

側壁効果による河床せん断応力の補正

九州大学 正 員○楊 永荻

〃 〃 平野宗夫

〃 〃 学生員 H. M. Nagy

1 まえがき

水路における流砂量を求める際には、河床せん断応力に対する側壁の影響を考慮する必要がある。特に、幅と水深の比が大きい水路における流れの実験データを解析する場合には、側壁の効果が大きいため合理的に補正しなければならない。従来より、壁面粗度が非一様な水路や河川の流れにおいて、各粗度の効果を区分して抵抗則を算出するさまざまな方法が提案されてきた。本文は、掃流砂量の実測データをもとにこれら各側面効果補正法を比較し、考察したものである。

2 側壁効果の補正法

2.1 分割面積法¹⁾ 側壁効果を重視して分割面積法を提唱したのはEinsteinが最初である。その後、Lotter、Vanoni & Brookなどがその修正案を提出した。足立、木村などは水路の内部の流速分布から分割面積法をより広い視点で検討した。しかし、分割面積法はある仮定に基づいており物理意味が不明確で、広い範囲に使用すると、不合理な点が多い。

2.2 Knightの式 Knightら^{2,3)}は壁面と底面の粗度が一樣の場合および非一樣の場合について、経験式をそれぞれ以下のように入えた。

$$\text{一樣粗度水路: } \%SF_w = e^{\alpha} \quad \alpha = a_1 \log(2A_r + a_2) + a_3 \quad \frac{\bar{\tau}_b}{\tau_0} = (1 - 0.01 \%SF_w) \left(1 + \frac{1}{A_r}\right) \quad (1)$$

$$\text{非一樣粗度水路: } \%SF_w = e^{\alpha} \{ \tanh \pi \beta - 0.5 (\tanh \pi \beta)^2 \} \quad \frac{\bar{\tau}_b}{\tau_0} = 1 - 0.2 \log R_r \quad (2)$$

ここに、 $\%SF_w$ は側壁に働くせん断応力と全せん断応力との比の百分率、 A_r は水路断面のAspect Ratio、 $A_r = b/h$ 、 b は水路の半幅、 h は水深、 $\bar{\tau}_b$ は河床における平均せん断応力、 τ_0 は過水断面の平均せん断応力、 $\tau_0 = \rho g R S$ 、 R は径深、 S は勾配、 a_1 、 a_2 および a_3 は定数で、それぞれ $a_1 = -3.230$ 、 $a_2 = 3$ 、 $a_3 = 6.146$ 、 R_r は水路側壁と底面の粗さの比、 $R_r = k_b/k_w$ 、 k_b 、 k_w は河床、側面のそれぞれ粗度の高さである。

2.3 楊・大同の式⁴⁾ 著者らは水路のAspect比および壁面粗度により流れをwide-shallow型流とnarrow-deep型流に区分したモデルを構築し、それに基づいて、壁面せん断応力式を誘導した。その結果は下記のようなのである。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{\tau}_b}{\tau_0} &= \left(1 + \frac{1}{A_r}\right) \left(1 - \frac{0.6}{A_r R_r^{0.1}}\right) & \text{for } A_r \geq 2 R_r^{0.1} \\ \frac{\bar{\tau}_b}{\tau_0} &= 0.38 \left(1 + \frac{1}{A_r}\right) \left[\left(1 + \frac{0.016}{A_r R_r^{0.1}}\right) \ln \left(1 + 6.3 A_r R_r^{0.1}\right) - 1 \right] & \text{for } R_r^{0.1} \leq A_r \leq 2 R_r^{0.1} \\ \frac{\bar{\tau}_b}{\tau_0} &= \left(1 + \frac{1}{A_r}\right) \left[1 - 0.38 \left[\left(1 + 0.016 A_r R_r^{0.1}\right) \ln \left(1 + \frac{6.3}{A_r R_r^{0.1}}\right) - 1 \right] \right] & \text{for } 0.5 R_r^{0.1} \leq A_r \leq R_r^{0.1} \\ \frac{\bar{\tau}_b}{\tau_0} &= \left(1 + A_r\right) \frac{0.6}{R_r^{0.1}} & \text{for } A_r \leq 0.5 R_r^{0.1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3 比較および考察

