

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

鮎川 登¹・三戸 孝延²・町山 友和³

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 日本工営株式会社 広島支店 (〒732-0806 広島市南区西荒神町 1-8)

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 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

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立坑とトンネルで構成されている。地下放水路の流れは開水路状態から管水路状態になり、再び開水路状態の流れに戻るが、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。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を用いて解析し、地下放水路の流れを解析するためには空気の圧縮性と立坑からの空気の排出を考慮することが必要であることを示し、またトンネル内に空気が閉じ込められると、立坑の水位およびトンネル内の圧力が上昇することを示した。

Key Words: underground diversion channel, gas-liquid two-phase flow, slot model

1. 序論

都市河川の治水対策の一環として構想され、施工さ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、河川水の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。流入が停止し、排水だけの状態になると、トンネル内の流れは管水路状態から開水路状態に戻る。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。トンネル内に空気が閉じ込められると、その分だけ流水断面積が減少し、地下放水路の流れはトンネル内に閉じ込められた空気により影響を受けることになる。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についてスロットモデルを用いて解析することを試みた。

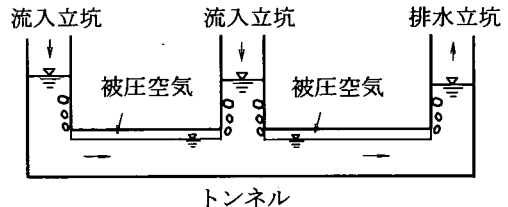


図-1 地下放水路

2. 実験の概要

実験は内径 20cm、長さ 122m の塩化ビニル製の管路の一端に流入立坑、他端に排水立坑、流入端から 60 m の位置に中間立坑を設置した図-2に示すような水路を用いて行った。水路の平均勾配は 1/5,000 である。流入立坑、排水立坑および中間立坑の内径は、それぞれ、36, 60 および 20cm である。立坑には水位計、管路部には水位計と圧力計を設置し、水位と圧力を測定した。図-2に水位計と圧力計の設置位置を示した。流入流量および排水流量は電磁流量計で測定した。

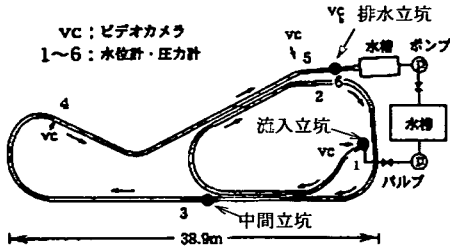


図-2 実験水路

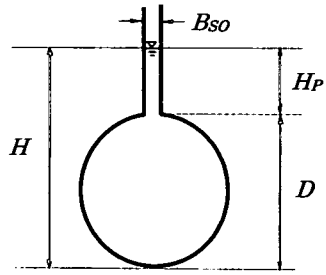


図-3 スロットモデル

実験は管路内にある水深に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。

実験は初期水深と流入流量・排水流量を変えて行ったが、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見られた。当初は空気の閉じ込めを考慮せずに実験の流れを解析することを試みたが、実験における立坑の水位変動および管路内の圧力変動を精度よく算定することができなかった。その原因は管路内に閉じ込められた空気の存在にあると考えられた。そこで、管路内に空気が閉じ込められている流れを解析できるように修正したスロットモデルを用いて、管路内における空気の閉じ込めを考慮して実験の流れを解析し、管路内に閉じ込められた空気が実験水路の流れに及ぼす影響を評価することを試みた。

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 Preissmann¹⁾によって提案されたモデルで、図-3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、管水路の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。スロットモデルによると、開水路状態と管水路状態を遷移する流れを開水路の流れとして解析することができることになる。

開水路の流れの支配方程式は次のように表示される。

連続方程式

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

運動方程式

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2)$$

ここで、 h は水深、 v は流速、 A は流水断面積、 B は水面幅、 S_0 は水路床勾配、 S_f は摩擦勾配、 g は重力の加速度である。

スロットモデルでは、管水路の流れの連続方程式として水の圧縮性と管路の弾性を考慮した式が用いられ、管水路の流れの支配方程式は次のように表示される。

連続方程式

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{c_0^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

