

粗度群背後の剥離流れの数値解析

広島大学大学院 学生会員

内田龍彦

広島大学大学院 フェロー会員

福岡捷二

株式会社フジタ 正会員

山崎幸栄

1. 序論

粗度群下流部は河床洗掘によって構造的に不安定になるだけでなく、粗度群背後の剥離による圧力低下により大きな流体力が作用するため、破壊を受けやすい。粗度群下流の河床洗掘や最下流粗度の流体力は粗度群背後に生じる剥離流れに支配される。そこで、本研究では、護床工などの粗度群を設計するために必要な粗度群背後の剥離流れを表すことができる数値解析モデルを構築することを目的としている。

2. 解析方法

解析対象は図-1 に示す二次元粗度実験¹⁾である。実験は、粗度群下流の河床洗掘を想定し、図-1 に示す河床低下量 Z を変化させて行われた。粗度群下流部では、水位が縦断的に大きく変化するため、水面に沿って計算格子を作成できる座標系を用いる。基礎式は座標系における流速の物理成分で表される z 方向運動方程式(式(1),(2))と連続式(式(3))である。方向の物理成分は、 x 方向の物理成分によってのみ決まるので、 x 軸に投影させた大きさを用いる。運動方程式の右辺第二項に含まれるせん断応力テンソルは平均速度勾配と渦動粘性係数 τ_t を用いて計算している。 τ_t は式(4)の θ 方程式モデルを用いて計算している。

方向の移流項は三次精度の風上差分で計算しているが、 $Fr > 1$ の領域では一次精度の風上差分を用いている。方向の移流項は一次精度の風上差分を用いている。圧力 P は式(5)で表し、 dp を HSMAC 法による繰り返し計算で求めている。このとき、水深積分の連続式(6)から水位 ζ を同時に更新する。時間前進は Heun 法を用いている。鉛直グリッドは各時間ステップで更新している。境界条件は以下に示す。水路の上流端では流速鉛直分布の相似性を仮定して流量を与えている。水面では、水面下グリッドで $dp=0$ を与え、水面の鉛直方向流速を式(7)の運動学的境界条件で計算している。図-2 は粗度に作用する抗力の計算方法を示す。抗力は粗度面に作用する圧力とせん断応力を積分して計算できる。本研究では、河床面よりも下の圧力分布は静水圧分布と仮定し、河床面における粗度前、背面の圧力を用いて式(8)で与えている。

