

# 水海川導水施設の設計について

林 尚典

近畿地方整備局 福井河川国道事務所 計画課 (〒918-8015 福井県福井市花堂南2-14-7) .

河川整備計画において、九頭竜川水系足羽川の支川部子川に洪水調節専用のダムと併せて、他流域の1河川(水海川)の洪水を導水するための導水施設(分水施設・導水路)を整備する。この水海川導水施設の水利設計について、導水トンネルの流れを常流から射流にすること等の視点によりコスト縮減に取り組んだので、報告する。

キーワード 洪水調節専用ダム, 導水施設, 水利設計, コスト縮減

## 1. 足羽川ダムの概要

足羽川ダム計画は、足羽川、日野川、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、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)に洪水調節専用のダム(以下、流水型ダム)と併せて、対流域の4河川(水海川、足羽川、割谷川、赤谷川)の洪水を導水するための導水施設(分水施設・導水路)を整備するものである。そのうち、河川整備計画においては、ダム本体及び水海川導水施設を整備することとなっている。



図-1 足羽川ダム計画平面図

表-1 足羽川ダムの諸元

目的	洪水調節専用
ダム形式	重力式コンクリートダム
規模	ダム高: 約96m、堤頂長: 約460m、貯水面積: 約94ha
	導水施設: 1期工事(水海川・径約10m)[全体計画: 4川導水]

## 2. 導水施設の概要

水海川導水施設(分水施設・導水路)については、足羽川の支川水海川(流域面積C=約20.7km<sup>2</sup>)からの導水を受け持つ施設である。当初概略設計において、トンネル延長約4.5km、延長計画導水流量164m<sup>3</sup>/s、設計対象流量220m<sup>3</sup>/s(計画導水流量の130%流量)、勾配1/600の円形断面(内径10m)の導水トンネル(常流)として設計されている。

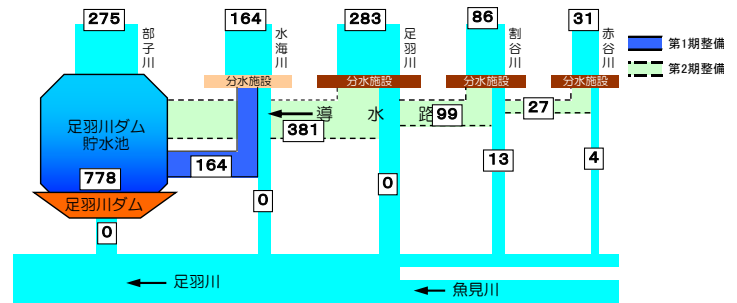


図-2 導水トンネル流量配分図

## 3. コスト縮減の視点

足羽川ダムにおいては、河川整備計画で整備する施設(以下、第1期整備施設)の事業費約960億円を厳守することが命題となっており、コストを縮減することが重要課題の1つとなっている状況である。

そこで、コスト縮減が可能かどうかの水海川導水施設全体の概略修正設計を実施した。その検討の中で、最も効果があったと思われる導水トンネルに対する水利設計について説明する。

### (1) 視点1: トンネル構造

水海川導水施設については、山間部を通過するため、

開水路構造ではなく、トンネル構造となっている。導水トンネル部分が約4.5kmと長く、トンネル施工費の縮減を図るのが、効率的で、水理的安定性を図った上で、トンネル延長のみでなくトンネル断面径の縮小を図ること（掘削費の縮減）が、コスト縮減に有効である。

**(2)視点2：設計条件の再確認**

視点1を踏まえて、導水トンネルの設計条件（断面形状、平面線形、縦断線形、呑口部、吐口部、設計流量、設計速度とフルード数、粗度係数等）を整理し、設計条件の変更が、コスト縮減に資する可能性があるかを確認する。なお、「改訂新版建設省河川砂防技術基準（案）設計編（I）第1章河川構造物の設計第10節トンネル構造による河川（以下、河川砂防技術基準）」の適用を除外する必要がある設計条件については、その除外理由についても整理することとし、水理設計面からのコスト縮減を試みた。

**4. 導水トンネルの水理設計**

**(1) 常流トンネルと射流トンネル**

当初設計においては、河川砂防技術基準に基づき、「トンネルの設計流量は、原則として計画で配分される計画高水流量の130%流量以上とするものとする。」、「トンネル内の設計流速は、トンネル本体の維持上安全な流速とするものとする（一般的には、トンネル内の設計流速は、7m/s以下（粗度係数 $n=0.015$ ）にとる場合が多い）。」、「フルード数0.8以下という条件で設計することが望ましいと考える。」といった基準を準拠するようにトンネル構造の河川（常流）として設計している。

水海川導水施設については、ダム管理施設であり、純粹なトンネル河川とは違うのではないかと発想に立ち、他事例の情報収集を実施した。そこで参考にしたのが、貯留型ダムで実施されている土砂バイパスである。2005年に完成した美和ダム再開発バイパストンネルや2013年に完成した小渋ダム土砂バイパストンネルである。この二つの事例は、中部地方整備局所管ダムであり、足羽川ダムにおいても参考になる部分があった。この2事例については、常流ではなく射流として設計されている。

