

(Ⅱ-19) 人工ワンド内の流れ場の2次元数値解析

東京大学大学院 学生員 中川研造
東京大学 正員 河原能久

1. はじめに

本研究で取り扱う人工ワンドとは複断面河道の高水敷を一部掘り込んで造成する淀み部のことである。人工ワンド内や周辺部の流れに関する研究は数少ないが、低水時にはワンド内に大きな循環流が形成されることや、平均流速は水深方向にはあまり変化しないことなどが実験的に確認されている。また、ワンドの幾何学的形状や開口部の形状がワンド内の流れのパターンに強く影響することも計測されている。ここでは低水時のワンド内の流れ場を浅水方程式と水深方向に平均した $k-\epsilon$ モデルを用いて解析した結果を報告する。

2. 基礎方程式と数値解析法

解析対象とする人工ワンドの形状を図-1 に示す。ワンド内の流れは本来3次元であるが、低水時の時間平均流速に着目すれば多くの位置において水深方向の変化は小さいので、水深方向に平均した平均流速分布の再現を試みる。未知量は水深 h ，水深平均した流速 u, v ，およびレイノルズ応力を算出するために必要な水深平均の乱れエネルギー k ，エネルギー散逸率 ϵ である。基礎方程式を表-1 に示す。

基礎方程式は有限体積法で離散化され、SIMPLE アルゴリズムを用いて解かれた。境界条件として計算領域の上流端で平均流速には実験結果を、乱流量には十分発達した流れでの計算値を指定した。下流端では未知量の流下方向の変化をゼロとした。固体壁では壁関数法を用い、壁面まで流れ場を解くことはしていない。収束の判定基準は連続式と運動量式の無次元化誤差が 10^{-3} 以下になることとした。

3. 解析結果と考察

実験では正方形のワンドの開口部の形状を系統的に変化させ、それぞれについて流速分布と水深とを測定した。実験条件の一部を表-2 に示す。流速測定には2成分電磁流速計を、水深測定には容量式波高計を使用した。

図-2 は実験-1 に対する平均流速ベクトルを比較したものである。実験における大きな循環流の強さや中心位置を計算結果が良好に再現している。

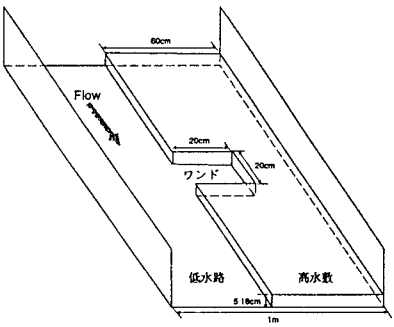
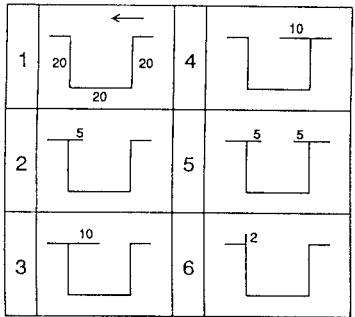


図-1 解析対象

表-2 実験条件



No	1	2	3	4	5	6
ワンド内水深(cm)	4.63	3.54	3.45	3.38	3.48	3.52
Re	12200	7200	7200	7100	7600	7400

表-1 基礎方程式

連続式	$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0$
運動量式	$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(-\tau_{bx} + \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} \right)$ $\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(-\tau_{by} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} \right)$
有効応力	$T_{ij}/\rho = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad \nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$
k 方程式	$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uk) + \frac{\partial}{\partial y}(vk) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P_k + P_{kv} - \epsilon$
ϵ 方程式	$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\epsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(v\epsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + P_\epsilon + P_{\epsilon v} - c_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k}$

図-3では実験-2について平均流速ベクトルを比較している。計算結果は測定結果を良く再現しているが、ワンド上流側の流速が異なっている。実験データでは流量の保存が満足されておらず、流速にみられる差異は実験結果のデータの不備にあるものと考えられる。図-4～図-7はそれぞれ実験-3～実験-6に対する計算結果のみを示している。ワンド開口部をより狭くするとワンド内の循環流は大きく変化している。ワンド開口部の面積を変えず上流側を半分閉め切った場合には大規模な循環流が算出されている。閉め切り部背後に2次的な循環流が存在する可能性があるが、数値計算は満足できる結果を与えている。図-6、図-7においても数値解析は実験において計測された流れのパターンを算出している。

4. おわりに

種々の開口部を有する正方形ワンド内の水深平均の低水時の流速分布を浅水方程式に基づく平面2次元解析では再現できることを確認した。今後、3次元数値解析コードを開発し、高水時の流れ場の解析を進める予定である。

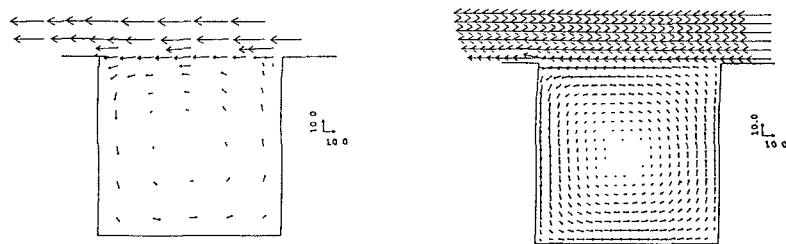


図-2 実験-1に対する流速ベクトルの比較

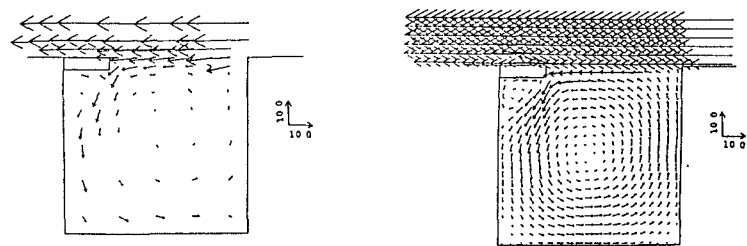


図-3 実験-2に対する流速ベクトルの比較

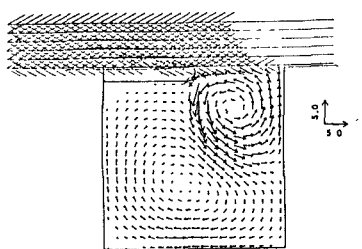


図-4 実験-3に対する計算結果

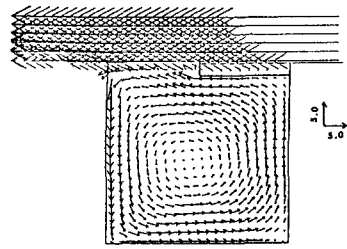


図-5 実験-4に対する計算結果

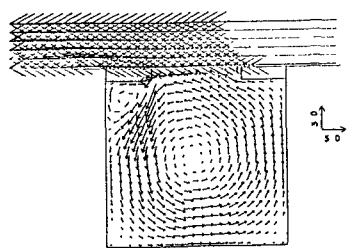


図-6 実験-5に対する計算結果

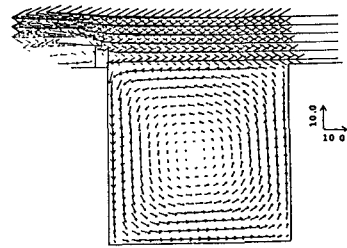


図-7 実験-6に対する計算結果