

水理模型実験による減勢工等の形状決定プロセスについて

渡邊 航太・小林 達

利賀ダム工事事務所 調査設計課 (〒939-1361 富山県砺波市太郎丸1-5-10)

利賀ダムでは2002年に減勢工を含む本体の形状が提案されたが、その後2019年に事前放流設備を配置するために形状の見直しがされた。減勢工の形状は水理模型実験を経て決定され、最終的には「減勢工幅拡幅+補助構造物配置+副ダム下流配置」構造が妥当と評価された。本稿では利賀ダムにおける減勢工形状変更の経緯と水理模型実験による形状決定プロセスについて報告する。

キーワード 利賀ダム、重力式コンクリートダム、減勢工、水理模型実験

1. はじめに

利賀ダムとは、富山県南砺市を流れる一級河川庄川水系利賀川において建設中の堤高112m、堤頂長255mの重力式コンクリートダムである。洪水調節、流水の正常な機能の維持、工業用水の確保を目的として1993年から建設事業が進められており、2031年度中の完成を予定している。また減勢工とは、ダムからの放流水を安全に流下させるための施設である洪水吐の一部であり、流下する水のエネルギーを小さくし、洗掘等を防ぐために堤体の下流部に作られる構造のことである。

利賀ダムでは2001年から2002年に、常用洪水吐を中心とし、非常用洪水吐としての越流頂を5門配置された形状で水理設計が検討され、その後水理模型実験により減勢工を含む形状が決定された。その後2019年にダム機能強化の一環として、既存ダムの有効貯水容量を洪水調節に最大限活用できるよう、事前放流設備を新たに設置する

洪水吐形状への見直しがされた。新たに事前放流設備が配置されたため、減勢工への流入条件が大きく変化すること等が挙げられ、形状の策定に向けた減勢工等の水理計算に基づく形状検討が行われた。そして、水理模型実験により洪水吐及び減勢工の検討が行われた。

本稿では事前放流設備の配置が決定された以降のダム本体の減勢工形式決定の経緯と、水理模型実験の実施結果、放流水の水理特性の把握結果と評価及び決定された利賀ダム減勢工の形状について報告する。

2. 減勢工の形式・形状

(1) 減勢工の形式

減勢工の形式には「スキージャンプ式」、「水平水叩き式（跳水式）」、「自由落下式」等があり、地形条件・下流水位の条件・堤趾導流部からの放流水の処理を考慮して選定される。自由落下式は通常アーチダムに用いられる形式のため採用されなかった。また、利賀ダム下流の河道は大きく右に湾曲しており、放流水脈を飛ばす噴流拡散で減勢するスキージャンプ式等は下流に水深の深い減勢池が必要になること、放流水脈の直進性が高く左岸側の山体に衝突すること、堤趾導流部からの放流水の処理が難しいことから利賀ダムには適さなかった。水平水叩き式は下流河道がある程度湾曲していても適用でき、副ダムを設け堰上げすることにより減勢が可能となり、かつ堤趾導流部からの放流水の処理も容易である。

以上の理由により減勢工形式は検討以前からの「副ダム付き水平水叩き方式」が選定され、一次減勢工の副ダム高・越流水深が大きく残存エネルギーが大きいことから、二次減勢工を設ける2段減勢工の考え方も踏襲した。また、既往の減勢工断面形状は下部を常用洪水吐放流量

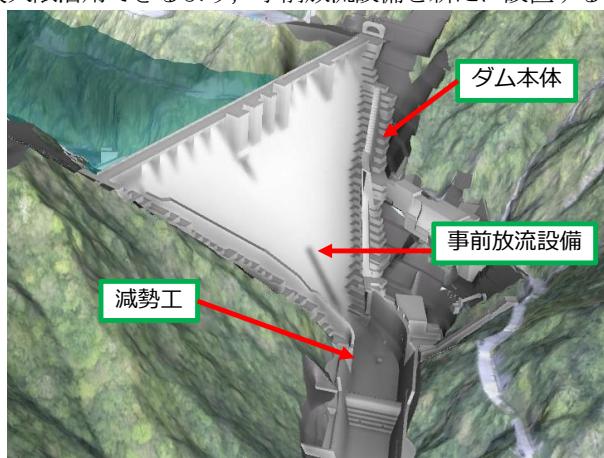


図-1 利賀ダムの完成予想図 (CIM)

