

with Dam Night 2023

第2部 基礎編

導流・減勢に関する用語

事前配布のチラシに、事前キーワードとして「正面越流、横越流、側水路、階段式、堤趾導流、漸縮、導流壁なし、トンネル導流、空中放流、サイホン流、副ダム、デフレクター、負圧、跳水、射流、バケット等」の基本となる水理用語を並べましたが、専門家でも混乱することが多い用語もあります。

そこで、ダムの導流・減勢を知るのに必要な基礎的な用語について、既存技術書を基に以下のように整理してみました。

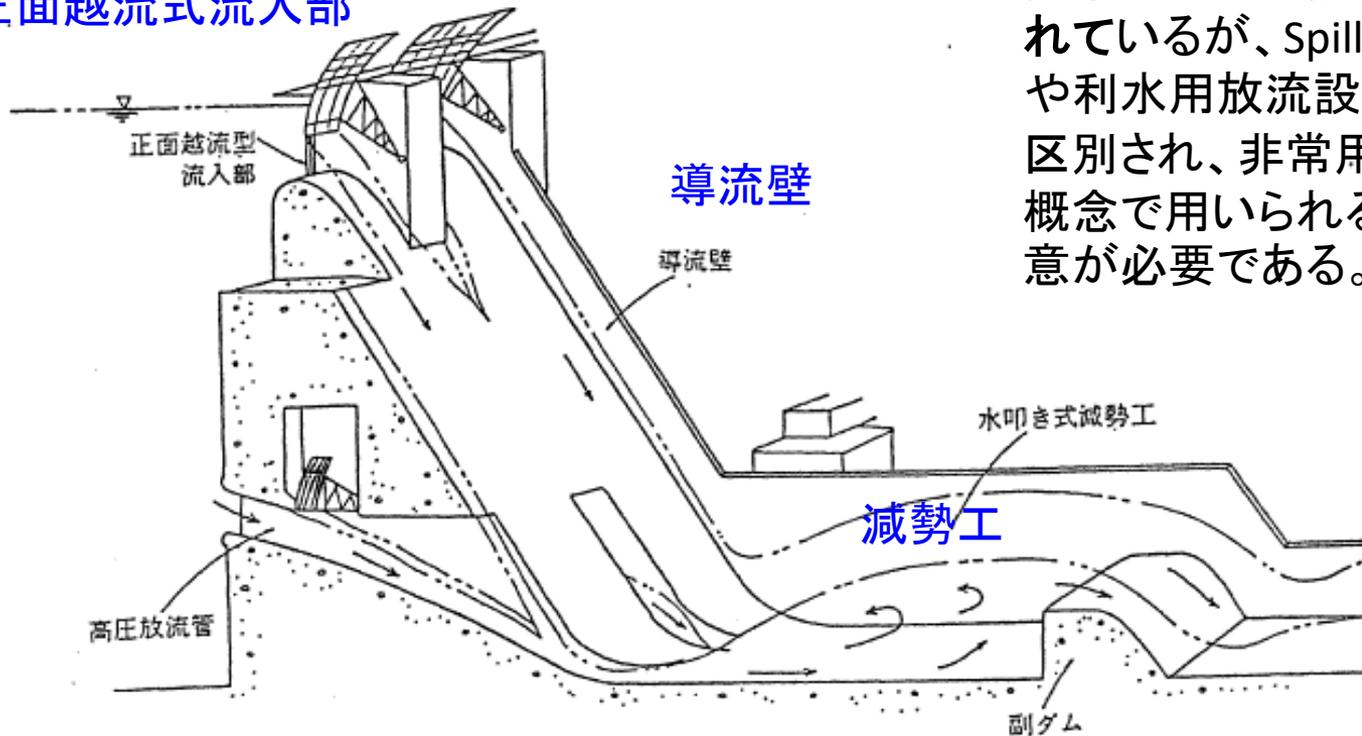
編集：エンジニアスカワサキ

1. 洪水吐き

H5.10河川総合開発用語集(河川局開発課)から

洪水吐きは、その水理機能から上流側から「流入部→導流部→減勢工」の3区間に区分される。
流入部は、人工的に支配断面を生じさせる部分までをいい、流れの形式から越流式と管路式に大別される。

正面越流式流入部



洪水吐きは一般にSpillwayと英訳されているが、Spillwayは、洪水調節用や利水用放流設備のOutlet Worksと区別され、非常用洪水吐きと同種の概念で用いられる場合が多いので注意が必要である。

