

自由落下水による空気混入の実験的研究

東北大学工学部 止員 坂本龍雄

東北大学大学院 学主員 村上和男

東北大学工学部 学生員 鈴木英世

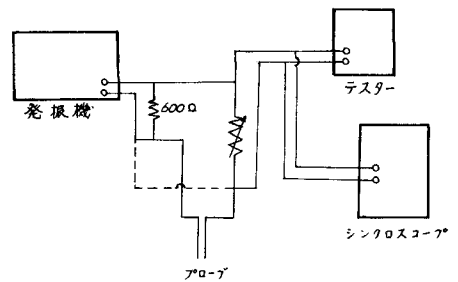
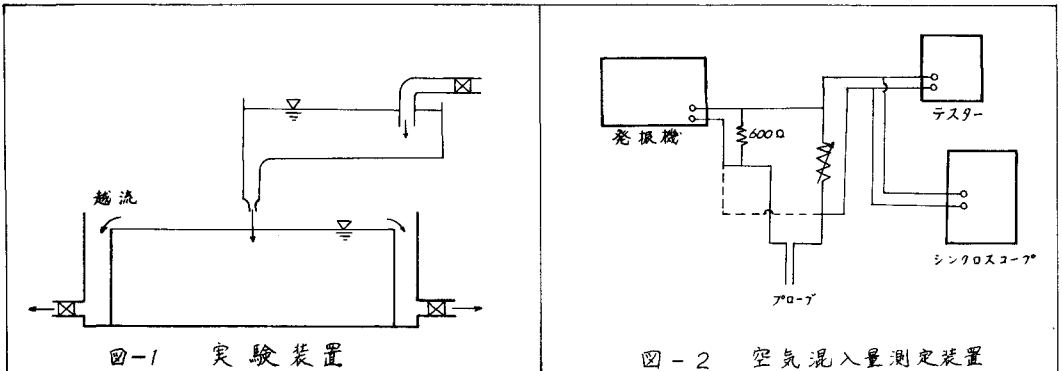
1. まえがき

アーチダムの洪水吐に見られるような自由落下水は、静水面に突入する際に多量の空気を含みながら突入してゆく。この空気の影響によって、乱流構造に変化を与えたり、浮力の作用が強いたりして、空気混入のないいわゆる落り噴流の場合とは、著しく異った現象を示す。落り噴流に関しては、過去に多くの論文が提出されているが、空気混入の噴流に関しては、あまり多くの論文が提出されていない現状である。

この論文では、自由落下水脈が静水中に突入する際に、空気が水脈に均一に分布するものとし、また空気混入流を噴流における物質拡散とみなして、安芸とAbrahamの各理論式を適用し、今回は実験的に行った実験値とこれと比較したものである。

2. 実験装置と実験方法

図-1に実験装置を示す。低水槽の大きさは、長さ3m巾0.6m高さ1.3mである。この水槽の真上から水を自由落下せしめるノズルの出口は、内法50cm×2cmで長い方の50cmの中央が水槽の中60cmの中央に一致している。高水槽の位置を上下に移動、かつ低水槽の越流部の板の高さを変化させることにより、ノズルの出口と水面との高さの差(落下高)を変化させた。流速計については、フロート型のピトー管を用い、空気混入量については、図-2に示すようなミネソタ大学で行なわれた実験方法を用いた。水中に空気泡が入ると、その間の抵抗が増大することを利用して、シンクロスコープにでた波形を写真に撮って、その値を平均することにより空気含有量を測定した。



