

流域の流出特性に着目した合理的なダム放流量の決定方法に関する研究

中央大学大学院 学生員
河川環境管理財団 正会員

腰塚 雄太
戸谷 英雄

(独)土木研究所 正会員
中央大学理工学部 フェロー会員

宮本 守
山田 正

1. はじめに：著者らは、1つのダムの合理的且つ効率的な運用操作を目指し研究を行っている。個々のダムの治水・利水機能を最大限に発揮することが可能になれば、統合的なダム管理、強いては現状以上に効果的な流域総合管理が可能になる。本論文では、流域の流出特性に着目し得られた知見をダム操作に応用し、新しいダム放流量決定手法を提案する事を目的とした。

2. 洪水調節の効率化に対する制限要素：本研究では渡良瀬川本川に唯一存在する草木ダム(集水面積：254km²)を対象とした。図-1は草木ダムの容量配分図である。草木ダムの洪水時における原則的な操作規程は、昭和52年の建設当時に定められており、それによると流入量500m³/s以上を洪水と定義し、洪水時の放流量は式(1)により決定される。流量制御中は式(1)の操作規程に則って流入量500m³/sを上回った量の1割に500m³/sを足して放流している。以後これを1割放流と言う。草木ダムの既往最大放流量は2001年9月10日(台風15号)の906m³/sである。このときの草木ダムにおける実際の運用状況を図-2に示す。ダム貯水位が満水位に近づいた時点で、ただし書き操作により流入量と同じ流量を放流し夏期制限水位になった時点で貯水位を夏期制限水位に保つ定水位操作に移行していることがわかる。このように現況の操作ルールでは対処しきれないような大きな洪水が実際に発生しているという事からも治水水面において克服する課題は多いと考える。

3. ダム操作に関連する流出特性：本研究では、全てのダムに対して普遍的に適用でき、適切な運用が可能となるダム放流量の決定方法の確立を目的としている。ここで大事な点は降雨予測や流出予測等に頼ることなく、各流域固有の流出特性から放流量が決定されることである。本論文では草木ダム流域が有する流出特性をハイドログラフ全体及び逓減部の2つの観点から解析を行った。ハイドログラフ全体を対象とした総降雨量と総直接流出量の関係を図-3に示す。総降雨量と総直接流出量は線形関係にあり、非常に高い相関性を有する。これにより、現時点での総降雨量からそれに伴い発生する総流出量が判明する。図-4はピーク流入量とその時点から4日間の総流入量との関係である。つまりは現時点の流入量からそれ以降の総流入量の算定が可能となる。図-3, 4を用いることで、出水中のある時点におけるダム貯水池への流入量、もしくは累積降雨量から、それ以降に無降雨であっても確実に流入してくる総流入量を算定することが可能であり、その総流入量に見合った流量を事前に前期放流することが可能である。

$$\text{放流量} = (\text{流入量} - 500) \times 0.1 + 500 \quad (\text{単位は } \text{m}^3/\text{s}) \quad (1)$$

$$Q_{OUT} = Q_{IN} + \frac{dV}{dt} \cdot \frac{dQ_{IN}}{dt} \quad (3)$$

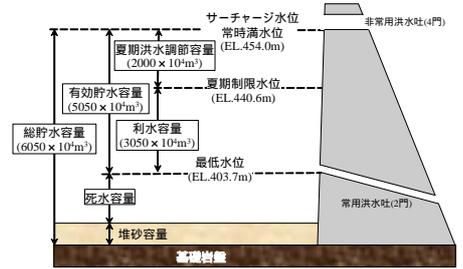
$$\int_{t_{rec}}^{t_{rec}+96} q_{*rec}(t) dt = \frac{q_{*rec}^{(1-\beta)} \left((1 + 96a_0 \beta q_{*rec}^\beta)^{(\beta+1)/\beta} - 1 \right)}{a_0(\beta-1)} \quad (5)$$

$$- \int_0^t (Q_{IN} - Q_{OUT}) dt = V(Q_{IN}(t)) \quad (2)$$

$$A(h) \frac{dh}{dt} = Q_{OUT} - Q_{IN} \quad (4)$$

$$Q_{OUT}(t) = 3.3 V(t-1) \quad (6)$$

4. 流出特性を用いた洪水調節方法：著者らは従来から図-5に示した内容の放流方法を提案している。3章で示したように、時々刻々の流入量、または累積降雨量から前期放流量をピーク制御に至るまで求め続けると、前期放流によりダム貯水位を下げた状態で洪水を迎えることが可能であり、洪水終了後にはダム貯水位は最低でも夏期制限水位までは回復することができる。この放流方法はいかなるダム流域においてもその流出特性を明らかにすることで適用することができる最も単純且つ合理的な放流方法と言える。ここで逓減部での総流入量を、ある時刻の流入量から算定しダム放流量を決定する手法を逓減特性方式、ある時刻の累積降雨量から算定しダム放流量を決定する手法を総降雨量方式と以下定義する。



