

成層型貯水池における内部跳水の混合について

九州工業大学工学部 学生員 ○田尻 真太郎、正会員 秋山 壽一郎、鬼束 幸樹
九州工業大学大学院 学生員 片山 哲幸

1. はじめに

成層型貯水池において、潜入を経て中層密度流として躍層に沿って貫入するときに発生する内部跳水について実験的に検討を加えた。

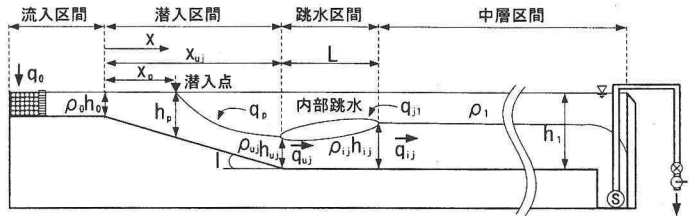


図-1 流れの定義図

2. 実験

実験装置は、アクリル製の水槽(流入区間長=1.0m、貯水池部長=2.48~3.10m、深さ=0.21~0.31m、幅=0.16m)中に I=1/5 の斜面部を有し、その下流側に躍層を想定したアクリル板を水平に設置したものである。なお、下流端は段落ちとなっている。

流れの定義図と実験条件をそれぞれ図-1 と表-1 に示す。流入水深 h_0 を 2.0cm、流入相対密度差 $\epsilon_0=(\rho_0-\rho_1)/\rho_1$ を 0.0008 で一定に保ち、単位幅流入流量 q_0 を 4.69~7.81cm²/s で、水域水深 h_1 を 21.0~31.0cm の範囲で、それぞれ変化させ実験を行った。ここで、 ρ_0 と ρ_1 はそれぞれ流入水と周囲水の密度、 h_p は潜入水深、 x_p は流入点から潜入点までの距離である。図-2 に示すように斜面下端で内部跳水が発生している様子がわかる。内部跳水における混合率を式(1)のように定義する。ここで、添字 uj と ij はそれぞれ内部跳水の開始点と終了点の特性量であることを示す。

表-1 実験条件

	q_0 (cm ² /s)	F_0	h_1 (cm)	h_p (cm)
A-1-1	4.69	1.87	21	3.35
A-1-2			31	3.54
A-2-1	6.25	2.50	21	5.47
A-2-2			31	5.09
A-3-1	7.81	3.12	21	6.25
A-3-2			31	6.25

$$\gamma = \frac{q_{ij}}{q_{uj}} - 1 \quad (1)$$

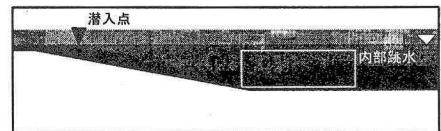


図-2 流動状況の一例(caseA-3-1)

実験・解析方法としては、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、内部跳水の開始点と終了点で、流速と塩分濃度の鉛直分布をそれぞれサーマル式微流速計と導電率計により計測した。なお、各分布の計測は、内部跳水長の判別が容易でなかったので、跳水の下流で行った。図-3 と 4 は、それぞれ内部跳水の開始点と終了点での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、流入内部 Froude 数 $F_0=(q_0^2/\epsilon_0 g h_0^3)^{1/2}$ と貯水池水深 h_1 と流入区間の水深 h_0 との比 h_1/h_0 に大きく依存せず、分布形状はほぼ相似形であることがわかる。

層平均流速 U 、層平均有効重力 $B(=\epsilon g)$ および層厚 h は、一次元下層密度流理論に基づき、式(2)に定義するモーメント法で式(3)のように算出した。ここで、 g は重力加速度である。これは速度界面と密度界面が異なるためである。また、これらの層平均量に基づき跳水開始点での内部 Froude 数 $F_{uj}(=U_{uj}/(B_{uj}h_{uj})^{1/2})$ を算出した。

$$Uh = \int_0^h u dy \quad UBh = \int_0^h ub dy \quad U^2 h = \int_0^h u^2 dy \quad (2)$$

$$U = \frac{\int_0^h u^2 dy}{\int_0^h u dy} \quad B = \frac{\int_0^h ub dy}{\int_0^h u dy} \quad h = \frac{(\int_0^h u dy)^2}{\int_0^h u^2 dy} \quad (3)$$

3. 実験結果

図-5 は、潜入点での内部 Froude 数 $F_p(=(q_0^2/\epsilon_0 g h_p^3)^{1/2})$ と流入内部 Froude 数 F_0 との関係を示したものである。図中には、有田・塚原によって得られた $I=1/4\sim 1/7$ の範囲で、斜面上での実験結果も示してある。これより、有田・塚原の実験結果とよく一致しており、潜入点については斜面上のものとは大きな違いがないことがわかる。

