

堰下流の河床洗掘計算

広島大学大学院 学生会員 ○内田龍彦

広島大学大学院 フェロー会員 福岡捷二

1. 序論

堰下流に生じる河床洗掘は、波状跳水状態の埋め戻し過程と潜り噴流状態の洗掘過程を交互に繰り返し発達する¹⁾。河床洗掘計算を行うためには、洗掘孔内に生じるこれら二つの流れを表現できる数値解法が必要となる。特に、潜り噴流状態では、河床変動量が大きく、堰下流の河床洗掘形状を決定付けるため、重要である。本研究では、潜り噴流状態で生じる洗掘、堆積域の発達と、これらが波状跳水への移行に伴って減衰する過程を表す数値解析モデルを構築し、解析モデルの再現性を検討する。

2. 計算方法

計算で対象とする実験条件を表-1に示す。堰下流の変動を伴う河床、水面形状を適切に評価するため、基礎方程式には移動 σ 座標系に展開された ξ, z 方向運動方程式と連続式を用いる²⁾。レイノルズ応力項にはSGS定数モデル($C_s=0.2$)を用いている。本研究では、水面グリッドは連続式から計算されるグリッド内の平均水位から作成している。計算の水面形を平均水面勾配の直線分布で表すと、図-1のように ξ 方向流速評価断面において水面グリッドと計算の水面にずれが生じる。これを評価するために、グリッド内の流体の占める割合を考慮し、連続式と ξ 方向運動方程式の慣性力項 I_ξ をそれぞれ式(1),(2)で表す。

$$\frac{\partial(dz + \Delta\zeta)\tilde{U}}{\partial\xi} + \frac{\partial d\xi(w + \tilde{\sigma}_z\tilde{U})}{\partial\sigma} = 0 \quad (1)$$

$$I_\xi = \frac{dz_0 + \Delta\zeta_0}{dz_0} \cdot \frac{\partial\tilde{U}}{\partial t} + \frac{dz + \Delta\zeta}{dz} \cdot \tilde{U} \frac{\partial\tilde{U}}{\partial\xi} + (\tilde{w} - w_s) \frac{\partial\tilde{U}}{\partial z} \quad (2)$$

ここで、 $d\xi, dz$:グリッド間隔、 $\Delta\zeta$:計算の水面と水面グリッドの差、であり、下付の0はコントロールボリューム内の平均値を示す。 ξ 方向流速評価断面で計算の水面形は不連続となるため、上流側の流体が移動すると考えて上流側の水位を用いる。河床面においても同様の方法を用いるが、河床面を流体は通過しないと考える、 ξ 方向流速評価断面の河床高は高いほうを用いる。流砂量の計算は、重力と同様³⁾に付加掃流力として圧力分布の影響を考慮した掃流力と斜面上の限界掃流力を用いて平衡流砂量を求め、福岡らが提案した非平衡流砂量式³⁾を解く。限界角以上の勾配をもつ斜面が形成された場合、砂のSlideにより斜面が限界角をとるような流砂量が生じるとしている。流砂の連続式より求めた河床変動速度を河床面のグリッド移動速度とし、河床変動計算と流況計算を連立させている。河床変動計算の初期条件として、実験の河床形状で計算した潜り噴流状態の流れ場(図-4 $t=0s$)を与える。また、河床変動の計算は洗掘孔内のみで行っている。

3. 計算結果

図-2は潜り噴流状態から波状跳水状態へ移行する直前の河床形状の実験結果と計算結果の比較である。実験結果は、計算条件とほぼ同様の水理条件で生じた4回の潜り噴流の結果を示す。堰下流の洗掘現象は非定常性が強く、不安定な現象であるため、実験結果はばらついている。しかし、堰直下の洗掘孔の形状は各実験で概ね等しいことから、潜り噴流状態から波状跳水状態へ移行現象は堰直下の河床形状に支配されていると考えられる。計算結果は洗掘孔下流部の堆積形状が実験値と異なる。これは堆積域頂部において砂が浮遊し、砂の移動距離が大きくなる機構が非平衡パラメータ κ_B ³⁾の算

表-1 実験条件

水路長	8.0 m
水路幅	0.3 m
初期河床勾配	1/166.7
実験流量	0.0072 m ³ /s
下流端水深	0.054 cm
河床砂の粒径	0.8 mm
初期の堰高	0.035 m
堰長	0.1 m

