浸透破壊模型実験の SPH 法を用いた浸透流解析による検証

(株)大林組	正会員	○中道	洋平	(株)大林組	フェロー	杉江	茂彦
(株)大林組	正会員	高橋	真一	神戸大学	正会員	竹山	智英

1. はじめに

浸透破壊は主に砂地盤を対象に様々な工事分野で生じ、特に開削工事や海・河川の締切工事における止水壁まわりのボイリングはその代表格と言える.本研究では止水壁まわりのボイリングの模型実験を実施し、粒子法のひとつである Smoothed Particle Hydrodynamics 法(以下,SPH法)を用いた浸透流解析により、ボイリング発生過程の検証を行った.なお、本研究は土水連成 SPH 法の適用を念頭に置き実施したものである.

2. SPH 法による定式化

SPH 法では地盤を質量,密度,水頭といった物理量を持つ粒子の集合体によって表現する.集合体のひとつである粒子iの物理量 $f_i = f(x_i)$ は,影響半径内(Support domain)にある粒子jの物理量 $f_j = f(x_j)$ を,重み関数(Smoothing kernel function)を内挿することで表現される¹⁾.本研究では計算の安定性から Moving Least Squares 近似による重み関数を用いた SPH 法 ²⁾(以下, MLS-SPH 法)を適用した. MLS-SPH 法では粒子 iにおける物理量 f_i は,

$$f_i = \sum_{j=1}^N f_j \,\phi_{ij} \tag{1}$$

と表される.ここに、Nは粒子の総数、 ϕ_{ij} は粒子における粒子のMLS重み関数であり、 $\phi_{ij} = \phi(x_i - x_j, h)$ である. hは Smoothing length と呼ばれる重み関数の影響範囲を規定する長さである.飽和地盤の流れの基礎方程式は、

$$\nabla^2 h - \frac{S_s}{k} \dot{h} = 0 \tag{2}$$

であり、hは全水頭、kは透水係数、 S_s は比貯留係数である.ただし、透水係数の異方性はないものと仮定する.式(2)を時間について離散化し整理すると、

$$k\nabla^2 h^{n+1} - \frac{S_s}{\Delta t} h^{n+1} = -\frac{S_s}{\Delta t} h^n \tag{3}$$

となる. さらに、式(1)を用いて式(3)を空間離散化すると、以下のようになる.

$$k\sum_{i=1}^{N} (h_j^{n+1} - h_i^{n+1}) \nabla_i^2 \phi_{ij} - \frac{S_s}{\Delta t} h_i^{n+1} = -\frac{S_s}{\Delta t} h_i^n \qquad (4)$$

式(4)を全ての粒子について重ね合わせると、各粒子のhⁿ⁺¹を未知数とする連 立一次方程式となり、これを境界条件のもとで解くことで、n+1ステップの 全水頭を求めることができる.境界条件の与え方は、関・竹山の方法³を踏襲 し流量境界条件は Lagrange の未定乗数法を用いた方法を適用した.

3. 一次元浸透問題に対する定常浸透流解析

本手法の妥当性を検証するために,図2に示す土コラム中の浸透問題に対 する定常浸透流解析を行った.解析モデルの模式図を図3に示す.土コラム の長辺方向の両端部に排水境界条件を与えた粒子をそれぞれ配置し,短辺方 向端部には非排水境界条件を与えた粒子を配置した.図4に全水頭コンター を示す.土コラム中の全水頭は横軸方向には安定した分布を示すとともに,左 端境界から右端境界に向かって全水頭が直線的に減少し,理論式のとおり計 算されていることが確認された.



図 1 粒子iの Support domain





図3 解析モデル模式図



キーワード 浸透破壊,浸透流解析,SPH法,粒子法 連絡先 〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640 (株)大林組技術研究所 TEL042-495-9636



4. ボイリング実験と非定常浸透流解析

図5に模型実験の概要を示す.模型地盤は珪砂6号を用い,空中落下法で地盤を作製後,緩速で浸水させた.模型地盤の間隙比は0.55,水中単位体積重量は10.4kN/m³,地盤の厚さは150mm,止水壁の根入れ長は50mmである.

実験は上流側の水位を一定に保ち,排水孔を設置した下流側の水位を下 げることで水頭差を与えた.写真1にボイリング発生直前の実験の様子 を示す.下流側水位-時間関係を図6に示す.ボイリングは水頭差Δh = 150mm (下流側水位260mm)のときに発生した.

図7に SPH 法による解析モデルの模式図を示す.解析に用いた透水係 数および比貯留係数もあわせて示す.止水壁および土槽境界には非排水 境界条件を与えた粒子を配置し,上流側および下流側の地表面には水頭 境界条件を与えた粒子を配置した.下流側の水頭境界条件は,実験から 得られた水位を2次多項式近似し経時的に低下するよう考慮した.図8 に水頭差Δh = 100mm(t = 484sec)の全水頭分布コンターを示す.止水壁 から放物線上に等ポテンシャル領域が分布し,計算の妥当性が確認でき る.図9に鉛直方向の動水勾配コンターを示す.水中単位体積重量から 限界動水勾配を算出し,限界動水勾配以上となる粒子を暖色で示した. Terzaghiの一次元計算式により算出される限界水頭差は104mm である が,この段階では止水壁下端付近にわずかに暖色域が生じる程度である. 水頭差153mm で暖色域が地表面まで進展し,実験でボイリングが発生し た水頭差と整合する結果となった.

5. おわりに

本研究では、止水壁まわりのボイリングについて MLS-SPH 法を用いた 飽和浸透流解析を行い、ボイリング発生過程の検証を行った.今後は MLS-SPH 法を用いた土水連成解析により、地盤変形を含めた浸透破壊の 再現性について検討を行う予定である.

参考文献

1) Monagham, J.J. : Smoothed particle hydrodynamics, Annual reviews astronomy and astrophysics 30, pp.543-574, 1999.

2) Dilts, G.A. : Moving-least-squares-particle hydrodynamics-I. consistency and stability, International journal for numerical methods in engineering 44, pp.1115-1155, 1999.

3) 関一, 竹山智英: SPH 法を使用した不飽和非定常浸透流における流量 境界条件の改良, 第 51 回地盤工学研究発表会概要集, pp.969-970, 2016.







図9動水勾配コンター