

九州大学工学部 正員 上田年比古

〃 〃 〇 釜口英昭

〃 〃 〃 学生員 与田博恭

1 緒言

潜り堰に関する流量公式については、2, 3 の実験的研究があるが、それは完全越流堰における流量公式の延長としてとらえられ、単に越流係数も実験的に検討することのみにとどまっている。しかし潜り堰における堰近傍の流れは非常に複雑であり、その流れの特性が解明されなければ理論的な流量公式を導くことはできないであろう。また堰近傍の流れは堰の形状による影響が最も大きいと考えられるので種々のタイプの堰の比較検討が必要であるが、ここではその一段階として中のうす板状の堰において、下流側の流れの特性を、拘束された流れの場合における噴流と類似の現象としてとらえ、橋平野⁽¹⁾による段落部の解析を参考として若干の実験と考察を行なり、さらにこれらの結果を利用して薄板潜り堰の流量算定式について検討した。

2. 実験装置と方法

実験は図-1 に示す巾 60 cm、深さ 65 cm、長さ 20 m のアクリライト張り水路で行なり、水位測定は傾斜モニターにより、また流速測定はピトー管と小型プロペラ流速計（至 1 cm）を使用した。堰近傍のはく離は流速計のプロペラの回転方向を調べると同時に、色素を流して写真撮影も行い測定した。また reattaching point は、水路底にはりつけた糸のなびき方とプロペラ流速計の回転方向を調べることにより測定した。

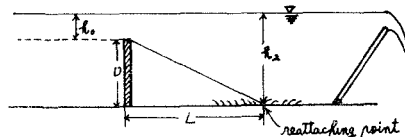


図-1 実験装置

3. 堰頂付近のはく離形状

堰頂上流端を基準として、堰頂付近のはく離形状の実測値を示したのが図-2 である。ここに、D は堰の高さ、Y は堰頂面上流端からの高さ、 r_0 は越流水深（堰上流側 70 cm の位置）、X は堰上流端からの流下方向の距離である。いまはく離高その最大の点 P の位置を X_d , Y_d とすれば、ほぼ

$$\left. \begin{aligned} X_d/r_0 &\approx 0.6 \\ Y_d/r_0 &\approx 0.12 \end{aligned} \right\} \text{-----(1)}$$

また P 点で水深は最小となり、P から下流部ではく離境界はほぼ直線的に低下している。なお、志村⁽²⁾は、角のある広頂堰の流入部のはく離測定結果より、 $X_d/r_0 \approx 0.45$, $Y_d/r_0 \approx 0.18$ という (1) 式と近似した値を報告している。

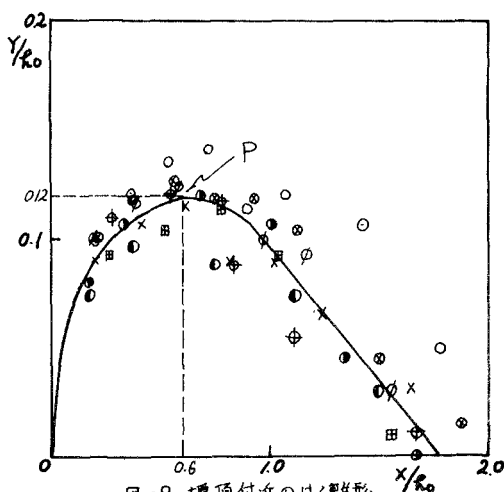


図-2 堰頂付近のはく離形状

4. はく離最高点より下流部の流れ

はく離最高点 P では流線はほぼ平行になっていると考えられるので、これより下流部の流れは図-3

の G P E に段落部をもつ流れに類似するものと考えられる。したがっていま段落部の研究で確らのセツ解析モデル(段落部から下流部を拘束された流れの場の噴流とみなす)ではなく離最高点以後に用いることにする。図-3 のようになる。ここに A P I が potential core, P C がはく離境界線, C が re-attaching point (はく離境界線と水路底との接点)である。噴流域における流速分布の相似性を仮定すると,

