

穴あきダムの三次元数値解析モデルに関する基礎的研究

3-D numerical analysis of hydraulic characteristic in dry dam

北海道大学工学部環境社会工学科シビルエンジニアリングコース
北海道大学大学院工学研究科准教授
北海道大学公共政策大学院教授
北海道大学大学院工学研究院特任教授

○学生員 村田 雄輝 (Yuki MURATA)
正 員 木村 一郎 (Ichiro KIMURA)
フェロー 清水 康行 (Yasuyuki SHIMIZU)
フェロー 鈴木 英一 (Eiichi SUZUKI)

1. はじめに

一般的にダムの機能は、水を貯める利水機能と洪水などの災害を防ぐ治水機能の二つに分類される。しかし、ダムに貯めた水が浮遊砂などの影響により濁水問題を起こすなどの環境問題が指摘され、現在ダムについて見直しが行われている。また、ダムに土砂が堆積することによって貯水容量が失われダムの機能が果たせなくなることは深刻な問題を引き起こしている。堆砂を取り除くには莫大な費用を要することから、ダム設計時にはあらかじめ大量の堆砂容量を確保しなければいけない。そのような背景から、土砂を流下する穴あきダムが注目されている。穴あきダムは河床近くに洪水吐を設置することによって流れの連続性が確保され、土砂の堆積を防ぐことができる。また洪水時にはダムのせき上げ効果によって洪水を抑えることから、穴あきダムは環境への配慮、堆砂対策、治水機能を有した構造物であるといえる。しかし、穴あきダムは国内での建設数も少なく、研究例も少ない。よって、本研究では、現在高精度化が成され、様々な分野で用いられている数値計算モデルを利用した解析により穴あきダムの水理特性を明らかにすることを目的とする。

穴あきダムは時には洪水吐からの流れに加えて越流による流れによって複雑な自由水面を有する流れが生まれることが考えられる。そこで本研究では三次元流れのもとで、自由水面流れを計算し、穴あきダムの水理特性を数値計算によって求める試みを行った。計算手法は津波のような自由水面の大変形を精度良く再現可能であるとされている密度関数法を用いて流れ計算を行った。密度関数法は、気層・液層それぞれに密度関数を定義し、その移流方程式を解くことで界面を補足する方法である。複雑で大規模な自由水面に対して有力な手法の一つであるが、数値拡散により気液界面のぼやけが生じ、その結果として体積保存性に問題が発生する。そこで、朝位・坪郷¹⁾によって提案されている体積補正法を行い、安定な計算を可能とした。用いる乱流モデルは、標準型 $k-\epsilon$ モデルと、二次非線形 $k-\epsilon$ モデルとする。

2. 数値解析法

(1) 基礎式

三次元解析の基礎式として、以下の非圧縮性流体に対する連続式、運動方程式、 $k-\epsilon$ 方程式を用いた。

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_j U_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial -u_i u_j}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial x_j} = -u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{D_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon U_j}{\partial x_j} = -C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{D_t}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} \quad (4)$$

ここに、 x_i : 空間座標、 t : 時間、 U_i : 流速、 p : 圧力、 u_i : 乱れ速度、 ν : 動粘性係数、 ρ : 流体の密度、 k : 乱れエネルギー、 ϵ : 乱れエネルギー散逸率、 D_t : 渦動粘性係数を表す。また添え字 ij は 1, 2, 3 の値をとり、それぞれ 1 は x 方向、2 は y 方向、3 は z 方向を表す。また添え字 ij に関しては総和の規則を用いている。式(3)、(4)中のモデル定数については、一般に $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$, $C_{\epsilon 1}=1.44$, $C_{\epsilon 2}=1.92$ が用いられる。

(2) 密度関数法

密度関数法では、以下に示す密度関数法 ($0 \leq \Phi \leq 1$) の保存則を解く。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\Phi \mathbf{u}) = 0 \quad (5)$$

ここで、 Φ は密度関数である。この関数は液相で 1 を、気相で 0 を気液界面で 0.5 の値をとる。

密度関数 Φ と密度 ρ および粘性係数 μ の関係は次式を用いる。

$$\rho = \Phi \rho_{Liq} + (1 - \Phi) \rho_{Gas} \quad (6)$$

$$\mu = \Phi \mu_{Liq} + (1 - \Phi) \mu_{Gas} \quad (7)$$

ここに ρ_{Liq} は液相の密度、 ρ_{Gas} は気相の密度、 μ_{Liq} は液相の粘性係数、 μ_{Gas} は気相の密度である。

(3) 乱流モデル

・標準型 $k-\epsilon$ モデル

$$-u_i u_j = \nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad S_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}, \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

