

日本建設コンサルタント(株) 正会員 ○ 張 敏燕

同上 フェロー 川崎 俊太

同上 正会員 上原 七司

## 1. はじめに

自然環境保全が叫ばれる今日、自然な低水(平常)時の流況解析は大変有意義と思われる。しかしながら、実河川流況の内、低水(平常)時の流況解析は、水深が浅く、局所的に高速流が生じ、河底地形(石や草木)の影響を大きく受けることから、流況解析は相当困難であるといえる。本解析は、急勾配水路を選び、一般に用いられる簡単な二次元浅水デルを用い、高速流の流況をどの程度解析できるかを検討する。

粗石水路<sup>(1)</sup>は水路底面に粗石を埋め込んだ形式の水路であり、粗石の設置による流速の低減効果を期待し、魚道等として使われる。一般に、このような水路は勾配が急で、粗石に対して水深が比較的浅いことから、射流が混在しているため、計算に際し、数値解の振動が生じやすいことが経験されている。そこで、比較する実験<sup>(2)</sup>としては 1/10 の急勾配水路で、実験のフルード数  $F_r$  は 1.5-5.0 の範囲での流況である。本解析では、計算の安定化のため、SUPG(Streamline Upwind/Petrov-Galerkin)/FEM 法<sup>(3)</sup>を採用し、その計算の適用性について検討した。

## 2. 解析手法

二次元浅水モデルは、静水圧を仮定することにより、各物理量の水深に関する平均量から流体の基礎方程式を構成したものである。流体の連続式と運動方程式を以下に示す。

$$\text{連続式:} \quad \dot{H} + q_{i,i} = 0 \quad (1)$$

$$\text{運動方程式:} \quad \dot{q}_i + \left(\frac{q_i^2}{H}\right)_{,i} + \left(\frac{q_i q_j}{H}\right)_{,j} = \nu_H (q_{i,i,i} + q_{i,j,j}) - g H H_{,i} + \tau_i \quad (2)$$

ここで、 $q_i$  は単位幅当たりの  $X_i$  方向流量( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $H$  は水深( $\text{m}$ )、 $\nu_H$  は渦動粘性係数、 $\tau_i$  は底面の  $X_i$  方向せん断応力である。

高速流における数値不安定を抑えるため、本研究では、SUPG/FEM 法を用いる。SUPG/FEM 法は FEM 法の重み関数に上流化の効果を取り入れる方法であり、定式化には以下に示す重み関数<sup>(4)</sup>を用いた。

$$\phi I = \phi I + \kappa u \cdot \Delta \phi I, \quad \kappa = \alpha |L|/|u|, \quad (3)$$

$$\text{本研究では} \quad \phi_i = \phi_i + \alpha \Delta t \left( u \frac{\partial \phi_i}{\partial X} + v \frac{\partial \phi_i}{\partial Y} \right) \quad (4)$$

とした。ここで、 $L$  は要素の大きさの代表値、 $u$  は流速ベクトル、 $\alpha$  は適切に選ぶべき定数である。 $\phi$  は形状関数、 $I$  は単位行列、 $u = [u, v]^T$  である。式(3)、(4)より、 $\alpha = 0$  の時、通常の Galerkin-FEM となる。

なお、時間積分には、予測子・修正子法を用いる。

## 3. 解析条件

本解析の急勾配粗石水路のモデル<sup>(1)</sup>を図 1 に示す。水路は全長  $L=10.0\text{m}$ 、粗石設置の区間  $L_s=7.0\text{m}$ 、幅  $0.5\text{m}$ 、勾配  $1/10$  の直線水路である。計算を安定させるため、上流部に  $2.0\text{m}$  長の水平な水路を付けた。粗石モデルとしては、上部と下部の辺長をそれぞれ  $0.05\text{m}$  と  $0.10\text{m}$  のオベリスクとして  $0.15\text{m}$  の間隔で配置した。要素寸法は粗石のサイズにあわせ、 $0.025\text{m} \times 0.025\text{m}$  とした。総要素数/総節点数はそれぞれ  $9,600/20,202$  である。境

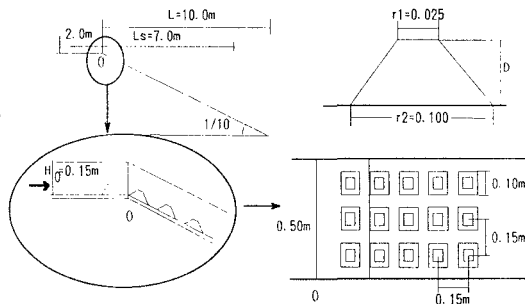


図1 急勾配粗石水路の計算モデル

界条件としては、水路の上流側は単位幅当たりの流量と固定水深  $H_0$  をそれぞれ  $0.09\text{m}^2/\text{s}$ 、 $0.15\text{m}$  とし、側面境界はスリップ、下流側は下流水位の影響を排除するため自由落下とした。底面摩擦係数は  $0.003$ 、渦粘性係数は  $0.01$  とした。

