

既設ダムに増設する放流設備の計画・設計

箱石憲昭*

1. はじめに

近年、少子高齢化・人口減少社会の到来による社会資本への投資余力の減少、自然環境保全への関心の高まりといった社会環境の変化から、既設ダムの有効活用に対する要請はますます高まっている。既設ダムへの放流設備の増設は当初から想定されたものではないことから、増設する放流設備の配置は、既設ダムの施設配置によって大きな制約を受ける。また、既設ダムの機能を維持したままでの施工を求められることがほとんどであり、貯水位を維持したまま施工するための大規模な仮締切の設置や非出水期に限定した施工、さらには工事中の洪水調節への対応など、施工面でも大きな制約を受ける。

本稿では、既設ダムに増設する放流設備の目的、形式、計画・設計にあたっての留意事項を概説した上で、重力式コンクリートダムに設置する増設放流設備(放流管)の設計手法について述べる。

2. 既設ダムに増設する放流設備

2.1 放流設備増設の目的

放流設備増設の目的は、既存の放流設備では対応できない領域をカバーすることであるが、大きく(1)既設放流設備の機能改善と(2)治水・利水の計画変更への対応に分類される。

(1) 既設放流設備の機能改善

既設放流設備設置当時の技術ではゲート全開・全閉のみの操作しか想定していなかったため、十分な放流量制御ができない状況や、既設の低水放流設備の放流能力が小さく、体制移行と放流開始時の警報・巡視を伴う大規模な洪水吐きゲートからの放流を頻繁に行わなければならない状況などを改善する場合である。

(2) 治水・利水計画の変更への対応

治水・利水計画の変更によって放流条件が変更となり、放流量の増大が求められる、あるいは放

流量は同じでもより低い貯水位での放流が求められるといった場合がある。

2.2 放流設備の増設方法

ダムに放流設備を増設する場合、ダム堤体や越流式洪水吐きの頂部を切り欠いて越流量を増大させる、ダム堤体に削孔して放流管を増設する、新たにトンネル式洪水吐きを設置するといったことが考えられる。

2.3 増設放流設備の計画・設計

2.3.1 放流能力の設定

増設目的に従い、増設後において必要とされる貯水位毎の放流量を整理し、既設放流設備の貯水位毎の放流可能量と比較して、放流能力が不足する貯水位の範囲と不足する放流量を明確にする。例えば、洪水調節容量を有効活用するためには、出水初期には下流に被害が生じない範囲でできるだけ貯留せずに放流し、洪水調節容量を確保しておくことが求められる。その結果、貯水位を保ったまま放流量を増加させることが必要となり、低い貯水位において放流能力不足となることが多い。

2.3.2 放流設備形式の選定

既設ダムの放流設備配置や周辺地形との取り合いによって、堤体に放流設備を増設できる箇所は限られる。その中で、ダムの構造への影響を考慮しつつ越流式洪水吐きの増設やコンクリート堤体の削孔による放流管増設の可否を検討する。堤体削孔にあたっては堤体構造上削孔径に限界があり、かつ水理面では管内流速に限界があることから、放流管1条あたりの放流量は制約される。必要放流量を満たせない場合は、条数を増やす必要があるが、配置できる放流管条数は個々のダムの条件により制約を受ける。堤体における放流設備の増設が困難な場合は、トンネル式洪水吐きの新設を検討することとなる。トンネル式洪水吐きは、地形や地質条件によってトンネル線形やトンネル径等が制約を受ける。これらの各形式の制約条件を考慮しつつ、当該ダムに適した放流設備形式を選定することとなる。

2.3.3 増設後の運用方法の検討

既設放流設備と増設放流設備をどのように組み合わせる運用するかによっても、増設放流設備の導流部・減勢工の設計が異なってくる。増設放流設備でなければカバーできない貯水位－放流量の領域以外では、既設放流設備と増設放流設備の放流量の組み合わせには自由度がある場合も多い。一般に新しい増設放流設備は操作性が向上しているので、増設放流設備を優先的に使用した方が管理上は有利と思われる。しかし、増設放流設備単独放流時が減勢工にとって最も厳しい状況となる場合には、既設放流設備にも放流を分担させ、増設放流設備の放流量を減らした方が増設放流設備の減勢工への負担が減ることとなる。その方が増設放流設備の減勢工規模を小さくでき、コスト縮減につながる可能性がある。その場合は当然当該条件での増設放流設備単独放流は避ける運用とする必要がある。

