

土石流の小規模貯水池流入による発生波シミュレーションについて

名城大学理工学部 正員 ○新井宗之  
 京都大学防災研究所 正員 高橋 保

1. はじめに：土石流の流下過程において，河道の合流などの他に，砂防ダムや落差工などの水理構造物が存在する場合が多い。しかしながらこれらの構造物が土石流の流下過程にどのような影響を与えているのか，いくつかの事例を除いてはあまり明らかにされていない。ここでは湛水した小規模貯水池に土石流が流入した場合の発生波について検討した。

2. 実験及び実験結果：実験水路は長さ6 m，幅15.0 cm，水路下流端に高さ34.7 cmの堰を設け，両側はアクリル製で，水路床はペンキ塗布仕上げの可変勾配水路である。水路勾配は  $\theta = 18^\circ$  で堰に水を湛水させ，上流端より水及び砂を供給し実験を行った。実験砂は  $d^{50} = 0.98 \sim 0.097 \text{ mm}$ ， $\sigma = 2.62 \sim 2.64 \text{ g/cm}^3$  を用い，土砂の流下容積濃度は  $C = 0.35$  及び清水の条件で実験を行った。

図-1は土石流の流入によって湛水面に生じる発生波の波速について理論値と実験結果を比較したものである。横軸に微小振幅波による理論値，縦軸に発生する波の第一波の実験結果を表したもので，図中の黒丸は濃度  $C = 0.35$  の実験結果であり白丸は清水を示している。理論計算値での波長  $L$  は実験結果を用いている。これらの結果をみると，理論値と実験値はほぼ一致しており，このような規模の湛水域に水や土石流が流入する場合の発生波は清水でも高濃度の流れでもほぼ微小振幅波の特性を示すと言えよう。しかし実際的には天端を越流する流量の時間的変化予測することが必要となり，波高や波速の算定を要する。しかしながら，水深が変化するような領域であり流入する流体も高速であるということなど，単純なモデル化は難しい。そこで自由表面を伴う数値計算法の一つであるMAC (Marker and Cell)法を適用して実験結果との関係を検討する。

3. 数値計算法：MAC法は差分格子において，流体部分にマーカーを配置し，計算ステップごとにマーカーを移動する。差分計算自身にはマーカーの情報は何の影響も与えないが，移動したマーカーの位置により自由表面をきめるというかたちで，その情報が計算にフィードバックされる。MAC法の中にもいくつかの計算方法があるが，ここでは圧力項を単純化したSMAC法に準じて計算している。水平方向を  $x$  軸，垂直方向を  $y$  軸にとり，基礎方程式及び差分式は次式のようなものである。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = g_x - \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \dots (1) \quad D \equiv \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \dots (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = g_y - \frac{\partial \theta}{\partial y} + v \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad \dots (2)$$

$$\begin{aligned} & \left( u_{i+1/2,j}^{n+1} - u_{i+1/2,j}^n \right) / \Delta t = \left( u_{i+1/2,j}^n u_{i-1/2,j}^n - u_{i+3/2,j}^n u_{i+1/2,j}^n \right) / \Delta x \\ & + \left( u_{i+1/2,j-1/2}^n v_{i+1/2,j-1/2}^n - u_{i+1/2,j+1/2}^n v_{i+1/2,j+1/2}^n \right) / \Delta y \\ & + \left( \theta_{i,j} - \theta_{i+1,j} \right) / \Delta x + g_x \\ & + v \left\{ \left( u_{i+1/2,j+1}^n + u_{i+1/2,j-1}^n - 2u_{i+1/2,j}^n \right) / \Delta y^2 \right. \\ & \quad \left. - \left( v_{i+1,j+1/2}^n - v_{i+1,j-1/2}^n - v_{i,j+1/2}^n + v_{i,j-1/2}^n \right) / \Delta x \Delta y \right\} \quad (4) \end{aligned}$$