こういった事例があることが判明したため、足羽川ダムにおいても「常流トンネルから射流トンネルへ」設計思想を変更し、トンネル断面径の縮小を図ることによるコスト縮減を検討することとした。

**(2) 検討内容**

水理面、地形地質条件、周辺環境への影響、経済性の面からトンネル平面線形（吐口位置）を見直し、射流トンネルの適用を各課題事項に対して水理的工夫を実施し、「断面径の縮小」を図った。

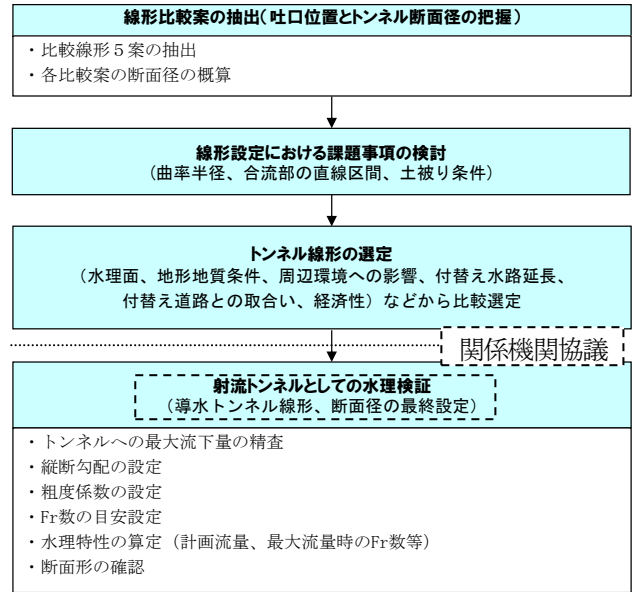


図-3 検討手順

**a)線形比較案の抽出（吐口位置とトンネル断面径の把握）**

下記の点を踏まえ、線形比較案として5案抽出するとともに、各案の流下特性（常流トンネルor射流トンネル）を踏まえた上で、吐口位置（標高）に応じたトンネル断面径を算定した。

- 射流トンネルの実績を踏まえ、「フルード数0.8以下」及び「流速7m/s以下」の制約条件を緩和する。
- 呑口標高については、必要導水量確保の観点から決定（標高295.50m）。
- 吐口標高については、ダム本体のSWL265.7m以上の標高において選定をおこなった。導水時に吐口位置が水面下とならないようにするため。

**b)線形設定における課題事項の検討**

平面曲率半径、屈曲部後の直線区間長、土被りについて、線形設定において課題となるため下記を踏まえて、検討を実施した。

- 平面曲率半径：水面上昇量は平面曲率半径が水路幅の30倍で急激に大きくなる傾向を示し、70倍程度以下では、一定量となる傾向。
- 屈曲部後の直線区間長：「改訂版砂防設計公式集」によると、一般に水路幅の6倍程度以上確保することが目安。
- 土被り：「トンネル標準示方書 山岳工法・同解説（2006制定）」の相互に近接するトンネルの設計時に留意すべき影響範囲の目安3Dを確保。

**c)トンネル線形の選定**

当初計画ルートに、「直線案」、「下流ルート案」を加えて、トンネル線形計画を見直し、水理面、地形地質条件、周辺環境への影響、経済性を面から比較検討した。検討の結果、「下流ルート案」が有力となることを確認した。

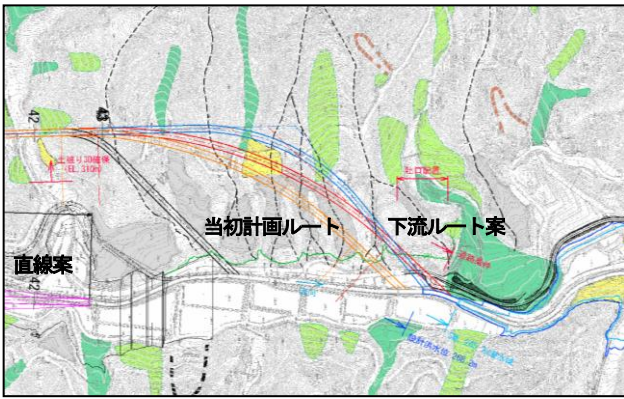


図4 ルート比較図

(2) 関係機関協議

これまでの検討内容（上記）について、水理設計的に成立する可能性があるかどうか関係機関（土木研究所、国土技術政策総合研究所）協議を実施した。

以下に、土木研究所及び国土技術政策総合研究所（以下、土木研究所等）との確認事項を示す。

a)断面設計条件の緩和

- 導水トンネルの設計については、トンネル河川の基準を準用しているという考え方であり、水理模型実験で確認する必要があるが、「流速7m/s以下に抑える」や「フルード数0.8程度以下に抑える」といった条件は、絶対条件ではない。射流にするのであれば、限界流付近にならないように注意すべきである。

