

京都大学工学部 学生会員 ○小林 祐司  
 京都大学工学研究科 正会員 五十里 洋行  
 京都大学工学研究科 正会員 後藤 仁志

1. はじめに

従来の MPS 法<sup>1)</sup>による流体解析では、多孔質体に浸入した流体の体積保存性が考慮されていなかったために、多孔質体内の浸透領域が正しく評価できていなかった。本研究では、改良型非均一粒子径モデルを導入し、多孔質体に浸透した水粒子の粒径を変更することで問題の解決を図る。そして実験結果と比較することにより、その妥当性を評価する。

2. 数値解析手法

(1) 流体計算手法

流体計算には MPS-HS-HL-ECS-GC-DS-SPP-WPP 法を用いた。重み関数に Wendland 型関数を使用した。

(2) 改良型非均一粒子径モデル

本研究では Tsuruta ら<sup>2)</sup>が提案した改良型非均一粒子径モデルを導入し、多孔質体に浸透した水粒子の粒径を変更する。以下に本モデルでの粒子数密度と重み関数を示す。

$$n_i = \sum_{j \neq i} w_{ij}^{new} ; w_{ij}^{new} = \frac{V_j w(|\mathbf{r}_{ij}|, r_e)}{V_0} \quad (1)$$

ここに、 $n$  : 粒子数密度、 $w^{new}$  : 非均一粒子径モデルでの重み関数、 $w$  : 従来の重み関数、 $V$  : 粒子の体積、 $V_0$  : 基準体積、 $\mathbf{r}_{ij}$  : 粒子  $i, j$  の相対位置ベクトル、 $r_e$  : 影響半径である。また、勾配には GC 法を適用した以下の式が用いられる。

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{1}{n_0} \sum_{j \neq i} \left[ \frac{p_j - p_i}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} C_i \mathbf{r}_{ij} w_{ij}^{new} \right] \quad (2)$$

ここで、 $n_0$  : 基準粒子数密度、 $p$  : 圧力、 $C$  : GC 法の修正行列である。

また、多孔質体に浸透した水粒子は、粒径を以下の式で与えた。

$$d_i = \frac{d_{min}}{\sqrt{n_w}} \quad (3)$$

ここに、 $d$  : 計算粒子の粒径、 $d_{min}$  : 計算粒子の最小粒径、 $n_w$  : 多孔質体の間隙率である。

(3) 抗力モデル

多孔質体に浸透した水粒子には Du-Plessis<sup>3)</sup>が提案した抗力モデルによる流体抵抗が作用する。以下にその式を示す。

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{g} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} - a\mathbf{u} - b\mathbf{u}|\mathbf{u}|$$

$$a = \alpha \frac{\nu(1-n_w)^2}{n_w^3 d_{50}^2}, b = \beta \frac{1-n_w}{n_w^3 d_{50}} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{41n_w^2}{\zeta^{2/3}(1-\zeta^{1/3})(1-\zeta^{2/3})}$$

$$\beta = \frac{\gamma n_w^2}{(1-\zeta^{2/3})^2} ; (\zeta = 1 - n_w) ; \gamma = 0.6$$

ここに、 $d_{50}$  : 多孔質体の中央粒径、 $\gamma$  : チューニングパラメータである。

3. 多孔質体を通過するダムブレイク計算

(1) 計算条件

Liu ら<sup>4)</sup>が行った実験を対象に、数値シミュレーションを実施することにより、本モデルの妥当性を検証する。図-1 に計算領域を示す。多孔質体の間隙率は  $n_w = 0.49$ 、中央粒径は  $d_{50} = 15.9\text{mm}$  である。

(2) 数値シミュレーション結果

図-2 に 0.2s から 2.2s までの、代表的な時刻の水面形を実験結果とともに示す。計算結果は、実験結果と良好な一致がみられる。計算初期 ( $t = 0.2\text{s}, 0.4\text{s}$ ) に多孔質体内に浸透する流体前面に水面の盛り上がりが見られる。また、 $t = 0.2\text{s}$  の段階で多孔質体前面に実験結果と異なる水面の盛り上がりが見られる。これらの違いは、実験では水柱を支えるゲートの開放におよそ 0.1s かかっているのに対し、計算では、瞬間

的に開放していることが原因であると考えられる。

また、粒径を変更して、本モデルの収束性の確認を行った。図-3 にその水面形を示す。図より、解像度の高いケースではほぼ同じ結果が得られており、収束性が確認できる。

#### 4. おわりに

本研究では、多孔質体内への浸入、浸出を含む自由表面流の数値解析を行い、改良型非均一粒子径モデルの妥当性を確認した。

今後は、激流の作用する消波ブロック被覆堤の越波計算や、比較的粒径の小さな地盤にも本モデルを適用できるかどうかを確認、検証していきたい。

#### 参考文献

- 1) S. Koshizuka and Y. Oka: Moving Particle Semi-implicit Method for Fragments Incompressible Fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol.123, pp. 421-434, 1996.
- 2) N. Tsuruta, H. Gotoh and A. Khayyer: A novel refreshment technique for projection-based particle methods, *Proceedings of the 11th international SPHERIC Workshop*, pp. 402-409, 2016.
- 3) J. P. Du Plessis: Analytical quantification of coefficients in the ergun equation for fluid friction in a packed bed, *Transport in Porous Media*, Vol.16, pp. 189-207, 1994.
- 4) P. L.-F. Liu, P. Lin, K.-A. Chang and T. Sakakiyama: Numerical Modeling of Wave Interaction with Porous Structures, *Jounal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, Vol.125(6), pp. 322-330, 1999.

