

一般財団法人新潟県建設技術センター

平成 30 年度 研究助成事業報告書

県内に広く分布する膨潤性粘土鉱物を含む地盤の  
風化促進メカニズムの探究と  
斜面災害対策方法の改善に関する事業

平成 31 年 3 月

研究代表者

長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻

福元 豊

## 1. はじめに

新潟県内の地山を構成する泥岩斜面には、その地形の成り立ちに起因して、モンモリロナイトを主体とした膨潤性の粘土鉱物が多く含まれている。膨潤性の粘土鉱物は吸水することで著しく体積を増加させる特徴をもつため、掘削時の切土斜面において過大なリバウンドを生じさせる原因となる。また、吸水膨張後に斜面が乾燥を受けると、今度は収縮により体積が著しく減少することで表面または内部に複数のクラックが発生し<sup>1)</sup>、施工済みの斜面でも急速に風化が進むと報告されている。そのため、膨潤性の粘土鉱物の物理・化学変化によって斜面の風化が促進されるメカニズムを探究することは、県内の斜面災害対策を改善するにあたって重要な課題の1つであると考えられる。

そこで、本研究では、膨潤性を持つ粘土鉱物が含まれた地盤材料が乾湿繰り返しによって風化する過程を再現できる粒子計算モデルについて検討した<sup>2,3)</sup>。また、乾湿を数回繰り返したモデルに対して一軸圧縮シミュレーションを実施し、その強度の変化を調べることで提案モデルの適用性を検証した<sup>4)</sup>。

## 2. 泥岩試料

粒子計算モデルの検討に先立って、新潟県内で採取した泥岩試料に対するスレーキング率試験と促進スレーキング試験をおこなった。泥岩の採取地は、長岡市寺泊、糸魚川市槇地、岩船郡粟島の3箇所である。ここでは、膨潤性を持つ粘土鉱物が多く含まれていると考えられる長岡市寺泊で採取した泥岩試料について主に報告する。

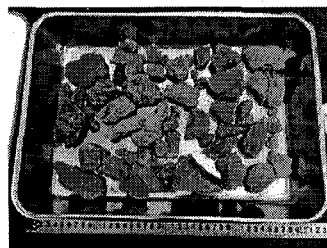


図1 初期の泥岩試料

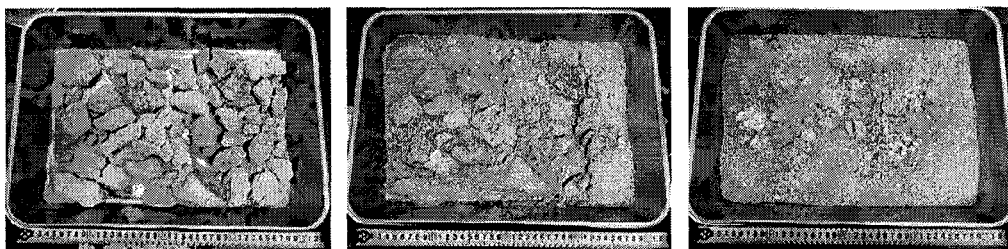


図2 スレーキング率試験の様子（左から順に、乾湿1回目、乾湿2回目、乾湿3回目）

図1は初期の泥岩試料で、図2はスレーキング率試験の様子である。スレーキング率の値は、乾湿1回目で2.63%、乾湿2回目で61.84%、乾湿3回目で90.13%である。乾湿1回目では初期とほとんど形状が変わらないが、乾湿2回目で急速に風化が進んだことが確認できる。

