

地盤材料の風化進行に関する実験を踏まえた粒状体解析モデルの検討

長岡技術科学大学大学院 修士2年 ○花沢 大輔
主査 福元 豊
副査 大塚 悟, 豊田 浩史, 陳 劍

1. はじめに

スレーキング現象は、膨脹れ・地すべり・斜面崩壊等の地盤災害を引き起こす。中でも、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⁾。実際、2008年9月に新潟県村上瀬波温泉ICの大規模切土²⁾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過程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調べるために要素試験を行い、スレーキングや膨潤が起こる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った。そのため、過程そのものを把握しようとする研究は少ない。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に、風化現象によって引き起こされる亀裂の発生、形状変化、強度変化に着目して、DEMモデルを拡張し、2次元シミュレーションにて実行した。提案モデルの妥当性・再現性を確認するために、土質試験で得られた結果と2次元数値解析結果を比較して提案モデルの適用性を検討した。

2. DEMモデル詳細（膨張と収縮モデル、粒子間の固着モデル）

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。DEMによる膨張収縮や膨張収縮による粒子間固着に関しては、これまでの研究³⁾と同様の方法を用いてモデル化した。

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 $t_\mu(N)$ 、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。また、粒子間の固着力を踏まえた上での回転抵抗モデル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、今回の検討では、図-1に示すように以前までの粒子間固着モデルを改良した。昨年度までのモデルでは法線方向の粒子間固着応力 t_μ のみ考慮していたが、今回は接線方向の粒子間固着応力 c_μ も考慮することにより、引張破壊およびせん断破壊を再現可能とした。ここで、図-1に示してある T_μ 、 C_μ は t_μ 、 c_μ に粒子半径を乗じたものである。これは長さの次元に対応した入力パラメータを乗じることで、粒子サイズに応じたボンド力を働かせることが可能となるからである。

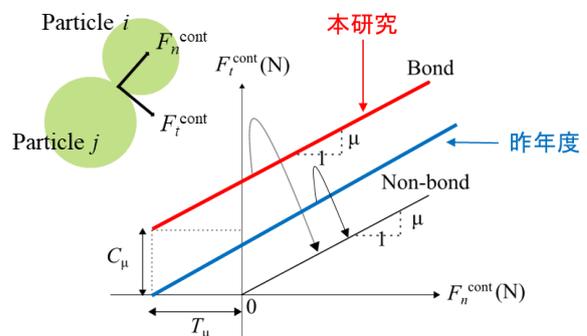


図-1 法線方向と接線方向の粒子間固着応力の関係

3. 亀裂を有する土の一軸圧縮シミュレーション

今回検討したDEMモデルは初期状態 ($t=0s$) での寸法が $50mm \times 100mm$ の長方形で、モデルの中心に亀裂を想定した斜めの空洞を有したモデルであり、平均粒径 $0.25mm$ の円形粒子が 79305 個で構成されている。モデルは含水比が最適値である状態を想定したモデルと含水比が最適値より多い状態を想定したモデルの2種類を使用する。含水比が最適値のモデルでは、法線方向の粒子間固着応力を $t_\mu = 5.0 \times 10^4 N/m$ 、接線方向の粒子間固着応力を $c_\mu = 2t_\mu = 1.0 \times 10^5 N/m$ とした。一方、含水比が最適値より多いモデルでは、法線方向の粒子間固着応力を $t_\mu = 2.0 \times 10^4 N/m$ 、接線方向の粒子間固着応力を $c_\mu = t_\mu = 2.0 \times 10^4 N/m$ とした。また、初期亀裂の表現に関しては、モデル中心部に初期亀裂を想定した高さ $8mm$ 、幅 $2mm$ 、角度 45 度の空洞を作成し一軸圧縮シミュレーションを行った。一軸圧縮は、モデル下面に接触した壁を $0.001m/s$ の速さで上方向に移動させた。図-2にシミュレーションより得られた一軸圧縮強度を示す。また、図-3に実験⁴⁾で得られた一軸圧縮強度を示す。