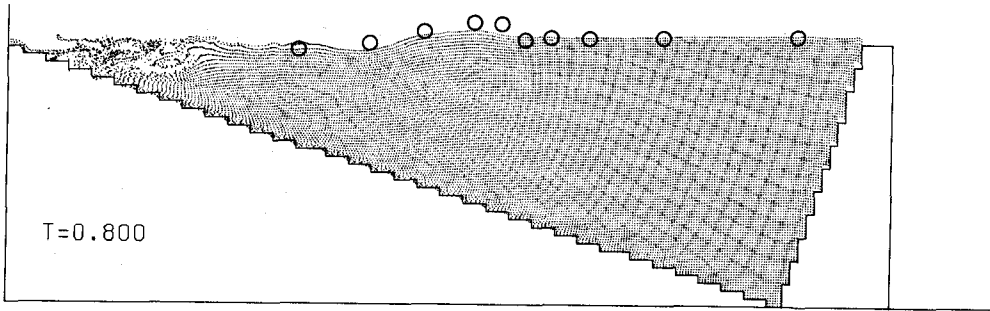


図 - 2 数値計算と実験結果

$$D_{i,j}^{n+1} \equiv (u_{i+1/2,j}^{n+1} - u_{i-1/2,j}^{n+1})/\Delta x + (v_{i,j+1/2}^{n+1} - v_{i,j-1/2}^{n+1})/\Delta y = 0 \dots (5)$$

ここに、 $\theta = p/\rho$ ,  $p$ : 圧力,  $\rho$ : 流体密度,  $g_x, g_y$ :  $x, y$  方向の重力加速度,  $u, v$ :  $x, y$  方向の速度成分,  $\nu$ : 流体の動粘性係数.

上式において添え字  $n+1$  は  $\Delta t$  時間ステップ後の値を示すが, (4) 式の  $u^{n+1}$  及び (2) 式より同様にして得る  $v^{n+1}$  は (5) 式を厳密に満足しないため, ポテンシャル関数を導入し速度成分を補正し, (5) 式厳密に満足するように解いている. 境界条件は, 壁面ではすべりのない壁とし, 自由表面では接線応力を 0 とするなどの条件とし, 湛水域上流端より流入するという条件である. <sup>1), 2)</sup>

4. 考察: 座標軸を水路床とその直角方向にとる方法と, 水平・垂直方向を座標軸にとる方法が考えられる. 前者は水路床などの境界面が直線になり実験上のそれとよく対応しているが, 自由表面の初期形状は計算格子のマーカはなめらかな形状ではなくなる. 後者の場合には水路床や堰などの境界形状は階段状になるが初期水面形状はなめらかな形状となる. いくつかの計算条件で両者の計算の収束性などを検討したが, 後者のほうが計算の収束性や安定性に優れていた. 従ってここでは後者の座標で計算している. このため河床形状と堰形状が階段状になっている. 計算条件は  $\Delta x = \Delta y = 1\text{cm}$ , 壁面からの流入流速  $u_b = 140\text{cm/s}$ ,  $h = 1\text{cm}$  であり, 計算時間ステップ  $\Delta t$  は 1 ステップごとに計算の収束条件から変えているが, 最大時間きざみ幅は  $\Delta t = 0.01\text{sec}$  としている. 湛水域上流端からの流入後  $T = 0.8\text{sec}$  の計算結果及びそれに相当する実験結果を図 - 2 に示した. 数値計算では水面から水滴が飛散するような非線形性の高い状態でも計算が可能となっている. 計算結果と実験結果 (白丸) とは比較的よく対応しており, このようなシミュレーションには有用な方法の一つであると思われる.

謝辞 この研究を遂行するにあたり名城大学岩垣雄一教授にご助言を頂いた. ここに記して謝意を表します. 参考文献 1) 高橋亮一: コンピュータによる流体力学<演習>, 構造計画研究所刊, 2) Robert K.C. Chen, Robert L. Street; A Computer Study of Finite-Amplitude Water Waves, J. Computational Physics 6, 68-94(1970)

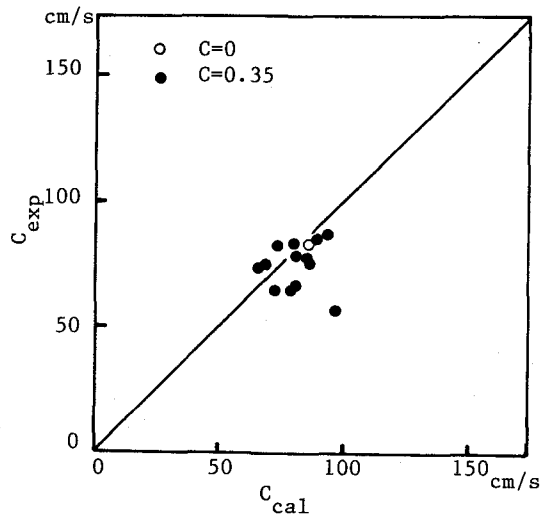


図 - 1 波速