

段落ち流れの3次元数値シミュレーション

東洋技研コンサルタント(株) 正会員 ○文堂 一樹
鳥取大学大学院工学研究科 正会員 檜谷 治
鳥取大学大学院工学研究科 正会員 梶川 勇樹

1. はじめに

床固め工あるいは護床工下流部の流れは、主として上下流の水位差に依存し、波状跳水流れと潜り噴流流れが発生することが知られている。これらの両流況は、移動床において局所的な洗掘現象を発生させるため、防災上の重要性からも従来より数多くの研究が行われてきた。特に、近年の数値解析的研究では、両流況の移行過程を含む局所洗掘現象について、その再現が可能なまでに発展している¹⁾。しかし、これらの研究の多くは、構造物が河道横断方向へ一様に設置されるとして、河道中央断面を対象とした鉛直2次元モデルによる検討例が殆どである。一方、段落ち流れのように、流れが射流から常流へと遷移する場合、水路幅/水深比により流況が変化することが確認されており²⁾、また、今後の実河川形状への適用の観点からも、鉛直2次元ではなく3次元モデルによる検討が必要になるものと考えられる。そこで、本研究では3次元モデルによる段落ち流れの再現を試みた。

2. 数値計算モデル

本数値モデルでは、座標系に長方形等間隔メッシュのデカルト座標系を採用し、それにより生じる境界条件の問題を複雑境界形状でも滑らかに境界条件を課すことのできる FAVOR 法を基礎式に導入することにより克服する。図-1(a)に FAVOR法における面積率 A_i の定義方向を、またその下にデカルト座標系 (x,y,z) における FAVOR法を導入した3次元の連続式、運動方程式および平面2次元の連続式をそれぞれ示す。ここで、各記号については慣用に従うが、平面2次元連続式における S および L_i はそれぞれ水面格子上の体積率および面積率を示す。計算格子には図-1(b)に示すコロケート格子を採用し、基礎式の離散化には移流項に QUICK 法を、時間積分には Adams-Bashforth 法を適用した。圧力偏差の収束計算にはコロケート格子における C-HSMAC 法³⁾を適用し、圧力計算終了後の更新された流速値を用いて式(3)より水面形を算定した。また、レイノルズ応力の評価には実用性を考慮し、渦動粘性係数による Ω -方程式モデルを採用した。

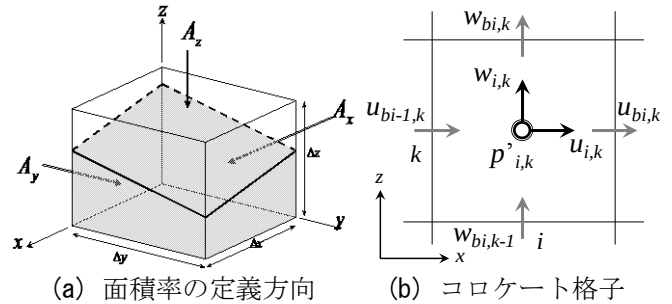


図-1 面積率の定義方向と計算格子

【3次元連続式】…(1)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \{A_{ij} u_j\} = 0$$

【3次元運動方程式】…(2)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V} \left\{ A_{ij} u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{V} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ A_{ij} \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \right]$$

【平面2次元連続式】…(3)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{S} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(L_x \int_{z_b}^{z_b+h} u dz \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(L_y \int_{z_b}^{z_b+h} v dz \right) \right\} = 0$$

表-1 段落ち流れの実験条件

	流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	段落ち高さ $W(\text{cm})$	下流端水深 $h(\text{cm})$
Case1 (波状跳水流れ)	1.068×10^{-2}	10	13.23
Case2 (潜り噴流流れ)			11.30

水路幅 $B=40\text{cm}$, 水路床勾配 $I=1/300$, マニングの粗度係数 $n=0.012$

表-2 段落ち流れの計算条件

流化方向 $\Delta x (\text{m})$	0.015	計算格子数	x	160
横断方向 $\Delta y (\text{m})$	0.02		y	20
鉛直方向 $\Delta z (\text{m})$	0.005		z	45
離散時間 $\Delta t (\text{sec})$	0.001	最小体積率	$V_{\min}$	5

3. 計算条件と境界条件

対象とした実験条件および計算条件を表-1 および表-2 にそれぞれ示す。ここでは、同一流量下で下流端水深を変化させた2caseを実施した。境界条件として、上流端では流量、下流端では所定の水位を与え、側壁は slip 条件、底面では対数則に従う摩擦抵抗を与えた。また、初期条件では下流端を堰上げた状態で水位一定・流速ゼロとし、徐々に下流端水位を所定の水位に低下させると共に、上流端より所定の流量となるまで流量を増加させた。

