

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02361

研究課題名(和文) 膨潤性岩盤を対象としたマルチスケール・マルチフィジックス岩盤力学の展開

研究課題名(英文) Development of multiscale multi-physics rock mechanics for swelling rock mass

研究代表者

京谷 孝史 (Kyoya, Takashi)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：00186347

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,200,000円

研究成果の概要(和文)：スメクタイトの膨潤による地中構造物の経年劣化問題の解決のため、岩盤の膨潤挙動に対するマルチフィジックス・マルチスケール岩盤力学解析モデルを開発した。まず、モンモリロナイト試薬を用いた膨潤実験を実施して、スメクタイトの吸水膨潤挙動を記述する熱力学モデルを定式化した。一方で、修正カムクレイモデルを基礎に強度と剛性が低下する岩盤の力学挙動を扱う数理モデルを定式化し、それに熱力学的膨潤モデルを組み込んで岩盤の膨潤に伴う劣化を表現するマルチスケール・マルチフィジックス解析モデルを開発した。検証例題として膨潤性岩盤に構築されたトンネルの応力変形照査解析を実施し、提案理論の有効性および発展性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、建設から数十年経つトンネル等の地下構造物が、岩盤の膨潤によって損傷し、その機能が著しく劣化する事象が多数生起しており、道路や橋梁などと共に社会基盤施設の健全な維持管理の大きな問題の一つとして顕現している。本研究は、そうした維持管理技術の高度化に資する点に社会的意義がある。また、本研究はスメクタイトの化学的な吸水膨潤挙動に対する熱力学モデルの定式化と、岩盤の材料劣化にともなう剛性と強度の低下を表現できる数値解析モデルを融合させたマルチスケール・マルチフィジックス岩盤力学解析モデルの開発を通して、岩盤の力学挙動を扱うための新しいアプローチ手法の確立に取り組んだ点に学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：In order to resolve the problem of deterioration of underground structures after construction due to swelling of rock mass we have developed a new multiscale multi-physics rock mechanics approach. We carried out laboratory swelling tests of montmorillonite and formulated a thermodynamics model for the swelling behavior. We also formulated a numerical analysis model based on the modified Cam-Clay model that can predict deteriorating strength and stiffness of rock mass along with a rigorous return-mapping algorithm. Then we developed a multiscale multi-physics analysis model for swelling rock mass by incorporating the thermodynamics swelling model into the Cam-Clay type model. A series of analyses of a tunnel within a swelling rock mass predicted displacement and stress distribution around the tunnel in good agreement with measured data. We conclude therefore the validity and effectiveness of this proposed multiscale multi-physics rock mechanics theoretical model.

研究分野：岩盤力学，地盤数値解析

キーワード：膨潤性岩盤 地下構造物 マルチスケール マルチフィジックス 数値解析

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開発当初の背景

スメクタイトを含む粘土地山では、工事から数年あるいは数十年経ってから地山が膨張してトンネルなど構造物が破壊するといった問題が起きている。その原因はスメクタイトの吸水膨潤反応にあるのだが、そのミクロスケールで生起する鉱物の膨潤反応が、最終的にマクロスケールで起こる地山の膨張挙動に結びつく過程は詳細に解明されていない。そのため地山の膨張量や構造物への影響が定量評価ができず、したがって、構造物の設計や補修における地山の膨張挙動への対処は手探りの状態にある。しかし、インフラの劣化が社会的問題となっている今、地中構造物の設計や維持管理の高度化・合理化のために地山の膨張現象の解明と合理的な予測評価手法の確立は喫緊の課題となっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、スメクタイトを含む地山の膨張によりトンネルなどの地中構造物が破壊するといった問題に対する合理的かつ効果的な対策法の確立のために、スメクタイト吸水膨潤反応に伴う粘土の微視構造の変化を定量的に把握し、そのミクロスケールで生起する現象を記述するマルチフィジックス数理モデルを開発し、そのミクロスケール膨潤モデルと、マクロスケールでの地山の変形を扱うマクロ解析モデルとをマルチスケール解析理論の枠組みにおいて組み合わせ、地山の膨潤挙動を高精度で予測評価するマルチスケール解析モデルを構築することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) スメクタイトの吸水膨潤挙動の定量的把握と膨潤挙動モデルの定式化

