

1. 緒言

筆者らは先に、潜りゼキ下流部の流れを、セキ頂部で発生するはく離による流れの収縮を経て、噴流と類似の拡散が発達していく過程として説明し、噴流拡散により乱れが発達した領域⁽¹⁾で、運動量の式、エネルギー積分式を適用して流れの解析を行ない、表面流速の低減その他潜りゼキ付近の流れについて説明した。ここでは、その後の検討結果について補足し、さらに潜りゼキの流量の算定法について述べる。

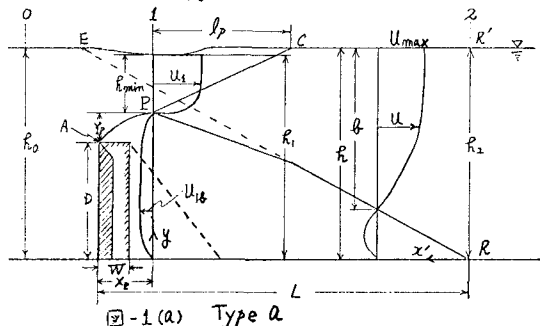


図-1(a) Type A

• Type A: ($W < X_p$) 図-1(a)に示す。流れは刃形ゼキと同一のものと考えてよい。

• Type B: ($W > X_p$) 図-1(b)に示す。

• Type C: (セキ頂部およびセキ下流部の二つにはく離領域が形成される) 図-1(c)に示す。

Type A, B は類似の流れと見なせるが、Type C は段落流れとなり、前者とは流れの様子を異にすると考えられる。ここでは主として Type A, B の場合について考察する。Type B と C を区別する方法について述べると、Type C にあって、はく離最高点 P から下流のはく離形を直線で仮定し、その勾配を θ' とすれば、近似的に、 $W > \theta' Y_p + X_p$ であれば Type C のセキとなる。石原志方は南水路急縮部において、はく離最高点 P から下流の流れの拡大部を一つの急拡部と考え、その形状に関する平均的拘束

2. 流れのモデル

セキ頂部 A 点で発生するはく離は P 点で最高になり、P 点から下流の流れは段落部と同様の、拘束された流れの場合における噴流と類似の現象となる。筆者らは先に、セキ頂部でのはく離の測定を行ない次のような実験式を与えた。⁽²⁾ ($S_s = 1 - D/R_0$)

$$\left. \begin{aligned} \Delta x < 0.6 \text{ では } X_p &= 0.6(R_0 - D), Y_p = 0.14(R_0 - D) \\ \Delta x > 0.6 \text{ では } X_p &= 0.36 R_0, Y_p = 0.08 R_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここでは、図-1に示すようにセキ巾 W と X_p との関係より、セキのタイプを次の3つに分類する。

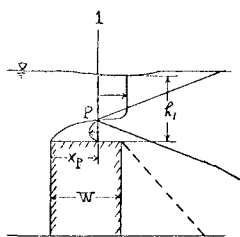


図-1(b) Type B

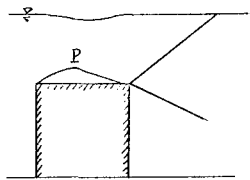


図-1(c) Type C

係数 θ_m として 3.3 ~ 5.0 を与えている。⁽³⁾ 近似的に $\theta' = 20^\circ$ とし、P 点の値として (1) 式を用いれば Type B と C のセキを区別することができる。筆者らが実験により θ' の値を求めたところ $\theta' = 20^\circ$ といった場合よりやや小さい値をとるようである。これは Type B と C の境界付近では、(1) 式の関係が厳密には成立しないことによると考えられ、さらに検討を要する。しかし、 θ' の値として $5 \sim 6^\circ$ を用いれば Type B と C とを区別する一応の目安となるであろう。

3. 表面流速の低減

図-2に、セキ下流部で測定した噴流域での表面流速の低減の様子が表示されている。 U_{max}/U'_{max} は、各点の表面流速とその最大値 (Potential core の流速) との比である。潜りゼキ下流部の流れにおいても、Potential core が存在して乱れが発達する領域、水深方向の乱れが卓越する領域、両者の中間の遷移領