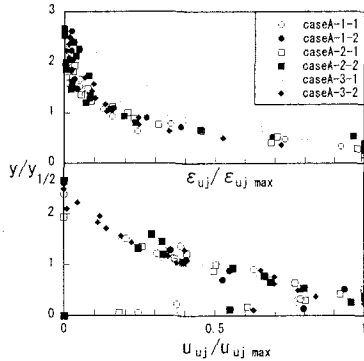


図-3 跳水開始点における各分布

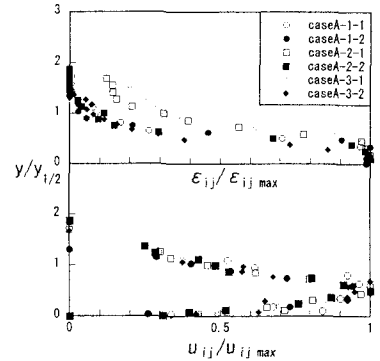


図-4 跳水終了点における各分布

図-6 は、内部跳水における混合率 γ と上述したモーメント法の結果に基づき算出した内部跳水の開始点における内部 Froude 数 F_{ij} との関係を示したものである。図中には、Garcia、鷺見らおよび中村らの実験結果も示してある。これより、本研究の結果では、 h_i/h_0 の影響により多少のパラつきが認められるが、 F_{ij} に対する依存性の方が強く、おおよそ式(4)で表されることがわかる。なお、中村らのデータが大きく外れている理由は、強制的に内部跳水を発生させているためであると推察される。

$$\gamma = 0.3(1 - F_{ij}^{-2}) \quad (4)$$

図-7 は、図-6 と同様にモーメント法に基づき算出した共役水深比 h_{ij}/h_{uj} と F_{ij} との関係を示したものである。これより、共役水深比 h_{ij}/h_{uj} は、混合を無視して得られる式(5)の Belanger の関係式でおおよそ表されることがわかる。

$$\frac{h_{ij}}{h_{uj}} = \frac{1}{2} \left\{ (1 + 8F_{ij}^{-2})^{1/2} - 1 \right\} \quad (5)$$

4. まとめ

- (1) 潜入点での内部 Froude 数 F_p と流入内部 Froude 数 F_0 との関係は、流入水が潜入を経て中層密度流として躍層に沿って貫入する場合と斜面上の潜入密度流と大きな違いは認められない。
- (2) 内部跳水における混合率 γ と内部跳水の開始点における内部 Froude 数 F_{ij} との関係は、おおよそ式(4)で表される。
- (3) 共役水深比 h_{ij}/h_{uj} と F_{ij} との関係は、式(5)の Belanger の関係式でおおよそ表される。

参考文献： 1) 秋山壽一郎：流入型密度流の水理特性とその予測，湖沼，貯水地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) 有田正光,塚原千明：貯水池密度流の潜り点の水理条件に関する解析的研究,水工学論文集,第 40 巻,pp.567-574,1996.3) Garcia : M.H. Hydraulic jumps in sediment-driven bottom currents, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.119, No.10, pp.1094-1117, 1993. 4) 鷺見元宏ら：断面の変化する水路における密度流，水理講演会論文集，第 27 巻，pp.537-542.5) 中村 充ら：密度成層流の内部跳水,海岸工学講演会論文集,第 25 回, pp.456-459.

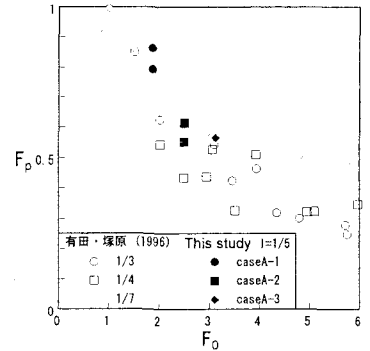


図-5 F_p と F_0 との関係

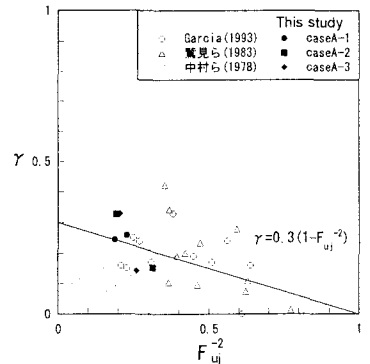


図-6 γ と F_{ij} との関係

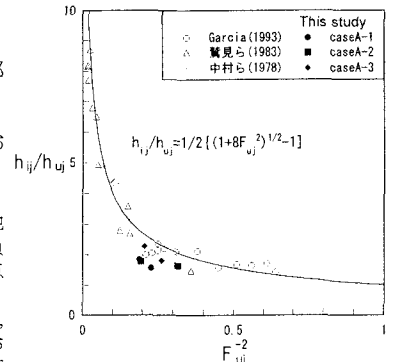


図-7 h_{ij}/h_{uj} と F_{ij} との関係