

一般座標系での3次元開水路流れモデルによる湾曲部流れの数値シミュレーション

○京都大学大学院 学生員 村瀬 仁士
 京都大学大学院助教 正会員 音田 慎一郎
 京都大学大学院教授 フェロー 細田 尚

1. はじめに

河道湾曲部の流れ特性として、二次流が発生することはよく知られており、この流れ特性は外岸沿いの速い流れや局所洗掘問題に関連するため、河川工学的に非常に重要な問題である。著者らは、河道湾曲部流れなどを少ない格子で精度よく予測する手法として、水面変動解析に密度関数法を用いた一般座標系での3次元数値モデルの構築を行った¹⁾。本研究では、構築したモデルを一樣湾曲水路流れに適用し、実験結果と詳細に比較することでモデルの妥当性を検証する。

2. 数値解析法

3次元流れ解析モデル¹⁾には、湾曲に沿って座標を設定する一般座標系での基礎式を用いるとともに、非定常流れの水面変動解析には密度関数法を適用した。基礎式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial \Phi V^i}{\partial \xi^i} \sqrt{g} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V^i}{\partial t} + \nabla_j [V^i V^j] \quad (2a)$$

$$= F^i - \frac{1}{\rho} g^{\bar{ij}} \nabla_j p + \nabla_j \left[-\overline{v^i v^j} \right] + 2\nabla_j S^{\bar{ij}}$$

$$\rho = \Phi \rho_{liq} + (1 - \Phi) \rho_{gas} \quad (2b)$$

$$\mu = \Phi \mu_{liq} + (1 - \Phi) \mu_{gas} \quad (2c)$$

ここに、 t : 時間、 ξ^i : 計算空間の空間座標、 Φ : 密度関数、 V^i : 流速ベクトルの反変成分、 v^i : 乱れ速度ベクトルの反変成分、 p : 圧力、 ρ : 流体の密度、 ρ_{liq} : 液相の密度、 ρ_{gas} : 気相の密度、 ν : 動粘性係数、 μ : 流体の粘性係数、 μ_{liq} : 液相の粘性係数、 μ_{gas} : 気相の粘性係数、 F^i : 重力ベクトルの反変成分をそれぞれ表す。また、乱流モデルには非線形 $k-\epsilon^2$ モデルを用いた。

計算法は有限体積法とし、安定性と有限体積法への親和性を考慮して、圧力、 k および ϵ を直方体の中央で、流速ベクトルを側面で定義する完全スタガード格子系

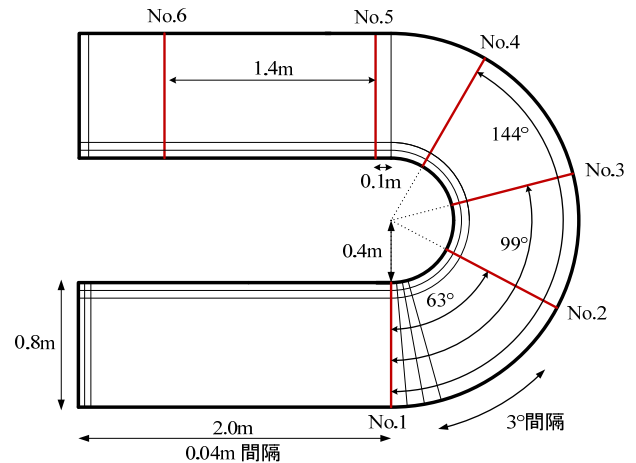


図-1 計算対象とする単一湾曲水路

を用いる。計量テンソル、クリストッフェルの記号などは格子点上で定義し、計算の過程で必要となる位置の値についてはその都度内挿して求めた。

運動方程式の移流項の離散化には QUICK スキームを、 Φ の移流方程式の離散化には TVD-MUSCL 法を用い、 k および ϵ 方程式の移流項には Hybrid 法を用いた。圧力の収束計算手法などについては参考文献¹⁾に記述してあるため、ここでは紙面の都合上は省略する。

3. 一樣湾曲水路流れへの適用

3次元流れ解析モデルの適用性を検証するために、図-1に示すような Rozovskii³⁾による単一湾曲水路実験に適用した。計算格子数は流れ、横断、鉛直方向にそれぞれ 160, 20, 20 とし、湾曲部を 60 分割して計算を行った。図に示す No.1～No.6 の各断面での水位と水深平均流速に関する横断分布と、主流と二次流の鉛直分布について実験値と比較した。