運動方程式

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (4)$$

ここで、 H は圧力水頭、 c_0 は管路における圧力波の水中伝播速度である。 c_0 は次式で与えられる。

$$c_0 = \sqrt{\frac{K_w}{\rho_w} / \left(1 + \frac{K_w D}{E \delta}\right)} \quad (5)$$

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

式(3)は次のように書き換えられる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{A}{B_{s0}} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

ここで、

$$B_{s0} = \frac{gA_0}{c_0^2} \quad (7)$$

である。\$A_0\$は管路の断面積である。管路の流れでは流水断面積\$A\$は管路の断面積\$A_0\$になるので、式(6)は式(3)と同じになる。

図-3に示すような幅\$B_{s0}\$のスロットを取り付けた仮想の開水路断面を考え、管路の流れの圧力水頭\$H\$を水深、スロット幅\$B_{s0}\$を水面幅、流水断面積\$A\$を管路の断面積とスロット内の水面積の和とすると、式(6)は式(1)と同じになり、式(4)は式(2)と同じになる。すなわち、図-3に示すような断面の水路を考えると、管路の流れを開水路の流れの連続方程式と運動方程式を用いて解析することができることになる。

なお、圧力\$\Delta p\$が作用することによる管路の単位長当りの水の質量増加量は、水の圧縮性による\$(\rho_w/K_w)A_0\Delta p\$と管路の弾性による断面積の増加に対応する\$\rho_w(DA_0/E\delta)\Delta p\$の和となり、\$(B_{s0}/g)\Delta p\$と表示される。したがって、圧力\$\Delta p = \rho_w g H_p\$の作用による管路の単位長当りの水の質量増加量は\$\rho_w B_{s0} H_p\$となるが、これは管路の単位長当りのスロット内の水の質量に等しい(\$H_p\$はスロット内の水深：図-3参照)。すなわち、スロットモデルでは圧力の作用による水の圧縮性と管路の弾性による水の質量増加量をスロットを取り付けることによる流水断面積の増加として表示することになる。通常の場合は管路における圧力波の伝播速度\$c_0\$は非常に大きいので、スロット幅\$B_{s0}\$は非常に小さくなり、水の圧縮性と管路の弾性の影響は非常に小さくなる。

4. 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解析

トンネル内に空気が閉じ込められている地下放水路内の流れを図-4に示すようなトンネル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て解析する²⁾。この場合のスロット幅\$B_s\$は次式で算定される。

$$B_s = \frac{gA_w}{c^2} \quad (8)$$

ここで、\$A_w\$は流水断面積、\$c\$は空気が閉じ込められ

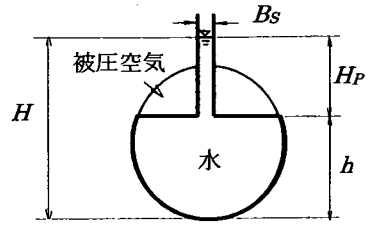


図-4 空気が閉じ込められている場合のスロットモデル

ているトンネル内の流れ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トンネル壁の弾性を考慮して導かれた次式で算定する³⁾。

$$c = \sqrt{\frac{K_w}{\rho_w} \left/ \left\{ 1 + (1 + \beta K_a) \frac{K_w A_a}{K_a A_w} + \frac{K_w D A_0}{E \delta A_w} \right\} \right.} \quad (9)$$

ここで、\$K_a\$は空気の体積弾性係数、\$A_a\$はトンネル断面内の空気の部分の面積、\$\beta\$は立坑からの空気の排出の影響を表す係数で、立坑からの空気の排出がない場合は\$\beta = 0\$となる。\$\beta\$は次式で定義される。

$$\left(\frac{\partial A_a}{\partial p} \right)_s = -\beta A_a \quad (10)$$

ここで、\$(\partial A_a / \partial p)_s\$は圧力\$p\$の変化に伴う立坑からの空気の排出による空気面積\$A_a\$の変化率を表す。

