

ダム常用洪水吐ゲートの機能低下に伴う洪水リスク評価に関する検討 Study on Flood Risk Assessment Caused by Functional Deterioration of Dam Flood Control Gates

高田翔也⁽¹⁾・角哲也

Shoya TAKATA⁽¹⁾, Tetsuya SUMI

(1) 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

(1) Department of Urban Management, Kyoto University

Synopsis

In recent years, dysfunction or malfunction of dam spillways or bottom outlets have been reported because of aging and sedimentation in existing dams worldwide. They affect discharge capacity of dams which may decrease suitable flood control functions. Therefore, in this research, risk factors for Japanese dams that cause functional deterioration of flood control ability have been discussed in order to extract high-risk dams. The risk factors for bottom outlets include inlet elevation over sedimentation level, number of outlet structures and existence of sunken large wood debris. In the risk assessment procedure, "n-1 rule" (n: number of gate) which is design criteria for securing the safety of dams in Switzerland is considered. We conducted case studies on the Susobana Dam in Nagano Prefecture to clarify actual risk after losing flood control capacity as well as numerical modelling to assess flow conditions acting on sunken large wood debris to be dragged into outlet gate.

キーワード: ダム堆砂, ゲート閉塞, n-1 rule, ダムリスクマネジメント

Keywords: reservoir sedimentation, clogging of outlets, n-1 rule, dam risk management

1. はじめに

日本国内には現在約3000基のダムが建設され、運用されている。ダムの目的は、社会要請の変化に 대응中で、治水、利水、環境面において多岐にわたっており、重要な社会資本として効果的かつ持続的な運用が求められている。主なダムの構成要素としては、堤体と放流設備が挙げられる。放流設備には、洪水吐き、取水設備等があり、ダムの治水及び利水面の機能を規定している。一般にコンクリートや土で作られる堤体部分は半永久的に使用できるとされるのに対し、機械設備等によって構成されるダム水理構造物は耐用年数が存在する。現在国内のダムは、約40%が管理開始後30年以上、約10%が50年以上経

過しており(国土交通省, 2013)、経年的なダム放流設備の劣化による機能低下が懸念される (fig. 1)。また、建設時に想定された外力に基づいて設計された放流設備にとって、気候変動に伴う将来の雨量分布及び規模の変化や、経年的な貯水池の堆砂進行は、ダムの目的を確実に果たす機能確保の上でのリスク要因である。近年、実際にこれらのリスクが顕在化した事例は国内外で数例報告されている。

米国カリフォルニア州のOroville damでは、2017年2月に洪水調節中の常用洪水吐きのシュート部が損壊し、非常用洪水吐きも正常に使用できなかったために、ダム下流への放流量が増大する懸念が生じ、多くの下流住民が一時避難する事態となった (fig. 2) (松本, 2017)。加えて、ダム堤体材料の流出に伴う堰

上げによるダム直下の水力発電所の冠水被害があり、また、避難指示発令時には下流部のハッチェリーにおいて魚の避難等も行われた。このダムは、堤高234mのアースフィルダムで、主ダム部分には損傷がなかったものの、洪水吐きの損傷及びこのときに運用以来初めて用いられた非常用洪水吐きの機能不全が、ダムの放流能力に支障をきたし、ダムの安全上のリスクとして課題となった。

一方、国内においても2017年8月に長野県の裾花ダムにおいて、洪水調節中の2門の常用洪水吐（コンジットゲート）のうち1門がおよそ4ヶ月間開閉不能となり、常用洪水吐1門のみでの洪水調節が行われる事態が生じている(fig. 3)(国土交通省, 2018)。ゲートが操作不能となった原因として、堆砂が常用洪水吐の設置高さにまで進行し、ゲート開操作時に流出した土砂と沈木がゲート開口部を閉塞させたことが考えられる(fig. 4)。最終的には、ゲートの直上流部における堆砂を掘削し、予備ゲートを閉じることで、閉塞した堆砂及び沈木を除去するに至ったが、ゲート閉塞がもたらす洪水調節上のリスクが課題となった。

このようなダムの安全上のリスクの高まりに対し、海外では以前からダムのリスクマネジメントの重要性を鑑み、既存ダムを対象にしたリスク評価を維持管理の優先順位づけに活かそうという試みが実践されてきている。例えば、欧米豪などでは、リスク分析、リスクアセスメント、リスク管理からなる定量

