

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

鮎川 登¹・梅田博志²・三戸孝延³・後藤正典⁴

¹フェロー 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

²正会員 工修 東海旅客鉄道株式会社

³学生会員 早稲田大学大学院 理工学研究科建設工学専攻

⁴株式会社荏原総合研究所 流体技術開発室(〒251-8502 神奈川県藤沢市本藤沢 4-2-1)

流れが開水路状態から管水路状態になり、再び開水路状態に戻る地下放水路の流れで、開水路状態から管水路状態に移るさいに、トンネル内に空気が閉じ込められる流れの数値計算法について検討した。まず、実験により空気の閉じ込めの発生過程を観察し、空気の閉じ込めが発生する時点を決める方法を示した。つぎに、トンネル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適用して解析する方法を提示し、立坑の水位およびトンネル内の水深あるいは圧力水頭の計算値と実験値を比較し、本論文で提示した解析法の妥当性を検討した。

Key Words: underground diversion channel, pile flow, slot model, numerical analysis

1. 序論

大阪府寝屋川流域、埼玉県の中川流域では、都市河川の治水対策の一環として地下放水路の建設が構想され、施工されている。

地下放水路の設計や運用計画の策定にあたっては、地下放水路の流れの挙動を把握することが必要である。

地下放水路は、図-1に示すように、立坑とトンネルで構成されている。

地下放水路の流れは、流入立坑への流入条件と排水立坑からの排水条件に応じて、開水路状態の流れ、管水路状態の流れおよび開水路状態と管水路状態を遷移する流れの3通りになる。なお、管水路状態の流れでは空気がトンネル内に閉じ込められる場合がある。

開水路状態の流れおよび管水路状態の流れは、それぞれ、開水路および管水路の非定常流の支配方程式に基づいて解析され^{1), 2)}、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を用いて解析される^{1), 3)}。

本論文では、トンネル内に空気が閉じ込められている場合の地下放水路の流れの数値計算法について検討する。

トンネル内における空気の閉じ込めは流れが開水路状態から管水路状態に移行するさいに生ずる。本論文

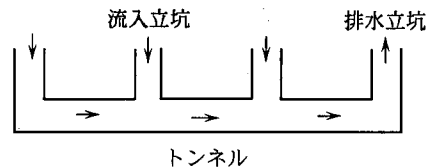


図-1 地下放水路

では、まず実験により空気の閉じ込めの発生過程を観察し、空気の閉じ込めが発生する時点を決める方法について考察する。つぎに、トンネル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適用して解析する方法について述べる。最後に、トンネル内に空気が閉じ込められている地下放水路の流れのスロットモデルによる数値計算結果と実験値とを比較し、本論文で提示した数値計算法の妥当性について検討する。

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に立坑を設置した図-2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

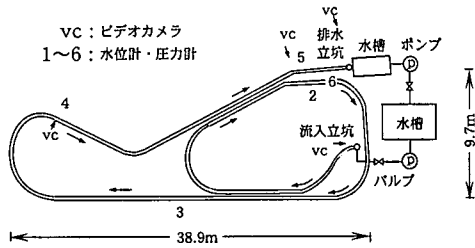


図-2 実験水路

坑の内径は36cm, 排水立坑の内径は60cmである。立坑には水位を測定するために、水位計と圧力計を設置した。管路部には水位と圧力を測定するために、図-2に示す6地点に水位計と圧力計を設置した。また、流れの状況を観察するために、流入立坑と排水立坑および管路部の2箇所にビデオカメラを設置した。流入流量および排水流量は電磁流量計で測定した。

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、流れが定常状態にほぼ達した後に流入を停止し、排水だけの状態にし、管路内の流れが管水路状態から開水路状態に移行した後に終了した。

3. 管路内の空気の閉じ込め

実験は初期水深を13~16cm, 流入流量・排水流量を0.2, 0.3, 0.4および0.5 m^3/min と変えて行ったが、いずれの実験においても管路内の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る現象が発生した。

