

自然安定河道の流速係数と無次元掃流力について

九州工業大学工学部 学生会員 ○ 内野 雅文 九州工業大学 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 国土交通省九州地方整備局 非会員 古賀 満

1. はじめに

本研究では、まず経年的に安定した状態にある国内外の実河川資料(以下「Data S」という)に基づき、流速係数 ϕ を推定し、この ϕ を用いて“安定河道の式”^{1),2)}(「式」)を近似した“式の簡易式”(「簡易式」)を提案した。同式の妥当性をData S、九州4河川の安定した状態にある区間の資料(「Data O, K」)および室内実験で得られた安定水路の資料(「Data E」)を用いて検証した。次に動的平衡状態にある無次元掃流力 τ_{*s} と代表粒径 d_R に関する関係式を提案し、Data S、O、KおよびE(「全Data」)に基づき同式の妥当性を実証した。

2. 安定河道の式

安定河道の横断形を規定する“等流の関係式”と筆者らが提案した“レジーム則を満たす条件”より、安定河道の横断形(h/d_R , B/d_R , A/d_R^2)と無次元掃流力 τ_{*s} に関する式が、河道形成流量 Q 、セグメント特性(河床勾配 I 、代表粒径 d_R)および水理解析より得られた ϕ を与条件として、表-1の式(1)~(4)のように得られる^{1),2)}。ここに、 K はセグメントグループ(「セググループ」)単位で定められる経験係数であり、セググループとは各セグメントをグループA(セグメント1, 2-1)、グループB(セグメント2-2, 3)に大きく分けたものである^{2),3)}。

3. 流速係数 ϕ の推定と式の簡易式

小規模河床形態を考慮した岸・黒木の抵抗則⁴⁾からわかるように、 ϕ は式の予測値である h/d や τ_{*s} に規定されている。このことを踏まえ、以下ではまず ϕ を与条件 I で表示した近似式を求め、次に式を与条件(Q , I , d_R)で表した簡易式を提案する。

(1) ϕ の推定とその検証

Data Sより、(i)大多数のデータがFroude数 $Fr(=U/(gh)^{1/2})$ が0.8~1.0以下のLower Regimeのものとなっていること²⁾、(ii) $h/d_R = \tau_{*s} \cdot (s/I)$ なる関係があり、図-1, 2で確認できるように、 $h/d_R \sim I^{-1}$ なる関係が成立していることと、 τ_{*s} が I と独立になっていることがわかる²⁾。これを踏まえれば、岸・黒木の抵抗則⁴⁾(砂堆： $\phi=2.4(h/d_R)^{1/6} \cdot \tau_{*s}^{-1/3}$ 、砂堆： $\phi=8.9$ 、平坦： $\phi=6.9(h/d_R)^{1/6}$)より、安定河道における砂堆と平坦河床の ϕ は、 I を与条件として式(5)で近似できる。なお、砂堆はこの関係

表-1 式まとめ

安定河道の式	
$h/d_R = K^{1/2} \cdot [(I/s)^{-1/2} \cdot (\phi^{-1} Q / (g I d_R^5)^{1/2})^{1/3}]$	(1)
$B/d_R = K^{-3/4} \cdot [(I/s)^{1/2} \cdot (\phi^{-1} Q / (g I d_R^5)^{1/2})^{1/2}]$	(2)
$A/d_R^2 = K^{-1/4} \cdot [(I/s)^{1/10} \cdot (\phi^{-1} Q / (g I d_R^5)^{1/2})^{5/6}]$	(3)
$\tau_{*s} = K^{1/2} \cdot [(I/s)^{5/2} \cdot (\phi^{-1} Q / (g I d_R^5)^{1/2})^{1/3}]$	(4)
$\phi = \beta \cdot I^{-1/6}$	(5)
式の簡易式	
$h/d_R = K^{1/2} \beta^{-1/3} s^{1/6} I^{-1/9} \cdot [Q / (g I d_R^5)^{1/2}]^{1/3}$	(6)
$B/d_R = K^{-3/4} \beta^{-1/2} s^{-1/4} I^{1/3} \cdot [Q / (g I d_R^5)^{1/2}]^{1/2}$	(7)
$A/d_R^2 = K^{-1/4} \beta^{-5/6} s^{-1/12} I^{2/9} \cdot [Q / (g I d_R^5)^{1/2}]^{5/6}$	(8)
$\tau_{*s} = K^{1/2} \beta^{-1/3} s^{-5/6} I^{8/9} \cdot [Q / (g I d_R^5)^{1/2}]^{1/3}$	(9)
$\tau_{*s} / [(Q^2 I^{13/3}) / g]^{1/6} = \zeta \cdot d_R^{-5/6}$	(10)
ここに、 $\zeta = (\beta^{-1/3} K^{1/2}) / s^{5/6}$	(11)

ここに、 A :河積、 B :川幅、 I :河床勾配、 K :セグメントグループ単位で定められる係数、 Q :河道形成流量、 d_R :河床材料の代表粒径、 g :重力加速度、 h :平均水深(=A/B)、 s :粒子の水中比重(=1.65)、 β :DataSに基づき定められる係数、 ϕ :流速係数、 τ_{*s} :動的平衡状態にある無次元掃流力(= $u_{*s}^2 / (sgd_R)$)

