

治水と利水の両立を目指した洪水時の 効率的なダム操作に関する研究

環境社会基盤工学専攻 水圏防災工学研究室 篠原昇
指導教員 細山田 得三

1. はじめに

近年, 台風や線状降水帯による洪水被害が増加傾向にある。洪水時には, 河川の状況をいち早く把握し, 氾濫の恐れがある場合には周辺地域へ避難勧告を行うなど人々の命を守る為迅速な対応が求められる。こうした洪水被害への対策としては, 事前にハザードマップの制定や避難訓練といった避難の際に迅速に行動できるよう周知しておくことに加え, 河川への流入量予測による予報や, 上流にダムが設置されている場合には下流への放流量をカットし洪水時の河川水深を低減させるといった防災操作を行う必要がある。しかし, 非常に強い降雨が発生しダムの調節能力を超えた場合には, ダム水位がサーチャージ水位に到達した後は緊急放流に移行し, 流入量と等しい水量を放流する。下流河川の水深が高まった状態で緊急放流を行うと河川水深が急上昇し, 堤防高を越えた場合は周辺地域に甚大な被害を及ぼす。ダムの操作における問題点として, 多目的ダムは操作規則によって操作に制限がある他に, 利水容量分の水を確保する必要があり, 洪水発生前にダム容量を十分に空けられずダムの防災能力を十分に発揮できない場合がある。こうした問題を受けて近年では, 国土交通省では事前放流ガイドライン¹⁾にてダムの貯水容量の一部を洪水前に事前放流を実施する指針を定めている。事前放流ガイドラインでは, ガイドラインに記載された手法によって各ダムで定められた基準降雨量を超えた場合, 84時間の降雨予測, 39時間の降雨予測の累積降雨量より, ダムへの流入量を予測する。その後, 予測される流入量, 現在ダムが貯留可能な空き容量, 同じ本川に合流するダムからの放流量, 下流河川の許容量より放流する量を定める。

また, 石尾らの事例²⁾では, 深層ニューラルネットワークよりダム放流量を管理するシステムを構築した結果, 仮想の洪水に対して, 操作規則に基づいた操作よりうまくダム操作を行えるようになったと述べている。しかし, AIによる流入予測とダム操作においては, 有用性があるといった結果になっているものの, 流入予測結果と実流入量とのギャップ, ダム操作に関しては実際のダム操作とは乖離したAIによる操作及び放流などの課題が残されている。

そこで本研究では, ダムが持つ役割である治水と利水の双方に着目し, 治水と利水を両立出来るダム操作の効率化について検証する。検証方法として, プログラムでダムへの流入, ダムからの放流を与えたとき, ダム水位を計算するモデルを作成する。その後, 事前放流量や放流手法を変更し, 下流河川の水深を計算する。計算結果を

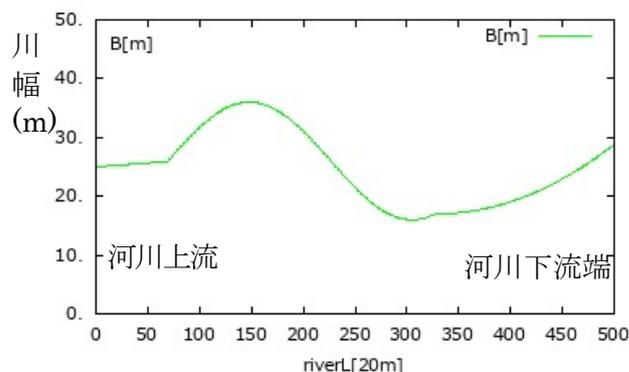


図-1 川幅の分布

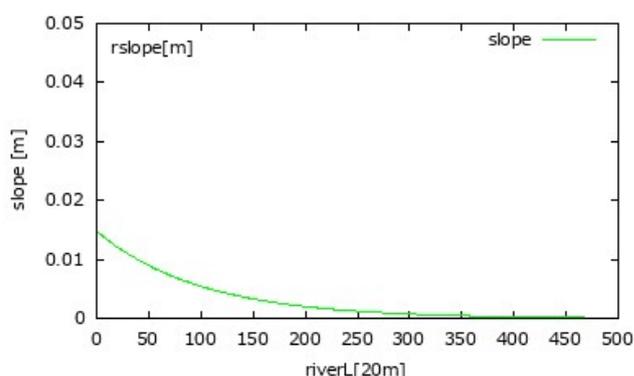


図-2 河床勾配の分布

表-1 三国川ダムの諸元³⁾

洪水時満水位	EL432.0m
最低水位	EL394.0m
有効貯水容量	19,800,000m ³
洪水調節容量	18,000,000m ³

比較し, 洪水時の治水と利水を両立させ効率化したダム操作について検証を行うものとする。

2. 検証方法

検証方法としては, ダム水位計算の為にダムモデルを作成し, 流入量とダム放流量の差から水位変動をモデルに反映するプログラムを用いて計算を行う。そして放流量を河川上端流量として河道モデルと接続し河川流の計算を行う。河道モデルは川幅, 河床勾配を変化させた形状とする。河床勾配は上流端を 0.01, 下流端を 0.001 とし傾斜を緩やかにした形状とした。なお, 図-1

