

鉛直上向き浸透流の作用する非粘着性材料の限界掃流力についての  
2次元 LBM-DEM シミュレーション  
2D LBM-DEM Study for Critical Tractive Force of Cohesionless Material  
under Upward Seepage Condition

○森田 健太郎\*・福元 豊\*\*・藤澤 和謙\*・村上 章\*

○Kentaro Morita, Yutaka Fukumoto, Kazunori Fujisawa and Akira Murakami

## 1. はじめに

河川における護床ブロックなどの土構造物は、土中を流れる浸透流だけでなく、その表面に作用する水流によって、侵食や不安定化を招くことが多くある。このような現象を理解するためには、浸透流と地表面を流れる水流による影響が、どのように地盤に及ぶかを把握する必要がある。そこで本研究では、個別要素法(DEM)と格子ボルツマン法(LBM)による粒子-流体連成計算モデル<sup>1)</sup>からなる2次元シミュレーションを用いて、上向きの浸透流が非粘着性の土試料に作用している場合の限界掃流力<sup>2)</sup>について調べた。限界掃流力は、河床侵食や土砂運搬を規定する重要な指標である。

## 2. 粒子-流体連成計算モデル<sup>1)</sup>

流体部分は LBM, 土試料に相当する固体部分は DEM によって解く。LBM は格子状に配置された流体粒子の運動について局所的に時間発展を解くため、並列化による計算負荷の緩和が容易である。DEM では、粒子間に若干のオーバーラップを許容することで接触力を算出する Soft sphere model を使用した。

粒子-流体の連成計算を実現する場合、移動する固液境界面を取り扱うとともに固体と流体の相互作用力を計算する方法が必要となる。これを求めるための境界条件として、本研究では Nobel and Torzynski(1998)の方法<sup>3)</sup>を採用した(図1参照)。同モデルでは、固体内部または固液境界面に位置する格子点における速度分布の確率密度関数  $\mathbf{f}$  を、その格子点が占める固体領域の体積分率から求まるパラメータ  $B$  と固体の移動速度  $\mathbf{u}_p$  に応じて再配分することで、固体と流体の相互作用力を計算している。同モデルによって、格子ボルツマン方程式は以下のように拡張される。

$$\mathbf{f}(\mathbf{x} + \mathbf{c}\delta t, t + \delta t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{\Omega}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

$$\mathbf{\Omega}(\mathbf{x}, t) = -(\mathbf{I} - B\mathbf{I})\tau^{-1}(\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{f}^{eq}(\mathbf{x}, t)) + B\mathbf{\Lambda} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{\Omega}$ は衝突項、 $\mathbf{c}$ は格子速度ベクトル、 $\mathbf{I}$ は単位行列、 $\tau$ は緩和時間係数である。またここで、追加衝突項  $\mathbf{\Lambda}$ は

$$\mathbf{\Lambda} = \mathbf{f}^{eq}(\rho, \mathbf{u}^p) - \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + (1 - \tau^{-1})\{\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{f}^{eq}(\rho, \mathbf{u})\} \quad (3)$$

となり、固体の移動速度  $\mathbf{u}^p$  によって算出する。

無次元限界掃流力  $\tau_c^*$  は、固体において水平方向に作用する流体力と鉛直方向に作用する力の比を意味し、限界掃流力  $\tau_c$  を用いて以下のように算出される。

$$\tau_c^* = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w)dg} \quad (4)$$

ここで、 $\rho_s$ ,  $\rho_w$ ,  $d$ ,  $g$  は固体の密度、流体の密度、粒径(粒子直径)、重力加速度である。また、上向きの浸透流が土試料に作用している場合は、見かけ上、粒子の質量は軽くなる。浸透流の作用下においても、土試

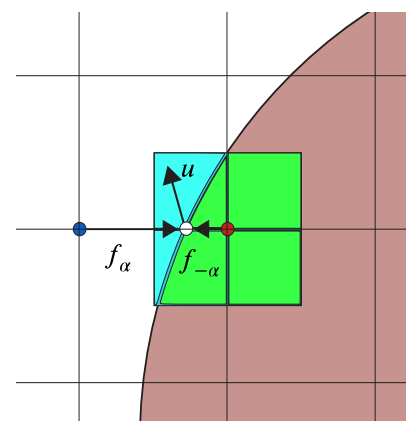


図1 粒子-流体相互作用力の算定

\*京都大学 農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University

\*\*長岡技術科学大学 工学研究科 Graduate School of Engineering, Nagaoka University of Technology

