

混合型貯水池での潜入密度流の水力特性について

九州工業大学工学部 学生員 ○松元 勇祐、正会員 秋山 壽一郎
九州工業大学大学院 学生員 西 恭太、土居 正明

1. はじめに

本研究では、緩勾配での潜入内部 Froude 数 F_p について有益な情報がほとんど得られていないことを踏まえ、広範囲な水路床勾配 I と流入内部 Froude 数 F_0 での F_p と初期混合率 γ について検討を行った。

2. 実験

実験装置は、前面アクリル製の水槽(長さ 9.0m、深さ 1.2m、幅 0.6m)中に長さ 1.15m の水平部と下端部が段落ちになった傾斜部よりなる幅 0.1m の水路を設置したものである。I を 1/150~1/30 の範囲で、単位幅流入流量 q_0 を 0.75~75cm²/s、流入相対密度差 $\epsilon_0(=(\rho_0 - \rho_a)/\rho_a)$ を 0.0007~0.1、水平流入水路の水深 h_0 を 2.4~5.0cm の範囲で、それぞれ変化させ実験を行った。ここで、 g は重力加速度、 ρ_0 と ρ_a はそれぞれ流入水と周囲水の密度である。潜入密度流の定義図を図-1 に示す。ここで、 h_p は潜入水深、 x_p は流入点から潜入点までの距離、 x_n は潜入区間長、 q_c は単位幅当りの初期混合量であり、添字 n は下層密度流の特性量であることを示す。実験・解析方法としては、潜入点近傍の流況を CCD カメラで撮影した画像をコンピュータ解析することで、 h_p および界面形状を求めた。また、潜入点より $30h_p$ 下流側で、下層密度流の流速ならびに塩分濃度の分布をそれぞれサーマル式微流速計ならびに導電率計により計測した。図-2 は各分布形状を示したものである。いずれも最大値と最大値を取る距離の半値半幅で無次元化されており、 I の値にかかわらず、分布形状はほぼ相似形であることがわかる。また、速度界面と密度界面が異なるため、両分布形状に基づき、モーメント法で、層平均流速 U_n 、層平均有効重力 $B_n(=\epsilon_n g)$ および層厚 h_n を求め、これらより下層密度流の Froude 数 $F_n(=(q_n^2/\epsilon_n g h_n^3)^{1/2})$ を算定した。

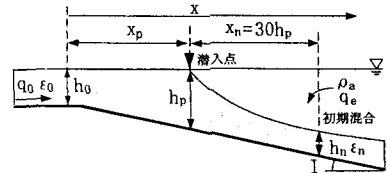


図-1 潜入密度流の定義図

3. 実験結果

図-3 は、 F_n と I との関係について調べたものである。図中の実線は、 $I=1/150$ のデータを除いたベストフィットカーブであり、式(1)で表される。これを除外した理由は、実験装置の制約から、必ずしも潜入領域下流端での正確な流速、密度分布が得られていると確認できなかったためである。これより、内部限界勾配は $I_c \approx 1/50$ であることがわかる。また、破線は以下に述べる 1 次元下層密度流の理論に基づき得られた関係であり、発達した F_n は式(2)で与えられ、底面傾斜角度 θ が 5°以上であれば、連行係数 E と θ との関係は式(3)で与えられる¹⁾。ただし、 $\theta < 5^\circ (I < 1/11.4)$ の下層密度流の E と I との関係はわかっていないので、式(3)がこの範囲でも成立すると仮定して算定した。ここで、 S_1 と S_2 は形状係数であり、 $I=1/150 \sim 1/30$ の範囲では、それぞれ約 0.7 と 1.0 であった。また、滑面水路を用いた室内実験結果であることを踏まえ $f_b=0.01$ とした。