的なリスクマネジメントの枠組みが意思決定支援ツールとして用いられている。また、スイスでは、ダムのリスク評価方法の一つとして「n-1」ルールが用いられている。これはダムの安全性を確保するために、全てのダムについて、n門のゲートを有する洪水吐きの中で最大の放流量を有するものが使用不可の場合(n-1)でも、洪水を安全に流下させる能力を必要とするものである。この「n-1 rule」により、多くの要因と不確実性を含む「n-1」条件下での放流能力のチェック、あるいはその結果生じる下流への影響について事前に検証が行われている。一方国内では、海外に比べダム損壊に至る事例も少なく、維持管理に関する方針は定められているものの、海外事例のようなダムリスクマネジメントに関する枠組みは存在していない。

そこで、約3000基ある国内の既設ダムについて、将来の気候変動や設備の老朽化、堆砂の進行に対し、維持管理費の効率的な配分を行うことで、信頼性のあるダム機能を確実に発揮し続けていくためには、リスクを正確に捉え、効果的な対策方法を見つめ出す意思決定の支援ツールとなるようなダムリスクマネジメントの枠組みが必要と考えられる。そのために、現状リスクマネジメントの枠組みの無い日本においては、各事例のリスク要因と発生確率、リスク発生時の影響度について体系的な整理を行う必要がある。

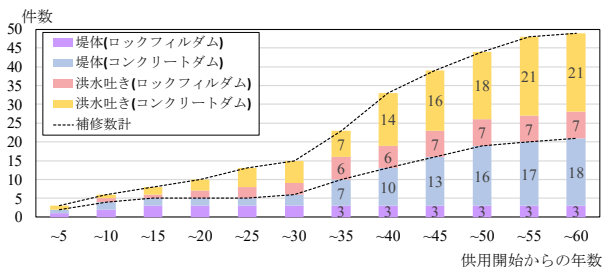


Fig. 1 Results of total repair (MLIT, 2013)



Fig. 2 Oroville dam spillways incident (Matsumoto, 2017)



Fig. 1 clogging of outlet of Susobana dam (MLIT, 2018)

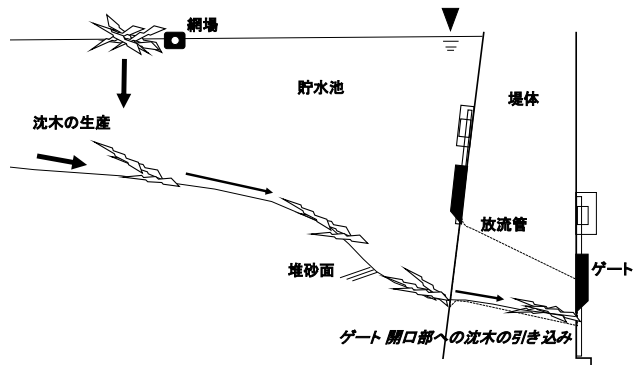


Fig. 4 Assumed mechanism of clogging of outlets

2. 研究目的

国内の既設ダムの包括的なリスク評価手法の枠組みを検討する上で、その第一歩として、ダムの直面するリスクを可能な限り洗い出し、リスクの頻度やそれがもたらす被害の大きさを評価することが重要である(小林, 2008)。そこで本研究では、国内で実際に生じた裾花ダムでのゲート閉塞事例を、本研究で主に対象とするリスク事例とする。これは、現在国内のダムにおいて堆砂問題が長く指摘され、また近年ダムで多くの流木が補足されていることを考慮すると、堆砂と沈木の複合要因により生じた裾花ダムの事例は、今後他のダムにおいても同様のリスクが危惧されることから、その研究の意義は大きく緊急性も高い。

