

設計規模を超える洪水リスクに対するダムでの適応策に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令2～令4

担当チーム：水工チーム

研究担当者：石神孝之、宮川仁

高田翔也

【要旨】

気候変動による外力増大を踏まえた治水対策の重要性が増している昨今において、ダムにおいても流量増大に対応した洪水調節機能の強化とダムそのもの安全性確保の検討が重要となっている。特に、ハード面の対策としては、上記機能を担保するダムの洪水吐きについて、既設構造物の設計条件を踏まえた上で、効果的かつ経済的な放流能力の増強策を見出す必要がある。

そこで本研究では、現在のダムの洪水吐きの設計条件を整理した上で、海外のダム放流能力増強事例や、新たな型式であるピアノキー型越流堰について文献調査を行うとともに、国内ダムにおける今後の方向性に関する検討を行った。

キーワード：気候変動、ダム洪水吐き、ダム再生、ピアノキー堰

1. はじめに

全国の一級水系では、現在気候と比べ、将来気候において年最大流域平均雨量が約1.1～1.3倍になること、基本高水を超える洪水の発生頻度が約1.8～4.4倍になることが予測されており、気候変動に対応した治水対策の重要性が増してきている。

平成30年7月豪雨では、国土交通省所管の558ダムのうち213ダムにおいて、防災操作（洪水調節）を実施し、下流河川の水位を低下させ、流域の被害軽減・防止効果を発揮した。一方、8ダムにおいては、洪水調節容量を使い切る見込みとなり、ダムへの流入量と同程度のダム流下量（放流量）とする異常洪水時防災操作に移行した。さらに、2019年10月の台風19号による豪雨においても、6ダムが異常洪水時防災操作に移行し、9ダムが異常洪水時防災操作を実施する可能性があった。このような洪水時防災操作実施に至るダムは、洪水調節容量が相対的に小さい場合が多く、気候変動に伴う洪水への対応を含め、洪水調節能力の増強が求められる。

また、米国 Oroville dam では、2017年の大規模洪水時に放流設備が損壊し、下流への放流量急増の危機が生じた¹⁾。一方、国内においても、長野県裾花ダムでは、2017年にダムの堆砂と沈木の複合作用により洪水調節中の常用洪水吐きゲートが機能不全となる事態が発生した。これらの事例は、ダムの洪水調節機能および安全性そのものを確保していく上で、洪水吐き機能



2017年の Oroville dam における常用洪水吐きの損壊
(事故調査の報告書¹⁾より抜粋)

の維持管理の重要性について警鐘を与える例といえ、今後、高経年化の進むダム洪水吐きの維持管理や、増大する貯水池堆砂および流木に対して、効果的かつ持続可能な新たな適応策の検討が必要となっている。さらに、国内では、完成年が古く、洪水吐きの放流能力が現在の河川管理施設等構造令に適合していないダムも存在しており、適切な更新が求められる。

ここで、洪水調節における異常洪水時防災操作は、ダム貯水位の異常上昇に伴い、設計上ダムから放流することが想定されていない箇所から下流への流出が生じ、放流量を制御できなくなることおよびそれに伴う下流における被害を防ぐために行われる。これは、治水計画の計画規模を超えて、洪水調節機能の限界に到達している状況であり、前節で挙げた事前放流等の容量確保による対策が求められる。

一方で、容量確保の議論とは別に、工学上予想される最大規模の洪水を超える洪水に対して、洪水吐きの放流能力が十分であるかという確認事項がある。放流能力が不十分な場合、流入＝放流の操作ができず、貯水位が設計で考慮している最高水位（設計洪水位）よりも上昇する恐れがある。ダムを設計する際には、洪水調節計画とは別に、工学上予想される最大規模の洪水量等をもとに洪水吐き規模が設定されているが、気候変動に伴う外力増大を考慮すると、非常用洪水吐き放流能力の増強の必要性についても今後検討を行う必要がある。

以上を踏まえ、本研究では、設計規模を超える洪水に対するダムでの適応策の提案に向けて、現行のダムにおける洪水吐きの設計条件の概略を整理するとともに、海外における洪水吐き放流能力増強事例、国内における今後の方向性に関する検討を行った。