図-4 は、各 I ごとの $F_p(=(q_0^2/\epsilon_0 g h_p^3)^{1/2})$ と $F_0(=(q_0^2/\epsilon_0 g h_0^3)^{1/2})$ との関係を示したものである。これより、次のことが分かる。 $F_0 \approx 1.0$ 以下、すなわち h_0 が内部限界水深 $h_c(=(q_0^2/\epsilon_0 g)^{1/3})$ より小さい場合は、 I にかかわらず、 F_p は増加する傾向があり、急勾配水路では $F_0 \approx 1.0$ で最大値を取るが、緩勾配水路ではそうはならない。また、 $F_0 \approx 1.0$ 以上では、急勾配水路での F_p は F_0 が大きくなるにつれて最大値から徐々に減少し、 $F_p \approx 0.5$ に漸近する。一方、緩

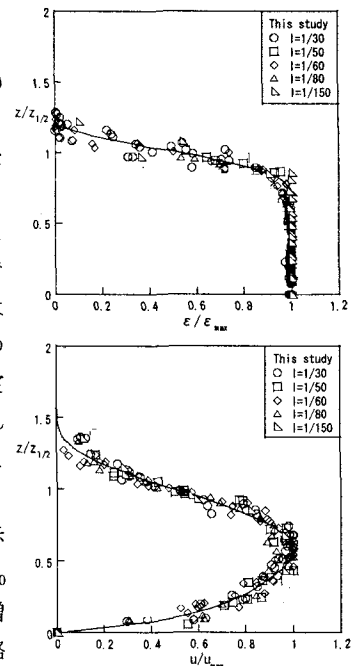


図-2 下層密度流の流速分布と密度分布

勾配水路での F_p は F_0 が大きくなるにつれて徐々に増加し、やはり $F_p \approx 0.5$ に漸近する。これは、 F_0 が大きくなると、 F_p は水路形状の影響を受けない普遍的な値である $F_p \approx 0.5$ となるためであると考えられる。本研究の結果より、 F_p が F_0 と I の影響を受ける範囲は、緩勾配水路で $F_0 \leq 2.0$ 程度、急勾配水路では $F_0 \leq 4.0 \sim 5.0$ 程度であると考えられる。

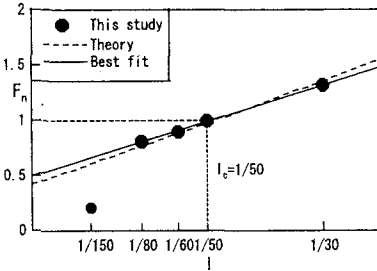


図-3 F_n と I の関係

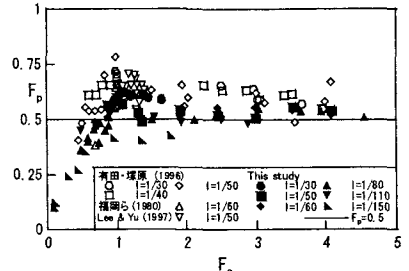


図-4 F_p と F_0 の関係

図-5 は、 x_p/L と F_0 の関係を調べたものである。ここで、 $L(=h_0 \phi)$ は flow force と buoyancy flux の保存より得られる長さスケールであり、 $\phi = F_0^{4/3}(1+0.5 F_0^{-2})$ である。これより、次のことが分かる。急勾配水路では、 $F_0 \geq 1.0$ で x_p/L はほぼ一定値を取るが、それ以下では x_p/L は増加率 a で線形的に増加する。一方、緩勾配水路では、 $F_0 = 0 \sim 2.0$ の範囲で x_p/L は線形的に増加し、最大値を取った後に減少する。また、 $F_0 = 0 \sim 2.0$ の範囲での増加率 a は I に応じて変化する。

