

段落ち下流部における波状跳水現象の数値シミュレーション

（株）東京建設コンサルタント 正会員 ○中本 英利
鳥取大学工学部 フェロー 道上 正規
鳥取大学工学部 正会員 檜谷 治

1. はじめに

河川構造物周辺などの流れの急変部では、局所的な流れの発生により局所洗掘が生じる。従来、この局所洗掘に対する数値解析が行なわれているが、流れの計算精度の問題で十分な再現ができていないのが現状である¹⁾。この問題を解明するためには局所流が再現できるような実用的な数値計算法を用いて、複雑な流れ場を対象とした流れの数値解析を行う必要がある。本研究が対象とする流れ場は、段落ち下流部の流況である。段落ち下流部では、常・射流が混在した波状跳水現象と潜り噴流現象が発生することが知られている²⁾。本研究では、その中の波状跳水現象を再現する数値計算法について検討し、従来の実験結果に対する数値シミュレーションを行う。

2. 基礎方程式および計算方法

本計算では、複雑な境界形状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流体の占める面積率を A_i と定義する。これにより連続式および運動方程式を流下方向のみ示すと以下ようになる。

【連続式】 (1) 【運動方程式（流下方向のみ）】 (2)

$$\frac{\partial}{\partial x}(A_x u) + \frac{\partial}{\partial y}(A_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z w) = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V} \left(A_x u \frac{\partial u}{\partial x} + A_y v \frac{\partial u}{\partial y} + A_z w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \varepsilon_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \varepsilon_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \varepsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\}$$

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 は水平方向および鉛直方向の渦動粘性係数、 p は圧力である。

本研究では河床変動計算への適用を考え、より実用性を重視している。そのため鉛直方向流速 w については連続式(1)を水路床より任意の点まで積分することにより求める。また水深 h は2次元の連続式である次式により求める。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} h}{\partial y} = 0 \quad \text{..... (3)}$$

ここに、上付横線は断面平均値を示す。

上記の(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求めるわけであるが、本計算法では圧力の鉛直方向分布を考慮に入れている。そこで圧力 p を静水圧 p_0 とこれからの偏差 p' に分けて次式のように表わす。

$$p = p_0 + p' = \rho g(\xi - z) + p' \quad \xi : \text{水位} \quad \text{..... (4)}$$

また、鉛直方向の運動方程式の時間項を微小項として省略すると、 p' に関する(5)式が導かれ、水面で p' が 0 という境界条件のもとに差分法を用いて p' を計算することができる。差分は慣性項に対しては風上差分、その他の項に関しては中央差分を用いる。

$$\frac{1}{V} \left(A_x u \frac{\partial w}{\partial x} + A_y v \frac{\partial w}{\partial y} + A_z w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} + \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \varepsilon_h \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \varepsilon_h \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \varepsilon_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \quad \text{..... (5)}$$

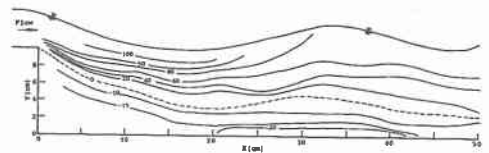


図-1 (a) 等流速線図（実験値）

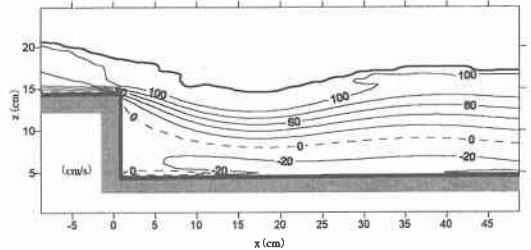


図-1 (b) 等流速線図（計算値）

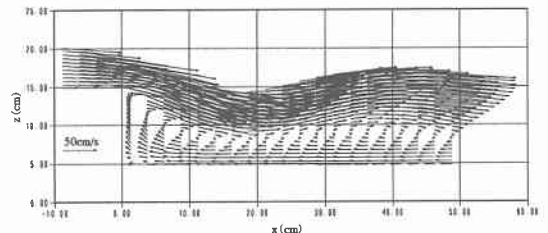


図-1 (c) 流速ベクトル図（計算値）

($W=10\text{cm}$, $q=400\text{cm}^2/\text{s}$, $h_t=13.87\text{cm}$)

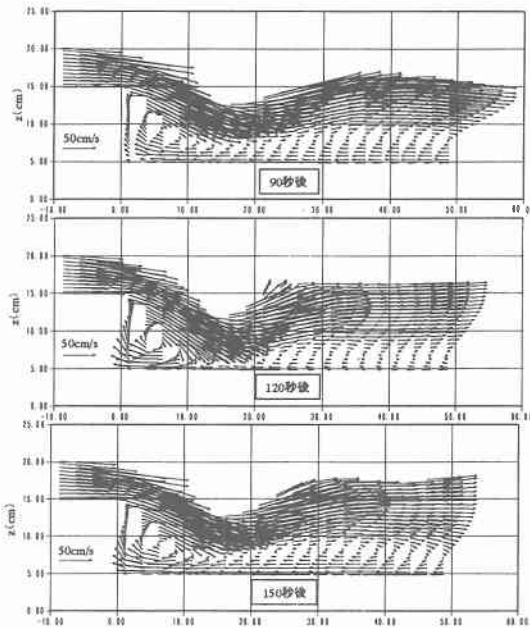


図-2 時間的変化(流速ベクトル図)

