

# 間欠性浅水流サージのダム流下における流況変化に関する 粒子法シミュレーションによる基礎的検討

名城大学 正会員 新井宗之  
国土交通省中部地整 正会員 金原政希  
国土交通省中部地整 正会員 村田雄大

## 1. はじめに

土石流に代表される段波状の浅水流サージが砂防ダムのような水理構造物を流下する場合の構造物による流下特性変化に関する検討である。砂防ダムの機能については土石流が通過する場合についてすでに多くの研究がされているが、短時間に多数のサージ状の流下がある場合の流況変化や砂防ダムの機能等に関する研究はあまりされていない。

短時間に多数のサージ流が堰を通過する場合、先行のサージ流下により堰上流側に湛水域が生じ、後続のサージがその湛水域に流入して堰を流下することが考えられる。実験によりこのような現象が確認される。このような流れを解析的に解くことは困難であるため、本研究では数値計算により検討するものである。ここで対象とする流れは、後続流の湛水域への流入、堰越流、堰からの流下等、激しい水面変化を伴う非線形性の強い現象である。このため、ここでは非線形現象にも有用な粒子法による数値シミュレーションで検討する。

## 2. 粒子法

粒子法は対象とする物体を粒子の集合として支配方程式を離散化する方法である。粒子法にはいくつかの方法があるが、ここでは越塚<sup>1),2)</sup>の方法により計算を行っている。その方法に基づいて以下概略を説明する。運動を支配する方程式として次式の流体の運動量保存則のナビエ・ストークス方程式を用いる。

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 u + f \quad (1)$$

ここに、 $D/Dt$ はラグランジュ微分と呼ばれる時間微分、 $\nabla$ はグラディエント演算子、 $\nabla^2$ はラプラス演算子、 $u$ は流速、 $\rho$ は流体密度、 $P$ は圧力、 $\mu$ は流体の粘性係数、 $f$ は外力である。外力は重力 $g$ のみを考える。式(1)は、左辺の時間微分の離散化により新しい時刻 $k+1$ の粒子 $i$ の速度 $u_i^{k+1}$ 、現時刻 $k$ の粒子 $i$ の速度 $u_i^k$ 、時間刻み幅 $\Delta t$ とすると

$$\frac{u_i^{k+1} - u_i^k}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \langle \nabla P \rangle_i^{k+1} + \frac{1}{\rho} \left[ \mu \langle \nabla^2 u \rangle_i^k + g \right] \quad (2)$$

とされる。

圧力 $P$ の勾配ベクトルに次式のグラディエントモデルを用いる。

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum \left[ \frac{P_j - P_i}{|r_j - r_i|^2} (r_j - r_i) w(|r_j - r_i|) \right] \quad (3)$$

ここに、 $d$ は次元数で2次元の場合 $d=2$ 、 $r$ は粒子の位置ベクトル、 $n^0$ は粒子数密度の基準値で次式で与える。 $r_i^0$ は

基準値となる粒子の位置ベクトルで、計算初期の最充填状態の粒子である。

$$n^0 = \sum_{j \neq i} w(|r_j^0 - r_i^0|) \quad (4)$$

$w$ は重み関数で次式で与える。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (r < r_e) \\ 0 & (r \geq r_e) \end{cases} \quad (5)$$

$r_e$ は影響半径と呼ばれ考慮する粒子の限界距離を表す。 $r_e$ はグラディエントモデルにおいて流体粒子の大きさの2.1倍を用いる。 $u$ のラプラシアン離散化には次式のラプラシアンモデルを用いる。

$$\langle \nabla^2 u \rangle_i = \frac{2d}{\lambda^0 n^0} \sum_{j \neq i} (u_j - u_i) w(|r_j - r_i|) \quad (6)$$

ここに、

$$\lambda^0 = \frac{\sum_{j \neq i} |r_j^0 - r_i^0|^2 w(|r_j^0 - r_i^0|)}{\sum_{j \neq i} w(|r_j^0 - r_i^0|)} \quad (7)$$

である。 $\lambda^0$ は影響半径内にある近傍粒子との距離の2乗の重み平均値を意味する。ラプラシアンモデルでの影響半径 $r_e$ は流体粒子の大きさの3.1倍を用いる。

