

地盤材料の風化に関する粒子計算モデルの高度化

長岡技術科学大学大学院

修士2年 ○立花 賢吾

主査 大塚 悟

副査 豊田 浩史, 宮木 康幸, 福元 豊

1. はじめに

スレーキング現象は、盤腫れ・地すべり・斜面崩壊等の地盤災害を引き起こす。中でも、モンモリロナイトやベントナイトに代表される膨潤性粘土鉱物を含む泥岩は、吸水により著しく体積が増加する。また、それらが乾燥することにより表面や内部に亀裂が生じることで風化が促進され細粒化を引き起こし、それらを含む切土斜面や盛土の強度に多大な影響を及ぼす¹⁾²⁾。実際、2008年9月に新潟県村上瀬皮温泉ICの大規模切土³⁾において、掘削による応力解放と泥岩のスレーキング現象に起因した崩落が発生している。そのため、泥岩の吸水膨張・乾燥収縮による風化プロセスを詳細に把握することは地盤防災の観点から重要な課題の1つである。

これまでの既往研究では、膨潤性粘土鉱物を含む土の特性を、収縮膨潤試験⁴⁾や一次元膨潤圧試験⁵⁾など要素試験を行う事でその地盤材料がどの程度軟弱化したのかを評価することが主流であり、現状では泥岩内部の微視的な部分の知見が少ない。

土は本来、粒子の集合体という粒状体であるため、その力学特性は粒子レベルの微視的な特性に支配されている。したがって、粒状体の力学的根本原理を解明するためには、微視的な観点から粒状体の挙動を把握することが不可欠である。そして、微視的特性と現象の作用との相関関係を把握する必要がある。しかしながら、土の要素試験では粒子接点角の配向性や粒子間力などの刻々変化する微視的な物理量を測定することは事実上不可能である。

そこで、本研究では、膨潤性粘土鉱物を含む泥岩の乾湿繰返しによるスレーキング現象の過程を詳細に把握するためのDEMモデルを拡張し、乾湿繰返しを受ける泥岩のスレーキング現象のシミュレーションを2次元で実行し、得られた結果から提案モデルの適用性を検証した。

2. 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) をベースとして行う。図1に示すように、膨潤性粘土鉱物と砂粒子で構成された直径約1mm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 $D_{in}(m)$ 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 $-\alpha_{sw}D_{in}(m)$ 、収縮幅の上限値を $\alpha_{sh}D_{in}(m)$ 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略化のため、粒子径の変化は経過時間に対して線形であると仮定し、膨張と収縮に必要な時間をそれぞれ T_{sw} 、 T_{sh} 、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 での粒子径 $D(t)$ は図2に対応して、以下のように表される。

このとき、膨張の速度は $-\alpha_{sw}D_{in}/T_{sw}$ 、収縮の速度は $\alpha_{sh}D_{in}/T_{sh}$ 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2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うことができると考えられるが、土質試験の結果と比較検討が必要であり、今後の課題である。

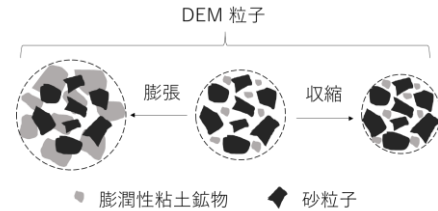


図1 膨張と収縮のモデル

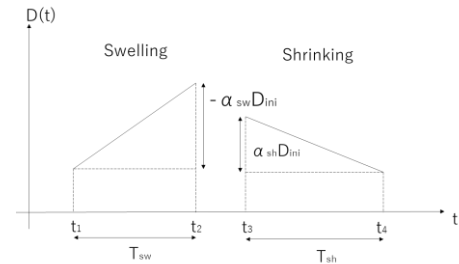


図2 膨張と収縮による粒子径の時間変化

$$\text{膨張: } D(t_2) = D(t_1) - \frac{\alpha_{sw}D_{in}}{T_{sw}} t$$

$$\text{収縮: } D(t_4) = D(t_3) - \frac{\alpha_{sh}D_{in}}{T_{sh}} t \quad (1)$$

3. 粒子間の固着のモデル

DEMによる岩石のような固着材料のモデル化では、粒子間パ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、粒子集合としての固着特性を表現した⁶⁾。図3に示すように、法線方向と接線方向の粒子間固着力は通常接触時のクーロンの破壊直線を接触法線方向力 $F_{norm}(N)$ の負の方向に $t_b(N)$ 、接触接線方向力 $F_{tan}(N)$ の正の方向に $c_t(N)$ だけ平衡移動させた直線に従い、これら、 t_b 、 c_t が粒子間パネの引張強度となりモデル係数となる⁷⁾。また、粒子間の固着力を踏まえた上での回転抵抗モデル⁸⁾を合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。また、本研究では粒子間固着力を経時的に変化させることで含水の影響を考慮した。