S32年制定の「ダム設計基準」では「余水吐き」を用いていた。今でも発電ダムでは余水吐きとしていることが多い。

2. 洪水吐きの構成と型式

河川砂防技術基準 第2章 ダムの設計 2021年10月

＜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。

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。

3. 洪水吐きの構成要素

H17.6 多目的ダム建設26章「水理構造の設計」から

放流設備は、流入部(呑込み方法)の違いから越流式と管路式に大別される。

越流式は、貯留水を導き越流により放流量を調節する**流入部**、流入部からの流れを減勢工へと導く**導流部**、過剰なエネルギーを減勢して下流河道に放流する**減勢工**から構成される。朝顔式や開水路トンネルは越流式に分類される。

管路式は、貯留水を管路にて取水して導き、管路出口にて放流量の調節を行うもので、流入部が管路形式のものをいう。越流式と同様、**流入部**、**導流部**、**減勢工**にて構成される。サイホン式や圧カトンネル式の洪水吐きは管路式に分類される。

越流式では、越流標高と減勢工標高に標高差が大きく、この間の導流が必要になるが、管路式では、管路により減勢工までの導流が可能であることから、管路出口から直接減勢工に放流され、導流部が省略される場合も多い。

フィルダム(昔の重力式ダムも)では、周辺の地山に越流式の洪水吐きが設けられる。地形の関係上流入部上流に水路を必要とする場合には、上記の流入部上流に**流入水路**の構成要素が加わることになる。

堤体との関係から「**堤体分離型**、**堤体付属型**」に区分される。基本的にフィルダムは堤体分離型であり、コンクリートダムの多くは堤体付属型である

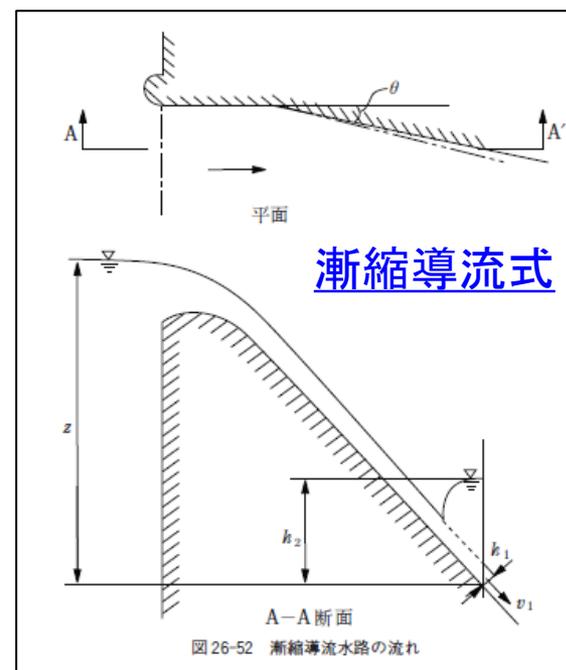
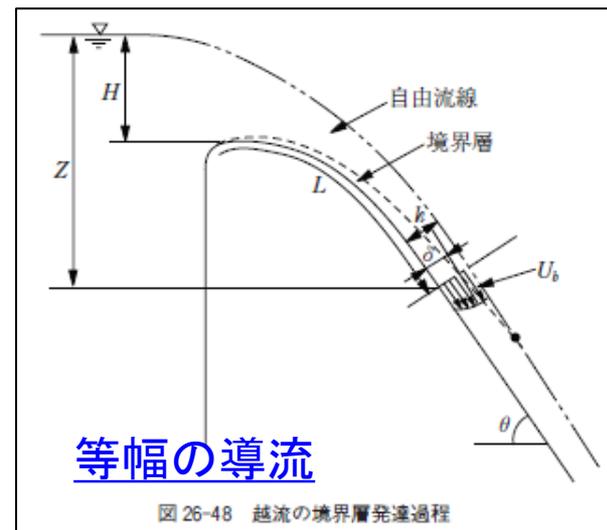
4. 重力式ダムの洪水吐き（流入部～導流部）

H17.6 多目的ダムの建設26章「水理構造の設計」から

越流頂を越える流れ：貯水池のほぼ静止している水が急激に加速する流れであり、ポテンシャル流れとして取り扱うことができるが、流下に伴い、底面から境界層が発達し、ポテンシャル流れとした場合と比較して、平均流速は小さく、水深は大きくなる。

等幅の導流：堤体下流面上で水路幅を変えない導流方式であり、通常の導流方式である。

漸縮導流式：堤体下流面上で水路幅を縮小させていく導流方式。導流壁沿いにおいても等幅水路上の衝撃波と同様の流れが生じ、導流壁屈折位置から水面が盛り上がる。ある位置から下流では水脈の上部が堤体側へと反転するようになり、らせん流となって流下する。



5. 横越流式流入部

横越流式流入部(side spillway)

越流水脈と下流水路との流向が直角ほどに異なる越流形式の流入部。越流水脈を受ける側の水路を横流入水路といい、比較的高位にて水脈を受け、流れを急勾配水路へと導流する。

