

II-310

空気が閉じ込められている地下放水路の流れの数値計算

東海旅客鉄道 正会員 梅田 博志 早稲田大学理工学部 フェロー 鮎川 登
早稲田大学大学院理工学研究科 学生会員 三戸 孝延
荏原製作所 浅水 高広 荏原総合研究所 後藤 正典

1. はじめに

地下放水路の流れは水の流入開始後しばらくは開水路の流れであるが、流入が続くと管路の流れに遷移する。実験によると、開水路の流れから管路の流れに遷移するときに、管路内に空気が閉じ込められる現象が観察された。本研究では、このように被圧された空気が管路内に閉じ込められている場合の地下放水路の流れをスロットモデルを用いて解析することを試みた結果について述べる。

2. 管路内の空気の閉じ込め

図1に示すような塩化ビニル製の実験水路を用いて行った実験では、空気の閉じ込めは次のように生じることが観察された。流入立坑から管路内に水が流入すると、段波が発生し、排水立坑に向かって伝播する。排水立坑に達すると、反射し、流入立坑に向かい、流入立坑に達すると、再び反射し、排水立坑に向かう。このように反射を繰り返しながら管路内の水深が増加していく。水深が大きくなると、反射段波により立坑の水位が管路の頂点より上になり、図1(a)に示すように、管路の断面が塞がれるようになることがある。そのような状態になると、数秒後あるいは10数秒後に他の立坑の水位も管路の頂点より上になり、図1(b)に示すように、空気が管路内に閉じ込められた状態の管路の流れになる。

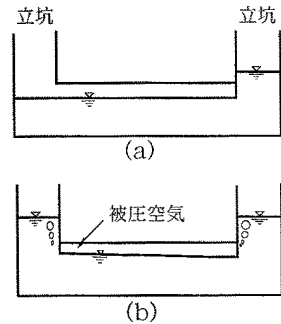


図1 空気の閉じ込め

3. 空気が閉じ込められている地下放水路の流れの数値計算

管路内に空気が閉じ込められている流れをスロットモデルを用いて解析する。スロットモデルは、管路において生ずる開水路状態と管路状態を遷移する流れを解析するために、Preissmannによって提案されたモデルで、図2に示すように、管路の頂部に幅 B_s のスロットを取り付けた仮想断面を考え、管路の流れを開水路の流れとして扱うように工夫されたモデルである。管路内に空気が閉じ込められている場合には、図3に示すように、管路壁面と被圧空気で構成される閉断面に幅 B_s のスロットを取り付けた断面とする。

管路における開水路状態と管路状態を遷移する流れをスロットモデルで解析する場合の支配方程式は次のようである。

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad (2)$$

ここで、 Q は流量、 A は流水断面積、 h は開水路流れのときは水深、管路流れのときは圧力水頭、 B は開水路流れのときは水面幅、管路流れのときはスロット幅 B_s 、 S_0 は水路勾配、 S_f は摩擦勾配、 g は重力の加速度である。

図3に示すような空気が管路内に閉じ込められている場合のスロットの幅 B_s は次式で与えられる。

$$B_s = gA_w / c^2 \quad (3)$$

ここで、 A_w は管路断面内の水の部分の面積、 c は圧力波の水中伝播速度、 g は重力の加速度である。

図3に示すような断面の水路の流れにおける圧力波の伝播速度 c は、管路壁の弾性および管路内に閉じ込められた空気と水の圧縮性と立坑からの空気の排出の影響を考慮して導かれた次式で算出する¹⁾。

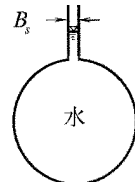


図2 スロットモデル

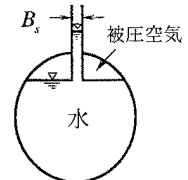


図3 管路内に空気が閉じ込められている場合の仮想断面

$$c = \sqrt{\frac{K_w}{\rho_w} \left/ \left\{ 1 + \left(1 + \beta K_a \right) \frac{K_w}{K_a} \frac{A_a}{A_w} + \frac{K_w}{E} \frac{D}{\delta} \frac{A_o}{A_w} \right\} \right.} \quad (4)$$

ここで、 ρ は密度、 K は体積弾性係数で、下付添字 w および a はそれぞれ水および空気を表す。 A_w は管路断面内の水の部分の面積、 A_a は管路断面内の空気の部分の面積、 A_o は管路の断面積、 D は管路の内径、 δ は管路の壁厚、 E は管路壁の弾性係数、 β は立坑からの空気の排出の影響を表す係数である。

立坑の水位は立坑についての連続方程式

$$F_{in} \frac{dH_{in}}{dt} = Q_{in} - Q_1, \quad F_{out} \frac{dH_{out}}{dt} = Q_N - Q_{out} \quad (5)$$