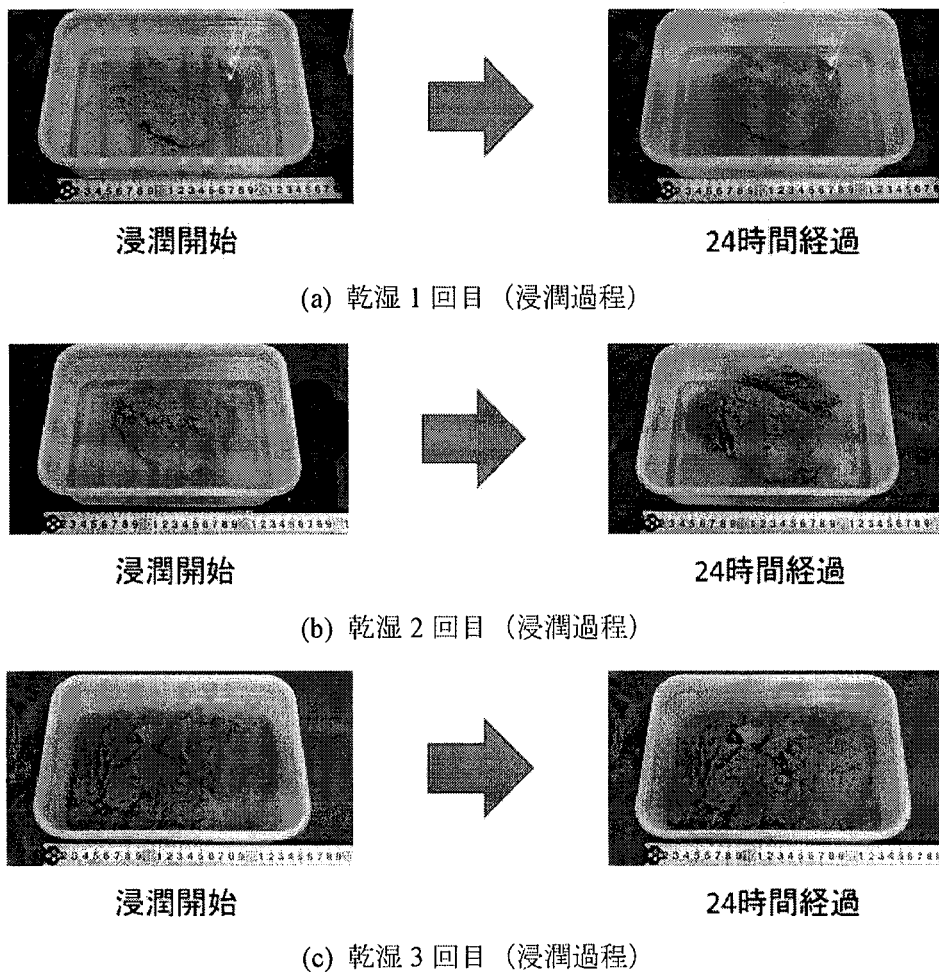


図3 促進スレーキング試験の様子

図3は促進スレーキング試験の様子で、ビデオカメラと定点カメラを用いて撮影した画像である。図2のスレーキング率試験でも見られたように、乾湿1回目の時点では風化は進まず、乾湿2回目以降に細粒化が進んだ。とくに乾湿2回目では、泥岩試料が膨張して大きな亀裂が発生する様子を観察することができた。

### 3. 粒子計算モデル

#### (1) 膨張と収縮のモデル

粒状体モデルの開発は、DEM (Discrete Element Method, 個別要素法) をベースとしておこな。図4に示すように、粘土鉱物と砂粒子で構成される直径1mmほどの点線で描かれた円形領域を1つのDEM粒子とする。そして、この領域内の膨潤性粘土鉱物の占める体積が変化することで、DEM粒子の大きさが初期粒子径  $D_{ini}$  (m) から変化すると考える。膨張を負、収縮を正として、膨張幅の上限値を  $-\alpha_{sw}D_{ini}$  (m)、収縮幅の上限値を  $\alpha_{sh}D_{ini}$  (m) とする。ここで、膨張係数  $\alpha_{sw} < 0$ 、収縮