3. 安芸, Abrahamの理論式

安芸の理論は、本実験と同じく自由落下水の研究であるが、Abrahamの研究は汚水の拡散に伴う流速の異なる噴流の研究である。両者とも、拡散水脈内の流速分布、流速分布をそれぞれGauss分布で近似できるものとして、(1)式、(2)式を与えている。

$$u/u_m = \exp\{-K(y/x)^2\}$$

$$(P-P_s)/(P_m-P_s) = \exp\{-\mu K(\gamma/x)^2\} \quad (2)$$

ここに於いて、 u : 流れ方向の流速、 u_m : 中心軸での流れ方向の流速、 K, μ : 定数、 x : 原点から中心軸方向の距離、 γ : 中心軸から水平方向の距離、 P : 密度、 P_m : 中心軸での密度、 P_s : 周囲の流体の密度を示す。連続の方程式、運動量方程式として(3),(4),(5)式を与えている。

$$d \int_{\gamma} u d\gamma = Q' dx \quad (3)$$

$$d \int_{\gamma} u(P-P_s) d\gamma = 0 \quad (4)$$

$$\int_{\gamma} P u^2 d\gamma = P_0 u_0^2 B_0 + g \int_0^x \int_{\gamma} (P_s - P) d\gamma \quad (5)$$

ここに於いて、 Q' : entrainment、 B_0 : ノズルの厚さ、 P_0, u_0 : $x=0$ での密度、流速

安芸は、(1)式、(2)式を(5)式に代入して(6)式を得、(6)式を整理して(7)式の三次方程式を得た。

$$\int_0^x P u^2 d\gamma = \int_0^x \{P_s + (P_m - P_s) e^{-\mu K(\gamma/x)^2}\} u_m^2 e^{-2K(\gamma/x)^2} d\gamma \quad (6)$$

$$\frac{(u_m)^3}{(u_0)^3} + \sqrt{\frac{2K(1+\mu)}{\pi(2+\mu)}} \frac{P_0 - P_s}{P_s} \frac{B_0}{x} \frac{(u_m)^2}{(u_0)^2} - \sqrt{\frac{2K}{\pi}} \frac{P_0 B_0}{P_s x} \frac{(u_m)}{(u_0)} - \sqrt{\frac{K(1+\mu)}{2\pi\mu}} \frac{P_0}{P_s} \frac{u_0^2}{(P_0 - P_s)/P_s g B_0} = 0 \quad (7)$$

また、Abrahamは(5)式に於いて、密度差が影響を及ぼすのは第4項だけであるとして、右辺の1を P_0 で置き換えて解析し、(8)式、(9)式を与えている。

$0 < x < x_e$ (Zone of positive entrainment)

$$\left(\frac{u_m}{u_0}\right)^2 = \frac{B_0}{x} \left\{ \sqrt{\frac{2K}{\pi}} \frac{M_0}{M_0} \right\}^{3/2} + \sqrt{\frac{2(1+\mu)K}{\pi\mu}} \frac{1}{F} \left\{ \left(\frac{x}{B_0}\right)^{3/2} - \left(\frac{x_e}{B_0}\right)^{3/2} \right\}^{2/3} \quad (8)$$

$x_e < x$ (Zone of negative entrainment)

$$\left(\frac{u_m}{u_0}\right)^2 = \frac{B_0}{x} \sqrt{\frac{2K}{\pi}} \frac{M_0}{M_0} + \frac{1}{2\sqrt{\mu}} \frac{1}{F} \frac{P_m - P_s}{P_0 - P_s} \left(\frac{x}{B_0} - \frac{x_e}{x B_0} \right) \quad (9)$$

ここに於いて e : positive entrainment と negative entrainment の遷移点

e : potential core の最終点

$$F: \text{Froude number} = u_0^2 / \frac{P_0 - P_s}{P_s} g B_0$$

今回の実験は装置の関係上、positive entrainmentの領域内のみの実験しか行われていない。

4. 実験結果

図-3に各横断面における流れ方向速度の分布の一例を示す。実線の曲線は $u_{um} = e^{-K(\gamma/x)^2}$ ($K=26.65$)の曲線を示す。この図から判る場合と同様に、空気混入の場合も similarity が大体成り立つものと仮定しても大きな誤差はない。また表-1に $u_{um}=0.5$ の時の γ/x の値を示す。これより、両方の場合とも拡散率が、原点からの距離 x に比例するということも仮定できる。これから式(1)の仮定が成り立つことがわかる。実験値を整理して次のような値を得た。これを表-2に示す。 P_0 は $x=0$ での密度であるが、この点での密度の測定が困難であるため、 $x=100\text{mm}$ に

