

粒子計算モデルによる泥岩の風化過程の再現解析

長岡技術科学大学大学院

修士2年 ○輪島 僚也

主査 大塚 悟

副査 杉本 光隆, 宮木 康幸, 福元 豊

1. はじめに

主に泥岩に生じる膨潤およびスレーキング現象は、盤膨れ・地すべり・斜面崩壊等の地盤災害を引き起こす。その中でも、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月に新潟県村上瀬波温泉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⁾など要素試験を行ってスレーキングや膨潤が起こる事と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 $D_{ini}(m)$ 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 $-\alpha_{sw}D_{ini}/T_{sw}$ 、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。

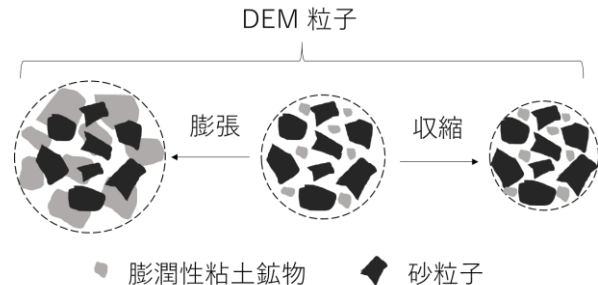


図-1 膨張と収縮のモデル

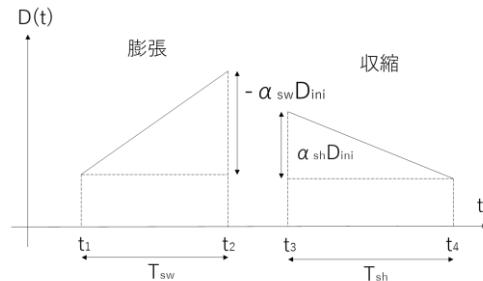


図-2 膨張と収縮による粒子径の時間変化

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

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

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 $F_n^{cont}(N)$ の負の方向に $t_\mu(N)$ 、接触接線方向力 $F_t^{cont}(N)$ の正の方向に $c_\mu(N)$ だけ平衡移動させた直線に従い、これら、 t_μ 、 c_μ が粒子間バ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。

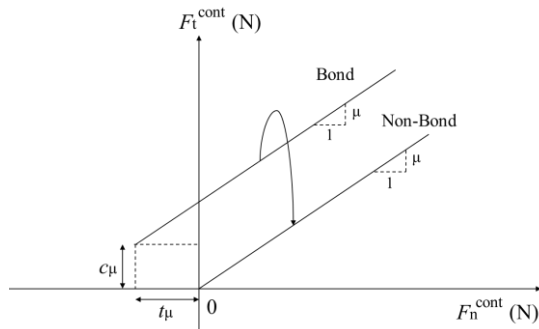


図-3 接触法線方向力と接線方向力の関係

4. 現地試料を用いた風化過程の観察

DEM モデルでのスレーキングシミュレーション解析の結果の妥当性を評価するために、現地の泥岩試料を用いてスレーキング率試験⁹⁾と促進スレーキング試験¹⁰⁾を行い泥岩試料のスレーキング区分判定とスレーキング率の算出を行った。

今回、スレーキング率試験と促進スレーキング試験で使用した泥岩試料は、新潟県の大河津付近で採取した泥岩で膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトを多量に含んでいる。

スレーキング率試験の結果として、1 サイクルでは2.63%、2 サイクルでは61.84%、3 サイクルでは90.13%となった。一般的に、スレーキング率が30%を超えるような地盤材料は、スレーキング抵抗が低く、スレーキングの起きやすい材料とされている。今回の泥岩試料は、3 サイクルでのスレーキング率が90%を超えるためスレーキング抵抗が低いといえる。促進スレーキング試験の結果としては、1 サイクルでは亀裂が少し見られ区分1であった。2 サイクルでは亀裂が進行していくつかの岩片の分かれたため区分2となった。3 サイクルでは全体的に細粒化がみられたが泥状化にまで至らなかったため区分3となった。



