

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15085

研究課題名（和文）粘土鉱物の形態変化を考慮できる粒子計算モデルの構築とスレーキング現象の微視的理解

研究課題名（英文）Development of particle based numerical model taking into account morphological changes in clay minerals and microscopic understanding of slaking phenomena

研究代表者

福元 豊（Fukumoto, Yutaka）

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60757350

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）：地盤材料のスレーキング現象を微視的な視点から理解するための粒子計算モデルについての検討を行った。粘土鉱物が占める領域の大きさの変化を考慮したDEM（個別要素法）モデルと、亀裂進展を伴う破砕挙動を考慮できるPeridynamicsとDEMを連成したモデルを、土質試験・模型実験との比較を通じて構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スレーキングは、道路盛土や自然斜面・切土斜面の崩壊の原因となりうるため、その発生機構を詳細に理解することは予期せぬ地盤災害を軽減するうえで重要な課題である。本研究で開発した粒子計算モデルを今後も発展させることができれば、複雑なスレーキング現象の進行要因の定量的な分類と整理ができる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：We developed a particle-based numerical model to understand the slaking phenomenon of geomaterials from a microscopic viewpoint. A DEM (Distinct Element Method) model that takes into account changes in the size of the region occupied by clay minerals and a coupled peridynamics and the DEM model that can take into account fracture behavior with crack propagation are investigated.

研究分野：地盤工学

キーワード：スレーキング 風化 個別要素法 粒状体 粒子シミュレーション 亀裂 Peridynamics

## 1. 研究開始当初の背景

砂や粘土のような土、砂岩や泥岩のような岩石から構成される地盤材料は、自然環境の作用を受けて次第にもろくなることが知られているが、この過程は風化と呼ばれている。風化の中でも、とくに、粘土を含む土や泥岩が乾湿の繰り返しを受けることで物理的に細粒化することを「スレーキング現象」という。スレーキングは、道路盛土や自然斜面・切土斜面の崩壊の原因となりうるため、その発生機構を詳細に理解することは予期せぬ地盤災害を軽減するうえで重要な課題であると考えられる。

スレーキングの主な発生要因として考えられているのは、粘土鉱物の吸水膨張と乾燥収縮の影響である。とくに膨潤性の粘土鉱物を含んでいる場合は、膨張と収縮の度合いが大きくなるため、スレーキングの進行が速くなるとされている。一方で、水や空気に触れることによる水和反応や酸化反応が影響することも考えられる。また、寒冷地であれば、間隙水の凍結と融解が要因となることが考えられる。これらのスレーキングが進行する機構を想像して説明することはできるものの、実際に数値計算や模型実験で再現し確認できなければ、それらは推測の域を出ない。また、どの要因がどれだけ風化を促進させているのかの定量的な理解が十分に進んでいない現状がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、地盤材料のスレーキング現象を従来とは異なる微視的な視点で捉えることで、その発生・進行要因の定量的な分類と整理を可能とすることである。その研究過程において、粘土鉱物が占める領域の大きさの変化や亀裂進展を伴う破碎挙動を考慮できる粒子計算モデルを、土質試験と模型実験で得られた結果と比較しながら構築する。

## 3. 研究の方法

### (1) DEMによる膨張収縮を考慮した粒子計算モデル

地盤材料の風化過程を取り扱うためのDEM (Discrete Element Method, 個別要素法) をベースとした粒子計算モデルについて検討した<sup>1,2,3)</sup>。粘土鉱物と砂粒子で構成される微小な球形領域を1つの粒子と考えると、その粒子径の大きさを変化させることにより、スレーキングの主な発生要因として考えられる吸水による膨張と乾燥による収縮を表現する。促進スレーキング試験やスレーキング率試験を参考として、乾湿繰り返しを受ける泥岩の変形シミュレーションを2次元と3次元の両方で実行し、得られた結果から提案モデルの適用性を検証した。また、乾湿繰り返しを受けた泥岩試料の強度低下に関する検討も実施した。