計算結果における水深平均流速ベクトルの平面分布を図-2に示す。湾曲部では内岸側の流速が大きく、直線区間に入って外岸側の流速が大きくなっていく様子が確認できる。

キーワード 一般座標系、密度関数法、湾曲流

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-3 TEL075-383-3269

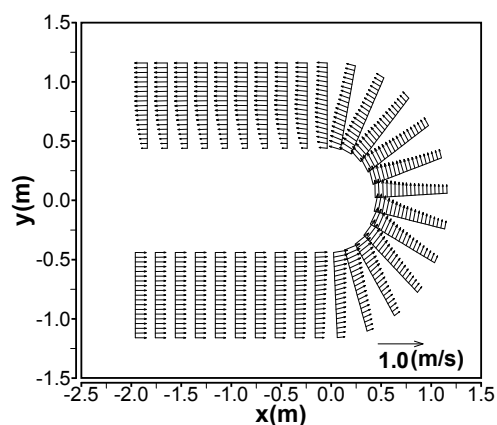


図-2 水深平均流速ベクトル図

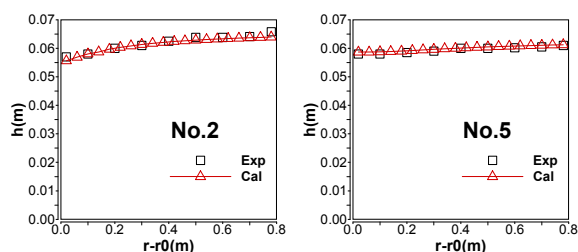


図-3 水位の横断分布

図-3 は No.2, No.5 断面における水位の横断分布を示したものである。湾曲部である No.2 では、外岸側の水位が内岸側と比べて大きく、湾曲部出口から 0.1m である No.5 では、水位差が小さくなっているという水面特性が再現されている。

また、No.2, No.3, No.6 断面での水路中央における主流流速(u_s)と二次流流速(u_n)の鉛直分布を示したものが図-4, 図-5, 図-6 である。図-4 をみると、No.2 断面では主流と二次流ともに適合性の良い結果が得られた。No.3 断面では、図-5 より二次流の発生は確認できるものの、主流流速については水面付近で、二次流については水面と底面付近で実験値に比べて低い値をとっており、二次流強度が低く計算されている。この原因については格子数の影響などが考えられるため、今後検討していく必要がある。湾曲部下流にあたる No.6 断面については、主流と二次流ともに適合性が良く、湾曲部から直線部に入り、遠心力が急に減少したため二次流が減衰したことが確認できる。

4. おわりに

本研究では、河道湾曲部での堤防越流などを精度よく予測できる 3 次元数値解析モデルの開発を最終目標とし、その第 1 ステップとして一様湾曲水路流れへの

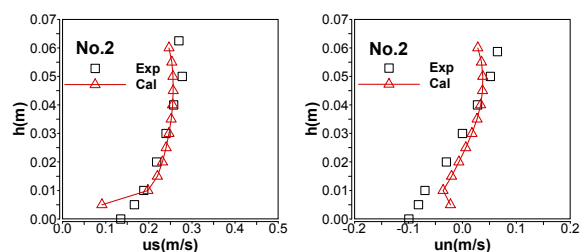


図-4 No. 2 断面における主流と二次流の鉛直分布

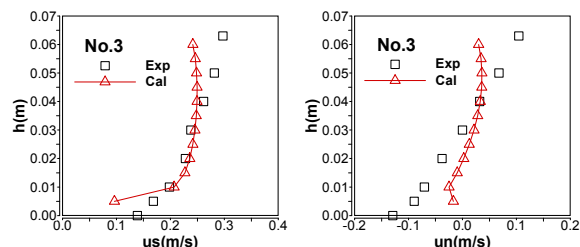


図-5 No. 3 断面における主流と二次流の鉛直分布

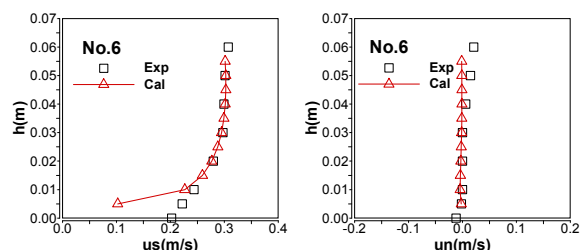


図-6 No. 6 断面における主流と二次流の鉛直分布

適用性について検討したものである。その結果、湾曲部における水位差や二次流の発生を確認するとともに、湾曲流特有の現象を良好に再現できることを示した。今後、上記のモデルに土砂輸送モデルを組み合わせることで、湾曲部での越流破堤過程について検討したい。

参考文献

- 1) 音田慎一郎, 細田 尚, 木村一郎, Jacimovic, N.: 境界適合座標系での密度関数法を用いた開水路流れ解析法の開発とその検証について, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, pp.I_505-I_510, 2016.
- 2) Kimura, I. and Hosoda, T.: A non-linear k- ϵ model with realizability for prediction of flows around bluff bodies, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Wiley, Vol.42, No. 8, pp.813-837, 2003.
- 3) Rozovskii, I. L.: Flow of water in bends of open channels, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel, 1961.