係数 $\alpha_{sh} > 0$ である。また、今回のモデルでは簡単のため、粒子径の変化は経過時間に対して線形であると仮定する。膨張と収縮に必要な時間をそれぞれ $T_{sw}, T_{sh}$ とし、膨張の開始時刻を $t_1$ 、終了時刻を $t_2$ 、収縮の開始時刻を $t_3$ 、終了時刻を $t_4$ とすると、ある時刻 $t$ の粒子径 $D(t)$ は図5に対応して、以下のように表される。

$$\text{膨張: } D(t_2) = D(t_1) - \frac{\alpha_{sw} D_{ini}}{T_{sw}} t, \quad \text{収縮: } D(t_4) = D(t_3) - \frac{\alpha_{sh} D_{ini}}{T_{sh}} t. \quad (1)$$

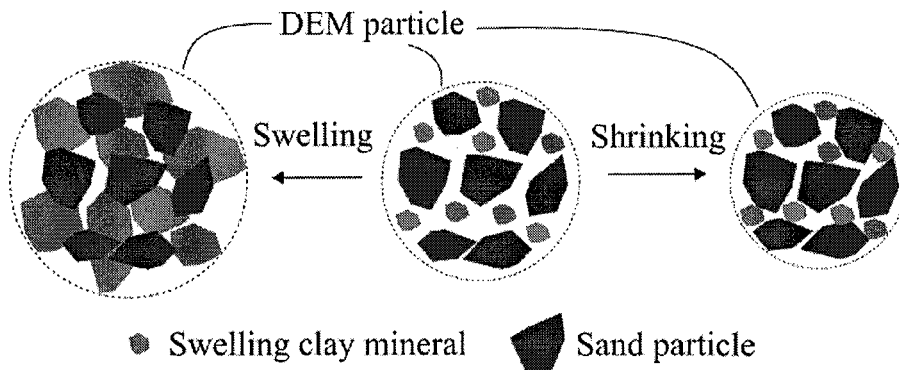


図4 粒子計算モデルの概念図

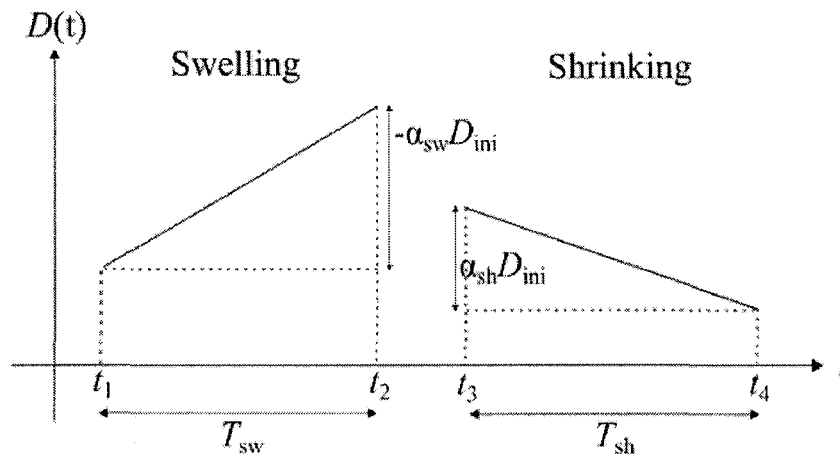


図5 膨張収縮に関するモデル係数

このとき、膨張の速度は $-\alpha_{sw} D_{ini} / T_{sw}$ 、収縮の速度は $-\alpha_{sh} D_{ini} / T_{sh}$ で表される。計算コストの観点から、 $T_{sw}, T_{sh}$ の値は現実よりもかなり小さく設定する必要がある。図5において、粒子径の時間変化を非線形にすることで、より現実に近いモデル化を行えると考えられるが、土質試験の結果との比較検討が必要であり、今後の課題である。

## (2) 粒子間の固着モデル

DEMによる岩石のような固着材料のモデル化では、粒子間バネの引張側に所定の強度を設けて粒子間に引力を生じさせることで、粒子集合体としての固着特性を表現した<sup>5)</sup>。通常接触時にお

