

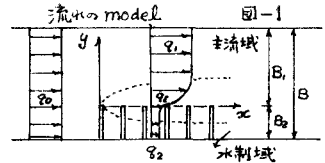
九州大学工学部 正員 橋 東一郎

九州大学大学院 学生員 〇 田 原 誠

吉 岡 邦 明

まえがき 図-1. のような直線水路に連続越流水制を設置した場合の流れは、水制の始末において流速(単位幅流量)は流れ方向に減少して平衡状態に達する。また

横方向には水制域と主流域との間に速度勾配の急激に変化する遷移領域を形成している。本文は、これら、縦、横方向の遷移領域について実験および解析を行ない、直線水路における水制の機能について若干の考察を行なったものである。



[1]. 水制域流量減少効果(流れ方向の考察)

水制の先端に原点をとり流れ方向に x 軸、それに垂直、水平に y 軸をとる。水制のないときの値 $\epsilon = 0$, 主流域, 水制域に 1, 2 をつけると, Froude 数, $Fr^2 = q_2^2 / g h_0^3 \ll 1$ の場合には、既に吉川、芦田教授の得られた式²⁾と同一の式が得られる。考察の便のために、解を無次元形を表示すると、

$$\frac{\epsilon}{\eta} = \frac{q_1}{2} \left[\frac{1 - \frac{q_2}{q_1} \mu}{\frac{q_1}{q_2} \mu - 1} \log_e \left| 1 + \left(\frac{q_1}{q_2} \mu - 1 \right) \frac{P'}{P} \right| - \frac{1 + \frac{q_1}{q_2} \mu}{\frac{q_1}{q_2} \mu + 1} \log_e \left| \left(\frac{q_1}{q_2} \mu + 1 \right) \frac{P'}{P} - 1 \right| \right] \quad (1)$$

ここに、 $P_2 = q_2 / q_0$, $P = q_1 / q_0$, $\epsilon = x / h_0$, $b_1 = B_1 / B$, $b_2 = B_2 / B$, B_2 = 水制幅, B = 水路幅, $\mu = B_1 \delta_1 / B_2 \delta_2$, $\delta = \int_0^B q dy / q_0 B_1$, $\delta_2 = \int_{B_2}^B q dy / q_0 B_2$, $\eta = q_1 / q_0$, $q_1 = q_0$: 水制のないときの流速係数, $q_0 = q_0 / h_0 \sqrt{3 h_0 I_0}$, q_2 は、糙粗度実験によると、水制高さ / 水制間隔 $= \lambda / h_0$, および P_1 / h_0 の関数(図-2)で、 $q_2 = \alpha (P_1 / h_0)^m$ を表わすとき、 $\alpha = 1.1 \sim 1.5$, $m = 0.7 \sim 0.9$ の程度である。

P は、連続の式 $b_1 \delta_1 P + b_2 \delta_2 P_2 = 1$ を用いて、 $P_2' = b_2 \delta_2 / P$ に置きかえ積分できる。境界条件として、水制の始末 $\epsilon = 0$ で、 $P_2' = b_2 \delta_2 / [b_2 + \alpha \frac{P_1 / h_0}{P_1 / h_0 - 1} (1 - b_2)]$ 式と置く。式(1)より、 P_2 は、 q_1 / q_2 および μ を parameter として、 $\epsilon = 0$ の P_2 より減少して、 $P_2 \text{ final} = 1 / b_2 \delta_2 \cdot (\frac{q_1}{q_2} \mu + 1)$ に収斂する。

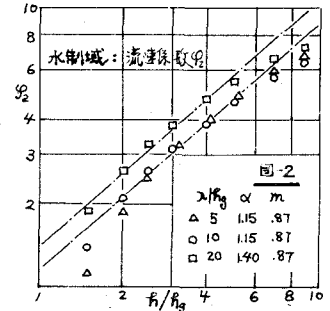
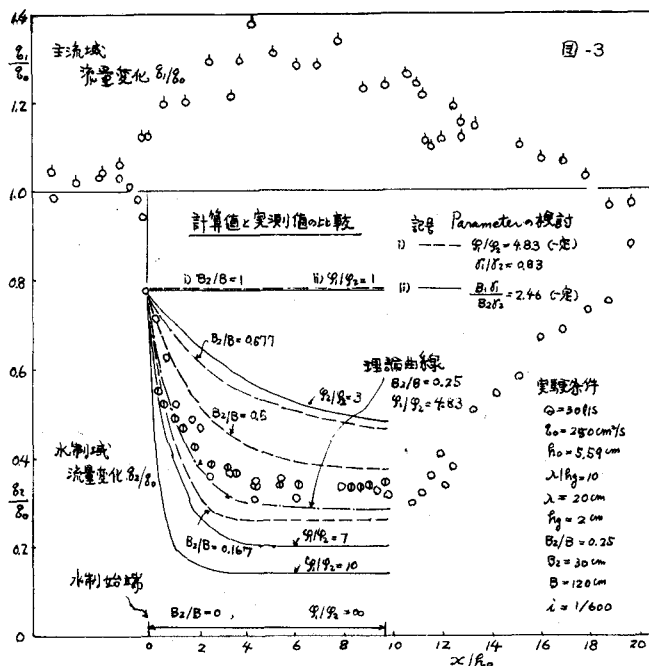


