

### 3. 「開水路式トンネル洪水吐きの形状 ー千苺ダムと笹生川ダムー」

執筆者：川崎秀明

【キーワード】 トンネル洪水吐き、開水路式、管路式、千苺ダム、笹生川ダム、基準類

#### 【概要】

トンネル洪水吐きには、開水路式と管路式の2種類がある。河川砂防技術基準等の現在の基準類においては、トンネル洪水吐きの流入部～導流部の流れは全区間での開水路流が基本である。一方、管路式は、区間の途中で満管の管路流が出現することを設計前提とするトンネル洪水吐きであり、数的にはこちらが多数である。

国内ダムでは、トンネル洪水吐きは、流木等による閉塞やキャビテーション損壊の恐れに対して、厳しい安全確認が必要であったため近年の実施数は少なかったが、最近になって鹿野川ダム、天ヶ瀬ダムのダム再生事業において大型の管路式トンネル洪水吐きが建設されている。

以下に両方式の既往建設例を記す。

#### ◎開水路式トンネル洪水吐き：

千苺ダム（兵庫県、1919年完成）の導水路トンネル（1931年）が最初であり、断面から全区間開水路式であることが判る。水理模型実験に基づく本格的なものは、笹生川ダム（福井県、1952年、図1上）が最初であり、大洪水後の対策として1977年に設置された。フィルダムでは、有間ダム（埼玉県、1985年完成、図1中）において、地形の制約からトンネル洪水吐きが建設時に採用された。

これら実績における実践的な水理設計は、現在でも大いに参考になる。その他に、美和ダム、小洪ダム等において貯水池中流部に横越流堤の流入部を設けた開水路式排砂バイパスが水理模型実験に基づいて設計され、設置されている。

#### ◎管路式トンネル洪水吐き：

管路式トンネルの古い例としては立ヶ畑ダムの（兵庫県、1914年再開発完成）の例があるが、排砂バイパスである。

管路式トンネル洪水吐きとしては、重力式ダムの場合、帝釈川ダム（広島県、1923年完成）と三浦ダム（長野県、1942年完成）において建設時に設置されている。フィルダムにおいては、洪水吐きと堤体と分離する必要から地形の制約を受けにくい当方式が採用されることがあり、仮排水路トンネルを転用した御母衣ダム（岐阜県、1961年完成）、朝顔式流入部を持つ天津岐ダム（福島県、1968年完成）等がある。

最近では、ダム再生として、鹿野川ダム（愛媛県、図1下）で大規模トンネル洪水吐きが2019年に完成し、天ヶ瀬ダム（京都府）でさらに大規模なトンネル洪水吐きが2021年に完成した。なお、2012年完成の本河内低部ダムは、呑口が円形の自由越流式の特殊構造ではあるが、堤体下を通る導流部が圧力管となることから管路式トンネル洪水吐きの一種である。

本稿では、流入部～導流部の全区間で満管状態が生じないという厳密な意味での開水路式トンネル洪水吐きである2事例（千苺ダムと笹生川ダム）を挙げる。



図1 トンネル洪水吐き最近例



(1) 千苺ダムのトンネル洪水吐き —トンネル洪水吐き形状の原型—

千苺ダム（表 1）は、普段目にしていない全面越流の堤体付属型洪水吐き（図 2）のほかに、左岸地山設置の横越流式流入堰から越流させて堤体直下流に放流する堤体分離型洪水吐きを有している。この洪水吐きは、1931 年完成の堤体 6m 嵩上げ時に増設されたものであり、横越流堤、側水路、導水路（開水路式トンネル洪水吐き）、放水口によって構成される（図 3 参照）。

表 1 千苺ダム諸元

1919 年完成、メソラリー重力式コンクリートダム、神戸市水道局管理
堤高：嵩上げ後 42.4m、堤頂長 107m

1) 流入部

横越流堤は、本堰堤左岸上流地山部に設置され、堰堤標高は常時満水位、堰堤延長は 99.179m となっている。側水路は横越流堤を越流した洪水流をトンネルまで導水する素堀水路（底版幅約 3.0m、高さ約 8.0m）となっている。元々の放流能力は 145.0m<sup>3</sup>/s である。