実験によると、流入流量が0.2および0.3 m^3/min の場合の管路内における空気の閉じ込めの過程はつぎのように観察された。流入立坑から水が流入すると、図-3に示すように、段波が発生し、排水立坑に向かって伝播し、排水立坑に達すると、反射し、流入立坑に向かって伝播する。流入立坑に達すると、反射し、再び排水立坑に向かって伝播する。このように段波の伝播、反射を繰返しながら管路内の水深が増大していく。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も上になり、図-4(a)に示すように、管路の断面が塞がれるようになる。そのような状態になると、数秒後ないし10数秒後に他の立坑の水位も管路の頂点よりも上になり、図-4(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水路の流れになる。流入流量が0.4および0.5 m^3/min の場合には、水の流入により水面に発生した波が立坑で反射し、立坑内で重複波が形成されることによって管路の断面が

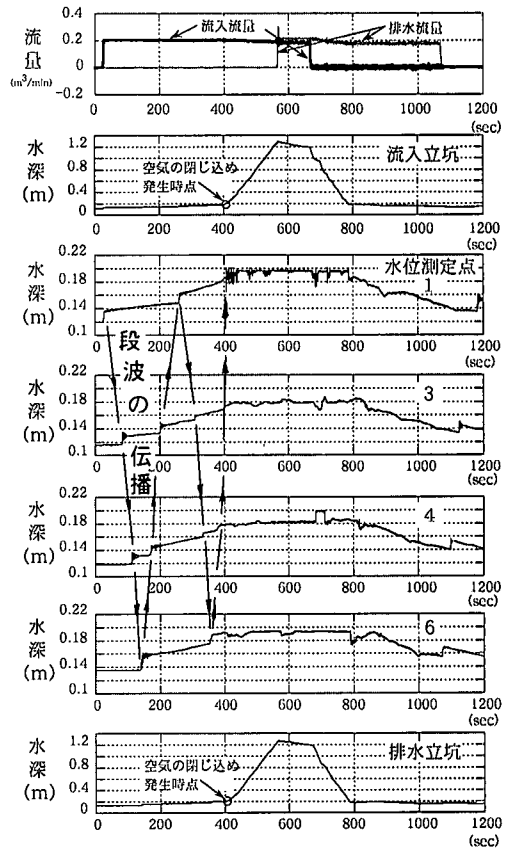


図-3 段波の伝播と空気の閉じ込め

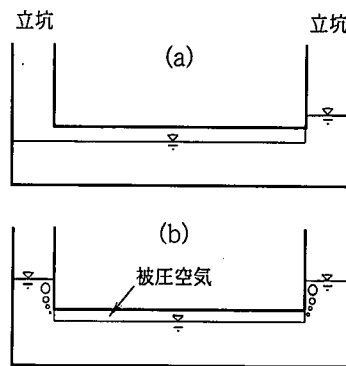


図-4 地下放水路内の空気の閉じ込め

塞がれ、管路内に空気が閉じ込められる。

なお、図-4(a)の状態から図-4(b)の状態になるのに要する時間は数秒ないし10数秒であるが、これは圧力波(水中の疎密波)が一方の立坑から他方の立坑まで空気が閉じ込められている管路の流れの中を伝播するのに要する時間にほぼ等しい(この場合の圧力波の伝播速

度は後出の式(10)によると、10～20m/s程度と推定される)。このことから図-4(a)の状態が生じた立坑の水位上昇(圧力上昇)は圧力波となって水中を伝播し、他の立坑に達して水位上昇を生じ、図-4(b)の状態になるものと推定される。すなわち、図-4(a)の状態になった時点で管路内の流れは管水路の流れとして扱えるものと考えられる。

4. 空気が閉じ込められている地下放水路の流れの解析

地下放水路の流れの解析の目的は、各流入立坑への流入条件と排水立坑からの排水条件および各立坑の初期水位と各トンネル部の初期水深、初期流量が与えられる場合に、各立坑の水位および各トンネル内の流量と水深(トンネル内の流れが開水路流れのとき)あるいは圧力水頭(トンネル内の流れが管水路流れのとき)を求めることである。

