

複雑な流れ場を有する沈砂池内の流動を評価するための準三次元洪水解析法の開発

中央大学研究開発機構 正会員 ○後藤 岳久
中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 目的

斐伊川放水路の分流堰下流には沈砂池が設けられ、実洪水に対する沈砂池の機能評価が求められている。そのためには、沈砂池内の流動と土砂輸送機構を適切に評価する解析法が必要である。岡田・福岡ら¹⁾は準三次元一般底面流速解析法(GBVC法)²⁾により、斐伊川の河床波の発達・変形を伴う放水路分流区間の河床変動や流量配分、土砂流入量を明らかにしている。これを用いて、沈砂池内の流動を準三次元洪水解析法の枠組みで評価出来れば、河道と分水路および沈砂池を一体的に検討することが可能になる。本研究では、沈砂池内の流動や堆砂を評価するための第一段階として、流れの解析精度を高めた準二層一般底面流速解析法を構築し、パッフル板を有する沈砂池流れの実験³⁾に適用し、有効性と課題について検討した。

2. 準二層一般底面流速解析法の概要

内田・福岡の一般底面流速解析法(GBVC法)²⁾では、式(8)から底面流速 u_{bi} が計算される。流速鉛直分布・渦度鉛直分布はそれぞれ三次式・二次式で定義され、流速・渦度分布の変形の影響は式(3),(4)における相互相関項を介して流れ場に反映される。沈砂池内では、図-1に示すように沈砂池下流端での段上がりにより、下流端堰高より下層の渦が沈砂池内に留められ、二層的な渦度鉛直分布が形成される。このような沈砂池内の二層流的な流れ場について、本研究では、流速や渦度鉛直分布の変形の影響が反映される水深積分渦度方程式(式(4))の相互相関項の精度を高めることで表現する。そこで、下流端堰高より下層渦度 Ω_{di} の水平・上層方向への輸送・伸縮・回転を式(10)で計算し、下層渦度 Ω_{di} の発達・減衰について評価する。下層渦度 Ω_{di} の発達・減衰の影響は、新たに三次式で定義した渦度鉛直分布 $\omega_i(\eta)$ から計算される相互相関項(式(12))を介して水深積分渦度方程式(式(4))に反映され、流れ場全体に反映される。ここで、式(12)の a, b, c, d は渦度鉛直分布の係数であり、水面での渦度が0、底面から水面および堰高までの渦度の積分値がそれぞれ $\Omega_i h$ 、 $\Omega_{di} h_d$ (h_d :下層水深)であること、底面渦度が ω_{bi} であることの条件から決定される。底面渦度 ω_{bi} は三次式の流速鉛直分布(式(9))を鉛直方向微分して評価する。

$$\int_0^1 \omega'_i u'_j d\eta = -\Delta u_i (a_j/28 + b_j/15 + c_j/10) - \delta u_i (a_j/14 + b_j/15 + c_j/20), \quad \omega'_i = \omega_i(\eta) - \Omega_i, u'_i = u_i(\eta) - U_i \quad (12)$$

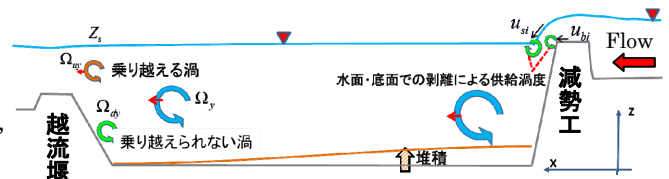
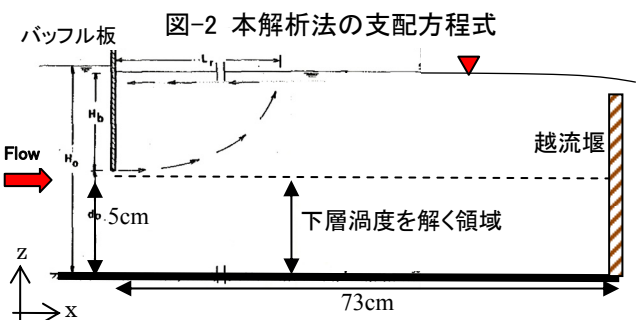