図-3 は、水制長 6.4m, $B_2/B = 0.25$, $q_1/q_2 = 4.83$ の場合について、始末から一様域中における主流部、水制部の流量分布および水制域下流の回復状態を示したもので、図中の一実線が計算結果である。また、同図には、 $q_1/q_2 = 4.83$ に保ち、 B_2/B を変化した場合(破線)、および $B_2/B = 0.25$ を保ち q_1/q_2 を変化した場合(実線)の計算結果もある。 B_2/B が減少するほど、 q_1/q_2 が増すほど定常状態に達するまでの距離も小さく、且つ定常状態における q_2/q_0 の値も小さく、水制に対する流速減の効果が大きいことがわかる。

1). 斎藤, 橋: 水制の機能に関する研究, 第 22 回土木学会講演会

2). 秋草, 吉川, 芦田坂上, 土屋: 水制に関する研究, 土木研究所報告 107 号の 6.



〔2〕. 定常域流量配分 (横断方向の考察)

水制区間が充分長い場合, 図-3のように横方向の流速分布は, ほぼ平衡状態に達する。又方向には, 静水圧分布に従うとして, x 方向の運動方程式と河床より水側まで積分すると, 平均流速 U は, つぎのようになる。

$$U \frac{\partial U}{\partial x} = g \left(i - \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} - \frac{\tau_0}{h} \right) \quad (2)$$

こゝに, τ_0 は, 河床の剪断応力で, 流速係数 φ を用いると, $\tau_0/\rho = U^2/\varphi^2$, τ_{yx} は, 渦動粘性係数 η_{xy} と導入して, $\tau_{yx} = \eta_{xy} \frac{\partial U}{\partial y}$ とある。一様流速 U_1, U_2 , 流速係数 φ_1, φ_2 を用い

ると, 基礎式は, 主流域, 水制域に対して, つぎのようになる。

$$\frac{U_1^2 - U_2^2}{C_1 \varphi_1^2} + \rho_1 \eta_{xy} \frac{d^2 U}{dy^2} = 0, \quad \frac{U_1^2 - U_2^2}{C_2 \varphi_2^2} + \rho_2 \eta_{xy} \frac{d^2 U}{dy^2} = 0. \quad (y < 0) \quad (3)$$

こゝに, C_1, C_2 は等流状態の流れに水制を設置した時の流れが, 等流でないための補正項で, $C_1 = I_2/I_1 = 1 + \frac{i-1}{I} \frac{U_1^2}{g h_1^3} \approx 1 + (i-1) \varphi_1^2$, $C_2 = I_2/I_1 \approx 1 + (i-1) \varphi_2^2 \approx 1$ とある。上式中の渦動粘性係数 η_{xy} は, 主流, 水制域の粗度または流速係数 φ の差異によって発生する乱れによるものであり, この函数形は明確でない。従つて, $\eta_{xy} = k \rho U$ (芦田教授が複断面水路を用いられた仮定), $\eta_{xy} = k \rho (U_1 - U_2)$, $\eta_{xy} = k^2 dU/dy$ (prandtl の仮定) の三つの仮定を採用し, 実験結果と照合することにした。その結果, $\eta_{xy} = k \rho U$ の表示が実験結果の比較に適當であり, また, 渦動粘性係数の物理的な意味も最も明確であるので, 以下この場合のみを述べる。

境界条件として, $y = 0$ で $U = U_1$, $y = B_1, -B_2$ で, U_1, U_2 を入れて積分し, 水深 h は, y 方向にはほぼ一定であるから, 流量 $Q = k \rho U$ を用いて表わすと,

$$\frac{Q}{B_1} = \sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^2 \right] \frac{\sinh K_1 B_1 (1 - y/B_1)}{\sinh K_1 B_1}}, \quad \frac{Q}{B_2} = \sqrt{1 + \left[\left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sinh K_2 B_2 (1 + y/B_2)}{\sinh K_2 B_2}} \quad (4)$$

$$\text{こゝに, } K_1 = \sqrt{\frac{2}{C_1 K_1}} \frac{1}{h \varphi_1}, \quad K_2 = \sqrt{\frac{2}{C_2 K_2}} \frac{1}{h \varphi_2} \quad (5)$$

