

弯曲底面上ラジアルゲートの水理特性

斎藤 隆*・赤司 信義**・本名 元***

Hydraulic Characteristics Radial-Gate on Variable Vertical Curvature Conduit

Takashi SAITOU, Nobuyoshi AKASHI, Hajime HONMYO

Abstract

The flow over the bed with vertical curvature is influenced by the centrifugal force due to the curvature of streamline and streamline profiles influence considerably the discharge, the bed pressure and so on. The accurate determination of the flow will require further knowledge of the streamline profile.

In this paper we deal with the flow in open channel with variable vertical curvature bed at downstream of radial gate. This flow is typical problem to give the verification of numerical method based on simple theory related to the characteristics of streamline, so that the direction of radius of curvature in a cross section are reversed. The assumption on the characteristics of streamline such as the radius of curvature and the inclination are proved by experiments on the discharge, the bed pressure and so on.

1. 緒 言

従来のダム放流施設は堤頂越流方式が主流であったが、越流水頭の増加による放流量の急増、洪水波特性によるゲート操作の複雑さなどから、近年常用洪水吐として管路ならびに半管路式放流施設が多用されることになった。管路・半管路式放流施設は過去の実績が少なく、流線の曲りが無視出来ない速い流れの解析法が十分確立されていないことから、その水理特性について不明な点が多く残されている。

弯曲底面上の流れを解析する場合、流線形状をどのように推定するかによって結果が異なることから、このような流れに関する理論的研究^{1)~5)}は流線形状を適切に推定することについての努力がなされている。これらの研究は越流流れについてのもので、考慮断面内における流線の曲率半径方向が全て壁面より水表面へ向っている。上に凸な弯曲底面上にあるゲート下流の水表面が下に凸な曲面をなす場合には、考慮断面内において曲率半径の方向が逆転することになる。このような流れ場についての解析はみあたらない。

* 建設工学科

** 西日本工業大学土木工学科

*** 大学院土木工学専攻

本研究は、半管路放流孔ラジアルゲート下流の考慮断面内で曲率半径の方向が逆転する末武川ダム常用洪水吐の水理機能に関する模型実験の機会が得られ、流線の曲りを考慮した流れの解析法を検証する典型的な問題として取り上げ、赤司ら⁶⁾が提案し、標準型越流頂を越流する流れで検証された解析手法を用いて流れを解析し、その結果と実験結果とを比較検討したものである。流れの解析には、水面形状の実験資料を用いて、水面附近と床面附近とは遠心力の方向が反転することを考慮し、かつ最も単純な曲率半径の大きさと方向の断面内分布を仮定し、実験から得られた流量係数を用いて分布形状を与える定数を定め、任意断面における床面圧力についての解析結果と実験結果との比較によって解析手法の検証を試みた。

2. 流れの基礎方程式

Fig. 1 に示す2つの座標系と記号を用いて流れの基礎方程式を導く。

床壁面より垂直に y の位置にある微小流体要素について考える。この要素を通る流線に直交する n 軸方向の運動方程式 (力の釣合式) は次のように書ける。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = -g \cos \theta + \frac{V^2}{R} \quad (1)$$

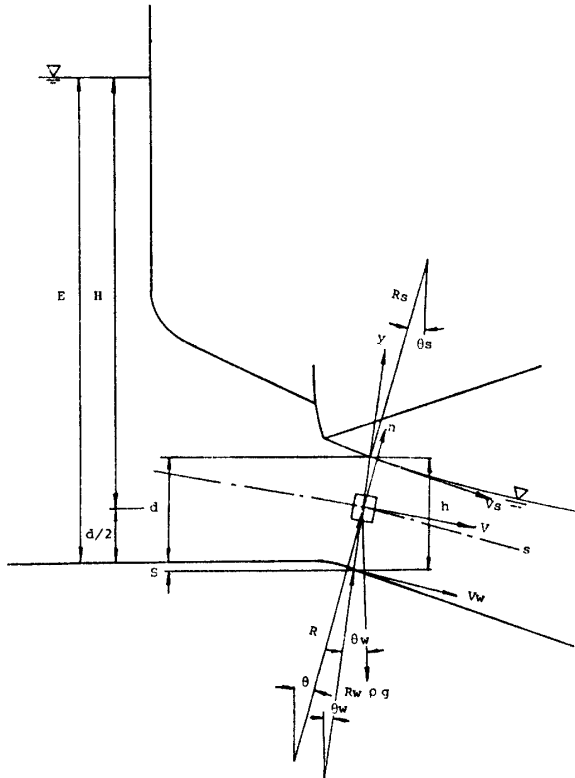


Fig. 1 Coordinate and notations

- ここに、 ρ ; 流体の密度
- p ; 圧力
- g ; 重力の加速度
- V ; 流速
- R ; 考慮点における流線の曲率半径
- θ ; 流線の接線と水平線との交叉角