(1) 立坑の水位の計算

a) 支配方程式

立坑の水位は立坑についての連続方程式により計算される。図-5に示すような*i*番目の立坑についての連続方程式はつぎのようになる。

$$A_{si} \frac{dH_{si}}{dt} = Q_{si} + Q_{Ni-1} - Q_{ii} \quad (1)$$

ここで、 H_{si} は *i* 番目の立坑の水位、 A_{si} は *i* 番目の立坑の断面積、 Q_{si} は *i* 番目の立坑への流入流量、 Q_{Ni-1} は *i-1* 番目のトンネル部から *i* 番目の立坑への流入流量、 Q_{ii} は *i* 番目の立坑から *i* 番目のトンネル部への流出流量である。

b) 境界条件

式(1)により立坑の水位 H_{si} を計算するためには、境界条件として立坑への流入流量 Q_{si} を与えることが必要である。

なお、式(1)に含まれる立坑に接続するトンネル部の流量 Q_{Ni-1} および Q_{ii} はトンネル内の流れを解くことによって与えられる。

(2) トンネル内の流量および水深あるいは圧力水頭の計算

本論文では、トンネル内の流れとしては開水路状態の流れから管水路状態の流れになり、再び開水路状態の流れに戻る流れで、開水路状態から管水路状態に移行するさいに、トンネル内に空気が閉じ込められる流れを解析の対象にする。

流れの状態が開水路状態と管水路状態を遷移する

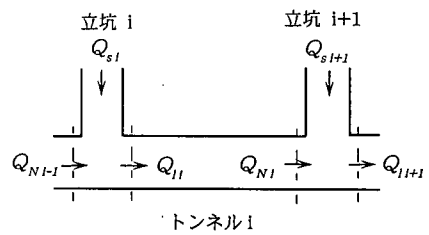


図-5 記号の説明図

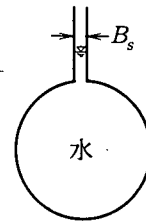


図-6 スロットモデル

管路の流れの解析にはスロットモデルが用いられる。

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-6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。

a) 支配方程式

開水路状態と管水路状態を遷移する管路内の流れを解析するために、スロットモデルで用いられる支配方程式は次のようである。

連続方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

運動方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad (3)$$

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 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。

摩擦勾配 S_f は次式で算定する。

$$S_f = \frac{f|Q|Q}{8gRA^2} \quad (4)$$

ここで、 R は径深、 f は抵抗係数である。

抵抗係数 f は流れが層流の場合は理論式、乱流の場合はColebrookの式により算定する。すなわち、

$$\text{層流: } f = \frac{64}{Re} \quad (5)$$

$$\text{乱流: } \frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 0.87 \ln \left(\frac{k_s}{2R} + \frac{18.7}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (6)$$

ここで、 $Re = 4vR/\nu$ はReynolds数、 ν は平均流速、 ν は水の動粘性係数、 k_s は相当粗度である。

スロット幅 B_s は次式で与えられる。

$$B_s = \frac{gA_0}{c^2} \quad (7)$$

ここで、 A_0 は管路の断面積、 c は圧力波の水中伝播速度である。

管水路の流れにおける圧力波の水中伝播速度 c は次式で与えられる。

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho} / \left(1 + \frac{K D}{E \delta} \right)} \quad (8)$$

ここで、 K は水の体積弾性係数、 ρ は水の密度、 E は管路壁の弾性係数、 D は管路の内径、 δ は管路の壁厚である。

管路内に空気が閉じ込められている管水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-7に示すように、管路壁面と被圧空気面と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を用いることを考える。

この場合の径深 R は、被圧空気面に作用する摩擦力は無視し、管路壁面に作用する摩擦力だけを考慮し、潤辺長を図-7の P のようにとり、 $R = A_w/P$ とする。ここで、 A_w は管路断面内の水の部分の面積(流水断面積)である。

スロット幅 B_s は次式で算定する。

$$B_s = \frac{gA_w}{c^2} \quad (9)$$

被圧された空気が閉じ込められている管水路の流れの圧力波の水中伝播速度 c は、鮎川ら⁴⁾がそのような流れをスロットモデルを適用して解析するために、管路壁の弾性、水の圧縮性、管路内に閉じ込められた空気(被圧空気)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いた次式により算定する。

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho} / \left\{ 1 + (1 + \beta K_a) \frac{K}{K_a} \frac{A_a}{A_w} + \frac{K D}{E \delta} \frac{A_0}{A_w} \right\}} \quad (10)$$

