

砂粒子運動を考慮した越流水による局所洗掘の3次元数値解析

3D Numerical Analysis for Local Scour by Overflow Considering Movements of Sand Particles

柳生大輔*・牛島省**・鳥生大祐***

Daisuke YAGYU, Satoru USHIJIMA and Daisuke TORIU

*京都大学大学院工学研究科修士課程 (〒 615-8530 京都府京都市西京区京都大学桂)

**工博 京都大学教授 学術情報メディアセンター (〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

***博(工) 京都大学助教 学術情報メディアセンター (〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

Key Words: local scour, overflow, sand particle motion, multiphase model

1. 緒言

堰を越流した水流が落下することによって砂面が洗掘される場合がある。このような洗掘現象に関して、いくつかの数値計算が試みられているが¹⁾、経験則を用いずに砂面の洗掘を計算することは難しく、また越流水による洗掘現象という複雑な現象に、既往の土砂水理学の経験則を適用する点については不明な点が多い。

このため、本研究では、流体と砂粒子の力学的相互作用と、個々の砂粒子の運動を扱うことができる3次元気液多相場の数値解法 MICS²⁾ を用いて、堰を越流した水流による局所洗掘の数値実験を行った。

2. 数値解析手法の概要

2.1 気液相の基礎式と解法

MICS²⁾ では、気液相に対して、以下の質量保存則、非圧縮条件、運動量保存則を用いる。

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = f_i - \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x_i} \\ + \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 t は時間、 x_i は直交座標成分、 u_i は気相と液相の質量平均速度であり、 p 、 ρ_f 、 μ はそれぞれ気相と液相の体積平均圧力、密度および粘性係数である。また、 f_i は外力加速度の x_i 成分である。これらの基礎式を、有限体積法を用いてコロケート格子上で離散化し、既報²⁾と同様の解法により、密度、流速および圧力の計算を行う。

2.2 砂粒子運動の数値解法

数値計算では、砂粒子は剛体とし、その形状は四面体要素の集合体として表され、表面には複数の接触判定球が配置される²⁾。この接触判定球を用いて砂粒子間の接触計算を行う。また、砂粒子に働く流体力は、流体と固体間の力学的な相互作用を考慮して求められる²⁾。以上のようにして得られた流体力および接触力を用いて、剛体の並進運動および回転運動の方程式から砂粒子の運動を計算する。

2.3 静止構造物の数値的取り扱い

本研究では静止構造物の表面は三角形要素の集合体として表される。流体計算における静止構造物内部の取り扱いについては既報³⁾と同様にした。また、砂粒子表面に配置された複数の衝突判定球と静止構造物表面の三角形要素を用いて接触計算を行った。

3. 越流水による局所洗掘の数値実験

3.1 計算条件

計算領域、砂粒子の初期配置および設定した静止構造物を図-1に示す。なお、 x_i ($i = 1, 2, 3$) 方向の計算領域の長さはそれぞれ 609.2 [mm]、146.2 [mm] および 400 [mm] である。砂粒子は図-1に示すように回転楕円体とし、その長径は 12.2 [mm] で短径は 5.0 [mm] とした。砂粒子数は 14,400 個である。本計算では、図-1に示す inlet の領域から流量 $Q = 1.80 \times 10^6$ [mm³/s] の水を流入させた。なお、水を流入させる時間は $0.0 \leq t \leq 1.5$ [s] であり、 $t = 1.5$ [s] 以降は $Q = 0$ [mm³/s] とし砂粒子がほぼ静止するまで計算を行った。

本計算は flat MPI を用いて並列化されており³⁾、並列数は 224 とした。なお、計算には京都大学のスーパーコンピュータ Cray XC30 を利用した。

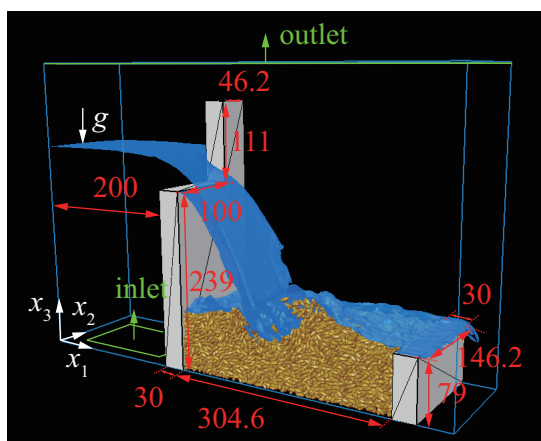


図-1 計算領域 (単位 [mm], $t = 1.5$ [s])

3.2 計算結果

計算結果を図-2 に示す。なお、図-2 では $0 \leq x_2 \leq 14.6$ [mm] の範囲内の砂面近傍領域のみを描画している。図-2(a) の初期状態から図-2(b) のように、越流した水流によって砂粒子が舞い上がり、砂面が洗掘されていく状況が確認できる。流入停止後、砂粒子がほぼ静止した時刻 $t = 3.0$ [s] では図-2(c) のような砂面形状となった。