Fig. 1 から明らかなように、

$$\partial n = \partial y \cdot \cos \varphi$$

であることより、式(1)は次式と書ける。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = -g \cos \theta \cos \varphi + \frac{V^2}{R} \cos \varphi \quad (2)$$

ここに、 $\varphi = \theta - \theta_w$

θ_w ; 壁面の法線と鉛直線との交叉角

放流孔の直下流部における流れを取扱うので、流れは無渦運動（静止状態からの流動直後であるから）であるとみなすことができる。したがって Bernoulli の式が流れ場全体に対して適用することができる。

$$E + S = \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + y \cos \theta_w \quad (3)$$

式(2)、(3)の両式より圧力項を消去すると、次式が得られる。

$$\frac{\partial V^2}{\partial y} + 2 \frac{V^2}{R} \cos \varphi = 2g (\cos \varphi \cos \theta - \cos \theta_w) \quad (4)$$

上式は V^2 についての一階線型常微分方程式を解くことに他ならない。 $y=h$ で、 $V=V_s$ なる境界条件を

用いると、上式の解は、 $\eta=y/h$ と置いて、次式と求まる。

$$\begin{aligned} \frac{V}{V_s} &= \exp \left\{ \int_{\eta}^1 A(\eta) d\eta \right\} \\ &\times \left[1 - \frac{2gE}{V_s^2} \frac{h}{E} \int_{\eta}^1 B(\eta) \right. \\ &\left. \times \exp \left\{ 2 \int_{\eta}^1 A(\eta) d\eta \right\} d\eta \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$A(\eta) = \frac{\cos \varphi}{R/h}$$

$$B(\eta) = \cos \varphi \cos \theta - \cos \theta_w$$

水表面流速 V_s は式(4)より、

$$\frac{V_s^2}{2gE} = 1 + \frac{S}{E} - \frac{h}{E} \cos \theta_w \quad (6)$$

と得られるので、任意点の圧力は式(4)、(6)を用いることによって次式で与えられる。

$$\frac{p}{\rho g E} = 1 + \frac{S}{E} - \frac{V_s^2}{2gE} \left(\frac{V}{V_s} \right)^2 - \frac{y}{E} \cos \theta_w \quad (7)$$

流量係数 C は、 y 軸に垂直方向の速度成分 u が

$$\frac{u}{V_s} = \frac{V}{V_s} \cos \varphi \quad (8)$$

なることを考慮して、式(5)を積分することによって、次式のように求まる。

$$C = \frac{V_s}{\sqrt{2gH}} \int_0^1 \frac{V}{V_s} \cos \varphi d\eta \quad (9)$$

床壁面の形状 (R_w, θ_w) が与えられ、式(5)に含まれている $A(\eta), B(\eta)$, すなわち、断面内における流線の曲率半径の大きさならびにその y 軸からの偏角が適切に推定することが出来れば、式(5)、(7)、(9)内の積分を実行することによって、任意断面内（ポテンシャル流動とみなせる範囲）における流速分布、圧力分布ならびに流量係数を求めることができる。

流線形状を直接推定するには大きな困難を伴うので、本研究では、水面形状を実験的に把握し、これと床壁面に沿う流線の両者を満足する最も単純な流線形状（曲率半径の大きさと偏角の断面内分布）を仮定して、実験結果によりその適合性を検討する。