スメクタイト類の代表であるモンモリロナイトの粉末鉱物資料を用いて、拘束応力を変えながら吸水膨潤実験を実施し、膨潤速度・膨潤量を計測して、スメクタイトの膨潤挙動を定量的に把握する。それらの結果をもとにして、スメクタイトの膨潤挙動を表現するミクロスケール膨潤モデルを定式化する。

#### (2) スメクタイト含有地山の膨潤挙動に対するマルチスケール解析手法の構築

マルチスケール解析理論の枠組みにおいて、スメクタイトの膨潤モデルと、地山の変形を扱うマクロスケール解析モデルを組み合わせ、地山の軟化を伴う膨潤挙動を予測評価するためのマルチスケール解析手法を構築する。

### 4. 研究成果

#### (1) 新しい測定原理に基づく膨潤試験装置の開発

図1に示す新たな測定原理に基づく膨潤試験装置を作成した(図2, 3)。開発した試験装置は、丈夫なゴム膜で覆った供試体を圧力容器に入れて水で満たし、その状態から供試体に水を供給して吸水膨潤させて容器から排除される水の体積から供試体の体積変化を測定すると機構になっている。吸水膨潤によって排斥された水の体積は、水位の変化として図3の中央に位置するレーザー変位計(黒色の箱)により正確に測定される。本試験機は供試体の形状変化によらず体積変化に伴う水位の変化量を計測するため、寸法と形状が決まった金属容器中での供試体の一方向の増加量を計測していた従来法に比べて、供試体が本来的に有する膨潤特性の正確な定量的把握を可能にするものである。

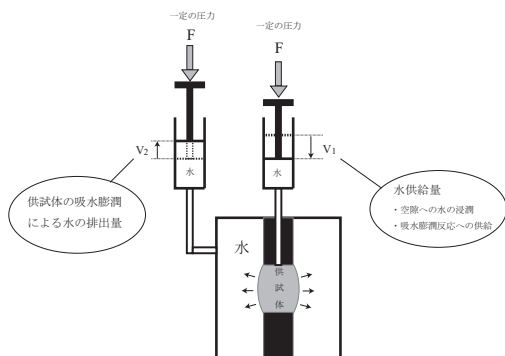


図1: 膨潤量の測定原理



図2: 膨潤試験機



図3: 膨潤量の計測部分

#### (2) スメクタイトの膨潤挙動の把握

水を含んで膨潤するにつれてスメクタイト類はゼリー状となることで透水性が著しく低下する。そのため、膨潤実験において、供試体を膨潤させるための水を安定的に供給出来なくなるといった問題が生じる。本研究では、モンモリロナイト粉末試料に豊浦砂を混合することとし、二つの材料を十分に

攪拌してゴムスリーブに詰める際に、水の供給を助けるろ紙を柱状にして骨格を作り供試体を作成することで問題を克服した。

実験では、まず供試体から空気を抜いて初期状態とし、圧力容器内の圧力と供試体に供給する水の圧力をそれぞれ、20kPa、40kPa、60kPa、100kPa、200kPaに保ち、供試体の粒子骨格にかかる有効応力は変化させずに間隙水圧のみを変化させて、供試体の膨潤量の増加が見られなくなるまで測定した。

膨潤実験後の供試体の様子を図4、5に示す。図4は膨潤実験後にゴムスリーブから供試体をそのまま取り出したもの、図5は供試体の内部が完全に湿潤しているか否かを確認するために供試体を手で崩した様子である。見たとおり、供試体内部まで水は浸潤しており、本膨潤試験は成功裏にデータが取得できていることを確認した。



