

貯水池流入部の潜り点及び初期混合に関する研究

On the Plunging Point and Initial Mixing of the Inflow into Reservoirs

芝浦工業大学 正会員 菅 和利
東京大学工学部 正会員 玉井 信行

1. はじめに

貯水池への流入水は洪水時には多量の浮遊砂を含み、その密度は貯水池の表層水のそれよりも大きい。このような濁水が貯水池に流入する際には、流入点近傍では濁水は全水深にわたって拡散されるが、やがてある地点で下方に流入して行く。この潜り点 (plunging point) に至る過程では激しく周囲水を連行し、その後下層密度流を形成する。この潜り点近傍での初期混合は、その後の濁水の挙動を決定する流入側境界条件を与える重要な問題である。

本研究は、流入点でのフルード数、密度フルード数の比較的大きい洪水時を対象とした。潜り点水深の予測は自由噴流の結果を拡張して取り扱い、初期混合率の算定法には運動量の釣り合いを考えることにより求めた。さらに、これらに対して検討し、確認を行ったものである。

2. 実験の概要

実験に用いた装置は長さ6 m、深さ0.9 m、幅0.1 mの片面ガラス張り水槽に0.6 mの水平部と、傾斜底面を設置した。濁質物の沈降速度は無視できるとして、清水を満たした水槽に着色した塩水を上流端より流入し、流速測定には熱膜流速計と染料による流線の可視化手法を併用し、塩分濃度測定には導電率計を用いた。潜り点の決定には、可視化手法と水面近くでの塩分濃度測定を併用した。密度フロントが通過した後定常状態となった時点で潜り点及びそれより下流5 cm、20 cm、40 cmの点で流速、密度の分布を測定した。実験条件は、単位幅流量 q_0 が2.5~2.4 cc/cm、初期塩分密度 ρ_0 が1.056~1.00005 g/cm³で、流入点フルード数が0.06~1.8、密度フルード数が0.45~210、底勾配が0.1~0.25である。

3. 潜り点付近の流れの概況

貯水池表層水よりも密度の大きい濁水が流入した場合流入点近傍では全水深に拡散された濁水は潜り点近傍で上層清水と激しく希釈混合し、その後、密度差による重力効果のために下方に潜り、下層密度フロントを形成する。この潜り点近傍での初期混合は写真-1に見られるような、潜り点近傍に出現する大規模な渦によってなされる。この大規模渦は間欠的に出現し、上層清水を取り込み希釈された後密度差により下層に戻り、これにより混合が生ずる。このような大規模渦の間欠的な出現により、潜り点位置は前後にゆらぐと共に、この渦が下流に流下するので下層密度界面にも大規模な渦が認められる。潜り点位置としては、これらのゆらぎの平均的な位置を数枚の写真より決定した。上層には初期混合を補償する流れが生ずる。

潜り点での密度分布、流速分布の一例を示したのが図-1である。流速分布、密度分布を無次元表示すると、潜り点においても壁面密度噴流のGörtler⁽¹⁾型の相似な分布であることがわかる。