域の存在が認められ、
また Potential core が消え
乱れが発達した領域
では、表面流速は距
離の 1/2 乗に比例して
減小しており、自由

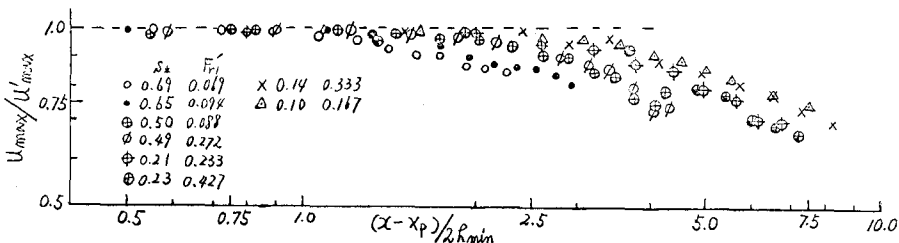


図-2 表面流速の低減

噴流と類似している。ただし、 $\delta^* > 0.5$ では低減特性がやや異なっており、ゆるやかな減少を示している。また、図によれば δ^* の値によって表面流速が減少し始める位置が変化しており、 δ^* が大きいほど早く低減が始まる。各実験におけるフルード数 ($A\delta^*$ のフルード数) が図中に示されているが、 δ^* が等しければフルード数を 2~3 倍変化させても表面流速の低減特性は変わらず、潜りゼキのような常流速移の流れでは、フルード数の影響は微小であると考えられる。図-3 は図-2 に示す実験値と断面 2 での平均流速 U_2 で無次元化したものである。($\delta^* + 5 = \overline{E}x/R_{min} - x/R_{min}$; x' は R より上流側へとの距離) 同図には、筆者らが先に与えた計算式により計算した結果も示している⁽⁴⁾。ただし、噴流域内の流速分布としては $U/U_{max} = f(\eta)$, $f(\eta) = 1 - (1 - \eta^{1/3})^2$, $\eta = 1 - (R - x)/\delta$ を用い、混合距離に関する定数 K は 0.16 とした。reattaching point

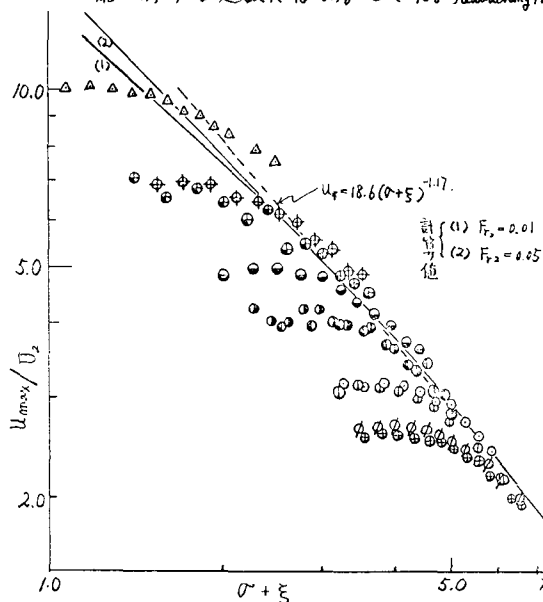


図-3

($\delta^* + 5 = 7.3$) に近づくにつれ U_{max}/U_2 は 1.86 に近づいており、計算値は実験値の傾向をかなりよく説明している。この実験値および計算結果からも、噴流が発達した領域ではフルード数の影響は小さいと言えるであろう。したがって $U_* (= U_{max}/U_2)$ は次式で近似計算を行ってもよいであろう。

$$U_* = 1.86 (\delta^* + 5)^{-1.17} \quad (2)$$

4. Potential core の長さ

図-4 に Potential core の長さの実験値を示す。 D/R_{min} が大きくなると δ_p/R_{min} も急激に大きくなり、 $D/R_{min} > 8$ ではほぼ一定値に近づいている。 D/R_{min} が大きくなると、流れは Free jet と類似の流れに近づくものと考えられる。Albertson⁽⁵⁾ は $\delta_p/2R_{min} = 5.2$ を与えているが、潜りゼキ下流部の流れにおいては、 δ_p/R_{min} は 6~7 の値に近づくようである。ここでは potential core の長さに関して近似的に次式を用いることにする。

$$\left. \begin{aligned} D/R_{min} < 4.0 \text{ 時は } \delta_p/R_{min} &= \frac{1}{0.44} \{1.8 + \log_e (D/R_{min})\} \\ D/R_{min} > 4.0 \text{ 時は } \delta_p/R_{min} &= 6.8 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