### (2) Peridynamics-DEMによる破碎挙動を再現可能な粒子計算モデル

地盤材料が変形、亀裂、破碎を繰り返す過程を連続的かつ効率よく扱うことを目的として、Peridynamics (PD) とDEMを連成した数値計算モデル (以下、PD-DEM) について検討した<sup>4,5)</sup>。今回用いるPDはbond-basedモデルに基づいており、物体同士または破壊後の分裂した物体同士の衝突による相互作用力については、摩擦も含めてDEMに基づいて計算する。この方法により、締固めた粘土を想定した破碎性を持つ複数の物体に対する圧縮破壊の計算を実施した。また、初期亀裂を有する供試体の一軸圧縮試験・圧裂引張試験の結果とPD-DEMによる再現計算の結果を比較した。

## 4. 研究成果

### (1) DEMによる膨張収縮を考慮した粒子計算モデル

モデルの開発は、DEMをベースとして行った。図-1に示すように、粘土鉱物と砂粒子で構成される直径1~2 mmほどの点線で描かれた球形領域を1つのDEM粒子とする。そして、この領域内の粘土鉱物の占める体積が乾湿を受けて変化することで、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。膨張幅と収縮幅の上限値に達するために必要な時間をそれぞれ $T_{sw}$ 、 $T_{sh}$  (s)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 $t_4$ とした。図-1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。

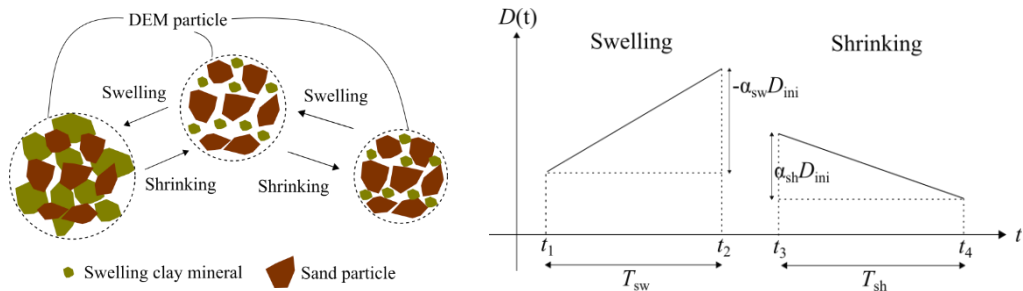


図-1 膨張収縮の DEM モデルの概念図とモデル係数<sup>1)</sup>

提案モデルの適用性を調べるために、促進スレーキング試験を参考として、乾湿繰り返しを受ける泥岩の変形シミュレーションを行った。図-2 左に示すように、初期の供試体の寸法は  $0.1 \times 0.1 \times 0.04$  (m)で、平均粒径 2 mm の 58337 個の球形粒子で構成されている。粒子サイズ変化を考慮する粒子と考慮しない DEM 粒子を混合しており、ここでは 1:1 の比率とした場合の結果を報告する。膨張係数  $\alpha_{sw} = -0.1$ 、 $T_{sw} = 0.5$  (s)、収縮係数  $\alpha_{sh} = 0.1$ 、 $T_{sh} = 0.5$  (s)として、膨張終了直後に収縮が開始する乾湿のサイクル 1 (s)を 3 回繰り返した。総計算時間は 3(s)である。粒子間固着に関するパラメータである  $t_\mu$ を 1~1000 (kPa)の範囲で変えながら計算を実行した。図-2 左は  $t_\mu = 10$  (kPa)の結果であり、各ケースの初期、乾湿 1 サイクル後、乾湿 2 サイクル後、乾湿 3 サイクル後の様子である。2 回目の乾湿サイクルが終了した時点で供試体の崩壊の始まりが確認された。続く 3 回目のサイクル終了時には、さらに土砂化が進んだ。図-2 右は、粒子間の固着の破壊割合  $\alpha$ (%)の時間変化を示した。粒子間固着に関するパラメータの値を変えた 3 ケースとも共通する傾向としては、乾湿 1 サイクル目の膨張開始直後に  $\alpha$ の値が急増する点が挙げられる。これは、解析条件として与えた  $T_{sw}$ の値が現実に比べて大きいことが影響していると考えられる。

