

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）

小泉 陽彦¹

¹近畿地方整備局 淀川河川事務所 工務第一課 (〒573-1191 大阪府枚方市新町2丁目2-10)

足羽川ダムは、足羽川、日野川及び九頭竜川下流域の洪水被害軽減を目的として建設中の洪水調節専用ダム(流水型ダム)である。現在ダム本体の実施設計を行っているが、机上設計では分からない水理特性については模型実験を行い流況等を確認する必要がある。本研究では過去の実験結果をもとに、本体基礎掘削形状の変更に伴う新たな堤趾導流部形状の模型を作成し、(i)堤趾導流部形状の検討、(ii)河床部放流設備等の流況確認を行った。実験の結果、(i)については机上設計(原案形状)を一部改良することで流況が安定することが確認できた。(ii)については、原案形状では放流設備への影響が懸念され、今後更なる検討が必要であることがわかった。

キーワード 流水型ダム、水理模型実験、洪水吐き

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)。

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いる。



図-1 足羽川ダム位置図

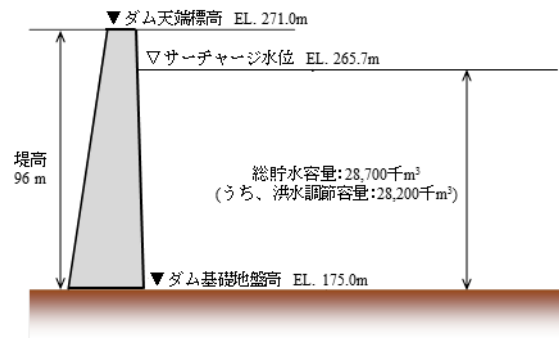


図-2 足羽川貯水池容量配分図

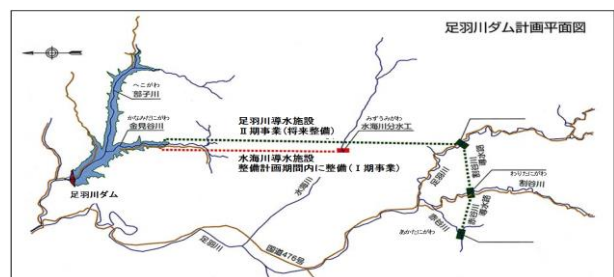


図-3 足羽川ダム計画平面図

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	B:2.2m×H:2.4m×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	B:5.0m×H:5.0m×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

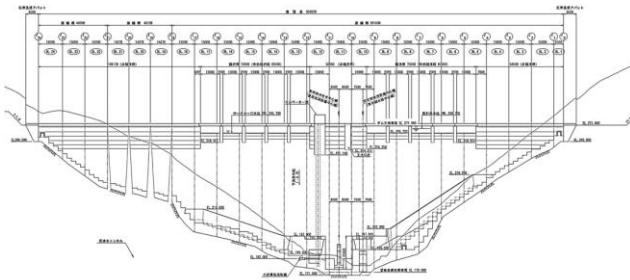


図-4 下流面図（設計原案）

(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理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全体模型および抽出模型を図-5、図-6に示す。ダム本体の全体模型は縮尺を1/62.5に、詳細な検討を必要とする河床部放流設備等は抽出模型として縮尺を1/31.25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、足羽川ダムの水理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。なお、本稿に記載されている数字は設計及び実験中のものであり、確定値ではない。