・二次非線形 $k-\varepsilon$ モデル

レイノルズ応力を次のように与える²⁾.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \frac{k}{\varepsilon} \nu_t \sum_{\beta=1}^3 C_{\beta} \left(S_{\beta ij} - \frac{1}{3} S_{\beta \alpha \alpha} \delta_{ij} \right) \quad (9)$$

$$S_{ij} = \frac{U_i}{x_j} + \frac{U_j}{x_i}, \quad \nu_t = C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad S_{lij} = \frac{U_i}{x_r} \frac{U_j}{x_r}$$

$$S_{2ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{U_r}{x_i} \frac{U_j}{x_r} + \frac{U_r}{x_j} \frac{U_i}{x_r} \right), \quad S_{3ij} = \frac{U_r}{x_i} \frac{U_r}{x_j}$$

上式は、より一般的な Pope³⁾の表現と等価である。式(9)中のモデル係数 C_1, C_2, C_3, C_{μ} については、ストレイン・パラメータ S とローテーション・パラメータ Ω の関数として次のように与える。

$$C_1 = 0.4 f_M(M), \quad C_2 = 0, \quad C_3 = -0.13 f_M(M) \quad (10a)$$

$$f_M(M) = \frac{1}{1 + 0.02 M^2}, \quad M = \max(S, \Omega) \quad (10b)$$

$$C(M)_{\mu} = \min[0.09, \frac{0.3}{1 + 0.09 M^2}] \quad (11)$$

$$S = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}}, \quad \Omega = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \Omega_{ij} \Omega_{ij}}, \quad \Omega_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (12a, b)$$

(4) 計算方法の概要

計算法は直交格子系の有限体積法とし、完全スタガード格子系を用いる。運動方程式の移流項は QUICK を、 k および ε 方程式の移流項は Hybrid 法を用いる。時間積分は完全陽解法とし、二次精度の Adams Bashforth 法を用いる。圧力については SOLA 法に従い各時間ステップごとに連続式を満たすように収束計算により求めた。

3. 穴あきダムへのモデルの適用

3.1 数値計算モデルの検証

本研究では、穴あきダムの洪水吐による流出と越流時の余水吐による流出について数値計算により解析を行った。まずは、洪水吐による流出と越流時の流出結果が定量的に再現されているかを理論値と比較することにより検証した。

3.1.1 洪水吐のみによる流出 (case1)

(1) 計算水路

スルースゲートのようなダムを設置して、越流させずに洪水吐のみの流出結果を理論値と比較する。図-1 に計算水路の形状を示す。計算格子は縦断方向に 30、横断方向に 4、鉛直方向に 15 で区切り、格子間隔は縦断・横断方向に 0.25m、鉛直方向に 0.2m とした。

(2) 洪水吐を流れる流量計算

洪水吐から流れる流量の理論値は以下の式で表される。

$$Q = c \times B h_s \times \sqrt{2gh} \quad (13)$$

ここで、 c : 流量係数である。

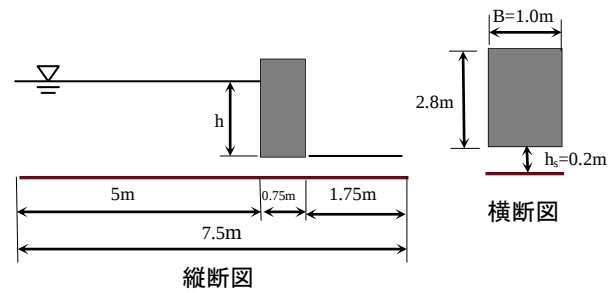


図-1 計算水路 (case1)

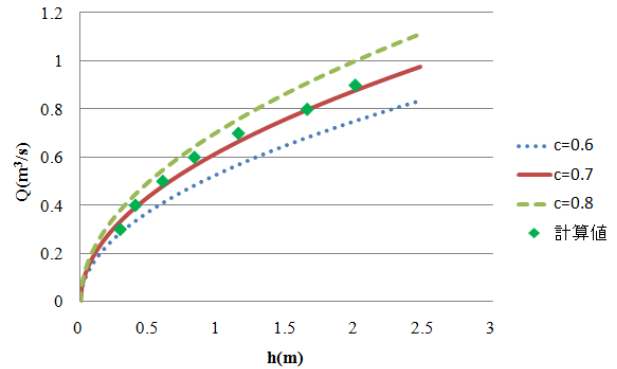


図-2 洪水吐による流出結果

(3) 流量の計算結果

理論値と計算結果の比較を図-2 に示す。流量係数は経験則によって 0.6~0.8 の幅の値をとるので、それぞれの値の結果を図示した。またプロットした値が各流量における数値計算で求めた計算結果である。結果を見ると、計算値が流量係数 0.7 の時の理論値と一致しているため、計算モデルは洪水吐による流出を定量的に再現していることがわかる。