出典：利根川ダム統合管理事務所HP
図-1 草木ダムの容量配分図

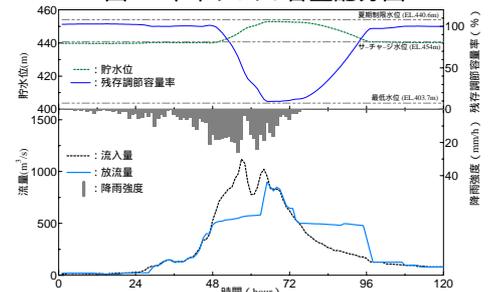


図-2 洪水時における草木ダム流域の時間降雨強度と草木ダムの流入・放流量の実測値 (2001年9月8日~13日)

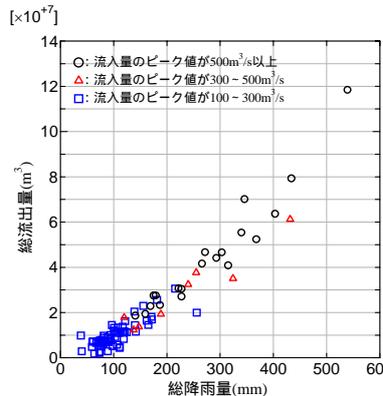


図-3 草木ダム流域における総降雨量と総直接流出量の関係

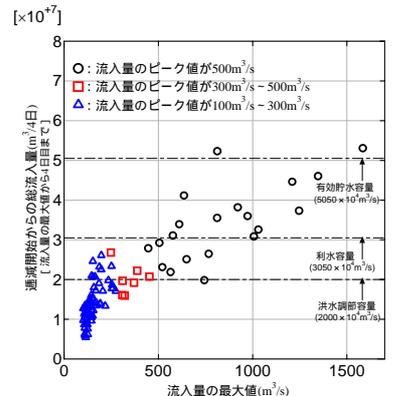


図-4 草木ダム流域におけるピーク流入量とピーク以降4日間の総流入量の関係

4.1 逓減特性方式を用いたダム放流量決定手法：逓減特性方式を用いたダム放流量の決定手法を数式化すると式(2)になる。左辺は前期放流量の総量であり、右辺はハイドログラフ逓減部にダム貯水池へ流入する総流入量である。この式(2)を時間(t)で微分し変形することで式(3)が得られる。ここに V : 流入ハイドログラフ逓減部の総流入量 $[m^3]$, Q_{IN} : ダム貯水池への流入量 $[m^3/s]$, Q_{OUT} : ダムからの放流量 $[m^3/s]$ である。さらに、式(4)よりダム貯水位も同時に算出し利水容量の安全性を確認した。ここに $A(h)$: 湛水面積 $[m^2]$, h : 貯水位 $[m]$ である。流入ハイドログラフ逓減部の総流入量である V の算出に当たっては、 V と Q_{IN} の関係を既往のデータから明らかにすることで流入ハイドログラフ逓減部の総量である V が算出可能である。本研究では山田ら¹⁾により V の算出式(5)式が導かれているのでそれを用いた。図-6 は降雨終了から2時間後の流入量とその後4日間の総流入量の関係である。即ち式(3)の V と Q_{IN} の関係である。

4.2 総降雨量方式を用いたダム放流量決定手法：図-5に示したとおり、洪水時にはダム上・下流域の情報を予め知ることが可能であり、ダム操作に適用することは高水管理上非常に効果的である。そこで本論文では、草木ダム上流16km地点に位置する足尾砂防ダムにおける降雨情報及び、ダム下流42kmに位置する足利懸案地点における水位情報をダム操作に加味した。図-7に足尾砂防ダム、草木ダム、足利懸案地点における累積降雨量と、洪水逓減部における総流入量との関係を示す。足尾砂防ダムから草木ダムまでの到達時間は過去の流量観測データから約1時間、また足尾砂防ダムで観測された流量の3.3倍が平均して草木ダムに流入してることが分かっている。よって足尾砂防ダムにおける現時点の累積降雨量から、洪水逓減部の総量を時々刻々算出し続け、その流量の3.3倍に見合う量を草木ダムにおける前期放流量とする。この総降雨量方式を用いたダム放流量の算出手法を数学的定式化すると式(6)になる。ここに、 V : 足尾砂防ダムにおけるある時刻の降雨量から求まる洪水逓減部の総流入量 $[m^3]$, Q_{OUT} : 草木ダムからの放流量 $[m^3/s]$ である。

