

浅水部・深水部が交互に配置された 開水路流の抵抗特性

FLOW RESISTANCE OF AN OPEN CHANNEL WITH ALTERNATIVELY ARRANGED RIFFLES AND POOLS

道奥康治¹・竹本修²・廣田宗明³

Kohji MICHIOKU, Osamu TAKEMOTO and Muneaki HIROTA

¹正会員 工博 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 工修 兵庫県土木部 (〒650 神戸市中央区下山手通5-10-1)

³正会員 工学 同上

In recent years, so called "near-nature river works" are made in many river channels in order to create a suitable hydrospheric environment and ecosystems. The channel is required not only to provide good water environment but also to transport water mass without any hydraulic engineering troubles. In the present paper a fundamental experiment was carried out to examine an open channel flow resistance and characteristics, where simplified models of riffles and pools are alternatively arranged along the channel. The friction factor is correlated as a function of longitudinal interval of riffles, approaching angle of the riffle element and other hydraulic parameters of riffles and pools' geometry. It is expected the present research work to be a useful measure to determine river bed dimensions, so that a river channel design might be optimized to construct a best cross section not only for water environment but also for hydraulic functions of river channel.

Key Words : flow resistance, open channel flow, riffles and pools, compound cross section
near-nature river works, river restoration

1. はじめに

近年の河川改修では、瀬や淵、中州を設けて、変化に富む河道線形を設置したり、水性植物や自然石ブロックの施工により護岸性能を向上させる工法が使われる。このように河川環境に配慮した改修では、工作物が潤辺の流水抵抗を増大させる場合もあり、河川の治水・利水機能を損なわないように、流水抵抗の的確な評価により河道断面を合理的に設計する必要がある¹⁾。

本研究では、瀬や淵の人為的設置を想定して浅水部と深水部が交互に配置された開水路流れを実験的に模擬し、水理特性を検討する。まず、種々の河道形状に対して、流速計測を実施し流れの構造を把握する。次に、壁面摩擦力と河道線形に起因する形状抵抗力とを個別に評価して各々の抵抗則を求め、運動量保存則に基づいて流れの全抵抗力を推定し実験値との比較検証を行う。

2. 対象とする流れ

一般に、流れに多様性を持たせる河道改修では、河道空間内に①流れの緩急、②水深の大小、③潤辺の粗滑をつけることを目的としている。本研究では、図-1に示す開水路によって流れの多様性を表現する。波長 λ で深水部と浅水部を交互に配置し浅水部上面には粗度要素を設置することにより、上記①～③が再現される。

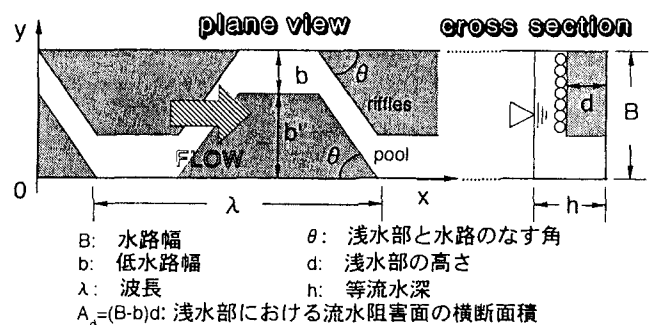


図-1 対象とする河道形状と諸量の定義

表-1 流速計測に関する実験の条件(Series-V) (全ケースに対して $R=3.60\text{cm}$.)

Case No.	R/λ	$\theta(\text{deg})$	d/R	$h(\text{cm})$	$d(\text{cm})$	$\lambda(\text{cm})$	$Q(\text{l/sec})$	$I(\times 10^{-3})$	$Re(\times 10^3)$	Fr
V-1	0.0243	45	0.779	6.50	2.80	148	4.40	1.25	7.59	0.313
V-2		75					4.38	1.00	7.54	0.311
V-3		90					4.38	1.18	7.55	0.311
V-4	0.0152	45	0.501	5.70	1.80	236	4.19	1.18	7.23	0.299
V-5	0.0243					148	4.27	0.67	7.38	0.308

表-2 抵抗特性に関する実験の条件

(a) 全潤辺が滑らかな場合(Series-S)

S-1は直線複断面水路, S-3は基準ケース.全ケースに対し $R=2.35\text{cm}$. 網掛けを施したケースでは水面変位も計測.