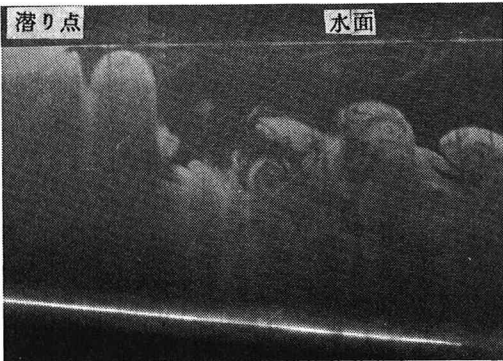


写真-1 潜り点付近の流況

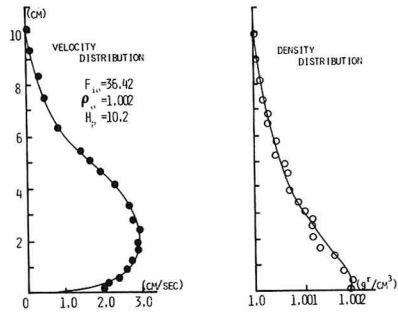


図-1 潜り点の流速、密度分布

従って流入点から潜り点近傍までの区間は壁面密度噴流として取り扱うことができる。

4. 潜り点での密度フルード数

潜り点は自由表面を持つ流れが密度流に移行する点であり、何らかの水理的な限界点と考えられる。岸⁽³⁾は上層静止の定常二次元漸変二層流の運動方程式の特性に開水路についての考え方を適用して、界面方程式が不定形となる特異点が流れの遷移点である潜り点に相当するとした。すなわち、潜り点での密度フルード数 $F_{ip} = q_p / (\epsilon_p g H_p^3)^{1/2}$ が 1.0 になるとしている。添字 p は潜り点での量を示し、 $\epsilon_p = (\rho_p - \rho_s) / \rho_p$ である。 ρ_s は貯水池表層水の密度、 H_p は潜り点水深である。福岡⁽⁴⁾は運動量、圧力の釣り合い式に、Benjamin の cavity flow の理論を適用して勾配が 0 の場合の F_{ip} として 0.5 を得ている。Parker, Keulegan⁽⁵⁾によると density wedge, salt wedge での限界点での密度フルード数は 0.75 であり、岸⁽³⁾、石橋⁽⁶⁾、岩崎⁽⁷⁾らの貯水池での現地観測では 0.54~0.69 が得られている。

潜り点は大規模渦の出現により前後にゆらぐが、その平均的な位置での時間平均の密度分布、流速分布の実測値より断面平均の流速、密度を計算し、これを用いて計算した密度フルード数は 0.45~0.92 の値である。これらの出現頻度のヒストグラムを 26 個のデータを用いて示したのが図-2 である。実験例は必ずしも多いとは言えないが、これより 0.6 と 0.7 の間にピークがあり、潜り点での密度フルード数は 0.6~0.7 であると思われる。なおこの資料の平均値は $F_{ip}=0.63$ であり、標準偏差は 0.12 である。又潜り点において密度フルード数がある限界値となるとすると、この密度フルード数は、潜り点が発生するか否かの境界を表わすものと考えられる。すなわち流入点密度フルード数がこの値

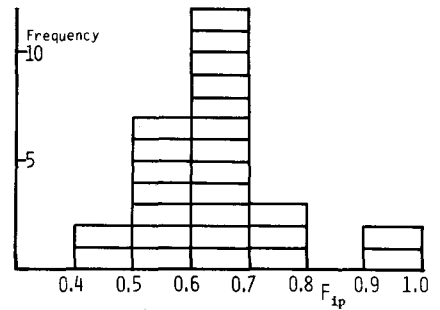


図-2 F_{ip} の出現頻度

で濁水が流入すると潜り点は出現できず、 $H_p/h_o=1.0$ となると考える。添字 0 は流入点での諸量である。密度フルード数の比較的小さいデータを $H_p/h_o \sim F_{io}$ の図上にプロットしたのが図-3 である。 F_{io} が減少すると H_p/h_o も減少し、限界値 $H_p/h_o=1.0$ に相当する密度フルード数は 0.62 である。現地観測、室内実験、さらには図-3 の結果を参照して、潜り点では勾配にかかわらず密度フルード数は約 0.65 であると考えられる。

5. 潜り点水深

潜り点水深を算定する従来の研究としては岸⁽³⁾、江頭⁽⁸⁾、福岡⁽⁴⁾らのものがある。これらの算定式を表-1 に示す。

(A)式は潜り点での密度フルード数を 1.0 として導き、混合率を 0.2 として実験結果を良く説明しているが、前章で述べられたように、 $F_{ip}=1.0$ は過大であると思われる。

