

(II-27) エアリフト流れの簡易計算法の浮力補正と揚水能力の検討

宇都宮大学大学院 学生員 木下 靖貴
宇都宮大学工学部 正会員 池田 裕一
宇都宮大学工学部 フェロー員 須賀 堯三

1. 研究の目的

エアリフトは圧縮空気を管の下端に送り込み、気泡の浮力によって管内に上昇流を生じさせるものである。利用法として、掘削工事中に生じるずりなどを輸送する流体輸送、あるいは富栄養化に対する曝気循環といった環境制御などが挙げられる。最近では、エアリフトをより深い水深で用いることも多くなった。その場合、水域下方では水圧が高いため気泡の大きさは小さく、上昇とともに水圧が低くなるため大きくなり、そのため気泡の浮力が変化することが特徴の一つとなっている。そこで本研究では、大気圧下および減圧下¹⁾において揚水特性についての実験を行ない、これに現地観測結果²⁾を加えて浮力補正を考慮した簡易計算法を導いた。また、これを用いて簡単な数値シミュレーションを行なった。

2. 実験概要

実験には、断面1.15m×0.64m、高さ1.0m(Case-N)ならびに内径50cm、高さ1m(Case-G)の2つのアクリル製の水槽を目的に応じて用いた。特に減圧時¹⁾(Case-G-2~4)には、円筒水槽の上端を厚さ2cmのアクリル製の蓋で密封し、真空ポンプを用いて水面付近の空気を吸引し減圧を行なった。実験中、流況を見るためにビデオカメラで撮影し、流動形態を把握できるようにした。また、揚水量の測定は、塩水を用いて水槽中に予め二成層を形成しておき、エアリフトの揚水によって密度界面が下降するその量から求めた³⁾。実験条件については表1に示す。

3. 浮力の評価と補正

エアリフト流れに作用する浮力は単位質量あたり、

$$\gamma g = \frac{\overline{Q_B} g}{A \overline{w_b}} \dots\dots\dots (1)$$

と書ける。ここに $\overline{Q_B}$ 、 $\overline{w_b}$ はそれぞれ空気流量、気泡上昇速度の代表値であり、 A は断面積、 g は重力加速度である。また $\overline{Q_B}$ はエアリフト1/2長地点での静水圧に対応するものとする。 $\overline{w_b}$ については今回、次のよ

表 1 実験条件(K1~3は金房ダムでの現地観測データを引用)

Case	水面での大気圧 水頭 $H_a(cm)$	エアリフト下端の 水深 $H(cm)$	管長 $L(cm)$	内径 $D(cm)$	空気量 Q_0	流動形態	記号
N-1	1020	75	60	4.5	2~50 (cm^3/s)	気泡流(小)	○
N-2	1020	75	60	4.5		気泡流(大)	△
N-3	1020	75	60	4.5		気泡弾	▽
N-4	1020	80	60	1.8		気泡流	□
N-5	1020	80	60	1.8		スラグ流	◇
N-6	1020	80	60	0.9		気泡流	◎
N-7	1020	80	60	0.9		スラグ流	×
G-1	1020	80	70	1.8	1.5~40 (cm^3/s)	気泡流	●
G-2	617	80	70	1.8		スラグ流	▲
G-3	349	80	70	1.8		気泡流	▼
G-4	282	80	70	1.8		気泡流	■
K-1	1020	1700	1200	50	0.6~1.7	気泡弾	△
K-2	1020	2100	1600	50	$\times 10^{-2}$	気泡弾	▽
K-3	1020	2500	2000	50	(m^3/s)	気泡弾	▲

うにして実験値より求めた。すなわち、運動量保存則により浮力の大きさと各損失の関係は次のように得られる⁴⁾。

$$\gamma g = \frac{1}{2}(K_e + K_o + f \frac{L}{D}) F_L^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$F_L^2 = u_p^2 / g L$$
はエアリフト内の慣性の大きさを示す無次元パラメーターを示す。 u_p は液相の流速(= Q_w/A)、 K_e 、 K_o 、はそれぞれ流入、流出損失係数($K_e = 0.5$ 、 $K_o = 1.0$)である。壁面摩擦損失係数 f には、扱いが簡便なBlasius則 $f = 0.3164(u_p D/\nu)^{-1/4}$ (ν は水の動粘性係数)を用いた。今回はこの式(1)、(2)を用いて実験データから $\overline{w_b}$ を算出することにする。

