

Peridynamics を用いた亀裂を有する粘性土の一軸圧縮シミュレーション

石川工業高等専門学校 学生会員 ○一藤 亮太
 長岡技術科学大学 学生会員 澤 知行
 長岡技術科学大学 学生会員 花沢 大輔
 石川工業高等専門学校 正会員 新保 泰輝
 長岡技術科学大学 正会員 福元 豊

表-1 青粘土の物性値

項目	単位	値
土粒子密度	g/cm ³	2.747
自然含水比	%	2.1
液性限界	%	40.0
塑性限界	%	22.4
塑性指数		17.6
最大粒径	mm	0.425
乾燥密度	g/cm ³	1.491
含水比	%	16.0

1. 目的

地震によって河川堤防や盛土などの斜面や天端に亀裂が生じる場合がある。一旦、地盤内に亀裂が入ると地盤内部には応力再配分が生じ、これによって亀裂がさらに進展する可能性がある。地盤の進行的な破壊現象を解明するためには、亀裂の発生とその進展現象を明らかにする必要がある。著者らは亀裂進展解析手法として Silling が開発した Peridynamics に着目している。Peridynamics は亀裂進展方向を定める特別な条件が不要かつ亀裂の自然発生も扱える粒子ベースの解析手法である。近年、精力的に研究がなされており、地盤材料への応用も増えている¹⁾。しかし、粘性土の亀裂進展解析は行われていない。そこで本研究では Peridynamics を用いた亀裂を有する粘性土供試体の再現解析を実施する。これにより、Peridynamics の粘性土材料への適用性を把握することを目的とする。

2. 亀裂を有する青粘土の一軸圧縮試験

再現解析に用いた亀裂を有する青粘土の一軸圧縮試験について概説する。使用した青粘土の諸量を表-1 に示す。含水比16%、締固め度90%となるように円柱供試体（直径5cm、高さ10cm）を作製した。作製した供試体中央に粘性土の破壊角である斜め45°の亀裂（長さ2cm、厚さ0.2mm）を貫通させる。その後、一軸圧縮試験を実施した。載荷時の破壊状況を図-1 に示す。図-1 は30fps で撮影した動画に対して色調補正したものである。図中数字は載荷板の変位である。また、荷重-荷重点変位を図-2 に示す。図-1、図-2 に示すように最大荷重後（1.34mm, 190.9N）、荷重の低下と共に表面に亀裂が生じ、初期亀裂に対して折れ曲がり、荷重方向に亀裂が進展している。図-2 中の数値解析結果については後述する。

3. Peridynamics について

再現解析には Ordinary State-Based Peridynamics (OSB-PD) を用いた。OSB-PD の支配方程式を以下に示す。

$$\rho \ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}_i, t) = \sum_{j=1}^{N_M} \left\{ \mathbf{T}(\mathbf{x}_i, t) \langle \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i \rangle - \mathbf{T}(\mathbf{x}_j, t) \langle \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j \rangle \right\} dV_j \quad (1)$$