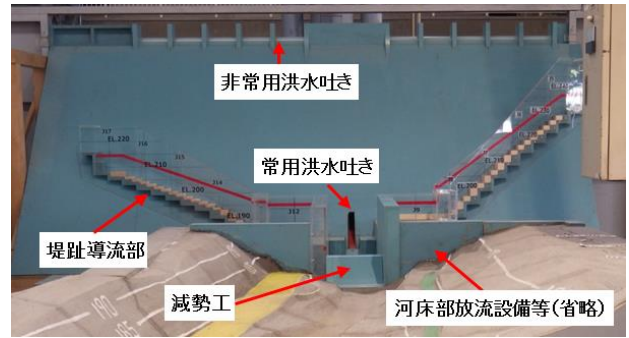


図-5 全体模型：縮尺1/62.5（設計原案，下流面）

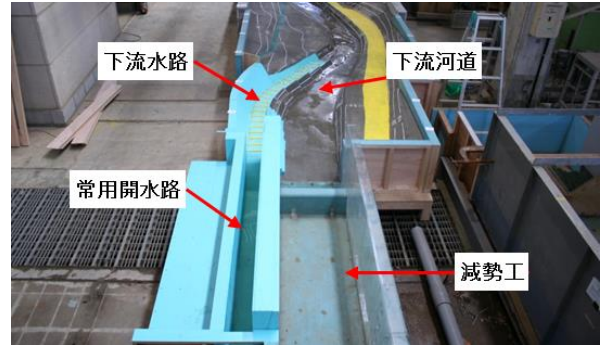


図-6 抽出模型：縮尺1/31.25（設計原案，下流方向）

表-2 諸量の縮率

(i) 全体模型(縮尺1/62.5)

諸量	次元	原型値	模型	
			縮率	模型値
水深	L	10m	1/n	1/62.5 0.16m
流量	L ³ /T	1,400m ³ /s	1/n ^{2.5}	1/30,881 0.0453m ³ /s
流速	L/T	10m/s	1/n ^{1/2}	1/7,906 1.26m/s

(ii) 抽出模型(縮尺1/31.25)

諸量	次元	原型値	模型	
			縮率	模型値
水深	L	10m	1/n	1/31.25 0.32m
流量	L ³ /T	180m ³ /s	1/n ^{2.5}	1/5,459.15 0.0330m ³ /s
流速	L/T	10m/s	1/n ^{1/2}	1/5,590 1.79m/s

3. 堤趾導流部形状の検討

足羽川ダムの非常用洪水吐き導流部の形式は堤趾導流型に分類される。この形式は一般に、レイアウトが左右対称に近いほど導流部から減勢工までの流況が安定すると言われている。足羽川ダムは完全な対称の配置とはなっていないため、導流部および減勢工での水位上昇など、流況の悪化が課題となっている。

本章では、上記の流況の悪化を改善するため、堤趾導流部において、既往実験を参考に(1)シュートブロック及び壁ブロックの配置を検討した後、(2)減勢工接続部形状の検討、(3)デフレクタ張出し長の検討を行い（図-7参照）、流況が安定する形状の抽出を行った。その後(4)改良案を反映した全体模型による実験を行い、洪水

吐きからの放流が安全に流下するか確認した。なお、対象流量についてはダム設計洪水流量 $1400\text{m}^3/\text{s}$ とした。

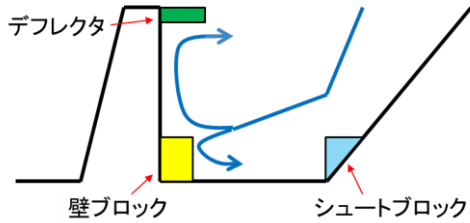


図-7 シュートブロック・壁ブロック・デフレクタのイメージ

(1) シュートブロック・壁ブロックの配置検討

図-8に示す設計原案では、左岸上流端において水位上昇、右岸上流端において水脈の飛散が確認された。これらの改善を行うため、図-9に示すように各ブロックの配置を変更した改良案を作成し、実験を行った。

図-10に実験で得られた水面形状（右岸側）を示す。赤丸で示した水位について注目すると、設計原案と比較して改良案の水位が低下していることが分かる。また、左岸側についても同様に水位の低下が見られ、ブロック配置の変更によって流況が改善されたことが分かった。

