

II-152 開水路流の河床形状変化に対する応答に関する数値計算

北海道開発庁 正員 ○神谷 昌文
 名古屋工業大学 正員 富永 晃宏
 名古屋工業大学 学生員 藤原 和宏

1. まえがき 堰や床止めといった河川構造物周辺の局所洗掘の機構やその生態系に及ぼす流れの影響を検討するためには、河床条件の急変を伴う流れの構造を明らかにすることが必要となる。河床条件の急変部を有する流れ場においては水面形の変化は避けられない事実であることから、本研究では、河床条件の急変を伴う開水路流れで、自由水面をもつ定常流を簡易的に数値解析する方法を検討した。代表的な急変流として段落ち流れを中心に実験との比較を行いその有効性を検証した。さらに、この結果をもとに各種水理条件の下で数値実験を行った。

2. 数値計算法 本研究では工学的応用という点を重視し、コスト削減のため大型計算機に頼らず計算が可能で、輸送式中の係数の普遍性、予測精度、経済性（計算量の少なさ）等の面で比較的優れており、十分実用的なモデルである $k - \varepsilon$ 乱流モデルを採用し、直交格子形において有限体積法（FVM）を用いることにより2次元乱流構造の数値解析を行おうとするものである。壁面の境界条件としては、レイノルズ数が高い場合によく使われる壁法則を用いた。鉛直2次元の開水路乱流場の基礎方程式として、連続の式、レイノルズ方程式、乱れエネルギー k 、エネルギー散逸率 ε の輸送方程式を用いた、 k 、 ε に関する定数は標準型の値を用いた。基礎方程式は式（1）の一般保存式で表される。ここで、 ϕ は変数であり、 S_ϕ は生成項、 Γ は拡散係数であり、それぞれの式について表1のように表される。

境界条件は壁面に関しては壁関数を適用し、開水路流の水面軸上では流れが対称となることから、図1に示す座標系において式(2)の対称条件が課せられる。

水面形の補正法は次のように行った。自由水面のコントロールボリューム（S格子）の圧力を P_s とするとき水深補正值は $\Delta h = P_s / \rho g$ となるので、これより水面形状を更新し、新たにセルを識別しその計算格子で収束するまで計算を行い $P_s = 0$ となるまで水面形状の更新を行う。セルの識別の例を図2に示す。水面形更新を伴う流れの計算の手順は図3のようになる。

a a a a a a a a a a a a a a a a	a... air
a a a a a a a a a a a a a a a a	w... water
i s s s s s s a a a a a a a a a a	s... water surface
i w w w w w w s a a s s s s s s	i... water in
i w w w w w w w s s s w w w w	o... object
b b b b w w w w w w w w w w w w	b... object bound
o o o o b w w w w w w w w w w w	

図2 セルの分類

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi U - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi V - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = S_\phi \quad (1)$$

表1 支配方程式

Equation	ϕ	Γ	S_ϕ
Continuity	1	0	0
x-momentum	U	$\nu_s + \nu$	$\nu \left(\sin \theta - \frac{dh}{dx} \cos \theta \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P'}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial V}{\partial x} \right)$
y-momentum	V	$\nu_s + \nu$	$-\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P'}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial V}{\partial y} \right)$
k	k	ν_s / σ_s	$G - \varepsilon$
ε	ε	ν_s / σ_s	$\frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \varepsilon)$

$\nu_s = C_s \cdot k^{2/3} / \varepsilon, G = \nu_s / \{2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2\}, \sigma_s = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_s = 0.08$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial \zeta} \right|_{y=h} = 0, \left. \frac{\partial k}{\partial \zeta} \right|_{y=h} = 0, \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial \zeta} \right|_{y=h} = 0 \quad (2)$$

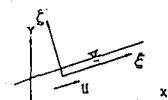


図1 水面に沿った座標系

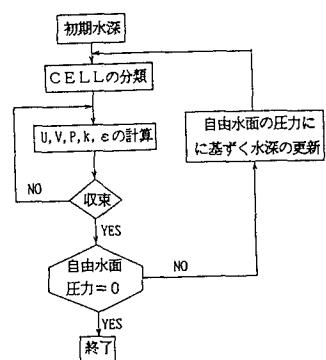


図3 計算フロー チャート

3. 段落ち流れについて 水面変化を伴う流れの極端な例として、段落ち高さや流量あるいは下流側水深の条件によって流況が著しく変化する段落ち流れについて数値計算を実行し、実験結果と比較検討した。

