

砂礫河川の安定な低水路断面形状に関する研究

九州工業大学大学院 フェロー会員 秋山 壽一郎 九州工業大学大学院 正会員 重枝 未玲
九州工業大学工学部 学生会員 ○岡田 和樹 九州工業大学大学院 学生会員 上田 和也

1. はじめに

近年、治水と環境とが調和した河川管理法の確立が求められている。しかし、治水と環境とが調和した河道断面形状の設計方法に関する情報は少ないため、その確立には自然河川の川幅・水深等の情報を整理することが不可欠である。本研究は、日本および海外の河川の低水路を対象に、安定な低水路の川幅、水深、河床勾配の関係を次元解析に基づき求めたものである。

2. 低水路断面形状の支配パラメータ

一般に河道の形成は、低水路満杯流量 Q_{bf} と深く関係する。低水路満杯時の河道特性を表すパラメータは、低水路満杯流量 Q_{bf} に加え、川幅 B_{bf} 、水深 H_{bf} 、河床勾配 S_0 、 D_r =代表粒径、 s =河床材料の水中比重、 ρ =水の密度、 g =重力加速度の8つのパラメータである。図-1に低水路満杯流量 Q_{bf} と川幅 B_{bf} 、水深 H_{bf} の定義を示す。河道特性を表す関数を ϕ とすると、 ϕ は式(1)で表され、流体特性量 ρ 、運動学的量 g 、幾何学的量 D_r を基本量として、バッキンガムの π 定理を用いると、 ϕ は式(2)に示す無次元量の関数となる。ここに、 $Q_{bf}/(gD_r^5)^{0.5}$ =無次元低水路満杯流量、 B_{bf}/D_r =無次元低水路満杯川幅、 H_{bf}/D_r =無次元低水路満杯水深である。

3. 結果と考察

解析に用いたデータは、日本¹⁾と海外²⁾の河川データである。各諸量の範囲は、低水路満杯流量 Q_{bf} : 0.697~16950 m³/s、低水路幅 B_{bf} : 2.32~776 m、低水路深さ H_{bf} : 0.201~13.92 m、河床勾配 S_0 : 1/33~1/14286、 D_r =代表粒径: 0.00014~175.8 mmである。日本の河川については低水路満杯流量 Q_{bf} が既知である42河川データを用いた。ただし、複列砂州が形成され、流路が複数形成される河川は対象外とした。なお、代表粒径には日本の河川では重量の60%通過粒径 D_{60} が、海外の河川では河床表層材料の中央粒径 D_{50} が用いられている。また、 $s=1.65$ を用いた。

図-2は、無次元低水路満杯川幅 B_{bf}/D_r 、水深 H_{bf}/D_r 、河床勾配 S_0 と無次元低水路満杯流量 $Q_{bf}/(gD_r^5)^{0.5}$ との関係を示したものである。データは礫床と砂床に分けてプロットしており、遷移河床のデータについては対象としていない。また、図中には同データから得られる回帰曲線もあわせて示している。これらの図から、砂床、礫床の河川において、無次元低水路満杯川幅 B_{bf}/D_r 、水深 H_{bf}/D_r 、河床勾配 S_0 のいずれについても相関があることが確認でき、無次元低水路満杯流量 $Q_{bf}/(gD_r^5)^{0.5}$ が河道形成に深く関係するパラメータであることがわかる。また、回帰曲線から、式(3)、(4)に示すような無次元関係式が得られる。これらの式から、(1) 低水路満杯川幅 B_{bf} は、砂床、礫床河川でそれぞれ流量 Q_{bf} の0.46乗、0.48乗で表されること、(2) 低水路満杯水深 H_{bf} は、砂床、礫床河川でそれぞれ流量 Q_{bf} の0.39乗、0.38乗で表されること、(3) 河床勾配 S_0 は、砂床、礫床河

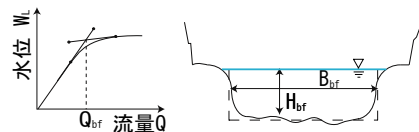


図-1 Q_{bf} , B_{bf} および H_{bf} の定義図

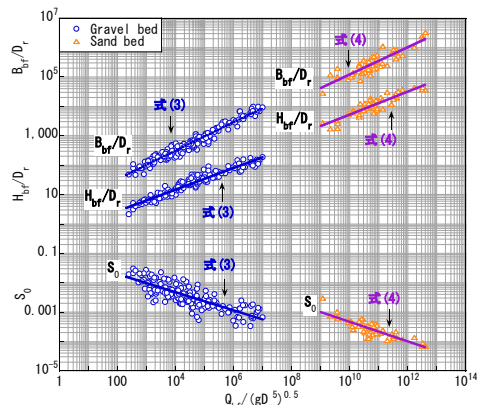


図-2 B_{bf}/D_r , H_{bf}/D_r , S_0 と $Q_{bf}/(gD_r^5)^{0.5}$ との関係

表-1 レジーム論のべき数

	nB	nH	nS
Leopold and Maddock (1953)	0.5	0.4	-
Bray (1982)	0.527	0.333	-0.342
Hey and Thorne (1986)	0.52	0.39	-

