

段落ち下流部流れの数値シミュレーション

鳥取県庁 正会員 ○木村 拓寛 鳥取大学 フェロー 道上 正規
 鳥取大学工学部 正会員 檜谷 治 鳥取大学大学院 学生員 梶川 勇樹
 鳥取大学大学院 学生員 成田 良子

1. はじめに

段落ち下流部では、主流水脈が水面近くを波状となって流れ、その下方に逆流域が形成される波状跳水現象と、逆に主流水脈が水路床に沿って流れその上方に逆流域が形成される潜り噴流現象とが、上下流側水位、あるいは段落ち高さ等の水理量の相対的關係により発生することが知られている¹⁾。本研究では、その段落ち下流部の流況を対象とした数値解析法の構築を目的としている。昨年度、道上ら²⁾の研究により、波状跳水現象に関する数値解析については、ある程度の精度で再現計算が可能となっている。しかし、潜り噴流現象に関してはまだその再現性が悪く、計算法の改良が望まれている。そこで、本研究では潜り噴流現象を再現できる数値計算法を構築し、従来の実験結果に対する数値シミュレーションを行い、波状跳水現象から潜り噴流現象への移行過程について検討する。

2. 基礎方程式および計算法

本計算では、複雑な境界上でも滑らかな境界条件を課すことのできる FAVOR 法³⁾を基礎式に導入する。FAVOR 法では複雑境界上の流れにおいて、格子中に流体部分と境界部分とが混在すると考え、任意の格子で流体の占める体積率を V 、 i 方向に垂直な断面で占める面積率を A_i と定義する。右に連続式(1)および流下方向のみの運動方程式(2)を示す。

ここに、 u 、 v および w はそれぞれ x 方向(流下方向)、 y 方向(横断方向)および z 方向(鉛直方向)の流速成分、 ε_h および ε_z は水平および鉛直方向の渦動粘性係数、 p は圧力である。鉛直方向流速 w に関しては、連続式(1)を水路床より積分することにより求める。また、水深 h に関しては 2 次元の連続式(3)より求める。これら(2)、(3)式を常・射流が混在した流れでも適用可能である MacCormack 法により差分化し流れ場を計算するわけであるが、圧力 p については道上ら²⁾と同様、圧力の鉛直方向分布を考慮に入れ、静水圧 p_0 とこれからの偏差 p に分割し計算を行う方法を適用する。

ここで、本研究では水面セルの取り扱いについて、図-1 に示すように実際の水面形状が(a)のような状態の時、(b)のように水面が x 軸に水平な場合、および(c)のように z 軸に水平な場合を考え、隣接する 2 点の液面位置を用いて液面の傾きを計算し、その値の小さい方を液面形状とする補正を行った。そして、水深 h を水面形状の補正後に解くものとした。また、水面セルでの流速を、ラグランジュ補間多項式により算出するものとした。

図-2 は水面形状の補正効果をみるため、段落ち高さ $W=10\text{cm}$ 、単位幅流量 $q=400\text{cm}^2/\text{s}$ 、下流端水深 $h=10.92\text{cm}$ における水面形状の補正を考慮した場合と考慮しない場合の計算結果、および実験結果の水面形状を示している。この図より、計算値は実験値と比べ、両結果ともまだ誤差があるものの、補正を行うことにより、水面形状および段落ち直下部の水位が改善されていることがわかる。

【連続式】…(1)

$$\frac{\partial}{\partial x}(A_x u) + \frac{\partial}{\partial y}(A_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z w) = 0$$

【運動方程式(流下方向のみ)】…(2)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V} \left(A_x u \frac{\partial u}{\partial x} + A_y v \frac{\partial u}{\partial y} + A_z w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \varepsilon_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \varepsilon_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \varepsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\}$$