洪水吐の機能不全・低下は、Oroville damの事例のように、①ダム構成要素そのものの安全性の低下、あるいは裾花ダムの事例のように、②洪水調節機能のサービスレベルの低下をもたらす要因となりうるため、その適切なリスク管理が求められる。特に、②では、急激な貯水位上昇及び過剰貯留に伴う放流量の増加を引き起こす要因となる可能性がある。また、従来堆砂進行がもたらす貯水池運用上のリスクとしては、fig.5に示すように、貯水池末端部の堆砂に伴う貯水池上流での堰上げによる洪水被害や、洪水調節容量内の堆砂に伴う洪水調節能力の低下などが主であったが、裾花ダムの事例では、ダム直上部の密度流堆積層部分における堆砂が誘因となっており、堆砂問題の新たなリスクの視座を提供している。これらを踏まえ、本研究では裾花ダムの事例を参考に、ダム水理構造物、特にゲートを有する常用洪水吐（コンジットゲート）の機能不全・低下の生じるリスクの高いダムの抽出方法の提案を行う。さらに、スイスのダムリスクマネジメント手法である「n-1 rule」に着想を得て、常用洪水吐きの機能不全・低下（n-1）の条件（fig.6）が、ダムの洪水調節機能のサービスレベルに及ぼす影響を評価し、そのリスク軽

減策について検討することを目的としている。

3. ゲート閉塞リスクの概要及びリスクの高いダムの抽出方法の提案

3.1 ゲート閉塞リスクの概要

洪水調節を目的とするダムには、ダム堤体下部に設置される洪水調節を行うための常用洪水吐き（コンジットゲート）と、計画を上回る流入量があった場合にダム堤体の安全性を確保するために非常用洪水吐き（クレストゲート）が設置される。ここで、主にリスクを検討する上で対象とするのは、裾花ダムの事例のとおりコンジットゲートである。コンジットゲートが閉塞（n-1）し、機能低下に陥る要因として、fig.7に示すような諸要因が挙げられる。fig.7はFT（Fault tree）図と呼ばれ、ここでは「n-1」に至る要因をANDとORの関係で整理したものである。このように、ゲート閉塞にいたる要因は様々に考えられるが、機械制御系統や点検、地震等に関するリスクマネジメントは、定期的な点検の枠組みで管理が行われており、リスクを考える上での緊急性は低いと考えられる。一方で、堆砂・沈木によるコンジットゲートの国内での閉塞事例は筆者の知る限りなく、本研究では特にこれらのリスク要因について検討を行う。

堆砂については、ゲート閉塞事例を検討する上で重要となるのは、ダム直上の堆砂位である。fig.8は、高田らによって整理された計画堆砂位及び放流管設置標高の関係を示したものである。高田らの対象としたダムについては、その半数以上のダムにおいて放流管（コンジットゲート）が計画堆砂位よりも低標高に設置されている。これは一般にダムの堆砂形状が、ダムの底部から一様とならず、堆砂率（現在の堆砂量/計画堆砂量）が100%となった場合においても、ダム直上流部では、堆砂位がコンジットゲートの設置標高を下回るためである。ダムの堆砂形状は、江崎(Ezaki, 1976)の調査結果をまとめた芦田らが、堆砂

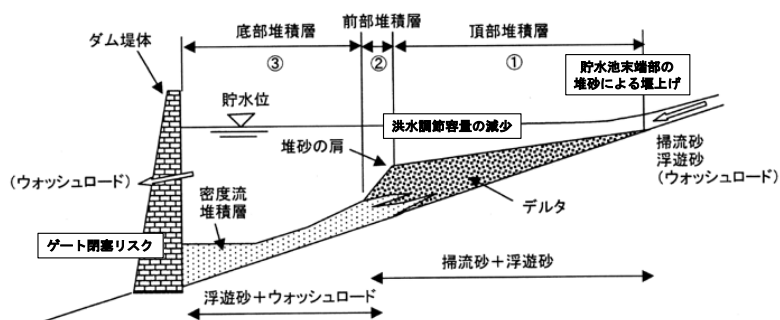


Fig. 5 Reservoir sedimentation and associated risk (Oya, 2002)

