

流水の減勢 (1) 減勢に係わる基本的事項

一般財団法人ダム技術センター顧問 高 須 修 二

キーワード 洪水吐き・減勢工・減勢・技術基準

はじめに

水の存在は周りの風景と絡み合って、心を和ませる独特の雰囲気醸しだします。水の流れは、さらに音や水面の動きを映しだして、心に何かを訴えかけてきます。その中でも滝は水しぶきや空気のはひんやりとした感覚を通して、極めて大きな心的効果を与えてくれます。

さて、世界に数多く存在している滝ですが、高い位置にある滝口から河川水や伏流水が落下あるいは滑り落ちるように流れ落ちています。技術用語を用いると、位置エネルギーが重力により運動エネルギーに変換され、流速を獲得しているということになります。

この流水のもつ運動エネルギーは滝壺で減殺され、そこから先では極めて穏やかな流れとなって川を下っていきます。滝壺は、落下水の運動エネルギーにより河床の岩盤が洗掘されて形成されたもので、その規模は流水のエネルギーを減殺するに十分な大きさになるまで進行していきます。なお、流水のエネルギーを減殺することを「減勢」と呼んでいます。

本講座は、このような滝からイメージされる、ダムにおける放流水とその減勢を対象とします。

さて、次の2枚の写真は私が頻繁に訪れる滝です。駒止の滝は落下位置に創られた滝壺からアーチダムからの放流水の減勢がイメージされます。また、袋田の滝は流



写真1 駒止の滝(直瀑)栃木県

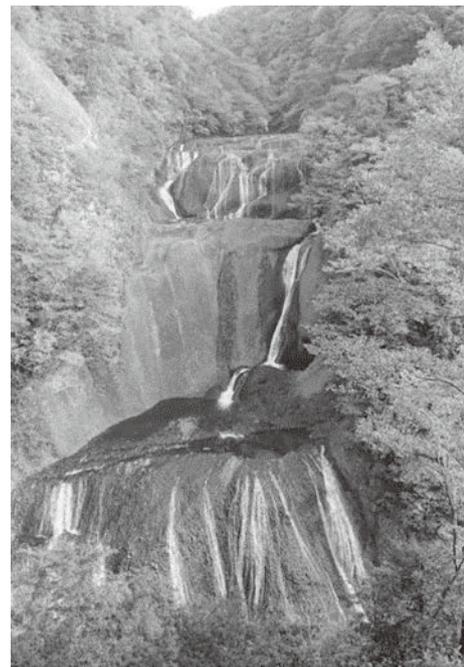


写真2 袋田の滝(段瀑)茨城県

量が少ない時期で迫力に欠けますが、各段の滑滝は重力式コンクリートダムの堤体下流面やフィルダム洪水吐きのシュート部での減勢がイメージされます。

河川を横断してダム堤体を設置することにより流水がせき止められ貯留されることとなりますが、結果として貯留水の位置エネルギーが得られることとなります。従前に貯水区間にあたる河道で失われていた運動エネルギーが、位置エネルギーとして温存、蓄積されることになるわけです。

水の位置エネルギーは放流することにより運動エネルギーとなり、水車を回して電力を生み出すことができます。一方、それ以外の放流水は、余水としてダム下流へ放流されることとなりますが、その位置エネルギーは、一部はエネルギー損失により失われるものの、多くは流水の運動エネルギーとして維持されます。

この運動エネルギーは下流河道で徐々に失われていくこととなりますが、その間、河道の河床や側岸に影響を及ぼし、滝壺に見られるように損傷・洗掘等を引き起こすことがあります。その損傷・洗掘が周辺に悪影響を及ぼさない場合はそれで良いとされますが、悪影響が避けられない場合には、河床や側岸を耐久性のある構造物により必要な区間を保護しなければなりません。

この保護のための構造物の規模や範囲を小さくするために、流水の持つエネルギーを効率よく減殺する水理的手段とそれを実現する装置が用いられてきました。

この講座では、ダムにおける流水のエネルギー減殺について、以下の内容で順次記述していきます。第1章では基本的事項を取り上げますが、一般的な考え方を記述するだけでは、個々のダムの条件に応じて講じている設計の意図を理解することは難しいと考えますので、第2章以下では出来るだけ具体的な事例を中心に話を進めていきたいと思えます。減勢方法が多様性に富んでいることから各章の表題と比べて内容が幅広くなっていますが、関連する事項をまとめて記述したことによるものです。

第1章 減勢に関わる基本的事項

- ・参考図書と技術基準の系譜
- ・河川管理施設等構造令
- ・河川砂防技術基準

第2章 跳水式減勢工の設計

- ・跳水現象と潜り跳水現象
- ・跳水式減勢工の形式と歴史
- ・最近の標準的な設計方法
- ・スキージャンプの併用
- ・不均等な流入水脈の減勢
- ・平面湾曲した減勢工

第3章 堤趾導流壁を有するダムにおける減勢

- ・堤趾導流壁からの流れの減勢
- ・流入水脈と幅の異なる水叩きでの減勢
- ・流入部及び導流部での減勢

第4章 自由落下式減勢工の設計

- ・噴流拡散現象
- ・アーチダムの減勢工
- ・重力式アーチダムの減勢工
- ・重力式コンクリートダムの自由落下式減勢工
- ・スキージャンプ式減勢工

第5章 その他の減勢工

- ・ダム再生事業における増設放流設備の減勢工
- ・水中放流方式の放流設備における減勢

第1章 減勢に関わる基本的事項

1-1 ダムの洪水吐きと減勢に関する技術の変遷

現在のダムの設計体系は河川法に基づく技術基準である河川管理施設等構造令を基盤として構築されています。

一方、河川管理施設等構造令のダム洪水吐きに関わる各規定は、ダム設計基準や水理公式集などに集約されてきたような技術の流れに倣うことによってここまで到達してきた概念を包含したものとなっています。

本章ではダム洪水吐きの減勢に関わる基本的事項について記述しますが、この中で、これまでの減勢に関わる技術的研究や技術基準の変遷についてもできるだけ触れていきます。これは、ダムからの放流水の減勢を考えるにあたって、河川管理施設等構造令だけではなく、そこに至る技術の動向を理解しておくことが必要と考えるからです。

ダムの洪水吐き、すなわちダムの水理設計に係わる記述がある基準や関連図書には表1に示すものがあります。なお、関連図書は私自身がこれまで活用してきたものを主として記載したもので、このほかにも多くの有益な図書があることは言うまでもありません。なお、重要な研究論文の多くはこれらの図書の中で使いやすい形で引用されていますので、本講座の中で直接取り上げることはしていません。

さて、表1のように関連図書を並べてみると、日本における水理設計技術の流れはダム設計基準と河川管理施設等構造令を区切りとすることができるように思います。

具体的には、昭和32年のダム設計基準がとりまとめられるまでの期間（第1期）、昭和46年の改訂ダム設計基準が検討されていた期間（第2期）、そして昭和51年の河川管理施設等構造令の施行以降（第3期）の期間と