ここで、 K_a は空気の体積弾性係数、 A_a は管路断面内

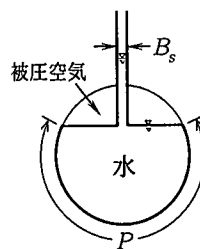


図-7 空気が閉じ込められている場合のスロットモデル

の空気の部分の面積、 β は立坑からの空気の排出の影響を表わす係数である。立坑からの空気の排出がないときは $\beta = 0$ とする。なお、空気が管路内に閉じ込められない場合には、 $A_a = 0$ 、 $A_w = A_0$ となるので、式(10)は式(8)になる。すなわち、式(10)は管路内に空気が閉じ込められる場合にも、閉じ込められない場合にも適用される。

管路断面内の流水断面積 A_w は空気が閉じ込められる時点における各断面の水深から算定する。その後、管路内に閉じ込められた空気が立坑から排出されると、管路断面内の空気の部分の面積 A_a は減少し、その分、流水断面積 A_w は増加する。立坑からの空気の排出による空気面積 A_a の変化を

$$\frac{dA_a}{dp} = -\beta A_a \quad (11)$$

と表示すると⁴⁾、立坑からの空気の排出による空気面積の減少量 ΔA_a は $\Delta A_a = -\beta A_a \Delta p$ と表示される。したがって、流水断面積の増加量 ΔA_w は $\Delta A_w = -\Delta A_a = \beta A_a \Delta p$ と表示される。すなわち、管路内に空気が閉じ込められる時点から後は、管路内の水圧の変化量 Δp に応じて流水断面積を変化させることになる。

開水路状態と管水路状態を遷移する地下放水路の流れをスロットモデルを適用して解析する場合には、トンネル内の流れの連続方程式(2)および運動方程式(3)を解いて、流量および水深あるいは圧力水頭を計算することになるが、そのためにはトンネル部の両端における水深あるいは圧力水頭を境界条件として与えることが必要である。

b) 境界条件

i) トンネル内の流れが開水路状態の流れである場合

トンネル内の流れが開水路状態の流れである場合には、 i 番目のトンネル部の両端(断面1と断面 N)における水深 h_i および h_{wi} は、それぞれ、立坑とトンネル部の断面1と断面 N に水頭損失を考慮してBernoulliの式をたてることにより導かれる次式で与える。

$$h_{li} = h_{si} + \alpha_{si} \frac{v_{si}^2}{2g} - \alpha_{li} \frac{v_{li}^2}{2g} - f_{eli} \frac{|v_{li}|v_{li}}{2g} \quad (12)$$

$$h_{Ni} = h_{si+1} + \alpha_{si+1} \frac{v_{si+1}^2}{2g} - \alpha_{Ni} \frac{v_{Ni}^2}{2g} + f_{eNi} \frac{|v_{Ni}|v_{Ni}}{2g} \quad (13)$$

ここで、 h_{si} 、 v_{si} 、 α_{si} は、それぞれ、 i 番目の立坑の水深、流速、エネルギー補正係数、 v_{li} 、 α_{li} は、それぞれ、 i 番目のトンネル部の断面1の流速、エネルギー補正係数、 f_{eli} は i 番目の立坑と i 番目のトンネル部の接合部の損失係数である。また、 h_{si+1} 、 v_{si+1} 、 α_{si+1} は、それぞれ、 $i+1$ 番目の立坑の水深、流速、エネルギー補正係数、 v_{Ni} 、 α_{Ni} は、それぞれ、 i 番目のトンネル部の断面 N の流速、エネルギー補正係数、 f_{eNi} は $i+1$ 番目の立坑と i 番目のトンネル部の接合部の損失係数である。

ii) トンネル内の流れが管水路状態の流れである場合

トンネル内の流れが管水路状態の流れである場合には、トンネル部の両端(断面1と断面 N)における圧力水頭 h_{li} および h_{Ni} は、それぞれ、つぎのように与える。

i 番目の立坑の水面から i 番目のトンネル部の入口直後の断面1まで管水路の非定常流の運動方程式を積分すると、断面1の圧力水頭 h_{li} を与える式として次式が得られる。

$$h_{li} = \frac{h_{si} - 0.5D_{li}}{g} \frac{dv_{si}}{dt} + h_{si} + \alpha_{si} \frac{v_{si}^2}{2g} + f_{si} \frac{h_{si} - D_{li}}{D_{si}} \frac{|v_{si}|v_{si}}{2g} - \alpha_{li} \frac{v_{li}^2}{2g} - f_{eli} \frac{|v_{li}|v_{li}}{2g} \quad (14)$$

