

大阪大学大学院工学研究科 正会員 川崎 浩司
 大阪大学大学院工学研究科 学生員 ○小野 稔和
 大阪大学大学院工学研究科 正会員 中辻 啓二

1. はじめに

今日、洪水氾濫による被害は、発展途上国さらには治水事業が充実している先進国においても発生している。洪水氾濫による被害を最小限に抑えるためには、ハード面のみならず、ハザードマップや洪水時の非難経路などのソフト面も強化する必要があると考えられる。よって、地形条件が複雑な都市部や山地に対しても氾濫域を精緻に予測・把握することが重要である。本研究では、氾濫水の動的挙動を精度よく解析するために、CIP 法と SMAC 法に基づいた氾濫流モデルを構築することを目的とする。

2. 氾濫流モデルの概要

基礎方程式は、式(1)～式(3)に示すとおり、平面 2 次元浅水方程式である。ここで、 H は水深、 U 、 V は x 、 y 方向の断面平均流速、 g は重力加速度、 n は Manning の粗度係数、 z_b は地盤高、 t は時間である。

基礎方程式

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial(UH)}{\partial t} + \frac{\partial(U^2H)}{\partial x} + \frac{\partial(UVH)}{\partial y} = -gH \frac{\partial(H+z_b)}{\partial x} - \frac{gn^2U\sqrt{U^2+V^2}}{H^{1/3}}$$

$$\frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial(UVH)}{\partial x} + \frac{\partial(V^2H)}{\partial y} = -gH \frac{\partial(H+z_b)}{\partial y} - \frac{gn^2V\sqrt{U^2+V^2}}{H^{1/3}}$$

移流段階

$$(1) \quad \frac{H^* - H^n}{\Delta t} + U^n \frac{\partial H^n}{\partial x} + V^n \frac{\partial H^n}{\partial y} = 0$$

$$(2) \quad \frac{U^* - U^n}{\Delta t} + U^n \frac{\partial U^n}{\partial x} + V^n \frac{\partial U^n}{\partial y} = 0$$

$$(3) \quad \frac{V^* - V^n}{\Delta t} + U^n \frac{\partial V^n}{\partial x} + V^n \frac{\partial V^n}{\partial y} = 0$$

非移流段階

$$(4) \quad \frac{H^{n+1} - H^*}{\Delta t} = -H^* \left(\frac{\partial U^{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial V^{n+1}}{\partial y} \right)$$

$$(5) \quad \frac{U^{n+1} - U^*}{\Delta t} = -g \frac{\partial(H^{n+1} + z_b)}{\partial x} - \frac{n^2 U^* \sqrt{\left(\frac{U^*}{H^*}\right)^2 + \left(\frac{V^*}{H^*}\right)^2}}{H^{1/3}}$$

$$(6) \quad \frac{V^{n+1} - V^*}{\Delta t} = -g \frac{\partial(H^{n+1} + z_b)}{\partial y} - \frac{n^2 V^* \sqrt{\left(\frac{U^*}{H^*}\right)^2 + \left(\frac{V^*}{H^*}\right)^2}}{H^{1/3}}$$

本モデルでは、基礎方程式を移流段階（式(4)～式(6)）と非移流段階（式(7)～式(9)）に分離して時系列計算を行う。移流段階計算では、拡散の激しい場においても物理量の移流を精緻に解析できる CIP（Cubic-Interpolated Propagation）法を採用した。非移流段階に関しては、水深の時間変化量を陰的に解くことによって解析する SMAC（Simplified Marker And Cell method）法を用いて計算した。

3. 1 次元水柱崩壊問題への適用

氾濫流が水のないドライベッド上を進行する現象を確認するために、中山ら(1998)が実施した 1 次元水柱崩壊計算と同じ条件で解析し、両計算結果の比較検討を行う。なお、メッシュ間隔を $\Delta x=1.0\text{m}$ 、時間ステップ間隔を $\Delta t=0.1\text{s}$ とした。図-1 は本モデルによる水柱崩壊シミュレーション結果の一例で、点線は初期の水面形状を示す。一点鎖線と実線は計算開始後 $t=20\text{s}$ での計算結果であり、前者は氾濫水先端部において流速の境界条件に slip 条件を課していない場合、後者は slip 条件を課した場合である。slip 条件下での計算結果から、氾濫水先端部の水面形状が滑らかに変化していることが確認できる。一方、slip 条件を課していない場合、先端部が切り立つ段波が発生している。このことから、氾濫水先端部の取り扱い方の差異により、計算結果が異なることがわかる。なお、本モデルでは、ドライベッド上を進行する表面水の先端部境界として、slip 条件を課すことにした。図-2 に中山ら(1998)が実施した 1 次元水柱崩壊問題の計算結果を示す。図中には、運動方程式の移流項に対してのみ CIP 法を使用した中山らのモデル、中央差分、風上差分、MacCormack 法などの計算結果も同時に図示している。中山らの CIP 法による計算結果を詳細にみると、表面水の先端部において急激な水深増加、つまりオーバーシュートの発生が認められる。一方、本研究で開発した数値モデルは、急激な水深変化を伴うことなく、安定に計算が行われていることが確認でき、モデルの妥当性が検証される。