3.1.2 越流(余水吐)による流出 (case2)

洪水時は越流が起こる可能性もありえるので、越流が起こった場合の計算モデルの検証を行う。洪水吐を設けずに、上から越流のみをさせるダムを設置した場合の流出結果を解析する。

(1) 計算水路

図-3 に計算水路の形状を示す。計算格子は縦断方向に 30、横断方向に 4、鉛直方向に 15 で区切り、格子間隔は縦断・横断方向に 0.25m、鉛直方向に 0.1m とした。

(2) 越流部を流れる流量計算

越流部ではフルード数が 1 となる支配断面が生まれるため、越流部を流れる流量の理論値は以下の式で表される。

$$Q = \left(B \frac{2}{3} h_o \right) \times \sqrt{g \frac{2}{3} h_o} \quad (14)$$

(3) 流量の計算結果

理論値と計算結果の比較を図-4 に示す。プロットした値が各流量における数値計算によって求めた結果である。計算結果を見ると、理論値と計算値との誤差は少なく、計算モデルは越流からの流出を定量的に再現していることがわかる。

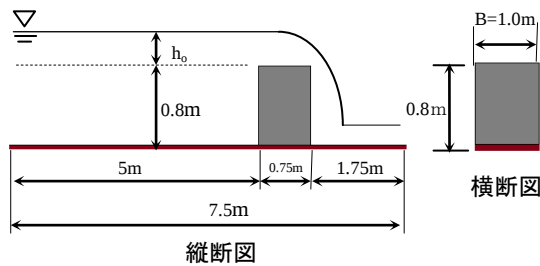


図-3 計算水路 (case2)

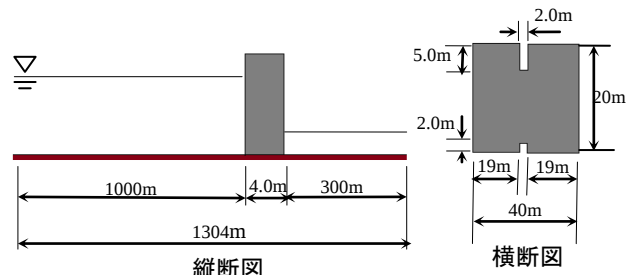


図-5 計算水路 (case3)

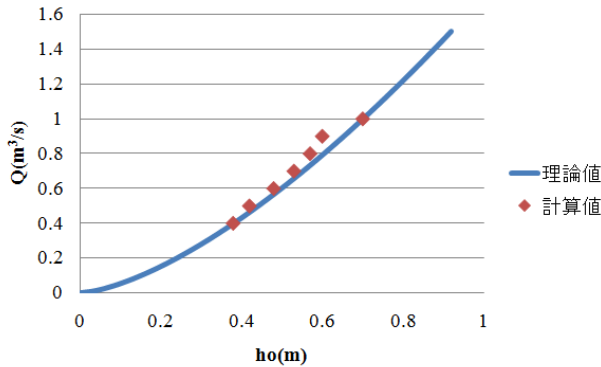


図-4 越流部による流出結果

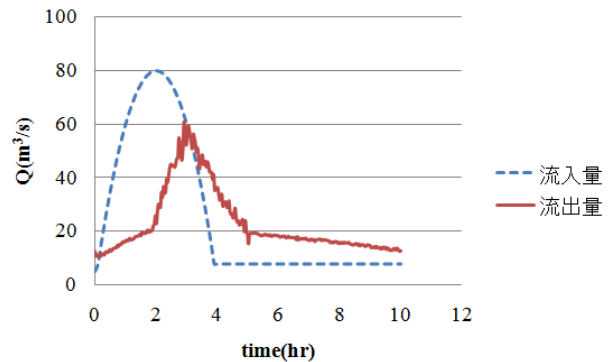


図-6 流出結果

3.2 洪水吐と越流による流出 (case3)

通常の穴あきダムでは大きな洪水が起こった場合、洪水吐の流出に加え、越流からの流出が加わるケースが起こることが予想される。3.1によって、洪水吐の流出と越流による流出の結果が定量的に再現された結果であったので、洪水吐と越流の二つの流出が想定されるケースについて、数値計算モデルによって水理特性を解析する。

