

トンネル内に閉じ込められた空気が地下放水路の流れに及ぼす影響の解析

日本工営

正 会 員 三戸 孝延

早稲田大学大学院理工学研究科

学生会員 町山 友和

早稲田大学理工学部

フェロー 鮎川 登

荏原総合研究所

後藤 正典

1. はじめに 地下放水路を模した実験によると、流れが開水路状態から管水路状態に移行するさいに管路内に空気が閉じ込められ、一部は立坑から排出される現象が観察された。本報文では、管路内に空気が閉じ込められている地下放水路の流れをスロットモデルを用いて解析し、管路内に閉じ込められた空気の存在および立坑からの空気の排出が地下放水路の流れに及ぼす影響に関して考察した結果について述べる。

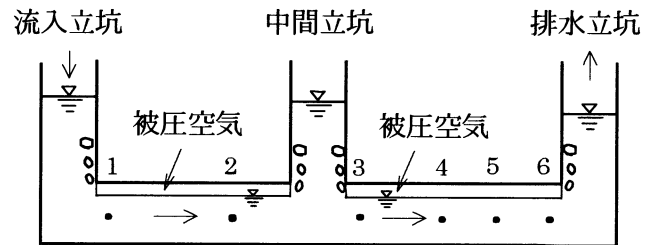


図1 実験水路

2. 実験の概要 実験は内径 20cm、長さ 122mの塩化ビニル製の円管路の両端と途中に立坑を設置した図1に示すような水路を用いて行った。水路の平均勾配は 1/5000 である。流入立坑、中間立坑および排水立坑の内径はそれぞれ 36cm、20cm、60cm である。実験は、管路内にある水深で水を貯めておいた状態で、流入立坑から一定流量の水を流入させ、管路内の流れが開水路状態から管水路状態に移行し、排水立坑の水位がある値に達した時点で、流入流量と同じ流量の水を排水し始め、流れがほぼ定常状態に達した後に流入を停止し、排水だけにし、管路内の流れが管水路状態から開水路状態に移行した後に終了した。実験では、流入流量、排水流量、各立坑の水位および管路内の水深と圧力を測定した。図1中の・は水位計と圧力計の設置位置を表わす。

3. スロットモデル スロットモデルは、管路において生ずる開水路状態と管水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、管水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。

スロットの幅は $B_s = g A_0 / c^2$ で与えられる。ここで、 A_0 は管路の断面積、 c は圧力波の水中伝播速度、 g は重力の加速度である。空気が閉じ込められている管路の流れをスロットモデルを適用して解析するために、図3に示すように、管路壁面と被圧空気面で構成される閉断面にスロットを取り付けた断面を用いることを考える。この場合のスロットの幅は $B_s = g A_w / c^2$ で与えられる。ここで、 A_w は流水断面積である。圧力波の水中伝播速度 c は、管路壁面の弾性、水の圧縮性、被圧空気の圧縮性および立坑からの空気の排出を考慮して導かれた次式¹⁾で算定する。

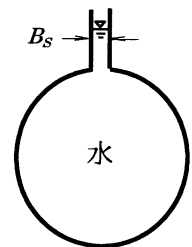


図2 スロットモデル

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

ここで、 K_w および K_a は水および空気の体積弾性係数、 A_w および A_a は水および空気の占める面積、 ρ_w は水の密度、 D は管の内径、 δ は管の壁厚、 E は管壁の弾性係数である。 β は立坑からの空気の排出の影響を表す係数で、次式で定義される。ただし、 p は圧力である。

$$\partial A_a / \partial p = -\beta A_a \quad (2)$$

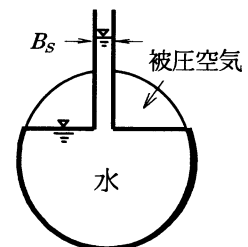


図3 空気が閉じ込められている場合のスロットモデル

4. 支配方程式 流入流量と排水流量が与えられる場合の立坑の水位および管路内の流量と水深、圧力は次のような立坑の連続方程式およびスロットモデルによる管路内の流れの連続方程式と運動方程式を解くことにより求められる。

立坑の連続方程式：

$$A_{Si} \frac{dH_{Si}}{dt} = Q_{Si} + Q_{Ni-1} - Q_{Li} \quad (3)$$

ここで、 H_{Si} と A_{Si} は*i*番目の立坑の水位と断面積、 Q_{Si} は*i*番目の立坑への流入流量、 Q_{Ni-1} は*i* - 1番目の管路部から*i*番目の立坑への流入流量、 Q_{Li} は*i*番目の立坑から*i*番目の管路部への流出流量である。

管路内の流れの支配方程式

$$\text{連続方程式： } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4), \quad \text{運動方程式： } \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad (5)$$

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、管水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、管水路流れのときはスロット幅、 S_0 は水路勾配、 S_f は摩擦勾配である。