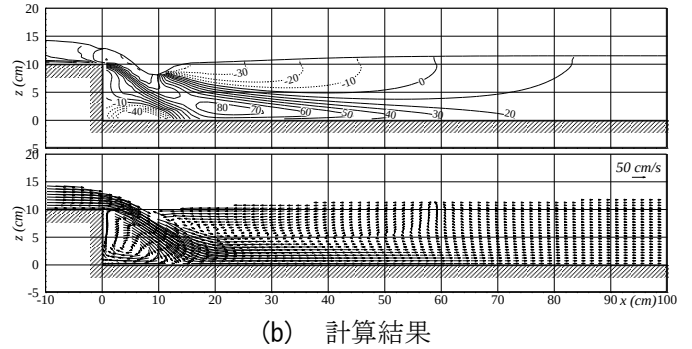
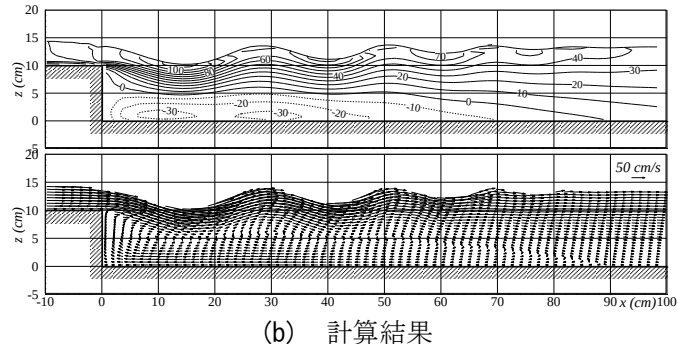
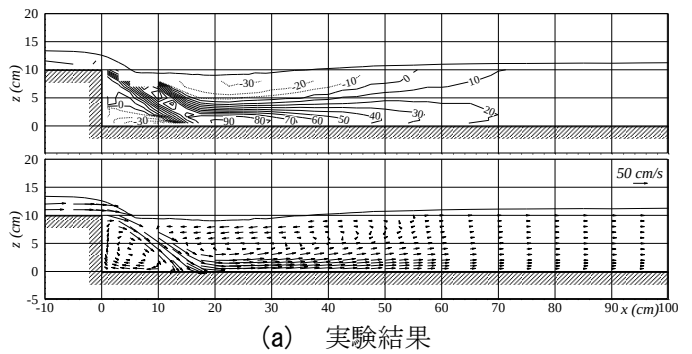
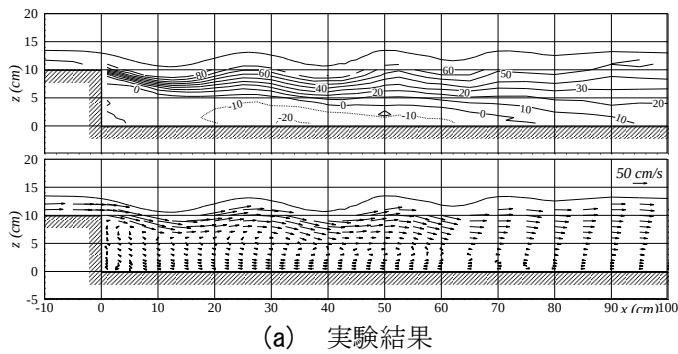


図-2 波状跳水流れの比較 (Case1)

図-3 潜り噴流流れの比較 (Case2)

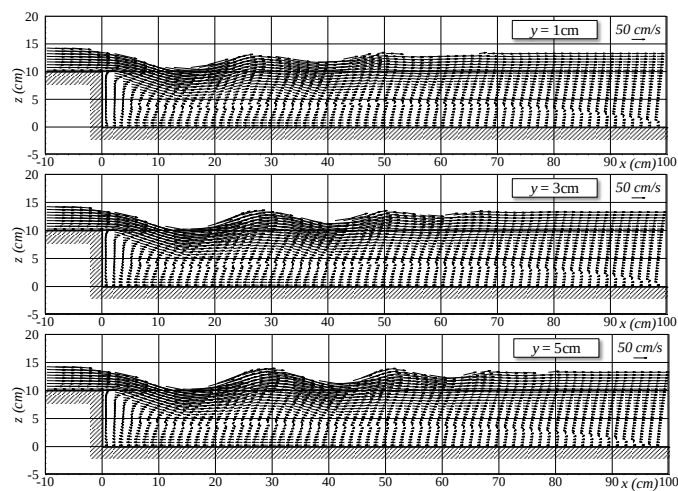


図-4 波状跳水流れの縦断流況 (Case1)