図4: 実験後の供試体



図5: 実験後の攪拌供試体

膨潤実験から得られたモンモリロナイト単位体積当たりの膨潤量を図6示す。膨潤挙動の傾向は間隙水圧が変化しても変わらず、膨潤率は実験開始直後に非常に高く、その後は経過時間とともに徐々に低くなり最終的には少々バラつきがあるものの一定値に収束している。この実験結果から、モンモリロナイトに代表されるスメクタイト類の最大膨潤量と要する時間は、間隙水圧によって変化しないという重要な事実を見出した。

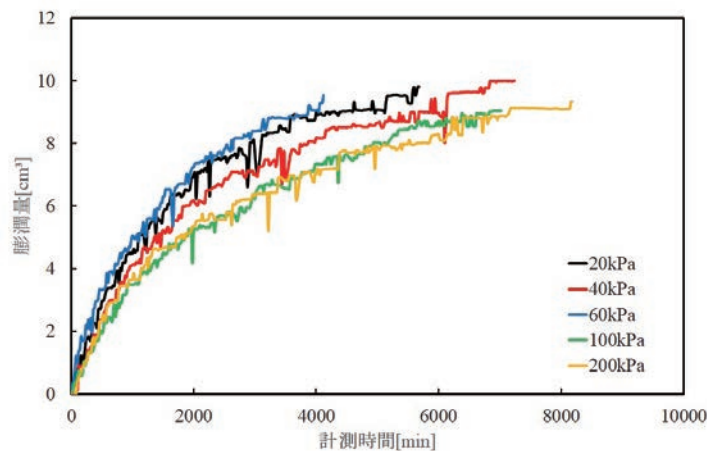


図6: モンモリロナイトの単位体積当たり膨潤挙動

### (3) スメクタイトの膨潤挙動に対する熱力学モデルの構築

実験で確認された事実を踏まえ、膨潤中のスメクタイトを「粘土鉱物と層間水からなる系」として理想化することで、スメクタイト類の膨潤挙動を記述する熱力学的なモデルを構築した。

スメクタイトの膨潤ポテンシャルは粘土鉱物（質量  $N_s$ ）と層間水（質量  $N_w$ ）によって決まると考えられる。すると、水の移動が止まるつり合い状態は水の化学ポテンシャルとのつり合いとして記述できるので、膨潤挙動が間隙水圧に依存しないという実験の結果を踏まえて、スメクタイト粒子に流入する間隙水の移動速度が膨潤ポテンシャルのつり合い状態からの差に比例すると仮定の下で、スメクタイトの膨潤挙動を広範囲の環境下で表すための化学ポテンシャルを次式のように定めた。

$$\mu_w(T, \sigma'_m; N) = \lambda \cdot V_{max} \left\{ 1 - \exp \left( - \frac{V_{max}}{N_{max}} t \right) \right\} \quad (1)$$

次に、スメクタイト粒子に関する質量保存則と密度変化を考慮し、スメクタイト粒子が取り込んだ層間水が増加するにつれて、スメクタイト粒子骨格のせん断弾性係数はゼロに近づき、体積弾性係数

は水の体積弾性係数に近づく弾性構成則を次式のように定式化した。

$$\varepsilon_{ij}^e = 2 \left[ \left( 1 - \frac{N}{\beta(\sigma'_m)} \right)^n \mu_s \right]^{-1} s_{ij} + \left[ \left( 1 - \frac{N}{\beta(\sigma'_m)} \right)^n \kappa_s + \left( 1 - \left( 1 - \frac{N}{\beta(\sigma'_m)} \right)^n \right) \kappa_w \right]^{-1} \delta_{ij} \sigma'_m \quad (2)$$