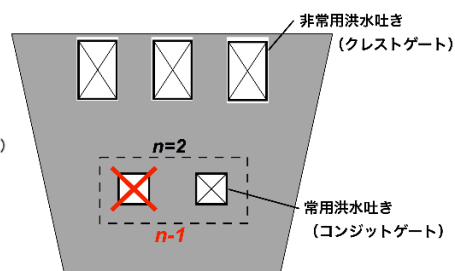


Fig. 6 Application of 「n-1 rule」 to function of flood control

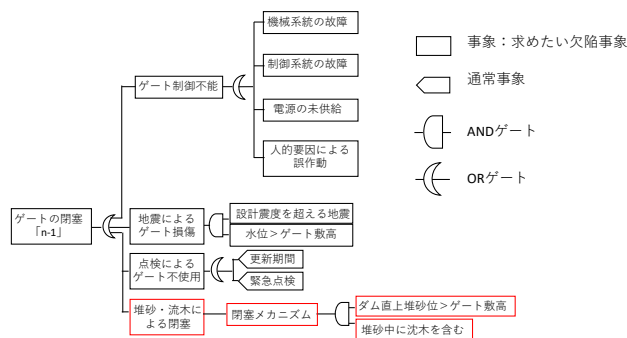


Fig. 7 Fault tree of clogging of gates (Irie, 2004)

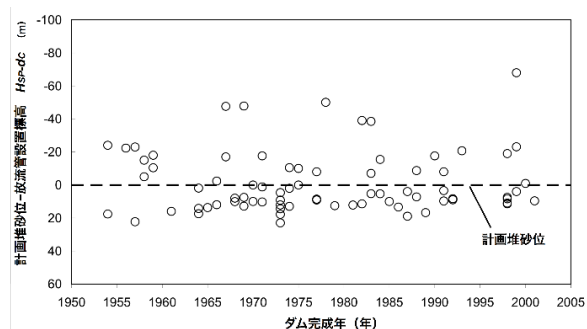


Fig. 8 Height from planned sedimentation elevation to gates elevation (Takata, 2006)

Table 1 classification of reservoir sedimentation (Ashida, 1983)

堆砂形状の 基本形の分類	堆砂形状及び堆砂過程	流入土砂の 粒度組成	貯水池 規模	貯水池の特徴
I 型		掃流砂・浮遊砂 ともに多い	大	最上流に位置する流域に崩壊地が多く、土砂生産が活発 多目的ダムでは、デルタ肩が 低水位付近にある
II 型		掃流砂が少なく 浮遊砂が多い	大	直上流に大規模な貯水池や 緩勾配の区間がある
III 型		浮遊砂が少なく 掃流砂が多い	大	堆砂の比較的初期の段階に 現れる
IV 型		掃流砂と浮遊砂 の堆積に区別が つかない	小	ダム付近まで著しく土砂が堆 積している ダムに近づくほど、堆積層の 厚さが増加している

形状を規定する主要因として流入土砂の粒度組成を挙げ、3つの基本形状に分類している。掃流砂、浮遊砂とも相当量流入する場合はI型、掃流砂の流入が少なく、浮遊砂の流入が多いダムはII型、浮遊砂供給が少ない場合はIII型とされている。また、流入量に対し貯水池容量の小規模なダムは、掃流砂と浮遊砂の堆積層の区分が明瞭でなくなり、これをIV型としている。それぞれの堆砂形状の特徴をTable 1に示す。これより、計画堆砂容量に対する堆砂量（以下、堆砂率）が同じでも、それぞれ分類される堆砂形状によって、ダムの直上における堆砂位の進行度は異なるといえる。しかし、いずれにしても裾花ダムの事例のように堆砂率100%を上回っているダムにおいては、堆砂位がコンジットゲート設置標高に達するリスクが考えられる。一方で、海外では堆砂をダム底部に設置したゲートから下流へと流す Pressure Flushing という方法も報告されており (F.Fruchard, B.Camenen, 2012), コンジットゲートにより堆砂を排出できる可能性も考えられ、堆砂がコンジットゲート設置標高に達することが直接ゲート閉塞につながるというわけではない点に留意が必要

である。

以上を踏まえ、裾花ダムでは、堆砂・沈木の複合要因によりゲート閉塞が生じたものと考えられるが、沈木についてのデータ及び研究成果は少ないため、堆砂の進行具合及びコンジットゲートの設置高さ等を閉塞リスクの主な要因と捉え、次節に示すゲート閉塞リスクの高いダムの抽出方法の提案を行った。

3.2 ゲート閉塞リスクの高いダムの抽出方法の提案

堆砂の進行を考慮したゲート閉塞「n-1」が生じるリスクの高いダムについて、次に示す流れで抽出する方法を提案する。ここでは、前提としてゲート直上流における堆砂高さが、ゲート敷高に達した時点で沈木との複合要因によってゲート閉塞リスクが急激に高まるもの、としている。

