

水理模型実験による足羽川ダム本体の水理設計

堀川 裕太¹

¹近畿地方整備局 足羽川ダム工事事務所 工事課 (〒918-8015 福井県福井市成和1-2111)

足羽川ダムは、足羽川、日野川及び九頭竜川の下流域における洪水被害の軽減を目的として建設を進めている洪水調節専用のダム（流水型ダム）である。現在は実施設計を終え、今年度より本体工事に着手する予定となっている。本研究では、足羽川ダムの実施設計のために行ってきた水理模型実験に関して、過年度までの報告にて課題とされていた河床部放流設備の施設形状について、既存の水理模型の形状を改良して流況確認を行った。実験の結果、河床部放流設備及び河床部放流設備の副ダムの形状を改良し、下流側に二次減勢工を追加することで流況が安定することを確認した。これにより、設計計画上的足羽川ダム本体洪水吐きの形状を全て確定することができた。

キーワード 流水型ダム、水理模型実験、河床部放流設備、二次減勢工

1. はじめに

足羽川ダムは、九頭竜川水系足羽川の支川部子川（福井県今立郡池田町小畑地先）に建設中の高さ96m、堤頂長460m、総貯水量28,700千 m^3 、有効貯水容量（洪水調節容量）28,200千 m^3 の重力式コンクリートダムである（図-1、図-2）。また、洪水調節専用の流水型ダムであり、日本国内の流水型ダムとしては、堤高、堤体積、洪水調節容量において日本最大規模である他、ゲートを有する唯一の流水型ダムである。

足羽川ダム建設事業は、足羽川ダム本体と併せて、図-3に示す他流域の4河川（水海川、足羽川、割谷川及び赤谷川）の洪水を導水するための分水施設（分水堰+導水トンネル）を整備するものである。このうち、足羽川ダム本体および水海川分水施設の建設を、九頭竜川水系河川整備計画期間内に整備する第Ⅰ期事業と位置付けて現在整備を進めている。なお、ダム本体は段階整備に適さない構造物であることから、4河川からの導水を見越した規模で建設している。



図-1 足羽川ダム位置図

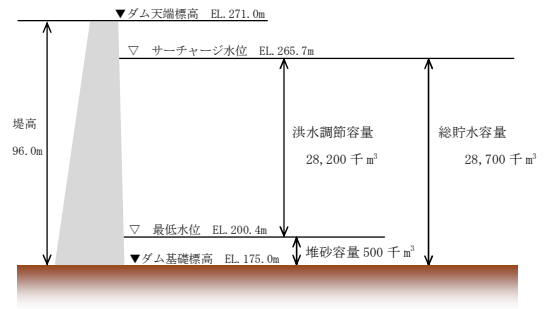


図-2 足羽川ダム貯水池容量配分図



図-3 足羽川ダム計画平面図

2. 足羽川ダムの諸元と実験模型

(1) 足羽川ダム本体設計原案の諸元

足羽川ダム本体は流水型ダムであるため、河床標高付近の左岸側（現況河道の位置）に河床部放流設備として高圧一面ベルマウス式放流管を1条設置しているのが特徴である。平常時にはこの河床部放流設備によって、ダム上下流の連続性を維持したまま河川水を流下させる。また、その6m上方の河道中心に位置する常用洪水吐きで洪水調節を行う。非常用洪水吐きは基本的に左右対称に洪水吐きを配置するという方針の元に設計しており、

左右に各5門（13.0m×10門）を配置している。
足羽川ダム設計原案の諸元を表-1に、足羽川ダム下流面図（設計原案）を図-4に示す。

表-1 足羽川ダム洪水吐きの諸元（設計原案）

項目		諸元
ダム貯水位	設計洪水位	EL.268.7m
	サーチャージ水位	EL.265.7m
非常用洪水吐き	天端標高	EL.265.7m
	越流幅	B=13.0m
	越流水深	H=3.0m
	自由越流	10門
常用洪水吐き	敷高標高	EL.187.0m
	高圧一面ベルマウス式放流管	B2.2m×H2.4m×1条
河床部放流設備	敷高標高	EL.181.0m
	高圧一面ベルマウス式放流管	B5.0m×H5.0m×1条
減勢工	水叩き長	L=35.0m
	減勢幅	B=20.0m
	副ダム高	h=8.0m