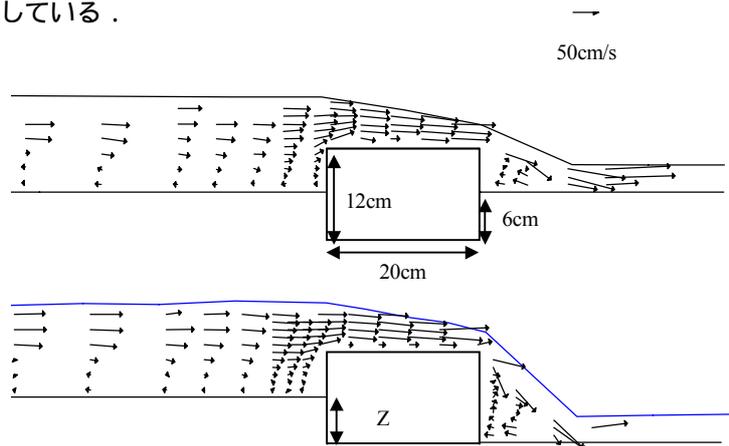


図-1 最下流粗度周辺の流れ場

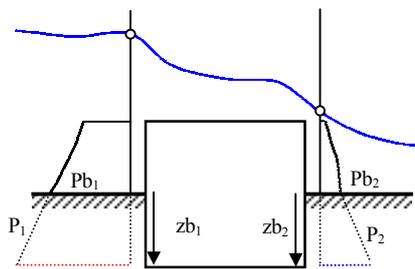
$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} + \tilde{U} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \xi} + (\tilde{W} - w_g) \frac{\partial \tilde{U}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial \xi} - \frac{z_\xi}{d\xi} \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \frac{1}{d\xi d\sigma} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} (d\sigma \tilde{\tau}_{\xi\xi}) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (d\xi \tilde{\tau}_{\xi\sigma}) \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \tilde{U} \frac{\partial w}{\partial \xi} + (\tilde{W} - w_g) \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{d\xi d\sigma} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} (d\sigma \tilde{\tau}_{z\xi}) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (d\xi \tilde{\tau}_{z\sigma}) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} d\sigma \tilde{U} + \frac{\partial}{\partial \sigma} d\xi (w + \tilde{\sigma}_x \tilde{U}) = 0 \quad (3), v_t = \frac{1}{6} \kappa u_* z \left(1 - \frac{z}{h} \right) \quad (4)$$

$$P = \rho g (\zeta - z) + dp \quad (5), \frac{\partial}{\partial \xi} \int_0^h \tilde{U} dz + d\xi \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \quad (6), w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \tilde{U} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \quad (7)$$

\tilde{U}, \tilde{W} : 座標系における流速の物理成分, w, w_g : 鉛直方向流速とグリッドの移動速度
 P : 圧力, ζ : 水位, dp : 静水圧分布からの偏差圧力



$$P_1 = Pb_1 + \rho g \Delta z b_1$$

$$P_2 = Pb_2 + \rho g \Delta z b_2 \quad (8)$$

Pb_1, Pb_2 : 河床面の粗度前、背面の圧力
 P_1, P_2 : 底面の粗度前、背面の圧力分布
 zb_1, zb_2 : 前、背面の根入れ深さ

図-2 抗力の計算方法

定して流量を与えている。水面では、水面下グリッドで $dp=0$ を与え、水面の鉛直方向流速を式(7)の運動学的境界条件で計算している。図-2 は粗度に作用する抗力の計算方法を示す。抗力は粗度面に作用する圧力とせん断応力を積分して計算できる。本研究では、河床面よりも下の圧力分布は静水圧分布と仮定し、河床面における粗度前、背面の圧力を用いて式(8)で与えている。

キーワード：最下流粗度，剥離流，数値解析，流体力，破壊

連絡先：広島大学大学院工学研究科 社会環境システムシステム専攻，739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1 Tel/Fax 0824(24)7821

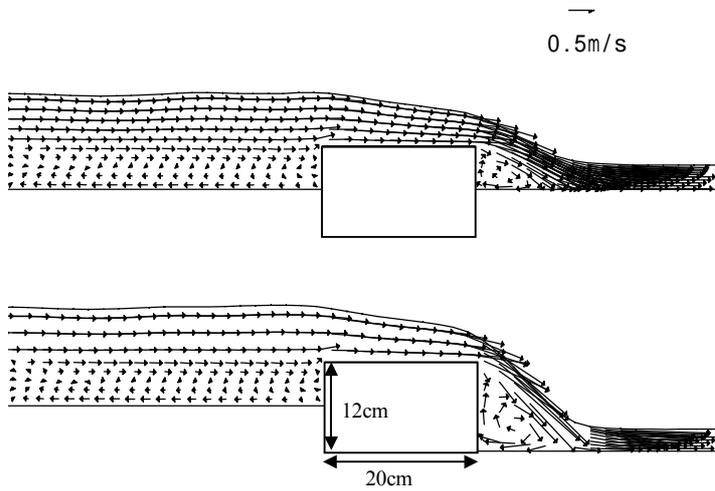


図-3 最下流粗度周辺の流れ場(計算結果)

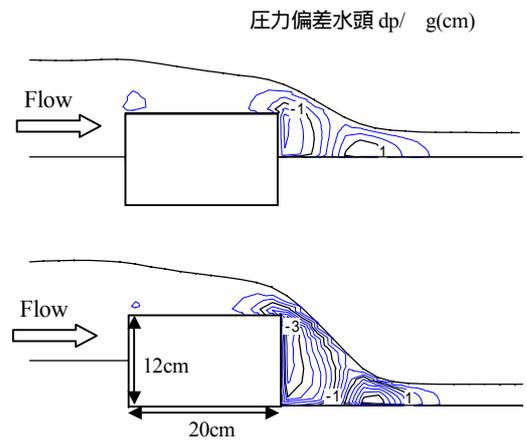


図-4 最下流粗度周辺の圧力場(計算結果)

