

水深平均流速場を用いた開水路流の三次元構造の推定法

東京建設コンサルタント

広島大学

広島大学

正会員

正会員

フェロー会員

○八木郁哉

内田龍彦

河原能久

1. 背景と目的

平成30年7月豪雨における広島県内の河川の現地調査結果では、河岸侵食の8割以上が湾曲部で発生し、その他の直線箇所での河岸侵食被害は、段落ち部や橋脚周辺などの構造物周辺において発生していたことが示された¹⁾。また、著者ら¹⁾は、太田川流域の三篠川で準三次元解析を用いて、洪水時の乱れエネルギーを計算し、河岸侵食箇所では乱れエネルギーが大きいことを明らかにした。このことから、河岸侵食発生箇所では、流れの三次元性が大きくなり、水面変動や乱れエネルギーが大きくなると考えられるため、流れの三次元場を推定することは重要と考えられる。

本研究では、一般に広く用いられている二次元解析による水深平均流速場から三次元流れを推定する方法を開発し、湾曲水路において妥当性を検証することを目的とする。

2. 解析方法・条件

本研究の解析モデルを示す。湾曲部では二次流が発生し、流速鉛直分布は等流状態から変形する。これは、一次的には底面せん断力により生産される水平方向渦が、流速の平面分布によって伸縮・回転することで生じると考える。水深平均流速場と三次元流速場の関係を検討するために、準三次元解析法であるSBVC法²⁾を用いる。SBVC法は大きなスケールの流れの解析に適用できる水深積分モデルの枠組みで、水深平均渦度方程式を解くことで流れの三次元性を考慮することができる。底面流速は渦度、水表面流速および鉛直方向流速を用いて式(1)で表し、これらに関する方程式と水深積分流速場の基礎方程式が連立して解かれる。

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3} \Omega_j h \quad (1)$$

ここに、 $i, j=1, 2$ であり、 (x_1, x_2) は水平 (x, y) 方向と定義され、 u_{bi} , u_{si} : x_i 方向の底面流速、水表面流速、 ε_{ij3} : Levi-Civita 記号、 Ω_j : x_j 方向の水深平均渦度、 h : 水深である。また、流速鉛直分布は、

$$u_i' = u_i - U_i = \frac{\delta u_i}{3} (1 - 3\eta^2) \quad (2)$$

$\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$, $\eta = z - z_s / h$, z_s : 水位、 U_i : x_i 方向の水深平均流速である。水深平均渦度は水深積分渦度方程式(3)で算出される。

$$\frac{\partial \Omega_i h}{\partial t} = ER_{\sigma i} + P_{\sigma i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(h D_{\omega ji} + \frac{v_i}{\sigma_\omega} \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

ここで水深積分渦度方程式の非定常項と拡散項を省略し、二次の流速鉛直分布をもちいることによって(4)式が導かれる。

$$P_{\sigma i} = \varepsilon_{j i 3} \left\{ \delta u_k \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \left(U_k - \frac{\delta u_k}{3} \right) \frac{\partial \delta u_j}{\partial x_k} \right\} \quad (4)$$

一方、生産項については平衡状態の渦度を等流状態の対数分布則で表し、底面の渦度を摩擦速度に対応する底面の渦度とすれば渦度の生産項を(5)式のように表される。

$$P_{\sigma i} = \varepsilon_{j i 3} \frac{2C_{\rho\omega} v_{tb}}{h^2} \left(1 + 2 \frac{C_b}{\kappa} \right) \left(\frac{3C_b}{\kappa + 2C_b} U_j - \delta u_j \right) \quad (5)$$

式(4)、(5)から式(6)が導かれる。

$$\delta u_i = \frac{3C_b}{\kappa + 2C_b} U_i - \frac{\kappa}{\kappa + 2C_b} \frac{h^2}{2C_{\rho\omega} v_{tb}} \left\{ \delta u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \left(U_j - \frac{\delta u_j}{3} \right) \frac{\partial \delta u_i}{\partial x_j} \right\} \quad (6)$$

式(6)の右辺の第一項は等流の流速分布を表した式であり、右辺の二項目以降は等流からのずれを生み出す項である。式(6)には右辺にも δu が含まれており、水深平均流速場 U_i から式(6)を数値的に解くために、

キーワード BVC法, 流れの三次元性, 河岸侵食

連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1 広島大学大学院工学研究科 社会基盤環境工学 専攻事務