(B)式は実用的観点より求められた式であるが、勾配の緩やかな場合には H_p を過大に算定し、勾配が急な場合には過少に算定する。これは流入点での条件が十分に検討されていないためと思われる。

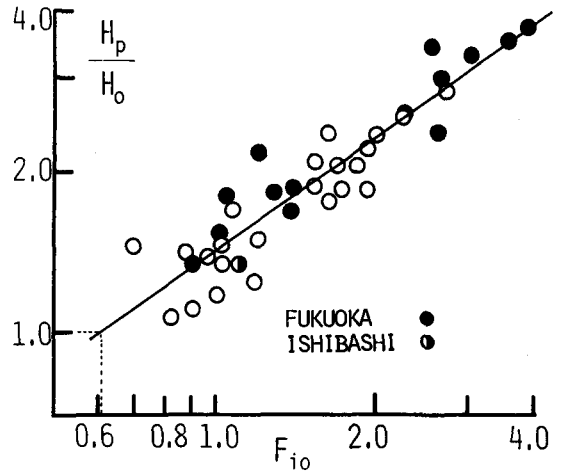


図-3 潜り点出現限界近くの $H_p/h_o \sim F_{io}$

	AUTHOR	FORMULA
(A)	KISHI ⁽³⁾	$H_p = (Q_p^2 / (C_p g b_o^2))^{2/3}$
(B)	EGASHIRA ⁽⁸⁾	$H_p = 0.362 Q_o^{2/3} / (C_o g b_o^2)^{1/3}$
(C)	FUKUOKA ⁽⁴⁾	$H_p = (Q_o^2 / (C_o g b_o^2 F_{ip}^2))^{1/3} / \cos \theta$

表-1 潜り点水深の従来の算定式

(C)式は運動量保存式、連続の式と Benjamin の cavity flow の理論とを用いて求められたものである。

潜り点での密度フルード数の考察の結果の $Fip = 0.65$ と、後に詳しく述べる初期混合率 r を用いると、 $Hp = 1.33(1+r)(q_0^2/\epsilon_0 g)^{1/3}$ と書くことができ、 r を 0 とすると、(C)式を検証した実験値に良く一致している。従って(C)式は潜り点での混合が小さい場合に相当している。

次に、従来の結果を総括して、流入点でのフルード数をも考慮した潜り点水深の算定式を提案する。流入する流れは潜り点近くまで壁面密度噴流の特性を有することが実験により確認されているので⁽⁹⁾、以下の様に壁面密度噴流での取り扱いを用いる。この場合に次のような仮定を設ける。

1) 解析は二次元的に行うので、潜り点近傍での激しい混合を 1 断面に集約して表現するには無理がある。従って、この混合量を流入点から潜り点までの間に分配できるものとする。周囲水の連行は、仮想的に噴流の横方向より行われるものとする。2) 潜り点が出現するまでの領域では運動量の式において浮力項、および連行に伴う運動量の変化は流下方向の運動量に比して無視しうとする。3) 浮力流束の保存則が成立する。4) 洪水時を対象とし、流入点でのフルード数、密度フルード数は共に大きいと考える。

座標原点を流入点に取り、水平方向に x 軸を取る。これらの仮定の下で連続の式、運動量の式、浮力の保存式を噴流断面で積分すると次式となる。

$$\frac{dQ}{dx} = U_e h, \quad \frac{dM}{dx} = \frac{-\tau_b b_0 \cos \theta}{\rho_s}, \quad \frac{dB}{dx} = 0 \quad (1)$$

ここに U_e は連行速度、 Q は流量、 M は運動量束 ($\int_A U^2 dA$)、 B は浮力流束 ($\int_A \epsilon U g dA$)、 A は噴流断面積、 τ_b は底面のセン断応力である。さらに(1)式の U_e 、 τ_b 、 A を次元解析より Q 、 M で書き表わす。

$$U_e = \frac{EM}{Q}, \quad \tau_b = f \rho_s \left(\frac{M}{Q} \right)^2, \quad A = C_1 \frac{Q^2}{M} \quad (2)$$