以上のことを、トンネル洪水吐きをイメージして示したのが図-1である。

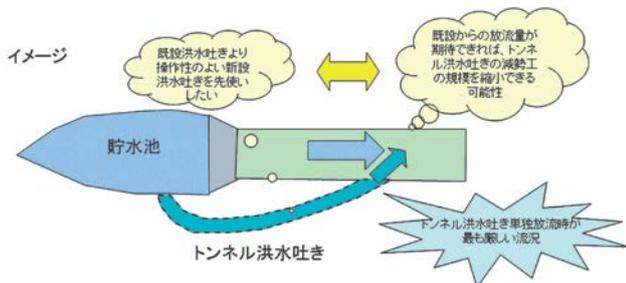


図-1 既設放流設備と増設（新設）放流設備の分担

2.3.4 施工計画を考慮した配置

放流設備の増設にあたっては、既設ダム機能の維持しながらの施工が求められることがほとんどである。そのため、工事時の貯水位低下を極力少なくし、かつ既設放流設備の機能をできるだけ維持するような施工計画が求められる。このことが、増設放流設備の配置計画にも影響を及ぼす。例えば、施工時の貯水位の設定の違いにより、堤体に削孔する孔周辺に生じる応力が異なり可能最大削孔径が影響を受け、放流管1条あたりの放流量に影響し、場合によって必要条数が変わってくる。また、既設ダムと周辺地形の関係で、資材運搬経路や施工方法が限定される場合も多い。このように、放流設備の増設は様々な制約条件が厳しく、「絵に描いた餅」にならないよう、施工計画

も考慮しつつ配置を考えなければならない。

3. 重力式コンクリートダムの増設放流設備

3.1 放流設備の配置

重力式コンクリートダムの増設放流設備の放流管線形イメージを図-2に示す。堤体に削孔して放流管を設置するため、堤体内にゲートハウスを設置することは困難であり、放流管下流端にゲートを設置した、管長の長い全管路型放流管となる。図-2に示すように、呑口標高はできるだけ高く、堤体を通過する部分は水平に、ゲート標高はできるだけ低くとの要求があり、その結果、図-2に示すような縦断線形が基本となる。

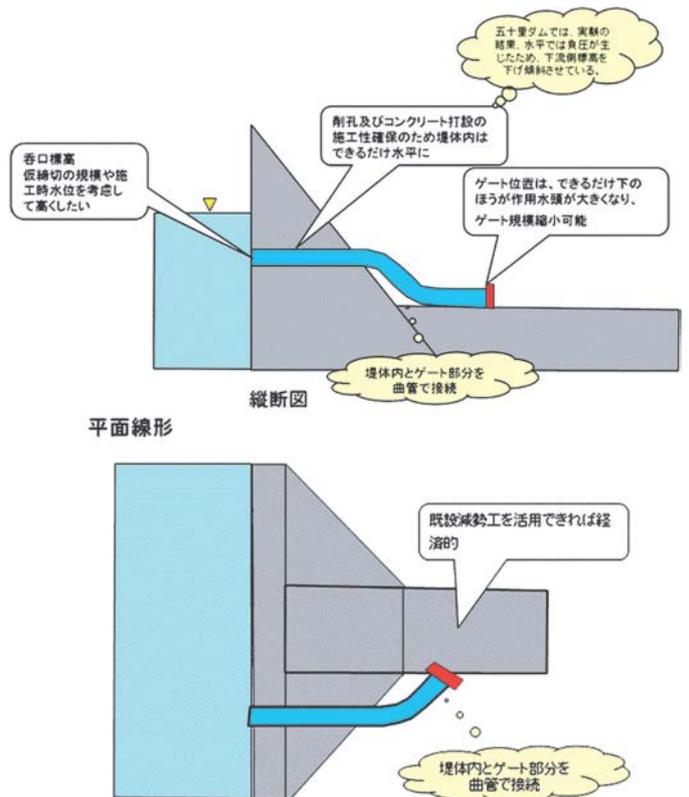


図-2 増設放流設備の放流管線形イメージ

また、既設洪水吐きの減勢工を活用できれば経済的となることから、平面線形にも湾曲が入り、縦断・平面ともに湾曲した線形となることが多い。小規模な利水放流管等では、管内の流れが複雑になるのを避けるため、縦断湾曲部と平面湾曲部はそれぞれ別の位置とするのが一般的である。しかし、増設放流管の場合、ゲートが下流になるほど減勢工における減勢長が確保しにくくなること、管径が大きいため管長が長くなるとコストへの影響が大きいこと、周辺地山の掘削が増える場合が

