

1. はじめに

近年、台風や地震等による土砂災害の頻発・激甚化が大きな社会問題となっている。このような現状で、土砂災害の効果的な予測・対策は日本の土地利用に係る喫緊の課題である。しかし、進行性破壊である盛土崩壊等の地盤破壊現象の科学的解明は未だ不十分である。地盤破壊現象の予測をするには、すべり面の発生やその成長過程を把握する必要がある。すべり面を物体が物理的に分離した面と考えると、破壊力学的にはすべり面の発生・成長を亀裂の発生・成長と捉えることができる。そのため、本研究では地盤が変形し亀裂が発生、破砕するサイクルおよび破壊後まで再現可能なモデルの作成を目的とする。

2. Peridynamics-DEM 連成モデル (PD-DEM) 詳細

2.1 Peridynamics (PD) 理論<sup>1)</sup>

PD 理論は連続体解析手法であり、注目する計算点について影響範囲内に存在する全計算点の影響を考慮する解析手法である。以下にPD理論の運動方程式を示す。

$$\rho(X)\ddot{u}(X,t) = \int_{H_X} f(X_i, X_j, t) dV_{X_j} + b(X_i, t)$$

本研究では、計算点間の力の計算は Bond-Based model で行う。また、計算点間の固着力の変化は PMB モデルと改良 PMB モデル<sup>2)</sup>の2種類により実施する。2種類の違いを示したグラフを図1に示す。通常 PMB モデルでは破壊点に達した時点で固着力は0に転じる。一方、改良 PMB モデルでは破壊点が通常 PMB モデルより高くなっており、破壊点に達した後は二次曲線を描きながら0に収束している。そのため、改良 PMB モデルではより実際の土の挙動に近い強度変化を再現可能としている。

2.2 PD-DEM

PD-DEM モデルは破壊が起こるまでは PD 理論に基づく計算を行い、破壊後は PD 理論に DEM の計算を足し合わす解析手法である。以下に PD-DEM の運動方程式を示す。

$$\rho(X)\ddot{u}(X,t) = \int_{H_X} f(X_i, X_j, t) dV_{X_j} + b(X_i, t) + \frac{1}{V_X} \sum_1^n F^{con}(X, t)$$

本解析手法では、粒子法である DEM と連成するため、連続体解析である PD 理論を粒子法と見立てさせる必要がある。そのため、PD 理論の計算点を中心とし、計算点間隔の 95%~99% の大きさの粒子が多数あると想定し再現解析を実施する。

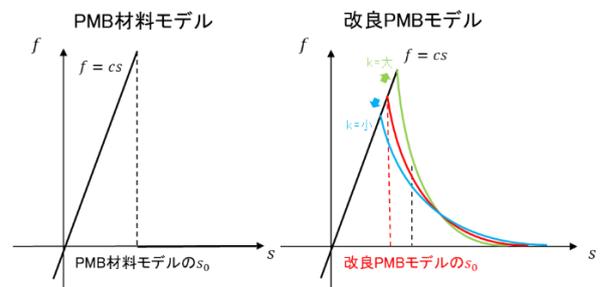


図1. モデル概要

3. 亀裂モデルの一軸圧縮シミュレーション

今回検討した PD-DEM モデルは初期状態 ( $t = 0s$ ) での寸法が 50 mm × 100 mm 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、格子幅が 0.25 mm、計算点が 79787 個で構成されている。1点に関する影響範囲は 0.25×4 mm、ヤング係数は 2.5×10<sup>6</sup> N/m とした。また、初期亀裂の表現は、モデル中心部に初期亀裂を想定した高さ 10 mm、幅 2 mm、角度 45 度の空洞を作成した。実験の再現は、モデル下面に接触した壁を 0.001 m/s の速

さで上方方向に移動させることにより実施した。今回は PMB 材料モデルと改良 PMB モデル ( $k = 0.01, 0.05, 0.005$ ) の 4 ケースにより再現解析を実施した。図 2 に一軸圧縮シミュレーションの破壊形態および対応した実験の写真を示す。また、図 3 に一軸圧縮シミュレーションと実験結果の一軸圧縮応力および対応する軸ひずみを示す。なお、解析結果は石川工業高等専門学校<sup>3)</sup>で行われた実験結果と比較した。図 2 より、破壊初期に初期亀裂からひび割れが進行し最終的な破壊形態が引張破壊となった。図 3 より、実験に対応した一軸圧縮強度が得られた。また、改良 PMB モデルを導入することで非線形の応力-ひずみ関係を得ることができた。