ける接触法線方向力  $F_n^{\text{cont}}$  (N) と接触接線方向力  $F_t^{\text{cont}}$  (N) の関係は、図 6 に Non-bond で示す傾きが粒子間摩擦  $\mu$  のクーロンの破壊直線に従う。一方、粒子間に固着力が作用している場合は、通常接触時の破壊直線を  $F_n^{\text{cont}}$  の負の方向に  $t_\mu$  (N)、 $F_t^{\text{cont}}$  の正の方向に  $c_\mu$  (N) だけ平衡移動させた直線に従う。これら  $t_\mu$  と  $c_\mu$  が粒子間バネの引張強度であり、モデル係数となる。以下、法線方向と接線方向の粒子間固着力と呼ぶ。また、粒子間の固着力を踏まえた上での回転抵抗モデル<sup>6)</sup> をあわせて導入することで、粒子間の固着がトルクに与える影響も考慮した。

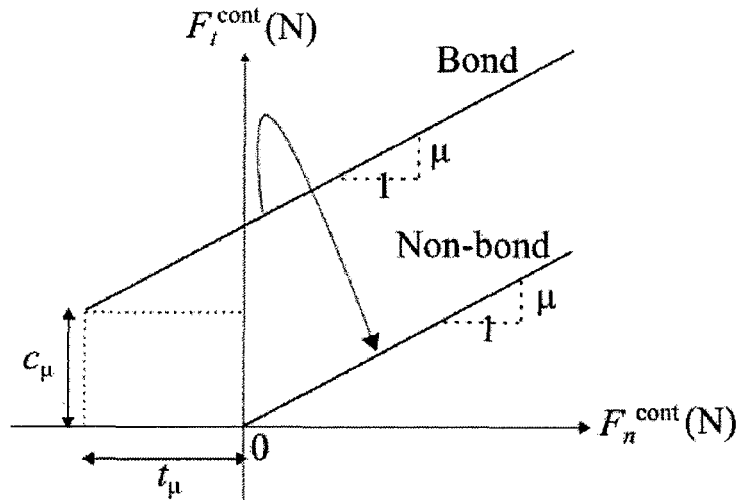


図 6 粒子間の固着に関するモデル係数

#### 4. 乾湿繰り返しを受ける泥岩のスレーキングシミュレーション

今回検討した DEM モデルは初期状態 ( $t=0$  s) での寸法が  $100\text{mm} \times 200\text{mm}$  の長方形で、平均粒径  $1\text{mm}$  の円形粒子約  $25000$  個で構成されている。法線方向の粒子間固着応力  $t_\mu=1.0 \times 10^6$  N/m とした。この値はバネ定数との組み合わせにより泥岩らしい一軸圧縮強度を再現できる範囲内の値である<sup>2)</sup>。膨張収縮を受ける領域についてはモデル全体の  $75\%$  とし、膨張終了直後に収縮が開始するサイクルを  $3$  回繰り返した。その他パラメーターは輪島ら<sup>3)</sup>と同様に設定して計算をおこなった。図 7 は以上の条件にて実行した計算結果を示したものである。拡大図より、乾湿を受ける度にクラックが増えていく様子が確認できる。

また、粒子間の固着破壊を粒子の細粒化と捉え、風化の進行度を示すスレーキング率と比較できると考えた。これを定量的に確認するために粒子間の固着が破壊された粒子間接触数の割合を  $\alpha$  とし、時間ごとに整理した。これを図 8 に示す。また全ての領域で膨張収縮を受けるモデルにも同様の計算を実行し、整理を行った。図 8 からは膨張領域  $75\%$  のモデルでの  $\alpha$  の値は初回の湿潤時に大きく破壊され  $20\%$  まで増加している。その後、著しい増加はないが、計算終了時点で  $28\%$  の固着破壊が起きていることがわかる。一方で膨張領域が  $100\%$  のモデルの  $\alpha$  の値は著しい増加は確認できず、モデルの固着破壊はほとんど起きていないことがわかる。以上から、非膨張領域を導入したことによって風化進行度に差異が生じたことを確認できる。