図-2より強度の大きさと、それに対応する軸ひずみの大きさは実験と同様の結果となった。このようになった要因として、法線方向と接線方向の粒子間固着応

力の大きさの比率が影響していると考えられる。また、実験と同様に、解析においても破壊初期ウイングクラックが発生し、破壊形態に関しても最適値の場合は引張破壊、最適値より水分量が多い場合はせん断破壊となった。

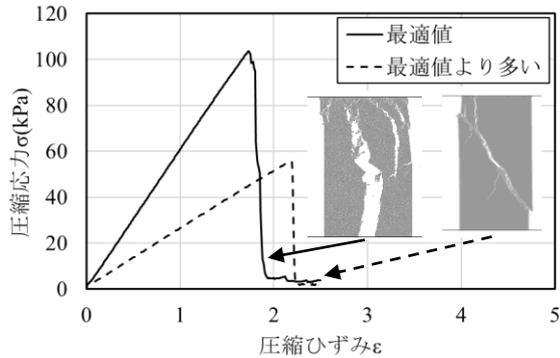


図-2 一軸圧縮シミュレーションより得られた一軸圧縮強度

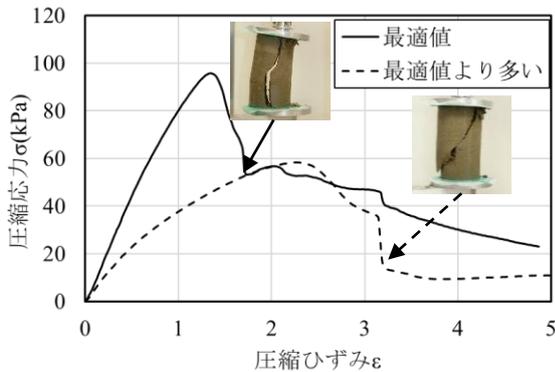


図-3 実験⁴⁾で得られた一軸圧縮強度

4. 乾湿繰り返し風化の再現シミュレーション

亀裂に関するシミュレーション結果を踏まえた上、泥岩のスレーキングシミュレーションを行い、改善したモデルで現地試料を用いたスレーキング率試験結果と同程度になるか確認した。モデル係数を様々なケースで変化させ風化の再現をした。今回は一部のスレーキングシミュレーション結果を図-4に示す。試験結果は省略するが、比較するとどちらも形状が大きく変化した。このことから、粒子間固着応力やばね定数を変化させるモデルを導入することで、一般的な泥岩の強度を用いた場合でも風化進行を再現することができた。

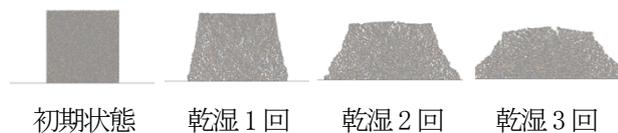


図-4 スレーキングシミュレーション
($0.0005\text{Mpa} < t_{\mu}' < 0.05\text{Mpa}$)

5. 乾湿を与えたモデルへの一軸圧縮シミュレーション

今回検討したDEMモデルは初期状態 ($t=0\text{s}$) での寸法が $50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の長方形で、平均粒径 0.25mm の円形粒子 79555 個で構成されている。膨張収縮を受ける領域については、モデル全体の 10% とし、膨張終了直後に収縮が開始するサイクルを 2 回繰り返した。法線方向の粒子間固着応力を $t_{\mu}=3.0 \times 10^4 \text{N/m}$ 、接線方向の粒子間固着応力を $c_{\mu}=2t_{\mu}=6.0 \times 10^4 \text{N/m}$ とした。また、法線方向ばね定数を $k_{\mu}=1.2 \times 10^7 \text{N/m}$ 、接線方向ばね定数を $k_{\tau}=3.0 \times 10^6 \text{N/m}$ とし、膨張収縮係数を 5%、10%、20% に変化させて一軸圧縮シミュレーションを行い試験結果と比較した。比較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 $9.5\text{mm} \sim 19.0\text{mm}$ に調整した試料と乾湿を 1 回繰り返した試料、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 とした。

