

1. はじめに 河川の曲線部においては凸岸附近には土砂が堆積し凹岸附近の河岸や河床は洗掘される傾向がある。したがって河川の曲線部はいわば不安定な状況にある。このような場合根固工などで補強するのに予め河流による最大洗掘深が予測できれば都合がよい。

開水路弯曲部における河床変動あるいは河床形等については須賀¹⁾、村本・坂本・吉村²⁾、吉川・池田・北川³⁾による研究が見られる。これらの研究において主流の横断方向への分布については、流れが弯曲部を十分に流下し二次流が完全に発達した領域で強制渦型になるとされている。すなわちある曲率半径 r の位置での主流の速度は r に比例するとしている。これらの整理された実験値を見ると r に比例するとした場合のもとしてはなると1に近くなっているが正確に1であることができないかどうかについては疑問がある。すなわち強制渦の考え方は流れが一体となって中心軸のまわりに角速度 ω で容器と一諸に回転する場合、任意半径 r の位置における速度 v は $v = \omega r$ となるということであり、二次流も摩擦も考えない状態での速度分布である。開水路弯曲部における河床変動を取扱う場合、二次流は重要な要素とされているし、また主流の鉛直方向の分布も考えているわけであるから、主流の横断方向への分布も強制渦型とは少し違った型になるのではないかと考えて実験値、野外測定値を整理した。

2. 解析 弯曲部を充分流下して二次流が完全に発達した領域においては流れは主流方向に一樣であり、慣性項を他の項に比較して小さいとすると円筒座標で表わした主流方向の水流の運動方程式はつぎのようである。

$$g I_0 + \partial(\varepsilon \partial U_0 / \partial z) / \partial z = g I_0 + (1/\rho) \partial T_0 / \partial z = 0 \quad (1) \quad \text{ここに } I_0 \text{ は自由表面の主流方向への勾配}$$

, ε は渦動粘性係数, z は鉛直上向きにとった座標, U_0 は主流の流速, ρ は水の密度, T_0 は主流方向についてのせん断力である。一方、自由表面の勾配 I_0 は流れが主流方向に一樣であるということから $r I_0 = r_c I_c$ (2)

である。ここに r_c は水路中心における曲率半径, I_c は水路中心における自由表面の勾配であり, $r_c I_c$ は単位弯曲角に対する自由表面の低下量を表わしている。すなわち $I_c = \Delta z_{hc} / r_c \Delta \theta$ であるから $r_c I_c = \Delta z_{hc} / \Delta \theta$ となる。ここに Δz_{hc} は水路中心における自由表面の弯曲角 $\Delta \theta$ に対する低下量を示している。式(2)は $I_0 = (r_c/r) I_c$ (2') となるから式(1)に代入すると $(1/\rho) \partial T_0 / \partial z = -g (r_c/r) I_c$ (3) となる。式(3)を z について積分すると $T_0/\rho = -g (r_c/r) I_c z + C$ となる。ここに C は積分定数である。自由表面においてせん断力は0であるという境界条件から積分定数を求めて代入し、河床面では $T_0 = T_b$ とするとつぎのようになる。 $(T_0/\rho) = g (r_c/r) I_c h$ (4) ここに h は水深である。摩擦速度を u_τ とすると式(4)の左辺は $u_\tau^2 = (g/C^2) U_m^2$ と表わすことができる。ここに C はChezy式における係数である。したがって式(4)はつぎのようになる。 $U_m = C \sqrt{r_c I_c} \sqrt{h/r} \quad (5)$ ここに U_m は主流流速 U_0 の鉛直平均 $U_m = (1/h) \int_{z_b}^{z_h} U_0 dz$, z_h , z_b はそれぞれ自由表面、河床における鉛直座標である。また C については n をManningの粗度係数とすると $C = h^{1/6}/n$ (6) と表わすことができる。

3. 実験値および野外測定値 実験に用いた水路は幅が50cm、深さが35cmで弯曲部の前後にそれぞれ5m、2.5mの直線部が接続していて、弯曲角は180°である。水路の中心における曲率半径は1mである。河床砂として用いた砂の中央粒径は