表 1 ダムの水理設計に係わる基準及び関連図書

施行・発行年	河川管理施設等構造令	河川砂防技術基準(案)	ダム設計基準	関連図書(水理設計を含むもの)
昭和 8 年/1933				水理学：物部長徳
昭和 11 年/1936				日本大堰堤台帳：大堰堤国際委員会日本国内委員会
昭和 13 年/1938				LOW DAMS：米国内務省開拓局
昭和 23 年/1948				水理公式集：土木学会
昭和 25 年/1950				TREATISE ON DAMS：米国内務省開拓局
昭和 29 年/1954				日本発電用高堰堤要覧：発電水力協会
昭和 32 年/1957		調査・計画・設計施工・管理編	ダム設計基準：国際大ダム会議日本国内委員会	水理公式集(昭和 32 年改訂版)：土木学会
昭和 33 年/1958				Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators: A. J. Peterka, 米国内務省開拓局
昭和 34 年/1959				OPEN-CHANNEL HYDRAULICS: VEN TE CHOW 日本語訳「開水路の水理学」：石原藤次郎(1962)
昭和 35 年/1960				DESIGN OF SMALL DAMS：米国内務省開拓局 日本語訳「ダムの計画と設計」日本大ダム会議(1966)
昭和 38 年/1963				水理公式集(増補改訂版)：土木学会
昭和 43 年/1968	ダム構造基準及び同細目(建設省河川局長通達)			
昭和 44 年/1969				多目的ダムの建設(研修テキスト)：建設省建設大学校
昭和 46 年/1971			改訂ダム設計基準：日本大ダム会議	水理公式集：土木学会
昭和 51 年/1976	河川管理施設等構造令及び同施行規則			
昭和 52 年/1977	解説・河川管理施設等構造令：日本河川協会	計画編		多目的ダムの建設：全国建設研修センター
昭和 53 年/1978			第 2 次改訂ダム設計基準：日本大ダム会議	
昭和 60 年/1985		設計編		水理公式集：土木学会
昭和 62 年/1987				多目的ダムの建設：全国建設研修センター
平成 4 年/1992	一部改正			
平成 9 年/1997	一部改正	(調査編) 計画編 設計編		
平成 11 年/1999	改定・解説・河川管理施設等構造令：日本河川協会			水理公式集：土木学会
平成 17 年/2005		(計画編)		多目的ダムの建設：ダム技術センター
平成 26 年/2014		維持管理編 [ダム編]		
平成 30 年/2018				水理公式集：土木学会

なります。各期間の中では、それぞれの文献が相互に影響を与えていますが、それぞれの技術的な立場からの集大成が行われています。

これらの文献の詳細については、必要に応じて各個所で説明していきますが、大略以下のようにまとめられると思います。

【第1期】

日本では、国内外のダム建設の実績や水理学の知識を踏まえて、昭和32年にダム設計基準が策定されました。

ダム水理研究の端緒となる水理現象の一つが「跳水」です。物部博士は、最初の水理公式集ともいえる著書「水理学」の中で、『水流が急に水深を増大して射流より常流に変じる現象を跳水（Hydraulic jump）と称し、常流水深 H_2 / 射流水深 H_1 が大なる場合は急斜面をなして一気に昇り斜面部には大なる渦動を生ずるも、 H_2/H_1 が大ならざる場合は跳水とともに定常波（Standing wave）を生じ、渦動は最初の波の前面に僅かに生ずる程度である。』と記述し、跳水や波状跳水（解説1参照）を取り上げています。

その他の文献でも、跳水を減勢の基本原則として低ダムの洪水吐きや運河で用いられている流水の減勢方法について事例を主体に記述されています。なお、減勢を行う装置のことは減勢工（Energy Dissipators）と呼称されています。

また、日本大堰堤台帳（昭和11年）及び日本発電用高堰堤要覧（昭和29年）には各ダムの図面が添付されており、日本における初期の減勢工の形状を把握することが出来ます。

なお、ダム設計基準では放射型バケットとしてスキージャンプ式の減勢についても考え方を示しています。

【第2期】

日本では、経験の積み重ねや技術の進展を踏まえて内容がさらに充実した「改訂ダム設計基準」が昭和46年に策定されましたが、これはその後の洪水吐きの設計を含むダム技術の基盤となっています。この時期には、海外では Ven Te Chow の「OPEN-CHANNEL HYDRAULICS」と A. J. Peterka の「Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators」が発刊され、我が国のダム設計基準や水理公式集に多くの影響を与えています。前者は水理学の教科書ですが、ダムの水理設計という面についても着目してまとめられています。後者は、減勢工の標準的な設計手法について、細部構造も含めてとりまとめたものです。なお、米国内務省開拓局の「DESIGN OF SMALL DAMS」も同時期に発刊され、日本語訳もあることからよく活用されていますが、減勢

【解説1】跳水現象

流水の持つエネルギーを効率よく減殺できる水理現象の代表的なものが「跳水」です。跳水現象については水理公式集を始めとして多くの図書で解説されていますが、減勢に係る基本的な事項なのでここで簡単にまとめておきたいと思います。

（水平水路の跳水）

跳水前後の水深をそれぞれ h_1 、 h_2 とすると運動量保存則より次式が得られます。

$$h_2/h_1 = (\sqrt{1+8F_1^2}-1)/2$$

$$\Delta E = (h_2 - h_1)^3 / 4h_1h_2$$

ここに、 F_1 ：跳水前の射流の Froude 数

ΔE ：跳水によって失われるエネルギー水頭

この式により跳水前の水理条件から必要下流水深 h_2 (h_1 の共役水深) が求められますが、 F_1 に応じて上下流の水位差が大きくなるのがわかります。

また、跳水の形態は F_1 によって異なり以下ようになります。（用語は水理公式集による）

① $F_1 = 1.0 \sim 1.7$ ：波状跳水

限界水深付近の現象であり、波が生じている状況で渦は見られない。

② $F_1 = 1.7 \sim 2.5$ ：弱跳水

表面付近に小規模な渦が生じていますが、水面は比較的安定しており、エネルギー損失は小さい。

③ $F_1 = 2.5 \sim 4.5$ ：動揺跳水

堤高 30 m 以下の低いダムでみられる現象。底面付近で生じた大規模な乱れが間欠的に表面に現れ、大きな波が下流に伝播しています。この波は下流河道に悪影響を与えるため、シュートブロック、エンドシル等の補助構造物などによる改善が必要。

④ $F_1 = 4.5 \sim 9.0$ ：定常跳水

安定した渦が生じており、水面は安定している。エネルギー損失は Froude 数に応じて 50～70% であり、減勢効果は高い。

⑤ $F_1 > 9.0$ ：強跳水

堤高 100 m 以上の高いダムでみられる現象。強い渦が生じておりエネルギー損失は 85% 程度と高いが、変動が下流へ伝播する。

工に係る部分は後者とほぼ同じ内容です。

これらの図書で標準とされている減勢工は、水叩き（Apron）にシュートブロック（Chute blocks）と歯形シル（Dentated sill）を用いることで、広範囲の下流水深で跳水を維持できるようになっています。さらに流入

流速が小さい場合には、バッフルピア (Baffle piers) を用いて水叩きの長さを短くできる標準的減勢工を示しています。また、低ダムの水叩きにみられる動揺跳水 (解説1参照) に対してもシュートブロックとエンドシル (End sill) を用いることで対応しています。

その他、水中バケット (Submerged Buckets) や順傾斜水叩き (Sloping Apron) を用いた減勢工の設計手法も示されていますが、これらの標準的な減勢工は水理公式集でも引用されています。

一方、この時期には「ダム構造基準及び同細目 (河川局長通達)」が策定されていますが、これは「改訂ダム設計基準」と相互補完する内容となっています。前者は用語の定義を示すなど基準としての立場を明確にしているのに対して、後者は具体的な設計手法にも触れて設計マニュアル的な性格を帯びています。