Case No.	R/λ	$\theta(\text{deg})$	d/R	$h(\text{cm})$	$d(\text{cm})$	$\lambda(\text{cm})$	$Q(\text{l/sec})$	$I(\times 10^{-3})$	$Re(\times 10^3)$	Fr
S-1	0	—	0.212	3.00	0.50	∞	2.11~8.29	0.50~5.0	4.18~16.2	0.348~1.35
S-2	0.0118	45	0.212	3.00	0.50	200	1.73~10.8	0.50~10.0	3.37~20.8	0.280~1.73
S-3	0.0159					148	1.80~8.44	0.50~6.7	3.50~16.3	0.291~1.36
S-4	0.0181					130	1.85~7.12	0.50~5.0	3.62~13.8	0.302~1.15
S-5	0.0226					104	2.16~11.1	0.67~14.0	4.17~21.8	0.347~1.81
S-6	0.0274					86	1.73~8.41	0.50~8.0	3.38~16.5	0.282~1.37
S-7	0.0159	30				148	2.01~7.84	0.50~5.7	3.99~15.6	0.333~1.30
S-8		60					1.77~6.64	0.52~5.0	3.41~13.1	0.284~1.09
S-9		75					1.76~6.38	0.50~4.4	3.42~12.5	0.286~1.04
S-10		90					1.93~7.05	0.50~5.0	3.79~14.0	0.316~1.17
S-11		45	0.765	3.96	1.80		2.50~6.18	1.4~6.5	4.73~11.7	0.386~0.955
S-12			1.19	4.71	2.80		2.39~5.72	1.7~8.1	4.40~10.5	0.355~0.848

(b) 浅水部に粗度を設置した場合(Series-R) R -7は直線複断面水路.全ケースに対し $d=1.48\text{cm}$, $I=1/400$.

Case No.	d/λ	$\theta(\text{deg})$	$\lambda(\text{cm})$	$Q(\text{l/sec})$	$h(\text{cm})$	$Re(\times 10^3)$	Fr
R-1	0.0172	45	86	0.69~7.69	2.55~6.11	1.38~13.4	0.265~0.531
R-2	0.0142		104	0.85~7.99	2.68~6.18	1.68~13.9	0.289~0.541
R-3	0.00998		148	1.70~7.69	3.15~5.76	3.31~13.6	0.405~0.586
R-4	0.00616		240	1.28~8.91	3.10~5.59	2.50~15.9	0.314~0.714
R-5	0.00998	30	148	2.08~8.83	3.31~5.95	4.03~15.5	0.446~0.638
R-6		60		1.98~8.75	3.38~6.12	3.82~15.3	0.406~0.603
R-7	0	—	∞	0.96~9.56	1.96~5.74	1.70~14.4	0.624~0.743

交互砂州が発達した河川における流れはこれと類似しており, Parker²⁾らによる流水抵抗の研究は本文と関連性が深い.

3. 実験方法

(1) 装置と方法

実験水路は, 長さ7m, 幅45cm, 深さ20cmの透明アクリル樹脂製である. 実験は常流の等流状態で行われた. 流速は, 二次元電磁流速計を用いて, サンプリング周波数10Hzで60秒間計測した. 縦断方向3断面, 横断方向4~5点の計12~15点において水深をポイントゲージで計測し, 平均水深を求めた. 水面変位の平面分布は, さらに密な水深計測から求められた. 水理諸量は, 水路中央付近の水路床形状一波長を対象に計測された.