を対象とする減勢工、上部を非常用洪水吐からの放流量が流下する水路となる複断面であったが、修正設計では常用洪水吐きと事前放流設備の放流水が減勢工両側より流入することから、単純な台形水路とした。既往設計と修正後の一次減勢工断面形状の比較は図-2、図-3のとおりである。また、一次減勢工から二次減勢工の縦断面図を図-4に記す。

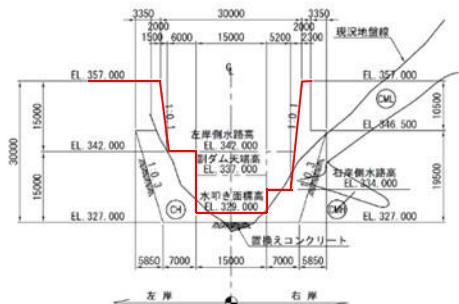


図-2 既往設計の断面形状

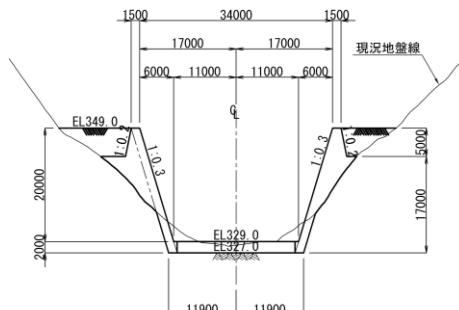


図-3 一次減勢工修正断面形状

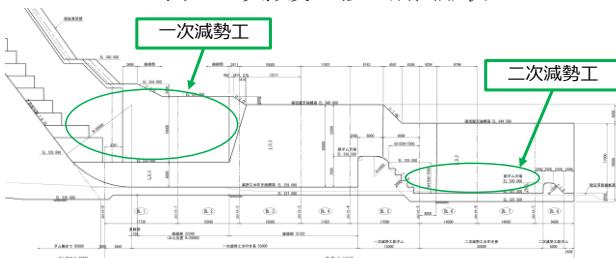


図-4 減勢工縦断面図

3. 水理模型実験

(1) 水理模型実験の実施

a) 水理設計条件

減勢工の形式決定後、設計のための基礎資料として、2020年度から国立研究開発法人土木研究所の水理実験施設にて水理模型実験を行った。実験にはフルードの相似則を用い、模型スケールは再現性が確保可能である1/45とした。

b) 机上設計形状での実験

2020年度は机上設計形状に対して実験を行い、水理特性を評価して減勢工に関して以下の3つの課題を抽出した。課題1：ダム設計洪水流量1630m³/sにおいて、非常用洪水吐きからの流水はステップ流下中の減勢が期待でき

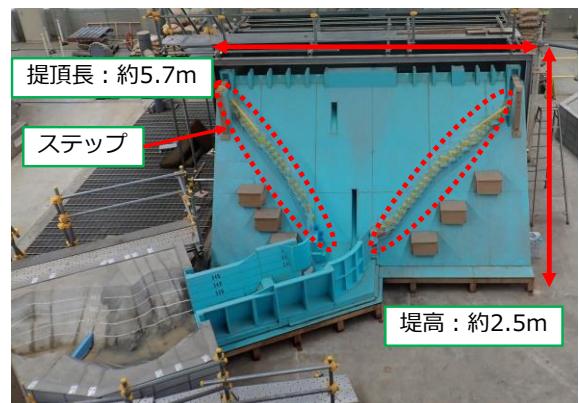


図-5 模型の全体像

るが、常用洪水吐きからの流水は減勢されずに減勢工に突入しており、対岸の左岸壁沿いの水面の上昇を発生させている。

課題2：計画最大放流量340m³/sにおいて、常用洪水吐から放流された水脈が底面に沿った流れとならず、やや剥離した状況となった。このため放流水脈の拡幅が期待できず、減勢工での偏りを大きくしている。

課題3：左岸導流壁での流況改善のために副ダムや補助構造物等の検討が必要である。

表-1 設計対象流量の整理

項目	対象水位	流量	備考
計画最大放流量	洪水時最高水位 434.5 m	340 m ³ /s	洪水調節時にダムから放流する最大の流量
ダム設計洪水流量	設計最高水位 437.4 m	1630 m ³ /s	200年に一度程度の洪水が発生したときの流量

c) 形状の再検討

2021年度から行われた実験では、過年度に得られた課題も含めて水理設計条件を満足する形状を策定するため、詳細な水理模型実験を行い水理設計を進めた。減勢工においては、左岸側の湾曲部に導流ブロックと減勢ブロックを設置し、減勢工壁沿い水位の低減を図った。堤趾導流部を含めた全体の予備実験で作成された実験の原案を図-6に記す。

