ゲート放流を考慮した平面2次元解析による 河川状ダム調整池における水位分布の再現

NUMERICAL SIMULATION OF WATER LEVEL IN MEANDERING DAM
RESERVOIR USING 2D FLOW MODEL CONSIDERING GATE OUTFLOW

有光 剛¹・牧野晋祐²・出口 恭³・大江一也⁴

Tsuyoshi ARIMITSU, Shinsuke MAKINO, Takashi DEGUCHI and Kazuya OOE

¹正会員 博(工) 関西電力株式会社 電力技術研究所 (〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺3-11-20)

²関西電力株式会社 電力技術研究所 (〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺3-11-20)

³正会員 博(工) 株式会社ニュージェック (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

⁴正会員 工修 関西電力株式会社 電力技術研究所 (〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺3-11-20) .

For operation and management of dams, it is most essential to evaluate inflow and outflow discharges in dam reservoirs. Outflow discharges have been evaluated from reservoir water elevations and gate openings. However, water surface elevations might be different by observation point at a meandering part of reservoir. In this study, a 2D depth-integrated flow model was improved in order to consider water surface elevations near gates. Moreover, estimation method of outflow discharge was proposed using charts, which were constructed employing the 2D flow model. The comparison between the numerical and observed results revealed that the proposed method could reasonably reproduce the outflow discharge even if difference in water surface elevation was generated.

Key Words : *Dam reservoir, outflow discharge, dam gate, water surface level, 2D depth-integrated flow simulation*

1. はじめに

一般的に、ダム調整池への流入量の算出には水位観測値が用いられ、水平湛水を仮定したH-V関係に基づく貯留量の増減と、ダムからの放流量から求められている。一方で、ゲート放流量の算出には、水位観測値とゲート開度による算定式¹⁾が用いられる。しかしながら、時空間的に変化する貯水位を、ダム近傍の1点で観測された水位で代表させているため、出水時の水面勾配や、風およびゲート操作による波浪やセイシュが発生する場合には、流量に誤差が含まれる可能性がある。また、上流域のダム調整池の中には、水面幅が狭く湾曲しているために、流速が大きくなった際に左右岸に水位差が生じ、水平湛水仮定の適用が困難となる地点もある。

ダム流入量の評価手法に関しては、中村ら²⁾が貯水位の平滑化によってセイシュ等の振動成分の除去する方法を提案している。また、鈴木ら³⁾は、小規模ダムにおいて接近流速が大きくなる場合には、水位平滑化法を用いて算出された放流量が過小評価となることを指摘してい

る。また、塚本ら⁴⁾は、平面2次元解析を実施し、調整池内の洪水伝播を考慮した流入量・放流量の評価を行っている。しかしながら、これらの流量算出に関する既往の研究においては、幅が狭く河川のような形状をしたダム調整池の湾曲部における横断方向の水面勾配を対象とした検討事例はない。

本研究では、幅が狭く曲率の大きい河川状のダム調整池を対象とし、平面2次元解析を用いて左右岸の水位差の再現を試みた。計算においては、ゲートからの放流の影響を考慮したモデルを組み込むことで、調整池内の複雑な水位分布の再現性の向上を図った。また、計算結果を活用して、横断方向の水面勾配が発生する状況においても適用可能である簡便なゲート放流量算出方法を提案する。

2. モデル区間の概要

本研究で対象としたダムは、有効貯水容量約500千m³、湛水面積約0.15km²の重力式コンクリートダムである。

図-1 モデル区間平面図

図-2 出水時の左右岸水位観測値

図-3 左右岸水位観測値から求めたゲート放流量

図-1に、モデル区間の平面図を示す。水面幅は約60mであり、細長く伸びた形状とダム直上流の湾曲部が特徴的なダム調整池である。ダムには幅8mの洪水吐ゲートが8門設置されている。本検討では、図中に示したダム堤体の約30m上流の左右両岸において水位を観測し、左右岸の水位差発生状況を把握した。