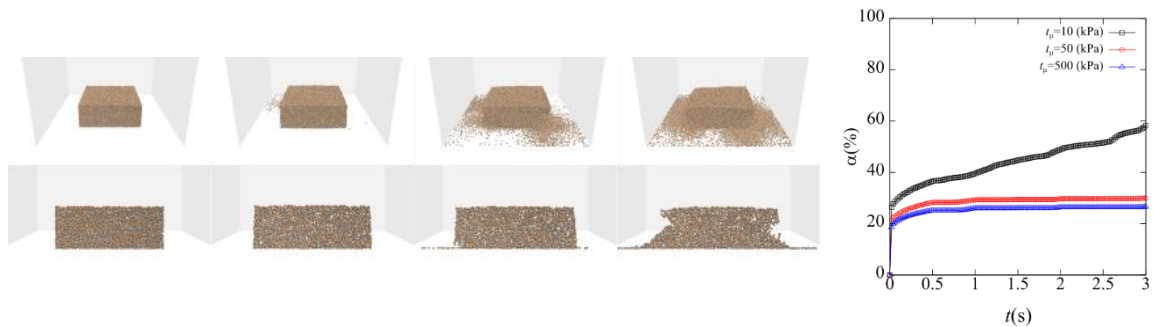


図-2 スレーキングが進行する様子<sup>2)</sup>

また、乾湿繰り返しを受けた泥岩試料の強度低下に関する検討も実施した。比較対象とする一軸圧縮試験の条件として、膨潤性粘土鉱物を含んだ泥岩を粒径 9.5mm~19.0mm に調整した試料と乾湿を 1 回繰り返した試料と 2 回繰り返した試料を準備した。これらの試料を自然含水比に調整し供試体を作製した。供試体の寸法は内径 50mm、高さ 100mm である。この土質試験を模擬した計算を実施した結果、図-3 のように、破壊形態は実験と同様に解析においても乾湿を受けていない場合は引張破壊、乾湿を受けるとせん断破壊に変化した。一軸圧縮強度が 1 回の乾湿により急激に低下する傾向も一致した。

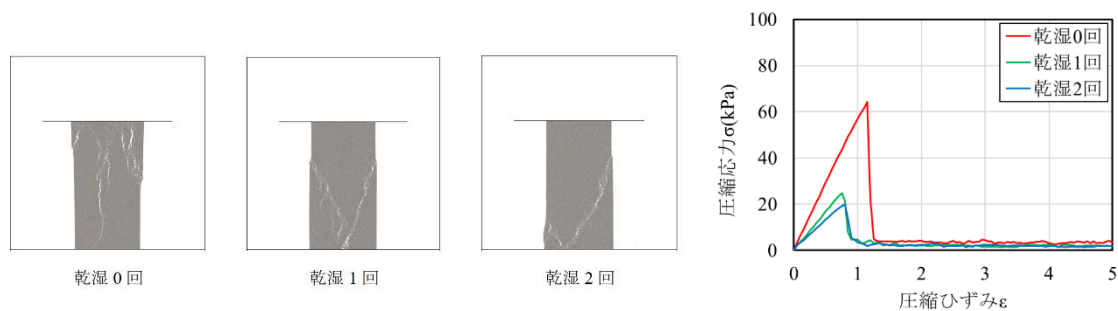


図-3 乾湿繰り返しの履歴による強度変化<sup>3)</sup>

(2) Peridynamics-DEM による破砕挙動を再現可能な粒子計算モデル

Peridynamics (PD) と DEM を連成した PD-DEM モデル (図-4) への拡張についても検討した。PD は、変位不連続の問題を取り扱うために提案された連続体解析手法である。初期の計算点の配置は等間隔の格子状にすることが多いが、計算中に固定の格子を必要としないため、メッシュフリーまたは粒子型の数値解析手法とも言える。近年、土木工学分野で対象となる土、岩盤、コンクリートのような材料への PD の応用が進んでいる。今回は、Bond-based モデルに基づいた PD (BB-PD) を採用した。物体内に亀裂が生じて破壊するまでを PD によって計算することは可能であるが、物体同士または破壊後の分裂した物体同士の接触による相互作用力を計算するためには、別の方法の導入が必要である。Short-range force のように、単に破壊後のめり込み防止することが目的の方法も提案されているが、本研究では摩擦まで考慮できる DEM の計算方法を導入した。