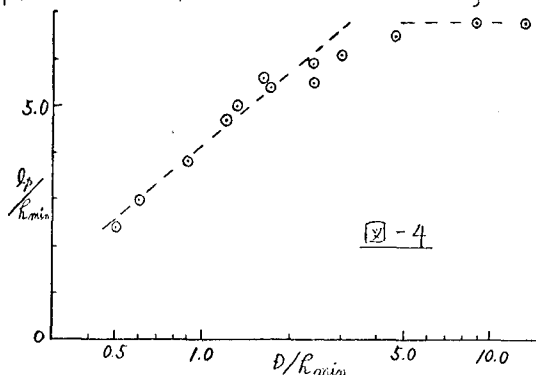


図-4

5. 流量算定式

(5-1) 断面 1, 2 間での運動量の式

Type a の場合に、断面 1, 2 間での運動量の式は、

$$\rho \int_{y=r_1-r_{\min}}^{y=r_1} u^2 dy + \rho \int_{y=0}^{y=r_1-r_{\min}} u^2 dy - \rho \beta_2 U_2^2 r_2 = \frac{\rho g}{2} \{r_2^2 - K_1 r_1^2\} \quad (4)$$

ここに β_2 : 断面 2 での運動量補正係数, U_2 : 断面 2 での平均流速, K_1 : 断面 1 での圧力補正係数である。

β_1 を断面 1 での運動量補正係数とし, (4) 式における断面 1 での運動量を次式のように定義する。

$$\rho \int_{y=r_1-r_{\min}}^{y=r_1} u^2 dy + \rho \int_{y=0}^{y=r_1-r_{\min}} u^2 dy = \rho \beta_1 U_{1\max}^2 r_{1\min} \quad (5)$$

$U_{1\max}$: 断面 1 での順流部最大流速である。(5) 式を考慮して (4) 式を変形し, $U_2^2 r_2$ で無次元化すると,

$$K_1 r_1^2 + 2 F r_2^2 \beta_1 U_{1\max}^2 r_{1\min} - 2 F r_2^2 \{ \beta_1 U_{1\max}^2 (D_* + Y_{P*}) + \beta_2 \} - 1 = 0 \quad (6)$$

ここに, $F r_2 = U_2 / \sqrt{g r_2}$, $r_{1\min} = r_1 / r_2$, $U_{1\max} = U_2 / U_2$, $D_* = D / r_2$, $Y_{P*} = Y_P / r_2$ である。同様に Type b の場合, セキ下流面に作用する水圧を r_2 で近似すると,

$$K_1 r_1^2 + 2 (F r_2^2 \beta_1 U_{1\max}^2 + K_1 D_*) r_{1\min} - 2 F r_2^2 (Y_{P*} U_{1\max}^2 \beta_1 + \beta_2) - K_1 D_*^2 - 1 = 0 \quad (7)$$

(5-2) 断面 0, 1 間でのエネルギー式

Type a の場合に断面 0, 1 間でエネルギー式を考える。ただし, 水路と配は小さいとする。

$$\alpha_0 \frac{U_0^2}{2g} + r_0 = \frac{1}{2g} \left\{ \int_{y=r_1-r_{\min}}^{y=r_1} u^2 dy + \int_{y=0}^{y=r_1-r_{\min}} u^2 dy \right\} + K_2 r_1 \quad (8)$$

ここに, U_0 : 断面 0 の平均流速, α_0 : 断面 0 のエネルギー補正係数, g : 単位中流量, K_2 : 断面 1 での圧力補正係数である。 α_1 を断面 1 でのエネルギー補正係数とし, (8) 式右辺の断面 (1) の速度水頭を次式のように定義する。

$$\frac{1}{2g} \left\{ \int_{y=r_1-r_{\min}}^{y=r_1} u^2 dy + \int_{y=0}^{y=r_1-r_{\min}} u^2 dy \right\} = \alpha_1 \frac{U_{1\max}^2}{2g} \quad (9)$$

(9) 式と考慮して (8) 式と流量 Q の式に変形すると,

$$Q = \left\{ \sqrt{\alpha_1 U_{1\max}^2 r_{1\min}^2 - \alpha_0} \right\} \cdot B r_0 \sqrt{2g (r_0 - K_2 (D + r_0))} \quad (10)$$