第2期以降に日本で標準とされた減勢工については、「1-6 減勢工の形式」で説明しています。

【第3期】

河川管理施設等構造令の制定により河川法に基づく技術基準が制度化され、その考え方を踏まえて各種基準が改訂されました。

なお、土木学会の水理公式集の改訂は水理学全体の進展を踏まえて適宜行われています。ダム水理に関しては堆砂対策やダム運用に係わる項目が増えています。洪水吐きや減勢工に関する内容は、構成の変更及び水理設計の動向を踏まえた項目の加除があるものの、全体としては昭和32年改訂版以降大きな変更はありません。

1-2 減勢の考え方の変遷

ダムにおける減勢の現在の考え方は河川管理施設等構造令及び河川砂防技術基準 (平成9年) に集約されていますが、その考え方は歴史的経緯の中で育まれてきたものであり、「ダム設計基準 (日本大ダム会議)」や「水理公式集 (土木学会)」の内容の変遷と一体不可分のものです。

時代により視点が異なることはあるものの、基本的となる部分については大きな違いはありません。具体的内容については第2章以降の事例の中で記述しますが、概要は以下の通りです。なお、ここで記載している期間は前節と同じ区分としています。

【第1期】

戦前から昭和20年代までの間に発電用のダムが数多く造られてきましたが、主として越流水深や堤高が大きい重力式コンクリートダムであったことから、減勢には自然の下流水位により水平水叩き上で生じる跳水を

利用していました。

水叩き部の長さは、跳水の表面渦の長さを基準として決めています。下流河床の状態、水叩き末端のエンドシルの形状によってある程度短縮することが試みられています。水理模型実験も活用されていたと思われます。

図1はその一例で、只見川に昭和28年に竣工した片門ダムの減勢工の断面図です。下流水位が確保できていることから、水叩き末端部に跳水を安定させるための菌形シルが設けられています。この時期に建設された発電用ダムではこの形式に類似した減勢工が数多く用いられています。写真3は片門ダムの上流にある上田ダム (昭和29年竣工) の減勢工末端と下流河道の状況ですが水叩きが水没しており、下流水位が高いことが伺えます。この減勢工には菌形シルが2列設けられています。

その後、大規模なダムの建設が進められるようになり、落差や越流水深が増加したため自然の下流水位では必要水深が確保できず跳水の発生が難しくなったことから、現在では、副ダム等により下流水位を高める方式が多用されています。

また、鉛直渦の形成を助けるために「水中」にバケッ

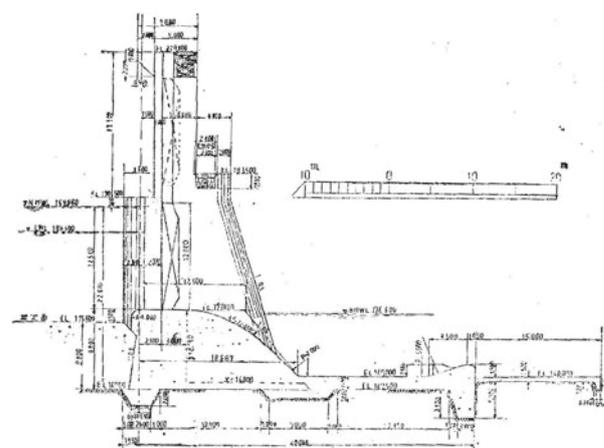


図1 片門ダム (東北電力) 減勢工



写真3 上田ダム (東北電力) 下流河道

トを設ける水中バケット方式も多くのダムに採用されています。この形式は、水叩きの長さが短くできることから工費を節減できると考えられています。

「ダム設計基準（昭和32年）」では、減勢工については水平水叩き式を基本として、下流水位が不足する場合に用いられる段上り（水叩き部を掘り下げる）や副ダム（下流水位を高くする）の利用、下流水位が高すぎる場合に用いられる水中バケットや水位変化に追従できる傾斜水叩きに触れています。また、フリップバケット（Flip Buckets）により水脈を空中に跳ばすスキージャンプ式にも言及しています。

本格的な水中バケットは奥泉ダム（中部電力、昭和30年）で、スキージャンプ式はアーチ式ダムである上椎葉ダム（九州電力、昭和30年、写真4）で採用されており、これらの経験を踏まえてダム設計基準に記述されたものと考えますが、標準的な設計方法については第2期を待つこととなります。

【第2期】

「改訂・ダム設計基準（昭和46年）」では、減勢工の形式として、跳水式、スキージャンプ式および自由落下式に大別し、それぞれの考え方について解説しています。また、これらの設計計算法については水理公式集（昭和46年版）に記述されています。詳細については各章で記述しますが、概要を以下に示します。

跳水式減勢工では、先の「ダム設計基準」で言及された、下流水位が不足する場合に用いられる段上りや副ダム、下流水位が高すぎる場合に用いられる水中バケットや水位変化に追従できる順傾斜水叩きの他、逆傾斜水叩きやシュートブロック、バツフルピア、エンドシルを用いた減勢方法に触れています。逆傾斜水叩きは井川ダム（中部電力、昭和32年）で採用されたものです。



写真4 上椎葉ダム（九州電力）

スキージャンプ式減勢工は、初期のアーチ式ダムで、放流水をダムの基礎から離れて落下させる目的で採用されました。先に示した上椎葉ダムや一ツ瀬ダム（九州電力、昭和37年）が代表的な例です。これらの例では、堤体両岸洪水吐きからの放流水を空中で衝突させることによるエネルギーの減殺を期待しています。なお、一ツ瀬ダムでは中央部にも使用頻度の小さい洪水吐きを配置しており、スキージャンプ式と自由落下式の併用方式となっています。

また、減勢対象流量を2段階に分け、100年確率流量程度までは跳水により減勢し、これを越える洪水流量は、上流面が傾斜しているシルまたは台形副ダムによりスキージャンプ式として水流を射出させ下流河道に落下させる、跳水式とスキージャンプ式の併用方式も多く採用されています。

自由落下式減勢工は主としてアーチ式ダムのように堤体下流面を導流部として使用出来ない場合に採用されています。

初期の高いアーチダムでは、堤体中央部からの越流水の落下地点がダム本体に近接すること及び落下水脈による河床の洗掘機構が不明確であることから採用されませんでした。その後、水叩き内での水理現象の解明や減勢方式をめぐる水理模型実験技術の進歩により、多くのアーチダムで採用されるようになりました。

なお、重力式や重力アーチ式コンクリートダムでも、放流管形式の常用洪水吐きのゲート室を堤体下流面に設けた場合、越流形式の非常用洪水吐きについては、その下流にシュートを設けて自由落下式とすることもあります。この場合は、跳水式と自由落下式の併用方式ということになります。

写真5に示す蕨原ダムでは、常用洪水吐きのゲート室



写真5 蕨原ダム（関東地整）のシュート

の屋根を洪水吐きシュートとしています。

スキージャンプ式および自由落下式の設計手法は、「第4章 自由落下式減勢工」で取り扱います。

【第3期】

この時期、越流幅の長い自由越流頂を天端に設置した全面越流形式のダムが増加しています。この場合、正面の主減勢工に流入する以前に、堤趾導流部や側水路において、ある程度の減勢効果を見込めることとなりますが、この場合の主減勢工の設計方法は、これまでとはまったく異なってきます。これらの事例とその考え方については、「第3章 堤趾導流壁を有するダムにおける減勢」で取り扱います。