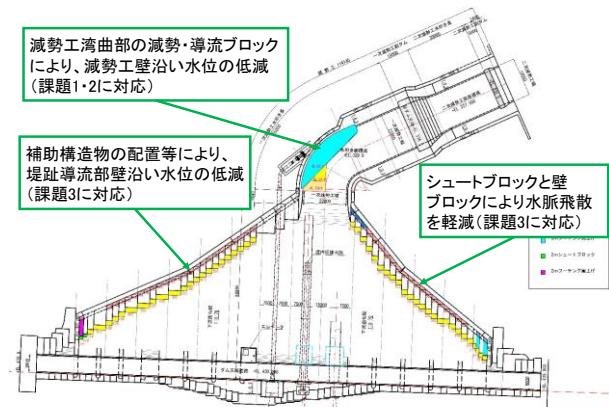


図-6 水理模型実験原案の形状

表-2 減勢工原案の流況概要

実験 原案	流量条件		導流部	一次減勢工	流況	三次減勢工・河道
	水位	放流パターン				
1 設計最高水位	事前：○ 常用：○ 非常用：○	シユートブロック及び壁ブロックにより壁沿いに週上する流れを規制するとともにデフレクターにより越水に対応している。常用洪水吐きからの放流水脈は負圧により堤体での水脈の拡かりは期待できない。	非常用(左、右)洪水吐き、常用洪水吐き及び事前放流設備からの4つの水脈が減勢工の始端で合流しているため不安定な流れを形成するとともに水脈の動搖が大きく左岸側に大きく偏る。	非常用(左、右)洪水吐き、常用洪水吐き及び事前放流設備からの4つの水脈が減勢工の始端で合流しているため不安定な流れを形成するとともに水脈の動搖が大きく左岸側に大きく偏る。	下流河道狭窄部での背水が大きく二次減勢工に連しているため、減勢工の流況は安定している。	下流河道狭窄部での背水が大きく二次減勢工に連しているため、減勢工の流況は安定している。
2 設計最高水位	事前：× 常用：○ 非常用：○	—	—	—	—	—
3 サーチャージ水位 →設計最高水位	事前：○ 常用：× 非常用：○	—	—	—	—	—
4 サーチャージ水位 →設計最高水位	事前：× 常用：○ 非常用：○	—	—	—	—	—
5 サーチャージ水位	事前：× 常用：○ 非常用：—	常用洪水吐きからの水脈は負圧により堤体での水脈の拡かりは期待できない。	水脈の拡かりがあり期待できないため河床ブロックに強い水脈が衝突し水塊の局所的な上昇が観察される。弱い渦がみられる。	非常用(左、右)洪水吐き、常用洪水吐き及び事前放流設備からの4つの水脈が減勢工の始端で合流しているため不安定な流れを形成するとともに水脈の動搖が大きく左岸側に大きく偏る。	下流河道狭窄部での背水が大きく二次減勢工に連しているため、減勢工の流況は安定している。	下流河道狭窄部での背水が大きく二次減勢工に連しているため、減勢工の流況は安定している。
6 サーチャージ水位	事前：○ 常用：○ 非常用：—	—	—	河床ブロックに衝突した流れはその部分で水位上昇を示している。全体の流れは大きく右岸に偏る。	河床ブロックに衝突した流れはその部分で水位上昇を示している。全体の流れは大きく右岸に偏る。	河床ブロックに衝突した流れはその部分で水位上昇を示している。全体の流れは大きく右岸に偏る。
7 サーチャージ水位	事前：○ 常用：○ 非常用：—	相互の水脈は干渉していない	—	—	—	—
8 最低水位 →常時満水位	事前：○ 常用：— 非常用：—	—	—	水位上昇に伴い減勢工への放流並びに流速が増加するため河床ブロックに衝突する流れによる水位上昇が大きくなるとともに偏流に伴う渦も大きくなる。	水位上昇に伴い減勢工への放流並びに流速が増加するため河床ブロックに衝突する流れによる水位上昇が大きくなるとともに偏流に伴う渦も大きくなる。	水位上昇に伴い減勢工への放流並びに流速が増加するため河床ブロックに衝突する流れによる水位上昇が大きくなるとともに偏流に伴う渦も大きくなる。
9 最低水位 →設計洪水位	事前：○ 常用：○ 非常用：○	水位が高くなると堤趾導流部の流れは安定しているが、常用洪水吐きからの放流水脈の拡がりが期待できなくなる。	事前単独はケース8と同様であるが、常用からの放流により減勢工内の偏りや渦は軽減される。しかし河床ブロック付近での水位上昇は観察される。設計洪水位はケース1と同じである。	事前放流設備と常用洪水吐きが同時に放流される状況から二次減勢工内に射流がみられる。その600m ³ /s付近で射流がピークとなるがさらに流量が増えると狭窄部の背水効果により安定していく。	事前放流設備と常用洪水吐きが同時に放流される状況から二次減勢工内に射流がみられる。その600m ³ /s付近で射流がピークとなるがさらに流量が増えると狭窄部の背水効果により安定していく。	事前放流設備と常用洪水吐きが同時に放流される状況から二次減勢工内に射流がみられる。その600m ³ /s付近で射流がピークとなるがさらに流量が増えると狭窄部の背水効果により安定していく。