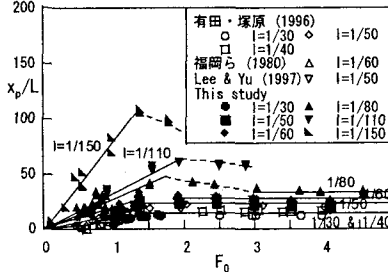


図-5 x_p/L と F_0 の関係

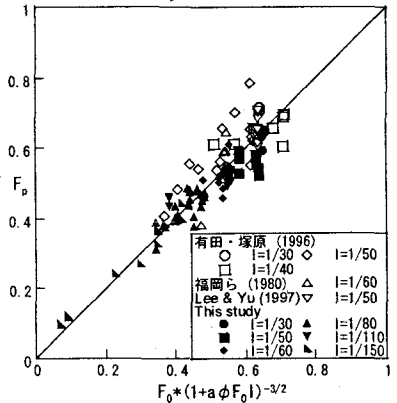


図-6 式(7)の妥当性の検証

図-6 は、水路の幾何学的形状より得られる関係式(4)と式(5)より導かれる式(6)の妥当性を検証した図であり、ほぼこの関係が成立していることが確認できる。

図-7 は、流速と密度分布を積分することで得られる単位幅流量 q_n と層平均相対密度差 ϵ_n に基づき、 $\gamma = q_n/q_0 - 1$ と $\gamma = \epsilon_n/\epsilon_n - 1$ の二通りの方法で算定された γ と I との関係について調べたものである。いずれの測定結果からも γ は I に依存していることが分かる。これより、

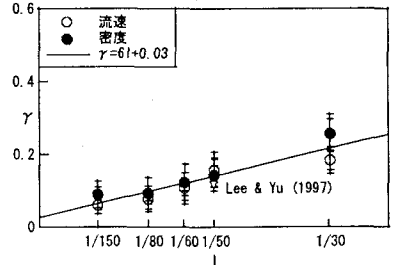


図-7 初期混合率 γ と水路床勾配 I との関係

$I = 1/150 \sim 1/30$ の範囲では、 γ は式(7)で表せると考えられる。ただし、先述した理由から、 $I = 1/150$ の γ 値は傾向が異なっている。なお、図中の矢印はエラーバーである。また、式(4)と式(7)より、Farrell & Stefan²⁾の経験式($F_n < 0.7$ で $\gamma = 0$ 、 $F_n \geq 0.7$ で $\gamma = 0.5(F_n - 0.7)$)と類似した関係式として、 $\gamma \approx 0.24(F_n - 0.5)$ の関係が得られる。

$F_n = 25I + 0.5$ (1)	$F_n = \frac{S_2 I - S_1 E/2}{f_b + E}$ (2)	$E = 0.0009(\theta + 5)$ (3)	$h_p/h_0 = 1 + x_p I/h_0$ (4)
$x_p/L = aF_0$ (5)	$F_p/F_0 = (1 + a\phi F_0 I)^{-3/2}$ (6)	$\gamma \approx 0.03 + 6I$ (7)	

4. まとめ

(1)混合型貯水池では、 F_p が流入条件(F_0)と水路形状(I)の影響を受ける範囲は、緩勾配水路で $0 < F_0 \leq 2.0$ 程度、急勾配水路では $0 < F_0 \leq 4.0 \sim 5.0$ 程度である。この範囲以外では、 $F_p \approx 0.5$ の値を取る。 $F_0 = 0 \sim 1.0$ での F_p は、式(6)で与えられる。その中間の F_0 では各 I に応じて変化する。なお、内部限界勾配は約 $1/50$ である。

(2)初期混合率 γ は、 I に依存し、関係式(7)で与えられる。

参考文献：1)秋山壽一郎：流入型密度流の水利特性とその予測、湖沼、貯水池の管理に向けた富栄養化現象に関する学術研究のとりまとめ、土木学会水理委員会、環境水理部会、pp.69-167, 2000、2) Farrell, G.J. & Stefan, H.G.: Mathematical modeling of plunging reservoir flows, *J. of Hydraulic Research*, Vol.26, No.5, pp.525-537, 1988.