

II-325

蛇行流路における流れの構造

立命館大学理工学部 正員 小澤功一

1. まえがき 一般の河川における流れの水深は川幅に比べてかなり浅い。したがって解析する場合においても水深方向に平均した値で検討することがよく行われる。主流速の場合は水深方向へそれほど変化しないから問題はないが、二次流の場合には水面近くと底面近くとでは方向が逆になるほど変化する。したがって、特定の高さでの二次流が大きく影響するような現象を検討する場合にはその水深方向の分布形を正確に把握する必要がある。この点に関するこれまでの研究については、二次流の完全発達域での検討がなされているが移流項も考慮した取扱いは充分にはなされていない。今回は、水深平均の浅水流方程式から摂動展開して得られる1, 2次解を利用して、二次流そして主流の水深方向への速度分布を検討し流れの構造について考察した。

2. 流速の分布式 流速の3次元的な分布を求めるのに、水深平均値を用いた連続式、流下方向(s)・横断方向(n)の運動方程式に摂動法を適用した、摂動パラメータ ε の2次までの解を用いる¹⁾。すなわち主流については $u(\bar{u}_s/V)=u_0+\varepsilon u_1+\varepsilon^2 u_2$ 、二次流については $v(\bar{u}_n/V)=v_0+\varepsilon v_1+\varepsilon^2 v_2$ 、水深については $h(\bar{h}_a/H_0)=h_0+\varepsilon h_1+\varepsilon^2 h_2$ である。ここに、 u_1, u_2 等は(s, n)の関数、 $\varepsilon=(B_0/2)/R$ 、 v_0, v_1 は共に0である。境界条件は1)側壁面の二次流, 2)上流端の主流, 3)下流端における水深について設定している。二次流の水深方向への分布も考慮した解は次のように求める。すなわち1次の解については移流項を省略したn方向の運動方程式を用いる。渦動粘性係数についてはEngelund等^{2), 3)}と同様に水深平均値を用いて、 $\nu_t=\alpha u_* h$ 、また u_n, h_a については水深平均の1次解を使い、主流の鉛直分布には放物線則^{2), 3)}を用いる。境界条件としては水面でせん断応力は0、底面から水面まで積分すると平均値 $(v_0+\varepsilon v_1)$ になるとする。積分して $(\hat{u}_n)_1=P_1+P_2\xi+P_3\xi^2+P_4\xi^3+P_5\xi^4+P_6\xi^5+P_7\xi^6$(1)を得る。このとき平均値からの変動量は $0(\varepsilon^2)$ 以下であるとする。一定曲率の場合のJ. & Parkerの式は

$$G_0(\xi)=g_1+g_2\xi+g_3\xi^2+g_4\xi^3+g_5\xi^4+g_6\xi^5+g_7\xi^6$$
.....(2)

である。2次の解については移流項も考慮した次式を用いる。

$$\nu_t \frac{\partial^2 (\hat{u}_n)_2}{\partial z_s^2} = u_s \frac{\partial (\hat{u}_n)_1}{\partial s_a} + u_n \frac{\partial (\hat{u}_n)_1}{\partial n_a} - \frac{u_s^2}{r_a} + g \frac{\partial h_a}{\partial n_a}$$
.....(3)

二次流 $(\hat{u}_n)_1$ については式(1)、主流・水深については水深平均の2次解、主流の鉛直分布については放物線則を用いる。境界条件としては水面でせん断応力は0、底面から水面まで積分すると平均値 $(v_0+\varepsilon v_1+\varepsilon^2 v_2)$ になるとする。積分して $(\hat{u}_n)_2$ を求めると $(\hat{u}_n)_2=(h_0+\varepsilon h_1+\varepsilon h_2)\{(u_0+\varepsilon u_1+\varepsilon^2 u_2) \cdot (r_c/r_a)A1(s, n)S2(\xi)+A2(s, n)/\varepsilon(M1/\alpha^2) \cdot H_0/R(h_0+\varepsilon h_1+\varepsilon^2 h_2)(1-\varepsilon \cos ks) \cos ks \cdot N2(\xi)-\cos ks(r_c/r_a)(u_0+\varepsilon u_1+\varepsilon^2 u_2)^2 AC2(\xi)+PRE(s, n)\xi^2/2+C1(s, n)\xi+C2(s, n)$(4)となる。ここに、 $(\hat{u}_n)_2=(u_n)_2/V$ 。主流については同様にして求める。結果は1次については $(\hat{u}_s)_1=(u_0+\varepsilon u_1)f_1(\xi)$(5)である。2次については $(\hat{u}_s)_2=0.7+0.8\xi+0.9\xi^2+0.10\xi^3+0.11\xi^4+0.12\xi^5+0.13\xi^6+0.14\xi^7+0.15\xi^8+0.16\xi^9+0.17\xi^{10}$(6)となる。

