

粗礫下流部の流速分布に関する一検討

日本大学工学部 正員 ○高橋 迪夫
日本大学工学部 正員 木村 喜代治
日本大学工学部 正員 小嶋 健一

1. ま え が き

一般的に、礫床河川における流れの抵抗特性には、平均的河床面から突出して点在する粗礫が大きな影響を及ぼしているものと考えられる。粗度下流部の流速分布に関しては、棧粗度上の流れを2次元後流と壁面乱流の組合せと考えた山岡¹⁾の詳細な研究、あるいは神田・喜久里²⁾の報告等がある。一方、本報で対象としている粗礫下流部における流れは、礫上方ならびに側方からの流れ込みによって混合、平均化が進み、その結果、2次元後流に比べて流速欠損の回復が速められることが推測され、後流域に対する3次元的な取扱いが必要と思われる。本報は、路床面に存在する単一半球粗度下流部の流速分布を、自由乱流の軸対称後流と対数則の成立する壁面乱流の流れの組合わせによって表現しようと試みたものである。

2. 理論的取扱い

Fig. 1に示すように、粗度下流部の流れが、粗度背後の剥離域との境界付近で生成される乱れが支配的で自由乱流後流としての特性が卓越する領域Ⅰと、粗度の上流側の特性が保存される、いわゆる壁面乱流における対数分布則が成り立つ領域Ⅱ、の2つの領域に区別されるものとする。なお、領域Ⅰの流れが路床面に到達する再付着域の下流側からは、壁面境界層が形成されるが、石川³⁾の段落ち流れの結果にも示されているように、

Fig. 1

その厚さは非常に薄く、また、その発達も流下距離に比べてはるかに小さく、本報においては、粗度高の10倍程度の下流側で底面ごく近傍に一部認められる程度であり、その結果、本報で主として対象としている粗度高の10～15倍程度までの流れにおいては、その領域はそれほど大きくないものと考えられ、省略された。

(1) 領域Ⅰの流れの解析： 領域Ⅰの流れは、自由乱流中に置かれた球の後流の問題として取り扱うことができると考えられる。Fig. 2のような軸対称後流における流れの基礎式は、流れの場の圧力を一定と考えると、次のように表される⁴⁾。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} (y \tau) \quad \dots \dots (1)$$

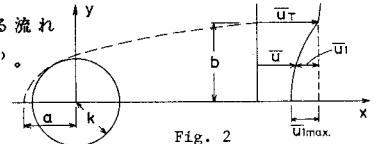


Fig. 2

一方、流れの物理量の大きさのオーダーの評価ならびに相似性の検討より、軸対称後流における後流の幅 b 、半値半幅 $b_{1/2}$ 、および最大欠損流速 $\bar{u}_{1max}$ に対する相似解は、それぞれ次のように表現される⁴⁾。

$$b = \sigma_1 (k^2 X)^{1/3} \quad \dots \quad (2)$$

$$b_{1/2} = \sigma_2 (k^2 X)^{1/3} \quad \dots \quad (3)$$

$$\bar{u}_{1max} = \alpha \bar{u}_\tau (X/k)^{-2/3} \quad \dots \quad (4)$$

これより、物体から充分離れた下流部における軸対称後流の欠損流速 $\bar{u}_1$ の分布は、次式で表される⁵⁾。

$$\frac{\bar{u}_1}{\bar{u}_{1max}} = \exp \left(-\frac{\xi^2}{\beta} \right) \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $\xi = y / (k^2 X)^{1/3}$ 、 $\beta = 6 \varepsilon_y / \bar{u}_\tau k (X/k)^{1/3}$ 、 ε_y ；渦動粘性係数。次に、物体を囲む検査面に運動量方程式を適用すると、式(4)の α は、 $\alpha = C_D / 2\beta \quad \dots \quad (6)$ となり、式(4) (6) および (5) より、欠損流速分布式は次のようにも表現される。ただし、 C_D ；抗力係数。

$$\frac{\bar{u}_1}{\bar{u}_\tau} = \frac{C_D}{2\beta} \left(\frac{X}{k} \right)^{-2/3} \exp \left(-\frac{\xi^2}{\beta} \right) \quad \dots \quad (7)$$

なお、 β は、半値半幅の定義より、式(3)の σ_2 と、 $\beta = 1.44 \sigma_2^2 \quad \dots \quad (8)$ となる。

以上より、領域Ⅰにおける粗度中心軸上の流速分布は次式で表される。ただし、 u_* ；摩擦速度。

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \left[1 - \frac{C_D}{2\beta} \left(\frac{X}{k} \right)^{-2/3} \exp \left(-\frac{\xi^2}{\beta} \right) \right] \frac{\bar{u}_\tau}{u_*} \quad (0 < y \leq b) \quad \dots \quad (9)$$