(1) 計算水路とダム形状

計算水路とダム形状を図-5に示す。このケースでは通常の穴あきダムの水理特性を解析するため水路とダムのスケールは小規模ダムを想定して計算を行った。

計算格子は縦断方向については上流端からダム堤体までを30、ダム堤体で2、ダム堤体から下流端までを20で区切った。また、今回のケースは水路長が長いため、上流端からダムまでの区間と、ダムから下流端の格子間隔は等比級数によって変化して与え、ダム付近で格子間隔が小さくなるように与えた。ダム堤体での格子間隔は2mである。また横断方向の計算格子を40、鉛直方向を20で区切った。格子間隔は横断方向、鉛直方向ともに1mである。

ダムの形状として、本ケースでは矩形断面を組み合わせたダムを考えた。ダムの高さは20m、幅40m、奥行きは4mとした。また洪水吐の大きさは2m×2mとして水深が15mを超えると越流させるような形状とした。

(2) 計算条件

本ケースでは、最大流量が80m³/sとなるようにハイドログラフを設定して流入させた。

また水路勾配は1/100とし、マニングの粗度係数は0.02で与えた。

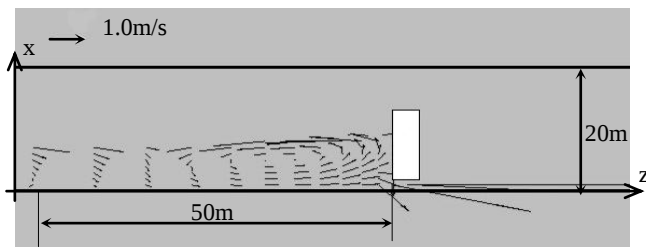
(3) 流出特性の考察

流入させた流量と穴あきダムから流出した流量の関係を図-6に示す。

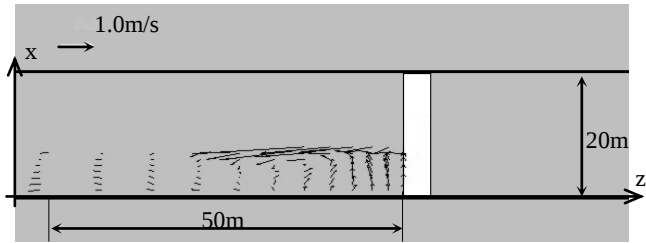
図-6の結果から、変化勾配が二つ現れた流出挙動の結果が得られた。穴あきダムの洪水時の特性として、はじめは洪水吐のみの流出であるが、流入量が増加するとダムによる堰上げ効果が働き水深が上昇する。本ケースでは、ダムの形状から水深が15mを超えると、上から越流が起こるため、越流からの流出が加わる。したがって、流出量の結果がある時刻から急に増加している原因としては、洪水吐の流出に越流からの流出が加わったためである。流入量が80m³/sでピークに達してからは時間が経つにつれて減少していくので、それに伴い水深が低下する。その後再び、洪水吐の流出のみになり、穴あきダムからの流出量が減少する。このような理由から穴あきダムの特徴的な流出挙動が得られたと考えられる。

また、洪水吐の流出に越流が加わった流出の時、得られた結果に振動が見られる。この原因については、洪水吐による流出と越流による流出の相互作用によって水面変動が起こったためだと考えられる。また、時間間隔や格子間隔についても検討する必要がある。

穴あきダムの治水効果について考える。貯水容量が余水吐の敷高を越えた場合には流入量と流出量が同じになるまではある勾配をもった流量の変化が見られることから下流に対し急激な水位上昇を防ぐことができると考えられる。

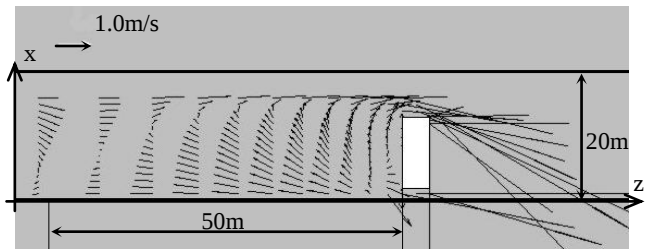


(a) 中央部 (y=20m)

