

間隙水の直接計算による透水シミュレーション

岐阜大学
 非会員 花北 誠
 正会員 森口 周二
 正会員 八嶋 厚
 正会員 沢田 和秀

1. はじめに

近年の計算機能力の向上により、数値解析の解像度も著しく向上している。地盤工学においても、土粒子レベルのメカニズム解明が連続体としての挙動を説明する有力な材料となることが報告されている¹⁾。マイクロレベルの地盤材料の挙動の再現には、個別要素法が広く用いられているが、間隙水の影響を考慮したものは少なく、土粒子と水のマイクロレベルの相互作用を数値解析で表現することは難しい。本研究では、土粒子と間隙水の挙動を直接的に数値解析で表現することを最終的な目的とする。本論文では、解析手法の枠組みを示すとともに、均一粒径材料の透水シミュレーションを実施し、解析手法の有効性を検証した。

2. 解析手法

本研究では、CFD を用いて粒子群の中の間隙水の挙動を直接的に解く。間隙水は非圧縮流体と仮定し、以下に示す支配方程式を解くことによりその挙動を再現する。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} + \mathbf{f}_a \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{u} は速度ベクトル、 p は圧力、 ρ は密度、 μ は粘性係数、 \mathbf{g} は重力加速度ベクトルである。 \mathbf{f}_a は流体が粒子から受ける力のベクトルである。この力の評価には Immersed Boundary Method (IBM)²⁾ を適用した。IBM は空間に固定された直交格子の上で格子を横切るような境界や移動境界を表現可能な手法であり、特に本研究のように、流体中に複数の固体を含むような計算に対して有効である。IBM では、図-1 に示すように、通常の直行格子による計算点 (Eulerian point) だけでなく、物体表面にも計算点 (Lagrangian point) を配置する。

Lagrangian point 上での物体の速度と流体の速度が一致する (滑りなし条件) のものとして、各時間ステップの中で以下の式で示される Lagrange point 上での力を求める。

$$\mathbf{F}_a = \frac{\mathbf{U} - \mathbf{u}}{\Delta t} - \mathbf{RHS} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{U} は物体表面の速度ベクトル、 \mathbf{u} は表面近傍の流体の速度ベクトル、 \mathbf{RHS} は式 (1) の右辺項、 \mathbf{F}_a は Lagrange point 上での力のベクトルを表す。ここで求めた力は、Lagrangian point から Eulerian point に分配され、Eulerian point では、周辺の Lagrangian point から分配される力の合計として式 (1) の \mathbf{f}_a が算出される。このとき、次式で力の分配が行われる。

$$\mathbf{f}_a(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} \mathbf{F}_a(\mathbf{x}_k) \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_k) d\mathbf{x}_k \quad (3)$$

\mathbf{x} は Eulerian point の位置ベクトル、 \mathbf{x}_k は Lagrangian point の位置ベクトル、 δ はデルタ関数である。また、 Ω は解析領域を表す。 \mathbf{f}_a の作用により、物体表面近傍の流体速度が強制され、直交格子系の中で物体境界が斜めに横切るといった場合でも、物体表面で滑りなしの速度の境界条件を満足させることができる。

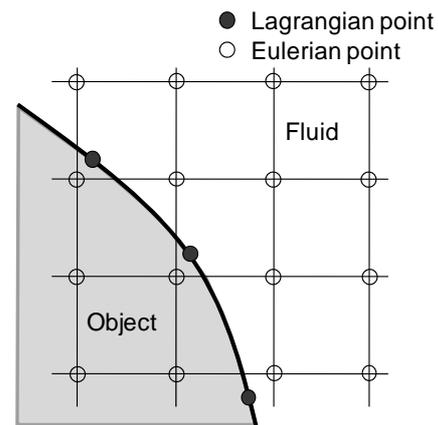


図-1 Lagrangian point と Eulerian point

3. 均一粒径材料の透水シミュレーション

解析手法の妥当性を検証するために、均一粒径材料の 3 次元透水シミュレーションを実施した。図-2 に示すように、箱の中に粒子を配置し、間隙水の流入面と流出面における圧力を固定し、導水勾配を一定として流出面における流出速度の変化を調べた。流入面と流出面における圧力差の値と試料長さを変化させて 4 ケースについて解析を実施した。表-1 に示したように、ケース 1,2,3 は試料長さを 1cm として、圧力差をそれぞれ 10,15,20Pa と変化させた。ケース 4 については、圧力差をケース 1 と同じ 10Pa とし、試料長さを 2cm とした。図-3 はケース 1,2,3 の解析モデルを、図-4 はケース 4 の解析モデルを示している。粒子の直径は 1mm であり空間に固定されている。間隙水の挙動計算用の格子には、格子間隔 0.1mm の直交等間隔格子を用いた。また、試料の間隙比は 0.91 となるように粒子を配置している。

図-5 は、各ケースの流出面における平均速度の時刻歴を示したものである。図-6 と図-7 はケース 1 とケース 4 の解析結果から得られた試料中央断面における流速のベクトル図である。図-5 より、圧力差に比例して流速は大きくなり、試料長さに反比例して流速は小さくなっている。この結果よりダルシー則が精度よく成り立っており、計算が十分な精度で行われていることが確認できる。図-6 と図-7 より、内部の間隙水は一樣に流れておらず、流速 0 を青色とし、速くなるにつれて、赤色に変動していく。部分的に流速が遅い部分と速い部分が存在することが確認できる。また、壁面部