すると、この弾性構成則に対応する単位体積当たりの Gibbs 自由エネルギーからスメクタイト粒子骨格の単位質量当たりの化学ポテンシャル（単位質量スメクタイト鉱物粒子当たり）が次式で与えられる。

$$\theta(\sigma'_{ij}, N) = g(\sigma'_{ij}, N) = -\frac{1}{2\rho(N)} \left( \frac{s_{ij}s_{ij}}{2\mu(N)} + \frac{\sigma_m^2}{\kappa(N)} \right) \quad (3)$$

これを用いて内部エネルギーの変化を考慮すると、スメクタイト粒子骨格の単位質量当たりのエントロピーの変化が

$$d\eta = \frac{1}{T} \left( de - \frac{1}{\rho} \sigma'_{ij} d\varepsilon_{ij}^e - \theta dN \right) = \frac{1}{T} \left( de - \frac{1}{\rho} \sigma'_{ij} d\varepsilon_{ij}^e \right) + \frac{1}{T} (-\theta dN) = \frac{dQ}{T} + \frac{(-\theta)}{T} dN \quad (4)$$

と与えられるので、これを熱力学第二法則は次式となる。

$$\frac{dQ}{T} \leq d\eta = \frac{dQ}{T} + \frac{(-\theta)}{T} dN = d\eta_r + d\eta_i \quad (5)$$

ここで、最右辺の第一項  $d\eta_r$  は熱の出入りによる可逆なエントロピーを表し、第二項  $d\eta_i$  は膨潤による不可逆なエントロピー増加を表すが、膨潤によるエントロピー増加  $d\eta_i$  は

$$d\eta_i = \frac{(-\theta)}{T} dN = \frac{1}{2T\rho(N)} \left( \frac{s_{kl}s_{kl}}{2\mu(N)} + \frac{\sigma_m^2}{\kappa(N)} \right) \alpha(\beta - N) dt \geq 0 \quad (6)$$

のように負にならないことからこのモデルの熱力学的な妥当性が確認できる。

#### (4) 膨潤性岩盤に対する弾塑性解析コードの開発

塑性軟化を伴う膨張、塑性硬化を伴う圧縮の両方の力学挙動を合理的に表現できる修正カムクレイ (Cam-Clay) モデルを基本として、スメクタイトの膨潤モデルを組み込んだ岩盤の膨潤挙動を扱うための弾塑性解析コードを開発した。

吸水膨潤を考慮した速度形修正カムクレイ弾塑性構成則の積分のために、リターンマッピングアルゴリズムを定式化した。

リターンマッピングアルゴリズムが正しく動作することを確認した後に、トンネル周辺の膨潤についての例題解析を行った。解析に用いた3次元有限要素モデルおよび境界条件を図7に示す。図中には解析に用いた修正 Cam-Clay モデルの物性値と境界条件を示している。なお、有限要素モデルは3次元であるが、空洞軸方向に鉛直な変位を固定して平面ひずみ条件を課している。膨潤解析では、対象のトンネルは素掘り状態として、図7に示すトンネルの下部の黄色の部分が等方的に膨潤するとして、トータルの体積ひずみが15%になるまで、膨潤ひずみを100ステップに分けて段階的に与えた。