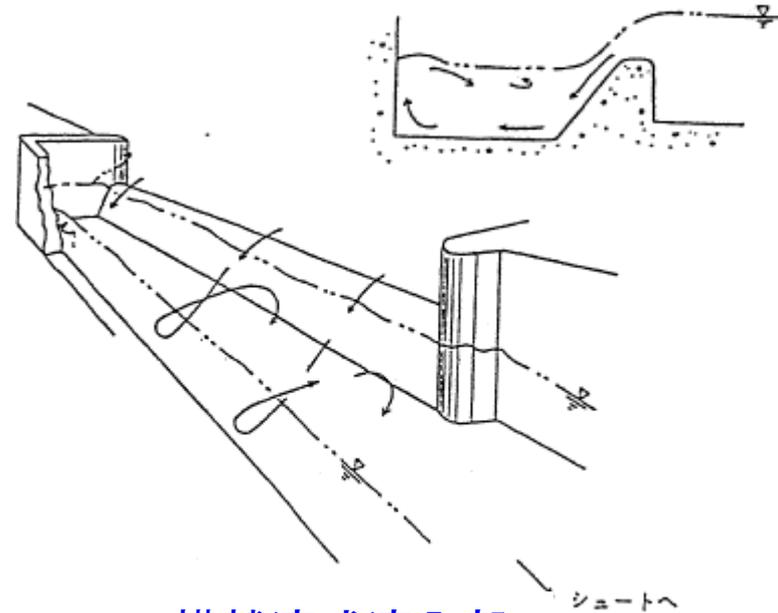
越流水脈は、横流入水路内で横断方向に回流し、らせん流となって流下する。また、その流最は流下に従い順次増加する。

横越流式は、越流水脈の流向を変えずに急勾配水路へと導流する正面越流方式に対する越流方式で、地山に洪水吐きが設けられ、無ゲートで非常用洪水吐き幅の広いフィルダムの洪水吐きとして多く用いられている。

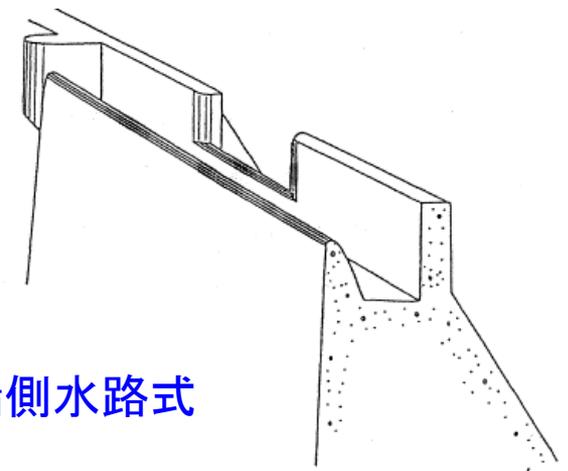
水路片側からの越流に対応するものが基本形式であるが、水路の短縮のため、上流からの越流も含めた二方向越流に対応するものや、水路両側および上流からの三方向越流に対応するものもある。これら形式の選定にあたっては、地山の地形が大きな決定要因となる。

