

# 水制の効果に関する研究

北海道大学工学部 学生員 清田 康明  
 北海道大学工学部 正 員 黒木 幹男  
 北海道大学工学部 正 員 板倉 忠興

## 1. はじめに

水制は、水はねや土砂堆積をねらって設置されるものであるが、護岸や根固め工法の進歩により、一時期ほどは設置されていない。しかし近年、景観や生態系の保全の面で護岸や根固めだけによる河川づくりを考え直すべきであり、水制工やその他の工法などを見直す必要があると思われる。水制の効果について山田<sup>(1)</sup>は水制の動きを粗度の増加で置き換えて解析的に水制周辺の流れの性質を考察している。しかし、水制の影響を粗度の増加だけで表現するのは困難である。

そこで、本研究では、水中に物体が存在すると考え、水制の動きを効力によるものとし、見通しをよくするために、1次元で単一水制の場合について解析を試みた。

## 2. 流れの基本式

A-A平面とB-B平面において、運動方程式をたてると以下のようなになる。

$$\begin{aligned} & -\dot{\rho} \dot{u}_A^2 \dot{h}_A + \dot{\rho} \dot{u}_B^2 \dot{h}_B \\ & = \dot{P}_A - \dot{P}_B - \dot{\rho} \dot{g} \dot{h} \frac{\partial \dot{z}}{\partial \dot{x}} d\dot{x} - \dot{\tau}_x \dot{i} d\dot{x} - \dot{D} \end{aligned} \quad (1)$$

この式を変形して

$$\begin{aligned} & \dot{\rho} \frac{\partial \dot{u}^2 \dot{h}}{\partial \dot{x}} \\ & = -\dot{\rho} \dot{g} \dot{h} \frac{\partial}{\partial \dot{x}} (\dot{h} + \dot{z}) - \dot{\tau}_x \dot{i} - \dot{\rho} C_D \Delta \frac{\dot{u}^2}{2} \frac{1}{d\dot{x}} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $\dot{u}$  ; x方向の流速、 $\dot{h}$  ; 水深、 $\dot{P}$  ; 圧力、

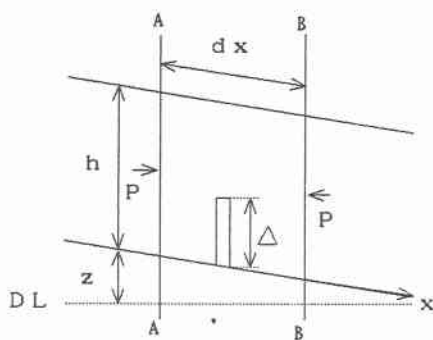
$\dot{\rho}$  ; 水の密度、 $\dot{g}$  ; 重力加速度、 $\dot{z}$  ; 基準面からの河床高、 $\dot{\tau}_x$  ; 底面せん断力、 $\dot{i}$  ; 潤辺長、

$\dot{D}$  ; 水制による抗力、 $\dot{D} = \dot{\rho} C_D \Delta \frac{\dot{u}^2}{2}$  とする。

また、連続の式は以下のようなになる。

$$\dot{h} \frac{\partial \dot{u}}{\partial \dot{x}} + \dot{u} \frac{\partial \dot{h}}{\partial \dot{x}} = 0 \quad (3)$$

(3) を (2) に代入すると以下のようなになる。



$$\frac{1}{2} \dot{\rho} \dot{h} \frac{\partial \dot{u}^2}{\partial x} = -\dot{\rho} \dot{g} \dot{h} \frac{\partial (\dot{h} + \dot{z})}{\partial x} - \dot{\tau}_x \dot{i} - \dot{\rho} C_D \dot{\Delta} \frac{\dot{u}^2}{2} \frac{1}{dx} \quad (4)$$

平均流速  $\dot{u}_0$ 、平均水深  $\dot{h}_0$  を用いて無次元化を行う。

$$\frac{1}{2} F_r^2 \frac{\partial u^2}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} (h+z) - \frac{\tau_x}{\rho g R} - \frac{C_D}{2} F_r^2 \Delta \frac{u^2}{h} \frac{1}{dx} \quad (5)$$

ただし、

$$u = \frac{\dot{u}}{\dot{u}_0}, \quad h = \frac{\dot{h}}{\dot{h}_0}, \quad z = \frac{\dot{z}}{\dot{h}_0}, \quad x = \frac{\dot{x}}{\dot{h}_0}, \quad dx = \frac{d\dot{x}}{\dot{h}_0}, \quad \Delta = \frac{\dot{\Delta}}{\dot{h}_0}, \quad \tau_x = \frac{\dot{\tau}_x}{\dot{\rho} \dot{u}_0}, \quad F_r^2 = \frac{\dot{u}_0^2}{g \dot{h}_0} \quad \text{ここで}$$