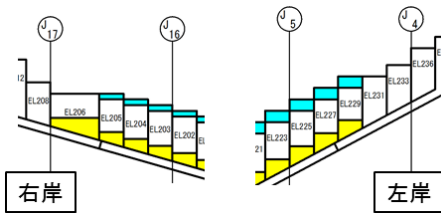


図-8 設計原案のブロック配置（上面図）

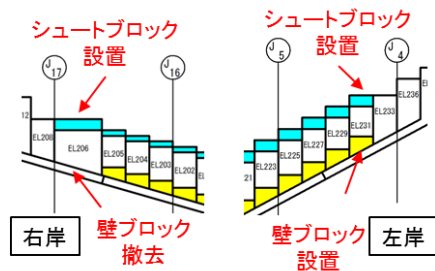


図-9 設計原案からの変更点（上面図）

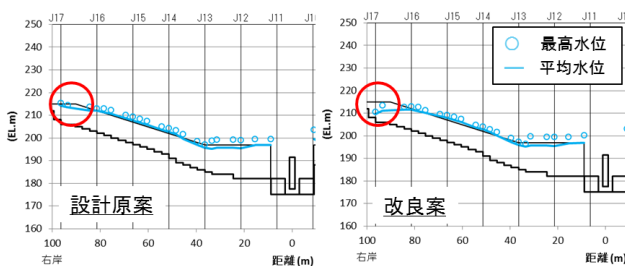


図-10 各ブロック配置による水面形状の違い（右岸側）

(2) 減勢工接続部形状の検討

堤趾導流部から減勢工への接続部における流況を改善するため、設計原案および改良案6ケースの計7ケースについて実験を行なった。

図-11に設計原案及び改良案（ケース1～ケース6）の減勢工接続部の形状を示す。また、図-12に前述の6ケースの実験結果を踏まえて作成した改良案（ケース7）の減勢工接続部の形状を示す。過去の実験結果から、減勢工接続部の水位低下が課題となっており、設計原案ではこの課題を解決するため、導流部からの接続部形状を大きな矩形とすることで対応が考えられた。一方、ケース7では、接続部を直線形とするとともに、堤趾導流壁終端に擦付け円弧を設ける等することで減勢工へスムーズに流入するよう工夫した。また、左右の偏りを解消するため右岸堤趾導流壁の終端が左岸と同位置になるよう折れ曲がり部を設けた。さらに、流況観察により減勢工形状に余裕があることが確認されたため、コスト削減の観点から副ダム高を設計原案より 1.5m 低下させた。

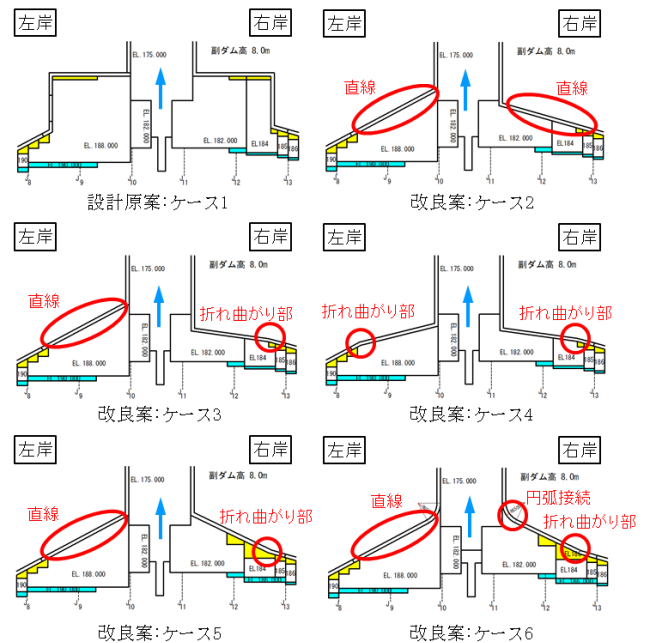


図-11 減勢工接続部の形状：ケース1～ケース6

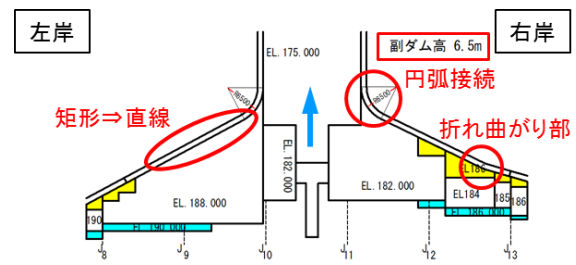


図-12 減勢工接続部の形状：ケース7

図-13、図-14に実験で得られた設計原案（ケース1）および改良案（ケース7）の水面形状を示す。設計原案では、左岸堤趾導流部終端の水位が上昇しており、減勢

工への流入流況に偏りが生じている様子がみられた。これは、右岸からの流下水脈については接続部に流入して減勢するが、左岸については減勢されずそのまま減勢工に突入するためと考えられる。一方でケース7では、原案形状と比較して水位の上昇も抑えられており、かつ流況の偏りについても改善された。

