

II-135 矩形断面直線開水路乱流の流速分布

東京都 建設局 正員 山岡 達也
早稲田大学 大学院 学生員 沢野 久弥
早稲田大学 理工学部 正員 吉川 秀夫

1. はじめに 直線開水路乱流に於ける乱流の三次元構造は、河川工学の最も根本的な部分であるにもかかわらず、二次流の発生機構および、主流の最大流速が自由水面下に現れる現象など、依然不明なところが多い。これら三次元構造を解明し、壁面上の剪断力を算定することは、河川工学上重要な意味をもつと思われる。しかしながら、理論的な解明は、三次元ともなるとかなり多くの諸条件が重なる為、非常に困難であろうと予想される。著者らは諸条件のうちいくつかを乱流の状態に大きな影響を及ぼさない程度に棄却した。すなわち、二次流の存在、主流の最大流速が自由水面下に現れる現象等を考慮しないものとして、研究を進めた。壁面剪断力を算定する手段として、Ghoshおよび馮場は、三次元場の乱流に於ける流速の分布式をそれぞれ提案している。著者らは、従来のPrandtlによる二次元の対数分布則の考え方を三次元に応用し、両者とは異なった三次元の流速分布式を考案した。

2. 実験概要 実験は、全長20m、水路幅60cm、および、全長10m、水路幅38.5cmのいずれも可変勾配型の鋼製水路を用いた。滑面として、側壁、底面はともにアクリル板を使用した。測定は、いずれも乱流の状態が、ほぼ等流とみなせる地点、つまり流下方向に対して中間地点に外径2mmのピトー管を設置し、半断面内の流速を調べた。尚、壁面剪断力は、Prestonの方法により算出した。

表-1 実験条件

| Case | 流量 Q (ℓ/s) | 水深 h (cm) | 水路幅 B (cm) | アスペクト比 B/h | $\sqrt{BR}/2$ (S) (cm) | 平均流速 \bar{V} (cm/s) | 平均摩擦速度 \bar{U}_* (cm/s) | フルード数 Fr | レイノルズ数 Re | エネルギ勾配 Ie |
|------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------|--------------------|-----------------------|
| R101 | 28.20 | 11.41 | 60.0 | 5.26 | 18.50 | 41.19 | 2.26 | 0.39 | 13.6×10^4 | 6.3×10^{-4} |
| R102 | 30.69 | 8.04 | 60.0 | 7.46 | 15.53 | 63.62 | 3.31 | 0.72 | 16.1×10^4 | 17.6×10^{-4} |
| R103 | 26.73 | 8.20 | 60.0 | 7.32 | 15.68 | 54.33 | 2.56 | 0.61 | 14.0×10^4 | 10.0×10^{-4} |
| R201 | 10.14 | 5.29 | 38.5 | 7.28 | 10.09 | 49.79 | 2.37 | 0.69 | 8.3×10^4 | 13.8×10^{-4} |

3. 三次元の流速分布式の考案

Prandtlは、二次元流に於いて、壁面近くでは、乱流運動は壁面によっておさえられるので、混合距離は壁面からの距離yに比例すると考えた。すなわち $l = Ky$ と仮定した。著者らは、このPrandtlの仮定にならって、三次元流に於いて、次のような仮定を行った。

$$L = K \cdot y^a z^b \quad \text{①}$$

ここで、座標系は図-1のようにとるものとし、Kは無次元の定数とする。また、 $y^a z^b$ を長さの次元にするために、 $a+b=1$ とする。さてこの仮定に基づいて、主流速Uは混合距離Lの増大に伴って増加するものとする。速度の変動分はそれぞれ図-2より

$$-u' = L_1 \frac{du}{d(y^a z^b)}, \quad v' = L_2 \frac{du}{d(y^a z^b)}, \quad w' = L_3 \frac{du}{d(y^a z^b)} \quad \text{②}$$