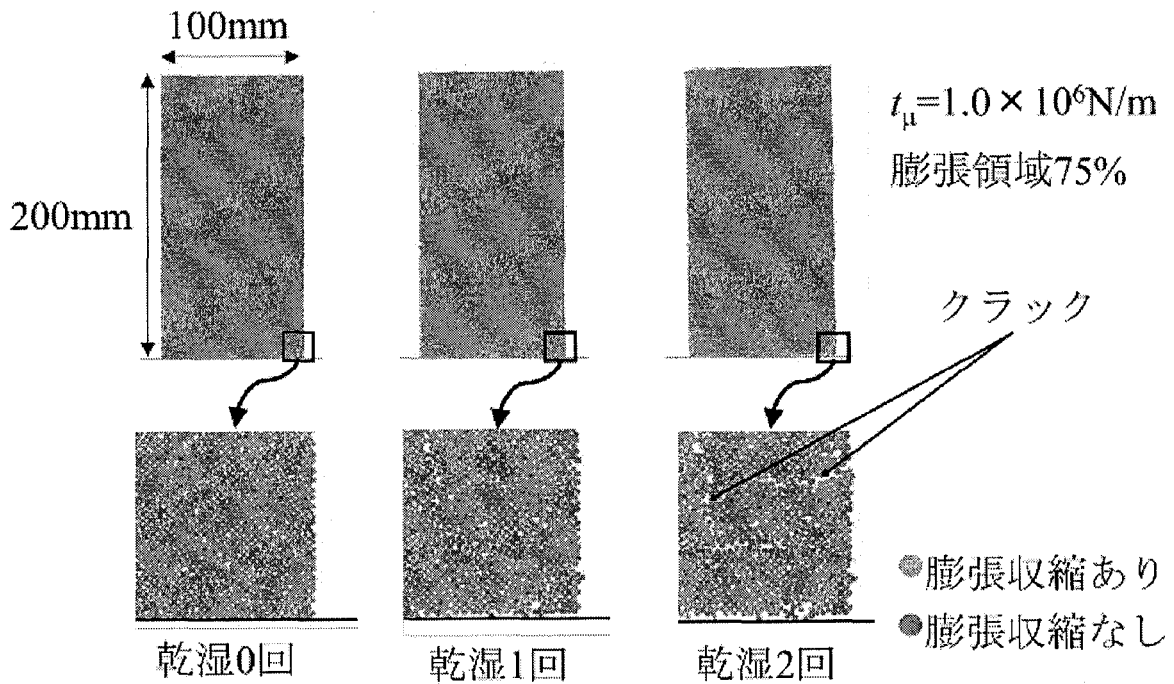


図7 乾湿繰り返しのシミュレーション

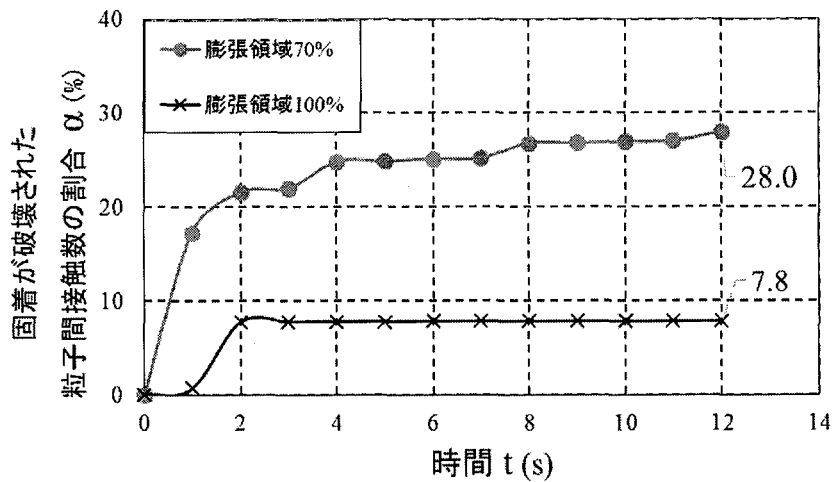


図8 固着が破壊された粒子間接触数の割合の変化

### 5. 乾湿風化を受けた泥岩の一軸圧縮シミュレーション

以上のような結果を踏まえて、乾湿繰り返しの受けたことによる強度特性の変化を調べた。前項で乾湿を与えたモデルに対して、一軸圧縮シミュレーションを行う。膨張領域100%のモデルに対しても計算を行ったが、乾湿前後の一軸圧縮強度に変化がみられなかったため、膨張領域75%のケースのみ掲載する(図9)。

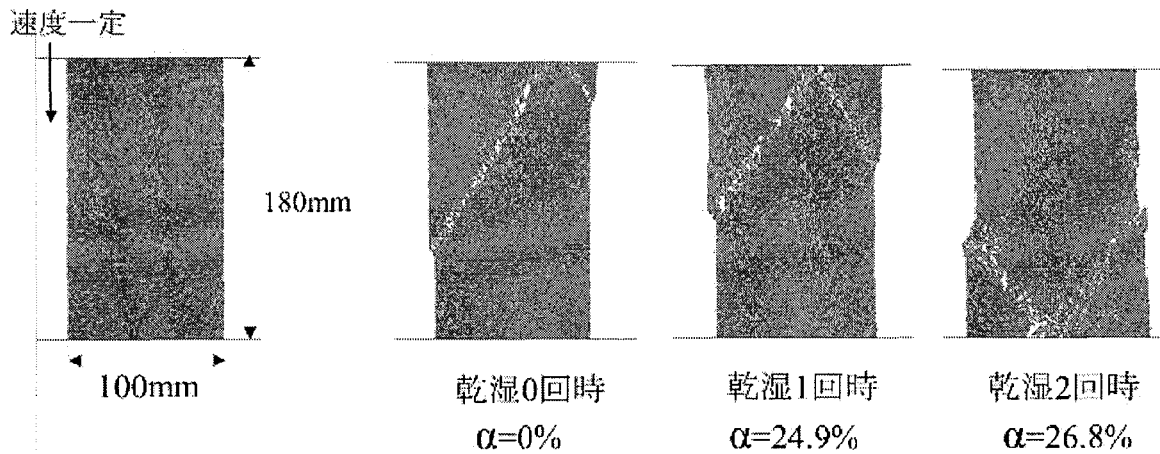


図9 一軸圧縮のシミュレーション

図10の応力-軸ひずみの関係からは、乾湿を受けたことによりモデルの一軸圧縮強度が低下していることがわかる。図8のグラフと照らし合わせると、大きな強度低下は $\alpha$ が最も大きく増加した初回の湿潤時のみに起きていることがわかる。このことからモデルの一軸圧縮強度は粒子間固着が破壊される割合 $\alpha$ の増加に伴って大きく低下していると推測できる。乾湿1回目と乾湿2回目の強度を比較した場合と、膨張領域100%の場合にて強度変化が見られなかった結果に対しても同様な理由で説明ができる。泥岩は乾湿の作用により細粒化する際に、一軸圧縮強さが細粒化の程度に伴って低下することが既往研究から知られている<sup>7)</sup>。そのため、今回のシミュレーションでは既往研究と定性的に一致する結果を得ることができた。