(2) 実験条件

図-1の開水路流に関連する水理量を用いて, 抵抗係数 $f \equiv 8gR I/U^2$ を支配する無次元量が次式のようにあらわされる.

$$f = \text{Func.}\left(\frac{R}{\lambda}, \theta, \frac{d}{R}, \frac{R}{B}, \frac{R}{b}, Re, Fr\right) \quad (1)$$

ここで, $Re \equiv UR/\nu$: Reynolds数, $Fr \equiv U/\sqrt{gD}$:

Froude数, $R \equiv \{Bh - d(B-b)\}/(B+2h)$: 径深, $D \equiv A/B$: 水理学的水深, である. 本実験では, さらに, $B=45\text{cm}$, $b=15\text{cm}$ と条件を固定し, 式(1)を次のように簡略化する.

$$f = \text{Func.}\left(\frac{R}{\lambda}, \theta, \frac{d}{R}, Re, Fr\right) \quad (2)$$

式(2)を参考にして条件を設定し, 次のような二種類の実験を実施した.

① 流速計測に関する実験(Series-V, 表-1)

水路床形状と流れ特性の相関性を調べる目的で, 表-1のような条件のもとに流速計測を行った. 径深 R は $R=3.60\text{cm}$ と固定され, $Re \approx 7,500$ となるように水路床勾配 I が調節された.

② 抵抗特性に関する実験(表-2)

抵抗係数を算出するために

- ・全潤辺が滑らかな場合(Series-S)
- ・浅水部に粗度を設置した場合(Series-R)
- ・直線複断面開水路(S-1, R-7)

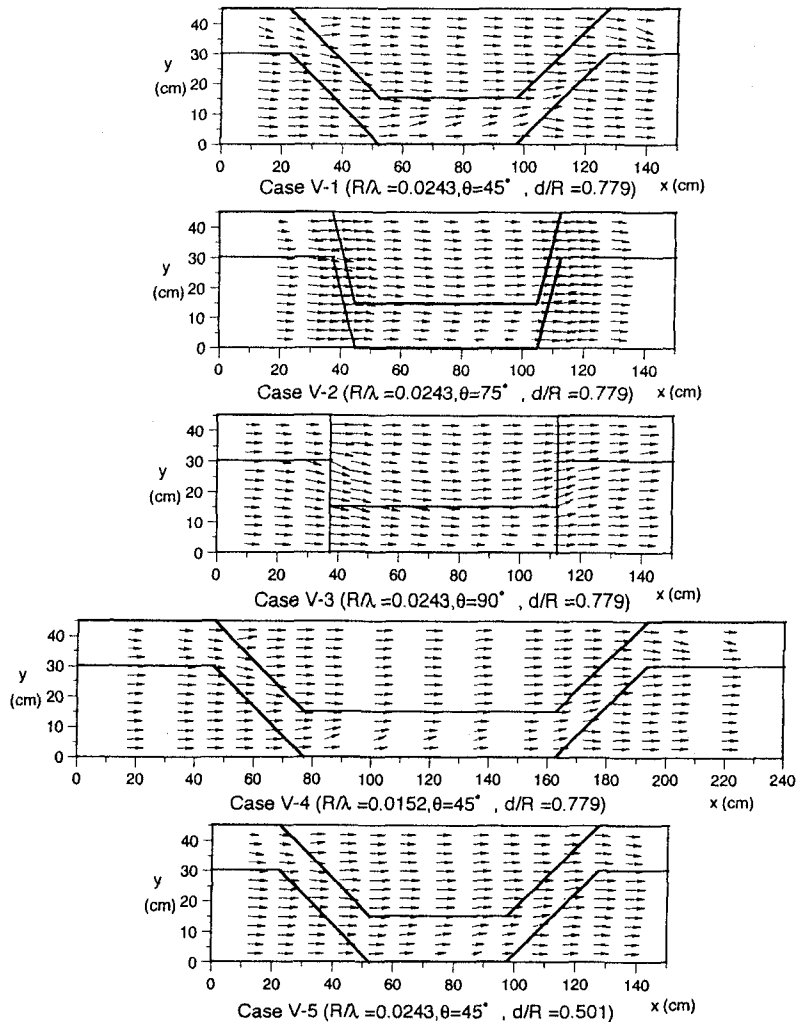


図-2 水面付近($z=3.8\text{cm}$)における二次元平面流況の比較(Series-V)

