

急勾配開水路の底部分水流れにおける 開口部形状の影響評価

ESTIMATION OF THE EFFECT OF THE OPENING CONFIGURATION ON THE FLOW AT BOTTOM INTAKE IN STEEP OPEN CHANNEL

島崎昌彦¹・川本治²

Masahiko SHIMAZAKI and Osamu KAWAMOTO

¹正会員 農修 農業技術研究機構 近畿中国四国農業研究センター (〒765-0053 香川県善通寺市生野町 2575)

²非会員 農博 農業技術研究機構 近畿中国四国農業研究センター (〒765-0053 香川県善通寺市生野町 2575)

In the small-scale and steep channels for irrigation or drainage on the mountainous areas, bottom intakes or bottom divisions are safer and more economical than other types of diverging facility. The hydraulic characteristic of that kind of structure has not been made clear, even though the detail of it would be necessary for reasonable design. In this study, the flow around a bottom intake is analyzed experimentally, and also theoretically as potential flow using the hodograph and conformal mapping. In the analysis, the position of the stagnation point that appears on the division side of the diverging corner is considered to be an important factor for the determination of diversion discharge. As a result, a method to estimate the diversion rate is developed.

Key Words : *super critical flow, bottom intake, potential flow, hodograph, conformal mapping*

1. 緒論

中山間地等の傾斜地における農地では、小規模で比較的急勾配な用・排水路が用いられることが多い。急勾配水路では一般に射流が生じ、断面変化等によって水位上昇や水の飛散などが生じ易い。

このような特性に起因する実際的な問題として、分水工に関する問題が挙げられる。一般に急勾配水路での分水は、流れを減勢してから緩勾配の水路と同様の方法により行う。しかし、水路底に開口部を設ける底部取水方式の分水工を用いれば減勢が不要で経済的に有利であり、減勢部での土砂堆積の問題も生じない。

底部取水方式の分水工の一つとして「渦動取水工」¹⁾が提案されており、これまで実験的にその分水特性の検討がなされている^{2),3)}。しかし、開口部の形状による分水特性への影響が大きいにも関わらず、その評価方法は不明である。

急勾配開水路の底部に設けた矩形の開口部による分水に関して、著者ら⁴⁾が開口部下流端に現れるよどみ点の位置が、分流量の決定に関して重要であることを指摘している。しかし、よどみ点の位置と分流量の関係、およびよどみ点の位置と開口部形状との関係についてはほとんど解明されていない。これらの関係を数値計算によらず解析的に評価することは、構造物の効率的な設計に有用と考えられる。また、分流量と開口

部形状によるよどみ点位置の決定機構には、運動学的な要素が多くを占めると考えられ、境界形状が単純であれば等角写像を用いたポテンシャル流解析による評価の有効性が期待できる。

そこで本研究では、実験およびホドグラフを用いた等角写像によるポテンシャル流解析により、これらの関係を調べる。

既往の研究において開水路の分合流にポテンシャル流解析を適用したものとしては、Milne-Thomson⁵⁾による自由流線を考慮しない分流の検討をはじめ、室田⁶⁾による自由流線を考慮してよどみ点が主水路側にあるときを含む分流の検討、Modiら⁷⁾による自由流線を考慮した合流の検討、藤田ら⁸⁾による自由流線を考慮してよどみ点が分岐の角に一致しない場合を含む合流の検討、Modiらと同様の方法によるSinhaら⁹⁾による分流の検討、Hassenpflug¹⁰⁾による半円への写像を用いてよどみ点が分岐の角に一致する場合に関する分合流の検討、Kacimov¹¹⁾によるよどみ点が分岐の角に一致する場合の分流の検討などがある。これらはいずれも水平2次元の分合流を対象としたものである。開水路底部分水流れでは、よどみ点が分水側に現れるためこれらの既往の研究を適用することができない。また、ホドグラフを用いたポテンシャル流解析は一般には自由流線の解析に用いられるが、本研究ではよどみ点位置の評価に用いる。