4. 解析結果

解析例は、粗石なしと粗石あり(粗石の高さ $=0.05\text{m}$ )の二つのケースとした。図2、図3に、それぞれ流下距離と流速、水深について実験値と計算値の比較を示す。粗石なしでは、実験の流速は  $1.5\text{--}3.5\text{m/s}$  で、流下距離の増加に伴って流速が増えるが、粗石ありでは、流速は  $1.0\text{--}1.2\text{m/s}$  で、ほぼ定常流に達することがわかる。一方、本解析は、粗石なしでは、 $F_r \approx 5.0$  となり、計算値と実験値は相当な差があることがわかる。一方、粗石ありでは、粗石の配置による流速の低減効果を期待して定常流の解析を扱うモデルを用いて解析を試みたもので、定性的に粗石の配置による流速の低減効果がみられ、 $F_r \approx 1.5$  程度の比較的に小さな場合には、流速と水深で多少の差が生じたが、高速流の解析が可能な結果となったと考えられる。

図4は粗石間の自由表面形状、図5は  $L=1.0\text{m}\text{--}2.0\text{m}$  の間の自由表面形状を示す。両図より、粗石を越流して粗石部での水面が高くなり、中心部の水位は低くなっていることがわかる。

4. おわりに

本解析では、SUPG/FEM法による二次元浅水モデルを用いて急勾配粗石水路の高速流解析を行なった。粗石の設置による流速の低減効果を模擬できたが、通常の SUPG では不十分なこともあることが分かった。今後、よりフルード数の大なる高速流の解析が可能な手法として、空気の流れに適用する Flux-Splitting の手法を試行・開発を進めていきたい。

参考文献

- (1) 菅原, 柏井: 土木学会第23回関東支部技術研究発表会, pp.246-247, 1995.
- (2) A.N.Books and T.J.R.Hughes: Computer Method in Appl. Mech. and Eng., Vol.32, pp.199-259, 1982.
- (3) 張, 川崎, 上原: 河道の水理と河川の環境シンポジウム論文集, pp.101-107, 1995.

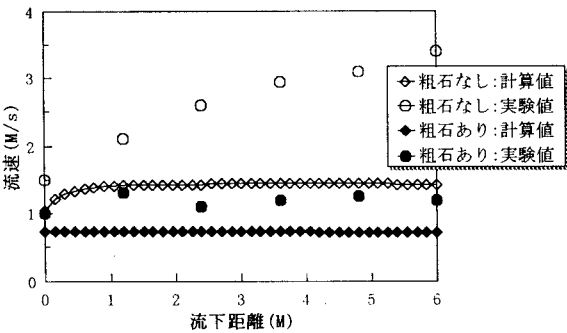


図2 流速と流下距離の関係

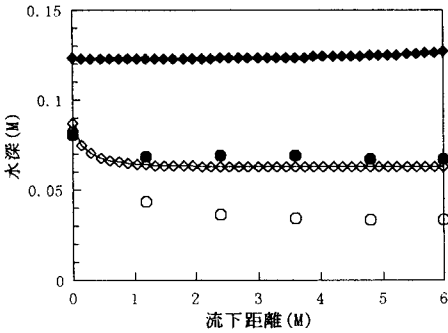


図3 水深と流下距離の関係

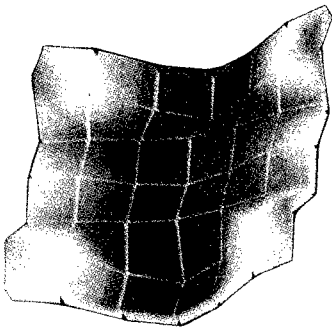


図4 粗石間の自由表面形状

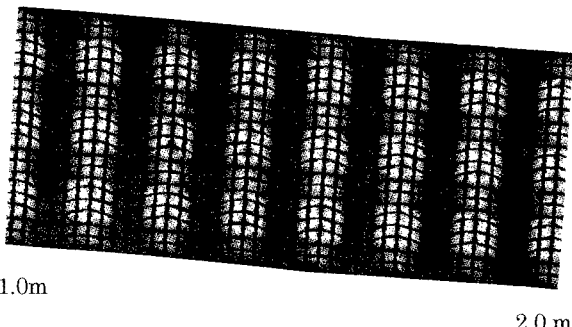


図5 粗石水路(1.0-2.0m間)の自由表面形状