2) 導流部

本格的なトンネル洪水吐きとして国内初であり、高く上方に開いた呑口から直下流で落とし込んで管路を漸縮させる形状は開水路式トンネル洪水吐きの原型となる設計である。

導水路トンネルは、内空断面（標準馬蹄形：高さ 6m、R=3.182m）、勾配 1/100 のトンネル水路（延長約 90m）となっており、堤体下流約 100m 地点の地山中腹部にある放水口から減勢池に向けて落下放流される。

普段人の入ることのできない場所にあるため、滅多に見ることができないが、トンネル内は精巧な石張りによる覆工仕上げが為されている。その優美な局面形状と内面の石張りの精密さは戦前のトンネル技術の傑作と言える。



図 2 千苺ダムの堤体付属の全面越流式洪水吐き

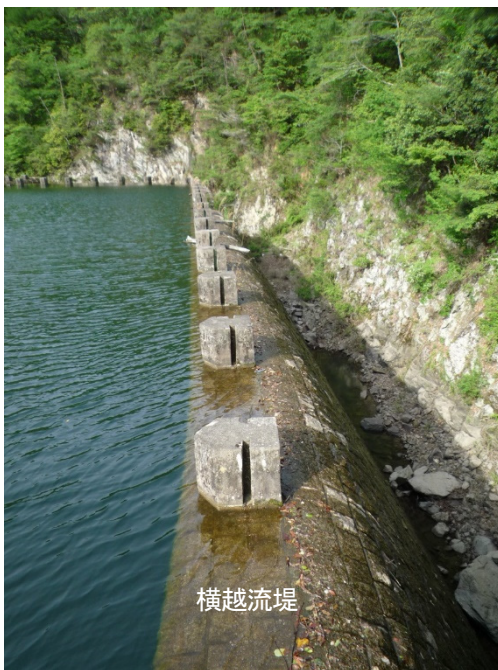


図 3 千苺ダム流入部 横越流堤～側水路～トンネル呑口 撮影 2013 年 6 月 12 日





図 4 導水路トンネル呑口の形状



図 5 導水路トンネル吐口の形状



(2) 笹生川ダムのトンネル洪水吐き —トンネル洪水吐きの規範形状—

笹生川ダムは、洪水調節、水道供給、水力発電を目的に1957年に完成した（事業費48億円、図6）。2020年9月28日には土木学会選奨土木遺産に認定されたが、認定理由として日本初の三次元的応力解析法を用いて構造設計を行った（ダム堤体積を1割節減）ことが評価された。

ダム完成後、1965年9月の奥越豪雨でダム放流能力をはるかに越えた洪水量がダム湖に流入し、ダム堤体を越流する危険な状態が発生した。このため、笹生川ダム左岸をバイパスして洪水を流下させる開水路式トンネル洪水吐きの工事が1973年6月実施され、1977年10月に完成した（事業費24億円、図6）。

笹生川ダムのトンネル洪水吐きは、最大放流量が860m<sup>3</sup>/sと大規模であり、国内初の本格的な開水路式トンネル洪水吐きとして設計諸元は水理模型実験に基づいて決定された。図7に示すように、直径9mの大断面開水路であり、ゲート流入部から呑込まれた洪水流は導水路トンネルを経て下流減勢工に放流される。

【トンネル洪水吐きの諸元】

流入部諸元： 区間長 30.0m、ゲート B 9.1m × H 8.89m 2門

トンネル部諸元： 標準直径 10.00m、区間長 267.2m、勾配 1/100、最大放流量 860m<sup>3</sup>/s



ダム管理者 福井県  
 九頭竜川水系、福井県大野市  
 1957年11月完成  
 重力式コンクリートダム  
 堤高76.0m、堤頂長209.8m、  
 堤体積225千m<sup>3</sup>  
 総貯水容量58,806,000m<sup>3</sup>  
 有効貯水容量52,243,500m<sup>3</sup>  
 目的：FNWP（洪水調節、流水の正常な機能の維持、水道用水の供給および発電）  
 本体工事 1955年5月～1957年11月  
  
