

埋め込み境界法を用いた地盤材料の透水シミュレーション

○東北大学大学院工学研究科
 東北大学災害科学国際研究所
 東北大学大学院工学研究科
 東北大学災害科学国際研究所
 岐阜大学工学部社会基盤工学科
 名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科

学生員 橘 一光
 正 員 森口 周二
 正 員 高瀬 慎介
 正 員 寺田 賢二郎
 正 員 神谷 浩二
 正 員 小高 猛司

1. 序論

災害リスク評価手法としての数値シミュレーションへの期待が年々高まっている。地盤工学分野においては、液状化や斜面災害といった広域災害の原因となる現象を詳細に理解するために、数値シミュレーションを用いて水と土との相互作用を適切かつ詳細に表現することが求められている。特に、土粒子スケールでの相互作用については、数値シミュレーションの枠組みが十分に確立されておらず、近年においても様々な試みがなされているところである。

本研究では、埋め込み境界法¹⁾による流体・固体間の相互作用表現を用いて、地盤材料内部のマイクロ領域を流れる流体の運動を数値シミュレーションによって直接的に表現する。これを浸透流解析に適用し、不規則な内部構造を持つ解析モデルを用いて浸透流の数値実験を行った。

2. 手法

(1) 計算スキーム

本研究では、地盤材料中の土粒子を固定された球として表現し、固定された一様な直交 Staggered 格子を用いた差分法によって間隙流体の運動を解く。流体の運動の支配方程式として、非圧縮ニュートン流体のナビエーストークス方程式に外力項 f を加えた以下の式を用いる。

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

ここに、 u は流速、 p は圧力、 ρ は密度、 μ は粘性係数である。外力項 f は固体表面での相互作用力を表しており、埋め込み境界法によって与えられる。上式に対して、1 次の前進差分形式で時間方向に離散化を行い、移流項は 3 次の Lagrange 補間を用いた Semi-Lagrangian 法によって、拡散項は 2 次の中央差分によって、圧力項はフラクショナルステップ法による陰的開放によってそれぞれ評価する。

本研究で用いた埋め込み境界法は、Uhlmann²⁾ が提案したものであり、Peskin¹⁾ の手法から派生したものである。これは、空間に固定された計算点の中で、運動する剛体と流体の相互作用を表現する手法であり、球表面にあらかじめ

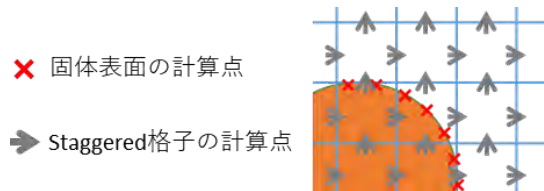


図-1 固体および流体の計算点

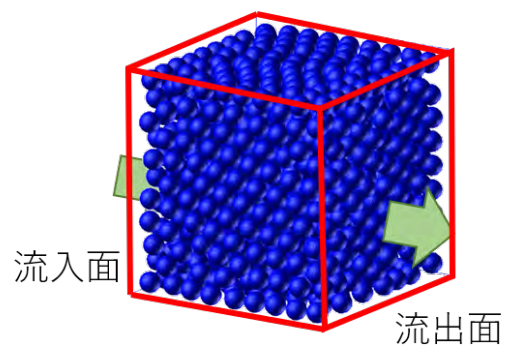


図-2 解析モデル

定義された計算点を用いて相互作用力を評価する。相互作用力は、流体の速度 u と固体の表面速度 U 、および仮想時間 Δt を用いて次の式のように計算される。

$$f_i = \frac{U_i - u_i}{\Delta t} \quad (2)$$

このとき、上式の速度は同じ点上で計算する必要があるため、Peskin³⁾ による平滑化 δ 関数を用いた補間によって、固体表面における流体の速度 u を求める。同様に、相互作用力 f についても平滑化 δ 関数を用いて流体の格子点上に配分する。

(2) 解析モデル

個別要素法を用いて直径 1mm の球要素をランダムパックすることで、砂質地盤の内部応答を模擬した解析モデルを作成した。図-2 の解析モデルは 1 辺 1cm の立方体内部に 1000 個の土粒子を、図-3 の解析モデルは図-2 の解析モデルに対して流下方向に 2 倍の長さを持つ直方体内部に 2000 個の土粒子をそれぞれ充填したものである。

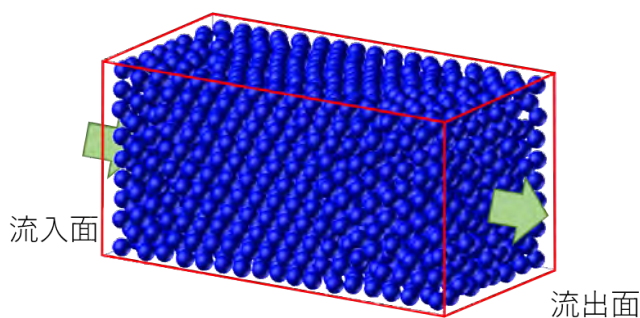


図-3 解析モデル (2 倍長)

