

II-79

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

早稲田大学大学院理工学研究科 学生会員 三戸 孝延
早稲田大学理工学部 フェロー 鮎川 登*
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

地下放水路を模した実験水路によると、地下放水路では流れが開水路状態から管水路状態に移行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。本報文では、管路内における空気の閉じ込め過程と管路内に空気が閉じ込められている地下放水路の流れの解析法に関して考察した結果について述べる。

2. 地下放水路における空気の閉じ込め過程

図1に示すような平均勾配1/5000に設置された内径20cm、長さ122mの塩化ビニル製の管路の両端に、内径36cmの流入立坑と内径60cmの排水立坑を取り付けた水路を用いて実験を行った。

実験は管路内に予めある水深に水を入れておいた状態で、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た後に、排水立坑から流入流量と同じ流量の水を排水し始め、管路内に流れがほぼ定常状態になった時点で流入立坑からの流入を停止し、排水のみの状態にし、管路内の流れが管水路状態から開水路状態に戻った後に終了した。実験では、流量を4通りに変え、各実験ごとに流入立坑と排水立坑の水深と管路の6断面で圧力と水深を測定した。

管路内の流れが開水路状態から管水路状態に移行する間の管路の測定断面3における圧力水頭と水深の測定例(流入流量 $0.05\text{m}^3/\text{min}$ の場合)を示すと、図2のようになる。図2によると、水深が小さいうちは圧力水頭と水深は一致するが(状態Ⅰ)、水深が大きくなると、圧

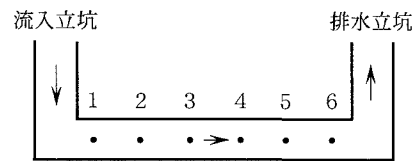


図1 実験水路

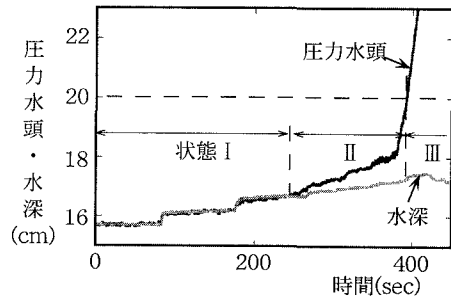


図2 圧力水頭と水深の時間変化

力水頭が水深より大きくなり(状態Ⅱ)、水深が管路の内径(20cm)近づくと、圧力水頭が急激に増加すること(状態Ⅲ)が認められる。状態Ⅰは流れが開水路状態にあることを示し、状態Ⅱは管路内の空気が立坑の空気と通じているにもかかわらず、管路内の空気が被圧されていることを示している。これは水深が大きくなると、管路内の空気が立坑に排出されにくくなるためであると考えられる。状態Ⅲは管路内に空気が存在するが、流れは管水路状態になることを示している。

管路内に空気が閉じ込められた状態で、管路内の流れが管水路状態の流れに移行する状況は流入のさせ方によって異なる。水を徐々に流入させる場合には、排水立坑側から満管状態になり、流入立坑側の水位がある値(本実験では19cm程度)以上になるか、あるいは両方の立坑側の水深がある値(本実験では19.5cm程度)以上になると、立坑の水深が急激に上昇し、管路内に空気を閉じ込めた状態で管路内の流れは管水路状態になる。水を急激に流入させる場合には、段波や波が発生し、段波や波の伝播により流入立坑側か排水立坑側のどちらか一方で満管状態になり、その時に他方の側の水深がある値(本実験では17~18cm程度)以上になっていると、流入立坑と排水立坑の水深が急激に上昇し、管路内に空気を閉じ込めた状態で管路の流れは管水路状態になる。なお、管路内に閉じ込められた空気は立坑から徐々に排出

されるが、ある量の空気は管路内に残された。

3. 地下放水路の流れの解析法

開水路状態と管水路状態を遷移する流れはスロットモデルにより解析される。スロットモデルは管路の頂部に幅 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、空気が閉じ込められている地下放水路の流れの仮想断面は図3のようになる。

スロット幅 B_s は $B_s = gA_w/c^2$ で与えられる。ここで、 A_w は流水断面積、 c は圧力波の水中伝播速度、 g は重力の加速度である。図3に示すような断面の流れにおける圧力波の伝播速度 c は、管路壁の弾性、水と空気の圧縮性および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定される¹⁾。

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

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。

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する場合には、開水路状態の流れから管水路状態の流れに移行する時点で管路の断面を図3に示すような仮想断面に変えて流れを計算することになるので、仮想断面に変える時点を定めることが必要である。また、仮想断面のスロット幅 B_s を決めるために、式(1)に含まれる係数 β の値を定めることが必要である。さらに、地下放水路に閉じ込められて空気は立坑から排出されるために、空気の占める断面積 A_a が減少し、その分流水断面積 A_w が増加することになるので、立坑からの空気の排出による流水断面積の変化を考慮する必要がある。

立坑からの空気の排出の影響を表す係数 β は $\partial A_a / \partial p = -\beta A_a$ により定義されているので、立坑からの空気の排出による空気の占める断面積の減少量は $\Delta A_a = -\beta A_a \Delta p$ で与えられることになり、立坑からの空気の排出による流水断面積の増加量は $\Delta A_w = -\Delta A_a = \beta A_a \Delta p$

と表示されることになる。すなわち、係数 β の値が与えられると、管路内の水圧の変化量 Δp を計算することにより空気の排出による流水断面積の増加量 ΔA_w を算定することができることになる。開水路状態の流れから管水路状態の流れに移行する時点と管路内に閉じ込められた空気の排出終了時点および係数 β の値を理論的に定めることは現在のところできないので、これらを実験結果に基づいて定め、スロットモデルを用いて空気が閉じ込められている地下放水路の流れを解析し、実験値と比較した。その結果の例を図4に示す。図4によると、計算値と実験値はほぼ一致しており、開水路状態の流れから管水路状態の流れに移行する時点と管路内に閉じ込められた空気の排出終了時点および係数 β の値を適当に定めることができれば、スロットモデルにより空気が閉じ込められている地下放水路の流れを解析することができるものと考えられる。

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。

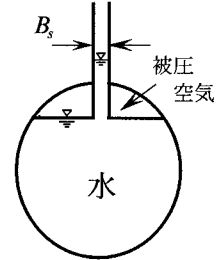
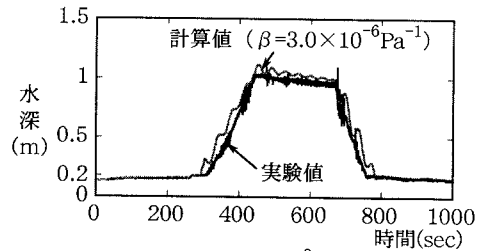
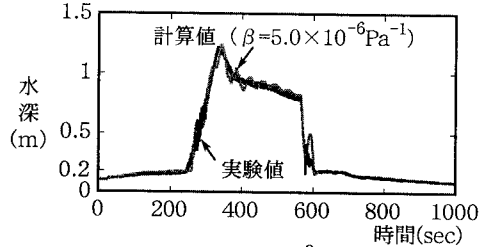


図3 スロットモデル



(a) 流入流量0.2m³/minの場合



(b) 流入流量0.5m³/minの場合

図4 流入立坑の水深の計算値と実験値の比較