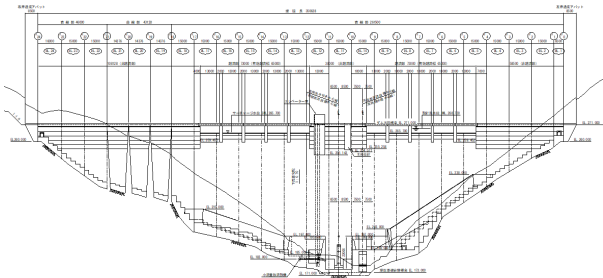


図-4 下流面図（設計原案）

(2) 実験施設および模型の諸元

実験は、国立研究開発法人土木研究所の水力実験施設で実施した。模型は形状の検討をする際に改造がしやすい構造とした。模型の改造・据付精度は±1mm以内とし、実験中もこれを維持するものとした。

製作した足羽川ダム本体の水力模型を図-5、図-6、図-7に示す。水の粘性等の影響により全体模型では流況の再現が難しい河床部放流設備及び常用洪水吐きについては、抽出模型を作成している。ダム本体の全体模型は縮尺を1/62.5に、河床部放流設備の抽出模型は縮尺を1/31.25に、常用洪水吐きの抽出模型は縮尺を1/20とした。

なお、全体模型においては河床部放流設備は検討対象で無いため省略して模型を製作した。また、流量等についてはフルードの相似則を用いて設定し、足羽川ダムの水力特性を再現できるよう留意した。表-2に全体模型および抽出模型における諸量の縮率を示す。



図-5 足羽川ダム本体模型（全体模型）

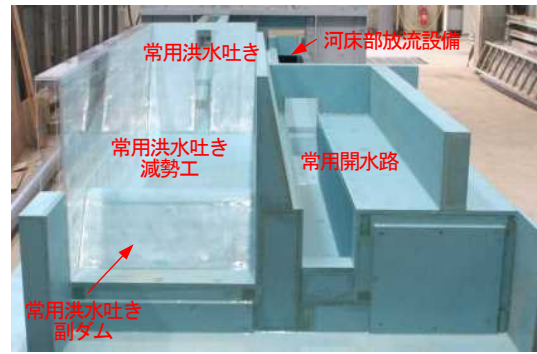


図-6 常用洪水吐き減勢工と河床部放流設備並列模型

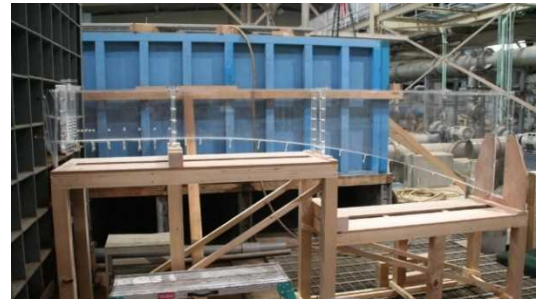


図-7 常用洪水吐き単独模型

表-2 模型縮尺毎の諸量の縮率，原型値と模型値の関係
足羽川ダム全体模型（縮尺 1/62.5）

諸量	次元	縮率	原型値	模型値
水深	L	1/n	10m	0.16m
流量	L ³ /t	1/n ^{5/2}	1,400m ³ /s	0.0453m ³ /s
流速	L/T	1/n ^{1/2}	10m/s	1.26m/s

常用洪水吐き減勢工と河床部放流設備並列抽出模型
（縮尺 1/31.25）

諸量	次元	縮率	原型値	模型値
水深	L	1/n	10m	0.32m
流量	L ³ /t	1/n ^{5/2}	180m ³ /s	0.0330m ³ /s
流速	L/T	1/n ^{1/2}	10m/s	1.79m/s