ここに E は連行係数、 f は抵抗係数、 C_1 は定数である。

底面の勾配を θ とすると $h = h_0 + x \sin \theta$ であるので、これらを(1)式に代入し、境界条件として $x=0$ で $Q=Q_0$ 、 $M=M_0$ を用い x について積分を行うと次式が得られる。

$$\frac{M}{M_0} = \left(1 + \frac{x \sin \theta}{h_0} \right)^{-f \cos \theta / \sin \theta} \quad (3)$$

$$\frac{Q^2}{Q_0^2} = 1 + \frac{2EM_0 h_0^2}{Q_0^2 (-f \cos \theta / \sin \theta + 2) \sin \theta} \left\{ \left(\frac{h}{h_0} \right)^{-f \cos \theta / \sin \theta + 2} - 1 \right\} \quad (4)$$

$$B = B_0 \quad (5)$$

(3)、(4)式は三次元壁面密度噴流に対する関係式であるが、これらを二次元の場合に修正して適用する。

単位幅当りの流量、運動量束、浮力流束をそれぞれ q 、 m 、 B とすると、次元解析より密度フルード数は $F_i = m^{3/2} / (B_0^{1/2} q^{3/2})$ と書くことができる。取り扱いを簡単にするために、底面のセン断応力を無視すると、 $m = m_0$ であり(4)式より次式が得られる。

$$1 + \frac{EM_0 h_0}{q_0^2 \sin \theta} \left\{ \left(\frac{h}{h_0} \right)^2 - 1 \right\} = \left(\frac{F_{i0}}{F_i} \right)^{4/3} \quad (6)$$

この関係式が潜り点においても成立するとし、連行係数 E は over all の Richardson 数 Ri の (-1) 乗に比例するとする。 $E = Ri^{-1} = m^3 / (B_0 q^3)$ を(6)式に代入し、密度フルード数が大きく、 Hp/h_0 が 1 に比して大きい場合について(6)式の左辺第二項の $\{ \}$ の中を $(Hp/h_0)^2$ で近似する。又運動量束、浮力流束、流量より次元解析によって得られる特性長さ $L_s = m^2 / B_0 q$ を採用する。潜り点までの距離 $l_p = (Hp - h_0) / \sin \theta$ を用い、 Hp/h_0 が 1.0 より相当に大きいとして近似的に $l_p \div Hp / \sin \theta$ とする。

(6)式は次のように書き直すことができる。

$$\frac{1}{\sin \theta} \left(\frac{Hp}{L_{sp}} \right)^2 L_{sp}^3 \frac{m p^2}{h_0 q^4} = 1 - \left(\frac{F_{ip}}{F_{i0}} \right)^{4/3} \quad (7)$$

洪水時の F_{io} が大きい場合には右辺第二項は無視し得る。左辺の m_p^2/q_p^4 は密度効果の無い特性長さ L_{cp} の (-2) 乗と表わすことができる。 L_{sp} , L_{cp} が流入点での水理量による L_{so} , L_{co} に比例するとし、さらに L_{co} として流入点での限界水深 h_c を仮定する。又 L_{so} は $F_{io}^2 h_o$ と書くことができるので(7)式より次式が得られる。

$$C_2 \left(\frac{l_p}{L_{so}} \right)^2 \sin \theta F_{io}^6 Fro^{-4/3} = 1 \quad (8)$$

