

1. はじめに 弯曲部における水流には遠心力が作用するために二次流が発生し、発達してくる。この二次流が流下方向へ変化することに伴って、主流もその方向へ変化する。すなわち鉛直分布については、徐々に水面から水底まで平均化されるようになってくる。

また横断方向の分布についても、直線部から弯曲部へ流入した当初においては内岸側の流速が大きくて外岸側へ行くに従い、小さくなるように分布しているが次第に均一化され、さらに流下すると今度は逆に外岸側の方が大きく、内岸側へ小さくなるような分布に変ってくる。

これらの分布のうちの最初のものは自由渦型分布として知られているが、その理論的な根拠は完全流体の流れとして取扱われている。その分布が変化して一様な流速になったり、強制渦型になったりする点については実験的には確かめられているが必ずしも理論的に充分説明されていない。

強制渦型の分布になる点について実験値を用いて流体力学的な説明を行おうとした。

2. 基礎式 弯曲水路の曲率半径は水深に比較して相当大きいと仮定する。また二次流は主流に対して微小であるとして、円筒座標で表した半径方向の運動方程式を示すと

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{U_\theta^2}{2} + gH \right) - U_\theta \gamma = g(r + \mu)_r \quad \text{-----①}$$

となる。ここに U_θ は主流速度、 g は重力加速度、 H はピエゾ水頭、 γ は Z 軸のまわりの渦度成分、 $(r + \mu)_r$ は渦粘性項の r 方向成分である。

また Rozovsky によると渦粘性項は次のように表わされる。 図-1 渦度 γ の流下方向への変化

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial U_r}{\partial z} \right) = g I_r - \frac{U_\theta^2}{r} \quad \text{-----②}$$

ここに ε は渦動粘性係数、 U_r は r 方向の二次流成分、 I_r は水面の r 方向についてのこう配である。

式①における渦粘性項を式②によって消去すると

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{U_\theta^2}{2} \right) - U_\theta \gamma = - \frac{U_\theta^2}{r} \quad \text{-----③}$$

となる。

渦度成分 γ は主流および二次流の関数であるが二次流に関する項は微小であるとする。

図-1 に示されているように、実験値を用いて γ の値を数値計算すると流下するに伴い大きな値になる。直線部から弯曲部へ流入した当初の断面では 0 に近い値であるが、それが徐々に大きくなり主流の横断分布が均等と見られる断面での値と強制渦型であると見ることができ、断面での値とを比較するとほぼ 2 倍になっている。

横断分布が均等であるとして見ることができ、断面での γ は (U_θ/r) の横断方向への平均をとることにし、強制渦型と見られる断面での γ はその 2 倍をとることにして式③へ代入し整理すると $\partial U_\theta / \partial t - U_\theta / r = 0$ -----④

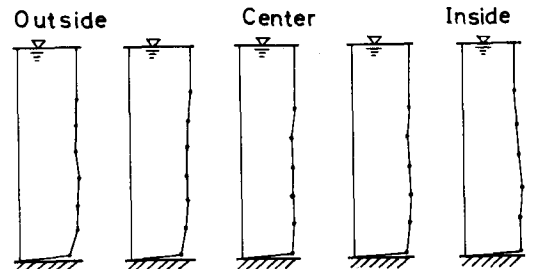
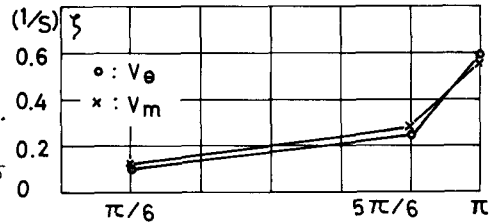


図-2-1 主流速度の鉛直分布 ($\theta = 5\pi/6$)

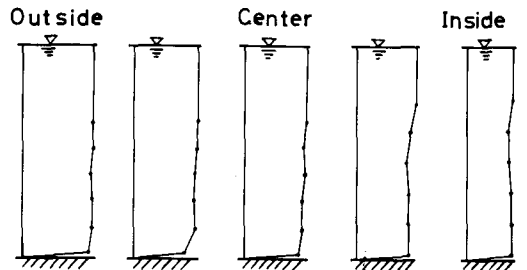


図-2-2 主流速度の鉛直分布 ($\theta = \pi$)

となる。これを積分すると主流速度 U_0 は曲率半径 r に比例する、いわゆる強制渦型の分布をする形になる。

3. 実験的検討 実験に用いた弯曲水路は単一の180度弯曲部の前後に直線部が接続し、水路幅は0.5 m、中心の曲率半径は1.0 mの鋼製のものである。

この水路に4.5 l/sの流量を流したときの主流の速度をピトー管で測定した。測定した断面は横断方向に一樣な流速分布と見られる位置とその方向への分布が半径に比例する強制渦型であると見られる位置とである。それぞれの断面で横断方向には0.1 m間隔で5点、鉛直方向には5 mm間隔で6、7点の測定を行った。

