

II-444 気泡噴流による塩水くさび進入防止法の解析

埼玉大学大学院 学生員 佐々木 威之
埼玉大学工学部 正 員 浅枝 隆

1. はじめに

河川河口部における塩水遡上、すなわち塩水くさびは、環境に対しても極めて大きな影響を及ぼす。環境を保護しながら塩水の遡上を防止する方法として、エアーカーテンの利用が可能である。ここでは、水槽実験およびモデル解析を行い、塩水進入流量と気泡流量、塩水密度、河川流量との関係を比較検討した。

2. 実験

実験では図1に示す水槽を用いた。左右に塩水、淡水を満したゲートを開けることで塩水くさびを発生させ、気泡噴流付近における塩水くさびの挙動について、密度測定、シャドウグラフ法による流量測定を行った。淡水の単位幅流量 Q 、気泡流量 q_a 、塩水密度 ρ_1 をそれぞれ変化させて実験を行った。

実際の塩水は、1：気泡噴流によって水面まで持ち上げられ水平方向に広がり、河川水によって押し戻されて進入が止まる、2：水面まで到達せずに気泡噴流を通過する、という挙動をとることが実験から確認できた。

（佐々木ら、1992）

3. モデル

まず、気泡噴流の連行流量を考える。上昇速度、不足密度はガウス分布をとり、ここでは二次元噴流である。

質量保存、運動量保存、浮力保存の三つの方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} \left(\int_{-\infty}^{\infty} v \exp \left(-\frac{y^2}{b^2} \right) dy \right) &= 2\alpha v \\ \frac{d}{dz} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \rho_p v^2 \exp \left(-\frac{2y^2}{b^2} \right) dy \right) &= k \int_0^{\infty} \rho_r g'_1 \exp \left(-\frac{y^2}{\lambda^2 b^2} \right) dy + \int_{-\infty}^0 \rho_r g'_2 \exp \left(-\frac{y^2}{\lambda^2 b^2} \right) dy \\ \frac{d}{dz} \left(\int_{-\infty}^{\infty} (\rho_2 - \rho_p) v \exp \left(-\frac{y^2}{b^2} \right) dy \right) &= (\rho_2 - \rho_1) \alpha v + \left(\int_{-\infty}^{\infty} v \exp \left(-\frac{y^2}{b^2} \right) dy \right) \frac{d\rho_2}{dz} \\ g'_1 &= -\frac{g}{\rho_r} (\rho_1 - \rho_p), \quad g'_2 = -\frac{g}{\rho_r} (\rho_2 - \rho_p) \end{aligned}$$

ここで、 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_r はそれぞれ塩水側、淡水側、気泡噴流内部の密度、 α 、 λ は連行係数、広がり率で定数、である。 k は、噴流に働く重力の影響として塩水側の等与分を表し、今回の計算では $k=0$ とした。さらに浮力の方程式には圧縮項が加わるが、浅い水深での解析では無視できるものとし、無次元化の際のみ考慮した。上の式を無次元化すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} (BV) &= V & \frac{d}{dx} (BV^2) &= BG & \frac{d}{dx} (BVG) &= -CBV, \text{ or } -DV \\ x &= \frac{z}{H} & B &= \frac{\sqrt{\pi}}{2\alpha H} b & V &= \frac{\sqrt{1+\lambda^2}}{U_B M^{\frac{1}{3}}} v & G &= \frac{\lambda(\lambda^2+1)H}{\sqrt{2} U_B^{\frac{2}{3}} M^{\frac{1}{3}}} g'_2 \\ M &= \frac{q_a P_a (1+\lambda^2)^2}{2\sqrt{2} \alpha H \rho_r U_B^3} & C &= \frac{(1+\lambda^2)^{1.5} H^2 N^2}{\sqrt{2} U_B^{\frac{2}{3}} M^{\frac{1}{3}}} & D &= \frac{(1+\lambda^2)^{1.5} H g (\rho_1 - \rho_r)}{2\sqrt{2} U_B \rho_r M^{\frac{2}{3}}} \\ N^2 &= -\frac{g}{\rho_r} \frac{d\rho_2}{dz} \end{aligned}$$

ここで、 H は大気圧水頭+水深、 C は塩水くさびが気泡噴流を通過する場合、 D は進入が止まる場合である。 N^2 は淡水側の密度成層を示す。

以上の方程式をもとにルンゲ=クッタ法を用いて、初期塩水密度、気泡流量、密度成層を与えたときの気泡噴流による連行流量を求めた。初期条件は $x=0.001$ 、また b 、 v 、 g'_2 は、Tekeli and Maxwellの実験式を用いた。