横越流式流入部は、一般には、地山に設けられた洪水吐きの流入部形式として用いられている。

重力式コンクリートダムで越流幅が河道幅より数倍大きい場合に、これを堤頂部に設けた水路で減勢工幅まで導流するものは天端側水路式と呼ばれる。



横越流式流入部



天端側水路式

6. トンネル洪水吐き（流入部～導流部）

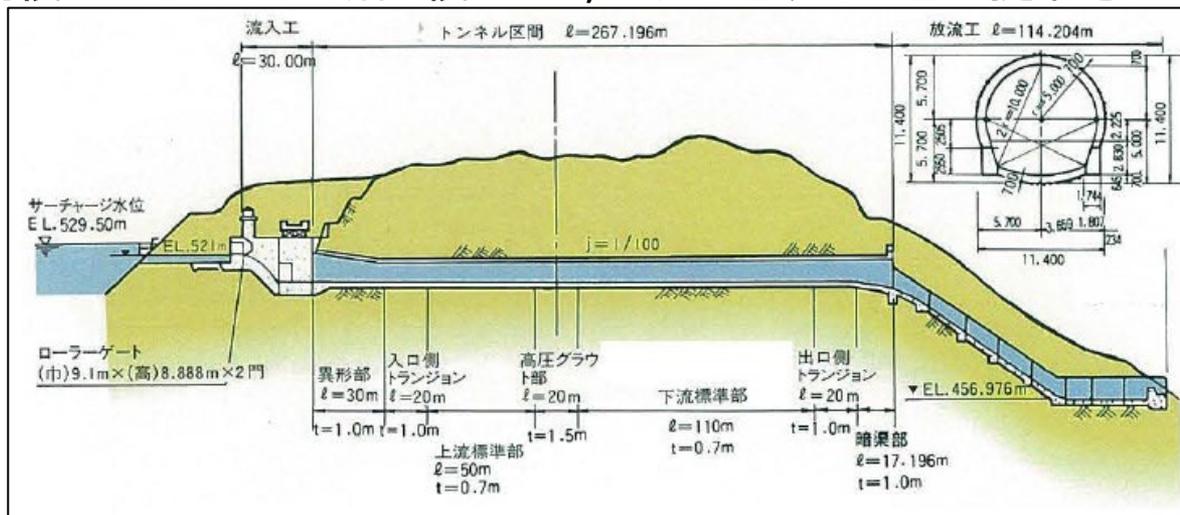
H17.6多目的ダムの建設26章「水理構造の設計」から

トンネル導流水路は、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、管路流を下流側から生じさせることにより防止することができるが、流れには大量の空気を取り込まれており、その挙動により不安定な現象が生じることがある。その適用に当たっては現象の解明が必要であり、現況では、開水路流として設計するのが安全といえよう。

開水路式のトンネル断面は、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。



笹生川ダムにおける
開水路式トンネル洪水吐き

8. 朝顔式と越流頂付き (流入部～導流部)

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

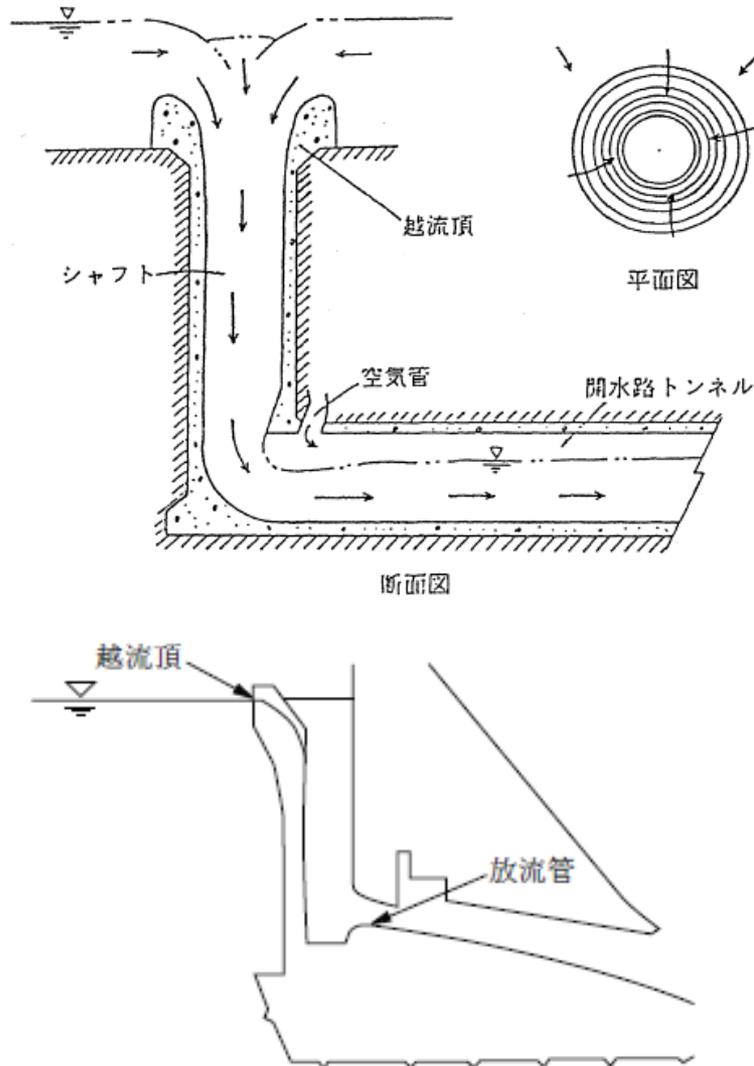


図 26-45 越流頂付き放流管

H5.10河川総合開発用語集(河川局開発課)から

朝顔式洪水吐き(morning glory) 地山に設けられた円形配置の越流頂を呑み口とし、鉛直の円形管(シャフト)、及び曲管を通じ水平トンネルへと導流する形式の洪水吐き流入部。主としてフィルダムの洪水吐きとして用いられる。