近年、既設ダムの有効活用の観点から貯水池の運用の柔軟性を図るため、洪水吐きを増設する事例が増えてきています。このような洪水吐きの減勢工の設計では多くの制約が生じることとなるため多大の配慮が必要となります。これらの事例については「第5章 その他の減勢工」で取り扱います。

1-3 河川管理施設等構造令

それでは、河川法に基づく技術基準である河川管理施設等構造令（以下、「構造令」という）を見てみましょう。

構造令において、洪水吐き及び減勢工は次のように規定されています。

(洪水吐き)

第7条 ダムには、洪水吐きを設けるものとする。
2 洪水吐き（減勢工を除く。）は、ダム設計洪水流量以下の流水を安全に流下させることができる構造とするものとする。
3 洪水吐きは、ダムの堤体及び基礎地盤並びに貯水池に支障を及ぼさない構造とするものとする。

(減勢工)

第9条 ダムの堤体又は下流の河床、河岸若しくは河川管理施設を保護するため、洪水吐きを流下する流水の水勢を緩和する必要がある場合においては、洪水吐きに適当な減勢工を設けるものとする。

なお、具体的な事項が「解説・河川管理施設等構造令（日本河川協会）」で解説されていますが、これらの内容は、後述する河川砂防技術基準に記述されていますので、ここでは多くは触れないことにします。

ここで着目すべきポイントは、「洪水吐きの機能」と「減勢工の機能」ということとなります。

(洪水吐きの機能)

第7条は、ダムに流入する洪水を適切に処理するため

に洪水吐き（Spillways）を設けるという規定です。洪水吐きは、流入部（Control Structure）、導流部（Discharge Channel, Discharge Carrier, Chute）及び減勢工（Energy Dissipator）に区分されますが、これらは一体となってその機能を発揮するものです。

一方、第7条第2項の「ダム設計洪水流量以下の流水を安全に流下させることができる構造とする」との規定では減勢工を除くとされており、その構造・機能については第7条第3項及び第9条の中で規定されています。このような規定となっているのは、流入部及び導流部と減勢工の果たす役割が以下のように異なるからです。

- ①流入部はダム設計洪水流量以下の洪水を適切に流下させて危険な水位上昇を避けてダム及び貯水池の安全を確保するための施設
- ②導流部は流入部からの流水を水路内に収めて適切に下流河道へ流下させて堤体と基礎の安全を確保する施設
- ③減勢工は堤体と基礎の安全の確保に加えて下流の河道や河川管理施設を流水から保護するための施設

すなわち、減勢工には、導流部と同様に流水を通過させて堤体と基礎の安全を確保することと、下流への影響を緩和するために減勢することの2つの目的があるということです。

(減勢工の機能)

第9条は、河川の流水の過剰なエネルギーを減殺する必要があるときには、洪水吐きに適当な減勢工を設けるという規定です。

条文には「適当な減勢工」とありますが、そこで求められる機能としては、解説では「洪水吐きの対象放流量の状態がダムができる以前の河状における流水の水勢の状況にすることが一応の目安」とされています。

なお、河川の状況によっては、減勢工において流水の水勢をある程度緩和した後、一定区間の河道を流水が流下して、従前の河状における流水の水勢の状態に復することも想定されます。この場合、減勢工の範囲は従前の河状における流水の水勢の状態に復するまでの区間となりますが、具体的には1-4で説明します。

また、減勢工は「ダムの堤体」または「下流の河床、河岸若しくは河川管理施設」を保護するために設けられるとされていますが、スキージャンプ式のようにダムの堤体から離れた位置に放流される場合は、前者は直接的な目的とはならないということになります。

1-4 河川砂防技術基準（案）設計編：平成9年

河川砂防技術基準（案）設計編（平成9年）（以下、「河砂基準」という）では、洪水吐き及び減勢工の設計

について次のように規定されています。

なお、河川砂防技術基準（案）は調査・計画・設計施工・管理編が昭和32年に策定されていますが、その後、構造令施行後の昭和52年に計画編が、昭和60年に設計編が改訂されています。改訂時期が異なることや設計編が抜本的に見直されていることから、洪水吐きや減勢工に関する規定は一部重複が見られますが、ここに示す平成9年版では整理されています。さらに、平成16年に計画編が抜本的に見直され、計画編には洪水吐きや減勢工の設計に係わる内容はなくなっています。

さて、河砂基準におけるポイントは、「洪水吐き及び減勢工の設計対象流量」です。なお、解説では標準的な減勢工の設計法が記述されていますが、これらについては1-6で触れることとします。

（第2章7.1.3 洪水吐きの設計）

洪水吐きは、設計洪水位において放流することとなる流量以下の流量をダムの堤体および基礎地盤の安全を損なうことなく流下させる構造となるよう設計するものとする。

また、流入部、導流部については、サーチャージ水位における放流可能流量もしくは年超過確率1/100の規模の洪水流量、もしくはダム地点の基本高水のピーク流量のうちいずれか大なる流量以下の流量を安定した流況で安全に流下させる構造となるよう設計するものとし、減勢工については、設計洪水位において放流することとなる流量以下の流量に対し、河川の従前の機能が維持されるよう設計するものとする。

（第2章7.4 減勢工の設計）

減勢工の形式、規模および形状は、ダムの堤体および基礎地盤の安全性、放流される流水の性状ならびに下流部の状況等を考慮して決定するものとする。また、その特性がすでに明らかにされている場合のほかは、実験に基づき定めるものとする。

（洪水吐きの設計対象流量）

洪水吐きの構造は構造令の規定により、ダム設計洪水流量時に設計洪水位において放流することとなる流量以下のすべての流量に対して、ダムの堤体ならびに基礎地盤の安全を損なうことなく流下させることができるものとしています。

一方、河砂基準では、『流入部及び導流部については、サーチャージ水位における放流可能流量もしくは年超過確率1/100の規模の洪水流量、もしくは基本高水のピーク流量のうち、いずれか大なる流量以下の流量（以下、「サーチャージ水位における放流可能流量等々」という）

をすべて安定した流況で安全に流下させること』を追加の設計条件としています。

すなわち、「サーチャージ水位における放流可能流量等々」の放流に対しては、水理設計の判断基準となる流況として、安定した流況（流れの水理量の時間的変動の少ない流況）とすることを求めています。

河砂基準のこの規定は構造令の解説でも記述されていますが、何故、ダム設計洪水流量以外に「サーチャージ水位における放流可能流量等々」に着目しているのでしょうか。

それを確認してもらうために、構造令の施行以前から実務的にダムの技術基準として用いられてきた「ダム設計基準」を吟味してみたいと思います。なお、同時期に建設省の河川砂防技術基準（案）（昭和32年）の調査・計画・設計施工・管理編が策定されており、その計画編の中の第6章ダム計画で余水吐（洪水吐き）が取り扱われていますが、その内容は「ダム設計基準」と同じです。

（ダム設計基準における設計洪水流量）

「ダム設計基準」は、国際大ダム会議日本国内委員会が昭和32年に制定したものです。

この中で「第3条 計画こう水流量算定基準」として『余水吐の設計に用いる計画こう水流量は、コンクリートダムにおいては少なくとも100年に1回、ロックフィルダムおよびアースダムにおいては、少なくとも200年に1回起こると考えられるこう水流量を基準として定めるものとする。ただし、観測または算出された既往最大こう水流量より少なくってはならない』と規定しています。この考え方は、用語の変化はありますが、基本的には現在まで踏襲されているものです。