図-2に、出水時に観測された左右岸それぞれの水位の時系列を例示する。出水中は、あらかじめ決められている操作順序に従い、流入量と等しい流量を放流するようにゲートの開閉操作が行われる。出水前には左右岸の水位が同程度であったものの、出水中には右岸側の水位が大きく低下して、左右岸に顕著な水位差が生じている。なお、この出水における左右岸の最大水位差は1.44mである。その後、右岸水位は徐々に回復し、最終的に水位差は解消されている。このことから、モデル区間では、平常時には横断方向の水面勾配は生じておらず、水平湛水が成り立っているといえる。一方で、出水により流量が大きくなった場合には、湾曲部外岸側に相当する左岸側の水位が上昇するのに対して、内岸側に相当する右岸

側の水位は低下するために、左右岸で大きな水位差が発生すると考えられる。

同じ出水に対して、ゲート開度と左右岸それぞれの水位観測値からゲート放流量時系列を試算した結果を図-3に示す。ここで、放流量は、水位観測値と各ゲートの開度を用いて流量算定式から得られるゲート毎の放流量を合計して求めた。流量が小さい出水初期には、左右岸の水位差が小さいために、いずれの水位観測値を用いても同程度の放流量が得られる。しかしながら、流量の増加に伴い、それぞれの水位観測値から算出される放流量に差異が生じる。これは、図-2に示したように、出水中に右岸側の水位が低下して横断方向に水位差が生じたことで、右岸側水位観測値に基づく放流量計算値が、左岸側からの値と比べて小さくなったためである。なお、前述の最大水位差(1.44m)が発生した時刻には、左右岸の水位観測値から求められる放流量は、それぞれ1000.2m³/s、825.2m³/sとなり、流量算定に用いる水位によって175m³/sの差異が生じる。

3. 平面2次元解析の概要

調整池湾曲部における横断方向の水面勾配の再現を目的として、平面2次元解析を実施した。計算には、出口ら⁵⁾の非構造格子有限体積法を用いた。空間積分には流束差分離法を、時間積分にはEulerの陽解法を適用した。なお、出口ら⁵⁾は河床変動を計算しているが、本検討では出水時の流動のみに着目しているため、土砂移動・河床変動を考慮しない固定床の計算を行った。計算領域は図-1に示したダムから約1.4kmの範囲であり、メッシュサイズは約2mとした。

計算においては、下流端で流量および水位の境界条件を設定する必要がある。以下では、一般的な方法として水位観測値に基づくゲート放流量とダム貯水位を下流端条件として与える計算と、ゲートモデルを組み込むことで下流端の水位・流量を計算によって求める方法の2通りの計算を行い、水位観測地点における左右岸水位差の再現性を比較した。

4. 水位観測値に基づく下流端条件を与えた計算

(1) 計算方法

ここでは、ダム調整池を対象とした流動再現計算における一般的な下流端条件の設定方法として、水位観測値を利用した方法で計算を行った。具体的な境界条件の設定方法を表-1に示す。両ケースとも、上流端では図-3に示す流量のうち、出水中の時間変化が小さかった左岸側の水位観測値に基づく流量時系列を与えた。予備計算の結果、下流端に左右岸いずれかの水位観測値を与えた場合には、水位が全体的に過大または過小評価されること

表-1 水位観測値に基づく下流端条件の設定方法

	水位	流量
ケース1	左右岸観測水位の 平均値	左岸水位観測値・ ゲート開度から計算
ケース2		自由流出

図-4 水位観測値に基づく下流端条件を用いた計算結果

が確認された。このため、両ケースとも、下流端水位の境界条件としては、左右岸の水位観測値を平均したものを時系列で与えた。流量の下流端条件は、上流端と同様に左岸側水位観測値とゲート開度から流量算定式を用いて求めた放流量を与える方法（ケース1）と、水位のみを条件として与えて自由流出とする方法（ケース2）の2通りの計算を実施した。ケース1では、水位とゲート毎の開度から算出した各ゲートの流量を合計し、下流端境界の計算メッシュに等分した。一方で、下流端における横断方向の水位分布やゲート毎の流量は不明であることから、ケース2では境界条件として水位のみを与え、各計算メッシュの上流の流況に応じた流量が放流されるように自由流出とした。2つのケースでは、観測値に基づいて同様の方法で下流端水位を設定しているものの、流量の算出方法が異なるため、それぞれの条件における左右岸水位差の再現性を比較した。なお、最大水位差発生時刻におけるケース2の放流量は1078.3m³/sであり、ケース1の1000.2m³/sと比較すると若干大きな値となった。