常用洪水吐き単独抽出模型（縮尺 1/20）

諸量	次元	縮率	原型値	模型値
水深	L	1/n	10m	0.5m
流量	L ³ /t	1/n ^{5/2}	180m ³ /s	0.1006m ³ /s
流速	L/T	1/n ^{1/2}	10m/s	2.24m/s

2. 過年度までの報告内容の整理

足羽川ダムの水力模型実験については、過年度までに「足羽川ダム水力模型実験中間報告について」及び「足羽川ダムの洪水吐きに係る水力模型実験について（続報）」にて報告がされている。本節ではこれらの報告内容を整理し、原案からの改良事項及び課題事項について整理する。

(1) 非常用洪水吐き

非常用洪水吐きは、設計洪水位（EL.268.7m）におい

て単独放流として1,400m³/sの放流能力を必要とするが、過年度の報告において、原案の形状にて1,454m³/sの放流能力を有することが確認されており、水理設計条件に整合することを確認している。

(2) 堤趾導流部

堤趾導流部については、過年度報告において、原案の形状での水理実験の結果、導流壁高に対して最大30mの水位が確認されたため、シュートブロック、壁ブロック及びデフレクタの組合せや配置を工夫することで流況の改善を図り、改善後の形状において、水理設計条件に整合することを確認している。過年度の報告で示された最終形状を図-8に示す。

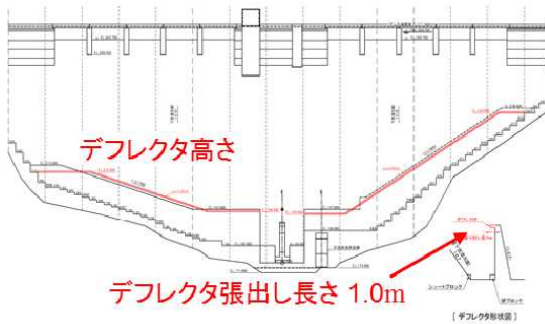


図-8 デフレクタ高さと壁沿平均水位の関係

(3) 常用洪水吐き

常用洪水吐きは、8割水位 (EL.261.2m) において、計画最大放流量180m³/sの放流能力が必要となる。過年度報告において、原案の形状では下流側の放流管内に負圧が発生し十分な給気が行えずゲート直下流の水脈の乱れが生じることから、下流側の形状を変更することで水面形の改善を図っており、改善後の形状において、水理設計条件に整合することを確認している。最終形状を図-9に示す。

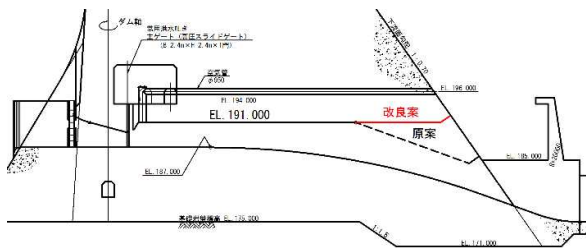


図-9 常用洪水吐き改良案

(4) 減勢工

減勢工は、過年度報告において、原案の形状にて設計洪水流量である1,400m³/sを流下させたところ、減勢工内の減勢が確認されたものの、減勢工始端部において水面の大きな上昇が確認されたことから、導流部との接続部の形状を直線形とした他、堤趾導流壁終端部に擦り付け円弧を設置、右岸堤趾導流壁の終端が左岸と同位置となるような折れ曲がり部を設置、常用洪水吐き出口の両側

にサイドブロックを設置することにより、水位の上昇と流況の偏りの改善を図っている。また、流況観測において、減勢工形状に余裕が確認されたことから、副ダムの高さを1.5m低下させている。これら、改善後の形状において、水理設計条件を満足することを確認している。過年度の報告で示された形状を図-10に示す。

