

流れ込み式発電所水路トンネル内の水理現象

広島大学工学部 正 員 余越正一郎
 広島大学工学部 〇正 員 細 田 尚

1. はじめに； 本研究は流れ込み式発電所水路トンネル内が空の状態のときに、スルース・ゲートにより導水を始めることによって生ずる水理現象について若干の解析を行ったものである。dry bed 上を先端が伝播するとともに、スルース・ゲートより下流の位置に跳水が形成されて行く過程を数値解析により再現し、先端部の伝播速度について検討した。

2. スルース・ゲートの特性； 対象発電所は斐伊川水系三刀屋川中流部に建設された中国電力三刀屋川発電所であり、水路トンネルの延長6,912 m、水路床こう配 1/1,500 の3 R馬蹄形断面(内径2.5 m)水路である。(Manningの粗度係数 $n = 0.013$) 観測諸量を表-1に、概念図を図-1に示した。観測諸量よりスルース・ゲートの流量係数 $C (Q = C a B \sqrt{2g H_0})$ を求め図-2に示した。($B = 2.178 \text{ m}$ とした。)

表-1 観測諸量

日	3/6	3/6	3/6	3/8	4/1	4/3	4/6	4/17
時刻	3/5	(10:10)	(10:20)					
ゲート開度 (cm)	6	10	15	15.5	10	10	15	10
トンネル水深 (cm)	3.5	4.4	5.6	5.4	4.0	4.1	5.6	3.7
流入量 (m ³ /s)	0.67	1.01	1.53	1.44	0.85	0.89	1.53	0.74
到達時間 (min)	101	87	77	77	93	87	81	90
取水位 (m)	/	169.540	/	/	/	169.480	169.490	169.550

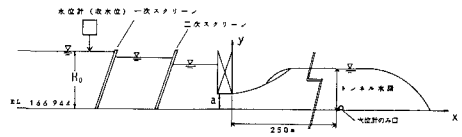


図-1 概念図

※1 取水口ゲートより下流250 m地点のトンネル水深

※2 トンネル水深から算定 ($\alpha = 0.103$)

※3 取水口からヘッドタンクまでのトンネル延長約6,912 mの到達時間

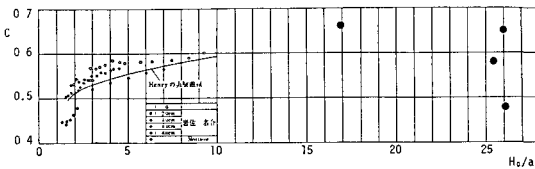


図-2 スルース・ゲートの流量係数

3. 水の伝播特性に関する数値解析； 水路は馬蹄形断面であるが、流れの挙動の定性的特性を検討するため、長方形断面として解析を行う。座標系は図-1を参照して次のような基礎式を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (1) \quad \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{g \cos \theta}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} = g h \left(\sin \theta - \frac{u |u| n^2}{h^{4/3}} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_0^h \overline{u^2} dy \right) \quad (2)$$

ここに、 h ；水深、 q ；単位幅流量、 u ；水深平均流速、 $\overline{u^2}$ ；流れ方向の乱れ強さ。 $\cos \theta = 1.0$ とおく。ここで $\int_0^h \overline{u^2} dy = D_m h \frac{\partial u}{\partial x}$ と仮定し、 $D_m = \alpha n \sqrt{g |h|} h^{-1/6}$ とおく。 $(\alpha$ ；定数) 解析法は岩佐・井上等の氾濫水の解析法に従った。図-3の変数の配置により、次のような離散化を用いた。ただし、 $t = (n+1)\Delta t$ での u_i^{n+1} は $u_i^{n+1} = q_i^{n+1} / h_{i-1/2}^{n+1/2}$ (q_i^{n+1} の正負に応じて $\alpha = 0, 1$) として求めた。

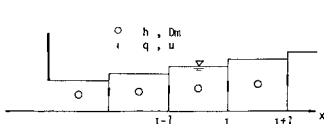


図-3 水理量の配置

$$\frac{h_{i+1/2}^{n+1/2} - h_{i+1/2}^{n-1/2}}{\Delta t} + \frac{q_{i+1}^n - q_i^n}{\Delta x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{q_i^{n+1} - q_i^n}{\Delta t} + \left(\frac{u_i^n + u_{i+1}^n}{2} \frac{q_{i+1}^n - q_i^n}{2} - \frac{u_i^n - u_{i-1}^n}{2} \frac{q_i^n - q_{i-1}^n}{2} \right) / \Delta x + \frac{g}{2} \frac{(h_{i+1/2}^{n+1/2})^2 - (h_{i-1/2}^{n+1/2})^2}{\Delta x}$$

$$= g \frac{h_{i+1/2}^{n+1/2} + h_{i-1/2}^{n+1/2}}{2} \left\{ \sin \theta - n^2 u_i |u_i| / \left(\frac{h_{i+1/2}^{n+1/2} + h_{i-1/2}^{n+1/2}}{2} \right)^{4/3} \right\} + \left\{ \frac{h_{i+1/2}^{n+1/2} D_{m,i+1/2} (u_{i+1}^n - u_i^n)}{\Delta x} - \frac{h_{i-1/2}^{n+1/2} D_{m,i-1/2} (u_i^n - u_{i-1}^n)}{\Delta x} \right\} / \Delta x \quad (4)$$

a, b は上流差分のパラメータ。先端部では連続式より決まる $t = (n+1/2)\Delta t$ での先端位置を $i = N$ とすれば、 $t = (n+1)\Delta t$ の q_{N-1}^{n+1} を次式で定めた。