$dx \rightarrow 0$  とすると、 $\frac{1}{dx}$  はデルタ関数を使い以下のように表せる。

$$\frac{1}{dx} = \delta(x - x_0) \quad (6)$$

$$\text{また } \dot{q} = \dot{u} \dot{h} = \dot{u}_0 \dot{h}_0 \cdot u h \text{ より } u h = 1 \quad (7)$$

$$\text{マンニング式 } n q = h^{\frac{5}{3}} I_0^{\frac{1}{2}} \text{ より } I_0 = I_{00} h^{-\frac{10}{3}} \quad (8)$$

(6)、(7)、(8) を (5) に代入すると以下ようになる。

$$(1 - F_r^2 h^{-3}) \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial x} - I_{00} h^{-3} - \frac{\Delta}{2} F_r^2 C_D h^{-3} \delta(x - x_0) \quad (9)$$

ここで  $h = 1 + \Delta \tilde{h} + \dots$  とし2次以上の項を無視して整理すると1次に関して次のような線形代数が求められる。

$$\frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} = A \tilde{h} - B \delta(x - x_0) \quad (10)$$

$$\text{ただし } A = \frac{10}{3} \frac{I_{00}}{1 - F_r^2}, \quad B = \frac{1}{2} \frac{C_D}{1 - F_r^2}$$

デルタ関数をフーリエ級数で表すと以下ようになる。

$$\delta(x - x_0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{ik(x - x_0)\} dk \quad (11)$$

よって  $\tilde{h}$  も同様にフーリエ級数で表す。

$$\tilde{h} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \exp\{ik(x - x_0)\} dk \quad (12)$$

(12) を (11) に代入して  $g(x)$  を求めると  $\tilde{h}$  は以下ようになる。

$$\tilde{h} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-B}{ik - A} \exp\{ik(x - x_0)\} dk \quad (13)$$

これを留数を使って解く。

$$A > 0 \text{ のとき } \tilde{h} = \begin{cases} -B \exp\{A(x - x_0)\} & (x \leq x_0) \\ 0 & (x > x_0) \end{cases} \quad (14)$$

$$A < 0 \text{ のとき } \tilde{h} = \begin{cases} -B \exp\{A(x - x_0)\} & (x \geq x_0) \\ 0 & (x < x_0) \end{cases} \quad (15)$$

ここで求めた  $\tilde{h}$  を  $h = 1 + \Delta \tilde{h}$  に代入すると水面形が求められる。

### 3. 河床形状の推定

流砂量  $\dot{q}$  は次式で表せる。

$$\dot{q} = \sqrt{s \cdot g \cdot d^3} \cdot 8 (\tau_x - \tau_{x_c})^{\frac{3}{2}} \quad (16)$$

ただし  $\tau_{x_c} = 0.05$  とする。

平均流砂量  $\dot{q}_0$  も同様にして

$$\dot{q}_0 = \sqrt{s \cdot g \cdot d^3} \cdot 8 (\tau_{x_0} - \tau_{x_c})^{\frac{3}{2}} \quad (17)$$

$\dot{q}$  を  $\dot{q}_0$  により無次元化すると、

$$q = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_0} = \left( \frac{\tau_x - 0.05}{\tau_{x_0} - 0.05} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (18)$$

ところで無次元掃流力  $\tau_x$  は次式のように表せる。

$$\tau_x = \frac{h \cdot I_o}{s \cdot d} = \frac{h_0 \cdot I_{o0}}{s \cdot d} \left( \frac{h}{h_0} \cdot \frac{I_o}{I_{o0}} \right) = \tau_{x_0} h^{-\frac{10}{3}} = \tau_{x_0} \left( 1 - \frac{7}{3} \Delta \tilde{h} \right) \quad (19)$$

(18) を (19) に代入して

$$q = \left( 1 - \frac{7}{3} \Delta \frac{\tau_{x_0}}{\tau_{x_0} - 0.05} \tilde{h} \right) = 1 - \frac{3}{2} \frac{7}{3} \Delta \frac{\tau_{x_0}}{\tau_{x_0} - 0.05} \tilde{h} \quad (20)$$

河床変動は場所ごとの流砂量が同一でないために生ずるので、 $q$  が求めれば、河床の変化を推定できる。

### 4. 結果と考察

図1は常流流れ、図2は射流流れでの水面形である。

この2つをくらべると常流では水制上流で水面が低下し、射流では水制下流で水面が上昇するという、常流と射流では全く逆になっているのが分かる。また、水面が変化している距離は、常流と射流ではかなりの差があり、常流のほうがはるかに長い。

ただし、計算条件は以下に示すとおりである。

図1、常流の場合

$$F_r = 0.5, \quad I_{o0} = \frac{1}{1000}, \quad C_D = 1.0, \quad \Delta = 0.5$$