に川幅のグラフ,図-2 に河床勾配のグラフを示す. 河川水深,流速計算は Dynamic-wave 法で行う. ダムモデルは新潟県南魚沼市にある三国川ダムの測量データより作成した. 表-1 に今回使用した三国川ダムの諸元について示す. なお,洪水時満水位はサーチャージ水位を示している.

検証対象となる洪水とその期間は,三国川ダム流域で2011年新潟・福島豪雨による影響が特に大きかった2011年7月29日から7月31日までの72時間とした.

3.計算方法

3.1 ダムモデルの計算

ダムモデルは,0.1m ごとの各水位の貯留量,湛水面積の測量データを使用し作成する. ダムの貯留量は管理日報の流入量,ダムからの放流量の差より計算を行う. そして計算した貯留量(m³)を湛水面積(m²)で除算し水位 h(m)とする. 今回使用する流入量のデータは管理日報より得た1時間毎のデータとし,水位は1cm 単位まで計算を行う. また,水位データの出力は10分毎に行う. ダム水位の計算式を(1)に示す.

$$A(h) \frac{dh}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

A(h): 水位ごとの貯水池湛水面積(m²)
Q_{in}: 流入量(m³/s), Q_{out}: 放流量(m³/s)

ダムモデルの動作について,2019年10月12-14日の期間を対象とした検証でダム+河川モデルの動作確認を行い,モデルが検証に使用するのに妥当であるか確認する. 検証の詳細について,Case A-E の5Caseにて放流を操作した場合のダム水位,放流量,ダム上流から6,000m 地点の河川水深よりダムと河川モデルの計算が動作しているか確認する.

3.2河川モデル計算

河川モデルでは Dynamic-wave 法(2)-(5)より計算を行う. 3.1のダムモデルからの放流量を河川上流端の流量として,河川長10,000mを500区間に分割し計算する. なお,マンニングの粗度係数は0.035とする. Dynamic-wave 法による運動方程式(2)と連続の式(3)より各区間ごとに水深と流速を求め,時間経過による河川の流れを計算する. 連続の式(3)を離散化し,(4)より水深hを求める. また,運動方程式(2)を離散化し式(5)より流速vを求める.

$$\text{運動方程式} \quad \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\beta v^2}{2g} \right] + \frac{\partial h}{\partial x} = i - \frac{n^2 v^2}{R^{4/3}} \quad (2)$$

$$\text{連続の式(横流入0の場合)} \quad 0 = \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (3)$$

$$\text{水深は, } h_{t+1} = (q_x - q_{x+1})dt/dx + h_t \quad (4)$$

$$\text{流速 } v_{t+1} = \left[- (h_{x+1} - h_x)/dx - \{(v_x)^2 - (v_{x-1})^2\}/(2g \cdot dx) + i - \frac{n^2 v_x^2}{R^{4/3}} \right] dt + v_t \quad (5)$$

Q: 流量(m³/s), A: 断面積(m²) R: 径深(m), n: 粗度係数, i, 斜面勾配

表-2 各 case の放流ルール

Case21	放流量 $Q_{out} = 80 - (Q_{in} - 200)$
Case22	流入量が 100m ³ /s 以上なら放流量 50m ³ /s. それ以外では放流量 200m ³ /s
Case23	流入量が 150m ³ /s 以上なら放流量 150m ³ /s. それ以外では放流量 200m ³ /s