5. トンネル内に閉じ込められた空気が地下放水路の流れに及ぼす影響 流入立坑からの流入流量および排水立坑からの排水流量を境界条件とし、流入開始前の管路内の水深と流量を初期条件として、式(3)～(5)を解いて立坑の水位および管路内の流量と水深あるいは圧力を求めることになるが、そのさいに管路内における空気の影響を考慮することが必要になる。管路内における空気の影響は図3に示すような断面を想定すること(管路内に空気が存在すると、その分だけ流水断面積が減少する)、および式(1)により圧力波の水中伝播速度を算定することにより考慮され、スロット幅に反映される(圧力波の水中伝播速度が小さくなり、スロット幅が大きくなる)。管路内の空気の立坑からの排出の影響としては圧力波の水中伝播速度の減少および流水断面積の増加の2つが考えられる。管路内の空気の立坑からの排出が圧力波の水中伝播速度に及ぼす影響は式(1)の β のかかる項により考慮され、スロット幅に反映される(管路内の空気が立坑から排出されると、圧力波の水中伝播速度が小さくなり、スロット幅が大きくなる)。立坑からの空気の排出による流水断面積の増加は式(2)により算定される。式(2)によると、立坑からの空気の排出による管路内の空気の断面積の減少量は $\Delta A_a = \beta A_a \Delta p$ (ただし、減少量を正とする)で与えられるので、流水断面積の増加量は $\Delta A_w = \Delta A_a = \beta A_a \Delta p$ と表示される。

ここでは、管路内に空気が閉じ込められないとして図2の断面を用いて計算する場合(ケースA)、管路内の空気の影響を考慮し、図3の断面を用いるが、立坑からの空気の排出はないものとし、 $\beta=0$ として計算する場合(ケースB)、管路内の空気の影響を考慮し、図3の断面を用い、立坑からの空気の排出の影響は圧力波の水中伝播速度に及ぼす影響だけを考慮し、流水断面積の増加は考慮しない場合(ケースC)および管路内の空気の影響および立坑から空気の排出の影響として圧力波の水中伝播速度の減少と流水断面積の増加をともに考慮する場合(ケースD)の計算結果を比較することにより管路内における空気の影響および管路内の空気の立坑からの排出が地下放水路の流れに及ぼす影響について検討した。その一例を図4に示す。図4には実験値も示してある。図4によると、ケースAの場合は立坑の水位および管路内の圧力水頭の計算値は実験値より小さくなるが、ケースBの場合には計算値は実験値より大きくなることわかる。ケースC($\beta=1.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$)の場合の計算値はケースBより小さくなり、実験値に近づき、ケースDの計算値は実験値とほぼ一致するようになる。ケースAとケースDの計算結果を比較することにより、管路内に空気が閉じ込められると、立坑の水位および管路内の圧力が上昇することがわかる。

参考文献 1) 鮎川 登・谷沢克也・新井和敏：土木学会論文集、No.579/II-41、pp.191～196、1997。

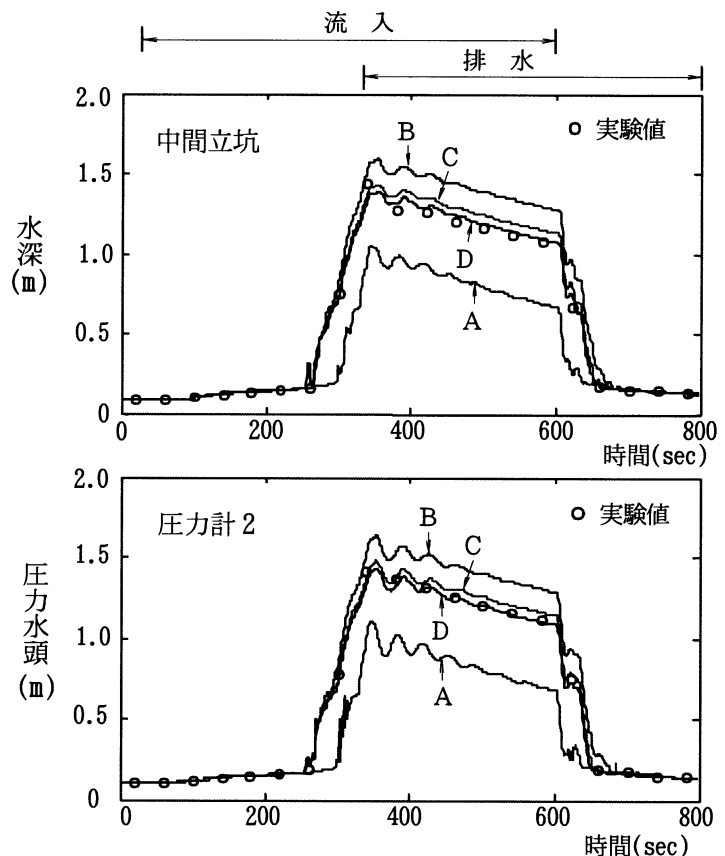


図4 管路内に閉じ込められた空気が立坑の水位および管路内の圧力に及ぼす影響