

締固め土の亀裂進展特性に基づく Peridynamics モデルの高度化

環境防災研究室 修士2年 小室 昂生
 福元 豊
 大塚 悟

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、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。本研究ではこれまで地盤材料の破壊現象を効率よく取り扱うための Peridynamics (以下、PD) と DEM の 2 次元連成モデルの作成を行ってきた。本研究では、初期亀裂角度に変化を与えて土質試験を行い、得られた結果と数値解析結果を比較することで提案モデルの高度化を図ることを目的とした。また、初期亀裂角度だけでなく初期亀裂幅、PD における影響半径、ボンドモデルの差異による亀裂の発生・進展挙動や強度に対する影響に着目して数値解析を行い、実際の地盤材料への適用性を検討した。

2. Peridynamics-DEM 連成モデル (PD-DEM) 詳細

2.1 Peridynamics (PD) 理論¹⁾

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。

$$\rho_i \ddot{u}_i(t) = \int_{\mathcal{H}_i} f(\eta, \xi) dV_j + b_i(t)$$

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バイリニアボンドモデル²⁾により算出する。従来用いられていた PMB モデルとの違いを示したグラフを図-1 に示す。PMB モデルでは破壊点に達した時点で固着力が 0 に転じる一方で、バイリニアボンドモデルでは破壊点に達した後は線形的に 0 に転じる。そのため、バイリニアボンド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 の計算を足し合わせる解析手法である。以下に PD-DEM の運動方程式を示す。

$$m_i \ddot{u}_i(t) = F_i^{PD} + F_i^{DEM} + m_i g$$

$$F_i^{PD} = \sum_{j \in \mathcal{H}_i} f(\eta, \xi) \Delta V_j \Delta V_i, \quad F_i^{DEM} = \sum_{j \in \mathcal{C}_i} F_{ij}^{CON}$$

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。

3. 圧裂引張試験概要

提案モデルの妥当性を評価するため、粘土を用いて圧裂引張試験を実施した。土の圧裂引張試験は実施例が少なく日本工業規格や地盤工学会基準による規定もないため、岩石に対する圧裂引張試験を参考とした³⁾。実験で使用した粘土は、石川高専で行われた締め固めた粘土の一軸圧縮試験の検討⁴⁾で用いられた材料と同じ物性値を有する青粘土とした。青粘土を 0.425mm のふるいに通した後最適含水比 18% に調整し、高さ 100mm、直径 50mm のモールドに 3 層 100 回で突き固めて供試体を作製した。その後、高さ 25mm、直径 50mm に成形し、電動ドリルで供試体中央に長さ約 15mm、幅約 1mm の初期亀裂を与え、0.0167mm/s の載荷速度で試験を行った。

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 15 mm の空洞を作成した。その他のパラメータは紙面の都合上割愛する。今回は初期亀裂の有無、初期亀裂角度、初期亀裂幅、影響半径、計算点間のボンドモデルを変えたケースの再現解析を実施した。表-1 に解析ケ

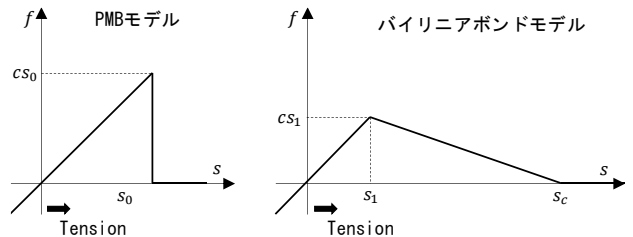


図-1 モデル概要

表-1 解析ケース一覧

	初期亀裂幅	影響半径	計算点間のボンドモデル
A	1mm	1mm	バイリニアボンドモデル
B	0.25mm	1mm	バイリニアボンドモデル
C	1mm	0.75mm	バイリニアボンドモデル
D	1mm	1mm	PMB材料モデル

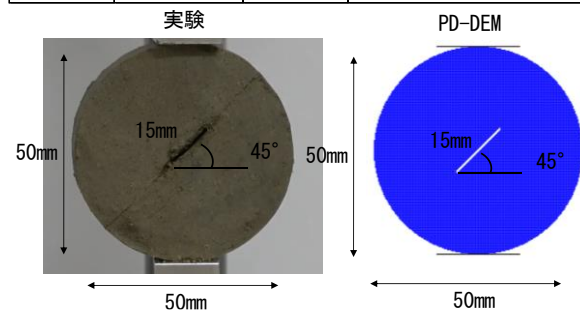


図-2 初期状態

ースの一覧を示す。図-2 に実験と解析における初期状態を示す。

図-3 に解析 A における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。初期亀裂なしのケースではモデル中央付近に亀裂が進展して破壊し、30°、45°、60°、90° のケースでは初期亀裂の端部から載荷面中央付近に向かって亀裂が進展して破壊するという実験と一致した傾向を示すが、0° のケースでは破壊形態に差異が見られた。他の解析ケースでも多少の差異はみられたが、概ね一致した亀裂進展の様子が得られた。図-4 に解析 A~解析 D における圧裂引張シミュレーションと実験結果の応力-ひずみ曲線を示す。解析 A、解析 B、解析 C で破壊前に傾きが減少したことから、バイリニアボンドモデルを導入することで実際の土のような非線形の応力-ひずみ関係を再現できることがわかった。一方で、解析 C では他のケースと比較して傾きが大きくなった。また、解析 D では非線形の応力-ひずみ関係が現れなかった。図-5 に解析 A~解析 D における初期亀裂角度による引張強度の変化を示す。実験では初期亀裂を入れることで引張強度が亀裂なしの 70%~90%程度まで低下したが、解析 A では 40%~65%程度、解析 B では 85%~90%程度、解析 C では 40%~55%程度、解析 D では 20%~30%程度まで低下する傾向を示した。また、グラフの概形は解析 B のみ右肩下がりとなり実験と一致した傾向がみられた。これより、初期亀裂幅が実験と同じ 1mm の場合、図-5 のグラフの概形や強度の低下量が実験と一致しないが、初期亀裂幅を小さくすることでこれらが実験と一致する傾向を示すことがわかった。そのため、地盤材料を取り扱う数値解析モデルでは、亀裂幅が重要なパラメータであることがわかった。

