

学位請求論文要旨

ダム貯水池における洪水流動解析と洪水流入量・放流量の評価方法に関する研究

Study on calculation method of flood flows in dam reservoirs and evaluation method of inflow and outflow discharges

都市環境学専攻 塚本洋祐

Civil and Environmental Engineering, Yosuke Tsukamoto

【研究の背景と目的】

我が国では、堤防整備、河道整備、洪水調節施設の整備を進めることで、段階的に流域の治水安全度の向上を図ってきた。しかし、近年、地球温暖化の進行に伴う豪雨、洪水規模の増大、頻度の増加が指摘される中、未だ整備水準の低い箇所も多く、日本各地で甚大な水災害が発生している。洪水調節施設は、河道を流下する洪水のピーク流量の低減や、洪水の遅達をもたらす点から有効な治水施設である。洪水調節施設には、ダムや遊水地、調節池がある。これらの内、ダム貯水池は河川上流部に位置しており、ダムへの流入量、ダムからの放流量は、下流河川の治水計画や流域の洪水予測を行う上での与条件となることから、治水計画に重要な構造物である。ダム貯水池は、治水施設としてのみならず限られた水資源を生み出し、水を効率的、効果的に活用するために精度の高いダム流入量、貯留量、放流量の算定が重要となる。

ダムによる洪水調節は、治水計画の基本的要件であることから、古くから検討されてきた。一般に、ダム貯水池に洪水流が流入するとき、貯水池内の水面はほぼ水平に上昇するとみなして流入量、放流量を算定してきた。すなわち、現行のダム管理では、貯水池下流端のダム堤体付近で観測された1点の貯水位とゲートの式から放流量を算出し、ダム放流量と貯水池の水位-水量(H-V)関係からダム流入量を算定し管理が行われている。この手法は、貯水池内の洪水流量の連続関係を用いて、ダムへの流入量、ダムからの放流量の関係を簡易に推定可能であるが、複雑な形状を有するダム貯水池内の洪水流は、貯水池内を流動、貯留しながら時空間的に流量や水位波形を変形しつつ流下する。したがって、現行のダム管理に用いられるダム流入量、放流量等ダム貯水池管理技術は、洪水時の貯水池内の流動、貯留、伝播メカニズムの力学的な検討に基づいて、検証がなされなければならない。本研究では、ダム貯水池に流入する洪水流の流動を現地ダムと大型模型実験で観測し、貯水池内を流下する洪水流の実態を理解し、複雑な形状を有する貯水池の流動を表現可能な準三次元数値解析モデルを開発する。次に、これを用いダム貯水池流れを定量的に扱うことにより、洪水流入量、放流量の定量的な評価を行い、安全で効率的、効果的なダム貯水池の管理につなげることを目的とする。

【本論文の内容と成果】

本論文は6章で構成される。各章の内容と成果の概要は以下の通りである。

第1章「序論」では、研究の背景、目的、および本研究の構成を述べている。

第2章「ダム貯水池内の洪水流下に関する既往の研究と本研究の位置づけ」では、ダム貯水池における洪水の流動、貯留、伝播機構に関する既往研究を概観し、課題を整理した上で本研究の位置づけを示している。ダム貯水池における洪水波形の伝播については、伊藤(1939)、Wilkinson(1945)により、ダム貯水池内の水位の伝播速度は、水深が深い所では、長波の伝播速度 \sqrt{gh} とほぼ等しくなり、波形が素早く伝わることを示された。矢野ら(1971)は、一様勾配、一様幅の直線水路に刃型堰を設置したダム貯水池模型を用い、貯水池を流動形態によって湛水領域、遷移領域、上流河川領域の3つの領域に分類し、洪水流の伝播、変形について実験分析を行っている。しかし、貯水池内の流動やそれに伴う貯留機構については十分言及されておらず、ダム貯水池内の流動、貯留、伝播