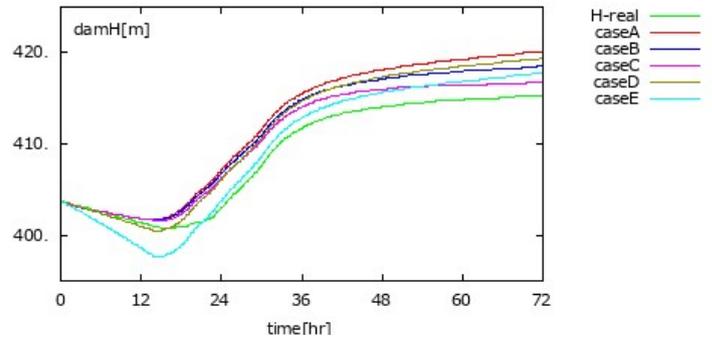


図-3 CaseA-E ダム水位

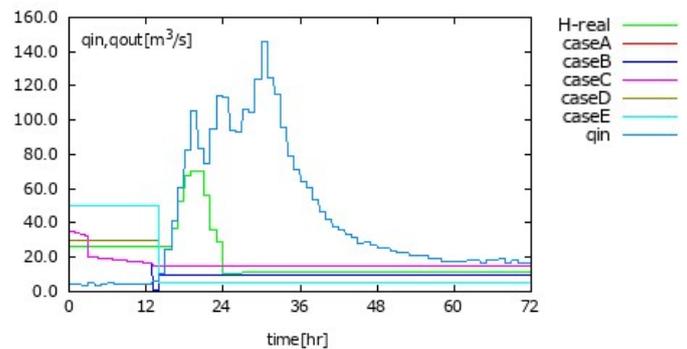


図-4 CaseA-E ダム放流量

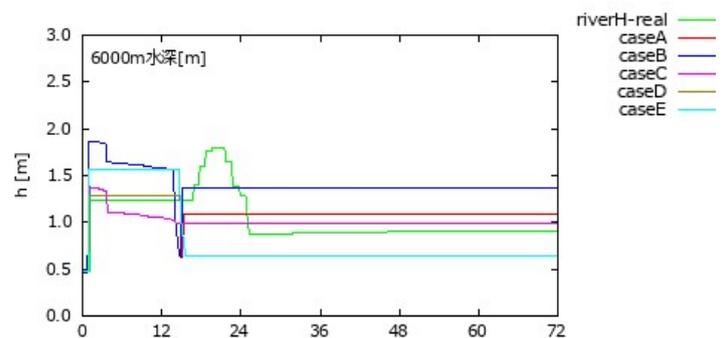


図-5 CaseA-E 河川水位

3.3ダムの放流量変更による河川モデル, ダム水位変化の検証

ダムモデル上で放流量を変更し,放流量を流入量の90%,70%,50%,30%としたパターンで計算する. 更に各パターンごとに最低放流量を50m³/s,100m³/s,150m³/s,200m³/s,250m³/sとしたCaseで計算を行う. (全20Case)また,事前放流後に放流量を低減する操作や,放

流量の増減を繰り返す操作を行い比較する。(21-23Case)表-2 に Case21-23 の操作方法を示す。なお,CaseA, B, C, 21, 22, 23 では,プログラム上におけるダムの放流量決定を,放流ゲートの面積とゲート開度を入力し,放流量をコントロールする方法としている。放流量を決定する式はトリチェリの定理より,以下の式(6)とする。

$$Q_{in} = C \cdot A \sqrt{2gH} \quad (6)$$

Q_{out} : 放流量(m^3/s),

C : 流量係数, A : 放流孔面積(m^2),

g : 重力加速度(m^2/s), H : ゲートと水面の水位差(m)

3.4 Froude 数による常流射流境界の計算

froude 数が 1 より大きい場合は射流, 1 より小さい場合は常流となる。また, froude 数が 1 の状態を限界流といい, 限界流を境目に常流と射流が変移する。射流では, 波の伝播速度より流速が大きいため, 河川の波は上流から下流へのみ伝わる。一方常流では, 波の伝播速度が流速を上回り波形が上流方向と下流方向の双方に伝わる流れとなる。以下に froude 数の計算式(7)を示す。

$$F = v / \sqrt{gh} \quad (7)$$

F : froude 数, v : 流速(m/s), g : 重力加速度(m^2/s),

h : 河川水深(m), \sqrt{gh} : 波の伝播速度(m/s)

4. 計算結果

4.1 ダムと河川モデルの動作確認

今回の検証結果では, 計算したダム水位と実際のダム水位の記録を比較した結果, ほぼ実際のダム水位を再現していたことが確認できた。また, 計算した水位は, 実際のダム水位と比べて 1 時間ほど水位が遅れて追従していた。

ダムから放流した水が矩形断面の河川を流れたときの水深を Kinematic-wave 法で計算した結果においては, 河川水深は放流量に比例して水深上昇, 水深低下をしていた。矩形断面は河川が一様断面で同一の河床勾配で水が流れ, Kinematic-wave 法による河川計算ではダムの放流による水の伝播が減衰しないまま下流へ流れることから, 河川水深が放流量の増減に最も影響を受けていた。

