

既設ダムへの放流設備増設に関する水理的課題と対応

箱石憲昭

1. はじめに

既設ダムを有効活用するための貯水池運用の変更や、設置後長期間が経過したダムの機能改善が求められ、それに対応するための放流設備の増設が行われている。本稿では、主として国土交通省直轄ダムの放流設備増設事例を紹介しつつ、水理面での技術的課題と、それに対応した土木研究所の取り組みについて述べる。

2. 放流設備増設の背景

洪水調節容量を有する多目的ダムの建設がはじまったのは1940年代であるが、洪水調節用のゲートは、それ以前に建設されていた発電用ダム等と同様に、堤頂に並ぶ形式であった。(写真-2の長安ロダム(四国地方整備局)も同様の形式である。)洪水調節容量を、より多く確保するためには、洪水調節による貯留を開始する際の貯水位を低くすることが求められた。その結果、堤頂に設置するゲートの扉高を大きくすることや、ダム堤体の比較的低い位置に大流量を放流可能な高压放流管を設置することが求められるようになった。洪水を貯留したときの水深が大きくなると、ゲートに作用する水圧が大きくなり、ゲートの変形により水密の確保が難しくなる。また、ゲートを通過する流れが高速となり、振動等への対策が必要となる。こうした課題に対応しながら、ダム用ゲートの設計・製作技術は発展を遂げてきた。

既設ダムにおいて、ダム堤体を嵩上げせずに洪水調節容量を増大させるためには、洪水調節による貯留を開始する際の貯水位を、従前よりさらに低くする必要がある。また、洪水調節容量を有効に活用するためには、出水初期には、下流に被害が生じない範囲で流入量と同じ量を放流し、洪水のピーク時に効率よく貯留できるよう、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、出水初期に、貯水位を低く保ったまま、流入量の

増加に合わせて放流量を増加させていく操作が求められる。従って、洪水調節効果の向上のためには、低い貯水位における放流能力の増強が必要となることが多い。

3. 放流設備増設の事例

3.1 放流設備の増設方法

放流設備の増設方法としては、堤体削孔による放流管増設、堤頂を切り欠いての越流式洪水吐きの増設、トンネル式洪水吐きの増設などがある。

既設ダムの放流設備の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、堤体削孔による放流管増設や堤頂を切り欠いての越流式洪水吐きの増設の可否を検討することとなる。堤体削孔においては、堤体構造面で削孔径に、水理面で管内流速に限界があることから、放流管1条あたりの放流量に限界がある。そのため、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があり、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増設を検討することとなる。

3.2 重力式コンクリートダム堤体への増設

3.2.1 堤体削孔による放流管の増設

国土交通省所管事業で、重力式コンクリートダムの貯水池側に仮締切を設置し、貯水池機能を維持しながら、堤体に削孔し放流管を増設したのは、鏝畑ダム(秋田県)の利水放流設備増設(東北地方整備局施工)(1990)がはじめてである。増設放流管は削孔径4.4m、放流管径3.2mであり、小容量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た。

五十里ダム(関東地方整備局)の洪水吐き増設(2002)は、上流の湯西川ダム(関東地方整備局)の建設に伴う洪水調節計画の変更に対応するもので、削孔径は5.0m、放流管径は3.8mである。五十里ダムでは放流管2条あわせて500m³/sの放流量が要求され、管内流速は22m/sを超えるほど



写真-1 五十里ダム増設放流設備据付状況

になった。そこで、土木研究所において、後述する高速放流管曲管部の壁面作用圧力特性を明らかにするための基礎的な研究が行われている。

現在工事中の鶴田ダム再開発事業（九州地方整備局）の洪水吐き増設では、詳細な堤体応力解析を行った上で、五十里ダムよりもさらに大きな削孔径6.0m、放流管径4.8mとしている。

3.2.2 堤体切り欠きによる越流式洪水吐きの増設

ダム堤体の頂部を切り欠いて越流式洪水吐きを増設する事例としては、長安ロダム改造事業（四国地方整備局・工事中）がある。写真-2 に示すように、長安ロダムは堤頂に 6 門のゲートを有しているが、洪水調節による貯留を開始する際の貯水位における放流能力増強のため、右岸側（写真左側）の山の影になっている部分の堤頂に越流式洪水吐きを増設する。増設される 2 門のゲートからは、既往最大規模に匹敵する越流水深約 20m の厚い水脈が放流され、その直下流の導流



写真-2 長安ロダム

壁で流向を川側へ曲げるという、新設ダムでは想定されないような厳しい制約条件での設計がなされている。

3.3 トンネル式洪水吐きの増設

トンネル式洪水吐きの増設事例としては、天ヶ瀬ダム再開発事業（近畿地方整備局・工事中）、鹿野川ダム改造事業（四国地方整備局・工事中）がある。堤体構造や求められる増設放流能力の関係から、両ダムともに堤体への洪水吐きの増設は困難と判断され、トンネル式洪水吐きが採用されている。特に天ヶ瀬ダムでは、地形上の制約や環境上の配慮から、跳水式減勢工もトンネル内に配置する計画としている。

