

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13824

研究課題名(和文) 表面化学作用に基づく膨潤性粘土の力学理論の構築-地盤工学における特殊粘土の再考-

研究課題名(英文) The construction of mechanical theory of expansive soils based on the chemical surface phenomena of mineral crystals - Reconsideration of problem soils in geotechnical engineering -

研究代表者

京川 裕之 (Kyokawa, Hiroyuki)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：60799865

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、膨潤性粘土を特徴づける構成鉱物の表面化学現象に着目した新しい構成モデルを開発し、実験による検証を行った。実験との比較から、提案モデルは膨潤性粘土鉱物の含有量や物性、水環境(イオン種類)の違いによる力学特性を適切に評価できることが示された。また、提案モデルを用いたシミュレーションにより、膨潤性土の浸透圧密現象について、水理-力学-化学連成現象として理論的に説明された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ベントナイトに代表される膨潤性粘土(鉱物)は、国内や世界中に広く分布しているにも関わらず、地盤工学的には設計法や評価法のない特殊土として扱われている。本研究では、それら膨潤性粘土の特徴を支配する構成粘土鉱物(スメクタイト)の表面化学現象に着目した新しい構成モデルを開発した。提案モデルは、膨潤性粘土鉱物の含有量や物性、水質環境の違いによる力学特性を適切に評価でき、有限要素法による数値解析コードに実装されている。今後、廃棄物処分施設の緩衝材の候補となっているベントナイトに限らず、自然地盤において膨潤性鉱物を含む各種地域土についても、その力学的挙動の評価が可能になる。

研究成果の概要(英文)：A novel mechano-chemical (MC) constitutive model for expansive soils based on the chemical surface phenomena of mineral crystals, which the representative and intrinsic characteristic of them, was proposed in this research. Comparing with the experiment results, the proposed MC model could properly describe the deformation characteristics of expansive soil (bentonite) depending on the content of expansive clay mineral and its properties, and the electrolyte solution. Moreover, by the finite element analysis implementing the proposed MC model, the osmotic consolidation behavior of expansive soils were theoretically explained as the hydro-mechano-chemical coupling phenomena.

研究分野：地盤工学

キーワード：膨潤性粘土 ベントナイト 構成式 水理-力学-化学連成 数値解析 浸透圧密 浸透膨潤

1. 研究開始当初の背景

膨潤性粘土(鈹物)は世界中に広く分布し、様々な地盤工学的問題を引き起こす一方、放射性廃棄物処分施設のオーバーパックを囲む緩衝材の候補材料になるなど、地盤工学的には身近な材料である。それにも関わらず、その特性は一見複雑であり、評価・設計手法のない特殊土として扱われる。一方、鈹物結晶の表面現象に着目することで、膨潤性粘土の微視構造特性は合理的に説明することができるが、従前の地盤工学ではそれらの特徴を適切に考慮した力学理論は体系化されていない。

2. 研究の目的

膨潤性粘土鈹物の結晶表面現象を考慮した水理-力学-化学連成理論(構成モデルおよび連成有限要素解析技術)を構築する。そして、膨潤性粘土の連成挙動に着目したモデル試験および構築理論に基づいた連成有限要素解析を実施し、これまでに合理的な説明がなされていなかった膨潤性粘土の挙動について、結晶表面現象に由来する水理-力学-化学連成境界値問題の観点からその変形特性を解明する。

3. 研究の方法

(1) 膨潤性粘土の間隙構造を「重層体である膨潤性粘土粒子の鈹物結晶層間の間隙」と「その粒子が構成する土粒子骨格の間隙」に分けて考え、それぞれの間隙変化をモデル化することで、膨潤性粘土の(全体)挙動の記述を試みる。その際、結晶層間間隙の挙動については、既往の界面コロイド化学の知見を活用し、基礎的かつ汎用性の高いモデルの構築を行う。また、同モデルをベースとして、水理-力学-化学連成解析コードを開発する。イオンの移動については移流拡散型の支配方程式を導出し、力のつり合い式、間隙水の質量保存則と連成させ、有限要素法を用いてそれらの支配方程式を解く。

