

# 自由表面流の鉛直 2 次元数値モデルの開発

## 1. モデルの概要

河川構造物の設計を行う上で、構造物に作用する流体力や構造物周辺あるいは下流で生じる河床洗掘特性の把握が重要になる。そのためには、構造物周辺の流れを的確に予測することが不可欠である。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、構造物周辺の流れと局所洗掘を取り扱うことができる数値モデルの開発を最終的な目的としている。ここでは、その第一歩として、一般座標コロケート格子と高解像度風上解法の一つである MUSCL 法を用い、自由表面流れの鉛直 2 次元モデルの構築を行った。次に、障害物がある場でのダム破壊流れと床止め下流の洗掘孔内の流れに関する実験結果に基づき、モデルの予測精度を検証した。

## 2. モデルの概要

一般座標コロケート格子と高解像度風上解法の一つである MUSCL 法を用い、自由表面流れの鉛直 2 次元モデルの構築を行った。基礎方程式は、連続の式、運動方程式および VOF 関数の移流方程式であり、それぞれ式(1)、(2)および(3)で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] - \rho g$$

$$\frac{\partial F_m}{\partial t} + \frac{\partial u F_m}{\partial x} + \frac{\partial v F_m}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここに、 $t$ =時間、 $x$ 、 $y$ =流下、鉛直方向、 $u$ 、 $v$ = $x$ 、 $y$  方向の流速、 $p$ =圧力、 $\rho$ =密度、 $g$ =重力加速度、 $\mu$ =粘性係数である。また、 $F_m$ =VOF 関数  $F$  を  $\tan$  関数により変数変換を施した関数であり、 $F_m = \tan[a\pi(F-0.5)] - \tan[a\pi(-0.5)]$  で定義される。これは、数値拡散による気液界面のぼやけを低減するために導入したものである。ここに、 $a$  は係数で、この値が大きいほど、数値拡散は小さくなる。ここでは  $a=0.99$  とした。

## 3. モデルの検証

ダム破壊流れおよび床止め下流の洗掘孔内の流れに関する実験結果に基づきモデルの検証を行う。

### (1) ダム破壊流れの実験結果に基づく検証

実験装置は、図-1 に示すように、貯水槽部、ダム、氾濫原部で構成されている。貯水槽部に水深 0.75m の水を貯留させ、瞬間的にダムを取り除くことでダム破壊流れを発生させている。

図-2 は、本モデルより得られた VOF 関数の経時変化を示したものである。これより、ダム破壊流れが、三角形の障害物に到達し、障害物を乗り越える様子や、障害物により発生した段波が時間の経過とともに貯水槽部へと進行する様子などが確認できる。また、VOF 関数の拡散状況に着目すると、障害物や壁面付近で拡散が若干大きいもののいずれも VOF 関数が 1 あるいは 1 に近い値であり、高い解

像度で水面を捉えていることがわかる。

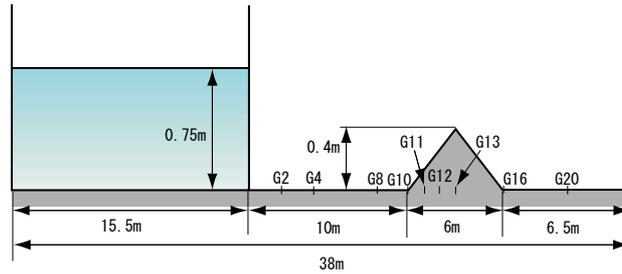


図-1 ダム破壊流れの実験装置と測定点の概要

図-3 は、測定点 G4, 10, 13, 20 の解析結果と実験値との比較を行ったものである。なお、解析については、VOF 関数  $F=0.5$  から求めた水深に加え、静水圧分布を仮定することで底面圧力から求めた水深も示している。

