

Ⅱ-158

スロットモデルによる地下放水路の流れの数値計算

水資源開発公団 正会員 野中 樹夫 電源開発(株) 正会員 栗崎 夏代子
早稲田大学理工学部 正会員 鮎川 登 (株) 荏原製作所 富田 強
(株) 荏原総合研究所 大淵 真志

1. はじめに

地下放水路の流れは、流入条件と排水条件により開水路状態の流れになったり、管水路状態の流れになったりすることが考えられる。開水路状態と管水路状態を遷移する流れを解析するモデルとしてスロットモデルが提案されている。本研究では、スロットモデルを用いて地下放水路の流れの数値計算を行ない、実験値と比較した結果について述べる。

2. 実験の概要

実験は、図1に示すような、5本の立坑を持つ内径0.2m、長さ122mの塩化ビニル性の地下放水路の模型を用いて行なった。実験では、立坑①と③から流入させ、立坑⑤から排水し、各立坑およびトンネル部の11箇所（図中の⊗点）で圧力を測定した。立坑①～⑤の内径は0.14、0.60、0.20、0.60、2.83mである。

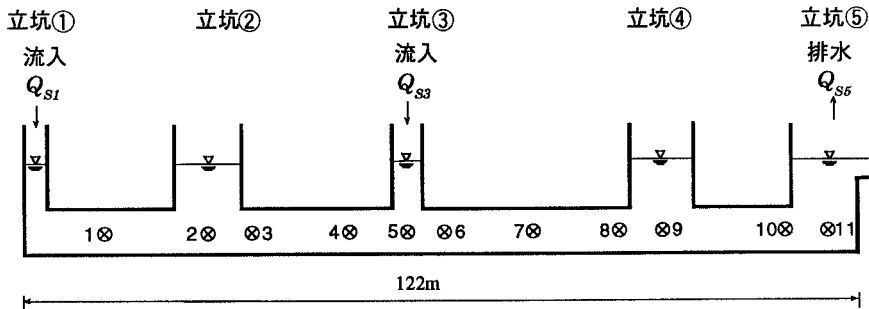


図1 実験装置概要

3. スロットモデル

スロットモデルでは、図2に示すように、管水路の頂部に微小幅 B_s のスロットを取り付けた仮想断面を考えることにより、管水路の流れを開水路の流れとして扱う。スロットモデルによると、スロットの幅 B_s を $B_s = gA_0/c^2$ (A_0 は管水路の断面積、 c は疎密波の伝播速度、 g は重力の加速度) とおくと、管水路の流れの支配方程式は開水路の流れの支配方程式と同一の式で表示されることになる。

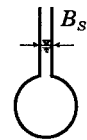


図2. スロットモデル

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

ここで、 H は水位またはピエゾ水頭、 B は水面幅で、管水路流れの場合は $B=B_s$ とする、 Q は流量、 A は流水断面積、 S_f は摩擦勾配で、 $S_f = f|Q|Q/8gRA^2$ 、 f は抵抗係数、 R は径深である。

スロットモデルによると、開水路の流れ、管水路の流れおよび開水路状態と管水路状態を遷移する流れが、いずれも、式(1)、(2)により解析されることになる。

4. スロットモデルによる地下放水路の流れの数値計算法

地下放水路では立坑からの流入があるが、立坑部の流れの連続方程式は次のように扱う。

$$A_{Si} \frac{dH_i}{dt} = Q_{Si} + Q_{i-1} - Q_i \quad (3)$$

ここで、 A_{Si} は立坑の断面積、 Q_{Si} は立坑への流入量であり、添字 i は、 A_{Si} 、 Q_{Si} については i 番目の立坑の値を示し、 Q については i 番目のトンネル部の値を示す。

立坑部の流れの運動方程式は、横流入がある場合の運動方程式を用いるが、横流入水がトンネルに直角に流入する場合は、運動方程式は式(2)と同じになる。

スロットモデルによる地下放水路の流れの数値計算では、連統方程式(1)、(立坑部では式(3)) および運動方程式(2)を四点陰差分法により差分化し、得られた非線形連立方程式をNewton-Raphson法により解き、 H および Q の数値解を求める。

なお、Newton-Raphson法では、繰返し計算の補正を $H_i^{k+1} = H_i^k + \Delta H_i$, $Q_i^{k+1} = Q_i^k + \Delta Q_i$ によって行なうが、この方法では解が収束しないことが多かったので、ここでは、緩和係数 α を導入し、

$$H_i^{k+1} = H_i^k + \alpha \Delta H_i \quad , \quad Q_i^{k+1} = Q_i^k + \alpha \Delta Q_i \quad (4)$$