 トンネル洪水吐き工事：1973年6月～1977年10月（1965年9月奥越豪雨）

図6 笹生川ダムトンネル洪水吐き 1977年 写真 福井県

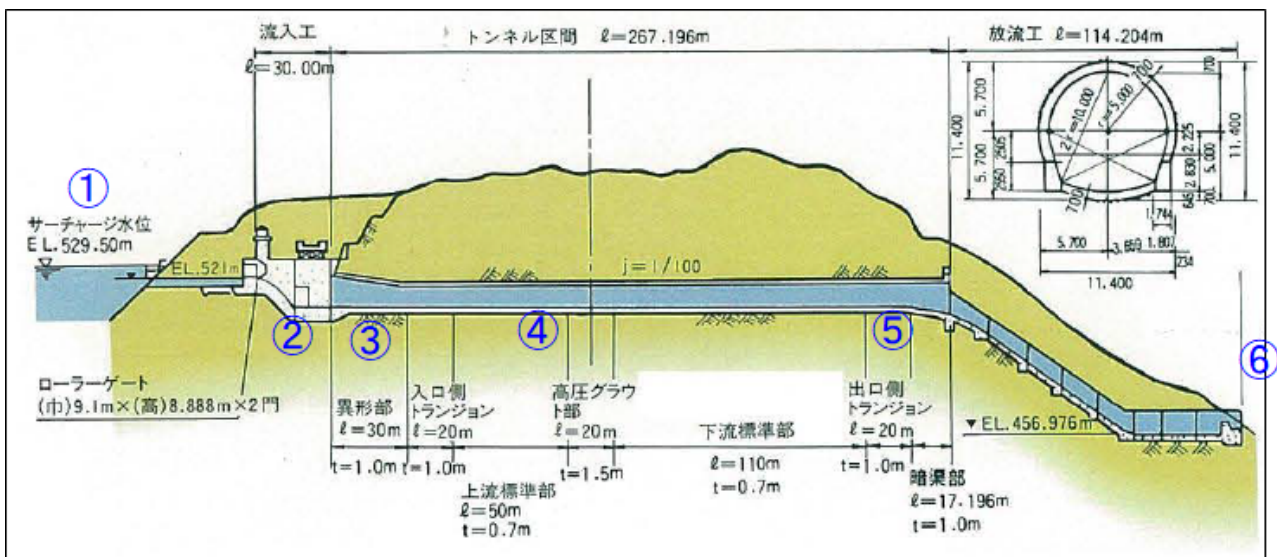


図7 笹生川ダムトンネル洪水吐きの縦断図 番号は写真位置 資料 福井県



図 8 と図 9 に笹生川ダムトンネル洪水吐きの現地状況を示す。合理的な施設設計となっており、最近の鹿野川ダム、天ヶ瀬ダムのトンネル洪水吐きの完成までは国内最大規模であった。ただし、完成後の洪水流下の実績はない。



流入部諸元：区間長 30.0m  
ゲート B 9.1m × H8.89m 2門



トンネル部諸元：標準直径 10.00m、  
区間長 267.2m、勾配 1/100

図 8 笹生川ダムトンネル洪水吐きの形状 1 左：呑口部ゲート、右：標準部の大断面

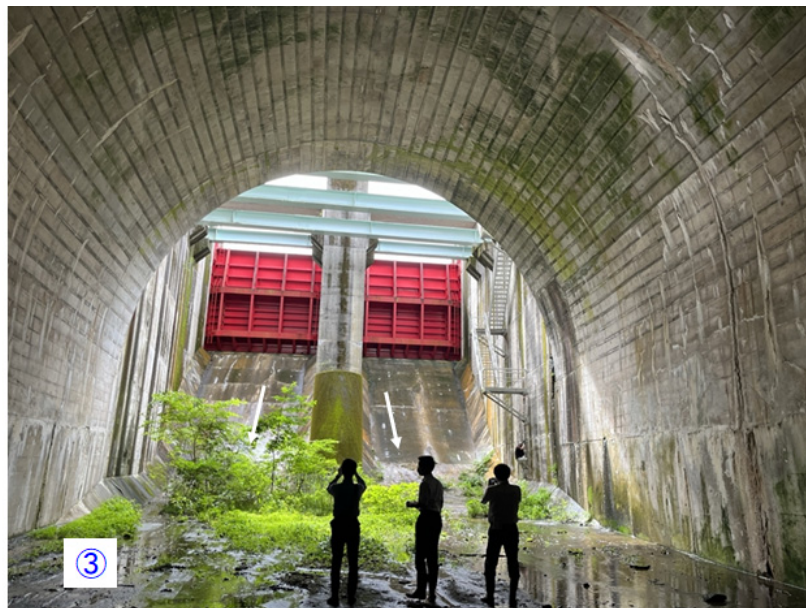
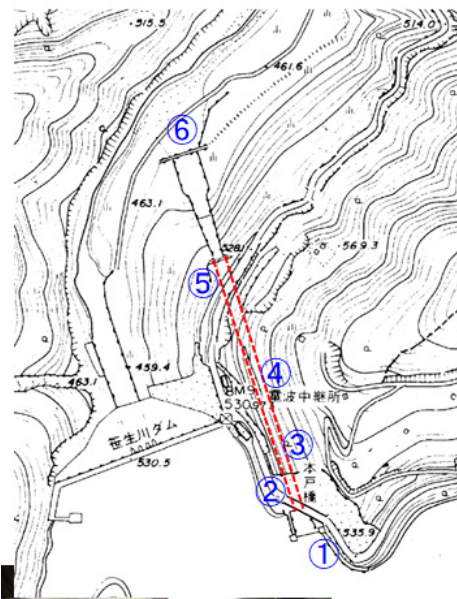