3. 実験装置と実験方法

実験に用いたラジアルゲートは Fig. 2 に示す末武川ダムの常用洪水吐部分の縮尺1/25の模型である。

実験は貯水池内水位を標高130m~150mに変え、水面形状、床壁面圧力分布、鉛直断面内流速分布の測定を行なった。

水面形状は、模型の状態ゲート直下流部においては測定が不可能であるため、ゲートのピンより下流において、ポイントゲージを用いて測定した。

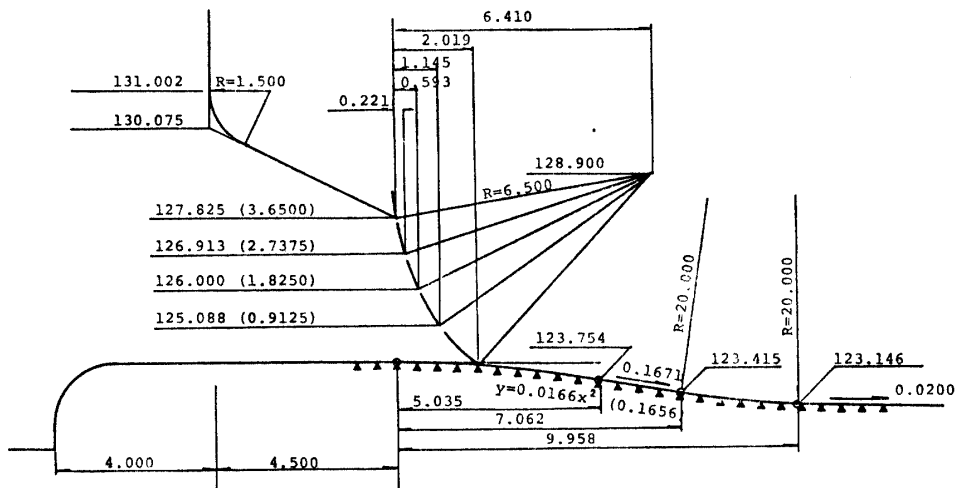


Fig. 2 Model of radial gate on variable vertical curvature conduit

床壁面の圧力は、Fig. 2 に▲描点で示した位置に圧力端子を埋設し、小さな圧力変動を除去するため、内径が 12 mm のアクリル管で製作した鉛直マンメーターで測定した。

流速の測定は床壁面の接線方向と一致するように設置したピトー管によって行なった。流速分布の測定断面はラジアルゲートの下端を通る断面である。

流量の測定は放流施設の下流側シュート部の下流に設けた量水槽の四角せきで行なった。

測定値の実物への換算はフルードの相似則によって行なった。

4. 実験結果

4.1 水面形状

貯水地内水位、ゲートの開度を変えて測定したゲ

ト下流部における水面形状を描点したものが Fig. 3 である。図中 3 本の縦軸上にある白丸描点はゲート下端の位置である。放流孔呑口床面の標高は EL 126 m であるので、放流孔の深さは 7~23m と 3 倍変化させているが、各ゲート開度において貯水地内水位の違いによる水面形状の有意な違いは認められない。

ゲート下端より約 1 m 区間における水面形状を最小 2 乗法によって 2 次曲線で近似し、ゲート下端における水面の曲率半径 R_s と曲率半径が鉛直線となす角度を求めて描点したものが Fig. 4, 5 である。

ゲート下端における水表面の曲率半径はゲート開度率 d/d_0 、放流孔のゲート開度に対する相対深さ H/d には関係なく、ほぼゲートの開度の 1.25 倍の大きさとなっている。このような結果は多分ゲート上流側面が円弧であることによるものと推察される。