図-1 沈砂池内の流動の模式図

連続式	水深積分運動方程式	GBVC法
$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_j h}{\partial x_j} = 0$ (1)	$\frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j h}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial h p}{\partial x_i} - g h \frac{\partial z_i}{\partial x_i} - \frac{p_i}{\rho} \frac{\partial z_i}{\partial x_i} - \frac{\tau_{bi}}{\rho} + \frac{\alpha(\tau_{ij} + u'_i u'_j)}{\rho \alpha x_j}$ (2)	
水深積分渦度方程式	Ω_i	各方程式の変数
$\frac{\partial \Omega_i h}{\partial t} = u_{si} \omega_{ss} - u_{bi} \omega_{bs} + C_{p\omega} V_{ib} \left(\frac{\omega_{bei} - \omega_{bi}}{h} \right) + \frac{\partial h D_{ai}}{\partial x_j}$ (3)	$D_{aij} = -U_j \Omega_i + U_i \Omega_j - \frac{\partial u'_i u'_j}{\partial x_j} + \frac{v_i}{\sigma_\omega} \left(\frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j} \right)$	渦度・流速鉛直分布の影響が反映される項(相互相関項)
水表面流速の運動方程式	u_{si}	
$\frac{\partial u_{si}}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} = g \frac{\partial z_i}{\partial x_i} + P_{si}$ (4)		
鉛直方向流速に関する方程式	W	
$W h = h \left(\frac{\partial z_m}{\partial t} + U_s \frac{\partial z_m}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ h^2 (k_s \Delta u_k + k_i \delta u_k) \right\}$ (5)		
水深積分鉛直方向運動方程式	dp	渦度の鉛直分布を高次化した影響
$\frac{dp_b}{\rho} = \frac{\partial W h}{\partial t} + \frac{\partial W U_j h}{\partial x_j} + \frac{\partial h \tau_{ij}}{\partial x_j}$ (6)		
$dp = dp_b h, \eta = (z_i - z)/h$ (7)		
底面流速の定義式	u_{bi}	流速鉛直分布
$u_{bi} = u_{si} - \epsilon_{ij} \Omega_j h - \left(\frac{\partial W h}{\partial x_i} - w_s \frac{\partial z_i}{\partial x_i} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right)$ (8)	$u_i = U_i + \Delta u_i (12\eta^2 - 12\eta + 1) - \delta u_i (4\eta^2 - 3\eta^2)$	$\eta = (z_i - z)/h$
下層渦度方程式	Ω_{di}	新たに追加した方程式
$\frac{\partial \Omega_{di} h_d}{\partial t} = u_{zvi} \omega_{zvi} - u_{bi} \omega_{bs} - \frac{\omega_{zvi} w_{zvi}}{h} + C_{p\omega} V_{ib} \left(\frac{\omega_{bei} - \omega_{bi}}{h} \right) + \frac{\partial h_d D_{aij}}{\partial x_j}$ (10)		
水平方向移流項	D_{aij}	鉛直方向移流項
$D_{aij} = -U_j \Omega_i + U_i \Omega_j - \frac{\partial u'_i u'_j}{\partial x_j} + \frac{v_i}{\sigma_\omega} \left(\frac{\partial \Omega_{di}}{\partial x_j} \right)$		
渦度鉛直分布	$\omega_i(\eta)$	
$\omega_i(\eta) = a\eta^3 + b\eta^2 + c\eta + d$ a, b, c, d : 係数		

図-3 Abdel-Gawadらの実験条件(実験R-2)³⁾

キーワード 沈砂池, 渦度分布, 2層流, 水深積分モデル

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31214 中央大学研究開発機構 TEL 03-3817-1615