これらから、解析結果は、測定点 G4 の  $t=15s$  付近を除いては実験結果を概ね再現していることがわかる。なお、測定点 G13 と G20 の 25 秒以降で水深が 0 であるのに、圧力が振動しているのは、 $F<0.5$  の VOF 関数が滞留しているためそこでの密度が他の箇所と比べて大きくなったためである。また、測定点 G4 でずれが生じるのは、上流へ伝播する段波の波高と波速を過小に評価したためと考えられる。これは、図-2  $t=15s$  に示されるように、界面補足法に起因した気相と液相との拡散や数値拡散により、せん断応力が生じるとともに障害物によって生じる段波の波高が過小に評価されるためだと考えられる。VOF 関数と圧力より求めた水深を比較すると、測定点 G10 および G13 の 10 秒以前で両者にずれが生じることが確認できる。これらはいずれも流れが物体周辺に到達した直後であり、これらの時間では静水圧近似が崩れることが確認できる。

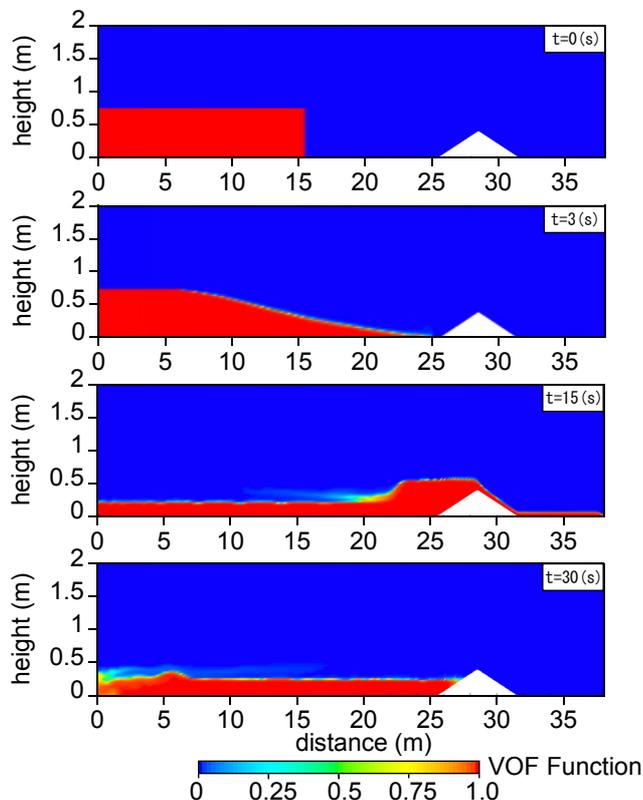


図-2 水面形状 (VOF 関数) の経時変化 (解析結果)

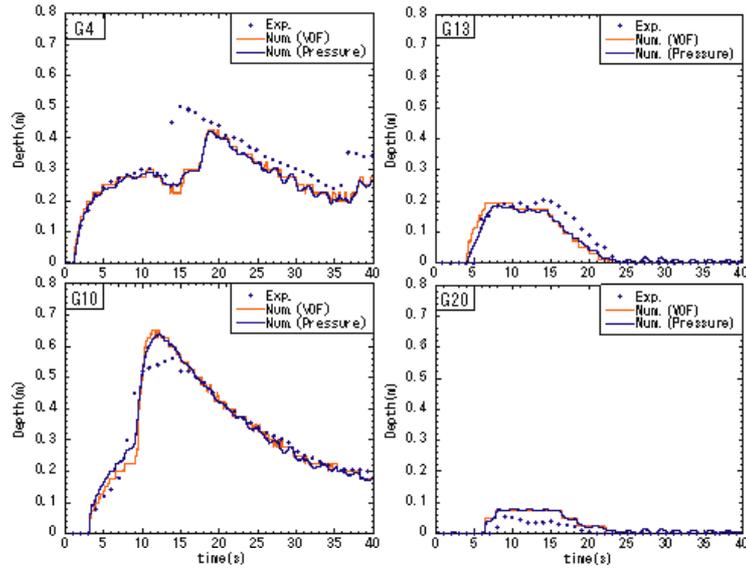


図-3 水深の経時変化の比較

以上から、本モデルは、ダム破壊流れのような計算の実行が困難な流れに対して数値拡散により水面のぼやけを極力抑えることができ、ある程度の精度で予測可能であることが確認された。