b)トンネル平面の曲率半径

- 射流で設計を行う場合には、常流状態よりも湾曲部での這い上がりが大きくなり、また、円形断面の場合には、馬蹄形等に比べその傾向は大きくなると考えられるため、射流トンネルの事例も参考に、平面曲率半径を出来るだけ大きく設定することが重要である。

c)トンネル吐口位置

- 設計洪水水位（EL. 268.20m）までは導水施設の機能を確実に担保出来る構造（吐口部の閉塞抑制等）となるべく設計上留意して設定する。

d)導水トンネルの水理設計について

- 射流トンネルとして設計する場合には、構造上トンネル内を流下する可能性がある流量に対して全て射流となるよう設計を行う。この条件が厳しい場合は常流トンネルの適用を検討すべきである。
- トンネルに流下する最大流量は、必ずしもトンネル河川の基準にある計画流量の1.3倍とする必要はなく、構造上トンネルに流下する可能性がある最大流量が良い。
- 供用後に想定される粗度係数の範囲は、トンネルの覆工構造や管理方法などを考慮して設定する。

(3) 射流トンネルとしての水理検証

河川砂防技術基準及び手引きや関係機関協議を踏まえ、射流トンネルの適用を視野に入れた上で、下記のとおり水理検証（導水トンネル線形と導水施設諸元の確認と最終設定）を行った。

a)設計の考え（設計条件）

河川砂防技術基準及び手引きなどの一般のトンネル河川における断面設定の「設計流量は1.3×計画流量、粗度係数 $n=0.023$ 時に空隙率15%以上」という基準は、将来の計画変更や閉塞リスク等を考慮したものであり、最終的に水理模型実験で確認する必要があるが、本導水トンネルでは将来的な計画変更はないこと、呑口部にて閉塞対策を行うことから必ずしも絶対条件にはならないと考えられる。

一方で、本導水トンネルは、射流トンネルとして考えていること、さらに平面曲率部（70D程度）を有することから、トンネル内流況の安定性を図るため限界流付近（一般に $Fr=0.8\sim 1.1$ 以下）にならないよう留意が必要であり、構造上トンネル内を流下する可能性がある流量に対して全て射流となるよう水理設計を行う必要がある。このため、本水理検証では、「トンネルに流下する最大流量」ならびに「供用後の粗度係数」を検証（設定）の上、本導水トンネルを射流トンネルとして扱うための水理設計を行った。

b)設計結果

選定ルート上の可能な縦断勾配（1/170）において、最大流量 170 $m^3/s$ 、供用後の粗度係数を 0.019（一般的なコンクリートライニングにおける経年後の粗度係数を参考に安全サイドに設定）時に、 $Fr=1.1$ 以上、かつ十分な空隙（15%以上）を確保できる断面径 8.5m に設定した。

表-2 設計条件の変更点

施設	設計条件の対象	当初計画	[変更内容]
導水トンネル	流下方法	常流トンネル	射流トンネル
	断面径	10.5m	8.5m
	曲率半径	10D	70D
	縦断線形	1/600	1/170
	設計流量	計画流量×1.3	トンネル内最大流量
	流速	7m/s以下	7m/s以下
	フルード数	0.8以下	1.1以上
	粗度係数	0.015、0.023	0.015、0.019
	空隙率	15%以上	15%以上
	吐口位置	延長約4.480mの位置	延長約4.710mの位置

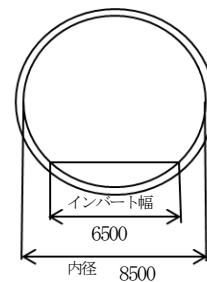


図-5 標準断面図

## 5. コスト縮減効果

トンネル延長は、当初計画より230m程度長くなったものの、常流トンネルから射流トンネルにすることによってトンネル断面径が10.5mから8.5mと2m縮小された。概略のコスト比較においては、延長が伸びることよりも断面縮小による掘削費の縮減効果が大きい結果となった。

断面縮小により、約30億円のコスト縮減が見込まれる。

## 6. 今後の課題

今回の検討において、射流トンネルを適用し、トンネル断面の縮小を行い、現状にて最適と考えられる「導水路」の基本設計を立案したが、今後（実施設計の前段階にて）、水理模型実験やトンネルや吐口部の地質情報の追加を踏まえ、修正設計が必要と考えられる。

2014年度には、今回の検討を実施した設計での水理模型実験が予定されていることを申し添える。

## 謝辞

水海川導水施設の設計検討にあたり、ご指導及びご助言を頂きました国土技術総合政策研究所及び土木研究所の研究員皆様に、心より感謝致します。

なお、本報告は、足羽川ダム工事事務所の導水施設他設計に関する成果の一部であり、著者が現所属の福井河川国道事務所に異動する前の足羽川ダム工事事務所での成果を取りまとめたものである。