3. 実測値との比較 実測値は図-1に示されているような蛇行長2.48m, 最大偏角45°, 水路幅0.3mの水路実験によつ

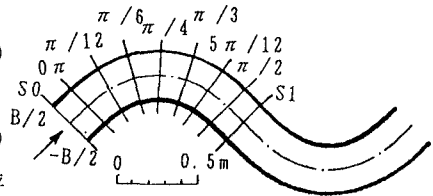


図-1 蛇行水路

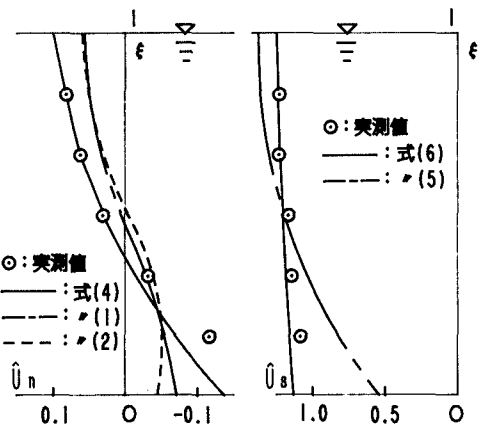


図-2 二次流の分布

図-3 主流の分布

ている⁴⁾。図-2, 3はそれぞれ二次流と主流の実測値（固定床）と計算値との結果である。その位置は流下、横断方向にそれぞれ $ks=\pi/4$, $n=-2/6$ である。二次流についてはJ. & Parkerによる計算値の結果も示している。一次の解の式(1)は曲率半径に反比例する形になっているからそれが大きい位置においては小さな二次流の値となる。しかし実測値は必ずしも小さくはないからそれらは大きく離れてくる。主流については一次の解の場合、底面近くで実測値と離れてくる。この傾向は他の位置においても見受けられる。主流の実測値と計算値

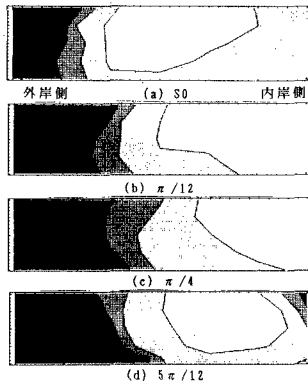


図-4 等流速線図
(固定床、実測)

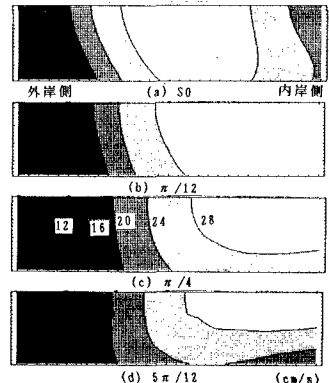


図-5 等流速線図
(固定床、計算)

について、流下方向の $S0, \pi/12, \pi/4, 5\pi/12$ （図-1参照）の位置で等流速線を用いて示すとそれぞれ図-4, 5のようである。これらの図においては横断方向に比べて水深方向は2倍のスケールになっている。計算値は2次の解（式(6)）に依っている。主流の流心は、蛇行形状の変曲点の位置（ $S0$ ）では水路の中央部にあるが、徐々に内岸部に偏り、次の変曲点でまた中央部へ移動する。全般的に、流速の水深方向への分布はほとんど一様で、横断方向には大きく変化している。これらの状況を実測値（図-4）と計算値（図-5）は良く現わしていると見ることが出来る。図-6, 7は移動床の場合のそれぞれ実測値⁵⁾と計算値（式(6)）による結果である。この場合の流心は変曲点（ $S0$ ）で内岸側にあり、それが徐々に外岸側へ移行し、次の変曲点では外岸側に偏る形になる。固定床の場合と移

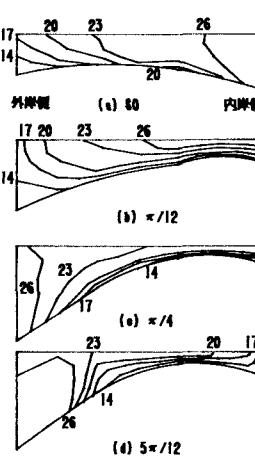


図-6 等流速線図
(移動床、実測)

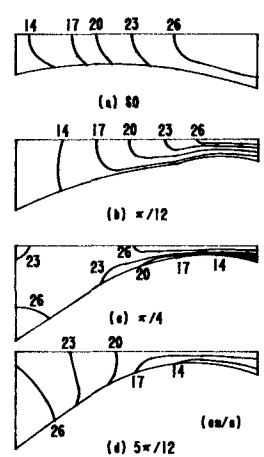


図-7 等流速線図
(移動床、計算)

動床の場合における流心の変化の違いは二次流に依っていると考えられる。実際、二次流の方向がほとんど逆になっている結果が得られている^{4), 5)}。なお移動床実験の平衡河床形状については $\eta (=h_b/H_0) = \eta_0 + \varepsilon \eta_1 + \varepsilon^2 \eta_2 = \varepsilon n(a_0 \sin ks + a_1 \cos ks) + \varepsilon^2(n^2 - 1/3)(a_2 + a_3 \sin 2ks + a_4 \cos 2ks)$ において、 $a_0=0.747$, $a_1=3.83$, $a_2=12.86$, $a_3=9.53$, $a_4=3.33$ である。

4. あとがき 蛇行流路における流れの速度の水深方向への分布についてはこれまで、流下方向へ変化しない流れと仮定して、あるいは摂動法の1次解を想定して求められてきた。この解は曲率の大きい位置においては実状に近い値が得られるが、蛇行形状の変曲点近くにおいては特に値が小さくなり実際の流れと異なってくる⁶⁾。今回は摂動法の2次解を利用して移流項も考慮した速度分布を求めた。その結果を実測値と比較するとかなり良く一致し、蛇行部の流れの構造を前述のように説明することも可能である。

参考文献 1) 池内幸司・玉井信行: 蛇行水路における水深平均流れ場の遷移特性, 1983. 2) Englund, F.: Flow and bed topography in channel bends, 1974. 3) Parker, G. et al.: Velocity Redistribution in Meandering River, 1989. 4) 玉井信行・池内幸司・山崎晶: 連続弯曲水路における流れの実験的研究, 1983. 5) Tamai, N et al.: Depth-averaged flow fields in meandering channels with alluvial equilibrium bed, 1985. 6) 小澤功一: 蛇行流路における二次流の鉛直分布について, 1996.