## (2) 床止め下流の流れの実験結果に基づく検証

実験装置は、図-4 に示すような全長  $L=20.5\text{m}$ 、幅  $B=0.6\text{m}$ 、勾配  $I=1/500$  の開水路である。床止めを  $2\text{m}$  にわたり設置し、床止め下流を  $3\text{m}$  にわたり粒径  $d=0.75\text{mm}$  の一様砂で敷き詰めた。床止め上流は固定床とし、床止め下流では河床洗掘を想定して初期河床までの落差を  $0.05\text{m}$  とした。

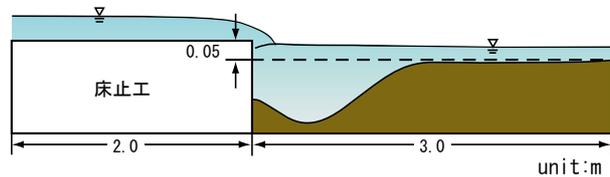


図-4 床止め下流の流れに関する実験装置の概要

図-5 は、平衡状態における潜り噴流の水位と流速ベクトルの比較を行ったものである。これより、解析結果は、水位および流速ベクトルを概ね再現していることが確認できる。しかしながら、床止めの洗掘孔内の流れの再付着点など再現できていない。これは、実験結果では床止め下流で大きな渦が生じ、流れのエネルギーが消失されているのに対し、本モデルは乱流モデルを導入していないためにこの現象を再現できないためと考えられる。

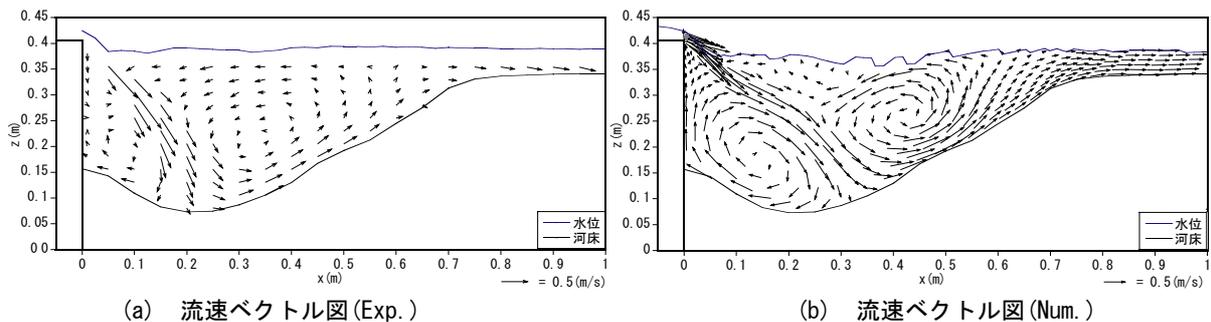


図-5 床止め下流洗掘孔内の流れの比較

#### 4. おわりに

以上、本研究では、一般座標コロケート格子と高解像度風上解法の一つである MUSCL 法を用い、自由表面流れの鉛直 2 次元モデルの構築を行った。このモデルを、障害物がある場でのダム破壊流れと床止め下流の洗掘孔内の流れに関する実験結果に基づき検証した。その結果、(1) 本モデルが、計算の実行が困難なダム破壊流れを再現でき、また水面のぼやけを抑えることができること、(2) 床止め下流のような複雑な流れを概ね再現できることが明らかとなった。今後は、ALE などの界面追跡法を用いたモデルとの比較を行うことで、より精度の高い自由表面の取り扱いについて検討するとともに、LES などの乱流モデルの導入することで、より精度の高いモデルを構築したいと考えている。