C_2 は定数と仮定する。又 Fro は流入点でのフルード数である。(8)式より次式が得られる。

$$\frac{l_p}{L_{so}} = C_3 (F_{io} \sin \theta)^{1/6} Fro^{-2/9 - 3} \quad (9)$$

l_p/L_{so} を $F_{io} \sin \theta$ Fro に対してプロットしたのが図-4である。岸⁽³⁾、石橋⁽⁶⁾、岩崎⁽⁷⁾らの実測データを合せて表示している。又潜り点位置の変動幅を矢印によって示した。図-4より次式の実験式が得られた。

$$\frac{l_p}{L_{so}} = 2.00 \{ F_{io} \sin \theta \}^{1/6} Fro^{-2/9 - 8/5} \quad (10)$$

(9)式と(10)式で指数が異なるが、これは、いくつかの仮定と、 C_2 等の比例定数を簡単に定数としたことによるものと思われる。しかし、密度噴流の取り扱いと、次元解析を併用して得られた(10)式は、フルード数、密度フルード数の幅広いデータを良く表わしている。 F_{io} が5以下の場合には混合が小さいので、(C)式で $F_{ip} = 0.65$ とした式を用いることもできる。

実際の貯水池では地形は複雑であり、平面的にも二次元ではない。幅の広がり効果を検討するために、壁面密度噴流が側壁より剥離する急拡の場合と、側壁にそって流下する場合について実験を行った。水路幅の広がり $db/dx = 0.1$ の場合での潜り点水深の実験値を二次元のパラメータで整理したのが図-4の▲印であり、直線によく一致している。漸拡の場合には二次元の結果が適用できる。側壁より剥離の生じる場合にはもはや二次元の結果は適用できず、この場合には流入点での水深水路幅比 As を導入し、密度フルード数を $Fi(A) = Q / (\epsilon g A^{3/2})^{1/2}$ と定義し、(3)、(4)式と次元解析を併用してパラメータを設定し、実験式として次式が得られた。

$$\frac{l_p}{L_{so}} = 2.40 \{ F_{io} Fro \sin \theta^{1/6} A_{so}^{1/2} \}^{-8/5} \quad (11)$$

ここに $L_{so}' = F_{io}(A)^2 h_o = F_{io}(h_o/b_o)^{1/2} h_o$ で、 $A_{so} = h_o/b_o$ である。

6. 初期混合について

流入点から潜り点通過直後までの混合は主として潜り点近傍において行われるが、これよりも上流においても濁水は清水と僅かではあるが混合を行う。ここではこれら全ての混合は潜り点近傍でのみ行われるとし大規模渦による周囲水の連行混合の後に下方に潜入するとする。初期混合率 r を次のように定義する。

$$r = (q_p - q_o) / q_o, \text{ 質量保存側より } r = (\rho_o - \rho_p) / (\rho_p - \rho_s) \quad (12)$$

初期混合率についての安芸⁽¹⁰⁾らの実測結果では $r = 0.5 \sim 1.0$ が、又岩崎⁽⁷⁾らによる実測では約 0.25 が報告されている。岸らの実験結果では 0.2 を得ている。著者らの実験によると r は $0.1 \sim 2.0$ と、流入点で

