

土粒子の間隙を流れる水の挙動に関する基礎的研究

八戸工業大学 梶谷 みなみ
 八戸工業大学 上野 礼慈
 八戸工業大学 中村 優真
 八戸工業大学 高瀬 慎介

1. はじめに

近年、豪雨による災害が続いている。これは地球規模の気候変動によってさらに厳しくなり、今後も豪雨災害は増加していくと考えられる。豪雨災害の中で斜面崩壊、堤防破堤、地盤材料の流失などの現象が発生し災害の被害を拡大する要因となっている。これらのリスクの予測や評価のためには土と水の相互作用力のモデルの精度向上が必須である。粒子群の間隙を流れる水の挙動については、古くから実験、解析の様々な研究がなされている。特に、地盤工学における透水問題については Darcy 則が最も基礎的なモデルであり、



写真-1 斜面崩壊¹⁾

さらに高度な物理となる非 Darcy 流れの効果の導入の必要性も議論されている。しかし非 Darcy 流れについては数値解析の中で扱うための基盤が十分に構築されていない。実際の地盤材料には粒度分布が存在し、大小様々な粒径の粒子群の集合体である。より現実に則した非 Darcy 流れのモデリングの高度化は今後の地盤材料の数値解析のために解消すべき課題の一つである。本研究では直接数値シミュレーションによる浸透流の数値解析を行い、地盤材料の特性をシミュレーションを通して理解することが目的である。数値解析手法は有限要素法を用いて実施する。本研究では、飽和土中の間隙水を密度 ρ 、粘性係数 μ をニュートン流体と仮定したうえで、時間 t 、速度 $u_i = (u, v, w)$ 、および圧力 p に関する支配方程式である3次元 Navier-Stokes 方程式²⁾

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i$$

および、連続の式

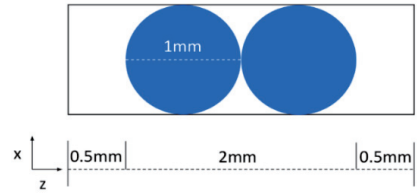
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

を数値計算によって解く。

*Study on the behavior of water flowing through the gaps of particle swarms by Minami Masaya, Reiji Uwano, Yuma nakamura, Shinsuke Takase

2. メッシュサイズの検討

浸透流のシミュレーションで用いるメッシュサイズの決定のために、粒形 1.0mm の球 2 つ配置したモデル（図一1）の解析を行った。球周りは非すべり、壁境界はすべり境界とする。メッシュサイズはそれぞれ 0.1, 0.05, 0.025 とし、動水勾配はそれぞれ 0.1, 0.5 を与えた。間隙流体のパラメータは $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ の水を用いるメッシュサイズごとの断面流速を表一1, 表一2 に示す。どちらもメッシュサイズが 0.05 の時点で断面流速は収束していた。本解析の規則配置モデルは球の直径 1mm の時にメッシュサイズが 0.05 とそれぞれ直径に対して 20 分割となるようにメッシュサイズを与える。



図一1 テストモデル

表一1 動水勾配 0.1 の断面流速

メッシュサイズ	断面流速[m/s]
0.025	0.10842
0.05	0.10756
0.1	0.09419

表一2 動水勾配 0.5 の断面流速

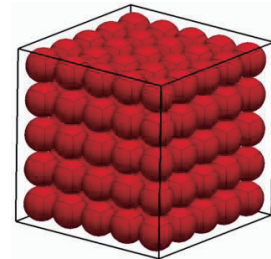
メッシュサイズ	断面流速[m/s]
0.025	0.02782
0.05	0.02721
0.1	0.02121

3. 解析概要

(1) 規則配置モデル

規則配置モデルを用いた浸透流のシミュレーションを行う。地盤材料に関するパラメータの変化に合わせて、内部の浸透流が変化していく過程の再現を試みる。規則配置モデルでは粒径の変化や動水勾配の変化に着目して解析を行う。

モデルは図一1 のように作成する。線で示した部分が解析対象の空間であり、内部の球体が土粒子を示す。間隙流体のパラメータは $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ の水を用いる。解析モデルに粒径 2.0mm~0.08mm のスケールを用いる。動水勾配は一律で 1.0 とする。それぞれ定常な流れが得られるまで浸透流のシミュレーションを行い、解析結果から動水勾配一定条件での粒形変化に対する透水係数の変化をみる。



