

Upper Flow Regime の流速係数について

徳島大学 正員 ○ 岡部 健士
同 正員 杉尾 捨三郎

1. まえがき

Upper Flow Regimeにある流れが受ける抵抗は、路床表面に停滞している砂粒群と流水との間に生じる摩擦力と、砂粒を輸送するに必要な力との和である。そこで、従来その流速係数は、相対水深 (h/d ; h = 水深あるいは径深、 d = 砂粒径) と、無次元掃流力 (U_{*0}^2/sgd ; U_{*0} = 摩擦速度、 s = 砂粒の水中比重、 g = 重力の加速度) の関数になるはずであるとして、幾つかの抵抗式が提案されている。しかし、それらはいずれも単に実験資料を整理した結果の実験式である。

移動床上の等流においては、流水と粒子群とが相互に干渉し合い、結果として一つの平衡状態が作り出されているはずであるから、それを考究すれば、より理論的な誘導過程を経て抵抗式を得ることが可能になると思われる。本報告は、Upper Flow Regimeにある流れの路床近傍において流砂が流速分布に及ぼす影響を水理学的に考察することによって導かれた流速係数式を紹介すると共に、その有用性の検討を行なうものである。

2. 流速係数式の誘導

Upper Flow Regimeとは Transition、Plane、Anti-Dunes、Standing Waveなどの総称であり、Ripples、Dunesに見出される流れのハク離がないので、流れの場の構造は比較的単純である。本報告では、流れを下記のような2つの領域に区分して考察する。

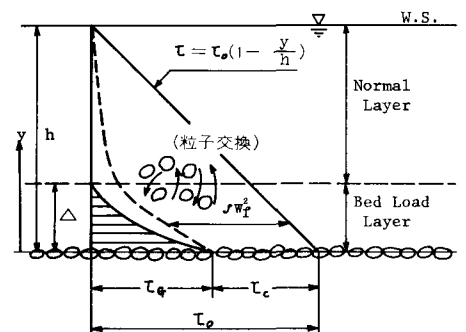
- (1) Bed load layer: 流砂が Bed-contacting load として運動する範囲の薄い (粒径オーダーの) 層。
- (2) Normal layer: Bed load layer 以外の部分で、浮遊粒子を含む層。

Bed load layer においては、砂粒子が路床との接触や他粒子との衝突をくり返しつつ、また、浮流砂との粒子交換を行ないつつ流下しているであろう。そして、流れが全体として一つの平衡状態にあれば、砂粒子群に作用する掃流力や揚力の平均値が、ある限界値に保持されているものと推察される。一方、Normal layerは、浮遊粒子の拡散領域であり、Bed load layerほど粒子濃度が高くなく、粒子が流水に及ぼす影響はさほど大ではないものと思われる。以上を基礎理念として両層の流速分布を定めたのち、流速係数を定式化する。

Bagnold¹⁾ および石原・岩垣・末石²⁾ は、流砂を多量に含む流れの路床近傍において詳細な流速測定を行ない、ここでは路床からの距離に関する速度勾配が、判数則によるものより小さくなっていることを示した。ことに、Bagnoldは、その原因が粒子相互の衝突による流水内剪断応力の減少であるとみなした。また、道土³⁾ は Bagnoldの成果をふまえ、停滞している砂面上の流水内剪断応力が砂粒の限界掃流力に等しいと仮定して、信頼度の高い掃流砂公式を得た。両者の考察を参考にして、当該流れの剪断応力分布を模式化したのが図-1である。

さて、Upper Flow Regimeの流れは多量の浮流砂を伴うものであることを考えると、Bed load layerには、浮流砂の“flux”に関連する限界条件が内在すると推察される。すなわち、路床面上で流水内剪断応力が砂粒限界掃流力に等しく保たれるとの道土の考えを拡張して、Bed load layer内の流水内剪断応力によって定められる摩擦速度は粒子の最終沈降速度に等しい (このとき $flux = 0$) と仮定するのは不合理ではあるまい。

粒子の存否によらず流水内の実質剪断応力が流速を規定すると仮定すれば、Bed load layerの流速は次式で表わされる。



τ_0 = 見かけの路床剪断応力、 τ_c = 粒子間応力
 τ_c = 粒子の限界掃流応力、 w_f = 粒子の沈降速度

図-1 流れの中の剪断応力分布の模式図

$$u/w_f = 1/K \ln(y/d) + C_1 \quad ; \quad (d < y < \Delta) \quad (1)$$

ここに、 u = 流速、 K = Kármán 定数 ($= 0.4$)、 y = 停止砂面からの距離、 C_1 = 定数
見かけの摩擦速度を u_{*0} とすれば、 $w_f < u_{*0}$ であるから (1) 式が与える速度勾配は、通常の形式の対数則が示すものより小さくなり、Bagnold や石原らの実測と傾向が合う。なお、 C_1 は Nikuradse の実験結果を整理して作られた図-2 より定めることにする。図-2 は粒径が一様な砂粒粗面上の流速分布を