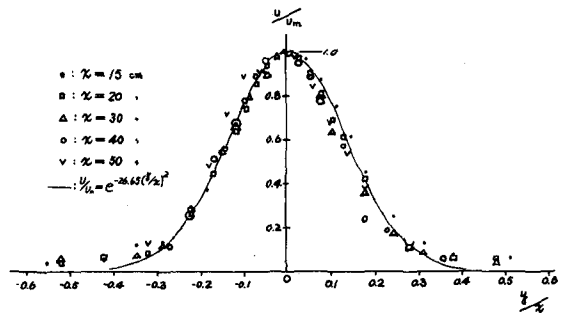


図-3. 各横断面における流れ方向速度の分布

これを表-2に示す。 P_0 は $x=0$ での密度であるが、この点での密度の測定が困難であるため、 $x=100\text{mm}$ に

於いて P を測定し、(4)式を用いて ρ_0 を決定した。この結果をみると、 ρ_0 の値は潜水高が増加するにつれて減少している。しかしこの値は余り精度が良くなく、この値が速度減衰に大きな影響をもつこととなり、もつ

表-1 $\rho_0 = 32.5\text{cm}$

x	y/x	K
15cm	0.165	25.46
20cm	0.158	27.77
30cm	0.153	29.61
40cm	0.160	27.08
50cm	0.160	27.08
60cm	0.173	23.16
70cm	0.168	24.56
80cm	0.160	27.08

表-2

ρ_0	潜り	2.5cm	12.5cm	22.5cm	32.5cm	42.5cm
P_0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
P_0	—	0.946	0.834	0.846	0.806	0.794
μ	—	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
K	51.56	49.07	44.80	36.48	26.65	23.57
u_0	4.01%	3.99%	4.21%	4.43%	4.65%	4.85%
B_0	20cm	20cm	20cm	20cm	20cm	20cm
F	00	-1504	-619	-650	-569	-583

と良い精度で測定する必要がある。表-3に $x=10\text{cm}$ での P の測定値をあげる。 $y=0.5\text{mm}$ がかなり小さい値を示している。これは進行する空気が、水脈と空気の境界から侵入するにがわかる。この分布も(2)式の Gauss 分布に近似することは、かなり無理があるが、計算の簡単のために Gauss 分布を用いた。図-4 図-5 に中心軸(=0)に沿う流速方向の流速分布を無次元化して、両対数グラフと片対数グラフにそれぞれプロットしてある。

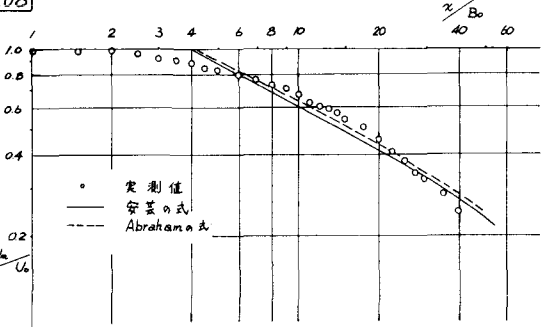


図-4 中心軸におう流速分布(両対数)

5. 計算結果と実験結果との比較

(4)式、(8)式に表-2の値を代入して、 u/u_0 の値を計算した。 ρ_0 と K は実験値であり、 μ の値は Abraham の文献に基づいて 0.5 と仮定した。この値は他の文献によると、Rouse(27)、安芸(28)の値が示されているが、各々の値について計算してみても、その解に大きな違いがみられなかった。ただ μ の値が小さい程、 u/u_0 の値が小さい、要するに速度の減衰が大きいことが示されたが、その差は小さく誤差の範囲内である。故にここでは Abraham の $\mu=0.5$ の値を採用した。この結果を図-4 に示す。Abraham と安芸の理論曲線は大体近い曲線を示している。若干 Abraham の方が、速度減衰が小さい。両者の理論曲線は両対数紙に直線にかなり近いゆるやかな曲線を示しているが、これにはよく実験値の方が曲がり方が大きい、これは