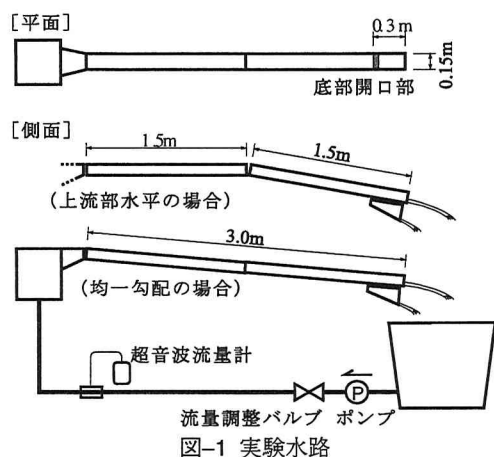


図-1 実験水路

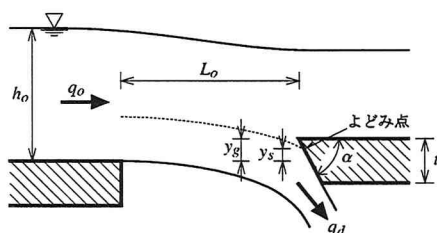


図-2 開口部流れの模式図

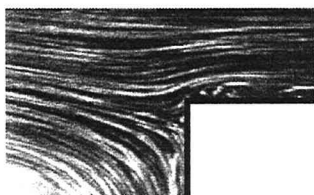


図-3 開口部下流端に現れるよどみ点

2. 実験による解析

(1) 実験条件

実験装置の概略を図-1 に示す。水路はアクリル製で、長さ 3.0m、幅 0.15m である。実験ケースにより、上流 1.5m を水平にした場合と、全体を均一勾配とした場合がある。開口部は水路下流端より約 0.3m の位置に設けた。

総流量は、容器法または水路下流端水槽から上流端水槽に送水する管に設置した超音波流量計を用いて測定した。分流量の測定は容器法を用いた。

本研究では、開口部の流れを図-2 に示すような鉛直 2 次元の流れとして取り扱う。開口部上下流高低差 y_g は、下流が高い場合に正、低い場合に負とする。

開口部下流端では流れが上下に分かれるので、時間平均流ではある位置によどみ点が現れることになる。図-3 に例を示すように、開口部の条件によって、よどみ点は下流端の角またはその下側に現れる。開口部上流端の水路底に対するよどみ点の高さを y_s として、正負は y_g と同様とする。

実験条件を以下に示す。水路の 2 次元流量 q_o は約 0.010~0.036 m²/s とした。水路勾配は、上流水平・下

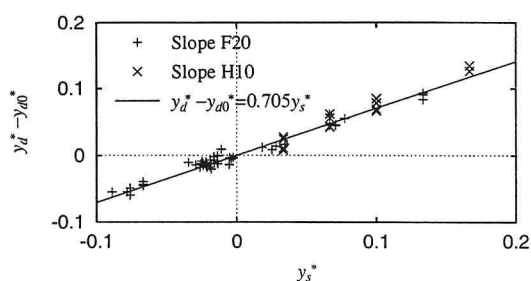


図-4 分流量へのよどみ点位置の影響

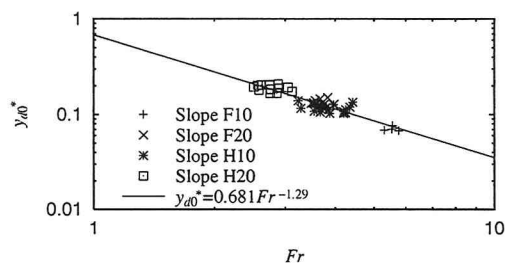


図-5 分流量へのフルード数の影響

流 1/20 (以下、H20 勾配と呼ぶ)、上下流 1/20 (F20 勾配)、上流水平・下流 1/10 (H10 勾配)、および上下流 1/10 (F10 勾配) の 4 条件とした。開口部上流における平均水深 h_o および平均流速 $V_o = q_o/h_o$ を用いて算出したフルード数 $Fr = V_o/\sqrt{gh_o}$ は 2.5~6.5 である。開口部下端角度 α (rad) は、 $0.25\pi \sim 0.5\pi$ 、開口幅 L_o は 0.02~0.05 m、 y_g は -0.002~0.004 m とした。