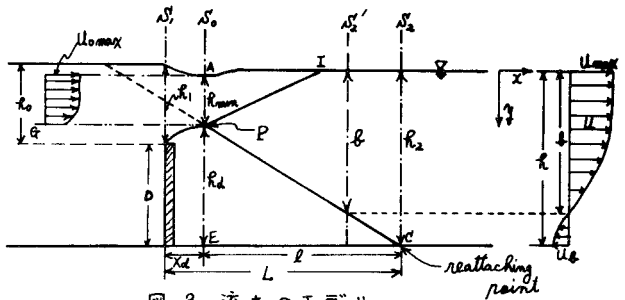


図-3 流れのモデル

$$\left. \begin{aligned} \text{噴流域 } (0 \leq y \leq b) : u/u_{\max} &= f_1(\eta), \quad \eta = 1 - y/b \\ \text{逆流域 } (b \leq y \leq h) : u/u_{\max} &= f_2(\eta, \xi), \quad \eta = (y-b)/(h-b), \quad \xi = x/r_{\min} \end{aligned} \right\} \quad \text{--- (2)}$$

断面 \$S_0\$ と \$S'_0\$ で連続の式と運動量の式を適用すると,

$$\frac{u_{\max}}{u_0} \cdot \frac{b}{r_{\min}} C_1 - \frac{u_e}{u_0} \cdot \frac{h-b}{r_{\min}} D_1 = 1 \quad \text{--- (3)}$$

$$\left(\frac{u_{\max}}{u_0} \right)^2 \frac{b}{r_{\min}} C_2 + \left(\frac{u_e}{u_0} \right)^2 \frac{h-b}{r_{\min}} D_2 = \beta_0 + \frac{1}{2\beta_0} \left\{ \left(1 + \frac{r_d}{r_{\min}} \right)^2 - \left(\frac{h}{r_{\min}} \right)^2 \right\} \quad \text{--- (4)}$$

\$u_0\$: 断面 \$S_0\$ における平均流速, \$r_{\min}\$: 断面 \$S_0\$ における P からの水深, \$\beta_0\$: 断面 \$S_0\$ における運動量補正係数, \$F_0 = u_0/g r_{\min}\$, \$C_1 = \int_0^1 f_1(\eta) d\eta\$, \$C_2 = \int_0^1 f_1^2(\eta) d\eta\$, \$D_1 = \int_0^1 f_2(\eta, \xi) d\eta\$, \$D_2 = \int_0^1 f_2^2(\eta, \xi) d\eta\$

5. 流速分布の相似性

図-4 は堰下流 50cm, 1m, および re-attaching point における噴流域内の流速分布の実測値を示している。これによる堰下流 1m, および re-attaching point における流速分布は, Tollmien による自由噴流の流速分布曲線にかなり良く一致している。なお堰下流 50cm における実測値が, Tollmien の曲線よりも大きい値を示しているのは, まだ potential core が存在して噴流が充分に発達していないからと考えられる。したがって, potential core が消滅し, 噴流が発達した部分に対しては近似的には流速分布の相似性を仮定することができるとであろう。

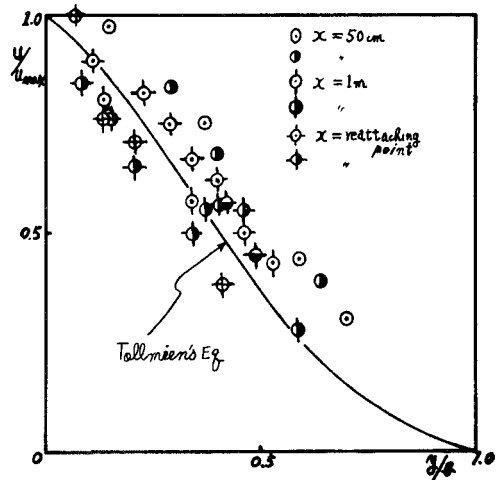


図-4 噴流域内流速分布

6. 表面流速の逆減

式(3),(4)より \$u_e\$ を消去すると

$$\left. \begin{aligned} \frac{u_{\max}}{u_0} &= \frac{\beta_0}{\beta_0 C_1 \beta_2} \frac{1}{\chi} + \frac{1}{\beta_0} \sqrt{\frac{\beta_0'}{C_2 \beta_2}} \frac{\sqrt{\chi - \beta_0'/\beta_2}}{\chi} \sqrt{\chi - \beta_0' \beta_2/\beta_2} \\ \chi &= r_x - \xi_g (1 - \beta_2/\beta_2) + \Delta r/r_{\min}, \quad \beta_0' = \beta_0 + \frac{r_d \Delta r}{F_0^2 r_{\min}}, \quad \xi_g = b/r_{\min} \end{aligned} \right\} \quad \text{--- (5)}$$