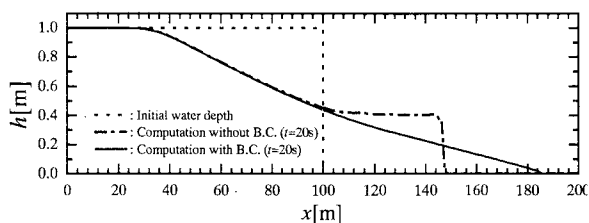


図-1 本モデルの計算結果

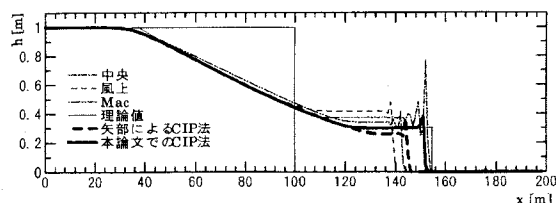


図-2 中山ら(1998)の計算結果

4. 平面 2 次元貯水池決壊問題への適用

貯水池が部分的に決壊したときの氾濫水の平面 2 次元的な挙動について調べるために、Fraccarollo and Toro (1995)による水理実験と比較検討する。図-3 に Fraccarollo and Toro が実施した貯水池部分決壊問題に関する水理実験の概略図を示す。左側に貯水槽(長さ 1m, 奥行き 2m), 右側に氾濫原(長さ 3m, 奥行き 2m)が設置されている。図中の点は水深の測定点である。なお、決壊部分中心を原点 O とし、 $x=0\text{m}$ には貯水槽と氾濫原を仕切る壁があり、その中央には幅 0.4m の決壊部が設けられている。貯水槽の初期水深は 0.6m で、氾濫原は水のないドライベッド状態である。また、氾濫原の 3 つの側面には壁がないため、計算では側方および下流端の境界条件を開境界とした。なお、Manning の粗度係数は $n=0$ とし、メッシュ間隔を $\Delta x = \Delta y = 0.1\text{m}$, 時間ステップ間隔を $\Delta t = 0.01\text{s}$ として計算を行った。各測定点での水深の時間変化を図-4 に示す。図中の○印は Fraccarollo and Toro による実験値、実線は本モデルによる計算結果である。計算結果は各測定点における急激な水深変化に対しても良好に水理実験を再現していることがわかる。したがって、本モデルの妥当性・有用性が確認される。しかしながら、決壊部に近い測定点 4 では、計算値と実験値の差が若干みられる。これは、決壊部周辺では鉛直方向の加速度が卓越するため、浅水方程式つまり静水圧近似に基づくモデルの限界と推察される。

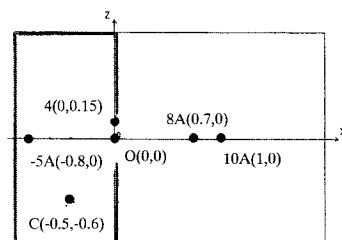


図-3 水理実験の概要

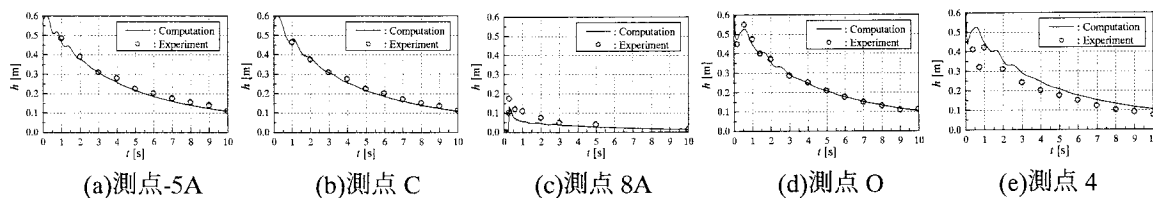


図-4 各測定点における水深の時間変化

5. おわりに

本研究では、氾濫水の動的挙動を高精度に数値解析するために、CIP 法と SMAC 法に基づく氾濫流モデルを構築した。そして、急激な水深変化を伴う水柱崩壊問題や貯水池決壊問題に適用することにより、本モデルが安定かつ精度よく氾濫流を計算できることを検証した。今後、堤防の越流効果を考慮するなど、更なるモデルの精度向上を図る予定である。

[参考文献]

- 中山恵介・佐藤圭洋・堀川康志(1998): CIP 法を用いた浅水流方程式の数値計算手法の開発, 水工学論文集 第 42 巻, pp.1159-1164.
- Luigi Fraccarollo and Eleuterio F. Toro(1995): Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems, Journal of Hydraulic Research, Vol.33, pp.843-864.