(2) 水理-力学-化学連成境界値問題である膨潤性粘土のイオン浸透挙動に対しては、一般的な圧密試験装置の圧密リングをアクリル素材で作製することで、浸透試験中の変形挙動を供試体側面から観察できるようにし、イオン浸透と変形の間接関係を観察した。また、同実験を連成有限要素解析コードによってシミュレーションすることで、イオン浸透時の膨潤性粘土の連成変形挙動について、合理的な説明を行う。

4. 研究成果

(1) 強度特性におけるイオン濃度の影響

開発する構成モデルの結晶層間(間隙)挙動は、結晶層間に作用する水和力、浸透力、van der Waals 力、外力として作用する有効応力のつり合いを解くことで求まる。また、土粒子骨格挙動については、粒子の回転や再配列によって引き起こされるものと考え、応力とひずみの関係を記述する従来型の一般的な(弾塑性)構成モデルで表現する。本研究では修正 Cam clay モデルを用いた。(図1参照)同モデル(Kyokawa et al., 2020)は飽和膨潤性粘土の浸透圧密/膨潤変形挙動を適切に再現することができる。

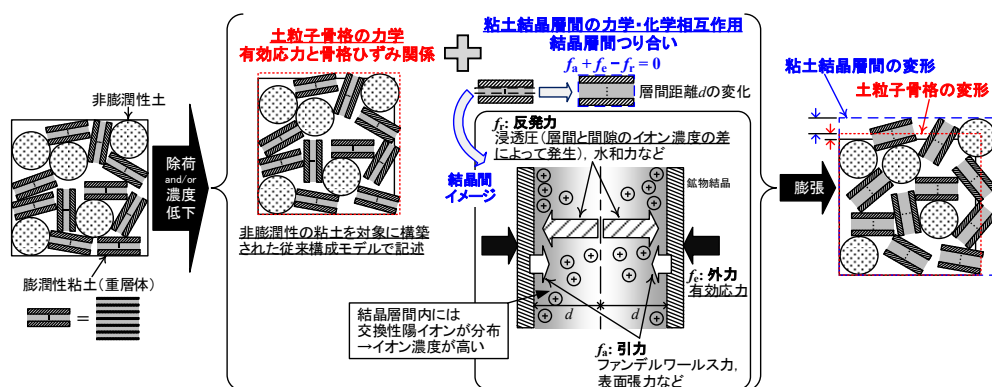


図1 土粒子骨格の力学(通常力学モデル)と結晶層間の化学-力学相互作用の合成として合理的に記述される膨張性粘土の力学挙動

本研究では、強度特性について同モデルの改良を行った。Wilkinson et al. の検討から、ベントナイトに NaCl 水溶液を加えることにより、多層構造であるベントナイト粒子は収縮かつ凝集することが示されている。これは、間隙溶液中のイオン濃度変化によって膨潤性粘土中の「多層構造をした膨潤性粘土鈹物結晶の層間に存在する間隙」と「土粒子の骨格となる通常の間隙」との間に浸透圧の差が生じ、膨潤性粘土鈹物の層間距離が変わることで土粒子が凝集し、その結果、土骨格を形成する土粒子構造も変化したと考えることができる。そこで本研究では、このように生じる土粒子の物理的な配置やかみ合わせの変化はせん断強度にも影響すると考え、粘土鈹物

の結晶層間距離 d と（骨格変形を表現する Cam clay ベースの弾塑性モデルにおける）せん断強度の指標である限界応力比 M を関係づけることで、モデルの改良を行った。図2、図3に Di Maio によって行われた塩分濃度が異なる膨潤性 Bisaccia clay 供試体の非排水せん断試験と改良モデルの解析結果を示す。図より、イオン濃度変化による土のせん断強度およびダイレイタンスー特性の変化を適切に表現できていることが分かる。