図-4 スレーキング率試験



図-5 促進スレーキング試験

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1 サイクルとして、時間刻み $\Delta t = 5.0 \times 10^{-7}s$ 、法線方向ばね定数 $k_n = 1.0 \times 10^8 N/m$ 、接線方向ばね定数 $k_t = 2.5 \times 10^7 N/m$ 、接線方向の粒子間固着応力 $c_t = 0N$ として、法線方向の粒子間固着応力 t_μ の値を $5.0 \times 10^4 N/m$ 、 $1.0 \times 10^5 N/m$ 、 $1.0 \times 10^6 N/m$ 、 $1.0 \times 10^7 N/m$ とした4種類と粒子が膨張・収縮を行う領域(以下、膨張領域)を100%、70%、50%、30%の4種類の15ケース ($1.0 \times 10^7 N/m$ のみ3種類) で3サイクルの計算を実行した。今回は、紙面の都合上(1) $t_\mu = 1.0 \times 10^5 N/m$ 膨張領域100%、(2) $t_\mu = 1.0 \times 10^5 N/m$ 膨張領域70%、(3) $t_\mu = 1.0 \times 10^5 N/m$ 膨張領域50%、(4) $t_\mu = 1.0 \times 10^5 N/m$ 膨張領域30%の4ケースについてのみ記述する。

各ケースの3サイクル後のシミュレーション結果は図-7のようになっている。 $t_\mu = 1.0 \times 10^5 N/m$ の各ケースでモデルの破壊性状が異なっていることがわかる。また、現地で採取した泥岩試料と図-8に示す内部の破壊性状を比較してみた場合、今回のDEMモデル泥岩試料はどちらも浸潤時に大きく形状が変化した。図-8に示すように粒子間の固着が破壊された粒子間接触数を時間ごとに整理した結果、膨張領域100%と70%の時では、非膨張領域を導入することによりスレーキング率に大きな変化が見られた。

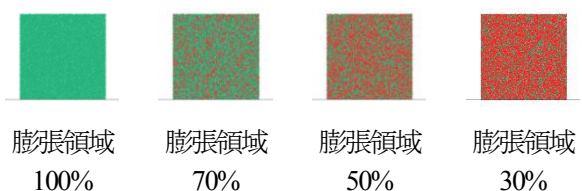
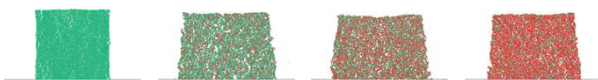


図-6 DEMモデルの概要



ケース (1) ケース (2) ケース (3) ケース (4)

図-7 各ケースでのシミュレーション結果

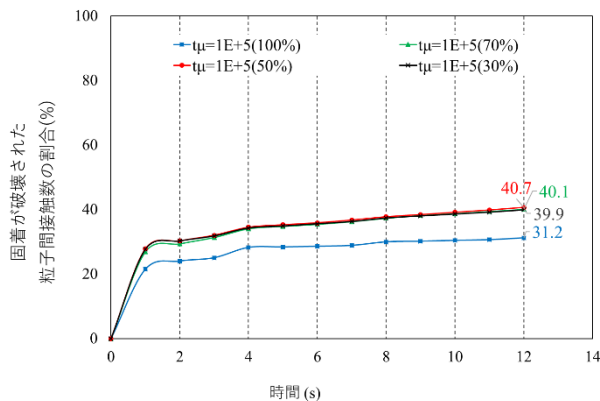


図-8 時間ごとの固着が破壊された粒子間接触数の割合

6. 結論

1) DEM モデルの破壊性状と実際の泥岩試料を用いた試験の変形挙動を比較したところどちらも浸潤時に大きく形状が変化していることがわかった。また、粒子間固着応力が $t_\mu = 5.0 \times 10^4 \text{N/m}$, $t_\mu = 1.0 \times 10^5 \text{N/m}$, $t_\mu = 1.0 \times 10^6 \text{N/m}$ では、亀裂の発生や細粒化の様子も試験とシミュレーションで概ね同じような挙動が確認できた。

2) 粒子間の固着応力を変化させることにより、DEM モデルの破壊性状を変化させることができたが軟岩と同程度の粒子間固着応力のパラメータでは、スレーキング率が十分ではなく外見の変形挙動も実際の泥岩と異なっていた。また、実際の泥岩は浸潤により粒子間の固着が弱まると考えられるため、新たに含水比や水分量によって膨張量が変化するパラメータを導入することでより現実的なモデル化が可能である。

3) 今回のシミュレーションでは、DEM モデルの粒子間固着応力のほかに膨張領域を 100%, 70%, 50%, 30% と変化させて解析を行った。膨張領域が 100% の場合には、 $t_\mu = 1.0 \times 10^6 \text{N/m}$ のケースでスレーキングが見られなかったが非膨張領域を導入することによりスレーキング率と変形挙動に変化が見られ実際の泥岩試料の風化挙動に近づいたといえる。しかし、70%, 50%, 30% では膨張領域の混合割合によつての差が見られなかった。これは、今回のモデルの粒子変化のパラメータは時間に対して線形で含水比や水分量を考慮していないためと考えられる。

参考文献

- 1) 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」新潟 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, 大河原正文, 工藤豊: 神居古潭帯に分布する蛇紋岩の不攪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