図一2 規則配置モデル

(2) 不規則配置モデル

不規則配置モデルを用いた浸透流のシミュレーションを行う。ランダムパッキングによって作成した解析モデル 3 つを使用する。粒子数と間隙比を表一3, 粒度分布を表一4 に示す。間隙流体のパラメータは $\rho = 1000$, $\mu = 1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ の水を用いる。それぞれのモデルに対して 0.1, 0.5, 1.0 と動水勾配を与える。透水方向は図一3 に示す。

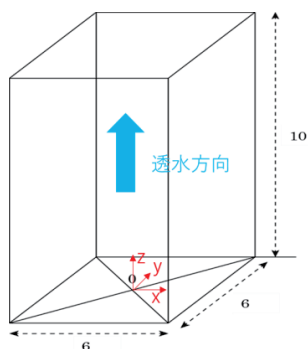


図-3 浸透方向

表-3 解析モデルごとの粒子数, 間隙比

解析モデル	粒子数	間隙比	メッシュサイズ
①	430	0.93	1/20
②	473	0.78	1/20
③	488	0.72	1/20

表-4 粒径の混合比

粒径	混合比
0.80	20%
0.91	20%
0.99	15%
1.03	45%

側面は壁境界, 球周りは非すべり境界, 壁境界はすべり境界としている。モデル①～③の不規則配置モデルは以下の図に示す。



図-4 モデル①

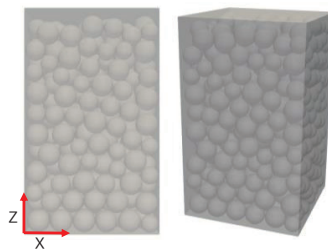


図-5 モデル②

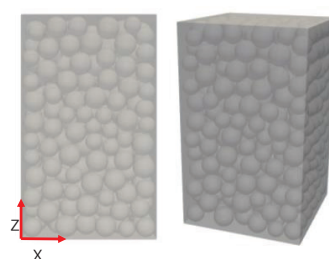


図-6 モデル③

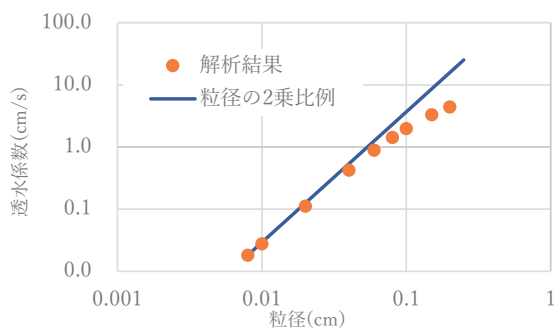
4.解析結果

(1) 規則配置モデル

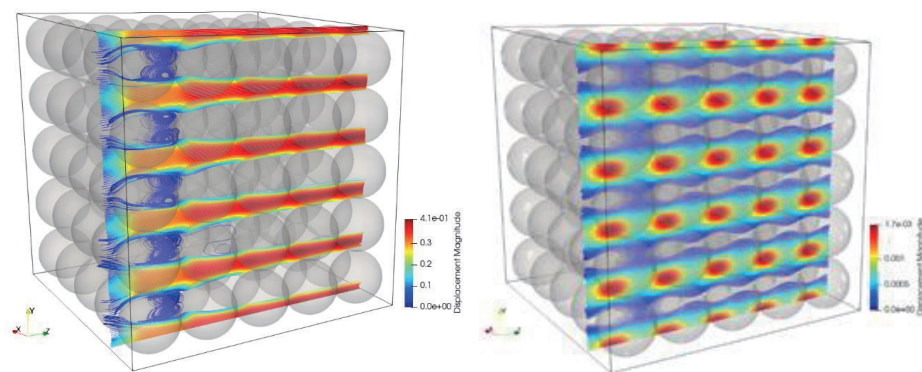
規則配置モデルでそれぞれ, 定常な流れが得られるまで浸透流のシミュレーションを行った。各解析モデルにおいて流速の値が一定値に収束した段階で定常とする。本解析で得られた, 解析結果から, 定常状態における平均速度の値を用いて, ダルシー則によって透水係数を求めた。その結果を図-7に示す。Hazen式やKozeny Carman式のようなDarcy測は整理すると係数×粒形二乗の項の比例系の形に整理でき, 数値解析の結果がこの形にそうと線形透水であるとされる。青線の2乗比例は最初の一点からそのまま延長している。粒形モデルが大きくなるにつれ, 平均速度は大きくなり, 流れの収束は遅くなる。粒形が小さな土粒子の解析結果において, 粒径の2乗に対する比例と合う結果が得られた。一方, 粒径が大きい土粒子の解析結果は粒径の2乗に対する比例から離れる結果となった。粒径の大きな土粒子の透水現象では, 内部に何らかの流れが発生していることが分かる。