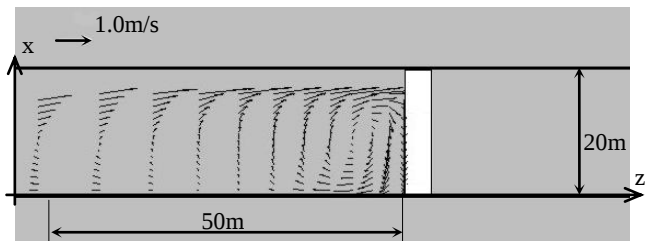


(b) 隔壁部 (y=10m)

図-7 洪水吐のみの流出時の流速分布(縦断断面)

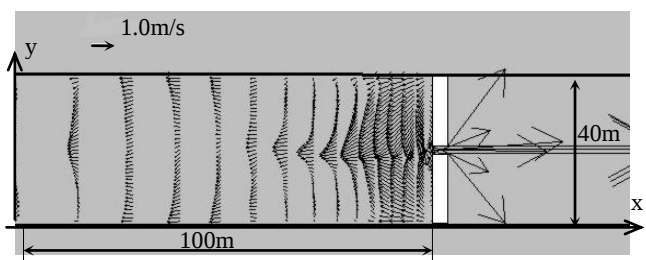


(a) 中央部 (y=20m)

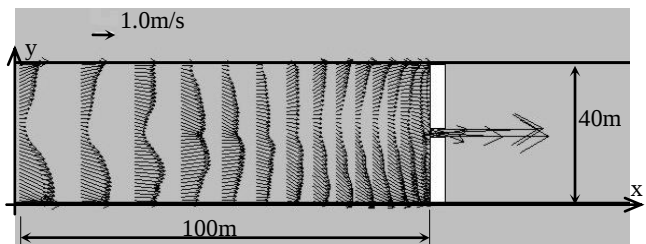


(b) 隔壁部 (y=10m)

図-8 洪水吐と越流の流出の場合の流速分布(縦断断面)



(a) 洪水吐の中心断面 (z=1m)



(b) 越流断面 (z=15m)

図-9 洪水吐と越流の流出の場合の流速分布(水平面)

(4) 流速の計算結果

洪水吐のみの流出時の縦断断面の流速分布を図-7、洪水吐と越流による流出時の流出分布を図-8、またこのときの水平面の流速分布を図-9に示す。

洪水吐のみの流出時の縦断断面の流速分布では中央部で洪水吐きから流れていく流速が急激に速くなっている。また、ダムによって水がせき止められることにより河床付近では流下方向に流速ベクトルが向いた渦が発生している様子が見られた。したがって、土砂輸送を考慮した場合、河床の土砂は洪水吐きに向かって排出されていくと考えられる。隔壁部においてもダムによるせき上げ効果が確認された。

図-8より、越流による余水吐の流出が加わると、ダム付近では洪水吐に向かっていく流速ベクトルと余水吐に向かっていく流速ベクトルに分かれている様子が見られた。また、この場合もダムによって渦が発生したが、河床付近の流速ベクトルは流下方向とは逆に向いているため、洪水吐のみによる流出の時と渦の向きが逆になっていることがわかる。隔壁部においても逆向きの渦が発生していることがわかる。

また、図-9より水平面の流速分布については、洪水吐の中心断面では流速ベクトルは流下方向とは逆に向いているが、越流断面では越流による影響を受け流速ベクトルは流下方向を向いていることがわかる。

4. おわりに

本研究では、穴あきダムの水理特性について三次元自由水面モデルを用いて解析を行った。

(1) 計算モデルの妥当性

本研究で用いた三次元計算モデルは洪水吐からの流出と越流による流出を定量的に再現していることがわかった。

(2) 穴あきダムの水理特性について

洪水吐と越流による流出を想定したケースの解析を行った結果、穴あきダムの効果が再現された。

また、流速分布では、洪水吐のみの流出の場合と、越流が加わった場合とでは、逆向きの渦が発生し定性的に異なる結果が得られた。この違いは河床変動を考慮した場合に大きな影響を与えようと考えられる。

今回は流れによる特性のみについて、解析を行ったが、今後は河床変動も考慮した計算モデルを構築して土砂輸送の影響なども解析を行い、さらに穴あきダムの特性について研究していきたい。

参考文献

- 1) 朝井孝二, 坪郷浩一: 密度関数法による自由水表面流れ解析のための体積補正法に関する研究, 水工論文集, 第49巻, pp697-702, 2005.
- 2) Kimura, I. and Hosoda, T.: A non-linear k-ε model with realizability for prediction of flows around bluff bodies, Int. J. for Numerical Method in Fluids, Vol.42, pp813-837, 2003.
- 3) Pope, S.B.: A more general effective viscosity hypothesis, J. Fluid Mech., Vol.72, pp331-340, 1975.