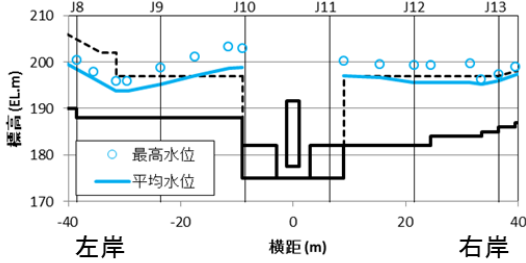


図-13 設計原案の水面形状：ケース1

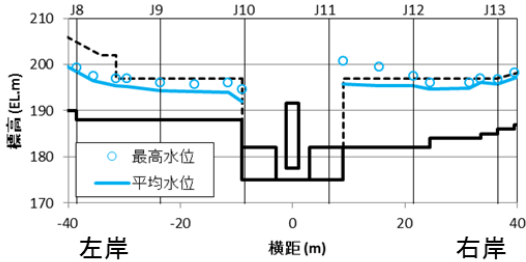


図-14 改良案の水面形状：ケース7

次に、階段状になっている堤趾導流部におけるステップ高についての検討を行った。設計原案では減勢工に接続する右岸ステップ高が左岸よりも6m低い形状となっており、これが流況悪化の要因となっていると考えられた。そこで、右岸のステップ高をEL.182m(原案高さ)～EL.188m(左岸ステップ高さ)まで2mずつ変化させたケース8～ケース10の計3ケースについて模型を作成し実験を行った。なお、減勢工接続部についてはケース7(図-12参照)の形状を用いた。

図-15に流況の改善が確認されたケース10のステップ形状と水面形状を示す。流入流況の悪化については改善されてはいるものの、設計原案高さよりも6m嵩上げする必要があり、コンクリート打設量の増加に伴う工事費用の増大が懸念される。そのため、若干の流況の偏りはあるものの安全に洪水を流下させることができるケース7を減勢工接続部の最終形状として採用することとした。

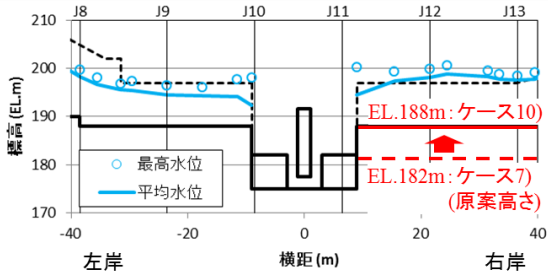


図-15 改良案：ケース10

(3) デフレクタ形状の検討

前節の減勢工接続部の検討におけるケース7の減勢工形状を基本に、デフレクタの張り出し長さの検討を行った。実験は図-16に示すように、張り出し長0.5mおよび1.0mの2ケースについて実施した。なお、デフレクタ設置高さについては、図-17に示すように設計原案の壁高勾配を基本にし壁沿い平均水位を包絡する高さとした。