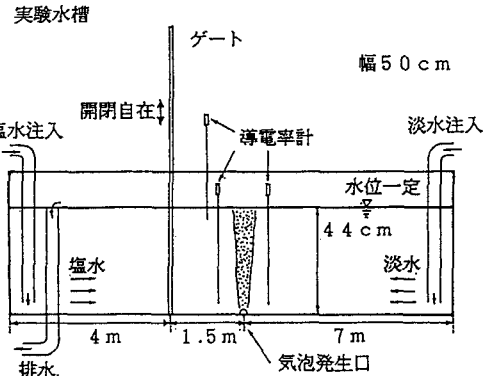


図1

次に、水平方向の全体の流れを考慮し、運動量保存、質量保存方程式、連続式をそれぞれ次のようにたてた。

$$\frac{1}{2} \frac{\rho_R}{\rho_r} g h^2 + \frac{1}{2} \frac{\rho_L - \rho_R}{\rho_r} g h_L^2 - \frac{1}{2} g h^2 - \frac{1}{2} \frac{\rho_S - \rho_r}{\rho_r} g h_S^2 = \frac{Q^2}{h - h_S} + \frac{q_S^2}{h_S} - \frac{q_R^2}{h - h_L} - \frac{q_L^2}{h_L}$$

$$q_R + q_L = Q + q_S$$

$$\rho_R q_R + \rho_L q_L = \rho_r Q + \rho_S q_S$$

ここで、 h は水深、 Q は河川流量、添字の L 、 R 、 S はそれぞれ塩水側下層、上層、淡水側下層を意味する。

最後に塩水くさび噴流の関係を次のようにおいた。

塩水側連行量+淡水側連行量=気泡噴流連行量+噴流通過流量（進入防止ができない流量）

4. 考察

まず、計算結果と実験データの比較を行ったグラフを図2、図3、図4に示す。全体的な傾向として、実験から得られた通過流量が、計算結果よりも低い値となっている。これは実験での初期塩水密度が、ゲートから気泡噴流に達するまでに薄められたと考えられ、このことを考慮すればおおむね妥当である。それぞれの計算結果から、塩水密度が高くなるに従って通過流量が大きくなることがわかる。

次に噴流気泡流量による進入流量の変化を表したのが、図5、図6である。いずれも空気流量が多くなるほど塩水遡上が制御されることがわかる。

河川流量を変化させたものが図7である。流量が-68.2の場合と-22.0の場合では変化が見られたが、-68.2と-49.5の時の変化は殆ど見られなかった。グラフから河川流量が大きい程、効果があることがわかる。

以上、気泡噴流による塩水くさび進入防止法について実験と計算を行い、塩水くさび流量と、気泡流量、河川流量、塩水密度の関係を確かめることが出来た。なお本研究では鹿島学術振興財団の援助を受けたことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) Trevor J. McDougall: Bubble plume in stratified environments: J.F.M. vol. 85 p665-672
- 2) Sahim Tekeli and W. Hall C. Maxwell: Physical modeling of bubble screens

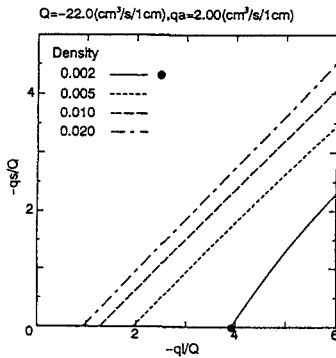


図2

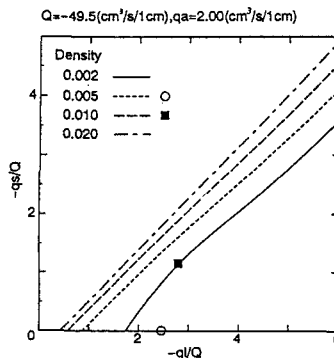


図3

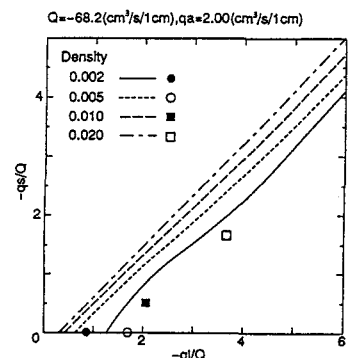


図4

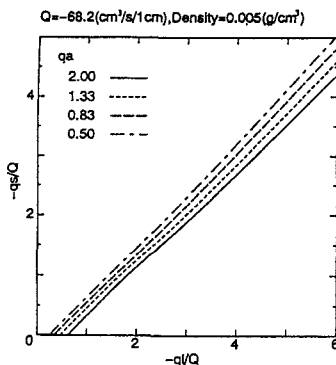


図5

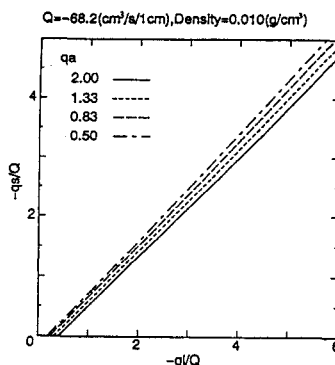


図6

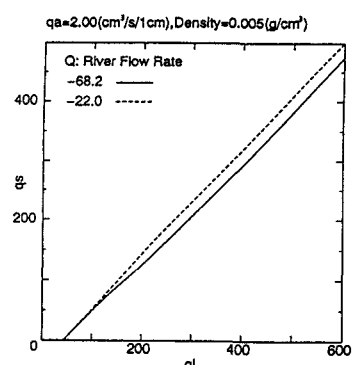


図7