キーワード: 数値解析

料が水流によって移動を始めるときの、水平方向と鉛直方向の力の比が保たれると仮定すると、動水勾配*i*を用いて以下の関係が導かれる。

$$\tau_{cs}^* / \tau_c^* = \tau_{cs} / \tau_c = 1 - i / i_c \quad (5)$$

ここで、 $\tau_{cs}$ 、 $\tau_{cs}^*$ はそれぞれ浸透流作用下での、限界掃流力、無次元限界掃流力である。また、 $i_c$ は限界動水勾配であり、土試料の固相率 $\xi$ を用いて以下のように計算される。

$$i_c = \xi(\rho_s / \rho_f - 1) \quad (6)$$

### 3. シミュレーションモデル

図2のようなT字型水路下部に、土試料として固体粒子を初期配置した。LBM格子幅 $h = 1.0 \times 10^{-4}$  m, 解析領域は $800h \times 800h$ である。固体粒子は粒径 $10h$ の単一粒子径とし、 $400h \times 550h$ の領域に空中落下法により作成した。固相率 $\xi = 0.879$ となった。初期状態において固体粒子が流入境界と重なることによる、計算開始時の不安定性を防ぐため、流入境界から $50h$ の位置に壁を設け、それよりも上部から地表流の直下までに初期配置した。

シミュレーションにおいては、T字型水路に上向きの浸透流を生じさせ、右向きの流速の値を繰り返し変化させた。そして固体粒子が動き出す限界での、固体粒子部分にかかる動水勾配*i*と無次元限界掃流力 $\tau_{cs}^*$ の値を求めた。

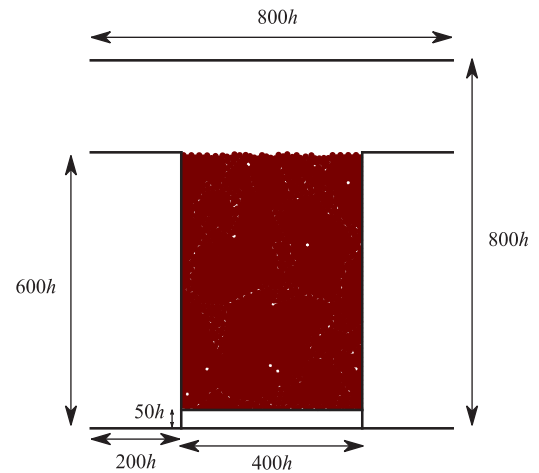


図2 シミュレーションモデル

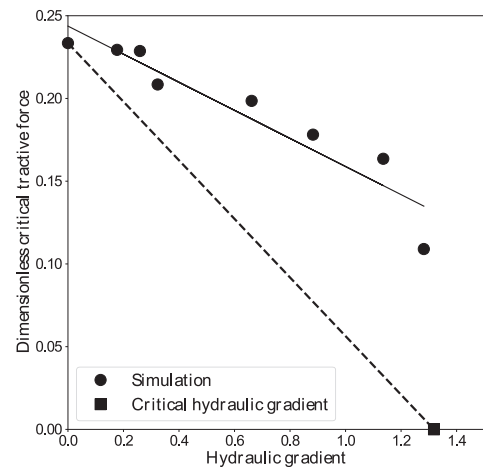


図3 動水勾配*i*と無次元限界掃流力 $\tau_{cs}^*$ の関係

### 4. 解析結果

図3に、シミュレーションから得られた動水勾配*i*と無次元限界掃流力 $\tau_{cs}^*$ の関係を示す。また同図にある点線は式(5)に対応し、 $x$ 切片は限界動水勾配 $i_c = 1.32$ である。図中の近似直線から分かるように、動水勾配が限界動水勾配に近づくにつれ、シミュレーションによる限界掃流力は減少するという結果が得られたが、減少傾向は式(5)によるそれに比べて小さいということが分かった。図中の点線の傾き $a_{eq.} = -1.77 \times 10^{-1}$ に対して、近似直線の傾き $a_{sim.} = -8.49 \times 10^{-2}$ であり、約1/2となった。また、シミュレーションは層流の範囲で行われたが、各動水勾配での $\tau_{cs}^*$ の値は層流域で予想される値<sup>4)</sup>に対して少し大きい。この理由としては、固体粒子が動き出したと判断されるLBM時間ステップの選定が難しいことが考えられる。

### 5. おわりに

粒子-流体連成計算モデル<sup>1)</sup>により、上向きの浸透流が非粘着性の土試料に作用している場合の限界掃流力について2次元シミュレーションを行った。本研究では動水勾配が限界動水勾配に近づくにつれ、限界掃流力の値が減少したが、その減少幅は式(5)のおよそ半分であるという結果が得られた。本研究は層流の範囲内で行われたため、今後は乱流下など、より高いレイノルズ数においての計算を容易にするMulti Relaxation Time<sup>1)</sup>の導入や、3次元への発展などを検討したい。

#### 参考文献

- 1) Fukumoto, Y.: Particle based multiphysics simulation for applications to design of soil structures and micromechanics of granular geomaterials, PhD thesis, Kyoto University, Japan, 2015.
- 2) 藤澤和謙, 杉野公亮, 村上章: 鉛直上向き浸透流を受ける非粘着性材料の限界掃流力測定. 土木学会論文集B2(海岸工学), **73**(2), pp.535-540, 2017.
- 3) Noble, D. and Torczynski, J.: A lattice Boltzmann method for partially saturated computational cells, *Int. J. Mod. Phys. C*, **9**(8), pp.1189-1201, 1998.
- 4) 後藤仁志: 数値流砂水理学, 森北出版株式会社, 2004.