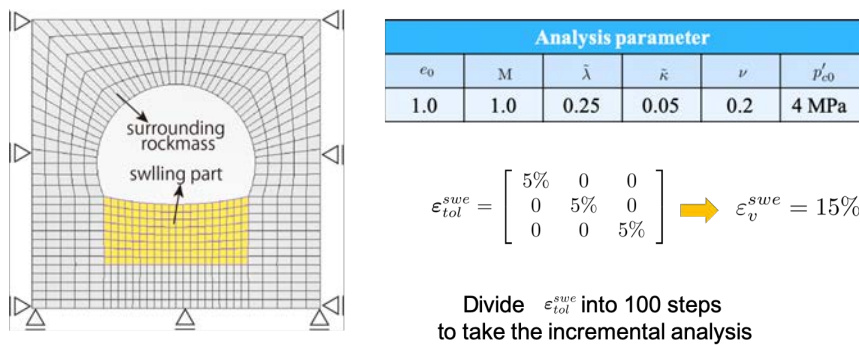


図7: トンネル周辺岩盤の膨潤解析に用いた有限要素モデル、境界条件および物性値

図8にトンネル周辺の応力分布の様子を示す。膨潤に伴って底盤部分に作用する応力が変化するが、底盤中央部を中心にして圧縮成分ならびにせん断成分の大きさが緩和されていく様子が見取れ、力学の常識に照らして妥当な結果が得られている。

また、膨潤体積ひずみ15%を与えた最終段階において、素掘りトンネル底盤中央の鉛直変位は66cmであった。この中央部における応力の変化の様子を図9に示す。膨潤の進行に伴って一旦は応力は増加するが、その後の塑性化に伴って、膨潤しつつ強度が低下（塑性軟化）している様子が見取れる。

岩盤は膨潤の膨潤解析モデルでは、膨潤に伴う材料劣化が表現できねばならないが、本モデルは強度の低下を表現できることを示しており、当初の目的とする解析モデルが有すべき機能は実現できた。