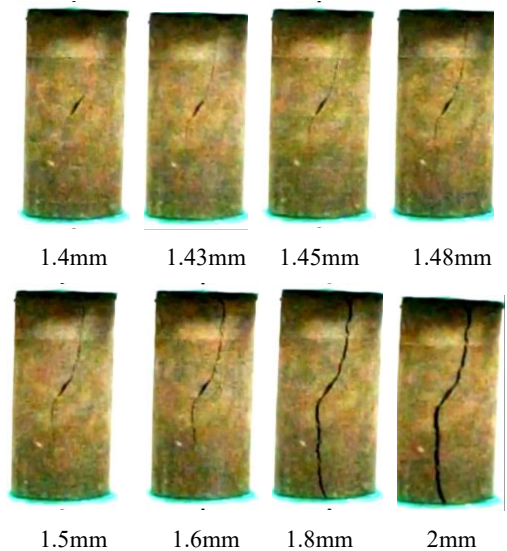


図-1 一軸圧縮試験時の破壊状況

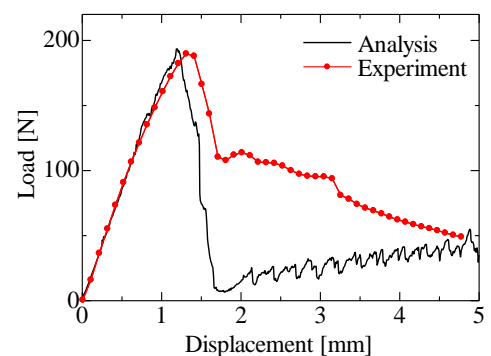


図-2 荷重-荷重点変位

紙面の都合上、記号の詳細は割愛する。物体は線形等方弾性体とし、Dynamic Relaxation Method を用いて準静的解析を実施した。また、粒子同士がめり込まないように Short-Range Force を用いた。解析モデル上面は鉛直固定、水平稼働、解析モデル底面は鉛直強制変位、水平稼働とした。なお、一軸圧縮試験中、亀裂面は常に開口していたため、再現解析では摩擦係数を 0 とする。以上の条件で式(1)を解き、粒子間距離と変位で定義するストレッチが破壊靱性値に達すると粒子間を切断して進展解析を実施する。解析に用いたパラメータを表-2 に示す。再現解析のために対象粒子とその周辺粒子の影響範囲 δ について検討した。粒子間隔 Δx に対して 3, 4, 5 倍とした結果を図-3 に示す。一軸圧縮試験結果を参考に再現解析では粒子間隔の 5 倍とした。なお、より単純な定式化である Bond-Based PD でも図-3 と同じような傾向を示す。

4. 再現結果

表-2 に示す破壊荷重を調整し、荷重-荷重点変位の最大荷重値を再現した(図-2)。図-2 に示すように、最大荷重までは再現できている。図-4 に破壊状況と荷重点変位関係を示す。

図-4 より、一軸圧縮試験と同様に圧縮荷重によって亀裂先端に引張破壊が生じた後、荷重方向に向かって進展していることが分かる。したがって、亀裂進展方向は若干異なるものの亀裂進展方向は概ね妥当と考えられる。ただし、図-4 に示すように亀裂が進展するタイミングは一軸圧縮試験と再現解析で大きく異なっている。進展タイミングの再現性向上は今後の課題とする。また、圧縮試験結果は最大荷重後に荷重が低下するものの残留荷重は残っている。一方、再現解析は急激に荷重が低下している。これはストレッチが破壊靱性値を超えた途端、粒子間の相互作用を切断しているためである。

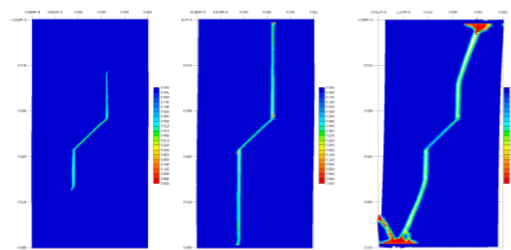
5. まとめ

本研究では、Peridynamics の地盤適用性を検討するために、亀裂を有する青粘土の一軸圧縮試験の再現解析を行なった。その結果、破壊荷重を調整することで最大荷重までの荷重-荷重点変位が再現できた。また、亀裂進展方向は実験と比較して妥当と判断できる結果を得た。今後は相互作用の切断方法の検討を行い、弾塑性計算や 3 次元解析を用いて残留挙動と亀裂進展タイミングの再現性向上を図る。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 19K04957 の助成を受けたものです。本研究の一部は長岡技術科学大学令和 2 年度「高専-長岡技科大共同研究助成」の助成を受けたものです。

参考文献 1) Taiki Shimbo, Ryota Itto, Koutaro Inaba, Kouichi Araki, Naoto Watanabe, Seismic response analysis for ordinary state-based peridynamics in a linear isotropic elastic material, *Journal of Peridynamics and Nonlocal Modeling*, Vol.2, No.3, pp.185 - 204, 2020.



(a) $\delta=3\Delta x$ (b) $\delta=4\Delta x$ (c) $\delta=5\Delta x$
 図-3 粒子影響範囲の検討 (変位 1.5mm)

表-2 解析パラメータ

項目	単位	値
ヤング率	MPa	8.726
ポアソン比		0.25
粒子間隔 $\Delta x, \Delta y$	μm	250
粒子数		82,611
強制変位速度	m/s	-1.7×10^{-5}
解析時間	s	300
解析ステップ数		300,000
破壊荷重	N	80.0

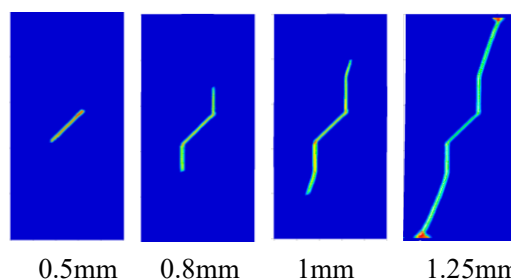


図-4 再現解析結果 (亀裂進展状況)