検討結果を図-18、図-19に示す。張り出し長0.5mでは這い上がり水脈厚に対して張り出し長が不足しており、張り出し長は1.0mが望ましいことが分かった。

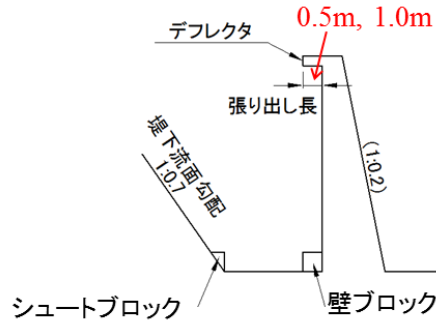


図-16 デフレクタ張り出し長さについての実験

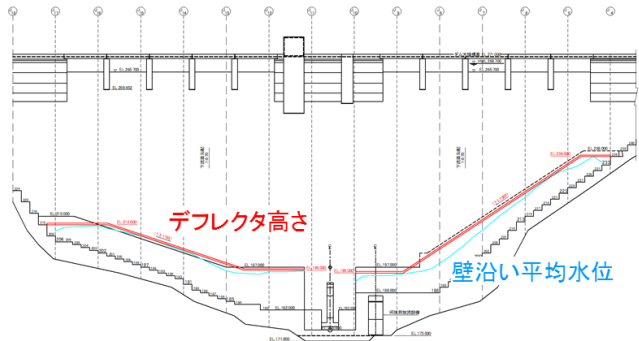


図-17 デフレクタ高さとは壁沿平均水位の関係



図-18 張り出し長さ0.5mにおける流況



図-19 張り出し長さ1.0mにおける流況

(4) 改良案形状における堤趾導流部，減勢工の流況確認

(1)～(3)における検討で得られた改良案を最終の改良案形状として，堤趾導流部および減勢工の流況を確認した。図-20，図-21に改良案形状の概要を示す。堤趾導流部については減勢工への流入流況をスムーズにすることを目的に，導流壁線形をストレートにした上で，右岸導流壁の終端を左岸と同じ位置に変更し，導流壁終端は擦り付け円弧形状としている。また，堤趾導流壁には張出長1.0mのデフレクタを設けた。減勢工は過去の実験結果から常用洪水吐きの吐き口にサイドブロックを設けることとし，副ダム高さは6.5mとした。

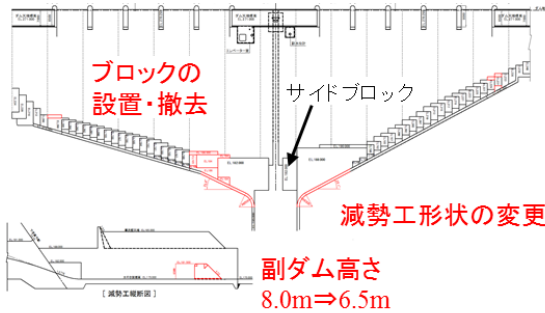


図-20 改良案形状の概要 (平面図)

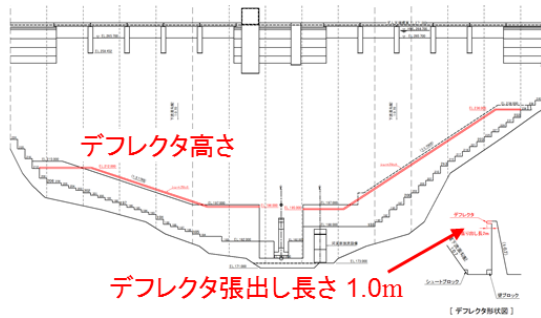


図-21 改良案形状の概要 (下流面図)

放流条件をダム設計洪水流量 $1400\text{m}^3/\text{s}$ (ケース1)，基本方針流量 $180\text{m}^3/\text{s}$ (ケース2) の2ケースとして実験を行った。

図-22～図-24にケース1における各設備の流況を示す。堤趾導流部はブロックおよびデフレクタにより水位上昇が抑制され，減勢工についても設計壁高EL.195mに収まっていることがわかる。また，ケース2についても実験の結果，流況が安定しており，問題なく流下していることを確認した。

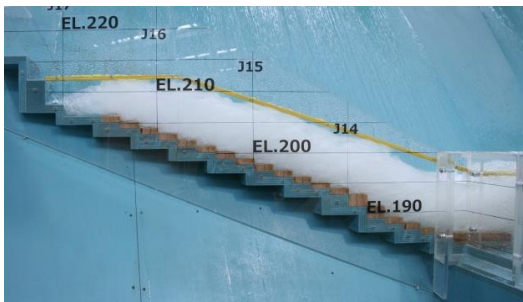


図-22 堤趾導流部の流況(右岸下流面，流量: $1400\text{m}^3/\text{s}$)



図-23 堤趾導流部の流況(左岸上面，流量: $1400\text{m}^3/\text{s}$)

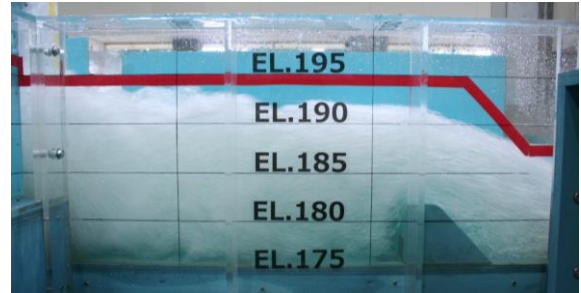


図-24 減勢工の流況(右岸から，流量: $1400\text{m}^3/\text{s}$)