また、当時の多くの先例を踏まえて規定された「第17条 跳水減勢の場合の水平水たたきの長さ」の解説で『水たたきの設計に用いられる流量は、その頻度、洗掘による危険度、などを考慮して、計画こう水流量の付近で決める。』とされています。

「ダム設計基準」でも「第6条 異常こう水流量」の規定の中で『非常時におけるダムの安全のため、計画こう水流量より20%程度大きな異常洪水を考慮するものとする。』とされており、計画こう水流量を上回る流量に対しても配慮することとなっていますが、基本的にはダムの非越流部の高さの設定に着目したものとなっています。

その後、「ダム設計基準」は、「改訂 ダム設計基準」として、社団法人日本大ダム会議が昭和46年に改訂していますが、用語としての「計画こう水流量」が「設計洪水流量」に変わっています。なお、この「設計洪水流

量」という用語は現在でも用いられていますが、構造令の「ダム設計洪水流量」とは異なることに注意が必要です。

先の問いの回答ですが、構造令によりダム設計の最大基本量が「設計洪水流量」（コンクリートダムでは100年につき1回起こると推定される洪水量）から「ダム設計洪水流量」（コンクリートダムではダム地点で発生する恐れがあると認められる洪水量）に変わったことが根本にあります。その結果、「設計洪水流量」に対応する水位である「設計洪水水位（旧）」がなくなり、サーチャージ水位の概念に統合されることとなっています。

すなわち、「設計洪水流量」は洪水吐き設計の基本量の一つであり、従来から流況の安定性に配慮した洪水処理という観点から特に留意すべき流量であると考えられてきました。このため、河砂基準における同様の概念である「サーチャージ水位における放流可能流量等々」に対しても「ダム設計洪水流量」より安定性レベルの高い流況が求められているのです。

議論しているテーマからは外れますが、河砂基準の「サーチャージ水位における放流可能流量等々」について少し触れておきます。

「サーチャージ水位における放流可能流量」とは、『ダム設計洪水流量時に設計洪水水位において放流することとなる流量の放流を行っているときのゲートなどの状態でサーチャージ水位時に放流される流量のこと』とされていますが、これはサーチャージ水位においてゲート操作を終了する（原則としてゲート全開状態）ことが想定されていることを意味しています。

また、『ダム地点の基本高水のピーク流量が決められていない場合、もしくはこの流量が年超過確率1/100の規模の洪水流量以下の場合、当該ダム地点のコンクリートダムとしてのダム設計洪水流量の80%の流量を基本高水のピーク流量として用いることができる』ものとしていますが、これは、利水専用ダムではこの流量をサーチャージ水位決定のための対象流量としていることによるものです。

（減勢工の設計対象流量）

河砂基準の解説では、『洪水吐きの減勢工は、水叩き下流端までの減勢池とその下流の護岸・護床などを施した河道区間に区分され、設計洪水水位において放流することとなる流量以下の流量を放流する際の流水の状態が、減勢工内においてダム築造前に復するよう設計することを標準とする』とされています。

一方、構造令の解説では、『減勢工において流水の水勢をある程度緩和した後、下流の河岸の護岸等の施設を新たに設けた一定区間の河道を流水が流下して、従前の

河状における流水の水勢の状態に復することも考えられます。なお、この場合、減勢工の範囲は従前の河状における流水の水勢の状態に復するまでの区間となります。』とされています。

このように、構造令では、「減勢工」という用語が、構造物としての「減勢工」と機能としての「減勢工」の両者に用いられています。河砂基準では、混乱を避けるため、前者を「減勢池」とし、後者を「減勢工」と呼称しています。

水理設計分野では〇〇式減勢工などという形式名称が用いられていますが、このような慣用的な用語と河砂基準の用語は必ずしも整合しているわけではありませんが、減勢工の機能の区分としては、河砂基準の定義に基づいて記述することとします。用語の曖昧さは依然として残りますが、やむを得ないことと考えました。

なお、減勢工から減勢池を除いた残りの部分について

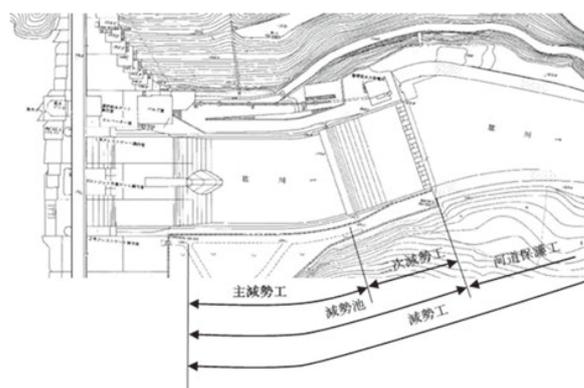


図2 野村ダム減勢工と下流河道



写真6 野村ダム減勢工と下流河道

は、「(下流河道の)保護工」という用語を用いることとします。用語を野村ダムに当てはめてみますと図2に示すようになります。下流の状況は写真6のとおりです。

さて、減勢池は、その形式にもよりますが、一般に比較的広い流量範囲において減勢効果を発揮しており、減勢池内において速やかに減勢できる流量を減勢池の対象流量としても、この対象流量を超える流量に対してかなりの程度の減勢効果を期待することができます。このため、減勢池の対象流量は、通常、設計洪水位において放流することとなる流量より小さい流量で設定しており、対象流量を超える流量に対しては、求められる減勢効果の一部を河道区間に分担させることになります。

この場合、減勢池の対象流量は、対象流量を超える放流における減勢工内の流れの状況、下流河道区間で必要となる護岸、護床等の規模・形式等の諸事項を勘案して決定する必要があります。これら諸事項の状況は、対象流量との流量比はもちろん、減勢形式、洪水吐き配置等により異なりますが、減勢池対象流量の一応の目安として計画最大放流量、年超過確率1/100の規模の洪水流量、ダム地点の計画高水のピーク流量等が挙げられます。これは、流入部及び導流部において安定した流況を求める流量に対応しています。

この考え方に基づいて水理模型実験での流況を踏まえて減勢工の諸元を設定し、ダム設計洪水流量以下の状況を踏まえて、下流河道の保護工も念頭に置いた「減勢工」を決定することになります。

日本では、副ダムを有する跳水式減勢工が最も一般的であり、水理特性の解明および水理設計条件の設定方法についても跳水式減勢工に対して特に検討が進められてきました。その結果、跳水式減勢工については、かなり具体的な設計条件を机上検討で与えることができますので、この結果を用いて水理模型実験の原案を策定することになります。

1-5 「ダムの堤体の保護」と「下流の河床、河岸若しくは河川管理施設の保護」

減勢工に求められている最も重要な条件は「有害な放流エネルギーが残存しないこと」です。この条件は、減勢池及び下流河道の保護工を含む減勢工全体に対して設定される条件ですが、「有害」とは流況により判断されるものではなく、下流の河道や護岸工、護床工の耐久性との相対的な関係で評価されるものです。すなわち、減勢工の水理設計では、当該ダム及び河道の特性を把握した上で、減勢池を含む各種工法の合理的な役割分担を図ることが重要となります。