で, 流量分布の形状係数である。

なお, 一様域の流量比 Q_1/Q_2 は, 式(3)で $dU/dy = 0$ と, U_1, U_2 となることから,

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{C_1 \varphi_1}{C_2 \varphi_2}} \quad (6)$$

$U = \sqrt{\frac{C_1 \varphi_1}{C_2 \varphi_2}}$ とおいて plot すると, 図-4のように上の関係は, ほぼ満足されている。

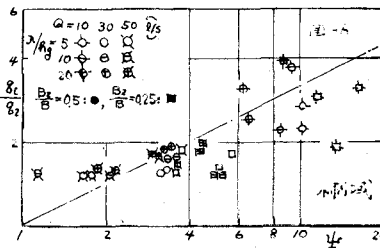
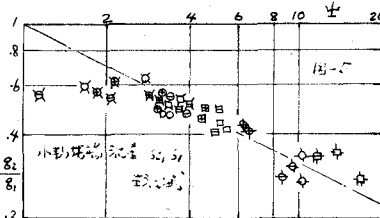
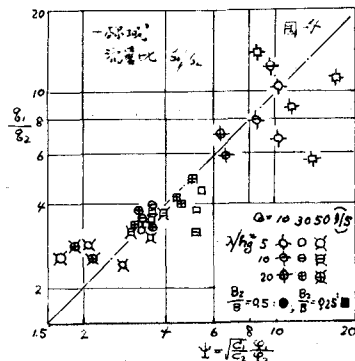
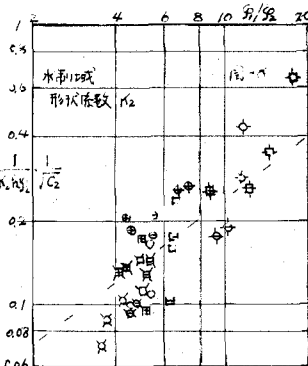
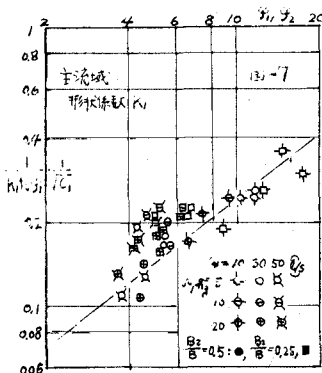
水利先端の流量 g_1 に対しては、式(4)の両式に対して、Stress
 $\log \frac{dy}{dx} \Big|_{y=0}$ が等しい条件を入ると、

$$\frac{g_1^2 - g_2^2}{g_1^2 - g_2^2} = \frac{k_2 \tanh K_1 B_1}{k_1 \tanh K_2 B_2} \Psi \quad (7)$$

同じく実測値と Ψ に対して plot すると、 $K_1 B_1$, $K_2 B_2 > 2$ であるから
 $\tanh K_1 B_1 = \tanh K_2 B_2 \approx 1$ を用いれば、粗い近似として、 $k_1 \approx k_2 = k$
とあける。このとき式(6)を用いて、境界流量 g_1 は、次式
のような形に帰着する。

$$\frac{g_1}{g_2} = \sqrt{\frac{1}{\Psi}}, \quad \frac{g_2}{g_1} = \sqrt{\Psi} \quad (8)$$

図-5, 6 は、 Ψ に対して同様に plot しにもの、ほう満足され
ていることがわかる。



つぎに、形状係数 K_1 , K_2 は、式(4)および実測の流量分布からある y に対応する g の実測値を用いて
逆算することができる。これらの値を用いて、 $1/\sqrt{k_1} K_1 g_1 = \sqrt{k_2/2}$, $1/\sqrt{k_2} K_2 g_2 = \sqrt{k_1/2}$ と Lateral 方向の
流量分布を発生させる要因である g_1/g_2 に対して plot したものが、図-7, 8 である。Vertical 方向の
滑動粘性係数は、 $k_2 = \frac{k}{\alpha h} = \frac{1}{15\alpha} h u$ に等しく、この実験では、 $\alpha = 18.4$ であるから、 $g_1/g_2 = 1$ と
 $\frac{1}{15\alpha} = 0.0426$ と通る指数形と仮定すると、 $k = \frac{1}{15\alpha} (g_1/g_2)^n$, $n = 0.75$ と表示される。なお、これか
ら、透流領域にみられる観る速度勾配は、 g_1/g_2 の差異によって発生し、横方向の滑動粘性係数は、
縦方向のもの $(g_1/g_2)^n$ 倍であることが推定される。上の k を用いると K_1 , K_2 は、