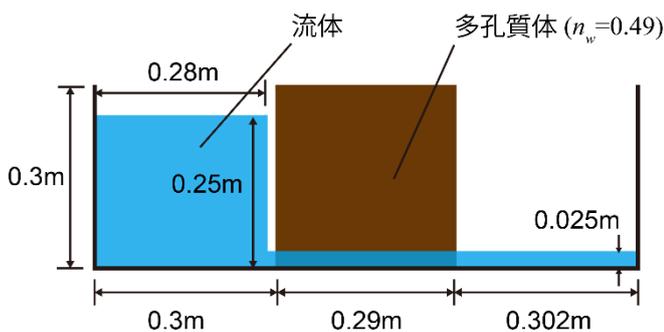


図-1 多孔質体を通過するダムブレイク計算領域

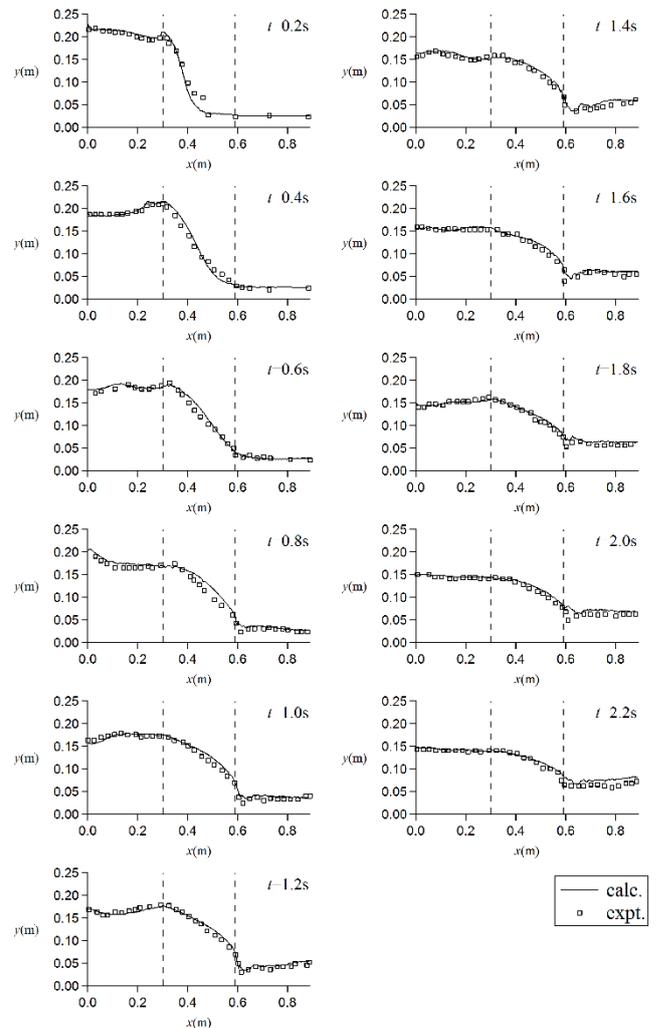


図-2 水面形

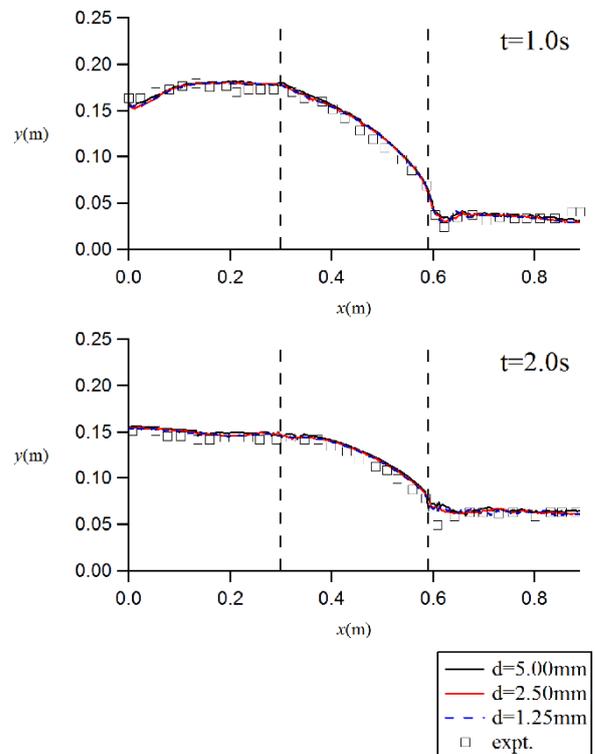


図-3 収束性の確認