本研究で解析の対象とする内径20cm、壁厚0.8cmの塩化ビニル製管路(\$E = 2.7 \times 10^9\$ Pa)の場合について、\$K_a = 1.4 \times 10^5\$ Pa、\$K_w = 2.2 \times 10^9\$ Pa、\$\rho_w = 1,000\$ kg/m³として、式(9)の関係を立坑からの空気の排出の影響を表わす係数\$\beta\$ (\$\beta = 0\$は立坑からの空気の排出がないことを表す)をパラメータとして図示すると、図-5のようになる。図中の\$h\$は水深を表す。管路内に空気が閉じ込められていない場合の塩化ビニル製管路内の流れにおける圧力波の水中伝播速度は321m/sであるが、図-5によると管路内に空気が閉じ込められると圧力波の水中伝播速度は非常に小さくなり、空気が立坑から排出されるときにはさらに小さくなるのがわかる。なお、式(9)の分母の第2項は圧力波の水中伝播速度に及ぼす被圧空気の圧縮性と立坑からの排出の影響を表し、第3項は管路の弾性の影響を表すが、通常の場合は第2項と第3項の比は100~1,000程度になるので、管路内に空気が閉じ込められているときには圧力波の水中伝

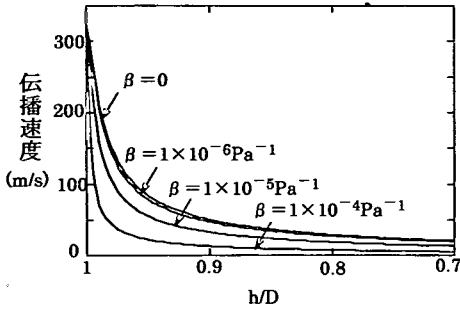


図-5 空気が閉じ込められている地下放水路の流れにおける圧力波の伝播速度

播速度は空気の圧縮性と立坑からの空気の排出の影響によってほぼ決まることになる。

地下放水路のトンネル内の流れはスロットモデルを用い、連続方程式および運動方程式を流速 v の代わりに流量 Q を未知数として書き換えた次式により解析する。

連続方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

運動方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_w} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad (12)$$

ここで、 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 を表す。

摩擦勾配 S_f は次式で算定する。

$$S_f = \frac{f|Q|Q}{8gRA_w^2} \quad (13)$$

ここで、 f は抵抗係数、 R は径深である。抵抗係数は流れが層流の場合は $f=64/Re$ ($Re=4vR/\nu$; ν は水の動粘性係数)、乱流の場合は Colebrook の式により算定する。

立坑の水位 H_s は立坑についての連続方程式

$$A_s \frac{dH_s}{dt} = Q_s + Q_U - Q_D \quad (14)$$

により計算する。ここで、 A_s は立坑の断面積、 Q_s は立坑への流入流量、 Q_U は立坑の上流側トンネルからの立坑への流入流量、 Q_D は立坑の下流側トンネルへの立坑からの流出流量である(図-6参照)。

スロットモデルによる地下放水路の流れの解析で

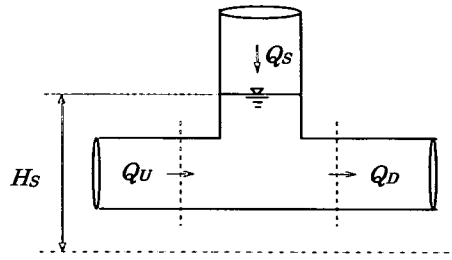


図-6 立坑の連続方程式の説明図

は、式(11)、(12)、(14)を解いて立坑の水位およびトンネル内の流量と圧力水頭を求める。

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の解析

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ことになる。トンネル内の空気の部分の面積は空気の圧縮性と立坑からの排出により変化する。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。

空気がトンネル内に閉じ込められている場合に圧力 Δp が作用することによる水の質量増加を流水断面積の増加として示すと、水の圧縮性による $(A_w/K_w) \Delta p$ と管路の弾性による $(DA_w/E\delta) \Delta p$ および空気の圧縮性による $(A_a/K_a) \Delta p$ と立坑からの排出による $\beta A_s \Delta p$ の和として $B_s \Delta p / \rho_w g$ と表示される。したがって、圧力 $\Delta p = \rho_w g H_p$ の作用による水の質量増加を流水断面積の増加として示すと、 $B_s H_p$ となるが、これはスロット内の水の面積に等しい (H_p はスロット内の水深: 図-4参照)。したがって、水の圧縮性、管路の弾性および被圧空気の圧縮性と立坑からの排出が水の質量増加(流水断面積の増加)に及ぼす影響はスロットの幅 B_s に反映されることになる。