6. まとめ

初期亀裂を有する粘土供試体の圧裂引張試験及び再現解析を実施したところ、実験と一致する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線形的に軟化させるバイリニアボンドモデルを導入することで、締め固めた粘土の実験結果でみられる非線形の応力-ひずみ関係を得ることができた。さらに、地盤材料を取り扱う数値解析モデルでは亀裂幅が重要なパラメータであることや、初期亀裂幅、影響半径・計算点間のボンドモデルの変化による結果への影響を明らかにし、提案モデルの高度化に寄与する知見を得た。今後は、圧裂引張試験の改良、解析パラメータの更なる検討、3 点曲げ試験及びその再現解析を実施する予定である。また、解析モデルの 3 次元化も引き続き検討する⁵⁾。

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) Niazi, S., Chen, Z., Bobaru, F. (2021) Crack nucleation in brittle and quasi-brittle materials: A peridynamic analysis. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 112, 102855.
- 3) 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.
- 4) Taiki Shimbo, Chisato Shinzo, Ukyo Uchii, Ryota Itto, Yutaka Fukumoto: Effect of different water contents and initial crack lengths on the mechanical properties

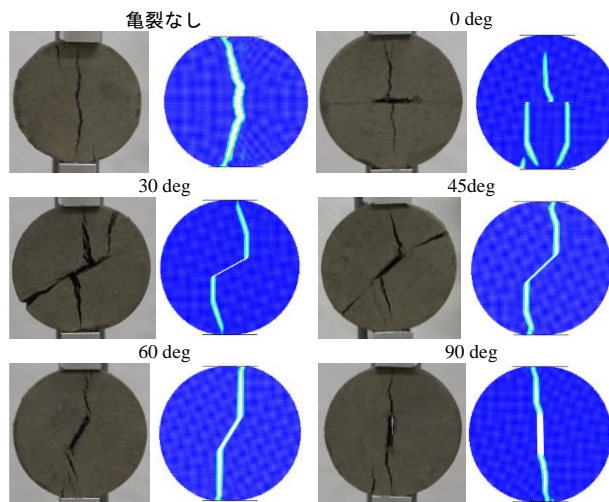


図-3 解析結果及び破壊形態の比較

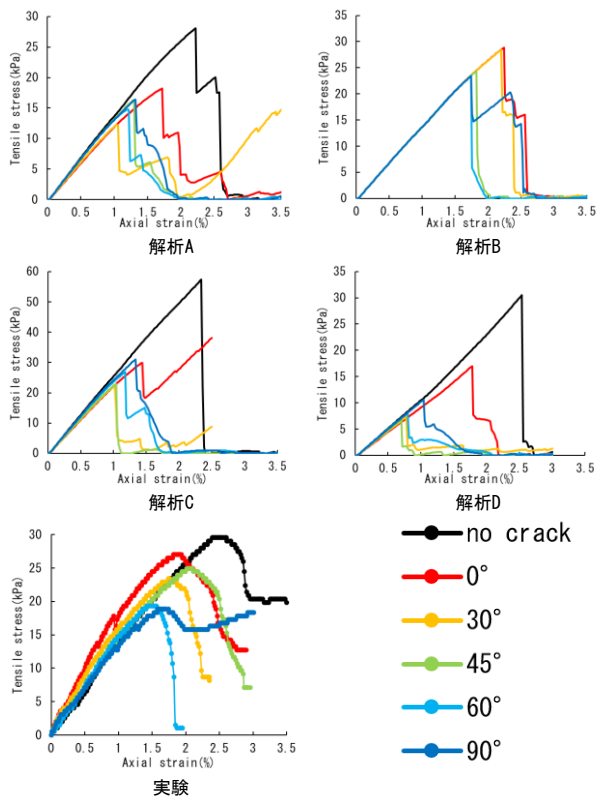


図-4 実験と解析における応力-ひずみ曲線

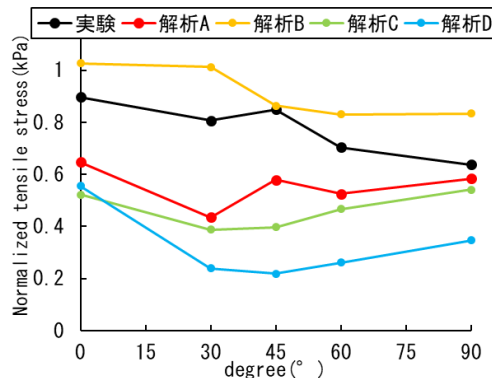


図-5 初期亀裂角度による引張強度の変化

and failure modes of pre-cracked compacted clay under uniaxial compression, *Engineering Geology*, Vol.301, 106593, 2022.

5) 福元 豊, 澤 知行, 小室昂生, 堀越晟治, 新保泰輝: 締め固めた粘土の亀裂進展と破壊に関する 3 次元 Peridynamics—DEM 連成解析, 計算工学講演会論文集, Vol.27, 2022.