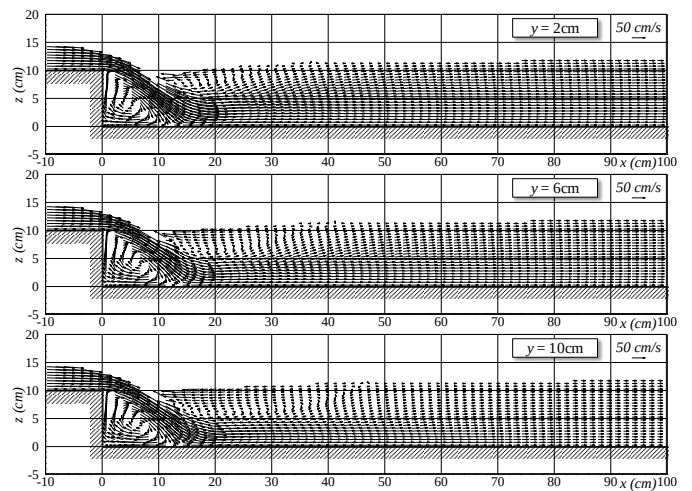


図-5 潜り噴流流れの縦断流況 (Case2)

4. 計算結果と考察

計算結果として、まず、図-2に Case1 (波状跳水流れ) を、図-3に Case2 (潜り噴流流れ) の結果をそれぞれ示す。ここで、実験結果および計算結果は水路中央断面のものを示している。図より、両 Case とも計算結果は概ね実験結果を再現できていることが分かる。図-2 の波状跳水流れでは、水面の波形状や底面付近の逆流領域、および主流の再付着点位置など良好に再現できていることが分かる。一方、図-3 の潜り噴流流れでは、底面付近の主流流速値が実験値に比べて若干小さいものの、段落ち剥離後の主流の加速や底面付近を流下する様子、および水面付近の逆流領域とその穏やかな水面形状など良好に再現できている。

次に、図-4 および図-5 に Case1 および Case2 における各縦断面の流速ベクトル図をそれぞれ示す。まず、図-4 の波状跳水流れについて、壁面近傍では側壁の影響により水面形が中央部に比べて穏やかであり、また底面付近の逆流領域も大きいことが分かる。そして、水路中央部へ向かうに従い明瞭な波形状が表れるとともに、側壁から 5cm 程度でほぼ水路中央部と同様の流況となっている。一方、図-5 の潜り噴流流れでは、側壁近傍における水面の逆流領域が、水路中央部に比べて小さいことが分かる。また、 $x=50\text{cm}$ より下流側を見ると、側壁近傍の方が水路中央部に比べて流速が大きく、図-3(a) に示す様な実験の様子を再現できていることが分かる。

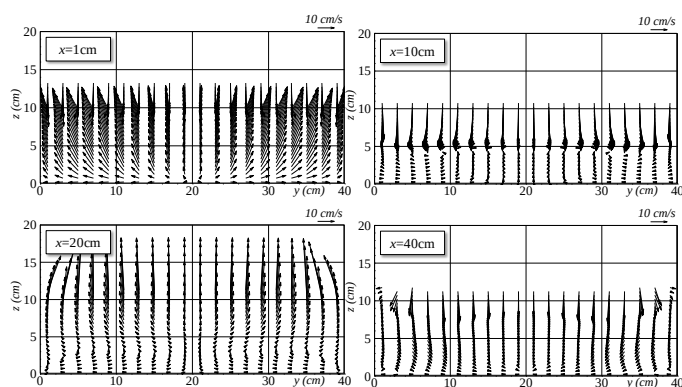


図-6 波状跳水流れの横断流況 (Case1)

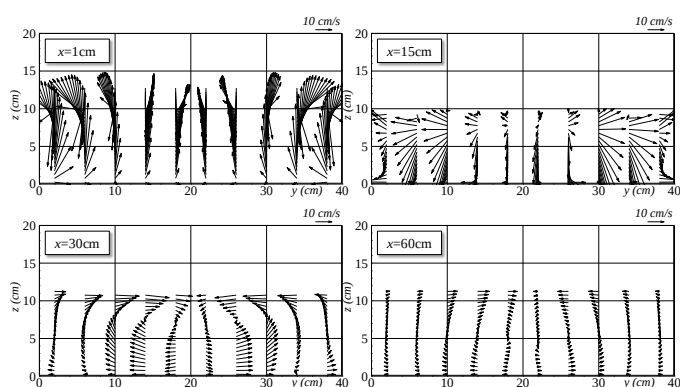


図-7 潜り噴流流れの横断流況 (Case2)