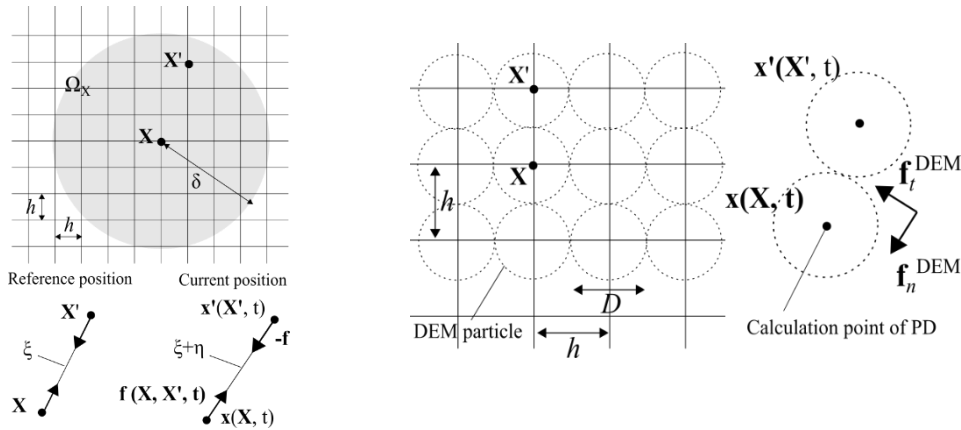


図-4 PD と DEM を連成した PD-DEM モデル<sup>4,5)</sup>

PD-DEM 連成モデルの検証のため、地盤材料のような破砕性を持つ複数の物体に対する圧縮破壊のシミュレーションを実施した (図-5)。初期の計算点の間隔  $h = 250\mu\text{m}$ 、影響半径  $= 4h$ 、粒子数は 38,976 個であり、時間ステップ  $2.0 \times 10^{-6} \text{ s}$  で  $2.5 \times 10^6 \text{ step}$  (5.0 秒間) とした。重力加速度は鉛直下向きに作用させた。破壊靱性に関するパラメータは、締固めた土を想定した一軸圧縮強度の大きさ (100kPa 程度) が得られるように与えた。上端の壁を鉛直下向きに一定速度 0.01m/s で変位させることで圧縮した。ここでは、摩擦を考慮した場合と考慮しない場合の 2 通りの結果を示した。図中のカラーバーは損傷値であり、赤色に近づくほど破壊が進んでいることを示している。どちらのケースにおいても、物体自体の破壊、物体同士の相互作用、破壊後の断片の生成、断片同士の相互作用、さらに破壊が進んで細粒化する様子が確認できた。2つのケースの破壊の進行過程には違いが見られ、DEM の計算方法の導入によって摩擦を考慮した効果も確認することができた。

