

京都大学工学部 正員 ○細田 尚 京都大学防災研究所 正員 井上和也
 京都大学工学部 福住 晃

1. はじめに：本研究は、発電所放水路系および下水道網などの地下水路系において生ずる管路・開水路共存状態の非定常流解析法について、基本的な現象を例として取り上げ考察したものである。対象とした現象は、図-1に示したような水で満たされた管路への空気泡の浸入過程であって、空気泡先端の伝播と水面形の変化を再現するための解析法を示すとともに、実験結果と比較することにより解析法の検証を試みる。

2. 解析法の概要：数値解析モデルの基礎式として、水の流れに関する開水路・管路状態の連続式と運動方程式および空気の流れに関する連続式と運動方程式を考える。座標系および記号の説明を図-2に示す。

水の流れ：

(開水路状態)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{p_a}{\rho} \right) - \frac{p_a}{\rho} \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (2)$$

(管路状態)

$$\frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{gD^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{p_D}{\rho} \right) = -2 \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (4)$$

空気の流れ

$$\frac{\partial h_a}{\partial t} + \frac{\partial M_a}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial M_a}{\partial t} + \frac{\partial u_a M_a}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h_a \frac{p_a}{\rho_a} \right) - \frac{p_a}{\rho_a} \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

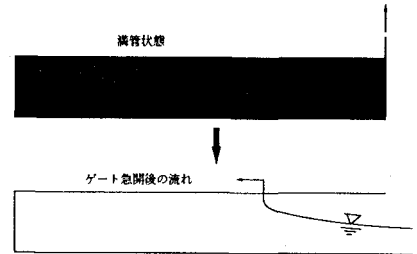


図-1 対象とする現象

ここに、 x ：空間座標、 t ：時間、 h ：水深、 M ：水の単位幅流量フラックス、 u ：水の流速、 ρ ：水の密度、 p_D ：管路状態の天端 ($y = D$) での圧力、 h_a ：空気流の厚さ、 M_a ：空気流の単位幅流量フラックス、 u_a ：空気の流速、 p_a ：空気の圧力、 ρ_a ：空気の密度、 τ_{bx} ：水流による底面せん断応力で Manning 則で評価する。

数値解析法としてはコントロール・ボリューム法を用いる。離散化にともなう水理量の定義位置ならびに解析の手順については、参考文献 [1] を参照されたい。ただし、空気泡先端近傍 (図-3の点C) の圧力を Benjamin [2] が用いたよどみ点に関するベルヌーイ式 (7) で評価する。(7) 式中 c は先端の伝播速度であり、(8) 式で評価した。

$$\frac{p_{DC}}{\rho} = \frac{p_{aB}}{\rho} - \frac{c^2}{2} \quad (7)$$

$$c = \alpha \frac{M_{II} - M_I}{h_{aI}} \quad (\alpha : \text{係数で1とした。}) \quad (8)$$

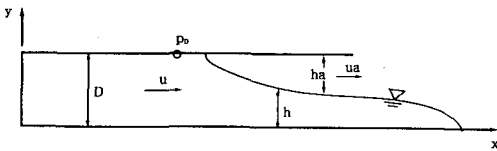


図-2 座標系と記号の説明

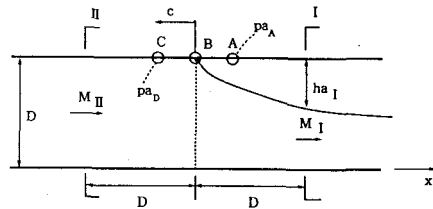


図-3 よどみ点圧力処理の説明

3. 実験の概要： 解析法を検証するために水理実験を行った。実験は図-4に示した幅5cm、長さ2m、高さ10cmの亚克力製水槽を用いて行われた。水槽の中央に仕切板を設置し、水槽の左半分を満管状態とする。その後、板を瞬間的に取り除くことにより大気泡を浸入させ、ビデオおよび写真撮影を行うことで水深変化を計測した。大気泡の浸入過程の一例を図-5に示した。