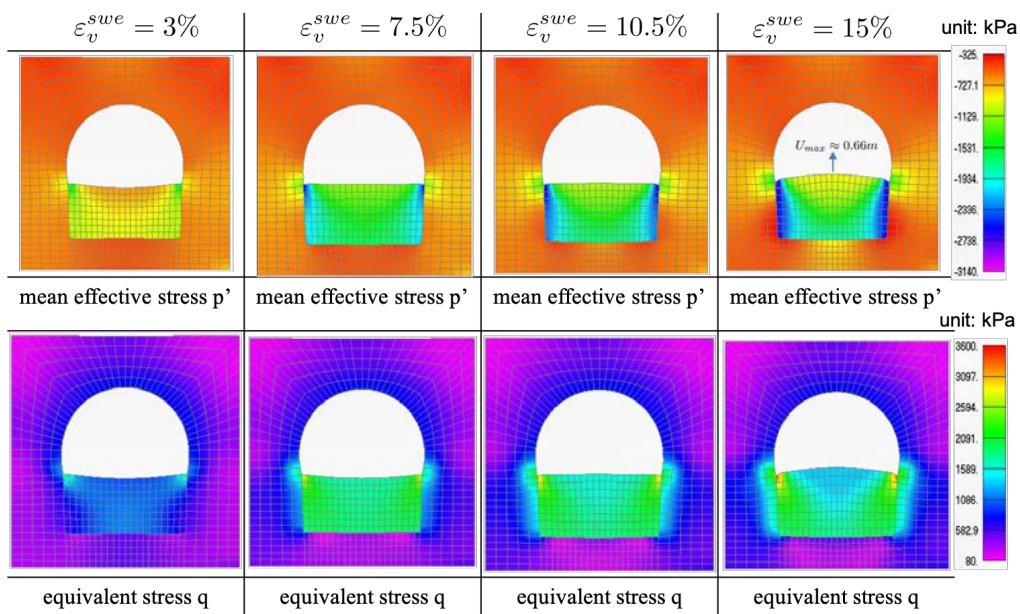


図 8: 底部岩盤の膨潤に伴うトンネル周辺の応力分布の変化

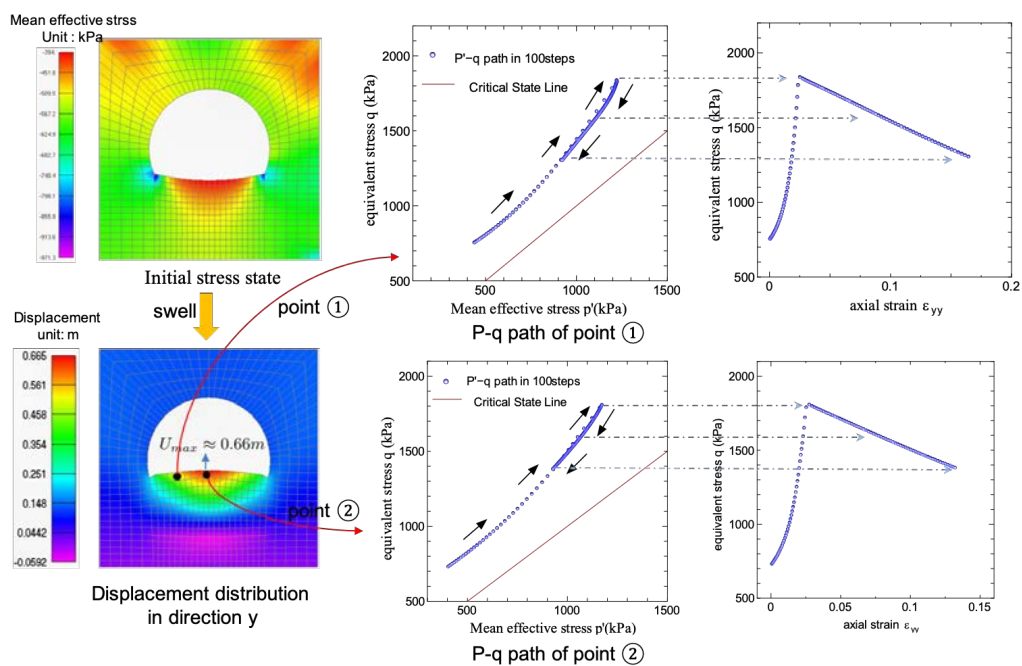


図 9: 底盤中央の塑性軟化を示す応力ひずみ曲線

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 1件）

1. 著者名 劉曉東, 鶴ノ沢均, 加藤準治, 京谷孝史	4. 巻 2018
2. 論文標題 割線剛性を用いた簡便なマルチスケール解析による膨張性地山のトンネル安定性評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transactions of JSCEs, Paper No. 2018004	6. 最初と最後の頁 14
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Xiaodong Liu, Seishiro Matsubara, Shotaro Yamada and Takashi Kyoya
2. 発表標題 Numerical Analysis of a Tunnel in Swelling Rockmass by a Modified Cam-Clay Based Model
3. 学会等名 YSRM2019 & REIF2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本颯人、京谷孝史、松原成志朗、劉曉東
2. 発表標題 トンネルの膨潤挙動に対する熱力学的解析モデル
3. 学会等名 令和元年度土木学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiaodong LIU, Seishiro MATSUBARA, Shotaro YAMADA, Takashi KYOYA
2. 発表標題 NUMERICAL ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF A TUNNEL EXCAVATED IN SWELLING ROCKMASS
3. 学会等名 公益社団法人土木学会第47回岩盤力学に関するシンポジウム
4. 発表年 2020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	寺田 賢二郎 (Terada Kenjiro) (40282678)	東北大学・災害科学国際研究所・教授  (11301)	
研究分担者	松原 成志朗 (Mtsubara Seishiro) (40823638)	東北大学・工学研究科・助教  (11301)	
研究分担者	山田 正太郎 (Yamada Shotaro) (70346815)	東北大学・工学研究科・准教授  (11301)	
研究分担者	大河原 正文 (Okawara Masafumi) (80223741)	岩手大学・理工学部・准教授  (11201)	
研究分担者	加藤 準治 (Kato Junji) (00594087)	東北大学・工学研究科・准教授  (11301)	
研究分担者	長田 昌彦 (Osada Masahiko) (00214114)	埼玉大学・理工学研究科・教授  (12401)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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	高瀬 慎介  (Takase Shinsuke)  (00748808)	東北大学・工学研究科・助教    (11301)	