

初期亀裂を含む土の一軸圧縮シミュレーション：DEM 及び Peridynamics による検討

長岡技術科学大学 ○小室 昂生

長岡技術科学大学 澤 知行

長岡技術科学大学 福元 豊

石川工業高等専門学校 新保 泰輝

1. はじめに

地盤材料の風化による影響として、亀裂の発生が挙げられる。地盤に亀裂が発生すると、地盤の安定性や強度に多大な影響を及ぼす。ゆえに、亀裂が進行する挙動やそれに伴う強度変化を詳細に知ることは、風化の数値解析モデル¹⁾を開発する上で重要な課題の1つである。本研究では、個別要素法（Discrete Element Method, 以下 DEM）及び連続体ベースの解析手法（Peridynamics, 以下 PD）を用いて、初期亀裂を含む地盤材料の破壊挙動を再現するための一軸圧縮シミュレーションを行った。そして、亀裂の挙動及び強度変化を対応した実験²⁾の結果と比較し、提案モデルの適用性を検討した。

2. DEM に基づくモデル

粒状体モデルの開発は、DEM をベースとして行う。DEM によるモデル化では、粒子間ボンドモデルにより、粒子同士が引き合う方向に接触力を作用させることで締め固めた地盤材料を表現した。接触法線方向と接線方向のそれぞれに入力パラメータの1つとしてボンド強度を与えた。また、転がり摩擦係数をモデルに組み込むことで地盤材料の性質を表現した。

3. PD に基づくモデル

Silling によって提唱された PD³⁾は、有限の距離で相互作用する粒子の運動を解くことで変位不連続の問題を取り扱うことが可能となった連続体解析手法である。従来、固体材料の変形を扱う場合は有限要素法による離散化を施した偏微分方程式を用いて解を求めることが一般的であるが、亀裂や破壊等の動的破壊現象が起こる場合不連続性を含んだ場となり、解が破綻する場合がある。それに対し、PD は積分方程式を用いることで亀裂の生成・進展等の挙動を平易に表現できる一方で、PD は破壊後の再現が不可能であるという特徴を持っているため、DEM と PD を組み合わせた PD-DEM⁴⁾によって、破壊前後の挙動の再現可能性を検討した。また、今回再現解析に用いる PD の支配方程式は以下のとおりである。紙面の都合上、記号の詳細は割愛する。

$$\rho \ddot{u}(x_i, t) + \rho \alpha \dot{u}(x_i, t) = \sum_{j=1}^{N_H} \{ \underline{T}(x_i, t) \langle x_j - x_i \rangle - \underline{T}(x_j, t) \langle x_i - x_j \rangle \} dV_j + \rho g(x_i)$$

4. 初期亀裂を含む土の一軸圧縮シミュレーション

今回検討したモデルは初期状態（ $t=0s$ ）での寸法が $50mm \times 100mm$ の長方形で、中心に初期亀裂を想定した高さ $8mm$ 、幅 $2mm$ 、角度 45 度の斜めの空洞を有したモデルである。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ることで一軸圧縮シミュレーションを行った。モデルは、実験と同様に含水比が最適値である状態を想定したモデル（ケース A）と、最適値より多い状態を想定したモデル（ケース B）の2種類を使用した。なお、本解析において上下の壁面との摩擦は考慮しないものとした。DEM のモデルは、平均粒径 $0.25mm$ の円形粒子 79307 個で構成されている。モデルの含水比による強度の違いは、粒子間の法線方向及び接線方向のばね定数により表現した。PD-DEM のモデルでは、格子間隔を $0.25mm$ 、計算点数を 79787 に設定した。モデルの含水比による強度の違いは、ヤング率と破壊靱性に関するパラメータにより表現した。

5. 解析結果

解析の手順として、応力-ひずみ曲線が実験値と一致するパラメータを探し、その際の破壊挙動も実験と一致するかを確認するという検討を繰り返し行った。図1に一軸圧縮シミュレーションの結果と対応した実験の結果を示す。図2に一軸圧縮シミュレーションより得られた一軸圧縮応力と対応した実験の写真を示す。実験のピーク強度とその際の軸ひずみが概ね一致するパラメータを設定したところ、DEMとPD-DEMの両方において、対応する実験の結果と同様に破壊初期にウイングクラックがみられた。破壊形態に関しては、DEMでの解析ではケースAで引張破壊、ケースBでせん断破壊を示し、実験と同様の結果が得られた。また、亀裂の進展挙動も実験と概ね一致した。一方、PD-DEMでの解析ではケースAとケースBの両方で引張破壊を示したと同時に、亀裂の進展挙動においても実験との差異がみられた。これは、今回は一般的なbond-based Peridynamicsを使用しているため、土の性質をモデルに反映できていなかったことに起因するものと考えられる。

