

まえがき

河川わん曲部における高水敷は、治水路の維持とともに、わん曲部外岸に発生しやすい局所沈掘を、治水護岸などに生じさせること、および高水敷の流速減少効果によって堤防付近に大流速の発生を避け、ともに高水堤防の安全性を高める作用も有する。近年河道掘削によって河道断面を、人工的に大規模に作りかえる例や都市河川における高水敷の整備が取り上げられるが、高水流量を対象とした場合に、わん曲部の高水敷の中や高土で流れる相互効果など、河道設計上水理的な検討を施しておく必要のある問題が少なくない。このような問題を考え、ゆく場合、複断面のその横断方向にエネルギー一定あるいは自由渦や強制渦といった仮定について検討する必要があるが、ここでは河川工学的に非常に興味深いところの、治水路の大土流速が高水敷に垂れ上がって、高水敷の肩付近に沈掘する現象について考えてみる。

解析

河川わん曲部の流れに円柱座標を適用した場合、流れには円軸のまわりの回転(渦度成分でいえば Ω_z)が現れることが、らせん流として特徴づけられる。今鉛直方向(z軸)の流速成分 v_z が無視できるような水路中央部付近の流れについて考えると、定常状態での運動方程式のうち、r方向成分に因る式は

$$\frac{\partial v^2}{\partial r} - v_\theta \Omega_z = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = -g \frac{\partial h}{\partial r} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} v^2 &= v_\theta^2 + v_r^2 \\ \Omega_z &= \frac{1}{r} \left(\frac{\partial r v_\theta}{\partial r} - \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

である。村本博士により定義されたわん曲流の発生域では、直線流からの流速分布のずれがあまり大きくないと考えられるので、それを次のように分割する。

$$v_r = v_{r0}(r, z) + v_r'(r, \theta, z) \quad (3)$$

わん曲角度0度の断面における流速分布と流向との実験結果によれば、水面付近では接線方向の流速成分のみであるが、河床付近ではすでに内岸向き流向となっていることを考慮して v_{r0} とおいた。すなわち水面では $v_r = 0$ 、河床面付近では v_{r0} は有限の値をもつ。 v_r' の発生が、流れがわん曲部に流入して、半径方向に一定の加速度 $-v_\theta^2/r$ が作用し、また鉛直方向に流速分布が存在するためによるものであるという従来の考え方をとれば、半径 r の位置における平均流速 $v_{\theta m}$ による半径方向加速度と水面勾配 $\partial h/\partial r$ が釣り合うとすれば(4)式を得る。ここに $v_{\theta m}$ は鉛直方向の平均流速で、後述のように対数流速分布を仮定できるような場合には $z_m = 0.367$ (これは全水深)の位置に現れる。

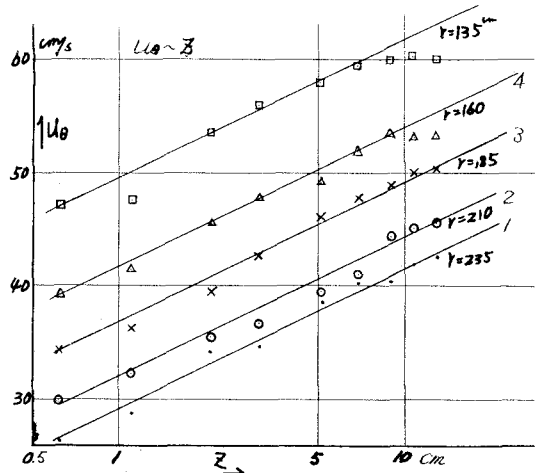


図-1 15°断面の流速分布

(1)式を考えている時に(4)式のような置き方をすると
 は一般に好ましくなく、実験によれば $Z = Z_m$ のとき

$$-\frac{V_{0m}^2}{r} = -\frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{1}{f} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (4)$$

$V_0 = V_{0m}$, $V_r = \text{const} = 0$ という実験結果があること、および今小さな量 V_r' を考えていることな
 りによって(4)式を考えても差し支えないと思われる。11), (3) および(4)式により、 $u \frac{\partial u}{\partial r}$ の項を
 無視すると(5)式が、また V_0 の θ 方向変化を無視すると、それぞれ(6)式が得られる。

$$\frac{\partial V_r'}{\partial \theta} = (V_0^2 - V_{0m}^2) / r V_0 \quad (5) \quad \frac{1}{r \partial \theta} \left(\frac{V_r'}{V_0} \right) = \left\{ 1 - \left(\frac{V_{0m}}{V_0} \right)^2 \right\} \frac{1}{r} \quad (6)$$