シャフト出口では断面が拡大されるとともに十分な給気が行われ、水平トンネルは仮排水路等を利用した開水路トンネルとされる。

朝顔式では越流頂が直線の越流式と比べ、狭いところで大きな越流頂長をとることができ、限られた空間で大きな流量の放流が可能である。

H17.6多目的ダムの建設26章「水理構造の設計」から

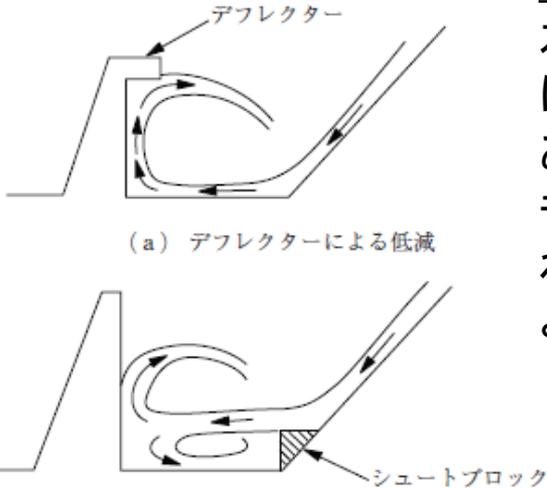
越流頂付き放流管: 越流頂付き放流管は、放流管上流に導水塔を設け、導水塔頂部の標高の高い位置に越流頂を設置したもので、貯水位が低い状態での放流量の増大を図ったものである。

堤体上流面に越流頂を設けたものが多く、この場合、「あご付き」とも呼ばれる。

8. 堤趾導流式と側水路式の導流部

H17.6 多目的ダムの建設26章「水理構造の設計」から

堤趾導流水路



(a) アフレクターによる低減

(b) シュートブロックによる低減

堤趾導流水路式(導流部): 流入水脈と階段上の流下水脈が相互に影響し合う非常に複雑なものである。このため、水理諸量の知見も比較的単純な階段形状に限られており、一般に水理模型実験による検討が必要になる。

階段式: 階段の減勢効果を得ることができ、減勢工規模を小さくできるメリットがある。我が国での適用事例は限られているが、世界的には、RCCダム等で採用されるようになってきており、今後の発展が期待される水路形式である。

階段式導流路

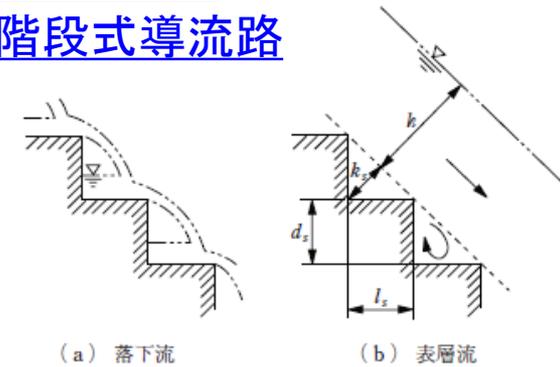


図 26-49 階段式導流水路上の流れ

側水路式(減勢工): 堤趾導流水路を流下し水叩きに流入する水脈は、ダムの堰上げによるエネルギーのかなりの部分を減勢して流入する。

側水路式は堤趾導流式において水路勾配を水平にし、減勢効果を最大限に発揮させたものとも位置付けることができる。それゆえ導流部形式として扱われる場合もあるが、ここではその有する減勢機能が水叩きのそれと同様であることから減勢形式の一つとして整理した。

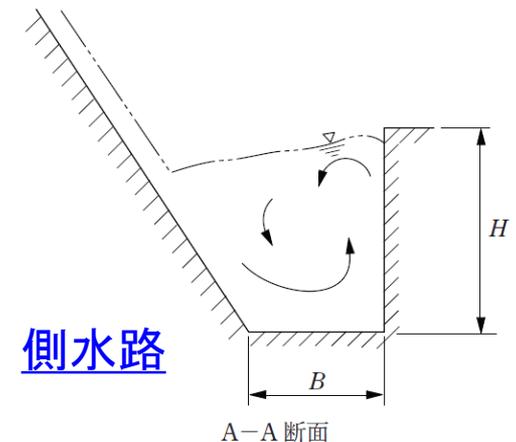


図 26-67 側水路式の流れ

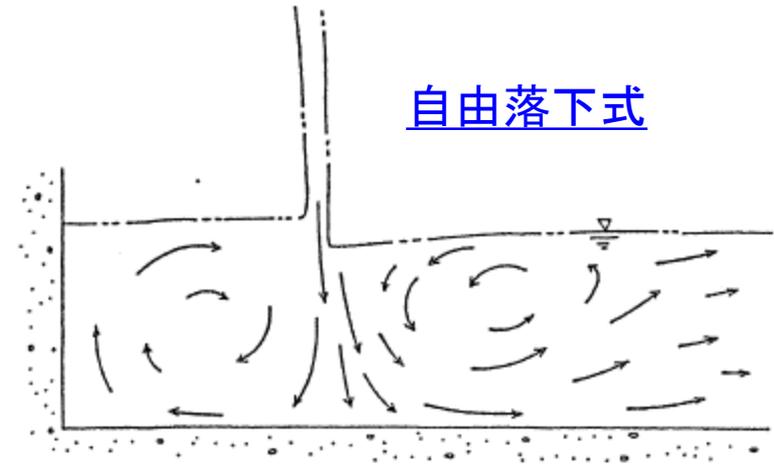
9. 自由落下式とスキージャンプ式 (導流部～減勢工)