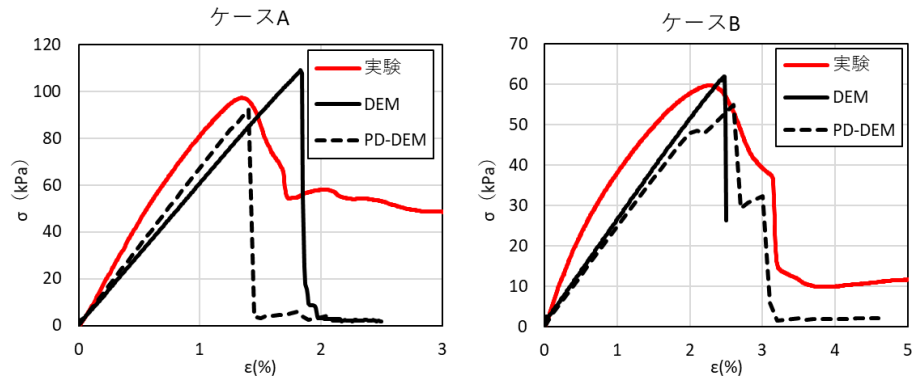


図1 実験と一軸圧縮シミュレーションとの応力-ひずみ曲線の比較

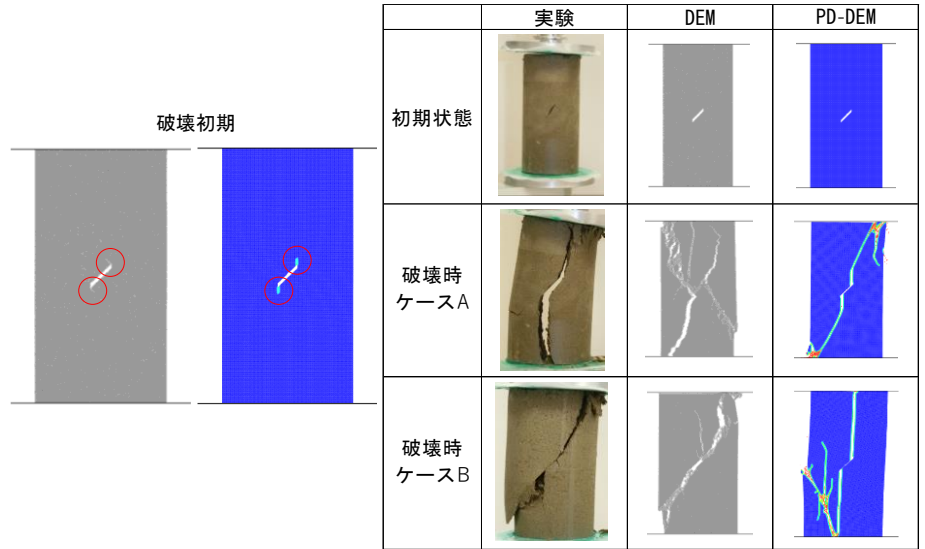


図2 実験と一軸圧縮シミュレーションとの破壊挙動の比較

6. おわりに

本研究では、初期亀裂を含む土の一軸圧縮試験に対するDEMとPeridynamicsを組み合わせたモデルの適用性を検討した。含水比が最適値の状態と最適値より多い状態の2パターンを想定したモデルに対して一軸圧縮シミュレーションを行った。その結果、DEMでは破壊初期に発生するウイングクラック及び破壊形態、亀裂の進展挙動が実験と概ね一致したが、PD-DEMではウイングクラックは再現できた一方で、破壊挙動及び亀裂の進展挙動は実験との差異がみられた。これらの結果を踏まえて、今後はより現実的な締め固めた土の破壊挙動を表現できるようモデルの改良を進めていく予定である。

7. 参考文献

- 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-pp139, 2019.
- 2)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.
- 3)Silling, S. A., Askari, E.: A meshfree method based on the peridynamic model of solid mechanics. Computers & structures, Vol. 83, No. 17-18, pp. 1526-1535, 2005.
- 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.