そこで、まず「ダムの堤体の保護」の機能に着目し、「下流の河床、河岸若しくは河川管理施設の保護」との関係性を吟味したいと思います。

さて、ダムからの放流水に対して適切な対応をしないと、堤体直下流の基礎岩盤が洗掘され、堤体の安定性が脅かされることとなります(図3(a))。「堤体の保護」とは、この岩盤洗掘を防止するための導流部末端の処理といえます。

この場合には、減勢というよりは流水を安全に通過させるということが主眼となります。ここでは、堤体の保護方法を基本として記述しますが、下流の状況を加味しますと、スキージャンプによる方法を除き、単に通過させるだけではなく直下に減勢池を設けて減勢機能を持たせる方が結果として合理的となります。

これまで言及してきたように、減勢方式にはスキージャンプ式、跳水式および自由落下式があり、堤体の安定性との関係に違いがありますので、その分類に従って記述していきます。

①フリップバケットによる方法(図3(b))

(スキージャンプ式減勢工)

高落差の導流部(シュート)末端にフリップバケットを設けて、流下してきた流れの流速エネルギーを利用して、スキージャンプ競技のジャンパーのように堤体から離れたところに着地させる方法です。

当然のことながら、フリップバケットで放出され、着床するまでの区間は空中にあり、減勢はほとんど生じません。流量が小さく水脈が薄ければ、空気抵抗による減勢効果はありますが、ダム設計洪水流量や計画最大放流量といった大流量時には、水脈が厚いため、スキージャンプによる減勢はほとんど期待できません。減勢は期待できませんが、比較的小規模の構造物によってダム堤体を保護するという役割を担うことができます。

この方式の場合、「下流の河床、河岸若しくは河川管理施設の保護」の役割は、水脈の着地点に自然に形成される減勢池が主として担うこととなります。詳細は後述しますが、フリップバケット、飛翔する水脈、自然の減勢池を含めたシステムをスキージャンプ式減勢工と呼称しています。

②バケットと水叩きにより流向を調整する方法(図3(c))

(跳水式減勢工に繋がる方法)

堤体直下流の洗掘は、主に堤体下流端で角度を持って基礎岩盤に衝突する水脈により生じます。このため、堤趾部に設けられるバケットとそれに接続する水叩きにより堤体を流下してくる流水の向きを河床に平行に変えることにより、ダム堤体の安定性を脅かす岩盤の洗掘の軽

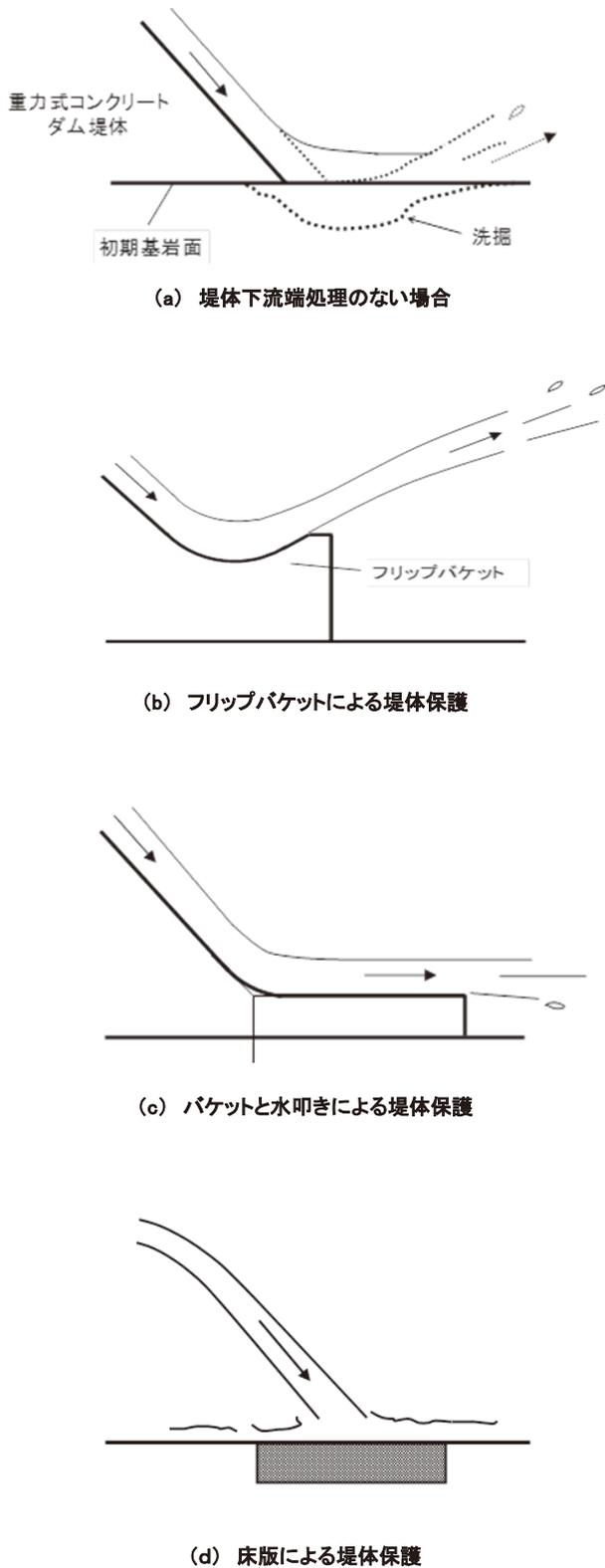


図3 堤体保護の概念

減しようとするものです。この場合にも、流向を変化させるのみであり減勢はほとんど生じません。

バケットには流向変化に伴う動水圧が作用しますが、

その影響は水脈厚程度の長さの水平水叩きを設置すれば、その下流では十分に軽減されたものとなります。

下流水位が低く跳水是生じないものとする、減勢しない流れがそのまま河床上を通過することになります。

岩盤の洗掘力はスキージャンプの着床部と比較してかなり小さいですが洗掘は生じます。特に、コンクリートの水平面から岩盤面へと移行する水叩き末端部での洗掘力は大きく、基本的には段差が形成されやすく、水叩き床版の浮き上がりの原因となり、床版が流失する恐れが生じ、結果として堤体保護工としての機能が失われることとなります。

このため、水叩きの延長は流水により堤体の安定性を脅かす河床洗掘等の可能性がなくなるまでの範囲とする必要があります。これは、コンクリート構造物である導流部を下流河道に沿って延長することとも捉えられます。

以上は、河床部についての記述ですが、河岸部についても同様です。湾曲部があれば、水衝部が生じ、大きな洗掘に至ることになりますので、必要に応じて対策が必要となります。

この方式において、「下流の河床、河岸若しくは河川管理施設の保護」をさらに延長した水叩きに役割を託すとすると、高速流をそのまま河床や河岸を保護することになるため、非常に広範囲にわたる構造物が必要となります。これを避けるためには、水叩き上流端で跳水させ減勢させる跳水式減勢工を設けるのが最も効果的で構造物の規模を小さくできる方法です。

いわゆる減勢池は全体をコンクリート構造物で覆います。つまり、上流側は堤体やシュートにより、側面は導流壁で、下流は堰上げ構造物で覆われることとなります。また、底面はコンクリートの水叩きにより保護されます。

詳細は後述しますが、このように堤体の保護の機能は跳水式減勢工に包含されることとなりますが、バケットと水平水叩きによる流向の変化は、的確な跳水の発生に大きく貢献しています。

なお、減勢池内の水面変動により導流壁からの越水が生じることがありますが、容易に対応可能で堤体保護の機能に齟齬をきたすことはほとんどないと言えます。

③頑丈な水叩きによる方法 (図3 (d))