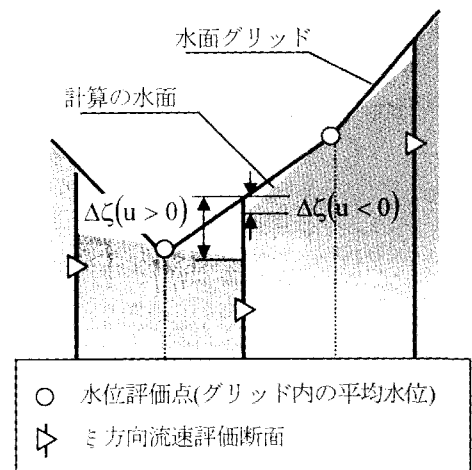


図-1 計算の水面形状の定義

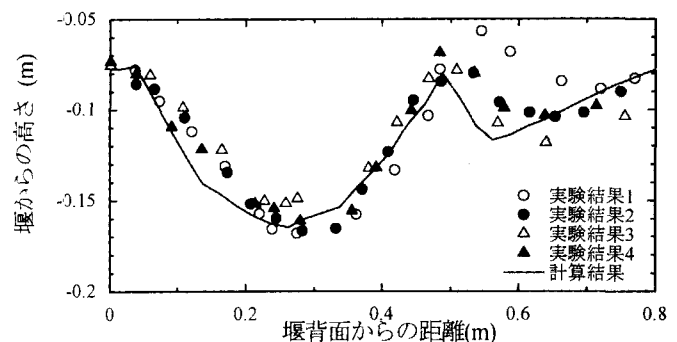


図-2 潜り噴流状態から波状跳水状態へ移行する直前の河床形状

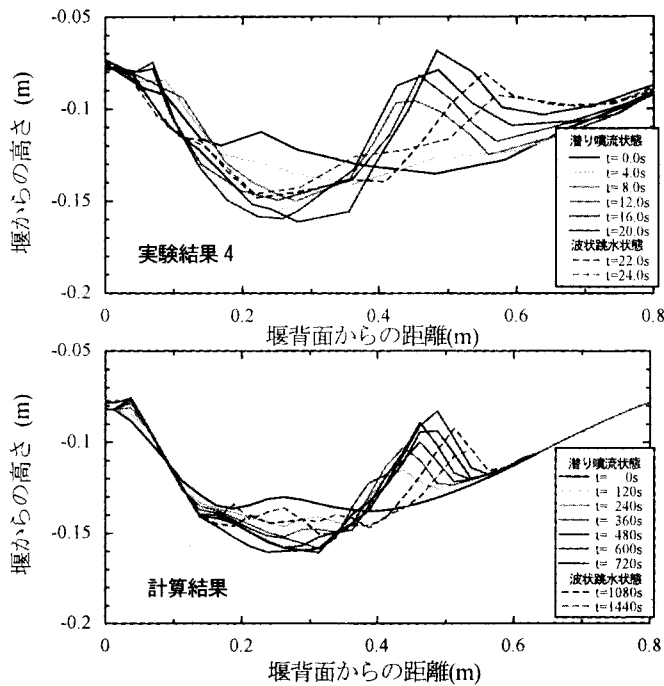


図-3 潜り噴流状態の河床形状の比較

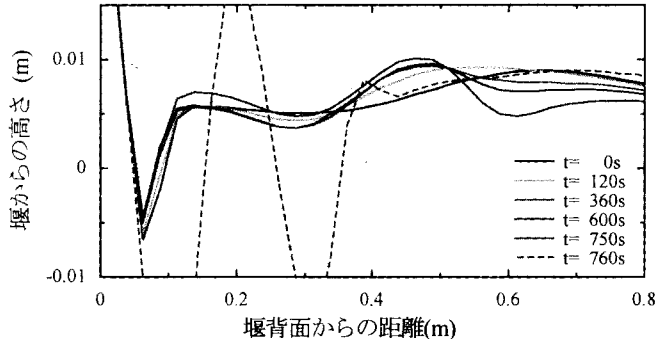


図-4 潜り噴流状態の水面形状の変化(計算値)