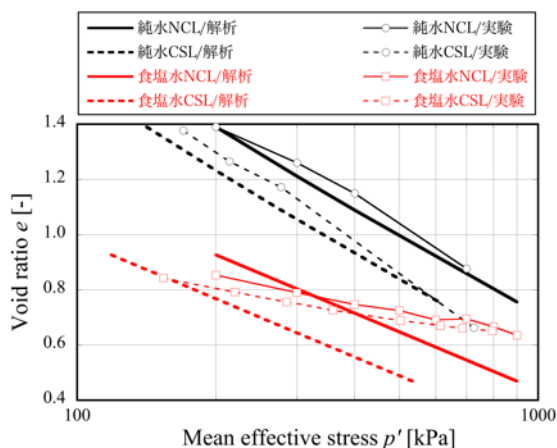


図2 正規圧密線と限界状態線

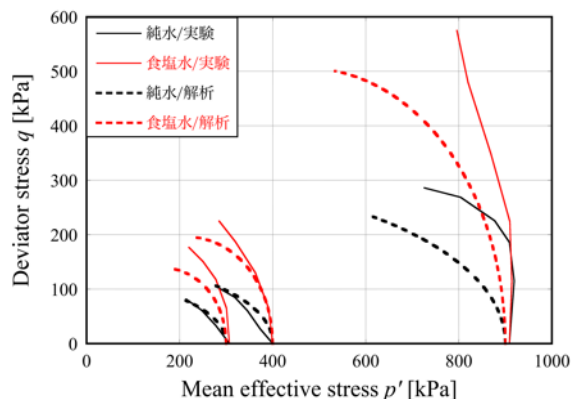


図3 有効応力経路

(2) 不飽和状態（浸水膨潤）の考慮

不飽和状態（から飽和状態の変遷）を考慮するように開発モデルを拡張することにより、膨潤性土の特徴である浸水時に大きな体積膨脹挙動（結晶膨潤と浸透膨潤）を表現する。土粒子骨格挙動については、Bishop の有効応力式に基づく飽和度による硬化挙動を考慮したモデルで表現する (Kikumoto et al, 2010)。一方、結晶層間挙動についても、既往研究を参考に改良を行った。結晶膨潤は、水分子が鉱物表面自体あるいは鉱物表面に吸着した陽イオンに水和することで生じ、湿度の上昇とともに水分子層が増加するため生じる。また、結晶周辺に発達した陽イオン電気二重層が重なり合う結晶層間水と土粒子骨格間隙水との濃度差に応じた浸透圧によって浸透膨潤は生じる。言い換えれば、結晶層間と土粒子骨格間隙の間に水が連続していなければ、浸透圧は生じないと考えられる。以上から本研究では、前者結晶膨潤を水和力 f_h 、後者浸透膨潤を浸透圧 f_o によって考慮し、それぞれを飽和度の関数として与えた。図4に締固められた FEBEX ベントナイトのサクシオン制御圧密試験 (Lloret et al., 2003)、図5にその解析結果を示す。提案手法は、飽和度に応じた硬化および密度/拘束圧の影響を考慮していることから、種々のサクシオン（飽和度）、間隙比における力学的な圧密挙動を適切に再現している。また、特に S1 と S5 の比較から、実験値に見られる浸透膨潤挙動の拘束圧依存性（拘束圧が高いほど、浸透膨潤量が小さくなる）を提案手法は表現できていることが分かる。