上記の関係を基本にするが、式(2)の圧力 $P$ は時刻 $k+1$ で未知数としている。この方法では、時刻 $k$ と $k+1$ の間での速度 $u^*$ および粒子の位置ベクトル $r^*$ を求め、時刻 $k+1$ の圧力 $P$ を次式のポアソン方程式より求めている。

$$\langle \nabla^2 P \rangle_i^{k+1} = -\rho \frac{1}{(\Delta t)^2} \frac{n_i^* - n^0}{n^0} \quad (8)$$

ここに、 $n_i^*$ は $r^*$ の粒子位置における粒子 $i$ の粒子数密度である。この結果を用い時刻 $k+1$ の流体粒子 $i$ の速度 $u_i^{k+1}$ および位置 $r_i^{k+1}$ を得る。

境界条件は、自由水面でディリクレ境界条件、壁面ではノイマン条件を与える。実際の計算では上記以外に粒子衝突の処理、ディリクレ境界条件の無い場合の圧力のポアソン方程式の対角成分に重み付け処理がある。ここでの計算は、文献1)で示しているC言語のプログラムを基にしているが、独自にMathematicaによるプログラムを開発して数値計算を行っている。

Keyword: 土砂流サージ, 粒子法, シミュレーション, 堰  
〒468-8502 愛知県名古屋市中白区塩釜口1-501 Tel: 052-838-2364

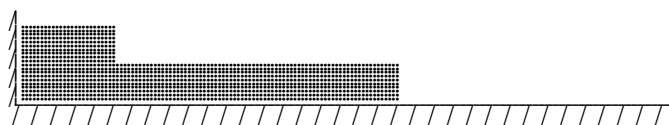
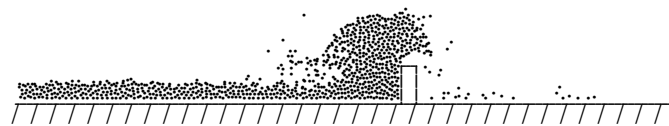
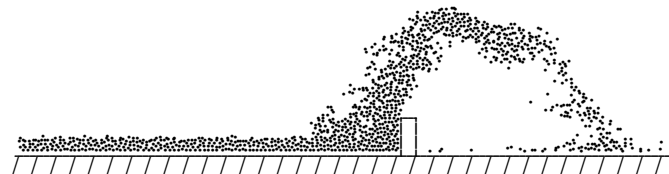


図-1 上流端初期条件



(a)  $t = 1.70\text{sec}$



(b)  $t = 2.10\text{sec}$

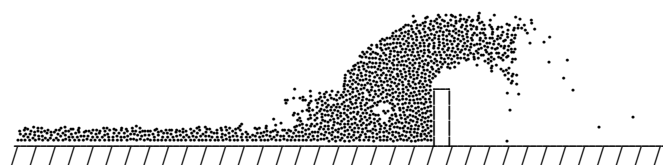
図-2 数値シミュレーション結果例  
堰高 0.2m

### 3. 計算条件・計算結果および考察

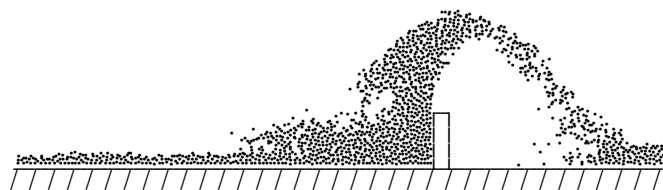
砂防ダムのような堰状の水利構造物を間欠的なサージ流が通過する場合、流況がどのように変化するかを数値シミュレーションで明らかにすることをここの計算の目的としている。特に、先行のサージ流によりダム上流側で湛水域が生じ、後続のサージが湛水域に流入して流下する場合の流況を明らかにすることを目的としている。