機構を検討するには、洪水時に貯水池内で発生する三次元流れや、流速分布の変形の詳細な検討が必要である。また、ダムからの放流量は、一般に大きな断面を有するダム堤体付近は洪水流の接近流速を無視できるとし、貯水位とゲートの式より算定されている。鈴木ら(2008)は、小規模発電ダムにおいては、ダム放流量が下流河川で観測された流量より小さく算定される傾向が強いことを指摘し、この不整合の要因が、小規模貯水池に流入する洪水流の接近流速の増大によることを示した。

以上の調査、既往研究から、洪水時のダム貯水池内の流動、貯留、伝播機構は未だ十分に解明されておらず、貯水池の適切な管理上の課題解明が求められているところであり、そのためには、洪水時に貯水池内で発生する三次元流れや、流速分布の変形機構の検討が必要なが明らかになった。本研究では、現地ダム貯水池での洪水観測と大規模水理模型実験を実施し、貯水池内での洪水流の流動実態把握を行う。また、現地観測および模型実験結果をもとに貯水池内の三次元流れや縦横断的な流速分布の変化機構を説明できる準三次元貯水池洪水流動解析法を開発し、観測された洪水流の流動、貯留、伝播の機構を明らかにする。さらに、現行のダム管理で用いられる洪水流入量、放流量の算定方法が有する課題を明らかにした上で、貯水池内とダム上下流河川の観測水面形の時系列データに基づく洪水解析から、ダム流入量、放流量の評価方法を提示し、その有効性、実効性を示す。

第3章「現地観測と大型水理模型実験によるダム貯水池内の洪水流動」では、大規模ダム貯水池内を流下する洪水流の流動、貯留、伝播の実態を明らかにするために、草木ダム貯水池における洪水の現地観測と、草木ダム貯水池(草木湖)を模したダム貯水池水理模型を用いた流動実験によりダム貯水池内の流動を詳細に観測し、流動機構を明らかにする。

草木ダムでは、平成25年9月、平成27年9月に発生したの2洪水を対象に洪水観測を実施した。観測項目は貯水池内およびその上・下流河川の洪水時の水面形の時間変化と上・下流河川の流量観測である。しかし、危険を伴う現地観測で流動データを収集するには制約を伴う。このため、草木ダム貯水池の1/75水理模型(長さ60m、最大幅6m)を作成し、平成25年9月洪水波形で、ピーク流量を中規模洪水(1,300m³/s)、大規模洪水(2,200m³/s、流量確率1/200)に引き伸ばした2洪水を流下させ詳細な洪水流動データを得た。ダム貯水池内の流動は、貯水池上流区間、上流区間と下流の湛水区間の間にある遷移区間、湛水区間の3つの異なる特性を持つ区間に分けられる。第一の貯水池上流区間では、慣性力の大きい洪水流が流入し、これが貯水池内で地形性の大きな平面渦を形成しながら流下する。第二の遷移区間では、流下方向の水深、貯水池底面の川幅の増大や、貯水池河岸の複雑な地形により発生した複数の平面渦の干渉と、貯水池底から発達する流速分布によって、明確な流動形態を示し流下する区間である。第三の湛水区間は、洪水流のピーク流量時であっても洪水流の流速が小さく、貯水池水面が静かに上昇する区間である。大型模型実験ではこれらの区間において、貯水池内の縦横断水面形、三次元的な流速分布等、流動の時空間変化が詳細に観測された。特に、大きな運動量を持った上流域からの流れが流入する遷移区間は、貯水池全体の流れ構造を規定する重要な区間であり、平面的な水面の広がりに加え、縦横断的な河床勾配が大きく変化することにより、底面付近で流速の鉛直分布が非平衡状態となり、特徴的な貯水池三次元流れを形成することが明らかとなった。遷移区間とそれに接続する湛水区間では、貯水池の地形変化と遷移区間の非平衡流れの形成により、縦横断的、時間的に流速分布を変化することで、洪水水位ハイドログラフ、流量ハイドログラフを変形しながら流下する。本章では、現地貯水池と大型水理模型での観測結果に基づいて洪水時の貯水池内の流動機構を詳細に調べ、貯水池に関して多くの重要な知見を得ている。

