

土の破壊に関する粒子型の数値解析手法の検討

環境防災研究室 ○村田 晴希

指導教員 福元 豊

大塚 悟

1.はじめに

地盤材料の風化による劣化の影響として挙げられる要因は、物理的作用と化学的作用の2点がある。物理的作用とは、接触する鉱物間の熱膨張率の違いや間隙中の水が凍結融解を繰り返すことから生じる体積の膨張収縮である。一方で化学的作用とは、主に地上で行われる生物活動と日照による酸化である。これら風化によって地盤中に発生した亀裂の、その後進行する挙動やそれに伴う強度変化を理解することは、地盤風化を数値解析モデルとして作成するにあたって有意義である。

本研究では、岩石やガラスの動的破壊プロセス解析についての基礎的検討で用いられたことのある Peridynamics を土粒子で構成される地盤に適用する。

2. Peridynamics 理論を用いた粒状体モデルの数値解析試験手法

Peridynamics とは Silling により提唱された理論^{1) 2)}で、有限の距離で相互作用する粒子の運動を解くことで連続体場を表現する手法である。次式で示されるように、支配方程式中に応力・歪み・変位の空間勾配の代わりに積分方程式を用いることで材料中の亀裂の生成・進展・連結等の煩雑な過程を容易に表現できる。紙面の都合上、記号の詳細は割愛する。

$$\rho_0(\mathbf{X}) \frac{\partial^2 \mathbf{u}(\mathbf{X}, t)}{\partial t^2} = \left[\iiint_{\mathbf{X}' \in H_{\mathbf{X}}} \{\mathbf{f}_{\mathbf{X}\mathbf{X}'}(\xi, \eta, t)\} dV_{\mathbf{X}'} + \iiint_{\mathbf{X}'' \in H_{\mathbf{X}}} \{-\mathbf{f}_{\mathbf{X}\mathbf{X}''}(-\xi, -\eta, t)\} dV_{\mathbf{X}''} \right] + \mathbf{b}$$

3. Peridynamics による数値解析結果

本 PD 解析では仮想計算区域において、所定の計算点を格子状に均等に配置し、縦

方向に圧縮力を加える。縦横 0.2m の空間内に、縦 0.1m 横 0.05m の供試体を想定して仮想粒子を 400×200 の 80000 粒子、格子状に敷き詰める。供試体中央部には初期亀裂として幅 0.002m 高さ 0.008m の亀裂を設ける。それにより、亀裂分の 126 粒子が 80000 粒子から引かれる。均等に格子状に配置された仮想粒子群を、上部は固定したまま下部を 0.001m/s の速度で圧縮する。これによって生じる初期亀裂両端に生じる亀裂進行の追跡及び圧縮応力を解析し、既往研究^{3) 4)}にて得られた試験結果と比較することで、PD による試験再現の妥当性及び Horizon δ の違いによる亀裂進行の違いなどを調査する。

表.1 PD 解析の各パラメータの変化

解析番号		A	B	C	D	E	F
項目	単位	値					
ヤング率	Pa	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7	0.75×10^7
粒子半径	m	0.000125	0.000125	0.000125	0.000125	0.000125	0.000125
粒子間隔 $\Delta x, \Delta y$	m	0.000250	0.000250	0.000250	0.000250	0.000250	0.000250
粒子数		79874	79874	79874	79874	79874	79874
圧縮速度	m/s	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Horizon δ		3	4	5	4	5	4
解析ステップ		3000000	3000000	3000000	3000000	3000000	3000000
ボンドの粘り強さ	J/m ²	0.1	0.1	0.1	0.15	0.15	0.15

本解析では、表.1 で示されるパラメータで実施し、影響範囲 Horizon δ を 3,4,5 (それぞれ、影響範囲の Horizon δ が粒子間隔の3倍,4倍,5倍)と変化させた解析結果をそれぞれ A,B,C とし、Horizon δ が 4,5 且つボンドの粘り強さ G_0 を 0.15 と上昇させた解析をそれぞれ D,E とし、Horizon δ が 4 且つ G_0 が 0.15 且つヤング率を 0.75×10^7 と減少させた解析を F とした。

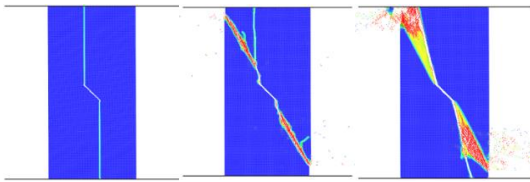


図.1 PD解析の破壊解析結果
(左から Horizon δ が 3,4,5)

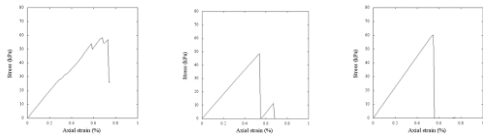


図.2 PD解析結果の応力-ひずみ曲線
(左から Horizon δ が 3,4,5)

図.1より, Horizon δ が3では亀裂の進展は初期亀裂から直線的に上下に伸び,そのまま破壊に至っている.初期亀裂両端にウィングクラックは発生せず Horizon δ が4,5と比較すると土の破壊形態としては不自然な破壊となっている.B,Cにおいては,また図.2の Horizon δ が3では応力のピークが複数回に分けられて発生しており,これも一般的な土系供試体の一軸圧縮破壊形態とは異なる.

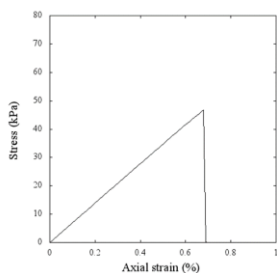


図.3 PD解析結果の応力-ひずみ曲線
(ヤング率が 0.75×10^7)

図.3より,応力のヤング率の変化は上昇割合に大きく影響を及ぼすことがわかる.ピーク応力が図.2では70kPa程度あったことに対し,図.3のように50kPa程度まで減少している.ピーク応力は変化しているがひずみには違いがないことから,上昇角度が小さくなっていることがいえる.

4. 結論と課題

本研究を通して,PDの仕様である Horizon δ の範囲の取り方について,土系供試体の圧縮試験再現については Horizon δ を4以上に設定する必要があることが分かった.また,破壊指数 G_0 の違いによって破壊形態には大きな変化が見られなかったが,一軸圧縮応力のピークに変化が見られた.一方,ヤング率の減少による違いではピーク応力が減少し,ピーク応力までの上昇角度も小さくなった.

今後の課題としては,今回の解析ではやや小さな値が解析された応力,ひずみを実際の単軸圧縮試験の値に近づけるべく破壊指数及びヤング率を調整することや,含水比と相関のあるパラメータを発見することなどが挙げられる.

5. 参考文献

- 1) Silling, J. Mech. Phys. Solids. 48(2000), 175-209.
- 2) Peridynamics を用いた岩石の動的破壊プロセス解析に関する基礎的検討, 福田, 大祐; Sang-Ho, CHO; 児玉, 淳一; 藤井, 義明, 2017-09-26
- 3) Peridynamics を用いた岩石の動的破壊プロセス解析に関する基礎的検討, 福田, 大祐; Sang-Ho, CHO; 児玉, 淳一; 藤井, 義明, 2017-09-26
- 4) 初期亀裂を含む土の一軸圧縮シミュレーション: DEMによる検討, 澤 知行, 花沢 大輔, 福元 豊, 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, Vol.38, [3-208], 2020.)