

2次元連成解析による排水パイプの目詰まり現象に関する基礎検討

鉄道総研
鉄道総研

正会員
正会員

○湯浅友輝
渡邊諭

正会員
正会員

内藤直人
布川修

1. はじめに

盛土の耐降雨性向上を目的に施工される排水パイプは排水機能により地盤内の地下水位の上昇を抑える効果がある。しかし、排水時の水の流れによって地盤内の不安定な土粒子が移動し目詰まりを発生させ、排水量が低下することがある¹⁾。簡便なアルゴリズムにより流体の挙動の計算が可能な格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method, LBM) は、個別要素法 (Distinct Element Method, DEM) との相性もよく様々な連成解析が行われている。そこで、本稿では流体を LBM、土粒子を DEM で表現する 2 次元連成解析手法 (以下解析という) を用いての排水パイプの目詰まり現象の解明を目的とした基礎解析を行うこととした。

2. 格子ボルツマン法

格子ボルツマン法は仮想粒子の並進運動と衝突によって流体の運動を決定するものであり、ボルツマン方程式により流体を構成する粒子の速度分布の振る舞いを格子上で離散化して解くものである。本研究では以下の式で表される 2 次元 9 速度モデル(D2Q9 モデル(図 1 参照))を用いた格子 BKG モデル²⁾を各タイムステップで解くことで流体の運動を計算した。

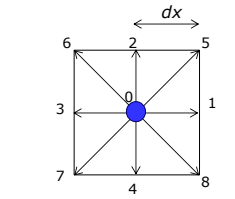


図 1 D2Q9 モデル

$$f_a(x+c_a\Delta t,t+\Delta t)=f_a(x,t)-\frac{1}{\tau}[f_a(x,t)-f_a^{eq}(x,t)] \tag{1}$$

$$f_a^{eq}=\rho w_a\left\{1+3\frac{c_a\cdot u}{c^2}-\frac{3u^2}{2c^2}+\frac{9(c_a\cdot u)^2}{2c^4}\right\}, w_a=\begin{cases} 4/9 & \text{for } a=0 \\ 1/9 & \text{for } a=1,2,3,4 \\ 1/36 & \text{for } a=5,6,7,8 \end{cases} \quad |c_a|=\begin{cases} 0 & \text{for } a=0 \\ c & \text{for } a=1,2,3,4 \\ \sqrt{2}c & \text{for } a=5,6,7,8 \end{cases} \tag{2}$$

ここで、 f_a は密度分布関数($a=0\sim8$)、 τ は緩和時間係数、 f_a^{eq} は平衡分布関数、 c_a は仮想粒子の速度ベクトル、 w_a は各粒子の方向ベクトルの重みを表すパラメータである。また、流体と DEM 要素の相互影響については Noble ら³⁾によって提案された移動境界条件を適用することで計算した。

3. 解析条件

渡邊ら¹⁾の排水パイプに対する定水位浸透模型実験では排水量が時間経過に伴い実験開始時の約 86%まで減少したのに対して、安富ら⁴⁾による同様の実験では、時間経過に伴い排水量がほぼ変化しないあるいは増加した結果となっている。この 2 つの実験の地盤条件に着目すると細粒分含有率 F_c が前者は 18%、後者は 4.3%と大きく異なる。そこで地盤の細粒分含有率に着目し、粒度分布を変えた地盤を作成し、上記の実験と同様に定水位状態で水を浸透させる定水位浸透解析を実施し、地盤内の流速の変化を確認した。