第4章「準三次元貯水池洪水流動解析法を用いたダム貯水池における洪水流の流動、伝播と洪水流入量、放流量の評価法」では、ダム貯水池内の三次元的な洪水流動を説明できる数値解析モデルを構築し、現地観測、模型

実験で得られた貯水池内の洪水流の流動、貯留、伝播機構を分析する。また、観測水面形の時系列データと準三次元貯水池洪水流動解析法を用い、ダム貯水池管理との関係でダム流入量、放流量の評価法を検討する。本章では、以下の4項目について検討を行っている。

第一に、第3章で示したダム貯水池内の洪水流動観測結果をもとに、貯水池内の三次元流れや縦横断的な流速分布の変化機構を説明できる準三次元貯水池洪水流動解析モデルを開発した。本解析モデルの特徴は、ダム貯水池内の縦横断的な地形変化による洪水の流動、変形を考慮するため、貯水池内の洪水流動を規定する河床勾配が縦断的に大きく変化する遷移区間における河床近傍の非平衡流れと、それに伴う流速の鉛直分布の変化を、河床近傍の境界層的な渦層で考慮していることにある。本解析モデルは、主計算領域と、河床近傍の渦層域の2層から構成されている。主計算領域は、洪水流が大きな運動量をもって流下しており河川の流れに近いことから内田ら(2015)の水深積分モデルの枠組みで、流れの三次元性を考慮できる一般底面流速解析法を用いる。一方、河床近傍の渦層域では、連続式、運動方程式より、非平衡状態の流れとそれに伴う流速分布の変化を直接的に評価する。主計算領域と渦層域の境界を通じて、渦度と鉛直流速によるフラックスが考慮されている。上流河川は河道条件が河川と同様であること、湛水領域は流速、流動が小さいが遷移領域と接続していることから一般底面流速解析法を用いる。準三次元貯水池流動解析モデルは、水深積分準三次元解析モデルの枠組みで、上流河川～遷移領域～湛水領域を流下する洪水流を一体的に取り扱うことが可能な解析モデルである。

第二に構築した準三次元貯水池洪水流動解析法、既存の一般底面流速解析法、平面二次元解析法を中規模洪水を対象とした大型水理模型実験結果に適用した。これらの比較検討から、一般底面流速解析法、平面二次元解析法は、貯水池流れを規定する遷移区間において、貯水池大型水理模型実験の流動結果と異なる流動形態を示した。一方、構築した本解析法が高い説明力を持つことを実証した。この理由を検討するために、本解析法と一般底面流速解析法による底面渦度、主計算領域と渦層域の運動量交換量を比較検討した。その結果、遷移区間では河床近傍の流れの非平衡性が強く、渦層域を考慮することにより貯水池内の非平衡な流動、流速分布の変化が表現できることが明らかとなった。また、平面二次元解析法は、渦度の形成、消失機構等三次元流れの発生機構を十分に考慮できていないため、遷移区間の流動が実際と大きく異なることを示した。

第三に、縦横断的に詳細な洪水水位データ等が観測された草木ダム貯水池とその下流河川を対象に洪水流入量、放流量の評価法について検討した。ダム貯水池の湛水域、遷移域、上流河川には準三次元貯水池洪水流動解析法を、ダム下流河川には一般底面流速解析法を適用し、観測水面形の時系列データに基づき一体的に洪水流解析を実施することで、ダム貯水池への流入量ハイドログラフ、ダム貯水池からの放流量ハイドログラフを算定し、観測流量ハイドログラフと比較した。上流河川、貯水池内とその下流河川における観測流量と解析流量がほぼ対応し、観測水面形の時系列変化を用いた本解析法が、流量、貯留量の算定に有効なことが示された。この方法は、今後全国のダム貯水池の流入量、放流量、貯留量の検討の有力な手段になることが示された。

