

貯水池密度流の潜り点の水理条件に関する解析

東京電機大学理工学部

正会員 有田 正光

1. 研究の目的 著者等は斜面勾配: S と放出密度フルード数: F_o の値の組み合わせによって貯水池密度流の潜り点の水理条件が大きく変化すること, およびその原因は密度楔タイプ(Type I)から内部跳水タイプ(Type IV)へと流動形態が大きく変化するためであることを明らかにした^{1)・2)}。本報においては密度楔タイプと内部跳水タイプについての解析を示した上で既報の実験結果^{1)・2)}をより合理的に説明することを試みる。

2. 密度楔タイプ(Type I)の解析 図1に考える流れの場を念頭において密度楔の特徴である漸変流としての解析を進めると密度界面形状を計算するための1階の微分方程式として次式を得る。

$$\frac{d\eta_r}{d\mathbf{x}_r} = -\frac{F_s^2}{\Delta^*} \left\{ \frac{\lambda_i(1+S\mathbf{x}_r)}{\eta_r^3(1+S\mathbf{x}_r-\eta_r)} + \frac{\lambda_b}{\eta_r^3} + \frac{2\lambda_{w2}}{\eta_r^2 B_r} + S\beta_1 \frac{q_r^2}{(1+S\mathbf{x}_r-\eta_r)^3} \right\} \quad (1)$$

ここに, $\Delta^* = 1 - \frac{F_s^2}{\eta_r} \left\{ \beta_2 + \beta_1 \beta_2 q_r^2 \frac{\eta_r^3}{(1+S\mathbf{x}_r-\eta_r)^3} \right\}$

$$\frac{dq_r}{d\mathbf{x}_r} = \frac{\alpha_j}{\eta_r} \quad (2)$$

上式中において, η_r = 無次元下層水深, q_r = 無次元下層流量, $\mathbf{x}_r$ = 無次元流下方向距離, β_1 = 上層流れの運動量補正係数 ≈ 6 , β_2 = 下層流れの運動量補正係数 ≈ 1 , $F_s = F_p$ = 潜り点における密度フルード数, S = 斜面勾配, B_r = 無次元水路幅である。また, λ_i = 界面抵抗係数, λ_b = 底面抵抗係数, λ_{w2} = 下層壁面抵抗係数, α_j = 連行係数, であるがそれぞれの係数の評価については文献[3]を参照されたい。なお, 紙面の都合により割愛するが, 式(1), (2)に示される解析に基づく計算結果と今回実施した実験の中でType Iの流動と見なせる場合の密度界面形状に関する実験結果の一致の度合は極めて良好なものであった。この事はType Iの流動現象は上式を基にして考察可能なものである事を示している。

3. 内部跳水タイプ(Type IV)の解析 内部跳水タイプの流動においては放出口地点(o点)を跳水始点, 潜り込み地点(p点)を跳水終点であるとする, 欠損密度流束をPとしてo~p間でたてられた運動比力: $M(\mathbf{x})$ の保存式は次式で与えられる。

$$M(\mathbf{x}) = \frac{q_o^2}{h_o} + \frac{1}{2} \frac{P_o}{q_o} h_o^2 = \frac{q_p}{h_p} + \frac{1}{2} \frac{P_p}{q_p} h_p^2 + \frac{F_s \mathbf{x}}{\rho_o} \quad (3)$$

上式において $F_s \mathbf{x}$ は o~p間の底面せん断力の積分値である。上式の解を無次元化して表示すると次式で与えられる。

$$h^* = A \cos B \quad (4a), \quad h^* = -A \cos(B - \pi/3) \quad (4b), \quad h^* = -A \cos(B + \pi/3) \quad (4c)$$

ここに, h^* = 無次元潜り点水深である。なお, A, Bの定義については文献[4]を参照されたい。

上式の解で跳水水深として物理的に意味のある解は式(4a)である。式(4a)において底面摩擦を無視すればその解は h_p/h_o (= 潜り点水深/放出口水深) = $(1/2) \{ (1+8F_o)^{1/2} - 1 \} = (h_p/h_o)_{ij}$ となり, 良く知られている内部跳水の解と一致する。一方, 底面摩擦を伴う場合には解は $h_p/h_o < (h_p/h_o)_{ij}$ となり結果として潜り点における密度フルード数: F_p の値は大きくなる。実験的検討によれば, 斜面勾配が比較的大きい場合

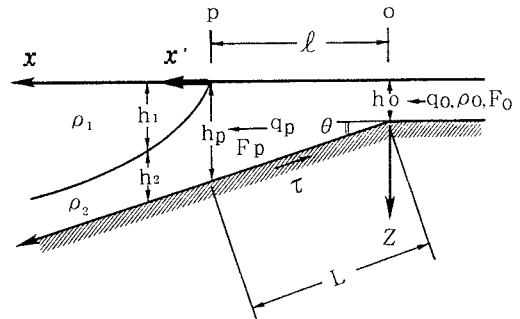


図1 考える流れの場の模式図

は h_p/h_o の値は $h_p/h_o \equiv (h_p/h_o)_{ij}$ で近似しうる事、および斜面勾配が小さくなると h_p/h_o の値は $h_p/h_o < (h_p/h_o)_{ij}$ となるが²⁾、その事は本解析の妥当性を裏付けていると考える。