開口部下流端に現れるよどみ点の位置は、可視化画像の上で測定した。可視化画像は、流れに混入した微小なプラスチック粒子をトレーサとして、ビデオカメラで撮影することにより取得した。照明の光源は、レンズによりスリット状にしたアルゴンイオンレーザ光を用いた。

(2) 実験結果

ここで、開口部上流において、流速分布は均一であるとして、よどみ点を通る流線 (図-2 における破線) の水路底からの高さ、すなわち分流される水の層の厚さを L_o で無次元化した値 y_d^* を考えると、

$$y_d^* = \frac{q_d}{q_o} \frac{h_o}{L_o} \quad (1)$$

である。ここに、 q_d は 2 次元分流量である。次元解析および実験データの解析により、 y_d^* は水路のレイノルズ数や L_o/h_o にはほとんど依存せず、 Fr 、 α および y_g に強く依存することがわかった。

y_s は α および y_g に依存するが、概ね $tg/V_o^2 > 0.02$ において図-2 に示す下流端厚さ t には依存しないことがわかった。また、 $\alpha = 0.25\pi$ のとき、よどみ点位置は下流端の角にほぼ一致した。したがって、 $\alpha = 0.25\pi$ かつ $y_g = 0$ ならば $y_s = 0$ であるとし、このときの y_d^* を y_{d0}^* とする。ここで、ある実験条件における y_d^* と、流量、水路勾配および開口幅が等しいときの y_{d0}^* との

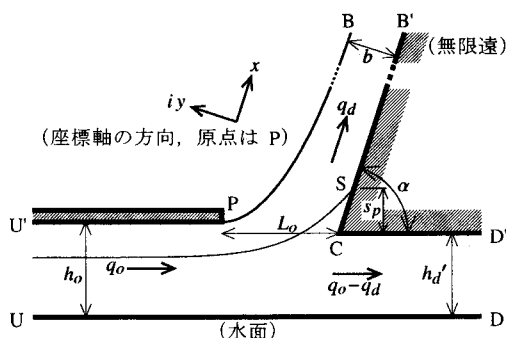


图-6 物理面 (z-面)

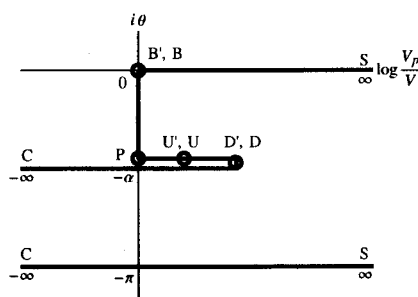
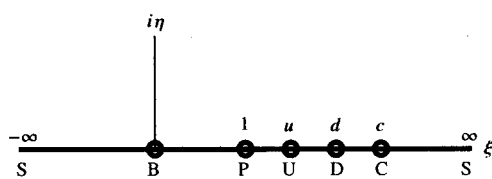
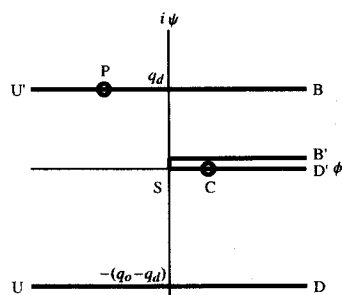
図-7 ホドグラフ面 (Ω -面)图-8 媒介平面 (ζ -面)

図-9 複素ポテンシャル面 (W-面)

差を $y_s^* = y_s/L_o$ に対してプロットすると図-4 となり、
実験式、

$$y_d^* = 0.705y_s^* + y_{d0}^* \quad (2)$$

が求められた.

また、 y_{d0}^* を Fr に対してプロットすると図-5 となり、実験式、

$$y_{d0}^* = 0.681 Fr^{-1.29} \quad (3)$$

が求められた。

以上より、 L_o , h_o , Fr を定めれば、式(1)~(3)より、 y_s^* と分流比 $q_r = q_d/q_o$ の関係を求めることができる。この関係は、 α および y_g の値には依存しない。よって、 α および y_g に依存する y_s^* と q_r の関係を別に定めれば、ここで求めた関係と連立することにより、流れと開口部の条件から q_r を求めることができる。