図2、射流の場合

$$F_r = 1.2, \quad I_{o0} = \frac{1}{200}, \quad C_D = 1.0, \quad \Delta = 0.5$$

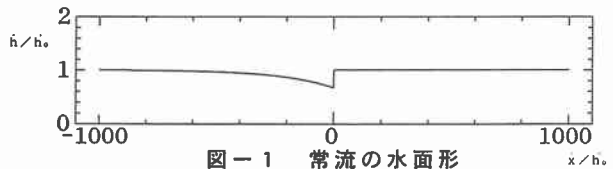


図-1 常流の水面形

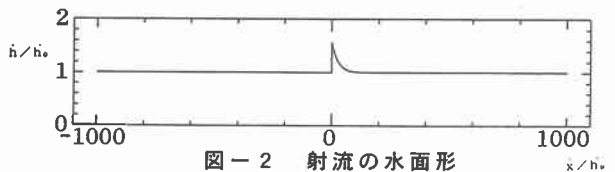


図-2 射流の水面形

水面形のイメージは常流は図1、射流は図2のようになるのであるが、他の計算条件の場合についても調べる必要があると思われる。よって、平均水深と水制設置位置の水深の差  $\Delta h$  と水制高、フルード数との関係について計算を行った。結果が図5で  $C_D = 1.0$  としている。ただし、図中の数字は水制高  $\Delta$  である。

結果からわかるように常流も射流もフルード数が1より遠ざかるほど $\Delta h$ は0に近く、また水制高が大きくなるにつれて $\Delta h$ の値も大きくなる。常流と射流では、常流の方が水制高による変化が大きい。

図3、図4はそれぞれ常流流れ、射流流れの流砂量に（流砂量の値が大きくなるにつれ河床が低下するので、河床変動のイメージが分かりやすいように）マイナスを乗じたものを示している。ある地点における流砂量が他の地点の流砂量よりも大きい場合や、小さい場合はその地点で堆積や洗掘が起こると推定できる。

常流の場合水制設置位置の上流で洗掘が起きる。射流の場合は水制設置位置の下流で著しい堆積が起きる。

ただし計算条件は

$h_0=1.0$ ,  $d=0.102 \times 10^{-3}$ ,  $s=1.65$ とし、その他の条件は、水面形の場合と同じにした。

以上より水制周辺の様子は、常流と射流とでは数値だけでなく全く異なったものとなる事が分かる。特に常流の場合には洗掘がおき、水制本来の目的とは異なっている。よって水制を設置する場合はそのことを十分に考慮し洗掘が起こらぬように何らかの手段を考えるべきである。

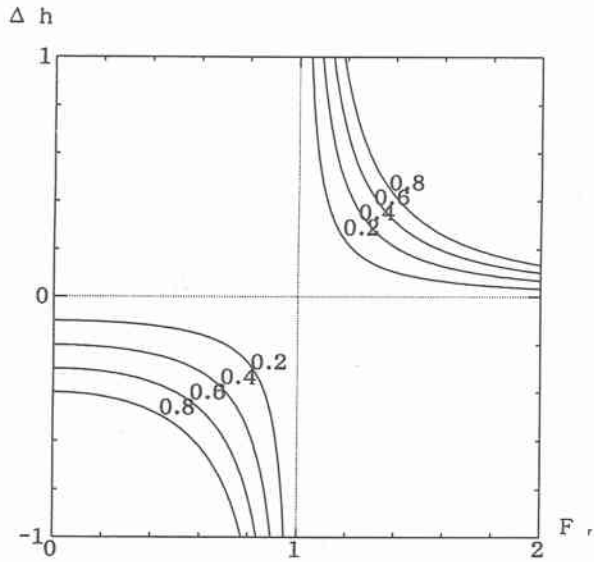


図-3 水面高と水制高、フルード数との関係

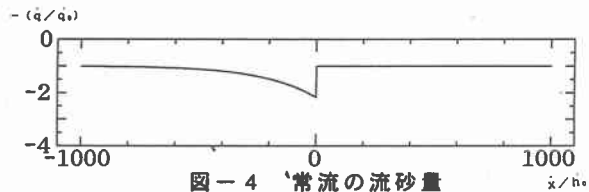


図-4 常流の流砂量

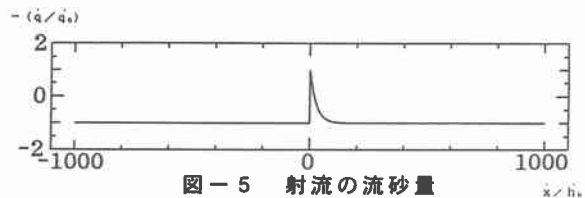


図-5 射流の流砂量

## 6. 参考文献

- (1) 山田浩次：蛇行河道における水制の効果に関する研究，土木学会北海道支部論文報告集第50号