今回は、膨張収縮係数 5% のケースについての結果を記載する。図-5 にシミュレーション結果と試験結果の破壊形態を示す。また、図-6 にシミュレーションより得られた一軸圧縮強度、図-7 に一軸圧縮試験結果を示す。図-5 より、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ていった。図-6 と図-7 を比較すると、どちらも一軸圧縮強度が 1 回の乾湿により低下していることがわかる。また、どちらも乾湿を受けたことにより応力-ひずみ曲線の傾きが次第に小さくなっていることがわかる。そのため、今回のシミュレーションでは風化進行による強度の低下を再現することができた。

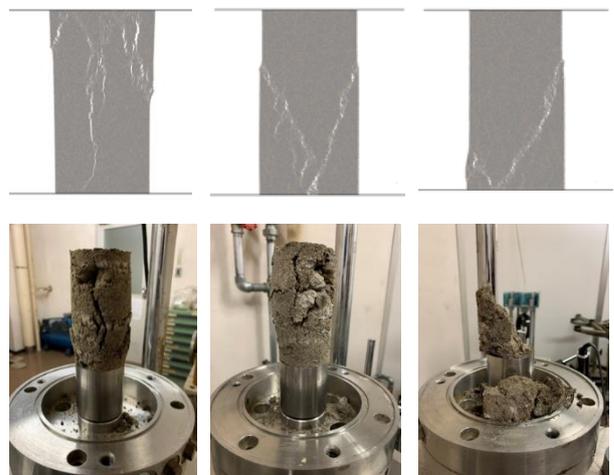


図-5 一軸圧縮シミュレーション結果と試験結果の破壊形態

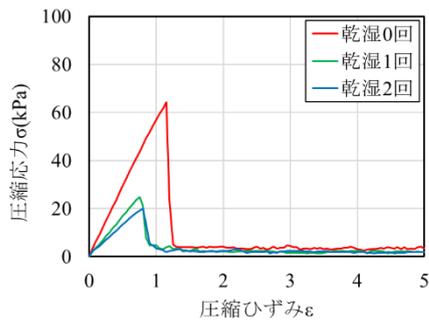


図-6 一軸圧縮シミュレーションより得られた一軸圧縮強度

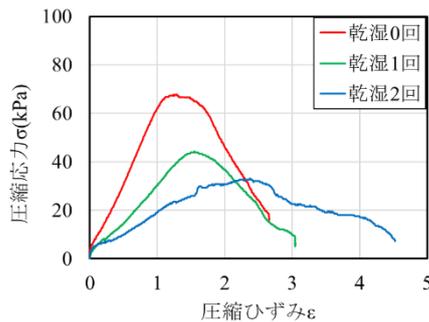


図-7 一軸圧縮試験結果

6. 結論

これまで用いてきたモデルから粒子間固着モデルを改善したことにより、亀裂が進行する挙動や土の一軸圧縮強度の違いに対応した異なる破壊形態を再現することができた。スレーキング率試験、一軸圧縮試験を再現したシミュレーションにおいても、実験と同様に形状が大きく変化し、風化進行による強度低下も確認できた。今後は、土の構成式や水分移動を考慮するために連続体の解析手法を導入し、より現実の地盤材料に近いモデルにすることが目標である。

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) 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.
- 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]
- 4) Ryota Itto, Tomoyuki Sawa, **Daisuke Hanazawa**, Taiki Shimbo, Yutaka Fukumoto: Inverse analysis of uniaxial compression tests on clays with a crack, Proceedings of STI-Gigaku, Vol. 5, 2020