2. 現在のダムの洪水吐きの設計条件

2.1 設計洪水位以下の洪水吐きの放流能力に係る設計条件

現在のダムの安全面に係る洪水吐きの設計条件は、設計洪水位でダム設計洪水流量を常用・非常用洪水吐きを併せて放流できることである。ここで、ダム設計洪水流量は昭和 51 年の河川管理施設等構造令以降、1)200 年確率流量、2)既往最大、3)地域別比流量図から定まる流量の中で最大の流量により決定される（フィルダムは当該流量の 1.2 倍）。そして、これらの流量が一定流入する仮定のもと（一部の貯留効果が見込めるダムを除く）、設計洪水位で放流可能な規模の洪水吐きが設けられている。土砂や流木、ゲート操作の遅れ等の他要因を除けば、ダム設計洪水流量そのものがダムの放流能力に関する水理条件であり、今後は気候変動を踏まえたダム設計洪水流量の設定方法の検討が重要となる。なお、実際の洪水において流量は時間的に変化し、一定流入することは考えにくいいため、今後の検討においてはその点についても留意が必要である。

2.2 設計洪水位以上の貯水位におけるダムに係る設計条件

洪水流入規模が、ダムが有する洪水吐き放流能力を上回った場合、流入＝放流とならず、過剰貯留により貯水位は上昇し、設計洪水位以上の貯水位となる恐れがある。実際のダムにおいては、前項で述べた設計洪水位に、風や地震による波浪などの影響を加味した非越流部高さが設定されている。一方で、設計外力とし

て設計洪水位以上は考慮していないこと（構造計算上安全率を見込んでいるためただちに構造上の危険が生じるものではない）、水位上昇に伴いゲート下端へ水脈が接触し、管路流移行に伴う放流能力低下が生じる可能性があることなど、設計洪水位以上の設計では考慮していない貯水位における現象については不確実要素が多い。そのため、貯水位が設計洪水位を超えた際にどういった現象が生じるか、またその際どのような被害が生じうるかについて検討し、そのリスクを把握しておくことが対策を講じるにあたり重要となる。

3. 海外のダム放流能力増強事例

海外では、外力設定の見直しにより、不足する洪水吐きの放流能力を増強する事例が増えている。米国では 2014 年に、FEMA（Federal Emergency Management Agency、連邦緊急事態管理庁）から” Technical Manual: Overtopping Protection for Dams” が公表された²⁾。このマニュアルでは、放流能力の増強を目的とした洪水吐き増設事例や堤体下流面や下流アバット岩盤を流水が安全に流下することを可能とした事例が紹介されている。ここでは、マニュアルで紹介されている事例のうち特徴的な事例を紹介する。なお、ここで紹介する事例が放流能力の増強そのものを目的としたものか、洪水調節機能の向上を目的としたものかについては区別していないが、ダム型式毎の改造方法について着目されたい。

Folsom dam（図-1）は 1956 年に完成した堤高 100m の重力式コンクリートダムである。放流能力増強のために、左岸側にあるフィル部のウィングダムと地山の間に洪水吐を増設する再開発事業が 2017 年に完成している。また、洪水期には降雨量の予測に基づき洪水調節容量を確保するために事前に放流が行われており、降雨予測が外れて利水容量が不足した場合には近傍の流域から用水を買い取る協定を予め締結しており実際に 1998 年に実施されている。

Big Tujunga dam（図-2）では、放流能力の不足から天端に越流型の洪水吐きが増設されるとともに、耐震性の不足から堤体下流面を増厚する再開発事業が行われている。

Coolidge dam（図-3）は、1930 年に建設された堤高 76m のマルチプルアーチダムで、左右岸に非常用洪水吐きが設置されている。1980 年に、洪水吐きの放流能力不足から洪水時に下流の岩盤が越流水により侵食されるリスクがあることが判明したことから、洪水吐きの放流能力増強のための改造が行われている。改造に