3.1 壁面粗度一樣の場合 図1は水路の潤辺に沿う壁面の粗度が一樣である水路のAspect比(A_r)と無次元化された河床せん断応力との関係について実験データと各側壁効果補正法による結果とを比較したものである。実験データは開水路および管路における滑面と粗面を含み、粗面の粗度の高さが広い範囲($k_b = 0.005 - 1.2$ cm)を用いた。図より、従来の分割面積法では側面が流れに及ぼす効果の補正がなくなり、その補正法の物理的な欠点、不合理性を示されている。流れのAspect比が大きい($A_r \geq 2$)、あるいは水路の側面が流れに及ぼす影響が比較的に小さいとき、Knightの式(1)と著者らの式(3)はほぼ同じで、実測データに合っているが、水路のAspect比が小さい、あるいは水路の側面が流れに及ぼす影響が比較的に大きい場合には、式(1)と式(3)は離れ、式(3)の方が実測データとの適合性はよい。

3.2 壁面粗度非一樣の場合 図2はKnightによって定義された側壁に働くせん断応力と全せん断応力との比について、実験データをVanoni & Brook、Knightの式(2)及び著者らの式(3)と比較したものである。図より、壁面粗度非一樣の場合にも、水路のAspectが小さい時、式(3)の方が実験データとより一致することを示している。また、壁面の粗さの比の変化に対して、Vanoni & Brookの補正法と式(2)による結果は差異が大きく、式(3)の方が実験データとの適合性がよい。

3.3 掃流砂量データとの比較 一般に、掃流砂量は流水が河床に作用するせん断応力によるもので、河床せん断応力を正確に算出することが必要である。特に、水路実験の場合には、水路幅が大きくできないので、河床せん断応力に対する側壁の効果が無視できない場合が多い。ここでは、長方形水路において広い範囲のAspect比($Ar=0.34-22.59$)もとで行われたWilliams³⁾の掃流砂量に関する実験データを用いて、各補正法の適合性について比較を行う。Williamsの実験水路の側壁はガラスを、実験砂は $d=0.135\text{cm}$ 自然砂を用いているため、 k_b, k_w はそれぞれ $k_b=0.135\text{ cm}$ 、 $k_w=\delta$ とする。ここに、 δ は粘性底層の高さ、 $\delta=11.6\nu/u_*$ である。

図3及び図4は各補正法による河床せん断応力とWilliamsの掃流砂量データとの関係を示したものである。図3は、せん断応力を水深 h を用いて ρghS とした場合と、径深 R をもちいて ρgRS とした場合を比較したものである。明らかに後者の方がまとまりがよく、側壁効果の補正が必要なることを示している。図4は各補正法で求めたせん断応力と掃流砂量の関係をプロットしたもので、データのバラツキはほぼ同じぐらいであり、優劣はつけ難い。また、径深で表すせん断応力を用いた場合と同程度のバラツキである。

つぎに、図4は径深で表すせん断応力を用いて、既往の掃流砂式(Meyer-Peter Muller¹⁾、佐藤ら⁷⁾及び芦田、道上⁶⁾)による計算値とWilliamsの実験値と比較したものである。Williamsのデータでは、径深のせん断応力を用いることにより掃流砂量を精度よく算定することができる。今後さらに広い範囲の流砂量のデータについて検討する予定である。