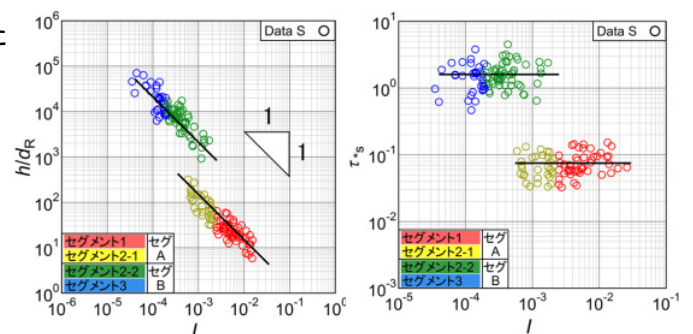


図-1 $h/d_R \sim I$ の関係

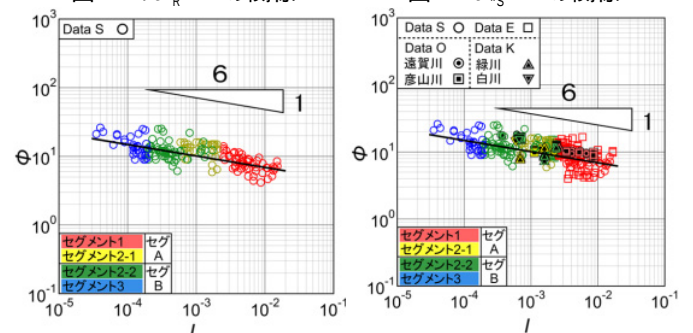


図-2 $\tau_{*s} \sim I$ の関係

図-3 $\phi \sim I$ の関係(左: Data S, 右: 全Data)

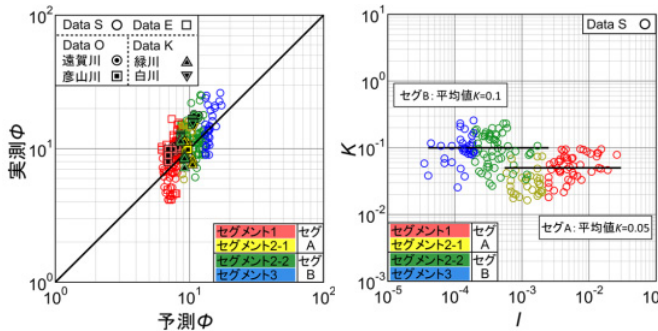


図-4 ϕ の実測値と予測値の比較 図-5 $K \sim I$ の関係

に従わないが、一般に砂堆の範囲は狭く、また砂堆の h/d_R に対する依存性を考慮すれば、砂堆の抵抗則は砂堆の延長線上で捉えることができる。

図-3にData Sと全Dataの $\phi \sim I$ の関係を示す。これよりややばらつきは認められるものの全セグメントにわたって $\phi \sim I^{-1/6}$ なる関係が成立していることが確認できる。Data Sに基づき式(5)の係数 β を求めると、全セグメントについて $\beta = 3$ となる。図-4に水理解析と式(5)より推定された ϕ を比較したものを示す。全Dataに対して両者がよく一致していることが確認できる。

(2)簡易式の検証

式(5)の ϕ を式(5)で近似すると、表-1の式(6)~(9)の簡易式が得られる。図-5にData Sの $K \sim I$ の関係を示す。これより K はセググループ単位で I に対してほぼ一定値を取ることが確認でき、 K の平均値はそれぞれグループAで0.05、グループBで0.1のように推定できる。

2). 図-6に全Dataに対する式(5)と簡易式の横断面と無次元掃流力 τ_{*s} の予測結果を示す。このように式(5)と簡易式の予測結果にはほとんど違いはない。また、式(5)の妥当性はData S, OおよびEから確認されていることから²⁾、簡易式が式(5)と同程度の予測精度を有していることがわかる。

4. 無次元掃流力 τ_{*s} と代表粒径 d_R の関係

図-7は全Dataを用いて $\tau_{*s} \sim d_R$ の関係(山本の経験則⁵⁾)について調べたものである。図中の青の実線は岩垣の式より得られる無次元限界掃流力 τ_{*c} である。これより、Data S, OおよびKは同経験則のまわりに分布しているものの散らばりが大きく、またData Eは同経験則から大きく外れていることが確認できる。図-8は式(4)に式(5)を適用して得られた式(10)の関係を示したものである。これよりセググループ単位で式(10)が良好に成立することがわかる。併せて図-8で山本の経験則から大きく外れていたData Eも式(10)に従うことが確認できる。

5. まとめ

本研究では、(i)自然安定河道の流速係数 ϕ を推定し、この ϕ を用いて安定河道の横断面(h/d_R , B/d_R , A/d_R^2)と無次元掃流力 τ_{*s} に関する“式(5)の簡易式”を提案し、その妥当性を検証した。(ii)動的平衡状態にある無次元掃流力 τ_{*s} と代表粒径 d_R に関する関係式を提案し、その妥当性を実証した。

参考文献：1) 秋山ら：砂礫河川の平均スケールと動的平衡条件，土木学会論文集B1(水工学)，2014. 2) 秋山ら：自然安定河道の特性に基づく砂礫河川の横断形状と無次元掃流力の予測，土木学会論文集B1(水工学)，2016. 3) 秋山ら：安定した砂礫河川低水路の無次元掃流力について，土木学会論文集B1(水工学)，2015. 4) 黒木・岸：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文集，1984. 5) 山本：沖積河川 -構造と動態-，技法堂出版，p.587, 2010.