自由落下式: アーチダム の 堤体 では、水路 面上 を 導流 する こと が 困難 であり、空中 を 自由 落下 させ た 流水 を 直ち に 跳水 させ て 減勢 する 自由 落下 式 減勢 工 が 用い られる。自由 落下 式 減勢 工 では、落下 点 が 堤体 と 近い ので、その 動水 圧 が 堤体 の 安全 を 損な わない 配慮 が 必要 と される。

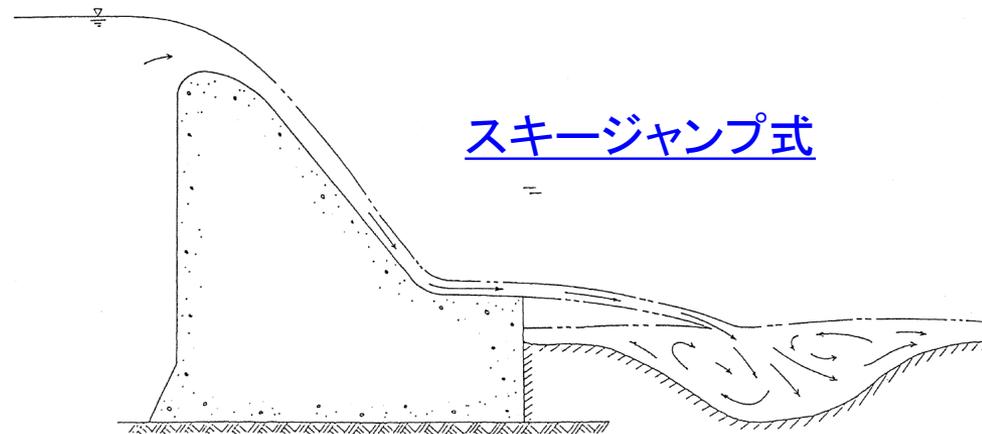
スキージャンプ式: ダム の 安全 確保 を 目的 とし、ダム 下流 保護 の 全て の 機能 を 河道 に 分担 させる もの と して スキージャンプ 式 減勢 工 がある。これは、水脈 を 下流水 位 上方 から ダム 遠方 へと 放流 し、落下 地点 に 洗掘 によって 形成 される プール を 利用 して 減勢 させる もので、水叩き 等を 必要 と せず 緑済 的 である が、河幅 が 十分 広い、長い 直線 区間 がある、河床 堆積物 の 層 が 厚い 等 河道 に 堰上 げ エネルギー に 対応 できる 条件 が 備わ っ て いな ければ なら ない。

スキージャンプ式はそれ自体が減勢効果をもっているわけではない。水脈をダム堤体に影響を及ぼさない位置まで下流に放出し、減勢を河道部に全面的に依存するものである。経済的に有利な形式であるが、放出水脈を減勢するという過酷な条件を満足する河道区間がダム下流に存在しなければならない。

H5.10河川総合開発用語集(河川局開発課)から



自由落下式減勢工



10. 跳水式減勢工

H17.6 多目的ダムの建設26章「水理構造の設計」から

水平水叩き方式：導流部を流下する高速流の減勢は、**跳水**現象を利用して行うのが一般的である。跳水を発生させるためには、流入条件に見合う下流水深が必要になる。下流水深がある程度高いと自然跳水となり、理論通りに減勢される。

しかし、我が国ではダム基礎岩盤を掘り込むことが多く、下流河道に対しかなり低い水叩き標高となり、**潜り跳水**となる場合が多い。その場合、跳水による減勢が不十分となり、跳水後の水深は常に下流河道水深より大きくなる。

このため、副ダムにより跳水下流水深を確保するケースがほとんどである。つまり、副ダム越流水は下流河道に対し、ダムの過剰なエネルギーを有していることになる。したがって、副ダム減勢池を設置して再度跳水させる、あるいは河道での減勢に期待し必要に応じ護岸を施すなど残存エネルギーの取り扱いを検討する必要がある。