①「ゲート総覧 I～V 巻」(社団法人ダム・堰施設技術協会, 1987-2006)より、洪水調節を目的に含み、コ

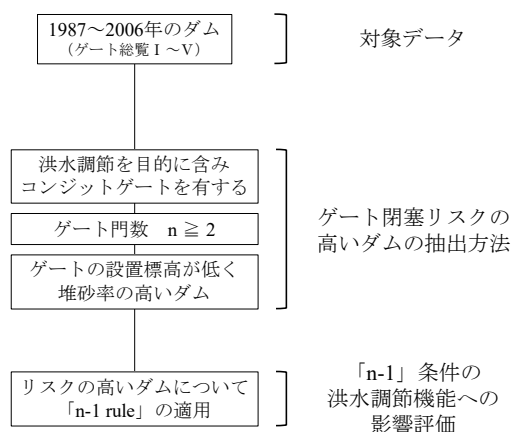


Fig. 9 Extraction method of dams with high risk of clogging of outlet

コンジットゲートを有するダムを抽出する。

「ゲート総覧Ⅰ～Ⅴ巻」は、1987年から2006年に竣工したダムのゲート設備について、まとめられたものである。ゲート設備の種類には、クレスト（非・常用洪水吐き）、コンジット（常用洪水吐き）、オリフィス（水位調整用）、選択取水、発電用、予備ゲート、等が含まれる。ここから洪水調節を目的に含み（多目的ダムを含む）、コンジットゲートを有するダムを抽出する。これらのダムの所管は、国土交通省(直轄)、都道府県(補助)、(独)水資源機構である。

②コンジットゲートの門数(n)が2以下のダムを抽出する。

「n-1」ルールを適用した場合、洪水吐からの放流能力は元々の放流能力の「1-1/n」となるため、ゲート洪水吐の数(n)が少ないダムのほうが、より放流能力低下の割合が大きくなる。これより、ゲート門数の少ないダムを抽出する。

③抽出されたダムのゲートの設計水深Hcと計画堆砂率に対する堆砂率を整理し、裾花ダムの事例と比較して、相対的にゲートの設置標高が低く、堆砂率の高いダムをゲート閉塞リスクの高いダムとして抽出する。

③ゲート閉塞リスクが高いとされるダムについて、「n-1」条件下での洪水調節計算を行い、「n-1」条件における洪水調節能力への影響を検証することで、ゲート閉塞による貯水位の急上昇および過剰貯留による放流量の増大といったリスクを検証する。