一般に、圧力の作用による水の質量の増加、すなわち、流水断面積の増加に対する水の圧縮性と管路の弾性の寄与は被圧空気の圧縮性および立坑からの排出の寄与に比し非常に小さいので、水の圧縮性と管路の弾性の影響は無視し得る。なお、本研究で解析の対象とする塩化ビニル製管路の場合の圧力の作用による水の質量の増加(流水断面積の増加)は水の圧縮性によるものを1とすると、管路の弾性によ

るもの10程度、空気の圧縮性と立坑からの排出によるもの 10^3 程度となる。

以下では、トンネル内における被圧空気の存在およびその圧縮性と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する。そのために、つぎの4つの場合について地下放水路の流れをスロットモデルを用いて数値計算し、それらの結果を比較する。

- (1) トンネル内の空気の存在を無視する場合[式(9)で $A_a = 0$ とする。：ケースA]
- (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[式(9)で $K_a = \infty, \beta = 0$ とする。：ケースB]
- (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[式(9)で $\beta = 0$ とする。：ケースC]
- (4) トンネル内の空気の存在および圧縮性と立坑からの排出を考慮する場合[ケースD]

流入流量および排水流量をともに 0.5 l/s とした場合の流入立坑、中間立坑および排水立坑の水深と圧力測定点2および4の圧力水頭についてケースA～Dの計算値と実験値を比較して示すと、図-7のようになる。なお、計算には β の値を与えるが必要になるが、 β はトンネル内の流れの圧力上昇に伴う立坑からの空気の排出量を理論的に解析することができていないために便宜的に式(10)の関係を仮定したために導入された係数で、 β の値は現在のところは実験的に定めざるを得ない。ここでは、ケースDの計算値が実験値と一致するように $\beta = 1.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ とした。

図-7によると、ケースAの計算値と実験値は大きく異なる。これはトンネル内に空気が閉じ込められているにもかかわらず、ケースAでは空気の存在を考慮しないで流れを解析したためである。トンネル内に空気が閉じ込められている場合には、当然のことながら空気の存在を考慮して流れを解析しなければならないことになる。

ケースBの計算値は実験値よりも大きくなっていく。これはケースBでは空気の存在だけを考慮し、空気の圧縮性および立坑からの排出による空気断面積の減少を考慮していないために空気断面積が大きめに算定されているためである。ケースCの計算値はケースBの計算値よりも小さくなり、実験値に近づいているが、これは空気の圧縮性による空気断面積の減少を考慮しているためである。ケースDの計