同様に Type b の場合

$$Q = \left\{ \sqrt{\alpha_1 U_{1\max}^2 r_{1\min}^2 - \alpha_0} \right\} \cdot B r_0 \sqrt{2g \{ r_0 - K_2 (D + r_0) \}} \quad (11)$$

ここに, $r_{0*} = r_0 / r_2$ である。

(5-3) β_1 および α_1 の計算

断面 1 における流速分布が相似であると仮定して次のようにおく。

$$\left. \begin{aligned} u_1 / U_{1\max} &= g_1(\eta_1) & \eta_1 &= (r-y) / r_{1\min} \\ u_{1b} / U_{1b\max} &= g_2(\eta_2) & \eta_2 &= y / (r_1 - r_{1\min}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ここに, u_1, u_{1b} : 断面 1 の順流部および逆流部流速, $U_{1b\max}$: 逆流部の最大流速である。(12) 式を考慮し (15) 式を変形すると,

$$\beta_1 = S_2 + \frac{E_2}{E_1^2 r_{1\min}^2} \left\{ \frac{1}{U_{1\max} r_{1\min}} - S_1 \right\}^2 \quad (13)$$

ここに, $S_1 = \int_0^1 g_1^2(\eta_1) d\eta_1$, $S_2 = \int_0^1 g_2^2(\eta_2) d\eta_2$, $E_1 = \int_0^1 g_1(\eta_1) d\eta_1$, $E_2 = \int_0^1 g_2(\eta_2) d\eta_2$, $r_{1\min} = (r_1 / r_{1\min}) - 1$ である。

同様に, (9) 式より,

$$\alpha_1 = r_{1\min} U_{1\max} \left\{ S_3 + \frac{E_2}{E_1^2 r_{1\min}^2} \left(\frac{1}{U_{1\max} r_{1\min}} - S_1 \right)^2 \right\} \quad (14)$$

ここに, $S_3 = \int_0^1 g_1^3(\eta_1) d\eta_1$, $E_3 = \int_0^1 g_2^3(\eta_2) d\eta_2$ である。(14) 式で, 逆流部の影響は小さいとしてこの項を無視すると,

$$\beta_1 = S_2, \quad \alpha_1 = r_{1\min} U_{1\max} S_3 \quad (15)$$

となる。($r_{1\min} = 1 - (D_* + Y_{P*})$) 図-5 に断面 1 における流速分布の実測値が示されている。流速分布はほぼ一様であり, 前述の相似性の仮定は満足していると思なされる。なお, 順流部において, $U_{1\max}$ は $(r-y) / r_{1\min} = 0.6 \sim 0.8$ 付近にあり, 表面に近づくにつれて流速はやや小さくなっている。これは流れのわん曲の影響と考えられる。図中に示された平

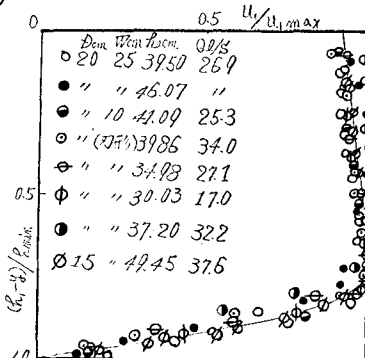


図-5(a) 断面1の流速分布(正流部)

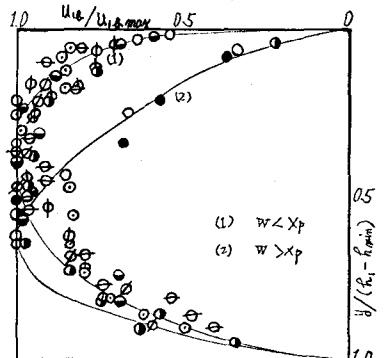


図-5(b) 断面1の流速分布(逆流部)

均流速分布曲線を想定して計算

すると、 $S_1=0.86$, $S_2=0.82$, $S_3=0.74$
 $W < Y$ では $E_1=0.70$, $E_2=0.56$, $E_3=0.48$
 $W < Y$ では $E_1=0.79$, $E_2=0.69$, $E_3=0.62$
 となる。