分において流速が速くなりやすい傾向も確認できる。

表.1 解析条件

	試料長さ (cm)	圧力差 (Pa)	粒径 (mm)	間隙比
ケース1	1	10	1	0.91
ケース2	1	15	1	0.91
ケース3	1	20	1	0.91
ケース4	2	10	1	0.91

5. まとめ

本研究では、地盤材料の直接計算を可能とする解析手法の枠組みを示すとともに、その有効性を検証するために、均一粒径材料の透水シミュレーションを実施した。解析結果はダルシー則を精度よく満足するものであり、粒子が数多く存在する複雑な場であっても間隙水の移動を正確に表現できていることが確認された。今後は、間隙比や粒径の変化に伴う透水係数の変化をシミュレーションにより再現し、既存の透水試験の推定式との比較を行うことで解析手法の有効性を検証する。また、粒子の移動や不飽和状態などのより複雑な挙動を再現するために解析手法の高度化を行う。

謝辞

本研究は、科学研究補助金基盤研究(B)により遂行しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、Maeda, K. and Hirabayashi, H., Influence of grain properties on macro mechanical behaviors of granular media by DEM, *Journal of Applied Mechanics*, **9**, pp.623-630, 2006
- 2) Peskin C. S., Numerical analysis of blood flow in the heart, *J. Comput. Phys.*, **25**, pp.220-252, 1977

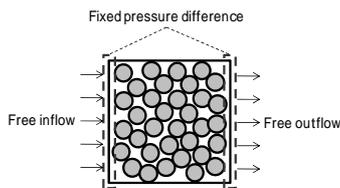


図-2 解析の境界条件

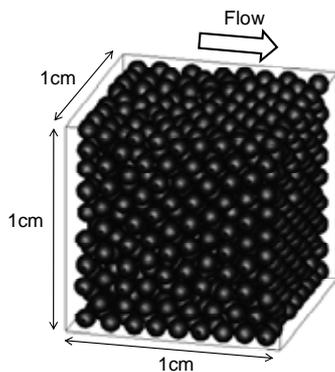


図-3 解析モデル (ケース 1,2,3)

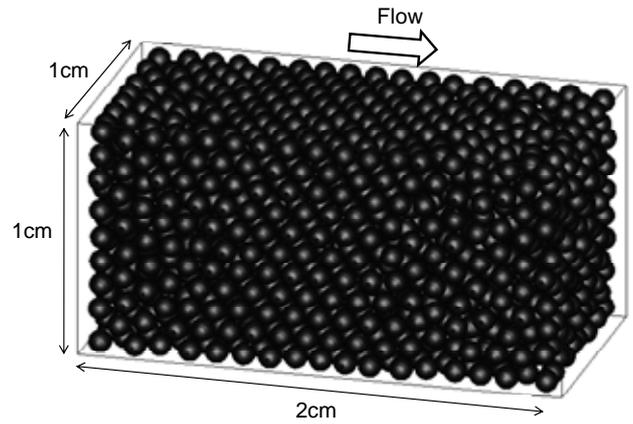


図-4 解析モデル (ケース 4)

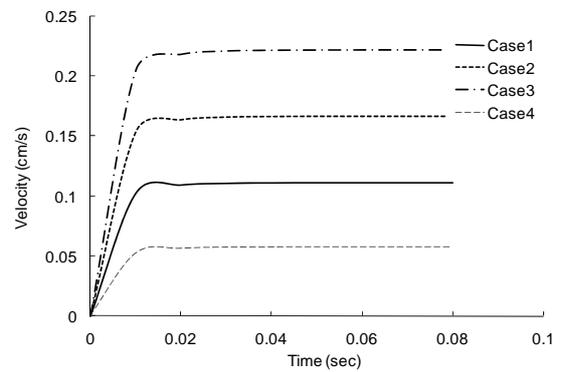


図-5 流出面における平均速度の時刻歴

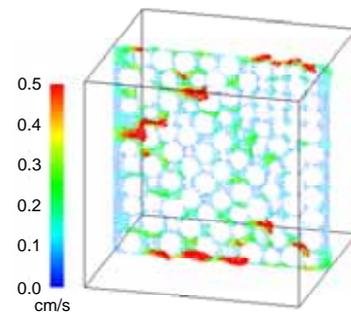


図-6 流体速度のベクトル図 (ケース 1)

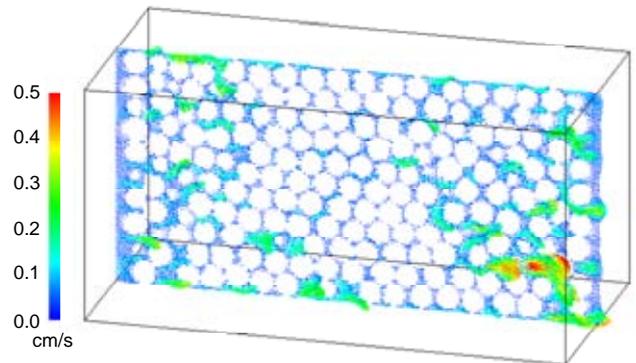


図-7 流体速度のベクトル図 (ケース 4)