あたっては、非常用洪水吐のシュート部の補強とともに、流水にさらされる懸念があった堤体下流アバット部の岩盤をコンクリートで保護する対策が実施されている。

Leyden dam (図-4) と Left hand valley dam (図-5) はともにアースフィルダムであり、堤体天端の一部を2m程度切り下げたうえで、天端と下流面を RCC (Roller Compacted Concrete) により階段状に保護することで流水の減勢効果を期待する対策が実施された。Left hand valley dam では、2013年の洪水時に約1週間最大約20cmの水深でRCC部を流下したものの大きな損傷は発生しなかったことが報告されている。

以上のとおり、設定外力の見直しに伴い、放流能力の増強を目的としたダム型式や現場条件に応じた多様なダム改造事例がある。その中には、ダム計画上の最高水位(設計洪水水位相当)以下で放流能力を増強させる事例のほか、堤体下流面や下流の岩盤を流水が流下することも想定して保護するといった日本には無い事例が存在し、その際の計画・設計・施工過程は日本においても重要な知見となると考えられる。

4. 海外におけるピアノキー型越流堰の事例

近年、フランスを中心に洪水吐き放流能力増強の一手法として、Piano Key Weir (ピアノキー型越流堰、以下「PKW」という。)の採用事例が増加している。PKWとは、図-6、図-7に示すようにラビリンズ堰の改良形状として、F. Lempérière ら⁴⁾により提案された。表-1は、近年のPKWを採用したダムの一覧である⁷⁾。

PKWは、Inlet(流入) & Outlet(流出) keyおよびsidewall(側壁)からなるユニットを基本構造としている。特徴としては、国内のダムに多く採用されている標準越流頂に比べ、越流長が長くなることから放流能力が増加する(図-7における $W \ll L$)¹⁷⁾。さらに、ラビリンズ堰に比べ、設置面積が小さくなり、施工上のメリットがあるとされている。一方で、形状のパラメータ(図-7中 P_i , L/W 等)は30以上とされ⁶⁾、設計手法が十分に整理されておらず、近年海外では実験、計算による知見が積み重ねられているところである。

我が国においても、非常用洪水吐きの放流能力の増大の観点、またダム設計洪水流量に対する設計水深を小さくできることによる洪水時最高水位の引上げ(洪水調節容量の増加)の観点から、導入メリットの多い洪水吐き形式と考えられる。一方で、地震等に対する構造面での検討事例は少なく、今後さらなる検討が必要である。



図-1 Folsom dam : 写真右側が増設された洪水吐き



図-2 Big Tujunga dam³⁾



図-3 Coolidge dam³⁾



図-4 Leyden dam : 堤体下流面をRCCで階段状に保護



図-5 Left hand valley dam : RCCで階段状に保護した堤体下流面からの流下状況³⁾

5. まとめ

本研究では、ダム放流能力の観点で大規模洪水に対する基礎的事項、海外の事例を整理した。今後の主な検討項目として、以下が挙げられる。

- 1) 放流能力増強に向けたダム形式毎の洪水吐き増設方法の整理・検討
- 2) 階段式の越流部やPKW等新たな洪水吐き形式の適用条件の検討および開発
- 3) 気候変動を踏まえたダム設計洪水流量の再検討
 - 1)、2)については、海外事例が参考となることから、各改造事例における水理的・構造的な設計思想、制約条件、コスト等の分析を進めていく必要がある。今後、
 - 3)についても海外での事例も踏まえながら検討していく必要がある。

参考文献

- 1) John Trojanowski, Stephen Rigbey, John France, Henry T. Falvey, Peter A. Dickson, Irfan A. Alvi : Independent Forensic Team Report, Oroville Dam Spillway Incident, 2018.
- 2) Federal Emergency Management Agency (FEMA): Technical Manual: Overtopping Protection for Dams, 462p, 2014.
- 3) K. D. Hansen and T. J. Fitzgerald: Performance of RCC Used for Overtopping Protection and Spillways, 2nd International Seminar on Dam Protection against Overtopping, pp.7-20, 2016.
- 4) Lempérière, F., Ouamane, A. 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. Hydropower & Dams 9(5), 144-149.
- 5) Laugier F, Lochu A, Gille C, Ribeiro ML and Boillat JL (2009) Design and construction of a labyrinth PKW spillway at Saint-Marc dam, France. The International Journal of Hydropower and Dams, 6(5): 100-107.
- 6) Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Erpicum, S., Machiels, O., Piroton, M., Boillat, J.L., Leite Ribeiro, M. and Schleiss, A.J. (2011). "A naming convention for the Piano Key Weirs geometrical parameters." Proc., International Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press, 271-278.
- 7) World Register of Piano Key weirs prototypes: https://www.uce.uliege.be/cms/c_5026433/en/world-register-of-piano-key-weirs-prototypes (2021年12月取得).



