

大型粗度を有する流れと粗度要素に作用する抗力の解析法

広島大学大学院 学生会員 ○内田 龍彦 広島大学工学部 7eD-会員 福岡 捷二
広島大学大学院 学生会員 福島 琢二 広島大学大学院 学生会員 木村健太郎

1.序論

大型粗度は、堰、床止めなど横断構造物下流部の水叩き部などに流速を低減させる目的で配置される．最下端粗度は大きな抗力が作用し、その下流に河床洗掘を生じるため、構造的に不安定となる．このため、護床工・護岸工の設計の際、粗度群下流部の流れや粗度要素に作用する抗力を精度良く見積もることは重要である．本研究では、流況が縦断的に大きく変化する粗度群下流部の流れと粗度要素に作用する抗力の解析手法を検討している．

2.実験方法

粗度群下流に生じる河床洗掘は三次元的な乱れや土砂、砂礫の供給に大きく影響するため、制御することが困難な水理現象である．そこで、洗掘が生じた場合でも下流側粗度要素が被害を受けないような、河床洗掘を見込んだ粗度配置法を考える．図-1 に実験水路と粗度配置を示す．粗度要素は千鳥状に配置している．粗度群では、下流が水面形を滑らかになるように、洗掘を見込んだ段階的に低くなる河床を想定し、粗度要素を配置している．白抜きの粗度要素、粗度 A、B、C は、分力計を用いて作用する抗力を直接計測している．表-1 に実測抗力値とその変動値を示す．抗力変動幅 ΔF は、最大抗力値と最小抗力値の差の 1/2 である．粗度 A は平均抗力値に比べその変動幅が大きい．これは、上流側粗度要素による水面変動が伝わったものと考えられる．また、粗度 B は、周辺の平均的な河床勾配が大きいいため、抗力の変動幅が他に比べて遥かに大きくなる．

写真-1 は 実験風景である．粗度群下流部の縦断勾配変化部の流れは、水面が乱れ、縦断的に流れの抵抗特性が変化する急変的な流れである．このよう流れ場を精度良く計算するためには、各粗度要素に作用する抗力を適切に評価する必要がある．

3.計算方法

計算に用いる基礎式は式(1)～(3)の二次元浅水流方程式である．水没粗度要素は、河床高の底上げによって直接計算に取り込む．水没粗度要素周辺の局所的な三次元流に起因する抵抗は、基礎式に流体力項を付加して評価する．流体力項は、粗度前面の局所的な接近流速 U と、それに対する粗度前面の投影幅 $b'\sin\theta$ 、及び抗力係数 C_D を用いて式(4)で表す．境界条件は、上流端で実験流量、下流端で実験水深、壁面では Slip

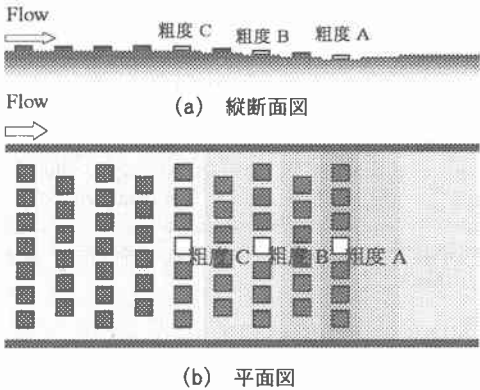


図-1 実験水路と粗度配置

表-1 実測抗力値
流量 $Q=105.2(\ell/s)$

	粗度 A	粗度 B	粗度 C
相対水深 h^*	1.8	1.6	2.6
平均抗力値 $F_s(gf)$	777.4	546.7	35.4
最大抗力値 $F_{max}(gf)$	854.6	686.8	91.3
抗力変動幅 $\Delta F(gf)$	70.0	143.8	72.7
$\Delta F/F_s$	0.09	0.26	1.59

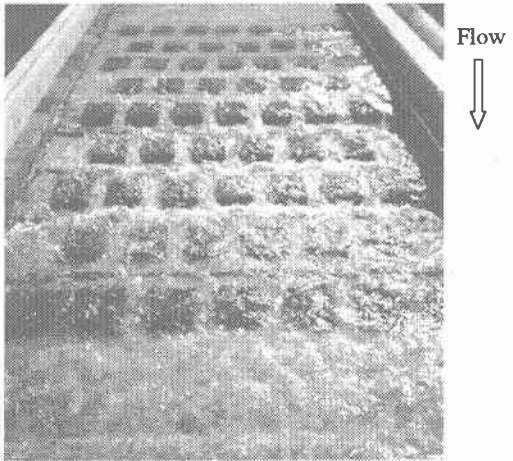


写真-1 実験風景

条件を与えている。下流端流出量が実験流量に漸近し安定するまで計算を進め、最終的な値を計算結果として出力している。

また、本解析モデルにおいて、粗度要素に作用する抗力は粗度要素天端のせん断力、前後の圧力差、及び流体力項で評価される。このため、これらの項を各粗度要素で積分することによって、粗度要素に作用する抗力を算出することができる。そこで、最終的な計算結果を用いて二次元解析における粗度要素の抗力値を算出し、分力計により直接計測した値と比較する。