(2) 左右岸水位差の再現性

前述の出水に対する両ケースの再現計算結果を、図-4に示す。図には、水位観測地点に相当するメッシュにおける水位の計算値を示している。両ケースとも、計算で得られる左右岸の水位は、左右岸の水位観測値の中間で推移している。このことから、左右岸の水位観測値を平均して下流端水位として与えた場合、調整池内の平均的な水位は再現することができるといえる。しかしながら、計算で得られる左右岸の水位差は観測値ほど小さくなく、モデル区間で生じる横断方向の水面勾配を含めた調整池内の水位分布を十分に再現することはできていない。なお、最大水位差(1.44m)発生時のケース1の水位差は0.53m、ケース2では0.32mである。これは、下流端水位として、ダムから約30m上流の地点における左右岸の水位観測値を平均して横断方向に一樣に与えたことが原因であると考えられる。このため、ゲート直上流における水位の横断方向分布が考慮できず、各ゲートからの放流量や調整池内の水位分布の再現性が不十分となると推察される。

5. ゲート放流を考慮した平面2次元解析

(1) 計算方法

前述のとおり、左右岸の水位観測値を平均したものを下流端に横断方向に一樣に設定した場合には、左右岸水位差など出水時の調整池内の複雑な水位分布を十分に再現できていない。そこで、平面2次元解析によって求められた水位・流量を下流端の条件とすることを目的として、ゲートモデルを構築した。モデルの概要を図-5に示す。ゲート境界メッシュにおける流量 Q_{out} は、1つ上流側

図-5 ゲートモデルの概要

のメッシュの水位 H_a 、流速 V_a およびゲート開度から求めた図中の H_1 、 H_2 を用い、以下の流量算定式により求める。

$$Q_{out} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} CB (H_1^{3/2} - H_2^{3/2}) \quad (1)$$

ここで、 g ：重力加速度、 C ：流量係数、 B ：ゲート幅である。ゲート境界メッシュにおいては、1つ上流側の水位 H_a とゲート敷高との標高差を水深 h_G とし、流速 V_G は放流量 Q_{out} を水深 h_G とゲート幅 B で除した値とした。

本来、(1)式による流量算定には速度水頭を含めた全水頭が用いられる。しかしながら、実際には接近流速が不明であるために、全水頭ではなく水位観測値が用いられているのが実情である。これに対して、ゲートモデルでは各メッシュの水平流速を計算しているために、速度水頭を加えた全水頭を用いた放流量算出が可能となり、接近流速の影響を加味することができる。また、計算領域内のすべてのメッシュの水位および流速が得られるため、ゲート直近の全水頭の横断方向の分布も考慮できる。

(2) 左右岸水位差の再現性

前述の出水において左右岸の水位差が最大(1.44m)となった時刻を対象に再現計算を行った。流量の真値が不明であるため、本計算では、各ゲートの当時の開度を設定したうえで流量のみを変化させた定常計算を実施した。ここでは、出水中の変動が小さかった左岸側の水位観測地点における水位計算値が観測値と一致する流量を試行錯誤により求め、その際の右岸水位計算値に基づいて左右岸水位差の再現性を評価した。

表-2に、左右岸水位の計算値と観測値の比較を示す。左岸水位が観測値と一致する条件における右岸水位計算値は463.00mであり、左右岸の水位差は1.24mである。ゲートモデルを用いることで、4.で述べた下流端水位を横断方向に一樣に設定した場合と比べて左右岸の水面勾配の再現性が大幅に改善されている。なお、その際の流量は859.1m³/sであり、左右岸の水位観測値から水平湛水仮定に基づいて求めた放流量(1000.2m³/s、825.2m³/s)の間であることから、合理的な値と考えられる。