Fig. 5 の θ_s をみると、放流孔の相対深さ H/d によ

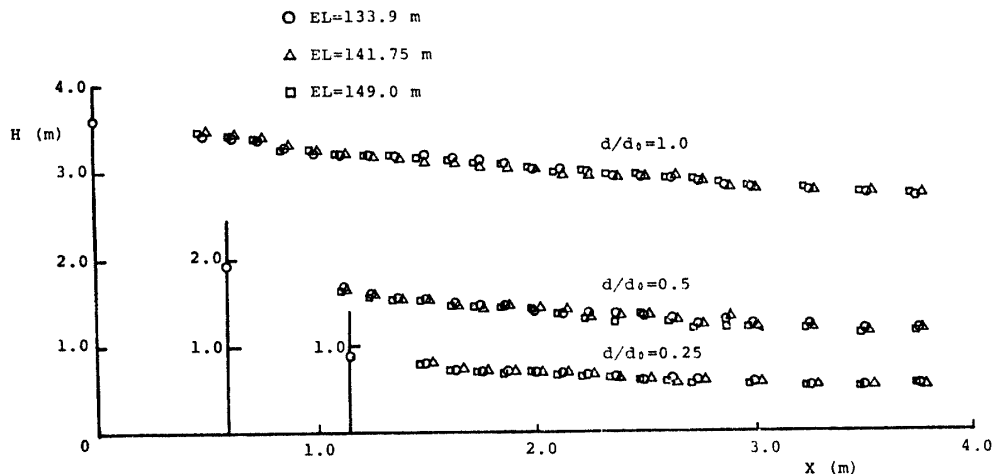


Fig. 3 Profile of water-surface at downstream of radial gate

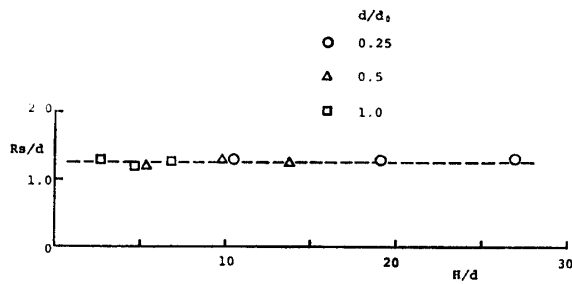


Fig. 4 Radius of curvature of water-surface at radial gate

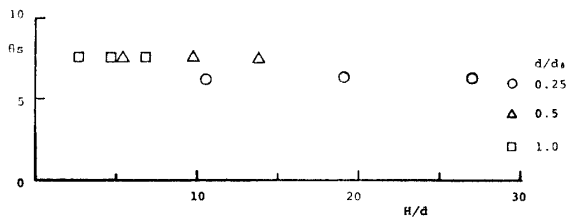


Fig. 5 Inclination of water-surface at radial gate to relative depth

る変化はほとんどなく、開度率 d/d_0 が小さいほど θ_s の値が小さくなっている。すなわち、開度率が小さいほど水表面は水平に近づいている。

各開度率に対する θ_s の平均値を開度率 d/d_0 に対して描点したものが Fig. 6 である。

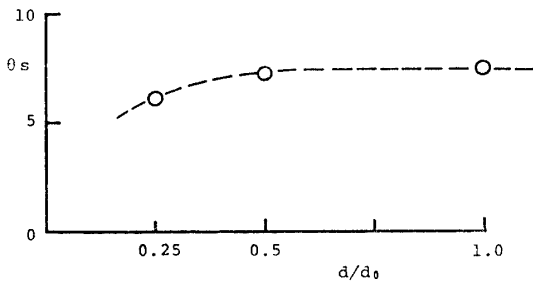


Fig. 6 Inclination of water-surface at radial gate to opening

4.2 床壁面圧力分布

Fig. 1 に示した位置で測定した床壁面の圧力を描点したものが Fig. 7 である。放流孔下流の床壁面が上に凸な曲線となっているところで圧力は最小値を示し、下流の定勾配水路において圧力は回復し、ほぼ水深と一致する値となっている。貯水池内水位が高いほど放流孔からの噴出流速が大きいので、流速の2乗に比例する遠心力が大きくなり、床壁面の最小圧力値は小さくなっている。同じ貯水池内水位に対し、ゲートの開度が小さくなると、噴出流速はほとんど変わらないので遠心力の作用はあまり変わらないが、水深が小さい