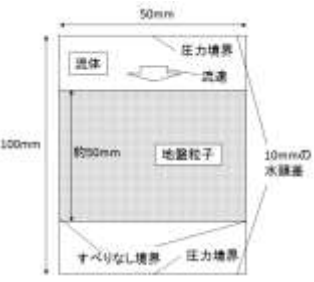


図 2 解析モデル

表 1 解析パラメータ

DEM		
時間ステップ	$\Delta t_t(s)$	1.0×10^{-6}
粒子密度	$\rho_p(kg/m^3)$	1650
平均粒径	$D_{50}(mm)$	3.3,3.7,4.1
粒子数(Case-1,2,3)	個	563,450,348
移動粒子数(Case-1,2,3)	個	198,103,76
移動粒子/全粒子(Case-1,2,3)		0.35,0.23,0.22
摩擦係数(粒子間)	μ_s	0.5
垂直バネ係数	$k_n(N/m)$	2.5×10^6
せん断バネ係数	$k_t(N/m)$	1.0×10^6
垂直粘性係数	$c_n(N\cdot s/m)$	1.0
せん断粘性係数	$c_t(N\cdot s/m)$	0.63
間隙比(Case-1,2,3)	e	0.176,0.175,0.176
重力加速度	$g(m/s^2)$	9.8
LBM		
格子間隔	$h(m)$	1.25×10^{-4}
時間ステップ	$\Delta t_f(s)$	1.0×10^{-4}
流体密度	$\rho_f(kg/m^3)$	1000
格子点数		400×800
動粘性係数	$\nu(m^2/s)$	1.3×10^{-6}

解析モデルを図 2 に示す。解析手順は下記の通りである。まず、地盤を構成する DEM 粒子 (地盤粒子) の平均粒径以下の粒子が多い条件(Case-1)、中程度含まれる条件(Case-2)、少ない条件(Case-3)になるように地盤粒子をランダムで発生させる(図 3)。その後発生させた地盤粒子をいずれのケースでも同程度の間隙比になるように解析モデル内にパッキングする。そして側面の境界付近を除く地盤粒子の中で他の地盤粒子と接する数 (接点数) が 3 より小さい地盤粒子を不安定な地盤粒子とみなし流体により移動する移動粒子に設定する。移動粒子以外の地盤粒子は流体解析において移動しない固定粒子に設定する。その後上下の境界に水頭差 1cm 相当の圧力境界を与える。ただし、流体解析を開始して解析モデル内の流速が落ち着くまでは全地盤粒

子を固定し、落ち着いたのを確認してから移動粒子の移動を開始した．なお、2次元で解析を行うため、流体解析を実施する際は全地盤粒子の粒径を円柱と球の体積比より0.67倍する．

図4(a)~(c)にランダムパッキング後の各ケースの状態を示す．図中の黒色が移動粒子、白色が固定粒子である．図より全地盤粒子の数はCase-1, 2, 3の順に多く、移動粒子の数もこの順に多くなった．また、全粒子に対する移動粒子の割合も細粒分が多いほど大きく、同程度の間隙比の地盤条件では細粒分を多く含む地盤の方が不安定な粒子が多いことがわかる．

4. 解析結果

図5, 6に移動粒子の移動が始まる前と移動が完了し流速が落ち着いた状態の各ケースの地盤粒子と流速の様子を示す．粒径が全体的に小さく表示されているのは上述の通り流体解析前に全粒子の粒径を0.67倍しているためである．

図より、移動後には全てのケースで地盤粒子の固定粒子同士の間隙での閉塞が複数箇所で見られ、特にCase-1では詰まっている箇所が多いことがわかる．また、下部の移動粒子は流出していることがわかる．流速を見ると移動開始前は全体的に均一に流速が分布しているのに対して、移動完了後は地盤粒子による間隙の閉塞をさけるように水が流れるため、特定の流路に流れが集中していることがわかる．

移動開始前と移動完了後定常状態となった後の地盤粒子下方の平均流速の比はCase-1が約0.72, Case-2が約0.64, Case-3が約1.64となり、細粒分を比較的多く含むと流速が減少、細粒分が少ないと流速が増加し、実験の結果と相関がある結果となった．これは、細粒分が多く不安定な地盤粒子が多い場合、移動粒子により流路が閉塞され地盤内の流路が長くなりエネルギーの損失が大きくなる一方で、細粒分が少なく移動粒子が少ないと、間隙が埋まらずに粒子が流出することで大きな水みちが形成されるためと考えられる．