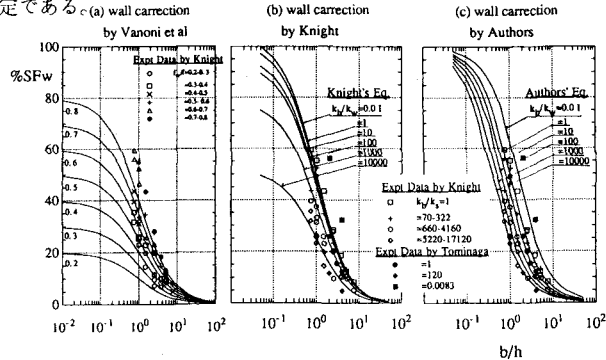


図2 壁面粗度非一様の河床せん断応力と幅一水深比の関係

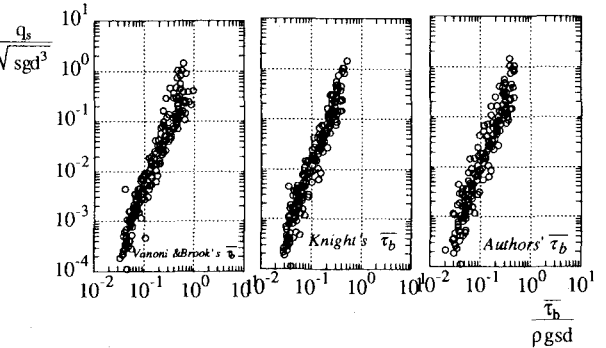


図4 各補正法による河床せん断応力と掃流砂量

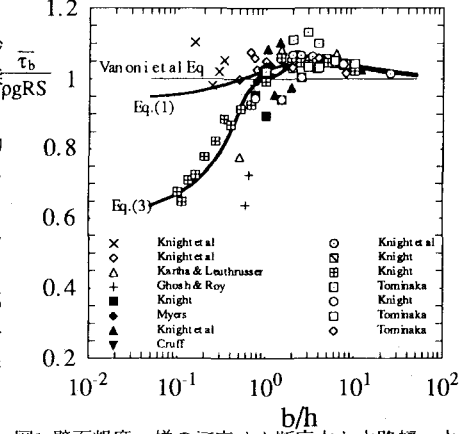


図1 壁面粗度一様の河床せん断応力と水路幅一水深比の関係

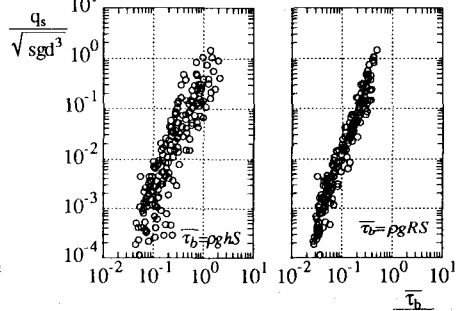


図3 河床せん断応力の表示と掃流砂量 pgsg

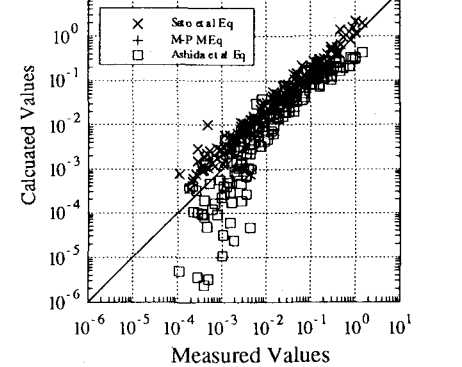


図5 掃流砂量の計算値と実測値の比較

参考文献 1)河村、土砂水理学、森北出版(1982)、2)Knight, D. W. et al, J ASCE, Vol.107, No.7(1981)、3)Knight D W, J. ASCE, Vol.111No.1(1985)、4)Yang, Y. and A. Daido, P. JSCE, No.467(1993)、5)Williams, G. P., Prof. Paper 562-H, U.S.G.S(1974).、6)芦田・道上、土木学会論文報告集, No. 206(1972)、7)佐藤ら、土木研究所(1956)