$$\frac{q_{N-1}^{n+1} - q_{N-1}^n}{\Delta t} + \left(u_{N-1}^n q_{N-1}^n - \frac{u_{N-1}^n + u_{N-2}^n}{2} q_{N-2}^n \right) / \Delta x + \frac{g}{2} \frac{(h_{N-1/2}^{n+1/2})^2 - (h_{N-3/2}^{n+1/2})^2}{\Delta x} \\ = g \frac{h_{N-1/2}^{n+1/2} + h_{N-3/2}^{n+1/2}}{2} \left\{ \sin \theta - n^2 u_{N-1}^n |u_{N-1}^n| / \left(\frac{h_{N-1/2}^{n+1/2} + h_{N-3/2}^{n+1/2}}{2} \right)^{4/3} \right\} - \frac{h_{N-3/2}^{n+1/2} D_{m,N-3/2} (u_{N-1}^n - u_{N-2}^n)}{\Delta x^2} \quad (5)$$

次に、 $q_N^{n+1} = q_{N-1}^{n+1}$ として q_N^{n+1} を定めた。 $\Delta x = 1\text{m}$ 、 $\Delta t = 0.03\text{sec}$ とした。計算の水理諸量を表-2に示す。ゲート開度を 3/5、3/6 (第1, 2回) に等くし、それぞれの等流水深にほぼ等くなるように単位幅流量を定めている。Run-1 での水面形の時間発展過程を図-4に示した。跳水が形成されながら先端が伝播していくことがわかる。 α による違いをみるために、Run 1, 2 の水面形を比較したのが図-5である。両者はほとんど一致している。これは D_m よりも数値粘性がかなり大きいと考えられ、離散化の方法、 Δx を変えた検討が必要である。図-6に水面形方程式(6)式とスルース・ゲート下流の定常とみなせる領域での水面形を比較した。

表-2 計算の水理量

	a(m)	q(m ² /s)	α
Run 1	0.06	0.40	1.0
Run 2	0.06	0.40	0.0
Run 3	0.10	0.64	1.0
Run 4	0.15	0.95	1.0

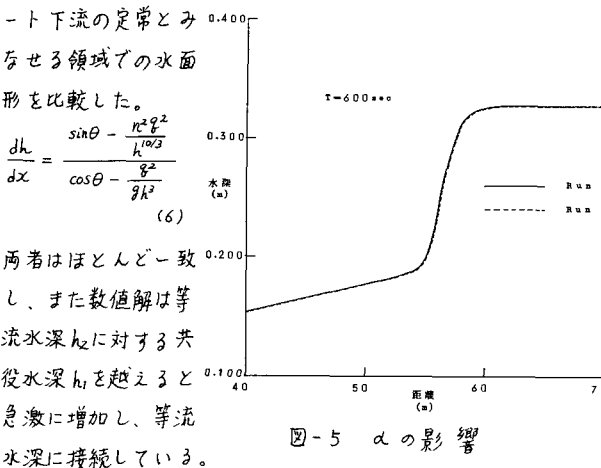


図-5 α の影響

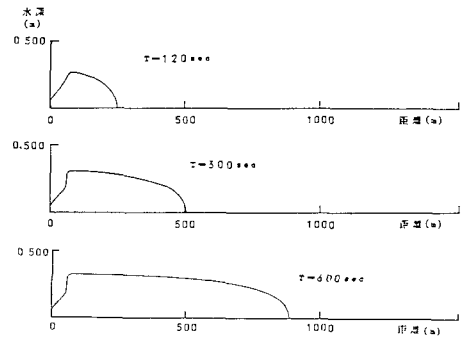


図-4 水の伝播過程 (Run1)

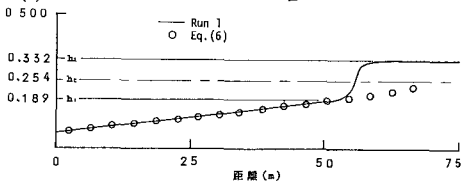


図-6 水面形方程式との比較

図-7には、Run 1, 3, 4 の先端の速度 V と $\sqrt{gh_0}$ (h_0 : 等流水深) の関係を示した。図には水路延長を到達時間で除した観測値、広長方形断面の等流流速 $v = h^{2/3} I^{1/2} / n$ (7)、馬蹄形断面の等流流速 $v = R^{2/3} I^{1/2} / n$ (8) も示してある。計算値はほぼ(7)式と適合している。観測値は馬蹄形断面の等流流速(8)式より大きいが増加の傾向は類似している。計算値は先端の軌跡のこう配より求めた伝播速度を用いているのに対し、観測値は延長距離を到達時間で除したため伝播速度の速い流入初期の影響により、(7)式より大きい観測値となっていると考えられる。

4. おわりに; 渦動粘性項のパラメータ α の影響がみられなかったが、 $\alpha = 0$ では限界水深をまたぐ連続解は存在しないはずである。数値粘性が D_m より大きいと考えられ、離散化の方法、 Δx を変化した検討が必要と思われる。

参考文献; (1) 岩佐・井上・水鳥; 京大防災年報第23号 B2, 1980

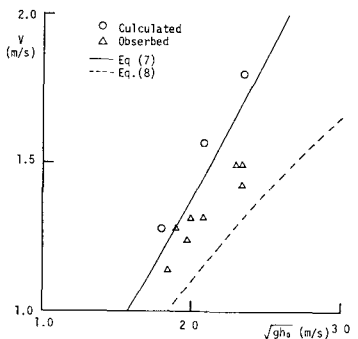


図-7 先端の伝播速度