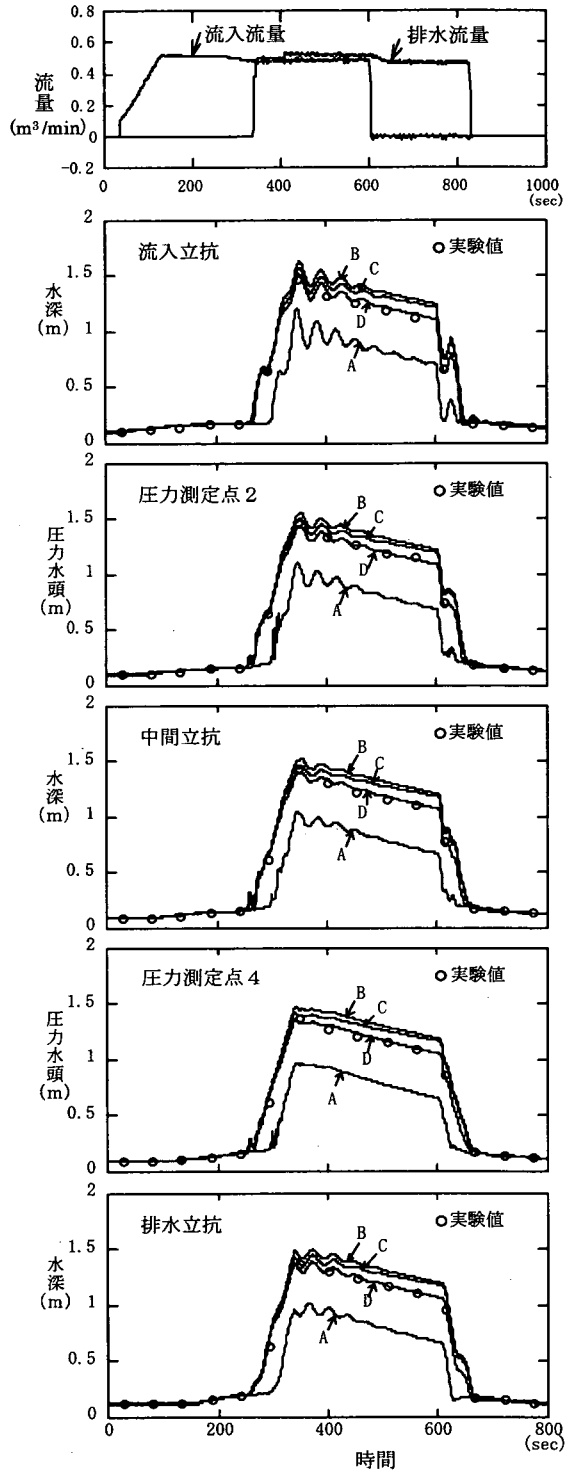


図-7 立坑の水位およびトンネル内の圧力水頭の実験値と計算値の比較

算値は実験値とほぼ一致しているが、これは空気の圧縮性による空気断面積の減少に加えて、立坑からの空気の排出による空気断面積の減少も考慮しているためであると考えられる。

なお、ケースDの計算値と実験値がほぼ一致していることは β の値を適切に定めることができれば本論文で用いた計算法により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解析し得ることを示しているものと考えられる。 β の値を定めるための理論式あるいは実験式を提示することがこの計算法の課題である。

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はケースAとケースDの計算値を比較することにより評価されるが、図-7によるとトンネル内に空気が閉じ込められると、立坑の水深およびトンネル内の圧力水頭が大きくなることがわかる。

なお、圧力波の水中伝播速度およびスロット幅はケースAでは321m/s, 0.003mm, ケースBでは21m/s, 0.6mm, ケースCでは16m/s, 1.0mm, ケースDでは11m/s, 2.4mmである。

流入流量・排水流量を変えて行った実験の流れの解析においても上記と同様な結果が得られた。

6. 結論

本研究では、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解析できるように工夫されたスロットモデルを用いて、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について解析した。その結果、次のことが示された。

(1) スロットモデルのスロット幅は水の圧縮性、管路の弾性および空気の圧縮性と立坑からの空気の排出によるトンネル内の水の質量増加（流水断面積の出加）を表す。ただし、水の圧縮性と管路の弾性の影響は空気の圧縮性と立坑からの空気の排出に比し無視し得る。

(2) トンネル内に空気が閉じ込められると、その分だけ流水断面積が減少し、地下放水路の流れは影響を受ける。トンネル内に閉じ込められた空気の断面積はトンネル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トンネル内に閉じ込められる空気の量と閉じ込められた後の空気の圧縮性および立坑からの空気の排出により決まるので、空気がトンネル内に閉じ込められている地下放水路の流れを解析するためには、トンネル内に閉じ込められた空気の圧縮性と立坑からの空気の排出の影響を考慮することが必要である。

(3) トンネル内に空気が閉じ込められると、立坑の水深およびトンネル内の圧力水頭が大きくなる。

参考文献

- 1) Preissmann, A.: Propagation des intumescence dans les canaux et rivières, 1st Cong. French Assoc. for Computation, Grenoble, 1961.
- 2) 鮎川 登, 梅田博志, 三戸孝延, 後藤正典: 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, 土木学会論文集, No. 635/II-49, pp. 41-48, 1999.
- 3) 鮎川 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.

(2001.10.1 受付)

ANALYSIS OF EFFECT OF ENCLOSED AIR ON UNDERGROUND DIVERSION CHANNEL FLOW

Noboru SUKEGAWA, Takanobu MITO and Tomokazu MACHIYAMA

When the flow of underground diversion channel shifts from the open channel flow to the pipe flow, the air is enclosed in the tunnel. In this study, the effect of the air enclosed in the tunnel on the flow of underground diversion channel was analyzed using the slot model. It was shown that it was necessary to consider the compressibility of the air and the discharge of the air from vertical shaft in order to analyse the effect of the air, and water level of the vertical shaft and pressure in the tunnel increased when the air is enclosed in the tunnel.