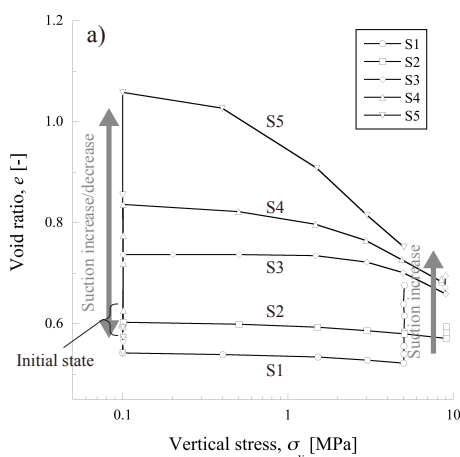


図4 サクシオン制御試験の実測結果

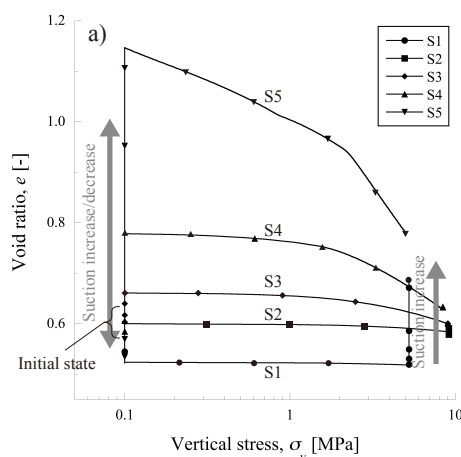


図5 サクシオン制御試験の解析結果

(3) 水理-力学-化学連成境界値問題としての浸透圧密試験

既往の膨潤性粘土のイオン浸透変形特性に関する研究は、膨潤圧／変形試験と同様に、標準圧密試験装置を用いて供試体端面における変位や膨潤圧を評価する検討がほとんどである。しかしながら、イオン浸透時の変形は、間隙溶液イオンの移動、イオン濃度に応じた体積変化、そして間隙水の排出で説明される圧密（膨張）現象の一種であるため、これら一連のメカニズムを解明するためには、供試体内部の局所挙動と経時変化を捉え、境界値問題として現象を考察する必要がある。そこで本研究では、膨潤性粘土の浸透圧密現象に着目して、一次元圧密試験装置を用いた溶液浸透試験（図6）を実施し、PTV法による画像解析を用いて浸透圧密中の局所変位の進展を観測（供試体に混入した色砂を追跡）した。また、試験後の供試体を分割し、各供試体片中の間隙水を遠心分離器で抽出し、イオン濃度を測定した。

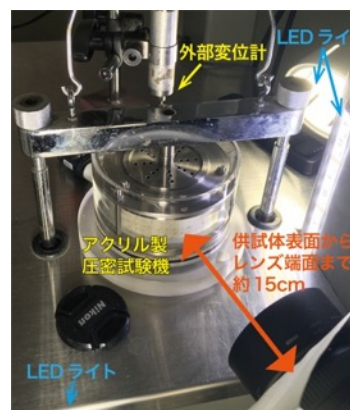


図6 浸透圧密試験装置

図7に片面排水浸透条件（4M NaCl）における供試体内の変位分布と試験終了後（供試体上端での変位が落ち着いた後）のナトリウムイオン濃度分布を示す。図より、上端からのイオン浸透によって、供試体上部から圧縮が生じていること、また、浸透中期では供試体下部において膨張が生じている（変位が負になっている）ことが分かる。また、最終的には供試体内部で様なひずみ（変位勾配）が生じているが、イオン濃度は境界条件である4Mに達しておらず、供試体内部でも下部ほど濃度が小さくなっていることが分かった。

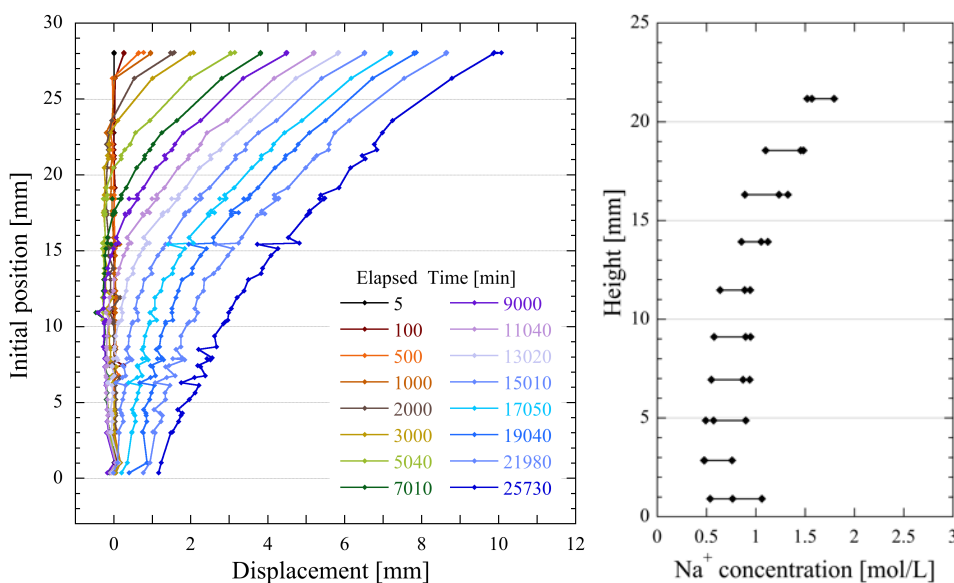


図7 片面排水浸透圧密試験（4M NaCl）

（左：変位分布の変遷，右：試験終了時のイオン濃度分布）

（4）膨潤性粘土の水力-力学-化学連成有限要素解析

開発モデルを組み込んだ水力-力学-化学連成有限要素解析コードを開発した。力のつり合い式、間隙水の質量保存則に加え、イオン浸透を考慮する物質移動式（移流拡散方程式）を有限要素法により、連成して解いた。図8に図7と同様の片面排水浸透条件（4M NaCl）の解析結果を示す。イオン拡散係数などの物性値が適切に設定できなかったため、実測値の定量的な評価に課題は残るが、定性的な挙動、特に上述の上部からの圧縮の進行ならびに浸透中期での供試体下部における膨張挙動を適切に再現できていることが分かる。シミュレーション結果より、圧縮に伴う間隙水の移動ならびに間隙水圧の上昇がこの膨張挙動の原因であることが示唆された。今後は、適切な物性値の設定に加え、多次元問題ならびに不飽和状態への適用を考えている。