の三種類の条件のもとで実験を行った。表-2に実験条件を示す。Case S-1とR-7は、浅水部が各々滑面と粗面の場合の直線複断面開水路である。滑面はアクリル壁、粗面は粒径2~4.75mmの砂粒を壁面に張り付けたものからなる。粗面の場合の相当粗度高さは $k_s=2.77\text{mm}$ である。Series-Sのうち網掛けのCaseでは、水路床形状と水位偏差との関係を調べるために、ポイントゲージにより縦横断方向3cmの間隔で水位計測を行った。Series-Sの実験では、 $R=2.35\text{cm}$ に固定して水路床勾配 I を変化させることによって、Series-Rの実験では、 $I=1/400$ に固定して径深 R を変化させることによって、それぞれ表中のレイノルズ数の範囲で流水抵抗を計測した。

4. 流況特性

(1) 水面近傍における平面二次元流速ベクトル

表-1のSeries-Vの各ケースにおける流況を図-2に示す。いずれも水面近くで計測された (x,y) 二次元平面内の流速ベクトルを表している。いずれ

のケースにおいても、太線であらわした深水部形状に沿うように流れの蛇行が観察される。しかし、流線形状は水路床の幾何条件によってかなり異なる。Case V-1に比べ、迎え角 θ が大きなV-2では、流れが水路床の曲がりには追従せず浅水部へ乗り上げ、流線の曲がりにはV-1ほど大きくない。Case V-3は、 $\theta=90^\circ$ で、非現実的な河床形状であるが、 θ が極限値をとる場合の流れの挙動を参考的に示している。 θ がV-1と等しく、波長 λ の長いCase V-4では、浅水部の流下方向距離が長く、浅水部へ乗り上げた流れの直進性が高い。深水部の屈曲部におけるV-1とV-4の流線形は類似している。浅水部の高さ d がV-1よりも低いCase V-5では、水路床形状の影響は小さく、水面近傍の流速ベクトルには顕著な流線の曲がりは見られない。

図-3にCase V-1の各水深における流速ベクトルを示す。底面に近いほど、流れは水路床形状に沿う傾向が強くなっている。底面から離れるにしたがい、水路床形状に沿う流線形から水路側

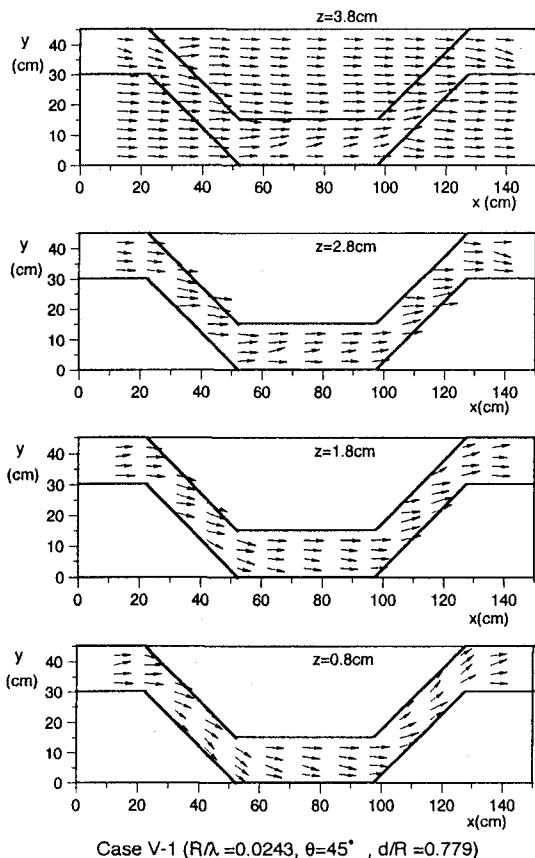


図-3 各水深毎の流速ベクトル(Case V-1)

