

トンネル内の被圧空気が地下放水路の流れに及ぼす影響の解析

早稲田大学大学院理工学研究科 学生会員 町山 友和
 日本工営 正会員 三戸 孝延
 早稲田大学理工学部 フェロー 鮎川 登

1. はじめに 都市河川の治水対策の一環として考えられている地下放水路は図1に示すように立坑とトンネルで構成されている。河川水は流入立坑から地下放水路に流入し、トンネル内を流れて排水立坑からポンプにより排水される。トンネル内の流れははじめのうちは開水路状態の流れになるが、流入が続くと、管水路状態の流れに移行する。そして、排水立坑の水位がある水位に達すると、ポンプにより排水される。実験によると、トンネル内の流れが開水路状態から管水路状態の流れに移行するさいにトンネル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、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をスロットモデルにより解析した結果について述べる。

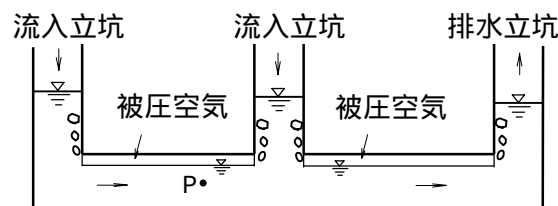
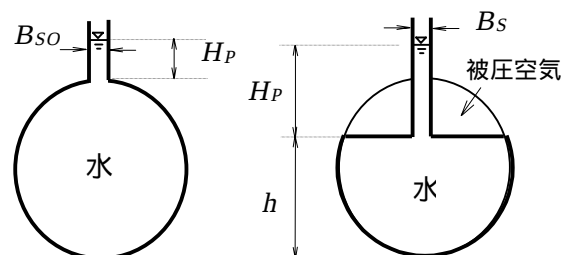


図1 地下放水路

2. スロットモデル スロットモデルはPreissmannによって提案されたモデルで、図2(a)に示すように管路の頂部に幅 B_{s0} のスロットを取り付けた仮想断面を考え、開水路状態と管水路状態の流れが共存する流れを開水路の流れとして解析できるように工夫されたモデルである。スロットの幅は $B_{s0} = g A / c_o^2$ で与えられる。ここで、 A は流水断面積、 c_o は管路における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2(b)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¹⁾。そ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、 c は管路壁面と被圧空気面で構成される閉断面水路における圧力波の水中伝播速度である。 c は水の圧縮性、被圧空気の圧縮性と立坑からの排出および管路の弾性を考慮して導かれた次式で算定する²⁾。



(a) 満水状態 (b) 空気が閉じ込められている場合

図2 スロットモデル

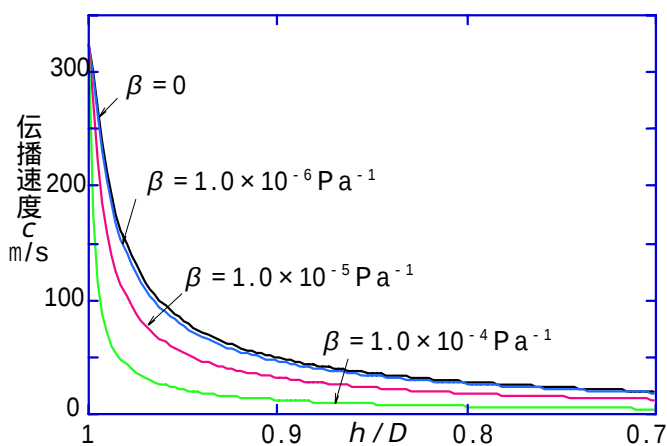


図3 圧力波の水中伝播速度

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、 A_0 は管路の断面積、 ρ_w は水の密度、 D は管路の内径、 δ は管路の壁厚、 E は管路の弾性係数であり、 β は立坑からの空気の排出の影響を表す係数で、 $\partial A_a / \partial p = -\beta A_a$ で定義される。ここで、 p は圧力である。本研究で解析の対象とした内径20cm、壁厚0.8cmの塩化ビニル製管路の場合について、 $K_w = 2.2 \times 10^9 \text{ Pa}$ 、 $K_a = 1.4 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $E = 2.7 \times 10^9 \text{ Pa}$ 、 $\rho_w = 1,000 \text{ kg/m}^3$ として式(1)の関係を β をパラメータとして図示すると、図3のようになる。図中の h は水深であ

る。空気が閉じ込められていない満水状態の場合のこの管路の圧力波の水中伝播速度は 320m/s であるが、図 3 によると管路内に空気が閉じ込められている場合の圧力波の水中伝播速度は空気の圧縮性と立坑からの排出により非常に小さくなることわかる。

3. 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 トンネル内に空気が閉じ込められると、満水状態の場合と比べその分だけ流水断面積が減少し、地下放水路の流れに影響を与える。トンネル内に閉じ込められた空気は水流から圧力を受け、圧縮され、また立坑から排出されることにより体積を変化させ、流水断面積に影響を与える。また、流水断面積は水の圧縮性と管路の弾性によっても変化する。