第四に、中規模洪水、大規模洪水が流入した場合に、現行のダム管理に問題が生じないかについて、中規模洪水と大規模洪水を対象とした大型水理模型実験と準三次元貯水池洪水流動解析法を適用し検討した。その結果、遷移区間の流動による水平からの時空間的な変化に伴う貯留量変化を考慮しても、貯水池の大部分を占める湛水区間で水面がほぼ水平に上昇するために、現行の貯水池全体が水平に上昇とした貯留量は、草木ダムで最大で約10%程度大きく見積もられることになった。これは、貯水池下端では流れの運動エネルギーが非常に小さく、水面高が貯水池内で最も高くなり、その高さが貯水池内でどこでも成立するとして貯留量を評価しているためである。洪水流入による流速分布等による貯留量の変化分は貯水池全体の貯留量に対しては、大きくないことを示している。この結果、現行のダム管理であるダム堤体付近の水位を指標とした管理は、安全側の貯留量を評価し

ており、実務上有効であると判断される。

第5章「河道化した小規模ダム貯水池における洪水流の流動と洪水流入量、放流量の評価法」では、長年にわたりダム貯水池への土砂堆積による貯水池の河道化が進行している高津戸ダムでは、放流量の式から求めた流量とダム下流の高津戸地点の浮子を用いた観測流量の間には差異が生じていることが示されてきた。本章では、差異の要因を明らかにするために、高津戸ダム貯水池とその上下流河川を対象に観測された水面形の時系列データと貯水池内の流動機構を考慮した一般底面流速解析法により検討を行い、ダムへの流入量、ダムからの放流量、高津戸地点の高水流量を算定した。

土砂堆積が進行し河床が上昇した高津戸ダム貯水池内は、河道に近い流況にあり、対象とした平成27年9月洪水では、貯水池内の水面は河川のように縦断面勾配を有し、堤体付近で3.0m/s程度の流速が発生する。しかし、現行のダム放流量算定式は、接近流速水頭を無視しており、流速水頭を考慮していない式を用いた現行のダム放流量は、下流河道の観測流量よりも小さく算定され、接近速度水頭を考慮した修正式より求めた放流量は、下流河川の水面形の時間変化から求めた流量ハイドログラフおよび浮子による観測流量とほぼ一致した。これより、土砂の堆積により河道化した小規模ダムからの放流量には、接近速度水頭の項を付加した放流量式を用いる必要があることが示された。

第6章「結論」では、本研究で得られた成果を総括し、今後の課題について述べている。

- ・ 貯水池洪水流について現地観測、大型水理模型実験の結果に基づき、主計算領域と渦層域の2層から成る準三次元貯水池洪水流動解析モデルを開発した。本解析モデルは複雑な形状を有するダム貯水池内の三次元流動や縦横断的に非平衡な流速分布、水位、流量ハイドログラフの伝播等を工学的に十分な精度で表現できることを示した。
- ・ 草木ダム貯水池とその下流河川において観測された水面形の時系列データと、準三次元貯水池洪水流動解析法、一般底面流速解析法を用いた上流河川からのダム貯水池への流入量ハイドログラフ、ダム貯水池から下流河川への放流量ハイドログラフの算定法は精度の高い評価を与え、貯水池への流入量、貯水池からの放流量の算定に有効であることを示した。
- ・ ダム貯水池内の流動、貯留、伝播機構を分析した結果、貯水池内の水面が水平に上昇するという現行のダム管理で用いられている方法は、貯水池への流入流量を大きめに評価しているが、安全側の値を与え、実用上有効であることが明らかとなった。
- ・ 土砂堆積により河道化したダム貯水池からの洪水時の放流量算定法の課題を解決するため、観測水面形の時系列データと河道化した貯水池内の流動機構を考慮した一般底面流速解析法より、高津戸地点の高水流量、ダム流入量、ダム放流量の算定を行った結果、河道化した小規模ダム貯水池では、放流地点の洪水流速水頭を考慮して算定する必要があることを示した。

貯水池規模、貯水池形状、流入洪水特性の違いにより、貯水池内の洪水流の流動や変形機構が異なるものと考えられることから、他のダム貯水池についても同様の検討が望まれる。また、本貯水池流動解析モデルにより貯水池底面で生じる流動が表現可能となったことで、これを現在懸案となっている貯水池堆砂・排砂問題等、貯水池土砂の合理的な管理に生かすことが望まれる。