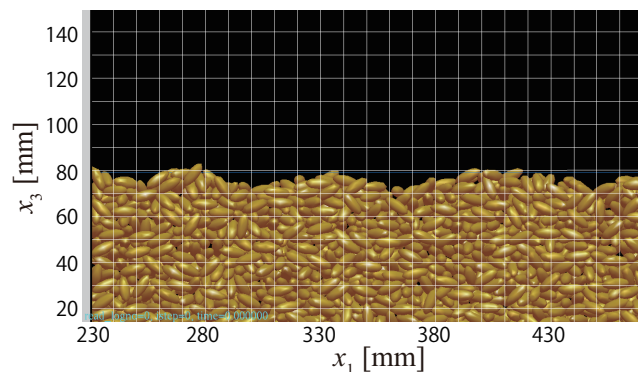
また、図-3 に $t = 3.0$ [s] における $x_1 - x_2$ 平面上の砂面の高さの分布を示す。図-3 に示されるように、堰の手前側を通過する越流水の落下位置付近の洗掘深が大きくなり、 x_2 方向にも砂面高さが変化する砂面形状が得られている。

4. 結言

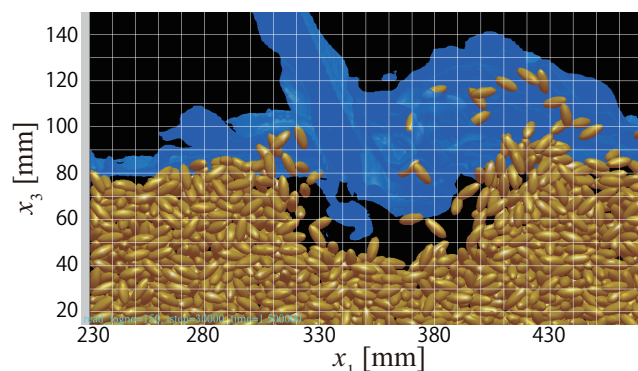
本研究では、堰を越流した水流による局所洗掘を対象として、3次元の固気液多相場の数値解法 MICS²⁾ を用いて個々の砂粒子運動を計算する数値実験を行った。その結果、洗掘過程および洗掘後の砂面形状を再現できる可能性があることが示された。今後は、水理実験等との定量的な比較を進める予定である。

参考文献

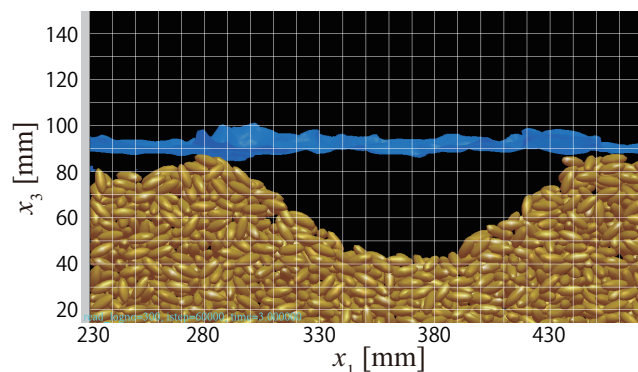
- 1) Sulianto, A. A. and Murakami, K.: Study on Local Scouring of Gravel Mound due to Tsunami Overflow, *Procedia Engineering*, Vol. 116, pp. 195 – 202, 2015.
- 2) 牛島省, 福谷彰, 牧野統師: 3次元自由水面流中の接触を伴う任意形状物体運動に対する数値解法, 土木学会論文集 B, Vol. 64 No.2, pp. 128–138, 2008.
- 3) 青木一真, 井唯博史, 牛島省, 鳥生大祐, 柳生大輔: 構造物および地表面との衝突を伴う多数の津波漂流物輸送の数値実験, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 71, No. 2, pp. I.379–I.388, 2015.



(a) $t = 0.0$ [s]



(b) $t = 1.5$ [s] (流入停止)



(c) $t = 3.0$ [s]

図-2 計算結果 ($0 \leq x_2 \leq 14.6$ [mm] の範囲内のみを描画)

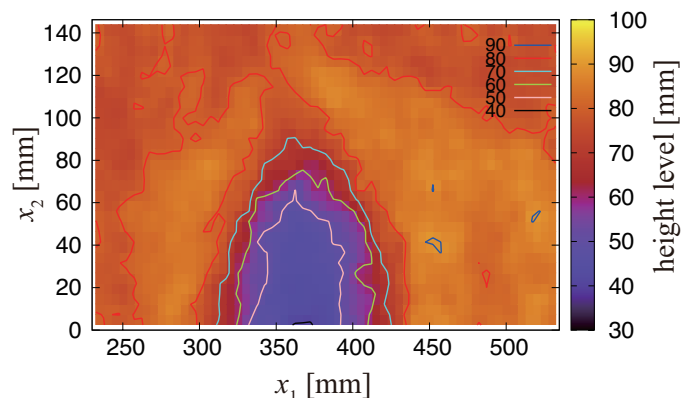


図-3 $t = 3.0$ [s] での計算で得られた砂面の高さ分布