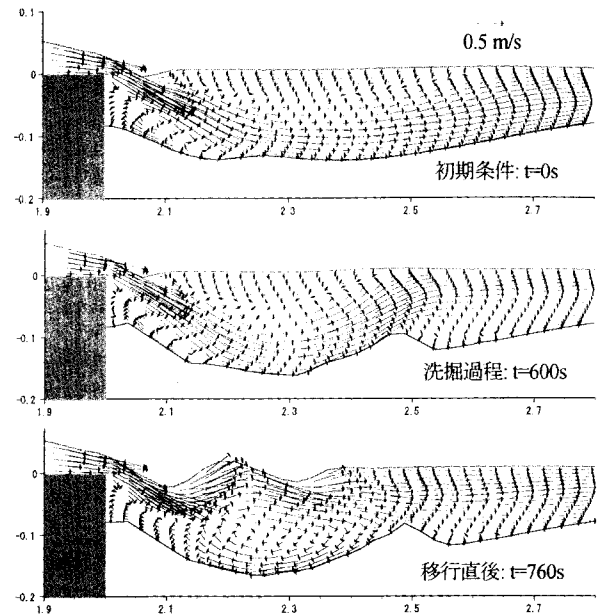


図-5 洗掘孔内の流速分布(計算値)

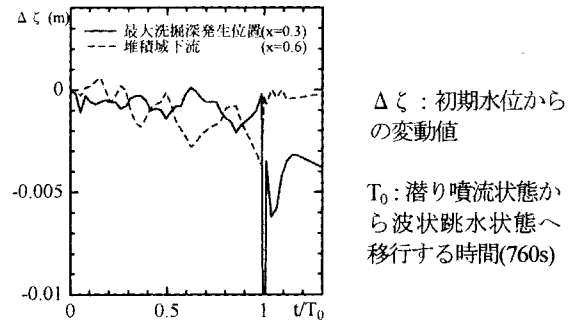


図-6 固定点水位の経時変化(計算値)

定で考慮されていないためである。しかし、計算結果は実験による堰直下の洗掘形状をほぼ再現している。図-3 は潜り噴流状態から波状跳水状態へ移行するまでの河床形状の比較である。実験値は、潜り噴流に移行する時間を $t=0.0s$ としている。波状跳水状態において埋め戻された砂は、潜り噴流に移行した直後に、上下流に輸送される。その後、波状跳水状態へ移行するまで最大洗掘深の位置をほとんど変えずに洗掘、堆積が発達し、移行後、これらは減衰する。計算結果は実験の洗掘孔の発達、減衰過程を概ね説明できている。図-4, 5 はそれぞれ潜り噴流状態から波状跳水状態へ移行するまでの水面形状と洗掘孔内の流れ場の計算結果である。また、図-6 は固定点水位の経時変化である。潜り噴流に移行した直後、水叩き部では河床低下に伴い水位が低下し、最付着点が上流に移動する。これは、河床低下によって再付着点付近の圧力上昇量が小さくなるためである。再付着点の移動はその結果生じる河床変動との相互作用により、図-6 に示す周期的な水面変動を引き起こす。堆積域背後に剥離が生じると、堆積域下流の水位が低下し、河床形状の波形よりもやや遅れた位相をもつ水面形状となる。その後、堆積域と水面の波形はそれぞれ下流、上流に進行し、水面と河床の位相差はほとんどなくなる。同時に、水面の変動幅は大きくなり、洗掘孔内の水位がピークとなるときに流れ場は波状跳水状態となり、洗掘、堆積域を減衰させる埋め戻し過程へ移行する。

4. 結論

本解析モデルは、堰下流の洗掘孔の潜り噴流状態における発達過程と、波状跳水状態における減衰過程を説明できることを示した。そして、堰下流の河床変動とそれに伴う流れ構造の変化を考察した。

参考文献 1) 鈴木幸一, 道上正規, 川津幸治: 床止め直下流部の流れと局所洗掘について, 第26回水理講演会論文集, pp.75-80, 1982. 2) 内田龍彦, 福岡捷二, 山崎幸栄: 二次元水理構造物を越流する流れの数値解析, 水工学論文集, 第47巻, pp.817-822, 2003. 3) 福岡捷二, 山坂昌成: 直線流路の交互砂州, 第27回水理講演会論文集, pp.703-708, 1983.