3. 開口部形状とよどみ点位置の関係

(1) ポテンシャル流解析

底部分水流れにポテンシャル流理論を適用し、等角写像により対数ホドグラフと複素ポテンシャルを媒介平面を用いて対応付ける方法により、開口部形状、 q_r 、およびよどみ点位置の関係を求める。ここでは重力および開口部下流端における流線の剥離は考慮せず、これらの影響については次節において検討する。

図-2 に示した底部分水の流れを簡略化し、図-6 に示すような x 軸の方向を分流の方向として、 $z = x + iy$ (i は虚数単位) とした複素平面 (物理面、 z -面) 上に表す。ここで、水面は分水開口部の上流側から下流側に至るまで水路底と平行とした。また、下流端厚さ t は無限大とした。図中、 b は分流方向無限遠での水流幅、 s_p は水路底とよどみ点の距離、また $h_d' = h_o - y_g$ である。

図-6 の流れを、

$$\Omega = \log \frac{V_P}{V} + i\theta \quad (4)$$

とするホドグラフ面 (Ω -面) として図-7 のように表す. ここに, V は流速の大きさ, V_p は点 P における V , θ は z -面における流速ベクトルの x 軸に対する角度 (rad) である. W を複素速度ポテンシャル $\phi + i\psi$ とすると, $\frac{dW}{dz} = Ve^{-i\theta}$ より,

$$\Omega = \log \left(V_p \frac{dz}{dW} \right) \quad (5)$$

と表せる.

Ω -面上の流れ場を，媒介複素平面 ζ -面 ($\zeta = \xi + i\eta$) の上半面に Schwarz-Christoffel 変換により図-8 に示すように写像すれば，

$$\frac{d\Omega}{d\zeta} = \frac{K(\zeta - d)}{(\zeta - c)\sqrt{\zeta}\sqrt{\zeta - 1}} \quad (6)$$

を得る. ここに K は定数である. 式 (6) を積分し,

$$\Omega = -2iK \left(\arctan \sqrt{\frac{\zeta}{1-\zeta}} - \frac{c-d}{\sqrt{c^2-c}} \arctan \sqrt{\frac{c-1}{c}} \sqrt{\frac{\zeta}{1-\zeta}} \right) + C_1 \quad (7)$$

を得る. ここに C_1 は定数である. $\Omega = 0$ のとき $\zeta = 0$ であることより, $C_1 = 0$ を得る.

点 P において, $\Omega = -\alpha i$ かつ, $\zeta = 1$ であるので,

$$K\pi\left(1 - \frac{c-d}{\sqrt{c^2-c}}\right) = \alpha \quad (8)$$

が得られる。また、点 C に対応する ζ -面上の点において、 $\zeta = c$ であるので、 $\zeta' = c + re^{i\theta}$ とおいて $\zeta = c$ のまわりの微小半円上で $\frac{d\Omega}{d\theta}$ を積分することにより、

$$\frac{K \pi (c - d)}{\sqrt{c^2 - c}} = \pi - \alpha \quad (9)$$

を得る。式 (8) および (9) より、

$$\frac{c-d}{\sqrt{c^2-c}} = \frac{\pi-\alpha}{\pi} \quad (10)$$

および $K=1$ を得る。よって、式 (7) は、

$$\Omega = -2i \left(\arctan \sqrt{\frac{\zeta}{1-\zeta}} - \frac{\pi-\alpha}{\pi} \arctan \sqrt{\frac{c-1}{c}} \sqrt{\frac{\zeta}{1-\zeta}} \right) \quad (11)$$

となる。

点 D および点 U と、 Ω および ζ との対応関係より、

$$\frac{h_d' q_r}{b(1-q_r)} = (\sqrt{d} - \sqrt{d-1})^2 \times \left[\frac{c-d}{\{\sqrt{c(d-1)} + \sqrt{d(c-1)}\}^2} \right]^{\frac{\pi-\alpha}{\pi}} \quad (12)$$

$$\frac{h_o q_r}{b} = (\sqrt{u} - \sqrt{u-1})^2 \times \left[\frac{c-u}{\{\sqrt{c(u-1)} + \sqrt{u(c-1)}\}^2} \right]^{\frac{\pi-\alpha}{\pi}} \quad (13)$$