5. まとめ

LBMとDEMを用いた流体と地盤の連成解析により、細粒分含有率を変化させた地盤で定水位浸透解析を実施した．その結果、細粒分の移動による流速の変化を確認できた．今後は他の解析パラメータを変化させた解析を行い目詰まり現象について検討する予定である．

【参考文献】

- 1) 渡邊諭, 川尻峻三, 西田幹嗣, 浅野嘉文, 太田直之, 高馬太一, 杉山友康, 西垣誠: 排水パイプの排水性能評価のための定水位浸透模型実験, 第49回地盤工学研究発表会, 2014.
- 2) Q. Zou and X. He. On pressure and velocity flow boundary conditions for the lattice Boltzmann BKG model. *Phys. Fluids* 9(6), June 1997. 1591-1598.
- 3) Nobel, D., and J. Torczynski. A lattice Boltzmann method for partially saturated computational cells. *International Journal of Modern physics C*. 1998, 9, 1189-1201.
- 4) 安富懸一, 古谷浩平, 大高範寛, 渡邊諭: 集水孔仕様が排水パイプの排水特性に及ぼす影響に関する定水位浸透模型実験, 土木学会第71回年次学術講演会, 2016年.

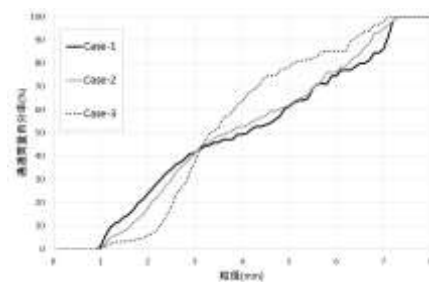


図3 各ケースの粒度分布

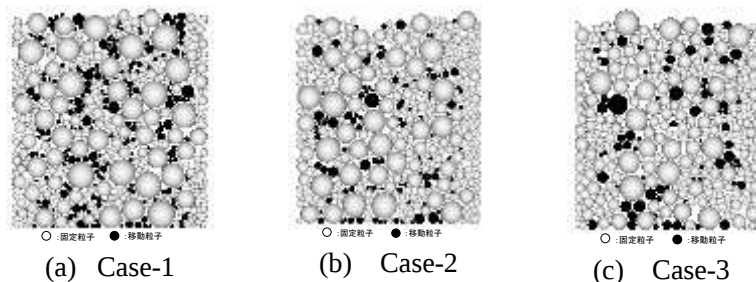


図4 パッキング後の地盤粒子の状態

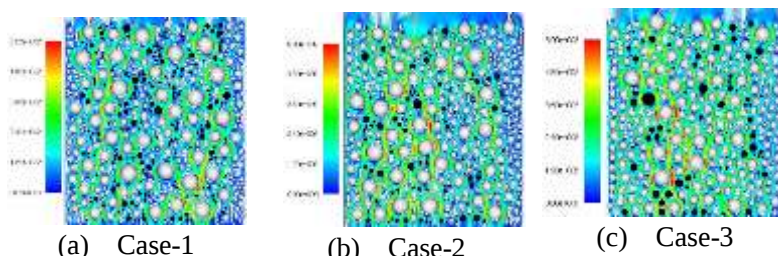


図5 移動開始前の地盤粒子と流速の状態

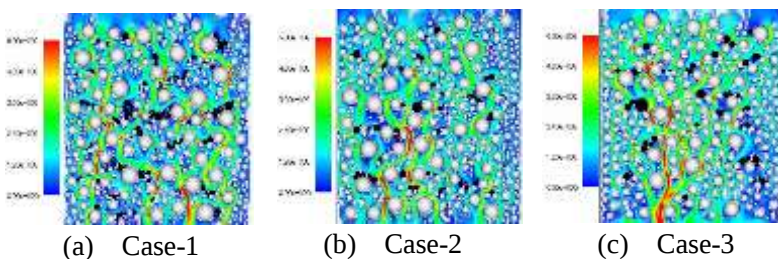


図6 移動完了後の地盤粒子と流速の状態