具体的な表現方法としては粒子間固着応力に上限値と下限値を設け、これを入力パラメータとして扱い、膨張と収縮に応じて粒子間固着応力を増減させることで経時的な変化を表現した。また、実際の泥岩は水分を含めば含む程柔らかくなり、乾いた状態になる程岩質は硬くなるといわれている。

そこで本研究では膨張時の間には固着力を上限値から下限値へ、収縮時の間では下限値から上限値へと線形的に変化させることで実現象へと対応した膨張と収縮に必要な時間をそれぞれ T_{sw} 、 T_{sh} 、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 での粒子間固着応力 t_b は図4のように表される。

このとき、膨張時の粒子間固着力の変化率は $-\alpha_{sw}D_{in}/T_{sw}$ 、収縮時の粒子間固着力の変化率は $\alpha_{sh}D_{in}/T_{sh}$ で表される。

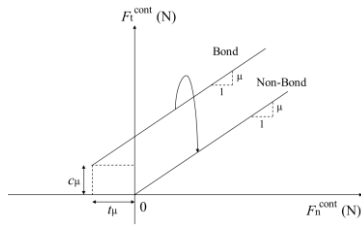


図-3 接触法線方向力と接線方向力の関係

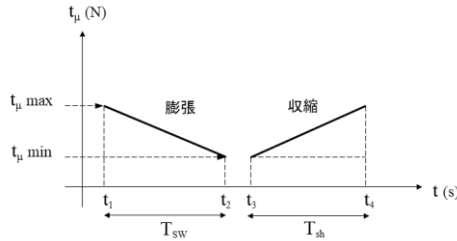


図-4 膨張と収縮による粒子間固着応力の時間変化

5. 乾湿繰返しを受ける泥岩の変形シミュレーション

今回、検討した DEM モデルの形状は初期状態 ($t=0s$) で $100mm \times 100mm$ の正方形で、平均粒径 $1mm$ の 12998 個の円形粒子で構成されている。膨張係数 $\alpha_{sw} = -0.1$, $T_{sw} = 2s$, 収縮係数 $\alpha_{sh} = 0.1$, $T_{sh} = 2s$ として、膨張終了直後に収縮が始まるサイクルを 5 回行った。また、時間刻み $\Delta t = 5.0 \times 10^{-7}s$, 法線方向ばね定数 $kn = 1.0 \times 10^8 N/m$, 接線方向ばね定数 $kt = 2.5 \times 10^7 N/m$, 接線方向の粒子間固着応力 $c_{\mu} = 0N$ として、法線方向の粒子間固着応力については表-1 のように上限値と下限値を組み合わせて計算を行った。

今回は、紙面の都合上固着力の下限値に $0.01MPa$, 上限値に $1.0MPa$ を用いたケースについて昨年度修論時のモデルと比較する。図-5 に昨年度修論時のシミュレーションの結果、図-6 に $0.01MPa$, 上限値に $1.0MPa$ を用いたケースの結果を示す。図-9 に破壊された固着の割合を経時的に示す。図-5 に示したシミュレーション結果を見るとモデルに多数のクラックが発生していることや乾湿を受ける度にモデル形状が大きく変形していることがわかる。さらに、図-9 を見ると計算終了時における破壊された固着の割合は 60% であり、グラフからも大きく風化進行していることがわかる。

昨年の修論時のモデルでは一般的な泥岩強度を用いると風化が十分に進行しない点については、欠点とされていたが、固着力の変化を考慮することで一般的な泥岩強度でも十分に風化進行させることが可能となった。また、図-9 のグラフを見ると本研究のモデルは乾湿を受ける度に固着が破壊されていることが確認でき、実際の風化挙動に近づいたといえる。