$$u/u_{*0} = 1/K \ln(y/k_s) + B \quad (2)$$

といたときの B の変化を図示したものである。ただし、いま考えている流れに対しては、 u_{*0} の代りに w_f を用い、実計算では下記のような近似式で (1) 式の C_1 を求めることにする。動粘性係数を ν とおき、

$$C_1 = 5.5 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{w_f d}{\nu} \right) \quad ; \quad w_f d / \nu \leq 5 \quad (3)$$

$$C_1 = 10.5 - \log_{10} \left(\frac{w_f d}{\nu} \right) \quad ; \quad 5 < w_f d / \nu \leq 100 \quad (4)$$

$$C_2 = 8.5 \quad ; \quad w_f d / \nu > 100 \quad (5)$$

つぎに、Normal layer では、(6) 式のような見かけの摩擦速度を流速スケールとする対数型流速分布式が適用可能であろう。

$$\frac{u}{u_{*0}} = \frac{1}{K} \ln \left(\frac{y}{d} \right) + C_2 \quad ; \quad C_2 = \text{定数} \quad (6)$$

ところで、浮遊砂を含む流れにおいては、 K が清水流のものより若干小さくなるとの報告があることを考慮すれば、(1) 式および (6) 式の K を常に 0.4 とすることに疑問が生じる。しかし、 K に関してはまだ議論の多い研究段階なので、本報では一応普遍定数としておく。

(1) および (6) 式を $y = \Delta$ において接続させることにすると、 C_2 は (1) 式により決定され、結果として (6) 式はつぎのように書き直される。

$$u/u_{*0} = 1/K \ln(y/\Delta) + w_f/u_{*0} \left(1/K \ln(\Delta/d) + C_1 \right) \quad (7)$$

さらに、Bed load layer の流量を無視して流速係数 φ を求めると、

$$\varphi = 1/K \ln(\Delta/d) - 1/K + w_f/u_{*0} (1/K \ln(\Delta/d) + C_1) \quad (8)$$

となる。ここに、 $\alpha = \Delta/d$ である。

Engelund、石原ら、芦田らの研究を参照すれば、 $\alpha = 2 \sim 4$ 程度となることが予想されるが、これについては実験資料を用いた検討を要する。

3. 数値検討

(8) 式の通用性を Guy・Simons・Richardson⁵⁾、田中⁶⁾、道上³⁾らの実験資料計 80 個を利用して検討した。その結果、 $\alpha = 3$ としたとき比較的良好的精度を期待し得ることがわかった。図-3 は実験値と計算値の比較図である。なお従来の抵抗式との比較については講演時に報告する。

[参考文献]

- 1) Bagnold: Philosophical Trans. Royal Soc. of London, Vol. 249, 1957.
- 2) 石原・岩垣・末石: 応用水理学中 I, 2・1, 丸善, 1958.
- 3) 道上: 京都大学学位論文, 昭和 47 年.
- 4) Schlichting: Boundary Layer Theory, 6th Ed., Chap. IX, 1968.
- 4) Guy・Simons・Richardson: Geological Survey Pro. Paper, 462-I, 1956-61.
- 6) 田中: 京都大学学位論文, 昭和 46 年.

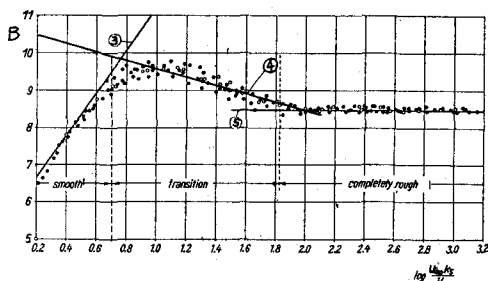


図-2 流速分布に関する係数 B と粒子粗度 $(u_{*0}d)/\nu$ 数との関係 (Nikuradse による)

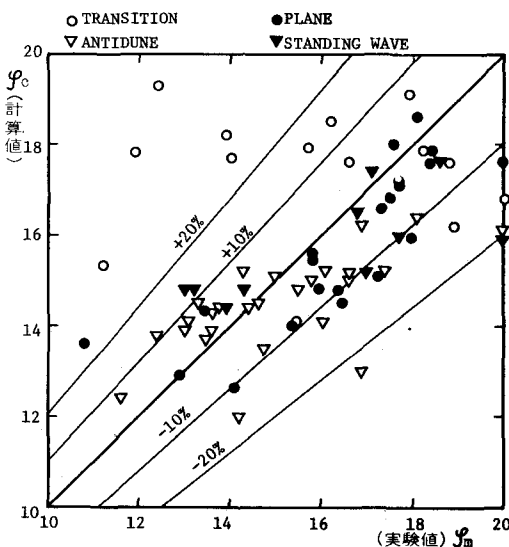


図-3 計算による流速係数 φ_c と実測の流速係数 φ_m との比較