4.3 前期放流を用いた流量制御：著者らが提案する放流量決定方法は前期放流量の決定に用いる事を前提としている。よって、逓減特性方式及び総降雨量方式を用いて前期放流量を決定し、流量制御を行うダム操作を実際の洪水に適用した。対象とした洪水は、足尾砂防ダムにおける流量観測データが得られた1998年9月16日(台風5号)の洪水(既往二番目の出水: 草木ダムにおけるピーク流入量が $1347m^3/s$)である。逓減特性方式及び総降雨量方式を用いて前期放流量を算出した際の流入量、放流量、貯水位の時系列、草木ダム最大放流可能量の時系列を図-8に示す。ここで草木ダム最大放流可能量とは、足利懸案地点において草木ダムからの放流量と足利残流域からの流量の総量が、危険水位以下で流下可能になる草木ダムからの流量と定義する。前期放流を行ったことで洪水のピークは制御されており、下流懸案地点においても安全に流下可能な量を放流量の最大値としているため、治水面上において非常に有効であり、また洪水終了後のダム貯水位を見ると利水容量を確保していることもわかる。特に総降雨量方式においては、ダム上流の降雨情報を用いて前期放流量を算出しているため、到達時間の1時間分早く放流できている事も分かる。これらのことから、前期放流を行うことを前提とすると治水安全度は増し、予めダム貯水位を夏期制限水位より高く設定しても治水上問題ない。そしてそれが新規水資源となり得る。さらには前期放流で洪水のピークと同程度の $1400 m^3/s$ 放流していることから人工的な洪水によりダム下流において河川流量の平滑化を防ぐ可能性をも示した。

5. まとめ：本論文ではダム流域の流出特性に着目し、極めて効率的且つ合理的なダム放流量の決定手法を提案した。それにより得られた知見を列挙する。1) ダム流域の流出特性を洪水ハイドログラフ全体と逓減部の2つの観点から解析を行った。その結果、洪水ハイドログラフの逓減特性と洪水ハイドログラフ全体の総降雨量と総流出量の特性により、ある時点以降にダム湖へ流入する総流量を算出し、それを前期放流するダム操作方法を提案した。2) 更に効率的且つ合理的なダム放流操作を可能にするために、上・下流域の降雨・水位情報をダム放流量算出の際の制限要素に加味し、総降雨量方式を用いてダム放流量を決定した。その結果、現況のダム操作よりも1時間早い流量制御が可能になり、前期放流を行うことで洪水のピークを制御する事が可能になった。



図-5 本研究で提案する放流ルールの考え方

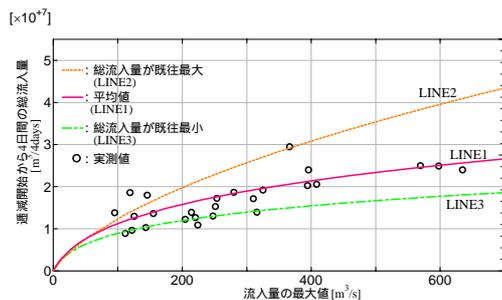


図-6 逓減開始時の流入量 Q_{IN} とその後4日間の総流入量 V と放流量算出に用いた解析解

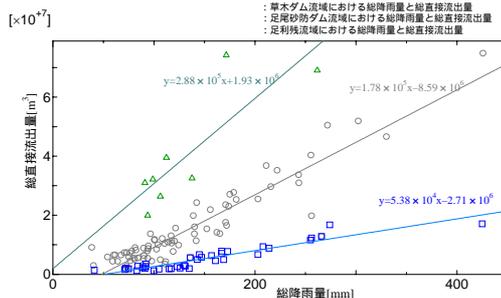


図-7 足尾砂防ダム・草木ダム・足利残流域における総降雨量と総直接流出量の関係

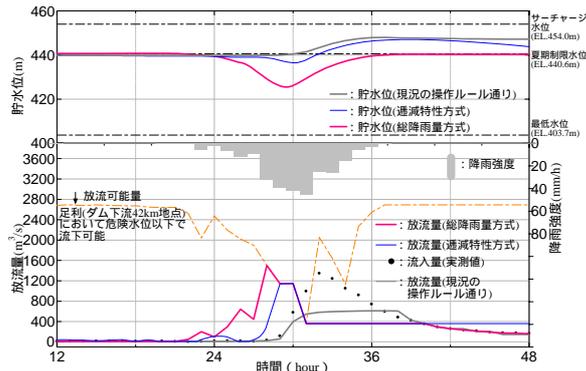


図-8 逓減特性方式・総降雨量方式を用いて前期放流を行った流量制御、現行の流量制御、実測の流入量、貯水位、及び時間降雨強度の時系列

<参考文献> 1) 呉修一, 腰塚雄太, 山田正: ハイドログラフの逓減特性を用いた流出特性の抽出, 土木学会水工学論文集, Vol.48, pp.13-18, 2004, 2) 竹内邦良: 貯水量の累加損失係数を用いた貯水池群の最適操作手法, 土木学会論文報告集, No.222, pp93-103, 1974, 3) 利根川ダム統合管理事務所: 利根川上流ダム群の概要