ここで、 h_{si} 、 v_{si} 、 D_{si} 、 f_{si} 、 α_{si} は、それぞれ、 i 番目の立坑の水深、流速、内径、抵抗係数、エネルギー補正係数であり、 v_{li} 、 D_{li} 、 α_{li} は、それぞれ、 i 番目のトンネル部の断面1の流速、内径、エネルギー補正係数である。 f_{eli} は i 番目の立坑と i 番目のトンネルの接合部の損失係数である。

立坑内の流速 v_{si} は式(1)により次式で表示される。

$$v_{si} = -\frac{dH_{si}}{dt} = -\frac{Q_{si} + Q_{Ni-1} - Q_{li}}{A_{si}} \quad (15)$$

i 番目のトンネル部の出口直前の断面 N から $i+1$ 番目の立坑の水面まで管水路の非定常流の運動方程式を積分すると、断面 N の圧力水頭 h_{Ni} を与える式として次式が得られる。

$$h_{Ni} = \frac{h_{si+1} - 0.5D_{Ni}}{g} \frac{dv_{si+1}}{dt} + h_{si+1} + \alpha_{si+1} \frac{v_{si+1}^2}{2g} + f_{si+1} \frac{h_{si+1} - D_{Ni}}{D_{si+1}} \frac{|v_{si+1}|v_{si+1}}{2g} - \alpha_{Ni} \frac{v_{Ni}^2}{2g} + f_{eNi} \frac{|v_{Ni}|v_{Ni}}{2g} \quad (16)$$

ここで、 h_{si+1} 、 v_{si+1} 、 D_{si+1} 、 f_{si+1} 、 α_{si+1} は、それぞれ $i+1$ 番目の立坑の水深、流速、内径、抵抗係数、エネルギー補正係数であり、 v_{Ni} 、 D_{Ni} 、 α_{Ni} は、それぞれ、 i 番目のトンネル部の断面 N の流速、内径、エネルギー補正係数である。 f_{eNi} は i 番目の立坑と $i+1$ 番目のトンネルの接合部の損失係数である。

立坑内の流速 v_{si+1} は次式で表示される。

$$v_{si+1} = \frac{dH_{si+1}}{dt} = \frac{Q_{si+1} + Q_{Ni} - Q_{li+1}}{A_{si+1}} \quad (17)$$

なお、立坑内の水の運動を無視する場合には、式(14)、(16)は、それぞれ、次のように簡略化される。

$$h_{li} = h_{si} - \alpha_{li} \frac{v_{li}^2}{2g} - f_{eli} \frac{|v_{li}|v_{li}}{2g} \quad (18)$$

$$h_{Ni} = h_{si+1} - \alpha_{Ni} \frac{v_{Ni}^2}{2g} + f_{eNi} \frac{|v_{Ni}|v_{Ni}}{2g} \quad (19)$$

5. 計算値と実験値の比較

地下放水路の立坑の水位およびトンネル内の流量と水深あるいは圧力水頭は式(1)～(3)を解くことによって求められるが、解析解を求めることは困難であるので、数値解を求めることになる。

式(1)および式(2)、(3)の数値計算法としては種々の方法が提案されているが、ここでは、式(1)は前進差分、式(2)および式(3)は4点陰差分により近似し、数値解を求める。