壁に沿う直進的な流線へと移行している。このように浅水部と深水部が交互に配置された開水路流においては、深水部に沿って蛇行しようとする下層流と、側壁法線に沿って直進しようとする上層流の間に強いせん断力が働いていることが推察される。

(2) 水面変位

図-4は、各種水路床形状に対する水面変位の分布を示す。平均水位 h (約3cm)からの鉛直偏差 ΔH を濃淡によって表わす。その正值(濃い部分)は h より水位が大きいことを意味する。水路床の幾何形状に対応して波状の水面変位が観測されている。「深水部-浅水部」間の境界面と流れが斜めに交差する水衝部において、水面波が特に顕著に見られ、その波峰線は深水部法線とほぼ平行である。斜めの深水部に沿って水位は上昇し、その前後の浅水部では水位が下降している。深水部が側壁と斜めに交差する屈曲部では、側壁との相互干渉による反射波もあらわれ、複雑な水位分布を呈している。波長 λ が大きく、 R/λ の小さいケースほど、定常波の数が増加している。

図-5には、迎え角 θ にともなう水面分布の差異をあらわす。 $\theta=30^\circ$ では、深水部線形に平行な

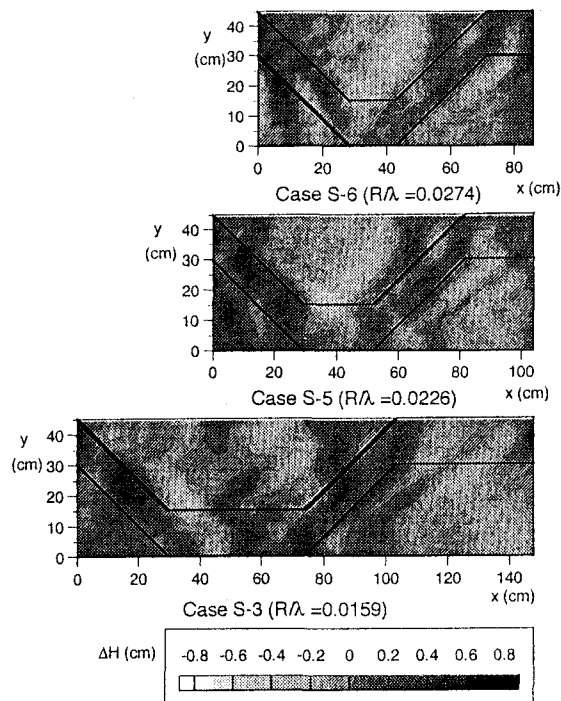


図-4 R/λ にともなう水面変位の変化($\theta=45^\circ$)

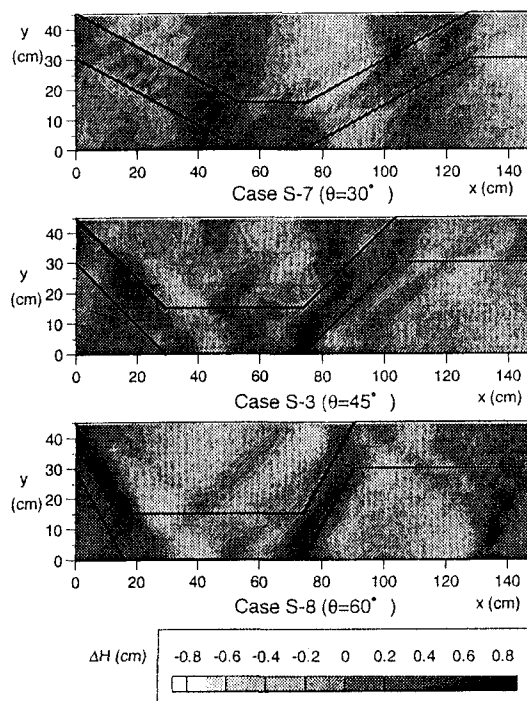


図-5 θ にともなう水面変位の変化($R/\lambda=0.0159$)