計算条件は、清水の流れで計算し、流体粒子の大きさを  $0.02 \times 0.02\text{m}$ 、流体の動粘性係数を  $\nu = \mu/\rho = 1.0 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 、時間ステップを  $\Delta t = 0.001\text{sec}$  としている。また、水路は勾配  $\theta = 10^\circ$ 、長さ  $10\text{m}$  で、水路上流端から  $6.0\text{m}$  の位置に高さ  $0.2\text{m}$  の堰、水路上流端から  $6.7\text{m}$  の位置に高さ  $0.3\text{m}$  の堰を設置した場合の計算を行った。給水方法は、上流端から長さ  $0.5\text{m}$ 、高さ  $0.4\text{m}$  とそれに接続して下流側へ長さ  $1.5\text{m}$ 、高さ  $0.2\text{m}$  の水塊(図-1)を自由崩壊で下流側に流下させ、湛水域への流入としている。堰での湛水は、水面が堰天端までであるほぼ満水状態として与える。次図等では水路を水平に描画しているが、実際は勾配  $\theta = 10^\circ$  の傾きを有している図である。

図-2 (a), (b) は堰高が  $0.2\text{m}$  の場合の数値シミュレーション結果の例である。流下した流れが湛水域に流入し堰を超える状態の計算結果例で、流体粒子を「 $\cdot$ 」で示している。ここでは計算結果の一部を示しているが、湛水域に流入する流れは湛水している水塊を連行するように堰を流下することがみられる。このため流下流量が湛水域の流下に伴い増加すると考えられる。図-3 (a), (b) は堰高が  $0.3\text{m}$  の場合の数値シミュレーション結果の例である。同様に湛水域に流入する流れにより湛水している水塊を連行することがみられ流下流量の増加をもたらしている。



(a)  $t = 2.10\text{sec}$



(b)  $t = 2.50\text{sec}$

図-3 数値シミュレーション結果例  
堰高 0.3m

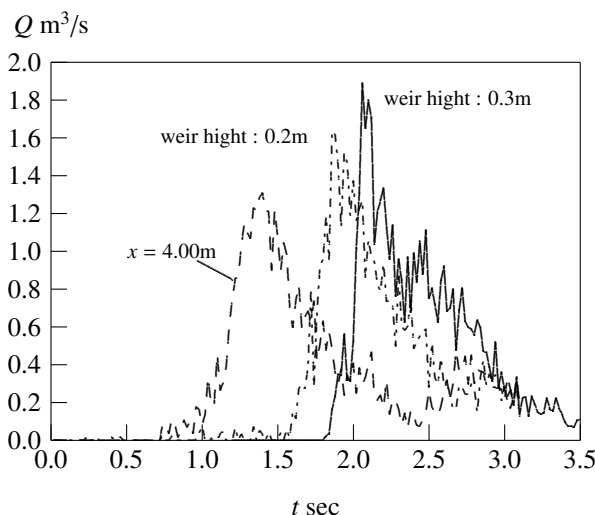


図-4 流量ハイドログラフ

図-4 は上流端から  $x = 4.0\text{m}$  の位置と堰高  $0.2\text{m}$  の天端での位置  $x = 6.02\text{m}$ 、および堰高  $0.3\text{m}$  の天端での位置  $x = 6.72\text{m}$  におけるハイドログラフの図である。  $x = 4.0\text{m}$  が破線、堰高  $0.2\text{m}$  の流量が一点鎖線、堰高  $0.3\text{m}$  の流量が実線でハイドログラフを示している。流量は、時間間隔  $\Delta t = 0.02\text{sec}$  の間にその断面を通過した粒子の流下  $x$  方向流速と流体粒子の大きさから流量を得ている。  $x = 4.0\text{m}$  の位置は、堰に湛水した水域の直上流の位置で、湛水域に流入するハイドログラフを示している。この計算結果では湛水域に流入するピーク流量に対し、堰を通過する時に堰高  $0.2\text{m}$  の場合で  $1.25$  倍、堰高  $0.3\text{m}$  の場合、  $1.44$  倍となっている。

### 4. 結語

これらのことより短時間に複数のサージが流下する場合、堰上流側に湛水域を生じた状態で後続のサージが流下するとピーク流量を増加させることを示している。

参考文献：1) 越塚誠一，柴田和也，室谷浩平：粒子法入門，丸善出版，2014.4.，2) 越塚誠一：粒子法，丸善出版，2005.2.