エアリフトの速度スケールとして $\overline{w_b}/(u_p + u_s)$ を考え、またエアリフト内の圧力を示す無次元パラメーターに $u_p/(g \overline{H_T})^{1/2}$ をとる。ここで $\overline{H_T}$ は、エアリフト1/2長地点での静水圧である。スリップ速度 u_s の値には、文献から典型的なものを引用した⁵⁾⁶⁾。図1より回帰式を求め、 $\overline{w_b}$ について整理すると

$$\overline{w_b} = C_w \left(\frac{u_p}{\sqrt{g \overline{H_T}}} \right)^{-7/5} \dots\dots\dots (3)$$

となる。 C_w には0.03を用いると、おおむね実験値を整理できることがわかる。図2、3はそれぞれ各Caseでの C_w の Re (= $u_p D/\nu$)および Fr (= $u_p/(g D)^{1/2}$)への依存性を検討したものである。

4. 揚水量の解析

$\overline{w_b}$ を式(3)でモデル化し、式(1)、(2)とともに簡易計算法を構築した。図4には $C_w=0.03$ を用いて計算した値と、実験値 u_p とを比較したものを示す。図よりある程度の一致が得られることがわかる。図5ではこのモデルを用いて、エアリフト下端の水深 $H = 50m$ における空気量と揚水量の関係について検討を試みた。エアリフトの管長 L を10、20、30 mの3種類に変化させてみたところ、同じ空気量でも揚水量に変化が見られることがわかる。

参考文献

- 1) 池田裕一・木下靖貴・須賀堯三:エアリフトの揚水特性に関する減圧実験の試み, 水工学論文集第40巻, pp1137-1140, 1996.
- 2) 浅枝隆:海・湖の下層低温水を水面まで浮上させる気泡弾を用いた揚水塔の開発, 文部省科学研究費補助金研究成果報告書, 課題番号 01850118, 1991.
- 3) Leitch, A.M. and Bains, W.D.: Liquid volume flux in a weak bubble plume, J. Fluid Mech., vol. 205, pp. 77-98, 1989.
- 4) 池田裕一・浅枝隆・須賀堯三:連続曝気式深層水揚水施設による密度成層の混合効率, 水工学論文集第38巻, pp325-330, 1994.
- 5) Milgram, J.H.: Mean flow in round bubble plumes, J. Fluid Mech., vol. 133, pp. 345-376, 1983.
- 6) Collins, R.: The effect of a containing cylindrical boundary on the velocity of a large gas bubble in a liquid, J. Fluid Mech., vol. 28, pp97-112, 1967.

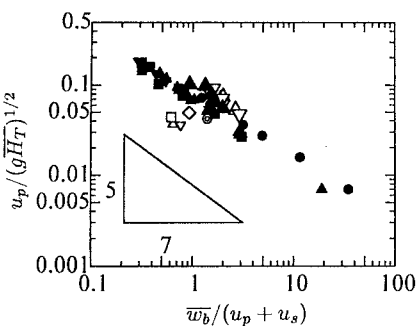


図1 揚水特性の検討

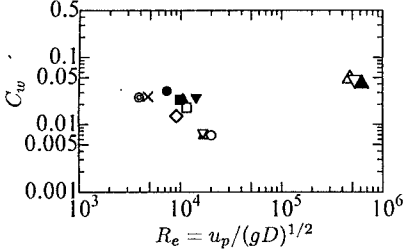


図2 C_wの検討1

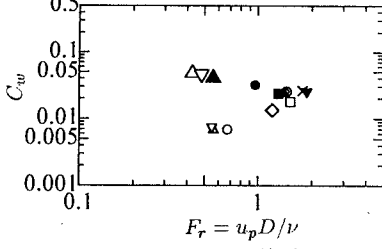


図3 C_wの検討2

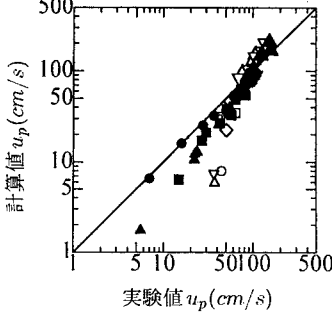


図4 計算値 u_p との比較

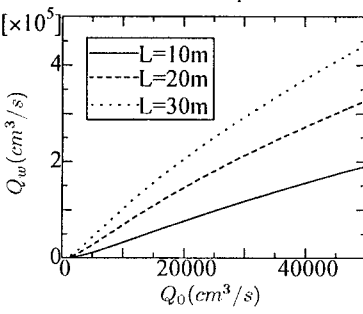


図5 揚水量の計算例($H = 50m$)