4. ゲート閉塞リスクの高いダムの抽出

4.1 抽出対象のコンジットゲートの概要

前章で提案した手法を用いて、1951年から2005年

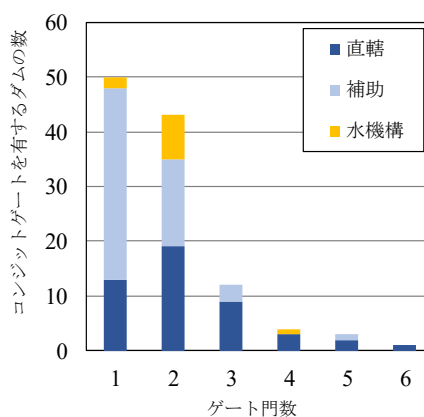


Fig. 10 Number of dams with conduit gates

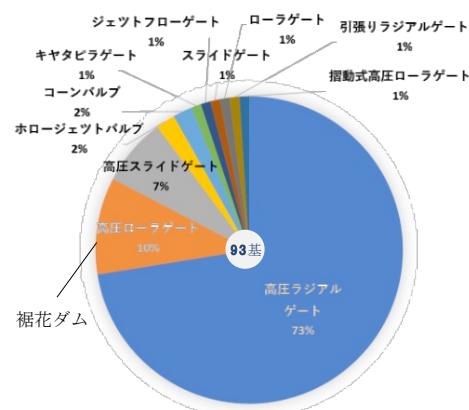


Fig. 11 Breakdown of the type of gate

までに建設されたダムのゲートのデータがまとめられている「ゲート総覧Ⅰ～Ⅴ巻」より、「n-1」ルールを適用するダムの抽出を行った。ゲート総覧に掲載されている約1800基のダムのうち、目的に洪水調節を含み、コンジットゲートを有するダムの抽出結果をfig10に示す。抽出されたダム数は116基と全体の一割にも満たない程であり、管理者は国土交通省の直轄または補助、(独)水資源機構である。これは、ゲート総覧で対象とするゲート設備には、小容量の農業用水や発電用を対象としたものの割合が多く、他に発電を目的としたクレストゲートのみを有するダムもあるためである。さらに、116基のうちコンジットゲートが2門以下のダムは93基であり、コンジットゲートを有するダムの8割以上を占めている。また、そのうちゲート門数が1門及び2門のダムについては都道府県管理である補助ダムが多いことが分かる。次に、fig 11は、93基のコンジットゲートのゲート型式の内訳を示している。ここで、裾花ダムのゲート形式である高圧ローラゲートは全体の10%程度であり、構造的に有利な高圧ラジアルゲートの割合が多く、ゲートの構造形式が堆砂及び沈木によるゲート閉塞機構に及ぼす影響についても今後詳細な検討が

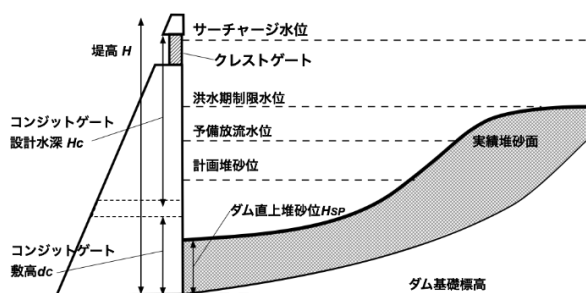


Fig. 12 Longitudinal section of dam

必要となることが示唆される。

4.2 堆砂率及びゲート敷高を用いたゲート閉塞リスクの高いダム抽出

fig13は、抽出された93基のダムから堆砂率のデータが得られた57基について、計画堆砂量に対する堆砂率と、堤高に対するコンジットゲートの設計水深の比 (fig12) を示したものである。ここで、縦軸は堤高に対する設計水深の比が1に近づくほど、ゲートがダム底部近くに設置されていることを示している。また、横軸の堆砂率は、堆砂率の高さがダム直上部の堆砂位の高さと相関があると仮定することで、堆砂率の高さからゲート閉塞のリスクを検討している。これより、今回リスク評価の基準と考える裾花ダムは、堤高に対するコンジットゲートの比がおおよそ0.5、堆砂率はおおよそ100%であるため、この値以上の設計水深及び堆砂率を有するダムではゲート閉塞のリスクが高いと考えられる。これらのダムは、いずれも平成29年度の段階で既に堆砂対策が実施されているか、あるいは堆砂対策が計画されているものの、計画中のダムは、対策を早急に実施する必要がある。また、今後堆砂の進行により、閾値周辺のダムについても閉塞リスクが高まっていくことが予想され、同様に予防保全的な対策が必須となるといえる。

4.3 堆砂率とダム直上堆砂位について

前節では、ゲート閉塞リスクの高いダムについて簡便なスクリーニング手法を提案した。しかし、リスク要因とした計画堆砂容量に対する堆砂率は、各ダム毎の堆砂形状の違いによって、厳密にはより直接的なリスク要因であるダム直上の堆砂高さの代替とならないことが考えられる。そこで、国土交通省管理の24ダムについて、ダム直上の堆砂位のデータ提供を受け、堆砂率とダム直上堆砂位の関係について整理した。ゲート敷高に対するクリアランス (ダ