図-7 減勢工の流況（実験原案、ケース1）

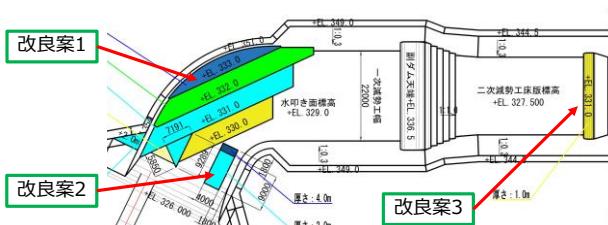


図-8 減勢工改良形状図面

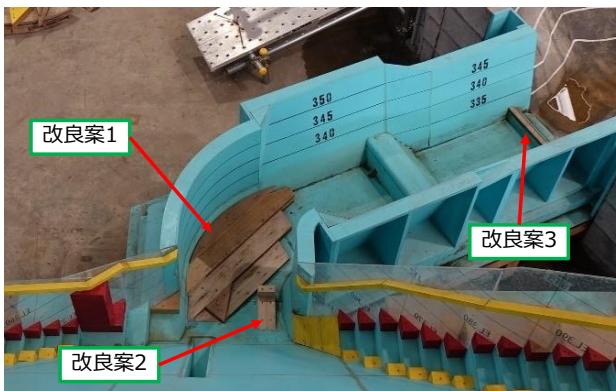


図-9 減勢工改良形状写真

d) 原案の実験結果と形状の改良

水位及び放流パターンごとの9ケースによる実験の結果を表-2、図-7に記す。設計最高水位（ケース1～4）での放流において減勢工内の水面変動や偏りが見られたため、さらにこれらを改善するため以下3つの改良案を実施した。

改良案1：減勢工外湾部の床版を階段状にし、放流水の偏りを軽減する。

改良案2：堤趾導流部左岸の終端の壁ブロックを一部改良し、水脈を堤趾導流部右岸の流れと常用洪水吐きからの落下流と衝突させることに加え、常用洪水吐き下流に床版の追加と柱状ブロック付きシートブロックを配置し、減勢効果を強化する。

改良案3：二次減勢工については一次減勢工副ダム下流で発生した露出射流を改善するためにエンドシルを1mかさ上げした。改良案の図面と水理模型の写真を図-8、図-9に示す。

e) 改良案の実験結果と課題

改良後の実験結果を表-3に示す。改良案は実験原案と比べて、一次減勢工の左岸壁偏流や二次減勢工の露出射流の緩和が見られたほか、以下のようない結果が得られた。

- ・ サーチャージ水位 EL434.5m における計画最大放流量 340m³/s 以下の流量を水叩き・副ダムにおいて十分に減勢できない。（減勢工内の水位が低い場合の水脈飛散および、ダムができる以前の河状における流水の水勢の状況とはなっていない。）
- ・ サーチャージ水位 EL434.5m において常用洪水吐き全開および事前放流設備全開における流量以下においてを水叩き・副ダムにおいて十分に減勢できる。
- ・ ダム設計洪水流量 1,630m³/s 以下の流量について、顕著な流況の悪化を生じない。
- ・ 減勢工側壁の壁高対象とする水面形は、両岸とも設計最高水位の平均水面形の最高水位を包絡する。