波峰線は明瞭ではないが、 θ の増加とともに、より大きな定常波が発達し、その峰線は深水部の線形に平行になる。図-5より、この θ の範囲では、 θ の増加とともに流れのエネルギーが造波に費やされ、水路床の形状に起因する流水抵抗が増加すると考えられる。

5. 流水抵抗の評価

ここで対象とする流れの抵抗力は、①壁面摩

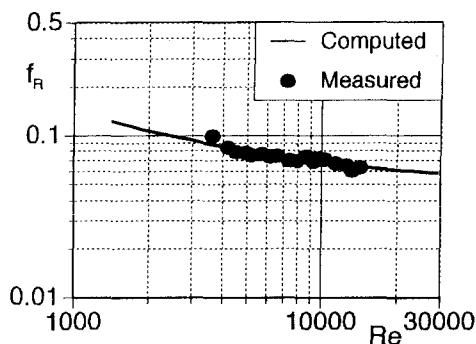


図-6 粗面の摩擦損失係数 f_R [式(3)との比較]

擦力と②水路床形状に起因する抗力からなると考える。

(1) 壁面摩擦力

複断面直線開水路の実験より、壁面摩擦力が評価される。全潤辺が滑面の場合の摩擦損失係数 $f_0=8gRI/U^2$ はおおよそBlasiusの式にしたがう(後述の図-7)。潤辺に相当粗度高さ $k_s=2.77\text{mm}$ の砂粒を張り付けた場合、摩擦損失係数 f_R は図-6のように粗滑遷移領域の抵抗則

$$\sqrt{\frac{1}{f_R}} = 2.10 + 2.03 \log\left(\frac{175}{Re \sqrt{f_R}} + \frac{k_s}{h}\right) \quad (3)$$

に従うことが確認される。なお、この粗面の場合のManningの粗度係数は $n=0.0156$ で一定であった。

(2) 水路床形状に起因する抵抗係数³⁾

全潤辺滑面の直線複断面水路(Case S-1)と各種幾何条件の開水路(全潤辺滑面)における実験値(Series-S)との比較から、水路床形状に関するパラメーター(R/λ , θ , d/R)と摩擦損失係数 f との相関関係が実験的に得られる。一例として、 R/λ と f との相関関係を図-7に示す。いずれの R/λ に対しても図のように、Blasius則と同様の関数形

$$f = K \cdot Re^{-1/4} \quad (4)$$

によって記述できる。他の二つの形状パラメーター(θ , d/R)を変化させた場合においても、高い相関で式(4)の関数形が成立することを確認した。また、図-7に示すように直線複断面開水路($R/\lambda=0$, Case S-1)の場合、Blasius則にほぼ一致している。

