

神戸大学大学院 学生員 藤井 宏行
 神戸大学工学部 正会員 道奥 康治
 兵庫県土木部 正会員 竹本 修

1. はじめに：河道に浅水部と深水部を設けて流れに多様性を持たせる河道改修が行われている。所定の治水機能を確保するためには、改修された断面の流水抵抗を水理学的に評価する必要がある。本報では、粗面浅水部と滑面深水部が交互に配置された開水路流の抵抗特性を実験的に検討する。

2. 実験概要：実験は長さ7m、水路幅45cm、深さ20cmの可変勾配開水路で行った。対象とする河道形状を図-1に示す。実験は等流状態で行われ、全潤辺が滑面からなる場合(Run-A)、浅水部(高水敷上)に粗度を設置した場合(Run-B)、及び、波長 λ が無限大の極限として、直線複断面流れに関する実験(Run-B-1)を行った。まず、Run-Aの実験より、滑面水路の全抵抗力から摩擦損失分を差し引いて、河道の形状による抵抗力を分離し評価する。次に、運動量保存式に基づいて、粗面と滑面からなる河道の全抵抗力を摩擦抵抗と形状抵抗の合成から評価し、Run-Bの実験結果との比較によってこれを検証する。全断面が滑面からなる場合の抵抗係数 f は次元的に次のようにあらわされる(なお、実験条件を $R=2.35\text{cm}$ 、 $B=45\text{cm}$ 、 $b=15\text{cm}$ と固定している)。

$$f = \text{Func.}\left(\frac{R}{\lambda}, \theta, \frac{d}{R}, \frac{UR}{\nu}\right) \quad (1)$$

式(1)に基づいて、Run-Aの実験条件を表-1のように設定した。また、Run-Bでは河床勾配を $I=1/400$ に固定して表-2の条件のもとに実験が行われた。

3. 直線複断面流れの抵抗特性：直線複断面流れの横断面図を図-2に示す。図のように断面を分割し、各断面について運動量の釣り合いを考えると、それぞれ次のようになる。

$$[\text{断面1}] : \tau_1(h-d) + \tau_f(B-b) - \rho f_a(U_2 - U_1)^2(h-d) = \rho g A_1 I \quad (2)$$

$$[\text{断面2}] : \tau_2(h+d+b) + \rho f_a(U_2 - U_1)^2(h-d) = \rho g A_2 I \quad (3)$$

ここで、 τ_1 、 τ_2 ：断面1、2の滑面部分に作用する壁面せん断力、 τ_f ：粗面に働く壁面せん断力、 f_a ：断面1、2間の混合係数、 U_1 、 U_2 ：断面1、2の平均流速である。予備的に行った滑面直線水路での実験から τ_1 、 τ_2 はブラジウスの式で表されることを確認している。 $\tau_f = \rho f_R U_1^2/8$ は別途行った粗面直線水路の実験より、次式の f_R から評価される。

$$\sqrt{\frac{I}{f_R}} = 2.10 - 2.03 \log \left(\frac{175\nu}{\sqrt{8gI}(h-d)^{1.5}} + \frac{0.00277}{h-d} \right) \quad (4)$$

混合係数 f_a をパラメータとして与え、式(2)、(3)を U_1 、 U_2 に関して解き、抵抗係数 f とレイノルズ数 Re との関係を、実験結果と比較したものを図-3に示す。 f_a の実験結果への最適値は $f_a=0.1$ である。

4. 浅水部が滑面の場合の抵抗特性：Run-Aより得られた実験結果の一例を

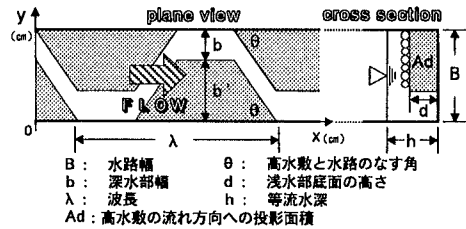


図-1 河道形状の模式図

表-1 Run-Aの実験条件

Run No.	R/λ	$\theta(\text{deg})$	d/R
A-1	0	—	
A-2	0.0118		
A-3	0.0159		
A-4	0.0181	45	
A-5	0.0226		
A-6	0.0274		
A-7		30	
A-8		60	
A-9		75	
A-10		90	
A-11		45	0.765
A-12			1.19

表-2 Run-Bの実験条件

Run No.	d/λ	$\theta(\text{deg})$
B-1	0	—
B-2	0.0172	
B-3	0.0142	
B-4	0.00998	45
B-5	0.00616	
B-6	0.00998	30
B-7		60

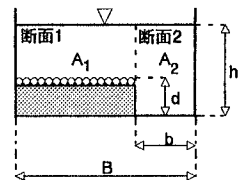


図-2 直線複断面流れの横断面図

キーワード：複断面河道、蛇行河道、瀬と淵、流水抵抗、摩擦損失係数

連絡先（〒657 神戸市灘区六甲台町1-1、神戸大学工学部建設学科、TEL (078)803-1044、FAX(078)803-1050）

図-4に示す。同図は R/λ をパラメーターとした場合の f と Re の関係である。いずれの R/λ に対しても、図中の直線群のように $-1/4$ 乗則、 $f=kRe^{-1/4}$ の関数形に回帰できる。ここで用いた河道模型は、流れ方向に周期的に変化するので、半波長 $\lambda/2$ 当たりの運動量の釣り合いを考える。浅水部の底面が滑面の場合(Run-A)は次式のように表わされる。

$$\frac{\rho}{2} g \lambda A I - \frac{1}{2} (B+2h) \lambda \tau_0 - \frac{\rho}{2} C_D U^2 A d = 0 \quad (5)$$