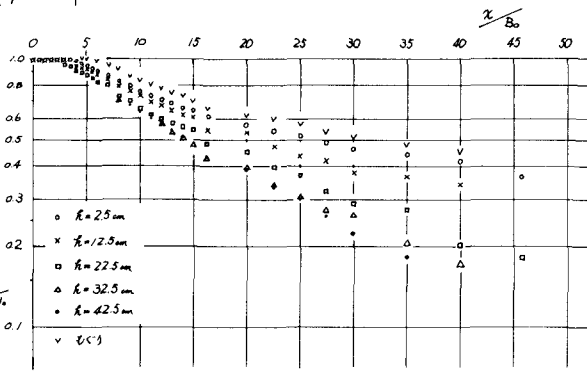


図-5 中心軸におう流速分布(片対数)

表-3

$y \backslash \rho_0$	2.5cm	12.5cm	22.5cm	32.5cm	42.5cm
0 cm	0.955	0.917	0.866	0.872	0.847
0.5 cm	0.952	0.904	0.899	0.848	0.863
1 cm	0.959	0.909	0.912	0.875	0.861
1.5 cm	0.981	0.914	0.928	0.913	0.905
2 cm	0.993	0.943	0.925	0.928	0.912
2.5 cm	1.000	0.934	0.938	0.953	0.930
3 cm	1.000	0.964	0.973	0.965	0.967

地下水脈中の空気泥が水塊と一体となり、運動、というものを仮定し、密度差の輸送として解析され

た安芸, Abrahamの理論式と本論文の実験結果とは、ある程度傾向はあっているが、まだまだ厳密さに欠けるのではないかと思われる。岩崎, 千秋の文献によると、空気混入噴流の場合は片対数グラフで直線になるとしているが、図-5をみると、落下高が大きい場合はかなり直線に近づくが、小さい場合は、落り噴流と同様に若干むしり曲線となってしまう。

6. おわりに

以上述べたことから、わかったことについて箇条書きにしてみる。

- 1) 落り噴流, 自由落下噴流についても *similarity* の仮定を用いても、差し障りはない。
 - 2) 向きをもち、拡散中は原点からの距離 x に比例するものとしてよい。
- 上の2つのことから、 $u_{1m} = c \cdot K^{1/2} x^{1/2}$ と仮定することは妥当である。
- 3) K の値は、落下高がなわう空気混入量が増加するにつれて、減少することがわかる。これは、空気混入量が増加すると、落下水塊の拡がりが大きくなることを示している。
 - 4) 安芸, Abrahamの理論式と実験結果を比較してみると、両者の理論式が両対数紙で、かなり直線に近い曲線があるのにくらべて、実験直線はほとんど傾斜はあっているが、曲線のまわりが大きく、まだまだ正しい結果とはいえない。

今後の課題として、密度 ρ の値をもう少し精度で決定すること、底面の影響が入らないように、流水槽の水深を大きくすること、そして、一般の密度の異なる液体の噴流と空気混入流の場合の拡散が異なる点を十分考慮に入れる必要があるのではないかと思われる。最後に本論文の作製にあたり、総括実験に協力して頂いた東北大学校官、御花政孝氏に感謝の意を表します。

7. 参考文献

- 1) Straub, Lorenz, G., and Lamb, O.P. "Experimental Studies of Air Entrainment in Open Channel Flow." Trans. A.S.C.E. Vol 121, pp 33-44, 1956.
- 2) 安芸剛一, "自由落下水のミクシオン効果に関する研究," 電力中央研究所研究報告, No. 5777, 1957.
- 3) Aomani, G. "Jet Diffusion in Stagnant Ambient Fluid." Delft Hydraulics Laboratory Publication, No. 29, 1953.
- 4) 岩崎敏夫, 千秋信一, "静水中に落下する水流の実験" 土木学会誌 38巻 8号, 昭和28年.