形状抵抗抗力を抗力係数 C_D によって記述するために、

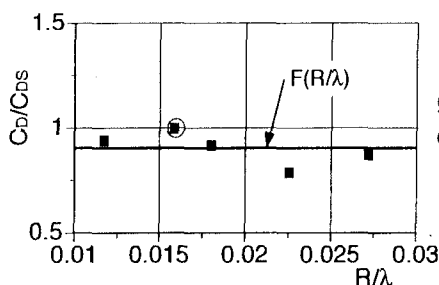


図-8 $C_D/C_{DS} \sim R/\lambda$ の関係

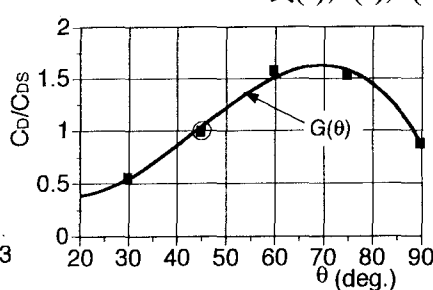


図-9 $C_D/C_{DS} \sim \theta$ の関係

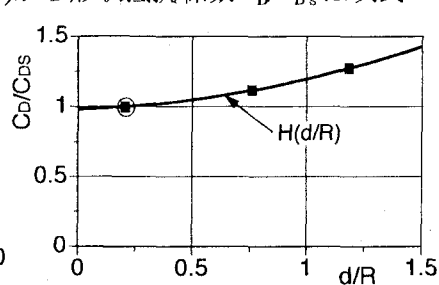


図-10 $C_D/C_{DS} \sim d/R$ の関係

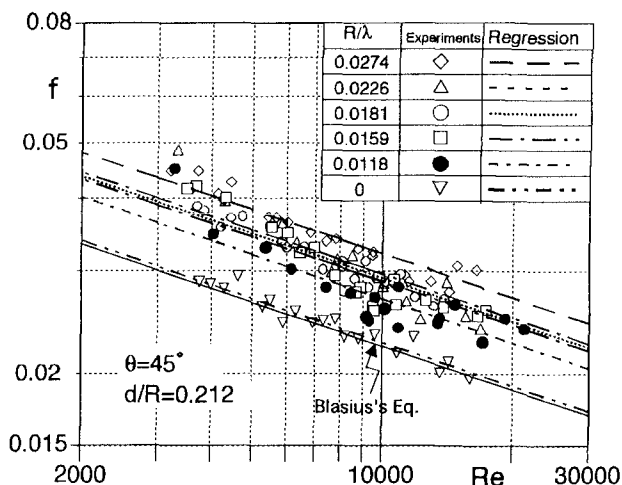


図-7 摩擦損失係数 f と(Re , R/λ)の関係(Series-S)

全潤辺が滑らかな開水路において、水路縦断方向半波長 λ あたりの力のつり合いを考える。

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

ここで、第1項は重力、第2項は壁面摩擦力、第3項は形状抵抗抗力であり、 $A_d = (B-b)d$ は、浅水部における流水障害面の横断面積(図-1の横断面図における塗りつぶし部分)である。

式(5)に、直線複断面開水路の壁面せん断力、 $\tau_0 = f_0 \rho U^2 / 8$ (ここで、 $f_0 = K_0 Re^{-1/4}$)、および全摩擦抵抗係数 f によって表した断面平均流速 $U = \sqrt{8gRI/f}$ を代入する。ここで、 f と f_0 に含まれる式(4)中の係数 K , K_0 は、図-7のようにして実験値からの回帰分析により求める。これにより、式(5)から C_D が算定される。表-2中に○で記した基準ケース(Case S-3: $R/\lambda=0.0159$, $\theta=45^\circ$, $d/R=0.212$)における抗力係数 C_{DS} を用いて、各水路床形状の抗力係数 C_D を無次元化する。これを(R/λ , θ , d/R)の関数として図-8, 9, 10に示す。図中の曲線は次のような回帰式である。

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

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

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

式(6), (7), (8)から形状抵抗係数 C_D/C_{DS} は次式の

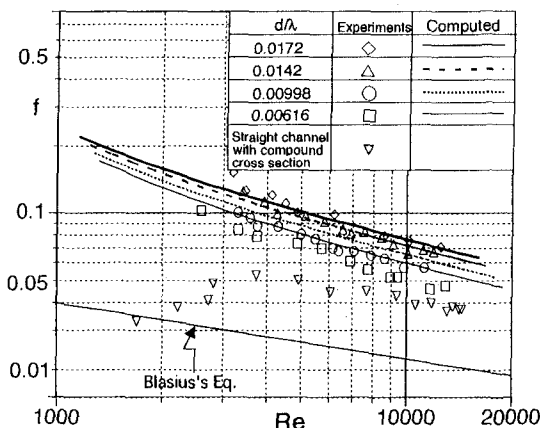


図-11 摩擦損失係数 f と $(Re, d/\lambda)$ の関係(Series-R)

ように定式化される.

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

6. 浅水部が粗面の水路における流水抵抗

以上のように評価された抗力係数 C_D を用いて、浅水部上端面に粗度を配した場合(Series-R)の抵抗係数を評価する. 前と同様に半波長あたりの運動量のつり合い式は次のようである.