ここで、 C_D ：浅水部の蛇行による形状抵抗係数、 A ：流水断面積、その他の諸量は図-1に示す。滑面の直線複断面水路の実験に基づけば、滑面の摩擦抵抗 τ_0 はブラジウスの式より算定される。また、図-4の f に関する実験式を用いて種々の河道形状を有する滑面水路(Run-A)の平均流速が $U=(8gRI/f)^{1/2}$ として求められ、 U と τ_0 を式(5)に代入すれば形状抵抗係数 C_D が算出される。各水路形状について得られた C_D を、基準ケース（ここでは、Run-A-3）の形状抵抗係数 C_{DS} によって無次元化し、 R/λ との関係を見たものを図-5に示す。実験値は、次式のように回帰される。

$$\frac{C_D}{C_{DS}} \left(\frac{R}{\lambda} \right) = F \left(\frac{R}{\lambda} \right) = 0.904 \quad (6)$$

また、他のパラメーターに対しても同様に、実験値を回帰すると次式を得る。

$$\frac{C_D}{C_{DS}} (\theta) = G(\theta) = -\frac{1.83}{10^5} \theta^3 + \frac{2.41}{10^3} \theta^2 - \frac{6.94}{10^2} \theta + 0.958 \quad (7)$$

$$\frac{C_D}{C_{DS}} \left(\frac{d}{R} \right) = H \left(\frac{d}{R} \right) = -0.161 \times \left(\frac{d}{R} \right)^2 + 0.0563 \times \left(\frac{d}{R} \right) + 0.981 \quad (8)$$

式(6)、(7)、(8)から形状抵抗係数 C_D/C_{DS} を定式化すれば次式を得る。

$$\frac{C_D}{C_{DS}} \left(\frac{R}{\lambda}, \theta, \frac{d}{R} \right) = F \left(\frac{R}{\lambda} \right) G(\theta) H \left(\frac{d}{R} \right) \quad (9)$$

5. 浅水部が粗面の場合の抵抗特性：以上により求められた C_D の実験式(9)を用いて、浅水部に粗度を設置した場合(Run-B)の運動量のつりあいから抵抗係数を評価する。前と同様に、流れ方向半波長当たりの力のつりあいは次式ようになる。

$$\frac{\rho}{2} g \lambda A I - \frac{1}{2} (b+2h) \lambda \tau_0 - \frac{1}{2} (B-b) \lambda \tau_f - \frac{\rho}{2} C_D U^2 A d = 0 \quad (10)$$

式(9)の C_D を式(10)に代入し、滑面水路としての摩擦抵抗 τ_0 をブラジウスの式により与え、粗面水路の摩擦抵抗 τ_f を式(4)の f で与えれば、 U が算定される。これより $f=8gRI/U^2$ として全抵抗に関する抵抗係数の解析値が求まる。様々な d/λ に対して f と Re の関係を実験値と共に図-6に示す。実験値と計算値の対応は良好である。以上により浅水部底面が粗面の場合の抵抗係数が、形状抵抗と摩擦抵抗の合成によって評価された。

6. 結び：ここで考えた河道形状に関するパラメーター以外についてもできるだけ多くの実験的な定式化を行い、より大きな水路での実験も含めて抵抗則を検討し、これに基づいて合理的な河道設計を行う必要がある。

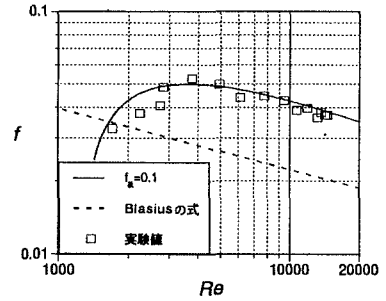


図-3 直線複断面流れの f と Re の関係

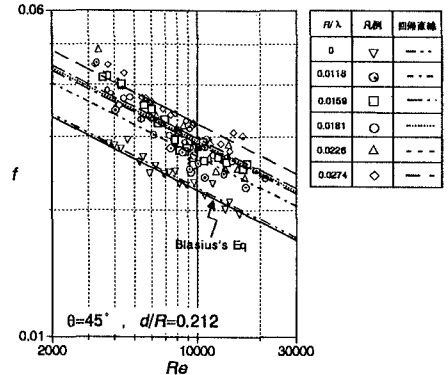


図-4 f と Re の関係(パラメーター R/λ)

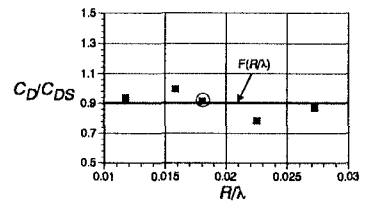


図-5 C_D/C_{DS} と R/λ

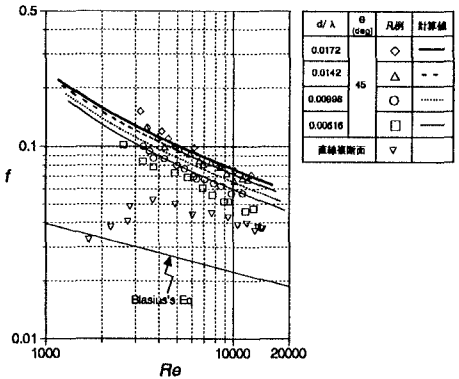


図-6 計算値と実験値の比較(パラメーター d/λ)