計算は管路の両端に立坑を設置した図-2に示すような実験水路における流れを対象として行った。塩化ビニル製の管路の内径は20cm、壁厚は0.8cm、長さは122m、流入立坑の内径は36cm、排水立坑の内径は60cmである。計算では、塩化ビニル管の相当粗度は0.001mm、弾性係数は 2.7×10^9 Pa、水の密度は $1,000$ kg/m³、水の体積弾性係数は 2.2×10^9 Pa、空気の体積弾性係数は 1.4×10^9 Paとした。計算時間間隔 Δt は1sec、計算断面間隔 Δx は1.22mとした[式(2)および式(3)を陽差分法により数値計算する場合は Δt と Δx のとり方に制約条件が付けられるが、陰差分法による場合には制約条件はないので、ここでは、 $\Delta t = 1$ sec、 $\Delta x = 1.22$ mとした]。境界条件は立坑の水の運動を考慮した式(13)および式(15)を用いる場合と無視した式(17)および(18)を用いる場合の2通りで与えたが、計算結果には殆ど差は見られなかったので、以下では立坑の水の運動を無視した場合の結果を示した。立坑と管路の接合部の損失係数 f_e は開水路流れの時は0とし、管水路流れのときは1.0とした。

計算は管路内の流れが開水路の状態から始め、いず

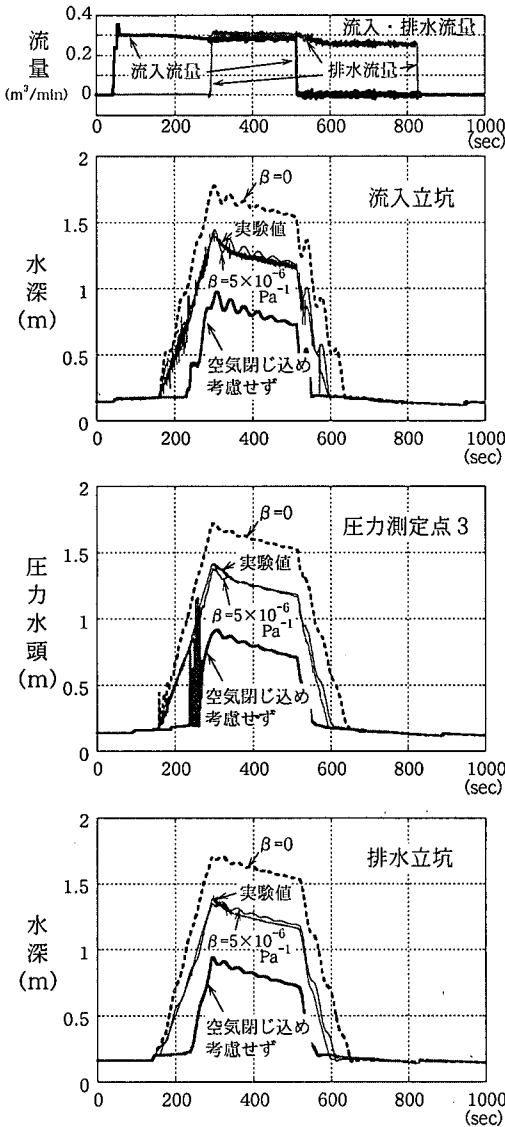


図-8 立坑水深および管路部圧力水頭の計算値と実験値の比較（流入・排水流量が0.3 m³/minの場合）

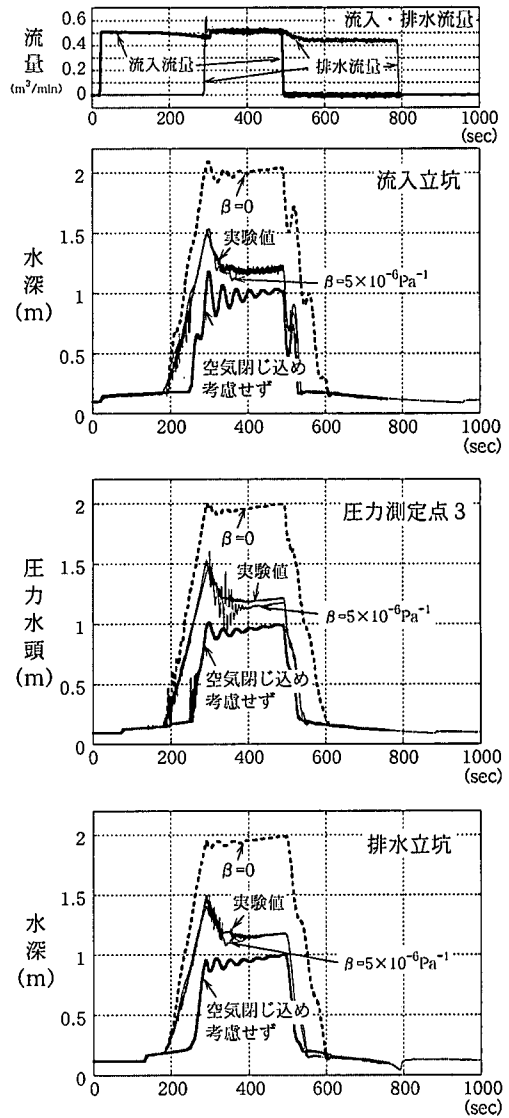


図-9 立坑水深および管路部圧力水頭の計算値と実験値の比較（流入・排水流量が0.5 m³/minの場合）

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った時点で、空気が閉じ込められ、流れは管路流れになるものとして、スロットモデルを適用して、円形断面を図-7に示すような仮想断面に換えて行った。

図-7に示すような断面の流水断面積 A_w は管路内に閉じ込められた空気が立坑から排出するにつれて増大する。水の流入により立坑の水位が上昇するときは、管路内の水圧が増加するために立坑から空気が排出し、流水断面積が増大する。管路内の水圧の増加高 Δp による流水断面積の増加量 ΔA_w は $\Delta A_w = \beta A_a \Delta p$ により算定される。なお、排水開始時には排水立坑の水位が低

下し、管路内の圧力も低下するが、そのときには排水立坑から空気が排出され、管路内の流水断面積が増加する。その場合の管路内の水圧の低下高 Δp による流水断面積の増加量 ΔA_w は、便宜的に、 $\Delta A_w = \beta A_a |\Delta p|$ により算定する。ただし、排水による管路内の水圧の低下が緩やかになると、空気は排出しなくなるが、現在のところ空気が排出しなくなる時点を算定することはできないので、実験により定め、それ以降は空気の排出はないものとして計算を行った。