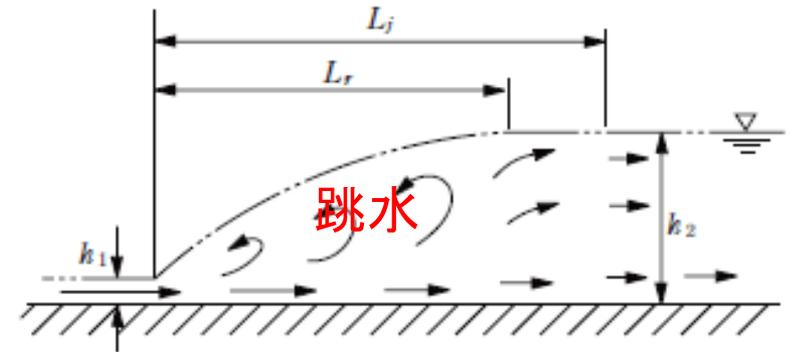


図 26-57 水平水叩き上の跳水

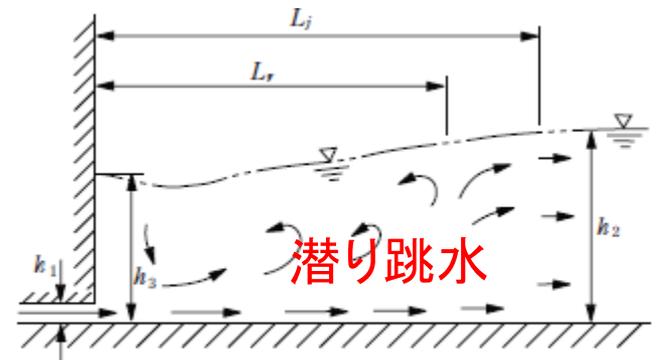


図 26-58 水平水叩き上の潜り跳水

1.1. 副ダムによる強制跳水式減勢工

H17.6 多目的ダムの建設26章「水理構造の設計」から

我が国の河道では、自然跳水の水深に対して下流河道水深が小さい場合が多い。このため、副ダムにより強制的に跳水下流水深を確保するケースがほとんどである。

副ダムを設けてダム直下にて跳水を形成させる減勢方法を「副ダム付き水平水叩き式」と呼ぶこともある。

なお、副ダム越流水は下流河道に対し、過剰なエネルギーを有していることが多い。この場合、更なる減勢が必要となる。

2次減勢工：副ダム越流水を対象とした減勢工。跳水式や自由落下式減勢工では、副ダムにより跳水のための水位確保を行う場合が多く見られるが、堤高と放流量の大きいダムでは、この副ダムそのものがかなり高いものとなり、二次減勢工が設けられる。二次減勢工でも跳水式を基本とした減勢が行われるが、流速が比較的小さいため、各種ブロック等も併用されている。

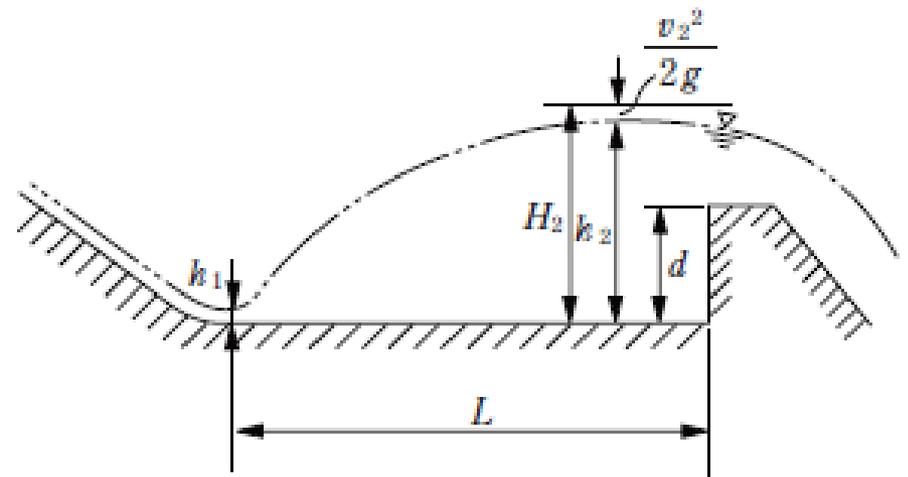


図26-59 副ダム付き水叩き上の跳水

大きい流量では、跳水渦区間内に副ダムが存在し、副ダムは単に跳水下流水深を確保するのみでなく、潜流の流向を強制的に変更させて強制跳水させる効果を有することになる。

12. 逆傾斜、バケット方式減勢工

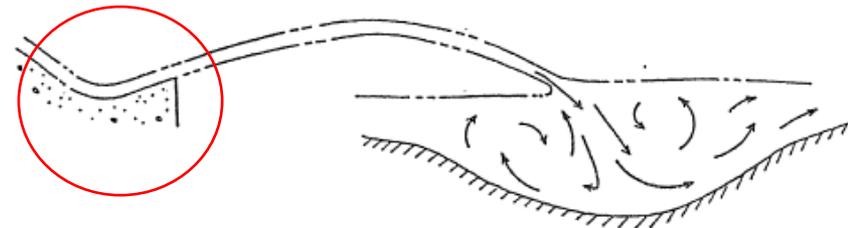
H5.10河川総合開発用語集(河川局開発課)から

逆傾斜水叩き

水叩き面が、下流に向かって上がる傾斜をもつ水叩き。水平水叩きに比べ小さい下流水深に対し跳水が行われる。

水脈放出のために設けられるバケットをフリップバケットともいい、フリップバケット式減勢工と呼ばれる場合もある。

バケット形減勢工(bucket basin): バケットカーブにより水脈を水中で上方に放出する形式の減勢工。下流水位が高い場合に効果的な減勢が期待できる減勢工形式であるが吹き上げられた水脈下方に生じる底部渦(グランドローラー)により、河床材料がバケット側に移動するとともに吹き上げられ、バケット損傷の原因となるので、その対処が必要とされる。