図-6 PKWが採用された Saint-Marc dam (左：完成後下流面、右：施工途中)⁵⁾

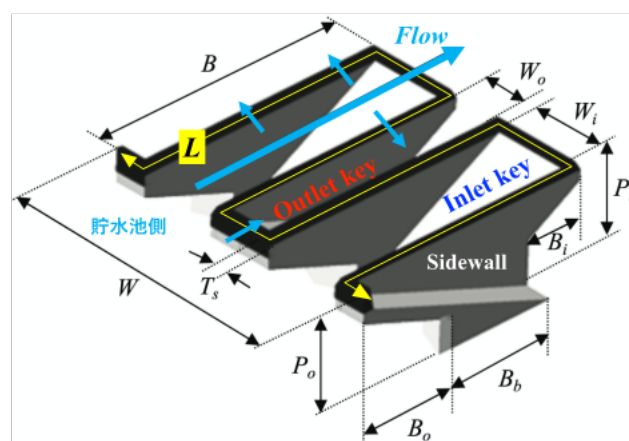


図-7 PKWの基本形状 (Pralongら⁶⁾に一部加筆)

表-1 PKWが採用されたダム一覧⁷⁾

Name	Country	Commissioning	Name	Country	Commissioning
Bakkhada	Algeria	1938	Emmenau	Switzerland	2012
Beni Bahdel	Algeria	1940	Campauleil	France	2014
Goulours	France	2006	Charmines	France	2015
Saint-Marc	France	2008	Rambawa Tank	Sri Lanka	2015
Etroit	France	2009	Rassisse	France	2015
Gloriettes	France	2010	Raviege	France	2015
Rattling Lake	Canada	2011	Van Phong	Vietnam	2015
Escouloubre	France	2011	Da Dang 3	Vietnam	2016
Gouillet	France	2011	Dak Mi 3	Vietnam	2016
Malarce	France	2012	Record	France	2016
Beaufort	France	2013	Xuan Minh	Vietnam	2016
Black Esk	United	2013	Gage	France	2017
Dak MI 4B	Vietnam	2013	Hazelmere	South Africa	2018
Dak MI 4C	Vietnam	2014	Oule	France	2018
Giritale	Sri Lanka	2013	Ouldjet	Algeria	2018
Loombah	Australia	2013	Lewis Creek	USA	2019
Sawra Kuddu	India	2013	reservoir		

ADAPTATION MEASURES AT DAMS FOR FLOOD RISKS EXCEEDING THE DESIGN FLOOD

Research Period: FY2020-2022

Research Team: Hydraulics and Sediment Transport Engineering Team,
River Dynamics Management Group

Author: ISHIGAMI Takayuki
MIYAKAWA Masashi
TAKATA Shoya

Abstract: As the importance of flood control measures to cope with increased external forces due to climate change has been increasing recently, it is important to consider strengthening flood control functions and ensuring the safety of the dam itself to adapt to the increased flow rate. As a hardware measure, it is necessary to find effective and economic measures to enhance the discharge capacity of the dam spillway to ensure the above functions, taking into account the design conditions of the existing structure. In this study, the design conditions of the dam spillways of current dams were summarized, and a literature survey was conducted on overseas examples of dam redevelopment to increase discharge capacity, and on a new type, the piano key weir. Furthermore, the future direction of their application to dams in Japan was discussed.

Keywords: Dam safety, Dam Redevelopment, Spillway, Piano key weir