が得られる。

一方、図-6 の流れを複素ポテンシャル面 (W -面) 上に表すと図-9 のようになる。これを ζ -面の上半面への写像すると、

$$\frac{dW}{d\zeta} = \frac{G}{\zeta(\zeta-u)(\zeta-d)} \quad (14)$$

を得る。ここに G は定数である。式 (14) を積分し、

$$W = \frac{G}{du(d-u)} \{ (d-u) \log \zeta + u \log(\zeta-d) - d \log(\zeta-u) \} + C_2 \quad (15)$$

が得られる。ここに C_2 は定数である。

点 U について、式 (9) を求めたときと同様にして、

$$q_o = \frac{\pi G}{u(u-d)} \quad (16)$$

が得られる。点 D および点 B に関して同様に、

$$q_o - q_d = \frac{\pi G}{d(u-d)} \quad (17)$$

$$q_d = -\frac{\pi G}{ud} \quad (18)$$

が得られる。点 P と W および ζ との対応関係、および式 (15), (16)~(18) より、点 P におけるポテンシャルを ϕ_P とすると、

$$W = \frac{G}{du(d-u)} \left\{ (d-u) \log \zeta + u \log \frac{\zeta-d}{d-1} - d \log \frac{\zeta-u}{u-1} \right\} + \phi_P \quad (19)$$

が得られる。よって、

$$\begin{aligned} \frac{dz}{d\zeta} &= \frac{dz}{dW} \frac{dW}{d\zeta} \\ &= \frac{b e^{\Omega}}{\pi(d-u)} \left(-\frac{d-u}{\zeta} - \frac{u}{\zeta-d} + \frac{d}{\zeta-u} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

が得られる。

自由流線は ζ -面において実軸上の 0 から 1 に対応するので、式 (20) より自由流線の y 座標 y_f は、

$$\begin{aligned} y_f &= - \int_{\zeta_f}^1 \text{Im} \frac{dz}{d\zeta} d\zeta \\ &= - \frac{b}{\pi(d-u)} \int_{\zeta_f}^1 \left(-\frac{d-u}{\zeta} - \frac{u}{\zeta-d} + \frac{d}{\zeta-u} \right) \sin \beta d\zeta \end{aligned} \quad (21)$$

となる。ここに、 ζ_f は y_f に対応する ζ であり、また、

$$\begin{aligned} \beta &= -2 \arctan \sqrt{\frac{\zeta}{1-\zeta}} \\ &\quad - \frac{\pi-\alpha}{\pi} \arctan \frac{-2\sqrt{(c^2-c)(\zeta-\zeta^2)}}{c+\zeta-2c\zeta} \end{aligned} \quad (22)$$

である。ここで、式 (21) において $\zeta_f \rightarrow 0$ のとき $y_f \rightarrow -L_o \sin \alpha + b$ であるから、

$$\frac{b}{L_o} = \frac{\sin \alpha}{1 + \frac{1}{\pi(d-u)} \int_0^1 \left(-\frac{d-u}{\zeta} - \frac{u}{\zeta-d} + \frac{d}{\zeta-u} \right) \sin \beta d\zeta} \quad (23)$$

が得られる。また、点 C から点 S は ζ -面において実軸上の c から ∞ に対応するので、 $s_p^* = s_p/L_o$ とすると、

$$\begin{aligned} s_p^* &= \frac{b \sin \alpha}{L_o \pi(d-u)} \int_c^\infty (\sqrt{\zeta} - \sqrt{\zeta-1})^2 \\ &\quad \times \left\{ \frac{c-\zeta}{c+\zeta-2c\zeta-2\sqrt{(c^2-c)(\zeta^2-\zeta)}} \right\}^{\frac{\pi-\alpha}{\pi}} \\ &\quad \times \left(\frac{d-u}{\zeta} + \frac{u}{\zeta-d} - \frac{d}{\zeta-u} \right) d\zeta \end{aligned} \quad (24)$$

と表せる。なお、これらの積分は実軸に沿って行う。

したがって、式 (10), (12), (13) および (23) より b , c , d および u が求まり、それらを式 (24) に代入して s_p^* を求めることができる。