から求める。ここで、 H は水位、 F は立坑の断面積で下付添字 in は流入立坑、 out は流出立坑の値を表わす。 Q_{in} は流入流量、 Q_{out} は排水流量、 Q_1 は流入立坑から管路への流量、 Q_N は管路から排水立坑への流量を表わす。

解析の対象とした流れは、流入立坑からの流入流量と排水立坑からの排水流量を図4(a)に示すように設定した場合に生ずる開水路の流れから管水路の流れに移した後に再び開水路の流れに移す流れで、管水路状態の流れのときには管路内に空気が閉じ込められている流れである。

実験によると、図1の(a)から(b)の状態に移る時間は圧力波が立坑まで伝播するのに要する時間にほぼ等しかったので、立坑内の水位上昇によって生じた圧力上昇は、図1(a)の状態でも、開水路状態で水位の変化として伝播するのではなく、管水路の状態でも圧力波(粗密波)となって伝播するものと考え、計算は開水路流れの状態から始め、いずれか一方の立坑の水位の計算値が管路の頂点より上になり、図1(a)の状態になった時点で管水路の流れになったとして円形断面を図3に示すような断面に換えて行った。

スロットモデルによる流れの解析では、式(1)および式(2)を4点陰差分法により差分化し、計算断面間隔 Δx を1.22m、計算時間間隔 Δt を1.0secとして数値解を求めた。なお、実験水路の諸元は、管の内径20cm、壁厚0.8cm、長さ122m、平均勾配1/5,000、流入立坑の内径36cm、排水立坑の内径60cmであり、塩化ビニル管の弾性係数は $2.7 \times 10^9 \text{ Pa}$ 、水の密度は $1,000 \text{ kg/m}^3$ 、水の体積弾性係数は $2.2 \times 10^9 \text{ Pa}$ 、空気の体積弾性係数は $1.4 \times 10^5 \text{ Pa}$ とした。

計算結果の一例として流入流量と排水流量を図4(a)に示すように設定した場合の立坑の水位の時間変化について計算値と実験値を比較して図4(b)(c)に示す。なお、図4(b)(c)には参考のために、空気の閉じ込めを考慮しない場合および空気の立坑からの排出の影響を考慮しない場合($\beta = 0$)の計算値も示した。

図4(b)(c)によると、管路内の被圧空気の状態を考慮しなかったり、立坑からの空気の排出の影響を考慮しないで $\beta = 0$ とすると、計算値と実験値は一致しないが、管路内の被圧空気の状態を考慮し、立坑からの空気の排出の影響を考慮して β の値を適当に定めると(この場合は $\beta = 2.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ とすると)、計算値を実験値とほぼ一致させることができることがわかる。なお、管路内の圧力水頭についても同様の結果が得られた。

4. おわりに 被圧された空気が管路内に閉じ込められている場合の地下放水路の流れをスロットモデルを用いて解析した結果、圧力波の水中伝播速度を算定するさいに立坑からの空気の排出の影響を考慮するために導入された係数 β の値を適当に仮定すると、スロットモデルによりそのような流れを解析しうることが示された。係数 β の値の決め方を提示することが今後の課題である。

参考文献 1) 鮎川登・谷澤克也・新井和敏：空気が閉じ込められている地下放水路の流れにおける圧力波の伝播速度、土木学会論文集、No.579/II-41、pp191~196、1997。

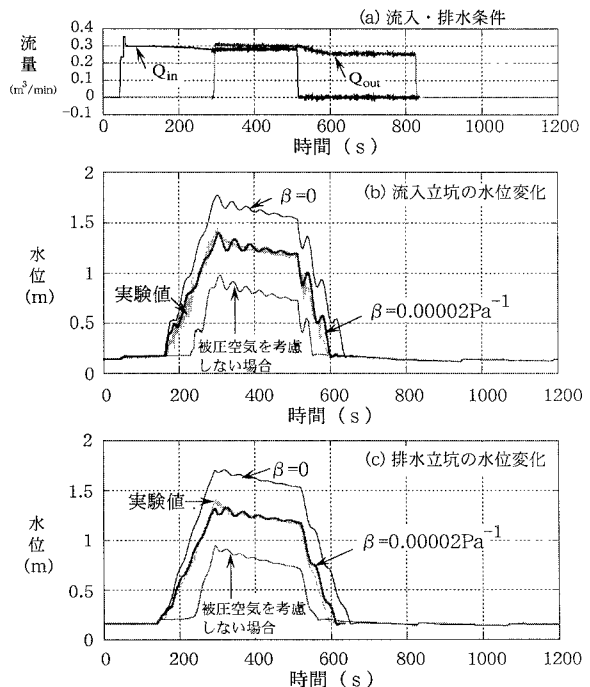


図4 立坑の水位の計算値と実験値の比較