

弯曲水路における主流速度の抵抗則について

立命館大学 正会員 小沢功一

1. はじめに 主流速度の鉛直方向の分布に関しては一般の直線配置の水路の場合について従来から検討されてきている。これらうちには一つとして Boussinesq-Bazin の放物線型のものがある。すなわち $V = V_{\max} - m\sqrt{hI}(1-\eta)^2$ 。ここに $V_{\max}$ は水表面における流速、 h は水深、 I は水面勾配、 η は鉛直方向の無次元座標、 m はパラメーターである。二つには指数式によって表わされる型がある。すなわち $V = V_{\max} \eta^n$ あるいは $V = (n+1)V_m \eta^n$ 。ここに V_m は鉛直方向の平均流速、 n はパラメーターである。さらには一般的によく知られている対数型の分布式である²⁾。すなわち $(V_{\max} - V)/u_* = (1/K) \ln \eta$ 。ここに u_* は摩擦速度、 K は Karman 定数³⁾である。

弯曲水路における鉛直方向の速度分布については Rozovskii など¹⁾によっても検討されているが、実験値などに依って対数則に従うとすることも出来ると考えられている。この場合 Karman 定数 K の値については、管路における Nikuradse の実験値に合う $K = 0.4$ とするか、あるいはまたそれより大きな値の方が適当であるとも述べている。

この Karman 定数の値に関連して、弯曲水路で行った実験値について検討をした。

2. 基礎式 水深 h が曲率半径 r 等に比較して小さいとすることが出来る場合、円筒座標で表わした θ 方向の運動方程式はつぎのようになる。 $\rho I_\theta + \partial(\varepsilon \partial V_\theta / \partial z) / \partial z = 0$ (1) ここに I_θ は主流方向の水面勾配であり、 z_h を水表面の鉛直座標とすると $I_\theta = -\partial z_h / \partial z$ と表わされる。 ε は渦動粘性係数、 V_θ は座標が z の位置における主流速度である。

式(1)を水表面においてせん断応力は $\tau_\theta = 0$ の境界条件のもとに積分し、無次元座標 $\eta = (z - z_b)/h$ を導入するとつぎのようになる。 $(\varepsilon/h)(\partial V_\theta / \partial \eta) = \rho I_\theta h(1-\eta)$ (2) ただし z_b は河床面における z 座標である。渦動粘性係数 ε については Prandtl の運動量輸送理論による、 $\varepsilon = \ell^2 (\partial V_\theta / \partial z)$ を用いる。ここに ℓ は混合距離でこの場合 $\ell = K(z - z_b)$ と表わされる。河床面におけるせん断応力を τ_0 としたとき $\tau_0 \sim \tau$ と仮定し、 $\rho I_\theta h = u_*^2$ とし、式(2)を積分するとつぎのようになる。 $(V_{\max} - V_\theta)/u_* = -(1/K) \ln \eta$ (3) ここに $V_{\max}$ は水表面 ($\eta = 1$) における V_θ である。

式(3)から明らかなように弯曲流における主流の鉛直方向の分布については、直線流における対数で表わされた速度欠損則と同じ分布形で示すことができる。

鉛直方向の平均流速 V_m は $V_m = \int_0^1 V_\theta d\eta = V_{\max} - (u_*/K)$ と表わされるから抵抗則として Chezy 式を用いると $u_* = V_m \sqrt{g}/C$ となるから式(3)は $(V_\theta/V_m) = 1 + (\sqrt{g}/KC)(1/\ln \eta)$ (4) と変形することができる。ここに C は Chezy 係数である。

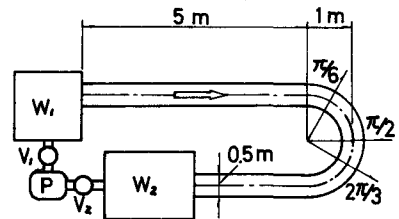


図-1 実験水路

Kōichi OZAWA

3. 弯曲水路における実験と考察 鉛直流速分布に関する従来の研究においては主として固定床における実験値について検討されてきている。しかし弯曲水路における流れは二次流が発達することにより河床が横断方向に斜面をなすように変化することがある。このような場合には主流の速度分布も固定床の場合とは違ったものになることもありうる。したがって今回の実験においては中央粒径が 0.72 mm の砂を水路床に約 8 cm の厚さに敷いて移動床として流速を測定した。

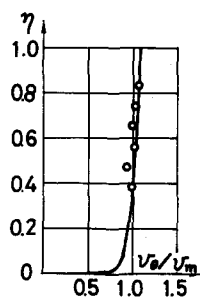
使用した水路は図-1に示してあるように幅が 50 cm で曲率半径は水路中央において 1 m である。流量は 20.5 l/s , 水深は 14.1 cm , フルード数は $Fr = 0.265$, レーノルズ数は $Re = 4.85 \times 10^4$ であった。測定位置は図-1に示してあるように弯曲角が $\theta = \pi/6, \pi/2, 2\pi/3$ における水路中央で、鉛直方向に河床を乱さない位置まで6, 7点で測った。鉛直方向の平均流速 U_m で割って無次元化した値について示すと図-2の(a), (b), (c)のようである。

式(4)を用いて計算した値も同時に示してあるが、式中のKarman定数 K の値については固体粒子を浮遊した流れのように乱流構造が変化する場合とか、曲線流のように二次流が発達するような場合には K の値が変化するとも言われている。弯曲水路の流れの場合 Rozovskii は $K = 0.4 \sim 0.6$ のうちから平均的な値として $K = 0.5$ を採用している。また村本は二次流の流速分布において、拡散項を考慮する場合の渦動粘性係数を $\varepsilon = K_h U_*^2$ と仮定した時の K について平均値として $K = 0.55$ を用いている。今回の実験における図-2の場合は $K = 0.6$ としている。また式(4)の中のもう一つのパラメーターである C については、壁面が粗い場合における式 $\bar{u}_m / U_* = C / \sqrt{\varepsilon} = 6.0 + 5.75 \log(hm/r_s)$ で r_s を河床砂の中央粒径に等しいとして得られた $C \approx 70$ を使っている。

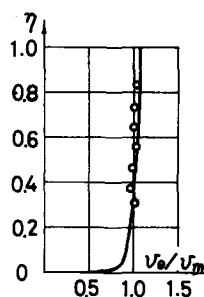
4. おわりに 二次流が発達している弯曲流の主流についての鉛直方向の速度分布に対数則を適用する場合、Karman定数は一般に使われる $K = 0.4$ より大きな値の方が適當のようである。今回の実験の場合 $K = 0.6$ とすると実験値と計算値とは比較的よく一致した。

〔参考文献〕

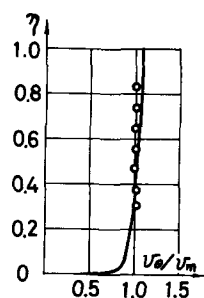
- 1) Boussinesq, J. : Essai sur la Théorie des Eaux Courantes, 1877.
- 2) Karman, T. von : The fundamentals of the statistical theory of turbulence, 1937.
- 3) Rozovskii, I. L. : Flow of water in bends of open channels, 1957.
- 4) 志村博康 : 浮遊砂を有する水流の諸特性について, 土木学会論文集, 第46号, 1957.
- 5) 村本義雄 : 開水路弯曲流の内部機構(Ⅱ), 京都大学防災研究所年報, 第9号, pp. 525~537, 1966.



(a) $\theta = \pi/6$



(b) $\theta = \pi/2$



(c) $\theta = 2\pi/3$

図-2 鉛直流速分布