$R_x = 1 + R_d/R_{min}$, β_2 : 噴流域運動量補正係数で $\beta_2 = C_2/C_1^2$, $\Delta R = R_2 - (R_{min} + R_d)$, $\gamma_0 = u_{max}/u_0$

図-5は, (5)式によつて計算された表面流

速の逆減特性(但し $\beta_0 = 1.03$, $\beta_2 = 1.65$,

$\beta_2/\beta_3 = 1.3$, $\gamma_0 = 1.13$)および, 表面流速の実測値を示している。これによつて実測値と計算値はほぼ同じ傾向を示している。実測値は R_d/R_{min} が小さい程, 逆減が早く始まる傾向を示しているが, これは段落部における逆減特性と一致する。Potential core の領域においては $u_{max}/u_{0,max} \approx 1.1$ であり, 石原や橋らの実験結果 $u_{max}/u_{0,max} = 1.0$ よりもやや大きな値を示すようである。

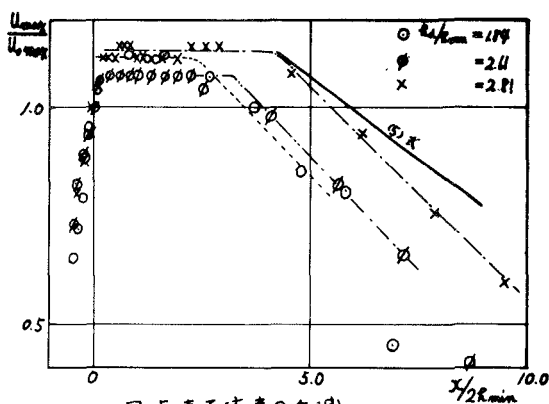


図-5 表面流速の逆減

7. はく離領域の長さ

reattaching point においては $\theta = R_2 = R$ であるから, 式(3),(4)より u_{max}/u_0 を消去すると

$$\frac{R_2}{R_{min}} = \sqrt{R_x^2 + 2F_0^2\beta_0 - 2F_0^2\beta_2/(R_x + \Delta R/R_{min})} \quad \text{----- (6)}$$

図-6に l/R_{min} と R_2/R_{min} の実測値を示す。橋らは, (6)式より計算した R_2/R_{min} と l/R_{min} の実測値を検討して,

$$\frac{l}{R_{min}} = 7.3 \left(\frac{R_2}{R_{min}} - 1 \right) \quad \text{----- (7)}$$

という実験式を与えているが, 本実測値とよく合っている。したがつて堰から reattaching point までのはく離領域の長さ L は, 近似的に

$$L = X_d + l = 0.6R_0 + 7.3(R_2 - R_{min}) \quad \text{----- (8)}$$

となる。また(6)式において $F_0^2 \rightarrow 0$ の場合には, $R_2/R_{min} \approx R_x$, したがつて

$$L \approx 0.6R_0 + 7.3R_d \approx 7.3D + 1.5R_0 \quad \text{----- (8)'}$$

となり, 実用的にははく離領域の長さ L は(8)'式により算定してよいであろう。

8. 渇り堰の流量算定式について

断面 S_1 と S_2 において運動量の式を適用すると,

$$\frac{1}{2}(R_1 + D)\beta + \beta_1 u_1^2 R_1 \beta = \frac{1}{2}R_2^2 \beta + \beta_2 u_2^2 R_2 \beta \quad \text{----- (9)}$$

ここに β : 水路中, β_1 : 断面 S_1 における運動量補正係数, u_1 : 断面 S_1 における平均流速, u_2 : 断面 S_2 における平均流速である。ここで $R_1/R_2 = \alpha$, $D/R_2 = K$ とおくと, (9)式は

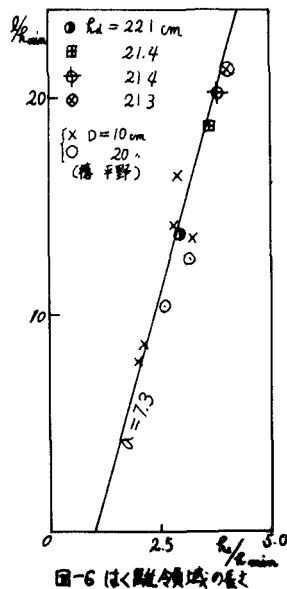


図-6 はく離領域の長さ

$$\alpha^3 + 2K\alpha^2 + (K^2 - 2\beta_2 F_2^2)\alpha + 2\beta_1 F_2^2 = 0 \quad \text{----- (10)}$$