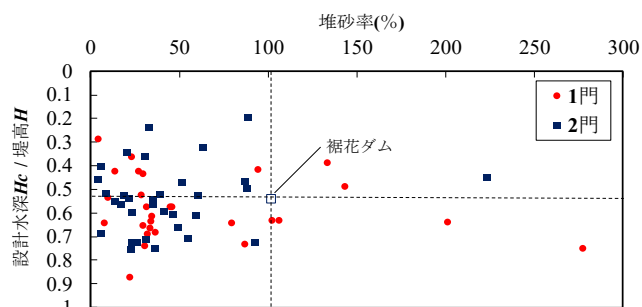


Fig. 13 Design depth of gates and sedimentation rates

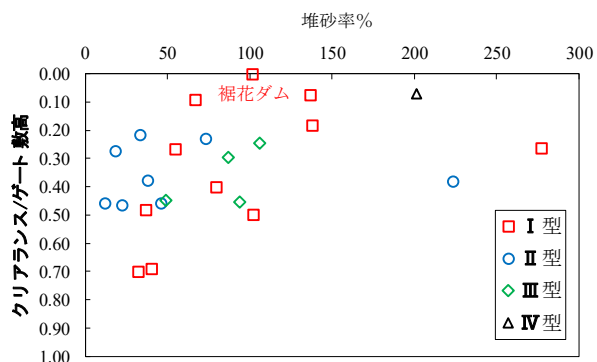


Fig. 14 Sedimentation rate and clearance

ム直上の堆砂高さからゲート敷高までの高さ) と堆砂率の関係をfig14に示す。また、3章で示した堆砂形状の分類に基づいて、各ダムをI～IV型の堆砂形状に分類した結果も併せて示している。これより、データ数が多くないため断定はできないものの、次の傾向が見て取れる。掃流砂、浮遊砂ともに多く流入するI型では、堆砂率が100%に近づくにつれ、比例的にクリアランスは0に近づいている。一方、浮遊砂が卓越するII型では、堆砂初期から密度流堆積層(fig 5)における堆砂が進行するためか、堆砂率が小さい時点でもクリアランスが小さくなっている。次にIII型では、密度流堆積層を構成する浮遊砂成分が少ないためか、高い堆砂率においても、クリアランスは大きい。なお、データが少ないが、貯水池規模が小さくダム付近まで著しく堆砂が進行していると定義されるIV型のダムについては、堆砂率が高くなってきた時点で対策検討が急務になると考えられる。このように、堆砂形状の違いによって、同抽出方法によるリスクの捉え方には幅を持たせる必要性があり、堆砂率を用いた簡便なスクリーニングを行った後、個別のダムの堆砂状況を精査するといった流れでの本手法の活用が求められる。

5. 「n-1」条件がダムの洪水調節能力に及ぼす影響評価

コンジットゲートの機能低下がダムの洪水調節能力に及ぼす影響について検討するため、実際の閉塞事例のあった裾花ダムを対象に、「n-1」条件下における洪水調節計算を行った。計算には、裾花ダム管理事務所より提供いただいたデータを用いた。fig15は、裾花ダムの洪水調節計画における計画流入波形及び計画放流量($n=2$)のハイドログラフ、また「n-1」条件下での放流量とそれぞれに対応する貯水位を示している。これより、本来の洪水調節計画では、コンジットゲート2門で計画放流量 $520\text{ m}^3/\text{s}$ を放流可能であるのに対し、「n-1」条件下では、コンジットゲート1門の最大放流量が $315\text{ m}^3/\text{s}$ であるため、貯水位がクレストゲートに達するまで、計画放流量へ移行できていない。そして、クレストゲートの水位に達した後、貯水位の上昇を抑えるため異常洪水時防災操作に移行した結果、計画放流量の1.5倍程度である $730\text{ m}^3/\text{s}$ となっている。これは、裾花ダム下流河道における疎通能力 $600\text{ m}^3/\text{s}$ を上回る流量であり、かつ放流量の増大が急激であるため、下流での被害が生じる懸念がある。

このように「n-1 rule」の適用によって、ゲート閉塞リスク発生時の洪水調節能力の機能低下レベルが評価できる。これより、現状ではそもそも「n-1」条件が生じないような予防保全的な対策が必須であるといえる。しかし、「n-1」が生じない、ということは断定できるものではなく、上述のリスク評価に基づいて、次のような対策案の検討を行うことができる。

- ・発電設備による代替放流
- ・貯水位の低下運用
- ・低標高での洪水吐きの増設「n+1」
- ・予備ゲートの運用による主ゲートの早期復旧

等、が挙げられる。しかし、発電用放流量が小さいダムの場合は放流能力の代替には及ばず、貯水位低下による運用でも、水位が低下するほど貯水池容量が小さくなることから、貯留量の代替確保にはなりにくいと考えられる。また、堆砂進行の影響を受ける場合、予備ゲートの運用は主ゲート同様その働きが制約されるおそれがある。そこで、「n-1」条件に対するリスク対策としては、近年増加しているダム低標高部における放流管増設事例のように、クレスト標高以下で放流量を維持し、ピーク流入量に対して洪水調節容量を確保できる設備投資が有力であると考えられる。このような場合、「n-1rule」の適用による影響度の評価は、予防保全的な対策を行う際の事業評価にもつながると考えられる。

