

弯曲水路における水流の流下方向への変化について

立命館大学 理工学部 正会員 小沢功一

1. はじめに 直線部から弯曲部へ流入した流れは流下するにつれて徐々に変化する。主流については横断方向に内岸側の速度が大きく、外岸側へ小さくなる分布が変化して次第にそれが逆転する分布となる。また鉛直分布も均一化するように変化してくる。ところが二次流の鉛直分布を求めようとするような場合、流速等は流下方向へ変化せず横断、鉛直方向にのみ分布している二次元流れとして従来取扱われているのが実状である。したがって実際の流れを反映できるように、流下方向の運動方程式からその方向への流速の変化の項も取り入れた渦度についての関係式を導き、それが流れ方向へどのように変化するのかを実験値を参考にしながら検討した。

この渦度の変化を横断方向の運動方程式に適用することによって、その方向への二次流が流下方向へどのように変化するのかを求めることができるものと考えられる。

2. 基礎式 座標系としては円筒座標を用いる。弯曲流における流下方向、横断方向、鉛直方向への代表長さをそれぞれ L 、 R 、 H とする。一般河川の流れに相当するように $L^2 \gg R^2 \gg H^2$ であると仮定する。このとき流下方向への運動方程式は渦度があらわれるような形で示すと次のようである。

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{U_\theta^2}{2} + gh \right) + U_r \zeta = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial U_\theta}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここに、 U_θ は主流速度、 g は重力加速度、 h は水深、 U_r は横断方向への二次流速度、 ζ は鉛直軸に関する渦度、 ε は渦動粘性係数である。また連続方程式は

$$\frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial U_r}{\partial r} + U_r/r + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

ここに、 U_z は鉛直方向の二次流速度である。

等流仮定 (図-1 参照) をすると式 (1) は次のようになる。

$$U_\theta (\partial U_\theta / \partial \theta) + U_r \zeta = 0 \quad (3)$$

二次流 U_r 、 U_z については近似的に次のように表わすことができる。^{1), 2)} $U_r = (U_m / \kappa^2) (h/r) (2\gamma - 1)$

$$U_z = (U_m / \kappa^2) (h^2/r^2) (\gamma^2 - \gamma) \quad (4)$$

ここに、 U_m は主流速度の鉛直平均、 κ は Karman 定数、 γ は

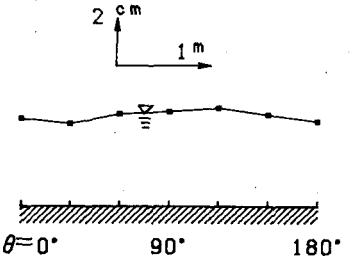


図-1 縦断水面形

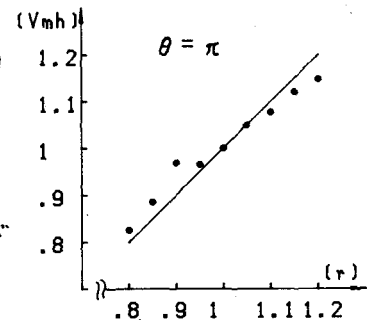
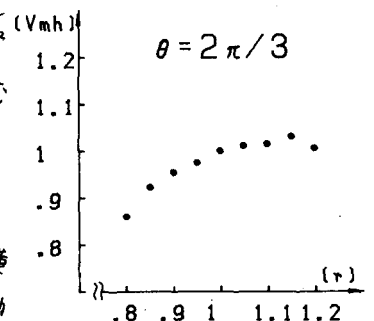
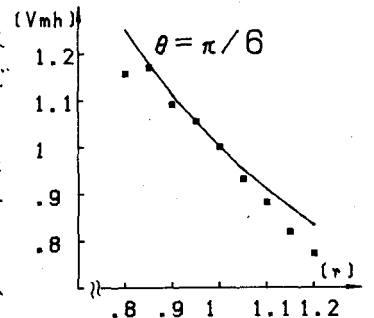


図-2 $U_m h$ の分布の変化

Koichi OZAWA

無次元鉛直座標 $\eta = z/h$ である。二次流の式(4)と連続式(2)とを連立させて $\partial U_0 / \partial r$ を求め式(3)へ代入すると渦度 ζ は

$$\zeta = (U_0/r) \left\{ (r/U_m h) \partial(U_m h) / \partial r + 1 \right\} \quad (5)$$

となる。

3. 実験的検討 実験に使用した水路は180度弯曲部の前後にそれぞれ5m、2.5mの直線部が接続している幅50cm、中心の曲率半径が1mの開水路である。底は水平で流した流量は4.45 l/s、Froude数は0.3~0.5程度である。流速はPitot管とPropeller式の小型流速計を用いて、横断方向には5cm間隔に9点、鉛直方向にはそれぞれの位置で5mm間隔に8点程測った。主流の鉛直平均流速 U_m と水深 h との積の横断方向への変化を示したのが図-2である。この図でそれぞれの座標は水路中心における値 U_{mc} 、 h_c 、 r_c で無次元にし、縦座標は $U_m h / U_{mc} h_c$ 、横座標は r/r_c としてある。

弯曲角が $\theta = \pi/6$ における図の実線は自由渦型分布を表わしている。測定値と比較するとほぼ一致していることがで(1)きる。 $\partial(U_m h) / \partial r$ が自由渦型であるとして式(5)の括弧中の第1項 $(r/U_m h) \partial(U_m h) / \partial r$ は-1となり、 ζ は0の値をとる。また $\theta = \pi$ における図の実線は強制渦型分布を表わしている。この場合も測定値はほぼ強制渦型に一致することができ(2)る。このとき $(r/U_m h) \partial(U_m h) / \partial r$ は1になり $\zeta = 2U_0/r$ となる。

これらの結果を実験のみから得られた従来の渦度 ζ の値と比較するとよく対応していることが(3)できる。

図みに近似的に h が r 方向に一定であるとして $\partial U_m / \partial r$ の流(4)下方向への変化を示したのが図-3である。この場合も $\theta = \pi/6$ で自由渦型、 $\theta = \pi$ で強制渦型となっているが、 h の変化も考慮した $\partial(U_m h) / \partial r$ の図の場合より実験値は理論値からはずれるようである。

4. おわりに 開水路弯曲部における水流の運動方程式を立てる場合、弯曲部の長さや曲率半径は水深に比べて相当大きいと仮定する。このとき渦度が現われる形で運動方程式を求め、連続式を考慮して渦度につき整理すると式(5)のようになる。従来からこの渦度についても実験的に求められている。すなわち、最初0に近かったものが徐々に大きくなり、やがて一定値になるように流下方向へ変化することが知られている。今回の式(5)から得られる渦度の値の場合もほぼ従来の結果と一致していることが(5)できる。式(5)の元になるものは式(3)であるが、この式からも明らかなように主流の流下方向への変化は無視することができない。この点が従来の考え方と異なるところである。今後は、この渦度の流下方向への変化を横断方向の運動方程式に適用して、二次流の鉛直方向への速度分布が流下方向へどのように変化するかを検討するのに役立てて行きたい。参考文献(1,2,3,4) Rozovski