(2) 重力等の影響の評価

ポテンシャル流解析によるよどみ点位置の計算では、重力および開口部下流端における流線の剥離を考慮していない。しかし、実際の流れでは、開口部において重力により流れが下方に偏向し、それがよどみ点位置に影響を与えると考えられる。また、 α や y_g は開口部下流端における剥離の状況に影響を与え、それに従いよどみ点位置も影響を受けると考えられる。したがって、実際の流れにおけるよどみ点位置をより精度よく評価するためには、これらの影響を考慮する必要がある。

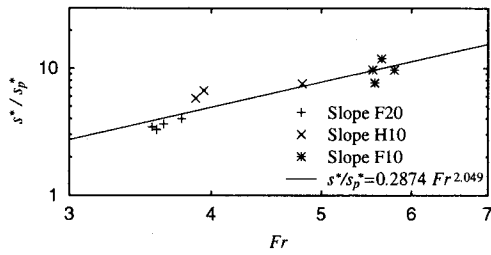


図-10 フルード数の影響の評価 ($\alpha = 0.5\pi$, $y_g = 0$)

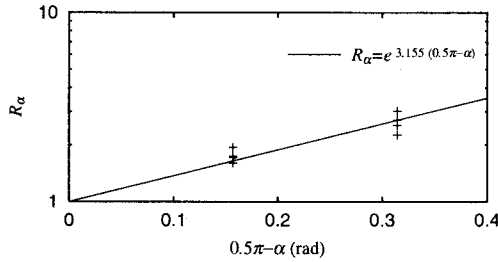


図-11 開口部下流端角度の影響の評価 (F20 勾配, $y_g = 0$)

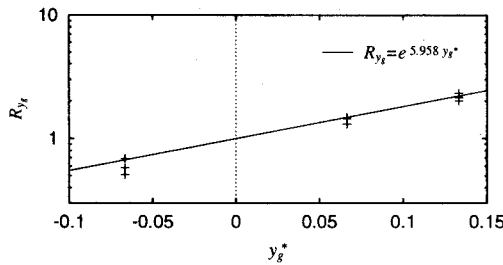


図-12 開口部上下流高低差の影響の評価 (F20 勾配, $\alpha = 0.5\pi$)

ここで、よどみ点位置を、ポテンシャル流解析の結果と Fr , α および y_g の影響を併せて考慮し、

$$s^* = s_p^* f_1(Fr) f_2(\alpha) f_3(y_g^*) \quad (25)$$

と表せるものとする。ここに、 $y_g^* = y_g/L_o$, $s^* = y_g^* - y_s^*$ である。また、 f_1 , f_2 および f_3 はそれぞれ Fr , α および y_g^* の関数である。以下において、実験値とポテンシャル流解析による計算値の比較により、 f_1 , f_2 および f_3 を定める。

図-10 に、 $\alpha = 0.5\pi$, $y_g^* = 0$ のときの s^*/s_p^* と Fr の関係を示す。ここに、 s^* は実測値である。

ここで、実験において α 以外の条件を一定としたときの、 $\alpha = 0.5\pi$ での s^*/s_p^* に対する $\alpha \neq 0.5\pi$ での s^*/s_p^* の比を R_α とする。また、 y_g^* 以外の条件を一定としたときの、 $y_g^* = 0$ での s^*/s_p^* に対する $y_g^* \neq 0$ での s^*/s_p^* の比を R_{y_g} とする。

図-11 に、F20 勾配における $y_g^* = 0$ のときの R_α と α の関係を示す。また、図-12 に、F20 勾配における $\alpha = 0.5\pi$ のときの R_{y_g} と y_g^* の関係を示す。

以上より実験式として、

$$f_1(Fr) = 0.2874 Fr^{2.049} \quad (26)$$

$$f_2(\alpha) = e^{3.155(0.5\pi - \alpha)} \quad (27)$$

$$f_3(y_g^*) = e^{5.958 y_g^*} \quad (28)$$

が求められた。

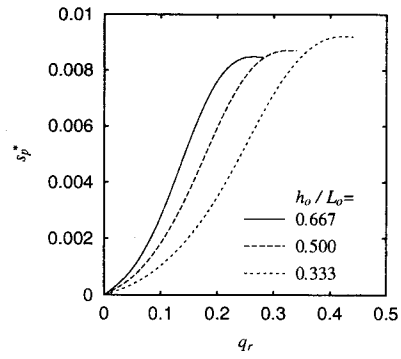


図-13 上流側水深とよどみ点位置の関係 ($\alpha = 0.5\pi$, $y_g = 0$)