表-2 ゲートモデルによる水位差の計算結果

	観測値	
	水位観測値	放流量算定値
左岸	464.24m	1000.2m³/s
右岸	462.80m	825.2m³/s
水位差	1.44m	
	計算結果（ゲートモデル）	
	水位計算値	計算放流量
左岸	464.24m	859.1m³/s
右岸	463.00m	
水位差	1.24m

図-6 ゲート直上流の水位・流速分布

図-7 各ゲートからの放流量

図-6に、ゲートモデルを用いた計算の結果得られた水位および流速ベクトルの分布を示す。ダムゲートから水位観測地点付近までの範囲の右岸側で、水位低下がみられるのに対して、左岸側では水位上昇が生じている。平面2次元解析によってこのような水位分布が得られたことで、観測地点における左右岸の水位差の再現性が大幅に向上したといえる。なお、流速ベクトルは調整池の形状には沿っておらず、右岸側で水位が低下する領域から左岸側へ偏った後、ダム直近では逆に右岸側へ向かう流れが生じている。ゲート直上流の水位は横断方向に一樣ではなく、流出の状況にもゲートによる差異がみられる。

図-7に、各ゲートからの放流量の計算結果を示す。図には、左右岸の水位観測値から求めた流量を各ゲートに等分した値も示す。ゲート毎の放流量は、水位観測値か

ら求めた値とは異なっており、ゲートによる差異が考慮されている。下流端水位を観測値に基づいて横断方向に一樣に与えた計算では、すべてのゲートに対して同じ水位を用いて放流量を計算するのに対して、ゲートモデルを組み込んだ計算では、ゲート毎の水位・流量を考慮することができ、結果的に調整池内の水位分布を精度よく再現できたものと考えられる。

6. 平面2次元解析に基づくゲート放流量算出方法

(1) 流量算出図表の概要

ゲート放流量を算出するために利用できる確実な情報は、ゲート開度と水位観測値のみあり、これらのデータから合理的な値を求める必要がある。ここでは、上述の平面2次元解析を活用して、横断方向の水面勾配が生じた場合でも、左右岸いずれか1地点における水位観測値を用いて簡便にゲート放流量を算出する方法を検討する。

左右岸水位差が生じる場合には、流量の真値が不明であるため、ゲートモデルを組み込んだ平面2次元解析を実施する場合には、前章で述べたとおり、開度を設定したうえで、水位観測値と計算値が一致する流量を試行錯誤によって求める必要がある。しかしながら、開度・水位観測値が変わる度に複数回の平面2次元解析を実施して試行錯誤的に流量を求めるには、多大な時間を要する。そこで、本検討では、あらかじめゲート開度と流量を変化させた計算を実施し、ゲート開度と左右岸それぞれの水位、流量の関係を、流量算出図表として整理することとした。これにより、ゲート開度と水位観測値の情報に基づく流量算出の精度向上と時間短縮の両立を図る。

(2) 流量算出図表の作成

流量および開度を变化させた平面2次元解析を実施し、その結果を整理することで、流量算出図表を作成した。計算には前章のゲートモデルを組み込んだ平面2次元モ

デルを用いた。流量を $25\text{m}^3/\text{s}$ ～ $1000\text{m}^3/\text{s}$ の範囲を $25\text{m}^3/\text{s}$ 間隔で、ゲートは 1m 間隔で全ゲートの開度の合計値（合計開度）を 20m まで変化させ、343ケースの計算を行った。それぞれの条件で定常状態となるまで計算を実施し、左右岸の水位観測地点に相当する計算メッシュの水位計算値を出力した。横軸をゲートの合計開度、縦軸を水位とした図表に計算結果をプロットして、流量毎に線で結ぶことで流量算定図表とした。8門あるゲートの開閉の順序はあらかじめ決められており、合計開度に応じたゲート毎の開度は一意に求まる。このため、ゲート操作の順序に基づいて 1m 間隔で各ゲートの開度を設定し、それぞれのケースの計算結果を、対応する合計開度上にプロットした。ただし、本検討では、半開流のパシカルフローを対象としており、越流状態のフリーフローとなった場合は描画の対象外とした。