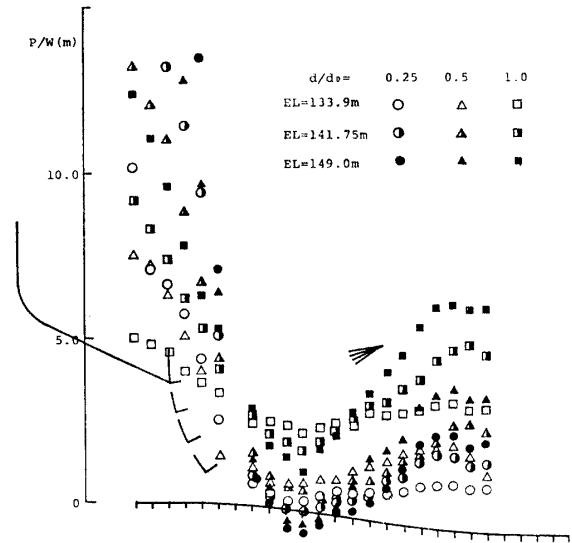


Fig. 7 The bed pressure distribution

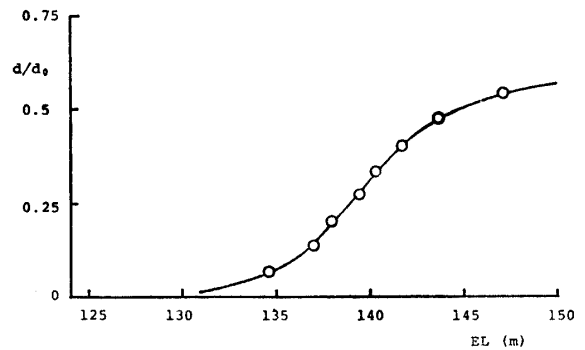


Fig. 8 The criterion of cavity pressure

ため静水圧の絶対値が小さくなるため、床壁面圧力の最低値は小さくなっている。

ゲートの開度率ならびに貯水池内水位を系統的に変えた実験により、床壁面に負圧が発生する条件を求めたものが Fig. 8 である。図の描点を結んだ実線よりも下側にある領域での開度率と貯水池内水位との関係にあると、床壁面に負圧が発生し、開度率と貯水池内水位との関係が曲線より上側の領域にあると、床壁面に負圧は生じない。ゲートの開度率 d/d_0 が0.6以上であると、設計洪水水位 EL 150 m まで水位が上昇しても負圧は発生しない。負圧の発生状況は上述した遠心力と静水圧との関係によって定性的に説明される。

4.3 放流量 (流量係数)

ゲートの開度率を変えて、貯水池内水位と放流量との関係を描点したものが Fig. 9 である。貯水池内水表面から測ったゲート開度中心の深さ H を用いて求めた流量係数を描点したものが Fig. 10 である。

通常、ゲートの流量係数は放流孔の相対深さ H/d

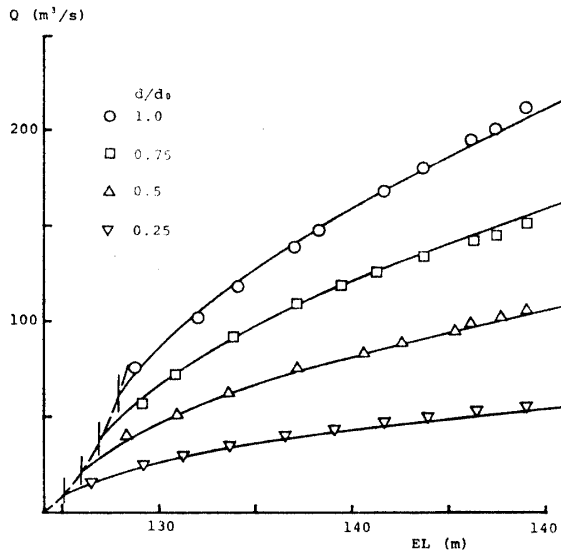


Fig. 9 relation between the discharge and water elevation

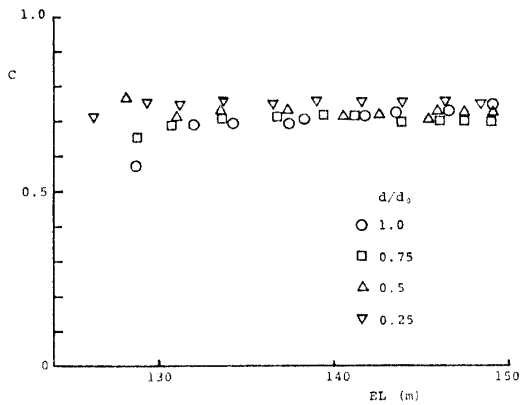


Fig. 10 Coefficient of discharge

によって変わり、相対深さが大きくなると流量係数は大きくなるが、本実験の結果では、開度が大きく相対深さが小さくて間欠的に空気を進行する場合を除くと、流量係数はほぼ一定値となっている。これは後述する数値的検討によって明らかにされるが、大略次のようにして説明することが出来る。

床壁面が水平である場合、流量係数は相対深さ H/d によってあまり変わらないが、収縮係数が相対深さによって変わるため、流量係数が相対深さによって変わる。本実験の場合、床壁面は上に凸な曲線となっているため、床壁面近くと水表面近くにおける遠心力の作用方向が逆になっているため、水表面近くにおける流れを阻止する作用と、床壁面近くにおける圧力低下による吸出し作用とが断面内に同時に存在することが床面が水平である場合と根本的に異なる。この両作用の均衡によって水表面形状が決まるはずで、その結果である前述した水表面形状が相対水深によって変わらない