$F_2^2 = u_2^2/gR_2$ である。この3次方程式の解は、 $(1/3 \cdot P)^3 > (1/2 \cdot g)^2$ に對して、

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= -\frac{2}{3}K - 2\sqrt{\frac{1}{3}(1+2\beta_2 F_2^2 + \frac{K^2}{3})} \cdot \cos \frac{\varphi}{3} \\ \alpha_2 &= -\frac{2}{3}K - 2\sqrt{\frac{1}{3}(1+2\beta_2 F_2^2 + \frac{K^2}{3})} \cdot \cos(\frac{\varphi}{3} + 120^\circ) \\ \alpha_3 &= -\frac{2}{3}K - 2\sqrt{\frac{1}{3}(1+2\beta_2 F_2^2 + \frac{K^2}{3})} \cdot \cos(\frac{\varphi}{3} + 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (11)}$$

$$\text{但し, } \left(\begin{aligned} P &= \frac{1}{3}K^2 + 2\beta_2 F_2^2 + 1, \\ \pm g &= \frac{-2}{27}K^3 + \frac{2}{3}K(1+2\beta_2 F_2^2) + 2\beta_1 F_2^2, \end{aligned} \quad \cos \varphi = \frac{\frac{1}{2}g}{\{\frac{1}{3}P\}^{3/2}} \right)$$

次に、接近流速を無視するとベルヌーイの定理より流量Qは

$$Q = bR_1 \sqrt{2g/\eta_1 (R_0 - R_1)} = b \sqrt{2g/\eta_1} \cdot R_0^{3/2} \cdot R_1/R_0 \cdot \sqrt{1 - R_1/R_0} \quad \text{----- (12)}$$

η_1 : 断面 α_1 における運動量補正係数、ここで $\delta = (R_2 - D - R_1)/R_2 = 1 - (K + \alpha)$ とおく

$$R_1 = (R_2 - D) \{ (1 - \delta) - \delta \cdot \frac{D}{R_2 - D} \} \quad \text{----- (13)}$$

(12), (13) 式より

$$Q = b \sqrt{2g/\eta_1} R_0^{3/2} (1 - \delta - \delta \cdot \frac{D}{R_2 - D}) \frac{R_2 - D}{R_0} \sqrt{1 - (1 - \delta - \delta \cdot \frac{D}{R_2 - D}) \frac{R_2 - D}{R_0}} \quad \text{----- (14)}$$

したがって、まず F_2 を假定して(11)式を計算し、その正根のうち大きいものを α として(14)式よりQを計算するという試算を行うことにより流量を計算できる。また下流水位(R_2)の測定位置は、いままで統一された適用がなされておらず、運動量補正係数もあまり考慮されていなかった。ここでは R_2 の測定位置として *reattaching point* (断面 α_2) とする。堰から *reattaching point* までの距離は(8)'式によって算定できる。また α_2 における運動量補正係数は図-4のデータより計算でき、 $\beta_2 \approx 1.65$ とする。越流水の流入部(断面 α_1)においては表面流速よりも堰頂付近の流速がかなり大きく、吉川の实测値より η_1, β_1 を計算すると $\eta_1, \beta_1 \approx 1.4$ とする。以上の考察より一例として $R_0 = 9.65 \text{ cm}$, $R_2 = 29.66 \text{ cm}$, $D = 2.0 \text{ cm}$ の場合に對して計算してみると、計算値 $Q = 0.116 \text{ m}^3/\text{s}$ に対して实测流量 $Q = 0.10 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、かなり良い結果がえられた。

9. まとめ

以上を要約すると、渇り堰下流部の流れでは段落部の流れと同様に噴流と類似の現象として取扱うことができ、それによって流量算定式における下流水深測定位置、運動量補正係数などを明確にすることができ比較的良好的流量算定を行うことができるようになった。なお今回の実験ならびに考察を行うにあたり、九州大学水工土木学教室橋東一郎教授および助手平野宗夫氏に有益な御助言をいただいた。ここに深謝いたします。また本研究は文部省科学研究費の補助を受けた。ここに深謝申し上げる。

参考文献:

- 1) 橋・平野: 段落部における流れの特性と浮流砂のまきみについて, 土木学会年講(第94)
- 2) 志村: 岸のある広頂堰流入部の流れの構造, 農業土木学会論文集13号
- 3) 石原忠方: 開水路急転部の水理学的性状に関する研究, 土木学会論文集第18号(第214)