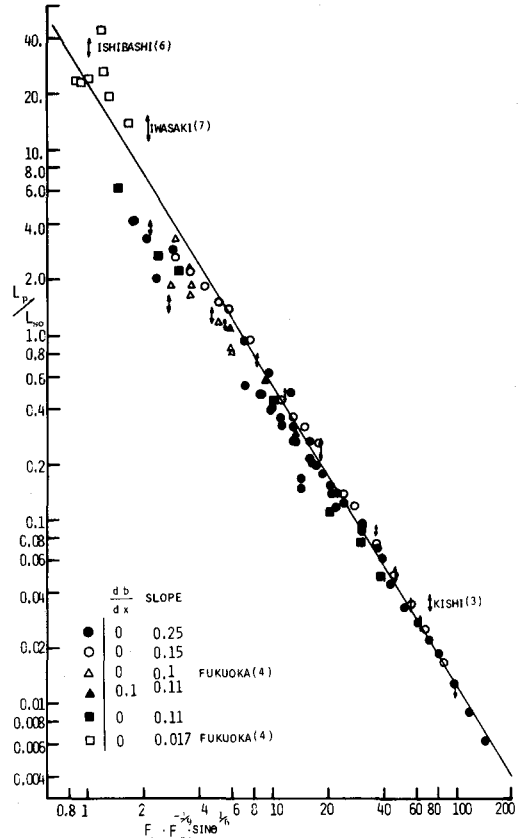


図-4 潜り点水深

の水利条件、勾配等によって幅広く変化することが観測されている。

初期混合率の算定法を以下の二つの簡単なモデルにより検討を行った。

6-1 モデル A

潜り点での密度フルード数に対する考察により $F_{ip}=0.65$ が得られたので、この結果を用いて次のように混合率 r を算定する。この場合には、潜り点近傍において周囲水を混合した後の密度、流速より密度フルード数 F_{ip} が決定されるとする。連続の式、質量保存の式より $q_p=(1+r)q_0$ 、 $\epsilon_p=\epsilon_0/(1+r)$ となるのでこれらを $F_{ip}=0.65$ の式に代入すると次式が得られる。

$$\frac{H_p}{h_0} = 1.33(1+r)F_{i0}^{2/3} \quad (43)$$

この式と潜り点水深の予測式を用いることにより、流入点での水理量が与えられると混合率 r を計算することができる。

潜り点通過直後の密度分布、流速分布より求めた混合率 r_{ob} と (43) 式より計算した混合率 r_{cal} とをプロットしたのが図-5 である。多少のばらつきがあるが、ほぼ実験値に対応している。潜り点水深をより正確に予測することができれば、このような簡単なモデルで混合率は充分予測することができる。

6-2 モデル B

潜り点近傍での流れを図-6 のようにモデル化し、潜り点を挟む上下流に検査断面 I、II を取り運動量の釣り合いを考える。取り扱いを簡単にする為に、潜り点までは流入水と密度が等しく、それより下流の密度は初期混合後の密度に等しいとする。又圧力は静水圧分布をすると仮定し、さらに、界面 PD を直線と近似する。潜り点から検査断面までの距離をそれぞれ L_1 、 L_2 とし、I の断面では流速は一樣で、II の断面では流速分布による運動量補正係数 β_s 、 β_d を導入する。添字 1, 2, P は検査断面 I、II 及び潜り点での諸量を表わし、又添字 s, d は検査断面 II での上層、下層に対する諸量を表わす。

I、II 断面の間での運動量の釣り合い式

$$\{ \rho_1 h_1^2 \cos \theta - \rho_s (h_s + h_d)^2 \cos \theta - (\rho_d - \rho_s) h_d^2 \cos \theta + \rho_1 (h_1 + H_p) L_1 \sin \theta + \rho_s (H_p + h_s + h_d) \times L_2 \sin \theta + (\rho_d - \rho_s) (H_p + h_d) L_2 \sin \theta \} g/2 = \rho_d \beta_d U_d^2 h_d - \rho_s \beta_s U_s h_s - \rho_1 U_1^2 h_1 \quad (44)$$

$$\text{質量保存の式} \quad \rho_1 h_1 U_1 + \rho_s h_s U_s = \rho_d h_d U_d \quad (45)$$

L_1 、 L_2 、 h_d を潜り点水深 H_p を用いて $L_1 = \eta_1 H_p$ 、 $L_2 = \eta_2 H_p$ 、 $h_d = \eta_3 H_p$ と書き表わすこととすると、 $h_s = (\eta_2 \tan \theta + 1 - \eta_3) H_p$ 、 $h_1 = (1 - \eta_1 \tan \theta) H_p$ と書ける。 $\epsilon = (\rho_1 - \rho_s) / \rho_1$ とし、 $F_{i1} = U_1 / (\epsilon g h_1)^{1/2}$ を定義する。さらに $h_1/H_p = \xi_1$ 、 $h_s/H_p = \xi_2$ 、 $h_d/h_1 = \xi_3$ 、 $h_s/h_1 = \xi_4$ と書き表わす。(44)、(45) 式より、