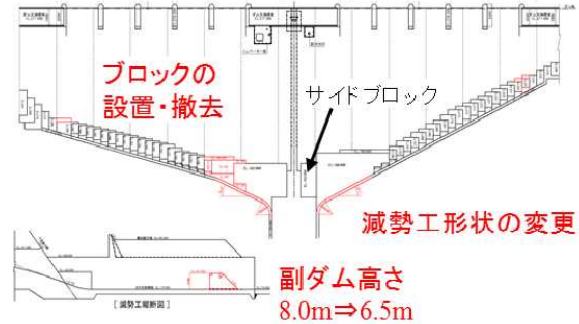


図-10 デフレクタ高さと壁沿平均水位の関係

(5) 河床部放流設備

河床部放流設備は、過年度報告において、原案の形状で魚道対象流量である4m³/sまでは安定した流れを確認したが、8m³/s～180m³/s (基本方針流量) では、図-11に示すとおり、常用開水路終端部での背水によって水位が上昇し河床部放流設備内が常流となることが確認されている。特に180m³/sでは跳水が発生することで水位の上昇が顕著となり、放流管内が管路流となることが確認されており、洪水時に放流管内に必要な給気がなされずにゲートが閉まらなくなる等のリスクが懸念されている。このため、今後の検討事項として、河床部放流設備の形状の改良を検討する必要がある。

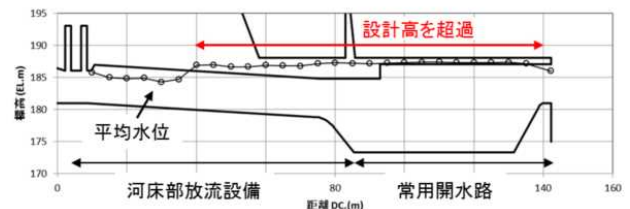


図-11 河床部放流設備の水面形 (流量：180m³/s)

以上より、本研究では、過年度までの報告において唯一課題として残っていた河床部放流設備の形状について検討し、抽出模型にて流況の確認を行うことで、水理設計条件を満足する最適な形状を決定することとする。

3. 河床部放流設備・常用開水路の形状の検討

前章で述べたとおり、河床部放流設備の原案の形状では、8m³/s以上の流れで河床部放流設備内の流況に乱れが発生することが問題となっていた。このため、改良案として、図-12に示すように、減勢工下流の付替水路 (魚道) を迂回させる形状とすることで、掘り込み式減勢工より下流部分の水脈を直接下流河道へ落

下させる形状に変更した。

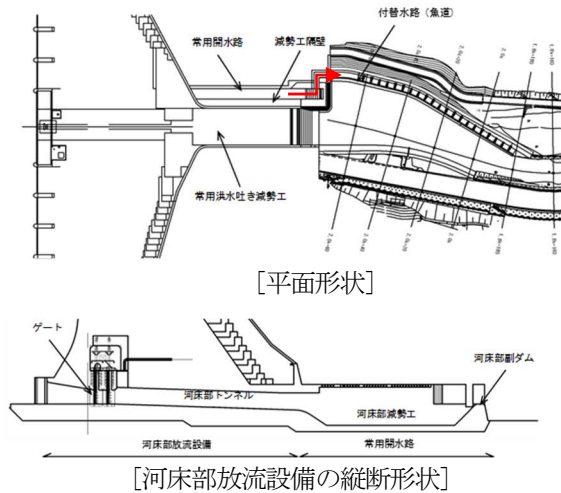


図-12 河床部放流設備・常用開水路の形状改良案

(1) 常用洪水吐き減勢工の調査

常用洪水吐き及び減勢工の形状は、常用開水路部の形状変更によって左岸導流壁の下流端が切り欠かれた形状となった他、付替水路（魚道）の線形変更に伴って河道形状も変更されている。このため、計画最大放流量180m³/sを対象に流況調査を実施した。