6. 結論

- (1) DEM の計算方法にもとづいて、粒子サイズを変化させるモデルと粒子間の固着を発生させるモデルを組み合わせることで、粘土鉱物の膨張収縮を要因とする地盤材料の風化現象を表現することができた。
- (2) スレーキング試験を模擬した条件での検討では、粒子サイズの変化に合わせて粒子間の固着力も同時に変化させることで、実際の泥岩の強度を満たす条件での風化進行を再現できることがわかった。
- (3) 一軸圧縮試験を模擬した条件での検討では、風化進行に伴う強度低下を提案モデルで再現できることもわかった。

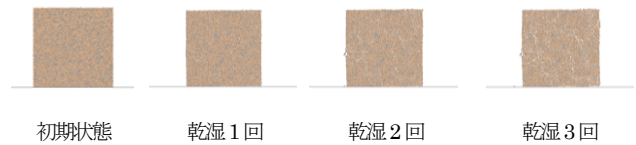


図-5 シミュレーションの結果 ($q_t = 1.0MPa$)

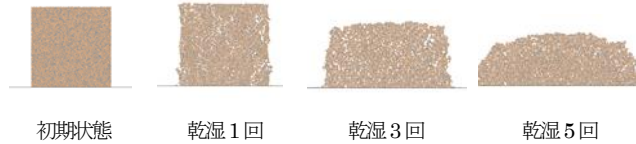


図-6 シミュレーションの結果 ($0.01MPa < q_t < 1.0MPa$)

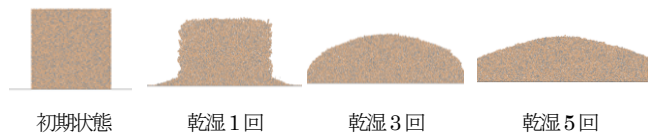


図-7 シミュレーションの結果 ($0.001MPa < q_t < 1.0MPa$)

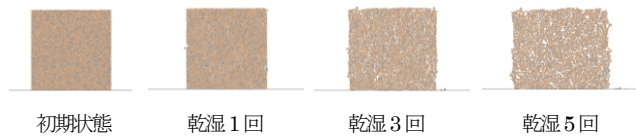


図-8 シミュレーションの結果 ($0.1MPa < q_t < 1.0MPa$)

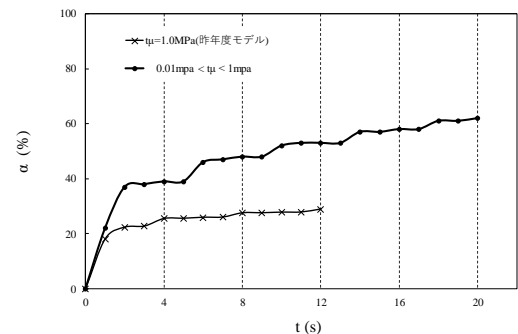


図-9 時間ごとの固着が破壊された粒子間接触数の割合

参考文献

田窪裕一, 大岸敏正, 奥村隆文, 門田圭司: 【55】スレーキングによる泥岩法面の崩壊事例, 全地連「技術フォーラム2012」(新編2) 盛土の挙動予測と実際編集委員会: 盛土の挙動予測と実際(地盤工学・実務シリーズ2), 地盤工学会, 1996. 3) 山田一夫, 水道龍次, 田嶋史人: 村上 IC 大規模切土法面の崩壊対策について, 北陸地方整備局管内事業研究会発表論文集, 2010. 4) Fityus, S.G., Walsh, P.F. and Cameron, D.A.: The shrink swell test, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol.28, No.1, 2004. 5) 三田地利之, 藤澤久子, 和智真太郎, 大可原正文, 工藤豊: 神居古潭帯に分布する蛇紋岩の不擾乱状態および再構成試料の力学特性, 地すべり学会誌 Vol.40, No.4, pp.35-43, 2003. 6) 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. 7) 福元豊, 藤川聡司, 大塚 悟: 粒状体モデルによる膨潤性粘土鉱物を含む泥岩の変形シミュレーション, 地盤工学研究発表会発表要旨集, Vol.52, pp.407-408, 2017. 8) Yutaka Fukumoto, Hide Sakaguchi and Akira Murakami: The role of rolling friction in granular packing, *Granular Matter*, Vol.15, pp.175-182, 2013. 9) 東日本高速道路・中日本高速道路・西日本高速道路: 岩のスレーキング率試験方法, NEXCO 試験方法 第1編 土質関係試験方法, pp.20-22, 2012. 10) 地盤工学会: 岩石の促進スレーキング試験方法 (JGS 2125-2009), 地盤材料試験の方法と解説