数理モデル概念図

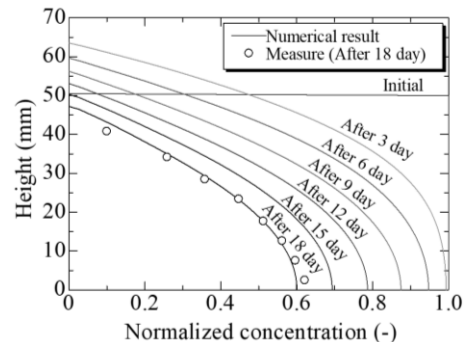
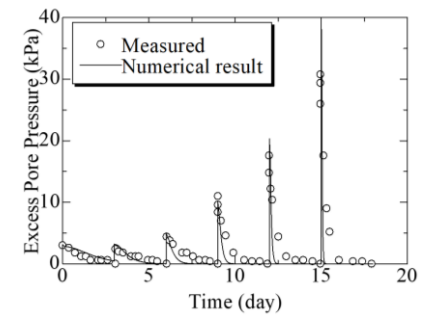
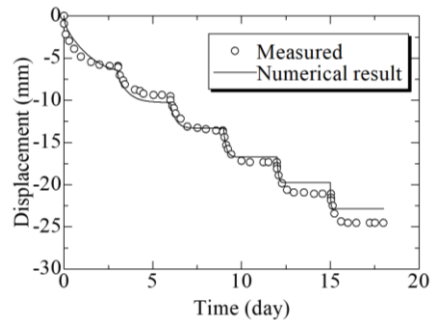


図-3 段階荷重による変形量(上), 過剰間隙水圧発生消散(中), 物質移動性(下)の実測と解析結果の比較

れた。それらの方程式群を基に全体剛性マトリクスを再構成することで、種々の地盤内物理現象を表現可能な数値解析コードの開発を進め、同解析コードによって種々の現象の再現解析を試みた。

また、現象の整理が十分になされていない地盤内の透水現象や少量の砂粒子を含んだ懸濁液の流動過程等を評価する手法の検討を進めた。

4. 研究成果

開発を進めた数値モデル（図-2）をもとに、初期に地盤内に特定の溶解物質相を有した状態で鉛直方向に圧密を行った試験の再現解析を実施した。供試体の高さは70 mmであり、粘土試料で構成されているものである。数理解析により、各載荷段階（3.1, 5.6, 10.4, 20.1, 39.5, 78.4 kPaを18日間で載荷）における地盤上面の沈下量（図-3上）と載荷過程で生じる間隙流体の移動によって生じる過剰間隙水圧の発生/消散過程（図-3中）は精度よく再現された。また、地盤内の物質は間隙水の排水過程に伴い情報に移動するが、実験終了後（18日後）の物質量のプロファイルは変形解析により高い精度で再現されていることが分かった（図-3下）。要素試験の再現解析を通して、同時に生じている地盤の変形-浸透-物質の移動性を評価する重要性を確認するとともに、開発手法はそれらを適切に評価できることが分かり、現象の総合的な理解のための指針とできることが示唆された。より現実的な挙動評価として、初期に物質相を有する地盤（図-4）を想定し、地盤表面への荷重の有無によりその移動性がどのように変化するか検討を進めた（図-5）。その結果、地表面に加えられた荷重により変形が進行する過程で、荷重を与えないケース（Case-A）に比べて物質の移動が顕著（Case-B）になることが分かった。加えて、物質相の深度分布、透水係数、飽和/不飽和条件が物質の移動挙動に与える影響に関して検討を進めた。

加えて、地盤材料の粒度分布を測定することで飽和透水係数を理論的に導出する手法の開発を行った。適切な粒度分布を持つ地盤試料に対して簡単な原始関数を設定することで、容易に分布関数のフィッティング（図-6）ができることが明らかになった。さらに想定した関数を用いることで領域の比表面積（地盤試料の単位体積当たりの表面積）を計算するための理論式を示した。導出した式を透水係数を算出する理論式であるコゼニーカルマン式に適用することで、要素実験を伴わずとも簡便に透水係数を外挿することに成功した（図-7）。当該手法はさらなる理論の発展により領域に微小な間隙空気を含んだ不飽和地盤における透水係数への拡張が期待される。

加えて、海底表層地盤の変形安定問題として、未固結地盤の力学特性の把握を要素実験により確認した。海底表層の土砂を巻き込みながら流動する流れのメカニズムの解明に向けて、粒子懸濁液を領域に連続注入し、土砂が領域に大規模に運搬される様子を検討した（図-8）。