ので、収縮係数が一定値となっている。このため流量係数が一定値となるのである。

5. 流線特性と数値的検討

水表面と床壁面における曲率半径の方向が逆になっていて、断面内で遠心力の方向が逆転している。この場合、数学的には考えられる曲率半径 $R=0$ は、その点での循環（渦の強さ）がきわめて大きい渦が存在することになるので、物理的には不適である。流線形状が下に凸な曲線から上に凸な曲線へ滑めらかに変化していくためには、その間に直線 ($R=\infty$) をなす流線が存在することが必要である。また、直線となる流線から流線が弯曲していく度合は、直線となる流線の両側において同じであることが自然であると考えられる。

以上の観点から、曲率半径の符号が逆転する高さ $\eta_* = y_*/h$ は水表面と床壁面の曲率半径の逆数に比例した高さとして次のように仮定する。

$$\eta_* = \frac{R_s}{R_s - R_w} \tag{10}$$

曲率半径 R ならびに流線の接線傾斜角を上述の条件を満足する最も単純な式形として次のように仮定する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{R}{R_s} &= \left(\frac{1 - \eta_*}{\eta - \eta_*} \right)^\alpha & \text{for } \eta > \eta_* \\ \frac{R}{R_w} &= \left(\frac{\eta_*}{\eta - \eta_*} \right)^\alpha & \text{for } \eta < \eta_* \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

$$\frac{\theta - \theta_w}{\theta_s - \theta_w} = \eta \tag{12}$$

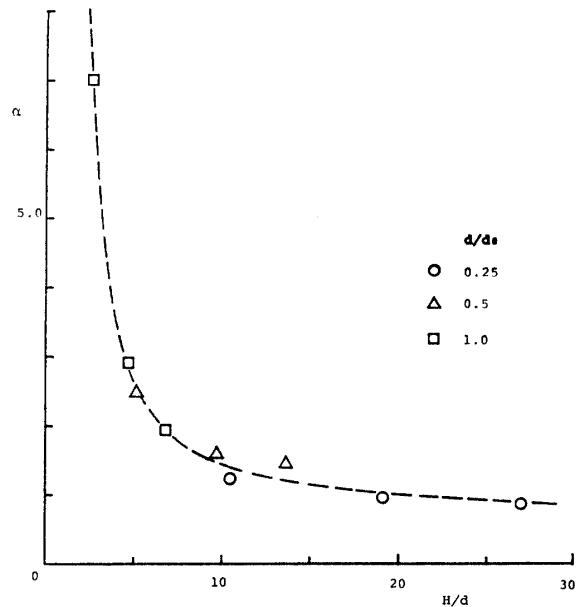
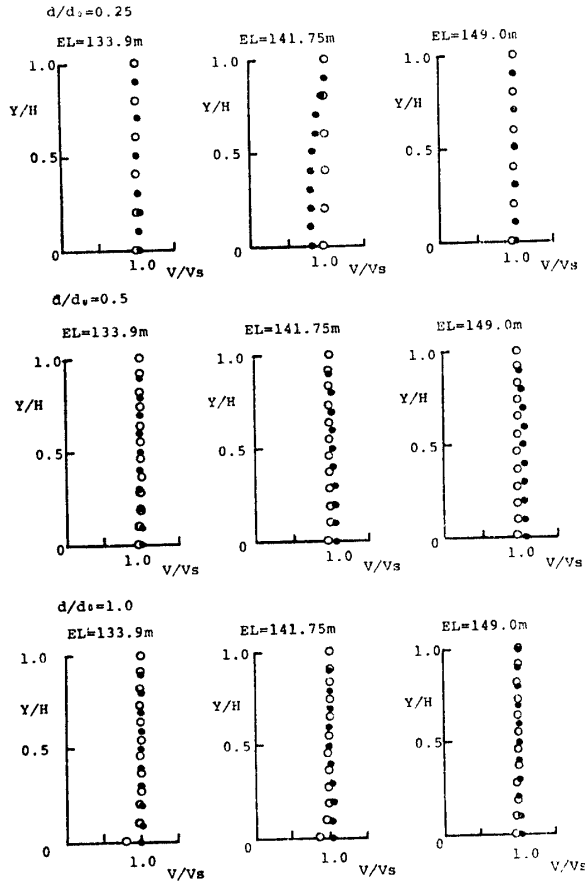