【2次元の連続式】…(3)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0$$

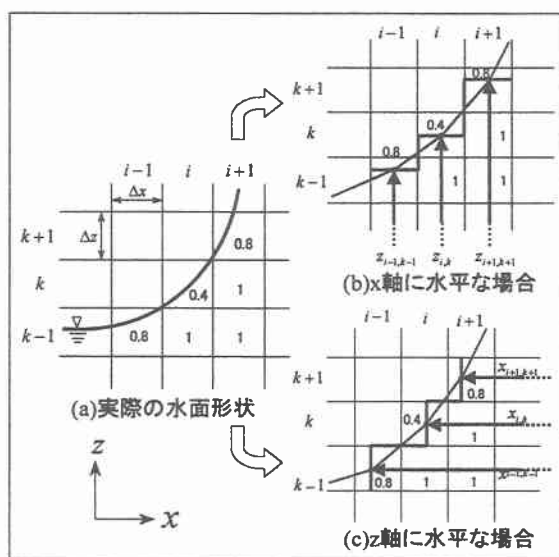


図-1 水面セルの取り扱い

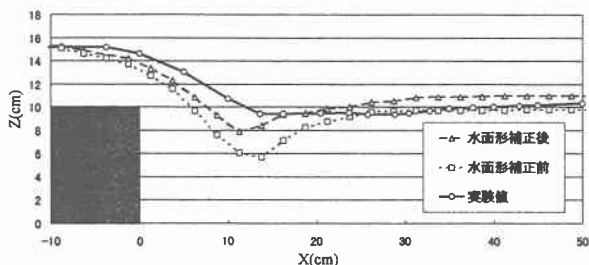


図-2 水面形比較図

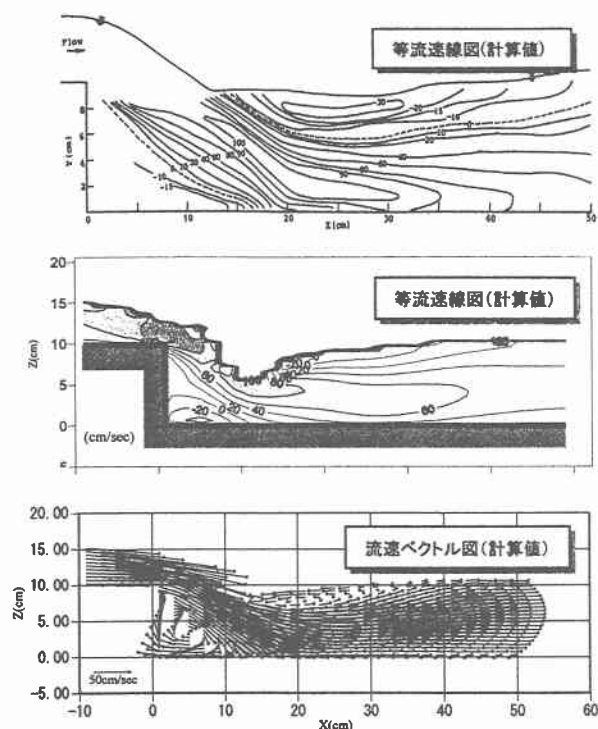


図-3 潜り噴流現象の再現計算結果

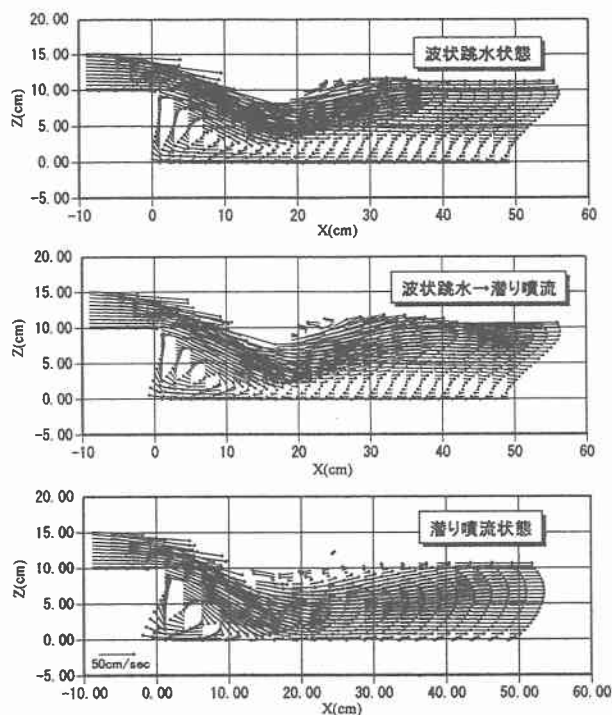


図-4 流れの移行過程

3. 計算結果と考察

図-3は、従来りの実験結果と比較するため、先ほどと同様の計算条件における等流速線図(実験値,計算値)、および流速ベクトル図(計算値)を示したものである。図を比較してもわかるように、実験結果、計算結果ともに主流水脈は段落ち下流部で剥離し、その水脈幅をほぼ保ったまま鉛直下向きに弯曲しながら水路床に衝突している。水路床に衝突した水脈の一部は、上流側に移動し弱い逆流域を形成している。このとき、実験では水面付近に逆流域が発生しているが、解析においても水面付近の逆流域が表現されており、流況をよく再現していると考えられる。

次に、波状跳水状態から潜り噴流状態への移行は下流端水深 h_t と段落ち高さ W に大きく依存していることが実験的に確認されている。そこで、同様の計算条件下で下流端水深を徐々に低下させていく時の、波状跳水状態から潜り噴流状態へ移行する過程をベクトル表示したものを図-4に示す。これらの図より、下流端水深の低下に伴い段落ち下流部での水面での波形状が顕著に表れ、水表面に逆流が生じ始める様子がうまく再現されている。最終的に、流れは潜り噴流状態になり、下流端水深の低下に伴う流れの移行過程現象をよく再現していると考えられる。