4.2 ダム放流量の値による河川水深変動について

洪水区間において, 放流量を流入量の 90% から 30% まで変化させ河川水深の応答を検証した結果(Case1-20)より, ①Case1(放流量 Q_{out} を流入量 Q_{in} の 90% に設定し, 最低放流量 Q_{min} を $50m^3/s$ とした) ②

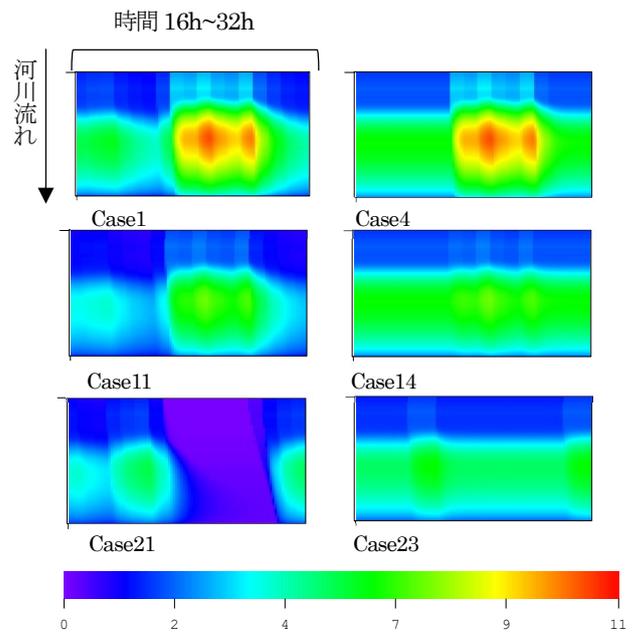


図-6 各 Case 河川水深

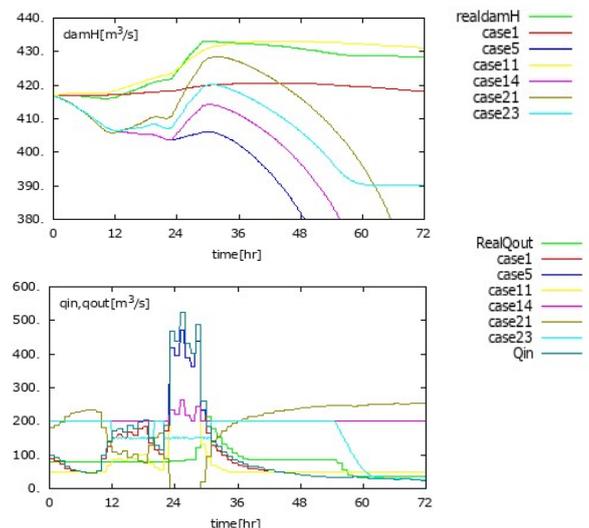


図-7 放流変更によるダム水位、放流量の比較

Case4($Q_{out}=Q_{in} \times 90\%$, $Q_{min}=200m^3/s$) ③

Case11($Q_{out}=Q_{in} \times 50\%$, $Q_{min}=50m^3/s$) ④

Case14($Q_{out}=Q_{in} \times 50\%$, $Q_{min}=200m^3/s$) の計算結果を図 6, 図-7 に示す。なお, 表示しているのは特に流入量が多い 16 時間後から 32 時間後の区間とする。各 Case では事前放流量が異なる場合においても, 河川の最大水深はダムからの最大放流量を記録した区間で最も河川水深が高かった。また, 川幅が収縮している区間で最も水深上昇していた。

4.3 放流量の増減による河川水深変動について

case21, case23 にて, 放流量を増大, 低減した操作を繰り返した場合の河川水深について比較する。放流量を増加させた場合, 下流へ水深上昇が短時間で反映しているが, 放流量を低減させた Case では, 水深低下が反映され

る時間が長く、水深が低下しきるまでにタイムラグが生じていた。

4.4 froude 数の計算結果

今回検証した Case より、図-8 に Case1, 4, 21 の限界流境界を示す。縦軸が時間、横軸がダム放流点からの距離(1区間 20m で 20m×500 ステップ=10,000m)を示している。froude 数の結果より、Case1, 4, 21 のいずれにおいてもダムから放流後 1km 以前で限界流となり、以後は常流であることが確認できる。また、限界流の境界線形状に着目すると、各 Case においてそれぞれ各 Case の放流量の線形と同様の形状をしており、放流後に限界流になるまでの距離はダムからの放流量が多いほど長くなるのが分かった。また、今回計算した 10km の区間においてはほとんどの区間で常流であり、流速が波速と比較して遅いことから水が滞留しており、川幅が収縮している部分で水深が高くなりやすくなっていることが考えられる。