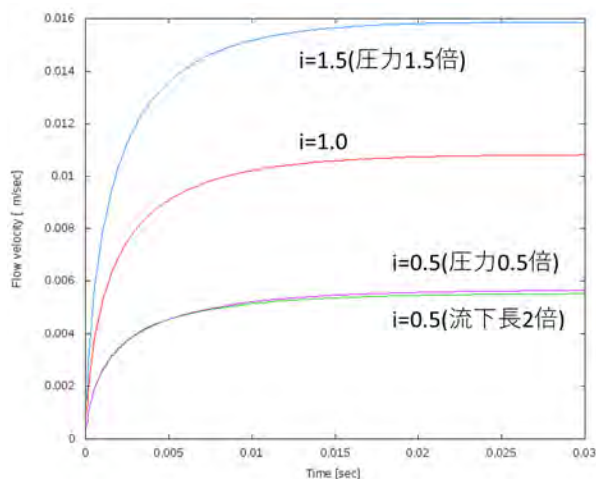


図-4 圧力勾配 i の異なる解析群の平均流出速度の比較

3. 解析結果

図-2 のモデルに対して動水勾配 i が異なる数値解析を行った。解析に際し、流入・流出面での圧力を固定して動水勾配を与え、流入・流出面以外の面は全て非すべりの壁境界条件を与えている。流出面における平均流出速度をもとに、結果を表-1 および図-4 のように整理した。また、平均流出速度が一定に収束した段階を定常な流れとみなし、図-5、図-6 に流速分布を示した。この結果は、Darcy 則における動水勾配と流速の線形関係をよく表している。また、図-3 に示す 2 倍長モデルについて、図-2 のモデルにおける $i = 1.0$ の解析と同等の条件を与え、同様に結果を図-4 に示した。この結果から、内部構造の差異があっても、流下長が 2 倍になることで動水勾配が変化することが正しく表現されていることがわかる。

4. 結論

本研究では、地盤材料内部のマイクロ領域を模した解析モデルを作成し、埋め込み境界法を用いた浸透流の数値シミュレーションを行った。数値解析の結果から、本研究で用いた数値シミュレーション手法において、不規則な内部構造を持った計算モデルに対する定量的な浸透流解析が可能であることがわかった。内部構造の変化に伴う特性変化につ

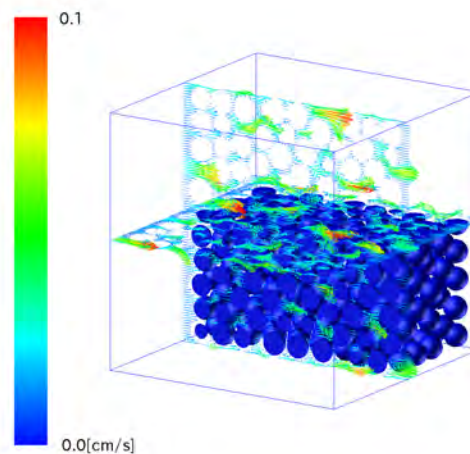


図-5 圧力勾配 1.5 の解析結果による流速分布

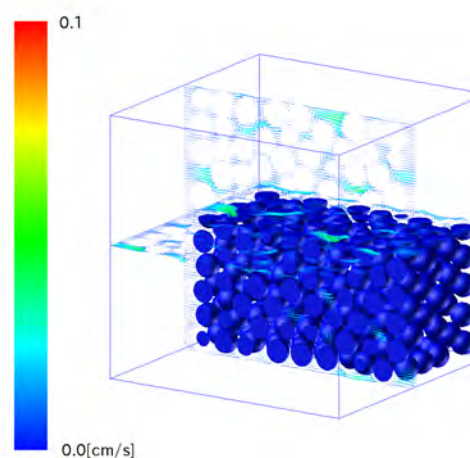


図-6 圧力勾配 0.5 の解析結果による流速分布

表-1 数値解析結果

圧力差 [Pa]	流下長 [cm]	動水勾配	平均流速 [cm/s]
100	1.0	0.10	1.08
150	1.0	0.15	1.59
50	1.0	0.05	5.53×10^{-1}
100	2.0	0.05	5.66×10^{-1}

いては、本研究で用いた不規則配置の設計における壁面付近の取り扱いの改善や、壁条件設定における周期境界の適用による計算条件の高度化を図った上で、今後さらに検証を進める必要がある。

参考文献

- 1) Peskin, C. S.: Flow patterns around heart valves: A numerical method, *Journal of Computational Physics*, 10(2), pp.252–271, 1972.
- 2) Uhlmann, M.: An immersed boundary method with direct forcing for the simulation of particulate flows, *Journal of Computational Physics*, 209(2), pp.448–476, 2005.
- 3) Peskin, C. S.: The immersed boundary method, *Acta Numerica*, 11, pp.479–517, 2002.