多いことなどから、できるだけ管長を短くする要求がある。そのため、縦断湾曲と平面湾曲を同じ箇所とした複雑な線形となることが多く、曲管部に作用する圧力等は水理模型実験により確認することが基本である。

3.2 管径、管内流速及び呑口標高

国土交通省所管の事業で、重力式コンクリートダムの貯水池側に仮締切を設置して堤体に削孔し増設放流管を設置したのは、鎧畑ダムの利水放流設備増設（1988～1990）がはじめてである。上流に建設される玉川ダムからの利水放流量を通過させるために設置されたものである。鎧畑ダムの増設放流管の設計にあたっては、小規模の利水放流管の設計の考え方が踏襲され、管内流速は10m/s以下に抑えられている。その後、田瀬ダムの洪水吐き増設（1994～1998）では、管内流速を約13m/sまで上昇させ、水理模型実験により、管内作用圧力の確認等が行われている。また、五十里ダムの洪水吐き増設では、管内流速は22m/sを超えており、後述する放流管湾曲部の壁面作用圧力特性を明らかにするための水理模型実験による基礎的な研究と実施設計形状に関する検討が行われている。

放流管径については、堤体構造から削孔径は通常堤体ブロック幅の1/3以下といわれており、ブロック幅15mの場合、最大削孔径は5mとなり、放流管の施工スペース等を差し引くと、最大の放流管径は3.8m程度となる。五十里ダムにおいても放流管径は3.8mである。現在計画中的鶴田ダムの洪水吐き増設では、詳細な堤体応力解析により、これより大きな削孔径を検討し、放流管径もこれより大きなものを採用することとしている。

呑口標高は、仮締切の設計や堤体応力の観点からは、できるだけ上の方が望ましいが、呑口からの空気の吸い込み防止、呑口ベルマウス部の負圧防止の観点からは、かぶり水深が大きくなるよう、できるだけ下の方が望ましい。堤体応力解析結果によって、呑口標高を低くすれば放流管径が小さくなってしまう場合は、ベルマウス部の圧力低下との関係に注意する必要がある。

円形放流管の放流量 Q は、

$$Q = AV = \frac{\pi}{4} D^2 V \quad \text{式(1)}$$

ここに、 A :放流管断面積、 V :管内流速、 D :放流管

径、であるから、

$$V = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D^2} \quad \text{式(2)}$$

となる。一方、ベルマウス部の圧力低下量 Δh_b は、

$$\Delta h_b = f_b \frac{V^2}{2g} \quad \text{式(3)}$$

ここに、 f_b :ベルマウス部損失係数、 g :重力加速度、であるから、放流量 Q が一定のもとでは、

$$\Delta h_b \propto \frac{1}{D^4} \quad \text{式(4)}$$

となり、管径 D が小さくなれば、ベルマウス部の圧力低下量 Δh_b は管径 D の4乗に反比例して大きくなる。

呑口標高を下げてかぶり水深を大きくしても、堤体応力解析結果から放流管径を小さくしなければならぬ場合は、放流量を確保するため流速を大きくする必要がある。その結果ベルマウス部の圧力低下が大きくなり、呑口標高を下げるのが必ずしも有利にはならないからである。

3.3 放流管湾曲部の壁面作用圧力特性

堤体に埋設される小規模な利水放流管の設計にあたっては、キャビテーション防止の観点から管内流速を10m/s以下に制限するのが一般的である。しかし、堤体に大規模な放流管を増設する場合、堤体構造の面から削孔径には限界があり、キャビテーションに対する安全性が確保される範囲で、流速をさらに大きく設定して管径を小さくすることが求められるのは前述のとおりである。