実験条件： 実験水路は幅30cm、長さ7.5mの長方形断面水路で、その中に高さ2cmの塩ビ製の板を設置し、段落ちを形成した。流速計はピト管とカットフィルムを用い、サンプリング周波数100Hzで計測時間は1点につき41秒として、計測点は水路の中央にとった。実験条件は特に下流側水深に注目し、単位幅流量 $q=0.017\text{m}^2/\text{s}$ 、水路勾配 $S=0.001$ で、段落ち部の下流3.5mで堰を設けることにより下流側フルード数を $Fr=1.86$ (case1), 0.5(case2), 0.4(case3)の3通りに変化させ、3種の流況を発生させた¹⁾。

水面形変動が比較的小さな場合： case3では、初期水面形として $x=2\text{m}$ で実測水深をとり水路底に平行な水面形を与え計算を実行した。このケースでは、図4に示すように断落ち部で若干ずれるものの水面形を全般的によく再現している。図5は計算による段落ち下流部の流況を示したものであるが波状跳水のような挙動を示している。また、段落ち後流域の大きさは段落ち高さの8倍程度となり中川、福津²⁾の結果より大きくなるが、本実験結果と一致する妥当な結果が得られた。

水面形変動がかなり大きな場合： case1, case2のような水面形変動が大きく急激なケースについては、全体を平行水面として計算を出発させると圧力の不安定から発散を招きやすい。したがってこの場合は、初期水面形として実測値より推測される水面形を与え計算を実行させた。図6のベクトル図は計算による断落ち下流部の流況を示したものであるが、下流端も射流となる(a)では主流水脈が鉛直下向きに湾曲する流況をよく再現している。このケースでも主流水脈と水路床の間に後流域が形成されるが、後流域は、断落ち高さの2~3倍程度になり実験値の後流域の大きさとほぼ一致する。しかし、(b)の下流端フルード数 $Fr=0.5$ の場合で完全跳水を伴う流れでは、跳水を伴う流れのために水面形状は非常に不安定となり、水面形状は再現できなかった。また水面での逆流域も現れないが水面近くで減速する傾向は認められ、底面近傍の流れ構造の変化過程は全体としてかなり再現できたといえる。

4. 結論と展望 水面形変動を考慮した流況の予測が本研究で用いた簡便な方法によっても比較的水面形変動が小さな場合には水面形を含めた流況の予測が十分可能であり、水面形変動がかなり大きな場合でも初期水面形を与えることによりある程度の流況の予測が可能であるといえる。また、図7に示したような広頂堰やトレーンチを過ぎる流れにおいても水面形の変化を含めて妥当な計算結果が得られたと考える。

参考文献 1)鈴木、道上、檜谷、Ibrahim: 第29回水理講演会論文集、pp. 615-620, 1985.

2)Nakagawa, Nezu: J. Hydraulic Research, vol. 25(1), pp. 67-88, 1987.

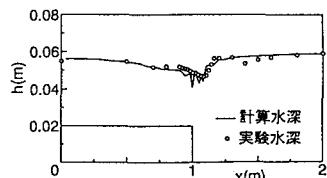


図4 水面形の比較

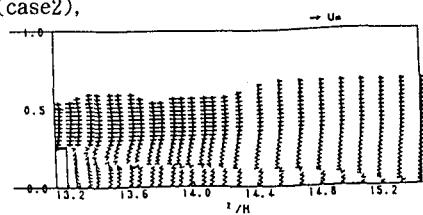


図5 流速ベクトル図 (case3)

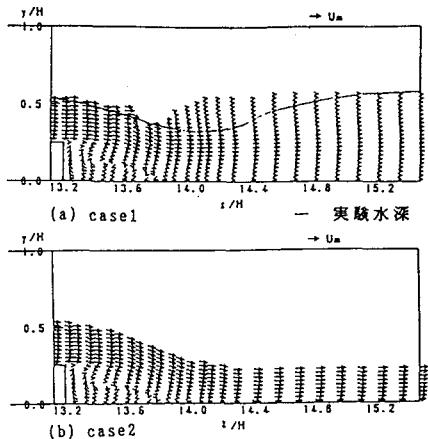


図6 流速ベクトル図 (case1, 2)

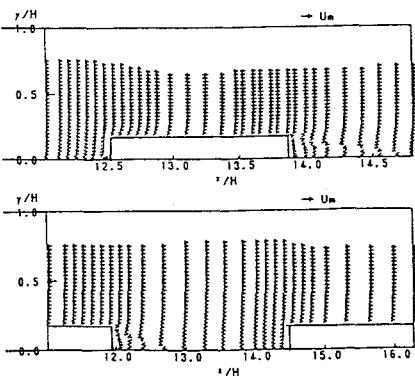


図7 流速ベクトル計算例