逆傾斜水叩き(フリップバケット式)

スキージャンプ式減勢工

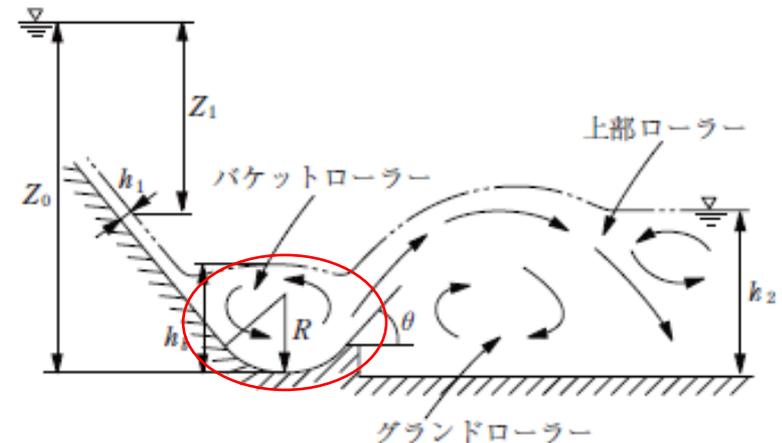


図 26-64 ローラーバケットによる跳水

1 3 . 空気混入・空気連行現象

H17.6 多目的ダムの建設26章「水理構造の設計」から

空気と接する高速流では、水面から空気を取り込み、水と空気が混合して流下する現象が生じる。これが空気混入現象であり、空気の混入により流積が増大する。

ダムの放流水が白濁して見えるのはこのためである。空気濃度は、流水側から空気側に向かって連続的に変化し、水面が明確でなくなる。

空気連行現象は、流水周辺の空気が流水に引かれて流下する現象である。高速流が流下すると、空気混入・連行現象により、大量の空気が高速流水とともに流下する。このため、上方が閉じられた暗渠内の流れでは、気圧が低下しやすい。著しい場合には、間欠的な満水状態(脈動)が生じ、極めて不安定な流れとなる。また、キャビテーション発生の原因ともなる。

したがって、高速流が流下する暗渠では、上方に大きな空間を確保するか、暗渠上流端付近からの給気が必要になる。コンクリートダム堤体内で管路流から開水路流に変化する部分管路型放流管や、トンネル内に放流する水位低下用放流設備など上流端が閉じられた暗渠では、こうした給気に対する配慮が不可欠である。

高速流放流による暗渠内の気圧低下の影響をなくすためには、非常に大きな空間や給気管が必要になり、安定した流況が得られるものとした通常の給気では、暗渠内のある程度の気圧低下は避けられない。

14. キャビテーションへの注意

H17.6 多目的ダムの建設26章「水理構造の設計」から

ある温度の液体の圧力が、その温度で決まる蒸気圧以下になると、液体が蒸発し、蒸気の泡が生じる。この現象をキャビテーション cavitation と言う。

キャビテーションが発生すると、「1) 水路面やゲートが損傷する。2) 振動・騒音が発生する。3) 流れの水理特性が変化する。」といった問題が生じる。

1)は、発生した気泡が圧力の高い所に達し、液体に戻る(崩壊という)際に非常に大きな衝撃圧が発生することにより生じる問題である。気泡崩壊時の衝撃圧の発生機構については、多くの研究がなされてきており、気泡の急激な収縮により気泡内部に含まれる空気などのガスの静圧が高くなって再膨張し、衝撃波が生じる場合や、気泡がドーナツ状になりながら崩壊し、壁に向かってマイクロジェットを発生する場合、衝撃波のショックにより壁面近傍の気泡にウルトラジェットを発生する場合が報告されている。崩壊は数マイクロ秒の短時間に生じ、崩壊圧力は最大1 GPa以上に達する場合もある。

キャビテーションによる損傷(壊食)は、局所的な衝撃圧の作用が繰り返されることにより生じ、長時間をかけて海綿状の壊食面を形成する特徴がある。また、壊食位置はキャビテーション発生位置下流側にその中心がある。

問題の2)はキャビテーションの発生、崩壊により生じる圧力変動に起因するものである。また、3)は流水場に気体が発生・消滅することにより生じる。