4. 河床部放流設備等の流況についての検討

足羽川ダムの河床部放流設備は開水路流となるように設計されている。また，河床部放流設備の下流には，図-25に示すように常用開水路および下流水路が配置されており，上流からダム本体に到達した河川水はこれらを通して下流河道へ流下する構造となっている。これらについて抽出模型を用いて実験を行い，設計原案における河床部放流設備等の流況を確認した。実験は，流量を $4\text{m}^3/\text{s}$ (魚道対象流量)， $8\text{m}^3/\text{s}$ ， $20\text{m}^3/\text{s}$ ， $40\text{m}^3/\text{s}$ ， $70\text{m}^3/\text{s}$ (整備計画流量)， $180\text{m}^3/\text{s}$ (基本方針流量) と順次増加させて行なった。

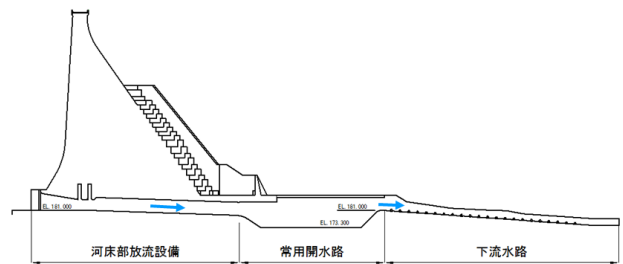


図-25 河床部放流設備，常用開水路及び下流水路の区分

実験の結果， $4\text{m}^3/\text{s}$ までは常用開水路の流れが安定しており魚類の遡上に問題のない流況であった。 $8\text{m}^3/\text{s}$ ～ $70\text{m}^3/\text{s}$ にかけて流量が増加するにつれて常用開水路終端部での背水によって水位が上昇するとともに，河床部放流設備についても常流となり水位が上昇した。基本方針流量 $180\text{m}^3/\text{s}$ に達すると図-26，図-27に示すように常用開水路終端において跳水が発生し背水による水位の

上昇が顕著となることがわかった。また、このとき水位が河床部放流設備放流管および常用開水路の設計高を超えており、放流管内が管路流となることが確認された。これにより洪水時に放流管内に必要な給気がなされず、ゲートが閉まらなくなる等のリスクが考えられるため、設計原案においては安全な放流が出来ない形状となっていることがわかった。

このように、河床部放流設備等の施設設計については課題が残っており、今後の水理模型実験により改良形状を検討する必要がある。



図-26 河床部放流設備内の流況 (流量:180m³/s)

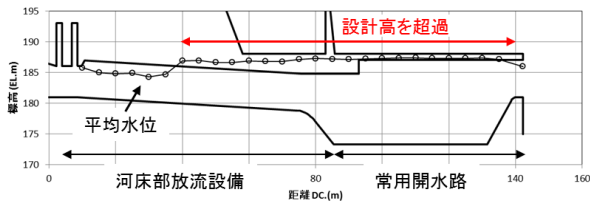


図-27 河床部放流設備の水面形 (流量:180m³/s)

5. まとめ

机上の設計では確認が難しい洪水吐きの水理特性について、流況等の把握と改良案の提示を目的に水理模型実験を行なった。

堤趾導流部の検討では、導流部や減勢工接続部の形状を変化させることで、洪水を安定した流況で下流へ流すことができることがわかり、ダム本体設計における堤趾導流部形状の検討を完了させることができた。

一方、河床部放流設備等における検討では、施設設計について課題があり、今後より詳細な検討が必要であることがわかった。

また、机上の検討で設計された形状による水理模型実験において、流況が安定しない場合や水位が上昇するケースを実際に観察することができた。ダムのような大規模でかつ複雑な形状の水理構造物においては、これら一連の水理模型実験による設計へのフィードバックが不可欠であるということが再確認できた。

今後足羽川ダム本体の設計が終盤をむかえるが、残る検討事項についても机上の設計と模型実験を並行して行い、それぞれの結果を反映し合うことで設計精度の向上を図っていく。

謝辞: 本論文の執筆にあたり、ご多忙の中適切な助言等頂きました。国立研究開発法人土木研究所の石神上席、宮脇特任研究員、宮川主任研究員に厚く感謝の意を表します。また、2017年4月~2018年3月の一年間、足羽川ダム工事事務所において熱心に指導頂きました伊藤課長、山崎係長を初めとする事務所職員の皆様に心から感謝致します。

※著者の略歴：2017年4月~2018年3月までダム本体の実施設設計等の業務に従事。2018年4月に現所属へ異動。

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