Fig. 11 Relation between α and relative depth

式(11)中の指数 α は実験から決まる定数である。指数 α の値を系統的に変えて式(9)を積分することによって流量係数を求め、計算結果として得られた流

量係数が、実験結果の平均値である流量係数の値 $C=0.73$ に一致する α の値を噴出孔の相対深さに対して描点したものが Fig. 11 である。図より、 α の値はゲートの開度率 d/d_0 による差異はないものとみてよく、噴出孔の相対深さ H/d によって規定されている。



このようにして求めた α の値を用いて、噴出孔断面における流速分布を計算し、実験結果と比較したものが Fig. 12 である。図中の黒丸描点が計算値で、白丸描点が測定値である。 $d/d_0=0.25$, $EL=141.75$ m の場合を除くと、床壁面のごく近傍以外では計算値と実験結果とは良く一致している。

考慮断面の上・下流約 1 m の範囲における実測水面を最小 2 乗法を用いて 2 次曲線で近似し、考慮断面における水表面の曲率半径 R_s と接線傾斜角 θ_s とを求めて、各断面内における流線の曲率半径 R ならびに接線傾斜角 θ の分布が噴出孔断面におけるそれらと同じであると、すなわち、各断面における指数 α の値は変わらないものとして、各断面における床面圧力を計算し、測定結果と比較したものが Fig. 13 である。図中の黒丸描点が計算値で、白丸描点が測定結果である。曲率半径ならびに接線傾斜角を求める際、水面形の 2 階微分値まで用いるので、これらの推定誤差は水面形の測定誤差より 1 ~ 2 桁大きくなる。計算描点の散乱はこの誤差によるものと考えられる。実験値は計算値のほぼ中心にあって、両者は良く一致しているものとみてよいであろう。

Fig. 12 Non-dimensional velocity profile at radial gate

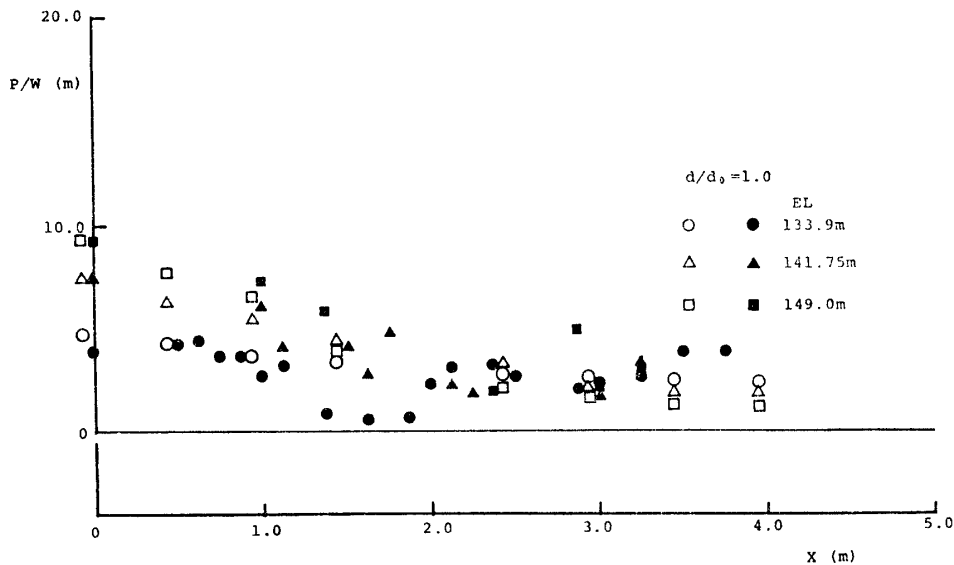


Fig. 13(a) The bed pressure distribution ($d/d_0=1.0$)