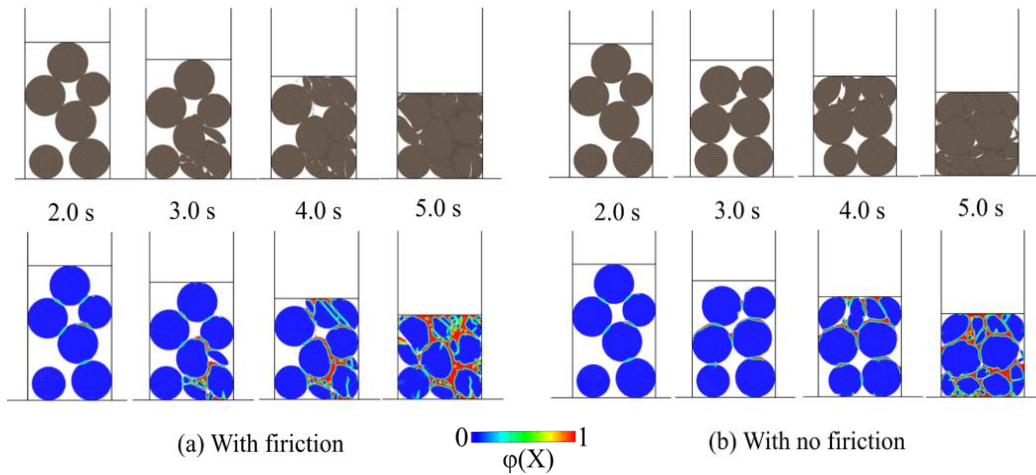


図-5 圧縮破砕のシミュレーション<sup>4,5)</sup>

<引用文献>

1. 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.
2. Yutaka Fukumoto, Satoru Ohtsuka: 3-D particle simulation model for weathering processes of geomaterials under a wet-dry cyclic condition, Proc. the 16th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (16th IACMAG), pp.624-631, 2021.
3. 花沢大輔, 立花賢吾, 福元 豊, 大塚 悟 : 泥岩の風化進行にともなう強度変化に着目した 2 次元 DEM シミュレーション, 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, Vol.37, [3-312], 2019.
4. Yutaka Fukumoto, Taiki Shimbo: A Numerical Model Based on Combined Peridynamics and Discrete Element Method for Fracture Behavior of Geomaterials, IX International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED 2021), IS23B-03, 2021.
5. 福元 豊, 新保泰輝 : Peridynamics と DEM の連成による地盤材料の破碎挙動の数値計算モデル, 計算工学講演会論文集, Vol.26, E-04-02, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Fukumoto Yutaka and Ohtsuka Satoru	4. 巻 16
2. 論文標題 Discrete particle simulation model for slaking of geomaterials including swelling clay minerals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 134 ~ 139
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2019.54.8230	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 -

1. 著者名 Kitao Tomohiro, Fukumoto Yutaka, Fujisawa Kazunori, Jewel Arif, Murakami Akira	4. 巻 16
2. 論文標題 Validation of LBM simulation of saturated seepage flow through 3D-printed homogeneous porous medium for fluid-particle coupled analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Geotechnica	6. 最初と最後の頁 2643 ~ 2656
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11440-021-01210-z	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 -

1. 著者名 Fukumoto Yutaka, Yang Hongxuan, Hosoyamada Tokuzo, Ohtsuka Satoru	4. 巻 136
2. 論文標題 2-D coupled fluid-particle numerical analysis of seepage failure of saturated granular soils around an embedded sheet pile with no macroscopic assumptions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers and Geotechnics	6. 最初と最後の頁 104234 ~ 104234
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compgeo.2021.104234	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10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yutaka Fukumoto, Satoru Ohtsuka
2. 発表標題 3-D particle simulation model for weathering processes of geomaterials under a wet-dry cyclic condition
3. 学会等名 IACMAG 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澤 知行, 花沢大輔, 福元 豊, 新保泰輝, 一藤亮太
2. 発表標題 初期亀裂を含む土の一軸圧縮シミュレーション: DEM による検討
3. 学会等名 第38回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 一藤亮太, 澤 知行, 花沢大輔, 新保泰輝, 福元 豊
2. 発表標題 Peridynamicsを用いた亀裂を有する粘性土の一軸圧縮シミュレーション
3. 学会等名 令和2年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福元 豊, 輪島僚也, 立花賢吾, 大塚 悟
2. 発表標題 粒子サイズの変化を考慮した3次元DEMモデルによる地盤材料の風化過程の数値解析
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 立花賢吾, 輪島僚也, 福元 豊, 大塚 悟
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 花沢大輔, 立花賢吾, 福元 豊, 大塚 悟
2. 発表標題 泥岩の風化進行にともなう強度変化に着目した2次元DEMシミュレーション
3. 学会等名 第37回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福元 豊
2. 発表標題 土に対する粒子ベースの直接的な数値モデリング
3. 学会等名 地盤工学会北陸支部地盤工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Fukumoto, Taiki Shimbo
2. 発表標題 A Numerical Model Based on Combined Peridynamics and Discrete Element Method for Fracture Behavior of Geomaterials
3. 学会等名 COUPLED 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taiki Shimbo, Tomoki Kawamura, Yutaka Fukumoto
2. 発表標題 Implementation of the Drucker-Prager model for Ordinary State-Based Peridynamics using a Local plastic multiplier
3. 学会等名 USNCCM16 (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 福元 豊, 新保泰輝
2. 発表標題 PeridynamicsとDEMの連成による地盤材料の破碎挙動の数値計算モデル
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

個人webページ <a href="https://whs.nagaokaut.ac.jp/edpl/yutakafukumoto/main_japanese.html">https://whs.nagaokaut.ac.jp/edpl/yutakafukumoto/main_japanese.html</a>
---

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------