ダムからの高速の放流水を減勢して放流するためには、減勢工において、安定した跳水を起こさせる必要があり、後述するように、土木研究所において、トンネル内の跳水特性を把握するための基礎的な水理実験が行われている。さらに、トンネル内減勢工からの発生音に関する研究も行われている。

4. 土木研究所の取組み

4.1 水理模型実験による設計

ダムからの放流水は、重力により加速されて高速流となり、減勢工でエネルギーを散逸させたのち、下流河川に放流される。この過程において、流れの状態は構造物の形状の影響を受けて極端に変化する。また、水面形や壁面に作用する圧力の時間的変動も大きい。このような複雑な流れを数値シミュレーションで再現するのは困難であり、ダムの洪水吐きの設計にあたっては、水理模型実験を行って形状を検討することが基本となる。

既設ダムへの放流設備の増設は、新設ダム以上に厳しい制約条件の下での検討となることが多い。また、既設ダムの機能を維持しながらの工事となるため、工事中の洪水処理機能確保の観点から、施工途中の形状を対象とした水理模型実験が必要となる場合も多い。

一事例として、写真-3 に長安ロダムの水理模型実験の状況を示す。3.2.2 で述べたとおり、厚い水脈をダム直下流で川方向に曲げ、既設減勢工に導流することが求められた。その際、流れが集中して落下し、既設減勢工の水叩きに過大な水圧が作用しないよう、できるだけ流れを一様に広げ



写真-3 長安ロダム導流部検討状況(上から見たところ)

る必要があった。導流壁の線形を試行錯誤的に変えながら流れの状況を観察し、最終的には写真-3のように、円弧と直線を組み合わせた形状を採用している。

このほか、事例として紹介した五十里ダム、鶴田ダム、天ヶ瀬ダム、鹿野川ダムの増設放流設備についても、土木研究所において、水理模型実験による形状設計が行われている。同時に水面形や壁面作用圧力等の構造設計に必要となるデータや、ゲート開き毎の貯水位と放流量の関係など、管理運用に必要なデータも収集されている。

4.2 高速放流管曲管部の水理特性に関する研究¹⁾

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る。そのため、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大きく設定することにより、放流管1条あたりの放流能力を大きくすることが求められる。その際問題となるのは、キャビテーションの原因となる管内の圧力低下である。そこで、土木研究所において、放流管曲管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が行われている。

実験は、図-1に示すように、長さ $10D$ (D :管径)の水平管の下流に中心角 60° の曲管を設置して実施した。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たエビ継ぎ管となり、接合部で折れが生じることとなる。このエビ継ぎ管の内側の接合部付近では、流れが剥離する傾向となって、局所的な圧力低下が生じると考えられる。そこで、エビ継ぎ管の屈折角 α と圧力低下特性の関係を調査した。

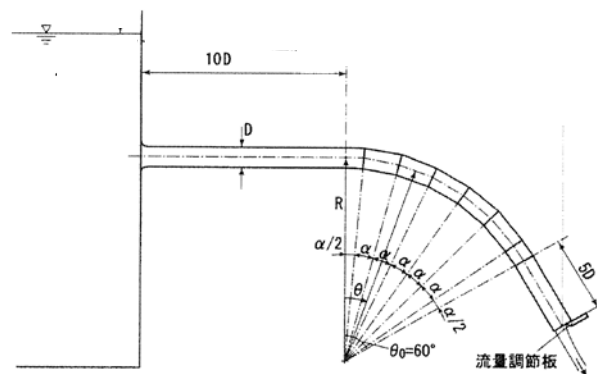


図-1 放流管曲管部(エビ継ぎ管)模型概要

その結果、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 の絶対値は、 α に対して直線的に変化することがわかった。この関係により、エビ継ぎ管部の圧力低下量を推定することができる。この研究成果や既往事例から、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手法がとりまとめられ、水理模型実験に供する基本設計形状の検討に反映されている。

4.3 トンネル内の跳水現象の把握²⁾

天ヶ瀬ダム再開発事業でトンネル内に跳水式減勢工を計画するにあたり、土木研究所において、トンネル内の跳水特性を把握するための基礎的な水理実験が行われている。実験では、幅 0.3m の水路に天板を設置し、その高さを変化させ、高速流による空気連行、跳水による空気の巻き込み状況、跳水部の空気圧等を調査した。実験状況を写真-4に示す。その結果、上流側からの給気がない場合、天板の高さが低くなると下流(出口)側からの給気が不十分となり、跳水部の空気圧が著しく低下することが確認された。 $H/h_2 \geq 1.2$ (H :天板の高さ、 h_2 :跳水計算による下流水深)で、跳水部の空気圧はほぼ一定となり、上部空間の風速