#### 4. 亀裂モデルの圧裂引張シミュレーション

今回検討した PD-DEM モデルは初期状態 ( $t = 0s$ ) での寸法が直径 50 mm の円形で、モデルの中心に初期亀裂を想定した長さ 10 mm、幅 1 mm、角度 45 度の空洞を作成した。その他のパラメータは前節と同様である。今回は PMB 材料モデルと改良 PMB モデル ( $k = 0.01, 0.05, 0.005$ ) を変えた 4 ケースの再現解析を実施した。なお、比較のために圧裂引張試験を実施した。実験の供試体は青粘土で作成し、寸法は直径 50mm、高さが 25mm の円柱状で、円形部の中心に亀裂を想定した長さ 10 mm、幅 1 mm 斜めの空洞を入れた。試験方法は、岩石に対する圧裂引張試験<sup>4)</sup>を参考にした。図 4 に圧裂引張シミュレーションの破壊形態および対応した実験の写真を示す。また、図 5 に圧裂引張シミュレーションと実験結果の一軸圧縮応力および対応する軸ひずみを示す。図 4 より、初期亀裂から荷重点の中央に向かって亀裂が進展しており、実験と類似した結果となった。図 5 では実験に対応した引張強度が得られた。また、改良 PMB モデルを導入することで非線形の応力-ひずみ関係を得ることができた。一方、引張強度最大の点を超えてからの挙動は再現する