実験は初期水深を13~16cm、流入流量・排水流量を0.2, 0.3, 0.4および0.5m³/minと変えて行った。ここでは、

初期水深を16cm, 流入流量・排水流量を0.3m³/minとした場合についての流入立坑と排水立坑の水深および圧力測定地点3の圧力水頭の計算値と実験値を比較した結果を図-8に示す. なお, 図-8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-8によると, 管路内の空気の閉じ込めを考慮しなかったり, 立坑から空気の排出の影響を考慮しないで $\beta=0$ とする場合には, 計算値と実験値は一致しないが, 管路内の空気の閉じ込めを考慮し, 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(この場合は $\beta=5 \times 10^{-6} \text{Pa}^{-1}$), また立坑からの空気の排出の終了時点を実験により定めると, 計算値と実験値をほぼ一致させることができることがわかる. ただし, 水深および圧力水頭の計算値には, 数値計算の影響と思われる振動の他に, 実験では見られない振動が生じているが, これは地下放水路で生ずるU字管振動に対応するものであると考えられる. 実験では管路内に閉じ込められている空気によって振動が吸収されるために, 実験値には振動が現われないものと考えられるが, これらの点については今後検討することが必要である. なお, この場合($\beta=5 \times 10^{-6} \text{Pa}^{-1}$)の圧力波の水中伝播速度 c は18~20m/s程度, スロットの幅 B_s は0.6~0.8mm程度であった. 立坑からの空気の排出の終了後 $\beta=0$ としたときの c は27m/sであった. 空気が閉じ込められていない満管状態の場合の c は320m/sである.

流入流量が0.2m³/minの場合も β の値と立坑からの空気の排出の終了時点を適当に定めると, 計算値と実験値をほぼ一致させることができ, 図-8と同様な結果が得られた.

流入流量が0.4および0.5m³/minの場合は, 空気の閉じ込めが水の流入により発生する水面波によって生ずるので, 本論文で提示した解析法では空気の閉じ込めの発生時点を定めることができないが, 空気の閉じ込めの発生時点を実験値を用いて定め, 係数 β の値を適当に仮定し(この場合も $\beta=5 \times 10^{-6} \text{Pa}^{-1}$), また立坑からの空気の排出の終了時点を実験により定めて計算すると, 図-9に示すように, 計算値と実験値をほぼ一致させることができた.