5. 考察

各 Case において事前放流量を変化させた場合でも、最大河川水深は事前放流の水量に関わらずダムからの最大放流量が影響していた。また、放流量を急増させた場合河川水深も短時間のうちに急上昇し氾濫の危険性が高いことが分かった。case21,23 を比較した結果については、放流増加による水深上昇は短時間だが、反対に水深低下は放流量を小さくしてもすぐには反映されず、水深が低下するのに時間がかかる。事前放流を過剰に大きくした操作ではダム水位が急低下し利水の点においても貯水量が少なくなり、治水においては放流を低下させた後も水深低下をするのに時間を要する。つまりダムの放流は事前放流量が大→洪水到達時に放流量を小さくするという操作ではな事前放流前後で放流量を一定にする手法のほうが河川水深上昇を抑えられる効率的な放流といえる。

6. まとめ

今回の検証では、ダムの放流による河川水深への影響を調べるため、治水と利水の面からダム操作を効率化する手法について検証した。その結果、河川水深が最も上昇する要因は事前放流の有無に関わらず、最大放流量の値が影響していた。また、洪水前に放流量を増加させると下流へ水深上昇が短時間で伝搬し、放流減少による水深低下においては下流へ影響するまでの時間が長いことから、治水と利水の観点における効率的なダム操作においては洪水時に放流量を一定とし水深上昇を抑える操作を行うことでダムによる河川水深上昇を低減できると考えられた。

7. 今後の展望

今後の展望として操作手法を河川測量より作成したより現実に即した河川モデルを使用することで実際のダム運用の評価が可能と考えられる。

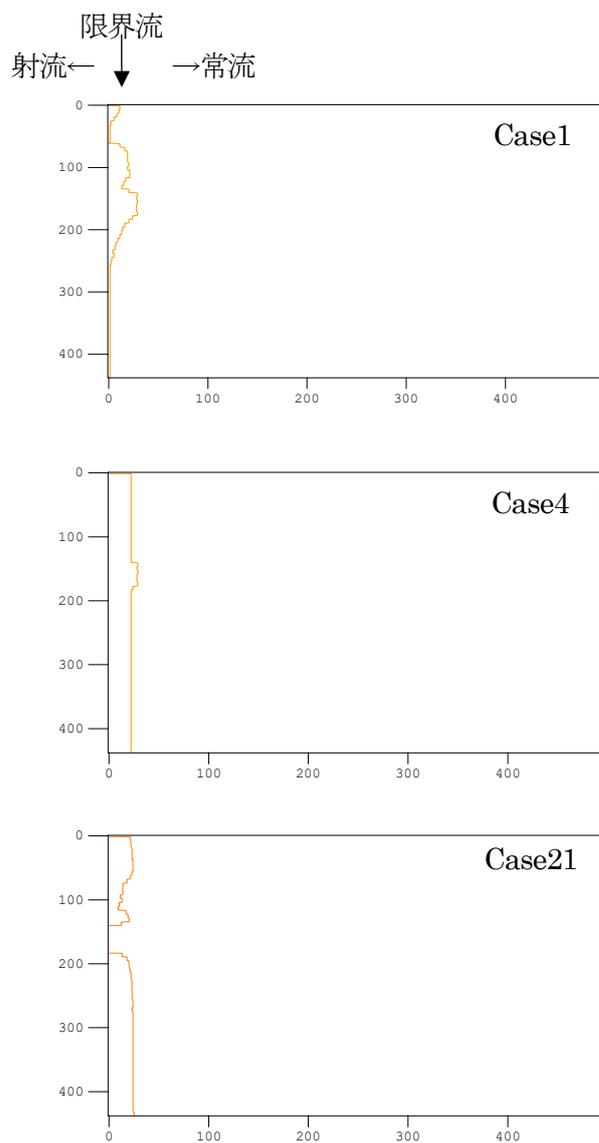


図-8 各 Case の限界流境界

参考文献

- 1) 国土交通省『事前放流ガイドライン』(R3.7)
URL: https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/pdf4/02jizenhouryu_guideline_honbun.pdf
- 2) 石尾将大, 一言正之, 島本卓三, 房前和朋: 深層強化学習を用いたダム操作モデルによる洪水調節 河川技術論文集 25 巻 pp339-344 20
- 3) 国土交通省北陸地方整備局 三国川ダム管理所『三国川ダムデータファイル』
URL: <https://www.hrr.mlit.go.jp/saguri/shirumanabu/datafile.pdf>