その際問題となるのは管内の圧力低下であり、土木研究所において、放流管湾曲部の壁面作用圧力特性を明らかにするため、水理模型実験を主体とした研究を行った。

実験は、図-3に示すように、水槽に取り付けた長さ $10D$ (D :管径)の水平管の下流に中心角 60° の湾曲管路を設けて実施した。大規模放流管は曲げ加工ができないことから、斜めに切断した直管をつなぎ合わせてエビの節のような形状で製作する。これを通称エビ継ぎ管と呼んでいる。このエビ継ぎ管の接合部付近で局所的な圧力低下が生じると考えられることからエビ継ぎ管の屈折角と圧力低下特性の関係性を調査した。実験結果の整理にあたっては、実験で計測された曲管部壁面の圧力水頭から摩擦損失水頭や湾曲部の遠心力を考慮して求めた、エビ継ぎ管部の局所的な圧力変

化の影響を表す係数 ϵ を導入して検討した。 ϵ の値が大きくなるほど圧力値が低下することを表す。

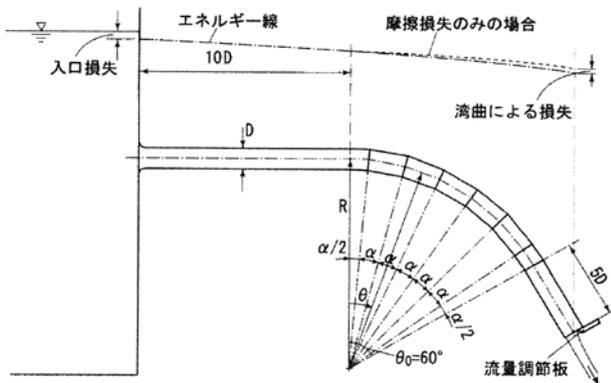


図-3 湾曲放流管模型概要

エビ継ぎ管接合部では屈曲の影響により ϵ は尖鋭なピークを示し、曲管外側で負、内側で正となり、遠心力による外側の圧力上昇及び内側の圧力降下を助長する。ここで、設計上重要と思われる曲管外側及び内側での ϵ の絶対値の最大値とエビ継ぎ管屈折角 α 、 R/D (曲管中心の曲率半径/管径) の関係を図-4に示す。図より ϵ の絶対値は α に対して直線的に変化している。これにより、エビ継ぎ管部の圧力低下量を推定することができる。

4. まとめ

既設ダムへの放流設備の増設においては、既設ダムの放流設備配置や周辺の地形、資材運搬路の確保、工事中のダムの機能維持のための貯水容量確保や洪水調節操作を考慮した施工計画、さらには既設放流設備をあわせた運用方法等、多様な制約条件を考慮しつつ計画・設計を進めていく必要があることを示した。そのため、施工区域周辺の地形地質調査、ダム堤体改造に関する構造的検討、

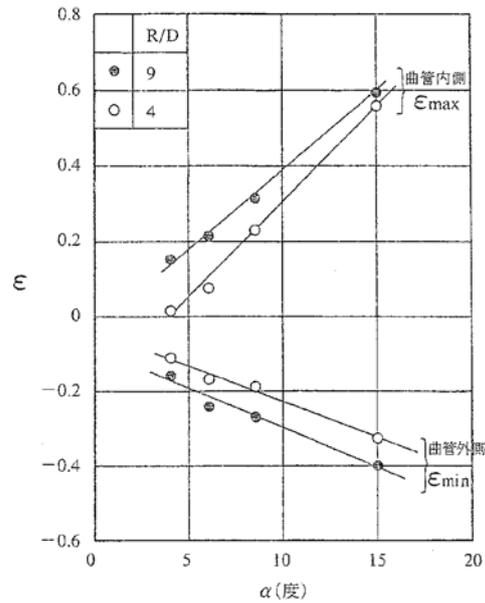


図-4 α と ϵ_{max} および ϵ_{min} の関係

施工計画の検討と継続的に調整を図りながら、その結果を増設放流設備の配置計画や設計にフィードバックさせることが重要となってくる。

既設ダムの改築事業の計画・設計にあたっては、地質、構造、水理、施工計画の担当者が情報交換しながら連携して進めていくことが、これまでのダム建設事業以上に求められている。

参考文献

- 1) 箱石憲昭：ダムの取水・放流設備の計画と設計、ダム技術、No.290、2010
- 2) 柏井条介：既設重力式コンクリートダム堤体に設置する増設放流管の水理設計、ダム技術、No.207、2003

箱石憲昭*



独立行政法人土木研究つくば
中央研究所水工研究グループ
水理チーム 上席研究員
Noriaki HAKOISHI