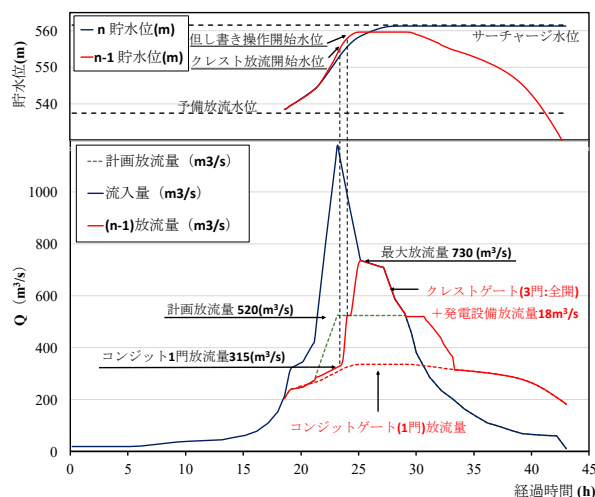


Fig. 15 Result of flood control calculation under “n-1” conditions

6. 結論

本研究では、近年顕在化しつつある既存ダム水理構造物に対するリスク評価手法を構築していく第一歩として、長野県裾花ダムで生じたゲート閉塞事例を参考に、堆砂の進行を踏まえた常用洪水吐きの閉塞リスクの高いダムの抽出方法の提案を行った。これは今後優先的に堆砂対策を進めていくべきダムを抽出する指標に成り得ると考えられる。また、スイスの「n-1 rule」を参考に、常用洪水吐きが1門使えない「n-1」条件が、ダムの洪水調節能力に及ぼす影響について明らかにした。このような影響度評価は、今後予防保全的な対策を行っていく上でその事業評価にもつながると考えられる。

本研究は国内における包括的なダムリスクマネジメントを構築していく上で的一部分であり、今後も検討を重ねていく必要があると考えられる。特に、海外事例のようななるべく定量的なリスク評価手法に近づけていくためには、ゲート閉塞の発生確率やそのメカニズムを把握する必要がある。そこで、今後の課題として、本研究では取り扱っていない沈木について、ゲート閉塞との関連性を検討していく必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、株式会社建設技術研究所、長野県裾花ダム管理事務所よりデータ提供を受けた。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- 芦田和男, 高橋保, 道上正規 (1983): 河川の土砂災害と対策, 森北出版.
- 入江洋樹, 柏木順, 上村寿一, 太田道男, 川原修司, 吉澤和美, 柏井条介 (2004): ダム分野におけるリスクアセスメントについて, 日本大ダム会議, 国際大ダム会議日本国内委員会会誌Vol. 188.
- 江崎一博 (1976): 貯水池の堆砂に関する研究, 京都大学学術情報リポジトリ紅.
- 大矢通弘, 角哲也, 嘉門雅史 (2002): ダム堆砂の性状把握とその利用法, ダム工学12巻(3), pp. 174-187.
- 社団法人ダム・堰施設技術協会 (1987-2006): ゲート総覧 I - V.
- 国土交通省水管理・保全局河川環境課(2013): ダム総合点検実施要領・同解説.
- 国土交通省水管理・保全局河川環境課 (2018): ダム貯水池流木対策の手引き(案).
- 小林潔司 (2008): アセットマネジメントはリスクマネジメント, 月刊建設52巻, pp. 4-6.
- 高田康史 (2006): 貯水池土砂管理手法とダム計画・管理への適用に関する研究, 京都大学博士学位論文DOI:10.14989/doctor.k12268.
- 松本徳久(2017): ICOLD をめぐる動き(第38報)ーオロビルダムの洪水吐きの事故ー, 大ダム239, pp. 1-4, 2017.
- F. Fruchard and B. Camenen (2012) : Reservoir sedimentation: different type of flushing - Friendly flushing example of Genissiat dam flushing.

(論文受理日 : 2019年6月17日)