表-3 減勢工改良案の流況概要

改良案	流量条件	放流パターン	導流部	流況	
				一次減勢工	二次減勢工・河道
1 設計最高水位	事前：○ 常用：○ 非常用：○	シートブロック及び壁ブロックにより壁沿いに選上する流れを規制するとともにデフレクターにより越水に対応している。常た。左右岸の水位差5.9m、水面変動は5.3m確認される。	左岸堤趾部の末端壁ブロックを変更したことにより原案と比べて減勢工への水脈の突入流況が変わり、左岸側への偏りが若干軽減された。左右岸の水位差5.9m、水面変動は5.3m確認される。	下流河道狭窄部での背水が大きく二次減勢工に達しているため、減勢工の流れは安定している。	
2 設計最高水位 1630m ³ /s相当	事前：× 常用：○ 非常用：○	用洪水吐きからの放流水脈は負圧により堤体での水脈の拡がりは期待できない。又、左岸端部の河床ブロックの変更に伴う導流部形状の変更はなく、スムーズに水脈が変更されている。	ケース1と同様に左岸堤趾部の末端壁ブロックを変更したことにより原案と比べて減勢工への水脈の突入流況が変わり、左岸側への偏りが若干軽減された。左右岸の水位差5.8m、水面変動は3.4m確認される。	ケース1と同様である。	
3 サーチャージ水位 →設計最高水位	事前：○ 常用：× 非常用：○		ケース1と同様に左岸堤趾部の末端壁ブロックを変更したことにより原案と比べて減勢工への水脈の突入流況が変わり、左岸側への偏りが若干軽減された。	中間水位では露出射流が発生しておりエンドシルの高さが不足している。	
4 サーチャージ水位 →設計最高水位	事前：× 常用：○ 非常用：○		ケース1と同様に左岸堤趾部の末端壁ブロックを変更したことにより原案と比べて減勢工への水脈の突入流況が変わり、左岸側への偏りが若干軽減された。	ケース4と同様である。	
5 サーチャージ水位 340m ³ /s相当	事前：× 常用：○ 非常用：—	常用洪水吐きからの放流水脈は空中放流となり堤体での水脈の拡がりは期待できない	原案と比べてシートブロック及び柱状ブロックへの衝突が強くなりブロック周辺の水位が大きくなっている。又、渦も観察される。	エンドシルの高さを変えることによって、露出射流が抑えられた。	
6 サーチャージ水位	事前：○ 常用：× 非常用：—	—	河床ブロック上を流下する流況となり平面渦も形成されている。	エンドシルの高さを変えることによって、露出射流が抑えられた。	
7 サーチャージ水位	事前：○ 常用：○ 非常用：—	相互の水脈は干渉していない。	原案と比べて柱状ブロック周辺の水位上昇はみられるが、事前からの水脈も放流し減勢工内の渦は軽減されている。	エンドシルの高さを変えることによって、露出射流が抑えられた。	
8 最低水位 →常時満水位	事前：○ 常用：— 非常用：—	—	原案と比べて河床ブロックによる規制が強くなり、ブロック沿いを流下する流れが強くなり渦も形成されている。	一次減勢工内でみられた偏りの影響は残るが減勢機能は期待できる。河道の流れは安定している。	
9 最低水位 →設計洪水位	事前：全開 常用：全開 非常用：全開	水位が高くなると堤趾導流部の流れは安定しているが、常用洪水吐きからの放流水脈の拡がりが期待できなくなる。	事前放流設備単独放流時はケース8と同様であるが、常用洪水吐きからの放流により減勢工内の偏りや渦は軽減される。柱状ブロック付近の水位上昇はなくなる。	事前放流設備と常用洪水吐きが同時に放流される状況から二次減勢工内で射流がみられるその600m ³ /s付近で射流がピークとなるがさらに流量が増えると狭窄部の背水効果により安定していく。	

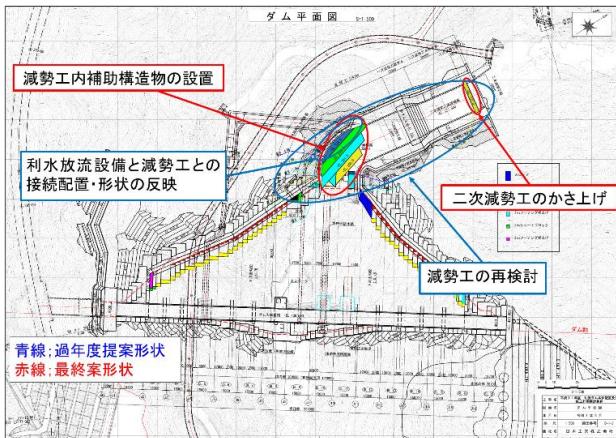


図-10 利賀ダム平面図（減勢工の改良点と課題箇所）

よって計画最大放流量 340m³/s 以下の流量においては減勢工が十分に機能せず、水理設計条件を満足しなかつたが、その他の条件では満足することができた。本実験を通して設計された形状を反映した設計形状図と、引き続きの検討や修正設計が必要であった箇所を図-11に示す。