4. 計算結果と実験結果の比較

図-2 は、二次元解析結果と実験結果の縦断水面形の比較である。粗度 C や粗度 B 周辺では、平均的な河床勾配が大きいいため、下流粗度要素による堰上げの影響が上流に伝わりにくくなる。このため、写真-1 のように、水位は縦断方向に大きく変化する。本解析モデルは、このような流れ場における粗度群の抵抗を適切に評価し、実験水面形を概ね再現できている。

図-3 は分力計により直接計測した実測抗力値と、二次元解析において、水面形の計算と同時に求めた抗力値の比較を示す。図の横軸は、 $X^*=0$ で粗度群の最上流に位置する粗度要素、 $X^*=1$ で粗度群の最下端に位置する粗度要素を示している。白抜きのプロットは実測抗力の時間平均値を示し、その上下の破線は実測抗力の時間変動幅である。計算抗力値は、黒塗りプロットで示している。計算抗力値は、実測抗力値よりも若干小さくなっているが、これは、水面形の計算精度に関係しているためと考えられる。しかし、全体的には、計算抗力値は実測抗力値を概ね表現できている。このことから、計算モデルは縦断的な抵抗特性の変化をほぼ評価していると言える。

以上から、本解析モデルは護床工など粗度群下流部の流れの計算に適用可能であると考えられる。

5. 結論

粗度群下流部の縦断勾配変化部では、粗度要素に作用する抗力が変動し、縦断的に流れの抵抗特性が変化する。本論文で構築した解析モデルは、このような急変的な流れ場の抵抗を適切に評価し、実験水面形、流体力をほぼ再現することが可能である。

連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

X方向

$$\begin{aligned} \frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial u^2 h}{\partial x} + \frac{\partial uvh}{\partial y} = & -\frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} - ghi_x \\ & - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 uh}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 uh}{\partial y^2} \right) + \frac{F_x'}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$

Y方向

$$\begin{aligned} \frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial uvh}{\partial x} + \frac{\partial v^2 h}{\partial y} = & -\frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial y} - ghi_y \\ & - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 vh}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 vh}{\partial y^2} \right) + \frac{F_y'}{\rho} \end{aligned} \quad (3)$$

u, v : X, Y 方向流速成分, h : 水深, g : 重力加速度, n : マニングの粗度係数, ε : 渦動粘性係数($=1/6 \kappa u_* h$), F_x', F_y' : X, Y 方向の流体力項

$$\frac{F_x'}{\rho} = -\frac{1}{2} C_D u \sqrt{u^2 + v^2} \frac{b' \sin \theta}{A'} d \quad (4)$$

$$\frac{F_y'}{\rho} = -\frac{1}{2} C_D v \sqrt{u^2 + v^2} \frac{b' \sin \theta}{A'} d$$

C_D : 抗力係数, $b' \sin \theta$: 粗度前面の主流方向に対する投影幅, A' : メッシュの面積, d : 粗度高さ

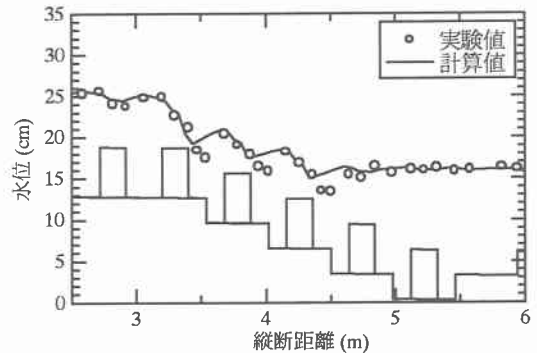


図-2 実験値と計算値の縦断水面形の比較

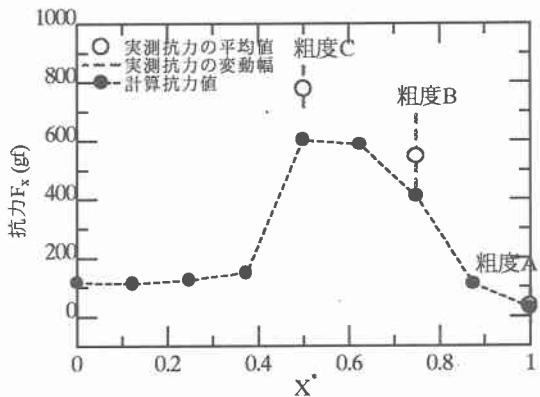


図-3 計算抗力値と実測抗力値の比較