

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

解析対象は二次元浅床粗度実験¹⁾である。実験水路を図-1に示す。実験では、最下流粗度の不安定性を検討するため、粗度群下流の河床洗掘を想定し、河床低下量 ΔZ を変化させて最下流粗度周辺の流れ場と最下流粗度の流体力が計測された。解析では、粗度群下流部で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 σ 座標系を用いる。基礎式は σ 座標系における流速の物理成分で表される ξ, z 方向運動方程式(式(1),(2))と連続式(式(3))である。 ξ 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 ν_t を用いて計算している。 ν_t は式(4)の0方程式モデルで表す。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。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。抗力は粗度の前、背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。

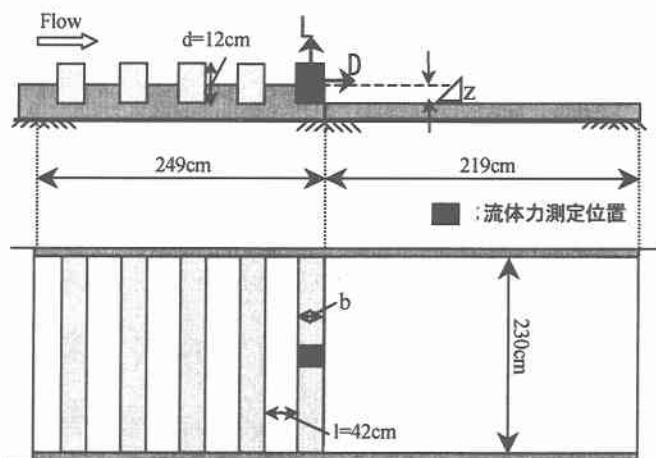


図-1 実験水路(縦断面図・平面図)

式モデルで表す。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。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。抗力は粗度の前、背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。

3. 解析結果

図-3は最下流粗度周辺の流速ベクトルの実験値と計算値の比較である。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-4は最下流粗度周辺の圧力偏差水頭 $dp/\rho g$ の計算結果を示す。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る。図-3に示す粗度群背後の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 $\rho g \partial \zeta / \partial x$ よりも大きな逆方向の圧力偏差勾配 $\partial dp / \partial x$ 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

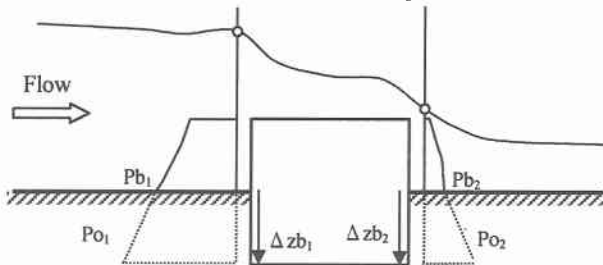
$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} + \tilde{U} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \xi} + (\tilde{W} - w_s) \frac{\partial \tilde{U}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial \xi} - \frac{z_\xi}{d\xi} \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \frac{1}{d\xi d\sigma} \left\{ \frac{\partial}{\partial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

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

$$\frac{\partial}{\partial \xi} d\sigma \tilde{U} + \frac{\partial}{\partial \sigma} d\xi (\tilde{W} + \tilde{\sigma}_z \tilde{U}) = 0 \quad (3), \nu_t = \frac{1}{6} k u_* z \left(1 - \frac{z}{h} \right) \quad (4)$$

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

$\tilde{U}, \tilde{W}$: σ 座標系における流速の物理成分, w, w_s : 鉛直方向流速とグリッドの移動速度



$$P_{01} = P_{b1} + \rho g \Delta z_{b1}$$

$$P_{02} = P_{b2} + \rho g \Delta z_{b2} \quad (8)$$

P_{b1}, P_{b2} : 河床面の粗度前、背面の圧力

P_{01}, P_{02} : 河床面より下の粗度前、背面の圧力分布

$\Delta z_{b1}, \Delta z_{b2}$: 粗度前、背面の河床面からの鉛直距離

図-2 抗力の計算方法

結果を示す。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る。図-3に示す粗度群背後の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 $\rho g \partial \zeta / \partial x$ よりも大きな逆方向の圧力偏差勾配 $\partial dp / \partial x$ 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