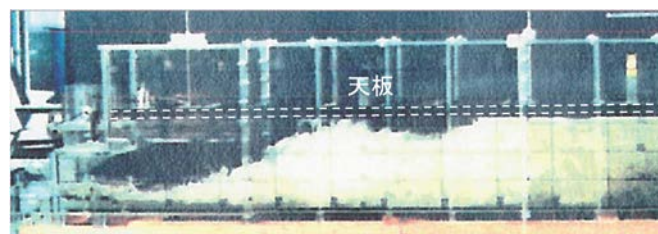


写真-4 トンネル内における跳水現象把握実験

は安定し、跳水長も一定となって、天板の影響が少なくなることが確認された。

この結果により、トンネル内減勢工において安定した跳水を発生させるため、跳水後の流水断面に対して2割以上の空き断面を確保することとした。

4.4 トンネル内減勢工からの発生音に関する研究³⁾

トンネル内に跳水式減勢工を設置する場合には、跳水時の発生音のみならず、共鳴現象といったトンネルにおける伝播挙動も問題となる可能性がある。そこで、トンネル内減勢工について、模型実験結果を実際の現象に換算するための相似則の検討を目的とし、幾何学的に相似で大きさの異なる4種類の模型を用いた実験を行い、跳水時の発生音の基本的な性質およびトンネル内での伝播特性を調査した。

実験模型の概要を図-2に示す。小さい方から2番目の大きさの縮尺模型を標準(1倍)とし、それより大きい模型(1.5倍、2倍)、小さい模型(1/2倍)の4種類で実験を行った。音の測定位置は、天板があるケースでは副ダム直下の測点2、天板がないケースでは跳水始端部直上の測点1および測点2である。

1倍模型の天板のないケースで、跳水始端付近から副ダム直下まで、連続的に音圧レベルを測定した結果、音圧の減衰状況から、音源は跳水始端において幅方向に分布する線音源と見なせることが確認された。

音圧測定結果から求めた音響出力と、放流条件から求めた水脈の流入エネルギーの関係を分析したところ、音響出力は流入エネルギーに比例することがわかった。その比例定数すなわち音響出力への変換率は、本実験条件の範囲では、放流条件や模型縮尺によらず、減勢工形状固有の値を持つと解釈された。

天板を設けた場合の各縮尺模型における副ダム下流の測定音のパワースペクトル(周波数分布)は、音源とは異なった分布形状となり、跳水始端で発生した音が、水面と天板にはさまれた細長い空間を伝播してくる際に、気柱共鳴を生じているものと考えられた。また、各周波数毎の伝達関数(観測音/音源=天板を設置した場合の測点2

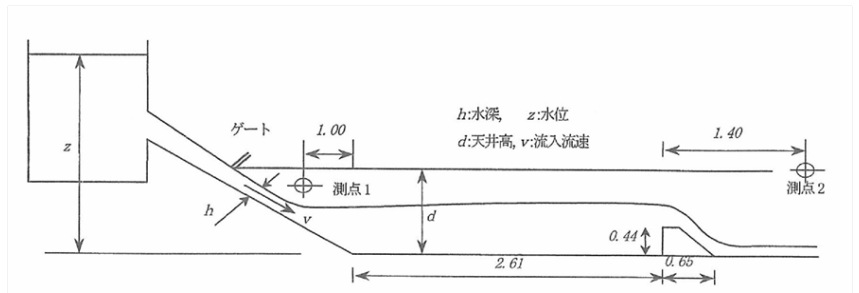


図-2 トンネル内減勢工模型(寸法は1倍模型 単位:m)

の測定音/天板を設置しない場合の測点1の測定音)が、水面と天板に挟まれた空間形状にほぼ依存し、模型縮尺による換算が可能であることが示された。これらの知見により、水理模型実験における計測結果から実物のトンネル出口における発生音を予測する手法を提案し、天ヶ瀬ダムトンネル式洪水吐きの発生音予測に反映されている。

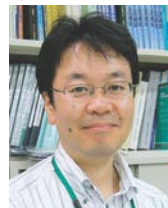
5. おわりに

土木研究所では、水理模型実験を主要な手段として、個々のダムの増設放流設備の設計を行いながら、それまでになかった条件での施設設計を可能とするための研究を行ってきた。既設ダムの有効利用の観点から、今後も放流設備の増設は続くと思われ、現場ニーズに対応した研究を行い、課題の解決に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 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
- 2) 新屋敷隆、高須修二、角哲也、本田敏也：トンネル内の跳水現象の特性について、第21回土木学会関東支部技術研究発表会、pp.140~141、1994.
- 3) 桜井力、柏井条介、櫻井寿之：地下に設けられる跳水式減勢工の発生音特性、水工学論文集、第43巻、1999

箱石憲昭



(独)土木研究所つくば中央研究所
 水工研究グループ水理チーム
 上席研究員
 Noriaki HAKOISHI