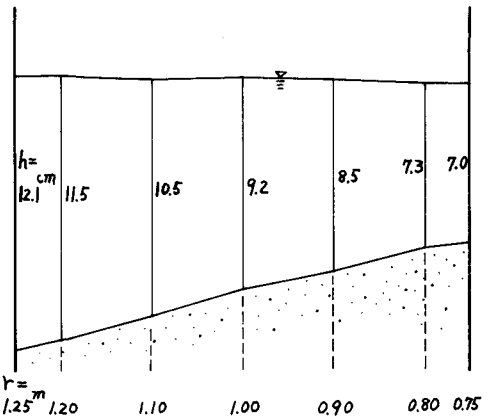


図-1 水路実験による横断断面

0.72mmであり、これを最初8cm程の厚さに水平に敷きならしておき流下実験後の河床高を測定して河床変動量を求めた。一連の実験で流した流量は13~21.5ℓ/sで、流下実験時間は30~300分であった。一例として13ℓ/sの流量を90分間流した後の河床形を水面形と一諸に示すと図-1のようである。これは彎曲部からの出口断面、すなわち彎曲角が180°の横断面である。この断面においては二次流は充分発達し、流れは主流方向に一樣になっているとすることができる。図-1の横断面における主流流速の鉛直平均を求める位置は側壁から5cmの点、それより中央部は10cmづつの点とした。平均流速はManning式から求めた。自由表面の主流方向への勾配 I_0 については式(2)を使った。水路中心における平均流速で割って無次元化して各位置の平均流速の分布を示すと図-2のようである。

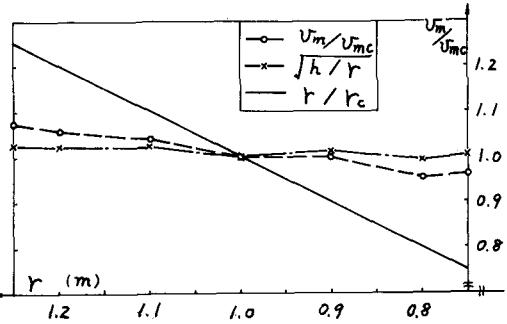


図-2 実験値の流速の横断面方向への分布
(U_{mc} : 水路中心の平均流速)

野外測定値については Rozovskii による Desna 川における測定値を用いた。この川は砂の堆積の中を流れており、測定された地域附近では2~3の180°彎曲部をなす蛇行を呈している。そのうちの一つの180°彎曲部の数箇所測定されているが、流れが主流方向に一樣になっていると見られる Section 2 の横断面は図-3のようである。この場合の河川の中心における曲率半径は約400mである。この横断面内の4点についての鉛直方向の平均流速の分布を無次元の形にして示すと図-4のようである。

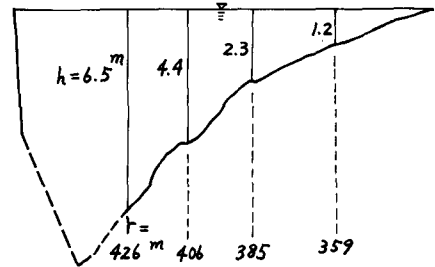


図-3 野外測定⁴⁾による横断面

4. 考察 式(5)から主流流速 U_m の鉛直平均 U_m を求める際、Chezy 式の係数Cは横断面方向に一定として扱っている。図-1に示されている横断面の場合について式(6)を用いてCを計算すると $C \approx 32$ になりほぼ横断面方向に一定であると見ることができる。図-2には実験水路による実験値の他に式(5)から得られる値と強制渦型としたときの値とが無次元の形で示されている。実験値と計算値とを比較すると強制渦型として計算した場合より式(5)によって得られた値の方が実験値に近いと言える。傾向としては凹岸側へ近づくにつれて鉛直方向についての平均流速 U_m は大きくなるようである。しかし断面全体の平均値に対する比は最大でも1.07程度である。一方、野外測定値による結果である図-4にも式(5)から得られる値と強制渦型としたときの値とが無次元の形で示されている。この場合も、測定値と計算値とを比較すると強制渦型として計算した場合より式(5)によって得られた値の方が測定値に近いと見ることができる。野外測定値の場合についても傾向は凹岸側に近づくにつれて鉛直方向についての平均流速 U_m は大きくなるようである。その程度は断面全体の平均流速に対する比で最大1.3程度になる。図-2の場合と図-4の場合とでは曲率半径 r が極端に異なっているが、両者の場合ともに主流流速の鉛直方向についての平均値の横断面方向への分布は強制渦型より式(5)による分布と見た方が近いようである。

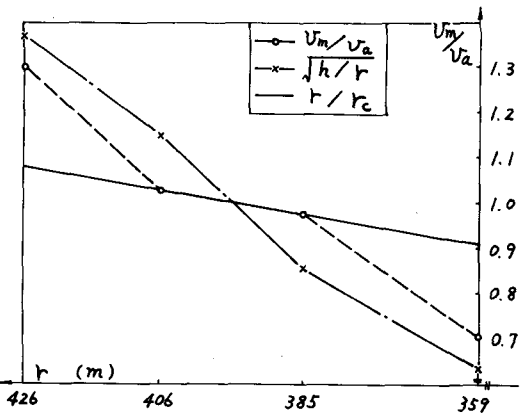


図-4 野外測定値⁴⁾の流速の横断面方向への分布
(U_a : 断面全体の平均流速)

参考文献 1) 須賀堯三: 開水路彎曲部河床の安定形状, 2) 村本嘉雄他, : 彎曲水路の河床変動に関する研究, 3) 吉川秀夫他, : 彎曲水路の河床変化について, 4) Rozovskii, I.L.