(5-4) 圧力補正係数 K_1, K_2 について

(4)(5) 式および (4)(7) 式より K_1, K_2 を求めると、

$$K_1 = \left(\frac{R_0}{R_1} \right)^2 \left\{ 1 - \frac{3}{R_1} \cdot (P_1 R_{\min} + U_{\max}^2 - P_2) \right\} \quad (16)$$

$$K_2 = \frac{1}{2gR_1} \left(\frac{g}{R_0} \right)^2 \left\{ \alpha_0 - \alpha_1 U_{\max}^2 R_{0x}^2 \right\} + \left(\frac{R_0}{R_1} \right) \quad (17)$$

図-6 は、Type A, B のセキで、断面 1 で測定したピエゾ水頭が示されている。Type A, B のセキでは、断面 1 において流線は外側にわん曲していると考えられ、遠心力の影響で順流部でのピエゾ水頭は水深が深くなるにつれ減少している。逆流部ではほぼ一定値であるが、水面付近よりやや小さな値を示す。図-7 に、(16)(17) 式で計算した K_1, K_2 および図-6 のデータより計算した K_1, K_2 が示されている。

K_1 の値は、流線の曲りによりかなりの変化を示している。 K_2 はほぼ 1 に近い値を保っている。実測値もほぼ同様の傾向を示しており、 K_1, K_2 もよく一致している。

6. 流量算定法とその結果について

以上の結果から、 R_0, R_1 を与え (6) および (10) 式または (7) および (11) 式を連立して試算を行なうと、Type A および B の潜りセキの流量を求めることができる。 $U_{\max}$ を与えるには、断面 1 での流速 $U_{\max}$ が potential core 内の流速に等しいと仮定し、potential core 末端の C 点の流速は、近似的に (2) 式で与えることにより求められる。ただし、(2) 式において、セキ下流部のはく離領域の境界は直線と近似し、その勾配は 7.3、はく離領域の長さとしては $L = X_p + 7.3(D + Y_p)$ とし、potential core の長さ l_p を図-4 または (3) 式で与えると、C 点での U が求められる。

α_1, β_1 は (13) および (14) 式で与えられるが、(19) 式を用い

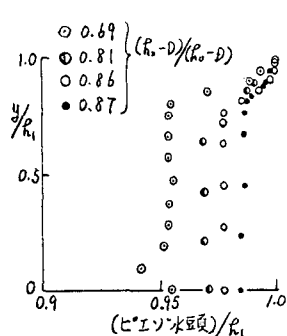


図-6 断面 1 のピエゾ水頭

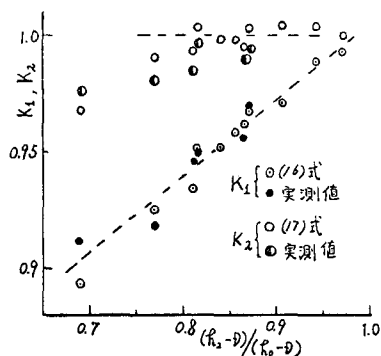


図-7 圧力補正係数

たほうが簡単であり、その値もほとんど変わらない。 K_1 の値は、図-7 より与えられる。 K_2 は近似的に 1 とする。これで Q が計算できる。

また、急転部の流れにおいて、その拡大角が 30° 以上でははく離領域の特性は拡大角によって変化しないことが明らかにされており⁽⁶⁾、したがって、セキ下流面が傾斜した台形セキ(図-11に実線を示す)においても、その勾配が大きい場合は流れにあまり影響ないと考えられ、逆流部を無視し、 α, β の値は (15) 式を用いると、前述の方法により流量算定できる。

図-8 は、以上の方法により計算した結果であるが、実測流量と計算流量の誤差はほぼ 10% 以内であり良い結果が得られた。最後に、実験にあたり協力いただいた九大水工土木科の木村繁元技官に感謝いたします。

参考文献

- (1) 上田 登口: 潜り台形セキ下流部の流れの性状について, 九大学集報 44巻 15
- (2) (1) に同じ
- (3) 石原 志彦: 開水路急転部の水理学的性状に関する研究, 土木学会論文集 138号 (54.4.2)
- (4) (1) に同じ
- (5) Albertson: Diffusion of Submerged jet, Proc. of ASCE Vol. 14, 1948
- (6) 石原 志彦: 開水路急転部の水理学的性状に関する研究, 土木学会論文集 128号 (54.1.4)