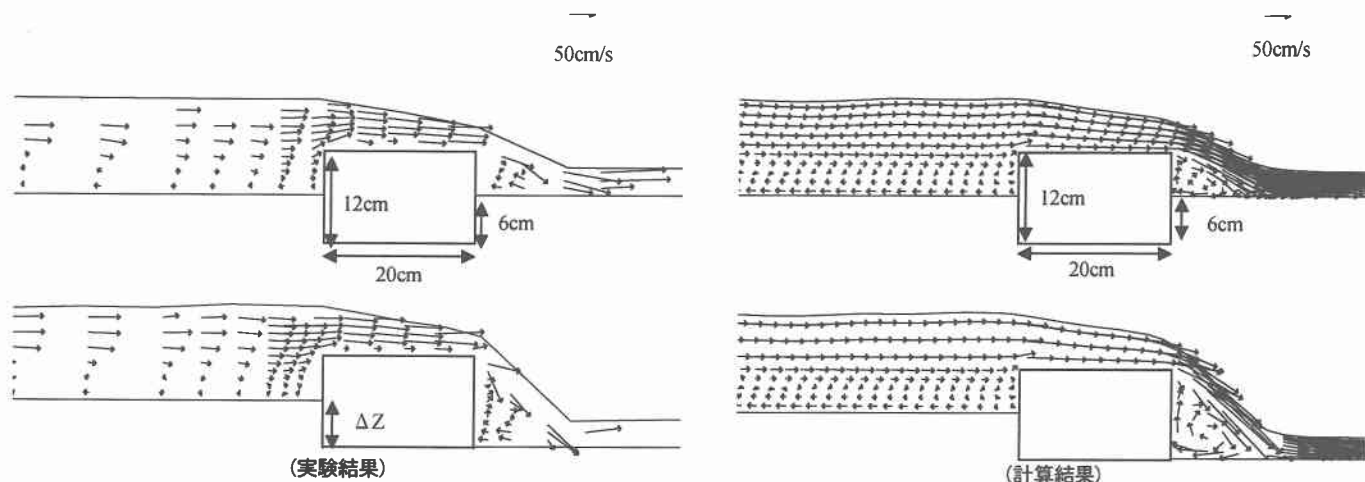


図-3 最下流粗度周辺の流れ場の実験結果と計算結果の比較

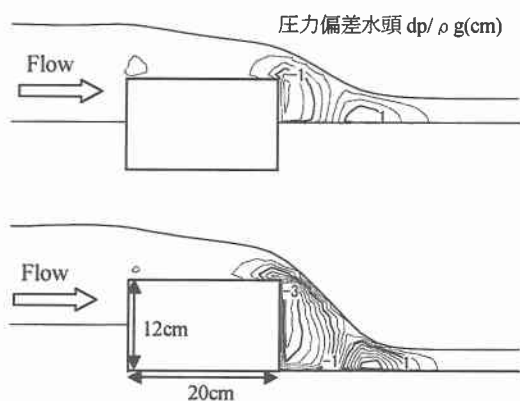


図-4 最下流粗度周辺の計算圧力場

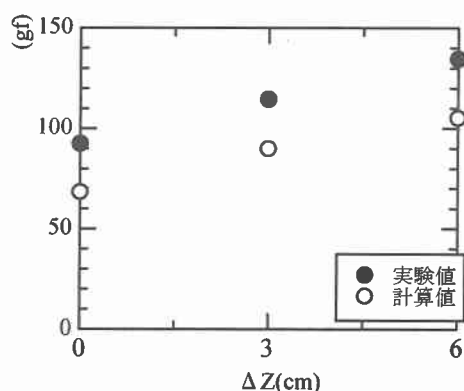


図-5 粗度の抗力の実験値と計算値の比較

下流の河床低下量 ΔZ が大きくなるほど、粗度背面の剥離流れが発達し、粗度下流の水位が低下し、粗度背面の圧力低下量と水叩き部の圧力増加量はともに大きくなる。

図-5 は最下流粗度に作用する抗力の実験値と計算値の比較である。河床低下量 ΔZ 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 ΔZ の増加に伴う抗力の増加傾向を表しているが、実験値に比べてやや小さい。図-6 は粗度上面の圧力分布の実験値と計算値の比較である。計算圧分布は実験値の全体的な圧力分布や河床低下量 ΔZ 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が、粗度上流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上面の上流端に生じる剥離流を十分に表現できていないためである。これらの実験値と計算値のずれは、主に計算格子の解像度が不十分であるためであり、粗度周りの圧力分布を精度よく計算するためには粗度上面の計算格子の解像度が重要であると考えられる。

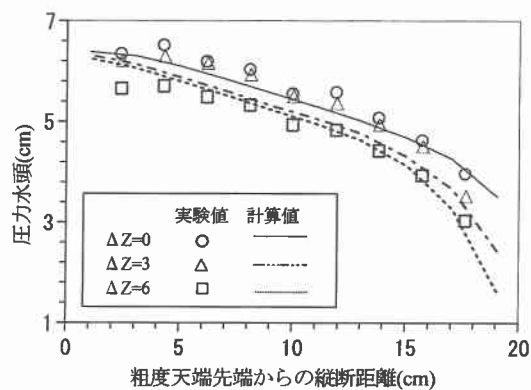


図-6 粗度上面の圧力分布の実験値と計算値の比較

4. 結論

粗度群背後の剥離流れを再現する移動 σ 座標系を用いた数値解析モデルを構築した。本解析モデルは、抗力および粗度上面の圧力分布を計算でき、最下流粗度の設計に応用可能である。

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