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2F_{i1}^2} \{ \cos \theta - (1 - \epsilon) (\xi_4 + \xi_3)^2 \cos \theta - \xi_3^2 \frac{\epsilon}{1+r} \cos \theta + (1 + \frac{1}{\xi_1}) \frac{\eta_1}{\xi_1} \sin \theta + (1 - \epsilon) (\xi_3 + \xi_4 + \frac{1}{\xi_1}) \frac{\xi_2}{\xi_1} \sin \theta \\ & + \frac{\epsilon}{1+r} (\xi_3 + \frac{1}{\xi_1}) \frac{\xi_2}{\xi_1} \sin \theta \} - \epsilon \beta_1 (1+r) (1+r-\epsilon) \frac{1}{\xi_3} + (1 - \epsilon) \epsilon \beta_2 r^2 \frac{1}{\xi_4} + \epsilon = 0 \end{aligned} \quad (46)$$

(46) 式で $\epsilon = \epsilon_0$ であり、 $F_{i1} = F_{i0} (h_0/H_p)^{3/2} / \xi_1^{3/2}$ であるので H_p/h_0 についての前記の算定法を適用すれば ϵ_0 、 F_{i0} は流入点での条件として既知とすると、 η_1 、 η_2 、 η_3 を与えれば r を計算することができる。運

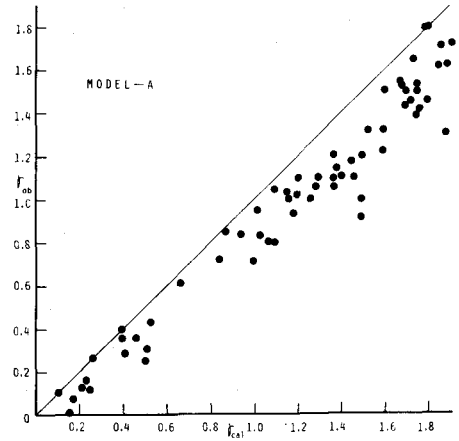


図-5 初期混合率 (モデル A)

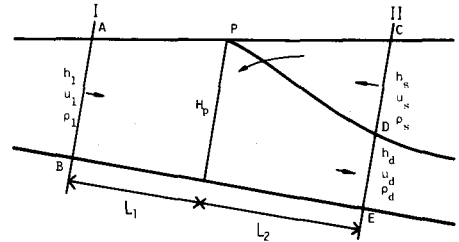


図-6 潜り点付近の流れ

動量補正係数 $\beta_s = \beta_d = 1.1$ とする。 η_3 は次の方法によって決定する。上層静止で界面での連行を無視した二次元定常漸変二層流の運動方程式より、 $X = x/H_p$ 、 $\eta = h/H_p$ とし、界面及び底面での抵抗係数 f_1 、 f_b を Ippen-Harleman に倣い $f_1 = a_1 f_b$ と置き、 $f_1 = a_2 Re^{-1/2} Fi^{-1}$ を用いると界面の方程式(4)式が得られる。

$$\frac{d\eta}{dX} = \frac{i_0 - a_2 / 8 Re^{-1/2} Fi (1 + 1/a_1) \eta^{-3/2}}{1 - \eta^{-3} Fi^2} \quad (7)$$

a_1 の値は著者らの実験では約 2.5 であった。 a_2 としては 1.7 を用いる。界面の計算は $\eta^{-3} Fi^2 = 1.0$ の点より始めるが、前章の考察で得た $Fi = 0.65$ を用いると $\eta = 0.75$ となる。