(2) 領域Ⅱの流れ : 領域Ⅱの流れは、次の対数分布式で表されるものとする。ただし、 B ; 定数。

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 5.75 \log \frac{y}{k} + B \quad (b < y \leq H) \quad \dots (10)$$

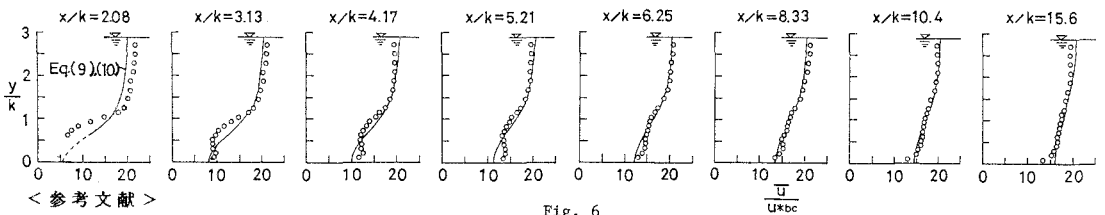
4. 実験結果および検討

(1) 後流の幅 : 流れの領域を区分するために、式(2)で示される後流の幅 b を決定する。領域Ⅱでは、流速の測定値 $\bar{u}/u_{*bc}$ と $\log y$ とは式(10)のように5.75の傾きを有する対数分布直線上にプロットされるはずであり、その結果、この直線からはずれる位置が領域の境界と考

えられる。ただし、 u_{*bc} は水路底面中央部の摩擦速度⁶⁾である。しかしながら、流下が進み領域Ⅱが減少していくに伴い、直線からはずれる位置の判定が不明確になる。一方、Fig. 3のように、粗度下流部における平均流エネルギー $\bar{u}^2$ に対する乱れエネルギー $\bar{q}^2 (= \bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \frac{b}{k} \bar{w}^2)$ の割合が、接近流におけるその割合と等しくなる位置は、領域ⅠとⅡとの境界に対応しているものと考えられる。ただし、添字 ∞ は接近流における値である。前者の判定方法(①)および後者の方法(②)により求められた b の値を示したのがFig. 4である。図より、式(2)の関数形は、実験値にはほぼ従っていることが認められ、その結果、 $\sigma_1 = 1.2$ および $a = 1.92 \text{ cm}$ が得られる。

(2) 後流の半値半幅および最大欠損流速 : 領域Ⅰにおける欠損流速 $\bar{u}$ の測定値を対数自乗グラフ上にプロットした一例がFig. 5である。この図より、路床面近傍を除くと、欠損流速はほぼ直線的に分布しており、領域Ⅰは、自由後流としての特性が支配的であることが理解される。なお、路床面近傍における直線からのずれは、路床面に到達して反射する流れによって $y(\text{cm})$ で路床面近傍の流速の欠損の回復が速められたためと推測される。これより $y = 0$ における $\bar{u}_1$ が最大欠損流速 $\bar{u}_{1\max}$ となり、さらに、 $\bar{u}_{1\max}/2$ における y の値から半値半幅 $b_{1/2}$ が求まる。このようにして求められた $b_{1/2}$ の値がFig. 4に示されている。この図より、式(3)の関数形は、実験値の傾向をほぼ表現していると考えられ、その結果、 $\sigma_2 = 0.48$ が得られ、さらに、式(8)より、 $\beta = 0.33$ となる。なお、 b と $b_{1/2}$ とは、 $b = 2.5 b_{1/2}$ となる。

(3) 流速分布 : 接近流 $x/k = -26.0$ における流速の測定値より、式(10)の定数を求めると、ほぼ $B = 18.0$ となる。以上の検討により求められた粗度下流部中心軸上の流速分布式(9)および(10)と測定値とを比較したのが、Fig. 6である。なお、式(9)の C_D の値は、実験結果をもとに、0.99とした。この図より、すでに指摘されたように、再付着域から反射する流れの影響によって路床面側で一部はずれているが、 $x/k = 4 \sim 5$ 程度の粗度に近い流れに対しても、両者はほぼ一致していると思われる。なお、 $x/k = 10.4$ あるいは15.6の路床面ごく近傍の測定結果に、壁面境界層の存在が一部認められるようである。



<参考文献>

Fig. 6

- 1) 山岡純, 北海道開発局土木試験所報告, 第27号, 1962.
- 2) 神田徹・喜久里政宏, 第23回水理講演会論文集, 1979.
- 3) 石川忠晴, 土木学会論文報告集, 第257号, 1977.
- 4) Schlichting, H.; Boundary-Layer Theory.
- 5) Hinze, J.O.; Turbulence.
- 6) 木村喜代治, 土木学会論文報告集, 第251号, 1976.