圧力変化 Δp に伴う流水断面積の変化量は水の圧縮性による $(A_w / K_w) \Delta p$ と空気の圧縮性による $(A_a / K_a) \Delta p$ 、立坑からの排出による $\beta A_a \Delta p$ および管路の弾性による $(D A_0 / E \delta) \Delta p$ の和として表示されるので、 $A_w \Delta p \{ 1 / K_w + (1 + \beta K_a) (1 / K_a) (A_a / A_w) + (1 / E) (D / \delta) (A_0 / A_w) \} = (A_w / \rho_w c^2) \Delta p = B_s \Delta p / \rho_w g$ となる。したがって、圧力変化 $\Delta p = \rho_w g H_p$ による流水断面積の変化量は $B_s H_p$ と表示され、スロット内の水の面積と等しくなる。すなわち、スロット内の水の面積は圧力変化に伴う水の圧縮性、被圧空気の圧縮性と立坑からの排出および管路の弾性による流水断面積の変化量を表すものと考えられる。本研究で解析の対象とした塩化ビニル製管路の場合の圧力変化に伴う流水断面積の変化量は水の圧縮性によるものを 1 とすると、被圧空気の圧縮性と立坑からの排出によるものは 10^3 、管路の弾性によるもの 10^1 程度となる。また、スロットの幅はトンネル内に空気が閉じ込められていない場合は 3×10^{-3} mm、トンネル内に空気が閉じ込められている場合は 1 mm 程度になる。したがって、圧力変化に伴う水の圧縮性および管路の弾性による流水断面積の変化は非常に小さく、無視し得る。

本研究では、被圧空気の存在およびその圧縮性と立坑からの排出による流水断面積の変化が地下放水路の流れに及ぼす影響について検討する。そのために、(1) トンネル内

の空気の存在を考慮しない場合(ケース A : $A_a = 0$)、(2) トンネル内の空気の存在は考慮するが、空気の圧縮性と立坑からの排出は考慮しない場合(ケース B : $K_a = \infty$ 、 $\beta = 0$)、(3) トンネル内の空気の存在と圧縮性は考慮するが、立坑からの排出は考慮しない場合(ケース C : $\beta = 0$)、(4) トンネル内の空気の存在と圧縮性および立坑からの排出を考慮する場合(ケース D : $\beta = 1.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$) の 4 つのケースについて、図 2 (b) に示すスロットモデルを用いて実験の流れを解析し、実験値と比較した例を図 4 に示す。図 4 によると、トンネル内に空気が閉じ込められると、満水状態の場合と比べ流水断面積が減少し、立坑の水位およびトンネル内の圧力水頭は上昇するが(A → B)、空気の圧縮性および立坑からの排出が流水断面積を増加させることになり立坑の水位およびトンネル内の圧力を減少させ(B → C → D)、立坑の水位およびトンネル内の圧力水頭はケース D のような時間変化をすることになる。

参考文献 1) 鮎川登・梅田博志・三戸孝延・後藤正典 :

土木学会論文集 No.635 / - 49, pp.41 - 48, 1999 .

2) 鮎川登・谷澤克矢・新井和敏 : 土木学会論文集 No.579

/ - 41, pp.191 - 196, 1997 .

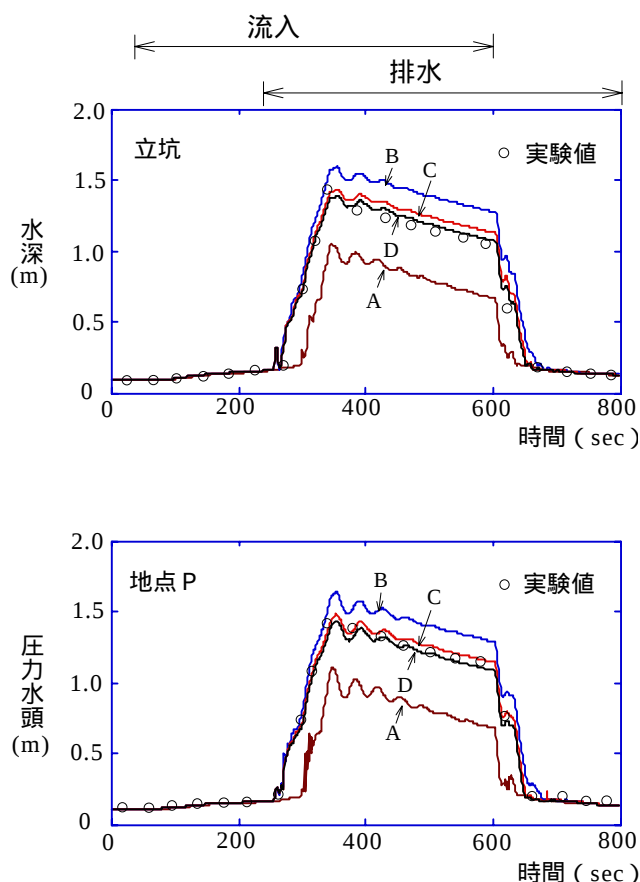


図 4 被圧空気が立坑の水位、トンネル内の圧力水頭に及ぼす影響