

粒子計算モデルによる地盤材料の風化過程の数値シミュレーション

長岡技術科学大学 非会員 ○立花 賢吾
長岡技術科学大学 非会員 輪島 僚也
長岡技術科学大学 正会員 福元 豊
長岡技術科学大学 正会員 大塚 悟

1. はじめに

地盤材料の風化には様々な発生過程があるが、代表的な風化の1つとして乾湿風化(粘土鉱物の吸水膨張と乾燥収縮)が挙げられる。¹⁾吸水膨張性を持つ粘土鉱物が含まれた地盤材料が風化すると、その安定性や強度に多大な影響を及ぼす。ゆえに乾湿繰り返しによる風化過程を詳細に知ることは重要な課題の1つである。本研究では、粒子計算モデル(DEM)を用い、吸水膨張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、粒子間固着力を変えながら2次元のシミュレーションにて再現した。

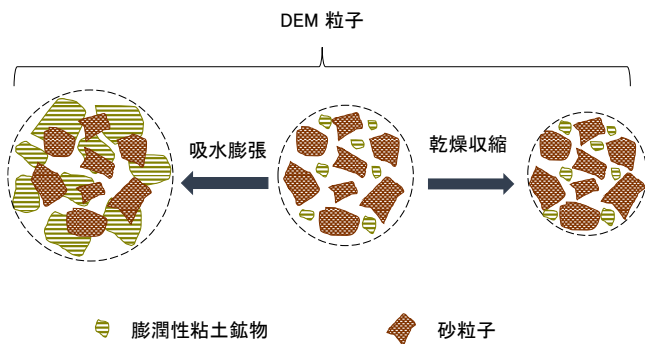


図-1 膨張と収縮のモデル概要図

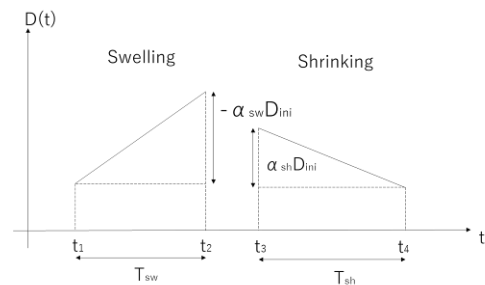


図-2 膨張と収縮による粒子径の時間変化

2. DEMモデルによる膨張と収縮の表現

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、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²⁾。

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

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。

3. DEMモデルによる粒子間固着の表現

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³⁾。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 $t_u(N)$ 、接触接線方向力 $F_t^{cont}(N)$ の正の方向に $c_u(N)$ だけ平衡移動させた直線に従い、これら、 t_u 、 c_u がモデル係数となる⁴⁾。また、粒子間の固着力を踏まえた上での回転抵抗モデル⁵⁾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。

4. 乾湿繰返しを3回受ける風化過程のシミュレーション

今回、検討した DEM モデルの形状は図-3にあるように初期 ($t=0s$) の供試体の寸法は $100mm \times 100mm$ で、平均粒径 $1mm$ の 12976 個の円形粒子で構成されている。

計算に利用したモデル係数等は輪島ら²⁾参考に設定を行い、膨張終了直後に収縮が始まるサイクルを3回繰り返す、合計12秒の計算を行った。また、法線方向の粒子間固着力 t_u の値を $5.0 \times 10^4 N(a)$ 、 $1.0 \times 10^5 N(b)$ 、 $1.0 \times 10^6 N(c)$ の3種類で計算を実行した。図-3は法線方向の粒子間固着力 t_u の値を変えて計算した結果をまとめたものである。

ケース(a)を見ると1回目のサイクル終了時(4s)にて多数のクラックが生じている。さらに、2,3回目のサイクル終了時(8s,12s)ではクラックの数が増加するとともに形状が初期の正方形から台形のような形状になる変化も見られた。

次にケース(b)を見ると1回目のサイクル終了時には特に変化は確認できないが、2回目のサイクル終了時にわずかなのであるがクラックの発生を確認することができた。3回目のサイクル終了時には、供試体の見た目がぼろぼろになっており、拡大図をみると供試体内部に複数のクラックが発生していることがわかる。

最後に、ケース(c)を見ると3回目のサイクル終了時においてもモデルの形状に大きな変化は見られなかった。拡大図をみても供試体内部のクラックの発生は確認できない。図-4は固着力が作用する粒子間接触数の時間変化を整理したものであり、収縮時より膨張時に固着が破壊されていることがわかる。これより、クラックの発生と粒子間接触数の減少は対応していると考えられる。

5. おわりに

本研究ではDEMモデルを用い3サイクルの乾湿繰返しによる風化過程を再現した。粒子間の固着力の大小に応じて、風化の進行度合いやクラックの発生、変形の差異を2次元シミュレーションにて得ることができた。今後は土質試験から膨張と収縮の度合いや、含水比による固着力の違いなどをモデル係数や粒子間パラメーターに組み込む検討や、一次元圧縮条件を考慮する¹⁾など実地盤に近い状態を再現し、シミュレーションを行う予定である。

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 (地盤工学) vol.72No.2, 126-135, 2016
 2) 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
 3) 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.
 4) 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
 5) Yutaka Fukumoto, Hide Sakaguchi and Akira Murakami: The role of rolling friction in granular packing, Granular Matter, Vol.15, pp.175-182, 2013.

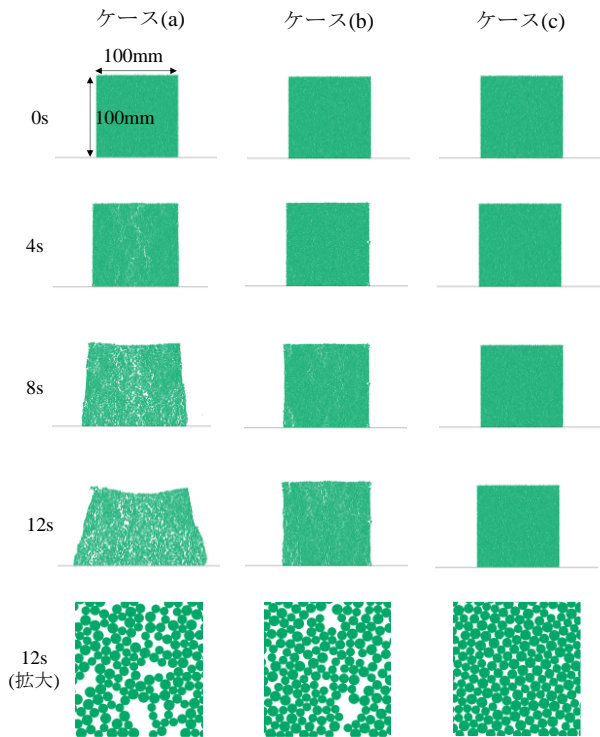


図-3 乾湿繰返しシミュレーション

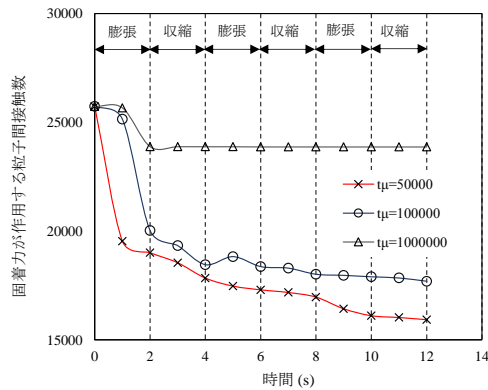


図-4 粒子間接触数の時間変化