図 9 笹生川ダムトンネル洪水吐きの形状 2 流入部～導流部～減勢工

### (3) 既往基準類や技術書におけるトンネル洪水吐きに関する経緯

開水路式と管路式に着目して、トンネル洪水吐きに関する記述を以下に抜粋して比較した。要約すると以下のことが言えそうである。

ダム設計基準にあるように、昭和30年代には既に、流木等によるトンネルの閉塞が強く意識されるとともに、空気振動の原因となる空洞の発生が厳しく規制された。このため、トンネル洪水吐きは開水路式が基本とされたが、背景として、海外における圧力トンネルの相次ぐ事故があった。

この考え方は、その後も引き継がれて、笹生川ダム、有間ダムのトンネル洪水吐きは、開水路式として建設された。2005年発刊多目的ダムの建設においても「開水路流にて設計されるのが通例である。」とあり、開水路式トンネル洪水吐きは、現在も続く基本的な方式である。

一方、管路式トンネル洪水吐きは、オリフィス、コンジット、ペンストック等で従来から用いられている圧力管方式の延長上の技術であり、空気振動や負圧発生への適切な対応が為されれば採用しても良いとされている。朝顔式やあご付きの場合、自由越流で流入しても水位が上昇すれば満管流の圧力管となることが多いから、水理設計上、途中を管路式とせざるを得ない場合も多くある。また最近では、仮締切技術の進歩からトンネル洪水吐きの流入口自体を圧力管とするダム再生事例も鹿野川ダム、天ヶ瀬ダムと続いている。

これらのトンネル洪水吐きの施工実績を反映して、2021年版の河川砂防技術基準では、「地形上の制約から水路式導流部を採用するのが困難な場合でそれを採用することの安全性が十分確認されている場合には、トンネル式導流部を用いることができる」としており、管路式トンネル洪水吐きの適用条件を明記する方向にある。

以上を総括すると、「トンネル洪水吐きは開水路式が基本であるが、安全性が十分確認されている場合に限り管路式を用いることができる。」と言える。

(1957年) 昭和32年制定 ダム設計基準、日本大ダム会議 pp12,13

#### 第7条 型式の選定

流入部は、横越流型、半円越流型、朝顔型等、地形に応じて十分な流入能力のあるものを選定するものとする。また、トンネルの閉そくに対処するため、予備越流水路を設けるか、または、流木、砂れき等の流入を防御し、かつ排除するために、前面には確実な排除施設を設けなければならない。

〔解説〕流入部は、横越流型、半円越流型、朝顔型等、地形に応じて十分な流入能力のあるものを選定するものとする。トンネル余水吐は、大別して2つの型式があり、立坑を有するものと、斜坑を用いるものがある。構造物を分けると次の4つとなる。

(a) 流入部、(b) 取合部、(c) 斜坑または立坑部、(d) 水平トンネル部

トンネル斜坑余水吐は自然流下式として設計するのがよい。その流入部は十分な流入能力があり、しかも地形に応じた最も経済的な構造とすべきである。

#### 第8条 空どうの振動

トンネル余水吐の線形および各部分の形状は空どう現象の発生を避けるようにしなければならない。

〔解説〕

トンネル余水吐は非常に高速にさらされるから、形状が適当でないと空どう現象と、それに続く浸食によって破壊を起すおそれがある。従って、越流形状、縦断こう配の凹部、断面の急な拡大等は特に注意して設計し、必要に応じて給気孔を設けなければならない。