Tel 082-424-7821

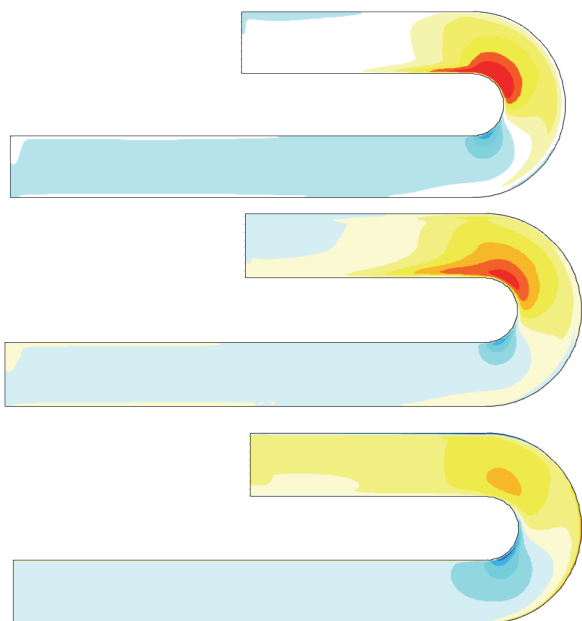


図-1 水深平均流速場からのずれの大きさ
(Top : 2D analysis model, Middle : SBVC analysis model,
Bottom : SBVC calculated value)

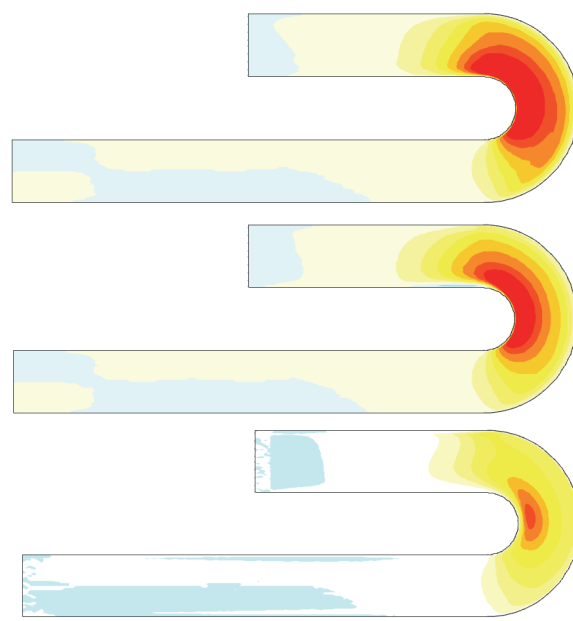


図-2 二次流成分
(Top : 2D analysis model, Middle : SBVC analysis model,
Bottom : SBVC calculated value)

式(6)を以下のように変形した。

$$\delta u = F(\delta u, U) \quad (7)$$

$$\delta u^N = \delta u^{N-1} + \alpha \left(F(\delta u^{N-1}, U) - \delta u^{N-1} \right) \quad (8)$$

ここで、 $\delta u^0=1$ を等流のときの底面と水面の流速差とすれば、水深平均流速場 U_i から、式(8)の繰り返し計算により式(6)の解を得ることが出来る。

3. 解析結果と考察

平面二次元解析を用いて本モデルで算出したもの、SBVC2 の水深平均流速の結果を用いて本モデルで解析したもの及び SBVC2 から直接算出したものの等流状態からのずれの大きさを図-1、二次流方向のずれの大きさを図-2 に示す。2D 及び SBVC を用いて本モデルで求めた、二次流方向の等流からのずれの最大を示す場所は、SBVC2 から直接算出して求めた結果と比較したときに概ね一致している。しかし、ずれの絶対値の最大値は比較した 2 つのパラメータのすべてにおいて、本モデルが SBVC2 から直接出した結果に比べてやや大きい。これは本モデルを導出する際に水深積分した渦度方程式の拡散項を無視したことが原因であると考えられる。2D から推定した場合は SBVC の場合に比べて若干大きくなっている。この原因については、二次元解析は等流の流速鉛直

分布を用いるのに対して、SBVC2 は二次の流速鉛直分布を仮定する。また二次の流速分布を用いる場合には流速を渦度の影響を考慮して計算することや、乱流運動による水深平均のせん断力を求める際にも先ほどの仮定が効くと考えられる。そのため、二次元解析の場合には水深平均渦度の影響が大きくなるような箇所ですれが生じると考えられる。

4. 結論

本研究では水深積分モデルを使って導出した本モデルの有効性を湾曲水路で SBVC2 および平面二次元解析と比較した。以下に本研究の主要な結論を述べる。

- ・ 水深積分した渦度方程式の非定常項を省略し、二次の流速分布関数を仮定することによって、二次元の枠組みから三次元流れを特定できる近似式を開発した。
- ・ 近似式を用いて、水深平均流速場から流れの三次元場が捉えることができることを示した。

参考文献

- 1) 八木郁哉・内田龍彦・河原能久：大規模洪水時における河岸侵食箇所の検出法，河川技術論文集，第 25 巻，2019
- 2) 内田龍彦，福岡捷二：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(水工学)Vol. 71, No.2, pp. 43-62, 2015.