$$K_1 B_1 = \sqrt{\frac{30\alpha}{C}} \frac{1}{g_1} \left(\frac{g_1}{g_2} \right)^{-n} \frac{B_1}{h}, \quad K_2 B_2 = \sqrt{\frac{30\alpha}{C}} \frac{1}{g_2} \left(\frac{g_1}{g_2} \right)^n \frac{B_2}{h} \quad (9)$$

流量分布式(5)において、 $K_i B_i \gg 1$ ($i=1, 2$) の場合には、 $\sinh K_i B_i (1 - y/B_i) / \sinh K_i B_i \approx e^{-K_i y}$
($y > 0$) に近似できる。この g の表示と、連続の式 $\int_0^y g dy + \int_y^{B_1} g dy = g_0 (B_1 + B_2)$, $i=1$ 代入し、積分
式(6)から $g_1/g_2 = \Psi$, 式(10)から $K_2 = \Psi K_1$ を用いて整理すれば、水利部-板域の流配配分は、
次式、

$$\frac{g_2}{g_0} = 1 / \left[\frac{1}{K_1 B} \left\{ \frac{2}{\Psi} (\sqrt{\Psi} - 1 + \log \frac{2}{\sqrt{\Psi} + 1}) + 2\Psi (\sqrt{\Psi} - 1 + \log \frac{2}{\sqrt{\Psi} + 1}) + \Psi + (1 - \Psi) \frac{B_2}{B} \right\} \right] \quad (10)$$

のようになる。これは、 $K_1 B$, Ψ を parameter とする g_2/g_0 の B_2/B に対する式である。更に、

式(4),(10)を組み合わせると、流量配分 q_2/q_0 がきまる。これを、水制始端から $4.4m(x/p_0 = 78.8)$ の場合につりて、実験結果と比較したものが、図-9にある。

なお、 $\eta_{xy} = k_2 h_2 (v_1 - v_2)$ 、 $\gamma_{xy} = l^2 du/dy$ は、この順に遷移領域の幅として過小の値を与える。

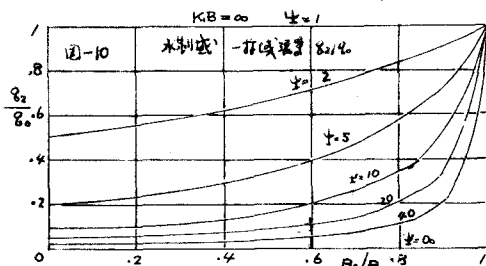


図-10は、 $K_2 B_2 = \infty$ の場合について、 ψ をparameterとして、 q_2/q_0 と B_2/B_0 の関係を示したものである。この結果は、遷移領域を無視した図-3の場合と同様であって、 B_2/B_0 が減る程、 ψ が増加する程 q_2/q_0 は、減少することと示している。従って、直線水路に設ける連続水制の流速減殺効果は、 $\psi = q_1/q_2$ が大きい程著しい。 q_1 は、原河床の粗度とまじり、 q_2 は、図-2に示すように、 λ/p_g および p_g/p_n の函数であるが、 $\lambda/p_g = 5, 10$ では、殆んど一致し、 $\lambda/p_g = 20$ でも大きな差異はなく、工費および p_g/p_n との関連において、 λ/p_g は決められるものと考えられる。

また、 B_2/B_0 は上の考察では小さの方が望ましいが、これには限界が存在して、式(5)から、 q_2/q_0 と $\psi = 5$ の場合について、 y/B_2 の函数として計算した結果が、図-11にある。 ψ の値には無関係に $K_2 B_2 \geq 5$ では、側壁付近に一杯流量 q_2 の部分が存在するが、 $K_2 B_2$ が小さくなると、主流域よりの流れのまわりこみが著しくなる。従って、実用上では $K_2 B_2 = 5$ を限界とすると、例え、限界は次式

$$K_2 B_2 = 2.6 \left(\frac{p_g}{p_n} \right)^{0.22} \frac{B_2}{p_n} = 5 \quad (11)$$

のようになり、水制長は水深および p_g/p_n との関連において適当な長さ決められる。なお、水制の高さおよび配置は、先端の洗掘や浮流砂の補償作用とも考慮して決められるべきであるが、これら移動床については、現在実験中である。