4. 各種流動形態の出現領域と潜り点の水理条件の評価法 本章においては上述の密度楔タイプと内部跳水タイプの解析結果をふまえて、各種流動形態の出現領域と潜り点の水理条件の評価法について論ずる。

斜面勾配が十分大きいと見なせる場合の潜り点水深は $h_p/h_o = (h_p/h_o)_{ij}$ で近似できる（文献[2]の図2参照）。また、この場合の潜り点の密度フルード数： $(F_p)_{ij}$ は $(F_p)_{ij} = F_o / (h_p/h_o)_{ij}^{3/2}$ で表される。なお、解析結果によれば S が小さくなると底面摩擦の効果により $h_p/h_o < (h_p/h_o)_{ij}$ となるので、そこでは $F_p < (F_p)_{ij}$ となる Type IV が出現することとなる。

斜面勾配が十分に小さい場合の流動形態は前述のように Type I の密度楔タイプとなる。同タイプの定性的挙動をより明らかにするために底面・壁面摩擦および上層の循環を無視して式(1)を書き直すと次式となる。

$$\frac{d\eta_r}{dX_r} = \frac{F_s^2}{F_s^2 - \eta_r^3} \frac{\lambda_i(1 + S X_r)}{\eta_r^3(1 - \eta_r r + S X_r)} \quad (4)$$

上式は S が大きいほど密度界面の勾配が緩くなることを示している。この事は結果として密度楔がより上流側に侵入する事を意味している。つまり、 h_p が小さくなり、その結果として F_p の値が大きくなる。結局、図2に示すように S の値が極めて小さな領域で F_p の値が S に対して大きくなり、ピークを持つ現象の原因となる。また、この事は同領域が密度楔タイプの領域であることを示している。なお、 $0 \leq F_o \leq 1$ の領域では塩水楔と同様に S の値によらず Type I が出現する。

以上の議論を念頭に置いて図2中に各種タイプの出現領域を示した。同図の特徴を以下に箇条書きにする。① F_o が $0 \leq F_o \leq 1$ の領域および $S \sim 0.08$ より小さな領域では Type I となる。② F_o が比較的大きい場合、 S が大きくなると流動形態は Type I $\rightarrow$ Type II $\rightarrow$ Type III $\rightarrow$ Type IV と変化する。③ F_o が比較的小さい場合、 S が大きくなると流動形態は Type I $\rightarrow$ Type II $\rightarrow$ Type IV と変化し Type III の領域は出現しない。

5. 総括 本報はまず貯水池密度流の潜り点近傍に出現する流動形態の中で、密度楔タイプおよび密度カレントタイプの二種について解析を示した。次にその解析結果を基に潜り点の水理条件の評価法について議論するとともに、 $S - F_o$ 平面上の F_p の出現し出現しないの三次元的挙動を示す図上で各種流動形態の領域分割図を示したものである。なお、図2に示す領域分割は極めて定性的なものであり、精度の高い領域分割図のためには追加的検討が必要である。

参考文献

- 1) Arita, M., Soga, M. and Tukahara, C.: Proc. of China-Japan Bilateral Sympo. on Fluid Mech. and Managment Tools for Environment, pp. 88-95, 1994.
- 2) 塚原千明, 有田正光: 第50回年次講演会概要集, pp. 1-2, 1995, 投稿中
- 3) Arita, M. and Jirka, G.H.: Jour. of Hy. Div., ASCE, Vol. 113, Part I and II, pp. 1229-1263, 1987.
- 4) Arita, M., Jirka G.H. and Tamai, N.: Jour. of Hy. Res., Vol. 24, No. 5, pp. 333-345, 1986.

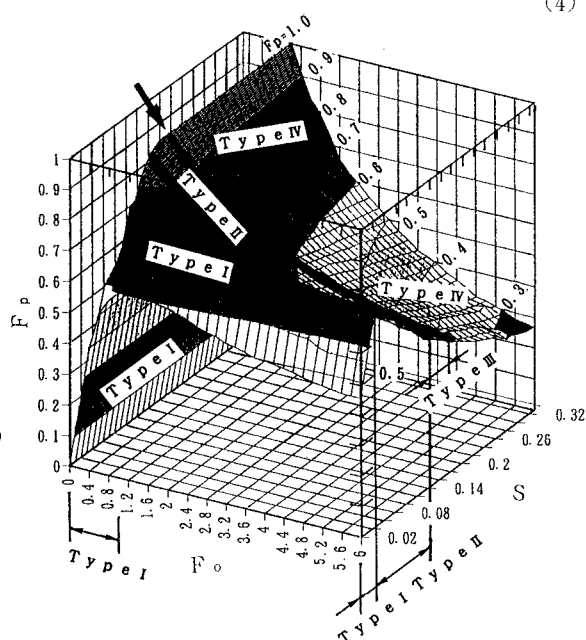


図2 $S - F_o$ 平面上の F_p の値の三次元的挙動と各流動形態の出現領域