流況調査の結果、減勢工の流況は安定しており問題となる現象は見られなかった。一方で、副ダムより下流は図-13のとおり露出射流となり、付替水路の終端付近では跳水が発生した他、副ダム下流から断面2.0k+20までの流速は10m/s程度と過大であった。下流河道の流速は5m/s程度が条件となっていることから、二次減勢工の設置等による対策が必要と判断された。



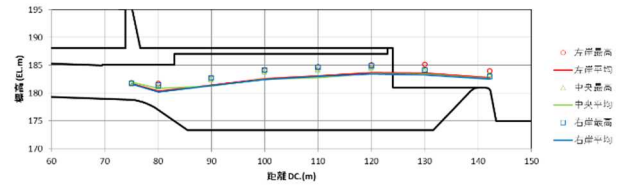
図-13 副ダム下流の流況

(2) 河床部放流設備・常用開水路の調査

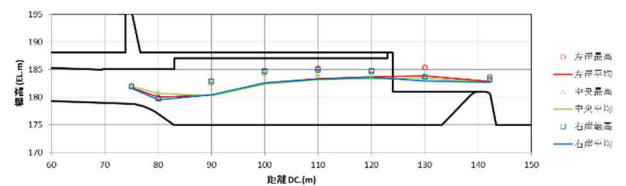
改良した河床部放流設備及び常用開水路の形状で、流量70m³/s及び180m³/sを対象に流況調査を実施した。

流況調査の結果、流量30～60m³/sでは河床トンネル内で跳水が発生し水深が3.7m程度まで上昇するものの、トンネル高が6mであり、クリアランスに問題がないことが確認された。流量70～180m³/sでは、河床部減勢工の始端で跳水が発生することで流況が弱跳水状態となり、水面の動揺が確認された。一方、河床部減勢工内の減勢は

十分にされており、減勢工規模に余裕が確認できたことから、コスト削減を目的に減勢工敷高をE.L. 173mからE.L. 175mに高くして再度流況調査を行ったところ、副ダムより下流の流況に大きな変わりはなく、むしろE.L. 173mの時に確認された河床部減勢工の水面の揺動が減少することが確認された。このことから、減勢工敷高をE.L. 175mとすることとした。常用開水路の敷高別水面形を図-14に示す。



〔河床部減勢工敷高 EL. 173.3m, 流量180m³/s〕



〔河床部減勢工敷高 EL. 175.0m, 流量 180m³/s〕

図-14 常用開水路の敷高別水面形

4. 二次減勢工の検討

前章の流況調査より、計画放流180m³/sにおいて副ダムより下流の河道流速が10m/sに達していることから、二次減勢工の必要性が確認された。本章では、二次減勢工と河床部放流設備の副ダム位置及びその形状について改良案を検討し、70m³/s及び180m³/s放流下での流況調査により、最適な形状を求めることとした。

(1) 当初形状案に対する流況検討

計画最大放流量180m³/sの条件下で、下流河道の流速が5m/s以下となることを目的として、図-15に示す二次減勢工の当初形状案を作成し、常用洪水吐き減勢工及び河床部放流設備・常用開水路の流況調査を実施した。

流況調査の結果、常用洪水吐き減勢工内の流況は、跳水が安定し減勢にも問題は見られなかったが、河床部放流設備・常用開水路の流況において、二次減勢工直下の流速が8.4m/s程度生じていることが確認され、ブロックの配置やシルの根入れなどを配慮する必要があることが分かった。また、二次減勢工より20m下流の流速が180m³/s放流時で4.2m/sとなっており、二次減勢工による減勢効果は確認出来るものの、図-16に示すように水叩き始端から露出射流が発生しており、減勢規模が不足していることが分かった。