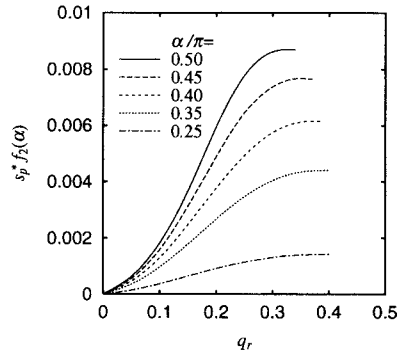


図-14 開口部下流端の角度とよどみ点位置の関係 ($y_g = 0$, $h_o/L_o = 0.5$)

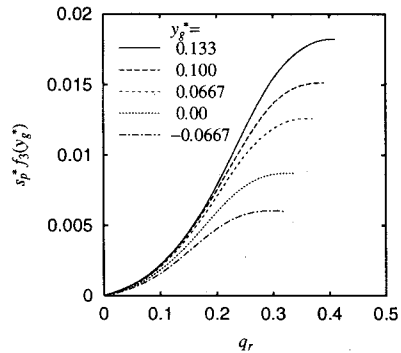


図-15 開口部の上下流高低差とよどみ点位置の関係 ($\alpha = 0.5\pi$, $h_o/L_o = 0.5$)

(3) 流れと開口部形状のよどみ点位置への影響

(1) 節および (2) 節の結果を用い、流れや開口部形状の変化がよどみ点位置に与える影響を考察する。ここでは、 Fr の影響は考慮しない。

上流側水深の影響を考察するため、 h_o/L_o をパラメータとして $\alpha = 0.5\pi$, $y_g^* = 0$ の場合の q_r と s_p^* の関係を式 (10), (12), (13), (23) および (24) より求めたものを図-13 に示す。この関係は、2 章の結果を考慮せず、図-6 のようによどみ点が分流側に現れることを前提とした運動学的な関係であるため、 $q_r = 0$ のとき $s_p^* = 0$ となり、 q_r の増加に伴い s_p^* が増加するものとなる。図-13 より、 q_r が等しいとき、 h_o が大きいほど s_p^* が大きい、すなわちよどみ点位置が低いことがわかる。

開口部下流端角度の影響を考察するため、 α をパ

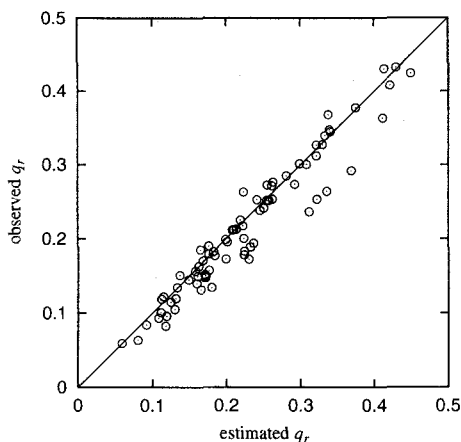


図-16 分流比の計算値と実験値の比較

ラメータとして $y_g^* = 0$, $h_o/L_o = 0.5$ の場合の q_r と $s_p^* f_2(\alpha)$ の関係を図-14 に示す。図より, q_r が等しいとき, α が小さいほど s_p^* が小さいことがわかる。また, 実験結果において $\alpha = 0.25\pi$ のときは $s^* = 0$ と見なしたが, 図-14 より, 計算結果においても $\alpha = 0.25\pi$ のとき s^* は極めて小さいことがわかる。

開口部の上下流高低差の影響を考察するため, y_g^* をパラメータとして $\alpha = 0.5\pi$, $h_o/L_o = 0.5$ の場合の q_r と $s_p^* f_3(y_g^*)$ の関係を図-15 に示す。図より, q_r が等しいとき, y_g^* が小さいほど s_p^* が小さいことがわかる。

