# 粒子 - 流体系連成解析による地盤変形解析手法

東京工業大学	正会員	森口	周二

東京工業大学 非会員 青木 尊之

#### 1.はじめに

地盤の変形解析では、材料を連続体と仮定し、対象とする問題により構成式を選定して解くというのが通常であ る。しかし、液状化地盤の側方流動や不飽和問題などでは、挙動を構成式で十分に表現することが難しく、また、 有限要素法などの Lagrange 型の解析手法では大変形領域における精度の低下が問題となる。本研究は、土粒子と間 隙流体(間隙空気・間隙水)の挙動を直接的に解くことにより地盤材料の挙動を表現する解析手法の開発を目的と する。

## 2.解析手法

土粒子と間隙流体の挙動はそれぞれ異なる手法で表現する。土粒子は離散体として扱い、個別要素法 (DEM:Distinct Element Method)<sup>1)</sup>を適用する。本研究で用いる個別要素法では、図1に示すような粒子間力モデ ルを用いる。2粒子間に対して法線方向と接線方向にそれぞれバネとダッシュポットを持ち、さらに接線方向にス ライダーの効果を設定している。間隙流体の挙動については、Euler型直交格子系流体解析手法を適用する。間隙 流体は非圧縮性流体と仮定し、以下の Navier-Stokes 方程式と連続式を用いて解く。

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

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{2}$$

ここで、 $\mathbf{u}$  は速度ベクトル、 $\mathbf{f}$  は外力ベクトル、p は圧力、 $\rho$  は密度、 $\mu$  は粘性係数である。また、空気と水の混相流を取り扱うため、以下の密度関数 $\phi$ の移流方程式を解く。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} - (\mathbf{u} \cdot \nabla \phi) = 0 \tag{3}$$

非移流項は差分法を用いて離散化し、移流項には Cubic Semi-Lagrangian Method(CUL)を適用する。CUL では、物理 量 f の局所補間関数を図2に示すように4点の計算点の情報から求める。さらに、求めた補間関数を移流速度に従っ て移動させることにより物理量の時間発展計算を行う。

土粒子と間隙流体の相互作用は Immersed Boundary Method(IBM)<sup>2)</sup> を用いて表現する。IBM は支配方程式に付加 的な外力を導入して速度を強制する手法である。図3のように直交格子上で固体表面が計算格子を斜めに横切るよ うな場合でも、個体表面上の流速条件を満足させることが可能であり、複雑境界問題や移動境界問題に広く用いら れている。



キーワード 地盤変形解析,粒子-流体連成解析,Immersed Boundary Method

連絡先 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1 東京工業大学学術国際情報センター Tel03-5734-3575

#### 3. 各種解析結果

まず、粒子と流体の相互作用の検証として、粒子を空中から水中へ落下させる計算を行い、浮力の効果を確認した。また、粒子同士の衝突を確認するために、5個の粒子を落下させた。図4・5は、それぞれ粒子比重0.5(ケースA)、粒子比重2.0(ケースB)の場合の解析結果を示している。これらの結果より、粒子に働く浮力の効果および粒子同士の衝突は適切に表現できていることが確認できる。



図5 ケースB解析結果

次に、粒子数を 72 個に増やし、水中へ落下させる解析を行った(ケース C)。図 6 は解析モデル、図 7 は解析結 果を示している。粒子比重は 2.0 とした。粒子半径は 3cm とした。このように多数粒子が存在する場の複雑な挙動 であっても、計算可能であり、安定に計算を進めることが可能であることが確認された。



図 6 解析モデル

図7 ケースC解析結果

#### 4.まとめ

本研究で提案する地盤変形解析手法は、土粒子と間隙流体を直接解くため、構成式を用いる必要がなく、問題の 種類や変形量に依存することなく幅広い問題に適用可能である。その反面、必要となる計算コストは爆発的に増加 することになるため、大規模な並列計算が不可欠となる。今後、適切なアルゴリズムについて検討し、解析プログ ラムの並列化を進める。また、現段階では地盤材料の変形挙動を対象とした検証を行っていないため、各種実験結 果と解析結果の比較を行い、解析手法の妥当性を確認する必要がある。

## 参考文献

1) P.A. Cundall: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1, pp.47–65, 1979.

2) C.S. Peskin: Numerical analysis of blood flow in the heart, J. Computational Phys., Vol.25, pp.220–252, 1977.