(自由落下式減勢工に繋がる方法)

自由落下してくる流水に対抗して、頑丈な水叩きで岩盤を直接的に保護する方法です。

アーチダムでは、一般的に角度を持って基礎岩盤に衝突する水脈が生じますが、これに主として床版の構造で対応しようとするものです。落差が大きい場合にはその

衝撃荷重はきわめて大きなものとなりかつ変動を有しています。この衝突時の動水圧やそれにより誘起される可能性のある背面からの揚圧力を軽減し、床版や側壁の安全性を確保するためにするためには、落下地点に大きな水深を確保することにより突入水の池内での減勢を図ることが必要になります。

詳細は後述しますが、ここで必要とされる減勢機能は、「下流の河床、河岸若しくは河川管理施設の保護」の機能を兼ね備えたものとなるのが一般的です。この方式は自由落下式減勢工と称されますが、この減勢池も全体をコンクリート構造物で覆います。つまり、上流側はアーチ式ダムの堤体により、側面は導流壁で、下流は堰上げ構造物で覆われることになります。また、底面はコンクリートの水叩きにより保護されますが落下点近傍の床版は特に厚くされます。

1-6 減勢工の形式

洪水吐きの減勢工の形式の選定、規模および形状の設計は、ダムの堤体および基礎地盤の安全性の確保とともに下流に残存する水勢の程度、水流の性状および下流部の状況等を考慮して行うことが必要です。

減勢工の形式については、これまでも触れてきましたが、ここでは、主として標準的な減勢工について河砂基準の解説を踏まえて概説します。ダムは多様な背景・環境の中に置かれていますので、減勢工についても標準的とは言えないものが多々あります。これらについては、第2章以降の記述の中で具体的に説明していきたいと思えます。

さて、河砂基準の解説では表2に示すように、洪水吐きの減勢工の形式として、跳水式、スキージャンプ式および自由落下式を取り上げています。ここで言う「減勢工」とは減勢のための全体システムを意味しており、水叩きや側壁などで構成される「減勢池」のほか付属する構造物が含まれています。

表2 洪水吐き減勢工の形式

減 勢 工	
跳 水 式	水平水叩き方式
	順傾斜水叩き方式
	逆傾斜水叩き方式
	水中バケット方式
	強制跳水方式
スキージャンプ式	
自由落下式	

これらの減勢工形式は「改訂ダム設計基準」でも取り上げられていますが、その技術的内容は本質的には変わりありません。

ただし、「改訂ダム設計基準」では、跳水式減勢工について「ダム設計基準」の考え方が踏襲されており、『跳水式減勢工の減勢能力は、設計流量が限度であるから、減勢工の形状によっては、流量が限界を超えた場合に下流河川に対してはなほだしい被害を与えることがある。したがって、跳水式減勢工の設計流量は、その頻度および流量が限界を越えた場合の危険度を考慮して、設計洪水流量時の放流量に近い値をとるものとする。』と解説されています。

(跳水式減勢工)

跳水式減勢工は、水叩き上で安定した跳水を形成するように設計します。

跳水式減勢工の形式は跳水の共役水深と下流河川の水位との関係によって決まるものですが、両者が放流量によらず常に一致することはほとんどありません。

下流水位が不足する場合は水平水叩き面を低下させたり、副ダムにより下流水位を高めたりする必要があります。なお、副ダムを設ける場合は、副ダムによる下流河道への落差に留意し、必要があれば副ダム下流に二次減勢工を設置することを考える必要があります。副ダム及び二次減勢工を有する跳水式減勢工の典型的な例として、写真7及び図4に蓮ダム（中部地整）の減勢工を示します。

一方、下流水位が高すぎる場合は、水平水叩き面の底上げ、バケット形水叩きまたは、順傾斜水叩きの採用が考えられます。

また、水叩き長の短縮や必要共役水深の低下を図るために、水叩きを逆傾斜とする減勢方式やシュートブロック、バツフルピア、エンドシルなどを用いた強制跳水による減勢方法を採用することもあります。

さて、安定した跳水を形成するためには、減勢工に流

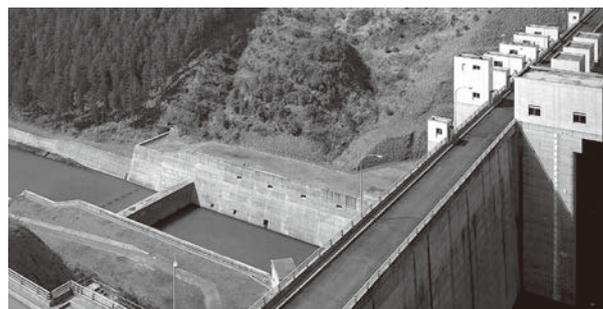


写真7 蓮ダム（中部地整）

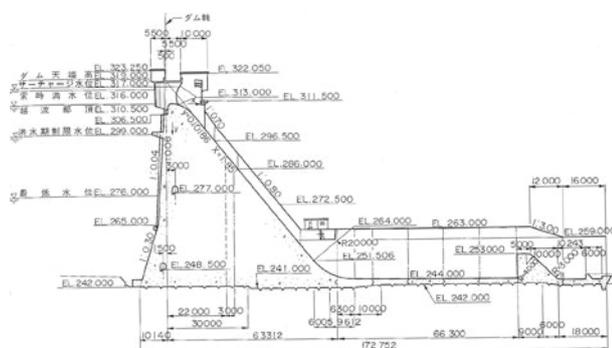


図4 蓮ダム減勢工

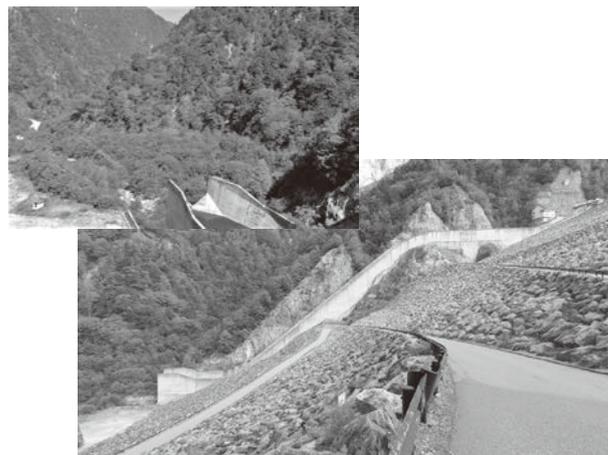


写真8 高瀬ダム（東京電力）シュート

入ってくる流水は幅方向に一様で、現象が二次元性を保てるようにすることが重要です。

発電用ダム等の利水ダムでは、洪水吐きは越流形式とすることが一般的で、ピア幅の影響はあるものの、ほぼ二次元的な流れが見られます。一方、多目的ダムをはじめとする洪水調節を目的とするダムでは、非常用洪水吐きは越流形式としますが、常用洪水吐きには管路形式が用いられることが多くなります。このため、単位幅流量は不均一となり、流れに優れた安定性を確保することは難しくなります。一般的には、副ダムにより確保する水位を高めとして、変動を押さえることが試みられています。このことが一因となり、近年では副ダムにより跳水を安定化させる方式が多用されています。