と表わせよう。ところで、乱流中の局所剪断力は、三次元流では、

$$\tau = -\rho \overline{u'v'} - \rho \overline{u'w'} \quad \text{③}$$

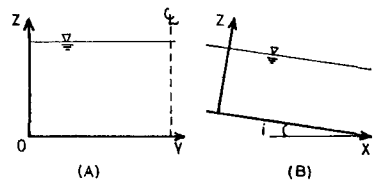


図1: 座標系の定義

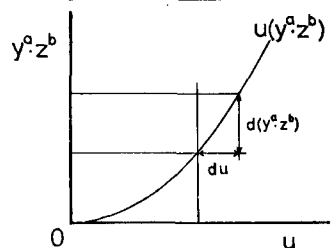


図2: 流速分布の仮定

となる。ところで、二次元場については、壁面剪断力を τ_0 とすると、 $\tau = \tau_0$ と置いた。これは、Prandtlの仮定が、壁面近くで成立するという理論を根拠にしているが、結果的には、壁面からかなり離れている方が、対数則はよく成り立っている。そこで視点を変えたと、二次元場の壁面剪断力が、その二次元断面の流速分布を支配しているといえよう。さて、この考え方を三次元場に応用するとすれば、その断面内の流速分布を支配しているのは、平均剪断力、 $\bar{\tau} = \rho g R_{ic}$ であるといえる。すなわち、③式に於いて、 $\tau = \bar{\tau}$ と考えることにする。これより、①式、②式から④式は、

$$\bar{\tau} = \rho K_1 (K_2 + K_3) y^{2a} z^{2b} \left\{ \frac{du}{d(y^a z^b)} \right\}^2 \quad (4)$$

(ここで、 K_1, K_2, K_3 は、無次元の定数)

となる。さて、 y 方向、 z 方向に対する混合距離の増加は、同程度とみなし、 $a=b=0.5$ とする。また、定数 $\sqrt{K_1(K_2+K_3)} = K$ とおき、④式を積分すると

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{K} \ln \sqrt{yz} + C_1 \quad (5)$$

を得る。ここで、式の形を整えるために、 $S = \sqrt{BR/2}$ として、次式を得る。

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{K} \ln \frac{\sqrt{yz}}{S} + C \quad (6)$$

4. 実験結果の適用

⑥式に於ける係数 K, C を 実験R101~R201の結果と比較することにより決定した。(図-3) これより $K = 0.26, C = 24$ という値を得た。すなわち

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{0.26} \ln \frac{\sqrt{yz}}{S} + 24 \quad (7)$$

という三次元流速分布式を得た。

5. 実験結果の考察 図-3によると、4ケースいずれも水路隅部に近いところでは、実測値は、⑦式とははずれている。これは、現在のところ二次流が原因と考えられている水路隅部への運動量の移送により主流速 u が増大するという事実を表わしているものと思われる。すなわち水路隅部付近では、三次元的に、⑦式とは異なる流速分布形をとっているといえよう。各ケースに於いて比較してみると、R101~R103は、かなり似かよった分布をしているが、R201は、はずれている。

6. まとめ

本研究の、究極の目的は、いかに壁面剪断力をうまく算出するかということである。今回は、三次元の流速分布式を提案するにとどまったが、今後は、この⑦式を生かして、壁面剪断力を算定する方法を考察しゆきたいと思っている。今回、壁面は、滑面に限ったが、粗面の場合も実河川上重要な問題である。また、アスペクト比の関与なども、非常に大切な点である。これらのことを今後の課題としてゆきたい。

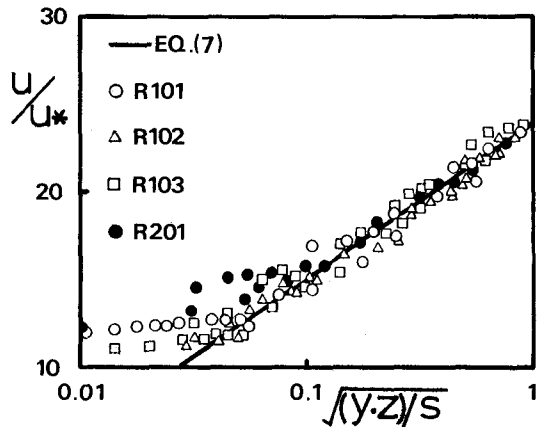


図3: 三次元の流速分布と eq.(7)

7. 参考文献

- 1) S.N. Ghosh 「Boundary Shear distribution in channels with varying wall roughness」
- 2) 馬場 洋二 「河川護岸近傍の水理に関する考察」