そこで図-1の実験結果に示すように、発生域では V_0 に対して対数流速分布を仮定してもよいよ
 うであり、このとき摩擦速度 U_* をほぼ一定として

$$U_0 = 5.75 \cdot U_* \cdot f(t) \cdot \log M Z \quad (7) \quad U_{0m} = 5.75 U_* \cdot f(t) \cdot \log M Z_m \quad (8)$$

$f(t)$ は、 I_{ppm} の仮定を使用し自由渦領域に対しては

$$f(t) = \frac{V_m \sqrt{r_c^2 - \frac{B^2}{4}}}{5.75 U_* \log M Z_m} \cdot \frac{1}{r} \quad (9)$$

が得られる。ここに $\log M = (8.5 - 5.75 \log R_0) / 5.75$,
 Z は河床からの距離で無次元化していない量である。
 また V_m は断面平均流速, r_c は水路中心曲率半径, B
 は水路幅である。このとき(5), (6)式は

$$\frac{\partial V_r'}{\partial \theta} = V_m \sqrt{r_c^2 - \frac{B^2}{4}} \cdot \frac{1}{r^2} \left(\frac{\log M Z}{\log M Z_m} - \log M Z \right) \quad (5')$$

$$\frac{1}{r \partial \theta} \left(\frac{V_r'}{V_0} \right) = \frac{1}{r} \left\{ 1 - \left(\frac{\log M Z_m}{\log M Z} \right)^2 \right\} \quad (6')$$

(5')式は $r = \text{const.}$ の線上に於ける V_r' の変化が一定である
 こと、(6')式は流向の変化を示す。なお(5')は local
 vorticity を表わし、断面スケールの外へは異なる。

(6')式の V_r'/V_0 は流向が接線方向となる角度である

$$V_r'/V_0 \sim \left\{ 1 - \left(\frac{\log M Z_m}{\log M Z} \right)^2 \right\} \theta \quad (10) \quad \text{の関係が見られる。}$$

例えば $B=1.7$, $r_c=1.85$ の 90°
 の内曲水路で、 $F_r=0.4$ のとき流速と流向のベクトル図が

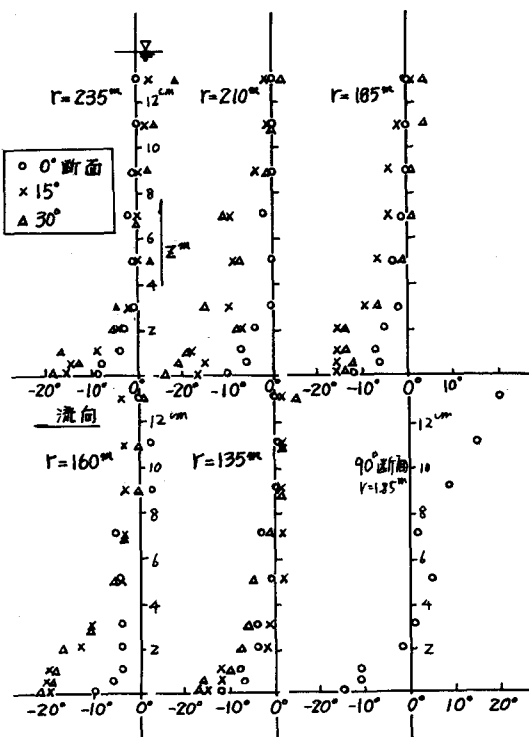


図-2

図-3

測定した結果は図-2のようであった。同図によれば、各水深位置の流向は水深のみに関係して方向、変化
 が少なく下流方向にゆくにつれて、流向が増加する(6')の関係が見られる。以上の検討に見られるように
 発生域では V_r' が徐々に発達してゆく。 V_r' 成分の発生は、水中に没した高水敷に低水路の流水が乗り上がる
 ことを意味する。一般に河川では発生域に与えられる偏角が小さい場合が多いが、内曲部の下流端付近の高水敷は

低水路の流速に与えられる場合がある。つぎに完全発達域では、我々の実験によると(7)式(8)式の仮定がもはや成り立た
 ないようであり、従って以上のような簡単な解析を続行できないが、 90° 断面における流向測定例をあげると図-3のようである。
 図-2の発生域にくらべて、断面付近の流向には大きな差が見られるが、断面付近の流向は極端に外岸を向いており
 180度の V_r' も発生域に比べてきわめて大きく、高水敷の斜面保護に与える重大な意味を見られる。なお今後、横断断面分布、断面端部付近の下降流
 などについて検討を続ける予定である。