3. 計算結果と考察

図-1は、従来²⁾の実験結果と比較するため、段落ち高さ $W=10\text{cm}$ 、単位幅流量 $q=400\text{cm}^2/\text{s}$ 、下流側水深 $h_t=13.87\text{cm}$ のケースにおける(a)等流速線図(実験値)、(b)等流速線図(計算値)および(c)流速ベクトル図(計算値)を示したものである。計算結果は通水開始から1分後の結果であり、等流速線図中の破線は流速 $u=0\text{cm/s}$ の線である。図を比較してもわかるように、実験結果、計算結果ともに段落ち下流端で剥離した主流水脈は波状形状をした水面付近を流れており、主流水脈下部の水路床付近には逆流領域を形成している。主流水脈下部の段落ち付近には、主流水脈へ一部流量が連行されるため上昇流がみられ、流況をよく再現していると思われる。

図-2は通水開始から5分間の流速の時間的変化を30秒毎に示した流速ベクトル図のうち、90秒～150秒後の結果を示したものである。図から、水面形、下降・上昇流速の大きさなど時間的に大きく変動していることがわかる。この主流水脈の不安定さが、逆流領域の規模や逆流流速に影響を及ぼすのは容易に推測される。そこで、主流水脈が再付着するまでの距離を L_r 、また逆流領域において最大逆流流速を示す位置の段落ちからの距離を L_u とし、それぞれを段落ち高さ W で無次元化したものの時間的変化を図-3に示す。図より L_r は時間的に W の約5～15倍と非常に広い範囲で変動しており、逆流領域が流下方向へ伸縮していることがよくわかる。これは剥離流線周辺の圧力分布の変動が大きな影響を及ぼしていると考えられる。一方、 L_u/W の値は L_r/W と比べると時間的に変動は少なくほぼ $L_u/W \approx 1$ である。そのため最大逆流流速の発生位置は再付着点距離の大きさにかかわらずほぼ段落ち高さ程度になるものと思われる。

また、逆流領域が形成されるためには、主流水脈からの流量の連行が必要となる。この連行流量は、逆流領域が形成されている各断面において、主流水脈の流速分布を積分することによって得られた流量と通水流量との差で定義する。図-4は各断面における連行流量 Δq のうち最大なものの $\Delta q_{\max}$ を通水流量 q で無次元化したものと下流側のフルード数 Fr_t との関係を示したものである。計算値は通水開始から1分後の値である。図より計算結果と実験結果とはほぼ同様の傾向を示しており、連行流量に関しても実験値を再現できることがわかった。

4. おわりに

本計算法を用いて、波状跳水現象のような複雑な流況をある程度の精度で再現することが可能であった。今後さらに改良を進め、潜り噴流現象の再現および河床変動計算への適用を考えている。

参考文献 1) 道上ら: 水制周辺の平面2次元河床変動に関する研究, 水工学論文集第36巻, pp.61-66, 1992. 2) 鈴木ら: 段落ち部の流況特性, 第29回水理講演会論文集, pp.615-620, 1985. 3) C.W.Hirt: Volume-fraction techniques: Powerful tools for wind engineering, Journal of Wind Engineering No.52, pp.333-344, 1992.

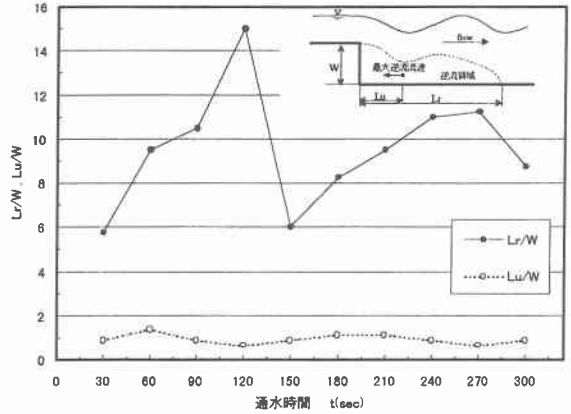


図-3 再付着点距離と最大逆流流速位置の時間的変化

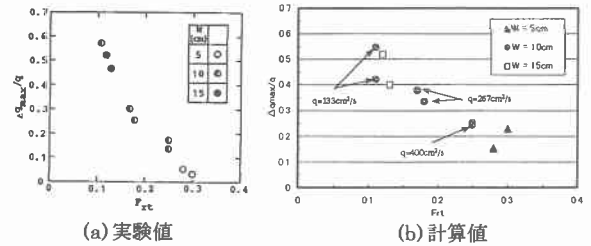


図-4 最大連行流量