しかし、流れ移行時の下流端水深 h_t が実験結果に一致しているとは限らない。そこで、本計算モデルでどの程度まで実験の移行限界条件を再現できるか、種々の水理条件に対して流れの移行計算を行い、実験値との移行条件を比較したものを図-5に示す。ここに、 h_c は限界水深を示しており、縦軸の下流端水深 h_t 、および横軸の段落ち高さ W は限界水深 h_c により無次元化表示している。図より、計算結果の移行限界水深は、実験値のそれと比べ低いものとなった。しかし、計算においても実験同様、段落ち高さ W が大きくなるにつれ、移行限界水深 h_t も大きくなるという傾向が得られ、実験結果を良く説明していると考えられる。

4. おわりに

本計算法を用いて、段落ち下流部における波状跳水状態から潜り噴流状態への移行過程を、ある程度の精度で再現することが可能であった。今後、さらにモデルの改良を進め、潜り噴流現象から波状跳水現象への移行過程、および局所洗掘問題への河床変動計算の導入を考えている。

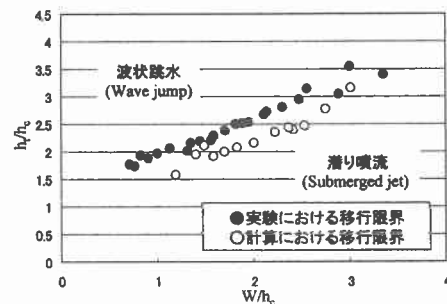


図-5 移行限界の比較

【参考文献】1) 鈴木ら:段落ち下流部の流況特性,第 29 回水理講演会論文集,pp.615-620,1985.2)道上前:射流部を含む段落ち流れの数値解析,第 55 回年講,II-334,2000.

3)C.W.HIRT:A PORSPITY TECNIQUE FOR THE DEFINITION OBSTA CLES IN RECTANGULAR CELL MESHES,1985.