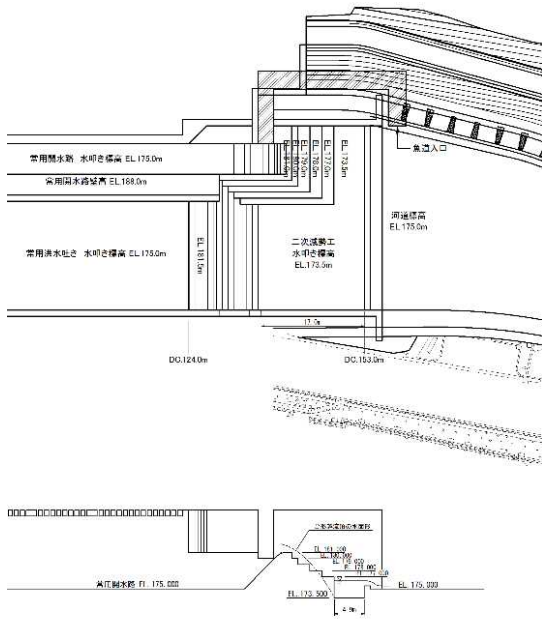


図-15 二次減勢工の当初形状案



図-16 河床部放流設備・常用開水路の流況

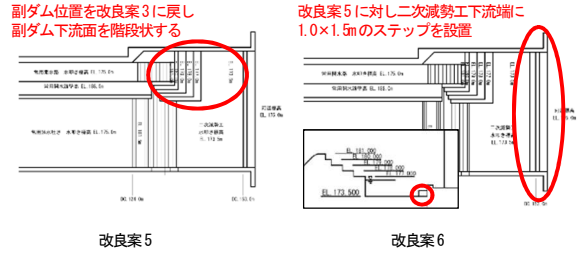


図-17 河床部放流設備形状（改良案1～6）

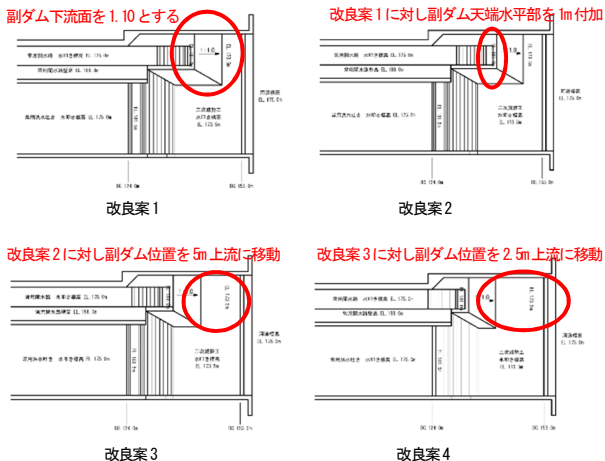
流況調査の結果、改良案1～5では、減勢工下流端で湧き上がりが大きいことや、減勢池内の流況が不安定となることが確認されたが、改良案6では、二次減勢工下流端での湧き上がりが他と比べて低減され、概ね安定した流況であることが確認され、改良案6が最適形状であると判断した。また、この最適形状に対して、常用洪水吐き減勢工の流況調査を実施したところ、減勢工内の流況は安定しており、図-18に示すとおり、副ダム直下においても露出射流は確認されず、二次減勢工直下の流速も3.0m/sと十分に減勢されていることが確認された。



図-18 二次減勢工の流況（改良案6）

(2) 最適形状の検討

(1)の流況調査結果より、当初案では安定した流況とはならなかったため、安定した流況への改善を目指して、図-17に示す副ダム位置及び副ダム下流面の形状を変えた6パターンの改良形状案について、それぞれの形状で河床部放流設備・常用開水路の流況調査を実施した。



5. 全体模型実験による流況調査

3章及び4章において決定した河床部放流設備及び二次減勢工の改良形状に対して、全体模型実験による全体の流況調査を実施することとした。実験ケースは表-3に示すとおりである。

表-3 実験ケース一覧（全体模型）

区分	検討内容	計測内容	貯水位(EL.m)	放流量(m³/s)
減勢工の検討	減勢工接続部の調査	流況	HWL	1595
			SWL	180
最終形状の調査	減勢工の調査	流況	HWL	1595
		水面形	HWL	1595
			SWL	180
	下流河道の調査	流況	HWL	1595
		水面形	HWL	1595
		流速	HWL	1400