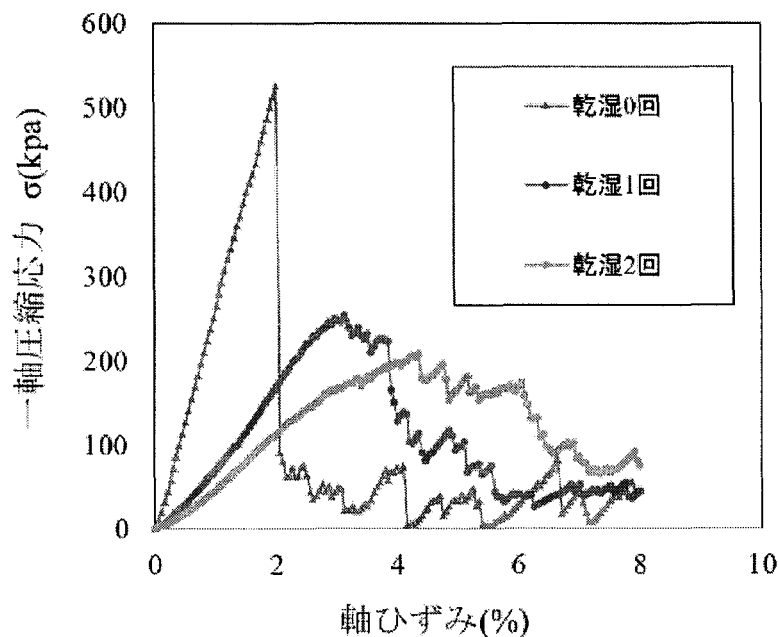


図10 一軸圧縮シミュレーションにおける応力-軸ひずみの関係

## 6. おわりに

膨潤性の粘土鉱物を含む地盤材料を取り扱うための粒子計算モデルを提案し、泥岩のような軟岩の変形の問題への適用可能性を示した。今後は、採取した泥岩試料の土質試験の結果との比較によりモデル係数を決める方法や、含水比の変化を考慮した膨張・収縮モデルと粒子間固着モデルについても検討する予定である。

膨潤性の粘土鉱物を含む地盤の風化メカニズムが明らかになれば、現場から採取した土試料に対する物理試験の結果から、新潟県内の斜面災害発生危険度をより定量的に判断できる可能性がある。また、物理・化学変化を考慮した粒子シミュレーションモデルの土木工学分野における応用例はこれまでに例が少ないため、学術的にも重要な知見を得ることができると考えられる。

研究の遂行にあたっては長岡技術科学大学修士課程2年生の輪島僚也氏と同修士課程1年生の立花賢吾氏からの多大なる協力を承った。

## 参考文献

1. 菊本 統, 福田 拓海, 京川 裕之: 破碎泥岩のスレーキング現象と変形挙動, 土木学会論文集C (地圏工学), vol.72, No.2, 126-135, 2016
2. Yutaka Fukumoto, Satoru Ohtsuka: Discrete particle simulation model for slaking of geomaterials including swelling clay minerals, International Journal of GEOMATE, Vol.16, No.54, pp.134-139, 2019.
3. 輪島僚也, 福元 豊, 大塚 悟: DEMモデルによる膨潤性を持つ泥岩のスレーキングシミュレーション, 地盤工学研究発表会発表要旨集, Vol.53, pp.507-508, サポートホール高松 (高松), 2018.
4. 立花賢吾, 輪島僚也, 福元 豊, 大塚 悟: 膨張収縮を考慮した粒子計算モデルによる地盤材料の2次元風化シミュレーション, 地盤工学研究発表会発表要旨集, 2019. (印刷中)
5. 福元 豊, 阪口 秀, 村上 章: 地盤の破壊基準を表現するためのシンプルなDEMモデル, 土木学会論文集A2 (応用力学), 土木学会, Vol. 67, No.1, pp.105-112, 2011.
6. Yutaka Fukumoto, Hide Sakaguchi and Akira Murakami: The role of rolling friction in granular packing, Granular Matter, Vol.15, pp.175-182, 2013.
7. 酒井崇之, 中野正樹, 倭大史, 福田雄斗, 工藤佳祐: スレーキング特性の異なる3種類の泥岩碎石集合体の力学特性に及ぼす乾湿経験回数の影響, 第27回中部地盤工学シンポジウム

\*参考文献2)と4)は研究期間内の主な成果であるため、別途添付した。