現象の二次元性を確保するためには、減勢工は等幅直線水路とすることが望ましいことから、水叩き幅の変化や平面湾曲はなるべく避ける必要があります。やむをえず水叩き幅を変化させたり湾曲させたりする特殊な水叩きを採用する場合は、水理模型実験によってその形状を定める必要があります。

（スキージャンプ式減勢工）

スキージャンプ式減勢工は、水流を空中に飛翔させて堤体からある程度離れた下流の河道に放流し、その洗掘によって形成される自然の減勢池でのウォータークッションによる減勢効果を期待するものです。

スキージャンプ式の参考事例として、写真8に高瀬ダム（東京電力：ロックフルダム）の洪水吐きシュート部および下流の状況を示します。

日本では、落下地点に河床堆積物が厚く分布している場合に採用されることが多いですが、洗掘された土砂が下流に悪影響を及ぼさないように予め河床堆積物を掘削除去することもあります。

基礎岩盤の洗掘を防止するために水脈の落下点をダムの堤体からできるだけ遠ざけること、落下点より下流の河川に必要以上の洗掘が生じることを避けるために水脈を広範囲に拡散させることが設計の原則となります。

拡散水脈の影響および河床洗掘の二次的影響によって周辺地山の崩壊を起こすことは絶対に避ける必要があるため、スキージャンプ式減勢工の利用は限定されることになります。

洗掘を防止するために水叩きや側壁などのコンクリート構造物により減勢池を構築する場合は、自由落下式減勢工として取り扱うこととします。

（自由落下式減勢工）

自由落下式減勢工は、水脈落下点の動水圧を軽減し、かつ落下後に速やかに減勢するように設計します。

自由落下水脈を受ける水叩き部は、ウォータークッションの有無にかかわらず動水圧が作用し基礎地盤が洗掘される恐れがあるので、水叩きコンクリートで保護することが必要です。

落下水脈が水叩きに与える動水圧の軽減やウォータークッションのない側壁や斜面に直接衝突することを回避するため、水叩き幅と水脈落下幅はほぼ等しくとることが適当です。

この場合、水叩き上の流れが落下水脈によって上下流に分断されることとなり、落下点と堤体との間の水深が大きくなり、ウォータークッションによる減勢効果を高めることができます。

自由落下式減勢工の参考事例として、写真9に矢作ダム（中部地整）、図5に小渋ダム（中部地勢）を示します。

1-7 まとめ

現在までに多目的ダムや利水専用ダム等数多くのダムが建設されていますが、減勢工を持たないダムは存在し



写真9 矢作ダム（中部地整）

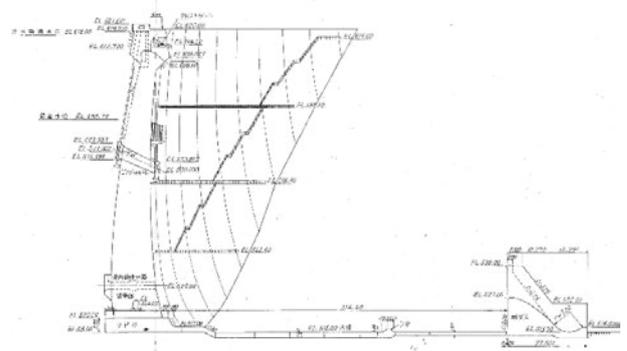


図5 小浜ダム（中部地整）減勢工

ないと言っても過言ではありません。

一方、放流水の減勢は減勢工だけで生じているわけではありません。堤体下流面、側水路、シュート部（階段式）等でのエネルギー損失も重要な減勢の要素となることも多々あります。また、減勢に係る水理現象としては跳水の他、噴流拡散現象や両者の中間に位置する潜り跳水現象もあります。

第1章で言及しなかったこれらの課題については、以降の関連する章で詳細に記述することとします。

さて、これまで述べてきたようにダムの洪水吐きには「河川の従前の機能の維持」を図ることが求められていますので、減勢工として考慮すべき流量はダム設計洪水流量以下のすべての流量となることは明らかです。

しかし、実務における設計過程ではその減勢の程度の方には幅があります。例えば、水平水叩きによる跳水式減勢工を設計する場合、ある対象の流量を与えて跳水計算により原案形状を作成し、それ以上の流量を含めて水理模型実験により流況を確認しながら、最終案を決定する方法が取られます。しかしながら、原案形状を求める流量の与え方は下流河道の状況を見て判断することが必要であり、一義的に定めることはできません。

このように、減勢工に流入する流量にある幅が存在する以上、ある流量を“点”にとらえて設計を行うのではなく、流量範囲を考慮して最も適切な規模を求める“線”の考え方で設計を行なう総合的な評価が重要視されていると言えます。

○ 参考図書・文献

- 1) (財) 国土技術研究センター編：改定 解説・河川管理施設等構造令, (社) 日本河川協会, 平成11年
- 2) (社) 日本河川協会編：改訂新版建設省河川砂防技術基準(案) 同解説(計画編・第12章ダム施設計画・第4節洪水吐きおよびその

他の放流設備, 設計編・第2章ダムの設計・第7節洪水吐きおよびその他の放流設備), 山海堂, 平成9年 [以下旧版: 設計編・昭和60年版, 計画編・昭和52年版]

- 3) 建設省：河川砂防技術基準(案)(第2編計画・第6章ダム計画・第3節放流設備), 昭和32年
- 4) (財) ダム技術センター：多目的ダムの建設(第26章水理構造物の設計・6. 減勢工の設計, 平成17年 [以下旧版 昭和62年版・第29章洪水吐きの設計・9. 減勢工の設計, 昭和52年版・第31章洪水吐きの機能設計, 昭和44年(研修テキスト)・23. ダム洪水吐きの設計・2.5 減勢工]
- 5) 土木学会・水工学委員会：水理公式集2018年版(第3編ダム・第4章導流部と減勢工) [以下旧版: 昭和24年版(第2編発電水力・6 跳水), 昭和32年改訂版(第2編発電水力・2.4 跳水), 昭和46年版(第3編・5. 跳水と減勢), 昭和60年版(第4編発電編・3. 跳水と減勢工), 平成11年版(第3編ダム・発電編・第3章跳水と減勢工)]
- 6) 柏井条介：ダムの水理設計(8)(必要な基礎知識と水理設計条件(8)), ダム技術, No.291, pp18-29, 2010
- 7) (社) 電力土木技術協会：水力技術百年史(2.1 ダム), 平成4年
- 8) 大堰堤国際委員会日本国内委員会：日本大堰堤台帳, 昭和11年
- 9) 通商産業省公益事業局水力課編纂：日本発電用高堰堤要覧, 発電水力協会, 昭和29年
- 10) 物部長徳：水理学, 岩波書店, 昭和8年
- 11) Water Resources Committee of National Resources Committee: LOW DAMS-A MANUAL OF DESIGN FOR SMALL WATER STORAGE PROJECT- (Chapter 5 Spillway Structures), 1938
- 12) Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior: TREATISE ON DAMS (CHAPTER12 SPILLWAYS), 1950
- 13) A. J. Peterka: Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators, Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior, 1958, 1963 (Revised)
- 14) Ven Te Chow: OPEN-CHANNEL HYDRAULICS, McGRAW-HILL, 1959
- 15) 石原藤次郎訳：開水路の水理学, 丸善, 昭和37年
- 16) Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior: DESIGN OF SMALL DAMS (Third Edition), 1987 [First Edition, 1960]
- 17) 米国内務省開拓局編：ダムの計画と設計, 社団法人日本大ダム会議, 1966