4. 計算値と実験値の比較

分流比 q_r について, 2 章および 3 章の結果を用いて開口部形状と流れの条件より算出した値と実験値との比較を行う。

2 章で述べたように, y_d^* に対する水路のレイノルズ数や L_o/h_o の影響は無視できる。また, 水路勾配が一定であれば流量の Fr への影響は一般に小さい。そこでここでは, 水路勾配, α , および y_g^* が一定であれば, y_d^* も一定であるとして, q_r の計算を行ってみる。すなわち, α および y_g^* が等しい複数の実験データがあるとき, そのうちのひとつのデータについて計算より y_d^* を求め, それをすべての q_r の計算に用いた。図-16 に結果を示すとおり, 計算値と実験値はよく一致した。

本研究の結果を実際の構造物の設計に適用する場合, 一般に設計上は $y_g^* = 0$ とし, y_g^* の影響は誤差の評価の際に考慮されることがえられる。また, 勾配の変動は一般に考慮する必要はないと考えられる。したがって, 設計においては水路勾配と開口部形状より y_d^* の代表値を算出し, それを用いて水路流量や開口幅の変動による分流比の変動を評価できる。

5. 結論

本研究では, 急勾配開水路の底部分水流れにおける開口部形状と分流比の関係について実験および理論解

析により検討した。

実験により, 分流比は開口部上流でのフルード数および開口部下流端に現れるよどみ点の位置を用いて評価できることがわかった。

理論解析として, ホドグラフを用いた等角写像によるポテンシャル流解析を行った。また, よどみ点位置はポテンシャル流解析では無視した重力や剥離の影響を受けると考えられるため, 水路のフルード数, 開口部下流端角度および開口部の上下流高低差の影響を実験結果を用いて評価した。その結果, 開口部形状, 開口部上下流の水深および分流比よりよどみ点位置を求めることができた。

以上の結果より, 開口部形状と水路の流れの条件から分流比を求めることができ, 求めた分流比と実測値を比較した結果, 両者は良く一致した。

謝辞：本研究を行うにあたり, 貴重なご指導ご助言を賜った神田徹神戸大学名誉教授, 神戸大学工学部道奥康治教授, 神戸大学都市安全研究センター藤田一郎助教授, および神戸大学工学部宮本仁志助手に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 島武男, 島崎昌彦, 田中良和, 中達雄: 傾斜地水田の用水取水に適用する渦動取水工, 農業土木学会誌, Vol. 68, No. 10, pp. 1043-1049, 2000.
- 2) 中達雄, 岩崎和巳, 田中卓二: 急勾配水路に適用する渦動排砂管の水理-傾斜地農地造成地における流亡土砂制御工法-, 農業土木学会誌, Vol. 58, No. 1, pp. 59-65, 1990.
- 3) 島崎昌彦, 島武男, 相川泰夫, 中達雄, 臼杵宜春: 渦動管付急勾配フリュームの水田取水工への適用性, 農業工学研究所技報, No. 197, pp. 19-24, 1999.
- 4) 島崎昌彦, 川本治, 島武男, 中達雄: 射流水路の底部分水における開口部形状の影響について, 平成 11 年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp. 38-39, 1999.
- 5) Milne-Thomson, L. M.: *Theoretical Hydrodynamics*, 5th ed., pp. 289-292, Dover Publications, 1996.
- 6) 室田明: 開水路分水路の研究, 土木学会論文集, No.70/別冊 I-1, pp. 1-33, 1960.
- 7) Modi, P. N., Ariel, P. D., and Dandedar, M. M.: Conformal mapping for channel junction flow, *Journal of the Hydraulics Division, Proc. ASCE*, Vol. 107, No. HY12, pp. 1713-1733, 1981.
- 8) 藤田一郎, 河村三郎: ホドグラフ法による合流部流線の解析, 土木学会論文集, No. 399/II-10, pp. 55-64, 1988.
- 9) Sinha, S. K. and Odgaard, A. J.: Applications of conformal mapping to diverging open channel flows, *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 30, pp. 355-363, 1996.
- 10) Hassenpflug, W. C.: Branched channel free-streamlines, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 159, pp. 329-354, 1997.
- 11) Kacimov, A. R.: Note on a paper by Sinha and Odgaard "Application of conformal mapping to diverging open channel flow", *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 37, pp. 397-400, 2000.

(2002. 9. 30受付)