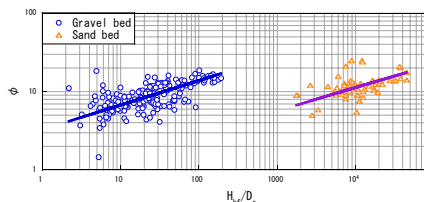


図-3 ϕ と H_{bf}/D_r との関係

$$\phi(Q_{bf}, B_{bf}, H_{bf}, S_0, D_r, g, \rho, s) = 0 \quad (1)$$

$$\phi\left(\frac{Q_{bf}}{\sqrt{gD_r^5}}, \frac{B_{bf}}{D_r}, \frac{H_{bf}}{D_r}, S_0, s\right) = 0 \quad (2)$$

砂床	礫床
$\frac{B_{bf}}{D_r} = 2.94 \left(\frac{Q_{bf}}{\sqrt{gD_r^5}} \right)^{0.463} \quad (3)$	$\frac{B_{bf}}{D_r} = 3.64 \left(\frac{Q_{bf}}{\sqrt{gD_r^5}} \right)^{0.483} \quad (4)$
$\frac{H_{bf}}{D_r} = 0.700 \left(\frac{Q_{bf}}{\sqrt{gD_r^5}} \right)^{0.388}$	$\frac{H_{bf}}{D_r} = 0.520 \left(\frac{Q_{bf}}{\sqrt{gD_r^5}} \right)^{0.382}$
$S_0 = 0.979 \left(\frac{Q_{bf}}{\sqrt{gD_r^5}} \right)^{-0.332}$	$S_0 = 0.0836 \left(\frac{Q_{bf}}{\sqrt{gD_r^5}} \right)^{-0.310}$
$\phi = 0.656 (H_{bf}/D_r)^{0.310}$	$\phi = 3.13 (H_{bf}/D_r)^{0.325} \quad (5)$

川でそれぞれ流量 Q_{bf} の-0.33乗, -0.31乗で表されること, (4) 低水路満杯川幅 B_{bf} と河床勾配 S_0 は, 代表粒径 D_r に依存するが, 低水路満杯水深 H_{bf} は, 代表粒径 D_r にはさほど依存しないことなどが確認できる.

レジーム論では, 低水路満杯川幅 B_{bf} , 低水路満杯水深 H_{bf} , 河床勾配 S_0 は, それぞれ $B_{bf} \propto Q_{bf}^{nB}$, $H_{bf} \propto Q_{bf}^{nH}$, $S_0 \propto Q_{bf}^{nS}$ のような関係で表される. ここに, nB , nH , nS =べき数で, 各研究者が提案するべき数は表-1の通りである. 式(3), (4)はこれらのべき数と概ね一致しており, レジーム論と整合していることがわかる. また, 式(3), (4)を用いて, 低水路満杯時のShields数 $\tau_{bf}^* (=H_{bf}S_0/(sD_r))$, 流速係数 ϕ , フルード数 Fr と無次元低水路満杯流量 $Q_{bf}/(gD_r^5)^{0.5}$ との関係を求めたところ, いずれの関係についても実測値を概ね再現していた.

図-3は, 流速係数 ϕ と無次元低水路満杯水深 H_{bf}/D_r との関係を示したものである. 図中には, 式(3), (4)より得られる ϕ と H_{bf}/D_r との関係式の式(5)も示している. この図より, 実測データにはばらつきがあるが, 式(5)は実測値を概ね再現できることがわかる. この式はManning・Stricklerの式と同様な形であり, そのべき数はManning・Stricklerの式では0.167となるが, 式(5)では少し大きくなる. これは, 式(5)には摩擦抵抗だけでなく, 河床波等の形状抵抗が含まれているためと考えられる.