(1) 堤趾導流部・減勢工の調査結果

堤趾導流部・減勢工の流況調査の結果、堤趾導流部及

び二次減勢工では流況に関する問題は確認されなかったものの、**図-19**に示すとおり、減勢工上流側において堤趾導流部からの流入水脈が衝突し、その水脈が減勢工の側壁に間欠的に衝突する現象が見られた。このことから、壁高を高くする等の対策が必要であることが分かった。



図-19 減勢工接続部の水面変動（右岸接続部）

(2) 減勢工接続部の改良

(1)の調査結果より、堤趾導流部と減勢工の接続部の水面変動が激しく、特に右岸側では非常に大きい水面の這い上がりが確認された。そのため、この這い上がりの低減を目的として、**図-20**に示すような左岸側最下段のフーチング部に補助構造物を設置し、流況調査を実施することとした。補助構造物の形状は、**表-4**に示す3パターンで検討することとした。

表-4 実験ケース一覧（減勢工すり付け部）

ケース	補助構造物高さ		
	①	②	③
ケース1	1.0m	1.0m	1.0m
ケース2	1.5m	1.5m	1.5m
ケース3	1.0m	1.5m	1.5m

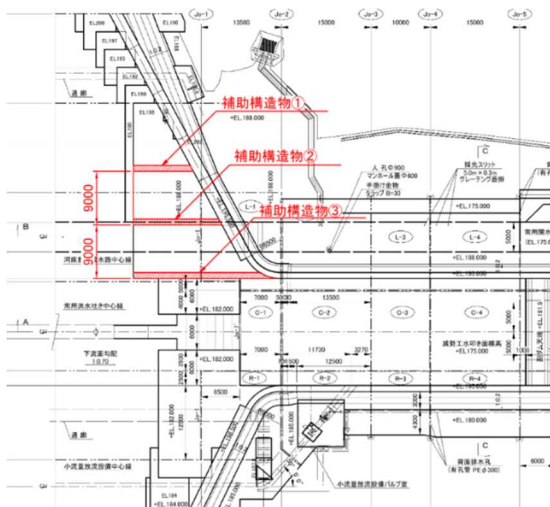


図-20 減勢工接続部検討図

流況調査の結果、ケース1では堤趾導流部から突入した水脈が間欠的に減勢工接続部に衝突し這い上がりが大きく、補助構造物の効果は見られなかった。ケース2では、補助構造物の高さがやや過大であったために、補助構造物①の直上流で這い上がりが生じ堤趾導流部に悪影響を及ぼすことが確認された。ケース3では、堤趾導流部から突入した水脈が減勢工接続部で大きく這い上がることもなく安定した流れであることが確認された。**(図-21)**このことから、ケース3を最終形状とすることとした。



図-21 減勢工接続部の水面変動（右岸接続部）
(ケース3)

5. まとめ

本研究では、過年度までの報告において課題となっていた河床部放流設備の形状について、水理模型実験を通して流況を確認し、最適な形状を確定することができた。これにより、設計計画上での足羽川ダム本体洪水吐きの形状を全て確定することが出来た。まとめとして、本研究で得られた施設形状の改良点を下記に記述する。

- ・河床部放流設備は、減勢工下端より下流を魚道等を迂回させる形状とし、掘り込み式減勢工より下流は直接水脈を下流河道へ落下させる形状に変更した。
- ・河床部放流設備の副ダム下流に、1.0m×1.5mのステップを付けた二次減勢工を追加した。
- ・河床部放流設備の副ダムは、下流面の形状を階段状とした。
- ・減勢工の左岸側の堤趾導流部と減勢工の接続部に3つの補助構造物を追加した。

参考文献

- 1) 田中 幹(2017)：足羽川ダム水理模型実験中間報告について
- 2) 小泉 陽彦(2018)：足羽川ダムの洪水吐きに係る水理模型実験について（続報）