横断方向にほぼ一樣な分布をする断面としては $\theta = \pi/2 \sim 5\pi/6$ 程度であるが、ここでは $5\pi/6$ における資料を採った。強制渦型の分布をすると見られる断面としては $\theta = \pi$ とした。これらの位置における測定値を鉛直方向には水深で割り、また横断方向には断面全体の平均流速で割って無次元化して示すと図-2のようである。

これから主流速度の横断方向への分布を類推することができるが底面から約6割の位置の値を無次元化したものの分布は図-4の上側に示されている。

弯曲角 θ が $\theta = \pi$ における主流速度の横断方向への分布は外岸側で速く内岸側の方へ行くに従い遅くなる形をしているが、これを強制渦 図-3 強制渦型分布と実験値($\theta = \pi$)型の分布と比較すると図-3のようであり、実験値はほぼこの分布であると見ることができる。

渦度成分 ω の値については、 $\omega = (1/r) \{ \partial(U_0 r) / \partial r \}$ を差分形式にして、実験値を代入して数値計算をした。その結果を $\theta = 5\pi/6$ 、 π の断面について示すと図-4の下側のようになる。横断方向へ必ずしも一定の値にはならないが、その平均値について流下方向への変化を調べてみると前掲図-1のようである。この図には比較のために主流速度の鉛直方向についての平均値を基にして計算した場合の値と、底面から約6割の位置の値から計算したものとを二通りが示してある。両者の差異はほとんど表われないようである。

ω の値の流下方向への変化については、 $\theta = 5\pi/6$ と π において比較すると、主流の横断方向への分布が一樣と見られる前者についての値は強制渦型分布と見られる後者の値の約1/2であるとなることができる。

4. おわりに 開水路弯曲部における主流速度の横断方向への分布については、直線部から弯曲部へ流入した当初の位置でのものとそこを流下して後の位置での分布とは異なってくる。

横断方向についての運動方程式を渦度成分 ω の入った形にすると式③のようであるが、流下方向への流速の横断分布の変化を ω の変化と対応させて検討してみた。

ω の値の横断方向についての平均値を流下方向へどのように変化するかを実験値を用いて計算すると図-1のようになった。すなわち最初0に近い値から徐々に大きくなり、やがて (U_0/r) の平均値に近づきそして $2(U_0/r)$ の平均値になってくる。

それらの値を式③に代入して積分すると、最初自由渦型であった分布がやがて一樣な分布となり、つづいて強制渦型の分布になるように変化する。

すなわち強制渦型の分布についてもある程度合理的に説明することができた。

参考文献 1)小沢功一、：弯曲水路における主流速度の鉛直分布について、第27回水理講演会論文集、1983.2. 2)Einstein, H.A. and Harder, J.A., : Velocity Distribution and the Boundary Layer at the Channel Bends, Trans., AGU, Vol. 35, 1954. 3)須賀、：開水路弯曲部河床の安定形状(その2) 4)Rozovskii, I.L.: Flow of Water

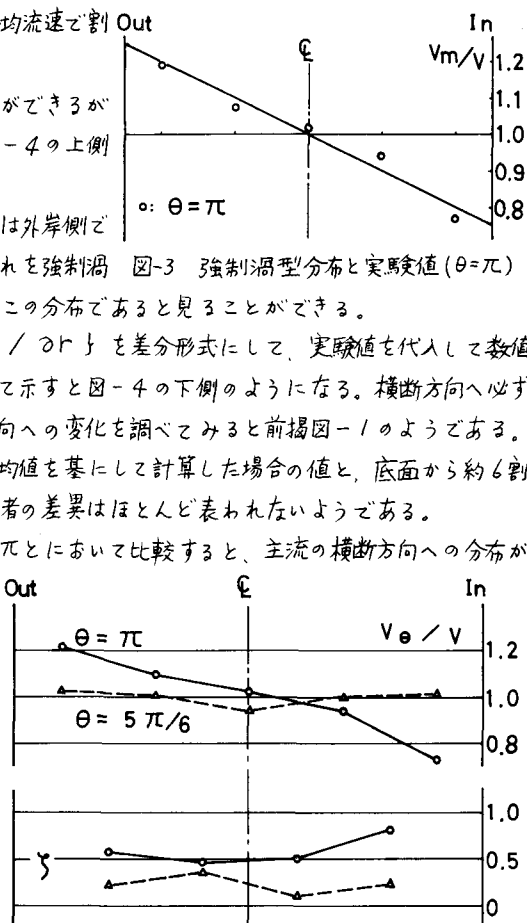


図-4 流速と渦度の横断変化