3. 解析結果

図-3,4 は、解析における最下流粗度周辺の流速ベクトルと圧力偏差水頭 dp/g の分布を示す。最下流粗度背後で圧力低下、粗度群下流の水叩き部で圧力増加が生じており、粗度群背面で逆流域が形成されている。逆流域が形成されるためには、粗度群下流部の水面勾配に起因する圧力勾配よりも大きな逆向きの圧力偏差勾配が必要であるため、粗度群背後の剥離流れの数値解析では特に圧力を計算する重要性が高い。また、粗度群下流の河床低下量 Z が大きくなるほど、粗度背面の剥離流れが発達し、粗度背面の圧力低下量は大きくなる。図-1 の実験結果と比較すると、計算結果は粗度背面の剥離領域の大きさや、粗度群下流部の急な水位低下を再現できている。

図-5 は最下流粗度に作用する流体力の実験値と計算値の比較である。河床低下量 Z が大きくなるほど背面の圧力が低下するため、抗力は大きくなる。計算抗力値は実験値をほぼ再現している。図-6 は粗度天端の圧力分布の計測値と計算値の比較である。計算圧力分布は粗度先端付近において実験値と異なっている。これは、本数値解析モデルでは粗度天端の先端に生じる剥離流を十分に表現できていないためと考えられる。このためには、粗度天端上の計算グリッドを小さくするなどの対処が必要である。しかし、本研究の目的である粗度の破壊を検討するためには天端の圧力分布の積分値とその作用点がわかれば十分である。計算圧力分布は実験値の全体的な圧力分布や河床低下量 Z の増加による天端圧力分布の低下などを概ね再現している。以上のことから、本数値解析モデルは粗度の破壊問題に適用可能であると考えられる。

4. 結論

本数値解析モデルは粗度群背後の剥離流れを再現する。また、本数値解析モデルは抗力および粗度天端の圧力分布を計算でき、粗度の破壊問題に適用可能であることが示された。

参考文献

1) 山崎幸栄, 福岡捷二, 内田龍彦, 福島琢二: 河川構造物下流の洗掘対策工の安定性に関する基礎的研究, 第 56 回年次学術講演会講演概要集, II-136, 2001

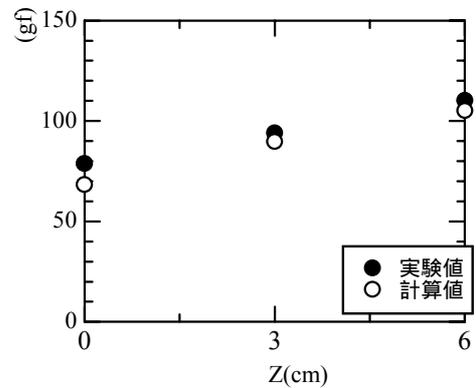


図-5 粗度の抗力の実験値と計算値の比較

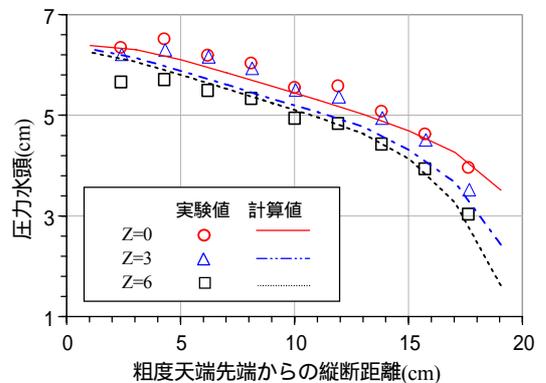


図-6 粗度天端の圧力分布の実験値と計算値の比較