図-8に、左右岸の流量算定図表を示す。図では、流量を $50\text{m}^3/\text{s}$ 毎に間引いている。同じ流量の場合、ゲート開度が大きいほど水位は低くなるため、図中の流量毎の曲線は右下がりとなる。なお、流量が小さい場合には左右岸の図表の差異が小さいのに対して、流量が大きいと同じ開度に対する左岸側水位が右岸側の値と比べて高くなっている。このように、あらかじめ平面2次元解析を実施して作成した流量算定図表は、流量が大きい場合に生じる左右岸の水位差に対応したものとなっている。

(3) 流量算出図表の適用性

流量算出図表を用いてゲート開度と左岸側の水位観測値からゲート放流量を読み取り、その開度・流量に対する右岸側水位を流量算出図表より求めた。図-9に、出水中の右岸側水位観測値と、流量算出図表から求められる右岸水位との比較を示す。図-9(a)は、前述の出水であり、左岸側水位観測値から水平湛水仮定に基づき算定される流量が $1000\text{m}^3/\text{s}$ を超える出水であった。図表から得られる右岸側水位は、観測値と同様に約2時間で 1m 程度低下している。その後の約6時間は、計算において一部

図-8 左右岸の水位に対する流量算出図表

(a) 最大流量 1019.7m³/s

(b) 最大流量 461.1m³/s

(c) 最大流量 599.4m³/s

図-9 流量算出図表の再現性

のゲートがフリーフロー状態となったため、対象外とした。洪水末期の右岸水位回復過程についても、図表から求めた水位は観測値を良好に再現している。他の2つの出水については、(a)と比べると流量は小さく(461.1m³/s, 599.4m³/s)、左右岸の水位差も比較的小さい(0.29m, 0.40m)。これらの出水に対しても、流量算定図表から求めた右岸水位は、観測値を良好に再現している。

図-10に示した左右岸水位差に関しても、図中に示す±50%の範囲内に収まっている。これらの結果から、流量や水位差の大小に関わらず、流量算定図表を用いることにより、左右岸どちらの水位観測値から流量を求めても、同程度の値が得られるといえる。

7. まとめ

本検討では、出水時に横断方向の水面勾配が生じるダ

図-10 左右岸水位差の再現性

ム調整池を対象に、平面2次元解析による左右岸水位差の再現を試みるとともに、水位差発生時にも合理的なゲート放流量を算出する方法を検討した。得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 水位観測値に基づいて下流端条件を設定した結果、平均的な貯水位は観測値と概ね一致するものの、調整池内の複雑な水位分布を十分に再現することは困難である。
- 2) 下流端にゲートモデルを組み込むことで、各ゲート直上流における水位および接近流速を考慮した放流量の算出が可能となる。その結果、水位観測地点における左右岸水位差の再現性が向上した。
- 3) 水位・ゲート開度およびゲート放流量の計算結果を整理して、流量算出図表を作成した。これにより、横断方向の水面勾配が生じた場合に、左右岸いずれの水位観測値を用いても同程度の流量の算出が可能となった。

本検討では、半開流（パーシャルフロー）を対象としている。今後は、ゲートを全開としたフリーフロー状態を対象とした検討を実施する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：水理公式集 平成11年度版，1999。
- 2) 中村興一，藤間 聡，中村篤史：ダム貯水池振動特性と貯水位平滑化について，水工学論文集，第48巻，pp.1387-1392，2004。
- 3) 鈴木洋之，落合 厚，須賀正志，溝口敦子：小規模ダム貯水池で洪水時に生じる流量推定精度の劣化，土木学会論文集B, Vol.65, No.2, pp.81-86, 2009。
- 4) 塚本洋祐，由井修二，福岡捷二：ダムの洪水流入量・放流量ハイドログラフと洪水伝播機構に関する研究，河川技術論文集，第20巻，pp.467-472, 2014。
- 5) 出口 恭，有光 剛，大江一也，藤田一郎：急勾配開水路湾曲部の側岸浸食を考慮した河床変動計算，応用力学論文集，Vol.13, pp.889-898, 2010。

(2014. 9. 30受付)