ことができなかった。原因としては実験の荷重面が大きく破壊後も供試体が割れずに荷重をしてしまったことが考えられる。

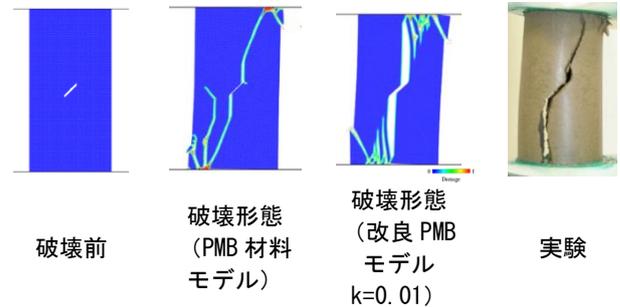


図 2. 解析結果および破壊形態の比較

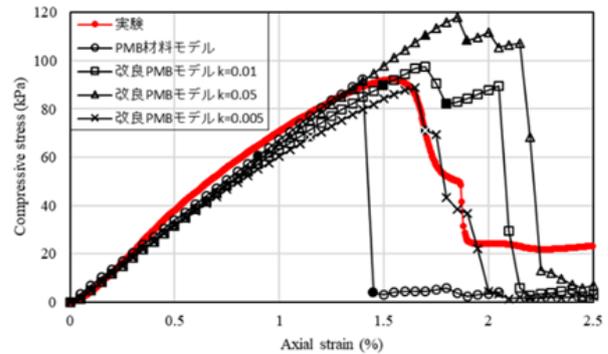


図 3. 圧縮強度の比較

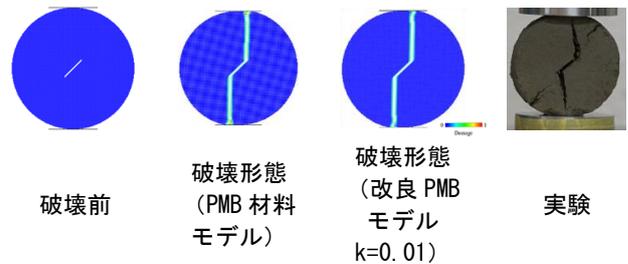


図 4. 解析結果および破壊形態の比較

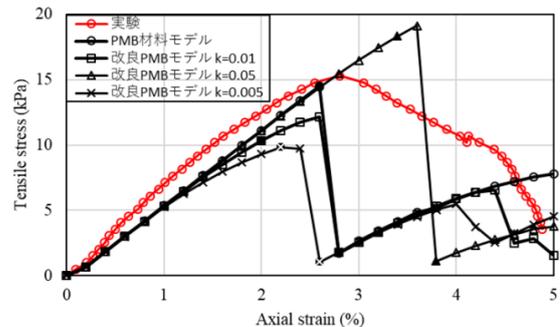


図 5. 引張強度の比較

## 5. 2次元数値解析モデルを用いた複数物体の破砕シミュレーション

前節までで得られたシミュレーション結果を踏まえ複数物体の破砕シミュレーションを行った。今回は直径 30mm の円形物体 3 つによる破砕シミュレーションを基本とし、摩擦の有無、物体の強度および形状の違いによる影響を PMB 材料モデルと改良 PMB モデル( $k = 0.05, 0.01, 0.005$ )の 4 ケースにより検討した。図 6 は前節までと同様のパラメータによる任意形状による破砕シミュレーション (改良 PMB モデル,  $k=0.01$ ) の結果である。上図は破砕進行の様子、下図は対応する上面に伝わる力である。その他の解析結果は紙面の都合上割愛する。結果として、破砕が発生するたびに摩擦の影響は、摩擦がない場合は破砕した物体が他の物体との隙間に入り密になるため破砕時の強度が強くなった。強度の影響は、強度が低くなると破砕した物体が細かくなった。また、土の特性を踏まえて、変形～亀裂～破壊のサイクルを連続的に扱えることがわかった。

## 6. 結論

地盤材料として締め固めた粘土に着目し、初期亀裂を有する供試体の一軸圧縮試験及び圧裂引張試験の再現解析を実施したところ、同じパラメータで実験に対応した圧縮・引張強度と亀裂進展の様子を得ることができた。また、計算点間のボンドを軟化させる改良 PMB モデルを導入することで、締め固めた粘土の実験結果で見られる非線形の応力-ひずみ関係を得るこ

とができた。複数物体による破砕シミュレーションより、線要素や任意の形状による解析が可能であることや土の特性を踏まえて、変形～亀裂～破壊のサイクルを連続的に扱えることがわかった。今後、モデルの高度化のために、圧裂引張試験の改良が必要である。具体策としては、載荷面を小さくすることや画像解析の導入 (亀裂発生前のひずみ分布の計測) が挙げられる。また、破砕シミュレーションの妥当性の検討をすることも必要である。そして、最終的には道路盛土や河川堤防などの土構造物スケールや粒子破砕現象のような土粒子スケールの解析へも展開できる可能性がある。

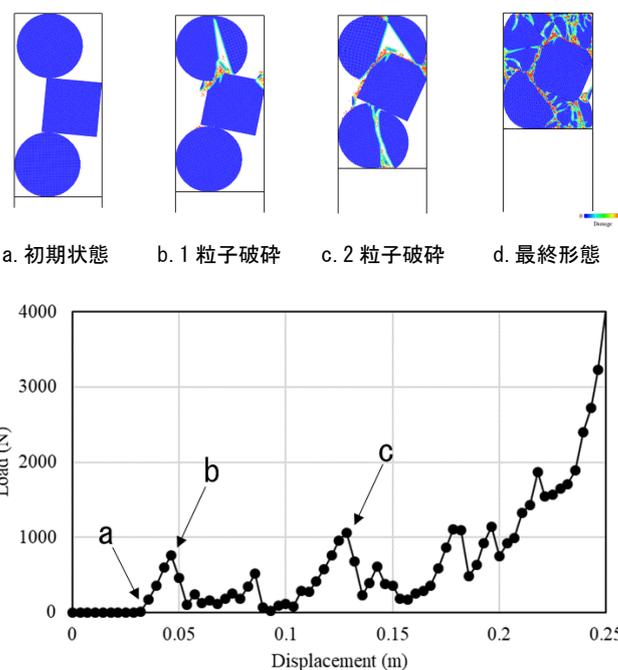


図 6. 任意形状による破砕シミュレーション結果 (改良 PMB モデル,  $k=0.01$ )

## 参考文献

- 1) Silling, S.A. (2000) Reformulation of Elasticity Theory for Discontinuities and Long-Range Forces. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 83, 1526-1535.
- 2) Tong, Y., Shen, W., Shao, J., & Chen, J. (2020). A new bond model in peridynamics theory for progressive failure in cohesive brittle materials. Engineering Fracture Mechanics, 223, 106767.
- 3) 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.

4) 地盤工学会, 地盤材料試験の方法と解説―二分冊の2―, 丸善出版株式会社, 2009