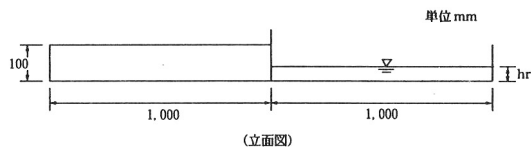


図-4 実験水槽

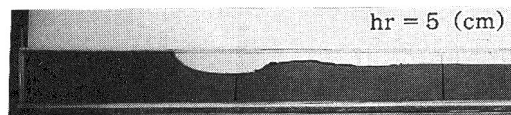


図-5 空気泡の浸入過程

4. 解析結果と実験結果の比較： 図-4の水深 h_r を0、5および7 (cm) に変化させて行った実験結果と、実験条件に合わせて行った解析結果を比較することにより、解析モデルの検証を試みる。図-6に $h_r = 0$ と5 (cm) の場合のゲート急開後1.2 (sec) の水深分布を示した。計算結果と解析結果はほぼ一致している。図-7には $h_r = 7$ (cm) の場合を示したが、空気泡先端近傍の波が増幅し先端に着水したため、以後計算不能になった。この波の増幅は水面と空気圧の相互作用によって生じると考えられる。そこで、実用的な観点から計算不能の状況を避けるために、空気圧分布を計算せずに空気圧は常に大気圧とし、よどみ点圧力処理のみ施した計算結果を図-8に示した。先端の伝播速度が実験結果より早く、実験結果との適合性は悪くなるが、 $h_r = 7$ (cm) の場合にも計算不能にならず、実用的には有効な方法と考えられる。

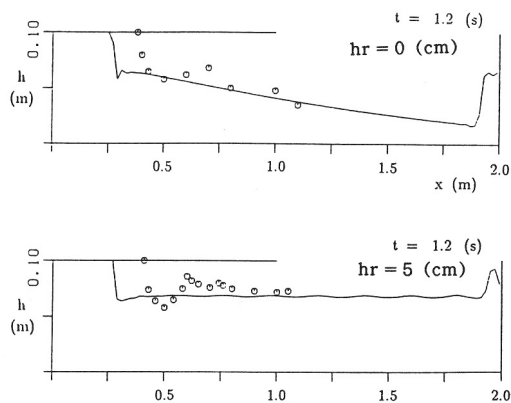
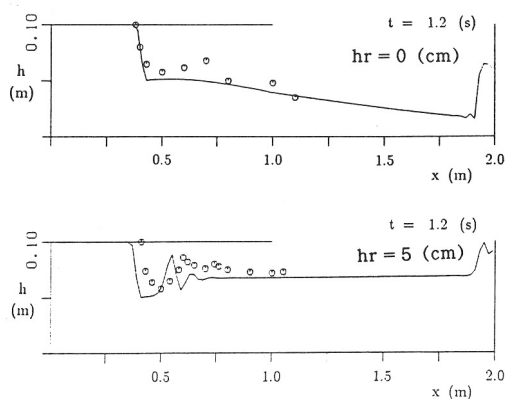


図-6 水深分布の比較 ($h_r = 0, 5$ (cm) の場合)

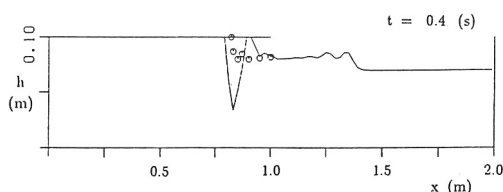


図-7 水深分布の比較 ($h_r = 7$ (cm) の場合)

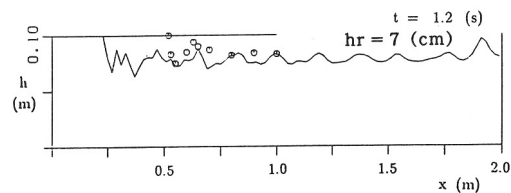


図-8 よどみ点処理のみ施した場合の水深分布の比較

参考文献：[1] 細田・井上・岩佐：水工学論文集第36巻，pp.317 - 322，1992，[2] Benjamin, T.B. : J.F.M., Vol.31, pp.209 - 248, 1968.