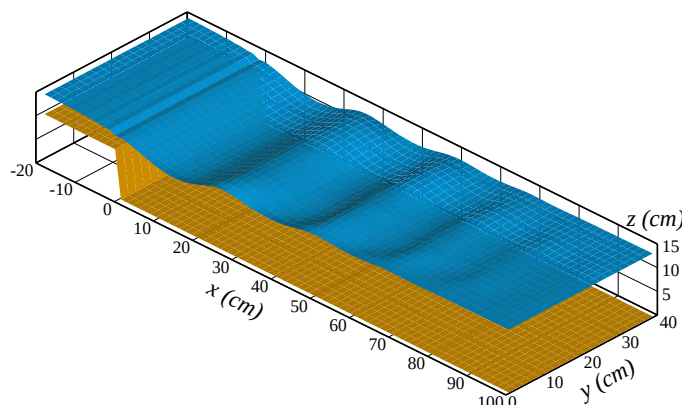


図-8 波状跳水流れの水面形俯瞰図 (Case1)

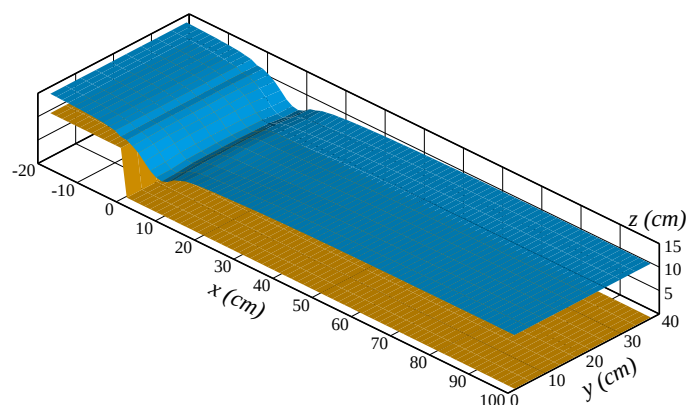


図-9 潜り噴流流れの水面形俯瞰図 (Case2)

最後に、図-6 および図-7 に Case1 および Case2 における横断流速ベクトル図をそれぞれ示す。まず、図-6 の波状跳水流れでは、段落ち直下流部で底面付近の逆流が段落ち部に衝突し、側壁方向へと拡散していることが分かる。そして、それ以降の下流側では大きな横断方向流速は発生していないものの、底面付近で水路中央部へと向かう弱い流れが発生している。一方、図-7 の潜り噴流流れでは、段落ち直下流部で底面付近の逆流が側壁方向へと拡散する様子は波状跳水流れとほぼ同様であるものの、 $x=15\text{cm}$ 以降の主流再付着後は、底面付近の主流が側壁方向へと拡散し、水面付近の逆流は水路中央部へと流れ込んでいることが分かる。そして、水面の逆流領域が終わる $x=60\text{cm}$ 以降も同様の流況が継続していた。このように、水路横断方向に一樣形状を持つ段落ちであっても、内部では 3 次元的な流況が発生しており、したがって、水路幅/水深比などのアスペクト比によっては移動床上における洗掘形状を鉛直 2 次元モデルで十分に再現できない可能性が指摘される。また、図-8 および図-9 は各 Case における水面形俯瞰図を示しているが、実験時の様子を概ね再現できているものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、3 次元モデルにより段落ち下流部における流況の再現を試みた。その結果、本数値モデルにより波状跳水流れおよび潜り噴流流れとも概ね良好に再現できることを示した。さらに、両流況時における内部流況について検討を行い、アスペクト比によっては鉛直 2 次元モデルによりその洗掘形状を再現できない可能性を指摘した。今後は、河床変動モデルを導入し局所洗掘現象への適用を試みるとともに、現地への適用性について検討を行う予定である。

【参考文献】1) 梶川勇樹, 道上正規, 檜谷治, 中村真郷: 段落ち下流部における常射流混在流れによる局所洗掘現象の数値計算, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.888-888. 2) 後藤浩, 安田陽一, 大津岩夫: 波状跳水の形成条件に対するレイノルズ数・アスペクト比の影響について, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.299-304. 3) 牛島省, 禰津家久: 移動一般座標系を用いたコロケート格子による自由水面流れの数値解析手法, 土木学会論文集, No.698/II-58, pp.11-19, 2002.