一般に, 低水路満杯流量 Q_{bf} の情報は少なく, そのため平均年最大流量を Q_{bf} とする場合が多い. 式(3)~(5)を用いると低水路満杯流量 Q_{bf} は B_{bf} , H_{bf} , S_0 , D_r の関数となり, 式(6)のように表すことができる.

- ・砂床: $Q_{bf}=0.656B_{bf}H_{bf}(gH_{bf}S_0)^{0.5}(H_{bf}/D_r)^{0.310}$
- ・礫床: $Q_{bf}=3.130B_{bf}H_{bf}(gH_{bf}S_0)^{0.5}(H_{bf}/D_r)^{0.325}$ (6)

図-4は式(6)の予測結果と実測値との比較を行ったものである. なお, 日本の河川については, 式(3)~(5)を求める際に用いたデータに加え, 低水路満杯流量が不明であった河川の実測値についても示している. これより, 予測結果と実測値は概ね一致しており, 式(6)の妥当性がわかる.

最後に, 河道形成状況を反映した式(3), (4)がセグメントについて表現できるか検討した. 図-5は, セグメント別に B_{bf}/D_r , H_{bf}/D_r および S_0 と $Q_{bf}/(gD_r^5)^{0.5}$ との関係を, 図-6は低水路満杯時のShields数 τ_{bf}^* と粒子Reynolds数 $Re_p (=sgD_r^3/\nu)^{0.5}$ との関係を示したものである. ここに, ν =動粘性係数である. なお, 図中のプロットはセグメントが明確に区別できるもののみとしている. また, 図-6中には, 山本が取りまとめた日本の河川の掃流力と代表粒径の関係¹⁾を無次元化したもの, 岩垣の式から求まる無次元限界掃流力, 摩擦速度 $u^*=$ 沈降速度 W となる浮遊限界の目安になるラインもあわせて示している. これらの図から, (1) プロットはセグメントごとにまとまっていること, (2) セグメント2-1と2-2は, 砂床と礫床河川で区別されており, 大きな違いは河床勾配で現れること, (3) セグメント3では浮遊砂が, セグメント2-2では浮遊砂と掃流砂が, セグメント2-1, セグメント1では掃流砂が河道形成に寄与しており, セグメント2-1, セグメント1では静的平衡状態が河道の形成に支配的であること, などがわかる. このように, 本研究の関係式は, セグメント別の河道特性についても捉えていると考えられる.

4. おわりに

以上, 本研究から, 日本および海外の砂礫床河川の低水路を対象に, 式(3)~(4)のような安定な低水路の川幅, 水深, 河床勾配の関係式を得た. さらに, 同関係式は, セグメントについても表現可能であること, 低水路満杯流量についても予測可能であること, などがわかった.

参考文献: 1)山本: 土木研究所資料, 第2662号, p.260, 1988. 2)Parker, G. et al.: *J. of Geophys. Res.*, Vol.112, F04005, 2007.

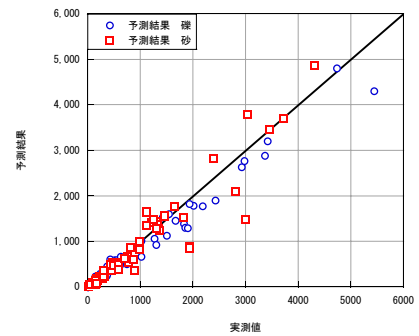


図-4 Q_{bf} の予測結果と実測値との比較

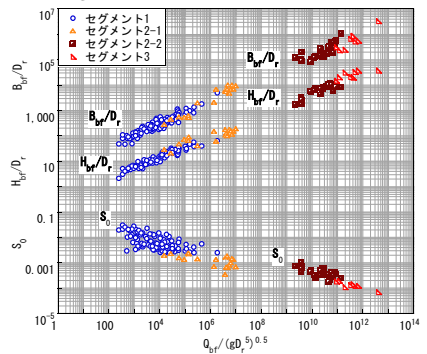


図-5 セグメント別の B_{bf}/D_r , H_{bf}/D_r および S_0 と $Q_{bf}/(gD_r^5)^{0.5}$ との関係

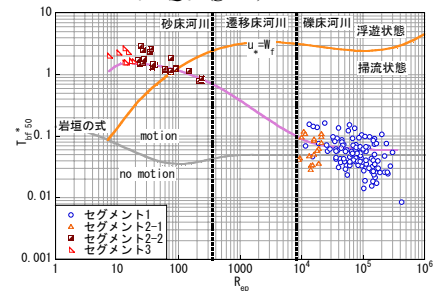


図-6 τ_{bf}^* と Re_p との関係