(2) 課題の改善策検討

a) 追加実験

過年度の水理模型実験で確認された課題を改善するため、2023年度に追加の水利模型実験が行われた。計画最大放流量340m³/s 以下の減勢が可能な形状の設計に加えて、二次減勢池下流での露出射流抑制方法の模索、補助構造物が複雑で施工が非常に煩雑となることから、簡易な形状の検討を行った。検討の概要を図-11に示す。



図-11 水理模型実験の検討概要

b) 形状の決定

最終的な減勢工の形状は、左右岸の拡幅に加え、簡易な補助構造物を配置することによって、過年度の実験と同程度の水位・流況となり、煩雑な補助構造物が解消された。また副ダムを下流に配置することで2次減勢工直下の露出射流が解消でき、流況が改善する様子が確認された。2022年度に設計された形状での流況と今回設計された形状での流況の比較を図-12に示す。また、過年度

に提案された形状と、修正後の形状を比較した図を図-13と図-14に示す。

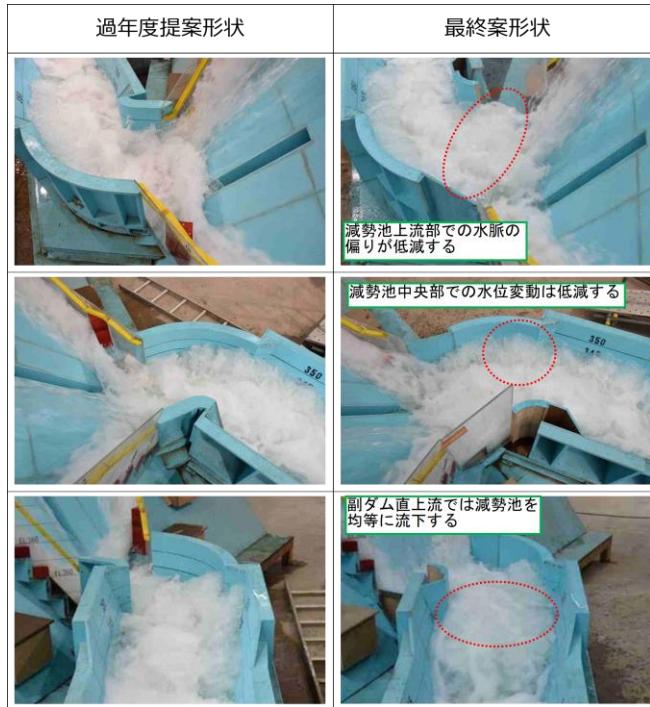


図-12 過年度形状と最終形状の流況比較

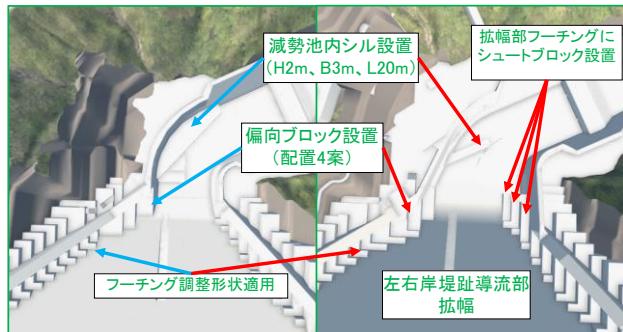


図-12 減勢工の最終形状案



図-13 2次減勢工副ダムの最終形状案

4. おわりに

本稿では、4年間に及ぶ水理模型実験を通じた利賀ダムにおける減勢工の形状決定プロセスについて報告した。従来の設計から幾度にも及ぶ実験と形状の変更を経て、事前放流設備を含む新しい洪水吐形状に対応した減勢工構造を決定することができた。今後は2次減勢工副ダムの設計に着手し、利賀ダム減勢工部分の設計を完了させるほか、2026年からの本格的なダム本体、減勢工のコンクリート打設開始に向け、着実に整備を進めていく所存である。

謝辞：本論文作成にあたり、ご指導・ご協力いただいた皆様に感謝申し上げます。また、利賀ダム建設事業の推進にあたり、ご理解・ご協力をいただいている地元の皆様や、関係機関の方々に感謝申し上げます。