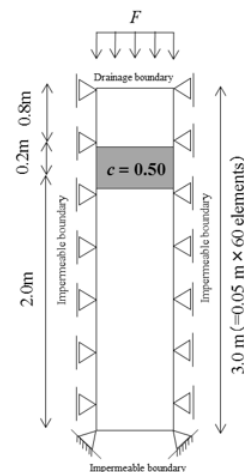


図-4 想定した地盤条件

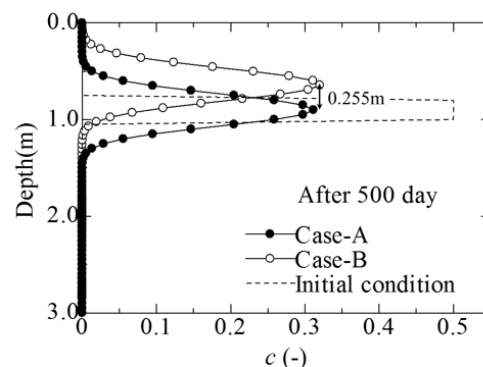


図-5 荷重の有無による物質移動の違い

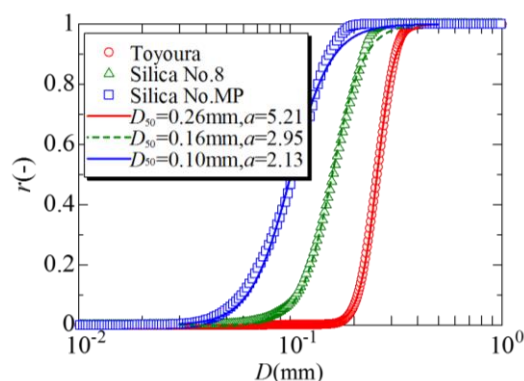


図-6 関数フィッティングによる粒度分布の再現

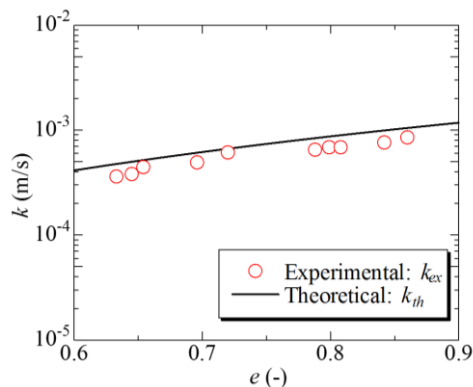


図-7 透水係数の理論値と実験値の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① Shun Nomura, Yuzuru Yamamoto, Hide Sakaguchi, Modified expression of Kozeny-Carman equation based on semilog-sigmoid function, *Soils and Foundations*, 58(6), 1350-1357, 2018, , 査読あり
- ② Shun Nomura, Katsuyuki Kawai, Shinya Tachibana, Atsushi Iizuka, Solute transfer during consolidation based on a solid-fluid-solute coupling model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2018, 査読あり
- ③ Shun Nomura, Jumpei Hitomi, De Cesare Giovanni, Yasushi Takeda, Yuzuru Yamamoto and Hide Sakaguchi, Sediment mass movement of a particle-laden turbidity current based on ultrasound velocity profiling and the distribution of sediment concentration, *Geological Society, London, Special Publications*, 477, 2018, 査読あり

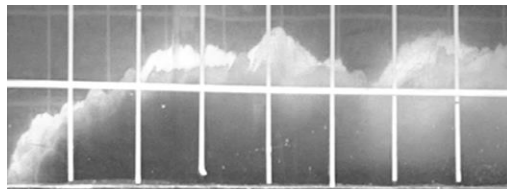


図-8 流動する土粒子群の様子

〔学会発表〕(計6件)

- ① Shun Nomura, Giovanni De Cesare, Hide Sakaguchi, Yasushi Takeda, Spatial and temporal turbidity currents sediment deposition assessment, *European Geosciences Union General Assembly 2018*
- ② Shun Nomura, Jumpei Hitomi, De Cesare Giovanni, Yuichi Murai, Yuji Tasaka, Yasushi Takeda, Hide Sakaguchi, Instantaneous flow vector measurement by a pair of ultrasound doppler instruments, *Proc. 11th ISUD*, 119-122, 2018
- ③ Jumpei Hitomi, Shun Nomura, Giovanni De Cesare, Yasushi Takeda, Hyun Jin Park, Yuji Tasaka, Yuichi Murai, Flow Monitoring of Particle-Laden Flows Combining Ultrasonic Doppler and Echo Intensity Profiling Techniques, *Proc. 11th ISUD*, 119-122, 2018
- ④ Shun Nomura, Hide Sakaguchi, De Cesare Giovanni, Venuleo Sara, Jumpei Hitomi, Yuichi Murai, Yuji Tasaka, Yasushi Takeda, Distinctive features of horizontal and vertical velocity profiles in turbidity and saline density currents, *Proc. of 5th IAHR Europe Congress*, 83-84, 2018
- ⑤ 人見純平, 野村瞬, De Cesare Giovanni, 武田 靖, Park Hyun Jin, 田坂 裕司, 村井 祐一, 乱泥流内粒子群運動の超音波による定量計測, *混相流シンポジウム 2018*
- ⑥ Shun Nomura, De Cesare Giovanni, Takada Yasushi, Yoshida Taiki, Tasaka Yuji, Hide Sakaguchi, GraCE: Velocity Structure and Spatio-temporal Evolution in the Turbidity Current Head based on Ultrasound Doppler Velocity Profiling, *European Geosciences Union General Assembly 2017*

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。