表一五 流速と透水係数

土粒子直径 [mm]	流速 [cm/s]	透水係数 [cm/s]
0.08	0.018	0.018
0.1	0.028	0.028
0.2	0.112	0.112
0.4	0.427	0.427
0.6	0.894	0.894
0.8	1.423	1.423
1.0	1.978	1.978
1.5	3.313	3.313
2.0	4.441	4.441



図一七 透水係数



図一八 粒径 2.0 の流線図 (左), 粒径 0.08 の流線図 (右)

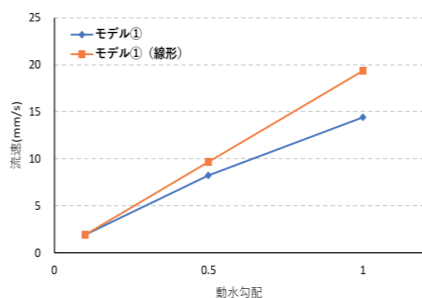
粒径 2.0mm と 0.08mm の定常な状態での流線図を上図一八、図一九に示す。粒径の大きい 2.0mm の流線は渦が発生し、乱れている様子が分かる。

(2) 不規則配置モデル

不規則配置モデルでそれぞれ、定常な流れが得られるまで浸透流のシミュレーションを行った。それぞれのモデルの解析結果を以下の表 6～8 と図 10～12 に示す。

表—6 解析モデル①

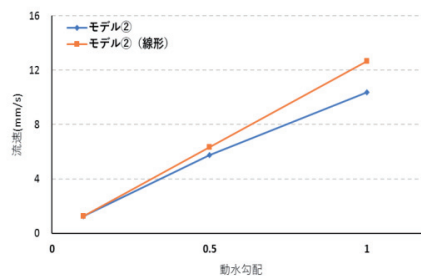
動水勾配	レイノルズ数	流速(mm/s)
0.10	1.9356	1.9356
0.50	8.2513	8.2513
1.00	14.4040	14.4040



図—10 解析モデル①

表—7 解析モデル②

動水勾配	レイノルズ数	流速(mm/s)
0.10	1.2649	1.2649
0.50	5.7445	5.7445
1.00	10.3629	10.3629



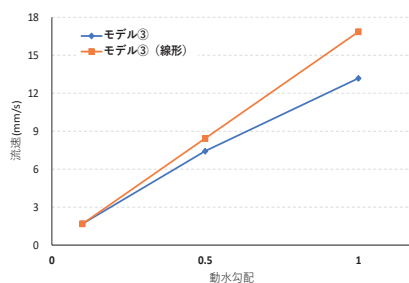
図—11 解析モデル②

線形は動水勾配が一番小さなケースの流速を動水勾配の増加に合わせて5倍、10倍としてプロットしたものとなっている。

3つの解析モデルの結果から、動水勾配が大きい値になるにつれ、線形から外れていくことが分かる。線形関係が成り立つはずであることから、想定した浸透流とは異なる結果となった。粒子数が多く、間隙比の値が大きいモデル①の流速が一番速い結果となった。

表—8 解析モデル③

動水勾配	レイノルズ数	流速(mm/s)
0.10	1.6862	1.6862
0.50	7.4284	7.4284
1.00	13.1874	13.1874



図—12 解析モデル③

5. 終わりに

粒形モデルが大きくなるにつれ、平均速度は大きく、流れの収束は遅くなり、実験的に知られている結果と似た浸透流の挙動となった。粒径の大きなモデルの解析結果に至っては、透水

減少に対する，既存の推定モデルではとらえることのできない流れが発生したと考えられる。Navier-Stokes 方程式の数値計算によって，浸透流の挙動を再現できた。今後として透水シミュレーションの結果からレイノルズ数を用い整理し，規則配置モデルと，不規則配置モデルの浸透挙動についてまとめていく予定である。本研究の解析モデルは簡易的なものであるため，内部構造がより複雑な実際の地盤材料の構造の解析を行う必要がある。

6.参考文献

- 1) 小山内信智：斜面災害の被災地の地形・地質と斜面崩壊の特徴 北海道測量技術講演会 2019.01.31 <https://www.gsi.go.jp/common/000208624.pdf>
- 2) Ikkoh Tachibana ,Shuji Moriguchi , Shinsuke Takase , Kenjiro Terada , Takayuki Aoki , Kohji Kamiya , Takeshi Kodaka : Characterization of transition from Darcy to non-Darcy flow with 3D pore-level simulations Soils and Foundations Vol.57 5号 2017.10 p709