(1993年) H5.10 河川総合開発用語集 (河川局開発課) pp206 から

トンネルを導流水路として用いる導流部。転流トンネルの一部が利用され、別途設けられた流入部、または導流部から接続される。トンネル洪水吐きの導流部の流れは開水路流が基本であり、トンネルの閉塞が生じないよう、流木対策、断面の余裕の確保や適切な給気設備の設備が必要とされる。



(2005年) H17.6 多目的ダム建設 26章「水理構造の設計」から

トンネル導水路 (=トンネル洪水吐き) は、越流水やその集水流又は管路流からの放流水を導水する暗渠水路をいい、開水路流にて設計されるのが通例である。

これは、トンネル内の流れが流量の増減により開水路流と管路流の2種の流況となる設計では、両者の流況の間に流量や圧力が周期的に大きく変動する脈動が生じる場合があるため、現象に対する知見が十分得られていないことにもよる。こうした脈動は、・・・・・・。現況では、開水路流として設計するのが安全といえよう。

開水路トンネルのトンネル断面は、安定した空気混入流が維持できるように、水のみを通水断面に余裕をもたせて設定する必要がある。一般には、最大流量流下時の水流の流積  $A_w$  がトンネル断面積  $A_0$  の  $3/4$  以下とすることが提唱されている。

一方、管路式トンネル洪水吐きは、圧力管時の安全性を十分考慮して設計する必要がある。フィルダムにおいては、仮排水路トンネルの転用事例がいくつかあるが、この場合、流入部が圧力管となる。一方、朝顔式や越流式(あご付き)の流入方式においては、貯水位の上昇とともに、越流から管路流に遷移する放流設備となるが、計画放流量時は開水路として設計するのが基本である。

米国の事例として、Hoover ダムではダム両岸直上に越流型洪水吐を設け、斜坑と水平坑からなるトンネル式洪水吐き4条を設置した。グレンキャニオンダムではトンネル洪水吐きにおいてキャビテーションによると推察される大規模な損傷が発生したが、その対策として高速流域において給気を行う方法を採用し、その後の損傷を防止している。

(2021年) 河川砂防技術基準改訂版 設計編2章第7節-3より

**<標準>** ダムの放流設備は、越流型と管路型に大別し、越流型は流入部、導流部及び減勢工により、管路型は放流管及び減勢工により構成することを基本とする。なお、越流型の放流設備は、原則として、越流式流入部、堤体流下式あるいは水路式導流部、跳水式あるいは自由落下式減勢工により構成することを基本とする。

**<例示>**

越流型の洪水吐きは、越流式流入部、堤体流下式あるいは水路式導流部、跳水式減勢工が最も好ましい組合せとなる。ただし、アーチ式コンクリートダムの減勢工では自由落下式とすることが多い。

常時満水位における放流能力が過大となる場合にはオリフィス型洪水吐きを採用することができる。

地形上の制約から水路式導流部を採用するのが困難な場合でそれを採用することの安全性が十分確認されている場合には、トンネル式導流部を用いることができる。

スキージャンプ式減勢工は、下流河床の洗掘等下流河川の管理上問題がない場合のみに限定して採用することができる。

(2021年) 河川砂防技術基準改訂版 設計編2章第11節-4より

**5. トンネル洪水吐きの増設 ・ ・ ・ 施工に関する<例示>記述**

地山を掘削して洪水吐きを設置するトンネル洪水吐きは、呑口部(流入水路含む)、トンネル部、吐口部(減勢工)で構成され、各々の構造的安定性を確保するように設計する必要がある。

トンネルの平面線形は、既設堤体及びカーテングラウチングに有害な影響を与えないこと、十分な浸透路長を確保すること等を考慮して定める必要がある。また、地山の地下水位がトンネル背面を介して下流側へ浸透しないようにトンネル周辺の止水処理は入念に行う必要がある。

呑口部は貯水池を運用しながら施工する場合は、大規模な仮締切(鋼管矢板構造等)が必要となり、土留め壁等として恒久的に活用する前提で仮締切を設計することが多い。この場合、仮締切は、完成後の形状と荷重条件も考慮して設計する必要がある。仮締切は、トンネル掘削時、流入水路設置時の鋼管矢板の切断により荷重状態が大きく変わるため、各施工ステップで構造的安定性を検討する必要がある。呑口部とトンネルの接合部は止水上の弱点となり易いため密実な止水グラウチングを行うことが重要である。