6. 結論

本論文では, 立坑が2本の最も単純な構造の地下放水路を対象として, トンネル内に空気が閉じ込められている流れについて実験および解析を行った. その結果, 次のようなことが示された.

(1) 実験によると, トンネル内の空気の閉じ込めの発

生過程は流入流量によって異なる. 流入流量が0.2および0.3m³/minの場合は水の流入によって生ずる段波の反射により管路の断面が塞がれることによりトンネル内の空気の閉じ込めが発生する. 流入流量が0.4および0.5m³/minの場合は水の流入によって発生する水面波の反射による重複波の形成により管路の断面が塞がれることによりトンネル内の空気の閉じ込めが発生する.

(2) トンネル内の空気の閉じ込めが水の流入により生ずる段波の反射によって発生する場合には, 図-7に示すような仮想断面を考え, 係数 β の値を適当に決め, 式(10)を用いてスロット幅を定め, また立坑からの空気の排出の終了時点を実験により定めて, スロットモデルにより立坑の水位およびトンネル内の圧力水頭を計算すると, 実験値とほぼ一致する結果が得られる.

(3) トンネル内の空気の閉じ込めが水の流入により生ずる水面波の反射によって発生する場合には, トンネル内の流れの支配方程式(2), (3)によっては水面波の発生および伝播は扱うことができないので, 空気の閉じ込めの発生時点を定めることができない. ただし, 空気の閉じ込めの発生時点を定められるものとする, この場合についても係数 β の値および立坑からの空気の排出の終了時点を適当に定めることにより立坑の水位とトンネル内の圧力水頭の計算値と実験値をほぼ一致させることができる.

今後の課題として次のことが挙げられる.

(1) 本論文では, 立坑が2本の最も単純な構造の地下放水路の流れを対象としたが, 今後は立坑が3本以上ある地下放水路について種々の条件の下で実験を行い, トンネルにおける空気の閉じ込めの発生過程を観察するとともに, 地下放水路の流れのパターンを調べる.

(2) トンネル内に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の算定式に含まれる係数 β の性質について検討し, β の値の決め方を提示する.

(3) トンネル内に閉じ込められた空気の立坑からの排出が終了する時点の定め方を検討する.

(4) 立坑の水位およびトンネル部の圧力水頭の計算値には, 実験に見られない振動が現れるが, この点を改良する計算モデルを開発する.

(5) トンネル内の空気の閉じ込めが水の流入により生ずる水面波の反射によって発生する場合の地下放水路の流れを解析できるモデルを開発する.

謝辞: 実験の遂行に協力していただいた, 荏原総合研究所の石井正治さん, 早稲田大学大学院理工学研究科大学院生の佐野宗一郎さん, 早稲田大学理工学部学生(当時)の岡本太郎さん, 宮野良和さんに謝意を表します.

参考文献

- 1) 栗崎夏代子: 地下放水路の流れの数値計算法に関する研究, 早稲田大学大学院理工学研究科修士論文, 1995.
- 2) 鮫川 登, 栗崎夏代子, 富田 強, 大淵真志: 地下放水路の管路状態の非定常流の数値計算, 土木学会論文集, No.545/II-36, pp.55-67, 1996.
- 3) 野中樹夫, 栗崎夏代子, 鮫川 登, 富田 強, 大淵真志: スロットモデルによる地下放水路の流れの数値計算, 第50回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第II部門, pp.316-317, 1995.
- 4) 鮫川 登, 谷澤克矢, 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, pp.191-196, 1997.

(1998.7.13 受付)

NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW IN UNDERGROUND DIVERSION CHANNEL WITH ENCLOSED PRESSURIZED AIR

Noboru SUKEGAWA, Hiroshi UMEDA, Takanobu MITO and Masanori GOTO

A method of numerical analysis of the flow in an underground diversion channel with enclosed pressurized air is proposed. The calculated values of water levels in vertical shafts and pressure heads in a tunnel agree well with experimental values.