によって、解の補正を行なった。計算は、まず、 $\alpha=1.0$ として行ない、解が得られない場合には、 α を0.5、0.25、0.1、0.05、0.01などのように小さくして行なう。

5. 管水路状態の流れの数値計算

スロットモデルにより地下放水路の管水路状態の流れの解析が行なえるか否かを検討するために、地下放水路の管水路状態の流れにスロットモデルを適用し、計算値と実験値を比較した。計算は計算時間間隔 Δt を1sec、計算断面間隔 Δx を3mとし、抵抗係数 f は乱流の場合はColebrookの式、層流の場合は層流の理論式で与えた。疎密波の伝播速度 c は265 m/sとした。

地下放水路の管水路状態の流れをスロットモデルにより計算し、実験値と比較した結果の一例を図3に示す。図3によると、スロットモデルによる計算値と実験値はほぼ一致することが認められる。

6. 開水路状態と管水路状態を遷移する流れの数値計算

計算条件を管水路状態の流れの数値計算の場合と同じにし、スロットモデルにより地下放水路の開水路状態と管水路状態を遷移する流れの数値計算を行ない、計算値と実験値を比較した。その一例を図4に示す。図4によると、スロットモデルによる計算値と実験値はほぼ一致することが認められる。なお、開水路状態と管水路状態を遷移する流れの計算結果には初期水位が強く影響することが認められた。

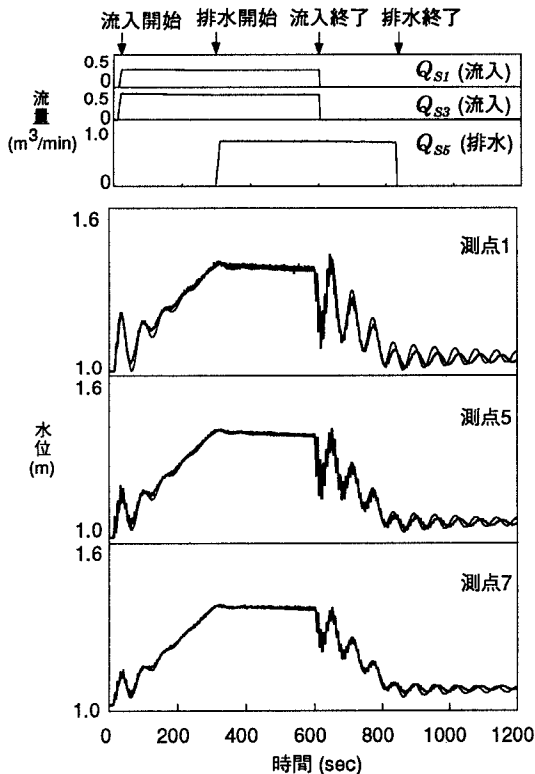


図3 管水路の流れにおける各立坑の水位の実験値と計算値の比較
(— 実験値、 - - - 計算値)

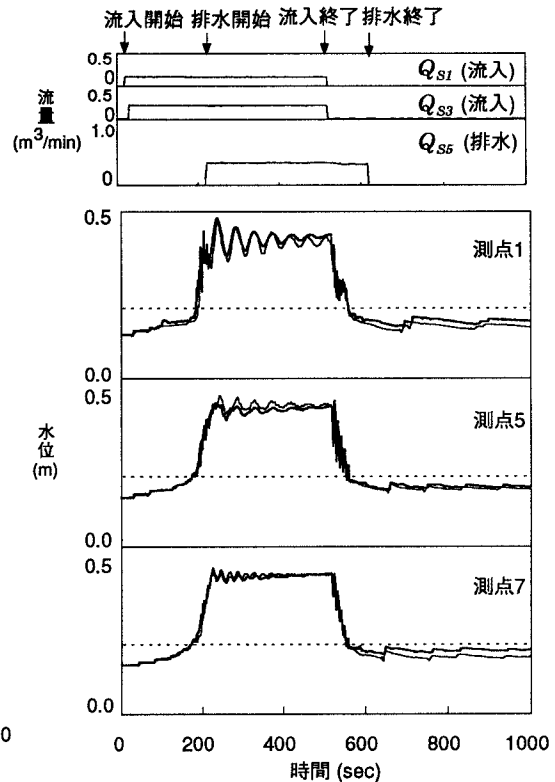


図4 管水路と開水路の状態を遷移する流れにおける各立坑の水位の実験値と計算値の比較
(— 実験値、 - - - 計算値)