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

上式中、粗面の浅水部におけるせん断力 $\tau_R = \rho f_R U^2 / 8$ は式(3)の f_R から、滑面部の壁面摩擦 τ_0 は先の f_0 から、形状抵抗は式(9)の C_D から、各々が評価される. 所定の水理条件のもとで式(10)を断面平均流速 U に関して解けば、水路全体の抵抗係数 f が算出される.

様々な d/λ に対する f と Re の関係を実験結果とともに図-11に示す. さらに、図-12はパラメータを θ とした場合の f と Re の関係、図-13は f と無次元水深 h/d の関係をそれぞれ表している. 各図の曲線群は式(10)から算定された f の解析値である. 実際には、断面内の高速部と低速部の流速差に起因する内部せん断力が働いている. 式(10)の運動量式に内部せん断力の効果を反映させることができれば、実験値との適合度がさらに改善されるかもしれない.

7. むすび

浅水部と深水部が混在する開水路の流況や流水抵抗など水理特性を実験的に検討した. 実河川の形状は多様であり、多自然的に改修された河川が本研究における開水路形状によって精確に記述されている

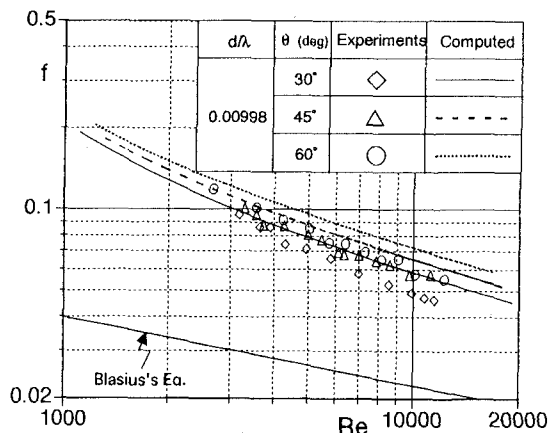


図-12 摩擦損失係数 f と (Re, θ) の関係(Series-R)

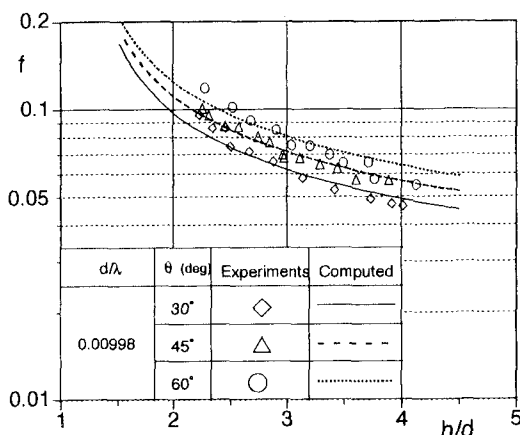


図-13 摩擦損失係数 f と $(h/d, \theta)$ の関係(Series-R)

わけではない. しかし、近年の河川工法の目的の一つは、流速・水深・潤辺粗度を不均一にして流れの多様性を生み出すことにあり、水路断面の抵抗増加や水衝部・緩流部など水理学的に検討すべき課題をとまなう. ここでは、河道要素の空間変化を単純化し、開水路の特性を実験的に検討した. 最終的にこれらの水理学的知見を河道計画に供するためには、粗度係数など一次元的な流水抵抗の表現に帰着する必要がある. 井田の断面分割法⁴⁾に代表されるように、河道内における流速や水深の不均一性を一次的に表現するためには、実河川における流速やせん断力などの三次元的特性に関する知見を積み重ねる必要がある.

参考文献

- 1) 福岡・藤田: 複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用, 土木学会論文集, No.411/II-12, pp.63-72, 1989.
- 2) Parker, G. and Peterson, W.: Bar resistance of gravel-bed streams, J. Hydraulic Eng., Proc. ASCE, Vol.106, HY10, pp.1559-1575, 1980.
- 3) 藤井・道奥・竹本: 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, 第52回土木学会年次学術講演会, 1997年.
- 4) 井田: 広巾員水路の定常流-断面形の影響について, 土木学会論文集, No.69, 別冊(3-2), 1960.

(1997.9.30受付)