$\eta = 1.0$ より 0.75 までの区間での水面形の計算に福岡⁽⁴⁾ らは Benjamin の理論を適用しているが、著者らは $\eta = 1.0$ ($X=0$) で $Fi = 0.99$ として(4)式を用いて計算を行った。その結果潜り点のごく近くを除いて、実験値と良い一致を見たので水面形の計算にはこの方法を採用する。従って η_2 を与えると η_3 はこの計算より求めることができる。 η_2 としては、 Fi が 1.0 となる断面すなわち、 $\eta = 0.75$ となる点を水面形の計算結果より求めた。 η_1 については Fi が 0.1 よりも大きい

場合には Fi が 1.0 となる点を求めそれに相当する η_1 を決定した。 Fi が 1.0 より小さい場合には流入点を検査断面として採用する。潜り点水深の算定式と、水面形を計算する式を用いることにより、流入点での水理条件に対する初期混合率 η を(4)式より計算することができる。このようにして計算した混合率 η_{cal} と実験値 η_{ob} とをプロットしたのが図-7 である。計算値は実験値に比して多少小さめであるがほぼ満足しうる結果が得られた。モデル A は簡単な計算によりモデル B と同等な結果が得られ、実用的には優っている。

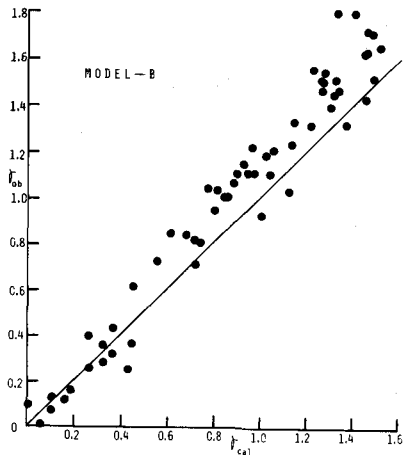


図-7 初期混合率 (モデル B)

7. 結 論

貯水池流入部における主要な現象である潜り点、初期混合について実験的に検討し次の結果が得られた。

- ① 潜り点近傍には大規模な渦が間欠的に出現し、この渦が初期混合及び潜り点位置のゆらぎに主要である。
- ② 潜り点出現限界の考え方より、潜り点での密度フルード数として 0.65 が得られた。
- ③ 壁面密度噴流の取り扱いと、次元解析を併用して、フルード数をも含んだ、潜り点水深の支配パラメータを設定し、潜り点水深の算定式を提案した。さらにこの式が漸拡の貯水池にも適用できることを示した。
- ④ 初期混合率を算定するモデルとして、上記②、③の成果を用いるモデル A と、運動量の釣り合い式に、上記②、③の成果を用いるモデル B を提案した。二つのモデル共実験値と良い一致をみた。

謝辞 実験資料の整理に助力いただいた、当時芝工大卒論生齊藤邦彦君(現大和市役所)に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 玉井信行: 密度流の水理, 新体系土木工学 (22), 技報堂出版, 1980.
- 2) 菅和利・玉井信行: 第 16 回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, PP. 235~238, 1979.
- 3) 岸 力・板倉忠興: 第 16 回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, PP. 233~234, 1979.
- 4) 福岡捷二・福岡祐介: 土木学会論文報告集, 第 302 号, PP. 55~65, 1980
- 5) Keulegan, G.: Report No. 5168, National Bureau of Standards, March 1959
- 6) 石橋 毅・秋元 保 他: 第 21 回水理講演会論文集, PP. 1~8, 1977.
- 7) 岩崎敏夫・山王英寿・他: 第 22 回水理講演会論文集, PP. 113~118, 1978.
- 8) 江頭進治・芦田和男: 第 15 回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, PP. 481~482, 1978.
- 9) 菅和利・玉井信行: 第 34 回年次学術講演会講演概要集, 第 2 部, PP. 283~284, 1979.
- 10) 安芸周一・白砂孝夫: 電力中央研究所技術第二研究報告, 74505, 74506, 1974.