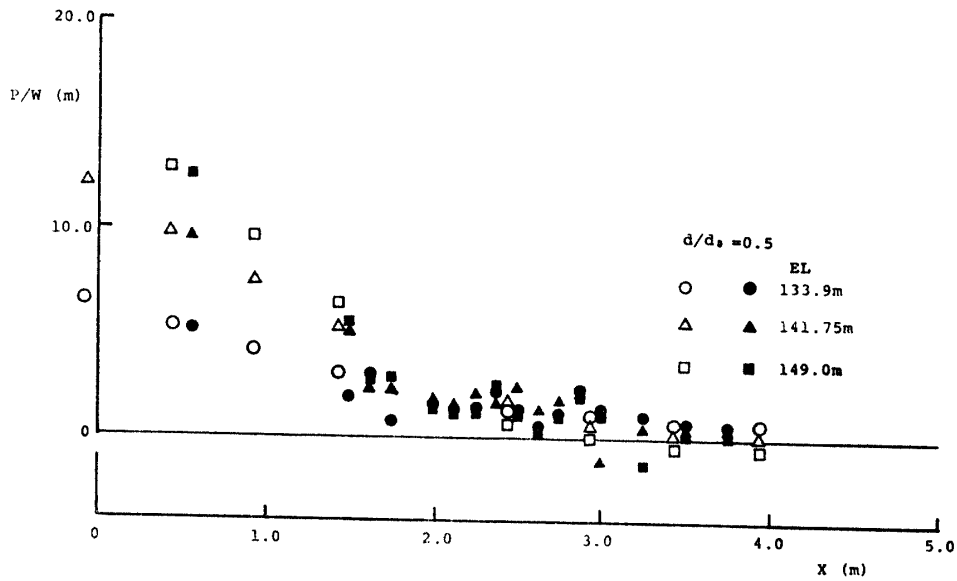


Fig. 13(b) The bed pressure distribution ($d/d_0=0.5$)

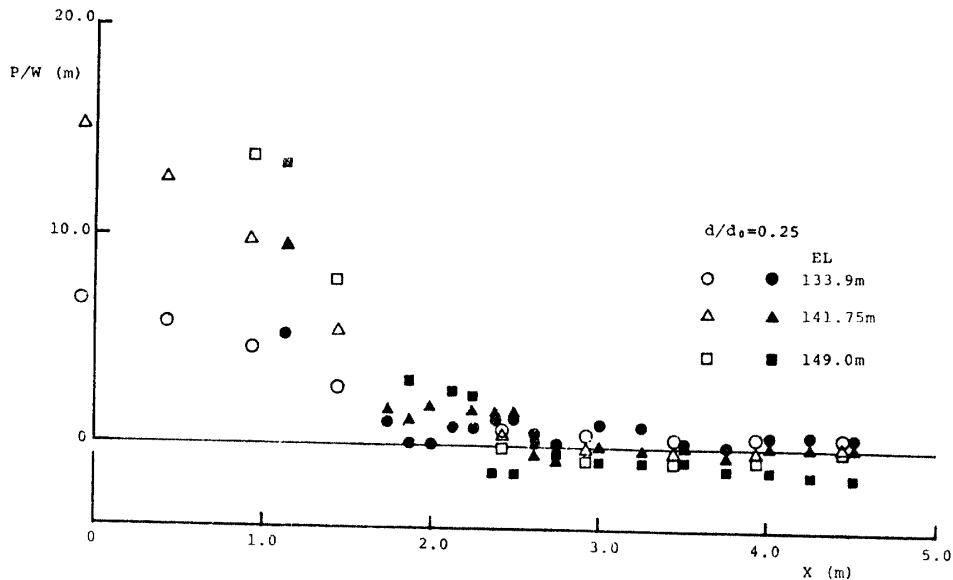


Fig. 13(c) The bed pressure distribution ($d/d_0=0.25$)

5. 結 論

流れの曲率を考慮した流れの基礎方程式を実験で得られた水面形状を境界条件とし、断面内における流線の曲率半径と接線傾斜角を最も単純な式形で仮定してラジアルゲートの水理特性を検討した。その結果、断面内における流線の曲率半径 R と接線傾斜角 θ は式 (10), (11), (12) の式形で、指数 α の値は Fig. 11 によって与えられることが明らかとなった。

本研究で提案した流れの解析手法は、水表面形状をなんらかの方法で推定することが出来れば、この種の流れ場の解析に応用することが可能である。

参 考 文 献

- 1) 井田至春, 土木学会論文集, 第32号, 22-33 (1956)
- 2) 岩崎敏夫, 土木学会論文集, 第43号, 29-37 (1957)
- 3) 荒木正夫, 土木学会論文集, 第24号, 58-67 (1955)
- 4) 村 幸雄, 荒木正夫, 土木研究所報告, No.93, 1~23 (1955)
- 5) 石井文雄, 藤本 成, 土木研究所報告, No.127, 1~17 (1967)
- 6) 赤司信義, 斎藤 隆, 土木学会論文報告集, No.339, 235~238 (1983)

(昭和59年 4月14日受理)