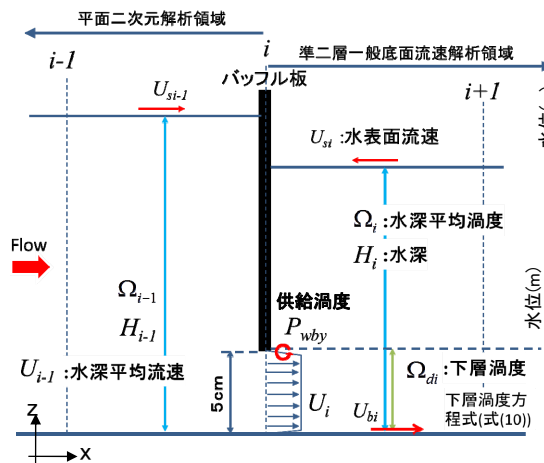


図-4 本解析におけるバッフル板の処理

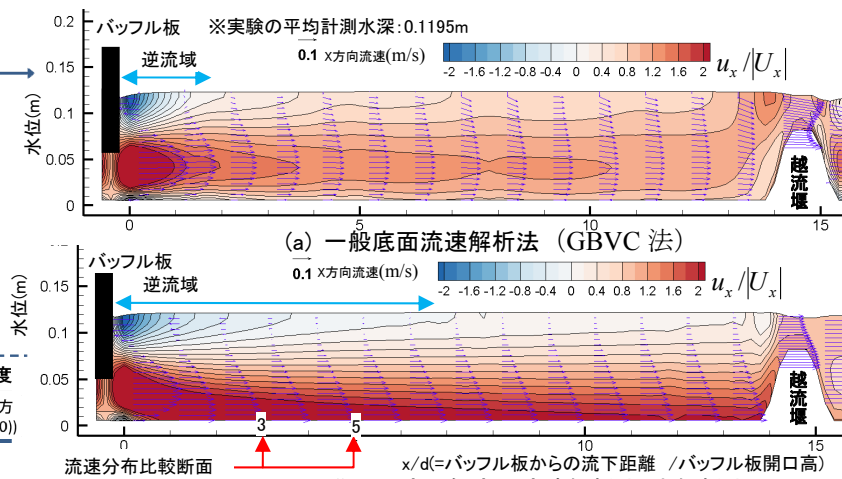


図-5 一般底面流速解析法と本解析法の流れ場の比較

3. Abdel-Gawad らの実験³⁾による本解析法の検証

Abdel-Gawad らはバッフル板を設置した沈砂池流れの実験を行い(図-3), これに Strip Integral 法を適用し, 実験結果と解析結果を比較検証している³⁾. 本研究では, バッフル板開口部からの噴流流れが二層流的な流れ場になることから, 構築した準二層流一般底面流速解析法を彼らの実験³⁾に適用し比較検証する. Abdel-Gawad らの実験水路の長さは 100cm, バッフル板の位置は上流から 23cm, バッフル板の開口高は 5cm である. 単位幅流量は $109.4\text{cm}^2/\text{s}$ であり, 水路幅については記載がなかったため, 本解析では水路幅を 10cm として流量 $1,094\text{cm}^3/\text{s}$ を与えた. 下流端の越流堰高は, 図から判読して 8.1cm を与えた. 流速分布はレーザードップラー流速計によって計測された. 対象実験が鉛直二次元(x-z)的な流れであること, 本論文では, 下層渦度方程式の回転項の離散化が適切に評価できていないことから, 式(10)の下層渦度方程式については y 方向渦度のみを考慮し, 圧力の非静水圧成分も考慮していない. これらの離散化の評価法については, 今後の課題とする. バッフル板断面では, 不透過面積とバッフル板下端での剥離渦の供給を水深積分渦度方程式と下層渦度方程式に考慮した(図-4). バッフル板下端からの供給渦度 P_{wby} は, バッフル板断面で流速分布が一様化されることから, 次のように表す($P_{wby} = -|1/2 U_x| \cdot U_x$). 図-5 は本解析法と GBVC 法における流速鉛直分布と x 方向流速のコンター図を示し, 図-6 は x/d (バッフル板からの流下距離/バッフル板開口高)=3, 5 における流速鉛直分布の解析結果と測定値の比較を示す. GBVC 法はバッフル板下流の水面付近の逆流域を小さく計算しているが, 本解析法は $x/d=3, 5$ における水面付近の逆流域や $z/h>0.2$ の流速分布をほぼ説明している. これは, 本解析では下層渦度を計算することにより, 図-7 に示すようなバッフル板開口高より下層の渦度が発達し流速分布が変形する機構を取り込んでいるためである. 一方, 本解析法では, 底面流速が計測値よりも大きく計算されている. これは, 渦層内 δ_z の流れを平衡状態と仮定しているため, 境界層の発達に伴い流速分布が形成される噴流場での流速分布の発達機構を適切に評価できていないためである. 従って, 渦層内の流れの非平衡性を考慮した非平衡粗面抵抗則⁴⁾の導入が必要である.

4. まとめ

本研究では沈砂池内の流動や土砂堆積を評価するための第一段階として, 渦度鉛直分布の精度を高めた準二層一般底面流速解析法を構築した. 本解析法をバッフル板のある沈砂池流れの実験³⁾に適用し, 下層で渦度が発達するような二層流的な流れ場において, 本解析法の有効性を示した. 一方, 噴流場における底面付近の流速分布を適切に評価するためには, 渦層内の流れの非平衡性を考慮した非平衡粗面抵抗則⁴⁾の導入が重要であることが分かった.

参考文献 1) 岡田, 大吉, 福岡: 網状砂州河道における大規模洪水時の河床変動, 河川技術論文集, 第 19 巻, 2013. 2) 内田, 福岡: 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法, 水工学論文集, 第 56 巻, 2012. 3) Abdel-Gawad & McCorquodale: Strip Integral Method Applied to Settling Tanks, J. Hydraul. Eng., Vol.110(1), 1984. 4) 内田, 福岡: 非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面流速解析法の導出と局所三次元流れへの適用, 土木学会論文集 B1, Vol.71, No.2, 2015.