<引用文献>

- ① Kyokawa, H. et al. 2020. A method for extending a general constitutive model to consider the electrochemo-mechanical phenomena of mineral crystals in expansive soils. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics **44**, 749–771.
- ② Wilkinson, N. et al., 2017. Ionic strength dependence of aggregate size and morphology on polymer-clay flocculation. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects **529**, 1037–1046.
- ③ Di Maio, C., 2004. Chemo-Mechanical Couplings in Porous Media Geomechanics and Biomechanics: 45-55.

④ Lloret, A. et al. 2003. Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes. Géotechnique 53, No. 1, 27–40.

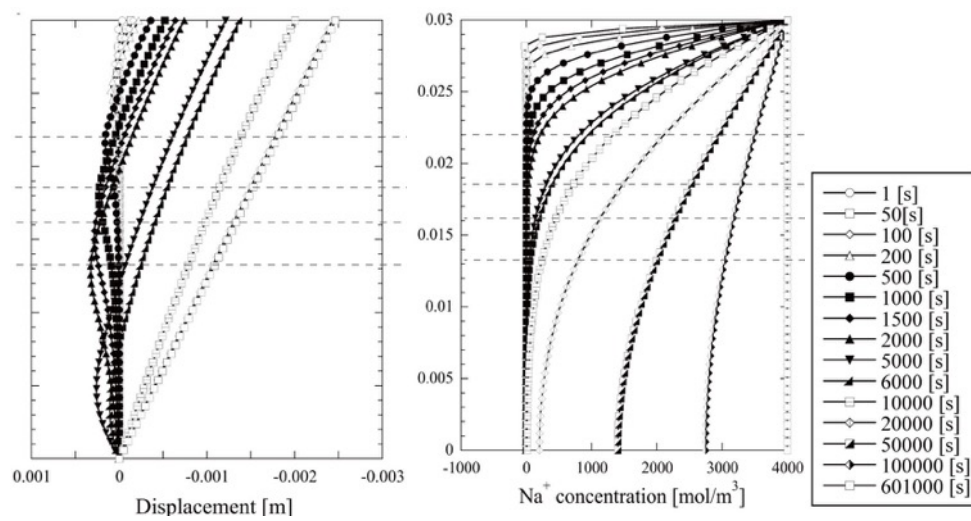


図8 片面排水浸透圧密試験 (4M NaCl) の解析結果
(左: 変位分布の変遷, 右: 試験終了時のイオン濃度分布)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Kyokawa, H., Ohno, S. and Kobayashi, I.	4. 巻 44
2. 論文標題 A method for extending a general constitutive model to consider the electro chemo mechanical phenomena of mineral crystals in expansive soils	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics	6. 最初と最後の頁 749-771
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/nag.3026	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Hiroyuki Kyokawa
2. 発表標題 A method to consider the electrical/chemical interaction of clay crystal in general constitutive model
3. 学会等名 Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 京川裕之
2. 発表標題 膨潤性粘土の力学 - 化学連成手法
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 Hiroyuki Kyokawa
2. 発表標題 Constitutive model describing the hydro-mechanical behaviors of compacted bentonite clay based on the crystal surface phenomena
3. 学会等名 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY GEOTECHNICS (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 京川裕之
2. 発表標題 膨潤土の水理 - 力学 - 化学連成挙動のモデル化手法
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平賀美沙
2. 発表標題 膨潤性粘土の浸透圧密現象の局所挙動とその時間的发展に関する実験的検討
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 依田光平
2. 発表標題 膨潤性粘土の強度特性におよぼす陽イオン濃度の影響のモデル化
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://geot.le.t.u-tokyo.ac.jp/hiroyuki-kyokawa/

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